



ISSN 1000-5013

CN 35-1079/N

CODEN HDZIEF

華僑大學學報

(自然科學版)

JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY

(NATURAL SCIENCE)

第 36 卷 第 6 期

Vol. 36 No. 6

2015

福建·廈門

ISSN 1000-5013



9 771000 501156



《 华 侨 大 学 学 报 (自 然 科 学 版) 》
第 六 届 编 辑 委 员 会

The Sixth Editorial Committee of
Journal of Huaqiao University (Natural Science)

主 编 (Editor in Chief)

乌东峰 (WU Dong-feng)

副主编 (Associate Editor in Chief)

陈国华 (CHEN Guo-hua) 黄仲一 (HUANG Zhong-yi)

编 委 (Members) (按姓氏笔划为序)

王加贤 (WANG Jia-xian) 王全义 (WANG Quan-yi)

方柏山 (FANG Bai-shan) 叶民强 (YE Min-qiang)

刘 焜 (LIU Gong) 江开勇 (JIANG Kai-yong)

张认成 (ZHANG Ren-cheng) 吴季怀 (WU Ji-huai)

吴逢铁 (WU Feng-tie) 陈锻生 (CHEN Duan-sheng)

周克民 (ZHOU Ke-min) 胡日东 (HU Ri-dong)

高轩能 (GAO Xuan-neng) 黄心中 (HUANG Xin-zhong)

童昕 (TONG Xin) 蔡灿辉 (CAI Can-hui)

欧阳明安 (OUYANG Ming-an)

编辑部主任 (Director)

黄仲一 (HUANG Zhong-yi)

目 次

采用模糊理论的零部件工艺 PFMEA 评估
..... 盛精, 王君, 罗善明 (609)

花岗石锯切过程声发射信号特征的实验
..... 张美琴, 高振, 吴海融, 李远, 黄国钦 (615)

侧翻安全性的校车侧围结构轻量化设计
..... 孙贵斌, 韩勇, 蓝平辉, 谢金萍, 纪碧端 (620)

仿人面部表情机器人研究进展
..... 张国亮, 王展妮, 王田, 吴昊 (626)

采用遗传算法的可见光通信 LED 阵列分布优化
..... 傅玉青 (632)

采用二维频域光学相干层析的透镜曲率半径测量
..... 陈丹阳, 游腾飞, 钟舜聪 (636)

对 Shor 算法破解 RSA 的探讨
..... 涂玲英, 胡一凡, 张洪涛, 代永涛, 熊红梅 (640)

粒子群与遗传算法的混合算法
..... 阳琼芳, 孙如祥 (645)

高速收敛混沌粒子群算法的云计算任务调度
..... 王秉 (650)

新三维混沌映射及其在数字图像信息加密中的应用
..... 刘冰, 潘大兵 (655)

采用 Oracle 的 Google 地图兴趣点抓取和发布的 WebGIS 系统
..... 章欣欣, 何原荣 (659)

采用遗传算法的网络优化技术	李国庆, 尹洪胜 (663)
采用 GERT 算法的电力抢修车应急运输路径选择	周学鼎, 郑星新 (667)
一种采用能量平衡关系的新型交流电弧炉模型	廖延涛, 张海龙, 王恩荣, 黄苗玉 (672)
碳纳米材料的无铜点击功能化	熊兴泉, 徐林建 (677)
溶解氧对短程同步硝化/反硝化耦合除磷工艺的影响	何争光, 谢谦, 丁丹 (683)
β -环糊精交联聚合物吸附水中亚甲蓝的机理	李国平, 吴晓萍, 黄泱, 陈建华 (687)
巨尾桉胞质 <i>EuCuZnSOD</i> 基因的克隆与原核表达	赵艳玲, 周利建 (693)
绿色经济理念的生态工业园区综合评价指标体系	商婕, 曾悦 (698)
常规桥梁搭板内力计算方法在 SIAB 中的适用性	庄一舟, 任卫岗, 陈小琴, 韩裕添, 王胜智, 田伟 (704)
不同地基条件对核岛厂房结构地震响应的影响	金煜皓, 尹训强, 王桂莹 (710)
冻融循环作用下混凝土毛细孔结构的劣化机制	姜作杰 (716)
Caputo 型分数阶微积分求解及其误差估计	李瑾 (721)
A-收敛与几乎处处收敛	鲍玲鑫 ¹ , 施慧华 (726)
第 36 卷总目次	(I ~ X)

CONTENTS

PFMEA Evaluation of Parts Process Based on Fuzzy Theory
..... SHENG Jing, WANG Jun, LUO Shanming (609)

Experiment on the Characteristic of Acoustic Emission in Circular Sawing of Granite
..... ZHANG Meiqin, GAO Zhen, WU Hairong, LI Yuan, HUANG Guoqin (615)

Lightweight Design of School Bus Side Structure for Rollover Safety
..... SUN Guibing, HAN Yong, LAN Pinghui, XIE Jingping, JI Biduan (620)

Development of Humanoid Facial Expression Robot
..... ZHANG Guoliang, WANG Zhangni, WANG Tian, WU Hao (626)

Research on LED Array for Illumination Uniformity in Visible Light Communication
Based on Genetic Algorithm
..... FU Yuqing (632)

Curvature Radius Measurement of Lens Based on Two-Dimensional Spectral-Domain
Optical Coherence Tomography
..... CHEN Danyang, YOU Tengfei, ZHONG Shuncong (636)

Discussion on Cracking RSA With Shor Algorithm
..... TU Lingying, HU Yifan, ZHANG Hongtao, DAI Yongtao, XIONG Hongmei (640)

Mixed Research on Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm
..... YANG Qiongfang, SUN Ruxiang (645)

Cloud Computing Task Scheduling of High-Speed Convergence of Chaotic Particle
Swarm Optimization
..... WANG Bing (650)

New 3D Chaotic Mapping and Its Application in Digital Image Encryption
..... LIU Bing, PAN Dabing (655)

WebGIS for Google Maps Point of Interest Grabbing and Publishing Based on Oracle
Spatial Database
..... ZHANG Xinxin, HE Yuanrong (659)

Network Optimization Technique Using Genetic Algorithm
..... LI Guoqing, YIN Hongsheng (663)

Using GERT Algorithm for Emergency Transportation Path Selection of Electrical Repair Vehicle	ZHOU Xueding, ZHENG Xingxin (667)
Novel Model of Alternating Current Electrical Arc Furnace Based on Energy Conservation	LIAO Yantao, ZHANG Hailong, WANG Enrong, HUANG Miaoyu (672)
Copper-Free Click Modification of Carbon Nanomaterials	XIONG Xingquan, XU Linjian (677)
Effect of Dissolved Oxygen on Simultaneous Shortcut Nitrification/Denitrification With Phosphorus Removal Process	HE Zhengguang, XIE Qian, DING Dan (683)
Study on the Adsorption of Methylene Blue With the β -cyclodextrin Crosslinked Polymer in the Water	LI Guoping, WU Xiaoping, HUANG Yang, CHEN Jianhua (687)
Cloning and Expression of the Cytosolic Copper/Zinc Superoxide Dismutase Gene in <i>Eucalyptus grandis</i> \times <i>E. ophylla</i>	ZHAO Yanling, Zhou Lijian (693)
Research on Comprehensive Evaluation of Eco-Industrial Parks Based on Green Economy	SHANG Jie, ZENG Yue (698)
Adaptability Analysis of Conventional Internal Force Calculation Method for Approach Slab of SIAB	ZHUANG Yizhou, REN Weigang, CHEN Xiaoqin, HAN Yutian, WANG Shengzhi, TIAN Wei (704)
Effects of Different Ground Conditions on Seismic Response of Nuclear Island	JIN Yuhao, YIN Xunqiang, WANG Guixuan (710)
Degradation Mechanism of Concrete Pore Structure Under the Action of Freeze-Thaw Cycle	JIANG Zuojie (716)
Algorithm and Error Estimate on the Fractional Differential Equation With Caputo Derivative	LI Jin (721)
On \mathbf{A} -Convergence and Almost Usual Convergence	BAO Lingxin, SHI Huihua (726)
Total Contents of Vol. 36	(I ~ X)

采用模糊理论的零部件工艺 PFMEA 评估

盛精, 王君, 罗善明

(厦门理工学院 机械与汽车工程学院, 福建 厦门 361024)

摘要: 为了控制和降低零部件的制造质量风险,在对零部件工艺过程进行分析的基础上,提出基于模糊理论的潜在失效模式及后果分析(PFMEA)方法.通过研究零部件加工过程的风险评估,构建基于生产成本的评价指标;设计评价因素集和因素水平集,并用层次分析法确定评价因素的权重,提出零部件制造工艺的风险评估模型;采用模糊评价决策,定量计算其综合评价值,进而确定其风险等级.以某型号叉车车架系统的横梁加工工艺为例进行实例验证,结果表明:改进后 PFMEA 方法的可行性和正确性.

关键词: 工艺过程;风险评估;过程失效模式及后果分析;模糊评价;层次分析法

中图分类号: TH 162.1

文献标志码: A

潜在失效模式及后果分析(failure mode and effect analysis, FMEA)是在可靠性工程中取得广泛应用的分析技术.过程失效模式及后果分析(process failure mode and effect analysis, PFMEA)是 FMEA 中的一部分,通过 PFMEA 分析,找出工艺过程中威胁生产安全和影响产品质量的所有潜在风险及原因,经采取的风险预防措施,可减少生产过程中的不稳定因素和提高产品的质量^[1]. Yeh 等^[2]将模糊评价理论结合 FMEA 进行系统失效风险分析,改进最初的风险评价方式. Shahin^[3]针对失效模式的严重度与发生频率之间非线性的问题,提出采用 FMEA 与 Kano 模型相结合的办法,使风险评价的结果更具可比性.高鹏程^[4]将 FMEA 与 FTA 相结合,使评价的过程更具效率,结果更加准确.陈超^[5]提出 NFMEA 的方法,即结合 FMEA 与 BFA 的可靠性建模方法-网状失效分析法,建立失效和系统设计参数之间的关系.聂森^[6]构建了 FMEA 的数据库系统.然而,这些方法都没有改变传统的 FMEA 中存在的问题,即它的风险评估的主观性和风险序数(risk priority number, RPN)值的可辨识度不高.因此,本文通过模糊评价的方式,结合基于过程成本制定的 PFMEA 评判标准,计算出失效模式的危害结论等级值,并以此值取代 RPN 值作为风险排序的依据.

1 传统 PFMEA 方法存在的缺陷

1.1 风险判别的主观性与模糊性

传统的 PFMEA 方法中,确定风险序数 RPN 的 3 个参数值(失效严重度 S , 失效发生频率 O , 失效探测难度 D)都是由定性描述的评价指标结合专家打分得到的.不同的分析团队在同一个失效模式、相同的评价指标下,很可能会得出相差较大的 RPN 值,从而极大地限制了 PFMEA 的使用效果.

1.2 风险序数值的分辨率不高

传统的 PFMEA 中,风险序数 RPN 的计算公式为 $RPN = S \times O \times D$. 3 个重要参数 S, O, D 的评分范围都是 1~10 分.令 $S_1 = 1, O_1 = 6, D_1 = 9$, 则 $RPN_1 = 54$; 令 $S_2 = 6, O_2 = 3, D_2 = 3$, 则 $RPN_2 = 54$. 可见, 2 个 RPN 值完全相等, 但 2 个失效模式的严重度、频度和探测难度都不相同, 其风险程度也不相同. 同时, 3 个参数对风险的影响程度不同, 在传统的使用 RPN 值的方法中, 也无法体现 3 个参数各自的权重. 因此, 传统 PFMEA 方法得出的 RPN 值存在分辨率不高的缺陷^[7].

收稿日期: 2015-07-12

通信作者: 盛精(1965-),男,教授,博士,主要从事汽车零部件 CAD/CAE 的研究. E-mail: shengjing@xmut.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375411); 厦门理工学院科研基金资助项目(YKJ11005R)

2 模糊评价方法建模

2.1 模糊评价的基本方法

运用模糊综合评价方法,将 PFMEA 中的 3 个评价因素组成集合 U ,同时构建由各级评语所组成的评价集合 V .进而针对目标中的每一个单个因素 u_i 用 V 中的评语进行评价,通过选取适当的隶属函数,得到因素集 U 在评价集 V 上的隶属度矩阵 R ,即单因素评价.通过单因素评价,可使传统 PFMEA 评价方法的主观性和模糊性变得更加客观和接近实际.

通过选用适当的权重分配方法对各评价因素确定权重,最终的 PFMEA 模糊综合评价模型为

$$B = W * R.$$

式中: R 为评价因素隶属度矩阵; W 为评价因素权重向量; B 为评估结果; $*$ 为模糊算子.模糊算子的模型主要有主因素决定型,主因素突出型,加权平均型等,根据具体情况的需要进行选择.

由于模糊综合评判的结果 B 为一个向量,为了使结果更加直观,可将 B 通过赋值法转化为一个简单的数字,作为评价目标的结论等级值,即

$$M = B \cdot A^T.$$

式中: A 为赋值向量(a_1, a_2, \dots, a_n).通过对各评价因素权重的确定和选择更贴近实际的模糊评判决策,并对模糊综合评价结果的赋值,可使最终得到的风险结果具有更高的分辨率.

模糊综合评价的基本步骤,如图 1 所示.

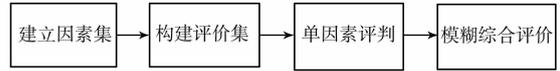


图 1 模糊综合评价基本步骤

Fig. 1 Basic steps of fuzzy comprehensive evaluation

2.2 评价因素集和评价因素水平集的建立

根据模糊数学的基本方法,建立包含所有需要评价的指标的集合^[8-9],即

$$U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_i\}. \tag{1}$$

式(1)中: u_i 为被评价对象的第 i 个决定因素.

针对需要被评价的因素,建立水平集合

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_j\}. \tag{2}$$

式(2)中: v_j 表示评价水平的第 j 个等级.

2.3 评价因素权重集的确定

在 PMFEA 中,经常需要将定性分析与定量分析相结合.因此,可用层次分析法确定权重集^[10-11].

首先,对评价因素两两进行比较,结合各因素的重要程度得出判断矩阵 $X = (x_{i,j})_{n \times n}$.其中, $x_{i,j}$ 取值如表 1 所示.

表 1 判断矩阵取值表
Tab. 1 Judgement matrix value

x_i 比 x_j	相同	稍强	强	很强	极强	稍弱	弱	很弱	极弱
$x_{i,j}$	1	3	5	7	9	1/3	1/5	1/7	1/9

在构造判断矩阵 X 之后,求出判断矩阵的最大特征值 λ_{max} ,并用一致性指标和随机一次性指标对其进行一致性检验.

一次性指标为

$$C = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}.$$

式中:当 $C=0$ 时,判断矩阵是一致的;当 C 的值为负数时,判断矩阵一定是不一致的;此外, C 的值越大,判断矩阵的不一致程度越严重.

此时,引入随机一致性指标,即

$$R = \frac{\bar{\lambda}_{max} - n}{n - 1}.$$

式中: $\bar{\lambda}_{max}$ 为多个 n 阶随机判断矩阵最大特征值的平均值.

当随机一致性比例 $C/R < 0.1$ 时,判断矩阵的一致性是可以接受的.

当判断矩阵 X 是一致时,求出其最大特征值所对应的特征向量 W ,并归一化,得到的向量即是评价

因素的权重分配,即

$$\mathbf{W} = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_i, \dots, \omega_n). \quad (3)$$

2.4 单因素评价

模糊单因素评价即确定评价因素对评价水平的隶属度. 建立模糊映射为

$$f: U \rightarrow \Gamma(V),$$

$$u_i \rightarrow f(u_i) = \{r_{i,1}, r_{i,2}, \dots, r_{i,j}\} \in \Gamma(V).$$

模糊映射即隶属函数,可导出模糊关系,即

$$\mathbf{R}_f(u_i, v_j) = f(u_i)(v_j) = r_{i,j}.$$

由于PFMEA的3个评价因素所构成的模糊集,很难直接给出其隶属度. 因此,采用二元对比排序法. 在确定严重度优先于探测难度,探测难度优先于频度的排序顺序后,采用平均法确定隶属函数,即

$$r_{i,j} = v_{i,j}/n.$$

式中: $r_{i,j}$ 表示第*i*项因素 u_i 对第*j*级评语 v_j 的隶属度; n 为参与评价的总人数; $v_{i,j}$ 表示第*i*项因素的第*j*级评语的评价人数. 单因素评价用矩阵表示为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & r_{1,3} & \cdots & r_{1,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n,1} & r_{n,2} & r_{n,3} & \cdots & r_{n,m} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

式(4)中: \mathbf{R} 为单因素评价矩阵,是 U 到 V 的模糊线性变换.

2.5 模糊综合评价

将权重集结合单因素评价矩阵,得出模糊评价向量^[12],即

$$\mathbf{B} = \mathbf{W} * \mathbf{R} = [\omega_1 \quad \omega_2 \quad \omega_3] * \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & r_{1,3} & \cdots & r_{1,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n,1} & r_{n,2} & r_{n,3} & \cdots & r_{n,m} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

式(5)中: $*$ 为模糊综合评判决策. 在模糊评价中,往往因具体考虑的因素情况不同和评判者偏重点的不同,有多种决策模型可以选择.

在PFMEA评估中,需对所有因素依权重大小均衡兼顾. 因此,评判决策中,使用加权平均模型

$$b_j = \sum_{i=1}^n a_i \cdot r_{i,j}.$$

其结果为一个向量,即

$$\mathbf{B} = (b_1, b_2, \dots, b_m).$$

对 (b_1, b_2, \dots, b_m) 归一化后,为模糊综合评价向量,代表评价因素的评价等级对 v_1, v_2, \dots, v_m 的隶属度分别为 b_1, b_2, \dots, b_m .

2.6 模糊评价结果的处理

根据等级赋值法,构造一个等级赋值向量. 将水平集中的评语用能体现水平级别差异的数字代替,即有

$$\mathbf{A} = (a_1, a_2, \dots, a_j, \dots, a_m).$$

式中: a_j 为赋予 v_j 水平的数值. 这样,利用表达式

$$\mathbf{M} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A}^T, \quad (6)$$

可以在模糊评价最终得到一个结论等级值.

3 改进后PFMEA方法的应用

以叉车门架的横梁加工工艺PFMEA为例. L公司是一个叉车专业研发生产企业,该厂为提高产品的质量水平,加强对制造过程可靠性的控制,特引用PFMEA的方法减小过程失效的风险.

将门架横梁的机加工工艺步骤由工艺工程师详细列出,评价组成员需针对失效模式严重度(S),发生频度(O)和探测难度(D)制定相应的评价指标,并以此对每一道工序逐一进行评价. 此项指标一经确定,则在之后对其他型号门架系统的PFMEA评估中,不得轻易更改,否则,会造成之前项目中所得的

数据与更改标准后所得的数据无可比性。

机加工 PFMEA 频度评价准则、机加工 PFMEA 严重度评价准则和 PFMEA 探测度评价准则,分别如表 2~4 所示。

该公司根据传统 PFMEA 方法,得到的加工门架左右板部分工序的风险分析结果,如表 5 所示。

由表 5 可知:传统 PFMEA 分析得出的风险序数 RPN 值的辨识度不高,不同的过程风险常常出现相同的 RPN 值,而其严重度、频度和探测难度都不相同,因此,无法区别这种情况下,工序之间的风险大小差异。

将改进后的模糊评判法的 PFMEA 运用在同样的工序上,以其中 RPN 值同为 45 的 2 个工序为例。

表 2 机加工 PFMEA 频度评价准则

Tab. 2 PFMEA frequency evaluation criteria for machining

失效发生的可能性	可能的失效率	评分
很高	$\geq 1/2$	10
	$\geq 1/40$	9
高	1/280	8
	1/400	7
中等	1/700	6
	1/1 400	5
低	1/4 200	4
	1/8 400	3
极低	1/16 800	2
	$\leq 1/20 000$	1

表 3 机加工 PFMEA 严重度评价准则

Tab. 3 PFMEA severity evaluation criteria for machining

严重度级别	后果	评分
无警告的严重危害	严重影响叉车安全运行,失效发生时无警告,给公司造成严重的负面影响	10
有警告的严重危害	严重影响叉车安全运行,失效发生时有警告,给公司造成严重的负面影响	9
很高	导致叉车无法正常使用,给公司造成严重的负面影响	8
高	严重影响叉车使用性能,给公司造成一定的负面影响,或造成经济损失 5 000~50 000 元	7
中等	需进行返工或报废,且因此造成经济损失在 500~5 000 元	6
低	需进行返工或报废,且因此造成经济损失在 100~500 元	5
很低	需进行返工或报废,且因此造成经济损失在 20~100 元	4
轻微	需进行返工或报废,且因此造成经济损失在 20 元以下	3
很轻微	只需做简单处理就可以正常使用,不需返工,且不会对产品质量有影响	2
无	没有影响	1

表 4 PFMEA 探测度评价准则

Tab. 4 PFMEA detection evaluation criteria

探测度	检测种类			检测方法的建议评价范围	评分
	防呆	量具	人工		
很微小			✓	本工序无检测措施,只能通过后续工作人员随机发现	9
微小			✓	只能通过间接的过程来发现,本工序操作员很难自己发现	7
普通		✓		在整个生产流程中有检测设备可以发现	5
高		✓	✓	在本工序上有专门的检测设备,不合格产品不会流入下一个环节	3
极高	✓			该过程已设计采用了防呆措施,不可能出现失效而未检出	1

表 5 传统 PFMEA 分析

Tab. 5 Traditional PFMEA analysis

工序	潜在失效模式	潜在失效后果	S	失效起因	O	现有控制方式	D	RPN
激光切割	560±1 超差	影响机加尺寸	3	设备不稳定	1	检具检查	3	9
	150±2.5 超差	影响机加尺寸	3	设备不稳定	1	检具检查	3	9
抛丸清理	有锈迹,有氧化皮	抛丸返工	3	生锈严重	5	目视检查	3	45
校正工件	平面度尺寸超差	影响机加定位,有可能返工	3	工件变形过大	3	目视检查	5	45
主轴头摆 45° 铣倒角 7×45°	7×45°超差	影响装配精度	1	用错铣刀	3	检具检查	3	9

3.1 建立评价因素集和因素水平集

根据 PFMEA 中的影响风险序数的 3 个评价指标,建立评价因素集为

$$U = \{S, O, D\}.$$

水平集是评价人员对各级评价指标给出的评语集合,根据制定的评价准则,将评价等级分为 10 级,则得因素水平集为

$$V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_{10}\}.$$

另外, 根据等级赋值法, 可构造一个等级赋值矩阵, 即

$$A = (1, 2, \dots, 10). \tag{7}$$

3.2 确定因素权重集

根据层次分析法, 建立判断矩阵为

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 3 \\ 1/4 & 1 & 1/2 \\ 1/3 & 2 & 1 \end{bmatrix}.$$

求其最大特征值为 3.03. 由 $\lambda_{\max} = 3.03$, 可求得判断矩阵 A 的一致性指标为 0.015, 引用撒汀的数据结论, 可得随机一致性比例为 $0.015/0.58 = 0.026 < 0.1$. 因此, 判断矩阵 A 的一致性可以接受, 求其最大特征值对应的特征向量, 并归一化后, 得到评价因素的权重分配为

$$W = (0.63, 0.14, 0.24).$$

3.3 单因素评价

小组中每个成员在不受他人影响的情况下, 对每个失效模式的评价因素进行单独打分. 根据每个成员(一组有 6 人)给出的打分, 制成统计表, 如表 6, 7 所示.

表 6 针对失效模式“有锈迹”的评分

Tab. 6 Score according to the “rust” failure mode

评价因素	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S	0	0	4	2	0	0	0	0	0	0
O	0	0	2	3	1	0	0	0	0	0
D	0	0	2	3	1	0	0	0	0	0

表 7 针对失效模式“平面度超差”的评分

Tab. 7 Score according to the “planar degree” failure mode

评价因素	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S	0	2	4	0	0	0	0	0	0	0
O	0	1	1	2	2	0	0	0	0	0
D	0	0	0	0	2	1	3	0	0	0

由之前确定的隶属函数, 可分别确定单因素模糊评价矩阵. 其中, 失效模式“有锈迹”的模糊评价矩阵 R_1 为

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.67 & 0.33 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.33 & 0.50 & 0.17 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.33 & 0.50 & 0.17 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

失效模式“平面度超差”的模糊评价矩阵 R_2 为

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0.33 & 0.67 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.17 & 0.17 & 0.33 & 0.33 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.33 & 0.17 & 0.50 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

3.4 模糊综合评价

由式(5)分别计算 2 个失效模式的模糊评价向量. 根据加权平均模型可得

$$B_1 = W \cdot R_1 = (0, 0.2317, 0.4459, 0.0462, 0.1254, 0.0408, 0.1200, 0, 0, 0).$$

归一化后, 得

$$B_1 = (0, 0, 0.5421, 0.3940, 0.0639, 0, 0, 0, 0, 0),$$

$$B_2 = (0, 0.2294, 0.4415, 0.0457, 0.1242, 0.0404, 0.1188, 0, 0, 0).$$

3.5 对模糊评价结果的处理

由式(6), (7)求得模糊评价的最终结论等级值(结果取小数点后两位)为

$$M_1 = B_1 \cdot C^T = 3.52,$$

$$M_2 = B_2 \cdot C^T = 3.66.$$

由此可知, 失效模式“平面度超差”的风险等级比“有锈迹”的风险等级高. 证明了传统的 PFMEA 评价方法是无法区分两者之间风险高低差异的, 这样会在大量的相同风险序数下, 掩盖了实际上具有高风险的一些工艺过程失效模式; 同时, 也验证了模糊理论应用于 PFMEA 评估的可行性和正确性.

4 结论

1) 使用传统 PFMEA 评价无法体现 3 个评价因素各自所占的权重, 即使得到相同的 RPN 值, 实际

上风险程度还是有差异的. 使用模糊评价的方法,可以更清晰准确的对工艺过程的风险大小进行排序.

2) 在评价过程中,一个人的主观因素对结果的影响降低了,并且越多的人参与评估,越能得到贴近现实的准确结果. 在风险值中,相等的数值越少越利于企业排查生产过程中存在的失效风险. 通过结论等级值进行排序之后,绘制帕拉图,可更方便地找出需要重点去改进或关注的工序.

3) 在 PFMEA 对工艺过程风险进行排序之后,针对预防风险确定改进措施的时候,也可采用模糊评价的方法对提出的改进方案进行优劣的判别和取舍. 这样可以使 PFMEA 在整个执行过程中尽量地减少人的主观因素带来的片面性,得到更准确和更合理的结果.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 系统可靠性分析技术失效模式和影响分析(FMEA)程序:GBT 7826-2012[S]. 北京:中国标准出版社,2012:5-11.
- [2] YE H T M, CHEN Longyi. Fuzzy-based risk priority number in FMEA for semiconductor wafer processes[J]. International Journal of Production Research, 2014, 52(2): 539-549.
- [3] SHAHIN A. Integration of FMEA and the Kano model: An exploratory examination[J]. International Journal of Quality and Reliability Management, 2004, 21(7): 731-746.
- [4] 高鹏程. FMEA 与 FTA 在阴极电泳项目质量管理中的应用研究[D]. 上海:上海交通大学,2011:10-17.
- [5] 陈超. 基于 FMEA 和 BFA 的产品失效分析方法的研究[D]. 上海:东华大学,2011:12-17.
- [6] 聂森. FMEA 技术研究与软件系统发展[D]. 合肥:合肥工业大学,2007:10-16.
- [7] BARENDT D M, OLDENHOF M T, VREDENBREGT M J, et al. Risk analysis of analytical validations by probabilistic modification of FMEA[J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2012, 64/65(4): 82-86.
- [8] 赖昱光,管霖,王滔,等. 基于模糊综合评判的直流输电系统检修时机选择方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(9): 90-94.
- [9] 马存宝,李雯,孙焱,等. 基于模糊理论的 FMEA 方法研究[J]. 测控技术, 2013, 32(8): 137-144.
- [10] 李涛. 基于模糊层次分析法和灰色关联分析方法的变电站选址研究[D]. 郑州:郑州大学,2014:15-17.
- [11] 崔文彬,吴桂涛,孙培廷,等. 基于 FMEA 和模糊综合评判的船舶安全评估[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(3): 263-267.
- [12] 梁晓飞,郑小燕,李忠梅. 基于可信性理论的桥梁基础施工风险评估[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2014, 37(12): 1483-1487.

PFMEA Evaluation of Parts Process Based on Fuzzy Theory

SHENG Jing, WANG Jun, LUO Shanming

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of technology, Xiamen 361024, China)

Abstract: In order to control and reduce the risk of parts manufacturing quality, based on the analysis of the process of parts and components, the potential failure mode and effect analysis (PFMEA) method based on fuzzy theory is proposed. By studying the risk assessment of parts processing process, the evaluation index based on production cost is constructed. Designing evaluation factor set and factor level set, and the weights of the evaluation factors are determined by the analytic hierarchy process, then risk assessment model of component manufacturing process is put forward. Fuzzy evaluation is used to calculate the comprehensive evaluation value, and then determine the risk level. Taking the cross beam manufacturing process of a certain type of forklift truck door frame system as an example, the results show that the improved PFMEA method is feasible and correct.

Keywords: process; risk assessment; process failure mode and effect analysis; fuzzy theory; analytic hierarchy process

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:杨建红)

花岗石锯切过程声发射信号特征的实验

张美琴¹, 高振², 吴海融², 李远², 黄国钦²

(1. 厦门理工学院 机械与汽车工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 华侨大学 制造工程研究院, 福建 厦门 361021)

摘要: 采用不同锯切参数对 G603, G657, G654 三种花岗石进行锯切实验, 监测锯切过程工件上声发射信号和锯机主轴功率消耗, 并以声发射均方值(AE_{RMS})为特征值对实验结果进行分析. 结果表明: 锯切过程中, AE_{RMS}随着锯切深度和进给速度的增大而增大, 随着锯片线速度的增大而减小; 与锯切功率具有良好的线性正相关对应关系; 不同花岗石锯切时, AE_{RMS}随锯切参数的变化趋势一致, 但幅值存在明显差异, 花岗石的抗压强度越高, AE_{RMS}值越大.

关键词: 花岗石; 锯切; 声发射; 锯切功率; 抗压强度

中图分类号: TG 580.6; TG 74

文献标志码: A

金刚石圆锯片锯切是石材行业主导加工方式之一. 受岩石的高硬度、非均质、解理面及缺陷丰富等天然属性影响, 如何控制锯切过程和正确判断岩石可加工性一直都是业界的难题. 尽管以往学者已对上述问题展开大量工作并取得一定研究成果, 但主要依赖于锯切力和功率这两个过程量^[1-2]. 声发射(acoustic emission, AE)是材料或构件在受力过程中产生变形或裂纹时, 以弹性波形式释放出应变能的现象, 一直以来都是研究岩石破碎失效过程的一个重要手段^[3]. 锯切过程是岩石在大量磨粒磨削作用下, 不断破碎失效的过程, 必然会伴有丰富的声发射信号. 因此, 国内外学者很早就尝试将 AE 技术应用于岩石锯切过程的研究. 马春孝等^[4]通过单颗磨粒划擦岩石, 发现声发射幅值波形和力波形的变化趋势有较好的一致性. 王成勇^[5]研究了单颗金刚石磨粒划擦岩石的 AE 信号特征, 发现磨粒刻划不同岩相组织时, 声发射均方根值(AE_{RMS})差异较大, 与岩石可加工性存在某种对应关系. Meding^[6]指出圆锯片锯切岩石时, 锯切加工性越差, AE_{RMS}值越大, 但没有指出其与常用于评判岩石可加工性力学指标的关联性. 在加工过程监控上, 胡映宁等^[7]将 AE 应用于锯切混凝土监测研究, 但在花岗石锯切监控上却鲜有报道. 随着花岗石超薄件、机床结构件等高附加值产品应用的日益增多, 采用 AE 技术监控锯切过程倍受业界关注. 本文通过对 3 种花岗石进行变参数锯切, 研究锯切过程 AE_{RMS}随锯切参数的变化规律, 初步分析其与锯切功率及岩石材料属性的对应关系.

1 实验方法

1.1 条件及方案

锯切测试系统原理, 如图 1 所示. 锯切实验在 QHD-500 型高速大切深数控桥式锯切平台(最高转速为 $5\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$)上进行, 冷却液采用自来水. 所用金刚石圆锯片的技术参数: 直径为 500 mm, 钴基胎体, 磨粒粒度为 US 40/50 目, 体积分数为 30%, 结块尺寸(长×高×宽)40 mm×5.0 mm×3.8 mm. 锯切参数组合, 如表 1 所示. 表 1 中: v_s 为线速度; v_f 为进给速度; a_p 为单次切深. 每种实验参数重复进

收稿日期: 2015-07-19

通信作者: 黄国钦(1981-), 男, 副教授, 博士, 主要从事硬脆材料高效加工及超硬材料工具制备技术的研究. E-mail: smarhggq@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAF13B04); 国家自然科学基金资助项目(51175194); 福建省教育厅 A 类科技项目(JA13019); 福建省厦门市科技计划指导性项目(3502Z20077003)

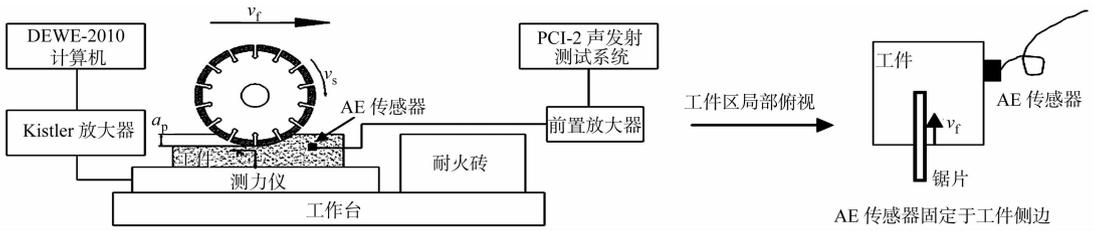


图1 锯切测试系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of sawing measurement system

行5次后取平均值,以提高实验数据的可靠性.为了保证锯片节块工作状态一致,每次锯切行程后都用耐火砖对锯片进行修整,具体放置的位置,如图1所示.

采用 DEWE-2010 型信号采集分析仪采集主轴电机功率信号,监控加工中锯切弧区功率消耗,采样频率为 1 kHz.将 ISR50-AA15 型声发射信号传感器(美国物理声学

公司)固定在工件侧边(图1),采用 PCI-2 型声发射信号测试分析仪(美国物理声学公司)对信号进行实时采集和分析.由于岩石的固有频率一般在 0~200 kHz 之间,故设声发射信号采样频率为 1 MHz.实验中选用的 3 种花岗岩的主要矿物成分及机械性能指标,如表 2 所示.表 2 中: $w_{石英}$, $w_{正长石}$, $w_{斜长石}$ 分别为石英、正长石、斜长石的体积分数; ρ 为密度;HS 为肖氏硬度; σ_{bb} 为抗弯强度; σ_{bc} 为抗压强度.

表2 花岗岩主要矿物成分及机械性能指标

Tab. 2 Main mineral compositions and mechanical properties of granites

石材代号	$w_{石英}/\%$	$w_{正长石}/\%$	$w_{斜长石}/\%$	$\rho/g \cdot cm^{-3}$	HS	σ_{bb}/MPa	σ_{bc}/MPa	结晶颗粒尺寸
G654	35	10	55	2.80	61.0	26	219	细
G603	25	5	60	2.70	89.1	17	185	中
G657	35	35	25	2.65	65.3	15	136	中粗

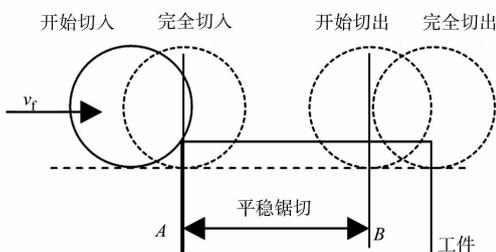
1.2 声发射信号处理

根据声发射信号在时间上的持续性,可分为突发型和连续型^[3].由于锯切过程是众多磨粒相互交替连续不断地对工件进行微观切削,以达到宏观上的材料去除,期间有大量的声发射事件同时发生,在时间上不可分辨.因此,采用连续型声发射信号分法进行分析,即以声发射信号均方根值(AE_{RMS} ,通常也称声发射有效值)衡量锯切过程声发射信号特征的变化.声发射信号的 AE_{RMS} 表达式为

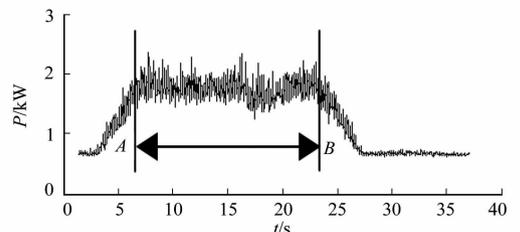
$$AE_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} u_{AE}^2 d\tau} \quad (1)$$

式(1)中: u_{AE} 为采集的声发射电压值, $d\tau$ 为采样时间.

一金刚石圆锯片切入切出工件完整过程中,其锯切功率(P)、声发射信号电压值(u_{AE})和 AE_{RMS} ,如图 2 所示.由图 2 可知:在锯片切入、平稳锯切和切出工件 3 个阶段中, AE_{RMS} 和功率信号都随之呈现显著规律性变化;锯片进入 A-B 锯切阶段,由于锯片与工件接触弧长不变,处于稳定锯切阶段^[2],因此, AE_{RMS} 和功率信号也都进入相对稳定阶段.为了便于研究,文中取平稳锯切阶段的 u_{AE} 和功率信号进行分析,即图上的 A-B 区间信号.



(a) 锯切过程锯片与工件相对位置示意



(b) 锯切功率信号图

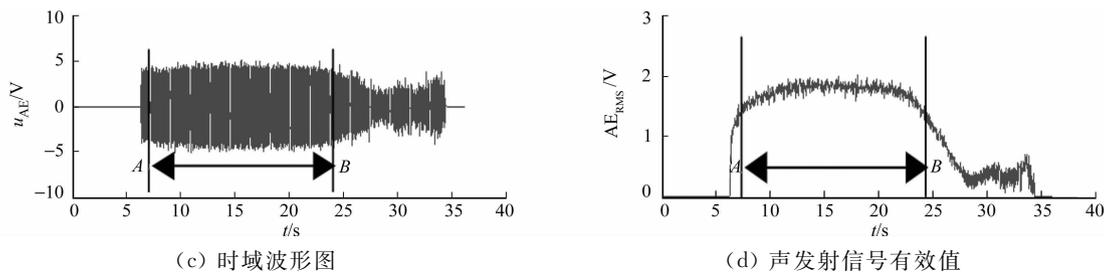


图 2 锯切切入切出过程的声发射信号

Fig. 2 AE signals collected in the whole sawing-in and sawing-out process

2 实验结果及分析

2.1 AE_{RMS} 随锯切参数的变化

锯切平稳过程中, AE_{RMS} 随锯切工艺参数的变化趋势, 如图 3 所示. 图 3 中: a_p 为锯切深度; v_f 为进给速度; v_s 为锯切线速度. 由图 3 可知: 随着锯切深度增大, AE_{RMS} 明显随之增大; AE_{RMS} 随着进给速度的增大而增大; AE_{RMS} 是随着锯切线速度增大呈缓慢减小的趋势.

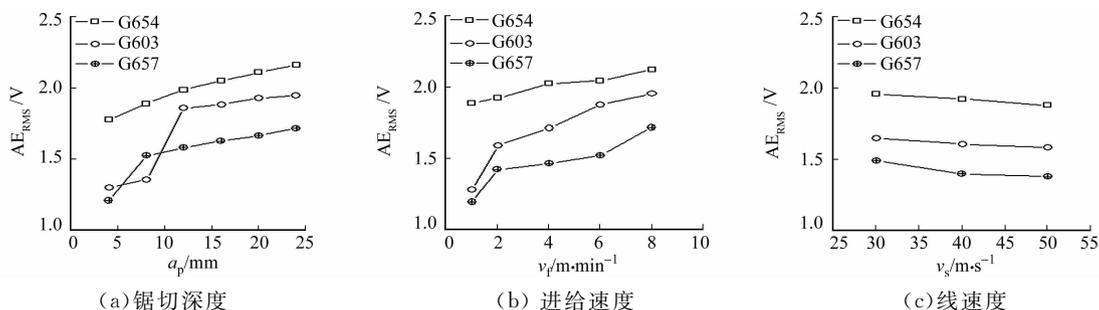


图 3 AE_{RMS} 随锯切工艺参数的变化趋势

Fig. 3 Tendency of AE_{RMS} versus sawing parameters

锯片与工件之间的干涉运动是去除工件材料的前提. 单颗磨粒进出锯切弧区的切削深度变化, 如图 4 所示. 图 4 中: 从弧区底部 A 点逐渐增大至顶部 B 点. 通常用单颗磨粒最大切削深度 h_{max} 衡量在锯切参数(线速度 v_s 、进给速度 v_f 和锯切深度 a_p) 的控制下, 单颗磨粒对工件的刻划程度, 表达式^[1]为

$$h_{max} = \sqrt{\frac{3}{C_a \cdot \tan \theta_g}} \left(\frac{v_f}{v_s} \right) \sqrt{\frac{a_p}{D_s}} \quad (2)$$

式(2)中: θ 为弧区接触角; θ_g 是磨粒刃角的一半, 取 $\theta_g = 60^\circ$; D_s 为锯片直径; C_a 为锯片节块表面单位面积内动态参与切削的有效磨粒数.

文献[4-5]表明, 在单颗磨粒划擦方式下, 增大磨削深度(即增大 h_{max})时, AE_{RMS} 随之增大. 线速度固定时, 单位时间进入锯切弧区磨粒数不变. 由式(2)可知: 增大锯切深度和进给速度时, h_{max} 增大, AE_{RMS} 也随之增大. 从声发射定义方面也容易理解, 材料释放的声发射能量与材料应变率及体积均成正比关系^[8]. 线速度固定时, 材料应变率变化不大, 但是, 进给速度和锯切深度增大均会导致单位时间材料去除体积直接增加, 因此, AE_{RMS} 随之增大.

相比上述而言, 线速度的影响更为复杂. 从压痕理论看, 锯切过程磨粒对工作材料的作用实际上可视为一个移动的压缩行为. 当进给速度和锯切深度固定、单位时间内材料去除体积不变、提高线速度时, 磨粒移动速度加快, 材料应变率增大, 理论上声发射能量增强, AE_{RMS} 应该增大. 但实际上, 由于锯切过程花岗石主要以脆性去除方式去除, 如图 5 所示. 从单颗磨粒去除材料角度看, 提高线速度时, h_{max} 变小(式 3), 花岗石材料倾向微脆性去除趋势, 即大块体积破碎减小^[1,9]. 单轴抗压实验表明^[10], 与金属等材料不同, 受岩石天然属性及其组织构成影响, 花岗石内部存在大量解离面、空隙等缺陷, 压缩的前期(弹、

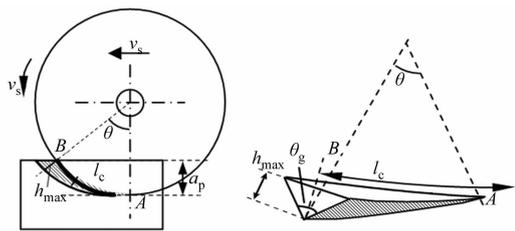


图 4 锯切弧区内单颗磨粒切削深度示意

Fig. 4 Cutting depth of a grit in cutting zone

塑变形过程)声发射事件很少,存在静默期,声发射主要集中在花岗岩脆性碎裂瞬间释放.因此,随着 h_{\max} 减小,声发射事件及强度变小, AE_{RMS} 减小.文献[8]指出 h_{\max} 减小时,微细破碎增多, AE 事件率增大但幅值减小,总体上 AE_{RMS} 减小.可见,线速度提高时, AE_{RMS} 变化是材料应变率和 h_{\max} 影响的综合反映.从 AE_{RMS} 随锯切线速度增大而减小(图3(c))的趋势看,花岗岩锯切时, h_{\max} 的影响略占主导.

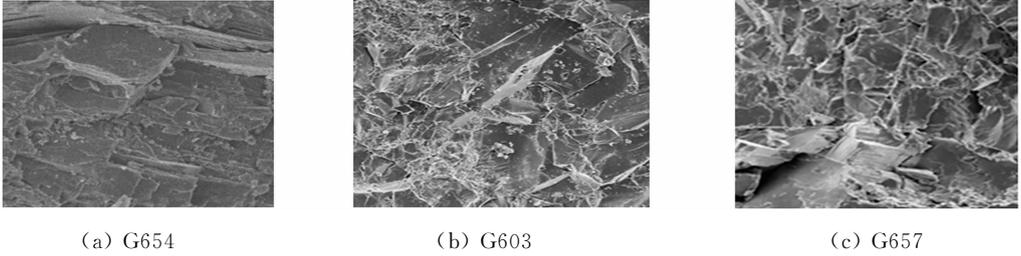


图5 锯切加工面的SEM图

Fig. 5 SEM photographs of machined surface

2.2 AE_{RMS} 与锯切功率的对应关系

锯切功率是锯切弧区内磨粒滑擦耕型、去除工件、岩屑摩擦等因素复杂作用的综合反映,是目前业界用于监控锯切过程难易程度、锯片磨损程度的关键指标. AE_{RMS} 随锯切功率(P)的变化趋势,如图6所示.由图6可知: AE_{RMS} 与锯切功率两者间具有很好的线性正相关,这与Tawakoli等^[11]在磨削金属上的研究结果一致,即 AE_{RMS} 也可充分反映锯切过程的能量消耗.因此,实际生产中也可以采用监测锯切过程声发射信号对锯切过程进行控制.

2.3 AE_{RMS} 受材料特性的影响

AE_{RMS} 与花岗岩抗压强度(σ_{bc})的关系,如图7所示.由图3,6,7可知:锯切不同花岗岩时, AE_{RMS} 表现出来的变化规律基本一致,但数值上存在明显的差异,总体上是 $G654 > G603 > G657$,与这3种花岗岩的抗压强度排序一致(表2).

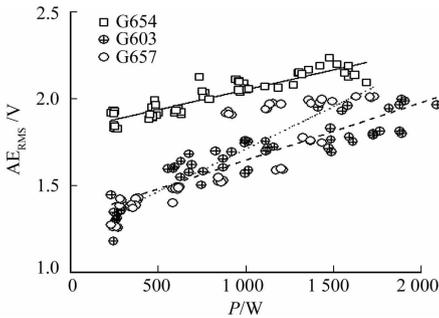


图6 AE_{RMS} 与锯切功率的关系

Fig. 6 Relationship between AE_{RMS} and sawing power

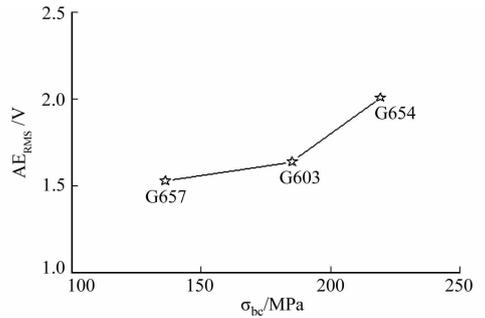


图7 AE_{RMS} 与花岗岩抗压强度的关系

Fig. 7 Relationship between AE_{RMS} and compressive strength of granite

花岗岩是由火山爆发的熔岩在受到相当的压力的熔融状态下,隆起至地壳表层并慢慢冷却凝固结晶后形成的一种火成岩(构造岩),其岩相主要由石英、长石、云母及少量胶结物构成,呈粒状或似斑状结构,其中石英和长石是主要硬质相.G603,G654和G657中所含石英和长石岩相总量比例相差不大,主要差异体现在结晶粒度上: $G654(\text{细粒}) < G603(\text{中等}) < G657(\text{中粗})$.花岗岩颗粒越均匀细密,其间隙小,结合强度越好,综合机械性越优异,这从表2中密度、抗弯及抗压强度均可以看出.

对岩石断裂过程中声发射的研究表明,在微裂纹生成区, AE_{RMS} 幅值较低,主裂纹的失稳扩展时, AE_{RMS} 达到最高值,且与岩石构造有很大的关系^[12].压缩研究表明,花岗岩晶粒越细越均匀,岩石构造致密度就越高,综合表现在其抗压强度越大,压缩失效瞬间的声发射强度越强,总体上 AE_{RMS} 随着抗压强度的增大而增大^[13].从试验结果不难看出,锯切过程同样也存在这样的规律,即花岗岩抗压强度越高,锯切过程释放的 AE_{RMS} 也越大.从锯切过程看,弧区内众多磨粒对岩石的划擦过程,实际上是大量微裂纹生成和主裂纹失稳扩展同时并存,使材料以脆性方式去除(图5).因而, AE_{RMS} 总体反映了弧区界面上工件材料裂纹形成与扩展的数量与难易程度,其值越大,难度越大.从 AE_{RMS} 看,3种花岗岩中,G657的

可锯性最好,G654 最差,这也与业界常用抗压强度判断石材可锯性的结果基本一致,即通常花岗石的抗压强度越高,其加工难度越大.可见,实际生产中可采用声发射进行花岗石可加工性的评判.

3 结束语

文中主要从时域上对锯切过程 AE_{RMS} 随锯切参数的变化规律进行实验研究,并分析其与锯切功率和岩石抗压强度的对应关系.后续工作将着重从频域角度对 AE 信号进行进一步分析.

参考文献:

- [1] 李远.花岗石超大切深锯切机理与技术研究[D].泉州:华侨大学,2004:4-12.
- [2] 黄国钦,徐西鹏.基于锯切弧区切向力分布的功率消耗模型[J].机械工程学报,2011,47(21):170-176.
- [3] 刘国华.声发射信号处理关键技术研究[D].杭州:浙江大学,2008:20-28.
- [4] 马孝春,张大伦.岩石切削中的声发射研究[J].岩石力学与工程学报,1996(15):77-78.
- [5] 王成勇.单颗粒金刚石磨削花岗岩的声发射信号特征[J].金刚石与磨料磨具工程,1996(3):2-7.
- [6] MEDING M. Analysis of acoustic emission from single grit scoring[J]. Industrial Diamond Review,1995,6(2):20-22.
- [7] 胡映宁,许振力,胡珊珊,等.基于声发射技术金刚石组合圆锯片干切混凝土的切削状态研究[J].金刚石与磨料磨具工程,2008(4):28-34.
- [8] 郭力.工程陶瓷高效深切磨削加工中声发射的实验研究[J].湖南文理学院学报(自然科学版),2008,20(2):78-84.
- [9] KONSTANTY J. Theoretical analysis of stone sawing with diamonds[J]. Journal of Materials Processing Technology,2002,123(1):146-154.
- [10] LOCKNER D. The role of acoustic emission in the study of rock fracture[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts,1993,3(7):883-899.
- [11] TAWAKOLI T. Developments in grinding process monitoring and evaluation of results[J]. International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems,2008,1(4):307-320.
- [12] HASHIDA T, THAKAHASHI H. Significance of AE crack monitoring in fracture toughness evaluation and non-linear rock fracture mechanics[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts,1993,30(1):47-60.
- [13] MANTHEI G. Characterization of acoustic emission sources in a rock salt specimen under triaxial compression[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,2005,95(5):1674-1700.

Experiment on the Characteristic of Acoustic Emission in Circular Sawing of Granite

ZHANG Meiqin¹, GAO Zhen², WU Hairong²,
LI Yuan², HUANG Guoqin²

(1. School of Mechanical and Automotive, Xiamen University of Technology, Xiamen 361021, China;
2. Institution of Manufacture Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Using different parameters, sawing experiments were carried out on three kinds of granites (G603, G654, G657), and acoustic emission (AE) and spindle power consumption were monitored during sawing processes. The experimental results were analyzed with the mean square value of AE (AE_{RMS}). The results show that AE_{RMS} increases with the increase of sawing depth and feeding speed, but decreases with the sawing speed, and has a good linear positive correlation relationship with sawing power. In sawing of different granites, AE_{RMS} tendencies with different sawing parameters are the same but there is obvious difference in amplitude. And the higher the compressive strength of granite is, the larger the value of AE_{RMS} becomes.

Keywords: granite; sawing; acoustic emission; sawing power; compressive strength

侧翻安全性的校车侧围结构轻量化设计

孙贵斌¹, 韩勇¹, 蓝平辉¹, 谢金萍¹, 纪碧端²

(1. 厦门理工学院 机械与汽车工程学院, 福建 厦门 361024;

2. 厦门金龙旅行车有限公司 技术中心, 福建 厦门 361006)

摘要: 根据《客车上部结构强度的规定》对校车车身结构侧翻安全性的规定, 建立和验证某校车有限元分析模型. 采用均匀设计方法对校车的侧围结构厚度参数进行多水平多因素实验设计和侧翻仿真分析, 并拟合实验设计数据获得轻量化水平较优的因素水平组合. 结果表明: 在侧围结构满足法规对生存空间要求的前提下, 选择因素水平组合 U_{2465} 并参考实际型钢的厚度规格(1(1.0, 1.0), 2(2.0, 1.5), 3(3.0, 2.0), 4(2.5, 2.0)), 可使侧身结构质量轻量化 24.39%.

关键词: 校车; 侧翻; 轻量化; 均匀设计; 侧围结构

中图分类号: U 461.91

文献标志码: A

校车是城市、农村承载学校与家庭之间儿童上下学的交通工具. 在国内, 2008 年专用校车的保有量仅为 56 辆, 2009 年增加到 702 辆, 2011 年则快速增加到 6 315 辆, 需求量巨大^[1]. 然而, 生产出来的校车为了保证足够的安全性, 却忽略了车身结构的轻量化, 导致车身结构设计不合理, 过于臃肿笨重, 增加了燃料损耗. 这样即使能满足安全法规的要求, 却较难适应当今汽车发展中节能、环保的主题目标. 因此, 校车的安全性及轻量化设计是校车结构设计的两个重要目标. Su 等^[2]采用响应面法和代理模型, 对客车的强度和侧翻安全性进行了梁厚度的多目标优化. Liang 等^[3]采用改变梁的厚度方法, 优化车身各结构的吸能特性以改善客车的侧翻安全性. Negrut 等^[4]利用灵敏度分析方法确定优化设计变量, 并对客车骨架结构进行了轻量化设计. 校车法规《专用校车安全技术条件》(简称《条件》)和《校车座椅系统及其车辆固定件的强度》的相继出台, 对设计安全又节能的校车非常具有挑战性^[5-6]. 本文采用有限元软件, 根据某校车原始设计方案中的几何尺寸建立校车有限元模型, 对满足侧翻安全性的校车车身侧围进行轻量化设计.

1 实验方法

1.1 校车模型的建立和验证

文中模型的建立是基于前期车身结构优化后, 满足侧翻安全性的校车整车有限元模型^[7]. 模型运用 Hypermesh 网格软件, 模块采用网格大小为 10 mm、雅克比(Jacobian)为 0.5 等网格划分标准划分校车模型. 完成后的校车整车有限元模型主要由四边形和少量的三角形单元构成, 单元数为 656 753, 节点数为 696 421. 整车有限元模型中包括根据 ECE R66 法规建立的生存空间^[8], 如图 1(a)所示. 此外, 校车整车结构采用的材料是普通碳素结钢 Q235 和 Q345.

完成整车材料属性后, 依据《客车上部结构强度的规定》(简称《规定》)要求^[9], 建立校车侧翻试验工况. 考虑计算效率, 校车的侧翻仿真从触地时刻开始计算^[10]. 在整个侧翻过程中, 通过能量守恒定律计

收稿日期: 2015-02-01

通信作者: 韩勇(1984-), 男, 副教授, 博士, 主要从事汽车碰撞安全、人体损伤生物力学和儿童乘员安全的研究. E-mail: yonghan@xmut.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(31300784); 福建省高校杰出青年科研人才培育计划及客车制造工艺精品课改项目(0000900167); 福建省厦门市科技计划项目(3502Z20153023)

算得知, 临界状态时刻的动能加重力势能之和与接触地面时刻的动能加重力势能之和相等, 即

$$E_{D1} + E_{S1} = E_{D2} + E_{S2}, \tag{1}$$

$$\frac{1}{2}J\omega_1^2 + mgh_1 = \frac{1}{2}J\omega_2^2 + mgh_2. \tag{2}$$

整理得

$$J = \frac{2mg\Delta h}{\omega_1^2 - \omega_2^2}. \tag{3}$$

式(1)~(3)中: E_{D1} 为临界位置动能(J); E_{S1} 为临界位置重力势能(J); E_{D2} 为将触地面动能(J); E_{S2} 为将触地面重力势能(J); h_1 为临界位置整车重心距离碰撞地面高度(mm); h_2 为临界位置整车重心距离碰撞地面高度(mm); g 为重力加速度 $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; J 为整车的转动惯量($\text{kg} \cdot \text{m}^2$).

临界时刻, 给模型设置任意角速度为 $1 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, 将模型导入 LS-DYNA 中, 计算得到初始动能值, 表达式为

$$E_D = \frac{1}{2}J\omega^2. \tag{4}$$

整理得 J 值, 即

$$J = \frac{2E_D}{\omega^2}. \tag{5}$$

将式(3)与式(5)联立, 得到接触地面时的角速度, 即

$$J = \frac{2mg\Delta h}{\omega_1^2 - \omega_2^2} = \frac{2E_D}{\omega^2}. \tag{6}$$

将 $\omega=1$, 临界 $\omega_1=0$ 代入式(6), LS-DYNA 计算出初始的动能值 E_D , 得出触地角速度 $\omega_2 = 2.31 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, 如图 1(b) 所示.

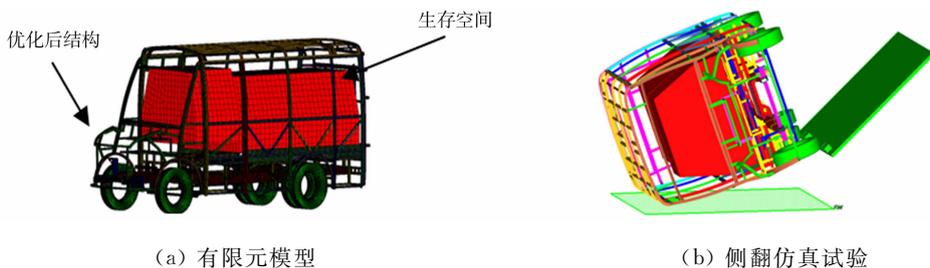


图 1 校车有限元模型和侧翻仿真试验

Fig. 1 School bus FE model and rollover simulation

仿真结束后, 通过后处理 Hypermesh 软件, 输出侧翻过程中能量、外力功的变化情况, 如图 2 所示. 图 2 中: E 为能量.

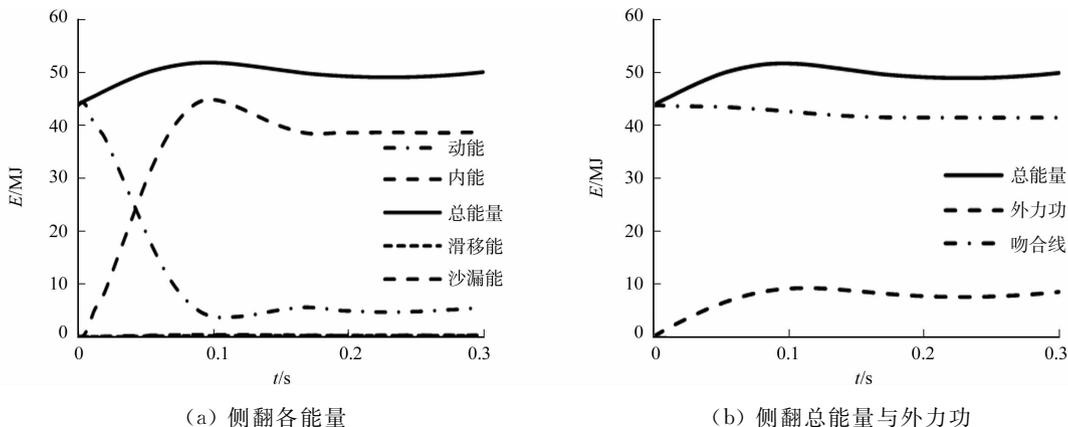


图 2 侧翻过程中能量、外力功的变化情况

Fig. 2 Energy and external work change during rollover

由图 2(a) 可知: 初始时刻动能出现最大值为 $44.30 \text{ MJ} \cdot \text{s}^{-1}$, 此后动能开始减小, 因车身结构变

形,整车内能不断增加;当 $t=0.10\text{ s}$ 时,沙漏能出现最大 $0.40\text{ MJ}\cdot\text{s}^{-1}$,此时总能量为 $51.80\text{ MJ}\cdot\text{s}^{-1}$ (沙漏能占总能量 0.77% ,远小于 5% 的失真标准^[11]);整个过程动能的减小与内能的增加趋势基本是一致的.对侧翻整个过程分析实质是研究能量转换的过程分析,在能量图中总能量的增加是额外功引起的.由图2(b)可知:总能量与外力功的变化趋势基本吻合.综上所述,仿真求解过程能量守恒,所建立的有限元模型结果稳定、准确、有效,是可以接受的.

此外,观察整个侧翻仿真动态过程,并未发现车身任何部位的位移量侵入生存空间,生存空间内的任何部分也不曾突出到变形的车身结构外,符合《规定》^[9]中侧翻结果评价标准.

校车实车车身长 $5\,543\text{ mm}$,宽 $2\,103\text{ mm}$,高 $2\,831\text{ mm}$,主要由顶盖、地板、侧围和底架构成.试验采用规格大小为CBC-45的侧翻台进行实车侧翻试验.开始后,侧翻台绕侧边旋转轴转动,在试验前锁死校车4个车轮,防止校车沿侧翻台前后运动.校车侧翻实车试验,如图3所示.当侧翻台转到临界侧翻位置时(图3(a)),校车开始脱离翻转台,在自身重力作用下撞击地面;接触地面后,校车车身结构变形剧烈,而后车架反弹变形减小直至最后稳定,试验结束.在整个实车侧翻过程中,校车车身结构运动稳定,经历了临界侧翻、空中侧翻、触地侧翻及侧翻结束等几个阶段,但未发现车身任何结构件对生存空间侵入,生存空间内的任何部分也不曾突出到变形的车身结构外,如图3(b)所示.



(a) 侧翻试验



(b) 侧翻结果

图3 校车侧翻实车试验

Fig. 3 Rollover test of the school bus

通过上述实车与仿真对比可知:仿真结果与实车结果基本吻合.所建立的校车有限元模型能较好地反映校车车身在侧翻过程中的变形情况,在侧翻的整个过程中,生存空间并未被变形的车身结构侵入.因此,不仅验证了模型的有效可用性,同时,模型也是符合《规定》法规要求的校车模型.

1.2 均匀设计方法

均匀设计方法又称均匀设计试验法,是由我国著名数学家方开泰教授和王元开发的一种考虑试验点在试验范围内均匀散布的实验设计方法^[12].因其具体试验次数少、每列不同数据只出现一次且均匀分散在各个试验格点上的特点,且能较好地反映试验数据变化影响的可信度,被广泛应用于医学、化学、农学等工程应用领域,并取得了大量实践研究成果.

采用均匀设计方法,对模型进行结构分析,发现车身左右(除车门对侧外)侧围结构基本一致.将对称的左右侧围分成4个因素情况(1,2,3,4),作为试验变量进行均匀试验设计,如图4所示.每个因素 X 均由立柱 A 及横梁 B 组成(因素 A 与 B 均指对应矩形管的壁厚).

各因素具体参数为:校车车门对侧立柱 A_1 厚度 A_1 ;门立柱之间的横梁 B_1 厚度 B_1 ;立柱 A_2 的厚度 A_2 ;立柱 A_2 与立柱 A_3 之间的横梁 B_2 厚度 B_2 ;立柱 A_3 的厚度 A_3 ;立柱 A_3 与立柱 A_4 之间的横梁 B_3 厚度 B_3 ;立柱 A_4 与立柱 A_5 的厚度 A_4 ;立柱 A_4 与立柱 A_5 之间的横梁 B_4 厚度 B_4 .因素 X_i ($i=1,2,3,4$)对校车的侧翻安全性能及侧围结构的质量有很大的影响,考虑实际钢材厚度情况,确定因素 X_i ($i=1,2,3,4$)的厚度范围: A_i

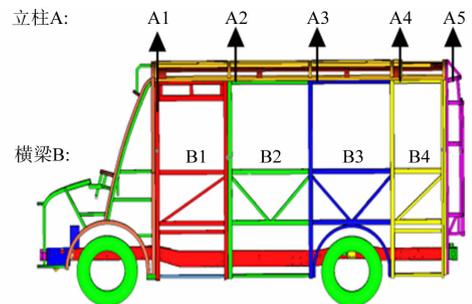


图4 各因素示意图

Fig. 4 Diagram of the factors

为 0.5~3.0 mm; B_i 为 0.5~2.0 mm(即均匀设计中的水平取值范围)。

文中所定义侧翻碰撞地面中的车身结构与生存空间之间的剩余量 L , 如图 5 所示。取侧翻过程中 L 的最小值^[13], 同时, 设 L_1 为门框立柱 A1 的剩余空间量, L_2 为立柱 A2 的剩余空间量, L_3 为立柱 A3 的剩余空间量, L_4 为立柱 A4 的剩余空间量, L_5 为立柱 A5 的剩余空间量。当 $L_i (i=1, 2 \dots 5)$ 为负值时, 表示生存空间被侵入; 当 $L_i (i=1, 2 \dots 5)$ 为正值时, 表示生存空间未被侵入。

经过优化变量的选取, 得到了均匀设计中的各因素水平。试验设计的目标是在满足侧翻法规安全性的前提下, 车身侧围结构的总质量最小, 具体数学模型为

$$\left. \begin{aligned} y &= (X_1, X_2, X_3, X_r), \\ \min F(y) &= \sum_{j=1}^n M_j, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中,

$$\left\{ \begin{aligned} \text{s. t } &L_i \geq 0, \quad i = 1, 2, 3, 4, \\ &X = (A, B), \\ &0.5 \text{ mm} \leq A_1, A_2, A_3, A_4 \leq 3.0 \text{ mm}, \\ &0.5 \text{ mm} \leq B_1, B_2, B_3, B_4 \leq 2.0 \text{ mm}, \\ &|A_{i+\Delta} - A_i| = 0.5, \\ &|B_{i+\Delta} - B_i| = 0.3. \end{aligned} \right.$$

式(7)中: $F(y)$ 为目标函数; n 为全部优化结构个数; M_j 为第 j 优化结构件的质量。

试验设计中涉及 4 个因素、6 个水平。为了更好地均匀分配试验, 可以采用 $U_6^*(6^4)$ 或 $U_6^*(6^4)$ 。其中, U 右上角加 * 和不加 * 分别代表 2 种不同的均匀设计表, 通常加 * 的均匀设计有更好的均匀设计性, 应优先选用^[14]。所以, 采用 $U_6^*(6^4)$ 均匀设计表, 根据结构的原始厚度数据实际情况、因素组成、水平的取值范围, 设计出均匀设计试验的具体试验号及对应的因素水平, 如表 1 所示。需要进行 6 次侧翻碰撞安全性仿真试验。

表 1 $U_6^*(6^4)$ 试验设计因素表

Tab. 1 Factors for uniform design method

试验	因素				试验	因素			
	1(A, B)	2(A, B)	3(A, B)	4(A, B)		1(A, B)	2(A, B)	3(A, B)	4(A, B)
1	(0.5, 0.5)	(1.0, 0.8)	(1.5, 1.1)	(3.0, 2.0)	4	(2.0, 1.4)	(0.5, 0.5)	(2.5, 1.7)	(1.5, 1.1)
2	(1.0, 0.8)	(2.0, 1.4)	(3.0, 2.0)	(2.5, 1.7)	5	(2.5, 1.7)	(1.5, 1.1)	(0.5, 0.5)	(1.0, 0.8)
3	(1.5, 1.1)	(3.0, 2.0)	(1.0, 0.8)	(2.0, 1.4)	6	(3.0, 2.0)	(2.5, 1.7)	(2.0, 1.4)	(0.5, 0.5)

根据试验设计表中各因素水平数值, 调整模型参数, 建立侧翻仿真工况条件, 完成仿真试验。

2 结果与分析

经过 6 组仿真试验后, 对各组试验中各因素的质量进行轻量化目标分析。各试验组因素质量结果表, 如表 2 所示。各试验中, 侧围轻量化的质量分数(w), 如图 6 所示。

由表 2 可知: 不同试验因素水平值的轻量化结果不一样, 即使在同一组试验中, 由于均匀数据分配原因导致各因素水平值的轻量化结果也不一样。

由图 6 对比可知: 每组试验均具有较高度度的轻量化结果, 可以作为轻量化目标结果。但是在保证车身侧围轻量化的同时, 更需要保证车身侧围与生存空间具有足够的安全空间, 防止其在侧翻过程中侵入生存空间, 威胁到乘员的生命安全。分别测量各车身立柱与生存空间的剩余空间量 $L_i (i=1, 2 \dots 5)$ 值, 判断是否符合法规要求, 并具有足够大

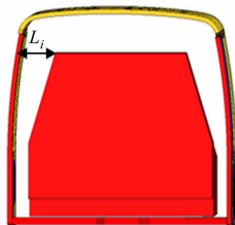


图 5 剩余空间量

Fig. 5 Remaining space

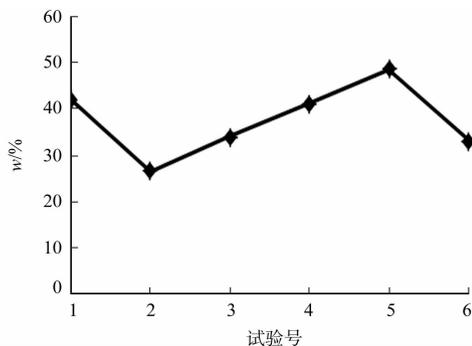


图 6 各试验侧围轻量化的质量分数

Fig. 6 Mass percentage of light weight in simulations

的空间剩余量保证乘员区安全.各立柱对应测量点的剩余空间数值表,如表3所示.

表2 各因素水平表

Tab.2 Level of the factors kg

试验	因素1	因素2	因素3	因素4	侧围
原始组	57.53	40.24	40.95	56.56	196.80
1	19.46	14.88	21.71	56.56	114.10
2	27.07	27.56	40.95	47.38	144.50
3	34.69	40.24	15.30	38.20	130.00
4	42.30	8.54	34.53	29.01	115.90
5	49.91	21.22	8.89	19.83	101.40
6	57.53	33.90	28.12	10.65	131.70

表3 各立柱剩余空间数值表

Tab.3 Remaining space value of each column mm

试验	立柱				
	A1	A2	A3	A4	A5
1	2.54	29.76	93.12	130.40	156.03
2	30.18	51.48	116.42	137.46	160.79
3	37.44	54.50	103.86	128.42	154.96
4	34.53	57.87	107.80	129.57	158.08
5	37.71	55.96	83.60	110.67	147.80
6	46.21	56.33	102.65	108.08	146.04

由表4可知:立柱A2~A5的剩余生存空间均有较大的剩余值,且后部的剩余空间大于前部的剩余空间,前部结构变形比较严重,剩余空间较小.但是,6组试验均未发生生存空间的入侵情况,均满足《规定》法规及数学模型中的 $L_i \geq 0$ 前提目标要求.同时,对比各个试验的立柱剩余空间量平均值:82.37, 99.27, 95.84, 97.57, 81.15, 91.86.在试验2轻量化参数设置下,车身侧围结构可以获得满足法规生存空间的要求,且具有最大的平均剩余空间量,更好地保证乘员区免受被车身侧围侵入生存空间造成乘员伤害的风险,具有较好的侧翻安全性能.

综上所述,车身侧围结构基于均匀设计方法的理论结果,采用 U_{2465} (试验2)因素水平值进行生产加工,不仅可以较好地满足校车侧翻安全性要求,还可以较大程度地减少材料用量、减低生产成本.考虑到因素组成中的B因子的厚度分配与实际钢材生产厚度规格(以0.5 mm为一生产单位)不相称.故对 B_1, B_2, B_4 三个因子考虑安全性,进行理论数值的实际拟合修正试验1(1.0, 1.0), 2(2.0, 1.5), 3(3.0, 2.0), 4(2.5, 2.0),然后建立侧翻试验工况条件进行模拟仿真.输出结果经测量,立柱1~5的生存空间剩余量分别为30.61, 52.02, 117.04, 137.24, 160.79, 车身侧围结构质量为148.80 kg.车身变形均满足法规目标要求未侵入生存空间,同时,侧围结构与原车模型质量轻了24.39%,达到了较大程度轻量化的目标要求.

