

ISSN 1000-5013 CN 35-1079/N CODEN HDZIEF

華僑大学学报

(自然科学版) JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY (NATURAL SCIENCE)

> 第 35 卷 第 5 期 Vol. 35 No. 5

> > 2014

福建・泉州 ISSN 1000-5013

《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) 叶民强 (YE Min-qiang) 方柏山 (FANG Bai-shan) 江开勇 (JIANG Kai-yong) 刘塨 (LIU Gong) 张认成 (ZHANG Ren-cheng) 吴季怀 (WU Ji-huai) 陈锻生 (CHEN Duan-sheng) 吴逢铁 (WU Feng-tie) 周克民 (ZHOU Ke-min) 胡日东 (HU Ri-dong) 高轩能 (GAO Xuan-neng) 黄心中 (HUANG Xin-zhong) 蔡灿辉 (CAI Can-hui) 童昕 (TONG Xin) 欧阳明安 (OUYANG Ming-an)

编辑部主任 (Director)

黄仲一 (HUANG Zhong-yi)

华侨大学学报

(自然科学版)

2014 年 9 月

目 次

三角网格模型五轴加工刀轴矢量调整及优化 平面度误差统计特征实验 ······ 王宇, 黄富贵, 李兴旺 (487) 改进 PTS 技术和改进阈值限幅法结合的 PAPR 降低方法 采用粒子群优化算法的液压挖掘机高效空中运动轨迹规划方法 Mealy 机的实时系统调度方法 总有机碳分析仪高温反应单元研制 福建省行政区划植被覆盖的动态变化多层次模型 ······· 李维娇, 邱炳文, 曾灿英 (513) 采用 OHNN 和 M-LFSR 的字序列密码加密方案 FP-Growth 的并行加权关联规则挖掘算法 ------ 李翔, 刘韶涛 (523) 神经网络的压力容器评估系统设计

采用蚁群算法的移动摄像头探访规划

......彭臻,王田,李晨阳,钟必能,陈叶旺(533) 白斑综合症病毒对对虾 Caspase 基因的调控 不饱和树脂/石墨烯复合材料的制备及性能 ------石沫,陈丹青,陈国华(542) 石墨烯量子点对对苯二酚的检测 钴、锰改性方法对酚醛炭泡沫除 SO₂/NO 的影响 不同活化方法对开心果壳活性炭的孔结构影响 宿主细胞 DNA 损伤反应与重组腺相关病毒载体基因表达 炸药近地爆炸的数值模拟及影响参数的分析 钢板笼约束混凝土短柱轴压承载力分析 代建制多项目管理风险评价指标体系的构建项剑平,王玉芳,张云波,祁神军(581) 考虑中间主应力与约束损失的深埋圆形隧道围岩特征曲线分析 钢绞线搭接锚固性能试验 ······ 李立文,郭子雄,黄群贤,陈建华,赖有泉 (592) 耦合的修正变系数 KdV 方程的非线性波解 ------ 温振庶 (597)

期刊基本参数: CN 35-1079/N * 1980 * b * A4 * 120 * zh * P * ¥8.00 * 1 000 * 23 * 2014-09 * n

JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY

(NATURAL SCIENCE)

Vol. 35 No. 5

Sum. 139

Sep. 2014

CONTENTS

Adjustment and Optimization of Tool Axis Vector of Triangular Mesh Model in 5-Axis
Machining
Experimental on Flatness Error Statistical Characterization
WANG Yu, HUANG Fu-gui, LI Xing-wang (487)
PAPR Reduction Method Based on Improved PTS Technology and Improved Threshold
Clipping Method
HUANG Xian, TAN Ge-wei (492)
Efficient Air Motion's Trajectory Planning Method of Hydraulic Excavator Based on
Particle Swarm Optimization Algorithm
SUN Xiang-yun, SHAO Hui, ZHAO Jia-hong (498)
Real-Time Scheduling Method Based on Mealy Machine
JI Yang-hong-kang, WANG Fei, YU Ting (503)
Temperature Catalytic Oxidation Reactor of Total Organic Carbon Analyzer
REN Hong-liang (509)
Vegetation Multi-Level Modeling Research in Fujian Province Based on Administrative
Region
LI Wei-jiao, QIU Bing-wen, ZENG Can-ying (513)
An Word Oriented Encryption Scheme Based on OHNN and M-LFSR
LIN Xiao-mei, LI Guo-gang, ZHANG Ze-pu (519)
A Parallel Weighted Association Rule Mining Algorithm on FP-Growth
LI Xiang, LIU Shao-tao (523)
Design of Pressure Vessel Evaluation System Based on Artificial Neural Networks
LYU Bing, WANG Hua-zhen, PAN Xiao-ming (528)
Visit Schedule of Mobile Cameras Base on Ant Colony Optimization

..... PENG Zhen, WANG Tian, LI Chen-yang, ZHONG Bi-neng, CHEN Ye-wang (533)

Regulation of Prawn Caspase Gene by White Spot Syndromic Virus

JIN Chun-ying, LIN Jin-qing, WANG Wei (537
Preparation and Properties of Unsaturated Polyester Resin/Graphene Composite
······ SHI Mo, CHEN Dan-qing, CHEN Guo-hua (542
Detection of Hydroquinone by Graphene Quantum Dots
LIU Peng-chao, SUN Xiang-ying, YANG Chuan-xiao (547
Modification Methods of Co and Mn and the Influence on Removel of SO_2 and NO of
the Carbon Foams from Phenolic Resin
CHENG Xin, XU Lu-si (552
Effect of Different Activation Methods on the Pore Structure of Activated Carbons
Prepared from Pistachio Shells
CHEN Hong-lin, SONG Lei (558
Interplay between DNA-Damage Response and Recombinant Adeno-Associated Virus
Vector in Host Cells
·········· PENG Jun-chun, DIAO Yong, LI Zhao-fa, WANG Qi-zhao, LYU Ying-hui (564
Numerical Simulation and Analysis of Influence Parameters for Explosions near
Ground
CHEN Xin, GAO Xuan-neng (570
Bearing Capacity of Prefabricated Cage System for Reinforcing Concrete Short Columns
under Axial Compression
LIANG Yang-bin, ZENG Zhi-xing, SU Jiang-lin, CHEN Yi-xiong (576
Risk Assessment of Multi-Project Management under Agent Construction System
Management Mode
XIANG Jian-ping, WANG Yu-fang, ZHANG Yun-bo, QI Shen-jun (581
Ground Reaction Analysis of Deep-Buried Circular Tunnels Considering Intermediate
Principal Stress and Confinement Loss
HUANG Qing-xiang, LIN Cong-mou, HUANG Yi-qun, LIN Da-wei (587
Experimental Study on Lap Anchorage Performance of Strand
LI Li-wen, GUO Zi-xiong, HUANG Qun-xian, CHEN Jian-hua, LAI You-quan (592
Nonlinear Wave Solutions for a Coupled Modified KdV Equation with Variable
Coefficients
WEN Zhen-shu (597

Serial Parameters: CN 35-1079/N * 1980 * b * A4 * 120 * zh * P * ¥8.00 * 1 000 * 23 * 2014-09 * n

文章编号:1000-5013(2014)05-0481-06

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2014.05.0481

三角网格模型五轴加工刀轴矢量调整及优化

祁杨停,黄常标,林俊锋

(华侨大学 厦门市数字化视觉测量重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要: 为消除全局干涉,提出了一种基于 K-D 树及刀具离散的高效刀轴矢量调整算法.算法首先以有限个 点离散表示刀具,然后利用 K-D 树快速查找刀具的可能干涉点,并在此基础上计算调整后的刀轴矢量.为避 免过大的刀轴矢量突变,提出一种分角度区域方法优化刀轴矢量.实例验证表明:算法能够高效实现全局干涉 避免及刀轴矢量优化.

关键词: 五轴数控加工;全局干涉避免;刀轴矢量优化;K-D树检索

中图分类号: TG 659; TP 391 **文献标志码:** A

三角网格模型因定义简单明确、拓扑适应能力强而成为几何模型的主要表示形式之一,并且广泛应 用在逆向工程、快速原型等领域.在加工复杂曲面方面,五轴数控加工可以获得比三轴加工更好的加工 质量和更高的加工效率^[1].刀轴矢量控制是五轴数控加工的关键问题,不仅关系着零件的加工质量和效 率,更与机床设备的性能息息相关.刀轴矢量研究主要分为两方面:一是避免刀具全局干涉的刀轴矢量 调整;二是避免刀轴突变过大的刀轴矢量优化.目前,提高全局干涉检索效率的方法主要是建立基于空 间对象的模型检索数据结构,如八叉树和 OBB 包围盒相结合的算法^[2]和 BSP 树检索方法^[3]等.为提高 检索效率,一般将连续的刀具模型离散化,通过几何求交判断干涉^[4];或以垂直于刀具的法矢与被加工 表面求交判断全局干涉^[5].刀轴矢量不仅会影响加工质量和加工效率,还与机床旋转轴运动和切削力变 化有关.因此,近年来国内外众多学者对刀轴矢量优化进行了大量研究,并提出了多种算法:1)在同一 切削行或同一区域内固定刀轴,如基于区域划分的方法^[6]、基于分行定轴的方法^[7]等;2)基于刀具可达 性的方法^[3+9];3)符合机床刚度性能和运动学特性的方法^[10+12];4)相邻刀轴矢量插值计算,常用的方法 是四元数插值法^[13+4].但这些方法存在使用范围窄,或计算复杂,耗费大量时间等缺点.本文结合三角网 格模型的表示特点,基于 K-D 树检索方法,提出一种高效的全局干涉处理算法,一种分角度区域的刀轴 矢量优化策略.

1 五轴数控加工全局干涉避免

全局干涉检测时往往需要遍历搜索整个被加工模型,从而判断可能发生干涉的区域.因此,提高模型搜索效率是加快全局干涉检测的关键.

1.1 刀具离散模型

为了从包含大量数据的模型中快速找到可能的干涉点,须建立模型数据的快速检索数据结构. K-D 树^[15]是基于点区域划分的空间索引结构,具有存储需求低、高效查询等优点^[16]. 基于 K-D 树检索可采 用范围查询,创建 K-D 树时,以三角网格模型的顶点作为输入数据,顶点坐标 X,Y,Z 为划分依据. 通过 K-D 树的创建,建立三角网格模型顶点的空间检索拓扑信息,可快速检索刀具的可能干涉点.

收稿日期: 2013-09-13

- 通信作者: 黄常标(1976-),男,教授,主要从事数字化设计制造技术、计算机图形学、逆向工程的研究. E-mail: huangcb@hqu. edu. cn.
- 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51105150); 福建省自然科学基金资助项目(2013J01190); 华侨大学中青年 教师科研提升资助计划(ZQN-PY102)

球头刀加工适应性强,且生成刀具轨 迹相对简单等优点^[17].为减少 K-D 树的检 索次数,沿刀轴方向离散刀具,以有限个点 来表示刀具,离散示意图如图 1 所示.图 1 中:点O为刀心点;刀具半径为r;刀柄半径 为R;L为刀杆长度;H为刀具全长;虚线 表示检索范围;点 P_i(i=0,…,n)表示刀杆 第 i 个离散点;P_i 为刀柄离散点.

刀具离散的原则是:从刀心点 O 开始, 沿刀轴方向等距离离散,检索范围需覆盖 整个刀杆和刀柄.

图 1 刀具离散模型 Fig. 1 Cutter discretized model

1) 刀具离散距离 h 由刀具具体情况确

定,h 过大,会造成干涉点检索不完整,影响干涉检测结果;h 过小,则增加了刀具离散点数,耗费 K-D 树 查找时间和干涉检测时间. P₀ 与刀心点 O 之间距离为h,为保证搜索范围的完整性,检索范围均定为 d, $\exists d = \sqrt{h^2 + r^2}$.

2) 以离散距离 h、检索范围 d 为离散参数,沿刀轴方向确定离散点 P_i,直到检索范围覆盖整个刀杆,最后一个离散点的检索范围应超出刀杆长度.刀杆的有限离散点个数为 n=floor((L-r)/h),其中: floor()函数为下取整函数.

3) 若离散点 *P*_n 的检索范围未完全覆盖刀杆末尾部分,即当 *r*² + (*L*-*r*-*n* • *h*)² > *d*² 时,需在 *P*_n 后再添加一个离散点,直到 *P*_n 满足离散原则.否则,刀杆离散完毕.

4) 鉴于刀柄具有较小的长宽比,不适合多次离散,以刀柄中心为离散点 P_j ,以 D 为检索范围. 其中: $D = \sqrt{R^2 - ((H-L)/2)^2}$.

1.2 全局干涉快速检测及避免方法

刀具离散后,以刀具的有限个离散点 P₀,…,P_n,P_j 作为 K-D 树的检索中心,以对应的检索范围作 为 K-D 树查询范围. 首先搜索模型中可能发生干涉的目标顶点,然后,计算目标顶点到刀轴的距离,并 判断是否发生干涉,如果存在干涉则调整刀轴矢量以消除干涉.

1) 干涉误判点的识别

干涉顶点判别时,刀杆检索中心对应的目标顶 点需位于刀杆长度范围内,而刀柄检索中心搜索到 的目标顶点应在刀柄内.根据上述刀具离散方法,刀 杆及刀柄会出现干涉误判区域,误判情况如图2所 示.图2(a)中:点*pi*为检索中心*P*,搜索到的目标顶 点,该点到刀轴的距离小于刀具半径*r*,是刀杆干涉 顶点,但该点在刀柄内,超出了刀杆长度范围,属于 刀杆干涉误判顶点.图2(b)中:点*pi*,*pj*为检索中心 *Pj*搜索到的目标顶点,两点到刀轴的距离均小于刀 柄半径*R*,但这两点都不在刀柄内,属于刀柄干涉误 判顶点.因此,针对*P*,*Pj* 搜索到的目标顶点,应先 判断其是否符合当前检索中心条件.对于刀杆检索



Fig. 2 Misjudgment of of tool rod

中心,其搜索到的目标顶点的 z 坐标值应满足 $z \in [0, L-r]$;由刀柄检索中心搜索到的目标顶点的 z 坐标值应满足: $z \in [L-r, H-r]$.

2) 刀轴矢量调整计算

计算目标顶点 P 到刀轴的距离 d_r . 设刀轴单位矢量为 T,则 $d_r = || OP \times T ||$. 通过比较 d_r 与刀具半 径 r 或刀柄半径 R 的大小判断 P 点是否为干涉点,找出各检索中心对应的最大干涉点及干涉距离.

采用旋转刀轴法避免全局干涉. 全局干涉避免 时刀轴矢量调整角度比较,如图 3(a)所示. 图 3(a) 中:粗曲线表示被加工面;点 p_1 为刀柄检索中心搜 索到的最大干涉点, p_2 , p_3 是刀杆两个检索中心搜索 到的最大干涉点. 由图 3(a)可知:点 p_1 , p_2 , p_3 的无 干涉刀轴矢量为 T_1 , T_2 , T_3 ,由刀轴矢量 T绕点 O旋 转角度 θ_1 , θ_2 , θ_3 获得. 为避免刀具全局干涉,应选取 最大的旋转角度作为刀轴调整角度. 因此,刀轴矢量 T绕 O点旋转角度 θ_3 ,获得无干涉的刀轴矢量 T_3 .

干涉调整角度及无干涉刀轴矢量的计算方法, 如图 3(b)所示.图 3(b)中:**T**为原刀轴单位矢量;*P* 为干涉点;*Q*为*P*在**T**上的投影点.*P*的投影方向即 单位矢量**v**为



(a)刀轴旋转角度比较(b)无干涉刀轴矢量计算图 3 刀轴矢量调整策略

Fig. 3 Tool axis vector adjustment strategy

$$\mathbf{v} = PQ / \parallel PQ \parallel . \tag{1}$$

式(1)中:Q计算公式为

$$Q = O + (OP \cdot T) \cdot T.$$
⁽²⁾

无干涉刀轴矢量 T'为

$$\mathbf{T}' = \frac{\mathbf{T} + \mathbf{v} \cdot \| \mathbf{QP}' \|}{\| \mathbf{T} + \mathbf{v} \cdot \| \mathbf{QP}' \| \|} = \frac{\mathbf{T} + \mathbf{v} \cdot \| \mathbf{OQ} \| \times \tan \theta}{\| \mathbf{T} + \mathbf{v} \cdot (\| \mathbf{OQ} \| \times \tan \theta \|)}.$$
(3)

式(3)中:判断刀杆干涉点的旋转角度θ为

$$\theta = \arcsin(r/ \| OP \|) - \arcsin(r/ \| PQ \| / \| OP \|); \tag{4}$$

判断刀柄干涉点的旋转角度 θ 为

$$\theta = \arcsin(R / \| OP \|) - \arcsin(r / \| PQ \| / \| OP \|).$$
(5)

比较各刀位点计算得到的角度,取最大角度 θ 对应的刀轴矢量为最终的无干涉刀轴矢量T':以刀位 点O为旋转中心,将T沿v方向旋转角度 θ ,获得无干涉刀轴矢量T'.

2 刀轴矢量优化

受机床转动角加速度的限制,为提高零件加工质量和效率,刀具的运动应尽量保持平稳,即保持刀 轴矢量的一致性.常见的刀轴矢量设计方法主要是法线加工法^[18],即刀轴矢量与刀触点法矢方向一致. 五轴加工是以后跟角 α 和侧偏角 β 来确定初始刀轴姿态,在实际加工中,初始位置取 $\alpha = 5^{\circ}, \beta = 0^{\circ}.$ 刀位 点的初始刀轴矢量由上述两个角度获得.

在文献[6]的刀轴优化思路的基础上,提出分角度区域的无干涉刀轴矢量优化策略.该策略的基本 原则是:在同一无干涉刀位轨迹上,起始刀位点的刀轴矢量为刀具姿态的初始状态,即刀位点的初始刀 轴矢量,刀位点 *P_{i,j}*的刀轴矢量与前一刀位点*P_{i-1,j}*的刀轴矢量保持一致.优化方法主要包括两个方面.

1) 在同一刀位轨迹上,刀轴矢量突变角度不宜过大,若当前刀轴矢量与刀触点法矢的夹角大于或 等于设定的角度阈值 θ (0°<θ<90°),则将当前刀轴矢量设为对应刀位点的初始刀轴矢量,且在该刀位 点前插入一个刀位点,并由前后刀轴矢量确定插入点的刀轴矢量.

刀位点 P_i 的刀轴矢量突变角度过大的判别方法是

$$\boldsymbol{N}_i \boldsymbol{\cdot} \boldsymbol{T}_i \leqslant \cos \theta. \tag{6}$$

式(6)中: N_i 为刀位点 P_i 对应的刀触点单位法矢; T_i 为刀位点 P_i 未优化前的刀轴单位矢量.

两相邻刀位点之间的距离较近,若 P_i 的刀轴矢量发生剧烈突变,在 P_i 前插入一个刀位点 P_k ,则 P'_k 为

$$P_k = (P_{i-1} + P_i)/2. (7)$$

插入点的刀轴单位矢量为

$$\mathbf{T}_{k} = \frac{(\mathbf{T}_{i-1} + \mathbf{T}_{i})/2}{\|(\mathbf{T}_{i-1} + \mathbf{T}_{i})/2\|}.$$
(8)

分角度区域刀轴矢量调整策略,如图 4 所示.图 4(a)中:刀位点 $P_{i,i}$ 到 $P_{i,k}$ 间的刀轴矢量均一致;刀 位点 $P_{i,k+1}$ 对应的刀触点法矢 $N_{i,k+1}$ 与未优化前的刀轴矢量 $T_{i,k+1}$ 的点积小于 cos θ ;刀轴矢量突变角度 过大.



(a) 同一轨迹上的刀轴矢量调整

(b) 相对 Z 轴矢量的刀轴矢量调整

图 4 分角度区域刀轴矢量调整策略 Fig. 4 Adjustment strategy of tool axis vector based on angled region

刀轴矢量优化方法为:点 *P*_{*i*,*k*+1}处的刀轴矢量设定为该点处对应的初始刀轴矢量,按式(7)在点 *P*_{*i*,*k*}与*P*_{*i*,*k*+1}间插入一个新刀位点 *P*_{*i*,*f*},并根据式(8)计算 *P*_{*i*,*f*}处的刀轴矢量,从而达到减小刀轴矢量剧烈突变的效果.

2) 若对应刀触点的法矢与 Z 轴矢量的夹角大于或等于设定的角度阈值 λ (90°<λ<180°),则调整 刀轴矢量使其与 Z 轴的夹角略小于 λ.

刀位点 P_i的刀轴矢量相对于 Z 轴矢量的不合理判别方法为

$$N_i \bullet Z \leqslant \cos \lambda. \tag{9}$$

式(9)中:Ni 为刀位点Pi 对应的刀触点单位法矢.

相对于 Z 轴矢量的刀轴矢量优化方法是:以刀位点 P_i 为旋转中心,将刀轴矢量 T_i 沿 Z 轴矢量方向 旋转角度 δ ,保证调整后 T_i 与 Z 轴矢量的点积大于 cos λ ,其中: $\delta = \lambda - (5^\circ \sim 10^\circ)$, λ 的取值大小与机床 相关,保证 λ 在刀具旋转角度范围内且主轴与工作台不发生碰撞.

由图 4(b)可知:点 $P_{i+1,j}$ 处的点积等于 cos λ , $P_{i+2,j}$, $P_{i+3,j}$ 处的点积均小于 cos λ , 不满足机床要求 量. 按照上述优化方法,分别调整点 $P_{i+1,j}$, $P_{i+2,j}$, $P_{i+3,j}$ 的刀轴矢量:分别以各刀位点为旋转中心,将刀 轴矢量沿 Z_w 轴方向旋转角度 $\lambda - \delta$, $\beta - \delta$ 和 $\gamma - \delta$, 使其与 Z_w 轴矢量的点积大于 cos λ .

分角度区域算法的基础是无干涉刀位轨迹,可获得同一轨迹上相邻刀轴矢量变化较小、较均匀的刀 轴集合.与现有方法相比,文中算法可使得同一轨迹上的刀轴矢量变化更小,刀轴平稳性更好;算法计算 简单,效率高,耗费时间较少;特别地,算法还考虑了刀轴矢量相对 Z 轴矢量的特殊性,确保了刀轴矢量 在实际加工中的可适用性.

3 实验验证

算法在 Visual Studio 2010 环境下编程实现,对全局干涉处理算法和刀轴矢量优化方法进行验证. 算法在 Inter(R) Core(TM) i5-2320 CPU 3.00 GHz,4 GB 内存微机上运行,全局干涉处理前后的刀轴 矢量对比,如图 5 所示.由图 5(a)可知:多个刀位点位置发生全局干涉.由图 5(b)可看出:利用提出的全 局干涉检测及避免算法,可以有效地避免全局干涉.当相邻刀轴矢量突变角度过大时,同一轨迹上刀轴 矢量优化前后对比,如图 6 所示.由图 6(a)可知:1,2,3 处的相邻刀轴矢量,在某些位置会发生相邻刀轴 矢量剧烈突变的情况.由图 6(b)可知:在对应的位置添加刀位点并确定合适的刀轴矢量,可以有效缓解 和避免相邻刀轴矢量的剧烈突变.相对于 Z 轴矢量的刀轴矢量优化前后对比,如图 7 所示.由图 7(a)可 知:刀轴矢量优化前,刀轴矢量与 Z_w 的夹角过大,实际情况下若刀具以该姿态加工,不仅超出了刀具旋 转角度,更会引起主轴与工作台的碰撞.由图 7(b)可知:利用本算法可以避免此类情况.由图 5~7 可以 看出:本算法能有效实现刀轴矢量的调整和优化.



(a) 刀轴矢量优化前





Fig. 7 Comparison of non-optimized and optimized tool axis vector relative to the Z axis

4 结束语

刀轴矢量控制对五轴数控加工具有重要意义.从刀轴矢量调整和刀轴矢量优化两方面出发,针对三 角网格模型,提出基于 K-D 树快速查找干涉点的全局干涉避免算法,算法提高了全局干涉避免的效率. 针对刀轴矢量突变角度过大以及相对主轴角度过大的问题,提出分角度区域的刀轴矢量优化方法,有效 优化了刀轴矢量,并使其满足实际加工时的刀轴要求.

参考文献:

- [1] DAVIM J P. Machining of complex sculptured surfaces[M]. London: Springer Verlag, 2012:4-6.
- [2] DING S, MANNAN M A, POO A N. Oriented bounding box and octree based global interference detection in 5-axis machining of free-form surfaces[J]. Computer-Aided Design, 2004, 36(13):1281-1294.
- [3] WANG Qing-hui, LI Jin-rong, ZHOU Ru-rong, Graphics-assisted approach to rapid collision detection for multi-axis machining[J]. The International Journal of Adv Hanced Manufacturing Technology, 2006, 30(9/10):853-863.
- [4] 张和明,张玉云,熊光楞.复杂曲面五坐标数控加工干涉检查及刀位修正[J].清华大学学报:自然科学版,1998,38 (2):67-70.
- [5] 谭光宇,袁哲俊,姚英学.加工过程碰撞干涉的矢量法检验[J].中国机械工程,1999,10(5):513-515.

- [6] 李炳林,王学林,胡于进,等.基于区域划分的刀具方向控制方法[J].中国机械工程,2010,21(4):452-457.
- [7] 任军学,何卿功,姚倡锋,等.闭式整体叶盘通道五坐标分行定轴加工刀轴矢量规划方法[J].航空学报,2012,33 (10):1923-1930.
- [8] LI L L,ZHANG Y F,LI H Y, et al. Generating tool-path with smooth posture change for five-axis sculptured surface machining based on cutter's accessibility map[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011,53(5):699-709.
- [9] 王晶,张定华,罗明,等.复杂曲面零件五轴加工刀轴整体优化方法[J].航空学报.2013,34(6):1452-1462.
- [10] 闫蓉,彭芳瑜,李斌,等.多轴数控加工刀具姿态优化及其刚度性能指标分析[J].中国机械工程,2008,19(22): 2699-2702.
- [11] 罗明,吴宝海,李山,等.自由曲面五轴加工刀轴矢量的运动学优化方法[J].机械工程学报,2009,45(9):158-163.
- [12] 章永年,赵东标,陆永华,等.平底刀最优刀轴矢量规划算法[J].机械工程学报,2012,48(5):180-186.
- [13] HO M C, HWANG Y R, HU C H. Five-axis tool orientation smoothing using quaternion interpolation algorithm
 [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(12):1259-1267.
- [14] LUO Ming, ZHANG Ding-hua, WU Bao-hai, et al. Tool orientation control using quaternion interpolation in multiaxis milling of blade[C] // Sixth International Conference on Manufacturing Automation. Washington D C: IEEE Computer Society Conference Publishing Service, 2010:128-132.
- [15] 栾丽华,吉根林.树型空间索引及其在聚类中的应用研究[J].计算机工程与应用,2005(19):166-169.
- [16] 郑坤,朱良峰,吴信才,等. 3D GIS 空间索引技术研究[J]. 地理与地理信息科学,2006,22(4):35-39.
- [17] 吴宝海,罗明,张莹,等.自由曲面五轴加工刀具轨迹规划技术的研究进展[J].机械工程学报,2008,44(10):9-18.
- [18] 张永超,于洋.五坐标加工中使用坐标内插法控制刀具轴向研究[J].组合机床与自动化加工技术,2011(8):39-42.

Adjustment and Optimization of Tool Axis Vector of Triangular Mesh Model in 5-Axis Machining

QI Yang-ting, HUANG Chang-biao, LIN Jun-feng

(Xiamen Key Laboratory of Digital Vision Measurement, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: According to triangular mesh model, for eliminating the global interference, an efficient algorithm to adjust tool axis vector was presented based on the K-D tree and cutter discretization. Firstly, the cutter was represented with a finite number of discrete points. Then, the possible interference points were found quickly using the K-D tree, and the tool axis vector after adjustment was calculated based on this step. In order to avoid the dramatic change of tool axis vector, a method of angled region was presented to optimize the tool axis vector. The example showed that the algorithm can efficiently achieve the global interference avoidance and the tool axis vector optimization.

Keywords: 5-axis NC machining; avoidance of global interference; tool axis vector optimization; K-D tree retrieval

(责任编辑:陈志贤 英文审校:杨建红)

文章编号:1000-5013(2014)05-0487-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2014.05.0487

平面度误差统计特征实验

王宇,黄富贵,李兴旺

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 针对平面度误差统计特征识别的问题,以条件概率和全概率为理论依据,提出由平面到直线再到平面的研究思路.采用三坐标测量机对某两个零件实际平面进行提取实验,通过对实验数据的分析和处理,对其平面度误差统计特征进行识别.经过检验方法计算验证,结果表明,在工艺系统稳定的情况下,加工出来的工件表面的平面度误差呈现正态分布的特征.

关键词: 平面度误差;条件概率;全概率;正态分布 中图分类号: TG 83; P 207 ______文献标志码: A

平面度公差是国际标准和我国标准中规定的重要形位公差项目之一,是实际平面相对于理想平面的最大允许变动范围.平面度误差是指被测实际表面相对其理想平面的变动量,平面度误差对各种有平面装配要求的零件的工作精度、连接强度、密封性具有重要影响,同时还影响它们的运动平稳性、耐磨性、噪音及寿命等.因此,平面度误差测量对于产品质量的检测和评定具有重要意义.新一代产品几何技术规范 GPS标准中,平面度误差测量的提取、拟合、评定是重要的环节^[1-3],合理规范这些环节,无疑对形位误差测量的具体操作是十分必要的.提取是形位误差测量的首要环节^[1-3],合理规范这些环节,无疑对形位误差测量的具体操作是十分必要的.提取是形位误差测量的首要环节^[1-4],提取包括提取方案和提取点数的确定对平面度误差的测量评定结果和精度都具有重要的影响. GPS标准及有关文献对平面度误差测量的提取方案作出了具体规定,但对提取点数确定的问题未做明确说明.目前,计算机随机仿真技术^[7-8]在研究提取点数的问题上应用较广,而采用随机仿真来研究平面度误差最佳提取点数,必须知道平面度误差随机性成分的统计特性.由于平面可以看作是线的组合,因此,本文主要借助概率论的相关知识,按照由平面到直线再到平面的思路,研究分析不同精度等级下的平面度误差的统计特性,识别出给定平面的误差统计模型.

1 条件概率、全概率公式

用三坐标测量机或其他形位误差测量设备对某一个零件被 测平面上点的坐标进行提取时,设定提取间距为 a×b,按照图 1 所示的提取路径进行提取,得到的提取数据为离散的三维坐标 点.用 MATLAB 软件将这些数据导入并绘制图形,由离散点模 拟出的平面三维形貌,如图 2 所示.由图 2 可知:数据点是沿着一 系列在等间距的平行线上密集排布的.



进一步对数据进行处理,通过计算求出各个离散点到拟合平面的距离值 h,并对其进行误差分离出随机性成分 k. 新的数据点

图 1 折线提取方案 Fig. 1 Polyline extraction plan

h, k 在平面的分布可以划分为一系列等间距平行线上的分布,如图 3 所示. 由图 3 可知:当 $y = y_i$ 时,某 一个数值 k_i 的条件概率为 $P(k_i | y_i)$,其中 k_i 的条件概率分布可体现在固定 y 值时,沿 x 方向某条直线

收稿日期: 2014-02-14

通信作者: 黄富贵(1966-),男,教授,主要从事精密测量技术的研究. E-mail:hmm@hqu. edu. cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2012J01216)

上的分布; y_i 在 y 方向上是均匀分布的, 在 y 轴上 y_i 的概率 $P(y_i)$ 相等, 假设取值为 A, \Rightarrow A=1. 全概 率公式表示为



sampling points in some plane



由式(1)可知:*k*_j的概率分布体现的是在整个平面上的分布,相当于各个条件下(*y*_i取不同值)沿*x* 轴方向所有直线上的*k*_j分布的累加.根据概率论的有关知识^[9],若几组数据*k*₁,*k*₂,…,*k*_n相互独立并且 都服从某种分布,那么它们的累加也服从于上述某种分布相关的分布,如正态分布、χ²分布.由于组成 平面的几何要素线都是由同一平面划分的,加工过程是连续不间断的,而且加工条件、设备、环境等外界 因素具有一致性,所以在理论上平面度误差在各个几何要素线上的分布也具有一致性.由此,只要掌握 平面度误差值在直线上分布规律,就可以在一定程度上掌握全局平面上平面度误差的统计特性.

2 平面度误差测量实验与数据处理

为了获得实验数据用于研究平面度误差分布,实验采用 global777 型三坐标测量机作为检测设备, 在 20 ℃恒温条件下,对 2 个不同零件的特定光滑平面区域进行提取,如图 4 所示.采用图 1 的方法对零







(b)零件 2

图 4 零件的测量现场 Fig. 4 Measurements of components

件 1,2 划定相同的提取面积约为 $A \times B = 74 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,零件 1,2 提取时设定相同提取间距为 $a \times b = 0.1 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$.采用自动扫描功能进行提取,可获得实验数据为三维坐标点 (x_i, y_i, z_i) 的形式,其中:零件 1 和零件 2 的 y_i 值各有 B/b+1=21 组,零件 1,2 的 $y_1 \sim y_{21}$ 的坐标值,如表 1 所示.每个固定 y_i 的条件下,沿 x 方向大约 720~750 个点,通过 MATLAB 软件编程处理,求出数据点 (x_i, y_i, z_i) 到拟 合平面的距离 h;然后,进行误差分离得到其随机性误差成分 k;最后,通过 MATLAB 软件画出 2 个平面内在任取不同 y_i 值条件下沿 x 方向直线上的k 的统计分布直方图.零件 1,2 各取 21 个不同 y_i 值时,由 MATLAB 绘制的 k统计直方图的走势及拟合曲线基本上是一致的.

对零件 1,2 各举几例取不同 yi 值时,用 MATLAB 软件绘制的直方图,如图 5 所示.图 5 中:n 为频

数.由于取不同 y_i值时,k的统计直方图及拟合曲线走势基本一致.因此,从图 5 各个分布直方图及拟合曲线可以很直观的看出:零件 1,2 在取不同 y_i值的条件下,沿 x 方向直线上的 k 的分布基本服从正态分布,但是否严格服从正态分布,还需要进行验证.

表1 零件数据的 yi 值

Tab. 1 y_i values of components y_i 值 y_1 y_2 y_3 y_4 y_5 y_6 y_7 y_8 y_9 y_{10} 零件1 145.8 145.3 144.8 144.3 143.8 143.3 142.8 142.3 141.8 141.3 零件 2 201.1 200.6 200.1 199.6 199.1 198.6 198.1 197.6 197.1 196.6 y_i 值 y_{11} y_{12} y_{13} y_{15} y_{16} y_{17} y_{18} y_{19} y_{20} y_{14} y_{21} 零件1 140.8 140.3 139.8 139.3 138.8 137.8 137.3 138.3 136.8 136.3 135.8 零件 2 196.1 195.6 195.1 194.1 193.6 193.1 192.6 192.1 191.6 191.1 194.6 120 140 120 100 100 80 80 и 60 60 40 40 20 20 0 0 -12 3 -2 0 2 -3 -2 0 1 -5 -3 -11 3 k/μm k/μm (a) 零件1取 y=y3 (b) 零件 1 取 y=y₁₀ 140 120 120 100 100 80 80 и 60 60 40 40 20 20 0 0 -2 $^{-1}$ 0 1 2 3 -2 0 2 4 -5 -34 5 -6 -4 6 k/μm k/μm (c) 零件1取 y=y₁₆ (d) 零件1取 y=y20 120 100 90 100 80 70 80 60 60 50 и 40 40 30 20 20 10 0 0 -2 2 -5 -3 -2-10 1 2 3 4 5 -6 -4 0 k/μm $k/\mu m$

(f) 零件 2 取 y=y5



(g) ≪什2 取 y-y₁₀
 (h) ≪什2 取 y-y₁₆
 图 5 零件部分沿 x 方向直线上的 k 的统计分布直方图
 Fig. 5 Statistic distribution histogram of data k along x direction of components

3 数据的正态性验证

由于每组数据的提取点大于 700,可以采用 D 检验法^[10-11]检验数据的正态性分布,用 MATLAB 编 程导入数据进行计算并验证. 当零件 1 的 y_i 取不同值时,用 MATLAB 运算后得出的结果,如表 2 所 示. 由表 2 可知:零件 1 的 y_i 取任意值时,沿 x 方向直线上的随机误差 k 均服从正态分布. 按照概率论 与数理统计的相关知识,由于取不同 y_i 值时,沿各自 x 方向直线上每组数据相互独立且都服从正态分 布. 根据概率论与数理统计的定理^[9](有限个相互独立的正态随机变量(数据)的线性组合仍然服从正态 分布),即若相互独立的 $k_i \sim N(\mu_i, \sigma_i^2), 则 \sum_{i=1}^{n} k_i \sim N(\sum_{i=1}^{n} \mu_i, \sum_{i=1}^{n} \sigma_i^2).$ 因此,上述各组数据累加后,体现在 整个平面上的随机误差 k 也服从正态分布. 代入表 2 的数据,可求得均值和方差分别为 $\sum_{i=1}^{n} \mu_i = 0.0017$ mm, $\sum_{i=1}^{n} \sigma_i^2 = 0.0068$ mm². 即对于零件 1,整个平面数据 k 服从期望值为 0.0017 mm,方差为 0.0068 mm² 的正态分布. 同样,对零件 2 采用上述方法可以得出随机误差在该平面上服从正态分布. 表 2 零件 1 各组数据 k 正态检验结果

y取值	${\mathcal Y}_1$	\mathcal{Y}_2	${\mathcal Y}_3$	${\mathcal Y}_4$	y_5	${\mathcal Y}_6$	${\mathcal Y}_7$
是否服从正态分布	服从	服从	服从	服从	服从	服从	服从
μ/mm	0.000 261	0.000 099	0.000 058	-0.000154	-0.000031	-0.00003	0.000 009
σ^2 /mm^2	0.000 003	0.000 003	0.000 002	0.000 004	0.000 003	0.000 003	0.000 003
y取值	${\mathcal Y}_8$	\mathcal{Y}_9	${\mathcal Y}_{10}$	\mathcal{Y}_{11}	\mathcal{Y}_{12}	${\mathcal Y}_{13}$	${\mathcal Y}_{14}$
是否服从正态分布	服从	服从	服从	服从	服从	服从	服从
μ/mm	0.000 165	0.000 150	0.000 205	0.000 114	0.000 068	-0.000043	0.000 059
σ^2/mm^2	0.000 003	0.000 003	0.000 003	0.000 003	0.000 004	0.000 002	0.000 003
y取值	${\mathcal Y}_{15}$	${\mathcal Y}_{16}$	${\mathcal Y}_{17}$	\mathcal{Y}_{18}	${\mathcal Y}_{19}$	${\mathcal Y}_{20}$	\mathcal{Y}_{21}
是否服从正态分布	服从	服从	服从	服从	服从	服从	服从
μ/mm	0.000 251	-0.000038	0.000 000	-0.000464	0.000 008	0.000 730	0.000 304
σ^2/mm^2	0.000 003	0.000 003	0.000 002	0.000 004	0.000 004	0.000 005	0.000 004

Tab. 2 Normal test results about data k of component 1

根据上述方法进行推广,在相同的实验条件下,对现有的几个其他不同零件平面进行实验并验证, 也得到了平面度误差随机性成分服从正态分布的结论.这一结论的合理性具有理论依据:在加工设备、 人员、环境等工艺系统稳定的情况下加工出来的平面,会受到大量的相互独立的随机因素的影响,所以 其平面度误差是随机的.平面度误差可以看作是大量相互独立的随机变量的集合,根据中心极限定理, 当这些随机变量个数足够多时,它们的集合即平面度误差的分布趋于正态分布.

4 结束语

结合条件概率和全概率公式,按照由全局到部分再到整体-即面到线再到面的研究思路,通过对零件表面进行数据提取处理并验证,得出了零件表面上平面度误差随机性成分的模型服从正态分布的结论.本实验为研究其他各种工件表面的平面度误差的统计特征提供了一种新的思路方法,同时为确定平面度误差提取点数的计算机随机模拟仿真的应用提供了理论基础.

参考文献:

- [1] 机械科学研究院,北京市计量科学研究院.GB/T 1958-2004产品几何量技术规范(GPS)形状和位置公差 检测规 定[S].北京:中国标准出版社,2004:9-10.
- [2] 机械科学研究院,中国计量科学研究院.GB/T 11337-2004 平面度误差检测[S].北京:中国标准出版社,2004:1-6.
- [3] 黄丽玲,黄富贵.一种基于区域搜索的平面度误差评定方法[J].华侨大学学报:自然科学版,2009,30(5):506-508.
- [4] RAGHUNANDAN R, RAO P V. Selection of sampling points for accurate evaluation of flatness error using coordinate measuring machine[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 202(1/2/3):240-245.
- [5] 郑玉花,张琳娜. 新一代 GPS 的提取方案及其应用研究[J]. 机械设计与制造,2008(6):193-194.
- [6] BADAR M A, RAMAN S, PULAT P S. Intelligent search-based selection of sample points for straightness and flatness estimation[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering 2003,125:263-271.
- [7] 罗国勋,罗昕,蒋天颖.系统建模与仿真[M].北京:高等教育出版社,2011:125-142.
- [8] 董兆鹏.蒙特卡罗法在圆度误差提取点数确定问题中的应用[D].厦门:华侨大学,2012:51-53.
- [9] 盛骤,谢式千,潘承毅.概率论与数理统计[M].北京:高等教育出版社,2007:109-153.
- [10] 黄丽玲,黄富贵.直线度误差统计模型识别的实验方法[J].华侨大学学报:自然科学版,2013,34(1):1-4.
- [11] 俞钟行.D检验法[J].地质与勘探,1990,26(2):45-46.

Experiment on Flatness Error Statistical Characterization

WANG Yu, HUANG Fu-gui, LI Xing-wang

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: To the characteristics of flatness error identification problem, a research idea is put forward by the plane to the line and then the plane based on conditional probability and the probability theory. The actual planes information of two parts is extracted by the experiments using a three coordinate machine. Through the analysis and processing of experimental data, the flatness error statistical characteristic is identified. After the verification of the test method, the results showed that flatness error of the work piece surface exhibited the characteristics of a normal distribution under the stable processing conditions.

Keywords: flatness error; conditional probability; total probability; normal distribution

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:杨建红)

文章编号:1000-5013(2014)05-0492-06

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2014.05.0492

改进 PTS 技术和改进阈值限幅法 结合的 PAPR 降低方法

黄娴,谭鸽伟

(华侨大学信息科学与工程学院,福建厦门 361021)

摘要: 针对阈值限幅法误码率极大和部分传输序列(PTS)技术复杂度高的问题,提出一种改进的基于阈值 限幅和 PTS 技术的正交小波包复用(OWPM)系统高峰均功率比(PAPR)降低方法. 仿真结果表明:改进后的 算法性能得到提升,且经阈值限幅法和 PTS 技术联合处理后,能够在尽量不影响原系统误码率性能的前提 下,更好地降低系统 PAPR 值,同时也降低了系统计算复杂度.

关键词: 多载波调制;正交小波包复用;峰值平均功率比;阈值限幅;部分传输序列

中图分类号: TN 911.72 文献标志码: A

正交小波包复用(OWPM)系统由于存在某个时刻多个子载波以同相累加产生的高峰均功率比问题,从而要求发射端功率放大器具有非常大的线性区域.若这一要求无法满足,就会产生信号的畸变及子载波间的互调干扰和带外辐射,最终降低系统的性能^[1].因此,有必要寻求一种本质上解决信号高峰均功率比(PAPR)问题的方法^[2].目前,针对OWPM系统PAPR抑制问题,一种思路是从优化小波包调制部分改善系统性能方面入手^[3-6],而另一种思路则是将其他多载波调制系统特别是正交频分复用(OFDM)系统已采用的算法应用到OWPM系统中^[7].文献[8-9]所探讨的概率类方法便是应用该种原理进行处理,通常不会影响系统的误码率性能,但实现复杂度高.文献[10-13]研究的预畸变方法则是直接对经过调制后的时域信号作非线性变换,从而降低信号的峰均功率比,但由于该种变换法引入的是非线性操作,所以容易引起信号的畸变.OWPM系统的各种 PAPR 降低方法均有其优缺点,如果仅用一种算法并不能达到想要的降低效果,而为了达到某种理想效果,可能会导致另一方面性能大大降低^[14].传统 PTS 技术采用遍历搜索法进行相位因子寻优,计算复杂度高,实际应用困难;另一方面,传统阈值限幅法又会引起系统误码率性能的降低.因此,针对传统算法的高计算复杂度和低误码率性能问题,本文提出一种基于改进 PTS 技术和改进阈值限幅法的 PAPR 降低方法.

1 基本原理

基于阈值限幅和 PTS 技术的联 合算法,其发送端原理框图如图 1 所 示.需要注意的是,由于 PTS 技术是 一种线性操作,而阈值限幅法是一种 非线性处理过程,如果采取先对系统 进行阈值限幅法操作,而后再进行 PTS 处理,那么 PTS 算法中的重组 过程将使得阈值限幅算法原先的降



图 1 联合算法的发送端原理框图

Fig. 1 Transmitter's functional block diagram of joint algorithm

收稿日期: 2013-10-26

- **通信作者:** 谭鸽伟(1970-),女,讲师,主要从事 SAR 信号处理、多载波通信及智能天线赋形算法的研究. E-mail: tangewei70@163.com.
- 基金项目: 福建省自然科学基金计划资助项目(2013J01242)

低效果被破坏;同时由于非线性的优先处理有可能使得后续的线性操作加大信号的畸变程度,所以联合 算法的执行中只能采取先对信号进行 PTS 技术处理,再对处理后的信号进行阈值限幅法操作.

2 改进 PTS 技术

首先,长度为 N 的源数据向量 X 通过串并变换和数据分割,得到 V 个互不重叠的子向量.为保证 每个子向量的长度均为 N,需要在每个子向量的剩余子载波位置上填零,最终得到长度都为 N 的 V 个 子向量 X_i = {X_i⁰, X_i¹, ..., X_i^N}.因此,有

$$\boldsymbol{X} = \sum_{l=1}^{V} \boldsymbol{X}_{l}.$$

其中:V表示数据分组数.

然后,分别对各个子向量进行逆离散小波包变换(IDWPT),得到 V 个时域信号,即

$$x_l = \text{IDWPT}\{\boldsymbol{X}_l\}, \quad l = 1, 2, \cdots, V_l$$

最后,将这V个时域信号与加权系数bi进行加权和优化处理,得到需要传送的信号为

$$x = \sum_{l=1}^{V} b_l \cdot x_l. \tag{1}$$

式(1)中: $b_l = (b_l^0, b_l^1, \dots, b_l^{N-1}), l = 1, 2, \dots, V$,也称作子向量的旋转因子,它们统计独立,并且满足 $b_l^i = \exp(j\phi_l^i), \phi_l^i \in [0, 2\pi]$.由于 b_l 可随机选择,所以可通过选择一组最优的加权系数,即需满足

 $\{b_1, b_2, \cdots, b_V\} = \operatorname*{arg\,min}_{\langle b_1, b_2, \cdots, b_V \rangle} (\max_{1 \leqslant n \leqslant N} \mid \sum_{l=1}^{v} b_l \cdot x_l \mid^2),$

使其 PAPR 值最小进行传送.其中:arg min(•)表示函数取最小值时所用的判决条件.

PTS技术是一种线性处理方法,不会对信号产生畸变且能有效地降低 PAPR,但有个致命的缺点,就是计算复杂度高.因此,研究具有低计算复杂度的 PTS技术是十分有必要的.下面主要从探讨搜索最优相位因子角度来降低系统的计算复杂度.

遍历搜索法是一种最优搜索方法,但计算复杂度高,实际应用困难. Cimini 等提出了一种次优算法 Cimini 搜索法,该算法很好地解决了遍历搜索法高计算复杂度的缺点,但它也导致了 PAPR 抑制性能 的降低. 为解决 Cimini 搜索法 PAPR 抑制性能差的问题,文献[15]提出一种阈值搜索法. 该算法采用循 环式的搜索方式,在阈值取得较小的时候,可以避免相位因子的搜索陷入局部最优点,从而增加搜索到 最佳相位因子序列的概率,最终大大地提升信号 PAPR 抑制性能,但它也带来了系统复杂度的提高.

针对文献[15]的不足之处,文中提出一种改进的阈值搜索法,改进的阈值搜索法具体流程如图 2 所示.即在保证高 PAPR 抑制性能的前提下,通过增加"可接受概率"模块来减少系统循环操作,达到快速收敛最优值的效果,最终达到降低系统复杂度的目的.假设当前相位因子序列计算所得峰均比为 PA-PR,而 threshold 表示系统预先设定的阈值,则可接受概率为

$$P = \begin{cases} 1, & \lambda \leqslant 0, \\ \exp(-\frac{\lambda}{T}), & \lambda > 0. \end{cases}$$
(2)

式(2)中: λ =PAPR-threshold,而 *T* 为一变量,随着循环迭代次数的增加而降低.这里采用模拟退火中的几何冷却对 *T* 进行处理^[15],即 *T_{i+1}=nT_i*,其中:*i* 为循环迭代次数;*n*=(*T_f*/*T_s*)^{1/1}为*T* 的下降速率,*I* 为总循环迭代数,*T_s*,*T_f*分别为 *T* 的初始值和最终值.

算法原理:若 $\lambda \leq 0$,即 PAPR \leq threshold,则 P=1,即百分之百接受当前相位因子序列,停止搜索; 若 $\lambda > 0$,即 PAPR>threshold,则计算可接受概率值 $P=\exp(-\frac{\lambda}{T})$,同时随机产生一个在(0,1)之间均 匀分布的数 r.从式(2)可以看出:PAPR 的值与 threshold 的值差距越大,即 λ 的值越大,P 的值就越小. 所以,只要 λ 的值在一个可接受的范围内,即只要P 的值大于 0.5,那么 r < P 的概率就要大于r > P 的 概率,此时可接受当前相位因子序列,停止搜索;否则,继续搜索.

算法有如下2个主要步骤.





图 2 基于改进的阈值搜索法的联合算法

Fig. 2 Joint algorithm based on improved threshold searching method

步骤1 令所有的相位因子 $b_l = 1\{l=1,2,\dots,V\}$,计算此时的峰均比 PAPR₀.

步骤2 假设阈值 threshold=4 dB. 若 PAPR₀ \leq threshold,则搜索结束;否则进行循环搜索. 循环搜索过程如下:令 i=1, l=1, 其中 i为循环次数;翻转 $b_l = -b_l$,并重新计算峰均比 PAPR_{i,l}.若 PAPR_{i,l} \leq threshold,则搜索结束;否则随机产生一个在(0,1)之间均匀分布的数 r,并计算当前可接受

概率 $P = \exp(-\frac{\lambda}{T})$,如果 r < P,那么搜索结束,否则恢复 $b_l = -b_l$,同时翻转 $b_{l+1} = -b_{l+1}$,计算此时的 峰均比 PAPR_{*i*,*l*+1},…,直到优化完所有的相位因子 b_l , $l = 2, 3, \dots, V$.

余下步骤与原阈值搜索法相同,最终可得到优化的相位因子序列为 $\{b_1, b_2, \dots, b_V\}$ = min(PAPR₁, PAPR₂, ..., PAPR_V).

相比原阈值搜索法,改进的阈值搜索法添加了一个"可接受概率"模块,通过比较随机数 r 与可接受 概率 P 之间的大小来判断是否接受当前相位因子序列,防止原阈值搜索法在阈值选取过低的时候产生 的循环操作,达到快速收敛最优值的效果.这是一种在计算复杂度与抑制 PAPR 性能两者之间寻求平 衡的有效方法.

3 改进阈值限幅法

传统阈值限幅法的原理相当于对原始信号加一矩形窗,如果信号幅值小于矩形窗函数的幅值,那么 保持信号不变;否则,信号幅值等于矩形窗函数的幅值.发送端函数表达式为

$$y = \begin{cases} x, & |x| \leq T, \\ T, & |x| > T. \end{cases}$$
(3)

式(3)中:T代表预先给定的阈值.

该方法可大大降低系统的 PAPR 值,但由于信号经过无线信道后,引入的多种噪声或干扰使得接 收端几乎难以解调出原始信号,所以误码率极高.研究者多年来都亲睐于此种方法的主要是因为其算法 简单,易实现.然后,虽可通过提升系统其他部分的误码率性能来补偿该方法引起的大误码率性能降低, 但总体性能还是受到了一定的影响.

针对传统阈值限幅法接收端解调难的问题,提出一种改进的阈值限幅法.该算法将发送端函数表达 式定义为

$$\mathbf{y} = \begin{cases} x, & |x| \leqslant T, \\ \frac{x}{k}, & |x| > T. \end{cases}$$
(4)

为避免信号严重畸变,可将 T 取值为信号的平均功率,k 取值为信号的平均幅值.其中,对于 k 的取 值不宜过大,否则系统误码率升高.考虑到研究的大多传输信号为复数,仅靠单纯的加减运算难以确保 信号幅值降低,所以把乘除运算应用于算法中,达到算法目的.所以,只要两种方法选取得当,就可以保 证在降低系统 PAPR 的情况下既降低了系统计算复杂度,又不会产生过大的噪声干扰和带外辐射.

4 实验仿真结果

实验采用 Matlab 软件进行仿真分析. 仿真环境: 源信号序列随机产生, 总符号数为 10 000, 采用 4QAM 进行星座映射, 子载波数为 8, 同时选取 db4 小波作为小波包基. 由于信号峰均比的 CCDF 是在 发送端进行计算的, 不涉及信道部分, 所以算法的 PAPR 抑制性能不受信道的影响. 但为了验证算法的 BER 性能, 在模拟信道中加入了高斯白噪声进行仿真比较.

针对传统算法的高计算复杂度和低误码率(BER)性能问题,从算法的 PAPR 抑制性能、系统复杂 度和误码率 3 个方面进行定量分析比较,结果分别如图 3,4 和表 1 所示.其中:*R*_{BE}为误码率;*R*_{SN}为信噪 比;未处理表示该系统未添加任何 PAPR 抑制算法;文中算法即基于改进 PTS 技术和改进阈值限幅法 的 PAPR 降低方法;系统复杂度度量只考虑 PAPR 的计算次数.



	- F				
Tab. 1 Number	of loop	o iterations	of various	searching	methods

项目	分割子模块数	遍历搜索法	Cimini 搜索法	阈值搜索法 (阈值=4 dB)	改进阈值搜索法 (阈值=4 dB)
最小迭代数	4 8	24 28	59	5 9	2 2
最大迭代数	4 8	24 28	5 9	10 36	10 34

从图 3 可知:经联合处理后的系统具有比单独使用改进阈值限幅法或者 PTS 基于改进阈值搜索法 更好的 PAPR 抑制性能效果.

从图 4 可知:在 R_{SN} <5 dB 的情况下,各种 PAPR 降低算法的 BER 性能曲线几乎重合;而当 R_{SN} > 5 dB 时,提出的 PAPR 降低方法,其 BER 性能虽略低于 PTS 基于改进阈值搜索法但却与改进阈值限 幅法相当.

从表1可知:Cimini 搜索法、阈值搜索法和改进阈值搜索法的复杂度都比遍历搜索法有了大幅度的 降低.其中,对于某些系统,所提出的改进阈值搜索法仅需2次的迭代数,即可使其具有比原阈值搜索法 更低的复杂度而却不影响其 PAPR 抑制性能.

综上所述,相比单独使用 PTS 基于改进阈值搜索法或改进阈值限幅法,提出的一种基于改进阈值 限幅法和改进 PTS 技术的 PAPR 降低方法,能够在尽量不影响原系统 BER 性能的前提下,更加有效地 提升发送端 PAPR 抑制性能,是一种在 PAPR 抑制性能和 BER 性能两者之间寻求平衡点的有效方法.

由于所提出的算法是两种算法的联合处理过程,所以影响因素较多.在这里,只针对改进阈值限幅 法中所涉及到的参数 *k* 进行定量分析比较,结果分别如图 5,6 所示.

从图 5 可知:参数 k 越大,对信号的 PAPR 抑制性能越好;然而参数 k 越大,系统的 BER 性能越差, 说明这是以牺牲一定的 BER 性能来换取 PAPR 抑制效果的提升.对于参数 k 的具体选取方法还未有 效的解决办法,须待后续的研究.实验仿真过程中,经过多次尝试与仿真,最终以信号的平均幅值作为文 中算法的参数 k 值.

