



ISSN 1000-5013

CN 35-1079/N

CODEN HDZIEF

华侨大学学报

(自然科学版)

JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY

(NATURAL SCIENCE)

第 35 卷 第 4 期

Vol. 35 No. 4

2014

福建·泉州

ISSN 1000-5013



07>

9 771000 501149



《 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)

徐西鹏 (XU Xi-peng)

副主编 (Associate Editor in Chief)

陈国华 (CHEN Guo-hua)

黄仲一 (HUANG Zhong-yi)

编 委 (Members) (按姓氏笔划为序)

王加贤 (WANG Jia-xian)

王全义 (WANG Quan-yi)

方柏山 (FANG Bai-shan)

叶民强 (YE Min-qiang)

刘 堪 (LIU Gong)

江开勇 (JIANG Kai-yong)

张认成 (ZHANG Ren-cheng)

吴季怀 (WU Ji-huai)

吴逢铁 (WU Feng-tie)

陈锻生 (CHEN Duan-sheng)

周克民 (ZHOU Ke-min)

胡日东 (HU Ri-dong)

高轩能 (GAO Xuan-neng)

黄心中 (HUANG Xin-zhong)

童昕 (TONG Xin)

蔡灿辉 (CAI Can-hui)

欧阳明安 (OUYANG Ming-an)

编辑部主任 (Director)

黄仲一 (HUANG Zhong-yi)

目 次

二段式钛合金种植牙不同弹性模量组件及其组合对骨界面
应力分布的影响
..... 石茂林, 李洪友, 陈梦月 (361)

采用欧几里得贴近度的精密车削误差源模糊诊断方法
..... 王建涛, 顾立志, 杜伟文, 黄燕华, 瞿少魁 (367)

混沌时间序列的 LSSVM 预测方法
..... 莫小琴, 李钟慎 (373)

利用 Petri 网特征结构的故障诊断方法
..... 叶丹丹, 罗继亮 (378)

应用 SIP 协议的楼宇对讲系统设计与实现
..... 许庆泳, 谭鸽伟 (383)

一组相关 XML 数据文件的数据类识别方法
..... 李赛男, 余金山 (387)

采用光流场运动估计的双树复小波域视频水印算法
..... 崔壮, 吕俊白 (392)

应用水印旋转角度加密的双水印算法
..... 吴新亚, 陈永红, 冯祥斌 (397)

酪氨酸分子印迹电化学传感器的制备及性能
..... 陈丹, 连惠婷, 孙向英, 刘斌 (403)

微波辐射 SnCl₄/C 催化对羟基苯甲酸乙酯的合成与表征
..... 陈会新, 唐忠科, 熊兴泉 (409)

CdS-Eu(Ⅲ)体系荧光恢复的磷酸根离子可视化测定	杨海冉, 杨传孝, 孙向英 (413)
Na ⁺ 在环八肽纳米管中的传输	李敬, 程杰 (419)
城市污泥中重金属形态及资源化可行性分析	袁柯馨, 孙荣, 李玉, 洪俊明 (424)
华侨大学泉州校区药用植物资源调查分析	徐先祥, 倪云霞, 付艺冰, 朱秦, 郑文杰, 李琼, 黄应钦, 秦思, 朱亚玲, 张小鸿 (430)
三面受火后混凝土短柱受剪承载力的数值计算	林碧兰, 李丹, 徐玉野 (437)
采用类桁架连续体的桁架结构拓扑优化方法	李霞, 周克民 (443)
混凝土桥梁全寿命的设计方法	梁巍, 卓卫东 (448)
代建制下多项目管理风险等级评价	段辉霞, 张云波, 项剑平, 王玉芳 (454)
泉州伊斯兰建筑遗存的遗产价值与保护规划	吴宇翔, 关瑞明 (460)
具有脉冲的非线性微分方程边值问题的多个正解	吴丽娇, 王全义 (466)
具有多个转向点的奇摄动二阶拟线性边值问题	许国安, 余赞平 (472)
解析函数的复合边值逆问题	武模忙, 林峰, 李锦成 (476)

CONTENTS

Influence of Two-Section Titanium Alloy Dental Implant Components with Different Elastic Modulus and Their Combinations on Implant-Bone Interface Stress Distribution	SHI Mao-lin, LI Hong-you, CHEN Meng-yue (361)
Fuzzy Diagnosis Method of Precision Turning Error Sources Using the Euclidean Closeness	WANG Jian-tao, GU Li-zhi, DU Wei-wen, HUANG Yan-hua, QU Shao-kui (367)
Prediction Method of the Chaotic Time Series Using Least Squares Support Vector Machine	MO Xiao-qin, LI Zhong-shen (373)
Method for Fault Diagnosis Using Characteristic Structure of Petri Nets	YE Dan-dan, LUO Ji-liang (378)
Solution of Building Intercom System Using SIP Protocol	XU Qing-yong, TAN Ge-wei (383)
Class Identification Method a Group Related of XML Data File	LI Sai-nan, YU Jin-shan (387)
A Digital Watermarking Algorithm Using the Motion Estimation of Optical Flow Field in the DT-CWT	CUI Zhuang, LYU Jun-bai (392)
A Dual Watermark Algorithm Using the Encryption of Watermark Rotation Angle	WU Xin-ya, CHEN Yong-hong, FENG Xiang-bin (397)
Preparation and Properties of Tyrosine Molecularly Imprinted Electrochemical Sensor	CHEN Dan, LIAN Hui-ting, SUN Xiang-ying, LIU Bin (403)
Synthesis and Characterization of Ethyl <i>p</i> -Hydroxybenzoate Catalyzed by SnCl ₄ /C under Microwave-Assisted Condition	CHEN Hui-xin, TANG Zhong-ke, XIONG Xing-quan (409)

Fluorescence Recovery and Visual Detections for Phosphate Based on CdS-Eu(Ⅲ) System	
.....	YANG Hai-ran, YANG Chuan-xiao, SUN Xiang-ying (413)
Na ⁺ Transport in Cyclic Octa-Peptide Nanotube	
.....	LI Jing, CHENG Jie (419)
Form of Heavy Metals in Sewage Sludge and Resource Feasibility in Southern City	
.....	YUAN Ke-xin, SUN Rong, LI Yu, HONG Jun-ming (424)
Investigation and Analysis on Medicinal Plant Resources in Quanzhou School District of Huaqiao University	
.....	XU Xian-xiang, NI Yun-xia, FU Yi-bing, ZHU Qin, ZHENG Wen-jie, LI Qiong, HUANG Ying-qin, QIN Si, ZHU Ya-ling, ZHANG Xiao-hong (430)
Numerical Calculation for the Shear Strength of Concrete Short Columns after 3-Face Heating	
.....	LIN Bi-lan, LI Dan, XU Yu-ye (437)
Topology Optimization Method of Truss Structures Using Truss-Like Continuum	
.....	LI Xia, ZHOU Ke-min (443)
Research Review of Design Method for Concrete Bridge Life Cycle	
.....	LIANG Wei, ZHUO Wei-dong (448)
Risk Assessment of Multi-Project Management under the Agent Construction System	
.....	DUAN Hui-xia, ZHANG Yun-bo, XIANG Jian-ping, WANG Yu-fang (454)
Heritage Value of Islamic Architectural Relics in Quanzhou and Conservation Planning	
.....	WU Yu-xiang, GUAN Rui-ming (460)
Multiple Positive Solutions of Boundary Value Problems for Nonlinear Impulsive Differential Equations	
.....	WU Li-jiao, WANG Quan-yi (466)
Singular Perturbation Second Order Quasilinear Boundary Value Problem with Multi-Turning Point	
.....	XU Guo-an, YU Zan-ping (472)
Inverse Compound Boundary Value Problem for Analytic Functions	
.....	WU Mu-mang, LIN Feng, LI Jin-cheng (476)

二段式钛合金种植牙不同弹性模量组件及其组合对骨界面应力分布的影响

石茂林¹, 李洪友¹, 陈梦月²

(1. 华侨大学 机电与自动化学院, 福建 厦门 361021;

2. 重庆医科大学 第一临床学院, 重庆 400016)

摘要: 采用 Pro/E 三维绘图软件及 Ansys Workbench 14.5 建立二段式钛合金种植牙系统模型, 并进行网格划分. 设定材料属性、约束和加载条件, 分析种植牙系统不同弹性模量组件及其组合对骨界面应力分布的影响, 研究种植牙系统的改进方法. 结果表明: 低模量值种植体具有更好的生物力学相容性, 种植牙系统采用适宜模量值基台和种植体组合能够有效地降低骨界面应力.

关键词: 种植牙; 种植体; 弹性模量; 钛合金; 骨界面; 接触分析

中图分类号: R 783.1

文献标志码: A

义齿种植具有美观舒适、咀嚼功能好、长期稳定性好等优点, 在牙齿修复应用中前景广阔, 已取得众多成功的案例^[1-2]. 种植义齿取得长期成功的关键在于种植体-骨组织界面具有良好的生物相容性. 生物相容性最主要的指标是骨界面应力. 骨界面应力过高, 引起骨水平下降, 出现“应力屏蔽”现象, 导致植入失败; 骨界面应力过低, 易引起骨质疏松, 对机体产生诸多不利影响^[3-4]. 因此, 种植牙系统骨界面应力分布研究一直是种植体生物力学的研究重点. 众多学者建立了相关模型, 采用有限元法进行力学分析和优化设计^[5-8]. 然而, 大多数研究对种植牙结构进行了简化, 未结合市场常见的种植牙系统进行分析, 且主要针对组件结构及材料的改善, 未考虑医疗实践时效性及现实困难. 根据前期调查可知: 对于一线的医疗工作者而言, 种植牙系统结构及材料的改善虽然能明显改善骨界面应力情况, 但不能满足医疗手术的时效性要求. 利用手术的现有条件, 正确选用现有组件进行合理组合, 减少骨界面应力才是提高植入成功率最直接的方法. 本文结合市场常见的两段式钛合金种植牙系统, 通过 Pro/E 三维软件建立钛合金种植牙系统骨组织模型, 采用 Ansys Workbench 14.5 对骨界面接触应力进行分析, 提出种植牙系统的改进方法.

1 材料和方法

参考瑞士某公司产品, 建立种植牙系统模型. 该模型分为种植体、基台、中央螺丝、亚冠 4 个部分. 种植体简化为圆柱体全埋式结构, 直径为 4 mm, 长度为 8 mm. 基台最大直径为 4.5 mm, 穿龈长度为 2 mm. 中央螺丝直径为 1.6 mm, 螺纹为 M1.6×0.25 标准螺纹. 亚冠固定长度为 6.5 mm. 牙冠覆盖基台承受主要荷载.

仿照人体第一前磨牙骨组织形式及性质建立骨组织模型, 该模型包含厚度为 2 mm 的外层致密皮质骨和内部疏松松质骨. 整体骨块的长为 20 mm, 上宽为 8 mm, 下宽为 14 mm, 高为 17.5 mm. 种植牙-骨组织有限元模型剖面图, 如图 1(a)所示.

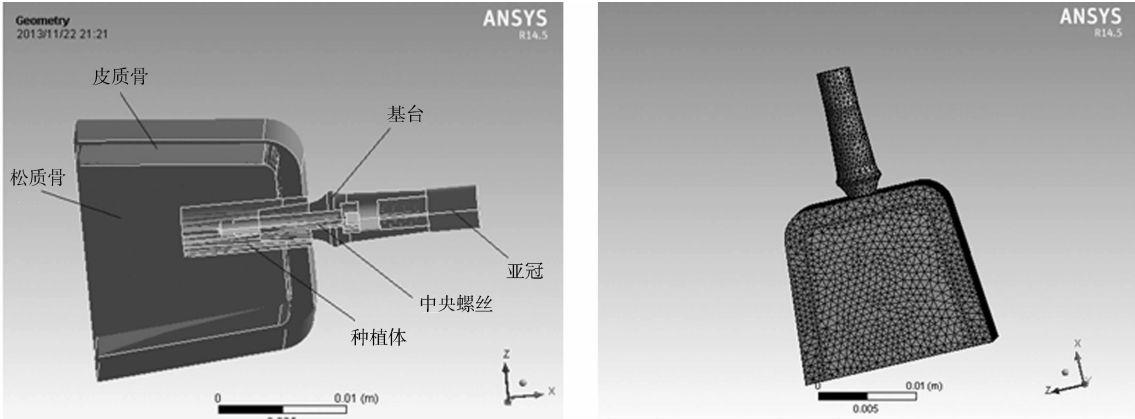
通过 Pro/E 三维绘图软件建立种植牙-骨组织模型, 采用 Ansys Workbench 14.5 进行有限元分

收稿日期: 2013-12-20

通信作者: 李洪友(1970-), 男, 副教授, 主要从事金属材料表面技术、特种加工的研究. E-mail: lihongy@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2012J01213)

析. 通过 Pro/E 与 Ansys Workbench 接口, 将 Pro/E 模型导入到 Ansys Workbench 中. 采用 Ansys Workbench 智能网格划分功能, 对种植牙系统及骨组织进行网格划分, 控制网格划分单元的大小, 如表 1 所示. 经过网格划分的种植牙-骨组织三维模型, 如图 1(b)所示.



(a) 有限元模型剖面图 (b) 网格划分后的有限元模型

图 1 种植牙-骨组织有限元模型

Fig. 1 Finite element model of dental implant and bone

表 1 种植体模型网格划分

Tab. 1 Finite element mesh of dental implant models

组件	松质骨	皮质骨	种植体	基台	中央螺丝	亚冠
节点	51 365	50 464	8 924	10 310	2 207	4 889
单元	32 041	29 092	5 099	5 821	1 143	2 631

模型材料为连续、均匀、各向同性的小变形弹性材料. 种植体与骨组织界面假设为理想骨性结合. 种植体与基台采用 4 种常见钛合金材料力学参数, 牙冠采用 Co-Cr 合金材料参数, 中央螺丝采用 TC4 钛合金材料参数. 种植体弹性模量分别为 30, 55, 75, 104 GPa, 依次设为 1~4 号种植体, 其参数如表 2 所示. 表 2 中: E 为弹性模量; ν 为泊松比.

种植体、基台、中央螺丝接触方式定义为 Frictional, 摩擦系数为 0.45. 亚冠与基台之间接触、种植体与骨组织接触、松质骨与皮质骨接触, 均定义为 Bonded.

骨组织模型侧面、底面施加完全约束, 并扩展到相应节点. 从种植体根部向上对模型施加相同的固定约束. 结合相关文献和临床经验, 在牙冠上加载竖直向下荷载 200 N, 颊舌斜向下 45°加载复合荷载 45 N^[1-2]. 中央螺丝预紧力加载荷载 200 N.

2 有限元分析结果

2.1 同一模量值基台与不同模量值种植体骨界面的应力分布比较

采用 Von-Mises 应力作为衡量应力水平的主要指标. 基台模量值为常见的医用钛合金的弹性模量值, 恒为 104 GPa. 4 种不同模量钛合金种植体骨界面应力分布情况, 如图 2, 3 所示. 图 3 中: E_1 为种植体模量; σ 为 Von-Mises 应力. 由图 2, 3 可以看出: 基台弹性模量为定值, 且荷载相同的情况下, 4 种植体骨界面中, 4 号种植体的 Von-Mises 应力最大, 为 0.975 35 MPa. 在皮质骨、松质骨区域, 最大应力值和分布有所不同, 松质骨区域中段为最大应力集中区域.

从 4 种不同模量值种植体骨界面应力分布云图可以看出: 皮质骨区域与松质骨区域中段(主要受力面, 对应面为种植体内部锥面)为高应力区, 随着种植体模量值的降低, 骨界面应力整体成递减趋势. 与松质骨区域相比, 种植体模量值改变对皮质骨区域应力影响较大.

表 2 种植牙系统与骨组织材料力学参数

Tab. 2 Dental implant system and bone material mechanics parameters

材料	E/GPa	ν
种植体	30, 55, 75, 104	0.35
基台	30, 55, 75, 104	0.35
皮质骨	20.0	0.30
松质骨	1.5	0.30
牙冠	220	0.30
中央螺丝	104	0.35

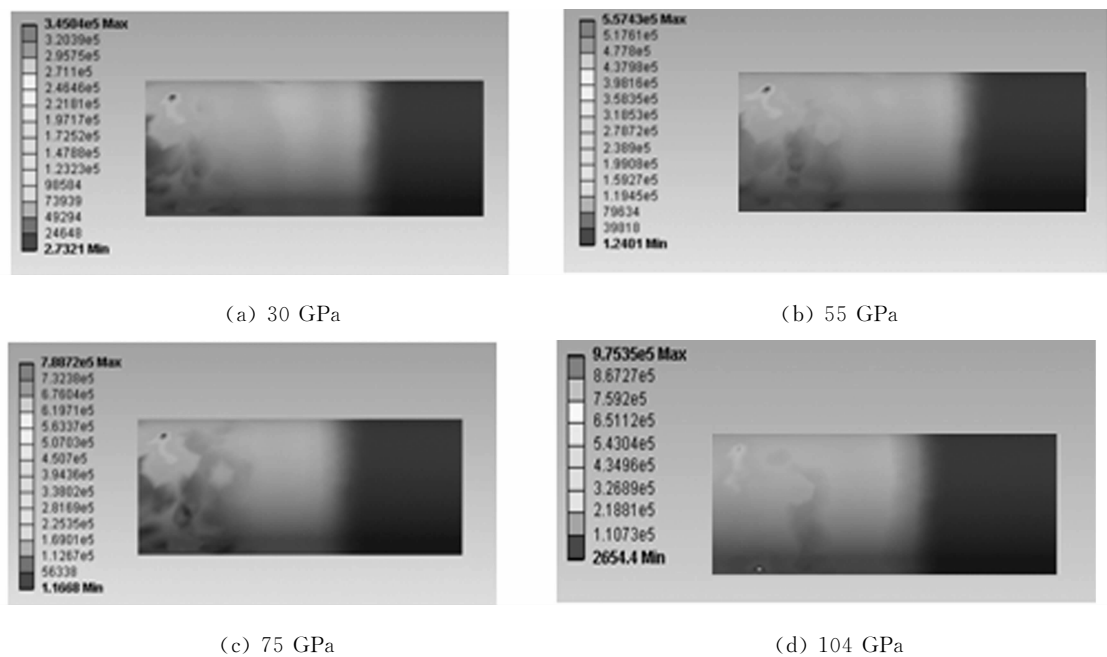


图 2 4 种不同模量值钛种植体骨界面应力分布云图

Fig. 2 Stress distribution in bone-plant interface of four different modulus values titanium implants

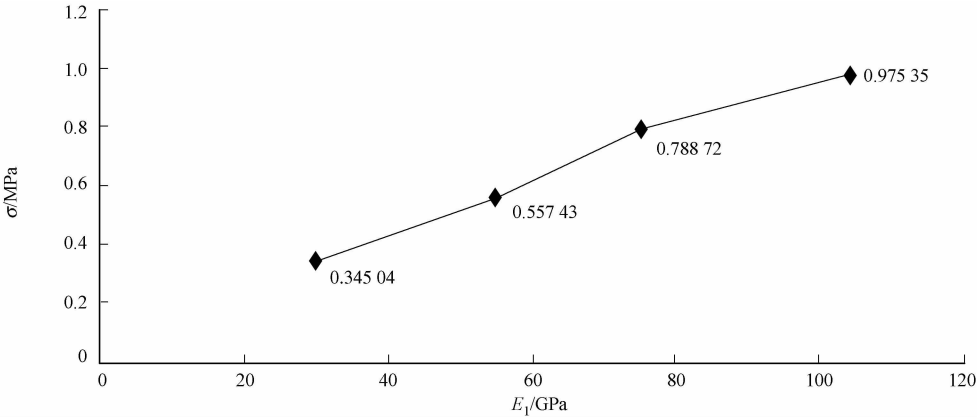


图 3 同一荷载下不同模量值种植体最大应力图

Fig. 3 Max stress distribution in implants with different modulus values under the same load

2.2 同一模量值种植体与不同模量值基台骨界面的应力分布比较

种植体模量值为常值 55 GPa,比较 4 种不同模量值基台骨界面的应力分布,如图 4,5 所示. 图 5 中: E_2 为基台模量. 由图 4,5 可以看出:种植体弹性模量为定值,荷载相同的情况下,骨界面应力水平偏低,种植体骨界面应力随基台模量值改变并无明显变化. 在皮质骨区域和松质骨中段区域,4 号种植体的应力值最大,为 0. 557 3 MPa. 在种植体与基台模量值相近时,最大应力值有所下降.

2.3 不同模量值种植体与基台交叉组合比较

设置 4 种不同模量值基台(30,55,75,104 GPa)与 4 种不同模量值种植体(30,55,75,104 GPa),在同一荷载下,研究不同模量值组件及其组合对种植体骨界面应力分布的影响,不同种植体与基台组合的最大应力值,如表 3 所示. 由表 3 可以看出:在基台模量值为较低值(30,55 GPa)条件下,种植体模量值降低,皮质骨与松质骨骨界面应力呈降低趋势;在基台模量值为较高值(75,104 GPa)条件下,骨界面应力随种植体模量值降低而成波浪变化;在种植体为常见的钛合金 TC4 模量值 104 GPa 条件下,随着基台模量值的改变,骨界面应力改变明显. 当种植体模量值为 30 GPa,接近骨组织模量值(15~20 GPa)时,基台模量值的改变,骨界面应力改变不明显. 当种植体模量值相对基台模量值有一定差值(基台大于种植体 20~30 GPa)时,骨界面应力相对较高. 种植体对应皮质骨区域与松质骨区域中段依旧为应力集中部分.

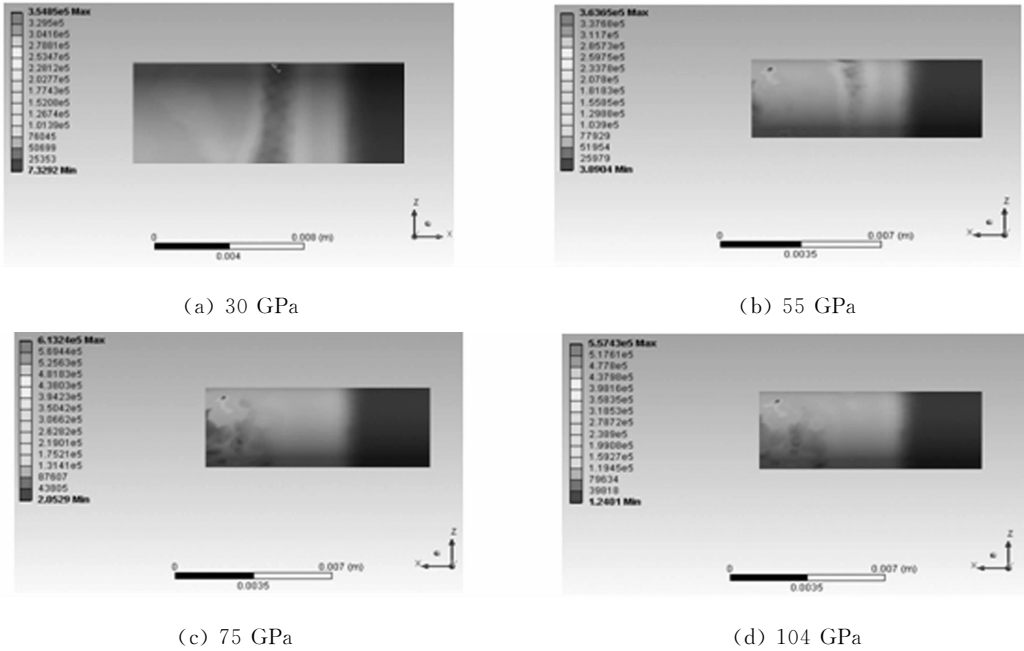


图 4 4 种不同模量值基台骨界面应力分布云图

Fig. 4 Stress distribution in bone-plant interface of four different modulus values abutments

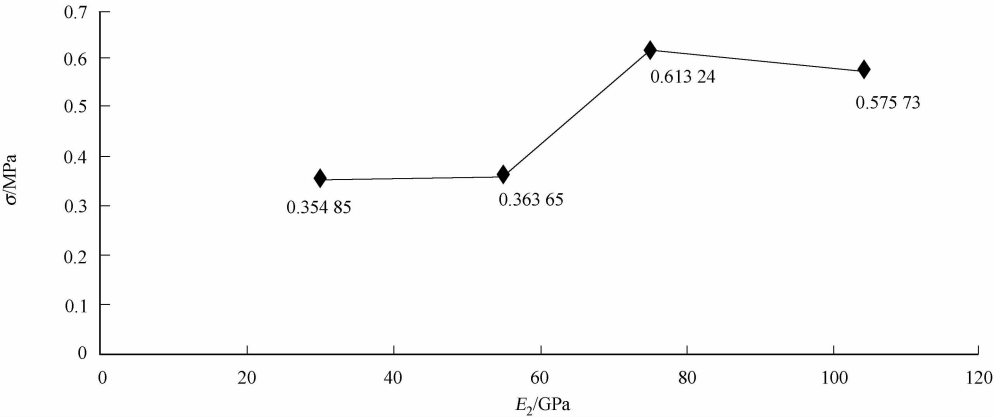


图 5 同一荷载下不同模量值基台最大应力图

Fig. 5 Max stress distribution in abutments with different modulus values under the same load

表 3 不同种植体与基台组合最大应力值

Tab. 3 Max stress value of different implants combined with abutments		MPa			
E_2 /GPa	E_1 /GPa				
	30	55	75	104	
30	0. 328 11	0. 354 85	0. 378 04	0. 345 04	
55	0. 374 53	0. 363 65	0. 362 53	0. 557 43	
75	0. 316 55	0. 613 24	0. 457 92	0. 788 72	
104	0. 382 36	0. 575 73	0. 462 25	0. 975 35	

3 分析与讨论

种植体植入人体后,其表面与人体骨组织结合形成骨界面,从而实现力的传导,完成目标修复功能.因此,骨界面结合的可靠性和稳定性成为种植体植入取得长期成功的关键因素,而骨界面应力分布及大小起到了决定性的作用.骨界面接触应力过大或过于集中,超过机体组织耐受极限,会导致机体骨组织应力疲劳损坏,甚至造成进一步的创伤.骨界面接触应力过小,则会引起骨质疏松及废用性骨萎缩.对骨界面应力分布而言,皮质骨可以承受较大荷载,因此,在满足应力荷载要求的前提下,更应该考虑应力荷

载对松质骨的影响.

改善骨界面结合的可靠性、稳定性主要从以下两个方面考虑:1) 降低载荷,以免超过载荷极限,包括针对不同病例设计不同针对性方案,避开患者组织低荷载应力区;2) 改善种植体结构及性能,包括低模量材料的选用,内部、外部结构的改变,表面性能改进、表面硬化等,以此增加骨界面结合强度,改善骨界面应力分布状况,从而提高种植体生物力学相容性,提高植入成功率.从生物力学及历史病例分析可知:植入体材料弹性模量应尽量降低,皮质骨弹性模量为 15~20 GPa,松质骨弹性模量为 1.3~3.5 GPa,种植体与骨组织模量差值越小,受力时组织接触界面应力越小,产生相对位移越小,可以有效地避免应力屏蔽,提高植入成功率.植入体材料硬脆度应适宜,若过高,则加大植入部位的承受载荷,同时会导致骨应力吸收;若过低,则不能满足荷载要求,导致形变,不仅破坏美观感,甚至会对机体产生损害,改变种植体整体结构.

目前而言,大部分生物应用材料模值均在 100 GPa 以上,密度较高,各项性能指数难以达到适宜的平衡.钛合金的出现,提供了一种具有广阔前景的高生物力学相容性材料.近几年,相关学者开发了多种低模量钛合金满足生物医用要求,从而扩大了钛合金应用范围^[9].钛合金表面活化处理可以增加钛合金生物相容性^[10].目前,通过微弧氧化法可以获得独特多孔结构氧化陶瓷层,有效地促进新骨组织附着于种植体生长,改善细胞沉积环境、有益于营养和氧气进入种植体-骨界面,提高骨界面结合能力^[9-10].钛合金表面涂层的改变为改善植入体骨界面结合应力分布提供了一个新的方向.

通过有限元分析可知:在同一荷载下,不同模量值基台与种植体组合骨结合界面应力分布情况均在皮质骨区域达到最大,向下逐步递减,但最大应力值有所不同,这与大多数学者得到的结论一致^[4-8,11-13].由于连接牙冠与种植体的基台为主要承受荷载(特别是扭矩荷载)组件,对于模量值要求较高.在保持基台高模量值前提(75,104 GPa)下,种植体材料模量值的降低,骨界面应力呈明显降低趋势.在保持种植体与骨组织模量值相近时(30 GPa),基台的模量值改变对于骨界面应力的改善不明显.因此,对于种植体系统材料的改善,应主要集中于种植体材料性能的提升.种植体与基台的模量值有一定差值(基台大于种植体 20~30 GPa),应力上升.应力集中区域为硬质骨区域与种植体中段(对应种植体内部受力锥面与螺纹面过度处),种植体内部结构改善能够有效地改善应力,但种植体体积微小,导致结构的改善往往带来加工困难,成本大幅提升.

本次有限元分析结果表明:种植体模量值及内部结构对骨界面应力分布有着重要影响.在目前内部结构改善较困难条件下,采用不同模量值基台与种植体组合,可以有效地改善种植体植入后的力学环境,提高种植体生物力学相容性.在医疗实践当中,生产厂商与医疗工作者应注意种植牙系统组件的正确组合,以避免错误组合导致植入失败.

4 结 论

1) 皮质骨区域与松质骨中段区域为种植体骨界面的高应力区,由皮质骨至松质骨呈总体下降趋势.应力较大的松质骨中段区域应为种植体材料选择的首要考虑因素.

2) 相同荷载下,优先满足种植体材料模量值要求时,基台模量值的改变对种植体骨界面应力分布影响不明显,低模量值种植体能够有效地改善骨界面应力分布;优先满足基台材料模量值要求时,骨界面应力随种植体模量值降低而降低.

3) 不同模量值基台与种植体的良性组合可有效地改善骨界面受力分布情况.结合本文分析,考虑到工业大规模生产、成本控制、种植体内部结构难以短期改善,医疗手术的时效性等实际困难,在基台为常见的钛合金 TC4 模量值 104 GPa 时,种植体选择 55 GPa 钛合金为宜.

参考文献:

[1] GENG J,TAN K B. Application of finite element analysis in implant dentistry: A review of the literature[J].J Prosthet Dent,2001,85(6):585-598.

[2] 林野.当代口腔种植学的进展及其临床意义[J].口腔颌面外科,2006,16(4):285-291.

[3] IPLIKCIONLU H,AKCA K. Comparative evaluation of the effect of diameter, length and number of implants sup-

porting three-unit fixed partial prostheses on stress distribution in the bone[J]. J Dent, 2002, 30(1): 41-46.

[4] VAN O H, DUYCK J, VANDER S, et al. The influence of bone mechanical properties and implant fixation upon bone loading around oral implants[J]. Clin Oral Implants Res, 1998, 9(6): 407-412.

[5] SATO Y, WADAMOTO M, TSUGA K, et al. The effectiveness of element downsizing on a three-dimensional finite element model of bone trabeculae in implant biomechanics[J]. J Oral Rehabil, 1999, 26(4): 288-291.

[6] 赵峰, 韩彦峰, 胡江峰, 等. 弹性模量和初始应力对种植体骨界面应力分布影响的三维有限元分析[J]. 中国口腔种植学杂志, 2006, 11(2): 55-58.

[7] 赵永康, 马红梅, 张力, 等. 种植体杨氏模量变化对下颌骨应力分布影响有限元分析[J]. 华西口腔医学杂志, 2006, 24(2): 89-91.

[8] 高勃, 赵峰, 刘振侠, 等. 螺旋形种植体弹性模量与骨界面应力分布关系的三维有限元分析[J]. 临床口腔医学杂志, 2006, 22(11): 667-670.

[9] OTSTSUKIA B, TAKEMOTOA M, FUJIBAYASHIA S, et al. Pore throat size and connectivity determine bone and tissue ingrowth into porous implants: Three-dimensional micro-CT based structural analyses of porous bioactive titanium implants[J]. Biomaterials, 2006, 27(35): 5892-5900.

[10] ST-PIERRE J P, GATUTHIER M, LEFEBVRE L P, et al. Three-dimensional growth of differentiating MC3T3-E1 pre-osteoblasts on porous titanium scaffolds[J]. Biomaterials, 2005, 26(35): 7319-7328.

[11] 于振涛, 余森, 田宇兴, 等. 外科植入物新型医用钛合金材料设计、开发与应用现状及进展[J]. 中国材料进展, 2010, 12(29): 35-51.

[12] 黄伟九, 李兆峰. 医用钛合金表面改性研究进展[J]. 材料导报, 2006, 11(20): 369-374.

[13] 邹敬才, 刘宝林, 唐文杰, 等. 影响人工种植牙-骨界面应力分布规律因素的多元逐步分布回归分析[J]. 医用生物力学, 2000, 15(4): 216-221.

Influence of Two-Section Titanium Alloy Dental Implant Components with Different Elastic Modulus and Their Combinations on Implant-Bone Interface Stress Distribution

SHI Mao-lin, LI Hong-you, CHEN Meng-yue

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. First Clinical College of Chongqing Medical University, Chongqing 400016, China)

Abstract: A two-section model of titanium alloy dental implant and bone issue was established by 3-D software Pro/E and meshed by Ansys Workbench 14. 5. The influence of components of different elastic modulus and their combinations on implant-bone interface stress distribution was studied after setting material properties, constraints and loading. The method to improve dental implant system was studied. The result shows that the dental implant system of lower elastic modulus implants was with better biomechanical compatibility. A dental implant system using suitable modulus abutment and dental implant combination can reduce implant-bone interface stress effectively.

Keywords: dental implant; implants; elastic modulus; titanium alloy; bone interface; contact analysis

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 杨建红)

采用欧几里得贴近度的精密车削 误差源模糊诊断方法

王建涛, 顾立志, 杜伟文, 黄燕华, 瞿少魁

(华侨大学 机电与自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 提出基于模糊数学原理,采用欧几里得(Euclid)贴近度判别和确定工件加工误差源的方法.加工误差利用模糊子集描述,加工误差源采用语言模糊矢量描述,用 7 个语言值表达加工误差和加工误差源语言模糊矢量的隶属度;构建加工误差源知识库,得到模糊语言隶属函数的数值表达式,进而得到模糊矩阵;建立加工误差与误差源之间关系的数学模型;计算欧几里得模糊贴近度,结合阈值原则和反向推理,实现加工误差源诊断.以一阶梯轴的加工为例的实验研究表明,该方法对机械加工过程中误差源的诊断准确、快捷.

关键词: 欧几里得贴近度;模糊数学;误差源;误差建模;模糊诊断

中图分类号: TG 502.13

文献标志码: A

机械加工过程是一个不断变化的极其复杂的过程,对零件加工精度有影响的因素很多,且各种影响因素与产品精度之间对应关系复杂,往往是非确定的、模糊的.机械加工误差直接影响零件的质量和性能,机械加工误差来源于加工系统各误差源.对误差源的恰当诊断,进而控制加工误差具有重要意义.由于误差源的多样性和随机性,对其诊断难度很大^[1].机械加工误差源的诊断方法主要有如下 4 种:1) 基于启发式的诊断方法;2) 基于进化计算的诊断方法^[2-3];3) 基于专家系统的诊断方法^[4-5];4) 基于模型的诊断方法^[6].模糊数学是研究和处理带有“模糊”性质的事物的一种理论和方法.它在工件误差与其误差源判别过程中,对于模糊信息和经验知识的数值化描述方面比其他方法具有很大的优势^[7-8].本研究提出基于模糊数学原理,采用欧几里得贴近度判别和确定加工误差源的方法,以揭示影响零件加工误差的主要误差源及其存在规律,进而找出减小加工误差、提升产品加工精度的途径.

1 模糊数学理论基础

1) 模糊集合. 设 U 是论域,称映射 $\mu: U \rightarrow [0, 1], u \mapsto \mu_A(u)$ 确定了 U 上的一个模糊子集,记为 A , μ_A 称为隶属函数, $\mu_A(u)$ 在 $u=u_0$ 的函数值称作 u_0 对 A 的隶属度^[9]. $\mu_A(u)$ 的大小能够反映 u 对模糊子集 A 的从属程度, $\mu_A(u)$ 的值愈接近 1,表示 u 从属 A 的程度愈高, $\mu_A(u)$ 的值愈接近 0,表示 u 从属 A 的程度愈低.

2) 模糊矩阵^[10]. 设 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$, R 为 U 到 V 的一个模糊关系,即 $R \in \mathcal{F}(U \times V)$. 则 R 可用一个 $m \times n$ 阶矩阵来表示,即 $R = (r_{i,j})_{m \times n}$, 其中 $r_{i,j} = R(u_i, u_j), i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$. 由于 $R(u_i, u_j) \in [0, 1]$, 故称 $R = (r_{i,j})_{m \times n}$ 为模糊矩阵.

3) 模糊集合间的贴近度^[11]. 考虑 $\mathcal{F}(U)$ 上的二元函数 $\sigma: \mathcal{F}(U) \times \mathcal{F}(U) \rightarrow [0, 1], (A, B) \mapsto \sigma(A, B)$. 若满足下列 3 条公理: 1) $\sigma(A, A) = 1, \sigma(U,) = 0$; 2) $\sigma(A, B) = \sigma(B, A)$; 3) $A \subseteq B \subseteq C \Rightarrow \sigma(A, B) \wedge \sigma(B, C) \leq \sigma(A, C)$.

收稿日期: 2013-12-19

通信作者: 顾立志(1956-),男,教授,主要从事先进切削加工技术、数字化设计与制造技术的研究. E-mail: gulizhi888@163.com.

基金项目: 教育部博士点科研基金资助项目(20103501110001); 福建省科技计划重点项目(2012H0034); 黑龙江省自然科学基金资助项目(41408721-4-12006/E0511)

C). 则称 σ 为 $\mathcal{F}(U)$ 上的贴近度函数, $\sigma(A, B)$ 为 A 与 B 的贴近度.

在机械加工误差源的诊断中,工人对已加工工件的质量特征进行初步判断,对可能引起加工误差的误差源用模糊语言描述. 例如:该零件的圆度误差“非常大”、“一般大”、“比较小”,加工过程中工件受力变形“非常小”、“比较大”等. 这些语言就构成了语言集合.

4) 语言隶属度. 设论域 U 上的语言模糊子集 A , 可用如下一个映射 $\mu_A(x)$ 定义, 即 $\mu_A(x): U \rightarrow L$, $x \rightarrow \mu_A(x)$ = 语言隶属度, 其中 L 为模糊语言值集合, $\mu_A(x)$ 为 A 的隶属函数, 表示模糊语言元素 x 隶属于 A 的程度.

5) 阈值原则. 设论域 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 上有 m 个模糊子集 $A_1, A_2, \dots, A_m$, 即 m 个模型. 对于任一 $u_0 \in U$, 取定水平 $\lambda \in [0, 1]$, 若存在 $i_1, i_2, \dots, i_k$, 使得 $A_{i_j}(u_0) \geq \lambda, (j = 1, 2, \dots, k)$, 则判定为 u_0 相对地隶属于 $A_{i_1} \cap A_{i_2} \cap \dots \cap A_{i_k}$.

对于语言模糊子集相互交叉(即边界模糊,有交叉现象),其对应的隶属函数目前只能基于领域专家学者的经验知识进行估算,无法用精确的数值模型计算的方法获取. 经过反复仿真分析表明,使用 7 个定性词汇(即 7 个语言值如“很大”、“比较大”等)来描述模糊语言元素的隶属度,就可以满足使用要求. 因此,可以定义该类情况的隶属函数,即 $\mu_A(x) = \{\text{很大, 相当大, 比较大, 中等, 比较小, 相当小, 很小}\}$.

为满足模糊逻辑运算和模糊诊断的需要,用 $[0, 1]$ 上数值表示语言隶属度, 即 $\mu_A(x) = \{1, 5/6, 4/6, 3/6, 2/6, 1/6, 0\}$. 通过这种方式及其表达,即可实现加工误差和加工误差源模糊信息的数值化.

2 加工误差与误差源的模糊数学表达

2.1 误差源的分类

机械加工误差源分类,如图 1 所示. 分析机械加工误差源,对加工过程中存在的误差源进行分类. 误差源的恰当分类有利于获取加工误差与误差源之间的映射关系^[12],便于利用模糊数学的方法描述加工过程中的现象和事实信息.

2.2 加工误差与误差源之间的逻辑关系

1) 不同误差源对加工误差的影响程度不同,即权重大小不同. 由于加工误差具有误差敏感方向,在众多误差源中,只有某个别误差源作用在加工误差的敏感方向上,则其对加工误差的影响程度较大,即权重大;其他误差源作用在与加工误差敏感方向成一定角度的方向上,角度越大,对加工误差的影响程度越小,即权重小^[13-14].

- 2) 不同误差源对同一个加工误差的影响方向不同,即使有使加工误差变大的,有使其变小的.
- 3) 同一误差源对不同加工误差的影响大小不同.

4) 在机械加工工艺系统中,工件加工误差不但与各误差源的原始误差大小有关,而且还与原始误差的传递途径有关^[15]. 例如,机床主轴的回转误差对加工工件的直径及圆柱度有较大的影响,而主轴的轴向窜动对工件直径和圆柱度没有影响.

5) 工艺系统的误差源与工件加工误差是多对多的对应关系. 工件的某一项加工误差是由多个误差源综合作用引起的,而一个误差源也能够引起多项加工误差. 如:机床主轴的回转误差一般可以导致被工件的圆柱度误差、圆度误差、表面粗糙度等;一根轴的圆柱度误差可能是由于刀具磨损、机床主轴回转误差、夹具变形误差等原因引起的.

6) 工件的最终加工质量是由各误差源共同作用的结果.

2.3 机械加工误差建模

在机械加工过程中,工件一般需要经过粗加工、半精加工、精加工等阶段. 工件的加工误差是机械加

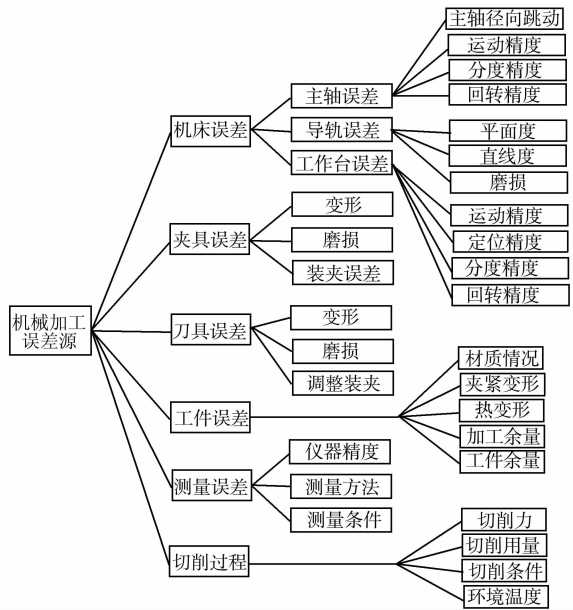


图 1 误差源的分类

Fig. 1 Classification of error sources

工工艺系统中各环节误差源的原始误差通过一定的误差传播途径,在工件上累积叠加耦合形成的^[16].

设工件在某道加工工序中存在 m 个加工误差,表示为 $\Delta\delta=(\Delta\delta_1,\Delta\delta_2,\Delta\delta_3,\cdots,\Delta\delta_m)$,且在该工序中存在 n 个加工误差源,表示为 $E=(e_1,e_2,e_3,\cdots,e_n)$. 从几何误差的角度分析,每个误差源最多可能产生 6 个方向的原始误差,3 个位置误差和 3 个角度误差. 在笛卡尔坐标系下,设第 j 个误差源产生的原始误差表示为 $\Delta\xi_j=(\Delta\lambda_{j,x},\Delta\lambda_{j,y},\Delta\lambda_{j,z},\Delta\theta_{j,x},\Delta\theta_{j,y},\Delta\theta_{j,z})^T$.

设 $\Delta\delta_{i,j}$ 表示第 j 个误差源对第 i 个加工误差产生的误差分量, $A_{i,j}$ 为相应的误差传播系数,则有

$$\mathbf{A}_{m\times n}=\begin{bmatrix}A_{1,1}&\cdots&A_{m,1}\\\vdots&\cdots&\vdots\\A_{n,1}&\cdots&A_{m,n}\end{bmatrix}.$$

(1)

$\mathbf{A}_{m\times n}$ 中各值可借助于齐次变换矩阵求出.

设 $k_{i,j}$ 为第 j 个误差分量对第 i 个加工误差 $\Delta\delta_i$ 的强度影响因子,即权重,则有 $K_i=(k_{i,1},\cdots,k_{i,n})$,

$$\sum_{j=1}^n k_{i,j}=1. \text{ 第 } i \text{ 个误差大小可表示为 } \Delta\delta_i=\sum_{j=1}^n k_{i,j}\Delta\delta_{i,j}=\sum_{j=1}^n k_{i,j}A_{i,j}\Delta\xi_j, \text{ 用矩阵形式可表示为}$$
$$\Delta\delta=K\mathbf{A}_{m\times n}\Delta\xi_n.$$

(2)

由以上分析可知:工件的加工误差主要取决于工艺系统中各误差源原始误差 $\Delta\xi_j$ 、各原始误差与工件加工误差间的传播系数 $A_{i,j}$ 和误差源对各加工误差的影响程度即权重系数 $k_{i,j}$. 因此,加工误差信息包含 3 个方面,即工艺系统各原始误差的大小、原始误差不同的传播途径^[17-19] 和加工误差源对各加工误差的权重系数. 式(2)不仅表达了机械加工误差,亦表达了机械加工误差与误差源之间的关系.

3 知识库的建立

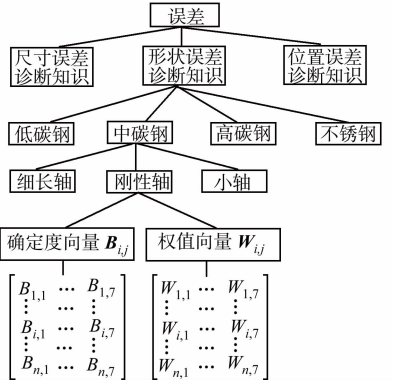
3.1 不确定性知识的表达

在知识库中,采用模糊量化的方式来表达不确定性知识. 加工误差源诊断中的不确定性知识,采用“从定性到定量”的模糊量化方法将其数值化,即采用模糊数学的方法将定性知识合理地转化为定量知识. 一个确定性概念可以用一个普通集合来表示,且一个普通集合可用一个特征函数来刻画. 与此类似,一个模糊概念可用一个模糊子集来表示,且模糊子集也可用相应的隶属函数来刻画. 因此,对于定性知识,只要合理确定它的隶属函数,就可以将其合理地量化.

3.2 知识库的结构

车削加工轴类零件的加工误差源诊断知识库,其知识组织形式按加工精度内容分为 3 大类:1) 被加工零件产生形状误差的诊断知识(圆柱度、圆度等);2) 被加工零件产生位置误差的诊断知识(同轴度、垂直度、圆跳动等);3) 被加工零件产生尺寸误差的诊断知识.

每大类知识按照被加工零件材料(低、中、高碳钢和不锈钢)分为 4 个中类;每中类知识按照被加工零件的几何状态(刚性轴、细长轴、小轴)分为 3 个小类;每个小类对应的内容一是各可能误差源与工艺系统中零件加工误差间的关系确定度模糊向量,二是各可能误差源与工艺系统中零件加工误差间影响程度的权值模糊向量. 车削加工误差源知识库结构,如图 2 所示.



4 加工误差源诊断

论域 $U=\{\text{主轴径向跳动, 主轴运动精度, 主轴分度精度, 主轴回转精度, 导轨平面度, 导轨直线度, 导轨磨损, 工作台运动精度, 工作台定位精度, 工作台分度精度, 工作台回转精度, 刀具变形, 刀具磨损, 刀具调整装夹精度, 工件材质, 工件夹紧变形, 工件热变形, 工件加工余量, 工件位置, 测量误差, 切削要素}\}$. 模糊子集: A_1 为直线度; A_2 为平面度; A_3 为圆度; A_4 为圆柱度; A_5 为齿轮廓度; A_6 为面轮廓度; A_7 为平行度; A_8 为垂直度; A_9 为倾斜度; A_{10} 为同轴度; A_{11}

图 2 知识库组织结构
Fig. 2 Organization structure of knowledge base

对称度; A_{12} 位置度; A_{13} 圆跳动; A_{14} 全跳动.

在进行误差源诊断时,通过人机交互方式将已加工好的工件误差特征信息用语言描述^[20],然后将所获得的零件加工误差信息转变成误差模糊向量,即

$$\mathbf{A} = [a_1, a_2, a_3, \cdots, a_n]^T.$$

其中: $a_1, a_2, a_3, \cdots, a_n$ 元素代表零件在加工过程中加工误差表现出的程度. 根据得到的误差模糊向量,由正向推理从已建立的知识库中得到各可能误差源与工艺系统中零件加工误差间的关系确定度模糊矩阵和影响程度的权值模糊矩阵

$$\mathbf{B} = (b_{i,j})_{m \times n}, \quad \mathbf{W} = (w_{i,j})_{m \times n}.$$

然后,利用模糊数学的原理方法,对误差源进行模糊逻辑运算和模糊诊断,由综合评判公式可得

$$\mathbf{R} = \mathbf{B} \circ \mathbf{A} = \begin{bmatrix} b_{1,1} & b_{1,2} & \cdots & b_{1,j} & \cdots & b_{1,n} \\ b_{2,1} & b_{2,2} & \cdots & b_{2,j} & \cdots & b_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ b_{i,1} & b_{i,2} & \cdots & b_{i,j} & \cdots & b_{i,n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ b_{m,1} & b_{m,2} & \cdots & b_{m,j} & \cdots & b_{m,n} \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_j \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_j \\ \vdots \\ r_n \end{bmatrix}. \tag{4}$$

模糊矩阵乘法采用欧几里得贴近度的方法计算,得到模糊向量($\mathbf{B}_i$ 和 $\mathbf{A}$)的贴近度为

$$r_i = \sigma_E(\mathbf{B}_i, \mathbf{A}) = 1 - \frac{1}{\sqrt{n}} \left[\sum_j^n w_{i,j} (b_{i,j} - a_j)^2 \right]^{1/2}, \quad i = 1, 2, \cdots, m. \tag{5}$$

式(5)中: n 为模糊向量 $\mathbf{A}$ 中的元素个数; m 为工艺系统中误差源的个数.

然后反向推理,由计算出的模糊贴近度的大小及给定的阈值 λ ,依据阈值原则确定属于工件误差模糊子集 $A_1 \sim A_{14}$ 中的误差源.

5 实验验证与结论

实验采用精密车床 CM6150,装夹方式为三爪卡盘及尾座顶尖,毛坯材料为直径为 $\Phi 40$ mm 的 45 钢棒料,刀具为 YT15(粗加工与半精加工)和 YT30(精加工),切削液为 5% 的乳化液,测量仪器为圆柱度测量仪 RS295C 和游标卡尺.

车削加工基本工艺流程:毛坯($\Phi 40$ mm $\times$ 205 mm)—车削两端面与打中心孔—粗车各段外圆,三爪卡盘及尾座顶尖装夹一半精车,三爪卡盘及尾座顶尖装夹一精车,三爪卡盘及尾座顶尖装夹.加工一个刚性轴类零件,同批 50 件,如图 3 所示.其外圆由车床加工完成后,经测量知直径为 $\Phi 34$ mm 轴段的圆柱度超差,测量结果如表 1 所示.

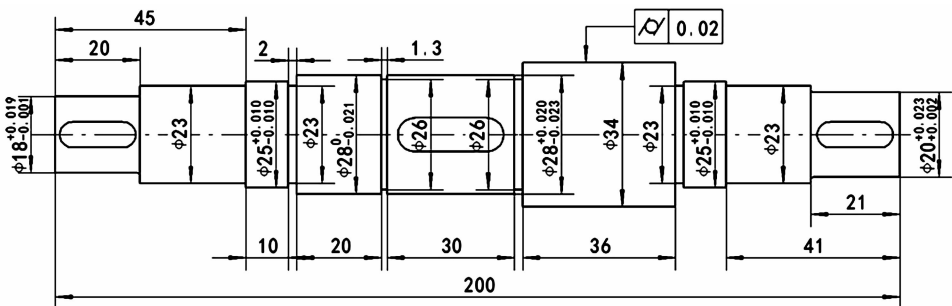


图 3 零件简图(单位:mm)
Fig. 3 Parts diagram (unit:mm)

表 1 圆柱度误差测量结果

Tab.1 Measurement results of cylindricity error

工件编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...
圆柱度值/mm	0.026	0.024	0.023	0.024	0.030	0.027	0.025	0.026	0.022	0.025	...

经验与分析认为,产生该误差的主要原因是机床床身导轨误差、工件变形. 因此,在诊断时,需要首

先询问在整个加工过程中出现的一些情况和现象,如 1) 工件该轴段直径是否两端相差较大;2) 加工过程中机床主轴转动平稳程度;3) 工件加工过程中刀具表面是否有积屑瘤产生;4) 工件表面是否凸凹不平;5) 加工过程中工件是否多次装夹;6) 加工后工件表面粗糙度是否超差;7) 工件弯曲形变现象的程度. 通过对上述问题一一回答,得到回答是{是;比较平稳;无;是;无;是;非常小}. 将以上信息转化成向量 $A=[1,0.83,0,0.67,1,1,0]^T$.

对已建立的知识库进行搜寻,根据以上的模糊向量,可以得到对应的确定度向量和权重向量.

- 1) 机床主轴回转误差. $B_1=(1,0,0,0,0.17,0,0),W_1=(0.23,0.23,0,0.11,0,0.43,0)$;
- 2) 床身导轨误差. $B_2=(0.67,0,0,0.83,0,0,0),W_2=(0.37,0,0,0.63,0,0,0)$;
- 3) 刀具刚度. $B_3=(0.83,0.5,0,0.67,0,0,0),W_3=(0.20,0.21,0,0,0,0.39,0.20)$;
- 4) 工件变形. $B_4=(0.67,0,0,0.33,0,0,0.5),W_4=(0.15,0,0,0.45,0,0,0.40)$;
- 5) 夹具装夹误差. $B_5=(0.33,0.17,0,0,0.5,0,0),W_5=(0.46,0,0,0,0.54,0,0)$;
- 6) 车削参数选择. $B_6=(0,0.5,1,0,0,1,0.83),W_6=(0,0.12,0.33,0,0,0.16,0.39)$;
- 7) 刀具几何角度. $B_7=(0,0.17,0.67,0,0,0,0),W_7=(0,0.28,0.31,0,0,0.41,0)$.

由此得到关系确定度模糊矩阵和权重模糊矩阵分别为

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0.17 & 0 & 0 \\ 0.67 & 0 & 0 & 0.83 & 0 & 0 & 0 \\ 0.83 & 0.5 & 0 & 0.67 & 0 & 0 & 0 \\ 0.67 & 0 & 0 & 0.33 & 0 & 0 & 0.5 \\ 0.33 & 0.17 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0.83 \\ 0 & 0.17 & 0.67 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$
$$W = \begin{bmatrix} 0.23 & 0.23 & 0 & 0.11 & 0 & 0.43 & 0 \\ 0.37 & 0 & 0 & 0.63 & 0 & 0 & 0 \\ 0.20 & 0.21 & 0 & 0 & 0 & 0.39 & 0.20 \\ 0.15 & 0 & 0 & 0.45 & 0 & 0 & 0.40 \\ 0.46 & 0 & 0 & 0 & 0.54 & 0 & 0 \\ 0 & 0.12 & 0.33 & 0 & 0 & 0.16 & 0.39 \\ 0 & 0.28 & 0.31 & 0 & 0 & 0.41 & 0 \end{bmatrix}.$$

由欧几里得贴进度公式计算模糊向量 A 与各可能误差源的贴进度,可得

$$R=(r_1,r_2,r_3,r_4,r_5,r_6,r_7)=(0.318\ 4,0.950\ 2,0.375\ 1,0.844\ 9,0.179\ 1,0.204\ 4,0.320\ 3).$$

最后根据阈值原则,由给定的截取阈值 $\lambda=0.8$ 和计算得出的贴进度可知 $r_2>\lambda,r_4>\lambda$. 运用反向推理得到引起工件圆柱度误差的工艺系统各可能误差源的权重矢量为

$$W=[0.099\ 7,0.297\ 6,0.117\ 5,0.264\ 7,0.056\ 1,0.064\ 0,0.100\ 3].$$

由所得权重矢量可知主要误差源有两点:1)机床导轨误差,其对工件误差影响的权重为 0.297 6;2)工件变形误差,其对工件误差影响的权重为 0.264 7. 该结果与实际加工情况吻合.

参考文献:

[1] 龚雯. 机械加工误差源模糊智能诊断系统建模研究[J]. 机械设计与制造,2003(5):36-38.
[2] 王帅强. 基于进化计算的行为模型自动精化和排序学习方法的研究[D]. 济南:山东大学,2009:3-13.
[3] 任伟建,王重云,康朝海,等. 基于神经网络和专家系统的故障诊断技术[J]. 电器应用,2013,32(15):66-71.
[4] FU Xiao-jin. Novelty analysis and diagnosis system of error sources in machining based on expert system[J]. The Chinese Society of Mechanical of Engineers,2007,28(2):225-232.
[5] 卞玉涛,李志华. 基于专家系统的故障诊断方法的研究与改进[J]. 电子设计工程,2013,21(16):83-87.
[6] 朱芳. 复杂零件加工过程质量控制理论与方法研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2011:3-21.

- [7] 龚雯. 用于机械加工误差源诊断的模糊专家系统设计[J]. 现代制造工程, 2005(5):97-100.
- [8] 吴常坤. 基于 SVM 和模糊专家系统的机械加工工序质量诊断[J]. 科技信息, 2012(36):433-434.
- [9] 谢季坚, 刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004:15-21.
- [10] CHEN De-gang, KWONG S, HE Qiang. Geometrical interpretation and applications of membership functions with fuzzy rough sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2012, 193(16):122-135.
- [11] 陈水利, 李敬功, 王向公. 模糊集理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009:15-21.
- [12] ZENG Li, JIN Nong, ZHOU Shi-yu. Multiple fault signature integration and enhancing for variation source identification in manufacturing processes[J]. IIE Transactions, 2008, 40(10):919-930.
- [13] 王秀艳. 机械加工误差及提高加工精度分析[J]. 中国新技术新产品, 2012(4):111.
- [14] 杜世昌, 王猛, 奚立峰. 多工序加工系统产品尺寸误差传递建模[J]. 机械工程学报, 2011, 47(16):143-149.
- [15] 刘道玉, 江平宇. 基于误差传递网络的工序流波动分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46(2):14-21.
- [16] JIAO Yi-bo, DJURDJANOVIC D. Compensability of errors in product quality in multistage manufacturing processes[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2011, 30(4):204-213.
- [17] 严子深. 基于误差流理论(SOV)的机械加工误差诊断系统研究[D]. 唐山: 河北理工大学, 2005:32-36.
- [18] 孙惠娟, 殷国富, 方辉, 等. 五轴数控机床综合误差建模评价方法研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2012, 44(6):197-202.
- [19] LOOSE J P, ZHOU Shi-yu, CEGLAREK D. Variation source identification in manufacturing processes based on relational measurements of key product characteristics[J]. Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME, 2008, 130(3):031007(1-11)(doi.org/10.1115/1.2844591).
- [20] 龚雯. 基于模糊理论的机械加工误差源智能诊断方法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2003(9):33-35.

Fuzzy Diagnosis Method of Precision Turning Error Sources Using the Euclidean Closeness

WANG Jian-tao, GU Li-zhi, DU Wei-wen,
HUANG Yan-hua, QU Shao-kui

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

Abstract: Based on fuzzy mathematics principle, the method using the Euclidean closeness is put forward to discriminate and determine the machining error sources. The machining errors is described with fuzzy subset and machining error sources are described by language fuzzy vector, and the membership of machining errors and machining errors sources language fuzzy vector is expressed with seven language value. The knowledge base of machining error sources is constructed, attaining the numeric expression of fuzzy language membership functions, and then fuzzy matrix is obtained. Mathematical model of the relation between machining errors and error sources is established. Then Euclidean fuzzy closeness is calculated to realize the machining error sources diagnosis, combining threshold principle and backward reasoning. An example study of a stepped shaft shows that this method is accurate and fast to diagnose machining error sources.

Keywords: euclidean closeness; fuzzy mathematics; error sources; error modeling; fuzzy diagnosis

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 杨建红)

混沌时间序列的 LSSVM 预测方法

莫小琴, 李钟慎

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 结合相空间重构理论, 提出运用最小二乘支持向量机(LSSVM)建立混沌时间序列的预测模型, 并用粒子群优化(PSO)解决 LSSVM 参数寻优的问题. 通过与 RBF 神经网络构建的预测模型相比较, 计算预测模型的均方根误差来评价模型的性能. 结果表明: 采用 PSO 优化的 LSSVM 预测模型的预测精度更高.

关键词: 混沌时间序列; 相空间重构; 最小二乘支持向量机; 粒子群优化; 预测模型

中图分类号: TP 216.1

文献标志码: A

随着混沌理论研究的不断深入, 混沌时间序列预测已成为非常重要的一个研究方向, 并广泛应用于信号处理、自动控制等领域^[1]. 但混沌系统对初值的极端敏感性使其很难进行精确的预测. 相空间重构是混沌时间序列预测的基础, 重构效果的好坏直接影响着预测的精度. 选用互信息法^[2]和 Cao 提出改进的模糊神经网络(fuzzy neural network, FNN)算法^[3]分别对相空间重构参数进行确定, 能够实现比较好的重构效果. 最小二乘支持向量机(least squares support vector machines, LSSVM)是一种新型的预测方法, 拥有强大的学习能力, 能很好地解决神经网络结构训练时容易陷入局部极小和过拟合等问题^[4-5]. 但是 LSSVM 在不同参数作用下, 预测性能会有很大的差别. 粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)是近年来发展比较快的一种简单可行的智能寻优算法, 能快速有效地解决如何寻找合适参数的问题^[6]. 因此, 本文在结合相空间重构理论的基础上, 提出 PSO 算法优化的 LSSVM 的混沌时间序列预测模型, 分别对一阶 Logistic、二阶 Henon、三阶 Lorenz 等 3 种典型混沌时间序列进行预测, 并与 RBF 神经网络的预测结果^[7]进行比较.

1 时间序列相空间重构

1.1 相空间重构

相空间重构提出从高维的相空间中恢复混沌吸引子^[8]. 它的思想是系统中任一个分量的演化进程都是由其他与其相互作用的分量决定的, 所以通过分析某一分量的一批时间序列数据, 能提取和恢复出原系统的规律. 根据 Takens 定理, 当吸引子的分形维数为 d 时, 选择合适的延迟时间 τ 和嵌入维数 m , 且满足 $m \geq 2d + 1$, 对混沌时间序列 $\{x(t)\}, t = 1, 2, \dots, n$ 进行相空间重构, 即

$$X(t) = (x(t), x(t+\tau), \dots, x(t+(m-1)\tau)), \quad X(t) \in \mathbf{R}^m, \quad t = 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

对 n 步后的预测为

$$X(t+n) = F(X(t)), \quad t = 1, 2, \dots, N. \quad (2)$$

式(2)中: $F(\cdot)$ 为构建的预测模型. 由 $F(x(k-m), x(k-m+1), \dots, x(k-1))$ 和 $Y(k) = x(k)$ 组成的样本对, 训练并建立 LSSVM 预测模型, 从而完成对混沌时间序列的预测.

1.2 重构相空间参数的选取

相空间重构吸引子的成败在于延迟时间和嵌入维数的选取, 并且这 2 个参数的选取是互不相关的^[9]. 互信息法是一种有效估计延迟时间的方法. Shaw 提出互信息第一次到达最小时滞时即为延迟时

间^[10]. 定义计算延时时间 τ 的公式为

$$I(\tau) = \sum_{n=1}^N P(x_n, x_{n+\tau}) \log_2 \left| \frac{P(x_n, x_{n+\tau})}{P(x_n) \cdot P(x_{n+\tau})} \right|.$$

(3)

式(3)中: $P(x_n, x_{n+\tau})$ 为时间序列 $\{x_n\}$ 和 $\{x_{n+\tau}\}$ 的联合概率; $I(\tau)$ 为某一时间序列包含另一时间序列信息的概率, 当 $I(\tau)$ 为第一个极小值时, τ 的取值就是最佳的延迟时间.

CAO 方法是对 FNN 算法改进后提出的一种选择最佳嵌入维数的方法^[3]. 其运算步骤为如下.

在 d 维空间中, 每一个相点矢量 $\mathbf{X}(i)$ 都有一个某距离内的最邻近点 $N^{NN}(i)$, 两者距离为 $R_d(i)$, 当维数增加到 $d+1$ 时, 两相点的距离发生变化, 则在 $d+1$ 维相空间中的距离为

$$R_{d+1}^2(i) = R_d^2(i) + \|X(i + \tau d) - X^{NN}(i + \tau d)\|^2.$$

(4)

若 $R_{d+1}(i)$ 远大于 $R_d(i)$, 可认为这两点是伪邻近点.

CAO 方法定义计算嵌入维数的公式为

$$a_2(i, d) = \frac{\|x_{d+1}(i) - x_{d+1}^{NN}(i)\|}{\|x_d(i) - x_d^{NN}(i)\|}.$$

(5)

计算所有 $a_2(i, d)$ 的平均值, 得到

$$E(m) = \frac{1}{N - m\tau} \sum_{i=1}^{N-m\tau} a_2(i, m).$$

(6)

计算 m 维到 $m+1$ 维的变化, 可得

$$E_1(m) = \frac{E(m+1)}{E(m)}.$$

(7)

式(7)中: 随着 m 的变化, $E_1(m)$ 达到饱和, 此时, $m+1$ 取值就是所求的最佳嵌入维数.

采用这 2 种方法分别确定的 3 种典型混沌时间序列的延迟时间(τ)以及嵌入维数(m), 如表 1 所示. 通过对比重构吸引子的几何形状与原吸引子之间的相似性, 以及不同延迟时间所产生的差异性, 可以验证这 2 种方法选取的参数能够达到比较好的重构效果^[8].

表 1 实验参数

Tab. 1 Experimental parameters

参数	Logistic 混沌系统	Henon 混沌系统	Lorenz 混沌系统
动力系统	$\lambda=4$	$a=1.4, b=0.3$	$s=16, b=4, r=45.92$
LSSVM 参数(γ, σ)	(90, 0.01)	(80, 0.05)	(100, 6)
τ/s	6	1	11
m	2	3	3

2 基于 LSSVM 的回归预测

2.1 LSSVM 模型

选取延迟时间 τ 和最优嵌入维数 m 后, 构造样本数据对

$$(X_1, y_1), (X_2, y_2), \dots, (X_k, y_k), (X_{k+1}, y_{k+1}), \dots, (X_M, y_M) \in \mathbf{R}^m \times \mathbf{R}.$$

(8)

式(8)中: $X_i(i=1, 2, \dots, M)$ 为预测输入数据; $y_i(i=1, 2, \dots, M)$ 为对应的输出数据.

对于一个给定的训练样本数据集 $(X_i, y_i)(i=1, 2, \dots, l)$, 在高维空间中用线性函数拟合样本, 可得

$$y_i = f(x_i) = \mathbf{w}^T \varphi(x_i) + b.$$

(9)

式(9)中: $\mathbf{w}^T$ 为二次规划问题解的矩阵; $\varphi(\cdot)$ 为非线性映射关系函数; b 为常值偏差.

时间序列的数据集被非线性映射函数 $\varphi(\cdot)$ 由输入空间映射到特征空间, 这样就把相应的预测问题转化优化的问题.

