

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

華僑大学学报

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

> 第 36 卷 第 4 期 Vol. 36 No. 4





# 《华侨大学学报(自然科学版)》 第六届编辑委员会

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

- 主编 (Editor in Chief) 乌东峰 (WU Dong-feng)
- **副主编 (Associate Editor in Chief)** 陈国华 (CHEN Guo-hua) 黄仲一 (HUANG Zhong-yi)

#### 编 委 (Members) (按姓氏笔划为序) 王加贤 (WANG Jia-xian) 王全义 (WANG Quan-yi) 叶民强 (YE Min-qiang) 方柏山 (FANG Bai-shan) 刘塨 (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) 黄心中 (HUANG Xin-zhong) 高轩能 (GAO Xuan-neng) 蔡灿辉 (CAI Can-hui) 童昕 (TONG Xin) 欧阳明安 (OUYANG Ming-an)

编辑部主任 (Director)

黄仲一 (HUANG Zhong-yi)

# 华侨大学学报

(自然科学版)

第36卷第4期

2015 年 7 月

# 总第 144 期

目 次

四轮轮毂电机电动车横摆力矩参数自调整模糊控制 ...... 李刚,韩海兰 (365) LED 散热体冲压成形尺寸和形状的误差数学模型建立 灵敏度分析的客车车身模块重构与结构轻量化优化设计 ...... 李奇,张勇,张成,周莎(377) 对象化 BR-TIN 模型三维地理信息组织方法 采用 SNMP 网络协议的地质公园设备管控系统设计 OHNN 新的分组 Hash 算法 结合 SLIC 超像素和 DBSCAN 聚类的眼底图像硬性渗出检测方法 融合全局和局部特征的图像特征提取方法 空间光通信中高斯光束传输闪烁指数测量系统 食品标签冲突检测的防碰撞控制

### STM32 的多传感器融合姿态检测

.....黄志伟,徐苏楠,韦一,唐莹(422)

二维 Otsu 自适应阈值快速算法的改进

增强现实技术的虚拟景区信息系统

......苏会卫,李佳楠,许霞(432)

#### 采用绝对值反馈的混沌系统投影同步的电路实现

------ 黄苗玉, 闵富红, 王恩荣 (437)

一种改进的动脉 CT 图像去噪方法

磁性钯催化剂对 Suzuki-Miyauraouyan 偶联反应的催化作用

部分充填钢箱-混凝土组合梁受力性能有限元分析

**又口竹奶重旧停止沙运小** 然後起而水重的 (1 开 / 云

······丁小平,刘昭,史宝童,黄嫚 (461)

电子垃圾拆解场周边环境多氯萘污染检测

------ 秦小军,陈群利 (467)

考虑风险偏好的 Stackelberg 博弈模型及其在 PPP 项目中的数值求解

某些近于凸调和函数的解析性质和系数估计

------ 黄赟, 黄心中 (478)

一类调和映照的系数估计

期刊基本参数: CN 35-1079/N \* 1980 \* b \* A4 \* 120 \* zh \* P \* ¥8.00 \* 1 000 \* 22 \* 2015-07 \* n

# JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY

( NATURAL

Vol. 36 No. 4

Sum. 144

SCIENCE)

Jul. 2015

# CONTENTS

Yaw Moment Control for Motor Electric Vehicle with Four-wheel Hub Based on Parameter Self-Regulation Fuzzy Control ..... LI Gang, HAN Hai-lan (365) Establishment of the Mathematical Model of Stamping Size and Shape Error for LED Heat Dissipation Body Module Reconfiguration and Structure Lightweight Optimization Design for Bus Body Based on the Sensitivity Analysis ..... LI Qi, ZHANG Yong, ZHANG Cheng, ZHOU Sha (377) An Organization Method for 3D Geographic Information Based on an Object-Oriented **BR-TIN Model** ..... LI Jing-wen, LYU Nan, LU Yan-ling, ZHANG Yuan, YE Liang-song (383) Geopark Equipment Control System Design Based on SNMP Network Protocol ..... HE Yuan-rong, LI Jia-nan, LU Lin (388) New Gouping Hash Agorithm Based on OHNN ..... LI Guo-gang, ZHONG Chao-lin, LIN Xiao-mei (393) Fundus Image Hard Exudates Detection Based on SLIC Superpixels and DBSCAN Clustering ..... LING Chao-dong, CHEN Hu, YANG Xiao, ZHANG Hao, HUANG Xin (399) Research on Image Feature Exaction Method by Combining Global and Local Features Scintillation Index Measuring System of Gaussian Beam on Space Optical Communication ..... WANG Jia-bin, CHEN Zi-yang, PU Ji-xiong (412) Collision Avoidance Control Based on Food Label Conflict Detection

..... CHEN Wei-jun, HUANG Yong-can (417)

Attitude Detection Based on STM32 Multi-Sensor Fusion

...... HUANG Zhi-wei, XU Su-nan, WEI Yi, TANG Ying (422)

Improvement for 2D Otsu Adaptive Threshold Fast Algorithm

...... QIAN Wei-xing, HUANG Li-ya (427)

Virtual Scenic Spot Information System Research Based on Augmented Reality Technique

..... SU Hui-wei, LI Jia-nan, XU Xia (432)

Chaotic Projective Synchronization Based on Absolute Feedback and Its Circuit

Implementation

..... HUANG Miao-yu, MIN Fu-hong, WANG En-rong (437)

Research on an Improved De-Noising Method for Artery CT Images

..... CHEN Ping-yun, LIN Chun-shen (443)

Magnetic Palladium Catalysts and Its Catalytic Activity for Suzuki-Miyaura Coupling Reaction

...... YU Yang, WU Cui-lin, WANG Zhen, ZHANG Ying-xue, QIAN Hao (449)

Finite Element Analysis of Mechanical Performance of Partially Filled Steel Box-Composite Beams

..... MO Shi-xu, ZHOU Xiao-bing, ZHOU Ying-chun, ZHANG Kun (455)

Calculation Method of Tunnel Water Inflow Based on Quantitative Correction Coefficient of

Permeability Composite Lining

..... DING Xiao-ping, LIU Zhao, SHI Bao-tong, HUANG Man (461)

Pollution Detection of Polychlorinated Naphthalenes in Soils and Sediment near E-Waste

**Dismantling Sites** 

..... QIN Xiao-jun, CHEN Qun-li (467)

Stackelberg Game Model with Risk Preference and Numerical Solving in the PPP Project

Problem

..... DU Yang, FENG Jing-chun (472)

On the Analytic Properties and Coefficient Estimate for Close-to-Convex Harmonic

Mappings

On the Coefficient Estimates for One Subclass of Harmonic Mappings

Serial Parameters: CN 35-1079/N \* 1980 \* b \* A4 \* 120 \* zh \* P \* ¥8.00 \* 1 000 \* 22 \* 2015-07 \* n

**文章编号:**1000-5013(2015)04-0365-06

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.04.0365

# 四轮轮毂电机电动车横摆力矩 参数自调整模糊控制

### 李刚,韩海兰

(辽宁工业大学 汽车与交通工程学院, 辽宁 锦州 121001)

摘要: 针对四轮轮毂电机电动车横摆力矩控制问题,进行横摆力矩参数自调整模糊控制研究,确定整车横摆 力矩分层控制结构.基于参数自调整模糊控制理论设计附加横摆力矩决策控制器.利用四轮驱动力矩独立可 控的优势,采用规则分配方法进行四轮驱动力分配,并通过 CarSim 与 Matlab/Simulink 联合仿真实验,选取 连续正弦方向盘转角输入工况对控制方法进行验证.结果表明:四轮轮毂电机横摆力矩参数自调整模糊控制 方法能够有效提高车辆行驶稳定性.

关键词: 四轮轮毂;电机电动车;横摆力矩;参数自调整;规则分配;行驶稳定性 中图分类号: TP 391.9 **文献标志码:** A

汽车电子稳定性控制系统(ESC)是车辆重要的主动安全控制系统,而直接横摆力矩控制(DYC)是 该系统的重要组成部分.传统内燃机汽车横摆力矩控制主要采用车轮差动制动方式实现<sup>[1-3]</sup>,而四轮轮 毂电机电动车四轮驱动力矩独立可控,在汽车横摆力矩控制方面可以通过四轮驱动力控制实现.由于电 机响应速度比液压响应速度快,转矩转速易于测得,因此,通过对四轮驱动力合理分配,四轮轮毂电机电 动车驱动横摆力矩控制能够更好提高行驶稳定性和乘坐舒适性<sup>[4-5]</sup>.目前,汽车横摆力矩控制方法有滑 模控制<sup>[1]</sup>、最优控制<sup>[2]</sup>、模糊控制<sup>[6]</sup>和神经网络控制<sup>[7]</sup>等方法.其中,模糊控制具有不依赖控制对象、鲁 棒性强等优点,在汽车横摆力矩控制中应用广泛.但传统模糊控制方法存在控制器规则不可变、不能适 用各种工况的问题,因此,近些年来发展了自适应模糊控制<sup>[8]</sup>,这一理论已在机械、电气等领域进行了应 用性研究<sup>[9-11]</sup>.本文基于参数自调整自适应模糊控制理论,研究了四轮轮毂电机电动车横摆力矩控制.

# 1 横摆力矩控制结构

图 1 为横摆力矩控制采用分层控制结构, 包括信号处理层、横摆力矩决策层、控制分配 层和执行层 4 部分.信号处理层中的参考模型 为二自由度车辆模型,参考模型根据驾驶员的 方向盘转角输入和车速计算出横摆角速度期 望值;横摆力矩决策层根据车辆实际的横摆角 速度值和参考模型,计算出横摆角速度期望 值,通过参数自调整模糊控制决策,实现汽车 稳定性控制所需的附加横摆力矩.控制分配层



根据总的目标驱动力矩和所需的附加横摆力矩,合理分配四轮驱动力;执行层通过输出的四轮轮毂电机,实现4个车轮的驱动力矩,完成控制.

**收稿日期**: 2015-04-24

通信作者: 李刚(1979-),男,副教授,博士,主要从事新能源汽车仿真与控制的研究. E-mail: lnitligang@126. com.

**基金项目:** 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51305190);吉林大学汽车国家重点实验室开放基金资助项目(20111104)

# 2 横摆力矩决策控制器设计

#### 2.1 参考模型

二自由度车辆模型<sup>[12]</sup>运动响应能够较好地反映车辆稳定行驶状态,而且具有实时性好的特点,因此,控制系统多选用线性二自由度模型作为参考模型<sup>[13]</sup>.根据整车基本参数建立线性二自由度模型,将 其横摆角速度值响应输出作为期望值进行控制.线性二自由度模型的横摆角速度值可表示为

$$\gamma_{\rm d} = \frac{v_x/L}{1 + K v_x^2} \delta. \tag{1}$$

式(1) 中: $K = \frac{m}{L^2} \cdot (\frac{a}{k_2} - \frac{b}{k_1})$ ,*a*,*b* 分别为汽车质心至前、后轴的距离,*k*<sub>1</sub>,*k*<sub>2</sub> 分别为汽车前、后轴的侧偏 刚度: $v_r$  为汽车纵向速度: $\delta$  为驾驶员通过方向盘给汽车的前轮转角输入值.

 $\gamma_{\text{bound}} = 0.85 \ \mu g / v_x.$ 式中: $\mu$  为路面附着系数;g 为重力加速度.

#### 2.2 参数自调整模糊控制器设计

由于汽车行驶环境复杂,传统模糊控制器 规则固定,很难适应所有工况,因此,设计了横 摆力矩决策参数自调整模糊控制器,其结构图 如2所示.

器和参数自调整模块两部分组成.模糊控制器

参数自调整模糊控制器由基本模糊控制



图 2 参数自调整模糊控制器结构

Fig. 2 Parameter self-regulation fuzzy controller structure

的核心在于模糊控制规则的设计. *e*, *A* 分别为横摆角速度实际值 γ 与期望值 γ<sub>d</sub> 的误差、误差的变化率, 附加的横摆力矩值为 Δ*M*, 量化因子和比例因子的调节值为 *N*. 合理设计两个模块模糊规则, 使参数自 调整模糊控制器通过调节量化因子 *K<sub>e</sub>*, *K<sub>A</sub>* 和比例因子 *K<sub>u</sub>* 在线自动调整, 从而较好解决单一模糊控制 器对各种工况适用性较差的问题.

2.2.1 基本模糊控制器设计 经过反复试验,横摆角速度的误差变化范围为[-8,8],误差变化率为

[-20,20],设定的量化因子都为1.因此,其论域分别为 [-8,8]和[-20,20],附加横摆力矩的模糊论域为[-52, 52].为了保证控制的精度,使其在变化工况下都能很好地 跟踪控制,最终将误差分为9个等级,模糊集为{NVB,NB, NM,NS,0,PS,PM,PB,PVB};将误差变化率分为7个等 级,模糊集为{NB,NM,NS,0,PS,PM,PB};输出的附加横 摆力矩分为9个等级,分别为{NVB,NB,NM,NS,0,PS, PM,PB,PVB};隶属函数均选用三角形隶属函数,如图3~ 5 所示.









当 e 为正时,应为车辆施加一个正的横摆力矩以跟踪期望的横摆角速度;当 e 为负时,应为车辆施

加一个负的横摆力矩,模糊控制规则,如表1 所示.

2.2.2 参数自调整模块设计 参数自调整 模块仍采用模糊控制,根据量化因子 K<sub>e</sub>,K<sub>A</sub> 和比例因子 K<sub>u</sub> 对控制性能的影响,可得到 如下调整规则:当 e 和 À 较大时,需附加较 大的横摆力矩.

为使车辆迅速做出响应,应降低量化因 子来减小对输入量的分辨率,同时加大比例 因子,从而可以获得较大的横摆力矩输出,使

响应速度加快.当 e 和 A 较小时,汽车已经接近稳定状态, 需要附加的横摆力矩值较小,为了提高控制精度,要增大量 化因子,提高对输入变化的分辨率.同时,减小输出比例因 子,防止超调或振荡,提高控制的稳态精度<sup>[14]</sup>.

根据以上参数调整的原则,设计了一个模糊参数调整器.输入变量为 e 和 À,输出变量为量化因子 K<sub>e</sub>,K<sub>A</sub> 的增大倍数为 N(等于比例因子 K<sub>u</sub> 缩小倍数).N 的论域定为 [0.5,1.5];模糊子集分为{CH(高缩),CL(低缩),AL(低放),AH(高放)},其隶属函数,如图 6~8 所示.控制规则, 如表 2 所示.



图 7 参数自调整模块中 À 的隶属函数 Fig. 7 Membership functions of À in parameter self-regulation module

# 3 驱动力分配器的设计

横摆力矩决策层所计算出的附加横摆力矩最 终需要通过驱动力分配实现. 四轮轮毂电机电动 汽车四轮驱动力可通过控制各轮轮毂电机转矩实 现,即

$$T_{\mathbf{x},i} = F_{\mathbf{x},i} \bullet r_i. \tag{2}$$

式(2)中: $F_{x,i}$ 为各车轮驱动力; $T_{x,i}$ 为各轮驱动力 矩; $r_i$ 为车轮半径,i=1,2,3,4,分别代表左前轮、 右前轮、左后和右后轮.

当车辆直线行驶时,四轮驱动力相等,设为 F. 当车辆转弯时,附加横摆力矩通过左右侧车轮驱动力 规则分配实现,为了提高车轮的稳定裕度,前后轴各产生所需附加横摆力矩的 1/2. 根据附加横摆力矩 符号,对车辆状态进行判断. 当车辆处于左转转向不足或右转转向过度时,适当增大右侧车轮驱动力矩, 减小左侧车轮驱动力矩,使每个车轮产生正的 1/4 附加横摆力矩;当车辆处于右转转向不足或左转转向

表 1 基本模糊控制器的模糊控制规则 Tab. 1 Fuzzy control rules of basic fuzzy controller

À					е				
А	NVB	NB	NM	NS	ZO	PS	РМ	PB	PVB
NB	NVB	NVB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	PS
NM	NVB	NVB	NB	NM	NM	NS	ZO	PS	$\mathbf{PM}$
NS	NVB	NVB	NB	NM	NS	ZO	$\mathbf{PS}$	РМ	PB
ZO	NVB	NB	NM	NM	ZO	PS	РМ	PB	PVB
PS	NVB	NB	NM	NS	ZO	PS	РМ	PB	PVB
РМ	NB	NM	NS	ZO	PS	РМ	PB	PVB	PVB
PB	NB	NM	NS	ZO	$\mathbf{PS}$	PM	$\mathbf{PB}$	PVB	PVB







Fig. 8 Membership functions



Tab. 2 Fuzzy control rules of parameter-self-tuning module

À -		e											
	NB	NM	NS	ZO	PS	РМ	PB						
NB	СН	СН	СН	СН	CH	СН	СН						
NM	CH	СН	CL	CL	CL	СН	CH						
NS	CL	AL	AL	AL	AL	AL	CL						
ZO	AL	AH	AH	AH	AH	AH	AL						
PS	CL	AL	AL	AL	AL	AL	CL						
PM	CH	СН	CL	CL	CL	СН	CH						
PB	CH												

过度时,适当增大左侧车轮驱动力矩,减小右侧车轮驱动力矩,使每个车轮产生负的 1/4 附加横摆力 矩.同时,保证了四轮驱动力矩之和为驾驶员所需的总的目标驱动力矩.具体的分配规则为:当附加横摆 力矩 Δ*M*=0时,车辆直线行驶,有

$$F_{x,1} = F_{x,2} = F_{x,3} = F_{x,4} = F_{x,4}$$

当附加横摆力矩 ΔM>0 时,车辆左转转向不足或右转向过度,为了纠正车辆状态,令

$$T_{x,1} = F_{x,1} \times r_1 - \frac{1}{4} \times |\Delta M| / (B/2), \quad T_{x,2} = F_{x,2} \times r_2 + \frac{1}{4} \times |\Delta M| / (B/2),$$

$$T_{x,3} = F_{x,3} \times r_3 - \frac{1}{4} \times |\Delta M| / (B/2), \quad T_{x,4} = F_{x,4} \times r_4 + \frac{1}{4} \times |\Delta M| / (B/2),$$
(3)

当附加横摆力矩 ΔM<0 时,当车辆右转转向不足或左转向过度时,为了纠正车辆状态,令

$$T_{x,1} = F_{x,1} \times r_1 + \frac{1}{4} \times |\Delta M| / (B/2), \quad T_{x,2} = F_{x,2} \times r_2 - \frac{1}{4} \times |\Delta M| / (B/2),$$

$$T_{x,3} = F_{x,3} \times r_3 + \frac{1}{4} \times |\Delta M| / (B/2), \quad T_{x,4} = F_{x,4} \times r_4 - \frac{1}{4} \times |\Delta M| / (B/2),$$
(4)

$$T_{x,1} + T_{x,2} + T_{x,3} + T_{x,4} = T_{x,req}.$$
 (5)

式中: $T_{x,1}, T_{x,2}, T_{x,3}, T_{x,4}$ 分别表示左前、右前、左后、右后车轮的驱动力矩; $\Delta M$ 为总的附加横摆力矩; B为前后轴轴距; $T_{x,req}$ 为目标驱动力矩.

#### 4 仿真试验验证

为了验证控制方法的有效性,进行 CarSim 与 Matlab/Simulink 联合仿真实验验证. 首先在 CarSim 中设置车辆模型参数,其中:整车质量 m 为 1 331 kg;簧载质量  $m_s$  为 1 111 kg;汽车质心距前轴的距离 a 为 1.04 m;距后轴的距离 b 为 1.56 m;距地面的距离 h 为 0.54 m;汽车前轮的轮距为 1.481 m;后轮的轮距为 1.486 m;汽车绕坐标轴 Z 轴的转动惯量为 2.314.

将 CarSim 中传统内燃机模型修改为四轮独立驱动电动车模型,应用 Matlab/Simulink 编写控制算 法程序,搭建控制模块,在数学模型求解部分将 CarSim 和 Matlab/Simulink 进行联合仿真计算.在 Car-Sim 中设置连续正弦方向盘转角,输入工况,对控制方法进行验证,实验结果在后处理部分显示.

当车速为 75 km·h<sup>-1</sup>,路面附着系数为 0.4 时,方向盘转角( $\delta$ )曲线,如图 9 所示.连续正弦方向盘转角输入工况仿真结果如图 10~16 所示.



图 9 方向盘转角曲线 Fig. 9 Curve of steering wheel angle



由图 10~13 可知:无控制时,在第 4~5 s,汽车出现了严重侧滑,而控制后汽车能够保持良好的行 驶稳定性,没有出现侧滑.

由图 10 可知:汽车无控制时横摆角速度明显大于有控制时横摆角速度,且在第 4~5 s 急剧增大, 而控制后参数自调整模糊控制和模糊控制都能控制汽车横摆角速度较好地跟踪期望值.

由图 11 可知:无控制时,质心侧偏角相对于有控制时质心侧偏角(β)较大,且在第 4~5 s 时急剧增 大,而控制后,汽车质心侧偏角较小,汽车保持稳定行驶.

由图 12 可知:参数自调整模糊控制汽车质心侧偏角整体明显小于模糊控制,说明参数自调整模糊





控制后汽车的稳定性要优于模糊控制.

由图 13 可知:有控制时,汽车行驶轨迹侧向位移变化要小于无控制,汽车纵向位移 80~100 m 时, 无控制相对于有控制出现了较大侧向位移变化,即汽车出现了较大侧滑,与前面分析结果一致.

由图 14 可知:两种控制方法对应附加横摆力矩的变化.

由图 15,16 可知:四轮驱动力矩变化与附加横摆力矩变化趋势相同.

#### 5 结论

1) 根据四轮轮毂电机电动汽车四轮驱动力矩独立可控的优势,基于参数自调整模糊控制理论,设 计了附加横摆力矩决策控制器,实现在线对模糊控制器参数的自调整,并通过四轮驱动力规则分配实现 附加横摆力矩控制.

2) CarSim 与 Matlab/Simulink 联合仿真实验表明:横摆力矩参数自整定模糊控制相对于汽车无控 制和横摆力矩模糊控制,提高了汽车行驶稳定性.

#### 参考文献:

- [1] 王伟达,张为,丁能跟.汽车 DYC 系统的二阶滑膜控制[J].华南理工大学学报:自然科学版,2011,39(1):141-151.
- [2] 杨建森.面向主动安全的汽车底盘集成控制策略研究[D].长春:吉林大学,2012:39-58.
- [3] 徐中明,于海兴,贺岩松.SUV 车辆差动制动防侧翻控制研究[J]. 汽车工程,2014,36(5):566-572.
- [4] RAUH J, AMMON D. System dynamics of electrified vehicles: Some facts, thoughts, and challenges[J]. Vehicle System Dynamics, 2011, 49(7):1005-1020.
- [5] 余卓平,冯源,熊璐.分布式驱动电动汽车动力学控制发展现状综述[J].机械工程学报,2013,49(8):105-114.
- [6] TAHAMI F,FARHANGI S,KAZEMI R. A Fuzzy logic direct yaw-moment control system for all-wheel-drive electric vehicles[J]. Vehicle System Dynamics, 2004, 41(3): 203-221.
- [7] 高利,李剑锋.一种车辆主动横摆力矩的神经网络控制方法[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2007,28(1):17-20.
- [8] 石如冬.自适应模糊控制算法研究及其实现[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008:10-42.
- [9] 王斌,邱志成,张宪民.气动驱动柔性臂自适应模糊振动控制[J].机械工程学报,2013,49(11):50-60.
- [10] 陈进,宁小波,李耀明.联合收获机前进速度的模型参考模糊自适应控制系统[J].农业机械学报,2014,23(10):87-91.
- [11] 雷金莉,窦满峰.基于损耗分析的高空电机效率模糊自适应优化控制[J].中南大学学报:自然科学版,2014,45 (3):742-747.
- [12] 余志生. 汽车理论[M]. 5 版. 北京:机械工业出版社, 2012:144-159.
- [13] RAJAMANI R. Vehicle dynamics and control [M]. New York: Springer, 2006:61-69.
- [14] 曾光奇,胡均安.模糊控制理论与工程应用[M].武汉:华中科技大学出版社,2006:39-62.

# Yaw Moment Control for Motor Electric Vehicle with Four-Wheel Hub Based on Parameter Self-Regulation Fuzzy Control

# LI Gang, HAN Hai-lan

((College of Automobile and Transportation Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

**Abstract:** For the yaw moment control of motor electric vehicle with four-wheel motor, the parameter self-regulation fuzzy control theory is studied in this paper. And the yaw moment hierarchical control structure of the vehicle is determined. The additional yaw moment decision-making controller is designed based on parameter self-regulation adaptive fuzzy control theory. Taking advantage of the independent control of the four-wheel driving torqu, rule allocation method is used for four-wheel driving forces distribution. Using CarSim and Matlab/Simulink co-simulation test, the control method is verified by selecting the input mode of the continuous sine steering wheel angle. The results show that the yaw moment based on parameter self-regulation fuzzy control method can improve vehicle driving stability effectively.

**Keywords**: four-wheel hub; motor; electric vehicle; yaw moment; parameter self-regulation fuzzy; rule allocation; driving stability

(责任编辑:陈志贤 英文审校:杨建红)

**文章编号:**1000-5013(2015)04-0371-06

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.04.0371

# LED 散热体冲压成形尺寸和形状的 误差数学模型建立

# 郑天清, 顾立志

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 基于误差反向传播算法,建立发光二极管(LED)散热体冲压成形尺寸和形状误差数学模型. 阐述 MATLAB神经网络工具箱求解误差数学模型的具体过程.针对某具体 LED 散热体产品,基于其相关的仿真 数据与设计的 MATLAB 程序,求解出该 LED 散热体尺寸和形状误差数学模型.验证结果表明:实验的壁厚 分布值与文中数学模型预测的壁厚分布值走势整体吻合,局部偏差不大;所建立的 LED 散热体冲压成形尺 寸、形状误差数学模型具有一定的实用性.

关键词: 误差反向传播;发光二极管;散热体;误差数学模型;壁厚

**中图分类号:** TH 128; TH 161 **文献标志码:** A

近年来,在全球节能意识高涨与相对较高的电价下,建筑、商业等应用领域持续引入发光二极管 (light emitting diodes, LED)照明,使LED照明产业取得了突飞猛进的发展.随着LED照明产业的发展,LED灯具的设计与制造逐渐成为企业的研究热点<sup>[1-3]</sup>.散热体作为解决LED灯散热问题的关键部件,决定着LED灯的使用寿命,其设计与制造至关重要<sup>[4-5]</sup>.提高散热体的冲压成形精度逐渐也成为企 业研究的重心之一.本文针对一LED散热体产品,基于误差反向传播算法,建立其尺寸和形状误差数学 模型,以实现对其冲压成形误差的主动控制,提高其冲压成形精度和生产合格率,并节约生产成本.

# 1 模型的建立

基于误差反向传播算法,LED 散热体冲压成形尺寸和形状误差的数学模型<sup>[6-8]</sup>为

$$u_h = \sum_{i=1}^{n} w_{i,h} x_i - b_h, \qquad v_h = f(u_h), \qquad h = 1, 2, \cdots, p,$$
 (1)

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)},$$
(2)

$$s_o = \sum_{h}^{p} w_{h,o} v_h - b_o, \qquad t_o = f(s_o), \qquad \Delta t_o = t_o - y_o, \qquad o = 1, 2, \cdots, q.$$
 (3)

式(1)~(3)中:x 为影响因素值;n 为误差数学模型中的输入层神经元个数,即影响因素个数;h 为误差数学模型中的隐含层神经元;p 为隐含层神经元个数;o 为误差数学模型中的输出层神经元;q 为输出层神经元个数;w<sub>i,h</sub>,w<sub>h,o</sub>分别为误差数学模型中不同的输入层与隐含层、隐含层与输出层的连接权值;b<sub>h</sub>, b<sub>o</sub>分别为误差数学模型中隐含层和输出层的各神经元阈值;f(•)为误差数学模型中激活函数;u= (u<sub>1</sub>,u<sub>2</sub>,…,u<sub>p</sub>),v=(v<sub>1</sub>,v<sub>2</sub>,…,v<sub>p</sub>)分别为误差数学模型中隐含层输入向量和输出向量;s=(s<sub>1</sub>,s<sub>2</sub>,…, s<sub>q</sub>),t=(t<sub>1</sub>,t<sub>2</sub>,…,t<sub>q</sub>)分别为误差数学模型中输出层输入向量和输出向量,即为关键尺寸、形状特征的输 出值;t<sub>o</sub> 为误差数学模型中输出层输出向量中的第o 个输出,即为第o 个关键尺寸、形状特征的 t 值;y<sub>o</sub>

通信作者: 顾立志(1956-),男,教授,博士,主要从事数字化设计制造的研究. E-mail:gulizhi888@163.com.

**收稿日期:** 2014-12-29

基金项目: 福建省科技计划项目(2014I01010233)

为第 o 个关键尺寸、形状特征的技术要求 y 值; Δt。为第 o 个关键尺寸、形状特征的误差.

求解误差数学模型的关键在于求解误差数学模型中的待定系数 w<sub>i,h</sub>, w<sub>h,o</sub>, b<sub>h</sub>, b<sub>o</sub>. 利用 BP 神经网络,结合仿真得到的数据,可求解以上待定系数.

#### 2 数学模型中待定系数的求解

#### 2.1 基本原理

利用 MATLAB 的神经网络工具箱求解待定系数,其基本原理主要由以下 9 个步骤组成[9-10].

步骤1 初始化神经网络. 给  $w_{i,h}, w_{h,o}, b_h$  和  $b_o$  分别赋予一个区间(-1,1)内的随机数,设定误差 函数  $e = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{q} (d_o(k) - y_o(k))^2$ ,设定计算精度值  $\epsilon$  和最大学习次数 *M*.

步骤 2 取第 k 个输入样本  $x(k) = (x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k))$  与其对应的期望输出  $d(k) = (d_1(k), d_2(k), \dots, d_q(k))$ .

步骤3 计算隐含层各神经元的输入 u<sub>k</sub>(k);基于激活函数,计算隐含层各神经元的输出 v<sub>k</sub>(k),即

$$u_{h}(k) = \sum_{i}^{n} w_{i,h} x_{i}(k) - b_{h}, \qquad v_{h}(k) = f(u_{h}(k)), \qquad h = 1, 2, \cdots, p, \qquad (4)$$

$$s_{o}(k) = \sum_{h}^{r} w_{h,o} v_{h}(k) - b_{o}, \qquad t_{o}(k) = f(s_{o}(k)), \qquad o = 1, 2, \cdots, q.$$
(5)

激活函数(神经元)为

$$y = f(\text{net}) = \frac{1}{1 + \exp(-\text{net})}.$$
 (6)

**步骤 4** 基于神经网络的期望输出  $d(k) = (d_1(k), d_2(k), \dots, d_q(k))$ 、神经网络的实际输出  $t_o(k)$ , 计算误差函数对输出层各神经元的偏导数  $\delta_o(k)$ ,即

$$\delta_o(k) = (d_o(k) - t_o(k))t_o(k)(1 - t_o(k)), \qquad o = 1, 2, \cdots, q.$$
(7)

**步骤 5** 基于隐含层到输出层连接权值  $w_{h,o}(k)$ 、输出层偏导数  $\delta_o(k)$ 、隐含层输出  $v_h(k)$ ,误差函数 对隐含层各神经元上的偏导数  $\delta_h(k)$ 进行相关计算,即

$$\delta_h(k) = \left[\sum_{o=1}^q \delta_o(k) w_{h,o}(k)\right] v_h(k) (1 - v_h(k)).$$
(8)

**步骤6** 基于输出层各神经元上的偏导数 $\delta_o(k)$ 和隐含层各神经元上输出 $v_h(k)$ ,修正连接权值 $w_{h,o}(k)$ 和阀值 $b_o(k)$ ,分别为

$$w_{h,o}^{N+1}(k) = w_{h,o}^{N}(k) + \mathfrak{p}_{o}(k)v_{h}(k), \qquad (9)$$

$$b_o^{N+1}(k) = b_o^N(k) + \eta \hat{b}_o(k).$$
(10)

式(9),(10)中:N表示调整前;N+1表示调整后;η为学习率,在(0,1)之间取值.

**步骤7** 通过输入层各神经元上的输入  $x_i(k)$ 和隐含层各神经元的偏导数  $\delta_h(k)$ ,修正连接权值  $w_{i,h}(k)$ 和阀值  $b_h(k)$ ,即

$$w_{i,h}^{N+1}(k) = w_{i,h}^{N}(k) + \eta \delta_{h}(k) x_{i}(k), \qquad (11)$$

$$b_{h}^{N+1}(k) = b_{h}^{N}(k) + \mathfrak{p}_{h}(k).$$
(12)

步骤8 计算全局误差 E,即

$$E = \frac{1}{2m} \sum_{k=1}^{m} \sum_{o=1}^{q} (d_o(k) - y_o(k))^2.$$
(13)

**步骤9** 判断神经网络误差是否满足要求. 当 *E*<ε 或学习次数大于设定最大次数 *M* 时,算法停止;否则,取下一个学习样本及相应期望输出,返回到步骤3,进入下一轮学习过程.

#### 2.2 待定系数的求解

2.2.1 前处理 文中的 LED 散热体结构,如图 1 所示.由图 1 可知:LED 散热体是由四道工序依次冲 压而成的,分别为拉深、反拉深、冲孔与反拉深、落料与缩口.LED 散热体最后的尺寸、形状误差是在每 一道工序的尺寸、形状误差相互影响作用下形成的,相互间影响关系极其复杂,但基本的影响关系是一 个误差累积的过程.LED 散热体四道工序的仿真是通过导入上一道工序仿真结果文件中的 dynain 文件,完成坯料在 DYNAFORM 软件的导入,以实现上道工序的计算结果,传递到下道工序的模拟计算中,使应力应变场等计算结果相互继承<sup>[11-13]</sup>.



图 1 LED 散热体结构图(单位:mm)

Fig. 1 Structure figure of LED heat dissipation body (unit:mm)

在LED 散热体最后的仿真成形零件上均匀取 8 个节点,如 图 2 所示.以四道工序中的 5 个工艺参数为输入数据,以基于 DYNAFORM 的 LED 散热体最后的仿真成形零件上 8 个节点 的壁厚分布情况(t)、成形零件上 8 个节点主应变情况(ma)、成 形零件上 8 个节点的次应变情况(mi)为输出数据.5 个工艺参数 如下:取第一至第四道凸模与板料、凹模与板料、压料板与板料、 外支撑与板料、内支撑与板料的摩擦系数为同一值,1 个工艺参数;级进模具的各工序冲压速度为同一值,1 个工艺参数;第一道 工序的压边力为 1 个工艺参数;第二道工序的压边力为 1 个工艺 参数;第三道工序的压边力为 1 个工艺参数.8 个节点的编号分 别为:26025;26454;26716;26978;27146;26883;26618;26087.



图 2 LED 散热体成形零件的 8 节点位置 Fig. 2 8 nodes location of the forming part of the LED heat dissipation

取 16 组 LED 散热体仿真数据作为训练样本(利用正交实验 part of the fuel datapation 法进行训练,采用的正交实验表为 L<sub>16</sub>(4<sup>5</sup>),训练尺寸、形状误差数学模型,得到其中的权值与阀值,即可 建立 LED 散热体的尺寸、形状误差数学模型.16 组训练 LED 散热体尺寸、形状误差数学模型的输入数据,如表 1 所示;16 组训练 LED 散热体尺寸、形状误差数学模型的输出数据,如表 2 所示.

表 1 16 组训练数学模型的输入数据(5×1	16)
-------------------------	-----

输入 样本	1(f)	2(p1)	3(p2)	4(p3)	5(speed)	输入 样本	1(f)	2(p1)	3(p2)	4(p3)	5(speed)
1	0.05	50 000	50 000	50 000	500	9	0.10	50 000	150 000	200 000	1 000
2	0.05	100 000	100 000	100 000	1 000	10	0.10	100 000	200 000	150 000	500
3	0.05	150 000	$150 \ 000$	150 000	2 000	11	0.10	150 000	50 000	100 000	5 000
4	0.05	200 000	200 000	200 000	5 000	12	0.10	200 000	100 000	50 000	2 000
5	0.07	50 000	100 000	150 000	5 000	13	0.13	50 000	200 000	100 000	2 000
6	0.07	100 000	50 000	200 000	2 000	14	0.13	100 000	150 000	50 000	5 000
7	0.07	150 000	200 000	50 000	1 000	15	0.13	150 000	100 000	20 0000	500
8	0.07	200 000	150 000	100 000	500	16	0.13	200 000	50 000	150 000	1 000

Tab. 1 16 groups of mathematics model training input data ( $5 \times 16$ )

表 2 16 组训练数学模型的输出数据(24×16)

Tab. 2 16 groups of mathematics model training output data ( $24 \times 16$ )

输出样本	1(t)	2(t)	3(t)	4(t)	5(t)	6(t)	7(t)	8(t)
1	2.100	2.088	2.097	2.093	2.100	2.040	2.099	2.046
2	2.180	2.150	2.130	2.100	2.150	2.080	2.079	2.100
3	2.150	2.140	2.200	2.160	2.114	2.170	2.078	2.035
4	2.190	2.187	2.165	2.110	2.119	2.108	2.087	2.103

续表 Continue table

			0	ontinue tubie				
输出样本	1(t)	2(t)	3(t)	4(t)	5(t)	6(t)	7(t)	8(t)
5	2.230	2.250	2.180	2.165	2.185	2.152	2.130	2.098
6	2.239	2.241	2.206	2.203	2.154	2.164	2.119	2.111
7	2.230	2.221	2.189	2.193	2.156	2.145	2.111	2.009
8	2.241	2.238	2.261	2.221	2.202	2.189	2.191	2.185
9	2.304	2.254	2.249	2.191	2.241	2.220	2.372	2.331
10	2.254	2.221	2.223	2.143	2.160	2.311	2.245	2.313
11	2.337	2.395	2.207	2.283	2.224	2.201	2.200	2.158
12	2.315	2.329	2.218	2.209	2.221	2.301	2.201	2.189
13	2.815	2.646	2.612	2.578	2.515	2.432	2.321	2.180
14	2.912	2.715	2.628	2.610	2.547	2.482	2.389	2.224
15	2.845	2.765	2.635	2.615	2.487	2.345	2.333	2.132
16	2.836	2.735	2.618	2.540	2.318	2.415	2.256	2.152
输出样本	9(ma)	10(ma)	11(ma)	12(ma)	13(ma)	14(ma)	15(ma)	16(ma)
1	0.020	0.070	0.080	0.011	0.010	0.008	0.013	0.012
2	0.030	0.065	0.089	0.021	0.020	0.029	0.014	0.011
3	0.025	0.055	0.073	0.091	0.036	0.021	0.030	0.016
4	0.045	0.035	0.044	0.035	0.025	0.031	0.013	0.021
5	0.039	0.031	0.029	0.031	0.019	0.021	0.018	0.015
6	0.048	0.047	0.038	0.036	0.017	0.022	0.019	0.012
7	0.042	0.045	0.036	0.035	0.025	0.021	0.016	0.011
8	0.044	0.048	0.039	0.040	0.039	0.025	0.020	0.193
9	0.086	0.015	-0.052	-0.001	0.002	-0.044	-0.074	0.024
10	0.073	0.004	-0.031	0.010	-0.013	-0.062	-0.049	0.022
11	0.082	0.041	0.024	0.006	-0.017	0.003	0.004	0.001
12	0.078	0.051	0.032	0.015	-0.021	0.015	0.015	0.029
13	0.280	0.210	0.168	0.171	0.174	0.162	0.155	0.112
14	0.310	0.270	0.178	0.181	0.175	0.163	0.159	0.142
15	0.276	0.245	0.188	0.193	0.172	0.159	0.145	0.147
16	0.253	0.234	0.183	0.187	0.168	0.151	0.149	0.139
输出样本	17(mi)	18(mi)	19(mi)	20(mi)	21(mi)	22(mi)	23(mi)	24(mi)
1	-0.036	-0.072	-0.032	-0.021	-0.014	-0.019	-0.017	-0.021
2	-0.017	-0.018	-0.019	-0.021	-0.026	-0.029	-0.032	-0.022
3	-0.048	-0.062	-0.039	-0.038	-0.032	-0.024	-0.036	-0.019
4	-0.054	-0.032	-0.025	-0.052	-0.034	-0.045	-0.032	-0.021
5	-0.062	-0.054	-0.032	-0.041	-0.015	-0.011	-0.021	-0.022
6	-0.063	-0.059	-0.038	-0.035	-0.028	-0.019	-0.024	-0.002
7	-0.075	-0.035	-0.045	-0.049	-0.036	-0.026	-0.019	-0.009
8	-0.065	-0.045	-0.051	-0.047	-0.043	-0.035	-0.029	-0.013
9	-0.229	-0.136	-0.066	-0.091	-0.117	-0.062	-0.098	-0.176
10	-0.194	-0.110	-0.076	-0.080	-0.065	-0.084	-0.067	-0.167
11	-0.238	-0.283	-0.206	-0.106	-0.056	-0.056	-0.075	-0.102
12	-0.189	-0.135	-0.153	-0.098	-0.078	-0.088	-0.062	-0.088
13	-0.287	-0.256	-0.215	-0.117	-0.116	-0.111	-0.108	-0.101
14	-0.310	-0.275	-0.222	-0.184	-0.157	-0.128	-0.132	-0.110
15	-0.299	-0.284	-0.255	-0.208	-0.198	-0.165	-0.145	-0.132
16	-0.293	-0.279	-0.243	-0.235	-0.186	-0.159	-0.138	-0.125

2.2.2 MATLAB求解待定系数的程序 求解待定系数的程序可表示为 A(1:16,[1:5])=xlsread('shuju2.xls',['B28:F43']);

375

 $A(1:16, \lceil 6:29 \rceil) = x lsread(shuju2, x ls', \lceil B2: Y 17' \rceil)$  $ax = A(1, 16, \lceil 1, 5 \rceil); ay = A(1, 16, \lceil 6, 29 \rceil);$ format long e; ax=ax';ay=ay'; [mx, set1] = mapminmax(ax); [my, set2] = mapminmax(ay);xn\_train=mx; yn\_train=my; NodeNum=23; TypeNum=24; p1=xn\_train; t1=yn\_train; Epochs=300000; %创建 BP 神经网络 net=newff(minmax(p1), [NodeNum TypeNum], {'tansig' 'purelin'}, 'traingdx'); %BP 网络训练 net.trainParam.epochs=Epochs; %网络训练时间设置 net. trainParam. goal=1e-100;%网络训练精度设置 net. trainParam. min\_grad=1e-100; net. trainParam. show=200; net. trainParam. time=inf; net. trainParam. mu=1e-10; net=train(net,p1,t1);%开始训练网络 net. iw{1,1}%表示输入到隐含层权值,即待定系数  $w_{i,h}$ net.  $lw{2,1}$ % 隐含层到输出层的权值,即待定系数  $w_{h,a}$ net. b{1}%表示输入到隐含层阀值,即待定系数 b<sub>b</sub> net. b{2}%表示隐含层到输出层的阀值,即待定系数 b。

2.2.3 权值与阈值 利用 MATLAB 的神经网络工具箱,经过 108 596 次数的迭代,大约 45 min 的训练,得到 LED 散热体冲压成形尺寸、形状误差数学模型的权值与阀值. 输入层到隐含层的权值是一个 23×5 阶的矩阵. 隐含层到输出层的权值是一个 24×23 阶的矩阵. 输入层到隐含层的阀值是一个 23×1 阶的矩阵. 隐含层到输出层的阀值是一个 24×1 阶的矩阵.

# 3 实验验证

选择一组误差数学模型输入的工艺参数为 0.1,60,100,80 kN, 500 mm • s<sup>-1</sup>;相对应实验的工艺参数为 0.1,60,100,80 kN,500 mm • s<sup>-1</sup>.其实验冲压出的零件,如图 3 所示.实验壁厚分布值与 LED 散热体尺寸、形状误差数学模型预测壁厚分布值对比,如图 4 所示.图 4 中:*d* 为壁厚分布值.由图 4 可知:实验壁厚分布值与文中 数学模型预测壁厚分布值整体吻合,局部偏差不大,证明了文 <sup>2</sup> 中所建数学模型具有较强的预测能力和较强的实用性.

# 4 结论

基于误差反向传播算法,建立 LED 散热体尺寸和形状误 差数学模型.说明了待定系数  $w_{i,h}, w_{h,o}, b_h, b_o$  是建立该数学模 型的关键问题,阐述了 MATLAB 神经网络工具箱求解待定系 数  $w_{i,h}, w_{h,o}, b_h, b_o$  的基本原理.

针对某 LED 散热体产品,其冲压成形由四道工序完成, 通过提取此 LED 散热体四道工序的仿真工艺参数为输入数据,基于 DYNAFORM 仿真成形零件上的 8 个节点的壁厚分 布情况(t)、主应变情况(ma)、次应变情况(mi)为输出数据;此 外,基于 MATLAB 神经网络工具箱、输入与输出数据,设计相



图 3 LED 散热体成形零件 Fig. 3 Forming part of the LED heat dissipation body



图 4 模型预测与实验的壁厚分布值对比 Fig. 4 Wall thickness comparison between the model predicted value and experimental value

应的 MATLAB 程序,求出此数学模型的待定系数,即得到了该 LED 散热体尺寸、形状误差数学模型.