3 结论

通过对某校车的车身侧围结构轻量化优化设计研究,可以得到以下4个结论.

1) 通过对比实车侧翻试验结果与有限元分析结构验证了校车有限元模型是有效的.

2) 对侧围结构采用了均匀设计方案进行轻量化设计后,找出了最佳的因素组合,即 U_{2465} 的因素厚度组合 $(A_i, B_i) = (1.0, 0.8), (2.0, 1.4), (3.0, 2.0), (2.5, 1.7)$.

3) 结合实际生产材料标准,对均匀试验设计最佳方案进行实际生产可行性数据拟合,即对 U_{2465} 试验数据修正,结果 $(A_i, B_i) = (1.0, 1.0), (2.0, 1.5), (3.0, 2.0), (2.5, 2.0)$ 不仅达到法规安全目标,也较大程度的在原模型侧围轻量化了24.39%.

4) 该结论对校车的实车后续生产和研究具有较大的实践指导性意义,从而节约材料,降低能耗,降低成本.

参考文献:

- [1] 陈军. 厦门金龙专用校车市场营销策略研究[D]. 成都:西南交通大学, 2012:18-22.
- [2] SU Ruiyi, GUI Liang, FAN Zijie. Multi-objective optimization for bus body with strength and rollover safety constraints based on surrogate models[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2011, 44(3): 431-441.
- [3] LIANG C C, LE G N. Optimization of bus rollover strength by consideration of the energy absorption ability[J]. International Journal of Automotive Technology, 2010, 11(2): 173-185.
- [4] NEGRUT D, RAMPALLI R, OTTARSSON G, et al. On an implementation of the HHT method in the context of index 3 differential algebraic equations of multi-body dynamics[J]. ASME Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2007, 2(1): 73-85.

- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 专用校车安全技术条件:GB 24407—2012 [S]. 北京:中国标准出版社,2012:3-20.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 专用校车学生座椅系统及其车辆固定件的强度:GB 24406—2012 [S]. 北京:中国标准出版社,2012:1-8.
- [7] 韩勇,蓝平辉,彭倩,等. 某校车车身结构碰撞吸能特性及优化设计[J]. 中国科学安全学报,2014,24(10):35-41.
- [8] UNECE. R66-Uniform technical prescriptions concerning the approval of large passenger vehicles with regard to the strength of their superstructure[S]. Geneva:United Nations,2006:1-30.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 客车上部结构强度的规定:GB/T 17578—2013 [S]. 北京:中国标准出版社,2013:3-4.
- [10] CHIRWA E C, TERRY D, MATSIKA E. Rollover design considerations of the superstructure of a thirty two passenger seat bus[C]//Proceedings of the 9th International Forum of Automotive Traffic Safety. Xiamen:[S. n.], 2011:5-12.
- [11] 周莎,张勇,张成,等. 基于梯度强度立柱的客车侧翻安全性多目标优化设计[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2015,36(3):241-246.
- [12] 刘文卿. 试验设计[M]. 北京:清华大学出版社,2005:102.
- [13] 阮诚心. 基于侧翻碰撞安全性的客车车身改进设计及乘员损伤研究[D]. 长沙:湖南大学,2012:51-55.
- [14] 李云雁,胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京:化学工业出版社,2008:162.

Lightweight Design of School Bus Side Structure for Rollover Safety

SUN Guibing¹, HAN Yong¹, LAN Pinghui¹,
XIE Jingping¹, JI Biduan²

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;

2. Technology Center, Xiamen Golden Dragon Van Limited Company, Xiamen 361006, China)

Abstract: According to the requirement of the rollover safety for school bus in the *provisions of strength for the bus superstructure*. A school bus finite element model was developed and validated. The uniform design experiment method was adopted for optimizing thickness parameter of the lateral confining structure using multi-level and multi-factor experiment design and rollover simulations. The optimum levels of the factors for light weighting was obtained by fitting the experimental data. The optimization result shows that under the premise of the lateral confining structure meeting the regulatory requirements on the living space, the weight of body structure was decreased by 24.39% by choosing U_{2465} factor level combination group and referring to the actual type of steel thickness specifications (namely: 1(1.0, 1.0), 2(2.0, 1.5), 3(3.0, 2.0), 4(2.5, 2.0) unit: mm).

Keywords: school bus; rollover; lightweight; uniform design; lateral confining structure

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:杨建红)

仿人面部表情机器人研究进展

张国亮, 王展妮, 王田, 吴昊

(华侨大学 计算机学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 首先,梳理近年来国内外这一领域的发展现状,并从心理学维度空间角度探讨了表情机器人的情感建模方法.其次,从机构设计、人脸表情的计算模型、表情特征的提取与分类的识别等多个方面,对表情机器人研究中的关键技术展开综述.最后,在综述分析的基础上,对表情机器人研究现状及其未来发展进行系统的评价,给出今后发展的 4 个方向.

关键词: 仿人机器人; 表情机器人; 面部表情; 面部动作编码; 心理学

中图分类号: TP 391.4

文献标志码: A

工业机器人在制造业中的快速发展为机器人进入民用服务领域提供了良好的契机.与传统的固定工位、固定工序和固定操作场景的工业机器人不同,服务机器人对于交互性、智能性和自主性的要求更高.在服务机器人领域中,仿人面部表情机器人因其人机交互友好、学科交叉融合度大等特点,成为当前这一研究领域中的热点问题.表情机器人的研究不仅涉及到信息传感、控制等自然学科,而且还需要考虑其内在的情感及情绪等心理变化.因此,本文从表情机器人的心理学建模、物理建模和计算模型等多个角度,详细阐述了该领域的相关理论与技术,展望了未来的发展方向.

1 国内外表情机器人研究现状

目前,对具有仿人面部表情机器人的研究主要集中在欧美、日本的大学及研究机构^[1-2],近年来,国外具有代表性的仿人面部表情机器人的概括,如图 1 所示.

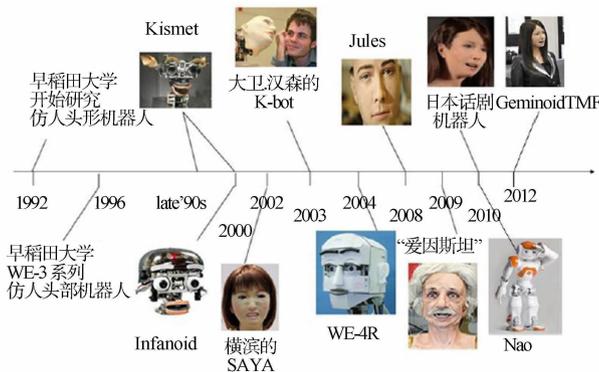


图 1 国外面部表情机器人研究进展

Fig. 1 Development of foreign facial expression robot

20 世纪 90 年代,美国麻省理工学院人工智能实验室的辛西娅·布雷齐尔博士等研发了婴儿机器人 Kismet.它是较早的具有面部表情的仿人机器人,能以类似婴儿的行为方式表达出 Ekman 定义

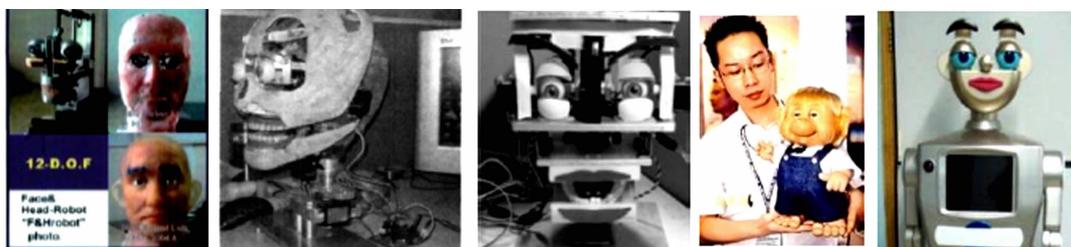
收稿日期: 2015-06-25

通信作者: 张国亮(1978-),男,讲师,博士,主要从事机器人视觉伺服、机器人遥控操作的研究. E-mail: zhangguoliang@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61202299);福建省自然科学基金资助项目(2013J050901);华侨大学高层次人才科研启动项目(11BS107)

的喜、怒、哀、乐等 6 种基本情感状态. 日本早稻田大学开发的 WE-3RV 的情感机器人将 6 种基本情感扩充到 9 种, 并建立了具有外界刺激的三维情感空间模型. 东京理工大学开发的 SAYA 机器人较早采用了人工肌肉辅助运动机构, 从而产生面部表情. SAYA 女性的外观使得其具有较好的亲和力, 现已尝试应用于指挥交通、授课及售货等日常生活领域. 英国赫特福德大学的设计 Nao 机器人, 具有 1 岁婴儿的情感及行为学习模式. 机器人在与人类的接触过程中, 通过观察身边人的表情、动作来分析人们的情感变化, 从而与人建立双向情感联系. 日本大阪大学智能机器人教授 Hiroshi 相继研究了 ReplieeQ1, ReplieeQ2 和 GeminoidTMF 等女性仿人机器人. 其中, GeminoidTMF 以日本新闻女主播藤井雅子为原型, 动作表情与真人极其相似, 使人即便在近处也很难分辨真伪.

国内仿人表情机器人研究工作起始于哈尔滨工业大学吴伟国教授领导的团队, 2004 年, 该项目组在国内首次研制了能够表达 8 种基本表情的 H&Frobot-I, 随后又相继研究了具有面部动作协调、口形与语音识别协调功能的 H&Frobot-II 和 H&Frobot-III^[3]. 北京科技大学王志良教授^[4-5] 等较早地对表情机器人的人工情感、多信息融合交互等方面展开研究, 设计了具有人机共同注意、动态情绪调节的仿人机器人头部. 2010 年, 上海大学的柯显信等^[6] 基于 AT89S52 单片机和 7 个舵机, 设计并实现了具有 11 个自由度的结构相对简单的 SHFR-1 表情机器人. 除此之外, “百智星”幼教机器人及“童童”3 机器人也是近年来国内研发的具有代表性的表情机器人. 国内面部表情机器人, 如图 2 所示.



(a) H&F 机器人 (b) 北科大仿人头部 (c) SHFR-1 (d) 百智星幼教机器人 (e) 童童机器人

图 2 国内面部表情机器人

Fig. 2 Domestic facial expression robot

2 仿人机器人表情的心理学模型

外在的刺激可以由传感器获取, 但内在的情感及心理活动的变化却属于心理学范畴. 因此, 建立与表情机器人相适应的情感模型是实现预期表情的理论基础. 在心理学研究领域, 对于情感的研究非常广泛, 常用的方法主要有基本情感论、维度空间理论、认知情感论、个性化和情绪化情感论等. 其中, 维度空间理论由于便于将复杂的情感多维量化, 在情感机器人建模领域中受到了广泛的关注, 目前多数的具有情感模型的表情机器人都采用了类似的理论模型.

维度空间论认为, 人的所有情感分布在由若干维度构成的某一空间中, 不同情感之间不是独立的, 而是连续可渐变的. 最早提出情感可进行维度量化的是实验心理学奠基人 Wundt, 他利用愉快-不愉快、紧张-松弛、兴奋-沉静 3 个维度来表示情感. 美国心理学家 Schlosberg 提出了与 Wundt 的方法类似的倒立圆锥情感空间. Schlosberg 认为, 任何的情感都可以在椭圆锥上找到自己合适的位置, Schlosberg 的椭圆锥是西方心理学提出的第一个具有维度情感量化表的情感模型. Plutchik^[7] 发展了 Schlosberg 的模型理论, 他利用因素分析法假设了情感之间存在着 3 个基本特征: 强度、相似性和两极性. Plutchik 认为原始的情感是从进化过程中分化出来的, 居于顶端最强烈, 沿着扇形面向下, 越靠近底端情感越微弱^[8]. 同一扇面上越临近, 情感性质上越接近, 互为对角的两个扇形中的情感则是相互对立的, 距离越远, 差异越大. Plutchik 情感模型具有典型的多维量表的模型结构, 在表情机器人等应用领域得到深入的研究, 如 MIT 的 Kismet 表情机器人就采用了与 Plutchik 情感模型类似的模型结构. 将 Plutchik 的扇形空间转换为对立性和外界刺激程度二维平面, 而将强度转换为对外界刺激程度的反应. 除 Plutchik 的倒立圆锥模型, 由 Russell 等提出的 PAD 维度观测模型也是目前心理学界公认的一种普适的三维情感模型. 国内毛峡等^[9-10] 研究的表情机器人及仿生代理中都采用了相似的模型.

3 仿人表情机器人的关键技术

3.1 表情机器人机构设计

表情机器人的头部机构是表情交互的物理载体,良好的机构设计是实现表情自然交互的前提条件.人类的脸部不仅运动器官众多,而且器官运动幅度的细微瞬间变化都可能表达不同的情感.因此,为达到表情正常输出,表情头部机构的设计不仅需要从生物学的角度模仿,还需要对整个系统综合考虑,在满足机构的运动学、动力学、控制能力、驱动系统和传感器需求的前提下,机构设计一般至少需要满足以下两点要求.

1) 外观上与人类头部外形、大小、样貌相似,给人以亲切感和可信任感.人的面部器官包括眼睛、鼻子、眉毛、嘴巴和下颚等.在这些器官中,眼睛是人类最为重要的面部器官.然而,对于人类的表情,仅仅依靠人眼是无法独立表达情感的,眼部表情动作一般需要结合眼球、眼睑和眉毛一起来表达.眼球具有上、下、左、右共4个自由度(DOF),每一个眼睛包含上、下两个眼睑,其设计难点在于眼球运动与眼睑运动可能存在空间干涉,且由于下眼睑运动幅度较小,多数研究从简化机构设计角度,只做了一侧眼睑,但考虑到眼睑睁开的幅度对表情有很大影响,双侧眼睑运动的设计能够表达更丰富的情感.眉毛和嘴部涉及的表情变化非常灵活,目前已出现有1,2,4,8等不同自由度的眉毛,而嘴部运动的变化更加丰富,不仅包含平面的运动,还涉及了空间运动.因此,在表情机器人设计中,从2~6个自由度的形式均有出现.下颌和颈部的承载力度最大,通常需要选择载荷较大的电机加以控制.

2) 在机构设计中,需要针对表情机器人的应用形式,整体考虑空间的布局和自由度的分配,为驱动和传感器预留足够的空间.在表情机器人中,为使每个器官运动的幅度与人类相近,需要把大量传感器和驱动装置装入头部中,这就需要在有限空间完成复杂机构设计,整个系统具有运动空间狭窄、运动范围小的特点.针对这种特殊的应用需求,国内外学者在机构设计方面提出了大量可行的研究方案,如德国 Kaiserslautern 大学的 ROMAN 机器人利用8个金属板支撑骨架,依靠10个舵机推拉线控制硅胶面皮,实现表情动作,并加入1个大扭矩输出舵机控制下颌动作,实现6种基本表情.日本东京通信研究实验室设计了15个自由度的 Infanoid,其突出特点是在眼部加了5个DOF,眼球能在正负45°范围内扫视.日本早稻田大学 WE-4R 机器人共有25个DOF,其设计也非常重视眼部和眉部的运动,眼球的俯仰运动与眼睑的开合能够联动. WE-4R 与其他表情机器人最大不同之处是运用蓝色和绿色的发光板来表达脸颊面色,面色并将其与眉毛、嘴唇、下颌和声音一起来表达情感.美国汉森公司研发的“爱因斯坦”是近年来具有最复杂机构的机器人表情头,它能够实现31个自由度,可表达28个脸部表情.国内北京科技大学的李娜等^[11]设计了11个DOF的表情头,眼球、眼睑、眉毛、颈部和下颚的自由度分别为4,2,2,2,1.哈工大的“H&F”系列机器人共有12个自由度,面部表情的驱动装置采用了电机与绳索相结合的驱动方式,而眼睛机构采用线传动.

3.2 人脸表情的计算模型

人类的面部表情非常丰富,脸部细小的微变可能表达完全不同的情感.据统计,人脸约可产生1万种表情,而其中的3000种是具有情感意义的.因此,为使表情机器人正确表达情感,需要对这些表情进行编码、统计,从而使其在不同的情境做出合适的表情,其中具有代表性的表情编码系统包括:面部动作编码系统(facial action coding system, FACS)、情感面部动作编码系统(emotional facial action coding system, EMFACS)、最大判别面部运动编码系统(maximally discriminative facial movement coding system, MAX)、MPEG-4 三维人脸动画标准和面部表情编码系统(facial expression coding system, FAC-ES)^[12]等.

FACS 是美国心理学教授保罗·艾克曼于20世纪70年代末提出的, FACS 根据解剖学定义了44个运动单元,及运动描述符来描述面部运动,每个运动单元具有不同的位置和强度. FACS 是迄今为止最为详尽、最为精细的面部测量系统,很多后续的方法都是以它作为基础展开的,例如,2002年, Ekman 在 FACS 系统的基础上,定义了6种基本表情及33种不同的表情倾向,确定了改进的简化 FACS 系统. EMFACS 则是将情感相关的面部运动与原始的 FACS 结合,对面部表情重新进行编码. MAX 系统由 Izard 提出,该系统提供一个有效和可靠的系统测量婴儿和儿童的面部行为中的情感信号. MPEG-4 三

维人脸动画标准利用人脸定义参数 (facial definition parameter, FDP) 描述特定人脸纹理形状模型与通用人脸模型之间的差别, 利用人脸动画参数 (facial animation parameter, FAP) 描述特定人脸表情与中性表情的变化关系。MPEG-4 中共定义了 68 个 FAP, 每个 FAP 分别定义人脸某一小区域的运动。在 FAP 基础上, MPEG-4 还利用了 FAP 之间的空间关系, 定义了人脸动画参数单元 (facial animation parameter unit, FAPU), 及其 84 个特征点, 用于校准人脸和产生人脸动画。美国加利福尼亚大学的 Kring 等提出的 FACES 提供了表情的频率、强度、诱惑力和持续时间等信息, 能对分布在情感维度模型上的表情进行度量, 并且所需时间较短。FACS 考虑了身体位置的移动、手部的遮挡、眼睛、讲话、面部抽搐等对表情的影响, 增强了系统的可靠性。

3.3 人脸表情识别技术

人脸表情识别是表情机器人应用的关键支撑技术。虽然近年来人脸检测技术已逐渐成熟, 但与之密切相关的表情分析识别方法仍有许多难点有待克服, 而表情数据库的建立、人脸特征的检测、分类的识别是其核心的研究内容。

3.3.1 人脸表情库 目前人脸表情数据库大致分为 3 类。第一类是以 6 种基本情感为基础, 直接建立具有不同情感的表情库, 例如马里兰大学人脸表情库^[13], 包含 40 种不同文化和种族的测试者 6 种基本情感的人脸表情库。荷兰代尔夫特理工大学 MMI 人脸表情数据库包含 50 名测试者的 6 种基本情感, 共 500 个静态图像和 2 000 个视频。德国慕尼黑理工大学 FG-NET 数据库包含 18 名测试者的 6 种基本情感表情和中性表情的序列。伊朗谢里夫理工大学 DML-SUT 人脸表情数据库包含 10 名被试者 6 种情感表情和中性表情的可见光和红外视频序列。五邑大学建立了包含 6 名男性和 5 名女性的 6 种基本情感表情和中性表情的 CED-WYU 人脸表情库^[14]。中国科技大学的建立了包含 6 种基本情感的可见光和红外人脸表情图像库 USTC-NVIE^[15]。第二类是以 FACS 是编码为基础, 建立基于量化数据的细微表情库。例如, 卡内基梅隆大学机器人研究所建立的包含单一运动单元和复合运动单元共 23 种表情人脸表情数据库 CK+。第 3 类是针对较大人脸表情姿态变化的三维表情数据库。如纽约州立大学宾汉姆顿分校建立了 BU-3DFE 库^[16], 包含 100 名不同种族被试者 6 种基本情感表情和中性表情的三维信息。英国中央兰开夏大学建立的 ADSIP3-D 动态人脸表情数据库包含 10 名被试者的害怕、厌恶、生气、高兴、惊讶、悲伤和疼痛 7 种表情, 并分为轻微、一般和极度 3 种强度^[17]。

除了以上 3 种典型表情库之外, 混合型表情数据库也受到学者的关注, 如北京航空航天大学建立的共包含 18 种单一表情、3 种混合表情和 4 种复杂表情的 BHU 数据库^[18]。中科院计算技术研究所人脸数据库建立了具有姿势、表情、饰品、光照、背景、距离和时间 7 种不同环境类别的人脸表情库 CAS-PEAL^[19], 其特殊性是考虑了环境因素的影响。

3.3.2 表情特征提取与分类识别 人的面部表情涉及了大量复杂的肌肉运动变化, 在考虑特征选择及分类模型时, 必须考虑柔性形变对于识别性能的影响。因此, 中性表情脸的差异化形变特征选取是表情分析识别领域最常采用的特征提取方法。常采用的方法有活动外观轮廓、点分布模型、Gabor 图像变换和采用主成分分析方法 (PCA) 等。

表情的分类器模型是建立在特征选择的基础之上的, 主要包括隐马尔科夫模型法、神经网络法、时空运动能量模板法、支持向量机、Adaboost、基于规则推理的方法、PCA 等。如胡敏等^[20]提出了一种基于梯度 Gabor 直方图的人脸表情特征识别方法。蒋斌^[21]在判别分量分析算法的基础上, 提出了针对人脸表情识别的局部判别分量分析算法。希腊雅典国家技术大学 Caridakis 等^[22]提出了对用户和上下文自适应的神经网络方法进行表情识别的方法。北航大学的 Wang 等^[23]引入流行学习中较为成熟的 LLE 代替 AAM 中的 PCA 方法描述面部运动, 在减小图像残差的基础上, 实现了面部较大变化的识别。

4 未来展望

表情机器人集成了人工智能、认知科学、信息科学等多学科的研究成果, 近年来取得了较快的发展, 但距离完全自然的人机交互还有一段距离, 其研究仍然面临许多挑战性课题, 从目前的研究状况来看, 以下 3 个方向将是今后发展的趋势。

4.1 特殊材料的应用

从近年来已面世的表情机器人来看,头部机械结构虽然较为复杂,但在机构设计方面基本已经成熟,并无太多实质性的研究进展.与之对比,表情机器人的外观和内部传感领域却硕果颇丰,其突出代表是汉森公司发明的人造皮肤和东京理工大学研制的气动人工肌肉.近十年来,汉森公司在人造皮肤领域取得了令人惊叹的成就,他们利用人造橡胶和泡沫混合物制造的人造皮肤外观仿真度极高,不仅可完整地模仿、表达人类的28种面部表情,且面部会随着年龄的变化而出现皱纹.东京理工大学研究的人工肌肉当被充气 and 吸气时,可以像人的肌肉一样伸缩,这种气动结构的肌肉组织具有质量小、运动平滑、动力强劲等特点,适合较大幅度的表情运动.

4.2 特殊情境下的表情识别研究

传统的表情分析、识别针对的是人类的正常状态,而特殊情境包括环境存在遮挡、被识别者本身受到某种外界因素干扰,如疲劳和疼痛等.鲁棒化识别和细微化识别是这一类特殊应用必须面对的课题.与鲁棒性识别相比,表情的细微化识别难度更大,目前,主要有概率模型和强度模型两种方法.由于人脸细微化表情在运动速度、幅度和时间上特殊性,目前的研究方法仅能对特定细微表情建模分析,很难对有意为之的伪表情和不经意流露出的微表情进行识别.因此,如何提高细微化表情的自动识别的准确性和鲁棒性,将是今后研究者深入思考的内容.

4.3 多信息、多方法的融合应用

考虑到表情建模,尤其是细微表情变化度量的复杂性,多信息、多方法的融合受到学者的广泛关注,这一策略包含两方面内容:一是方法策略间的融合;二是通过方法间的互补性来提高复杂表情的识别效率.Zhao等^[24]提出了结合模糊核分类和支持向量机的面部复杂表情识别方法;Littlewort等^[25]结合Adaboost和SVM建立了自发疼痛表情识别系统;为提高痛苦表情识别的准确率,张伟等^[26]提出基于监督保局投影与多核线性混合支持向量机的识别方法.

5 结束语

类人表情机器人研究涉及心理学、认知科学、计算机智能、自动控制、机械设计等多领域知识,具有典型的多学科交叉特征.文中系统分析了该领域国内外研究工作的最新进展,并从心理学理论模型和应用关键技术两个方向详细阐述了当前亟需解决的问题,展望了表情机器人未来的发展方向.

参考文献:

- [1] HIRTH J, BRAUN T, BERNS K. Emotion based control architecture for robotics applications[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Italy: IEEE Press, 2007: 2150-2155.
- [2] HIRTH J, BRAUN T, ERNS K. Emotion based control architecture for robotics applications[C]// Proceedings of 30th Annual German Conference on Artificial Intelligence. Osnabrück: IEEE Press, 2007: 464-467.
- [3] 吴伟国, 宋策, 孟庆梅. 仿人头像机器人“H&F Robot-III”语音及口型系统研制与实验[J]. 机械设计, 2008, 25(1): 15-20.
- [4] 王巍, 王志良, 郑思怡, 等. 一类具有相同结构的表情机器人共同注意方法[J]. 机器人, 2012, 34(3): 265-274.
- [5] 刘欣, 谢仑, 杨文祥, 等. 表情机器人的动态情绪调节过程研究[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(7): 936-947.
- [6] 柯显信, 唐文彬, 陈玉亮, 等. 仿人面部表情机器人的控制系统设计[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2011, 17(1): 79-84.
- [7] PLUTCHIK R. Emotion: A psychoevolutionary synthesis [M]. New York: Harper & Row Publishers, 1980: 30-52.
- [8] RUSSELL S J, SUBRAMANIAN D. Provable bounded-optimal agents[J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 1995, 2(1): 575-609.
- [9] MAO Xia, XUE Yuli, CHENG Leelun, et al. Harmonious Graphics Generating Based on the $1/f$ Function Theory [J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2007, 32(2): 521-525.
- [10] 包海燕. 智能仿生代理的情感建模方法研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2010: 45.
- [11] 李娜, 陈工, 王志良. 表情机器人设计与实现[J]. 机器人技术, 2007, 23(12): 231-234.
- [12] KRING A M, SHOAN D M. The facial expression coding system (FACES), development, validation, and utility

- [J]. *Psychological Assessment*, 2007, 19(2): 210-224.
- [13] BLACK M J, YACOB Y. Recognizing facial expressions in image sequences using local parameterized models of image motion [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 25(1): 23-48.
- [14] 朱明早, 李树涛, 叶华. 基于稀疏表示的遮挡人脸表情识别方法[J]. *模式识别与人工智能*, 2014, 27(8): 708-712.
- [15] WANG Sangfei, LIU Zhilei, Lyu Siliang, et al. A natural visible and infrared expression database for expression recognition and emotion inference[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2010, 12(7): 682-691.
- [16] RABIEE H R. DML-SUT facial expression database[EB/OL]. [2011-03-10]. <http://fedb.dml.ir>.
- [17] FROWD C D, MATUSZEWSKI B J, SHARK L K, et al. Towards a comprehensive 3D dynamic facial expression database[C]// *Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on Multimedia, Internet & Video Technologies*. Hungary: IEEE Press, 2009: 113-119.
- [18] 薛丽丽, 毛峡, 张帆. BHU人脸表情数据库的设计与实现[J]. *北京航空航天大学学报*, 2007, 33(2): 224-228.
- [19] GAO Wen, CAO Bo, SHAN Shiguang, et al. The CAS-PEAL large-scale Chinese face database and base-line evaluations[J]. *IEEE Transactions on Systems*, 2008, 38(1): 149-161.
- [20] 胡敏, 朱弘, 王晓华, 等. 基于梯度 Gabor 直方图特征的表情识别方法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2013, 25(12): 1856-1862.
- [21] 蒋斌, 贾克斌. 局部判别分量分析算法[J]. *电子学报*, 2014, 42(1): 155-159.
- [22] CARIDAKIS G, KARPUZIS K, KOLLIAS S. User and context adaptive neural networks for emotion recognition [J]. *Neurocomputing*, 2008, 71(13/14/15): 2553-2562.
- [23] WANG Xiaokan, MAO Xia, Caeleau C D. Nonlinear shape texture manifold learning[J]. *IEICE Transactions on Information and Systems*, 2010, E93-D(7): 2016-2019.
- [24] ZHAO Hui, WANG Zhiliang, MEN Jihui. Facial complex expression recognition based on fuzzy kernel clustering and support vector machines[C]// *Proceedings of 3rd International Conference on Natural Computation*. Haikou: Natural Computation, 2007: 562-566.
- [25] LITTLEWORT G C, BARTLETT M S, LEE K. Faces of pain: Automated measurement of spontaneous facial expressions of genuine and posed pain[C]// *Proceedings of the 9th International Conference on Multimodal Interfaces*. Haikou: ACM, 2007: 15-21.
- [26] 张伟, 黄炜, 夏利民, 等. 基于 SLPP 与 MKSVM 的痛苦表情识别[J]. *计算机工程*, 2013, 39(12): 196-199.

Development of Humanoid Facial Expression Robot

ZHANG Guoliang, WANG Zhangni, WANG Tian, WU Hao

(College of Computer Science and Technology, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In this paper, the development status of this field has been investigated recently and the method of expression robot modeling has been explored for expression robot. Firstly the key technologies of expression robot are surveyed in detail, such as mechanism design, expression computation model, expression feature extraction and classification and so on. Furthermore, the research status and future development of facial expression robot are evaluated based on the survey analysis and four directions of future development are presented.

Keywords: humanoid; expression robot; facial expression; facial action coding; psychology

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 吴逢铁)

采用遗传算法的可见光通信 LED 阵列分布优化

傅玉青

(华侨大学 工学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 采用遗传算法快捷、准确地优化发光二极管(LED)阵列结构,使其在接收器上(目标平面)的光照分布均匀. 推导 LED 阵列的照度分布函数,以光照函数标准差与平均差的比值构建一个适应度函数,以此衡量目标平面的光照分布均匀度. 获得光照分布最优时的 LED 阵列结构数据后,应用 MATLAB 对几何模型进行仿真,仿真结果表明:目标平面的照度均匀度达到 97.4%,验证了所提算法的有效性与可行性.

关键词: 发光二极管; 阵列; 遗传算法; 光照度; 可见光通信

中图分类号: TN 401

文献标志码: A

可见光通信(VLC)是近几年迅速发展起来的一种新型无线通信方式^[1-5]. VLC 通过在发光二极管(LED)灯中植入芯片,让 LED 灯变成无线访问接入点(AP),利用 LED 发出的肉眼看不到的高速明暗闪烁信号传输信息,达到通信的目的. 在使用 LED 的 VLC 系统中,为了在整个室内区域获得一致的通信效果和灯光照明,防止盲区的出现,要求 LED 光源发出的光照度均匀分布. 然而,单个 LED 的照度分布近似于朗伯分布,无法满足均匀分布的要求. 二元光学可以改变单个 LED 输出的照度分布^[6-7],但单个 LED 输出功率有限,将影响其传输质量和传输距离. 因此,有必要将多个 LED 灯按一定方式排列,以获得均匀的照度分布^[8-9]. 相关研究人员采用不同的研究模型对 LED 的圆形分布、方形分布、环形分布、菱形分布、球面分布等进行了分析^[10-14]. 但这些传统分析方法都是基于理论计算的方法,运算过程复杂且繁琐. 遗传算法(GA)是一种借鉴生物界自然选择思想和自然遗传机制的全局随机搜索算法,是一种自适应的迭代寻优过程,可用于对多目标、非线性等问题的优化^[15-20]. 遗传算法随机初始化一个种群,以该初始种群作为初始迭代点,通过随机选择、交叉和变异的遗传操作,产生一群新的更适应环境的个体,使群体进化到搜索空间中越来越好的区域. 本文采用遗传算法优化 LED 阵列分布,以获得较均匀的照度分布.

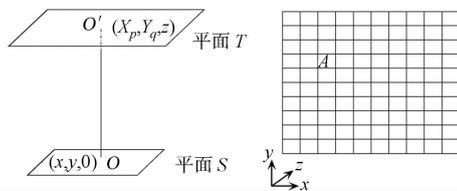
1 LED 阵列分布数学模型

LED 照明系统及目标平面 T ,如图 1 所示. LED 灯随机分布在平面 S 上,目标平面 T 呈 $M \times N$ 格分布. 两平面之间的垂直距离为 z . 每个 LED 灯的照度分布可近似为朗伯分布.

设平面 S 上 LED 灯坐标 $(x, y, 0)$ 到达平面 T 上点 A 坐标 (X_p, Y_q, z) 的照度^[12-15]为

$$E(X_p, Y_q, z) = I_0 z^{m+1} [(X_p - x)^2 + (Y_q - y)^2 + z^2]^{-(m+3)/2}. \quad (1)$$

式(1)中: I_0 是视角为 0° 方向的光强度; m 是光源的辐射模式,与半光强度角 $\theta_{1/2}$ (发光强度下降到轴向



(a) LED 照明系统 (b) 平面 T
图 1 LED 照明系统及平面 T 示意图

Fig. 1 Schematic diagram of LED illumination and T -plane

收稿日期: 2015-01-15

通信作者: 傅玉青(1984-),女,讲师,博士,主要从事光通信技术、激光技术、可见光通信的研究. E-mail: fuyq@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省科技创新平台资助项目(2013H2002)

强度值一半时,发光方向与光轴之间的夹角,通常由生产商提供)有关,其计算公式^[1,10-15]为

$$m = \frac{\ln 2}{\ln(\cos \theta_{1/2})}, \tag{2}$$

则所有 LED 灯到达点 A 的总光照度为

$$E(X_p, Y_q, z) = \sum_{i=1}^n I_0 z^{m+1} [(X_p - x_i)^2 + (Y_q - y_i)^2 + z^2]^{-(m+3)/2}. \tag{3}$$

式(3)中: $(x_i, y_i, 0)$ 为第 i 个 LED 灯在平面 S 的坐标; n 为 LED 灯的总数.

为了优化 LED 阵列分布,取 CV(RMSE)为适应度函数,描述目标平面照度的均匀性.CV(RMSE)为均方根误差的变化系数^[14],即

$$f(x_1, y_1; \dots; x_i, y_i; \dots; x_n, y_n) = \frac{\sigma}{\bar{E}}. \tag{4}$$

式(4)中: \bar{E} 定义为目标平面的光照度平均值,即

$$\bar{E} = \frac{1}{M \times N} \sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^N E(X_p, Y_q, z). \tag{5}$$

σ 是目标平面光照度的标准差,可表示为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^N [E(X_p, Y_q, z) - \bar{E}]^2}. \tag{6}$$

式(4)的适应度函数是各 LED 灯的坐标函数.为了得到均匀的照度分布,要求取适应度函数的最小值,即通过遗传算法优化 LED 分布,让目标平面的光照度最均匀.

2 遗传算法设计

在遗传算法中,模拟自然选择的过程主要通过适应度函数实现.个体适应度的大小决定其继续繁衍或消亡,适应度高的个体被复制到下一代的可能性高于适应度低的个体.采用式(4)作为适应度函数,以各 LED 灯在平面 S 的坐标为函数.

采用遗传算法优化 LED 分布,主要有以下 3 个步骤^[20-21].

步骤 1 初始化群体集.设置迭代次数、交叉概率、变异概率;在初始范围内,对种群进行随机初始化;构造适应度函数(式(4)).

步骤 2 循环.对种群进行选择、交叉、变异的遗传操作;计算适应度大小,评价个体的优劣;迭代次数增加 1 次.

步骤 3 当适应度函数达到满意值或达到最大迭代次数时,停止算法,输出优化后的 LED 坐标;否则,返回步骤 2.

遗传算法的流程图,如图 2 所示.

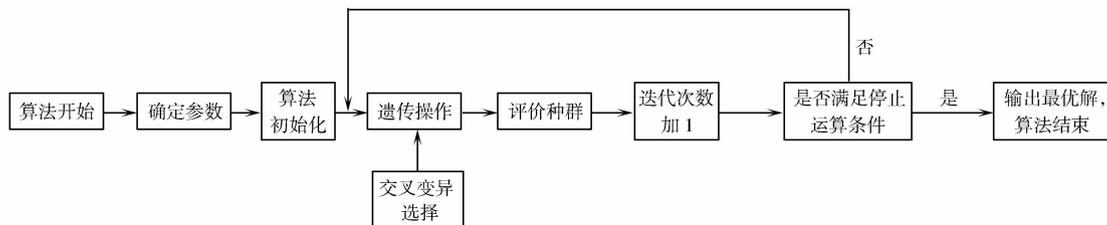


图 2 遗传算法的流程图

Fig. 2 Flow diagram of genetic algorithm

3 结果与分析

应用遗传算法对 LED 阵列分布进行优化,平面 T 为 30 cm×30 cm;平面 S 为 20 cm×20 cm;平面 T 与平面 S 的距离为 3 m;垂直方向的发光强度 I_0 为 32.69 cd;半功率角 $\theta_{1/2}$ 为 54°;阵列中 LED 数为 54;假设所有 LED 灯的发射角度和轴向光照度都相同.

遗传算法初始化参数和截止条件:迭代数为 150;种群大小为 25;交叉率为 0.9;变异率为 0.001;收敛条件 (FFV) 为 0.01. 第 51 代时, $FFV=0.008$, 达到了算法运行停止条件, 这个数值小于预先设定的值. 优化后的 LED 阵列分布, 如图 3 所示.

利用 MATLAB 对 LED 阵列分布进行仿真, 归一化光照度的三维及二维分布, 如图 4 所示. 图 4 中: I 为归一化的光照度. 由图 4 可知: 应用遗传算法对 LED 阵列分布优化后, 光照度均匀性非常好, 均匀度达到 97.4%. 这个值与优化结果 FFV 量级非常吻合, 说明数值优化是可行的.

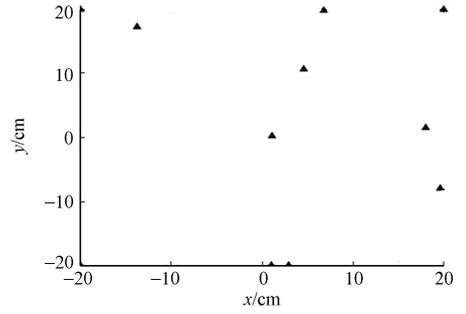
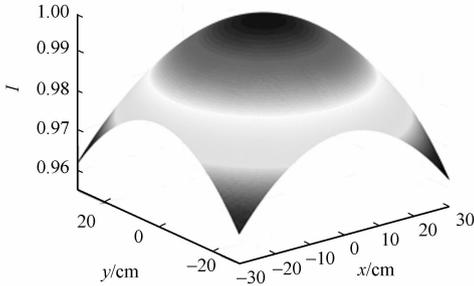
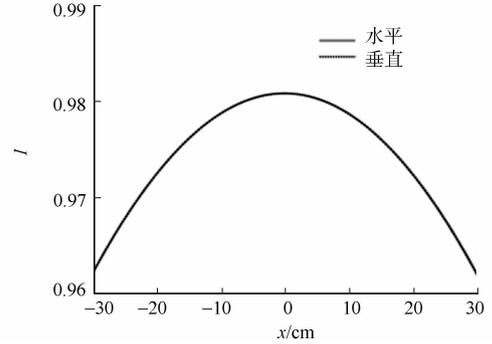


图 3 优化后的 LED 阵列分布

Fig. 3 Optimized distribution of LED array



(a) 三维分布



(b) 二维分布

图 4 归一化的光照度分布

Fig. 4 Normalized irradiance distribution

4 结束语

构造一个以所有 LED 灯坐标为函数的适应度函数, 表征 LED 光源在目标平面的光照度均匀程度. 利用遗传算法对 LED 阵列分布进行优化, 将优化结果进行仿真. 仿真结果表明: 目标平面的照度均匀度达到 97.4%, 可以满足可见光通信和照明要求. 采用这种数值优化算法可借助计算机实现自动优化设计, 并可应用于不同光照度的 LED 灯的优化.

参考文献:

- [1] TANAKA Y, HARUYAMA S, NAKGAWA N. Wireless optical transmissions with white colored LED for wireless home links[C]// Proceedings of the 11th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. London: IEEE Press, 2000: 1325-1329.
- [2] MINH H L, O'BRIEN D, FAULKNER G, et al. High-speed visible light communications using multiple-resonant equalization[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2008, 20(14): 1243-1245.
- [3] KWOHYUNG L, HYUNCHEOL P, JOHN R B. Indoor channel characteristics for visible light communications[J]. IEEE Comm Lett, 2011, 15(2): 217-219.
- [4] CHIEN H Y, YEN L L, CHI W C. Realtime white light phosphor-LED visible light communications (VLC) with compact size[J]. Opt Express, 2013, 21(22): 26192-26197.
- [5] KOMINE T, LEE J H, HARUYAMA S, et al. Adaptive equalization for indoor visible-light wireless communication systems communications[C]// Asia-Pacific Conference on IEEE. Perth: IEEE Press, 2005: 294-298.
- [6] DING Yi, LIU Xu, ZHENG Zhenrong, et al. Freeform LED lens uniform illuminations[J]. Opt Express, 2008, 16(17): 12958-12966.
- [7] KIM B, KIM H, KANG S. Reverse functional design of discontinuous refractive optics using an extended light source for flat illuminance distributions and high color uniformity[J]. Opt Express, 2011, 19(3): 1794-1807.
- [8] 刘浩杰, 蓝天, 倪国强. 室内可见光通信发光二极管阵列发射性能的研究[J]. 物理学报, 2014, 63(23): 238503(1-8).
- [9] 赵芝璞, 季凌燕, 沈艳霞, 等. 基于 PSO 粒子群算法的 LED 照明系统光照均匀性研究[J]. 发光学报, 2013, 34(12):

1677-1682.

- [10] MORENO I, AVENDAÑO-ALEJO M, TZONCHEV R I. Designing light-emitting diode arrays for uniform near-field irradiance[J]. *Appl Opt*, 2006, 45(10): 2265-2272.
- [11] MORENO I, MUÑOZ J, IVANOV R. Uniform illumination of distant targets using a spherical light-emitting diode array[J]. *Opt Eng*, 2007, 46(3): 033001(1-7).
- [12] YANG Hongming, BERGMANS J W M, SCHENK T C W, et al. Uniform illumination rendering using an array of LEDs: A signal processing perspective[J]. *IEEE Signal Proces*, 2009, 57(3): 1044-1057.
- [13] WHANG A J W, CHEN Y Y, TENG Y T. Designing uniform illuminance systems by surface-tailored lens and configurations of LED arrays[J]. *J Disp Technol*, 2009, 5(3): 94-103.
- [14] QIN Zong, WANG Kai, CHEN Fei, et al. Analysis of condition for uniform lighting generated by array of light emitting diodes with large view angle[J]. *Opt Express*, 2010, 18(16): 17460-17476.
- [15] SU Zhouping, XUE Donglin, JI Zhicheng. Designing LED array for uniform illumination distribution by simulated annealing algorithm[J]. *Opt Express*, 2012, 20(S6): A843-A855.
- [16] WU N H, CHAN K C. A genetic algorithm based approach to optimal fixture configuration comput[J]. *Ind Eng*, 1996, 31(3/4): 919-924.
- [17] KRISHNAKUMAR K, MELKOTE S N. Machining fixture layout optimization using the genetic algorithm[J]. *Int J Mach Tool Manu*, 1999, 40(4): 579-598.
- [18] KULANKARA K, SATYANARAYANA S, MELKOTE S N. Iterative fixture layout and clamping force optimization using the genetic algorithm[J]. *J Manufacturing Science and Engin*, 2002, 124(1): 119-125.
- [19] KAYA N. Machining fixture locating and clamping position optimization using genetic algorithms[J]. *Comput Ind*, 2006, 57(2): 112-120.
- [20] HAMED M. Intelligent fixture design through a hybrid system of artificial neural network and genetic algorithm [J]. *Artif Intell Rev*, 2005, 23(3): 295-311.
- [21] RAJENDRAN I, VIJAYARANGAN S. Optimal design of a composite leaf spring using genetic algorithms[J]. *Comput Struct*, 2001, 79(11): 1121-1129.

Research on LED Array for Illumination Uniformity in Visible Light Communication Based on Genetic Algorithm

FU Yuqing

(College of Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: For obtaining uniform distribution of illumination on the receiver plane (target), the genetic algorithm is used to accurately and quickly optimize the light emitting diode (LED) array. LED array illumination distribution function is derived. A fitness function with the ratio of standard deviation and mean difference of the illumination function is built. The optimal distribution of LED array by applying the light distribution uniformity on the target plane is then achieved. Finally, the geometric model is simulated by using MATLAB. The simulation results show that the illumination uniformity on the target plane reached 97.4% and indicate that the proposed algorithm is feasibility and effectiveness.

Keywords: light emitting diode; array; genetic algorithm; illumination distribution; visible light communication

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 吴逢铁)

采用二维频域光学相干层析的透镜曲率半径测量

陈丹阳¹, 游腾飞², 钟舜聪²

(1. 漳州职业技术学院 电子工程系, 福建 漳州 363000;
2. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要: 利用自主研发的二维频域光学相干层析系统, 测量透镜的曲率半径及焦距. 为了提高透镜曲率的测量精度, 采用频谱校正技术校正快速傅里叶变换产生能量泄漏而造成的误差. 试验结果表明: 研发的二维频域光学相干层析系统具有非接触式无损伤的特点, 可以一次采集成像获取透镜的曲率半径和焦距, 不需任何机械扫描运动就能获取透镜的曲率轮廓, 且测量结果精确.

关键词: 透镜; 曲率半径; 二维频域光学相干层析; 频谱校正方法

中图分类号: TP 39

文献标志码: A

关于透镜曲率半径测量法的研究受到广泛的关注. 目前, 主要的方法有等厚干涉法^[1]、自准直法^[2]、差动共焦法^[3]和球径仪法^[4]. 二维频域光学相干层析(OCT)成像技术利用宽带弱相干光干涉仪的基本原理^[5], 通过探测被测样品不同深度层面对入射光的反射或后向散射, 得到被测样品的结构信息. 通过扫描被测样品, 可获得二维或三维高分辨率的结构图像. Huang 等^[6]首次提出 OCT 成像技术, 并在医学领域得到广泛应用^[7-12]. 近年来, OCT 成像技术逐渐向非医学领域拓展, 如结构振动和热变形^[13-14]、珍珠识别^[15]、药片缓释涂层的检测^[16]和复合材料内部结构的检测^[17]等. 本文利用自主研发的 OCT 系统对透镜的曲率半径进行测量.

1 测量系统及主要参数

二维频域 OCT 系统的光学元器件与一维频域的类似^[13-14]. 二维频域系统光路由光源、透镜、分光镜、PZT 移相器、线性电动移动平台、光谱仪等器件组成. 二维频域系统使用柱透镜和面阵相机, 而一维单点式系统使用线性相机.

二维频域系统原理图, 如图 1 所示. 宽带弱相干光源发出的光, 被透镜聚焦后进入光纤; 从光纤输出的光经过透镜, 成为一束平行光. 该束平行光在进入干涉仪之前, 要先通过柱透镜, 使其聚焦成线. 经过柱透镜聚焦后的光束经分光镜分成两束光, 一束为参考光, 另一束为样品光. 样品光和参考光反/散射后发生干涉. 干涉光中携带样品在焦线处位置的结构信息. 干涉光经过衍射光栅, 将干涉光按波长分散开来, 形成干涉光谱. 然后, 再利用电荷耦合元件

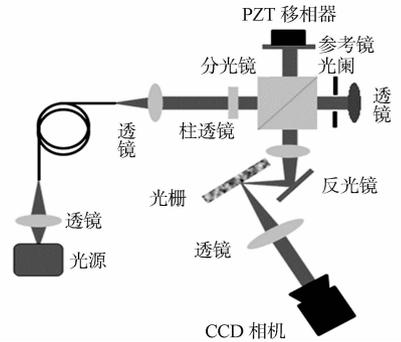


图 1 二维频域 OCT 系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of a two-dimensional spectral-domain optical coherence tomography system

收稿日期: 2015-07-06

通信作者: 钟舜聪(1976-), 男, 教授, 博士, 主要从事光学、太赫兹和无损检测的研究. E-mail: sczhong@fzu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51005077); 国家卫生和计划生育委员会科研基金资助项目(WKJ-FJ-27); 国家质检总局科研基金资助项目(2011QK216); 教育部高等学校博士学科点科研基金资助项目(20133514110008); 福建省杰出青年基金滚动资助项目(2014J07007); 福建省杰出青年基金资助项目(2011J06020); 福建省质量技术监督局项目(FJQI2009039, FJQI201014)

(CCD)相机采集此干涉光谱. 因此, 一次采集成像就能得到样品的二维结构信息.

参考光可表达为

$$I_R(k) = E_R \times \exp(i2kr). \quad (1)$$

式(1)中: E_R 为参考光的振幅幅值; $\exp(i2kr)$ 为相位, $2r$ 为参考臂的光程长度, k 为波数, 且 $k = 2\pi/\lambda$.

经过样品不同深度层面的反射光可表达为

$$I_S(k) = \int_{-\infty}^{\infty} E_S(z) \exp(i2k(r+nz)) dz. \quad (2)$$

式(2)中: $E_S(z)$ 为对应样品不同的深度层面反射光的幅值; n 为样品的折射率. 如果忽略光在样品中经过多次反射和散射, 则 $2(r+nz)$ 为样品在深度 z 层面上对应的光程值.

当参考光和样品光发生干涉后, 干涉光谱信号 $I(K)$ 可表达为

$$I(K) = S(k) [E_R \times \exp(i2kr) + \int_{-\infty}^{\infty} E_S(z) \exp(i2k(r+nz)) dz]^2. \quad (3)$$

式(3)中: $S(k)$ 为光源的功率密度谱函数. 式(3)还可表达为

$$I(K) = S(k) \{ E_R^2 + 2E_S \int_{-\infty}^{\infty} E_S(z) \cos(2knz) dz + \iint_{-\infty}^{\infty} E_S(z) E_S(z') \exp(i2k(nz - nz')) dz dz' \}. \quad (4)$$

式(4)中: 干涉光谱 $I(K)$ 共由 3 项组成, 第一项代表干涉光谱的直流分量, 第二项代表样品不同深度层面反射不同频率的光的叠加, 即不同深度的结构信息, 第三项代表样品不同深度层面的互相干关系. 一般而言, 第三项远小于参考光的强度, 可以忽略. 因此, 式(4)可简化为

$$I(k) = S(k) [E_R^2 + 2E_S \int_{-\infty}^{\infty} E_S(z) \cos(2knz) dz]. \quad (5)$$

对式(5)进行傅里叶变换, 可得

$$F\{I(k)\} = F\{S(k)\} * \{ E_R^2 \delta(z) + [E_R + E_S^*(-z)] \}. \quad (6)$$

式(6)中: $*$ 为卷积运算.

对于光学相干层析系统, 一般将光源相干长度的一半定义为系统的纵向分辨率, 可采用半高全宽 (FWHM) 作为衡量指标, 即

$$\Delta I_{\text{FWHM}} = \frac{2 \ln 2}{\pi} \left(\frac{\lambda_0^2}{\Delta \lambda} \right). \quad (7)$$

式(7)中: λ_0 为光源中心波长; $\Delta \lambda$ 为光源半高全宽的光源带宽. 由式(7)可知: 系统的纵向分辨率与光源中心波长和带宽相关. 当光源的半高全宽一定时, 使用中心波长小的光源可获得系统纵向分辨率提升.

此外, 光学相干层析系统的信噪比表征了系统对探测待测样品后向散射光或反射光的能力. 频域 OCT 系统中, 信噪比可以表达为

$$R_{\text{SN}} = 10 \cdot \log \frac{\eta p}{2h\nu \text{NEB}}. \quad (8)$$

式(8)中: η 为探测器的量子效率; p 为信号功率; $h\nu$ 为光子能量; NEB 为滤波器等效噪声带宽. 由式(8)可知: 频域系统的信噪比跟光源的带宽和探测深度无关; 随着探测深度的增加, 样品对光的吸收增强和散射作用增强, 降低了系统的信噪比.

2 测量实验及结果讨论

选用 LA1433 型平凸透镜 (美国 THORLABS 公司) 进行测量. 该透镜的标称焦距为 150 mm, 产商提供的透镜球面曲率半径为 77.3 mm. 对干涉信号进行信号处理和图像重构^[13-14], 可得透镜表面的形状信息, 如图 2 所示. 图 2 中: D 为深度; P 为位置.

提取透镜表面信息的曲线, 并对其进行横纵坐标的修正, 使曲线的横纵坐标对应的单位长度一样, 否则拟合出的曲线将发生变形, 得到错误的结果. 利用最小二乘法对曲线进行拟合, 获得透镜的曲率半径. 然而, 在提取曲线时, 得到的结果带有阶梯的曲线 (粗虚线), 如图 3 所示. 这是因为傅里叶变换过程中的频谱泄漏^[18-19]造成的.

为了提高对透镜曲率的测量精度, 在进行曲线拟合之前, 采用频谱校正技术校正由于能量泄漏而造

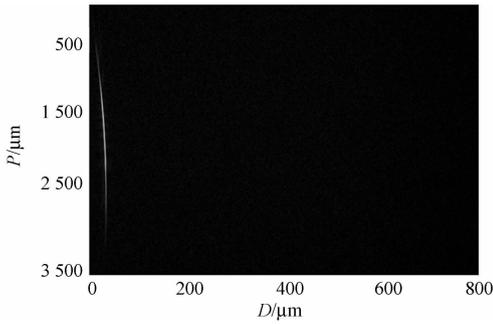


图2 平凸透镜的表面形状

Fig. 2 Surface shape of a planoconvex lens

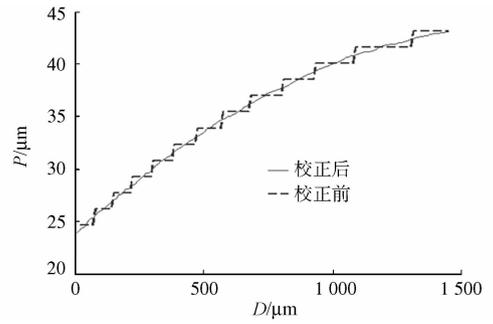


图3 曲线提取及频谱校正

Fig. 3 Curve extraction and spectrum correction

成的误差^[18-19]. 采用离散频谱时移相位差校正方法对其进行校正, 提高对透镜曲率半径的测量精度. 利用两段连续的信号经过平移, 以及加不同的窗后得到相位差 $\Delta\phi$, 即

$$\Delta\phi = \phi - \phi_0 = -2\pi a_1 T(f_1 - \Delta f). \quad (9)$$

式(9)中: ϕ, ϕ_0 为两段信号的相位; T 为所加对称窗的长度. 连续信号 $x(t)$ 平移 $a_1 T$, 得到信号 $x_0(t)$. 其中: $a_1 > 0$; f_1 为校正之前信号的离散频谱峰值频率; Δf 为频率修正量. 由式(9)可得频率修正量为

$$\Delta f = \frac{-2\pi a_1 T f_1 - \Delta\phi}{2\pi a_1 T}. \quad (10)$$

利用频谱校正技术处理后, 曲线较为平滑(细实线), 如图3所示. 这对提高后续的拟合精度具有重要作用. 拟合得到的曲率半径为 77.327 mm, 与产商给出的透镜球面曲率半径 77.3 mm 基本吻合, 精度较高. 在获得该透镜的曲率半径后, 可算出该透镜的焦距, 即

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right). \quad (11)$$

式(11)中: f 为透镜的焦距; n 为透镜材料折射率; R_1, R_2 分别为透镜两个面的曲率半径. 假如为平凸透镜, 则其中一个面的曲率半径为无限大, 式(11)可以写为

$$f = \frac{R}{n-1}. \quad (12)$$

除了 LA1433 型透镜, 利用所搭建的二维频域 OCT 系统测量了另外 2 个未镀膜的不同焦距的球面平凸透镜(LA1131, LA1608), 其透镜参数和实测结果, 如表1所示. 表1中: f_n 为标称焦距; f_r 为实际焦距; R 为曲率半径. 由表1可知: 利用光学相干层析法可以准确测量透镜的曲率半径和焦距.

表1 透镜参数和实测结果

Tab. 1 Parameters of lens and experimental results

型号	f_n /mm	f_r /mm	R /mm	材料
LA1131	50	49.8±1.0%	25.8	N-BK7
LA1608	75	74.8±1.0%	38.6	N-BK7
LA1433	150	149.5±1.0%	77.3	N-BK7

3 结束语

利用自主研发的二维频域光学相干层析系统测量透镜的曲率半径及焦距. 该系统一次采集成像就可以获取透镜的曲率半径和焦距. 与一维光学相干层析系统相比较而言, 二维光学相干层析系统不需任何的机械扫描运动就能获取透镜的曲率轮廓, 测量结果精确. 所研发的二维频域光学相干层析系统具有非接触式无损的优点, 在透镜的曲率半径等几何参数测试上具有很好的应用前景.

参考文献:

- [1] 王中林, 郑丹, 孙冬丽. 基于白光干涉的光学球面半径测量研究[J]. 应用光学, 2007, 28(6): 707-711.
- [2] 苏芳珍, 杨德甫, 曹海玲. 用自准直法测薄凸透镜焦距实验中“真”“假”像的判断[J]. 延安大学学报(自然科学版), 2008, 27(4): 40-42.

- [3] 徐鹏,赵维谦,王方彪,等.光栅尺测长式激光差动共焦曲率半径测量系统[J].应用光学,2014,35(6):1023-1028.
- [4] 娄颖.光学透镜参数现代测量方法研究[J].红外与激光工程,2008,37(增刊1):41-47.
- [5] ZHONG Jianfeng,ZHONG Shuncong,ZHANG Qiukun,et al. Two-dimensional optical coherence tomography for real-time structural dynamical characterization[J]. Optics and Lasers in Engineering,2015,66(3):74-79.
- [6] HUANG D,SWANSON E A,LIN Chanpin,et al. Optical coherence tomography[J]. Science,1991,254(22):1178-1181.
- [7] FILHO C,ROSENFELD P,YEHOSHUA Z,et al. Spectral-domain optical coherence tomography imaging of age-related macular degeneration[J]. US Ophthalmic Review,2011,4(2):113-118.
- [8] FENG Yunwei,VARIKOOTY J,SIMPSON T. Optical coherence tomography of overnight swelling of human cornea and corneal epithelium[J]. Investigative Ophthalmology and Visual Science,2000,41(4):S675.
- [9] 龚雪,刘丽.光学相干层析技术用于早期龋检测的研究进展[J].国际口腔医学杂志,2012,39(5):668-671.
- [10] 石博雅,孟卓,刘铁根,等.OCT系统对人体牙齿组织的非失真成像深度的研究[J].光学学报,2014,34(2):0217001(1-7).
- [11] 南楠,步鹏,王向朝,等.三维全深度复频域光学相干层析成像系统及其对人体皮肤的在体成像[J].中国激光,2012,39(7):120-125.
- [12] 任杰,王颖,顾瑛,等.激光散斑成像和光学相干层析成像用于皮肤微血管无创检测的基础研究[J].中国激光医学杂志,2012,21(5):309.
- [13] 陈丹阳,张秋坤,钟剑峰,等.基于频谱校正技术的光学相干振动和热变形层析系统研究[J].南京大学学报(自然科学版),2014,50(2):1-6.
- [14] ZHONG Shuncong,SHEN Hao,SHEN Yaochun. Real-time monitoring of structural vibration using spectral-domain optical coherence tomography[J]. Optics and Lasers in Engineering,2011,49(1):127-131.
- [15] ZENG Nan,HE Yonghong,MA Hui,et al. Pearl detection with optical coherence tomography[J]. Chinese Journal of Lasers,2007,34(8):1140-1145.
- [16] ZHONG Shuncong,SHEN Yaochun,HO L,et al. Non-destructive quantification of pharmaceutical tablet coatings using terahertz pulsed imaging and optical coherence tomography[J]. Optics and Lasers in Engineering,2011,49(3):361-365.
- [17] ZHONG Shuncong,YAN Yongfu,SHEN Yaochun. Non-destructive testing of GFRP materials by Fourier-domain infrared optical coherence tomography[C]//International Conference on Automatic Control and Artificial Intelligence. Xiamen:[s. n.],2012:1407-1410.
- [18] 丁康,朱小勇.离散频谱综合相位差校正法[J].振动工程学报,2002,15(1):114-118.
- [19] 丁康,钟舜聪.通用的离散频谱相位差校正方法[J].电子学报,2003,31(1):1-4.

Curvature Radius Measurement of Lens Based on Two-Dimensional Spectral-Domain Optical Coherence Tomography

CHEN Danyang¹, YOU Tengfei², ZHONG Shuncong²

(1. Department of Electronic Engineering, Zhangzhou Institute of Technology, Zhangzhou 363000, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Measurement of curvature radius and focus length of lens using a home-made two-dimensional spectral-domain optical coherence tomography (2DOCT) system was proposed. In order to enhance the measurement precision of curvature radius of lens, spectrum correction method was employed in the system to reduce the energy effect due to fast Fourier transform computation. The experimental results show that the developed 2DOCT has non-contact and non-invasive in nature; the system could measure the radius curvature and focus length of a lens, with high precision, using a single-shot imaging without any mechanical scanning.

Keywords: lens; curvature radius; two-dimensional spectral-domain optical coherence tomography; spectrum correction method

对 Shor 算法破解 RSA 的探讨

涂玲英^{1,2}, 胡一凡^{1,2}, 张洪涛^{1,2}, 代永涛^{1,2}, 熊红梅^{1,2}

(1. 湖北工业大学 纳米电子技术与微系统实验室, 湖北 武汉 430068;

2. 湖北工业大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068)

摘要: 针对 Shor 算法具有随机性,会导致破解 RSA 公钥密码体制成功率不高的问题,对 Shor 算法原理、RSA 公钥密码体制特点和大量计算结果进行分析,提出量子函数式 $f(x)=a^x \bmod n$ 对 a 值的随机选取是有规律的.结合数论知识和蒙特卡洛法证明,结果表明:随机数 a 取完全平方数,所求周期 r 很可能不满足 Shor 算法要求; a 取非完全平方数可以提高 Shor 算法破解 RSA 的成功率.

关键词: Shor 算法;非完全平方数;RSA 算法;公钥密码体制;蒙特卡洛法

中图分类号: TP 301.6

文献标志码: A

迄今为止,RSA 算法被认为是世界上最成熟完善的公钥密码体制.它能够抵抗已知的绝大多数密码攻击,已被 ISO 推荐为公钥数据加密标准.目前,世界上还没有任何可靠的方法破解 RSA.随着 Shor 算法的提出和量子计算机的不断发展,RSA 的安全性也受到威胁. Shor 算法利用量子计算的并行性,可以快速分解出大数的质因子,它的提出在理论上破解了目前被认为最安全的 RSA 公钥密码. Shor 算法的基本原理是运用量子傅里叶变换,将大整数因子分解转化为求某一个函数的周期^[1].但是在求函数周期过程中,现有的 Shor 算法随机性大,效率不高^[2].鉴于此,本文通过对 Shor 算法和 RSA 算法原理的分析,并结合前人的研究成果,提出了一种可以提高 Shor 算法破解 RSA 成功率的方法.

1 RSA 公钥密码

RSA 使用公开的公钥进行加密通信,密文只能被拥有与之匹配的私钥的人解开. RSA 算法的理论基础^[3]是可逆模指数运算,它的安全性基于数论中大整数分解的复杂性.数论中,大整数分解的问题可概述为:已知整数 $n=p \cdot q$,其中, p 和 q 是 2 个素数,求出 p 和 q 的值.

在 RSA 公钥密码体制中,用户拥有 2 个密钥:公钥 $PK=\{e,n\}$ 和私钥 $SK=\{d,n\}$.公钥用于加密,私钥用于解密.用户可将公钥 PK 公开,而私钥中的 d 必须严格保密. RSA 公钥密码中相关参数的计算如下.1) 选取 2 个保密的素数 p 和 q (p 和 q 为 100 位以上的十进制数).2) 计算 $n=p \cdot q$ 的值.其中, n 是 RSA 算法的模数.3) 计算 $\phi(n)=(p-1)(q-1)$ 的值, $\phi(n)$ 是 n 的欧拉函数值.4) 随机选取 1 个整数 e ,使其满足 $1 < e < \phi(n)$,且 $\gcd(\phi(n), e) = 1$.5) 计算私钥 SK 中的 d 值,满足 $d \times e \equiv 1 \pmod{\phi(n)}$, d 是 e 在模 $\phi(n)$ 下的乘法逆元.因为 $\gcd(\phi(n), e) = 1$,由模运算可知,它的乘法逆元一定存在.6) 将 $PK=\{e, n\}$ 作为公钥公布, $SK=\{d, n\}$ 作为私钥保留.此时, p, q 不再需要,可以销毁.

设 m 为需要加密的明文, c 为加密后的密文.加密时,先将明文比特串进行分组,让每个明文分组的十进制数 m_i 小于 n ,记 c_i 为对应的 m_i 加密后的密文,则加密算法为

$$c_i = m_i^e \bmod n. \quad (1)$$

式(1)中: $0 \leq m_i < n, 0 \leq c_i < n$.

收稿日期: 2015-05-24

通信作者: 涂玲英(1963-),女,副教授,主要从事量子通信与量子计算、视频监控系统的研究. E-mail:947392311@qq.com.

基金项目: 湖北省武汉市科技局“十城千辆新动力汽车计划”项目(2013011801010600)

解密时, 先对密文 c 进行比特串分组, 则解密算法为

$$m_i = c_i^d \bmod n. \quad (2)$$

因此, RSA 公钥密码体制中, 最关键的是公钥 PK 中的 e 值和私钥 SK 中的 d 值.

2 Shor 算法

2.1 原理描述

Shor 算法的原理是依据数论中的相关定理, 将大数因子分解转化为求 1 个函数的周期. 主要过程^[4]有如下 3 个步骤. 1) 已知整数 n 的值, 随机选取正整数 $a, a \in Z_n^*, Z_n^* = \{a \in Z \mid a < n, \gcd(a, n) = 1\}$. 2) 定义函数 $f(x) = a^x \bmod n$, 能发现 $f(x)$ 是 1 个周期函数, 记周期为 r , 则

$$a^x \bmod n = a^{x+r} \bmod n. \quad (3)$$

故

$$a^r = 1 \bmod n. \quad (4)$$

3) 求 A 和 B , 表达式为

$$(a^{r/2})^2 - 1 = 0 \bmod n, \quad (5)$$

$$(a^{r/2} + 1)(a^{r/2} - 1) = 0 \bmod n. \quad (6)$$

令

$$A = \gcd(a^{r/2} + 1, n), \quad B = \gcd(a^{r/2} - 1, n), \quad (7)$$

得出

$$n = A \times B. \quad (8)$$

式(7)中: 为保证 A, B 为整数, 周期 r 应为非零偶数^[5-6].

2.2 周期 r 的求取

由 A 和 B 的表达式可知: 只要求出函数 $f(x)$ 的周期 r , 大整数 n 的因子分解问题就得到了解决. Shor 算法中, 周期 r 的信息是通过量子傅里叶变换获得的^[7-8].

首先, 对 2 个量子寄存器 $R1$ 和 $R2$ 进行初始化, 再对 $R1$ 依次作 H 变换和幺正变换, 得到的结果分别存放到 $R1$ 和 $R2$ 中. $R1$ 和 $R2$ 中的状态为纠缠态, 即

$$H : |\Psi_0\rangle \rightarrow |\Psi_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{q}} \sum_{x=0}^{q-1} |x\rangle |0\rangle, \quad (9)$$

$$U_f : |\Psi_1\rangle \rightarrow |\Psi_2\rangle = \frac{1}{q} \sum_{x=0}^{q-1} |x\rangle |f(x)\rangle = \frac{1}{q} \sum_{x=0}^{q-1} |x\rangle |a^x \bmod N\rangle. \quad (10)$$

然后, 对 $|R2\rangle$ 进行测量. 假设 $f(x)$ 的周期为 r . 当 $|R2\rangle$ 坍缩时, $|R1\rangle$ 也对应地坍缩为

$$|R1\rangle = \frac{1}{\sqrt{A+1}} \sum_{j=0}^A |1+jr\rangle. \quad (11)$$

式(11)中: A 为小于 $(q-1)/r$ 的最大整数.

最后, 对 $|R1\rangle$ 作量子傅里叶变换, 并对其进行测量, 求出函数 $f(x)$ 的周期 r , 表达式为

$$\tilde{f}(c) = \frac{\sqrt{r}}{q} \sum_{j=0}^{q/(r-1)} \exp(2\pi(1+jr)c/q) - (\frac{\sqrt{r}}{q} \exp(2\pi jrc/q))c. \quad (12)$$

量子傅里叶变换会使需要的结果增强, 并使不需要的结果为 0, 这种现象称为量子干涉^[9]. 所以, 当 $c = kq/r$, 则

$$|R1\rangle_{\text{QFT}} = \frac{1}{\sqrt{r}} \sum_{k=0}^{r-1} \exp(2\pi/k) |kq/r\rangle. \quad (13)$$

$|R1\rangle$ 经量子傅里叶变换后, 周期从 r 变为 q/r . 由于 $c = kq/r$, c 和 q 是已知的, 如果 k 与 r 互质, 就能求出 r ^[10]. 最大的非零偶数 r , 就是要求的 $f(x)$ 的周期.

3 Shor 算法在破解 RSA 中的应用

RSA 的安全性取决于大整数 n 的分解, Shor 算法的功能是分解大整数 n , 所以 Shor 算法在理论上破解了 RSA 公钥密码^[11-12]. 破解过程具体如下 6 个步骤.

步骤 1 通过量子傅里叶变换, 求出函数 $f(x)$ 的周期 r , 并保证 r 为非零偶数.

步骤 2 将 r 带入式子(7),(8)中,结合待分解的大整数 n ,求出 A 和 B 的值.

步骤 3 RSA 中已销毁的 p, q 值分别是 A, B .

步骤 4 将 p, q 带入式子 $\phi(n) = (p-1)(q-1)$ 中,求出 $\phi(n)$.

步骤 5 将 $\phi(n)$ 和已知的 e 值带入式子 $d \times e \equiv 1 \pmod{\phi(n)}$ 中,求出 d 值.

步骤 6 将 d, n 的值带入式(2)中,完成了对 RSA 的破解.

4 对 Shor 算法破解 RSA 的优化

4.1 优化思路

Shor 算法虽然在理论上破解了 RSA,但还是存在一些微小的不足的地方.应用 Shor 算法破解 RSA,并不是大数 n 满足了条件就一定能成功破解,只是能使破解的成功率尽量接近 1.

Shor 算法能否成功破解 RSA 的关键在于函数 $f(x)$ 的周期 r ,而 r 在很大程度上取决于随机选择的数 a .Shor 算法中, $a \in Z_n^*$,如果对 a 再做一个限定,求得的周期 r 为偶数的概率可能会变大很多.提出一个提高 Shor 算法破解 RSA 成功率的优化思路:对 a 做个限定, $a \in Z_n^*$,且 a 不能是完全平方数.

例 1 函数 $f(x) = a^x \pmod{33}$,选取 $a=4$,求周期 r .

$$\begin{aligned} f(0) &= 1, & f(1) &= 4, & f(2) &= 16, & f(3) &= 31, & f(4) &= 25, \\ f(5) &= 1, & f(6) &= 4, & f(7) &= 16, & f(8) &= 31, & f(9) &= 25, \quad \dots \end{aligned}$$

此时周期 $r=5$,不是偶数.

为了方便计算 a 取完全平方数时周期 r 的值,用 C 语言编写了一段程序,程序的源代码为

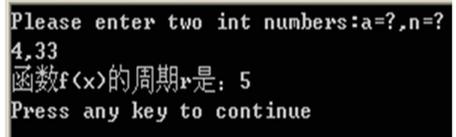
```
#include <stdio.h>
#include <math.h>
int gcd(int x,int y);
void main() {int a,c,x,n;
printf("Please enter two int numbers:a=?,n=? \n");
scanf("%d,%d",&a,&n); if(gcd(a,n) != 1 || a>n)
printf("Please enter two correct int numbers b,n\n");
else { x=1; c=1%n;
while((int)(pow((double)a,(double)x))%n != c)
x++; printf("函数 f(x)的周期 r 是:%d\n",x);
}
}
int gcd(int x,int y) {
int z; if(x<y)
{ z=x; x=y; y=z;}
if(x%y == 0) return y;
else return gcd(y, x%y); }
```

在 Visual C++ 中运行程序验证例 1 的结果,验算结果如图 1 所示.由图 1 可知:当 $a=4$ 时,周期 r 为 5,例 1 的结果得到了验证.此程序方便求取 r ,为大量计算 a 取不同的完全平方数时对应的周期 r 提供了便利.