LSSVM 的目标优化函数为

$$\min_{\omega, b, \epsilon} J(\omega, \epsilon) = \frac{1}{2} \mathbf{w}^T \mathbf{w} + \frac{\gamma}{2} \sum_{i=1}^M \epsilon_i^2.$$

(10)

约束条件为

$$y_i = \mathbf{w} \varphi(x_i) + b = \epsilon_i, \quad \epsilon_i > 0, \quad i = 1, 2, \dots, l.$$

(11)

建立 Lagrange 函数

$$L(w,b,\epsilon,a) = \frac{1}{2}w^T w + \frac{\gamma}{2} \sum_{i=1}^l \epsilon_i^2 - \sum_{i=1}^l a_i [w^T \varphi(x_i) + b + \epsilon_i - y_i]. \tag{12}$$

式(10)~(12)中: ϵ 为指数; a 为拉格朗日乘子; γ 为正则化参数. 根据最优化条件对 $L(w,b,\epsilon,a)$ 进行求偏导并消去 ϵ_i 和 w 后,把优化问题转化为求解下列线性方程组,即

$$\begin{bmatrix} 0 & \mathbf{F}^T \\ \mathbf{F} & \mathbf{\Omega} + \gamma^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{Y} \end{bmatrix}. \tag{13}$$

式(13)中: $\mathbf{Y}=[y_1,y_2,\cdots,y_l]^T$; $\alpha=[a_1,a_2,\cdots,a_l]^T$; $\mathbf{F}=[1,1,\cdots,1]^T$; $\mathbf{I}$ 为单位阵; $\mathbf{\Omega}$ 可表示为

$$\Omega_{i,j} = \varphi(x_i)^T \varphi(x_j) = K(x_i,x_j), \quad i,j = 1,2,\cdots,l. \tag{14}$$

式(14)中: $K(\cdot)$ 为满足 Mercer 条件的核函数. 以最小二乘法求解系数 a_i 和偏差 b ,可得混沌时间序列的 LSSVM 预测模型为

$$f(x) = \sum_{i=1}^l a_i [\exp(\frac{-\|x-x_i\|^2}{2\sigma^2}) + b]. \tag{15}$$

式(15)中: σ 为径向基宽度是一个待定参数.

2.2 PSO 参数寻优

PSO 算法^[11]起源于对鸟群捕食行为的研究,是一种模拟群体智能行为的优化算法. 其基本原理是:每一次迭代,粒子通过跟踪个体极值 P_{best} 和全局极值 g_{best} 这 2 个极值来更新自己的速度和位置;之后根据目标值的大小选择最优参数再次进行训练,直到得到目标训练模型. 在找到 2 个最优解时,粒子根据下式来更新自己的速度和位置,即

$$v = \omega \times v + C_1 \times r_1 \times (P_{best} - x) + C_2 \times r_2 \times (g_{best} - x), \tag{16}$$

$$\chi = x + v. \tag{17}$$

式(16),(17)中: ω 是惯性权重因子; v 为粒子速度; χ 为当前粒子位置; r_1,r_2 为介于(0,1)之间的随机数; C_1,C_2 为学习因子,通常取 1.5.

LSSVM 模型正则化参数 γ 和径向基宽度 σ 的选取对预测精度有很大的影响^[12]. 文中采用 PSO 算法来优化 LSSVM 参数. 基本步骤如下:1) 随机产生一组 $\{\gamma,\sigma\}$ 作为粒子的初始位置,读取样本数据;2) 进行 LSSVM 训练,计算训练样本的均方误差作为验证误差;3) 以验证误差作为适应值,同时记忆个体与群体对应的最佳适应值的位置,再根据 PSO 优化方程搜索更好的 $\{\gamma,\sigma\}$;4) 重复训练与计算误差直到满足结束条件.

3 仿真研究

把一维 Logistic 系统、二维 Henon 系统和三维 Lorenz 系统 3 种典型的混沌系统作为研究对象. 通过迭代计算得到混沌时间序列,均去掉前 3 000 个暂态数据,选取后 3 000 点作为实验数据,对所选数据进行归一化处理,选取合适的延迟时间和嵌入维数,对 3 种典型的混沌时间序列进行相空间重构. 选用其中 1 500 个作为训练数据,应用相应的测试模型进行学习和预测,后 1 500 个作为测试数据. 在 PSO 优化模型^[13]中,采用的粒子种群数为 20,最大迭代次数 90,惯性权重为 0.9. 运行 PSO 优化模型,不断更新粒子当前的最优位置,分别得到 3 种混沌时间序列的 LSSVM 最优参数 $\{\gamma,\sigma\}$,结果如表 1 所示.

为了衡量预测模型的有效性和精确度,采用均方误差(RMSE)作为评价整体预测性能的指标,即

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{n=1}^K (x(n) - \hat{x}(n))^2}. \tag{18}$$

式(18)中: $x(n)$ 是第 n 个时间序列的实际值; $\hat{x}(n)$ 是预测值.

应用 LSSVM 预测模型分别对 3 种典型混沌系统进行预测,表达式与预测结果如下所示.

1) 考虑 Logistic 映射迭代表达式为

$$x(n+1) = \lambda x(n)(1-x(n)). \tag{19}$$

式(19)中:初始值取 0.4,当 $\lambda=4$ 时,系统处于混沌状态. 运用 LSSVM 预测模型的输出值和真实值的比较($x(n)$)和预测误差(e),如图 1(a)所示. 为了便于观察,图 1(a),(b)只截取 800 到 950 之间的数据预

测结果进行展示;图 1(c)则截取 800 到 900 之间的数据.

2) 考虑 Henon 映射迭代表达式

$$\left. \begin{aligned} x(n+1) &= 1 - ax(n)^2 + y(n), \\ y(n+1) &= bx(n). \end{aligned} \right\}$$

(20)

式(20)中:取 $a=1.4, b=0.3$, 此时系统处于混沌状态. 预测结果如图 1(b)所示.

3) 考虑 Lorenz 映射迭代表达式

$$\left. \begin{aligned} dx/dt &= s(y-x), \\ dy/dt &= rx-y-xz, \\ dz/dt &= -bz+xy. \end{aligned} \right\}$$

(21)

式(21)中:当 $s=16, b=4, r=45.92$ 时,系统处于混沌状态. 运用 LSSVM 预测模型的输出值和真实值的比较和预测误差,如图 1(c)所示. 由输出误差可知:PSO 优化的 LSSVM 模型能够实现对混沌时间序列较精确的预测.

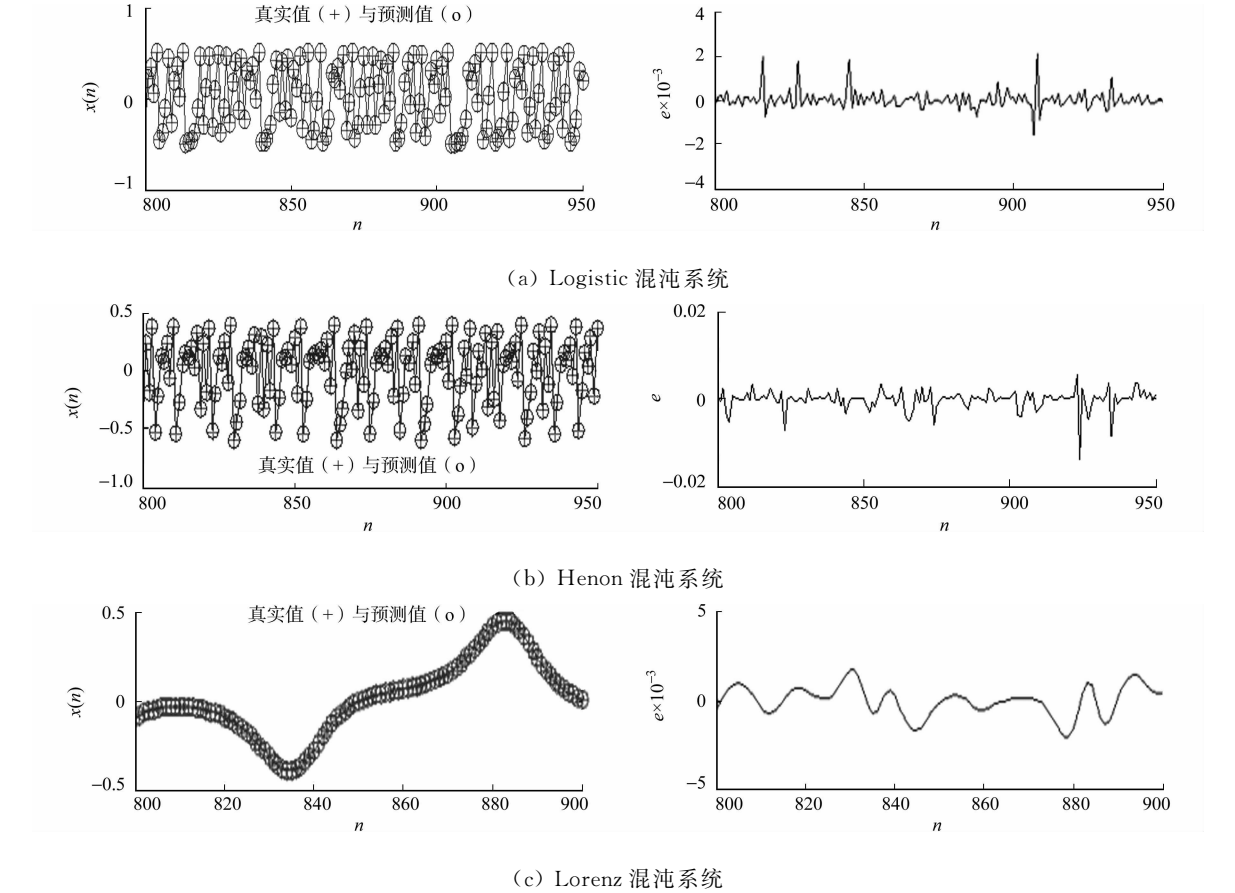


图 1 不同混沌系统的预测结果

Fig. 1 Prediction results of different chaotic system

仿真实验中所用的参数,如表 1 所示. 通过计算均方误差($\hat{e}$)作为衡量性能的标准,并与 RBF 神经网络建立的预测模型的预测结果进行比较. 其中:RBF 神经网络采用的是二层结构网络,神经元数目等于输入向量的个数,比较结果如表 2 所示.

由表 2 可知:采用 PSO 算法优化的 LSSVM 的预测效果明显优于 RBF 预测算法.

4 结束语

结合相空间重构理论建立 LSSVM 预测模型,利用 PSO 算法的全局优化和快速收敛的能力,克服了 LSSVM 预测模型参数选取的随机性,提

表 2 均方误差的对比结果

Tab. 2 Compared results of the mean square error

预测模型	$\hat{e}$		
	Logistic 系统	Henon 系统	Lorenz 系统
LSSVM	5.24×10^{-4}	1.12×10^{-3}	1.67×10^{-3}
RBF	5.95×10^{-3}	9.58×10^{-3}	1.16×10^{-2}

高了 LSSVM 预测模型的泛化能力和预测精度. 通过对 3 种典型的混沌时间序列进行预测, 并与 RBF 神经网络建立的预测模型的预测结果进行比较, 表明 PSO 优化的 LSSVM 预测模型的预测精度更高.

参考文献:

[1] 党建亮. 基于支持向量机的混沌序列预测方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006: 12-24.

[2] 雷绍兰, 孙才新, 周浪, 等. 基于改进加权一阶局域预测模型的短期负荷预测方法研究[J]. 电测与仪表, 2006, 43 (455): 5-6.

[3] CAO Liang-yue. Practical method for determining the minimum embedding dimension of a scalar time series[J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 1997, 110(1): 43-50.

[4] 朱光兆, 何伟. 基于支持向量机的混沌时间序列预测分析[J]. 自动化仪器仪表, 2012(1): 145-149.

[5] 往永生, 刘卫华, 杨利斌, 等. 基于最小二乘支持向量回归的混沌时间序列预测研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2009, 24(3): 283-288.

[6] 翟永杰, 王子杰, 黄宝还, 等. 基于 PSO 优化的 SMO 算法研究及应用[J]. 华北电力大学学报, 2008, 35(1): 57-61.

[7] 孙涛, 李健, 郑豫, 等. 基于神经网络的混沌时间序列预测[J]. 成都信息工程学院学报, 2008, 23(2): 126-130.

[8] 张弦, 王宏力. 嵌入维数自适应最小二乘支持向量机状态时间序列预测方法[J]. 航空学报, 2007, 31(12): 672-675.

[9] 张淑清, 贾键, 高敏, 等. 混沌时间序列重构相空间参数选取研究[J]. 物理学报, 2010, 59(3): 1576-1582.

[10] 王朝. 基于 SVM 的混沌时间序列预测方法研究[D]. 保定: 河北大学, 2012: 15-20.

[11] 陈旭, 刘延泉, 葛建宏. 基于 PSO 优化的 LS-SVM 的混沌时间序列预测[J]. 仪器仪表用户, 2009, 16(1): 135-136.

[12] 孙斌, 姚海涛. 基于 PSO 优化 LSSVM 的短期风速预测[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 85-89.

[13] 朱小明, 张慧斌. PSO 算法的稳定性分析及算法改进[J]. 计算机科学, 2013, 40(3): 275-278.

Prediction Method of the Chaotic Time Series Using
Least Squares Support Vector Machine

MO Xiao-qin, LI Zhong-shen

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

Abstract: Based on the phase space reconstruction theory, prediction model of chaotic time series using least squares support vector machine (LSSVM) was presented in this paper, and particle swarm optimization (PSO) was used to solve the LSSVM parameter optimization problems. By comparing with the established prediction model of RBF neural network, the root mean square error of the prediction model was calculated to evaluate the performance of the model. The results show that the PSO optimized LSSVM prediction model has higher prediction accuracy.

Keywords: chaotic time series; phase space reconstruction; least squares support vector machine; particle swarm optimization; prediction model

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 杨建红)

利用 Petri 网特征结构的故障诊断方法

叶丹丹, 罗继亮

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为解决大规模复杂系统故障诊断中计算复杂性高的问题,提出一种基于 Petri 网的在线故障诊断方法. 首先,建立诊断对象的规范 Petri 网模型;其次,提出模型的严格最小库所不变量和特征库所不变量集合,并借助特征库所不变量集合描述 Petri 网模型的结构信息;最后,基于特征库所不变量集合提出任意当前标识的故障函数,并利用故障诊断函数完成故障识别和定位. 结果表明:该故障诊断方法采用了系统结构信息,无需遍历系统状态空间,具有多项式级的计算复杂性,能够满足实时性要求.

关键词: 故障诊断; Petri 网; 库所不变量; 故障函数

中图分类号: TP 277

文献标志码: A

由于 Petri 网是直观的图形化的语言,而且存在建模效率高的优点,因此近几年被广泛应用于离散事件系统的故障诊断中^[1-5]. Giua 等^[6]提出了基于基础标识和判断数来分析事件序列中的故障信息. Genc 等^[7]给出了基于有界 Petri 网的分布式故障诊断方法. Lefebvre 等^[8]构建了一个最小诊断器用来立即检测和隔离故障. Ru 等^[9]提出了将给定的部分可观的 Petri 网转化为等价的有标签的 Petri 网,通过库所和变迁的观测器,计算出故障变迁发生的置信度. Cabasino 等^[10]将基础标识的方法应用到制造业系统中,通过对比基础可达诊断器和可达集合,验证了此方法运算复杂度低的问题. Cabasino 等^[11]利用基础标识的方法,将故障变迁推广到不可观变迁及带有相同标签的不可分辨可观变迁. 郑永煌等^[12]针对一个液体火箭发动机启动过程的故障诊断,提出了针对实时 Petri 网的诊断方法. Hashizume 等^[13]提出利用 Petri 网中的库所不变量来寻找系统故障的方法. 本文在分析文献方法中的计算效率低、故障诊断不及时、故障定位模糊等缺点后,提出了基于 Petri 网特征结构的故障诊断方法.

1 基本概念和定义

Petri 网结构表示为 $N=(P,T,Pre\ Post)$. 其中: P 是库所的集合, $P=\{p_1,p_2,\cdots,p_n\}$; T 是变迁的集合, $T=\{t_1,t_2,\cdots,t_m\}$; $Pre:P\times T\rightarrow\{0,1,\cdots\}$ 是前向关联矩阵,定义了从库所到变迁的有向弧的权值; $Post:T\times P\rightarrow\{0,1,\cdots\}$ 是后向关联矩阵,定义了从变迁到库所的有向弧的权值. 标识是 n 维的列向量 m ,其元素 $m(j)$ 是第 j 个库所的托肯数目. m_0 是系统的初始标识,变迁 t_j 可表示为一个 m 维向量 δ_j ,其第 j 分量等于 1. 当 t_j 发生后,系统到达新标识 $m'=m+D\cdot\delta_j$. 其中: $D=Post-Pre$ 称为关联矩阵;变迁序列表示为 δ ,也可以描述为一个激发向量 δ ,其各分量等于相应变迁在 δ 中出现的次数.

在一个 Petri 网结构里,存在一个向量 $y:P\rightarrow\mathbf{Z}$. 如果 $y\geq 0$,并且 $y\cdot D=0$,可以得到

$$y\cdot m = y\cdot m_0. \tag{1}$$

整个系统若是可以正常运行,则标识 m 要满足方程(1).

收稿日期: 2013-10-22

通信作者: 罗继亮(1977-),男,副教授,主要从事离散事件系统监控理论和 Petri 网理论与应用的研究. E-mail:jlluo@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家青年自然科学基金资助项目(60904018);福建省自然科学基金资助项目(2010J01339);福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划项目(11FJRC01);福建省高校杰出青年科研人才培育计划项目(JA10004);中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(JB-SJ1006)

定义 1 设 R 为集合 S 上的一个关系,则集合 $\{x \in S | (x, y) \in R, \text{至少一个 } y \in S\}$ 称为 R 的支集,记做 $\text{Supp } R$,则 $\text{Supp } y = \{p \in P | y(p) \neq 0\}$.

定义 2 Petri 网结构里的一个库所不变量 y ,若不存在另一个库所不变量 $y' \neq y$,使得 $\text{Supp } y' \subset \text{Supp } y$,则该库所不变量 y 为最小库所不变量.

定义 3 如果最小库所不变量 y 中各元素的最大公约数为 1,那么 y 称为严格最小库所不变量. y_1 就是严格最小库所不变量,而 y_2, y_3 不是严格最小库所不变量.

定义 4 在一个 Petri 网结构里,如果 Y 是严格最小库所不变量组成的集合,并且其中元素是库所不变量的最大线性无关组,那么 Y 称为特征库所不变量集.

特征库所不变量集 Y 蕴含 Petri 网结构的系统信息,即 Petri 网中所有库所不变量可由该集合中元素线性表示,它表征了由严格最小库所不变量为基底向量所构成的空间.若系统可以正常运行,则系统 Petri 网结构中所有库所间的关系须包含于该空间内.

定义 5 在一个 Petri 网结构里, Y 是一个特征库所不变量集.设 Y 内包含 k 个元素,那么标识 m 的故障矩阵定义为 $k \times n$ 维的矩阵 $T(m)$,它需要满足下列条件

$$T(m)_{i,j} = \begin{cases} 1, & y_i \cdot m \neq y_i \cdot m_0 \wedge y_i(p_j) \neq 0, & 1 \leq i \leq k, \quad 1 \leq j \leq n, \\ 0, & y_i(p_j) = 0, & 1 \leq i \leq k, \quad 1 \leq j \leq n, \\ -1, & y_i \cdot m = y_i \cdot m_0 \wedge y_i(p_j) \neq 0, & 1 \leq i \leq k, \quad 1 \leq j \leq n. \end{cases}$$

从严格最小库所不变量 y_i 中,可以获取非零列(j 列)所对应的库所 p_j 所携带的系统信息.若在任意当前标识 m 下,库所间关系不满足严格最小库所不变量 y_i ,则在该 y_i 中携带系统信息的库所 p_j 可能存在故障,记其 $T(m)_{i,j}$ 为 1;同理,若库所间关系满足严格最小库所不变量 y_i ,则该 y_i 中携带系统信息的库所 p_j 无故障,记其 $T(m)_{i,j}$ 为 -1;而 y_i 中零列,即不体现系统信息的库所 p_j 的故障情况未知,记其 $T(m)_{i,j}$ 为 0.

定义 6 在一个 Petri 网结构中,定义一个函数 f ,若对于 $\forall p_j \in P$,有 $f(p_j) = \sum_{i=1}^k T_{i,j}, j = 1, 2, \dots, n$,则称函数 f 为库所的故障函数.

故障函数表征了系统的故障信息,即各个库所发生故障概率的相对大小,某一个 p_j 库所的故障函数 f 越大,则其发生故障的可能性越高.在诊断故障的过程中,计算出每个库所的故障函数,取其中最大值,也就是故障最有可能发生的库所,这样就可以锁定故障范围了.

2 故障诊断算法及其分析

输入:Petri 网 N, m_0 和任意当前标识 m ;输出:故障概率最大的结点(库所).

步骤 1 求出 Petri 网 N 的关联矩阵 D ;

步骤 2 利用方程(1),计算一个特征库所不变量集 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_k\}, k \in \mathbf{Z}^+$;

步骤 3 判断 $y_i \cdot m = y_i \cdot m_0, i = 1, 2, \dots, k$,等式是否成立;如果上述等式均成立,则没有故障发生,算法退出;否则,执行下一步;

步骤 4 根据定义 5,计算故障矩阵 $T(m)$;

步骤 5 根据 $T(m)$ 和定义 6,计算故障函数 λ_m ;

步骤 6 比较 n 个库所的故障函数 $\lambda_m(p_j)$,选出最大的 $\lambda_m(p_j)$,则故障出现在第 j 个库所的概率最大,退出算法.

在算法中,根据给定的系统 Petri 网的模型,首先可以求得该 Petri 网的关联矩阵 D .如果当前标识 m 可以从初始标识 m_0 到达,则其必须满足 $m = m_0 + D \cdot \delta$.在式子的两边同时右乘 n 维的矩阵 y ,可以得到 $y \cdot m = y \cdot m_0 + y \cdot D \cdot \delta$.当 $y \cdot D = 0$ 时,即 $y \cdot m = y \cdot m_0$,对于任何从初始标识 m_0 开始可达的标识 m 都满足托肯的总数是不变量;如果 Petri 网模型代表的是一个正常运行的系统,则对于任何可达的当前标识 m 都满足约束条件 $y \cdot m = y \cdot m_0$.通过方程 $y \cdot D = 0$ 去寻找库所不变量 y .

解这个齐次方程,利用该方程的基础解系,可以表示空间中满足该约束的任意库所不变量 y ,用一个集合表示基础解系,即特征库所不变量集 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_k\}, k \in \mathbf{Z}^+$.在这个集合中,每一个元素都需

分别选取 $[y_1, y_2, y_5, y_7]$ 为 $[1, 0, 0, 0], [0, 1, 0, 0], [0, 0, 1, 0]$ 和 $[0, 0, 0, 1]$, 代入求解严格最小库所不变量 y 的方程组

$$\left. \begin{aligned} -y_1 + y_3 &= 0, & -y_2 + y_4 &= 0, & -y_3 - y_4 - y_5 + y_6 + y_7 &= 0, \\ -y_7 + y_8 &= 0, & -y_7 + y_9 &= 0, & -y_8 - y_9 + y_{10} &= 0, \\ -y_{10} + y_{11} &= -y_0 + y_1 + y_2 &= 0, \end{aligned} \right\}$$

(2)

可得到一组基础解系, 即 $\xi_1 = [1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0], \xi_2 = [1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0], \xi_3 = [0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0], \xi_4 = [0, 0, 0, 0, 0, 0, -1, 1, 1, 1, 2, 2]$. 令 $y_1 = \xi_1, y_2 = \xi_2, y_3 = \xi_3, y_4 = \xi_4$, 得到一个特征库所不变量集

$$Y = \{y_1, y_2, y_3, y_4\}.$$

其中: 4 个严格最小库所不变量为

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 \end{bmatrix}.$$

给定一个当前

标识 $m' = [0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$, 带入方程(1)中, 容易得到

$$\begin{cases} y_1 \cdot m' \neq y_1 \cdot m_0, & y_2 \cdot m' \neq y_2 \cdot m_0, \\ y_3 \cdot m' \neq y_3 \cdot m_0, & y_4 \cdot m' \neq y_4 \cdot m_0. \end{cases}$$

因此, 当前标识 m' 对应的故障矩阵为

$$T(m') = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

则相应的故障函数为 $\lambda(p_0) = \sum_{i=1}^4 T_{i,0} = 2$; 同理可得, $\lambda(p_1) = 1, \lambda(p_2) = 1, \lambda(p_3) = 1, \lambda(p_4) = 1, \lambda(p_5) = 1, \lambda(p_6) = 4, \lambda(p_7) = \lambda(p_8) = \lambda(p_9) = \lambda(p_{10}) = \lambda(p_{11}) = 1$. 比较发现 $\lambda(p_6)$ 取值最大, 则故障发生库所 $\lambda(p_6)$ 处的概率最大.

下面需要验证实例的正确性. 首先根据给定的 Petri 网模型, 可以得到该 Petri 网系统的可达图, 如图 2 所示. 在图 2 中可以看到: 任意当前标识下, 库所 p_5 和 p_6 中是不可能同时存在托肯的; 同样从火箭启动的过程中看到, 只有当燃烧剂到达预燃室、氧化剂到达预燃室以及涡轮泵准备就绪时, 托肯才有可能到达涡轮泵测速状态, 与可达图相符. 在给定的当前标识 $m' = [0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 下, 库所 p_5 和 p_6 中同时存在托肯, 并且库所 p_1 和 p_2 中也存在托肯. 从图 2 可以看出: 当 p_1 和 p_2 中存在托肯时, 库所 p_5 中必然存在托肯, 所以最大可能是库所 p_6 违背了可达图的演化规则, 即 p_6 中出现故障的概率最大, 这也验证了算法的正确性.

4 结束语

在分析文献方法中的计算效率低、故障诊断不及时、故障定位模糊等缺点后, 提出了基于 Petri 网特征结构的故障诊断方法. 给出了特征库所不变量集的定义, 提出了故障矩阵和故障函数的概念, 并利用数学计算来进行故障定位. 该方法使得故障诊断更加快速, 故障定位更加精确, 由于是多项式级的计算复杂度, 同样利于工程应用.

参考文献:

[1] SAMPATH M, SENGUPTA R, LAFORTUNE S, et al. Diagnosability of discrete-event systems[J]. IEEE Transac-

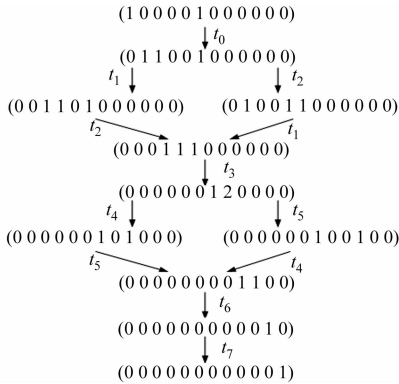


图 2 液体火箭发动机启动过程的 Petri 网可达图
Fig. 2 Reachable graph of the starting process of liquid propellant rocket engine in Petri nets

- tions on Automation Control, 1995, 40(9): 1555-1575.
- [2] MOSTERMAN P J. Diagnosis of physical systems with hybrid models using parameterized causality[C]// Proceedings of the 4th International Workshop on Hybrid Systems: Computation and Control. London: Springer-Verlag, 2001: 447-458.
- [3] ASHLEY J, HOLLOWAY L E. Qualitative diagnosis of condition systems[J]. Discrete Event Dynamic Systems, 2004, 14(4): 395-412.
- [4] HADJICOSTIS C N, VERGHESE G C. Monitoring discrete event systems using Petri net embeddings[J]. Lecture Notes in Computer Science, 1999, 1639(1): 188-208.
- [5] CABASINO M P, GIUA A, LAFIRTYBE S, et al. Diagnosability analysis of unbounded Petri nets[C]// Proceeding of the 48th IEEE Conference on Decision and Control. Shanghai: IEEE Press, 2009: 1267-1272.
- [6] GIUA A, SEATZU C. Fault detection for discrete event systems using Petri nets with unobserved transitions[C]// Proceeding of the 44th IEEE Conference on Decision and Control. Seville: IEEE Press, 2005: 6323-6328.
- [7] GENC S, LAFORTUNE S. Distributed diagnosis of place-bordered Petri nets[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2007, 4(2): 206-219.
- [8] LEFEBVRE D, DELHERM C. Diagnosis of EDS with Petri net models[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2007, 4(1): 114-118.
- [9] YU R, HADJICOSTIS C N. Fault diagnosis in discrete event system modeled by partially observed Petri nets[J]. Discrete Event Dynamic Systems, 2009, 19(4): 551-575.
- [10] CABASINO M P, GIUA A, POCCI M, et al. Discrete event diagnosis using labeled Petri nets: An application to manufacturing systems[J]. Control Engineering Practice, 2011, 19(9): 989-1001.
- [11] CABASINO M P, GIUA A, SEATZU C. Diagnosis using labeled Petri nets with silent or undistinguishable fault event[J]. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 2013, 43(2): 345-355.
- [12] 郑永煌, 田锋, 李人厚, 等. 基于 Petri 网的液体火箭发动机启动过程实时在线故障诊断方法[J]. 信息与控制, 2010, 39(2): 207-211.
- [13] HASHIZUME S, YAJIMA T, KUWASHITA Y, et al. Integration of fault analysis and interlock controller synthesis for batch process[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2008, 16(1): 57-61.

Method for Fault Diagnosis Using Characteristic Structure of Petri Nets

YE Dan-dan, LUO Ji-liang

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

Abstract: For fault diagnosis in large complex systems, a on-line fault diagnose method is proposed to solve the problem of high computational complexity. First, modeled a Petri net model. Secondly, proposed the strict minimal place-invariant and the set of characteristic place-invariant, so that might describe the structure information of Petri net model. Finally, based on the set of characteristic place-invariants, the failure function for any current marking is proposed. And then, utilized this failure function to diagnose and locate the faults. The result shows that this fault diagnosis method with the structure information dose not need traverse all states space of system. Furthermore, this method is with the computational complexity of polynomial, which makes this method meet the real time requirements.

Keywords: fault diagnosis; Petri nets; place-invariant; failure function

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 吴逢铁)

应用 SIP 协议的楼宇对讲系统设计与实现

许庆泳, 谭鸽伟

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 通过对 SIP 协议功能及特性的研究, 将 SIP 协议应用到传统的小区楼宇对讲系统. 提出一种新型的基于 SIP 协议的小区楼宇对讲系统解决方案, 克服了传统方案的许多不足, 解决了楼宇对讲网络与因特网、通信网的无缝融合, 可实现家居门禁移动对讲, 提升楼宇智能化水平. 设计一个嵌入式终端 SIP 协议栈, 完成基于该协议栈的楼宇对讲系统终端的实现, 并搭建一个小型的楼宇对讲系统, 验证了方案的可行性. 测试结果分析表明: 该方案具备了较好的可行性和稳定性.

关键词: SIP; 协议栈; 小区楼宇; 对讲系统; 网络融合

中图分类号: TN 919.2

文献标志码: A

相比于数字化网络, 当前广泛使用的是基于 CAN 总线独立组网型的楼宇对讲系统^[1], 但其存在着大规模组网复杂, 业务单一等缺点. 在物联网概念和网络融合的背景下, 将楼宇对讲系统数字化, 与移动通信网络融合成为了新的需求. SIP (session initiation protocol) 是 IETF (internet engineering task force) 提出的会话管理协议^[2], 在 VOIP (voice over internet protocol) 中表现出了优越的信令管理性能, 并被 3GPP (the 3rd generation parteer project) 定为 IMS (IP multimedia subsystem) 核心网的会话控制信令, 成为因特网、通信网及其他独立网络相互融合的首选协议. 本文提出了一种基于 SIP 的小区楼宇对讲系统解决方案, 将 SIP 的会话管理优势与 IP 网络数据传输优势相结合, 应用在小区楼宇对讲领域.

1 系统原理分析

传统的楼宇对讲系统一般由门口机、室内用户机、中央控制器以及各楼层的分配器、解码器组成, 有独立的布线结构^[3], 实现访客与户主之间的呼叫寻址、语音通信和门禁控制.

基于 SIP 协议的新方案, 采用 IP 网搭建小区内部 SIP 网络, 使得建网高效、简易. 通过 SIP 协议的注册机制, 可以很好地实现同一服务器域内的任何两点间呼叫寻址, 创建并管理两端间的多媒体会话. 结合 SDP (session description protocol) 协议开展多种类型业务, 包括文本、语音、视频、XML 甚至 Java 小程序. 将基于 SIP 协议的楼宇对讲系统与 IMS 网络进行无缝连接, 实现与数据网、通信网的最终融合. 经过二次开发, 极易实现基于楼宇平台上的家居安全、状态显现、移动监控等新型应用.

2 SIP 楼宇对讲系统设计

2.1 系统网络结构设计

本方案的网络结构设计, 如图 1 所示. 系统由基于 SIP 的门口机、基于 SIP 的室内用户机和小区管理中心的 SIP 服务器组成. 整体采用 C/S 架构, 门口机和室内机为客户端, 小区管理中心为服务端, 双绞线方式接入小区局域网, 并以 IP 网接入方式接入 IMS 通信网. 系统的关键包括客户端 SIP 协议栈设

收稿日期: 2013-06-04

通信作者: 谭鸽伟 (1970-), 女, 讲师, 主要从事 SAR 信号处理, 高分辨率机载 SAR 运动补偿, 模式识别, 智能天线的研究. E-mail: tangewei70@163.com.

计、终端的软硬件设计和网络搭建. 因此, 设计将侧重于方案设计及室内机终端的软硬件实现.

2.2 SIP 协议栈设计

SIP 协议栈是在开源 OSIP 的基础上^[4], 针对楼宇对讲系统的行业特点开发实现, 整个协议栈结构^[5], 如图 2 所示. 协议栈最顶层的事务用户层实现了协议栈面向用户所表现出来的全部行为和功能, 包括 UI 界面生成的操作指令、底层上传的 SIP 事件指令和定时器生成的超时指令. 实现中, 设计了一个分层通信处理机制, 将协议栈收到的指令用 E_CMD_TYPE 枚举类型定义, 并为每种类型的指令注册对应的回调处理函数, 所有的指令类型及处理函数组成一个指令池. 每收到一个指令 eCmd, 则从指令池中寻找匹配对应的处理函数 HandlerFunc (Msg_DATA_ST stMsgData, int nAcutIndex), 并执行函数, 完成一个 SIP 会话操作. 协议栈事务层管理功能直接调用 OSIP 的实现. 传输层调用 socket() 函数创建网络套接字, bind() 和 listen() 函数绑定和监听端口, rcvfrom() 和 sendto() 函数收发数据^[6].

针对楼宇对讲中远程开锁的实际需求, 本协议栈在事务用户层中, 采用 SIP 协议对即时消息的 MESSAGE 扩展来实现该功能. 由室内机端发送的 MESSAGE 类型消息的消息体携带远程开锁指令“OPEN DOOR”. 指令发送方向为单向, 只能由室内机发往门口机, 其网络通信的信令应答为 MESSAGE-200 OK.

2.3 室内机软硬件设计

2.3.1 硬件实现 室内机的硬件结构, 系统模块组成, 如图 3 所示. 系统主要由处理器、数据存储模块、人机交互模块、网络及音频数据通信模块和电源供电模块等构成.

主芯片处理器采用 TI 公司 1055 型芯片, 该芯片内嵌一个 32 位 165 MHz 的 MIPS R4000 型处理器, 用于系统运行控制; 一个 125 MHz 的 C55X 系列 DSP 处理器, 专用于语音数字信号处理. 片上还集成两个 10/100 Mb · s⁻¹ 以太网通信接口, 两个 16 位的 ADC 和 DAC 转换器, 以及 LCD 控制器、键盘接口、I2C 等通用接口. 通过共用地址总线和数据总线可同时外扩 1 个 FLASH 存储器和 1 个 SDRAM 存储器. 外围硬件部分, 以太网通信接口采用 S317103NL 型网络变压器, 其与耦合电容构成差分信号耦合滤波电路, 并接入主芯片片上 PHY 控制器. 人机交互模块, 输入采用 4×6 扫描方式的键盘矩阵, 显示采用天马 RGB 三基色 LCD 屏. 电源供电模块由 TI 的 TPS54286 电源控制芯片, 结合比例电阻和稳压二级管构成, 可提供 1.5、3.3、5 V 三种供电电压.

2.3.2 软件实现 室内机软件依据实现的功能不同, 分三层结构设计, 分别为底层软件、中间层软件 and 上层软件, 整体设计架构, 如图 4 所示.

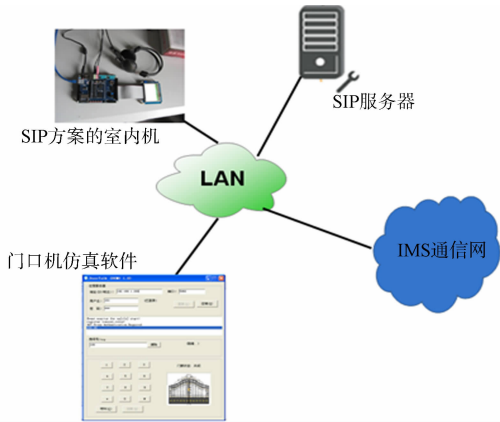


图 1 系统结构框图
Fig. 1 System structure diagram

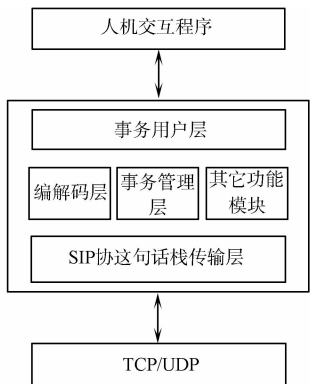


图 2 协议栈结构框图
Fig. 2 Protocol stack structure diagram

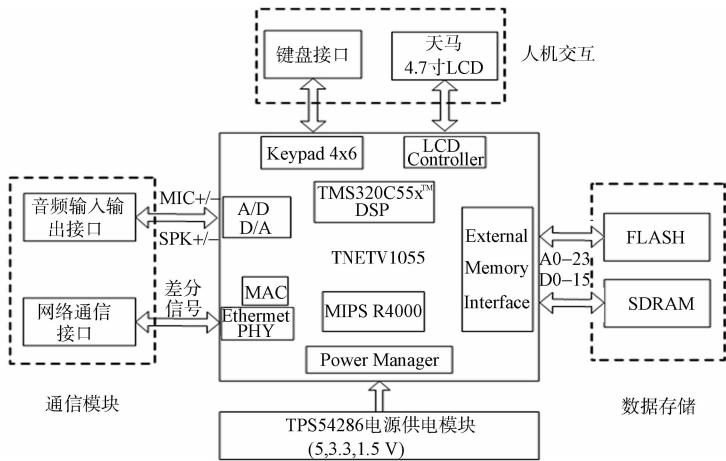


图 3 室内机硬件模块组成图
Fig. 3 Hardware module of indoor machine

底层软件主要是 Linux 操作系统以及硬件驱动,包括主芯片、存储器、网口、LCD、键盘等,并为上一层软件提供系统级接口调用. 中间层软件包含 SIP 协议栈和 DSP 语音数字信号处理模块. SIP 协议栈负责终端接入 SIP 网络并管理 SIP 会话. 语音处理模块运行在 DSP 处理器上,完成语音信号的编解码及 RTP 拆封包. 其中,语音编解码算法采用 G711A-Law,语音防抖技术采用分配固定缓冲内存,接收 RTP 语音包的策略^[7]. 上层软件主要实现人机交互,用户界面采用北京飞漫公司 MinuGUI 开发实现^[8].

2.4 门口机与服务器

门口机采用 VC 6.0 编写的仿真软件. 该终端后台运行了对楼宇对讲系统设计的 SIP 协议栈,可完成呼叫、接收解析门禁控制 SIP 消息指令. 服务器采用 SIP 开源的 SER 服务器^[9],负责终端帐号接入和权限管理,并对 SIP 信令进行路由和转发.

3 系统实验与分析

3.1 系统实验测试

为验证方案的可行性,根据所设计方案的系统结构框架(图 1),在局域网内部搭建了小型楼宇对讲系统测试环境. 测试中观察 UI 界面的状态提示,并用 WireShark 网络抓包工具,捕获 SIP 包进行深层次逻辑分析^[10]. 测试内容包括以下 3 个功能项.

1) 注册认证功能测试

预置条件:服务器、室内机、门口机接入 LAN,并配置静态 IP 为 192.168.1.200,192.168.1.10,192.168.1.20; SIP 服务器上创建户主帐号、密码等鉴权数据,并将室内机 SIP 帐号设为 101@192.168.1.200,密码为 101;门口机 SIP 帐号为 100@192.168.1.200,密码为 100.

测试步骤:两终端分别输入服务器 IP 地址 192.168.1.200,端口 5060,以及各自的帐号和密码,接入局域网网络,向服务器发送 REGISTER 类 SIP 消息注册.

测试结果:界面提示注册成功;抓包分析 SIP 信令流为 REGISTER-401-REGISTER-200 OK.

结果分析:SIP 信令流正确,终端帐号注册认证成功,成功接入服务器.

2) 会话创建功能测试

预置条件:室内机与门口机处于已注册状态,与服务器连接正常.

测试步骤:门口机 192.168.1.20,输入被呼叫用户的门牌号“101”,按“呼叫”键,开始呼叫;室内机振铃,摘话柄,创建会话进行语音通信,挂机退出.

测试结果:室内机 UI 界面显示“进来呼叫”,摘手柄后切换到通话状态,能听到 192.168.1.20 端的声音,挂机结束会话;抓包显示 192.168.1.20,信令流程为 INVITE-180 Ringing-200 OK-ACK-BYE-200 OK;语音通信正常,wireshark 可捕获 RTP 语音包.

结果分析:SIP 信令流正常;任意帐号点对点间能创建会话,语音数据传输流畅.

3) 远程开锁功能测试

预置条件:门口机与室内机已经建立会话且正在语音通信中;门口机门禁处于“关闭”状态.

测试步骤:室内机 192.168.1.10,按“开锁”键,往门口机 192.168.1.20 发送携带 OPEN DOOR 指令的 MESSAGE 消息.

测试结果:门口机门禁状态由“关闭”切换为“开启”;抓包显示 192.168.1.10/20 的 SIP 信令流程为 MESSAGE-200 OK.

结果分析:通过 MESSAGE 消息实现了对远端门禁系统开关状态有效的实时管理.

通过上述系列功能测试并分析,验证了所提方案能很好的满足楼宇对讲系统的需求. 且采用 SIP 实现,在帐号管理、组网、会话创建、寻址呼叫以及业务承载等方面也都有着很好的性能表现.

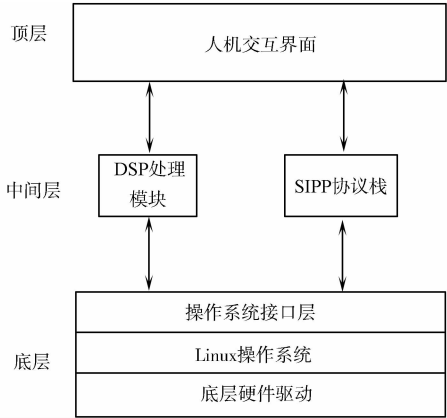


图 4 整机软件结构
Fig. 4 Software structure diagram

3.2 系统性能优势分析

为了验证方案的总体性能优劣,将所设计方案与传统的基于总线型的方案,就系统的关键指标进行比较,如表 1 所示.

表 1 楼宇对讲系统方案比较
Tab. 1 Comparison of building intercom system

方案类型	组网性能	呼叫能力	数据传输	网络融合	业务
传统总线方案	总线、不易扩展	弱、范围小	模拟传输,距离短	独立网络	单一
基于 SIP 方案	简单、大规模	强、任意点对点	数字传输,距离远	可多网融合	丰富

通过对比分析,基于 SIP 方案的系统凭借 SIP 体系网络所具备的特点,在组网能力、数据传输、呼叫能力、业务支持上都具备极大优势;尤其是采用 SIP 协议,可实现与 IMS 通信网的无缝融合的特性,更是以往的对讲系统所无法比拟.

4 结束语

SIP 被誉为通信网中的“TCP/IP”协议,具有很强的生命力.测试分析表明:基于 SIP 协议的楼宇对讲系统方案,不仅克服了传统技术存在的缺陷,提高了系统建设的方便性.更重要的是,方案采用同 IMS 核心网相同的控制信令,将使得楼宇对讲系统不再只是独立的网络系统,而可以直接通过 IP 网接入,与下一代 IMS 移动通信网进行对接,提升楼宇智能化水平,具有重要的实用价值.

参考文献:

[1] 武金山. 基于 CAN 总线的楼宇自动化系统设计[D]. 合肥:合肥工业大学,2008:8-18.

[2] ROSENBERG J,SCHULZRINNE H,CAMARILLO G,et al. RFC 3261 SIP: Session Initiation Protocol. [2008-01-23]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc3261.txt>.

[3] 谢杨华. 智能楼宇可视对讲系统的研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2007:6-23.

[4] 赵璐璐,张善从. 基于 oSIP 的嵌入式 SIP 协议栈设计[J]. 计算机应用与软件,2010,27(3):265-268.

[5] 张薇薇. 嵌入式 SIP 协议栈的设计与实现[J]. 计算机应用与软件,2007,24(4):139-141.

[6] 王枫,罗家融. Linux 下多线程 Socket 通讯的研究与应用[J]. 计算机工程与应用,2004,16:102-109.

[7] 白宪丽. 基于 RTP 音频的实时传输实施与实现[D]. 成都:电子科技大学,2009:37-54.

[8] 于水生. 基于 Linux 和 MiniGUI 的嵌入式计算机系统的研发[D]. 北京:北京邮电大学,2007:47-51.

[9] 彭扬,黄永峰. SER 服务器的结构分析[J]. 数据通信,2007,6:28-32.

[10] 林浒. SIP 协议测试方法和测试工具的研究[J]. 小型微型计算机系统,2008,29(3):406-410.

Solution of Building Intercom System Using SIP Protocol

XU Qing-yong, TAN Ge-wei

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

Abstract: After carefully studying on the function and feature of SIP protocol, we applied SIP protocol to traditional building intercom system, and proposed a new building intercom system solution based on SIP protocol. The new solution will overcome some weakness of traditional solution, integrate with internet and communication network, provide mobile communication with the house entrance guard, and improve the intelligent of building. In this solution, a SIP protocol stack which can work in an embedded terminal was designed, the building intercom system terminal were implemented based on protocol stack. At the end, a small scale building intercom system was set up to test our solution. The test results confirm the feasibility and validity of the solution.

Keywords: SIP; protocol stack; traditional building; intercom system; network convergence

一组相关 XML 数据文件的数据类识别方法

李赛男, 余金山

(华侨大学 计算机科学与计算学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为解决当前可扩展标记语言(XML)绑定框架普遍存在的由 XML 模式映射生成的数据类的冗余,以及数据类系统规模过大的问题,提出一种从一组相关 XML 数据文件的数据实体类识别方法.该方法先抽取这一组 XML 数据文件的 XML 模式树图,并将其每个节点表示成向量空间中的向量;然后,利用相似度和距离识别该模式节点对应的预定义模式节点类型;最后,按模式节点类型到类的映射规则得到数据类.结果表明:该方法能识别合并对应同一个实体的数据类避免类冗余,将集合类型的 XML 文件映射成泛型类和集合类减小生成类系统的规模.

关键词: 类识别;可扩展标记语言;数据绑定;模式树图;节点类型;相似度

中图分类号: TP 311

文献标志码: A

可扩展标记语言(extensible markup language,XML)数据绑定是指将数据从一些 XML 文件中取出,通过程序表示这些数据的过程.即把数据绑定到计算机能够理解且可以操作的某种内存结构中^[1],大多数是绑定到类对象实例上.XML 数据绑定隐藏了 XML 数据的具体结构,方便程序直接使用 XML 文档中的数据内容,使得 XML 数据能够直接转换为可处理的业务数据^[2].目前,将 XML 数据绑定到 Java 对象的框架有 XStream, JAXB, XMLBeans, Castor 和 JiBX^[2-6].这些 XML 绑定框架的关键是 XML 数据对应数据类的获得,即根据 XML 模式文件按一定规则生成的,或用户自己编写绑定映射规则再字节码生成.它们可以很好地对遵循同个 XML 模式文件约束的一组 XML 文件进行 XML 数据绑定.但要解决来自相同应用系统中,遵循不同 XML 模式文件的 XML 文件的数据绑定,会有数据类冗余、生成类系统庞大等问题.基于此,本文提出一种从一组相关 XML 数据文件的数据类识别方法.

1 XML 结构特点及相关定义

1.1 XML 结构特点

每个 XML 文档有且仅有一个根元素,它是所有其他元素的父元素,而所有元素都可拥有子元素、文本内容和属性.从元素的嵌套关系可以看出 XML 文档是一棵文档树.相应地有一种抽象数据结构——文档对象模型(document object model,DOM).DOM 将 XML 文档中各种类型的数据映射到相应的类型对象,构建出树形结构^[7],分成文档节点、元素节点、文本节点、属性节点、处理指令节点、注释节点、文档类型节点、文档段节点、符号节点、CDATA 段节点、实体节点和实体引用节点等 12 类.

XML 文档可以分为以数据为中心和以文档为中心两大类.以数据为中心的 XML 文档常被用于机器的使用,而以文档为中心的 XML 文档则主要是为人类而设计的.文中涉及的 XML 数据文档均属于以数据为中心的 XML 文档.它着重于文档中的数据,而非文档格式.具有结构化的数据、数据粒度大小适中、很少或没有混合内容,以及文档顺序不重要等特点.故在考虑设计实现问题解决方案时,需要考虑的 DOM 节点对象只有属性节点、元素节点和文本节点.

1.2 XML 模式节点定义

XML 文档模式描述一类 XML 文档中数据的结构关系和类型信息,在内存可表现为一个树图.树

节点对应元素节点、属性节点，节点的附加信息有元素或属性的名称、重数、数据类型等。将模式树图中的模式节点进行分类，以建立 XML 模式到数据类之间的映射，并定义如下 6 个模式节点类型。

- 1) 属性型。该模式节点对应 XML 文档中的属性节点。
- 2) 属性类元素型。该模式节点对应 XML 文档中的元素节点，而该元素节点没有子元素节点或只包含文本节点，没有属性。
- 3) List 类元素型。该模式节点仅包含一个子模式节点，而该子模式节点是非属性类节点且对应元素节点的重数大于 1。
- 4) 包装类元素型。该模式节点包含多个属性类节点和一个非属性类节点的子模式节点。在多 XML 文件环境下，包装类元素型的模式节点有两种类型：一种是包含一个非属性类型的子模式节点，但具有多套不同的属性类型的子模式节点组；另外一种是有只有一个属性类型的子模式节点组，但包装多套非属性类型的子模式节点。
- 5) 包装类属性集型。用于组织包装类元素型模式节点下的属性类型的模式节点。
- 6) 实体类元素型。该分类设置为非属性类型的模式节点类型的默认值，除前面 5 种类型节点外，剩下的模式节点就属于实体类元素节点。实体类元素型模式节点中有一类节点具有明显特征，即该模式节点有子模式节点且这些子模式节点均属于属性类型。

上述 6 类模式节点类型中，属性型和属性类元素型统称属性类型。至此，模式节点中包含的信息可以确定有：模式节点类型、模式节点名称、数据类型、映射到类的属性名称、重数、子模式节点列表、所属 XML 文件标识名、根节点标识、文本标识等。

2 XML 模式抽取

文中描述的是从一组相关 XML 数据文件识别实体类的方法，其总体思路是先得到 XML 文档的数据模式，再将 XML 数据模式映射到实体类。方法的第一步是得到 XML 文档的数据模式，即为每个 XML 数据文件建立一个 XML 模式树图，并填充模式树图中每个模式节点的信息。在抽取 XML 模式时，需要判断模式树图中的模式节点的类型。预定义的 6 种模式节点类型中，属性型、属性类元素型、List 类元素型根据其说明的特征可以很容易判断出来，包装类属性集型不需要判断，而是最后再生成并填进模式树图的。

第一种类型包装型模式节点具有一个非属性类型和多套不同属性类型的子模式节点组。对于这种类型，模式节点下的属性类型的子模式节点的相似度超过阈值 A 则为实体类元素型，否则为包装类元素型。第二种类型包装类元素型模式节点具有一个属性类型的子模式节点组和多套单个非属性类型的子模式节点。对于这种类型，模式节点下的属性类型的子模式节点的相似度超过阈值 B ，并且非属性类型的子模式节点的相似度低于阈值 C 则为包装类元素型，否则为实体类元素型。

模式节点的相似度是利用空间向量模型 VSM^[8] 将其表示成向量后再计算，具体计算方法如下：1) 设在一组 XML 文件的模式树图中有 n 个同名的模式节点 N ，分别记为 $N_1, N_2, \dots, N_n, N_i (1 \leq i \leq n)$ 下的子模式节点记为 $[M_{i,1}, M_{i,2}, \dots, M_{i,s_i}]$ ，其中 s_i 为 N_i 的子节点的个数；2) 将所有的模式节点 $N_1, N_2, \dots, N_n$ 的子模式节点合并，去除已重复名称的子模式节点，得到结果 $\text{Base}[M_{1,1}, \dots, M_{n,s_n}]$ 。将 Base 作为基，将模式节点 N_i 表示成由 0, 1 组成的向量 V_i 。如果 N_i 包含 $M_{i,j}$ ，则在 V_i 的 $M_{i,j}$ 位置上标为 1，否则标为 0。模式节点 N 的相似度使用 V_i 中两两之间的 Jaccard 相似系数 $= \frac{f_{1,1}}{f_{1,1} + f_{1,0} + f_{0,1}}$ 的平均值来计算^[9]。具体操作时，还需将 Base 分成属性类节点的 Base 和非属性类节点的 Base，用以计算属性类型和非属性类型的子模式节点相似度。

在同一个应用系统环境下，从多个 XML 文档生成的多个 XML 模式树图中会有相同名称的实体类元素型模式节点。因此，可利用它们的子模式节点的余弦距离进行基于密度聚类，把属于同一个聚类簇的模式节点的子模式节点合并当做同一个模式节点进行处理，以此避免模式节点映射成数据类时生成冗余的数据类。

对 XML 数据文档进行模式抽取，有如下 5 个主要步骤。

步骤 1 把 XML 数据转换为 DOM 树.

步骤 2 先根遍历 DOM 树,从中获得相关模式信息,创建相应类型的模式节点,并构建初步的模式树图,具体流程如图 1 所示. 输入 XML 数据文档的 DOM 元素节点,输出结果是相应的模式节点,且能判断出相应的节点类型. 最先获得元素节点的名称用于设置模式节点名,再判断元素节点是否符合属性元素型模式节点的特征,即元素节点没有属性且没包含子元素. 符合特征,则根据元素文本内容判断其数据类型用于设置模式节点的数据类型,并返回属性元素型模式节点. 处理元素节点及其属性列表创建的默认类型的模式节点,并设置模式节点的重数信息和文本标识等. 最后再判断当前模式节点是否仅包含一个子模式节点,该子模式节点是非属性类节点且对应的元素节点的重数大于 1,如果是,则将节点类型设置为 List 类元素型.

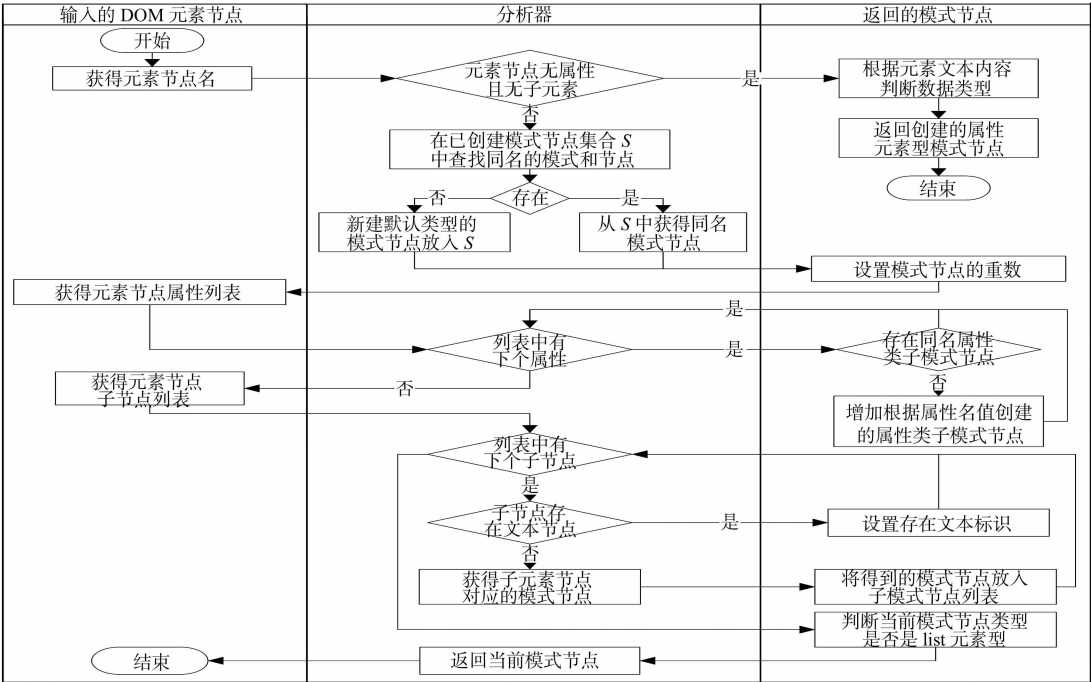


图 1 初步构建模式树图的流程

Fig. 1 Process of the preliminary constructing pattern tree diagram

步骤 3 对分布在不同 XML 模式树图中的同名模式节点进行相似度分析,识别包装类元素型和实体类元素型,并对实体类元素型模式节点进行聚类来完成合并工作,具体流程如图 2 所示. 先进行一个快速优化的判断,即如果输入的模式节点列表只有一个模式节点,且该模式节点只包含一个多重的默认类型的子模式节点或一个 List 类元素型子模式节点,则把该模式节点的类型设置为包装类元素型后结束;否则,接着根据输入的模式节点列表建立属性和非属性类节点的 Base,以此计算出模式节点列表中每个模式节点的属性类和非属性类节点向量. 如果非属性节点列表为空,则说明该模式节点一定是实体类型;否则,计算属性类和非属性类节点向量列表的相似度 A 和 E . 根据两次条件判断模式节点是否属于包装类元素型,如果是,则将模式节点设置为包装类元素型;不是,则将属性类和非属性类节点向量合并得到模式节点向量列表,再对模式节点向量列表使用余弦距离进行聚类. 把聚类得到聚类簇中模式节点的子节点合并成新的子模式节点列表,并替换簇中模式节点的子模式节点列表. 另外,为区别同名的不同实体类节点的模式节点,在模式节点名称后加上序列数 $1, 2, \dots$.

步骤 4 从所有的模式树图中识别创建不重复的包装类属性集型模式节点. 将所有模式树图中包装类元素型模式节点下的属性类子节点打包到一个新建的包装类属性集型模式节点的子模式节点列表中,再将此新建的模式节点替代原来的属性类子节点,插入到包装类元素型模式节点下作为新子模式节点. 包装类属性集型模式节点是可以重用的,但必须保证包装类元素型模式节点下的每个属性类型模式节点的名称和重数是相同的.

步骤 5 后根遍历所有模式树图,填充模式节点中剩余的模式信息. 包括映射到类的属性名称的设

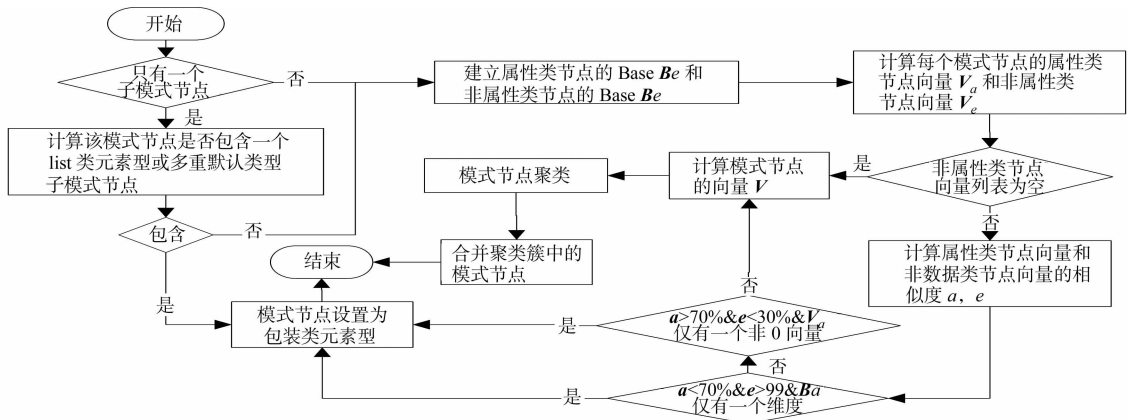


图 2 模式树图的模式节点的进一步分类流程

Fig. 2 Further classification process of the mode pattern tree node

置,数据类型的设置. List 类元素型和包装类元素型模式节点需要添加子模式节点的数据类型添加泛型信息,包装类属性集型和实体类元素型需要确定映射的数据类的类名.

将一组相关 XML 数据文档经过 5 个步骤处理后得到完整的 XML 模式树图. 图中的每个模式节点包含了完整的模式信息,作为 XML 数据模式映射到实体类的输入数据.

3 XML 模式树图到类的映射

从一组 XML 数据文件中识别数据类的最后步骤是,将 XML 模式树图中的模式节点按照一定规则映射到数据类. 把识别出的模式节点特征信息存储在模式节点的类型信息中,在 XML 模型到类层次的映射过程会根据模式节点类型,将模式节点映射成不同类型的数据类.

映射规则有如下 8 个方面:1) 模式节点的模式节点名称映射成数据类的类名;2) 模式节点的子模式节点映射成数据类的成员变量,该子模式节点映射到类字段名称映射成成员变量名,子模式节点的数据类型映射成成员变量的数据类型;3) 如果是模式节点的文本标识,则新增一个名为_value,类型为字符串的成员变量;4) 如果子模式节点的重数大于 1,则需将用集合类类名包装原数据类型作为其数据类型;5) 若成员变量的数据类型是泛型,则还需在该成员变量之前添加注解的配置信息说明具体的泛型信息;6) 给每个数据类的成员变量生成 setter 和 getter;7) 将包装类属性集节点类型、实体类元素节点类型和包装类元素节点类型的模式节点分别生成放在 vo. attribute 包中的属性类、放在 vo. entity 包中的实体类和放在 vo. wrapper 包中的包装类;8) 包装类元素节点类型的模式节点映射成的包装类是预先定义的泛型类 ListWrapper<S, T>和 SingleWrapper<S, T>. 这 2 个包装类的只有 2 个成员变量分别对应包装类属性集节点类型的子模式节点和非属性类节点类型的子模式节点.

经过上述映射规则,得到数据类从一组 XML 数据文件中识别出的数据类. XML 模式到类层次映射方法和目前 XML 绑定框架的模式编译器生成类文件的映射规则不同的是,还要根据模式节点的类型进一步区分映射成不同类型的类,如集合类、泛型类、实体类等,以减小生成类系统的规模.

4 应用实例

将提出的一组相关 XML 数据识别方法应用在一个 Last. FM OpenAPI 的数据实体类代码生成器的实现中. 该代码生成器先从网络上抓取每个 Last. FM OpenAPI 返回的 XML 数据,得到一组相关 XML 数据文件;然后,使用文中方法获得识别出的数据类的元数据;最后,在结合类模板输出类定义代码源文件. 该代码生成器从网络上获取的 Last. FM OpenAPI 返回的 XML 文件有 131 个,使用文中方法输入预定义的阈值 A、阈值 B、阈值 C 是经验估计值,分别是 70%,70%,30%. 经过计算,最终识别出 47 个实体类,38 个属性类,总共 85 个类. 如果使用传统的数据绑定框架对 131 个 XML 文件进行数据类生成,最终得到的数据类最少有 131 个. 使用文中方法生成类的个数比之前的方法降低 35%,而且生成的实体类和实体一一对应没有存在冗余. 该代码生成器的结果说明,文中提出的方法可以较好地解决

当前 XML 绑定框架类中生成器产生的类冗余和生成类系统规模过大的问题.

5 结 束 语

提出从一组相关 XML 数据文件的数据实体类识别的方法. 该方法能有效解决当前 XML 绑定框架在绑定一组来自同一个应用框架下, 遵循多个 XML 模式文件的 XML 文件时产生的类冗余和生成类系统规模过大的问题. 但该方法存在的不足是, 区别包装类元素型和实体类元素型的模式节点中的相似度阈值是预先给定的, 后续工作需采用启发式及回归模型^[10]对相似度阈值进行调整确定.

参考文献:

[1] MCLAUGHLIN B. Practical data binding: Get your feet wet in the real world [EB/OL]. [2004-05-20]. <http://www.ibm.com/developerworks/xml/library/x-pracdb1/index.html>.

[2] 焦春芳, 罗晓沛. 基于 Castor 的数据绑定技术[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(17): 4550-4553.

[3] 吴翔, 饶若楠. 连接 XML 与对象的桥梁——XMLBean[J]. 计算机工程, 2004, 30(增刊 1): 69-71.

[4] BANGALORE R. Use XStream to serialize java objects into XML[EB/OL]. [2008-07-23]. <http://www.ibm.com/developerworks/xml/library/x-xstream/>.

[5] SIMEONI F, LIEVENS D, CONNOR R, et al. Language bindings to XML[J]. IEEE Internet Computing, 2003, 7(1): 19-27.

[6] 许晖. 应用 XML 实现 Java 对象序列化技术简述[C]//第七届中国 Java 技术及应用交流大会文集. 北京: [s. n.], 2004: 73-78.

[7] 李青山, 陈平. 对象层次上的 XML 数据绑定模型的研究[J]. 西安电子科技大学学报, 2001, 28(6): 768-771.

[8] 庞剑锋, 卜东波, 白硕. 基于向量空间模型的文本自动分类系统的研究与实现[J]. 计算机应用研究, 2001, 18(9): 23-26.

[9] 李桂林, 陈晓云. 关于聚类分析中相似度的讨论[J]. 计算机工程与应用, 2004(31): 64-66.

[10] ZHANG Yi, CALIAN J. Maximum likelihood estimation for filtering thresholds[C]//Proc of the 24th Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval. New York: ACM Press, 2001: 294-302.

Class Identification Method a Group Related of XML Data File

LI Sai-nan, YU Jin-shan

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

Abstract: In order to solve the XML binding framework ubiquitous redundant classes generated by the XML schema mapping and data class system large scale, we presented a method of data entity class recognition from a group of related XML data file. The method first extracted XML mode tree a group of XML data files, and each node was represented as a vector in the vector space. Then used their similarity and distance to identify the mode node corresponded to a predefined mode node types. Finally by according to the mode node type to the class mapping rules to obtain the data classes. The results showed that: this method can identify and merger the class that correspond to the same entity to avoid redundant, mapped the collection of XML documents into a generic class and collection class to reduce the size of the generate class system.

Keywords: class recognition; extensible markup language; data binding; pattern tree diagram; node type; similarity

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 吴逢铁)

采用光流场运动估计的 双树复小波域视频水印算法

崔壮, 吕俊白

(华侨大学 计算机科学与技术学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 提出一种基于光流场的双树复小波变换(DT-CWT)的数字水印算法. 首先利用光流信息检测出视频序列的关键帧, 然后利用光流场技术对选取的关键帧进行局部区域的运动估计. 最后, 根据人眼对快速流动物体敏感性弱的特点, 将水印信号分块嵌入关键帧内快速运动区域. 测试结果表明: 该算法具有很好的不可见特性, 在面对噪声、缩放等恶意攻击时 also 具有很好的稳定性, 同时也具有很好的实时性.

关键词: 光流场; 双树复小波变换; 运动估计; 数字水印

中图分类号: TP 391 **文献标志码:** A

随着网络技术的发展, 数字视频水印技术成为了当前水印研究的一个热点. 然而, 数字视频序列不同于静态图片载体, 每个视频序列帧之间具有一些固有的特征, 这导致视频水印技术的发展落后于数字图像水印技术. 视频水印按嵌入的时间不同, 分为基于原始视频的水印嵌入和基于压缩视频的水印嵌入^[1]. 基于原始视频的嵌入是指对未经编码的视频序列进行处理, 如文献[2]在传统的差分能量水印算法基础上, 通过在水印嵌入过程中引入能量分布公式, 改进传统的差分能量水印算法, 增加了嵌入的有效性和水印的稳健性. 文献[3]中首先对压缩视频进行解码, 利用水印分层的思想, 将灰度水印图像自适应地嵌入于离散余弦变换(DCT)系数中. 基于视频的水印嵌入技术与以图像为载体的水印嵌入技术最大的不同之处在于载体的运动性. 根据相关的心理视觉研究表明, 人眼对各种环境有不同的敏感性. 例如, 由于人类视觉的惰性, 对运动的物体比较敏感, 但对高速运动物体的细节部分则不是很敏感. 基于此, 本文根据人眼视觉敏感特性, 提出一种将水印嵌入于载体快速运动区域块的水印算法.

1 双树复小波变换

自 21 世纪 80 年代开始, 小波理论研究工作日臻完善, 应用的领域也不断扩大. 然而, 传统离散小波变换(DWT)却有着明显的不足, 即平移敏感性和方向选择缺乏. 这些缺陷可能使小波在提取信号特征时丢失一些重要的信息. 为了克服 DWT 的这些缺陷, Kingsbury 等^[4-5]提出了具有平移不变性和多方向选择性的双树小波复小波变换(DT-CWT). 它是通过两个独立的小波变换并行作用于信号实现实部(tree-A)和虚部(tree-B)运算的.