 R_{BE}





为了观察算法在不同噪声类型下的 BER 性能,分 别引入均匀分布白噪声和指数分布白噪声加以分析比 较,结果如图 7 所示.图 7 中:指数分布白噪声的参数 MU取值为1;而选取均匀分布白噪声的均值为0,方差 则由系统所给信噪比算出.从图 7 可知:加入噪声后,系 统的 BER 性能都有所下降,指数分布白噪声对系统的 影响最大,而高斯白噪声与均匀分布白噪声的 BER 性 能相当.

5 结束语

研究阈值限幅法和 PTS 技术的改进算法,同时对 改进后的两种算法进行级联合处理,提出一种改进的基 于阈值限幅和 PTS 技术的 OWPM 系统的 PAPR 降低



Fig. 7 BER performance comparison under different noises

方法.理论和仿真结果显示:改进后的阈值限幅法或者 PTS 技术相比改进前的算法都有了相对应的性能提升;而经阈值限幅法和 PTS 技术的联合处理,能够在尽量不影响原系统误码率性能的前提下,更好的降低系统 PAPR 值,同时降低系统计算复杂度.

参考文献:

- [1] AZURDIA-MEZA C A, LEE K, LEE K. PAPR reduction in SC-FDMA by pulse shaping using parametric linear combination pulses[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(12): 2008-2011.
- [2] 郝久玉, 耿化卿, 何要庄, 等. 小波包多载波调制峰均功率比问题研究[J]. 天津大学学报, 2006, 39(5): 605-608.

- [3] LIU Miao, WANG Ke, HE Yan, et al. Optimizing PAPR by linear programming in wavelet packet modulation[C]// 2010 2nd International Conference on Advanced Computer Control (ICACC). Shenyang: IEEE Press, 2010;227-231.
- [4] KUMBASAR V, KUCUR O. Better wavelet packet tree structures for PAPR reduction in WOFDM systems[J]. Digital Signal Processing, 2008, 18(6):885-891.
- [5] LE N T, MURUGANATHAN S D, SESAY A B. An efficient PAPR reduction method for wavelet packet modulation schemes[C]//Vehicular Technology Conference. Barcelona: IEEE Press, 2009:1-5.
- [6] ZAKARIA J,SALLEH M F M. Wavelet-based OFDM analysis: BER performance and PAPR profile for various wavelets[C]//IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications. Bandung: IEEE Press, 2012;29-33.
- [7] 王丽, 谌明, 卢满宏. 采用正弦压扩变换降低 OFDM 峰均比的方法研究[J]. 遥测遥控, 2010, 31(4): 22-24.
- [8] LIXIA M, MURRONI M. Peak-to-average power ratio reduction in multi-carrier system using genetic algorithms [J]. IET Signal Processing, 2011, 5(3): 356-363.
- [9] TORUN B,LAKSHMANAN M K,NIKOOKAR H. Peak-to-average power ratio reduction of wavelet packet modulation by adaptive phase selection[C] // IEEE 21st International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications. Instanbul; IEEE Press, 2010;105-110.
- [10] ROSTAMZADEH M, VAKILY V T, MOSHFEGH M. PAPR reduction in WPDM and OFDM systems using an adaptive threshold companding scheme[C]//IEEE 5th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices. Amman; IEEE Press, 2008;1-6.
- [11] ABDULLAH H N, SAHIB F, VALENZUELA A. Hybrid PAPR reduction technique for complex wavelet packet modulation system[C]//Wireless Days. Dublin: IEEE Press, 2012:1-3.
- [12] JIANG Tao, LI Cai, NI Chun-xing. Effect of PAPR reduction on spectrum and energy efficiencies in OFDM systems with class-A HPA over AWGN channel[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2013, 59(3):1-7.
- [13] WANG Y, WANG L H, GE J H, et al. Nonlinear companding transform technique for reducing PAPR of OFDM signals[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2012, 58(3):752-757.
- [14] 黄淑梅,朱瑾瑜,刘海燕.使用联合算法来降低 OFDM 系统的峰均比[J]. 计算机应用,2007,27(8):1874-1876.
- [15] KWON O J, HA Y H. Multi-carrier PAP reduction method using sub-optimal PTS with threshold[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2003, 49(2):232-236.

PAPR Reduction Method Based on Improved PTS Technology and Improved Threshold Clipping Method

HUANG Xian, TAN Ge-wei

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

Abstract: Aiming at the problem of large BER for the threshold clipping method and the high computational complexity for partial transmit sequence (PTS) technology, an improved peak to average power ratio (PAPR) reduction method based on the threshold clipping and PTS technology for orthogonal wavelet packet multiplexing (OWPM) system is put forward in the paper. Simulation results show that the improved algorithm compared with the original algorithm has the corresponding performance improvement, and by the combined treatment with threshold clipping method and PTS technology, in the premise of not affectting the original system BER performance, better reduce the system PAPR value, while reducing system computational complexity.

Keywords: multicarrier modulation; orthogonal wavelet packet multiplexing; peak to average power ratio; threshold clipping; partial transmit sequence

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:吴逢铁)

文章编号:1000-5013(2014)05-00498-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2014.05.0498

采用粒子群优化算法的液压挖掘机 高效空中运动轨迹规划方法

孙祥云1,邵辉1,赵家宏2

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院,福建 厦门 361021;
 2. 福建晋工机械有限公司,福建 晋江 362261)

摘要: 以铲斗姿势角为约束,利用三次多项式插值法进行轨迹规划,以铲斗尖运动的最短路径为目标,并以 各关节的最大运动速度为约束,用粒子群优化(PSO)算法对各关节的运动时间进行优化.实验数据和仿真结 果表明:经过粒子群算法优化后的轨迹规划方法可大幅度提高挖掘机空中运动的工作效率,并保证各关节运 动的平稳性,实现运动路径最优的目标.

关键词: 液压挖掘机;轨迹规划;粒子群优化算法;时间优化 中图分类号: TU 621; TP 271.31 文献标志码: A

液压挖掘机广泛应用于水利工程、交通运输、电力工程、矿山采掘等机械施工和救灾现场中.在施工 过程中,由于液压系统的高度非线性常使挖掘机出现短时间的停顿,甚至出现抖动,运动的不连续给挖 掘机司机的操作带来不便^[1-2].目前,机器人运动轨迹规划算法^[3]已经有了较全面的研究,主要针对工业 机器人和分散式机器人,且多以时间最优和系统能量最优为性能指标进行轨迹规划^[4-9].然而,无论是挖 掘机器人还是机械臂,都没有同时以轨迹最短为目标进行规划研究^[10-11].因此,本文提出基于粒子群算 法(PSO)的液压挖掘机空中运动的轨迹规划方法.

1 系统概述

图 1 为反铲斗液压挖掘机的结构,其结构可分 为工作装置、上部转台和行走装置 3 个部分.其中, 工作装置(由动臂、斗杆和铲斗铰接组成)直接完成 挖掘任务,动臂的起落、斗杆的摆动和铲斗的转动则 由液压缸驱动完成^[12].文中采用福建晋工机械有限



图 1 液压挖掘机结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of hydraulic excavator

公司生产的 JG915 型挖掘机,其结构参数如表 1 所示. 表 1 中:L 为长度;s 为行程; ϕ 为转角范围; L_{max} 为最长缸长; L_{min} 为最短缸长; v_{max} 为最大速度.

1 ab. 1 Parameters of hydraulic excavator							
名称	L/mm	s/mm	$\psi/$ (°)	$L_{ m max}/ m mm$	$L_{ m min}/ m mm$	$v_{ m max}/$ (°) • s ⁻¹	
动臂	4 500	990	$-64 \sim \! 48$	2 490	1 500	21	
斗杆	2 500	1 175	$28 \sim 151$	2 875	1 700	37	
铲斗	1 300	885	$-42 \sim 143$	2 262	1 377	28	

表1 液压挖掘机性能参数

收稿日期: 2013-12-10

通信作者: 邵辉(1973-),女,讲师,主要从事机器人控制、运动规划、智能控制、非线性系统 LPV 建模的研究. E-mail: shaohuihu11@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61203040);福建省泉州市科技计划项目(2013Z34);华侨大学引进人才科 研启动项目(12Y0306)

研究液压挖掘机的空中运动,即假定机体与底座之间 无相对转动,且铲斗从空中的任意一点运动到挖掘起始点. 因此,挖掘机的运动学模型与平面三自由度机械臂相似.取 动臂和车身的链接点(x1,y1)为坐标原点,挖掘机的平面坐 标系,如图 2 所示.图 2 中: θ_1 , θ_2 , θ_3 分别为动臂、斗杆和铲 斗的关节角度;铲斗的角度 θ_3 由铲斗姿势角 $\theta_{1,2,3}$ 确定, $\theta_{1,2,3} = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3^{[5]}.$

挖掘机轨迹规划 2

2.1 轨迹规划方法

机器人某关节在运动开始时刻 to=0 时的关节角度值 为 θ_0 ,在 t_f 时刻运动到目标值 θ_f .设该关节在运动开始点和 到达目标点时的速度均为 0,则可确定唯一的三次多项式通式[13],即



Fig. 2 Plane coordinate system of hydraulic excavator

$$a_1$$

 y_4
 y_4
 y_4
 y_4
 y_4
 x_4
 x_5
 x_5

$$\theta(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3.$$
⁽¹⁾

挖掘机的运动轨迹需要满足两个必要条件[6-7]:1)规划出的轨迹必须在机械结构的可达范围内;2) 随着铲斗尖运动轨迹的变化,铲斗姿势一定要是可行的.因此,采用的轨迹规划方法是结合铲斗姿势角 约束的三次多项式法,即

$$\theta_1 = a_{1,0} + a_{1,1}t + a_{1,2}t^2 + a_{1,3}t^3, \qquad (2)$$

$$\theta_2 = a_{2,0} + a_{2,1}t + a_{2,2}t^2 + a_{2,3}t^3, \qquad (3)$$

$$\theta_3 = \theta_{1,2,3} - \theta_1 - \theta_2, \qquad (4)$$

$$\theta_{1,2,3} = \theta_{1,2,3,\max} - a_{1,2,3}t.$$
(5)

式(4)中:θ.2.3的范围因挖掘点到机身的距离不同而有所变化,从实际操作的经验数据中选取,有

$$\begin{array}{c}
 a_{1,0} = \theta_{1,0}, \\
 a_{1,1} = 0, \\
 a_{1,2} = 3 \frac{(\theta_{1,f} - \theta_{1,0})}{t_{f,1}^2}, \\
 a_{1,3} = -3 \frac{(\theta_{1,f} - \theta_{1,0})}{t_{f,1}^3}; \\
 a_{2,0} = \theta_{2,0}, \\
 a_{2,1} = 0, \\
 a_{2,2} = 3 \frac{(\theta_{2,f} - \theta_{2,0})}{t_{f,2}^2}, \\
 a_{2,3} = -3 \frac{(\theta_{2,f} - \theta_{2,0})}{t_{f,2}^3}; \\
 \end{array}$$
(6)
$$(6)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(8)$$

点的关节角度;t₁,t₁₂,t₅₃分别为动臂、斗杆、铲斗的运动时间.由于三次多项式法可以满足液压挖掘机 在空中运动时对于平稳性的要求,并可以有效地结合挖掘姿势角来进行规划,所以没有再选用高次多项 式法来规划轨迹.

а

2.2 时间最优求解

式(6)~(8)为三次多项式规划方法中未知系数的解,是以各个关节运动时间为前提条件的.为了使 挖掘机的动臂、斗杆和铲斗在最短的时间内完成空中运动得到最优轨迹,需要以轨迹最短为目标,以最 大关节速度为约束来优化各个关节的运动时间.其约束方程为

$$f(t) = \min L(t),$$

s.t. $\max\{|v_1|\} \leqslant v_{1,\max}, \quad \max\{|v_2|\} \leqslant v_{2,\max}, \quad \max\{|v_3|\} \leqslant v_{3,\max}.$ (9)

式(9)中:L(t)为铲斗尖完成运动的路径长度,通过运动学方程使其转换成为与运动时间相关的函数; |v₁|,|v₂|,|v₃|分别为动臂、斗杆和铲斗在各个运动时间点的速度集合;v_{1,max},v_{2,max},v_{3,max}分别为动臂、 斗杆和铲斗的最大关节速度.三次多项式法不具备优化算法的性质,因此,这里采用粒子群优化算 法^[9,14]对各关节的运动时间同时进行优化以得到最优的运动轨迹.

粒子群优化算法(PSO)是一种基于群体智能的优化方法,该算法模拟鸟群飞行觅食的行为来达到 最优.在 PSO 中,种群的每个成员称为粒子,每个粒子在多维空间内进行飞行,每个粒子的初始位置和 速度是随机产生的,并不断地根据粒子本身的经验、整个种群的经验来更新自己位置的速度.优化对象 抽象为粒子 *i*,并延伸到 N 维空间,粒子 *i* 在 N 维空间的位置表示为矢量 *x_i*,飞行速度表示为矢量 *v_i*,每 个粒子 *i* 都有一个由目标函数决定的适应值(fitness value),每个粒子的最优位置为 pBest,整个群体中 所有粒子的最优位置为 gBest.基本粒子群算法粒子 *i* 的进化方程可描述为

$$v_{i,j}^{k+1} = w \times v_{i,j}^{k} + c_1 \times r_1 \times (p_{i,j} - x_{i,j}^{k}) + c_2 \times r_2 \times (p_{g,j} - x_{i,j}^{k}),$$
(10)

$$x_{i,j}^{k+1} = x_{i,j}^k + v_{i,j}^{k+1}.$$
(11)

式(10)~(11)中: $v_{i,j}^{k}$ 为第i个粒子在第k次迭代时的飞行速度的第j维分量; $x_{i,j}^{k}$ 为第i个粒子在第k次迭代时的飞行位置的第j维分量; $p_{g,j}$ 为群体最好位置 gBest 的第j维分量; $p_{i,j}$ 为粒子i最好位置 pBest 的第j维分量; r_{1} , r_{2} 为随机数; c_{1} , c_{2} 为权重因子;w为惯性权重.

对挖掘机的动臂、斗杆和铲斗的运动时间进行优化,优化的目标函数为式(9), $t_{f,1}$, $t_{f,2}$ 和 $t_{f,3}$ 是待优化的未知量,即粒子 i 的 $x_{i,j}^{k}$;同时,系数 $a_{1,0}$, $a_{1,1}$, $a_{1,2}$, $a_{1,3}$, $a_{2,0}$, $a_{2,1}$, $a_{2,2}$, $a_{2,3}$ 和 $a_{1,2,3}$ 也是待求解的未知数,即以 $t_{f,1}$, $t_{f,2}$ 和 $t_{f,3}$ 为因变量的函数.

为了使关节速度尽快收敛到约束条件内,只选择符合约束条件的粒子进行迭代寻优.通过优化出的 各个关节运动时间可得到空中运动中每一个关节变量的表达式,再通过挖掘机的运动学方程得到对应 时间内各个关节的位姿,然后计算每次迭代优化出的粒子对应斗尖运动的路径长度,长度最小所对应的 那组粒子即为各个关节的最优运动时间.具体有以下 8 个步骤.

步骤1 初始化种群,即在3个关节运动时间的搜索空间中随机产生 *m*×3个粒子,粒子的最大迭 代速度为 *v*_{max},最大迭代次数为 *k*_{max},迭代次数为 *k*.

步骤2 根据产生的 m 组粒子,即[$t_{f,1}$, $t_{f,2}$, $t_{f,3}$]代入式(6)~(8)中,求解出系数 $a_{1,0}$, $a_{1,1}$, $a_{1,2}$, $a_{1,3}$, $a_{2,0}$, $a_{2,1}$, $a_{2,2}$, $a_{2,3}$, $a_{1,2,3}$.

步骤3 将系数代入式(2)~(5)中,求解出各个关节变量的三次多项式,并对时间求导,得到各个关节的速度函数,留下符合最大速度约束的函数对应的*n*(*n*≤*m*)组粒子.

步骤4 对符合最大速度约束条件的每组粒子代入式(2)~(5)进行求解,再根据逆运动学公式求出各个关节运动的位置,从而得到每组粒子对应的各关节运动轨迹长度,取所有组中轨迹长度的最小值来设置 *p_{i,j}和 p_{g,j}*.

步骤 5 对步骤 3 留下的 n 组粒子进行迭代更新,使每个关节的运动时间尽量减小,并通过步骤 4 不断更新 *p*_{i,i}和 *p*_{s,i}.

步骤 6 根据式(10)~(11)迭代更新每组粒子 *i* 的速度和位置,如果 $p_{g,j}$ 的适应度值比 $p_{i,j}$ 的适应 值高,则用 $p_{g,j}$ 取代 $p_{i,j}$;反之,则用 $p_{i,j}$ 取代 $p_{g,j}$.

步骤7 满足终止条件则算法结束,否则转入步骤2继续迭代优化.

步骤8 完成各关节的运动时间优化,3个关节的整体运动时间取 t_{f,1},t_{f,2},t_{f,3}中的最大值,各关节的运动时间达到各自优化的运动时间就停止运动,可同时满足其运动学和关节变量的约束. PSO 的初始化过程由随机数开始,在计算步骤3时,若无符合条件的粒子留下,需要重新调整粒子的取值范围.

2.3 仿真结果分析

选取初始点(5,5.2,70°)和终点(7.5,-1.5,30°),采用晋工机械 JG915 型挖掘机的参数进行仿真 验证.用有挖掘姿势角约束的三次多项式法规划出运动轨迹,再经过 PSO 迭代优化出的各关节运动时 间 $t_{f,1}, t_{f,2}, t_{f,3}$ 分别为 4.961 6,4.004 6,4.774 9 s,与优化前的运动时间相比分别缩短了 0.038,0.995, 0.225 s.优化之后的各关节位置和速度曲线,如图 3~4 所示.由图 3~4 可知:各关节运动的最大速度 分别趋近 $v_{1,max}, v_{2,max}, \eta_{3,max}$,同时各关节的位置变化无起伏、较平滑.



图 3 各关节位置曲线

Fig. 3 Position curves of hydraulic excavator joints Fig. 4

优化后的铲斗运动轨迹的长度为 7.345 6 m,比优化前的运动轨迹的长度减少了 0.184 5 m.经过

粒子群算法优化后的各关节的运动轨迹对比,如图 5 所示. 斗杆和铲斗的运动轨迹有明显的缩短,由于动臂的运动时 间优化前后变化不大,所以运动轨迹几乎没有变化.

各关节的缸长曲线,如图 6 所示.由图 6 可知:铲斗缸 的缸长曲线只出现了 1 次轻微波动(图 6 右下角的放大 图),这是在铲斗姿势角的约束下无法避免的,但动臂缸和 斗杆缸的缸长曲线均没出现起伏变化.

液压挖掘机从空中起始点运动到挖掘目标点的动态 图,如图7所示.由图7可知:3关节在整个空中运动中没 有往复运动,即运动过程中各关节没有抖动出现.

实验数据和仿真图表明:在铲斗姿势角约束下的轨迹 规划法经过粒子群算法的优化后可以大幅度提高挖掘机空 中运动的工作效率,并保证各关节运动的平稳性,实现运动 路径最优的目标.



图 5 优化前后的轨迹对比曲线 Fig. 5 Trajectory comparison before and after optimization



Fig. 6 Length curves of hydraulic excavator joints' cylinders

图 7 3关节的动态图 Fig. 7 Motion dynamics of 3 joints

3 结束语

提出一种符合铲斗姿势约束条件的液压挖掘机空中运动的轨迹规划方法,可以满足其在作业过程 中的平稳性,并能够提高其空中运动的效率.从仿真结果可以看出:液压挖掘机在运动时间达到最优的 同时,各关节的运动轨迹是平稳的,并且各关节的液压缸缸长变化能够证明其作业过程中没有出现往复 运动.该方法是单纯以运动学分析为基础的,鉴于挖掘机液压系统存在强非线性的特性,还需要结合挖 掘机液压模型的研究和仿真分析,并合理地加入一些非线性控制方法[15].

参考文献:

- [1] 华靖. 液压挖掘机反铲斗杆回摆运动问题分析及解决方法[J]. 矿山机械,2006,34(5):63-64.
- [2] SHAO Hui, YAMAGUCH T, YAMAMOTO H. Bucket trajectory planning of hydraulic excavator[C]//12th Robotics Symposium. Hakone: [s. n],2007;354-359.
- [3] 蔡自兴. 机器人学[M]. 北京:清华大学出版社, 2000: 265-280.
- [4] 肖文皓,白瑞林,许凡,等.基于信赖域算法的机械臂时间最优轨迹规划[J].传感器与微系统,2013,32(6):77-80.
- [5] 黄钢,李德华,杨捷.机械臂最优运动规划问题的混合粒子群算法[J].计算机科学,2009,36(11):232-234.
- [6] LIAO Yi-huan, LI Dao-kui, TANG Guo-jin. Motion planning for vibration reducing of free-floating redundant manipulators based on hybrid optimization approach[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(4):533-540.
- [7] 潘双夏,季炳伟,童永峰.基于操作平稳性的液压挖掘机轨迹规划方法[J].浙江大学学报:自然科学版,2006,10 (8):1311-1314.
- [8] 任志贵,陈进,贺康生,等.基于运动学分析的挖掘机器人轨迹规划新方法[J].中国工程机械学报,2012,10(2):150-155.
- [9] 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.
- [10] 邵辉,胡伟石,罗继亮,等.自动挖掘机的动作规划[J].控制工程,2012,19(4):594-597.
- [11] SHAO Hui, YAMAMOTO H, SAKAIDA Y, et al. Automatic excavation planning of hydraulic excavator[C] // International Conference of Intelligent Robot and Application. Wuhan: [s. n.], 2008:1201-1211.
- [12] 林慕义,史青录.单斗液压挖掘机构造与设计[M].北京:冶金工业出版社,2001:23-25.
- [13] 李团结. 机器人技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 116-119.
- [14] 李士勇.智能优化算法原理与应用[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2012:82-86.
- [15] 邵辉,胡伟石,罗继亮.基于 LPV 模型的鲁棒 PI 控制方法[J].北京工业大学学报,2012,38(12):1761-1765.

Efficient Air Motion's Trajectory Planning Method of Hydraulic Excavator Based on Particle Swarm Optimization Algorithm

SUN Xiang-yun¹, SHAO Hui¹, ZHAO Jia-hong²

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Jingong Machinery Company Limited, Jinjiang 362261, China)

Abstract: Satisfying the constraint condition of bucket attitude, cubic polynomial interpolation method is used for the trajectory planning on hydraulic excavators. Furthermore, particle swarm optimization (PSO) algorithm is employed to optimize the time of joint motion with the maximum joints' velocity constraints, ensuring a shortest motion trajectory of bucket tip. The experimental data and simulation results show that the proposed trajectory planning algorithm greatly improves the working efficiency of excavator motion, guarantees the smooth movement of each joint, and obtains the optimal motion path in free space.

Keywords: hydraulic excavator; trajectory planning; particle swarm optimization algorithm; time optimization

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 吴逢铁)

文章编号:1000-5013(2014)05-0503-06

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2014.05.0503

Mealy 机的实时系统调度方法

汲洋弘康,王飞,余婷

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为得到实时并发系统的最优运行路径,提出一种基于 Mealy 机建模的最优调度方法.通过分析以 P-time Petri 网建模的实时系统,并用 Mealy 机建立中库所及其对应时间的关系,得到在满足系统非死锁、非阻塞特性下的最优路径.基于这种方法,可获得 P-time Petri 网的最优合法序列.通过实例验证表明:所提出的方法具有较好的效果.

关键词: 实时系统; Mealy 机; P-time Petri 网; 调度分析 中图分类号: TP 271.8 **文献标志码:** A

在实时领域中,调度分析是一个非常重要的研究方向. 自从 20 世纪 70 年代 Liu 等^[1]提出调度分析 模型以来,研究人员针对不同的系统计算模型和不同的调度策略,提出了大量的调度分析方法. 由于很 多实际过程都可以抽象为离散事件动态系统过程,合理利用有限自动机理论进行建模是实现过程自动 化的关键^[23]. 近年来,虽然结合离散事件系统模型进行调度分析的方法越来越多^[46],但是在对实时系 统进行调度时,无论是自动机还是 Petri 网都很容易陷入死锁或阻塞的状态. Petri 网因其所提供的理论 信息非常丰富,而被广泛应用于计算机科学、控制科学、系统科学等交叉领域. Tarek 等^[4]为了寻找 Petri 网的最优激发序列,结合最优原则和线性规划,提出了一种避免死锁的改进方法. 苏国军等^[5]对半导 体制造系统,提出了基于分层着色时间 Petri 网模型的分时段优化调度方案,克服了模型规模膨胀的缺 陷. Bonhomme^[7]针对实时系统的 Petri 网建模问题,提出了"Firing Instant Notion",给出满足安全性的 P-TPN 对实时系统进行建模分析的方法,但并未涉及算法的分析. 解决 Petri 网模型中主干路径的寻优 问题,有利于对复杂系统进行分析^[8]. 基于此,本文提出一种基于 Mealy 机建模的最优调度方法.

1 基本概念

TPN(time Petri-nets)是为了解决 PN 中某些没办法被很好描述的约束而提出的,用来证明和详述 并发系统的形式化工具^[9].禁止 TPN 中会超过终止期限的变迁发生,对于系统正常运行是非常重要 的^[10].使用 TPN 可以允许在其组成部分的执行期间上引入时间约束,而 P-TPN 则是在其库所上引入 了静态时间区间^[11].

定义 $1^{[7]}$ P-TPN 的形式化定义由一个二元组(N_r ; I)给定,其中

1) N_r 是普通的 Petri 网.

2) *I*=[*a_i*,*b_i*],*b_i≥a_i*,定义为在库所中一个静态操作时间区间.只有当 token 在对应的区间[*a_i*,*b_i*] 中时,token 在这个库所的输出变迁上才被认为是使能的.因此,当其操作时间最终变为 *b_i* 时,就不得不 离开这个库所.在时间 *b_i* 后,token 将会失去活性,并且不再考虑变迁的使能,从而导致系统阻塞.

实际上,每个 token 还存在一个动态区间,描述系统在整个正常运行过程中的总和时间区间[11].

定义 2^[12] 设 *N*=(*S*,*T*;*E*,*M*₀)为1个 Petri 网,*s*∈*S*. 若存在一个正整数 *B*,使得 \forall *M*∈*R*(*M*₀):

收稿日期: 2013-11-02

通信作者: 王飞(1977-),男,副教授,主要从事离散事件系统、资源优化配置的研究. E-mail:feiw545@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61203040);福建省自然科学基金资助项目(2011J01352)

 $M(s) \leq B$,则称库所 s 为有界的,并称满足此条件的最小正整数 B 为库所 s 的界,记为 B(s).即 $B(s) = \min\{B | \forall M \in R(M_0) : M(s) \leq B\}$.其中:当 B(s) = 1 时,则称库所 s 为安全的.

2 用 Mealy 机建立时间关系模型

P-TPN 中,库所上的时间是本质研究对象^[7],不仅要考虑 token 在库所中的活性,还要考虑使系统 正常运行的时间约束.基于文献[7]中的安全 Petri 网模型,分析其库所及其对应时间约束的关系.通过 将 Petri 网的变迁转换成 Mealy 机的输出集合 Δ,并把时间约束边界作为 Mealy 机的输入集合 Σ,可以 简单直观的得到主干路径的调度结果.

基于一个 token,考虑不同的库所和变迁,可以将 P-TPN 网状结构分成 5 类,如图 1 所示.由图 1 可知:图 1(e)由于缺少 token,需要与其他情况相结合才有意义;图 1(b),(e)组合因所形成的 Petri 网在选择变迁时具有不确定性,故不予以考虑;将图 1(a)看作串联型结构,图 1(c),(d)结合为一个并联型结构,便可以确定一个库所只对应一个输出变迁.



图 1 P-TPN 的 5 种分类情况

Fig. 1 Five kinds of classification in P-TPN

2.1 用 Mealy 机表示 P-TPN 的运行序列

2.1.1 串联结构的 P-TPN 一个有界的 P-TPN, $N = (N_r; I)$, 其中: $N_r = (P, T, E)$; $P = \{P_i | i = 0, 1, 2, 3, ..., n\}$; $T = \{t_j | j = 0, 1, 2, 3, ..., n-1\}$; $I = [a_i, b_i]$. 此时, 只有一个 token 在 P_0 , 且对任意的 P_i 只有一个与其对应的输入变迁 t_{i-1} 和输出变迁 t_i ,则在这个 Petri 网运行过程中,转移状态与时间极值的关系可以转化成一个 Mealy 机. 即 $A = (Q, \Sigma, \delta, q_0, \Delta, \varphi)$, 状态 Q 为 P 的幂集; $\Sigma = \{a_i, b_i | i = 0, 1, 2, 3, ..., n\}$; $\delta(q_i, a_i) = q_{i+1} \bigcup \delta(q_i, b_i) = q_{i+1}$; $\Delta = \{t_i | i = 0, 1, 2, 3, ..., n-1\}$; $\varphi(q_i, a_i) = t_i \bigcup \varphi(q_i, b_i) = t_i$.

由定义1可知:在 P_i 中的 token,必须在 $[a_i,b_i]$ 时间段内向下一个变迁转移,故可以用 Σ 来表示所选择的时间点集合.由于时间点的不确定性,使所得到的输入集合 Σ 包含许多元素,从而在进行相关描述时导致状态空间爆炸问题.因此,针对考虑的最优调度序列,在进行分析时简化不同时间点所产生的影响,用时间约束边界作为 Mealy 机的输入集合 Σ .根据定义 1,对应于这种结构的 P-TPN 模型,假定系统可以正常运行,即每个库所对应的变迁都可以触发,则可用 Mealy 机中的 Q表示网中的库所, δ 表示由库所中的 token 在时间极点处进行的转移, φ 表示当前库所对应的输出变迁.此时,可得到用于描述库所及其对应激发时间关系的 Mealy 机,如图 2 所示.

任意有界的 Petri 网都可以用相应的有限自动机来模拟^[11].当用 P-TPN 描述实时系统时,由于库 所 P_i 中的 token 只能在[a_i,b_i]区间段内发生,那么其变迁只是为了进一步体现状态转移的路径^[7].因 此,可以用区间极点作为输入集合 Σ,各库所对应的输出变迁作为输出集合 Δ,构造带输出的 Mealy 机 模型,描述系统中各个环节静态区间极点的线性组和,即此时系统正常运行总时间为

$$t_s \in \left[\sum_{i=0}^n a_i, \sum_{i=0}^n b_i\right].$$

那么,所构造的 Mealy 机的输出就对应着原 T-TPN 的正常运行序列.



图 2 Mealy 机状态转移图

图 3 并联结构的 P-TPN 模型

Fig. 2 Mealy machine state transition diagram Fig. 3 Parallel structure of the P-TPN model P_1, P_2 中都含有 token,可认为系统从状态 $\{P_0\}$ 经过时间 $T_0 \in [a_0, b_0]$ 过渡到状态 $\{P_1, P_2\}$,之后对应 2 个变迁 t_1 和 t_2 ,此时存在以下 2 种情况.

1) $[a_1, b_1] \cap [a_2, b_2] \neq \emptyset$. 设 $[a_1, b_1] \cap [a_2, b_2] = [a_2, b_1], t_1$ 可以先触发到达状态 $\{P_3, P_2\}$,再触发 t_2 到达状态 $\{P_3, P_4\}$;或t₂ 先触发, t₁ 后触发;也可以在交集内 t₁, t₂ 同时触发,直接到达状态 $\{P_3, P_4\}$. 此时,可以将状态与时间的关系转换成对应的 Mealy 机,如图 4 所示.由图 4 可知:在分时触发的情况 下,其状态图形非常复杂,且还要考虑输入小于零所导致无法触发的情况;左右两种构造情况,所描述的 时间线性组合是一致的.



图 4 并联结构 P-TPN 模型的状态转移图

Fig. 4 State transition diagram in parallel structure of the P-TPN model

2) $[a_1, b_1] \cap [a_2, b_2] \neq \emptyset$. 若 $a_2 > b_1, t_1$ 先触发到达状态 $\{P_3, P_2\}$,则可能的变迁激发序列是 $t_0 t_1 t_2$; 若 $a_1 > b_2, t_2$ 先触发到达状态 $\{P_1, P_4\}$,则可能的变迁激发序列是 $t_0 t_2 t_1$,用 Mealy 机描述如图 5 所示. 由图 5 可知:P-TPN 中多个库所对应同一输入变迁的情况,反映

到自动机上的对应状态时,可以用这几个库所的并集来表示.

由于在 P-TPN 中,控制系统运行的是库所中的活性 token. 在经过同一变迁时,可以同时进入 2 个不同的库所中,同样的进 程反映到自动机上时,只是一个状态向另一个状态的转移.如果 不对库所进行合并,而是分成 2 种状态,就会出现非确定型自动 机,这与 P-TPN 相悖.因此,对库所进行正确的合并,可以有效的 还原原系统中时间与转移状态之间的关系.

2.1.3 特殊并联型结构的 P-TPN 带控制环节的 P-TPN 模型, 如图 6 所示. 对于图 6 的并发系统,只能让其中一个库所中的 to-ken 进入等待,避免产生死锁.

设此时满足 $[a_1, b_1] \cap [a_2, b_2] \neq \emptyset$. 当变迁 t_1 和 t_2 同时触发 时,为了争夺在 P_{control} 中的唯一资源(token),就会造成 P_1, P_2 互



图 5 不满足[a₁,b₁]∩[a₂,b₂]≠Ø时的 并联结构 P-TPN 模型的状态转移图 Fig. 5 State transition diagram in

parallel structure of the P-TPN model doesn't meet $[a_1, b_1] \cap [a_2, b_2] \neq \emptyset$ 相等待的现象,使系统陷入死锁状态^[7].因此,在同一时刻,只能激活变迁 t₁ 或 t₂,令其中一个库所中的 token 进入等待的状态.

由图 5 可知:若不对其进行简化,则会在第 5 次 转移时生成 32 个不同情况的{*P*₅,*P*₆},从而加大了 对系统进行分析的难度.

2.2 满足的约束

通过上述方法,虽然可以构造出反映变迁激发顺序的自动机模型,但并不能保证构造的模型不会 发生死锁、阻塞等情况.为了使系统正常运行,需要 对各个静态区间进行讨论,采用递归的思想,简化对





系统正常运行所要满足约束的描述.因此,对使系统陷入死锁、阻塞以及使 token 失去活性的激发序列进行排除,根据原有 P-TPN 的模型,有以下 3 种情况.

1) 串联型(图 2),满足每个库所中的 token 都在使能区间内触发转移就可以保证系统正常运行.

2) 并联型(图 3),满足到达最终变迁 t_f 前,每条直线型支路的总区间交集不为空.即 $[a_1+a_3,b_1+b_3] \cap [a_2+a_4,b_2+b_4] \neq \emptyset$,之后每条直线型的约束满足情况 1).

3)存在控制环节的并发系统(图 6),要先满足与控制环节相连的每条支路都安全运行,避免死锁. 即{ $[a_1+a_3,b_1+b_3] \cap [a_2,b_2]$ } U { $[a_1,b_1] \cap [a_2+a_4,b_2+b_4]$ } $\neq \emptyset$,最后满足情况 2).

在直线型结构中,若 token 经过库所时都保持活性,则系统一定可以正常运行,这也是系统正常运行的基础.在分支型结构中,多条支路对应同一 t_f 的情况,由定义1可知: t_f 之前的库所中,都要存在一个没有失去活性的 token, t_f 才能被激发.由于各支路在到达 t_f 前相对独立,互不影响,为了使系统正常运行,就需考虑每条支路到达 t_f 前的库所时,所用的时间总和,以及在这个库所中存活的时间.当存在控制器时,与控制器相连的可并发环节就类似于两条互不影响的直线型,变迁 t_1 , t_2 不能同时触发,如图 6 所示.这就必定会让某条支路上的 token 陷入等待的状态,且在等待中 token 不能失去活性.此时,其局部最小值为这两条支线上与控制器相连环节的区间极小值的总和 $t_{min} = a_1 + a_3$ 或 $t_{min} = a_2 + a_4$.

3 实时系统的调度方法

找出系统的约束条件,虽然可以得到反映系统正常运行时间的自动机模型,但通过图2可知,即使 是最简单的直线型,构造成自动机模型时也会使所得到的状态激增.因此,在满足系统正常运行的条件 下,对系统进行并行考虑并简化模型,可以缓解状态空间爆炸的问题.

3.1 并行考虑

图 3 中:最短时间为各支路可运行时间交集的最小值. 假设 $a_1 + a_3 < a_2 + a_4$ 且为安全 Petri 网,则 [$a_0 + a_1 + a_3, b_0 + b_1 + b_3$] \cap [$a_0 + a_2 + a_4, b_0 + b_2 + b_4$] = [$a_0 + a_2 + a_4, X$](X 不用考虑),对应 2 条支路 分别有 2 个极小的运行时间: $a_0 + a_1 + a_3$ 和 $a_0 + a_2 + a_4$. 若取最短运行时间 $T_{\min} = a_0 + a_1 + a_3$,可知 T_{\min} 并不在交集内部,库所 P_3 中 token 有活性, P_4 中 token 没有活性或不存在 token,即系统无法触发 t_f ; 反之,取 $T_{\min} = a_0 + a_2 + a_4$ 满足交集的约束,使 P_3 和 P_4 中同时具有活性 token, t_f 可以触发.因此,在 进行实际分析时,可以只考虑交集内部的上下界,简化对问题的分析.

3.2 模型简化

为了得到最短运行时间的自动机模型,需要对Σ进行简化,剔除静态区间极点的线性组合中非极 小的序列.在确定 Petri 网为安全网时,其具体的情况有以下3点.

1) 若原 P-TPN 呈直线型,则只需消除 Σ 中的 b_i . 此时, $\Sigma = \{a_i | i = 0, 1, 2, 3, \dots, n\}; \Delta = \{t_i | i = 0, 1, 2, 3, \dots, n\}; \Delta = \{t_i | i = 0, 1, 2, 3, \dots, n-1\}; \delta(q_i, a_i) = q_{i+1}; \varphi(q_i, a_i) = t_i$. 可以得到系统最短运行时间 $T_{\min} = \sum_{i=0}^{n} a_i$,及其变迁触发 序列 $t_0 t_1 t_2 t_3 \cdots t_{n-1}$.

2) 若原 P-TPN 呈并联型,可得 2 种情况. 当变迁 t₁,t₂ 同时触发时,设[a_{1,2},b_{1,2}]=[a₁+a₃,b₁+

 b_3] \cap [$a_2 + a_4, b_2 + b_4$],合并库所 P_1, P_2 为一个状态{ P_1, P_2 },并合并 t_1, t_2 为一个输出{ t_1, t_2 }.回到情况 1)取极小值,对下一个状态{ P_3, P_4 }进行讨论;当变迁 t_1, t_2 不可同时触发时,设 $a_{1,2} = \min(a_1, a_2)$,优先运行静态区间小的库所,达到下一个状态{ P_1, P_4 }或{ P_3, P_2 }后,继续进行讨论.

3) 若原 P-TPN 为图 6 所示的并发结构,则变迁 t₃ 与 t₄ 要分时触发. 与控制器相连的并行环节中的库所,可以近似等价为 2 个直线型结构串联.

4 实例验证

文献[7]采用一组线性约束的方法寻找其系统最优序列,得到最短运行时间为1600.下面结合这个例子,证明上述方法的有效性.由于已知系统可以正常运行且已经得到结果,故不再赘述系统所需满足的约束.

如图 7 所示的 P-TPN 模型可以分解成:4 个直线型 结构 *t*_{1,1}*t*_{1,2}*t*_{1,3}*t*_{1,4}*t*_{4,0},*t*_{2,1}*t*_{2,2}*t*_{2,5}*t*_{4,0},*t*_{1,1}*t*_{1,2}*t*_{2,3}*t*_{2,4}*t*_{2,5}*t*_{4,0}, *t*_{1,1}*t*_{1,2}*t*_{2,3}*t*_{2,4}*t*_{3,1}*t*_{3,2}*t*_{3,3}*t*_{3,4}*t*_{4,0} 或是一组并联结构 *t*_{1,1}*t*_{1,2} *t*_{1,3}*t*_{1,4}*t*_{4,0},*t*_{2,1}*t*_{2,2}*t*_{2,5}*t*_{4,0}; 或一组有控制环节的并发结构 *t*_{2,1}*t*_{2,2}*t*_{2,5}*t*_{4,0},*t*_{1,1}*t*_{1,2}*t*_{2,3}*t*_{2,4}*t*_{2,5}*t*_{4,0}.

根据上述方法存在以下分析.

1) 首先,由于 $a_{1,1}+a_{1,2}+a_{2,4} > a_{2,1}+a_{2,2}$,即 $p_{2,1}$ 中的 token 以最短时间运行到 $p_{2,3}$ 时, $p_{2,4}$ 中的 token 还未 触发或 $p_{2,4}$ 中还没有 token.这样, $p_{2,0}$ 的作用就微乎其 微了,可以得到这个结构在到达 $t_{2,5}$ 处的最短时间为 300.若此时 $t_{2,5}$ 触发,系统就只能在1300时刻触发 $t_{4,0}$, 否则 $p_{2,7}$ 的 token 就会失去活性.



图 7 PLC 监控的 P-TPN 模型 Fig. 7 P-TPN model of PLC monitoring

2) 其次,由于并发结构 t_{1,1}t_{1,2}t_{2,3}t_{2,4}t_{2,5}t_{4,0}和 t_{2,1}t_{2,2}t_{2,5}t_{4,0}到达 t_{4,0}的最短运行时间都是 1 300,且与 第 1 步结果重复,因此可以略去讨论此过程.

3)最后,4条直线型结构的最短运行时间(T_{min})分别是1300,1100,1300,1600.做交运算后可知: $T_{min} \ge 1600$,即 $p_{2,6}$, $p_{2,3}$ 中的token在满足活性的要求下,最短可激活时间 $T_{min} \ge 1600-1000 = 600$,此时得到 $t_{2,5}$ 在t = 600时触发,可以达到系统运行最小值.由于 $b_{1,5} = b_{3,5} = 3000 \ge 1600$,故不用担心 $p_{3,1}$, $p_{3,5}$ 中token失去活性的问题.据此,可以得到简化后Mealy机模型的状态转移图,如图 8 所示.



图 8 图 7 的 P-TPN 模型中库所与其对应时间关系的 Mealy 机状态转移图

Fig. 8 Mealy machine state transition diagram about the P-TPN model place and its corresponding time in figure 7

综上所述,可以得到系统最短运行时间为 $T_{\min} = 150 + 150 + 150 + 150 + 1000 = 1600$.由于很多变 迁可以并发,根据上述方法,此 P-TPN 对应的最优触发序列并不只有一种: $(t_{1,1}t_{2,1})(t_{1,2}t_{2,2})(t_{1,3}t_{2,3})(t_{1,4}t_{2,4})t_{3,1}t_{3,2}t_{3,3}(t_{3,4}t_{2,5})t_{4,0}$ (括号内的变迁表示并发).

5 结束语

针对以 P-TPN 建模的实时系统,提供了一种结合 Mealy 机模型的优化调度方法.首先,将 P-TPN 中库所与其对应时间极值的关系转化成 Mealy 机模型,用 Mealy 机的输出表示所选择的变迁;然后,采用动态规划的思想,进一步简化所生成的 Mealy 机模型,使其能够避免状态空间爆炸问题,直观地反映出系统最优触发序列.采用 Mealy 机模型结合时间 Petri 网进行分析,极大地简化了主干路径的寻求过程,不仅有利于对 P-TPN 建模的实时系统进行分析,而且在应用上(如对柔性制造系统进行调度分析)

也有着广泛的前景.

参考文献:

- [1] LIU C L, LAYLAND J W. Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard real-time environment [J]. Journal of the ACM, 1973, 20(1): 46-61.
- [2] KAMALA KRITHIVASAN R R. 形式语言,自动机理论与计算导论[M]. 孟宇龙,等译. 北京:电子工业出版社, 2012:42-77.
- [3] 王柏.形式语言与自动机[M].北京:北京邮电大学出版社,2003:23-55.
- [4] TAREK A,LOPEZ-BENITEZ N. Optimal legal firing sequence of Petri nets using linear programming[J]. Optimization and Engineering,2004,5(1):25-43.
- [5] 苏国军,汪雄海.半导体制造系统改进 Petri 网模型的建立及优化调度[J].系统工程理论与实践,2011,31(7): 1372-1377.
- [6] 邵志芳,刘仲英,钱省三.整合 Petri 网和蚁群优化算法用于柔性制造系统调度优化研究[J].计算机应用,2006,26 (11):2753-2755.
- [7] BONHOMME P. Scheduling and control of real-time systems based on a token player approach[J]. Discrete Event Dynamic Systems, 2013, 23(2):197-209.
- [8] 苏海洋. Petri 网络径寻优[D]. 西安:西安建筑科技大学,2007:15-31.
- [9] CASSEZ F, ROUX O H. From time Petri nets to timed automata[J]. Advances in Verification of Time Petri Nets and Timed Automata: A Temporal Logic Approach, 2006(1):51-62.
- [10] MERLIN P, FARBER D. Recoverability of communication protocols-implications of a theoretical study[J]. IEEE Transactions on Communications, 1976, 24(9): 1036-1043.
- [11] CASSANDRAS C G, LAFORTUNE S. Introduction to discrete event systems [M]. Berlin: Springer, 2008: 40-42, 224-230.
- [12] 吴哲辉. Petri 网导论[M]. 北京:机械工业出版社,2006:27-29.

Real-Time Scheduling Method Based on Mealy Machine

JI Yang-hong-kang, WANG Fei, YU Ting

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

Abstract: In this paper, in order to get the optimal path of real-time concurrent systems, an optimal scheduling method based on Mealy machine was proposed. Through analyzing on the real-time system with P-time Petri nets model and modeling the relationship between the place and its corresponding time with Mealy machine, the optimal path satisfied with non-deadlock and non-blocking was obtained. Based on this method, the optimal legal firing sequence of P-time Petri nets can be obtained, experimental results show that, the proposed method has a good effect.

Keywords: real-time system; mealy machine; P-time Petri nets; scheduling analysis

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:吴逢铁)

文章编号:1000-5013(2014)05-0509-04

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2014.05.0509

总有机碳分析仪高温反应单元研制

任洪亮

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 研制适用于高温燃烧氧化-非分散红外吸收法的总有机碳(TOC)分析仪高温反应单元.该系统利用立式管式炉内侧的镍烙丝对石英管和石英管中的石英棉和催化剂进行加热,炉内安置 K 型热电偶,用于检测石 英棉和催化剂的温度,管式炉外径达到 130 mm,以保证保温性能.系统工作温度设定为 680 °C,以保证催化燃 烧效果.分别在蜂窝陶瓷上进行负载质量分数为 0.5%的 Pd 和 0.07%的 Pt 两种催化剂测试.实验结果显示:这两种催化剂都能完全催化氧化 TOC 质量浓度为 40 mg \cdot L⁻¹的邻苯二甲酸氢钾和蔗糖有机物溶液;对 TOC 质量浓度高达 1 000 mg \cdot L⁻¹的试样,Pt 催化剂效果稍稍优于 Pd 催化剂.

关键词: 总有机碳;分析仪;高温反应;催化剂;Pt;Pd

中图分类号: X 853 文献标志码: A

总有机碳(TOC)是评价水体有机物污染程度的综合性指标^[1-2],唐静玥等^[3]将气体-气溶胶收集仪 与总有机碳分析仪联用,开发了一套在线测量细粒子中水溶性有机碳的方法和设备,并在珠江三角洲地 区进行外场观测.de Troyer 等^[4]将 TOC 分析仪和同位素比质谱计联用,测定了土壤中碳的同位素.这 些研究显示了 TOC 分析仪在新领域的应用价值.Peterson 等^[5]通过选用高灵敏度探测器等技术手段, 提高了 TOC 分析仪的性能.TOC 分析仪系统改善也依赖于各种有机物氧化效率的提高.目前,通过色 谱/质谱联用仪等分析发现,饮用水中可检出的有机污染物达 2 221 种^[6].1817年,Humphry^[7]发现了 煤气和氧气在铂丝上的无焰燃烧反应.1949年,美国催化燃烧公司(现环球油品公司)研制出采用 Pt 和 Pd 作催化剂的废气净化系统^[8-9].20 世纪 60 年代后,科技人员进行了汽车尾气净化技术^[10]和有机废气 催化焚烧技术^[8-9]的研究,并发展成较为成熟的理论模型.本文对 TOC 分析仪高温反应单元进行了热分 析,验证了 Pt 和 Pd 作为 TOC 分析仪催化剂的可行性.

1 高温反应单元基本结构

总有机碳分析仪高温反应单元,如图 1 所示.基于燃烧氧化-非分散红 外吸收原理的 TOC 分析仪包括进样系统、高温反应单元、二氧化碳红外检 测模块和数据处理系统.高温反应单元主要是将内置催化剂的石英管装配 在高温管式炉中.催化剂上部安置少量石英棉,以防止盐分等不可燃烧的 杂物吸附到催化剂,降低催化剂效率.石英棉不能沾染有机物,否则会导致 CO₂ 析出,导致仪器基线偏移.石英棉是高热容惰性填料,能对水样进行预 热汽化.石英管内径为 17 mm,总高度为 320 mm.管式炉为立式、中空,中 间安装石英管,内侧绕上炉丝.用其对石英管及其内部的催化剂和石英棉 进行加热,炉温监测点对应于催化剂和石英棉所在位置.管式炉保的温材 料为纤维材料,外径为 130 mm,具有足够的保温性能.



Fig. 1 Temperature catalytic oxidation reactor

收稿日期: 2013-10-08

通信作者: 任洪亮(1980-),男,副教授,主要从事光电检测及光学微操控仪器研发的研究. E-mail:renhongliang@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省泉州市科技计划资助项目(2012Z95)

TOC 分析仪测量过程:将经酸化曝气吹除无机碳后的测试水样注入到高温石英管中,使有机物在 催化剂的作用下转化为 CO₂;红外检测模块测定载气中 CO₂ 质量浓度,并将 CO₂ 质量浓度信号输入到 数据处理系统,进行数据处理、显示、存储和通信.

2 燃烧催化剂分析

样品中的有机物被燃烧氧化成二氧化碳的反应机理表示为

$$C_m H_n + (m + \frac{n}{4}) O_2 \xrightarrow{\hat{B} \triangleq} m CO_2 + \frac{n}{2} H_2 O$$
(1)

燃烧催化剂在工业废气净化和汽车尾气净化等方面已经取得了极大的成果,其中,以Pt 和Pd 为代 表的贵金属催化剂被称之为完全氧化催化剂^[11-12],而不同的贵金属催化剂的活性具有较大差异^[10-11]. 含苯、甲苯和二甲苯等有机物的工业废气催化燃烧实验发现:Pd,Pt 对各种常见燃料的燃烧均具有很好 的完全氧化活性;Pd 较适用于 CO、天然气、CH₄ 和烯烃类燃料;Pt 则适用于长链烷烃(*n*_c>3)燃料;而 对芳香族有机物的氧化,两者相当^[11-13].目前,汽车尾气净化用三效催化剂 Rh,Pd 和 Pt 等为催化剂,其 中,Rh 是用于催化 NO 还原,Pd 和 Pt 用于促进 CO 和未燃烧的烃类有机物完全氧化,净化后尾气排放 能达到国四标准^[14].因此,本研发工作中初步选用 Pd 和 Pt 作为高温燃烧催化剂.

以纯粹的颗粒状或者蜂窝状贵金属作为催化剂,造价昂贵.目前一般将贵金属催化剂涂覆到高比表 面载体上,以获得较大的活性表面,同时减少高温烧结.贵金属燃烧催化剂常用的载体材料有 Al₂O₃ 和 堇青石(2MgO•2Al₂O₃•5SiO₂)等^[15-16].Pt 的氧化物与 Al₂O₃ 的表面相互作用较小,易形成大颗粒金 属结晶,因此,本 TOC 分析仪采用蜂窝状圆柱堇青石陶瓷作为载体.该陶瓷贯穿着许多直通道,相比颗 粒式载体,蜂窝状载体气路压降更低,导热性能更好,且具有热膨胀系数小、耐热性好、机械强度大、耐冲 击等优点^[15-16].设计两种催化剂,载体皆为蜂窝陶瓷,分别负载质量分数为 0.5% 的 Pd 和 0.07% 的 Pt.

3 高温反应单元热分析

贵金属催化剂 Pt 和 Pd 对有机物的起燃温度和完全燃烧温度有较大差异,但催化转换曲线一般都显示对苯、甲苯等有机物的起燃温度只有 200 ℃左右,达到 90%的转化率也只需 300 ℃左右^[17-18].贵金属催化剂 Pd 的使用温度不能超过 800 ℃^[19].为保留一定的安全余量,本 TOC 分析仪高温反应单元温度设定为 680 ℃,降低了贵金属的挥发性,保护高温炉内的石英管和贵金属催化剂,延长了石英管和贵金属的使用寿命,从而保证有机物的催化转换效果.相比有些厂家所用的 900 ℃或者更高温度,其能耗有所降低.

TOC 分析仪高温反应单元的管式电炉选用镍烙丝作为炉丝. 镍烙丝能耐 1 100 ℃的高温,远高于本 TOC 分析仪设定的 680 ℃工作温度,具有足够的安全余量,可以防止炉丝熔断,保证高温炉寿命和使用安全性,并有助于保证控温准确性. 热敏电阻一般温在 100 ℃以下使用,即使是 Pt 电阻温度计,一般也只适用于 200 ℃以下.因此,本 TOC 分析仪选择适用于 0~1 300 ℃的镍铬-镍硅(K型)热电偶测量炉温.

TOC 分析仪测试的水样常常选取体积为 30 μ L,半径为 1.93 mm,表面积为 46.7 mm².由于表面 张力的作用,水滴为球体.水样注入管和石英棉相距 180 mm,水滴滴落时间 t 为 0.19 s. 石英管温度为 680 °C ($T_1 = 953.15$ K),假设水样从注入管滴落时温度为室温($T_2 = 300$ K),由于 $T_1 > T_2$,由斯蒂芬-玻 耳兹曼定理和兰贝特定律可导出石英管和水滴间辐射传热功率为

$$W_{1,2} = \varepsilon c_0 \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right) \varphi_{1,2} S_1 = \varepsilon c_0 \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right) \varphi_{2,1} S_2.$$
(2)

式(2)中:黑体的辐射系数 $c_0 = 5.67 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)^{-1}$; ϵ 为黑度,即石英管和水滴实际辐射能力与同温 度下黑体的辐射能力之比, $\epsilon = \frac{2}{\varphi_{1,2}(\frac{1}{\epsilon_1}-1)+1+\varphi_{2,1}(\frac{1}{\epsilon_2}-1)}$;石英管的 $\epsilon_1 \approx 0.94$,水的 $\epsilon_2 \approx 0.96$, $\varphi_{1,2}$ 为

石英管对水滴的角系数, q2,1为水滴对石英管的角系数; S1 为石英管面积; S2 为水滴面积. 由于石英管
511

包围水滴, $\varphi_{2,1}=1$, $\varphi_{1,2}S_1=\varphi_{2,1}S_2=S_2$.由于 $S_2/S_1\approx 0$, $\epsilon\approx \epsilon_2$. $W_{1,2}$ 近似为 $W_{1,2}\approx \epsilon_1c_0((\frac{T_1}{100})^4-(\frac{T_2}{100})^4)$ S_2 .由于 $\epsilon_2 \leqslant 1$, $W_{1,2}$ 最大值为 $W_{1,2,\max} = c_0((\frac{T_1}{100})^4-(\frac{T_2}{100})^4)S_2$,从而水滴下落过程中最大吸热量为 $Q_{12,\max} = W_{12,\max}t \leqslant c_0((\frac{T_1}{100})^4-(\frac{T_2}{100})^4)S_2t = 0.4$ J. 30 μ L室温下的水汽化所需要的热量 Q_2 为9.2 J,远大于水滴下落过程中吸收的辐射热 0.4 J,水滴在滴落过程中不会汽化.当催化剂上部安置 2 g 石英棉,假设水滴升温所需要的热量全部来自于吸收石英棉,水样和石英棉温度平衡后,石英棉温度下降不到 12 ℃,可以认为催化剂温度基本保持恒定,能够保证催化性能的稳定性.