通过实验验证,对比了实验壁厚分布值与文中数学模型壁厚预测分布值.结果表明:分布值整体吻合,局部偏差不大,证明了该 LED 散热体误差数学模型具有较强的实用性.

#### 参考文献:

[1] 佟鑫. LED 灯具散热器的结构研究与优化设计[D]. 长春: 吉林大学, 2013: 1-6.

- [2] 李琳红.大功率 LED 模组及工矿灯散热分析[D].重庆:重庆大学,2012:1-8.
- [3] 张雪粉. 大功率 LED 散热研究及散热器设计[D]. 天津:天津大学. 2007:1-9.
- [4] 张驰,吕文婷,徐沛娟,等.大功率 LED 照明灯散热装置研究[J].新技术新工艺,2011(3):1-3.
- [5] 杨广华,李玉兰,王彩凤,等. 基于 LED 照明灯具的散热片设计与分析[J]. 电子与封装,2010,81(1):39-42.
- [6] 李小燕. 灰色神经网络预测模型的优化研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2009:10-56.
- [7] 韩飞,莫健华,龚攀.基于遗传神经网络的数字化渐进成形回弹预测[J].华中科技大学学报,2008,36(1):121-124.
- [8] 陈涛,龚正虎,胡宁,等.基于改进 BP 算法的网络态势预测模型[J].中国电子商情:通信市场,2009(2):93-99.
- [9] 党建武.神经网络技术及应用[M].北京:中国铁道出版社,2000:25-32.
- [10] 李友坤. BP 神经网络的研究分析及改进应用[D]. 淮南:安徽理工大学, 2012: 20-55.
- [11] 安治国. 径向基函数模型在板料成形工艺多目标优化设计中的应用[D]. 重庆:重庆大学,2009:81-108.
- [12] 张彬,李东升,周贤宾.基于人工神经网络的拉形回弹预测技术研究[J].塑性工程学报,2003,10(2);28-31.
- [13] 魏光明.多工位级进冲压工艺分析及成形全工序数值模拟[D].广州:华南理工大学,2012:35-40.

# Establishment of the Mathematical Model of Stamping Size and Shape Error for LED Heat Dissipation Body

# ZHENG Tian-qing, GU Li-zhi

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

Abstract: Based on error back propagation algorithm, the mathematical model of stamping size and shape error for light emitting diodes (LED) heat dissipation body was established. Explain the specific process to solve the error mathematics model using MATLAB neural network toolbox. Based on a product of LED heat dissipation body, used the related simulation data and the designed MATLAB program to solve the mathematical model of stamping size and shape error for LED heat dissipation body. Verification results showed that the overall value was matched and the local deviation was little for the comparison between the experimental value of the wall thickness distribution and the mathematics model predicted value of that in this paper, the established mathematical model of stamping dimension-error and shape-error for LED heat dissipation body has fine practicality.

Keywords: error back propagation; light emitting diodes; heat dissipation body; error mathematical model; wall thickness

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:杨建红)

**文章编号:**1000-5013(2015)04-0377-06

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.04.0377

# 灵敏度分析的客车车身模块重构与 结构轻量化优化设计

# 李奇,张勇,张成,周莎

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 提出基于灵敏度分析的车身模块重构设计,结合结构优化方法开展客车车身的轻量化设计.通过车身 模块化减少灵敏度分析时的设计维度,并基于各子块厚度对车身扭转刚度的灵敏度系数进行车身的模块重 构和结构优化.通过对比优化前后整车的强度,验证该方法对客车车身轻量化设计的可行性.结果表明:该方 法使客车车身的质量降低了460 kg,最大应力减少了14.26%,且降低了车身结构优化设计的复杂度. 关键词: 灵敏度分析;模块重构;轻量化;客车车身;结构优化 中图分类号: U 271.1 **文献标志码:** A

客车的主要能源是石油,但有研究表明,到 2085 年世界石油资源将枯竭<sup>[1]</sup>.对于传统的内燃机汽车,整车质量每减轻 10%,可降低油耗 8%左右,降低排放 4%左右<sup>[2-3]</sup>.而客车整车质量中的 1/3~1/2为车身质量,因此客车车身轻量化研究具有重要的意义.目前,对客车车身进行轻量化设计主要有两个途径:一是选用轻量化材料;二是改进零部件结构和工艺,设计受力承载更为合理的车身结构<sup>[4-5]</sup>.国内外学者对此也做了大量的研究.张大千等<sup>[6]</sup>提出了基于灵敏度分析的客车车身骨架轻量化设计的方法;那景新等<sup>[7]</sup>研究了从构件受力合理的角度实现客车车身骨架的轻量化;孟庆功等<sup>[8]</sup>通过结构优化实现客车的轻量化设计;Butdee 等<sup>[9]</sup>通过新式的结构设计和新材料达到轻量化的目的.但是这些方法仍存在一些缺陷:使用新材料和改进工艺的方法会增加车身的制造成本;针对客车车身骨架的复杂空间高次超静定结构的数值优化及结构分析,具有设计维度大、计算成本高的缺点.为了解决这些缺陷,研究者将模块化的概念引入到客车车身的结构设计中.张玉津等<sup>[10]</sup>对客车车身的模块化做了相应的研究,最终把车身骨架分成了 40 个模块;戴声良等<sup>[11]</sup>根据相似性的原理对客车车身进行了有限度的模块化;此外,文献[12-13]也都在汽车模块化方面进行了相关的研究工作.通过模块划分虽然简化了车身结构,对车身的结构设计具有非常重要的指导作用,但以上的模块划分原则仍具有一定的经验性和局限性.因此,基于以上的研究成果,本文提出了基于灵敏度分析的车身模块重构与结构优化方法.

# 1 功能相似性车身模块化

结合功能相似性原则对 6125 型客车开展基于车身结构功能相似性原则的车身模块化设计,从而减 少设计变量.传统的整车车身常划分为 5 大主模块:前围、后围、侧围、底架和顶棚.

前、后围结构简单,依据对称及相似性的原则可把前围分为3个模块,后围整体作为1个模块,如图 1(a)所示.车身侧围依据对称性及存异性原则将左右两侧对称的结构归为同一模块,中门作为单独的模 块.此外,两侧中间腰梁和底部纵梁分别作为单独的模块.因此,侧围一共分为9块,如图1(b)所示.依 据对称性原则,顶棚左右两根处于对称位置的纵梁作为一个模块,其余杆件从前至后分成了6个模块,

**收稿日期:** 2014-06-17

通信作者: 张勇(1980-),男,副教授,博士,主要从事汽车碰撞安全性的研究. E-mail:flashzy1980@163. com.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51205141);华侨大学中青年教师科研提升计划资助(ZQN-PY202);中国 博士后科学基金项目资助(2014T70613)

共有7个模块,其模块分布如图1(c)所示.



(a) 前围和后围

(b) 侧围 图 1 整车车身的分块图

Fig. 1 Block diagram of the whole vehicle body

由于车身底架结构较复杂且许多杆件都是主受力杆件,因此需对底架进行细分.底架先分成4大

块,每一大块又按照功能相似原则分成若干模块,如图 2 所示.其中:地板分为 11 模块;前段分为 20 模块;中段分为 12 模块;后段分为 20 模块;整个底架共分为 63 模块.

最终,整个车身分成了 83 个模块:顶棚 p<sub>1</sub>~p<sub>7</sub>;侧围 p<sub>8</sub>~ p<sub>16</sub>;前、后围 p<sub>17</sub>~p<sub>20</sub>;底架 p<sub>21</sub>~p<sub>83</sub>,每个模块所有杆件的厚 度和材料都相同.然而,为了减少设计维度,降低车身轻量化<sup>能</sup> 设计的复杂度,需要进一步进行模块的重构.

2 灵敏度分析和模块重构设计

#### 2.1 灵敏度分析

选用车身各块的厚度作为设计变量对整车的扭转刚度做灵敏度分析.车身各块的厚度对车身扭转 刚度的灵敏度可以定义为

$$\operatorname{Sen}(\frac{u_j}{x_i}) = \frac{\partial u}{\partial x_i}.$$
(1)

式(1)中:u<sub>j</sub>为第 j 个函数,即扭转刚度的约束函数和目标函数;x<sub>i</sub>为函数的第 i 个设计变量.

车身各块厚度(d)对车身扭转刚度响应的灵敏度系数,如表1所示.由表1可知:前围、后围、顶棚和 侧围模块的灵敏度系数较大(>0.3),而底架模块的灵敏度系数普遍偏小(<0.3).

表1 各子块对车身扭转刚度的灵敏度系数

Tab. 1 Torsional stiffness sensitivity coefficient for each sub-block of bus body

编号	d/  m mm	系数	编号	d/mm	系数	编号	d/  m mm	系数	编号	d/  m mm	系数	编号	d/  m mm	系数
$\mathbf{p}_1$	1.6	0.655 1	$p_{18}$	1.5	0.322 4	$\mathbf{p}_{35}$	3.0	0.074 9	$\mathbf{p}_{52}$	3.0	0.343 3	$p_{69}$	2.0	0.193 7
$\mathbf{p}_2$	1.8	0.449 6	$p_{19}$	1.5	0.108 3	$\mathbf{p}_{36}$	3.0	0.017 3	$\mathbf{p}_{53}$	3.0	0.332 2	$\mathbf{p}_{70}$	3.0	0.051 2
$\mathbf{p}_3$	2.5	0.679 3	$\mathbf{p}_{20}$	1.5	0.323 3	$p_{37}$	3.0	0.011 8	$\mathbf{p}_{54}$	3.0	0.050 0	$p_{71}$	3.0	0.081 3
$\mathbf{p}_4$	1.5	0.278 8	$\mathbf{p}_{21}$	3.0	0.136 8	$p_{38}$	3.0	0.166 7	$\mathbf{p}_{55}$	3.0	0.069 1	$p_{72}$	3.0	0.016 3
$\mathbf{p}_5$	2.0	0.389 4	p <sub>22</sub>	1.5	1.010 6	$p_{39}$	3.0	0.071 1	$\mathbf{p}_{56}$	3.0	0.006 1	$p_{73}$	2.0 -	-0.015 0
$\mathbf{p}_6$	1.5	0.220 5	$p_{23}$	2.5	0.225 6	$p_{40}$	2.0	0.077 0	$\mathbf{p}_{57}$	2.0	0.078 0	$\mathbf{p}_{74}$	3.0	0.018 5
$\mathbf{p}_7$	1.5	0.598 8	$\mathbf{p}_{24}$	2.5	0.229 7	$p_{41}$	3.0	0.110 2	$\mathbf{p}_{58}$	3.0	0.219 0	$p_{75}$	3.0	0.008 6
$\mathbf{p}_8$	1.5	1.517 1	$\mathbf{p}_{25}$	2.5	0.384 6	$p_{42}$	4.5	1.063 4	$\mathbf{p}_{59}$	2.0	0.235 6	$\mathbf{p}_{76}$	3.0	0.000 8
$\mathbf{p}_9$	3.2	1.853 4	$\mathbf{p}_{26}$	2.5	0.105 7	$p_{43}$	3.0	0.366 7	$\mathbf{p}_{60}$	3.0	0.228 8	p <sub>77</sub>	3.0	0.002 3
$\mathbf{p}_{10}$	1.5	0.541 8	$p_{27}$	2.5	0.007 8	$\mathbf{p}_{44}$	3.0	0.101 6	$\mathbf{p}_{61}$	3.0	0.001 1	$p_{78}$	2.0	0.009 7
$\mathbf{p}_{11}$	3.5	1.448 3	$p_{28}$	3.0	$-4.8 \times 10^{-7}$	$\mathbf{p}_{45}$	2.0	0.076 8	$\mathbf{p}_{62}$	4.0	0.568 6	$\mathbf{p}_{79}$	2.0	0.013 6
$p_{12} \\$	2.5	0.314 2	$\mathbf{p}_{29}$	3.0	0.300 9	$\mathbf{p}_{46}$	3.0	0.205 9	$\mathbf{p}_{63}$	3.0	0.015 8	$\mathbf{p}_{80}$	6.0	0.000 9
$p_{13} \\$	2.0	1.193 6	$\mathbf{p}_{30}$	1.5	0.114 8	$p_{47}$	3.0	0.181 6	$\mathbf{p}_{64}$	6.6	1.752 1	$p_{81}$	5.0	0.019 1
$p_{14} \\$	4.2	0.417 7	$\mathbf{p}_{31}$	3.0	0.079 9	$\mathbf{p}_{48}$	3.0	0.008 2	$\mathbf{p}_{65}$	2.0	0.259 1	$p_{82}$	5.0	0.118 9
$\mathbf{p}_{15}$	1.5	0.536 1	$\mathbf{p}_{32}$	2.0	0.416 2	$p_{49}$	3.0	0.055 5	$\mathbf{p}_{66}$	3.0	0.186 3	$\mathbf{p}_{83}$	3.0	0.033 3
$\mathbf{p}_{16}$	2.5	0.6877	$\mathbf{p}_{33}$	3.0	0.023 2	$\mathbf{p}_{50}$	3.0	0.128 5	$\mathbf{p}_{67}$	3.0	0.028 2			
$p_{17}$	1.5	0.577 8	$\mathbf{p}_{34}$	3.0	0.280 2	$\mathbf{p}_{51}$	3.0	0.269 5	$\mathbf{p}_{68}$	3.0	0.046 9			



图 2 底架分块图 Fig. 2 Chassis block diagram

(c) 顶棚

#### 2.2 基于灵敏度分析的模块重构设计

通过灵敏度分析得到各模块厚度对车身扭转刚度的敏感 系数,灵敏度系数的大小能反应各模块厚度对车身扭转刚度 的敏感程度,因此,基于灵敏度系数(表1)开展了模块化重构, 其流程如图 3 所示.

通过模块合并法对模块进行重构设计.由表1和图3可 知:模块  $p_1 \sim p_{20}$ 中,只有顶棚子块  $p_4$ 和  $p_6$ 的灵敏度系数相近 目原始厚度都为 1.5 mm, 所以这两个模块可以合并为模块 T<sub>1</sub>;模块 p<sub>21</sub>~p<sub>83</sub>为客车的底架部分,底架中灵敏度系数大于 0.3 的模块共有 10 块, p43, p52 和 p53 这 3 个模块合并为模块 T<sub>2</sub>;底架中灵敏度系数小于 0.3 的模块共有 53 块,对灵敏度 系数和厚度相差不大的模块进行合并,如表2所示.

通过模块重构设计,原车身由 83 块减少到 51 块,有效地 Fig.3 Flow chart of module reconfiguration 缩减了车身的模块数量,降低了设计的维度.



模块重构设计和结构优化流程图 图 3

design and structure optimization

	表 2	模块重构
Tab. 2	Mod	ule reconfiguration

可重构模块	合并后模块	可重构模块	合并后模块	可重构模块	合并后模块
$\mathbf{p}_{21}$ , $\mathbf{p}_{50}$	$T_3$	$\mathbf{p}_{27}$ , $\mathbf{p}_{48}$ , $\mathbf{p}_{56}$ , $\mathbf{p}_{61}$ , $\mathbf{p}_{75}$ , $\mathbf{p}_{77}$	$T_6$	$\mathbf{p}_{33}$ , $\mathbf{p}_{36}$ , $\mathbf{p}_{37}$ , $\mathbf{p}_{63}$ , $\mathbf{p}_{67}$ , $\mathbf{p}_{68}$ , $\mathbf{p}_{72}$ , $\mathbf{p}_{74}$ , $\mathbf{p}_{81}$ , $\mathbf{p}_{83}$	T <sub>9</sub>
$p_{23}\ensuremath{\text{,}}\ensuremath{p_{58}}\ensuremath{\text{,}}\ensuremath{p_{59}}\ensuremath{\text{,}}\ensuremath{p_{60}}\ensuremath{}\ensuremath{p_{60}}\ensuremat$	$T_4$	$\mathbf{p}_{40}$ , $\mathbf{p}_{45}$ , $\mathbf{p}_{57}$	$T_7$	$\mathbf{p}_{54}$ , $\mathbf{p}_{70}$	$T_{10}$
$\mathbf{p}_{26}$ , $\mathbf{p}_{41}$ , $\mathbf{p}_{44}$	$T_5$	$\mathbf{p}_{46}$ , $\mathbf{p}_{47}$	$T_8$	$\mathbf{p}_{31}$ , $\mathbf{p}_{35}$ , $\mathbf{p}_{39}$ , $\mathbf{p}_{55}$ , $\mathbf{p}_{71}$	T <sub>11</sub>

#### 3 整车模块的结构优化

基于表1的灵敏度系数和模块的重构设计,明确需要进行结构优化的模块,并对其开展结构优化, 从而最大限度的降低车身的质量,达到轻量化的目的.结构优化流程,如图3所示.

#### 3.1 整车模块的厚度优化

由表 1,2 和图 3 可以得到整车模块中需要进行厚度优化的模块. 在保证整车强度达标的情况下,对 这些模块的原始设计厚度进行减薄,如表3所示.表3中:dout为优化厚度.

模块	$d_{ m opt}/ m mm$	模块	$d_{ m opt}/ m mm$	模块	$d_{ m opt}/ m mm$	模块	$d_{ m opt}/ m mm$	模块	$d_{ m opt}/ m mm$	模块	$d_{ m opt}/ m mm$
$T_3$	2.5	T <sub>7</sub>	1.8	T <sub>11</sub>	2.5	$\mathbf{p}_{34}$	2.5	$\mathbf{p}_{65}$	2.0	$p_{76}$	2.0
$T_4$	2.5	$T_8$	2.5	$\mathbf{p}_{19}$	1.5	$\mathbf{p}_{38}$	2.5	$\mathbf{p}_{66}$	2.5	$\mathbf{p}_{78}$	1.5
$T_5$	2.5	T <sub>9</sub>	2.5	$\mathbf{p}_{28}$	2.0	$p_{49}$	2.0	$\mathbf{p}_{69}$	2.0	$\mathbf{p}_{79}$	1.5
$T_6$	2.0	$T_{10}$	2.5	$\mathbf{p}_{30}$	1.5	$\mathbf{p}_{51}$	2.5	$p_{73}$	1.5	$\mathbf{p}_{82}$	3.0

表 3 模块的优化厚度 Tab. 3 Optimized thickness of the module

#### 3.2 车身冗余结构的优化

顶棚各模块的编号为  $p_1 \sim p_7$ ,侧围、前围和后围各模块的编号为  $p_8 \sim p_{20}$ .由表1可知:模块  $p_4$ 和  $p_6$ 的灵敏度系数小于 0.3,可对其进行结构优化;除模块 p10,其余模块的灵敏度系数都大于 0.3,基于结构 优化原则暂不对这些模块进行结构优化.其中,模块 pis虽然灵敏度系数小于 0.3,但因其结构较为简单 也不进行结构优化.删除非主受力的冗余杆件,如图4所示.

#### 3.3 底架冗余结构的优化

底架各模块的编号为 p21~p83. 由表 1 可知:底架模块的灵敏度系数普遍较小,具有极大的结构优 化空间.底架中段的初始结构,如图 5(a)所示,底架中段支撑杆的灵敏度系数较小,说明底架中段支撑 杆对车身扭转刚度不敏感.因此,对图 5(a)中矩形圈中的小角度斜撑,短横梁和纵梁这些非主受力杆件 进行删除,并对其中椭圆处的大角度斜撑进行改进,优化改进后底架中段的结构,如图 5(b)所示.

由表1可知:底架后段和前段的各模块灵敏度系数都小于0.3,有很大的结构优化空间.底架后段

的初始结构和优化后的结构,如图 6 所示. 底架前段的初始结构和优化后结构,如图 7 所示.





Fig. 8 Floor structure optimization

通过车身各模块的结构优化后,车身质量进一步降低,由 2.782 t 下降到 2.322 t.整车总质量下降 了 16.53%,降幅明显,达到了轻量化设计的目的.

# 4 模块化车身结构的强度验证

在现代客车车身结构设计中,强度分析始终贯穿于车身结构设计的整个过程.因此,在客车车身的 轻量化设计中,需要考虑车身的结构强度.结合强度分析验证改进车型的合理性.原车型为某公司 6125 型全承载式大客车,车身和底架的材料均为 Q345,其材料参数:密度为 780 kg • m<sup>-3</sup>;弹性模量为 210 GPa; 泊松比 0.3; 屈服极限为 345 MPa. 通过调整各区域所加载的质量点的大小使车身质心位置和实车 基本吻合,误差在 2%以内.配重后整车质量为 12.691 t.

弯曲工况和单轮悬空工况是客车整车结构强度分析的 2 种典型工况<sup>[14]</sup>.因此,选取弯曲和单轮悬 空工况下对 6125 型客车的原车型和改进车型进行静态分析.其中,单轮悬空工况包括左前轮悬空和右 前轮悬空 2 种工况.

# 4.1 弯曲工况

弯曲工况整车 VonMises 应力云图,如图 9(a)所示.由分析结果可知:原车型和改进车型在弯曲工况下,车身大部分的应力都小于 32 MPa,其中,原始车型最大应力为 319.5 MPa,改进车型最大应力为 237.9 MPa.原始车型和改进车型在此工况下的最大应力出现在同一位置,即右后轮后端悬架与车身连

接的支座处,其局部应力云图,如图 9(b)所示.



(a) 整车弯曲工况应力云图

(b) 最大应力分布图

图 9 弯曲工况应力云图

Fig. 9 Stress nephogram of the bending working condition

#### 4.2 左前轮悬空工况

左前轮悬空工况整车 VonMises 应力云图,如图 10(a)所示.由图 10(a)可知:左前轮悬空工况下两 车型车身大部分区域应力也都较小,基本在 39 MPa 以下.其中:原始车型最大应力为 332.6 MPa;改进 车型最大应力为 290.5 MPa.此工况下,最大应力出现在右前轮前端悬架支撑梁处,其局部应力云图,如 图 10(b)所示.



(a) 整车左前轮悬空工况应力云图

(b) 最大应力分布图

Fig. 10 Stress nephogram of the left front wheel dangling working condition

#### 4.3 右前轮悬空工况

右前轮悬空工况整车 VonMises 应力云图,如图 11(a)所示.由分析结果可知:此工况下,车身大部分地区应力在 41 MPa 以内.其中:原始车型最大应力为 314.1 MPa;改进车型最大应力为 269.3 MPa. 原始车型车身最大应力点位于中门底部横梁处,改进车型车身的最大应力点位于中门上部的增强处,其局部应力云图,如图 11(b)所示.





(b) 最大应力分布图

图 11 右前轮悬空工况应力云图

Fig. 11 Stress nephogram of the right front wheel dangling working condition

通过对原始车型和改进车型车身结构的静态分析可知:在3种工况下车身的最大应力由 332.6 MPa下降到 290.5 MPa,小于材料屈服极限 345 MPa,结构优化后的车身整体强度和安全裕度有所提 高.由以上分析可知,基于灵敏度分析的车身模块重构和结构优化对客车车身轻量化设计是可行的,并 取得较好的轻量化效果.

#### 5 结论

研究和探讨基于灵敏度分析的车身模块重构和结构优化方法在车身轻量化设计中的应用.以功能 相似性车身分块原则和灵敏度分析为基础,对车身进行模块重构设计和以轻量化为目的车身结构优化

图 10 左前轮悬空工况应力云图

设计,并以静弯曲、弯扭两种典型工况下的强度分析验证模块重构和结构优化的可行性.

通过的研究可以得到以下 4 点结论. 1)通过对客车车身进行模块化设计,可以将复杂的车身结构 划分为简单的模块单元,有助于车身的结构分析和轻量化设计. 2)以各子模块对车身扭转刚度的灵敏 度分析为车身模块重构设计和结构轻量化设计的准则,不仅能较好地减少了初始模块的数量,降低了设 计维度,而且也为结构优化提供了依据. 3)车身模块化重构及结构优化使得客车车身的结构强度在 2 种典型工况下均有所提高,并使整车质量减轻了 460 kg,较好地达到了轻量化设计的要求. 4)基于灵敏 度的模块重构和结构优化方法能够有效地减轻车身的质量,为客车车身复杂系统的轻量化设计提供了 一种新的思路,在车身的数值结构分析与优化设计中具有广阔的应用前景.

#### 参考文献:

- [1] 刘玉梅. 汽车节能技术与原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 1-4.
- [2] 施颐,朱平.面向车身前部结构轻量化的试验设计方法研究[J].汽车技术,2010(2):46-50.
- [3] BENEDYK J. Light metals in automotive applications[J]. Light Metal-Age, 2000, 58(10): 34-35.
- [4] 新涛.多材料结构汽车车身轻量化设计方法研究[D].天津:天津大学,2007:4-7.
- [5] 龙江启,兰凤崇,陈吉清.车身轻量化与钢铝一体化结构新技术的研究进展[J].机械工程学报,2008,44(6):28-35.
- [6] 张大千,张天侠,张国胜,等.基于灵敏度分析的客车车身骨架轻量化设计[J].机械强度,2011,33(6):913-920.
- [7] 那景新,何洪军,闫亚坤.基于构件内力优化的车身结构轻量化设计[J].吉林大学学报:工学版,2010,40(6):1492-1496.
- [8] 孟庆功,徐宝云,黄华.低地板城市电动客车车架结构有限元分析及其轻量化设计[J].机械研究与应用,2004,17 (1):51-62.
- [9] BUTDEE S, VIGNAT F. TRIZ method for light weight bus body structure design[J]. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2008, 31(2):456-462.
- [10] 张玉津,郭子阳.客车车身的模块化概念设计[J].客车技术与研究,2001,23(6):10-12.
- [11] 戴声良.模块化设计理论及在客车车身设计中的应用研究[D].合肥:合肥工业大学,2007:4-12.
- [12] 张利,张建国,李传斌,等.汽车底盘模块化设计中客户需求层次分析模型研究[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2005,28(9):994-996.
- [13] 赵海燕.产品模块化设计方法在重型汽车设计中的应用[J].重型汽车,1998(2):13-15.
- [14] 储昭淼.基于有限元分析的客车车身骨架轻量化研究[D].合肥:合肥工业大学,2010:19-22.

# Module Reconfiguration and Structure Lightweight Optimization Design for Bus Body Based on the Sensitivity Analysis

# LI Qi, ZHANG Yong, ZHANG Cheng, ZHOU Sha

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

**Abstract:** A novel module reconfiguration design and structure optimization method of bus body are proposed based on sensitivity analysis in order to perform lightweight design of bus body. The design dimensions of the sensitivity analysis are reduced by using the body module, moreover, the module reconfiguration and the structure optimization of bus body are performed based on the sensitivity coefficient of each sub-block thickness for body torsional stiffness. Finally, the feasibility of this method to the lightweight design of bus body is verified by comparing the strength of the vehicle before and after optimization. The research results show that the method not only makes the weight and maximum stress of bus body decrease 460 kg and 4.26%, respectively, but also reduce the complexity of body structure optimization design. **Keywords:** sensitivity analysis; module reconfiguration; lightweight; bus body; structural optimization

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:杨建红)

**文章编号:**1000-5013(2015)04-0383-05

# 对象化 BR-TIN 模型三维地理信息组织方法

李景文1,2, 吕楠1,2, 陆妍玲1,2, 张源3, 叶良松1

(1. 桂林理工大学 测绘地理信息学院,广西 桂林 541004;
 2. 桂林理工大学 广西空间信息与测绘重点实验室,广西 桂林 541004;
 3. 广东省国土资源测绘院,广东 广州 510599)

**摘要:** 在分析边界表示法(BR)和不规则三角网(TIN)特征的基础上,采用面向对象方法将 BR 模型与 TIN 有机地结合起来,提出一种面向对象的 BR-TIN 三维数据模型.研究模型的集成过程、对象化过程、信息组织 和存储过程,并将其应用到三维建筑实体表达中.实验结果表明:该模型能够实现地理实体的对象化建模和对 几何特征、属性等综合信息的一体化组织,有利于实现复杂三维地理实体空间数据的有效组织与管理. 关键词: 面向对象; BR-TIN 模型; 三维数据模型; 空间信息组织; 实体建模 中图分类号: P 208 **文献标志码**: A

三维空间数据建模是对三维 GIS 地理实体进行数字化描述、可视化表达和三维信息一体化存储、 处理及分析等研究的基础<sup>[1-2]</sup>.近年来,众多学者提出了基于四面体的三维混合数据模型<sup>[3-4]</sup>、3DFDS 拓 扑空间数据模型<sup>[5-6]</sup>、基于单纯形剖分的拓扑空间数据模型<sup>[7-8]</sup>、边界表示法(BR)模型<sup>[9]</sup>等三维空间数 据建模模型.基于四面体的三维混合数据模型便于三维分析和显示,但是建模数据量庞大;3DFDS 拓扑 空间数据模型易实现几何特征和专题特征的关联,但不支持描述复杂地理实体信息;基于单纯形剖分的 拓扑空间数据模型对三维空间地理要素拓扑关系的定向描述和定量计算能力较强,但无法表达复杂实 体的纹理特征;BR 模型能够详细描述构建实体的几何形体的几何信息及几何元素的空间逻辑关系,但 对外表不规则、结构复杂的三维空间对象难以描述.由于不规则三角网(TIN)的三角网格剖分技术对 BR 模型难以描述复杂空间实体对象细节信息的不足具有补充性<sup>[10-11]</sup>,本文将 BR 模型与 TIN 有机结 合,构建了一种能够描述三维空间实体复杂空间关系的 BR-TIN 模型.

#### 1 BR-TIN 三维模型构建方法

BR-TIN 模型是在对空间实体采用 BR 表示法描述的过程中,按照 BR 模型的数据结构对复杂三维 空间实体进行形态分解,获取各个不同层面的点、线、面等几何元素;再通过不同层次间元素的正则布尔 运算(交、差、并)和空间的几何变换(平移、旋转、缩放)等空间逻辑计算,对各类几何元素进行有效地组 织和拓扑关联;利用三角网格剖分技术对模型的表面进行细节刻画,构造最小单元实体;最终聚合成为 目标实体.对目标实体通过采用函数定义方法具体表示为

$$E = \underset{m=1}{\overset{}{Y}} e_{m}.$$
 (1)

式(1)中: $l = \bigcup_{i=n}^{n+1} p_i$ , $s = \bigcup_{j=1}^{n} (p_i, l_j)$ , $e = \bigcup_{k=1}^{n} s_k$ , $p_i$ 为不重叠的点元素; $l_j$ 为线元素,由 $p_i$ 相连构成; $s_k$ 为面元素,由点集 $p_i$ 和若干相互邻接的 $l_j$ 构成; $e_m$ 为最小单元实体,由若干相互邻接的 $s_k$ 构成;E为目标实体,由 e\_m 聚合构成;n为大于0的整数.

- 通信作者: 李景文(1971-),男,教授,博士,主要从事 GIS 理论和应用方面的研究. E-mail:lijw@glut.edu.cn.
- **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(41461085); 广西科学研究与技术开发计划项目(1598019-4); 广西自然科学基金重点项目(2014GXNSFDA118032); 广西桂林市科技攻关项目(20140108-2)

**收稿日期:** 2015-04-26

模型采用 TIN 面片表达方式描述空间关系,用三维空间点描述点 元素,坐标 *p*(*x*,*y*,*z*)明确了空间中点的位置,两个三维空间点相互连接 构成直线,进而形成线元素.点和直线段等基本元素构成了多边形和函 数构造面等高一级的几何要素,通过 TIN 面片对高级几何要素进一步 描述形成面元素,一系列面元素的组合构成最小单元实体和目标实体. 模型构建过程,如图 1 所示.

BR-TIN 模型较好地描述了三维空间实体的空间信息,有效地记录 了空间实体的空间关系,但是在对复杂的地理实体描述时,增加了对地 理实体几何、属性信息与空间逻辑关系一体化表达的复杂度.因此,将面 向对象组织方法运用到 BR-TIN 模型的构建过程中.



╈

直线段

- - 🗡

面元素

最小单元实体

点p(x,y,z)

函数构造面

# 2 基于 BR-TIN 地理实体信息对象化组织方法

对象化组织方法是将具有复杂地理属性的三维地理实体按照 BR-TIN 模型的要求进行分解、抽象和组织,用抽象的数据类型方式将构成地理实体的基本元素的几何特征、属性数据和基于数据的相关操作封装在属性数据类型内部,建立各元素对象之间的语义关系,采用元素对象聚合形成组合对象的信息组织方式达到信息重复利用的目的,从而降低模型数据量,最终实现地理实体信息的有效描述和组织,降低复杂三维地理实体建模的复杂度.

#### 2.1 地理实体信息抽象表达过程

依据 BR-TIN 模型的三维建模原则,对地理实体进行对象化抽象的过程如下:通过对象化的方式对 地理实体的几何特征、属性数据及相应的操作等进行封装,将实体抽象为点对象、线对象、面对象及组合 对象等空间对象,每个对象都包含各自的属性、特征及地理实体的时空信息,对象之间通过对象标识 ID 建立联系.其中:点、线、面三类简单对象是对空间对象的进一步详细划分.

在模型中,将单一的点对象表示为 P<sub>i</sub>,多个不重叠的点相连形成的线段 L<sub>i</sub> 为单一的线对象,若干相互邻接的线对象构成的多边形 S<sub>i</sub> 是一个面对象,若干相互邻接的面对象构成的多面体 E<sub>i</sub> 是一个体对象.可将点对象、线对象、面对象和体对象拓扑对象集分别表达为

$$O_{\text{points}} = \sum_{i=1}^{n} P_{i}, \qquad O_{\text{lines}} = \sum_{i=1}^{n} L_{i}, \qquad O_{\text{surface}} = \sum_{i=1}^{n} S_{i}, \qquad O_{\text{entity}} = \sum_{i=1}^{n} E_{i}.$$
 (2)

式(2)中:单个的点、线、面、体对象可以用四元组(ID,Ele<sub>i</sub>,A,M)对其进行表示,ID 是对象的唯一标识符,Ele<sub>i</sub>(*i*=1,2···,*n*)表示单一的点元素、线元素、面元素和体元素,A={A<sub>1</sub>,A<sub>2</sub>,···,A<sub>n</sub>}是属性信息集, M 是实体对象所接收的操作.因此,单一的点、线、面和体对象可分别表达为

$$P_{i} = (\mathrm{ID}_{i}, p_{i}, \sum_{j=1}^{n} A_{j}, \sum_{j=1}^{n} M_{j}), \qquad i = 1, 2, \cdots, n,$$
(3)

$$L_{i} = (\mathrm{ID}_{i}, l_{i}, \sum_{j=1}^{n} A_{j}, \sum_{j=1}^{n} M_{j}), \qquad i = 1, 2, \cdots, n,$$
(4)

$$S_{i} = (\mathrm{ID}_{i}, s_{i}, \sum_{j=1}^{n} A_{j}, \sum_{j=1}^{n} M_{j}), \qquad i = 1, 2, \cdots, n,$$
(5)

$$E_{i} = (\mathrm{ID}_{i}, e_{i}, \sum_{j=1}^{n} A_{j}, \sum_{j=1}^{n} M_{j}), \qquad i = 1, 2, \cdots, n.$$
(6)

点、线、面、体对象集的表达集合,构成了简单对象(simple object,SO)的内部组成.简单对象是构造 地理实体的最小单元,将简单对象抽象表达为 SO =  $\bigcup_{i=n}^{n} (\sum_{i=1}^{n} P_i, \sum_{i=1}^{n} L_i, \sum_{i=1}^{n} S_i, \sum_{i=1}^{n} E_i)$ .组合对象 (combined object,CO)是若干不同类别的简单对象的聚合,可表达为 CO =  $\sum_{i=1}^{n} SO_i$ .

#### 2.2 地理实体信息组织过程

采用 BR 表示法将复杂地理实体抽象为三维几何形体模型,根据实体的几何特征对其表面进行分解,获得基本几何对象,并通过正则布尔运算和空间几何变换将几何对象有机地联系在一起,同时利用

线元素

占元素

三角形

TIN 表达方法对得到的单元面进行细化表达,实现地理实体空间数据模型的构建.在模型构建中,将地 理实体的几何数据、属性数据、操作和函数等相关信息封装在对象结构中,每一个空间对象是独立封装 的概念实体,其形式化可描述为〈BR-TIN 实体模型〉::=〈空间实体〉|〈BR-TIN 元素〉〈正则布尔运 算〉〈BR-TIN 元素〉|〈BR-TIN 元素〉〈几何变换〉|〈BR-TIN 元素〉|〈附加特征〉.其中:〈空间实体〉是 BR-TIN 建模目标;〈BR-TIN 元素〉是采用面向对象技术将实体进行分解,组成不同层次的点、线、面元 素;〈正则布尔运算〉对实体进行交、差、并等操作;〈几何变换〉采用平移、旋转、缩放等操作对实体进行变 换;〈附加特征〉是面元素 TIN 表达过程,能够使得模型具有更强的空间实体描述的能力.

采用函数定义,对基于 BR-TIN 对象化方法构成的三维目标地理实体(geographical entity,GE)具

体描述为  $GE = \bigcup_{i=n}^{n} (SO_i, CO_i)$ . 式中: GE 为目标地理 实体, *n* 为大于 0 的整数.

在对地理实体空间信息对象化组织过程中,将复 杂地理实体采用 BR 表示法定义的点元素和线元素进 行对象化得到点对象和线对象,并与由点和线构成的 面对象一起构成单元面对象.利用三角剖分方法,对单 元面对象进行 TIN 面片表达形成几何对象.几何对象 分为简单对象和组合对象,系列几何对象的组合构成 目标实体.信息对象化组织过程,如图 2 所示.图 2 中: 单元面对象是对目标地理实体对象的讨尽表达.





#### 2.3 地理实体信息存储过程

采用以 BR 的数据结构作输入的 BR-TIN 数据组织和分层存储相结合的方式,围绕节点集合和单元集合对三角剖分的数据进行组织,将地理实体按照 BR-TIN 模型数据结构的要求,以对象方式将地理实体的空间几何信息和属性信息封装并存储到 Oracle Spatial 的 SDO\_GEOMETRY 字段中.其中:节点和单元都是通过所在集合的 ID 标记,节点包含空间位置属性,具体分为与节点所关联的 BR 元素类型和标识,每个结点指针指向一个对应的基本几何元素,通过访问结点指针不仅能够访问到目标地理实体的几何特征,还能了解目标地理实体的构建过程,而节点附加的颜色、材质、纹理等非几何信息为模型不同属性的查询提供了查询条件.

对地理实体几何模型的点、边、环、面的数据及逻辑连接关系进行记录时,采用单链表的数据结构,

围绕对象将实体模型的数据分层存储在 Oracle Spatial 中.具体层次包括点、线、面和实体 4 个层次, 层次在数据库表单之间通过对象 ID 建立联系,空间 对象表的数据结构,如图 3 所示.

# 3 基于 BR-TIN 模型的三维建筑实体 表达

形体不规则且外表面凹凸不平的复杂建筑实体 很难实现三维数字化建模,依据 BR-TIN 模型构建原 理,通过 BR 表示法对建筑物几何结构进行分解、组织 及单元面的 TIN 表达,将建筑物抽象为构成它的基本





Fig. 3 Date structure of space objects list

元素,并运用面向对象技术将元素的纹理、材质、颜色等属性信息进行封装,形成最基本的点对象、线对 象以及面对象、体对象.点对象、线对象等基本对象采用 TIN 表示方法聚合形成 TIN 面片;系列 TIN 面 片采用空间逻辑运算构成建筑体,从而实现基于 BR-TIN 的建筑物模型的构建,如图 4 所示.图 4 中:复 杂建筑物左边侧面呈垂直曲面,右边是一顶部为圆锥状屋顶的建筑,其表面呈锥形曲面.根据复杂建筑 实体的结构特点,在对其进行 BR-TIN 的表达过程中,可将其分为简单建筑对象 I 和简单建筑对象 II. 简单建筑对象 I 由一个平面屋顶、两个垂直平面侧面和一个垂直曲面侧面构成;简单建筑对象 II 由 一个圆锥状曲面及其周围不规则平面共同组成的屋顶和三个垂直平面侧面构成.针对简单建筑物 I 左 侧的垂直曲面,在其上部边缘与下部边缘各提取一定密度的特征点 a<sub>i</sub> 和 b<sub>i</sub>,进而构造一系列的 TIN 面 片即可对其进行描述;对于简单建筑物 II 右侧屋顶的圆锥形,在其外表面上按一定密度采集若干特征 点 c<sub>i</sub>,并以此为基础构造一系列 TIN 面片完成几何形体的模拟,再在其形体上添加相关属性进行纹理 映射从而实现屋顶的完整表达;建筑物 I 和 II 的其他面均为平面区域,可直接通过采用平面多边形的三 角剖分方法实现它们的表达.其具体表达步骤,如图 5 所示.









计算多边形 defghkq 所有的内角角度,从最小的内角 $\angle q$  开始构造 TIN 面片,当边 dk 与边界不重合时,连接边 dk 形成三角 abc,同时生成新的多边形 defghk.依次类推,最终完成平面多边形的 TIN 表达.其中,内角角度通过计算方位角差的方法获得.设点 d,e 的坐标分别为( $x_1$ , $y_1$ ),( $x_2$ , $y_2$ ),S 为线段 dq 的长度, $A_{ad}$ 为点q 至点d 的坐标方位角,则

$$S = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}, \qquad (7)$$

$$A_{ql} = \arccos(\frac{x_2 - x_1}{S}). \tag{8}$$

若  $A_{qd}$  为负,则  $A_{qd} = A_{qd} + 360^{\circ}$ . 同理可得  $A_{qk}$ ,即

在基于 BR-TIN 的复杂三维建筑实体信息组织方法中,为了描述结构边界,需要将简单建筑物分为

楼顶和墙面两类进行三角剖分,并 分类存储.采用单链表的数据结构 对建筑实体几何模型的点、边、环、 面的数据及逻辑连接关系进行记录,分层存储在 Oracle Spatial 中, 不同的层次在数据库表单之间通过 对象 ID 建立联系.基于 BR-TIN 的 建筑空间对象表的数据结构,如图 6 所示.其中,通过访问结点指针不仅 能够访问到建筑实体的几何特征以 及颜色、材质、纹理等非几何信息, 还能了解建筑实体的构建过程.



objects list based on BR-TIN

# 4 结束语

对象化 BR-TIN 三维数据模型将复杂对象的几何特征、属性数据和操作等相关要素嵌入到模型的 信息组织过程中,全面、详细地描述了地理实体的三维空间信息,并实现了对复杂地理实体信息的组织, 解决了对具有复杂几何形态特征的不规则地理实体进行几何形体和逻辑关系一体化的模型表达问题. 模型采用简单构件聚合成组合实体的方法重复利用信息,从而简化了数据管理方式、降低了模型数据量,并通过对象化描述降低了模型构建的复杂度;同时,利用网格信息刻画了地理实体的几何特征和颜色、材质、纹理等非几何信息.该模型可以运用到城市建筑物、非规则地理实体等复杂地理实体信息的组织过程中,解决建筑、地形、水系、桥梁等复杂地理实体的模型表达问题,为复杂地理实体信息的组织、管理和描述提供一种新方法.

#### 参考文献:

- [1] 吴德华,毛先成,刘雨.三维空间数据模型综述[J]. 测绘工程,2005,14(3):70-73.
- [2] 毕硕本,张国建,侯荣涛,等.三维建模技术及实现方法对比研究[J].武汉理工大学学报,2010,32(16):26-30.
- [3] 徐则中,庄燕滨.三维建模系统的综述[J]. 测绘通报,2008(2):16-19.
- [4] 吴慧欣,薛惠锋.基于块段模型的三维 GIS 混合数据结构模型研究[J].计算机应用研究,2007,24(10):273-275.
- [5] 王继周,李成名,林宗坚,等. 三维 GIS 的基本问题与研究进展[J]. 计算机工程与应用,2003(24):40-43.
- [6] 符海芳,朱建军,崔伟宏. 3D GIS 数据模型的研究[J]. 地球信息科学,2002(2):45-49.
- [7] 上官宁,刘斌. 三角网格模型特征线提取方法[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2010,31(5):487-490.
- [8] 郑坤, 贠新莉, 刘修国, 等. 基于规则库的三维空间数据模型[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2010, 35(3): 369-374.
- [9] 孙锐.边界表示实体模型简化方法研究[D].杭州:浙江大学,2010:4-7.
- [10] 王华军. 三角网自动连接的聚焦算法[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2005,26(2):199-202.
- [11] MAARTEN L, JACK S. Delaunay triangulation of imprecise points in linear time after preprocessing[J]. Computational Geometry: Theory and Applications, 2010, 43(2):234-242.

# An Organization Method for 3D Geographic Information Based on an Object-Oriented BR-TIN Model

LI Jing-wen<sup>1,2</sup>, LYU Nan<sup>1,2</sup>, LU Yan-ling<sup>1,2</sup>, ZHANG Yuan<sup>3</sup>, YE Liang-song<sup>1</sup>

(1. College of Geomatic Engineering and Geoinformatics, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;

- 2. Guangxi Key Laboratory of Spatial Information and Geomatics, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;
  - 3. Surveying and Mapping Institute Lands and Resource Department of Guangdong Province, Guangzhou 510599, China)

**Abstract:** Based on analyzing the characteristics of the boundary representation (BR) and triangulated irregular network (TIN), by combining the BR and TIN, an object oriented BR-TIN model is presented. This paper aims to study the processes of integration, objectification, organization and storage of the model, and apply it to 3D architectural expression. The experimental result showed that the model could realize an object modeling of geographical entities, and it took geometric features, property information and sense relations together in order to realize the effective organization and management of the complex 3D geographical space data.