图 1 为二维 DT-CWT 分解框图. 其每一级的分解产生 2 个低频子带(用于下一尺度上的系数计算)和 6 个方向($\pm 15^\circ, \pm 45^\circ, \pm 75^\circ$)的高频子带, D 维的双树复小波变换的冗余度为 $2^D : 1$.

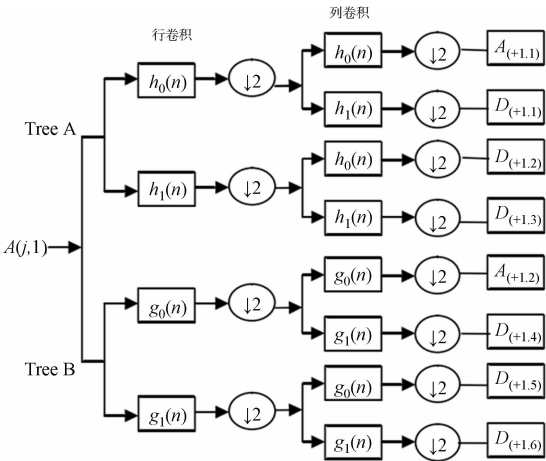


图 1 二维 DT-CWT 分解图

Fig. 1 2-D DT-CWT decomposition

2 算法的实现

2.1 光流场

光流^[6]的基本原理是,利用不同图像序列中的各像素位置强度随着时间的变化而改变,同时相邻序列中的像素又具有强相关性等特性来确定每个像素位置的“运动”.即反映图像的灰度在时间上的变化与景象中物体结构及其运动的关系.光流场是图像灰度模式的表现运动,是一个二维矢量场,所包含的信息就是各个像素点的瞬时运动速度矢量信息.

文中采用微分光流计算的代表方法 Horn-Schunck 算法^[7],来计算每一个视频帧的光流场信息.该算法的基本思想是在求解光流信息量时,要求光流本身尽可能地平滑,即引入对光流的整体平滑性约束来求解约束方程的病态问题.利用 Horn-Schunck 算法计算的 foreman 视频序列的第 6 帧和第 63 帧的光流计算结果,如图 2 所示.

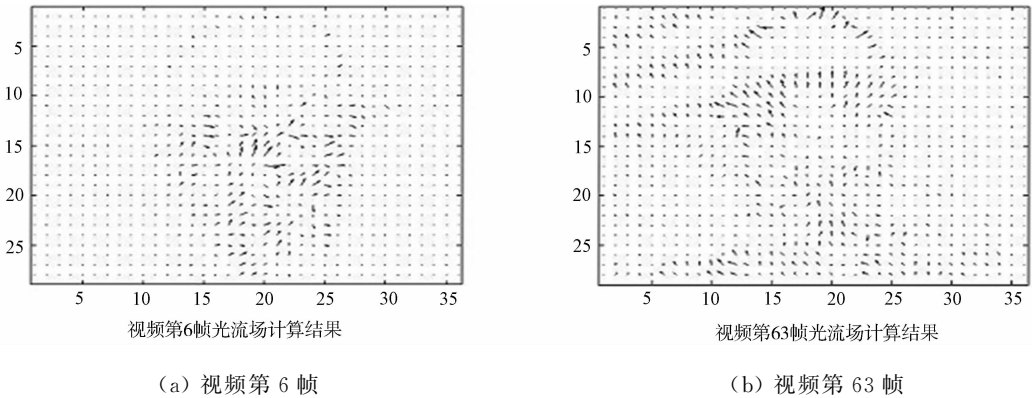


图 2 Horn-Schunck 算法的光流场计算仿真实验

Fig. 2 Optical flow calculating simulation in Horn-Schunck

2.2 基于光流场的视频关键帧提取

一个视频镜头是由一些连续、渐变的帧所组成,关键帧就是反映了这段镜头里面主要内容的关键图像帧.文中选择 Wolf 所提出的极小值算法来提取关键帧. Wolf 算法通过光流分析来计算视频帧中的运动量,在运动量局部最小值处选取关键帧,这些关键帧反映了视频数据的静止状态^[8].该视频帧的总光流 $M(t)$ 为

$$M(t) = \sum \sum |u(x,y,t)| + |v(x,y,t)|. \quad (1)$$

式(1)中: u,v 为该视频帧中光流矢量的两个分量.

Foreman 视频序列中的每一帧图片光流场量所连成的曲线图,如图 3 所示.根据 Wolf 算法选取光流曲线图中的极小值点所在的帧图片作为水印嵌入的关键帧.同时,考虑到不同的帧图像间的横向比较,算法选取总光流最大的 P 帧作为嵌入水印的关键帧.

2.3 视频帧重要系数的提取

因为光流可以表征物体运动情况,对物体的运动区域进行估计,光流法求出的不同位置上的光流矢量越大,代表这个位置上的运动速度越快.那么,这些位置上人眼的敏感性就会最弱,进行水印的嵌入也是最合适的.文中选取每个关键视频帧中系数值最大的位置作为重要系数用于嵌入水印.视频帧重要系数的提取有如下 3 个具体步骤.

- 1) 对每一个 Wolf 算法所提取的关键帧再次进行光流场的计算.
- 2) 对计算得到的光流信息矩阵进行降维后按照升序排序.
- 3) 选择排序前 N 位作为重要系数用于水印嵌入,达到在每个所选取的关键帧中嵌入一个小的水印分块的目的,即实现将水印分块嵌入于视频帧的子块中.

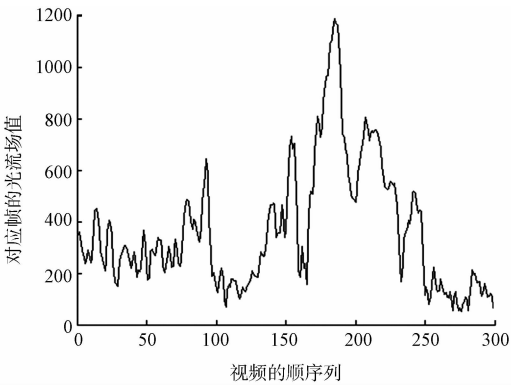


图 3 视频序列的光流场计算曲线

Fig. 3 Calculating curve in optical flow of the video

2.4 水印的嵌入

水印嵌入利用图像的分块嵌入原则,将分块后的子水印信息嵌入于每一个视频帧的重要系数中,有效保证水印算法的不可见性. 水印嵌入有如下 4 个具体步骤.

- 1) 对原始水印 W 图像进行置乱加密,置乱次数作为密钥记为 $key1$.
- 2) 将置乱后的水印图像分成小块,并将其按行优先排序标号,分别记为 $w_1, w_2, \cdots, w_k$.
- 3) 对选取的每个关键帧的重要系数进行 2 次双树复小波变换,选择低频子带,对其进行分块,在每个小块中嵌入 1 bit 位的水印信号,将具体的水印嵌入位置进行加密,记密钥为 $key2$.
- 4) 对每个低频的分块子图按照关系特征关系的方法进行水印的嵌入,具体的嵌入公式为

$$M_i = \begin{cases} \text{ave}(I_i) \cdot a, & w_i = 0, \\ \text{ave}(I_i)/a, & w_i = 1. \end{cases} \tag{2}$$

式(2)中: M_i 为第 i 个小块中水印嵌入位置的系数; I_i 为原始载体第 i 个小块; $\text{ave}(I_i)$ 为小块系数的均值; w_i 为第 i 位上的水印信号值.

2.5 水印的提取

水印的提取过程就是嵌入关系的逆过程,有如下 2 个具体步骤.

- 1) 选取关键帧的重要系数进行 2 次双树复小波变换,并对低频子带进行 2×2 分块.
- 2) 根据密钥找到水印的嵌入位置,对比每个小块内嵌入系数与均值间的关系,提取出水印信号,有

$$w_i = \begin{cases} 0, & M_i > \text{ave}(I_i), \\ 1, & M_i < \text{ave}(I_i). \end{cases} \tag{3}$$

3 实验结果

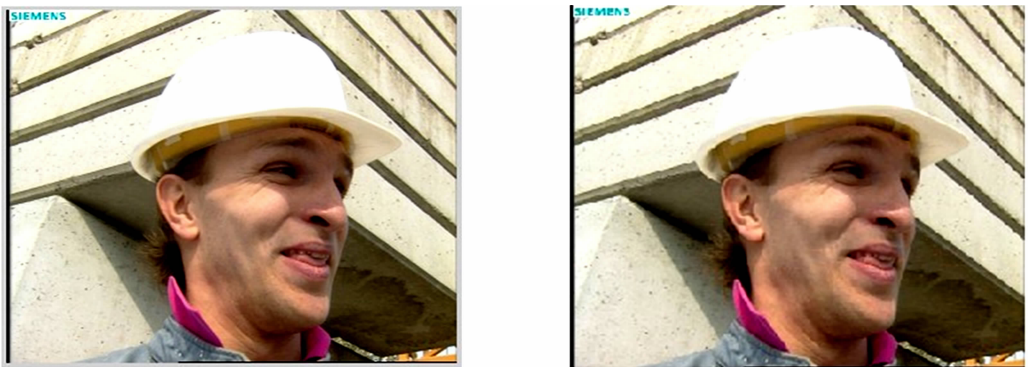
实验以 MATLAB 7.10.0 为平台,使用的水印为具有意义的二值水印图像,载体序列是 300 帧的 Foreman 视频序列和 478 帧的 Friends 视频序列. 采用峰值信噪比(R_{SN})和误码率(E_c)为客观评价标准,其计算式为

$$R_{SN} = 10 \lg \frac{\max(f^2(x,y))}{\frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (f(x,y) - f'(x,y))^2}, \quad E_c = \frac{\sum \sum w'_{i,j} \oplus w_{i,j}}{\sum \sum w_{i,j}}. \tag{4}$$

式(4)中: f, f' 为计算的两幅图像矩阵; M, N 为矩阵的行数和列数; $w_{i,j}$ 为原始的水印信号; $w'_{i,j}$ 为提取出的水印信号.

3.1 不可见性实验

水印的不可见性就是要求视频在嵌入水印后,在视觉上无法感知水印的存在. Foreman 视频序列第 10 帧图像和 Friends 视频序列第 224 帧图像嵌入水印前后的载体视频帧对比,分别如图 4,5 所示. 从图 4,5 可知:图像几乎看不出嵌入水印后载体的变化,说明算法的图像视觉效果很好.



(a) 原始的视频第 10 帧图像 (b) 嵌入水印后的视频帧

图 4 Foreman 视频序列第 10 帧图像嵌入水印前后的载体视频帧对比

Fig. 4 Video of foreman after embedded in 10th frame



(a) 原始 Friends 第 224 帧



(b) 嵌入水印的视频帧

图 5 Friends 视频序列第 224 帧图像嵌入水印前后的视频帧嵌入对比

Fig. 5 Video of friends after embedded in 224th frame

嵌入载体后,图像亮度分量上的峰值信噪比(R_{SN})变化情况,如图 6 所示.从图 6 可知:嵌入水印后的 Foreman 和 Friends 视频的 R_{SN} 平均值分别为 43.287 3,44.619 9,说明嵌入水印后的视频序列具有很好的不可见性.

3.2 时间性能

由于视频序列的运动性,所以视频水印技术的另一个重要评价指标是其算法的复杂度,也就是视频水印算法运行所需要的时间. Foreman 视频序列各帧的算法运行时间与文献[9]中的各帧运行时间对比,如图 7 所示.由图 7 可知:算法的平均运行时间为 0.243 7 s,与文献[9]中的平均运行时间 0.24 s 基本相同,优于文献[10]中的算法,证明文中的视频水印算法具有良好的实时性.

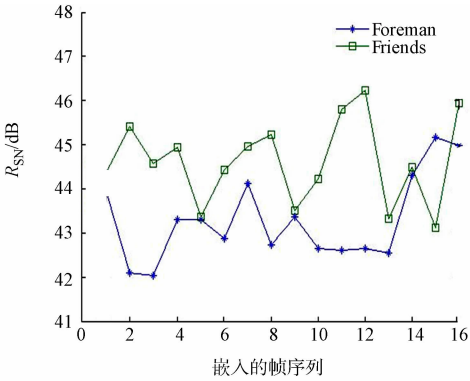


图 6 嵌入水印后的 R_{SN} 变化情况

Fig. 6 R_{SN} of the watermarking after embedded

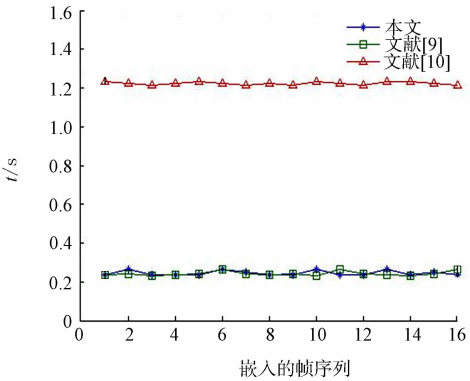


图 7 Foreman 视频序列运行时间

Fig. 7 Running time of the algorithm

3.3 嵌入水印后视频的比特率变化

嵌入水印后,载体视频帧的比特率变化如表 1 所示.表 1 中: R_{bit} 为视频的比特率; η_{bit} 为比特率的相对变化率.

3.4 鲁棒性分析

对原始视频序列 foreman 进行增加噪声、帧删除等攻击,计算得出提取水印的误码率(E_c),结果如表 2 所示.

表 2 攻击后提取出水印信号误码率

Tab. 2 Error code rate of the watermarking after attack

表 1 视频序列码率变化

Tab. 1 Code rate of video after embed

测试序列	$R_{bit}/\text{Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$		$\eta_{bit}/\%$
	水印嵌入前	水印嵌入后	
Foreman	58.013	58.033	0.0345
Friends	21.467	21.478	0.0512

受到的攻击	$E_c/\%$	受到的攻击	$E_c/\%$	受到的攻击	$E_c/\%$	受到的攻击	$E_c/\%$
椒盐噪声(0.01)	4.58	帧删除(5%)	4.39	高斯噪声(0.002)	3.32	缩放攻击(0.8)	4.33
椒盐噪声(0.02)	5.66	帧删除(10%)	5.47	高斯噪声(0.004)	4.29	缩放攻击(1.3)	7.51

4 结束语

采用光流场技术对视频帧进行运动估计,将水印图像分块嵌入于载体中,这种分块区域的嵌入方法有助于降低嵌入水印后的载体失真.实验表明:算法无论是在载体的保真性还是抵抗恶意攻击的鲁棒性上,均取得了很好的效果.

参考文献:

[1] 曾骁,陈真勇,陈明,等. 基于帧间预测误差扩展的可逆视频水印[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2010,22(5): 871-878.

[2] 傅德胜,王建荣. 基于 H. 264 的视频水印技术[J]. 计算机应用,2009,29(4):1174-1176.

[3] BISWAS S, DAS S R, PETRIU E M. An adaptive compressed MPEG-2 video watermarking scheme[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2005,54(5):1853-1861.

[4] SELESNICK I W, BARANIUK R G, KINGSBURY N G. The dual-tree complex wavelet transform[J]. IEEE Signal Processing,2005,22(6):123-151.

[5] KINGSBURY N. Complex wavelets for shift invariant analysis and filtering of signals[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis,2001,10(3):234-253.

[6] DEQING S, ROTH S, BLACK M J. Secrets of optical flow estimation and their principles[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Francisco: Computer Vision and Pattern Recognition, 2010: 2432-2439.

[7] 谢梅芬. Horn-Schunck 光流算法在运动目标检测及跟踪中的运用研究[J]. 长江大学学报:自然科学版,2012,11(9):146-147.

[8] 李玉峰. 基于动态帧的视频关键帧提取算法研究[J]. 天津科技大学学报,2009,24(4):69-72.

[9] 曾骁,陈真勇,陈明,等. 基于帧间预测误差扩展的可逆视频水印[J]. 计算机辅助设计与图形学报,2010,22(5):871-878.

[10] LIN C C, HSUEH N L. A lossless data hiding scheme based on three-pixel block differences[J]. Pattern Recognition,2008,41(4):1415-1425.

A Digital Watermarking Algorithm Using the Motion Estimation of Optical Flow Field in the DT-CWT

CUI Zhuang, LYU Jun-bai

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

Abstract: This article presents a digital watermark algorithm based on optical flow field in dual tree complex wavelet transform (DT-CWT). In the beginning, detected the key frame of the video by optical flow information, then do the motion estimation of the key frame using optical flow field. According to the sensitivity of the human eye for the rapid flow things, embed the sub-block watermark in the area of rapid movement. The measuring result shows that this algorithm has great features of the sight. At the same time, it's has great stability face to the noise, scaling and other malicious attacks, it also shows a good real-time.

Keywords: optical flow field; dual tree complex wavelet transform; motion estimation; digital watermarking

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 吴逢铁)

应用水印旋转角度加密的双水印算法

吴新亚, 陈永红, 冯祥斌

(华侨大学 计算机科学与技术学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 提出一种基于水印旋转角度加密的新型双水印算法. 该算法首先分块载体图像, 选取预定大小的载体图像子图像作为嵌入可见水印的载体. 其次, 使用图像旋转算法对待嵌入的可见水印进行微角度旋转处理, 用该旋转角度作为其中一个密钥, 以此作为验证该可见水印是否为水印信息的手段之一. 最后, 在除了用于嵌入可见水印的载体图像的其他子块中使用模糊归类的方法, 嵌入不可见的鲁棒水印. 实验结果证明: 该算法嵌入双水印后图像没有明显的降质, 合法去除可见水印之后, 载体图像也不会出现明显的降质; 被恶意篡改之后的可见水印恢复能力强, 而鲁棒性水印抵抗 JPEG 压缩、剪切、高斯噪声、滤波、缩放等常见的信号处理攻击和几何攻击性能良好.

关键词: 图像旋转; 双水印; 版权水印; 模糊归类; 自适应

中图分类号: TP 391.41 **文献标志码:** A

数字化信息未经授权的复制和发布, 使得数字多媒体信息的知识产权的保护和认证成为近年来研究的热点. 为了保护版权, Braudaway 等^[1]提出了一种早期的可见水印方法, 利用非线性方程组来完成对空间域的亮度的修改. 随后, 可见水印方法也越来越多^[2-5]. 朱从旭等^[6]提出了一种基于提升小波变换和 Liu 混沌系统的图像双水印算法, 通过混沌系统确定可见水印的嵌入系数, 同时用系统量化实现鲁棒性水印的嵌入. 罗永等^[7]提出了一种小波变换结合纠错编码的半透明数字水印以标示版权, 但是该算法在水印合法移除之后, 载体图像会有一定的降质. Hu 等^[8-9]提出一种在小波域自适应嵌入可见水印的算法, 该算法中在图像融合时的亮度掩蔽效应采用高斯截断函数. 本文提出了一种结合图像旋转算法^[10]的双水印版权水印算法, 用于版权保护.

1 图像旋转及旋转角度估计算法

1.1 全局运动估计

当连续的图像序列围绕着任意的旋转中心 (x_0, y_0) 作纯旋转运动, 且角度为 θ 时, 图像帧之间的像素点运动如图 1 所示. 如果把平移变换与纯旋转运动相结合, 那么此时像素间的移动关系表达式为

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & x_0 \\ y_1 & y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \end{bmatrix}. \tag{1}$$

式(1)中: d_x 和 d_y 是各个帧分别沿着 x 和 y 方向上的平移变换.

假设旋转的角度很小, 那么式(1)可以简化为

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\theta \\ \theta & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & x_0 \\ y_1 & y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \end{bmatrix}. \tag{2}$$

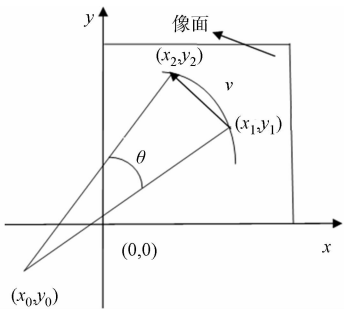


图 1 纯旋转运动时像素点的移动
Fig. 1 Movement of pixel point after pure rotational motion

把式(2)用于图像帧间局部运动的所有个匹配点对上,可以得到一个由包含 5 个未知数($\theta_1, x_0, y_0, dx, dy$)的显性方程组构成的系统. 把式(2)重新排列成 $\bar{b} = A\bar{x}$ 形式,即

$$\begin{bmatrix} x_{1,2} - x_{1,1} \\ x_{2,2} - x_{2,1} \\ \vdots \\ x_{N,2} - x_{N,1} \\ y_{1,2} - y_{1,1} \\ y_{2,2} - y_{2,1} \\ \vdots \\ x_{N,2} - x_{N,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -y_{1,1} & 0 & 1 & 1 & 0 \\ -y_{2,1} & 0 & 1 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -y_{N,1} & 0 & 1 & 1 & 0 \\ x_{1,1} & -1 & 0 & 0 & 1 \\ x_{2,1} & -1 & 0 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{N,1} & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ K \\ L \\ d_x \\ d_y \end{bmatrix}, \quad \bar{b} = A\bar{x}. \tag{3}$$

式(3)中: K 和 L 分别替换了式(2)中的 $x_0\theta$ 和 $y_0\theta$.

因为矩阵 A 的秩是 3,所以式(3)得到的 5 个未知数的解不唯一. 为了估计这 5 个参数,需要连续帧间更多的信息或者使用其他的方法.

1.2 旋转算法

基于式(1),一个基本的旋转模型定义为

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 - \alpha \\ y_1 - \alpha \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}. \tag{4}$$

式(4)中: α 和 β 分别表示像素点(x_1, y_1)在水平方向和垂直方向的平移运动量.

通过式(1),(4),可以推导出 α 和 β 为

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \left\{ (1 - \cos \theta) \left(\begin{aligned} & -\cos \theta \cdot x_0 \\ & + \sin \theta \cdot y_0 + x_0 + d_x \end{aligned} \right) + \sin \theta \left(\begin{aligned} & \sin \theta \cdot x_0 \\ & + \cos \theta \cdot y_0 - y_0 - d_x \end{aligned} \right) \right\} / \{2(1 - \cos \theta)\}, \\ \beta &= \frac{1}{1 - \cos \theta} \left[\begin{aligned} & -\sin \theta x_0 - \cos \theta \cdot y_0 + y_0 + d_y \\ & + \sin \theta \left\{ (1 - \cos \theta) \left(\begin{aligned} & -\cos \theta \cdot x_0 \\ & + \sin \theta \cdot y_0 + x_0 + d_x \end{aligned} \right) \right. \\ & \left. + \sin \theta \left(\begin{aligned} & \sin \theta \cdot x_0 \\ & + \cos \theta \cdot y_0 - y_0 - d_y \end{aligned} \right) \right\} / 2(1 - \cos \theta) \end{aligned} \right] \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

式(5)中: $\theta \neq n \cdot \pi$ (n 是整数).

由式(4),(5)可以判断出旋转和平移变换运动都可以用单向旋转模型表示,同时可以使用全局运动估计来找到式(4)中所需要的参数,即旋转中心和角度.

1) 旋转中心估计

块运动和中值滤波的结果是当前图像帧的每个像素点的局部运动矢量. 而任意点(x, y)的局部运动矢量可以表示为 $u = x_2 - x_1, v = y_2 - y_1$. 第 2 个图像帧点(x_2, y_2)是第一个图像帧在经过纯旋转后所对应的点, u 和 v 分别是 x 轴和 y 轴所对应的运动矢量. 对于纯旋转运动的情况,运动矢量会在任意一点与一个圆的切线重合,而该圆的中心与图像旋转中心是同一个点. 因此,任意点处与运动矢量垂直的垂直线会相交于一点,这样就可以描绘出旋转中心,如图 2 所示. 图 2 中:点 A, A_1, A_2 的坐标分别为(x_0, y_0), (x_1, y_1), (x_2, y_2), A_1 和 A_2 是带箭头的向量的起点. 点 $A_1(x_1, y_1)$ 局部运动矢量的垂直平分线为 $y = a_1x + b_1, a_1 = u_1/v_1, b_1 = (y_1 + v_1/2) - a_1(x_1 + u_1/2)$,而 u_1 和 v_1 是点 $A_1(x_1, y_1)$ 的局部运动矢量. 点 $A_1(x_2, y_2)$ 局部运动矢量的垂直平分线为 $y = a_2x + b_2$,其中 $a_2 = u_2/v_2, b_2 = (y_2 + v_2/2) - a_2(x_2 + u_2/2)$,而 u_2 和 v_2 是点 $A_2(x_2, y_2)$ 局部运动矢量.

为了保证噪声环境下计算结果的鲁棒性,可以使用超定系统来替代 3 个匹配点的方法. 对于 N 个匹配点的情况,可以得到

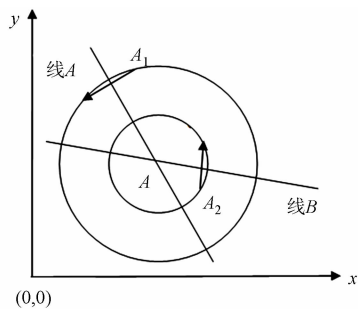


图 2 旋转中心点估计
Fig. 2 Rotation center estimation

$$\begin{bmatrix} -a_1 & -a_2 & \cdots & -a_N \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & \cdots & b_N \end{bmatrix}^T. \tag{6}$$

式(6)可以写成 $\mathbf{Ax}=\mathbf{b}$,那么旋转中心可以表示为 $\mathbf{x}=(\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{b}$.

2) 旋转角度估计

通过图 1 的第一个帧中的点 (x_1,y_1) 和与该点移动后相匹配的点 (x_2,y_2) ,可以得到旋转角度,计算方法为

$$\theta = \tan^{-1} \frac{(y_2 - y_0)(x_1 - x_0) - (x_2 - x_0)(y_1 - y_0)}{(x_2 - x_0)(x_1 - x_0) + (y_2 - y_0)(y_1 - y_0)}. \tag{7}$$

考虑到数值的可靠性,最终的估计结果是采用 N 个匹配点的估计值的平均值.

2 双水印算法

2.1 可见水印的嵌入与消除和提取

在小波域根据亮度和局部空间特征,自适应地嵌入可见水印,其过程有如下 7 个步骤.

1) 设载体图像 $Z=\{Z(x,y),1\leq x,y\leq n\}$,而水印信息表示为

$$\text{watermark} = \{w(x,y),1\leq x,y\leq m\},$$

其中: n 能被 $2m$ 整除, $n/(2m)\geq 3$.

2) 对待嵌入的水印进行顺时针旋转 -0.5° ,得到处理后的水印图像信息 $W_{i,j}$.

3) 把原始载体图像 Z 分成大小为 $m\times m$ 的子块,选出一个大小为 $m\times m$ 的子块 Z' 作为嵌入可见水印的载体.

4) 对载体图像 Z' 和水印图像进行小波分解(DWT).

5) 计算选取的 $m\times m$ 的载体子图像的亮度掩蔽 $L(i,j)$,缩放其值的范围在 $[0.9,0.95]$.使用缩放后的 $L'(i,j)$ 来计算载体图像和水印图像低频子带的缩放因子 α_l 和 β_l ,即 $\alpha_l=L'(i,j),\beta_l=1-L'(i,j)$.

6) 计算在一个高频子带上的坐标 (i,j) 处的 σ_x 的值.对 σ_x 进行标准化,且缩放处理至 $[0.9,1]$ 内.这个缩放后的标准差 σ'_x 可以用来确定该高频子带上的缩放因子 $\alpha_h(i,j)$ 和 $\beta_h(i,j)$,即

$$\alpha_h(i,j) = \sigma'_x L'(i/2^{2-r},j/2^{2-r}),$$
$$\beta_h(i,j) = \frac{1}{\sigma'_x(1-L'(i/2^{2-r},j/2^{2-r}))},$$

其中: σ'_x 表示坐标 (i,j) 处的标准差 σ_x 缩放处理后的值; $L'(i/2^{2-r},j/2^{2-r})$ 表示其亮度掩蔽.

7) 按照选取的载体子图像的比例,把水印图像的每个子带的系数值缩放后加入载体图像的相应取值范围的子带中,以完成水印的嵌入,可表示为

$$C'_{i,j} = \alpha(i,j)C_{i,j} + \beta(i,j)W_{i,j},$$

其中: α 和 β 是载体图像和水印图像分别所对应的缩放因子,它们是由低频子带的亮度掩蔽或者高频子带的亮度掩蔽,以及每个像素的空间活动级决定的; $C_{i,j}$ 和 $W_{i,j}$ 分别表示小波分解后的载体图像和水印图像的小波系数, $C'_{i,j}$ 指嵌有水印的图像的小波系数.小波进行逆变换,得到嵌有可见水印的图像.

本方案中消除该可见水印的数学表达式可以表示为 $C_{i,j}=[C'_{i,j}-\beta(i,j)W_{i,j}]/\alpha(i,j)$.作为标示作用的可见水印,一般情况下是不需要抽取的,而本算法为了通过旋转角度估计验证该可见水印是否是原水印,有必要对其进行抽取.抽取过程描述为:对嵌有可见水印信息的载体图像 $Z'(x,y)$ 和原始载体图像进行分块处理,并进行 DWT 分解;利用表达式 $W_{i,j}=[C'_{i,j}-\alpha(i,j)C_{i,j}]/\beta(i,j)$ 对水印子块进行抽取;利用图像旋转算法对步骤 2),得到可见水印信息进行逆处理,从而提取出可见水印图像.

2.2 不可见鲁棒水印的嵌入和提取

2.2.1 水印信息的预处理 为了使该鲁棒水印在不产生块效应和视觉冗余前提下嵌入到图像中,要对其进行如下 5 个步骤的预处理.

1) 把载体图像分为 $2m\times 2m$ 的图像子块,那么嵌入可见水印之后,用于嵌入鲁棒性水印的子块总数为 $i=[n/(2m)\times n/(2m)-1]$ 个,用 $\mathbf{s}=(s_1,s_2,\cdots,s_i)$ 表示这些子块,并记做 s_i ;

2) 用位平面分解方法对可见水印子块进行位平面分解操作,分解为 8 个 $m\times m$ 的位平面,接着把

这些位平面逐个扫描成一维的二进制序列,得到长度为 $m \times m \times 8$ 的序列,并用 0 对其进行扩充得到长度为 $c = m \times m \times i$ 的序列 A' ;

- 3) 用初值混沌映射把序列 A' 映射成混沌序列 $L = (L_1, L_2, \cdots, L_c)$;
- 4) 对序列 L 进行索引排序得到 $L' = (L_{b_1}, L_{b_2}, \cdots, L_{b_c})$,那么其对应的索引 $B = (b_1, b_2, \cdots, b_c)$;
- 5) 用索引 B 对序列 A' 进行处理,然后每截取长度为 m 的序列作为一列,最终得到 i 个 $m \times m$ 的水印矩阵,然后使用模糊归类的方法把这些水印矩阵嵌入到 $s = (s_1, s_2, \cdots, s_i)$ 的 i 个子块里面.

2.2.2 基于模糊归类的鲁棒性水印嵌入与检测 1) 计算载体图像分块后得到的子图的边缘点数量 $\text{sum}\{e(x,y)=0, (x,y) \in s_i\}$,其中: $e(x,y)$ 是载体图像中提取的二值化边缘图的数学表示.

2) 对分类后的原始图像的子块 s_i 进行 DWT 变换,得到低频子带 LL_i ,利用步骤二中的归类结果,根据人眼的视觉掩蔽特性,使嵌入水印的强度同图像子块的纹理复杂度成正比,达到自适应水印嵌入的效果,嵌入水印的方法为

$$LL'_i(x,y) = LL_i(x,y) + \delta \times W'.$$

(8)

式(8)中: $LL_i(x,y)$ 表示用于嵌入鲁棒性水印的载体图像的子块低频子带; δ 表示嵌入强度; W' 表示经预处理后的水印信息; $LL'_i(x,y)$ 表示嵌入水印后的低频子带. 对各图像子块进行 DWT 反变换,重构得到嵌有水印的图像 $Z'(x,y)$.

鲁棒性水印的检测:载入原始图像并对其进行分块分类处理,得到各分块的纹理复杂度隶属结果和相应的嵌入强度 δ ;对原始图像的各个分块进行 DWT 变换,得到小波域的低频子带 LL_i ;对嵌入水印的图像 $Z'(x,y)$ 也进行 DWT 变换,得到其小波域的低频子带 LL'_i ;利用假设检测的方法进行水印的检测,同时用嵌有水印的图像子块系数减去原始载体图像子块的系数再除以嵌入强度,从而提取出水印信息;对水印信息实施水印信息预处理步骤 2) 的逆过程得到 8 个位平面,再利用该 8 个位平面重构得到加密的水印图像,进行混沌加密的逆过程得到最终的水印图像.

3 实验仿真结果

实验采用大小是 512 px×512 px 的灰度图像,鲁棒性水印和可见水印信息都是使用二值灰度图像,中文字为“华”,通过统计各子块的边缘点数得到各类的嵌入强度,分别取 $\delta_1 = 3, \delta_2 = 5, \delta_3 = 7$. 实验第一默认载体图像选用 Lena 的灰度图像,如图 3 所示.

3.1 可见水印的嵌入效果

用大小为 512 px×512 px 的 Lena 和 Goldhill 图像作为载体图像,验证可见水印的嵌入效果和可消除性能,其效果如图 4 所示. 从图 4 的(a),(c)可以看出:两图的左上角版权信息标志清晰可见,又不影响载体图像的观赏性,且嵌入双水印后的载体图像没有出现明显的降质,表明可见水印的嵌入效果良好. 从图 4(b),(d)可以看出:去除水印后载体图像没有明显的降质;去除可见二值水印信息的 Lena 和 Goldhill 与原始的 Lena 和 Goldhill 图像的峰值信噪比(R_{SN})分别是 43.138 2 和 40.842 4,这说明可见水印算法的可移除性良好. 合法移除可见水印信息后的图像质量对比,如表 1 所示.

表 1 合法移除可见水印信息后的图像质量对比

Tab. 1 Comparison of image quality after the visible watermark is removed lawfully

载体图像	R_{SN}		
	本文	文献[6]	文献[7]
Lena	43.138 2	41.079 5	36.137 0
Barbara	42.073 3	40.841 0	36.513 0
Boat	44.676 4	40.862 7	36.726 0
Goldhill	40.842 4	41.128 2	36.162 0
Mandrill	42.746 2	40.192 0	36.522 0



图 3 原始载体图像和二值水印图像

Fig. 3 Original carrier image and the binary watermark image

华



(a) Lena 图嵌入双水印 (b) Lena 图去除可见水印 (c) Goldhill 图嵌入双水印 (d) Goldhill 图去除可见水印

图 4 Lena 和 Goldhill 嵌入双水印和可见水印的合法消除效果图

Fig. 4 Results of embedding dual watermark and lawfully remove visible watermark based on Lena and Goldhill

从表 1 可以看出:当用户采用合法手段移除可见水印信息后,移除可见水印信息之后的载体图像与原始载体图像的峰值信噪比 R_{SN} 的值在整体上优于文献[6-7]的算法方案. 仅在 Goldhill 作为载体图像时,本算法略低于文献[6],但比文献[7]的算法方案好. 这说明算法具有较好的可见水印合法去除性能.

3.2 可见水印的防篡改和恢复性能

3.2.1 可见水印的防篡改性能 为了提高多媒体信息的版权信息的篡改检测性能,在嵌入可见水印时对该水印信息做了图像旋转处理,旋转角度为 -0.5° . 因为肉眼对这个角度的旋转几乎是不可察觉的,这样就可以通过水印抽取方法得到该可见水印子块,再用水印旋转角度评估方法对水印旋转角度进行评估. 实验结果表明:在接收端使用估计方法评估得到的角度是 -0.4768° . 通过设置不同的旋转角度进行多次试验,有效地验证了该水印是原来嵌入的可见水印. 另一方面,可以通过提取不可见信息,验证该标识的内容是否与原来一致.

3.2.2 可见水印篡改后的恢复性能 当通过水印信息预处理步骤 1) 发现当前载体图像上的版权可见水印信息不是合法的,那么有必要对其进行更正,以保护该多媒体信息的版权合法性. 在此使用 Goldhill 作为载体,以验证该可见水印算法的恢复性能,把原来的版权标示信息“华”改为“侨”,随后对其进行恢复,结果如图 5 所示. 在验证版权信息被修改之后,本算法能在不影响载体图像质量的情况下对其进行修正.

3.3 鲁棒水印的抗攻击性能

与文献[6]鲁棒性对比,使用 Baboon 作为载体,并使用诸如 JPEG 压缩、高斯噪声、滤波、剪切等对含水印载体的图像进行攻击后,用相似度系数 NC 衡量鲁棒性,实验结果如表 2 所示.

表 2 鲁棒水印的抗攻击能力

Tab. 2 Anti-attack capability of the robust watermark

攻击类型	NC 值	
	本文	文献[6]
JPEG_20	0.998 9	0.998 4
中心剪切 1/4 面积	1.000 0	0.973 3
放大到 2 倍后还原	1.000 0	1.000 0
缩小到 1/2 后还原	0.998 2	0.963 8
3×3 中值滤波	0.892 9	0.795 6
0.01 的椒盐噪声	1.000 0	0.923 0
0.002 的高斯噪声	0.850 4	0.981 1

表 2 中:JPEG_20 表示质量因子为 20 的 JPEG 压缩(即压缩掉 80% 的信息). 从表 2 可以看出:本算法的鲁棒水印对于 JPEG、缩放、剪切、噪声等噪声和几何攻击有良好的鲁棒性,并且除了对高斯噪声之外的其他几类攻击的鲁棒性优于文献[6]的算法,这使得版权信息更加安全和可靠.

4 结束语

提出了一种结合水印角度旋转算法的新型双水印方案,该算法将可见水印信息进行微角度旋转后嵌入到选取的载体图像子图像中,保证了载体图像的视觉质量. 不可见水印和可见水印的原始水印信息



(a) 可见水印被篡改 (b) 恢复合法的可见水印

图 5 可见水印信息的篡改后恢复效果

Fig. 5 Recovery result of visible watermark information after tampered

一致,增强了可见水印的篡改后恢复性能,且能起到保护可见水印的作用.实验结果表明:本算法中可见水印的可移除性良好,且在被恶意篡改之后恢复能力比较强,不可见水印对常见的 JPEG、剪切、滤波、缩放等噪声和几何攻击有良好的鲁棒性.

参考文献:

- [1] BRAUDAWAY G W. Protecting publicly-available images with an invisible image watermark[C]// International Conference on Image Processing, Santa Barbara; IEEE Signal Processing Society, 1997: 524-527.
- [2] HUANG Biao-Bing, TANG Shao -Xian. A contrast-sensitive visible watermarking scheme[J]. Multimedia, 2006, 13 (2): 60-66.
- [3] LUO Yong, WANG Jian-xin, LI Shu-xing, et al. A Lossless and visible watermarking algorithm[C]// Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, Shanghai; IEEE Computer Society Conference Publishing Services, 2011: 95-98.
- [4] CUI De-long, LING Bin. A visible watermarking algorithm based on wavelet domain with lossless recovery[J]. Journal of Tibet University, 2008, 23(1): 111-114.
- [5] HSIEH W F, LIN Pei-yu. Imperceptible visible watermarking scheme using color distribution modulation[C]// The 9th International Conference on Ubiquitous Intelligence & Computing and 9th International Conference on Automatic & Trusted Computing, Fukuoka; IEEE Computer Society Conference Publishing Services, 2012: 1002-1005.
- [6] ZHU Cong-xu, CHEN Zhi-gang, XU Xia. Image dual watermark algorithm based on lifting wavelet and liu chaotic system[C]// The Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation, Dalian; IEEE Robotics and Automation Society, 2006: 10476-10480.
- [7] 罗永, 成礼智, 吴翊, 等. 小波变换结合纠错编码的半透明数字水印[J]. 计算机学报, 2004, 27(11): 1533-1539.
- [8] HU Yong-jian, KWONG S. Wavelet domain adaptive visible watermarking[J]. Electronics Letters, 2001, 37(20): 1219-1220.
- [9] HU Yong-jian, KWONG S. An image fusion based visible watermarking algorithm[C]// Proceedings of the 2003 International Symposium on Circuits and Systems, Bangkok; IEEE Circuits and Systems Society, 2003: III794-III797.
- [10] YU Zhong-da, DONG Jun-yu, WEI Zhi-qiang, et al. A fast Image rotation algorithm for wptical character recognition of chinese documents[C]// Proceedings of the 2006 International Conference on Communications, Circuits and Systems, Guilin; IEEE Circuits and Systems Society, 2006: 485-489.

A Dual Watermark Algorithm Using the Encryption of Watermark Rotation Angle

WU Xin-ya, CHEN Yong-hong, FENG Xiang-bin

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

Abstract: A new dual watermarking algorithm based on dual the encryption of watermark rotation angle is proposed. First, the algorithm blocks the original carrier image, and uses a sub-image of the original carrier image to embed the visible watermark. The size of the sub-image is predetermined by the visible watermark. Second, we process the visible watermark with the image rotation algorithm, so the rotation angle is used as one of the keys and use it as one of the means to test and verify the watermark information. Finally, the invisible robust watermark is embedded at the remainder original carrier image based on fuzzy classified. The experimental results show the presented algorithm can embed dual watermark image without significant degradation, and the carrier image doesn't appear significant degradation when the visible watermark is removed legally. The visible watermark has a strong recovery performance after tampered, and the robust watermark has a good robustness against common signal processing and geometric attacks such as JPEG compression, cropping, Gaussian noise, filtering, scaling.

Keywords: image rotation; dual watermark; copyright watermarking; fuzzy classified; adaptive

酪氨酸分子印迹电化学传感器的制备及性能

陈丹, 连惠婷, 孙向英, 刘斌

(华侨大学 材料科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 采用恒电位沉积法,制备以 *L*-酪氨酸为模板分子,壳聚糖为功能基体的分子印迹电化学传感器.实验结果表明:在优化的制备和测试条件下,所制得的印迹传感器对 *L*-酪氨酸具有良好的特异识别性能,印迹因子达 3.34;在 pH 值为 6.0,0.1 mol·L⁻¹ 的磷酸盐缓冲溶液中,*L*-酪氨酸的微分脉冲伏安氧化峰峰电流与浓度在 $4.0 \times 10^{-7} \sim 1.0 \times 10^{-4}$ mol·L⁻¹ 范围内呈良好的线性关系,检出限为 2.0×10^{-7} mol·L⁻¹.将该传感器用于人血清中酪氨酸含量的测定,平均回收率为 89.50%~99.67%.

关键词: *L*-酪氨酸;分子印迹;电化学传感器;壳聚糖

中图分类号: O 657.1; TP 212.2

文献标志码: A

酪氨酸(Tyr)是肾上腺激素、去甲肾上腺激素和多巴胺等用于调节情绪的生物信号分子的重要母体之一.如果人体缺乏酪氨酸,就会出现代谢异常、智力低下、抑郁等疾病^[1-2],而过量酪氨酸摄入则会使姊妹染色单体发生改变^[3].因此,建立准确、灵敏测定酪氨酸的方法具有重要意义.检测酪氨酸的方法主要有高效液相色谱法^[4]、毛细管电泳法^[5]、气相色谱法^[6]、紫外可见吸光光度法^[7]、荧光光度法^[8-9]等.酪氨酸具有电活性,灵敏快速的电化学传感器法也常用于酪氨酸的检测^[10-15].这些方法虽然展现出较高的灵敏度及较好的选择性,但在对实际样品中酪氨酸的准确快速检测仍存在局限.分子印迹电化学传感器(MIECS)因兼具分子印迹技术(MIT)对目标分子的特异识别性^[16-19]和电化学检测技术的优点,即高选择性、高灵敏度、低成本、易于微型化和自动化^[20-21],有望改善其他方法的不足之处,实现酪氨酸的便携、快速、准确测定.基于此,本文结合电化学的高灵敏度优势和分子印迹技术的高选择性特点,采用恒电位沉积得到复合物膜电极,选用适宜的洗脱剂洗脱去模板分子得到酪氨酸分子印迹电化学传感器,并优化其电沉积时间、洗脱剂、洗脱时间等实验条件.

1 实验部分

1.1 仪器和试剂

1) 仪器. CHI660D 型电化学工作站,上海辰华仪器有限公司;三电极系统:玻碳电极及其修饰膜电极为工作电极,铂丝电极为对电极,饱和甘汞电极(SCE)为参比电极;S-4800 型扫描电子显微镜,日本日立公司;PARSTAT2273 型高级电化学工作站,美国 Princeton Applied Research 公司.

2) 试剂.壳聚糖(CTS),AR 级,德国 Sigma Aldrich;*DL*-丝氨酸(*DL*-Ser),BR 级,上海丽珠东风生物技术有限公司;*L*-酪氨酸(*L*-Tyr)、*L*-苯丙氨酸(*L*-phe)、*L*-色氨酸(*L*-Trp)、多巴胺(DA)、抗坏血酸(AA)、尿酸(UA),均为 BR 级,国药集团化学试剂有限公司;人血清(Human serum),华侨大学校医院提供;实验用水均为 Milli-Q 系统提供的超纯水,美国 Millipore 公司,18 MΩ·cm.

1.2 酪氨酸分子印迹电化学传感器的制作方法

将 0.350 0 g CTS 溶解于稀 HCl 中,以 NaOH 溶液调节 pH 值至 5.7,配制成 $7.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ CTS 溶

收稿日期: 2013-12-20

通信作者: 刘斌(1963-),男,教授,主要从事电化学传感器的研究. E-mail: bliu@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(20955001, 21175049, 21275059);福建省自然科学基金计划资助项目(2011J01049, 2012J01044, 2013J01047);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JB-ZR1215)

液. 将 0.018 2 g *L*-Tyr 溶解于 HCl 溶液中, 配制成 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ *L*-Tyr 溶液. 取 2.00 mL *L*-Tyr 与 8.00 mL CTS 搅拌混匀, 配制成含 $0.02 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ *L*-Tyr, $5.6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ CTS 的混合电沉积底液, 置于 4 ℃ 冰箱中避光保存备用. 圆盘玻碳电极依次用不同粒径 Al_2O_3 泥浆仔细打磨抛光, 再依次经 1 : 1 HNO_3 、二次蒸馏水超声清洗各 3~5 min 至电极表面呈疏水镜面, 室温下自然晾干. 将以玻碳电极为工作电极的三电极系统移入上述配制的酪氨酸壳聚糖混合电沉积底液中, 在 -1.1 V (vs. SCE) 恒电位下沉积一定时间后, 取出工作电极, 并用少量二次蒸馏水淋洗后晾干, 即制备出壳聚糖-酪氨酸聚合膜修饰电极. 将电极置于 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH 和无水乙醇的混合溶液中, 施加 $+1.0 \text{ V}$ 电压以洗脱去模板分子, 制备成保留有酪氨酸分子空穴的分子印迹电极 (MIP/GCE).

非印迹膜对照电极 (NIP/GCE) 的制备. 除电沉积液中不含模板分子外, 其他制备过程及条件与印迹电极的制备相同.

1.3 实验方法

1.3.1 电化学方法 以 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 值为 6.0 的磷酸盐缓冲溶液 (PBS) 为支持电解质, 采用微分脉冲伏安法 (DPV) 进行扫描, 考察工作电极在 $1.0 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ *L*-Tyr 溶液中的电化学响应. 电位扫描范围为 $0.4 \sim 1.0 \text{ V}$, 扫描速度为 $50 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$, 脉冲幅度为 0.05 V , 脉冲周期为 0.02 s , 脉冲宽度 0.05 s , 灵敏度为 1.0×10^{-6} . 记录 *L*-Tyr 在工作电极上的氧化峰峰电流与电位的关系曲线.

电化学阻抗谱 (EIS) 实验是在含有 $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} [\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-/4-}$ 电化学探针的 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 溶液中进行, 频率范围为 $1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^5 \text{ Hz}$.

1.3.2 扫描电镜表征 将 CTS, *L*-Tyr_{NIP} 和 *L*-Tyr_{MIP} 分别电沉积于金片基底表面后, 真空干燥 48 h. 在加速电压为 5.0 kV 下, 通过 S-4800 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察各样品的表面形貌.

2 结果与讨论

2.1 *L*-Tyr 在复合膜修饰电极上的电化学响应

为了验证实验中酪氨酸分子能与壳聚糖一同沉积至电极表面并经 DPV 扫描溶出, 考察 CTS-Tyr 复合膜修饰电极与 CTS 修饰电极在 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 值为 6.0 的 PBS 溶液中的 DPV 响应, 结果如图 1 所示. 由图 1 可知: 相对于 CTS/GCE 的 DPV 曲线, CTS-Tyr/GCE 的 DPV 曲线在 0.762 V 处有一个较强的酪氨酸特征氧化峰; 而内插图为 MIP/GCE 在含 $1.0 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ *L*-Tyr 溶液中 DPV 曲线, 酪氨酸的氧化峰出现在 0.720 V . 两者氧化峰电位基本一致, 可确定酪氨酸分子可与壳聚糖共同沉积至电极表面, 并能通过 DPV 检测出来. 同时, 溶液中的酪氨酸氧化峰电位较之膜上的负移了 42 mV , 可知印迹电极表面印迹位点的存在更有利于 *L*-Tyr 在电极表面的氧化.

2.2 实验条件的优化

2.2.1 电沉积时间的选择 电沉积时间不同, 则印迹膜厚度不同, 膜厚度随沉积时间增加而变大. 不导电的印迹膜越薄, 目标分子通过界面的电荷转移阻碍越小, 则其对目标物质的响应越灵敏; 印迹膜越厚, 虽然灵敏度下降, 但是其膜上印迹位点增加, 印迹膜对目标物质结合量也增加. 采用恒电位沉积法, 得到电沉积时间不同的印迹膜电极. 根据洗脱模板分子后得到的印迹膜电极对同一浓度 *L*-Tyr 溶液的 DPV 响应峰电流大小, 来获得最佳电沉积时间. 实验结果表明: 电沉积时间小于 100 s 时, 随沉积时间增加, 响应电流逐渐增加; 沉积时间为 100 s 时, 响应峰电流达到最大; 而沉积时间大于 100 s 时, 由于圆盘电极表面积有限, 膜太厚不利于膜中心 *L*-Tyr 的进出, 影响模板分子的完全洗脱及再次识别, 所以响应峰电流反而减少. 因此, 100 s 为最佳电沉积时间.

2.2.2 洗脱剂中无水乙醇含量的选择 壳聚糖在水中溶胀度较大, 显著影响其分离选择性能, 因此必须先设法抑制其溶胀, 维持其印迹空穴的刚性结构^[22]. 研究表明: 壳聚糖具有良好的耐有机溶剂 (如乙醇) 性能^[23], 因此, 采用调节洗脱剂中乙醇的体积分数来调节壳聚糖膜的抗溶胀性能. 为了选得最佳的

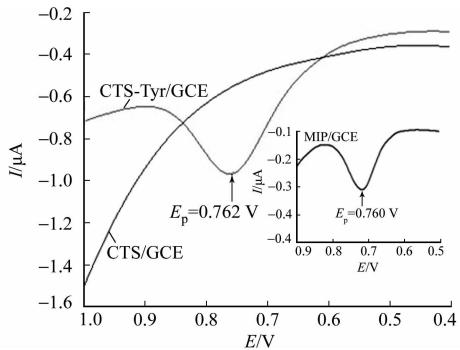


图 1 不同修饰电极的 DPV 电化学响应
Fig. 1 DPVs of different modified electrodes

洗脱剂,考察了 $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaOH}$ 和不同体积分数的无水乙醇作为洗脱剂时,印迹膜电极对同一浓度 $L\text{-Tyr}$ 溶液的响应峰电流(I)与第一次测定电流(I_0)的百分比随时间的变化.结果表明:当洗脱剂中无水乙醇的体积分数为 0.5% 时,酪氨酸的电化学响应峰电流基本不变;而当无水乙醇的体积分数低于或超过 0.5% 时,响应峰电流在一定程度上会随着时间推移而增加或降低.由此可知,适量的乙醇增强了壳聚糖膜的致密性与稳定性,有利于印迹膜微观构型的维持及印迹膜与目标分子间相互作用的增强.

2.2.3 洗脱时间的选择 印迹电极的制备需经电位诱导洗脱除去膜上的模板分子,留下能与酪氨酸特异性结合的印迹位点.若洗脱时间太短,模板分子未完全洗脱,导致未洗脱掉的模板分子占据一定量的印迹位点,影响印迹膜电极对目标物质的再次识别;若洗脱时间太长,模板分子已完全洗脱,多余的电位诱导时间又会对膜的性质带来不必要的影响.因此,需选择最佳洗脱时间.

洗脱时间对洗脱效果的影响,如图 2 所示.由图 2 可知:当洗脱时间低于 500 s 时,随着洗脱时间增加, $L\text{-Tyr}$ 的 DPV 响应峰电流逐步降低,但还是有信号残留(曲线 a~d),说明未能将 $L\text{-Tyr}$ 从印迹膜上洗脱下来;当洗脱时间达到 500 s 后,电极在 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ pH }6.0\text{ PBS}$ 中的 DPV 曲线(曲线 e)上基本没有 $L\text{-Tyr}$ 的特征峰,表明洗脱剂已将 $L\text{-Tyr}$ 完全洗脱.后续试验中还发现,该印迹膜电极对 $L\text{-Tyr}$ 的响应稳定.因此,认为 500 s 为最适宜的洗脱时间.

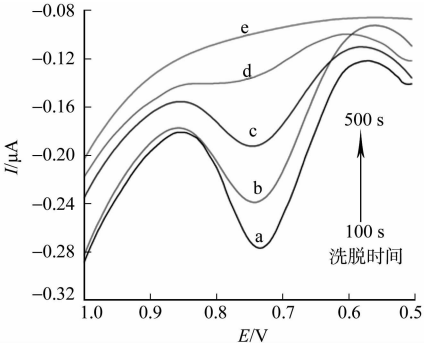


图 2 洗脱时间对洗脱效果的影响
Fig. 2 Impact of different elution time on the elution effect

将三电极系统在含 $0.02\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ L-Tyr}$ 的壳聚糖混合电沉积液中,于 -1.1 V 恒电位下沉积 100 s ,用少量二次水淋洗后晾干.然后,将制得的聚合膜修饰电极在 $+1.0\text{ V}$ 电位下,于 $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaOH}$ 和 0.5% 无水乙醇混合液中,恒电位洗脱 500 s ,即制得对 $L\text{-Tyr}$ 具有良好电化学响应的酪氨酸分子印迹电极.

2.3 酪氨酸分子印迹传感器的修饰膜表征

2.3.1 SEM 表征 采用 SEM 表征可得印迹膜的形貌及微观结构,如图 3 所示.裸金电极表面呈平整

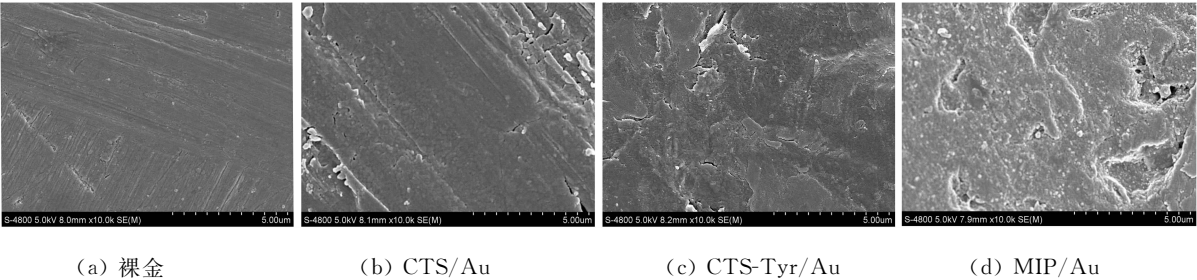


图 3 电极表面不同修饰膜的 SEM 图

刚性的结构(图 3(a));电沉积上 CTS 后,其表面可以观察到致密的薄膜结构(图 3(b),(c));当 $L\text{-Tyr}$ 从复合物膜中洗脱后,印迹膜表面呈现疏松多孔结构(图 3(d)),有利于模板分子的进出.

2.3.2 EIS 表征 采用 EIS 研究电极表面与溶液之间的电荷转移,不同电极的交流阻抗图谱如图 4 所示.交流阻抗图由预示膜阻抗的高频区半圆(R_p)和溶液扩散电阻的低频区直线(R_s)组成.由图 4 可知:裸电极(曲线 a)的交流阻抗曲线近似为直线,表明此时 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-/4-}$ 在裸电极上的反应主要受溶液扩散控制;当电极表面电沉积上 CTS(曲线 c)以及 CTS-Tyr 复合物(曲线 d)后,形成的复合物膜使 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-/4-}$ 在电极界面的电荷转移受阻,产生膜阻抗, R_p 值分别增大至 $431.3, 470.5\ \Omega$;而随着酪氨酸的洗脱(曲线 b), R_p 降至 $304.2\ \Omega$,说明洗脱模板分子后,膜上留下的印迹空穴使得 $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-/4-}$ 到达电极表面变得容易.

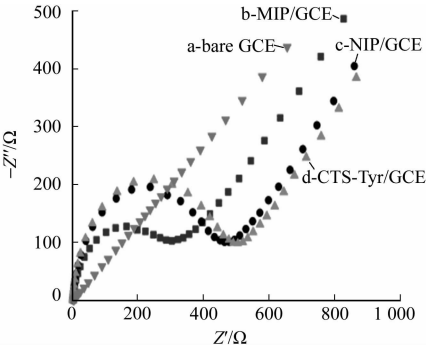


图 4 不同电极的交流阻抗图谱
Fig. 4 EIS of GCE modified with different material

2.4 酪氨酸分子印迹传感器的特异识别性能

2.4.1 抗干扰性能 为了考察所制备的印迹电极抗其他共存物质的干扰性能,参考了血清中几种物质的相对酪氨酸含量,模拟血清中各物质的含量相对于酪氨酸含量的比率,如表 1 所示.测定了当不同浓度倍数的共存物质存在下,印迹电极对浓度为 $1.0\times10^{-5}\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ $L\text{-Tyr}$ 的 DPV 响应峰电流与不存在干扰时的峰电流比值(I/I_0),如图 5 所示.

由图 5 可知:在远超过其理论相对含量的共存干扰存在下,所制得的印迹传感器对同等浓度酪氨酸的电化学响应峰电流变化在可接受的波动范围内.因此,该传感器可以应用于实际样品的检测.

表 1 抗干扰实验溶液配制表

Tab.1 Preparation of mixture solutions in the anti-interence experiment

共存物质	混合溶液/ $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	共存物质	混合溶液/ $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$
Non	$10\times10^{-5} L\text{-Tyr}$	AA	a. Non+ 1.0×10^{-5} AA
			b. Non+ 5.0×10^{-5} AA
			c. Non+ 1.0×10^{-4} AA
DA		DA	a. Non+ 1.0×10^{-8} DA
			b. Non+ 1.0×10^{-7} DA
			c. Non+ 1.0×10^{-6} DA
UA		Phe	a. Non+ 1.0×10^{-5} Phe
			b. Non+ 1.0×10^{-4} Phe
			c. Non+ 1.0×10^{-3} Phe
		Ser	a. Non+ 1.0×10^{-5} Ser
			b. Non+ 1.0×10^{-4} Ser
			c. Non+ 5.0×10^{-3} Ser

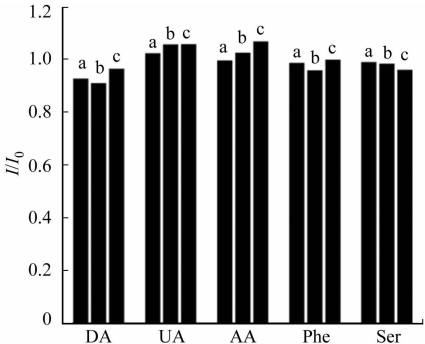


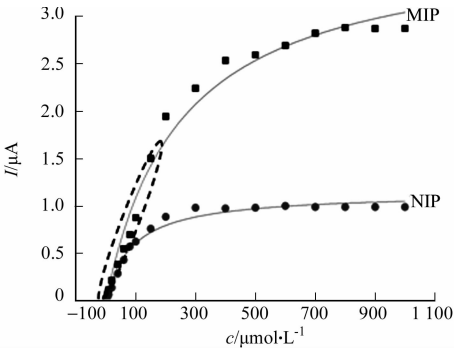
图 5 不同干扰物存在时,印迹传感器对酪氨酸的响应电流变化
Fig.5 I/I_0 of the MIP sensor for $L\text{-Tyr}$ in the presence of dirrerent co-existing substances in blood serum

2.4.2 吸附等温曲线研究及工作曲线 吸附等温线是评价印迹膜亲和性能的主要方法.为了模拟酪氨酸分子印迹电化学传感器吸附酪氨酸分子的等温吸附模型,参考 Langmuir 吸附模型^[26],提出一个适合本体系的拟合公式,即

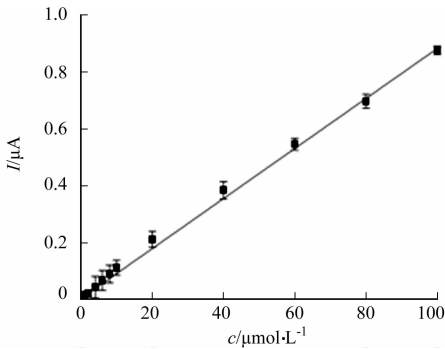
$$I_p = I_{pm} \cdot \frac{c}{k + c}.$$
 (1)

式(1)中: I_p 为分子印迹传感器吸附达到平衡时,印迹膜上的的平衡吸附不同浓度酪氨酸时的响应电流值, μA ; c 为吸附平衡时溶液中酪氨酸的浓度, $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; I_{pm} 为饱和吸附状态下的响应电流值, μA ; k 为吸附平衡解离常数, $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$. 而印迹膜的印迹效果,可以用印迹因子 IF 表示,即 $IF = I_{pm}(\text{MIP})/I_{pm}(\text{NIP})$. IF 越大,说明印迹膜的识别性强,印迹效果越好.

制备 NIP 和 MIP 两种电化学传感器,分别作其对 $L\text{-Tyr}$ 的等温吸附曲线,如图 6 所示.由图 6(a)可知: $L\text{-Tyr}$ 在印迹传感器上的 DPV 响应明显大于非印迹传感器.表 2 为平衡吸附等温曲线参数拟合表.从表 2 的拟合数据可知:饱和状态下的响应电流值 MIP 明显大于 NIP,IF 可达 3.34,表明印迹传感器对酪氨酸具有较好的识别性能.



(a) 等温吸附曲线



(b) 椭圆虚框内的数据线性拟合

图 6 印迹与非印迹传感器对酪氨酸分子的等温吸附曲线

Fig.6 Adsorption isotherm curves of $L\text{-Tyr}$ on MIP and NIP sensors

解离常数 k 反映解离反应的快慢, k 越小说明解离越慢,解离程度越低,代表膜与分子之间的亲和力越强.表 2 中:印迹膜的 k 明显小于非印迹膜的,同样说明了印迹膜对 $L\text{-Tyr}$ 特异性识别.

由图 6(b)可知:酪氨酸印迹传感器对 L -Tyr 的响应峰电流在 $4.0\times10^{-7}\sim1.0\times10^{-4}\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度范围,呈现良好的线性变化,线性方程为 $I_p=0.008\ 78\ c+0.003\ 52,R^2=0.999\ 1$,定量检出下限达 $2.0\times10^{-7}\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

2.5 重现性和稳定性

将所制备的酪氨酸分子印迹电极重复洗脱,测定其对 $1.0\times10^{-5}\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ L -Tyr 的电化学响应.结果表明:所得 I_p 的标准偏差为 $0.81\%(n=10)$,说明该传感器重现性较好.每天使用一次该传感器,连续使用一周后, I_p 变化为初始值的 99.76% ,说明该电化学传感器具有较好的稳定性.

2.6 血清样品分析及回收率的测定

自然界中的氨基酸和糖有左旋和右旋,但在生命体中,只有左旋的氨基酸和右旋的糖,即生命体中只有 L -型氨基酸和 D -型糖.

将印迹传感器用于血清样品中 L -Tyr 的测定,采用加标回收法测回收率,结果如表 3 所示.表 3 中: c_d 为样品测定值; c_a 为加入量; c_f 为测得量; η 为回收率.由表 3 可知:MIP/GCE 用于血清样品中 L -Tyr 含量的测定,平均回收率在 $89.50\%\sim99.67\%$ 之间.

表 2 平衡吸附等温曲线参数拟合表

Tab.2 Values of isotherm adsorption model parameters

传感器类型	R^2	$k/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	$I_{pm}/\mu\text{A}$	IF
MIP/GCE	0.989 8	87.573 6	3.808 3	3.34
NIP/GCE	0.985 3	250.758 7	1.140 6	

表 3 血清样品中酪氨酸的测定

Tab.3 Determination of the tyrosine in human serum samples

样品	$c_d/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	$c_a/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	$c_f/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	$\eta/\%$
1	52.13	10	9.20	92.00
		20	19.60	98.00
		30	29.75	99.17
2	46.35	10	9.20	92.00
		20	19.52	97.60
		30	29.90	99.67
3	62.83	10	8.95	89.50
		20	19.35	96.75
		30	29.73	99.10

3 结束语

采用分子印迹技术,借助功能基体壳聚糖的电沉积制备了 L -Tyr 分子印迹电极,通过 DPV 法考察其对 L -Tyr 的响应情况.在最佳制备条件下,所构建的印迹膜传感器对 L -Tyr 具有很好的灵敏度和特异识别性,同时也有较低的检测限和较好的重现性及稳定性.印迹膜传感器良好的抗干扰性能,使其成功地应用于血清中 L -Tyr 的测定.实验结果表明:其在临床诊断中,对血清酪氨酸的快捷、准确检测具有潜在的应用价值.

参考文献:

[1] CARLSSON A,LINDQVIST M,ARCH N S. Dependence of 5-HT and catecholamine synthesis on concentrations of precursor amino-acids in rat brain[J]. Pharmacology,1978,303(2):157-164.

[2] BOOMSMA F,MEIRACKER A,SCHALEKAMP M. Contrasting effects of peripheral decarboxylase inhibitors on plasma activity of aromatic- L -amino acid decarboxylase and semicarbazide-sensitive amine oxidase in Parkinson's disease[J]. Life Sci,1995,57(19):1753-1759.

[3] 邹忠梅,喻长远. 人体生命之源(氨基酸)[M]. 北京:中国医药科技出版社,2000:76-77.

[4] GÖTZE L,HEGELE A,METZELDER S K,et al. Development and clinical application of a LC-MS/MS method for simultaneous determination of various tyrosine kinase inhibitors in human plasma[J]. Clin Chim Acta,2012,413(1/2):143-149.

[5] CHRISTOPHER D A,NICOLAS G,STANISLAV R S. Automated method for analysis of tryptophan and tyrosine metabolites using capillary electrophoresis with native fluorescence detection[J]. Anal Bioanal Chem. 2013,405(8): 2451-2459.

[6] DENG Chun-hui,DENG Yong-hui,WANG Bin,et al. Gas chromatography-mass spectrometry method for determination of phenylalanine and tyrosine in neonatal blood spots[J]. J Chromatogr B,2002,780(2):407-413.

[7] CHRASTIL J. Spectrophotometric determination of tryptophan and tyrosine in peptides and proteins based on new color reactions[J]. Anal Biochem,1986,158(2):443-446.

[8] 魏薇,王洪鉴,江崇球,等. 新型荧光试剂 1,5-二(4,6-二氯三嗪)-氨基萘与酪氨酸相互作用[J]. 分析化学,2007,35(12):1772-1775.