4 有机物催化燃烧转化率

标准 HJ 501-2009《水质 总有机碳的测定 燃烧氧化-非分散红外吸收法》规定邻苯二甲酸氢钾 (KHP)作为有机碳标准测试液,本实验利用邻苯二甲酸氢钾和蔗糖,分别制备了 TOC 质量浓度为 40, 1 000 mg • L⁻¹的测试溶液,测试本 TOC 分析仪的有机物转化率及系统实用性. 红外检测模块检测到 的 CO₂ 质量浓度曲线经平滑降噪后,取曲线峰高作为二氧化碳质量浓度测量值,曲线底部平坦部分作 为基线.

根据本 TOC 分析仪石英管体积,可以估算当 TOC 质量浓度分别为 40,1 000 mg・L⁻¹时,CO₂ 质量浓度理论峰值分别为 138,2 762 Gg・L⁻¹. KHP 和蔗糖溶液测试结果,如表 1 所示.表 1 中:TOC 转 化率 $\eta = \frac{峰值-基线}{理论峰值} \times 100\%$.

由表1可以知道:没有使用催化剂时,有机物不能全部被氧化;使用催化剂后,TOC 质量浓度为40 mg•L⁻¹的水样中有机物基本全部被氧化转化为CO₂;而通过TOC 质量浓度为1000 mg•L⁻¹的水样 测试显示,Pt 催化剂效果稍稍优于Pd 催化剂,并且KHP 比蔗糖更容易氧化.Pt 催化剂的质量分数虽 然低于Pd 催化剂的质量分数,但实验显示,Pt 对于KHP 和蔗糖的催化转发效率更高.可能由于KHP 和蔗糖中碳的质量分数相对较高.

TOC 质量浓度为 1 000 mg • L⁻¹的水样在日常生产和生活中并不多见,可据此测试本 TOC 分析 仪对高质量浓度有机物的氧化转化率.结果显示:本分析仪能够氧化含高质量浓度有机物的水样,系统 具有较强的实用性.有机物转化率大于 100%,主要由于基线扣除的不足,或者系统电子学噪声的影响.

测试样品	η(KHP	η(蔗糖)/%	
	$\rho(\text{TOC}) = 40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\rho(\text{TOC}) = 1 \ 000 \ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\rho(\text{TOC}) = 1\ 000\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
无催化剂	66	25	9
Pd 催化剂	99	98	92
Pt 催化剂	100	101	98

表 1 KHP 和蔗糖溶液测试结果 Tab. 1 KHP and sugar solutions test using TOC analyzer

5 结束语

根据燃烧氧化-非分散红外吸收法,研制了 TOC 分析仪的高温反应单元,实现催化性能的稳定.系统工作温度设定为 680 ℃,降低了能耗,延长了石英管和贵金属催化剂的使用寿命.实验结果显示:这两种催化剂都能较好地催化氧化 TOC 质量浓度为 40 mg • L⁻¹的 KHP 和蔗糖溶液.对 TOC 质量浓度为 1 000 mg • L⁻¹的 KHP 和蔗糖溶液,Pt 催化剂效果稍稍优于 Pd 催化剂效果,表明具有完全催化氧化效 果的 Pt 催化剂也适用于高 TOC 质量浓度的水样,下一步拟实验测试石英管最佳体积.

参考文献:

- [1] 马康,谷雪蔷,黎朋. 总有机碳 (TOC) 分析技术及仪器的计量标准现状[J]. 中国计量,2011(5):94-96.
- [2] 王德明. 水体 TOC 与 COD_{Cr}, BOD₅、COD_{Mn}相关性研究[J]. 化学分析计量, 2010, 19(3):61-64.

- [3] 唐静玥,曾立民,董华斌.一种在线测量颗粒物中 WSOC 的新方法及其应用[J].环境科学学报,2010,30(5):908-914.
- [4] de TROYER I, BOUILLON S, BARKER S, et al. Stable isotope analysis of dissolved organic carbon in soil solutions using a catalytic combustion total organic carbon analyzer-isotope ratio mass spectrometer with a cryofocusing interface[J]. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2010, 24(3): 365-374.
- [5] PETERSON M L, LANG S Q, AUFDENKAMPE A K, et al. Dissolved organic carbon measurement using a modified high-temperature combustion analyzer[J]. Marine Chemistry, 2003, 81(1):89-104.
- [6] 刘洋,李阳.饮用水源地水有机物污染现状及检测技术分析[J].黑龙江科技信息,2010(32):3.
- [7] HUMPHRY D. Some researches on flame[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1817 (107):45-76.
- [8] SUTER H R. Catalytic fume incineration: U S Patent 2658742[P]. 1953-11-10.
- [9] 徐锦航. 铂族金属燃烧催化剂应用于废气治理[J]. 环境保护科学, 1978(2): 38-48.
- [10] GANDHI H S,GRAHAM G W, MCCABE R W. Automotive exhaust catalysis[J]. Journal of Catalysis, 2003, 216 (1):433-442.
- [11] 袁强.氧化铝为载体的负载型钯催化剂对甲烷催化燃化燃烧反应性能的研究[D].厦门:厦门大学,2001:19-20.
- [12] SPIVEY J J. Complete catalytic oxidation of volatile organics[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 1987,26(11):2165-2180.
- [13] 李鹏,童志权. 三苯系 VOCs 催化燃烧催化剂的研究进展[J]. 工业催化,2006,14(8):1-6.
- [14] 陈耀强,王健礼,史忠华,等.机动车尾气净化催化剂的研究进展[J].中国科学基金,2008,22(1):8-12.
- [15] 金凌云,何迈,鲁继青,等. Y₂O₃ 涂层负载 Pd 整体式催化剂的制备和催化性能[J]. 催化学报,2007,28(7):635-640.
- [16] 官芳,卢晗锋,张燕,等.蜂窝陶瓷型 La_{0.8} Sr_{0.2} MnO₃ 催化剂 VOCs 催化燃烧反应活性[J]. 浙江工业大学学报, 2009,37(1):22-26.
- [17] 曹国起,胡克季,薛志元,等.易挥发有机化合物在 Pt/Al₂O₃-Si 纤维催化剂上的低温氧化[J].环境化学,1997,16 (3):197-203.
- [18] 易灵. 有机废气治理技术的研究进展[J]. 四川环境, 2011, 30(5): 103-107.
- [19] KIRCHNEROVÁ J. Materials for catalytic gas combustion[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 1999, 16
 (4):427-433.

Temperature Catalytic Oxidation Reactor of Total Organic Carbon Analyzer

REN Hong-liang

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

Abstract: Temperature catalytic oxidation reactor of total organic carbon (TOC) analyzer using temperature catalytic oxidation technique and non-dispersive infrared absorption method is developed. Quartz tube, quartz wool and noble catalysts are heated by nickel wire, which is embedded in a high temperature tube furnace (D=130 mm). The operation temperature is set to 680 °C in order to ensure the catalytic efficiencies and the temperatures are monitored by K type thermocouple. 0.5% (mass fraction) Pd and 0.07% (mass fraction) Pt loaded on honeycomb ceramics are selected as noble catalysts. The experiments show that KHP and sucrose can be fully oxidized by either Pd or Pt catalyst when TOC concentration is 40 mg \cdot L⁻¹. Pt catalyst is more effective than Pd catalyst when TOC concentration is 1 000 mg \cdot L⁻¹. **Keywords:** total organic carbon; analyzer; high-temperature reactor; catalyst; Pt; Pd

(责任编辑:陈志贤 英文审校:刘源岗)

文章编号:1000-5013(2014)05-0513-06

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2014.05.0513

福建省行政区划植被覆盖的动态变化多层次模型

李维娇, 邱炳文, 曾灿英

(福州大学 空间信息工程研究中心,福建 福州 350000)

摘要: 以福建省 85 个县级行政区划为第一层单元,以福建省行政区划的 9 个市作为第二层单元,在资源环境卫星数据的基础上,构建县-市级二层植被动态变化影响模型.在中观和宏观上分析福建省植被覆盖动态演变的驱动机制,分析不同行政单元上,不同的社会经济因子和政策等对植被覆盖的影响.研究表明:在市级层次上,国民收入的最终使用指标对植被覆盖的影响较大,与植被覆盖成负相关;在县级层次上,地形因子对植被覆盖的影响较大,与植被覆盖呈正相关,生产要素和生活条件指标与植被覆盖成负相关.

关键词: 多层次模型;行政区划;植被覆盖;驱动因子;福建省

中图分类号: TP 79; F 301.24(257) 文献标志码: A

利用现代手段进行定量分析和模型模拟是生态-地理格局和过程研究的趋势之一.许多研究探讨 了植被格局与环境的时空演变关系^[1-4],但有关植被覆盖的多尺度多层次研究还比较少见.尽管已有不 少学者开展了植被的多尺度综合效应研究^[5-6],也有少量学者开展了土地利用驱动因子的多层次建模研 究^[7-8].然而,这些研究均偏重于从自然单元层次(如流域),从不同土地利用类型开展植被覆盖驱动因 子影响机制研究,且驱动因子大多以气候、地形等自然因子为主.植被覆盖的动态变化不仅受到地形等 自然因子的影响,社会经济条件和政府决策更会从中观、宏观上影响到它的分布与演变,从而影响植被 覆盖和土地利用变化^[8].社会经济条件、政府决策、土地管理策略、植被利用与保护措施等在同一行政管 理单元中具有一定的相似性,以县、市等不同管理级别作为模型中的不同层次,便于考察不同的社会经 济条件与管理调节手段下植被覆盖演变特征,评估不同特色的土地管理政策与措施的实施效果.由于多 层次模型的层次结构特点,近年来,国外在土地利用变化科学研究中也有一些应用^[9-10].植被覆盖变化 的驱动力研究及其在不同尺度不同层次的变化一直是学者们关注的热点问题.本文将多层次模型与地 理学知识相结合,以福建省为研究区,在行政区划的基础上对福建省的植被指数进行多层次线性回归分 析,在中观和宏观上分析福建省植被覆盖动态演变的驱动机制.

1 研究区概况与数据处理

1.1 研究区概况

福建地处我国东南部、东海之滨,陆域介于 $23^{\circ}30'N \cong 28^{\circ}22'N$, $115^{\circ}50'N \cong 120^{\circ}40'N$ 之间, 全省陆地面积为 12.4万 km²,地势西北高,东南低,山地、丘陵和平原分别占 75%,15%和 10%.海域面积为 13.6万 km².福建属温暖湿润的亚热带海洋性季风气候,年平均气温 17~21 °C,平均降雨量 1 400~2 000 mm,是中国雨量最丰富的省份之一.

福建的森林覆盖率为 63.1%,居全国首位.林地面积 617.9万 hm²,为全国六大林区之一.有的已 辟为自然保护区,如建瓯万木林保护区及武夷山国家自然保护区等,福建林区可分为中西部亚热带常绿 阔叶林区和东部亚热带季风雨林区.

收稿日期: 2014-03-16

- 通信作者: 邱炳文(1973-),女,副研究员,主要从事地理信息系统的研究. E-mail:qiubingwen@fzu. edu. cn.
- **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(41071267);福建省科技计划重点项目(2012I0005);福建省自然科学基金 资助项目(2012J01167);教育部留学人员回国科研启动项目(教外司留[2012]940)

1.2 数据源

福建省植被覆盖 NDVI 数据来源于环境卫星一号 2010 年 201012283 数据,如图 1 所示. NDVI 是反映植物冠层背景 影响的指数,与地表植被覆盖有关.通常情况下,NDVI 的值 域范围在一1 到 1 之间,正值表示地表有植被覆盖,且 NDVI 值随着植被覆盖度的增大而增大;0 值表示地表为岩石或裸 土,无植被覆盖;负值表示地表覆盖受到云、水、雪的影响.

福建省社会经济数据采用 2010 年的年鉴统计数据^[11],高 程通过分辨率为 30 m 的 DEM 数据获取并从该 DEM 中提取 出坡度,气象因子由 2010 年福建省的 65 个气象站点观测数据 进行插值生成 250 m 分辨率的均温、累积降水、平均日照等因 子,并重采样到 30 m 分辨率.人为因子体现为交通可达性因 子(距离最近道路距离,距离最近河流距离,距离最近居民点 距离及距离最近铁路距离)和土地利用综合指数,所有的数据



图 1 福建省植被覆盖 NDVI 示意图 Fig. 1 NDVI schematic coverage of vegetation in Fujian Province

预处理操作均在 ESRI 公司中 ARCGIS 9.3 软件中实现. 气象因子、地形因子和人为影响因子均是求各个县、市内的平均值来代表该行政单元内的值.

1.3 数据处理

根据经验,以往的研究^[7-10]和数据条件应尽可能全面考虑影响植被覆盖的因子(表 1),以便从中筛 选出真正显著影响植被覆盖的因子.由于所考虑自然因子和社会经济因子众多,将因子进行分类,分类 表如表 2 所示.为了排除因子之间的共线性,利用 SPSS 软件对所有因子做相关分析,在 0.01 水平上显 著相关的两个因子只取其中一个,尽量为每一类型选出一至两个代表因子,最后筛选结果如表 3 所示. 表 3 中:各个因子均进行归一化处理,即归一化值=(因子一平均值)/方差.

表 1 NDVI 的影响因子基本筛选结果

Tab. 1	Prime	selection	of	impact	factors	of	NDVI
--------	-------	-----------	----	--------	---------	----	------

层次		考虑的因子
第一层(县)	企业固定资产年末 路线总长度、农业 比去年增长工资、 DEM、坡度	5.净值、房地产投资、建筑业产值、粮食产量、人均 GDP、公路通车里程、农村投递 人口、非农业人口、农作物播种面积、农林水事务支出、单位从业人员数、在职职工 农民人均收入同比上年增长、农民人均收入、衣着支出、居住支出、固定住宅面积、
第二层(市)	总工业产值、轻工」 第二产业产值、社 资、第三产业投资 币存款余额、农村 数、期末参加基本 距离、日照、累积降	业产值、重工业产值、工业产值比去年增长、地区总产值、地区第一产业产值、地区 会消费、城镇化水平、新增固定资产、固定资产投资、第一产业投资、第二产业投 、年末户籍统计总人口、常住人口数、人口密度、地方财政收入、金融机构各项人民 居民最低生活保障人数、居民最低生活保障人数、期末参加新型农村医疗保险人 医疗保险的职工人数、期末参加基本养老保险职工人数、据河流的距离、据道路的 多水量、均温
		表 2 影响因子分类表
		Tab. 2 Classification of impact factor
因子	类型	考虑的因子
	生产要素和 生活条件指标	农业人口、非农业人口、农作物播种面积、农林水事务支出、单位从业人员数、第 一产业投资、第二产业投资、第三产业投资、年末户籍统计总人口、常住人口数、 人口密度
	社会生产 成果指标	总工业产值、轻工业产值、重工业产值、工业产值比去年增长、地区总产值、地区 第一产业产值、地区第二产业产值、建筑业产值、粮食产量、人均 GDP
从 汶田子	社会产品实物的 流通和消费指标	公路通车里程、农村投递路线总长度、新增固定资产、固定资产投资
空价囚丁	人民生活 指标体系	衣着支出、居住支出、固定住宅面积、农村居民最低生活保障人数、居民最低生活保障人数、期末参加新型农村医疗保险人数、期末参加基本医疗保险的职工人数、期末参加基本养老保险职工人数
	国民收入的初次 分配和再分配指标	在职职工比去年增长工资、地方财政收入、农民人均收入同比上年增长、农民人 均收入、金融机构各项人民币存款余额
	国民收入的 最终使用指标	社会消费、企业固定资产年末净值、城镇化水平、房地产投资

	续表					
		Continue table				
因子	类型	考虑的因子				
	距离因子	据河流的距离、据道路的距离				
其他因子	气象因子	日照、累积降水量、均温				
	地形因子 DEM、坡度					
		表 3 NDVI 的影响因子最终筛选结果				
		Tab. 3 Final selection of impact factors of NDVI				
层次		考虑的因子				
第一层(县)	企业固定资产 ⁴ 积、农林水事务	F末净值、房地产投资、建筑业产值、粮食产量、农业人口、非农业人口、农作物播种面 支出、农民人均收入、衣着支出、居住支出、DEM				
第二层(市)	总工业产值、轻 平、新增固定资	工业产值、地区总产值、地区第一产业产值、地区第二产业产值、社会消费、城镇化水产、固定资产投资、年末户籍统计总人口、常住人口数、人口密度、地方财政收入				

2 多层次模型的构建

对于植被覆盖变化来说,其驱动因子之间有着组效应,多层次模型正是一种有着组效应的线性分析 方法.也就是说,在分析各行政单元植被覆盖变化相应的社会、地形等因子关系时,要考虑区域背景的变 化(即个体效应与组效应). 文中构建以福建省县级行政区划为第一层次和市级行政区划为第二层次的 两层次模型. 在该层次模型中,不同的市级行政区划其回归方程的截距和斜率都是不同的,随机的.其 中,第二层次的斜率和截距依赖于第一层次,如此构成了一个基于行政区划的两层次模型.

1) 县级层次模型为

$$Y_{i,j} = \beta_{0,j} + \beta_{1,j} X_{i,j} + r_{i,j}, \qquad (1)$$

2) 市级层次模型为

$$\beta_{0,j} = r_{0,0} + r_{0,1} W_j + u_{0,j}, \qquad \beta_{1,j} = r_{1,0} + r_{1,1} W_j + u_{1,j}.$$
⁽²⁾

其中:按照福建省的行政区划,县级层次有 i 个单元(i=1,…,85)嵌套于第市级层次的 j 个单元(j=1, (...,9)中; $\beta_{0,i},\beta_{1,i}$ 为随机变量; $\beta_{0,i},\beta_{1,i}$ 被分解为 $r_{0,0},r_{1,0}$ (常数)与 $u_{0,i},u_{1,i}$ (随机效应)的和; $r_{0,0},r_{0,1},r_{1,0}$ 和 $r_{i,i}$ 是第二层回归方程的系数; $X_{i,i}$ 是县级层次的预测变量,代表第i个县在第i个市中自变量X的 取值;W;是市级层次回归方程的预测变量;r.;是县级层次回归方程的随机效应,代表残差,其含义是第 *i* 个县在第*j* 个市中的测量值 Y 不能被自变量 X 解释的部分.

零模型在于了解植被变异在各个层次所占的比例及建立该层次的必要性,是方差成分分析,是必须 要用的模式. 它决定是否需要引入市级层次的变量来解释县级层次的回归系数,即1)县级层次:Y_{ii}= $\beta_{0,j} + r_{i,j}$, $\operatorname{Var}(r_{i,j}) = \sigma^2$ 为组内方差; 2) 市级层次: $\beta_{0,j} = r_{0,0} + u_{0,j}$, $\operatorname{Var}(u_{0,j}) = \tau^2$ 为截距的方差.

评估多层次模型首先是将无条件(unconditioned)的 NULL 模型与有截距的 NULL 模型进行比 较.其中:NULL模型指的是没有引入解释变量的模型.然后,采用逐步线性回归模型确定第一层的解 释因子,并且通过容限度来诊断共线性.如果容限度在 0.5 以上,可以排除它们之间的共线性;若各自 变量共线性容限度都小于 0.1,则可以认为这一变量与其他自变量存在着超出容许范围的共线性.

3 结果分析

构建多层次模型时,在不同的层次引入不同的自变量,解释不同因子在不同尺度、不同层次的贡献 与作用.零模型,不包括任何自变量,只包括了高层次的随机效应.利用方差显著与否决定在该多层次应 用研究中层次是否合理,并且是否充分体现了植被覆盖嵌套格局.同时,计算组内相关系数(ICC)确定 植被覆盖与变化的变异有多大比例是由区域背景条件的差异造成的.植被覆盖与变化的变异,是由组内 相关系数 ICC 确定的. 模型一县级层次上包含了一些影响植被覆盖情况的变量. 模型二在第一层县级 变量的基础上,引入可能影响植被覆盖与植被变化的市级宏观层次因子,即第二层变量.通过容限量和 差统计量得出.

3.1 NDVI 零模型结果

零模型的随机效应包含层一和层二部分,分别代表植被覆盖的变化中源于县级和市级的随机效应, 即分别是组内差异和组间差异.NDVI零模型运行的结果显示:其偏差为-121.832 762;χ² 为 37.7;组 间方差为 0.007 23(*p*<0.000 1),组内方差为 0.004 13.县级层次内组内相关系数为 0.636 4,市级层次 为 0.363 6,两级行政区划内县级层次对植被覆盖的影响率略大于市级层次.这表明植被覆盖县级尺度 内的变异占据主导地位.据建立的经验判断准则,当组内相关系大于 0.059 时,就需要在统计建模处理 中考虑如何处理组间效应^[8,12-13].因此,对植被覆盖与变化的驱动因子进行由县-市的多层线性模型分析 完全是必要的.

3.2 NDVI 多层次模型结果

使用容限度作为判断共线性的标准,当各个自变量的容限度共线性大于 0.5 时,它们之间的贡献度 是基本可以排除的,如果容限度在 0.1 以下,则该自变量与其他自变量之间超过了多重共线性的容许界 线.完整模型通过逐步引入或删除不同的因子获得最优的多层次模型结果.表4 为 NDVI 多层次模型结 果,表5 为 NDVI 多层次模型结果拟合统计量.表5中:模型一为引入第一层解释变量的模型;模型二 为引入第二层解释变量的模型.

从表 4 可知:模型二(引入市级解释变量)的解释力度较模型一(引入县级解释变量)稍高,其 R^2 分 别为 67.4%(p=0.001)和 49.93%(p<0.001),市级层次略高于县级(表 5).模型在不同层次选取不同 的社会经济因子、自然因子对植被覆盖的影响不同.

表 4 NDVI 多层次模型结果 Tab. 4 Multilevel model results of NDVI

层次	固定效应	系数	标准差	容限度	自由度	Þ	贡献度
	截距	0.533 723	0.010 135	52.660	6	<0.001	_
层1 (县级层次)	非农业人口数	-0.026 837	0.006 643	-4.040	6	<0.001	0.185 3
	农作物播种面积	0.013 686	0.004 439	3.083	6	0.003	0.071 0
	DEM	0.040 106	0.009 109	4.403	6	<0.001	0.243 8
层 2 (县级层次)	总工业产值	-0.015 880	0.006 478	-2.451	53	0.018	0.148 4
	社会消费	-0.015 144	0.004 388	-3.451	53	0.001	0.114 3
	城镇化水平	-0.082 190	0.018 574	-4.425	55	0.004	0.411 8

表4的层1结果表明:在县级层次上, 多个因子中非农业人口数、农作物播种面积、地形因子(DEM)与 NDVI 显著相关. 其中:DEM 和农作物播种面积对 NDVI 的影响是正的,而非农业人口数与 NDVI 呈负相关.这其中 DEM 对 NDVI 的影响 最大,其相贡献度为 0.243 8;非农业人口 表 5 NDVI 多层次模型拟合统计量

Tab. 5 Multi-level model fit statistics of NDVI

模型	零模型	模型 1	模型 2
离差统计量	-121.832762	-141.574973	-139.315196
χ^2	_	60.121 80	22.582 20
自由度	—	6	53
Þ	—	<0.001	0.001
R^2	—	0.499 3	0.674 5

数次之(0.1853),贡献度最小的是农作物播种面积.由于福建有着多山地多丘陵的地形地貌,对于福建 省来说,DEM 基本上可以在一定程度上反映植被的覆盖情况,海拔越高的地区,是山地的可能性越大, 其植被覆盖越好,海拔相对较低的地方,人类活动多聚集于此.非农业人口数代表一个地区的土地利用 开发程度和人类活动的占地水平,非农业人口数越大,其土地被开发利用的程度越大,人类占地面积越 大,不利于植被大面积覆盖故而与 NDVI 呈显著负相关的关系.农作物播种面积反应一个县的农业生 产的总规模,农作物是县内主要的经济来源与植被覆盖来源,农作物种植面积越大,NDVI 值越大,农作 物播种面积对整个县的植被覆盖有着显著的正向影响.

表 4 的层 2 结果表明:NDVI 的分布差异不仅在县级中观层次上受到非农业人口数、农作物播种面积、DEM 因子的影响,同时也在市级层次上受到总工业产值、社会消费、城镇化水平等因子的显著影响. 其中市级层次上选取的几个因子均呈负相关.社会消费在一定程度上反映该市的经济状态与经济实力, 社会消费越多,植被覆盖越差.总工业产值是以货币表现的工业企业在报告期内生产的工业产品总量, 总工业产值越高,对环境的影响越大,植被的覆盖越差.城镇化水平指一个地区城镇化所达到的程度,一 个地区达到的城镇化水平越高,其植被覆盖越差.在市级层次上城镇化水平对植被的影响较大,其贡献 度达到 0.411 8,其次为总工业产值(0.148 4)和社会消费(0.114 3).

3.3 NDVI 残差

图 2 为 NDVI 的各层次残差.由第一层次的残差图可以看出:NDVI 多层次模型县级层次在福建 省的中部区域解释得较好,残差较小,这些区域主要集中在南平南部、漳州东部、泉州南部和福州西部等 区域,个别残差较大的区域主要集中在南平北部和莆田、泉州东部.市级层次上的福建省南平、福州、泉 州区域解释较好,但是其残差都已经比较小了.



Fig. 2 Residuals at all levels of NDVI

4 结论

在中观层次即县级层次上,地形因子(DEM)对植被覆盖的影响较大,并且与植被覆盖呈正相关.这 是由于福建处于南方丘陵地区,随着海拔的升高,土地利用类型由人类活动聚集的建筑用地逐渐向人烟 稀少的林地转变,植被覆盖也由差变好.模型中,生产要素和生活条件指标(非农业人口数、农作物播种 面积)对植被覆盖的影响略小于地形因子.其中,非农业人口数是反映一个地区工业化的重要标志,一个 地区非农业人口数越大该地区土地被开发利用的程度越大,越不利于植被大面积覆盖,故而与 NDVI 呈负相关的关系.而农作物播种面积代表了一个地区的工业化程度,农作物播种面积对整个县的植被覆 盖有正向影响.

在宏观层次即市级层次上,国民收入的最终使用指标(社会消费与城镇化水平)和社会生产成果指标(总工业产值)对植被覆盖影响较大,二者均与植被覆盖成负相关.其中,社会消费、城镇化水平和总工业产值都从某一侧面代表一个地区的工业发达程度,通常情况下,一个地区工业越发达,植被覆盖越差.

通过建立从县到市的多层次模型,定量分析各级行政区划内社会经济因素、人为影响及自然条件下 植被覆盖动态演变格局.从中观和宏观角度分析植被覆盖与演变影响因素,有利于指导各级行政区划 优化土地利用格局,为平衡区域发展与生态建设之间的关系,实现各级可持续发展战略提供决策支持.

由于经济数据和其他资料的欠缺,尚未考虑更为微观的村级行政区划层次上社会经济条件与灌溉 等因素对植被的影响,以后的研究可建立微观(村)-中观(县)-宏观(市)的三层模型,从而在微观层面指 导各级行政区划优化植被覆盖格局.同时,由于观测范围与分辨率的限制,不能很好地提供土地利用系 统的全部信息,因此,在多尺度方法的区域实践研究方面需要进一步研究.

参考文献:

- [1] HOU Guang-lei, ZHANG Hong-yan, WANG Ye-qiao. Vegetation dynamics and its relationship with climatic factors in the Changbai mountain natural reserve[J]. Journal of Mountain Science, 2011,8(6):865-875.
- [2] MARTÍNEZ B, GILABERT M A. Vegetation dynamics from NDVI time series analysis using the wavelet transform

[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(9): 1823-1842.

- [3] NELSON A, OBERTHÜR T, COOK S. Multi-scale correlations between topography and vegetation in a hillside catchment of Honduras[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2007, 21(2):145-174.
- [4] DE SOUZA A A, GALVAO L S, DOS SANTOS J R. Relationships between Hyperion-derived vegetation indices, biophysical parameters, and elevation data in a Brazilian savannah environment[J]. Remote Sensing Letters, 2010, 1 (1):55-64.
- [5] 陈佑启, VERBURG P H, 徐斌. 中国土地利用变化及其影响的空间建模分析[J]. 地理科学进展, 2000, 19(2): 116-127.
- [6] 吕一河,赵文武,傅伯杰.多尺度土地利用与土壤侵蚀[J].地理科学进展,2006,25(1):24-33.
- [7] 李晓亮,赵智杰,黄钱.塔里木河下游垦区耕地面积变化及驱动力的多层次分析[J].安徽农业科学,2008,36(9): 3830-3833.
- [8] 杨维鸽,陈海,杨明楠,等.基于多层次模型的农户土地利用决策影响因素分析:以陕西省米脂县高西沟村为例[J]. 自然资源学报,2010,25(4):646-655.
- [9] PAN W K Y, BILSBORROW R E. The use of a multilevel statistical model to analyze factors influencing land use: A study of the Ecuadorian Amazon[J]. Global Planetary Change, 2005, 47(2/3/4): 32-52.
- [10] OVERMARS K P, VERBURG PH. Multilevel modelling of landuse from field to village level in the Philippines[J]. Agrieultural Systems, 2006, 89(2/3):435-456, 22.
- [11] 中国统计局. 福建统计年鉴(2010) [M]. 北京:中国统计出版社, 2011:569-605.
- [12] 刘德智,朱建宝.介绍一种教育研究统计软件 HLM-多层线形模型[J].计算机在化学中的应用,2004,31(8):61-62.
- [13] 周皓,巫锡炜. 流动儿童的教育绩效及其影响因素:多层线性模型分析[J]. 人口研究,2008,32(4):22-32.

Vegetation Multi-Level Modeling Research in Fujian Province Based on Administrative Region

LI Wei-jiao, QIU Bing-wen, ZENG Can-ying

(Spatial Information Research Center of Fujian, Fuzhou University, Fuzhou 350000, China)

Abstract: Based on resource satellite data, use 85 country-level administrative regions of Fujian Province as the first layer, administrative districts of 9 city as the second to construction country-city layer vegetation dynamics influence model. Analyzing the driving mechanism of the vegetation dynamic evolution in Fujian Province by the medium and macroscopic, and the social economic factors and policies impacting on the vegetation coverage in different administrative units is also discussed. Research result shows that on the municipal level, national income eventually use index and vegetation coverage have negative correlation. At country level, terrain factors has a bigger impact (positive) on vegetation coverage, however, the factors of production and living conditions index has a negative impact on vegetation coverage. **Keywords**: multilevel model; administrative division; vegetation coverage; driving factors; Fujian Province

(责任编辑:黄仲一 英文审校:吴逢铁)

文章编号:1000-5013(2014)05-0519-04

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2014.05.0519

采用 OHNN 和 M-LFSR 的字序列密码加密方案

蔺小梅,李国刚,张泽普

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 结合反馈型离散 Hopfield 神经网络(HNN)和改进型的线性反馈移位寄存器(M-LFSR)的优点,提出 基于 OHNN 和 M-LFSR 的字序列密码.该方案利用离散 Hopfield 神经网络的混沌吸引子对改进型线性反馈 移位寄存器的非线性选择输出,实现加密.安全性分析与仿真验证表明:该算法构造的伪随机序列具有良好的 随机性、复杂度等特点,满足密码学的要求.

关键词: 序列密码;线性反馈移位寄存器;离散型 Hopfield 神经网络;混沌吸引子

中图分类号: TN 918.4 文献标志码: A

序列密码实质上是一个密钥流发生器,通过将密钥流序列与明文异或完成加密和解密.传统序列密码软件实现速度慢、效率低^[1],而为了满足高速通信和数据大吞吐量的需求,一类基于字的序列密码被提出^[2].本文提出由一个改进型的线性反馈移位寄存器(M-LFSR)、一个数据选择器和离散 Hopfield 神经网络(HNN)^[3]组成的字序列密码加密方案.

1 理论基础

1.1 改进型线性反馈移位寄存器

传统 LFSR 结构存在合成随机数速度受随机数字长限制的缺陷,即一个时钟通常只能产生 1 bit 的输出,而现代处理器每个时钟可以处理多达 64 bit 的操作,这大大降低了系统的运行效率.为了弥补这个缺点,需要对传统 LFSR 做出改进.

假设一个 LFSR 的特征多项式为 $f(x) = x^p + x^q + 1$,则其所产生的随机序列^[4-5]为

$$U_k = a_k + a_{k+1}x + \dots + a_{k+p-1}x^{p-1}.$$
 (1)

其中: ${a_i}(i=k,k+1,k+2,\dots),u_k=(k=0,1,2,\dots)$ 为多项式,其次数小于 p,系数为 0 或 1,当 k=0时,u=0.由式(1)可以推出

 $u_{n+p} = xu_{n+p-1} \pmod{x^p + x^q + 1} = u_{n+p} + u_n \pmod{x^p + x^q + 1}.$ (2)

式(2)中: $n=0,1,2,\dots$. 若令 $w_k = (a_k, a_{k+1}, \dots, a_{k+p+1}), p > 2q, 则可以通过式(2) 推导出系数 <math>w_k$ 之间 的递推关系为 $w_{n+p} = w_{n+q} \oplus w_n$. 利用该递推关系式可以得到

 $\begin{cases} a_{n+p} = a_n \bigoplus a_{n+q}, \\ a_{n+p+(p-q-1)} = a_{n+p-q-1} \bigoplus a_{n+p-1}, \\ a_{n+p+(p-q)} = a_{n+p-q} \bigoplus a_{n+p} = a_{n+p-q} \bigoplus [a_n \bigoplus a_{n+q}], \\ a_{n+2p-1} = a_{n+p-1} \bigoplus a_{n+p-q-1} = a_{n+p-1} \bigoplus [a_{n+q-1} \bigoplus a_{n+2q-1}]. \end{cases}$

这表明 w_k 经过模 2 加运算得到 w_{n+p} . 假设 A 和 B 是长度为 L 的寄存器,且满足 L=p,p>2q.

根据以上算法,改进传统 LFSR,其结构如图 1 所示. 从图 1 可知:对于传统型 LFSR 要输出一个 L 位的随机序列,需要 L 个时钟周期,而 M-LFSR 只需要一个时钟周期就可完成,其吞吐率约为传统型 LFSR 的 L 倍. 它不仅很好地弥补了传统 LFSR 合成随机数速度受随机数字长制约的缺陷,而且提高了 系统运行效率. 文献[6]表明:M-LFSR 产生的伪随机性序列功率谱平坦,自相关函数趋于零,能通过均

收稿日期: 2013-07-18

通信作者: 李国刚(1973-),男,副教授,主要从事集成电路设计与信息安全的研究. E-mail:lgg@hqu. edu. cn.

匀性检验、独立性检验等统计检验,具有良好的统计特性.

1.2 离散神经网络模型

文中采用工作中过饱和状态下的离散型 Hopfield 神经网络. 假设每个神经元状态只为 0 或 1,那么它的下一个状态 S_i(t+1) 取决于当前各神经元的状态 S_i(t),即

$$S_{i}(t+1) = \sigma(\sum_{j=0}^{N-1} T_{i,j}(t)S_{i}(t) + \vartheta_{j}), \qquad i = 0, 1, \cdots, N-1.$$

上式中: 神经元 i 的國值 ∂_{i} , 与神经元 j 之间的联接权值为 $T_{i,j}; \sigma(x)$ 为任一非线性函数, 设为单位阶跃函数. 则系统在 t 时 刻的能量函数为

$$E(t) = \frac{1}{2} \sum_{i,j} T_{i,j}(t) S_i(t) S_j(t).$$
(3)

Fig. 1

在文献[7]中,Hopfield已证明式(3)是随系统状态的演进而单调下降,最终会达到一种稳定状态, 即混沌吸引子,且其吸引域所包含的状态消息间存在不可预测的关系.如果改变联结权值矩阵 T,则吸 引子及其相应的吸引域都会发生改变.在引入随机变换矩阵 H 后,原初始状态 S 和吸引子 S_{μ} ,可由 $\hat{S} =$ SH 和 $\hat{S}_{\mu} = S_{\mu}H$ 更新,得到新的初始状态 S 和吸引子 \hat{S}_{μ} ,而且这个过程是单向、不可逆的^[8].

2 系统结构及原理

所提出的新的字序列密码加密方案,其结构由 M-LFSR,N 阶离散 Hopfield 神经网络和数据选择

器组成,如图 2 所示.系统的工作原理:M-LFSR 作为系 统驱动部分,产生随机数,OHNN 作为系统的控制单 元,是一个单向陷门函数,控制数据选择器对伪随机数 的非线性选择,得到的初始矩阵,网络演变后生成混沌 吸引子.数据选择器根据混沌吸引子对随机数进行非线 性选择,输出伪随机数,经过编码后,得到密钥序列.密 钥序列一方面经过扰动函数,反馈到 M-LFSR 扰动更新 M-LFSR;另一方面,同明文序列异或产生密文序列,实 现加密.



图 2 系统结构图 Fig. 2 System structure

神经网络采用 N 阶的,吸引子总数为 2N,均分为个数相等的 α 和 β 两类^[9]. 文中将混沌吸引子分 类,选择 N 路数据开关,故混沌吸引子和数据是 2 对 1 的映射关系,吸引子和数据选择器里面的 S 盒的 映射关系是在系统运行过程中建立的.另外,还有一路初始化开关.数据选择器将系统产生的随机数转 化为二进制(L 位),然后随机选择 A(L,M)中的 N+1 种($M \leq L$),M为密钥序列宽度.在这些排列组合 中,一种作为初始化开关,其他 N 种作为数据开关.S 盒的数据由 A(L,M)随机产生的.文中拟采用的 阶数 N 为 16.

3 系统安全性能分析及测试

3.1 抗暴力攻击

若文中采用对称加密,由于离散神经网络由 N 个神经元所组成的,则每个随机变换矩阵 H 都存在 N! 种可能,即它的密钥空间为 N!. 若采用穷举法攻击,要得到目标随机变换矩阵,需要运行 N! 次. 假 设采用每秒钟能计算 10⁵ 个变换矩阵的专业计算机,当 N=32 时,遍历一次就需要 10²⁰ MPIS Years,远 远超出现在所能接受的安全水平,即 10¹² MPIS Years^[3].

若攻击者绕过 HNN 复杂的 NP 问题,转而针对 M-LFSR 分析.在此种情况下,系统开关选择每个时钟都在变化,约有 1.26×10²²(A(32,16))种选择.攻击者要尝试 1.26×10²²次,才能得到一个时钟的密钥序列.假设采用我国的"天河一号"超级计算机,运算速度是 2.570×10¹⁷次 • s⁻¹,每年也只能解密出约 1 KB 的信息.在现有计算机计算水平下,这种攻击方式是徒劳的.



Structure of M-LFSR

520

3.2 抗矩阵分析和差分分析

若采用公钥加密体制,文献[3]从正交分解、奇异值分解和三角分解出发,逐一论证了 HNN 网络的 安全性是可靠的.由于整个密码系统是不规则的,在加密过程中,即使同一明文序列加密后,得到的密文 序列也不可能是相同的.而且,在解密过程采用自吸引的方法,故差分密码分析对该算法是无效的.

3.3 随机性测试

采用为 RedHat 9.0 测试平台,依据美国国家标准与技术委员会(NIST)制定的考评随机和伪随机 序列的测试标准 SP800-22. 首先在 VC 上得到的密钥序列样本,然后将测试样本为 100 组,每组 10⁵ 个 数据,最后在测试平台上逐一得到测试指标,结果如表 1 所示.表 1 中: $P_{\rm H}$ 为最高值; $P_{\rm L}$ 为最低值.设 α =0.01,若计算出的 P 值小于 α ,则测试序列不为随机序列;反之,则不是随机序列^[10]. 从表 2 可知:算 法产生的密钥序列具有较好的随机性.

	D	D	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	D	D
	ИН	ΙL	侧风件平	ИН	ΓL
Frequency	0.984 043	0.595 549	Block Frequency	0.971 897	0.679 024
Cumulative Sums	0.984 242	0.410 556	Runs	0.999 078	0.333 213
Longest Run of Ones	0.989 068	0.496 386	Rank	0.949 536	0.159 044
Discrete Fourier Transform	0.926 884	0.118 754	Non-Overlapping Template	0.978 072	0.173 082
Overlapping Template	0.965 781	0.286 319	Linear Complexity Test	0.933 851	0.178 718
Universal	0.966 669	0.144 169	Approximate Entropy	0.950 958	0.115 881
Random Excursions	0.981 982	0.200 173	Random Excursions Variant	0.981 792	0.165 642
Serial	0.770 014	0.102 229			

表 1 随机序列的随机性测试 Tab. 1 Random test of random sequence

3.4 相关性测试

1) 自相关测试.选取内容重复的明文,如"钓鱼岛自古以来就是中国的领土!",经加密后,得到一份密钥序列.若自相关函数变化越小,表明序列随机性越好^[10].测试结果如图 3(a)所示.图 3(a)表明: 自相关函数变化很小,序列随机性好.2) 互相关测试.随机改变矩阵 H 其中的一位,得到另一份密钥序 列样本.若互相关函数越接近零,说明两个序列越互不相关^[11].测试结果如图 3(b)所示.图 3(b)表明: 两份密钥序列的互相关系数很小,相关度很低,一个微小改变可以引起雪崩效应.





3.5 加解密测试

测试平台为 Lenovo Z460, CPU 为 Intel(R) Core(TM)i5, 内存 2.00 GB. 系统中, M-LFSR 的特征 函数为: $f(x) = x^{33} + x^{13} + 1$, p = 33, q = 13, L = 32, 密钥序列宽度 M = 16. 在此成功完成对内容为古诗 《静夜思》txt 文档的加解密测试. 加密过程中计算 1 次混沌吸引子就可以加密 1 bit 明文信息, 对 txt 文 档实际测量的加解密速度为 423, 412 b • s⁻¹, 是文献[12]的 17 倍, 是文献[3]的 7 倍.

4 结论

提出的基于 OHNN 和 M-FSR 的字序列密码加密算法不仅可以在不同的密码体制中实现,而且密

钥序列的宽度可以调整,最高可达到 p,并由特征多项式决定.所涉及的该方案不仅需要具有良好密码 学特性,较高软件实现效率,而且由于每次输出的是一个字而非一个比特,其吞吐量大幅度提升^[12],还 解决了 LFSRs 之间的延迟和本原多项式难选取的问题^[13],保证了其安全.

新方案经理论分析和软件测试,具有可靠的安全性和较高的效率,在不影响系统的速度的前提下, 可以增加神经网络阶数,提高系统复杂度,使系统更加安全,为通信加密提供了一种新的选择.

参考文献:

- [1] FENG Deng-guo, FENG Xiu-tao, ZHANG Wen-tao, et al. Loiss: A byte-oriented stream cipher[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2011, 6639, 109-125.
- [2] EKDAHL P, JOHANSSON T. A new version of the stream cipher SNOW[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2002,2595,47-61.
- [3] 刘年生,郭东辉.基于神经网络混沌吸引子的公钥密码算法安全性分析及其实现[J]. 厦门大学学报:自然科学版, 2007,46(2):187-193.
- [4] GAO Hui-xuan. Statistical computing[M]. Beijing: Peking University Press, 1996:80-120.
- [5] MATTEIS A D, PAGNUTTI S. Long rang correlation in linear and nonlinear random number generation[J]. Parallel Computing, 1990, 14(1): 207-210.
- [6] 崔嵬,李承恕.线性反馈移位寄存器的改进算法及其电路实现[J].北京交通大学学报,2004,28(5):69-72.
- [7] HOPFIELD J J. Neurons, dynamics and computation[J]. Physics Today, 1994, 47(2):40-46.
- [8] LI Guo-gang, GUO Dong-hui. One-way property proof in public key cryptography based on OHNN[J]. Procedia Engineering, 2011, 15(1/2):1812-1816.
- [9] CHAN C K, CHENG L M. The convergence properties of a clipped Hopfield network and its application in the design of key stream generator[J]. IEEE Trans Neural Networks, 2001, 12(2): 340-348.
- [10] 廖晓峰,肖迪,陈勇,等. 混沌密码学原理及其应用[M]. 北京:科学出版社,2009:35-37,92-105,248-249.
- [11] 张雪峰,范九伦.基于线性反馈移位寄存器和混沌系统的伪随机序列生成方法[J].物理学报,2010,59(4):2289-2297.
- [12] 曾光,韩文报,斯雪明.字序列密码驱动部分设计分析[J].电子科技大学学报,2007,36(6):1485-1488.
- [13] 何峥,李国刚.基于神经网口护盾吸引子的混合加密算法[J].通信技术,2012,45(5):49-52.

An Word Oriented Encryption Scheme Based on OHNN and M-LFSR

LIN Xiao-mei, LI Guo-gang, ZHANG Ze-pu

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

Abstract: A new encryption technique in word-oriented stream cipher has been proposed. It consists modified linear feedback shift register simu-lated (M-LFSR), and a feedback discrete-time Hopfield neural networks (HNN). Nonlinearity of the M-LFSR has been chosen by the chaotic attractors of discrete-time HNN as the output to achieve encryption. Safety analysis and simulation have shown that the pseudo-random sequence constructed by the proposed algorithm has been characterized by good randomness and complexity, which meets the requirements of cryptography.

Keywords: stream cipher; linear feedback shift register simu-lated; Hopfield neural networks; chaotic attractors

(责任编辑:黄仲一 英文审校:吴逢铁)

文章编号:1000-5013(2014)05-0523-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2014.05.0523

FP-Growth 的并行加权关联规则挖掘算法

李翔,刘韶涛

(华侨大学 计算机科学与技术学院,福建 厦门 361021)

摘要: 基于 FP-Growth 算法,提出一种并行加权的关联规则挖掘(PWARM)算法,证明其满足加权向下封闭性.使用 MapReduce 计算模型,在分布式集群中并行挖掘出关联规则.实验结果表明:该算法可以满足数据权重不同的需求,且在处理大数据集时能有效地提高挖掘的效率.

关键词: 关联规则挖掘;并行加权; FP-Growth 算法; MapReduce; 加权频繁项集 中图分类号: TP 311 **文献标志码:** A

Apriori 算法^[1]和 FP-Growth 算法^[2]都带有 2 个默认假设:一是数据库中的数据重要性相同;二是数据在数据库中分布均匀.然而在现实中,数据库中数据并非如此.为了解决这个问题,文献[3]提出了一种加权模型,并引入 *k*-支持期望.文献[4]提出一种基于 Apriori 算法的加权模型;文献[5]提出了基于最小支持度的加权模型.文献[6]基于文献[4]的加权模型,提出基于 FP-Growth 算法的加权模型,并进行归一化处理,提高了算法性能.现有的 ARM 算法在处理大数据集时会遇到内存使用和计算消耗的瓶颈.并行的关联规则挖掘(association rule mining, ARM)算法^[7-10]降低了每台机器运行时的内存和计算消耗.文献[7]提出了并行化 FP-Growth 算法,并进行均衡处理.文献[10]使用 MapReduce 并行化FP-Growth 算法的效率,提高了容错性.本文提出一种基于 FP-Growth 并行加权关联规则挖掘算法,适应在具有给定权重的大数据集中的关联规则挖掘.

1 并行加权关联规则挖掘(PWARM)算法

 $I = \{i_1, i_2, i_3, \dots, i_k\}$ 是由 k 个不同项目组成的集合, DB = $\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ 是事务数据库, 其中每个 事务 $T_i(i=1,2,\dots,n)$ 包含唯一的事务标志 TID 和 I 的一个子集.

定义1 假设项目集 $I = \{i_1, i_2, i_3, \dots, i_k\}$ 中的每个项目 $i_j(j=1,2,\dots,k)$ 有一个权重 $W(i_j), \pm 0 < W(i_j) < 1$. 项目有了权重,其所属项集 $X(X \ge I$ 的一个子集)也就有权重 $W_I(X) = \sum_{i_j \in X} W(i_j) / |X|$. D B中的交易事务权重为 $W_T(t) = \sum_{i_j \in t} W(i_j) / |t|$. 关联规则A \Rightarrow B的加权支持度记为 $W_{\text{sup}}(A \cup B)$, 定义为同时包含 A 和 B 的事务权重之和除以所有事务权重之和,即 $W_{\text{sup}}(A \cup B) = \sum_{t \in T \land A \cup B \subset t} W_T(t) / \sum_{t \in T} W_T(t)$.

1.1 加权模型

定义2 设最小加权支持度为 $W_{\min, \sup}$,若项集X是加权频繁的,则其加权支持度不小于最小加权支持度,即 $W_{\sup}(X) \ge W_{\min, \sup}$.

定理1 如果项集 X 和 Y 是 I 的一个子集,即 X \subset I,Y \subset I 且 X \subset Y,则有 $W_{sup}(X) \ge W_{sup}(Y)$. 证明 在一个交易数据集中,包含 X 和 Y 的交易事务集 $T_X, T_y, t \in T_y$,必然有 $\forall t \in T_x$.因此

收稿日期: 2013-06-27

通信作者: 刘韶涛(1969-),男,副教授,主要从事软件体系结构与软件复用的研究. E-mail: shaotaol@hqu. edu. cn.

基金项目: 国务院侨办科研基金资助项目(09QZR02)

定理 2 (加权向下封闭性)如果项集 *X* 和 *Y* 是 *I* 的一个子集,即 *X* \subset *I*,*Y* \subset *I* 且 *X* \subset *Y*,若 *X* 不频 繁,则 *Y* 也不频繁.

证明 X 不频繁,由定义 2 可知 $W_{sup}(X) < W_{min,sup}$,再由定理 1 可知 $W_{sup}(Y) \leq W_{sup}(X)$,由此可得 $W_{sup}(Y) < W_{min,sup}$,Y 不频繁.证毕.

1.2 基于 MapReduce 的加权 FP-Growth 算法

Map input(transactions)

FP-Growth采用分而治之的思想,只需2次扫描数据库.第1次扫描数据库,根据项目的出现次数 排序产生一个排序好的项目集,记为F-List;第2次将数据库构建成一个FP-tree.FP-Growth算法可 以根据已经构建好的FP-tree,针对每一个支持度大于最小支持度的项目生成相应的条件样式树.

基于 MapReduce 的加权 FP-Growth 算法简化了 FP-Growth,省 表1 项目名称及权重 去了构建 FP-tree 和 Head 表的过程. 给定数据库中的项目权重,表1^{Tab.1} Name and weight of items 为一个实例数据库中的项目权重. 表1中:项目权重在1~10之间;1表 项目号 项目 权重 示权重最小,10表示权重最大.

Mapper 过程为数据库中的项目计数,统计出项目的支持度.统计 出事务的权重 $W_T(t_i)$ 和总的事务权重和 SUM(t) = $\sum_{t_i \in T} W_T(t)$,做归 一化处理,事务归一化后的权重为 $W_{TN}(t_i) = W_T(t_i)/SUM(t)$,输出条 件事务集为〈Key= i_i , Value={ $\{i_0, i_1, \dots, i_i\}, W_{TN}(t_i)\}$ 〉.

 项目号
 项目
 权重

 1
 a
 1

 2
 b
 2

 3
 c
 2

 4
 f
 1

 5
 m
 3

 6
 p
 4

Map outputs(conditional transactions)

1 (()

Reducer 过程接受 Mapper 过程的输出,聚集 Key 值相同的输出,

并统计出集合中项目的加权支持度,筛选出加权支持度大于最小加权支持度的项目作为条件 FP-tree.

基于 MapReduce 加权 FP-Growth 算法模型,算法伪码如表 2 所示. DB 是一个包含 5 条交易记录 的实例数据库,最小加权支持度 $W_{\min,sup}=0.5$.

表 2 MapReduce 加权 FP-Growth 算法实例 Tab. 2 Instance of MapReduce weighted FP-Growth algorithm

Sorted transactions

 $\mathbf{WT}(\boldsymbol{x}) \mathbf{WT}(\boldsymbol{x})$

key-value	$\mathbf{v} 1 (\boldsymbol{\iota}_i), \mathbf{v} 1_N (\boldsymbol{\iota}_i)$	$Key = \iota_j, value = ((\iota_0, \iota_1, \ldots, \iota_j), value)$	
		p:fcam 0.212	
facmp	fcamp 2.2,0.212	$m_1 f ca 0.212$	
raemp	•	a:tc 0.212	
		c:f 0.212	
		m:fcab 0.174	
1 (b:fca 0.174	
abcim	Icabm 1. 8, 0. 174	a:fc 0.174	
		c:f 0.174	
bf	fb 1.5,0.145	b : f 0.145	
bcp		p:cb 0.257	
	cbp 2.66,0.257	b :c 0.257	
		p:fcam 0. 212	
c		m:fca 0.212	
atcmp	fcamp 2.2,0.212	a:fc 0.212	
		c:f 0.212	
Redice in	nputs	Conditional ED trace	
$key = i_j, value = \{\{i_0, i_1\}\}$, \cdots , i_j } , $WT_N(t_i)$ }	Conditional FF-trees	
p:{{fcam 0.212},{fcam	0.212},{cb 0.257}}	{c: 0.681} p	
m:{{fca 0.212},{fca 0.	212},{fcab 0.174}}	$\{\{f 0.598\}, \{c 0.598\}, \{a 0.598\}\} m$	
b:{{fca 0.174},{f 0.	145},{c 0.257}}	{ } b	
a:{{fc 0.212},fc 0.2	174}, { fc 0.212 } }	$\{\{f 0.598\}, \{c 0.598\}\} a$	
$c \cdot \{\{f \mid 0 \mid 212\}, \{f \mid 0 \mid 174\}, \{f \mid 0 \mid 212\}\}$		$\{f 0, 598\} c$	

Procedure: MapReduce-FP-Growth(DB, W_{min,sup}) $SUM(T_i) + = (W_T(T_i);$ Procedure Mapper(DB, W_{min, sup}) End Sort F[]; Define and clear F-list F[]; Define and clear $SUM(T_i)$; foreach Transaction T_i in DB do Define and clear $W_{TN}(T_i)$: $W_{TN}(T_i) = W_T(T_i)/SUM(T_i)$ foreach Transaction T_i in DB do foreach Item i_i in T_i do Define and clear $W_T(T_i)$; Call Outputs foreach Item ii in Ti do $\langle \text{key}=i_i, \text{value}=\{i_0, i_1, \dots, i_i\}, W_{TN}(T_i)\} \rangle$ $F[i_i] + +$ End $(W_{T}(T_{i})) + = W(i_{i}) / |T_{i}|;$ End End

Procedure Reducer(key= i_j , value=S({ $\{i_0, i_1, \dots, i_j\}, W_{TN}(T_i)\})$)

for each Item i_m in S($\{i_0, i_1, \dots, i_j\}$) do

Define and clear $SUM_N(i_m)$;

 $SUM_N(i_m) + = M_{TN}(t_m)$;

if $SUM_N(i_m) > = W_{min sup}$

 $S(i_{m}, SUM_{N}(i_{m}) + = \{i_{m}, SUM_{N}(i_{m})\};$

End

Call Outputs($\langle Key=i_j, Value=\{S(i_m, SUM_N(i_m))\}\rangle$)

1.3 PWARM 算法

对于给定的 DB, PWARM 算法共 5 个步骤, 使用 4 次 MapReduce 并行化加权 FP-Growth 算法, 加权 FP-Growth 算法使用加权模型.

步骤1 碎片化.将一个数据库碎片化成存储在多个分布 PC上的局部数据库,每一个局部数据库 称为一个碎片.在现实中,大数据集往往分布存储在一个集群上,步骤1就可以省略.

步骤2 并行计数.使用1次 MapReduce,在每个碎片中并行计算数据库中的每个项目出现次数,即项目的支持度.根据支持度排序结果集并存储在 F-list 中.F-list 中包含了 DB 的项集和项集中每个项目的支持度.

步骤3 项集分组. 将 F-list 中的全部项集分成 Q 个分组,分组是为了便于并行计算. 根据实际情况中内存的大小来确定 Q 值的大小,保证每组中的内存都可以满足该组算法的运行. 每个组中包含 F-list 的一个子集,称为 G-list,并为每一个组赋予一个唯一的标记(gid).

步骤4 并行加权 FP-Growth 是算法的重点,使用一次 MapReduce.

Mapper 过程:根据 G-list 中的每一个项目,并行将每个碎片中的事务派发到 Q 个分组中. Mapper 过程生成了 Q 个键值对,键为每个分组的 gid,值是一个对于 G-list 完整的事务集.

Reducer 过程:并行地在 Mapper 生成的组完整事务集中运行加权 FP-Growth 算法.构建加权 FP-tree 和加权条件 FP-tree,挖掘出每一个项目的加权频繁项集.