4.2 优化思路的证明

由例 1 可知: a 取完全平方数算得的周期都不是偶数.通过计算发现,这是 Shor 算法周期求解中的大概率事件.如果对随机选取的 a 增加限制,不选取完全平方数,破解 RSA 的成功率会相应地提高^[5].

证明 已知 $n=pq$, p 和 q 均为素数, $a \in Z_n^*$,其中 $Z_n^* = \{a \in Z | a < n, \gcd(a, n) = 1\}$.



```
Please enter two int numbers:a=?,n=?
4,33
函数f(x)的周期r是: 5
Press any key to continue
```

图 1 例 1 的验算结果

Fig. 1 Verification results of example 1

令 $p=2^x+1, q=2^y+1$, 且 $x \neq y$, 则成功破解 RSA 的概率表示为

$$2^{-(x+y)} \left(1 + \sum_{j=0}^{\min(x,y)-1} 4^j \right) \leq \frac{1}{2}.$$

类似地, 假设存在数 $f \in Z_p^*, g = f^s$, 其中, s 是奇数. 则 g 的阶满足 $\text{ord}_p(g)s = 0 \pmod{p-1}$, 即 $\text{ord}_p(g)s = k(p-1)$, g 模 p 的阶一定为偶.

如果 a 在 Z_p^* 或 Z_q^* 中有偶数阶, 则 a 在 Z_n^* 中有偶数阶. 推出至少有一半的 $a \in Z_n^*$ 满足以下 2 个条件: 1) $\exists k$ 满足 $\text{ord}_n(a) = 2k$; 2) $a^k \neq -1 \pmod n$.

令 $d = g^u, v$ 为 d 的阶, 这就等同于 $uv = 0 \pmod{p-1}, v$ 最小.

已推出属于 Z_n^* 的 a 的阶是偶数, 计算 $a \in Z_n^*$ 不满足条件 2) 但满足 $(a/n) = -1$ 的元素, 等同计算 $a^k = -1 \pmod p$ 和 $a^k = -1 \pmod q$. 这表示 u 和 v 都不能划分 k . $(a/n) = -1$ 表示 $(a/p) = -1$ 且 $(a/q) = 1$, 或者 $(a/p) = 1$ 且 $(a/q) = -1$.

设 $m \in Z_p^*, a = m^t$ (t 为奇数), 需计算所有满足条件的偶数 t_1 . $a = m^{t_1}$ 的阶是 $2^i s, s$ 为奇数. 此时, 所有 1 到 $p-1$ 之间的奇数都能求出 t_1 .

讨论和 q 有关的元素. 已设 $q = 2^y + 1$, 令 $r \in Z_q^*, a = r^{t_2}$, 计算所有满足条件的偶数 t_2 . 当 $x = y$ 时, t_2 没有偶数解; 当 $x > y$ 时, r^{t_2} 的阶会划分 r^{t_2} , 没有这样的值. 所以, 只剩下 $x > y$.

当 $x \neq y$ 时, 只需考虑 $x < y$ 的情况, 满足条件 1), 2) 的所有值满足

$$A(n) = \frac{p-1}{2} 2^{(x-1)} = \frac{p-1}{2} \frac{2^y}{2^{(y-x+1)}} \frac{1}{4} (p-1)(q-1) \frac{1}{2^{(y-x)}} = \frac{1}{4} \varphi(n) \frac{1}{2^{(y-x)}}.$$

所以, 成功破解 RSA 的概率是

$$p(n) = 1 - \frac{A(n)}{\varphi(n)} = 1 - \frac{1}{2^{(y-x+2)}} \geq \frac{3}{4}, \quad x < y.$$

在 $x = y$ 的情况下, 此时概率为 1, 表示 $(a/n) = -1$ 中的 a 总是满足条件 1) 和 2).

从证明过程可看出, 对 a 经过一定的限定, 应用 Shor 算法破解 RSA 的成功率明显得到提高, 说明优化思路是可行有效的. 采用蒙特卡洛法作进一步分析.

列举不同的整数 N 值, 算出 a 在 2 个条件下, 函数 $f(x)$ 的周期 r 为偶数的概率 P , 如表 1 所示. Shor 算法能否高效破解 RSA, 对应函数式 $f(x)$ 的周期 r 为偶数的概率 P 是重要指标. 功能函数方程为

$$T_1 = g(X_1, X_2, \dots, X_n) = P_1 - P_2. \tag{14}$$

式(14)中: P_1 为 $a \in Z_n^*$ 且 a 为非完全平方数条件下, 周期 r 为偶数的概率; P_2 为 $a \in Z_n^*$ 条件下, 周期 r 为偶数的概率.

用蒙特卡洛法分析提高 Shor 算法破解 RSA 成功率的原理是: 假设对大整数 N 进行 M 次随机抽样, 求出每组 P_1, P_2 , 并将其代入功能函数进行计算, 得到 M 个 T 值. 若 $T > 0$, 则破解的成功率得到提升; 若 $T \leq 0$, 则破解的成功率未得到提升.

在考虑各参数变异性时, 借助 ANSYS 中的概率功能模块, 求出当 $a \in Z_n^*$ 且 a 为非完全平方数时, 周期 r 为偶数的概率 P_1 和当 $a \in Z_n^*$ 时, 周期 r 为偶数的概率 P_2 的概率分布, 从而得到功能函数的可靠度和可靠度指标. 采用蒙特卡洛法中的拉丁超立方方法, 对表 1 中参数值所对应的模型进行 500 次计算分析, 得到 a 在 2 种不同条件下, 对应 P_1 和 P_2 的部分分布曲线, 如图 2 所示.

表 1 a 在不同条件下函数周期为偶数的概率

Tab. 1 Probability that the cycle of function is even when a is under different conditions

N	P	
	$a \in Z_n^*$ 时	$a \in Z_n^*$ 且 $\sqrt{a} \in Z$ 时
21	0.473	0.812
2 701	0.485	0.855
⋮	⋮	⋮

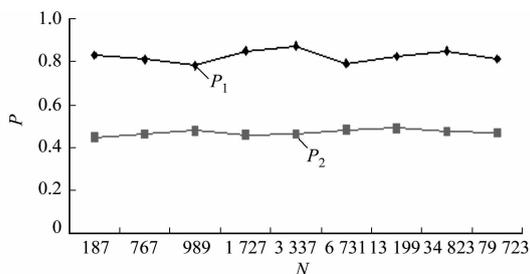


图 2 P_1 和 P_2 的部分曲线分布

Fig. 2 Part of the curve distribution of P_1 and P_2

由图 2 可知, 对于任意样本 N 值, P_1 均大于 P_2 . 对随机数 a 不做限定时, Shor 算法成功破解 RSA 的概率

P_2 不会超过 50%;若限定随机数 a 取非完全平方数,破解的成功率 P_1 不会低于 75%,即 $T > 0$,说明 Shor 算法破解 RSA 的成功率得到提升.

5 结束语

Shor 算法尽管已是一种成熟的算法,并在理论上破解了 RSA,但由于随机性,它破解 RSA 的成功率不高.根据 RSA 和 Shor 算法的原理,通过大量计算得到的结果显示, $a \in Z_n^*$ 且 a 不取完全平方数时,函数 $f(x)$ 的周期很可能是偶数,那么 RSA 被破解的成功率会大幅提升.并对这个优化思路进行了证明.受现有技术的制约,文中的优化思路只停留在理论上.

参考文献:

- [1] HARDY G H, WRIGHT E M. An introduction to the theory of numbers[M]. 张晓尧,译. 5 版. 北京:人民邮电出版社,2009:58-102.
- [2] 朱和贵. 探析初等数论基本知识在密码学中的应用[J]. 山东工业技术,2014(21):253.
- [3] 李海峰,马海云,徐燕文. 现代密码学原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2013:110-114.
- [4] NAM Y S, BLUMEL R. Sealing laws for Shor's algorithm with a banded quantum fourier transform[J]. Physica Review A,2013,87(3):032333.
- [5] 彭卫丰,孙力. SHOR 量子算法的优化及应用研究[J]. 计算机应用与软件,2009,26(5):239-240,246.
- [6] NIELSEN M A, CHUANG I L. 量子计算和量子信息(一)[M]. 赵千川,译. 北京:清华大学出版社,2009:199-223.
- [7] 王蕴,黄德才,俞攸红. 量子计算及量子算法研究进展[J]. 计算机系统应用,2011,20(6):228-231.
- [8] 徐炜,肖智,杨道理. 量子算法在大数据挖掘中的应用前景浅析[C]//中国信息经济学会学术年会暨博士生论坛论文集. 广东:中国信息经济学会,2013:2-7.
- [9] 付向群,鲍皖苏,王帅. ZN 上离散对数量子计算算法[J]. 计算机学报,2014,37(5):1058-1062.
- [10] GARCIA-MATA I, FRAHM K M, SPEPELYANSKY D L. Effects of imperfections for Shor's factorization algorithm[J]. Physical Review A,2007,75(5):2311.
- [11] LUCERO E, BARENDTS R, CHEN Y, et al. Computing prime factors with a Josephson phase qubit quantum processor[J]. Nature Physics,2012,8:719-723.
- [12] THOMPSON M G, POLITI A, MATTHEWS J C F, et al. Integrated waveguide circuits for optical quantum computing[J]. Circuits, Device and System, IET,2010,5(2):94-102.

Discussion on Cracking RSA With Shor Algorithm

TU Lingying^{1,2}, HU Yifan^{1,2}, ZHANG Hongtao^{1,2},
DAI Yongtao^{1,2}, XIONG Hongmei^{1,2}

(1. Nanoelectronics and Microsystems Technology Laboratory, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;
2. School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: Since the randomness of Shor algorithm could lead to low success rate in cracking RSA. By analyzing the principle of Shor algorithm, characteristics of RSA public key password system and lots of data, the view that the way for quantum functional in randomly selecting value is regular was putting forward. Verified by number theory and Monte Carlo method, the results showed that if takes a perfect square, the cycle probably can't meet the requirements of Shor algorithm. It comes to a conclusion that take a non-perfect square can improve the success rate of Shor algorithm in cracking RSA.

Keywords: Shor algorithm; non-perfect squares; RSA algorithm; public key password system; Monte Carlo method

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:吴逢铁)

粒子群与遗传算法的混合算法

阳琼芳¹, 孙如祥^{1,2}

(1. 广西职业技术学院 计算机与电子信息工程系, 广西 南宁 530226;

2. 广西大学 计算机与电子信息学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 针对粒子群算法直接用于求解离散旅行商优化问题会存在诸多困难,通过分析粒子群算法、遗传算法各自优缺点,将粒子群算法、遗传算法有效结合组成混合算法用于求解离散旅行商问题.混合的目的在于保持两种算法各自的优点,并有效地避免各算法原有的不足.对3个不同规模的巡回旅行商问题进行实验,结果表明:混合算法提升了算法的局部搜索能力.

关键词: 离散旅行商问题;遗传算法;粒子群算法;自适应;启发策略

中图分类号: TP 302

文献标志码: A

遗传算法(genetic algorithm, GA)起源于 Holland 教授与其学生对自然界生物进化系统的计算机模拟研究,其本质是一种随机全局搜索的进化算法.它能在搜索过程中自动获取和积累有关搜索空间的特征知识,并自适应的控制搜索过程,最终求得最优可行解.遗传算法的操作以“物竞天择,适者生存”为原则,在可行的解决方案种群中产生一个逐渐逼近最优可行解的方案.1995年, Kennedy, Eberhart 两位博士首先提出粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)^[1-2],算法源于鸟类寻找食物时的飞行规律.粒子群算法简单明了、收敛迅速而且精度也高,是非线性连续问题的有效求解方法^[3].针对遗传算法求解离散旅行商问题(travelling salesman problem, TSP)存在的不足^[4-5],一些学者提出了定位-配给问题(location-allocation problems, LAP)模型^[6-8].为了加快粒子群的搜索速度,一些学者采取了自适应的加速因子策略^[9-10].为了更好地解决 TSP 离散问题,需要对粒子群算法的两个位置更新公式进行修改.二元交叉在操作上类似于遗传算法的交叉算子,同时又有粒子群算法学习因子的操作特征.为了进一步加快混合算法的收敛速度,提高算法的收敛精度,采用城市距离远近关系的启发策略.本文通过引入二元交叉操作解决 TSP 离散问题.

1 混合算法的设计

1.1 遗传交叉算子的设计

用路径表示的旅行商问题,若采用基本遗传法中简单的一点或者多点交叉策略,必然产生不能完全遍历所有城市的非法旅行路线.文中采用顺序表示的基因码,配合交叉择优保留策略.即如果交叉之后,个体更加优良,则用子个体替换父代中的较差个体;否则,还原.

1.2 遗传变异算子设计

求解旅行商问题的遗传算法常用的变异算子有常规变异、逆转变异、对换变异、插入变异等.选用对换变异算子,配合变异择优保留策略,对随机的两个码位进行对换,对换后的个体如果得到改进,则保留该次变异,否则,还原.对换变异对采用路径表示的染色体基因的绝对位置影响比较小,也就是说其对码串模式的影响比较小.随着进化的进行,个体的优良基因不断增加,这种变异策略能够在不破坏优良基

收稿日期: 2015-10-08

通信作者: 阳琼芳(1973-),女,副教授,主要从事农业信息化、计算机应用技术的研究. E-mail:459776040@qq.com.

基金项目: 广西高校科学技术研究项目(2013YB295)

因的前提下对个体进行改进,而且所需计算也较为简单.

1.3 离散粒子运动方程

近年来,人们提出了多种离散粒子群算法模型,如 Wang 等^[11]提出的基于交换子、交换序两种策略的离散粒子群改进算法.粒子群算法最初是为了解决连续优化的计算问题而提出的,其粒子更新公式是针对连续的对象而设计,因此,需要改造其粒子运动方程才能用于解决离散旅行商问题.离散粒子运动方程^[12]改进简化为

$$v(t+1) = x(t) \otimes ((C_1 \cdot R_1) \cdot S(t)) \otimes ((C_2 \cdot R_2) \cdot G(t)), \quad (1)$$

$$X(t+1) = \text{reverse}(V(t+1), f, l). \quad (2)$$

式(1),(2)中: \otimes 表示二元交叉运算,类似遗传算法中的交叉思想; $x(t)$ 表示 t 时刻群体中的某个粒子对应的一种旅行路线方案; $S(t)$ 表示到 t 时刻为止,粒子曾经寻找到的最好的旅行路线方案; $G(t)$ 表示到 t 时刻为止,群体中的所有粒子曾经寻找到的最好旅行路线方案; C_1 和 C_2 对应连续优化计算问题中的两个学习因子; R_1 和 R_2 为0到1之间符合均匀分布的随机数; $C_1 \cdot R_1$ 和 $C_2 \cdot R_2$ 分别控制当前粒子与个体发现的最佳路线方案和群体发现的最佳路线方案的最大交换长度,离散运动方程通过类似遗传算法的交叉操作实现了对个体最佳可行解和全局最佳可行解的跟踪; $\text{reverse}(V(t+1), f, l)$ 表示 $V(t+1)$ 的排列从 f 的位置开始到 l 位置结束的子序列进行逆转,其中, f, l 为随机整数,并且满足 $1 \leq f \leq l < N$, N 为城市数目.

粒子的当前路线方案编码与个体历史最优路线方案编码、全局历史最优路线方案编码的交叉策略通常可以采用遗传算法中的部分匹配交叉或者顺序交叉策略,这两种策略都能保证下一代新个体能够从两个最优个体继承到优良的基因片段,在这些片段中,城市的相对访问次序已经是最佳次序.

1.4 启发因子策略

如果没有一些针对 TSP 问题而设计的特定辅助策略,而只是针对一般的离散优化问题进行一些泛型优化设计,那么,对于规模较大的 TSP,在算法演进前期,尽管在寻优速度上可能会有所改进,但在算法的后期搜索阶段,搜索到最优可行解的速度可能会非常缓慢,甚至可能根本搜索不到最优可行解.通过对多个旅行商问题的最终解决方案的研究,发现最佳路径中某个城市的下一个或者前一个访问城市很大程度上都是与该城市距离最近或者相对较近的城市,这个是旅行商问题的最优解的一种特征属性.

启发因子策略在算法开始前需要计算粒子间的相互距离,然后,把结果收集以用于后续的算法搜索^[12].当问题规模巨大时,这种计算耗时较长,不适合求解要求快速响应的问题.改进启发因子策略,当粒子进化到一定程度时,而群体中的最优粒子又没有变化时,开始使用启发因子策略.因为在编码位置上,某个城市的最近距离的城市往往就在附近,因此,只需要在某个城市及相邻的几个城市间做小范围调整,即可得到局部最优旅行路线.其具体做法是随机选中一个码位,将它与相邻的或者较近的码位对换,配合择优保留策略,如果得到改良,则保留该次交换;否则,还原.

1.5 混合策略

算法的混合需要遵守一些结合原则^[13],才能有效利用原有进化算法各自的优点,加快收敛速度,保证混合算法求解到的最优可行解的质量高于原有算法,从而达到改进算法的目的.结合粒子群、遗传混合算法的思想,将粒子群算法中每个粒子搜索到的历史最优可行解与遗传算法共享,遗传算子根据指定的进化原则,在这些可行解上进行搜索进化,更新这些历史最优可行解.混合策略既能够保持粒子群算法良好的局部搜索性能,又能够利用遗传算法良好的全局搜索能力.因此,混合策略在粒子群、遗传算法的性能基础上提升了算法性能.

2 实验步骤

混合算法有如下 8 个主要步骤.

步骤 1 设置算法的进化参数:群体规模、终止迭代次数、合理的学习因子 C_1, C_2 .

步骤 2 初始化粒子群体,并存储记忆当前的最优粒子.

步骤 3 开始进化.由于设计的遗传算法保留策略的特殊性,无论是交叉还是变异算子都只会进化到更优的个体.因此,遗传算法的操作对象是粒子群算法中每个粒子曾发现的最优旅行路线染色体编

码, 粒子群算法操作的是另一个染色体编码, 当这个染色体编码代表的旅行方案更优时, 才更新覆盖遗传算法操作的染色体编码。

步骤 4 执行遗传算法的交叉操作、变异操作, 并同时更新存储记忆的历史最优粒子。

步骤 5 执行粒子群算法的二元交叉与逆转更新, 并同时更新存储记忆的历史最优粒子。

步骤 6 判断是否达到使用启发因子策略的条件. 如果达到, 后续的搜索将一直使用启发策略, 执行启发搜索并更新记忆中的最优粒子; 否则, 继续下一步。

步骤 7 如果达到搜索停止条件, 则停止搜索; 否则, 返回步骤 4, 继续重复执行。

步骤 8 算法迭代完成后, 种群中的存储记忆的最优结果就是全局最佳旅行路线方案。

3 实验结果与分析

3.1 实验环境

软件编程环境是 Microsoft Visual Studio 2010, 编程语言是 C++, 硬件环境是 i5-2450 M 的处理器, 4 GB 的内存. 选用 3 个不同的例子进行实验测试, 并与文中未结合粒子群算法、未采用启发因子策略但已部分改进的遗传算法 (IMGA) 的求解结果进行对比, 以检验混合算法 (IPSOGHA) 的有效性. 其中, 算例 1, 2 来源于文献 [14], 其城市规模分别是 10 个和 50 个, 算例 3 来源于 TSPLIB [15], 其城市规模是 131 个. 3 个算例的进化截止代数均为 200.

3.2 实验结果对比

算例 1 的理论最优路径长度为 309.642 558, 算例 2 的理论最优路径长度为 571.253 118, 算例 3 的理论最优路径长度是 567.203 000. IPSOGHA, IMGA 算法均能在指定迭代次数内找到算例 1 的理论最优路径. 对于算例 2, IPSOGHA 算法能在指定迭代次数内找到最优路径, 而 IMGA 算法仅能找到长度为 576.168 375 的路径. 对于算例 3, 在指定迭代次数内, IMGA 算法只能找到长度为 587.501 025 的旅行路径, 而 IPSOGHA 算法可以找到最优旅行路径。

3.3 XQF131 城市进化情况

XQF131 的 131 个城市坐标分布图 [15], 如图 1 所示. 初始化生成的路径最优个体, 如图 2 所示. 图 2 中: 路程长度 (l) 为 4 103.789 851. 经过 1 次进化, 第一代最优个体的路径图, 如图 3 所示. 图 3 中: 路程的长度为 1 516.901 870. 第 10 代最优个体路径图, 如图 4 所示. 图 4 中: 路程的长度为 700.517 251. 第 40 代最优个体路径图, 如图 5 所示. 图 5 中: 路程的长度为 663.286 373. 第 60 代最优个体路径图, 如图 6 所示. 图 6 中: 路程的长度为 616.076 940. 第 80 代最优个体路径图, 如图 7 所示. 图 7 中: 路程的长度为 587.501 025. 第 200 代最优个体路径图, 如图 8 所示. 图 8 中: 路程的长度为 567.203 000.

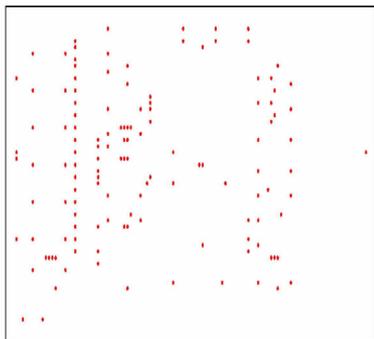


图 1 XQF131 的 131 城市坐标分布图

Fig.1 City coordinates distribution map of 131 cities of XQF131

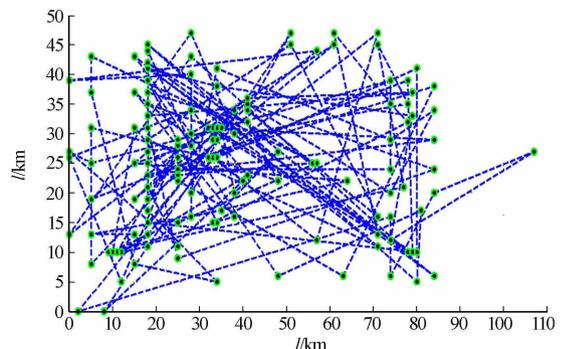


图 2 初始种群最优旅行路线方案

Fig.2 Optimal route scheme of initial population

对于 10 城市旅行商问题, 两种算法均能在截止进化代数范围内找到最佳旅行路线, IPSOGHA 算法要比 IMGA 更加优异一些, 所需平均进化代数略少于 IMGA 算法. 对于 50 城市以及 131 城市旅行商问题, IMGA 算法无法在 200 代之内找到最佳旅行路线, 即使将最大截止进化代数增加至 300, IMGA 算法依旧无法寻找到最佳旅行路线, 说明其局部搜索能力不足, 无法应对城市数量稍多的旅行商问题。

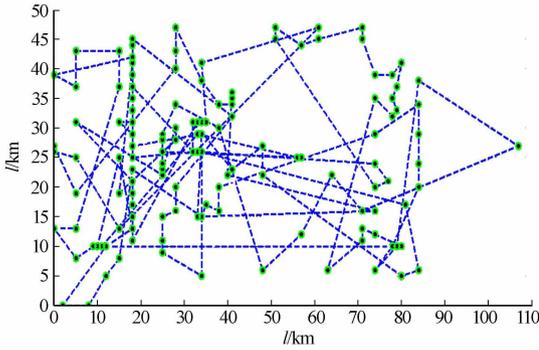


图3 第1代最优旅行路线方案

Fig. 3 Optimal route scheme of 1th generation

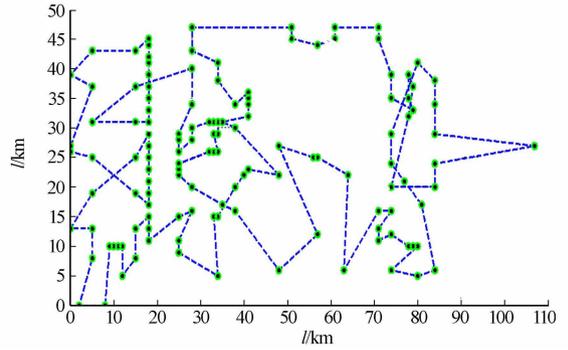


图4 第10代最优旅行路线方案

Fig. 4 Optimal route scheme of 10th generation

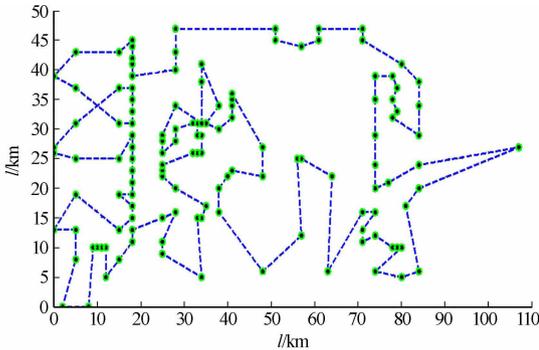


图5 第40代最优旅行路线方案

Fig. 5 Optimal route scheme of 40th generation

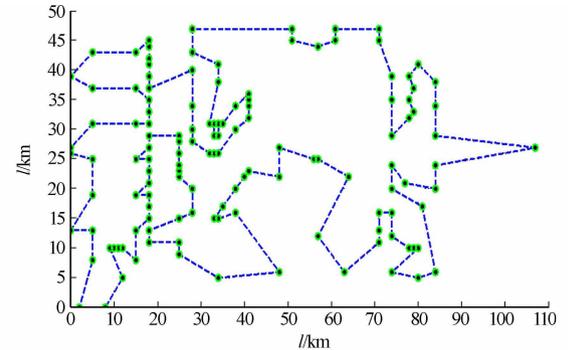


图6 第60代最优旅行路线方案

Fig. 6 Optimal route scheme of 60th generation

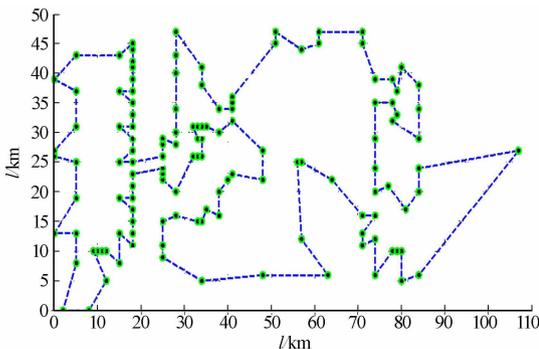


图7 第80代最优旅行路线方案

Fig. 7 Optimal route scheme of 80th generation

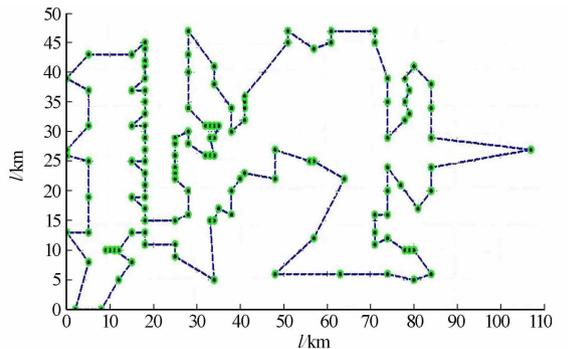


图8 第200代最优旅行路线方案

Fig. 8 Optimal route scheme of 200th generation

由图2~8可知:IPSOGHA在算法的执行初期就具有很好的进化能力,初始化生成的最优个体的路程是4 103. 789 851,经过仅仅一代的进化便迅速缩短为1 516. 901 870;随着进化的不断进行,个体不断接近最优个体.

在后期,算法每10代的进化改进幅度要小于初期的每10代进化幅度,进化速度没有前期那么快.IMGGA具有很好的进化能力,但由于篇幅的限制,没有给出其具体进化路径图. IPSOGHA算法在进化后期虽然速度放缓,但进化仍旧是稳步向前的,IMGGA算法则基本停止不前,尽管增加其进化截止次数,但情况依旧很少有改观,其原因在于其局部搜索能力没有IPSOGHA算法好.

3 结束语

对于城市数目少的旅行商问题,未加入粒子群算法及启发因子策略的改进遗传算法同样能在规定的进化次数内快速地找到最优可行方案.但对于城市数目稍微大的旅行商问题,该算法虽然也能寻找到很接近最优的可行方案,但始终不能进化到问题的最优可行路线.对于IPSOGHA算法,尽管在算法进化的后期表现出来的性能没有前期那么优秀,但还是能在较少的进化次数内找到问题的最优解,这样的

表现整体上还是不错的,即粒子群算法及启发因子的加入达到了算法结合的目的,提升了算法的局部搜索能力。

参考文献:

- [1] 龚纯,王正林.精通 Matlab 最优化计算[M].北京:电子工业出版社,2009:270-272.
- [2] 崔长彩,李兵,张认成.粒子群优化算法[J].华侨大学学报(自然科学版),2006,27(4):343-346.
- [3] 付荣,居鹤华.基于粒子群优化的时间最优机械臂轨迹规划算法[J].信息与控制,2011,40(6):802-808.
- [4] 潘文军,王健.基于改进遗传算法的食品召回中心选址研究[J].物流工程与管理,2014,12(36):53-55.
- [5] 胡大伟,陈诚.遗传算法和禁忌搜索算法在配送中心选址和路线问题中的应用[J].系统工程理论与实践,2007(9):172-179.
- [6] 付宝英,王启志.自适应粒子群优化 BP 神经网络的变压器故障诊断[J].华侨大学学报(自然科学版),2013,34(3):262-267.
- [7] 蒋腾旭.改进的遗传蚁群混合算法在 TSP 中的应用[J].计算机与现代化,2013,12(220):31-33.
- [8] 王晓霞,王涛.基于粒子群优化神经网络的变压器故障诊断[J].高电压技术,2008,24(11):2362-2367.
- [9] 詹仕华,王长缨,钟一文.求解 TSP 问题的贪心遗传离散粒子群优化算法[J].小型微型计算机系统,2011,32(1):181-184.
- [10] 赵远东,方正华.带有权重函数学习因子的粒子群算法[J].计算机应用,2013,33(8):2265-2268.
- [11] WANG Kangping, HUANG Lan, ZHOU Chunguang. Particle swarm optimization for traveling salesman problem [C]//Proc of the 2nd International Conference on Machine Learning and Cybernetics Piscataway. Nanjing: IEEE Press, 2003:1583-1585.
- [12] 钟一文,杨建刚,宁正元.求解 TSP 问题的离散粒子群优化算法[J].系统工程理论与实践,2006,6(6):89-94.
- [13] 江中央,蔡自兴,王勇.求解全局优化问题的混合自适应正交遗传算法[J].软件学报,2010,21(6):1296-1307.
- [14] 王秋芬,袁东锋,梁道雷.一种求解 TSP 的贪心遗传算法[J].制造自动化,2013,35(1):71-74.
- [15] Andre Rohe. Forschungsinstitut für Diskrete athematik[DB/OL]. [2015-10-05]. <http://www.math.uwaterloo.ca/tsp/vlsi/index.html#XQF131>.

Mixed Research on Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm

YANG Qiongfang¹, SUN Ruxiang^{1,2}

(1. Department of Computer and Electronic Information Engineering,
Guangxi Vocational and Technical College, Nanning 530226, China;

2. College of Computer and Electronic Information, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: There are many difficulties when particle swarm optimization is used directly to solve discrete travelling salesman problem (TSP) optimization problems. Therefore, we analyze the advantages and disadvantages of particle swarm optimization algorithm and genetic algorithm, and then mix them to be an effective algorithm to solve discrete TSP. The purpose of combination is to keep the original advantages of the two kinds of algorithms and to avoid the existing deficiencies. We conduct some experiments on the 3 TSP problems different scales. The result shows that the hybrid algorithm can highly improve the local search ability of algorithm.

Keywords: genetic algorithm; particle swarm optimization algorithm; self-adaptive; heuristic strategy

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 吴逢铁)

高速收敛混沌粒子群算法的 云计算任务调度

王秉

(河南交通职业技术学院 航海海事系, 河南 郑州 450000)

摘要: 针对传统粒子群算法在处理云计算任务调度问题时,存在求解精度不高、容易陷入早熟收敛等缺陷,提出一种改进的高速收敛混沌粒子群算法.首先,采用混沌序列对初始化过程进行优化;其次,利用适应度方差对早熟现象进行有效诊断,并对算法在负梯度方向进行修正,使其跳出局部最优,实现高速收敛.仿真实验表明:改进后的粒子群算法能有效地避免早熟,收敛速度及求解精度都明显提高,非常适合云计算任务调度.

关键词: 云计算; 任务调度; 粒子群算法; 混沌

中图分类号: TP 393

文献标志码: A

云计算资源服务模式有效地实现了资源配置和按需访问.由于云计算具有分布式计算的特性,每天都要处理海量信息,且处理过程要有很高的实时性.因此,在云计算环境下,进行高效合理的任务调度,实现系统全局最优,成为时下研究的热点问题之一^[1-2].与网格计算类似,云环境下的任务调度也属于一个 NP 难解问题^[3].用于网格计算的传统任务调度算法,如 Min-Min/Max^[4],Sufferage^[5]等也被用于解决云环境下的任务调度,但效果不佳.而一些具有启发式性质的智能算法,在处理该问题时显示出较好的效果,如遗传算法^[6]、蚁群算法^[7]、粒子群算法等^[8].刘万军等^[9]研究云计算服务集群资源调度和负载均衡优化问题,在粒子群算法中,引入了动态多群体协作和变异粒子逆向飞行思想;苏淑霞^[10]对传统粒子群算法进行改进,采用间接方式进行初始化编码,扩展了求解的空间,但是解的精度不高;封良良等^[11]采取间接编码形式,同时对适应度函数进行了优化;王波等^[12]将粒子群算法与遗传算法结合,引入变异、交叉等机制,提高了算法的全局搜索能力,但求解过程较复杂.尽管取得了一定的成果,但在解决云环境下的任务调度问题时,必须考虑信息量的庞大.因此,粒子群算法应该具有足够的解空间,高效的求解速度及有效克服早熟收敛的能力等,而这些问题在现有文献中的研究还不够深入.基于此,本文研究将粒子群算法用于解决云环境下的任务调度问题.

1 问题的描述

目前,应用最广泛的是谷歌公司提出的 Map/Reduce 编程模型.该模型将整个计算过程分为 2 个阶段:映射(Map)和化简(Reduce).一个大任务可以被分解成多个相互独立的子任务,在不同资源节点上,通过并行的方式完成,汇总后给出执行结果.因此,云环境下任务调度问题是将子任务合理的与资源进行匹配,从而使完成任务的总代价最小.

云计算环境下,假设总任务为 N ,将其拆分为 n 个相互独立的子任务,而这些子任务需要在 m 个虚拟资源节点上执行($m < n$).任务集可以表示为 $T = \{t_i | i = 1, 2, \dots, n\}$,资源节点集可以表示为 $VM = \{vm_j | j = 1, 2, \dots, m\}$,其中,规定每个子任务只能在一个虚拟资源上执行.利用矩阵形式, T 与 VM 之间的关系表示为

收稿日期: 2015-10-08

通信作者: 王秉(1965-),男,副教授,主要从事计算机图形图像的研究. E-mail: wbjtxy@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(201411326136);河南省科技厅项目(2013132300410337)

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,n} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m,1} & x_{m,2} & \cdots & x_{m,n} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

式(1)中: $x_{i,j} \in \{0,1\}$ 为子任务 t_i 与虚拟资源 vm_j 之间的分配关系,且满足条件 $\sum_{i=1}^m x_{i,j} = 1, x_{i,j} = 1$ 表示 t_i 分配给 vm_j 执行. $ETC_{i,j}$ 表示 t_i 在 vm_j 上的期望执行时间,其矩阵形式为

$$\mathbf{ETC} = \begin{bmatrix} ETC_{1,1} & ETC_{1,2} & \cdots & ETC_{1,n} \\ ETC_{2,1} & ETC_{2,2} & \cdots & ETC_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ ETC_{m,1} & ETC_{m,2} & \cdots & ETC_{m,n} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

那么,任务完成的总时间为

$$\text{SFT} = \max_{r=1}^m \sum_{i=1}^n \text{RT}(r,i). \quad (3)$$

式(3)中: $\text{RT}(r,i)$ 为第 i 个子任务在第 r 个资源上的完成时间. 任务调度的优化目标即使 SFT 最小.

2 算法的设计

2.1 标准粒子群算法

首先,在解空间初始化生成一群粒子,每个粒子都代表优化问题的一个潜在最优解,并通过位置、速度和适应度值表征每个粒子的特性. 粒子在解空间中运动,根据个体极值 P_{best} 和群体极值 G_{best} 的变化对位置和适应度值进行更新. 同时,通过对比新粒子的适应度值和 $P_{\text{best}}, G_{\text{best}}$ 的适应度值,再次更新 P_{best} 和 G_{best} . 速度和位置的更新公式分别为

$$v_{i,d}^{k+1} = \omega v_{i,d}^k + c_1 r_1 (p_{i,d}^k - x_{i,d}^k) + c_2 r_2 (p_{g,d}^k - x_{i,d}^k), \quad (4)$$

$$z_{i,d}^{k+1} = z_{i,d}^k + v_{i,d}^{k+1}. \quad (5)$$

式(4)~(5)中: ω 为惯性权重; $d=1,2,\dots,D$; k 为当前迭代次数; $v_{i,d}$ 为粒子的速度; 参数 c_1 和 c_2 为 0 或正常数,代表速度的加权学习因子; r_1 和 r_2 是随机数,取值范围为 $[0,1]$.

为了避免粒子在解空间中盲目进行目标搜寻,位置一般取值范围为 $[-z_{\text{max}}, z_{\text{max}}]$,速度一般取值范围为 $[-v_{\text{max}}, v_{\text{max}}]$.

2.2 混沌初始化

标准粒子群及许多改进算法在初始化过程中,基本都采用随机方式. 这种方式虽然实现简单,但是初始化粒子的均衡度较差,多样性不高. 考虑到混沌序列具有良好的随机性和遍历性,可以在一定程度上按照自身规律不重复遍历全部状态. 因此,文中研究在粒子群算法的初始化过程中,采用混沌序列,从而有效提高粒子的分布均衡度和多样性.

在混沌理论中,包括多种混沌映射,使用的为立方映射数学模型为

$$y(n+1) = 4y(n)^3 - 3y(n), \quad -1 \leq y(n) \leq 1, \quad n = 0,1,2,\dots. \quad (6)$$

由式(6)可知:立方映射生成序列的取值范围为 $(-1,1)$,在使用时,还需将其映射到粒子的搜索空间,映射公式为

$$x_{i,d} = \min_d + (1 + y_i(d)) \frac{(\max_d - \min_d)}{2}, \quad i = 1,2,\dots,N, \quad d = 1,2,\dots,D. \quad (7)$$

式(7)中: $y_i(d)$ 为第 i 个粒子的第 d 维; $x_{i,d}$ 为其坐标; \max_d 和 \min_d 为其上下限.

此外,为了进一步提高立方映射的分布多样性,在生成粒子的过程中嵌入位置信息,即要满足

$$\cos(\mathbf{z}_i, \mathbf{z}_j) = \frac{\mathbf{z}_i^T \mathbf{z}_j}{\|\mathbf{z}_i\|_2 \times \|\mathbf{z}_j\|_2} \leq \varepsilon, \quad i, j = 1,2,\dots,N, \quad i \neq j. \quad (8)$$

式(8)中: \mathbf{z}_i 为某一个利用立方映射生成的粒子向量; ε 为事先选定的阈值; $\cos(\mathbf{z}_i, \mathbf{z}_j)$ 为粒子间的位置信息, $\cos(\mathbf{z}_i, \mathbf{z}_j)$ 越大表示粒子越靠近.

2.3 早熟诊断和高速收敛策略

尽管混沌序列初始化加强了粒子的多样性,但还是无法避免粒子群算法出现早熟现象.早熟是算法错误地将一个局部次优解当作真正的全局最优解,而使算法停止搜索.因此,早熟的有效诊断十分重要.在发现早熟现象以后,如何使粒子跳出当前搜索空间,重新进行有效搜索值得研究.

借鉴吕振肃等^[13]提出的适应度方差策略诊断算法的早熟现象,定义种群规模为 N , f_i 为第 i 个粒子的当前适应度值, f_{ave} 为平均适应度值,那么,可以得到一个归一化定标因子,即

$$f = \begin{cases} \max(|f_i - f_{ave}|), & \max(|f_i - f_{ave}|) > 1, \\ 1, & \text{其他.} \end{cases} \quad (9)$$

在此基础上,适应度方差的计算公式为

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{f_i - f_{ave}}{f} \right)^2. \quad (10)$$

从适应度方差的定义可知:粒子在收敛过程中, σ^2 会逐渐变小直至为 0,达到完全收敛的状态,表征的是种群中粒子的收敛程度.因此,可以根据经验事先设定一个阈值,当 σ^2 小于这个阈值时,即判断为算法早熟.尽管如此,当算法搜索到真正的全局最优解时,也会出现该现象,为了避免冲突,算法在运行过程中,还要验证当前的最优适应度值 f_{best} 是否大于理论最优适应度值 f_d ,若条件成立,则为早熟.

当判断算法出现早熟现象以后,需给算法添加一个扰动,使粒子跳出当前的搜索空间.采用负梯度方向调整策略,使粒子快速进入新的搜索空间,并且整个算法以较高速率收敛.负梯度调整公式为

$$-\nabla F(f_{best}) = \frac{F(f_{best}^{old}) - F(f_{best})}{f_{best}^{old} - f_{best}}. \quad (11)$$

式(11)中: f_{best} 当前种群的最优适应度值; f_{best}^{old} 为 f_{best} 最邻近的一次未更新之前的值.

2.4 算法的实现步骤

步骤 1 初始化种群规模 N , 粒子搜索空间维度 D , 惯性权重 ω_0 , 加速因子 c_1 和 c_2 , 迭代次数 $t=0$, 最大迭代次数为 T .

步骤 2 随机生成一组粒子位置的初始向量 $z_1 = (z_{1,1}, z_{1,2}, \dots, z_{1,D})$, 取值范围 $(-1, 1)$, 剩余 $N-1$ 组粒子位置的初始向量按照式(6)产生. 要注意满足式(8)条件, 并按照式(7)进行映射.

步骤 3 定义适应度函数 $F(i) = \frac{1}{SFT_i}$, $1 \leq i \leq N$, 并计算适应度值.

步骤 4 更新粒子速度、位置和惯性权重.

步骤 5 按照式(10)计算适应度方差 σ^2 , 如果 $\sigma^2 < \gamma$ 且 $f_{best} > f_d$, 按照式(11)进行调整.

步骤 6 $t=t+1$, 如果 $t < T$, 转至步骤 4; 否则, 算法结束.

3 仿真实验

为了验证文中所提算法的性能,在 Cloudsim 云平台实现算法的仿真分析,并与标准粒子群算法和文献[11]提出的改进粒子群算法进行比较.

设置算法的参数为:种群规模 100, 惯性因子 $\omega=0.9$, 加速因子 $c_1=c_2=2$, 最大迭代次数 200. 完成一组固定任务和资源数量的调度对比试验,共包括 2 种情况:1) 50 个任务, 5 个资源;2) 500 个任务, 5 个资源. 2 种情况下的任务性质和资源能力完全相同,所有任务的长度范围为 $[400 \text{ MI}, 1\ 000 \text{ MI}]$, 5 个资源的处理能力分别为 $\{400 \text{ MIPs}, 600 \text{ MIPs}, 800 \text{ MIPs}, 1\ 000 \text{ MIPs}, 1\ 200 \text{ MIPs}\}$. 每种算法在相同条件下各运行 10 次,取平均值作为最终的结果,如图 1 所示.图 1 中: n 为迭代次数, t 为总任务完成时间.

由图 1 可知:由于文中算法与文献[11]算法在标准粒子群算法的初始化阶段都进行了优化,因此,算法迭代前期,任务调度的时间基本相同,但都优于标准粒子群算法;随着算法迭代的深入,标准粒子群算法和文献[11]算法没有早熟的诊断和跳出机制.因此,找到的都不是最优解,任务调度的时间也要明显多于文中算法,尤其是在情况 1 时,文献[11]算法的后期结果与标准粒子群算法接近,可见早熟对于粒子群算法影响较大,而文中算法却始终保持一个较好的进化过程,性能明显更好.

考察在资源数量一致且任务量不同的情况下,3 种算法的性能.设置资源个数为 5,任务量从 0 依次

递增到 500(每隔 50 递增). 算法参数与上述相同, 结果如图 2 所示. 图 2 中: t 表示任务完成时间; N_r 表示任务数.

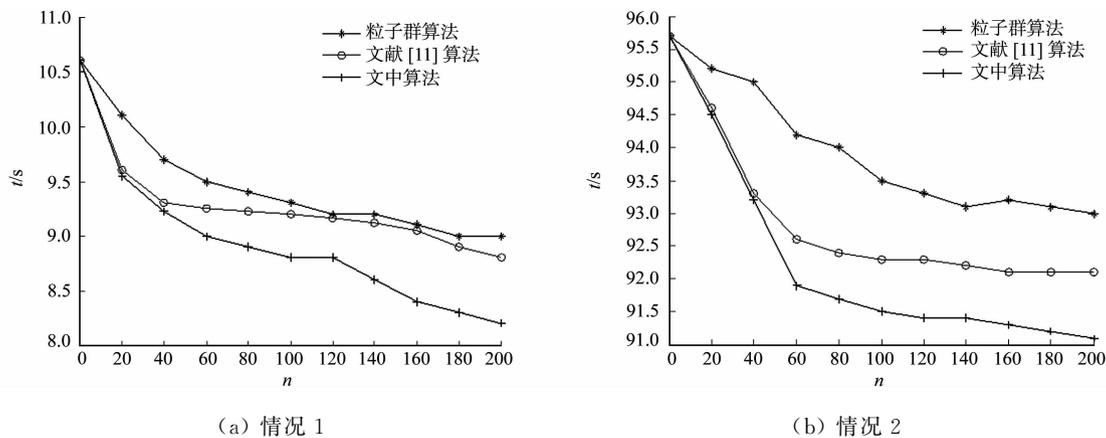


图 1 2 种情况下的调度结果

Fig. 1 Scheduling results for two cases

由图 2 可知: 当资源数量固定时, 随着任务数量的增加, 调度时间也逐渐增加; 但是标准粒子群算法与文献[11]算法的调度用时明显高于文中算法, 尤其是任务数量达到 150 以后, 差距更为显著; 随着任务数量的进一步递增, 文中算法的优势更加明显.

比较任务量固定、资源数量不同时, 3 种算法的性能, 主要考察资源负载均衡度, 结果如图 3 所示. 图 3 中: η 为资源负载均衡度; N_d 为资源节点数量. 根据以往的研究^[14], 资源负载均衡度越接近 1, 说明资源的利用率越高, 算法的调度越理想.

由图 3 可知: 文中算法具有更好的系统负载均衡度, 平均值为 0.847, 比较接近 1, 说明该算法对资源的利用率较高. 而文献[11]算法和标准粒子群算法的资源负载均衡度分别只有 0.6 和 0.5 左右, 相对较低, 反映出资源负载具有较高的不平衡度.

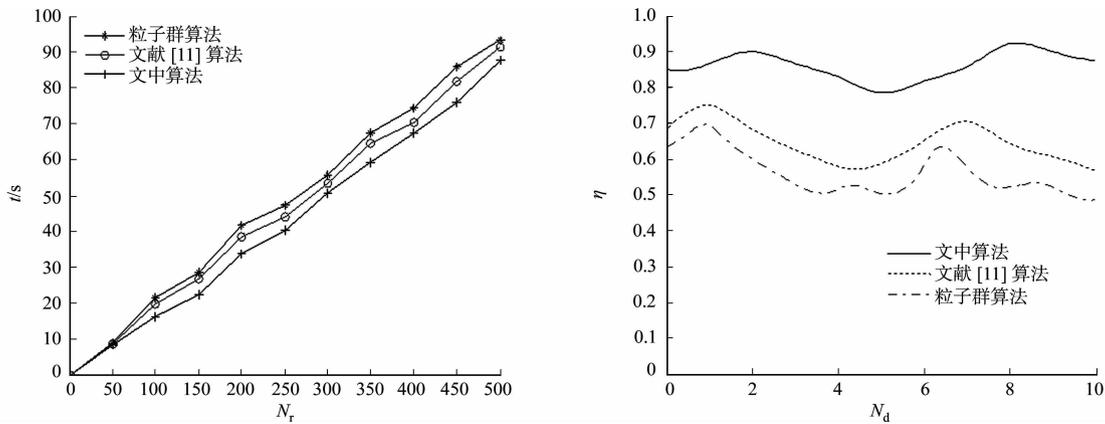


图 2 不同任务量情况下的调度结果

Fig. 2 Scheduling results with various tasks

图 3 3 种算法的资源负载均衡度比较

Fig. 3 Comparison of the resource load balancing degree for 3 kinds algorithms

综合上述实验结果, 提出的高速收敛混沌粒子群算法的性能更优, 更适合解决云计算环境下的资源调度问题.

4 结束语

对云计算环境下的任务调度问题进行深入研究, 提出一种基于高速收敛混沌粒子群的任务调度算法. 简要分析了云环境下的计算模型, 并针对标准粒子群算法的缺陷提出了改进措施. 采用混沌映射优化初始化过程, 同时给出了算法早熟的诊断方法和高速收敛策略. 仿真实验的结果表明: 所提算法具有较好的性能, 收敛速度快, 求解的精度更高, 非常适合解决云计算环境下的资源调度问题. 在下一步的工

作中,还将研究同时考虑计算成本、节能等因素的云计算调度问题。

参考文献:

- [1] GUO Lizheng, ZHAO Shuguang, SHEN Shigen, et al. Task scheduling optimization in cloud computing based on heuristic algorithm[J]. Journal of Networks, 2012, 7(3): 547-553.
- [2] 王燕琼, 李国刚. 下行多小区 MIMO 系统协作多点传输联合调度机制[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2012, 33(3): 260-264.
- [3] ARMBRUST M, FOX A, GRIFFITH R, et al. A view of cloud computing[J]. Communications of the ACM, 2010, 53(4): 50-58.
- [4] 王观玉. 网格计算中任务调度算法的研究和改进[J]. 计算机工程与科学, 2011, 33(10): 186-190.
- [5] 胡志刚, 陈俊. 网格 workflow 中一种扩展的 QD-Sufferage 调度算法[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(5): 1504-1506.
- [6] 朱宗斌, 杜中军. 基于改进 GA 的云计算任务调度算法[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(5): 77-80.
- [7] LI Jianfeng, PENG Jian, CAO Xiaoyang, et al. A task scheduling algorithm based on improved ant colony optimization in cloud computing environment[J]. Energy Procedia, 2011, 6(13): 6833-6840.
- [8] 郭力争, 耿永军, 姜长源, 等. 云计算环境下基于粒子群算法的多目标优化[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(7): 2358-2362.
- [9] 刘万军, 张孟华, 郭文越. 基于 MPSO 算法的云计算资源调度策略[J]. 计算机工程, 2011, 37(11): 43-44.
- [10] 苏淑霞. 粒子群算法在云计算任务调度中的应用[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2014, 37(4): 145-149.
- [11] 封良良, 张陶, 贾振红, 等. 云计算环境下基于粒子群的任务调度算法研究[J]. 计算机工程, 2013, 39(5): 183-186.
- [12] 王波, 张晓磊. 基于粒子群遗传算法的云计算任务调度研究[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(6): 84-88.
- [13] 吕振肃, 侯志荣. 自适应变异的粒子群优化算法[J]. 电子学报, 2004, 32(3): 416-420.
- [14] ISARD M, PRABHAKARAN V, CURRCY J, et al. Quincy: Fair scheduling for distributed computing clusters[C] // Proceedings of on Operating Systems Principles. New York: ACM, 2009: 261-276.

Cloud Computing Task Scheduling of High-Speed Convergence of Chaotic Particle Swarm Optimization

WANG Bing

(Department of Maritime, Henan Vocational and Technical College of Communications, Zhengzhou 450005, China)

Abstract: In this paper, we proposed an advanced high speed of convergence chaotic particle swarm algorithm to adjust the common problems of traditional particle swarm algorithm such as low accuracy and easily trapped in premature convergence during the cloud computing task scheduling. Firstly, the initial process was optimized by chaotic sequence. Then, the effective diagnosis of premature phenomenon was determined by fitness variance. The algorithm correction was performed by negative gradient direction, which could jump out the local optimum and achieve high speed of convergence. Simulation experiments show that the improved particle swarm algorithm can effectively avoid premature, enhance convergence speed and solution accuracy, which is suitable for cloud computing task scheduling.

Keywords: cloud computing; task scheduling; particle swarm optimization algorithm; chaotic

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 吴逢铁)

新三维混沌映射及其在数字图像 信息加密中的应用

刘冰, 潘大兵

(达州职业技术学院 公共事务管理系, 四川 达州 635001)

摘要: 引入新的三维混沌映射,结合有限域运算处理,构建一种数字图像加密方法.首先,Lu映射将原始图像信息映射为2个混沌矩阵;其次,将原始图像矩阵和生成的2个混沌矩阵,在有限域上执行4个轮次的运算处理.实验结果表明:提出的加密方法可以获得均匀细腻的置乱效果,在直方图评价、三向相关性评价等方面都表现出良好的加密性能,整个算法的加密速度也比较快.

关键词: 数字图像;图像加密;三维混沌映射;三向相关性;Lu映射

中图分类号: TP 311

文献标志码: A

数字图像信息,作为数字信息中最重要的一类,如何保障其安全可靠地传输,成为数字技术中的关键问题^[1].数字图像加密技术^[2]利用各种加密模型和加密算法,对原始图像信息进行置乱处理,加密后的图像必须通过特定的密钥及解密算法才能恢复成原始图像,从而确保图像传输和使用过程的安全性^[3].然而,早期的数字图像加密技术的加密思路和置乱规律被逐步破译,其安全性和可靠性大大降低^[4-6].因此,更为复杂的加密模型和置乱算法开始逐步进入图像加密领域.近年来,基于混沌理论和混沌系统的加密方法在数字图像信息加密过程中获得广泛地应用,大大增强了加密安全性和可靠性^[7-8].基于混沌映射的数字图像加密方法,已具有许多成功的案例^[9-12].鉴于混沌理论在数字图像加密领域中的成功应用,本文采用一种新的三维混沌映射,构建一种基于此映射的数字图像加密算法.

1 新的三维混沌映射

在数字图像加密领域,Logistic混沌映射、Lorenz混沌映射都有比较成功的应用.为了进一步增强后续图像加密算法的抗攻击能力,引入一个新的三维混沌映射^[13],称为Lu映射,其动力学方程为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= a(z - y), \\ \dot{y} &= bx - dx^2, \\ \dot{z} &= kxy - cy - gz. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)中: a, b, c, d, k, g 等6个参数的取值分别为8.0,40.0,10/3,3.0,1.0,4.0.

Lu映射是一个典型的三维混沌系统,内含2个非线性项.Lu混沌系统含有2个平衡点(0,0,0),(40/3,0,0),且都是不稳定的鞍焦点,这说明Lu映射是一个耗散系统.

2 基于Lu映射的数字图像加密算法

2.1 加密算法的总体流程

在Lu映射的基础上,结合有限域上的相关运算构建图像加密算法,有利于提升加密过程的安全性

收稿日期: 2015-10-08

通信作者: 刘冰(1970-),男,副教授,主要从事计算机信息技术及其应用的研究. E-mail:newbing@126.com.

基金项目: 四川省教育厅重点科技计划项目(14ZA0330);四川省达州市2014年科技计划项目(2014-8220)

与抗攻击能力.此外,由于有限域运算在速度上的优势,不会导致整个加密算法的执行时间明显增加.构建的数字图像加密算法整体流程,如图1所示.由图1可知:Lu映射在前几个环节用于混沌置乱处理,而有限域运算则用于进一步增加加密过程的复杂性.

2.2 Lu混沌映射置乱处理

将要执行加密处理的原始图像信息作为 x 代入式(1),通过 Lu 映射计算出 y, z ,进而对 y, z 执行标度变换,使其数值范围正好映射在 $(0, 255)$ 这个区间,恰好符合数字图像的灰度值范围要求.其数学模型为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{A} &= (y \times 1\ 000) \bmod 256, \\ \mathbf{B} &= (z \times 1\ 000) \bmod 256. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(2)中: \mathbf{A}, \mathbf{B} 为 y, z 标度变换后的映射序列;mod 为取模的运算.

由式(2)获得 2 个一维数据变量 \mathbf{A}, \mathbf{B} ,且这 2 个变量的数据长度和原始图像的数据长度一致.为了满足后续执行有限域矩阵运算的处理,将这 2 个一维数据变量,进一步映射成图像像素矩阵的形式,即

$$\mathbf{A}_{M \times N} = \mathbf{A}_n, \quad \mathbf{B}_{M \times N} = \mathbf{B}_n. \quad (3)$$

式(3)中: M, N 为原始图像的宽度和高度.

2.3 有限域加密处理

为了提升整个加密过程的复杂性,进一步执行有限域矩阵运算处理.首先,选取原始图像数据矩阵 $\mathbf{I}_{M \times N}^1$ 和混沌映射矩阵 $\mathbf{A}_{M \times N}$,分别在有限域上执行一次加法处理和一次乘法处理,即

$$\mathbf{I}_{M \times N}^2 = \mathbf{I}_{M \times N}^1 \oplus \mathbf{A}_{M \times N}, \quad (4)$$

$$\mathbf{I}_{M \times N}^3 = \mathbf{I}_{M \times N}^2 \otimes \mathbf{A}_{M \times N}. \quad (5)$$

式(4),(5)中: $\mathbf{I}_{M \times N}^2$ 为原始图像矩阵 $\mathbf{I}_{M \times N}^1$ 执行有限域上加法处理的结果; $\mathbf{I}_{M \times N}^3$ 为 $\mathbf{I}_{M \times N}^2$ 执行有限域上乘法处理的结果.

其次,针对图像矩阵 $\mathbf{I}_{M \times N}^3$,利用 $\mathbf{B}_{M \times N}$ 再执行两次有限域上的加法处理和乘法处理,即

$$\mathbf{I}_{M \times N}^4 = \mathbf{I}_{M \times N}^3 \oplus \mathbf{B}_{M \times N}, \quad (6)$$

$$\mathbf{I}_{M \times N}^5 = \mathbf{I}_{M \times N}^4 \otimes \mathbf{B}_{M \times N}. \quad (7)$$

式(6),(7)中: $\mathbf{I}_{M \times N}^4$ 为 $\mathbf{I}_{M \times N}^3$ 执行有限域上加法处理的结果; $\mathbf{I}_{M \times N}^5$ 为 $\mathbf{I}_{M \times N}^4$ 执行有限域上乘法处理的结果.

2.4 加密算法的解密流程设计

为了确保加密图像能够被正确解密,需要根据加密过程设计相应的解密过程.对于设计的基于 Lu 映射的图像加密算法,在解密过程中,仍然要采用 Lu 映射,并设置同加密端一样的初始状态,再在有限域上执行加密过程的各种逆运算.加密算法的解密流程为:1) 根据 Lu 混沌映射设置初始状态;2) 根据 Lu 混沌映射和加密图像矩阵 $\mathbf{I}_{M \times N}^5$ 生成混沌序列 \mathbf{A}, \mathbf{B} ;3) 将混沌序列 \mathbf{A}, \mathbf{B} 转换为图像形式;4) 将 $\mathbf{I}_{M \times N}^5$ 和 \mathbf{B} 在有限域上执行乘法处理的逆运算,恢复出图像矩阵 $\mathbf{I}_{M \times N}^4$;5) 将 $\mathbf{I}_{M \times N}^4$ 和 \mathbf{B} 在有限域上执行加法处理的逆运算,恢复出图像矩阵 $\mathbf{I}_{M \times N}^3$;6) 将 $\mathbf{I}_{M \times N}^3$ 和 \mathbf{A} 在有限域上执行乘法处理的逆运算,恢复出图像矩阵 $\mathbf{I}_{M \times N}^2$;7) 将 $\mathbf{I}_{M \times N}^2$ 和 \mathbf{A} 在有限域上执行加法处理的逆运算,恢复出原始图像 $\mathbf{I}_{M \times N}^1$.

3 结果与分析

实验的计算机硬件配置:酷睿双核;主频 2.0 GHz 的 CPU;4 GB 大小的内存.计算机软件配置:Windows 7.0 操作系统;Matlab 编译环境.选取 2 幅灰度图像作为实验对象,结果如图 2 所示.



(a) 原始图像(Lena)



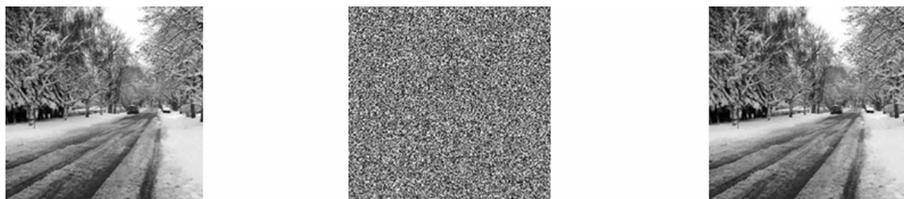
(b) 加密图像(Lena)



(c) 解密图像(Lena)



图 1 加密原理及流程图
Fig. 1 Encryption principle and flow chart



(d) 原始图像(风景) (e) 加密图像(风景) (f) 解密图像(风景)

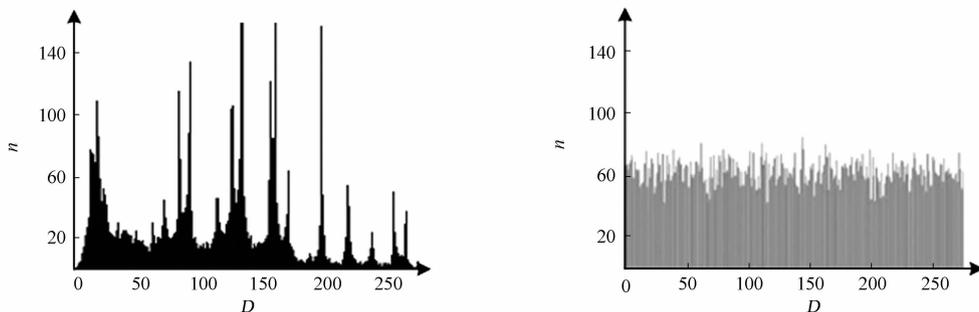
图 2 图像的加密效果

Fig. 2 Effect of image encryption

由图 2 可知:Lena 图像经加密处理后,原始图像信息被均匀置乱,无法看到和原始图像有关的细节信息.进一步对加密结果实施解密算法,解密结果准确地恢复出原始图像信息.风景图像与 Lena 有同样的表现,这充分证实了加密方法的鲁棒性.

3.1 灰度直方图评价

一般而言,一幅纹理特征明显的图像,其灰度(D)分布会比较集中.经图像加密算法处理后,灰度直方图的分布比较均匀,均匀性越好,证明加密效果越好.风景数字图像加密前后的直方图效果,如图 3 所示.由图 3 可知:经加密后,图像的灰度直方图分布变得非常均匀,证明文中方法的加密安全性较高.



(a) 图像加密前

(b) 图像加密后

图 3 灰度直方图评价

Fig. 3 Evaluation of gray histogram

3.2 三向相关性评价

三向相关性,指的是图像像素在水平方向、垂直方向和对角线方向之间的相关性.无论哪个方向上的相关性高,都会使图像数据容易破译.因此,衡量一个加密算法性能的好坏,最直接的思路就是评价这 3 个方向上的相关性.相关性计算公式为

$$E(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \tag{8}$$

$$D(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - E(x))^2, \tag{9}$$

$$\text{cov}(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - E(x))(y_i - E(y)), \tag{10}$$

$$r_{x,y} = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sqrt{D(x)} \times \sqrt{D(y)}}. \tag{11}$$

利用上述公式可得,风景图像加密前 3 个方向的相关系数为 0.904 6,0.924 0,0.917 0,加密后 3 个方向的相关系数为 0.001 8,0.002 1,0.002 3.由此可知:文中加密方法具有较高的安全性能.

3.3 执行时间分析

对加密方法的执行时间进行测试. Lena 图像加密和解密的时间分别为 0.078,0.080;风景图像加密和解密的时间分别为 0.081,0.083.由此可知:加密过程和解密过程的时间较短,执行速度较快.

4 结束语

引入一种新的三维混沌映射,结合有限域上的运算处理构建图像加密算法.原始图像信息在 Lu 映

射下被置乱为 2 个混沌矩阵,进而将原始图像和这 2 个混沌矩阵执行 4 个轮次的有限域运算处理.选择 2 组实验图像,分别进行加密效果测试、加密效果评价、执行时间测试等验证性实验.结果表明:对于 Lena 图像和风景图像,基于新的三维混沌映射的图像加密方法表现出加密效果良好、抗攻击性能强、执行时间快的特点.

参考文献:

- [1] ROHITH S, BHAK K N, SHARMA A N. Image encryption and decryption using chaotic key sequence generate by sequence of logistic map and sequence of states of linear feedback shift register[C]// International Conference on Advances in Electronic, Computers and Communications. New Jersey: IEEE Press, 2014: 1124-1130.
- [2] 王玉惠, 陈哨东. 基于五维超混沌的全球信息栅格图像加密算法[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2011, 29(1): 51-56.
- [3] PATIDAR V. A robust and secure chaotic standard map based pseudorandom permutation-substitution scheme for image encryption[J]. Optics Communications, 2010, 284(19): 4331-4339.
- [4] BARRERA J F. Experimental opto-digital synthesis of encrypted sub-samples of an image to improve its decoded quality[J]. Optics Communications, 2009, 51(11): 1822-1827.
- [5] CHANG W L, HUANG S C, LIN K W, et al. Fast parallel DNA-based algorithms for molecular computation; Discrete logarithm[J]. J Supercomputing, 2011, 5(6): 129-133.
- [6] 赵文博, 田小平, 吴成茂. 基于低密度奇偶校验编码和混沌系统的图像加密[J]. 计算机应用, 2012, 32(7): 2018-2021.
- [7] SHIU H J, NG K L, FANG J F, et al. Data hiding methods based upon DNA sequences[J]. Information Sciences, 2010, 180(11): 2196-2208.
- [8] 孙劲光, 汪洁, 孟祥福. 改进的 Fibonacci 双置乱图像加密算法[J]. 计算机科学, 2012, 39(11): 249-253.
- [9] BANERJEE S. Synchronization of spatiotemporal semiconductor lasers and its application in color image encryption[J]. Optics Communications, 2009, 284(9): 2278-2291.
- [10] ELABADY N F, ABDALDADER H M, MOUSSA M I, et al. Image encryption based on new one-dimensional chaotic map[C]// International Conference on Engineering and Technology. Berlin: Springer, 2015: 851-892.
- [11] FU Chong, ZHU Zhiliang. A chaotic image encryption scheme based on circular bit shift method[C]// The 9th International Conference for Young Computer Scientists. New Jersey: IEEE Press, 2013: 3057-3061.
- [12] SINGH H, YADAV A K, VASHISTH S, et al. Double phase-image encryption using gyrator transforms, and structured phase mask in the frequency plane[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 67(4): 145-156.
- [13] 陆安山, 周小珠. 一个新三维混沌系统及其同步[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2008, 36(1): 66-68.

New 3D Chaotic Mapping and Its Application in Digital Image Encryption

LIU Bing, PAN Dabing

(Department of Public Affairs Management, Dazhou Vocational and Technical College, Dazhou 635001, China)

Abstract: Based on the new 3D chaotic mapping and finite field operations, a new method of digital image encryption is constructed. Firstly, Lu mapping is used to map the original image information into two chaotic matrices. Secondly, the original image matrices and two generated chaotic matrices, are executing four rounds operations in the finite field. Experimental results show that the proposed encryption method can obtain uniform and fine scrambling effect. The evaluation of the histogram and three-direction correlation evaluation also has good encryption performance, and the encryption speed of the whole algorithm is also relatively fast.

Keywords: data image; image encryption; 3D chaotic mapping; three correlation; Lu mapping

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 吴逢铁)

文章编号:1000-5013(2015)06-0659-04

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.06.0659

采用 Oracle 的 Google 地图兴趣点抓取和发布的 WebGIS 系统

章欣欣, 何原荣

(厦门理工学院 计算机与信息工程学院, 福建 厦门 361024)

摘要: 通过 Google Maps API 开发实现对兴趣点的抓取,以 Oracle Spatial 点对象字段实现存储,借助 Oracle Maps 开发 WebGIS 系统,实现 Google Maps 兴趣点数据快速抓取,并与对应的属性和地图符号在 Oracle 中一体化存储,最终实现同数据库中已有的矢量和栅格数据的叠加和集成发布.对桂林市漓江流域旅游资源空间数据构建进行应用实践,结果表明:该系统可帮助开发者快速构建集兴趣点位置、属性、显示符号为一体的空间数据库,大大缩短开发周期并有效降低开发成本.

关键词: Google Maps API; 兴趣点; Oracle Spatial; Oracle Map

中图分类号: P 208

文献标志码: A

针对兴趣点数据(POI)的采集和获取是构建专题地理信息系统(如旅游^[1]、大众生活服务)的基础,常见数据采集的方式包括传统测绘、从专业资质认证机构购买、遥感影像解译等^[2].但这些方式在资金成本、技术门槛、采集周期等方面都有较高的要求,对于一般中小型 IT 企业、学校研究机构,以及个人开发者而言,往往无法满足^[3].如何以较低的成本,快速、简易、准确地获取所需的兴趣点数据,是当前地理信息系统(GIS)应用推广亟待解决的问题. Google 拥有全球最大数据量、覆盖最完整的兴趣点定位数据资源,同时,提供地图应用编程接口 Google Maps API 供用户提取坐标,并在此基础上进行 GIS 的二次开发.因此,基于 Google 地图或者其他可提供 API 接口的地图服务产品,进行兴趣点数据的提取是目前快速获取所需数据的有效手段.直接利用 Google Maps、加载本地数据、通过文件格式转换、借助抓取程序是基于 Google 数据的 GIS 常见的 4 种开发方式^[4-7]. Oracle 作为目前商用关系数据库代表产品之一,具有高性能、可靠性强、支持多用户并行操作和分布式处理等优点.在此基础上,从 Oracle 7.1.6 开始,通过 Oracle Spatial 模块进一步扩充和完善空间数据存储与操作功能,使其在空间数据库方面走在世界前列^[8-12].本文基于 Oracle 的空间扩展部件,通过 Google Maps API 开发抓取兴趣点,并集成录入相应的属性存储于 Oracle 中;利用存储的 SVG 符号和已有的空间数据,借助 Oracle Maps 开发 WebGIS 系统,实现 Google Maps 兴趣点数据快速抓取入库与集成发布.

1 系统功能设计

Google 地图 API 基于 JavaScript,其可将 Google 地图嵌入用户自定义的网页中,还提供了一系列地图处理(距离、面积测量)和向地图添加自定义内容的服务.在使用 API 之前,需要在 Google 上申请一个 API 密钥,将申请的密钥嵌入网页的<Script>标签中,即能调用 Google Maps API.

系统主要完成地图浏览、经纬度抓取、属性录入、SVG 符号化及 WebGIS 快速发布等功能.系统流

收稿日期: 2015-10-08

通信作者: 章欣欣(1983-),男,讲师,博士后,主要从事遥感图像处理、土地利用变化建模的研究. E-mail:zhangxinxin@xmut.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41401475, 41471366);福建省自然科学基金资助项目(2013J01165);福建省中青年教育科研项目(A类)(JA14231);厦门理工学院高层次人才科研启动项目(YKJ13022R)

程,如图 1 所示.