- [9] ZHU Xia-shi, XU Su-qin. Determination of *L*-tyrosine by β -cyclodextrin sensitized fluorescence quenching method[J]. Spectrochim Acta Part A, 2010, 77(3): 566-571.
- [10] SAUMYA V, PRATHISH K P, RAO T P. In situ copper oxide modified molecularly imprinted polypyrrole film based voltammetric sensor for selective recognition of tyrosine[J]. Talanta, 2011, 85(2): 1056-1062.
- [11] TANG Xiao-feng, LIU Yang, HOU Hao-qing, et al. Electrochemical determination of *L*-tryptophan, *L*-tyrosine and *L*-cysteine using electrospun carbon nanofibers modified electrode[J]. Talanta, 2010, 80(5): 2182-2186.
- [12] JIANG Lin, GU Su-qing, DING Ya-ping, et al. Amperometric sensor based on tricobalt tetroxide nanoparticles-graphene nanocomposite film modified glassy carbon electrode for determination of tyrosine[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2013, 107(1): 146-151.
- [13] SRIVASTAVA, ASHWINI K, GAICHORE R R. Simultaneous determination of *L*-tyrosine and caffeine based on their electrocatalytic oxidation at a 4-tert-butylcalix[6] arene-modified carbon paste electrode[J]. Journal of AOAC International, 2013, 96(1): 133-141.
- [14] GHOREISHI S M, BEHPOUR M, JAFARI N, et al. Electrochemical determination of tyrosine in the presence of dopamine and uric acid at the surface of gold nanoparticles modified carbon paste electrode[J]. J Chin Chem Soc, 2012, 59(8): 1015-1020.
- [15] LIU Xiao, LUO Li-qiang, DING Ya-ping, et al. Simultaneous determination of *L*-cysteine and *L*-tyrosine using Au-nanoparticles/poly-eriochrome black T film modified glassy carbon electrode[J]. Bioelectrochemistry, 2012, 86(2012): 38-45.
- [16] 周丰, 连惠婷, 曹学功, 等. 掺杂石墨烯分子印迹传感器对色氨酸的手性识别[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2012, 33(5): 528-534.
- [17] 孙兆辉, 连惠婷, 孙向英, 等. 石墨烯掺杂对分子印迹电化学传感器的增敏作用[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2012, 33(4): 401-406.
- [18] LIU Bin, WANG Xiao-li, LIAN Hui-ting, et al. Xanthine microsensor based on polypyrrole molecularly imprinted film modified carbon fiber microelectrodes[J]. Anal Biochem, 2013, 440(2): 220-226.
- [19] 姜忠义, 吴洪. 分子印迹技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 1-3.
- [20] PILLETISKY S A, TURNER A P F. Electrochemical sensors based on molecularly imprinted polymers[J]. Electroanalysis, 2002, 14(5): 317-323.
- [21] BKABCI-LOPEZ M C, LOBO-CASTANON M J, MIRANDA-ORDIERES A J, et al. Electrochemical sensors based on molecularly imprinted polymers[J]. TrAC Trends Anal Chem, 2004, 23(1): 36-48.
- [22] 农兰平, 黄敏, 庄玉萍. *L*-色氨酸分子印迹壳聚糖膜的制备及透过选择性[J]. 化学研究, 2009, 20(3): 15-18.
- [23] 吴洪, 赵艳艳, 喻应霞, 等. 分子印迹壳聚糖膜分离手性苯丙氨酸[J]. 功能高分子学报, 2007, 19/20(2): 262-266.

Preparation and Properties of Tyrosine Molecularly Imprinted Electrochemical Sensor

CHEN Dan, LIAN Hui-ting, SUN Xiang-ying, LIU Bin

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

Abstract: A novel molecularly imprinted electrochemical sensor was prepared with chitosan as functional matrix and *L*-tyrosine (*L*-Tyr) as template molecule by potentiostatic electrodeposition. According to our experimental results, the molecular imprinted polymer (MIP) sensor with an imprinted factor of 3.34 showed well sensitivity and good selectivity to *L*-Tyr among the structural similarities and co-existences. The oxidation peak currents of differential pulse voltammetry were linear to the concentration of *L*-Tyr in the range from 4.0×10^{-7} to 1.0×10^{-4} mol $\cdot$ L $^{-1}$ with a detection limit of 2.0×10^{-7} mol $\cdot$ L $^{-1}$. Furthermore, the recoveries ranged from 89.50% to 99.67% were obtained when the sensor was applied to real samples analysis.

Keywords: *L*-tyrosine; molecular imprinting; electrochemical sensor; chitosan

文章编号:1000-5013(2014)04-0409-04

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2014.04.0409

微波辐射 SnCl_4/C 催化 对羟基苯甲酸乙酯的合成与表征

陈会新, 唐忠科, 熊兴泉

(华侨大学 材料科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 在微波辐射条件下,以对羟基苯甲酸与乙醇为原料, SnCl_4/C 为异相催化剂,高效、绿色地合成对羟基苯甲酸乙酯. 分别研究催化剂用量、醇酸摩尔比、反应时间、反应温度、微波辐射功率等对收率的影响,并采用傅里叶变换红外光谱(FT-IR)、核磁共振氢谱(^1H NMR)和质谱(MS)确定产物的结构. 结果表明:合成对羟基苯甲酸乙酯最佳条件为 $n(\text{对羟基苯甲酸}):n(\text{乙醇})=1:4$,反应时间为 25 min,催化剂的质量分数为 10%,反应温度为 120 $^\circ\text{C}$,微波辐射功率为 640 W,产品收率为 95%; SnCl_4/C 催化剂循环使用 4 次后,仍然显示出良好的催化活性,产率可达 89%.

关键词: 对羟基苯甲酸乙酯;微波合成; SnCl_4/C ;异相催化剂

中图分类号: O 625.54

文献标志码: A

对羟基苯甲酸乙酯,又名尼泊金乙酯,由于具有高效、低毒、广谱以及易配伍等优点,被广泛应用于食品、日化、医药、饲料及各种工业防腐化妆品、药品的防腐剂等方面. 目前为止,它是世界上用途最广、用量最大、应用频率最高的防腐剂之一,也是我国重点发展的替代苯甲酸钠等食品防腐剂的产品之一^[1]. 工业上生产对羟基苯甲酸乙酯的方法很多,最常见的是以硫酸、固体超强酸、对甲苯磺酸、离子液体等作为催化剂^[2-10],以有机溶剂作为带水剂,使对羟基苯甲酸与相应的醇反应. 然而,已报道的固体超强酸及其离子液体等催化剂具有制备工业复杂、生产成本低,或反应时间长等缺点. 近年来,以 SnCl_4 作为对羟基苯甲酸酯化反应的催化剂已取得了较好的结果,无副反应发生,后处理简单^[11]. 但是,该催化剂催化活性不高(一般要 5 h 以上)、容易吸潮、较易溶于很多有机溶剂导致很难对产物进行有效分离. 微波辐射是近十几年来开发的一种新兴的绿色合成技术,已广泛应用于有机合成反应. 与传统的合成方法相比较,微波技术能极大地加快反应速率,节省反应时间,从而显著提高经济效益. 为了克服 SnCl_4 均相催化酯化反应的缺点,本文结合微波辐射技术和异相催化剂两方面的优点,以价廉、易得的负载型 SnCl_4/C 为异相催化剂,以对羟基苯甲酸与乙醇为原料合成对羟基苯甲酸乙酯,系统研究其合成工艺、优化反应条件,探索一条绿色环保的合成新途径.

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

1) 仪器: MCR-3 型微波化学反应器(河南省巩义市予华仪器公司); Nicolet Magna IR560 型傅里叶变换红外光谱仪(美国 Nicolet 公司,液膜法); X-4 型数字显微熔点测定仪(北京泰克仪器有限公司); Bruker DMX-400NMR 型核磁共振仪(TMS 为内标).

收稿日期: 2013-12-03

通信作者: 熊兴泉(1980-),男,副教授,主要从事结构可控聚合物的合成、性能研究以及精细化学品绿色合成的研究. E-mail: xxqluli@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省教育厅 A 类科技基金资助项目(JA12007); 华侨大学实验改革与建设基金资助项目(2009 年度)

2) 试剂: 乙醇, 对羟基苯甲酸, $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 均为分析纯; 颗粒状活性炭为市售。

1.2 负载型固体催化剂 SnCl_4/C 的制备

用质量分数为 10% 的稀硝酸浸泡颗粒状活性炭 24 h, 用去离子水洗尽并抽干, 于 120 °C 下干燥 2 h, 冷却。称取一定量的经过预处理的活性炭和 $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ($m(\text{活性炭}) : m(\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}) = 1 : 1$), 溶于适量乙醇中回流 0.5 h, 在旋转蒸发器上减压蒸干乙醇, 在 110 °C 烘箱干燥备用。

1.3 对羟基苯甲酸乙酯的合成

对羟基苯甲酸乙酯的合成路线, 如图 1 所示。以对羟基苯甲酸和乙醇为原料, 以 SnCl_4/C 为催化剂, 按照一定的比例加入到 100 mL 的圆底烧瓶中。将烧瓶置于 MCR-3 型微波化学反应器中, 设定一定功率、温度及反应时间, 开启搅拌器, 待温度升到设定温度后, 开始计时。采用薄层色谱 (TLC) 对酯化反应进行跟踪, 待酯化反应完全结束后, 关闭微波反应器, 趁热过滤回收催化剂, 将滤液倒入适量冷水中, 有白色晶体析出, 过滤, 用质量分数为 10% 碳酸氢钠溶液洗涤后再用水洗, 得白色晶体。称量计算收率, 并对产品进行表征。

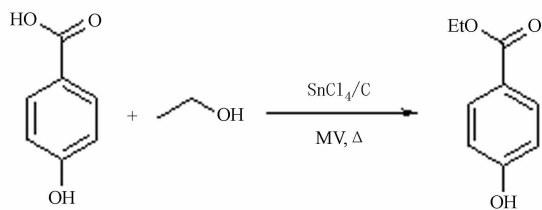


图 1 对羟基苯甲酸乙酯的绿色合成途径

Fig. 1 Green synthesis of ethyl *p*-hydroxybenzoate

2 结果与讨论

2.1 催化剂用量对产率的影响

以 7.25 mmol 对羟基苯甲酸, 29.0 mmol 乙醇为原料, 在反应时间为 25 min, 微波辐射功率为 640 W, 反应温度为 120 °C 的条件下, 改变催化剂的使用量。当催化剂的质量分数分别为 6%, 8%, 10%, 12% 时, 产率分别为 89%, 90%, 94%, 94%。由实验结果可知: 随着催化剂用量的增加, 产率随之增加。当催化剂的用量为反应物质的总质量的 10% 时, 产率达到 94%, 再增加催化剂的用量, 产率没有继续增加。因此, 在本实验条件下, 催化剂用量为底物质量的 10% 最适宜, 产率可达 94%。

2.2 醇酸摩尔比对产率的影响

以 7.25 mmol 对羟基苯甲酸, 质量分数为 10% 的 SnCl_4/C 为原料, 在反应时间为 25 min, 微波辐射功率为 640 W, 反应温度为 120 °C 的条件下, 改变乙醇的使用量。当对羟基苯甲酸和乙醇的物质的量之比分别为 1 : 2, 1 : 3, 1 : 4, 1 : 5 时, 产率分别为 80%, 89%, 94%, 94%。由实验结果可知: 产率随醇酸摩尔比增加而增加, 当达到 1 : 4 时, 产率最高, 再增大比例, 产率反而下降。这是因为在反应开始阶段, 随着醇的用量的增加, 有利于酸的转化; 但转化达到最大时, 再增加乙醇的用量则降低了对羟基苯甲酸的质量浓度, 不利于反应进行。因此, 实验采用 $n(\text{对羟基苯甲酸}) : n(\text{乙醇}) = 1 : 4$ 。

2.3 反应时间对产率的影响

以 7.25 mmol 对羟基苯甲酸, 29.0 mmol 乙醇, 质量分数为 10% 的 SnCl_4/C 为原料, 微波辐射功率为 640 W, 反应温度为 120 °C 的条件下, 改变反应时间。当反应时间分别为 15, 20, 25, 30 min 时, 产率分别为 88%, 94%, 95%, 94%。由实验结果可知: 随着反应时间的增加, 产率逐渐增高, 当反应 25 min 时, 产率达到 95%, 继续延长反应时间, 产率有所下降至 94%, 且颜色加深。这主要是由于随着反应时间的延长, 副反应增多, 产品质量下降。

2.4 反应温度对产率的影响

以 7.25 mmol 对羟基苯甲酸, 29.0 mmol 乙醇, 质量分数为 10% 的 SnCl_4/C 为原料, 在反应时间为 25 min, 微波辐射功率为 640 W 的条件下, 改变反应温度, 研究温度对产率的影响。当反应温度分别为 100, 110, 120, 130 °C 时, 产率分别为 60%, 70%, 95%, 94%。由实验结果可知: 产率随着反应温度的升高而增大, 当反应温度达到 120 °C 时, 产率可达 96%, 再将反应温度增加至 130 °C 时, 反应体系由于反应过于激烈, 且容易增加副产物的生成, 从而导致产率稍有下降。

2.5 催化剂 SnCl_4/C 重复使用次数

为评估 SnCl_4/C 催化剂的重复使用性能, 每次实验后, 将过滤洗涤所得的催化剂置于 110 °C 干燥 1 h 后, 再重复使用。在最佳反应条件下, 即 $n(\text{无水乙醇}) : n(\text{对羟基苯甲酸}) = 4 : 1$, 反应温度为 120 °C,

微波功率为 640 W,反应时间为 25 min,催化剂用量为醇酸总质量的 10%,重复进行一系列的实验. 结果表明:在最佳条件下, SnCl_4/C 催化剂可重复使用 4 次以上,使用 1~4 次时的产率分别为 95%,92%,90%,89%. 随着使用次数的增加,产率缓慢降低,其主要原因是随着反应的进行,负载在炭粉上的 SnCl_4 催化剂会发生流失. 另外,在反应过程中,异相催化剂活性中心通道可能被堵塞,导致其与反应底物接触机会减少,从而造成催化效果慢慢变差.

3 产品鉴定

3.1 熔点鉴定

经鉴定,产物熔点为 115.5~116.5 ℃,外观为白色晶体,与文献报道相符.

3.2 红外光谱、核磁共振氢谱以及质谱的测定

产品和原料的红外光谱图,如图 2 所示. 由图 2 可知:苯甲酸由羧基中的 O—H 的伸缩振动吸收峰出现在 $3\,385\text{ cm}^{-1}$ 处,几乎将酚羟基的 O—H 的伸缩振动吸收峰全部覆盖. 而苯甲酸乙酯的这个峰消失,酚羟基的 O—H 的伸缩振动吸收峰出现在 $3\,219\text{ cm}^{-1}$ 处,说明羧基中的 —OH 基团消失;苯甲酸乙酯中在 $2\,980\text{ cm}^{-1}$ 处出现一系列新峰,是甲基和亚甲基的 C—H 的伸缩振动吸收峰,在 $1\,475,1\,372\text{ cm}^{-1}$ 处的新峰则是甲基和亚甲基中 C—H 的面内弯曲振动吸收峰,说明完好地引入乙基,酯化成功进行;羧基中的 C=O 的伸缩振动吸收峰位置一般高于 $1\,700\text{ cm}^{-1}$ 处,但连接苯环后,由于与碳碳双键的共轭效应,使吸收峰向低频方向移动. 由图 2 可知:羧基中 C=O 的伸缩振动吸收峰出现在 $1\,676\text{ cm}^{-1}$ 处,苯甲酸乙酯相应的峰由于共轭效应大于酯化所带来的影响,C=O 的伸缩振动峰只发生少量移动,出现在 $1\,674\text{ cm}^{-1}$ 处;苯甲酸乙酯中 $1\,238,1\,016\text{ cm}^{-1}$ 处出现了特征的对应于 C—O—C 的反对称和对称伸缩振动吸收峰,进一步证明酯化反应的进行. 同时,其他的峰只发生了少量移动,强度变化不大.

产品的核磁共振氢谱,如图 3 所示. 由图 3 可知:由于处于芳环体系,受到化学各向异性效应的影响,化学位移值向高场移动,即苯环上的氢(H—a 和 H—b),又由于对羟基苯甲酸乙酯中羰基的吸电子作用使得距离它较近的氢的化学位移向低场移动,所以 H—a 在 6.91,H—b 在 8.13~7.91 分别有 2 个氢;由于酚羟基中的氢只连接在氧上,导致 H 出现在较高场,在 6.76~6.18 和 H—b 相比,H—a 的化学位移出现在 6.91,在 6.76~6.18 处 1 个小钝峰,对应与酚羟基 H—c,H—d 由于受到酯中氧原子的影响,吸电子作用相比酚羟基则小得多,所以受氧原子的影响,在 4.38 处出现 1 个四重峰;e 处的氢 H—e 受氧原子的影响较小,在 1.34 处出现 1 个三重峰. 即对羟基苯甲酸乙酯的 ^1H NMR 谱图(400 MHz, CDCl_3)的 δ 值:8.13~7.91(m,2H,H—b),6.91(d,2H,H—a),6.76~6.18(m,1H,H—c),4.38(q,2H,H—d),1.34(dd,3H,H—e);质谱(MS):166 (M^+ ,20%),138 (M^+-28 ,23%),121 (M^+-45 ,100%),与对羟基苯甲酸乙酯所对应的标准质谱数据一致. 综上所述,数据符合对羟基苯甲酸乙酯的结构,证明了产物为对羟基苯甲酸乙酯.

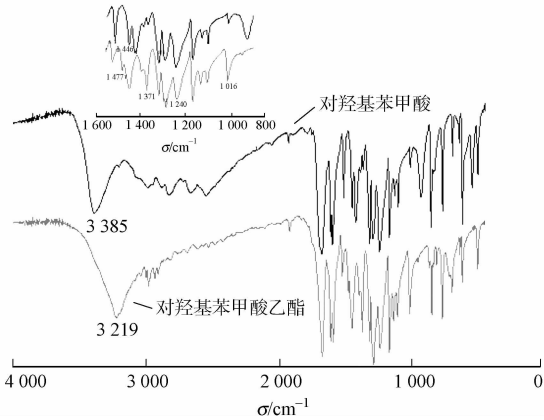


图 2 产品和原料的 FT-IR 谱图

Fig. 2 FT-IR spectra of reagent and the raw material and obtained product

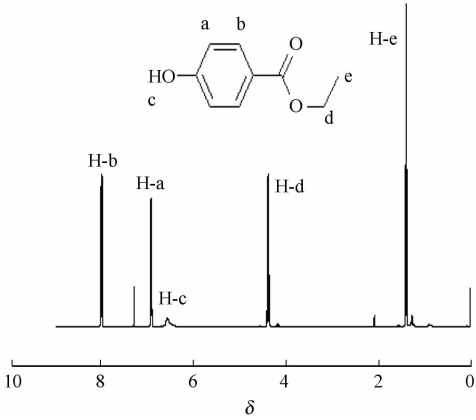


图 3 对羟基苯甲酸乙酯的 ^1H NMR 谱图

Fig. 3 ^1H NMR spectrum of ethyl *p*-hydroxybenzoate

4 结 论

以对羟基苯甲酸和乙醇为反应原料, SnCl_4/C 为负载型异相催化剂, 高效、绿色合成了对羟基苯甲酸乙酯. 其最佳实验条件为 $n(\text{对羟基苯甲酸}):n(\text{乙醇})=1:4$, 催化剂用量为 10%, 反应温度为 120 ℃, 微波辐射功率为 640 W, 反应时间为 25 min. 同时, 研究了该种异相催化剂的重复使用情况. 研究表明: 该催化剂可循环使用 4 次, 仍保持良好的催化活性, 第 4 次酯化率仍可达 89%. 与其他已报道的合成方法相比, 该方法具有反应产率高、反应时间短、后处理简单, 以及对设备的腐蚀小等突出的优点. 本实验为将来绿色、高效, 以及低成本工业化合成对羟基苯甲酸乙酯进行了有益的前期探索.

参考文献:

[1] 张殿义. 化妆品原料规格使用手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002:112.

[2] 李玲珍, 赵淑桂, 易杨柳. 对羟基苯甲酸乙酯合成方法的改进[J]. 化学通报, 1988(4):33.

[3] 周建平, 田志高, 李淑琴. 特殊固体超强酸 $\text{SO}_4^{2-}/\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 催化合成对羟基苯甲酸乙酯的研究[J]. 广州化工, 2005, 33(2):21-22.

[4] 秦正龙, 孟庆华, 梁燕波. 固体超强酸催化合成对羟基苯甲酸乙酯的研究[J]. 精细化工, 1997, 14(6):23-25.

[5] 高文艺, 任立国, 张晓丽. 固体超强酸 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}/\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 催化合成对羟基苯甲酸乙酯[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2006, 26(3):34-37.

[6] 林棋, 吕吓强, 柯志超, 等. 固体超强酸 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}/\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 催化合成对羟基苯甲酸乙酯[J]. 湖北民族学院学报, 2001, 19(3):60-62.

[7] 叶天旭, 刘京燕, 张斌, 等. 磷钨酸-拟薄水铝石负载催化剂合成对羟基苯甲酸乙酯[J]. 应用化学, 2009, 26(9):1114-1116.

[8] 唐明明, 刘葵, 梁敏. 对甲苯磺酸催化合成对羟基苯甲酸乙酯的研究[J]. 天津化工, 2003, 17(5):22-23.

[9] 谭丰, 胡蓉, 杨学军, 等. 新型酸功能化离子液体中合成对羟基苯甲酸乙酯的研究[J]. 西南民族大学学报: 自然科学版, 2008, 34(2):330-332.

[10] 谢辉, 陈卓, 何树林, 等. 离子液体催化合成对羟基苯甲酸乙酯[J]. 化学研究与应用, 2011, 23(8):1048-1050.

[11] 张玉霞, 薛灵芬. 氯化高锡催化尼泊金乙酯的合成[J]. 化学世界, 2001(9):482-483.

Synthesis and Characterization of Ethyl *p*-Hydroxybenzoate
Catalyzed by SnCl_4/C under Microwave-Assisted Condition

CHEN Hui-xin, TANG Zhong-ke, XIONG Xing-quan

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

Abstract: Ethyl *p*-hydroxybenzoate was produced from *p*-hydroxy benzoic acid and ethanol as starting materials by using SnCl_4/C as efficient and green heterogeneous catalyst under microwave-assisted condition. The influences of the quantity of SnCl_4/C , the ratio of acid and ethanol, and reaction time and temperature factors on the esterification yield are discussed. The structure of ethyl *p*-hydroxybenzoate was characterized by Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR), ^1H nuclear magnetic resonance spectroscopy (^1H NMR) and mass spectroscopy (MS). The results showed that the optimal reactive conditions were as following: 10% catalyst, the ration of acid and ethanol 1 : 4, the radiation time 25 minutes, the reaction temperature 120 ℃, the microwave power 640 W. Under the optimal reactive conditions, the yield of ethyl *p*-hydroxybenzoate was up to 95%. Moreover, SnCl_4/C catalyst can be recycled and reused at least 4 consecutive runs without a noticeable drop in the product yield (89%).

Keywords: ethyl *p*-hydroxybenzoate; microwave synthesis; SnCl_4/C ; heterogeneous catalyst

CdS-Eu(Ⅲ)体系荧光恢复的 磷酸根离子可视化测定

杨海冉, 杨传孝, 孙向英

(华侨大学 材料科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 以聚丙烯酸(PAA)为稳定剂,成功合成了水溶性的 CdS 量子点(QDs). CdS QDs 表面的羧基能与 Eu^{3+} 结合导致 QDs 聚集,有效引发 QDs 间能量的转移,致使 CdS QDs 荧光显著猝灭.当加入 PO_4^{3-} 时,由于 PO_4^{3-} 与 Eu^{3+} 的结合能力强于 CdS QDs 表面的羧基,CdS QDs 荧光强度又逐渐恢复.由此建立一种基于 CdS-Eu(Ⅲ)体系荧光恢复可视化测定磷酸根离子的新方法.该方法灵敏、简单,检测限为 $0.078 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

关键词: CdS 量子点; Eu^{3+} ; 荧光恢复; 磷酸根离子

中图分类号: O 655

文献标志码: A

磷酸根离子是水生微生物营养链的主要成分,其衍生物是生命遗传物质的重要组成部分,同时也是水体富营养化的重要来源.因此,发展一种简单、可视化检测水溶液中 PO_4^{3-} 的方法具有重要的现实意义.目前,检测 PO_4^{3-} 的方法有分光光度法^[1]、离子色谱法^[2]、电化学法^[3]、酶传感^[4]及数码成像比色法^[5]等.但是,在复杂环境体系中高灵敏度、高选择性地检测 PO_4^{3-} 仍然是一个挑战.量子点(quantum dots, QDs)是一种新型的纳米发光材料,具有激发范围宽、发光效率高、发射峰位窄且峰位可调等特点,是一种理想的可视化荧光传感材料^[6].在离子检测方面,报道较多的是 QDs 直接用于金属离子的测定^[7],而 QDs 直接用于阴离子测定的研究报道却较少.目前,研究较多的是将 QDs 进行表面修饰,制备 QDs 双荧光发射纳米复合材料^[8-9];或在 QDs 及其复合物表面包覆具有介孔结构的二氧化硅^[10-11],然后建立比率荧光传感的模式.虽然这些方法可有效提高其对金属离子的选择性,但制备过程繁琐,有的荧光颜色变化不明显.理想可视化荧光传感策略是建立在 QDs 的荧光共振能量转移体系的基础上,可充分发挥 QDs 的发光特性,提高被识别分析物的选择性^[12-13].基于此,本文用聚丙烯酸为稳定剂、硫脲为硫源合成表面富含羧基的 CdS QDs,设计建立了基于 CdS-Eu(Ⅲ)体系荧光恢复可视化测定 PO_4^{3-} 的新方法.

1 实验部分

1.1 仪器与试剂

F-4500 型荧光分光光度计(日本日立公司)和 UV-2102 PC 型紫外可见分光光度计(尤尼克上海仪器有限公司)分别用于 QDs 荧光强度和吸收光谱的测定;H-7650 型透射电镜(日本日立公司)用于表征纳米粒子的大小以及形态;FL-920 型荧光分光光度计测定 QDs 的荧光寿命.

氯化镉(CdCl_2),西陇化工厂有限公司;硫脲(TU),天津市福晨化学试剂厂;磷酸钠(Na_3PO_4)、聚丙烯酸(PAA)、氧化铕(Eu_2O_3),国药集团化学试剂有限公司;使用二次蒸馏水,所用试剂均为分析纯.

1.2 实验方法

1.2.1 CdS QDs 的合成 取 1.0 mL, $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ CdCl_2 于三颈瓶中,加入 180 mL 二次蒸馏水,然

收稿日期: 2014-01-04

通信作者: 杨传孝(1970-),男,副教授,主要从事纳米材料及生化、环境分析的研究. E-mail: cxyang@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21275059, 21175049);华侨大学基本科研业务费专项基金资助项目(JB-ZR1118)

后再加入 5.0 mL, 0.6% PAA, 0.3 mL, $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 硫脲, 用 $1.0\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH 溶液调 pH 值至 11.5 左右, 于 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下加热回流 4 h.

1.2.2 CdS-Eu(Ⅲ) 测 PO_4^{3-} 取 1.0 mL CdS QDs 于 10 mL 比色管中, 加入 0.5 mL pH 值为 8.01 的 Tris 缓冲溶液, 然后加入 $0.6\text{ mL}, 1.0\times 10^{-4}\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Eu^{3+} 和适量 PO_4^{3-} 标准溶液或样品溶液, 用二次蒸馏水定容至 5 mL, 1 h 后测定其荧光光谱及紫外-可见吸收光谱, 紫外灯下用数码相机成像.

2 结果与讨论

2.1 CdS QDs 的光谱特征

PAA 稳定 CdS QDs 的荧光光谱和吸收光谱, 如图 1 所示. 由图 1(a)可知: 在回流时间大于 2 h 时, CdS QDs 的荧光强度达到最大; 当反应时间在 2~4 h 内, 荧光强度基本一致, 但其发射峰发生红移, 在紫外灯照射下发出黄色荧光. 由图 1(b)可以看出: 硫脲在 235 nm 处的吸光度随着反应时间的增加逐渐下降, 而 CdS QDs 带边吸收却逐渐增加. 这充分说明: 在碱性条件下, 随着加热回流时间的延长, 硫脲释放出 S^{2-} 的量逐渐增加, CdS QDs 的量也随之增加, 因而荧光强度不断增长.

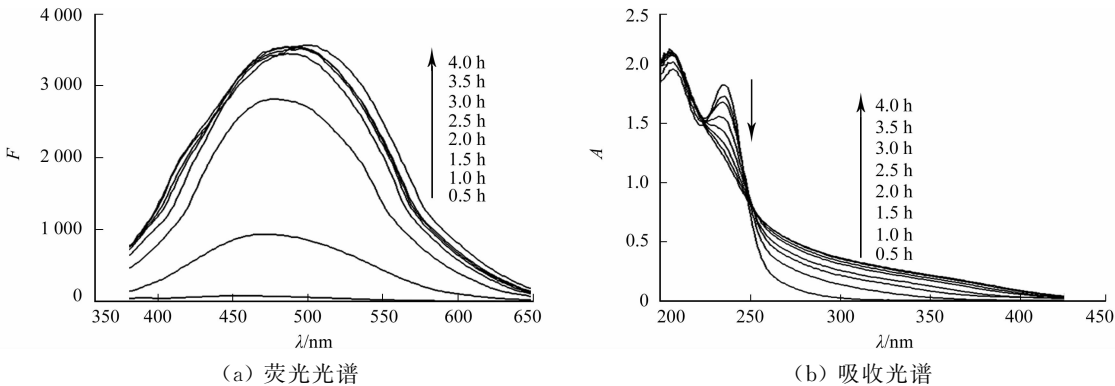


图 1 CdS QDs 的荧光和吸收光谱

Fig. 1 Fluorescence spectra and absorption spectra of CdS QDs

2.2 CdS-Eu(Ⅲ)体系测定磷酸根离子

2.2.1 CdS-Eu(Ⅲ)与 PO_4^{3-} 作用的荧光光谱 Eu^{3+} 能与 CdS QDs 表面的羧基结合, 使 CdS QDs 聚集导致其荧光强度降低, 如图 2 所示. 由图 2 可知: Eu^{3+} 浓度越大, CdS QDs 荧光强度猝灭越明显; 当 Eu^{3+} 浓度为 $16\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, CdS QDs 的黄色荧光基本被猝灭. 当加入 PO_4^{3-} (phosphate anion, Pi) 时, CdS QDs 解聚, 使 CdS QDs 荧光强度及黄色荧光逐渐恢复, 最大恢复率可达 84.28%, 如图 3 所示. 图 3 中: 1 为 CdS QDs; 2 为 CdS-Eu(Ⅲ); 3~16 为 CdS-Eu(Ⅲ)- PO_4^{3-} ; E_x 为 340 nm. 由图 3 可知: 当加入 PO_4^{3-} 浓度小于 $35\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, CdS QDs 荧光强度的恢复与 PO_4^{3-} 浓度呈较好线性关系.

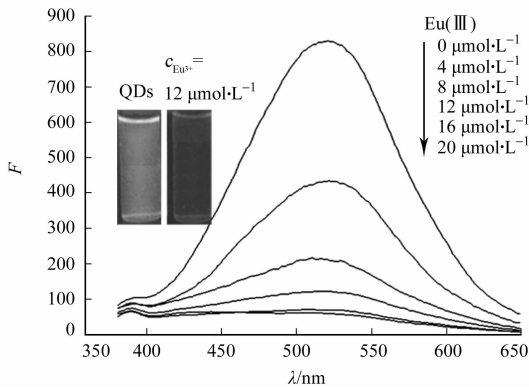


图 2 Eu^{3+} 浓度对 CdS QDs 荧光光谱的影响

Fig. 2 Effect of the concentration of Eu^{3+} on the fluorescence spectra of CdS QDs

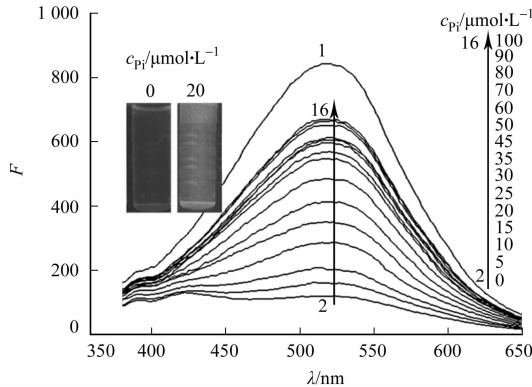


图 3 PO_4^{3-} 与 CdS-Eu(Ⅲ) 作用的荧光光谱

Fig. 3 Fluorescence spectra of the reaction between CdS-Eu(III) and PO_4^{3-}

2.2.2 pH 值的影响 pH 值越高, 硫脲释放出 S^{2-} 的速度快, CdS 纳米粒子的形成也较快, 如图 4 所

示.由图 4 可知:当 pH 值小于 10.53 时,合成的 CdS QDs 的荧光强度较低,随着 pH 值的增加,CdS QDs 的荧光强度也逐渐增加;当 pH 值为 11.5 时,CdS QDs 的荧光强度达到最大;若继续增加 pH 值,CdS QDs 的荧光强度反而减少.图 5 为溶液 pH 值对 CdS-Eu(Ⅲ)与 PO_4^{3-} 作用的影响.由图 5 可知:随着 pH 值的增大,CdS-Eu(Ⅲ)的荧光强度有缓慢增加的趋势(曲线 1);当 PO_4^{3-} 加入后体系荧光强度也随之增加;当溶液 pH 值为 8.01 时,荧光强度增量达到最大;pH 继续增加,体系荧光强度增加量却逐渐降低(曲线 2).因此,选用 pH 值为 8.01 的 Tris-HCl 缓冲溶液来调节溶液 pH 值.

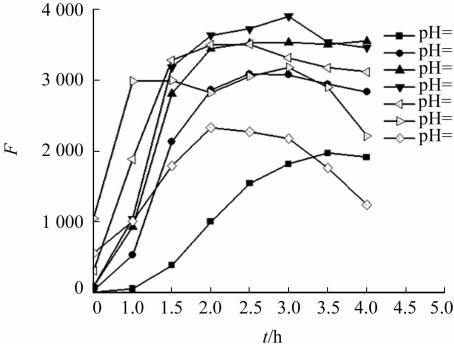


图 4 pH 值对 CdS QDs 荧光强度的影响
Fig. 4 Effect of the pH value on the fluorescence intensity of CdS QDs

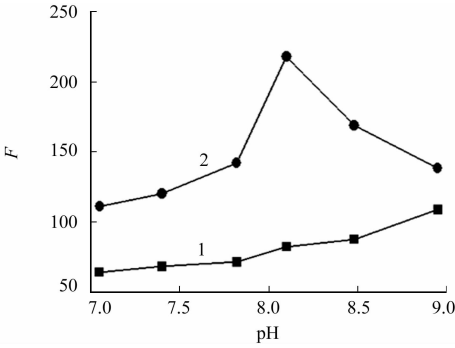


图 5 pH 值对 CdS-Eu(Ⅲ)与 PO_4^{3-} 作用的影响
Fig. 5 Effect of the pH value on the reaction between CdS-Eu(Ⅲ) and PO_4^{3-}

2.2.3 PAA 加入量的影响 PAA 表面富含羧基对 CdS QDs 具有稳定作用,如图 6 所示.由图 6 可知:PAA(0.6%)加入量越小,PAA 对 CdS QDs 的稳定作用越小,合成的 CdS QDs 的荧光强度较弱;随着 PAA 量增加,CdS QDs 的荧光强度达到最大时,所需回流时间延长,CdS QDs 的荧光强度也随之增加;当 PAA 加入量达到 5~6 mL 时,CdS QDs 的荧光强度达到最大且较为稳定.由图 7 线 1 可知:当 PAA 加入量小于 6 mL 时, Eu^{3+} 对 CdS QDs 的荧光猝灭率(η_i)约为 90.0%;当 PAA 加入量大于 6 mL 时,PAA 量越多, Eu^{3+} 对 CdS QDs 的荧光猝灭率也随之减弱.PAA 加入量对 CdS-Eu(Ⅲ)体系的荧光恢复率(η_r)也有较大的影响.当 PAA 量大于 6 mL 时,加入 PO_4^{3-} 后 CdS-Eu(Ⅲ)体系的荧光强度基本没有恢复;当 PAA 量小于 6 mL 时,加入 PO_4^{3-} 后 CdS-Eu³⁺ 体系的荧光强度有明显恢复,且 5 mL PAA 稳定的 CdS QDs 其荧光强度恢复最好.因此,选用 5 mL PAA(0.6%)作为合成 CdS QDs 稳定剂.

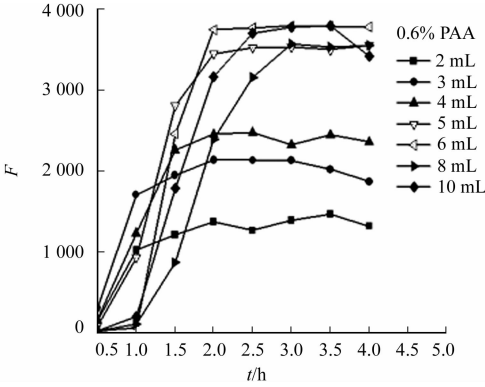


图 6 PAA 加入量对 CdS QDs 荧光强度的影响
Fig. 6 Effect of the concentration of PAA on the fluorescence intensity of CdS QDs

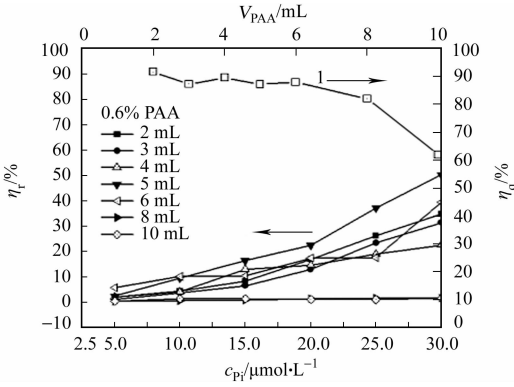


图 7 PAA 加入量对 CdS-Eu(Ⅲ)与 PO_4^{3-} 作用的影响
Fig. 7 Effect of the concentration of PAA on the reaction between CdS-Eu(Ⅲ) and PO_4^{3-}

2.2.4 TU 加入量的影响 碱性条件下,TU 分解产生的 S^{2-} 作为合成 CdS QDs 的硫源.因此,TU 加入量对 CdS QDs 的荧光强度有较大的影响,如图 8 所示.由图 8 可知:随着回流时间增加,CdS QDs 的荧光强度先增加后降低;TU($0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)加入量越多,CdS QDs 的荧光强度达到时所需的时间越短,但形成 QDs 的荧光强度越低;当 TU 加入量为 0.3~0.4 mL,回流时间为 2~4 h 时,可以获得发光强度高且相对稳定的 CdS QDs.考察 PO_4^{3-} 对 CdS-Eu(Ⅲ)体系荧光恢复的影响,如图 9 所示.由图 9 可知:当 TU 加入量为 0.2~0.5 mL 时,CdS QDs 与 Eu(Ⅲ)作用后,其荧光强度随着 PO_4^{3-} 的增加均有显

著的恢复,且体系的荧光强度随着 PO_4^{3-} 浓度的增加呈线性增加;而 TU 的量太小或太高,CdS QDs 荧光强度都较低(图 8). 因此,选用 0.3 mL TU($0.01\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)合成的 CdS QDs 用于 PO_4^{3-} 的检测.

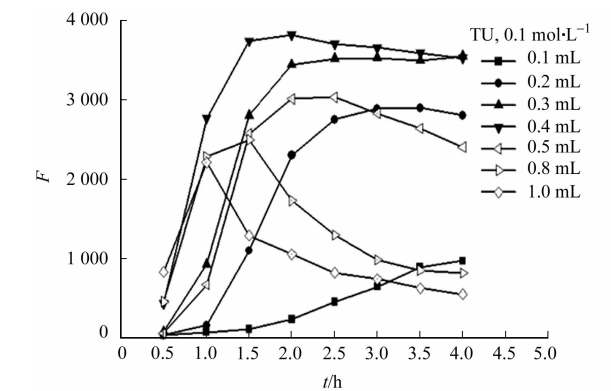


图 8 TU 加入量对 CdS QDs 荧光强度的影响
Fig. 8 Effect of the concentration of TU on the fluorescence intensity of CdS QDs

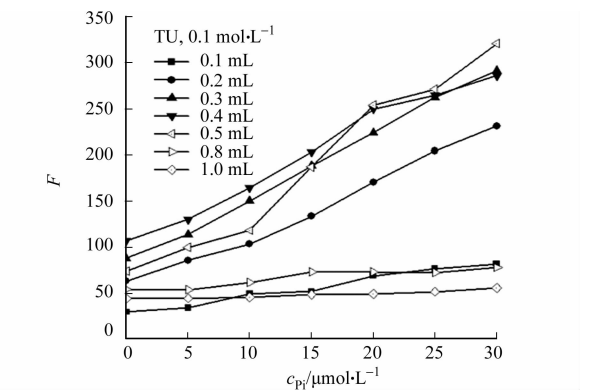


图 9 TU 加入量对 CdS-Eu(Ⅲ)与 PO_4^{3-} 作用的影响
Fig. 9 Effect of the concentration of TU on the reaction between CdS-Eu(Ⅲ) and PO_4^{3-}

2.2.5 共存物质的影响 考察了常见的金属离子、阳离子和阴离子对 CdS-Eu(Ⅲ)体系测定 PO_4^{3-} 的影响. 实验结果表明:常见的金属离子 Na^+ , K^+ , Zn^{2+} 的最大允许浓度为 $1.0\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$; Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} , Pb^{2+} 的最大允许浓度为 $100\text{μmol}\cdot\text{L}^{-1}$; Cd^{2+} , Ni^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Ag^+ 的最大允许浓度为 $20\text{μmol}\cdot\text{L}^{-1}$; Co^{2+} , Cu^{2+} 的最大允许浓度为 $2\text{μmol}\cdot\text{L}^{-1}$. 虽然允许浓度相对较小,但实际样品测定中可用巯基棉除去可能共存的重金属离子^[13]. 常见的阴离子 CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , NO_2^- , SiO_3^{2-} , 卤素离子, 三聚磷酸根, 六偏磷酸根没有干扰,最大允许浓度大于 $1.0\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$. 说明 CdS-Eu(Ⅲ)体系用于 PO_4^{3-} 的测定具有较好的选择性.

2.3 标准曲线及样品测定

反应时间对 CdS-Eu(Ⅲ)与 PO_4^{3-} 作用的影响,如图 10 所示. 由图 10 可知: PO_4^{3-} 浓度较低时,CdS-Eu(Ⅲ)体系的荧光强度恢复较快;随着 PO_4^{3-} 浓度的增加,CdS-Eu(Ⅲ)体系的荧光强度恢复较慢;当 PO_4^{3-} 浓度低于 $35\text{μmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,CdS-Eu(Ⅲ)恢复的荧光强度与 PO_4^{3-} 浓度呈很好的线性关系(表 1). 表 1 中: k 为斜率; R 为线性回归系数. 由表 1 可知:随着反应时间的延长线性拟合曲线的斜率逐渐增加、线性相关系数变好,当反应 1 h 后,斜率增加变缓. 因此,选择的反应时间为 1 h,检出限(3σ)为 $0.078\text{μmol}\cdot\text{L}^{-1}$.

为考察文中方法的可行性,通过标准加入法对白鹭池水样(按 GB 11893—1989《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》对水样进行处理)中, PO_4^{3-} 浓度进行测定并与分光光度法比较,结果如表 2 所示. 表 1,2 的反应条件为:1.0 mL CdS QDs; $12\text{μmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Eu^{3+} ; pH 值为 8.01; $E_x=340\text{nm}$; $E_m=515\text{nm}$. 表 2 中: c_1 , c_2 分别为文中方法和分光光度法测得的 PO_4^{3-} 的浓度; c_a 为标准溶液的加入量; $c_{\text{PO}_4^{3-}}$ 水样中磷酸根的测得值; η 为回收率. 由表 2 可知:测定结果与分光光度测定结果相近,说明本方法有很强的实用性.

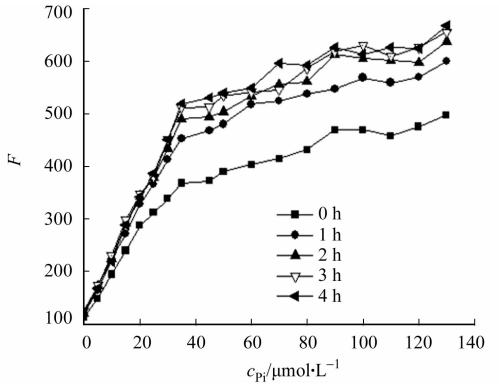


图 10 反应时间的影响
Fig. 10 Effect of the reaction time

表 1 测定 PO_4^{3-} 分析参数

Tab. 1 Analytical parameters for the determination of PO_4^{3-}

t/h	线性回归方程	线性范围/ $\text{μmol}\cdot\text{L}^{-1}$	k	R
0	$\Delta F=10.9+7.27c$	1.03~35	7.27	0.978 7
1	$\Delta F=7.5+9.56c$	0.78~35	9.56	0.995 2
2	$\Delta F=5.1+10.39c$	0.72~35	10.39	0.994 7
3	$\Delta F=-2.5+10.99c$	0.68~35	10.99	0.993 1
4	$\Delta F=-12.5+11.54c$	0.64~35	11.54	0.996 6

表 2 理想水样品测定的结果

Tab.2 Determination results for real water samples

样品	$c_1/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	$c_2/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	$c_a/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	$c_{\text{PO}_4^{3-}}/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	$\eta/\%$
1	0.20	0.19	6.0	6.09	101.5
2	3.91	4.01	8.0	8.12	101.5
3	2.55	2.83	10.0	10.5	105.0

2.4 机理探讨

量子点的透射电镜图,如图 11 所示.由图 11(a)可知:电镜图表明 PAA 稳定的 CdS QDs 具有较好的分散特性,紫外灯照射下发黄色荧光. Eu^{3+} 加入后, CdS QDs 发生明显聚集(图 11(b)),黄色荧光猝

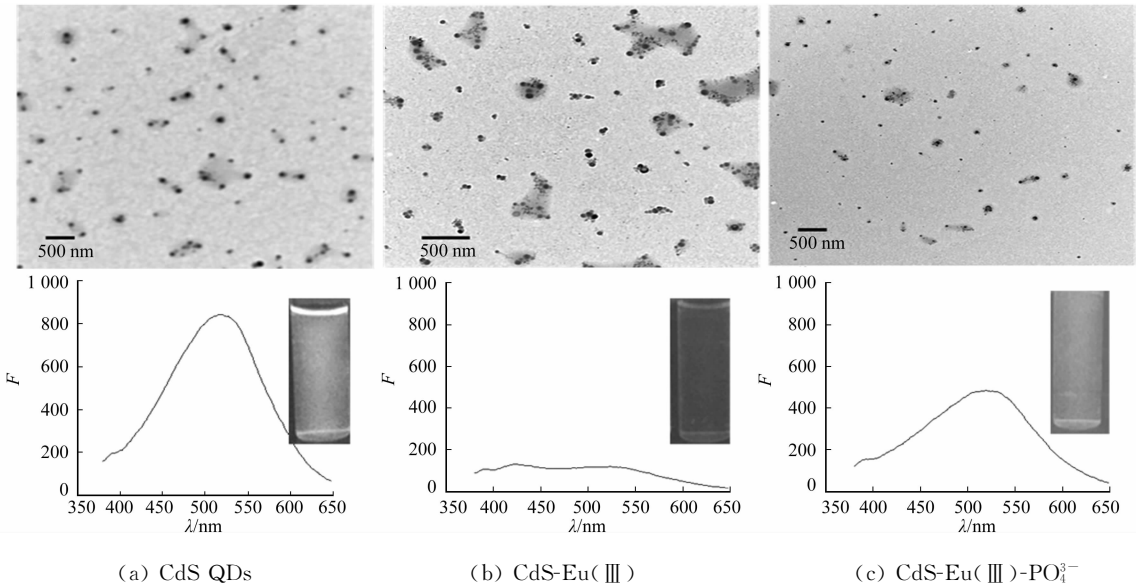


图 11 量子点的透射电镜图

Fig. 11 TEM images of QDs

灭;但是 PO_4^{3-} 加入后, CdS QDs 又重新得到分散、黄色荧光恢复(图 11(c)). 这是由于 PAA 稳定的 CdS QDs 表面富含羧基, Eu^{3+} 与 QDs 表面的羧基螯合,导致 QDs 聚集形成紧密堆集的 QDs 簇,从而增加了量子点之间能量转移的效率,导致黄色荧光猝灭. 又因为 PO_4^{3-} 与 Eu^{3+} 的结合能力远大于羧基与 Eu^{3+} 的结合能力. 因此,加入 PO_4^{3-} 后, QDs 聚集体被 PO_4^{3-} 瓦解其分散程度明显增加,从而阻断了 QDs 间的能量转移、黄色荧光得到恢复. 从荧光寿命测量可以进一步得到证实,如图 12 所示. 由图 12 可知:当 Eu^{3+} 加入后, CdS QDs 的发射寿命由 67.01 ns 减小到 57.42 ns,这是由于 QDs 聚集体作为能量接受体,提供了多个附加衰减通道所致^[13];当 PO_4^{3-} 加入后,发射寿命从 57.42 ns 恢复到 64.66 ns,证明随着 QDs 分散程度的增加,原来 QDs 聚集体中作为能量受体的粒子所提供的附加衰减通道消失、荧光恢复.

3 结束语

用 PAA 为稳定剂、硫脲为硫源成功合成了水溶性、表面富含羧基的 CdS QDs. 实验结果表明: Eu^{3+} 能与 PAA 稳定的 CdS QDs 作用形成 CdS QDs 簇,并诱导 CdS QDs 簇之间的能量转移,导致 QDs 荧光猝灭,而 PO_4^{3-} 却能把 Eu^{3+} 从 CdS QDs 间的位置竞争下来,阻断 QDs 之间的能量转移,致使 CdS-Eu(III) 体系荧光恢复. 由此发展了一种简单的荧光恢复可视化荧光测定 PO_4^{3-} 的新方法. 该法具有灵敏度高、选择性好、可视化等特点,可用于环境水样中 PO_4^{3-} 的分析测定.

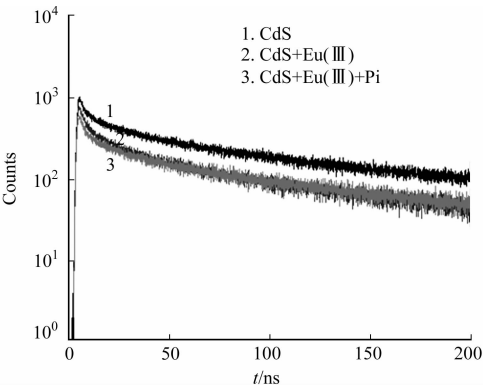


图 12 荧光衰减曲线图

Fig. 12 Fluorescence decay curves

参考文献:

- [1] 俞林. 水质监测分析方法标准实务手册[M]. 北京:中国环境科学出版社,2002;1015-1019.
- [2] COLINA M,GARDINER P H E. Simultaneous determination of total nitrogen,phosphorus and sulphur by means of microwave digestion and ion chromatography[J]. J Chromatogr: A,1999,847(1/2):285-290.
- [3] CHENG Wan-ling,SUE Jun-wei,CHEN Wei-chung,et al. Activated nickel platform for electrochemical sensing of phosphate[J]. Anal Chem,2010,82(3):1157-1161.
- [4] RAHMAN M A,PARK D S,CHANG S C,et al. The biosensor based on the pyruvate oxidase modified conducting polymer for phosphate ions determinations[J]. Biosens Bioelectron,2006,21(7):1116-1124.
- [5] 杨传孝,孙向英,刘斌. 数码成像比色法测定水样中的总磷[J]. 分析化学,2007,6(6):850-853.
- [6] CHIN P T K,BUCKLE T,de MIGUEL A A,et al. Dual-emissive quantum dots for multispectral intraoperative fluorescence imaging[J]. Biomaterials,2010,31(26):6823-6832.
- [7] 杨传孝,孙向英. 三聚磷酸钠稳定硫化镉量子点荧光猝灭法测定痕量铁[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2011,32(5):537-542.
- [8] SUN Xiang-ying,LIU Bin,XU Yi-bang. Dual-emission quantum dots nanocomposites bearing an internal standard and visual detection for Hg^{2+} [J]. Analyst,2012,137(5):1125-1129.
- [9] ZHANG Kui,ZHOU Hai-bo,MEI Qing-song,et al. Instant visual detection of trinitrotoluene particulates on various surfaces by ratiometric fluorescence of dual-emission quantum dots hybrid[J]. J Am Chem Soc,2011,133(22):8424-8427.
- [10] SONG Ying-ying,CAO Xue-bo,GUO Yang,et al. Fabrication of mesoporous CdTe/ZnO@SiO₂ core/shell nanostructures tunable dual emission and ultrasensitive fluorescence response to metal ions[J]. Chem Mater,2009,21(1):68-77.
- [11] YANG Chun-xiao,LIU Bin,SUN Xiang-ying. Visual and trap emission spectrometric detections of Ag(I) ion with mesoporous ZnO/CdS@SiO₂ core/shell nanocomposites[J]. Anal Chim Acta,2012,746:90-97.
- [12] ROGACH A L,KLAR T A,LUPTON J M,et al. Energy transfer with semiconductor nanocrystals[J]. J Mater Chem,2009,19(9):1208-1221.
- [13] 曹春,刘玫瑰,曹明. 基于自然尺寸分布的单一 CdTe 量子点样品中 Eu(Ⅲ)诱导的能量转移测定磷酸根离子[J]. 中国科学:化学,2010,40(4):379-385.

Fluorescence Recovery and Visual Detections for Phosphate Based on CdS-Eu(Ⅲ) System

YANG Hai-ran, YANG Chuan-xiao, SUN Xiang-ying

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

Abstract: In this study, the water-soluble CdS quantum dots (QDs) stabilized by polyacrylic acid (PAA) were successfully synthesized. Eu^{3+} ions could efficiently induce clustering of QDs through the carboxylic acid groups on surface of CdS QDs, which resulted in apparent fluorescence quenching due to energy transfer between CdS QDs. Because the chelation ability between Eu^{3+} and PO_4^{3-} was stronger than that between Eu^{3+} and carboxyl groups, the fluorescence intensity of CdS QD gradually recovered when PO_4^{3-} were introduced to the CdS-Eu(Ⅲ) system. Thus a novel fluorescence recovery and visual method for the determination of PO_4^{3-} has been developed based on CdS-Eu(Ⅲ) system. The present novel assay with a detection limit (3σ) of $0.078 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ is very simple and sensitive.

Keywords: CdS quantum dots; Eu^{3+} ; fluorescence recovery; phosphate anion

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:熊兴泉)

Na⁺ 在环八肽纳米管中的传输

李敬, 程杰

(华侨大学 化工学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为了探究环肽纳米管介导离子和小分子物质的跨膜转运机制,以环八肽纳米管中 Na⁺ 为模型,采用拉伸分子动力学方法,研究了 Na⁺ 在自组装环八肽纳米管 {cyclo[-(D-Ala-L-Ala)-]₄}₁₀ 中的传输. Na⁺ 沿纳米管轴向拉力作用方向运动,在每个环平面波动较长时间,占据环中心位置,然后迅速通过环间,跃迁到下一环平面. 研究表明:Na⁺ 以跳跃方式在环肽纳米管中传输的平均速度为 0.837 m·s⁻¹,其中在环平面的传输速度几乎为 0,而在环间的瞬时传输速度可达 350.8 m·s⁻¹,平均传输速度为 111.8 m·s⁻¹. Na⁺ 在环肽纳米管内的环平面内受到阻力作用,在环间受到拉力作用.

关键词: 环肽纳米管; 跨膜离子通道; 拉伸动力学; 分子模拟; 传输

中图分类号: TQ 460.1

文献标志码: A

环肽纳米管是环肽分子采用近似平面的构象,通过主链骨架肽氨基中的 C=O 和 N-H 形成分子间的氢键网络,以 β 片层反平行方式堆积成中空管状结构^[1]. 环肽纳米管结构简单、性质稳定,通过控制环肽中氨基酸的数目和种类,可以得到管径和外壁性质恰当的纳米管,并在细胞膜中形成孔道结构,介导离子和小分子物质的跨膜转运. 由于环肽纳米管的特殊结构和性质,使其在离子和小分子跨膜转运、药物分子的设计、生物传感器的研究等方面具有广泛应用前景^[2-8]. 美国 Skipps 实验室的 Ghadiri 教授等^[9]第一个人工设计了环肽纳米管,并在 1993 年第一次合成的环八 cyclo[-(D-Ala-Glu-D-Ala-Glu)₂-] 纳米管. 随后,研究小组又将一种环八肽,植入到脂质双分子膜 DMPC 中,证实环肽纳米管可作为跨膜离子通道转运 Na⁺ 和葡萄糖,传输 Na⁺ 的速度是类似物辅酶-A 的 3 倍^[10]. 然而,由于环肽纳米管特别易于聚集的特性,在当前实验仪器条件下,无法在实验上对其传输机制进行揭示^[11]. 分子动力学可在原子尺度上直接研究单个分子的行为性质. 本文采用拉伸动力学,研究受限在环八肽纳米管 {cyclo[-(D-Ala-L-Ala)-]₄}₁₀ 中 Na⁺ 的传输,对其传输机制进行研究.

1 模型和方法

1.1 离子传输模型

参考文献[12-13]中实验和计算数据,在 VMD 图形软件上建立离子传输模型. 由于环肽 cyclo[-(D-Ala-L-Ala)-]₄ 易于采用平环状构象,以反平行的方式结合,因此以二聚体作为结构单元,搭建成 10 个环组成的纳米管. 二聚体和纳米管模型,以分子力学进行几何优化. 优化后的环肽纳米管的直径和环间距分别为 478,750 pm,此结果与实验的计算结果一致^[12,14].

将一个 Na⁺ 置于纳米管第 2 个环中心处,48 个水分子随机分布在纳米管内和端口处,传输模型如图 1 所示. 为了使水分子分布合理,采用分子力学和 500 ps 平衡动力学交替进行的方法,对离子传输模型进行优化. 在优化过程中以 0.419 YJ·(mol·m²)⁻¹ 的外力固定 α -C 原子和 Na⁺ 离子.

1.2 拉伸动力学

沿纳米管轴向,对 Na⁺ 施加力,使其通过环肽纳米管. 加力方式有两种:1) 通过对 Na⁺ 施加不断变化的力,使 Na⁺ 以恒定的速度通过环肽纳米管;2) 对 Na⁺ 施加大小恒定的力,使 Na⁺ 通过环肽纳米管.

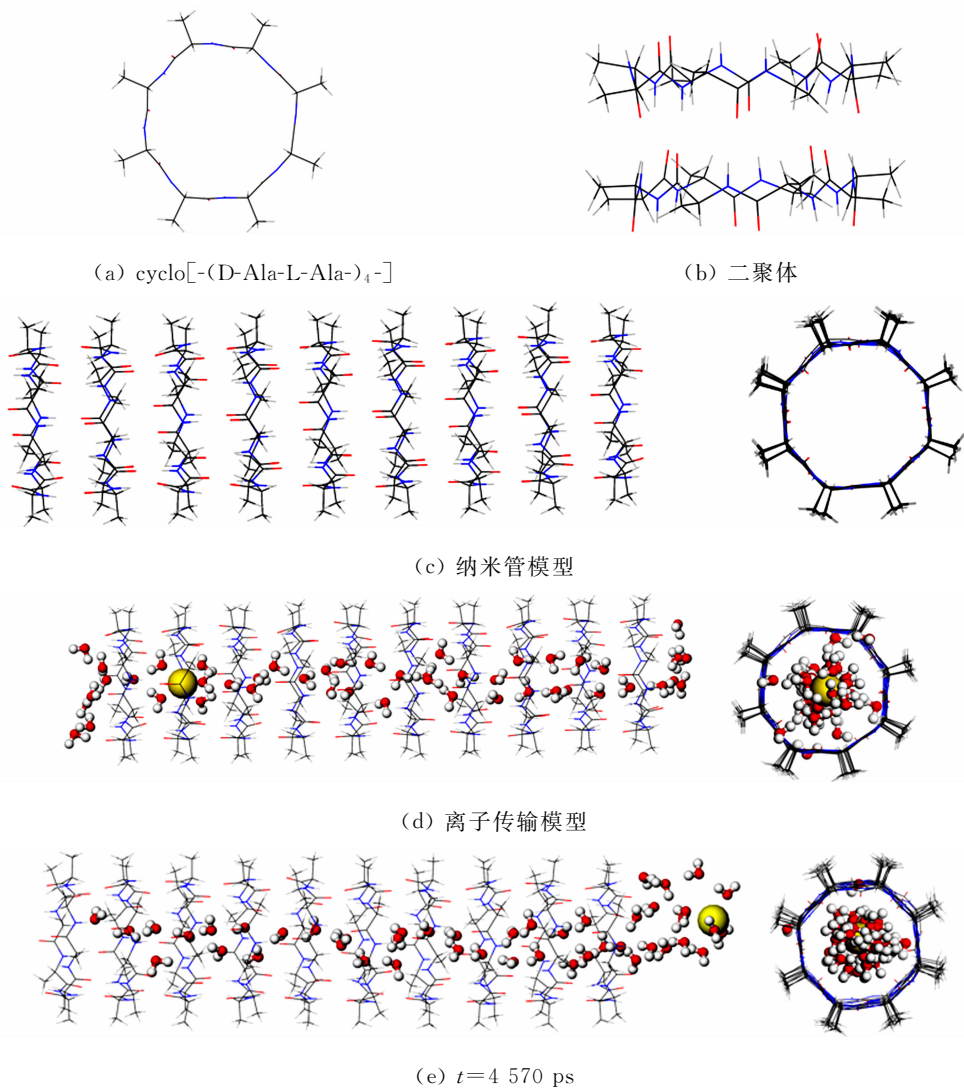


图 1 Na⁺ 在环肽纳米管中的传输模型

Fig. 1 Models of Na⁺ transport in cyclic peptide nanotube

动力学模拟采用郎之万计算方法,参数条件设定为:定温 300 K;定压 1 100 kPa;范德华和静电相互作用力的截止距离为 1 200 pm;总的模拟时间为 5 ns;时间间隔为 1 fs,每 500 fs 输出一个分子结构用于分析.为了加速计算过程,采用 $0.419 \text{ YJ} \cdot (\text{mol} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ 的外力将环肽纳米管中的 $\alpha\text{-C}$ 原子固定.所有计算和分析,采用 Charmm27 力场^[15-16],使用 NAMD 2.8^[17] 和 VMD 1.9^[18] 软件.在至强 12 核 CPU 的超性能计算服务器,及 AMD Athlon(TM) II P340 双核处理器,2.2 GHz,2 G 内存的 PC 笔记本上完成.

2 结果与讨论

2.1 Na⁺ 在环肽纳米管中的传输

在 Na⁺ 上施加沿环肽纳米管轴向恒定的力,拉动离子和水运动,由于受到纳米管内阻力的限制,拉力必须大于一定值才能保证 Na⁺ 通过纳米管.本研究中选择拉力 $F=117.2 \text{ TJ} \cdot (\text{mol} \cdot \text{m})^{-1}$.

从动力学轨迹可以看到:经过 4 570 ps 后,Na⁺ 和部分水分子沿着拉力的方向通过了环肽纳米管. Na⁺ 在环八肽纳米管中的运动呈跳跃式,即在环平面停留较长时间后,很快通过两相邻环空间,到下一环平面又波动较长时间.整个传输过程中 Na⁺ 由水分子包围,如图 1(e)所示.

2.2 Na⁺ 在环肽纳米管中的传输速度

Na⁺ 沿环肽纳米管轴向的运动距离(d)随时间(t)变化的关系,如图 2 所示.图 2 中:每一个波动的

平台是 Na^+ 在环平面上的停留过程;每一次跳跃是从一个环平面到另一个环平面的过程. 从图 2 可以看出: Na^+ 除了在第 2 个环平面(起始位置)停留时间较长和在第 6 个环处没有停留外,在环上停留时间大约为 300 ps,而在每个环间只停留了 20~30 ps;从第 2 个环平面中心到第 10 个环平面中心总的移动距离是 3 824 pm,用时 4 570 ps,平均速度为 $0.837 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,此计算结果与 Hwang 等^[4]的结果一致.

对 Na^+ 在纳米管轴向的运动距离与时间关系曲线进行差分处理,可以得到 Na^+ 在不同位置的运动速度. 由于 Na^+ 在环平面上几乎没有位移,因此其瞬时和平均速度都是 0. Na^+ 在环间传输速度迅速增大,并且在两环中心的瞬时速度最大,运动速度如图 3 所示. 从图 3 中可知: Na^+ 在环间平均传输速度为 $1.118 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,瞬时速度最大可达 $3.508 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 由于在第 6 个环上没有停留,因此其平均速度不为 0.

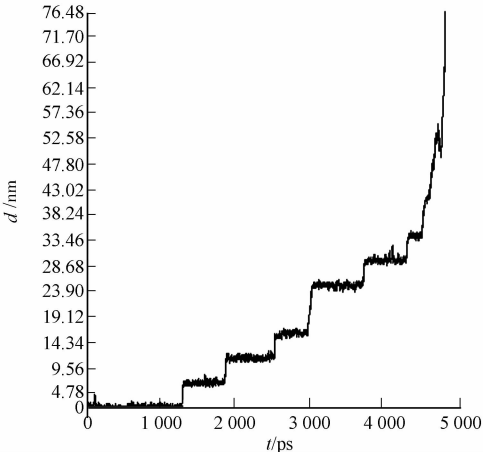


图 2 Na^+ 的传输距离随时间的变化关系曲线

Fig. 2 Curve of distance of Na^+ transposition vs time

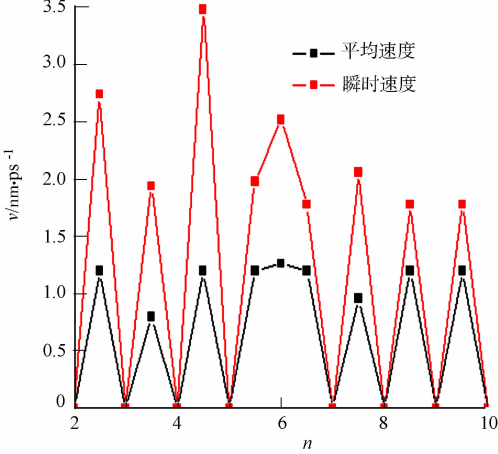
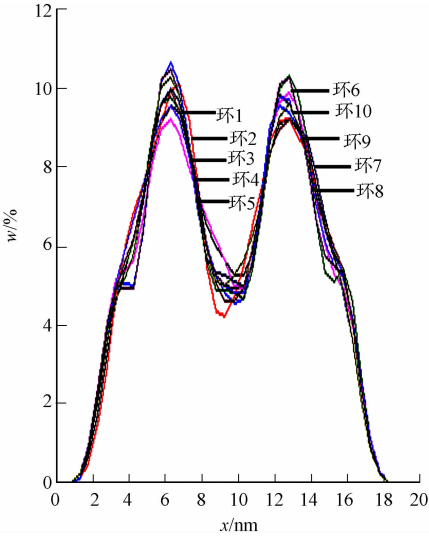


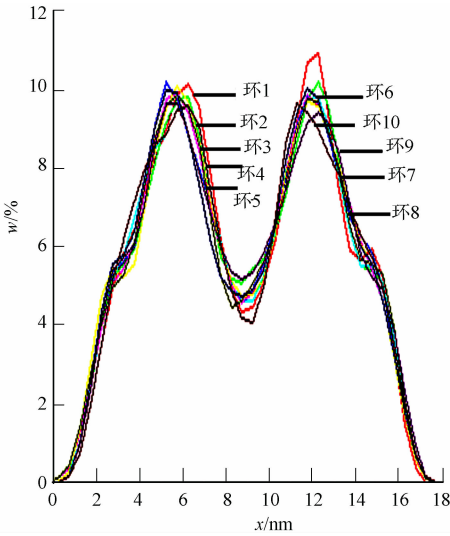
图 3 Na^+ 在不同位置的运动速度

Fig. 3 Curves of velocity of Na^+ vs the rings

为了进一步了解影响 Na^+ 在环肽纳米管中传输运动的因素,从环的半径和相邻环之间的距离分析了纳米管结构对传输速度的影响. 纳米管的半径可以从原子在径向上的质量分数分布曲线得到,因为纳米管在管壁上原子的密度最大,所以曲线两峰间的距离为环的半径^[12-13,19]. Na^+ 在第 6 环和在最后一个环时,原子在 x -轴上的质量分数分布,如图 4 所示. 从图 4 可以看到:在这两个时刻,即 Na^+ 在纳米管中心和端口位置上,每个环的半径都是 750 pm,也就是说纳米管的直径对 Na^+ 的传输没有影响.



(a) 第 6 个环



(b) 第 10 个环

图 4 纳米管上原子在 x -轴上的质量分数分布曲线

Fig. 4 Curves of atom concentration of every ring along x -axis

对相邻环的环间距进行统计,环平均间距的统计结果为:第 1~2 环为 478.3 pm;第 2~3 环为 478.5 pm;第 3~4 环为 478.5 pm;第 4~5 环为 476.2 pm;第 5~6 环为 478.8 pm;第 6~7 环为 476.0 pm;

第7~8环为478.4 pm;第8~9环为477.5 pm;第9~10环为476.4 pm. 所有环间距均在476~488 pm之间,这与其他实验和计算结果相一致^[20-22]. 在第5~6,6~7环之间的距离,并没有明显比其他环间距离短,这说明环间距离对 Na^+ 的传输速度也没有直接的影响. 从以上的分析可以看出: Na^+ 没有在第6个环上停留,并不是受纳米管结构的影响.