步骤5 整合.将步骤4生成的结果使用一次 MapReduce 过程来整合,生成完整的频繁项集. 1.3.1 并行计数 针对每一个划分好的数据库碎片,使用一次 MapReduce. Mapper 过程的输入为数 据库碎片中每一个事务,〈key,value= T_i 〉($T_i \subset DB$).输出是〈Key'= i_i , Value'=1〉($i_i \in I \& \& i_i \in T_i$). 当每一个 Mapper 实例全部计算完成以后, Reducer 过程将 Mapper 产生的输出集合起来产生输出 〈Key''= i_i , Value''=Sum(Value')_{Key'=Key'}〉. 伪码如下所示.

Procedure: $Mapper(key, value = T_i)$

foreach item i_i in T_i do

```
Call Output(\langle \text{Key}' = i_i, \text{Value}' = 1 \rangle);
```

End

Procedure Reducer($\langle Key' = i_i, Value' = 1 \rangle$)

C**←**0;

526

Foreach item i_i in T_i do

 $C \leftarrow C+1;$

End

Call Output $\langle Key'' = i_i, Value'' = C \rangle$

1.3.2 并行加权 FP-Growth 算法的第3步将 F-list 划分成 Q 个组,每一个组都有一个唯一标识 gid. 本步骤在此基础上并行处理每个数据库碎片.根据 G-list 中的内容,派发数据库碎片中的每一个事务到 一个组独立的事务数据库中.再在这些组独立的数据库中构建加权 FP-tree,挖掘出加权的频繁关联规则.具体拆分为一个 Mapper 和 Reducer 过程.

Mapper 过程. 每一个 Mapper 实例启动时,输入一个数据库碎片,输入可以表示为〈Key, Value = T_i 〉;对每一个 T_i ,将 G-list 哈希成哈希表 H 加载到内存中,倒序遍历 T_i 中的项目 $i_j \in T_i$,搜索 H 中包 含 i_j 的组 G_k ,从 H 中删除 G_k 的全部元素,输出〈key=gid, value={ i_1, i_2, \dots, i_j 〉.

Reducer 过程.将 Mapper 过程产生的结果,根据 key 值聚集在一起,生成 Q 个组独立的事务集;再并行地在每个组独立的事务集上,执行基于 MapReduce 的加权 FP-Growth 算法;生成碎片数据库的条件 FP-tree.

2 实验结果和分析

实验用 4 台计算机,1 台运行 WFP(weighted FP-growth)算法,其他 3 台组成一个 Hadoop 集群,运行 PWARM.实验环境是 openSUSE Linux 11,Inter(R) Core(TM) i3-3220 CPU 3.30 GHz,2 G 的 内存,JDK-1.7.0, Hadoop-0.20.2.实验数据采用 http://cdiac.ornl.gov/ftp/上的气象数据进行离散 化处理后做为事务数据源,该数据是由中科院 2 个基站观测到的气象数据,项集包括平均气压,平均温度,平均最高气温等 14 个气候数据和时间(年月日)数据以及基站编号数据.使用一个随机生成函数给 项目一个权重,权重分布在 1 至 10 之间.通过关联规则挖掘,找寻气象要素之间的关联规则关系.

随数据集增大,WFP 算法和 PWARM 算法的运行时间,如图 1 所示.当数据集中事务数超过 8 万时,WFP 算法因为内存不足,算法无法运行下去.PWARM 算法使用 MapReduce 分布式的计算模型,使用 3 台计算机并行的计算,其运行时间要小于 WFP 算法的运行时间.当事务集中事务数目增大时, PWARM 算法可以使用集群中的共享内存,所以不会产生因为内存不足导致算法运行不了的情况.



图 1 算法运行时间比较 Fig. 1 Comparing of running time

3 结束语

提出了基于 FP-Growth 算法的并行加权的关联规则挖掘算法,利用随机生成函数给每个项目设置 不同的权重,从而解决交易数据库中数据项的重要性各不相同,且实际出现频率分布不均的问题.使用 MapReduce 计算模型来提高算法的运行效率.并行化的计算以解决处理大数据集时内存不足导致算法 无法运行的问题.但是没有就权重对算法的影响进行实验,也没有与其他的并行加权算法做横向比较, 因此,下一步将就此方面做深入研究,以完善算法.

参考文献:

- [1] AGRAWAL R, SRIKANT R. Fast algorithms for mining association rules [C] // International Conference on Very Large Data Bases (VLDB 94). San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc, 1994:487-499.
- [2] HAN Jia-wei, PEI Jian, YIN Yi-wen, et al. Mining frequent patterns without candidate generation[C]//Data Mining and Knowledge Discovery. Hingham M A:Kluwer Academic Publishers, 2000:53-87.
- [3] CAI C H, ADA W C F, CHENGTAL C H. Mining association rules with weighted item[C]// Proc of International Symposium on Database. Washington D C: Engineering & Applications, 1998:178-186.
- [4] FENG Tao, MURTAGH F, FARID M. Weighted association rule mining using weighted support and significance framework[C]// Proc of 9ths ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. [S. I]: ACM Press, 2003;661-666.
- [5] 邹力鹍,张其善.基于多最小支持度的加权关联规则挖掘算法[J].北京航空航天大学学报,2007,33(5):590-593.
- [6] CHEN Wen. Mining algorithm for weighted frequent pattern based on FP-tree[J]. Computer Engineering, 2012, 38 (6):24-27.
- [7] PRAMUDIONO I, KITSUREGAWA M. Parallel FP-growth on PC cluster[C] // PAKDD. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin, 2003:141-144.
- [8] ZAIANE O R.El-HAJJ M,LU P. Fast parallel association rule mining without candidacy generation[C] // ICDM. Washington D C: IEEE Computer Society, 2001:21-26.
- [9] ZHOU Le, Balanced parallel FP-Growth with MapReduce information computing and telecommunications[C]//2020 IEEE. New York: ACM Press, 2008: 243-246.
- [10] LI Hao-yuan, WANG Yi, ZHANG Dong. Chang PFP: Parallel FP-growth for query recommendation[C] // ACM. New York: ACM Press, 2008:107-114.

A Parallel Weighted Association Rule Mining Algorithm on FP-Growth

LI Xiang, LIU Shao-tao

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

Abstract: Proposeing a parallel weighted association rule mining (PWARM) algorithm on FP-Growth algorithm. Testified that the algorithm is satisfy weighted downward closure property, using MapReduce mining association rules in parallel in a distributed cluster. Experimental analysis shows that this algorithm can satisfy the demand of mining the data with different weight in the database, and in dealing with large data sets to speed up the efficiency of mining.

Keywords: association rule mining; parallel weighted; FP-Growth algorithm; MapReduce; weighted frequent items

(责任编辑:陈志贤 英文审校:吴逢铁)

文章编号:1000-5013(2014)05-0528-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2014.05.0528

神经网络的压力容器评估系统设计

吕兵,王华珍,潘孝铭

(华侨大学 计算机科学与技术学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为解决长周期压力容器设备安全评估的低效率、低可靠性和不能人机交互等问题,利用开源的 R 语 言设计复杂的神经网络识别算法,并通过 C # . NET 设计出一套界面友好的压力容器评估系统. 实验结果表 明:创建的压力容器评估系统嵌入 BP 神经网络算法,能精确刻画压力容器参数与状态之间的复杂非线性关 系,评估准确率高;同时,软件系统实现了评估过程的交互性和自动化,具有良好的用户体验和很强的实践性. 关键词: 压力容器;评估;人工神经网络;混合编程 中图分类号: TP 183 **文献标志码**: A

压力容器广泛应用于石油化工、能源、机械和冶金等领域,其内部或外部承受气体或液体压力,对安 全性有较高的要求.如何及时有效地对长周期压力容器设备进行安全评估,保证压力容器设备可靠地使 用,已成为工业生产的迫切要求.传统的评估方法通过人工对检测到的参数值,按照阈值水平等规范进 行简单运算.其工作量大且需要检验人员专家经验知识指导,受人为因素的影响较大,一般无法综合考 虑多种因素之间的相互作用,因此,无法正确刻画压力容器多种因素与安全状态之间的非线性关系.目 前,压力容器缺陷的安全评定出现了一些新的技术方法^[1].如基于模糊理论的评定技术^[2]对压力容器结 构存在大量的不确定性,采用模糊数学方法进行处理;专家系统技术^[3]基于事例的推理算法归纳出若干 条输入因素与输出安全性能之间的规则,从而进行评估;采用概率断裂力学的评定技术^[4]将概率统计理 论与确定性断裂力学理论相结合;基于人工神经网络的评定技术^[5-6]利用机器学习(ML)技术从高维、海 量的数据中自动地学习到容器参数和安全性之间蕴含的复杂非线性关系,无限逼近地挖掘到输入与输 出之间的关系.本文利用机器学习技术设计压力容器安全性智能评估算法,使其高效地刻画出压力容器 安全性评估模式;同时研究生产实践中常用的C♯.NET 平台与智能算法编写工具 R 语言的混合编程 技术,开发出简单、易用的软件界面.

1 系统总体设计

在实际应用中,比较典型的机器学习算法有人工神经网络(ANN)^[7]、支持向量机(SVM)^[8]、集成学 习^[9]等.在智能算法选择方面采用 ANN 算法.在软件系统设计方面,采用 C#.NET 技术构建用户交互 界面,并使用 R 语言来编写 ANN 算法程序嵌入其中.在 R 和 C#.NET 的调用连接方面,采用 Stat-ConnDCOM 接口软件来实现二者的混合编程(http://rcom.univie.ac.at/).这种 COM(组件对象模 型)组件相当于 C#与 R 间交互的媒介或数据转换器,使数据能很好的在 2 种平台之间实现互相通信.

PVES系统的技术原理,如图1所示.PVES的工作流程为:1)现场采集数据,构建完整、详实的压力容器数据库,数据库中的数据集在机器学习领域称为样本集,该数据库可实现数据的增加、删除、查询、修改和统计等基本功能;2)使用 ANN 算法从数据库中的样本集中学习出 ANN 智能评估模型,这一过程实现了评估系统的自学习、自适应;3)当采集到新的待评估的压力容器的一系列参数,将这些参数值输入到 ANN 模型中,由模型推断出压力容器的安全性(安全或不安全).这一过程实现了系统的自

收稿日期: 2013-09-26

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2012J01274);华侨大学高层次人才科研项目(09BS515)

通信作者: 王华珍(1975-),女,讲师,主要从事机器学习、模式识别的研究. E-mail:wanghuazhen@hqu. edu. cn.

动、智能评估.本系统的开发环境包括:.NET 4.0 框架平台;Visual Studio 2010 开发工具;R 3.0.0 软件平台;statconnDCOM 3.5 组件;Microsoft Access 2010 数据库.

2 建模与混合编程相关技术研究

2.1 人工神经网络模型的建立

人工神经网络 ANN 是由大量并行运算的处理单元即神经元 互联组成的复杂网络结构,能够对信息进行分布存储,以及对输入 输出关系进行无限逼近拟合.迄今为止,具有代表性的 ANN 网络 模型有感知器及多层感知器、BP 网络、RBF 网络、Hopfield 网络、 SOM 模型等^[10].文中需要对压力容器的安全性(安全或不安全) 进行评估,其本质是分类过程.在以上 ANN 模型中能够完成分类

任务的是多层感知器(MLP)、误差反向传播神经网络(BP)以及径向基函数神经网络(RBF). MLP 是感知器的推广,解决了感知器不能对线性不可分数据进行识别的问题,其学习函数常用 SCG 算法^[11].

以 3 层结构 BP 神经网络为例,论述 ANN 的学习和建模过程. BP 神经网络由输入层、隐含层和输出层组成,其结构如图 2 所示,具体的学习和建模流程分为以下 4 个过程.

 1)模式顺传播.输入模式(数据)由输入层经过隐含层 向输出层逐层传播的过程.输入层只是简单将接收到的输 入模式作为输出模式传递给隐含层,隐含层各个神经元的 净输入和输出为

$$b_j^k = f(\sum_{i=1}^n w_{i,j} x_i^k - \theta_j), \qquad j = 1, 2, \cdots, p.$$

输出层各个神经元的净输入和实际输出计算式为

Þ

$$c_t^k = f(\sum_{j=1}^{k} v_{i,j} b_j^k - \gamma_t), \quad t = 1, 2, \cdots, q.$$
 (2) Fig. 2 Basic Structure of BP network model

(1)

式(1)~(2)中:中间层采用 S 型激活函数,输出层采用线性激活函数.

2)误差逆传播.误差信号(网络的期望输出与实际输出之差)由输出层经隐含层向输入层逐层修正 连接权值的过程.输出层和隐含层的各个神经元的校正误差分别为

$$d_{t}^{k} = (y_{t}^{k} - c_{t}^{k}) f'(\sum_{j=1}^{r} v_{i,j} b_{j}^{k} - \gamma_{t}), \qquad t = 1, 2, \cdots, q,$$
(3)

$$e_j^k = \left[\sum_{t=1}^{j} v_{i,j} b_t^k\right] f'\left(\sum_{i=1}^{j} w_{i,j} x_i^k - \theta_t\right), \qquad j = 1, 2, \cdots, p.$$

$$\tag{4}$$

修正隐含层至输出层的连接权值 V 和输出层神经元的阈值 γ,即

$$\Delta v_{j,t} = \alpha d_t^k b_j^k, \qquad j = 1, 2, \cdots, p, \qquad t = 1, 2, \cdots, q, \tag{5}$$

$$\Delta \gamma_t = \alpha d_t^k, \qquad t = 1, 2, \cdots, q. \tag{6}$$

修正输入层至隐含层的连接权值 W 和隐含层神经元的阈值 θ ,即

$$\Delta w_{i,j} = \beta e_j^k x_i^k, \qquad i = 1, 2, \cdots, n, \qquad j = 1, 2, \cdots, p, \tag{7}$$

$$\Delta \theta = \beta \boldsymbol{x}_{j}^{k}, \qquad j = 1, 2, \cdots, p.$$
(8)

3) 记忆训练. 随机一定量的学习模式对提供给网络,由前两个过程反复交替进行网络训练.

4) 学习收敛. 判断网络全局误差 E 是否满足精度要求,即 E≤ε.

2.2 R语言与C#.NET 混合编程

R语言是一套完整的数据处理、计算和绘图系统,是一个自由、免费、开源的软件.而C♯.NET是 针对.NET平台而设计的,利用C♯.NET开发的系统软件能有效脱离编程环境运行.但NET框架平 台缺少统计学、机器学习(尤其是人工神经网络)方面的类库.如果独立开发,会使软件开发周期加长,并



图 1 R 与 C #. NET 混合编程技术图

Fig. 1 Technical chart of R and

C#.NET mixed programming

529



图 2 BP 网络模型的基本结构

且.NET 在数据分析和作图功能上表现并不突出,无法满足数据挖掘方面的应用.

将 R 与 C #. NET 混合编程协同工作,能够实现优势互补,既可以利用人工神经网络模型对长周期 压力容器进行有效地分析建模,又可以利用友好操作界面来提高压力容器安全性评估的实用性. 但是, 由于两者的混合编程受到 R 版本和相应的. NET 动态链接库的支持包 rscproxy 的兼容性等限制,这给 混合编程技术研究带来很大的困难. 目前研究 R 和 C #. NET 的混合编程的工作非常少,只有赵毅 等^[12]尝试将 R 与. NET 混合编程实现其在重质油数据管理分析中的应用. 文中针对压力容器这个特定 领域,开发基于 R 语言环境和 C #. NET 混合编程的智能评估系统,具有理论和实践的迫切性.

3 实验与分析

3.1 数据与实验设置

针对具体项目中的压力容器的常见缺陷,即安全状态进行建模和评定.这些典型缺陷分为体积型缺陷和面型缺陷,其中面型缺陷又主要分为纵环焊缝裂纹缺陷和接管角焊缝裂纹缺陷两种.针对这3种不同的安全性问题,其所关联的特征集(容器参数等)略有差异.因此,PVES系统将针对这医药个缺陷(安全评估)问题分别构建3种不同的智能评估模型,即体积型缺陷评估模型,纵环焊缝裂纹评估模型和接管角裂纹评估模型.这3种模型所对应的参数集、样本集情况,如表1所示.其中:安全性能(数据所对应的类别)分为"安全"和"不安全"两类.

	Tab.1 Information of sample sets							
样	本信息		参数(特征)分布	〕 情况	柱尔首粉	+¥ + **	과는 DI #6-	
缺	·陷类型	材料参数	应力参数(模型尺寸)	缺陷参数(缺陷尺寸)	付征心奴	件平奴	矢ガ奴	
体利	积型缺陷	材质	凹坑所在部位计算厚度, 平均半径,工作压力	凹坑长轴长度一半,凹坑 短轴长度一半,凹坑深度	7	1 458	2	
面型	纵环焊 缝裂纹	材质	筒体直径,筒体长度, 筒体壁厚,封头壁厚, 工作压力	焊缝位置,裂纹短轴长 度一半,裂纹长轴长度 一半,错边量,角变形	11	13 474	2	
三 缺 陷	接管角焊 缝裂纹	材质	筒体直径,筒体长度, 筒体壁厚,接管壁厚, 接管内径,工作压力	圆形裂纹半径	8	1 672	2	

表1 样本集介绍

以上个模型对应的样本集具有多参数、混合特征(即同时存在连续和离散型特征)等特点.对表1中 3个样本集分别随机选择其中的70%作为训练集,剩下的30%作为测试集.在训练集上采用十重交叉 验证对参数进行网格搜索,以得到最优的ANN模型.

R 语言的 RSNNS 软件包能够同时实现 MLP, BP 和 RBF 算法并且提供了详细的参数调整方案.这 3 种算法共同的参数设置是:1) 输入层节点数,其数量等于特征的个数;2) 输出层神经元个数为2个, 对应最终评估结果为"安全"和"不安全"两种情况.此外,3 种算法还有各自特定的参数,如 BP 网络的隐 含层神经元个数根据经验公式: $h = \sqrt{n+t} + a$,1 $\leq a \leq 10$,其中:h为隐含层节点数;n为输入层节点数;t为输出层节点数.经过参数优化过程,得到3 种最优网络模型对应的参数值,如表2 所示.

	Tab. 2 Op	timal parameters of three	network models	
名称	检入日本占粉	隐含层节点数		迭代次数
	捆八层 1 点数	MLP/BP/RBF	一	MLP/BP/RBF
体积型缺陷	7	10/8/15	2	150/100/100
纵环焊缝裂纹	11	13/14/34	2	240/200/200
接管角焊缝裂纹	8	10/11/15	2	120/100/100

表 2 3 种网络模型最优参数 Fab. 2 Optimal parameters of three network model

3.2 实验结果

对体积型缺陷样本集、纵环焊缝裂纹样本集和接管角焊缝裂纹样本集分别进行学习建模,每个模型 分别采用 3 种 ANN 算法实现,实验重复 20 次,得到 3 种 ANN 算法的平均运行时间(t)和测试集平均 预测准确率(η),如表 3 所示(下划线数字为性能最优结果).

性能	安全评估模型	MLP 模型	BP网络	RBF 网络
	体积型缺陷	4.43	3.23	4.29
t/s	纵环焊缝裂纹	29.60	<u>19.97</u>	21.27
	接管角焊缝裂纹	6.74	3.46	4.03
	体积型缺陷	98.80	99.31	95.30
$\eta/\%$	纵环焊缝裂纹	96.76	99.46	90.77
	接管角焊缝裂纹	99.16	99.20	93.10

表 3 MLP, BP 网络和 RBF 网络性能比较 Tab. 3 Properties comparison of MLP, BP network and RBF network

通过 3 种 ANN 算法的性能比较可知:BP 算法的运行时间最快,其次是 RBF 网络,而 MLP 所需的 迭代次数最多,在网络训练中运行时间最长.在测试集的预测准确率上,BP 网络最高,MLP 同样很高, 但 RBF 网络预测效果明显要差许多.因此,在具体的 PVES 构建中选择 BP 网络作为内嵌智能算法.

3.3 系统实现

PVES 实现了 3 种不同的安全评估模型,软件界面如图 3 所示.图 3 中,在菜单栏显示了 PVES 的

主要功能模块:安全评估模块、材料性能参数数据库模块、 分类应力参数数据库模块和缺陷复合参数数据库模块等. 其中:后面3个模块是压力容器相关参数的数据库管理模 块,用于存储和管理压力容器的参数数据,其功能对应于机 器学习领域中的训练数据集构建.而安全评估模块是系统 的核心模块,主要完成从压力容器训练数据集学习出智能 评估模型.安全评估模块上方有体积型缺陷评估、纵环焊缝 裂纹评估和接管角裂纹评估3个交互界面,每个界面针对 特定问题有不同的参数输入和结果输出.这里以体积型缺 陷(安全性)评估模型为例,展示其在 PVES 中的使用流程 和关键技术的实现.





在工业环境中实际使用时,用户在界面上输入体积型缺陷辨识模型相应的7个特征参数值后, PVES通过COM构件启动和调用R程序,R系统将从数据库中调用历史样本数据集进行特定的BP网络模型构建.R同时绘制其建模过程的拟合错误率曲线图并显示于程序操作界面,随着迭代次数的增加训练误差逐渐减小,最终达到指定的误差下限,表明判别模型构建完成.接下来用户点击"评估"按钮,则用户输入的参数将送入判别模型中推理,PVES根据R的分析结果来给出评估结果,即安全或不安全. 用户可将本次评估数据使用"保存"按钮添加至相应数据库,或使用"重置"按钮进行下一轮的数据评估. PVES 对测试数据进行评估的结果,如表4 所示(限于篇幅,只列出10 组数据进行对比).

			特征	正参数集				古中	河仕
序号	材质	凹坑所在部位 容器计算厚度	平均 半径	工作 压力	凹坑长轴 长度一半	凹坑短轴 长度一半	凹坑 深度	- 具头 状态	F 伯 结果
1	Q 235B	6	400	1.30	40	45	3.0	安全	安全
2	Q345R	6	500	1.77	30	90	2.0	安全	安全
3	Q245R	8	400	2.00	50	75	3.0	安全	安全
4	Q 235B	6	600	1.57	50	135	1.0	不安全	不安全
5	Q245R	10	1 000	2.00	30	150	2.5	不安全	不安全
6	Q 235B	14	1 600	2.00	130	105	0.5	不安全	不安全
7	Q345R	14	1 600	1.77	85	30	3.5	不安全	不安全
8	Q345R	8	900	1.30	50	150	0.5	安全	安全
9	Q 235B	10	600	1.57	10	45	0.5	安全	安全
10	Q245R	12	1 300	1.30	70	90	2.5	安全	安全

表 4 PVES 评估结果 Tab. 4 Evaluated results of PVES

运行结果表明: PVES运用 BP 网络模型对压力容器的检测结果和测试样本集的真实类别基本一致,表明 PVES 能够有效地对长周期压力容器进行安全评估.

4 结束语

研究智能算法编写工具 R 语言与生产实践中常用的 C #. NET 技术的混合编程技术,构建长周期 压力容器智能评估软件系统 PVSE. 该软件系统充分结合了 BP 神经网络智能算法和 C #. NET 软件工 程两者强大的功能和优势,使得高端的智能算法能够嵌入到实际的工业流程中.实验结果表明:采用 BP 神经网络智能算法可以综合考虑压力容器多种因素之间的相互作用,正确刻画压力容器多因素与安全 状态之间的非线性关系. 同时,利用界面交互操作使得压力容器评估工作简单易用,具有良好的用户体 验. 接下来的工作将考虑综合运用多种评估方法来进行补充、完善和校验长周期压力容器评估系统.

参考文献:

- [1] 韩毅,淡勇,李小勇,等.含缺陷压力容器安全评定的发展历程与趋势[J].石油化工设备技术,2012,33(4):47-50, 71.
- [2] 龙伟,杜仕冲,余进.基于含缺陷在役压力容器的模糊评定[J].四川大学学报:工程科学版,2007,39(1):166-170.
- [3] 戴树和.化工装置在线检查诊断中的非精确性推理[J].化工学报,1994,45(2):141-146.
- [4] 陈国华.含缺陷压力容器失效概率分析方法初步研究[J].化工机械,1996,23(4):42-45,63.
- [5] 俞树荣,李尔国,贾立.基于人工神经网络的压力容器初级评定方法[J].化工机械,1999,26(3):54-56,64.
- [6] 俞树荣,李尔国,贾立.人工神经网络与失效评定图在压力容器安全评定中的应用[J].化工机械,1999,26(5):280-283,301.
- [7] HAYKIN S. Neural networks and learning machines[M]. New York: Prentice Hall, 2009:122-154.
- [8] GUYON I, WESTON J, BARNHILL S, et al. Gene selection for cancer classification using support vector machines [J]. Machine Learning, 2002, 46(1/2/3):389-422.
- [9] DIETTERICH T G. Ensemble methods in machine learning[M]. Springer:Berlin Heidelberg, 2000;1-15.
- [10] 马锐.人工神经网络原理[M].北京:机械工业出版社,2010:45-49.
- [11] MØLLER M F. A scaled conjugate gradient algorithm for fast supervised learning[J]. Neural Networks, 1993, 6 (4):525-533.
- [12] 赵毅,史权,赵锁奇,等. R 语言与. NET 混合编程在重质油数据管理分析中的应用[J]. 计算机与应用化学,2012, 29(4):491-494.

Design of Pressure Vessel Evaluation System Based on Artificial Neural Networks

LYU Bing, WANG Hua-zhen, PAN Xiao-ming

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

Abstract: To address the problems of low efficiency, low reliability, without human-computer interaction in the safety e-valuation of the long-periodic pressure vessel, an intelligent evaluation system based on artificial neural network algorithm is established. In which the open source R language is used to design the complex neural network intelligent algorithm and a user-friendly operating system is developed through C #. NET technology. The experimental results show that the pressure vessel evaluation system embedded BP neural network algorithm can precisely figure out the complex nonlinear relationship between the parameters and the state of pressure vessel by significantly high accuracy. Meanwhile, the software system promotes the interactivity and automation of the evaluation process, which gives good user experience and strong practicality.

Keywords: pressure vessel; evaluation; artificial neural networks; mixed programming

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:吴逢铁)

文章编号:1000-5013(2014)05-0533-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2014.05.0533

采用蚁群算法的移动摄像头探访规划

彭臻,王田,李晨阳,钟必能,陈叶旺

(华侨大学 计算机科学与技术学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 规划了摄像头的移动路径,快速轮询所需要监控区域的热点,从而提高监控的有效性和安全性.定义 一个最短轮询监控点的问题,证明该问题是 NP-难的.设计了基于"视距蚂蚁"的蚁群算法,通过大量模拟实验 证明:设计的算法是有效的,可以在近似最短距离的路径轮询到所有监控点.

关键词: 视频监控;最短路径;蚁群算法;路径规划;摄像头;安全

中图分类号: TP 393 **文献标志码:** A

虽然当今的视频监控发展的非常迅速,应用范围也极为广泛^[1],但也还存在不少问题.传统的摄像 头基本上都是位置固定的^[24],这种提前部署的摄像头容易被犯罪嫌疑人利用,在犯案前踩点,从而在犯 案时躲过摄像头的监控.针对传统部署的固定位置的摄像头所存在的问题,提出移动式摄像头监控的方 案,即将摄像头安装在可以控制其移动的装置上(如移动的机器人、小车)^[5-7].这样不仅可以扩大监控的 范围,也能实现对目标的多角度监控^[8-9].针对该方案,本文提出了快速轮询、探访监控点的问题,证明了 该问题是 NP-难的,并设计了"带视距蚂蚁"的蚁群算法.

1 探访规划问题

平面区域内上有 N 个需要监控的热点,设监控摄像头的视野范围为 r,则 N 个点可以看成是 N 个 半径为r 的圆盘.从 N 个圆盘中的任意一点出发,设计最短的探访轨迹,使得该轨迹经过且仅经过一次 所有的圆盘并最终回到原点.假设需要监控的位置为"质点",而实际中这些关键的位置可能是一个区 域,但是很容易就能扩展到这种探访"区域"的问题.在蚁群算法里,只需要将每只接近半径为 r 的圆盘 的蚂蚁的视距调整为 r 即可.

探访规划问题的一个简单例子,如图1所示.图1中:有一个 可以移动的监控摄像头,其视野范围是5m,要依次访问一个矩形 监控区域内的5个监控点并回到原点,使得所经过的路程最短. 假设 *a* 点为移动摄像头的初始位置,它要依次探访 *A*,*B*,*C*,*D*,*E* 各点,圆的半径是摄像头的监控半径,只要小车到达各个圆内,就 能确保清晰观察到所要监控的对象.小车从*a* 点出发,到达*b* 点 后探访到 *B*,接着到达*c* 点可以探访到 *C*,依次探访 *D*,*E*,最后小 车从*e* 回到*a*.如此循环往复,以完成对所有点的轮询.



图 1 探访规划示意图 Fig. 1 Illustration of visit schedule

考虑该探访问题的一个特例,即假设摄像头的监控视野为 0, Fig. 1 Illustration of visit schedule 那么该问题就退化为传统的货郎 TSP 担问题.由于 TSP 问题是一个已知的 NP-难问题,所以探访规划

收稿日期: 2013-12-26

- 通信作者: 王田(1982-),男,讲师,主要从事物联网,无线传感网,智能视频监控的研究. E-mail:wsnman@gmail. com.
- 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61202468,61202299,61302094);中央高校华侨大学高层次人才科研启动 经费(12BS218);华侨大学科技创新团队和领军人才支持计划(2014KJTD13);福建省自然科学基金计 划资助项目(2014J01240,2012J05117)

2 "视距蚂蚁"蚁群算法

探访规划问题的近似算法——"视距蚂蚁"算法是基于传统蚁群算法^[10]所设计的.传统蚁群算法的 基本原理是:蚂蚁在试探寻找路径时会在路径上释放出一种特殊的信息素,往返一次的路径越长,释放 的激索浓度越低.路径上的激素浓度越高,蚂蚁选择这条路径的概率就越大,这样形成一个正反馈.最 后,蚂蚁们会逐渐找到趋近于最优的路径.*t* 时刻蚂蚁选择路径*ij*(此时蚂蚁位于*i*点)的概率为

$$P_{i,j}^{k}(t) = \begin{cases} \frac{\left[r_{i,j}(t)\right]^{\alpha} \cdot \left[\eta_{i,j}\right]^{\beta}}{\sum\limits_{k \in \theta_{k}} \left[r_{i,k}(t)\right]^{\alpha} \cdot \left[\eta_{i,k}\right]^{\beta}} & j \in a_{k}; \\ 0, & \text{ The } M \end{cases}$$
(1)

式(1)中: $r_{i,k}(t)$ 为路径 ij上的信息素浓度; $\eta_{i,j}$ 为路径 ij的可见度,可以简单看做是路径 ij的距离的倒数; a_k 为位于位置i时可供选择的下一个目标点的集合; α,β 均为常量参数.

显然,路径越短,蚂蚁往返一次的时间也就越短,而该路径上信息激素的浓度相对就越强,从而可以 吸引更多的蚂蚁,如此反复.当蚂蚁群体数量足够大、往返趟数足够

多时,逐渐就会形成最短的路径.

"视距蚂蚁"算法与传统蚁群算法不同的是:每只蚂蚁是带有一定的视距的,蚂蚁们不需要走到访问点就可以提前"嗅探"(实质是看到)到之前蚂蚁遗留的信息素,从而提前决策示例,算法如图 2 所示. 传统的蚁群算法下,A 点出发的蚂蚁要走到 B 点,根据路径 BC 及 BD 的信息素浓度强弱来决定选择的概率.而根据文中的算法,蚂蚁 走到 b 点即可提前嗅探到往 C 方向和 D 方向的信息素浓度,从而提 前做出选择.为不失一般性,假设传统的蚁群算法和改进的蚁群算法 都选择 C 作为下一个探访的目标,即传统蚁群算法的路径是 ABC, 而改进后的蚁群算法路径是 abc1,显然后者的距离更短. 由图 2 可 知:蚂蚁在走到 c1 点后,会将访问过的 A,B,C 三个点从可选列表中



图 2 视距蚁群算法示例 Fig. 2 Example of the algorithm for stadia ant

改进后的蚁群算法流程图,如图 3 所示.现以一 只蚂蚁为例描述该选路过程.假设所有的蚂蚁均从 标号为 0 的点出发(实际可以为指定的任意点),并 将点 0 加入禁忌表.禁忌表存放已访问过的点坐标, 蚂蚁每访问过一个点,都将该点加入到自身的禁忌 表中.如果该蚂蚁还未访问完所有点,则在邻近访问 该点的时候依据信息素的浓度大小按照概率选择下 一个预访问的点,并将该点坐标加入禁忌表.如果所 有点都已访问过一次,则计算出蚂蚁走过的路径长 度并更新信息素,更新方法是根据式(1)计算得到所 走路径上的点两两之间的信息素浓度.其他蚂蚁重 复该蚂蚁的选路过程,直到所有的蚂蚁都轮询了所 有点,这样就形成了最后的优化后的路径.

3 仿真实验

实验数据基于 TSP 的经典数据 Oliver30,即在



图 3 "视距蚂蚁"算法流程图 Fig. 3 Flowchart of the algorithm for stadia ant

100 m×100 m 的平面区域内有 30 个探访点. 摄像头的探访半径为 1~10 m. 为了便于比较,除实现了 传统的蚁群算法之外,还设计了一个"最近邻居节点"算法. 该算法每次以贪心算法的形式选取离当前节 点最近的一个作为下一个探访点,移动到该探访点的半径 r 处即被认为探访到该点,以该点为参照再选 择下一个最近的点,如此直到访问完所有的点.

当节点个数依次增大情况下,探访距离的变化情况如图 4 所示.图 4 中:摄像头监控半径 R 设置为 2 m,计算次数为 100 次;蚂蚁数量为 30.由图 4 可知:由蚁群算法、最近邻居节点算法和"视距蚂蚁"算 法求出的最短路径长度,随着节点个数的增多(需要探访的点增加了)而增加;但在相同节点个数下,"视 距蚂蚁"算法求出的最短路径长度明显小于蚁群算法,而"最近邻居节点"算法的性能最差.

蚂蚁数量(k)依次增多的情况下探访距离的变化情况,如图 5 所示.图 5 中:视频监控半径 R=2 m; 循环次数为 20;蚂蚁数量从 1 开始依次增加到 10.由图 5 可知:随着蚂蚁数量的增多,最优路径长度呈 逐渐变短的趋势,虽然中途有所反复(如当蚂蚁数量为 7,8,9 时),但这不改整体向下的趋势;但当蚂蚁 数增加到 10 的时候,路径长度又继续变小,这是因为有更多蚂蚁探路,就可能寻找到更加优良的路径; 当蚂蚁数接近 10 的时候,路径长度趋于稳定.







10

监控半径依次增大的情况,算法如图 6 所示.循环次数依次增加的情况,算法如图 7 所示.图 6 中: 监控半径从 1 依次增加到 10.由图 6 可知:随着监控半径的逐渐增大,两种算法计算出来的最短路径都 会减小,并渐渐趋于平缓.不难理解,如果监控半径大到极限,将每个点都包含在内,则摄像头不需要移 动就可以监控到所有的节点.算法较最近邻居算法缩短距离达 10%~70%,有着明显的优势.



图 7 中:蚂蚁数量为 10;监控半径 R 为 2;循环次数从 1 开始逐渐增加到 100. 由图 7 可知:随着循 环次数的增加,探访距离越来越短,这是因为"视距蚂蚁"算法每次循环后更新信息素的强度,每次都是 短的路径的信息素浓度高;蚂蚁再一次循环时,就会按照信息素浓度高的路径走,并且会继续使这条路 上的信息素浓度增加,所以每次循环后蚂蚁都会选择出较优的路径;循环次数越多,寻找到的路径越优, 最终结果会在循环 100 次以内收敛,这说明了算法的快速性.

4 结束语

根据可控移动性视频监控的思想,结合蚁群算法中蚂蚁根据信息素的强弱选择最优路径的原理,设 计出"视距蚂蚁"的算法.与传统的蚂蚁算法不同,该算法予以每只蚂蚁一定的视距,蚂蚁不需要走到访 问点就可以提前"嗅探"到之前蚂蚁遗留的信息素,从而提前决策.大量的模拟实验证明,"视距蚂蚁"算 法在视频监控的路径规划上有效地缩短了所走路径长度,节省了时间,大大提高了移动智能视频监控的 有效性.

参考文献:

- [1] 蒋馨. 浅析国外智能视频监控技术的发展及应用[J]. 中国安防,2011(10):105-108.
- [2] 李文航,汪国平,陈毅松.基于移动网络的远程视频监控系统[J].计算机应用研究,2009,26(10):3798-3800.
- [3] 赵瑞宇,孙首群,吕晓军,等.高铁闸机智能监控系统中的行人检测算法研究[J].计算机应用与软件,2013,30(3): 85-88.
- [4] WANG Hui-bin, LU Qiu-li, ZHANG Li-li, et al. An approach for vehicle warning based on video information in transportation surveillance [C] // International Conference on Computer and Electrical Engineering. Phuket: IEEE Press, 2008: 553-557.
- [5] PARK S, HASHIMOTO S. Autonomous mobile robot navigation using passive RFID in indoor environment [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(7):2366-2373.
- [6] FUKUI R, MORISHITA H, MORI T, et al. HangBot: A ceiling mobile robot with robust locomotion under a large payload (Key mechanisms integration and performance experiments)[C]//International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Shanghai: IEEE Press, 2011:4601-4607.
- [7] ZHAN Yan-mei, LEUNG H, KWAK K C, et al. Automated speaker recognition for home service robots using genetic algorithm and Dempster-Shafer fusion technique [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009,58(9):3058-3068.
- [8] ZHANG Jun, SONG Guang-ming, QIAO Gui-fang, et al. An indoor security system with a jumping robot as the surveillance terminal [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2011, 57(4):1774-1781.
- [9] FOLGADO E, RINCóN M, áLVAREZ J R, et al. A multi-robot surveillance system simulated in gazebo[C]//Nature Inspired Problem-Solving Methods in Knowledge Engineering. Berlin Heidelberg: Springer, 2007;202-211.
- [10] 侯文静,马永杰,张燕,等.求解 TSP 的改进蚁群算法[J].计算机应用研究,2010,27(6):2087-2089.

Visit Schedule of Mobile Cameras Base on Ant Colony Optimization

PENG Zhen, WANG Tian, LI Chen-yang, ZHONG Bi-neng, CHEN Ye-wang

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

Abstract: Mobile cameras can raise the visual field to a great extent. This paper focuses on how to plan the movement path of the cameras so as to quickly visit the hot spots of the area to be monitored. The shortest route for the cameras is designed in order to improve the effectiveness and security. This paper defines a shortest polling monitoring point problem, which is proved to be NP-Hard. Finally, an ant colony optimization algorithm based on the stadia of ant is designed. Extensive simulation results validate the efficiency of the algorithm proposed. All of the monitoring point can be visited in almost the shortest distance.

Keywords: video surveillance; shortest path; ant colony optimization; path planning; camera; security

文章编号:1000-5013(2014)05-0537-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2014.05.0537

白斑综合症病毒对对虾 Caspase 基因的调控

金春英1,林金清2,王蔚3

(1. 华侨大学 化工学院,福建 厦门 361021;
 2. 华侨大学 材料科学与工程学院,福建 厦门 361021;
 3. 国家海洋局第三海洋研究所,福建 厦门 361005)

摘要:研究病毒感染对白斑综合症病毒基因的录调控的影响,将 Caspase 调控区的 DNA 进行生物素标记,然后与链霉亲和素修饰的琼脂糖结合.通过下拉发现,Caspase 基因的启动子序列与 white spot syndromic virus(WSSV)病毒的两个蛋白 Vp38 和 Vp41B 有相互作用.通过荧光素酶报告基因发现,Vp38 和 Vp41B 对 Caspase 启动子活性分别有抑制和激活作用.采用 RNAi 技术下调两个 WSSV 蛋白的表达后,研究发现:Vp38 和 Vp41B 分别对对虾血细胞的凋亡水平有促进和抑制的调控作用.

关键词: 对虾白斑综合症病毒; Caspase 基因; 调控; 凋亡

中图分类号: Q 516 文献标志码: A

白斑综合症病毒(white spot syndromic virus,WSSV)是对虾养殖中危害最严重的病原.该病毒传 染力强、致死率高、流行范围广,给全球对虾养殖业造成了巨大损失^[1].由于对虾等海洋无脊椎动物的免 疫系统不完善,无法用疫苗进行免疫防治,至今仍未能有效控制该病毒病的发生与发展^[2].在以往的研 究中,通过抑制差减杂交发现,日本对虾(*Peneaus japonicus*)中 *Caspase* 基因通过细胞凋亡在对虾抗 病毒免疫中发挥重要作用^[3-4].为进一步研究 *Caspase* 基因在病毒感染过程中的调控,本文对 *Caspase* 调控区,结合蛋白 Vp38 和 Vp41B,研究了对虾免疫和病毒感染过程中的所起的重要作用.

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

1) 材料:淡水克氏原螯虾和日本对虾购于厦门第八市场;WSSV 原始病毒提取自厦门同安对虾养 殖场收集的感染阳性对虾;大肠杆菌(*E. coli* DH5α和*E. coli* BL21)、质粒(pGL3-Basic 和 pIZ/V5-his) 和细胞(High Five)由本实验室保藏.

2) 试剂:胶回收用试剂盒(美国 Omega 公司);组织 DNA 提取试剂盒、Taq 合成酶、T4 DNA 连接 酶、限制性内切酶、pMD18-T 载体和 siRNA 体外转录试剂盒(日本 TaKaRa 公司);细胞培养用培养瓶、 多孔板(美国 Corning 公司);荧光素酶分析系统及半乳糖苷酶检测系统(美国 Promega 公司);Express-Five SFM 基础培养基与 L-谷氨酰胺、Cellfectin(美国 Invitrogen 公司);链霉亲和素琼脂糖(美国 Thermo 公司);其他化学试剂均为市售分析纯产品.

1.2 仪器

高速冷冻离心机(德国 Beckman 公司);电泳仪和 PCR 扩增仪(美国 Bio-RAD 公司);发光仪(美国 MGM 公司).

收稿日期: 2013-12-28

通信作者: 金春英(1976-),女,实验师,主要从事免疫防治的研究. E-mail:jcying@hqu. edu. cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31272684);国家海洋局海洋生物遗传资源重点实验室开放研究基金项目 (HY201102)

1.3 引物

均用设计软件 Primer Premier 由 Invitrogen 公司合成. Cas-Bio-F: Bio-5'-AGCTGCATTCTT-GCTTCCCTC-3'; Cas - Bio - R: Bio - 5' - GGGGCAATACTGACACAAG AT - 3'; Cas - Luc - F: 5' - CGAGCTCGAGAGGGAACGGGTAGACT - 3'; Cas - Luc - R: 5' - AACTCGAGCAAGTAATTATT-GCGATTACAT-3'; pIZ-Vp38-F: 5'-CCCAAGCTTGGGATGTCTTCTTCGTCTTCTG-3'; pIZ-Vp38-R: 5'-CCGGAATTCC GGTTATGAACATGTTACAATTATTC-3'; pIZ-Vp41B-F: 5'-CCCAAGCTT-GG GATGGGAGATAAGCAAAAG-3'; pIZ-Vp41B-R: 5'-CCGGAATTCCGGCTAGGAGCATGTG-CATG-3'; Vp38-siRNA: 5'-AAGACATTGTAAATGCTCTAG-3'; Vp38-mutation-siRNA: 5'-AAGACATGTAAATGCTCTAG-3'; Vp41B-mutation-siRNA: 5'AAGCATCC GATACATATGATA-3'.

1.4 方法

1.4.1 *Caspase* 基因启动子调控蛋白 通过向淡水克氏原螯虾注射 WSSV 病毒株进行人工感染,完整病毒粒子制备和纯化过程参照文献[5]的方法.将纯化的 WSSV 病毒粒子加入等体积,且体积分数为 2%的 NP-40 中,在室温下轻柔震荡 1 h,使得病毒粒子中的蛋白得以裂解.震荡后,在 3×10⁴ r•min⁻¹ 的转速下,4 ℃离心 20 min,吸取上清为 WSSV 的病毒总蛋白.

对虾基因组 DNA 用组织 DNA 提取试剂盒提取,经质量浓度为 0.5% 的琼脂糖凝胶电泳,并紫外 分光.测其浓度后,以之为模板,用一对生物素标记的引物(Cas-Bio-F 和 Cas-Bio-R)扩增对虾 *Caspase* 基因的 $-30 \sim -508$ 部分的上游调控区^[6].取 100 pmol 的生物素标记 PCR 产物,3 mg 链霉素琼脂糖和 经过裂解后的病毒粒子总蛋白,在 25 ℃下,用结合缓冲液(20 mmol·L⁻¹的 Tris,pH 值为 7.9;150 mmol·L⁻¹的 NaCl,体积分数为 5%的甘油;0.5 mmol·L⁻¹的 EDTA;1 mmol·L⁻¹的 MgCl₂,体积 分数为 1%的 Triton X-100) 孵育 2 h. 然后,用 1 mLde 结合缓冲液洗涤 3 次,再用 5 mol·L⁻¹的 NaCl 洗去非特异性结合的蛋白.最后,将琼脂糖与 20 μ L SDS-PAGE 上样缓冲液液混合后煮沸,以释放强力 结合的蛋白.

DNA 结合蛋白用质量分数为 10% 的 SDS-PAGE 电泳分离后,考马斯亮蓝 R250 染色、脱色. 切取 DNA 结合蛋白条带,用基质辅助激光解析电离飞行时间串联质谱得到肽质量指纹图谱数据,利用 MASCOT 软件分析处理.

1.4.2 重组质粒的构建 取带有 Sac I and Xho I 酶切位点的引物 Cas-Luc-F 和 Cas-Luc-R,以对虾基 因组 DNA 为模板,扩增对虾 Caspase 基因 - 678 到 141 bp 部分的上游调控区域.将该序列装载至 pGL3-Basic 载体,命名为 pGL3-ProCas.根据已公布 Vp38 和 Vp41B 编码基因序列(NCBI 序列号 NC_003225.2),设计含有 Hind Ⅲ和 EcoR I 限制性酶切位点两对引物 pIZ-Vp38-F,pIZ-Vp38-R,pIZ-Vp41B-F,pIZ-Vp41B-R.以纯化的 WSSV 病毒 DNA 为模板,PCR 扩增 Vp38 和 Vp41B 基因,并将其装载至 pIZ/V5-His 表达载体中,分别命名为 pIZ-Vp38 和 pIZ-Vp41B.

1.4.3 瞬时共转染试验 转染前 24 h,在 6 孔板中接种适量 High Five 细胞,细胞密度达到 60%~80%后进行转染.转染前 1 h,更换新鲜的不含抗生素和血清的完全培养液,置于 27 ℃培养箱中.将构建的 pGL3-ProCas 报告质粒(1 μ g)分别与 pIZ-Vp38,pIZ-Vp41B,以及阴性对照质粒 pIZ/V5-His(1 μ g)进行共转染细胞.每个孔转染 0.5 μ g pSV- β -Galactosidase 作为标准内质控,以校正各组之间的差异. 质粒与 2 μ L 的 Cellfectin 试剂混匀,将所得的转染工作液在室温下放置 15 min,逐滴加入 500 μ L 培养液并混匀,置 27 ℃培养箱中培养.转染 4 h 后,更换培养液,30 h 后按照荧光素酶及半乳糖苷酶检测试剂盒提供的方法,将细胞裂解 15 min,裂解物用发光仪测定相对荧光素酶活性.每组实验重复 3 次.

1.4.4 siRNA 合成 根据 siRNA 的设计规则,设计 Vp38 和 Vp41B 基因特异的 siRNA,同时以突变 1 个碱基的 siRNA(mutation-siRNA)为阴性对照.利用 siRNA 体外转录试剂盒合成 siRNA,操作过程 参考试剂盒说明书.日本对体长为 8~10 cm 的对虾,随机选取一组 20 只,暂养在 100 L 海水水族箱,水 温为 20 ℃,并向水族箱不间断连续充气.以浙江科盛饲料股份有限公司生产的南美白对虾配合饲料为 基础饲料,每天投饵 2 次(早晚各 1 次).投饵量为实验对虾体质量的 3%左右,每天吸污、换水,换水量 为 30%.经室内暂养 3 周后,挑选外观正常,体质健壮的个体作为实验用虾.对每只对虾同时注射 24

μmol • L⁻¹的 siRNA 和 10 000 个 WSSV 病毒粒子,在注射 2,24,36,48,72 h 后,抽取对虾血细胞,通 过 Northern blot 验证干扰对虾后的 Vp38 和 Vp41B 基因转录变化.

1.4.5 血细胞凋亡的检测 对虾血淋巴置于多聚赖氨酸包被的载玻片上,室温静置 30 min 后,用体积 分数为4%的多聚甲醛固定 30 min.用质量浓度为1 μg•mL⁻¹,溶于甲醇的 DAPI 溶液洗涤一次后,于 37 ℃下,将其放入盖着铝箔纸的湿盒中染色 15 min.最后,弃去 DAPI 溶液,细胞用 PBS 溶液洗涤以除 去多余的染料.玻片风干后加入抗淬灭剂,正置荧光显微镜下观察拍照,每组观察 1 000 个细胞,计算凋 亡细胞所占总细胞的百分比.

2 结果与分析

2.1 Caspase 基因启动子调控蛋白的筛选和验证

链霉亲和素与生物素之间因其强的亲和力被广泛用于生物分子间 相互作用的研究^[7-8].以生物素标记的 Caspase 启动子片段,通过生物素 与固化在载体上的链霉亲和素亲和结合.当与 Caspase 启动子片段有相 互作用的 WSSV 蛋白与此固相复合物混合时,蛋白即被吸附而分离.被 吸附的蛋白通过与 SDS-PAGE 上样缓冲液混合后煮沸分离,用 SDS-PAGE 电泳染色,蛋白试验如图 1 所示.图 1 中:箭头 1 所示条带为 Vp41B;箭头 2 所示条带为 Vp 38;泳道 M 为蛋白 marker;泳道 1 为煮 沸 10 s 的洗脱结果;泳道 2 为加煮沸 30 s 的洗脱结果;泳道 3 为无 DNA 结合的阴性对照.比较结合有 Caspase 启动子琼脂糖(泳道 1,2) 和没有结合 Caspase 启动子的琼脂糖(泳道 3)的下拉结果,发现大小分 别约为 38,41 ku 的两个蛋白(箭头所示)可与 Caspase 启动子特异结



图 1 Caspase 启动子的 DNA 蛋白结合试验 Fig. 1 DNA-binding protein assay for the Caspase promoter

合.分别割取蛋白条带进行质谱鉴定,采用 Mascot 在 GenBank 数据库中检索分析得到的多肽序列.结果发现:下拉获得的分子量为 38,41 ku 左右的蛋白分别与 WSSV 的 Vp38 及 Vp41B 蛋白相匹配.

链霉亲和素下拉技术方法简便敏感,同时避免了使用同位素等危险物质,在生物分子相互作用研究 中有很广泛的应用.缺点在于分子间相互作用是在非生理状态下进行的,人为的影响分子浓度对实验结 果也有一定影响^[9-10].为验证 Vp38 和 Vp41B 对 Caspase 基因启动子的调控作用,文中构建了 Caspase

启动子序列调控荧光素酶表达的质粒 pGL3-ProCas,同时将 Vp38 和 Vp41B 的完整编码区序列克隆到 pIZ/V5-His 载体中以构建 Vp38 和 Vp41B 表达载体.用 High Five 细胞进行共转染实验.6 孔 板中加入 1 μ g 的报告基因,1 μ g 表达载体(pIZ-Vp38 或 pIZ-Vp41B)或作为阴性对照的 pIZ/His-V5 载体,或作为内参的 0.5 μ g pSV- β -Galactosidase 载体.转染 48 h 后,测定荧光素酶和半乳糖苷 酶的活性.将荧光素酶和半乳糖苷酶的活性进行均一化,得到相对荧 光活性(RLU)以消除因为质粒的转染效率不同而带来的误差,结果 如图 2 所示.pIZ-Vp38 表达载体与报告基因共转后,其荧光素酶活 性比 pIZ/V5-His plasmid 共转低 69%,说明 Vp38 对 Caspase 的启 动子活性有抑制作用;反之,pIZ-Vp41B 表达载体与报告基因共转 后,其荧光素酶活性比 pIZ/V5-His plasmid 共转提高 2 倍,说明 Vp41B 对 Caspase 的启动子活性有激活作用.



图 2 Caspase 启动子在 High Five 细胞中荧光素酶活性分析 Fig. 2 Luciferase reporter assay of the Caspase promoter in High Five cells

2.2 RNAi 对 Vp38 和 Vp41B 基因表达的抑制作用

分别用特异的 siRNA(Vp38-siRNA 和 Vp41B-siRNA)、单碱基 突变(Vp38-mutation-siRNA 和 Vp41B-mutation-siRNA)注射对虾. 在注射后不同时间点收集对虾血 淋巴,以 DIG 标记的 Vp38-siRNA,Vp41B-siRNA,β-actin(对照)特异的探针进行 Northern blot 分析, 结果如图 3 所示. 由图 3 可知:siRNA 干扰后,Vp38 和 Vp41B 的基因的转录量明显下降,在 48 h 时达 到最低,用 Northern blot 未检测到基因的转录;在 72 h 后,两个蛋白编码基因转录又开始增加,在注射 mutation-siRNA 的对照组中,Vp38 和 Vp41B 的转录量未变化,作为对照的 β-actin 转录水平始终保持 一致.研究结果表明:RNAi 具有高度的特异性,而 Vp38 和 Vp41B 基因的转录已被基因特异的 siRNA 抑制.



图 3 siRNA 对 Vp38 和 Vp41B 基因转录的抑制效果 Fig. 3 Effect of siRNA on the transcription of Vp38 and Vp41B

2.3 对血细胞凋亡的调控

在 Vp38 和 Vp41B 基因的转录受到抑制的情况下,研究 WSSV 病毒感染对虾血细胞凋亡百分率的 变化,对显微镜观察的结果进行统计分析,如图 4 所示.由图 4 可知:抑制 Vp38 的转录后,血细胞的凋 亡百分率(RLU)出现了明显上升;在注射 siRNA 48 h 后,凋亡百分率为原来的 1.3 倍;而注射 Vp41BsiRNA 后,血细胞的凋亡百分率出现了明显下降,凋亡百分率为原来的一半,同时未注射的对照 组凋亡百分率无变化;注射 siRNA 72 h 后,实验组和对照组的凋亡百分率差异降低,可能是由于 siR-NA 在体内的不稳定性,Vp38 和 Vp41B 基因 mRNA 转录水平逐渐恢复导致.以上结果说明:Vp38 和 Vp41B 参与了对虾血细胞的凋亡作用,当基因表达受到抑制时,血细胞的凋亡功能也出现变化.

细胞凋亡作为宿主细胞的一种重要免疫策略,在限 制病毒增殖及减少或消除自带病毒在宿主细胞内的复 制有重要作用.同时,病毒也有一套有效的相应机制来 抑制或者延迟凋亡途径来消除自己的子代病毒.在病毒 感染的后期,当子代病毒大量增殖,由于感染到邻近细 胞将会促使凋亡更加活跃.凋亡途径不仅仅受到宿主的 调控,同样病毒也可以对其有所影响.研究发现:在对虾 被 WSSV 感染过程中,Vp41B蛋白能够激发凋亡反应, 并促进 caspase 的表达来保护宿主;相反,Vp38蛋白通 过下调 caspase 来阻断凋亡途径从而增强病毒致病性.

Vp38 和 Vp41B 分别是由 WSV259 和 WSV242 所 编码的病毒外膜蛋白^[5].病毒的外膜蛋白在病毒的入 侵、组装和出芽过程中起重要作用^[11].Vp41B 能够通过 多聚化参与病毒颗粒的组装^[12],生物信息学分析发现



图 4 siRNA 对对虾血细胞凋亡活性的影响 Fig. 4 Effect of siRNA on apoptosis of shrimp hymocytes

其具有潜在的跨膜结构域^[5],可能是由于跨膜域引起 Vp41B 蛋白结构重新定向,使之具有转录因子激活功能.但是,在 Vp38 中没有找到跨膜结构域^[5].研究显示:Vp38 能够直接与 WSSV 外膜蛋白 Vp24 相互作用^[11].在 WSSV 病毒中,4 个主要的结构蛋白 Vp28,Vp26,Vp24 和 Vp19 构成了蛋白聚合体^[13],而 Vp26 通过与核衣壳蛋白的 Vp51 相互作用来连接病毒的外膜和核衣壳^[14].由此推测,Vp38 可能是通过结合中间蛋白来介导 *Caspase* 的转录调控,从而对凋亡进行调节.