2 开发与实验

1) 地图初始化. 在页面中指定一个文档对象模型(DOM)节点, 创建一个 div 标签元素作为地图容器, 可指定地图的显示样式, 一般代码如下

```
<div id="map" style="width: 1348px; height: 611px;"></div>
```

在初始化地图之前, 需先以对象变量的形式创建一个 Map Option 地图对象, 其包含地图缩放级别、地图中心等元素. 代码如下

```
var mapOption = {
    zoom: 9,
    center: lanlng,
    mapTypeId: google.maps.MapTypeId.ROADMAP,
    title: "选为地址",
}
```

如果将地图的中心设为某一已知待定点, 则还需创建一个 latlng 值, 提供坐标位置信息, 将其作为构造函数的参数传递给 Map Option. 通过 google.maps.Map 对象初始化地图, 如图 2 所示. 代码如下

```
map = new google.maps.Map(document.getElementById('map'), mapOption)
```

2) 经纬度抓取. 鼠标左键点击地图上的任意一点, 返回该点的经纬度, 并显示在文本框内. 在点击地图之前, 需在页面中添加一个 Click 事件监听器, 以响应用户在地图上的点击, 并获取所点击点的经纬度, 如图 3 所示, 具体代码如下

```
google.maps.event.addListener(map, 'click', function(event) {
    lat.value = event.latLng.lat();
    lng.value = event.latLng.lng();
    addMarker(event.latLng);
});
```



图 2 地图初始化显示效果

Fig. 2 Displaying result of initialized map

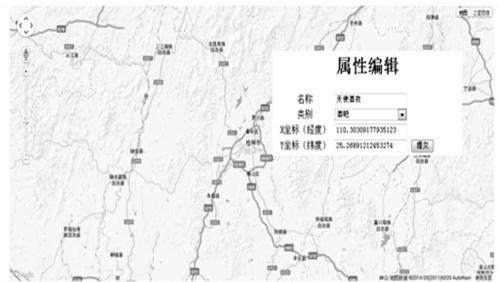


图 3 兴趣点抓取与属性编辑界面

Fig. 3 Interface of POI grabbing and properties editing

然后, 将提取抓取的点数据坐标及属性数据传递到本地服务器进行保存, Oracle 数据表的 SQL 语句如下

```
String sql = "insert into NEWPOINT values('"+
    mc+"', MDSYS.SDO_GEOMETRY(2001, 21418, MDSYS.SDO_POINT_TYPE('"+ x + "',
    '"+ y + "', null), null, null))";
```

其中, x, y 为在 Google Maps 抓取的经纬度坐标, mc 为输入的属性字符串, 提交后完成一个抓取点的空间信息和属性信息的存储.

3) SVG 地图符号绑定. 由于 Oracle Spatial 尚没有地图符号管理工具, 缺乏关联的符号使数据的内容过于单一, 难以辨认. 为了将抓取并存储在 Oracle 的坐标点按地图图式进行 Web 可视化, Oracle Spatial 提供地图符号数据表 USER_SDO_STYLES, 如表 1 所示. 采用 SVGDEVELOPER 或 Inkscape 等 SVG 图形工具绘制相应的地图符号, 保存成 *.svg 文件后, 上传到 CLOB 类型的 DEFINITION 字段中.



图 1 系统流程图

Fig. 1 Flow chart of proposed system

表 1 Oracle Spatial 符号数据表 USER_SDO_STYLES 的存储结构

Tab. 1 Storage structure of table USER_SDO_STYLES for Oracle Spatial symbol library

列名	数据类型	字段含义
NAME	VARCHAR2	样式的名字, 名称必须唯一, 不能为空.
TYPE	VARCHAR2	符号样式类型, 包括 Area, Color, Line, Marker, Text, Advanced, 不能为空.
DESCRIPTION	VARCHAR2	符号样式的文字性描述, 可以为空
DEFINITION	CLOB	符号样式的 XML 的代码, 不能为空
IMAGE	BLOB	用于表示图像、点时的图像, 可以为空

以旅游景点地图符号为例, 采用 Inkscape 绘制符号存储到 CLOB 字段的代码如下

```

<? xml version="1.0" encoding="utf-8" standalone="no"?>
<svg width="640" height="480" version="1.1" xmlns="http://www.w3.org/2000/svg"
xmlns:xlink="http://www.w3.org/1999/xlink">
<circle cx="241.5" cy="112.5" r="64.5" fill="none" stroke="#000000" stroke-opacity="1"
transform="matrix(1,0,0,1,3,5)"/>
<polygon points="305 119,206 170,211 59" fill-rule="evenodd" fill="#000000" fill-opacity="1"
stroke="#000000" transform="matrix(0.002,-0.405,0.6149999,0.003,172.742,200.953)"/>
<line x1="222" y1="141" x2="222" y2="141" stroke="none" stroke-opacity="0"/>
<line x1="228" y1="143" x2="228" y2="143" stroke="none" stroke-opacity="0"/>
<line x1="241" y1="148" x2="226" y2="143" stroke="none" stroke-opacity="0"/>
<line x1="217" y1="139" x2="217" y2="139" stroke="none" stroke-opacity="0"/>
<rect x="222" y="118" width="7" height="42" fill="#000000" stroke="#000000"
transform="matrix(1.3,0,0,1,-67.65,0)"/>
<rect x="260" y="119" width="9" height="41" fill="#000000" stroke="#000000"/>
</svg>

```

采用 Map Builder 连接数据库后, 在列表中可以显示相关的符号样式, 绑定到相应的抓取的点图层的显示效果, 如图 4 所示。

4) 集成发布. 采用文中程序调用 Google 地图框选抓取桂林市漓江流域旅游资源调查中所需要的景区、餐馆、酒店、购物、会展等 5 类数据集, 如图 5 所示. 构建兴趣点数据库, 与采用 Oracle Map Builder 导入的同样为 WGS-84 坐标系的遥感背景图层进行叠加, 基于 Oracle Mapviewer 发布数据界面, 如图 6 所示. 对比结果表明: 基于 Google API 开发抓取兴趣点到本底数据进行集成发布, 方法是可行的, 不仅可以实现兴趣点数据的快速采集, 也能充分利用已有的本地化数据资产, 为进一步集成开发提供了高效的数据源构建渠道。



图 4 SVG 符号显示效果图

Fig. 4 Displaying result of SVG symbols



图 5 原始兴趣点在 Google 地图中的显示效果

Fig. 5 Displaying result of original

POI on Google Map

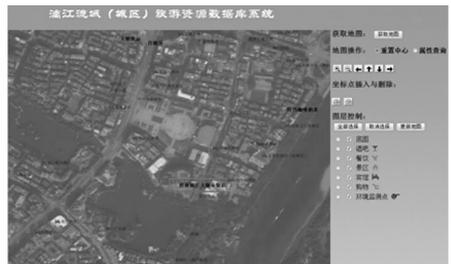


图 6 抓取的兴趣点在 Oracle Map 中的显示效果

Fig. 6 Displaying result of grabbing

POI on Oracle Map

3 结束语

通过 Google Maps API 实现对兴趣点的抓取,以 Oracle Spatial 点对象字段实现存储,可与其对应的属性和地图符号实现一体化存储,借助 Oracle Maps 开发 WebGIS 系统,实现 Google Maps 兴趣点数据快速抓取入库,及其与已有的矢量和栅格数据的集成发布.帮助应用开发者快速构建空间数据库、集成发布,大大降低开发周期.结合已有的桂林市漓江流域(城区)旅游资源调查实验数据,验证了这一技术方案的可行性与优越性.

参考文献:

- [1] 骆炎民. 泉州旅游交通 WebGIS 的设计与实现[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2007, 28(1): 23-26.
- [2] 王建敏, 黄旭东, 于欢, 等. 遥感制图技术的现状与趋势探讨[J]. 矿山测量, 2007, 35(1): 38-41.
- [3] 杨立法. 基于 Google Maps API V3 的地理数据采集技术[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(5): 791-798.
- [4] 彭璇, 吴肖. Google Map API 在网络地图服务中的应用[J]. 测绘信息与工程, 2010, 35(1): 25-27.
- [5] 游兰, 彭庆喜. 基于 Google Maps API 的地图解析研究与实现[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2010, 32(2): 161-164.
- [6] 戴兵. 基于 Google Maps API 的校园地图设计[J]. 电脑与技术, 2008, 15(2): 184-185.
- [7] 崔金红, 王旭. Google 地图算法研究及实现[J]. 计算机科学, 2007, 34(11): 193-195.
- [8] 孙晓茹, 赵军. Google Maps API 在 WEBGIS 中的应用[J]. 微计算机信息, 2006, 22(7): 224-226.
- [9] 巫细波, 胡伟平. Google Maps 运行机制以及应用研究[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2009, 54(2): 106-110.
- [10] 范新南, 陈鹏. COM 与 WEB 技术在地理信息系统中的应用[J]. 微计算机信息, 2003, 19(2): 75-77.
- [11] 何原荣. 矿区环境高分辨率遥感监测及信息资源开发利用[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 77-84.
- [12] RAVIKANT K, ALBERT G, EURO B. Oracle Spatial 空间信息管理: Oracle Database 11g[M]. 管会生, 译. 北京: 清华大学出版社, 2009: 26-42.

WebGIS for Google Maps Point of Interest Grabbing and Publishing Based on Oracle Spatial Database

ZHANG Xinxin, HE Yuanrong

(College of Computer and Information Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

Abstract: The point of interest (POI) grabbing is realized by using Google Map API, then data is stored in term of point type provided by Oracle Spatial. With the aid of Oracle Maps, a WebGIS system is subsequently developed for the purpose of fast POI grabbing and integrative storage of POI data, as well as its corresponding properties and SVG symbols. Application has been carried out for the Lijiang River Vally tourism resources in Guilin city. The results show that the system can help developers to construct Spatial database very quickly, which combines the location of POI, properties, as well as the displaying symbols. Additionally, it is effective to shorten development cycle and reduce the system cost.

Keywords: Google Maps API; point of interest; Oracle Spatial; Oracle Map

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 吴逢铁)

采用遗传算法的网络优化技术

李国庆, 尹洪胜

(中国矿业大学 信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 针对树型网络的拓扑结构和数学模型,从个体编码、种群初始化、种群进化、适应度函数等方面构建基于遗传算法的网络优化方法.实验结果表明:所构建的方法进一步修正了适应度函数,增强了弱势个体被选择的概率,避免遗传算法优化过程的过早收敛问题,缩短了执行时间,取得了较佳的网络优化结果.

关键词: 树型网络;网络优化;遗传算法;适应度函数

中图分类号: TP 312; TP 393

文献标志码: A

网络优化是诸多领域的关键技术,如通信网络、电力网络、交通网络等^[1].无论是何种类型的网络,都会涉及到网络组建的成本最小化、网络节点连接代价最小化的问题,而这些问题又与网络的拓扑结构密切相关^[2].在各领域的网络结构设计中,设计人员的经验起到至关重要的作用^[3].但依托于人工手段实现的网络优化,优化效率和结果都难以达到最佳.在这种背景下,依托于计算机辅助手段的网络优化技术开始出现.在计算机辅助优化框架下,网络优化问题映射为全局优化的复杂性求解问题^[4].很多全局优化算法都被引入到网络优化中,如禁忌搜索法、神经网络法、蚁群算法、粒子群算法等^[5-6].赵云丰等^[7]在人工免疫算法的基础上,构建了一种新的禁忌搜索机制,通过特赦准则和高斯变异实现网络优化,但该算法复杂度较高.李柞泳等^[8]针对 BP 网络的实际问题,根据训练误差和检验误差更新信息素浓度,但该方法只针对 BP 网络,具有一定的局限性.乔俊飞等^[9]针对排污网络的具体问题,设计新的隶属度函数,构建了基于粒子群算法的网络智能优化系统.樊富有等^[10]为了实现无线传感器网络的优化,设计了一种基于优化量子旋转门的遗传算法.然而,遗传算法在网络优化时,容易过早收敛.从已有的研究成果看,遗传算法在网络优化问题中已有比较成功的应用^[11],但也存在一些问题.因此,本文在前人研究成果的基础上,借助遗传算法并重点解决其过早收敛问题,以期实现对树状网络的拓扑优化.

1 树型网络及其数学模型

典型的网络结构有星型拓扑结构、环型拓扑结构、总线型拓扑结构、树型拓扑结构等.树型拓扑结构从总线型拓扑结构演变而来,不仅易于终端扩展,也有利于故障隔离.一般性的树型网络,如图 1 所示.

对树型网络的优化就是实现各个节点的更合理连通,使网络投资更小、网络连接代价更低.针对图 1 的网络结构,假设其中存在 n 个节点 P , m 个连接 L ,则其网络的拓扑结构可以描述为 $T(P,L)$,并且具备属性为

$$|P| = n, \quad (1)$$

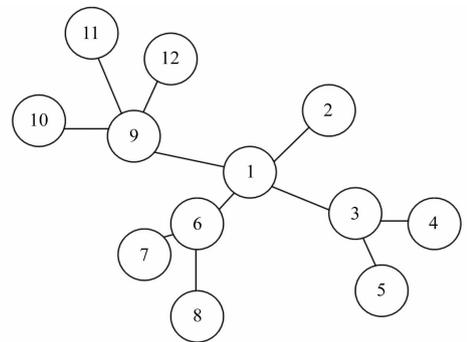


图 1 树型网络拓扑结构

Fig. 1 Tree network topology structure

$$\max |L| = \frac{n(n-1)}{2}. \quad (2)$$

式(1),(2)分别描述了节点集中的节点数量和各节点的最大可能连接.

对于节点 i 和节点 j , 判断它们之间是否存在连接的表达式为

$$\left. \begin{aligned} l_{i,j} &= 1, && 2 \text{ 个节点之间存在连接;} \\ l_{i,j} &= 0, && 2 \text{ 个节点之间不存在连接.} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式(3)中: $l_{i,j}$ 为2个节点之间的连接状况.

如果用 $\{l_{i,j}\}$ 表示一个树型网络的所有连接集合, 用 $\{c_{i,j}\}$ 表示所有连接对应的连接代价集合, 则树型网络的优化问题就变成是对 $\{c_{i,j}\}$ 集合的优化问题, 对应的数学模型为

$$\min \mathcal{R}(l) = \sum_i \sum_j c_{i,j} l_{i,j}. \quad (4)$$

式(4)中: $\mathcal{R}(l)$ 为网络连接的优化函数.

2 基于遗传算法的网络优化方法的构建

首先, 构建一个一般性的树型网络, 设定网络存在 n 个节点, 网络节点的集合用 $\{n_i\}$ 表示, 网络的最小树连接要存在 $(n-1)$ 条边. 同时, 从网络的一般属性特征看, 网络还必须满足: 每个节点都至少与其他一个节点连接; 整个网络是连通的, 不存在被孤立的节点; 每个节点最多只能和 \hat{n} 个其他节点相连.

遗传算法的执行环节: 个体编码、种群初始化、种群进化(选择、交叉、变异)、计算适应度函数.

假设网络(图1)节点为12个, 即 $n=12$; 同时, 每个节点和其他节点的最大连接数目不超过4个. 根据图1的具体结构, 存在4个分支结构. 为了从数学意义上描述当前连接状态, 为种群的初始状态构建一个连接编码集合, 即

$$\left[\begin{array}{cccc} n_1 - n_2 & & & \\ n_1 - n_3 & n_3 - n_4 & n_3 - n_5 & \\ n_1 - n_6 & n_6 - n_7 & n_6 - n_8 & \\ n_1 - n_9 & n_9 - n_{10} & n_9 - n_{11} & n_9 - n_{12} \end{array} \right]. \quad (5)$$

之后, 以随机生成的方式, 按照一定规模对网络各节点连接的初始状态进行初始化. 以这些个体状态作为初始种群, 按照遗传算法的典型操作执行网络优化. 其中, 交叉操作是以初始种群中的个体作为父代繁殖子代. 繁殖过程中, 个体被选择的概率, 根据适应度函数计算, 即

$$\Phi(k, n) = \frac{1}{\sum_i \sum_j c_{i,j}^k l_{i,j}^k}. \quad (6)$$

式(6)中: k 为的是种群代数. 交叉操作的结果形成新的网络连接, 如果满足预先设定的各种约束条件, 则保留; 如果不满足, 则选择另外的双亲执行新的交叉操作生成.

变异操作, 是对个体状态的某个位进行随机变异, 也是生成新个体的重要方法. 每一轮遗传操作处理后, 那些最优的个体会被保留, 依据式(4)进行优化操作.

按照上述过程执行网络优化时, 遗传算法存在早熟或局部收敛的问题, 导致无法形成最优优化结果或非全局最优结果. 其原因在于适应度函数的设置, 使部分候选个体被选择的概率过小, 而早早地被淘汰. 为此, 对适应度函数进行修改, 增强弱势个体被选择的概率^[12], 即

$$\Phi'(k, n) = \frac{\sum_i \sum_j c_{i,j}^k l_{i,j}^k}{\sum_k \sum_i \sum_j c_{i,j}^k l_{i,j}^k}. \quad (7)$$

至此, 针对树型网络模型构造了基于遗传算法的优化过程, 并对早熟和局部收敛问题进行了抑制.

3 实验结果与分析

实验所用的计算机硬件配置为酷睿双核主频 2.0 GHz 的 CPU, 8 G 内存; 软件配置为 Windows XP 操作系统、Visual C++ 程序编译平台.

网络模型约束条件为 12 个网络节点,每个节点和其他节点最多不超过 4 个连接.遗传算法的群体规模最大为 60,遗传迭代的代数为 200.

根据文中方法获得的网络优化结果,如图 2 所示.图 2 中:左上位置是“最优网络连接视觉效果”显示区,用于显示最佳的网络连接拓扑结构;右上位置是“参数设置区”,包括节点个数、节点负载、遗传代数的设置;右下位置是“优化排名”显示区,用于将排名前 5 位的最小代价显示出来,排名第一的最小代价,就对应视觉效果显示区的网络连接拓扑结构;左下位置是 3 个按钮,分别链接到 3 种网络优化算法(禁忌搜索法、传统遗传法、文中算法).

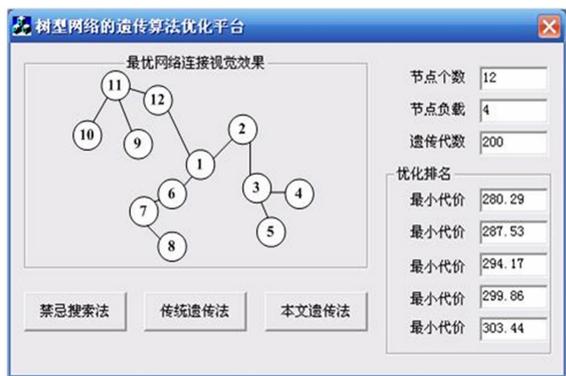


图 2 优化结果显示界面

Fig. 2 Display interface of optimized result

根据当前的优化结果可以看出:在文中算法的优化后,整个网络连接的最低代价为 280.29,网络连接的拓扑结构和初始状态比,从 4 个分支更新到 3 个分支.第一个分支,根节点 1 到中间节点 2,再从中间节点 2 到中间节点 3,最后从中间节点 3 到叶子节点 4 和叶子节点 5;第二个分支,根节点 1 到中间节点 6,再从中间节点 6 到中间节点 7,最后从中间节点 7 到叶子节点 8;第三个分支,根节点 1 到中间节点 12,再从中间节点 12 到中间节点 11,最后从中间节点 11 到叶子节点 9 和叶子节点 10.

上述网络连接结果的数学描述为

$$\begin{bmatrix} n_1 - n_2 & n_2 - n_3 & n_3 - n_4 & n_3 - n_5 \\ n_1 - n_6 & n_6 - n_7 & n_7 - n_8 & \\ n_1 - n_{12} & n_{12} - n_{11} & n_{11} - n_9 & n_{11} - n_{10} \end{bmatrix}.$$

比较禁忌搜索法、传统遗传法、文中算法 3 种方法形成的优化结果.3 种方法优化出的网络最小代价排名前 10 位的结果,如表 1 所示.

从表 1 可知:禁忌搜索法获得的网络最小代价都比较高,其中排在第 10 位的最小代价为 527.77,排在第 1 位的最小代价为 333.85,从最小代价的绝对量上看,禁忌搜索法都劣于遗传算法;传统遗传算法获得的网络最小代价,排在第 10 位的为 411.36,排在第 1 位的为 308.02,这种方法在最小代价为 311.64 之后,趋于收敛状态,之后的最小代价与此值相差不大,存在过早收敛的问题;文中算法排在第 10 位的最小代价为 408.27,排在第 1 位的最小代价为 280.29,同时,没有出现过早收敛的问题,可以获得更小的网络连接代价.

进一步对比禁忌搜索法、传统遗传法、文中算法 3 种方法的执行时间^[13],如图 3 所示.图 3 中: t 为时间; n 为迭代次数.由图 3 可知:在迭代次数较低时,禁忌搜索法执行时间较快,随着迭代次数的增加,执行时间增加非常快.文中算法和传统遗传算法相比,执行时间相差不大,但文中算法的执行时间增长趋势在放缓,这也体现出文中算法在执行时间上的优势^[14].

表 1 3 种方法的优化结果

Tab. 1 Optimization results of the three methods

排名	禁忌搜索法	传统遗传法	文中算法
最小代价 1	333.85	308.02	280.29
最小代价 2	352.17	309.27	287.53
最小代价 3	371.39	310.22	294.17
最小代价 4	380.88	310.53	299.86
最小代价 5	396.24	311.64	303.44
最小代价 6	405.15	342.39	322.51
最小代价 7	421.82	370.18	330.78
最小代价 8	444.69	381.45	356.83
最小代价 9	480.33	392.26	378.99
最小代价 10	527.77	411.36	408.27

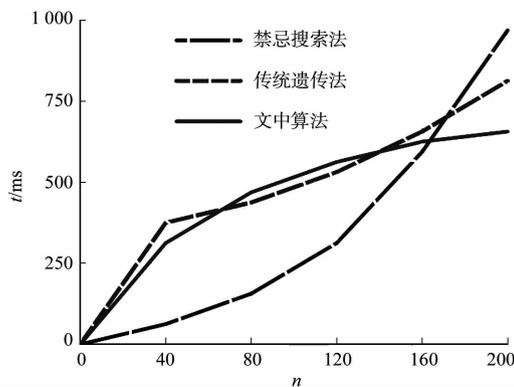


图 3 3 种方法的执行时间

Fig. 3 Execution time of the three methods

4 结束语

以树型网络的优化为切入点,对其拓扑结构和数学模型进行研究.基于此,从个体编码、种群初始化、种群进化、适应度函数计算等方面,构建了一种可以优化树型网络的遗传算法.为了避免遗传优化过程的过早收敛,对适应度函数进行了改进,可以增强弱势个体在遗传操作时被选择的概率.实验结果表明:与禁忌搜索法和传统遗传法相比,文中算法可以获得理想的网络优化结果,执行时间随着迭代次数的增加,增长趋势也在放缓.

参考文献:

- [1] 邓亮,赵进,王新.基于遗传算法的网络编码优化[J].软件学报,2009,20(8):2269-2279.
- [2] MICHAEL B,RICHARD M,SLYKE V. Backtracking algorithms for network reliability analysis[J]. Annals of Discrete Mathematics,2012,1:221-235.
- [3] 吴琼,郑士源,朱太球.基于列生成算法的集装箱班轮运输网络优化[J].上海海事大学学报,2014,35(1):29-35.
- [4] GREINER D,WINTER G,EMPERADOR J M. Optimising frame structures by different strategies of genetic algorithms[J]. Finite Elements in Analysis and Design,2001,37(5):381-442.
- [5] AMORETTI M,GRAZIOLI A,ZANICHELLI F. Towards a formal approach to mobile cloud computing[C]// Euro-micro International Conference on Parallel, Distributed, and Network-Based Processing. Torino: IEEE Press, 2014:743-750.
- [6] BILGAIYAN S,SAGNIKA S,DAS M. A multi-objective cat swarm optimization algorithm for workflow scheduling in cloud computing environment[J]. Advances in Intelligent Systems and Computing,2015,308(1):73-84.
- [7] 赵云丰,付冬梅,尹怡欣,等.一种改进的人工免疫网络优化算法及其性能分析[J].自然科学进展,2009,19(4):434-445.
- [8] 李柞泳,汪嘉杨,郭淳,等.基于蚁群算法的BP网络优化算法[J].计算机应用,2010,30(6):1513-1517.
- [9] 乔俊飞,逢泽芳,韩红桂.基于改进粒子群算法的污水处理过程神经网络优化控制[J].智能系统学报,2012,7(5):429-437.
- [10] 樊富有,杨国武,乐千恺,等.基于量子遗传算法的无线视频传感网络优化覆盖算法[J].通信学报,2015,36(6):22-27.
- [11] 杨四海. TSP的等价解及其对免疫遗传算法的干扰[J].华侨大学学报(自然科学版),2007,28(1):27-29.
- [12] 庄健,杨清宇,杜海峰,等.一种高效的复杂系统遗传算法[J].软件学报,2010,21(11):2790-2801.
- [13] 都成娟,李和成.多下层分式双层规划问题的改进遗传算法[J].计算机应用,2012,32(11):2998-3001.
- [14] 黄江波,付志红.基于自适应遗传算法函数优化与仿真[J].计算机仿真,2011,28(5):237-240.

Network Optimization Technique Using Genetic Algorithm

LI Guoqing, YIN Hongsheng

(School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Based on genetic algorithm, a network optimization method is proposed according to the topology and mathematical model of tree-shape network from the aspects of individual encoding, population initialization, population evolution, fitness function and so on. Experimental results show that the proposed method can further modify the fitness function, enhance the probability of the weak individuals' being chosen, avoid the premature convergence of genetic algorithm, and reduce the execution time. The results show good networking optimization.

Keywords: tree-shape network; network optimization; genetic algorithm; fitness function

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:吴逢铁)

采用 GERT 算法的电力抢修车 应急运输路径选择

周学鼎, 郑星新

(国家电网公司 福建古田供电有限公司, 福建 宁德 352200)

摘要: 研究电力抢修车应急运输路径选择问题. 根据图形评审技术(GERT)构建某突发灾害地区紧急转运配送过程的随机网络模型, 对比电力抢修车到达不同灾区的成功配送概率、风险概率和紧急配送生命周期望, 从而得出模型的缺陷和改进方法. 结果表明: 该模型方法具有可行性和适用性.

关键词: 路径选择; 图形评审技术; 电力抢修车; 电力系统; 灾害

中图分类号: TM 732; TM 743

文献标志码: A

近年来, 由于人类活动及地球本身的运动导致的灾害频繁发生, 电力系统遭受破坏的次数逐年增加^[1-2], 破坏程度和后果也越趋严重, 致使救援队伍的抢救工作难以顺利展开. 在灾害发生时, 电力抢修车应急运输必须保证抢修物资和抢修人员在最短的时间内以最大的效率到达受灾点, 以便及时抢修电力系统. 由于灾区的交通系统遭到严重破坏, 但又必须要求进入灾区的路径具有可靠性、路段具有连通性. 因此, 进入灾区的路径的可靠连通性和高效性成为决策人员在选择电力抢修车应急运输路径的关键要素. 现有的电力抢修车应急物流运输路径的选择研究主要集中在如何使路径达到最短化, 却忽视了在时间上做出进一步的优化^[3-5]. 在解决随机网络问题上, 学者们常用的方法是图解评审技术(graph evaluation and review technique, GERT). 该方法融合了各种理论和技术, 如网络理论、模拟技术等, 并成功地运用于解决不同的统筹问题, 如排队论、质量控制、运输路径等^[6]. 本文建立了电力抢修物资配送中心向多个受灾点紧急配送的 GERT 模型, 并寻找最优路径, 以提高应急运输的效率.

1 GERT 算法分析

在 GERT 网络中, 设 $P_{i,j}$ 为节点 i 至节点 j 的支线实现概率, 且完成该支线所需要的时间概率密度为 $f(t_{i,j})$. 对于随机变量时间 $t_{i,j}$ 和任意实数 s , 其中, $t_{i,j}$ 为节点 i 至节点 j 所需要的时间, 则随机变量的矩母函数定义^[7] 为

$$M_{i,j}(s) = \begin{cases} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(st_{i,j}) f(t_{i,j}) dt_{i,j}, & t_{i,j} \text{ 为连续随机变量,} \\ \sum \exp(st_{i,j}) p(t_{i,j}), & t_{i,j} \text{ 为离散随机变量.} \end{cases}$$

对于一个每项活动都有两项参数 $P_{i,j}$ 和 $t_{i,j}$ 的网络 G , 可以用一个与原网络结构相同, 但每项活动上只有一个传递函数 $W_{i,j}(s)$ 的网络 G 代替, 其公式为

$$W_{i,j}(s) = P_{i,j} M_{i,j}(s).$$

式中: $W_{i,j}(s)$ 为节点 i 到节点 j 的传递函数. 对具有 $W_{i,j}(s)$ 函数的网络, 可先求解其等效函数 $W_{E(s)}$, 根据梅森公式^[10] 可知

收稿日期: 2015-10-08

通信作者: 周学鼎(1970-), 男, 高级经济师, 主要从事电网经营、规划、建设、电力服务管理的研究. E-mail: 827137766@qq.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41371205)

$$W_{E(s)} = T_{i,j} = \left(\sum_{k=1}^m P_k \Delta_k \right) / \Delta.$$

其中: $T_{i,j}$ 为流线图中从节点 i 到节点 j 的等效传递系数; P_k 为流线图中从节点 i 到节点 j 的第 k 条线路的值, 等于构成该线路的枝线路的传递系数乘积; m 为节点 i 到节点 j 的线路条数; Δ_k 为流线图中不与第 k 条线路接触的回路特征值, $\Delta_k = 1 - \sum$ 不与第 k 条线路接触的奇数阶回路的值 + \sum 不与第 k 条线路接触的偶数阶回路的值; Δ 为流线图中反映回路组成的特征值, $\Delta = 1 - \sum$ 两节点间奇数阶回路的值 + \sum 两节点间奇偶数阶回路的值.

根据 GERT 网络原理, 对于任意 GERT 网络, 可以先将各项活动定义为其 W 函数; 然后, 运用流线图理论求得网络的等效函数 $W_{E(s)}$; 最后, 利用矩母函数的基本性质, 就可以得到网络的所有参数^[8]. 根据文献[9, 11-15]可以用下面的公式计算紧急配送过程中成功的概率(P_E)、风险概率($P_V = 1 - P_E$)、紧急配送的生命周期的期望值 $E[X]$ 及方差 $V[X]$, 即

$$\begin{cases} P_E = W_{E(s)} |_{s=0}, & P_V = 1 - P_E, \\ E[X] = \frac{\partial}{\partial s} [M_{E(s)}] |_{s=0} = \frac{\partial}{\partial s} \left[\frac{W_{E(s)}}{W_{E(0)}} \right] |_{s=0}, \\ E[X^2] = \frac{\partial^2}{\partial s^2} [M_{E(s)}] |_{s=0} = \frac{\partial^2}{\partial s^2} \left[\frac{W_{E(s)}}{W_{E(0)}} \right] |_{s=0}, \\ V[X] = E[X^2] - (E[X])^2 = \frac{\partial^2}{\partial s^2} \left[\frac{W_{E(s)}}{W_{E(0)}} \right] |_{s=0} - \left\{ \frac{\partial}{\partial s} \left[\frac{W_{E(s)}}{W_{E(0)}} \right] |_{s=0} \right\}^2. \end{cases}$$

2 算例分析

以我国某地区发生灾害为例, 构建出紧急转运配送过程的 GERT 随机网络模型图, 如图 1 所示. 图 1 的各项活动的含义如表 1 所示, 各项活动的参数如表 2 所示.

从图 1 可以看出: 由该地区电力抢修物资配送中心 F 向 3, 6, 7 三个受灾点进行电力抢修车应急配送, 途经 1, 2, 4, 5 四个节点, 电力抢修车应急物资的运送可由 1, 2, 4, 5 四个节点进行联动配送, 保证应急抢修物资和抢修人员在规定的时间内能送达指定的受灾点. 当已经电力抢修车经过节点 1 和 7 时, 由于各种原因导致应急抢

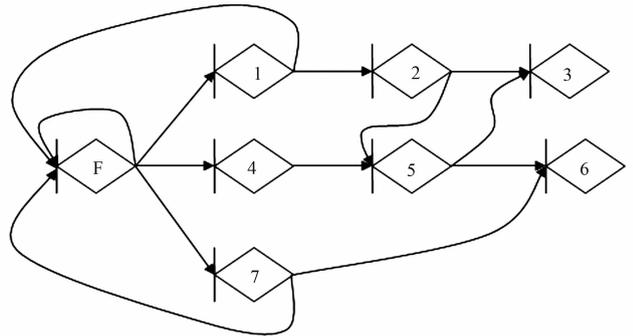


图 1 配送过程的 GERT 随机网络模型图
Fig. 1 GERT model of emergency delivery process

表 1 配送过程的 GERT 随机网络模型的各项活动含义

Tab. 1 Definitions of GERT model in emergency delivery process

活动	活动内容说明
(F, F)	抢修物资在配送中心 F 处进行分拣和装车
(F, 1)	抢修物资从配送中心 F 运往节点 1
(1, F)	节点 1 处道路坍塌物资被迫运回配送中心 F
(1, 2)	抢修物资向 3 区紧急配送的初始路线
(2, 3)	应急抢修物资成功送到 3 区
(2, 5)	电力抢修车通往 3 地区紧急配送的道路交通拥挤
(5, 3)	电力抢修车向 3 区紧急配送遇上交通拥挤后经结点 5 成功到达 3 区
(F, 4)	电力抢修车从配送中心 F 开往节点 4
(4, 5)	电力抢修车向 6 区紧急配送的初始路线
(5, 6)	电力抢修车成功送到 6 区
(F, 7)	电力抢修车从配送中心 F 运往节点 7
(7, F)	节点 7 处道路坍塌物资被迫运回配送中心 F
(7, 6)	电力抢修车成功到达 6 区

修物资和抢修人员不得回到物资配送中心 F 重新进行配送; 当节点 2 发生路面坍塌或其他突发情况时, 可经节点 5 进行转运, 到达受灾点 3.

表 2 配送过程的 GERT 随机网络模型中各项活动参数

Tab. 2 Parameters of GERT model in emergency delivery process

程序代码	传递函数	实现概率	时间	矩母函数	程序代码	传递函数	实现概率	时间	矩母函数
(F,F)	W_1	0.2	1	e^s	(F,4)	W_8	1.0	1	e^s
(F,1)	W_2	0.8	1	e^s	(4,5)	W_9	0.3	1	e^s
(1,F)	W_3	0.5	1	e^s	(5,6)	W_{10}	0.8	1	e^s
(1,2)	W_4	0.6	1	e^s	(F,7)	W_{11}	1.0	1	e^s
(2,3)	W_5	0.5	2	e^{2s}	(7,F)	W_{12}	0.4	0.5	$e^{0.5s}$
(2,5)	W_6	1.0	1	e^s	(7,6)	W_{13}	0.6	2	e^{2s}
(5,3)	W_7	0.4	2	e^{2s}					

该网络中有 3 个一阶环(W_1), (W_2, W_3), (W_{11}, W_{12}), 由电力抢修配送中心 F 到灾区 3 有两条路线: F-1-2-3 和 F-1-2-5-3; 而由电力抢修配送中心 F 到灾区 6 有两条路线: F-4-5-6 和 F-7-6.

1) 电力抢修配送中心 F 到灾区 3 的 GERT 特征值计算公式为

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{F-3} &= 1 - W_1 - W_2 W_3, \\ P_1 &= W_2 W_4 W_5, \quad P_2 = W_2 W_4 W_6 W_7, \\ \Delta_1 &= 1 - W_{11} W_{12}, \quad \Delta_2 = 1 - W_{11} W_{12}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)中: Δ_{F-3} 为电力抢修配送中心 F 到灾区 3 的 GERT 线路的总特征值; P_1, P_2 为各支线上的传递函数乘积值; Δ_1, Δ_2 为各分支的特征值.

将式(1)代入梅尔森公式, 可得

$$T_{F-3} = W_{E(s)} = \frac{\sum_{k=1}^2 p_k \Delta_k}{\Delta_{F-3}} = \frac{(1 - W_{11} W_{12})(W_2 W_4 W_5 + W_2 W_4 W_6 W_7)}{(1 - W_1 - W_2 W_3)} = \frac{(1 - 0.4e^{1.5s})(0.8e^s \times 0.6e^s \times 0.5e^{2s} + 0.8e^s \times 0.6e^s \times e^s \times 0.4e^{2s})}{1 - 0.2e^s - 0.8e^s \times 0.5e^s} = \frac{(1 - 0.4e^{1.5s})0.24e^{4s} + 0.32e^{5s}}{1 - 0.2e^s - 0.4e^{2s}},$$

$$P_E = W_{E(s)} \Big|_{s=0} = \frac{(1 - 0.4)(0.24 + 0.3)}{1 - 0.2 - 0.4} = 0.84,$$

$$P_V = 1 - P_E = 1 - 0.84 = 0.16,$$

$$E[X] = \frac{\partial}{\partial s} [M_{E(s)}] \Big|_{s=0} = \frac{\partial}{\partial s} \left[\frac{W_{E(s)}}{W_{E(0)}} \right] \Big|_{s=0} = \left[\frac{(0.96e^{4s} + 1.6e^{5s} - 0.528e^{4.5s} - 0.832e^{5.5s})(1 - 0.2e^s - 0.4e^{2s}) + (0.2e^s + 0.8e^{2s})(0.24e^{4s} + 0.32e^{5s} - 0.096e^{5.5s} - 0.128e^{6.5s})}{0.84 \times (1 - 0.2e^s - 0.4e^{2s})^2} \right] \Big|_{s=2} = \left[\frac{(0.96 + 1.6 - 0.528 - 0.832)(1 - 0.2 - 0.4) \times (0.2 + 0.8)(0.24 + 0.32 - 0.096 - 0.128)}{0.84 \times (1 - 0.2 - 0.4)^2} \right] = 2.43,$$

$$E[X^2] = \frac{\partial^2}{\partial s^2} [M_{E(s)}] \Big|_{s=0} = \frac{\partial^2}{\partial s^2} \left[\frac{W_{E(s)}}{W_{E(0)}} \right] \Big|_{s=0} = \frac{\partial}{\partial s} \left[\frac{(0.96e^{4s} + 1.6e^{5s} - 0.528e^{4.5s} - 0.832e^{5.5s})(1 - 0.2e^s - 0.4e^{2s}) + (0.2e^s + 0.8e^{2s})(0.24e^{4s} + 0.32e^{5s} - 0.096e^{5.5s} - 0.128e^{6.5s})}{0.84 \times (1 - 0.2e^s - 0.4e^{2s})^2} \right] \Big|_{s=2} = \left[\frac{(3.84 + 7.28 - 2.688 - 2.688 - 2.904 - 5.496 - 4 - 2.064 + 1.9584) \times (0.4^2 + 2 \times (0.2 + 0.8) \times 0.4 \times 0.76)}{0.84 \times (1 - 0.2 - 0.4)^4} \right] = \frac{0.21856 + 0.608}{0.84 \times 0.4^4} = 38.44$$

$$V[X] = E[X^2] - E[X]^2 = \frac{\partial^2}{\partial s^2} \left[\frac{W_{E(s)}}{W_{E(0)}} \right] \Big|_{s=0} - \left\{ \frac{\partial}{\partial s} \left[\frac{W_{E(s)}}{W_{E(0)}} \right] \Big|_{s=0} \right\}^2 = 38.44 - 2.43^2 = 32.54.$$

由以上数据可知,电力抢修配送中心 F 经两条线路到达灾区 3 的风险概率为 16%,紧急配送的生命周期为 2.43 h.由此可见,理论上从这条线路上电力抢修车到达灾区 3 的成功概率还是较大的,但是仍存在着一定的风险.

2) 电力抢修配送中心 F 到灾区 6 的 GERT 特征值计算公式为

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{F-6} &= 1 - W_{11}W_{12}, \\ P_1 &= W_8W_9W_{10}, \quad P_2 = W_{11}W_{13}, \\ \Delta_1 &= 1 - W_1 - W_2W_3, \quad \Delta_2 = 1 - W_1 - W_2W_3. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

将式(2)代入梅尔森公式,可得

$$T_{F-6} = W_{E(s)} = \frac{\sum_{k=1}^2 p_k \Delta_k}{\Delta_{F-6}} = \frac{(1 - W_1W_2W_3)(W_8W_9W_{10} + W_{11}W_{13})}{1 - W_{11}W_{12}} =$$

$$\frac{(1 - 0.2e^s - 0.4e^{2s})(e^s \times 0.3e^s \times 0.8e^s + e^s \times 0.6e^{2s})}{1 - e^s \times 0.4e^{0.5s}} =$$

$$\frac{(1 - 0.2e^s - 0.4e^{2s})(0.24e^{3s} + 0.6e^{3s})}{1 - 0.4e^{1.5s}},$$

$$P_E = W_{E(s)} \Big|_{s=0} = \frac{(1 - 0.2 - 0.4)(0.24 + 0.6)}{1 - 0.4} = 0.54,$$

$$P_V = 1 - P_E = 1 - 0.56 = 0.44,$$

$$E[X] = \frac{\partial}{\partial s} [M_{E(s)}] \Big|_{s=0} = \frac{\partial}{\partial s} \left[\frac{W_{E(s)}}{W_{E(0)}} \right] \Big|_{s=0} =$$

$$\left[\frac{(0.52e^{3s} + 0.672e^{4s} - 1.68e^{5s})(1 - 0.4e^{1.5s}) + 0.6e^{1.5s} \times (0.84e^{3s} + 0.168e^{4s} - 0.336e^{5s})}{0.56 \times (1 - 0.4e^{1.5s})^2} \right] \Big|_{s=2} =$$

$$\frac{(0.52 - 0.672 - 1.68)(1 - 0.4) + 0.6 \times (0.84 + 0.168 - 336)}{0.56 \times (1 - 0.4)^2} = 1.5,$$

$$E[X^2] = \frac{\partial^2}{\partial s^2} [M_{E(s)}] \Big|_{s=0} = \frac{\partial^2}{\partial s^2} \left[\frac{W_{E(s)}}{W_{E(0)}} \right] \Big|_{s=0} =$$

$$\frac{\partial}{\partial s} \left[\frac{(0.96e^{4s} + 1.456e^{5s} - 0.448e^{6s} - 0.384e^{7s} - 0.528e^{5.5s} + 0.846e^{6.5s} + 0.2752e^{7.5s} + 0.2304e^{8.5s})}{0.56 \times (1 - 0.4e^{1.5s})^2} \right] \Big|_{s=2} =$$

$$\frac{0.652 - 0.2177}{0.56 \times 0.6^4} = 5.98,$$

$$V[X] = E[X^2] - E[X]^2 = \frac{\partial^2}{\partial s^2} \left[\frac{W_{E(s)}}{W_{E(0)}} \right] \Big|_{s=0} - \left\{ \frac{\partial}{\partial s} \left[\frac{W_{E(s)}}{W_{E(0)}} \right] \Big|_{s=0} \right\}^2 = 5.98 - 1.5^2 = 3.73.$$

由以上数据可知,电力抢修配送中心 F 经两条线路到达灾区 6 的风险概率为 44%,紧急配送的生命周期为 1.5 h.可见,理论上从这条线路上电力抢修车到达灾区 6 的成功概率较之到灾区 3 的成功概率要低很多.所以,必须要在这一条线路上做更多的准备工作,以确保使得风险度能降低.

分析可知:电力抢修配送中心 F 向受灾点 3 进行紧急电力抢修的成功率最高,时间在预计之内且波动不大,应首先选择从电力抢修配送中心 F 向受灾点 3 进行紧急抢修配送;同时,也要保证抢修物资储备库的紧急库存充足以备进行灾区 6 的配送.在紧急抢修配送运输中,要考虑到在途中可能遇见的特殊情况,也要避免交通堵塞等情况,以便能在最短时间内将电力抢修物资和抢修人员送达需求地.

3 结束语

根据 GERT 原理构建了电力抢修物资配送中心向多个受灾点紧急配送的 GERT 随机网络模型,结合算例研究了成功配送至目的地的期望和概率,从中得出模型中的缺陷及改进方法. GERT 随机网

络同其他传统的进度管理方法相比拥有更合理的部分,它考虑了反馈回环问题,但是它也有缺点,如在实际的交通网络中,电力抢修车在两个需求地之间行驶的时间往往是一个不确定的随机量,造成这种不确定性的原因有交通堵塞、道路维修、车辆自身故障等。可以预见,信息时代的发展将进一步推动 GERT 的广泛应用,对 GERT 的研究也将更加深入广泛地开展,这对于 GERT 随机网络模型能在电力抢修系统中具有重要的理论与现实意义。

参考文献:

- [1] 邹其嘉,孙振凯,毛国敏. 电力系统地震易损性研究[J]. 自然灾害学报,1994,3(2):81-90.
- [2] 谢强,李杰. 电力系统自然灾害的现状与对策[J]. 自然灾害学报,2006,15(4):126-131.
- [3] HWANG H S. A Food distribution model for famine relief[J]. Computers and Industrial Engineering,1999,37(1/2):335-338.
- [4] YI W,KUMAR A. Ant colony optimization for disaster relief operations[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review,2007,43(6):660-672.
- [5] YI W,ÖZDAMAR L. A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities[J]. European Journal of Operational Research,2007,179(3):1177-1193.
- [6] 郭建飞,乔立红. 产品开发过程的图示评审技术建模方法[J]. 计算机集成制造系统,2004,10(7):758-763.
- [7] 俞高明. GERT 在评审砼现场供应方案上的运用[J]. 安徽大学学报(自然科学版),2000,24(2):79-83.
- [8] 郑爱萍,金福江. 多产品运输问题的建模及优化算法设计[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2013,03:281-285.
- [9] 方志耕,杨保华,陆志鹏,等. 基于 Bayes 推理的灾害演化 GERT 网络模型研究[J]. 中国管理科学,2009,17(2):102-107.
- [10] 张延锋,司春林. 基于图示评审技术的风险投资组合模型[J]. 系统管理学报,2007,16(3):298-301.
- [11] 施骞,龚婷. 基于 GERTs 的随机网络计划关键链识别方法[J]. 系统工程理论与实践,2012,32(7):1531-1536.
- [12] 陶良彦,刘思峰,方志耕,等. 基于多层次 GERT 的复杂产品研制进度规划“超冲突均衡”博弈模型[J]. 控制与决策,2014,29(11):2002-2010.
- [13] 杨保华,方志耕,刘思峰,等. 基于 GERTS 网络的非常规突发事件情景推演共力耦合模型[J]. 系统工程理论与实践,2012,32(5):963-970.
- [14] 汪涛,吴琳丽. 军事物流供应链 G-GERT 网络风险识别模型研究[J]. Computer Engineering and Applications,2012,48(1):231-233
- [15] 陆琳. 基于 GERT 随机网络的城市交通流仿真研究[J]. 天津工业大学学报,2011,30(2):85-88.

Using GERT Algorithm for Emergency Transportation Path Selection of Electrical Repair Vehicle

ZHOU Xueding, ZHENG Xingxin

(Gutian Fujian Power Supply Company Limited, State Grid Corporation of China, Ningde 352200, China)

Abstract: In this paper, the research focus on the selection problem of electrical repair vehicle's emergency transportation path. Based on the graph evaluation and review technique (GERT), the specific function for the probability of successful distribution, the probability of the risk and the expectations, and the variance of the emergency distribution life cycle are given, respectively. By developing a stochastic network model of a case study, this research compares the the probability of successful distribution, the probability of the risk and the expectations of the emergency distribution life cycle between the different disasters. The results show that the model is highly feasible and applicable.

Keywords: path selection; graph evaluation and review technique; electrical repair vehicle; power system; disaster

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:吴逢铁)

一种采用能量平衡关系的新型交流电弧炉模型

廖廷涛¹, 张海龙², 王恩荣¹, 黄苗玉³

- (1. 南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042;
2. 南京师范大学 物理科学与技术学院, 江苏 南京 210023;
3. 金陵科技学院 电子信息工程学院, 江苏 南京 211169)

摘要: 基于能量守恒定律,建立一种以微分方程描述的新型交流电弧炉(EAF)时域模型.模型以电弧导纳作为状态变量,弧长和电流作为输入,引入时序变化的电弧半径作为参变量,并给出模型参数的估算方法.以实际炼钢交流电弧炉为例,建立电气系统仿真模型,对熔化期的电弧特性及电弧炉对电网的冲击响应进行仿真研究.结果表明:仿真得到的电弧伏安特性与实测数据吻合度较高,有功和无功冲击均与实际工况相符,验证了模型的准确性和实用性.

关键词: 电弧炉; 电弧阻抗; 电弧半径; 负荷建模; 电能质量

中图分类号: TM 924.4

文献标志码: A

随着电力工业的发展、冶炼技术的进步及电弧炉设备的改进,交流电弧炉冶炼成本不断下降,效率不断提高,交流电弧炉在炼钢工业中得到了越来越广泛的应用.然而,电弧炉作为电力系统中对电网影响最大的负荷之一,由于电弧电抗的非线性、电极同炉料的接触性短路、炉料崩塌,以及钢液面的剧烈波动等因素,其负荷冲击性变化引起的电压波动与闪变,电弧阻抗非线性导致的电力系统谐波等一系列电能质量问题也不容忽视^[1-2].建立精确的模型是分析治理电弧炉引起的电网污染的关键^[3],国内外学者对此进行了大量研究并取得了一些成果^[4-12].本文基于能量守恒定律,提出一种新的交流电弧炉模型,从而仿真出较为准确的电弧炉实际运行特性.

1 交流电弧炉数学模型

等效数学模型的导出基于以下2个假设^[13].1) 电弧是具有明确界限的圆柱形气体通道,其截面具有均匀分布的温度.2) 能量散出是因弧柱变化过程所造成,与电极无关.

由能量平衡原理,可得

$$\frac{dq}{dt} = ei - S_{\text{loss}}. \quad (1)$$

式(1)中: q 为单位长度电弧弧柱中积累的能量; e 为弧柱中电场强度; i 为电弧电流; S_{loss} 为单位长度电弧弧柱的视在功率损失.

将模型表示成导纳的形式,将式(1)进一步转化为

$$\frac{dy}{dt} = (ei - S_{\text{loss}}) \frac{dy}{dq}. \quad (2)$$

式(2)中: y 为电弧导纳.

根据气体分子运动论,得到单位长电弧弧柱中积累的能量^[14]为

收稿日期: 2015-08-09

通信作者: 张海龙(1988-),男,博士研究生,主要从事电力系统自动化及非线性动力学的研究. E-mail:131001005@stu.njnu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51475246);江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYLX15_0725)

$$q = 0.354 p \pi r^2 (1 - \frac{T_1}{T_0}), \quad (3)$$

式(3)中: r 为电弧半径; T_1 为电弧炉的炉温; T_0 为电弧的弧柱温度; p 为气体压力,由于电弧炉是在一个标准大气压条件下自由燃烧的,所以 p 取值为 $1 \text{ W} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-3}$.

由沙哈公式推导出电弧电导率方程为

$$\sigma = \sigma_0 e^{-m/T_0}. \quad (4)$$

式(4)中: σ 为电弧电导率; σ_0 , m 为常数, m 取值为 $3.323 \times 10^4 \text{ K}^{-1}$ [15].

由式(4)可得电弧导纳 y 为

$$y = \frac{\pi r^2 \sigma}{L}. \quad (5)$$

式(5)中: L 为电弧弧长.

由式(3)~(5),可得

$$\frac{dy}{dq} = \frac{\frac{dy}{dT_0}}{\frac{dq}{dT_0}} = \frac{k}{r^2} y. \quad (6)$$

式(6)中: k 的表达式为

$$k = \frac{m}{0.354 p T_1 \pi}. \quad (7)$$

将式(6)代入式(2),整理得

$$\frac{1}{y} \cdot \frac{dy}{dt} = (ei - S_{\text{loss}}) \frac{k}{r^2}. \quad (8)$$

将式(8)两边同时乘以电弧弧长,进一步转化为

$$\frac{L}{y} \cdot \frac{dy}{dt} = (ui - S_0) \frac{k}{r^2}. \quad (9)$$

式(9)中: u 为电弧电压; S_0 为电弧弧柱的视在功率损失.

电弧损失的视在功率与电弧导纳的关系表达式为

$$S_0 = U_{\text{arc}}^2 y. \quad (10)$$

式(10)中: U_{arc} 为电弧电压有效值.将式(10)代入式(9),整理得

$$\frac{dy}{dt} = (i^2 - U_{\text{arc}}^2 y) \frac{k}{L r^2}. \quad (11)$$

通过以上推导得到以能量守恒定律为基础的交流电弧炉模型.它以 i, L 作为输入; U_{arc}, r 是与电弧特性直接相关的物理量; k 主要取决于电弧的燃烧环境.

2 电弧炉模型参数的估算方法

一般在电弧自由燃烧时,电弧电流越大,电弧半径越大,电弧阻抗也越低.因此,电弧半径与电弧导纳的关系[10]可以定义为

$$r = \frac{m+2}{\sqrt{ny}}. \quad (12)$$

式(12)中: m, n 为常数. m 根据电弧半径的增大分别选择0,1或2,在熔化初期,电弧半径较小, m 取值为0;根据专家经验[16]和实际调试,可得 n 为30.

在冶炼过程中,炉温是变化的,但一般情况下可以认为炉温变化对电弧特性几乎没有影响,可将其视为常数[17].根据电弧炉的生产规格,熔化期炉温基本上在 $300 \sim 1800 \text{ K}$ 范围内变化.取 T_1 的值为 800 K ,根据式(7),可估算出 k 为37.3687.

当电流大于 100 A 时,电弧电压有效值 U_{arc} 与电弧长度 L 的关系[18]为

$$U_{\text{arc}} = \alpha + \beta L. \quad (13)$$

式(13)中: α 为电弧阳极和阴极的电位降; β 为弧柱梯度.根据弧电位分布的研究成果[19],在熔化期 α 取值为 40 V , β 取值为 $10 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$.

电弧炉单相等效电路图,如图1所示.图1中: U_p 表示与炉用变压器档位电压对应的相电压; r_d 为短网电阻; L_{dM} 为短网电感; r_t 为变压器内部电阻; L_t 为变压器内部电感; Z_{arc} 为电弧阻抗.由电路原理和式(13)可得弧长 L 为

$$0 \leq L < \frac{U_p - \alpha}{\beta} \quad (14)$$

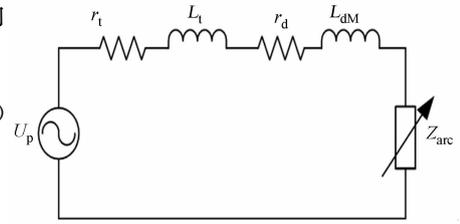
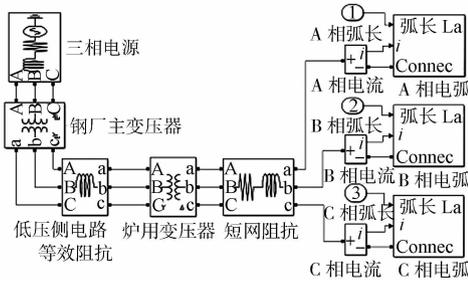


图1 电弧炉单相等效电路图
Fig. 1 Single-phase equivalent circuit diagram of the EAF

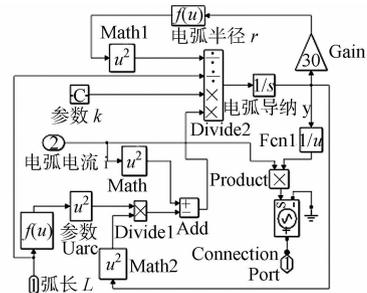
3 算例分析

3.1 模型验证

以江苏地区某钢厂100 t电弧炉为例,对熔化期的电弧特性进行仿真分析.基于Matlab/Simulink建立的三相交流电弧炉电气系统仿真模型,如图2所示.系统的主要参数表述如下:钢厂主变压器将220 kV的高压电网电压变为35 kV;低压侧电路等效阻抗为3.234 6 Ω ;通过炉用变压器将电压降到996 V;短网电阻为0.407 7 m Ω ;短网电抗为2.978 6 m Ω ;钢厂主变压器的额定容量为130 MV·A;炉用变压器的额定容量为90 MV·A.根据式(14)计算出熔化期弧长的理论波动范围为0~53.5 cm,文中取弧长值为45 cm.



(a) 供电系统



(b) 电弧

图2 三相交流电弧炉电气系统仿真模型

Fig. 2 Simulation model of the electrical system for the three-phase AC EAF

电弧阻抗(Z_{arc})和电弧半径(r)曲线,如图3所示.由图3可知:1) 电弧阻抗和半径呈现脉动形变化,频率为供电频率的两倍;2) 当电弧半径增加时,由于弧柱温度上升,电离度提高,导致电弧阻抗迅速降低,反之亦然.

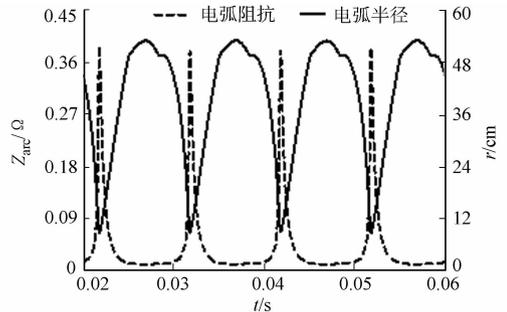
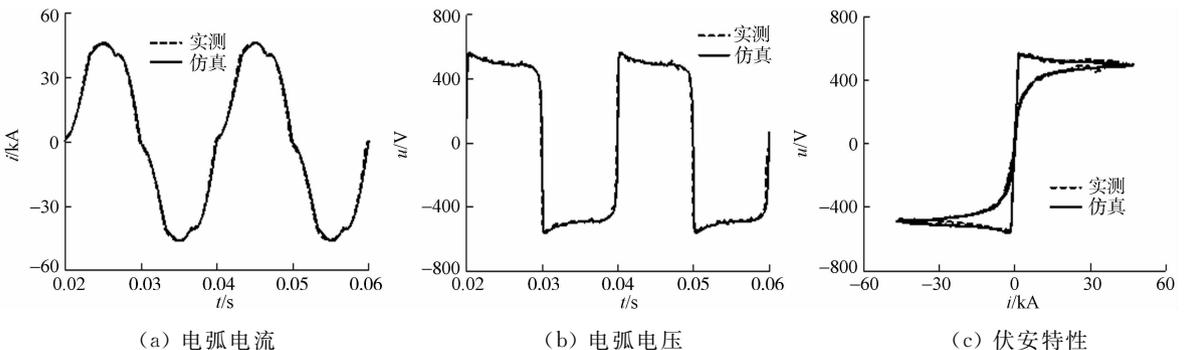


图3 电弧阻抗和电弧半径曲线

Fig. 3 Curve of electric arc impedance and radius

上述结论符合电弧的实际特性,说明提出的模型对于电弧现象的吻合度较高,从而在真实反映电弧物理特征的基础上,得到更加准确的仿真结果.

电弧电流(i)、电弧电压(u)和伏安特性曲线对比图,如图4所示.由图4可知:仿真结果与实测曲线基本一致,从而证明了以上的推断.



(a) 电弧电流

(b) 电弧电压

(c) 伏安特性

图4 电弧电流、电弧电压和伏安特性对比图

Fig. 4 Comparison diagram of arc current, arc voltage and volt-ampere characteristic

3.2 电弧炉对电网的冲击影响

电弧炉在熔化期时,弧长变化比较剧烈,电弧熄灭(即开路)与短路现象频繁发生,对电网造成强烈的冲击干扰.当三相电弧断路时,电弧炉的有功功率急剧变化,对电网造成的有功冲击最大;当三相电弧短路时,则对电网造成的无功冲击最为明显.

公共连接点(PCC)有功功率(P)和无功功率(Q)冲击响应,如图5所示.根据电弧炉的实际运行状态,一般发生一次短路或断路故障的持续时间为 $0.01\sim 0.02\text{ s}$,仿真所设置的故障时间为 $0.37\sim 0.38\text{ s}$,其余时间为稳态运行.由图5可知:1)断路故障发生时,PCC点的有功功率从正常值迅速跌落至零点附近,呈负值是由故障瞬间电弧炉设备向外输送少量电能所致;2)短路故障发生时,PCC点的无功功率剧烈波动,经过 0.1 s 后才逐渐恢复平稳,其最大波动量达到 9.62 Mvar .

通过以上分析可知,电弧炉在实际运行过程中对电网的冲击影响是不容忽视的,必须采取相应的电极控制和无功补偿等方法进行治理,从而验证了文中提出的模型是合理、有效的.

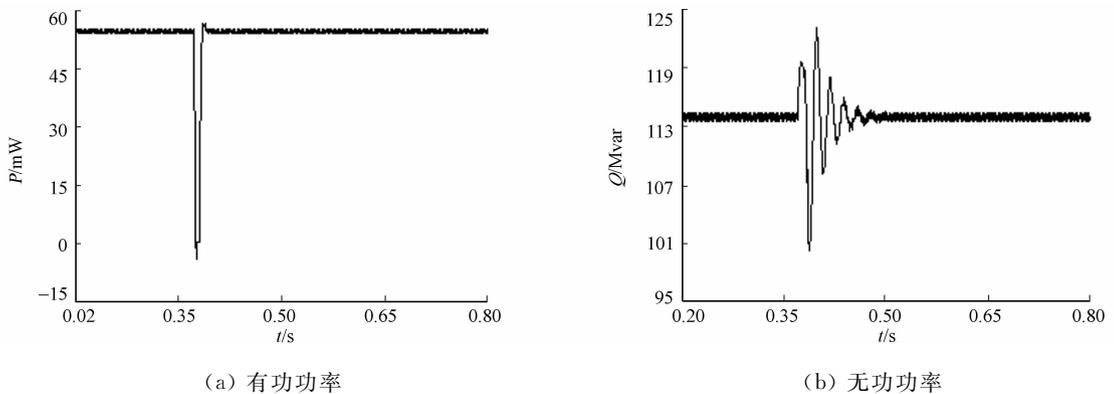


图5 PCC点有功功率和无功功率冲击响应

Fig. 5 Active power and reactive power shock responses of PCC

4 结束语

基于电弧的物理机理,从能量方程出发,以电弧导纳为状态变量,电弧电流和弧长作为输入,创新地采用时序变化的电弧半径作为模型参数,实现一种能够综合反映电弧特性的新型电弧炉模型.将电弧模型作为等效的电压源接入供电系统,通过仿真,该模型不仅体现了电弧半径与阻抗之间的关系,而且模拟出的电弧电压、电弧电流、伏安特性,以及PCC点有功和无功冲击响应均与实际工况相符.这表明模型较好地实现了电弧的内在物理机理和外在电路特性的统一,避免了此类模型参数不易估算的缺陷,因而兼有准确性和实用性的特点.这对于进一步深入开展电弧炉的理论分析和仿真研究,具有较大的意义,也为采取相应的电能质量治理措施奠定了基础.虽然文中是以特定的电弧炉作为研究对象,但仍可结合其他电弧炉系统的供电运行条件 and 生产规格进行仿真,进一步用于电能质量的分析.

参考文献:

- [1] 彭卉,邹舒,付永生,等.冲击负荷接入电网的电能质量分析与治理方案研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(1):54-61.
- [2] 刘华东,张定华,唐建宇,等.抑制电弧炉闪变的STATCOM直接电压控制研究[J].电工技术学报,2012,27(9):41-47.
- [3] 鞠平,王耀,项丽,等.考虑特殊负荷的宁夏电网负荷建模[J].电力自动化设备,2012,32(8):1-4.
- [4] CHANG G W, SHIH M F, CHEN Yiyang, et al. A hybrid wavelet transform and neural-network-based approach for modelling dynamic voltage-current characteristics of electric arc furnace[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 815-824.
- [5] 王育飞,姜建国.用于电能质量研究的新型交流电弧炉混沌模型[J].中国电机工程学报,2008,28(10):106-110.
- [6] ALONSO M A P, DONSION M P. An improved time domain arc furnace model for harmonic analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1): 367-373.

- [7] 祁碧茹,肖湘宁.用于电压波动研究的电弧炉的模型和仿真[J].电工技术学报,2000,15(3):31-35.
- [8] 刘小河,赵刚,于娟娟.电弧炉非线性特性对供电网影响的仿真研究[J].中国电机工程学报,2004,24(6):30-34.
- [9] WANG Yan, MAO Zhizhong, TIAN Huixin, et al. Modeling of electrode system for three-phase electric arc furnace [J]. Journal of Central South University of Technology, 2010, 17(3): 560-565.
- [10] ACHA E, SEMLYEN A, RAJAKOVIC N. A harmonic domain computational package for nonlinear problems and its application to electric arcs[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(3): 1390-1397.
- [11] 池伟,张恺伦,查蕾,等.基于能量平衡的电弧炉模型的仿真与参数辨识[J].机电工程,2012,29(4):454-457.
- [12] 王晶,束洪春,林敏,等.用于动态电能质量分析的交流电弧炉的建模与仿真[J].电工技术学报,2003,18(3):53-58.
- [13] 王仁甫.电弧现象模型的发展[J].高压电器,1991,4(12):39-46.
- [14] 王其平.电器电弧理论[M].北京:机械工业出版社,1991:167.
- [15] 刘小河,程少庚,苏文成.电弧炉电气系统的谐波分析研究[J].电工技术学报,1994,9(1):21-26.
- [16] 申展,朱永强.PSCAD中基于能量平衡关系的电弧炉负荷模型的参数[J].现代电力,2007,24(3):34-38.
- [17] ALEXIS J, RAMIREZ M, TRAPAPA G, et al. Modeling of a DC electric arc furnace-heat transfer from the arc[J]. ISIJ International, 2000, 40(11): 1089-1097.
- [18] HORTON R, HASKEW T A, BURCH R F. A time-domain AC electric arc furnace model for flicker planning studies[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 1450-1457.
- [19] 南条敏夫.炼钢电弧炉设备与高效益运行[M].李中祥,译.北京:冶金工业出版社,2000:67-71.

Novel Model of Alternating Current Electrical Arc Furnace Based on Energy Conservation

LIAO Yantao¹, ZHANG Hailong²,
WANG Enrong¹, HUANG Miaoyu³

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China;

2. School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;

3. School of Electronic Information Engineering, Jingling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

Abstract: A novel time-domain differential model is proposed for the alternating current electrical arc furnace (EAF) based on the law of conservation energy. The model is established with arc admittance as a state variable, arc length and current as the input, respectively. The chronological arc radius is introduced as a parameter. In addition, the method to estimate the model parameters is given. Moreover, a real EAF is taken to establish the simulation model of the electrical system. The arc characteristics and the shock response of EAF on the power grid in smelting stage are simulated. The results show that the simulated arc volt ampere characteristics are highly identical with actual measurement data, the active and reactive power shock are consistent with the actual working condition. It proves the accuracy and practicability of the proposed models.

Keywords: electrical arc furnace; arc impedance; arc radius; load modeling; power quality

(责任编辑:钱筠 英文审校:吴逢铁)

碳纳米材料的无铜点击功能化

熊兴泉, 徐林建

(华侨大学 材料科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 碳纳米管、富勒烯、石墨烯等碳纳米材料在水和有机溶剂中的溶解性不理想,导致在一定程度上限制了进一步的应用.文中综述了近几年无铜催化的点击反应,如 Diels-Alder 反应、巯基-烯点击反应等对碳纳米材料的化学修饰,并对其发展和应用前景进行了展望.

关键词: 碳纳米材料; 功能化; Diels-Alder 反应; 巯基-烯点击反应

中图分类号: O 643.2

文献标志码: A

随着科技的进步和生活水平的提高,纳米科学和纳米技术越来越受到人们的广泛关注.纳米材料被广泛应用于催化剂、汽车、能源、生物医学、环境和药物释放等方面^[1].纳米结构的材料由于尺寸小、比表面积大,在磁学性能、光学性能、电学性能和热学性能等方面具有一些优异和独特的性能^[2].碳纳米管(CNTs)、富勒烯、石墨烯和碳量子点等碳基纳米材料由于其特殊的结构、小尺寸的效应、量子与表面的效应等,成为生物传感器、超级电容器、燃料电池、药物输送等领域的研究热点^[3-4].尽管这些碳纳米材料具有高的机械强度、良好的导电性能及优秀的导热性能,但它们低溶解性(在常用溶剂中)、不好的润湿性和很差的分散性限制了其应用.因此,采用 Diels-Alder 环加成反应、巯基-烯等无铜催化的点击反应对这些材料进行改性及功能化是纳米材料科研工作者研究的重点内容.本文综述了无铜催化的点击反应,展望了其发展和应用的前景.

1 CNTs 的改性

CNTs 自 1991 年出现之后就成为了纳米科技领域的热点^[5].由于其优良的性能被广泛应用于纳米器件和纳米生物技术等方面.CNTs 通过用聚合物进行杂化改性,使其在制备高性能的材料方面展现出明显的价值,通常引进 CNTs 可以高效改善聚合物的机械和热学性能,同时,也可以增加它的电导率和热导率.在二甲基乙酰胺(DMAc)溶剂中,马来酰亚胺修饰的聚酰胺(PAMI)和 MWCNTs 进行 Diels-Alder 反应,制备了 PAMI-MWCNTs 杂化材料,如图 1 所示. Liu 等^[6]在 50 °C 条件下,将呋喃甲醇和 N-(4-羟基苯基)马来酰亚胺分别溶解在多壁碳纳米管(MWCNTs)、二甲基亚砜(DMSO)溶剂中,通过 Diels-Alder 反应,制备了呋喃修饰的多壁碳纳米管(MWCNT-FA)和马来酰亚胺改性的 MWCNTs(MWCNT-NHMI).

2011 年, Liu 等^[7]用 N-(4-羟基苯基)马来酰亚胺(NHMI)和二(3-呋喃甲基-3,4-二氢-1,3-苯并恶

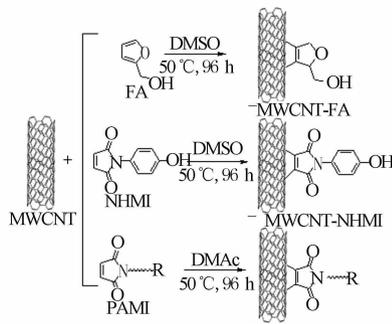


图 1 FA, NHMI 和 PAMI 对 MWCNTs 进行功能化

Fig. 1 Functionalization of MWCNTs with FA, NHMI and PAMI

收稿日期: 2015-07-03

通信作者: 熊兴泉(1980-),男,副教授,博士,主要从事高分子材料的合成、性能的研究. E-mail: xxqluli@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21004024);福建省自然科学基金资助项目(2011J01046);福建省高校新世纪优秀人才支持计划(2012FJ-NCET-ZR03);福建省高校杰出青年科研人才培养计划(11FJPY02);华侨大学中青年教师科研提升计划项目(ZQN-YX103)

噁基)异丙烷(BPA-FBz),通过 Diels-Alder 点击反应,对 PVDF/MWCNTs 复合材料进行了修饰,对复合材料进行热处理诱发进行 retro-D-A 反应,得到去功能化的复合材料.研究表明:热处理过程中产生复合材料电导率增加和逾渗阈下降,并且它的机械性能不受影响.

2012年,Liu等^[8]在80℃下,将二(3-咪唑甲基-3,4-二氢-1,3-苯并恶噁基)异丙烷(BPA-FBz)和MWCNTs溶解在二甲基甲酰胺(DMF)中,进行 Diels-Alder 点击反应120h,得到苯并恶噁功能化的MWCNTs(MWCNTs-FBz).然后,在80℃下,将BPA-FBz、双马来酰亚胺(BMI)和MWCNTs溶解在DMF中,通过 Diels-Alder 点击反应120h,制备聚苯并恶噁/MWCNTs 复合材料(MWCNTs-PFBz).结果显示:该纳米复合材料具有高的电导率(大约 $7 \times 10^{-5} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$)和好的机械强度.

Liu等^[9]通过 Diels-Alder 点击反应制备导电和磁性的聚乳酸/MWCNTs ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PLA}/\text{MWCNTs}$)纳米复合材料和静电纺丝纳米纤维.结果表明:质量分数为0.3%的mCNT-PLA纳米纤维其杨氏模量和断裂伸长率分别为25MPa和150%,相比于杨氏模量和断裂伸长率分别为9MPa和12%的纯PLA静电纺丝得到的纤维,mCNT-PLA的存在不仅可以增强,也可以增韧PLA基静电纺丝的纤维.

Sui等^[10]在CuBr/PMDETA的催化下,利用2,2,6,6-四甲基哌啶氮氧化物(TEMPO)功能化的碳纳米管(MWCNT-TEMPO)和溴化聚苯乙烯(PS-Br)进行原子转移氮氧自由基偶联反应(ATNRC),合成了聚苯乙烯接枝的多壁碳纳米管(PS-g-MWCNTs).研究显示:合成的PS-g-MWCNTs改善了MWCNTs在溶剂中的可分散性,如二氯甲烷、四氢咪唑和甲苯等溶剂.

Paris等^[11]用咪唑功能化的荧光聚苯乙烯,通过 Diels-Alder 反应,对MWCNTs进行修饰,得到了荧光聚苯乙烯修饰的MWCNTs(相比于传统方法,该方法不用对MWCNTs管进行预处理,还可以控制聚合物接枝链的结构).