2.3 Na^+ 在环肽纳米管中的受力

离子在纳米管内的移动速度与两个因素有关系:一个是移动距离,这由纳米管的空间结构所决定,前面已证明其不是 Na^+ 离子传输的主要影响因素;另一个就是离子受到的合力大小,包括拉力和阻力.

在拉力恒定的情况下, Na^+ 在纳米管内以跳跃式迁移,说明其在不同位置受到的阻力不同. 为了考察 Na^+ 沿环肽纳米管轴向受到的阻力大小,使 Na^+ 以恒定的速度 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 通过环肽纳米管,如果 Na^+ 在环肽纳米管内不同位置所受阻力不同,则需不断变化施加在 Na^+ 上的力以维持其恒定速度. Na^+ 上施加力随时间变化关系,如图5所示.

从图5可以看出:当 Na^+ 从环平面内传输到环间时,拉力从600 pN下降-400 pN;即 Na^+ 传输过程中,在环平面内受到的阻力,需较大的拉力来维持 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的运动速度,而在环间表现为受到拉力的作用,需施加反方向的作用力. 此结果与 Na^+ 在恒力作用下的传输速度相一致,这是由于环肽纳米管特殊的 β -片层结构影响.

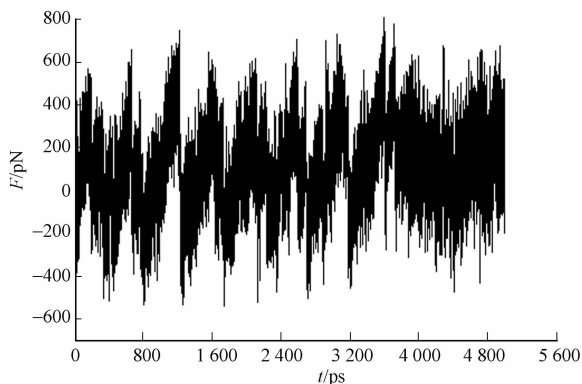


图5 Na^+ 沿轴向拉力随时间变化关系

Fig. 5 Force exerted on Na^+ along z-axis vs time

3 结论

通过拉伸动力学,研究了 Na^+ 在环肽纳米管中的传输. 结果表明: Na^+ 在环八肽纳米管中的传输运动呈跳跃式, Na^+ 在环平面内波动较长时间后,迅速通过环间,跃迁到下一环平面; Na^+ 在环间平均传输速度为 $1.118 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,瞬时速度为 $3.508 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; Na^+ 传输过程中在环平面受到阻力作用,在环间受拉力作用. 研究结果可为环肽纳米管在跨膜离子通道、药物传输和生物传感器方面的应用提供理论依据.

参考文献:

- [1] GHADIRI M R, KOBAYASHI K, GRANJA J R. The structural and thermodynamic basis for the formation of self-assembled peptide nanotubes[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 1995, 34(1): 93-95.
- [2] GRANJA J R, GHADIRI M R. Channel-mediated transport of glucose across lipid bilayers[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1994, 116(23): 10785-10786.
- [3] de GROOT B L, Grubmüller H. Water permeation across biological membranes: Mechanism and dynamics of aquaporin-1 and GlpF[J]. *Science*, 2001, 294(5550): 2353-2357.
- [4] HWANG H, SCHATZ G C, RATNER M A. Steered molecular dynamics studies of the potential of mean force of a Na^+ or K^+ ion in a cyclic peptide nanotube[J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2006, 110(51): 26448-26460.
- [5] CHENG Jie, ZHU Jing-chuan, LIU Bo. Molecular modeling investigation of adsorption of self-assembled peptide nanotube of cyclo-[(1R,3S)- γ -Acc- α -Phe]₃ in CHCl_3 [J]. *Chemical Physics*, 2007, 333(2/3): 105-111.
- [6] GHADIRI M R, GRANJA J R, BUEHLER L K. Artificial transmembrane ion channels from self-assembling peptide nanotubes[J]. 1994, 369(6478): 301-304.
- [7] 刘健. 环肽纳米管作为跨膜水通道[D]. 苏州: 苏州大学, 2011: 301-304.
- [8] VIJAYARAJ R, DAMME S V, BULTINCK P, et al. Theoretical studies on the transport mechanism of 5-fluorouracil through cyclic peptide based nanotubes[J]. *Phys Chem Chem Phys*, 2013, 15(4): 1260-1270.
- [9] GHADIRI M R, GRANJA J R, MILLIGAN R A, et al. Self-assembling organic nanotubes based on a cyclic peptide architecture[J]. *Nature*, 1993, 366(6453): 324-325.
- [10] AMORÍN M, GARCÍA-FANDIÑO R, GRANJA R. Transmembrane ion transport by self-assembling α , γ -peptide nanotubes[J]. *Chem Sci*, 2012, 3(11): 3280-3285.

- [11] KIM H S, HARTGERINK J D, GHADIRI M R. Oriented self-assembly of cyclic peptide nanotubes in lipid membranes[J]. Journal of the American Chemical Society, 1998, 120(35): 4417-4424.
- [12] CHENG Jie, ZHU Jing-chuan, LIU Bo. Investigation of structures and properties of cyclic peptide nanotubes by experiment and molecular dynamics[J]. J Comput Aided Mol Des, 2008, 22(11): 773-781.
- [13] CHENG Jie, ZHU Jing-chuan, LIU Bo. Structure of a self-assembled single nanotube of cyclo[(-D-Ala-L-Ala)₄-] [J]. Molecular Simulation, 2009, 35(8): 625-630.
- [14] BURIK J M, GHADIRI J R. Self-assembly of peptide based nanotubes[J]. Materials Science and Engineering C, 1997, 4(4): 207-212.
- [15] BROOKS B R, BRUCCOLERI R E, OLAFSON B D. CHARMM: A program for macromolecular energy, minimization, and dynamics calculations[J]. Comput Chem, 1983, 4(2): 187-217.
- [16] SAPAY N, TIELEMAN P D. Combination of the CHARMM27 force field with united-atom lipid force fields[J]. Journal of Computational Chemistry, 2011, 32(7): 1400-1410.
- [17] KALE L, SKEEL R, BHANDARKAR M, et al. NAMD2: Greater scalability for parallel molecular dynamics[J]. J Comput Phys, 1999, 151(1): 283-312.
- [18] HUMPHREY W, DALKE A, SCHULTEN K J. VMD-visual molecular dynamics[J]. J Molec Graphics, 1996, 14(1): 33-38.
- [19] CHENG Jie, SHAN Song-bo, WENG Lian-jin. Molecular dynamics investigation of nanotube diameter and wall thickness of cyclic hexa⁻, octa⁻, deca⁻ and dodeca-peptide[J]. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 2013, 10(6): 1335-1337.
- [20] TAKAHASHI R, WANG H, LEWIS J P. Electronic structures and conductivity in peptide nanotubes[J]. J Phys Chem B, 2007, 111(30): 9093-9098.
- [21] QU Wen-wen, TAN Hong-wei, CHEN Guang-ju. The self-assembled of cyclic *D*, *L*- α -peptide systems: Insights into the structure and energetics[J]. International Journal of Quantum Chemistry, 2010, 110(9): 1648-1659.
- [22] ROSENTHAL-AIZMAN K, SVENSSON G, UNDÉN A. Self-Assembling peptide nanotubes from enantiomeric pairs of cyclic peptides with alternating *D* and *L* amino acid residues[J]. American Chemical Society, 2004, 126(11): 3372-3373.

Na⁺ Transport in Cyclic Octa-Peptide Nanotube

LI Jing, CHENG Jie

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

Abstract: In order to explore the mechanisms of cyclic peptide nanotube-mediated transmembrane transport of ions and small molecules, Na⁺ constrained in cyclic octa-peptide nanotube was selected as the model to investigate Na⁺ transport in the self-organized {cyclo[-(D-Ala-L-Ala-)₄-]}₁₀ peptide nanotube using steered molecular dynamics (SMD). Na⁺ moves along the pulling force direction which is parallel to the channel axis, and vibrates up and down at the center of every ring plane for a long time, then quickly jumps through the inter-ring to the next ring plane. The results show that in the jumping way Na⁺ transport through cyclic octa-peptide nanotube, the average transport rate is 0.837 m • s⁻¹; the speed is almost zero at ring plane; while the instantaneous speed is up to 350.8 m • s⁻¹ and the average rate is 111.8 m • s⁻¹ between the middle planes. The force exerted on Na⁺ appears to be the resistance force at the ring plane and the pulling force between neighboring rings.

Keywords: cyclic peptide nanotubes; transmembrane ion channels; steered molecular dynamics; molecular modeling; transport

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 刘源岗)

城市污泥中重金属形态及资源化可行性分析

袁柯馨, 孙荣, 李玉, 洪俊明

(华侨大学 化工学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 以南方某市 6 个污水处理厂为例,分析污泥中重金属 Cu,Zn,Ni,Pb,Cd,Cr 的质量比及其形态分布特征,分析污泥农用的最大施用量和制砖的最大添加量.结果表明:污泥中的 Pb,Ni,Cd 有效态比例较高,Zn,Cr 主要以不可利用态存在,Cu 主要以潜在有效态和不可利用态存在.污泥农用的静态环境容量分析结果显示:不同来源污泥的最大施用量有显著差异,可将 Cd 作为主要监控污染元素,同时作为控制城市污水污泥农过程中最高施用量的计算参考指标,以保证土壤环境安全.通过制砖污泥添加比例的计算,选取 Cu 作为 E 污水厂污泥制砖过程的限制性指标,其余 5 个污水处理厂的限制性指标为 Cr.

关键词: 污泥; 重金属; 形态分布; 资源化

中图分类号: X 703 **文献标志码:** A

随着城市化和工业化的推进,污水处理率不断提高,污泥产量随之增加,污泥处理问题愈加突出^[1].污泥的任意排放或堆放,不但对环境造成严重的二次污染,还造成了资源的浪费^[2].一直以来城市污泥主要采用卫生填埋、堆肥农用、焚烧、制砖等处置方式^[3].污泥农用和资源化制砖,一方面有效利用污泥,变废为宝,降低处置成本;另一方面有效避免二次污染,被认为是处理容量大且经济可行的污泥资源化方法^[4].污泥中含有的重金属是污泥资源化的主要限制因素之一,此外,污泥中重金属生物有效性及潜在迁移性不仅与其总量有关,更大程度上依赖于其在环境介质中的存在形态^[5-6].城市污泥中重金属质量分数和形态分布已成为研究热点^[7-9],但对污泥在农用和制砖过程中的施用量及添加量的研究还鲜有报道.本文对南方某市 6 个污水处理厂脱水污泥进行系统取样分析,为城市污泥资源化利用提供参考.

1 材料与方法

1.1 污泥样品的采集和预处理

污泥采自南方某城市 A~F 等 6 座污水处理厂的脱水机房,于 5~7 月间多次采样,采得的污泥阴干后过 100 目筛.6 座污水处理厂的基本情况,如表 1 所示.表 1 中: Q_1 为设计水量; η 为工业废水比例;

表 1 6 座污水处理厂的基本情况

Tab.1 Description of the six wastewater treatment plants

编号	$Q_1 / \text{万 t} \cdot \text{d}^{-1}$	处理工艺	$\eta / \%$	$Q_2 / \text{万 t} \cdot \text{d}^{-1}$	$Q_3 / \text{t} \cdot \text{d}^{-1}$	工业废水类型	出水标准
A	30.0	前置反硝化曝气生物滤池	10	26~28	195~210	商业、码头	一级 B
B	20.0	A ₂ /O 结合氧化沟	15	16~18	120~135	商业、光电	一级 B
C	10.0	A ₂ /O	50	6~8	45~60	化工、电镀、垃圾渗滤液	一级 B
D	6.0	DE 氧化沟	60	5~6	37.5~45	电镀、机械五金、食品	一级 B
E	2.5	氧化沟	70	1.5~2.0	11~15	电子、光电、电镀	一级 B
F	5.0	Orbal 氧化沟	30	4~5	30.0~37.5	电子、电镀	一级 B

收稿日期: 2013-09-04

通信作者: 洪俊明(1974-),男,副教授,主要从事水污染控制工程及清洁生产的研究. E-mail:jmhong@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家水专项城市污水处理系统运行特性与工艺设计技术研究项目(2012ZX07313-001);福建省厦门市科技计划项目(3502Z20110008, 3502Z20123029)

Q_2 为实际运行水量; Q_3 为污泥产生量;出水标准参考 GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》. 样品采集点选择正常工况下各污水处理厂污泥脱水车间连续稳定运行的脱水机出泥口. 其中:A,B 污水处理厂主要处理生活污水和少量工业废水;C~F 污水处理厂进水中的工业废水比例相对较高.

1.2 污泥中重金属的总量和形态分布测定

参考 CJ/T 221—2005《城市污水处理厂污泥检验方法》,采用 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2\text{-HCl}$ 常压消解法提取污泥中重金属总量. 采用 Tessier 五步提取法^[10]对污泥重金属形态进行分析. 上述分析均设 3 次重复,并且在测定过程中,每 10 个测定样品间用标准样检测结果,以确保测定精度. 采用 SPSS 19.0 软件进行数据统计分析和作图,采用单因素方差分析进行差异显著性检验.

2 结果与分析

2.1 污水处理厂污泥中重金属总量分布及其影响因素

污泥中重金属质量比受污水处理厂进水水源、重金属形态、污水处理规模、污水处理工艺等因素影响. 其中,城市污水处理厂进水水源对重金属质量比的影响较大. 我国城市污水处理厂进水主要由生活污水、工业污水和降水组成. 冶炼、电镀、化工、制革和机械加工等行业易排放含有重金属的污水. 而塑料、制药和食品等轻工业所排放的重金属相对较少. 6 个污水处理厂中污泥重金属质量比,如表 2 所示. 表 2 中:不同的字母表示不同污水处理厂污泥中的重金属质量比差异有统计学意义,“*”为 $P<0.05$,“**”为 $P=0.000$.

表 2 南方某城市污水处理厂中污泥重金属质量比
Tab. 2 Content of heavy metals of sewage sludge from the southern city mg · kg⁻¹

项目	w(Cu)	w(Pb)	w(Ni)
A	289.40±1.62a**	277.06±1.33d**	79.14±0.54a**
B	600.46±2.21c**	240.37±1.24b**	156.22±0.93b**
C	1 093.55±4.23d**	258.72±1.04c**	551.90±2.45e**
D	5 889.40±6.09e**	222.02±1.65a**	1 702.98±3.21f**
E	9 760.37±8.31f**	295.41±1.79f**	330.94±1.44d**
F	450.69±1.94b**	240.37±1.20b**	192.19±1.01c**
中国城市污泥平均值	486.00	131.00	77.50
南方某市土壤平均值	18.40	73.26	9.61

项目	w(Cr)	w(Zn)	w(Cd)
A	1 788.57±3.87a**	1 011.78±2.12c**	5.25±0.000 21a*
B	2 331.43±3.56b**	543.78±1.11a**	6.02±0.000 52a*
C	2 760.00±3.99d**	1 081.82±3.50d**	6.02±0.000 49a*
D	20 588.57±2.95f**	1 260.11±3.24e**	4.48±0.000 11a*
E	3 274.29±3.76e**	578.80±2.01b**	4.48±0.000 14a*
F	2 645.71±3.22c**	1 260.11±2.89e**	7.56±0.000 49b*
中国城市污泥平均值	397.00	185.00	2.97
南方某市土壤平均值	48.50	153.80	0.17

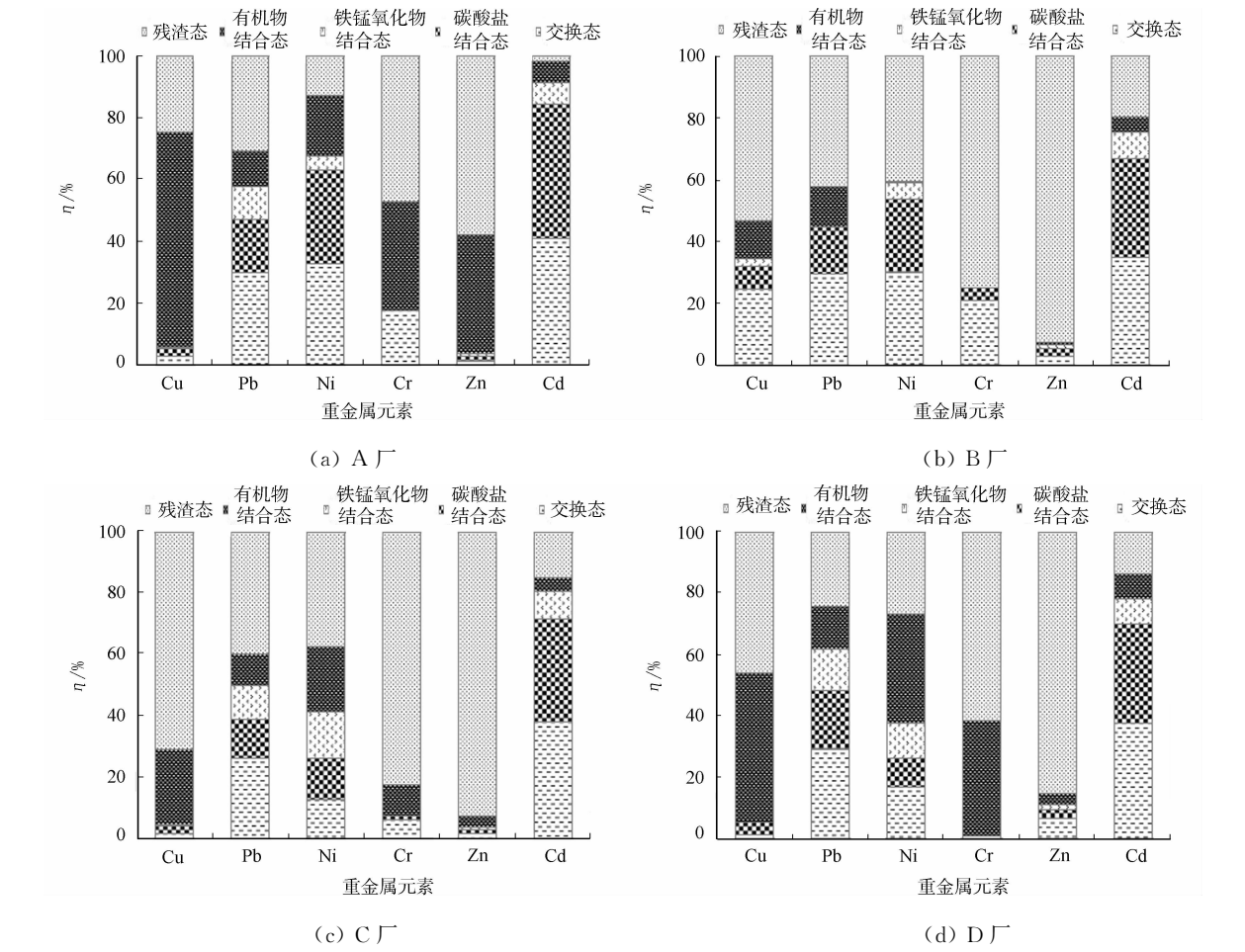
由表 2 可以看出:各污水处理厂污泥中 Zn,Pb 质量比均低于 GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》. C~E 污水处理厂 Cu 质量比高于排放标准的限值 800 mg · kg⁻¹;A,B,F 污水处理厂 Cu 质量比均达到了排放标准要求限值. B~F 等 5 个污水处理厂中 Ni 质量比未达到标准中所规定的 100 mg · kg⁻¹ 的排放要求. 6 个污水处理厂中,Cr 质量比在 1 788.57~20 588.57 mg · kg⁻¹ 之间,不能满足排放要求;从 Cd 质量比来看,A,B,C,F 等 4 个污水处理厂均略高于标准值 5 mg · kg⁻¹,而 D 和 E 污水处理厂则在标准值内. 各污水厂重金属均超过该市土壤平均值^[11].

除部分污水处理厂的 Cu、Ni 和 Cr, 其他重金属均在 GB/T 25031—2010《城镇污水处理厂污泥处置制砖用泥质》标准限值内; 各污水处理厂中 6 种重金属质量比大多高于 GB 4284—1984《农用污泥中污染物的控制标准》中的限值。C~E 等 3 个污水处理厂的进水中含有电子、化工、机械制造、电镀、皮革等工业污水, 因此, 重金属质量比明显高于其他 3 个污水处理厂。由表 2 还可知: 各污水处理厂污泥中的 Cu、Pb、Ni、Cr 和 Zn 差异性显著, Cd 在 A~E 等 5 个污水处理厂污泥中的质量比与 F 中存在显著性差异, 但各厂之间差异性不显著。因此, 在污泥农业利用和资源化制砖前需对污泥中重金属进行严格控制。

2.2 污泥中重金属的形态特征

重金属元素的存在形态直接影响该元素的环境行为、生物给性、迁移转化能力, 以及在生物体中的积累能力及毒性。根据各结合态生物利用性的大小, 可把重金属的各种化学形态大致归为 3 类: 有效态、潜在有效态和不可利用态。交换态和碳酸盐结合态归为有效态, 易发生淋滤并被植物吸收; 铁锰氧化物结合态和有机结合态归为潜在有效态, 它们的有效态的直接提供者, 在 pH 和氧化还原条件改变时, 容易被生物吸收; 残渣态稳定性强, 几乎无生物有效性, 故被归为不可利用态^[12]。

6 个污水处理厂污泥中各种重金属形态分布, 如图 1 所示。由图 1 可以看出: B、C、F 等 3 个污水处理厂污泥中 Cu 主要以不可利用态形式存在, 比例分别为 53.15%, 70.91%, 52.84%, 生物有效性很低。A、D、E、F 污水处理厂污泥 Pb 的有效态质量比较高, 分别为 47.01%, 48.61%, 51.89%, 62.90%。A、B、E、F 污水处理厂污泥中 Ni 的有效态质量比较高, 分别为 65.60%, 41.23%, 53.82%, 59.92%; 而 C 和 D 污水处理厂中 Ni 的潜在有效态比例相对较高, 当环境变化时, 会被释放而被生物所利用, 因此, 其有效性仍不可忽略, 在污泥资源化时要综合考虑其环境危害。6 个污水处理厂 Cr、Zn 都主要以不可利用态形式存在, 这说明污泥中 Cr 和 Zn 大部分被束缚在矿物晶格中, 其潜在生物毒性相对较弱。相反, 6 个污水处理厂污泥中 Cd 以有效态为主, 都占到了总量的 60% 以上, 具有较强的直接生物有效性, 易被释放到环境形成“二次污染”, 对环境的潜在危害很大。因此, 在资源化过程中应重点考察其危害性。



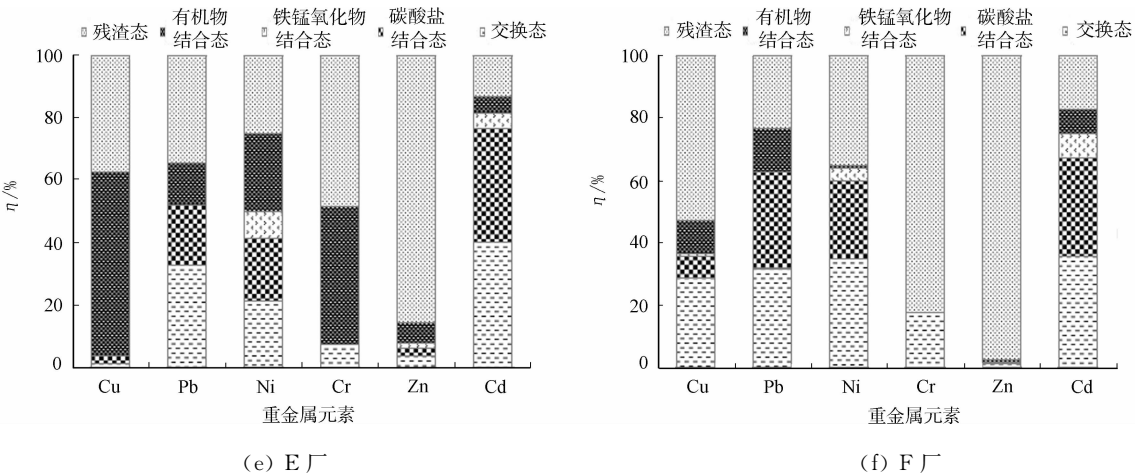


图 1 6 种城市污泥中重金属的形态分布

Fig. 1 Distribution of various fractions of heavy metals in six sludge samples

3 城市污泥资源化分析

3.1 土壤重金属的环境容量及污泥土地利用分析

污泥所施用地区的土壤重金属的环境容量是确定一个城市的污泥安全输入量的关键因素,土壤重金属的环境容量包括了静态容量和动态容量.静态容量的计算公式^[13]为

$$Q_i = (2.25 \times 10^6) \times (S_i - C_i) \times 10^{-6}.$$
 (1)

式(1)中: Q_i 为土壤重金属*i*的静态环境容量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; S_i 为土壤重金属*i*的临界值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_i 为土壤重金属*i*的质量比, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 2.25×10^6 为每 $10\,000\text{ m}^2$ 的土壤平均质量, kg ; 10^{-6} 为换算系数.

将这些城市污泥农用时,一次性投入量较大,此时根据土壤静态容量计算得到的施用量即为该城市污泥的最高施用量.其具体的计算公式^[13]为

$$S_{i,\max} = Q_i / w_{s,i} \times 10^9.$$
 (2)

式(2)中: $S_{i,\max}$ 为污泥最高施用量, $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$; $w_{s,i}$ 为城市污泥中重金属*i*的平均质量比, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

该市地处福建东南部,土壤类型属于赤红壤,这种土壤的风化淋溶作用略弱于砖红壤,颜色红,土层较厚,质地较粘重,肥力较差,呈酸性, $\text{pH} < 6.5$ ^[11].选择 GB 15618—1995《土壤环境质量标准》中二级标准 $\text{pH} < 6.5$ 中的重金属为临界值,参考该市土壤重金属质量比调查结果,将其中土壤的重金属质量比设为背景值,计算城市污泥农用的最高施用量,如表 3,4 所示.

表 3 南方某市土壤重金属的静态环境容量及城市污泥的最高施用量(I)

项目	Cu	Pb	Ni	Cr	Zn	Cd
$S_i/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	50.00	250.00	40.00	150.00	200.00	0.30
$C_i/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	18.40	73.26	9.61	48.50	153.80	0.17
$Q_i/\text{mg} \cdot \text{hm}^{-2}$	71.10	397.67	68.39	228.37	103.95	0.28

表 4 南方某市土壤重金属的静态环境容量及城市污泥的最高施用量(II)

项目	工厂	Cu	Pb	Ni	Cr	Zn	Cd
$S_{i,\max}/\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$	A	245.68e**	1 435.30b**	864.16f**	127.68e**	102.74c**	54.02c*
	B	118.41c**	1 654.43d**	437.76e**	97.95d**	191.16e**	47.10b*
	C	65.02b**	1 537.09c**	123.91b**	82.74c**	96.09b**	47.10b*
	D	12.07a**	1 791.16e**	40.16a**	11.09a**	82.49a**	63.34d*
	E	7.28a**	1 346.15a**	206.65c**	69.75b**	179.60d**	63.34d*
	F	157.76d**	1 654.43d**	355.83d**	86.32c**	82.49a**	37.48a*

由表 3,4 可知:Cu,Cr 和 Cd 的最高污泥施用量较低. 张丽丽等^[9]认为 Cr 在土壤中多以难溶性化合物形态存在,迁移能力较弱,城市污泥施加到土壤后,Cr 也多转变为难溶态,且 90% 以上迅速被土壤吸附固定,在土壤中难再迁移,其迁移活性相对较弱,不宜作为限制性指标.

经形态分析,由图 1 可以看出:Cu 主要以相对稳定的形态存在,其迁移活性弱,不宜作为限制性指标. 相较其他测定金属而言,Cd 有较强的潜在迁移活性^[14-15]. 因此,选取 Cd 作为城市污泥最高施用量的主要限制性指标.

3.2 城市污泥制砖利用分析

GB/T 25031—2010《城镇污水处理厂污泥处置制砖用泥质》中提出:污泥用于制砖时,污泥中重金属质量比要低于相关限值,此外,将污泥与其他制砖原料混合时,污泥与制砖总原料的质量比,即混合比例小于或等于 10%. 利用这一比例上限值,结合标准中污泥重金属浓度限值,采用污泥添加比例计算公式,对文中污泥进行添加比例计算,即

$$X = (M_i \times 10\%) / w_{s,i} \times 100.$$
(3)

式(3)中: M_i 为污泥制砖标准中重金属 i 的质量比限值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; $w_{s,i}$ 为城市污泥中重金属 i 的平均质量比, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; X 为污泥实际添加比例.

6 个污水处理厂污泥的 Cr 均超标,C 污水处理厂 Ni 超标,D,E 污水处理厂 Cu,Ni 超标. 针对污水处理厂超标重金属元素进行污泥制砖添加比例(δ)计算,为污泥制砖无害化提供理论基础,计算结果如表 5 所示. 由表 5 可知:A,B,C,D,F 等 5 个污水处理厂 Cr 的污泥添加比例最低,E 污水处理厂 Cu 的污泥添加比例最低,其次为 Cr.

表 5 城市污泥制砖资源化添加比例

Tab. 5 Addition proportions of sewage sludge in brick

工厂	$\delta/\%$					
	Cu	Pb	Ni	Cr	Zn	Cd
A	—	—	—	5.59	—	—
B	—	—	—	4.29	—	—
C	—	—	3.62	3.62	—	—
D	2.55	—	1.17	0.49	—	—
E	1.54	—	6.04	3.05	—	—
F	—	—	—	3.78	—	—

污泥砖烧制过程中,大部分有机物被氧化分解,金属硫化物发生氧化而转化为氧化物,导致污泥中不稳定部分的重金属形态比例降低,而稳定部分比例升高. 由于物理、化学性质的差异,不同重金属元素经过高温烧结后的迁移固定表现也各不相同^[16]. 因此,在污泥制砖过程中,除考虑污泥本身重金属的危害,还应综合考虑污泥中重金属在高温烧结过程的迁移、转化和固定.

Obrador 等^[17]发现 Zn,Ni 和 Pb 高温热处理后,原有的不稳定形态基本消失,残渣态比例明显增加. Ni 在高温烧结过程中会形成一系列不易浸出化合物,得到明显固化^[16]. 鉴于 E 污水处理厂中 Cu 的添加比例最低,选取 Cu 作为污泥制砖过程的限制性指标. Cr 是典型的亲氧元素,高温下发生氧化反应,易发生迁移、转化,高温条件对 Cr 的固化作用不明显^[16];另外,研究发现 Cr 在所调查的 A,B,C,D,F 等 5 个污水处理厂的超标现象也最为严重,因此,将 Cr 作为这 5 个污水厂污泥制砖过程的限制性指标.

4 结论

1) 各污水处理厂中重金属质量比和形态分布规律均存在差异. 其中,Zn,Cr 主要以不可利用态存在,Cu 主要以潜在有效态和不可利用态存在,而 Pb,Ni,Cd 有效态比例较高.

2) 根据该市主要旱地赤红壤静态环境容量计算表明,污泥农用过程中,Cd 是主要限制性指标. 不同污水处理厂污泥的最大施用量有明显差异,为保证土壤环境的安全,建议将 Cd 作为城市污水处理厂污泥农用过程中最高施用量的限制性指标.

3) 制砖过程中污泥添加比例研究表明,E 污水厂 Cu 添加比例最低,作为该厂污泥制砖过程的限制性指标;其余 5 个污水厂的 Cr 添加比例最低,作为其制砖资源化过程的限制性指标.

参考文献:

[1] 杨军,郭广慧,陈同斌,等. 中国城市污泥的重金属含量及其变化趋势[J]. 中国给水排水,2009,25(13):122-124.

[2] FYTILI D,ZABANIOTOU A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new method; A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2008,12(1):116-140.

[3] 胡绵好,袁菊红,黄和平,等. 南昌市城市污泥重金属形态分布及其生物活性研究[J]. 水土保持通报,2010,30(5): 64-67.

[4] BASEM S I K,KALAVROUZITIS P H,KOUKOULAKIS A Y. Soil pollution indices under the effect of sludge [J]. Water, Air and Soil Pollution,2013,224(2):1436-1441.

[5] IMPELLITTERI C A,SAXE J K,COCHRAN M,et al. Predicting the bioavailability of copper and zinc in soils: Modeling the partitioning of potentially bioavailable copper and zinc from soil solid to soil solution[J]. Environmental Toxicology and Chemistry,2003,22(6):1380-1386.

[6] SASTRE J,HERNANDEZ E,RODRIGUEZ R,et al. Use of sorption and extraction tests to predict the dynamics of the interaction of trace elements in agricultural soils contaminated by a mine tailing accident[J]. Science of the Total Environment,2004,329(1/2/3):261-281.

[7] 谢莹,张涛,金建峰,等. 污水处理厂脱水污泥中重金属的形态分布特征研究[J]. 中国给水排水,2012,28(5):93-96.

[8] 姚金铃,王海燕,于云江,等. 城市污水处理厂污泥重金属污染状况及特征[J]. 环境科学研究,2010,23(6):676-702.

[9] 张丽丽,李花粉,苏德纯. 我国城市污水处理厂污泥中重金属分布特征及变化规律[J]. 环境科学研究,2013,26(3): 313-319.

[10] TESSIER A,CAMPBELL P G C,BISSON M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. Analytical Chemistry,1979,51(7):844-851.

[11] 邱海源. 厦门市翔安区土壤重金属分布、形态及生态效应研究[D]. 厦门:厦门大学,2008:163-165.

[12] 于瑞莲,胡恭任,张丽玲. 泉州城市污泥中重金属赋存形态和生物有效性分析[J]. 环境化学,2011,30(11):1965-1966.

[13] 姜勇,梁文举,张玉革,等. 污灌对土壤重金属环境容量及水稻生长的影响研究[J]. 中国生态农业学报,2004,12 (3):124-127.

[14] 冯春,杨光,杜俊,等. 污水污泥堆肥重金属总量及形态变化[J]. 环境科学研究,2008,21(1):97-102.

[15] 李淑更,张可方,周少奇,等. 脱水污泥在美人蕉种植中的应用[J]. 环境科学研究,2008,21(2):158-162.

[16] 马雯,呼世斌. 以城市污泥为掺量制备烧结砖[J]. 环境工程学报,2012,6(3):1035-1038.

[17] OBRADOR A,RICO M I,ALVAREZ J M,et al. Influence of thermal treatment on sequential extraction and leaching behavior of trace metals in a contaminated sewage sludge[J]. Bioresource Technology,2001,76(3):259-264.

Form of Heavy Metals in Sewage Sludge and
Resource Feasibility in Southern City

YUAN Ke-xin, SUN Rong, LI Yu, HONG Jun-ming

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

Abstract: The content and form distribution of heavy metals (Cu, Zn, Ni, Pb, Cd, Cr) from sewage sludge in six wastewater treatment plants in a southern city of China were investigated. The maximum amount of sewage sludge which could be applied to agricultural soil and brick was also calculated. Results revealed that Zn and Cr existed mainly in unavailable form, and Cu was in a state of potentially effective and unavailable fraction. The effective proportions of Pb, Ni and Cd were larger than other metals. As calculated by the static environmental capacity of latosolic red solid of the city, the main detected harmful heavy metal was Cd in the course of agriculture utilization of sludge. The maximum application amount of sludge from various sources were significantly different. Therefore, we suggested that the content of Cd in sewage sludge could be used as a reference index, which was used for calculating the maximal application rate in the control of application rate of sludge for agricultural land, and for the protection of solid environment. As calculated by the addition ratio of the sewage sludge in the brick, the main control index was Cu in the E wastewater treatment plant, meanwhile Cr was selected as the dangerous heavy metal in the other five wastewater treatment plants.

Keywords: sewage sludge; heavy metal; form distribution; resource

华侨大学泉州校区药用植物资源调查分析

徐先祥,倪云霞,付艺冰,朱秦,郑文杰,
李琼,黄应钦,秦思,朱亚玲,张小鸿

(华侨大学 生物医学学院,福建 泉州 362021)

摘要: 对华侨大学泉州校区药用植物进行系统的调查研究,根据校园自然分区,编制华侨大学泉州校区校园内药用植物名录和图册,并从药用植物的多样性、生长习性、生态稳定性和功能性等方面进行分析与评价. 研究表明:华侨大学泉州校区校园内共有药用植物 315 种,隶属 101 科,其中被《中国药典》收录的有 85 种.

关键词: 药用植物;资源调查;华侨大学;泉州校区

中图分类号: R 282.5

文献标志码: A

福建省泉州市位于闽南沿海,是古代“海上丝绸之路”的起点,中心市区位于北纬 $24^{\circ}50' \sim 25^{\circ}18'$,东经 $118^{\circ}29' \sim 119^{\circ}01'$,依山面海,属亚热带海洋性季风气候,年平均气温 $19.5 \sim 21.0^{\circ}\text{C}$,年平均降水量 $1\,202 \sim 1\,550\text{ mm}$,全年无霜期 358 d,终年温暖湿润.古诗称泉州“四季有花常见雨,一冬无雪却闻雷”,故泉州中心市区有“温陵”雅称^[1-2]. 华侨大学泉州校区坐落于清源山山脚下,校园内植物种类丰富,野生和人工栽培的药用植物种类繁多,是泉州市乃至闽南地区植物分布的一个缩略图,不仅可为药学类学生观察药用植物提供最直接的大课堂,同时也为本地区中草药资源研究提供第一手资料. 本文通过实地调查并查阅相关资料,对华侨大学泉州校区的药用植物资源进行系统研究.

1 研究方法

采用分区调查和查阅文献相结合的方法. 根据校园自然分区,将华侨大学分成以下几个片区:中片区(以陈嘉庚纪念堂为中心辐射的办公教学区),秋中湖区,体育场区,新体育场区,东、西、南和新南小区教工宿舍区,学生宿舍北区. 对各区、主干道、次干道的现有植物资源进行实地调查,调查内容包括植物种类、生长环境及分布等. 通过查阅相关资料^[3]进行鉴定,按照植物分类系统分门别类和统计分析.

2 调查结果与分析

2.1 种类统计

对华侨大学泉州校区的药用植物进行考察和统计,发现共有药用植物 315 种,分属 101 个科,其中藻类植物 1 科,苔藓类植物 1 科,蕨类植物 4 科,裸子植物 7 科,被子植物占有绝对的优势(双子叶植物 75 科,单子叶植物 13 科).

参照 2010 年版《中国药典(一部)》收录品种,编制华侨大学泉州校区药用植物名录,如表 1 所示. 由表 1 可知:在单子叶植物中以百合科药用植物最多(13 种),而双子叶植物中则以菊科药用植物最多(25 种),其次为豆科和大戟科(均为 14 种);315 种药用植物中被药典收录的中药有 85 种,标注“*”的为 2010 年版《中国药典(一部)》收录品种. 由于篇幅有限,该名录的药用部位和功效参见文献[4-9].

收稿日期: 2013-12-23

通信作者: 徐先祥(1978-),男,助理研究员,主要从事中药有效成分和药理学的研究. E-mail: xuxianxiang@163.com.

基金项目: 福建省科技计划重点项目(2012Y0049);华侨大学本科教育教学改革专项(2013-52)

表 1 华侨大学泉州校区药用植物名录

Tab.1 List of the medicinal plants in Quanzhou school district of Huaqiao University

科名	种名	拉丁学名	科名	种名	拉丁学名
念珠藻科	地耳	<i>Nostoc commune</i> Vauch.	紫萁科	紫萁*	<i>Osmunda japonica</i> Thunb.
葫芦藓科	葫芦藓	<i>Funaria hygrometrica</i> Hedw.	海金沙科	海金沙*	<i>Lygodium japonicum</i> (Thunb.) Sw
凤尾蕨科	井栏边草	<i>Pteris multifida</i> Poir.	罗汉松科	罗汉松	<i>Podocarpus macrophyllus</i> (Thunb.) Sweet
	蜈蚣草	<i>Pteris vittata</i> L.		竹柏	<i>Nageia nagi</i> (Thunb.) Kuntze
苏铁科	苏铁	<i>Cycas revolute</i> Thunb.	松科	马尾松*	<i>Pinus massoniana</i> Lamb.
肾蕨科	肾蕨	<i>Nephrolepis cordifolia</i> (L.) Presl	杉科	柳杉	<i>Cryptomeria fortunei</i> Hooibrenk ex Otto et Dietr.
银杏科	银杏*	<i>Ginkgo biloba</i> L.	三白草科	鱼腥草*	<i>Houttuynia cordata</i> Thunb.
柏科	侧柏*	<i>Platycladus orientalis</i> (L.) Franco.	榆科	榔榆	<i>Ulmus parvifolia</i> Jacq.
	柏木	<i>Cupressus funebris</i> Endl.		朴树	<i>Celtis sinensis</i> Pers.
	圆柏	<i>Sabina chinensis</i> (L.) Ant.		山黄麻	<i>Trema orientalis</i> (L.) Blume.
红豆杉科	南方红豆杉	<i>Taxus chinensis</i> var. <i>mairei</i>	杨柳科	垂柳	<i>Salix babylonica</i> L.
	榧树*	<i>Torreya grandis</i> Fort. et Lindl.		杨树	<i>Populus bonatii</i> Levl.
桑科	桑树*	<i>Morus alba</i> L.	茄科	茄子	<i>Solanum melongena</i> L.
	菠萝蜜	<i>Artocarpus heterophyllus</i> Lam.		龙葵	<i>Solanum nigrum</i> Ait.
	菩提树	<i>Ficus religiosa</i> L.		枸杞*	<i>Lycium barbarum</i> L.
	榕树	<i>Ficus microcarpa</i> L.		朝天椒	<i>Capsicum frutescens</i> var. <i>fasiculatum</i> Bailey
	薜荔	<i>Ficus pumila</i> L.		辣椒*	<i>Capsicum annuum</i> L.
	琴叶榕	<i>Ficus pandurata</i> Hance		马铃薯	<i>Solanum tuberosum</i> L.
	笔管榕	<i>Ficus superba</i> Miq. var. <i>japonica</i> Miq.		珊瑚豆	<i>Solanum pseudocapsicum</i> L. var. <i>diflorum</i> (Vell.) Bitter
	无花果	<i>Ficus carica</i> L.		夜香树	<i>Cestrum nocturnum</i> L.
	葎草	<i>Humulus scandens</i> (Lour.) Merr.		假烟叶树	<i>Solanum erianthum</i> D. Don
荨麻科	小叶冷水花	<i>Pilea microphylla</i> (L.) Liebm.	商陆科	美洲商陆*	<i>Phytolacca acinosa</i> Roxb.
蓼科	何首乌*	<i>Polygonum multiflorum</i> Thunb.	苋科	鸡冠花*	<i>Celosia cristata</i> L.
	杠板归*	<i>Polygonum perfoliatum</i> L.		土牛膝	<i>Achyranthes aspera</i> L.
	扁蓄*	<i>Polygonum aviculare</i> L.		莲子草	<i>Alternanthera sessilis</i> (L.) DC.
	竹节蓼	<i>Homalocadium platycladum</i> (F. Muell. Ex Hook.) L. H. Bailey		青箱子*	<i>Celosia argentea</i> L.
	酸模	<i>Rumex acetosa</i> L.		反枝苋	<i>Amaranthus retroflexus</i> L.
	火炭母	<i>Polygonum chinense</i> L.		血苋	<i>Iresine herbstii</i> Hook. f. ex Lindl.
藜科	藜	<i>Chenopodium album</i> L.	紫茉莉科	紫茉莉	<i>Mirabilis jalapa</i> L.
	土荆芥	<i>Chenopodium ambrosioides</i> L.		三角梅	<i>Bougainvillea spectabilis</i> Willd.
马齿苋科	马齿苋*	<i>Portulaca oleracea</i> L.	防己科	木防己	<i>Cocculus orbiculatus</i> (L.) DC
	土人參	<i>Talinum paniculatum</i> (Jacq.) Gaertn.		藤三七	<i>Boussingaultia gracilis</i> Miers var. <i>Pseudobaselloides</i> Bailey
	太阳花	<i>Portulaca grandiflora</i> Hook.		粪箕笃	<i>Stephania longa</i> Lour.
落葵科	落葵	<i>Basella alba</i> L.	石竹科	石竹*	<i>Dianthus chinensis</i> L.
芍药科	牡丹*	<i>Paeonia suffruticosa</i> Andr.	腊梅科	腊梅	<i>Chimonanthus praecox</i> (L.) Link
木兰科	白玉兰*	<i>Magnolia denudata</i> Desr.	景天科	垂盆草*	<i>Sedum sarmentosum</i> Bunge
	白兰花	<i>Michelia alba</i> DC. Syst.		落地生根	<i>Bryophyllum pinnatum</i> (L. f.) Oken.
	广玉兰	<i>Magnolia grandiflora</i> L.		景天三七	<i>Sedum aizoon</i> L.
	含笑	<i>Michelia figo</i> (Lour.) Spreng.		佛甲草	<i>Sedum lineare</i> Thunb.
睡莲科	睡莲	<i>Nymphaea tetragona</i> Georgi.	小檗科	南天竹	<i>Nandina domestica</i> Thunb.
	荷花*	<i>Nelumbo nucifera</i> Gaertn.		柠檬桉	<i>Eucalyptus citriodora</i> Hook. f.
樟科	樟树*	<i>Cinnamomum camphora</i> (L.) Presl	漆树科	芒果	<i>Mangifera indica</i> L.
	阴香	<i>Cinnamomum burmanni</i> (Nees) Bl.		盐肤木*	<i>Rhus chinensis</i> Mill.

续表

Continue table

科名	种名	拉丁学名	科名	种名	拉丁学名
白花菜科	黄花草	<i>Cleome viscosa</i> L.	虎耳草科	绣球	<i>Hydrangea macrophylla</i> (Thunb.) Ser.
十字花科	萝卜*	<i>Raphanus sativus</i> L.	无患子科	龙眼*	<i>Dimocarpus longan</i> Lour.
	碎米荠	<i>Cardamine hirsuta</i> L.		栾树	<i>Koelreuteria paniculata</i> Laxm.
	印度葶菜	<i>Rorippa indica</i> (L.) Hiern		车桑子	<i>Dodonaea viscosa</i> (L.) Jacq.
海桐花科	光叶海桐	<i>Pittosporum glabratum</i> Lindl.	旱金莲科	旱金莲	<i>Tropaeolum majus</i> L.
蔷薇科	刺蔷薇	<i>Rosa acicularis</i> Lindl.	夹竹桃科	夹竹桃	<i>Nerium indicum</i> Mill.
	桃*	<i>Amygdalus persica</i> L.		络石*	<i>Trachelospermum jasminoides</i> (Lindl.) Lem.
	枇杷*	<i>Eriobotrya japonica</i> (Thunb.) Lindl.		鸡蛋花	<i>Plumeria rubra</i> L. cv. <i>Acutifolia</i>
	月季*	<i>Rosa chinensis</i> Jacq.		软枝黄蝉	<i>Allamanda cathartica</i> L.
	茅莓	<i>Rubus parvifolius</i> L.		长春花	<i>Catharanthus roseus</i> (L.) G. Don
	木莓	<i>Rubus swinhoei</i> Hance		盆架树	<i>Winchia calophylla</i> A. DC
	玫瑰*	<i>Rosa rugosa</i> Thunb.		糖胶树	<i>Alstonia scholaris</i> (L.) R. Br.
豆科	刺桐	<i>Erythrina variegata</i> L.	大戟科	红背桂	<i>Excoecaria cochinchinensis</i> Lour.
	绿豆	<i>Vigna radiate</i> (L.) R. Wilczek		泽漆	<i>Euphorbia helioscopia</i> L.
	凤凰木	<i>Delonix regia</i> (Boj.) Raf.		木薯	<i>Manihot esculenta</i> Crantz
	紫藤	<i>Wisteria sinensis</i> Sweet		蓖麻*	<i>Ricinus communis</i> L.
	羊蹄甲	<i>Bauhinia purpurea</i> L.		一品红	<i>Euphorbia pulcherrima</i> Willd. ex Klotzsch
	红花羊蹄甲	<i>Bauhinia blakeana</i> Dunn		变叶木	<i>Codiaeum variegatum</i> (L.) A. Juss.
	国槐*	<i>Sophora japonica</i> L.		铁海棠	<i>Euphorbia milii</i> Ch. des Moulins
	龙爪槐	<i>Sophora japonica</i> L. var. <i>pendula</i> Loud.		地锦草*	<i>Euphorbia humifusa</i> Willd. ex Schlecht.
	含羞草	<i>Mimosa pudica</i> L.		绿玉树	<i>Euphorbia tirucalli</i> L.
	木豆	<i>Cajanus cajan</i> (L.) Millisp.		飞扬草*	<i>Euphorbia hirta</i> L.
	白扁豆*	<i>Dolicho lablab</i> L.		霸王鞭	<i>Euphorbia royleana</i> Boiss.
	豌豆	<i>Pisum sativum</i> L.		乌桕	<i>Sapium sebiferum</i> (L.) Roxb.
	鸡眼草	<i>Kummerowia striata</i> (Thunb.) Schindl.		叶下珠	<i>Phyllanthus urinaria</i> L.
	链荚豆	<i>Alysicarpus vaginalis</i> (L.) DC.		红雀珊瑚	<i>Pedilanthus tithymaloides</i> (L.) Poit.
酢浆草科	酢浆草	<i>Oxalis corniculata</i> L.	桃金娘科	蒲桃	<i>Syzygium jambos</i> (L.) Alston
	红花酢浆草	<i>Oxalis corymbosa</i> DC.		白千层	<i>Melaleuca leucadendra</i> L.
	阳桃	<i>Averrhoa carambola</i> L.		红千层	<i>Callistemon rigidus</i> R. Br.
芸香科	九里香*	<i>Murraya exotica</i> L.	楝科	香椿	<i>Toona sinensis</i> (A. Juss.) Roem.
	柑橘*	<i>Citrus reticulata</i> Blanco		麻楝	<i>Chukrasia tabularis</i> A. Juss.
	金橘	<i>Fortunella margarita</i> (Lour.) Swingle		苦楝*	<i>Melia azedarach</i> L.
	竹叶椒	<i>Zanthoxylum armatum</i> DC.		米兰	<i>Aglaia odorata</i> Lour.
		<i>Buxus sinica</i> (Rehd. et Wils.)	冬青科	枸骨*	<i>Ilex cornuta</i> Lindl. et Paxt.
黄杨科	小叶黄杨	Cheng ssp. <i>sinica</i> var. <i>parvifolia</i> M. Cheng	凤仙花科	凤仙花*	<i>Impatiens balsamina</i> L.
槭树科	鸡爪槭	<i>Acer palmatum</i> Thunb.			<i>Passiflora edulis</i> f. <i>flavicarpa</i> Deg.
杜英科	锡兰橄榄	<i>Canarium zeylanicum</i> (Retz.) Blume	西番莲科	百香果	
木棉科	木棉*	<i>Bombax malabaricum</i> DC.	堇菜科	紫花地丁*	<i>Viola ycdensis</i> Mak.
山茶科	山茶	<i>Camellia japonica</i> L.	石榴科	石榴*	<i>Punica granatum</i> L.
番木瓜科	番木瓜	<i>Carica papaya</i> L.	蓝果树科	喜树	<i>Camptotheca acuminata</i> Decne.
杜鹃花科	锦绣杜鹃	<i>Rhododendron pulchrum</i> Sweet	山榄科	人心果	<i>Manilkara zapota</i> (L.) van Royen

续表 1

Continue table 1

科名	种名	拉丁学名	科名	种名	拉丁学名
紫金牛科	朱砂根*	<i>Ardisia crenata</i> Sims	柿科	柿树*	<i>Diospyros kaki</i> Thunb.
卫矛科	雷公藤	<i>Tripterygium wilfordii</i> Hook. f.	仙人掌科	仙人掌	<i>Opuntia dillenii</i> (Ker-Gaw.) Haw.
	扶芳藤	<i>Euonymus fortunei</i> (Turcz.) Hand.-Mazz		蟹爪兰	<i>Schlumbergera truncata</i> (Haw.) Moran
葡萄科	山葡萄	<i>Vitis amurensis</i> Rupr.	伞形科	芫荽	<i>Coriandrum sativum</i> L.
	乌莓莓	<i>Cayratia japonica</i> (Thunb.) Gagnep.		天胡荽	<i>Hydrocotyle sibthorpioides</i> Lam.
	爬山虎	<i>Parthenocissus heterophylla</i> (Bl.) Merr.		积雪草*	<i>Centella asiatica</i> (L.) Urban
	地锦	<i>Parthenocissus tricuspidata</i> (Sieb. et Zucc.) Planch.		胡萝卜	<i>Daucus carota</i> L. var. <i>Sativa</i> DC.
锦葵科	锦葵	<i>Malva sinensis</i> Cavan.	旋花科	红薯	<i>Dioscorea esculenta</i> (Lour.) Burkill
	赛葵	<i>Malvastrum coromandelianum</i> (L.) Gurcke		牵牛*	<i>Pharbitis nil</i> (L.) Choisy
	玫瑰茄	<i>Hibiscus sabdariffa</i> L.		五爪金龙	<i>Ipomoea cairica</i> (L.) Sweet
	木芙蓉	<i>Hibiscus mutabilis</i> L.		茛萝	<i>Quamoclit pennata</i> (Lam.) Bojer
	木槿	<i>Hibiscus syriacus</i> L.		蕹菜	<i>Ipomoea aquatica</i> Forsk.
	朱槿	<i>Hibiscus rosa-sinensis</i> L.		马蹄金	<i>Dichondra repens</i> Forst.
秋海棠科	四季海棠	<i>Begonia semperflorens</i> Link et Otto	玄参科	通泉草	<i>Mazus japonicus</i> (Thunb.) O. Kuntze
千屈菜科	紫薇	<i>Lagerstroemia indica</i> L.		紫草科	<i>Carmona microphylla</i> (lam.) G. Don.
	大花紫薇	<i>Lagerstroemia speciosa</i> (L.) Pers.		柔弱斑种草	<i>Bothriospermum tenellum</i> (Hornem.) Fisch. et Mey.
	五加科			木樨科	<i>Osmanthus fragrans</i> Lour.
	鹅掌柴	<i>Scheffera octophylla</i> (Lour.) Harms.		女贞*	<i>Ligustrum lucidum</i> Ait.
	常春藤	<i>Hedera nepalensis</i> var. <i>sinensis</i> (Tobl.) Rehd.			<i>Ligustrum quihoui</i> var. <i>trichopodum</i> Y. C. Yang
	八角金盘	<i>Fatsia japonica</i> (Thunb.) Decne. et Planch.		茉莉	<i>Jasminum sambac</i> (L.) Ait.
	七叶莲	<i>Schefflera arboricola</i> Hagata		迎春花	<i>Jasminum nudiflorum</i> Lindl.
	幌伞枫	<i>Heteropanax fragrans</i> (Roxb.) Seem	天南星科	绿萝	<i>Epipremnum aureum</i> (Linden et André) Bunting
	马鞭草科			马蹄莲	<i>Zantedeschia aethiopica</i> (L.) Spreng.
	马缨丹	<i>Lantana camara</i> L.		尖尾芋	<i>Alocasia cucullata</i> (Lour.) Schott
	龙吐珠	<i>Clerodendrum thomsonae</i> Balf.		犁头尖	<i>Typonium divaricatum</i> (L.) Decne
	假连翘	<i>Duranta repens</i> L.	芭蕉科	芭蕉	<i>Musa basjoo</i> Siebold & Zucc. ex Iinuma
	花叶假连翘	<i>Duranta repens</i> cv. <i>Variegata</i>		棕榈科	<i>Trachycarpus fortunei</i> (Hook.) H. Wendl.
薯蓣科	山药*	<i>Dioscores opposita</i> Thunb.		蒲葵	<i>Livistona chinensis</i> (Jacq.) R. Br.
禾本科	绿竹*	<i>Dendrocalamopsis oldhami</i> (Munro) Keng f.		假槟榔	<i>Archontophoenix alexandra</i> (F. Muell.) H. Wendl. & Drude
	狗尾草	<i>Setaira viridis</i> (L.) Beauv.		海枣	<i>Phoenix dactylifera</i> L.
	狗牙根	<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers.		散尾葵	<i>Chrysalidocarpus lutescens</i> H. Wendl.
	牛筋草	<i>Eleusine indica</i> (L.) Gaertn.		鱼尾葵	<i>Caryota ochlandra</i> Hance
	白茅*	<i>Imperata cylindrica</i> (L.) Beauv.			
	竹叶草	<i>Oplismenus compositus</i> (L.) Beauv.			

续表 2

Continue table 2

科名	种名	拉丁学名	科名	种名	拉丁学名
鸢尾科	鸢尾	<i>Iris tectorum</i> Maxim.	姜科	姜*	<i>Zingiber officinale</i> Roscoe
	射干*	<i>Belamcanda chinensis</i> L.		姜花	<i>Hedychium coronarium</i> Koenig
美人蕉科	美人蕉	<i>Canna indica</i> L.	兰科	铁皮石斛*	<i>Dendrobium officinale</i> Kimura et Migo
车前科	车前草*	<i>Plantago asiatica</i> L.	莎草科	莎草*	<i>Cyperus rotundus</i> L.
忍冬科	金银花*	<i>Lonicera japonica</i> Thunb.	败酱科	白花败酱	<i>Patrinia villosa</i> (Thunb.) Juss.
葫芦科	丝瓜*	<i>Luffa cylindrica</i> (L.) Roem.	鸭跖草科	鸭跖草*	<i>Commelina communis</i> L.
	苦瓜	<i>Momordica charantia</i> L.		紫鸭跖草	<i>Setcreasea purpurea</i> Boom.
	南瓜	<i>Cucurbita moschata</i> (Lam.) Poiret		紫背万年青	<i>Rhoeo discolor</i> Hance.
百合科	百合*	<i>Lilium brownii</i> F. E. Brown ex Miellez var. viridulum Baker	紫葳科	凌霄*	<i>Campsis grandiflora</i> (Thunb.) Schum.
		<i>Aloe vera</i> (L.) Burm. f. var. chinensis (Haw.) Berg.		炮仗花	<i>Pyrostegia venusta</i> (Ker-Gawl.) Miers
	沿阶草*	<i>Ophiopogon japonicus</i> (L. f.) Ker-Gawl.	爵床科	爵床	<i>Rostellularia procumbens</i> (L.) Nees
	短葶山 麦冬*	<i>Liriope muscari</i> (Decn.) Bailey		穿心莲*	<i>Andrographis paniculata</i> (Burm. f.) Nees
	大蒜*	<i>Allium sativum</i> L.		大花老鸦嘴	<i>Thunbergia grandiflora</i> Roxb.
	吊兰	<i>Chlorophytum comosum</i> (Thunb.) Baker		狗肝菜	<i>Strobilanthes tetraspermus</i> (Champ. Ex Benth.) Druce
	天门冬*	<i>Asparagus cochinchinensis</i> (Lour.) Merr.		驳骨丹*	<i>Gendarussa vulgaris</i> Nees
	韭菜*	<i>Allium tuberosum</i> Rottl. ex Spreng.	茜草科	鸡屎藤	<i>Paederia scandens</i> (Lour.) Merr.
	葱	<i>Allium fistulosum</i> L.		梔子*	<i>Gardenia jasminoides</i> Ellis.
	菝葜*	<i>Smilax china</i> L.		六月雪	<i>Serissa foetida</i> (L. f.) Comm.
	文竹	<i>Asparagus setaceus</i> (Kunth) Jessop		龙船花	<i>Ixora chinensis</i> Lam.
	武竹	<i>Asparagus densiflorus</i> (Kunth) Jessop cv. Sprengeri		阔叶丰花草	<i>Spermacoce latifolia</i> Aubl.
	玉簪	<i>Hosta plantaginea</i> (Lam.) Aschers.		猪殃殃	<i>Galium aparine</i> L. var. tenerum (Gren. et Godr.) Reichb.
	虎尾兰	<i>Sansevieria trifasciata</i> Prain.	菊科	伞房花耳草	<i>Oldenlandia corymbosa</i> (L.) Lamk.
	菊科	<i>Chrysanthmum morifolium</i> Ramat.		肿柄菊	<i>Tithonia diversifolia</i> A. Gray
		<i>Emilia sonchifolia</i> (L.) DC.		山苦荬	<i>Ixeris chinensis</i> (Thunb.) Nakai
		<i>Crossostephium chinense</i> (L.) Makino		苏门白酒草	<i>Conyza sumatrensis</i> (Retz.) Walker
		<i>Eclipta prostrata</i> (L.) L.		红凤菜	<i>Gynura bicolor</i> DC.
		<i>Xanthium sibiricum</i> Patr.		艾*	<i>Artemisia argyi</i> Lévl. et Van.
		<i>Artemisia lavandulaefolia</i> DC.		黄鹌菜	<i>Youngia japonica</i> (L.) DC.
		<i>Cirsium japonicum</i> Fisch. ex DC.		蒲公英*	<i>Taraxacum mongolicum</i> Hand.-Mazz.
		<i>Conyza canadensis</i> (L.) Cronq.		白花鬼针草	<i>Bidens pilosa</i> L. var. radiata Sch.-Bip.
		<i>Crassocephalum crepidioides</i> (Benth.) S. Moore		白背三七	<i>Gynura bicolor</i> (Roxb. ex Willd.) DC.
		<i>Tagetes patula</i> L.		三裂蟛蜞菊	<i>Wedelia trilobata</i> (L.) Hitchc.
		<i>Erigeron annuus</i> (L.) Pers.		马兰	<i>Kalimeris indica</i> (Linn.) Sch.
		<i>Aster tataricus</i> L.		白子菜	<i>Gynura divaricata</i> (L.) DC.
	腺梗稀莧*	<i>Siegesbeckia pubescens</i> Makino			

续表 3

Continue table 3

科名	种名	拉丁学名	科名	种名	拉丁学名
石蒜科	葱兰	<i>Zephyranthes candida</i> (Lindl.) Herb.	石蒜科	文殊兰	<i>Crinum asiaticum</i> L. var. sinicum (Roxb. ex Herb.) Baker
	红花葱兰	<i>Zephyranthes grandiflora</i> Lindl.		君子兰	<i>Clivia miniata</i> Regel
	蜘蛛兰	<i>Hymenocallis littoralis</i> (Jacq.) Scalisb.		朱顶红	<i>Hippeastrum rutilum</i> (Ker-Gawl.) Herb.
唇形科	罗勒	<i>Ocimum basilicum</i> L.	唇形科	紫苏*	<i>erilla frutescens</i> L.
	广防风	<i>Epimeredi indica</i> (L.) Rothm.		肾茶	<i>Clerodendranthus spicatus</i> (Thunb.) C. Y. Wu ex H. W. Li
	薄荷*	<i>Mentha haplocalyx</i> Briq.		留兰香	<i>Mentha spicata</i> L.
	一串红	<i>Salvia splendens</i> Ker-Gawler		韩信草	<i>Scutellaria indica</i> L.
	风轮菜*	<i>Clinopodium chinense</i> (Benth.) O. Kuntze.		筋骨草*	<i>Ajuga decumbens</i> Thunb.

2.2 药用植物的多样性

华侨大学泉州校区药用植物中,既有校园内自然野生的草本植物如黄鹌菜、酢浆草、飞扬草、紫花地丁、火炭母、鸡屎藤等,也有校园内作为绿化景观的如朱槿(扶桑花)、羊蹄甲(紫荆花)、女贞、刺桐(中药海桐皮)等.在教工宿舍区种植的药用植物包括:菜蔬类如红凤菜(紫背天葵菜)、苦菜(白花败酱)、丝瓜(中药丝瓜络)、萝卜(中药莱菔子)等;广为熟知的药食同源植物如枸杞、山药、薄荷、紫苏、罗勒、鱼腥草等;观赏花卉类如百合、射干、朱顶红、牡丹、铁海棠(虎刺梅)等.还有一些药用植物被种植的原因可能就是在其药用保健价值,如艾、肾茶、藤三七、穿心莲、铁皮石斛等.在各类药用植物中,既有全国广泛分布的如麦冬、车前等,也有体现本地区特点的如龙眼、番木瓜、芙蓉菊、姜花、玫瑰茄、雷公藤、短葶山麦冬、基及树(福建茶)、木豆(观音豆),以及棕榈科和榕属的多种药用植物.按照药用部位划分,以全草类药材最多,根、叶、茎类药材次之;按照药用植物的功效划分,既有清热解毒,活血祛风的治疗药,又有补血养阴、滋补肝肾的补益药.

2.3 药用植物的生长习性

一些野生药用植物可快速增长而成为泛滥成灾的实例,如白花鬼针草、葎草(拉拉藤)、赛葵、肿柄菊等.经过人工管理,在校园内得到很好的控制,可以看到一墙之隔的校园内外的生长情况悬殊.三裂叶蟛蜞菊(南美蟛蜞菊)虽作为栽培的地被植物,常生长成片,侵占草地,造成其他植物生长受排斥.华侨大学泉州校区水生植物只有秋中湖的再力花(非药用植物)、下游的睡莲和教工宿舍南区池塘的少量荷花.因此,可考虑增加荷花的放养,引入菖蒲、灯心草等水生植物,既可美化水面,又可增加生物多样性^[10].

2.4 药用植物的生态稳定性

学校园林后勤部门对校园的绿化建设付出了辛勤的劳动,具有药用价值的园林植物特别是行道树和花卉都得到很好的养护.野生的药用植物资源特别是草本植物如蒲公英、青葙子等在校园内并不多见,往往会被作为杂草拔除,尽管符合学校的整体绿化,但对于药用植物研究及植物多样性来说不能不说是一个损失.在教工宿舍区也经常可以看到一些兼具观赏和药用价值的栽培植物,并且不乏一些从外地引种的药用植物,但品种具有不稳定且不便观察其特点.此外,教工宿舍东区即将面临拆迁,一些具有较高药用价值的植物有必要进行移植保护.

2.5 药用植物的功能性

丰富的校园药用植物资源为《药用植物学》、《生药学》、《中药学》等相关课程的教学与实践提供了保障,为学生观察与识别植物提供了最直接的素材.同时,校园植物还行使了净化空气、遮阳、降低噪音等生态功能.丰富繁茂的植物是多年校园文化的见证者,其和谐的文化内涵可以体现人与自然的统一.

3 结论

通过调查身边具有药用价值的植物,并整理其种类、特征、分布和用途,为药学类学生近距离观察与识别药用植物提供了一个便利的学习途径,提高了同学们专业学习的兴趣,编撰的图册具有强烈的观赏

性,今后可进一步建立网络数据库,更好地为相关教学与科研提供实践基础.

本调查结果也可在校园规划、引种、绿化建设等提供科学依据,对校园文化建设和环保意识培养有一定促进作用. 通过这次实地调查,可发现学校内的植物种类丰富,无论是药用植物或者单纯的观赏植物,栽种搭配也相对合理,但校园内一些自然野生以及教工宿舍区栽培的药用植物存在生态不稳定性. 因此,可以考虑由药学等专业的学生,配合校园绿化部门,组织定期的人力劳动对校园内的植物进行更好的规划和管理. 同时,引进一批具有药用价值的植物品种,在若干区域设置药用植物园专门种植,通过给植物挂上铭牌这样的身份证,注明中文名、拉丁学名和药用价值等,在校园内科普植物学知识,不仅更好地发挥服务教学科研的功能,也可在校园景观增光添彩.

参考文献：

[1] 薛佳薇,陈志宏. 泉州近代洋楼民居湿热气候环境适应性[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2011,32(3):332-337.
[2] 黄秀珍,许嵘. 泉州市区可药用的园林观赏植物资源调查[J]. 阜阳师范学院学报:自然科学版,2013,30(1):40-45.
[3] 《福建植物志》编写组. 福建省科学技术委员会. 福建植物志: 1~6 卷 [M]. 福州:福建科学技术出版社,1995:1-685.
[4] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(2010 年版): 一部[S]. 北京:中国医药科技出版社,2010:1-397.
[5] 国家中药管理局《中华本草》编委会. 中华本草: 1~10 卷 [M]. 上海:上海科技出版社,1999:1-1646.
[6] 福建省医药研究所. 福建药物志: 第一册[M]. 福州:福建人民出版社,1979:1-558.
[7] 刘建福,范燕萍,许瑞安. 福建泉州地区珍稀野生药用植物资源与保护[J]. 热带作物学报,2010,31(2):281-294.
[8] 吴文杰,蔡英卿,葛清秀,等. 福建清源山药用蕨类植物资源与分布[J]. 亚热带植物科学,2001,30(4):36-39.
[9] 苏小青. 福建药用苔鲜植物资源[J]. 中国野生植物资源,2001,20(2):38-39.
[10] 高小琴. 高校校园绿化植物配置存在的问题及对策:以华侨大学泉州校区为例[J]. 后勤产业,2012(5):85-87.