Keywords: object-oriented; BR-TIN model; 3D date model; spatial information organization; solid modeling

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:吴逢铁)

文章编号:1000-5013(2015)04-0388-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.04.0388

# 采用 SNMP 网络协议的地质公园 设备管控系统设计

# 何原荣1,李佳楠2,陆琳2

(1. 厦门理工学院 计算机与信息工程学院, 福建 厦门 361024;2. 贵州财经大学 管理科学与工程管理学院, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:** 基于简单网络管理协议(SNMP),设计地质公园智能设备的管控系统,可实现开启或禁用拟定设备、 远程监控智能设备端口、汇总设备数据、查看和更新设备工作事件信息、实时监控设备运转状态的功能.应用 结果表明:该系统可通过有线及无线网络把地质公园所有智能设备连接到同一管控平台,实时监控设备的运 行状态、流量信息、数据统计及故障数据等,并能通过手机短信及自动电话拨打方式向管理员发出故障报警. 关键词: 设备监控;简单网络管理协议;智慧景区;故障报警;地质公园 中图分类号: TP 273.5; TU 986.5 **文献标志码:** A

随着智慧型设备网络领域的持续延伸,网络管理的繁复程度不断加大.各种不同类型的子网构成了 多样性异构网络,每种智能设备均具备其单独的管理体系.操作系统(OS)平台、计算机、APP软件正在 逐步显露出难以管控的发展态势.智能设备管理系统成为旅游信息化研究中的关键课题之一,是智慧旅 游建设的决定性技术.现有的网络管理系统,如 HP 公司的 Open View,IBM 公司的 System View,Sunsoft 公司的 SunNet Manager 等,虽然解决方案不尽相同,但都不适用于智能公园设备网络的管理<sup>[1]</sup>. 随着智慧旅游的井喷式发展,地质公园智能设备的数量呈几何级数增加,不同类别的设备配备独立的管 理系统,而各系统无法做到无缝连接,极大地增加了管理难度.本文基于简单网络管理协议(SNMP), 设计地质公园智能设备网络的设备管控系统.

## 1 系统设计

#### 1.1 设计思路

系统需要完成查看设备的状态,进行数据分析,修改设备上指定的信息,远程启动或关闭设备通信 端口,以及利用 Trap 实时监控设备安全事件等系列功能.因此,初步开发一个基于 Windows 的,能进 行跨越局域网,实现远程管理的软件.首先,它要能从正在运行的网络设备获取指定信息,分析流量,并 了解设备运行情况;其次,要能接收来自设备发送的被动异常情况和联络数据包,把控设备的运行;最 后,需要为设备录入相应数据,更正运行性质,并限定端口.

系统实现分为三阶段.第一阶段,配置好一台智能电脑和一台交换机,使用 HP 公司开发的 SNMP<sup>++</sup>类库,用 Visual C<sup>#</sup>编写一个 Windows 下的针对地质公园智能设备的管控系统,从指定的智 能设备上实现设备信息读取、设备信息修订、异常情况数据包接收的计算方法和步骤<sup>[2]</sup>.第二阶段,在智 能设备上实现端口流量分析、端口启动、关闭操作.第三阶段,试图编写满足大众网络设备的网络协议

**收稿日期:** 2015-06-17

- **通信作者:** 何原荣(1977-),男,副教授,博士后,主要从事地图制图学与地理信息工程的研究. E-mail:191222177@ qq. com.
- 基金项目: 广西教育厅科研项目 (TB2014481); 广西桂林市科学研究与技术开发项目(20140302-3); 广西人才小高 地重点项目(GXRCGD201402); 广西桂林旅游高等专科学校科研重点项目(2013ZD02)

设备管理程序.网络管理拓扑结构,如图1所示.

1) 配置网络设备的 SNMP 代理服务. 要使用基于 SNMP 协议的软件对设备进行管理,必须先启动设备端 的 SNMP 代理服务器,以响应 SNMP 管理程序的请求.

2) SNMP 协议的对象管理结构 MIB 变量.SNMP 客户端通过发送 SNMP 消息修改或获得 MIB 值,MIB 定义了 SNMP 服务器必须维护的所有变量.不同厂家 有不同的 MIB 私有数据.

3) SNMP<sup>++</sup> 类库 Window 应用程序的调用.分析 SNMP<sup>++</sup> 的类库结构,成员变量和成员函数,实现适合 于 IP 和 IPX 协议的程序.

4) Visual C<sup>#</sup> 的界面开发.采用 Visuanl C<sup>#</sup> 来实现



Fig. 1 Network management topology structure

用户界面, Visuanl C<sup>#</sup> 是一个强大的 widows 程序开发工具, 给开发人员提供了方便的类库接口和窗口 设计器<sup>[3]</sup>. 构建基于 Windows 平台、安卓及 IOS 移动操作系统的设备管控系统.

#### 1.2 开发环境

硬件环境:联想 Thinkpad x220 笔记本电脑一台、Cisco 5600 路由器一台、Cisco 3500 交换机一台、 公园监控摄像头 3 个、公园小型 LED 显示屏一块、红外感应器两个、门禁系统一套,以及公园智能电瓶 车一辆.软件环境:Windows XP 操作系统、Linux 服务器操作系统、Microsoft C<sup>#</sup> 开发环境、HP 公司 SNMP<sup>++</sup> SDK 模块,采用公园内部网络及电信 3G 网络环境.

#### 1.3 技术特点和难点

直接使用 C<sup>++</sup>底层代码开发 SNMP 程序是一个复杂而繁重的过程,最新推出的 DELPHI 提供有 IndyCLients 控件 IDSNMP,可以方便地进行简单的 SNMP 操作,网络流行的 PowerTCP 控件也是一 个方便的第三方控件<sup>[4]</sup>.通过比较,基于 HP 公司的 C<sup>#</sup> 类库 SNMP<sup>++</sup>有如下 4 个主要特点:1) SNMP 的基础开发受到 SNMP<sup>++</sup> 的阻碍,简化了开发 APP 的过程;2) 操作灵活稳定,保证很强的安全可信 度;3) 方便地从 SNMP 版本 1 移植到 SNMP 版本 2;4) 脱离操作平台,可不更改代码.

#### 2 SNMP 管控系统开发

#### 2.1 系统体系结构设计

管理系统调用管理客户机(MC)软件,通过 Internet 与智能设备上的管理服务器(MS)软件联系<sup>[5]</sup>,

主机和智能设备在同一个服务器上运行程序.针对技术层面, 类似服务器也叫做管理代理.管理系统调用本地主机上的客 户软件,然后标注和它传递信息的代理.客户机与服务器达成 联络后,即发送命令更新智能设备中状态或者提交申请以获 得路由器信息<sup>[6]</sup>.当然,在一个大网络中的所有智能设备并不 都被同一个管理系统管理,大多数管理系统只控制其网点上 的几个智能设备.管控系统管理协议模型,如图 2 所示.

#### 2.2 网络管理软件结构

SNMP 并非直接参与网络工作,而是为网络管理搭建基础结构,从而实现支持网络管理的开发和操作系统. 网络管理软件的组织结构迥然有别,同相关联的在线功能与网络管理水平都是息息相关的<sup>[7]</sup>. SNMP 智能设备管控系统功能结构,如图 3 所示.



图 2 管控系统管理协议模型 Fig. 2 management protocol model of management and control system

设计智能设备管控软件的硬性要求包括:将整个控制技术和通信信息投递到客户云端,使服务器终端最大程度便捷,从而达到降低受控管理设备承担影响的作用<sup>[8]</sup>.换而言之,智能设备的稳定性不随受

控设备开展网络管理效应的干扰而受到影响.

1) 查看数据方式,特定网络设备上特定信息的读取.包括 Get 读取指定 MIB 变量,Get-Nex 读取下一个 MIB 变量,读取一个 MIB 组的变量.

2) 修改设备上的数据. 修改特定设备的特定 管理信息对象.

3) 数字监控视窗,整理设备端口上的传输数 据单位.

4) 识别、补充、更新设备地址.

#### 2.3 程序各模块算法实现

首先,对程序用到的数据进行初始化,读取记录在文件中的设备地址列表;然后进行功能选择,提供 菜单和工具栏的方式为用户提供操作的选择.算法的核心部分就是数据的读出与修改.

1) Get 读取设备上指定信息



创建一个 Vb 对象,记录设备指定对象的标识符 Oid.

创建一个 PDU 对象,进行网络数据传输对象,封装了 ICTarget 和 Vb 的信息.

创建一个 SNMP 对象引发一个 Get()函数,把数据从指定设备、对象上读出到指定字符串变量中. 2) Get-Next

······[Get-Next 操作的使,	用说明]	
int SNMP::get_next( Pdu &pdu,	// 设置 PDU 对象	
SNMPTarget & target, );	//目标对象	

设置远程设备的 IP 地址,网络协议等信息记录到 CTarget 对象中.

创建一个 Vb 对象,记录设备指定对象的标识符 Oid.

创建一个 PDU 对象,进行网络数据传输对象,封装了 ICTarget 和 Vb 的信息.

创建一个 SNMP 对象引发一个 get\_next()函数,把数据从指定设备、对象上读出到指定字符串变量中.

·······[Get-Bulk 操作的使用说明]·······								
int SNMP::get_bulk(Pdu &pdu,	//设置 PDU 对象							
Target & target,	//目标对象							
const int non_repeaters,	//无中继器							
const int max_reps, );	//最大重试次数							

3) Get-Bulk 操作函数定义

设置远程设备的 IP 地址,网络协议等信息记录到 CTarget 对象中.

创建一个 Vb 对象,记录设备指定对象的标识符 Oid.

创建一个 PDU 对象,进行网络数据传输对象,封装了 ICTarget 和 Vb 的信息.

创建一个 SNMP 对象引发一个 get\_next()函数,把数据写入到指定设备,指定对象上. 4) Set 操作函数定义

[Set 操作的使用说明]	]
int SNMP::set( Pdu &pdu,	//设定 PDU 对象
SNMPTarget & target);	//指定 target 对象

设置远程设备的 IP 地址,网络协议等信息记录到 CTarget 对象中.



Fig. 3 Functional structure diagram

创建一个 Vb 对象,记录设备指定对象的标识符 Oid,把需要写到设备的数值添加到 lib. 创建一个 PDU 对象,进行网络数据传输对象,封装了 ICTarget 和 Vb 的信息. 创建一个 SNMP 对象引发一个 sett()函数,把数据写入到指定设备,指定对象上.

「載取 Tran 句和 Inform 句的揭作]
int SNMP::notify_register(OidCollection &ids,   // 侦听类型
TargetCollection & targets, // 侦听对象
SNMP_callback callback, //回复信号
void * callback_data=0);    //回复数据

定义一个 SNMP 对象,然后指定特定的设备通用标识符,启动数据接收.

#### 3 系统测试与实例应用

#### 3.1 监视智能设备的运行状态

显示名为 Okinawa 的智能设备运行时间 2 132 min,统计了各个端口流量信息.测试端口启动关闭,关闭端口1.操作开启端口1,在右上角的单行文本框内输入端口1,单击"开启".端口1,由关闭状态转为开启状态,对话框提示"端口开启成功".

#### 3.2 接收 Trap 数据包的测试

监控设备端口的 Trap 事件. 打开 Trap 窗口, 侦听 UDP162 端口. 打开 Trap 监控窗口, 并拔掉交换 机端口1连接线, 接着又插上. 此时返回了几个智能发回来的事件, 显示了交换机端口的状态变更, 红线 的地方表示, 端口1现在已经处于连接状态. Trap 设备故障自动报警模块, 如图4 所示.

#### 3.3 SET 功能的测试

修改指定设备的信息,打开 SET 窗口,并指定智能的 IP 地址.在 MIB 数控件窗口选择要修改的变量,在弹出的窗口中输入数值,如图 5 所示.





Fig. 4 Trap equipment failure alarm module



图 5 修改设备参数控制设备状态

Fig. 5 Modify equipment parameter control equipment status

#### 3.4 应用实例

系统以广西资源国家地质公园为数据采集点,通过公园内部有线网络、无线 WiFi、3G 网络把所有 智能设备连接起来,开发智能设备的 MIB 数据库接口,把智能设备连接到同一管控平台.系统连接了公 园的灯光管理、喷泉管理、音乐管理、船闸管理、船只 GPS 模块、门禁售票系统等,极大地方便了公园的 管理及监控,对智能公园的发展有着积极的意义.

### 4 结论

不同的智能设备的管理界面及通信网络互不相同,给管理造成了极大麻烦.如监控设备状态需要专门的监控系统,船只状态需要船只系统,而在管理过程中,管理主要查询设备的安全、位置、电压、负载等关键数据<sup>[9]</sup>.通过 SNMP 系统平台可以直接与各个异构设备通信,读取和修改相关参数,大大提高了数据查询及设备监控效率.

基于 SNMP 网络协议的管理系统,可运行于 TCP/IP 协议的任何网络,系统可以在现有网络的基

础上进行通信,避免了增加新设备带来的成本及维护工作量.随着智能设备数量增加,设备种类越来越 多,管理系统各不相同,管理越来越复杂.SNMP系统按需要读取关键的数据,如故障、超负荷、超压、高 温,并以短信或直接拨打电话方式通知管理员,极大地减轻了管理员的工作量,并实现了系统 24 h 自动 管控报警.

系统基于 Windows 平台与手机 APP 平台开发,用户可在任一电脑及安卓手机上安装管理系统,也可以安装在安卓系统的平板电脑及智能电视上,可实时查看到公园智能设备的状态,并对特定参数进行远程修改<sup>[10]</sup>.

#### 参考文献:

- [1] BANKER K, MELLQUIST P E. SNMP<sup>++</sup>帮助文档[Banker, ellquist]SNMP<sup>++</sup>[J]. Connexions, 1995, 9(3): 5-8.
- [2] CASE J, MCCLOGHRIE K, ROSE M, et al. Coexistence between version 1 and version 2 of the Internet-standard network management framework[J]. Internet RFC Archives Search, 1993(3):1452.
- [3] CASE J, MCCLOGHRIE K, ROSE M, et al. Structure of management information for version 2 of the simple network management protocol (SNMPv2)[J]. Internet RFC Archives Search, 1993(3):1442.
- [4] 苏会卫,孙琳,欧瑜枫.DTN 中服务感知的自适应消息转发路由算法[J]. 计算机工程与设计,2010(17):3816-3819.
- [5] 吴金龙.计算机网络对等安全通信技术的研究[J].华侨大学学报:自然科学版,2000,21(4):419-424.
- [6] 龙夏,凌军,汤彪,等. 基于 ISAPI 过滤器的网页防篡改系统[J]. 合肥学院学报:自然科学版,2010,20(3):40-43.
- [7] 杨玉杰,雷京.北京市地方税务局网络安全监控管理系统[J].办公自动化,2006,12(5):4-5.
- [8] 李俊. 基于 SNMP 的 GIS 软件与资源的监控管理系统[J]. 软件导刊, 2008, 7(3): 34-35.
- [9] 庄权. 邮政金融实时交易通用监控管理系统的研究与设计[J]. 福建电脑, 2005, 21(7): 114.
- [10] 苏会卫,孙琳,文进爱.建立简单高效的校园网络监控管理系统[J].大众科技,2009,11(12):13-14.

# Geopark Equipment Control System Design Based on SNMP Network Protocol

# HE Yuan-rong<sup>1</sup>, LI Jia-nan<sup>2</sup>, LU Lin<sup>2</sup>

(1. College of Computer and Information Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;

2. School of Management Science and Project Management,

Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang 550025, China )

**Abstract**: Based on simple network management protocol (SNMP), designing management and control system of geopark intelligent devices, which can realize enable or disable drafting devices, remote monitoring intelligent equipment port, summary data equipment, view and update equipment event information and real-time monitor the operation status of the equipment function. Application results show that system can connect all geo-parks intelligent devices to the same management and control platform via wired or wireless network, real-time monitoring devices operation status, traffic information, data statistics and fault data, etc, and those will be sent to the administrator through mobile phone text and automatic fault alarm phone call.

Keywords: equipment monitoring; simple network management protocol; wisdom scenic spot; fault alarm; geo-park

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 吴逢铁)

**文章编号:**1000-5013(2015)04-0393-06

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.04.0393

# OHNN 新的分组 Hash 算法

### 李国刚, 钟超林, 蔺小梅

(华侨大学信息科学与工程学院,福建厦门 361021)

**摘要:** 在 Hash 函数算法的研究设计过程中,引入混沌系统理论,探索研究基于混沌动力学的 Hash 函数算法.将分段线性混沌映射和过饱和的 Hopfield 神经网络(OHNN)进行结合,提出一种基于混沌动力理论的单向 Hash 函数构造方法.对算法进行仿真和测试,从不同方面分析验证所提新的算法满足 Hash 算法的性能指标.安全性分析表明:该算法能抵抗多种碰撞和统计分析的攻击,具有很好的安全性能.

关键词: Hopfield 神经网络; 混沌吸引子; 分段线性映射; Hash 算法

**中图分类号:** TN 918.4 文献标志码: A

采用大量逻辑运算的 Hash 函数的方法已不具备所需的安全特性<sup>[1-6]</sup>,当经典 Hash 函数被攻破后,寻找一个更安全的算法就变得不再那么简单.于是,在 Hash 函数算法的研究设计过程中,引入混沌系 统理论<sup>[3]</sup>,探索基于混沌动力学的 Hash 函数算法,成了密码学领域研究的新思路.本文将分段线性混 沌映射和过饱和 Hopfield 神经网络(OHNN)进行结合,提出一种基于混沌动力理论的单向 Hash 函数 构造方法.

### 1 分段线性映射

选择的混沌映射是一维分段线性映射,它从标准帐篷映射和斜帐篷映射推广演化而来,函数为

$$x_{n+1} = \begin{cases} x_n/q, & 0 \leq x_n < q, \\ (x_n - q)/(0.5 - q), & q \leq x_n < 0.5, \\ (1 - x_n - q)/(0.5 - q), & 0.5 \leq x_n < 1 - q, \\ (1 - x_n)/q, & 1 - q \leq x_n < 1. \end{cases}$$
(1)

式(1)中:x取值范围为[0,1];控制参数q取值范围为(0,0.5). 当q在(0,0.5)的范围内时,会产生混沌现象,其函数图形,如图 1 所 示.由文献[6]可知:该分段线性映射的输出序列在(0,1)是遍历的, 有着很好的数学统计特性.系统的不变分布函数 $f^*(x)$ 的算子[5]为

$$P_{s}f^{*}(x) = Pf^{*}(xP) + (0.5 - P)f^{*}(P + x(0.5 - P) + (0.5 - P)f^{*}(0.5 + (1 - x)(0.5 - P)) + Pf^{*}(1 - xP).$$

f(x) = 1表明系统在(0,1)上是均匀分布的.

# 2 OHNN 吸引子的混沌特性

在 OHNN 中吸引子<sup>[4]</sup>在每个稳定状态时候的收敛域是混沌的, 其与神经网络的初始状态之间表现出一种不规则的关系,称之为混

**收稿日期:** 2014-12-29

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

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61370007);华侨大学科研基金资助项目(14BS115)



图 1 分段线性映射 Fig. 1 Piecewise linear mapping

沌性<sup>[5]</sup>. 假设 Hopfield 神经网络有 N 个神经元,算法中取 N=16. 引入一随机变换矩阵 H,原始状态  $S_u$  和吸引域中各元素组成的矩阵 S 的演变规律为

$$\hat{\boldsymbol{S}} = \boldsymbol{S}\boldsymbol{H}\,,\tag{3}$$

$$\hat{\boldsymbol{S}}_{\mathrm{u}} = \boldsymbol{S}_{\mathrm{u}} \boldsymbol{H}. \tag{4}$$

式(3)~(4)中: *ŝ* 是 *S* 的更新状态; *ŝ* 是 *S* 的更新状态. 神经网络新的权值联结矩阵 *T* 为

$$\boldsymbol{T} = \boldsymbol{H}\boldsymbol{T}_{0}\boldsymbol{H}^{\prime}.$$

式(5)中:H'为H的转置矩阵.

网络运行后,按式(2),(3)的变化规律,当改变混沌神经网络的初值,即T发生改变时,其对应的吸引子和吸引域都都将发生非常明显的改变.基于离散的 Hopfield 神经网络的统计概率问题,如果要有较多的不可预测的吸引子,则要求网络中兴奋性的突触连接和抑制性的突触连接的数目要尽可能地相等.算法选取 N=16,也是基于此考虑.

设 OHNN 网络的初始联结矩阵 T。与 N 阶非奇异随机变换矩阵 H 分别为

	<b>1</b>	1	1	1		0	—	1	-1	-	- 1	—	1	-1	_	- 1	_	1	0	1	1	[1
	1	1	1	1		1		0	-1	_	- 1	_	1	-1	_	- 1	_	1	-1	0	1	1
	1	1	1	1		1		1	0	-	- 1	—	1	-1	_	- 1	_	1	-1	-1	0	1
	1	1	1	1		1		1	1		0	_	1	-1	_	- 1	_	1	-1	-1	-1	0
	0	1	1	1		1		1	1		1		0	-1	-	- 1	_	1	-1	-1	-1	-1
	-1	0	1	1		1		1	1		1		1	0	) –	- 1	_	1	-1	-1	-1	-1
	-1	-1	0	1		1		1	1		1		1	1		0	_	1	-1	-1	-1	-1
$T_{\cdot} =$	-1	-1	-1	0		1		1	1		1		1	1		1		0	-1	-1	-1	-1
<b>I</b> 0 —	-1	-1	-1	-1		0		1	1		1		1	1		1		1	0	-1	-1	-1
	-1	-1	-1	-1	_	- 1		0	1		1		1	1		1		1	1	0	-1	-1
	-1	-1	-1	-1		- 1	_	1	0		1		1	1		1		1	1	1	0	-1
	-1	-1	-1	-1	_	- 1	—	1	-1		0		1	1		1		1	1	1	1	0
	0	-1	-1	-1	_	- 1	—	1	-1	-	- 1		0	1		1		1	1	1	1	1
	1	0	-1	-1	_	- 1	_	1	-1	-	- 1	_	1	0	)	1		1	1	1	1	1
	1	1	0	-1	_	- 1	—	1	-1	-	- 1	—	1	-1		0		1	1	1	1	1
	L 1	1	1	0		- 1	_	1	-1	-	- 1	_	1	-1	-	- 1		0	1	1	1	1
				[0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
				0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0			
				-			-		Ŭ		-	0	0						Ŭ			
				0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
				0	0	1 0	0	0 0	0	0	0	0	0	0 0	0	0 0	0	0 0	0			
				0 0 0 0	0 1 0	1 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 1	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0			
				0 0 0 1	0 1 0 0	1 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0 0	0 0 1 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0			
				0 0 0 1 0	0 1 0 0 0	1 0 0 0	0 0 0 0 1	0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 1 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0 0				
			H =	0 0 0 1 0 0	0 1 0 0 0 0	1 0 0 0 0	0 0 0 0 1 0	0 0 0 0 1	0 0 0 0 0 0 0	0 0 1 0 0 0		0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0	0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0			
			H =	0 0 0 1 0 0 0	0 1 0 0 0 0 0	1 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 1 0 0	0 0 0 0 1 0		0 0 1 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 1	0 0 0 0 0 0 0 0		0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0				
			H =	0 0 0 1 0 0 0 0	0 1 0 0 0 0 0 0 0	1 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 1 0 0 0 0	0 0 0 0 1 0 0		0 0 1 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 1 0		0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1	0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0				
			H =	0 0 1 0 0 0 0 0	0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	1 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0	0 0 0 0 1 0 0 0		0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0	0 0 0 0 0 0 0 0		0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0				
			H =		0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 1 0 0 0 0		0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0				
			H =		0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0		0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0				
			H =		0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0				
			H =		0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1					
## 3 算法设计

Hash 算法结构上一般分为压缩函数和运算迭代. 压缩函数承担 Hash 算法最关键的功能,即如何 将任意长度明文序列单向压缩映射成固定长度的输出,设计了一种新的单向分组 Hash 函数算法. 算法 的基本思想如下:将 OHNN 的收敛域中的吸引子元素 x<sub>0</sub> 作为密钥,同原始文本比特、分段线性映射 (式(4))的上一次迭代结果的值结合一起,共同运算得出对应的 Hash 值. 设计的 Hash 函数生成的函数 值长度(K)为 128 b. 整个算法的结构框图,如图 2 所示.



#### 图 2 算法结构框图

Fig. 2 Block diagram of the algorithm

1) 明文扩展. 明文消息是一段任意长字符,每一个明文字符数值 ASCII 变换后,转换为[0,1]之间 的浮点数. 将转换后的数值存储在数组 D 中. 扩展方法如下:设消息明文为 m,该消息明文的长度设为 s,再添加 n b 的(101010…)2,使得(m+n)mod 1 024=1 024-s 成立. s 的取值一般为 64,0 $\leq n \leq Kl$ . 添 加后的待处理消息变成 M,可分为 l 个 1 024 b 的子模块, $M = (M_1, M_2, \dots, M_l), m+n+s=1$  024l.

2) 密钥流生成. 初始密钥由 OHNN 和参数 H<sub>0</sub> 提供. 在 OHNN 中随机选取吸引域中的一个值的前一状态,将其转换为[0,1]间的浮点数,并将其存储,作为选取的密钥,赋值给 x<sub>i</sub> 和 H<sub>0</sub>,作为分段线性 映射的初始值.

3) 段线性映射处理. 算法对明文的迭代处理,采用分组并行处理方式. 算法对每一个明文分组子模 块 *M<sub>i</sub>*(1,2,3,…,*l*)的处理,采用不同的密钥参数,但采用同样的迭代算法(图 2). 以第 *M<sub>i</sub>* 个模块为例, 对于当前所选择的子模块 *m<sub>i,j</sub>*(*j*=1,2,3,…,128),由混沌神经网络产生吸引子的前一个状态作为一个 密钥,初始化为当前函数的初始值,经过混沌分段映射函数 *m<sub>i,j</sub>*次迭代,生产当前状态值 *x<sub>m<sub>i,j</sub>*. 然后,将 当前生成的混沌状态四舍五入为相对应的 0 或者 1,一直到模块中的所有值都处理完毕,得到的是由 *Hl* 个 1 或者 0 组成的数组. 通过级联这 *Kl* 个 0 或者 1 就是第 *i* 个模块的 Hash 值.</sub>

4) 最终 Hash 值的生成. 每个消息模块 M<sub>i</sub>(i=1,2,...,l)都会生成一个中间 Hash 值 H<sub>i</sub>(i=1,2,...,l),最后按 H(M)=H(l)⊕H(l-1)⊕…⊕H(1)计算,得到整个明文序列的最终 Hash 值.

## 4 算法测试及安全性能分析

#### 4.1 Hash 值分布

混沌 Hash 函数的主要性能分析方法:固定长度的消息经过 Hash 函数,通过计算,得到的 Hash 值 能均匀反应消息中每个消息.算法输入的明文序列为

The chip is a communications processor consisting of a reduced instruction set computer processor and a digital signal processor. This device has a rich peripheral set architected specifically for voice over internet protocol phone applications that results in a reduced bill of materials, reduced complexity, and reduced time to develop an internet protocol phone. The chip architecture uses advanced design features to provide flexibility and performance. Combined with Telogy Networks software for IP phone applications, the chip provides a complete hardware/software solution capable of reducing system design cycle times.

原始明文的 ASCII 码分布,如图 3(a)所示.由图 3(a)可知:明文的 ASCII 都集中在一个小范围之 内. 算法之后的最终散列值的分布图, 如图 3(b)所示. 由图 3(b)可知: 经过本 Hash 函数计算以后的散 列值分布相当均匀.



(a) 明文 ASCII 码值分布

图 3

(b) 十六进制散列值分布

#### 4.2 文本仿真

仿真采用 Hash 算法, 对一段任意长的原始明文进行计算, 获取其十六进制的 Hash 值 Ho. 对原始 明文文本按 n(n>1)种不同的修改方法,修改成与原始明文只有微小差异的 n 组明文,并计算其对应的 Hash 值 H<sub>n</sub>. 将文本相关参数做下列 6 种情况的改变:1) 直接计算文本 Hash 值;2) 将首字符 T 变为 Y;3) processor 变为 orocessor;4)最后字符"."变为"。";5) 最后位置添加空格符;6) 密钥 0.232323 更 改为 0.232326. 分别得到的 Hash 值用十六进制表示如下:

明文信息和 Hash 值分布 Fig. 3 Plaintext and Hash value distribution

1) 923A0D309FCE9739325786F0D52F99BD; 2) 22CA1394803B775095A647053CC9B48B; 3) A2647C3D6CC5CEBA28D571DAF0D0E714; 4) 4AFC27F2E08794EB19A45D4A752BB3C4; 5) C814C819818BC3FE89B7884797D03764:6) 18DA39BCEA0C8EE77D1D7533988782EF. 不同条件下的 Hash 值,如图 4 所示. 由图 4 可知: 文中构造的 Hash 算法单项性能良好,任何明文或者秘钥微小的改 变都能给最终的结果带来很大的变化,完全符合密码学的混乱的特性.



不同条件下的 Hash 值 图 4



#### 4.3 混乱与扩散性质统计分析

随机选取一段明文并计算出其 Hash 值 H<sub>0</sub>. 然后,随机改变明文中1个比特位的值,计算出改变后 的 Hash 值 H<sub>n</sub>,比较 H<sub>n</sub>和 H<sub>0</sub>间不同的比特位个数,完成一次测试统计.重复上述过程 N 次,得到统 计数据.文中测试的 Hash 算法生成的 Hash 值长度为 128 b.测试中 N 取1024,如图5 所示.由图5 可 知:每改变明文1b,对应输出的 Hash 值较为均匀地分布在理论值 64 b 的周边,说明有着较强的混乱和 扩散性.对128,256,512,1024,4 种不同测试次数的实验数据进行统计分析,如表1 所示.



图 5 明文敏感性测试

Fig. 5 Plaintext susceptibility testing

表1 统计分析测试结果

Tab. 1 Statistical analysis of the test results

Ν	$\overline{B}$	$P \sqrt[0]{0}$	$\Delta B$	$\Delta P$	$B_{ m min}$	$B_{ m max}$
128	64.187 5	50.927 7	5.182 9	4.83	52	79
256	64.304 7	50.960 0	5.346 4	4.76	49	81
512	64.095 7	50.860 0	5.449 0	4.98	49	82
1 024	64.093 2	50.250 0	5.426 3	4.57	49	82

由表 1 可知:明文每改变 1 b 时,算法的平均变化比特数 B 非常接近于 64 b 的理想值,平均变化概率 P 也都接近于 50%的理想状况;其对应的均方差  $\Delta B$  和  $\Delta P$  均非常小,说明变化幅度很小且这种变化是非常稳定的.从统计学的角度说明其具有良好的抗统计攻击的能力.

#### 4.4 抗碰撞分析

文中采用文献[7]的方法,测试算法的抗碰撞能力.经过1024次试验,得到最大差异度为2180,最 小差异度为853,平均差异度为1506,平均差异度/字符是88.82,非常接近理想值85.3333,说明本算 法的碰撞程度很低,完全能够抵抗碰撞攻击.

#### 4.5 生日攻击

生日攻击的原理不使用 Hash 函数和任意代数性质,只决定于消息摘要的长度.为了抵抗生日攻击,通常把消息摘要的长度取为至少 128 b,对于 MD5 的生日攻击需要约 2<sup>64</sup> 次哈希运算,SHA-1 输出 长度选择的 160 b 也是出于这样的考虑.算法最终的哈希值为 128 b.

#### 4.6 算法的比较

选取具有代表性的算法<sup>[6,8+0]</sup>与所提算法进行对比分析,从相关统计数据得出基于混沌的 Hash 函数均具有很好的统计性能,平均变化比特数达到 64 b,而同时每比特的平均变化概率 50%以上,接近 Hash 函数算法理论上的理想水平.文中算法与文献[8,10]的算法均具有良好的统计性能,在抗碰撞攻 击方面,文中算法在抗碰撞分析中的平均差异度是 88.82,而文献[8]所提算法是 97.5,明显优于文献 [8]所提算法.同文献[6,9]中的平均变化比特数和每比特平均变化概率相比,所设计的算法具有较好的 统计性能指标.

#### 5 结束语

提出的基于 OHNN 的新的分组 Hash 算法采用并行运算思维,提升了算法执行效率. OHNN 的结

构和性质满足混沌密码系统的要求,与单纯引入一个混沌系统相比,具有更好的安全性能.即使消息明 文的长度相同,只要改 H,其对应的吸引子和产生的吸引域则会完全不同.这使分段映射的输入控制参 数不一样,引入了扰动,避免混沌动力学特性退化,并确保了最终散列值完全不相同.消息的扩展这一步 骤,即把消息长度也作为一个参数项,增加了攻击的难度,使算法的安全性能有了进一步的保障.最后, 从不同方面分析验证了所提新的算法满足 Hash 算法的性能指标.安全性分析表明:本算法能抵抗多种 碰撞和统计分析的攻击,具有很好的安全性能.

#### 参考文献:

- WANG Xiao-yun, YAO Fang. Cryptanalysis of SHA-1 hash function [C] // Proceedings of Crypto 2005. Berlin: Springer-Verlag, 2005:19-35.
- [2] XIAO Di,LIAO Xiao-feng, WANG Yong. Improving the security of a parallel keyed hash function based on chaotic maps[J]. Phys Lett A,2009,373(47):4346-4353.
- [3] YANG Gang, YI Jun-yan. Dynamic characteristic of a multiple chaotic neural network and its application[J]. Soft Computing, 2013, 17(5):783-792.
- [4] LI Guo-gang, GUO Dong-hui. One-way property proof in public key cryptography based on OHNN[J]. Procedia Engineering, 2011, 15(1/2):1812-1816.
- [5] LASOTA A, MACKEY M C. Probabilistic properties of deterministic systems[M]. Cambridge:Cambridge University Press, 1985:1.
- [6] XIAO Di, LIAO Xiao-feng. One-way Hash function construction based on the chaotic maps with changeable-parameter[J]. Chaos Solitons and Fractais, 2005, 24(1):65-71.
- [7] WONG K W. A combined chaotic cryptographic and hashing scheme [J]. Physics Letters A, 2003, 307(5/6): 292-298.
- [8] 李永华. 混沌加密算法与 Hash 函数构造研究[D]. 大连: 大连大学, 2012: 45.
- [9] WANG Yong, LIAO Xiao-feng, XIAO Di, et al. One-way hash function construction based on 2D coupled map lattices[J]. Information Sciences, 2008, 178(5): 1391-1406.
- [10] XIAO Di, LIAO Xiao-feng, DENG Shao-jiang. Parallel keyed hash function construction based on chaotic maps[J]. Phys Lett A, 2008, 372(26):4682-4688.

# New Gouping Hash Agorithm Based on OHNN

# LI Guo-gang, ZHONG Chao-lin, LIN Xiao-mei

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

**Abstract:** In the design process of the Hash function algorithm study, the chaotic systems theory, is introduced to investigate the Hash Function Algorithm Based on Chaos Dynamics. Combining the piecewise linear chaotic map and oversaturated Hopfield neural network (OHNN). An unidirectional Hash function construction method based on chaotic dynamical theory is proposed. The new algorithm is verified to meet the performance index of Hash algorithm from different aspects by simulation and testing. Security analysis shows that the proposed algorithm can resist many kinds of attacks, and has good security performance.

Keywords: hopfield neural; the chaotic attractor; piecewise linear mapping; Hash algorithm

(责任编辑:陈志贤 英文审校:吴逢铁)

**文章编号:**1000-5013(2015)04-0399-07

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.04.0399

# 结合 SLIC 超像素和 DBSCAN 聚类的 眼底图像硬性渗出检测方法

# 凌朝东,陈虎,杨骁,张浩,黄信

(华侨大学信息科学与工程学院,福建厦门 361021)

摘要: 为自动检测出眼底图像中的硬性渗出,结合简单线性迭代聚类(SLIC)超像素分割算法和基于密度的 聚类算法(DBSCAN),提出一种对眼底图像硬性渗出的检测方法.首先,采用 SLIC 超像素分割算法对彩色眼 底图像进行过分割;然后,采用 DBSCAN 对上述分割得到的超像素进行聚类,形成簇;最后,分割出目标图像, 并选用标准糖尿病视网膜病变数据库(DIARETDB0 和 DIARETDB1)的眼底图像验证上述组合算法的可行 性.实验结果表明:算法能够快速、可靠地检测出眼底图像中的硬性渗出,具有可直接对彩色图像进行分割、特 征提取的特点.

关键词: 图像分割;超像素;硬性渗出;糖尿病视网膜病变;简单线性迭代聚类;基于密度的聚类算法 中图分类号: TP 391.41; R 774.1 **文献标志码:** A

在图像处理中,涉及图像目标特征的提取和分析的过程都离不开图像分割方法<sup>[1]</sup>.超像素分割作为 图像分割的一种,它以基本单元的形式将图像中相似区域归为一类,并把这些基本单元作为目标对象以 减少冗余信息,以便快速地分割出目标物体.糖尿病视网膜病变(diabetic retinopathy,DR)是糖尿病的 严重并发症,是引起人们视力障碍、甚至失明的常见原因之一<sup>[2-3]</sup>.按我国糖尿病视网膜病变分期标准, 以是否出现新生血管为界,分为非增殖期糖尿病视网膜病变(NPDR)和增殖期糖尿病视网膜病变 (PDR)两大类.硬性渗出(hard exudates,HEs)作为 DR 的早期临床症状,出现在 NPDR 的 II 期,是因血 管通透性增加,类脂质从血管中渗出累积而成<sup>[4]</sup>.早在二十世纪七八十年代,就有国外学者提出基于数 字眼底视图像的 DR 自动筛查方法,并有学者在黑白眼底图像上运用灰度特征提取出硬性渗出区域.基 于灰度图像的硬性渗出检测方法主要分为阈值分割方法、区域生长的方法、数学形态学的方法以及分类 的方法<sup>[5]</sup>等四类.彩色图像除了包括亮度信息外,还包含色调、饱和度等有用信息.随着实际的需要,对 彩色图像的分割引起了学者的关注.目前,相关的算法存在对单色图像进行处理的信息不充分,以及过 多地依靠前期预处理的信息损失、繁琐的冗余步骤和检测结果在原图上叠加的过程等不足.鉴于此,本 文结合简单线性迭代聚类(simple linear iterative clustering,SLIC)超像素分割和基于密度的聚类算法 (density-based spatial clustering of applications with noise,DBSCAN),提出一种对彩色眼底图像的硬 性渗出进行检测和标记的方法.

# 1 实验部分

#### 1.1 眼底图像硬性渗出检测方法

提出一种结合 SLIC 超像素和 DBSCAN 聚类方法对眼底图像的硬性渗出进行检测.首先,采用 SLIC 超像素分割算法对经预处理的整幅彩色原图像进行分割,以减轻后续图像处理的复杂度;然后,采 用 DBSCAN 聚类算法,对这些被分割的超像素进行聚类,形成像素,产生最终的目标分割图像;最后,对

收稿日期: 2014-12-03

通信作者: 凌朝东(1964-),男,教授,主要从事生物医学信号处理等的研究. E-mail:edac@hqu. edu. cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61203369,61204122);福建省自然科学基金资助项目(2011J01351);福建省科技计划重点项目(2013H0029);福建省泉州市科技计划项目(2013Z33)

目标分割图像的硬性渗出进行检测和标记.

#### 1.2 SLIC 超像素分割算法

作为当前较为常用的图像处理方法之一,通常需要超像素分割算法具有快速、便于使用的特性,并 且能产生区分度较佳的块<sup>[6]</sup>.目前,超像素算法大体分成基于图论和梯度上升的两种方法.基于图论的 算法有归一化割(normalized cuts)算法、基于图的分割(graph-based segmentation)算法等;而基于梯度 上升的分割方法代表算法有快速漂移(quick shift)算法、简

单线性迭代聚类(SLIC)算法等.

SLIC 由 Achanta 等<sup>[7]</sup>提出的,它克服了以往算法计算 量大或超像素形状及数量不可控等的不足. 将图像转化为 五维特征向量, V = [l, a, b, x, y],其中,[l, a, b]为像素颜 色,属 CIELAB 颜色空间,[x, y]为像素位置. 由此构造一 个距离度量,它既考虑了像素颜色间的相似性,又考虑了像 素间的距离要素,利用该距离度量重新聚类中心点周围的 像素,进而得出新的聚类中心. 在这个迭代过程中,若前后 中心像素的剩余误差足够小,则迭代停止,至此整个超像素 分割过程结束. 文中采用此算法对原始彩色眼底图像分割 处理,算法示意框图,如图 1 所示.

由于颜色空间和距离空间的度量方法不同,SLIC 提出 新的距离度量方法(也称紧凑因子)<sup>[8]</sup>,即



图 1 SLIC 超像素分割算法处理流程图 Fig. 1 SLIC superpixels algorithm flow diagram

$$d_{lab} = \sqrt{(l_k - l_i)^2 + (a_k - a_i)^2 + (b_k - b_i)^2},$$

$$d_{xy} = \sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2},$$

$$D_s = d_p + \frac{m}{s} d_{xy}.$$
(1)

式(1)中:k和i分别为两像素; $D_s$ 为 CIELAB 色彩空间值距离  $d_{lab}$ 和图像平面内位置距离  $d_{xy}$ 的加权和,表示两个像素间的距离;变量 m 度量超像素的紧凑性,m 值越大,紧凑性就越高.若每幅图像像素的总数为 N,预输出 K 个超像素,那么就有 N/K 个像素包含在每个超像素中,超像素的预期边长  $S = \sqrt{N/K}$ ,且这些超像素在每个边长为 S的网格中应有一个中心像素.

超像素的分割有如下4个主要步骤.

**步骤1** 以网格为基本单位,在每个网格中选择一点作为超像素中心,计算其3×3 邻域内像素的 梯度.其中,梯度值的最小像素作为新的梯度中心.

**步骤 2** 在每个区域中心的 2S×2S 邻域内对属于该区域的像素进行搜索,并将所有像素归为与其 临近的区域中心.

步骤3 对分割出的中心像素重新计算,并计算新旧两区域中心的剩余误差.

步骤4 重复步骤2,3,当误差小于一定值时,则超像素分割结束;否则,返回步骤2.

#### 1.3 DBSCAN 聚类算法

聚类是一种非监督的学习方法,它根据数据对象之间的相似性将数据集分割成具有同类内相似性 最大、类间相似性最小特征的类<sup>[9]</sup>.目前,主要有基于划分的聚类、基于模型的聚类方法、基于层次的聚 类、基于网格的聚类和基于密度的聚类等5大类.基于密度的 DBSCAN 聚类算法能够将数据定义为密 度可达的数据对象组成的集合,不但可以分类出任意形状的类簇,而且具有对噪声数据不敏感的特性.

DBSCAN 的相关定义<sup>[10-13]</sup>如下.

**定义1** (数据对象的邻域)数据对象  $\forall p \in D$  的 Eps 邻域定义为以 p 为核心, Eps 为半径的 d 维超 球体区域,即

 $N_{\rm Eps}(p) = \{q \in D \mid {\rm dist}(p,q) \leqslant {\rm Eps}\}.$ 

其中:D为d维空间上的数据集;dist(p,q)表示D中点p和q间的距离.

定义2 (核心点与边界点)对于数据对象  $\forall p \in D$ ,给定 Eps 和 MinPts,若 $|N_{Eps}(p)| \ge MinPts,则$ 称 p 为核心点;边界点为非核心点但在某个核心点的 Eps 邻 域内.

定义3 (直接密度可达)对于数据对象  $p,q \in D$ ,给定 Eps和 MinPts,若 p满足  $p \in N_{Eps}(q)$ 且  $N_{Eps}(p) \ge MinPts,则$ 称对象 p是从 q 出发直接密度可达的,但直接密度可达不具 有对称性.

**定义4** (密度可达)如果对于数据对象  $\forall p \in D$ ,则 Eps 和 MinPts 存在数据对象序列  $p_1, p_2, \dots, p_n \in D$ .其中: $p_1 = q$ ,  $p_n = p$ ,且  $p_{i+1}$ 从  $p_i$  直接密度可达,则称对象 p 从 q 密度可达, 密度可达是非对称的.

定义5 (密度相连)对于数据对象  $\forall p \in D$ ,给定 Eps 和 MinPts 存在一个数据对象 o,使得 p 和 q 从 o 密度可达,则称 对象 p 和 q 密度相连,它满足对称性.

**定义6** (簇、噪声)从任一核心点对象开始,对象密度可达的所有对象形成一个簇,噪声即为不属于任何簇的对象.

DBSCAN 聚类算法流程图<sup>[14]</sup>,如图 2 所示.