3 结束语

通过链霉亲和素下拉、质谱鉴定等分析发现:对虾的凋亡调控基因 Caspase 启动子与 WSSV 蛋白 Vp38 和 Vp41B之间存在相互作用.荧光素酶报告实验和 RNAi 特异性干扰结果显示:WSSV 感染过程 中 Vp41B蛋白通过促进对虾 Caspase 基因的表达来激发凋亡反应,从而对宿主本的抗病毒免疫起到重 要作用;相反,Vp38 蛋白通过下调 Caspase 的表达来阻断凋亡途径,促进病毒的感染.研究结果揭示: Vp38 和 Vp41B 在 WSSV 病毒感染和对虾抗病毒免疫中作用的分子机制,对于白斑综合症的预防和控制具有重要的意义.

参考文献:

- [1] 李光,樊景凤,林凤翱,等.对虾的免疫机制及其疾病免疫预防的研究进展[J].水产科学,2007,26(1):56-59.
- [2] 韩建山,龙燕,孟小林,等. 鲤鱼生长激素和对虾白斑病毒囊膜蛋白 Vp28 的融合表达及功能研究[J]. 水生生物学报,2008,32(3):308-313.
- [3] LAN Yong-shen, XU Xun, YANG Feng, et al. Transcriptional profile of shrimp white spot syndrome virus (WSSV) genes with DNA microarray[J]. Arch Virol, 2006, 151(9):1723-1733.
- [4] WANG Lei, ZHI Bin, WU Wen-lin, et al. Requirement for shrimp caspase in apoptosis against virus infection[J]. Dev Comp Immunol, 2008, 32(6): 706-715.
- [5] XIE Xi-xian, XU Li-mei, YANG Feng. Proteomic analysis of the major envelope and nucleocapsid proteins of white spot syndrome virus[J]. J Virol, 2006, 80(21):10615-10623.
- [6] 金春英,高涢,王磊,等.对虾 Pj Caspase 基因启动子的克隆及其特征的初步分析[J].水生生物学报,2011,35(3): 523-527.
- [7] IIOKA H,LOISELLE D, HAYSTEAD T A, et al. Efficient detection of RNA-protein interactions using tethered RNAs[J]. Nucleic Acids Res, 2011, 39(8):e53.
- [8] ROBERTS T L, IDRIS A, DUNN J A, et al. HIN-200 proteins regulate caspase activation in response to foreign cytoplasmic DNA[J]. Science, 2009, 323(5917):1057-1060.
- [9] RYU C J, CHO D Y, GRIPON P, et al. An 80-kilodalton protein that binds to the pre-S1 domain of hepatitis B virus [J]. J Virol, 2000, 74(1):110-116.
- [10] DING Tian-bing, REN Jun-ping, MA Wen-yu. Methods for the study of virus receptors[J]. Virol Sin, 2006, 21(2): 189-193.
- [11] JIE Zu-liang, XU Li-mei, YANG Feng. The C-terminal region of envelope protein Vp38 from white spot syndrome virus is indispensable for interaction with Vp24[J]. Arch Virol, 2008, 153(11): 2103-2106.
- [12] 丁琦,杨丰. 对虾白斑综合征病毒结构蛋白质 Vp41 的研究[J]. 厦门大学学报:自然科学版,2006,45(4):549-552.
- [13] ZHOU Qing, XU Li-mei, LI Hui, et al. Four major envelope proteins of white spot syndrome virus bind to form a complex[J]. J Virol, 2009, 83(9):4709-4712.
- [14] WAN Qiang, XU Li-mei, YANG Feng. Vp26 of white spot syndrome virus functions as a linker protein between the envelope and nucleocapsid of virions by binding with Vp51[J]. J Virol, 2008, 82(24):12598-12601.

Regulation of Prawn Caspase Gene by White Spot Syndromic Virus

JIN Chun-ying¹, LIN Jin-qng², WANG Wei³

(1. College of Chemical Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. College of Material Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

3. Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration (SOA), Xiamen 361005, China)

Abstract: The prawn *Caspase* gene was previously found to play important roles in protecting host from viral infection. In order to further delineate the transcriptional regulation of *Caspase* in response to viral infection, the *Caspase* promoter was biotin-labeled and bind to streptavidin-beads. Through pulldown assay the *Caspase* promoter was founded to interact with two white spot syndromic virus (WSSV) proteins Vp38 and Vp41B. Luciferase reporter assay revealed that Vp38 and Vp41B act as repressor and activator of *Caspase* transcription respectively. RNAi inhibition of Vp38 and Vp41B indicate the two WSSV proteins play roles on the regulation of prawn hymocyte apoptosis. These results provided insights into the immune mechanism of invertebrates, and will also be helpful for shrimp viral disease control.

Keywords: white spot syndromic virus; Caspase gene; regulation; apoptosis

文章编号:1000-5013(2014)05-0542-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2014.05.0542

不饱和树脂/石墨烯复合材料的制备及性能

石沫, 陈丹青, 陈国华

(华侨大学 材料科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 采用球磨法制备不饱和聚酯树脂/石墨烯纳米复合材料,并对其力学性能、动态力学性能和导电性能进行研究.结果表明:石墨烯微片经过球磨被剥离成厚度低于5层的石墨烯;制备的不饱和聚酯树脂石墨烯复合材料与纯的不饱和聚酯树脂相比,当石墨烯的质量分数为0.5%时,复合材料的拉伸强度、杨氏模量、弯曲强度均达到最大值,分别提高44.99%,47.67%和55.08%;复合材料的冲击性能基本不受石墨烯加入的影响;且复合材料的渗滤阀值为6%.

关键词: 复合材料;不饱和聚酯树脂;石墨烯;球磨;力学性能

中图分类号: TB 332; TQ 323.4 **文献标志码:** A

不饱和聚酯树脂(UPR)是热固性树脂中使用量最多的,也是现代复合材料技术中最早使用的复合物基体.不饱和树脂具有强度高、质量轻、耐腐蚀、耐疲劳、工艺制作简单、价格低廉等优点,被广泛地应用于建筑、交通运输、造船工业、宇航工具等行业.不饱和树脂的高交联度使热固性树脂具有良好性能的同时,也使其具有硬而脆、冲击性差等缺点,严重影响了热固性树脂的应用.由于纳米粒子具有小尺寸效应、量子尺寸效应、表面效应与宏观量子隧道效应等,从而表现出一系列特殊的物理化学性质,这为解决以上问题提供了可能性^[1-5].石墨烯是一种碳原子以 *sp*² 杂化轨道组成的二维材料,具有许多优异的性能,包括良好的力学性能、高热导率、大的比表面积和优良的电子传输特性.这些性能使其广泛地应用于复合材料的改性中^[6-10].本文选用球磨法将石墨粉剥离成低于5层的石墨烯片,制成复合材料,同时研究了石墨烯质量分数对复合材料的力学性能、硬度、导电性能、动态力学性能的影响.

1 实验部分

1.1 材料与试剂

912[#]不饱和聚酯树脂(福建漳州亚邦化学有限公司);石墨烯微片 KNG-180(福建厦门凯纳石墨烯 技术有限公司),厚度为 20~100 nm;环烷酸钴(上海国药集团化学试剂有限公司);过氧化丁酮(上海晶 纯生化科技股份有限公司).

1.2 复合材料的制备

将石墨烯微片置于 90 ℃的真空干燥箱中干燥 24 h.取一定量的石墨烯(质量分数为 0.1%~7%) 微片与不饱和树脂混合均匀,并将该混合物装入聚四氟乙烯球磨罐中.球磨罐中含有 300 g 的氧化锆 球,其直径分别为 20,50 μm,质量比为 8 : 2.将 4 个体积为 100 mL 的聚四氟乙烯球磨罐置于球磨机 中,连续球磨 2 h.将混合物过滤后,取出.在制得的石墨烯不饱和聚酯树脂混合物中,分别加入促进剂 环烷酸钴和固化剂过氧化甲乙酮,快速机械搅拌 2 min,室温下抽真空,倒入硅胶模具中固化成型.

1.3 实验方法

1.3.1 力学性能测试 采用 CMT6000 型万能拉力机(深圳三思有限公司)进行拉伸强度和弹性模量

收稿日期: 2014-03-15

- **通信作者:** 陈国华(1964-),男,教授,主要从事石墨的层层剥离、制备石墨烯与石墨烯微片及其复合功能材料的研究. E-mail:hdcgh@hqu. edu. cn.
- 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51373059); 福建省产学研重大项目(2013H6014)

的测试.测试的拉伸样品按照 GB/T 1040-1992《塑料拉伸性能试验方法》制备.在拉伸性能测试过程中,设定样品的拉伸速度为 2 mm • min⁻¹.

1.3.2 导电性测试 实验前,用砂纸将样品打磨均匀.若材料的电阻小于 2 000 MΩ,采用 UT70A 型 数字多用表进行测试;若材料电阻大于 2 000 MΩ,则采用 ZC36 型高阻仪进行测试.用游标卡尺测量样 品的长、宽、高,通过公式换算成电阻率.

1.3.3 硬度测试 取导电性测试中打磨好的样品,用 IX-D 型邵氏硬度计(广东艾力公司)进行测试.

2 结果与讨论

2.1 石墨烯的结构表征

图 1 为将复合材料磨成粉末,用环氧树脂包埋切片后得到的透射电镜图.图 2 为将复合材料置于 650 ℃的马弗炉中燃烧 2 h 后,将粉末进行拉曼测试得到的结果.由图 1 可以看出:石墨烯微片被剥离成





Fig. 1 TEM image of unsaturated polyester resin/graphene nanaocomposite

了褶皱的片状结构;石墨纳米微片经过球磨过程被剥离成了低于 5 层的石墨烯片,且均匀的分散在基体中;所得到的片层结构厚度 约为 0.4 nm. 由图 2 可以看出:石墨烯微片的 D 峰、G 峰和 2D 峰 分别为 1 348,1 579 和 2 708 cm⁻¹. 由此可知:球磨以后,D 峰消 失,G 峰和 2D 峰红移. 通过对 2D 峰的半峰宽值进行计算,得到其 半峰宽为 63.4 cm⁻¹. 可知复合材料中的石墨烯约为 4 层^[11]. 这 是由于在球磨过程中,高速旋转产生的剪切力能够克服石墨层间 的范德华力,使其被机械剥离. 不饱和树脂的存在能很好的包裹 住这些被剥离出来的石墨烯片,防止二次团聚. 在球磨过程中,石 墨烯也均匀地分散在基体中.

2.2 力学性能

复合材料的力学性能与石墨烯质量分数之间的关系,如图 3 所示.图 3(a)~(d)分别为复合材料的拉伸强度(R_m)和杨氏模量



图 2 石墨与球磨 2 h 后复合材料中 石墨烯拉曼光谱图

Fig. 2 Raman spectra of graphite and graphene sheet ball milling for 2 h

(*E*_y)、弯曲强度(*R*_i)和弯曲模量(*E*_i)、冲击强度(*R*_i)、硬度(HD)随着石墨烯质量分数(*w*)变化的示意 图.由图 3(a),(b)可知:复合材料的拉伸性能和弯曲性能都比纯不饱和聚酯树脂有不同程度的提高,且 呈现先增大后减小的趋势.当石墨烯的质量分数为 0.5%时,复合材料的拉伸强度、杨氏模量、弯曲强度 均达到最大值,分别为 46.87,4 400.67 和 109.30 MPa.与纯不饱和树脂相比,复合材料的拉伸强度、杨 氏模量、弯曲强度分别提高了 44.99%,47.67%和 55.08%.当石墨烯的质量分数为 3.0%时,复合材料 的弯曲模量达到最大值为 4 377.60 MPa,与纯不饱和树脂(2 768.95 MPa)相比提高了 58.10%.随着石 墨烯的加入,复合材料的冲击性能并没有受到多大的影响.复合材料的硬度随着石墨烯含量的增加呈现 先增大后减小的趋势,但其总体比纯不饱和树脂都有一定程度的增加.

由此可见,石墨烯的加入能够明显的提高复合材料的力学性能.这是由于石墨烯本身具有良好的机 械性能和较大的比表面积,能够很好的提高复合材料的力学性能.球磨过程中,剪切力δ使石墨粉剥离 成石墨烯片的同时,也使石墨烯很好的分散在不饱和树脂中,不饱和树脂的存在能将形成的石墨烯片包裹住,防止二次团聚,应力分散均匀.石墨烯与基体紧密的结合也是复合材料力学性能提高的重要原因. 这些因素能使应力从基体向石墨烯片转移.石墨烯的大比表面积以及本身的褶皱机构,使石墨烯与不饱 和聚酯树脂的接触面积增大,有利于最大化的使能力从基体向石墨烯转移.从而使复合材料的力学性能 大幅度提高.



图 3 复合材料的力学性能与石墨烯质量分数之间的关系

Fig. 3 Mechanical properties of nanocomposites vs filler loading

图 4 为复合材料的拉伸断面扫描电镜图. 由图 4(a)可知:该断面粗糙且有很多具有韧性特征的凹 坑,石墨烯均匀的分散在基体中且有部分石墨烯已经被拔出. 由图 4(b)可以看出:石墨烯与复合材料的 界面结合很紧密,这些都是复合材料力学性能增强的重要因素. 随着石墨烯含量的增大,力学性能出现 减小的趋势,这是因为大量的石墨烯在一定程度上会阻碍不饱和树脂的固化,使树脂的交联度降低,力 学性能下降^[12-13].







2.3 动态力学性能

图 5(a),(b)分别为当石墨烯质量分数不同时,复合材料的储能模量(E')与损耗因子(tan δ).由图 5

(a)可以看出:当室温石墨烯质量分数为 0.3%时,储能模量最大为 2.36 GPa,比纯不饱和聚酯树脂树脂



(a) 储能模量 E'

(b) 损耗因子 tan δ

图 5 不饱和树脂/石墨烯纳米复合材料的动态力学性能

Fig. 5 Dynamic mechanical property curves of UPR/graphene nanocomposites

(2.12 GPa)提高了 11.3%;随着石墨烯的继续加入,储能模量开始减小;当石墨烯质量分数为5%时,储 能模量降到 1.86 GPa.这可能是因为过量的石墨烯虽然使接触面积增大,但同时也不利于不饱和聚酯 树脂的固化,使复合材料的交联度降低,从而降低复合材料的力学性能.随着温度的上升,储能模量开始 下降.这是因为复合材料从玻璃态向橡胶态转变时,出现了储能耗散.玻璃化转变温度(θ)是损耗因子的 峰值.从图 5(b)可以看出:纯不饱和聚酯树脂的玻璃化转变温度为 131 ℃,石墨烯的加入使复合材料的 玻璃化转变温度升高.

2.4 电学性能

不饱和聚酯树脂/石墨烯复合材料的电阻率(ρ)与石墨 烯质量分数(w)之间的关系,如图 6 所示.从图 6 可以看 出:当石墨烯的质量分数低于 5%时,电阻率保持不变;当 石墨烯的质量分数为 5%~8%时,电阻率迅速下降;当石 墨烯质量分数大于 8%时,电阻率基本不随石墨烯含量的 变化而变化.这是由于石墨烯含量低时,石墨烯在树脂中是 孤立存在的;当石墨烯质量分数达到 5%时,导电网络形 成;当石墨烯质量分数为 6%时,电阻率迅速下降,此时达 到渗滤阀值.



3 结论

采用球磨法能够将石墨烯微片剥离成石墨烯片,从而制备不饱和聚酯树脂/石墨烯纳米复合材料. 与纯不饱和聚酯树脂相比,制备的不饱和聚酯树脂/石墨烯纳米复合材料的拉伸强度提高了 44.99%, 杨氏模量提高了 47.67%.当石墨烯的质量分数为 0.5%时,复合材料的弯曲强度达到最大;当石墨烯质 量分数为 3.0%时,复合材料的弹性模量达到最大.这是因为球磨的作用使石墨烯均匀的分散在基体 中,石墨烯微片与基体的接触良好,且石墨烯的褶皱结构增加了石墨烯与基体的接触面积.不饱和聚酯 树脂/石墨烯纳米复合材料的渗滤阀值为 6%,具有较好的导电性.

参考文献:

- [1] BLEDZKI A K,GASSAN J. Composites reinforced with cellulose base fibers[J]. Prog Polym Sci,1999,24(2):221-274.
- [2] DHAKAL H N,ZHANG Z,RICHARDSON M. Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites[J]. Compos Sci Technol, 2007, 67(6/7):1674-1683.
- [3] ZHANG M, SINGH R P. Mechanical reinforcement of unsaturated polyester by Al₂O₃ nanoparticles[J]. Materials

Lett,2004,58(3/4):408-412.

- [4] KORNMANN X, BERGLUND L A, STERTE A J. Nanocomposites based on montmorillonite and unsaturated polyester[J]. Polym Eng Sci,1998,38(8):1351-1358.
- [5] SINGH R P,ZHANG M,CHAN D. Toughening of a brittle thermosetting polymer: Effects of reinforcement particle size and volume fraction[J]. J Mater Sci,2002,37(4):781-788.
- [6] NOVOSELOV K S,GEIM A K,MOROZOV S K, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. Science, 2004, 306(5696): 666-669.
- [7] LEE C, WEI X D, KYSAR J W, et al. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene[J]. Science, 2008, 321(5887): 385-388.
- [8] STOLLER M D, PARK S, ZHU Yan-wu, et al. Graphene-based ultracapacitors [J]. Nano Lett, 2008, 10(8): 3498-3502.
- [9] BALANDIN A A,GHOSH S,BAO W, et al. Superior thermal conductivity of single-layer graphene[J]. Nano Lett, 2008,8(3):902-907.
- [10] SENGUPTA R,BHATTACHARYA M,BANDYOPADHYAY S, et al. A review on the mechanical and electrical properties of graphite and modified graphite reinforced polymer composites[J]. Prog Polym Sci,2011,36(5):638-670.
- [11] HAO Yu-feng, WANG Ying-ying, WANG Lei, et al. Probing layer number and stacking order of few-layer graphene by raman spectroscopy[J]. Small,2010,6(2):195-200.
- [12] KIM K S, JEON I Y, AHN S N, et al. Edge-functionalized graphene-like platelets as a co-curing agent and a nanoscale additive to epoxy resin[J]. J Mater Chem, 2011, 21(20):7337-7342.
- [13] BAO Chen-lu, GUO Yu-qiang, SONG Lei, et al. In situ preparation of functionalized graphene oxide/epoxy nanocomposites with effective reinforcements[J]. J Mater Chem, 2011, 21(35):13290-13298.

Preparation and Properties of Unsaturated Polyester Resin/Graphene Composite

SHI Mo, CHEN Dan-qing, CHEN Guo-hua

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

Abstract: Unsaturated polyester resin (UPR)/graphene nanocomposite was prepared by ball milling in this paper. The mechanical, conductivity properties and the dynamic mechanical properties of the composites were studied. It was found that the graphene in the composite was fewer than 5 layers. When the mass fraction of graphene is 0.5%, the tensile strength, the Young's modulus and flexural intensity of the composite material reached the maximum, respectively improved 44.99%, 47.67% and 55.08%. Their impact strength was not affected by the loading of graphene. The percolation threshold of the nanocomposite was 6%.

Keywords: composite material; unsaturated polyester resin; graphene; ball milling; mechanical property

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:熊兴泉)
文章编号:1000-5013(2014)05-0547-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2014.05.0547

石墨烯量子点对对苯二酚的检测

刘鹏超,孙向英,杨传孝

(华侨大学 材料科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 以柠檬酸为碳源,采用一步熔融法制备了石墨烯量子点,通过红外光谱、紫外-可见吸收光谱、荧光光 谱对其光学性能进行表征,同时考察了石墨烯量子点耐光漂白能力和抗盐性. 该石墨烯量子点可应用于对苯 二酚的检测,其荧光强度与对苯二酚浓度成良好的线性关系(*R*² = 0.979),方法的检测限为 3.1 nmol·L⁻¹, 线性范围为 1.0×10⁻⁷~5.0×10⁻⁶ mol·L⁻¹.

关键词: 石墨烯量子点; 对苯二酚; 柠檬酸; 熔融法; 荧光检测

中图分类号: O 657.3 文献标志码: A

作为一种新型荧光探针,石墨烯量子点(graphene quantum dots,GQDs)因其低生物毒性、高发光 性能、稳定的化学性质和制备简易等优点而备受关注^[1],并在生物成像^[2-3]、离子检测^[4-6]、荧光比色传 感^[7-8]、免疫分析^[9]等方面得到广泛的应用.但现阶段对 GQDs 的研究,大多还是集中在新的制备方法 的开发,利用其光学性质应用报道仍然不多.对苯二酚是一种重要的化工原料,应用于化妆品、食品、农 药、制药,以及照片的显影剂等多个行业领域^[10].与此同时,对苯二酚会诱发癌症,并会对生物中枢神 经系统产生严重影响^[11],给公众健康和环境安全带来巨大的危害.因此,开发一种简单、低成本、灵敏 的分析方法来检测对苯二酚依然非常重要.本文以柠檬酸为碳源,合成了高耐盐及耐光漂白的石墨烯量 子点.

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

1) 仪器:F-7000 型荧光分光光度计(日本 Hitachi 公司); Nicolet Magna IR560 型傅里叶变换红外 光谱仪(美国 Nicolet 公司); UV-2800H 紫外可见光谱仪(上海 Unico 公司); UB-7 酸度计(德国 Sartorius 公司); Milli-Q 超纯水(美国 Millipore 公司).

2) 试剂:柠檬酸(citric acid,CA)、对苯二酚、氯化钠(分析纯); 实验用水均为 Milli-Q 型超纯水机 制备的二次去离子水.

1.2 GQDs 的合成

按照文献[12]合成 GQDs. 将 2 g 的柠檬酸放入 10 mL 的小烧杯中,在 200 ℃下,油浴约 5 min. 当 CA 熔融成浅黄色液体,持续加热约 30 min 后,液体变为橙色. 用滴管将其逐滴滴入 100 mL 质量浓度 为 10 mg • mL⁻¹的 NaOH 溶液中,并将其置于冰箱中储存备用.

1.3 GQDs 对对苯二酚的传感

取 10 mL 比色管,依次加入 1 mL 的缓冲溶液,100 μL 的 GQDs 溶液,一定体积的对苯二酚储备液,并用二次水定容至 10 mL,摇匀后室温下放置 60 min. 测定含有不同浓度对苯二酚的 GQDs 溶液的

收稿日期: 2014-04-15

- **通信作者:** 孙向英(1965-),女,教授,主要从事超分子自组装膜的构建与界面光电传感体系的设计、环境污染物监测 与分析的研究. E-mail:sunxy@hqu. edu. cn.
- **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(21275059, 21175049); 福建省自然科学基金资助项目(2012J01044, 2011J01049)

荧光强度. 固定激发波长为 365 nm,狭缝为 2.5 nm/5.0 nm.

2 结果与讨论

2.1 GQDs 的光学性能

GQDs 的荧光光谱,如图 1 所示. 在 365 nm 的紫外光激发下,GQDs 发射蓝色的荧光,如图 1(a)所示. 图 1 (a)中:荧光发射光谱拥有尖锐的峰形,其最大荧光发射峰波长(λ)为 460 nm. 尽管现阶段无法对 GQDs 提出统一确切的发光机理,但以柠檬酸为碳源的 GQDs 的蓝色荧光被认为是来自于 GQDs 表面有序且孤立的 sp² 簇^[12]. 这些 sp² 簇由 sp³ 簇(sp³ 簇即为 GQDs 上包括 C-O-C,COOH 和 C-OH 在内的含氧基团)分隔孤立.

GQDs 的发射波长与激发波长无关,不同激发波长的 GQDs 荧光光谱,如图1(b)所示.图1(b)中: 尽管激发光谱从 330 nm 变化至 400 nm,GQDs 的最大发射波长却固定于 460 nm,该 GQDs 表现出的 发射波长与激发光无关的光学性质,表明该 GQDs 中的 sp² 簇具有均一的表面态和大小;GQDs 在 359 nm 处具有明显的吸收光谱,与激发光谱非常相近.







2.2 傅里叶红外吸收光谱表征

GQDs 的 FTIR 测试结果,如图 2 所示.由图 2 可知:GQDs 具有羧基的吸收峰,表明 GQDs 上含有 -COOH.在3 419 cm⁻¹处出现了-OH 伸缩振动吸收,并且在1 392 cm⁻¹处出现了-OH 弯曲振动的 吸收,表明 GQDs 上具有羟基;在1 080 cm⁻¹处出现的吸收应归属于 C-O-C 的伸缩振动,说明 GQDs 上具有 C-O-C 基团;在 2 972 cm⁻¹处出现微弱的吸收,则为-CH₂-或-CH₃ 的伸缩振动峰,即表明 GQDs 上还有未被碳化的柠檬酸^[12].

2.3 离子强度对 GQD 荧光强度的影响

GQDs 具有非常优异的抗盐能力,如图 3 所示. 由图 3 可知:在浓度范围为 $0 \sim 2.0 \text{ mol} \cdot L^{-1}$ 的 NaCl 溶液中,GQDs 的荧光强度基本保持稳定.







图 3 GQDs 的荧光强度 Fig. 3 Fluorescence intensity of GQDs

2.4 紫外光照时间对 GQDs 荧光强度的影响

GQDs 具有良好的抗光漂白能力.将制备好的 GQDs 水溶液放在发光波长为 365 nm 的紫外灯下照 射,每隔一定时间记录其荧光强度,曲线如图 4 所示.由 图 4 可知:光照开始时,随着时间的增加,GQDs 的发射 峰荧光强度逐渐增强,并在 20 min 后荧光强度基本趋 于稳定;随后连续的 70 min 内,GQDs 的荧光强度基本 保持不变,说明所合成的 GQDs 很稳定,几乎没有光漂 白现象.

此后,每次使用 GQDs 作为荧光探针进行分析检测前,都应先将 GQDs 溶液置于紫外灯下照射 20 min,使得测试过程中荧光强度稳定,从而提高方法的灵敏度和精确度.





2.5 标准曲线及检测限

考察了 GQDs 探针溶液对对苯二酚进行检测时的线性范围和最低检测光谱浓度,光谱如图 5 所

示.图 5 中:GQDs 在 365 nm 激发光激发下产生蓝 色荧光;随着对苯二酚浓度不断增大,GQDs 的荧光 强度不断降低.Stern-Volmer 方程为

 $F_{0}/F = 1 + K_{sv}C_{q}$,

上式中: F_0 和 F分别为对苯二酚加入前后所测得 GQDs的荧光强度; K_{sv} 是猝灭常数; C_q 为猝灭剂的 浓度.

GQDs的猝灭程度与对苯二酚浓度呈现良好的 线性关系,如图 5 内插图所示.图 5 插图中:在最佳 实验条件下,GQDs的猝灭程度与对苯二酚浓度呈现 良好的线性关系.通过计算,本方法的线性回归方程 为

 $F_0/F = 0.991 + 0.137 \, 6c$,

上式中:c的单位为 mol • L^{-1} ;线性范围为 1.0× in KH $10^{-7} \sim 5.0 \times 10^{-6}$ mol • L^{-1} 以 3 倍的空白信号标准 偏差除以标准曲线的斜率的方法计算出的检测限为 3.1 nmol • L^{-1} .



2.6 响应时间

考察了响应时间对 GQDs 猝灭强度的影响,如图 6 所示. 由图 6 可知:当溶液加入对苯二酚后,石墨烯量子点的荧光强 度随时间增加不断降低,60 min 后,体系的荧光逐渐趋于稳 定.同时,为保证检测方法的灵敏和快速,在加入对苯二酚 60 min 后进行测定.

2.7 pH 值的影响

GQDs 的荧光强度受 pH 值影响显著,如图 7 所示.由图 7 可知:在酸性条件下,GQDs 上作为稳定基团的羧基发生质子 化,GQDs 表面所带的负电荷数降低,导致 GQDs 不能稳定存 在于水溶液中,荧光发生猝灭; 而在中性和碱性条件下,羧基 发生解离,使 GQDs 表面带上大量负电荷,能稳定存在于水环



图 6 GQDs 荧光强度随时间的变化 Fig. 6 Fluorescence intensity of GQDs with changed time



图 5 GQDs 在不同浓度对苯二酚下的荧光光谱 Fig. 5 Fluorescence emission spectra of GQDs with different concentration of hydroquinone in KH₂PO₄-NaOH buffer solution

境中,因而 GQDs 的荧光强度在碱性时较强,且在碱性 pH 值范围内荧光强度基本保持不变,说明中性或碱性 是体系的最适环境.为了提高体系的灵敏度和选择性, 选择 pH=9 的 KH_2PO_4 -NaOH 缓冲溶液(0.02 mol· L⁻¹)为检测环境.

机理解释 3

对苯二酚的紫外吸收受 pH 值影响显著,这可归因 于对苯二酚在不同 pH 值下的结构不同,光谱如图 8 所 示.由图 8 可知:酸性条件下,溶液中对苯二酚分子大量 存在;随着 pH 值的增大, 酚羟基发生电离和重排, 对苯 二酚变为对苯醌^[13];但当 pH 值继续增大,对苯二酚形成酚盐.

分析可知:GQDs荧光猝灭的原因很可能是,对苯二酚在弱碱性条件下被溶解氧氧化成对苯醌,对 苯醌具有较强的氧化性,能与 sp² 簇发生作用,破坏 GQDs 的 表面态,进而导致了 GQDs 的荧光猝灭^[14],这是 pH 值为 9 时 对苯二酚对 GQDs 的猝灭效率最高的原因.

结论 4

合成了具有优异荧光性能的 GQDs,将其作为荧光探针应 用于对苯二酚的分析检测. 在选定的实验条件下,该探针的相 对荧光强度比 F_0/F 与对苯二酚浓度在 1.0×10⁻⁷~5.0× 10^{-6} mol • L⁻¹范围内呈现良好的线性关系,检测限低至 3.1 nmol • L⁻¹. 以柠檬酸(CA)为碳源合成的 GQDs 探针成本低 廉,可以广泛应用,并且绿色环保,操作简便,适用于对苯二酚 的微量检测.



- $\lceil 1 \rceil$ SHEN Jian-hua, ZHU Yi-hua, YANG Xiao-ling, et al. Graphene quantum dots: Emergent nanolights for bioimaging, sensors, catalysis and photovoltaic devices[J]. Chemical Communications, 2012, 48(31): 3686-3699.
- $\lceil 2 \rceil$ ZHU Shou-jun, ZHANG Jun-hu, QIAO Chun-yan, et al. Strongly green-photoluminescent graphene quantum dots for bioimaging applications[J]. Chemical Communications, 2011, 47(24):6858-6860.
- [3] CHEN Shuai, HAI Xin, XIA Chang, et al. Preparation of excitation-independent photoluminescent graphene quantum dots with visible-light excitation/emission for cell imaging J]. Chemistry-A European Journal, 2013, 19(47): 15918-15923.
- $\begin{bmatrix} 4 \end{bmatrix}$ SUN Han-jun, GAO Nan, WU Li, et al. Highly photoluminescent amino-functionalized graphene quantum dots used for sensing copper ions[J]. Chemistry-A European Journal, 2013, 19(40): 13362-13368.
- [5] RAN Xiang, SUN Han-jun, PU Fang, et al. Ag nanoparticle-decorated graphene quantum dots for label-free, rapid and sensitive detection of Ag⁺ and biothiols[J]. Chemical Communications, 2013, 49(11):1079-1081.
- [6] HUANG Hong-duan, LIAO Lei, XYU Xiao, et al. The electron-transfer based interaction between transition metal ions and photoluminescent graphene quantum dots (GQDs): A platform for metal ion sensing[J]. Talanta, 2013, 117 (15):152-157.
- ZHU An-wei, QU Qiang, SHAO Xiang-ling, et al. Carbon-dot-based dual-emission nanohybrid produces a ratiometric [7] fluorescent sensor for in vivo imaging of cellular copper ions[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2012, 124(29):7297-7301.
- CAO Ben-mei, YUAN Chao, LIU Bian-hua, et al. Ratiometric fluorescence detection of mercuric ion based on the na-[8] nohybrid of fluorescence carbon dots and quantum dots[J]. Analytica Chimica Acta, 2013, 786:146-152.



1.0

0.8

0.6

0.4

0.2

图 8

Fig. 8

⁰200

pH=8

pH=7

300

pH=4/5/6

 λ /nm

对苯二酚在不同 pH 值下的

UV-vis absorption spectra of

紫外-可见吸收光谱

hydroquinone at different pH value

pH=9

400

500

- [9] ZHAO Hui-min, CHANG Yang-yang, LIU Meng, et al. A universal immunosensing strategy based on regulation of the interaction between graphene and graphene quantum dots[J]. Chemical Communications, 2013, 49(3):234-236.
- [10] WANG Hui-ying, CHEN Ding-long, WEI Yong-ju, et al. A localized surface plasmon resonance light scatteringbased sensing of hydroquinone via the formed silver nanoparticles in system[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2011, 79(5): 2012-2016.
- [11] BHANGER M I, NIAZ A, SHAH A, et al. Ultra-trace level determination of hydroquinone in waste photographic solutions by UV-vis spectrophotometry[J]. Talanta, 2007, 72(2): 546-553.
- $\lceil 12 \rceil$ DONG Yong-qiang, SHAO Jing-wei, CHEN Cong-qiang, et al. Blue luminescent graphene quantum dots and graphene oxide prepared by tuning the carbonization degree of citric acid[J]. Carbon, 2012, 50(12): 4738-4743.
- [13] SOUCEK P, IVAN G, PAVEL S. Effect of the microsomal system on interconversions between hydroquinone,
- benzoquinone, oxygen activation, and lipid peroxidation[J]. Chemico-Biological Interactions, 2000, 126(1):45-61. $\lceil 14 \rceil$ DONG Yong-qiang, LI Ge-li, ZHOU Na-na, et al. Graphene quantum dot as a green and facile sensor for free chlo-
- rine in drinking water [J]. Analytical Chemistry, 2012, 84(19): 8378-8382.

Detection of Hydroquinone by Graphene Quantum Dots

LIU Peng-chao, SUN Xiang-ying, YANG Chuan-xiao

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

With citric acid as carbon source, graphene quantum dots was prepared by one-step melting method. The Abstract spectral properties of the graphene quantum dots was characterized by FTIR, UV-visible absorption spectra and fluorescence spectra. In addition, its ability of light bleaching and salt resistance were investigated. Then, the graphene quantum dots was used for the detection of hydroquinone by a fluorescent sensor. The fluorescence intensity of graphene quantum dots and the concentration of hydroquinone exhibited a good linear relationship ($R^2 = 0.979$) with a wide concentrations range of $1.0 \times 10^{-7} \sim 5.0 \times 10^{-6}$ mol • L⁻¹ as well as the limit of detection was calculated to be 3.1 nmol • L⁻¹. Keywords: graphene quantum dots; hydroquinone; citric acid; melting method; fluorescence detection

(责任编辑:陈志贤 英文审校: 熊兴泉) **文章编号:**1000-5013(2014)05-0552-06

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2014.05.0552

钴、锰改性方法对酚醛炭泡沫除 SO₂/NO 的影响

程辛,许绿丝

(华侨大学 化工学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 研究金属 Mn,Co的不同改性方法对酚醛活性炭泡沫表面物理结构、化学性质,以及脱硫脱硝效率的 影响.以 MnCl₂,CoCl₂ 为改性剂,采用内、外两种改性法对酚醛炭泡沫进行金属负载改性,并进行模拟烟气脱 硫脱硝的实验.实验结果表明:经 CoCl₂ 内、外改性样品的脱硫效率较未改性样品(CF₀)分别提高了 22.9%, 8.2%,脱硝效率提高了 58.6%,134%;经 MnCl₂ 内、外改性样品的脱硫效率分别提高了 4.5%,3.1%,脱硝 效率提高了 79.3%,10.3%.因此,内改性有利于酚醛活性炭泡沫脱硫脱硝,其中 CF_{Con}脱硫脱硝效果最佳. 关键词: 酚醛活性炭泡沫;内、外改性法; Co 改性剂; Mn 改性剂;脱硫脱硝 中图分类号: X 511 **文献标志码:** A

目前,煤燃烧产生的 SO₂ 和 NO 是形成酸雨和 PM 2.5 的主要原因,因此,去除烟气中 SO₂/NO 势 在必行^[1].现有的活性炭质在吸附材料的同时,脱除 SO₂ 和 NO,但普遍存在效率低的问题.改性酚醛活 性炭泡沫,在保留了活性炭材料的表面物理化学特性的同时,具有低密度、热膨胀系数、高孔隙率等优 点.生产工艺简单、成本低、成型性好、耐腐蚀、孔径可控.通过内、外改性方法负载,金属离子对 SO₂/NO 有较强的结合力和催化性能.因此,在烟气脱硫脱硝方面具有实际应用价值^[2-6].纳宏波等^[7]采用 FeCl₂,NH₄NO₃ 内改性法制备改性酚醛活性炭泡沫,成功负载利于脱硫脱硝的铁离子;李锦等^[8]制备 的酚醛炭泡沫采用 CuCl₂,FeCl₂,MgCl₂,其内改性法改性后脱硫脱硝效率均提高.本文分别采用了内、 外改性法,对改性前后进行表征.

1 实验部分

1.1 实验试剂与仪器

试剂:氯化锰(自制酚醛树脂);氯化钴、硫酸、正戊烷、吐温-80(分析纯).

仪器:多用分散砂磨机(上海微特电机有限公司);管式高温炉 Nabertherm、NEXUS-470 型傅里叶 变换红外光谱仪(美国 Thermo Nicolet 公司);SmartLab 系列 X 射线衍射仪(日本理学株式会社);全自 动比表面积、微孔孔隙和化学吸附仪(北京贝士德仪器科技有限公司);S-4800 型场发射扫描电子显微 镜(日本日立公司);testo350 加强型烟气分析仪(德国德图公司).

1.2 改性酚醛活性炭泡沫的制备

1.2.1 内改性酚醛活性炭泡沫的制备 在酚醛树脂中加入匀泡剂和质量分数为 10% 的金属改性剂 (分析纯),搅拌均匀,再加入发泡剂,继续搅拌,最后加入固化剂,搅拌均匀.将其注入模具内,在 70 ℃的 烘箱内静置 3 h,制得酚醛泡沫,再进行炭化活化.具体方法如下:取内改性酚醛泡沫,切割成块状,测量 其原始质量,并装入石英管中,通入氮气;在氮气氛围中,开启电源设置升温程序,从室温升至 300 ℃,升 温时间为 30 min,保持恒温 300 ℃,在高温炉内预氧化 60 min;再从 300 ℃升温至 500 ℃,升温时间为 30 min,保持恒温 500 ℃,炭化 30 min;接着通入 0.2 L•min⁻¹的水蒸汽,活化 30 min;最后关闭电源,

收稿日期: 2014-01-01

通信作者: 许绿丝(1963-),女,教授,主要大气污染控制工程、节能与清洁生产、环境材料从事的研究. E-mail:xulv-si0505@126.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178195)

使高温炉缓慢自然冷却至室温后取出样品,制得内改性酚醛活性炭泡沫.

1.2.2 浸渍法改性酚醛活性炭泡沫的制备 将 0.5 g 金属氯化物浸渍到 5 g 酚醛活性炭泡沫上,在室 温下振荡 24 h 后取出,晾干,约在 110 ℃下烘干.

1.3 改性酚醛基炭泡沫的命名

采用外改性,根据改性剂的不同, $MnCl_2$, $CoCl_2$ 改性的酚醛活性炭泡沫标示为 CF_0 , CF_{Mn} , CF_{Co} .采 用内改性,根据改性剂的不同,MnCl₂,CoCl₂改性的酚醛活性炭泡沫标示为CF_{Mnn},CF_{Con}.

2 结果与讨论

2.1 表面形貌结构分析

通过扫描电镜,观察不同金属改性方法的酚醛活性炭泡沫表面微观结构,如图1所示.从样品的 100 倍电镜可以看出:CF₀,CF_{Mn},CF_{Co},CF_{Mn},CF_{Con}均具有连续泡孔结构,且泡孔较为均匀,这些较大 的泡孔可以起到通道的作用,使 SO₂和 NO 进入酚醛炭泡沫的微孔中.



(a) CF_0

(b) CF_{Mn}

(c) CF_{Co}



(d) CF_{Mn-n}



(e) CF_{Corn}

图 1 样品的 100 倍电镜图

Fig. 1 100 times SEM photographs of samples

样品的1000倍电镜图,如图2所示.图2中:所有样品的泡孔表面均存在褶皱.一方面是由于在发 泡过程中加入的吐温-80、硫酸等杂质残留在孔洞中,使酚醛泡沫在炭化过程中发生表面张力;另一方面



(a) CF₀

(b) CF_{Mn}



(c) CF_{Co}



(d) CF_{Mn-n} (e) CF_{Co-n} 图 2 样品的 1 000 倍电镜图 Fig. 2 1 000 times SEM photographs of samples

由于活化过程中水蒸气氧化刻蚀不均匀.所有样品的泡孔表面均存在大量微小孔洞,一方面是由于在发泡过程中残留的发泡剂和匀泡剂等残留药剂在炭化时挥发;另一方面由于在水蒸气活化过程中基体被氧化刻蚀,这些大量的微小孔洞可以提高对 NO 和 SO2 的吸附性能.

样品的 8 000 倍电镜图,如图 3 所示. 由图 3 可知:图 3(b),(c)中比较亮的点是 MnCl₂,CoCl₂,说明 通过浸渍法成功将金属负载到酚醛活性炭泡沫上;而图 3(d),(e)中并没有发现此特征,表明通过内改 性方法的金属是均匀地分散在材料中^[9].





图 3 样品的 8 000 倍电镜图

Fig. 3 8 000 times SEM photographs of samples

2.2 表面物理结构分析

利用全自动比表面积、微孔孔隙和化学吸附仪测定样品的孔结构参数,如表1所示.表1中: S_1 为 BET 比表面积; S_2 为 T-plot 微孔比表面积;V为总孔容; V_m 为 T-plot 微孔孔容; S_m 为中孔比表面积; d为 BET 吸附的平均孔径.由表1可知:CF_{Con}的比表面积最大;而 CF_{Co},CF_{Mn},CF₀依次减小. CF_{Mnn},CF_{Con}的比表面积和微孔含量分别大于 CF_{Mn},CF_{co},说明了通过内改性负载的金属更有利于泡孔 的形成.此外,外改性样品的中孔比表面积较其他样品的增大,这是由于浸渍法负载的金属氯化物在烘 干后形成结晶体.

由图 3 可以判断:结晶颗粒大小约为 200~500 nm,可以阻塞部分大孔,使大孔向中孔转变,致使中 孔比表面积增大.由 BET 吸附的平均孔径方面可以看出:采用内改性的酚醛活性炭泡沫的平均孔径均 小于采用外改性的酚醛活性炭泡沫,说明金属在酚醛活性炭泡沫的活化过程中,可以促进中孔和微孔的 产生,使吸附的平均孔径减小.因此,内改性酚醛炭泡沫对 SO₂ 和 NO 的物理吸附性能优于外改性,这 将促进下一步的化学吸附性能.

				re parameters o			
试样	S_1/m^2 • g^{-1}	S_2/m^2 • g^{-1}	$V/\mathrm{mL} \cdot \mathrm{g}^{-1}$	$V_{ m m}/{ m ml}$ • ${ m g}^{-1}$	$S_{ m m}/{ m m}^2$ • ${ m g}^{-1}$	V_1/mL • g^{-1}	d/nm
CF_0	327.92	309.68	0.143 7	0.107 6	15.25	0.033 5	2.28
$\mathrm{CF}_{\mathrm{Co}}$	460.16	396.32	0.297 5	0.201 7	39.80	0.073 8	3.19
$\mathrm{CF}_{\mathrm{Mn}}$	427.29	380.68	0.251 2	0.183 2	38.60	0.069 5	3.35
$\mathrm{CF}_{\mathrm{Co-n}}$	520.93	436.87	0.308 2	0.225 4	28.96	0.068 9	2.63
$CF_{\text{Mn-n}}$	453.82	396.52	0.274 9	0.199 1	19.30	0.045 1	2.38

表 1 样品的孔结构参数

Tab. 1 Pore structure parameters of samples

2.3 表面官能团分析

酚醛活性炭泡沫样品的红外光谱图,如图 4 所示.图 4 中: CF_0 , CF_{Mn} , CF_{Co} 在 3 400 cm⁻¹处存在分子间氢键 O-H 伸缩振动; CF_{Mn} , CF_{Con} 在 3 400 cm⁻¹处的 O-H 伸缩振动减弱; CF_0 , CF_{Mn} , CF_{Co} 在 1 250~1 000 cm⁻¹处存在的 C-O 键伸缩振动,而 CF_{Mnn} , CF_{Con} 的 C-O 伸缩振动消失.这可能由于内

555

改性样品在炭化时炭先将金属氯化物还原,再 通过活化过程中水蒸气和表面的含氧官能团 将金属氧化. CF₀, CF_{Mn}, CF_{co}在 900~650 cm⁻¹的指纹区存在较多的吸收峰,说明苯环 上取代基的个数较多; CF_{Mn}, CF_{con}的 900~ 650 cm⁻¹的指纹区消失,说明金属 Mn, Co 在 炭化过程中促进部分官能团分解;所有样品在 1 650~1 450 cm⁻¹处出现多个峰,这是苯环的 C=C 伸缩振动峰^[8].

总而言之, CF₀, CF_{Mn}, CF_{Co}, CF_{Mn-n}, CF_{Co-n} 均有苯环结构; CF₀, CF_{Mn}, CF_{Co}还存在酚羟





基,C-O键;而 CF_{Mnn},CF_{Con}苯环上 O-H,C-O等部分官能团减少甚至消失. 酚醛活性炭泡沫中的酚醛基和 C-O键均属于弱酸性含氧官能团,这有利于吸附 SO₂和 NO等极性化合物. 另外,表面含氧官能团促使 N 原子向碳原子(具有+ δ 电荷)进攻,同时 NO 中的氧原子向相邻的碳原子进攻,最终由中间生成物转变成 N₂和 CO₂. 因此,表面含氧官能团对脱氮氧化物是有利的^[9].

2.4 金属改性酚醛活性炭泡沫的微晶结构分析

样品的 XRD 衍射图谱. 如图 5 所示. 由图 5 可知:改性前后的酚醛活性炭泡沫均出现(101)和(002)

谱带;处于 2θ=22°附近的衍射峰,属于碳的(002)晶面衍射 峰;处于 2θ=43°附近的衍射峰,属于碳的(101)晶面衍射 峰.除此之外,XRD 图谱中没有出现其他碳的晶面衍射峰. 这表明 500 ℃的炭化温度可使碳由无定型结构向是石墨结 构转变^[10].

外改性样品 CF_{Mn}, CF_{co}与 CF_o 的图谱相比新增峰不 多,主要由于通过外改性负载的金属没有参与炭化活化过 程,其金属主要由氯化物形式存在,即 CF_{Mn}在 2θ =50°附近 出现 MnCl₂ 的衍射峰, CF_{co}在 2θ =52°处存在 CoCl₂ 的衍 射峰. CF_{Mn-n}在 2θ =27°, 36°, 61°, 67°分别出现 Mn, MnO₂ 和 MnO 的衍射峰. CF_{co}在 2θ =35°, 2θ =52°附近出现的 Co,



Fig. 5 XRD patterns of samples

Co₃O₄的衍射峰,这是由于炭化过程中,炭将金属还原,活化过程中金属又被氧化.因此,CF_{Mnn},CF_{Con}中的金属主要以单质和氧化物形式存在.金属各种氧化物形态可在酚醛活性炭泡沫表面形成 SO₂/NO 的反应活性中心,对脱硫脱硝反应有重要的催化作用^[11].

2.5 脱硫脱硝实验

将样品切割成 5 cm×3 cm×3 cm 的矩形,置于反应器中.保持气质比 W/Q 为 3 g • (min • L)⁻¹, N₂ 作为载气,流量为 1 L • min⁻¹, O₂ 体积分数为 6%, NO 流量为 0.4 mL • min⁻¹, SO₂ 流量为 10.4 mL • min⁻¹, 反应温度 50 °C,采用 NaOH 和 KMnO₄ 吸收尾气.通过烟气分析仪测定进出口 SO₂ 和 NO 的变化,得到脱硫脱硝效率曲线.

Co,Mn 改性酚醛炭泡沫如图 6,7 所示. 从图 6,7 可以看出:所有样品的脱硫效率($\eta(SO_2)/\%$)在 60 min 时均在 70%以上;而脱硝效率在 30 min 时均下降到 17%以下.这主要由 3 个原因造成:一是由 于 NO 属于非极性分子,SO₂ 属于极性分子,酚醛活性炭泡沫更易对 SO₂ 进行物理吸附;二是由于化学 吸附的 NO 在被氧化的过程中将电子转移给 SO₂,促进 SO₂ 的化学吸附;三是由于 SO₂ 和 NO 在活性 中心形成中间产物[(NO₂)(SO₃)],其中一部分会还原成 NO,导致 NO 的脱除效率($\eta(NO)/\%$)较 低^[12-13].

本实验中, CF_{Co}, CF_{Con}, CF_{Mn}, CF_{Mn}, OF_{Mn}的脱硫效率较 CF₀分别提高了 8.2%, 22.9%, 3.1%, 4.5%; CF_{Co}, CF_{Mn}, CF_{Mn}, Mid效率较 CF₀分别提高 58.6%, 10.3%, 79.3%, CF_{Con}脱硝效率是 CF_{Co}的 2.3倍. 一是由于 CF_{Co}, CF_{Con}, CF_{Mn}, CF_{Mn}, CF_{Mn}, 較 CF₀ 的比表面积更大, 开孔率更高, 孔洞分布更均匀, 更有利于对 烟气中 SO₂ 和 NO 的物理吸附;二是由于添加到炭泡沫中的金属离子可以催化氧化 SO₂ 和 NO 的去除 过程.另外,CF_{Mn},CF_{Con}的脱硫脱硝效率分别大于 CF_{Mn},CF_{Co}.这是由于通过内改性负载的金属是均匀 分布在酚醛炭泡沫中,且负载的金属不易在脱硫脱硝的过程中脱落.从图 3,5 都可知:外改性负载的金 属主要是以范德华力附着在炭泡沫表面上,且主要以金属氯化物形式存在,容易在脱硫脱硝的过程中脱 落,难以对脱硫脱硝产生催化作用^[14-16];二是浸渍法负载于炭泡沫上的金属的不均匀性及其堵塞孔隙导 致,降低了其对 SO₂ 和 NO 的吸附作用.



图 7 Mn 改性酚醛炭泡沫

Fig. 7 Desulfurization efficiency of samples modified by Mn

采用内、外改性均能提高酚醛活性炭泡沫的脱硫脱硝效率,是因为金属离子可以增加 NO 的吸附、 反应的活性中心,此外金属离子可以与 SO₂ 形成共用电子对,提高酚醛活性炭泡沫对 SO₂ 的捕捉能力. CF_{con}的脱硫脱硝效率最高,这是由于 Co 更易失去电子,使 SO₂ 和 NO 更容易转化成 SO₃ 和 NO₂.

3 结论

采用金属改性后酚醛活性炭泡沫的脱硫脱硝效率均提高,这主要由于金属 Co 和 Mn 可以对 SO₂ 和 NO 的去除过程起重要的催化氧化作用.内改性法较外改性法更有利于酚醛活性炭泡沫脱硫脱硝,这是由于采用内改性的酚醛活性炭泡沫比表面积更大,有利于物理吸附 SO₂ 和 NO.同时,内改性负载的金属均匀分布在炭泡沫之间,不易脱落.且有一部分是以金属氧化物形式存在,可作为 SO₂ 和 NO 的吸附、反应活性中心,提高其脱硫脱硝效率.通过内改性法负载的金属 Co 比 Mn 更有助于脱硫脱硝,这是由于 Co 更易失去电子,促进了 SO₂,NO 转化成 SO₃ 和 NO₂.

参考文献:

- [1] 胡龙,沈珊,王小书,等.烟气脱硫脱硝的研究进展[J].化学工程师,2010,54(7):54-58.
- [2] 刘明贤,甘礼华,吴方锐.酚醛树脂为前驱体制备多孔碳泡沫材料[J].功能材抖,2008,39(1):108-110.
- [3] 雷世文,郭全贵,史景利,等.纳米孔径酚醛树脂基泡沫碳前驱体的隔热性能[J]. 宇航材料工艺,2009,22(5):32-35.

- [4] 沈璐,杨小宁,华坚,等.不同造孔剂负载金属活性炭的制备及其脱硫性能初步研究[J].四川环境,2006,25(6):27.
- [5] WANG Jian-ying, ZHAO Feng-yun, HU Yong-qi. Modification of act-ivated C arbon fiber by loading metals and their performance on SO₂ removal[J]. l Chin J Chm Eng, 2006, 14(4): 478-485.
- [6] PARK Soo-jin, SHIN Jun-sik. Influence of copper content on NO removal of the activated carbon fibers produced by electroplating[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2003, 264(2): 39-42.
- [7] 纳洪波,许绿丝,李锦.改性酚醛基活性炭泡沫的制备与表征[J].材料导报,2010,24(9):104-107.
- [8] 李锦,许绿丝,李宝宁,等.改性酚醛基炭泡沫的表面结构及脱硫脱硝[J].环境工程学报,2012,6(5):1637-1642.
- [9] 张强波,黄盼,李月丽,等. ACF 表面化学官能团对影响脱硫性能的研究进展[J].资源开发与市场,2010,26(4): 341-342.
- [10] 崔华飞,李彩亭,路培,等. ACF负载金属氧化物及尿素低温去除 NO[J]. 环境科学,2010,31(11):2578-2579.
- [11] 许绿丝,岑泽文,曾汉才,等.活性炭纤维吸附 NO 和 SO₂ 的试验研究[J].华中科技大学学报:自然科学版,2006, 34(2):105-107.
- [12] 唐强,张智刚,樊越胜,等.活性炭选择性吸附烟气中 SO2 和 NO 的实验研究[J]. 热力发电,2003(12):52-56.
- [13] BYEON J H. Electroless copper deposition on a pitch-based activated carbon fiber and an application for NO removal[J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202(8):3571-3578.
- [14] PARK S J, SHIM G H. NO removal of Ni-electroplated activated carbon fibers[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2005, 291(5):585-586.
- [15] PARK S J, KM B J. A study on NO removal of activated carbon fibers with deposited silver nanoparticles[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2005, 282(3):124-127.
- [16] 符若文,杜秀英,曾汉民,等.负载金属基活性炭纤维对一氧化氮和一氧化碳的吸附及催化性能研究[J].新型炭材料,2000,15(3):1-6.

Modification Methods of Co and Mn and the Influence on Removel of SO₂ and NO of the Carbon Foams from Phenolic Resin

CHENG Xin, XU Lu-si

(College of Chemical Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to investigate how the different modification methods of Mn and Co influencing the physical and chemical characteristics, as well as the desulfurization and denitrification efficiencies of the activated carbon foams from phenolic resin, this article studied the internal or external modification of carbon foams from phenolic resin using $MnCl_2$ and $CoCl_2$ as modifiers, and mimicked the experiments of desulfurization and denitrification. The results indicated that the desulfurization efficiencies of the samples modified by $CoCl_2$ in internal and external modification ways (CF_{Corn} and CF_{Co} respectively) increased by 22.9% and the denitrification efficiencies increase by 58.6% and 134%. Furthermore, the desulfurization efficiencies of the samples modified by $MnCl_2$ in internal and external modification ways (CF_{Mnrn} and CF_{Mn} respectively) increased by 4.5% and 3.1%, and the denitrification efficiencies increased by 79.3% and 10.3%. Therefore, the internal modification method is more efficient for the desulfurization and denitrification of the activated carbon foams from phenolic resin, and CF_{Corn} presents the highest efficiencies.