Guńko等^[12]分别用3,6-二(3,5-二甲基-1-吡唑)-四嗪(dmptz)和3,6-二氨基四嗪(datz)对单壁碳纳米管(SWCNTs)进行修饰,它们在乙醇溶剂中进行四嗪-烯之间的Diels-Alder反应,得到了四嗪/SWCNTs纳米复合材料.四嗪功能化的SWCNTs电子特性发生了改变,这些重要的发现可以应用在将来纳米技术领域.

Barner-Kowollik等^[13]在环境温度下或80℃下,利用一步的Diels-Alder反应,合成了环戊二烯封端的聚甲基苯丙烯酸甲酯功能化的SWCNTs.其中,室温下SWCNTs上的接枝密度为 $0.064 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$,而80℃下为 $0.086 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$.该合成方法为改性碳纳米管来制备高分子纳米复合材料领域开创了一个简便和富有创新性的策略.

Hadjichristidis等^[14]通过Diels-Alder反应,用钛醇盐对退火处理过的MWCNTs和SWCNTs进行功能化,得到纳米管表面接有钛醇盐的催化剂.它可以作为表面引发钛调控的配位聚合的催化剂,用来催化L-丙交酯、 ϵ -己内酯和n-异氰酸己酯发生配位聚合.

Hadjichristidis等^[15]用4-羟乙基苯并环丁烯(BCB-EO)和苯并环丁烯乙基-溴代异丁酯(BCB-EBIB)通过Diels-Alder反应,对退火处理过的MWCNTs进行修饰,得到接有两种不同前驱体引发剂的MWCNTs.该引发剂用一步法引发内酯的ROP聚合和苯乙烯或甲基丙烯酸甲酯的ATRP聚合.

Hadjichristidis等^[16]通过Diels-Alder反应,制备了BCB-EO功能化的MWCNTs大分子引发剂,用它来引发 ϵ -己内酯和环氧乙烷.然后,分别进行开环聚合和活性阴离子聚合制备,得到了可生物降解和生物相容性的纳米材料.实验还研究了它的动力学结晶行为,结果表明:它的成核和结晶动力学受到MWCNTs与聚合物之间共价键的强烈影响.

2010年,Hadjichristidis等^[17]利用BCB-EO和BCB-PE为原料,通过Diels-Alder反应,合成了BCB-EO和BCB-PE功能化的MWCNTs.研究表明:实验制备出的MWNT-g-(BCB-EO)BBBnBBB可以引发 ϵ -己内酯开环聚合,接着与2-溴异丁酰溴反应生成ATRP的大分子引发剂可以引发苯乙烯发生ATRP聚合.MWNT-g-(BCB-PE)BBBnBBB和仲丁基锂反应得到的引发剂可以引发环氧乙烷发生阴离子聚合,接着与2-溴异丁酰溴反应得到大分子引发剂,可以引发苯乙烯发生ATRP聚合.这种合成方法可以控制纳米管上接枝成分,并且可以拓展其接枝嵌段共聚物的多样性.

Hong等^[18]用1-氨基蒽,通过Diels-Alder环加成反应和ATRP聚合,对SWCNTs进行改性.该方法可以用来有效分离半导体特性的s-SWCNTs和金属特性的m-SWCNTs.实验表明:s-SWCNTs和

1-氨基蒽发生 Diels-Alder 环加成反应比 m-SWCNTs 和 1-氨基蒽的加成反应的反应活性要高。

2014 年, Zhang 等^[19]用溴代乙丁酰溴功能化的呔喃, 通过 Diels-Alder 环加成反应, 对 SWCNTs 进行功能化, 制备出具有 ATRP 引发点的功能性 SWCNTs. 然后, 再与双键功能化的聚硅烷进行 ATRP 聚合, 制备出核壳结构的功能性 SWCNTs. 结果表明: 这种材料具有高的介电常数和低的介电损耗。

除了通过 Diels-Alder 环加成反应功能化的 CNTs 用于光电等材料的研究外, 也有通过 Diels-Alder 环加成反应功能化的 CNTs 用于骨头组织工程方面的初步研究, 研究探讨了该材料的体外与体内生物相容性与生物降解性, 并取得不错效果^[20]. 到目前为止, 采用 Diels-Alder 环加成和 ATNRC 等反应已经实现对 CNTs 的有效改性, 并赋予其许多新的功能。

2 石墨烯的改性

自 2004 年, 石墨烯从石墨中剥离出来以后, 就已经成为了科技工作者关注的焦点. 石墨烯是由 sp^2 杂化碳原子构成的二维片层, 它具有优秀的机械、电和热等独特的性能, 吸引了人们的广泛关注, 使得其在许多领域都具有潜在应用价值。

Yang 等^[21]用 TEMPO 改性的石墨烯和溴化聚苯乙烯, 通过 ATNRC 制备了聚苯乙烯改性的石墨烯(Graphene-g-PS). 该方法制备的 Graphene-g-PS 改善了石墨烯在甲苯、甲醇和氯仿等有机溶剂中的分散性, 可以拓宽石墨烯的应用领域。

Huang 等^[22]利用 ATNRC 制备了聚异丙基丙烯酰胺改性的石墨烯片层(GS-PNIPAM). GS-PNIPAM 由于其具有亲水性的 PNIPAM 片段, 它在各种溶剂中都有很好的分散性, 包括极性和非极性无机溶剂, 甚至是水. 有趣的是在 37 °C 左右, GS-PNIPAM 在水中的分散性具有温度响应性行为, 主要是由于它具有热响应性的 PNIPAM 链存在。

Haddon 等^[23]以四氰乙烯(TCNE)和马来酸酐(MA)为亲双烯体, 以 9-甲基蒽(9-MeA)和 2,3-甲氧基-1,3-丁二烯(DMBD)为双烯体, 以石墨烯为双烯体和亲双烯体, 分别通过 Diels-Alder 反应, 制备了以石墨烯为基质的纳米材料. 该方法可以用来构建可逆能带结构的石墨烯, 并且可以提高石墨烯的电导率, 是一种非常简单和高效的方法, 也为石墨烯后接枝改性提供了一个平台。

Weng 等^[24]利用还原石墨烯和环戊二烯基封端的聚乙二醇, 通过一步 Diels-Alder 点击反应合成了环戊二烯基封端的聚乙二醇功能化的石墨烯, 如图 2 所示. 结果表明: 实验制得的纳米材料在各种溶剂中的分散性都得到了良好的改善; 另外, 热重分析(TGA)揭示了在周围环境温度和 80 °C 下, 它的接枝率分别为 16.7% 和 21.8%。

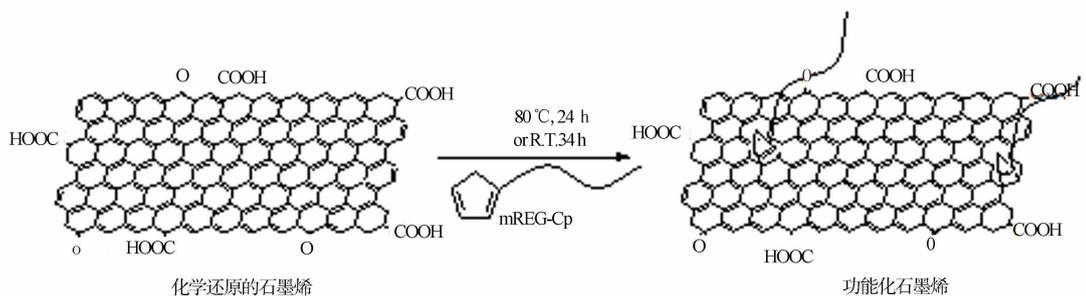


图 2 聚乙二醇功能化的石墨烯

Fig. 2 Functionalization of graphene with PEG

2014 年, Seo 等^[25]首次以新鲜石墨、马来酸酐或马来酰亚胺为原料, 在无溶剂以及氩气保护的条件下加热, 进行 Diels-Alder 环加成反应, 可以制备出功能化的石墨烯纳米片层. 研究表明, 该方法为批量化生产纳米片层结构的石墨烯提供了有效的途径。

3 富勒烯的改性

1985 年, 富勒烯相比于其他碳结构材料, 由于其独特的物理和化学性质, 被广泛应用于电子设备、

催化材料和超纤维等方面。

Bassani 等^[26]用富勒烯(C_{60})在末端修饰的硅烷上,通过 Diels-Alder 环加成反应,在室温下,甲苯溶液中反应 48 h,直接制备了单层富勒烯材料.该方法制备的富勒烯单层在构建有机场效应晶体管(OFET)装置和传感器方面引起了科技工作者的广泛兴趣。

Yagci 等^[27]在 70 °C 条件下,用 ω -巯基功能化的聚苯乙烯(PS-SH)和富勒烯以 AIBN 为引发剂,通过巯基-烯点击反应,进行一步加成合成了富勒烯封端的聚苯乙烯,如图 3 所示.这种用单加成聚合物-富勒烯这类纳米材料的合成方法所需反应时间短,且在温和条件下反应就可以进行。

Peyghan 等^[28]用 2,3-二甲基丁二烯(DMB),通过 Diels-Alder 点击反应,对 C_{60} 进行了修饰.实验结果表明: C_{60} 的 HOMO-LUMO 能隙反应后发生了轻微改变,同时,相比于 C_{60} ,改性后的 C_{60} 面场导致电子发射势垒较小.改性后的 C_{60} 在构建纳米器件方面有潜在的应用价值。

Barner-Kowollik 等^[29]在环境温度下,用环戊二烯基封端的聚乙二醇和 C_{60} ,通过 Diels-Alder 点击反应进行 5 min,以及在 80 °C 下,用巯基封端的聚乙二醇和 C_{60} ,进行 Diels-Alder 反应 1.5 h,最后,得到聚乙二醇改性的 C_{60} ,如图 4 所示.实验结果表明:改性后的 C_{60} 在溶剂中的分散性的都很好的改善。

Jones 等^[30]用连续流法,将甲苯磺酰脲和 C_{60} 通过 Diels-Alder 点击反应,合成富勒烯的衍生物.实验制备的 C_{60} 的衍生物可以作为基于 C_{60} 的电子受体材料,可以用在有机光电应用等领域.相对于传统的间歇法,该方法所需的时间更短,且产率更高。

Takaguchi 等^[31]用 Diels-Alder 反应在 C_{60} 上接枝了糖类树枝状分子.有趣的是,通过 Diels-Alder 环加成反应,可以得到一对光学纯的非对映异构体.该反应合成的糖类树枝状分子富勒烯衍生物在药学方面有很大的应有价值。

4 金刚石的改性

金刚石上每个碳原子都以 sp^3 杂化轨道存在,并与另外 4 个碳原子通过共价键键接成正四面体,它长久以来一直被认为是一种惰性的材料,它的应用主要集中在其显著的光学特性和大的机械阻力方面.然而,最近几年金刚石作为化学气相沉积增长膜或者纳米粒子在许多领域都有巨大的应用潜力。

Krueger 等^[32]研究了退火的纳米金刚石(亲双烯体)和邻二溴甲苯衍生物原位产生的邻醌二甲烷双烯体,通过 Diels-Alder 点击反应,合成了接有芳香有机部分的纳米金刚石,接着在芳香环上进行改性,得到了功能性的纳米金刚石材料.实验制备的功能性的纳米金刚石材料具有类似分子行为和可控的表面等性能。

最近,Krueger 等^[33]用热退火的纳米金刚石、邻二溴甲苯原位产生的邻醌二甲烷双烯体以及烯烃修饰的糖类,通过 Diels-Alder 反应和巯基-烯双点击反应,制备了糖类修饰的纳米金刚石.实验制备的糖类修饰的纳米金刚石可以高效探测和去除致病菌。

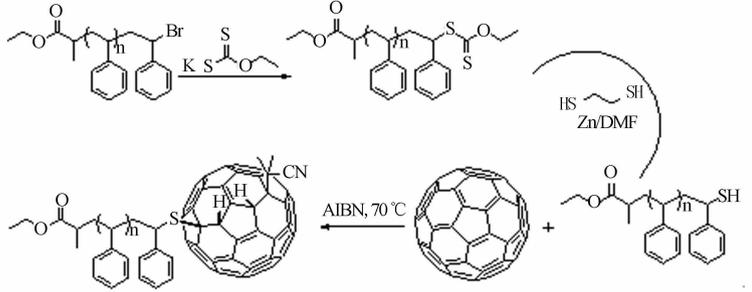


图 3 富勒烯封端的聚苯乙烯的合成

Fig. 3 Synthesis of C_{60} -end-capped polystyrene

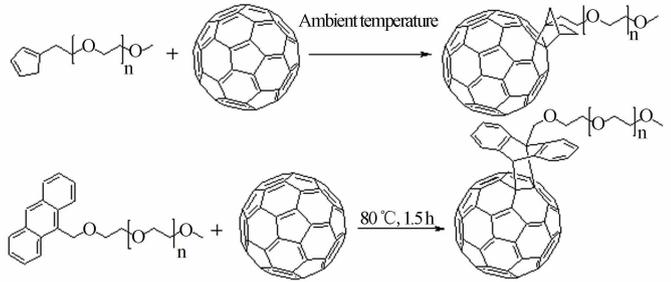


图 4 两种不同功能化的聚乙二醇修饰富勒烯

Fig. 4 Modification of C_{60} with two different functional PEG

5 结束语

碳纳米材料拥有许多独特优异的物理、化学性能,在诸多领域内有着广泛的应用.但是,由于碳纳米材料在水和有机溶剂中的溶解性不理想,因此,在一定程度上限制了碳纳米材料的进一步应用.为克服这些缺陷,对碳纳米材料进行化学改性显得尤为重要.基于此,综述无铜催化的点击反应,如 Diels-Alder 反应、巯基-烯点击反应等对碳纳米材料的化学修饰.这些无铜催化的点击反应在碳纳米材料化学修饰中,既简单灵活方便,产率又较高,为碳纳米材料的进一步研究与应用提供了新的方法.

参考文献:

- [1] ODOM T W, PILENI M P. Nanoskiving: A new method to produce arrays of nanostructures[J]. *Acc Chem Res*, 2008, 41(12):1565-1851.
- [2] SMYTHE E J, DICKEY M D, WHITESIDES G M, et al. A technique to transfer metallic nanoscale patterns to small and non-planar surfaces[J]. *ACS Nano*, 2009, 3(1):59-65.
- [3] YOON H, JANG J. Conducting-polymer nanomaterials for high-performance sensor applications: Issues and challenges[J]. *Adv Funct Mater*, 2009, 19(10):1567-1576.
- [4] WU Xiaomeng, HE Xiaohua, ZHONG Liang, et al. Water-soluble dendritic-linear triblock copolymer-modified magnetic nanoparticles: Preparation, characterization and drug release properties[J]. *J Mater Chem*, 2011, 21(35):13611-13620.
- [5] IJIMA S. Helical microtubules of graphitic carbon[J]. *Nature*, 1991, 354(7):56-58.
- [6] CHANG C M, LIU Yingling. Functionalization of multi-walled carbon nanotubes with furan and maleimide compounds through diels-alder cycloaddition[J]. *Carbon*, 2009, 47(13):3041-3049.
- [7] CHANG C M, LIU Yingling. Electrical conductivity enhancement of polymer/multiwalled carbon nanotube (MWCNT) composites by thermally-induced defunctionalization of MWCNTs[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2011, 3(7):2204-2208.
- [8] WANG Y H, CHANG C M, LIU Yingling. Benzoxazine-functionalized multi-walled carbon nanotubes for preparation of electrically-conductive polybenzoxazines[J]. *Polymer*, 2012, 53(1):106-112.
- [9] LI H Y, CHANG C M, HSU K Y, et al. Poly(lactide)-functionalized and Fe₃O₄ nanoparticle-decorated multiwalled carbon nanotubes for preparation of electrically-conductive and magnetic poly(lactide) films and electrospun nanofibers[J]. *J Mater Chem*, 2012, 22(11):4855-4860.
- [10] SUI Kunyan, YANG Chunjia, et al. A novel route for well-defined polystyrene-grafted multiwalled carbon nanotubes via the radical coupling reaction[J]. *J Appl Polym Sci*, 2009, 114(3):1914-1920.
- [11] BERNAL M M, LIRAS M, VERDEJO R, et al. Modification of carbon nanotubes with well-controlled fluorescent styrene-based polymers using the Diels-Alder reaction[J]. *Polymer*, 2011, 52(25):5739-5745.
- [12] HAYDEN H, GUNCO Y K, PEROVA T, et al. Investigation of tetrazine functionalised single walled carbon nanotubes[J]. *Plastics, Rubber and Composites*, 2009, 38(6):253-256.
- [13] ZYDZIAK N, HUBNER C, BRUNS M, et al. One-step functionalization of single-walled carbon nanotubes (SWCNTs) with cyclopentadienyl-capped macromolecules via Diels-Alder chemistry[J]. *Macromolecules*, 2011, 44(9):3374-3380.
- [14] PRIFTIS D, PETZETAKIS N, SAKELLARIOU G, et al. Surface-initiated titanium-mediated coordination polymerization from catalyst-functionalized single and multiwalled carbon nanotubes[J]. *Macromolecules*, 2009, 42(9):3340-3346.
- [15] PRIFTIS D, SAKELLARIOU G, BASKARAN D, et al. Polymer grafted Janus multi-walled carbon nanotubes[J]. *Soft Matter*, 2009, 5(21):4272-4278.
- [16] PRIFTIS D, SAKELLARIOU G, HADJICHRISTIDIS N, et al. Surface modification of multiwalled carbon nanotubes with biocompatible polymers via ring opening and living anionic surface initiated polymerization kinetics and crystallization behavior[J]. *J Polym Sci: Part A*, 2009, 47(17):4379-4390.
- [17] PRIFTIS D, SAKELLARIOU G, MAYS J M, et al. Novel diblock copolymer-grafted multiwalled carbon nanotubes via a combination of living and controlled/living surface polymerizations[J]. *J Polym Sci*, 2010, 48(5):1104-1112.
- [18] SUN Jiaotong, ZHAO Luyang, HONG Chunyan, et al. Selective Diels-Alder cycloaddition on semiconducting single

- walled carbon nanotubes for potential separation application[J]. *Chem Commun*, 2011, 47:10704-10706.
- [19] ZHANG Wenjing, ZHOU Zhen, LI Qifang, et al. Controlled dielectric properties of polymer composites from coating multiwalled carbon nanotubes with octa-acrylate silsesquioxane through Diels Alder cycloaddition and atom transfer radical polymerization[J]. *Ind Eng Chem Res*, 2014, 53(16):6699-6707.
- [20] MATA D, AMARAL M, FERNANDES A J S, et al. Diels-Alder functionalized carbon nanotubes for bone tissue engineering: *In vitro/in vivo* biocompatibility and biodegradability[J]. *Nanoscale*, 2015, 7(20):9238-9251.
- [21] 陈小乙, 石远琳, 杨东, 等. 原原子转移氮氧自由基偶合反应制备聚苯乙烯改性的石墨烯[J]. *化学学报*, 2012, 70(7):817-821
- [22] DENG Yan, LI Yongjun, DAI Jing, et al. An efficient way to functionalize graphene sheets with presynthesized polymer via ATNRC chemistry[J]. *J Polym Sci: Part A*, 2011, 49(7):1582-1590.
- [23] SARKAR S, BEKYAROVA E, NIYOGI S, et al. Diels-alder chemistry of graphite and graphene: Graphene as diene and dienophile[J]. *J Am Chem Soc*, 2011, 133(10):3324-3327.
- [24] YUAN Jinchun, CHEN Guohua, WENG Wengui, et al. One-step functionalization of graphene with cyclopentadienyl-capped macromolecules via Diels-Alder "click" chemistry[J]. *J Mater Chem*, 2012, 22(16):7929-7936.
- [25] SEO J M, BAEK J B. A solvent-free Diels-Alder reaction of graphite into functionalized graphene nanosheets[J]. *Chem Commun*, 2014, 50(79):14651-14653.
- [26] RAY D, BELIN C, HUI F, et al. Direct formation of fullerene monolayers using [4+2]Diels-Alder cycloaddition [J]. *Chem Commun*, 2011, 47(9):2547-2549.
- [27] ISKIN B, YILMAZ G, YAGCI Y. Mono-addition synthesis of polystyrene-fullerene (C₆₀) conjugates by thiol-ene chemistry[J]. *Chem Eur J*, 2012, 18(33):10254-10257.
- [28] BEHESHTIAN J, PEYGHAN A A, BAGHERI Z. Functionalization of [60]fullerene with butadienes: A DFT study[J]. *Appl Surf Sci*, 2012, 258(22):8980-8984.
- [29] NEBHAN L, BARNER-KOWOLLIK C. Functionalization of fullerenes with cyclopentadienyl and anthracenyl capped polymeric building blocks via Diels-Alder chemistry[J]. *Macromol Rapid Commun*, 2010, 31(14):1298-1305.
- [30] SEYLER H, WALLACE W H, WONG W W H, et al. Continuous flow synthesis of fullerene derivatives[J]. *J Org Chem*, 2011, 76(9):3551-3556.
- [31] TAKAHASHI N, TAJIMA T, TSUGAWA N, et al. Optically pure fullerodendron formed by diastereoselective Diels-Alder reaction[J]. *Tetrahedron*, 2010, 66(39):7787-7793.
- [32] JARRE G, LIANG Y J, BETZ P, et al. Playing the surface game-Diels-Alder reactions on diamond nanoparticles [J]. *Chem Commun*, 2011, 47(1):544-546.
- [33] HARTMANN M, BETZ P, SUN Y C, et al. Saccharide-modified nanodiamond conjugates for the efficient detection and removal of pathogenic bacteria [J]. *Chem Eur J*, 2012, 18(21):6485-6492.

Copper-Free Click Modification of Carbon Nanomaterials

XIONG Xingquan, XU Linjian

(College of Material Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The poor solubility in water and organic solvents of carbon nanomaterials, such as carbon nanotubes, fullerene and graphene, limits its further application in part. In this paper, the application of the copper-free click reaction (such as Diels-Alder reaction and thiol-ene click reaction) on the functionalization of the carbon nanomaterials is reviewed. In addition, the trend of its development is also discussed.

Keywords: carbon nanomaterials; functionalization; Diels-Alder reaction; thiol-ene click reaction

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 熊兴泉)

溶解氧对短程同步硝化/反硝化 耦合除磷工艺的影响

何争光, 谢谦, 丁丹

(郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 采用人工模拟的高氨氮城市污水,对厌氧/好氧/缺氧(A/O/A)序批式活性污泥法反应器内短程同步硝化/反硝化耦合除磷过程的实现及稳定性进行研究.对一个典型周期内水质变化情况进行测定和分析,系统对化学需氧量(COD)、氨氮(NH_4^+-N)、总氮(TN)、总磷(TP)去除率分别为 94.8%,97.6%,89.4%,93.1%.调节曝气量以改变溶解氧质量浓度,结果表明:随着溶解氧质量浓度升高,亚硝化率由 97%下降至 20%;溶解氧质量浓度过低,会抑制好氧阶段的吸磷过程;溶解氧质量浓度过高,会影响好氧、缺氧阶段磷的有效吸收.

关键词: 硝化/反硝化;序批式活性污泥法;溶解氧;除磷

中图分类号: X 703

文献标志码: A

随着新型城市化进程的不断加快,水资源短缺已成为制约社会发展的重要因素之一.氮、磷等污染物引起的水环境问题日益严重,越来越严格的排放标准使传统脱氮除磷工艺的污水处理厂面临着升级或改造.研究并开发更加经济高效的污水处理工艺成为亟需解决的问题之一^[1-2].国内外已有研究表明,聚磷菌与硝化菌间存在着泥龄矛盾、碳源不足等问题,限制其对氮磷的同步去除^[3-4].短程同步硝化/反硝化耦合除磷工艺利用亚硝化菌泥龄短的特点,迎合了聚磷菌所需的短泥龄.与传统的脱氮除磷工艺相比,短程同步硝化/反硝化耦合除磷工艺不仅可以节省 25%的曝气量,40%的反硝化碳源,50%的碱投加量,还可以缩短反应时间,减小反应器容积,解决碳源不足的问题^[5-7].本文对厌氧/好氧/缺氧(A/O/A)序批式活性污泥法(SBR)反应器内,短程同步硝化/反硝化耦合除磷过程的实现及稳定性进行研究,并探讨不同溶解氧(DO)质量浓度对系统脱氮除磷效果的影响.

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验装置,如图 1 所示. SBR 反应器的内筒直径为 24 cm,高度为 35 cm,每隔 8 cm 设置一个取样口,有效容积约为 10 L. 微孔曝气沙头设于容器底部,采用空气压缩机进行曝气,气体转子流量计控制曝气量,并通过机械搅拌机进行搅拌.潜水泵由顶端进水,蠕动泵由容器底端排水口排水,二者均通过智能定时插座开关控制.每天运行 2 个周期,每个周期 12 h.运行方式为瞬时进水 5 min,厌氧搅拌 60 min,曝气搅拌 200 min,缺氧搅拌 150 min,静止沉淀 60 min,排水 20 min,剩余时间闲置.每个周期末排泥 200 mL.

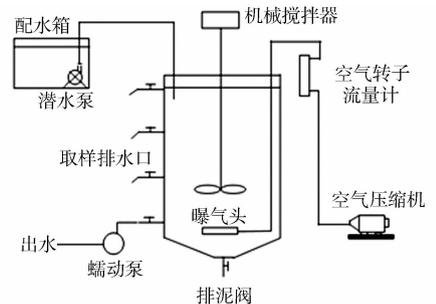


图 1 试验装置

Fig. 1 Experimental setup

收稿日期: 2015-06-23

通信作者: 何争光(1963-),男,教授,博士,主要从事环境工程和给排水方面的研究. E-mail:hezhen guang163@163.com.

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07204-001-02-01)

1.2 用水水质

采用人工模拟的高氨氮城市污水,主要成分为无水乙酸钠、氯化铵、磷酸二氢钾、 $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 、 $CaCl_2 \cdot 2H_2O$,以及多种无机盐组成的微量元素溶液.在原水水质中:化学需氧量(COD)为 $360 \sim 400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,氨氮(NH_4^+-N)为 $80 \sim 95 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,总磷(TP)为 $6 \sim 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,pH 值为 $7.5 \sim 7.8$,温度为 $20 \sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

1.3 分析方法

COD 采用重铬酸钾快速消解法;TP 采用钼锑抗分光光度法;氨氮(NH_4^+-N)采用纳氏试剂分光光度法;亚硝酸盐氮采用 N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法;硝酸盐氮采用麝香草酚分光光度法;总氮(TN)采用过硫酸钾氧化-麝香草酚分光光度法;混合液悬浮固体质量浓度(MLSS)采用重量法;DO,pH 值为在线监测.

2 结果与讨论

2.1 A/O/A SBR 工艺的启动

一般认为,硝化菌最适宜的 pH 值为 $6.0 \sim 7.5$,而亚硝化菌最适宜的 pH 值为 $7.0 \sim 8.5$,且亚硝化菌的世代周期更短,最大比增长速率更大^[8].因此,基于动力学选择原理,改变实验的运行条件,引起反应器内亚硝化菌与硝化菌的竞争,通过“洗泥”使亚硝化菌成为硝化反应的优势菌^[9].

采用两个阶段对污泥进行驯化培养,保持碳氮比值恒定为 4.5.启动阶段氮素质量浓度($\rho(\text{氮素})$)的变化情况,如图 2 所示.由图 2 可知:第一阶段的反应阶段厌氧为 2 h,好氧为 6 h,从而富集硝化菌与聚磷菌;第二阶段以试验设计的反应方式运行,投加碳酸氢钠,使进水 pH 值增大至 $7.6 \sim 8.2$,再调节曝气量,降低溶解氧至 $0.4 \sim 0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,每个周期末排泥由 110 mL 增大至 200 mL,污泥龄由 $18 \sim 21 \text{ d}$ 减少至 $9 \sim 13 \text{ d}$.出水中亚硝态氮质量浓度明显增大,总氮去除率($\eta(\text{TN})$)不断提高,说明发生了短程硝化/反硝化现象.

2.2 A/O/A SBR 反应器周期内水质的变化

一个典型周期内水质的变化情况,如图 3 所示.由图 3 可知:进入厌氧阶段,COD 质量浓度下降至 $34.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,TP 质量浓度上升至 $78.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,呈较好的负相关性, NH_4^+-N 的质量浓度下降至 $69.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;进入好氧阶段,由于曝气的作用, NH_4^+-N 质量浓度不断下降,系统内的 $NO_2^- - N$ 出现积累,最大积累量为 $19.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而 $NO_3^- - N$ 始终保持极低的质量浓度,此阶段总氮出现明显的缺失,损失幅度高达 68.1% ,系统发生了较为明显的短程同步硝化/反硝化作用;进入缺氧阶段, $NO_2^- - N$ 和 TP 的质量浓度同步下降,呈正相关性,说明系统内可能存在以 $NO_2^- - N$ 为电子受体的反硝化除磷反应进行;系统对 COD,氨氮,TN,TP 的去除率分别为 94.8% , 97.6% , 89.4% , 93.1% ,说明在稳定运行期间 A/O/A SBR 反应器内实现了短程同步硝化/反硝化与除磷过程的耦合;在沉淀排水之后的闲置阶段,反应器内的微生物利用内源呼吸产物对残余氮素进行充分反硝化,并达到一种饥饿状态,为下一周期的运行做好准备.

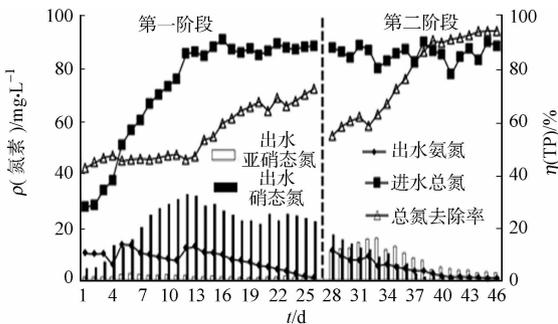


图 2 启动阶段氮素的变化情况

Fig. 2 Change of nitrogen during start-up period

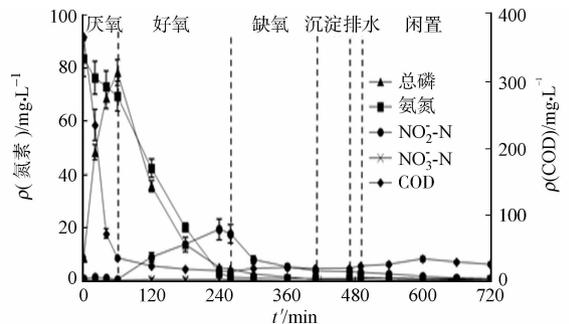


图 3 一个典型周期内水质变化情况

Fig. 3 Water quality change during one typical cycle

2.3 溶解氧对 A/O/A SBR 工艺的影响

在系统稳定运行期间,调整曝气量,使好氧阶段反应器的溶解氧分别为 0.2~0.4,0.6~0.8,1.0~1.2,1.4~1.6 mg·L⁻¹,每个工况运行 7 d,分别测定周期变化曲线。

2.3.1 溶解氧对脱氮的影响 不同溶解氧质量浓度下的各种氮素的周期变化情况,如图 4 所示。由图 4 可知:当 DO 质量浓度为 0.2~0.4 mg·L⁻¹时,氨氮不能得到有效地去除,出水氨氮质量浓度高达 10.1 mg·L⁻¹;当 DO 质量浓度大于 1.0 mg·L⁻¹时,缩短了短程硝化/反硝化的进程,具体表现为亚硝态氮的最大积累质量浓度下降,峰值出现的时间提前;当 DO 质量浓度为 1.0~1.2,1.4~1.6 mg·L⁻¹时,好氧阶段结束时,硝氮的质量浓度分别达到 16.1,35.8 mg·L⁻¹,亚硝化率分别降至 41%,20%;当 DO 质量浓度为 0.6~0.8 mg·L⁻¹时,不仅氨氮能得到有效去除,在好氧阶段也发生了较为明显的短程同步硝化/反硝化作用,当好氧阶段结束时,亚硝化率高达 97%。随着 DO 质量浓度的升高,反应器内的短程硝化向全程硝化转变,而且过高的溶解氧破坏了颗粒污泥的微环境,对短程同步硝化/反硝化作用产生不良影响。

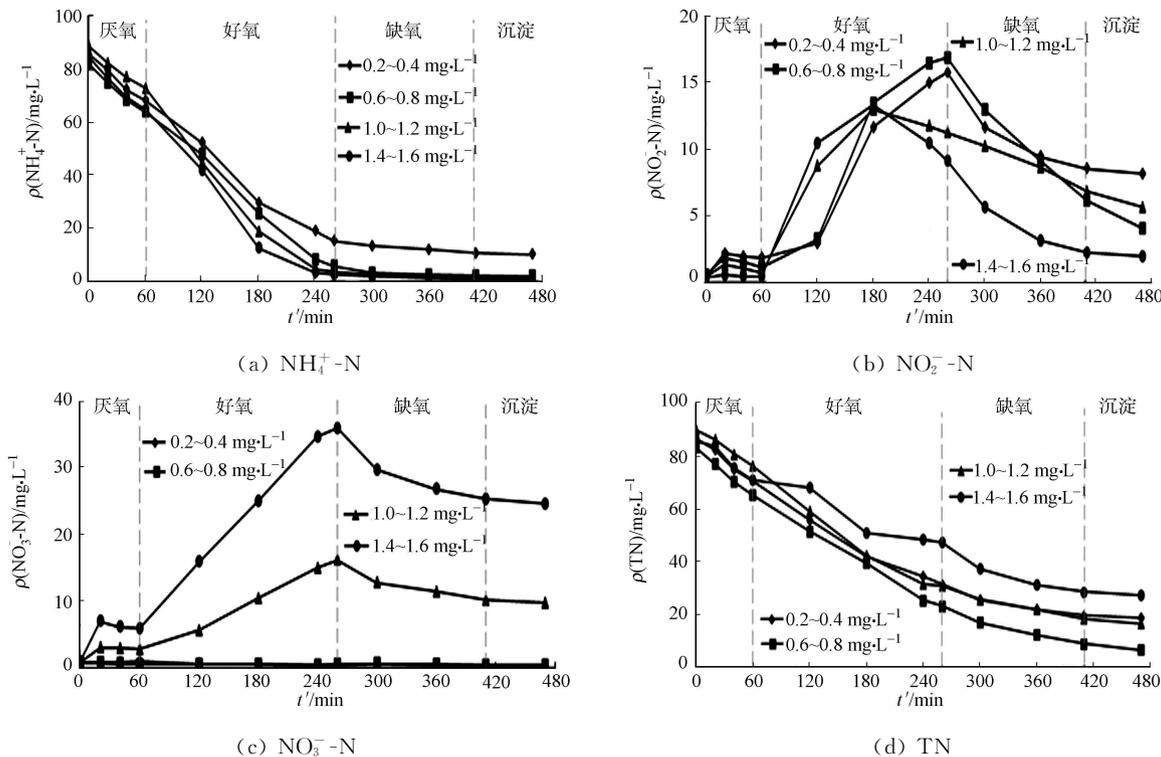


图 4 不同溶解氧质量浓度下氮素的周期变化

Fig. 4 Periodic changes of nitrogen under different DO concentration

2.3.2 溶解氧对除磷的影响 不同溶解氧质量浓度下总磷的周期变化,如图 5 所示。由图 5 可知:随着 DO 质量浓度的升高,好氧阶段的吸磷速率越快,吸磷量越大。由于在闲置阶段中,本周周期残余的氮素或溶解氧基本已消耗殆尽,其对下一周期厌氧阶段释磷作用的影响甚微。当 DO 质量浓度为 0.2~0.4 mg·L⁻¹时,好氧阶段结束时的总磷质量浓度为 7.91 mg·L⁻¹,而出水总磷质量浓度为 2.85 mg·L⁻¹,说明 DO 质量浓度过低对好氧阶段的吸磷作用产生了抑制。随着溶解氧质量浓度的升高,好氧阶段结束时的总磷质量浓度分别为 4.14,2.16,1.24 mg·L⁻¹,而出水总磷质量浓度分别为 0.51,0.95,1.58 mg·L⁻¹。当 DO 质量浓度大于 0.8 mg·L⁻¹时,好氧吸磷作用程度的增强导致

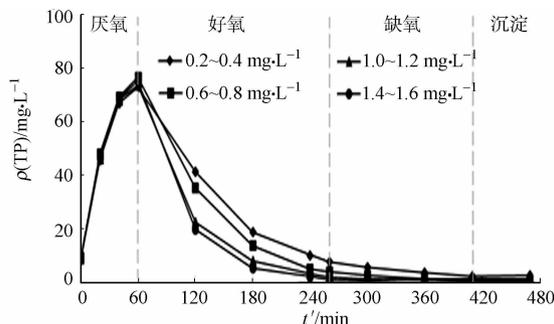


图 5 不同溶解氧质量浓度下总磷的周期变化
Fig. 5 Periodic changes of total phosphorus under different DO concentration

消耗过量的有机物,影响磷的有效吸收^[9],导致反应器在缺氧阶段对磷的去除能力下降.

3 结论

1) 稳定运行条件下,系统对 COD,氨氮,TN,TP 的去除率分别为 94.8%,97.6%,89.4%,93.1%,实现了短程同步硝化/反硝化与除磷过程的耦合.

2) 当 DO 质量浓度大于 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,氨氮得到有效去除.随着 DO 质量浓度的升高,好氧阶段结束时的亚硝化率由 97% 逐渐下降至 20%,对短程同步硝化/反硝化产生不良影响.

3) 当 DO 质量浓度为 $0.2 \sim 0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,不能满足好氧阶段对磷的充分吸收;当 DO 大于 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,随着 DO 质量浓度的升高,在好氧和缺氧阶段对磷的有效吸收受到影响.

参考文献:

- [1] 何岩,赵由才.高浓度氨氮废水脱氮技术研究进展[J].工业水处理,2008,28(1):1-4.
- [2] 钟金松,闵育顺.浅谈高浓度氨氮废水处理的可持续发展方向[J].环境科学技术,2008,31(2):92-94.
- [3] 徐微,吕锡武.反硝化聚磷污泥厌氧释磷影响因素研究[J].安全与环境工程,2009,16(3):26-30.
- [4] ZHOU Yan,PIJUAN M,YUAN Zhiguo.Free nitrous acid inhibition on anoxic phosphorus uptake and denitrification by poly-phosphate accumulating organisms[J].Biotechnology and Bio-engineering,2007,98(4):903-912.
- [5] 杨少武,王晓青,杨顺生.生物脱氮除磷新技术研究进展[J].安徽化工,2011,37(1):21-22.
- [6] 郭冬艳,李多松,孙开蓓,等.同步硝化反硝化生物脱氮技术[J].安全与环境工程,2009,16(3):41-44.
- [7] 马娟,彭永臻,王丽,等.反硝化除磷技术及其影响因素分析[J].工业水处理,2009,29(4):4-8.
- [8] 李泽兵,李军.短程硝化反硝化技术研究进展[J].给水排水,2011,37(9):163-168.
- [9] 李梅芳,宋秀兰.厌氧/好氧/缺氧模式的 SBR 处理生活污水[J].工业水处理,2013,33(8):22-25.

Effect of Dissolved Oxygen on Simultaneous Shortcut Nitrification/Denitrification With Phosphorus Removal Process

HE Zhengguang, XIE Qian, DING Dan

(College of Water Conservancy and Environmental Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: By using synthetic domestic sewage as feed, it was researched that A/O/A sequencing batch reactor activated sludge process was utilized to combine simultaneous shortcut nitrification/denitrification with phosphorus removal. The typical circle was tested and analyzed, and the system removal of chemical oxygen demand (COD), NH_4^+ -N, total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) was 94.8%, 97.6%, 89.4%, 93.1% respectively. Dissolved oxygen (DO) concentration was changed by adjusting the aeration, and the result showed: with DO concentration growing up, the shortcut nitrification rate changed from 97% into 20%. Phosphorus absorption process was inhibited at aerobic stage when DO concentration was too low, while the effective absorption of phosphorus was affected during aerobic and anoxic stage when DO concentration was too high.

Keywords: nitrification/denitrification; sequencing batch activated sludge process; dissolved oxygen; dephosphorization

(责任编辑:钱筠 英文审校:刘源岗)

β -环糊精交联聚合物吸附水中亚甲蓝的机理

李国平, 吴晓萍, 黄泱, 陈建华

(闽南师范大学 化学与环境学院, 福建 漳州 363000)

摘要: 以氧化镁为致孔剂,利用环氧氯丙烷交联 β -环糊精,合成多孔 β -环糊精交联聚合物(β -CDP). 考察 β -CDP 对亚甲蓝(MB)的吸附动力学、热力学讨论吸附的作用机理,并考察 pH 值、MB 的初始质量浓度、吸附剂的投入量、吸附时间及吸附温度对 β -CDP 吸附 MB 的影响. 结果表明:在室温下,水体的 pH 值为 6.54,MB 初始质量浓度为 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,吸附剂投入量为 $0.6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, β -CDP 的最大吸附量为 $62.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;吸附符合准二级吸附动力学模型和 Freundlich 等温吸附模型;结合颗粒内扩散模型,以及吸附热力学数据 ΔH 为 $20.50 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, ΔG 为 $-6.1 \sim -7.5 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$,可得该吸附为异质表面的多因素联合控制物理吸附.

关键词: β -环糊精交联聚合物; 吸附; 亚甲蓝; 动力学; 热力学

中图分类号: O 661.1

文献标志码: A

随着染料工业的快速发展,纺织印染业成为工业废水的排放大户,染料污水具有色度深、盐度高、毒性强、难降解的特点,是一类难处理的工业废水. 研究染料废水的治理技术和工艺一直是工业废水处理的难点和热点. 目前,国内外常用的染料废水处理方法主要包括物理法^[1-5]和化学法^[6-13]. 亚甲蓝(MB)是一种吩噻嗪类的有毒、常用的染料,在工业废水中广泛存在. 由于 MB 不能生物降解,廉价、高效的活性炭吸附成为去除 MB 的最佳办法^[14-15],但研究最为广泛的活性炭也存在分离难、再生难等缺点. β -环糊精交联聚合物(下面简称 β -CDP)是一类具有化学稳定性好、机械强度高、抗碾压、环境相容性好的弹性树脂颗粒,很好地克服了部分吸附剂易碎、二次污染和难分离的缺陷. 同时,性质稳定的 β -CDP 保留了 β -CD 的多羟基端口和空腔,又具有交联树脂网状结构,使其具有多样性的吸附位点和吸附选择. 本文探讨 β -CDP 吸附 MB 的热力学和动力学等问题,并解释吸附的机理.

1 材料与方 法

1.1 β -CDP 交联聚合物的合成

取 10 g 的 β -CD,加入 25 mL 质量分数为 25% 的 NaOH 溶液中,于 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 油浴中搅拌至 β -CD 完全溶解. 然后,加入 1 g 的 MgO 粉末,逐滴加入 15 mL 的环氧氯丙烷,得到凝胶状固体. 冷却至室温,水洗涤至呈中性,用稀盐酸泡 4 h,除去氧化镁,再用水洗和丙酮洗,抽滤,于 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 下真空干燥,研磨粉碎过 200 目筛,即制得吸附所需的 β -CDP. 以上试剂均为 AR 级,广东省汕头市西陇化工有限公司.

1.2 β -CDP 交联聚合物的表征

将吸附 MB 前、后的 β -CDP 于 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 下避光真空干燥 2 h,得到干燥的待测样品. 采用 Nicolet IS10 型傅里叶变换红外光谱仪(美国赛默飞世尔公司)测试吸附前后的 β -CDP 的红外光谱,光谱扫描范围为 $500 \sim 4\,000 \text{ cm}^{-1}$. 利用 JSM-6010LA 型扫描电子显微镜(配备 EDX,日本电子公司)表征 β -CDP 的表面形态,并通过能量色散 X 射线能谱测定并绘制吸附前后的 β -CDP 的 EDX 图,加速电压为 20 kV. 采用 Gemini VII 2390 型比表面积及孔径分布仪(美国麦克仪器公司)测试 77 K 下 N_2 的吸附-脱附等温曲线,推断 β -CDP 的比表面积(S_{BET})、孔容积(V_{tot}),并通过 t-plot 法评估得到微孔面积(S_{mic})、表面积(S_{ext})、

收稿日期: 2015-08-12

通信作者: 李国平(1978-),男,讲师,主要从事高分子有机合成及应用的研究. E-mail:545194760@qq.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21076174);福建省教育厅科研项目(JA14199)

微孔容积 (V_{mic})、中孔容积 (V_{meso}) 及吸附平均孔径 ($D_p = 4V_{tot}/S_{BET}$).

1.3 吸附动力学实验

配置 $1\ 000\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 MB 溶液为储备液, 避光冷藏, 实验所用各质量浓度 MB 溶液均由该溶液稀释得到. 根据实验需要取一定量的 β -CDP 与 50 mL 各质量浓度 MB 溶液在气浴恒温振荡器振荡一定的时间, 并控制不同的温度. β -CDP 对 MB 的吸附平衡 $q_e(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$ 和去除率 $\eta(\%)$ 的计算公式为

$$\eta = (C_0 - C_e)/C_0, \quad q_e = (C_0 - C_e)V/m.$$

式中: C_0, C_e 分别为 MB 的初始质量浓度与平衡质量浓度; V 为 MB 溶液的体积; m 为吸附剂投入量.

将 $0.03\ \text{g}$ 质量浓度为 $0.6\ \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 β -CDP 加入 50 mL, 质量浓度分别为 $20, 40, 60\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 MB 溶液中, 室温下振荡 $5 \sim 80\ \text{min}$. 将所得的吸附数据进行动力学模式拟合, 确定其动力学模式. 准一级、准二级动力学模拟方程及 Elovich 方程模拟表达式分别为

$$\begin{cases} \ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t, \\ \frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}, \\ q \cdot t = \left(\frac{1}{b}\right) \ln(a \cdot b) + \left(\frac{1}{b}\right) \ln t. \end{cases}$$

式中: q_e, q_t 分别表示平衡吸附量和 t 时刻吸附量; k_1, k_2 分别为一级、二级吸附动力学常数; a 为初始吸附速率常数; b 为 Elovich 常数. 以 $\ln(q_e - q_t) - t$, $t/q_t - t$ 和 $q \cdot t - \ln t$ 分别作图, 可得准一、二级动力学与 Elovich 方程的动力学参数.

相应的, 内部粒子扩散模式表达式为 $q_t = k_{id} t^{0.5} + C$. 其中: k_{id} 为颗粒内扩散速率常数, 由 $q_t - t^{0.5}$ 的线形图斜率得到; C 为与边界层厚度相关的常数.

1.4 等温吸附线实验

将 $0.03\ \text{g}$ 的 β -CDP 加入 50 mL, 质量浓度为 $10 \sim 60\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 MB 溶液中, 室温下振荡 $80\ \text{min}$ 进行等温吸附研究. 将数据代入热力学模拟方程, 确定其吸附热力学模式. Langmuir, Freundlich 和 Temkin 吸附热力学方程分别为

$$\begin{cases} \frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{k_L q_m} + \frac{C_e}{q_m}, \\ \lg q_e = \lg k_F + \frac{1}{n} \lg C_e, \\ q_e = B \ln A + B \ln C_e. \end{cases}$$

式中: q_e, C_e 分别为吸附平衡时的吸附量和溶液 MB 质量浓度; q_m 为吸附剂最大吸附量; k_L 为 Langmuir 常数; k_F 和 $1/n$ 分别为 Freundlich 方程经验常数; $B = RT/b$, b 是 Temkin 吸附能量的相关常数, R 是气体常数; A 是特征常数. B 和 A 的值可以从 q_e 对 $\ln C_e$ 作图的截距计算得到.

1.5 吸附热力学实验

吸附热力学吉布斯自由能 ΔG 的计算式为 $\Delta G = -RT \ln k_c$. 其中: k_c 为平衡常数, $k_c = C_A/C_S$, C_A 和 C_S 分别为平衡时染料被吸附剂吸附的质量浓度和溶液的质量浓度; R 为气体的摩尔常数; T 为绝对温度. 通过 $\ln k_c = -\Delta H/RT + \Delta S/R$ 计算可得到 ΔH 和 ΔS , 而 Van't Hoff 图的斜率和截距分别等于 $-\Delta H/R$ 和 $\Delta S/R$.

2 结果与讨论

2.1 吸附 MB 前后的 β -CDP 的表征

吸附 MB 前后 β -CDP 的红外谱图 (FT-IR), 如图 1 所示. 由图 1 可知: $3\ 369\ \text{cm}^{-1}$ 为一 OH 的伸缩振动峰; 大约在 $2\ 920\ \text{cm}^{-1}$ 附近的一组峰为 $-\text{CH}_3$ 和 $-\text{CH}_2$ 的伸缩振动峰; $1\ 642\ \text{cm}^{-1}$ 为 $-\text{C}=\text{O}$ 的伸缩振动峰; $1\ 019\ \text{cm}^{-1}$ 为 C-OH 弯曲振动峰; $851\ \text{cm}^{-1}$ 为吡喃糖苷

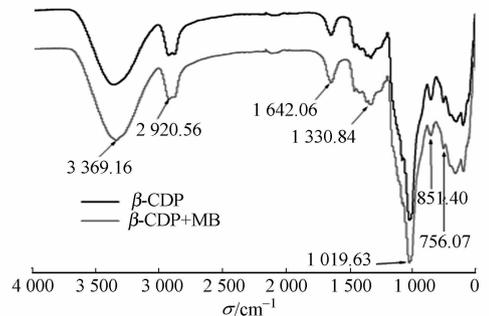


图 1 β -CDP 的红外光谱图

Fig. 1 FT-IR spectra of the β -CDP

键特征峰; 756 cm^{-1} 为糖环弯曲振动峰^[16]. 相比于未吸附 MB 的 β -CDP, 吸附了 MB 的 β -CDP 的红外谱图于 $1\ 642\text{ cm}^{-1}$ 的 $\text{C}=\text{O}$ 的伸缩振动峰面积略微增大, 而 851 cm^{-1} 为吡喃糖苷键特征峰和 756 cm^{-1} 为糖环弯曲振动峰峰面积减小. 从吸附 MB 对 β -CDP 的红外特征带的位置和强度的微弱影响, 可推论出 β -CDP 吸附 MB 为静电作用或范德华力的物理吸附^[17].

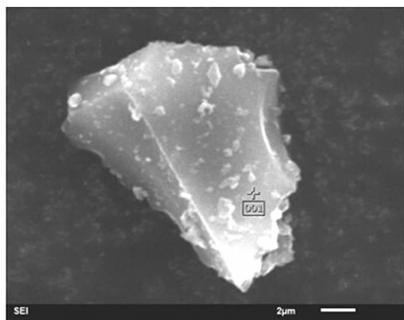
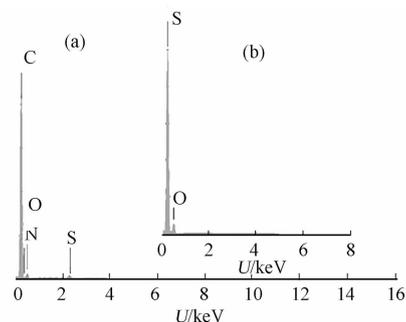
β -CDP 的孔结构参数, 如表 1 所示. 由表 1 可知: β -CDP 的比表面积 (S_{BET}) 为 $177.3\text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 孔总容积 (V_{tot}) 为 $0.722\text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$, 平均孔径 (D_p) 为 16.28 nm . 这说明材料孔类型为介孔, 孔容积分布为微孔占 7.1% , 介孔占 92.9% , 较小的表面积能够验证说明材料对 MB 吸附量较低实验结果.

表 1 β -CDP 的孔结构参数Tab. 1 Parameters of porous structure of β -CDP

$S_{\text{BET}}/$ $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	$S_{\text{ext}}/$ $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	$S_{\text{mic}}/$ $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	$V_{\text{tot}}/$ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$	$V_{\text{mic}}/$ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$	$V_{\text{meso}}/$ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$	$V_{\text{mic}}/$ $V_{\text{tot}}/\%$	$V_{\text{meso}}/$ $V_{\text{tot}}/\%$	D_p/nm
177.3	130.5	46.8	0.722	0.051	0.671	7.1	92.9	16.28

吸附 MB 后的 β -CDP 扫描电镜图 (SEM), 如图 2 所示. 由图 2 可知: 吸附 MB 前后的 β -CDP 扫描电镜图相同, 均为无规则、表面平滑的块状形态; 从 SEM 图不能区别 β -CDP 表面是否吸附了 MB.

吸附 MB 前后的 β -CDP 的能量色散 X 射线能谱 (EDX), 如图 3 所示. 由图 3 可知: β -CDP 颗粒表面主要含 C 和 O 两种元素, 半定量分析得到质量分数分别为 92.98% , 7.02% ; 而吸附了 MB 的 β -CDP 颗粒表面测得含 C, O, N 和 S 等 4 种元素, 半定量分析得到质量分数分别为 68.02% , 8.36% , 21.87% 和 1.75% . 由于 N 和 S 是 MB 分子含有的元素, 其中, N 的质量分数大大高于 MB 所含的质量分数, 这是因为 N 峰位置与 C 太接近, 峰叠加导致 N 的信号值过大产生误差, 据此可推出 β -CDP 对 MB 有一定的吸附.

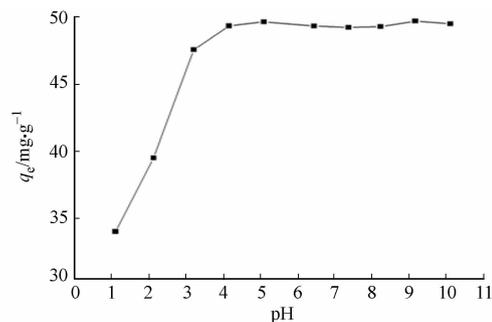
图 2 吸附 MB 后的 β -CDP 的 SEM 图 ($\times 5\ 500$)Fig. 2 SEM images of β -CDP after adsorption ($\times 5\ 500$)图 3 吸附 MB 前后的 β -CDP 的 EDX 图Fig. 3 EDX analysis of β -CDP before and after adsorption of MB

2.2 β -CDP 吸附 MB 的影响因素

2.2.1 pH 值 考察 pH 值对 β -CDP 吸附 MB 的影响, 如图 4 所示. 由图 4 可知: 当 pH 值在 $1\sim 4$ 的范围内, 吸附量 (q_e) 随 pH 值的增大而急剧上升; 而当 pH 值在 $4\sim 10$ 的范围内, 吸附量则基本保持不变. 这是由于酸性减弱并向碱性过渡时, OH^- 的去质子化作用使 β -CD 荷负电荷, 提高了其吸附正电性 MB 的能力. 但是, 随着溶液碱性的逐步增强, MB 的正电性削弱^[18], 反而不利于 β -CDP 对它的吸附. 因此, 选择水体系 pH 值为 6.54 (偏弱酸性) 作为实验条件.

2.2.2 吸附剂用量 考察吸附剂投加量 (ρ) 对 β -CDP 吸

附 MB 的影响, 如图 5 所示. 由图 5 可知: β -CDP 吸附量 (q_e) 随着吸附剂投放量的增加先缓慢下降, 然后急剧下降. 这是 MB 质点数和 β -CDP 吸附位点的数竞争的结果, β -CDP 投入量为 $0.1\sim 0.6\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, MB 的质点数大于 β -CDP 吸附位点的数, 能满足 β -CDP 的饱和吸附; 随着 β -CDP 投入量增加 $0.6\sim 1.0$

图 4 pH 值对 β -CDP 吸附 MB 的影响Fig. 4 Effect of pH on the adsorption of MB by the β -CDP

$g \cdot L^{-1}$, 吸附位点随吸附剂投入量的增加而增加, MB 的质点数不变, 吸附未达到饱和, 吸附量下降.

2.2.3 吸附时间和亚甲蓝初始质量浓度 考察吸附时间(t)和 MB 初始质量浓度对 β -CDP 吸附 MB 的影响, 如图 6 所示. 由图 6 可知: β -CDP 对不同初始质量浓度的 MB 溶液的吸附随吸附行为的快速进行, 由于 MB 被完全吸附($20 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ 的 MB 溶液)或吸附剂的吸附位点几乎被完全占用($40, 60 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ 的 MB 溶液), 呈现先快速上升, 然后达到平衡的态势. β -CDP 的吸附容量随着初始质量浓度的增大而增大, 表明了 MB 初始质量浓度于固-液两相中提供了重要的驱动力, 起到了克服传质阻力的作用. 因此, 高初始质量浓度可以提高吸附容量.

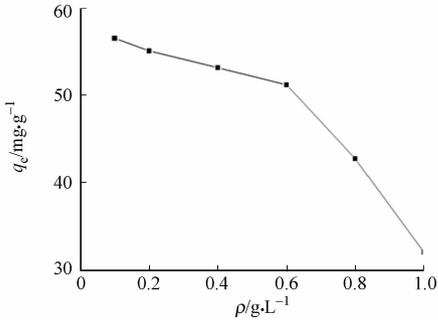


图 5 吸附剂用量对 β -CDP 吸附 MB 的影响
Fig. 5 Effect of adsorbent dosage on the adsorption of MB by the β -CDP

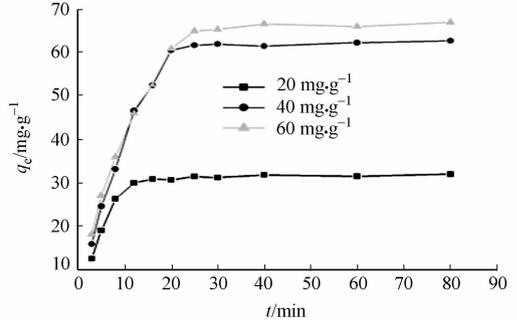


图 6 吸附时间、MB 初始质量浓度对 β -CDP 吸附 MB 的影响
Fig. 6 Effect of contact time and initial MB concentration on the adsorption of MB by the β -CDP

为研究吸附机理及潜在的速率控制步骤, 通过 Origin 7.5 分别对以上数据进行吸附动力学准一级、准二级和 Elovich 线性拟合, 结果如表 2 所示. 表 2 中: $H = k_s \cdot q_e^2$; $q_{e, \text{exp}}$ 为实验平衡吸附量; k_t, k_s 分别为准一级、准二级速率常数.

表 2 β -CDP 吸附 MB 的动力学参数

Tab. 2 Kinetic parameters for the adsorption of MB by the β -CDP

$C_0 / \text{mg} \cdot L^{-1}$	$q_{e, \text{exp}} / \text{mg} \cdot g^{-1}$	准一级模型			准一级模型			Elovich 模型			
		k_t / min^{-1}	$q_e / \text{mg} \cdot g^{-1}$	R^2	$k_s / g \cdot (\text{mg} \cdot \text{min})^{-1}$	H	$q_e / \text{mg} \cdot g^{-1}$	R^2	$a / \text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$	$b / \text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$	R^2
20	33.20	0.150 2	30.49	0.753 0	0.013 7	15.10	32.01	0.997 6	4.710	0.985 5	0.736 3
40	62.62	0.170 7	137.11	0.804 4	0.002 7	13.11	68.68	0.989 1	5.539	0.633 6	0.864 2
60	66.87	0.171 1	183.77	0.794 2	0.002 4	13.30	74.46	0.992 4	3.532	0.612 6	0.901 7

由表 2 可知: 准二级动力学的吸附模式更适合本吸附实验结果, 其线性拟合 R^2 为 0.99 左右, 且其实验平衡吸附量($q_{e, \text{exp}}$)与理论计算平衡吸附量(q_e)的值比较接近. 准二级动力学模型说明该吸附多重吸附的作用结果, 包含外部液膜扩散、吸附和内部颗粒扩散等^[19]. Elovich 模型适用于化学吸附过程和表面异构吸附, 其模拟结果并不理想, 也说明该吸附模式并不是化学吸附.

2.3 β -CDP 吸附 MB 的颗粒内扩散

不同 MB 质量浓度的颗粒内扩散模型的拟合, 如图 7 所示. 从图 7 可知: 吸附均分为两部分, 当 $t^{0.5}$ 小于 5 时, 为 MB 快速扩散到吸附剂表面(即液膜扩散)的过程; 当 $t^{0.5}$ 大于 5 时, 为吸附剂表面上的 MB 向吸附剂微孔内扩散的过程. $q_t \cdot t^{-0.5}$ 拟合的吸附曲线明显不过原点, 表明吸附过程为多级限制吸附过程, 可能是液膜扩散和颗粒内扩散联合控制^[20].

2.4 β -CDP 吸附 MB 的等温吸附

室温下, 对投放量为 0.03 g 的 β -CDP 与初始质量浓度为 $40 \text{ mg} \cdot g^{-1}$ 的 MB 的吸附实验数据进行等温吸附方程拟合, 考察 β -CDP 吸附 MB 的吸附容量和表面吸附性能, 其热力学参数值, 如表 3 所示. 表 3 中: q_{max} 为模拟曲线计算出来的最大吸附量. 由表 3 可知: 比较线性拟合的相关系数 R^2 , Freundlich

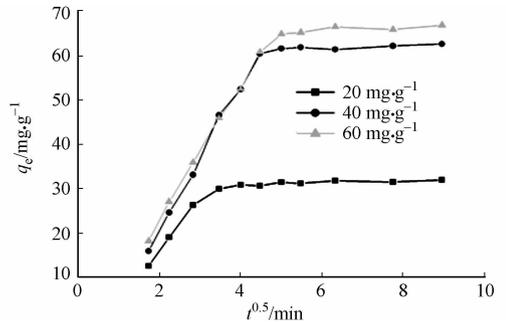


图 7 β -CDP 吸附 MB 的颗粒内扩散模型
Fig. 7 Intra-particle diffusion mode for the adsorption of MB by the β -CDP

等温吸附模式最能表达 β -CDP 吸附 MB, $n > 1$ 也能表明良好的吸附拟合合理性. Freundlich 等温吸附模式的拟合也说明该吸附为异质表面吸附^[21], 即吸附位点存在多样性且相互独立, 这也符合动力学的推论结果.

表3 β -CDP 吸附 MB 的吸附等温参数Tab. 3 Isotherm parameters for the adsorption of MB by the β -CDP

Langmuir 等温吸附参数			Freundlich 等温吸附参数			Temkin 等温吸附参数		
$q_{\max}/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	$k_L/\text{mL} \cdot \text{mg}^{-1}$	R^2	$k_f/\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	n	R^2	$A/L \cdot \text{g}^{-1}$	B	R^2
62.893 1	0.51	0.576 2	34.6	1.03	0.999 5	0.109 3	1.198 5	0.822 5

2.5 β -CDP 吸附 MB 的吸附热力学

温度(T)对 β -CDP 吸附 MB 效果的影响, 可以通过 Van't Hoff 方程描述, 方程具有良好的线性关系 ($\ln k_c = 11.572 - 2465.776/T, R^2 = 0.9924$). 当温度为 293, 298, 305, 310 K 时, ΔG 分别为 $-6.12, -6.51, -7.04, -7.52 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, $\Delta H = 20.50 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, $\Delta S = 96.2 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$. 由此可知, 该吸附为放热的物理吸附. Özcan 等^[22]认为物理吸附的吸附焓变 ΔH 的绝对值在 $0 \sim 40 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 而 ΔG 为 $-6.1 \sim -7.5 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 则说明吸附为快速自发的物理吸附.

3 结束语

室温下, 在 pH 值为 6.54, MB 初始质量浓度为 $40 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 吸附剂投入量为 $0.6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, β -CDP 吸附 MB 的最大吸附量为 $62.6 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$; 吸附符合准二级吸附动力学模型, 结合颗粒内扩散模型的拟合可推测吸附为外部液膜扩散、吸附和内部颗粒扩散等多因素的联合控制吸附; Freundlich 等温吸附模式可得 β -CDP 吸附 MB 为异质表面吸附; 范特霍夫方程计算吸附热力学数据 ΔH 为 $20.50 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, ΔG 为 $-6.1 \sim -7.5 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 说明该吸附为快速的放热物理吸附, β -CDP 中的 β -CD 的多羟基端口或吸附剂的 β -CD 空腔和吸附剂的网状交联微孔为物理吸附亚甲蓝的主要位点.

参考文献:

- [1] 冯冰凌, 叶菊招, 郎雪梅, 等. 聚氨基葡萄糖超滤膜的研制及其在印染水处理中的应用[J]. 工业水处理, 1998, 18(4): 16-18.
- [2] 孙巍, 李真, 吴松梅, 等. 磁分离技术在污水处理中的应用[J]. 磁性材料及器件, 2006, 37(4): 6-10.
- [3] LI Lin, WANG Shaobin, ZHU Zhonghua. Geopolymeric adsorbents from fly ash for dye removal from aqueous solution[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2006, 300(1): 52-59.
- [4] RASHMI S, BHATTACHARYA B. Review on decolorisation of aqueous dye solutions by low cost adsorbents[J]. Coloration Technology, 2002, 118(5): 256-259.
- [5] ÖZER D, GÜBRYI D, ÖZER A. Methylene blue adsorption from aqueous solution by dehydrated peanut hull[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 144(1/2): 171-179.
- [6] LIU Guiping, WANG Mingjie, LIU Changfeng, et al. Dye wastewater treatment by chitosan/bauxite composite flocculant[J]. Journal of Textile Research, 2010, 31(9): 79-83.
- [7] 张芝兰, 陆雍森. 稻草类碱木素混凝剂的性质及其应用[J]. 环境科学学报, 1997, 17(4): 450-454.
- [8] 雷乐成, 汪大辉. 湿式氧化法处理高浓度活性染料废水[J]. 中国环境科学, 1999, 19(1): 42-46.
- [9] ALIREZA K, REZA D C S, YOUNES H, et al. Synthesis and characterization of dysprosium-doped ZnO nanoparticles for photocatalysis of a textile dye under visible light irradiation[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2014, 53(5): 1924-1932.
- [10] MAHMOUDA S A, FOUAD O A. Synthesis and application of zinc/tin oxide nanostructures in photocatalysis and dye sensitized solar cells[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2015, 136: 38-43.
- [11] NIYZA M M. Binary catalyst system dye degradation using photocatalysis[J]. Fibers and Polymers, 2014, 15(2): 273-280.
- [12] JI G D, SUN T H, NI J R, et al. Anaerobic baffled reactor (ABR) for treating heavy oil produced water with high concentrations of salt and poor nutrient[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(3): 1108-1114.
- [13] JIN Min, WANG Xinwei, GONG Taishi, et al. A novel membrane bioreactor enhanced by effective microorganisms

- for the treatment of domestic wastewater[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2005, 69(2): 229-235.
- [14] LI Kunquan, ZHENG Zheng, LI Ye. Characterization and lead adsorption properties of activated carbons prepared from cotton stalk by one-step H_3PO_4 activation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 181(1/2/3): 440-447.
- [15] CHOY K K H, MCKAY G, PORTER J F. Sorption of acid dyes from effluents using activated carbon[J]. Resour Conserv Recycl, 1999, 27(1): 57-71.
- [16] 徐永群, 汤俊明, 周群, 等. β -环糊精变温红外光谱的二维相关分析[J]. 分析化学研究简报, 2003, 31(5): 590-593.
- [17] RAFATULLAH M, SULAIMAN O, HASHIMA R, et al. Adsorption of copper(II), chromium(III), nickel(II) and lead(II) ions from aqueous solutions by merantisawdust[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 170: 969-977.
- [18] 路平, 张晓慧, 王敏娟. β -环糊精对亚甲基蓝光脱色表观动力学的影响[J]. 江汉大学学报(自然科学版), 2008, 36(2): 23-27.
- [19] CHANG M Y, JUANG R S. Adsorption of tannic acid, humic acid, and dyes from water using the composite of chitosan and activated clay[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2004, 278(1): 18-25.
- [20] MITTAL A, MALVIVA A, KAUR D, et al. Studies on the adsorption kinetics and isotherms for the removal and recovery of Methyl Orange from wastewaters using waste materials[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 148(1/2): 229-240.
- [21] LIU Hai, DAI Peng, ZHANG Jian, et al. Preparation and evaluation of activated carbons from lotus stalk with trimethyl phosphate and tributyl phosphate activation for lead removal[J]. Chemical Engineering Journal, 2013(228): 425-434.
- [22] ÖZCAN A S, ERDEM B, ÖZCAN A. Adsorption of acid blue 193 from aqueous solutions onto Na-bentonite and DTMA-bentonite[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2004, 280(9): 44-54.

Study on the Adsorption of Methylene Blue With the β -cyclodextrin Crosslinked Polymer in the Water

LI Guoping, WU Xiaoping, HUANG Yang, CHEN Jianhua

(College of Chemistry and Environment, Minnan Normal University, Zhangzhou 363000, China)

Abstract: β -cyclodextrin crosslinked polymer (β -CDP) was fabricated with the aid of magnesium oxide (MgO) as pore-foaming agent and epichlorohydrin as a crosslinker for β -cyclodextrin. Methylene blue (MB) adsorption on the surface of the β -CDP was proved by FT-IR, SEM and EDX. Then, the kinetics and thermodynamics of the adsorption of MB from aqueous solution onto the β -CDP was studied to explain the adsorption mechanism. Batch adsorption experiments were carried out to study the effects of solution pH, initial MB concentration, adsorbent dose, contact time and adsorption temperature on adsorption property. The results indicated that β -CDP presented the maximum MB uptake capacity of $62.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ under the aqueous solution pH of 6.54, adsorbent dose of $0.6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, the initial MB concentration of $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ at room temperature. Kinetics experiments indicated that the pseudo-second-order model displayed the best correlation with adsorption kinetics data. And the isothermal adsorption was well described by Freundlich isotherm. Combine with the intra-particle model and the negative ΔG (-6.1 — $-7.5 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$) and positive ΔH ($20.5 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$) obtained from van't Hoff equation, it could be discovered that the adsorption is a heterogeneous surfaces physical absorption with a multistep-controlling process.

Keywords: β -cyclodextrin crosslinked polymer; adsorption; methylene blue; kinetics; thermodynamics

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 刘源岗)

文章编号:1000-5013(2015)06-0693-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.06.0693

巨尾桉胞质 *EuCuZnSOD* 基因的克隆与原核表达

赵艳玲, 周利建

(华侨大学 化工学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 通过克隆巨尾桉的胞质 *EuCuZnSOD* 基因, 构建原核表达载体 pET-CuZnSOD, 并研究该基因的功能. 测序结果表明: 基因序列长度为 459 bp; 152 个编码氨基酸, 蛋白相对分子质量为 15.2 ku. 在 28 °C 条件下, 1 mmol · L⁻¹ 异丙基硫代半乳糖苷(IPTG)诱导 4 h, 转化菌株的超氧化物歧化酶(SOD), 总酶活比对照组平均高 19.9%. 结果表明: 克隆获得的巨尾桉胞质 *EuCuZnSOD* 的重组基因表达产物具有 SOD 酶活性, GenBank 注册号为 JX138573.

关键词: 巨尾桉; *EuCuZnSOD* 基因; 铜锌超氧化物歧化酶; 克隆; 原核表达

中图分类号: Q 943.2

文献标志码: A

桉树在我国造纸木浆生产上具有重要地位, 但是低温限制了桉树的种植范围, 盲目北移推广种植遭受重大经济损失. 过去的桉树抗寒性研究主要集中在优树选育、抗寒锻炼和抗寒生理生化机制等, 随着现代生物技术的发展, 通过基因工程手段定向增加树木抗寒能力已成为可能. 超氧化物歧化酶(super-oxide dismutase, SOD)是体内氧自由基清除反应的第 1 个酶类, 催化超氧负离子转变成 O₂ 和 H₂O₂. 植物细胞主要含有 3 种类型的 SOD: *CuZnSOD*, *MnSOD* 和 *FeSOD*^[1]. *CuZnSOD* (简称 CSD) 是 3 种歧化酶中质量分数最丰富的一种, 是活性氧清除酶系统中最重要酶, 分布于植物的叶绿体、细胞质、质外体、过氧化物酶体和细胞核^[2], 与植物的非生物胁迫如旱^[3]、盐碱^[4]、重金属^[5]、低温^[6], 以及生物侵袭^[7-8]等多种氧化应激反应密切相关. 在桉树抗寒性与保护酶的关系方面, 国内主要研究 SOD 活性, SOD 活性是桉树本身遗传因子所决定的, 可作为筛选桉树抗寒性的一个生理指标. 研究发现: 造成巨尾桉幼苗低温伤害的主要原因是体内活性氧代谢的失调^[9]. 尾巨桉幼苗在低温胁迫下 SOD 的活性先升高, 后降低, 随低温胁迫时间的延长酶活性下降^[10], 桉树的不同种类应对低温逆境时, 其 SOD 的活性变化差异明显^[11], 低温胁迫处理后, 耐寒的邓恩桉比尾叶桉的 SOD 活性高^[12]. 桉树个体内的 SOD 活性随时间不断变化, 耐寒能力强的桉树, SOD 低温反应较敏感^[13]. 综上所述: SOD 的活性越高, 表明桉树对低温胁迫的抵抗能力越强. 但是, 桉树的 *CuZnSOD* 基因至今未有成功克隆, GenBank 中只注册成功一段长 390 bp 的 mRNA 部分序列. 本文成功克隆了巨尾桉的 *EuCuZnSOD* 基因, 通过该基因的原核表达确定了 *EuCuZnSOD* 基因的功能, 为进一步探讨桉树的抗寒性机理提供了物质基础.