1.4 算法的评价指标选取

1.4.1 算法病变检测效果的评价指标 选取评价视网膜病变硬性渗出检测算法的评价指标[15]为

Sensitivity = 
$$\frac{TP}{TP + FN}$$
,  
Specificity =  $\frac{TN}{TN + FP}$ ,  
PPV =  $\frac{TP}{TP + FP}$ ,  
Accuracy =  $\frac{TN + FN}{TN + FN + FP + FN}$ .  
(2)

式(2)中:Sensitivity为灵敏度;Specificity为特异性;PPV为阳性预测值;Accuracy为准确率;TP(真阳)、TN(真阴)、FP(假阳)、FN(假阴)四个符号分别代表病变特征被算法正确检测出、非病变区域被正确的检测出、非病变区域被错误的判为病变区域和病变区域未被正确的检测出.

对图像分割算法效果进行评价,常采用基于图像及病灶区域水平定义的评价指标,一般选取灵敏度、特异性两个指标.这些针对单色图像算法处理的评价指标,两值越大,说明检测方法越好.

1.4.2 算法性能的评价指标 鉴于文中是直接对彩色图像处理,因此,引用适合超分割算法的评价指标.目前,超像素分割效果评价指标主要有边界响应率(boundary recall,BR)、计算代价(computation cost,CC)、区域内部均匀性、可完成的分割精度(achievable segmentation accuracy,ASA)以及欠分割错误率(under-segmentation error,UE)等指标.其中:边界响应率(BR)的计算式<sup>[16]</sup>为

$$BR(s) = \frac{\sum_{p \in \delta T} |\min_{p \in \delta S} ||p-q|| < \phi |}{|\delta T|}.$$
(3)

式(3)中: $\delta S$ 和  $\delta T$ 分别表示超像素边界和真实切割边界点单位集合; $\phi$ 表示 p和 q相差的阈值范围,单位是像素.

重叠率(overlap ratio, OR)是为了测量超像素块的规则性,其计算公式为

$$OR(s) = \frac{\sum\limits_{s_i \in S} (Area(s_i) - |s_i|)}{Z} = \frac{\sum\limits_{s_i \in S} (Area(s_i) - Z)}{Z}.$$
(4)

式(4)中:Z为图像中所有像素的个数;s<sub>i</sub>表示第i个超像素块;S表示超像素块的集合;Area(s<sub>i</sub>)代表包含s<sub>i</sub>在内的最小网格区域.由式(4)可知:OR 值越小,说明矩形与超像素的差越小,超像素越规则.





对 DBSCAN 算法进行评价,数据量为 n 的样本集合,其 DBSCAN 的计算复杂度为 O(n<sup>2</sup>). 文中采 用空间索引的方法降低时间复杂度,时间复杂度为 O(n • log n).

# 2 结果与分析

#### 2.1 文中算法的硬性渗出检测结果分析

为了验证文中算法的有效性和通用性,运用文中提出的 SLIC 超像素分割和 DBSCAN 聚类算法, 分别对 DIARETDB0 及 DIARETDB1 数据集中含硬性渗出较多的彩色眼底图像进行算法处理,结果如 图 3,4 所示.

从图 3 和图 4 的(d),(e),(f)中经 SLIC 超像素分割后的分割效果图可知:结果图已经把图中相似 的区域分割成具有相似特征的图像区域,其他无关特征基本被分割成近似六边形的区域.这样就有助于 接下来采用合适的算法对相似的区域进行提取,甚至分类,最终精确提取出感兴趣的区域.由此可以看 出:文中算法的优越之处是对彩色图像直接进行处理,规避了对单色图像,或者以往对灰度图像预处理 和后续候选区域提取过程中出现的信息损失,更好地保留和利用了图像的有效信息.

图 3 和图 4 的(g),(h),(i)分别对应图 3 和图 4 的(d),(e),(f)的 DBSCAN 聚类结果,可以看出其 准确地对硬性渗出进行了分割和标记.



(a) 眼底图像 image 013 原图



(b) 眼底图像 image 016 原图



(c) 眼底图像 image 017 原图



(d) image 013 的 SLIC 超像素分割



(e) image 016 的 SLIC 超像素分割





(f) image 017 的 SLIC 超像素分割



(g) image 013 的 DBSCAN 聚类结果 (h) image 016 的 DBSCAN 聚类结果 (i) image 017 的 DBSCAN 聚类结果
图 3 文中算法对 DIARETDB0 中眼底图像硬性渗出检测方法实验结果图
Fig. 3 Hard exudates detection result images using proposed methods in DIARETDB0 data sets
综上所述,由图 3,4 分割提取结果可以看出:与传统的基于单色图像或者灰度图像进行处理不同,

文中组合算法除考虑采用彩色图像的完整信息及空间距离外,整个处理过程只需要设定3个主要参数.

其中:SLIC 超像素分割设置一个参数,DBSCAN 聚类算法需要设置数据对象 p 的 Eps 邻域和 MinPts 两个参数.此外,从分割的直观效果来看,已经初步验证了文中组合算法的可行性和实用性.



(a) 眼底图像 image 005 原图



(b) 眼底图像 image 015 原图



(c) 眼底图像 image 019 原图



(d) image 005 的 SLIC 超像素分割



(e) image 015 的 SLIC 超像素分割



(f) image 019 的 SLIC 超像素分割







(g) image 005 的 DBSCAN 聚类结果 (h) image 015 的 DBSCAN 聚类结果 (i) image 019 的 DBSCAN 聚类结果
 图 4 文中算法对 DIARETDB1 中眼底图像硬性渗出检测方法实验结果图
 Fig. 4 Hard exudates detection result images using proposed methods in DIARETDB1 data sets

# 2.2 文中算法病变检测评价标准结果分析

对 DR 病变特征算法检测性能有两种评价指标:基于(病灶)区域和基于图像水平.其中:基于(病 灶)区域的评价标准侧重于判断一个图像候选区域是否为 DR 病变,注重算法能否检测出 DR 病变的数 量;而基于图像图像水平的评价指标侧重判断图像是否含有 DR 病变,不注重 DR 病变数量.

用文中算法对 DIARETDB0 和 DIARETDB1 数据集中眼底图像逐一进行算法验证,统计出评价指标,并与 Li 算法<sup>[17]</sup>、Walter 算法<sup>[18]</sup>和高玮玮算法<sup>[19]</sup>等硬性渗出检测算法评价结果对比,如表1 所示. 表1 眼底图像的硬性渗出检测方法实验结果对比

Tab. 1 Experimental results comparison of hard exudates detection methods for fundus image

检测方法	数据库	基于区域	或的评价结果	基于图像的评价结果			
	(被测图像数)	灵敏度/%	阳性预测值/%	灵敏度/%	特异性/%	准确率/%	
Li 算法	35	—	—	100	—	74.0	
Walter 算法	15	92.8	92.4	100	86.7	—	
高玮玮算法	56	93.6	95.6	100	89.3	85.7	
文中算法	130	93.7	94.7	100	82.3	92.8	

Li算法是运用一种基于区域的分割方法;Walter算法是运用一种基于形态学的分割方法,由于受到结构元素的限制,检测算法只在结构元素不太大的范围内且相对孤立的硬性渗出区域的检测结果才

较为理想;高玮玮算法是运用一种基于径向基函数(RBF)神经网络的方法,这种方法虽然在检测算法的 效率上有了一定提高,但不如 Li 等提出的基于数学形态学的检测算法精度高.文中硬性渗出检测方法 是一种基于聚类的图像分割算法,由上述分析,文中算法虽计算耗时略长,但检测精度和算法的适用性 和敏感性上较前三者要好.

#### 2.3 文中图像分割算法评价指标分析

对 SLIC 超像素分割来说,因为超像素分割不同于一般的图像分割,有着不同的分割目的,它是将 一个物体过分割成若干块,因此它的效果评价指标也有很大差别.文中 SLIC 算法采用 OR,BR,CC 三 个指标对超分割结果进行评价,结果如图 5 所示.图 5 中:Z 表示超像素的个数.



图 5 文中算法的 3 个主要指标性能效果

Fig. 5 Effect of three main indicators performance of the proposed algorithm

由图 5(a)可知:OR 值越小,说明网格与超像素的差越小,即随着超像素的增加,边界分的就越精 细.由图 5(b)可知:随着超像素个数的增加,前期持续增加,后期渐趋平稳,BR 值越高,说明分割的越精 细,就越减轻后期处理负担.由图 5(c)可知:计算法处理耗时始终是图像处理领域处理关注的重要对 象,准确、高效的算法对实际生活都密切相关.由前所述,文中算法处理相关指标已基本满足实际要求.

## 3 结束语

不同于以往基于单色的处理方法,文中对彩色眼底图像的硬性渗出进行检测,并纵向地与现有该领域的算法在边界响应率、重叠率和计算耗时三个指标对算法进行了量化比较.实验结果表明:两者结合达到了对硬性渗出进行快速、可靠地自动检测,并且检测结果直接在原彩色眼底图像上标记,省去了以往算法预处理以及检测结果再在原图上叠加的过程,满足了临床要求.下一步的工作将对文中引用的两种算法作进一步地改进,如两者参数的自适应选择、SLIC超像素算法.

#### 参考文献:

- [1] 贾冀.基于聚类的图像分割与配准研究[D].西安:西安电子科技大学,2013:1-2.
- [2] RAM K,SIVASWAMY J. Multi-space clustering for segmentation of exudates in retinal color photographs[C]// 31st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Minneapolis: IEEE Press,2009:1437-1440.
- [3] NAGY B, ANTAL B, HAJDU A. Image database clustering to improve microaneurysm detection in color fundus images[C]//25th International Symposium on Computer-Based Medical Systems. Rome: IEEE Press, 2012:1-6.
- [4] RANAMUKA N G, MEEGAMA R G N. Detection of hard exudates from diabetic retinopathy images using fuzzy logic[J]. IET Image Processing, 2013, 7(2):121-130.
- [5] GIANCARDO L, MERIAUDEAU F, KARNOWSKI T P, et al. Automatic retina exudates segmentation without a manually labelled training set[C] // International Symposium on Biomedical Imaging, Chicago: IEEE Press, 2011: 1396-1400.
- [6] 刘芳,代钦,石祥滨,等.基于超像素的快速 MRF 红外行人图像分割算法[J].计算机仿真,2012,29(10):26-29.
- [7] ACHANTA R, SHAJI A, SMITH K, et al. SLIC superpixels compared to state-of-the-art superpixel methods[J].

IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(11): 2274-2282.

- [8] 刘进立. SAR 图像分割与特征提取方法研究[D]. 沈阳:辽宁大学, 2013:25-26.
- [9] 杨静,高嘉伟,梁吉业,等.基于数据场的改进 DBSCAN 聚类算法[J].计算机科学与探索,2012,6(10):903-911.
- [10] 陈刚,刘秉权,吴岩. 一种基于高斯分布的自适应 DBSCAN 算法[J]. 微电子学与计算机,2013,30(3):27-30,34.
- [11] 于亚飞,周爱武. 一种改进的 DBSCAN 密度算法[J]. 计算机技术与发展,2011,21(2):30-33.
- [12] 赵文,夏桂书,苟智坚,等.一种改进的 DBSCAN 算法[J].四川师范大学学报:自然科学版,2013,36(2):312-316.
- [13] 张丽杰. 具有稳定饱和度的 DBSCAN 算法[J]. 计算机应用研究, 2014, 31(7): 1973-1975.
- [14] BANDYOPADHYAY S K, PAUL T U. Segmentation of brain tumour from MRI image-analysis of K-means and DBSCAN clustering[J]. International Journal of Research in Engineering and Science, 2013, 1(1): 48-57.
- [15] SAE-TANG W, CHIRACHARIT W, KUMWILAISAK W. Exudates detection in fundus image using non-uniform illumination background subtraction[C] // TENCON 2010-2010 IEEE Region 10 Conference. Fukuoka: IEEE Press, 2010:204-209.
- [16] 张育雄.基于几何约束和熵率的超像素分割[D].天津:天津大学,2012:30-33.
- [17] LI Hui-qi, CHUTATAPE O. Automated feature extraction in color retinal images by a model based approach[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2004, 51(2):246-254.
- [18] WALTER T,KLEIN J C,MASSIN P, et al. A contribution of image processing to the diagnosis of diabetic retinopathy: Detection of exudates in color fundus images of the human retina[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging,2002,21(10):1236-1243.
- [19] 高玮玮,沈建新,王玉亮. 眼底图像中硬性渗出自动检测方法的对比[J]. 南京航空航天大学学报,2013,45(1):55-61.

# Fundus Image Hard Exudates Detection Based on SLIC Superpixels and DBSCAN Clustering

# LING Chao-dong, CHEN Hu, YANG Xiao, ZHANG Hao, HUANG Xin

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

**Abstract:** In order to detect the hard exudates in fundus images automatically, this paper presented a hard exudates detection method which combines simple linear iterative clustering (SLIC) superpixels and DBSCAN clustering algorithm to detect the Harde exudates. Firstly, an over-segmentation image was formed by algorithm of the SLIC superpixels. Next the superpixels obtained were processed using the DBSCAN method, so that the final segmentation could be generated from the clusters of superpixels. The fundus image of the standard Diabetic Retinopathy datasets of DIARETDB0 and DI-ARETDB1 were chosen to verify the feasibility of the method proposed. The experimental results showed that the algorithms can detect exudates effectively and reliably. Moreover, the method can be directly applied to color image segmentation and feature extraction.

**Keywords:** image segmentation; superpixels; hard exudates; diabetic retinopathy; simple linear iterative clustering; density-based clustering method

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:吴逢铁)

**文章编号:**1000-5013(2015)04-0406-06

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.04.0406

# 融合全局和局部特征的图像特征提取方法

张雅清1,刘忠宝2

(1. 太原学院 数学系,山西 太原 030012;2. 中北大学 计算机与控制工程学院,山西 太原 030051)

**摘要:** 针对图像特征提取无法同时利用样本的全局和局部特征的问题,提出融合全局和局部特征的特征提 取方法.该方法充分利用线性判别分析和保局投影算法分别在特征提取中保持样本全局特征和局部特征方 面的优势,进一步提高图像特征提取效率.首先,引入全局散度矩阵和局部散度矩阵分别表征样本的全局特征 和局部特征.然后,基于同类样本尽可能紧密,异类样本尽可能远离的思想,构造最优化问题.比较实验表明: 与传统的主成分分析、线性判别分析、保局投影算法相比,文中方法的工作效率有一定提高.

关键词: 特征提取;线性判别分析;保局投影算法;全局特征;局部特征

**中图分类号:** TP 391 文献标志码: A

特征提取是模式识别、数据挖掘和机器学习领域研究的重点问题之一,近年来受到众多研究人员的 广泛关注<sup>[1]</sup>.特征提取是指原始特征空间根据某种准则变换得到低维投影空间的过程<sup>[2-3]</sup>.当前主流的 特征提取方法主要包括线性方法和非线性方法.其中,线性方法有主成分分析(PCA)<sup>[4]</sup>、奇异值分解 (SVD)<sup>[5]</sup>、非负矩阵分解(NMF)<sup>[6]</sup>、独立成分分析(ICA)<sup>[7]</sup>、线性判别分析(LDA)<sup>[8]</sup>;非线性方法有多 维缩放(MDS)<sup>[9]</sup>、局部线性嵌入(LLE)<sup>[10]</sup>、保局投影(LPP)<sup>[11]</sup>.此外,还有核主成分分析(KPCA)<sup>[12]</sup>、核 线性判别分析(KLDA)<sup>[13-14]</sup>、拉普拉斯特征映射(Laplacian eigenmap)等<sup>[15]</sup>.当前主流的特征提取方法 主要基于两种思路:一是基于样本的全局特征突出样本间的差异性;二是利用样本的局部特征保证特征 提取前后样本局部结构的一致性.当前图像特征提取相关研究面临的最大问题是无法同时利用样本的 全局特征和局部特征.鉴于此,本文提出融合全局和局部特征的特征提取方法(FEM-GLC).

## 1 融合全局和局部特征的特征提取方法

设有 d 维样本  $X = [x_1, x_2, \dots, x_N] \in \mathbb{R}^{n \times N}$ . 其中: $x_i \in \mathbb{R}^n$  为第 i 个样本; N 为样本数;  $N_i$  为各类样本数; 第 i 类的样本均值为 $\overline{x}_i$ ,  $i=1, \dots, c, c$  为样本类别数; 所有样本均值为 $\overline{x}_i$ ;  $x_{i,j}$ ,  $i=1, \dots, c, j=1, \dots, N_i$  为各类样本.

#### 1.1 线性判别分析

线性判别分析(LDA)是模式识别中一种经典的有监督学习方法,是提取鉴别特征的有效判别方法 之一,为各种线性判别分析方法的提出奠定基础.因此,LDA 也被称为 FLDA(fisher linear discriminant analysis).LDA 的基本思想是保证特征提取后的同类样本尽可能紧密,而异类样本尽可能远离.LDA 在引入类间离散度矩阵和类内离散度矩阵的基础上,利用 Fisher 准则,建立最优化问题.

定义1 类间离散度矩阵为

$$\boldsymbol{S}_{B} = \sum_{i=1}^{c} \frac{N_{i}}{N} (\overline{x}_{i} - \overline{x}) (\overline{x}_{i} - \overline{x})^{\mathrm{T}}.$$
(1)

定义2 类内离散度矩阵为

**收稿日期:** 2015-04-17

通信作者: 刘忠宝(1981-),男,副教授,博士后,主要从事机器学习的研究. E-mail:liu\_zhongbao@hotmail.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61202311);山西省高等学校科技创新项目(2014142)

$$\mathbf{S}_{\mathbf{W}} = \sum_{i=1}^{c} \sum_{j=1}^{N_{i}} \frac{1}{N} (x_{i,j} - \bar{x}_{i}) (\bar{x}_{i,j} - \bar{x}_{i})^{\mathrm{T}}.$$
 (2)

Fisher 准则定义为

$$J(\boldsymbol{W}_{opt}) = \max_{\boldsymbol{W}} \frac{\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{S}_{\boldsymbol{B}} \boldsymbol{W}}{\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}}.$$
(3)

利用 Fisher 准则得到的最优投影矩阵  $W_{opt}$ 保证特征提取后的样本具有最大的类间离散度和最小的类内离散度. 当  $S_W$  非奇异时, $W_{opt}$ 满足等式  $S_W^{-1}S_BW = \lambda W$  的解. LDA 及其改进算法具有以下 2 点优势:1) LDA 及其改进算法将原最优化问题转化为广义特征值求解问题,可以得到全局最优解,避免其他方法可能得到的局部最优解;2) LDA 无需事先给定参数,因而不存在参数选择问题,克服了神经网络等方法的不足. 然而,随着应用的深入,LDA 本身也有一些问题亟待解决,制约其效率进一步提升的关键问题是 LDA 在特征提取时仅关注样本的全局特征,并未考虑局部特征.

#### 1.2 保局投影算法

保局投影算法(LPP)作为一种重要的特征提取方法,更注重样本的局部流形结构.LPP 有效地克服 了非线性方法的不足,在特征提取时,很好地保留了原始样本之间的非线性结构.LPP 的基本思想是保 证原始空间相邻的样本在特征提取后相对关系尽量不变.

LPP 的算法流程有以下 3 个步骤.

**步骤1** 定义ε邻域或k邻域,构造邻接图G.

1)  $\varepsilon$  近邻:当样本  $x_i, x_j$  满足  $||x_i - x_j||^2 < \varepsilon, 则 x_i, x_j$  相邻,并将两者连接起来.

2) k 近邻:当样本  $x_i$  是样本  $x_j$  的 k 个近邻之一,则将两者连接起来.其中,k 为事先给定参数.

步骤2 计算邻接图 G 中边的权重. 相似度函数描述样本 x<sub>i</sub>, x<sub>j</sub> 的相似度, 其定义为

$$S_{i,j} = \begin{cases} \exp(-\|x_i - x_j\|^2/t), & x_i, x_j \text{ answer} \\ 0, & \text{ It } \\ \end{bmatrix}$$

上式中:t为常数.

步骤3 求投影矩阵.最优化表达式为

$$\min_{\mathbf{W}} \sum_{i,j} (\mathbf{W}^{\mathrm{T}} x_i - \mathbf{W}^{\mathrm{T}} x_j)^2 S_{i,j}, \qquad (4)$$

s. t. 
$$\sum_{i} \boldsymbol{W}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{x}_{i} \boldsymbol{D}_{i,i} \boldsymbol{x}_{i}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{W} = 1.$$
(5)

式(4),(5)中:W为投影矩阵; $S_{i,j}$ 为相似度函数; $D_{i,i} = \sum_{j} S_{i,j}$ .

上述最优化问题可转化为

$$\min \boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}\boldsymbol{L}\boldsymbol{X}\boldsymbol{W},\tag{6}$$

s. t. 
$$\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}\boldsymbol{D}\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}} = 1.$$
 (7)

式(6),(7)中:L = D - S.

综上可知:LPP 在进行特征提取时关注的是样本的局部结构,其试图保持样本的局部结构在特征 提取前后不变.然而,LPP 特征提取效率并非最优,因为在特征提取时并未考虑样本的全局特征.

#### 1.3 算法思想

为了充分利用样本的内在特征并有效提高特征提取效率,提出融合全局和局部特征的特征提取方法 FEM-GLC. 该方法受到 LDA 算法在 Fisher 准则基础上保证类间离散度与类内离散度之比最大,以及 LPP 保持样本的局部流形结构不变的启发,引入局部散度矩阵和全局散度矩阵这两个重要概念,分别刻画样本的局部特征和全局特征.

定义3 局部散度矩阵为

$$\boldsymbol{L} = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} \| x_i - x_j \|^2 S_{i,j}.$$
(8)

式(8)中:相似度函数 S<sub>i,i</sub>定义为

$$S_{i,j} = \begin{cases} 1, & ||x_i - x_j||^2 < \varepsilon, \\ 0, & \text{ 其他.} \end{cases}$$
(9)

由式(8),(9)可知:局部散度矩阵反映的是样本 x<sub>i</sub>,x<sub>j</sub> 的相似度.特征提取的目的是保证相邻样本 在特征提取前后相对关系保持不变.

定义4 全局散度矩阵为

$$\boldsymbol{G} = \sum_{i=1}^{c} \sum_{j=1}^{c} (x_i - \bar{x}_j) (\bar{x}_i - \bar{x}_j)^{\mathrm{T}}.$$
(10)

由式(10)可知:全局散度矩阵反映的是异类样本中心之间的距离.特征提取的目的是保证异类样本 在特征提取前后均彼此远离.基于以上分析,FEM-GLC 算法保证找到的投影方向满足类间差异度和类 内相似度均尽可能大.

#### 1.4 最优化问题

FEM-GLC 算法的最优化表达式为

$$\max_{\mathbf{W}} \mathbf{W}^{\mathrm{T}} \mathbf{G} \mathbf{W} - k \mathbf{W}^{\mathrm{T}} \mathbf{L} \mathbf{W}, \tag{11}$$

s.t. 
$$WW^{\mathrm{T}} = 1.$$
 (12)

式(11),(12)中:目标函数中的W<sup>T</sup>GW,W<sup>T</sup>LW分别表示投影后的异类数据尽可能远离,而同类数据尽可能紧密;常数 k 为平衡因子,其取值为正数,k 反映了在特征提取过程中全局特征和局部特征对最终结果的影响程度;约束条件WW<sup>T</sup>将投影矩阵进行归一化处理.

上述最优化问题可通过 Lagrange 乘子法求解. 定义 Lagrange 函数为

$$J(\boldsymbol{W},\boldsymbol{k}) = \boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}\boldsymbol{W} - \boldsymbol{k}\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{L}\boldsymbol{W} - \boldsymbol{\lambda}(\boldsymbol{W}\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}} - 1).$$
(13)

式(13)中: $\lambda$ 为 Lagrange 乘子. J(W,k)对 W 求偏导,可得

$$\frac{\partial J}{\partial W} = (G - kL)W - \lambda W. \tag{14}$$

令式(14)偏导为零,可得

$$(\mathbf{G} - k\mathbf{L})\mathbf{W} - \lambda\mathbf{W} = 0. \tag{15}$$

即

$$(G - kL)W = \lambda W. \tag{16}$$

求解式(16)等价于求解矩阵 G-kL 的特征值问题.

为了保证投影方向同时满足类间差异度和类内相似度最大,亦可做类似于 LDA 基于 Fisher 准则的处理,即

$$\max_{\mathbf{W}} \mathbf{W}^{\mathrm{T}} \mathbf{G} \mathbf{W} - k \mathbf{W}^{\mathrm{T}} \mathbf{L} \mathbf{W}, \tag{17}$$

s.t. 
$$WW^{\mathrm{T}} = 1.$$
 (18)

上述优化问题求解方法类似于 LDA,其存在矩阵 L 奇异的问题,即当矩阵 L 奇异时, $L^{-1}$ 不存在,则无法求得投影方向 W.因此,最优化问题采用  $L_1$  形式具有更好的健壮性.

#### 1.5 算法描述

输入:训练样本集  $X = [x_1, x_2, \dots, x_N]$ ,用户事先给定的降维数 d.

输出:降维后的样本集 $Y = [y_1, y_2, \dots, y_N]$ .

步骤1 当 x<sub>i</sub>, x<sub>i</sub> 相邻时,利用式(9)构造相似度函数.

步骤2 利用式(8)和式(10)分别计算局部散度矩阵和全局散度矩阵.

**步骤3** 求解投影方向 W. 求矩阵 G-kL 对应的特征值和特征向量,将特征值按由大到小顺序排列,选取最大的 d 个特征值对应的特征向量作为投影方向 W.

步骤 4 对于新进样本 x,利用  $y = W^T x$  可得其在投影方向 W 上的特征提取结果.

#### 1.6 复杂性分析

FEM-GLC 算法解决一个具有线性约束的二次规划问题,其计算对象主要包括大小为  $N \times N$  矩阵的转置运算,以及 QP 问题求解运算.大小为  $N \times N$  矩阵转置运算的时间复杂度为  $O(N^2 \log(N))$ ,QP 问题求解的时间复杂度为  $O(N^2)$ .因此,FEM-GLC 算法的时间复杂度为  $O(N^2 \log(N)) + O(N^2)$ .由于  $O(N^2 \log(N)) \ge O(N^2)$ ,FEM-GLC 算法的时间复杂度可近似表示为  $O(N^2 \log(N))$ .此外,FEM-GLC

算法的空间复杂度为 $O(N^2)$ .以上复杂度计算中,N表示训练样本总数.

#### 2 实验分析

为验证 FEM-GLC 算法的有效性,在标准人脸数据集上进行仿真实验.硬件环境为 CPU:Inter(R) Core(TM) i3-2350M 2.3 GHz, RAM: 4.0 G;软件环境为 Matlab 2014;操作系统为 Windows 7. 算法中 参数 k 利用网格搜索法获得,其取值范围为{0,1,1.5,2,2.5,3,3.5,4,4.5,5}.

#### 2.1 实验步骤

实验验证采用如图 1,2 所示的 ORL 和 Yale 人脸数据库,具体有以下 4 个步骤.

- 步骤1 分别选取每人前 m 幅照片作为训练样本,剩余照片作为测试样本.
- 利用 FEM-GLC 算法对训练样本进行学习,进而得到投影方向 W. 步骤2
- 将测试样本逐个投影到W上得到降维后的样本Y. 步骤3
- 利用最近邻分类法(NN)对特征提取后的测试样本与训练样本进行比对,得到识别结果. 步骤4



图 1 ORL 人脸数据库部分人脸图像

Fig. 1 Part of face images on the ORL dataset

#### 2.2 参数 k 对识别率的影响

选取 ORL 人脸库中每人前 4 幅照片作为训练样本,剩下的 6 幅照片作为测试样本. 当降维数为 100 时,识别率  $\eta$  与参数 m 的关系,如图 3 所示.

由图 3 可知:当 m=1 时,识别率取得最小值为 0.82;当 m=4 时,识别率取得最大值为 0.89.从识 别率角度看,参数 m 不论如何取值对识别率的影响基本可以接受,即 FEM-GLC 可以较好地完成特征 提取任务.

#### 2.3 降维数 d 对识别率的影响

选取 ORL 人脸库中每人前4幅照片作为训练样本,剩下的6幅照片作为测试样本.不失一般性,选 取 m=2,识别率 n 与降维数 d 的关系,如图 4 所示.由图 4 可知:随着降维数的增加,识别率呈上升趋 势;当降维数 d=40 时,识别率达到最大值 0.895.



#### 2.4 训练样本数对识别率的影响

选取 ORL 人脸库中每人前 m(m=3,4,5,6,7,8)幅照片,以及 Yale 人脸库中每人前 m'(m'=4,5, 6,7,8,9)幅照片作为训练样本,剩余照片作为测试样本.与传统的特征提取方法 PCA,LDA,LPP 比较, 验证 FEM-GLC 的有效性.由于存在小样本问题,LDA 实为 PCA+LDA.训练样本数对识别率(n)的影





Fig. 2 Part of face images on the Yale dataset

响,如表1所示.表1中:FEM-GLC算法识别率后的括号表示参数 k 的取值.

由表 1 可知:随着训练样本数的增加,识别率不断提高.在大多情况下,较之传统特征提取方法, FEM-GLC 的识别率具有一定优势.当选取 ORL 人脸库中每人前 3,4 幅照片作为训练样本时,LDA 识 别率最高,FEM-GLC 与 LPP 均次之;当选取 Yale 人脸库中每人前 4 幅照片作为训练样本时,LPP 识 别率最高,FEM-GLC 次之.在以上两种情况下,FEM-GLC 算法效率仅次于 LDA,LPP,但仍具有较高 的识别率.综上所述,从平均性能角度看,较之传统方法,FEM-GLC 可以更好地完成特征提取任务.

	表 1	识别率与训练样本数的关系
--	-----	--------------

Tab. I	Relationship	between t	the recognition	accuracies	and t	the numb	per of	training	samples	

数据集	训练样本规模	$\eta_{ m PCA}$ / $^{0}\!\!\!/_{0}$	$\eta_{ m LDA}$ / $\%$	$\eta_{ m LPP}$ / $^{0}\!\!\!/_{0}$	$\eta_{ ext{FEM-GLC}}$ / $\%$
	3	76.4	87.5	83.6	83.6(0.5)
	4	85.4	88.3	90.0	88.8(1.0)
ORL	5	87.0	89.5	91.5	91.5(3.5)
	6	88.1	94.4	93.8	94.4(2.0)
	7	89.1	94.2	95.0	95.0(2.0)
	8	88.9	95.0	95.0	96.3(1.0)
	4	60.0	64.8	73.3	70.5(1.5)
	5	65.6	70.0	75.6	76.7(4.0)
Yale	6	64.0	68.0	73.3	78.7(4.5)
	7	76.7	78.3	83.3	90.0(3.0)
	8	80.0	84.4	80.0	88.9(1.0)
	9	83.3	76.7	76.7	96.7(0.5)

#### 2.5 时间代价比较

选取 ORL 人脸库中每人前 m(m=3,4,5,6,7,8)幅照片作为训练样本,剩余照片作为测试样本.各算法的时间代价(t),如表 2 所示.由表 2 可知:与 PCA,LDA,LPP 相比,FEM-GLC 的时间代价更大,因为在特征提取时考虑了样本的全局特征以及局部特征.因此,FEM-GLC 能在可接受的时间范围内高效地完成特征提取任务.

表 2 PCA,LDA,LPP,FEM-GLC 算法的时间代价 Tab. 2 Time cost of LDA,LDA,LPP,FEM-GLC

训练样本规模	$t_{ m PCA}$	$t_{ m LDA}$	$t_{ m LPP}$	$t_{ m FEM-GLC}$
3	0.249 6	0.249 6	0.280 8	1.357 2
4	0.280 8	0.280 8	0.358 8	1.419 6
5	0.280 8	0.296 4	0.296 4	1.591 2
6	0.312 0	0.343 2	0.312 0	1.622 4
7	0.312 0	0.452 4	0.327 6	2.043 6
8	0.249 6	0.458 8	0.358 8	2.246 4

# 3 结束语

特征提取方法是模式识别、数据挖掘、机器学习等领域研究的重点问题之一.经过近年的发展,先后 涌现出不少有效算法.为了进一步提高特征提取效率,提出融合全局和局部特征的特征提取方法 FEM-GLC.该方法引入局部散度矩阵和全局散度矩阵两个重要概念,分别刻画样本的局部特征和全局特征, 保证找到的投影方向满足类间差异度和类内相似度均尽可能大.在 ORL,Yale 人脸库上的实验验证了 所提方法的有效性.FEM-GLC 的算法效率对参数的选取有一定依赖,如何快速准确获取相关参数,以 及如何对参数进行优化等问题是今后研究的方向.

#### 参考文献:

[1] 罗学刚,吕俊瑞,王华军,等.基于超像素的互惠最近邻聚类彩色图像分割[J].广西大学学报:自然科学版,2013,38 (2):374-378.

- [2] 刘忠宝.基于核的降维和分类方法及其应用研究[D].无锡:江南大学,2012:1-2.
- [3] 陈新泉,苏锦细.基于半监督学习的 k 平均聚类框架[J].广西大学学报:自然科学版,2014,39(5):1074-1082.
- [4] CAMACHO J, PIC J, FERRER A. Data understanding with PCA: Structural and variance information plots[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2010, 100(1):48-56.
- [5] LIPOVETSKY S. PCA and SVD with nonnegative loadings[J]. Pattern Recognition, 2009, 42(1):68-76.
- [6] LEE D D, SEUNG H S. Learning the parts of objects by non-negative matrix factorization[J]. Nature, 1999, 401 (6755):788-791.
- [7] RADULOVIC J, RANKOVIC V. Feedforward neural network and adaptive network-based fuzzy inference system in study of power lines[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(1):165-170.
- [8] PETER N B, JOAO P H, DAVID J K, et al. Fisherfaces: Recognition using class specific linear projection[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(7):711-720.
- [9] 杜家杰,段会川. MDS 在企业客户分类中的应用研究[J]. 计算机工程与设计,2011,32(5):1658-1660.
- [10] ROWEIS S T, SAUL L K. Nonlinear dimensionality reduction by locally linear embedding[J]. Science, 2000, 290 (5500):2323-2326.
- [11] HE Xiao-feng, NIYOGI P. Locality preserving projections [C] // Advances in Neural Information Processing Systems. Vancouver: [s. n. ], 2003:153-160.
- [12] LOPEZ M M, RAMIREZ J, ALVAREZ I, et al. SVM-based CAD system for early detection of the Alzheimer's disease using kernel PCA and LDA[J]. Neuroscience Letters, 2009, 464(3):233-238.
- [13] MIKA S,RATSCH G, WESTON J, et al. Constructing descriptive and discriminative nonlinear features: Rayleigh coefficients in kernel feature spaces[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence,2003,25(5):623-628.
- [14] HSUAN Y M. Kernel eigenfaces vs kernel fisherfaces: Face recognition using kernel methods[C]// Processing of the 5th IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition. Washington D C: IEEE Press, 2002:215-220.
- [15] BELKIN M, NIYOGI P. Laplacian eigenmaps and spectral techniques for embedding and clustering[C] // Processing of Advances in Neural Information Processing Systems. Cambridge: MIT Press, 2001:585-591.

# Research on Image Feature Exaction Method by Combining Global and Local Features

# ZHANG Ya-qing<sup>1</sup>, LIU Zhong-bao<sup>2</sup>

(1. School of Mathematics, Taiyuan University, Taiyuan 030012, China;

2. School of Computer and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** With the development of application, the main problem of image feature extraction is almost no study taking both global and local features into consideration. In view of this, feature exaction approach by combining global and local characteristics (FEM-GLC) is proposed in this paper. The advantages of linear discriminant analysis (LDA) in extracting the global feature and locally preserving projections (LPP) in preserving the local feature are taken into consideration in FEM-GLC which tries to improve the efficiencies of feature extraction. In FEM-GLC, the global divergence matrix and the local divergence matrix are introduced which respectively represents the global feature and local feature. The optimization problem of FEM-GLC is constructed based on the close relation between samples of the same class and far away between different classes. The comparative experiments with PCA, LDA and LPP on the ORL dataset and Yale dataset verify the effectiveness of FEM-GLC.

Keywords: feature exaction; linear discriminant analysis; locally preserving projections; global feature; local feature

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 吴逢铁)

文章编号:1000-5013(2015)04-0412-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.04.0412

# 空间光通信中高斯光束传输 闪烁指数测量系统

王佳斌<sup>1</sup>,陈子阳<sup>2</sup>,蒲继雄<sup>2</sup>

(1. 华侨大学 工学院,福建 泉州 362021;2. 华侨大学 信息科学与工程学院,福建 厦门 361021)

**摘要:** 基于 ARM9 嵌入式 MCU 设计并制作了闪烁参数测量系统,利用该系统对激光在实际湍流中的闪烁 指数进行实验测量.在实际测量中,证明该系统能实时地测量激光在湍流大气中传输的闪烁指数.实验结果表 明:当高斯光束在湍流大气中的传输距离越大,其闪烁指数越大;在相同位置处,高斯光束的闪烁指数随着湍 流强度的增加而增大.

关键词: 高斯光束;闪烁指数;激光;湍流大气;嵌入式

**中图分类号:** O 439 **文献标志码:** A

由于激光光束在光通信和遥感探测等众多领域中的应用,其在大气湍流中的传输特性一直是一个 重要的研究内容<sup>[1]</sup>.与理想的自由空间不同,大气湍流中存在不同类型的散射介质,这些介质使在其中 传输的激光光束的光强出现了涨落,即闪烁现象.光束的光强出现涨落会影响基于光强进行信息编码的 光通信的应用.因此,研究光束在大气湍流中的闪烁指数,具有非常重要的意义<sup>[2-13]</sup>.学者对高斯光 束<sup>[14]</sup>、平顶高斯光束<sup>[15]</sup>、高阶高斯贝塞尔光束<sup>[16]</sup>、随机电磁光束<sup>[17]</sup>等各种类型光束经过不同强度湍流 的闪烁特性,进行深入地研究.通过合理地调制光束的特性,减小光束的闪烁指数.对光束的偏振状态的 调控,可以有效地减小光束的闪烁指数<sup>[18]</sup>.研究表明,部分相干光束具有比完全相干光束更小的闪烁, 例如,降低准部分相干高斯-谢尔模型光束的相干度可以降低光束的闪烁大小<sup>[19-20]</sup>.此外,利用多光束进 行组束,获得阵列光斑,并合理地调节各光束之间的相对位置,也可以有效地降低光束的闪烁<sup>[21]</sup>.然而, 目前关于光束在大气湍流中的闪烁的研究,大多局限于理论方面的研究或仿真计算,使用真实测量系统 采集数据进行研究的很少.本文基于 ARM9 嵌入式系统及数据的网络传输技术,设计并构建了闪烁参 数测量系统,利用该系统对高斯光束在 400 m 实际湍流大气中的光强和闪烁指数进行实验测量<sup>[22]</sup>.

# 1 闪烁参数测量系统的设计与实现

由于没有湍流大气影响光强及闪烁指数的测量 仪器,文中基于 ARM9 嵌入式系统设计并制作了闪 烁测量系统.测量系统结构<sup>[23-24]</sup>,如图 1 所示.

测量系统主要包括光电传感器模块、数据采集 模块、数据分析处理及传输模块和客户端软件<sup>[25]</sup>.数 据传输采用 TCP/IP 协议,因此,该系统可以方便地



图 1 闪烁参数测量仪系统结构



**收稿日期:** 2015-04-16

- 通信作者: 王佳斌(1974-),男,副教授,主要从事激光应用、嵌入式系统开发、测量技术、智能仪器的研究. E-mail:fat-wang@hqu.edu.cn.
- 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61178015,11304104);福建省科技创新平台资助课题(2013H2002);中央 高校基本科研业务费专项基金资助项目(10QZR04);福建省泉州市科技项目计划重点项目(2013Z12)

扩展为远程测量系统.其中,采用了一套基于 ARM9 核心的嵌入式系统,用以协调各模块之间的工作.

#### 1.1 光电传感器

系统光电传感器采用了连续型激光器发射接收模块,其结构框图,如图2所示.

光电探测器负责激光信号的接收、检波、放大,并对该信号进行解调解码的输出.接收探测器采用了 优质器件及优化过的电路结构以确保灵敏度高,响应速度快,线性度好.该探测器的输出信号有两种工 作模式:一种是开关量信号,用以表明是否收到相应波段的激光信号;另外一种可以将接收到的激光信 号强度转换为电压信号,供后续处理使用.本测量系统采用了后一种工作模式.



(a) 光电发射接收系统结构

(b) 激光探测器接收部分电路结构

图 2 光电传感器结构框图

Fig. 2 Block of photosensor structure

#### 1.2 数据采集和传输系统

为了使系统可以有效地处理经大气湍流影响后的相应波段激光信号,系统采用以 ARM9 为核心的 S3C2440 芯片组成数据集及处理系统.该芯片是基于 32 位高性能 RISC 指令集的嵌入式 CPU,工作频 率为 400 MHz,4 路高速 DMA 通道,8 通道 10 位高精度 A/D 转换器,精度可满足本系统要求.为确保 数据采集后的运算处理及实时传输,配置了 64 M 内存及 256 M 的 Nandflash.

系统移植了嵌入式 Linux 操作系统,作为协调整个系统的数据采集工作及数据传输操作的控制模 块<sup>[26]</sup>.通过进程间通信的方法向 A/D 转换器发送命令,在 A/D 转换器转换结束后,向系统发信息以通 知系统进行数据的采集及存储;随后,在系统端对采集的数据进行初步处理及计算;再向网络模块发送 数据传输的命令,使数据可以通过 TCP/IP 协议在普通网络中传输;最终,传送到客户端软件.

为了减轻客户端软件的数据处理和数据传输压力,系统采用分布式计算方式设计,采集到的数据在 嵌入式端做初步的处理后再进行传输.

#### 1.3 网络传输

系统在嵌入式设备端进行了数据采集及初步处理后,就可以将数据发送到客户端软件做进一步的 运算和处理.测量系统通常采用 RS-232 或 485 等常用现场总线作为传输介质.系统采用遵循 TCP/IP 协议网络接口进行数据传输.通信硬件是 10 M/100 M 的 DM9000 网络芯片,其通信带宽完全可以满足 系统对数据传输的实时性要求.为保障通信的实时性,采用 TCP/IP 协议簇中的 UDP 协议完成数据传 输任务.UDP 协议是一种面向无连接的网络通信协议,它的特点是通信无需事先建立连接、传输速度 快、可满足实时通信要求.

网络传输模块的加入,使本系统摆脱了传统的并口或串口等接口束缚,使数据传输可在 100 M 的 网络带宽中进行,大大提高了数据传输的速度,提高了系统的实时性;同时,使得系统可以方便地接入互 联网,实现远程测量.

#### 1.4 用户操作界面

作为用户界面 PC 端的客户端软件,采用基于可视化编程的 Delphi 语言编写. 该程序既是数据的汇 聚中心,也是数据处理最终的展示窗口. 以图表的方式展示经过算法处理的接收到的数据,并可进行相 关的数据运算,数据统计等工作. 为了适应不同强度激光信号的测量,图表坐标的设计采用动态可调节 的方式,输出波形可以展示出令人满意的幅度. 客户端软件通过网络接收嵌入式系统组成的数据采集处 理端传来的数据. 也可以通过互联网对测量仪器进行远程的数据读取及操作. 如果系统位于无线局域 网,还可实现无线的测量,该模式奠定了测量方式的物联网化基础.

## 2 实验测量

测量高斯光束在实际湍流大气中闪烁指数的 实验装置,如图 3 所示.以波长为 632.8 nm 的氦 氖光束为入射光,经过一个由焦距分别为 5,30 cm 的两个透镜组成的扩束系统扩束后,将其入射 到实际湍流大气中.由于大气中各种散射介质的 存在,使光束在其中传输时,光强出现了涨落,利





用闪烁仪对光束的闪烁指数进行实验测量.闪烁仪包括一个光电探测器,所获得的信号经过计算得到光强的闪烁指数.闪烁仪的接收孔径大约为5 cm,因此,实验上所测量的是一个面范围内的闪烁指数.

根据 Rytov 理论,高斯光束在 Kolmogorov 大气湍流中的闪烁指数可以表示为[1]

$$\sigma_{\rm I}^{2}(r,z) = 4.42\sigma_{\rm R}^{2}\Lambda^{5/6} \frac{r^{2}}{w^{2}} + 3.86\sigma_{\rm R}^{2}\{0,40[(1+2\Theta)^{2}+4\Lambda^{2}]^{5/12}\times \cos\left[\frac{5}{6}\tan^{-1}(\frac{1+2\Theta}{2\Lambda})\right] - \frac{11}{16}\Lambda^{5/6}\}.$$
(1)

式(1)中:r为径向距离;z为传输距离; $\sigma_{R}^{2} = 1.23C_{n}^{2}k^{7/6}z^{11/6}$ 为平面波的 Rytov 方差; $\Theta = \frac{\Theta_{0}}{\Theta_{0}^{2} + \Lambda_{0}^{2}}, \Lambda = \frac{\Lambda_{0}}{\Theta_{0}^{2} + \Lambda_{0}^{2}}, \Theta_{0} = 1 - \frac{z}{R_{0}}, \Lambda_{0} = \frac{2z}{kw_{0}^{2}}, 其中, R_{0}$ 和  $w_{0}$ 为入射高斯光束的曲率半径以及光斑大小, $k = 2\pi/\lambda, \lambda$ 为

入射光波长,k为波数.