Investigation and Analysis on Medicinal Plant Resources in Quanzhou School District of Huaqiao University

XU Xian-xiang, NI Yun-xia, FU Yi-bing, ZHU Qin,
ZHENG Wen-jie, LI Qiong, HUANG Ying-qin,
QIN Si, ZHU Ya-ling, ZHANG Xiao-hong

(School of Biomedical Science, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: Systematic investigation and research were accomplished on the medicinal plant resources in Quanzhou school district of Huaqiao University. According to the campus natural zoning, the investigation compiled a list and atlas of the medicinal plants in Quanzhou school district of Huaqiao University. Furthermore, the diversity, growth habit, ecological stability and functionality were also analysed and evaluated. The investigation results show that there are 315 medicinal plant species which belongs to 101 families in Quanzhou school district of Huaqiao University, among which 85 medicinal plant species are indexed by the Chinese Pharmacopoeia.

Keywords: medicinal plant; resource investigation; Huaqiao University; Quanzhou school district.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 刘源岗)

三面受火后混凝土短柱受剪承载力的数值计算

林碧兰¹, 李丹², 徐玉野²

(1. 厦门理工学院 材料科学与工程学院, 福建 厦门 361024;
2. 华侨大学 福建省结构工程与防灾重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要: 基于有限元软件 ABAQUS 建立火灾后混凝土短柱推覆过程的数值分析模型, 并对火灾后 7 根混凝土短柱的试验结果进行模拟分析, 建议模型分析参数. 分析水平力方向、受火时间、轴压比、剪跨比、截面尺寸、箍筋间距对三面受火后混凝土短柱受剪承载力的影响规律. 基于自编的有限元程序计算三面受火后混凝土截面抗压强度的平均折减系数, 提出三面受火后混凝土柱受剪承载力的实用计算方法. 研究结果表明: 数值模型对火灾后混凝土短柱受剪承载力的预测较准.

关键词: 钢筋混凝土; 短柱; 火灾; 受剪承载力; 数值模型

中图分类号: TU 375.3 **文献标志码:** A

火灾后混凝土结构的剩余承载性能是进行灾后结构鉴定和加固设计的基础, 目前已取得一定的进展^[1-6]. 徐玉野等^[1]编制了火灾后混凝土柱压弯性能的有限元分析程序, 并建立了火灾后混凝土方形柱剩余压弯承载力的实用计算公式. 唐跃峰等^[2]进行了火灾后混凝土受压柱的破坏形态、变形特点和剩余承载力等的试验研究. 吴波等^[3-4]进行了轴向约束混凝土柱火灾后轴压承载力和轴压刚度的试验研究, 以及火灾后混凝土柱强度、刚度、延性和滞回特性等抗震性能的试验研究. Chen 等^[5]进行了火灾后混凝土柱双向偏压力学性能的试验研究. Huo 等^[6]进行了有初始轴压力作用的混凝土短柱在全过程火灾后轴压承载力、刚度和延性的试验研究. 现有研究主要集中在火灾后混凝土柱式构件的正截面承载性能方面, 而有关其斜截面受剪性能方面的研究少有报道. 本文以较易发生剪切破坏的混凝土短柱为试验对象, 在 7 根四面受火后混凝土短柱和 1 根未受火混凝土短柱抗震性能的试验研究^[7-8]基础上, 进一步建立火灾后混凝土短柱推覆过程的有限元模型, 并建议三面受火后砼柱受剪承载力实用计算式.

1 有限元模型及其试验验证

1.1 单元类型和网格划分

利用有限元软件 ABAQUS 建立数值分析模型. 高温下热分析时, 混凝土采用 8 节点三维实体单元 DC3D8, 钢筋采用 2 节点杆单元 DC1D2. 高温后推覆过程分析时, 混凝土采用三维实体 8 节点缩减积分单元 C3D8R, 钢筋采用忽略横向剪切作用的三维 2 节点杆单元 T3D2, 混凝土和钢筋间用 Embedded 进行自由度耦合, 不考虑钢筋和混凝土之间滑移. 高温后推覆过程分析的网格划分与高温下热分析的网格相同, 网格划分过程中, 混凝土以钢筋的位置进行切分, 确保划分过程中钢筋和混凝土共节点. 建立的混凝土短柱试件的有限元模型, 如图 1 所示.

1.2 材料性能

混凝土(硅质骨料)和钢筋的热工性能(包括热传导系数、体积比热、热膨胀系数)采用加拿大学者 Lie 等建议的公式^[9]. 高温后钢筋的力学性能基本能恢复, 假定其应力-应变关系与未受火时的相同,

收稿日期: 2014-01-20

通信作者: 徐玉野(1978-), 男, 副教授, 主要从事混凝土结构抗灾的研究. E-mail: yuyexu@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50908091); 福建省自然科学基金资助项目(2012J05099, 2012J01221); 福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划资助项目(11FJRC03)

采用理想弹塑性模型. 混凝土采用塑性损伤本构模型, 经反复试算建议了塑性势能方程和屈服面方程的基本参数取值: 膨胀角为 45° ; 流动偏心率为 0.1; 混凝土双轴等压屈服强度与单轴抗压强度比值为 1.16; 拉压子午线上第二应力不变量比值为 $2/3$. 混凝土的受拉软化性能采用混凝土破坏能量准则描述, 对于 C20 混凝土, 断裂能取 $40\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$; 对于 C40 混凝土, 断裂能取为 $120\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$; 对于其他等级混凝土, 断裂能通过内插或外插得到^[10]. 高温后混凝土的受压应力-应变关系采用陆洲导建议的模型^[11].

1.3 边界条件和分析步骤

利用 ABAQUS 软件进行高温下温度场分析. 升温前, 试件内部各点温度均匀, 且等于环境温度. 升降温过程中, 环境温度一般取 ISO 834 标准升降温曲线, 但与试验结果对比时, 环境温度取试件明火试验时炉膛内实测升降温曲线, 炉壁温度取为 0.9 倍的炉膛温度. 受火面的对流换热系数取 $25\text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$, 辐射系数取 $0.5\text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$; 未受火面的对流换热系数取 $9\text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$. 钢筋与混凝土之间采用点面 Tie 约束, 使得不同材料在几何位置相同的单元节点处具有同样的温度.

由于高温后钢筋和混凝土材料的本构关系主要与各点经历的最高过火温度有关, 因此, 利用 Python 编程语言对高温下温度场分析结果进行后处理. 编制 1 个循环嵌套程序, 对每个节点在每个分析步中经历的温度进行比较, 提取模型中各节点的编号和经历的最高过火温度存入可供后续计算读取的 temp.fil 文件, 将该文件从预定义场中导入 step-1 中, 作为火灾后推覆过程模拟的初始条件.

利用 ABAQUS 软件进行高温后混凝土短柱推覆过程的数值模拟. 试件底端按固定端约束, 分 2 个荷载步施加作用: 1) 建立参考点 RP1 与加载面耦合, 将竖向荷载施加于参考点上并保持恒定; 2) 建立参考点 RP2 与水平加载面耦合, 在 RP2 点上施加位移曲线进行水平位移控制加载. 通过建立参考点与加载面耦合可以避免直接施加集中力, 导致加载点过早开裂或压碎造成的收敛困难.

1.4 计算结果及分析

文献[7]进行了 7 根明火加热后钢筋混凝土短柱试件和 1 根未受火对比试件的低周反复荷载试验. 试件的截面尺寸为 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}$, 纵向钢筋采用对称配筋, 每侧配置 $3\Phi 20$, 纵筋配筋率为 2.79%, 纵筋保护层厚度为 30 mm, 箍筋采用 $\Phi 8@100$, 体积配箍率为 0.837%.

利用 ABAQUS 计算的温度-时间($\theta-t$)关系曲线与文献[7]的试件 Z2 和 Z4 中埋设的各测点实测结果对比, 如图 2 所示. 从图 2 可以看出: 1) 温度场分析结果与试验结果大体上吻合; 2) 数值模拟结果与试验结果之间存在误差的主要原因是数值模拟中未考虑水分蒸发和迁移的影响, 热电偶的埋设位置误差、热工参数本身存在一定离散性等原因也会造成一定误差.

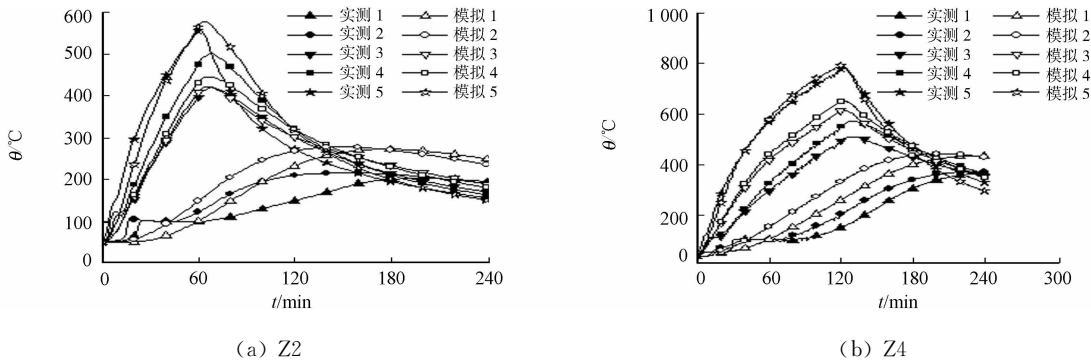


图 2 温度-时间关系曲线的数值模拟结果与试验结果的对比

Fig. 2 Comparison between numerical results and experimental results of the temperature-time curves

火灾后混凝土短柱受剪承载力的计算结果与文献[7]中试件 Z2~Z8 试验结果的对比情况, 如表 1 所示. 表 1 中: t_f 为受火时间; n 为轴压比; λ 为剪跨比; d 为箍筋直径; s 为箍筋间距; V_u 为受剪承载力实

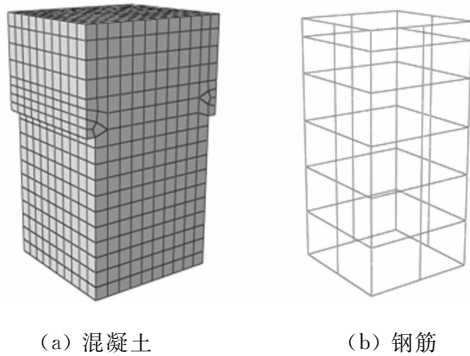


图 1 试件的有限元模型

Fig. 1 Finite element model of the specimens

测值; V_u^c 为受剪承载力计算值; η 为计算值与实测值之间的相对误差. 从表 1 中可以看出:1) ABAQUS 对受剪承载力的模拟值与实测值吻合较好;2) 受剪承载力的计算值总体上略小于实测值,这可能是在温度场分析时未能考虑混凝土内水分蒸发和迁移的影响,导致内部混凝土最高过火温度的计算结果偏高,以及数值计算过程中未考虑过火温度对混凝土断裂能的影响.

表 1 受剪承载力的计算结果与试验结果的对比

Tab. 1 Comparison between numerical results and experimental results of shear strength

试件编号	t_f/h	n	λ	d/mm	s/mm	V_u^c/kN	V_u^e/kN	$\eta/\%$
Z2	1.0	0.2	1.78	8	100	297.4	273.6	-8.0
Z3	1.5	0.2	1.78	8	100	269.5	247.6	-8.1
Z4	2.0	0.2	1.78	8	100	230.8	219.3	-5.0
Z5	1.0	0.1	1.78	8	100	267.3	238.4	-10.8
Z6	1.0	0.3	1.78	8	100	288.3	294.0	2.0
Z7	1.5	0.2	1.58	8	100	284.2	281.9	-0.8
Z8	1.5	0.2	1.98	8	100	251.4	224.2	-10.8

火灾后混凝土短柱试件单向推覆过程的力-位移($F-\Delta$)关系曲线的计算值与文献[7]中试件 Z2~Z8 试验结果的对比情况,如图 3 所示. 从图 3 可以看出:ABAQUS 模拟的力-位移关系曲线的上升段趋势与试验值大致吻合,但模拟曲线的上升段斜率相对偏大,且下降段不明显. 力-位移关系曲线的试验值与计算值的差异除了上述最高过火温度计算的误差外,还可能由下列原因引起:1) 选择的火灾后材料本构关系与实际情况存在一定差异;2) 数值模拟未考虑钢筋与混凝土之间滑移和混凝土压碎、脱落的影响,这会使上升段斜率偏大.

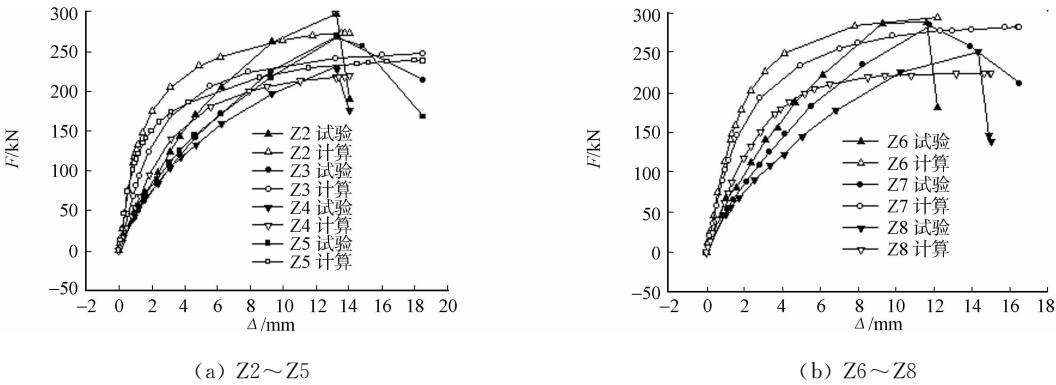


图 3 力-位移关系曲线的数值模拟结果与试验结果的对比

Fig. 3 Comparison of shear strength between numerical simulation and simplified calculation

2 影响因素分析

作为初步探讨,以三面受火后普通混凝土方形柱为研究对象,受火面的环境温度遵循 ISO 834 标准升降温曲线. 通过典型算例,分析水平力方向、受火时间、轴压比、剪跨比、截面尺寸、箍筋间距对受火后混凝土短柱受剪承载力的影响规律. 算例的基本条件:截面尺寸 a 为 300 mm;箍筋为 $\phi 8@100$;纵筋为 8 $\phi 20$;剪跨比 λ 为 1.78;受火时间 t_f 为 1 h;轴压比 n 为 0.2;混凝土保护层厚度 c 为 30 mm;纵筋与箍筋的屈服强度 f_y 分别为 484,425 MPa;混凝土立方体抗压强度 f_{cu} 为 41.1 MPa. 当考察某些参数变化对受火后混凝土短柱受剪承载力的影响时,该部分参数再补充考虑其他取值情况.

对于三面受火的方式,当水平力沿对称轴方向时,水平力的方向存在 2 种可能,如图 4 所示. 图 4 中:方向 1 的受拉侧未受火,方向 2 的受压侧未受火. 2 种水平力方向下推覆过程的力-位移曲线,如图 5 所示. 从图 5 可以看出:1) 2 个方向的力-位移关系曲线大致重合,水平力的方向对三面受火后混凝土短柱推覆过程影响较小;2) 方向 1 的受剪承载力略小于方向 2,二者相差 1.4%. 水平荷载通常是反复荷载,受剪承载力是 2 个方向的较小值,因此,在后续的受剪承载力计算分析中,水平力的方向取方向 1.

三面受火后混凝土柱的受剪承载力 V_u 随受火时间 t 的变化情况,如图 6 所示. 从图 6 可以看出:三

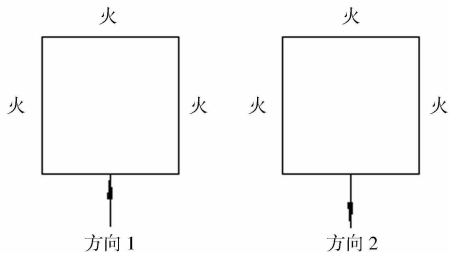


图 4 水平力加载方向

Fig. 4 Direction of horizontal force

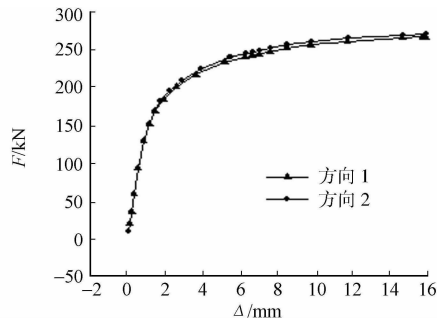


图 5 不同水平力方向下力-位移关系曲线

Fig. 5 Force-displacement curves for different load directions

面受火后短柱的受剪承载力随受火时间的增加近似呈线性降低。

三面受火后混凝土柱的受剪承载力 V_u 随轴压比 n 的变化情况,如图 7 所示。从图 7 可以看出:火灾后混凝土短柱的受剪承载力,当轴压比小于 0.3 时,随轴压比的增大而线性增大;当轴压比为 0.3~0.5 时,变化不大;当轴压比大于 0.5 时,随轴压比的增大反而下降。可见,轴压比在一定范围内对柱子的受剪承载力是有利的,这与未受火时轴压力对混凝土短柱受剪承载力的影响规律一致。

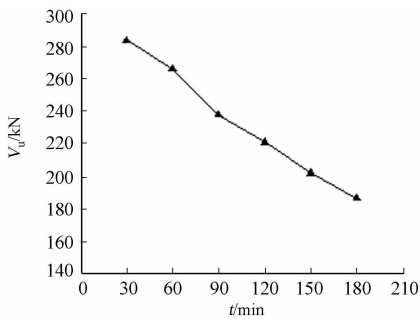


图 6 受剪承载力随受火时间的变化情况

Fig. 6 Variation of shear strength with fire exposure time

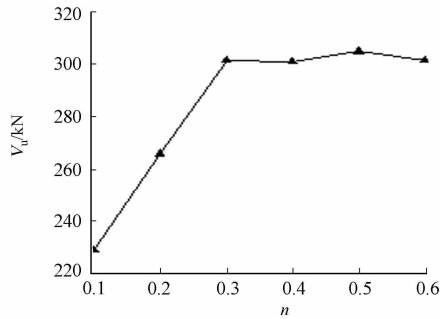


图 7 受剪承载力随轴压比的变化情况

Fig. 7 Variation of shear strength with axial compressive ratio

三面受火后混凝土柱的受剪承载力 V_u 随剪跨比 λ 的变化情况,如图 8 所示。从图 8 可以看出:火灾后柱子的受剪承载力随剪跨比的增大而降低。三面受火后混凝土柱的受剪承载力 V_u 随方形柱截面尺寸 a 的变化情况,如图 9 所示。从图 9 可以看出:火灾后柱子的受剪承载力随截面尺寸的增大呈线性增加。三面受火后混凝土柱的受剪承载力 V_u 随箍筋间距 s 的变化情况,如图 10 所示。从图 10 可以看出:火灾后柱子的受剪承载力随箍筋间距的增大呈线性降低。

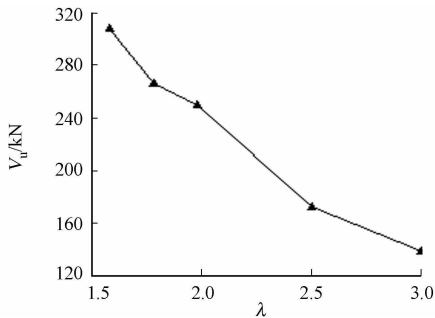


图 8 受剪承载力随剪跨比的变化情况

Fig. 8 Variation of shear strength with shear span ratio

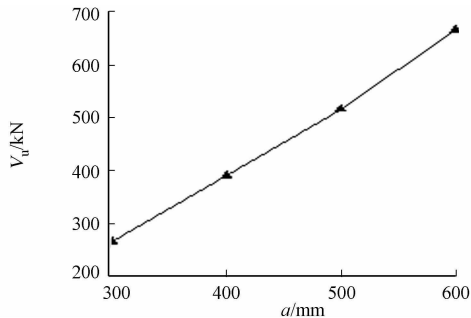


图 9 受剪承载力随截面尺寸的变化情况

Fig. 9 Variation of shear strength with sectional dimension

3 三面受火后混凝土柱受剪承载力的实用计算式

借鉴文献[12]中未受火钢筋混凝土柱受剪承载力的计算公式和第 2 节中分析得到的各参数的影响

规律,建议采用下式计算三面受火后混凝土柱的受剪承载力 V_u ,即

$$V_u = 0.9 \frac{1.75}{\lambda + 1} k_c f_t b h_0 + 0.9 f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + 0.07 N. \quad (1)$$

式(1)中: f_t 为混凝土轴心抗拉强度的设计值; f_{yv} 为箍筋抗拉强度的设计值; b 为柱截面的宽度; h_0 为柱截面的有效高度; A_{sv} 为配置的箍筋截面面积; s 为箍筋的间距; N 为与剪力设计值 V 相应的轴向压力设计值,当 N 大于 $0.3k_c f_c A$ 时,取 $0.3k_c f_c A$,此处, A 为构件的截面积, f_c 为混凝土轴心抗压强度的设计值, k_c 为三面受火后混凝土截面抗压强度的平均折减系数.式(1)中系数 k_c ,0.9(第二项式)是考虑火灾高温对混凝土、箍筋受剪贡献的降低.第一项式中 0.9 是考虑三面受火后混凝土短柱发生不对称烧损,截面的极强中心朝方向 1 的受拉侧偏移,相当于增大竖向荷载的偏心距,使受剪承载力降低.

将混凝土截面划分为很多网格,按文献[7]中给出的方法,利用有限元模型计算出混凝土截面内每个网格的最高过火温度,并代入火灾后混凝土的抗压强度公式,算出每个网格火灾后混凝土的抗压强度,进而计算出三面受火后混凝土截面抗压强度的平均折减系数 k_c . 其计算结果如表 2 所示.对于方形柱的其他截面尺寸和受火时间,通过查表插值可以算得 k_c .

对表 2 中的数据采用统计产品与服务解决方案(SPSS)软件进行非线性回归,可以得到 k_c 与截面尺寸 a ,受火时间 t 的关系式为

$$k_c = 0.747 + 0.953a - 0.294t + 0.0179t^2 - 0.799a^2 + 0.206at. \quad (2)$$

式(2)中: a,t 的单位分别为 m,h. 表 2 中的数据和式(2)的计算结果总体上吻合较好:二者的相关系数、后者与前者之比的平均值和均方差分别为 0.996,1.001 和 0.015.这表明式(2)具有较好的精度,可用于 k_c 的计算.

按照第 1 节的方法,利用 ABAQUS 进行 6 根混凝土柱三面受火后推覆过程分析,可计算得到其受剪承载力.利用简化计算公式(1)计算得到的受剪承载力 $V_{u,2}$ 与 ABAQUS 模拟计算的 6 根混凝土柱的受剪承载力 $V_{u,1}$ 的对比,如表 3 所示.表 3 中:试件编号 Zxxx-yyy,xxx 表示受火时间,单位为 min,yyy 表示轴压比.算例的基本参数:截面尺寸为 400 mm×400 mm;箍筋为 $\phi 8@100$;纵筋为 8 $\phi 20$;剪跨比 λ 为 1.78;受火时间为 60,120 min;轴压力 N 为 250,500,750 kN;纵筋与箍筋的屈服强度 f_y 分别为 484,425 MPa;混凝土立方体抗压强度 f_{cu} 为 41.1 MPa;混凝土的轴心抗拉强度 f_t 为 2.43 MPa.从表 3 中可以看出:式(1)可用于三面受火后钢筋混凝土柱受剪承载力的实用计算.

表 3 受剪承载力模拟结果与简化计算结果的对比

Tab. 3 Comparison of simulation and simplified calculated shear strength

试件号	$V_{u,1}/\text{kN}$	$V_{u,2}/\text{kN}$	$V_{u,1}/V_{u,2}$	试件号	$V_{u,1}/\text{kN}$	$V_{u,2}/\text{kN}$	$V_{u,1}/V_{u,2}$
Z60-0.1	338.6	315.4	1.07	Z120-0.1	316.0	286.5	1.10
Z60-0.2	391.4	332.9	1.18	Z120-0.2	355.6	304.0	1.17
Z60-0.3	438.7	350.4	1.25	Z120-0.3	387.0	321.5	1.20

4 结论

基于有限元软件 ABAQUS 建立的火灾后混凝土短柱推覆过程的数值模型,分析相关因素对三面受火后混凝土短柱受剪承载力的影响规律,并借鉴现有规范公式,提出三面受火后混凝土柱受剪承载力的实用计算方法,可以得到以下 3 点主要结论.

1) 有限元软件 ABAQUS 对火灾后混凝土柱受剪承载力的预测较准.

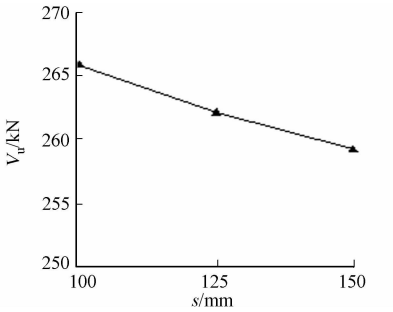


图 10 受剪承载力随箍筋间距的变化情况

Fig. 10 Variation of shear strength with stirrup spacing

2) 当水平力沿着三面受火后混凝土柱的对称面施加时,水平力的加载方向对三面受火后柱的受剪承载力影响不大.受火后混凝土短柱的受剪承载力随受火时间的增加、箍筋间距的增大近似呈线性降低,随截面尺寸的增大呈线性增加,随剪跨比的增大而降低.当轴压比小于 0.3 时,随轴压比的增大而线性增大;当轴压比为 0.3~0.5 时,变化不大;当轴压比大于 0.5 时,随轴压比的增大而降低.

3) 提出的三面受火后混凝土柱受剪承载力的计算式具有一定的安全保证率,可用于该类构件受剪性能的损伤评定.

参考文献:

- [1] 徐玉野,王全凤.火灾后钢筋混凝土柱的剩余承载力研究[J].工程力学,2010,27(2):84-89.
- [2] 唐跃峰,刘明哲,于长海,等.火灾后钢筋混凝土柱剩余承载力研究[J].宁波大学学报:理工版,2011,24(4):112-115.
- [3] 吴波,李毅海.轴向约束钢筋混凝土柱火灾后剩余轴压性能的试验研究[J].土木工程学报,2010,43(4):85-91.
- [4] 吴波,马忠诚,欧进萍.高温后钢筋混凝土柱抗震性能的试验研究[J].土木工程学报,1999,32(2):53-58.
- [5] CHEN Y H, CHANG Y F, YAO G C, et al. Experimental research on post-fire behavior of reinforced concrete columns[J]. Fire Safety Journal, 2009, 44(5): 741-748.
- [6] HUO Jing-si, ZHANG Jia-guang, WANG Zhi-wei, et al. Effects of sustained axial load and cooling phase on post-fire behavior of reinforced concrete stub columns[J]. Fire Safety Journal, 2013, 59(7): 76-87.
- [7] 徐玉野,杨清文,吴波,等.高温后钢筋混凝土短柱抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2013,34(8):12-19.
- [8] 林燕卿,徐玉野,杨清文,等.火灾后混凝土短柱的滞回性能和损伤评定[J].华侨大学学报:自然科学版,2013,34(5):563-569.
- [9] LIE T T, CELIKKOL B. Method to calculate the fire resistance of circular reinforced concrete columns[J]. ACI Materials Journal, 1991, 88(1): 84-91.
- [10] 王玉钊,傅传国. ABAQUS 结构工程分析及实例详解[M].北京:中国建筑工业出版社,2010:127-131.
- [11] 陆洲导,朱伯龙,熊海贝,等.钢筋砼框架火灾后的加固修复研究[J].四川建筑科学研究,1995,21(3):7-12.
- [12] 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,2011:56-57.

Numerical Calculation for the Shear Strength of Concrete Short Columns after 3-Face Heating

LIN Bi-lan¹, LI Dan², XU Yu-ye²

(1. College of Materials Science and Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;

2. Key Laboratory for Structural Engineering and Disaster Prevention of Fujian Province, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: A numerical model for the push-over analysis of concrete short columns after fire was developed by ABAQUS, and some key finite element model parameters for the short columns were suggested through the numerical analysis of the tests of seven columns. The effects of horizontal force direction, fire exposure time, axial compressive ratio, shear span ratio, sectional dimension and stirrup spacing on the shear strength of concrete short columns after 3-face heating were investigated based on the numerical model. The average reduction coefficient of compressive strength in concrete sections after 3-face heating was calculated by a self-developed finite element program, and a practical calculation method for the shear strength of concrete columns after 3-face heating was proposed. The results indicate that: the shear strength of concrete short column after fire is well predicted by the established model.

Keywords: reinforced concrete; short column; fire; shear strength; numerical model

(责任编辑:钱筠 英文审校:方德平)

采用类桁架连续体的桁架结构拓扑优化方法

李霞, 周克民

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为了将非均匀各向异性类桁架连续体离散化为工程实际需要的杆系结构, 分析了类桁架结构的性质和集中杆的确定方法, 建立了类桁架结构的离散化方法. 算例显示: 采用先构造类桁架连续体, 再离散化为杆系结构的方法是可行的, 得到非常接近解析解的结果.

关键词: 结构优化; 拓扑优化; 类桁架连续体; 离散化

中图分类号: TU 323

文献标志码: A

Michell 桁架是精确的理论解, 经常被用来检验各种数值优化方法的正确性, 但由于没有一般的求解方法, 求解困难^[1-3]. 因此, 许多数值方法大多采用有限元数值分析方法^[4-7]. 为了克服数值不稳定问题, 陆续提出了周长控制、梯度控制等方法^[8]. 这些方法不仅增加了计算量, 而且计算过程中的一些控制参数事先难以估计, 不适当的参数可能会得不到有意义的结果. Michell 理论已经揭示了拓扑优化结构的类桁架性质, 拓扑优化结构理论上一般是非均质各向异性连续体. 因此, 上述优化方法所采用的各向同性材料无法精确描述这种拓扑优化结构. 一些学者^[9-11]将问题完全放松, 采用一般各向异性材料模型. 但是这种材料与工程结构没有明确的对应关系, 后期处理困难, 而且也没有反映类桁架结构的本质. 本文提出有限元优化类桁架连续体方法, 解决了求解困难^[12-15].

1 类桁架连续体离散化

1.1 类桁架连续体中杆件的分布性质

按照 Michell 理论, 拓扑优化结构是由无限细、无限密杆件构成的类桁架连续体. 习惯上将杆件在单工况应力约束下的优化分布区域分为 5 种: 单向拉伸(R^+)、单向压缩(R^-)、各向均匀拉伸(S^+)、各向均匀压缩(S^-)和两向分别拉压(T). 如果不区分拉压, 去掉上角标中的符号, 可归纳为 3 类: 单向拉压(R , 杆件沿拉压方向), 各向均匀拉压(S , 杆件沿任意方向)和两向分别拉压(T , 杆件沿拉压两个方向). 对于多工况或其他约束, 杆件优化分布性质有所不同. 将以上杆件优化分布划分方式推广到更一般的情况, 其中: S 区域仍然表示杆件任意分布; R 区域表示杆件沿某个单一方向分布; 而 T 区域表示杆件沿某几个确定方向(不限于 2 个, 也不一定正交)分布. 这种划分方式可以包括杆件所有分布情况. S 区域由于杆件优化方向是任意分布的, 所以不需要研究其优化方向, 实际优化问题中也不常见. 但是, 实际优化问题中会经常遇到 S 区域退化为 1 个孤立的点的特殊情况, 这是一个比较特殊的情况. 例如当许多杆件汇交于一点时就会出现这种情况, 文中将这样的点称为“奇异点”.

在优化的杆件分布场中存在分布杆件和集中杆件两种情况. 分布杆有无限多, 不可能都保留. 但集中杆数量有限, 全部是平衡必需的, 应该全部保留.

1.2 集中杆件的选择

一个力学问题有力和位移两种边界条件, 在有限元计算中, 各种荷载一般都要等效到结点上, 形成

收稿日期: 2013-12-09

通信作者: 李霞(1970-), 女, 实验师, 主要从事结构优化的研究. E-mail: xlixia@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11172106)

结点集中力. 在有限元分析完成后, 位移边界条件也可以转化为结点集中力. 一个优化问题实际上就是设计这些集中力的优化传递路径. 因此, 文中只讨论结点集中力的情况. 结点集中力需要集中杆件传递, 或者需要无限多汇交于一点的分布杆件. 当无限多的分布杆件汇交于一点时, 杆件在汇交点位置的方向不确定, 该点就是奇异点(S 区). 因此, 集中力作用点(包括位移约束结点, 以下不再特别说明)的位置必然有集中杆件或是奇异点. 从平衡的角度看, 由于集中杆件也可以理解为集中力, 所以集中杆件的端部必然是集中力或奇异点, 选择所有集中力作用点和奇异点作为集中杆可能经过的位置, 在这些位置上布置杆件就可以将所有集中杆件选择上.

确定奇异点位置的杆件方向比较困难, 需要进一步分析. 分布杆的奇异点位置的杆件方向不确定, 由于集中杆的两端只能是集中力或奇异点, 而集中力和奇异点的数量是有限的, 所以为了将两个端点都位于奇异点位置的集中杆件也选上, 在每个奇异点位置分别选择指向其他每个奇异点方向的杆件.

1.3 分布杆件的选择

无论是集中杆件还是分布杆件, 由于仅考虑轴力而不考虑弯矩作用, 曲杆仅在杆端力的作用下不能平衡, 必须借助横向分布杆件. 因此, 在曲杆的横向应该有分布杆件.

在形成杆系结构过程中, 分布杆件选择要适当. 杆件选多了可以减少误差, 更接近理论解, 但过多的杆件并不实用. 选择的标准是用最少的杆件实现最小的误差.

分布杆与集中杆结构的体积误差, 如图 1 所示. 图 1(a) 中: 曲线 AB 表示一段集中曲杆; 曲率半径为 R ; 圆心角为 2α ; 圆心为 O ; A, B 两端的集中力 F 分别为沿圆弧在 A, B 点的切向. 如果曲杆 AB 不受弯矩作用, 在扇形 ABO 区域内应有径向分布杆, 即 Michell 桁架的一个扇形段, 使得圆弧杆的横向受到分布应力 σ 的作用, 它传递 A, B 和 O 点集中力在理论上的最优传力路径^[13]. 根据圆弧杆 AB 的竖向平衡条件, 可以知道这些分布杆件的合力作用在 O 点, 大小为 $2F\sin\alpha$. 假设这个扇形区域内有均匀径向应变 ϵ , 材料的弹性模量为 E , 那么, 所需材料体积为 $V_m = (4FR/E\epsilon)\alpha$.

1.4 离散杆件系统体积误差估计

采用图 1(b) 所示的三角形离散桁架来代替图 1(a) 所示的理论上的分布杆, 由平衡关系, 图 1(b) 中各杆件的轴力为

$$F_1 = \frac{F}{\cos \alpha}, \quad F_2 = F \tan \alpha. \quad (1)$$

在同样的应变场下, 三角形离散桁架的体积为

$$V_D = \frac{1}{E\epsilon} \sum F_i l_i = \frac{1}{E\epsilon} (F_1 l_1 + 2F_2 R) = \frac{4FR}{E\epsilon} \tan \alpha. \quad (2)$$

由式(2)减式(1), 得到两个结构的体积误差, 即

$$\Delta V = \frac{4FR}{E\epsilon} (\tan \alpha - \alpha). \quad (3)$$

如果离散结构的杆件较多, 其圆心角不会太大, 可以利用三角函数的展开式, 即

$$\tan \alpha \doteq \alpha + \alpha^3/3, \quad (4)$$

将式(4)代入式(3), 得

$$\Delta V = \frac{4FR}{3E\epsilon} \alpha^3. \quad (5)$$

由图 1(a) 的平衡关系, 得

$$\sum F_y = 0 : \int_{-\alpha}^{\alpha} \sigma_r R t \cos \varphi d\varphi = 2F \sin \alpha. \quad (6)$$

式(6)中: t 是径向杆件在环向截面上的杆件密度. 作为近似估计, 假设密度是线性变化, 则

$$t(\varphi) = t_1 + \frac{\varphi + \alpha}{2\alpha} (t_2 - t_1), \quad dt(\varphi) = \frac{t_2 - t_1}{2\alpha} d\varphi. \quad (7)$$

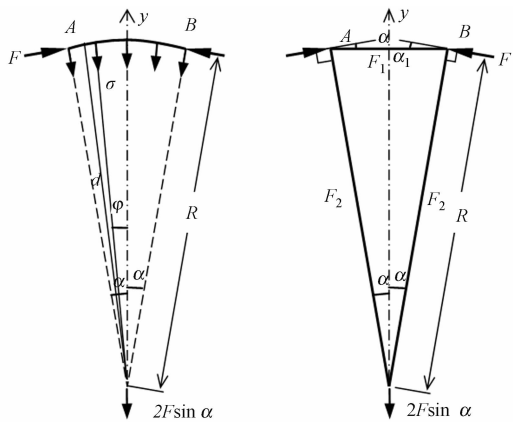


图 1 分布杆与集中杆结构的体积误差
Fig. 1 Volume error between distributed and concentrated members

将式(7)代入式(6)的积分表达式,得

$$\int_{-\alpha}^{\alpha} \sigma_p R \cos \varphi t d\varphi = E\epsilon R \int_{-\alpha}^{\alpha} t d\sin \varphi = E\epsilon R t \sin \varphi \Big|_{-\alpha}^{\alpha} - E\epsilon R \int_{-\alpha}^{\alpha} \sin \varphi dt =$$
$$E\epsilon R (t_2 + t_1) \sin \alpha - E\epsilon R \frac{t_2 - t_1}{2\alpha} \int_{-\alpha}^{\alpha} \sin \varphi d\varphi = E\epsilon R (t_2 + t_1) \sin \alpha.$$

(8)

再将式(8)代入式(6)中,得

$$E\epsilon R (t_2 + t_1) = 2F.$$

(9)

最后,将式(9)代入式(5)中,得

$$\Delta V = \frac{2}{3} R^2 \alpha^3 (t_2 + t_1) = \frac{4}{3} \alpha s^2 \bar{t}.$$

(10)

式(10)中: s 为弧; $\bar{t}$ 为径向杆件的横截面平均面积.

结点 i 位置的径向杆件在环向截面的密度记作为 t_i , 角度为 α_i . 结点 i 与结点 $i-1$ 之间的单元边界长为 s_i . 结点 1 到 k 之间径向杆件的平均环向截面面积的计算式为

$$\bar{t} = \sum_{i=1}^k s_i (t_i + t_{i-1}) / \sum_{j=1}^k s_j.$$

(11)

将式(11)代入式(10)中,得

$$\Delta V = \frac{2}{3} (\alpha_k - \alpha_0) \sum_{j=1}^k s_j \cdot \sum_{i=1}^k s_i (t_i + t_{i-1}).$$

(12)

由离散杆系代替连续分布杆件引起的体积增加量(ΔV)作为控制条件, 决定离散杆件的选择.

2 算法的实现

2.1 离散杆系结构

由于集中杆件的端部一定是集中力或奇异点, 所以在每个集中力作用点布置杆件, 并且所有奇异点之间连接杆件就可以保证所有集中杆件都被选择上. 由于分布杆件无限多, 不能全部保留, 只能保留相距一定间距的部分杆件. 将其余的分布杆件集中到被保留的杆件上. 确定杆件间距的依据就是使式(12)为常数. 此外, 还有 2 点需要说明.

1) 在奇异点附近, 杆件向奇异点汇交, 因此该区域的杆件变化较大. 因为集中力作用点附近会有应力集中, 计算误差也会较大. 根据奇异点的性质, 在奇异点附近的杆件方向做特别的处理. 当杆件进入奇异点附近时, 杆件方向一律直接与奇异点相连. 进入奇异点附近的标准是杆件与奇异点的距离小于单元边长的一半.

2) 由于存在数值计算误差, 没有材料部分的杆件密度会比 0 大一些. 特别是对于位移约束结点, 设定一个阈值, 当密度低于阈值时认为没有杆件了.

2.2 奇异结点的判断

在形成离散结构过程中, 判断奇异点是一个比较困难的问题. 从理论上讲, 杆件汇交点就是奇异点. 但是, 由于数值计算误差的存在, 计算结果并不能保证相邻几个结点的杆件恰好相交于奇异点. 奇异点判断, 如图 2 所示. 图 2 中: 假设结点 i 是奇异点; 围绕结点 i 的所有结点(称为相邻结点)为 $j, j \in J_i$; 相邻结点与结点 i 同属于一个单元, 包括没有边联接的结点 2; 密度足够大的杆件都汇交结点 i . 奇异点是汇交点, 所以密度应该比周围的密度大. 结点 j 密度最大方向杆件所在直线到结点 i 的距离应足够小. 两个连续的相邻点和奇异点就构成属于 S 区域的一个子域, 为了避免误判, 要求至少存在 2 个这样的连续子域.

2.3 确定潜在杆件的过程

1) 选择所有集中力作用结点包括位移约束结点, 沿着杆件密度足够大的方向画线段, 交于单元的边界作为线段终点. 由该线段终点所在单元边界两端的结点处的杆件密度和方向, 插值得到线段终点处的杆件密度和方向.

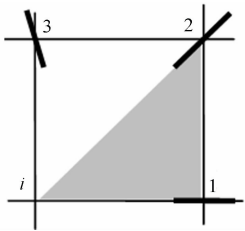


图 2 奇异点判断

Fig. 2 Judgment of singular node

- 2) 为了提高计算精度,取线段起点和终点的杆件方向的平均值,从起点重新画该直线,得到修正的线段.
- 3) 以该线段终点为下一线段的起点画下一段线段,直到域边界或密度过小,得到若干直线段连接而成的折线.
- 4) 重新沿该折线逐段计算式,累计达到指定值标记一个“结点”;再计算下一段,得到若干结点.
- 5) 分别从这些结点开始,沿横向画另一组折线;
- 6) 重复过程 1)~3),得到一个曲线网络.曲线网络相交点作为结点,用直线代替两个结点之间的折线构成离散桁架.

3 算例

力学模型,如图 3 所示.图 3 中:矩形设计域左边固定;上边作用两个集中力.按照满应力准则,任意位置的应变不超过允许应变.当离散后的结构杆件足够多,应变差异应该不大由于拓扑优化结果与力和尺寸大小无关.集中力(n)的大小分别取 $-2, -1, 0, 2$,当 n 从 0 到 2 之间变化时,拓扑优化结果差别不大.因此,没有给出 $n=1$ 的结果.采用 40×20 矩形单元,优化的杆件分布场和离散桁架,如图 4 所示.图 4 中:左列给出杆件的优化分布;线段长度表示杆件密度;线段方向表示杆件方向;右列给出对应的拓扑优化离散杆系结构.离散杆系结构中的杆件数量可以根据需要选择,粗线表示压杆,细线表示拉杆.结果与理论解^[2,4] 比较接近.

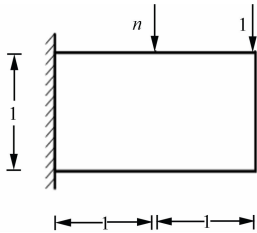


图 3 力学模型
Fig. 3 Mechanics model

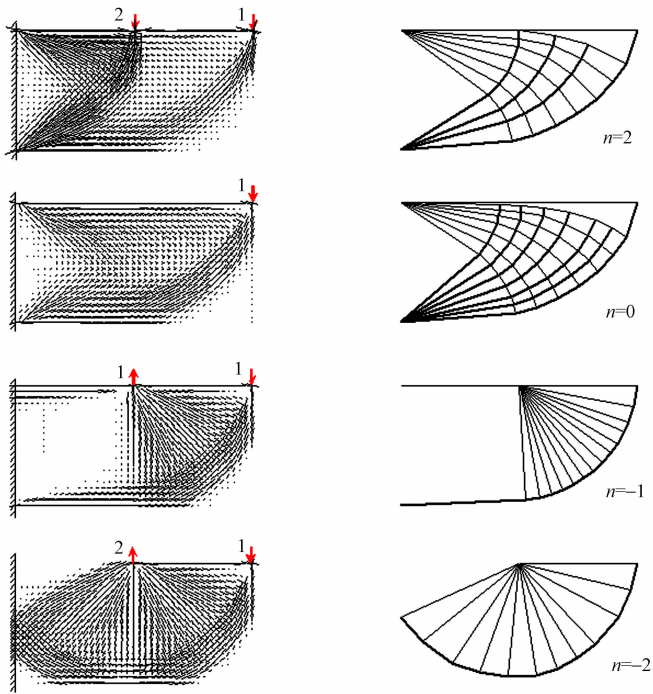


图 4 优化的杆件分布场和离散桁架
Fig. 4 Optimum truss-like continua and their discrete truss

4 结束语

研究了基于类桁架材料模型的杆系结构拓扑优化方法.类桁架优化过程中没有抑制中间密度,完全避免了数值不稳定问题.杆系结构通过选择类桁架中的部分杆件形成,杆件的数量可以直观地控制,从而得到满足工程需要的结构.将桁架结果按照截面相等的原则转化为等厚带孔板,结果同样会比均匀化等以单元表示结构拓扑的方法更精确,效率更高,具体实现方法是下一步要进行的工作.

参考文献：

[1] MICHELL A G M. The limits of economy of material in frame structure[J]. Philosophical Magazine, 1904, 8(6): 589-597.

[2] LEWINSKI T,ZHOU M,ROZVANY G I N. Extended exact solutions for least-weight truss layouts (Part I): Cantilever with a horizontal axis of symmetry[J]. International Journal of Mechanical Sciences,1994,36(5):375-398.

[3] ESCHENAUER H A,OLHOFF N. Topology optimization of continuum structures: A review[J]. Applied Mechanics Reviews,2001,54(4):331-389.

[4] ROZVANY G I N. Exact analytical solutions for some popular benchmark problems in topology optimization[J]. Structural Optimization,1998,15(1):42-48.

[5] ROZVANY G I N,BENDSOE M P. KIRSCH U. Layout optimization of structures[J]. Applied Mechanics Reviews, 1995,48(2):41-119.

[6] BENDSOE M P,KIKUCHI N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,1988,71(2):197-224.

[7] XIE Yin-min,STEVEN G P. A simple evolutionary procedure for structures optimization[J]. Computers and Structures,1993,49(5):885-896.

[8] SIGMUND O,PETERSSON J. Numerical instabilities in topology optimization: A survey on procedures dealing with checkerboards, mesh-dependencies and local minima[J]. Structural Optimization,1998,16(1):68-75.

[9] HORNLEIN H R E M,KOCVARA M,WERNER R. Material optimization:bridging the gap between conceptual and preliminary design[J]. Aerospace Science and Technology,2001,5(8):541-554.

[10] HSU Y,SHO M,CHEN Chuan-tang. Interpreting results from topology optimization using density contours[J]. Computers and Structures,2001,79(10):1049-1058.

[11] MATSUI K,TERADA K. Continuous approximation of material distribution for topology optimization[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering,2004,59(14):1925-1944.

[12] ZHOU Ke-min,LI Xia. Topology optimization for minimum compliance using fiber-reinforced composite material model[J]. Structural Optimization,2006,37(1):49-56.

[13] ZHOU Ke-min,LI Jun-feng. Topology optimization of structures under multiple load cases using fiber-reinforced composite[J]. Structural Optimization,2008,38(5):525-532.

[14] PRAGER W. A note on discretized Michell structures[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,1974,3(3):349-355.

[15] ZHOU Ke-min,LI Jun-feng. The exact weight of discretized Michell trusses for a central point load[J]. Structural Optimization,2004,28(1):69-72.

Topology Optimization Method of Truss Structures
Using Truss-Like Continuum

LI Xia, ZHOU Ke-min

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

Abstract: The non-uniform anisotropic truss-like continuum was discretized to truss structure required in engineering. Based on the analysis of the character of truss-like structure and the technique to locate the concentrated members, the method to discretize truss-like continuum was established. Numerical examples illustrate that it is feasible that truss-like continuum is established first, and then it is discretized to form truss. Its result is very close to analytical solution.

Keywords: structural optimization; topology optimization; truss-like continuum; discrete

(责任编辑：陈志贤 英文审校：方德平)

混凝土桥梁全寿命的设计方法

梁巍^{1,2}, 卓卫东¹

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108;
2. 福建船政交通职业学院 道路工程系, 福建 福州 350007)

摘要: 以混凝土桥梁为研究对象,比较了当前具有代表性的两种桥梁全寿命设计方法的基本框架,以建立的桥梁全寿命设计基本分析流程为主线,归纳了各个主要环节的研究进展,指出各环节当前应用中存在的困难,并总结了目前桥梁全寿命设计中存在的问题。
关键词: 混凝土桥梁;全寿命设计;使用寿命;耐久性;成本分析
中图分类号: TU 723.3 **文献标志码:** A

我国桥梁在数量上已超越美国,成为世界上桥梁数目最多的国家,桥梁建设的水平步入了世界前列.但与此形成强烈反差的是,许多桥梁在建成后几年内就出现了钢筋锈蚀、混凝土开裂等现象.一些桥梁使用仅十多年就需要进行大修和加固,远远小于其预期寿命,同样的情况也曾经出现在欧美发达国家.严峻的现实使得国内外学者开始反思传统桥梁设计方法中只注重成桥状态,而忽视使用阶段;只注重强度设计,而忽视耐久性问题;只注重初始投资,而忽视后期巨大维护费用的弊端.由此提出了桥梁全寿命设计的理论与方法.鉴于此,本文在理清桥梁全寿命设计的基本思路和分析流程的基础上,分析其中各个关键环节现有的研究成果和存在的不足,提出相应可能的解决方法.

1 桥梁全寿命设计的分析流程

国内针对桥梁结构全寿命设计较具代表性的观点有以下两种.

1) 邵旭东等^[1]基于寿命周期成本,以桥梁构件性能预测模型为基础,利用优化设计,建立桥梁全寿命设计方法基本框架及分析流程.但其中没有明确桥梁的设计使用寿命,计算准确性取决于性能预测模型的精度,并且更侧重对方案本身的优化.分析过程复杂,计算求解工作量大,不易于对不同桥型方案进行比选,而更适于特殊恶劣环境条件下的桥梁结构设计以及桥梁长寿命周期的设计.

2) 陈艾荣等^[2]通过给定桥梁的整体使用寿命,对构件进行分级,提出全寿命设计方法、基本框架及分析流程.从桥梁设计的 3 个阶段和 6 个过程来理解全寿命设计的含义,侧重于从宏观概念、结构体系、构造措施来保证桥梁的性能.采用综合评价指数的方式,其计算准确性较为依赖设计者的经验,更适合于方案比选以及常规桥梁设计.

综合以上两种理论以及其他学者的相关成果,并结合桥梁的具体设计过程,可以得出桥梁全寿命设计的分析流程,如图 1 所示.

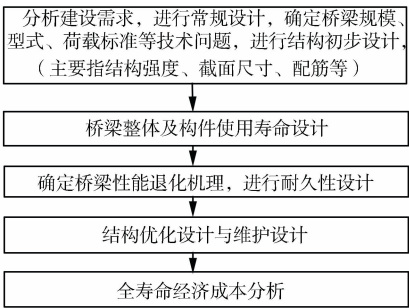


图 1 桥梁全寿命设计分析流程

Fig. 1 Analysis process of design method of bridge life cycle

应当明确的是,桥梁全寿命设计方法并不排斥依据现有规范进行的常规设计,而是针对其不足之处予以完善. 对于常规设计而言,当前各国的设计规范大多形成了以承载能力极限状态和正常使用极限状态来控制结构性能的基本理论.

2 桥梁设计使用寿命

2.1 现有的规范

由于对桥梁长期性能退化规律缺乏认识,以往的设计并不注重其设计使用寿命. 目前,我国桥梁设计规范中关于桥梁的设计使用寿命尚无明确的规定,仅在 GB/T 50476—2008《混凝土结构耐久性设计规范》中规定了“城市快速路和主干道上的桥梁以及其他道路上的大型桥梁、隧道、重要的市政设施等设计使用年限不低于 100 年,城市次干道和一般道路上的中小型桥梁,一般市政设施不低于 50 年”. 这一规定过于笼统,没有针对桥梁所处的自然环境条件和具体的功能要求进行细分,因而无法满足全寿命设计的要求.

2.2 使用寿命的分类

Somerville^[3]从使用寿命终结准则出发,将使用寿命划分成 3 类:1) 技术性使用寿命;2) 功能性使用寿命;3) 经济性使用寿命. 对桥梁的功能性使用寿命进行预测比较困难,因为通常会涉及到社会的发展和地区的规划. 金小川等^[4]从桥梁经济、社会变迁速度、车辆通行量、建筑材料等各方面论证了桥梁应缩短设计使用年限,但没有给出具体可行的操作方式. 对技术性使用寿命一般可以通过分析桥梁所处环境来预测和定义其性能退化模型^[5-6],而对经济性使用寿命必须在技术性使用寿命的基础上,结合成本-效益分析方法进行确定的相关研究较为少见.

2.3 简化确定方法

桥梁设计使用寿命的确定应在充分考虑以上 3 种使用寿命的相互影响基础上,根据重要程度、结构及材料本身的性能、周边的环境状况、现有的技术水平等因素,并综合考虑现有同类型桥梁整体及构件使用寿命规律的统计分析进行确定. 陈艾荣等^[7]分析了多个国家桥梁实际使用寿命的统计数据,将桥梁构件按其使用寿命特征划分成 4 类,给出了常规桥梁整体和构件的基础使用寿命建议值,在此基础上提出了考虑修正因素的桥梁典型构件使用寿命为

$$LS = LS_0 \times C_1 \times C_2 \times C_3. \tag{1}$$

式(1)中:LS 为桥梁结构或构件使用寿命建议值;LS₀ 为基础设计使用寿命建议值;C₁ 为气候影响系数;C₂ 为桥位小环境系数;C₃ 为养护系数. 这一公式大大简化了桥梁设计使用寿命的设计过程,但对于所处环境复杂、性能退化严重的桥梁,仍需进行特殊设计. 并且由于统计数据的时限性和技术进步的可能性,其基础使用寿命建议值应及时更新.

3 桥梁耐久性设计

随着对桥梁性能退化规律认识的不断深入,人们已逐渐开始意识到进行专门的耐久性设计的必要性. 李毓龙等^[7-8]分析了国内外有关混凝土桥梁的相关规范,认为各国规范都基本认同需根据特定环境来进行混凝土桥梁的耐久性设计,但在使用寿命、环境作用划分思路及细致程度分类、材料要求、防腐措施等方面的规定有较大的差别,且现有规范仍以原则规定和定性要求居多,定量计算和理论模型偏少. 因此,应考虑从耐久性设计基本方法入手,解决混凝土耐久性的问题.

现有对混凝土结构耐久性设计方法的研究主要基于随机动态可靠度^[9-10],该方法将结构耐久性失效的功能函数表示为

$$Z(t) = R(t) - S(t).$$

利用结构性能退化模型直接计算不同时刻 t 的抗力效应 $R(t)$ 与荷载效应 $S(t)$,用蒙特卡罗法求解对应时刻功能函数 $Z(t)$ 的可靠度. 这种方法形式简单、意义明确,且与我国现行桥梁设计规范中所采用的极限状态法保持一致,易为技术人员所接受与掌握,也是当今耐久性设计方法发展的趋势,但该方法的实现还有待于完善结构性能退化模型和耐久性评价体系两个方面的研究.

3.1 结构性能退化模型

我国当前桥梁建设以混凝土桥梁为主,现阶段混凝土桥梁性能退化研究取得的成果主要可分为材料和构件两个层次.材料层次的研究主要是考虑环境作用引起的混凝土性能退化,集中于混凝土碳化、氯离子侵蚀、冻融、钢筋锈蚀等几个方面^[11-13];构件层次的研究主要是应用材料层次研究的结果,分析构件在荷载作用 and 环境的共同影响下结构抗力的时变性,包括由于截面面积损失、钢筋锈蚀、钢筋与混凝土黏结性能降低等因素而导致的构件受力性能变化^[14-17].

总的来说,材料层次的研究目前已经取得了较为丰富的结果,但仍然以单一环境作用下的为主,多机理共同作用下的混凝土劣化性能,相关研究仍不成熟,缺乏可供实际分析的定量模型^[18-20].构件层次的研究主要集中于钢筋混凝土构件,对于桥梁结构中常用的预应力混凝土构件的相关报道较少,而且现有的研究大多限于其中的某一阶段,还需建立起“外部环境作用分析-混凝土性能退化/钢筋锈蚀-混凝土发生开裂-钢筋锈蚀急剧发展-混凝土裂缝宽度变大-构件承载能力降低”全过程分析的概念.

3.2 耐久性评价体系

耐久性评价体系的建立包含两个层次,一是耐久性评价指标的问题;二是耐久性评估方法的问题.

3.2.1 耐久性评价指标 采用哪些指标来衡量结构的耐久性,目前尚无统一的标准.我国现有规范仅仅是将使用环境进行粗略的分级后,以混凝土保护层厚度、水灰比、水泥用量、含气量和水泥种类等几个指标来作为评定的依据.但实际上,这些指标并不能完全表征结构耐久性的状况,也无法反映耐久性能的动态变化特征,并且不同的学者在研究过程往往也是从各自需要的角度出发,采用不同的指标如钢筋锈蚀量、裂缝宽度、使用寿命等来表示结构的耐久性^[13,18,21].

评价指标体系的缺失使得人们缺乏统一的标准来衡量结构的耐久性能,一些学者就这一问题从不同的角度进行了探讨.王玉倩等^[22]通过对国内外混凝土桥梁耐久性规范的调研,对耐久性指标进行了分类,提出了涵盖环境、材料、构件和结构 4 个层次,考虑设计、施工和检测 3 个阶段的混凝土桥梁耐久性指标体系,但没有给出各指标的限值.钟小平等^[23]采用基于性能的设计理论,将结构的耐久性按其重要性划分 3 个等级,并建议以目标可靠性指标、有害介质扩散深度、钢筋锈蚀率及锈胀裂缝宽度来作为耐久性能的控制指标,仅给出了可靠性指标的建议取值,对其他几种指标没有深入研究.高宇等^[24]以适修性或耐久性能转折点为界,提出了耐久性评价指标,综合考虑了各项耐久性影响因素,并结合检测数据与经验,建立了梁桥与拱桥在碳化、冻融、氯离子侵蚀 3 种环境下的耐久性指标体系.

3.2.2 耐久性评估方法 目前,相关研究多以单一某项耐久性指标达到或超过其限值来评估结构的耐久性极限状态,但实际上这并不能完全真实地反映结构的耐久性能,如钢筋混凝土梁发生性能退化时,其各项耐久性指标可能并没有达到或超过其限值,由于材料截面面积削弱、强度指标降低等综合因素影响,其承载能力小于外部荷载而发生失效.因此,除了单一指标限值外,还应该发展多指标综合评定方法.高宇等^[24]通过研究钢筋锈蚀、混凝土开裂、剥落等耐久性指标与构件承载力之间的关系,提出了一种以承载力下降相对量值为指标的综合指标评定法,为该问题提供了一种解决方法.

4 优化与维护设计

当桥梁寿命期内耐久性无法满足要求时,可通过优化设计或维护设计提高其初始性能或改变其性能退化过程,以保证结构符合要求.

4.1 优化设计

当桥梁的耐久性能不足时,可考虑进行优化设计,即通过改变结构设计变量,以期用较小的初始建造成本来加强结构的耐久性,从而防止桥梁在后期出现过大的养护、维护甚至是加固的费用.禹智涛等^[25]介绍了基于可靠度的桥梁结构优化的设计方法,讨论了其优化模型,综述了该研究方向的发展动态.彭建新^[26]采用截面高度、保护层厚度、配筋率为设计变量,以满足桥梁服务水平为前提,以总成本最低为原则,通过计算可靠度对预应力空心板梁的优化设计做了示例.

4.2 维护设计

全寿命设计有别于传统桥梁设计的一个重要的方面,即把运营阶段的维护养护纳入整个设计体系中.桥梁维护设计的一般过程为:选取作为判断桥梁性能依据的评价指标,选定适当的桥梁性能劣化模

型,选择维护方式,判断维护发生的时间,进行维护组合优化.

4.2.1 评价指标与劣化模型 由于对结构性能退化的理论研究尚不十分成熟,因此,目前并没有直接采用耐久性设计中所建立的桥梁性能退化模型进行维护设计,更多的是依靠大量的统计数据,对所处环境相似的桥梁建立基于可靠指标和状态指标的劣化模型,进行耐久性设计. Frangopol 等^[27]利用效果叠加法,将结构在维护条件下的指标模型进行简化和线性化处理,定义了含有 8 个随机变量的随机模型,并成为目前普遍采用的模式. 曹明兰^[28]在此基础上,结合我国工程实际,探讨了两段线性劣化模型的参数取值问题,并发展了多段线性劣化模型的指标计算公式.

但从长远来看,维护设计与耐久性设计中所采用的评价指标与劣化模型应该相互统一,应当将目前对混凝土结构在材料、构件、结构方面取得的耐久性研究成果应用于维护设计,使得当前基于统计分析的劣化模型与耐久性设计建立的性能退化模型能够相互验证,提高预测模型的精度.

4.2.2 维护方式的选择及组合 桥梁维护设计研究过程中的关键问题是选定具体的维护方式,以及确定各种维护活动发生的时间. 一种方法可采用我国现行《公路桥涵养护规范》中的相关规定,根据桥梁总体或构件的检查评定结果将其技术状况等级分为 5 类:1 类桥梁采用正常保养;2 类桥梁采用小修;3 类桥梁进行中修;4 类桥梁进行大修或改造;5 类桥梁进行改建或重建,但该方法侧重从桥梁的外观判断其破坏状态,无法充分反映结构的性能退化规律. 另一种即以结构可靠度达到其对应的临界状态为准,也代表着今后研究的方向,但目前的成果主要是桥梁构件层次^[28-31],而对于桥梁总体层次(即基于系统可靠度)的研究较为少见.

维护过程中通常采用多种方式维持或改善桥梁使用过程中的性能,因此可能产生多种组合形式,应当对其进行折优选择,即优化组合方式. 优化的基本目标一般可采用以下 4 项:桥梁使用寿命、可靠度指标、状况指标和维修成本,据此又可分为单目标优化和多目标优化. 多目标优化^[32]是今后发展的趋势,一般可以采用多目标加权法、 ϵ 约束法、目标规划法、神经网络方法、遗传算法等计算. 曹明兰^[28]详细分析了单目标优化和多目标优化的常见类型,并采用目标规划法建立了后者的分析模型. 彭建新^[26]以维护成本最小、可靠指标最大化和状态指标最大化为目标,利用粒子群算法对预应力混凝土梁进行了多目标维护优化组合计算.

5 全寿命成本分析

5.1 周期成本的组成

桥梁生命周期成本可定义为在桥梁规划、设计、施工、运营、养护、维修、加固以及拆除时的过程中承担者支付的一切费用,但其具体的组成随承担者的类型和目标不同而有所区别. 王玉倩等^[33]分析了基于国家立场和基于企业立场生命周期成本构成的不同,但没有进一步提出基于企业立场的成本组成计算公式,现有的研究主要仍然是基于国家立场. 邵旭东等^[1]由此将生命周期成本划分为管理单位成本、用户成本和社会成本组成. 其中管理单位成本包括初始造价、将来改造和维护成本、周期养护成本、日常管理成本、设计成本以及荷载试验成本等;用户成本包括汽车运行成本、交通耽搁成本和其他,社会成本包括事故成本、环境影响成本以及其他,国内外其他学者的分类方法基本与此类似.

5.2 各项成本的确定方式

初始造价可根据桥梁的《公路基本建设工程概算、预算编制办法》进行计算,设计成本、荷载试验成本、日常管理成本一般可视为初始造价的百分比;周期养护成本可结合《公路桥涵养护规范》以及各地区有关部门制定的《公路养护工程预算编制办法》进行计算. 改造和维护成本中桥梁主体构件必须根据桥梁维护设计中所确定的维护组合方式,以及维护发生的时间进行计算,附属构件可通过陈艾荣等^[4]提出的桥梁典型构件使用寿命计算公式,大致确定出桥梁寿命期改造和维护发生的时间和次数,使计算过程得到一定程度的简化. 用户成本中汽车运行成本、交通耽搁成本与桥梁结构所处的路线、桥梁位置、交通状况、桥梁结构的性能状态以及环境等因素相关,比较复杂,现有的分析过程中大多是采用交通仿真软件来确定. 社会成本中的事故成本目前仍然没有统一的考量方式,王玉倩等^[33]将事故成本量化为人的剩余生命价值和赔偿金,并根据我国现有的国家标准和统计数据,得出了两者的计算方式,提供了一种

较好的解决思路. 社会成本中关于环境成本的计算方法亦少见报道, 大多数研究是利用生命周期评价理论^[34], 从资源耗竭、能源耗竭、人类健康受损和生态破坏等宏观层面来考虑其环境影响, 最终量化的指标中也没有体现桥梁的经济属性. 因此, 在实践中仍然无法广泛运用. 刘沐宇等^[35]利用生命周期评价和生命周期成本分析理论, 初步建立了桥梁环境影响成本分析模型, 但其成本类型以及寿命阶段的划分方式和现有桥梁寿命周期成本理论并不相同, 如何将两者相互结合并统一有待进一步研究.

5.3 折现率的选择

全寿命成本计算准确度受折现率的影响很大, 通常的做法是采用社会折现率. 但这对于永久性工程或者受益期超长的项目来说并不一定合适, 造成寿命周期过程中越晚发生的成本越低, 甚至趋近于零, 因此, 可能低估了发生在寿命周期使用阶段的各项成本. 目前, 较好的一种方式是采用分段折现率的方式来减小误差, 如胡江碧等^[36]分析了折现率与社会折现率和物价波动水平3者之间的关系, 认为我国桥梁全寿命周期内, 成本应符合分阶段递减的规律, 并建议前60a取2%, 后60a取3%.

6 研究展望

桥梁全寿命设计方法是桥梁工程设计方法的发展趋势, 其意义重大, 长远经济效益明显. 目前的研究已经在各个环节取得了较为丰富的成果, 然而真正实施并非易事, 仍需要大量的基础工作和可靠的依据.

今后的研究应着重关注以下方面: 1) 加强桥梁在复杂环境下性能劣化模型的研究, 建立多重机理影响下的性能退化定量公式; 2) 统一构件耐久性退化模型, 或建立退化模型选择的标准; 3) 折现率指标的进一步研究; 4) 桥梁营运期成本基本参数的统计收集和整理工作, 建立并完善营运期基础资料数据库; 5) 进一步研究和评估维护措施对桥梁性能变化规律的影响.

参考文献:

- [1] 邵旭东, 彭建新, 晏班夫. 桥梁全寿命设计方法框架性研究[J]. 公路, 2006(1): 44-49.
- [2] 马军海, 陈艾荣, 贺君. 桥梁全寿命设计总体框架研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(8): 1003-1007.
- [3] SOMERVILLE G. The design life of structures[M]. Edi: Blackie and Son Ltd, 1992: 4-10.
- [4] 金小川, 周宗红, 金小安, 等. 中国桥梁设计使用年限的研究[J]. 公路与汽运, 2012(3): 162-165.
- [5] 林兵, 郑丹, 周建庭, 等. 西南地区桥梁寿命预测分析[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2008, 27(3): 374-378.
- [6] 李海涛. 基于时变可靠度分析的桥梁使用寿命预测[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(6): 100-105.
- [7] 陈艾荣, 王玉倩, 吴海军, 等. 桥梁结构构件设计使用寿命的确定[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(3): 317-322.
- [8] 李毓龙, 刘 钊, 张建东. 混凝土桥梁耐久性设计规范的框架与理念[J]. 结构工程师, 2012, 28(5): 20-24.
- [9] DARMAWAN M S, STEWART M G. Spatial time-dependent reliability analysis of corroding pretensioned prestressed concrete bridge girders[J]. Structural Safety, 2007, 29(1): 16.
- [10] KWON K, FRANGOPOL D M. Bridge fatigue assessment and management using reliability-based crack growth and Probability of detection models[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2011(26): 471-480.
- [11] 肖佳, 勾成福. 混凝土碳化研究综述[J]. 混凝土, 2010(1): 40-44.
- [12] MERIA G, ANDRADE C, ALONSO C, et al. Durability of concrete structures in marine atmosphere zones-the use of chloride deposition rate on the wet candle as an environmental indicator[J]. Cement and Concrete Composites, 2010, 32(6): 427-435.
- [13] 段桂珍, 方从启. 混凝土冻融破坏研究进展与新思考[J]. 混凝土, 2013(5): 16-20.
- [14] DONG C, MAHADEVAN S. Chloride-induced reinforcement corrosion and concrete cracking simulation[J]. Cement and Concrete Composites, 2008, 30(3): 227-238.
- [15] AKG L F, FRANGOPOL D M. Lifetime performance analysis of existing reinforced concrete bridges[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2005, 11(2): 129.
- [16] 孙丛涛. 基于氯离子侵蚀的混凝土耐久性与寿命预测研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010: 1-152.
- [17] 武海荣. 混凝土结构耐久性环境区划与耐久性设计方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 1-176.
- [18] 牛荻涛, 孙丛涛. 混凝土碳化与氯离子侵蚀共同作用研究[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(8): 1094-1099.