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 菌株与植物材料 pET-32a(+), *E. coli* JM109, BL21(DE3), 巨尾桉植株为本实验室保存; pMD18-T Vector 购自大连 Takara 有限公司.

1.1.2 试剂 PrimeScript II 1st Strand cDNA Synthesis Kit, 聚合酶链式反应(PCR)体系等均购自大连 Takara 公司; 其他试剂购自上海生工公司; 引物由厦门精聚公司合成.

收稿日期: 2015-01-05

通信作者: 赵艳玲(1978-), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事植物分子生物学的研究. E-mail: zhaoyl@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31300497)

1.2 实验方法

1.2.1 巨尾桉 *EuCuZnSOD* 的克隆 用 Trizol 法提取巨尾桉总 RNA(),根据 Takara 公司的反转录试剂盒说明书反转录总 RNA,通过生物信息技术分析植物 *CuZnSOD* 基因的保守区域,设计引物 FSOD: 5' ATGGTGAA- GGCCGTTGCCGTCC 3', RSOD: 5' TTAGCCTTGCAGACCAATAATAC 3',应用降落 PCR 扩增目的基因,反应程序为:94 °C 变性 2 min;然后 94 °C,30 s,65~56 °C 退火 45 s (每个循环降低 1 °C),72 °C 延伸 60 s,共 10 个循环;之后,94 °C,30 s,55 °C,45 s,72 °C,60 s,共 20 个循环;最后 72 °C 延伸 5 min. 玻璃奶回收试剂盒(美国 Promega 公司)回收目的片段与 pMD18-T Vector 连接. 重组载体转化 JM109 感受态,筛选阳性质粒. 通过 Sac I/BamH I 双酶切验证阳性克隆子,命名为 pMD-CSD,送上海生工生物工程股份有限公司双向测序,将测序结果提交至 NCBI.

1.2.2 原核表达载体 *pET-CuZnSOD* 的构建 将 pMD-CSD 和 pET-32a(+)质粒用 BamH I 和 Sac I 双酶切后,回收目的片段,并连接,转化 BL21 感受态,筛选阳性克隆菌株,Sac I/BamH I 双酶切验证,命名为 *pET-CuZnSOD*.

1.2.3 *EuCuZnSOD* 蛋白原核表达 将含有 *pET-CuZnSOD* 的 BL21 菌株、含有 pET-32a(+)的 BL21 菌株及空菌株 BL21,分别接种于 5 mL LB 培养基中(50 $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ Amp),37 °C 振荡培养过夜;以 1 : 50 量各接种两瓶共 6 瓶 50 mL LB 培养基中(50 $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ Amp),37 °C 振荡培养至 $D(600)$ 为 0.4,添加 1 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的异丙基硫代半乳糖苷(IPTG)诱导,不加 IPTG 为空白对照组,37 °C 诱导 4 h 后取 1 mL 菌液离心,收集菌体,加 100 μL 的蛋白上样缓冲液,沸水 5 min,吸取 10 μL 上样,质量分数为 15% SDS-PAGE 电泳分析,经考马斯亮蓝 R250 染色,脱色分析.

1.2.4 IPTG 对 *EuCuZnSOD* 蛋白原核表达的影响 同节 1.2.3,挑单菌落,37 °C 振荡培养,转接 5 瓶,培养至 $D(600)$ 为 0.4,分别添加 IPTG 至终浓度为 0,0.5,1.0,1.5,2.0 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,培养 5 h 后分别取 1 mL 菌液,同节 1.2.3 方法处理,对质量分数为 12% 的 SDS-PAGE 电泳分析.

1.2.5 诱导时间对 *EuCuZnSOD* 蛋白原核表达的影响 同节 1.2.3,挑单菌落,37 °C 和 28 °C 条件下分别振荡培养,转接培养至 $D(600)$ 为 0.4,添加 IPTG 1 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,分别培养 0,1,2,3,4,5,6 h,每隔 1 h 取 1 mL 菌液离心,对质量分数为 2% 的 SDS-PAGE 电泳分析.

1.2.6 NBT 法检测 SOD 蛋白酶活性 同上,挑单菌落摇菌,添加 IPTG 1 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,培养至 3 h,不含载体的空白菌株平行处理做对照组. 超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定采用氮蓝四唑(NBT)法,已知活性单位以抑制 NBT 光化还原的 50% 为一个酶活性单位表示,SOD 活性为

$$z(\text{SOD}) = (A_{C,K} - A_E) \times 16\ 067V / (1/2 \times A_{C,K} \times W \times V_i)$$

上式中: z 为总活性(nKat); $A_{C,K}$ 为对照组管的吸光度; A_E 为样品管的吸光度; V 为样品总体积(mL); V_i 为测定时样品用量(mL); W 为样品鲜质量(g).

2 结果与分析

2.1 巨尾桉 *EuCuZnSOD* 的克隆

用 Trizol 试剂提取总 RNA,反转录成 cDNA 后,经 PCR 扩增,获得一条大约 500 bp 的条带,如图 1 所示. 图 1 中:M 为蛋白 Marker. PCR 产物与 pMD-18T 连接,命名为 pMD-CSD,SacI/BamHI 双酶切验证具有一条 500 bp 左右的条带,表明连接成功,如图 2 所示. 图 2 中:M 为蛋白 Marker. 经上海生工生物工程股份有限公司双向测序后,基因序列长度为 459 bp,编码 152 个氨基酸,蛋白相对分子质量为 15.2 ku,等电点为 6.42. 经生物信息学分析(数据未列出),克隆得到的巨尾桉 *EuCuZnSOD* 为胞质 *CuZnSOD*,是非跨膜性亲水性稳定非分泌蛋白,无规则卷曲和 β -折叠是其蛋白质二级结构的主要元件.

与之前在 GenBank 中注册成功的一段长为 390 bp 的 mRNA 部分序列比对,两片段的相似性是 79%,在 NCBI 中 Blast 发现:与树棉的胞质 *CuZnSOD* 的相似性最高是 90%,申请 GenBank 注册,基因注册号为 JX138573.

2.2 原核表达载体 *pET-CuZnSOD* 的构建

采用外源基因原核表达法研究该克隆基因片段的功能. 琼脂糖凝胶回收的双酶切 *EuCuZnSOD* 片段与 pET-32a(+)连接,命名为 *pET-CuZnSOD*,SacI/BamHI 双酶切筛选阳性克隆. 结果表明:在 459

bp 处有目的条带, 如图 3 所示. 图 3 中: M 为蛋白 Marker. 由图 3 可知: *EuCuZnSOD* 原核表达载体构建成功.

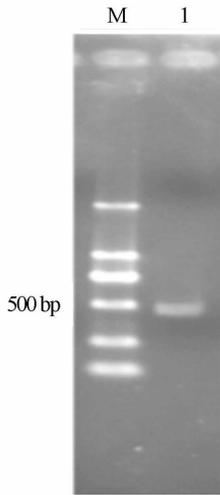


图 1 巨尾桉 *EuCuZnSOD* cDNA 序列扩增

Fig. 1 Amplification products of Eucalyptus *EuCuZnSOD* cDNA sequence

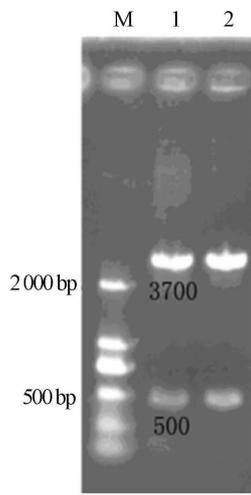


图 2 pMD-CSD *SacI/BamHI* 双酶切电泳图

Fig. 2 Gel analysis of the plasmid double digested with *SacI/BamHI* pMD-CSD

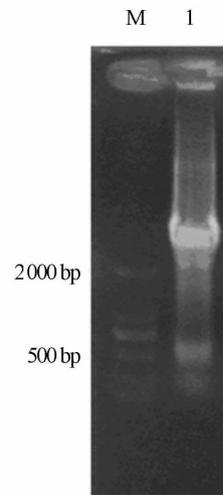


图 3 原核表达载体 *pET-CuZnSOD* *SacI/BamHI* 双酶切电泳图

Fig. 3 Gel analysis of *pMD-CuZnSOD* double digested with *SacI/BamHI*

2.3 *EuCuZnSOD* 重组蛋白的表达分析

以含有 *pET-CuZnSOD* 的 BL21 菌株、空菌株和含有质粒 pET32a(+) 的菌株研究目的蛋白的表达. pET-32a(+) 载体的 N 端部分相对分子质量大约为 20 ku, 巨尾桉 *EuCuZnSOD* 基因完整的阅读框架为 459 bp, 编码 152 个氨基酸, 理论上可表达为 15.2 ku 的蛋白, 加上表达系统的融合蛋白部分, 预期表达产物大约 35 ku. 实验结果表明: 经过 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 IPTG 诱导后, SDS-PAGE 图谱显示在蛋白相对分子质量 29.0 ku 以上有一条明显的蛋白差异带, 如图 4 所示. 图 4 中: M 为蛋白 Marker; 1 为未诱导的空菌株; 2 为诱导的空菌株; 3 为未诱导的含 pET-32a(+) 的菌株; 4 为诱导的含 pET-32a(+) 的转化菌株; 5 为未诱导的含 *pET-CuZnSOD* 的转化菌株; 6 为诱导的含 *pET-CuZnSOD* 的转化菌株, 箭头所示为表达的融合蛋白条带位置. 由图 4 可知: 目标蛋白可以在大肠杆菌中表达.

2.4 不同 IPTG 浓度诱导对重组蛋白 *EuCuZnSOD* 表达的影响

通过研究 IPTG $0.5 \sim 2.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 4 个浓度梯度对重组蛋白诱导表达的影响, 筛选最佳的 IPTG 诱导浓度. 诱导 4 h 的 *EuCuZnSOD* 蛋白表达量, 如图 5 所示. 图 5 中: M 为蛋白 Marker; 1~5 分别为 $0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 诱导 4 h 的蛋白表达; 箭头所示为表达的融合蛋白条带. 由图 5 可知: 所有浓度的 IPTG 均诱导出目的蛋白条带, 重组蛋白表达量无明显变化, 说明 $0.5 \sim 2.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 IPTG 浓度对目的蛋白的表达没有影响.

2.5 不同培养时间对重组蛋白 *EuCuZnSOD* 表达的影响

通过检测重组菌在不同时间表达 *EuCuZnSOD* 蛋白量确定最佳诱导时间. $37 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $28 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下重组菌在 1 h 既有蛋白表达, 如图 6 所示. 图 6 中: M 为蛋白 Marker; 1~7 分别为 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 h 诱导的表达蛋白; 箭头所示为表达的融合蛋白条带. 由图 6 可知: 重组蛋白的 $37 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下的最佳诱导时间为 3 h, $28 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下在 4 h 重组蛋白的表达量达到最高水平.

2.6 巨尾桉 *EuCuZnSOD* 酶活检测

因为大肠杆菌具有 *CuZnSOD* 酶, 酶活性的测定方法是相同的, 所以研究采用测定转化菌株总 SOD 酶活性的变化, 验证诱导表达的巨尾桉 *EuCuZnSOD* 蛋白是否具有生物学功能. $37 \text{ }^\circ\text{C}$ 培养条件下, 转化菌株的 SOD 总酶活反而比对照组低, 可能是表达蛋白在此温度下形成包涵体所致, 而包涵体中的蛋白无酶活性, 可能也影响了菌株本身的 SOD 酶活性. 培养温度的选择是影响外源基因在大肠杆菌中表达的重要因素之一, 外源蛋白大部分以活性存在的诱导温度是 $25 \sim 37 \text{ }^\circ\text{C}$, 降低诱导温度, 减慢细胞

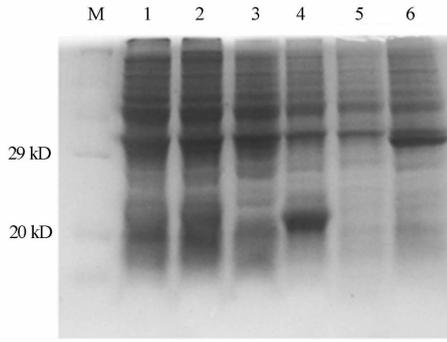


图4 *pET-CuZnSOD* 在 *E. coli* BL21 表达的 SDS-PAGE 电泳图

Fig. 4 SDS-PAGE analysis of the expression *E. coli* BL21 of recombination *pET-CuZnSOD* in

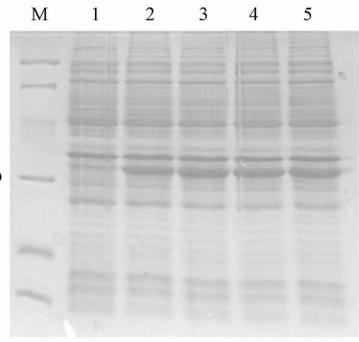
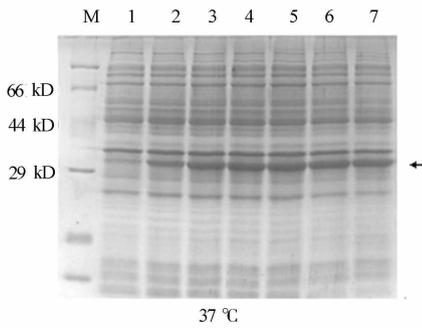
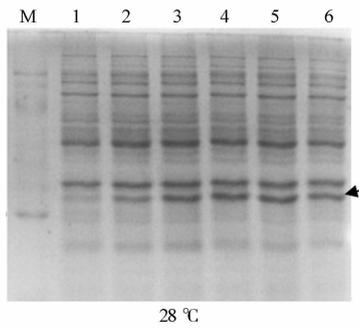


图5 不同 IPTG 浓度对重组蛋白 *EuCuZnSOD* 表达的影响

Fig. 5 Effect of the IPTG on the expression of recombinant *EuCuZnSOD*



(a) 37 °C



(b) 28 °C

图6 不同培养时间对重组蛋白 *EuCuZnSOD* 表达的影响

Fig. 6 Effect of the incubation time on the expression of recombinant *EuCuZnSOD*

的生长速度,酶蛋白具有足够的时间进行正确的折叠^[14-18]. 实验结果表明:在 28 °C 培养条件下,转化菌株的 SOD 总酶活比对照组平均高 19.9%. 说明在该温度条件下获得的外源表达产物存在可溶性蛋白,具有一定的酶活性.

3 结束语

成功克隆了巨尾桉的 *EuCuZnSOD* 基因,通过原核表达技术证明该基因具有生物学功能,但是该基因在巨尾桉中的时空表达特点以及在不同的胁迫环境下的表达模式需要进一步的研究.通过基因工程手段获得过量表达 *EuCuZnSOD* 的桉树植株,可能会提高桉树的抗寒能力以及综合抵抗各种逆境的能力,今后的研究目标和内容是培育出适应范围更广的桉树,为桉树定向培育研究提供物质基础和技术支持.

参考文献:

[1] ABREU I A, CABELLI D E. Superoxide dismutases: A review of the metal associated mechanistic variations[J]. *Biochimica et Biophysica Acta*, 2010, 1804(2): 263-274.

[2] MAHANTY S, KAUL T, PANDEY P, et al. Biochemical and molecular analyses of copper-zinc superoxide dismutase from a C4 plant *Pennisetum glaucum* reveals an adaptive role in response to oxidative stress[J]. *Gene*, 2012, 505(2): 309-317.

[3] PRASHANTH S R, SADHASIVAM V, PARIDA A. Overexpression of cytosolic copper/zinc superoxide dismutase

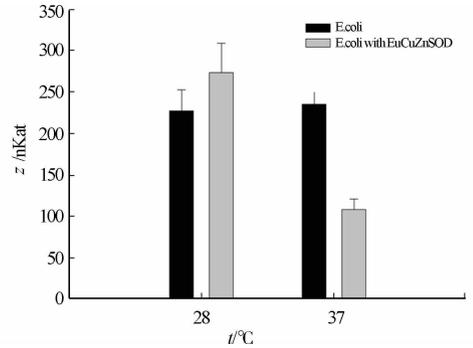


图7 SOD 酶活性

Fig. 7 SOD enzyme activity

- from a mangrove plant *Avicennia marina* in indica rice var Pusa Basmati-1 confers abiotic stress tolerance[J]. *Transgenic Res*, 2008, 17(2): 281-291.
- [4] LEE Y P, KIM S H, BANG J W, et al. Enhanced tolerance to oxidative stress in transgenic tobacco plants expressing three antioxidant enzymes in chloroplasts [J]. *Plant Cell Rep*, 2007, 26(5): 591-598.
- [5] RODRIGUEZ-Serrano M, ROMERO-PUERTAS M C, PAZMINO D M, et al. Cellular response of pea plants to cadmium toxicity: Cross talk between reactive oxygen species, nitric oxide, and calcium [J]. *Plant Physiol*, 2009, 150(1): 229-243.
- [6] HERNÁNDEZ-NISTAL J, DOPICO B, LABRADOR E. Cold and salt stress regulates the expression and activity of a chickpea cytosolic Cu/Zn superoxide dismutase[J]. *Plant Science*, 2002, 163(3): 507-514.
- [7] FAIZE M, BURGOS L, FAIZE L, et al. Modulation of tobacco bacterial disease resistance using cytosolic ascorbate peroxidase and Cu, Zn-superoxide dismutase[J]. *Plant Pathology*, 2012, 61(5): 858-866.
- [8] 邢朝斌, 龙月红, 李宝财, 等. 刺五加 *CuZnSOD* 的克隆及内生真菌对其表达的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2013, 41(1): 82-85.
- [9] 吕成群, 黄宝灵. 低温胁迫对巨尾桉幼苗膜脂过氧化及保护酶的影响[J]. *广西植物*, 2004, 24(1): 64-68.
- [10] 刘奕清, 李会合, 陈泽雄. 尾巨桉幼苗对低温胁迫的生理生化反应[J]. *福建林业科技*, 2007, 34(4): 24-26.
- [11] 刘友全, 刘加林, 潘天玲. 赤桉在湖南的抗寒与生长适应性[J]. *中南林学院学报*, 2000, 20(3): 86-89.
- [12] 刘建. 两种桉树对低温胁迫的响应机制研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2008: 28-35.
- [13] 朱宁华, 李志辉, 李芳东. 桉树耐寒性与超氧化物歧化酶关系研究[J]. *中南林学院学报*, 2000, 20(3): 63-66.
- [14] LIANG Rubing, LIU Xipeng, LIU Jianhua, et al. A T7-expression system under temperature control could create temperature-sensitive phenotype of target gene in *Escherichia coli* [J]. *J Microbiol Methods*, 2007, 68(3): 497-506.
- [15] AKKAPEDDI A S, SHIN D I, STANEK M T, et al. cDNA and derived amino acid sequence of the chloroplastic Copper/Zinc-superoxide dismutase from *Aspen (Populus tremuloides)* [J]. *Plant Physiol*, 1994, 106(3): 1231-1232.
- [16] 王芳, 董乐, 戴聪杰, 等. 杨梅 *Cu/Zn* 超氧化物歧化酶基因 (*MrSOD1*) cDNA 的克隆及表达分析[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(22): 27-33.
- [17] 吴军帅, 李培环, 李鼎立, 等. 桃果实铜锌超氧化物歧化酶基因 *PpCuZnSOD* 的克隆与分析[J]. *核农学报*, 2013, 27(4): 408-417.
- [18] 董乐. 杨梅铜锌超氧化物歧化酶基因 *MrCu₂Zn₂SOD1* 的原核表达及活性鉴定[J]. *基因组学与应用生物学*, 2012, 31(4): 349-354.

Cloning and Expression of the Cytosolic Copper/Zinc Superoxide Dismutase Gene in *Eucalyptus grandis* × *E. ophylla*

ZHAO Yanling, Zhou Lijian

(College of Chemical Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Copper Zinc superoxide dismutases are avital antioxidant enzymes that catalyze the disproportionation of superoxide anion to oxygen (O_2) and hydrogen peroxide (H_2O_2) to guard cells against superoxide toxicity. The cytosolic *CuZnSOD* gene was cloned from *Eucalyptus grandis* × *E. ophylla* (GenBank Accession Number: JX138573). The cDNA nucleotide sequence analysis revealed that an open reading frame contains 459 bp nucleotide coding for 152 residues (15.2 ku). The full-length gene is amplified to construct expression vector *pET-CuZnSOD*. The *Escherichia coli* is induced by $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ IPTG in 28°C for 4 hours and enzyme activity assay result shows that enzyme activity has increased 19.9% than the control in 28°C .

Keywords: eucalyptus grandis; copper/zinc-superoxide dismutases; clone; prokaryotic expression

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 刘源岗)

绿色经济理念的生态工业园区 综合评价指标体系

商婕^{1,2}, 曾悦¹

(1. 福州大学 环境与资源学院, 福建 福州 350116;

2. 福建省环境科学研究院 福建省环境工程重点实验室, 福建 福州 350013)

摘要: 基于绿色经济理论,提出生态工业园区绿色发展水平的内涵,从经济发展、生态环境保护、生态工业链建设及绿色管理4个方面综合考虑,建立了生态工业园区绿色发展综合评价指标体系.以福州经济技术开发区为例,利用熵权系数法客观地确定指标权重,利用综合指数法进行园区绿色发展水平综合评价,从中识别和分析开发区在“十一五”期间经济发展、环境保护、管理等方面存在的问题,并给予针对性建议.

关键词: 生态工业园区; 绿色经济; 评价指标体系; 环境管理

中图分类号: X 321

文献标志码: A

生态工业园区(eco-industrial parks, EIPs)作为协调环境污染和经济发展的有效手段之一,其发展状况得到研究学者的广泛关注.国内外专家学者从不同的角度运用不同的方法对生态工业园评价体系进行了大量研究. Lowe^[1]提出一套类似于ISO 14000的环境管理体系评价生态工业园区的综合水平. Roberts等^[2-4]从不同的方面设计了生态工业园区综合评价指标体系.朱丽等^[5-6]从不同的角度对生态工业园区进行评价.孙晓梅等^[7-8]运用不同的方法对园区进行评价.为加强指标体系的实用性,我国学者也构建了具有行业特征或地域特性的生态工业园区建设水平评价指标体系^[9-11].面对资源约束趋紧、环境污染严重、生态系统退化的严峻形势,党的十八大提出要把生态文明建设放在突出地位,着力推进绿色发展、循环发展、低碳发展,努力建设美丽中国.生态工业园区是工业领域推进生态文明建设的主要形式^[12],绿色发展是生态文明理念对生态工业园区发展的内在要求^[13].因此,如何实现绿色经济指导下的生态工业园区综合评价显得十分必要.本文基于绿色经济理论,建立了生态工业园区绿色发展综合评价指标体系.

1 生态工业园区绿色发展水平

1.1 内涵

生态工业园区的核心是生态工业的建设,即借鉴自然生态系统中物质与能量的传递方式,建立企业群落,以获得生态环境与经济的双赢^[14].绿色经济是可持续发展观的产物,是以保护和完善生态环境为根本的经济形态^[15-16].因此,生态工业园区绿色发展水平是在综合考虑生态工业园区经济发展、资源利用、生态环境保护等方面下,衡量经济发展对资源消耗和对环境的影响程度.该指标体系突出绿色与发展,并注重生态工业链网的特征,从而反映园区对区域环境质量的影响及改善潜力.

1.2 生态工业园区绿色发展水平的表现因素

根据生态工业园区绿色发展水平的内涵,确定影响其表现的因素有以下4点.

1) 经济发展水平.经济发展是生态工业园区发展的重要支撑,而企业是生态工业园区的主体,追求

经济利益是企业发展的根本动力. 经济的发展不仅需要关注企业的经济实力是否雄厚, 结构是否合理, 还需要其注重单位工业产值污染物排放量, 明确经济发展的环境代价, 以体现生态工业园区经济发展的“绿色”程度.

2) 生态环境保护水平. 资源与生态环境是制约园区发展的关键因素, 园区环境污染严重, 资源利用效率低下, 直接影响区域环境质量, 污染治理成本提高, 甚至产生不可逆转生态环境破坏, 从而影响园区的可持续发展. 可见, 资源与生态环境不仅是园区绿色发展有力保障, 更是园区绿色发展的生命源泉.

3) 生态工业建设水平. 企业共生关系是生态工业园区建设与发展的核心, 产业链的完善程度直接关系到资源利用最大化、污染排放最小化. 因此, 生态工业建设水平是促进园区绿色发展的本质因素.

4) 绿色管理水平. 生态工业园区是由不同的利益相关者组成, 有必要对园区内的活动进行合理规范的管理, 包括对园区内企业认证及园内基础设施建设等. 这不仅可以从源头上控制污染物的排放、利于构建生态工业链, 还可以提高企业参与环境保护的积极性. 可见, 绿色管理水平推动园区绿色发展是园区绿色发展不可或缺的因素.

2 综合评价指标体系的构建

2.1 指标体系结构的建立

评价体系采用主题框架模式, 根据状态-影响的逻辑思路, 将各表现因素作为准则层, 再以准则层为子系统, 分别确定影响其状态的因素. 层次上形成目标层(A)-准则层(B)-次准则层(C)-变量层(D)的结构, 将准则层称为系统层, 次准则层称为状态层. 以生态工业园区绿色发展水平为总目标, 根据影响其表现的因素, 确定经济发展水平、生态环境保护水平、生态工业建设水平、绿色管理水平为准则层. 将可能影响准则层状态的因素作为状态层, 选取经济实力、污染控制水平、产业链特征等 10 个评价指标.

2.2 变量层指标的确定

在评价目标内涵的充分了解基础上, 根据评价目标与指标内涵之间的关系, 筛选出能够反映评价对象本质的指标. 对有关生态工业园区的评价报告、相关期刊、论文中的指标及相关指标体系中的相关指标进行频度统计, 建立园区绿色发展综合评价体系变量层的备选指标集. 将备选指标依据独立性、针对性、可操作性、可比性原则进行剔除, 保留的指标按照指标体系结构构建绿色发展综合评价指标体系, 如表 1 所示.

表 1 中: ① 表示生态工业园区内废气、废水必须根据国家污染物排放要求收集处理, 达标排放; ② 表示空气污染综合指数小于等于 100, 空气质量优良, 对人体不良影响, 可正常进行户外活动; ③ 表示各水质污染物均符合区域水环境质量要求, 综合指数不得超过 1, 若所选取的水质污染物中任意一项存在超标情况, 则水质污染综合指数指标评分时直接赋 0 分; ④ 根据环境功能区划及要求, 该区域声环境执

表 1 生态工业园区绿色发展综合评价指标体系

Tab. 1 Indicator set for evaluating EIPs green-comprehensive development level

目标层	准则层	状态层	变量层	标准值	指标出处
园区绿色发展综合水平(A)	经济实力(C ₁)		人均工业增加值(D ₁)	≥15 万元·人 ⁻¹	文献[14]
			工业增加值增率(D ₂)	≥25%	文献[7]
	经济结构(C ₂)		高新技术产业占全区工业产值比重(D ₃)	50%~80%	文献[7,17]
			主导产业产值占全区工业产值比重(D ₄)	50%~80%	文献[5]
			第三产业占 GDP 比重(D ₅)	20%~40%	文献[17]
	经济发展水平(B ₁)		单位工业增加值综合能耗(D ₆)	≤0.5 t·万元 ⁻¹	文献[14]
			单位工业增加值新鲜水耗(D ₇)	≤9 m ³ ·万元 ⁻¹	文献[14]
	绿色经济水平(C ₃)		单位工业用地工业增加值(D ₈)	≤9 亿元·km ⁻²	文献[14]
			单位工业增加值 COD 排放量(D ₉)	≤1 kg·万元 ⁻¹	文献[14]
			单位工业增加值氨氮排放量(D ₁₀)	≤0.08 kg·万元 ⁻¹	文献[5]
			单位工业增加值 NO _x 排放量(D ₁₁)	≤1 kg·万元 ⁻¹	文献[5]
			单位工业增加值 SO ₂ 排放量(D ₁₂)	≤1 kg·万元 ⁻¹	文献[14]
			单位工业增加值固体废物产生量(D ₁₃)	≤0.1 t·万元 ⁻¹	文献[14]

续表 1

Continue table 1

目标层	准则层	状态层	变量层	标准值	指标出处
园区绿色发展综合水平(A)	生态环境 保护水平(B ₂)	污染控制 水平(C ₄)	工业废水排放达标率(D ₁₄)	100%	①
			工业废气排放达标率(D ₁₅)	100%	①
			危险废物安全处理处置率(D ₁₆)	100%	文献[14]
			生活垃圾无害化处理率(D ₁₇)	90%~100%	文献[14]
	环境质量(C ₅)	空气污染综合指数(D ₁₈)	100	②	
		水质污染综合指数(D ₁₉)	≤1	③	
	改善潜力(C ₆)	环境噪声(D ₂₀)	≤60 dB	④	
		清洁能源使用比重(D ₂₁)	50%~80%	文献[17-18]	
	生态工业 建设水平(B ₃)	资源利用(C ₇)	环境保护支出占财政支出比重(D ₂₂)	1%~3%	文献[17]
			工业用水重复利用率(D ₂₃)	75%~100%	文献[14]
产业链特征 (C ₈)		工业固体废物综合利用率(D ₂₄)	85%~100%	文献[14]	
		生态产业链完整性(D ₁₄)	—	专家咨询	
绿色管理 水平(B ₁)	环境管理(C ₉)	生态产业链运行柔性(D ₂₆)	—	专家咨询	
		规模以上企业清洁生产审核实施率(D ₂₇)	100%	文献[14]	
	基础设施(C ₁₀)	通过 ISO 14001 认证率(D ₂₈)	100%	文献[7]	
		园区内部管理制度的制定和实施(D ₂₉)	—	专家咨询	
		基础设施配套完善度(D ₃₀)	—	专家咨询	
		信息平台完善度(D ₃₁)	—	专家咨询	

行 GB 3096—2008《声环境质量标准》中 2 类区标准,昼夜环境噪声限值分别为 60,50 dB,由于缺乏夜间环境噪声数据,此处仅考虑昼间环境噪声。

2.3 标准值的获取

在制定指标评价标准值时,主要遵循以下 4 个原则. 1) 有国家或行业标准的,尽量采用标准中的规定值,或者根据具体情况进行适当调整. 2) 与我国相关政策研究的目标值相一致,或优于其目标值. 3) 考虑园区的实际发展水平,以园区的发展规划为目标,同时参考国内外运行良好的生态工业园区的现状值. 4) 对缺乏统计数据的,但在指标体系中很重要的指标,采用专家咨询、定性描述等方法来确定。

2.4 评价方法

1) 权重方法的确定. 评价采用熵权系数法进行权重的确定,熵权系数法是一种以指标值所包含信息量大小来计算指标权重的方法,当某项指标计算得到的信息熵越小,说明该指标的变异程度越大,在综合评价中起到的作用越大,则这项指标的权重也会越大,反之亦然. 因此,可以运用熵权系数法,判断每个指标值之间的变异程度,计算指标的权重。

2) 综合评价方法的确定. 采用综合指数法进行评价,其评价步骤是:首先,取得评价指标的权数,根据设定的标准值计算各指标的分值;然后,将各指标的权重分别乘以对应的评分结果;最后,汇总得到综合评价结果. 通过综合评价,可以确定一个区域或一个时期的总体水平,并对于多区域或时期数据具有可比性,用于判断发展的阶段等。

3 实证研究

福州经济技术开发区位于福州市马尾区,成立于 1985 年,经过近 30 a 的开发建设,开发区已成为产业聚集突出的外向型现代工业园区. 至 2010 年,全区 7 大行业集群完成产值 420.14 亿元,比“十一五”初期(207.29 亿元)增长 102%^[19]. 以福州经济技术开发区(economic and technical development zone,ETDZ)为例(以下简称“开发区”),运用建立的生态工业园区绿色发展综合评价指标体系对开发区“十一五”期间的绿色发展水平进行评价。

3.1 福州经济技术开发区绿色发展水平评价

通过开发区统计年鉴、环境调查资料、相关报告及专家咨询等方式得到开发区“十一五”期间各指标的现状数据,利用熵权系数法计算出各个指标的权重值,累加后依次得到状态层和系统层的权重值,计

算结果, 如表 2 所示.

表 2 福州经济技术开发区绿色发展综合评价指标现状值及权重(2006—2010 年)

Tab. 2 Statistics values and weights of green-comprehensive development level in Fuzhou ETDZ (2006-2010 year)

准则层	状态层	变量层	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	变量层 权重	状态层 权重	准则层 权重
B ₁	C ₁	D ₁	10.004 0	10.905 0	12.149 0	11.858 0	14.948 0	0.030 5	0.070 5	0.462 8
		D ₂	14.400 0	20.600 0	20.100 0	13.500 0	17.100 0	0.040 0		
	C ₂	D ₃	54.000 0	55.000 0	56.000 0	65.000 0	70.000 0	0.044 0		
		D ₄	73.700 0	71.822 0	74.530 0	74.906 0	70.626 0	0.033 6		
		D ₅	23.380 0	22.741 0	24.277 0	33.421 0	30.851 0	0.045 4		
	C ₃	D ₆	0.293 0	0.291 0	0.238 0	0.213 0	0.173 0	0.039 5		
		D ₇	11.158 0	9.924 0	7.987 0	5.710 0	4.657 0	0.034 9		
		D ₉	0.418 0	0.367 0	0.295 0	0.180 0	0.149 0	0.036 4		
		D ₁₀	0.013 6	0.019 8	0.012 5	0.017 5	0.018 7	0.039 0		
		D ₁₁	0.332 0	0.272 0	0.188 0	0.141 0	0.126 0	0.033 4		
		D ₁₂	1.211 0	1.146 0	0.778 0	0.670 0	0.615 0	0.040 8		
		D ₁₃	0.031 9	0.044 8	0.050 6	0.051 1	0.051 2	0.045 3		
		C ₄	D ₁₄	100.000 0	97.3	100.000 0	100.000 0	100.000 0		
D ₁₅	100.000 0		100.000 0	100.000 0	100.000 0	100.000 0	—			
D ₁₆	100.000 0		100.000 0	100.000 0	100.000 0	100.000 0	—			
D ₁₇	92.000 0		96.500 0	97.200 0	97.500 0	97.500 0	0.029 4			
C ₅	D ₁₈	64.800 0	54.300 0	55.700 0	52.200 0	58.600 0	0.027 2			
	D ₁₉	0.380 0	0.390 0	0.380 0	0.380 0	0.330 0	0.037 0			
C ₆	D ₂₀	56.000 0	55.500 0	55.900 0	56.400 0	55.800 0	0.025 5			
	D ₂₁	53.520 0	49.960 0	53.950 0	53.990 0	56.660 0	0.024 5			
B ₂	C ₇	D ₂₂	0.320 0	0.460 0	0.250 0	0.560 0	0.580 0	0.036 3		
		D ₂₃	84.850 0	82.000 0	83.390 0	86.110 0	87.290 0	0.030 8		
	C ₈	D ₂₄	95.470 0	96.500 0	97.220 0	98.140 0	97.990 0	0.031 0		
		D ₂₅	60.000 0	60.000 0	70.000 0	80.000 0	80.000 0	0.049 5		
	C ₉	D ₂₆	60.000 0	70.000 0	80.000 0	80.000 0	90.000 0	0.027 8		
		D ₂₇	1.031 0	2.439 0	4.673 0	4.808 0	13.300 0	0.034 0		
B ₃	C ₁₀	D ₂₈	5.670 0	5.854 0	18.692 0	24.039 0	30.542 0	0.041 5		
		D ₂₉	70.000 0	70.000 0	80.000 0	80.000 0	90.000 0	0.038 6		
	D ₃₀	70.000 0	70.000 0	70.000 0	80.000 0	90.000 0	0.048 6			
B ₄	C ₁₀	D ₃₁	60.000 0	70.000 0	70.000 0	70.000 0	80.000 0	0.024 7		

由于 D₈ 现状数据收集不全, 所以不参加本次评价. 按照综合评价指数法的步骤, 将各个指标的评分结果乘以对应的权重, 通过加法合成, 得到开发区“十一五”期间绿色发展的综合水平. 计算结果, 如表 3 所示.

表 3 福州经济技术开发区“十一五”期间绿色发展水平评价结果

Tab. 3 Evaluation results of Fuzhou ETDZ during the Eleventh Five-Year Period

指标名称	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年
绿色发展综合水平(A)	57.91	57.37	64.56	69.92	72.49
经济发展水平(B ₁)	29.68	30.50	32.87	37.08	37.99
生态环境保护水平(B ₂)	11.83	9.99	13.60	13.68	13.91
生态工业建设水平(B ₃)	8.82	9.05	9.87	10.46	10.76
绿色管理水平(B ₄)	7.58	7.83	8.22	8.70	9.82

3.2 评价结果

根据综合评价结果显示, 开发区“十一五”期间, 除 2007 年外, 绿色发展综合水平形成向上发展的态势. 2008 年, 开发区绿色发展水平开始达到及格水平(64.56 分); 2010 年, 达到中等水平(72.49 分). 4 个准则层增幅大小依次为绿色管理水平、经济发展水平、生态工业建设水平和生态环境保护水平.

4 结果分析

福州经济技术开发区 2007 年的绿色发展水平最低(57.37 分),主要原因是由于该年度生态环境保护水平低,表现在工业废水排放不达标、清洁能源使用比例不高且类型单一等方面.这些也是造成开发区“十一五”期间整体生态环境保护水平增幅小的主要原因.“十一五”期间开发区清洁能源使用比例始终维持在 50%左右,所用的清洁能源主要为天然气、电能和液化石油气,其中,绝大部分还是依靠电能,天然气仅在 2010 年才投入使用.这说明开发区使用的清洁能源不仅使用比例不高且类型比较单一.环境方面还存在工业用水重复利用率水平不高、政府及开发区管理者环境保护方面的支出较小等问题.

经济发展缓慢是阻碍福州经济开发区绿色发展的重要原因.虽然开发区经济结构在“十一五”期间表现较好,但从总体上看,经济实力发展较缓慢.与国内著名的天津泰达经济技术开发区相比,该开发区在 2007 年时,工业总产值为 3 350.67 亿元,单位工业用地工业总产值已达到 $74.46 \text{ 亿元} \cdot \text{km}^{-2}$ ^[20],而福州经济技术开发区 2010 年工业总产值为 594.87 亿元,单位工业用地工业总产值为 $23.46 \text{ 亿元} \cdot \text{km}^{-2}$,这说明目前福州经济技术开发区的单位面积产值远远低于国内先进水平.随着开发区产业的发展,土地资源短缺将成为发展的“瓶颈”,规模以上企业的清洁生产审核和 ISO 14001 环境管理体系的认证率均远低于设定的目标值(表 2).

5 结论

针对以上福州经济技术开发区存在的问题,提出如下 3 个建议.

1) 经济方面,应加大产业集群效应,大力引进第三产业企业.结合开发区产业规划及各组团规划布局,综合考虑区域环境承载力、开发区基础设施承载力等因素,强化龙头企业的项目,带动物流等相关产业联动发展,大力引进物流、旅游、中介等服务贸易项目,强化第三产业和城镇基础设施建设.

加强开发区工业用地管理.开发区需要对开发区的土地集约利用情况进行评价,劝说占地面积大但经济效益不高的企业搬迁或进行整合,将土地转让给高新技术以及环境友好型企业,提高单位土地面积产值和土地利用率.

2) 环境方面,开发区必须从源头、过程及末端 3 个方面提高资源利用效率.督促现有水资源利益效率低的企业改进其耗水工艺,广泛应用废水回用技术.工业废水进入污水处理厂前应严格执行排放标准,加强污水处理厂的运行管理.除了可以要求各个企业设有废水再生单元外,还可以在开发区建立废水循环系统,例如,在开发区配套的污水处理厂内设立废水循环利用中心作为开发区的中水备用水库.

改善能源消费结构,提高清洁能源使用比例.增加天然气和可再生能源等优质能源为主的清洁能源使用比重,强化能源利用过程,鼓励企业使用清洁能源.同时,加强清洁能源基础设施建设,便于开发区企业使用清洁能源.加大财政在环境保护方面的支出与环境监管力度,从而为开发区的可持续发展、绿色发展提供有力保障.

3) 管理方面,应加强对企业污染物排放的监测,建立企业物料使用、副产品产生情况的信息库,为完善开发区工业共生网络打好基础.通过建立开发区企业考核制度督促企业积极参与清洁生产审核及 ISO 14001 环境管理体系认证.同时,开发区管理者可以通过制定绿色招商评价指标体系对入园项目的绿色水平进行考核,从源头控制污染物的排放和构建开发区生态工业链,促进开发区可持续发展.

参考文献:

- [1] LOWER E. Eco-industrial park handbook for asian developing countries[EB/OL]. [2012-10-01]. <http://indigodev.com>.
- [2] ROBERTS B H. The application of industrial ecology principles and planning guidelines for the development of eco-industrial parks: An australian case study[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2004, 12(8/9/10): 997-1010.
- [3] OH D S, KIM K B, JEONG S Y. Eco-industrial park design: A daejeon technovalley case study[J]. *Habitat International*, 2005, 29(2): 269-284.
- [4] GIBBS D, DEUTZ P. Implementing industrial ecology planning for eco-industrial parks in the USA[J]. *Geoforum*,

2005,36(4):452-464.

- [5] 朱丽.综合类生态工业园区指标体系及稳定机制研究[D].山东:山东大学,2011:91-100.
- [6] 雷明,钟书华.生态工业园区综合评价指标体系研究[J].中国科技论坛,2009(11):110-115.
- [7] 孙晓梅,崔兆杰,朱丽,等.生态工业园运行效率评价指标体系的研究[J].中国人口·资源与环境,2010,20(1):124-128.
- [8] 张成考.基于灰色理论的生态工业园区综合评价模型研究[J].科技管理研究,2006(9):264-268.
- [9] 张帆,麻林巍,蓝钧,等.生态工业园评价方法研究:以北京市为例[J].中国人口·资源与环境,2007,17(3):100-105.
- [10] 郝艳红,王灵梅.火电厂生态工业园评价指标体系研究[J].环境科学与技术,2006,29(2):70-74.
- [11] 梁彬,田金平,陈吕军,等.精细化工园区生态环境效益评价指标体系研究[J].环境污染与防治,2009,31(4):89-92.
- [12] 钟琴道,姚扬,乔琦.中国生态工业园区建设历程及区域特点[J].环境工程技术学报,2014,4(5):429-435.
- [13] 智静,乔琦,姚扬,等.生态文明视角下我国生态工业园区建设[C]//2013中国环境科学学会学术年会论文集.北京:中国环境科学出版社,2013:526-532.
- [14] 中华人民共和国环境保护部.HJ 274-2009 综合类生态工业园区标准[S].北京:中国环境科学出版社,2009:6-23.
- [15] 赖劲榕.对绿色经济的几点认识[J].改革与开发,2011(2):96.
- [16] 于法稳.近10年中国生态经济理论提升及实践发展[J].中国农村经济,2011(5):93-96.
- [17] 元炯亮.生态工业园区评价指标体系研究[J].环境保护,2003(3):38-40.
- [18] 姜楠.生态工业园区综合评价体系研究[D].长春:吉林大学,2007:42.
- [19] 福州经济技术开发区统计局.福州经济技术开发区年鉴(2007-2011年)[M].北京:中国统计出版社,2011:42.
- [20] 薛晓燕.生态工业园区运行评价研究:以天津泰达生态工业园区为例[D].天津:天津理工大学,2010:57.

Research on Comprehensive Evaluation of Eco-Industrial Parks Based on Green Economy

SHANG Jie^{1,2}, ZENG Yue¹

(1. College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

2. Fujian Provincial Academy of Environment Science, Fujian Key Laboratory of Environmental Engineering, Fuzhou 350013, China)

Abstract: Based on green economy, the meaning of green development of eco-industrial parks was determined. Then managing four aspects to consider all the factors from the economic development, ecological environmental protection, ecological industry chain construction and green management, the index system for evaluating EIPs green-comprehensive development level was constructed. Taking Fuzhou economic and technological development zone (ETDZ) as the research area, it used the entropy weight to give the weight to each indicator, and utilized the composite index method to appraise the development status of the period of the Eleventh Five-Year period. At last, it distinguished the problems for Fuzhou development zone from economy development, environment protection and management aspects.

Keywords: eco-industrial parks; green economy; indicator set; environmental management

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 刘源岗)

常规桥梁搭板内力计算方法在SIAB中的适用性

庄一舟¹, 任卫岗¹, 陈小琴², 韩裕添¹, 王胜智¹, 田伟¹

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108;

2. 义乌工商职业技术学院 建筑与艺术分院, 浙江 义乌 322000)

摘要: 探讨了常规有缝桥梁搭板内力计算方法在半整体式桥台桥梁(SIAB)中的适用性. 首先, 介绍常规有缝桥梁搭板的内力计算方法, 根据 SIAB 的构造特点, 分析搭板近台端受到结构温变变形和收缩徐变引起的水平力、弯矩和剪力的影响; 然后, 建立 SIAB 搭板的有限元法(FEM)模型, 并分析这些内力对 SIAB 搭板内力计算的影响程度. 分析结果表明: 剪力、弯矩的影响很小, 可以忽略不计, 但水平力的影响很大, 搭板在进行内力计算时需加以考虑. 最后, 提出了简支梁修正法, 并与既有有缝桥梁搭板内力计算方法做了对比. 结果表明: 有缝桥梁搭板内力计算方法不适用于 SIAB 搭板内力计算的结论.

关键词: 有缝桥梁; 桥梁搭板; 半整体式桥台桥梁; 内力计算

中图分类号: U 442.5

文献标志码: A

桥头跳车通常不会引起较大的安全问题, 但会对路面铺装层与伸缩缝造成损害. 据统计, 我国约有 20%~30% 以上的桥梁存在不同程度的桥台背路基沉陷现象, 造成桥头跳车, 导致的经济损失也是非常之巨大^[1-2]. 世界各国通常在交通运输系统中设置桥头搭板来解决桥头损害问题^[3], 而桥头搭板的设计过程需要对其进行内力计算, 所以, 使用合适的搭板内力计算方法是解决这一问题的关键. 常规的有缝桥梁, 搭板受竖向的铺装层及搭板自质量提供的均布荷载和车辆轮压提供的集中荷载作用, 其内力计算方法是将其搭板横桥方向划分成单位板宽的搭板条, 等效成弹性地基梁进行计算. 半整体式桥台无缝桥梁^[4]的主梁与桥头搭板通过联接钢筋连在一起^[5], 在温降荷载作用下, 主梁产生的伸缩、膨胀变形带动桥头搭板纵向平移或水平面内转动(对斜交桥), 从而在搭板端部产生额外内力, 特别是在温降荷载产生的拉力作用下, 会使搭板端部增加额外的拉应力^[6], 并在受拉区与搭板受弯产生的拉应力相叠加形成高拉应力区, 这与既有有缝桥梁搭板的受力情况明显不同. 但是, 目前 SIAB 搭板的内力是按既有有缝桥梁的搭板内力计算方法进行计算. 因此, 为了验证既有有缝桥梁的搭板内力计算方法在 SIAB 搭板中是否适用, 本文采用了既有有缝桥梁搭板设计方法对 SIAB 搭板设计计算的适用性分析.

1 常规有缝桥梁搭板的内力计算方法

1.1 弹性地基梁的温克尔法

温克尔地基模型的基本假定是^[7-8]: 地基表面上任何一点的沉降量 y 与该点的应力值 p 成正比, 即 $p = k \cdot y$. 其中: k 为基床系数 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$). 平面曲线的曲率关系式为

$$\kappa(x) = \frac{1}{\rho(x)} = \pm \frac{w'''}{(1 + w'^2)^{3/2}}. \quad (1)$$

式(1)中: $\rho(x)$ 为梁体的曲率半径(m).

弹性地基梁的受力模式图, 如图 1 所示. 图 1 中: y 为沉降位移; M 为弯矩; Q 为剪力的正方向. 曲率与弯矩 M 的物理关系为

收稿日期: 2015-06-28

通信作者: 庄一舟(1964-), 男, 教授, 博士, 主要从事无缝桥梁的研究. E-mail: 478372092@qq.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278126); 福建省自然科学基金资助项目(2013J01187)

$$M_q(x) - M_p(x) = EI\kappa(x), \tag{2}$$

式(2)中: $M_q(x)$ 为荷载 q 引起梁体的弯矩 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$); $M_p(x)$ 为地基反力 p 引起梁体的弯矩 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$); EI 为梁体的弯曲刚度 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$).

从而有

$$\frac{\omega''}{(1 + \omega'^2)^{3/2}} = -\frac{M_p(x) - M_q(x)}{EI}. \tag{3}$$

式(3)中: ω 为梁体的挠度 (m).

由于梁发生的变形是微小变形, 因此有

$$\omega'' = -\frac{M_p(x) - M_q(x)}{EI}. \tag{4}$$

将式(4)两边同时对 x 求二次导, 可得

$$\omega^{(4)} EI = EI \frac{d^4 y}{dx^4} = q(x) - p(x). \tag{5}$$

将温克尔假定的 $p(x) = k \cdot y$ 代入式(5), 有

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + ky = q(x). \tag{6}$$

令 $\beta = \sqrt[4]{k/4EI}$, 则有

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + 4\beta^4 y = \frac{q(x)}{EI}. \tag{7}$$

解微分方程式(7)^[9], 得

$$y = C^{\lambda x} (A \cdot \cos \lambda x + B \cdot \sin \lambda x) + C \cdot e^{-\lambda x} (C \cdot \cos \lambda x + D \cdot \sin \lambda x). \tag{8}$$

根据不同的荷载情况及其边界条件, 即可得到相应不同情况下的内力解.

1.2 简支梁法

在集中荷载 p 和均布荷载 q 作用下, 有

$$M = M_p + M_q = P(\frac{l}{2} - 0.7) + \frac{1}{8}ql^2. \tag{9}$$

2 SIAB 搭板的有限元法 (FEM) 模型

SIAB 搭板与主梁通过滑动支座支承在桥台上, 搭板近台端支承在桥台背墙上, 且两者之间铺设油毛毡, 使搭板能够在背墙端面滑动. 将搭板与主梁界面 (相当于固定端) 截开, 可知搭板端部有弯矩、剪力和水平力. 弯矩和剪力主要由于边跨主梁和搭板所受竖向荷载产生, 水平力主要由主梁受温降荷载发生伸缩所产生. 其中, 半整体桥梁的搭板是跨越桥台背墙, 近台端搭板可视作简支背墙端面上, 又桥台相对于主梁搭板更为刚性, 故搭板端部剪力完全由桥台背墙承担, 与其承受弯矩和水平力的影响相比可以忽略不计.

2.1 有限元模型

搭板端部的正弯矩是由自桥台计偶数跨主梁受竖向荷载而产生的, 负弯矩是由自桥台计奇数跨主梁受竖向荷载而产生的. 搭板近台端所受水平力主要是由主梁在温降荷载作用下的伸缩变形而产生的, 并通过联接钢筋和主梁搭板界面传递至搭板^[9].

为判别端部负弯矩的影响, 建立 3 跨连续梁模型, 且自桥台端计第 1, 3 跨按照 JTG D60-2004《公路桥涵设计通用规范》满布竖向荷载; 为判别端部正弯矩的影响, 建立 4 跨连续梁模型, 自桥台端计第 2, 4 跨满布竖向荷载. 为判别端部水平力的影响, 建立 4 跨连续梁模型, 全桥受 30 °C 范围的温降荷载. 主梁、搭板、软木条和主梁搭板界面采用 C3D8R 实体单元, 联接钢筋采用 T3D2 单元, 搭板底部的地基作用采用弹簧单元进行模拟. 3 跨连续梁模型的主梁支座采用滑动支座模拟, 4 跨连续梁模型桥梁中心处支座采用固定支座, 其他处采用滑动支座. 搭板近台端采用滑动支座, 远台端采用滑动支座进行模拟.

ABAQUS 建立单位宽度的主梁-搭板节点模型的基本参数假定为: 主梁采用 16 m 空心板, 梁宽 1

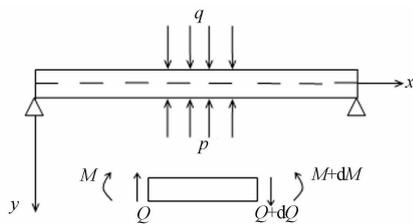


图 1 桥头搭板受力模型

Fig. 1 Mechanical model of approach slab

m, 梁高 0.85 m. 搭板长、宽、高分别为 8.0, 1.0, 0.3 m. 主梁和搭板均采用 C30 混凝土, 主梁搭板联接钢筋采用直径为 $\Phi 32$ 的 HRB 335 钢筋, 横向间距为 10 cm. 搭板下部地基土竖向、横向基床系数分别取 10, 12 $\text{MN} \cdot \text{m}^{-3}$. 对搭板模型施加汽车荷载及搭板自质量, 得到台端搭板受正负弯矩及水平力作用时的有限元模型, 如图 2~7 所示.

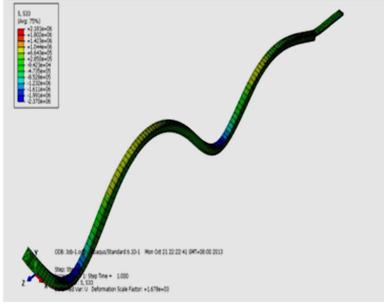


图 2 奇数跨受荷载时挠曲变形

Fig. 2 Deflection under odd-span loading

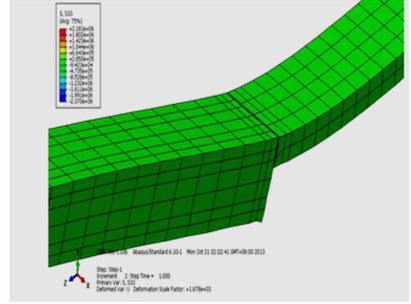


图 3 负弯矩作用下桥头区域云纹图

Fig. 3 Principal stress pattern under negative bending moment

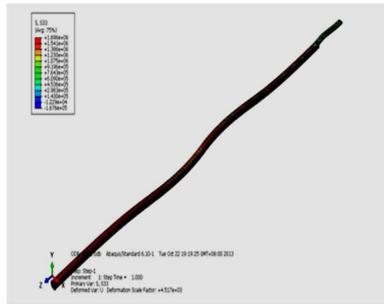


图 4 偶数跨受荷载时挠曲变形

Fig. 4 Deflection under even-span loadings

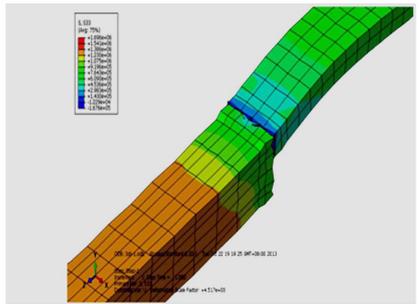


图 5 正弯矩作用下桥头节点云纹图

Fig. 5 Principal stress pattern under positive bending moment

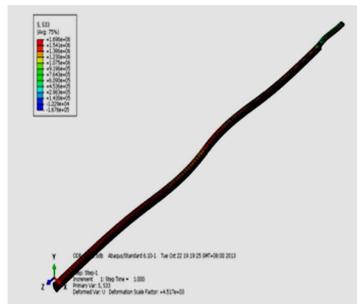


图 6 温降荷载时挠曲变形

Fig. 6 Deflection under temperature decrease

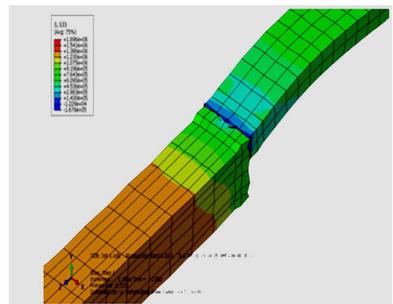


图 7 水平力作用下桥头节点云纹图

Fig. 7 Principal stress pattern under horizontal loading

2.2 内力分析

自近台端开始, 在搭板截面 1/16, 2/16, 3/16, 4/16, 3/8, 4/8, 5/8, 6/8, 7/8 处标记. 运算 FEM 模型, 并提取以上截面处搭板上表面各点应力状况. 计算各截面负弯矩作用产生的最大拉应力与 C30 混凝土抗拉强度 (1.39 MPa) 的比值 (η), 结果如表 1 所示.

计算各截面正弯矩作用产生的最大拉应力与竖向荷载作用产生的应力的比值结果, 如表 2 所示.

计算各截面由温降荷载产生的水平力作用下的最大拉应力与竖向荷载产生的应力的比值, 结果如表 3 所示.

由表 1 可知: 在搭板端部负弯矩作用下, 搭板近台端上表面拉应力与 C30 混凝土抗拉强度相比 (搭板截面中和轴以上拉应力由混凝土承担), 最大达到 76%,

表 1 负弯矩作用下比值

Tab. 1 Ratio under negative bending moment

截面位置	σ (负弯矩)/MPa	η /%
1/16	1.063	76
2/16	0.857	61
3/16	0.651	47
4/16	0.414	30
3/8	0.228	16
4/8	0.124	9
5/8	0.073	5
6/8	0.041	3
7/8	0.021	1

最小只有 1%, 都未达到 C30 混凝土抗拉强度. 远离台端搭板的负弯矩作用下的应力越来越小, 有的甚至可以忽略.

表 2 正弯矩作用下比值

表 3 水平力作用下比值

Tab. 2 Ratio under positive bending moment

Tab. 3 Ratio under horizontal force

截面位置	σ (正弯矩)/MPa	σ (竖向荷载)/MPa	$\eta/\%$
1/16	0.165	0.438	37.7
2/16	0.131	0.853	15.4
3/16	0.108	1.680	6.4
4/16	0.074	2.514	2.9
3/8	0.026	3.759	0.7
4/8	0.012	4.425	0.3
5/8	0.008	3.716	0.2
6/8	0.003	2.543	0.1
7/8	0.001	0.873	0.1

截面位置	σ (水平力)/MPa	σ (竖向荷载)/MPa	$\eta/\%$
1/16	2.527	0.438	577
2/16	2.373	0.853	278
3/16	2.102	1.680	125
4/16	1.857	2.514	74
3/8	1.521	3.759	41
4/8	1.210	4.425	27
5/8	0.914	3.776	25
6/8	0.692	2.523	28
7/8	0.325	0.873	37

由表 2 可知: 在端部正弯矩作用下, 搭板下表面的应力均较小, 搭板近台端应力最大值为 0.165 MPa, 远台端应力最小值为 0.001 MPa; 自搭板近台端 1/16 和 2/16 截面处, 由正弯矩作用产生的搭板底面应力与竖向荷载产生的底面应力百分比分别为 37.7% 和 15.4%, 其他各截面百分比均未达到 10%. 且正弯矩产生的搭板底面应力是搭板自近台端向远台端逐渐减小的, 而竖向荷载产生的应力是呈两头小、中间大状态, 符合实际情况.

由表 3 可知: 在温降荷载产生的端部水平力作用下, 搭板下表面的应力水平较高. 搭板自近台端应力逐渐减小, 在搭板近台端应力大于 2 MPa, 远台端应力小于 0.1 MPa, 影响水平明显大于表 1 和表 2 所述.

结合上述 3 种情况, 搭板端部水平力作用下搭板下表面产生的应力水平较高, 对搭板内力计算影响很大, 是最主要的因素.

3 简支梁修正法

常规有缝桥梁搭板的内力计算方法有简支梁法和弹性地基梁法, 由弹性地基理论, 将搭板视为单位板宽的简支梁来分析计算^[10]. 在 SIAB 搭板的内力计算中, 两种计算方法都忽略了搭板由温变引起的水平拉应力的作用, 其中, 简支梁法除了未考虑由温变引起的水平拉应力作用外, 也忽略了弹性地基的支撑作用. 所以, 对于 SIAB 搭板, 不能将其简单地视为弹性地基上的简支板.

简支梁修正法在简支梁法的基础上做出修正, 提出两个修正搭板长度的系数 α 和 β 分别用来修正搭板下面弹性地基对搭板的支撑作用和由温变引起的水平拉应力的作用. 然后, 用 α 和 β 的乘积 γ 作为综合修正系数, 用 γ 乘以搭板长度, 由式(9)得到搭板的控制弯矩, 有

$$\frac{1}{8}q(\gamma l)^2 + P\left(\frac{\gamma l}{2} - 0.7\right) = M, \quad (10)$$

式(10)中: 通过统计大量 α 和 β 的数据可得到 γ .

3.1 SIAB 桥梁搭板钢筋应力

3.1.1 计算假定 1) 搭板参数. 搭板长度为 8 m, 厚度为 0.3 m, 采用 C30 混凝土, HRB335 钢筋, 其强度设计值为 300 MPa.

2) 地基参数. 地基的水平向、竖向基床系数分别为 $6, 10 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3}$.

3) 荷载作用. 假定混凝土铺装层为 100 mm, 计入 300 mm 搭板自质量, 作为分布在搭板上的均布荷载. 汽车荷载是公路-I 级, 按 JTG D60-2004《公路桥涵设计通用规范》规定布置汽车荷载, 取后轴重力. 搭板端部水平力选取一般温降情况 ($\Delta t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$), 由 MIDAS 软件计算得出的搭板端部水平力作为 ABAQUS 软件的搭板模型端部水平力作用.

3.1.2 配筋计算 在一般温降荷载状态下, 分别用 3 种搭板内力计算方法计算出相应的控制弯矩、受拉区纵筋面积, 并据此对各个情况进行配筋设计. 48 m 长桥梁计算得到的搭板配筋量, 如表 4 所示.

表4 48 m长桥梁的设计配筋

Tab. 4 Reinforcement design of a 48 m long bridge

搭板设计方法	$M/N \cdot m \cdot m^{-1}$	A/mm^2	受拉区钢筋		受压区钢筋	
			纵向	横向	纵向	横向
简支梁修正法	180 880	4 150	$\Phi 22@90$	$\Phi 16@200$	$\Phi 14@90$	$\Phi 14@200$
弹性地基梁法	154 140	3 780	$\Phi 22@100$	$\Phi 16@200$	$\Phi 14@100$	$\Phi 14@200$
简支梁法	128 800	3 430	$\Phi 25@140$	$\Phi 18@200$	$\Phi 14@140$	$\Phi 14@200$

3.2 有限元计算结果比较

分别运算各计算方法设计的搭板模型,得出各模型顺桥方向各截面处受的拉区钢筋应力、搭板底缘应力和搭板挠度,比较简支梁修正法、简支梁法和弹性地基梁法的计算结果,分析简支梁修正法在SIAB搭板设计中的适用性。

各计算方法中,设计的搭板模型顺桥方向各截面处的受拉区钢筋应力大小、底缘应力大小、挠度大小如图8~10所示。

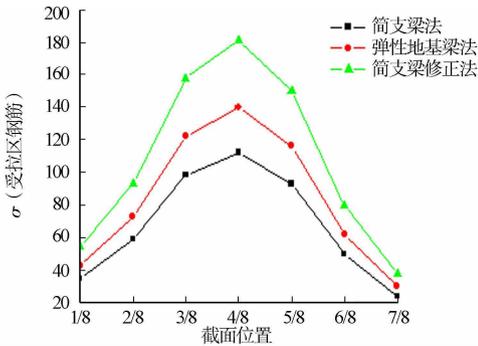


图8 搭板模型顺桥向各截面处受拉区钢筋应力

Fig. 8 Rebar tensile stress distribution along an approach slab

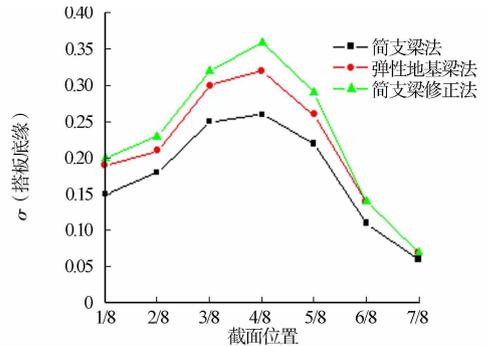


图9 搭板模型顺桥向各截面处底缘应力

Fig. 9 Bottom stress distribution along an approach slab

由图8可知:3种计算方法计算的搭板受拉区钢筋的应力中,简支梁法计算值最小,简支梁修正法计算值最大。由图9可知:用简支梁修正法计算得到的搭板底缘应力也是最大,弹性地基梁法次之,简支梁法最小。由图10可知:简支梁修正法设计的搭板挠度最大,弹性地基梁法次之,简支梁法最小。这是因为SIAB搭板在温降荷载的作用下,主梁产生的伸缩、膨胀变形,通过连接钢筋带动桥头搭板纵向平移,从而在搭板端部产生额外内力,并在受拉区与搭板受弯产生的拉应力相叠加,形成高拉应力区,增加了搭板的受力。相比弹性地基梁法和简支梁法,用简支梁修正法计算搭板的内力时,得到的搭板顺桥向各截面处受拉区钢筋应力、底缘拉应力以及挠度值都最大。在SIAB搭板的内力计算当中,通过对比提出的简支梁修正法和常规有缝桥梁搭板内力计算方法之后,发现常规有缝桥梁搭板内力计算方法是不合理的,由主梁传递给搭板的额外内力不能忽略。

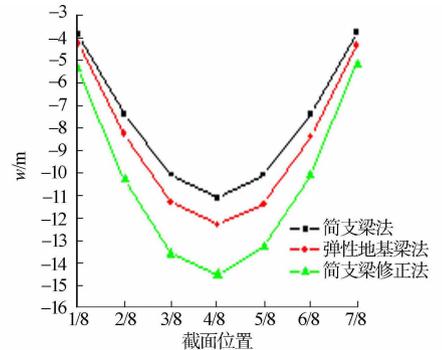


图10 搭板模型顺桥向各截面处搭板挠度

Fig. 10 Deflections distribution along an approach slab

4 结论

1) 在主梁传递至搭板端部的正、负弯矩作用下产生的应力,相对于竖向荷载产生的应力,对搭板内力计算影响很小,可以忽略。

2) 在搭板端部,主梁受温度效应的影响,发生伸缩移动,产生端部水平力,其对搭板产生的应力相对竖向荷载产生的应力,水平较高,对搭板内力计算的影响很大,不能忽略。

3) 在搭板端部受到的剪力、弯矩和端部水平力当中,剪力对搭板内力计算的影响最小,其影响可以

忽略。

4) 与常规有缝桥梁搭板的简单受力相比,SIAB搭板的受力更为复杂。常规有缝桥梁搭板的基准内力计算方法在SIAB搭板中不适用。用于SIAB搭板的内力计算方法应该考虑搭板由温变引起的水平拉应力的作用和弹性地基的支撑作用。

参考文献:

- [1] PHARES B M, FARIS A S, GREIMANN L, et al. Integral bridge abutment to approach slab connection[J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(2): 179-181.
- [2] 乔华. 桥头搭板设计方法及技术参数研究[D]. 西安: 长安大学, 2011: 1-2.
- [3] RANDY D, MARTIN M, ASCE T H. Structural design and construction issues of approach slabs [J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2013, 18(1): 12-20.
- [4] WANG Tianli, LI Qingning, HU Dalin. The review about a new type of bridge structure-semi-integral abutment jointless bridge[C]//Proceedings of the International Conference of Architecture and Technology (I). Xi'an: Trans Tech Publications LTD, 2011: 72-75.
- [5] 金晓勤, 邵旭东. 半整体式无缝桥梁研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(9): 68-73.
- [6] 占雪芳, 邵旭东. 半整体式无缝桥中带预压缝的配筋接线路面温降效应[J]. 土木工程学报, 2011, 44(11): 74-78.
- [7] 张荣. 弹性地基梁计算模型研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007: 1-2.
- [8] 吴艳红, 郭春霞, 梁志刚. 考虑纵向摩阻时弹性地基梁的弯曲[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2013, 6(3): 379-382.
- [9] 王智德. 搭板设计参数优化解决桥头跳车的研究及应用[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011: 10-11.
- [10] 宋娃丽, 史文革, 王凤岐. 桥头搭板的受力计算[J]. 河北工业大学学报(自然科学版), 1999, 28(4): 95-98.

Adaptability Analysis of Conventional Internal Force Calculation Method for Approach Slab of SIAB

ZHUANG Yizhou¹, REN Weigang¹, CHEN Xiaoqin²,
HAN Yutian¹, WANG Shengzhi¹, TIAN Wei¹

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Architecture and Art College, Yiwu Industrial and Commercial College, Yiwu 322000, China)

Abstract: The adaptability of calculation method for internal forces of approach slab in semi-integral abutment bridge (SIAB) was discussed. Firstly, the conventional bridge internal forces calculation method of approach slab was introduced. According to the structural characteristics of SIAB, the influence on approach slab near the abutment, due to horizontal force, bending moment and shear force caused by structural thermal deformation and shrinkage and creep, was analyzed. Then, FEM model of approach slab of SIAB was established, and the influence of the internal forces on the approach slab of SIAB was analyzed. The results show that the influence of the shear force and the bending moment is negligible; however, the influence of the horizontal force is significant, which would be considered in the calculation of internal force. Finally, a correction method for simply-supported beam is put forward, and a comparison of calculation methods for approach slabs between conventional bridge and SIAB is conducted, which concludes that the calculation method for calculating the internal force of approach slab in conventional jointed bridge is not suitable for SIAB.

Keywords: jointed bridges; approach slab; semi-integral abutment bridge; internal force calculation

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)

不同地基条件对核岛厂房结构 地震响应的影响

金煜皓, 尹训强, 王桂莹

(大连大学 土木工程技术与开发中心, 辽宁 大连 116622)

摘要: 以某 CPR1000 堆型反应堆厂房的集中质量简化模型为研究对象, 基于 Super FLUSH 软件平台, 考虑结构-地基动力相互作用(SSD), 并采用弹性模量模拟岩性地基线性特征, 等效线性模拟土质地基非线性特性. 建立不同地基条件的核岛厂房结构响应分析模型, 从而分析不同地基条件对核岛厂房结构地震响应的影响. 该模型计算结果表明: 随着地基条件的变化, 尤其是从岩性地基到土质地基, 核岛结构响应变化明显.

关键词: 能量传递边界; 岩性地基; 土质地基; 结构地震响应; 核岛; 厂房结构

中图分类号: TV 312

文献标志码: A

目前, 我国已建核电站均选址在沿海岩基上, 这是因为沿海岩性基础具有天然的高承载力. 然而, 我国的核电厂址资源日趋紧张, 基岩厂址已基本覆盖潜在的核电厂址区域. 为满足核电快速发展的要求, 在内陆地区的非岩性地基上建设核电厂, 成为核电发展的必然方向. 与此同时, 核电的加速发展, 也使人们越来越关注核电安全性. 核电工程结构的抗震能力是保障核电安全的重要内容之一^[1-3]. 一般而言, 在地震作用下, 无论是沿海岩性地基还是内陆土质地基, 结构抗震分析均需考虑结构-地基动力相互作用(SSD)^[4]. 因此, 考虑不同地基条件下的结构-地基动力相互作用就显得非常重要. 然而, 已有研究并没有将结构-地基相互作用与不同地基条件这 2 种要素有机的统一起来^[5-7], 且不同地基条件变化(岩基到土质地基)过程中, 对核岛厂房结构地震响应的规律认识还很不充分. 对这一过程的认识正是内陆核电厂厂址地基抗震适应性评价的关键内容之一. 为解决上述问题, 本文以我国某拟建内陆核电厂为研究背景, 以 Super FLUSH 程序作为研究平台, 将 CPR1000 型核岛厂房结构简化成多质点集中质量模型, 建立二维 CPR1000 型核岛厂房结构-地基相互作用模型, 研究不同地基条件对核岛结构地震响应的影响.

1 结构-地基动力相互作用

1.1 结构-地基相互作用方程

结构-地基动力相互作用运动方程为

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = P. \quad (1)$$

式(1)中: M 为质量矩阵; C 为阻尼矩阵; K 为刚度矩阵; u 为上部结构模型中节点相对于基础的位移向量; P 为外力向量. 为进一步说明人工边界问题, 上述运动方程可改写为

$$M\ddot{u} + Ku = -ma - T. \quad (2)$$

式(2)中: a 为刚性基础加速度; m 为与 a 方向相关的向量; 与能量传递有关的力向量 T 为

$$T = (R + L)(u - u_f). \quad (3)$$

式(3)中: R, L 是边界刚度矩阵, 该矩阵与频率有关; u_f 为自由场位移向量.