根据式(1)可以对高斯光束在大气湍流中的闪烁进行数值 模拟.相关的数值模拟结果表明<sup>[1]</sup>:高斯光束轴上点光强在湍 流大气中的闪烁指数随着传输距离的增加而增大,并且随着径 向距离的增加而增大;在相同距离处,高斯光束的闪烁指数随 着湍流强度的增加而变大.

利用闪烁仪器对高斯光束在实际湍流大气中的闪烁指数 进行测量.由于实验条件的限制,只测量了在大气中传输距离 为400 m的闪烁指数.将探测器放置在光轴上,探测轴上一个 小区域的闪烁指数.3个不同时间所测量的闪烁指数,如图4所 示.图4中:实线、虚线和点线所对应的曲线的湍流强度依次增 加.由图4可知:当传输距离为100 m时,3种不同湍流条件下 的闪烁指数都很小;随着传输距离的增加,闪烁指数逐渐变大; 在较强湍流的情况下,闪烁指数增加得更快;在相同距离处,不



传输轴上的闪烁指数

Fig. 4 Scintillation index of Gaussian beam on the axis of the propagation in atmosphere

同强度的湍流造成光强涨落有较大的区别;高斯光束在较强湍流中的闪烁指数比较弱湍流中的更大.

除了轴上的闪烁指数,还研究了固定距离处,闪烁指数随着径向距离(即探测器的中心与光轴之间 的距离)的变化情况,如图 5,6 所示.图 5,6 中: σ<sup>2</sup> 为闪烁指数;r 为径向距离.图 5 的实验结果与图 4 的



the radial distance (refer to the full line in figure 4)



the radial distance (refer to the dashes line in figure 4)

由图 5,6 可知:随着传输距离的增加,光斑的大小也在逐渐增大;当传输距离为 100 m 时,光斑的半径约为 1 cm;当传输距离增加到 400 m 时,光斑的半径增加到约为 5 cm;激光光束的闪烁指数随着径向距离的增加而逐渐增加.这与理论模拟的结果一致.

## 3 结论

基于 ARM9 嵌入式系统设计并制作了闪烁参数测量系统.利用该仪器对高斯光束在 400 m 的实际 湍流中的闪烁指数进行了实验测量,主要测量高斯光束轴上位置在不同强度湍流中的闪烁指数随传输 距离增加的变化,以及在相同湍流中闪烁指数随着离轴距离增加的变化规律.

闪烁仪器的测量数据表明:在同一湍流中,高斯光束轴上位置的闪烁指数随着传输距离的增加而逐渐增大;在不同湍流中,同一位置处高斯光束的闪烁指数在较强的湍流中更大;此外,高斯光束闪烁指数随着闪烁仪器离轴距离的增加也逐渐增大.

通过自制嵌入式测量系统对激光在湍流大气传输中的光强进行实际测量,为后续计算研究高斯光 束闪烁指数与传输距离之间的关系提供参考.实际测量计算的结果有效地验证了理论曲线的正确性.

#### 参考文献:

- [1] ANDREWS L C, PHILLIPS R L. Laser beam propagation through random media[M]. Bellingham: SPIE Press, 1998:1789-1890.
- [2] BAYKAL Y, EYYUBOĜLU H T. Scintillations of incoherent flat-topped Gaussian source field in turbulence[J]. Appl Opt, 2007, 46(22): 5044-5050.
- [3] BAYKAL Y, EYYUBOĜLU H T, CAI Yang-jian. Scintillations of partially coherent multiple Gaussian beams in turbulence[J]. Appl Opt, 2009, 48(10):1943-1954.
- [4] EYYUBOĜLU H T, BAYCKAL Y, CAI Yang-jian. Scintillations of laser array beams
   [J]. Appl Phys B, 2008, 91 (2):265-271.
- [5] KIASALEH K. On the scintillation index of a multiw avalength Gaussian beam in a turbulent free-space optical communications channel[J]. J Opt Soc Am A,2006,23(3):557-566.
- [6] EYYUBOĜLU H T. Concept of area scintillation[J]. Appl Phys B,2009,96(2):301-308.
- [7] EYYUBOĜLU H T. Area scintillations of Bessel Gaussian and modified Bessel Gaussian beams of zeroh order[J]. Appl Phys B,2010,98(1):203-210.
- [8] LI Cheng-liang, WANG Tao, PU Ji-xiong, et al. Ghost imaging with partially coherent light radiation through turbulent at mosphere[J]. Appl Phys B,2010,99(3):599-604.
- [9] PU Ji-xiong, KOROTKOVA O. Propagation of the degree of cross-polarization of a stochastic electromagnetic beam through the turbulent atmos-phere[J]. Opt Commun, 2009, 282(9):1691-1698.
- [10] CUI Lin-yan, XUE Bin-dang, CAO Lei, et al. Irradiance scintillation for Gaussian-beam wave propagating through weak non-Kolmogorv turbulence[J]. Optics Express, 2011, 19(8):16872-16884.
- [11] BAYKAL Y, EYYUBOĜLU H T. Scintillation index of flat-topped Gaussian beams[J]. Applied Optics, 2006, 45 (16):3793-3797.

- [12] EYYUBOĜLU H T, SERMUTLU E, BAYKAL Y, et al. Intensity fluctuations in J-Bessel-Gaussian beams of all orders propagating in turbulent atmosphere[J]. Applied Physics B, 2008, 93(2/3):605-611.
- [13] KOROTKOVA O. Scintillation index of a stochastic electromagnetic beam propagating in random media[J]. Optics Communications, 2008, 281(9): 2342-2348.
- [14] GU Y, KOROTKOVA O, GBUR G. Scintillation of nonuniformly polarized beams in atmospheric turbulence[J]. Optics Letters, 2009, 34(15): 2261-2263.
- [15] SCHULZ T J. Optimal beams for propagation through random media[J]. Optics Letters, 2005, 30(10):1093-1095.
- [16] QIAN Xian-mei, ZHU Wen-yue, RAO Rui-zhong. Numerical investigation on propagation effects of pseudo-partially coherent Gaussian Schell-model beams in atmospheric turbulence[J]. Optics Express, 2009, 17(5): 3782-3791.
- [17] GU Y,KOROTKOVA O,GBUR G. Reduction of turbulence-induced scintillation by nonuniformly polarized beam arrays[J] Optics Letters, 2012, 37(9):1553-1555.
- [18] ANDREWS L C, PHILLIPS R L. Laser beam propagation through random media[M]. Bellingham: SPIE Publications, 1998;123-161.
- [19] BAYKAL Y. Correlation and structure functions of Hermite-sinu soidal-Gaussian laser beams in a turbulent at mosphere[J]. J Opt Soc Am A,2004,21(7):1290-1299.
- [20] CAI Yang-jian, CHEN Yun-tian, EYYUBOĜLU H T, et al. Scintillation index of elliptical Gaussian beam in turbulent at mosphere[J]. Opt Lett, 2007, 32(16): 2405-2407.
- [21] EYYUBOĜLU H T, BAYKAL Y, SERMUTLU E, et al. Scintillation index of modified Bessel-Gaussian beams propagating in turbulent media[J]. J Opt Soc Am A, 2009, 26(2):387-394.
- [22] 王佳斌,刘永欣,蒲继雄.激光在湍流大气中传输的闪烁系数及其测量[J].强激光与粒子束,2011,23(4):915-918.
- [23] 黄超,罗宏宇. Borland Delphi 网络应用开发技术与实例[M]. 北京:清华大学出版社, 2003: 235-356.
- [24] 吴明晖. 基于 ARM 的嵌入式系统开发与应用[M]. 北京:人民邮电出版社,2004:288-321.
- [25] 李俊. 嵌入式 Linux 设备驱动开发详解[M]. 北京:人民邮电出版社, 2008: 86-107.
- [26] YAGHMOUR K. 构建嵌入式 Linux 系统[M]. 北京:中国电力出版社, 2004: 232-313.

# Scintillation Index Measuring System of Gaussian Beam on Space Optical Communication

WANG Jia-bin<sup>1</sup>, CHEN Zi-yang<sup>2</sup>, PU Ji-xiong<sup>2</sup>

(1. College of Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;

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

**Abstract**: A scintillation index measuring system based on embedded MCU of ARM9 is designed. The scintillation index of laser beams in a real turbulent atmosphere is experimentally measured, and the experimental result shown that the scintillation index of a Gaussian beam increases with the increasing of the propagation distance. Moreover, at the same location, the scintillation index is larger in a stronger turbulent atmosphere.

Keywords: Gaussian beam; scintillation index; laser; turbulent atmosphere; embedded system

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:吴逢铁)

**文章编号:**1000-5013(2015)04-0417-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.04.0417

# 食品标签冲突检测的防碰撞控制

# 陈卫军,黄永灿

(安阳师范学院 软件学院,河南 安阳 455000)

**摘要:** 提出一种基于冲突检测的食品安全标签防碰撞控制方法.对标签批量读取,进行数据的层次化融合, 描述食品安全标签的冲突信号生成模型,分析食品安全追踪标签冲突信号的超宽带特征,实现对食品(食物) 的种植、养殖、加工、包装、储藏、运输、销售、消费等活动的安全控制.通过食品安全标签射频识别技术(RFID) 进行冲突分流控制,达到防碰撞控制的目的.仿真实验表明:文中方法可加快防碰撞的识别效率,降低标签防 碰撞的机率,提高防碰撞检测工作效率.

关键词: 冲突检测;防碰撞控制;食品安全;标签;射频识别技术

**中图分类号:** TP 309.3 文献标志码: A

近年来,随着信息技术的不断发展而出现的物联网技术,使食品安全的网络信息追踪和识别技术得 到广泛的应用.在食品安全追踪过程中,需要根据物资标签批量读取技术进行识别,食品标签批次和计 量具有复杂性和不规则性,导致标签信息冲突碰撞,需要进行防碰撞控制.食品安全标签防碰撞控制算 法在保证食品安全追踪应用过程中具有重要意义<sup>[1]</sup>.传统方法中,对食品安全追踪标签防碰撞控制方法 采用码元帧格式扫频射频识别技术(RFID)达到冲突分流控制的目的,在扩展损失呈突变衰减时,碰撞 控制容错效果不好.许多学者对此进行了算法的改进设计<sup>[2-6]</sup>.本文提出一种基于冲突检测的食品安全 标签防碰撞控制方法,达到防碰撞控制的目的.

## 1 防碰撞控制模型和冲突问题描述

#### 1.1 食品安全标签防碰撞控制模型

建立食品安全标签防碰撞控制模型<sup>[7]</sup>.食品安全标签控制的分组交换网络有许多组网方式.其中,

最为典型的是 AD Hoc 组网.考虑两种节点 k 获得未编 码分组 P 的机会:通过链路(k,i)将 P 传输到节点 i,假 设食品安全追踪网络系统智能体为  $L_i$ {i=1,2,..., $C_L$ }, 网络建模为一个有向图  $G = \{V, E\}$ ,其中,V 为节点集 合,E 为链路集合.由此得到食品安全标签控制的节点 传递模型,如图 1 所示.图 1(a)中:节点 k 处的分组为  $P_2$ .由于超短带格栅状网络路由编码同时涉及到前跳节 点和后跳节点的有限功率控制,导致食品安全追踪标签 冲突.文中采用射线模型进行邻居节点统计学模型构 建,分析食品安全追踪标签冲突信号的超宽带特征,实



现对食品(食物)的种植、养殖、加工、包装、储藏、运输、销售、消费等活动的安全控制.

生产、加工、销售以及运输整个流通环节的任意时间节点定义为

**收稿日期:** 2015-06-15

通信作者: 陈卫军(1971-),男,副教授,主要从事计算机网络、计算机应用的研究. E-mail: cwj@aynu. edu. cn.

基金项目: 河南省科技厅基础与前沿研究基金资助项目(112300410129)

$$z_k^i = h_k^i(x_k, u_k) + v_k^i, \qquad i = 1, 2, \cdots, M.$$
 (1)

式(1)中:i为相应的物资标签传感器节点.

构建标签传感网络模型,采用四元组 $\{S_1, S_2, \dots, S_L\}$ .通过中间件技术对标签批量读取数据层次化融合,食品标签批量读取和网络交互过程中,采用  $f_{\text{effecting}}(N_{\text{perception}}) = N_{\text{sensation}}$  描述从知觉层到感觉层的反馈、预测、指导等操作,网络系统节点分布模型为

$$C_{\rm m} \, \frac{{\rm d}v_{\rm Th}}{{\rm d}t} = - I_{\rm L} - I_{\rm Na} I_{\rm K} - I_{\rm T} - I_{\rm syn} + I_{\rm SM} \,, \tag{2}$$

$$\frac{\mathrm{d}h_{\mathrm{Th}}}{\mathrm{d}t} = \frac{(h_{\infty}(v_{\mathrm{Th}}) - h_{\mathrm{Th}})}{\tau_{\mathrm{h}}(v_{\mathrm{Th}})},\tag{3}$$

$$\frac{\mathrm{d}w_{\mathrm{Th}}}{\mathrm{d}t} = \frac{(w_{\infty}(v_{\mathrm{Th}}) - w_{\mathrm{Th}})}{\tau_{\mathrm{h}}(v_{\mathrm{Th}})}.$$
(4)

在使用 RFID 的无线射频识别技术时,往往会采集到含有大量噪声的原始数据,导致标签碰撞.因此,需要进行防碰撞控制,在信道环境恶劣(如大多普勒频移)时的时隙分配碰撞介质为

$$\hat{X}(k+1 \mid k) = f(\hat{X}(k \mid k)).$$
(5)

采用 P 为伪码序列,用于时隙同步; I 为标识符,用于区分、识别当前食品标签的类型的链路分离. 通过上述分析,得到了食品安全标签防碰撞控制模型,为进行防碰撞控制和冲突检测奠定了模型基础.

#### 1.2 食品安全检测标签的冲突问题描述

在上述模型构建的基础上,对标签批量读取数据层次化融合,描述食品安全标签的冲突信号生成模型,并进行 RFID 冲突分流控制<sup>[8-13]</sup>. 假设食品安全检测系统内有 m 个待识别标签,系统使用 L 叉树,当 搜索深度为 1 时,食品标签的识别概率为

$$P(1) = [1 - L^{-1}]^{m-1}.$$
(6)

采用超高频射频识别技术(UHF RFID),得到标签数据的搜索深度的均值为

$$E(k) = \sum_{k=0}^{\infty} [1 - P(1)]^{k} = \frac{1}{1 - [1 - P(1)]} = \frac{1}{P(1)} = \frac{1}{(1 - 1/L)^{m-1}}.$$
(7)

设计 RFID 射频中间件技术,提高对计量器具的食品标签批量读取能力,RFID 射频中间件分别包括:1) RFID 网络中间件;2) RFID 配置中间件;3) RFID 功能中间件.由此构建食品安全标签的冲突信 号模型,得到在约束范围(x,x(k))内, $c_k$  以 $|m_k - l_k|$ 为最大步长,在基点  $m_k$ 的两侧随机取值,i,j分别 表示食品安全标签控制网络节点通信范围内的关联状态坐标向量,从而得到节点的密度为

$$D_{\text{mode}}(\boldsymbol{i}) = \frac{N'_{\text{mode}}(\boldsymbol{i})}{N_{\text{mode}}}, \qquad 1 \leqslant \boldsymbol{i} \leqslant N_{\text{mode}}. \tag{8}$$

任意网络节点任务执行食品安全追踪标签冲突重整的有限监测向量空间 GF(q)上的约束范围为

$$SL_{i'} = \begin{cases} L_i, & i = 1, \\ i'_{New}, & \notin tet. \end{cases}$$

$$\tag{9}$$

式(9)中: $i'_{\text{New}} = (e_{i',1}, e_{i'2}, \dots, e_{i',D})$ ,其生成公式为

$$e_{i',k} = \begin{cases} x_k, & l_k \cdot U(1 - sR, 1 + sR) < x_k, & k = 1, 2, \cdots, D, \\ \overline{x}_k, & l_k \cdot U(1 - sR, 1 + sR) > \overline{x}_k, & k = 1, 2, \cdots, D, \\ l_k \cdot U(1 - sR, 1 + sR), & \notin e. \end{cases}$$
(10)

式(10)中:sR为局部搜索半径;U(1-sR,1+sR)取(1-sR,1+sR)之间的随机数.

当多个食品标签同时存在于阅读器的可读范围内时,所有的电子标签都是工作在读写器的频段上. 因此,当读写器唤醒所有标签后,所有标签在同一时间向读写器申请传输数据,产生了数据碰撞,需要进 行防碰撞控制<sup>[13-16]</sup>.

#### 2 冲突检测算法的提出和防碰撞控制改进

## 2.1 标签冲突检测算法的提出

在食品安全跟踪过程中,各个标签在传输数据时互相干扰,导致标签 EPC 码的错误传输甚至丢失,

产生碰撞(Collision)问题.文中采用 RFID 技术进行标签的冲 突检测. RFID 技术最早新兴于国外,各方面已经发展得较为 成熟.中国现已在零售业、金融业等行业中大规模地应用了 RFID 技术,同时也涉及到校园、公共交通和地铁等日常生活 范围<sup>[17-20]</sup>. RFID 系统包括标签阅读器和数据处理系统,其组 成原理如图 2 所示.

RFID系统中的信息通信双方是读写器和标签.在实际应用中,RFID系统工作时,一定会出现多个阅读器和标签共同存在的情况.此时,RFID系统的数据传输不可避免地出现信道或时序重叠,容易造成传送的数据错误,即发生了数据碰



图 2 RFID 系统组成原理

Fig. 2 RFID system composition principle

撞.发生碰撞的射频识别系统中,同时存在着两种不同的碰撞方式:一种是一个标签同时收到了不同阅 读器发出的指令,称为阅读器碰撞;另一种是一个阅读器同时收到了多个标签应答的数据,称为多标签 碰撞.

目前的防碰撞算法在解决碰撞问题时,通常利用碰撞数据的首位或前几位的信息.传统的食品安全 追踪标签防碰撞控制方法采用码元帧格式扫频射频识别技术达到冲突分流控制的目的,在扩展损失呈 突变衰减时,碰撞控制容错效果不好.文中提出一种基于冲突检测的食品安全标签防碰撞控制方法.用 μ定义碰撞比例,假设标签码长度为 n,其中,有 n。位产生碰撞.此时,碰撞因子可以表示为 μ=n。/n.如 果在阅读识别范围内,共有 m 个可以识别的标签,那么其中任意一位免于碰撞的概率为 0.5<sup>m-1</sup>,可得

$$\mu = 1 - 0.5^{m-1}. \tag{11}$$

标签识别系统有 m 个待识别标签,系统使用 L 叉树,当搜索深度为 1 时,标签识别概率为  $P(1) = [1 - L^{-1}]^{m-1}$ ;当搜索深度为 k 时,识别概率为

$$P(k) = P(1) = [1 - p(1)]^{k-1}.$$
(12)

此时搜索深度的均值为

$$E(k) = \sum_{k=0}^{\infty} [1 - p(1)]^{k} = \frac{1}{1 - [1 - p(1)]} = \frac{1}{p(1)} = \frac{1}{(1 - 1/L)^{m-1}}.$$
(13)

通过设置时间窗口的大小检测数据是否冗余,得到时频冲突检测平均时隙数为

$$T_{1-ary} = E(k)L = \frac{L}{(1-1/L)^{m-1}}.$$
 (14)

由以上分析可知:食品标签的数量与出现碰撞的概率成正比.因此,通过冲突检测可以实现对食品 安全标签的防碰撞控制.

#### 2.2 食品安全标签防碰撞控制算法实现

设计一种通过 Hashtable 保存不同键值数据的时间戳的方法,可实现对食品安全标签的防碰撞控制.具体有以下 5 个步骤.

步骤1 将空的 Hashtable 食品数据送入 TABLE.

**步骤 2** 判断是否存在标签碰撞,碰撞因子可以表示为 μ=n<sub>c</sub>/n. 如果在阅读识别范围内,共有 m 个可以计量汲取食品标签的批量识别标签,将下一次食品数据阅读值送入 INCOMING.

步骤3 所有的电子标签都是工作在读写器的频段上,因此,当读写器唤醒所有标签后,如果 IN-COMING 的时间戳大于最大窗口时间,则输出 INCOMING,同时结束一次阅读循环.

**步骤4** 组件通过关键字 provides 和 uses 申明对接口使用的方式,将食品标签的[INCOMING. key]升级为时间戳.

步骤5 终止循环.

## 3 仿真实验与结果分析

为了测试文中算法在实现食品安全标签防碰撞控制和食品安全追踪中的性能,进行仿真实验.采用 Java 语言构建开发在开源的云计算平台框架下进行标签读取的 RFID 模型.实验仿真环境为:IntelCore3-5301G内存; Windows 7操作系统. 冲突信号存储了 100 TB的内容,每个内容块的大小为1 MB,统计表记录了在当前时间周期[ $t_0$ , $t_0$ +C]内边界路由器 R2转发给其他 AS的所有 interest 食品安全追踪报文的统计信息,C为周期长度. 仿真实验实验参数为:食品安全追踪数量为 10<sup>16</sup>;节点数目为 100个; RFID 频段为 13.56 MHz;标签分布特征为双随机过程. 在上述仿真实验环境设计的基础上,进行食品安全标签防碰撞控制实验,生成的冲突信号模型,如图 3 所示. 对冲突信号模型进行时频特征分析,提取能量密度特征,结果如图 4 所示. 图 3,4 中;t 为采样时间;t<sup>'</sup>为时延.



根据上述特征提取结果,对标签批量读取,进行数据的层次化融合,描述食品安全标签的冲突信号 生成模型,并进行食品安全标签射频识别技术冲突分流控制,以食品安全检测的识别吞吐率为测试指 标,采用传统方法与新方法识别速度的比较结果,如图5所示.图5中:n为吞吐率;n为待识别标签数.

由图 5 可知:新提出的标签识别比传统的识别速度更快更有效率,加快了防碰撞的识别效率,减低 了标签防碰撞的机率,提高了防碰撞检测工作效率,避免了资源的浪费,提高了食品安全追踪的效率和 准确性.



图 5 传统方法与新方法食品标签识别吞吐率的比较

Fig. 5 Comparison between traditional methods and new methods for the recognition of food labels

#### 4 结论

食品的安全追踪贯穿于食品种植、养殖、加工、包装、储藏、运输、销售、消费等活动中.在食品安全追踪过程中,需要根据标签物资标签批量读取技术进行识别,食品标签批次和计量具有复杂性和不规则性,导致标签信息冲突碰撞,需要进行防碰撞控制.研究食品安全标签防碰撞控制算法在保证食品安全追踪应用过程中具有重要意义.

文中提出一种基于冲突检测的食品安全标签防碰撞控制方法.构建食品安全标签检测模型,采用中间件技术,对标签批量读取,进行数据的层次化融合,描述食品安全标签的冲突信号生成模型,并进行食品安全标签射频识别技术(RFID)冲突分流控制,达到防碰撞控制的目的.仿真实验表明:改进的 RFID标签防碰撞算法可以改善原有的食品标签 RFID 识别系统,加快防碰撞的识别效率,降低标签防碰撞的

机率,提高防碰撞检测工作效率,避免资源的浪费,提高食品安全追踪的效率和准确性,在食品安全监测 等领域具有较好的应用价值.

#### 参考文献:

- [1] 何艳.物联网农产品智能销售系统[J].黑龙江科学,2012,3(1):57-59.
- [2] 陈园,熊键.食品安全呼唤物联网技术的运用和普及[J].广东化工,2012,39(1):166-167.
- [3] 陈泰伟,项颖,吴黎明,等.一种基于图论的 RFID 防冲突建模与优化方法[J]. 微电子学与计算机,2012,29(1):155-158.
- [4] 李梦寻,刘宏志.基于物联网的食品安全监理模型研究[J].北京工商大学学报:自然科学版,2011,29(2):54-57.
- [5] 周应恒, 耿献辉. 信息可追踪系统在食品质量安全保障中的应用[J]. 农业现代化研究, 2002, 23(6): 451-454.
- [6] 邓海生,李军.RFID数据流过滤算法研究[J].计算机技术与发展,2012,22(6):26-29.
- [7] 禄琳,刘凤山.基于物联网的农产品供应链管理研究[J].现代化农业,2012,7(57):57-60.
- [8] 卢印举,苏玉,单国全.基于 RFID 技术的跟踪与追溯系统研究[J].煤炭技术,2012,31(6):163-164.
- [9] 潘伟杰,李少波,许吉斌. 自适应时间阈值的 RFID 数据清洗算法[J]. 制造业自动化,2012,34(7):24-27.
- [10] 张明哲,张强,袁巍,等.嵌入式 RFID 中间件数据过滤模型研究[J]. 计算机工程与设计,2010,31(17):3743-3746.
- [11] 陈金花,刘国辉,吴军,等.数据过滤在 RFID 系统中的应用[J].光通信研究,2009(4):41-43.
- [12] 邓海生,李军.RFID数据流过滤算法研究[J].计算机技术与发展,2012,22(6):26-29,34.
- [13] 张勇,梁宝全,侯玉文,等.采用 RFID 技术和 U 盘存储的抄表器设计[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2010,31 (5):507-510.
- [14] 张学军,蔡文琦,王锁萍.改进型自适应多叉树防碰撞算法研究[J].电子学报,2012,40(1):193-198.
- [15] 陈毅红,冯全源.物联网中标签持续到达的 RFID 防碰撞算法[J].计算机集成制造系统,2012,18(9):2076-20810
- [16] 宋建华, 郭亚军,韩兰胜,等. 自调整混合树 RFID 多标签防碰撞算法[J]. 电子学报, 2014, 42(4):685-689.
- [17] 曾炼成,沈岳,彭佳红.基于 UHF RFID 标签的农产品可追溯系统研究[J]. 安徽农业科学,2010,38(26):14734-14735,14740.
- [18] 曹洁,窦聪. 一种改进的混合查询树防碰撞算法[J]. 小型微型计算机系统,2015,36(2):322-326.
- [19] 江雨,马满福.物联网中 RFID 位匹配防碰撞算法[J].计算机应用研究,2012,29(1):88-91.
- [20] 杨晓娇,闫斌,谢光斌.一种改进的二进制防碰撞算法[J].计算机应用与软件,2013,30(10):312-316.

## **Collision Avoidance Control Based on Food Label Conflict Detection**

# CHEN Wei-jun, HUANG Yong-can

(School of Software Engineering, Anyang Normal University, Anyang 455000, China)

**Abstract:** The paper puts forward a kind of food safety label conflict detection based anti-collision control method. It may read labels bulkily, proceed with level data fusion. By describing the conflict signal generation model of food safety labels and analysis the ultra wide band characteristics of food safety traceability label conflict signal, to realize the food safety control of planting, breeding, processing, packaging, storage, transportation, sale and consumption activities. Based on the technology of radio frequency identification (RFID) of the food safety label and the conflict shunt control to achieve the purpose of anti-collision control. Simulation results show that the method may speed up the anti-collision recognition efficiency, reduce the probability of the label anti-collision and improve the anti-collision detection efficiency. **Keywords:** conflict detection; collision avoidance control; food safety; tag; radio frequency identification technology

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 吴逢铁)

**文章编号:**1000-5013(2015)04-0422-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.04.0422

# STM32 的多传感器融合姿态检测

# 黄志伟,徐苏楠,韦一,唐莹

(中国计量学院光学与电子科技学院,浙江杭州 310018)

**摘要:** 采用 STM32 微控制芯片作为主控芯片,搭载 MPU6050 传感器、HMC5883L 磁场传感器,以四旋翼 飞行器为平台进行载体姿态检测的实验.对比单一传感器和多传感器姿态检测的实验结果,结果表明:基于多 传感器融合的姿态检测能弥补单一传感器检测姿态的不足,提高姿态信息的精确性.

关键词: 姿态检测; STM32; MPU6050; HMC5883L; 传感器

**中图分类号:** TP 368.1 文献标志码: A

姿态检测在医疗仪器、机器人、惯性测量单元、汽车电子、导航控制等领域应用广泛<sup>[1-3]</sup>.国内外众多 学者对基于传感器的姿态检测进行了大量的研究和应用.浙江大学利用加速度传感器对人体姿态进行 检测来监测人体跌倒<sup>[4]</sup>.哈尔滨工业大学机器人研究所利用惯性传感器来检测机器人的姿态,并取得良 好效果<sup>[5]</sup>.国防科技大学机电工程与自动化利用惯性传感器对机器人进行水平姿态的检测<sup>[6]</sup>.美国密歇 根大学机械工程系通过在棒球和全球内部安装姿态检测单元,研究棒球垒球在投掷、飞行、下落过程中 运动轨迹和特点<sup>[7]</sup>.姿态检测作为惯性测量的内容,还可应用于飞行器的起飞、降落、导航等<sup>[8-13]</sup>领域. 本文讨论了多传感器融合进行姿态检测的硬件设计,并搭建了四旋翼飞行器的平台.

# 1 硬件设计

基于 Cortex-M3 型内核的 STM32 型系列芯片性能优越、性价比极高,专为低功耗领域设计等优 点<sup>[14-15]</sup>,选择 STM32f103c8t6 型芯片作为主控芯片,该芯片是一款 32 位 ARM 微控制器,最高支持 72 MHz 时钟频率,处理速度高,集成了很多常用外设大量的通用输入输出接口,非常适用于多传感器的控 制处理. 陀螺仪和加速度传感器选用 Invensence 公司的 MPU6050 型芯片,该芯片将三轴陀螺仪和三轴

加速度传感器集成,能同时输出 6 轴信息,消除了由于 安装和焊接带来的轴间误差,减少了软件的补偿,保证 实验的准确性.通过 IIC 接口,扩展外部传感器输出 9 轴信息.磁场传感器采用美国 Honeywell 公司生产的 HMC5883L 型高精度磁场传感器,分辨率达 0.002 G, 最大输出频率达 160 Hz.高度测量采用的是 BMP085 型气压传感器,测量范围为 300~110 kPa,在超低功耗 模式和超高效模式下,测量精度分别为 0.06,0.03 hPa, 高度分别精确至 0.5,0.25 m. 陀螺仪和加速度传感器 模块与磁场传感器相整合,可以完成九轴姿态的解算, 其电路如图 1 所示.



图 1 九轴姿态测量模块

Fig. 1 Test module of nine axes attitude detection

高度传感器直接与主控模块通过 IIC 总线相连,实现快速通信,用以检测的实验平台为四旋翼飞行

**收稿日期:** 2015-06-15

通信作者: 唐莹(1981-)女,副教授,博士,主要从事半导体器件及其嵌入式系统的研究. E-mail:tangy@cjlu.edu.cn.

基金项目: 浙江省公益性技术应用研究项目(2013C31068)

器,整体硬件模块示意图及实物飞控电路板,如图2所示.



(a) 四旋翼飞行器各模块硬件示意图



(b) 四旋翼飞行器控制电路板

图 2 四旋翼飞行器的实验平台 Fig. 2 Test platform of quadrotor helicopter

# 2 四旋翼飞行器的姿态检测

陀螺仪是姿态检测中的核心部件,众多关于姿态求解的理论也都是基于陀螺仪<sup>[16-17]</sup>. 三轴陀螺仪能 输出载体绕3个坐标旋转的角速度量,通过对时间积分,得到载体绕旋转轴的角度. 加速度传感器也是 姿态检测中的重要惯性器件,它测量载体相对惯性空间的绝对加速度和引力加速度之差,称为比力. 在 静止的状态下,三轴加速度读传感器能测量重力在载体在3个轴上的重力分量. 磁场传感器灵敏度高, 能够测量地球弱磁场,通过磁场的分布,能够计算出载体当前偏离北向的角度. 高度测量通过气压传感 器测量大气压强度,间接测量高度的变化. 实验以四旋翼飞行器为测试平台,测试在振动干扰情况下姿 态检测的准确性.

#### 2.1 陀螺仪测量姿态

陀螺仪通过对时间积分求得载体姿态,但是有严重的漂移现象,包括静止时零点的偏移和温度引起 的漂移.这些偏移在积分过程中会形成累积误差,使最终计算得到的角度会随时间漂移而不准确.首先, 对陀螺仪数据进行零偏校正.陀螺仪静止时,三轴输出数据在理想情况下应该为0,根据这一特性,在每 次硬件初始化工作时,取静止下一组陀螺仪输出数据求平均值作为陀螺仪的零位偏移,以后读取的数据 每次都要减去这个偏移值.然后,对校正偏移后的数据进行滑动平均滤波,完成对陀螺仪数据的处理.用

陀螺仪输出角速度对时间积分来测量姿态角. 陀螺仪检测 静止条件下的角度(φ),如图 3 所示.

姿态角的计算周期是 2 ms,由图 3 可知:在水平静止 120 s 情况下,陀螺仪测量到的角度漂移了 2.5°左右,并且 角度的漂移是持续的;更长时间后,角度误差会积累到更 大.因此,仅靠陀螺仪测量姿态会产生较大的测量误差,要 进一步提高精度,必须融合其他种类的传感器.

#### 2.2 姿态的测量

加速度能测量载体受到的比力大小,无其他外力的情况下,载体只受到来自地球的引力,根据引力在3个坐标轴上的分量,计算得到载体当前的水平姿态信息.根据加速度 传感器特性,弥补陀螺仪在静态情况下的不足,提高姿态检



measurement angle

测的精确度<sup>[18-20]</sup>.按照文献[16]的方法对三轴加速度传感器进行校准,由于三轴加速度传感器是由一个 双轴传感器和一个单轴传感器组合而成,所以,可以省略轴间差校准这一步骤.实际上,加速度传感器不 仅对重力,而且对外力产生的加速度都非常敏感.换言之,它不能区分加速度是重力引起的,还是除了重 力之外的力引起的.因此,加速度传感器测量到的信号是重力加速度和外力加速度的总和.在数据融合 时,采用互补滤波器加入闭环控制进行水平姿态的测量. 互补滤波器利用加速度传感器测量重力矢量 $\hat{g}^{b}$ 和陀螺仪测量到的角速度矢量 $\Omega^{b}$ ,分别对重力矢量和角速度矢量进行低通滤波和高通滤波.将重力矢量 $\hat{g}^{b}$ 做归一化处理,得到一个单位向量 $\bar{v}$ .然后,将单位向量与观测值 $\hat{v}$ 进行叉积.根据叉积概念,假设有a,b两个向量,这两个向量叉积得到一个向量, 其方向与这两个向量形成的平面垂直,新的向量模的大小为两个向量模的积乘上两个向量夹角的正弦 值 sin a. 根据小角近似,sin a  $\approx$ a. 将 $\bar{v}$ 与 $\hat{v}$ 叉积,便会得到一个近似的角度偏差值 e,这个偏差代表了真 实姿态与测量姿态之间的误差大小,将该误差进行比例和积分环节,用来修正陀螺仪角速度矢量的偏 移.通过四元数算法,得到最终的四元数姿态矩阵.对校准过的加速度进行形如陀螺仪数据的滑动平均 滤波得到可靠的数据.在四旋翼飞行器电机开启情况下进行姿态检测测试,得到的俯仰角( $\theta$ )和横滚角 ( $\gamma$ ),如图 4,5 所示.









开启四旋翼飞行器的 4 个电机,检测到俯仰角和横滚角能保持在水平位置,只在±1°的范围内漂移.当将飞行器姿态调整到 22.5°时,系统能够迅速响应,并保持新的位置姿态,检测角度误差在±1°范围内.

#### 2.3 偏航角

偏航角的融合采用了磁场传感器,变化的电流会产生磁场.因此,磁场传感器会受到各种外界磁场 干扰,而使测量结果不准确,必须注意选取合适的磁场传感器安装环境.HMC5883L型三轴磁场传感器 能够对地球磁场进行测量,通过磁场在 *x* 轴与 *y* 轴的分布,确定载体当前偏离北向的角度.然而,磁场 传感器必须严格保持水平才能测得准确的偏航角.在三维条件下,需要加速度传感器和陀螺仪融合获得 的水平方向横滚角和俯仰角对磁场传感器进行倾斜补偿,以获得动态倾斜状态下的偏航角.

当磁场传感器水平放置时,偏航角的计算公式为

$$\varphi = \arctan(M_x/M_y). \tag{1}$$

式(1)中: $M_x$ 和 $M_y$ 为磁场传感器测量到的x轴和y轴磁场大小. 当磁场传感器倾斜时,设磁场传感器输出为 $M_{y,0,\varphi} = [M_{x,1}, M_{y,1}, M_{z,1}]^{T}$ ,相同偏航角水平放置的传感器输出为 $M_{0,0,\varphi} = [M_{x,0}, M_{y,0}, M_{z,0}]^{T}$ . 由欧拉旋转公式有

$$\boldsymbol{M}_{0,0,\varphi} = \boldsymbol{R}_{\theta}^{-1} \boldsymbol{R}_{\gamma}^{-1} \boldsymbol{M}_{\theta,\gamma,\varphi}.$$
<sup>(2)</sup>

式(2)中: $\mathbf{R}_{\gamma}$ 和 $\mathbf{R}_{\theta}$ 是绕 y 轴旋转的横滚角  $\gamma$  和绕 x 轴旋转的俯仰角  $\theta$  的旋转矩阵.

$$\boldsymbol{R}_{\gamma} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix}, \qquad \boldsymbol{R}_{\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}.$$
(3)

代入式(2)可得

$$\begin{bmatrix} M_{x,0} \\ M_{y,0} \\ M_{z,0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & \sin \gamma \\ \sin \theta \cdot \cos \gamma & \cos \theta & -\sin \theta \cdot \cos \gamma \\ -\cos \theta \cdot \sin \gamma & \sin \theta & \cos \theta \cdot \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{x,1} \\ M_{y,1} \\ M_{z,1} \end{bmatrix}.$$
 (4)

由式(4)可求得  $M_{x,0}$  和  $M_{y,0}$ ,由式(1),可求得当前载体偏航角.

在实际环境中,由于磁场硬铁效应和软铁效应的存在,导致磁场传感器旋转一周得到的并不是一个标准的圆,而是一个椭圆.对于罗盘误差的修正,采用最小二乘法对椭圆进行矫正,将偏差补偿到原始数据上.实验方法是将传感器在水平方向上旋转一周,得到 *x* 轴和 *y* 轴数据,并绘制出二维坐标图.在Matlab中,用最小二乘法对原始数据进行拟合,得到椭圆的长短半轴以及偏离中心点(0,0)的坐标.补偿后的偏航角(*ϕ*)实验结果,如图 6 所示.

磁场正北方向通过指南针测得,将磁北规定为0°方向,北偏 东为正方向.将磁场传感器放置于正北方向,检测到偏航角度大 约0.5°.一段时间后,将磁场传感器按正方向旋转到20°,检测到 偏航角度为25°,误差为5°.

#### 2.4 高度测量模块

BMP085 气压传感器能测量大气压,气压与海拔高度(h)存 在如下函数关系,即

$$h = 44\ 330 \times (1 - (p/p_0)^{1/5.255}).$$

通过气压与高度的函数关系,间接计算海拔高度.BMP085 只有一个控制寄存器,地址为0xF4,用来配置气压和温度的测量 模式.BMP085不需要上电初始化时进行驱动,而是在每次测量



after compensation

前都需要向控制寄存器内写入指令.该传感器通过自带的补偿算法进行高度的计算,所以,在测量前,需 要读出传感器内部自带 EEPROM 里的一些校准数据.

(5)

实测中气压传感器数据波动较大,影响高度计算的准确性.因此,采用滑动均值滤波的方法对气压 数据进行滤波.10个气压数据先后入队列,进行均值滤波,每次滤波后最先进入队里的数据被新的数据 替换,取得了比较良好的效果,并且数据实时性没有受到影响.利用楼层高度对气压传感器进行测试,经 滤波后的气压趋势图,如图 7(a)所示.

根据气压与高度的计算公式计算出海拔高度,图7(a)所对应的楼层海拔高度,如图7(b)所示.由于 海平面是处于不断变化中的,气压随气候季节和温度的变化也非常明显.因此,绝对海拔高度的测量误 差较大.由图7(b)可知:地平面海拔大约为-2m,与实验当地的海拔相差较大.相对高度的测量,楼层 高度为3.84m,气压计测量到的最大值为3.97m,最小值为3.65m,误差在20cm内.因此,在四旋翼 飞行器系统初始化的时候,记录此时的气压计数据,并将高度设置为零,通过测量气压变化差值.计算并 反馈四旋翼飞行器的飞行高度,气压计的误差在可接受范围内,可以有效地减少气压变化带来的误差.



Fig. 7 Detection figure of pressure trend

#### 3 结束语

基于 STM32 实现的多传感器融合的姿态检测方法,能够弥补单个传感器的缺陷.采用多种传感器 融合后的姿态检测方法,抗干扰能力强,动态响应快速,输出俯仰角和横滚角误差不超过 1°.偏航角误 差在 5°左右.这是因为俯仰角和横滚角的误差会随着倾斜补偿公式累积到偏航角上.设计的姿态检测 方案在四旋翼飞行器平台上实验效果良好.需要说明的是,设计的姿态测量硬件模块同时也适用于其他 一些姿态测量应用,如人体姿态的检测.

#### 参考文献:

- [1] 胡炼,赵祚喜,吴晓鹏. ADIS16300四自由度 IMU 在姿态测量中的应用[M]. 电子设计工程,2010,18(7):103-106.
- [2] 蒋少茵. 机械手模型控制及轨迹定位精度测试[J]. 华侨大学学报:自然科学版,1999,20(4):396-399.
- [3] 陈胜奋,谢明红.工业机器人运动碰撞的仿真实现[J].华侨大学学报:自然科学版,2015,36(2):137-141.
- [4] 文耀锋. 一种实时的跌倒姿态检测和心率监护系统的研究[D]. 杭州:浙江大学,2008:2-3.
- [5] 秦勇,臧希喆,王晓宇,等. 基于 MEMS 惯性传感器的机器人姿态检测系统的研究[J]. 传感技术学报 2007,20(2): 298-301.
- [6] 何伟,陈伟. 基于 MEMS 惯性传感器的机器人水平姿态检测系统设计[J]. 机器人技术与应用,2009,10(5):51-55.
- [7] MCGINNIS R S, PERKINS N C. A highly miniaturized, wireless inertial measurement unit for characterizing the dynamics of pitched baseballs and softballs[J]. Sensors, 2012, 12(9):11933-11945.
- [8] WENDEL J, MEISTER O, SCHLAILE C, et al. An integrated GPS/MEMS-IMU navigation system for an autonomous helicopter[J]. Aerospace Science and Technology, 2006, 10(6):527-533.
- [9] GRZONKA S,GRISETTI G,BURGARD W. A fully autonomous indoor quadrotor[J]. IEEE Press,2012,28(1):90-100.
- [10] BOUABDALLAH P, MURRIERI P, SIEGWAR R. Towards autonomous indoor micro VTOL[J]. Autonomous Robots, 2005, 18(1): 171-183.
- [11] KIM S G, CRASSIDIS J L, CHENG Y, et al. Kalman filtering for relative spacecraft attitude and position estimation[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2007, 30(1):133-143.
- [12] REHBINDER H, HU X. Drift-free attitude estimation for accelerated rigid bodies[J]. Automatica, 2004, 40(4): 653-659.
- [13] JURMAN D, JANKOVEC M, KAMNIK R, et al. Calibration and data fusion solution for the miniature attitude and heading reference system [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 138(2):411-420.
- [14] 邱文挺,杜勇前.可视化电气火灾预警系统的设计与实现[J].华侨大学学报:自然科学版,2013,34(6):646-648.
- [15] 郭尚佳,唐艳芳,李钟慎.一种高精度超声波测距系统的设计[J].华侨大学学报:自然科学版,34(5):489-493.
- [16] 林生荣,张辉. 三轴加速度传感器校正方法研究[M]. 传感器与微系统, 2011, 30(11): 72-74.
- [17] 李文望. 微机械振动陀螺隔离耦合的结构设计[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2003,22(4):380-384.
- [18] 林生荣,张辉. 三轴加速度传感器校正方法研究[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(11):72-74.
- [19] YOO T S, HONG S K, YOON H M, et al. Gain-scheduled complementary filter design for a MEMS based attitude and heading reference system[J]. Sensors, 2011, 11(4): 3816-3830.
- [20] COLORADO J,BARRIENTOS A,MARTINEZ A, et al. Mini-quadrotor attitude control based on hybrid backstepping and frenet-serret theory[C] // IEEE International Conference on in Robotics and Automation (ICRA). New York: IEEE Press, 2010:1617-1622.