[19] 许晨,王传坤,金伟良. 混凝土中氯离子侵蚀与碳化的相互影响[J]. 建筑材料学报,2011,14(3):376-380.

[20] 苑立冬,牛荻涛,姜磊,等. 硫酸盐侵蚀与冻融循环共同作用下混凝土损伤研究[J]. 硅酸盐通报,2013,32(6):1171-1176.

[21] SAYDAM D,FRANGOPOL D M. Time-dependent performance indicators of damaged bridge superstructures[J]. Engineering Structures,2011(33):2458-2471.

[22] 王玉倩,程寿山,李万恒,等. 国内外混凝土桥梁耐久性指标体系调查分析[J]. 公路交通科技,2012,29(2):67-72.

[23] 钟小平,金伟良. 混凝土结构全寿命性能设计理论框架研究[J]. 工业建筑,2013,43(8):1-9.

[24] 高宇. 在用混凝土桥梁构件耐久性指标体系的研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2012:1-103.

[25] 禹智涛,韩大建. 基于可靠度的桥梁结构优化设计[J]. 广东工业大学学报,2002,19(3):50-55.

[26] 彭建新. 基于寿命周期成本的桥梁全寿命设计方法研究[D]. 长沙:湖南大学,2009:1-229.

[27] FRANGOPOL D M,KONG J S,GHARAIBEH E S. Reliability-based life-cycle management of highway bridges [J]. Journal of Computing in Civil Engineering,2001(1):27-34.

[28] 曹明兰. 桥梁维修全寿命经济分析与优化的理论框架研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007:1-161.

[39] KONG J S,FRANGOPOL D M. Evaluation of expected life-cycle maintenance cost of deteriorating structures[J]. Journal of Structural Engineering,2003,129(5):682- 691.

[30] NEVES L C,FRANGOPOL D M. Condition, safety and cost profiles for deteriorating structures with emphasis on bridges[J]. Reliability Engineering and System Safety,2005,89(2):185-198.

[31] 武文杰,王元丰,解会兵. 基于 LCA 和时变可靠度分析的桥梁维护策略优化[J]. 公路交通科技,2013,30(9):94-100.

[32] OKASHA N M,FRANGOPOL D M. Novel approach for multicriteria optimization of life cycle preventive and essential maintenance of deteriorating structures[J]. Journal of Structural Engineering,2010(8):1009-1022.

[33] 王玉倩,陈艾荣. 考虑决策人目标的桥梁工程计算期成本构成和参数分析[J]. 公路交通科技,2012,29(1):97-103.

[34] AMANJEET S,GEORGE B, SATISH J. Review of life-cycle assessment applications in building construction[J]. American Society of Civil Engineers,2011,23(3):15-23.

[35] 刘沐宇,陈方芳. 桥梁生命周期环境影响成本分析模型研究[J]. 土木工程学报,2010,43(增刊 1):373-378.

[36] 胡江碧,刘妍,高玲玲. 桥梁全寿命周期费用折现率分析[J]. 公路,2008(9):363-367.

Research Review of Design Method for Concrete Bridge Life Cycle

LIANG Wei^{1,2}, ZHUO Wei-dong¹

(1. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Department of Road Engineering of Fujian Chuanzheng Communications College, Fuzhou 350007, China)

Abstract: Taking the concrete bridges as the research object, and the basic frame of two kinds of representative design method of bridge life cycle was compared. The analysis process of design method of bridge life cycle was established and recent research of each aspect of the process was introduced. The difficulties encountered in each aspect are analyzed, and the problems existed in design method of bridge life cycle are summarized. The study lays the groundwork for the implementation of design method of bridge life cycle.

Keywords: concrete bridge; design method for bridge life cycle; service life; durability; cost analysis

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)

文章编号:1000-5013(2014)04-0454-06

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2014.04.0454

代建制下多项目管理风险等级评价

段辉霞^{1,2}, 张云波^{1,2}, 项剑平¹, 王玉芳^{1,2}

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 华侨大学 建设管理与房地产研究所, 福建 厦门 361021)

摘要: 为解决代建制下多项目管理中存在的风险问题,根据可拓学理论,建立评价物元模型.采用熵权法计算指标权重,构建基于熵权可拓决策的风险评价模型,并对代建制下多项目管理风险等级进行评价.研究结果表明:由关联度数据,可以获知指标层对准则层的关联重要情况;根据权重,可以得出对于目标层准则层的影响程度.

关键词: 项目管理;代建制;熵权法;可拓理论;风险评价

中图分类号: O 189; F 224.5

文献标志码: A

代建制模式起源于美国的建筑工程管理(CM)建设管理模式,主要有 CM 模式、项目管理(PM)模式和工程项目管理承包(PMC)模式.目前,关于代建制下多项目风险研究的主要有:Bernard^[1]对项目经理以及信息管理提出新的要求;Olsson^[2]从项目集合风险管理的视角,提出了项目集合风险管理的方法;严玲等^[3]构建了基于项目所有权配置的风险分担机制;林义峰等^[4]建立了施工阶段的风险矩阵,结合影响程度、发生概率以及风险因素权重进行风险评价;刘炳南等^[5]采用熵度量法建立政府投资项目代建制模式下的风险评价模型,并进行实证分析;刘刚^[6]将代建单位在代建过程中面临的风险分为自然风险、经济风险、技术风险、管理风险、业主风险等,采用层次分析法进行权重排序进行分析;候延陶^[7]根据建设周期的 4 个阶段建立风险评价指标,结合模糊综合评价模型进行风险评价.因此,较多学者分析和探讨代建制项目诸多风险中的某一方面,多种模式的风险管理,而较少学者研究代建制模式下的多业主、多项目的风险管理.本文通过构建代建制下多项目风险评价可拓模型,建立代建制下多项目管理风险评价方法.

1 熵权可拓模型

1.1 可拓学概述

可拓学是以蔡文为首的中国学者的独创的一门交叉学科,研究的对象为矛盾问题^[8],其基本理论为可拓论,方法体系为可拓方法,逻辑基础为可拓逻辑.可拓论有 3 个支柱:基元理论、可拓集合理论和可拓逻辑.可拓学是一门横向学科,应用于实际生产生活的各个领域,形成可拓工程,如可拓检测技术^[9]、可拓策划方法^[10]、可拓故障诊断方法^[11]等.

1.2 模型评价过程

1.2.1 确定物元 给定事物的名称为 N ,它关于特征 c 的量值为 v ,以有序 3 元 $R=(N, c, v)$ 组作为描述事物的基本元,简称物元.若代建制下多项目管理风险有 m 个等级, n 个特征 $c_1, c_2, \dots, c_n$ 和 n 个相应的量值 $v_1, v_2, \dots, v_n$,物元的经典域(R_j)和节域(R_p)分别表示为

收稿日期: 2013-12-25

通信作者: 张云波(1962-),男,教授,主要从事项目管理的研究. E-mail: zhangyb@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71303082);福建省自然科学基金青年创新项目(2012J05095);中央高校基本科研业务基金资助项目(11QZR06)

$$\mathbf{R}_j(N_j, c_i, v_i) = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & v_1 \\ N_j & c_2 & v_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ N_j & c_n & v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & (a_{j,1}, b_{j,1}) \\ N_j & c_2 & (a_{j,2}, b_{j,2}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ N_j & c_n & (a_{j,n}, b_{j,n}) \end{bmatrix}. \tag{1}$$

式(1)中: N_j 为 j 个评价等级; v_i 为 N_j 关于 c_i 取值的范围,表示为 $(a_{j,i}, b_{j,i})$,即经典域.

$$\mathbf{R}_p(P, c_i, v_{p,i}) = \begin{bmatrix} P & c_1 & v_{p,1} \\ P & c_2 & v_{p,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ P & c_n & v_{p,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & (a_{p,1}, b_{p,1}) \\ N_j & c_2 & (a_{p,2}, b_{p,2}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ N_j & c_n & (a_{p,n}, b_{p,n}) \end{bmatrix}. \tag{2}$$

式(2)中: P 为全部评价等级;下标 p, i 为 c_i 在 p 条件下的取值范围,表示为 $(a_{p,i}, b_{p,i})$.

1.2.2 建立关联函数 各单项评价指标关于各类别等级的关联度为

$$K_{j(v_i)} = \begin{cases} \frac{-\rho(v_i, X_{j,i})}{|X_{j,i}|}, & v_i \in X_{j,i}, \\ \frac{\rho(v_i, X_{j,i})}{\rho(v_i, X_{p,i}) - \rho(v_i, X_{j,i})}, & v_i \notin X_{j,i}. \end{cases} \tag{3}$$

式(3)中:距的定义为

$$\left. \begin{aligned} |X_{j,i}| &= b_{j,i} - a_{j,i}, \\ \rho(v_i, X_{j,i}) &= |v_i - \frac{1}{2}(a_{j,i} + b_{j,i})| - \frac{1}{2}(b_{j,i} - a_{j,i}), \\ \rho(v_i, X_{p,i}) &= |v_i - \frac{1}{2}(a_{p,i} + b_{p,i})| - \frac{1}{2}(b_{p,i} - a_{p,i}). \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

1.2.3 权重的确定 m 个评价等级, n 个评价指标,形成数据矩阵 $\mathbf{R} = (K_{j(v_i)})_{m \times n}$,其中 $K_{j(v_i)}$ 为第 j 个等级下第 i 个评价指标的关联度,则各指标值权重 w_i 为

$$w_i = \frac{(1 - k \sum_{j=1}^m p_{j(v_i)} \cdot \ln p_{j(v_i)})}{\sum_{j=1}^m (1 - k \sum_{j=1}^m p_{j(v_i)} \cdot \ln p_{j(v_i)})}. \tag{5}$$

式(5)中: $k = \frac{1}{\ln m}$; $p_{j(v_i)} = p_{j(v_i)} = \frac{(1 - K_{j(v_i)})}{\sum_{i=1}^m (1 + K_{j(v_i)})}$.

1.2.4 综合关联度的计算与等级评定 利用熵权法对每个特征 c_i 取其权值为 w_i ,且 $\sum_{i=1}^n w_i = 1$.则待评事物 N 关于等级 j 的关联度为

$$K_{j(N)} = \sum_{i=1}^n (w_i \cdot K_{j(v_i)}), \tag{6}$$

若 $K_j = \max_{j \in (1,2,\cdots,m)} K_{j(N)}$,则评定事物 N 属于等级 j .

2 风险评价模型

2.1 风险评价指标体系的构建

在代建制下多项目风险管理的基础上,遵循评价指标体系构建的可拓性原则、完备性原则、重要性原则、层次性原则和独立性原则等,分别从组织、合同、沟通、目标、采购等 5 个方面确立了代建制下多项目管理风险研究的最终风险清单^[12]. 指标体系如表 1 所示.

2.2 风险评价过程

2.2.1 数据获取 本研究采用问卷调查方法,首先,通过风险识别将代建制下多项目管理风险体系中所有的风险因素列出,设计风险问卷调查表. 确定故障树每个底事件风险因素的等级值,用 0.2,0.4,0.6,0.8 和 1.0 表示很小、较小、中等、较大和很大 5 个等级,然后,有关专家对各风险因素进行评估打

分. 按照平均值,求得各个风险因素的风险等级. C1,C2,C3,C4,C5,C6,C7,C8,C9,C10,C11,C12,C13,C14 ,C15,C16,C17, C18,C19,C20,C21,C22,C23,C24,C25,C26,C27,C28,C29,C30,C31,C32 风险因素的风险等级分别为 0.790,0.702,0.672,0.730,0.640,0.770,0.702,0.792,0.762,0.690,0.766,0.742,0.796,0.776,0.720,0.748,0.720,0.686, 0.654, 0.646, 0.706,0.828, 0.700, 0.724,0.754, 0.756,0.742,0.672,0.762,0.728,0.746,0.720.

表 1 代建制下多项目管理风险评价指标体系

Tab.1 Index system of multi-management risk assessment under the agent construction system

目标层	准则层	指标层
代建制下多项目管理风险评价指标体系	组织层(O)	组织结构风险(C1)
		多业主的控制权大小不同(C2)
		承包商之间地位的差别(C3)
		代建方在多项目下人员分配不合理(C4)
		不同项目中监理人力分配不均(C5)
		参建各方的综合能力差(C6)
	合同层(C)	程序性条款(C7)
		价款的支付方式和取费标准(C8)
		违约争议解决(C9)
		代建管理费取费模式(C10)
		责任义务不对等、不明确(C11)
		变更的标准和程序的多样化(C12)
	沟通层(L)	索赔和变更的不及及时性、不规范化、不公平性(C13)
		代建方的管理人员的沟通、协调能不足(C14)
		承包商之间相互协调能力差(C15)
		承包商对专业承包商与劳务分包商的协调能力差(C16)
		分包商之间的相互合作能力差(C17)
		代建方档案、资料收集不足或管理不当(C18)
	目标层(T)	信息化建设不成熟(C19)
		代建方对多业主的需求分解(C20)
		业主间的要求和利益冲突(C21)
		部分项目进度款支付拖延(C22)
		多个业主对项目的异质化要求(C23)
		承包商流水施工的应变能力不足(C24)
	采购层(P)	承包商并行施工的资源组织能力差(C25)
		代建项目的审批程序过多且效率低(C26)
		总承包商对需求分解与指令理解错误(C27)
		监理方差别化对待不同项目(C28)
		设计变更多样化(C29)
		差异化设计方案的成本不同(C30)
		供应商联合蓄谋抬价(C31)
		材料供应的应变能力不足(C32)

针对代建制下多项目管理风险研究,本次调查问卷共发放问卷 400 份,回收 243 份,问卷回收率为 60.75%,其中有效问卷共 211 份,有效率为 86.8%. 主要调研对象是具有多年工作经验的施工单位和建设单位的从业人员,占 71.56%. 有 5 a 以上工作经验的被调研者为 87.7%,且学历均为大专以上,其中本科和大专分别占 49.3%,36.5%;采用 SPSS 20.0 对问卷的可靠性进行了分析,数据信度检验,如表 2 所示. 表 2 中: α 的总和为 0.914.

根据在社会科学研究中的 Cronbach's Alpha 信度系数的判断标准,当 α 系数高于 0.65 时,可以接受. 本问卷的 Cronbach's Alpha 值

表 2 数据信度检验

Tab.2 Reliability test of data

各潜变量	<i>n</i>	α
组织层	6	0.663
合同层	7	0.760
沟通层	8	0.781
目标层	9	0.811
采购层	2	0.705

在 0.663~0.914 之间,具有较好的可信度.其次,根据 Kaiser(1974 年)观点,KMO 值大于 0.8 是比较好的,本问卷的巴特利特球度检验小于 0.001,KMO 值为 0.877,大于 0.8,由此说明问卷数据有效,可做进一步研究.

2.2.2 计算关联函数 针对代建制下多项目管理风险评价体系构造了 32 个待判物元,将其风险等级划分为 N_1, N_2, N_3, N_4 和 N_5 等 5 个等级,5 个等级分别表示很小、较小、中等、较大和很大,对应的区间为 $(0, 0.2), (0.2, 0.4), (0.4, 0.6), (0.6, 0.8), (0.8, 1.0)$. 根据关联函数的定义及问卷获取的数据,可得各待评单元的关联函数值,并将结果记为矩阵 K ,具体数据如表 3 所示.

表 3 关联函数值矩阵
Tab.3 Matrix of correlation function

i	$K_{1(v_i)}$	$K_{2(v_i)}$	$K_{3(v_i)}$	$K_{4(v_i)}$	$K_{5(v_i)}$	i	$K_{1(v_i)}$	$K_{2(v_i)}$	$K_{3(v_i)}$	$K_{4(v_i)}$	$K_{5(v_i)}$
1	-0.738	-0.650	-0.475	0.050	-0.045	17	-0.650	-0.533	-0.300	0.400	-0.222
2	-0.628	-0.503	-0.255	0.490	-0.247	18	-0.608	-0.477	-0.215	0.430	-0.266
3	-0.590	-0.453	-0.180	0.360	-0.281	19	-0.568	-0.423	-0.135	0.270	-0.297
4	-0.663	-0.550	-0.325	0.350	-0.206	20	-0.558	-0.410	-0.115	0.230	-0.303
5	-0.550	-0.400	-0.100	0.200	-0.308	21	-0.633	-0.510	-0.265	0.470	-0.242
6	-0.713	-0.617	-0.425	0.150	-0.115	22	-0.785	-0.713	-0.570	-0.140	0.140
7	-0.628	-0.503	-0.255	0.490	-0.247	23	-0.625	-0.500	-0.250	0.500	-0.250
8	-0.740	-0.653	-0.480	0.040	-0.037	23	-0.655	-0.540	-0.310	0.380	-0.216
9	-0.703	-0.603	-0.405	0.190	-0.138	25	-0.693	-0.590	-0.385	0.230	-0.158
10	-0.613	-0.483	-0.225	0.450	-0.262	26	-0.695	-0.593	-0.390	0.220	-0.153
11	-0.708	-0.610	-0.415	0.170	-0.127	27	-0.678	-0.570	-0.355	0.290	-0.184
12	-0.678	-0.570	-0.355	0.290	-0.184	28	-0.590	-0.453	-0.180	0.360	-0.281
13	-0.745	-0.660	-0.490	0.020	-0.019	29	-0.703	-0.603	-0.405	0.190	-0.138
14	-0.720	-0.627	-0.440	0.120	-0.097	30	-0.660	-0.547	-0.320	0.360	-0.209
15	-0.650	-0.533	-0.300	0.400	-0.222	31	-0.683	-0.577	-0.365	0.270	-0.270
16	-0.685	-0.580	-0.370	0.260	-0.171	32	-0.650	-0.533	-0.300	0.400	-0.222

2.2.3 确定各评价指标的权重 根据熵权法有关权重计算过程及公式,各层次各指标因素关联度的权重分别为:第 3 层次的组织层 $w_o=(0.250, 0.222, 0.161, 0.217, 0.107, 0.043)$,合同层 $w_c=(0.139, 0.158, 0.139, 0.125, 0.141, 0.136, 0.162)$,沟通层 $w_L=(0.151, 0.141, 0.142, 0.141, 0.123, 0.084, 0.075, 0.143)$,目标层 $w_T=(0.269, 0.096, 0.094, 0.095, 0.095, 0.094, 0.069, 0.096, 0.094)$,采购层 $w_p=(0.5, 0.5)$;第 2 层次的组织层 $w=(0.182, 0.210, 0.186, 0.213, 0.209)$.

2.3 代建制下多项目管理风险等级评价

根据公式(5),可得综合关联度为

$$K_p = (-0.672, -0.562, -0.343, 0.271, -0.179).$$

从总体来说,依相应的评价准则可知:代建制下多项目管理体系的风险等级综合评价为“较大”,说明该管理体系存在较大的风险,必须采取相应的措施保障代建制下多项目体系顺利运转;从第 2 层次来说,依据熵权法确定的权重,代建制下多项目管理体系中目标层对其影响程度最大,为 21.3%,其次是合同层和采购层,分别为 21.0%和 20.9%,最后是沟通层和组织层,分别为 18.6%和 18.2%.目标层、合同层、采购层、沟通层和组织层的影响程度差别并不显著,可见代建制下多项目管理是一个系统工程,必须综合考虑各种风险的影响.因此,应重点控制目标层的风险,同时兼顾合同、采购、沟通和组织层等方面的管理,有针对性地采取控制措施.

2.3.1 目标层 部分项目进度款支付拖延(C22)对合同层的影响程度最大为 26.9%,而 C23,C24,C25,C26,C27,C28,C29,C30 对其影响程度大致相同.因此,必须重点控制 C22,同时兼顾对目标层其他风险因素的管理.业主对进度款的支付是否及时,支付是否足额,以及进度款支付的审批繁琐程度都将影响工程的进度状况,故必须在合同中明确进度款支付担保,并将其作为业主及政府的业绩考核中.不同的业主对于项目的质量、进度和成本要求不一致,导致工程参建方对项目 3 大控制要求的侧重点不一样,必须增强代建制企业并行施工的变通能力.最后,建立一定标准的市场准入制度,建立代建制综合评

价体系,建立施工能力评价表,实施奖惩制度,实行动态监督,这为确保承包商能较好、较快地完成建设项目提供了保障.

2.3.2 合同层 价款的支付方式和取费标准(C8)、责任义务不对等不明确(C11)、程序性条款(C7)、违约争议解决(C9)以及变更的标准和程序的多样化(C12)对合同层的影响程度分别为 15.8%,14.1%,13.9%,13.9%,13.6%,此 5 者影响程度高达 71.3%.因此,必须重点控制 C8,C11,C7,C9,C12 等风险因素.复杂的变更和审批程序不仅可能导致工期的延误,更可能因此带来成本的提升以及相关的变更纠纷,故规范变更和索赔程序迫在眉睫.科学合理地简化变更和审批程序,集中审批相关部门,为相关审批衔接合作提供便利;另外,合同中必须明确预付款支付、里程碑付款的分期划分方式和支付时间以及相关的索赔方式,并通过担保方式规避、变更以及索赔相关风险;仔细审阅合同条款,将其内容解释清楚,避免出现歧义引发索赔.

2.3.3 采购层 供应商联合蓄谋抬价(C31)与材料供应的应变能力不足(C32)对采购层的影响程度相同,业主和代建制企业必须慎重选择材料、机械设备等供应商,谨防潜在供货商联合抬高材料、设备的价格;同时,在运营过程中,要选择长期合作材料供应商,尽可能降低重新选择供应商而产生相关的风险;另外代建制企业必须增强自身多项目并行施工材料供应的应变能力,积极学习精益物流管理,提高自身在解决可能出现的材料供应数量、质量、时效时问题的能力.

2.3.4 沟通层 代建方的管理人员的沟通、协调能力不足(C14)、业主间的要求和利益冲突(C21)、承包商对专业承包商与劳务分包商的协调能力差(C16)、承包商之间相互协调能力差(C15)、分包商之间的相互合作能力差(C17)对沟通层影响程度分别为 15.1%,14.3%,14.2%,14.1%,14.1%,此 5 者影响程度高达 71.8%.因此,必须重点控制 C14,C21,C16,C15,C17 等风险因素.代建方即总承包企业是整个代建制系统中的核心,既要处理各方的利益与冲突,又要在时间、空间及劳务分配等方面进行协调、沟通等相关管理工作.因此,积极推进新的项目管理方式,比如组建代建制模式下的 PPP(公共私营合作制)模式、综合项目交付(IPD)方式等,在项目早期组建各个参建方组成的集成化团队,鼓励、培育、促进和支持多边开放共享与合作,实现集成化管理和风险分担,降低设计变更等相关风险;同时,采用先进的代建制多项目综合管理信息系统,如建立个性化的项目信息门户(PIP)、推广建筑信息模型(BIM)等,从而为建设项目的参与各方提供一个高效的信息交流和协同工作的环境.

2.3.5 组织层 组织结构风险(C1)、多业主的控制权大小不同(C2)、代建方在多项目下人员分配不合理(C4)、承包商之间地位的差别(C3)对组织层的影响程度分别为 25.0%,22.2%,21.7%,16.1%.此 4 者影响程度高达 85.0%.因此,必须重点控制 C1,C2,C3,C4 等风险因素.在多业主、多项目的框架下,工程更具复杂性和多变性,沿用传统的组织模式,可能存在多个指令矛盾冲突、信息传递过慢等问题.因此,必须优化代建制下多项目管理的组织结构,结合矩阵型和事业部型的项目组织结构,突破传统项目组织结构的限制.做好各个项目参与方的协调工作,始终坚持“项目利益高于一切,平等、沟通、合作、共赢”的原则,避免出现业主、承包商之间存在差别对待的现象.

3 结论

结合熵权法和可拓理论模型对代建制下多项目管理风险进行评价,不仅从多项目的研究角度丰富了代建制相关的研究,同时克服了传统以定性分析为主的风险评价的不足.引入熵权法从数据本身所反映的信息无序化效用值来计算权重系数,有效地减少了权重计算的主观性.利用可拓集合的概念摆脱了经典数学的二值限制,提高了模型的可扩充性和灵活性.研究得到如下 2 点结论.

- 1) 代建制下多项目管理体系存在较大的风险,必须采取有效的措施保障其顺利运转;
- 2) 代建制下多项目管理体系中,目标层对其影响程度最大,高达 21.3%,其次分别是合同层、采购层、沟通层和组织层.

由于熵权可拓模型建立在风险因素之间相互独立的基础上,而部分因素之间可能相互影响,从而可能影响评价结果.评价一个模型通常从拟合原始数据的能力和预测性能两方面.而熵权可拓模型只能进行风险因素及其之间的相关影响关系的量化,而不能进行风险预测.因此,在未来的一段时间内,需要继续展开深入的研究.

参考文献：

[1] BERNARD A. Construction client multi-projects: A complex adaptive systems perspective[J]. International Journal of Project Management, 2009, 27(1): 72-79.

[2] OLSSON R. Risk management in a multi-project environment: An approach to manage portfolio risks[J]. International Journal of Quality and Reliability Management, 2008, 25(1): 60-71.

[3] 严玲, 赵华. 项目所有权配置下代建项目风险分担机制研究[J]. 武汉理工大学学报: 信息与管理工程版, 2009, 31(1): 121-125.

[4] 林义峰, 张宏胜, 张文平. 基于矩阵法的代建人在施工阶段的风险管理[J]. 重庆工商大学学报, 2010, 6(3): 287-291.

[5] 刘炳南, 李雪成. 基于熵度量法的代建制项目风险评价[J]. 企业经济, 2010(12): 33-35.

[6] 刘刚. 代建单位视角的代建项目风险研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012: 1-54.

[7] 候延陶. 基于模糊综合评价的代建单位风险识别与评价分析[D]. 南京: 南京大学, 2013: 1-48.

[8] 蔡文, 杨春燕. 可拓学的基础理论与方法体系[J]. 科学通报, 2013, 58(13): 1190-1199.

[9] 黄仁东, 张小军. 基于熵权物元可拓模型的隧道瓦斯等级评价[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(4): 77-82.

[10] 付彦景, 王杰. 可拓理论在龙峪湾旅游景区策划中的运用[J]. 中国商贸, 2011(3): 163-164.

[11] 杜占龙, 谭叶双, 甘彤. 基于可拓理论的模拟电路故障诊断方法[J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(12): 2908-2911.

[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, 30(23): 68-72.

Risk Assessment of Multi-Project Management
under the Agent Construction System

DUAN Hui-xia^{1,2}, ZHANG Yun-bo^{1,2},
XIANG Jian-ping¹, WANG Yu-fang^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China
2. Institute of Construction Management and Real Estate, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: To solve the risk of multi-project management under the agent construction system, the matter-element model for assessment was established by the extension theory. The index weight was calculated by the entropy method, then the assessment model of risk based on entropy method and extension theory was constructed. It's shown that connections between indexes layer and criterion layer can be acquired according to the correlation data, and then influence degree of criterion layer to object layer can be obtained according to the index weight.

Keywords: project management; agent construction system; entropy method; extension theory; risk assessment

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)

泉州伊斯兰建筑遗存的遗产价值与保护规划

吴宇翔¹, 关瑞明²

(1. 北京大学 城市与环境学院, 北京 100871;

2. 福州大学 建筑学院, 福建 福州 350108)

摘要: 阐述福建泉州清净寺、伊斯兰教圣墓和丁氏宗祠等伊斯兰建筑遗存的历史与现状, 并从世界遗产的视野对其进行类相比较与遗产价值分析. 结合已有的保护规划, 提出泉州伊斯兰建筑遗存保护规划的建议.

关键词: 建筑遗存; 伊斯兰文化; 遗产价值; 世界遗产; 保护规划; 泉州

中图分类号: TU 252

文献标志码: A

海上丝绸之路的兴盛使福建泉州与世界上许多国家和地区建立了密切的经济联系, 也使泉州与世界各地的文化产生了直接的接触和交融, 古基督教、伊斯兰教等西方宗教在泉州得到广泛传播. 这也使得泉州成为了联合国教科文组织全球首个“世界多元文化展示中心”城市, 并成为了中国首个“东亚文化之都”. 伊斯兰文化是泉州多元文化的一个重要组成部分, 泉州是中国境内伊斯兰教兴衰过程与海外交通贸易关联最为密切的一个城市, 也是幸存伊斯兰教石刻等文物数量最大的一个名城^[1]. 宗教建筑是反映特定历史时期人类宗教社会活动的物质文化遗存和精神文化载体, 是文化遗产中的特殊城市建筑遗产之一^[2]. 因此泉州伊斯兰建筑遗存的遗产价值分析与保护规划的制定十分重要. 在泉州伊斯兰建筑遗存中, 全国重点文物保护单位有清净寺、伊斯兰教圣墓和丁氏宗祠, 有关这些建筑遗存的研究成果不多. 在这些研究中历史考证较多, 对于泉州伊斯兰建筑遗存保护规划、遗产价值和开发利用方面的研究极少. 本文从世界遗产视野探讨泉州伊斯兰建筑遗存的整体遗产价值保护规划.

1 泉州伊斯兰建筑遗存现状

1.1 泉州清净寺

泉州清净寺, 又称麒麟寺, 阿拉伯名为“艾苏哈卜清真寺”(意为“圣友寺”), 位于泉州市鲤城区涂门街中段, 占地 2 184 m². 始建于北宋大中祥符 2 年(1009 年); 元武宗至大三年(1310 年)伊斯兰教徒艾哈默德·伊本·穆罕默德·古德西哈出资重修; 万历三十五年(1607 年)泉州大地震, 清净寺遭受严重破坏, 两年后进行了重修, 后许多文物又因年久失修而再度毁于清代^[3]. 现存的建筑遗址, 主要包括门楼、奉天坛和明善堂等. 清净寺内存有明成祖永乐五年(1407 年)颁发保护清净寺和伊斯兰教的《敕谕》石刻; 另有明万历三十七年(1609 年)李光缙《重修清净寺碑记》石刻一方.

1.2 泉州伊斯兰教圣墓

伊斯兰教(灵山)圣墓位于泉州城区东部的丰泽区圣茂村灵山南坡, 是我国现存较为古老和完好的伊斯兰教圣迹之一. 据明代何乔远《闽书》记载, 唐武德年间(618—626 年), 伊斯兰教始祖穆罕默德的两位门徒三贤、四贤来泉传教, 卒葬于东门外灵山^[4]. 圣墓坐北朝南, 占地约 300 m², 包括一对石棺、一座石亭、半圆形石回廊和立于回廊下的石碑, 包括重修圣墓碑(1322 年)、郑和行香碑和数方清代穆斯林官员重修圣墓的石碑, 现存回廊建于元至治三年(1323 年). 圣墓的始建年代不详, 有唐武德说, 唐永徽说, 唐中叶至北宋说, 唐末宋初以后说, 上限为公元九世纪说, 宋代说和元代说等主要观点^[5].

收稿日期: 2014-04-02

通信作者: 关瑞明(1961-), 男, 教授, 主要从事建筑与城市的地域性研究. E-mail: golfski@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278122); 福建省自然科学基金资助项目(2011J01304)

1.3 泉州丁氏宗祠

丁氏宗祠始建于明永乐年间,历经修葺、重建、扩筑.嘉靖四十年(1561年)毁于兵燹,万历二十八年(1600年)重建,是泉州丁氏回民祭祀祖先的场所.宗祠坐北朝南,建筑群体以廊院式组织,即以回廊围合成院,采用闽南传统民居的建筑技术,以砖、石、木构造.中轴线自南至北为泮池、门埕、前厅、前庭院、中堂(主殿)、后庭院、后殿,除泮池外,南北长 49.24 m,东西宽 21.38 m,总占地面积 1 052.75 m²[6].

2 建筑遗存的类项比较

2.1 世界遗产名录中的伊斯兰建筑遗存

截止 2013 年 12 月 31 日,联合国教科文组织(UNESCO)的世界遗产名录已达 981 项,其中伊斯兰建筑遗存或含伊斯兰建筑遗存的项目 108 项,涉及的缔约国达 41 个,其中包含清真寺的有 87 项,缔约国达 38 个.由于清真寺(mosque)是最为常见的伊斯兰建筑遗存,因此文中以清真寺对世界遗产名录中的伊斯兰建筑遗存进行分析.分析后发现,世界遗产名录中包含清真寺的项目大多位于中亚、西亚、北非和欧洲,这些地区绝大部分是伊斯兰国家或目前伊斯兰在国内占据极重要地位的地区.除此之外,西班牙拥有 4 个项目,印度拥有 3 个项目,俄罗斯拥有 1 个项目.目前中国没有包含在伊斯兰建筑遗存的世界遗产名录遗产项目中(资料来源:联合国教科文组织世界遗产中心官网 <http://whc.unesco.org/>).

世界遗产名录中包含伊斯兰(Islam)项目都保存的较为完好,但也受到了当地主流文化的影响,如科尔多瓦大清真寺被改建成大教堂.泉州的伊斯兰建筑遗存中的清净寺的许多文物因年久失修而毁于清代,寺庙的整体性因此受到影响,而伊斯兰教圣墓和丁氏宗祠则保存较为完好.与以上项目相比,泉州伊斯兰建筑遗存回汉文化融合的特征明显,如丁氏宗祠将伊斯兰风格与传统闽南风格相融合,体现了多种文化相互融合与和谐共处的特点.同时其反映了海上丝绸之路的传播作用,为考证和研究泉州的历史和阿拉伯文化的传播与发展等提供了重要的资料,是中世纪泉州与阿拉伯地区密切的经济与文化往来和伊斯兰教从海上丝绸之路传入中国的重要见证.

2.2 全国重点文物保护单位中的伊斯兰建筑遗存

截止 2013 年 12 月,我国国务院共批准公布七批全国重点文物保护单位,其中伊斯兰建筑遗存共 51 处.而截止 2011 年,我国国务院共批准公布和增补的国家级历史文化名城共达 117 座,国家级历史文化名城中的全国重点文物保护单位伊斯兰建筑遗存共 28 处(资料来源:中国国家文物局官网 <http://www.sach.gov.cn/>).对这 28 处伊斯兰建筑遗存的批次、地理位置、面积范围、时代、历史属性和建筑属性等进行类项比较,如表 1 所示.

通过对以上 28 处国家级历史文化名城中的全国重点文物保护单位伊斯兰建筑遗存的比较,发现泉州伊斯兰建筑遗存有以下 6 个主要特点.

1) 在福建省的范围内,泉州是唯一在伊斯兰建筑遗存方面拥有全国重点文物保护单位的地区,在省内拥有唯有其有而它无的独特性.

2) 国家级历史文化名城中的全国重点文物保护单位伊斯兰建筑遗存的时代多在明清时期.泉州的伊斯兰建筑遗存相比其他类项历史更为悠久,其中清净寺是我国现存最早的阿拉伯建筑风格的伊斯兰教清真寺[4].伊斯兰教圣墓虽然关于其年代许多学者都有自己的观点,但最晚仍为元代说,是全国伊斯兰教墓地中最古老的之一.清净寺是第 1 批全国重点文物保护单位,在所有伊斯兰建筑遗存中是独一无二的,而伊斯兰教圣墓(第 3 批)是所有伊斯兰墓地中最早列为全国重点文物保护之一的单位.

3) 从全国角度看,泉州是除了喀什和广州外,唯一既拥有全国重点文物保护单位级伊斯兰寺庙和墓葬的城市,丁氏宗祠更是唯一入选全国重点文物保护单位的回民祠堂.泉州出土的伊斯兰教碑刻现存 200 多方,占全国伊斯兰教碑刻出土数量的 75%.丰富齐全是泉州伊斯兰建筑遗存的一个重要特色.

4) 全国重点文物保护单位通过海上丝绸之路传播的伊斯兰建筑遗存除位于泉州地区外的仅有 5 处,分别为广州市的圣光寺光塔、杭州凤凰寺、扬州普哈丁墓、南京淳泥国王墓、广州清真先贤古墓.与海上丝绸之路密切相关是泉州伊斯兰建筑遗存的重要特色之一,其是中世纪泉州与阿拉伯地区密切的经济与文化往来和伊斯兰教从海上丝绸之路传入中国的重要见证.

5) 泉州清净寺是国内仅存,全部以花岗岩和辉绿岩建造,具有中世纪中亚风格的伊斯兰教寺^[7]. 伊斯兰教圣墓现存回廊建于元至治三年(1323 年),石廊、柱础及柱头的做法极似宋、元之物,是唐和宋元时期中国回廊建筑艺术的见证,其中廊柱中保留有数根柱体上下作卷杀的梭柱,是唐(7 世纪)流行的做法,迄今少见. 丁氏宗祠从平面上看正好构成一个汉文“回”字形,后殿东北削角砌筑右侧被斜斜地削去一角,使回字口部更与汉字书法转角顿笔象形,是丁氏回族把民族意识融入宗祠建筑形式中的体现.

6) 泉州的伊斯兰建筑遗存与其他文化的长期共存、相和相安,形成了中西文明兼容并蓄、多元文化相熔于一炉的特点,如清净寺紧邻关岳庙和文庙,伊斯兰教圣墓保护区范围内有省僮诸禅师舍利塔和承天寺四众弟子普同塔,丁氏宗祠结合汉族祠堂与伊斯兰思想等.

表 1 全国重点文物保护单位中伊斯兰建筑遗存类项比较
Tab. 1 Comparison of Islamic architectural relics in national key cultural relics conservation units

伊斯兰建筑	地理位置	建筑面积/ hm ²	年代	历史属性	建筑属性
清净寺	福建省泉州市	0.20	宋	海上丝绸之路传播	伊斯兰教古建筑
牛街礼拜寺	北京市宣武区	0.60	明~清	元朝回人后代所建	中国殿式与伊斯兰清真寺结合
西安清净寺	陕西省西安市	1.30	明~清	陆上丝绸之路传播	中国殿式古建筑
苏公塔	新疆吐鲁番市	0.25	清	穆斯林所建	伊斯兰教塔
伊斯兰教圣墓	福建省泉州市	2.28	元	海上丝绸之路传播	伊斯兰式墓地
阿巴和加麻礼	新疆喀什市	5.01	清	清当地回民修建	伊斯兰式墓地
怀圣寺光塔	广东省广州市	0.42	唐	海上丝绸之路传播	中国殿式与伊斯兰教古塔
凤凰寺	浙江省杭州市	0.26	元~清	海上丝绸之路传播	中国殿式与伊斯兰式清真寺结合
艾提尕尔清真寺	新疆新疆维吾尔自治区喀什市	1.68	明	明当地回民所建	伊斯兰教古建筑
普哈丁墓	江苏省扬州市	0.65	宋	海上丝绸之路传播	伊斯兰式与中式墓地结合
淳泥国王墓	江苏省南京市	17.00	明	明初政权支持修建	中式墓地
朱仙镇清真寺	河南省开封县	0.90	清	陆上丝绸之路传播	中国殿式为主
开封东大寺	河南省开封县	0.80	清	清伊斯兰教徒募捐重修	中国殿式为主
后街清真寺	甘肃省天水市	0.14	清	清当地回民修建	中国殿式与伊斯兰清真寺结合
麻赫穆德·喀什噶里墓	新疆维吾尔自治区疏附县	0.12	元	元当地回民修建	伊斯兰墓地
陈埭丁氏宗祠	福建省晋江市	0.13	明	海上丝绸之路传播	中国殿式与伊斯兰清真寺结合
定州清真寺	河北省保定市定州市	0.53	元至清	元回民后代所建	中国殿式为主
太原清真寺	山西省太原市迎泽区	0.28	明至清	明当地回民修建	中国殿式为主
呼和浩特清真大寺	内蒙古自治区呼和浩特市回民区	0.40	清至民国	清当地回民修建	中国殿式与伊斯兰清真寺结合
阿城清真寺	黑龙江省阿城区	0.90	清	清当地回民修建	中国殿式为主
寿县清真寺	安徽省六安市寿县	0.56	明至清	明清当地回民修建	中国殿式为主
安庆南关清真寺	安徽省安庆市迎江区	0.18	清	清当地回民修建	中国殿式与伊斯兰清真寺结合
郑州清真寺	海南省郑州市管城回族区	1.13	清	陆上丝绸之路传播	中国殿式与伊斯兰清真寺结合
巴巴寺	四川省南充市阆中市	1.30	清	因清传教士所建	中国殿式与伊斯兰清真寺结合
大学习巷清真寺	陕西省西安市莲湖区	0.39	明至清	明初政权支持重修	中国殿式为主
纳家户清真寺	宁夏回族自治区银川市永宁县	0.90	清	元伊斯兰后裔所建	中国殿式与伊斯兰清真寺结合
莎车加曼清真寺	新疆维吾尔自治区喀什地区落车	2.00	清	清当地回民修建	伊斯兰教古建筑
清真先贤古墓	广东省广州市越秀区	2.53	唐	海上丝绸之路传播	伊斯兰式与中式墓地结合

3 建筑遗存的遗产价值

世界遗产价值是指那些“罕见且无法替代的财产”所具有的“突出的普遍价值”,是一项遗产得以列入世界遗产名录的基础^[8]. 泉州伊斯兰建筑遗存遗产价值,除了前有所述外,对照《实施世界遗产保护公

约操作指南》中的六条世界文化遗产标准,至少可以对应地阐述出第Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ,Ⅵ项标准的价值.

3.1 建筑遗存的艺术性

清净寺代表的中世纪中亚地区流行的伊斯兰教寺风格,和伊斯兰教碑刻中特有的伊斯兰风格的云月图案和几何图案,影响了阿拉伯和中亚地区的建筑艺术、城镇规划和景观设计. 丁氏宗祠的“回”字形结构,是丁氏回族把民族意识融入宗祠建筑形式中,结合汉族祠堂与伊斯兰思想的体现. 泉州伊斯兰建筑遗存的存在和其所代表的建筑文化通过与中国传统建筑文化的融合,深刻地影响了泉州城市的规划和建筑艺术. 因此,泉州伊斯兰建筑遗存符合世界文化遗产第Ⅱ条标准.

3.2 建筑遗存的独特性

建于 11 世纪的清净寺是中国现存最古老的伊斯兰教寺之一. 据记载,11~14 世纪泉州城区有来自波斯、也门等不同国家和地区的穆斯林共建造了 6~7 座伊斯兰教寺,而清净寺是现今泉州仅存的伊斯兰古教寺^[9]. 伊斯兰教圣墓是我国现存最古老完好的伊斯兰教圣迹之一,据明代何乔远《闽书》记载为三贤、四贤之墓,其内拥有大量的碑文记录了郑和行香等一些历史事件. 泉州遗存的伊斯兰教碑刻现存 200 多方,是全国其他地方无法比拟的,碑文明确记载穆斯林的来源有也门、波斯、亚美尼亚、土耳其等至少十余处;这些碑刻也为考证和研究泉州的历史和阿拉伯文化的传播与发展等提供了重要的资料^[10].

阿拉伯伊斯兰教在泉州的建筑遗存,以实物的形式无可辩驳地证实中世纪泉州海外贸易的繁荣,以及泉州与阿拉伯伊斯兰教的友好关系,是中世纪泉州与阿拉伯地区密切的经济与文化往来和伊斯兰教从海上丝绸之路传入中国的重要见证. 因此,泉州伊斯兰建筑遗存符合世界文化遗产第Ⅲ条标准.

3.3 建筑遗存的历史性

清净寺制作精巧的穹顶门楼,巍峨壮观、宽敞雄浑的奉天坛,古朴典雅;镌刻在建筑体上极富装饰艺术的《古兰经》石刻,是中国国内仅存的全部以花岗岩石与辉绿岩石建造的具有中世纪中亚地区流行风格的伊斯兰教寺建筑,在阿拉伯地区也已罕见,为中世纪伊斯兰教建筑文化提供了颇为难得的见证. 伊斯兰教圣墓现存回廊建于元至治三年(1323 年),廊柱中保留有数根柱体上下作卷杀的梭柱,是唐宋流行的做法,迄今少见. 石廊、柱础及柱头的做法极似宋、元之物,是唐和宋元时期中国回廊建筑艺术的见证. 因此,泉州伊斯兰建筑遗存符合世界文化遗产第Ⅳ条标准.

3.4 建筑遗存的文化性

泉州的伊斯兰建筑遗存是中世纪泉州与阿拉伯地区密切的经济与文化往来,以及伊斯兰教从海上丝绸之路传入中国的重要见证,与一些历史事件如四贤传教、郑和下西洋(行香)等密切相关. 因此,泉州伊斯兰建筑遗存符合世界文化遗产第Ⅵ标准.

与前述世界遗产名录中的包含的伊斯兰建筑遗存的项目相比,由于遗产的完整性等原因,泉州伊斯兰建筑遗存的艺术价值尚不足以申报世界遗产,但其可以作为海上丝绸之路的重要部分参与到世界遗产的申报当中,其遗产价值需要更深入的研究和挖掘. 以世界遗产标准来衡量,能够有效地揭示泉州伊斯兰建筑遗存的历史内涵,充分认识其文化遗产价值,从而有助于对它的保护、规划与管理.

4 泉州伊斯兰建筑遗存的保护建议

4.1 现有的保护性规划概况

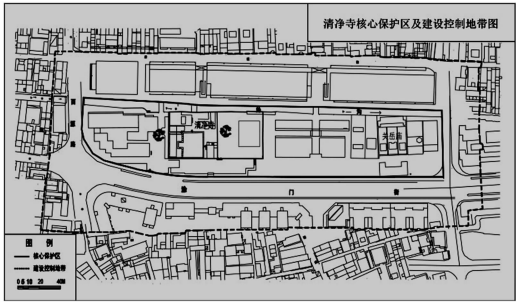
在遗产所在城镇的保护规划上,福建省泉州市人民政府于 2010 年 3 月通过的《泉州市城市总体规划(2008—2030)》,其中第八章为历史文化名城保护规划. 同时,泉州市于 2007 年 11 月修编了《泉州古城保护整治规划》. 在泉州伊斯兰建筑遗存的保护规划方面,目前没有已通过的专项保护规划. 但在地方性法规中,1996 年福建省人民政府关于公布国家重点和省级文物保护单位(第二批)保护范围的通知,其中包括了清净寺、伊斯兰圣墓和丁氏宗祠的保护范围.《福建省“海上丝绸之路:泉州史迹”文化遗产保护管理办法》对泉州海丝遗产的保护进行了规定,清净寺和伊斯兰圣墓属于泉州海丝遗产的范围.

《泉州清源山风景名胜区旅游发展规划》中规划中的灵山圣墓景区包括大坪山、灵山及北部山体,规划面积 1.22 km²,其中北渠和道路围合的圣墓中心区范围约 0.18 km². 以先贤墓园、卧榕奇石为主要景观,以海丝史迹考察游览、宗教文化领略为主题.

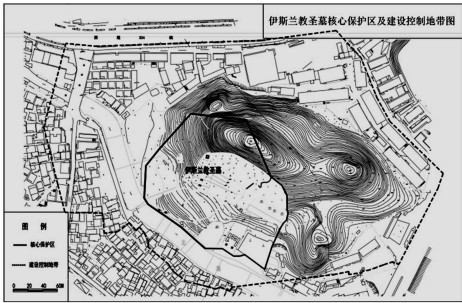
4.2 保护性规划的建议

通过对泉州伊斯兰建筑遗存的保护规划的阐述,发现泉州伊斯兰建筑遗存有关的规划文本所涉及的保护理念与具体规划,基本符合城镇遗产保护的规范.但是有许多方面尚未提及、有待改进以及有些做法值得商榷.同时,保护规划中对保护范围和建设控制地带的划定具有非常重要的意义^[11].因此,为了更好地保护泉州伊斯兰建筑遗存及其遗产环境,对泉州伊斯兰建筑遗存保护规划范围进行了建议性的划定(图 1),并提出以下几点建议.

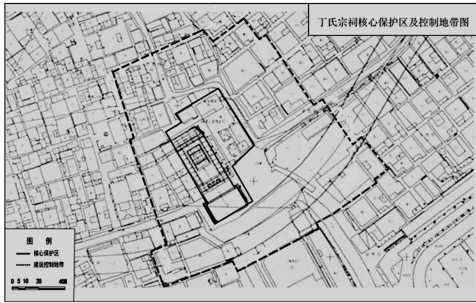
1) 全球的文化遗产视野.要从世界文化遗产的视野上全面认识泉州伊斯兰建筑遗存的遗产价值,在保护与规划中加以体现与落实.现有规划是对全市域或古城范围内相关的文物保护单位都进行阐释,而并非专门的对泉州伊斯兰建筑遗存进行描述,在泉州伊斯兰建筑遗存的保护规划上难免不够详细和完整.对于清净寺和伊斯兰圣墓在保护区划定、历史沿革方面阐述的比较清楚,而文物综述、现状评估、管理、影响遗产因素、监测等



(a) 泉州清净寺



(b) 伊斯兰教圣墓



(c) 丁氏宗祠

图 1 泉州伊斯兰建筑遗存建议核心保护区和建设控制地带

Fig. 1 Suggested preservation scope and constructive control area of Islamic architectural relics in Quanzhou 方面的内容都有待提出和改进.对于居住地遗存(如丁氏宗祠)的保护意识还需加强,需提出相应的保护规划和措施.

2) 整体的保护规划意识.虽然已有地方性法规中对泉州伊斯兰建筑遗存的保护范围及建设控制地带(缓冲区)已经明确划出,但是鉴于泉州文化融合特点,要强调整体保护规划意识.可以将泉州伊斯兰建筑遗存和其他文化的建筑遗存一起进行保护规划.如清净寺可以与紧邻的关岳庙一起进行规划,与邻近的文庙组成一个多样文化保护区域.伊斯兰教圣墓保护区由于环境优美,其范围内有省澄诸禅师舍利塔和承天寺四众弟子普同塔等,也可以结合起来一起进行规划.

3) 分级的单体保护方法.在对伊斯兰教圣墓的研究和保护规划中,过去的研究和重点都放在先贤墓上,对于先贤墓周围阿拉伯后裔的陵墓如丁氏祖墓等的重视程度不够.这些阿拉伯后裔陵墓跨越十余代并延续至今,是伊斯兰文化在泉州的传播与发展的明证,反映了其漫长的历史和巨大的影响力,应该与伊斯兰教圣墓一起进行保护.

4) 可移动文化财产的保护.泉州伊斯兰建筑遗存中所包含的伊斯兰教碑刻为考证和研究泉州的历史和阿拉伯文化的传播与发展等提供了重要的资料,应给与足够的重视,并结合 1978 年国际教科文组织《关于保护可移动文化财产的建议》中对可移动文化财产提出的建议进行保护.

5) 新宗教建筑的应对.建筑反映了特定历史时期人类的生产活动,蕴涵着当时政治、经济、文化等信息^[12],因此应正确处理原有建筑遗存和新建设的宗教建筑的关系.在 2007 年清净寺东侧保护范围内兴建了由阿曼国王捐资建设的泉州清净寺新礼拜堂,这虽然突出了中外交流友好的主题,但是可能会对清净寺的原有风貌产生破坏.同时,近十余年来有大批阿拉伯后裔的新墓在未经文物部门批准的情况下私自开山筑墓入侵伊斯兰教圣墓的保护范围.这些问题都应谨慎对待,并提出合理的解决的应对措施.

6) 原建筑遗存的利用.应对泉州伊斯兰建筑遗存进行利用规划,并加大宣传力度.清净寺、伊斯兰

教圣墓和伊斯兰石刻都是独特的伊斯兰教文化遗产,但是目前泉州对于伊斯兰建筑遗存的利用重视程度不够,没有对伊斯兰建筑遗存进行旅游规划以及其相应的设施、人力资源等的建设. 如果泉州能加大对于伊斯兰建筑遗存的宣传力度并进行合理的利用方面的规划,让世界的穆斯林了解泉州这些文化遗产,定有许多穆斯林会不远万里前来朝拜和游览.

5 结 束 语

古代泉州的自然、技术和社会经济条件,为古代伊斯兰友人在泉州的活动并且留下丰富的伊斯兰建筑遗存创造了良好的条件^[13]. 通过与世界遗产名录和全国重点文物保护单位中的类项进行比较,泉州伊斯兰建筑遗存具有全国范围内独一无二、历史悠久、种类齐全、与海上丝绸之路密切相关、建筑特色独特、文化多元共处等特点. 其遗产价值对照《实施世界遗产保护公约操作指南》中的六条世界文化遗产标准,至少可以对应地阐述出第Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ,Ⅵ项标准的价值. 以世界遗产标准来衡量,能够有效地揭示其历史内涵,充分认识其文化遗产价值,从而有助于对它的保护、规划与管理.

参考文献:

[1] 李兴华. 泉州伊斯兰教研究[J]. 回族研究,2010(2):67-83.
[2] 阙维民,边雪. 世界遗产视野中的哈尔滨东正教堂[J]. 城市发展研究,2009,16(11):143-148,96.
[3] 黄秋润. 泉州清净寺[J]. 中国穆斯林,1990(1):28-31.
[4] 《全国重点文物保护单位》编辑委员会. 全国重点文物保护单位(第 1 至第 5 批): 第Ⅱ卷[M]. 北京:文物出版社,2004:176,227.
[5] 林翠茹,庄景辉. 泉州伊斯兰教圣墓年代及其墓主人身份的考证[J]. 海交史研究,2000(1):102-114.
[6] 庄景辉. 陈埭丁氏宗祠[M]. 厦门:厦门大学出版社,2003:4-5.
[7] 李雄飞,李昊. 伊斯兰文化东渐的遗踪:海上丝绸之路名城泉州中亚风格清真寺建筑构图研究[J]. 华中建筑,2008,26(9):211-222.
[8] 戴湘毅,阙维民,李辉,等. 龙游石窟的成因及遗产价值分析[J]. 人文地理,2012(5):42-47,127.
[9] 庄为玘,陈达生. 泉州伊斯兰教寺址考[J]. 厦门大学学报:哲学社会科学版,1981(2):120-129.
[10] 福建省泉州海外交通史博物馆. 泉州伊斯兰教石刻[M]. 银川:宁夏人民出版社;福州:福建人民出版社,1984:2-3.
[11] 王涛. 文物保护单位保护规划中保护范围和建设控制地带的划定和分级[J]. 东南文化,2010(2):23-26,132.
[11] 阙维民,宋颖. 京西古道的遗产价值与保护规划建议[J]. 中国园林,2012(3):84-88.
[12] 谢承平,关瑞明. 福州圣约翰堂的建筑特征及其文物价值[J]. 华中建筑,2013(6):5-9.
[13] 蔡玉霖. 古代伊斯兰教传入泉州的地理透视[J]. 福建地理,1996(2):68-71.

Heritage Value of Islamic Architectural Relics in
Quanzhou and Conservation Planning

WU Yu-xiang¹, GUAN Rui-ming²

(1. College of Urban and Environmental Science, Peking University, Beijing 100871, China;
2. School of Architecture, Fuzhou University, Fujian 350108, China)

Abstract: The historical and current situation of Islamic architectural relics in Quanzhou were described, including Qingjing Mosque, Islamic (Lingshan) Holy Tomb and Dings' Ancestral Hall. The comparison of its related properties and analysis of the heritage value were conducted in view of world heritage. Proposals for conservation planning are also put forward.

Keywords: architectural relics; Islamic culture; heritage value; world heritage; conservation planning; Quanzhou

具有脉冲的非线性微分方程 边值问题的多个正解

吴丽娇, 王全义

(华侨大学 数学科学学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 研究一类带有脉冲的一阶非线性微分方程边值问题的多个正解的存在性问题. 利用 Avery-Henderson 不动点定理以及一些分析技巧, 得到该脉冲非线性微分方程的边值问题存在多个正解的一些充分条件的新结果.

关键词: 边值问题; 脉冲; 多个正解; 锥; 不动点定理

中图分类号: O 175.14

文献标志码: A

脉冲微分方程是微分方程中一个新的分支, 它在物理、化学、生物医学、工业机器人技术和经济学中都有很好的应用. 脉冲微分方程边值问题的正解的存在性问题受到许多学者的广泛关注^[1-10]. 例如, 文献[5]运用锥压缩与不动点定理, 研究以下一类具有脉冲的一阶微分方程边值问题

$$\left. \begin{aligned} x'(t) + a(t)x(t) &= f(t, x(t)), & a.e. t \in [0, T] \setminus \{t_1, \dots, t_p\}, \\ \Delta x(t_k) &= x(t_k^+) - x(t_k) = I_k(x(t_k)), & k = 1, 2, \dots, p, \\ x(T) &= x(0) \end{aligned} \right\} \quad (A)$$

正解的存在性问题. 其中: $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_p < t_{p+1} = T$, $f: [0, T] \times [0, +\infty) \rightarrow [0, +\infty)$ 是一个脉冲 Caratheodory 函数, $I_k: [0, +\infty) \rightarrow [0, +\infty)$ 是连续的.

文献[10]运用锥压缩与不动点定理, 研究具有脉冲的一阶非线性微分方程边值问题

$$\left. \begin{aligned} x'(t) + a(t, x(t))x(t) &= f(t, x(t)), & t \in [0, \omega] \setminus \{t_1, \dots, t_p\}, \\ \Delta x(t_k) &= x(t_k^+) - x(t_k) = I_k(x(t_k)), & k = 1, 2, \dots, p, \\ x(\omega) &= x(0) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

的正解存在性问题. 其中: $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_p < t_{p+1} = \omega$; $a: [0, \omega] \times [0, +\infty) \rightarrow \mathbb{R}$ 连续; $I_k: [0, +\infty) \rightarrow [0, +\infty)$ ($k = 1, \dots, p$) 是连续的; $f: [0, \omega] \times [0, +\infty) \rightarrow [0, +\infty)$; $\omega > 0$ 是常数. 所得结果推广并改进了文献[5]的相关结果. 本文利用 Avery-Henderson 不动点定理以及一些分析技巧, 得出了该脉冲非线性微分方程的边值问题存在多个正解的一些充分条件的新结果.

1 预备知识及引理

设条件 H_1) 存在 $[0, \omega]$ 上的连续函数 $a_1(t), a_2(t)$, 使得对 $\forall (t, x) \in [0, \omega] \times [0, +\infty)$ 都有 $a_1(t) \leq a(t, x) \leq a_2(t)$, 且对 $a_1(t)$ 有 $\int_0^\omega a_1(s) ds > 0$ 成立.

定义 1 设 X 是一个 Banach 空间, K 是 X 中的一个非空子集, 且满足: 1) 对任意的 $x, y \in K$ 和实数 $\alpha, \beta \geq 0$, 有 $\alpha x + \beta y \in K$; 2) 若 $x, -x \in K$, 则 $x = 0$. 那么称 K 为 X 中的一个锥.

定义 2 设 X 是一个 Banach 空间, K 是 X 中的一个锥. 定义 K 上的偏序: 如果对任意的 $x, y \in K$,

收稿日期: 2013-07-01

通信作者: 王全义(1955-), 男, 教授, 主要从事常微分方程和泛函微分方程的研究. E-mail: wqy19555@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金数学天元基金资助项目(11226145)

$x \leq y$ 当且仅当 $y - x \in K$.

定义 3 设 X 是一个 Banach 空间, K 是 X 中的一个锥. 如果映射 $\varphi: K \rightarrow [0, +\infty)$ 满足对任意的 $x, y \in K, x \leq y$, 就有 $\varphi(x) \leq \varphi(y)$, 则称映射 φ 是锥 K 上的一个非负连续的增泛函.

假设 φ 是锥 K 上的一个非负连续的增泛函, $K \subset X, \forall d > 0$, 记集合 $K(\varphi, d) = \{x \in K | \varphi(x) < d\}; \partial K(\varphi, d) = \{x \in K | \varphi(x) = d\}; \overline{K(\varphi, d)} = \{x \in K | \varphi(x) \leq d\}$.

引理 1^[11] (Avery-Henderson) 设 K 是 X 中的一个锥. 令 γ, φ 是 K 上的非负连续增泛函, θ 是 K 上的非负连续泛函, 其中 $\theta(0) = 0$. 存在常数 $c > 0$ 和 $M > 0$, 对 $\forall x \in \overline{K(\gamma, c)}$, 使得 $\gamma(x) \leq \theta(x) \leq \varphi(x), \|x\| \leq M\gamma(x)$. 假设存在一个全连续算子 $T: \overline{K(\gamma, c)} \rightarrow K$, 对常数 $0 < a < b < c, 0 < \lambda < 1$ 及 $x \in \partial K(\theta, b)$ 满足 $\theta(\lambda x) \leq \lambda \theta(x)$, 且

- 1) $\gamma(Tx) > c$, 当 $x \in \partial K(\gamma, c)$ 时;
- 2) $\theta(Tx) < b$, 当 $x \in \partial K(\theta, b)$ 时;
- 3) $\varphi(Tx) > a$ 及 $K(\varphi, a) \neq \varphi$, 当 $x \in \partial K(\varphi, a)$ 时,

则算子 T 在 K 上至少存在两个不动点 $x_1, x_2 \in \overline{K(\gamma, c)}$ 使得 $a < \varphi(x_1), \theta(x_1) < b, b < \theta(x_2), \gamma(x_2) < c$.

引理 2^[11] (Avery-Henderson) 设 K 是 X 中的一个锥. 令 γ, φ 是 K 上的非负连续增泛函, θ 是 K 上的非负连续泛函, 其中 $\theta(0) = 0$. 存在常数 $c > 0$ 和 $M > 0$, 对 $\forall x \in \overline{K(\gamma, c)}$, 使得 $\gamma(x) \leq \theta(x) \leq \varphi(x), \|x\| \leq M\gamma(x)$. 假设存在一个全连续算子 $T: \overline{K(\gamma, c)} \rightarrow K$, 对常数 $0 < a < b < c, 0 < \lambda < 1$ 及 $x \in \partial K(\theta, b)$ 满足 $\theta(\lambda x) \leq \lambda \theta(x)$, 且

- 1) $\gamma(Tx) < c$, 当 $x \in \partial K(\gamma, c)$ 时;
- 2) $\theta(Tx) > b$, 当 $x \in \partial K(\theta, b)$ 时;
- 3) $\varphi(Tx) < a$ 及 $K(\varphi, a) \neq \varphi$, 当 $x \in \partial K(\varphi, a)$ 时,

则算子 T 在 K 上至少存在两个不动点 $x_1, x_2 \in \overline{K(\gamma, c)}$ 使得 $a < \varphi(x_1), \theta(x_1) < b, b < \theta(x_2), \gamma(x_2) < c$.

下面令

$$X = PC([0, \omega], R) = \left\{ x: [0, \omega] \rightarrow R \left| \begin{array}{l} x(0) = x(\omega) \text{ 且 } x(t) \text{ 对于 } t \in [0, \omega] / \{t_1, \dots, t_p\} \\ \text{是连续的, 又当 } t = t_k \text{ 是左连续的且} \\ x(t_k^+) \text{ 存在, } k = 1, \dots, p \end{array} \right. \right\}.$$

对 $\forall x \in X$, 取范数 $\|x\| = \sup_{t \in [0, \omega]} |x(t)|$, 则 X 在此范数下是一个 Banach 空间.

定义 4 函数 $f: [0, \omega] \times [0, +\infty) \rightarrow [0, +\infty)$ 是一个 L^1 -Caratheodory 函数, 如果 1) 对于 $\forall u \in R, f(\cdot, u) \in X$; 2) 对于 $t \in [0, \omega], f(t, \cdot)$ 是连续的; 3) 对于每个 $q > 0$, 都存在 $h_q \in L^1[0, \omega]$, 使得对于 $t \in [0, \omega], 0 \leq u \leq q$, 有 $|f(t, u)| \leq h_q(t)$.

假设条件 H_2) 函数 $f: [0, \omega] \times [0, +\infty) \rightarrow [0, +\infty)$ 是一个 L^1 -Caratheodory 函数成立.

引理 3^[10] 如果条件 H_2) 成立, 则对于任意的 $u \in X$ 且 $u(t) \geq 0, \theta_k \in R$, 下列脉冲微分方程的边值问题

$$\left. \begin{array}{l} x'(t) + a(t, u(t))x(t) = f(t, u(t)), \quad t \in [0, \omega] / \{t_1, \dots, t_p\}, \\ \Delta x(t_k) = \theta_k, \quad k = 1, 2, \dots, p, \\ x(\omega) = x(0), \end{array} \right\} \tag{2}$$

有一个解, 即

$$x(t) = \int_0^\omega G(t, s, u) f(s, u(s)) ds + \sum_{k=1}^p G(t, t_k, u(t)) \theta_k.$$

其中

$$G(t, s, u) = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{\exp(\int_0^s a(r, u(r)) dr) + \int_0^\omega a(r, u(r)) dr}{\exp(\int_0^\omega a(r, u(r)) dr) - 1}, & 0 \leq s < t \leq \omega, \\ \frac{\exp(\int_t^s a(r, u(r)) dr)}{\exp(\int_0^\omega a(r, u(r)) dr) - 1}, & 0 \leq t \leq s \leq \omega. \end{array} \right. \tag{3}$$

假设函数 $a_1(t), a_2(t)$ 满足条件 H_1), 现在定义函数

$$G_1(t, s) = \begin{cases} \frac{\exp(\int_0^s a_1(r) dr + \int_t^\omega a_1(r) dr)}{\exp(\int_0^\omega a_2(r) dr) - 1}, & 0 \leq s < t \leq \omega, \\ \frac{\exp(\int_t^s a_1(r) dr)}{\exp(\int_0^\omega a_2(r) dr) - 1}, & 0 \leq t \leq s \leq \omega. \end{cases}$$

$$G_2(t, s) = \begin{cases} \frac{\exp(\int_0^s a_2(r) dr + \int_t^\omega a_2(r) dr)}{\exp(\int_0^\omega a_1(r) dr) - 1}, & 0 \leq s < t \leq \omega, \\ \frac{\exp(\int_t^s a_2(r) dr)}{\exp(\int_0^\omega a_1(r) dr) - 1}, & 0 \leq t \leq s \leq \omega. \end{cases}$$

令

$$a_1^-(t) = \min\{0, a_1(t)\}, \quad a_2^+(t) = \max\{0, a_2(t)\}, \quad K_1 = \exp(\int_0^\omega a_1(r) dr),$$

$$K_2 = \exp(\int_0^\omega a_2(r) dr), \quad M_1 = \exp(\int_0^\omega a_1^-(r) dr), \quad M_2 = \exp(\int_0^\omega a_2^+(r) dr).$$

从而由条件 H_1) 可得 $K_1 \leq K_2, M_1 \leq 1 < M_2$. 又令 $\delta = \frac{M_1(K_1 - 1)}{M_2(K_2 - 1)}$, 则有 $\delta \in (0, 1)$. 于是又由定积分的性质可得

$$\begin{cases} G_1(t, s) \geq \frac{M_1}{K_2 - 1}, & (t, s) \in [0, \omega] \times [0, \omega]; \\ G_2(t, s) \leq \frac{M_2}{K_1 - 1}, & (t, s) \in [0, \omega] \times [0, \omega]. \end{cases}$$

由 $a_1(t), a_2(t), a(t, x), G_1(t, s), G_2(t, s)$ 的定义即得到如下引理 4.

引理 4 如果条件 $H_1), H_2)$ 成立, 则对任意 $x \in X, (t, s) \in [0, \omega] \times [0, \omega]$, 有

$$\frac{M_1}{K_2 - 1} \leq G_1(t, s) \leq G(t, s, x) \leq G_2(t, s) \leq \frac{M_2}{K_1 - 1}.$$

定义 $E = \{x \in X : x(t) \geq 0\}, K = \{x \in E : x(t) \geq \delta \|x\|, x(t) \exp(\int_0^t a_2(s) ds) \text{ 关于 } t \text{ 是递增函数}\}$. 易见 K 是 X 中的一个锥.

定义算子 $T: K \rightarrow X$ 为

$$(Tx)(t) = \int_0^\omega G(t, s, x) f(s, x(s)) ds + \sum_{k=1}^p G(t, t_k, x) I_k(x(t_k)), \quad \forall x \in K. \quad (4)$$

显然有 $T: K \rightarrow X$.

引理 5 如果条件 $H_1)$ 成立, 则算子 $T: K \rightarrow K$.

由于文中的锥 K 是文献[10]中的锥 K 的一个子集, 且文中的算子 T 与文献[10]中的算子 T 的表达式相同, 故由文献[10]中的引理 6 立即得到如下的引理.

引理 6 如果条件 $H_1), H_2)$ 成立, 则算子 $T: K \rightarrow K$ 是全连续的.