收稿日期: 2015-05-24

通信作者: 尹训强(1986-), 男, 讲师, 博士, 主要从事结构动力分析的研究. E-mail: lc-tm2008@163.com.

基金项目: 国家重大科技专项资助课题(2011ZX06002-10); 辽宁省教育厅一般项目(L2014498)

1.2 能量传递边界模型

无限地基辐射阻尼效应描述半无限地基中能量的逸散, 是有效模拟结构-地基相互作用的关键. 而有限元模型一般在截断边界处, 施加局部人工边界对地基辐射阻尼进行模拟. 常用的局部人工边界有粘性边界、能量传递边界和粘弹性边界等. 能量传递边界最初由 Lysmer 等^[8] 提出. 计算分析表明, 在相同条件下, 能量传递边界比粘性边界更稳定, 不会出现低频失稳现象. 与粘弹性人工边界相比, 能量边界可进一步减小有限元部分截取范围, 从而节省计算单元. 因此, 文中选用能量传递边界模拟地基辐射阻尼, 能量传递边界模型, 如图 1 所示.

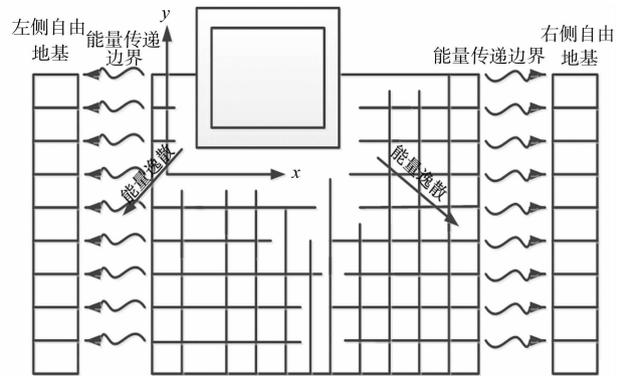


图 1 能量传递边界模型

Fig. 1 Energy-transmitting boundary model

对于有限元右侧边界, 考虑向 x 的正方向传播的表面波; 对于左侧边界, 则考虑向 x 的负方向传播的表面波. 假定自由地基地面为刚性基岩, 且无外力作用, 考虑自由地基中 x 方向传播的波动, 其运动方程为

$$(K^2[A] + iK[B] + [C] - \omega^2[M])\{U\} = 0. \tag{4}$$

这是一个以圆频率 ω 为解析频率的求解复数特征值问题, 一般可用牛顿迭代法求解 n 层自由地基的 $4n$ 个复数特征值 K_s ($2n$ 个 $\pm K_s$ 值) 及相应复数特征向量 $\{V_s\}$. 由 K_s 和 $\{V_s\}$ 可确定自由地基中表面波的传播特性和深度方向的振幅分布. 对于右侧能量传递边界, 根据虎克定律, 应力-应变关系为

$$\sigma_x(\lambda + 2G)\epsilon_x + \lambda\epsilon_y, \tag{5}$$

$$\tau_{x,y} = G\tau_{x,y}. \tag{6}$$

式(5)~(6)中: λ 为拉梅常数; G 为剪切模量.

由于左侧能量边界应力-应变和右侧边界表达式一致, 故在此不做赘述.

2 核岛厂房结构地震响应分析

2.1 计算模型及参数选取

2.1.1 核岛厂房结构 某 CPR1000 堆型反应堆厂房包括安全壳、内部结构和筏板基础. 该反应堆采用集中质量简化模型, 结构用来抵抗扭矩和剪切变形的几何惯性矩, 模型中节点间梁模拟剪切面积, 表现结构惯性的质量和转动惯量集中在各节点上.

核岛厂房结构模型, 如图 2 所示. 平面上 x, y 向对称, 梁单元参数, 如表 1 所示. 表 1 中: S_h 为横截面积; I 为惯性矩; a 为剪切系数; S 为剪切面积. 节点坐标、质量及转动惯量, 如表 2 所示. 表 2 中: m 为质量; J 为转动惯量. 混凝土材料性能参数如下: 动弹性模量为 40 GPa; 剪切模量为 16 GPa; 泊松比为 0.2; 质量密度为 $2.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; 阻尼比为 7%.

表 1 梁单元参数

Tab. 1 Parameters of beam element

单元类别号	梁号	S_h/m^2	I/m^4		S/m^2	
			$I_{x,x} = I_{y,y}$	$a_x = a_y$	$S_{a,x} = S_{a,y}$	
1	1	31.031	2 975.2	1.110	27.957	
2	2	4.536	787.9	2.000	2.268	
3	3~7	2.758	495.9	2.000	1.379	
4	8	1.289	147.4	2.632	0.490	
5	9	2.835	210.3	1.571	1.804	
6	10	3.608	210.3	2.000	1.804	
7	11	1.546	8.4	2.000	0.773	

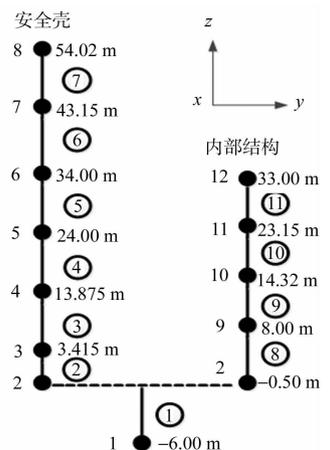


图 2 核岛厂房结构简化模型

Fig. 2 Calculation model of nuclear reactor

表2 节点坐标、质量及转动惯量

Tab.2 Nodal coordinates, mass and moment of inertia

节点序号	m/Mg	$J/Gg \cdot m^2$		节点序号	m/Mg	$J/Gg \cdot m^2$	
		$J_{x,x}=J_{y,y}$	$J_{z,z}$			$J_{x,x}=J_{y,y}$	$J_{z,z}$
1	217.1	21.727	42.345	7	79.1	14.485	27.861
2	345.9	16.237	49.768	8	161.6	23.454	44.510
3	59.0	10.928	21.327	9	147.2	9.536	0
4	78.2	14.639	28.015	10	153.9	10.155	0
5	76.3	14.728	27.397	11	174.0	12.887	0
6	76.3	14.728	27.397	12	32.7	2.835	0

2.1.2 地基参数 为表现不同的地基条件,选取可以体现由岩性到非岩性变化过程的地基,标准如下:硬质基岩地基,剪切波速 $V_s \geq 1066.80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;软质岩石地基,剪切波速 $V_s \geq 731.52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;土质地基(中软土),剪切波速 $V_s = 161 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 岩土剪切波速是反映岩土动力特征的参数,是岩土层刚度的反映. 为定量研究不同地基条件,选取硬质基岩地基、软质岩石地基、更软质岩石地基和土质地基4种代表性地基作为模型地基参数的输入依据. 不同地基条件的输入参数,如表3所示. 表3中: V_s 为剪切波速; E_d 为弹性模量; ν 为泊松比; ρ 为密度.

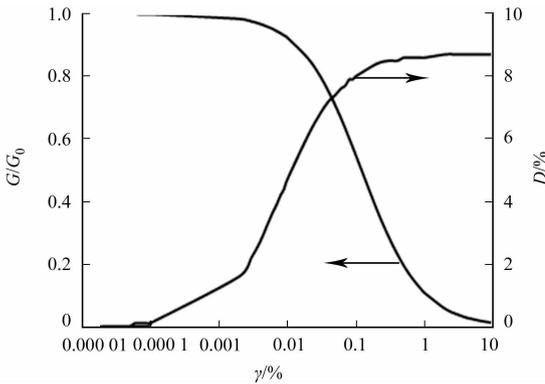
表3 不同地基条件输入参数

Tab.3 Input parameters of different foundation conditions

地基	$V_s/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	E_d/GPa	ν	$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
玄武岩	1569	15.49	0.28	2.45
细砂岩	980	9.01	0.29	2.23
砂质页岩	740	4.18	0.32	2.13
淤泥质粉质粘土	161	0.16	0.49	1.88

地基模型中,岩性地基表现为线弹性特征,将弹性模量作为地基参数输入. 淤泥质粉质粘土所代表的中软土在地震作用下,具有强烈的非线性特性,所以无法用单一的弹性模量作为地基参数输入,应采用等效线性法模拟地基非线性特征^[9]. 该方法根据动剪切模量 G 和剪切应变 γ 的关系曲线、阻尼比 D 和剪切应变 γ 的关系曲线修正剪切模量和阻尼比,直到结果收敛误差达到要求的范围为止. 淤泥质粉质粘土 $G-\gamma$ 与 $D-\gamma$ 关系曲线,如图3所示.

2.1.3 模型的计算 某核岛厂房基础筏板长度为 $b=39 \text{ m}$,地基有限元计算模型计算范围:左右两侧各延伸 50 m ;深度 85 m ;域内采用4节点平面等参元离散;有限元网格密度均保证每个波长内有 $4 \sim 8$ 个节点. 整个模型共有节点 1142 个,单元 1031 个,如图4所示. 图4中: a_{\max} 为峰值加速度; t 为时间.

图3 $G-\gamma$ 与 $D-\gamma$ 关系曲线Fig.3 Curve between $G-\gamma$ and $D-\gamma$

2.2 工况的计算

为了考察不同地基条件对核岛厂房结构动力响应的影 响,选取4种工况进行对比计算,条件如表4所示.

2.3 地震动的输入

考虑地震动谱特性,探讨地震动选择方案的合理性可以使计算结果更合理、准确^[10]. 因此,在计算分析中,选用美国 RG1.60 地震动,开展考虑 SSI 效应不同地基

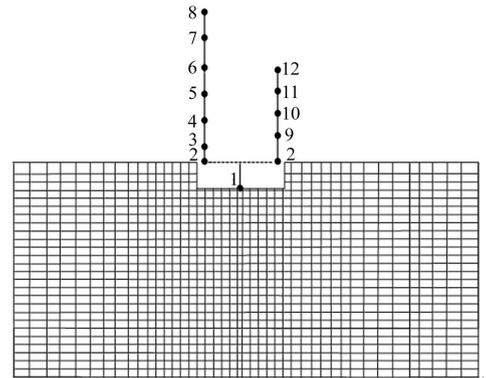


图4 地基计算模型

Fig.4 Finite element model of foundation

表4 不同地基条件对核岛厂房结构动力响应
Tab.4 Seismic response of nuclear island factory building structure under different ground conditions

工况	不同地基条件	地震波输入
1	玄武岩	地表三向输入
2	细砂岩	地表三向输入
3	砂质页岩	地表三向输入
4	淤泥质粉质粘土	地表三向输入

条件核岛厂房结构地震响应研究. 因为地震动所对应的 RG1.60 反应谱峰值段比较宽, 具有包络性, 一般都能包络国内的厂址特定谱, 较为典型; 且满足不同地基条件下, 核岛结构抗震分析的需要; 可以反映地基的特点, 计算结果具有代表性. RG1.60 地震时程曲线, 如图 5 所示. 图 5 中: 水平向峰值加速度为 $0.932 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; 垂直向峰值加速度为 $0.540 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; 总持时为 28 s; 时间步长为 0.01 s.

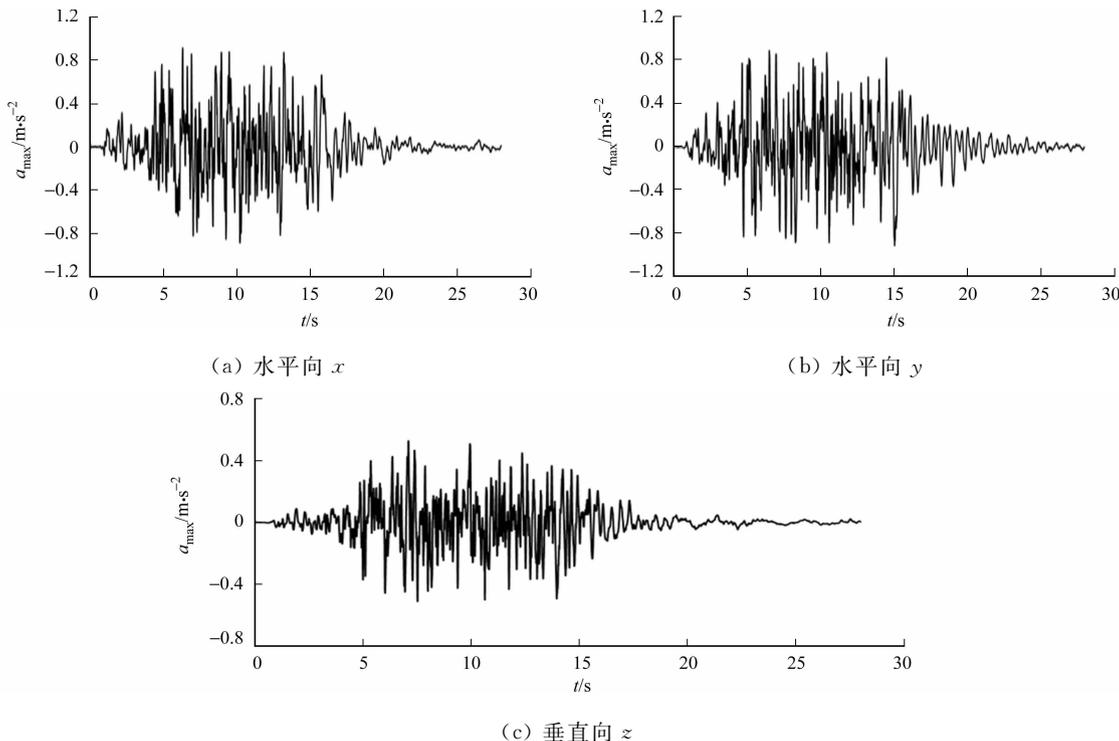


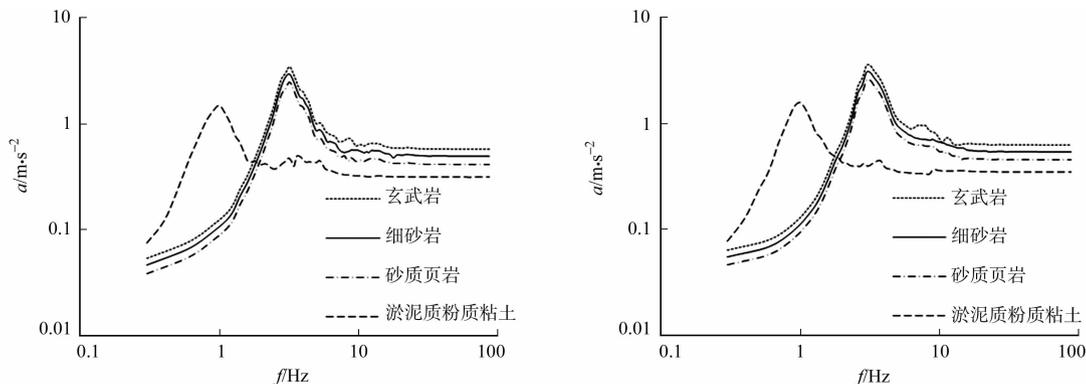
图 5 地面运动加速度输入时程曲线

Fig. 5 Time-history curve of input ground acceleration

2.4 不同地基条件下楼层反应谱分析

核电站厂房楼层反应谱作为核电设备抗震设计及抗震试验的输入数据, 在核电站地震响应分析中具有举足轻重的意义^[11-12]. 选取核岛厂房模型 2 个主要部分关键节点, 即安全壳节点 8 和内部结构节点 12. 对比 4 种工况条件下, 阻尼比为 5% 的加速度反应谱, 如图 6 所示. 图 6 中: a 为加速度; f 为频率.

由图 6 可知: 地基条件由岩性到非岩性的变化过程中, 节点 8, 12 的响应表现出顺次减小的趋势, 且各节点反应谱曲线变化规律基本一致. 岩性地基条件下, 玄武岩、细砂岩和砂质页岩所引起的核岛结构动力响应逐渐减小. 相对于工况 1, 在节点 8 处, 工况 2 加速度峰值 3 个方向减小幅度分别为 14.3%, 14.1% 和 33.3%; 相对于工况 1, 在节点 8 处, 工况 3 的 3 个方向峰值的减小幅度分别为 28.6%, 27.2% 和 40.0%; 相对于较高点的节点 8, 内部结构节点 12, 工况 2, 3 相对于工况 1, 加速度峰值 3 个方向减小幅度依次为 10.0%, 10.3%, 12.5 和 25.0%, 24.8%, 25.1%.



(a) 节点 8x 向加速度反应谱

(b) 节点 8y 向加速度反应谱

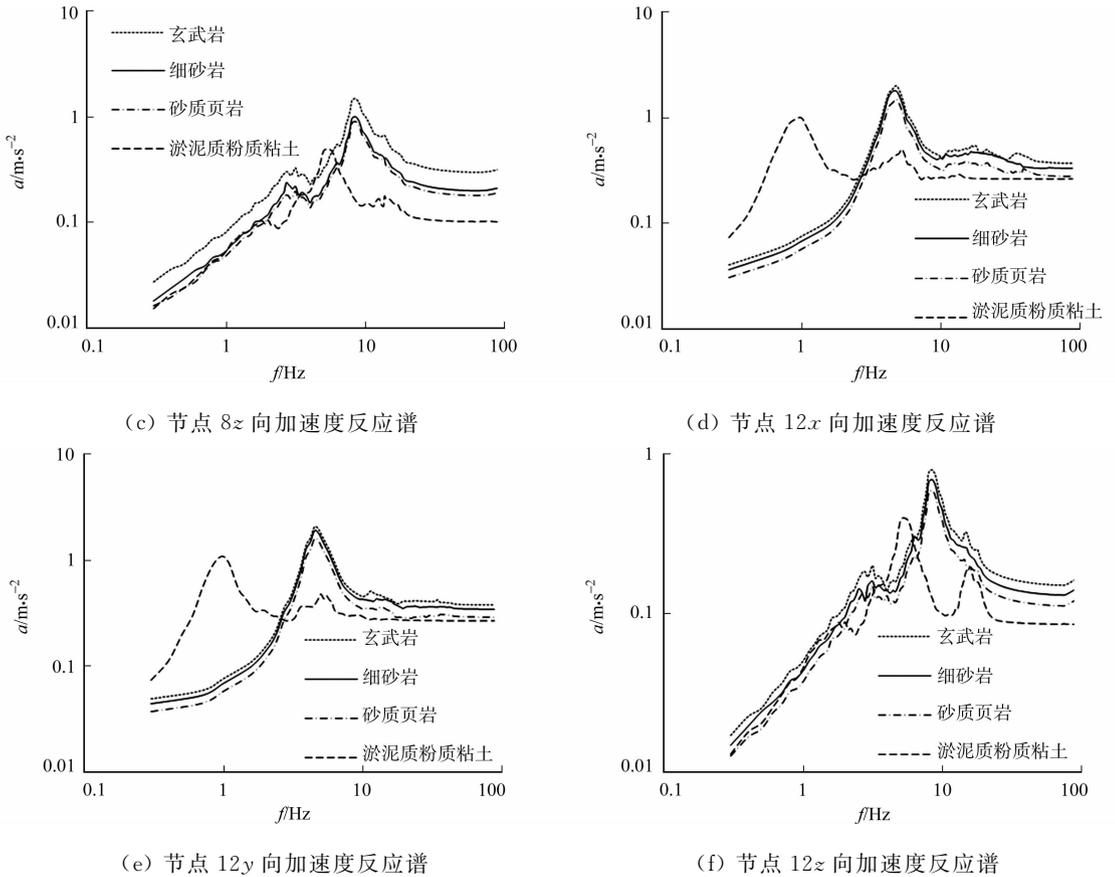


图6 上部厂房集中质量点不同工况地震响应对比

Fig. 6 Comparison of the concentrated mass seismic response under different conditions

从上述结果可以看出,随着地基岩性的减小,结构动力响应随之减小.这是因为代表岩性地基软硬程度的地基弹模对核岛厂房结构动力响应有着明显的影响,且地基弹模越大,核岛厂房结构响应越强烈;相反,弹性模量减小,地基刚度随之减小,则柔性增加,从而地基辐射阻尼效应也会变得更加明显,所以其引起的结构响应减小幅度也更显著.此外,节点8的减小幅度大于节点12,说明不同地基条件下,较高的楼层结构响应变化较为明显.

从节点8与节点12水平方向加速度反应谱可以看出:对比工况1,2,3的岩性地基条件,工况4所代表的土质地基核岛厂房结构地震动力响应显著减弱,最大减小幅度为66.5%,且主频向低频移动明显.这是因为考虑非线性效应后,等效线性法模型中,剪切模量以及阻尼比随着等效剪应变的变大而分别降低和增大,导致地基主频有所降低(约在1.0 Hz附近),从而使核岛结构的加速度幅值在较低频段有所增大.

3 结论

不同地基条件对核岛结构地震响应影响研究,是核电厂内陆发展厂址地基抗震适应性评价的核心内容之一.文中通过选用能量边界模拟无限地基辐射阻尼效应,考虑结构-地基相互作用,采用弹性模量模拟岩性地基线弹性特征,并运用等效线性模拟近场土体的非线性,建立了不同地基条件下的核岛厂房结构响应分析模型,进而对CPR1000堆型反应堆厂房结构进行了4种工况条件下的楼层谱响应分析,通过对比可得出以下3点结论.

1) 岩性地基条件,随着弹性模量的减小,地基刚度减小,地基变柔,核岛结构动力响应减小,且相同条件下,较高楼层结构响应变化较为明显.

2) 非岩性地基条件,地震作用下,地基非线性特性更为明显,水平向地基主频有所降低(约在1.0 Hz附近),同时核岛结构的加速度幅值在较低频段有所增大;与岩性地基条件相比,核岛厂房结构响应峰值显著降低,说明了等效线性的应用对未经线性化处理的谱峰值起到了消减作用.

3) 考虑结构-地基动力相互作用,通过比较不同地基条件对核岛厂房结构地震响应的影响,说明了核岛厂房结构动力响应随着地基岩性变化(岩性地基到土质地基)而发生显著的变化,所得变化规律对不同地基条件,尤其是将来内陆核电站厂址地基的抗震适应性分析,具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 戚承志,钱七虎. 核电站抗震研究综述[J]. 地震工程与工程振动,2000,20(3):76-86.
- [2] 孔宪京,林皋. 核电厂工程结构抗震研究进展[J]. 中国工程科学,2013,15(4):63-70.
- [3] VIALLET E, LABBÉ P, GALLITRE E. Seismic re-evaluation of EDF Bugey 900 PWR nuclear power plant in the frame of the 3rd periodic safety review[J]. Nuclear Engineering and Design,2010,240:1306-1319.
- [4] 陈灯红,杜成斌. 结构-地基动力相互作用的时域模型[J]. 岩土力学,2014,35(4):1165-1172.
- [5] 裴强,薛志成,胡波. 考虑地基不均匀性核反应堆地震响应分析[J]. 地震工程与工程振动,2011,31(6):168-172.
- [6] 王天运,任辉启,刘国强,等. 考虑土-结构相互作用的核电站动力分析方法[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(22):3841-3845.
- [7] 李忠献,李忠诚,梁万顺. 考虑地基岩土参数不确定性的核电厂结构随机地震反应分析[J]. 核动力工程,2006,27(2):31-36.
- [8] LYSMER J, DRAKE L A. A finite element method for seismology[C]//Methods of Computational Physics. New York:Academic Press,1972:34-35.
- [9] 李昕,周晶,陈建云. 考虑土体非线性特性的直埋管道-土体系统的动力反应分析[J]. 计算力学学报,2011,8(2):168-172.
- [10] 刘良林,王全凤,沈章春. 基于弹性总输入能的地震波选择方法[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2009,30(2):191-194.
- [11] 侯春林,李小军,潘蓉,等. AP1000 设计地震反应谱在具体厂址评价中的应用[J]. 原子能科学技术,2013,47(7):1197-1201.
- [12] 李忠献,李忠诚,沈望霞. 核反应堆厂房结构楼层反应谱的敏感性分析[J]. 核动力工程,2005,26(1):45-50.

Effects of Different Ground Conditions on Seismic Response of Nuclear Island

JIN Yuhao, YIN Xunqiang, WANG Guixuan

(Research and Development Center of Civil Engineering Technology, Dalian University, Dalian 116622, China)

Abstract: A nuclear reactor CPR1000 calculation model of different ground conditions based on the software of Super FLUSH was established, which adopted the concentrated mass by setting energy-transmitting boundary in the limited area of foundation. The elastic modulus was used to simulate the linear elasticity of rock and the equivalent linear method was applied to consider the nonlinear characteristics of soil foundation. The seismic response models with different ground conditions were analyzed, the effects of different ground conditions on seismic response of nuclear island were investigated. The calculation results indicate: the seismic response changes obviously for the ground condition variation from soil to rock.

Keywords: energy-transmitting boundary; rock foundation; soil foundation; structural seismic response; nuclear island; factory building structure

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)

文章编号:1000-5013(2015)06-0716-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.06.0716

冻融循环作用下混凝土毛细孔结构的劣化机制

姜作杰

(呼伦贝尔学院 建筑工程学院, 内蒙古 呼伦贝尔 021008)

摘要: 研究冻融循环作用下混凝土毛细孔结构的演变规律,并与吸水性及宏观性能相结合,探索毛细孔结构的劣化机制及其对混凝土宏观性能的影响规律.结果表明:水饱和状态是造成冻融循环过程中混凝土孔结构改变的重要因素;利用混凝土毛细吸水系数能够较为明确地反映冻融循环作用下混凝土内部结构的改变;毛细吸水系数初值和增长速率是表征毛细孔结构演变规律的关键参数,毛细吸水系数越大,冻融循环后混凝土强度越低.

关键词: 毛细吸水;水饱和状态;冻融循环;孔结构;混凝土

中图分类号: TU 528.0

文献标志码: A

混凝土是一种多孔的建筑材料,水在多孔材料中的传输是造成其性能劣化的重要原因^[1].水在材料中的迁移有3种方式:毛细作用、扩散作用及在压力梯度下的渗透^[2].在非压力作用下,水在混凝土中的扩散是一个相当缓慢的过程.在混凝土中,毛细作用是水渗透的主要方式,日益受到各国学者的关注^[3-5].冻融破坏是我国东北、西北和华北地区水工混凝土建筑在运行过程中产生的主要病害,对于水闸、渡槽等中小型水工混凝土建筑物,冻融破坏的地区范围更为广泛^[6].冻融循环的主要破坏机理是混凝土孔结构中的水在环境作用下,体积变化产生的压力破坏^[3].在冻融循环作用下,毛细孔中的水会引起9%的体积变化^[4,7].因此,深入研究混凝土孔结构,尤其是毛细孔结构,对于提高混凝土抗冻融循环作用具有重要意义.本文主要研究冻融循环对混凝土毛细吸水性能的影响,将混凝土毛细孔结构的变化与混凝土宏观性能相结合,深入研究孔结构的劣化机制.

1 材料与方法

1.1 原材料

海螺P II 52.5级水泥;I级粉煤灰,符合GB/T 1596-2005《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》的质量要求;浙江某公司袋收尘二氧化硅粉,比表面积为 $19.1 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$;市售聚羧酸型高效减水剂;细骨料采用河砂,细度模数为2.8的II区中砂;粗骨料5~20 mm,连续级配碎石.

1.2 试验内容

研究冻融循环作用下混凝土吸水性能的变化,混凝土成型后,标准养护28 d,进行冻融循环试验^[8].在冻融循环25,50,75和100次时,分别检测混凝土表观孔隙率、含水率、水饱和度和抗压强度.同时,研究掺加硅灰、粉煤灰冻融循环混凝土的性能,硅灰、粉煤灰分别取代5%,10%水泥.混凝土配合比^[9]中,水、水泥、矿粉、硅灰、减水剂、砂、石分别为 $175, 400, 0, 0, 6, 800, 1\ 000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

1.3 试验方法

1.3.1 表观孔隙率及水饱和度的计算 将待测的混凝土试块放入70℃的烘箱中烘干至恒质量,真空保水6 h,在室温下,放置至恒质量.

孔隙率、水饱和度^[3]的计算公式为

收稿日期: 2015-10-08

通信作者: 姜作杰(1979-),男,高级工程师,讲师,主要从事结构力学、建筑结构的研究. E-mail:69480226@qq.com.

基金项目: 国家教师科研基金“十二五”规划重点课题(CTF120905)

$$P = 100\% \times \frac{m_{\text{sat}} - m_{\text{dry}}}{m_{\text{dry}}}, \quad (1)$$

$$P_w = 100\% \times \frac{m_{\text{wat}} - m_{\text{dry}}}{m_{\text{sat}} - m_{\text{dry}}}. \quad (2)$$

式(1),(2)中: P 为孔隙率; P_w 为水饱和度; m_{sat} 为空气饱和质量; m_{wat} 为水饱和质量; m_{dry} 为绝干质量。

1.3.2 毛细吸水系数的测定 真空饱水 6 h 后,放入温度为 70 °C 的烘箱中烘干、称质量,已切割的试件烘干后称净质量。在试件的侧面涂上环氧树脂,搁放在支棒上,使试件的内表面与水接触,水面高出试样不超过 5 mm。毛细吸水试验装置,如图 1 所示。

经不同的时间间隔,取出试件,用湿布将试件与水接触面上的多余水分擦去,然后称质量,整个过程在 30 s 内完成。

毛细吸水系数^[4]的计算公式为

$$k = \frac{Q}{A} / \sqrt{t}. \quad (3)$$

式(3)中: k 为毛细吸水系数; Q 为毛细吸水量, cm^3 ; A 为毛细吸水面积, cm^2 ; t 为毛细吸水时间, s 。

1.3.3 混凝土力学性能 参照 GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》检测对应冻融循环破坏后的混凝土强度。

2 分析与讨论

2.1 冻融循环作用下混凝土吸水性能的变化

利用饱和吸水率的方法表征混凝土孔结构,测量的孔隙率结果,如图 2 所示。由图 2 可知:随着冻融循环次数(n)的增加,混凝土的孔隙率(η)逐步增加。以基准混凝土为例,经过 100 次冻融循环,混凝土孔隙率增加 48%,说明经过冻融循环,混凝土内部结构发生显著变化,最终会影响混凝土的宏观结构。

对比图 2 中的 3 条孔隙率变化曲线可知:不同阶段混凝土的孔隙多少呈现稳定的趋势,掺加粉煤灰混凝土孔隙率 > 普通混凝土孔隙率 > 掺加硅灰的混凝土孔隙率。这是由于硅灰的颗粒粒径远远小于粉煤灰,在填充混凝土结构微孔方面的作用显著高于粉煤灰。

随着冻融循环次数的增加,3 条曲线呈现出不同的变化趋势。当冻融循环小于 50 次时,基准混凝土的孔结构变化并不明显,仅呈现出略微增加的趋势;而当冻融循环超过 50 次,继续进行冻融循环,混凝土孔结构显著地变化,孔隙率呈现快速增加的趋势。即在前 50 次的冻融循环过程中,普通混凝土的总孔隙结构并未发生显著地变化,混凝土处于相对稳定的阶段;而继续增加冻融循环,内部损伤加剧,产生大量的裂纹并继续发展,造成了总孔隙的快速增加。

掺加硅灰的混凝土,与普通混凝土的变化趋势相似。首先,平稳变化,而后呈现较快地增长。不同的是,掺加硅灰的混凝土经历了 75 次冻融循环之后,其总的孔隙率变化并不明显。这说明掺加硅灰之后,混凝土内部结构得到加强,对由于冻融循环导致的应力破坏具有更强的抵抗能力^[10-11]。掺加粉煤灰的混凝土,在冻融循环开始之后,孔隙率随循环次数增加而增长,经过 100 次冻融循环后,总孔隙率达到 17%。

冻融循环后,混凝土毛细吸水效应的变化,如图 3 所示。由图 3 可知:与总孔隙率的变化趋势不同,混凝土毛细吸水性能随冻融次数增加而显著增加^[12]。毛细吸水系数的增加意味着混凝土内部毛细孔结构的显著改变,这一改变包括自身毛细孔结构由于内部毛细水冻融作用下产生的体积变化,引起了毛细

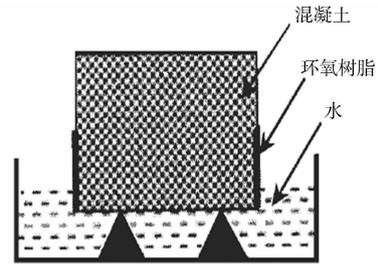


图 1 毛细吸水试验装置

Fig. 1 Capillary suction test setup

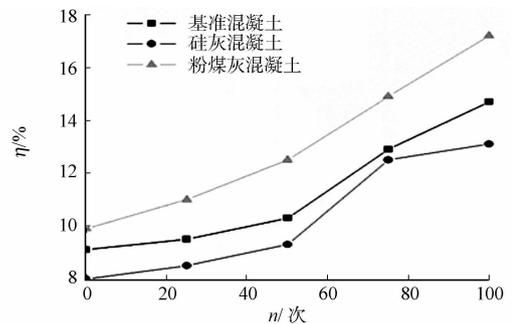


图 2 冻融循环对混凝土孔隙率的影响

Fig. 2 Influence of freezing-thawing cycles on the porosity of concrete

孔结构的膨胀破坏,进而形成更为粗大的宏观孔;另一方面,水泥产物中的部分尺寸更小的凝胶孔由于收到应力破坏而形成的毛细孔.因此,毛细吸水系数的变化代表着两部分孔结构变化的工作作用结果.

对应图2混凝土总孔隙率的讨论,以普通混凝土为例,在冻融循环小于50次时,仅是内部不同孔径的转化,产生了更多的毛细孔,而总孔隙率并不显著.当冻融循环次数继续增加,混凝土内部产生了大量的孔融破坏,总孔隙率显著增加.经过100次冻融循环后,基准混凝土、掺加粉煤灰混凝土和掺加硅灰的混凝土,毛细吸水系数分别增加了133%,104%和151%.

由此可见,硅灰显著地降低了混凝土内部毛细孔数量,然而,在经受冻融循环之后,其内部的毛细孔结构变化要高于普通混凝土和掺加粉煤灰后的混凝土.而掺加粉煤灰后,混凝土初始毛细孔量高于普通混凝土,但在变化趋势上显得更为平缓.这可能是由于硅灰在改善混凝土致密性的同时,提高了混凝土的刚度.因此,在冻融循环后,其内内应力作用增加,导致孔结构变化更为显著.

相比于混凝土饱和和吸水孔隙率,混凝土毛细吸水系数更能体现出冻融循环作用下,混凝土内部结构的变化趋势.而与混凝土宏观性能显著关联的混凝土毛细吸水系数,在变化过程中,与混凝土的内部密实度和刚度都具有较强的关联性,在性能设计过程中需要综合考虑.

2.2 吸水性能与混凝土宏观性能的关系

不同冻融循环作用下,混凝土的抗压强度的变化情况,如图4所示.由图4可知:随着冻融作用的增加,混凝土强度(p')显著下降.在经过100次冻融之后,基准混凝土、粉煤灰混凝土和硅灰混凝土强度分别下降20%,18%和25%.

硅灰对于提高混凝土的抗压强度具有重要的作用.因此,在冻融循环作用前后,硅灰混凝土的强度都显著高于其他两类型混凝土.粉煤灰由于活性较低,在冻融之前的强度最低.然而,在100次冻融之后,其强度与基准相近,甚至略高于基准.这说明在抵抗冻融循环作用过程中,粉煤灰具有相对的潜力.冻融循环作用下,混凝土的内部结构受到膨胀应力的破坏,产生大量的微裂缝和孔洞.因此,混凝土的宏观强度显著下降^[13].

在节2.1中,研究了混凝土冻融循环对混凝土孔结构的影响,将混凝土毛细孔结构的代表值毛细吸水系数(k)与混凝土抗压强度进行关联,结果如图5所示.由图5可知:毛细吸水系数与混凝土宏观强度具有很高的关联度.毛细孔结构的变化会引起混凝土宏观强度的显著变化.此时,利用总孔隙率由于不能充分地表征内部不同孔径的转换关系,其与宏观强度的关联性更弱^[14].

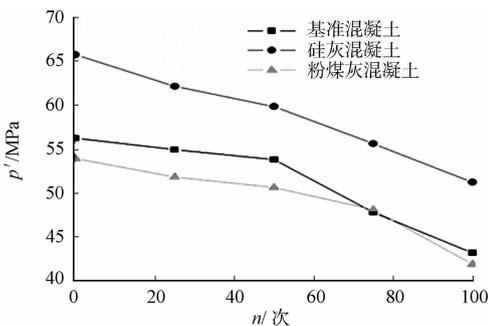


图4 冻融循环对混凝土抗压强度的影响

Fig. 4 Influence of freezing-thawing cycles on compressive strength of concrete

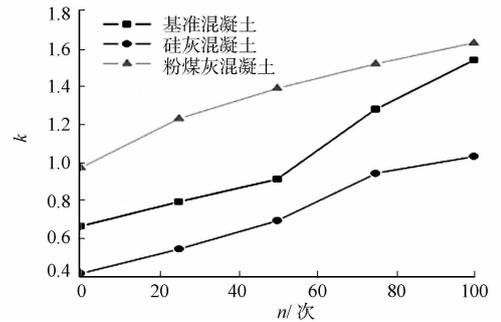


图3 冻融循环对混凝土毛细吸水系数的影响

Fig. 3 Influence of freezing-thawing cycles on capillary water absorption coefficient of concrete

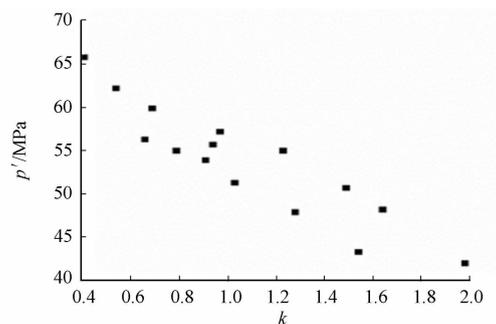


图5 混凝土毛细孔结构与宏观性能的关系

Fig. 5 Relationship between pore structure and macro properties of concrete

混凝土毛细孔结构与混凝土抗压强度具有很好的相关性,硅灰能显著提高混凝土各种环境下的力学性能,却加速了冻融循环对混凝土的强度的破坏速率^[15].虽然粉煤灰对混凝土强度贡献较小,但掺加粉煤灰后能降低冻融循环对混凝土结构的破坏速率.

2.3 毛细孔结构劣化分析

材料空隙中存在多种状态的液体,不同状态的液体具有不同的特征,由于冻融循环作用,混凝土孔隙中的水分在液-固转化过程中产生的膨胀压力对混凝土内部结构具有重要影响^[16]。

假设当孔隙中水均以液相存在时,孔隙中水的压力满足开尔文方程,即

$$p - p_0 = \frac{RT}{v_w} \cdot \ln\left(\frac{p_v}{p_{v,0}}\right). \quad (4)$$

式(4)中: p 为液相压力; p_0 为大气压; p_v 为蒸汽压; $p_{v,0}$ 为饱和蒸汽压; $p_v/p_{v,0}$ 即为水饱和度; R 为气体常数,取 $8.314 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$; T 为温度; v_w 为比体积,当 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, v_w 为 $1.8 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

根据式(4),假设内部相对湿度 85% ,在 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下, $p - p_0 = -22 \text{ MPa}$,压力负值说明在正常条件下,由于孔隙内水分的存在,混凝土收到潜在的收缩力,对于混凝土强度是有利的。

如果孔隙内水分收到冻融循环作用而结冰,其内部方程转化为

$$p - p_0 = \frac{RT}{v_i} \cdot \ln\left(\frac{p_v}{p_{v,0} x_{w,i} \gamma_w}\right) + \frac{\Delta h_{w,i}^*}{v_i T_0} (T_0 - T) + \frac{c_{p,i}^* - c_{p,w}^*}{v_i} T. \quad (5)$$

式(5)中: v_i 为冰的比体积,取 $1.998 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$; $\Delta h_{w,i}^*$ 为液相固化焓; $c_{p,i}^*$, $c_{p,w}^*$ 分别为冰、水的比热容; $x_{w,i}$ 为水的摩尔分数,假设没有多余盐类渗入,可以简化为 1 ; γ_w 取活性系数为 1 ,在理想状态下,溶质及溶液均符合拉乌尔定律。

对比式(4),(5)可知:随着冻融过程的进行,孔结构中的水压力逐步从负值转为正值,形成膨胀压力,造成混凝土内部微结构的改变。

冻融循环作用下,水饱和度对混凝土孔结构改变的影响,如图6所示。图6中: $\ln(p_v/p_{v,0})$ 为蒸汽压 p_v 与饱和蒸汽压 $p_{v,0}$ 比值的对数值。由图6可知:两者具有较好的关联性。因此,在冻融循环过程中,水饱和度是影响混凝土孔结构及性能的显著因素。

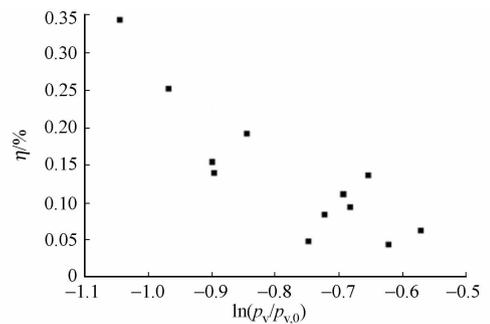


图6 冻融循环作用下水饱和度对混凝土孔结构改变的影响

Fig. 6 Effect of water saturation on the change of concrete pore structure under freezing-thawing cycle

3 结论

研究冻融循环作用下混凝土毛细孔结构的演变规律,并与吸水性及宏观性能相结合,探索毛细孔结构的劣化机制及其对混凝土宏观性能的影响规律,得出以下3点结论。

- 1) 毛细吸水系数能够表征冻融循环作用下混凝土毛细孔结构的特征,毛细吸水系数初值和增长速率是毛细孔结构演变规律的关键参数。
- 2) 在与混凝土宏观性能的关联研究中,毛细吸水系数相比于孔隙率更为精准。毛细吸水系数越高,强度下降越快。
- 3) 在冻融循环过程中,孔结构水饱和度是引起混凝土孔结构改变的重要因素。

参考文献:

- [1] LI Shuguang, CHEN Gaixin, JI Guojin, et al. Quantitative damage evaluation of concrete suffered freezing-thawing by DIP technique[J]. Construction and Building Materials, 2014(69): 177-185.
- [2] 黄蓓, 钱春香. 掺合料混凝土的毛细吸水现象[J]. 混凝土与水泥制品, 2008(4): 14-16.
- [3] ROSSIGNOLO J A, AGNESINI M. Durability of polymer-modified lightweight aggregate concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2004, 26(4): 375-380.
- [4] TASDEMIR C. Combined effects of mineral admixtures and curing conditions on the sorptivity coefficient of concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(10): 1637-1642.
- [5] MEDEIROS M, HELENE P. Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(3): 1476-1484.
- [6] 李金玉, 曹建国, 徐文雨, 等. 混凝土冻融破坏机理的研究[J]. 水利学报, 1999(1): 41-49.

- [7] MARTYS N S, FERRARIS C F. Capillary transport in mortars and concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 1997, 27(5): 747-760.
- [8] 慕儒. 冻融循环与外部弯曲应力、盐溶液复合作用下混凝土的耐久性与寿命预测[J]. 南京: 东南大学, 2000: 1-20.
- [9] 陈斌, 李富强, 刘国华, 等. 混凝土配合比的非线性多目标优化算法研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2005, 39(1): 16-19.
- [10] WANG Zhenjun, LI Kezhi, WANG Chuan. Freezing-thawing effects on electromagnetic wave reflectivity of carbon fiber cement based composites[J]. *Construction and Building Materials*, 2014(64): 288-292.
- [11] YAZICI H. The effect of silica fume and high-volume class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze-thaw resistance of self-compacting concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(4): 456-462.
- [12] 张朝辉, 王沁芳, 杨娟, 等. 透水混凝土强度和透水性影响因素研究[J]. *混凝土*, 2008(3): 7-9.
- [13] SI Wei, MA Biao, LI Ning, et al. Reliability-based assessment of deteriorating performance to asphalt pavement under freeze-thaw cycles in cold regions[J]. *Construction and Building Materials*, 2014(68): 572-579.
- [14] 张金喜, 张建华, 邬长森, 等. 再生混凝土性能和孔结构的研究[J]. *建筑材料学报*, 2006, 9(2): 142-147.
- [15] 李浩, 施养杭. 混凝土碳化深度预测模型的比对与分析[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2007, 28(2): 192-195.
- [16] 陈健, 徐伟. 清水混凝土耐久性的内部结构微观分析[J]. *建筑施工*, 2005, 27(10): 62-64.

Degradation Mechanism of Concrete Pore Structure Under the Action of Freeze-Thaw Cycle

JIANG Zuojie

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The influence of freezing-thawing cycle on capillary pore structure of concrete was investigated. Combining water absorption and macro performance, the capillary pore structure degradation mechanism under freezing-thawing cycle under the effect of capillary pore structure and its influence on macro properties of concrete were discussed. The results show that the water saturation state is an important factor to change concrete pore structure under freezing-thawing cycles; the change of internal structure of concrete under freezing and thawing cycles can be clearly defined by the capillary water absorption coefficient of concrete; the initial value and its growth rate of capillary water absorption coefficient are the key parameter for characterization of pore structure evolution; as capillary water absorption coefficient increases, the concrete strength decreases after freezing-thawing cycle.

Keywords: capillary water absorption; water saturation state; freezing-thawing cycle; pore structure; concrete

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)

Caputo 型分数阶微积分求解及其误差估计

李瑾

(河南财政税务高等专科学校 信息工程系, 河南 郑州 451464)

摘要: 研究 Caputo 型分数阶微分函数的正解情况, 考察其正解的唯一性问题, 进而研究其数值求解的误差估计, 所得结果拓展了 Wyss 的研究成果.

关键词: 分数阶微积分; Caputo 型; Chebyshev 多项式; 误差估计; 唯一性

中图分类号: O 155

文献标志码: A

分数阶微积分在一些混沌领域, 如在遗传数理得到了较为广泛的应用^[1-3]. 然而, 由于其应用上的非局部性, 使得分数阶微积分数值计算较为复杂, 进而导致发展较为缓慢^[4]. Diethelm^[5] 根据前人的研究成果^[6-11], 给出了几种较为常见的分数阶微积分的数值算法, 并提出了分数阶微积分的 Gauss 求解原理及算法. 本文基于 Sugiura 等^[12] 的分数阶微积分 Chebyshev 多项式数值算法模型, 考察 Wyss 等^[13] 设计的 Caputo 型分数阶微分函数的正解情况, 进而研究其数值求解的误差估计.

1 分数阶积分及其拓展算法

Wyss 和 Chneider 建构了分数阶积分函数, 令 $\varphi(x), \psi(x)$ 为已知函数, 所组成的偏微分方程为

$$u(x, t) = \varphi(x) + t\psi(x) + \frac{1}{\Gamma(a)} \int_0^t (t-s)^{a-1} \Delta u(x, s) ds, \quad a \geq 1. \quad (1)$$

$$U(\xi, t) = \Phi(\xi) + t\Psi(\xi) + \frac{(-\xi^2)}{\Gamma(a)} \int_0^t (t-s)^{a-1} U(\xi, s) ds. \quad (2)$$

为进一步研究高阶分数阶积分, Miyakoda 拓展了 Wyss 的研究成果, 建构基于 Chebyshev 多项式逼近的高阶分数阶积分^[13]. 为此, 令函数 $f(x)$ 分数阶积分为

$$J_{a,t} f(t) = \frac{1}{\Gamma(a)} \int_a^t (t-\tau)^{a-1} f(\tau) d\tau, \quad a > 0. \quad (3)$$

结合文献[3]的研究, 对上述方程进行多项式逼近, 可得到

$$f(t) \approx p_n(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n a_k T_k(2t-1), \quad 0 \leq t \leq 1. \quad (4)$$

式(4)中: $a_k = \frac{\delta_k}{n} \{f(t_0) + f(t_n) \cos(k\pi) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(t_i) \cos(\frac{ik\pi}{n})\}$, $\delta_k = 1, k = 0, 1, \dots, n-1$; $\delta_k = 0.5$.

令插值节点 $t_i = (1 + \cos(\frac{i\pi}{n}))/2$, 于是, 可得到 Chebyshev 多项式为

$$T_0(x) = 1, T_1(x) = x, T_{n+1}(x) = 2xT_n(x) - T_{n-1}(x).$$

结合式(4),由方程(1)可得

$$J_{0,t}^a f(t) \approx J_{0,t}^a p_n(t) = \frac{1}{\Gamma(a)} \int_0^t (t-\tau)^{a-1} p_n(\tau) d\tau. \quad (5)$$

为了进一步得出该多项式的算法,记 p_n 为式(4)的 n 次多项式,于是有

$$\int_x^t (p_n(t) - p_n(\tau)) - (t-\tau)^{a-1} d\tau = (L_n(t) - L_n(x))(t-x)^a. \quad (6)$$

令 $L_n(x) = \sum_{i=1}^n A_i(t) \frac{(t-x)^i}{a+i}, L'_n(x) = \frac{b_0}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} b_i T_i(2x-1), 0 \leq t \leq 1$,由式(6),有

$$(2x-1)L'_n(x) = \frac{b_1}{2} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n-1} (b_{i+1} + b_{i-1}) T_i(2x-1). \quad (7)$$

于是,可得到

$$L'_n(x)(t-x) = \frac{(2t-1)b_0 - b_1}{4} + \frac{1}{4} \sum_{i=1}^{n-1} (2(2t-1)b_i - b_{i+1} - b_{i-1}) T_i(2x-1), \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n a_i (T_i(2t-1) - T_i(2x-1)) &= \frac{(2t-1)b_0 - b_1}{4} + \frac{1}{4} \sum_{i=1}^{n-1} (2(2t-1)b_i - \\ &b_{i+1} - b_{i-1}) T_i(2x-1) + a \sum_{i=1}^n \frac{b_{i-1} - b_{i+1}}{4i} (T_i(2t-1) - T_i(2x-1)). \end{aligned} \quad (9)$$

由方程(9)中 $T_i(2x-1) (i=1, 2, \dots, n)$ 的系数,可以得到

$$4a_i = (1 - \frac{a}{i})b_{i+1} - 2(2t-1)b_i + (1 + \frac{a}{i})b_{i-1}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad b_{n+1} = b_n = 0. \quad (10)$$

所以,分数阶积分(1)的数值算法为

$$J_{0,t}^a f(t) \approx \frac{t^a}{\Gamma(a)} \left\{ \frac{1}{a} \left(\frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n a_k T_k(2t-1) \right) - \sum_{k=1}^n \frac{b_{k-1} - b_{k+1}}{4k} (T_k(2t-1) - T_k(-1)) \right\}. \quad (11)$$

式(11)中: $\alpha > a, t \in [0, 1], a_k, b_k$ 由方程(4)及方程(10)给出.

2 Caputo 型分数阶微分的数值算法

首先,给出 Caputo 型分数阶导数的定义.令函数 $f(t)$ 的 Caputo 型分数阶导数为

$${}_c D_{0,t}^a f(t) \approx \frac{1}{\Gamma(m-a)} \int_a^t (t-\tau)^{m-a-1} f^m(\tau) d\tau, \quad t > a, \quad m-1 < a < m \in \mathbf{Z}^+. \quad (12)$$

式(12)中: $\Gamma(\cdot)$ 是 Gamma 函数.接下来,对该导数进行 Chebyshev 多项处理,可得

$${}_c D_{0,t}^a f(t) \approx {}_c D_{0,t}^a p_n(t) = \frac{1}{\Gamma(2-a)} \int_0^t (t-\tau)^{1-a} p_n^{(2)}(\tau) d\tau, \quad 1 < a < 2. \quad (13)$$

令 $p_n^{(2)}$ 为上式的 $n-2$ 次多项式,则存有 L_{n-2} 多项式满足

$${}_c D_{0,t}^a f(t) \approx {}_c D_{0,t}^a p_n(t) = \frac{t^{2-a}}{\Gamma(2-a)} \cdot (p_n^{(2)}(t) - L_{n-2}(t) + L_{n-2}(0)). \quad (14)$$

假设, $L'_{n-2}(x) = b_0/2 + \sum_{i=1}^{n-3} b_i T_i(2x-1), 0 \leq x \leq 1$, 在 $[x, t]$ 区间内,对上式积分,得到

$$L_{n-2}(t) - L_{n-2}(x) = \sum_{i=1}^{n-2} \frac{b_{i-1} - b_{i+1}}{4i} \cdot (T_i(2t-1) - T_i(2x-1)), \quad (15)$$

进而得到

$$\begin{aligned} L'_{n-2}(x)(t-x) &= -L'_{n-2}(x) \frac{(2t-1) - (2x-1)}{2} = \\ &\frac{(2t-1)b_0 - b_1}{4} + \frac{1}{4} \sum_{i=1}^{n-3} (2(2t-1)b_i - b_{i+1} - b_{i-1}) T_i(2x-1). \end{aligned} \quad (16)$$

再令 $p'_n(x) = \frac{c_0}{2} + \sum_{k=1}^{n-1} c_k T_k(2x-1), p''_n(x) = \frac{c_0}{2} + \sum_{k=1}^{n-1} c_k T_k(2x-1), p''_n(x) = \frac{d_0}{2} + \sum_{k=1}^{n-1} d_k T_k(2x-1)$.

根据文献[3]的研究, a_k, c_k, d_k 满足

$$\left. \begin{aligned} c_k &= c_{k+1} + 4ka_k, & k &= n, n-1, \dots, 1, & c_{n+1} &= c_n = 0, \\ d_{k-1} &= d_{k+1} + 4kc_k, & k &= n-1, n-2, \dots, 1, & d_n &= d_{n-1} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

为了进一步明确 b_i , 将方程(16)~(18)整合, 可得到

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{n-2} d_k (T_k(2t-1) - T_k(2x-1)) &= \frac{(2t-1)b_0 - b_1}{4} + \\ &\frac{1}{4} \sum_{i=1}^{n-3} (2(2t-1)b_i - b_{i+1} - b_{i-1}) T_i(2x-1) + \\ &(2-a) \sum_{k=1}^{n-2} \frac{b_{k-1} - b_{k+1}}{4k} (T_K(2t-1) - T_K(2x-1)). \end{aligned}$$

可以发现

$$4d_k = -2(2t-1)d_k + (1 - \frac{2-a}{k})b_{k+1} + (1 + \frac{2-a}{k})b_{k-1}. \quad (18)$$

式(18)中: $k=1, 2, \dots, n-2; b_{n-1}=b_{n-2}=0$. 于是, 可得到 Caputo 型的分数阶导数的数值算法为

$$\begin{aligned} {}_c D_{0,t}^a f(t) &\approx \frac{t^{2-a}}{\Gamma(2-a)} \left\{ \frac{1}{2-a} \left(\frac{d_0}{2} + \sum_{k=1}^{n-2} d_k T_k(2t-1) \right) - \right. \\ &\left. \sum_{k=1}^{n-2} \frac{b_{k-1} - b_{k+1}}{4k} \cdot (T_k(2t-1) - T_k(-1)) \right\}. \end{aligned} \quad (19)$$

式(19)中: $a \in (1, 2), t \in [0, 1]$, 而 d_k, b_k 分别由方程(17), (18) 确定.

3 Caputo 型分数阶微分方程解的唯一性问题

上面给出了 Caputo 型分数阶微分 ${}_c D_{0,t}^a f(t)$ 的定义, 并给出了其数值算法. 接下来, 利用混合单调算子不动点定理, 考察 Caputo 型分数阶微分方程解的唯一性问题.

当 $t \in (0, +\infty), (0, \infty) \rightarrow \mathbf{R}$ 时, $f(x)$ 的 a 阶 ($a \in \mathbf{R}^+$) 分数阶积分为

$$D_{0,t}^{-a} f(t) = \frac{1}{\Gamma(a)} \int_0^t (t-\tau)^{a-1} f(\tau) d\tau.$$

所以, 其 Caputo 型分数阶导数则为

$${}_c D_{0+}^a f(t) = D_{0,t}^{-(n-a)} \frac{df^n(t)}{dt^n} = \frac{1}{\Gamma(n-a)} \int_0^t (t-\tau)^{n-a-1} f^n(\tau) d\tau.$$

假设 $G(t, s) > 0 (t, s \in (0, 1))$ 为 Green 函数, 于是, 在 $g \in [0, 1], 2 \leq a \leq 3$, Caputo 型分数阶导数微分方程为

$${}_c D_0^a u(t) + g(t) = 0, \quad u(0) = u'(1) = u''(0) = 0, \quad 0 < t < 1, \quad (20)$$

存在唯一解 $u(t) = \int_0^t G(t, s)g(s) ds, t \in [0, 1]$, 有

$$G(t, s) = \begin{cases} \frac{(a-1)t(1-s)^{a-2} - (t-s)^{a-1}}{\Gamma(a)}, & 0 \leq s \leq t \leq 1, \\ \frac{t(1-s)^{a-2}}{\Gamma(a-1)}, & 0 \leq s \leq t \leq 1. \end{cases}$$

上式中: $G(t, s)$ 满足 $\frac{a-1}{\Gamma(a)}(1-s)^{a-2}st \leq G(t, s) \leq \frac{1}{\Gamma(a-1)}(1-s)^{a-2}t, \forall t, s \in (0, 1)$. 此时的积分空间 C

为 Banach 空间, 即 $\forall x, y \in C[0, 1], x \leq y \Leftrightarrow \forall t \in [0, 1], x(t) \leq y(t)$ 集合空间成立.

设 $P = \{x \in C[0, 1] | x(t) \geq 0, t \in [0, 1]\}$, 所以 P 为 Banach 空间 C 的正规锥, 于是提出如下假设.

假设 1 $f(t, u, v) : [0, 1] \times [0, \infty) \times [0, \infty) \rightarrow [0, \infty)$ 连续, 且 $f(t, 0, 1) \neq 0$.

假设 2 当 $t \in [0, 1], v \in [0, \infty)$ 时, 在 $u \in [0, +\infty)$ 区间, $f(t, u, v)$ 单调递增; 当 $t \in [0, 1], u \in [0, +\infty)$ 时, 在 $v \in [0, +\infty)$ 区间, $f(t, u, v)$ 单调递减; $\forall \gamma \in (0, 1)$, 存在 $\varphi(\gamma) \in (\gamma, 1)$, 使 $f(t, \gamma u, \gamma^{-1}v) \geq \varphi(\gamma)f(t, u, v), \forall u, v \in [0, \infty)$. 于是, 提出以下 3 点结论.

1) 存在 $r \in (0, 1)$ 及 $u_0, v_0 \in P_w$, 使不等式 $rv_0 \leq u_0 < v_0$ 成立, 并满足

$$u_0(t) \leq \int_0^1 G(t, s) f(s, u_0(s), v_0(s)) ds, \quad v_0(t) \geq \int_0^1 G(t, s) f(s, v_0(s), u_0(s)) ds.$$

上式中: $w(t) = t, t \in [0, 1]$.

2) 在 $P = \{x \in C[0, 1] \mid f(x) \geq 0, x \in [0, 1]\}$, Caputo 分数阶微分方程具有唯一解 u^* .

3) $\forall x_0, y_0 \in P$, 构造迭代序列

$$x_n(t) = \int_0^1 G(t, s) f(s, x_{n-1}(s), y_{n-1}(s)) ds, \quad y_n(t) = \int_0^1 G(t, s) f(s, y_{n-1}(s), x_{n-1}(s)) ds.$$

上式中: $n = 1, 2, \dots$.

当 $n \rightarrow \infty$ 时, $x_n(t) \rightarrow u^*(t), y_n(t) \rightarrow u^*(t)$ 成立.

4 误差分析

根据文献[15]的研究, 令积分空间为 $C_r: z = \frac{w + w^{-1} + 2}{4}, w = r \exp(i\theta), 1 < r < \infty, 0 \leq \theta \leq 2\pi$, 假设 $f(x)$ 解析于 C_r , 且 $x \in [0, 1]$, 则有

$$E_n(t) = f(t) - p_n(t) = \frac{T_{n+1}(2t-1) - T_{n-1}(2t-1)}{2\pi i} \times \int_{C_r} \frac{f(z) dz}{(z-t)(T_{n+1}(2t-1) - T_{n-1}(2t-1))}. \quad (21)$$

由于前述的 Chebyshev 多项式 $p_n(x)$ 具有解的有界性和一致性, 所以有

$$|J_{0,t}^a f(t) - J_{0,t}^a p_n(t)| \leq \frac{2M_n}{\Gamma(a+1)},$$

$$M_n = \max_{0 \leq t \leq 1} \left\{ \frac{1}{2\pi i} \cdot \int_{C_r} \frac{f(z) dz}{(z-t)(T_{n+1}(2t-1) - T_{n-1}(2t-1))} \right\}, \quad a > 0.$$

于是, 在积分空间 C_r 上, Chebyshev 多项式分数阶积分 $f(x)$ 的数值算法具有误差估计为

$$|J_{0,t}^a f(t) - J_{0,t}^a p_n(t)| \leq \frac{2M_r}{\Gamma(a+1)(r-1)^2(r^n - r^{-n})} = o(r^{-n}). \quad (22)$$

式(22)中: $M = \max_{z \in C_r} |f(z)|, r > 1$. 因为 $z = (w + w^{-1} + 2)/4$ 及 $T_n(x) = ((x - \sqrt{x^2 - 1})^n + (x + \sqrt{x^2 - 1})^n)/2$, 于是有

$$\begin{aligned} |J_{0,t}^a f(t) - J_{0,t}^a p_n(t)| &\leq \frac{2M_n}{\Gamma(a+1)} \frac{2}{\Gamma(a+1)} \times \\ &\max_{0 \leq t \leq 1} \left\{ \left| \frac{1}{2\pi i} \int_{|w|=r} \frac{f(z)}{z-t} \cdot \frac{2}{(w^n - w^{-n})(w - w^{-1})} \cdot \frac{1-w^{-2}}{4} dw \right| \right\} \leq \\ &\frac{2}{\Gamma(a+1)} \times \frac{1}{4\pi} \times \int_{|w|=r} \frac{4rM}{(r-1)^2} \times \frac{1}{(r^n - r^{-n})^2} dw = \\ &\frac{4rM}{\Gamma(a+1)(r-1)^2(r^n - r^{-n})} = o(t^{-n}). \end{aligned}$$

所以, 在积分空间 C_r 上, Chebyshev 多项式分数阶积分 $f(x)$ 的数值算法具有的误差估计满足

$$A_{n+1}(t) = T_{n+1}(2t-1) - T_{n-1}(2t-1), \quad B_n(t) = \frac{1}{2\pi i} \cdot \int_{C_r} \frac{f(z) dz}{(z-t)A_{n+1}(z)}.$$

于是, $E_n(t) = f(t) - p_n(t) = A_{n+1}(t)B_n(t)$, 又由于 Chebyshev 多项式 $f(x)$ 的一致有界性, 所以有

$$\begin{aligned} |cJ_{0,t}^a f(t) - cD_{0,t}^a p_n(t)| &\leq \frac{2M_r}{\Gamma(a+1)(r-1)^2(r^n - r^{-n})} = o(r^{-n}) \leq \\ &\frac{1}{\Gamma(3-a)} (8n^2 M_{0,n} + 16n(M_{0,n} + M_{1,n}) + 2(8M_{0,n} + M_{2,n})). \end{aligned}$$

上式中: $M_{0,n} = \max_{0 \leq t \leq 1} |B_n(t)|; M_{1,n} = \max_{0 \leq t \leq 1} |B'_n(t)|; M_{2,n} = \max_{0 \leq t \leq 1} |B''_n(t)|; 1 < a < 2$.

注 上述结论中 o 的含义为 $n \rightarrow +\infty$ 时, Chebyshev 多项式 $f(x)$ 数值算法误差的收敛速率.

参考文献:

- [1] PODLUBNY I. Fractional differential equations, mathematics in science and engineering[M]. New York: Academic Press, 1996: 120-125.
- [2] MILLER K S, ROSS B. An introduction to the fractional calculus and fractional differential equations [M]. New York: John Wiley, 1998: 76-91.
- [3] HIEBER M. Laplace transforms and α -time integrated semigroups[J]. Forum Math, 1991, 120(3): 595-612.
- [4] 徐明瑜, 谭文长. 中间过程、临界现象: 分数阶算子理论、方法、进展及其在现代力学中的应用[J]. 中国科学(G辑), 2006, 36(3): 198-229.
- [5] DIETHELM K. An improvement of a nonclassical numerical method for the computation of fractional derivatives [J]. Numer Algor, 2009, 131(1): 209-254.
- [6] SUGIURA H, HASEGAWA T. Quadrature rule for Abel's equations: Uniformly approximating fractional derivatives[J]. Comput Appl Math, 2009, 223(1): 460-471.
- [7] FOX C. The G and H functions as summertrical Fourier kernels[J]. Trans Amer Math Soc, 1961(98): 396-410.
- [8] ELLIOTT D. ELLIOTT Truncation errors in two Chebyshev series approximations [J]. Math Compute, 1965(19): 234-248.
- [9] FUJITA Y. Fujita Cauchy problems of fractional order and stable processes[J]. Japan J Appl Math, 1990, 7(3): 459-476.
- [10] FUJITA Y. Integro differential equation which interpolates the wave equation[J]. Osaka J Math, 1990, 116(27): 797-804.
- [11] YCAN L, AGTTAWAL O P. A numerical scheme for dynamic systems containing fractional derivatives[J]. ASME J Vibr Acoust, 2002, 124(2): 321-324.
- [12] HASEGAWA T, SUGIURA H. Uniform approximation to fractional derivatives of functions of algebraic; singularity[J]. Compute Appl Math, 2009, 228(1): 247-253.
- [13] SCHNEIDER W R, WYSS W. Fractional diffusion and wave equations[J]. J Math Phys, 1989, 134(30): 129-139.
- [14] FUJITA Y. Energy inequalities for interop-partial differential equations with Riemann Lowville integrals[J]. SIAM J Math Anal, 1992(23): 1179-1201.
- [15] BAI Zhanbing. Eigenvalue intervals for a class of fractional boundary value problem[J]. Computers and Mathematics with Applications, 2012, 64(10): 3248-3261.

Algorithm and Error Estimate on the Fractional Differential Equation With Caputo Derivative

LI Jin

(Department of Information Technology, Henan Finance and Taxation College, Zhengzhou 451464, China)

Abstract: The development speed of the reactional differential equation is slow due to the application nonlocality and the calculative complexity. In this paper, we will discuss the positive solution to the fractional differential equation with Caputo derivative based on the current research. Then we also study the uniqueness of the solution and discern the deviation comparing with numerical solution. The paper expands Wyss' research and conclusion.

Keywords: fractional differential equation; Caputo derivative; Chebyshev polynomial; error estimate; uniqueness

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 吴逢铁)

文章编号:1000-5013(2015)06-0726-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.06.0726

A-收敛与几乎处处收敛

鲍玲鑫¹, 施慧华²

(1. 福建农林大学 计算机与信息学院, 福建 福州 350002;

2. 华侨大学 数学科学学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 设 $A \equiv (a_i)_{i=1}^{\infty} \subset S_{\ell_1}^+$, 其中, $S_{\ell_1}^+$ 表示 ℓ_1 单位球面上的所有正向量构成的集合. Banach 空间 X 中的序列 (x_n) 称为 A -收敛于 $x \in X$, 是指对任意的 $\epsilon > 0$, $\lim_{i \rightarrow \infty} \langle a_i, \chi_{A(\epsilon)} \rangle = 0$, 其中, $A(\epsilon) = \{n \in \mathbb{N} : \|x_n - x\| \geq \epsilon\}$. 用两种不同的收敛方式刻画 A -收敛, 即证明对任意 $A \equiv (a_i)_{i=1}^{\infty} \subset S_{\ell_1}^+$, 存在一个 \mathbb{N} 上的理想 I_A , 以及一族极端有限可加概率测度 $P_{\text{ext}}(I_A)$, 使 A -收敛且理想 I_A -收敛和测度 $P_{\text{ext}}(I_A)$ -收敛互为等价. 此外, 证明 A -收敛为测度 $P_{\text{ext}}(I_A)$ -几乎处处收敛的充分必要条件是 A -收敛为非退化的.

关键词: 统计收敛; 理想收敛; 几乎处处收敛; 极端测度; Banach 空间

中图分类号: O 177.2

文献标志码: A

统计收敛的定义由 Fast^[1] 和 Steinhaus^[2] 于 1951 年在实数空间中引入, 它是经典序列收敛定义的一种推广形式. 在此后半个多世纪中, 统计收敛出现许多推广形式, 如 A -统计收敛^[3]、Lacunary-统计收敛^[4] 和理想 I -收敛等^[5]. 给定 $A \subseteq \mathbb{N}$, χ_A 表示集合 A 的特征函数, \mathbb{N} 表示所有自然数构成的集合. Banach 空间 X 中的序列 (x_n) 称为统计收敛于 $x \in X$, 指对任意 $\epsilon > 0$, $\lim_{i \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \chi_{A(\epsilon)}(j) = 0$, 其中, $A(\epsilon) = \{n \in \mathbb{N} : \|x_n - x\| \geq \epsilon\}$ (下同, 略). 2008 年, Cheng 等^[6-7] 利用几何泛函分析与 Banach 空间理论引入了统计测度理论, 并证明了各种具体形式的统计收敛均可以用相应的一族统计测度收敛加以刻画. 给定一族统计测度 S , Banach 空间 X 中的序列 (x_n) 称为测度 S -收敛于 $x \in X$ 是指对任意的 $\epsilon > 0$, $\mu(A(\epsilon)) = 0$ 对一切 $\mu \in S$ 成立. 2013 年, Bao 等^[8] 进一步证明了任意一个理想 $I \subset 2^{\mathbb{N}}$, 存在一族统计测度 S , 使理想 I -收敛等价于测度 S -收敛. 2013 年, Bao 等^[9] 利用 ℓ_1 单位球面上的一列正向量 $A \equiv (a_i)_{i=1}^{\infty}$, 定义了一个推广形式的 A -统计收敛, 即 A -收敛. 文献^[9] 证明了 A -收敛可以用一族概率测度 M_A -收敛加以刻画, 并证明了 A -收敛等价于统计测度收敛, 依赖于 A 的 ω^* -拓扑性质. A -收敛可以用测度 M_A -收敛等价刻画, 也就存在是否等价于依测度 M_A -几乎处处收敛的问题. 基于此, 本文首先证明 A -收敛、测度收敛与理想收敛相互等价, 并证明 A -收敛为测度 $P_{\text{ext}}(I_A)$ -几乎处处收敛的充分必要条件是 A -收敛为非退化的.

1 A-收敛和理想收敛与极端测度收敛

文中的所有记号都是统一的. X 表示实 Banach, S_X 和 X^* 分别表示 X 的单位球面和共轭空间. 如果 X 是一个序列空间, X^+ 表示 X 的正锥, 即 $X^+ = \{x = (x(n)) \in X : x(n) \geq 0\}$, P^+ 表示 X^* 中所有正线性泛函所构成的集合. 因此, 有 $S_X^+ = S_X \cap X^+$, $S_{X^*}^+ = S_{X^*} \cap P^+$. 对任意一个集合 G , \overline{G} 表示集合 G 的基数(势). 给定 $A \subseteq \mathbb{N}$, A 的特征函数 χ_A 可以看作是 ℓ_{∞} 中的一个向量, 记 $\chi_{\mathbb{N}} = e$, (e_n) 表示 ℓ_{∞} 中的标准

收稿日期: 2015-04-03

通信作者: 鲍玲鑫(1982-), 男, 讲师, 博士, 主要从事基础数学泛函分析、Banach 空间几何的研究. E-mail: bolingxmu@sina.com.

基金项目: 国家自然科学基金专项数学天元基金资助项目(11426064, 11426061); 国家自然科学基金青年基金资助项目(11401227, 11501108); 福建省自然科学基金资助项目(2015J01579)

单位向量. 设 $(x_n) \subset X$ 及 $x \in X$, 对任意的 $\epsilon > 0$, 定义集合 $A((x_n), x, \epsilon) = \{n \in \mathbf{N} : \|x_n - x\| \geq \epsilon\}$, 简记为 $A(\epsilon)$.

定义 1^[9] 设 $\mathbf{A} = (a_i)_{i=1}^\infty \subset S_{l_1}^+$, 且设 $(x_n) \subset X$ 及 $x \in X$. 如果对任意的 $\epsilon > 0$, $\lim_{i \rightarrow \infty} \langle a_i, \chi_{A(\epsilon)} \rangle = 0$, 则称序列 (x_n) A-收敛于 x .