# Attitude Detection Based on STM32 Multi-Sensor Fusion

# HUANG Zhi-wei, XU Su-nan, WEI Yi, TANG Ying

(College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Attitude detection was to measure the attitude information of the carrier in three dimension space and show it in the shape of euler angle visually. This article take STM32 microcontroller as the main control chip, carry the MPU6050 sensor, HMC5883L magnetic sensor. We make some experiment about the attitude detection on the platform of quad-ro-tor helicopter and compare the experimental result between signal sensor and multi-sensor. The result shows that attitude detection based on multi-sensor can cover the weakness of signal sensor, enhance the accuracy of the attitude information. **Keywords:** attitude detection; STM32; MPU6050; HMC5883L; sensor

文章编号:1000-5013(2015)04-0427-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.04.0427

# 二维 Otsu 自适应阈值快速算法的改进

# 钱卫星1,2,黄丽亚2

(1. 杭州职业技术学院 信息工程学院,浙江 杭州 310018;2. 南京邮电大学 电子科学与工程学院,江苏 南京 210003)

**摘要:** 分析二维 Otsu 自适应阈值快速算法的斜方窄带判决域特性,在不增加算法复杂度的前提下,通过建 立窄带斜方轴截距与图像像素二维概率密度信息关联分布数据,提出动态窄带斜方轴截距自适应选择方法. 实验结果表明:改进后的二维 Otsu 自适应阈值快速算法更加适应图像分割的实际工况,并取得良好的图像分 割效果.

关键词: 图像分割; 二维 Otsu; 窄带斜方; 自适应轴截距

**中图分类号:** TP 391.41 文献标志码: A

阈值分割<sup>[1]</sup>是图像分割处理的典型算法,其算法简单而有效,被广泛地应用于计算机视觉图像处理 领域.近年来,如何优化分割阈值算法、提升图像分割效果成为图像处理领域研究的热点问题之一.许多 学者提出了多种分割阈值的选取方法.其中,依据方差判别确定图像分割阈值的 Otsu 法因算法相对简 单、分割效果满足一般要求而得到了广泛地应用.Otsu 算法由日本学者大津于 1979 年提出,也称大津 阈值法<sup>[2]</sup>.由于一维 Otsu 直方图信息量的局限,学者提出了二维 Otsu 自适应阈值分割方法,使分割效 果得到了改善<sup>[3-4]</sup>.然而,引入二维 Otsu 直方图后,算法复杂度大幅度增加,不能实时处理.郝颖明等<sup>[5-7]</sup> 改进了算法,改判决域直分为斜分,提出不同阈值分割准则,增强图像的分割效果,降低算法的运算量, 提高算法的处理速度.张新明等<sup>[8-10]</sup>运用二维直方图概率分布特性,结合最小误差方式,在斜分算法基 础上,改进快速二维直方图斜分算法的阈值分割方法.本文在二维 Otsu 自适应阈值快速算法基础 上<sup>[11-13]</sup>,提出动态窄带斜方轴截距 N 和 M 的自适应选择方法,并根据图像像素的概率密度信息,进一 步进行优化调整.

# 1 Otsu 算法

基于图像灰度的一维直方图,以图像主体目标前景和图像背景的类间最大方差为图像分割阈值选 取准则,完成图像目标部分与背景部分的分离.类间方差越大,说明构成图像的主体目标与背景两部分 的差别越大.图像分割效果越好,意味分割时图像内容错分的概率和比例越小.

图像像素集合为 f(x,y),图像总平均灰度为 $\mu$ ,类间方差为  $S_b$ ,其主体目标和背景的分割阈值符为 T,属于主体目标像素的平均灰度为  $\mu_0$ ,其像素占图像总像素的比例为  $\omega_0$ ,图像背景像素平均灰度为  $\mu_1$ ,其像素占图像总像素的比例为  $\omega_1$ .假设图像大小为  $M \times N$ ,图像中像素灰度值小于阈值点 T 的像素 数量为  $N_0$ ,大于阈值点 T 的像素数量为  $N_1$ ,则关系表达式为

$$\omega_0 = N_0 / (M \times N), \qquad (1)$$

$$\omega_1 = N_1 / (M \times N), \qquad (2)$$

**收稿日期:** 2015-06-15

**通信作者:** 钱卫星(1974-),男,讲师,博士研究生,主要从事嵌入式技术应用的研究. E-mail:qianweixingxdx@163. com.

基金项目: 浙江省教育厅科研项目(Y201327284)

$$N_0 + N_1 = M \times N, \tag{3}$$

$$\omega_0 + \omega_1 = 1, \tag{4}$$

$$\boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{\omega}_0 \times \boldsymbol{\mu}_0 + \boldsymbol{\omega}_1 \times \boldsymbol{\mu}_1, \qquad (5)$$

$$\mathbf{S}_{\mathrm{b}} = \boldsymbol{\omega}_{\mathrm{0}} (\boldsymbol{\mu}_{\mathrm{0}} - \boldsymbol{\mu})^{2} + \boldsymbol{\omega}_{\mathrm{1}} (\boldsymbol{\mu}_{\mathrm{1}} - \boldsymbol{\mu})^{2}. \tag{6}$$

在很多情况下,基本算法进行图像分割都能取得良好效果,但图像灰度一维直方图仅能表达图像灰度分布信息,缺失图像内像素间各种空间关联的有效信息.因此,在图像背景较复杂性的情况下,如信噪比较弱、光照过暗等不利因素较多时,图像一维灰度直方图便不能理想地区分图像主体目标和图像背景信息,此时再依据基本算法进行图像分割就会造成误分割概率大幅上升.

## 2 二维 Otsu 原理及斜分快速算法

#### 2.1 二维 Otsu 原理

关联原始图像像素点信息与其邻域像素点信息,建立图像像素信息联合直方图.将一维 Otsu 算法 推广到二维 Otsu 算法,并建立阈值的自适应判别算法.挖掘图像像素关联信息并加以利用后,有效克 服了分割时的图像背景噪声影响,极大提高了图像分割准确性,使图像分割效果得到有效改善.

设一图像 f(x,y)的灰度等级为 $(0,1,2,\dots,L-1)$ ,共 L 级,其邻域平滑图像 g(x,y)(以  $k \times k$  的邻 域图像像素均值作为该灰度值)的灰度级也为 L 级,表达式为

$$g(x,y) = \frac{1}{k^2} \sum_{m=-k/2}^{k/2} \sum_{n=-k/2}^{k/2} f(x+m,y+n).$$
<sup>(7)</sup>

式(7)中:1 $\leqslant x+m \leqslant M$ ,1 $\leqslant y+n \leqslant N$ ,M和N分别为图像的宽度和高度;k一般取奇数.

建立像素灰度值 i 和邻域平均灰度值 j 的图像像素二维灰度信息数据,记满足 i 和 j 像素点数为  $f_{i,j}$ ,图像总像素数为 K,则有二维联合概率密度为  $P_{i,j} = f_{i,j}/K$ ,相关等式为

$$\sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} f_{i,j} = K, \qquad \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} P_{i,j} = 1.$$
(8)

原始图与二维 Otsu 直方图,如图 1 所示.由图 1(b)可知:图像主体目标像素和图像背景像素围绕 在二维直方图的 45°对角线周边;图像主体目标像素、图像背景像素的各自灰度值和其邻域灰度均值较 接近,而在图像主体目标和图像背景的分界邻域处,像素的灰度值和邻域的灰度均值差距较大.

设任给定一个阈值数据(*s*,*t*),将二维Otsu直方图分割成A~D等4个区域,如图2所示.由图2可知:区域B对应于图像主体目标像素;区域C对应于图像背景像素;区域A,D的大部分远离对角线,图像像素灰度与领域均值灰度差别较大,对应图像边缘和图像噪声等.



由  $i, j, f_{i,j}, P_{i,j}$ 可以计算出图像主体目标像素点数比例  $\omega_0$ ,主体目标像素均值灰度  $\mu_0$ ,图像背景像素点数比例  $\omega_1$ ,背景像素均值灰度为  $\mu_1$ ,以及图像像素总均值灰度  $\mu_2$ ,前景、后景概率比例为

$$\omega_0 = \sum_{i=0}^{s-1} \sum_{j=0}^{t-1} P_{i,j}, \qquad \omega_1 = \sum_{i=s}^{L-1} \sum_{j=t}^{L-1} P_{i,j}.$$
(9)

各平均灰度计算公式为

$$\boldsymbol{\mu}_{0} = (\mu_{0,i}, \mu_{0,j})^{\mathrm{T}} = \left(\sum_{i=0}^{s-1} \sum_{j=0}^{t-1} i P_{i,j}, \sum_{i=0}^{s-1} \sum_{j=0}^{t-1} j P_{i,j}\right)^{\mathrm{T}},$$
(10)

$$\boldsymbol{\mu}_{1} = (\mu_{1,i}, \mu_{1,j})^{\mathrm{T}} = (\sum_{i=s}^{L-1} \sum_{j=t}^{L-1} i P_{i,j}, \sum_{i=s}^{L-1} \sum_{j=t}^{L-1} j P_{i,j})^{\mathrm{T}},$$
(11)

$$\boldsymbol{\mu}_{z} = (\mu_{z,i}, \mu_{z,j})^{\mathrm{T}} = (\sum_{i=s}^{L-1} \sum_{j=t}^{L-1} i P_{i,j}, \sum_{i=s}^{L-1} \sum_{j=t}^{L-1} j P_{i,j})^{\mathrm{T}}.$$
(12)

大多数图像的图像边缘概率比例和图像噪声概率比例很小,在图像分割效果满足实际要求的情况下,这部分数据可以忽略不计.因此,设定区域 A 和 D 的概率比例为零.式(9),(12)可近似为

$$\omega_0 + \omega_1 \approx 1, \tag{13}$$

$$\boldsymbol{\mu}_{z} \approx \boldsymbol{\omega}_{0} \times \boldsymbol{\mu}_{0} + \boldsymbol{\omega}_{1} \times \boldsymbol{\mu}_{1}. \tag{14}$$

由此可得类间离散方差表达式 S<sub>b</sub> 为

$$S_{\rm b} = \frac{\omega_0 \left[ (\omega_0(s,t)\mu_{z,i}\mu_{0,i}(s,t))^2 + (\omega_0(s,t)\mu_{z,j}\mu_{0,j}(s,t))^2 \right]}{\omega_0(s,t)(1-\omega_0(s,t))}.$$
(15)

当类间离散方差达最大值 max $\{S_b\}$ 时,对应的 $(s_0, t_0)$ 为图像分割最佳阈值数据.

#### 2.2 二维 Otsu 斜分快速算法

传统的二维 Otsu 应用存在两个缺陷:一是概率为零的假设仅在 远离对角线的部分成立,计算最佳阈值时,如果将靠近对角线的概率 非零数据被忽略,势必会影响分割结果;二是在运算过程中,需建立 阈值点数据 *s* 和 *t* 的双重循环,在循环内部需要对 *s*×*t*+(*L*-*s*)× (*L*-*t*)个数据点作累加运算,总计算量大、耗时长,不适用于连续图 像的实时处理.改进后的二维 Otsu 斜分快速算法图像分割方式,如 图 3 所示.建立截距为 *N* 的沿对角线方向的斜方窄带区域(图 3 阴 影部分),斜线表达式为



图 3 二维 Otsu 阈值斜分法图 Fig. 3 2D Otsu histogram obliqu segmentation method

$$f_{\perp} = g + N, \qquad f_{\mathbb{F}} = g - N. \tag{16}$$

划定通过二维 Otsu 阈值斜分法图上设定的阈值点(s,t),且与对角线相垂直的斜分线,进行图像区 域分割,则位于窄带区域内斜分线两侧的像素点对应于图像主体目标像素比例 ω。和图像背景像素比例 ω,可以推断出该斜分线表达式为

$$f = s + t - g. \tag{17}$$

改进后的二维 Otsu 斜分分割具有以下 3 点优势:1) 当 N 取足够大时,可以将所有概率不为零的 点都包括进来,避免了误分割;2) 运算时仅包括窄带内的数据,而将其余部分忽略,缩小了运算范围;3) 如果将 s+t 看成一个整体,则该斜分准则可以避开从 s,t 两维角度来进行阈值计算判断,而只与其两者 之和的一个数据来进行阈值计算判断,将运算从二维降低转换成为一维,大幅降低了运算量.

# 3 二维 Otsu 自适应阈值斜分快速算法的改进

在实际工程图像处理时面临着各种工况,图像自身的复杂度、图像获取时环境的光照度等,使应用 二维 Otsu 自适应阈值快速算法处理时,对每幅待处理图像 *f* 轴和 *g* 轴均有不同的最佳斜线轴截距 *N*, *M*.针对这些问题,提出动态窄带斜线轴截距 *N*,*M* 的自适应选择方法.

#### 3.1 二维 Otsu 直方图斜分窄带判决域分析

斜方窄带判决域分析,如图 4 所示. 在包含所有图像灰度信息前提下,图像不同或图像处理条件不同,斜线轴截距 N, M存在动态变化,大部分情况下截距 N 不等同于截距 M,如包含了所有像素灰度信息的组合  $M_1, N_1$ . 在图像分割前人为指定了 N, M,如  $M_2 = N_2 = 40$  的组合,必然会导致以下某种情况出现:1)建立的窄带可能会缺漏一部分有效灰度信息数据,导致部分重要的图像信息被忽略,带来图像分割效果不理想;2)可能会盲目匡大了窄带范围,必然导致运算过程中,相当数据是无效运算,增加了图像分割处理时间,于实时处理不利;3)指定截距 N和 M适应了特定某一幅图像分割,但不适应情况变化后的其他图像分割处理,没有普适性.

在建立二维 Otsu 直方图的过程中,直方图上联立灰度的概率密度存在疏密不匀的情况,斜线轴截距  $N_2$ , $M_2$  建立的窄带内包含了绝大部分的图像灰度信息,只有少部分概率较低的灰度数据落在窄带以外,并且离对角线垂直距离较远.这时要将其匡定在窄带里面,势必要加大斜线轴截距 N,M,如  $N_2/M_1$ 或者  $N_1/M_2$ 所框定的窄带组合,在没有明显图像分割效果提高的情况下,加入大截距小概率的像素信息后会大幅度增加阈值确定的运算量.因此,相对而言,此种情况下较优的斜线轴截距选择组合仍然是  $N_2/M_2$ .

# 3.2 动态斜线轴截距 N 和 M 的自适应确定算法

P

1) 确立窄带斜方轴截距  $N_{\text{max}}$ 和  $M_{\text{max}}$ . 建立数据链 $(i, j, f_{i, j}, f_{i, j})$ 

 $P_{i,j}, N_{i,j}/M_{i,j}$ ).其中, $N_{i,j}$ 为i < j的情况下阈值点坐标为(s,t)时对应的g轴斜线轴截距数据(即s=i, t=j时); $M_{i,j}$ 为i > j情况下的f轴斜线轴截距数据.由图 3 可知:对角线上方的窄带斜线表达式为f=g-N;对角线下方的窄带斜线表达式为f=g+M.因此,N=g-f,代入相关数据信息可得 $N_{i,j}=j-i$ , 同理可得 $M_{i,j}=i-j$ .在原二维Otsu斜分快速算法计算 $f_{i,j}$ , $P_{i,j}$ 过程中,可以直接计算得到 $N_{i,j}$ , $M_{i,j}$ . 令动态斜方最优轴截距N,M为 $N_{max}$ , $M_{max}$ ,设其初始值为零,在计算 $N_{i,j}$ , $M_{i,j}$ 的同时,通过不断地比较,持续更新 $N_{max}$ , $M_{max}$ 数据,则在图像遍历计算获得 $f_{i,j}$ , $P_{i,j}$ 的同时,可获得在二维直方图中包含所有 灰度数据信息的窄带斜方轴截距 $N_{max}$ , $M_{max}$ , $M_{max}$ .

2) 对应轴截距 N,M 的图像像素概率密度信息数据分析. 建立两个图像像素概率密度的一维数组  $P_N[], P_M[], 在计算 N_{i,j}, M_{i,j}$  的同时,可以获得  $P_N[], P_M[]$ 数据,计算公式为

$$_{N}[N_{i,j}] += P_{i,j}, \quad P_{M}[M_{i,j}] += P_{i,j},$$
(18)

$$\sum P_{N}[] + \sum P_{M}[] = 1.$$
<sup>(19)</sup>

假设图像中出现窄带斜方轴截距  $N_{i,j} = 15$  的情况共有 3 处,分别是  $N_{i=5,j=20}$ , $N_{i=20,j=35}$ , $N_{i=33,j=48}$ ,则一维数据元素  $P_N[15]$ 的数据为三处的  $P_{i,j}$ 累加值, $P_M[]$ 计算过程类似相同.因此,在图像遍历计算获得  $f_{i,j}$ 和  $P_{i,j}$ 的同时,也获得了对应于 N,M 的图像像素概率密度信息数据.图 1(a)图像及对应于各 N,M 的图像像素概率密度信息数据图,如图 5 所示.

由图 5 可知:截距  $N_{max}$ 为 79;截距  $M_{max}$ 为 103;图像像素概率较集中的区域为两轴截距 20 以内.对 图像(图 1(a))进行不同轴截距组合情况的图像分割处理,涵盖了较集中信息时,N=20,M=20 的图像 分割结果,如图 6(a)所示.当窄带取 N=60,M=80 时,涵盖了图像主要信息,图像分割结果如图 6(b) 所示.当窄带取 N=80,M=100 时,涵盖了图像所有信息,图像分割结果如图 6(c)所示.由图像分割结 果比较可知:图 6(b),(c)基本没有区别,分割效果较图 6(a)更好,保留的图像主体目标像素更完整.因 此,在不影响图像分割质量的前提下,考虑工程需求偏向实时性要求的情况,可以根据图像像素概率密 度一维数组  $P_N[]$ 和  $P_M[]$ 内数据,在图像分割时自适应地忽略大截距小概率的像素信息,使自适应阈 值在计算过程中,能更快速定位,以满足实时性的需求.



图 5 图像像素概率密度信息数据图

Fig. 5 Image pixel probability density data map

图 6 图像分割效果图 Fig. 6 Image segmentation effect diagram



Fig. 4 Analysis of the trapezius

narrowband decision domain
# 4 结束语

分析原二维 Otsu 自适应阈值快速算法人为匡定轴截距形成斜方窄带判决域的缺陷,在没有增加 原算法复杂度的前提下,提出动态窄带斜方轴截距 N 和 M 的自适应选择方法.该方法能根据图像自身 特征自动地建立斜方窄带判决域,克服原快速算法存在的缺陷.在分析图像像素概率密度信息基础上, 考虑图像处理时实时性要求,设立了自动忽略大截距小概率的像素信息准则,对建立的斜方窄带判决域 进一步优化调整.改进后的二维 Otsu 自适应阈值快速算法可以适应图像分割的实际工况,在实验验证 中取得了良好的图像分割效果.

#### 参考文献:

- [1] 章毓晋.图像分割评价技术分类和比较[J].中国图形图像学报,1996,1(2):151-157.
- [2] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on System Man and Cybernetic, 1979, 9(1):62-66.
- [3] 刘建庄,栗文青.灰度图像的二维 Otsu 自动阈值分割方法[J]. 自动化学报,1993,19(1):101-105.
- [4] 郝颖明,朱枫.二维 Otsu 自适应阈值的快速算法[J].中国图像图形学报,2005,10(4):484-488.
- [5] 杨金龙,张光南,厉树忠,等. 基于二维直方图的图像分割算法研究[J]. 激光与红外,2008,38(4):400-403.
- [6] 吴一全,潘喆,吴文怡,等.二维直方图区域斜分的最大熵阈值分割算法[J].模式识别与人工智能,2009,22(1):162-168.
- [7] 范九伦,雷博.灰度图像最小误差阈值分割法的二维推广[J].自动化学报,2009,35(4):386-393.
- [8] 陈琪,熊博莅,陆军,等.改进的二维 Otsu 图像分割方法及其快速实现[J].电子与信息学报,2010,32(5):1100-1104.
- [9] 朱齐丹,荆丽秋,毕荣生,等. 最小误差阈值分割法的改进算法[J]. 光电工程,2010,37(7):107-113.
- [10] 梁义涛,庞蕊,朱远坤.灰度图像二维 Otsu 折线阈值分割法[J].计算机工程与应用,2012,48(33):178-182.
- [11] 张新明,李振云,孙印杰,等.快速二维直方图斜分最小误差的图像阈值分割[J].电光与控制,2012,19(6):8-12.
- 「12] 李森,杨恢先.改进二维直方图区域划分的阈值分割方法研究「J].光电子・激光,2013,4(7):1426-1433.
- [13] 何志勇,孙立宁,陈立国.Otsu 准则下分割阈值的快速计算[J].电子学报,2013,41(2):267-272.

# Improvement for 2D Otsu Adaptive Threshold Fast Algorithm

# QIAN Wei-xing<sup>1,2</sup>, HUANG Li-ya<sup>2</sup>

(1. Electronic Information College, Hangzhou Vocational and Technical College, Hangzhou 310018, China;

2. School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** Base on the characteristics of the trapezius narrowband verdict scope of 2D Otsu adaptive threshold fast algorithm. Through the establishment of distribution data of the information association between narrowband trapezius intercept and image pixel two-dimensional probability density, this paper proposes a dynamic trapezius intercept narrowband adaptive selection method without increasing complexity. The experimental result has demonstrated that the improved fast algorithm of two-dimensional Otsu adaptive threshold was more adapted to the actual condition of image segmentation, and has achieved good effect.

Keywords: image segmentation; 2D Otsu; trapezius narrowband; adaptive intercept

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 吴逢铁)

**文章编号:**1000-5013(2015)04-0432-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.04.0432

# 增强现实技术的虚拟景区信息系统

# 苏会卫1,李佳楠2,许霞1

(1. 桂林旅游学院 旅游与休闲管理系,广西 桂林 541004;2. 贵州财经大学 管理科学学院,贵州 贵阳 550025)

**摘要:** 针对传统旅游模式智能化问题,设计并实现基于增强现实技术的虚拟实境空间系统,利用增强现实技术,将二维设计操作移植到三维环境中形成三维交互建模,实现三维虚拟环境定位实体场景和人机交互体验. 结果表明:该系统为用户创造了新的旅游体验方式与平台,也验证了基于增强现实技术的虚拟景区信息系统的可行性,改进了增强现实技术中存在的技术瓶颈.

关键词: 增强现实; 虚拟景区; 三维建模; 用户体验

**中图分类号:** TP 391 文献标志码: A

旅游业被确定为我国国民经济中的朝阳产业,是国家战略性支柱产业.日本东京街头的 ibutterfly 虚拟游览项目<sup>[1]</sup>、美国的迪斯尼乐园,以及手机上的增强现实程序都出现各种立体的动画人物,并可进 行互动<sup>[2]</sup>.圆明园采用增强现实技术(augmented reality technique,简称 AR)完成建筑物的虚拟重建, 用户在园中戴上特殊三维眼镜能够观览到当年皇家园林原貌<sup>[3]</sup>.在景点入口处,游客通过使用移动终端 可以下载基于增强现实技术的景区虚拟信息系统,系统带有景区导航功能.在景区特定的区域设置大幅 图形标记或小型二维码识别标签,游客可以通过扫描标签自动激活虚拟导游讲解系统,触发文物三维 360°展示功能<sup>[4]</sup>.游客还能直接和增强现实景区系统的虚拟人物或物体等进行方便有效的交互,并能与 其他游客进行基于景区 SNS(social networking services)的智能化联系<sup>[5]</sup>,让游客置身于数字化环境 中,真实场景与虚拟信息相得益彰,刺激创新型旅游增长点.我国在 AR 领域的研究起步较晚,集中在配 准技术和系统应用,学术层次有待拓展、涉及领域相对局限,未实现流程标准化.AR 技术仍未系统地基 于游客旅游角度开发便于操作的、能虚拟场景顺畅交流的信息系统,只有个别景区的应用性研究.从专 利申请的情况看,全球共有 108 个<sup>[6]</sup>,其中,我国仅有北京理工大学开发出相关系统<sup>[7]</sup>.本文研究了改进 型增强现实的关键技术,构建了基于云计算三维素材的大数据量存储和高速传输,实现了增强现实技术 的虚拟景区信息系统.

### 1 增强现实理论

增强现实技术是一种通过计算机技术实时地将不同的 3D 虚拟对象整合到真实的三维空间中的技术,加强用户在真实的环境中感受虚拟世界中的信息<sup>[8]</sup>.增强现实是虚拟环境(virtual environments, VE)的一种变化.增强现实技术能够通过将虚拟物体与真实物体相互叠加,令用户不仅能够体验到虚拟环境,而且能够感受并看到真实的环境.这种交互式方式使得虚拟世界和真实世界的联系更加紧密, 用户的体验也更加满足.

增强现实让人们能以普通方式运用自己所熟悉的日常对象,而不是键盘输入、凝神屏幕. 医生可以 观察添加的医药图像,儿童可以为垒高(LEGO)玩具编程,建筑工程师可以运用普通的纸面工程画和远

**收稿日期:** 2015-06-15

- 通信作者: 苏会卫(1980-),男,副教授,主要从事计算机应用技术、物联网的研究. E-mail:76908345@qq. com.
- **基金项目:** 广西教育厅科研项目(TB2014481); 广西桂林旅游高等专科学校重点项目(2013ZD02); 广西桂林市科 学研究与技术开发项目(20140302-3, GXRCGD201402)

方同事交流.增强现实不是让人们沉浸在人工创造的虚拟世界中,而是通过以丰富的数码信息与交流能 力来增强物理世界中的对象.

#### 1.1 技术支持

增强现实体现在它将虚拟世界与真实世界紧密相连,支撑 VR 的技术有以下 3 种.

1) 计算机图形图像技术(computer graphics technology). 在真实世界中,该项技术能够让使用增强现实的用户借助透明的护目镜看到投影,并叠加于真实物体上的虚拟对象,令用户感受到物理世界之外的景象.

2) 空间定位技术(space positioning technology)<sup>[9]</sup>. 空间定位技术通过三维环境注册系统,实现虚 拟物体跟随用户的身体移动,改变相应的位置,增强用户的体验效果.

3)人文智能(humanistic intelligence)<sup>[10]</sup>.人文智能是一种反馈回路中人和处理设备的信号处理框架,将自然赋予人的能力与处理设备交织在一起.人们可以利用人文智能获取自己的生活见识,并与他人进行更有效的交流.

#### 1.2 技术问题

1) 增强现实需要的 3D 素材缺乏,没有一个统一的素材云平台<sup>[11]</sup>.

2) 定位标记的微小抖动就会影响到增强现实的三维坐标和实物坐标融合.

3) 用户与虚拟物体的手势交互的灵敏度不高,有待改进.

#### 1.3 技术创新

1) 采用对人眼透明的水印基础场景上添加现实物体定标.

2) 根据读者所在环境的光照情况,系统分析采集的实物图像灰度分布,自动调整三维素材色彩,达 到虚实光照一致性.

3) 系统支持虚实碰撞检测的手势交互及手机触摸交互<sup>[12]</sup>. 增强触摸的连贯性、真实性,能带来很好的用户使用体验.

#### 1.4 应用拓展

1) 在传统的旅游项目引进虚拟体验技术<sup>[13]</sup>,以全新的 3D 立体展示方式为观光模式注入新生活力.突破性应用形态的涌现创造全新的用户观赏体验.

2)新的数字讲解方式,用户与虚拟景区进行主动交流而非被动信息接受.增强现实技术可以预先 设计一些场景人物进行虚拟投影,游客可以通过虚拟设备触发系统<sup>[14]</sup>和虚拟人物进行对话.

3)用增强现实技术可很好地对少数民族文化遗产进行保护.把少数民族文化遗产于旅游业发展联系起来,在一定程度上"活化"传统文化.

### 2 技术方法及实现

系统利用识别图像匹配技术获得注册信息,使其成为适用于旅游景点的增强现实系统.系统将移动 终端作为图像显示和获取设备,将摄像头拍摄到的图像与事先存储的识别图在移动终端中进行匹配分 析运算,获取输入图像注册信息.据此,对事先已经渲染过的虚拟三维模型进行信息的调用.将其与移动 终端的视频输入设备获取真实的画面进行叠加,最后,将完成虚拟与现实融合的增强画面显示于移动终 端的屏幕上.这一方法允许用户在任何环境下进行操作,从而不受诸如天气、地理位置等外界因素的影 响.系统将移动终端作为图像采集与显示设备,其便携的特点促成了系统导航功能的诞生.

#### 2.1 建立三维旅游素材服务平台

对纸面印刷二维码的快速识别,读取三维素材标记等数据,查找或下载对应的素材到移动终端.

1) 采用 python 脚本语言<sup>[15]</sup>,可以实现服务器的快速开发,具有高速和高并发的优秀特性.同时采用 3DMax 制作三维素材<sup>[16]</sup>,并将它们通过服务器后台批量导入素材库,自动产生标记,导出二维码提供印刷,为终端获取信息提供支持.

2)在掌握二维码边缘的图形特殊性的情况下,采用特征识别的方法<sup>[17]</sup>,在设备的拍摄画面中完整获取二维码图像,并将二维码图像以外的内容清空.

3) 对图像进行二值化处理,得到黑白的画面,再结合 Unger 提出的平滑算法去除图像上的杂散的 点<sup>[18]</sup>,对图像进行降噪,得到比较清晰的二维码.

4) 对处理后的图像再次进行特征识别,主要为了获取二维码的偏转角度,并对图像进行旋转,获得 了较为精确的二维码图像.

5) 对二维码进行译码,获取其中包含的信息.

#### 2.2 三维注册

以虚实融合的方式,使用实时跟踪摄像机,完成三维虚拟环境定位,实体场景中的注册位置是 AR 中一个关键三维注册技术.采用改进的三角点 Mark 识别法<sup>[19]</sup>,主要利用 Mark 图像信息,结合摄像头 参数采用透视投影成像原理来获得变换矩阵信息,从而进行三维坐标在二维实物坐标上的注册.然而, 显式的 Mark 图像将会对杂志内容产生较大程度上的影响,借鉴以图像为载体的数字水印技术,将"看 不见的"Mark 图像信息加入到杂志图像上,终端通过规定的规则对图像进行处理识别出 Mark 图像.

#### 2.3 素材亮度值和阴影的添加

基于 Mark 识别法完成精确注册,确定虚拟场景和真实环境相互的阴影、遮挡与光照的一致性效果.为了使设备生成的虚拟场景更加真实地与周围环境融合,需要对嵌入的虚拟场景进行真实感渲染.

#### 2.4 手势交互和人机交互体验

为了使真实场景中的虚拟信息更加自然地交互,拟采用手势识别交互和碰撞检测的结合技术增强 用户的体验.对人手进行三维建模,选取 27 维的一只人手,将其分解成 15 个 6 维的指节,别具匠心地 "拆零"人手,进而,依照指节与指节的绑定关系,"组装"匹配人手,即达成对人手每根手指的精准追踪. 为确保动态手势识别和人手跟踪能在低维的层级潜变量空间顺利开展,采用基于三维人手运动的层级 潜变量空间研究,增强手势跟踪和识别精确度.建立手势数据库记录系统中可能出现的手势模型,通过 对人手手势的正确识别,并结合碰撞检测技术,产生对应的三维动画效果增强用户的体验.

#### 2.4 原始内容图像的处理

首先,确定将要添加 Mark 图像的的区域,分析区域图像获取亮度分步信息. 然后,添加 Mark 图像的区域内多对特征点(以中心对称),将每对点中一个亮度值加一,另一个减一,不影响整个图像平均亮度. 最后,将处理后的图像存储印刷到纸面,用于提供 Mark 标示.

设备识别是分析处理图像,获得亮度分布,再根据上面二维码中记录的特殊规则定位出 Mark 图像的位置,获取 Mark 图像.在识别出 Mark 图像后,获取特征图的 4 个顶点,计算变换矩阵 h, 拟合初始特征模板.

假设所有顶点均被定位,则遵从初始算法,开展识别跟踪.假设小于两个顶点被定位,那么识别不成功;若是3个顶点被定位,则特征图形只可见一部分,另需计算特征图形坐标系与显示器屏幕坐标系和 摄像机坐标系之间的变换关系,以下是详细步骤:

1)选择罗伯特·哈拉利克提出的算法<sup>[20]</sup>,获得3个点在显示器坐标系中的坐标,并计算3个顶点 位于摄像机坐标系中对应点的坐标,获取4组大致的对应点坐标集合.

2)依此对4组可能的解计算对应的投影变换矩阵,特征图形坐标系与显示器屏幕坐标系的变换关系公式为

$$\boldsymbol{h} \begin{bmatrix} \boldsymbol{u} \\ \boldsymbol{v} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1,1} & C_{1,2} & C_{1,3} \\ 0 & C_{2,2} & C_{2,3} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & r_{1,3} & t_1 \\ r_{2,1} & r_{2,2} & r_{2,3} & t_2 \\ r_{3,1} & r_{3,2} & r_{3,3} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{X} \\ \boldsymbol{Y} \\ \boldsymbol{Z} \\ 1 \end{bmatrix} = \boldsymbol{C} \boldsymbol{T} \begin{bmatrix} \boldsymbol{X} \\ \boldsymbol{Y} \\ \boldsymbol{Z} \\ 1 \end{bmatrix}.$$
(1)

式(1)中:矩阵 C 为摄像机的内部参数矩阵,摄像机定标后为已知参数;矩阵 T 为待求的变换矩阵.

借助平面几何原理,构建3个定位点组成平面坐标系.显示器屏幕坐标系与特征图形坐标系的变换 矩阵为 T<sub>1</sub>,T<sub>1</sub> 可以表示为

$$\mathbf{T}_{1} = \begin{bmatrix} U_{x} & U_{y} & U_{z} & P_{1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$
 (2)

同理,可以求得摄像机坐标系与特征图形坐标系的变换矩阵  $T = T_2 T_1^{-1}$ .

3)应用最小二乘法,求解 4 组可能的解,计算出的 4 个变换矩阵,还原 4 组特征图形顶点的坐标. 采纳精确度最高的矩阵,形成目前图像对应的变换矩阵.依据图像分析,获取最小的图像顶点与恢复的 顶点之间的距离的平方和.

# 3 开发实例

对于原始算法,使用 Matlab 等建模工具进行模拟仿真.对于软件原型,最初可以通过打印在纸质上的二维码,通过电脑摄像头进行试验;后期可对有图形标记的印刷品,通过苹果手机、Android 手机等设备进行实验和测试.

测试人员模拟游客游览,使用安卓平板电脑,运行恐龙公园景区增强现实移动 APK 程序.使用摄像头对准恐龙二维图形标记进行扫描,如图 1 所示.系统自动定位到图形标记,并现实虚拟的三维恐龙 模型,叠加到真实的摄像头场景中.单移动设备平移或旋转时,三维恐龙会跟随图形标记一起旋转,灯光 和颜色会调整到最佳状态,如图 2 所示.三维模型在展示的同时能嵌入音乐或语言解说,对恐龙的种类、 特性、生活场景等进行详细介绍.游客还能通过平板电脑的触摸屏选中恐龙模型,放大、缩小、360°旋转 模型,阅读介绍文字,添加标注等,实现与增强现实场景的交互,大大提高游览的乐趣,丰富游客的信息 获取量.



图 1 制作二维图形标记 Fig. 1 Make 2D graphics Mark



图 2 立体恐龙投影 Fig. 2 Stereo projection of dinosaurs

在景区内的特色服装拍摄区,游客通常或穿上少数名族服装、历史朝代服装或动漫主题服装等进行 拍摄.通过开发的增强现实系统的服装试穿模块,游客可以使用移动终端摄像头进行自拍,使用触摸式 交互组件.各种景区主题相关的 3D 素材都会存储在系统云端服务器,游客可以从海量的素材中选择自 己喜欢的帽子、衣服、道具等进行拍摄,增加了旅游的乐趣,给顾客带来全新的体验.

## 4 结束语

从虚拟景区的角度出发,改进了增强现实技术中的标记定位技术、图形现实算法以及虚拟交互模 块,重点探讨虚拟物体与实景空间合成的一致性问题.游客置身于数字化环境中,真实场景与虚拟信息 交相辉映,增强现实系统可很好地对文化遗产进行保护.另外,社交网络技术 SNS 也被融入到系统中, 增强游客和导游之间的互动是虚拟现实应用研究领域中一种新的尝试.结果表明:增强现实技术将民族 文化遗产与旅游业发展联系起来,在一定程度上"活化"传统文化,并在在航天、军事、建筑规划等领域有 着广泛的应用前景.未来将进一步研究虚拟与真实物体之间的遮挡、碰撞,以及虚拟物体的光照、阴影等 问题,使得虚实进行更好地结合.

#### 参考文献:

- [1] 李季,杨长青.故宫博物院近期对外及港澳台地区的文化交流[J].故宫博物院院刊,2012,55(3):6-15,160.
- [2] 郭葆锋.建设设计中的虚拟现实[J].华侨大学学报:自然科学版,2001,22(3):284-287.
- [3] 范承啸,韩俊,熊志军,等.无人机遥感技术现状与应用[J].测绘科学,2009,34(5):214-215.

- [4] 王聪华,林宗坚. UAVRS影像空中三角测量实验研究[J]. 测绘科学,2007,32(4):41-43.
- [5] 高宇,邓宝松,杨冰,等.基于增强现实的虚拟实景空间的研究与实现[J].小型微型计算机系统,2006,30(1):146-150.
- [6] 陈新玺,李浩,张曼祺.普通数码相机构像畸变差两种检校模型的比较[J].北京测绘,2005,48(4):50-54.
- [7] 罗自荣,常明,肖人彬.面向虚拟环境的场景管理关键技术及其实现研究[J].系统仿真学报,2003,15(6):891-894, 897.
- [8] 张岸,庄剑顺,齐清文,等.基于增强现实技术的纸质地图增强表达与交互[J].热带地理,2012,32(5):476-480.
- [9] 连镇华. 无人机航摄相片倾角对立体高程扭曲的影像分析[J]. 地理空间信息,2010,8(1):20-22.
- [10] 常勇,施闯.基于增强现实的空间信息三维可视化及空间分析[J].系统仿真学报,2007,19(9):1991-1995,1999.
- [11] 苏会卫,何原荣,聂菁,等.基于物联网的绿色建筑在城市碳减排的应用研究[J].自然灾害学报,2014,23(6):88-94.
- [12] 石勇,许世远,石纯,等.基于情景模拟的上海中心城区居民住宅的暴雨内涝风险评价[J].自然灾害学报,2011,20 (3):177-182.
- [13] 汪永旗,王惠娇. 旅游大数据的 MapReduce 客户细分应用[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2015,36(3):292-296.
- [14] 王峰,刘仁义,刘南. WebGIS 和虚拟现实技术在旅游业发展中的应用研究[J]. 浙江大学学报:理学版,2005,32 (6):706-710.
- [15] 符慧兰. 虚拟旅游与现实旅游的有机对接模式与功能互补性探讨[J]. 旅游纵览:行业版, 2013, 2(5):54-56.
- [16] 李志飞.论旅游景区的 e 化管理[J]. 华侨大学学报:哲学社会科学版,2006,24(4):73-77.
- [17] 孙敏,陈秀万,张飞舟,等. 增强现实地理信息系统[J]. 北京大学学报:自然科学版,2004,40(6):906-913.
- [18] 胡芬,张进.虚拟旅游体验者满意感影响因素研究[J].湖北大学学报:哲学社会科学版,2013,40(3):129-132.
- [19] 郭艳华.基于信息依赖的旅游体验增强技术研究[J].经济论坛,2011,25(8):147-149.
- [20] 陈靖,王涌天,林精敦,等.基于增强现实技术的圆明园景观数字重现[J].系统仿真学报,2010,22(2):424-428.

# Virtual Scenic Spot Information System Research Based on Augmented Reality Technique

SU Hui-wei<sup>1</sup>, LI Jia-nan<sup>2</sup>, XU Xia<sup>1</sup>

(1. College of Tourism and Recreation Management, Guilin Institute of Tourism, Guilin 541004, China;

2. School of Management Science, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang 550025, China )

**Abstract**: In view of the traditional tourism mode intelligence problem, design and implement of virtual reality space system based on augmented reality technique. Migrating 2D design operation into 3D environment to form 3D interactive modeling by augmented reality technology, and realize 3D virtual environment to locate entity scene and human-computer interactive experience. Results show that the system creates a new way of tourism experience and platform for user, and also verify the feasibility of the virtual scene spot information system based on augmented reality technology. **Keywords**: augmented reality; virtual scenic spot; 3D modeling; user experience; user experience

augmented rearry; virtual scenic spot; 5D modeling; user experience; user experience

(责任编辑:陈志贤 英文审校:吴逢铁)

文章编号:1000-5013(2015)04-0437-06

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.04.0437

# 采用绝对值反馈的混沌系统投影同步的电路实现

# 黄苗玉, 闵富红, 王恩荣

(南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

**摘要:** 针对变形蔡氏电路的全状态混合投影同步(FSHPS)问题,提出一种非线性反馈同步控制方案.在响应系统中引入关于状态变量的绝对值函数进行反馈控制,实现全部状态变量在比例因子相同和相异情况下的投影同步.利用 Multisim 软件设计模块化的同步电路,数值仿真和硬件实验结果表明:文中的全状态混合投影同步方案具有有效性和可行性.

关键词: 全状态混合投影同步;蔡氏电路;反馈控制;非线性;绝对值函数

**中图分类号:** TP 13 **文献标志码:** A

混沌同步在保密通信、生物工程、信息科学等领域表现出巨大的应用潜力,已成为非线性科学领域 中的热点课题之一<sup>[1-3]</sup>.自1990年 Pecora等<sup>[4]</sup>首次在电子线路中实现混沌同步研究后,混沌同步已发 展出完全同步、反同步、广义同步和投影同步等多种方式<sup>[5-9]</sup>.近年,Hu等<sup>[10]</sup>将投影同步推广到全状态 混合投影同步,即对于维数相同的混沌系统,其对应状态变量之间拥有独立的比例因子.由于比例因子 可以任意组合,因而全状态混合投影同步囊括了完全、反相和混合同步等多种同步方式.这种特殊的同 步现象在实现数字保密通信的安全快速传输方面有着重要的应用前景,并初步取得了一些研究成 果<sup>[11-14]</sup>.Giuseppe等<sup>[13]</sup>在驱动系统中引入一个标量同步信号作为新的驱动系统,再设计控制器以实现 混沌系统的全状态混合投影同步.薛怀庆等<sup>[14]</sup>基于反馈控制原理,提出一种不需要进行李雅普诺夫稳 定性证明的同步控制器,实现了混沌系统的全状态投影同步.但上述方法仅从理论分析和数值仿真角度 进行研究,设计的控制器较为复杂,不易进行电路实现.本文基于非线性反馈控制理论,提出一种利用绝 对值函数进行反馈控制的同步方案.

### 1 问题描述与系统模型

考虑两个非线性混沌系统,即

$$\dot{x}(t) = F(x), \tag{1}$$

$$\dot{y}(t) = G(y) - u. \tag{2}$$

式(1),(2)中: $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$ , $y = (y_1, y_2, \dots, y_n) \in \mathbb{R}^n$  分别为驱动系统和响应系统的状态变 量;u 为待设计的控制器.如果存在一个非零常数矩阵  $\alpha = \text{diag}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 使两系统状态向量 的投影误差系统满足

 $\lim_{i \to \infty} \|e\| = \lim_{i \to \infty} \|y - \alpha x\| = \lim_{i \to \infty} \|y_i - \alpha_i x_i\| = 0, \qquad i = 1, 2, \cdots, n,$ (3) 则该驱动系统和响应系统之间是全状态混合投影同步.

蔡氏电路是目前众多混沌电路中最具代表性的一种,其典型的电路结构已成为理论和实验研究混沌的一个范例.用函数 *x* | *x* | 代替蔡氏电路中分段函数可得非光滑变形蔡氏电路<sup>[15]</sup>,其数学模型为

**收稿日期:** 2014-09-23

- 通信作者: 闵富红(1972-),女,副教授,博士,主要从事非线性系统混沌分析与控制的研究. E-mail:minfuhong@njnu.edu.cn.
- 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075215,51475246);江苏省自然科学基金资助项目(BK20131402)

$$\begin{array}{c} \dot{x} = \alpha [y - g(x)], \\ \dot{y} = x - y + z, \\ \dot{z} = -\beta y. \end{array}$$

$$(4)$$

式(4)中:g(x) = ax + bx |x|,a,b为参数变量;x,y,z为状态变量; $a,\beta$ 为系统参数. 当a = 10, a = -1/6, b = 1/16时,参数 $\beta$ 的变化对系统运动状态的影响,如图1所示.图1中:x为状态变量.由图1可知:当  $\beta \in [15.935, 15.945] \cup [16.181, 16.700]$ 时,Lyapunov指数小于零,系统为周期状态;当 $\beta \in [15.800, 15.935) \cup (15.945, 16.181)$ 时,Lyapunov指数大于零,系统为混沌状态.