Keywords: activated carbon foam from phenolic resin; internal or external modification; Co modifier; Mn modifier; desulfurization and denitrification

(责任编辑:陈志贤 英文审校:刘源岗)

文章编号:1000-5013(2014)05-0558-06

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2014.05.0558

不同活化方法对开心果壳活性炭的孔结构影响

陈虹霖, 宋磊

(华侨大学 化工学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 以开心果壳为原料制备活性炭,通过在-196 ℃下测定活性炭的氮气吸附等温线,探讨 ZnCl₂ 法、KCl 法以及 ZnCl₂-KCl-H₂O 联合活化法对活性炭孔结构的影响.研究表明:ZnCl₂ 法制备的开心果果壳活性炭以 微孔为主,采用 40%ZnCl₂ 溶液浸渍,在 500 ℃下活化 1.5 h 后得到的活性炭的比表面积为 630 m² · g⁻¹;单 独 KCl 活化法不能起到较好的活化效果;对于 ZnCl₂ 活化法和 KCl 活化法,增加水蒸气活化都能增强活化效 果,尤其对 KCl 活化的增强效果最为明显,使其比表面积增大近 9 倍,但其孔结构仍是微孔为主;ZnCl₂-KCl-H₂O 联合活化法能有效增加活性炭的中孔,采用 40%ZnCl₂ 和 6%KCl 溶液浸渍,在 900 ℃下活化 1.5 h 后得 到的活性炭的中孔添加量为 0.10 cm³ · g⁻¹,比表面为 740 m² · g⁻¹,中孔孔径集中在 4 nm.

关键词: 开心果壳;活性炭;孔结构;中孔添加;活化方法

中图分类号: X 705 文献标志码: A

活性炭(activated carbon, AC) 是一种孔隙结构发达的多孔性功能炭材料. 近年来,有诸多采用油 茶壳^[1]、城市固体有机废弃物^[2]、烟草杆^[3]、枣椰子树根^[4]、竹质^[5]、椰壳等^[6-7]制备中孔活性炭的研究. 这种用廉价的农产品废弃物制备高性能的活性炭成为研究的热点之一. 开心果壳是我国近几年出现的 农产品废弃物,虽然国外已有对开心果果壳制备活性炭的研究^[8-13],但只局限于高比表面积微孔活性炭 的制备,对于如何控制其孔结构特别是中孔结构未见文献报道. 此外,对于添加剂钾盐助剂 KCl 与 ZnCl₂ 联合活化的方法研究较少. 早在 1992 年,就有人研究了钾催化剂对椰子壳制活性炭的影响. 结果 发现:除 KCl 外,多种含钾化合物在用 CO₂ 作活化剂,活化温度为 800 ℃时,都是椰子壳制备活性炭的 有效催化剂^[14]. 即使在碳酸钾没有 CO₂ 存在时,也有助于椰子壳的炭化、活化. 磷酸钾则既可防止产品 过度烧失而降低表面积,又有助于中孔的增加. 2008 年,邓先伦等^[15]论述了在经典的 ZnCl₂ 锌法制造活 性炭工艺的基础上添加其他无机盐的新工艺研究,提出添加 KCl 可在炭活化过程中减轻物料黏性,有 利于机械化、连续化生产. 2012 年,刘杰等^[16] 以 KOH 为主活化剂,研究了钾盐助剂对活性炭孔结构的 影响,提出加入 KCl 能够促进孔径的扩张. 综合以上研究成果,本文以开心果壳为原料制备活性炭,考 察了不同的活化方法,ZnCl₂ 法、KCl 法、ZnCl₂-KCl-H₂O 联合法,不同的制备条件对开心果壳活性炭的 孔结构的影响,探讨对于开心果壳活性炭的微孔结构和中孔结构新的调控方法.

1 实验部分

1.1 原材料和预处理

采用市售开心果果壳,洗净晒干后粉碎,用蒸馏水煮沸 0.5 h 后,于 105 ℃烘干,放入干燥器保存. 1.2 原材料的热重分析

使用 DTG-60(H)型差热-热重分析仪(日本岛津公司)研究样品的热稳定性能,载气为氮气,流速为 50 mL • min⁻¹,升温速率为 10 ℃ • min⁻¹,测试范围为室温至 1 000 ℃.

收稿日期: 2014-02-25

通信作者: 宋磊(1973-), 男, 副教授, 主要从事环境材料的研究. E-mail: songlei@hqu. edu. cn.

基金项目: 华侨大学基本科研业务费专项基金资助(JB-ZR1150);华侨大学高层次人才科研启动基金(11BS215)

1.3 开心果果壳活性炭的制备

称取一定量原料放入不同浓度的 ZnCl₂ 溶液中,浸渍 24 h 后过滤取出,于 105 ℃烘干一夜. 在不同 条件下活化,活化后的样品用 0.1 mol・L⁻¹盐酸煮沸,以除去残余的活化剂和灰分,并用热蒸馏水反复 洗至滤液呈中性. 然后,将其在 105 ℃下烘干,即得开心果果壳活性炭. 制得的活性炭按 gk(*x*Zn-*y*-*z*)记 录. 其中:*x* 为 ZnCl₂ 的浸渍浓度;*y* 为活化温度;*z* 为活化时间.

按照同样的方法,将原料放入 ZnCl₂ 和 KCl 的混合溶液中,在不同活化条件下活化.制备所得的活性炭按 gk(*x*Zn-yK-*z*-*j*-*k*)记录,其中:*x* 为 ZnCl₂ 的浸渍浓度;*y* 为添加的 KCl 的浸渍浓度;*z* 为活化温度;*j* 为活化时间;*k* 为活化气体.制备所得的开心果果壳活性炭统一记为 GKAC.

1.4 活性炭的结构表征和分析

采用贝士德 3H-2000PS1 型静态容量法比表面积及孔径分析仪,于一196 ℃下测定样品的氮气吸 附等温线.通过 BET 多点法计算活性炭的比表面积;采用 BJH 法计算中孔的孔容、平均孔径和孔径分 布;采用 t-plot 法和 s-plot 法分别计算微孔的孔容和平均孔径.前处理条件为 200 ℃下脱气 6 h.

2 结果与讨论

2.1 原材料热解分析

图 1 为开心果壳热重分析曲线. 由图 1 可知:从 0 ℃升温至 200 ℃的过程中,果壳的质量下降平缓, 说明这个阶段果壳失去的是自由水分子;从 200 ℃升温至 350 ℃,果壳质量急剧下降,表明果壳中的有 机挥发成分开始被降解;到 350 ℃,原材料质量仅剩 30%,继续升高温度,果壳的质量继续降低,这个阶 段果壳中的无机碳被氧化烧失.

2.2 ZnCl₂活化法对孔结构的影响

2.2.1 活化温度对孔结构的影响 采用 40% ZnCl₂ 溶液浸渍,在不同温度下活化 1.5 h 后得到的 GKAC,在-196 ℃下测得的氮气吸脱附等温线,如图 2 所示.由图 2 可知:等温线的类型都为 I 型,显 示活性炭孔结构为微孔.







不同活化温度下,活性炭的产率和孔结构参数如表1所示.表1中:s为BET 比表面积;V为孔容;d 为微孔平均孔径;η为产率.由表1可知:500℃时,活性炭的比表面积、微孔孔容和总孔容最大;随着温 度的增大,比表面积先增大后逐渐降低.ZnCl₂属于酸,具有催化脱羟基和脱水的作用,其熔点约290 ℃,沸点约732℃.活化温度为400℃时,熔融状态的氯化锌不容易进入到深层的孔隙中,较多停留在外 表面且表面原料的羟基等作用,形成微孔,因此得到的活性炭微孔孔容较小.当活化温度为500℃时,温 度的提高可以使熔融的氯化锌一部分继续停留在外表面,一部分进入原料固有的深层的孔隙中,其他部 分进入升温过程中因挥发分的去除而产生的孔隙中,使最后活化效果增强,微孔孔容增大.当活化温度 继续提高到600~700℃时,此时氯化锌的蒸气压较大,极易发生气化^[15],所以氯化锌开始发生蒸发损 耗,导致温度的升高对微孔孔容和中孔孔容的影响变化都不大.此外,由此得到的氯化锌法制得的开心

表1 不同活化温度下活性炭的产率和孔结构参数

Tab. 1 Pore structure parameters and yield of GKAC prepared at different activation temperatures

迁北刘日孙	/2 m ⁻¹		V/cm^3 • g^{-1}	- d/nm	. / 0/	
伯化们而作	s/m•g —	总孔容	中孔	微孔		η / $>$ 0
gk(40 %Zn-400-1.5)	410	0.20	0.05	0.16	0.68	39.4
gk(40 %Zn-500-1.5)	630	0.29	0.04	0.26	0.66	36.5
gk(40%Zn-600-1.5)	580	0.26	0.02	0.23	0.64	35.5
gk(40%Zn-700-1.5)	570	0.25	0.00	0.22	0.66	34.8
gk(40%Zn-800-1.5)	560	0.24	0.01	0.24	0.67	33.0
gk(40%Zn-900-1.5)	540	0.25	0.03	0.23	0.68	32.7

从表1可知:活化温度的改变对于活性炭的微孔的孔径的影响很小.随着活化温度的升高,活性炭的产率逐渐下降,这是由于温度升高而形成的挥发性组分引起的脱水及消去反应使材料进一步失重. 2.2.2 浸渍浓度对孔结构的影响 采用不同浓度的 ZnCl₂ 溶液浸渍果壳,在 500 ℃下活化 1.5 h 后得 到的 GKAC,在-196 ℃下测得的氮气吸脱附等温线,如图 3 所示.由图 3 可知:其等温线的类型都为 I 型,显示活性炭孔结构为微孔.

不同浸渍浓度下制备得到的 GKAC,其产率和孔结构数据如表 2 所示.由表 2 可知:随着浸渍浓度 的增大,活性炭的比表面积、微孔孔容逐渐减小.氯化锌浓度在一定范围内的增大,使得氯化锌和原料的 羟基和水分子反应程度就越剧烈,部分生成的微孔坍塌,微孔孔容减少.浸渍浓度的改变对于活性炭的 微孔平均孔径变化不大.随着浸渍浓度的增大,活性炭的产率呈现下降趋势.

表 2 不同浸渍浓度下 GKAC 产率和孔结构参数

Tab. 2 Pore structure parameters and yield of GKAC prepared with different impregnation concentrations

迁小刘日孙	s/m^2 • g^{-1} –		V/cm^3 • g^{-1}	- d/nm	m/0/	
(百年七)门 时 作		总孔容	中孔	微孔	<i>a</i> / IIII	η / >0
gk(30%Zn-500-1.5)	640	0.29	0.02	0.28	0.67	38.9
gk(40%Zn-500-1.5)	630	0.29	0.04	0.27	0.66	36.5
gk(50%Zn-500-1.5)	580	0.26	0.03	0.24	0.68	35.3
gk(60%Zn-500-1.5)	560	0.25	0.03	0.24	0.68	35.2

2.2.3 活化时间对孔结构的影响 采用 40 % ZnCl₂ 溶液浸渍果壳,在 500 ℃下活化不同时间后得到的 GKAC,在-196 ℃下测得的氮气吸脱附等温线,如图 4 所示.由图 4 可知:等温线的类型都为 I 型,显示活性炭孔结构为微孔.







图 4 不同活化时间的 GKAC 氮气吸附等温线 Fig. 4 N₂ adsorption isotherms on GKAC prepared for different activation times

不同活化时间下,活性炭的产率和孔结构数据如表3所示.由表3可知:活化时间为1.5h时,活性炭的比表面积和中孔孔容都是最大;微孔平均孔径也随着活化时间的延长是先增大后减小;活性炭的产率则随着活化时间的延长而降低.活化时间太短,则反应时间不够,活化程度不够,无法形成足够的孔

隙,微孔孔容和中孔孔容都较小,微孔平均孔径较小;随着活化时间的延长,反应得到充分进行,活化效 果增强,孔容增大,微孔平均孔径也增大;但活化时间如果太长,则微孔和中孔都面临坍塌,孔容减小.

表 3	不同活化时间	► GKAC	〕产率和扎结构参数

Tab. 3 Pore s	structure parameters	and yield	of GKAC	prepared for	different	activation	times
---------------	----------------------	-----------	---------	--------------	-----------	------------	-------

迁化刘日孙	$n/m^2 - m^{-1}$		$V/\mathrm{cm^3}$ • g^{-2}	d/nm	. / 0/	
佰化剂面种	s/m ∙g	总孔容	中孔	微孔	a / IIIII	η / / 0
gk(40%Zn-500-0.5)	470	0.20	0.00	0.20	0.58	37.2
gk(40%Zn-500-1.5)	630	0.29	0.04	0.30	0.66	36.5
gk(40%Zn-500-2.5)	600	0.27	0.01	0.22	0.64	36.1

2.3 不同活化剂中水蒸气活化对孔结构的影响

采用 40%ZnCl₂ 溶液或 6%KCl 溶液浸渍果壳,在 900 ℃下、以水蒸气为活化气体活化 1.5 h 后得 到的 GKAC,在-196 ℃下测得的氮气吸脱附等温线,如图 5 所示.由图 5 可知:在通入水蒸气活化后得 到的 gk(40%Zn-900-1.5-H₂O)和 gk(6%K-900-1.5-H₂O)的氮气吸脱附等温线仍是 I 型等温线,显示 了活性炭的孔结构为微孔.gk(6%K-900-1.5-H₂O)的等温线在 P/P_0 接近于 1 处上升,且脱附曲线和 吸附曲线有轻微的不重合,说明有较大孔径的中孔产生.

ZnCl₂/KCl 活化法中,水蒸气为活化气体得到的 GKAC 孔结构数据,如表 4 所示.由表 4 可知:对 于 ZnCl₂ 活化法和 KCl 活化法,添加水蒸气活化都相应的增大了活性炭的比表面积,且都比单纯水蒸 气活化法的得到的活性炭的比表面要高.单独 KCl 活化的比表面仅为 70 m² · g⁻¹,说明单独 KCl 并不 能起到较好的活化效果.通过引入水蒸气对 KCl 的活化效果增强尤为明显,其比表面大幅度增大到 581 m² · g⁻¹,说明 KCl 在水蒸气存在的条件下能更好地与材料发生反应,取得较好的活化效果,消耗掉的 C 主要生成了 K₂CO₃,而 K₂CO₃ 在高温下分解生成 CO₂ 扩张了孔径^[16].

迁化刻日动	$r/m^2 \cdot r^{-1}$	V/cm^3 • g^{-1}			\mathbf{V} , \mathbf{V} ,	d/	d/nm	
行行行了的时代	3/ m • g	总孔容	中孔	微孔	v 中/ v 微	中孔	微孔	
gk(40 %Zn-900-1.5)	540	0.25	0.02	0.23	0.09	3.36	0.68	
gk(6%K-900-1.5)	70	0.04	0.01	0.03	0.33	4.69	0.67	
$gk(40\% Zn-900-1.5-H_2O)$	700	0.31	0.02	0.28	0.09	2.48	0.67	
$gk(6\% K-900-1.5-H_2O)$	590	0.27	0.02	0.22	0.09	4.75	0.64	
gk(900-1.5-H ₂ O)	500	0.22	0.02	0.19	0.08	2.76	0.70	

表 4 采用不同活化剂以水蒸气活化的 GKAC 孔结构参数 Tab. 4 Pore structure parameters of GKAC steam-activated with different activating agents

主要反应式为: $2K^++2H_2O \rightarrow 2KOH+H_2\uparrow$,

 $4\text{KOH}+\text{C}\rightarrow\text{K}_2\text{CO}_3+\text{K}_2\text{O}+\text{H}_2\uparrow$,

$$K_2 CO_3 \rightarrow K_2 O + CO_2 \uparrow$$

2.4 ZnCl₂-KCl-H₂O联合活化法对孔结构的影响

采用 ZnCl₂-KCl(即 40% ZnCl₂+6%KCl)联合活化法,在 900 ℃下活化 1.5 h 后得到的 GKAC,在 -196 ℃下测得的氮气吸脱附等温线,如图 6 所示.由图 6 可知:在没有水蒸气的条件下,ZnCl₂-KCl 联 合活化得到的活性炭的等温线属于 I 型等温线,即孔结构以微孔为主;在通入水蒸气时,ZnCl₂-KCl-H₂O 联合活化得到的活性炭的等温线属于 IV 型等温线,显示有明显中孔产生,滞后环属于 II 类,说明生 成的是平板狭缝孔.

水蒸气为活化气体时,得到 GKAC 孔结构数据如表 5 所示.由表 5 可知:在没有水蒸气的条件下, ZnCl₂-KCl 联合活化得到的活性炭的比表面积,比单独 ZnCl₂ 活化或单独 KCl 活化的比表面积都要低, 且中孔孔容也仅为 0.01 cm³ · g⁻¹,说明在没有水蒸气的条件下,KCl 的添加不能起到助活化扩孔的目 的,反而对孔的生成有破坏或者抑制作用;在通入水蒸气时,ZnCl₂-KCl-H₂O 联合活化得到的活性炭的 比表面积,比单独 ZnCl₂ 活化或单独 KCl 活化的比表面积都要高,且中孔孔容上升到 0.1 cm³ · g⁻¹,说 明氯化锌、氯化钾和水蒸气共同存在能够促使中孔的产生.这也再次说明了 KCl 在水蒸气存在的条件 下能更好的与材料发生反应,取得较好的活化效果,单独 KCl 并不能起到活化效果.



图 5 采用 ZnCl₂/KCl 活化法以水蒸气活化得到的 GKAC 氮气吸附等温线







Fig. 6 N_2 adsorption isotherms on GKAC prepared by using ZnCl₂-KCl-H₂O as activating agent

表 5 ZnCl₂-KCl-H₂O联合活化法中不同水蒸气条件下的 GKAC 孔结构参数

Tab. 5 Pore structure parameters of GKAC steam-activated by using ZnCl₂-KCl-H₂O as activating agent

迁化刘日劫	$a/m^2 \cdot m^{-1}$	I	$7/{\rm cm}^3 \cdot {\rm g}^{-1}$	1	$\mathbf{V} = /\mathbf{V}$	d/nm	
(百)七)7门 百日 7 円	s/m•g –	总孔容	中孔	微孔	v 中 / v 微	中孔	微孔
gk(40%Zn-6%K-900-1.5)	350	0.16	0.01	0.13	0.08	4.55	0.67
$gk(40\% Zn-6\% K-900-1.5-H_2O)$	740	0.39	0.10	0.30	0.39	4.38	0.70

活化温度 900 ℃时,KCl 发生高温电离,电离出的钾离子进 入升温阶段氯化锌作用生成的初孔,在初孔内被碳还原,生成游 离态的钾单质,钾单质在高温环境中,以蒸汽形态不断挤入由碳 原子所构成的层状结构^[19].与此同时,在有水蒸气的条件下,管式 炉中的水蒸气附在材料表面或进入孔隙中,发生钾和水蒸气在材 料上剧烈反应,进一步促使材料中孔的产生,即在水蒸气存在的 前提下,KCl 在 ZnCl₂ 活化形成的初孔中进一步发生活化作用, 达到扩孔的作用.

ZnCl₂-KCl-H₂O活化的活性炭,其BJH法测得的孔径分布 如图 7 所示.由图 7 可知:活性炭的中孔孔径主要集中在 4 nm.





3 结束语

562

以开心果壳为原料制备活性炭,考察了 ZnCl₂ 法、KCl 法、ZnCl₂-KCl-H₂O 联合法对活性炭孔结构 的影响.通过控制不同的活化方法能够实现对活性炭微孔结构和中孔结构的控制.同时,本研究提出的 ZnCl₂-KCl-H₂O 联合活化法也为中孔活性炭的制备提出了一种新的可供参考的方法,即 ZnCl₂-KCl-H₂O 活化法能有效增加活性炭的中孔.此外,ZnCl₂ 活化法得到的活性炭以微孔为主;单独 KCl 活化法 不能起到较好的活化效果;对于 ZnCl₂ 活化法和 KCl 活化法,增加水蒸气活化都能增强活化效果,尤其 对 KCl 活化的增强效果尤为明显,但其孔结构还是以微孔为主.

今后的工作将以研究 ZnCl₂-KCl-H₂O 联合活化法为重点,考察联合活化法中活化温度、活化时间 以及 KCl 浸渍浓度对活性炭中孔结构形成的影响.

参考文献:

- [1] 王琳琳,龙柳锦,陈小鹏,等.油茶壳基中孔活性炭的表征与孔结构研究[J].高校化学工程学报,2013,27(2):297-303.
- [2] 解立平,林伟刚,杨学民.城市固体有机废弃物制备中孔活性炭[J].过程工程学报,2002,2(5):465-469.
- [3] 张利波,彭金辉,张世敏,等.磷酸活化烟草杆制备中孔活性炭的研究[J].化学工业与工程技术,2006,27(2):1-5.

- [4] HADOUN H, SADAOUI Z, SOUAMI N, et al. Characterization of mesoporous carbon prepared from date stems by H₃PO₄ chemical activation[J]. Applied Surface Science, 2013, 280:1-7.
- [5] 王玉新,时志强,周亚平.竹质中孔活性炭在双电层电容器中的应用研究[J].炭素技术,2008,27(3):8-10.
- [6] 魏海博,陈一民,白书欣.KOH活化法制备椰壳活性炭研究[J].广州化工,2012,40(14):101-104.
- [7] 陈永,周柳江,洪玉珍,等.椰壳纤维基高比表面积中孔活性炭的制备[J].新型炭材料,2010,25(2):151-155.
- [8] FOO K Y, HAMEED B H. Preparation and characterization of activated carbon from pistachio nut shells via microwave-induced chemical activation[J]. Biomass and Bioenergy, 2011, 35(7): 3257-3261.
- [9] OKUTUCU C, DUMAN G, UCAR S, et al. Production of fungicidal oil and activated carbon from pistachio shell [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2011, 91(1):140-146.
- [10] DOLAS H, SAHIN O, SAKA C, et al. A new method on producing high surface area activated carbon. The effect of salt on the surface area and the pore size distribution of activated carbon prepared from pistachio shell[J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 166(1):191-197.
- [11] FOO K Y, HAMEED B H. Preparation and characterization of activated carbon from pistachio nut shells via microwave-induced chemical activation [J]. Biomass and Bioenergy, 2011, 35(7): 3257-3261.
- [12] YANG T,LUA A C. Textural and chemical properties of zinc chloride activated carbons prepared from pistachionut shells [J]. Materials Chemistry and Physics, 2006, 100(2/3):438-444.
- [13] LUA A C, YANG T. Characteristics of activated carbon prepared from pistachio-nut shell by zinc chloride activation under nitrogen and vacuum conditions[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2005, 290(2): 505-513.
- [14] 孔繁柏,谢瑞萍. 钾催化剂对椰子壳制活性炭的影响[J]. 林产化工通讯,1992(5):26-29.
- [15] 邓先伦,姜兆熊,郑德良,等.氯化锌复合盐法制造活性炭的新工艺研究[C]//2008年中国活性炭学术研讨会.杭州:中国林学会,中国兵工学会,2008:22-25.
- [16] 刘杰,徐卡秋,罗仕忠,等. 钾盐助剂对活性炭甲烷吸附性能及孔结构的影响[J]. 天然气化工(C1 化学与化工), 2012,37(2):7-11.
- [17] 苑守瑞,朱义年,梁美娜.氯化锌活化法制备柚子皮活性炭[J].环境科学与技术,2010,33(6E):22-25.
- [18] 李园园,张召基,石建稳,等.氯化锌活化丝瓜络制备微孔活性炭[J].炭素技术,2012,31(3):A1-A5.
- [19] 张淮浩,陈进富,郭绍辉,等.低活化比制备天然气吸附剂:活化助剂提高吸附剂性能[J].燃料化学学报,2009,37 (1):98-103.

Effect of Different Activation Methods on the Pore Structure of Activated Carbons Prepared from Pistachio Shells

CHEN Hong-lin, SONG Lei

(College of Chemical Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract : Activated carbons were prepared from Pistachio nut shells by using $ZnCl_2$, KCl and $ZnCl_2$ -KCl-H₂O as activating agents separately, and were tested at -196 °C to obtain the N₂ adsorption isotherms to get the pore structure properties. It showed that the pore structure of $ZnCl_2$ -activated carbons was mainly micropore, and the max BET area of the activated carbons was 630 m² • g⁻¹ when impregnated with 40% ZnCl₂ and activated at 500 °C for 1.5 h. While using KCl as activating agent alone, it could be hardly to obtain good activation effect. The activation effect was improved by introducing vapor as the activating gas by using ZnCl₂ and KCl as activating agent, which played a much more important played a much more important role on formation of new pores, especially for the method of KCl, and its BET area increased by about 9 times, and the pore structure was mainly micropore. Mesopore was effectively donated by using ZnCl₂-KCl-H₂O as a mixed activating agent. Under the condition of impregnating with 40% ZnCl₂ and 6% KCl, the BET area of the activated carbons was 740 m² • g⁻¹, as well as the mesoporous volume was 0.10 m³ • g⁻¹ and the major pore size of mesopores was about 4 nm when activated at 900 °C for 1.5 h.

Keywords: pistachio nut shell; activated carbon; pore structure; mesopore addition; different activation methods

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:刘源岗)

文章编号:1000-5013(2014)05-0564-06

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2014.05.0564

宿主细胞 DNA 损伤反应与重组腺 相关病毒载体基因表达

彭俊纯, 刁勇, 李招发, 王启钊, 吕颖慧

(华侨大学 生物医学学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 文中主要讨论细胞 DNA 修复机制与重组腺相关病毒(recombinant adeno-associated virus,rAAV)载体的相互关系,探讨通过调节宿主细胞 DNA 修复机制,提高 rAAV 载体表达及基因打靶效率的方法,进而提高 rAAV 载体基因表达的可能性.

关键词: 腺相关病毒; 基因治疗; DNA 损伤修复; 基因打靶

中图分类号: Q 78 文献标志码: A

基于腺相关病毒(adeno-associated virus, AAV)构建的重组腺相关病毒(rAAV)载体,因免疫源性低、致病风险小、宿主范围广,成为目前基因治疗研究的热点.以rAAV为载体的基因药物 Glybera于2012年正式在欧盟获准上市,表明rAAV基因药物的临床有效性和安全性已获得认可^[1].在rAAV载体中,野生 AAV的病毒基因 Rep 和 Cap 被目的基因表达框所替代,保留的病毒成分仅仅是基因组两端145 bp长度的反向末端重复(inverted terminal repeats, ITR)序列.rAAV载体因不能在宿主细胞内表达 AAV蛋白,无法有效地复制其基因组,导致转基因表达效率较低.增加rAAV载体用量可以提高其转基因表达水平,但人体应用后有可能诱发宿主免疫反应等毒副反应^[2-3].提高rAAV载体的基因表达效率,是其走向临床广泛应用的关键.rAAV载体转导细胞的过程,包括与靶细胞表面受体的结合、受体介导的病毒内吞、内体介导胞质内运输、从内体逃逸后入核、核内脱壳释放基因组、双链形成、转录和翻译等,其中每一步骤都可能影响rAAV载体的表达效率.rAAV载体的基因表达,需要宿主细胞内相关机制的积极参与.近期的研究表明:宿主细胞的 DNA 修复机制对rAAV的核内行为,包括基因组的双链化、环化以及染色体整合等,具有重要影响.而rAAV载体的相互关系进行讨论,并探讨通过调节宿主细胞 DNA 修复机制,提高rAAV载体基因表达的可能性.

1 DNA 损伤反应与 rAAV 核内过程

rAAV载体作为入侵者进入宿主细胞后,首先会遭遇宿主细胞天然免疫反应的围剿^[4].rAAV载体 基因组进入细胞核后,还会受到核内 DNA 修复机制的围剿.细胞核内 DNA 的修复是真核细胞与生俱 来的,实施病毒防御的机制之一.实际上,DNA 修复机制是细胞为了确保体内遗传信息的正确性,在进 化过程中形成的针对所有原因导致的 DNA 损害的修复补救措施.当 rAAV 在细胞核内脱壳后,其释放 的基因组 DNA 游离末端,会立刻激活 DNA 修复系统,其命运被宿主细胞所主宰.所以,rAAV 在细胞 内因表达水平的高低,是其与 DNA 修复系统博弈的最终结果.

早期研究表明, DNA 修复系统对 rAAV 基因组的核内过程具有重要影响. 当细胞遭遇基因毒性应

收稿日期: 2013-12-17

- 通信作者: 刁勇(1967-),男,教授,主要从事基因治疗的研究. E-mail:diaoyong@hqu.edu.cn.
- **基金项目:** 国家国际科技合作专项项目(2011DFG33320); 国家自然科学基金资助项目(81371669, 81271691, 81201183); 福建省自然科学基金资助项目(2012J01397)

激时,包括 UV 照射和抗癌药物处理,rAAV 载体的转导效率会显著增加^[5-6].与分裂细胞比较,非分裂 细胞的转导效率促进作用更加明显.因为这些应激往往造成细胞 DNA 损伤,而 DNA 损伤又会激活 DNA 修复途径,人们推测 DNA 修复途径的激活可能促进了 rAAV 的表达活性.之后大量有关 DNA 修 复与 rAAV 表达之间相互关系的深入研究,使人们对其中的分子机制有了初步认识.

1.1 rAAV 载体 DNA 的双链化

因 rAAV 基因组内只有两端 ITR 是病毒序列,不能表达其他任何病毒基因产物,rAAV 基因组的 加工几乎完全依赖宿主细胞.rAAV 载体在进入细胞核后,脱壳释放出单链基因组 DNA.单链 DNA 两 个游离末端的大量存在,立刻激活细胞 DNA 修复系统,随后单链基因组 DNA 被转换成为各种形式的 双链 DNA^[7-8].

有证据表明,在rAAV入核后,细胞内 Mre11/Rad50/NBS1(MRN)复合物被激活,并与rAAV 载体的 ITR 结合,抑制rAAV 的转导^[9-10].已知 MRN 复合物是 DNA 同源重组修复(homologous recombination repair, HRR)机制中的重要成分^[11]. HRR 是利用姐妹染色单体、或同源染色体、或 DNA 重复序列的重新组合,对双链 DNA 断裂(double-strand break, DSB) 损伤进行修复的机制,多发生于细胞周期的 S/G2 期. MRN 的功能主要是检测 DSB 损伤,并利用 Mre11 内切和外切核酸酶活性处理 DNA 断裂末端,以形成可重组的 3′单链尾巴^[12].

HRR 机制中的另一成分——共济失调-毛细血管扩张突变基因(ataxia-telangiectasia mutated, ATM),也可能参与 rAAV 基因组双链转化.因为 ATM 缺陷的细胞,单链 rAAV 的转导效率显著提高^[13].然而,Cataldi 等^[14]提出,ATM 并不参与 rAAV 基因组的第二链合成.因为 ATM 缺陷的细胞,基因组是双链的自身互补型 rAAV(self-complementary rAAV,scrAAV)载体的转导效率也可以增强.因此,ATM 对 rAAV 的转导抑制,也可能是基于基因沉默机制.

另一个可以抑制 rAAV 基因组双链转化过程的因子是酪氨酸磷酸化 FKBP52,其与 ITR 结合并抑制第二链的合成^[15].T 细胞蛋白酪氨酸磷酸酶(TC-PTP)将 FKBP52 去磷酸化后,FKBP52 释放 ITR, 允许 rAAV 基因组以 ITR 为引物自身合成双链^[16].催化 rAAV 基因组 DNA 第二链合成的 DNA 聚合酶是 DNA 聚合酶 δ^[17],这是一种在 DNA 修复过程中,可弥补 DNA 单链缺口的聚合酶^[18].

1.2 rAAV 载体 DNA 的环化

在宿主细胞内, DNA 修复机制不仅介导 rAAV 基因组的双链转换,还会通过分子内或分子间 DNA 重组,将其加工成为单分子环状附加体及多分子环状附加体等形式.这些双链环状附加体的存在, 对于 rAAV 的长期基因表达非常重要,因为它们可以在非分裂细胞内,以染色质的形式稳定存在^[19].

在 rAAV 基因组的环化重组过程中,ITR 元件发挥了举足轻重的作用. T 形发夹结构的 ITR 触发 DNA 损伤反应,宿主细胞迅速募集一系列的 DNA 修复蛋白,参与 rAAV 基因组的环化重组. 其中包括 HRR 机制涉及的 ATM,MRN 和 Bloom 蛋白(BLM),还包括非同源末端连接(non-homologous end-joining,NHEJ)机制涉及的 DNA 蛋白依赖激酶催化亚基(DNA-PKcs),Artemis 和 Warner 蛋白 (WRN)^[14,20-21].

rAAV 基因组的分子内环化重组主要依赖于 NHEJ 途径,重组 DNA 接头处存在不同程度的核苷酸缺失,与 NHEJ 介导的分子重组机制一致^[21]. NHEJ 途径不需要两段 DNA 间具有严格的同源性,只是借助相关蛋白将两段 DNA 末端链接起来,在整个细胞周期都可以进行. DNA-PKcs 和 Artemis 是 NHEJ 途径 DSB 修复的 2 个主要成分. Artemis 由 DNA-PKcs 激活后,具有核酸内切酶的活性,可促使 ITR 发夹中的环和护翼结构解离,以促进双链 DNA 末端连接^[22]. 在没有 DNA-PKcs 或 Artemis 时,培养细胞和动物组织 rAAV 内分子的内重组会显著降低^[14,21,23]. 值得注意的是,NHEJ 途径可能与 rAAV 基因组的表观遗传修饰相关联^[14]. 通过 NHEJ 途径进行的 rAAV 基因组环化重组,产生的环化基因组表达活性高.

HRR 可能是 rAAV 分子间环化重组的主要途径,因为在缺乏 NHEJ 途径关键因子 DNA-PKcs 或 Artemis 时,分子间重组也可有效地发生^[21]. 对重组分子交界处的序列进行研究,发现存在长度为 165 nt 的双 D 序列 ITR 结构,这正是 HRR 的特点^[24].来自同一血清型 AAV 的同源 ITR 之间的重组,优于 不同血清型 AAV 异源 ITR 之间的重组^[25],也表明这一猜测的正确性.在 DNA-PKcs 功能缺陷的 SCID

小鼠组织中,呈现 HRR 特点的 rAAV 重组比例增加,这表明在动物非分裂细胞中,在不存在 DNA-PKcs 蛋白的情况下,HRR 会代偿性激活.

BLM 和 WRN 均属于 RecQ 家族的 DNA 解旋酶成员,分别是 HRR 和 NHEJ 途径的关键因子.其 主要作用均是松驰双链 DNA,以确保重组中间体的形成^[26].

1.3 rAAV 载体基因组的整合

野生型 AAV 可以依赖 Rep 蛋白,与宿主细胞染色体发生定点整合,如定点整合于人 19 号染色体 19q13.42 的 AAVS1 位点^[27].但 rAAV 不表达 Rep 蛋白,因此它缺乏定点整合到细胞基因组的能力, 发生随机整合的频率一般为 rAAV 转导总量的 0.1%^[28].当宿主细胞基因组存在 DSB 损伤时,rAAV 基因组可以被细胞基因组断裂位点捕获,由 DNA 修复机制介导发生整合^[29].动物实验也表明:rAAV 基因组的随机整合可能会引起插入突变,导致小鼠发生肝细胞癌^[30].

对培养细胞和小鼠组织中发生 rAAV 整合的基因序列进行分析,发现 rAAV 的整合不会以利落的 剪裁和粘贴方式发生,总是伴随着不同程度的序列缺失^[31-34],甚至会导致染色体易位.这些研究表明: NHEJ 机制介导了 rAAV 整合的发生. DNA-PKcs 对于 rAAV 整合具有明显的影响,但不同的研究却 报告了截然相反的结果. 在体外无细胞 rAAV 整合系统,加入 DNA-PKcs 蛋白抑制 rAAV 的整合,加 入 DNA-PKcs 抗体则促进 rAAV 的整合^[35];在 DNA-PKcs 缺陷的 SCID 小鼠, rAAV 的整合频率显著 高于正常小鼠^[35],提示 DNA-PKcs 抑制 rAAV 整合. 但当使用高表达 DNA-PKcs 的 M059K 细胞及 DNA-PKcs 缺陷的 M059J 细胞进行研究时,发现 DNA-PKcs 蛋白可以促进 rAAV 的整合^[14,36]. 也有可 能是其他因子(如 ATM),共同参与了 rAAV 的整合过程^[13-14],每种因子的作用大小取决于细胞和 rAAV 类型. 总之,在 DNA 修复机制如何介导 rAAV 整合方面,尚未有明晰的结论.

2 DNA 损伤修复与 rAAV 基因表达

rAAV载体转导非分裂细胞的效率远远优于分裂细胞.随着细胞分裂的进程,以染色体外附加体形式存在的rAAV基因组会逐渐在子代细胞中稀释,而失去基因表达活性.而在非分裂细胞中,rAAV基因组可以稳定存在,并维持长期表达活性^[19],所以提高rAAV载体转导非分裂细胞的效率,成为实现长期、高效表达转基因的关键.

Alexander 等^[5]最早发现,以紫外光照射等方式对非分裂细胞进行 DNA 损伤处理,可提高 rAAV 载体的转导效率达 750 倍. 随后 Russell 等^[6]报道,用阿非迪霉素或羟基脲等 DNA 合成抑制剂预处理 正常人成纤维细胞,rAAV 载体转导效率可提高 300 倍以上. 拓扑异构酶抑制剂依托泊苷或喜树碱也有 同样的效果. 近期研究表明,羟基脲等药物可以干扰细胞 DNA 损伤应答元件的功能^[37]. 核仁素(nucleolin,NCL)和核基质蛋白(nucleophosmin,NPM)是参与 DNA 损伤反应的因子,具有结合单链 DNA 和 RNA 的能力^[38-39]. 羟基脲可能是通过减弱这些因子结合 rAAV 基因组的能力,从而提高 rAAV 载体的 转导效率^[37]. 这些结果表明:合成具有激活细胞 DNA 损伤修复能力的药物,是提高 rAAV 载体人体内 基因表达效率的可行手段.目前可以应用的药物有顺铂、羟基脲、喜树碱和鬼臼乙叉甙等^[9].

3 DNA 损伤修复与 rAAV 基因打靶

基因打靶是指通过 DNA 定点同源重组,改变基因组中特定基因功能的方法,是矫正致病基因的有效方法.普通基因治疗载体介导的基因打靶效率,一般低于细胞总数的百万分之一,而 rAAV 的效率却高达 1%^[40-43].如果通过位点特异性内切核酸酶,在靶基因位点引入 DSB,更可以将重组效率进一步增加 60~100 倍以上^[44-45].

有关 rAAV 介导的基因打靶分子机制研究刚刚起步. 起初认为 rAAV 载体的单链性质是进行高效 基因打靶的关键^[46]. 最近发现,基因组为双链的 rscAAV 介导基因打靶的效率,与单链 rAAV 不相上 下^[47]. rAAV 载体的基因打靶主要发生在 S 期细胞,在已分化的细胞则效率很低^[48-49],说明 rAAV 基因 打靶应用的 DNA 修复途径,与基因组整合不同. 总的来说, NHEJ 似乎是 rAAV 整合的主要途径,而 rAAV 基因打靶则使用 HRR 途径^[50]. Rahman 等^[51]发现,rAAV 基因打靶效率也可以通过合用小分子药物而提高. 靛玉红-3'-肟是一种 治疗白血病的有效药物,属于细胞周期激酶(CDK)抑制剂. 肿瘤细胞经靛玉红-3'-肟处理后,细胞周期 停滞发生在细胞周期的 G1 或 G2 期,此时以 rAAV 基因打靶,效率可以提高 6 倍.

4 结束语

尽管 rAAV 基因药物的临床应用已经获得认可,大量临床研究也正在顺利进行中,但人们对 rAAV 在宿主细胞内的行为还知之甚少.从病毒学、分子生物学等角度,认真研究 rAAV 载体的基本生 物学性质,尤其是其胞内命运的分子机制,一定会有利于其临床应用潜力的挖掘.DNA 损伤修复对 rAAV 载体的胞内命运,是非常有意义的研究方向,相关成果的取得也一定会为 rAAV 转基因表达和 基因打靶效率的优化奠定扎实的理论基础.

参考文献:

- [1] MILLER N. Glybera and the future of gene therapy in the European Union[J]. Nat Rev Drug Discov, 2012, 11(5):
 419.
- [2] MINGOZZI F, MEULENBERG J J, HUI D J, et al. AAV-1-mediated gene transfer to skeletal muscle in humans results in dose-dependent activation of capsid-specific T cells[J]. Blood, 2009, 114(10): 2077-2086.
- [3] MANNO C S, PIERCE G F, ARRUDA V R, et al. Successful transduction of liver in hemophilia by AAV-Factor IX and limitations imposed by the host immune response[J]. Nat Med, 2006, 12(3): 342-347.
- [4] 刁勇,许瑞安.重组腺相关病毒载体诱导的天然免疫反应及机制[J]. 微生物学报,2012(5):550-557.
- [5] ALEXANDER I E, RUSSELL D W, MILLER A D. DNA-damaging agents greatly increase the transduction of nondividing cells by adeno-associated virus vectors [J]. J Virol, 1994, 68(12): 8282-8287.
- [6] RUSSELL D W, ALEXANDER I E, MILLER A D. DNA synthesis and topoisomerase inhibitors increase transduction by adeno-associated virus vectors[J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 1995, 92(12):5719-5723.
- [7] DEYLE D R, RUSSELL D W. Adeno-associated virus vector integration[J]. Curr Opin Mol Ther, 2009, 11(4):442-447.
- [8] SCHULTZ B R, CHAMDERLAIN J S. Recombinant adeno-associated virus transduction and integration[J]. Mol T-her, 2008, 16(7): 1189-1199.
- [9] CERVELLI T, PALACIOS J A, ZENTILIN L, et al. Processing of recombinant AAV genomes occurs in specific nuclear structures that overlap with foci of DNA-damage-response proteins[J]. J Cell Sci, 2008, 121(3): 349-357.
- [10] SCHWARTZ R A, PALACIOS J A, CASSELL G D, et al. The Mre11/Rad50/Nbs1 complex limits adeno-associated virus transduction and replication[J]. J Virol, 2007, 81(23):12936-12945.
- [11] 张德莉,朱圣姬,罗光富,等.自由基与 DNA 氧化损伤的研究进展[J]. 三峡大学学报:自然科学版,2004,26(6): 563-567.
- [12] WILLIAMS G J, LEES-MILLER S P, TAINER J A. Mre11-Rad50-Nbs1 conformations and the control of sensing, signaling, and effector responses at DNA double-strand breaks[J]. DNA Repair (Amst),2010,9(12):1299-1306.
- [13] SANLIOGLU S, BENSON P, ENGELHARDT J F. Loss of ATM function enhances recombinant adeno-associated virus transduction and integration through pathways similar to UV irradiation[J]. Virology, 2000, 268(1):68-78.
- [14] CATALDI M P, MCCARTY D M. Differential effects of DNA double-strand break repair pathways on singlestrand and self-complementary adeno-associated virus vector genomes[J]. J Virol, 2010, 84(17): 8673-8682.
- [15] QING K, HANSEN J, WEIGEL-KELLEY K A, et al. Adeno-associated virus type 2-mediated gene transfer: Role of cellular FKBP52 protein in transgene expression[J]. J Virol, 2001, 75(19): 8968-8976.
- [16] QING Ke-yun, LI Wei-ming, ZHONG Li, et al. Adeno-associated virus type 2-mediated gene transfer: Role of cellular T-cell protein tyrosine phosphatase in transgene expression in established cell lines in vitro and transgenic mice in vivo[J]. J Virol, 2003, 77(4): 2741-2746.
- [17] NASH K, CHEN W, MCDONALD W F, et al. Purification of host cell enzymes involved in adeno-associated virus DNA replication[J]. J Virol, 2007, 81(11): 5777-5787.
- [18] TORRES-RAMOS C A, PRAKASH S, PRAKASH L. Requirement of yeast DNA polymerase delta in post-replicational repair of UV-damaged DNA[J]. J Biol Chem, 1997, 272(41): 25445-25448.

- [19] PENAUD-BUDLOO M, LE GUINER C, NOWROUZI A, et al. Adeno-associated virus vector genomes persist as episomal chromatin in primate muscle[J]. J Virol, 2008, 82(16):7875-7885.
- [20] CHOI V W, MCCARTY D M, SAMULSKI R J. Host cell DNA repair pathways in adeno-associated viral genome processing[J]. J Virol, 2006, 80(21):10346-10356.
- [21] INAGAKI K, MA C, STORM T A, et al. The role of DNA-PKcs and artemis in opening viral DNA hairpin termini in various tissues in mice[J]. J Virol, 2007, 81(20):11304-11321.
- [22] MA Y,SCHWARZ K,LIEBER M R. The Artemis: DNA-PKcs endonuclease cleaves DNA loops, flaps, and gaps [J]. DNA Repair (Amst),2005,4(7):845-851.
- [23] DUAN Dong-sheng, YUE Yong-ping, ENGELHARDT J F. Consequences of DNA-dependent protein kinase catalytic subunit deficiency on recombinant adeno-associated virus genome circularization and heterodimerization in muscle tissue[J]. J Virol, 2003, 77(8):4751-4759.
- [24] DUAN Dong-sheng, YAN Zi-ying, YUE Yong-ping, et al. Structural analysis of adeno-associated virus transduction circular intermediates[J]. Virology, 1999, 261(1):8-14.
- [25] YAN Zi-ying, LEI-BUTTERS D C, ZHANG Yu-long, et al. Hybrid adeno-associated virus bearing nonhomologous inverted terminal repeats enhances dual-vector reconstruction of minigenes in vivo[J]. Hum Gene Ther, 2007, 18 (1):81-87.
- [26] BERNSTEIN K A, GANGLOFF S, ROTHSTEIN R. The RecQ DNA helicases in DNA repair[J]. Annu Rev Genet, 2010, 44: 393-417.
- [27] KOTIN R M, SINISCALCO M, SAMULSKI R J, et al. Site-specific integration by adeno-associated virus[J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 1990, 87(6):2211-2215.
- [28] INAGAKI K, PIAO C, KOTCHEY N M, et al. Frequency and spectrum of genomic integration of recombinant adeno-associated virus serotype 8 vector in neonatal mouse liver[J]. J Virol, 2008, 82(19):9513-9524.
- [29] MILLER D G, PETEK L M, RUSSELL D W. Adeno-associated virus vectors integrate at chromosome breakage sites[J]. Nat Genet, 2004, 36(7):767-773.
- [30] DONSANTE A, MILLER D G, LI Y, et al. AAV vector integration sites in mouse hepatocellular carcinoma[J]. Science, 2007, 317(5837): 477.
- [31] INAGAKI K, LEWIS S M, WU X, et al. DNA palindromes with a modest arm length of greater, smilar 20 base pairs are a significant target for recombinant adeno-associated virus vector integration in the liver, muscles, and heart in mice[J]. J Virol, 2007, 81(20): 11290-11303.
- [32] MILLER D G, TROBRIDGE G D, PETEK L M, et al. Large-scale analysis of adeno-associated virus vector integration sites in normal human cells[J]. J Virol, 2005, 79(17): 11434-11442.
- [33] NAKAI H, FUESS S, STORM T A, et al. Unrestricted hepatocyte transduction with adeno-associated virus serotype 8 vectors in mice[J]. J Virol, 2005, 79(1): 214-224.
- [34] NAKAI H, WU X, FUESS S, et al. Large-scale molecular characterization of adeno-associated virus vector integration in mouse liver[J]. J Virol, 2005, 79(6): 3606-3614.
- [35] SONG Si-hong, LU Yuan-qing, CHOI Y K, et al. DNA-dependent PK inhibits adeno-associated virus DNA integration[J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 2004, 101(7):2112-2116.
- [36] DAYA S,CORTEZ N,BERNS K I. Adeno-associated virus site-specific integration is mediated by proteins of the nonhomologous end-joining pathway[J]. J Virol,2009,83(22):11655-11664.
- [37] JOHNSON J S.SAMULSKI R J. Enhancement of adeno-associated virus infection by mobilizing capsids into and out of the nucleolus[J]. J Virol, 2009, 83(6): 2632-2644.
- [38] YANG Chong-lin, MAIGUEL D A, CARRIER F. Identification of nucleolin and nucleophosmin as genotoxic stress-responsive RNA-binding proteins[J]. Nucleic Acids Res, 2002, 30(10):2251-2260.
- [39] TAKAGI M, ABSALON M J, MCLURE K G, et al. Regulation of p53 translation and induction after DNA damage by ribosomal protein L26 and nucleolin[J]. Cell, 2005, 123(1), 49-63.
- [40] HENDRIE P C, RUSSELL D W. Gene targeting with viral vectors[J]. Mol Ther, 2005, 12(1):9-17.
- [41] KHAN I F, HIRATA R K, RUSSELL D W. AAV-mediated gene targeting methods for human cells[J]. Nat Protoc, 2011, 6(4): 482-501.
- [42] RUSSELL D W, HIRATA R K. Human gene targeting by viral vectors[J]. Nat Genet, 1998, 18(4): 325-330.

- [43] VASILEVA A, JESSBERGER R. Precise hit: Adeno-associated virus in gene targeting[J]. Nat Rev Microbiol, 2005,3(11):837-847.
- [44] MILLER D G, PETEK L M, RUSSELL D W. Human gene targeting by adeno-associated virus vectors is enhanced by DNA double-strand breaks[J]. Mol Cell Biol, 2003, 23(10): 3550-3557.
- [45] PORTEUS M H, CATHOMEN T, WEITZMAN M D, et al. Efficient gene targeting mediated by adeno-associated virus and DNA double-strand breaks[J]. Mol Cell Biol, 2003, 23(10): 3558-3565.
- [46] HIRATA R K, RUSSELL D W. Design and packaging of adeno-associated virus gene targeting vectors[J]. J Virol, 2000,74(10):4612-4620.
- [47] HIRSCH M L, GREEN L, PORTEUS M H, et al. Self-complementary AAV mediates gene targeting and enhances endonuclease delivery for double-strand break repair[J]. Gene Ther, 2010, 17(9):1175-1180.
- [48] LIU Xiao-ming, YAN Zi-ying, LUO Mei-hui, et al. Targeted correction of single-base-pair mutations with adeno-associated virus vectors under nonselective conditions[J]. J Virol, 2004, 78(8):4165-4175.
- [49] TROBRIDGE G, HIRATA R K, RUSSELL D W. Gene targeting by adeno-associated virus vectors is cell-cycle dependent[J]. Hum Gene Ther, 2005, 16(4): 522-526.
- [50] FATTAH F J,LICHTER N F,FATTAH K R, et al. Ku70, an essential gene, modulates the frequency of rAAVmediated gene targeting in human somatic cells[J]. Proc Natl Acad Sci U S A,2008,105(25):8703-8708.
- [51] RAHMAN S H,BOBIS-WOZOWICZ S,CHATTERJEE D,et al. The nontoxic cell cycle modulator indirubin augments transduction of adeno-associated viral vectors and zinc-finger nuclease-mediated gene targeting[J]. Hum Gene Ther,2013,24(1):67-77.

Interplay between DNA-Damage Response and Recombinant Adeno-Associated Virus Vector in Host Cells

PENG Jun-chun, DIAO Yong, LI Zhao-fa, WANG Qi-zhao, LYU Ying-hui

(School of Biomedical Sciences, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The article mainly discusses the connection between the mechanism of DNA repair in cells and the recombinant AAV (rAAV) vectors, and explores the methods for improving the efficiency of rAAV vectors expression and gene targeting by regulating the mechanism of DNA repair in host cells, thus more likely to increase the rAAV vectors gene expression.

Keywords: adeno-associated virus; gene therapy; DNA damage repair; gene targeting

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:刘源岗)

文章编号:1000-5013(2014)05-0570-06

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2014.05.0570

炸药近地爆炸的数值模拟及影响参数的分析

陈鑫1,2,高轩能1

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;2. 福建农林大学 交通与土木工程学院, 福建 福州 350002)

摘要:应用 ANSYS/LS-DYNA 有限元程序建模,在验证模型及参数选取正确可靠的基础上,研究了地面材料、炸药高度、空气域形状以及炸药当量等参数对马赫波超压的影响.结果表明:对于非近距离的爆炸,不同地面上的马赫波超压峰值相差不大,可简化为刚性地面;建模宜选择刚性壳体地面以及长方体空气域;与经验公式相比,数值模拟的马赫波超压峰值误差随着炸药当量的增大而减小,随着炸药高度的减小而增大. 关键词:爆炸;马赫反射波;数值模拟;参数分析;TNT炸药;地面刚度 中图分类号: 0 383 **文献标志码:** A

近年来,各类建筑结构的恐怖爆炸袭击以及在建筑中的意外爆炸事件时有发生,给社会的和谐稳定 和公民的生命财产安全造成了重大威胁.此类爆炸多为近地爆炸,爆炸冲击波经过地面反射加强,比空 爆更具破坏力.如何有效准确的模拟出近地爆炸中冲击波的反射传播过程,从而更精确地分析近地爆炸 对建筑结构以及人员的冲击作用,就显得尤为重要.许多学者^[144]在建模中通常将地面简化为刚性体,而 未考虑不同材料地面反射冲击波能力的差异性.汪维等^[5]模拟了刚性地面上的爆炸,获得了不同爆炸高 度下的冲击波变化规律.成凤生等^[6]研究了刚性平面上方的传播反射规律,当比例距离大于1.5 m・ kg^{-1/3}时,可以忽略炸药形状的影响.杨亚东等^[7],Wang^[8],李利莎等^[9]在数值建模中考虑实际的地面材 质,但其研究重点是炸药对土体或混凝土破坏成坑情况.刘伟等^[10]试验并模拟了 TNT 近地面爆炸的冲 击波的传播,数值模拟结果与试验数据吻合较好,建模中考虑了地面土壤材料,但未与刚性地面进行对 比.李鑫等^[11]等对刚性和沙土地面上 TNT 爆炸对超压分布的影响进行了简单对比,证明刚性地面上起 爆的超压最大.综上所述,目前的文献中对将各种地面简化为刚性地面的适用性探讨不多,对各种近地 爆影响因素的分析比较不够全面.本文应用 ANSYS/LS-DYNA 有限元程序,研究马赫波的传播特性, 分析探讨不同参数对马赫波超压的影响.

1 刚性地面上炸药近地爆炸的数值模拟

1.1 计算模型的建立

计算模型模拟炸药在刚性地面上空爆炸,利用对称性建立 1/4 模型,以节约计算成本.1/4 的炸药 尺寸为 0.2 m×0.2 m×0.4 m,炸药中心离地高度 1.2 m. 空气域尺寸取 12 m×12 m×8 m(长×宽× 高),计算模型如图 1 所示.模型总共高 8 m,以地面为原点,地面以上 6 m,地面以下 2 m. 炸药与空气选 用 SOLID 164 实体单元,并采用多物质 ALE 网格;刚性地面选用 SHELL 163 壳体单元,并采用拉格朗 日网格.两种网格通过流固耦合算法相互作用,并在关键字中通过 * CONSTRAINED_LAGRANGE_ IN_SOLID 约束来实现.在模型的 Oxz,Oyz 面上施加对称约束,其余表面均采用透射边界以模拟无限 空气域,单元网格尺寸均取 0.2 m. 考虑到在后续不同地面的建模中,混凝土和土体须采用实体单元模

收稿日期: 2014-02-15

- 通信作者: 高轩能(1962-),男,教授,主要从事钢结构及工程结构灾害控制的研究. E-mail:gaoxn117@sina. com.
- **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51278208);福建省自然科学基金资助项目(2011J01319);中央高校科研业 务费专项基金资助项目(JB-JC1005)

拟,因此建立了刚性实体单元地面的模型进行比对.在原模型中删除刚性壳体单元,将地面以下-2~0 m 的空气单元置换成刚性地面单元,并采用了共用节点算法考虑材料间的相互作用.

1.2 材料参数取值

炸药的爆炸采用高能炸药 * MAT_HIGH_EXPLO-SIVE_BURN 材料模型,并用 JWL(Jones-Wilkins-Lee)状态方程来描述,即

$$p = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V}) e^{-R_1 V} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V}) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V}.$$
 (1)

式(1)中:p为压力;A,B, R_1 , R_2 , ω 为 JWL 状态方程参数,

其值由试验确定;V为相对体积; E_0 为初始内能.参数取值如表 1 所示,表 1 中:D为炸药的爆速; P_{CI} 为爆压; ρ 为炸药密度; V_0 为初始相对体积.

	表 1	炸药的材料参数	
T.L. 1	Mater	nial panamatana of dynam	:

				1 ab. 1	Wateria	ii parameters or	aynan	inte		
参数	$A/{ m GPa}$	B/GPa	R_1	R_2	ω	$E_{\rm o}/{ m GJ}$ • m ⁻³	$V_{\scriptscriptstyle 0}$	$D/{ m m} \cdot { m s}^{-1}$	$P_{\rm CJ}/{\rm GPa}$	$ ho/~{ m kg}$ • ${ m s}^{-3}$
取值	540.9	9.4	4.5	1.1	0.35	8	1.0	6 718	18.5	1 630

空气采用 * MAT_NULL 材料模型,并用线性多项式方程 * EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 来描述,其表达式为

$$p = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E.$$
⁽²⁾

式(2)中: $\mu = \rho/\rho_0 - 1$, ρ 为质量密度, ρ_0 为参考质量密度;E为单位体积的材料内能; C_0 , C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 , C_6 为实常数.参数按理想气体状态方程取值,如表 2 所示.表 2 中: V_0 表示初始相对体积.