注释 1 1) 若令定义中 $\mathbf{A} = (e_i)$, 则 A-收敛等价于经典的序列收敛.

2) 设 $(a_{i,j})_{\mathbf{N} \times \mathbf{N}}$ 表示一个非负正则可和矩阵, 满足 $\sum_{j=1}^\infty a_{i,j} = 1$ 对任意的 $i \in \mathbf{N}$. 如果令定义中 $\mathbf{a}_i = (a_{i,j})_{j=1}^\infty (i=1, 2, \dots)$, 则 A-收敛即为经典意义下的 A-统计收敛.

对于定义 1 中的序列 $\mathbf{A} = (a_i)_{i=1}^\infty = ((a_{i,j})_{j=1}^\infty)_{i=1}^\infty \subset S_{l_1}^+ \subset S_{l_\infty}^+$, 定义 l_∞ 上的连续半范数 p_A 为

$$p_A(x) = \limsup_{i \rightarrow \infty} \sum_{j=1}^\infty a_{i,j} |x(j)|, \quad x = (x(j)) \in l_\infty.$$

记 $\mathbf{M}_A = \{x^* \circ \chi_{(\cdot)} : x^* \in \partial p_A(e)\}$, 则文献[9]证明了 $\mathbf{M}_A \subset \mathbf{P}(\mathbf{N}, 2^{\mathbf{N}})$, 其中, $\mathbf{P}(\mathbf{N}, 2^{\mathbf{N}})$ 表示定义在可测空间 $(\mathbf{N}, 2^{\mathbf{N}})$ 上所有有限可加概率测度构成的集合.

定理 1^[9] 设 $\mathbf{A} = (a_i)_{i=1}^\infty \subset S_{l_1}^+$, 且 $(x_n) \subset X$ 以及 $x \in X$. 则序列 (x_n) A-收敛于 x 当且仅当 (x_n) 测度 \mathbf{M}_A -收敛于 x .

若 $I \subset 2^{\mathbf{N}}$ 满足: 1) 任意 $A, B \in I, A \cup B \in I$; 2) 任意的 $A \in I$ 及 $B \subseteq A, B \in I$, 则称 I 为 \mathbf{N} 上的一个理想. 如果理想 I 还满足: $I \neq \emptyset (\mathbf{N} \notin I, \text{包含所有单点集})$, 则称 I 为非平凡(真, 统计型)理想. 对于上述定义连续半范数 p_A , 令 $I_A = \{A \in 2^{\mathbf{N}} : p_A(\chi_A) = 0\}$, 则容易验证 I_A 为 \mathbf{N} 上的一个非平凡的真理想. I_A 为统计型理想的充分必要条件参见文献[9]的定理 4.2. 定义

$$X_{I_A} = \overline{\text{span}\{\chi_A : A \in I_A\}} \subset l_\infty.$$

令 $\tilde{P} = \{\tilde{x} \in l_\infty / X_{I_A} : x \in l_\infty^+\}$ 表示商空间 $(l_\infty / X_{I_A}, \|\cdot\|_Q)$ 的正锥以及 \tilde{P}^+ 表示其共轭锥. 定义 l_∞ 上的连续半范数 q_A 为

$$q_A(x) = \|\tilde{x}\|_Q, \quad x \in l_\infty, \tilde{x} = x + X_{I_A}.$$

设 f 是定义在 X 上的连续凸函数, 则 f 在点 $x \in X$ 的次微分映射 $\partial f : X \rightarrow 2^{X^*}$ 定义为

$$\partial f(x) = \{x^* \in X^* : f(x+y) - f(x) \geq \langle x^*, y \rangle, \text{对任意的 } y \in X\}.$$

性质 1 是经典的^[10].

性质 1 设 p 是定义在 X 上连续的 Minkowski 泛函, 则对任意给定 $x \in X$, 有 1) $\partial f(x)$ 是非空 τ^* -紧凸集; 2) $x^* \in \partial f(x)$, 当且仅当 $x^* \leq p$, 且 $\langle x^*, x \rangle = p(x)$.

定理 2 1) 对任意的 $A \in 2^{\mathbf{N}}, p_A(\chi_A) = 0$, 当且仅当 $q_A(\chi_A) = 0$.

2) $\partial q_A(e) \subset \partial \|e\| = S_{l_\infty}^+$.

3) 对任意的 $x \in l_\infty^+, q_A(x) = \sup\{\langle x^*, x \rangle : x^* \in \partial q_A(e)\} = \sup\{\langle x^*, x \rangle : x^* \in \text{ext } \partial q_A(e)\}$. 其中, $\text{ext } \partial q_A(e)$ 表示 $\partial q_A(e)$ 的所有端点构成的集合.

证明 1) 对任意的 $A \in 2^{\mathbf{N}}, p_A(\chi_A) = 0 \Rightarrow q_A(\chi_A) = 0$ 是显然的. 设 $q_A(\chi_A) = 0$, 则 $\chi_A \in X_{I_A}$. 从而对任意的 $0 < \epsilon < 1$, 存在 $x = \sum_{j=1}^n a_j \chi_{A_j} \in \text{span}\{\chi_A : A \in I_A\}$, 使 $\|\chi_A - x\| < \epsilon$. 这意味着 $A \subseteq \bigcup_{j=1}^n A_j$. 因为 I_A 是一个理想, $A \in I_A$. 从而 $p_A(\chi_A) = 0$.

2) 根据文献[8]的引理 2.9 可知, $q_A(e) = \text{dist}(e, X_{I_A}) = 1 = \|e\|$. 另外, 不难验证 $q_A(x) \leq \|x\|$ 对一切 $x \in l_\infty$ 成立. 根据性质 1 中 2) 可知, $\partial q_A(e) \subset \partial \|e\|, \partial \|e\| = S_{l_\infty}^+$ 为文献[9]中命题 2.2 的一部分.

3) 首先, 证明第一个“=” . 设 $X_{I_A}^\perp$ 表示 X_{I_A} 的零化子空间. 由性质 1 中 2) 可知, $\partial q_A(e) \subset X_{I_A}^\perp$. 从而, 对于 $x \in l_\infty^+ \cap X_{I_A}$ 的情形结论成立是显然的. 设 $x \in l_\infty^+ \setminus X_{I_A}$, 同样根据性质 1 中 2) 可知

$$\sup\{\langle x^*, x \rangle : x^* \in \partial q_A(e)\} \leq q_A(x).$$

基于此, 只需找到一个 $x^* \in \partial q_A(e)$ 使 $\langle x^*, x \rangle = q_A(x)$, 便可以保证第一个“=”成立. 对于上述 $x \in l_\infty^+ \setminus X_{I_A}$, 在商空间 l_∞ / X_{I_A} 中, 利用 Hahn-Banach 定理可知, 存在 $\tilde{x}^* \in \tilde{P}^+$ 使 $\|\tilde{x}^*\| = 1$, 并且 $\langle \tilde{x}^*, \tilde{x} \rangle = \|\tilde{x}\|$. 根据经典定理 $(l_\infty / X_{I_A})^* = X_{I_A}^\perp$ ^[11] 可知, 存在唯一的 $x^* \in X_{I_A}^\perp$, 使 $\|\tilde{x}^*\| = \|x^*\|$ 及 $\langle \tilde{x}^*, \tilde{y} \rangle = \langle x^*, y \rangle$ 对所有的 $y \in l_\infty$ 成立. 特别的,

$$\langle \mathbf{x}^*, \mathbf{x} \rangle = \langle \tilde{\mathbf{x}}^*, \tilde{\mathbf{x}} \rangle = \|\tilde{\mathbf{x}}\| = q_A(\mathbf{x}).$$

下面证明 $\mathbf{x}^* \in \partial q_A(\mathbf{e})$. 因 $\|\tilde{\mathbf{x}}^*\| = 1$, 故有 $\langle \tilde{\mathbf{x}}^*, \tilde{\mathbf{e}} \rangle = 1$, 即 $\langle \mathbf{x}^*, \mathbf{e} \rangle = 1$. 另外, 对任意的 $\mathbf{y} \in \ell_\infty$, 有

$$\langle \mathbf{x}^*, \mathbf{y} \rangle = \langle \tilde{\mathbf{x}}^*, \tilde{\mathbf{y}} \rangle \leq \|\tilde{\mathbf{y}}\| = q_A(\mathbf{y}).$$

再根据性质 1 中 2) 可知, $\mathbf{x}^* \in \partial q_A(\mathbf{e})$.

对于第二个“=”, 注意到性质 1 中 1), $\partial q_A(\mathbf{e})$ 是一个非空的 ω^* -紧凸集. 从而根据 Krein-Milman 定理得到第二个等号成立.

注释 2 由定理 2 中 2) 可知, $\partial q_A(\mathbf{e}) \circ \chi_{(\cdot)} \subset \partial \| \mathbf{e} \| \circ \chi_{(\cdot)} = \mathbf{P}(\mathbf{N}, 2^{\mathbf{N}})$. 定义

$$\mathbf{P}(\mathbf{N}, 2^{\mathbf{N}}, \mathbf{I}_A) = \{ \mu \in \mathbf{P}(\mathbf{N}, 2^{\mathbf{N}}) : \mu(A) = 0 \text{ 对所有的 } A \in \mathbf{I}_A \}.$$

根据定理 2 中 1), 3), 在文献[8]定理 2.3 的意义下, 有 $\mathbf{P}(\mathbf{N}, 2^{\mathbf{N}}, \mathbf{I}_A) \cong \partial q_A(\mathbf{e})$. 即有 $\mathbf{P}(\mathbf{N}, 2^{\mathbf{N}}, \mathbf{I}_A) = \partial q_A(\mathbf{e}) \circ \chi_{(\cdot)}$.

令 $\mathbf{P}_{\text{ext}}(\mathbf{N}, 2^{\mathbf{N}}, \mathbf{I}_A) = \text{ext } \partial q_A(\mathbf{e}) \circ \chi_{(\cdot)}$. 下文中分别用 $\mathbf{P}(\mathbf{I}_A)$ 和 $\mathbf{P}_{\text{ext}}(\mathbf{I}_A)$ 表示 $\mathbf{P}(\mathbf{N}, 2^{\mathbf{N}}, \mathbf{I}_A)$ 和 $\mathbf{P}_{\text{ext}}(\mathbf{N}, 2^{\mathbf{N}}, \mathbf{I}_A)$.

定理 3 设 $\mathbf{A} = (\mathbf{a}_i)_{i=1}^{\infty} \subset S_{\ell_1}^+$, 且设 $(\mathbf{x}_n) \subset X$ 及 $\mathbf{x} \in X$, 则下列说法等价: 1) (\mathbf{x}_n) \mathbf{A} -收敛于 \mathbf{x} ; 2) (\mathbf{x}_n) \mathbf{M}_A -收敛于 \mathbf{x} ; 3) (\mathbf{x}_n) \mathbf{I}_A -收敛于 \mathbf{x} , 即对任意 $\varepsilon > 0$, $A(\varepsilon) \in \mathbf{I}_A$; 4) (\mathbf{x}_n) $\mathbf{P}(\mathbf{I}_A)$ -收敛于 \mathbf{x} ; 5) (\mathbf{x}_n) $\mathbf{P}_{\text{ext}}(\mathbf{I}_A)$ -收敛于 \mathbf{x} .

证明 1) \Leftrightarrow 2) 即为定理 1.

2) \Leftrightarrow 3) 由性质 1, 定理 2 以及 \mathbf{I}_A 的定义即可验证.

3) \Leftrightarrow 4) 注意到注释 2 的 $\mathbf{P}(\mathbf{I}_A) \cong \partial q_A(\mathbf{e})$ 即可得到.

4) \Leftrightarrow 5) 只需利用定理 2 中 3) 即可验证.

2 A-收敛与几乎处处收敛

作为文献[12]定理 1.5 的特殊情形, 有如下结论成立.

定理 4 设 $\mathbf{x}^* \in \partial q_A(\mathbf{e})$, 则 $\mathbf{x}^* \in \text{ext } \partial q_A(\mathbf{e})$ 当且仅当 \mathbf{x}^* 为 ℓ_∞ 上的保正交不变的泛函, 即对任意的 $\mathbf{x} = (\mathbf{x}(n)), \mathbf{y} = (\mathbf{y}(n)) \in \ell_\infty$ 满足: $\mathbf{x}\mathbf{y} = (\mathbf{x}(n)\mathbf{y}(n)) = 0$, $\langle \mathbf{x}^*, \mathbf{x}\mathbf{y} \rangle = 0$.

基于此, 可以得到如下结论.

定理 5 设 $\mathbf{x}^* \in \text{ext } \partial q_A(\mathbf{e})$, 则或 $\mathbf{x}^* \in c_0^\perp$, 或 $\mathbf{x}^* \in \ell_1$. 当 $\mathbf{x}^* \in \ell_1$ 时, 存在某个 $n \in \mathbf{N}$ 使 $\mathbf{x}^* = \mathbf{e}_n$.

证明 设 $\mathbf{x}^* \in \text{ext } \partial q_A(\mathbf{e})$, 若 $\langle \mathbf{x}^*, \mathbf{e}_n \rangle = 0$ 对一切 $n \in \mathbf{N}$ 成立, 则此时有 $\mathbf{x}^* \in c_0^\perp$. 若存在某个 $n_0 \in \mathbf{N}$ 使 $\langle \mathbf{x}^*, \mathbf{e}_{n_0} \rangle \neq 0$, 根据定理 4 可知, $\langle \mathbf{x}^*, \mathbf{e}_{n_0} \rangle \langle \mathbf{x}^*, \chi_{\mathbf{N} \setminus \{n_0\}} \rangle = 0$. 从而有 $\langle \mathbf{x}^*, \mathbf{e}_{n_0} \rangle = 1$ 及 $\langle \mathbf{x}^*, \chi_{\mathbf{N} \setminus \{n_0\}} \rangle = 0$. 如果 $\mathbf{x}^* \in \ell_1$, 且注意到定理 2 中 2), 可得 $\mathbf{x}^* = \mathbf{e}_{n_0}$. 下面只需证明 $\mathbf{x}^* \in \ell_1$. 因为 $\ell_\infty^* = \ell_1 \oplus_{\ell_1} c_0^{\perp \perp}$ [11], 所以存在正分解 $\mathbf{x}^* = \mathbf{x}_1^* + \mathbf{x}_2^*$, 其中, $\mathbf{x}_1^* \in \ell_1 \cap P^+$ 及 $\mathbf{x}_2^* \in c_0^\perp \cap P^+$. 从而有

$$1 = \langle \mathbf{x}^*, \mathbf{e}_{n_0} \rangle = \langle \mathbf{x}_1^*, \mathbf{e}_{n_0} \rangle + \langle \mathbf{x}_2^*, \mathbf{e}_{n_0} \rangle = \langle \mathbf{x}_1^*, \mathbf{e}_{n_0} \rangle,$$

以及

$$0 = \langle \mathbf{x}^*, \chi_{\mathbf{N} \setminus \{n_0\}} \rangle = \langle \mathbf{x}_1^*, \chi_{\mathbf{N} \setminus \{n_0\}} \rangle + \langle \mathbf{x}_2^*, \chi_{\mathbf{N} \setminus \{n_0\}} \rangle = \langle \mathbf{x}_1^*, \chi_{\mathbf{N} \setminus \{n_0\}} \rangle.$$

由定理 2 中 2) 可知, \mathbf{x}_2^* 是正线性泛函, 从而具有单调性. 于是对任意的 $\mathbf{x} \in \ell_\infty$, 有

$$\langle \mathbf{x}_2^*, \mathbf{x} \rangle = \langle \mathbf{x}_2^*, \mathbf{x}\mathbf{e}_{n_0} \rangle + \langle \mathbf{x}_2^*, \mathbf{x}\chi_{\mathbf{N} \setminus \{n_0\}} \rangle = 0.$$

因为 \mathbf{x} 的选取是任意的, 所以 $\mathbf{x}_2^* = 0$, 故有 $\mathbf{x}^* = \mathbf{x}_1^* \in \ell_1$.

注释 3 对任意的 $\mathbf{x}^* \in \text{ext } \partial q_A(\mathbf{e})$, \mathbf{x}^* 要么是纯连续, 要么是 ω^* -序列连续的. 从而对任意的 $\mu \in \mathbf{P}_{\text{ext}}(\mathbf{I}_A)$, μ 要么是可数可加测度, 要么是纯有限可加测度. 其中, 相关概念与性质可以参考文献[13].

\mathbf{A} -收敛某种意义上说具有选择收敛性, 它与经典收敛的差异可以是巨大的. 如选取 $\mathbf{A} = (\mathbf{a}_i)_{i=1}^{\infty} \subset S_{\ell_1}^+$ 使 (\mathbf{a}_i) 按范收敛于 \mathbf{e}_1 , 则对任意一个序列 $(\mathbf{x}_n) \subset X$ 都是 \mathbf{A} -收敛的 (\mathbf{A} -收敛于 \mathbf{x}_1), 但不能保证存在 (\mathbf{x}_n) 子列按范收敛于 \mathbf{x}_1 . 另外, 设序列 $(\mathbf{x}_n) \subset X$ 按范收敛于 $\mathbf{x} \in X$, 当 $\mathbf{x} \neq \mathbf{x}_1$ 时, (\mathbf{x}_n) 不会 \mathbf{A} -收敛于 \mathbf{x}_1 . 文中将这种类型的 \mathbf{A} -收敛称为退化的.

定义 2 设 $\mathbf{A} = (\mathbf{a}_i)_{i=1}^{\infty} \subset S_{\ell_1}^+$ 满足: $\text{ext } \partial q_A(\mathbf{e}) \subset \ell_1$, 且 $\overline{\text{ext } \partial q_A(\mathbf{e})} < \infty$, 则称该 \mathbf{A} -收敛是退化的. 否则, 称为非退化的.

这里称 A-收敛为退化的原因是它等价于由有限个退化的测度定义的收敛. 称 $A \in 2^{\mathbb{N}}$ 为 $\mathbf{P}_{\text{ext}}(\mathbf{I}_A)$ -零测集是指对任意的 $\mu \in \mathbf{P}_{\text{ext}}(\mathbf{I}_A)$ 都有 $\mu(A) = 0$.

定义 3 设 $\mathbf{A} \equiv (a_i)_{i=1}^{\infty} \subset S_{\ell_1}^+$, 且设 $(x_n) \subset X$ 及 $x \in X$. 如果存在 $\mathbf{P}_{\text{ext}}(\mathbf{I}_A)$ -零测集 $G \subset \mathbb{N}$ 使 $(x_n)_{n \in \mathbb{N} \setminus G}$ 按范数收敛于 x , 则称 (x_n) $\mathbf{P}_{\text{ext}}(\mathbf{I}_A)$ -几乎处处收敛于 x .

注释 4 由定理 3 及定义 3 可知, 序列 $(x_n) \subset X$ 为 $\mathbf{P}_{\text{ext}}(\mathbf{I}_A)$ -几乎处处收敛于 x 总是意味着 (x_n) A-收敛于 x .

下面给出 A-收敛为几乎处处收敛的一个充分必要条件.

定理 6 设 $\mathbf{A} \equiv (a_i)_{i=1}^{\infty} \subset S_{\ell_1}^+$, 且设 $(x_n) \subset X$ 及 $x \in X$. 则该 A-收敛为非退化的当且仅当 (x_n) A-收敛于 x 意味着 (x_n) 为 $\mathbf{P}_{\text{ext}}(\mathbf{I}_A)$ -几乎处处收敛于 x . 从而, 当 A-收敛为非退化时, A-收敛与 $\mathbf{P}_{\text{ext}}(\mathbf{I}_A)$ -几乎处处收敛是等价的.

证明 充分性是显然的. 因为如果 A-收敛是退化的, 根据定理 5 可知, 存在有限个正整数 $A \equiv \{n_1, n_2, \dots, n_k\}$ 使 $\mathbf{P}_{\text{ext}}(\mathbf{I}_A) = \{e_{n_1} \circ \chi(\cdot), e_{n_2} \circ \chi(\cdot), \dots, e_{n_k} \circ \chi(\cdot)\}$. 对任意的 $x_0 \in X \setminus \{0\}$, 定义序列 $x_n = x_0, n \in A; = 0, n \in \mathbb{N} \setminus A$. 则不难验证, (x_n) A-收敛于 x_0 , 但不会 $\mathbf{P}_{\text{ext}}(\mathbf{I}_A)$ -几乎处处收敛于 x_0 . 这是一个矛盾.

往证必要性. 设 (x_n) A-收敛于 x , 且令

$$C_0 = \{n \in \mathbb{N} : \|x_0 - x\| \geq 1\}, \quad C_k = \{n \in \mathbb{N} : 2^{-k} < \|x_n - x\| \leq 2^{-(k-1)}\}, (k = 1, 2, \dots).$$

根据定理 3 可知, $\{C_k\}_{k=0}^{\infty}$ 是一列两两不交的 $\mathbf{P}_{\text{ext}}(\mathbf{I}_A)$ -零测集. 而且依 A-收敛的定义, $\lim_{i \rightarrow \infty} \langle a_i, \chi_{C_k} \rangle = 0$ 对任意的 $k (= 0, 1, 2, \dots)$ 成立. 从而可以找到一个严格单增的子列 $(m_k) \subset \mathbb{N}$ 使对任意 k , 有

$$\sum_{n=0}^k \langle a_i, \chi_{C_n} \rangle < 2^{-k}, \quad \forall i \geq m_k.$$

另外, 因为 $\mathbf{A} \equiv (a_i)_{i=1}^{\infty} \subset S_{\ell_1}^+$, 所以存在一个严格单增的子列 $(J(i)) \subset \mathbb{N}$, 使

$$\sum_{j=J(i)}^{\infty} a_{i,j} < 2^{-i}, \quad \forall i \in \mathbb{N}.$$

令 $B_k = (C_k \setminus \{1, 2, \dots, J(m_k)\}) (k = 0, 1, 2, \dots)$, 且令 $B = \bigcup_{k=0}^{\infty} B_k$. 则断言: 1) B 为 $\mathbf{P}_{\text{ext}}(\mathbf{I}_A)$ -零测集; 2) $\overline{\mathbb{N} \setminus B} = \infty$; 3) $(x_n)_{n \in \mathbb{N} \setminus B}$ (按通常范数意义下) 收敛于 x .

下面证明上述 3 个断言.

1) 对任意 $i \geq m_0$, 都存在唯一的 $k(i) \in \mathbb{N}$, 使 $m_{k(i)} \leq i < m_{k(i)+1}$. 另外, 当 $j \leq J(m_{k(i)+1})$ 及 $k > k(i)$ 时, $j \notin B_k$. 故而

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{\infty} a_{i,j} \chi_B(j) &= \sum_{j=1}^{J(m_{k(i)+1})} a_{i,j} \chi_B(j) + \sum_{j=J(m_{k(i)+1})+1}^{\infty} a_{i,j} \chi_B(j) \leq \sum_{j=1}^{J(m_{k(i)+1})} a_{i,j} \chi_B(j) + \sum_{j=J(i)+1}^{\infty} a_{i,j} < \\ &\sum_{j=1}^{J(m_{k(i)+1})} \chi_B(j) + 2^{-i} \leq \sum_{j=1}^{\infty} a_{i,j} \sum_{k=0}^{k(i)} \chi_{C_k}(j) + 2^{-i} = \sum_{k=0}^{k(i)} \langle a_i, \chi_{C_k} \rangle + 2^{-i} < 2^{-k(i)} + 2^{-i}. \end{aligned}$$

注意到 $i \rightarrow \infty$ 时, $k(i) \rightarrow \infty$. 根据定理 2 中 1), 3) 可知

$$p_A(\chi_B) = 0 = q_A(\chi_B) = \sup\{\langle x^*, \chi_B \rangle : x^* \in \text{ext } \partial q_A(e)\}.$$

即得到 B 为 $\mathbf{P}_{\text{ext}}(\mathbf{I}_A)$ -零测集.

2) 根据 1) 可知, $\mu(\mathbb{N} \setminus B) = 1$ 对所有 $\mu \in \mathbf{P}_{\text{ext}}(\mathbf{I}_A)$, 即对任意 $x^* \in \text{ext } \partial q_A(e)$, $\langle x^*, \chi_{\mathbb{N} \setminus B} \rangle = 1$. 如果 $\overline{\mathbb{N} \setminus B} < \infty$, 记 $\mathbb{N} \setminus B = \{n_1, n_2, \dots, n_k\}$. 对任意给定 $x^* \in \text{ext } \partial q_A(e)$, $\langle x^*, \chi_{\mathbb{N} \setminus B} \rangle = \sum_{j=1}^k \langle x^*, \chi_{\{n_j\}} \rangle = 1$. 根据定理 4 (x^* 的正交性) 可知, 必然存在 $\mathbb{N} \setminus B$ 中的某个 n_k , 使 $\langle x^*, \chi_{\{n_k\}} \rangle = 1$. 从而根据定理 5 可知, $x^* = e_{n_k} \in \ell_1$. 注意到 x^* 的选取是任意的, 故而该 A-收敛为退化的, 这与定理假设相矛盾.

3) 对任意的 $0 < \epsilon < 1$, 存在 $m \in \mathbb{N}$, 使 $2^{-m} < \epsilon \leq 2^{-(m-1)}$. 从而有 $A(\epsilon) \subset \bigcup_{k=0}^{\infty} C_k$, 其中, $A(\epsilon) = \{n \in \mathbb{N} : \|x_n - x\| \geq \epsilon\}$. 进一步地, $A(\epsilon) \setminus \bigcup_{k=0}^{\infty} B_k < \infty$. 故而 $\overline{A(\epsilon) \setminus B} < \infty$, 这意味着 $(x_n)_{n \in \mathbb{N} \setminus B}$ (按通常范数意义下) 收敛于 x .

推论 1 经典统计收敛、A-统计收敛 (包括 lacunary-统计收敛和 λ -统计收敛) 在统计测度意义下都

是几乎处处收敛的.

参考文献:

- [1] FAST H. Sur la convergence statistique[J]. Colloq Math, 1951, 2: 241-244.
- [2] STEINHAUS H. Sur la convergence ordinaire et la convergence asymptotique[J]. Colloq Math, 1951, 2: 73-74.
- [3] CONNOR J. On strong matrix summability with respect to a modulus and statistical convergence[J]. Canad Math Bull, 1989, 32(2): 194-198.
- [4] FRIDY J, ORHAN C. Lacunary statistical convergence[J]. Pacific J Math, 1993, 160(1): 43-51.
- [5] KOSTYRKO P, SALAT T, WILCZYNSKI W. I-convergence[J]. Real Anal Exchange, 2000/2001, 26(2): 669-689.
- [6] CHENG Lixin, LIN Guochen, LAN Yongyi. Measure theory of statistical convergence[J]. Sci China Ser A, 2008, 51(12): 2285-2303.
- [7] CHENG Lixin, LIN Guochen, SHI Huihua. On real-valued measures of statistical type and their applications to statistical convergence[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2009, 50: 116-122.
- [8] BAO Lingxin, CHENG Lixin. On statistical measure theory[J]. J Math Anal Appl, 2013, 407: 413-424.
- [9] BAO Lingxin, LIN Lihua. On convergences[J]. Journal of Mathematical Study, 2013, 46: 116-125.
- [10] CHENG Lixin, SHI Shuzhong, LEE E. Generic Frechet differentiability of convex functions on non-Asplund spaces [J]. J Math Anal Appl, 1997, 214(2): 367-377.
- [11] HOLMES R B. Geometric functional analysis and its applications[M]. New York: Springer-Verlag, 1975: 123-124, 129-130.
- [12] BAO Lingxin. Ideal convergence and almost usual convergence[EB/OL]. [2015-06-01]. <http://advmath.pku.edu.cn/CN/10.11845/sxjz.2015061b>.
- [13] CHENG Lixin, SHI Huihua. A functional characterization of measures and the Banach-Ulam problem[J]. J Math Anal Appl, 2011, 374: 558-565.

On \mathbf{A} -Convergence and Almost Usual Convergence

BAO Lingxin¹, SHI Huihua²

(1. School of Computer and Information, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2. School of Mathematical Sciences, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: Let $\mathbf{A} \equiv (a_i)_{i=1}^{\infty} \subset S_{\mathcal{I}_1}^+$, a sequence (x_n) of points in a Banach X is said to be \mathbf{A} -convergent to $x \in X$ provided that for any $\epsilon > 0$, $\lim_{i \rightarrow \infty} \langle a_i, \chi_{A(\epsilon)} \rangle = 0$, where $A(\epsilon) = \{n \in \mathbf{N} : \|x_n - x\| \geq \epsilon\}$. In this paper, we give two different approaches of \mathbf{A} -convergence via ideal on \mathbf{N} and via extreme measures. We show that for any $\mathbf{A} \equiv (a_i)_{i=1}^{\infty} \subset S_{\mathcal{I}_1}^+$, there exist an ideal \mathbf{I}_A and a collection $\mathbf{P}_{\text{ext}}(\mathbf{I}_A)$ of extreme probability measures such that the \mathbf{A} -convergence, the ideal \mathbf{I}_A -convergence and the measure $\mathbf{P}_{\text{ext}}(\mathbf{I}_A)$ -convergence are equivalent. We also show that \mathbf{A} -convergence equivalent to $\mathbf{P}_{\text{ext}}(\mathbf{I}_A)$ -almost usual convergence if and only if it is nondegenerate.

Keywords: statistical convergence; ideal convergence; almost usual convergence; extreme measures; Banach space

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 黄心中)

第 36 卷总目次

第 1 期

汽车自动驾驶碰撞试验的控制系统设计	方道, 杨福清, 俞剑斌 (1)
Sigma-Delta 调制器的设计与仿真	黄锐敏, 杨清河, 陈兴, 梅丹丹 (7)
地市级电网发展诊断体系及综合评价	史智萍, 单体华, 刘文峰, 张兴平 (11)
面向 RTF 文件的 Word 漏洞分析	乐德广, 章亮, 郑力新, 李鑫, 陈经途 (17)
二维直方图的 HEVC 帧内快速深度决策算法	许东旭, 林其伟 (23)
FPGA 组合逻辑程序的 Petri 网建模方法	陈琰, 黄颖坤, 罗继亮 (29)
铂金团簇结构与稳定性的密度泛函研究	吴珊, 王怀谦, 李嘉琪, 李颖钰, 余逸男, 韩佳 (35)
采用线性预测模型的语音篡改检测	林晓丹 (40)
50 L 规模电镀 Fe-P 非晶合金及其组合镀层	王森林, 李瑞, 洪宏伟, 翁建新 (45)
医药洁净室的计算流体力学模拟及实测对比	彭皓, 雷飞 (49)
改性硅藻土的多级 A/O 工艺除磷优化及尾水深度除磷	马翠, 何争光, 张碧晰 (55)
抗氧化剂阿魏酸自组装金纳米颗粒的体外抗氧化	张晗, 李砚超, 姜玉刚, 杜立波, 施维, 刘扬 (60)
FRP 与砖界面粘结性能的数值分析	黄奕辉, 罗才松, 黄田良 (64)
水泥基快硬瓷砖胶中铝酸盐复合胶凝体系的试验	卢红, 武海龙, 王卫华 (69)
采用等效结构参数的混凝土试块弹性模量监测	郭智刚, 孙智 (74)
刚性桥面板天然气管道悬索跨越结构力学性能	陈誉, 林智寰 (80)
延深基坑桩锚加固支护结构力学特性分析	郭力群, 陈亚军, 徐芳超 (86)
福州地铁 1 号线典型软土的工程性质	刘纪峰, 李雄润, 陈福星 (91)
建筑造型理论下景观构筑物的结构隐形作用	王瑜, 陈震 (97)
我国小城镇滨水区的景观规划策略	朱建国, 金倩 (103)
响应率法求解二阶部分极点配置问题	陈梅香 (107)
局部和稀疏保持无监督特征选择法	简彩仁, 陈晓云 (111)
非平稳高斯序列最大值与部分和的几乎处处中心极限定理	汪园芳, 吴群英 (116)

第 2 期

基于布尔求差的对数螺旋锥齿轮精确建模	向铁明, 顾立志, 李鹏, 陈维周 (121)
渐开线齿轮齿廓偏差测量中的采样分析	李兴旺, 黄富贵, 王宇, 马冬冬 (127)
利用电磁辐射信号的串并联电弧故障检测	丁浩江, 张认成, 杨凯, 杨建红, 陈首虹 (132)
工业机器人运动碰撞的仿真实现	陈胜奋, 谢明红 (137)
应用小波变换和支持向量机的商业电力负荷预测	杨屹洲, 方瑞明, 黄文权, 梁颖, 汪亮 (142)
理想轴棱锥与圆顶轴棱锥对无衍射光束的聚焦特性	陈姿言, 何艳林, 陈婧, 吴逢铁 (147)
布拉格反射波导双光束边发射半导体激光器	苏道军, 计伟, 崔碧峰, 邱伟彬, 佟存柱, 张松, 王晓玲, 凌小涵, 王加贤 (151)

- 一种雾天退化场景快速复原方法..... 王伟鹏, 戴声奎, 项文杰 (156)
- 微熵率算法分析及实证研究 黄奕, 谢维波 (161)
- 采用小波变换的脑电图信号分析及其应用..... 蔡琼, 陈鹏慧, 魏武 (166)
- 超宽带小尺寸介质谐振器天线 曾小虎, 葛悦禾 (171)
- 一种可编程逻辑控制程序的竞态检测方法 黄颖坤, 罗继亮 (175)
- 开源 Linux 的嵌入式安全 SOHO 路由器设计 朱龙, 刘长君 (179)
- 海洋着色菌 *Marichromatium gracile* YL28 静息细胞对无机三态氮的相互转化作用
..... 蒋鹏, 洪璇, 赵春贵, 杨素萍 (185)
- 多溴联苯醚气相色谱相对保留时间的定量结构-活性关系 吴志渊, 薛秀玲, 邱其俊 (190)
- 空气源热泵直接地板辐射供暖系统优化运行方式 杜彦, 田琦, 杨晋明, 郭卫强 (199)
- 小分子靶向受体酪氨酸激酶抑制剂 TW9183 的合成及体外抗肿瘤活性
..... 雷春花, 王雪玉, 杨育才, 吴振, 王立强 (205)
- 泉州湾海岸线变迁的分形分析..... 李滕, 林从谋, 黄逸群 (211)
- 激光测距仪在海崖剖面形态快速测量中的应用..... 常方强, 孟希, 罗才松 (215)
- 考虑轴向应变不均匀性的 RC 柱轴压性能研究 许鹏红, 刘亚, 刘阳, 黄秋来, 黄群贤 (221)
- 战略导向下大型建设企业多项目组合决策模型..... 张云波, 李悦, 祁神军 (226)
- 信息非对称的城市大型公共建筑项目决策影响力分析 黄远辉, 王诗才 (232)
- 一类极小系统的动力性状 颜棋, 尹建东 (237)

第 3 期

- 基于梯度强度立柱的客车侧翻安全性多目标优化设计 周莎, 张勇, 张成, 李奇 (241)
- 乘用车齿轮齿条式的液压助力转向系统匹配..... 陈丁跃, 杨励, 贺志瑛 (247)
- 逆向工程的车身三维造型数字化技术 何龙 (252)
- 冷风油雾润滑对 TC4 铣削过程刀-屑摩擦的影响 王宁昌, 程鑫, 姜峰, 谢鸿 (258)
- 引导滤波在雾天图像清晰化中的应用 王伟鹏, 戴声奎 (263)
- P300 的 BCI 汉字在线输入系统 徐鑫, 方慧娟 (269)
- 一种采用内预测模式的 HEVC 视频信息隐藏算法 董晓慧, 林其伟, 许东旭 (275)
- 神经网络预测控制在污水处理溶解氧控制中的应用 张学阳, 项雷军, 林文辉, 郭新华 (280)
- 从双视图到多视图的协同优化立体视觉匹配算法..... 王道累, 吴懋亮, 陈军 (286)
- 旅游大数据的 MapReduce 客户细分应用 汪永旗, 王惠娇 (292)
- 碱度对动态膜生物反应器处理效果的影响
..... 胡苗苗, 洪俊明, 李尚惠, 戴兰华, 陈向强, 谢小青 (297)
- 羧基功能化超顺磁性纳米粒子吸附牛血清蛋白的特性..... 吴志超, 陈国, 苏鹏飞 (303)
- 萘甲酰胺衍生物 TW918 的合成及体外活性考察 王立强, 雷春花, 邱飞, 杨会 (309)
- RNAi 表达载体在哺乳动物中的研究进展 侯莹, 成志云, 王立强, 许瑞安, 唐明 (314)
- 压剪工况下型钢混凝土柱轴力分配规律试验..... 王梓懿, 刘阳, 郭子雄, 贾磊鹏, 陈庆猛 (321)
- 土楼夯土结构受力变形特性的数值模拟..... 许永贤, 彭兴黔, 梁兰娣 (327)
- 钢骨-钢管高强混凝土偏心受压柱非线性分析 关萍, 陈兰响, 刘晴晴 (332)
- 中国工程造价信息化管理趋势 沈华 (338)
- 沟通与合同对代建制多项目目标管理的影响 王玉芳, 张云波, 祁神军, 项剑平 (343)
- 城市住区低碳评价指标体系建构..... 高涛, 王建平, 刘晴 (348)

- 稳定单叶调和凸函数和星像函数的构造 朱孟坤, 黄心中 (354)
- 新的递推有界 GM 回归估计算法 成立花, 张俊敏 (359)

第 4 期

- 四轮轮毂电机电动车横摆力矩参数自调整模糊控制 李刚, 韩海兰 (365)
- LED 散热器冲压成形尺寸和形状的误差数学模型建立 郑天清, 顾立志 (371)
- 灵敏度分析的客车车身模块重构与结构轻量化优化设计 李奇, 张勇, 张成, 周莎 (377)
- 对象化 BR-TIN 模型三维地理信息组织方法 李景文, 吕楠, 陆妍玲, 张源, 叶良松 (383)
- 采用 SNMP 网络协议的地质公园设备管控系统设计 何原荣, 李佳楠, 陆琳 (388)
- OHNN 新的分组 Hash 算法 李国刚, 钟超林, 蔺小梅 (393)
- 结合 SLIC 超像素和 DBSCAN 聚类的眼底图像硬性渗出检测方法
..... 凌朝东, 陈虎, 杨骁, 张浩, 黄信 (399)
- 融合全局和局部特征的图像特征提取方法 张雅清, 刘忠宝 (406)
- 空间光通信中高斯光束传输闪烁指数测量系统 王佳斌, 陈子阳, 蒲继雄 (412)
- 食品标签冲突检测的防碰撞控制 陈卫军, 黄永灿 (417)
- STM32 的多传感器融合姿态检测 黄志伟, 徐苏楠, 韦一, 唐莹 (422)
- 二维 Otsu 自适应阈值快速算法的改进 钱卫星, 黄丽亚 (427)
- 增强现实技术的虚拟景区信息系统 苏会卫, 李佳楠, 许霞 (432)
- 采用绝对值反馈的混沌系统投影同步的电路实现 黄苗玉, 闵富红, 王恩荣 (437)
- 一种改进的动脉 CT 图像去噪方法 陈萍芸, 林春深 (443)
- 磁性钯催化剂对 Suzuki-Miyauraouyan 偶联反应的催化作用
..... 俞洋, 吴翠玲, 王震, 张莹雪, 钱浩 (449)
- 部分充填钢箱-混凝土组合梁受力性能有限元分析 莫时旭, 周晓冰, 周迎春, 张堃 (455)
- 复合衬砌量化修正渗透系数隧道涌水量的计算方法 丁小平, 刘昭, 史宝童, 黄嫒 (461)
- 电子垃圾拆解场周边环境多氯萘污染检测 秦小军, 陈群利 (467)
- 考虑风险偏好的 Stackelberg 博弈模型及其在 PPP 项目中的数值求解 杜杨, 丰景春 (472)
- 某些近于凸调和函数的解析性质和系数估计 黄贇, 黄心中 (478)
- 一类调和映照的系数估计 阙玉琴, 陈行堤 (484)

第 5 期

- 车载武器在后坐力冲击作用下的振动响应 战仁军, 商保利, 商鹏, 张洪彪, 吴虎胜 (489)
- 风洞层流风场中的 WDPSS-8 机器人系统的末端位姿偏移及补偿 王梓, 郑亚青 (494)
- 立轴冲击破碎机转子出料特性仿真实验 邢大伟, 房怀英, 杨建红 (500)
- 空气悬架城市客车平顺性评估及优化
..... 彭倩, 胡小生, 刘金武, 韩锋钢, EMMANUEL Matsika (506)
- 采用 BP 神经网络的猪肉冷链物流预警模型与仿真 杨玮, 岳婷, 曹薇, 高煦尧, 张文燕 (511)
- 声纹识别在开放仪器管理中的应用 赖丽旻, 洪青阳 (517)
- 利润约束的关联规则挖掘算法 朱龙 (522)
- 采用图像增强的图像特征点匹配算法 黄超 (527)
- 三维激光扫描技术在木雕展品建模中的应用 李华伟 (532)
- 采用图像几何校正和分块压缩感知测量值奇异值分解的鲁棒水印技术
..... 池晓芳, 冯桂, 董晓慧 (535)

Fe ₃ O ₄ 纳米颗粒的制备及其催化性能	陈亚杰, 林赏心, 蒲继雄 (541)
内回流比对内循环式多级 A/O 新工艺的脱氮影响	何争光, 崔战胜, 焦耀亮 (546)
候选药物 TW918 对 K-Ras 突变型人肺腺癌 A549 细胞的体外抑制作用	王凤玲, 杨育才, 李谦, 王立强 (552)
刺五加提取物对无氧运动训练效果的影响	宋广侠, 吴江涛 (558)
大型建设企业多项目管理成熟度影响因素分析	祁神军, 张云波, 吴晶晶, 陈伟, 王玉芳 (563)
闽江口地区地下空间开发利用适宜性评价	唐勇 (569)
厦门市公共建筑能耗影响因素与节能潜力分析	秦旋, 刘倩昆 (575)
人工势场法在航道测量中的应用	史艳霞, 贾贵奎, 董宏超 (581)
武汉市道路网空间结构与住宅地价的协同性分析	邹利林, 胡学东, 梁发超, 何建刚 (587)
公共建筑太阳能热水系统运行效益考察及分析	闻豪, 周文成 (593)
采用产品数据管理技术的工程施工管理模型	高群, 诸溢琳, 李圆 (598)
调和映照与像域为线性连结的剪切函数的关系	占龙俊, 黄心中 (603)

第 6 期

采用模糊理论的零部件工艺 PFMEA 评估	盛精, 王君, 罗善明 (609)
花岗石锯切过程声发射信号特征的实验	张美琴, 高振, 吴海融, 李远, 黄国钦 (615)
侧翻安全性的校车侧围结构轻量化设计	孙贵斌, 韩勇, 蓝平辉, 谢金萍, 纪碧端 (620)
仿人面部表情机器人研究进展	张国亮, 王展妮, 王田, 吴昊 (626)
采用遗传算法的可见光通信 LED 阵列分布优化	傅玉青 (632)
采用二维频域光学相干层析的透镜曲率半径测量	陈丹阳, 游腾飞, 钟舜聪 (636)
对 Shor 算法破解 RSA 的探讨	涂玲英, 胡一凡, 张洪涛, 代永涛, 熊红梅 (640)
粒子群与遗传算法的混合算法	阳琼芳, 孙如祥 (645)
高速收敛混沌粒子群算法的云计算任务调度	王秉 (650)
新三维混沌映射及其在数字图像信息加密中的应用	刘冰, 潘大兵 (655)
采用 Oracle 的 Google 地图兴趣点抓取和发布的 WebGIS 系统	章欣欣, 何原荣 (659)
采用遗传算法的网络优化技术	李国庆, 尹洪胜 (663)
采用 GERT 算法的电力抢修车应急运输路径选择	周学鼎, 郑星新 (667)
一种采用能量平衡关系的新型交流电弧炉模型	廖廷涛, 张海龙, 王思荣, 黄苗玉 (672)
碳纳米材料的无铜点击功能化	熊兴泉, 徐林建 (677)
溶解氧对短程同步硝化/反硝化耦合除磷工艺的影响	何争光, 谢谦, 丁丹 (683)
β -环糊精交联聚合物吸附水中亚甲蓝的机理	李国平, 吴晓萍, 黄泐, 陈建华 (687)
巨尾梭胞质 <i>EuCuZnSOD</i> 基因的克隆与原核表达	赵艳玲, 周利建 (693)
绿色经济理念的生态工业园区综合评价指标体系	商婕, 曾悦 (698)
常规桥梁搭板内力计算方法在 SIAB 中的适用性	庄一舟, 任卫岗, 陈小琴, 韩裕添, 王胜智, 田伟 (704)
不同地基条件对核岛厂房结构地震响应的影响	金煜皓, 尹训强, 王桂莹 (710)
冻融循环作用下混凝土毛细孔结构的劣化机制	姜作杰 (716)
Caputo 型分数阶微积分求解及其误差估计	李瑾 (721)
A-收敛与几乎处处收敛	鲍玲鑫 ¹ , 施慧华 (726)
第 36 卷总目次	(I ~ X)

Total Contents of Vol. 36

No. 1

Control System Design for Crash Tests of Self-Driving Car FANG Qiu, YANG Fuqing, YU Jianbin (1)

Design and Simulation of a Sigma-Delta Modulator
..... HUANG Ruimin, YANG Qinghe, CHEN Xing, MEI Dandan (7)

Comprehensive Evaluation and Development Diagnosis System of the Municipal Power Grid
..... SHI Zhiping, SHAN Tihua, LIU Wenfeng, ZHANG Xingping (11)

Research on Word Vulnerability Analysis for the RTF File
..... LE Deguang, ZHANG Liang, ZHENG Lixin, LI Xin, CHEN Jingtu (17)

Fast Depth Decision Algorithm Based on Two-Dimensional Histogram for HEVC Intra Coding
..... XU Dongxu, LIN Qiwei (23)

Modeling Method for FPGA Combinational Logic Program Based on Petri Net
..... CHEN Long, HUANG Yingkun, LUO Jiliang (29)

Density Functional Theory Study of the Structures and Relative Stabilities of Platinum Clusters
..... WU Shan, WANG Huaiqian, LI Jiaqi, LI Yingyu, YU Yinan, HAN Jia (35)

Speech Forgeries Detection With Linear Prediction Model LIN Xiaodan (40)

Deposition of the Fe-P Amorphous Alloy in the Scale of 50 L Bath and Its Combinatorial Coatings
..... WANG Senlin, LI Rui, HONG Hongwei, WENG Jianxin (45)

Computational Fluid Dynamics Simulation and Measured Contrast Research of Pharmaceutical Clean Room
..... PENG Hao, LEI Fei (49)

Optimization of Phosphorus Removal From Multistage A/O Process With Modified Diatomite and Advanced
Treatment of Phosphorus Removal in Tail Water MA Cui, HE Zhengguang, ZHANG Bixi (55)

In Vitro Antioxidant Activity Study of Ferulic Acid Self-Assembled Gold Nanoparticles
..... ZHANG Han, LI Yanchao, JIANG Yugang, DU Libo, SHI Wei, LIU Yang (60)

Numerical Analysis of Interface Bonding Between Fiber Reinforced Polymer and Clay Brick
..... HUANG Yihui, LUO Caisong, HUANG Tianliang (64)

Study of Fast Harden Tile Adhesive Mortar With AC Based Binder System
..... LU Hong, WU Hailong, WANG Weihua (69)

Monitoring for Elastic Modulus of Concrete Based on Equivalent Structural Parameters
..... GUO Zhigang, SUN Zhi (74)

Research on Mechanical Property of Cable-Suspended Structure of Liquefied Natural Gas Pipelines With
Rigid Deck Slab CHEN Yu, LIN Zhihuan (80)

Analysis on Mechanical Characteristics of Deepening Excavation Foundation Pit Reinforced by Pile-Anchor
Structure GUO Liqun, CHEN Yajun, XU Fangchao (86)

Engineering Properties Study of Typical Soft Soil in Fuzhou Metro Line 1
..... LIU Jifeng, LI Xiongrun, CHEN Fuxing (91)

Invisibility of Structure for Landscape Architecture Influenced by the Theory of Architectural Form
..... WANG Yu, CHEN Zhen (97)

- Strategies of the Waterfront Landscape Planning of Small Towns in China ZHU Jianguo, JIN Qian (103)
- Partial Quadratic Pole Assignment Using the Method of Receptances CHEN Meixiang (107)
- Unsupervised Feature Selection Using Locality and Sparsity Preserving JIAN Cairen, CHEN Xiaoyun (111)
- Almost Sure Central Limit Theorem for Maxima and Partial Sums of Non-Stationary Gaussian Sequence
..... WANG Yuanfang, WU Qunying (116)

No. 2

- Accurate Modeling for Logarithmic Spiral Bevel Gear Based on Boolean Subtraction Operation
..... XIANG Tieming, GU Lizhi, LI Peng, CHEN Weizhou (121)
- Sampling Analysis of Involute Gear Tooth Profile Deviation Measurement
..... LI Xingwang, HUANG Fugui, WANG Yu, MA Dongdong (127)
- Series and Parallel Arc Fault Detection Using Electromagnetic Radiation Signal
..... DING Haojiang, ZHANG Rencheng, YANG Kai, YANG Jianhong, CHEN Shouhong (132)
- Simulation of Industrial Robot Motion Collision CHEN Shengfen, XIE Minghong (137)
- Commercial Power Load Forecasting Using Wavelet Transform and SVM
..... YANG Yizhou, FANG Ruiming, HUANG Wenquan, LIANG Ying, WANG Liang (142)
- Focal Characteristics of Ideal Axicon and Vaulted Axicon on Bessel Beams
..... CHEN Ziyang, HE Yanlin, CHEN Jing, WU Fengtie (147)
- Twin Beam Edge-Emitting Semiconductor Laser With Bragg Reflection Waveguide
..... SU Daojun, JI Wei, CUI Bifeng, QIU Weibin, TONG Cunzhu,
ZHANG Song, WANG Xiaoling, LING Xiaohan, WANG Jiexian (151)
- A Fast Method for Haze Image Restoration WANG Weipeng, DAI Shengkui, XIANG Wenjie (156)
- Analysis and Empirical Research of the Entropy Ratio Method HUANG Yi, XIE Weibo (161)
- Analysis and Application of Electroencephalography Signal Based on Wavelet Transform
..... CAI Qiong, CHEN Penghui, WEI Wu (166)
- A Compact Ultra-Wideband Dielectric Resonator Antenna ZENG Xiaohu, GE Yuehe (171)
- A Race Detection Method for Programs in Programmable Logic Controllers
..... HUANG Yingkun, LUO Jiliang (175)
- Design of an Embedded Security SOHO Router Apparatus of the Open Source Linux
..... ZHU Long, LIU Changjun (179)
- Reciprocal Transformation of Inorganic Nitrogen by Resting Cells of *Marichromatium gracile* YL28
..... JIANG Peng, HONG Xuan, ZHAO Chungui, YANG Suping (185)
- Quantitative Structure-Activity Relationships on Gas Chromatographic Relative Retention Time of
Polybrominated Diphenyl Ethers WU Zhiyuan, XUE Xiuling, QIU Qijun (190)
- Research of Optimizing Running Modes for Direct Radiant Floor Heating System With Air-Source Heat Pump
..... DU Yan, TIAN Qi, YANG Jinming, GUO Weiqiang (199)
- Synthesis and Anti-Tumor Activities *In Vitro* of Small Molecule Targeted Receptor Tyrosine Kinase Inhibitor
TW9183 LEI Chunhua, WANG Xueyu, YANG Yucui, WU Zhen, WANG Liqiang (205)
- Fractal Analysis of Quanzhou Bay Coastline Change LI Meng, LIN Congmou, HUANG Yiqun (211)
- Application of Laser Distance Meter in Rapid Measurement of Sea-Cliff Profiles
..... CHANG Fangqiang, MENG Xi, LUO Caisong (215)
- Study on the Axial Compression Performance of RC Columns Considering the Nonuniformity of Axial Strain
..... XU Penghong, LIU Ya, LIU Yang, HUANG Qiulai, HUANG Qunxian (221)

- Research on Decision Model in Large-Scale Construction Enterprises of Multi-Project Portfolio Based on Strategic Orientation ZHANG Yunbo, LI Yue, QI Shenjun (226)
- Research on Large-Scale Public Construction Project Decision Making Based on Information Asymmetry HUANG Yuanhui, WANG Shicai (232)
- Dynamical Propertise for a Class of Minimal Dynamical Systems YAN Qi, YIN Jiandong (237)

No. 3

- Multi-Objective Optimization Design for Bus Rollover Safety Based on Gradient Strength Pillar ZHOU Sha, ZHANG Yong, ZHANG Cheng, LI Qi (241)
- Matching of Hydraulic Power Assisted Steering System in the Gear and Rack Type Passenger Vehicle CHEN Dingyue, YANG Li, GUO Zehong, HE Zhiying (247)
- Digital Technology of the Auto Body Three-Dimensional Model Based on the Reverse Engineering HE Long (252)
- Friction Behavior Between Tool and Chip During TC4 Milling With Cold Air Oil Mist Jet Lubricant WANG Ningchang, CHENG Xin, JIANG Feng, XIE Hong (258)
- Application of Guided Filter to Haze Image Sharpening WANG Weipeng, DAI Shengkui (263)
- A P300-Based BCI System for Online Chinese Input XU Xin, FANG Huijuan (269)
- An Information Hiding Algorithm Based on Intra-Prediction Modes for HEVC DONG Xiaohui, LIN Qiwei, XU Dongxu (275)
- Application of Neural Network Predictive Control to Dissolved Oxygen Control in Sewage Treatment Process ZHANG Xueyang, XIANG Leijun, LIN Wenhui, GUO Xinhua (280)
- An Algorithm of Stereo Matching Based on Cooperative Optimization From Two Views to Multiple Views WANG Daolei, WU Maoliang, CHEN Jun (286)
- Application of Customer Segmentation Based on MapReduce Under Big Data of Tourism WANG Yongqi, Wang Huijiao (292)
- Effect of Influent Alkalinity on the Treatment Characteristic of Dynamic Membrane Bioreactor HU Miaomiao, HONG Junming, LI Shanghui, DAI Lanhua, CHEN Xiangqiang, XIE Xiaoqing (297)
- Adsorption Properties of Bovine Serum Albumin on Carboxyl-Functioned Superparamagnetic Nanoparticle WU Zhichao, CHEN Guo, SU Pengfei (303)
- Synthesis and *In Vitro* Activity of Naphthamide Derivatives TW918 WANG Liqiang, LEI Chunhua, QIU Fei, YANG Huiyong (309)
- Research Progress of RNA Interference Expression Vector in Mammals HOU Ying, CHENG Zhiyun, WANG Liqiang, XU Ruian, TANG Mingqing (314)
- Experimental Study on the Axial Force Distribution of SRC Columns Under Axial and Lateral Loads WANG Ziyi, LIU Yang, GUO Zixiong, JIA Leipeng, CHEN Qingmeng (321)
- Numerical Simulation of Tulou Rammed Earth Structure Deformation Characteristics of Numerical Simulation XU Yongxian, PENG Xingqian, LIANG Landi (327)
- Nonlinear Analysis of Steel Tube Filled With Steel-Reinforced High-Strength Concrete Column Under Eccentric Compression GUAN Ping, CHEN Lanxiang, LIU Qingqing (332)
- Trend of Construction Cost Information Management in China SHEN Hua (338)
- Impact of Communication and Contract on Multi-Project Objective Management Under the Agent Construction System WANG Yufang, ZHANG Yunbo, QI Shenjun, XIANG Jianping (343)

Study on Low Carbon Evaluation Index System of Urban Residential District

..... GAO Tao, WANG Jinping, LIU Qing (348)

Construction of Stale Univalent Convex Harmonic Mappings and Starlike Mappings

..... ZHU Mengkun, HUANG Xinzhong (354)

A New Recursive Bounded GM-Estimator for Regression CHENG Lihua, ZHANG Junmin (359)

No. 4

Yaw Moment Control for Motor Electric Vehicle With Four-Wheel Hub Based on Parameter Self-Regulation

Fuzzy Control LI Gang, HAN Hailan (365)

Establishment of the Mathematical Model of Stamping Size and Shape Error for LED Heat Dissipation Body

..... ZHENG Tianqing, GU Lizhi (371)

Module Reconfiguration and Structure Lightweight Optimization Design for Bus Body Based on the Sensitivity

Analysis LI Qi, ZHANG Yong, ZHANG Cheng, ZHOU Sha (377)

An Organization Method for 3D Geographic Information Based on an Object-Oriented BR-TIN Model

..... LI Jingwen, LYU Nan, LU Yanling, ZHANG Yuan, YE Liangsong (383)

Geopark Equipment Control System Design Based on SNMP Network Protocol

..... HE Yuanrong, LI Jianan, LU Lin (388)

New Gouping Hash Algorithm Based on OHNN LI Guogang, ZHONG Chaolin, LIN Xiaomei (393)

Fundus Image Hard Exudates Detection Based on SLIC Superpixels and DBSCAN Clustering

..... LING Chaodong, CHEN Hu, YANG Xiao, ZHANG Hao, HUANG Xin (399)

Research on Image Feature Exaction Method by Combining Global and Local Features

..... ZHANG Yaqing, LIU Zhongbao (406)

Scintillation Index Measuring System of Gaussian Beam on Space Optical Communication

..... WANG Jiabin, CHEN Ziyang, PU Jixiong (412)

Collision Avoidance Control Based on Food Label Conflict Detection CHEN Weijun, HUANG Yongcan (417)

Attitude Detection Based on STM32 Multi-Sensor Fusion

..... HUANG Zhiwei, XU Sunan, WEI Yi, TANG Ying (422)

Improvement for 2D Otsu Adaptive Threshold Fast Algorithm QIAN Weixing, HUANG Liya (427)

Virtual Scenic Spot Information System Research Based on Augmented Reality Technique

..... SU Huiwei, LI Jianan, XU Xia (432)

Chaotic Projective Synchronization Based on Absolute Feedback and Its Circuit Implementation

..... HUANG Miaoyu, MIN Fuhong, WANG Enrong (437)

Research on an Improved De-Noising Method for Artery CT Images CHEN Pingyun, LIN Chunshen (443)

Magnetic Palladium Catalysts and Its Catalytic Activity for Suzuki-Miyaura Coupling Reaction

..... YU Yang, WU Cuilin, WANG Zhen, ZHANG Yingxue, QIAN Hao (449)

Finite Element Analysis of Mechanical Performance of Partially Filled Steel Box-Composite Beams

..... MO Shixu, ZHOU Xiaobing, ZHOU Yingchun, ZHANG Kun (455)

Calculation Method of Tunnel Water Inflow Based on Quantitative Correction Coefficient of Permeability

Composite Lining DING Xiaoping, LIU Zhao, SHI Baotong, HUANG Man (461)

Pollution Detection of Polychlorinated Naphthalenes in Soils and Sediment Near E-Waste Dismantling Sites

..... QIN Xiaojun, CHEN Qunli (467)

Stackelberg Game Model With Risk Preference and Numerical Solving in the PPP Project Problem

- DU Yang, FENG Jingchun (472)
- On the Analytic Properties and Coefficient Estimate for Close-to-Convex Harmonic Mappings
- HUANG Yun, HUANG Xinzhong (478)
- On the Coefficient Estimates for One Subclass of Harmonic Mappings QUE Yuqin, CHEN Xingdi (484)

No. 5

- Vibration Response of Vehicle-Mounted Weapons Under Recoil Shock
- ZHAN Renjun, SHANG Baoli, SHANG Peng, ZHANG Hongbiao, WU Husheng (489)
- End-Pose Deviation and Compensation for WDPSS-8 Robotic System in Laminar Flow Field of Wind Tunnels
- WANG Zi, ZHENG Yaqing (494)
- Simulation Experiment Study on Discharging Characteristic of Vertical Shaft Impact Crusher Rotor
- XING Dawei, FANG Huaiying, YANG Jianhong (500)
- Evaluation and Optimization on the Ride Comfort of a City Bus With an Air Spring Suspension
- PENG Qian, HU Xiaosheng, LIU Jinwu, HAN Fenggang, EMMANUEL Matsika (506)
- Early-Warning Model and Simulation of Pork in the Cold-Chain Logistics Based on BP Neural Network
- YANG Wei, YUE Ting, CAO Wei, GAO Xuyao, ZHANG Wenyan (511)
- Application of Voiceprint Recognition in Opening Instrument Management LAI Limin, HONG Qingyang (517)
- Association Rules Mining Algorithm for Profit Constraint ZHU Long (522)
- Image Feature Point Matching Algorithm Research Using Image Enhancement HUANG Chao (527)
- Application of Three Dimensional Laser Scanning Technology in the Modeling of Wood Carving ... LI Huawei (532)
- Robust Digital Watermarking Algorithm Based on Image Geometric Correction and SVD of Block Compressive Sampling Measurements CHI Xiaofang, FENG Gui, DONG Xiaohui (535)
- Preparation and Catalytic Performance of Fe_3O_4 Nanoparticles CHEN Yajie, LIN Shangxin, PU Jixiong (541)
- Influence of Internal Reflux Ratio on Performance of a New Internal Cycle Multistage A/O Process
- HE Zhengguang, CUI Zhansheng, JIAO Yaoliang (546)
- In Vitro* Inhibition Effects a Candidate Drug TW918 on K-Ras Mutatant Human Lung Adenocarcinoma Cell Line A549 WANG Fengling, YANG Yucai, LI Qian, WANG Liqiang (552)
- Influence of Siberian Ginseng P. E. on the Training Effects of Anaerobic Exercise
- SONG Guangxia, WU Jiangtao (558)
- Study on the Influent Factors of Multi-Project Management Maturity for Mega Contracting Construction Enterprises QI Shenjun, ZHANG Yunbo, WU Jingjing, CHEN Wei, WANG Yufang (563)
- Suitability Evaluation of Underground Space Development in Minjiang Estuary Area TANG Yong (569)
- Study on the Influencing Factors and Energy-Saving Potential of Energy Consumption of Public Building in Xiamen City QIN Xuan, LIU Qiankun (575)
- Application of the Artificial Potential Fields in the Hydrographic Measurement
- SHI Yanxia, JIA Guixi, DONG Hongchao (581)
- Cooperativity Analysis on the Road Network Topology and Residential Land Price in Wuhan City
- ZOU Lilin, HU Xuedong, LIANG Fachao, HE Jiangang (587)
- Effectiveness Analysis of Solar Water Heating Systems for Public Buildings ... WEN Hao, ZHOU Wencheng (593)
- Management Model of Construction Project Based on Product Data Management Technology
- GAO Qun, ZHU Milin, LI Yuan (598)
- Relation Between Harmonic Mapping and Its Shear Function With Linearly Connected Image Domain
- ZHAN Longjun, HUANG Xinzhong (603)

No. 6

- PFMEA Evaluation of Parts Process Based on Fuzzy Theory SHENG Jing, WANG Jun, LUO Shanming (609)
- Experiment on the Characteristic of Acoustic Emission in Circular Sawing of Granite
..... ZHANG Meiqin, GAO Zhen, WU Hairong, LI Yuan, HUANG Guoqin (615)
- Lightweight Design of School Bus Side Structure for Rollover Safety
..... SUN Guibing, HAN Yong, LAN Pinghui, XIE Jingping, JI Biduan (620)
- Development of Humanoid Facial Expression Robot
..... ZHANG Guoliang, WANG Zhangni, WANG Tian, WU Hao (626)
- Research on LED Array for Illumination Uniformity in Visible Light Communication Based on Genetic
Algorithm FU Yuqing (632)
- Curvature Radius Measurement of Lens Based on Two-Dimensional Spectral-Domain Optical Coherence
Tomography CHEN Danyang, YOU Tengfei, ZHONG Shuncong (636)
- Discussion on Cracking RSA With Shor Algorithm
..... TU Lingying, HU Yifan, ZHANG Hongtao, DAI Yongtao, XIONG Hongmei (640)
- Mixed Research on Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm YANG Qiongfang, SUN Ruxiang (645)
- Cloud Computing Task Scheduling of High-Speed Convergence of Chaotic Particle Swarm Optimization
..... WANG Bing (650)
- New 3D Chaotic Mapping and Its Application in Digital Image Encryption LIU Bing, PAN Dabing (655)
- WebGIS for Google Maps Point of Interest Grabbing and Publishing Based on Oracle Spatial Database
..... ZHANG Xinxin, HE Yuanrong (659)
- Network Optimization Technique Using Genetic Algorithm LI Guoqing, YIN Hongsheng (663)
- Using GERT Algorithm for Emergency Transportation Path Selection of Electrical Repair Vehicle
..... ZHOU Xueding, ZHENG Xingxin (667)
- Novel Model of Alternating Current Electrical Arc Furnace Based on Energy Conservation
..... LIAO Yantao, ZHANG Hailong, WANG Enrong, HUANG Miaoyu (672)
- Copper-Free Click Modification of Carbon Nanomaterials XIONG Xingquan, XU Linjian (677)
- Effect of Dissolved Oxygen on Simultaneous Shortcut Nitrification/Denitrification With Phosphorus Removal
Process HE Zhengguang, XIE Qian, DING Dan (683)
- Study on the Adsorption of Methylene Blue With the β -cyclodextrin Crosslinked Polymer in the Water
..... LI Guoping, WU Xiaoping, HUANG Yang, CHEN Jianhua (687)
- Cloning and Expression of the Cytosolic Copper/Zinc Superoxide Dismutase Gene in *Eucalyptus grandis* \times
E. ophylla ZHAO Yanling, Zhou Lijian (693)
- Research on Comprehensive Evaluation of Eco-Industrial Parks Based on Green Economy
..... SHANG Jie, ZENG Yue (698)
- Adaptability Analysis of Conventional Internal Force Calculation Method for Approach Slab of SIAB
..... ZHUANG Yizhou, REN Weigang, CHEN Xiaoqin, HAN Yutian, WANG Shengzhi, TIAN Wei (704)
- Effects of Different Ground Conditions on Seismic Response of Nuclear Island
..... JIN Yuhao, YIN Xunqiang, WANG Guixuan (710)
- Degradation Mechanism of Concrete Pore Structure Under the Action of Freeze-Thaw Cycle ... JIANG Zuojie (716)
- Algorithm and Error Estimate on the Fractional Differential Equation With Caputo Derivative LI Jin (721)
- On \mathbf{A} -Convergence and Almost Usual Convergence BAO Lingxin, SHI Huihua (726)
- Total Contents of Vol. 36 (I ~ X)

《华侨大学学报(自然科学版)》简介

BRIEF INTRODUCTION TO JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY (NATURAL SCIENCE)

《华侨大学学报(自然科学版)》(下称《学报》)创刊于1980年,是福建省教育厅主管,华侨大学主办,面向国内外公开发行的自然科学综合性学术理论刊物。

《学报》的办刊宗旨是:坚持四项基本原则,贯彻“百花齐放,百家争鸣”和理论与实践相结合的方针,广泛联系海外华侨和港、澳、台、特区的科技信息,及时反映国内尤其华侨大学等高等学府在理论研究、应用研究和开发研究等方面的科技成果,为发展华侨高等教育和繁荣社会主义科技事业服务。

《学报》以创新性、前瞻性、学术性为办刊特色,主要刊登机械工程及自动化、测控技术与仪器、电气工程、电子工程、计算机技术、应用化学、材料与环境工程、化工与生化工程、土木工程、建筑学、应用数学等基础研究和应用研究方面的学术论文,科技成果的学术总结,新技术、新设计、新产品、新工艺、新材料、新理论的论述,以及国内外科技动态的综合评论等内容。

《学报》既是中文综合性科学技术类核心期刊,又是国内外重要数据库和权威性文摘期刊固定收录的刊源。在历次全国及福建省的科技期刊评比中,《学报》都荣获过大奖。曾获得1995年“全国高等学校自然科学学报系统优秀学报一等奖”,1997年“第二届全国优秀科技期刊奖”,1999年,2008年“全国优秀自然科学学报及教育部优秀科技期刊”,并于2001年入选“中国期刊方阵‘双效期刊’”。

《学报》现为双月刊,A4开本。中国标准连续出版物号:CN 35-1079/N;国际标准连续出版物号:ISSN 1000-5013;国内邮发代号:34-41;国外发行代号:NTZ1050。

Journal of Huaqiao University (Natural Science) (abbreviated to the Journal), started publication in 1980, is a comprehensive and academic journal about natural science, open distribution at home and abroad, sponsored by Huaqiao University; Fujian Bureau of Education is responsible for its work.

The Journal has its purpose: adhering to the four cardinal policies, carrying out the principles of the “Flowers Blossom; Schools of Thought Contend” and theory combined with practice, collecting information of science and technology from overseas and those in Hong Kong, Macao, Taiwan and special economic zones and all sides, and in time reflecting the scientific and technological achievements about domestic theoretical research, applied research and development research in our university and others, and serving for development of the overseas Chinese higher education and the socialist prosperity on science and technology.

The Journal, with characteristics of creative, perspective and academic study, publishes the articles of fundamental and applied research on mechanical engineering and automation, observing and controlling technology and instruments, electric and electronic engineering, computer, applied chemistry, materials and environmental engineering, chemical and biochemical engineering, civil engineering, architecture, applied mathematics, etc. and the academic reports on achievements of science and technology, theses on new technology, new design, new products, new crafts, new materials, new theories, and the comprehensive reviews on scientific and technological developments at home and abroad.

The Journal is not only a core Chinese periodical on comprehensive science and technology, but also an important data base at home and abroad and periodical source that the authoritative abstracts have been recorded regularly. The Journal won the prizes among the national and provincial evaluation of scientific and technological periodicals such as “the first prize of good natural science of the national higher education periodicals” in 1995, “the good prize of the second national periodicals of science and technology” in 1997, “the good scientific and technological periodicals of the national natural science journals and the State Education Department” in 1999 and 2008, and selected into “‘double-effect periodical’ of the China periodicals matrix” in 2001. The Journal welcomes the contributors from our university and others.

The Journal is bimonthly publication, with format of A4. China standard serial number: CN 35-1079/N; International standard serial number: ISSN 1000-5013; Domestic mail number: 34-41; International issue number: NTZ1050.



公众微信号

网站二维码

- 《中文核心期刊要目总览》
- ISTIC 中国科技核心期刊
- RCCSE 中国核心学术期刊
- 全国优秀科技期刊
- 中国期刊方阵“双效期刊”
- 华东地区优秀期刊
- 中国科技论文在线优秀期刊

本刊被以下国内外检索期刊和数据库列为固定刊源

- 美国《化学文摘》(CAS)
- 波兰《哥白尼索引》(IC)
- “STN 国际”数据库
- 中国科学引文数据库
- 中国科技论文统计期刊源
- 中国学术期刊(光盘版)
- 中文科技期刊数据库
- 中国力学文摘
- 中国生物学文摘
- 中国数学文摘
- 俄罗斯《文摘杂志》(AJ, VINITI)
- 荷兰《文摘与引文数据库》(Scopus)
- 德国《数学文摘》(Zbl MATH)
- 中国学术期刊综合评价数据库
- 中国期刊网
- 万方数据库
- 中国机械工程文摘
- 中国化学化工文摘
- 中国无线电电子学文摘
- 中国物理文摘

华侨大学学报(自然科学版)

JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY

Huaqiao Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)

(NATURAL SCIENCE)

(双月刊, 1980 年创刊)

(Bimonthly, Started in 1980)

第 36 卷 第 6 期 (总第 146 期) 2015 年 11 月 20 日

Vol. 36 No. 6 (Sum. 146) Nov. 20, 2015

主管单位: 福建省教育厅

Competent Authority: Department of Education of Fujian Province

主办单位: 华侨大学

Sponsor: Huaqiao University (Xiamen 361021, Fujian, China)

(中国福建厦门 361021)

编辑出版: 华侨大学学报自然科学版编辑部

Edited and Published by Editorial Department of Journal of Huaqiao University (Natural Science)

电话: 0595-22692545
 电子信箱: journal@hqu.edu.cn
 网址: www.hdxh.hqu.edu.cn

Tel: 0595-22692545

E-mail: journal@hqu.edu.cn

Http://www.hdxh.hqu.edu.cn

主编: 乌东峰

Editor in Chief: WU Dong-feng

印刷: 泉州晚报印刷厂

Distributed by China Publication Foreign Trading Corporation

国内发行: 福建省泉州市邮政局

(P. O. Box 782, Beijing, 100011, China)

订购处: 全国各地邮政局(所)

国外发行: 中国出版对外贸易总公司

(北京 782 信箱, 邮政编码 100011)

刊号: ISSN 1000-5013
CN 35-1079/N

代号: 国内邮发 34-41
国外 NTZ 1050

国内定价: 8.00 元/期
48.00 元/年