图 1 非光滑变形蔡氏电路系统随参数β变化时动力学特性

Fig. 1 Dynamic characteristics of non-smooth modified Chua's circuit system by varying parameter  $\beta$ 

# 2 全状态混合投影同步

#### 2.1 同步控制器的提出

以非光滑变形蔡氏电路为例,对其全状态混合投影同步问题进行研究.驱动系统和响应系统为模型 相同,初始值和系统参数均不相同的两个系统.设驱动系统为

$$\begin{array}{c} \dot{x}_{1} = \alpha \left[ y_{1} - (ax_{1} + bx_{1} \mid x_{1} \mid) \right], \\ \dot{y}_{1} = x_{1} - y_{1} + z_{1}, \\ \dot{z}_{1} = -\beta_{1} y_{1}. \end{array} \right\}$$
(5)

响应系统为

$$\begin{array}{c}
\dot{x}_{2} = \alpha \left[ y_{2} - (ax_{2} + bx_{2} \mid x_{2} \mid) \right] - u_{1}, \\
\dot{y}_{2} = x_{2} - y_{2} + z_{2} - u_{2}, \\
\dot{z}_{2} = -\beta_{2} y_{2} - u_{3}.
\end{array}$$
(6)

式(6)中: $u_1$ , $u_2$ , $u_3$ 分别为加在对应状态变量上的非线性控制器.状态误差信号  $e_1 = x_2 - p_1 x_1$ , $e_2 = y_2 - p_2 y_1$ , $e_3 = z_2 - p_3 z_1$ .其中, $p_1$ , $p_2$ , $p_3$ 为x,y,z的投影同步比例因子.根据式(5),(6),误差系统为

$$\begin{array}{c}
\dot{e}_{1} = \alpha \left[ e_{2} - (ae_{1} + bx_{2} \mid x_{2} \mid -bp_{1}x_{1} \mid x_{1} \mid) \right] - u_{1}, \\
\dot{e}_{2} = e_{1} - e_{2} + e_{3} - u_{2}, \\
\dot{e}_{3} = -\beta_{2} y_{2} - \beta_{1} y_{1} - u_{3}.
\end{array}$$
(7)

如果没有施加控制器,驱动系统和响应系统在初始条件和参数取值不同的情况下,系统的运动轨线 将大相径庭.如果设计合适的控制器对响应系统的运动状态加以控制,当时间趋于无穷时,可实现误差 e1,e2,e3 收敛于零,与驱动系统同步.以往的控制器设计<sup>[11-14]</sup>采用消除误差系统中的非线性项和反馈控 制相结合的方法,结构较为复杂.文中提出一种结构简单新颖的非线性反馈控制器,其数学模型为

$$\begin{array}{c} u_{1} = k_{1} \mid x_{2} - p_{1}x_{1} \mid, \\ u_{2} = k_{2} \mid y_{2} - p_{2}y_{1} \mid, \\ u_{3} = k_{2} \mid z_{2} - p_{3}z_{1} \mid. \end{array}$$

$$(8)$$

该控制器采用绝对值的形式,将误差信号始终以负值的形式反馈回响应系统,直到系统的误差为零.因此,可以根据需要,选择合适的比例因子  $p = [p_1, p_2, p_3]^T$  与控制增益  $k = [k_1, k_2, k_3]^T (k_1, k_2, k_3)$ 

大于 0),可实现驱动系统和响应系统同步的全状态混合投影同步.

在数值仿真中,采用 Runge-Kutta 法求解式(5),(6),驱动系统和响应系统的初值分别为(0.6,0.6, 0.6),(0.4,0.3,0.1),选取参数  $\beta_1 = 15.4$ , $\beta_2 = 16.4$ ,使两个系统分别处于双涡卷混沌状态和双周期状态.取比例因子 p 分别为 $[1/3, 1/3, 1/3]^{T}$ , $[1, 1/2, 1/3]^{T}$ ,对应的控制增益 k 分别为 $[40, 100, 40]^{T}$ , $[50, 200, 50]^{T}$ ,其同步误差曲线如图 2 所示.由图 2 可知:在绝对值控制器的作用下,误差信号(e)随时间(t)的增加快速趋于零,驱动系统和响应系统达到同步.



图 2 非光滑变形蔡氏电路同步误差曲线



#### 2.2 电路设计

基于混沌电路的模块化设计方法<sup>[16]</sup>,对式(5),(6)进行微分-积分转换,并采用线性电阻、线性电容、运算放大器(TL082CP)、乘法器(AD633JN,内部增益为 0.1)和二极管(IN5179)以实现非光滑变形 蔡氏电路的同步,如图 3 所示.其驱动电路的数学模型为

$$\frac{\mathrm{d}x_{1}}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{R_{4}C_{1}} \left[ \frac{R_{3}}{R_{1}} y_{1} - \frac{R_{3}}{R_{2}} \left( -\frac{R_{26}}{R_{25}} x_{1} + \frac{R_{26}}{R_{24}} \cdot 0.1 x_{1} | x_{1} | \right) \right],$$

$$\frac{\mathrm{d}y_{1}}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{R_{11}C_{2}} \left( \frac{R_{10}}{R_{7}} x_{1} - \frac{R_{10}}{R_{8}} y_{1} + \frac{R_{10}}{R_{9}} z_{1} \right),$$

$$\frac{\mathrm{d}z_{1}}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{R_{16}C_{3}} \left( -\frac{R_{15}}{R_{14}} y_{1} \right).$$
(9)

比较式(5)与式(9),可得各参数的表达式为

$$a = \frac{R_3}{R_1 R_4 C_1} = \frac{R_3}{R_2 R_4 C_1}, \qquad \beta = \frac{R_{15}}{R_{14} R_{16} C_3}, \qquad a = \frac{R_{26}}{R_{25}}, \qquad b = \frac{R_{26}}{R_{24}},$$

$$\frac{R_{10}}{R_7 R_{11} C_2} = \frac{R_{10}}{R_8 R_{11} C_2} = \frac{R_{10}}{R_9 R_{11} C_2} = 1.$$

$$(10)$$

式(10)中:令 $\alpha$ =10,a=1/6,b=1/16,则 $R_i$ =100 k $\Omega(i=1,2,3,4,7,8,9,11,15,16)$ , $R_i$ =10 k $\Omega(i=5, 6,10,12,13,17,18,19,20,22,23,26)$ , $R_{21}$ =5 k $\Omega$ , $R_{24}$ =16 k $\Omega$ , $R_{25}$ =60 k $\Omega$ .

为了在实际示波器中观测到混沌波形,需要提高混沌信号的频率.因此,将 $C_1$ , $C_2$ , $C_3$ 的值统一缩 小为原来的 1/100,即由理论上的 1  $\mu$ F 置换成 10 nF. $\beta$ 的取值则由  $R_{14}$ 决定, $R_{14}$ 采用 100 k $\Omega$  的可调电 阻,改变  $R_{14}$ 的值可以得到混沌系统的不同运动状态.

绝对值非线性反馈控制器的电路为虚线表示的中间部分(图 3),可调电阻  $R_{54}$ , $R_{64}$ , $R_{74}$ 分别用来调 节  $p_1$ , $p_2$ , $p_3$  的取值,可调电阻  $R_{62}$ , $R_{72}$ , $R_{82}$ 分别用来调节  $k_1$ , $k_2$ , $k_3$  的取值,当 $R_{53}$  = $R_{55}$  = $R_{63}$  = $R_{65}$  =  $R_{73}$  = $R_{75}$  =10 kΩ 时,有

$$k_1 = \frac{R_{29}}{R_{62}R_{30}C_4}, \qquad k_2 = \frac{R_{36}}{R_{72}R_{37}C_5}, \qquad k_3 = \frac{R_{41}}{R_{82}R_{42}C_6},$$
 (11)

$$p_1 = rac{2}{rac{R_{54}}{R_{56}} + 1}, \qquad p_2 = rac{2}{rac{R_{64}}{R_{66}} + 1}, \qquad p_2 = rac{2}{rac{R_{74}}{R_{76}} + 1}.$$
 (12)

实际电路中运算放大器(TL082CP)的输出限幅为±13.5 V,若要在其线性工作区域实现同步控

制,则需要对比例因子的取值范围进行进一步分析.由式(12)可知: $R_{54}/R_{56}$ , $R_{64}/R_{66}$ , $R_{74}/R_{76}$ 的范围为 [0,+∞),当其为0时,即 $R_{54}$ , $R_{64}$ , $R_{74}$ 取0,则 $p_1 = p_2 = p_3 = 2$ ;当其为+∞时,即 $R_{56}$ , $R_{66}$ , $R_{76}$ 取0时,则  $p_1 = p_2 = p_3$ 无限趋近于0.因此,同步控制电路的比例因子取值范围为(0,2],不仅可以实现驱动系统与 响应系统的完全同步,还可以在运放的线性工作范围内实现对驱动系统状态变量的合理缩小与放大.



图 3 同步电路原理图

Fig. 3 Principle diagram of synchronization circuit

为了验证同步电路的有效性,在保持电路其他参数不变的情况下,将 $R_{14}$ , $R_{40}$ 调为 66,61 k $\Omega$  的阻 值,电容初始值设为 $C_1(0)=0.6$  V, $C_4(0)=0.4$  V,使驱动系统和响应系统分别处于双涡卷和双周期两 种运动状态.按照数值仿真将比例因子 p 分别设为 $[1/3,1/3,1/3]^{T}$ , $[1,1/2,1/3]^{T}$ ,对应的比例因子调 节电阻和反馈电阻的参数调节至 $R_{54}=R_{64}=R_{74}=50$  k $\Omega$ , $R_{62}=R_{82}=25$  k $\Omega$ , $R_{72}=1$  k $\Omega$ ,以及 $R_{54}=10$ k $\Omega$ , $R_{64}=30$  k $\Omega$ , $R_{74}=50$  k $\Omega$ , $R_{62}=R_{82}=20$  k $\Omega$ , $R_{72}=0.1$  k $\Omega$ ,其同步曲线如图 4,5 所示.由图 4,5 可 知:加入反馈控制器以后,响应系统的状态变量始终与驱动系统达到相位相同,幅值对应成比例,即实现 了两个系统的全状态投影同步.



Fig. 5 Timing diagram of synchronization with  $p_1 = 1, p_2 = 1/2, p_3 = 1/3$ 

#### 2.3 电路实验结果

根据图 3 进行硬件电路实验,元件的取值均参照仿真电路中的设置,实验结果如图 6~8 所示.响应 系统由周期轨道迅速转变为双涡卷状态的混沌运动,幅值和相位都精确跟随驱动系统,这与数值模拟与 电路仿真结果相一致,验证了所提出的全状态混合投影同步方案的有效性和可行性.







(b) 双周期状态





## 3 结束语

针对非光滑的变形蔡氏电路,提出一种基于绝对值函数的同步控制方案.设计并搭建驱动系统和响应系统的硬件电路,通过调节同步控制器的控制增益,可实现系统全状态变量在任意比例因子下的投影同步.虽然只是对变形蔡氏电路进行研究,但由于所设计的同步控制器无须已知驱动系统和响应系统的精确模型,可在不改变结构的情况下适用于一般混沌系统的同结构和异结构的投影同步.设计的同步方案结构简单,易于工程实现,能够从电路层面上对混沌的同步现象进行直观描述.考虑到电路系统易受外界干扰导致系统变化,而设计的控制器仍能使同步不受影响,具有较好的鲁棒性.

#### 参考文献:

[1] ABDULLAH A. Synchronization and secure communication of uncertain chaotic systems based on full-order and re-

duced-order output-affine observers[J]. Applied Mathematics and Computation, 2013, 219(19):10000-10011.

- [2] WU Xiang-jun, WANG Hui, LU Hong-tao. Modified generalized projective synchronization of a new fractional-order hyperchaotic system and its application to secure communication[J]. Nonlinear Analysis: Real World Applications, 2012,13(3):1441-1450.
- [3] 曹鹤飞,张若洵.基于单驱动变量分数阶混沌同步的参数调制数字通信及硬件实现[J].物理学报,2012,61(2): 020508(1-8).
- [4] PECORA L M, CARROLL T L. Synchronization in chaotic systems[J]. Physical Review Letters, 1990, 64(8):821-824.
- [5] 傅桂元,李钟慎.无源控制的超混沌 Chen 系统的自适应同步[J].华侨大学学报:自然科学版,2010,31(4):378-382.
- [6] 李钟慎,傅桂元,杨凯.不确定性超混沌系统的自适应鲁棒反同步[J].华侨大学学报:自然科学版,2012,33(2):129-133.
- [7] 张丽丽, 蕾友发. 自治混沌系统普适广义投影同步理论及应用[J]. 动力学与控制学报, 2013, 11(2): 118-121.
- [8] SI Gang-quan, SUN Zhi-yong, ZHANG Yan-bin, et al. Projective synchronization of different fractional-order chaotic systems with non-identical orders[J]. Nonlinear Analysis: Real World Applications, 2012, 13(4):1761-1771.
- [9] 谢勇,姚洪兴,张芳.时滞驱动:响应网络系统的函数投影同步[J].复杂系统与复杂性科学,2012,9(4):50-54.
- [10] HU Man-feng, XU Zhen-yuan, ZHANG Rong, et al. Parameters identification and adaptive full state hybrid projective synchronization of chaotic (hyper-chaotic) systems[J]. Physics Letters A, 2007, 361(3):231-237.
- [11] 阿布都热合曼·卡的尔,王兴元,赵玉章.统一超混沌系统的投影同步[J].物理学报,2011,60(4):040506(1-5).
- [12] 黄露,唐驾时,符文彬.异结构超混沌系统动力学分析和同步控制策略研究[J].动力学与控制学报,2012,10(1): 43-47.
- [13] GIUSEPPE G, DAMON A M. Dead-beat full state hybrid projective synchronization for chaotic maps using a scalar synchronizing signal[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2012, 17(4):1824-1830.
- [14] 薛怀庆,彭建奎,安新磊,等.分数阶混沌系统全状态混合投影同步及在保密通信中的应用[J].信息与控制,2012, 42(2):229-235.
- [15] 邓杰生,文剑锋,钟国群,等.具有 x | x | 非线性的蔡氏电路[J]. 控制理论与应用,2003,20(2):223-227.
- [16] 李亚,禹思敏,戴青云,等.一种新的蔡氏电路设计方法与硬件实现[J].物理学报,2006,55(8);3938-3944.

# Chaotic Projective Synchronization Based on Absolute Feedback and Its Circuit Implementation

# HUANG Miao-yu, MIN Fu-hong, WANG En-rong

(School of Electical and Automation Engineering, Nangjing Normal University, Nangjing 210042, China)

**Abstract:** A synchronization method based on nonlinear feedback control is proposed for the full state hybrid projective synchronization (FSHPS) of modified Chua's system. The absolute function of states variable are introduced into the response system to realize the project synchronization in the same and different scale factor. The modularized synchronization circuit is designed and realized using Multisim. Numerical simulation and circuit implementation show the effective-ness of the proposed scheme in the paper.

Keywords: full state hybrid projective synchronization; Chua's circuit; feedback control; nolinear; absolute function

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 杨建红)

**文章编号:**1000-5013(2015)04-0443-06

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.04.0443

# 一种改进的动脉 CT 图像去噪方法

# 陈萍芸,林春深

(福州大学石油化工学院,福建福州 350000)

摘要: 针对常用医学图像去噪方法中存在去除噪声不全面、图像清晰度损失的缺点,提出一种改进型的方法.根据 Brige-Massart 惩罚策略,由图像自身噪声确定每层阈值,根据控制变量法确定其他的相关因素.结合图像去嗓目的与去嗓效果,根据计算机断层扫描(CT)图像动脉区域的灰度值特点,对阈值进行硬阈值化处理.最后,对图像进行仿真对比实验,实验结果显示:中值小波去嗓的峰值信噪比(R<sub>PSN</sub>),标准信噪比(R<sub>SN</sub>)与均方差(*E*<sub>MS</sub>)数值都优于其他去嗓方法.

关键词: 计算机断层扫描图像;图像去噪;动脉;小波变换;阈值;中值滤波 中图分类号: TP 391.4 **文献标志码**: A

动脉瘤(aneurysm)是指动脉呈瘤样扩张,其破裂后的致死率非常高,达到 65%至 85%,其主要的治疗手段之一是腔内修复术(EVAR)<sup>[1]</sup>. 修复前期需要根据计算机断层扫描(computed tomography,CT) 图像的诊断确定相应器材,因此,动脉 CT 图像的诊断在腔内修复术中占有极为重要的地位. 为了便于 观察图像,需要对图像进行分割,再进行诊断测量. 但医学图像在成像、传递与分割的过程中都存在不同 程度的噪音干扰. 噪声会影响对图像的诊断,也使得图像在进一步分割处理中产生过分割现象<sup>[2]</sup>,从而 影响支架的选择. 医学上常用于图像去噪方法有均值滤波去噪、中值滤波去噪、小波变换去噪等<sup>[3-5]</sup>. 但 均值滤波去噪的固有缺陷是对图像的噪声与边缘都进行平滑处理. 因此,易破坏图像高频细节,导致图 像的模糊化. 而中值滤波不但运算速度快还可以很好地保护图像的边缘信息,使得图像复原性较好,但 其对高斯噪声去除的效果并不理想. 基于以上问题,本文根据动脉 CT 图像重点保留动脉高频区域的特 点,提出一种改进型中值小波去噪方法.

## 1 CT 图像与噪声

CT 成像技术是根据人体不同组织对 X 线的吸收与透过率的不同,应用灵敏度极高的仪器对人体进行测量,然后将测量所获取的数据输入电子计算机,电子计算机对数据进行处理后,可根据检查人体被检查部位的断面或立体图像来发现病变位置<sup>[6]</sup>.

CT 图像的形成过程中产生的噪声是指在扫描过程中,其像素 CT 值偏离标准值之差.某物质的 CT 值 V<sub>CT</sub>等于该物质的衰减系数 μ<sub>m</sub> 与水的吸收系数 μ<sub>w</sub> 之差,再与水的衰减系数 μ<sub>w</sub> 相比之后,乘以分度 因素 α.即

$$V_{\rm CT} = \alpha \times (\mu_{\rm m} - \mu_{\rm w}) / \mu_{\rm w}. \tag{1}$$

CT 值是用来反映物质密度,当物质的密度越高则 CT 值就越高,CT 值的单位为享氏单位(Hu).在进行图像处理过程中,将 CT 值换算成 CT 图像中的灰度来表示<sup>[7]</sup>.

文中所处理的动脉 CT 图像重点在于保留动脉部分,而动脉 CT 图像的特点是动脉与骨骼部分灰度值高,与周边像素反差明显,支架的选择需要对动脉精确的测量.因此,在对此类图像选择去噪方法要求在去除噪声的同时不能损失动脉边缘的高频信息.CT 图像的噪声主要可分为内部噪声与外部噪声

**收稿日期:** 2015-01-25

通信作者: 林春深(1976-),男,讲师,博士,主要从事过程装备与控制的研究. E-mail:183978819@qq. com.

基金项目: 国家质检总局科技计划资助项目(2010QK032)

两类<sup>[8]</sup>,外部噪声主要由电子器械运动与光电干扰产生;文中用表现形式相类似的高斯噪声与椒盐噪声 来模拟 CT 图像处理过程中产生的内外部噪声.

# 2 改进型中值小波去噪

#### 2.1 原始中值小波去噪

医学 CT 图像结构的复杂性决定了单一的去噪方法无法取得良好的去噪效果.由于小波阈值变换 去噪<sup>[9]</sup>具有低熵性、多分辨性、去相关性和选基灵活性等优点,成为传统医学图像去噪最常用的方法之 一,但其对于图像分割传递过程中产生的噪声抑制效果不理想.因此,采用中值滤波结合小波阈值的方 法对医学图像进行去噪.中值滤波<sup>[10]</sup>对椒盐噪声有很好的抑制效果,且操作简单,结合小波换滤波对高 斯噪声的抑制效果,可以去除绝大部分噪声.将中值滤波与小波阈值变换结合用于图像的去噪<sup>[11]</sup>,但这 种方法在对动脉 CT 图像去噪时仍会使图像高频部分受到损失,如图 1 所示.

原始型中值小波去噪采用固定全局阈值,其阈值的大小对图像去噪效果有很大的影响,阈值过大, 会导致图像高频部分的损失;过小,则导致去噪不彻底.原始型中值小波去噪对阈值采用软阈值化,增加 了图像高频部分的损失,使图像高频部分失真.针对这些问题,提出了一种改进型中值小波去噪方法,该 方法根据动脉 CT 图像中重点保留高频区域的特点,对阈值采用硬阈值化,并根据图像噪声的大小来确 定阈值以获得最适合图像去噪的阈值大小.







(b) 原始型中值小波去噪



#### 2.2 改进型中值小波去噪原理

改进型中值小波去噪的算法,如图 2 所示.改进型中值小波去噪在小波阈值之前先进行中值滤波. 运用 Birge-Massart 策略原则,分解图像特性,计算每层图像中的阈值用于去噪,取代了原始型中值小波 去噪中采用的全局阈值,以保留更多的图像边缘信息.对图像进行 3×3 中值滤波后,再进行小波阈值变 换处理,即按一定要求将图像进行小波的分解与重构.将图像视为二维矩阵,并假设其大小为 N×N,且 N=2n(n≥0).任何平方可积的二维函数都可以分解为最低分辨尺度上的平滑函数和更高尺度上的细 节函数<sup>[12]</sup>.

经小波变换后,图像信息能量对应幅值较大的小波系数主要集中在低频部分;而噪声能量则对应于 幅值较小的小波系数,分散于小波变换后的所有系数中.根据该特征设定一个阈值门限,在高频处(即细 节分量中),将所有小于该阈值的小波系数视为噪声部分将其置零去除.当一次的阈值去噪无法消除大 部分噪声时,则对未处理的低频部分再次进行小波分解与阈值去噪.

阈值的选取是在图像的小波分解变换后,将小波系数按绝对值递减的顺序存储于 m(k)中,计算通 过高频系数绝对值的中值,再将系数适当扩大得到每层的噪声标准差 σ,即

$$\sigma = \frac{\text{median}(\mid W_{h,v,d} \mid)}{0.674\ 5}.$$
(2)

式(2)中:median为中值滤波函数,其作用是获取水平,垂直和对角方向的高频部分.

根据 Brige-Massart 惩罚策略,通过极小化式的惩罚标准,有



图 2 改进型中值小波去噪算法图

Fig. 2 Algorithm diagram of improved median filter of wavelet de-noising

$$C(t) = \sum_{k \leq t} m^2(k) + 2\sigma^2 t(\alpha + \ln \frac{n}{t}), \qquad t = 1, 2, 3, \cdots, n.$$
(3)

式(3)中: $\alpha$ 为惩罚因子,用来调整由 Brige-Massart 惩罚策略获得的自适应于噪声水平的阈值,在对图像进行去噪时, $\alpha$ 其典型值为3;n 代表系数个数;当 $t = t_{min}$ 时,C(t)取得最小值,阈值 $T = |C(t_{min})|$ .

传统的小波去噪方法对阈值的处理通常有两种方法:硬阈值化与软阈值化.硬阈值化是指将大于阈 值的数保留下来,而将低于阈值的数全部置零.软阈值与硬阈值的不同之处在于将大于阈值的数乘以一 个数收缩保留下来.

硬阈值为

$$\boldsymbol{W}_{T} = \begin{cases} \boldsymbol{W}, & |\boldsymbol{W}| \ge T, \\ 0, & |\boldsymbol{W}| < T. \end{cases}$$
(4)

软阈值化为

$$\boldsymbol{W}_{T} = \begin{cases} \operatorname{sign}(\boldsymbol{W}) \left( \mid \boldsymbol{W} \mid -T \right), & \mid \boldsymbol{W} \mid \geq T, \\ 0, & \mid \boldsymbol{W} \mid < T. \end{cases}$$
(5)

式(5)中:W为图像二维变换后的系数矩阵;WT为阈值化后的小波系数矩阵.

采用软阈值的方法保持连续、无断点,不会发生激变,但对于绝对值大于阈值的系数采用 T 来缩减 使图像失真;而采用硬阈值方法在跳跃点产生激变,在图像高频部分引起变化,对于大于阈值的系数采 取直接保留,使图像高频区域不失真<sup>[13]</sup>.动脉 CT 图像的重点在于对高频区域的保真效果,因此,对阈 值采用硬阈值化处理.

# 3 改进型中值小波去噪的其他参数

#### 3.1 小波基的选择

小波基的选取要素<sup>[14]</sup>包括:正交性、紧支性、对称性、正则性及消失矩阵阶数.不同的小波基的运用 会产生不同的去噪效果,引入客观判断标准信噪比(*R*<sub>SN</sub>),峰值信噪比(*R*<sub>PSN</sub>)与均方差(*E*<sub>MS</sub>)来描述图像 去噪后的质量<sup>[15]</sup>.其定义为

$$R_{\rm PSN} = 10 \times \lg(\frac{(2^n - 1)^2}{E_{\rm MS}}), \qquad (6)$$

$$R_{\rm SN} = 10 \times \lg(\frac{\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} g(i,j)^2}{\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} [g(i,j) - f(i,j)]^2}),$$
(7)

$$E_{\rm MS} = \frac{\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} [g(i,j) - f(i,j)]^2}{M \times M}.$$
(8)

式(6)~(8)中:n 是每个采样值的比特数; $E_{MS}$ 是原图像与处理图像之间均方误差;g(i,j)为去噪后图像 灰度值;f(i,j)为去噪前图像灰度值; $R_{PSN}$ 或 $R_{SN}$ 大的表示图像质量好.因此,可以通过小波分析方法处

理前后的信噪比或误差来判断小波基的好坏.

满足正交性、紧支撑性及近似对称性的小波基有 DbN,SymN,CoifN 等小波基族. 三者的消失矩阵 阶数、支撑长度(1)及正则性都随着 N 的增加而增加,但去噪效果并不随着 N 的增大而提高.分别计算 三种小波系的信噪比,如图 3 所示,由图 3 可知,DbN 夫噪效果良好地集中在  $N=3\sim5$  与  $N=10\sim12$ 处:SymN 小波系则比较分散,在 N=5,8,12,14 夫噪效果都比较不错;文中选取小波基 db3 进行夫噪.

#### 3.2 分解层数的选择

变换层数对时频分辨率和小波系数的变化范围有一定影响.分解层数过少,可能导致去噪不彻底、 过多,则会导致信息丢失严重,因此,合理的分解层数有利于获得较好的重构质量[16],固定小波基,将分 解层数(n)从1到6逐一尝试,并计算此时的去噪质量,如图4所示.由图4可知:图像的去噪质量随着 分解层数的增加而下降.因此,在动脉 CT 图像去噪中,洗取的小波变换分解层数为1.



#### 实验与讨论 4

现选取福建省福州市某一医院心血管外科动脉病例的图片进行研究,对图像先进行部分截图,重点 突出动脉部分,并对图像加入混合噪声,以便肉眼观察去噪效果.分别用小波阈值去噪,原始中值小波去 噪与改进型小波去噪对图像进行处理,结果如图 5 所示.



(a) 加入混合噪声





1516



(c) 原始中值小波去噪 (d) 改进型中值小波去噪

图 5 图像去噪 Fig. 5 Image de-noising



仍存在大量噪声.肉眼判断带有很强的主观性与限制性, 为了可以更客地观评价图像的去噪质量,对三种去噪方 法分别计算其客观标准值 RPSN, RSN 与 EMS, 数据结果如 表1所示.

由表1可知:小波阈值去噪,原始中值小波去噪与改 进型中值小波去噪的 R<sub>PSN</sub>与 R<sub>SN</sub>呈递增趋势, E<sub>MS</sub>呈递减 趋势. E<sub>MS</sub>与 R<sub>PSN</sub>表示去噪后的图像与原图像间的失真

方式	$R_{ m PSN}/ m dB$	$R_{ m SN}/{ m dB}$	$E_{ m MS}$				
小波	56.602 0	65.073 2	0.020 2				
原始	58.812 3	69.673 8	0.006 9				
改进	58.999 9	69.869 1	0.006 1				

Tab. 1  $R_{\text{PSN}}$ ,  $R_{\text{SN}}$  and  $E_{\text{MS}}$  values of different

methods to remove different noise

程度,一般而言, E<sub>MS</sub>越小, R<sub>PSN</sub>越大, 表明去噪后的图像与原图像失真度越小, 图像质量越好. 信噪比

R<sub>SN</sub>越大,则说明混在图像信号中的噪声越小,图像去噪效果越好.

两种复合型去噪方法都抑制了图像绝大部分噪声,但原始中值小波去噪使得图像模糊化,而改进型 去噪方法则较为清晰,如图 6 所示.









图 6 两种复合型去噪方法细节图

Fig. 6 Two kinds of compound de-noising methods detail

为了充分说明该方法的有效性,现选取 10 组动脉图像(S1,S2,S3,…,S10)分别进行小波变换.原 始中值小波与改进型中值小波去噪,并进行标准值计算,如图 7 所示.





图 7 多组图像的 R<sub>PSN</sub>, R<sub>SN</sub>, E<sub>MS</sub> 值

Fig. 7  $R_{\text{PSN}}$ ,  $R_{\text{SN}}$  and  $E_{\text{MS}}$  values of different images

由图 7 可知:在 R<sub>PSN</sub> 与 R<sub>SN</sub>的数值大小上,改进型去噪方法高于其他方法,改进型去噪方法的 E<sub>MS</sub>数 值低于其他去噪方法的 E<sub>MS</sub>数值,因此,改进型去噪方法对图像的去噪效果优于其他去噪方法.由图 7 还可知:根据计算数值,改进型中值小波去噪的 R<sub>PSN</sub>平均提高 0.046 6 dB,R<sub>SN</sub>平均提高 0.084 9 dB,使 得图像去噪效果更好,图像高频区域清晰度也得到提升.

### 5 结束语

改进型中值小波去噪方法是基于 Birge-Massart 惩罚策略的原则,根据每层图像噪声来确定阈值, 并对阈值采用硬阈值化的方法,用于实现对动脉 CT 图像生成过程中产生的噪声的去除.将该方法应用 到具体病例图像的去噪,相对于小波变换去噪与原始中值小波去噪而言,其去噪效果以及图像清晰度保 持方面有了一定程度的提高.因此,该法可以用于图像进一步分析分割前的去噪.

#### 参考文献:

- PHYLLIS A, GORDON P A, BOULOS T. Treatment of abdominal aortic aneurysms: The role of endovascular repair[J]. AORN Journal, 2014, 100(3): 241-259.
- [2] 张利红,梁英波,支联合,等.基于多结构多尺度形态学梯度的医学图像边缘检测[J].激光杂志,2012(3):31-32.
- [3] SHREYAMSHA K. Image denoising based on non-local means filter and its method noise thresholding[J]. Signal, Image and Video Processing, 2013, 7(6):1211-1227.
- [4] CADENAS J, MEGSON G M, SHERRATT R S, et al. Fast median calculation method[J]. Electronics Letters, 2012,48(10):558-560.
- [5] CUI Hui-min, ZHAO Rui-mei, HOU Yan-li. Improved threshold denoising method based on wavelet transform[J]. Physics Procedia, 2012, 33:1354-1359.
- [6] 高丽娜,陈文革.CT技术的应用发展及前景[J].CT理论与应用研究,2009,18(1):99-109.
- [7] 朱浩栋,陈瑛,张鲁. 医学 CT 显示图像灰度归一化研究[J]. 国际生物医学工程杂志,2006,29(3):148-151.
- [8] 陈志安,潘勇,岳勇,等. CT 图像噪声相关因素的分析[J]. 中国医学影像技术,2001,17(12):1236-1238.
- [9] 熊江.基于小波变换的图像去噪[J].计算机科学,2007,34(7):232-234.
- [10] CADENAS J, MEGSON G M, SHERRATT R S, et al. Fast median calculation method[J]. Electronics Letters, 2012,48(10):558-560.
- [11] 李智,张根耀,王蓓,等.基于中值滤波和小波变换的图像去噪[J].现代电子技术,2014,37(13):72-74.
- [12] 朱希安,曹林.小波分析及其在数字图像处理中的应用[M].北京:电子工业出版社,2012:42-45.
- [13] 聂真真. 基于小波阈值去噪算法的研究[J]. 科教导刊, 2011, 18: 122-123.
- [14] 李月琴,栗苹,闫晓鹏,等.无线电引信信号去噪的最优小波基选择[J].北京理工大学学报:自然科学版,2008,28 (8):723-726.
- [15] 周玉林,毛家发,熊鹏荣.基于 SNR 和 PSNR 特征的净图定量描述方法的研究[J]. 上饶师范学院学报,2009,29 (3):81-85.
- [16] 黄兆杰,金思毅,王莉.化工过程强制去噪小波滤波最优分解层数的选取[J].青岛科技大学学报:自然科学版, 2013,34(3):260-264.

# **Research on an Improved De-Noising Method for Artery CT Images**

# CHEN Ping-yun, LIN Chun-shen

(School of Chemical Enginering, Fuzhou University, Fuzhou 350000, China)

Abstract: Because of other common medical image de-noising methods are not comprehensive in the process of image de-noising. It damages the image's definition, so this paper came up with a modified median wavelet de-noising method to de-noise. Used the Brige-Massart penalty policy and combined with the image itself noise to determine each layer threshold. Other variables are introduced by the control variable method in the process of de-noising. Combined with the Purpose and effect of image de-noising, the threshold did hard threshold processing based on computed tomography (CT) image grey value characteristics of artery territory. Lastly, through experiments, it is concluded that the  $R_{PSN}$ ,  $R_{SN}$  and  $E_{MS}$  of the improved de-noising method are superior to other methods.

Keywords: computed tomography; images de-noising; artery; wavelet transform; threshold; median filtering

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 吴逢铁)

**文章编号:**1000-5013(2015)04-0449-06

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.04.0449

# 磁性钯催化剂对 Suzuki-Miyaura 偶联反应的催化作用

俞洋1,吴翠玲1,王震1,张莹雪2,钱浩1

(1. 华侨大学 材料科学与工程学院,福建 厦门 361021;
 2. 华侨大学 信息科学与工程学院,福建 厦门 361021)

摘要: 以四氧化三铁/聚苯乙烯核壳结构的纳米微球为载体,通过傅克反应在其表面修饰高活性的大位阻 N 杂环卡宾配体,并利用 Suzuki-Miyaura 偶联反应考察此催化剂的综合性能.研究结果表明:制备的负载催化剂 易于分离,对溴代芳烃表现出极高的催化活性,对低活性的氯代芳烃也有良好的催化效果,且具有良好的可重 复使用性.

关键词: 负载催化剂;磁性载体;纳米微球;N杂环卡宾;Suzuki-Miyaura反应; 钯复合物 中图分类号: TQ 426.81 **文献标志码:** A

在 Suzuki-Miyaura 偶联反应中, 钯催化剂起到举足轻重的作用. 经过数十年的发展, 尽管均相催化剂的活性和对底物的适应性已经取得很大进步, 但其难以分离的缺点依然非常突出<sup>[1-4]</sup>. 负载型钯催化剂是解决上述问题的一个重要途径<sup>[5-8]</sup>. 纳米尺寸的磁性载体是一种优良的催化剂载体, 它所具备的超顺磁性, 在外加磁场的情况下可以快速分离, 而撤掉外加磁场后, 载体可以通过简单的方法进行再分散, 具有极好的可回收特性. 此外, 纳米尺寸的载体提供了较大的比表面积, 有效地减小了反应的传质阻力, 可以充分保持催化剂的催化活性<sup>[9-10]</sup>. 就 Suzuki-Miyaura 偶联反应而言, 负载型催化剂大致可以分为两个主要类型: 纳米钯负载催化剂和有机金属化合物型负载催化剂, 纳米钯催化剂通常表现出较高的活性, 但是副反应较多, 稳定性不足<sup>[11]</sup>. 有机金属化合物类负载催化剂, 一般是让载体修饰可以结合金属 钯原子的配体结构, 两者结合以后形成催化活性单位. N 杂环卡宾是近十年发展起来的一种新型配体, 具有成本低廉、制备简单、毒性小、稳定性高等优点. 它与膦配体一样, 是优良电子供体, 在一定程度上可以取代叔膦配体, 常被称为"仿膦配体"<sup>[12-13]</sup>. 本文研究固体磁性钯催化剂对 Suzuki 反应的催化作用.

# 1 实验部分

#### 1.1 主要实验原料

苯乙烯(减压蒸馏后备用);二乙烯基苯(减压蒸馏后备用);过二硫酸钾;七水合硫酸亚铁;六水合三 氯化铁;氨水(质量分数为25%~28%);无水乙醇;十二烷基磺酸钠;十六烷;碳酸钾;氢氧化钾;2,6-二 异丙基苯胺;乙二醛(质量分数为40%的水溶液);多聚甲醛;甲醇;甲酸(质量分数为80%);乙酸乙酯; 3-氯吡啶;N,N-二甲基甲酰胺;三氯甲烷;氯化钯;异丙醇(上海市国药集团化学试剂有限公司).

#### 1.2 实验仪器

RCT型磁力搅拌器(德国 IKA 集团);RW20型悬臂式搅拌器(德国 IKA 集团);KQ-100E型超声 波清洗器(江苏省昆山市超声仪器有限公司);TGA-50型热重分析仪(日本岛津公司);SmartLab型 X 射线衍射仪(日本理学株式会社);AA-7000型原子吸收分光光度计(日本岛津公司);6890型气相色谱 仪(美国安捷伦科技有限公司);7850型透射电子显微镜(日本日立公司).

**收稿日期:** 2014-12-17

通信作者: 钱浩(1974-),男,教授,博士,主要从事高分子化学的研究. E-mail:hquqh@126. com.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2013J01046)

### 1.3 纳米磁性微球负载催化剂的合成

催化剂的制备包括磁性载体的制备与表面功能化、N杂环卡兵配体的制备、配体的固载化金属的络合,其过程如图1所示.



#### 图1 催化剂的制备

Fig. 1 Preparation of magnetic palladium catalysts

1.3.1 磁流体的制备 在三口瓶中加入 200 mL 蒸馏水,24.3 g 六水合三氯化铁,17 g 七水硫酸亚铁, 在氮气保护下搅拌,使其充分溶解.向溶液中缓慢加入 60 mL 氨水和 4 g 油酸.升温至 90 ℃,保持 4 h. 整个反应过程持续通入氮气保护.反应结束后磁分离,用蒸馏水和无水乙醇充分洗涤烘干.将烘干后的 磁粒子加入辛烷中,配置成质量分数为 65%的磁流体.

1.3.2 纳米磁性高分子微球载体的合成与氯乙酰化 载体制备过程分为单体乳液的制备、磁粒子乳液的制备、两种乳液的融合并聚合等 3 个部分.分别取 0.04 g 十六烷,2.5 g 苯乙烯,0.5 g 二乙烯基苯,将 0.05 g 十二烷基磺酸钠溶解于 40 mL 水中.将上述液体混合,持续搅拌 3 h,搅拌速率为 800 r · min<sup>-1</sup>.取 0.04 g 十二烷基硫酸钠(SDS),溶解于 40 mL 蒸馏水中,加入 2 g 磁流体,超声搅拌 20 min.将磁粒子乳液缓慢倒入单体乳液中,调节转速至 200 r · min<sup>-1</sup>,搅拌 30 min 后,置于 80 ℃水浴锅恒温 15 min,加入 0.04 g 过硫酸钾引发乳液聚合,反应 24 h 后,通过磁分离,洗涤得到产物并干燥备用<sup>[14]</sup>.称取一定量的干燥磁球,在二氯甲烷中超声分散 20 min 后,置于圆周震荡反应器上震荡.向分散液中加入氯乙酰氯、三氯化铝,持续震荡反应一定时间.依次用四氢呋喃、N,N-二甲基甲酰胺、稀盐酸(0.5 mol · L<sup>-1</sup>)各洗涤 3 次.然后,用蒸馏水充分清洗,用 0.1 mol · g<sup>-1</sup>硝酸银溶液检验上清液,直到无白色混浊产生.干燥后可得到氯乙酰基化磁球.

1.3.3 配体的合成与负载 取 3.63 g 乙二醛溶液溶于 50 mL 甲醇中,加入 9.64 g 2,6-二异丙基苯 胺,再加入 0.25 mL 甲酸作为催化剂,常温磁力搅拌反应 48 h 后,过滤.用冰甲醇洗涤数次后,在 40 ℃ 条件下真空干燥.称取第一步产物 12.5 g 加入 100 mL 甲苯中,再加入 1 g 多聚甲醛,升温至多聚甲醛 大部分溶解(100 ℃).将温度降至 40 ℃,注射 4 mol・L<sup>-1</sup>的氯化氢的二噁烷溶液 8.25 mL,升温至 70 ℃,反应 5 h,停止加热,继续反应 24 h.产物用四氢呋喃充分洗涤,可得灰白色固体产物<sup>[15].1</sup>H NMR (500 MHz,CD<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>),δ值:10.11(s,1H),7.78(d,2H),7.65(t,2H),7.39(d,4H),2.44(s,4H),1.28 (d,12H),1.27(d,12H).将 1 g 干燥的氯乙酰化磁球超声分散在 20 mL 干燥的二氯甲烷中,加入 0.067 g 无水三氯化铝 30 min 后,再加入配体 0.23 g,继续搅拌 12 h.反应结束后,磁分离得到产品,依次用 N,N-二甲基甲酰胺、稀盐酸(0.5 mol・L<sup>-1</sup>)以及去离子水洗涤数次后烘干备用.

1.3.4 负载配体与金属的反应 将1g载体,6 mL 3-氯吡啶,1.2g碳酸钾依次加入单口瓶中,80 ℃水浴,搅拌 24 h.反应结束后用 N,N-二甲基甲酰胺和乙醇充分洗涤,干燥得到磁性钯固体催化剂<sup>[16]</sup>.

# 2 结果与讨论

#### 2.1 载体与负载催化剂的表征

2.1.1 磁粒子形貌和红外检测 磁粒子的透射电镜(TEM)照片及红外光谱图,如图 2 所示.由图 2(a) 可知:亲油性的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 颗粒,粒径均一,平均尺寸约为 10 nm,明显低于 30 nm 的超顺磁性临界尺寸.由 图 2(b)可知:590 cm<sup>-1</sup>为四氧化三铁吸收峰;2 925,2 861 cm<sup>-1</sup>存在亚甲基、甲基的 C-H 振动峰;1 443 cm<sup>-1</sup>为羰基和羟基耦合振动吸收峰;1 554 cm<sup>-1</sup>为碳碳双键吸收峰.由此可知:超顺磁性磁粒子表面接 枝了大量油酸分子链 CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>7</sub>CH=CH(CH<sub>2</sub>)<sub>7</sub>COOH.



图 2 磁粒子 TEM 照片和红外光谱图

Fig. 2 TEM photo and FTIR curves of magnetite particles

2.1.2 催化剂的形貌表征和磁质量分数检测 催化剂的 TEM 照片及热重分析(TGA)图谱,如图 3 所示.由图 3 可知:催化剂平均粒径约为 100 nm,磁质量分数约为 38%.通过催化剂在溶剂中的分散、磁分离以及再分散测试证明:在乙醇体系中超声分散 10 min 后,催化剂在 1 h 内不出现明显的沉降;在外加磁场作用下,1 min 之内绝大多数催化剂被分离,催化剂具有良好的分散性和磁分离特性,其结构与性能如图 4 所示.图 4 中:*M* 为饱和磁强度.



图 3 催化剂 TEM 照片及 TGA 表征图谱 Fig. 3 TEM photo and TGA curves of magnetic catalysts



Fig. 4 Structure and properties of magnetic catalysts

由图 4(b)可知:当磁性催化剂在重复磁分离之后,再次分散时,依然保持良好的分散特性,这对高效催化和重复回收都具有重要的意义.由图 4(c)可知:磁性催化剂的饱和磁强度达到 17.3 emu · g<sup>-1</sup>,可以在溶液体系中实现灵敏的磁分离过程.由图 4(d)可知:磁性催化剂和磁性微球的红外光谱图区别较小,这是因为配体催化剂在磁性载体的表面修饰量较小,在红外谱图上没有明显的特征吸收峰,且磁性化合物很难用核磁共振谱进行分析.因此,可通过计算钯的质量摩尔浓度和元素分析(N 的质量摩尔浓度)来分析配体的修饰量.

2.1.3 催化剂元素质量摩尔浓度分析和 X 射线衍射表征 将催化剂消解后,用火焰原子吸收光谱法 检测,金属钯为 0.09 mmol •  $g^{-1}$ ,与载体表面修饰的的配体(0.1 mmol •  $g^{-1}$ )基本一致.负载纳米钯 A

与负载催化剂 B、载体 C 的 X 射线衍射图谱,如图 5 所示.由 图 5 可知:仅负载纳米钯(曲线 A)出现了金属钯的衍射峰,分 别代表(1,1,1),(2,0,0)和(2,2,2)晶面;催化剂(曲线 B)与纳 米磁性载体的出峰情况相同;得到的钯催化剂为有机金属化 合物类催化剂,在制备过程中,载体表面没有钯纳米产生.

#### 2.2 磁球氯乙酰化的条件选择

2.2.1 反应时间对氯乙酰化的影响 取 0.5g干燥的磁球, 加入 10 mL 二氯甲烷,超声分散 20 min. 加入 0.5 mmol 氯乙 酰氯,摇床震荡. 15 min 后,迅速加入 0.128g无水三氯化铝, 计时反应.采用氢氧化钠熔融法检测磁球氯的质量摩尔浓度.



Fig. 5 X-ray diffraction pattern

反应 2,4,5,6,7,8,9 h 后,磁球氯质量摩尔浓度分别为 0.431,0.608,0.739,0.826,0.962,1.083, 1.265 mmol • g<sup>-1</sup>.反应超过 7 h 后,氯的质量摩尔浓度出现高出理论最大值(1 mmol • g<sup>-1</sup>)的现象,但 傅克反应产生的盐酸已经比较明显地腐蚀磁球中的四氧化三铁,导致磁性能下降.综合考量氯质量摩尔 浓度的需求和载体结构的完整性不被破坏,选取 4 h 作为最佳反应时间.