2 主要结果及证明

首先, 取正数 l_1, l_2 满足 $0 < l_1 < t_1 < l_2 < t_2 < \omega$, 再取下列正数

$$A = \frac{M_1}{K_2 - 1}, \quad \eta_1 = \exp(-\int_0^{l_1} a_2(s) ds), \quad B = \frac{M_2}{K_1 - 1}, \quad \eta_2 = \exp(-\int_0^{l_2} a_2(s) ds).$$

并定义如下一些泛函, 即

$$\gamma(x) = \min_{t \in [l_1, l_2]} x(t) \exp\left(\int_0^t a_2(s) ds\right) = x(l_1) \exp\left(\int_0^{l_1} a_2(s) ds\right), \quad (5)$$

$$\theta(x) = \max_{t \in [0, l_1]} x(t) \exp\left(\int_0^t a_2(s) ds\right) = x(l_1) \exp\left(\int_0^{l_1} a_2(s) ds\right), \quad (6)$$

$$\varphi(x) = \min_{t \in [l_2, \omega]} x(t) \exp\left(\int_0^t a_2(s) ds\right) = x(l_2) \exp\left(\int_0^{l_2} a_2(s) ds\right). \quad (7)$$

其中, $x \in K$. 则显然如下命题成立.

命题 1 i) γ, θ, φ 是关于 $x \in K$ 的非负连续增泛函;

ii) 对于 $\forall x \in K$ 有 $\gamma(x) \leq \theta(x) \leq \varphi(x)$, 并且 $\gamma(x) = x(l_1) \exp\left(\int_0^{l_1} a_2(s) ds\right) \geq \delta \exp\left(\int_0^{l_1} a_2(s) ds\right) \|x\|$, 及 $\|x\| \leq M\gamma(x)$, 其中 $M = \frac{1}{\delta} \exp\left(-\int_0^{l_1} a_2(s) ds\right)$;

iii) 对 $\lambda \in [0, 1]$, 有 $\theta(\lambda x) \leq \theta\lambda(x)$.

定理 1 若存在正常数 a, b, c 满足 $0 < a < b < c, a \exp\left(\int_0^{l_2} a_2(s) ds\right) < \delta^2 b < \delta^4 c$, 使得

$$D_1) f(t, x) > \frac{c\eta_1}{2A\omega}, \quad I(x) > \frac{c\eta_1}{2Ap}, \quad \text{其中 } t \in [0, \omega], \delta c\eta_1 \leq x \leq \frac{c}{\delta}\eta_1;$$

$$D_2) f(t, x) < \frac{b\eta_1}{2B\omega}, \quad I(x) < \frac{b\eta_1}{2Bp}, \quad \text{其中 } t \in [0, \omega], \delta b\eta_1 \leq x \leq \frac{b}{\delta}\eta_1;$$

$$D_3) f(t, x) > \frac{a\eta_2}{2A\omega}, \quad I(x) > \frac{a\eta_2}{2Ap}, \quad \text{其中 } t \in [0, \omega], \delta a\eta_2 \leq x \leq \frac{a}{\delta}\eta_2.$$

那么脉冲边值问题(1)至少存在两个正解 $x_1, x_2 \in \overline{K(\gamma, c)}$, 使得 $x_1(l_2) > a\eta_2, x_1(l_1) < b\eta_1, x_2(l_1) > b\eta_1, x_2(l_1) < c\eta_1$.

证明 考虑由式(4)定义的算子 $T: K \rightarrow X$. 由引理 5 和引理 6 易知 $T: \overline{K(\gamma, c)} \rightarrow K$ 且 T 是全连续的. 再考虑由式(5)~(7)定义的 K 上的 3 个非负连续增泛函 $\gamma(x), \theta(x), \varphi(x)$.

下面证明算子 T 满足引理 1 中的所有条件.

首先, 由于 $\forall x \in \partial K(\gamma, c), t \in [0, \omega]$ 有 $\gamma(x) = \exp\left(\int_0^{l_1} a_2(s) ds\right) = c$, 此时 $x(t) \geq \delta \|x\| \geq \delta x(l_1) = \delta c \exp\left(-\int_0^{l_1} a_2(s) ds\right) = \delta c\eta_1$.

由命题 1 的结论 ii) 可知: 当 $x \in \partial K(\gamma, c)$ 时, 可以得到 $\|x\| \leq \frac{1}{\delta} \gamma(x) \exp\left(-\int_0^{l_1} a_2(s) ds\right) = \frac{c}{\delta} \eta_1$.

因此, 当 $x \in \partial K(\gamma, c), t \in [0, \omega]$ 时, $\delta c\eta_1 \leq x(t) \leq \frac{c}{\delta} \eta_1$.

由条件 D_1) 可知, 当 $\delta c\eta_1 \leq x \leq \frac{c}{\delta} \eta_1, t \in [0, \omega]$ 时, 有 $f(t, x) > \frac{c\eta_1}{2A\omega}, I(x) > \frac{c\eta_1}{2Ap}$, 所以此时有

$$\begin{aligned} \gamma(Tx) &= \min_{t \in [l_1, l_2]} (Tx)(t) \exp\left(\int_0^t a_2(s) ds\right) = (Tx)x(l_1) \exp\left(\int_0^{l_1} a_2(s) ds\right) \geq \\ &\exp\left(\int_0^{l_1} a_2(s) ds\right) \left[\frac{c\eta_1}{2A\omega} \frac{M_1}{K_2 - 1} \omega + \frac{c\eta_1}{2Ap} \frac{M_1}{K_2 - 1} p \right] = \\ &\exp\left(\int_0^{l_1} a_2(s) ds\right) c\eta_1 = c. \end{aligned}$$

其中, $x \in \partial K(\gamma, c)$. 即引理 1 的条件 1 被满足.

其次, 由于 $\forall x \in \partial K(\theta, b), t \in [0, \omega]$, 有 $\theta(x) = x(l_1) \exp\left(\int_0^{l_1} a_2(s) ds\right) = b$, 此时 $x(t) \geq \delta \|x\| \geq \delta b \exp\left(-\int_0^{l_1} a_2(s) ds\right) = \delta b\eta_1$.

由命题 1 的结论 ii) 可知, 当 $x \in \partial K(\theta, b)$ 时, 可以得到 $\|x\| \leq \frac{1}{\delta} \gamma(x) \exp\left(-\int_0^{l_1} a_2(s) ds\right) \leq \frac{1}{\delta} \theta(x) \exp\left(-\int_0^{l_1} a_2(s) ds\right) = \frac{b}{\delta} \eta_1$. 因此, 当 $x \in \partial K(\theta, b), t \in [0, \omega]$ 时, $\delta b\eta_1 \leq x(t) \leq \frac{b}{\delta} \eta_1$.

由条件 D_2) 可知, 当 $\delta b\eta_1 \leq x \leq \frac{b}{\delta}\eta_1, t \in [0, \omega]$ 时, 有 $f(t, x) < \frac{b\eta_1}{2B\omega}, I(x) < \frac{b\eta_1}{2Bp}$, 所以

$$\begin{aligned}\theta(Tx) &= \max_{t \in [0, l_1]} (Tx)(t) \exp\left(\int_0^t a_2(s) ds\right) = (Tx)x(l_1) \exp\left(\int_0^{l_1} a_2(s) ds\right) < \\ &\exp\left(\int_0^{l_1} a_2(s) ds\right) \left[\frac{b\eta_1}{2B\omega} \frac{M_1}{K_2-1} \omega + \frac{b\eta_1}{2Bp} \frac{M_1}{K_2-1} p\right] = \\ &\exp\left(\int_0^{l_1} a_2(s) ds\right) b\eta_1 = b.\end{aligned}$$

其中, $x \in \partial K(\theta, b)$. 即引理 1 的条件 2 被满足.

最后, 由于 $\forall x \in \partial K(\varphi, a), t \in [0, \omega]$, 有 $\varphi(x) = x(l_1) \exp\left(\int_0^{l_2} a_2(s) ds\right) = a$, 此时 $x(t) \geq \delta \|x\| \geq \delta x(l_2) = \delta a \exp\left(-\int_0^{l_1} a_2(s) ds\right) = \delta a \eta_2$.

由命题 1 的结论 ii) 可知: 当 $\forall x \in \partial K(\varphi, a)$ 时, 可以得到 $\|x\| \leq \frac{1}{\delta} \varphi(x) \exp\left(-\int_0^{l_2} a_2(s) ds\right) = \frac{a}{\delta} \eta_2$. 因此, 当 $\forall x \in \partial K(\varphi, a), t \in [0, \omega]$ 时, 有 $\delta a \eta_2 \leq x(t) \leq \frac{a}{\delta} \eta_2$.

由条件 D_3) 可知, 当 $\delta a \eta_2 \leq x \leq \frac{a}{\delta} \eta_2, t \in [0, \omega]$ 时, 有 $f(t, x) > \frac{a\eta_2}{2A\omega}, I(x) > \frac{a\eta_2}{2Ap}$, 所以此时有

$$\begin{aligned}\varphi(Tx) &= \min_{t \in [l_2, \omega]} (Tx)(t) \exp\left(\int_0^t a_2(s) ds\right) = (Tx)x(l_2) \exp\left(\int_0^{l_2} a_2(s) ds\right) \geq \\ &\exp\left(\int_0^{l_2} a_2(s) ds\right) \left[\frac{a\eta_2}{2A\omega} \frac{M_1}{K_2-1} \omega + \frac{a\eta_2}{2Ap} \frac{M_1}{K_2-1} p\right] = \\ &\exp\left(\int_0^{l_2} a_2(s) ds\right) a\eta_2 = a.\end{aligned}$$

其中, $\forall x \in \partial K(\varphi, a)$. 即引理 1 的条件 3 被满足.

故由引理 1 可知算子 $T: \overline{K(\gamma, c)} \rightarrow K$ 至少存在两个不动点 $x_1, x_2 \in \overline{K(\gamma, c)}$ 满足

$$\begin{aligned}\gamma(x_2) &= x_2(l_1) \exp\left(\int_0^{l_1} a_2(s) ds\right) < c, & a < \varphi(x_2) &= x_1(l_2) \exp\left(\int_0^{l_2} a_2(s) ds\right), \\ \theta(x_1) &= x_1(l_1) \exp\left(\int_0^{l_1} a_2(s) ds\right) < b, & b < \theta(x_2) &= x_2(l_1) \exp\left(\int_0^{l_1} a_2(s) ds\right).\end{aligned}$$

再由引理 3 可知脉冲边值问题(1)至少存在两个正解 $x_1, x_2 \in \overline{K(\gamma, c)}$, 使得 $x_1(l_2) > a\eta_2, x_1(l_1) < b\eta_1, x_2(l_1) > b\eta_1, x_2(l_2) < c\eta_1$. 证毕.

为了得到另一个新结果, 取正数 l_1, l_2 满足 $0 < l_1 < t_1 < l_2 < t_2 < \omega$, 并定义如下一些新泛函(为简单起见, 仍然采用前面的符号). 即有

$$\begin{aligned}\gamma(x) &= \max_{t \in [0, l_1]} x(t) \exp\left(\int_0^t a_2(s) ds\right) = x(l_2) \exp\left(\int_0^{l_1} a_2(s) ds\right), \\ \theta(x) &= \min_{t \in [l_1, l_2]} x(t) \exp\left(\int_0^t a_2(s) ds\right) = x(l_1) \exp\left(\int_0^{l_1} a_2(s) ds\right), \\ \varphi(x) &= \max_{t \in [0, l_2]} x(t) \exp\left(\int_0^t a_2(s) ds\right) = x(l_2) \exp\left(\int_0^{l_2} a_2(s) ds\right).\end{aligned}$$

其中, $x \in K$. 则显然如下命题成立.

命题 2 i) γ, θ, φ 是关于 $\forall x \in K$ 的非负连续增泛函;

ii) 对于 $\forall x \in K$ 有 $\gamma(x) \leq \theta(x) \leq \varphi(x)$, 并且 $\gamma(x) = x(l_1) \exp\left(\int_0^{l_1} a_2(s) ds\right) \geq \delta \exp\left(\int_0^{l_1} a_2(s) ds\right) \|x\|$, 及 $\|x\| \leq M\gamma(x)$, 其中 $M = 1/\delta \exp\left(-\int_0^{l_1} a_2(s) ds\right)$;

iii) 对 $\lambda \in [0, 1]$ 有 $\theta(\lambda x) \leq \lambda \theta(x)$.

定理 2 若存在正常数 a, b, c 满足 $0 < a < b < c, a \exp\left(\int_0^{l_2} a_2(s) ds\right) < \delta^2 b < \delta^4 c$, 使得

$$\begin{aligned} D_1) \quad & f(t,x) < \frac{c\eta_1}{2A\omega}, \quad I(x) < \frac{c\eta_1}{2Ap}, \quad \text{其中 } t \in [0, \omega], \delta c\eta_1 \leq x \leq \frac{c}{\delta}\eta_1; \\ D_2) \quad & f(t,x) > \frac{b\eta_1}{2B\omega}, \quad I(x) > \frac{b\eta_1}{2Bp}, \quad \text{其中 } t \in [0, \omega], \delta b\eta_1 \leq x \leq \frac{b}{\delta}\eta_1; \\ D_3) \quad & f(t,x) < \frac{a\eta_2}{2A\omega}, \quad I(x) < \frac{a\eta_2}{2Ap}, \quad \text{其中 } t \in [0, \omega], \delta a\eta_2 \leq x \leq \frac{a}{\delta}\eta_2, \end{aligned}$$

那么脉冲边值问题(1)至少存在两个正解 $x_1, x_2 \in \overline{K(\gamma, c)}$, 使得 $x_1(l_2) > a\eta_2, x_1(l_1) < b\eta_1, x_2(l_1) > b\eta_1, x_2(l_1) < c\eta_1$ (因篇幅限制, 证略).

参考文献:

[1] NIETO J J. Basic theory for nonresonance impulsive periodic problems of first order[J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 1997, 205(2): 423-433.

[2] ZHAO Ai-min, BAI Zhen-guo. Existence of solutions to first-order impulsive periodic boundary value problems[J]. Nonlinear Analysis, 2009, 71(5/6): 1970-1977.

[3] NIETO J J. Periodic boundary value problems for first order impulsive ordinary differential equations[J]. Nonlinear Analysis, 2002, 51(7): 1223-1232.

[4] LIU Yang-shen. Periodic boundary value problems for first order functional differential equations with impulsive[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2009, 223(1): 27-39.

[5] LIU Yu-ji. Positive solutions of periodic boundary value problems for nonlinear first-order impulsive differential equations[J]. Nonlinear Analysis, 2009, 70(5): 2106-2122.

[6] LI Jian-li, SHEN Jian-hua. New comparison results for impulsive functional differential equations[J]. Applied Mathematics Letters, 2010, 23(4): 487-493.

[7] NIETO J J. Impulsive resonance periodic problems of first order[J]. Applied Mathematics Letters, 2002, 15(4): 489-493.

[8] ZHANG Feng-qin, MA Zhi-en, YAN Ju-rang. Periodic boundary value problems for first order impulsive delay differential equations with a parameter[J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 2004, 290(1): 213-223.

[9] LI Jian-li, NIETO J J, SHEN Jian-hua. Impulsive periodic boundary value problems of first-order differential equations[J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 2007, 325(1): 226-236.

[10] 吴丽娇, 王全义. 具有脉冲的一阶非线性微分方程边值问题的正解[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2012, 33(3): 342-347.

[11] AVERY R I, HENDERSON J. Two positive fixed points of nonlinear operations on ordered Banach spaces[J]. Comm Appl Nonlinear Anal, 2001, 8(1): 27-36.

Multiple Positive Solutions of Boundary Value Problems
for Nonlinear Impulsive Differential Equations

WU Li-jiao, WANG Quan-yi

(School of Mathematical Sciences, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: The problem on the existence of multiple positive solutions of a class of boundary value problems for nonlinear first order impulsive differential equations is considered. By applying Avery-Henderson cone fixed point theorem and some analysis techniques, some new results of sufficient conditions which guarantee the existence of multiple positive solutions of the boundary value problems for the impulsive differential equations are established.

Keywords: boundary value problems; impulse; multiple positive solutions; cone; fixed point theorem

具有多个转向点的奇摄动二阶拟线性边值问题

许国安¹, 余赞平²

(1. 华侨大学 数学科学学院, 福建 泉州 362021;
2. 福建师范大学 数学与计算机科学学院, 福建 福州 350007)

摘要: 在缺乏弱稳定的条件下, 考虑具有两个转向点的二阶拟线性边值问题, 证明解的存在性并给出了解的一致有效估计. 研究结论可推广至含有 $m(m \geq 2)$ 个转向点情形.

关键词: 转向点; 边值问题; 奇摄动; 拟线性

中图分类号: O 175.1

文献标志码: A

转向点问题是奇摄动理论的重要内容, 在量子力学、流体力学、光的传播, 以及化学反应等物理和化学现象中广泛出现^[1-2], 许多学者对此问题做了大量工作^[3-7]. 然而, 其中大部分工作都是在假设弱稳定条件下完成的. 文献[8]在缺乏弱稳定的条件下考虑了具有单个转向点的二阶拟线性边值问题, 证明了解的存在性并给出了解的一致有效估计. 本文研究具有多个转向点的奇摄动二阶拟线性边值问题, 在缺乏弱稳定的条件下, 证明解的存在性并给出解的一致有效估计.

1 基本假设

考虑如下边值问题(BVP), 即

$$\left. \begin{aligned} \epsilon y''(t) &= f(t, y)y' + g(t, y), & a < t < b, \\ y(a, \epsilon) &= A, & y(b, \epsilon) &= B. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

对于边值问题(1), 作如下 3 点假设.

H₁) 退化问题 $\begin{cases} f(t, u)u' + g(t, u) = 0, \\ u(a) = A, \end{cases}$ $f(t, u)u' + g(t, u) = 0$, 以及 $\begin{cases} f(t, u)u' + g(t, u) = 0, \\ u(b) = B, \end{cases}$ 分别存

在解 $u = u_L(t) \in C^2[a, t_1]$, $u = u_0(t) \in C^2[t_1, t_2]$ 与 $u = u_R(t) \in C^2[t_2, b]$, $t_1, t_2 \in (a, b)$.

设退化轨道 $u(t) = \begin{cases} u_L(t), & t \in [a, t_1], \\ u_0(t), & t \in [t_1, t_2], \\ u_R(t), & t \in [t_2, b], \end{cases}$ 再预设区域 $\begin{cases} D_1 = \{(t, y) | a \leq t \leq t_1, |y - u_L(t)| \leq d_L(t)\}, \\ D_2 = \{(t, y) | t_1 \leq t \leq t_2, |y - u_0(t)| \leq d_0(t)\}, \\ D_3 = \{(t, y) | t_2 \leq t \leq b, |y - u_R(t)| \leq d_R(t)\}. \end{cases}$

其中, $d_L(t), d_0(t), d_R(t)$ 为正的连续函数, $\delta \leq d_L(t), d_0(t), d_R(t) \leq \max\{|u_0(t_1) - u_L(t_1)|, |u_0(t_2) - u_R(t_2)|\} + \delta$, 并且有

$$\begin{cases} d_L(t) = \begin{cases} \delta, & t \in [a, t_1 - \delta], \\ |u_0(t_1) - u_L(t_1)| + \delta, & t \in [t_1 - \delta/2, t_2], \end{cases} \\ d_0(t) = \delta, & t \in [t_1 + \delta, t_2 - \delta], \\ d_R(t) = \begin{cases} |u_0(t_2) - u_R(t_2)| + \delta, & t \in [t_2, t_2 + \delta/2], \\ \delta, & t \in [t_2 + \delta, b]. \end{cases} \end{cases}$$

这里 δ 为适当小的正数.

H₂) 设 $f(t, y), g(t, y)$ 在 $D_1 \cup D_2 \cup D_3$ 上充分光滑.

收稿日期: 2013-04-09

通信作者: 许国安(1981-), 男, 讲师, 主要从事常微分奇异摄动理论的研究. E-mail: xga99163@163.com.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目, 华侨大学科研基金资助项目(10HZR25)

$H_3)$ 设 $t=t_1, t=t_2$ 分别为边值问题(1)的 m_1, m_2 阶转向点. 这里转向点的定义如下:

设 $t=t_0$ 为边值问题(1)的 m 阶转向点, $f(t_0, y)=0, \frac{\partial f(t_0, y)}{\partial t}=\frac{\partial^2 f(t_0, y)}{\partial t^2}=\cdots=\frac{\partial^{m-1} f(t_0, y)}{\partial t^{m-1}}=0$

$$\frac{\partial^m f(t_0, y)}{\partial t^m} \neq 0, (t_0, y) \in D_1 \cup D_2 \cup D_3, m \in N.$$

可以对转向点的阶数作如下拓广, 即 $|f(t, y)|=O(|t-t_0|^m), t \rightarrow t_0$. 在拓广意义下研究转向点问题, 为了描述的方便, 作如下定义.

定义 1 函数 $u(t)$ 在 $[a, b]$ 中是 (I_q) 稳定的, 如果存在正常数 k , 使得 $\partial_y^j h(t, u(t)) \equiv 0, a \leq t \leq b, 0 \leq j \leq 2q$, 且在 $D_1 \cup D_2 \cup D_3$ 上 $\partial_y^{2q+1} h \geq k > 0$, 其中 $h(t, y) = f(t, y) \cdot u'(t) + g(t, y)$.

定义 2 函数 $u(t)$ 在 $[a, b]$ 中是 (II_n) 稳定的, 若 $u(a) \leq A, u(b) \leq B$ 且存在一个正数 k , 使得 $\partial_y^j h(t, u(t)) \geq 0, a \leq t \leq b, 1 \leq j \leq n-1$, 且在 $D_1 \cup D_2 \cup D_3$ 中, $\partial_y^n h(t, y) \geq k > 0$.

定义 3 函数 $u(t)$ 在 $[a, b]$ 中是 (III_n) 稳定的, 如果 $u(a) \geq A, u(b) \geq B$, 且存在一个正数 k , 使得 $\partial_y^{j_0(j_e)} h(t, u(t)) \geq 0, a \leq t \leq b, 1 \leq j_0, j_e \leq n-1$, 其中 $j_0(j_e)$ 表示一个奇(偶)整数, 并且在 $D_1 \cup D_2 \cup D_3$ 中, $\partial_y^n h(t, y) \leq -k < 0 (\geq k > 0)$, 若 n 是偶(奇)整数.

2 主要结果及证明

引理 1 如果假设 $H_1), H_2)$ 成立, 且退化轨道 $u(t)$ 在 $[a, b]$ 中是 (I_q) 或 $(II_n), (III_n)$ 稳定的, 则 $u_L(t_1) = u_0(t_1), u_R(t_2) = u_0(t_2)$.

证明 不妨设退化轨道是 (II_n) 稳定的(另两种稳定情形的证明类似).

先证明 $u_L(t_1) = u_0(t_1)$. 令 $h(t, y) = f(t, y)u'(t) + g(t, y)$, 假设 $u_L(t_1) \neq u_0(t_1)$, 不妨假设 $u_L(t_1) < u_0(t_1)$, 则

$$\begin{aligned} & f(t_1, u_L(t_1))u'_L(t_1) + g(t_1, u_L(t_1)) - f(t_1, u_0(t_1))u'_0(t_1) - g(t_1, u_0(t_1)) = \\ & h(t_1, u_L(t_1)) - [\sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{i!} \partial_y^i h(t_1, u_L(t_1))(u_0(t_1) - u_L(t_1))^i + \\ & \frac{1}{n!} \partial_y^n h(t_1, y)(u_0(t_1) - u_L(t_1))^n] + f(t_1, u_0(t_1))[u'_L(t_1) - u'_0(t_1)]. \end{aligned}$$

由于 t_1 为 m_1 阶转向点, 故 $f(t_1, u_0(t_1))=0$, 且已知 $h(t_1, u_L(t_1))=0$. 此外, 又由于 $u(t)$ 是 (II_n) 稳定的, 故 $\partial_y^i h(t_1, u_L(t_1)) \geq 0 (i=1, \cdots, n-1), \partial_y^n h(t_1, y) \geq k > 0 (y \text{ 介于 } u_L(t_1) \text{ 与 } u_0(t_1) \text{ 之间})$, 从而有

$$\begin{aligned} & f(t_1, u_L(t_1))u'_L(t_1) + g(t_1, u_L(t_1)) - f(t_1, u_0(t_1))u'_0(t_1) - g(t_1, u_0(t_1)) = \\ & - \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{i!} \partial_y^i h(t_1, u_L(t_1))(u_0(t_1) - u_L(t_1))^i + \frac{1}{n!} \partial_y^n h(t_1, y)(u_0(t_1) - u_L(t_1))^n] < 0. \end{aligned}$$

这与 $f(t_1, u_L(t_1))u'_L(t_1) + g(t_1, u_L(t_1)) - f(t_1, u_0(t_1))u'_0(t_1) - g(t_1, u_0(t_1))=0$ 矛盾. 同理可证, 当 $u_L(t_1) > u_0(t_1)$ 时, 也存在矛盾, 故假设不成立, 即 $u_L(t_1) = u_0(t_1)$. 类似可证 $u_0(t_2) = u_R(t_2)$.

由引理 1 结论可知, 在假设稳定的条件下, 退化解在转向点处一定是相连的, 即退化轨道是连续的.

定理 1 若假设 $H_1) \sim H_3)$ 成立, 且设退化轨道 $u(t)$ 是 (I_0) 稳定的, 则存在 $\epsilon_0 > 0$, 使得对于 $0 < \epsilon \leq \epsilon_0$ 时, 边值问题(1)存在解 $y = y(t, \epsilon)$, 满足 $|y(t, \epsilon) - u(t)| \leq v_1(t, \epsilon) + v_2(t, \epsilon) + c\epsilon^p$. 其中: $v_1(t, \epsilon) = \frac{1}{2}(\frac{\epsilon}{k})^{1/2} |u'_0(t_1) - u'_L(t_1)| \cdot \exp[-(\frac{k}{\epsilon})^{1/2} |t - t_1|]; v_2(t, \epsilon) = \frac{1}{2}(\frac{\epsilon}{k})^{1/2} \cdot |u'_R(t_2) - u'_0(t_2)| \cdot \exp[-(\frac{k}{\epsilon})^{1/2} |t - t_2|]; p = \min\{\frac{m}{2}, 1\}; m = \min\{m_1, m_2\}; c$ 为充分大的正数.

证明 定义 $\alpha(t, \epsilon) = u(t) - v_1(t, \epsilon) - v_2(t, \epsilon) - \frac{\epsilon r}{k} - \frac{c_1 \epsilon^{m/2}}{k}, \beta(t, \epsilon) = u(t) - v_1(t, \epsilon) - v_2(t, \epsilon) - \frac{\epsilon r}{k} + \frac{c_1 \epsilon^{m/2}}{k}$. 其中, c_1 为某一充分大的正数, $r \geq |u''|$.

先考虑界定函数 $\alpha(t, \epsilon)$, 注意到 v_1 是 $\epsilon v'' = kv$ 在 $[a, t_1) \cup (t_1, b]$ 中的解, v_2 是 $\epsilon v'' = kv$ 在 $[a, t_2) \cup (t_2, b]$ 中的解, 且满足

$$v'_1(t_1^-, \epsilon) = -v'_1(t_1^+, \epsilon) = \frac{1}{2} |u'_0(t_1) - u'_L(t_1)|,$$

$$v_1(t_1^-, \epsilon) = v_1(t_1^+, \epsilon) = \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon}{k}\right)^{1/2} |u'_0(t_1) - u'_L(t_1)|,$$

$$v'_2(t_2^-, \epsilon) = -v'_2(t_2^+, \epsilon) = \frac{1}{2} |u'_0(t_2) - u'_R(t_2)|,$$

$$v_2(t_2^-, \epsilon) = v_2(t_2^+, \epsilon) = \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon}{k}\right)^{1/2} |u'_0(t_2) - u'_R(t_2)|.$$

故 $\alpha'(t_i^-, \epsilon) \leq \alpha'(t_i^+, \epsilon)$, $i=1, 2$, 且有

$$\begin{aligned} \epsilon \alpha'' - f(t, \alpha) \alpha' - g(t, \alpha) = \\ \epsilon u'' - \epsilon v''_1 - \epsilon v''_2 + \partial_y h(t, \xi)(u - \alpha) + f(t, \alpha)(v'_1 + v'_2) \geq \\ \epsilon r - \epsilon |u''| + c_1 \epsilon^{m/2} - |f(t, \alpha) v'_1| - |f(t, \alpha) v'_2|. \end{aligned}$$

由文献[8]的定理1证明, 可得 $|f(t, \alpha) v'_1| \leq c_1/2\epsilon^{m_1/2} \leq c_1/2\epsilon^{m/2}$, $|f(t, \alpha) v'_2| \leq c_1/2\epsilon^{m_1/2} \leq c_1/2\epsilon^{m/2}$. 当 $0 < \epsilon < 1$ 时, $\epsilon \alpha'' - f(t, \alpha) \alpha' - g(t, \alpha) \geq 0$.

同理可证, $\beta'(t_i^-, \epsilon) \geq \beta'(t_i^+, \epsilon)$, $i=1, 2$, 且 $\epsilon \beta' - f(t, \beta) \beta' - g(t, \beta) \leq 0$, $r \geq |u''(t)|$ 时. α, β 分别是边值问题(1)的下解与上解, 故由引理1知边值问题(1)存在解 $y = y(t, \epsilon)$, 满足 $|y(t, \epsilon) - u(t)| \leq v_1(t, \epsilon) + v_2(t, \epsilon) + c\epsilon^p$, $m = \min\{m_1, m_2\}$; 当 $0 < m < 2$ 时, $p = m/2$, 当 $m \geq 2$ 时, $p = 1$, $c > c_1$ 为充分大的正数.

定理2 若设 $H_1) \sim H_3)$ 成立, 且退化轨道 $u(t)$ 是 (I_q) ($q \geq 1$) 稳定的, 则当转向点的阶数 $m_1, m_2 > 1 + 1/q$ 时, 存在 ϵ_0 , 使得当 $0 < \epsilon \leq \epsilon_0$ 时, 边值问题(1)存在解 $y = y(t, \epsilon)$, 满足

$$|y(t, \epsilon) - u(t)| \leq v_3(t, \epsilon) + v_4(t, \epsilon) + \bar{c} \epsilon^{1/2q(2q+1)}.$$

式中: $v_3(t, \epsilon) = \epsilon^{1/2q} \sigma_1 (\epsilon^{1/2(q+1)} + \sigma_2 |t - t_1|)^{-1/q}$; $v_4(t, \epsilon) = \epsilon^{1/2q} \sigma_3 (\epsilon^{1/2(q+1)} + \sigma_4 |t - t_2|)^{-1/q}$. 其中: $\sigma_1 = \frac{1}{2} |u'_0(t_1) - u'_L(t_1)|^{1/q+1} \left[\frac{(2q+2)!}{2k} \right]^{1/2(q+1)}$; $\sigma_2 = q \left[\frac{(2q+2)!}{2k} \right]^{-1/2(q+1)} |u'_0(t_1) - u'_L(t_1)|^{q/q+1}$; $\sigma_3 = \frac{1}{2} \times |u'_0(t_2) - u'_R(t_2)|^{1/q+1} \left[\frac{(2q+2)!}{2k} \right]^{1/2(q+1)}$; $\sigma_4 = q \left[\frac{(2q+2)!}{2k} \right]^{-1/2(q+1)} |u'_0(t_2) - u'_R(t_2)|^{q/q+1}$; $\bar{c}$ 为某一充分大的正数.

证明 定义 $\alpha(t, \epsilon) = u(t) - v_3(t, \epsilon) - v_4(t, \epsilon) - \frac{\epsilon r^{1/2q+1}}{k} - \bar{c} \frac{(2q+1)!}{k} \epsilon^{1/2q(2q+1)}$, $\beta(t, \epsilon) = u(t) + v_3(t, \epsilon) + v_4(t, \epsilon) + \frac{\epsilon r^{1/2q+1}}{k} + \bar{c} \frac{(2q+1)!}{k} \epsilon^{1/2q(2q+1)}$, $\bar{c}$ 为某一充分大的正数, $r \geq |u''(t)|(2q+1)!$.

先考虑界定函数 $\alpha(t, \epsilon)$, 注意到 v_3 是 $\epsilon v'' = \frac{k}{(2q+1)!} v^{2q+1}$ 在 $[a, t_1) \cup (t_1, b]$ 中的解, v_4 是 $\epsilon v'' = \frac{k}{(2q+1)!} v^{2q+1}$ 在 $[a, t_2) \cup (t_2, b]$ 中的解, 且满足

$$v'_3(t_1^-, \epsilon) = -v'_3(t_1^+, \epsilon) = \frac{1}{2} |u'_0(t_1) - u'_L(t_1)|,$$

$$v_3(t_1^-, \epsilon) = v_3(t_1^+, \epsilon) = \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon}{k}\right)^{1/2} |u'_0(t_1) - u'_L(t_1)|,$$

$$v'_4(t_2^-, \epsilon) = -v'_4(t_2^+, \epsilon) = \frac{1}{2} |u'_0(t_2) - u'_R(t_2)|,$$

$$v_4(t_2^-, \epsilon) = v_4(t_2^+, \epsilon) = \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon}{k}\right)^{1/2} |u'_0(t_2) - u'_R(t_2)|.$$

故 $\alpha'(t_i^-, \epsilon) \leq \alpha'(t_i^+, \epsilon)$, $i=1, 2$, 且有

$$\begin{aligned} \epsilon \alpha'' - f(t, \alpha) \alpha' - g(t, \alpha) = \\ \epsilon u'' - \epsilon v''_3 - \epsilon v''_4 - \frac{1}{(2q+1)!} \partial_y^{2q+1} h(t, \xi)(\alpha - u) + f(t, \alpha)(v'_3 + v'_4) \geq \\ \frac{\epsilon r}{(2q+1)!} - \epsilon |u''| + \bar{c} \epsilon^{1/2q} - |f(t, \alpha) v'_3| - |f(t, \alpha) v'_4|. \end{aligned}$$

由文献[8]的定理 2 证明, 可得 $|f(t, \alpha)v'_3| \leq \bar{c}/2\epsilon^{1/2q}$, $|f(t, \alpha)v'_3| \leq \bar{c}/2\epsilon^{1/2q}$. 当 $0 < \epsilon \ll 1$ 时, $\epsilon\alpha'' - f(t, \alpha)u'(t) - g(t, \alpha) \geq 0$.

同理可证, $\beta'(t_i^-, \epsilon) \geq \beta'(t_i^+, \epsilon)$, $i=1, 2$, 且 $\epsilon\beta' - f(t, \beta)\beta'(t) - g(t, \beta) \leq 0$, 当 $r \geq |u''|(2q+1)!$ 时.

α, β 分别是边值问题(1)的下解与上解, 由引理 1 知边值问题(1)存在解 $y=y(t, \epsilon)$, 满足 $|y(t, \epsilon) - u(t)| \leq v_3(t, \epsilon) + v_4(t, \epsilon) + \bar{c}\epsilon^{1/2q(2q+1)}$. 若退化轨道 $u(t)$ 是 (II_n) 或 (III_n) 稳定时, 也能得到如下结论.

定理 3 若假设 $H_1) \sim H_3)$ 成立, 且退化轨道 $u(t)$ 是 (II_n) 稳定的, 有 $u''_{\text{L}} \geq 0, u''_0 \geq 0, u''_{\text{R}} \geq 0$, 以及 $u'_{\text{L}}(t_1) < u'_0(t_1), u'_0(t_2) < u'_{\text{R}}(t_2)$, 则当转向点阶数 $m_1, m_2 > \frac{n+1}{2}$ 时, 存在 $\epsilon_0 > 0$, 使得对于 $0 < \epsilon \leq \epsilon_0$ 时, 边值问题(1)存在解 $y=y(t, \epsilon)$, 满足 $0 \leq y(t, \epsilon) - u(t) \leq v_5(t, \epsilon) + v_6(t, \epsilon) + c\epsilon^{1/2qn}$. 其中: $v_5(t, \epsilon) = \frac{1}{2}\sigma_5[1 + \frac{n-1}{2}(\frac{\epsilon(n+1)!}{2k})^{-1/2}\sigma_5^{n+1}] = \frac{\epsilon(n+1)!}{2k}|u'_0(t_1) - u'_{\text{L}}(t_1)|^2$; $v_6(t, \epsilon) = \frac{1}{2}\sigma_6[1 + \frac{n-1}{2}(\frac{\epsilon(n+1)!}{2k})^{-1/2}\sigma_6^{\frac{n-1}{2}}|t-t_2|]^{\frac{2}{1-n}}, \sigma_6^{n+1} = \frac{\epsilon(n+1)!}{2k}|u'_0(t_2) - u'_{\text{R}}(t_2)|^2$; c 为充分大的正数.

定理 4 若假设 $H_1) \sim H_3)$ 成立, 且退化轨道 $u(t)$ 是 (III_n) 稳定的, 有 $u''_{\text{L}} \leq 0, u''_0 \leq 0, u''_{\text{R}} \leq 0$, 以及 $u'_{\text{L}}(t_1) > u'_0(t_1), u'_0(t_2) > u'_{\text{R}}(t_2)$, 则当转向点阶数 $m_1, m_2 > \frac{n+1}{2}$ 时, 存在 $\epsilon_0 > 0$, 使得对于 $0 < \epsilon \leq \epsilon_0$ 时, 边值问题(1)存在解 $y=y(t, \epsilon)$, 满足 $-v_5(t, \epsilon) - v_6(t, \epsilon) - c\epsilon^{1/2qn} \leq y(t, \epsilon) - u(t) \leq 0$. 其中: $v_5(t, \epsilon), v_6(t, \epsilon)$ 与定理 3 一致.

以上讨论可推广至含有 $m(m > 2)$ 个转向点情形, 并可得到类似的结论.

参考文献:

- [1] NAYFEH A H. Perturbation methods[M]. New York: Wiley, 1973: 120-200.
- [2] OMALLEY R E. Introduction to singular perturbations[M]. New York: Academic Press, 1974: 1-45.
- [3] 余赞平. 一类具有高阶转向点的二次问题的奇摄动[J]. 数学研究, 2005, 38(2): 180-183.
- [4] 蔡建平, 林宗池. 具有转向点的三阶半线性奇摄动边值问题解的存在性[J]. 应用数学和力学, 1993, 14(12): 1035-1039.
- [5] 吴钦宽, 张祥. 具有转向点的奇摄动非线性边值问题解的一致有效估计[J]. 应用数学, 1995, 8(2): 231-238.
- [6] 余赞平, 肖蓬. 一类具有转向点的边值问题的奇摄动[J]. 福建师范大学学报: 自然科学版, 2004, 20(4): 6-8.
- [7] 章国华, 侯斯 F A. 非线性奇异摄动现象: 理论和应用[M]. 福州: 福建科学技术出版社, 1989: 6-15, 28-31.
- [8] 许国安, 余赞平. 具有转向点的奇摄动二阶拟线性边值问题[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2010, 31(3): 346-350.

Singular Perturbation Second Order Quasilinear Boundary Value Problem with Multi-Turning Point

XU Guo-an¹, YU Zan-ping²

(1. School of Mathematical Sciences, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;

2. School of Mathematics and Computer Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: The singularly perturbation second order quasilinear boundary value problem with two turning points is studied. Under the weakness condition, the existence of solutions is proved, and the uniformly valid asymptotic estimation of solutions is obtained. The results could be extended to boundary value problem (BVP) with m ($m > 2$) turning points.

Keywords: turning point; boundary value problem; singular perturbation; quasilinear

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 黄心中)

解析函数的复合边值逆问题

武模忙, 林峰, 李锦成

(华侨大学 数学科学学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 给出解析函数的复合边值逆问题的数学提法. 利用已有的复合边值问题的结果, 讨论此边值逆问题的可解性, 并给出其可解条件和解的积分表达式.

关键词: 复合边值; 逆问题; Riemann 边值逆问题; Hilbert 边值逆问题; 复合边值问题

中图分类号: O 175.8

文献标志码: A

文献[1-2]给出一类解析函数的 Riemann 边值逆问题的提法, 讨论了该边值逆问题的正则型和非正则型情况的解法. 文献[3]给出解析函数的 Hilbert 边值逆问题的提法, 讨论了此边值逆问题的可解性, 给出其可解条件和解的表达式. 文献[4-5]给出了半平面中解析函数的 Hilbert 边值逆问题的提法, 得到了该边值逆问题的可解条件和解的积分表达式. 文献[6-8]分别研究了广义解析函数的 Riemann 边值问题、一类 Dirichlet 边值逆问题及半平面中的 Dirichlet 边值逆问题. 文献[9-11]分别讨论了解析函数的非正则型 Riemann Hilbert 边值逆问题、解析函数在开口弧段上的 Riemann 边值逆问题, 以及双解析函数在开口弧段上的 Riemann 边值逆问题. 本文将讨论解析函数的复合边值逆问题.

1 问题的提法

设 L 为复平面中的一单位圆 $|t|=1$ 且已取定逆时针向为其正向, 其内域记为 D . 在 D 内又有一组互相外离的封闭光滑曲线 $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_n$, 均已取定顺时针向为其正向. 记 $\Gamma = \sum_{j=1}^n \Gamma_j$, Γ_j 所围内域记为 D_j^- , 而 L 与 Γ 间所围区域记为 D_0^+ .

求函数组 $(\Phi(z), \Psi_1(\tau), \Psi_2(\tau))$. 其中: $\Phi(z)$ 为 D 中以 Γ 为跳跃曲线的分区全纯函数; $\Psi_1(\tau)$ 为 Γ 上的 H 类函数; $\Psi_2(\tau)$ 为 L 上的 H 类实函数. 满足下列边值条件, 即

$$\begin{cases} G_{1,1}(\tau)\Phi^+(\tau) = G_{1,2}(\tau)\Phi^-(\tau) + g_1(\tau)\Psi_1(\tau) + h_1(\tau), & \tau \in \Gamma, \\ G_{2,1}(\tau)\Phi^+(\tau) = G_{2,2}(\tau)\Phi^-(\tau) + g_2(\tau)\Psi_1(\tau) + h_2(\tau), & \tau \in \Gamma, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \operatorname{Re}[\overline{\lambda_1(t)}\Phi^+(t)] = r_1(t)\Psi_2(t) + c_1(t), & t \in \Gamma, \\ \operatorname{Re}[\overline{\lambda_2(t)}\Phi^+(t)] = r_2(t)\Psi_2(t) + c_2(t), & t \in \Gamma. \end{cases} \quad (2)$$

式(1), (2)中: $G_{pq}(\tau), g_p(\tau), h_p(\tau), p=1, 2; q=1, 2$ 都是 Γ 上的已知 H 类函数; $\lambda_p(t) = a_p(t) + ib_p(t)$, $a_p(t), b_p(t), r_p(t), c_p(t), p=1, 2$ 都是 L 上的已知 H 类实函数, 且 $r_1(t) \neq r_2(t)$.

记 $G_1(\tau) = \begin{vmatrix} G_{1,1}(\tau) & g_1(\tau) \\ G_{2,1}(\tau) & g_2(\tau) \end{vmatrix}$, $G_2(\tau) = \begin{vmatrix} G_{1,2}(\tau) & g_1(\tau) \\ G_{2,2}(\tau) & g_2(\tau) \end{vmatrix}$, $G_3(\tau) = \begin{vmatrix} G_{1,1}(\tau) & G_{1,2}(\tau) \\ G_{2,1}(\tau) & G_{2,2}(\tau) \end{vmatrix}$, $G_4(\tau) = \begin{vmatrix} h_1(\tau) & G_{1,2}(\tau) \\ h_2(\tau) & G_{2,2}(\tau) \end{vmatrix}$, $\tilde{h}(\tau) = \begin{vmatrix} h_1(\tau) & g_1(\tau) \\ h_2(\tau) & g_2(\tau) \end{vmatrix}$, $\lambda(t) = \begin{vmatrix} \lambda_1(t) & r_1(t) \\ \lambda_2(t) & r_2(t) \end{vmatrix}$, $r(t) = \begin{vmatrix} 1 & r_1(t) \\ 1 & r_2(t) \end{vmatrix}$, $c(t) = \begin{vmatrix} c_1(t) & r_1(t) \\ c_2(t) & r_2(t) \end{vmatrix}$. 其中, $\tau, t \in \Gamma$.

上述问题称为解析函数的复合边值逆问题,简称为 RH^{-1} 问题,若 $G_1(\tau) \neq 0, G_2(\tau) \neq 0, \lambda(t) \neq 0$, 则称该逆问题为正则型 RH^{-1} 问题, 否则称为非正则型 RH^{-1} 问题. 以下讨论正则型 RH^{-1} 问题.

2 问题的转化

由式(1)的第一式两端乘以 $g_2(\tau)$, 并与式(1)的第二式两端乘以 $g_1(\tau)$ 后相减, 可得

$$\Phi^+(\tau) = G(\tau)\Phi^-(\tau) + h(\tau) \quad \tau \in \Gamma. \tag{3}$$

式(3)中: $G(\tau) = \frac{G_2(\tau)}{G_1(\tau)}, h(\tau) = \frac{\tilde{h}(\tau)}{G_1(\tau)}, \tau \in \Gamma.$

由式(2)的第一式两端乘以 $r_2(t)$, 并与式(2)的第二式两端乘以 $r_1(t)$ 后相减, 可得

$$\operatorname{Re}[\overline{\lambda(t)}\Phi^+(t)] = c(t), \quad r \in \Gamma. \tag{4}$$

这样, 若求满足 RH^{-1} 问题边值条件的分区全纯函数 $\Phi(z)$, 即求满足以下复合边值问题

$$\left. \begin{aligned} \Phi^+(\tau) &= G(\tau)\Phi^-(\tau) + h(\tau) & \tau \in \Gamma, \\ \operatorname{Re}[\overline{\lambda(t)}\Phi^+(t)] &= c(t), & t \in \Gamma \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

的分区全纯函数 $\Phi(z)$.

记 $\ln d_{r_j} G(\tau) = \frac{1}{2\pi} [\arg G(\tau)]_{r_j} = \kappa_j, \ln d_r G(\tau) = \kappa = \sum_{j=1}^n \kappa_j, \ln d_l \lambda(t) = \frac{1}{2\pi} [\arg \lambda(t)]_r = k,$
 $K = k + \kappa$, 而把 $2K$ 称为所提 RH^{-1} 问题的指标.

由文献[12]可知, 复合边值问题(5)的一般解为

$$\Phi(z) = X(z) = \Phi_0(z) + \Phi_1(z), \tag{6}$$

且有

$$\Phi_1(z) = \frac{X(z)}{2\pi i} \int_{\Gamma} \frac{h(\zeta) d\zeta}{X^+(\zeta)(\zeta - z)} + X(z)F(z), \quad z \notin \Gamma, \tag{7}$$

$$X(z) = \begin{cases} \frac{\exp(\Gamma(z))}{\prod(z)}, & z \in D_0^+ + L, \\ \exp(\Gamma(z)), & z \in \sum_{j=1}^n D_j^-, \end{cases} \tag{8}$$

式(8)中: $\prod(z) = \prod_{j=1}^n (z - z_j)^{\kappa_j}; \Gamma(z) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\Gamma} \frac{\log[\prod(\zeta)G(\zeta)]}{\zeta - z} d\zeta; z_j$ 为 D_j^- 内任意的点.

以下不妨取 $F(z) \equiv 0, \Phi_0(z)$ 由下式确定, 即

$$\operatorname{Re}[\overline{\lambda(t)}X(t)\Phi_0^+(t)] = c^*(t), \quad t \in \Gamma. \tag{9}$$

式(9)中: $c^*(t) = c(t) - \operatorname{Re}[\overline{\lambda(t)}X(t)\Phi_1(t)], c^*(t) \in H$ 于 L 上, $\overline{\lambda(t)}X(t) \in H$ 于 L 上.

3 问题的求解

3.1 Hilbert 边值问题(9)的求解

考虑如下 Riemann 边值问题

$$\Omega^+(t) = G^*(t)\Omega^-(t) + g^*(t), \quad t \in L. \tag{10}$$

式(10)中: $G^*(t) = \frac{\lambda(t)\overline{X(t)}}{\lambda(t)X(t)}, g^*(t) = \frac{2c^*(t)}{\lambda(t)X(t)}, t \in L.$ Riemann 边值问题(10)的指标为

$$\kappa' = \ln d_r G^*(t) = \ln d_r \left[\frac{\lambda(t)\overline{X(t)}}{\lambda(t)X(t)} \right] = \ln d_r \left[\frac{\lambda(t)}{\lambda(t)} \right] + \ln d_r \left[\frac{\overline{X(t)}}{X(t)} \right] =$$

$$2\ln d_r \lambda(t) - 2\ln d_r X(t) = 2k - 2\ln d_r \left[\prod_{j=1}^n (t - z_j)^{\kappa_j} \exp(\Gamma(t)) \right] =$$

$$2k - 2(-\kappa + \ln d_r \exp(\Gamma(t))) = 2(k + \kappa) = 2K.$$

I) 当 $K \geq 0$ 时, Riemann 边值问题(10)在 R_0 中有一个特解, 即

$$\Omega_0(z) = \frac{X_1(z)}{\pi i} \int_{\Gamma} \frac{c^*(\xi) d\xi}{\lambda(\xi) X(\xi) X_1^+(\xi) (\xi - z)}, \quad z \notin L. \quad (11)$$

式(11)中: $X_1(z) = \begin{cases} C \exp(\Gamma_1(z)), & |z| < 1, \\ C z^{-2K} \exp(\Gamma_1(z)), & |z| > 1; \end{cases} \Gamma_1(z) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\Gamma} \frac{\log[\xi^{-2K} G^*(\xi)]}{\xi - z} d\xi; \overline{X_1^+(t)} = t^{2K} X_1^-(t)$. 这里已取 $C = \exp\left\{-\frac{i}{4\pi} \int_0^{2\pi} \arg\left[-t^{-2K} \frac{\lambda(t) \overline{X(t)}}{\lambda(t) X(t)}\right] d\theta\right\}, t = \exp(i\theta)$.

令

$$\Omega(z) = \frac{1}{2}[\Omega_1(z) + \Omega_{0*}(z)] = \frac{X_1(z)}{2\pi i} \int_{\Gamma} \frac{c^*(\xi) d\xi}{\lambda(\xi) X(\xi) X_1^+(\xi) (\xi - z)} + \frac{z^{2K+1} X_1(z)}{2\pi i} \int_{\Gamma} \frac{c^*(\xi) d\xi}{\lambda(\xi) X(\xi) X_1^+(\xi) \xi^{2K+1} (\xi - z)}, \quad z \notin L. \quad (12)$$

式(12)中, $\Omega_{0*}(z)$ 是 $\Omega_0(z)$ 关于 $|t|=1$ 的对称扩张, 则有 $\tilde{\phi}_0(z) = \Omega(z), |t| < 1$ 是 Hilbert 边值问题(9)的一个特解. 因此, Hilbert 边值问题(9)的一般解为

$$\Phi_0(z) = \tilde{\phi}_0(z) + X_1(z) \sum_{j=0}^{2K} C_j z^j. \quad (13)$$

式(13)中, $C_0, C_1, C_2, \dots, C_{2K-1}, C_{2K}$ 为任意常数, 且须满足

$$C_0 = \bar{C}_{2K}, C_1 = C_{2K-1}, \dots, C_{K-1} = \bar{C}_{K+1}, C_K = \bar{C}_K. \quad (14)$$

II) 当 $K < 0$ 时, 当且仅当条件

$$\int_{\Gamma} \frac{\xi^m c^*(\xi) d\xi}{\lambda(\xi) X(\xi) X_1^+(\xi)} = 0, \quad m = 0, 1, \dots, -2K-2 \quad (15)$$

成立时, Hilbert 边值问题(9)有唯一解为

$$\Phi_0(z) = \frac{X_1(z)}{2\pi i} \int_{\Gamma} \frac{c^*(\xi) d\xi}{\lambda(\xi) X(\xi) X_1^+(\xi) (\xi - z)}, \quad |z| < 1. \quad (16)$$

因此, 复合边值逆问题的解中 $\Phi(z)$ 的表达式为

$$\Phi(z) = X(z) \Phi_0(z) + \Phi_1(z). \quad (17)$$

式(17)中: 当 $K \geq 0$ 时, $\Phi_0(z)$ 由式(13)给出; 当 $K < 0$ 时, 当且仅当条件式(15)满足, $\Phi_0(z)$ 由式(16)给出. 此外, $\Phi_1(z), X(z)$ 分别由式(7)和式(8)给出.

3.2 $\Psi_1(\tau)$ 的求解

将复合边值逆问题的解 $\Phi(z)$ 代入式(1)中, 将其第一式两端乘以 $G_{2,2}(\tau)$ 并与与第二式两端乘以 $G_{1,2}(\tau)$ 后相减, 可得

$$\Psi_1(\tau) = \frac{G_3(\tau)}{G_2(\tau)} \Phi^+(\tau) + \frac{G_4(\tau)}{G_2(\tau)} = -\frac{G_3(\tau)}{G_2(\tau)} [X^+(\tau) \Phi_0(\tau) \Phi_1^+(\tau)] + \frac{G_4(\tau)}{G_2(\tau)}. \quad (18)$$

式(18)中, 当 $K \geq 0$ 时, $\Phi_0(\tau)$ 由 τ 代入式(13)得到; 当 $K < 0$ 时, 当且仅当条件式(15)满足时, $\Phi_0(\tau)$ 由 τ 代入式(16)得到. 由式(7), (8)及 Cauchy 型积分 Plemelj 公式, 可以得到

$$\Phi_1^+(\tau) = \frac{h(\tau)}{2} + \frac{X^+(\tau)}{2\pi i} \int_{\Gamma} \frac{h(\zeta) d\zeta}{X^+(\zeta) (\zeta - \tau)}, \quad z \notin \Gamma, \quad (19)$$

$$X^+(\tau) = \frac{\exp(\Gamma^+(\tau))}{\prod(\tau)}, \quad \tau \in \Gamma. \quad (20)$$

3.3 $\Psi_2(t)$ 的求解

将复合边值逆问题的解 $\Phi(z)$ 代入式(2)中, 两式相减可得

$$\operatorname{Re}[(\lambda_2(t) - \lambda_1(t)) \Phi^+(t)] = r(t) \Psi_2(t) + c_2(t) - c_1(t), \quad t \in L, \quad (21)$$

$$\begin{aligned} 2r(t) \Psi_2(t) &= (\lambda_2(t) - \lambda_1(t)) \Phi^+(t) + (\lambda_2(t) - \lambda_1(t)) \overline{\Phi^+(t)} - \\ &= 2(c_2(t) - c_1(t)), \quad t \in L. \end{aligned} \quad (22)$$

(I) 当 $K \geq 0$ 时, 由于有

$$\Phi(z) = X(z)\tilde{\phi}_0(z) + X(z)X_1(z)\sum_{j=0}^{2K}C_jz^j + \Phi_1(z),$$

(23)

所以有

$$\begin{aligned} 2r(t)\Psi_2(t) &= \overline{(\lambda_2(t) - \lambda_1(t))}X(t)\tilde{\phi}_0^+(t) + (\lambda_2(t) - \lambda_1(t))\overline{X(t)}\overline{\phi_0^+(t)} + \\ &\overline{(\lambda_2(t) - \lambda_1(t))}X(t)X_0^+(t)\sum_{j=0}^{2K}C_jt^j + (\lambda_2(t) - \lambda_1(t))\overline{X(t)}\overline{X_1^+(t)}\sum_{j=0}^{2K}\overline{C_jt^j} + \\ &\overline{(\lambda_2(t) - \lambda_1(t))}\Phi_1^+(t) + (\lambda_2(t) - \lambda_1(t))\overline{\Phi_1^+(t)} - 2(c_2(t) - c_1(t)) = \\ &I_1 + I_2 + I_3 + I_4. \end{aligned}$$

(24)

式(24)中: I_1 为和式中第 1,2 项之和, I_2 为第 3,4 项之和, I_3 为第 5,6 项之和, I_4 为第 7 项.

注意到有

$$\tilde{\phi}_0^+(t) = \Omega^+(t), \quad \overline{\phi_0^+(t)} = \Omega^-(t).$$

由 Cauchy 型积分 Plemelj 公式,可以得到

$$\begin{aligned} \tilde{\phi}_0^+(t) = \Omega^+(t) &= \frac{c^*(t)}{\lambda(t)X(t)} + \frac{X_1^+(t)}{2\pi i} \int_r \frac{c^*(\xi)d\xi}{\lambda(\xi)X(\xi)X_1^+(\xi)(\xi - t)} + \\ &\frac{t^{2K+1}X_1^+(t)}{2\pi i} \int_r \frac{c^*(\xi)d\xi}{\lambda(\xi)X(\xi)X_1^+(\xi)\xi^{2K+1}(\xi - t)}, \end{aligned}$$

(25)

$$\begin{aligned} \overline{\phi_0^+(t)} = \Omega^-(t) &= -\frac{c^*(t)X_1^-(t)}{\lambda(t)X(t)X_1^+(t)} + \frac{X_1^-(t)}{2\pi i} \int_r \frac{c^*(\xi)d\xi}{\lambda(\xi)X(\xi)X_1^+(\xi)(\xi - t)} + \\ &\frac{t^{2K+1}X_1^-(t)}{2\pi i} \int_r \frac{c^*(\xi)d\xi}{\lambda(\xi)X(\xi)X_1^+(\xi)\xi^{2K+1}(\xi - t)}, \end{aligned}$$

(26)

所以有

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{c^*(t)X_2(t)}{\lambda(t)X(t)X_1^+(t)} + \frac{X_3(t)}{2\pi i} \times \\ &\left[\int_r \frac{c^*(\xi)d\xi}{\lambda(\xi)X(\xi)X_1^+(\xi)(\xi - t)} + t^{2K+1} \int_r \frac{c^*(\xi)d\xi}{\lambda(\xi)X(\xi)X_1^+(\xi)\xi^{2K+1}(\xi - t)} \right]. \end{aligned}$$

(27)

式中: $X_2(t) = \overline{(\lambda_2(t) - \lambda_1(t))}X(t)X_1^+(t) - (\lambda_2(t) - \lambda_1(t))\overline{X(t)}X_1^+(t)$; $X_3(t) = \overline{(\lambda_2(t) - \lambda_1(t))}X(t) \times X_1^+(t) - (\lambda_2(t) - \lambda_1(t))\overline{X(t)}X_1^+(t)$.

注意到 $\overline{X_1^+(t)}t^{2K}X_1^-(t)$ 及式(14),可以得到

$$I_2 = X_3(t)\sum_{j=0}^{2K}C_jt^j,$$

(28)

$$I_3 = 2\text{Re}[\overline{(\lambda_2(t) - \lambda_1(t))}\Phi_1^+(t)],$$

(29)

$$I_4 = -2(c_2(t) - c_1(t)),$$

(30)

所以有

$$\Psi_2(t) = (I_1 + I_2 + I_3 + I_4)/2r(t).$$

(31)

式(31)中: I_1, I_2, I_3, I_4 分别由式(27)~(30)给出.

(II) 当 $K < 0$ 时,当且仅当条件式(15)成立时, 其唯一解为

$$\Phi(z) = X(z)\Phi_0(z) + \Phi_1(z).$$

其中, $\Phi_0(z)$ 由式(16)给出,所以有

$$\begin{aligned} 2r(t)\Psi_2(t) &= \overline{(\lambda_2(t) - \lambda_1(t))}X(t)\Phi_0^+(t) + (\lambda_2(t) - \lambda_1(t))\overline{X(t)}\overline{\Phi_1^+(t)} + \\ &\overline{(\lambda_2(t) - \lambda_1(t))}\Phi_0^+(t) + (\lambda_2(t) - \lambda_1(t))\overline{\Phi_1^+(t)} - 2(c_2(t) - c_1(t)) = \\ &I_1' + I_3 + I_4. \end{aligned}$$

(32)

式(32)中, I_1' 为和式中第 1,2 项之和. 注意到有

$$\Phi_1^+(t) = \Omega_0^+(t), \quad \overline{\Omega_0^+(t)} = \Omega_0^-(t).$$

用上述同样的方法,可以得到

$$\Phi_1^+(t) = \frac{c^*(t)}{\lambda(t)X(t)} + \frac{X_1^+(t)}{\pi i} \int_r \frac{c^*(\xi) d\xi}{\lambda(\xi)X(\xi)X_1^+(\xi)(\xi-t)}, \quad (33)$$

$$\overline{\Phi_0^+(t)} = -\frac{c^*(t)X_1^-(t)}{\lambda(t)X(t)X_1^+(t)} + \frac{X_1^-(t)}{\pi i} \int_r \frac{c^*(\xi) d\xi}{\lambda(\xi)X(\xi)X_1^+(\xi)(\xi-t)}, \quad (34)$$

所以有

$$I'_1 = \frac{c^*(t)X_2(t)}{\lambda(t)X(t)X_1^+(t)} + \frac{X_3(t)}{\pi i} \int_r \frac{c^*(\xi) d\xi}{\lambda(\xi)X(\xi)X_1^+(\xi)(\xi-t)}, \quad (35)$$

即有

$$\Psi_2(t) = (I'_1 + I_3 + I_4)/2r(t), \quad (36)$$

式(36)中: I'_1, I_3, I_4 分别为式(35), (29), (30)给出.

定理 1 对于正则型 RH^{-1} 问题, 当 $K \geq 0$ 时, 其一般解为 $(\Phi(z), \Psi_1(t), \Psi_2(t))$, 其中 $\Phi(z), \Psi_1(\tau), \Psi_2(\tau)$ 分别由式(16), (17), (33) 给出; 而当 $K < 0$ 时, 当且仅当条件式(16) 满足时, 其有唯一解 $(\Phi(z), \Psi_1(t), \Psi_2(t))$, 其中 $\Phi(z), \Psi_1(\tau), \Psi_2(\tau)$ 分别由式(16), (17), (36) 给出.

参考文献:

- [1] 李星. 一类 Riemann 边值逆问题[J]. 数学杂志, 1996, 16(3): 303-306.
- [2] 王明华. Riemann 边值逆问题与奇异积分方程组[J]. 数学杂志, 1999, 19(2): 175-180.
- [3] 王明华. 一类 Riemann-Hilbert 边值逆问题[J]. 纯粹数学与应用数学, 2006, 28(2): 225-231.
- [4] 王明华. 半平面中的 Hilbert 边值逆问题[J]. 四川师范大学学报: 自然科学版, 2011, 34(2): 208-212.
- [5] 鄢盛勇. 半平面中一类 Riemann-Hilbert 边值逆问题[J]. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2011, 29(1): 52-57.
- [6] 王明华. 广义解析函数的 Riemann 边值逆问题[J]. 宁夏大学学报: 自然科学版, 2006, 27(1): 18-20.
- [7] 王明华. 一类 Dirichlet 边值逆问题[J]. 系统科学与数学, 2008, 28(2): 225-231.
- [8] 王明华. 半平面中的 Dirichlet 边值逆问题[J]. 四川师范大学学报: 自然科学版, 2006, 29(6): 683-687.
- [9] 鄢盛勇. 解析函数的非正则型 Riemann-Hilbert 边值逆问题[J]. 兰州理工大学学报, 2011, 37(2): 141-145.
- [10] YAN Sheng-yong. Inverse riemann boundary value problem along open arcs[J]. Journal of Yunan University of Nationalities: Natural Sciences Edition, 2011, 20(2): 107-112.
- [11] 鄢盛勇. 双解析函数在开口弧段上的 Riemann 边值逆问题[J]. 云南民族大学学报: 自然科学版, 2012, 21(2): 125-129.
- [12] 路见可. 解析函数边值问题教程[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2009: 97-102.

Inverse Compound Boundary Value Problem for Analytic Functions

WU Mu-mang, LIN Feng, LI Jin-cheng

(School of Mathematical Sciences, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: The mathematical formulation of inverse compound boundary value problem for analytic functions is given. Based on the theory of compound boundary value problem in plane, the solvability of the inverse compound boundary value problem is discussed. The solvable conditions and the integral representations of the solutions are obtained.

Keywords: compound boundary value problem; inverse problem; inverse Riemann boundary value problem; inverse Hilbert boundary value problem; compound boundary value problem

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 黄心中)

《华侨大学学报(自然科学版)》简介

BRIEF INTRODUCTION TO JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY (NATURAL SCIENCE)

《华侨大学学报(自然科学版)》(下称《学报》)创刊于1980年,是福建省教育厅主管,华侨大学主办,面向国内外公开发行的自然科学综合性学术理论刊物。

《学报》的办刊宗旨是:坚持四项基本原则,贯彻“百花齐放,百家争鸣”和理论与实践相结合的方针,广泛联系海外华侨和港、澳、台、特区的科技信息,及时反映国内尤其华侨大学等高等学府在理论研究、应用研究和开发研究等方面的科技成果,为发展华侨高等教育和繁荣社会主义科技事业服务。

《学报》以创新性、前瞻性、学术性为办刊特色,主要刊登机械工程及自动化、测控技术与仪器、电气工程、电子工程、计算机技术、应用化学、材料与环境工程、化工与生化工程、土木工程、建筑学、应用数学等基础研究和应用研究方面的学术论文,科技成果的学术总结,新技术、新设计、新产品、新工艺、新材料、新理论的论述,以及国内外科技动态的综合评论等内容。

《学报》既是中文综合性科学技术类核心期刊,又是国内外重要数据库和权威性文摘期刊固定收录的刊源。在历次全国及福建省的科技期刊评比中,《学报》都荣获过大奖。曾获得1995年“全国高等学校自然科学学报系统优秀学报一等奖”,1997年“第二届全国优秀科技期刊奖”,1999年,2008年“全国优秀自然科学学报及教育部优秀科技期刊”,并于2001年入选“中国期刊方阵‘双效期刊’”。

《学报》现为双月刊,A4开本。中国标准连续出版物号:CN 35-1079/N;国际标准连续出版物号:ISSN 1000-5013;国内邮发代号:34-41;国外发行代号:NTZ1050。

Journal of Huaqiao University (Natural Science) (abbreviated to the Journal), started publication in 1980, is a comprehensive and academic journal about natural science, open distribution at home and abroad, sponsored by Huaqiao University; Fujian Bureau of Education is responsible for its work.

The Journal has its purpose: adhering to the four cardinal policies, carrying out the principles of the “Flowers Blossom; Schools of Thought Contend” and theory combined with practice, collecting information of science and technology from overseas and those in Hong Kong, Macao, Taiwan and special economic zones and all sides, and in time reflecting the scientific and technological achievements about domestic theoretical research, applied research and development research in our university and others, and serving for development of the overseas Chinese higher education and the socialist prosperity on science and technology.

The Journal, with characteristics of creative, perspective and academic study, publishes the articles of fundamental and applied research on mechanical engineering and automation, observing and controlling technology and instruments, electric and electronic engineering, computer, applied chemistry, materials and environmental engineering, chemical and biochemical engineering, civil engineering, architecture, applied mathematics, etc. and the academic reports on achievements of science and technology, theses on new technology, new design, new products, new crafts, new materials, new theories, and the comprehensive reviews on scientific and technological developments at home and abroad.

The Journal is not only a core Chinese periodical on comprehensive science and technology, but also an important data base at home and abroad and periodical source that the authoritative abstracts have been recorded regularly. The Journal won the prizes among the national and provincial evaluation of scientific and technological periodicals such as “the first prize of good natural science of the national higher education periodicals” in 1995, “the good prize of the second national periodicals of science and technology” in 1997, “the good scientific and technological periodicals of the national natural science journals and the State Education Department” in 1999 and 2008, and selected into “‘double-effect periodical’ of the China periodicals matrix” in 2001. The Journal welcomes the contributors from our university and others.

The Journal is bimonthly publication, with format of A4. China standard serial number: CN 35-1079/N; International standard serial number: ISSN 1000-5013; Domestic mail number: 34-41; International issue number: NTZ1050.

- 《中文核心期刊要目总览》
- ISTIC 中国科技核心期刊
- RCCSE 中国核心学术期刊
- 全国优秀科技期刊
- 中国期刊方阵“双效期刊”
- 华东地区优秀期刊
- 中国科技论文在线优秀期刊

本刊被以下国内外检索期刊和数据库列为固定刊源

- 美国《化学文摘》(CAS)
- 波兰《哥白尼索引》(IC)
- “STN 国际”数据库
- 中国科学引文数据库
- 中国期刊网
- 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
- 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

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 4 期 (总第 138 期) 2014 年 7 月 20 日

JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY

(NATURAL SCIENCE)

(Bimonthly, Started in 1980)

Vol. 35 No. 4 (Sum. 138) Jul. 20, 2014

主管单位: 福建省教育厅

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

电 话: 0595-22692545
电子信箱: journal@hqu.edu.cn
网 址: www.hdxh.hqu.edu.cn

主 编: 徐 西 鹏

印 刷: 泉州晚报印刷厂

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)

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.hdxh.hqu.edu.cn

Editor in Chief: XU Xi-peng

Distributed by China Publication Foreign
Trading Corporation

(P. O. Box 782, Beijing, 100011, China)

刊 号: ISSN 1000-5013
CN 35-1079/N

代 号: 国内邮发 34-41
国外 NTZ 1050

国内定价: 8.00 元/期
48.00 元/年