	表	2	空气	的材料参数		
Tab.	2	Ma	terial	parameters	of	air

参数	$ ho_{ m 0}/{ m kg}$ • ${ m m}^{-3}$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	$E/MJ \cdot m^{-3}$	$V_{\scriptscriptstyle 0}$
取值	1.290	0	0	0	0	0.4	0.4	0	0.25	1.0

刚性地面采用 * MAT_RIGID 材料模型来控制;参数 CON1 取 7,表示约束 x,y 和 z 三个方向位 移;参数 CON2 取 7,表示约束 x,y 和 z 三个方向转角.

1.3 数值结果分析

在地表上距离炸药中心投影点 2~11 m 的区间内,每隔 1 m 选取一个测点,读取超压数值.这些测 点都位于马赫反射区.为了验证模型计算的准确性,将测点的超压值与经验公式计算值进行对比.马赫 反射区内空气冲击波超压的计算公式^[12]为

$$\Delta P_{\rm m} = \Delta P_{\rm G} (1 + \cos \varphi). \tag{3}$$

式(3)中: $\Delta P_{\rm m}$ 为马赫波阵面的超压; φ 为马赫反射区内测点对应的入射波的入射角; $\Delta P_{\rm G}$ 为相应的地爆炸超压.GB 6722-2003《爆破安全规程》^[13]的公式为

$$\Delta P_{\rm G} = \frac{1.06}{\overline{R}} + \frac{4.3}{\overline{R}^2} + \frac{14}{\overline{R}^3}, \qquad \frac{H}{\sqrt[3]{W}} \leqslant 0.35, \quad 1 \leqslant \overline{R} \leqslant 10 \sim 15.$$

$$\tag{4}$$

式(4)中: $\overline{R} = R / \sqrt[3]{W}$ 为比例距离(下同); R 表示炸药中心到测点的距离(m); W 为 TNT 炸药当量 (kg).

Henrych^[14]的空爆公式(对于刚性地面爆炸,计算时取2倍TNT炸药当量代入)为

$$\Delta P_{f} = 14.071\ 7/\overline{R} + 5.539\ 7/\overline{R}^{2} - 0.357\ 2/\overline{R}^{3} + 0.006\ 25/\overline{R}^{4}, \qquad 0.05 \leqslant \overline{R} \leqslant 0.3, \\ \Delta P_{f} = 6.193\ 8/\overline{R} + 0.326\ 2/\overline{R}^{2} + 2.132\ 4/\overline{R}^{3}, \qquad 0.3 \leqslant \overline{R} \leqslant 1.0, \\ \Delta P_{f} = 0.662/\overline{R} + 4.05/\overline{R}^{2} + 3.288/\overline{R}^{3}, \qquad 1.0 \leqslant \overline{R} \leqslant 10.$$

Newmark^[14]的常规炸药地表爆炸的超压峰值公式为

$$\Delta P_{\rm G} = \frac{93}{\bar{R}^{3/2}} + \frac{6\ 784}{\bar{R}^3},\tag{6}$$



曹树鼎^[16]通过实验拟合的地爆公式为

$$\Delta P_{\rm G} = \frac{11.568}{\bar{R}} + \frac{978.23}{\bar{R}^2}, \qquad 0.8 \leqslant \bar{R} \leqslant 3.0. \tag{7}$$

由经验公式求得地爆超压后,代入式(2), 计算马赫反射波的超压.数值模拟结果与经验 公式的对比,如图 2 所示.由图 2 可知:马赫波 超压峰值衰减的整体趋势均与经验公式保持 一致,在近爆炸中心处,其与 Henrych 公式最 为接近.

当 \bar{R} =0.495 m·kg^{-1/3}时,刚性壳体地面 和刚性实体地面与 Henrych 公式之间的误差 分别为 9.1%和 32.4%;而当 \bar{R} 增大到 0.887 m·kg^{-1/3}后,数值模拟结果与 Newmark 公式 更为接近,且随着 \bar{R} 的增大,误差开始不断减 小.当 \bar{R} =2.35 m·kg^{-1/3}时,刚性壳体和刚性 实体地面与 Newmark 公式的误差分别减小为 3.64%和 1.75%;当 \bar{R} <1.9 m·kg^{-1/3}时,刚



图 2 马赫波超压数值模拟与经验公式对比 Fig. 2 Comparison of the Mach wave overpressure with numerical simulation and empirical formulas

性壳体地面的马赫波超压大于刚性实体地面,与经验公式更为接近;当R>1.9m·kg^{-1/3}时,刚性实体地面上的超压值开始略大于刚性壳体地面,更接近经验公式.

通过对比提取的马赫波的压力时程曲线,发现刚性壳体地面上的马赫波到达时间要早于刚性实体 地面.这表明两种地面单元及算法之间存在差异,刚性实体地面上反射波的产生时间相对滞后,入射波 在合成为马赫波时间亦滞后,并造成了两种地面马赫波超压峰值的不同.

2 不同参数变化对爆炸的影响

2.1 不同地面材料的影响

计算模型模拟炸药在不同材料地面上空的爆炸,建模方式与1.1节模型基本相同,将地面以下的网格分别置换成砂质土、粘性土、混凝土3种材料,均采用多物质ALE网格,同时按共用节点算法建模.此外,考虑到实际建筑结构的地面多为土壤地基上浇筑一定厚度的混凝土层,因此以沙土为地基,在地表位置建立了一层30 cm厚的混凝土层.此处的混凝土采用拉格朗日网格,并与其他材料按流固耦合算法相互作用.炸药和空气材料的状态方程与参数取值均与1.2节相同,砂质土和粘性土均采用*MAT_SOIL_AND_FOAM 材料模型,此材料模型没有应变硬化,屈服极限仅与压力 *p* 有关,即参数取值,如表3 所示.表3中:*p*⁰ 为土体的密度(kg·m⁻³);*G* 为剪切弹性模量;BULK 为卸载时的体积模量;*a*₀,*a*₁,*a*₂ 为式(8)中的塑性屈服常数;PC 为拉应力系数;VCR 是体积沙漏选项;REF 则为是否使用参考几何初始化压力的选项.

$$\sigma_{y} = [3(a_{0} + a_{1}p + a_{2}p^{2})]^{1/2}.$$
(8)
 a_{3} 砂质土和粘性土的材料参数

Tab. 3 Material parameters of sandy soil and cohesive soil

 参数

$$\rho_0/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$$
 G/MPa
 BULK/GPa
 a_0
 a_1
 a_2
 PC
 VCR
 REF

 砂质土^[17]
 1 850
 16.00
 0.25
 3.3×10^{11}
 0
 0
 0
 0
 0

 粘性土^[8]
 1 800
 63.85
 30.00
 3.4×10^9
 7.033×10^4
 0.3
 -6.90×10^3
 0
 0

混凝土材料采用 * MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE 材料模型(HJC 模型),是综合 考虑了高压效应、高应变率和损伤的混凝土或岩石类材料的模型,其强度按无量纲等效应力表示为^[18] $\sigma^* = \lceil A(1-D) + BP^{*N} \rceil \lceil 1 - c \ln(\epsilon) \rceil.$ (9)

式(9)中: σ^* 为实际等效应力与准静态单轴抗压强度 f'_c 之比; P^* 为无量纲压力; ϵ 为无量纲应变率;A为无量纲粘聚强度;B为无量纲硬化系数;c为应变率系数;N为应变硬化参数.参数取值如表 4 所示.

表 4 混凝土的材料参数

Tab. 4Material parameters of concrete										
参数	$ ho_0/{ m kg}$ • m ⁻³	G/GPa	Α	В	С	Ν	f'с	Т	$\boldsymbol{\varepsilon}_0$	$\epsilon_{ m min}$
取值	2 400	14.86	0.79	1.60	0.007	0.61	48×10^{6}	4×10^{6}	0.001	0.01
参数	$S_{ m max}$	$P_{\rm C}/{ m MPa}$	$\mu_{ m C}$	$P_{ m lock}/ m GPa$	$\mu_{ m lock}$	D_1	D_2	K_1/GPa	K_2/GPa	K_3/GPa
取值	7.0	16	0.001	0.8	0.1	0.04	1	85	-171	208

在地表上距离炸药中心投影点分别为 2~11 m 的区间内,每隔 1 m 选取一个测点,读取马赫波超 压数值.将各种材料的地面与刚性实体地面以及刚性壳体地面的马赫波超压峰值绘图对比,距离曲线如 图 3 所示.由图 3 可知:除去采用刚性壳体的超压峰值在 R 较小时有一定差异外,其他采用各种材料的 实体单元地面的超压峰值很接近.

在 \bar{R} =2.35 m·kg^{-1/3}处,各实体地面之 间的最大误差仅为 1.99%;在 \bar{R} =0.495 m·kg^{-1/3}处(地表上距离炸药中心投影点 2 m 处),砂质土、粘性土、混凝土、土上覆 30 cm 混 凝土以及刚性实体地面的超压峰值(MPa)分 别为 4.730,4.840,4.870,4.870 以及 4.990, 误差不大.两种混凝土地面上的超压峰值与刚 性实体地面上的超压很接近(误差 2.4%),说 明在本模型的工况下,混凝土地面为刚性地 面.粘性土地面的误差为 3.0%,砂质土地面 的误差最大(5.2%),砂质土和粘性土在炸药 作用下的破坏并形成爆炸坑,爆炸能量被消



图 3 马赫波超压-比例距离曲线

Fig. 3 Mach wave overpressure-scaled distance curve

耗,故峰值较小.因此,对于模拟土质地面上的爆炸,若简化为刚性地面建模,需根据不同的情况,针对性的进行修正.

2.2 不同炸点高度的影响

当炸药高度为 1.2 m 时,不同实体单元地面的马赫波超压相差不大,故尝试将炸药高度进行改变, 计算比较马赫波超压峰值的差异.随着炸药成坑体积增大,耗能增加,砂质土、粘性土地面的冲击波压力 场与刚性地面有明显区别,如图 4 所示.







图 4 冲击波压力场



由图 4 可知:在一定时间内,砂质土地面上压力峰值集中在爆炸坑中,而刚性地面却可以很好的反 射冲击波.炸高 0.4 m 时的马赫波超压,如图 5 所示.由图 5 可知:炸高 0.4 m 时,不同材料地面的产生 超压差异性增大; Ā 在 0.433 m•kg^{-1/3}处,刚性实体地面与砂质土地面间的误差为 11.6%, Ā 在 2.34 m•kg^{-1/3}处,这一误差降为 4%.将各种炸高下的超压与经验公式比较后发现:随着炸高减小,马赫波 超压误差增大,刚性壳体地面上的爆炸马赫波超压与经验公式最为吻合.

2.3 不同空气域形状的影响

炸药冲击波的传播过程呈放射状,故分别建立球体,圆柱体和长方体的空气域,对应在划分网格时,

球体和圆柱体的网格在曲边上由内向外逐渐变大. 建模方式和参数取值保持不变,比对地面材料取砂 质土、刚性实体和刚性壳体的3种情况,如图6所 示.由图6可知:对于相同的地面材质,圆柱体和长 方体的空气域下数值模拟的马赫波超压很接近,球 体空气域下的马赫波超压略小.以刚性壳体地面为 例, R 在 2.35 m · kg^{-1/3}处,球体,圆柱体和长方体 的空气域的马赫波超压分别为 1.41,1.43,1.43 MPa.砂质土、刚性实体地面亦可以得到相同的规 律.对于 R 较小的区域,采用长方体的空气域下模拟 的马赫波超压最接近经验公式.

2.4 不同炸药当量的影响

为了研究不同炸药当量对地爆产生的影 响,选用了 3 种尺寸的立方体炸药进行模拟, 炸药边长分别为:0.2,0.4,0.6 m(当量 W 分 别为 13.04,104.32,352.08 kg).为了减小网 格差异对爆炸模拟产生的影响,在水平投影面 上,炸药周围 2 m×2 m 的区域内采用渐变网 格,保证与炸药水平距离 2 m 以外的网格尺寸 均为 0.2 m,建模方式和参数取值保持不变. 在地表上选取 \overline{R} =1.30 m · kg^{-1/3} 附近的测点 (水平距离分别为 3,6,9 m),以及水平距离皆 为 10 m 的测点.分别将模拟所得马赫波超压 与 Henrych 经验公式进行对比,如表 5 所示. 由表 5 可知:虽然各个测点的 \overline{R} 略有差异,但







with different air domain shape

因为随着 R 的增大,误差在不断减小,因此,随着炸药当量的增加,马赫波超压的误差在减小.

 $\Delta P/MPa$

表 5 不同炸药当量的马赫波超压对比

au/lea	P/m	$\overline{\mathbf{P}}$ /m a $lr \sigma^{-1/3}$	刚性壳体	*地面		
<i>W</i> / Kg	K / III	K/ Ⅲ • Kg	$\Delta P_{ m m}/{ m MPa}$	δ / $^{0}\!\!/_{0}$	$\Delta P_{ m m}/{ m MPa}$	δ / $\%$
13.04	3.0	1.372	3.29	63.4	2.28	74.7
104.32	6.0	1.300	4.61	42.8	3.43	61.5
352.08	9.0	1.286	5.65	34.6	4.54	47.5
13.04	10.0	4.278	0.47	33.3	0.46	34.8
104.32	10.0	2.139	1.68	39.1	1.74	37.0
352.08	10.0	1.426	4.42	34.3	3.68	45.3

Tab. 5 Comparison of shock waves overpressure with different explosive equivalents

对比相同 TNT 时,刚性实体和刚性壳体地面上的马赫波超压误差,可以看出总体上,刚性壳体的 误差更小,更适合模拟刚性地面.

3 结束语

1) 基于 LS-DYNA 有限元程序,炸药近地爆炸的数值模拟计算是可行的,模拟结果与经验公式的 误差随着比例距离的增大而减小.

2)除爆炸中心区域外,不同材料地面与刚性地面的差异性较小,混凝土地面的误差最小.综合不同 工况的地爆模拟结果,刚性壳体地面上的马赫波超压峰值误差较小,更适合模拟刚性地面;空气域形状 为长方体时,网格最均匀,马赫波超压误差最小. 3) 炸药高度对马赫波超压峰值的影响大,随着炸高减小,误差增大;随着炸药当量的增大,马赫波 超压误差减小.

参考文献:

- [1] 丁阳,汪明,李忠献. 爆炸荷载作用下钢框架结构连续倒塌分析[J]. 建筑结构学报,2012,32(2):78-84.
- [2] 高轩能,刘颖,杨维英.马场坪收费站汽车爆炸破坏的数值模拟分析[J].振动与冲击,2012,31(21):184-189.
- [3] 段雷琳,高轩能,江媛.内爆炸下球面钢网壳结构的冲击波超压计算分析[J].华侨大学学报:自然科学版,2013,34 (5):557-562.
- [4] 高轩能,王书鹏,江媛.爆炸荷载下大空间结构的冲击波压力场分布及泄爆措施研究[J].工程力学,2010,27(4): 226-233.
- [5] 汪维,张舵,卢芳云,等.大当量 TNT 装药爆轰的远场数值模拟及超压预测[J].弹箭与制导学报,2010,30(1):127-130.
- [6] 成凤生,宋浦,顾晓辉,等.TNT装药爆炸波在刚性平面上方传播反射的数值研究[J].爆破器材,2011,40(4):1-4.
- [7] 杨亚东,李向东,王辉,等. RDX 基含铝炸药和 TNT 浅层土壤中爆炸开坑的数值模拟与试验[J]. 火炸药学报, 2013,36(2):24-29.
- [8] WAMG J. Simulation of landmine explosion using LS-DYNA3D software: Benchmark work of simulation of explosion in soil and air[R]. Melbourne: Defence Science & Technology Organisation, 2001:10.
- [9] 李利莎,谢清粮,郑全平,等. 基于 Lagrange、ALE 和 SPH 算法的接触爆炸模拟计算[J].爆破,2011,28(1):18-22.
- [10] 刘伟,郑毅,秦飞.近地面 TNT 爆炸的试验研究和数值模拟[J].爆破,2012,29(1):5-26.
- [11] 李鑫,吴桂英,贾吴凯.挡墙对爆炸冲击波传播影响的数值模拟[J].工程力学,2012,29(2):245-250.
- [12] 李翼祺,马素贞.爆炸力学[M].北京:科学出版社,1992:284.
- [13] 中华人民共和国国家标准.GB 6722-2003 爆破安全规程[S].北京:中国标准出版社,2003:43.
- [14] HENRYCH J. 爆炸动力学及其应用[M]. 熊建国,译. 北京:科学出版社,1987:127.
- [15] 刘蕾.爆炸荷载作用下轻钢柱动力响应及破坏模式数值分析[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2012:13.
- [16] 曹树鼎. 化爆空气冲击波参数实验数据的经验拟合[J]. 爆炸与冲击,1984,4(1):82-85.
- [17] 尚晓江. ANSYS/LS-DYNA 动力分析方法与工程实例[M]. 2版. 北京:中国水利水电出版社, 2008: 299.
- [18] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析[M]. 北京:科学出版社, 2005:102.

Numerical Simulation and Analysis of Influence Parameters for Explosions Near Ground

CHEN Xin^{1,2}, GAO Xuan-neng¹

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. College of Traffic and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: A simulation model is established by finite element program ANSYS/LS-DYNA. Based on the correctness and reliability of the model and parameters selection, the influences of different parameters on the Mach wave overpressure, including the ground material, explosive height, air domain shape and explosive equivalent on the Mach wave overpressure are investigated. The numerical results show that: 1) For the explosion of non-close range, the Mach wave overpressure peaks on different grounds are similar, which can be simplified as rigid ground. 2) Rigid shell ground and cuboid air domain would be chosen to establish model. 3) Comparing with empirical formula, the numerical simulation error of Mach wave overpressure peak decreases with the increase of explosive equivalent, and increases with the increase of explosive height.

Keywords: explosions near ground; Mach reflection waves; numerical simulation; parameter analysis; TNT explosive; ground stiffness

文章编号:1000-5013(2014)05-0576-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2014.05.0576

钢板笼约束混凝土短柱轴压承载力分析

梁扬滨,曾志兴,苏江林,谌意雄

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为了研究新型结构构件钢板笼混凝土短柱的轴心受压承载力,在已有受约束混凝土本构关系基础上, 根据箍筋约束混凝土的拱作用原理,对钢板笼套箍约束混凝土承载力进行分析,推导出钢板笼混凝土轴压短 柱的承载力公式,并将计算结果与试验数据进行对比.研究结果表明:钢板笼对混凝土的横向约束与钢管混凝 土相似,纵向连接成角钢约束力强,模型计算结果和试验数据吻合较好.

关键词: 钢板笼;轴压短柱;约束混凝土;承载力

中图分类号: TU 360.2 文献标志码: A

钢板笼混凝土结构(简称 PCS)是由美国学者 Mohanmmad Shamsai 和 Halil Sezen 于 2005 年提出 来的新型预制混凝土结构,其特点是用钢板代替钢筋,纵向钢板和横向钢板连成一个整体,与钢管混凝 土相比,钢板笼可节省材料.与钢筋混凝土相比,钢板笼纵横向钢板尺寸精确.在钢板笼混凝土柱构件 中,纵向钢板提供轴向承载力,横向钢板约束核心混凝土,通过控制开孔尺寸、开孔间距、钢板厚度调整 配筋率,满足试验和设计的要求[12].钢板笼混凝土是一种介于钢管混凝土和钢筋混凝土之间的结构体 系,目前,钢管混凝土主要用于受压构件中,具有较好的三向受压性能,其核心区混凝土抗压强度高,钢 管内部的混凝土可以有效防止钢管发生局部屈曲.钢管对混凝土约束可从两方面分析.1) 基于统一理 论,结合极限平衡理论和叠加原理,考虑不同套箍系数对钢管混凝土短柱承载力的影响.舒赣平等[3]讨 论了不同套箍系数和配筋率作用下,配筋圆钢管的极限承载力.张志强等^[4]将统一理论推广应用到复合 钢管混凝土柱轴压强度计算中,考虑不同钢管内型钢截面形式,提出了组合等效配箍系数.2)分析钢管 对混凝土的有效约束面积,通过钢管对混凝土的有效约束系数,讨论钢管混凝土极限承载力.张正国[5] 分析了方钢管混凝土应力分布和约束机理,讨论钢管宽厚比对方钢管混凝土承载力的影响.周绪红等[6] 采用弹塑性应力分析方法对钢管进行全过程应力分析,并提出钢管约束钢筋混凝土的轴压承载力公式. 钢板笼和钢管对混凝土约束的区别在于钢板笼侧面开孔形成角钢,使其对混凝土约束弱于钢管,相比钢 筋混凝土,钢板笼对混凝土具有更高约束力.本文基于开孔钢管对核心区混凝土的约束作用,分析钢板 笼混凝土短柱受力特性及核心混凝土约束影响,并与4个钢板笼混凝土短柱轴压试验进行对比验证.

1 核心区混凝土约束模型

1.1 钢管约束核心混凝土抗压强度

在受压混凝土短柱截面核心区域,由于横向钢板对混凝土的约束作用,混凝土趋于三向受压状态, 其抗压强度极限承载力得到很大地提高.根据蔡绍怀教授^[7]提出的钢管约束核心混凝土抗压强度本构 关系,即

$$f'_{\rm cc} = f'_{\rm co} (1+1.5\sqrt{\frac{P}{f'_{\rm co}}} + 2\frac{P}{f'_{\rm co}}).$$
(1)

收稿日期: 2013-12-26

通信作者: 曾志兴(1967-),男,教授,主要从事混凝土结构的研究. E-mail: zhixing@hqu. edu. cn.

基金项目: 国家自然科学基金培育计划专项(JB-ZR1121)

式(1)中: f'_{ee} 为核心区混凝土抗压强度值; f'_{ee} 为混凝土弱约束区强度值,一般取单轴混凝土标准抗压强度值; $P = k_e \times f_1$,P为箍筋约束有效侧向约束应力, f_1 为箍筋提供的侧向约束应力, k_e 为约束系数.

1.2 箍筋约束混凝土柱模型

Sheikh 等^[8]提出了箍筋约束混凝土的拱作用原理. 在轴向压力作用下,核心区混凝土产生横向变形使箍筋的水平线段产生弯曲,由于箍筋中间抗弯刚度较小,对核心区混凝土的反作用力也较小,形成 了弱约束区. 箍筋转角部刚度较大,变形较小,对核心区域混凝土的约束作用力强,箍筋由于自身约束 差,使其被约束混凝土形成"拱作用". 柱截面中间部分和指向箍筋转角部的延伸带形成混凝土的强约束

区,即箍筋对混凝土的有效约束区面积,如图1所示.柱的纵向剖 面图上,相邻箍筋之间混凝土截面所处的高度位置不同,混凝土 核心区域面积大小也不同,在相邻箍筋的中间位置截面处,受约 束区域的面积最小.张正国^[5]对方形钢管混凝土柱的机理和承载 力进行分析,认为钢管对核心混凝土侧向压力,在角点处集度最 大,各个边中点处集度最小,且趋于零.通过实验分析验证:钢板 对混凝土约束存在有效区和薄弱区.



图 1 拱作用模型 Fig. 1 Model of arch

2 钢板笼约束混凝土强度分析

2.1 钢板笼混凝土短柱侧向约束应力

横向钢板约束混凝土的计算简图,如图2所示. 假设箍筋已经屈服,混凝土的平均水平应力沿着箍筋均匀分布,根据计算简图可得 ← f_{yv}A_{sv}

$$\sigma_x = 2 f_{yy} A_{sy} / sb_y,$$

 $\sigma_y = 2 f_{yy} A_{sy} / sb_x.$

式(2)~(3)中: f_{yx} 为屈服强度; σ_x , σ_y 分别为在X,Y轴方向约束混凝土的单向应力; A_{sx} 为箍筋截面面积; b_x , b_y 分别为约束混凝土沿X轴、Y轴的边长;s为箍筋间距.结合箍筋配箍特征值和体积配箍率计算公式^[9],可得

$$\lambda_{\rm v} = \frac{2A_{\rm sv}f_{\rm yv}(b_x + b_y)}{b_{\rm v} \times f_{\rm b}}.$$
(4)

$$b_y$$
 σ_x

Fig. 2 Calculation diagram

$$\sigma_x = \lambda_v f_c \times \frac{b_x}{b_x + b_y},\tag{5}$$

(2)(3)

$$\sigma_{y} = \lambda_{v} f_{c} \times \frac{b_{y}}{b_{x} + b_{y}}.$$
(6)

若横向钢板笼为 b_x=b_y,则钢板提供的侧向约束应力为

$$f_1 = \sigma_x = \sigma_y = \lambda_v f_c \times \frac{1}{2}.$$
 (7)

2.2 钢板笼混凝土短柱约束系数分析

將式(4)与式(2),(3)结合,推导得

根据式(1)中采用的约束系数分析有效约束应力,结合钢板笼构件的实际模型,考虑钢板笼配箍形 式对混凝土约束的影响.即分析钢板箍形式影响系数 α_n和钢板箍间距影响系数 α_s,则钢板箍约束混凝 土有效系数为

$$k_{\rm e} = \alpha_{\rm n} \times \alpha_{\rm s}. \tag{8}$$

式(8)中:k。为考虑钢板笼有效约束混凝土面积与核心混凝土面积之比的影响系数;an 为钢板箍形式影响系数;as 为钢板箍间距影响系数.

2.2.1 钢板箍形式影响系数 α_n 取钢板箍约束受压区混凝土面积为 A_{xy} = b_x×b_y,有效约束核心混凝 土面积 A_{en}.则钢板箍形式的影响系数为箍筋截面有效约束截面面积与核心混凝土截面面积的比值,即

$$\alpha_{\rm n} = A_{\rm en}/A_{\rm xy}.$$
 (9)

根据 Sheikh 提出的拱作用理论,截面可分为箍筋对混凝土有效约束区和弱约束区,如图 3 所示.

Mander 等^[10] 对箍筋约束混凝土的模型划分以 45°初始角的二次曲线为分界线,其中弱约束区可近似取 为等腰三角形,高度取底边三角形边长的 1/3.因此,对混凝土有效约束面积取箍筋约束总面积减去弱 约束区,即

$$A_{\rm en} = A_{xy} - \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2} \times \frac{1}{3} \times l_i^2, \qquad (10)$$

$$\alpha_{\rm n} = \frac{A_{\rm en}}{A_{\rm xy}} = 1 - \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{6} \times \frac{1}{A_{\rm xy}} \times l_i^2.$$
(11)

周绪红等^[6]认为方钢管对核心混凝土的有效约束区为距角部 0.1d 的范围,而边缘 0.8d 范围内为 非约束区,非约束区的抛物线为 1/4 圆弧,如图 4 所示.在截面形式上,钢板笼与钢管更为相似.因此,钢 板笼横向钢板对核心混凝土的约束系数 α_n 取 0.635.根据几何关系,求得对核心区混凝土有效约束面积 A_{en},即

$$A_{\rm en} = 0.635 A_{xy}.$$
 (12)

2.2.2 钢板箍间距影响系数 α_s 钢板笼纵横向连接处形成角钢刚度较大,中间刚度小^[11],如图 5 所示.根据拱作用理论分析,位于箍筋间距中间位置即 s/2 处为约束薄弱区,钢板笼对混凝土的约束侧向 大于钢筋笼而小于纯钢管.因此,钢板弱约束区抛物线高度可取 1/8~1/15 的底边长.箍筋间距对混凝



$$A_{\rm es} = (b_x - \frac{s}{10})(b_y - \frac{s}{10}), \qquad (13)$$

$$\alpha_s = A_{\rm es} / A_{xy}. \tag{14}$$

结合上述公式求出 k。为

$$k_{\rm e} = a_{\rm n} \times a_{\rm s} = 0.635 \times \left[(1 - \frac{s}{10b_x}) \times (1 - \frac{s}{10b_y}) \right].$$
(15)

所以,当钢板笼构件 b_x=b_y时,约束混凝土有效侧向约束应力为

$$P = k_{\rm e} \times f_1 = 0.635 \times \left[(1 - \frac{s}{10b_x}) \times (1 - \frac{s}{10b_y}) \right] \times (\lambda_{\rm v} f_{\rm c} \times \frac{1}{2}). \tag{16}$$

3 钢板笼约束混凝土短柱极限承载力计算

3.1 极限承载力

根据式(16)解出 P,代入式(1)求出核心混凝土抗压强度 f_{cc}.钢板笼混凝土短柱轴心受压极限承载 力可分为两部分,即

$$N = N_{\rm s} + N_{\rm c} = f'_{\rm y} A'_{\rm s} + f'_{\rm cc} A_{\rm c}.$$
 (17)

式(17)中: N_s 为构件纵向钢板抗压承载力; N_c 为钢板约束混凝土抗压承载力; f'_s 纵向钢板抗压强度 值; A'_s 纵向钢板截面积; f'_{cc} 为钢板约束混凝土抗压承载力; A_c 为核心区混凝土约束面积.

3.2 模型验证

用4根钢板笼混凝土短柱进行试验^[12-15],构件截面尺寸(*b*×*h*)为250 mm×250 mm,钢板笼约束混 凝土短柱高度为750 mm,混凝土强度等级采用C30,实测强度为20.7 MPa.钢板采用强度为Q235,厚 度为 6 mm,实测强度为 276.7 MPa,具体参数如表 1 所示.表 1 中:*a*_n 为混凝土保护层厚度;*z* 为钢板笼 混凝土短柱高度;钢板笼以实际加工尺寸为准.

表 1	试验主要参数
-----	--------

Tab. 1 Parameters of specimens

试件编号	$b imes h/\mathrm{mm} imes \mathrm{mm}$	$a_{ m n}/ m mm$	$z_{/}\mathrm{mm}$	$s_{/}\mathrm{mm}$	$A_{ m s}/{ m mm}$	$\lambda_{ m v}$
PCS-1	250×250	25	750	160	1 632	0.095
PCS-2	250×250	25	750	90	1 632	0.169
PCS-3	250×250	25	750	70	1 632	0.218
PCS-4	250×250	25	750	50	1 632	0.305

图 6 为钢板笼变形破坏图. 由图 6 可知:钢板中点处刚度较弱,存在弱约束区;角点处刚度大,约束强,变形小. 随着核心区混凝土横向变形系数增大到大于钢板笼横向变形系数,钢板笼受到挤压,对核心区混凝土产生约束效应. 当荷载接近钢板的屈服荷载时,在开裂荷载的挤压下,钢板笼弱约束区出现外凸变形,随着纵向的变形发展,有些部位出现了近似圆形的破坏截面.

将式(17)计算值与文中试验数据进行比较,结果如表 2 所示.表 2 从核心混凝土抗压强度、构件极限荷载值两方面进行比较分析,其中:δ 为相对误差.结果表明:PCS-1,PCS-2,PCS-4 试验值与计算值较为吻合,误差较小.这是由于混凝土浇筑时不均匀性,钢板笼加工时材料性能产生的允许误差.而 PCS-3* 加载过



图 6 钢板笼变形图 Fig. 6 Deformation of PCS

程中由于施加荷载端出现失衡,试验失败,试验结果值与理论数值偏差较大.因此,文中可取3个试验值 与钢板笼混凝土短柱承载力计算公式值相对比.

计化位日	试验	验值	按式(17)	2/0/	
风件细亏	$f_{ m cc}/{ m MPa}$	P/kN	$f'_{\rm cc}/{ m MPa}$	P'/kN	O / /0
PCS-1	26.210	1 438	26.718	1 476.69	2.69
PCS-2	33.118	1 698	29.595	1 587.07	6.53
PCS-3 *	38.671	1 907	31.251	1 650.63	13.44
PCS-4	37.236	1 853	33.932	1 753.47	5.37

表 2 计算结果与试验数据对比 Tab. 2 Comparison between the calculation results and experimental data

4 结论

1) 在拱作用理论的基础上,分析了钢板笼的钢板箍形式、钢板箍间距对有效约束核心区混凝土强 度的影响,横向钢板对混凝土的约束与方钢管相似,纵向钢板连接成一个整体形成角钢,约束力比钢筋 混凝土强.

2)钢板笼角部刚度大、约束力强,中间部位刚度小,存在弱约束区,当钢板屈服时,弱约束区最早出 现变形.

3) 基于钢管约束混凝土本构关系,通过考虑钢板对混凝土约束的影响,给出了钢板笼约束混凝土 短柱轴压承载力计算公式,公式的计算结果与试验数据吻合较好,验证了公式的合理性.

参考文献:

- [1] SHAMSAI M, WHITLATCH E, SEZEN H. Economic evaluation of reinforced concrete structures with columns reinforced with prefabricated cage system[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2007, 133(11): 864-870.
- [2] SHAMSAI M, SEZEN H. Behavior of square concrete columns reinforced with prefabricated cage system[J]. Materials and Structures, 2011, 44(1): 89-100.

- [3] 舒赣平,刘小萤,缪巍. 配置圆钢管混凝土轴心受压短柱试验研究与承载力分析[J]. 工业建筑,2010,40(4):100-106.
- [4] 张志强,赵均海,张玉芬,等.复合钢管混凝土柱轴压承载力的计算[J].长安大学学报,2010,30(1):67-70.
- [5] 张正国. 方钢管混凝土柱的机理和承载力的分析[J]. 工业建筑,1989,1(11):2-7.
- [6] 周绪红,甘丹,刘界鹏,等.方钢管约束钢筋混凝土轴压试验研究与分析[J].建筑结构学报,2011,32(2):68-74.
- [7] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京:人民交通大学出版社,2003:38-39.
- [8] SHEIKH S A, UZUMERIS M. Analytical model for concrete confinement in tied columns[J]. ASCE J Strucural Division, 1982, 108(12): 2703-2722.
- [9] 李国强,李杰,苏小卒.建筑结构抗震设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2002:143-144.
- [10] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical stress-strain behavior for confined concrete[J]. Structural Enineering, 1988, 114(8): 1827-1849.
- [11] 谌意雄,曾志兴.钢板开孔对结构性能的影响及其对策[J].低温建筑技术,2013,35(11):44-47.
- [12] 李飞.钢板笼混凝土短柱轴压性能试验研究[D].厦门:华侨大学,2012:27-32.
- [13] 梁扬滨,曾志兴,陈荣淋,等.钢板笼混凝土短柱轴压性能的数值模拟[J].华侨大学学报:自然科学版,2014,35 (1):88-91.
- [14] SEZEN H, SHAMSAI M. High-strength concrete columns reinforced with prefabricated cage system[J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(5): 750-757.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB 50010-2010 混凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社, 2010:207-211.

Bearing Capacity of Prefabricated Cage System for Reinforcing Concrete Short Columns under Axial Compression

LIANG Yang-bin, ZENG Zhi-xing, SU Jiang-lin, CHEN Yi-xiong

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Based on the existed concrete constitutive relationship and arch action principle of stirrups confined concrete. The prefabricated cage system ferrule form and spacing constraints concrete bearing capacity are investigated. The formula of prefabricated cage system bearing capacity of axially loaded concrete is proposed, and the calculation results are compared with experimental data. The result shows that the lateral confinement of prefabricated cage system for reinforcing concrete is similar to concrete-filled steel tube, the confinement of angle steel connected longitudinally is strong, and the calculation results agree well to experimental data.

Keywords: prefabricated cage system; short column under axial compression; confined concrete; bearing capacity

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)

文章编号:1000-5013(2014)05-0581-06

代建制多项目管理风险评价指标体系的构建

项剑平,王玉芳,张云波,祁神军

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 针对同一代建单位代建多个业主的多项目管理难题,通过专家访谈和文献阅读法,从组织、合同、沟 通、目标控制及采购五个维度识别出 32 个风险因素;采用结构方程模型方法,构建代建制多项目管理风险评 估体系,得到 28 个关键风险因素;基于结构方程模型的路径系数作为指标权重,结合模糊综合评价法对代建 制多项目管理风险进行量化评估,构建代建制多项目管理风险评估模型.结果表明:该代建制多项目管理风险 的"量化"评估有利于风险管理与控制.

关键词: 代建制;多项目管理;结构方程模型;模糊综合评价;风险评估 中图分类号: TU 72 **文献标志码:** A

多项目管理最早由美国的迈克尔托比和艾琳托比提出的,主要是指在企业中同时管理,协调多个项目的选择、评估、计划、控制、执行,以及收尾等各项工作,使所有项目的综合执行效果达到最优的项目管理方式.多项目管理是通过对项目群、项目组合,以及项目的成功管理来实现的^[1].随着多项目管理理论的发展,政府投资项目常以组群的形式出现,这就导致了一个代建单位往往面临着多个业主多个项目的代建工作.多业主的差异化需求和多项目的复杂化,使代建项目不确定、不稳定性的因素大大增加,增加了代建制模式下的风险.代建制模式指的是以项目管理公司为代建单位的代建制模式,而多业主、多项目均指多个业主共同拥有的同一区域内的政府投资项目,多项目管理指同一区域内多个业主的项目群管理.针对代建项目的风险,目前国内外学者开展了许多研究^[2-7],但研究主要采用定性分析法.有学者采用层次分析法^[8]、三角模糊综合评价法^[9]、神经网络^[10]、熵权法^[11]等方法量化评价代建制模式的风险,但很少有学者研究多业主的代建制模式下多项目管理的风险评价方法.模糊综合评价法是针对评估项的模糊性而采取的最好评估方法,其权重通常是专家根据经验确定的,难免带有主观性.结构方程模型是一种定性与定量相结合的数理统计方法,尽量减少了个人主观臆断,弥补模糊综合评价法的不足.基于此,本文将这两种方法结合起来,针对一个代建单位代建多个业主的多项目管理,通过结构方程模型确定评价指标体系和各指标权重,用多层次的模糊综合评价方法对代建制多项目管理进行风险评估.

1 结构方程模型中的潜在变量及观测变量设计

多业主多项目的代建制模式作为一个新兴的制度,其所包含的风险因素不能一一进行管控,只能对 影响这一新兴制度的重要风险因素进行重点管理.风险因素选择得当与否,会对研究结论产生很大的影 响.根据文中的研究内容,基于相关文献,搜集影响代建制多项目管理实施的相关因素.结合国内代建制 多项目工程的实际情况,根据项目管理的九大知识领域确定各主要利益相关方在项目实施的各阶段所 面临的各种风险,并对在代建制方面作相关研究的众多学者和代建制多项目管理实施单位的专家进行 访谈;识别对代建制模式下的多业主、多项目的管理的关键风险因素,构建了组织、合同、沟通、目标控制 及采购等5个维度(潜在变量),以及相应的的32个二级指标(观测变量)的代建制多项目管理风险评

收稿日期: 2014-02-01

通信作者: 项剑平(1963-),男,讲师,主要从事项目管理的研究.E-mail;xjp1017@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71303082);中央高校基本科研业务基金资助项目(11QZR06);福建省自然 科学基金青年创新项目(2012J05095) 价影响因素理论模型^[12],如表1所示.

表 1 结构方程模型中的潜在变量及观测变量设计

Tab. 1 Design of latent variables and observed variables in structural equation model

潜在变量	观测变量
	组织结构风险(X11)
	多业主的控制权大小不同(X12)
细细团险(V1)	承包商之间地位的差别(X13)
组织风险(AI)	代建方在多项目下人员分配不合理(X14)
	不同项目中监理人力分配不均(X15)
	参建各方的综合能力差(X16)
	程序性条款(X21)
	价款的支付方式和取费标准(X22)
	违约争议解决(X23)
合同风险(X2)	代建管理费取费模式(X24)
	责任义务不对等、不明确(X25)
	变更的标准和程序的多样化(X26)
	索赔和变更的不及时性、不规范化、不公平性(X27)
	代建方的管理人员的沟通、协调能力不足(X31)
	承包商之间相互协调能力差(X32)
	承包商对专业承包商与劳务分包商的协调能力差(X33)
海通団陸(V 2)	分包商之间的相互合作能力差(X34)
何進八陸(A3)	代建方档案、资料收集不足或管理不当(X35)
	信息化建设不成熟(X36)
	代建方对多业主的需求分解(X37)
	业主间的要求和利益冲突(X38)
	部分项目进度款支付拖延(X41)
	多个业主对项目的异质化要求(X42)
	承包商流水施工的应变能力不足(X43)
	承包商并行施工的资源组织能力差(X44)
目标控制风险(X4)	代建项目的审批程序过多且效率低(X45)
	总承包商对需求分解与指令理解错误(X46)
	监理方差别化对待不同项目(X47)
	设计变更多样化(X48)
	差异化设计方案的成本不同(X49)
至购风险(X5)	供应商联合蓄谋抬价(X51)
	材料供应的应变能力不足(X52)

2 基于 SEM 的风险评价指标权重

2.1 基本假设

为了代建制多项目管理风险评价的理论模型,模型中建立了组织、合同、沟通、目标和采购5个维度 对风险评估的关系.为了便于对模型的实证分析,提出以下5个基本假设:H1)组织层与风险之间具有 正相关关系;H2)合同层与风险之间具有正相关关系;H3)沟通层与风险之间具有正相关关系;H4)目 标层与风险之间具有正相关关系;H5)采购层与风险之间具有正相关关系.

2.2 数据来源与处理

为了进一步识别各风险因素的重要性,以对代建制多项目管理有所研究及实践的专家、学者,以及 代建制多项目管理的实施单位为主要调查对象.本次调查问卷共发放 400 份,回收 243 份,回收率为 60.75%,其中经过筛选后得到的有效问卷共 211,有效率为 86.8%.调查问卷中共有 151 份来自代建及 施工单位,10 a 以上工作经验的调查问卷参与者有 46.6%,5~10 a 工作经验的占 41.1%,5 a 以下工作 年限的只有 12.3%;中级职称以上的有 143 人,占 67.8%,初级职称的占 25.5%,其他职称占 6.7%.
在进行问卷分析之前,有必要对问卷进行信度和效度分析,即检验问卷的稳定性和可靠性,以及检验问卷结果的一致性.选用α信度系数法进行检验,采用 SPSS 20.0 软件对问卷结果进行可靠性检验. 检验结果显示:问卷总量表的α信度系数为0.914,且各分量的Cranach'sα系数分别为0.663,0.760, 0.781,0.811,0.705,这说明量表数据的内在信度非常高,问卷设计合理.因此,认为本次调查问卷的结 果具有非常好的信度,能够比较真实的反映实际情况.此外,通过 KMO 和 Bartlett 球形检验的效度分 析方法,检验通过问卷调查方式所得到的各个变量的相关性和独立性,KMO 数值为0.877,大于0.7, 显著性系数 Sig 为0.000,小于0.05,说明样本数据拥有相关性,可以较好地支持测量量表,即效度较 好,且数据相关矩阵不是单位矩阵,可以进行因子分析.

2.3 指标权重的计算

通过 Amos 软件对初始模型进行运算,并根据模型拟合指数评价以及系数估计结果对模型进行调整,得到最终模型及标准化路径系数,即指标权重,如表 2 所示.

重要的拟合指数结果比较理想,如表 3 所示.由表 3 可知:除 GFI,AGFI 值分别为 0.884 和 0.855 外,其他拟合指标都满足拟合要求.如 RMSEA 为 0.016,不仅低于 0.05,且接近 0.01,表明本模型能非 常出色的拟合,修正后的模型具有较好的结构效度和适配性.Bentle 指出,对包含较多变量的模型来说, 完全达到一般认定的拟合优度是比较困难的^[13].优化后的模型包含了 5 个潜变量、28 个观测变量.由 此,构建 28 个二级指标、5 个一级指标的多层次评价指标体系.

序号	变量	标准化路径系数	序号	变量	标准化路径系数	序号	变量	标准化路径系数
1	目标	0.930	12	X22	0.530	23	X37	0.690
2	沟通	0.875	13	X23	0.590	24	X38	0.550
3	合同	0.872	14	X24	0.590	25	X42	0.640
4	采购	0.861	15	X25	0.530	26	X43	0.670
5	组织	0.799	16	X26	0.720	27	X44	0.660
6	X11	0.520	17	X27	0.640	28	X46	0.660
7	X12	0.580	18	X32	0.680	29	X47	0.700
8	X13	0.630	19	X33	0.690	30	X48	0.670
9	X14	0.620	20	X34	0.620	31	X49	0.720
10	X15	0.620	21	X35	0.590	32	X51	0.730
11	X21	0.560	22	X36	0.510	33	X52	0.780

表 2 标准化路径系数输出表 Tab. 2 Output of standardized path coefficients

表 3 修正后模型拟合度摘要表

Tab. 3 Fit indices assessment of SEM

分类	绝对拟合效果指标		相对拟合效果指标			简约指标				
指数	$X^2 DF$	GFI	AGFI	IFI	TLI	CFI	PGFI	CN	CMIN/DF	AIC
文中值	1.051	0.884	0.855	0.946	0.923	0.934	0.706	226	1.051	504.597
评价	是	可接受	可接受	是	是	是	是	是	是	是

3 代建制多项目风险评估模型的构建

基于 SEM 模型结果,结合模糊综合评价法构建代建制多项目管理风险评估模型.以建立二级评价 模型为例,有如下 4 个主要步骤.

1)确定因素集及权重.根据 SEM 模型确定主因素和子因素集,并根据标准化路径系数进行归一化处理,确定相应的权重.主因素(U)及其权重(w)的计算式为

$$U=\left(U_{1},U_{2},U_{3},U_{4},U_{5}
ight),$$

w = (0.184, 0.201, 0.202, 0.214, 0.199).

相应的,各子因素及其权重的计算式为

$$U_1 = (U_{11}, U_{12}, U_{13}, U_{14}, U_{15}),$$

$$\begin{split} w_1 &= (0.166, 0.184, 0.210, 0.212, 0.228);\\ U_2 &= (U_{21}, U_{22}, U_{23}, U_{24}, U_{25}, U_{26}, U_{27}),\\ w_2 &= (0.152, 0.149, 0.151, 0.135, 0.128, 0.142, 0.143);\\ U_3 &= (U_{31}, U_{32}, U_{33}, U_{34}, U_{35}, U_{36}, U_{37}),\\ w_3 &= (0.119, 0.162, 0.144, 0.153, 0.154, 0.139, 0.130);\\ U_4 &= (U_{41}, U_{42}, U_{43}, U_{44}, U_{45}, U_{46}, U_{47}),\\ w_4 &= (0.147, 0.156, 0.166, 0.108, 0.146, 0.135, 0.143);\\ U_5 &= (U_{51}, U_{52}),\\ w_5 &= (0.457, 0.543). \end{split}$$

2) 评语集及其量化. 确定评语集=(高风险, 较高风险, 一般风险, 较低风险, 低风险), 即 v=(v₁, $v_2, v_3, v_4, v_5) = (5, 4, 3, 2, 1).$

3)模糊评价矩阵的建立,根据专家的评价结果求出各因素属于不同等级评语的隶属度,建立模糊 评价矩阵 R_k. 那么组织维度上的综合评价计算公式为

):

);

$$\boldsymbol{B}_{1} = w_{1} \times \boldsymbol{R}_{1} = (0.166, 0.184, 0.210, 212, 0, 0.228) \times \boldsymbol{R}_{1}.$$

$$\boldsymbol{B}_{2} = w_{2} \times \boldsymbol{R}_{2}, \boldsymbol{B}_{3} = w_{3} \times \boldsymbol{R}_{3}, \boldsymbol{B}_{4} = w_{4} \times \boldsymbol{R}_{4}, \boldsymbol{B}_{5} = w_{5} \times \boldsymbol{R}_{5}.$$
(1)

代建制多项目管理风险评价对评语集的隶属度为

$$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{w} \times \boldsymbol{R} = \boldsymbol{w} \boldsymbol{\cdot} (\boldsymbol{B}_1, \boldsymbol{B}_2, \boldsymbol{B}_3, \boldsymbol{B}_4, \boldsymbol{B}_5)^{\mathrm{T}}.$$

主因素

4) 评价结果. 采用加权评价原则[14],其计算式为

$$Y = \sum_{j=1}^{m} b_{j}^{k} v_{j} / \sum_{j=1}^{m} b_{j}^{k}.$$
 (3)

实证分析 4

同理

4.1 项目简介及数据来源

选取某代建多业主多项目(简称 Z 项目)进行实 证分析. Z项目位于福建省厦门市集美区, 总用地面积 1.32 km², 总规划建筑面积 0.6 km², 包含多个在建和 已建项目.研究采用问卷调查的方式,利用投票百分比 法计算 Z 项目的风险评价各二级指标因素对不同等 级评语的隶属度,共调查10位该Z项目的专家,调查 结果如表4所示.

4.2 风险评估

(

(

(

将表4的调查结果代入式(1)中,可分别得到

$$B_{1} = w_{1} \times R_{1} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.166\\ 0.184\\ 0.210\\ 0.212\\ 0.228 \end{bmatrix}^{T} \times \begin{bmatrix} 0 & 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0.1\\ 0 & 0.3 & 0.5 & 0.1 & 0.1\\ 0.1 & 0.1 & 0.4 & 0.4 & 0\\ 0.1 & 0.3 & 0.1 & 0.3 & 0.2\\ 0 & 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 \end{bmatrix} =$$

$$B_{2} = w_{2} \times R_{2} =$$

$$0.175 \ 5, \ 0.200 \ 0, \ 0.382 \ 5, \ 0.185 \ 8, \ 0.073 \ 9);$$

$$B_{3} = w_{3} \times R_{3} =$$

$$0.031 \ 5, \ 0.341 \ 2, \ 0.425 \ 2, \ 0.129 \ 3, \ 0.073 \ 8);$$

$$B_{4} = w_{4} \times R_{4} =$$

(0.052 9, 0.330 9, 0.368 2, 0.168 2, 0.080 8);

	X12	0,0.3,0.5,0.1,0.1
X1	X13	0.1,0.1,0.4,0.4,0
	X14	0.1,0.3,0.1,0.3,0.2
	X15	0,0.4,0.4,0.2,0
	X21	0.1,0.2,0.3,0.2,0.2
	X22	0.3,0.1,0.3,0.2,0.1
	X23	0.2,0.1,0.3,0.3,0.1
X2	X24	0.1,0.2,0.5,0.1,0.1
	X25	0.1,0.2,0.4,0.3,0
	X26	0.1,0.2,0.5,0.2,0
	X27	0.3,0.3,0.4,0,0
	X31	0,0.4,0.4,0.2,0
	X32	0.1,0.6,0.2,0.1,0
	X33	0,0.5,0.5,0,0
X3	X34	0.1,0.1,0.5,0.1,0.2
	X35	0,0.1,0.5,0.3,0.1
	X36	0,0.3,0.3,0.2,0.2
	X37	0,0.4,0.6,0,0
	X41	0,0.5,0.2,0.2,0.1
	X42	0,0.3,0.4,0.2,0.1
	X43	0,0.4,0.3,0.3,0
X4	X44	0.1,0.3,0.4,0,0.2
	X45	0,0.2,0.5,0.2,0.1
	X46	0.1,0.4,0.5,0,0
	X47	0.2,0.2,0.3,0.2,0.1
V 5	X51	0.2,0.1,0.6,0.1,0
$\Lambda 0$	X52	0,0.1,0.4,0.5,0

表 4 专家调查结果计算表 Tab. 4 Results of expert survey

隶属度向量

0,0.2,0.5,0.2,0.1

子因素

X11

 $B_5 = w_5 \times R_5 = (0.0914, 0.1000, 0.4914, 0.3172, 0.0000).$

所以,根据式(2)得到 Z 项目的风险评价对评语集的隶属度向量为

 $B = w \times R = (0.0785, 0.2453, 0.4077, 0.2076, 0.0613).$ 对其进行归一化,得到

 $\mathbf{B}' = (0.0785, 0.2452, 0.4075, 0.2075, 0.0613).$

因此,表示 Z项目属于高风险的比例为 7.85%;属于较高风险的比例为 24.52%;属于一般风险的 比例为 40.75%;属于较低风险的比例为 20.75%;属于低风险的比例为 6.13%.最后,根据式(3),计算 可得

Y = B' =

 $\frac{0.0785 \times 5 + 0.2453 \times 4 + 0.4075 \times 3 + 0.2075 \times 2 + 0.0613 \times 1}{0.0785 + 0.2452 + 0.4075 + 0.2075 + 0.0613} =$

$3.07 \in (3,4).$

故可知该 Z 项目的风险评价是介于较高风险与一般风险之间.

4.3 风险管理应对策略

1) 从表 2 可以看出:目标风险、沟通风险、合同风险、采购风险、组织风险五个潜变量的权重差别并 不显著,说明代建制多项目管理是一个系统工程,各个子系统之间存在关联性,必须综合考虑各种风险 的影响,不能顾此失彼.其中,目标层对代建制多项目管理的风险评估值为 0.214,其影响权重最大.因 此可以认为,多业主或代建企业要降低代建制多项目管理的风险,就应该在侧重于目标控制管理的同时 兼顾对组织、合同、沟通和采购层方面的管理.

2) 就二级指标而言,标准化路径系数较大的因素主要包括 X52,X49,X47,X51,且路径系数均大于 0.7,应作为重要的风险因素.因此,加强采购管理是成本控制和风险管理的关键,应慎重选择有能力的 材料、设备供应商,尽量避免指定品牌的供应商蓄意抬价.同时,不同业主的不同需求所导致的差异化设 计也是代建制多项目管理的关键因素,重视此关键因素来降低项目的风险,加强成本管理.就多业主、多 项目的特殊性,加强监理单位的监管管理同样重要,尽可能避免监理方差别对待不同项目,出现部分项 目监管不到位的问题.

3) 从准则层面上,**B**₁,**B**₂和**B**₄属于一般风险,其比例在35%~40%之间,**B**₃,**B**₅属于一般风险,其 比例分别为43%,49%,即在组织、合同、沟通、目标和采购层五个维度上;采购层属于一般风险的比例 最大.因此,做好采购管理是 Z项目成功的关键,其次是沟通层面.

4)结合权重系数分析, Z项目的多业主或代建企业要降低代建制多项目管理的风险, 就应该在侧 重于采购和目标控制管理的同时, 兼顾对组织、合同和沟通方面的管理.目标控制在 Z 项目中并不是风 险最大的层面, 可能是由于目标控制在执行上达到了良好的效果, 做好进度、质量和成本三大目标的控 制依旧是降低风险的有效措施.

5 结束语

代建制下的多项目在管理过程中可能出现的风险复杂且多样化,如何正确处理影响代建制多项目 管理风险的各种指标因素,构建能够准确评估风险程度的预警机制,成为此项研究中有待解决的首要问 题.文中尝试将结构方程模型得到的权重系数与模糊综合评价法结合,对代建制多项目管理风险进行 "量化"评估,直观地反映代建制多项目管理的风险程度与风险因素,从而为决策者和管理者对代建制多 项目的风险管理提出有益的参考依据和建议.但是,文中还存在一些不足,如由于结构方程模型的局限, 本研究并不能进行风险预测.此外,文中建构的模型迁就于问卷,模型形式的设定可能有失偏颇,对代建 制多项目管理风险评价研究还有待更深入的分析.

参考文献:

- [1] 孙军,黄丹.多项目管理及其应用实例探讨[J]. 商场现代化,2009,564(3):87.
- [2] 王雪青,刘姗姗,郭晓博.基于模糊层次分析法的代建制企业风险评价[J].北京理工大学学报:社会科学版,2008,

10(3):73-77.

- [3] 郑树荣,候旭光.项目代建制下利益主体面临的风险与对策研究[J].改革与战略,2008,24(12):53-56.
- [4] 陈志华,成虎,周红.代建制的风险分析与控制策略[J]. 经济问题,2006(4):26-27.
- [5] 王爽,宋金波,李铮,等.政府投资项目代建制的关键风险研究[J].项目管理技术,2013,11(1):17-21.
- [6] 戴大双,李铮,王东波.基于多案例的代建制项目关键风险识别研究[J].管理案例研究与评论,2010,3(6):460-468.
- [7] 黄喜兵,苏文乾.基于委托代理的代建风险规避研究[J].科技进步与对策,2010,27(19):44-47.
- [8] 谢朦,倪国栋,王建平.基于模糊层次分析法的代建单位风险评价研究[J].工程管理学报,2010,24(3):262-266.
- [9] 张志伟,李景霞.代建制项目风险的模糊综合评价[J].经营管理者,2010(19):194-195.
- [10] 方俊,刘俊. 基于 BP 神经网络的政府投资工程代建风险分析[J]. 武汉理工大学学报:信息与管理工程版,2007,29 (6):89-92.
- [11] 王爱领,孙少楠.基于熵度量法的代建制项目风险评价研究[J].中国管理信息化,2009,12(9):108-111.
- [12] 祁神军,王玉芳,张云波,等.基于结构方程模型的代建制多项目管理风险分析[J].科技进步与对策,2013(23):68-72.
- [13] BENTLER P M. Comparative fit indexes in structural models[J]. Psychlogical Bulltin, 1990, 107(2);238-246.
- [14] 苏为华. 模糊分类综合评价中的识别原则问题研究[J]. 商业经济与管理,2001,117(7):39-42.

Risk Assessment of Multi-Project Management under Agent Construction System Management Mode

XIANG Jian-ping, WANG Yu-fang, ZHANG Yun-bo, QI Shen-jun

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: To investigate the multi-project management problem agented by the same agent-construction organization for many owners, thirty two risk factors are proposed by the expert interview method and literatures, considering the organization, contract, communication, goal control and purchase. Adopting structural equation model method and the risk assessment system of agent construction multi-project management, 28 key risk factors are obtained; the path coefficients of structural equation model are used as index weight, and combining with the fuzzy comprehensive evaluation method, the multi-agent system project management risk is assessed quantitatively. The results show that the multi-agent system project management risk.

Keywords: agent construction system; multi-project management; structural equation model; fuzzy comprehensive evaluation; risk assessment

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)

文章编号:1000-5013(2014)05-0587-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2014.05.0587

考虑中间主应力与约束损失的 深埋圆形隧道围岩特征曲线分析

黄清祥,林从谋,黄逸群,林大炜

(华侨大学 岩土工程研究所, 福建 厦门 361021)

摘要: 提出基于统一强度理论和非相关联流动法则,推导同时考虑中间主应力和约束损失两种因素作用下的围岩弹塑性应力-位移解析解.结合算例,分析中间主应力和约束损失对围岩特征曲线的影响规律.结果表明:考虑中间主应力的影响,能够充分发挥围岩的强度;考虑约束损失的影响,计算得到的围岩塑性区径向位移值减小,说明在利用围岩特征曲线进行支护设计时,同时考虑以上两种因素,能够取得较好的经济效益. 关键词: 隧道工程;围岩特征曲线;统一强度理论;约束损失;中间主应力 中图分类号: U 451 **文献标志码:** A

深埋圆形隧道开挖的围岩特征曲线一般采用平面应变假设分析^[1]. 在弹塑性应力-位移求解时,只 考虑平面内的 2 个主应力 σ_0 , σ_r ,而不考虑纵向中间主应力 σ_z 的影响,与实际情况必然存在误差. 许东俊 等^[2-3]通过岩石试验研究指出考虑 σ_z 影响,岩石强度可增大 30%或 14%~44%. 在深埋圆形隧道围岩 特征曲线分析中,考虑 σ_z 影响能充分发挥岩石强度的潜能,提高经济效益;引入约束损失 λ ^[4](指距开挖 面一定距离处的径向位移值与径向位移最大值之比, $0 \leq \lambda \leq 1$)能够考虑隧道开挖的空间效应影响,得到 隧道围岩的三维应力-位移实际变化情况,但许多研究者只考虑 σ_z 与 λ 中的一个因素. 张常光等^[5]推导 了考虑 σ_z 、围岩软化、剪胀和塑性区较小弹性模量等综合因素影响的深埋圆形岩石隧道围岩特征曲线解 析解;刘志钦等^[6]推导了考虑 σ_z 和剪胀特性的深埋圆形巷道塑性区应力-位移解析式;余东明等^[7]推导 出考虑 σ_z 的横观各向同性的深埋圆形隧道围岩塑性区应力-位移解析式,但忽略了考虑 λ 的影响. 李煜 舲等^[1]基于 Mohr-Coulomb强度准则,考虑 λ 的影响,通过外显分析法得到围岩特征曲线,但忽略了考 虑 σ_z 的影响.本文基于统一强度理论,推导同时考虑 σ_z 和 λ 影响的围岩弹塑性应力-位移解析解,并结 合实际算例,分析参数 b(指反应 σ_z 作用的权系数, $0 \leq b \leq 1$)和是否考虑 λ 对围岩特征曲线的影响规律.

1 统一强度理论

对于岩石类材料,其统一强度理论^[8]有如下关系:

当
$$\sigma_2 \leqslant \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi$$
 时,有

$$F = \sigma_1 \leqslant \frac{b\sigma_2 + \sigma_3}{1+b} \cdot K_{\varphi} = \sigma_c; \qquad (1a)$$

当 $\sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi$ 时,有

$$F' = \frac{\sigma_1 + b\sigma_2}{1 + b} - \sigma_3 \cdot K_{\varphi} = \sigma_c.$$
(1b)

上式中:b为反应中间主应力 σ_z 作用的权系数, $0 \leq b \leq 1$; φ 为岩石内摩擦角;c为岩石黏聚力; K_{φ} , σ_c 分

收稿日期: 2014-03-17

通信作者: 林从谋(1957-),男,教授,主要从事隧道与岩土工程设计与施工技术的研究. E-mail: cmlin@hqu. edu. cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278208);福建省交通科技发展基金资助项目(200910)

别为 Mohr-Coulomb 强度包络线斜率和岩石单轴抗压强度, $K_{\varphi} = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}, \sigma_{e} = \frac{2c\cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$

2 围岩弹塑性应力和位移解

2.1 考虑约束损失λ的影响

将统一强度理论作为岩体屈服准则来考虑中间主应力 σ 的影响,并通过引入约束损失 λ 来考虑隧 道开挖的空间效应影响,同时,结合2种因素的作用,推导在平面应变问题 $\begin{tabular}{c} \begin{tabular}{c} \begin{tab$ 中围岩应力、位移的解析解.

假设深埋圆形隧道处于均质、连续、各向同性的围岩体中,初始应力大 小为 σ_0 ,侧压力系数K=1,隧道半径为R,塑性区半径 R_0 .按平面应变问题 分析,其计算简图如图1所示.

2.1.1 弹性变形阶段分析

1) 平衡方程(应力边界条件:r = R时, $\sigma_r = 0$; $r \rightarrow \infty$ 时, $\sigma_r = \sigma_0$)为

$$\frac{\sigma_{\rm r}}{r} + \frac{\sigma_{\rm r} - \sigma_{\theta}}{r} = 0.$$
(2)
^{图 1} 弹塑性分析计算简图
Fig. 1 Calculation diagram of

2) 几何方程为

$$\epsilon_r = \frac{\mathrm{d}u_r}{\mathrm{d}r}, \qquad \epsilon_{\theta} = \frac{u_r}{r}.$$
(3)

3) 物理方程为

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{1+\mu}{E} [(1-\mu)\sigma_{\theta} - \mu\sigma_{r}],$$

$$\varepsilon_{r} = \frac{1+\mu}{E} [(1-\mu)\sigma_{r} - \mu\sigma_{\theta}].$$
(4)

式(2)~(4)中:r为到隧道圆心的距离: ϵ_r 和 ϵ_0 分别为径向应变和切向应变: u_r 为径向位移;E为弹性模 量;µ为泊松比.

隧道在掘进过程中,在开挖面空间效应影响范围-4R < Z < 4R内,引入围岩约束损失 λ 的影响,联 立式(2)~(4),得深埋圆形隧道的应力和位移为

$$\sigma_{\rm r} = \left[1 - \lambda \left(\frac{R}{r}\right)^2\right] \sigma_0, \qquad (5)$$

$$\sigma_{\theta} = \left[1 + \lambda \left(\frac{R}{r}\right)^{2}\right] \sigma_{0}, \qquad (6)$$

$$u_{\rm r} = \lambda \frac{\sigma_0 R}{2G} \frac{R}{r}.$$
(7)

式(7)中:G为剪切模量,2G=E/(1+ μ).

由于弹性区应力、位移大小与围岩屈服准则无关,故式(5)~(7)与李煜舲[1]的计算结果一致. 2.1.2 塑性变形阶段分析 假设隧道主应力存在 $\sigma_0 = \sigma_1 < \sigma_2 = \sigma_z < \sigma_3 = \sigma_r$ 的关系, 塑性区在纵向 Z方 向上的体应变为 $\varepsilon_r = 0$ 时,满足 $\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}, \sigma_2 \ge \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi$ 的条件,则岩体屈服强度采用式 (1b)计算.

整理式(1b)得

$$F' = \sigma_1 - \sigma_3 \cdot \alpha - \beta \cdot \sigma_c = 0.$$
(8)

式(8)中: $\alpha = \frac{2(1+b)K_{\varphi}-b}{2+b}; \beta = \frac{2(1+b)}{2+b}.$

在无衬砌支护体系下,当隧道开挖进尺一段距离后,离开挖面距离越大的围岩断面,因受空间效应 约束减弱,约束损失λ呈递增变化,围岩逐渐达到统一强度理论屈服准则时(即达到弹性极限状态),之 后围岩开始进入塑性变形阶段.将式(5),(6)代入式(8),得到约束损失弹性极限值λ。,即

$$\lambda_{e} = \frac{1+b}{1+K_{\varphi}+bK_{\varphi}}(\frac{\sigma_{e}}{\sigma_{0}}+K_{\varphi}-1).$$
(9)



elastic-plastic analysis



将破坏准则式(8)代入平衡方程式(2),由弹性区与塑性区径向应力 σ_r边界条件的连续性,在围岩 弹塑性区交界 *r*=*R*_p 处积分后,可得深埋圆形隧道在塑性区的径向和切向应力分别为

$$\sigma_{\rm R} = \frac{\sigma_0}{\alpha - 1} \cdot \left[2\lambda_{\rm e} \left(\frac{R}{R_{\rm p}} \right)^{\alpha - 1} - \frac{\beta \sigma_{\rm c}}{\sigma_0} \right], \tag{10}$$

$$\sigma_{\theta} = \alpha \sigma_{\mathrm{R}} + \beta \sigma_{\mathrm{c}}. \tag{11}$$

塑性区半径 R_p 为

$$\frac{R_{\rm p}}{R} = \left\{ \frac{2\lambda_{\rm e}}{(\alpha+1)\lambda_{\rm e} - (\alpha-1)\lambda} \right\}^{1/(\alpha-1)}.$$
(12)

选择塑性势非相关联流动法则,在隧道开挖面 r=R 处,隧道塑性径向位移^[1]为

$$U_{\rm R} = \lambda_{\rm e} \, \frac{\sigma_0 R}{2G} (\frac{R_{\rm p}}{R})^{K_{\psi}+1}. \tag{13}$$

式(13)中: ϕ 为膨胀角; K_{ϕ} =tan²(45°+ $\phi/2$);当 $\phi \neq \varphi$ 时,为非相关联流动法则.

2.2 不考虑约束损失λ的影响

根据胡小荣等[8]基于统一强度理论在巷道围岩弹塑性分析可知

$$\sigma_{\rm R}^{\rm p} = \cot \varphi \left[\left(\frac{r}{R} \right)^{\kappa_1} - 1 \right], \tag{14}$$

$$\sigma_{\rm p} = R \left[\frac{2(\sigma_0 + K_2/K_1)}{(2K_2/K_1 + K_2)} \right]^{1/K_1}, \qquad (15)$$

$$U_{\rm R} = \frac{(\sigma_0 - \sigma_{\rm R}^{\rm p})R_{\rm p}^2}{2Gr}.$$
(16)

 $\vec{\mathfrak{X}}(14) \sim (16) \ \oplus : R \leqslant r \leqslant R_{\mathfrak{p}}; K_1 = \frac{4(1+b)\sin\varphi}{(2+b)(1-\sin\varphi)}; K_2 = \frac{4c(1+b)\cos\varphi}{(2+b)(1-\sin\varphi)}.$

3 算例与分析

3.1 参数选取

假设深埋圆形隧道开挖半径 R=2.5 m,初始应力 $\sigma_0 = 20 \text{ MPa}$,且无衬砌支护作用.选取文献[9-10]中的围岩物理参数,如表1所示.表1中: φ 为摩擦角;c为黏聚力; σ_c 为岩体单轴抗压强度;E为岩体 变形模量; μ 为泊松比; ϕ 为膨胀角.在分析中取一般岩体质量等级参数为例计算.

3.2 中间主应力 σ₂ 的影响

 在一般围岩条件下,隧道开挖后,由弹性变形阶段向塑性 变形阶段临界点的约束损失弹性极限值 λ。与考虑中间主应力 σ_z 的权系数 b 的关系,如图 2 所示.

由图 2 可知: λ_e 随着 b 值增大而增大,且两者呈非线性关系; 当 b=0 时,统一强度屈服准则变为 Mohr-Coulomb 屈服准则形 式;当 b=1 时, λ_e 较 b=0 时增大了 11.5%.表明采用考虑中间主 应力 σ_z 作用的统一强度理论准则比 Mohr-Coulomb 屈服准则, 更能发挥围岩强度.

Tab. 1 Strength parameters of rock							
mass in different quality							
岩体质量	很差	一般	很好				
φ	24	33	46				
c/MPa	0.55	3.5	13				
$\sigma_{ m c}/{ m MPa}$	1.7	13	64.8				
E/MPa	1 400	9 000	42 000				
μ	0.3	0.25	0.2				
ψ	0	4	11.5				

表1 不同质量岩体的强度参数

2)在一般围岩条件下,取不同权系数 b值,分析 R_p/R 与 λ
 的关系,结果如图 3 所示.在权系数 b 值为 0,0.5,1.0 时,计算得到围岩约束损失弹性极限值 λ_e,分别为 0.69,0.75,0.78.

由图 3 可知:当约束损失 $\lambda \leq \lambda_e$ 时,塑性区半径 R_p 与隧道开挖半径 R 的比值都为 1;当 $\lambda \geq \lambda_e$ 时,围 岩进入塑性变形阶段,塑性区半径随约束损失 λ 增大而增大,且两者呈非线性关系;当 b=1 时,围岩塑 性区半径最大值较 b=0 时的减小 12.63%,随着 b 的增大 R_p/R 与 λ 关系曲线右移,说明围岩在相同约 束损失 λ 条件下,考虑中间主应力计算得出的围岩塑性区半径随之减小.

3.3 中间主应力 σ₂ 与约束损失 λ 对围岩特征曲线的影响

1) 在一般围岩条件下,取权系数分别为 b 为 0,0.5,1.0 时,考虑中间主应力 σ₂ 对深埋圆形隧道围



岩特征曲线的影响规律,如图 4 所示.图 4 中: $U_{\rm R}$ 为最大径向位移.

由图 4 可知:当约束损失 $\lambda \leq \lambda_e$ 时,围岩径向位移值与 σ_R/σ_0 呈线性关系, b 的取值与围岩特征曲线 无关;当约束损失 $\lambda \geq \lambda_e$ 时,围岩径向位移值与 σ_R/σ_0 呈非线性关系,随着 b 的增大,围岩特征曲线斜率 增大,围岩在发生相同径向位移时 σ_R/σ_0 减小,即对应的衬砌支护应力减小.说明若采用 Mohr-Coulomb 屈服准则,计算得到的衬砌支护应力偏大,设计偏保守.根据实际工程需要,考虑中间主应力 σ_z 的影响, 在围岩支护设计中会取得一定的经济效益.

对比是否考虑中间主应力 σ_z 的影响,计算的最大径向位移值 U_{R} .结果表明:当b=0,0.5,1.0 时, U_{R} 分别为 9.56,8.25,7.60.

 为比较是否考虑约束损失λ对深埋圆形隧道受力计算分析的影响,在一般围岩条件下,利用式(10),(13)和胡小荣等^[8]得到的式(14),(16),绘制围岩特征曲线进行对比分析,如图5所示.图5中:取 b=0.5.



由图 5 可知:考虑隧道约束损失λ时计算得到的塑性区径向位移最大值较不考虑时减小 22.24%, 且围岩特征曲线左移,表明在相同 σ_R/σ₀下,围岩变形越小.故在实际工程若采用平面应变问题计算,不 考虑约束损失λ的影响得到的围岩变形结果偏大,围岩支护设计偏保守.

4 结束语

针对深埋圆形隧道,基于统一强度理论,同时考虑中间主应力和约束损失两种因素,推导得到围岩 特征曲线的弹塑性方程解析解.对上述2种因素对围岩特征曲线的影响规律进行对比分析,得出以下3 个主要结论.

1)约束损失极限值λ。随着b的增大而增大,围岩塑性区半径随着b的增大而减小;且b=1.0时, 比b=0时的围岩约束损失弹性极限值λ。增大11.5%,围岩塑性区半径最大值减小12.63%,说明考虑 中间主应力的影响有利于发挥围岩自身的强度.

2) 深埋圆形隧道在弹性变形阶段,权系数 b 的取值对围岩特征曲线无关;在塑形变形阶段,随着 b 的增大,围岩特征曲线斜率增大.

3)考虑隧道约束损失λ时,计算得到的塑性区径向位移最大值较不考虑时减小22.24%,且围岩特 征曲线左移.

根据实际工程的情况,同时考虑中间主应力 σ₂ 和约束损失 λ 更接近于实际围岩在开挖过程中应力 应变的受力特点,在围岩支护设计中更能达到优化方案.

参考文献:

- [1] 李煜舲,李文元.隧道开挖地层反应曲线的外显分析[J].岩石力学与工程学报,2010,29(2):3685-3692.
- [2] 许东俊, 耿乃光. 岩石强度随中间主应力变化规律[J]. 固体力学学报, 1985(1): 72-80.
- [3] 徐德欣. 岩石中间主应力效应的理论分析[J]. 山地学报, 2003, 21(2): 246-251.
- [4] 李煜舲,林銘益,许文贵.三维有限元分析隧道开挖收敛损失与纵剖面变形曲线关系研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(2):258-265.
- [5] 张常光,赵均海,张庆贺.基于统一强度理论的深埋圆形岩石隧道收敛限制分析[J].岩土工程学报,2012,34(1): 110-115.
- [6] 刘志钦,余东明.考虑中间主应力和剪胀特性的深埋圆巷弹塑性应力位移解[J].工程力学,2012,29(8):289-296.
- [7] 余东明,姚海林,卢正,等.考虑中间主应力的横观各向同性深埋圆隧弹塑性解[J].岩土工程学报,2012,34(10): 1850-1857.
- [8] 胡小荣,俞茂宏.统一强度理论及其在巷道围岩弹塑性分析中的应用[J].中国有色金属学报,2002,12(5):1021-1025.
- [9] 唐俊雄. 隧道收敛约束法的理论研究与应用[D]. 湖北:华中科技大学,2009:49.
- [10] HOEK E, BROWN E T. Practical estimates of rock mass strength[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(8):1165-1186.

Ground Reaction Analysis of Deep-Buried Circular Tunnels Considering Intermediate Principal Stress and Confinement Loss

HUANG Qing-xiang, LIN Cong-mou, HUANG Yi-qun, LIN Da-wei

(Institute of Geotechnical Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Based on the unified strength theory and a non-associated flow rule, an analytical solution for elastic-plastic of a deep circular rock tunnel is presented taking into consideration both effects of the intermediate principal stress and confinement loss factor. In combination with a calculation example, the impacts of these two factors on the ground reaction curve from are studied. The results show: consideration of the impact of intermediate principal stress is conducive to develop the strength of the surrounding rock; considering the impact of the constraint loss, the radial displacement of surrounding rock decrease. Consequently, when two factors are considered, using the characteristic curve of surrounding rock for designation, benign economic benefit can be achieved.

Keywords: tunneling engineering; ground reaction curve; unified strength theory; confinement loss; intermediate principal stress

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)

文章编号:1000-5013(2014)05-0592-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2014.05.0592

钢绞线搭接锚固性能试验

李立文1,郭子雄1,黄群贤1,陈建华2,赖有泉2

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;
 2. 福建省第一公路工程公司, 福建 泉州 362000)

摘要: 针对目前钢绞线网片-聚合物砂浆加固技术中存在搭接,提出相向搭接和对扣搭接两种搭接方式,通 过对拉试验研究这两种搭接方式的搭接锚固性能,包括搭接方式、钢绞线直径和涂抹聚合物砂浆.试验结果表 明:1)采用配套铝扣锚固不会造成锚固位置钢绞线的局部损伤,所有试件的破坏位置均不在铝扣锚固位置; 2)两种搭接方式均具有良好的搭接效果,但由于局部锚固导致钢绞线应力不均匀现象等影响,试件承载能力 有10%~20%的损失量,因此,搭接位置应避开内力最大处;3)涂抹聚合物砂浆的试件和对扣搭接的试件钢 绞线未出现相对滑移,而相向搭接试件出现一定的相对滑移.

关键词: 钢绞线; 搭接性能; 聚合物砂浆; 铝扣

中图分类号: TU 4 文献标志码: A

钢绞线网片-聚合物砂浆加固技术是一种新型的加固技术,其将钢铰线网片敷设于被加固构件的受 拉部位,然后在钢铰线网片上涂抹聚合物砂浆用于加固构件.由于聚合物砂浆对砖砌体或混凝土材料具 有良好渗透性,使钢铰线网片与原结构构件变形协调、共同工作,有效提高加固构件的承载能力和刚度. 与传统加固方法相比,该加固技术具有高效、加固快捷和加固后不影响观瞻等诸多优势,因而在实际工 程中得到广泛应用^[1-2].目前,已有一些学者对该技术进行研究^[3-12],成果主要集中在加固机理和加固效 果,而对该加固技术的构造措施和施工工艺的研究相对较少.考虑到钢绞线-聚合物砂浆在受弯加固应 用中,由于受弯构件跨度较大,钢绞线往往由于长度不够有搭接的需求,但是在这方面尚未有研究,因 此,有必要对钢绞线的搭接性能开展试验研究.本文针对目前钢绞线网片-聚合物砂浆加固技术中存在 搭接需求,提出两种搭接方式,通过对拉试验对这两种搭接方式的搭接锚固性能开展试验研究.

1 试验概况

在钢绞网片-聚合物砂浆加固技术中,往往存在钢绞线长度不够需要进行搭接的问题,设计了两种 钢绞线搭接方式,分别为相向搭接和对扣搭接,搭接方式如图1所示.



(a) 相向搭接

(b) 对扣搭接

图 1 钢绞线搭接方式 Fig. 1 Lap types of strand

收稿日期: 2014-04-01

- 通信作者: 郭子雄(1967-),男,教授,主要从事工程结构抗震减灾的研究. E-mail:guozxcy@hqu. edu. cn.
- **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51208219); 福建省科技计划重点项目(2012Y0051); 福建省科技重大项目 (2013Y4006)

采用对拉试验研究两种搭接方式的搭接性能.试验共有 30 个试件,每个试件由两根钢绞线搭接而成,研究参数包括搭接方式、钢绞线直径和涂抹聚合物砂浆.涂抹聚合砂浆的每个参数有 1 个试件,其余的每个研究参数均有 3 个试件,各试件的试验参数如表 1 所示.表 1 中:D 为钢绞线直径;F_u为极限承载力;η为承载力损失量;搭接形式中,1 为相向搭接,2 为对扣搭接.在实际加固中,搭接区域需涂抹聚合物砂浆,且实际使用中钢绞线距离聚合物砂浆表面约 20 mm.为模拟真实的涂抹聚合物砂浆的效果, 有涂抹聚合物砂浆的试件按照工程上的实际情况进行设计,具体的聚合物砂浆涂抹方式,如图 2 所示.

		1			
编号	D/mm	搭接形式	聚合物砂浆类型	$F_{ m u}/{ m kN}$	$\eta/\%$
1-1-1	3.05	1	—	6.3	10.76
1-1-2	3.05	1	_	6.1	13.60
1-1-3	3.05	1	—	6.9	2.27
1-2-1	3.60	1	_	9.6	3.03
1-2-2	3.60	1	—	8.7	12.12
1-2-3	3.60	1	—	9.0	9.09
1-3-1	4.00	1	—	11.3	10.00
1-3-2	4.00	1	—	10.6	15.54
1-3-3	4.00	1	—	10.3	17.93
2-1-1	3.05	2	_	6.3	10.76
2-1-2	3.05	2	_	6.2	12.18
2-1-3	3.05	2	_	5.7	19.26
2-2-1	3.60	2	—	8.4	15.15
2-2-2	3.60	2	—	8.0	19.19
2-2-3	3.60	2	—	8.5	14.14
2-3-1	4.00	2	_	10.7	14.74
2-3-2	4.00	2	_	10.1	19.52
2-3-3	4.00	2	_	10.3	17.93
3-1	3.05	1	双组分	6.2	12.18
3-2	3.05	1	单组分	6.3	10.76
3-3	3.60	1	双组分	8.9	10.10
3-4	3.60	1	单组分	8.3	16.16
3-5	4.00	1	双组分	10.5	16.33
3-6	4.00	1	单组分	10.4	17.13
4-1	3.05	2	双组分	6.5	7.93
4-2	3.05	2	单组分	6.3	10.76
4-3	3.60	2	双组分	8.5	14.14
4-4	3.60	2	单组分	8.1	18.18
4-5	4.00	2	双组分	10.1	19.52
4-6	4.00	2	单组分	10.3	17.93

表1 试件参数及试验结果 Tab.1 Test parameters and results





(b) 剖面

图 2 聚合物砂浆试件示意 Fig. 2 Detail of polymer mortar specimen 试验采用 $6 \times 7 + 1$ WS 型镀锌钢绞线,其材料力学性能,如表 2 所示.表 2 中:D 为公称直径;d 为单 丝直径; F_b 为最小破坏力;A 为横截面面积; f_t 为抗拉强度.铝扣为钢绞线网片安装标准配件,铝扣大小

与钢绞线直径相匹配,直径为 3.05 的对应一种铝扣, 直径为 3.60,4.00 的对应另一种铝扣.通过专门设计 的挤压模具和液压钳对铝扣进行挤压,使铝扣与钢丝 绳挤压成一体,如图 3 所示.钢绞线的搭接长度为 100 mm.试验参数如表 1 所示.试验采用的聚合物砂浆有 单组分和双组分两种,双组份聚合物砂浆实测强度为 53.5 MPa,单组分聚合物砂浆实测强度为 47.1 MPa.







properties of strand

D/mm	d/mm	$F_{ m b}/{ m kN}$	A/mm^2	$f_{\rm t}/{\rm MPa}$
3.05	0.34	7.06	4.45	1 586
3.60	0.40	9.90	6.16	1 607
4.00	0.44	12.55	7.45	1 684



(b) 液压钳

图 3 专业器具 Fig. 3 Test equipments

2 加载制度及量测方案

试验采用对拉的加载方式、加载装置,如图4所示.试件加载端采用钢套管注入植筋胶实现钢套管

与钢绞线连接,避免钢绞线局部损伤.首先固定两端钢套管,拉力采用手动液压穿心千斤顶进行施加.试验中,拉力控制在 1.5~2.0 kN•min⁻¹,直 至钢绞线拉断.

试验的主要量测内容:1)通过介于穿心千斤 顶和固定端板之间力传感器对拉力进行量测;2) 采用预装在钢绞线上的引伸仪对钢绞线的相对滑 移进行量测.引伸仪的测量标距为150 mm.所有 数据均采用 DH3816 数据采集系统采集.

3 试验结果及分析

钢绞线对拉试验结果,如表1所示,两种搭接 方式的试件最终均出现钢绞线被拉断,典型破坏 形态,如图5所示.由图5可知:未涂抹聚合物砂





浆的相向搭接试件,钢绞线拉断位置在距离铝扣 30~40 mm,对扣搭接的试件钢绞线在对扣位置被拉 断,表明采用专门的挤压模具对钢绞线和铝扣进行锚固不会对钢绞线产生局部损伤.由表 1 可知:两种 搭接方式的极限荷载相差不大,均出现一定承载力损失,极限承载力损失量均在 20%以内.对扣搭接试 件在对扣位置由于两根钢绞线的互相挤压导致钢绞线局部弯折受损,试件最终在对扣位置被拉断,试件 的极限承载力小于钢绞线的最小破断力.相向搭接试件由于铝扣对钢绞线的局部锚固作用,钢绞线在受 拉状态下出现应力不均匀现象,使得极限承载力也小于钢绞线的最小破断力.

有涂抹聚合物砂浆的试件也由于聚合物砂浆对钢绞线局部锚固作用,出现钢绞线局部应力不均匀 现象,其破坏位置在聚合物砂浆端部1 cm 位置处钢绞线被拉断,极限承载力也有所下降.其破坏形态如



(a) 相对搭接试件破坏形态

(b) 对扣搭接试件破坏形态
 图 5 典型破坏形态
 Fig. 5 Detail of lap joint failure pattern

(c) 涂抹砂浆试件破坏形态

试验采用引伸仪对钢绞线的相对滑移量进行量测.涂抹聚合物砂浆的试件和对扣搭接的试件钢绞

线未出现相对滑移,而相向搭接试件出现一定的相对滑移,其 典型相对滑移-荷载曲线如图 6 所示.由图 6 可知:各试件的起 滑荷载相差不大,起滑荷载在 4~6 kN,滑移量随荷载的增大 而变大,极限滑移量在 1.5~2.3 mm,表明铝扣通过挤压对钢 绞线具有较好的锚固效果.同时,所有试件破坏时并未达到最 小破断力,但承载力损失量均在 20%以内.因此,钢绞线搭接 部位不应在受力较大处搭接,可在受力相对较小处进行搭接.



4 结束语

通过钢绞线搭接性能对拉试验可以得到以下4个结论.

采用配套铝扣和挤压模具对钢绞线进行锚固不会造成
 钢绞线的局部损伤,所有试件钢绞线拉断位置均未出现在锚
 固处。

滑移-荷载曲线 Fig. 6 Relative slippage vs loads for the strand with opposite lap

2)相向搭接试件由于铝扣对钢绞线局部锚固作用,使钢绞线在受拉状态下出现应力不均匀现象, 使得极限承载力小于钢绞线的最小破断力.而对扣搭接试件由于在对扣位置两根钢绞线的互相挤压弯 折导致钢绞线局部受损,极限承载力也出现损失.

3)涂抹聚合物砂浆的试件和对扣搭接的试件钢绞线未出现相对滑移,而相向搭接试件出现一定的 相对滑移.

4)所有试件的承载力损失量均在 20%以内,钢绞线搭接部位不应在受力较大处搭接,可在受力相 对较小处进行搭接.

参考文献:

- [1] 王亚勇,姚秋来,巩正光,等.高强钢绞线网-聚合物砂浆在郑成功纪念馆加固工程中的应用[J].建筑结构,2005,35 (8):40-42.
- [2] 龚文斌,胡其龙,龚锐.高强钢绞线网-聚合物砂浆加固技术在南京某厂房改造中的应用[J].建筑结构,2007,37(7): 47-49.
- [3] 聂建国,蔡奇,张天申,等.高强不锈钢绞线网-渗透性聚合砂浆抗剪加固的试验研究[J].建筑结构学报,2005,26 (2):10-17.
- [4] 聂建国,王寒冰,张天申,等.高强不锈钢绞线网-渗透性聚合砂浆抗弯加固的试验研究[J].建筑结构学报,2005,26 (2):1-9.
- [5] 姚志华.高强钢绞线网-聚合物砂浆复合面层加固 RC 梁的研究[D].北京:北京科技大学,2008:16-81.
- [6] 吴刚,蒋剑彪,吴智深.预应力高强钢丝绳抗弯加固钢筋混凝土梁的试验研究[J].土木工程学报,2007,40(12):17-27.

- $\lceil 7 \rceil$ 阮爱兵.钢丝绳(钢绞线)网片-聚合物砂浆外加固层加固方法应用现状[J].福州大学学报:自然科学版,2013,41 (4):463-470.
- 曹忠民,李爱群,王亚勇.高强钢绞线网-聚合物砂浆加固技术的研究和应用[J].建筑技术,2007,8(6):3-4. [8]
- [9] 曹忠民,李爱群,王亚勇,等.高强钢绞线网-聚合物砂浆抗震加固框架梁柱节点的试验研究[J].建筑结构学报, 2006,27(4):10-15.
- [10] 郭彤,李爱群,姚秋来,等.钢绞线网片-聚合物砂浆加固钢筋混凝土箱梁试验[J].中国公路学报,2010,23(2):36-42.
- [11] 王军辉,徐向东,贾留东.高强钢丝-聚合物砂浆加固梁抗剪性能的研究[J].山东建筑大学学报,2008,23(4):293-296.
- 卢长福.高强钢绞线网-聚合物砂浆加固钢筋混凝土梁抗剪性能试验研究[D].南昌:华东交通大学,2010:12-58. $\lceil 12 \rceil$

Experimental Study on Lap Anchorage Performance of Strand

LI Li-wen¹, GUO Zi-xiong¹, HUANG Qun-xian¹, CHEN Jian-hua², LAI You-quan²

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 2. Fujian First Highway Engineering Company, Quanzhou 362000, China)

Abstract: For to the lap in the strengthening technique with strand mesh-polymer mortar, two kinds of lap jointing type are proposed, then the lap anchorage performance of these lap jointing types with different parameters are investigated, including lap jointing type, strand diameter and daubing polymer mortar. The test result shows: 1) the aluminum anchor does not results in local damage of strand, no damage happens on anchorage position; 2) two lap jointing types has good lap anchorage performance, but because of non-uniform stress, the bearing capacity decreases by $10\% \sim 20\%$, so the lap position would avoid the position with maximal internal force; 3) the relative slip dies not occur in the test specimens of daubing polymer mortar and buckle lap, relative slap occurs in the test specimens of opposite lap.

Keywords: strand; lap anchorage performance; ploymer mortar; aluminium anchor

(责任编辑: 钱筠 英文审校:方德平) **文章编号:**1000-5013(2014)05-0597-04

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2014.05.0597

耦合的修正变系数 KdV 方程的非线性波解

温振庶

(华侨大学 数学科学学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 研究一个带变系数的耦合修正 KdV 方程的非线性波解,利用 *F*-展开法获得多种非线性波解,这些解 包括孤立波解、扭波解(反扭波解)、爆破解和周期爆破解.带变系数的耦合修正 KdV 方程具有扭波解(反扭波 解),而对于带变系数的耦合 KdV 方程,却未得到.这个结果与修正 KdV 方程和 KdV 方程的情形是类似的. 关键词: KdV 方程;非线性波解;变系数;*F*-展开法 中图分类号: O 175.29 **文献标志码:** A

1 预备知识

自从著名的 KdV 方程^[1] u_t +6 uu_x + u_{xxx} =0 被引入后,它及其变体得到了人们的广泛关注. KdV 方 程首先被推广为修正 KdV(mKdV)方程^[2-3] u_t + au^2u_x + u_{xxx} =0,进一步发展为高阶 KdV 方程^[4] u_t + au^nu_x + u_{xxx} =0,甚至成为耦合的 KdV 方程^[5].

最近,带变系数的非线性微分方程^[6-7]引起了人们的广泛关注.文献[6]研究了带变系数的 KdV 方 程 $u_t + \alpha(t)uu_x + \gamma(t)u_{xxx} = 0$;文献[8]进一步把文献[6]拓展成带变系数的修正 KdV 方程 $u_t + \alpha(t)u_x - \beta(t)u^2u_x + \gamma(t)u_{xxx} = 0$;且文献[9]通过一些新的变换进一步研究了文献[8]方程.此外,文献[10]引入 了一个带变系数的耦合 KdV 方程,即

$$\begin{array}{l} u_t + \alpha(t) u u_x + \beta(t) v v_x + \gamma(t) u_{xxx} = 0, \\ v_t + \delta(t) u v_x + \gamma(t) v_{xxx} = 0. \end{array}$$

$$(1)$$

式(1)中: $\alpha(t)$, $\beta(t)$, $\gamma(t)$ 和 $\delta(t)$ 满足一定的条件.

从把 KdV 方程拓展成 mKdV 方程的角度来看,考虑把方程(1) 拓展成带变系数的耦合修正 KdV 方程,即

$$u_t + \alpha(t)u^2 u_x + \beta(t)v^2 v_x + \gamma(t)u_{xxx} = 0,$$

$$v_t + \delta(t)u^2 v_x + \gamma(t)v_{xxx} = 0.$$
(2)

式(2)中: $\alpha(t)$, $\beta(t)$, $\gamma(t)$ 和 $\delta(t)$ 都是仅关于变量 t 的函数,并且假定它们满足以下条件,即

$$t) \neq 0, \quad \delta(t) \neq 0, \quad \delta(t) - \alpha(t) = \sigma^{3} \beta(t), \quad \gamma(t) = \kappa \delta(t).$$
(3)

式(3)中:σ和κ都是常数.

本文主要研究方程(2)的非线性波解.

β(

2 方程(2)的求解

利用 F-展开法获得方程(2)的非线性波解. 对方程(2)作替换
$$u = f(\xi), v = g(\xi), \xi = \lambda x + \mu(t),$$
得到
 $\mu'(t)f' + \lambda_{\alpha}(t)f^{2}f' + \lambda\beta(t)g^{2}g' + \lambda^{3}\gamma(t)f''' = 0,$
 $\mu'(t)g' + \lambda\delta(t)f^{2}g' + \lambda^{3}\gamma(t)g''' = 0.$
(4)

假定 $f(\xi)$ 和 $g(\xi)$ 可以展开成关于 $F(\xi)$ 的有限幂级数,即

收稿日期: 2014-02-28

通信作者: 温振庶(1984-),男,讲师,主要从事微分方程与动力系统的研究. E-mail:wenzhenshu@hqu. edu. cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11326163);华侨大学高层次人才科研启动项目(12BS223)

$$f(x,t) = \sum_{i=0}^{m} a_i F^i(\boldsymbol{\xi}), \qquad a_m \neq 0,$$
(5)

$$g(x,t) = \sum_{i=0}^{n} b_i F^i(\boldsymbol{\xi}), \qquad b_n \neq 0.$$
(6)

由式(7)可得到

$$F'F'' = q_2 FF' + 2q_4 F^3 F',$$

$$F'' = q_2 F + 2q_4 F^3,$$

$$F''' = q_2 F' + 6q_4 F^2 F'.$$
(8)

将式(5),(6)代入式(4)中,并考虑到关系式(8),根据 $f^2 f', g^2 g' = f''(g = f'')$ 之间的齐次平 衡,得到 m = n = 1,也就是说,式(5),(6)可以分别表示为

$$f(x,t) = a_0 + a_1 F(\xi), \qquad a_1 \neq 0,$$
 (9)

$$g(x,t) = b_0 + b_1 F(\xi), \qquad b_1 \neq 0.$$
 (10)

把式(9),(10)代入式(4)中,并利用关系式(7),(8),得到

$$(a_{1}\mu'(t) + \lambda a_{0}^{2}a_{1}\alpha(t) + \lambda b_{0}^{2}b_{1}\beta(t) + \lambda^{3}a_{1}q_{2}\gamma(t))F' + 2\lambda(a_{0}a_{1}^{2}\alpha(t) + b_{0}b_{1}^{2}\beta(t))FF' + \lambda(a_{1}^{3}\alpha(t) + b_{1}^{3}\beta(t) + 6\lambda^{2}a_{1}q_{4}\gamma(t))F^{2}F' = 0,$$
(11)

$$(b_1\mu'(t) + \lambda a_0^2 b_1 \delta(t) + \lambda^3 b_1 q_2 \gamma(t))F' + 2\lambda a_0 a_1 b_1 \delta(t)FF' +$$

$$\lambda(a_1^2 b_1 \delta(t) + 6\lambda^2 b_1 q_4 \gamma(t)) F^2 F^* = 0.$$
(12)

$$a_{1}\mu'(t) + \lambda a_{0}^{2}a_{1}\alpha(t) + \lambda b_{0}^{2}b_{1}\beta(t) + \lambda^{3}a_{1}q_{2}\gamma(t) = 0,$$

$$2\lambda(a_{0}a_{1}^{2}\alpha(t) + b_{0}b_{1}^{2}\beta(t)) = 0,$$

$$\lambda(a_{1}^{3}\alpha(t) + b_{1}^{3}\beta(t) + 6\lambda^{2}a_{1}q_{4}\gamma(t)) = 0,$$

$$b_{1}\mu'(t) + \lambda a_{0}^{2}b_{1}\delta(t) + \lambda^{3}b_{1}q_{2}\gamma(t) = 0,$$

$$2\lambda a_{0}a_{1}b_{1}\delta(t) = 0,$$
(13)

$$\lambda(a_1^2b_1\delta(t)+6\lambda^2b_1q_4\gamma(t))=0.$$

方程组(13)在条件(3)下的解为

$$a_0, b_0 = 0,$$
 (14)

$$a_1 = \pm \sqrt{-6\kappa \lambda^2 q_4}, \qquad b_1 = \sigma a_1. \tag{15}$$

此外,有

$$\mu(t) = -\lambda^3 q_2 \int_0^t \gamma(\tau) \mathrm{d} \tau + c.$$
(16)

式(16)中:c是任意常数.

把式(14)和(15)代入式(9)和(10),得到方程(2)的一般形式的解,即

$$u(x,t) = f(\xi) = \pm \sqrt{-6\kappa\lambda^2 q_4} F(\xi), \qquad v(x,t) = g(\xi) = \sigma f(\xi).$$

$$\vec{x}(17) + \kappa \pi q_4 \quad \text{if } \mathcal{E} \kappa \cdot q_4 \leq 0.$$

$$(17)$$

注1 对式(5),(6)尝试更一般的表达式,即令
$$f(x,t) = \sum_{i=-m_1}^{m_2} a_i F^i(\xi), a_{-m_1} \neq 0, a_{m_2} \neq 0, g(x,t) = \sum_{i=-m_1}^{n_2} b_i F^i(\xi), b_{-n_1} \neq 0, b_{n_2} \neq 0,$$
得到了同样的表达式(9)和(10).

3 方程(2)的非线性波解

根据 F-展开法与方程(7),如果 q_0 , q_2 和 q_4 分别取一些特殊的值, $F(\xi)$ 可以通过 Jacobian 椭圆函数 来表示,结果如表 1 所示. 从表 1 可知:其最后两列,即当 Jacobian 椭圆函数的模量(modulus) $k \rightarrow 0$ 或者

2014 年

(12)

k→1时,F(ξ)的极限,获得了方程(2)的多种形式的非线性波解,这些结果放在如下的定理中.

表 1 $F(\xi)$ 及在相应的 (q_0, q_2, q_4) 下 $F(\xi)$ 的极限

Tab. 1 Solution $F(\xi)$ and the limit of $F(\xi)$ under corresponding (q_0, q_2, q_4)

q_0	q_2	$oldsymbol{q}_4$	F	$\lim_{k \to 0} F$	$\lim_{k \to 1} F$
1	$-(1+k^2)$	k^2	$sn\xi,cd\xi$ = $cn\xi/dn\xi$	$\sin \xi, \cos \xi$	tanh <i>ξ</i> ,1
$1 - k^2$	$2k^2 - 1$	$-k^2$	$cn\xi$	$\cos \xi$	sec $h\xi$
$k^2 - 1$	$2-k^{2}$	-1	$dn\xi$	1	sec $h\xi$
k^2	$-(1+k^2)$	1	$ns\xi = (sn\xi)^{-1}, dc\xi = dn\xi/cn\xi$	$\csc \xi$, $\sec \xi$	$\coth\xi,1$
$-k^{2}$	$2k^2 - 1$	$1 - k^2$	$nc\xi = (cn\xi)^{-1}$	sec ξ	$\cosh \xi$
-1	$2-k^{2}$	$k^2 - 1$	$nd\xi = (dn\xi)^{-1}$	1	$\cosh \xi$
1	$2-k^{2}$	$1 - k^2$	$sc\xi = sn\xi/cn\xi$	tan <i>ξ</i>	$\sinh \xi$
1	$2k^2 - 1$	$-k^2(1-k^2)$	$sd{\xi}{=}sn{\xi}/dn{\xi}$	$\sin \xi$	$\sinh \xi$
$1 - k^2$	$2-k^{2}$	1	$cs\xi = cn\xi/sn\xi$	cot ξ	$\csc h\xi$
$-k^2(1-k^2)$	$2k^2 - 1$	1	$ds\xi = dn\xi/sn\xi$	$\csc \xi$	$\csc h\xi$

定理1 方程(2)有各种形式的非线性波解,且解的显式表达式如下4种情况.

1) 孤立波解

2) 扭波解(反扭波解)

$$u_{2}(x,t) = \pm \sqrt{-6\kappa\lambda^{2}q_{4}} \tanh(\lambda x + \mu(t)), \qquad v_{2}(x,t) = \sigma u_{2}(x,t).$$
(19)
$$\vdots (19) + \mu(t) \pm (16) + \eta \pm (q_{2} = -2, q_{4} = 1.$$

3) 爆破解

$$u_{3}(x,t) = \pm \sqrt{-6\kappa\lambda^{2}q_{4}} \coth(\lambda x + \mu(t)), \qquad v_{3}(x,t) = \sigma u_{3}(x,t).$$
(20)

式(20)中: $\mu(t)$ 在式(16)中可给出, $q_2 = -2, q_4 = 1, 以及$

$$u_{4}(x,t) = \pm \sqrt{-6\kappa\lambda^{2}q_{4}} \csc h(\lambda x + \mu(t)), \qquad v_{4}(x,t) = \sigma u_{4}(x,t).$$
(21)

式(21)中: $\mu(t)$ 在式(16)中可给出, $q_2=2, q_4=1$.

4) 周期爆破解

$$u_{5}(x,t) = \pm \sqrt{-6\kappa\lambda^{2}q_{4}} \tan(\lambda x + \mu(t)), \qquad v_{5}(x,t) = \sigma u_{5}(x,t).$$
(22)
$$\pm (22) + \mu(t) \pm (16) + \eta \pm (q_{2}) = 2, q_{4} = 1.$$

 $u_{6}(x,t) = \pm \sqrt{-6\kappa\lambda^{2}q_{4}}\cot(\lambda x + \mu(t)), \qquad v_{6}(x,t) = \sigma u_{6}(x,t).$ (23) $\vdots (23) \oplus \mu(t) \pm \pi i (16) \oplus \pi i \oplus \mu, q_{2} = 2, q_{4} = 1.$

$$u_{7}(x,t) = \pm \sqrt{-6\kappa\lambda^{2}q_{4}}\sec(\lambda x + \mu(t)), \qquad v_{7}(x,t) = \sigma u_{7}(x,t).$$
(24)
$$\pm (24) \pm \sigma = -1, \ \sigma = -1, \ \gamma =$$

式(24)中: $q_2 = -1, q_4 = 1, 以及$

$$u_{8}(x,t) = \pm \sqrt{-6\kappa\lambda^{2}q_{4}}\csc(\lambda x + \mu(t)), \qquad v_{8}(x,t) = \sigma u_{8}(x,t).$$
(25)
$$\vec{x}(25) \oplus q_{2} = -1, q_{4} = 1.$$

证明 由式(17)和表 1,容易证明定理 1.

注 2 由定理 1,方程(2)具有扭波解(反扭波解)(19),而方程(1)却未找到这样的解^[10],类似的结果也在 KdV 方程和 mKdV 方程中出现.

4 结束语

利用 F-展开法获得了一个带变系数的耦合的修正 KdV 方程,即方程(2)的多种非线性波解.这些 解包括孤立波解,扭波解(反扭波解),爆破解和周期爆破解.文献[3]利用微分方程定性理论与动力系统 分支方法^[11-15]研究 KdV 方程和 mKdV 方程,并发现 mKdV 方程具有扭波解(反扭波解),而 KdV 方程 却未找到.因此,进一步核查方程(1),(2)的解,发现虽然它们的大部分解是相同类型的,但同样的,方程 (2)具有扭波解(反扭波解),而方程(1)却未找到这样的解.

参考文献:

- [1] KORTEWEG D, de VRIES D. On the change of form of long waves advancing in a rectangular canal, and on a new type of long stationary waves[J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1895, 39(240): 422-443.
- [2] SCOTT A, CHU F, MCLAUGHLIN D. The soliton: A new concept in applied science[J]. Proceedings of the IEEE, 1973,61(10):1443-1483.
- [3] 刘正荣,唐昊. KdV 方程和 mKdV 方程的新奇异解[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2012, 40(10):96-101.
- [4] MIURA R. The korteweg-devries equation: A survey of results[J]. SIAM Review, 1976, 18(3): 412-459.
- [5] LOU Shen-yue, TONG Bin, HU Heng-chun, et al. Coupled KdV equations derived from two-layer fluids[J]. Journal of Physics A: Mathematical and General, 2006, 39(3):513-527.
- [6] WANG Ming-liang, WANG Yue-ming. A new bäcklund transformation and multi-soliton solutions to the KdV equation with general variable coefficients[J]. Physics Letters A,2001,287(3/4):211-216.
- [7] 吴楚芬,翁佩萱.几类具有变系数的 KdV 型方程的孤波解[J].华南师范大学学报:自然科学版,2010(4):15-18.
- [8] PRADHAN K, PANIGRAHI P. Parametrically controlling solitary wave dynamics in the modified Korteweg-de Vries equation[J]. Journal of Physics A: Mathematical and General, 2006, 39(20):L343-L348.
- [9] YAN Zhen-ya. The modified KdV equation with variable coefficients: Exact uni/bi-variable travelling wave-like solutions[J]. Applied Mathematics and Computation, 2008, 203(1):106-112.
- [10] ZHOU Yu-bin, WANG Ming-liang, WANG Yue-ming. Periodic wave solutions to a coupled KdV equations with variable coefficients[J]. Physics Letters A,2003,308(1):31-36.
- [11] WEN Zhen-shu, LIU Zheng-rong. Bifurcation of peakons and periodic cusp waves for the generalization of the camassa-holm equation[J]. Nonlinear Analysis: Real World Applications, 2011, 12(3):1698-1707.
- [12] WEN Zhen-shu, LIU Zheng-rong, SONG Ming. New exact solutions for the classical drinfel'd-sokolov-wilson equation[J]. Applied Mathematics and Computation, 2009, 215(6):2349-2358.
- [13] WEN Zhen-shu. Bifurcation of traveling wave solutions for a two-component generalized θ-equation[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2012, 2012:1-17.
- [14] WEN Zhen-shu. Extension on bifurcations of traveling wave solutions for a two-component fornberg-whitham equation[J]. Abstract and Applied Analysis, 2012, 2012:1-15.
- [15] WEN Zhen-shu. New exact explicit nonlinear wave solutions for the Broer-Kaup equation[J]. Journal of Applied Mathematics, 2014, 2014:1-7.

Nonlinear Wave Solutions for a Coupled Modified KdV Equation with Variable Coefficients

WEN Zhen-shu

(School of Mathematical Sciences, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: In this paper, we study a coupled modified KdV equation with variable coefficients by exploiting *F*-expansion method and obtain multifarious explicit nonlinear wave solutions, which include solitary wave solutions, kink (or antikink) wave solutions, blow-up solutions and periodic blow-up solutions. The coupled modified KdV equation with variable coefficients possesses kink (or antikink) wave solutions, however, for the coupled KdV equation with variable coefficients, kink (or antikink) wave solutions have not been obtained. This result is similar with that of MKdV equation and KdV equation.

Keywords: KdV equation; nonlinear wave solution; variable coefficients; F-expansion method

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:黄心中)

《华侨大学学报(自然科学版)》征稿简则

《华侨大学学报(自然科学版)》是华侨大学主办的,面向国内外公开发行的自然科学综合性学术刊物.本刊坚持四项基本原则,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,及时反映国内尤其是华侨大学等高等学府在基础研究、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.本刊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、数学和管理工程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.

1 投稿约定

- 1.1 作者应保证文稿为首发稿及文稿的合法性;署名作者对文稿均应有实质性贡献,署名正确,顺序无 争议;文稿中所有事实均应是真实的和准确的,引用他人成果时,应作必要的标注;不违反与其他 出版机构的版权协议及与其他合作机构的保密协议;无抄袭、剽窃等侵权行为,数据伪造及一稿两 投等不良行为.如由上述情况而造成的经济损失和社会负面影响,由作者本人负全部责任.
- 1.2 自投稿日期起2个月之内,作者不得另投他刊.2个月之后,作者若没有收到反馈意见,可与编辑 部联系.无论何种原因,要求撤回所投稿件,或者变更作者署名及顺序,需由第一作者以书面形式 通知编辑部并经编辑部同意.
- 1.3 作者同意将该文稿的发表权,汇编权,纸型版、网络版及其他电子版的发行权、传播权和复制权交本刊独家使用,并同意由编辑部统一纳入相关的信息服务系统.
- 1.4 来稿一经刊用,作者须按规定交纳版面费,同时编辑部按篇一次性付给稿酬并赠送该期刊物.本刊 被国内外多家著名文摘期刊和数据库列为收录刊源,对此特别声明不另收费用,也不再付给稿酬.
- 1.5 其他未尽事宜,按照《中华人民共和国著作权法》和有关的法律法规处理.

2 来稿要求和注意事项

- 2.1 来稿务必具有科学性、先进性,论点鲜明、重点突出、逻辑严密、层次分明、文字精练、数据可靠.
- 2.2 论文题名字数一般不超过18字,必要时可加副题.文中各级层次标题要简短明确,一般不超过15字,且同一层次的标题应尽可能"排比".
- 2.3 署名作者应对选题、研究、撰稿等作出主要贡献并能文责自负,一般以不超过3名为宜.作者单位 应标明单位、所在城市、省份及邮政编码.
- 2.4 摘要应包括研究的目的、使用的方法、获得的结果和引出的结论等,应写成独立性短文且不含图表和引用参考文献序号等.其篇幅一般以150~250字左右为宜,关键词以4~8个为宜.
- 2.5 量和单位符号等要符合国家标准和国际标准.
- 2.6 能用文字说明的问题,尽量不用图表;画成曲线图的数据,不宜再列表.图表应有中英文标题.
- 2.7 参考文献仅选最主要的,且已公开发表的,按规范的内容、顺序、标点书写列入,并按其在文中出现的先后次序进行编号和标注.参考文献不少于5篇,未公开发表的资料不引用.
- 2.8 英文摘要尽可能与中文摘要对应,包括题目、作者姓名、作者单位、摘要、关键词.用过去时态叙述 作者工作,用现在时态叙述作者结论,并符合英文写作规范.
- 2.9 文稿首页地脚处依次注明收稿日期;通信作者为可联系作者的姓名、出生年、性别、职称、学历、研究方向、电子邮件地址;基金项目为课题资助背景及编号,可几项依次排列.
- 2.10 投稿请直接登陆学报网站(www.hdxb.hqu.edu.cn)在线投稿.

《华侨大学学报(自然科学版)》编辑部

- ·《中文核心期刊要目觉览》
- · 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
- 中国期刊网
- 万方数据库
- 中国机械工程文摘
- 中国物理文摘
- 中国生物学文摘
- 中国数学文摘

华侨大学学报(自然科学版)

Huaqiao Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban) (双月刊,1980年创刊)

第35卷第5期(总第139期)2014年9月20日

主管单位: 福 銉 省 教 育 厅 主办单位: 华 侨 大 学 (中国福建泉州 362021) 编辑出版: 华侨大学学报自然科学版编辑部 话:0595-22692545 电 电子信箱:journal@hqu.edu.cn 址:www.hdxb.hqu.edu.cn XX 编: 乌 东 峰 È EП 刷:泉州晚 报印刷 国内发行: 福建省泉州市邮政局 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) ISSN 1000-5013 号:

CN 35-1079/N

代

号:

国外 NTZ 1050

刊

- ·俄罗斯《文摘杂志》(AJ, VINITI)
- ·荷兰《文摘与引文数据库》(Scopus)
- 中国学术期刊综合评价数据库
- 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
- 中国化学化工文摘
- 中国无线电电子学文摘

JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY

(NATURAL SCIENCE)

(Bimonthly, Started in 1980 Vol. 35 No. 5 (Sum. 139) Sep. 20, 2014

Competent Authority: Department of Education of Fujian Province Sponsor: Huaqiao University (Quanzhou 362021, Fujian, China) Edited and Published by Editorial Department of Journal of Huaqiao University (Natural Science) Tel: 0595-22692545 E-mail: journal@hqu. edu. cn Http://www.hdxb.hqu.edu.cn Editor in Chief: WU Dong-feng **Distributed by** China Publication Foreign Trading Corporation (P. O. Box 782, Beijing, 100011, China) 国内邮发 34-41 8.00 元/期 国内定价: <u>48.00</u> 元/年