2.2.2 氯乙酰氯用量对氯乙酰化的影响 改变氯乙酰氯的用量,反应4h后,检测磁球上氯的质量摩 尔浓度.结果表明:当氯乙酰氯用量分别为0.25,0.50,0.80,1.00 mmol时,氯的质量摩尔浓度分别为 0.306,0.608,1.260,1.630 mmol・g<sup>-1</sup>.由此可知:在0.25,0.50 mmol的使用量下,随着氯乙酰氯的成 倍增长,氯的质量摩尔浓度几乎也成倍数增长,并从0.8 mmol的使用量开始出现突跃.然而,当氯乙酰 氯使用量过大时,磁球中四氧化三铁的消耗明显增大;当氯乙酰氯提升至1.50,2.00 mmol时,磁球的 严重腐蚀,甚至完全酸解.因此,每克磁球对应添加1 mmol的氯乙酰氯为最佳的表面修饰方案.

#### 2.3 催化活性及其底物适应性

选用不同的卤代芳烃作为底物,检测催化剂对不同取代基底物的 Suzuki-Miyaura 偶联反应的催化 活性,结果如表 1 所示.

序号	R1	Х	R2	$\eta/\%$	序号	R1	Х	R2	$\eta$ / $^{\prime\prime}$
1	p-COCH <sub>3</sub>	Br	Н	99	7	m-CH <sub>3</sub>	Cl	Н	87
2	Н	Br	<i>p</i> -CH <sub>3</sub>	99	8	1-Naphc	Cl	Н	92
3	p-COCH <sub>3</sub>	Cl	Н	95	9	$p$ -OCH $_3$	Cl	Н	95
4	p-COH	Cl	Н	95	10	o-CN	Cl	Н	89
5	p-CH <sub>3</sub>	Cl	Н	97	11	<i>p</i> -OH	Cl	Н	90
6	o-CH <sub>3</sub>	Cl	Н	93					

表 1 催化剂在不同底物的 Suzuki-Miyaura 偶联反应中的活性 Tab. 1 Activity of catalysts in different substrates towards Suzuki-Miyaura coupling reaction

表1中:η为产率;1,2的卤代芳烃、苯硼酸、碳酸钾分别为1.0,1.2,2.0 mmol,乙醇作为溶剂,在35 ℃下反应2h,催化剂的摩尔分数为1×10<sup>-6</sup>%;3~11的卤代芳烃、苯硼酸、氢氧化钾分别为1,2,4 mmol,异丙醇作为溶剂,在70℃下反应8h,催化剂摩尔分数为0.1%,底物为1-氯化萘.在反应管中, 将催化剂超声分散于5mL溶剂中,加入卤代芳烃、苯硼酸和适当的碱,恒温水浴锅震荡,反应一段时 间.待反应结束,磁分离出催化剂,并用氯仿萃取3次,用气相色谱分析产率.

由表1可知:在低温下,催化剂对溴代芳烃的 Suzuki-Miyaura 偶联反应使用极低的催化剂用量,短

时间即可达到非常高的转化率;对不同取代基的氯代芳烃,在8h内,摩尔分数为0.1%的催化剂添加量 最高转化率可达97%,说明催化剂具有较高的催化活性.

#### 2.4 可重复使用性能检测

催化剂的可重复使用性能是负载型催化剂的一个重要指标,它反映了催化剂的分离回收的便利性. 催化剂的重复实用性与其热过滤实验,如图 6 所示.图 6 中:η为产率;N 为循环次数;t 为反应时间.由 图 6(a)可知:以序号 1(表 1)为基准,催化剂在循环使用 5 次后,产率基本没有变化.对反应结束后磁分 离完毕的剩余物进行金属含量分析,未发现金属钯的泄露,表明催化剂具有较高的稳定性.综合磁性载 体易于分离的特点,可有效地实现钯催化剂的分离、回收和重复使用.

为了进一步验证催化反应过程中,催化中心是钯复合物还是纳米钯,进行了热过滤实验,如图 6(b) 所示.由图 6(b)可知:反应 20 min 后,趁热过滤,将催化剂通过磁分离手段取出,剩余的反应液继续反 应,转化率基本维持不变,未发生明显地提高,这表明催化中心已经被分离,反应体系中基本没有纳米 钯.因此,在本体系中,催化中心主要负载于磁性微球表面的钯复合物.



#### Fig. 6 Recycling test and hot filtration test of the catalyst

# 3 结束语

采用双细乳液法制备了粒径约 100 nm 的磁性高分子微球载体,通过氯乙酰化与 N 杂环卡兵配体结合,得到易分离回收的磁性负载钯催化剂.实验结果表明:在保证载体的磁响应性能的前提下,每 1 g 磁球中加入 1 mmol 氯乙酰氯,0.256 g 无水氯化铝,在 20 mL 溶剂中反应 4 h 时,氯乙酰化得到的载体最佳.同时,通过对不同卤代芳烃作为底物的 Suzuki-Miyaura 偶联反应的催化实验,以及循环重复使用的实验结果表明:按照上述方法制备得到的催化剂不仅具备易分离回收再分散性能,而且是一种高活性、稳定性良好、可重复利用的负载催化剂.

### 参考文献:

- [1] WOLFER J P, SINGER R A, YANG B H, et al. Highly active palladium catalysts for suzuki coupling reactions[J]. Journal of the American Chemical Society, 1999, 121(41): 9550-9561.
- [2] BEI Xiao-hong, TURNER H W, WEINBERG W H, et al. Palladium/P,O-ligand-catalyzed suzuki cross-coupling reactions of arylboronic acids and aryl chlorides: Isolation and structural characterization of (P,O)-Pd(dba) complex [J]. Journal of Organic Chemistry, 1999,64(18):6797-6803.
- [3] FEUERSTEIN M,LAURENTI D,BOUGEANT C, et al. Palladium-tetraphosphinecatalysed cross coupling of aryl bromides with arylboronic acids. Remarkable influence of the nature of the ligand[J]. Chemical Communications, 2001(4):325-326.
- [4] 徐广庆,赵庆,汤文军.发展高效的不对称 Suzuki-Miyaura 偶联反应及其合成应用[J].有机化学,2014(34):1919-1940.
- [5] BENAYLIA M, PUGLISI A, COZZI F. Polymer-supported organic catalysts[J]. Chemical Reviews, 2003, 103(9): 3401-3430.

- [6] CATHERINE A M, DIXON J M, BRADLEY M. Recoverable catalysts and reagents using recyclable polystyrenebased supports[J]. Chemical Reviews, 2002, 102(10): 3275-3300.
- [7] 郝树林,张政朴,刘长令.固相有机合成中钯催化的交叉偶联反应研究进展[J].高分子通报,2011(7):1-23.
- [8] 颜美,冯秀娟.负载钯催化的 Suzuki 偶联反应研究进展[J].有机化学,2010,30(5):623-632.
- [9] POLSHETIWAR V, LUQUE R, FIHRI A, et al. Magnetically recoverble nanocatalysts[J]. Chemical Reviews, 2011,111(5):3036-3075.
- [10] 万红亮,白雪峰.磁性可回收钯催化剂催化 Suzuki 反应的研究进展[J].化学与粘合,2012,34(1):48-54
- [11] DHITAL R N,KAMONSATIKUL C,SAKURAI H. Low-temperature carbon-chlorine bond activation by bimetallic gold/palladium alloy nanoclusters: An application to ullmann coupling[J]. Journal of American Chemical Society,2012,134(50):20250-20253.
- [12] HERRMANN W A, REISINGE C P, SPIEGLER M. Chelating N-heterocyclic carbene ligands in palladium-catalyzed heck-type reactions[J]. Journal of Organometallic Chemistry, 1998, 557(1):93-96.
- [13] 于宏伟,施继成.NHC-Pd 配合物的合成及其催化 Suzuki-Miyaura 偶联反应的研究[J]. 精细石油化工进展,2014, 15(2):34-37.
- [14] XU Hong, LONGLAN C, NAIHU H, et al. Developmentof magnetization Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/polystryrene/silica nanospheres via combined miniemulsion/emulsion polymerization[J]. Journal of American Chemical Society, 2006, 128(49): 15582-15583.
- [15] JAFARPOUR L, STEVENS E D, NOLAN S P. A sterically demanding nucleophiliccarbene: 1,3-bis(2,6-diisopropylphenyl)imidazol-2-ylidene). Thermochemistry and catalytic application in olefin metathesis[J]. Journal of Organometallic Chemistry,2000,606(1):49-54.
- [16] CHARTOIRE A, FROGNEUX X, BOREUX A, et al. [Pd(IPr\*)(3-Cl-pyridinyl)Cl<sub>2</sub>]: A novel and efficient PEP-PSI precatalyst[J]. Organometallics, 2012, 31(19):6947-6951.

# Magnetic Palladium Catalysts and Its Catalytic Activity for Suzuki-Miyaura Coupling Reaction

YU Yang<sup>1</sup>, WU Cui-lin<sup>1</sup>, WANG Zhen<sup>1</sup>, ZHANG Ying-xue<sup>2</sup>, QIAN Hao<sup>1</sup>

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

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

**Abstract:** The magnetic nano-beads of  $Fe_3O_4$ /polystyrene with core/shell structure were used as catalyst carriers and its surface was modified with high active ligand of bulky N-heterocyclic carbine via Friedel-Crafts reaction. Suzuki-Miyaura coupling reaction was used to evaluate the catalytic properties of the obtained catalysts. It indicated that the catalyst could be easily separated and showed extremely high activity when brombenzene was employed as starting material. It showed good catalytic activity to the chlorobenzene, and the good reusability was also found for these magnetic catalysts.

Keywords: supported catalysts; magnetic carrier; nano microspheres; N-heterocyclic carbine; Suzuki-Miyaura reaction; palladium complex

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 熊兴泉)

文章编号:1000-5013(2015)04-0455-06

# 部分充填钢箱-混凝土组合梁受力性能有限元分析

莫时旭1,2,周晓冰1,周迎春1,张堃1

(1. 广西岩土力学与工程重点实验室,广西 桂林 541004;2. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院,广西 桂林 541004)

**摘要:** 为了研究部分充填钢箱-混凝土组合梁负弯矩区的受力性能,完成3根简支组合梁构件在跨中两点反向对称荷载作用下的试验.选用合适的单元类型、本构关系及破坏准则,建立以模拟试验梁为对象的非线性模型,得到相应的挠度-荷载曲线和截面应变值,模拟结果与试验结果吻合良好.通过改变梁的一些主要参数,对极限承载力和跨中挠度进行预测.分析表明:若要提高极限承载力和降低跨中挠度,可依次提高梁的配筋率,加厚底板、腹板、顶板和中隔板,也可适当提高混凝土强度.

关键词: 钢箱-混凝土组合梁;受力性能;非线性模型;挠度-荷载曲线

**中图分类号:** TU 321.1; TU 317.1 **文献标志码:** A

钢-混凝土组合梁是由钢梁和混凝土翼板通过抗剪连接件叠合而成的组合结构,能充分利用各自材料的力学性能.与钢结构、混凝土结构相比,它具有承载力高、塑性和韧性良好、经济效益显著、施工方便等特点.由于混凝土材料的不均匀,钢-混凝土组合梁负弯矩区混凝土容易开裂,裂缝的宽度不仅影响结构的外观,而且影响其承载力和耐久性.为此,学者提出一种新型的部分充填钢箱-混凝土组合结构<sup>[1]</sup>,在钢箱内充填 50%的混凝土,改善其结构性能,提高负弯矩区的受力性能.目前,国内外对这种新型结构研究较少,但钢-混凝土组合结构的研究已取得一定成果<sup>[2-6]</sup>.经历了几十年的发展,有限元方法已趋于完善,非线性问题的各种算法日益成熟,在工程领域得到广泛的应用.有限元求解的基本过程主要包括结构离散化、有限元求解、计算结果的后处理等三个部分.该方法不需要实验场地,能降低设计成本和缩短设计时间,不受环境的影响,改变参数就能得到所需的有限元模型.国内有关学者已对钢-混凝土组合梁模型进行了有限元模拟,并取得了预期的效果<sup>[7]</sup>.本文利用 ANSYS 软件对 3 根部分充填钢箱-混凝土简支梁试件受力性能进行模拟计算分析,验证模型的有效性.

# 1 试验设计

#### 1.1 试件及材料性能

设计 3 根不同混凝土翼板配筋率的部分充填式钢箱-混凝土组合结构简支梁,通过两点对称反向加载的加载模式模拟组合梁负弯矩的受力性能.组合梁的截面尺寸相同,长度均为 4.4 m,梁高为 0.42 m.其中:钢箱梁高为 0.3 m;宽为 0.18 m;混凝土翼板的厚度为 0.12 m;宽度为 1 m;翼板与钢箱采用栓钉连接,其抗剪连接度为 1.0.试验梁 PSCB1~PSCB3 的纵向配筋率分别为 1%,2%,3%,横向分布钢筋的的配筋面积为纵向钢筋的 20%.钢箱体由钢板板焊接而成,顶板和底板采用 10 mm Q235 钢板,腹板采用 4 mm Q235 钢板,隔板采用 4 mm Q235 钢板.将钢箱分成上下两个箱室,下箱室充填混凝土,上箱室为空室.试件正面及组合梁侧面的投影示意图,如图 1,2 所示.

混凝土翼板和箱内充填混凝土设计等级均为 C40. 由于一次性浇筑的混凝土量少,故采用自拌混凝土. 水泥选用 42.5 号的普通硅酸盐水泥,细骨料选用中粗河沙,粗骨料采用级配良好的碎石. 为了保证

**收稿日期:** 2015-03-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51168011,51108109)

通信作者: 莫时旭(1964-),男,教授,博士,主要从事桥梁工程的研究. E-mail:moshixuwh@yahoo.com.cn.

混凝土拌合物的和易性和因混凝土的收缩而与钢箱之间脱空,加入适量的减水剂和膨胀剂.混凝土配合 比:水泥:水:碎石:沙=1:0.43:2.92:1.25.减水剂和膨胀剂分别为水泥的2%,3%.



图 1 试件正面投影示意图(单位:mm) Fig. 1 Front projection of specimen sketch (unit:mm)



图 2 组合梁侧面投影示意图(单位:mm) Fig. 2 Side projection of composite beam diagrammatic sketch (unit:mm)

#### 1.2 荷载加载装置及测点布置

使用 200 t 的千斤顶进行反向加载,通过分配梁等分为两个集中荷载对称施加在梁上,计算跨径为 1.4 m,分级加载,并通过压力传感器进行控制.在跨中处安装百分表,以测量梁的跨中挠度,并由人工 逐级记录.为了测量混凝土板裂缝的位置,每隔 10 cm,用墨斗在翼板的顶面沿梁的横向和纵向弹线形 成方格网.随着荷载的增加,用笔芯标定裂缝的开展.

# 2 有限元模型的建立

#### 2.1 基本假设

部分充填钢箱-混凝土组合结构受力复杂,为使问题简化,做如下4点假设.1)钢箱与混凝土之间的粘接是可靠的,忽略两部分之间的滑移.2)钢材、钢筋采用理想弹塑性本构关系模型.3)不考虑混凝 土徐变、收缩等时随效应.4)混凝土板与钢箱之间无相对摩擦,所有剪力均有抗剪连接件传递.

#### 2.2 单元的选择

Solid 65 是用于仿真的 3D 实体结构. 元素由 8 点组合而成,每个节点具有 x,y,z 位移方向的 3 个自由度,具有潜变、塑性、膨胀、大变形、大应变、应力强化的特性. 当某个单元被压溃或拉裂时,该单元的 刚度变为零,单元不起作用,从而模拟构件的破坏<sup>[8]</sup>. Link 8,Link 10 单元可应用于不同工程领域,如桁 架、杆件、弹簧等. 该元素为三维空间承受单轴拉力-压力,每个节点具有 x,y,z 位移方向的 3 个自由度, 无法承受力矩,能模拟蠕变、钢筋松弛、应力刚化等特性. Shell 单元具有弯曲及薄膜特性,与平面同方向 及法线方向的负载皆可承受. 元素具有 x,y,z 位移方向及 x,y,z 旋转方向的 6 个自由度. 应力强化及 大变形的效应也适合该单元. 可选择连续性相切矩阵用于大变形(有限的旋转)分析. 因此,模型中的翼 板混凝土和内填混凝土采用 Solid 65 单元,钢板采用 Shell 181 单元,钢筋采用 Link 8 单元.

#### 2.3 材料本构关系

钢筋采用 Higashibata 提出的应力-应变关系<sup>[9]</sup>,取  $E'=0.01E_s$ ,有

$$\sigma_{s} = \begin{cases} f_{y}, & \varepsilon \geqslant \varepsilon_{y} = \frac{f_{y}}{E_{s}}, \\ \varepsilon E_{s}, & -\varepsilon_{y} \leqslant \varepsilon \leqslant \varepsilon_{y}, \\ -f_{y}, & \varepsilon_{t} \leqslant \varepsilon \leqslant -\varepsilon_{y}, \\ -f_{y} - E'(\varepsilon - \varepsilon_{t}), & \varepsilon_{t} \leqslant \varepsilon \leqslant -\varepsilon_{y}. \end{cases}$$
(1)

混凝土采用韩林海等<sup>[10]</sup>建议的以□为主要参数的应力-应变关系,即

$$\sigma_{c} = \begin{cases} f'_{c} \left[ A \frac{\varepsilon_{c}}{\varepsilon_{0}} - B(\frac{\varepsilon_{c}}{\varepsilon_{0}})^{2} \right], & \varepsilon \leqslant \varepsilon_{y}, \\ f'_{c} \left( \frac{\varepsilon_{c}}{\varepsilon_{0}} \right) \frac{1}{\beta(\frac{\varepsilon_{c}}{\varepsilon_{0}} - 1)^{n} + \frac{\varepsilon_{c}}{\varepsilon_{0}}}, & \varepsilon_{t} \geqslant \varepsilon_{y}. \end{cases}$$
(2)

有限元计算方案:完全忽略钢箱与混凝土之间的相对位移,两者在受力过程中视为一整体,计算模

型中钢板与混凝土界面上共用相同的节点;由于试验出现混凝土的收缩而与钢箱脱空,考虑采用接触单

元分析;混凝土采用五参数破坏准则,裂缝张开剪力传递系数为 0.5,裂缝闭合剪力传递系数为 1.0,混凝土抗拉强度由混凝土强度等级确定, 关闭压碎判断,拉应力折减系数选用默认值 0.6,其余均采用默认值<sup>[11]</sup>. 有限元模型,如图 3 所示.

#### 2.4 荷载的施加、收敛准则

在梁的非线性有限元分析过程中,应力集中使支点或加载点的混凝 土过早地出现开裂或压碎破坏,导致有限元分析过程提前终止,模拟失 败.因此,在计算机建模时,可以在支点或加载点处设置弹性垫块<sup>[10]</sup>.模 型在荷载分配梁支座下设置弹性垫块,采用 Solid 45 单元模拟.



图 3 有限元模型 Fig. 3 Finite element model

采用位移控制法控制收敛.程序的收敛性受子步数的影响,太小或太大都不能达到正常收敛.为了 容易收敛,节约运算时间,将收敛精度放宽至5%,每个子步中平衡迭代的最大次数为50次.

## 3 有限元分析与试验的对比

#### 3.1 荷载位移曲线

开裂弯矩计算值与实测值,如表1所示.表1中:试验开裂荷载为 p<sub>exp</sub>;模拟开裂荷载为 p<sub>e</sub>;试验极限荷载为 p<sub>exp</sub>;模拟极限荷载为 p<sub>e</sub>;试验极限荷载为 p<sub>exp</sub>;模拟极限荷载为 p<sub>e</sub>,...由表1可知:有限元模拟的开裂荷载比实测开裂荷载低,这是因为 实测开裂荷载由肉眼可见裂缝而定,偏差(η)在允许范围以内,吻合较好.模拟的极限承载力比试验结果 高,这是因为命令流文件中没有考虑混凝土翼缘与钢箱间的滑移,偏差也在允许范围以内,满足要求,挠 度-荷载曲线反应了很好的延性.

		0				
试件编号	$p_{ m exp}/{ m kN}$	$p_{ m c}/{ m kN}$	$\eta/\%$	$p_{ m exp,u}/ m kN$	$p_{ m c,u}/ m kN$	$\eta/\%$
PSCB1	110	88	20.0	430.0	450	4.4
PSCB2	150	124	17.3	604.8	627	3.5
PSCB3	169	130	23.1	676.8	695	2.6

表 1 开裂弯矩计算值与实测值 Tab. 1 Cracking moment of calculation value and measured value

由有限元分析结果可知:3 根简支梁的结果相近.以 PFSCB1 为例,分析部分填钢箱-混凝土组合梁的受力过程,极限荷载作用下梁的跨中挠度-荷载(*f-p*)曲线,如图 4 所示.由图 4 可知:在弹性阶段,*p*<0.3*p*<sub>u</sub>,荷载与挠度基本上呈线性关系,有限元曲线与试验曲线吻合良好;在弹塑性阶段,*p*<0.8*p*<sub>u</sub>,此阶段开始于受压区混凝土板中钢筋的屈服,并伴随着钢箱的局部屈曲;在完全塑性及破坏阶段,即荷载加载至接近极限值时,挠度快速发展,钢箱腹板局部屈曲加快,曲线平缓甚至出现下降段.

由于试验中混凝土板跨中的应变值不理想,因此,文中只给出钢箱跨中顶板、腹板、底板应变-荷载 (ε-p)曲线,如图 5~7 所示.由图 5~7 可知:模拟结果与试验结果吻合良好,说明所建立的非线性模型 是有效的,在设计中可通过参数的改变对所需结果进行预测.







图 5 跨中顶板应变-荷载试验与模拟值比较 Fig. 5 Comparison between experimental and simulation values of mid-span top plate strain-load







图 7 跨中底板应变-荷载试验与模拟值比较 Fig. 7 Comparison between experimental and simulation values of mid-span bottom plate strain-load

# 4 组合梁参数分析

通过改变部分充填钢箱-混凝土组合梁混凝土强度(C)、配筋率(ρ)、钢箱顶板厚度、中隔板厚度、腹 板厚度、底板厚度(l)、钢箱内充填混凝土等参数,得到各参数的变化与梁的极限承载力提高百分比(η) 的关系.

混凝土强度从 C20 提高到 C45,梁的极限承载力提高的百分比,如图 8(a)所示.由图 8(a)可知:强 度增至 C40 后,极限承载力提高的速率有所降低,但总体而言,混凝土强度的提高对梁的极限承载力的 提升效果较好.

组合梁配筋率从1%提高到5%,梁的极限承载力提高的百分比,如图8(b)所示.由图8(b)可知:随 着配筋率的提高,梁的极限承载力增加明显,尤其是在1.5%到2.5%之间;配筋率超过2.5%后,极限 承载力提高百分比的速率越来越慢.因此,在设计中若要提高梁的极限承载能力,可选择提高梁的配筋 率,但配筋率不宜过高.

钢箱顶板厚度、中隔板厚度、腹板厚度、底板厚度从1 mm 加厚至8 mm,梁的极限承载力提高的百分比,如图 8(c)所示.由图 8(c)可知:加厚钢箱底板和腹板对提高承载力可达到满意的效果,但加厚中隔板和顶板效果不明显,加厚顶板的效果最差.因此,在满足梁的稳定性的前提下,适当加厚腹板和顶板可提高梁的极限抗载能力.

钢箱内充填混凝土从 0%提高到 100%,即由空钢箱提高到全充填混凝土,梁的极限承载力提高百分比,如图 8(d)所示.由图 8(d)可知:钢箱内混凝土提高至 60%时,梁的极限承载力最大;70%时出现 拐点,之后保持不变,因为随着箱内混凝土的增加,梁的相对受压区保持不变,使部分充填混凝土受拉.

在相同荷载作用下,通过改变部分充填钢箱-混凝土组合梁配筋率、钢箱顶板厚度、中隔板厚度、腹 板厚度、底板厚度等参数,得到各参数的变化与梁的跨中挠度降低百分比的关系(η). 混凝土强度等级 从 C20 提高至 C45,梁跨中挠度降低的百分比,如图 9(a)所示. 由图 9(a)可知:效果并不理想,考虑到对 极限承载力的影响,建议混凝土强度采用 C40.

组合梁配筋率从1%提高到5%,梁的跨中挠度降低的百分比,如图9(b)所示.由图9(b)可知:配筋 率的提高对梁跨中挠度的降低有显著的影响,配筋率在1.5%~4.0%之间,效果尤为明显.因此,结合 配筋率变化对极限承载力的影响,建议配筋率在4%左右.

钢箱顶板厚度、中隔板厚度、腹板厚度、底板厚度从1 mm 加厚至10 mm,梁的跨中挠度降低的百分比,如图9(c)所示.由图9(c)可知:加厚底板对降低跨中挠度的效果最好,其次是腹板,中隔板最差.因此,适当加厚底板和腹板最为经济.

钢箱内充填混凝土从 0%提高到 100%,梁的跨中挠度降低的百分比,如图 9(d)所示.由图 9(d)可知:充填量从 0%提高到 10%,跨中挠度下降地最快,因为为了便于浇灌在钢箱内加了一层中隔板;在 10%到 60%之间基本保持不变.因此,钢箱内充填 60%最为合适.

2015 年



Fig. 9 Relationship between parameter varation and cross deflection reduction diagram

# 5 结论

建立部分充填钢箱-混凝土组合梁有限元模型,对模拟结果与试验结果进行比较,可以得出以下 5 点结论. 1) 模拟结果与试验结果虽然存在一定的偏差,但都在工程误差允许范围之内.

- 2) 由于没有考虑钢箱与混凝土之间的滑移,模拟结果中的极限荷载和模拟值弹性刚度偏大.
- 3) 组合梁受力性能较好,极限承载力和刚度高.

4)通过对梁的各主要参数进行分析可知:配筋率对极限承载力和跨中挠度的影响效率最高;钢板 在保证梁的局部稳定的前提下,使用薄的钢板更为合理.建议在对组合梁进行设计时,混凝土强度采用 C40,配筋率在4%左右,钢箱内混凝土充填60%.

5)应用有限元软件可以实现对钢箱-混凝土梁的非线性有限元分析,并能得到正确可靠的结果.

#### 参考文献:

- [1] NAKAMURAA S I, MOR ISH ITA B H. Bending strength of concrete-fill eduarrow-width steel box girder[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64:128-133.
- [2] 张金,周志祥,向红,等.钢-混凝土组合连续梁力学性能分析[J].中外公路,2012,32(1):120-125.
- [3] 解恒燕,郑文忠.内置钢箱-混凝土简支组合梁受力性能试验[J].哈尔滨工业大学学报,2009,41(2):37-42.
- [4] 杨树标. 按变刚度计算钢筋混凝土梁挠度[J]. 河北煤炭建筑工程学院学报,1992(2):1-8.
- [5] 薛伟,胡夏闽,刘加荣.简支钢-混凝土组合梁挠度计算方法的探讨[J].江苏建筑,2009(125):29-31.
- [6] 孙小菲,吴春生.界面滑移效应下钢-混凝土组合梁总剪力和挠度[J].南昌大学学报:工科版,2007,29(4):390-394.
- [7] 刘洋,童乐为,孙波,等.负弯矩作用下钢-混凝土组合梁受力性能有限元分析及受弯承载力计算[J].建筑结构学报,2014,35(10):10-20.
- [8] 周勇. 钢筋混凝土梁的非线性有限元分析[J]. 国外建材科技,2008,29(3):22-24.
- [9] 吕西林,陆伟东.反复荷载作用下方钢管混凝土柱的抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2000,21(2):2-11,27.
- [10] 韩林海,陶忠.方钢管混凝土轴压力学性能的理论分析与试验研究[J].土木工程学报,2001,34(2):17-25.
- [11] 莫时旭,郑艳,钟新谷,等.钢箱-混凝土组合梁受力性能有限元分析[J].广西大学学报:自然科学版,2010,35(4): 543-548.

# Finite Element Analysis of Mechanical Performance of Partially Filled Steel Box-Composite Beams

# MO Shi-xu<sup>1,2</sup>, ZHOU Xiao-bing<sup>1</sup>, ZHOU Ying-chun<sup>1</sup>, ZHANG Kun<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Guangxi Geotechnical and Geotechnics Engineering, Guilin 541004, China;

2. College of Civil Engineering and Arcitecture, Guilin University of Science and Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** The mechanical performance of partially filled steel box-concrete composite beams was investigated by the experiment of three simple-supported composite beam components under mid-span two-point antisymmetric loads. Suitable element types, constitutive relationship and failure criterion were selected to establish a nonlinear model to simulate the experimental beams. The deflection-load curves and cross-sectional strain values were obtained. The simulation results a-gree with the obtained experimental results, indicating the validity of finite element model. The bearing capacity and the mid-span deflection can be predicted by some of the major beam parameters. The analysis indicates that the ultimate load bearing capacity and stiffness of beams enhance as reinforcement ratio of girders, thickness of baseboard, web, roof, partition and concrete strength increase.

Keywords: steel box-concrete composite beams; mechanical performance; nonlinear model; deflection and load curve

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)

文章编号:1000-5013(2015)04-0461-06

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.04.0461

# 复合衬砌量化修正渗透系数 隧道涌水量的计算方法

丁小平1, 刘昭2, 史宝童2, 黄嫚2

(1. 宁夏公路建设管理局,宁夏银川 750000;2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司,陕西西安 710075)

摘要: 为了使用轴对称解计算设置防水板和排导系统的复合式衬砌的隧道涌水量,假定隧道二次衬砌均匀
 渗水,从隧道涌水量不变的角度,通过反演分析得到复合衬砌的一个量化修正渗透系数 K<sub>1</sub><sup>\*</sup>.通过六盘山特长
 隧道实际工程验证了这种方法的可行性及准确性,为复合衬砌涌水量计算提供了有利条件.
 关键词: 隧道;复合衬砌;渗透系数;涌水量;计算方法
 中图分类号: U 451.4
 文献标志码: A

随着我国现代化建设步伐的加快,公路隧道、铁路隧道呈现出跨越式的发展,各种大跨度、超长隧道 不断涌现,隧道设计中普遍采用了设置防水板和排导系统的复合式衬砌.目前,求解这种复合衬砌的隧 道涌水量常规方法有水压力折减法、数值计算法和数学解析法等.国内外学者在渗流场基本理论研究的 基础上进行了大量研究<sup>[1]</sup>.郭瑞等<sup>[2]</sup>、王建字<sup>[3]</sup>、张志强等<sup>[4]</sup>分析衬砌水荷载的影响因素,分别提出衬砌 水压力荷载的简化计算方法,得到衬砌荷载与排放流量的关系,总结了隧道涌水量预测的影响因素.邓 捷<sup>[5]</sup>通过现场压水试验,预测了下穿隧道涌水量.郭牡丹等<sup>[6]</sup>用流固耦合理论对隧道涌水量进行数值模 拟.采用有限元方法计算隧道涌水量并不复杂,但是具体隧道断面较多,需要建立众多模型,比较耗费时 间.常规轴对称均质解析解概念清楚,计算简单,应用比较广泛,但其衬砌渗透系数是根据试验及经验选 取,未能准确考虑隧道立体排水系统的影响,针对性不强.为了简化计算,本文假定隧道二次衬砌均匀渗 水(隧道衬砌一般为防水混凝土,隧道的排水是通过在衬砌背后设置排导系统实现),当隧道设置排导系 统时,假设隧道涌水量不变,通过反演分析即可得到复合衬砌的一个量化修正渗透系数,类似工程即可 直接采用轴对称解计算设置排导系统的复合式衬砌的隧道涌水量.

## 1 复合衬砌量化修正渗透系数

复合衬砌设置由透水层、防水板、衬砌、排水孔组成排导系统,认为衬砌是不透水结构,围岩渗水主 要通过排导系统从排水孔中排出,这种复合衬砌排水结构可以很好地对围岩渗水进行定向引流,保护衬 砌的稳定性.

为了保持地下水环境的稳定,保护生态环境,隧道涌排水设计通常"以堵为主,限量排放"为原则,因 地制宜,综合治理.准确预测隧道涌水量是隧道限排标准设计的基础,常规的有限元解法比较复杂,难以 大面积推广使用.将设置排导系统的复合衬砌进行简化处理,如图1所示.假设简化后的隧道涌水量等 于实际涌水量,即可通过轴对称解反算求得简化后的衬砌渗透系数,将简化后的衬砌渗透系数称为复合 衬砌的量化修正渗透系数.

**收稿日期:** 2015-06-10

通信作者: 丁小平(1970-),男,教授,主要从事隧道涌排水控制及公路工程管理的研究. E-mail:1005484926@qq. com.

基金项目: 宁夏六盘山隧道科技项目(KYHT2013-18)





# 2 复合衬砌量化修正渗透系数计算方法

复合衬砌量化修正系数的计算分为两个步骤:首先,通过有限元数值计算法分析计算透水层、排水板、排水孔等排导系统的复合衬砌涌水量;然后,通过轴对称解反算简化后的衬砌量化修正渗透系数.当隧道位置水头小于隧道埋深<sup>[3,7]</sup>,隧道施作衬砌但不注浆情况下,利用退化轴对称解给出每延米隧道排水量的轴对称解计算公式,即

$$Q = \frac{2\pi H k_1}{\ln \frac{r_i}{r_0} + \frac{k_1}{k_r} \cdot \ln \frac{r^2}{r_1}},$$
(1)

经转换可得

$$k_{1} = \frac{Q \ln \frac{r_{i}}{r_{0}}}{\frac{2\pi H - Q}{k_{r} \ln \frac{H}{r_{1}}}}$$
(2)

式(2)中:Q为隧道涌水量;r<sub>0</sub>为衬砌内半径;r<sub>1</sub>为外半径;H为隧道水头高度;k<sub>1</sub>为衬砌渗透系数;k<sub>r</sub>为 围岩渗透系数.

当简化衬砌涌水量为Q\*=Q时,即可求得简化后衬砌的量化修正渗透系数,即

$$k_1^* = k_1 = \frac{Q^* \ln r_i / r_0}{(2\pi H - Q) / (k_r \ln H / r_1)}.$$
(3)

# 3 复合衬砌涌水量

为了能够采用轴对称解计算隧道涌水量,首先要将复合式衬砌断面换算成圆形断面,一般是通过周 长相等的方式按照如下公式进行转化,即

$$r = \frac{l}{2\pi}.$$
(4)

式(4)中:r为简化复合衬砌半径;l为复合衬砌实际周长.

通过轴对称解式(1),带入围岩渗透系数、量化渗透系数、计算得到的简化衬砌内外半径、隧道水头 高度等,即可求得隧道涌水量.

# 4 涌水量简化计算

#### 4.1 六盘山超长隧道简介

六盘山隧道穿越六盘山国家自然保护区的实验区,六盘山隧道设计为单洞分离式隧道,左右线间隔为31~48 m,属超长隧道.左线隧道起迄桩号分别为ZK6+270,ZK15+760,隧道长度为9490 m,隧道 纵坡为1.676/-2.782;右线隧道起迄桩号分别为K6+230,K15+710,隧道长度为9480 m,隧道的纵

坡为 1.68/-2.7.项目隧道穿越褶皱构造,层状砂岩岩体裂隙发育,在断层破碎带和赋水段,有突发性 涌水的可能,特别是在 K12~K13 附近,经过将台水库,及清凉水库(这两座水库为隆德县饮用水源).

## 4.2 模型简化

隧道围岩渗流计算,是一个三维问题,为了简化计算,本节假设简化后排水面积不变,将三维问题转 化成二维问题进行求解<sup>[8]</sup>.隧道防排水系统主要包括环向排水管、纵向排水管、横向排水管、中心水沟和 衬砌背后土工织物(起导水和保护防水板作用),根据各级围岩排水系统参数建立数值模型求解隧道立 体排水系统涌水量 Q\*,计算中为求解方便,采用等效排水面积概念对以下排水设施进行了等效简化, 形成衬砌背后透水层模拟排水系统排水.

1) 土工布等效简化. 根据王俊林等<sup>[9]</sup> 对土工织物透水特性的试验研究,无纺布的渗透系数一般在 0.01~1 mm•s<sup>-1</sup>之间,在相同试验条件下,3~4 cm 厚的针刺无纺布的平均渗透系数约为5 mm•s<sup>-1</sup>, 计算中取透水层渗透系数 0.2 cm•s<sup>-1</sup>. 由于防水板的隔水作用,可认为二次衬砌材料不透水,但为了 避免计算结果出现奇异,计算中取衬砌渗透系数 k<sub>l</sub>=0.1 nm•s<sup>-1</sup>.

2)环向排水管等效简化.环向排水管主要用来引排围岩渗水、基岩裂隙水、局部涌水、突水.正常段 每道放置一根,局部水量大时可酌情增加到2~3根.V,Ⅳ级围岩间距按4,6m一道设计;Ⅲ,Ⅱ级围岩 间距按8,10m一道设计.

环向排水管等效厚度 t1 为

$$t_1 = \frac{\pi d_{\mathcal{H}}^2}{4} \cdot \frac{n_1}{s_1}.$$
 (5)

式(5)中:t<sub>1</sub>为环向排水管等效厚度;d<sub>环</sub>为环向排水管直径;s<sub>1</sub>为环向排水管间距;n<sub>1</sub>为环向排水管每 排数量.

3) 纵向排水管等效简化. 纵向排水管全隧道埋设, 纵向坡度与隧道相同, 主要引排环向排水管及衬 砌背后积水, 纵向排水管等效厚度 t<sub>2</sub> 为

$$t_2 = \frac{\pi d_{\text{M}}^2}{4} \cdot \frac{n_2}{l_{\text{H}}}.$$
(6)

式(6)中: $t_2$ 为反滤层厚度; $d_{\mathfrak{M}}$ 为纵向排水管直径; $l_{\mathfrak{M}}$ 为衬砌相对周长(不考虑仰拱); $n_2$ 为纵向排水管 根数.

初支与二衬之间的防排水体系等效透水层厚度为

$$\delta = t_0 + t_1 + t_2. \tag{7}$$

式(7)中:δ为防排水系统等效透水层厚度,其他符号意义同上.

4) 横向排水管等效简化. 横向排水管主要连接纵向排水管与隧道中心排水沟,其设置间距根据开 挖后地下水情况设置,不大于10m,纵坡不小于3%,施工时应采取措施对其进行防护,防止施工时引起 横向引水管破损.

在二维平面问题中横向排水管可等效成一个排水缝,并认为排水缝渗透系数等于无穷大,但为了避免计算结果出现奇异,排水孔渗透系数为

$$k=1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1},$$

其宽度为

$$D = \frac{\pi d^2}{4n}.$$
(8)

式(8)中:D为平面问题中的排水缝宽;d为实际工程中排水孔的直径;n为排水孔的纵向间距.

#### 4.3 两种复合式衬砌作用下的围岩渗流场分析

在 SL 279-2002《水工隧洞设计规范》中,衬砌结构表面的水压力计算公式为

$$P_{\rm e} = \beta_{\rm e} \gamma_{\rm w} H_{\rm e}. \tag{9}$$

式(9)中: $P_e$ 为作用在衬砌结构外表面的地下水压力, $kN \cdot m^{-2}$ ; $\beta_e$ 为外水压力折减系数; $\gamma_w$ 为水的重度, $kN \cdot m^{-3}$ ,一般采用 9.81  $kN \cdot m^{-3}$ ; $H_e$ 为地下水位线至隧洞中心的作用水头,m,内水外渗时取内水压力.

常规水压力计算采用水工隧道规范或王建宇等推导的轴对称解析解<sup>[3]</sup>,得到相等的拱顶、边墙、仰 拱的孔隙水压力.在实际隧道开挖过程中,各部位的孔隙水压力是不一致的,这样就容易造成计算出现 较大误差.为了提高计算精度,利用有限元软件分析两种常用的复合式衬砌的排水方式下孔隙水压力的 分布规律.

全包防水是在隧道初期支护与二次衬砌之间设盲沟、反滤层(无纺布)、防水板.半包防水,只在边墙与拱顶的初期支护与二次衬砌之间设盲沟、反滤层、防水板,在仰拱处不设盲沟、反滤层、防水板.两种排水措施都是通过在二衬边墙底部设置有排水孔(纵向间距一般为 10 m 左右),将围岩渗出的水经盲沟、反滤层排入排水沟.衬砌渗透系数为  $k_1$ =1 pm · s<sup>-1</sup>,无纺布的渗透系数约为 1  $\mu$ m · s<sup>-1</sup>,透水层渗透系数 2 mm · s<sup>-1</sup>,排水孔渗透系数为 k=1 km · s<sup>-1</sup>,围岩渗透系数为 0.32  $\mu$ m · s<sup>-1</sup>,透水层厚度为 5 mm,排水孔厚度为 2 mm,隧道埋深为 400 m,地下水位高度为 350 m.

半包防水与全包防水衬砌上的水压力分布规律如图 2,3 所示.半包防水作用在拱顶、排水孔附近、仰拱衬砌上的水压力值分别为 681.2,0,757.5 kN·m<sup>-2</sup>,排水孔涌水量为 3.66×10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup>·(m·s)<sup>-1</sup>; 全包防水作用在拱顶、排水孔附近、仰拱衬砌上的水压力值分别为 713.4,0,820.0 kN·m<sup>-2</sup>,排水孔涌 水量为 0.26×10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup>·(m·s)<sup>-1</sup>.通过对比两种防水措施下的计算结果可知:半包防水时,作用在仰 拱上水压力值较大,主要是因为仰拱处未设透水层,而对于设置了全环透水层的全包防水衬砌,作用在 衬砌上的水压力相对较小,且水压力在仰拱、拱顶、边墙等部位的大小逐渐变化,与轴对称均质解析解计 算的水压力有所不同.



图 2 半包排水孔隙水压(単位:kN・m<sup>-2</sup>) Fig. 2 Pore water pressure of semi-circle drainage (unit:kN・m<sup>-2</sup>)



图 3 全包排水孔隙水压(单位:kN・m<sup>-2</sup>) Fig. 3 Pore water pressure of full circle drainage (unit:kN・m<sup>-2</sup>)

#### 4.4 数值计算模型

六盘山隧道的围岩主要为粉砂质泥岩,主要分为N级深埋段、N级加强段和V级深埋段.围岩采用 半包排水的衬砌设计,衬砌厚度为0.5 m.由于防水板的隔水作用,可认为二次衬砌材料的渗透系数是 零值<sup>[10-12]</sup>(在计算中,不考虑喷混凝土层的阻水作用),但为了避免计算结果出现奇异,取衬砌渗透系数  $k_1=1 \text{ pm} \cdot \text{s}^{-1}$ ;无纺布的渗透系数约为 2 mm  $\cdot \text{s}^{-1}$ ,取透水层渗透系数为 1  $\mu \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ .围岩渗透系数根 据水文实验结果选取,排水孔宽度及透水层厚度可以根据式(7),(8)求得,隧道埋深分别为 292,450.6, 124.5 m.

计算参数如表1所示.表1中:k<sub>r</sub>表示围岩渗透系数;δ表示透水层厚度;D表示排水孔直径;k表示 排水孔渗透系数.

围岩级别	$k_{\rm r}/{ m m}$ • s <sup>-1</sup>	$\delta/\mathrm{mm}$	$D/\mathrm{mm}$	$k/\mathrm{km}$ • $\mathrm{s}^{-1}$
Ⅳ级深埋段	0.320	5.41	2.35	1.00
Ⅳ级加强段	0.345	6.07	3.52	1.00
V级深埋段	0.369	6.72	4.70	1.00

表 1 复合衬砌量化修正渗透系数计算参数 Tab. 1 Calculation Parameters of quantitative correction coefficient of permeability

根据3个断面地层情况将分析模型分为3层:强风化粉砂岩、中风化粉砂质泥岩、中风化粉砂岩,分

层厚度根据实际地层分布选取.计算模型如图 4 所示.



(a)分析模型

(b)模型局部详图

图 4 复合衬砌量化修正渗透系数计算模型

Fig. 4 Analysis model of quantitative correction coefficient of permeability

#### 4.5 复合衬砌量化修正渗透系数分析

将数值分析得到的 3 种不同工况下对应的涌水量 Q<sub>1</sub>,Q<sub>2</sub>,Q<sub>3</sub> 带入到式(3),可得 3 种工况下量化修 正渗透系数,如表 2 所示.

表 2 复合衬砌量化修正渗透系数

Tab. 2 Results of quantitative correction coefficient of permeability

围岩级别	$k_{ m r}/\mu{ m m}$ • s <sup>-1</sup>	$r_{\rm o}/{ m m}$	$r_1/\mathrm{m}$	H/m	$Q/ imes 10^{-5} \mathrm{m}^3 \cdot (\mathrm{m} \cdot \mathrm{s})^{-1}$	$K_1^*$ /nm • s <sup>-1</sup>
Ⅳ级深埋段	0.320	5.85	6.35	200	6.06	8.25
Ⅳ级加强段	0.345	5.85	6.35	200	7.60	12.60
V级深埋段	0.369	5.85	6.35	200	8.13	13.40

### 4.6 基于量化修正渗透系数涌水量预测

为了验证基于量化修正渗透系数隧道涌水量预测方法的可靠性,重新选取参数采用 MIDAS-GTS 建立有限元分析模型,计算隧道涌水量,并与采用量化修正渗透系数的轴对称解计算的涌水量进行对比 分析.水头高度分别为 300,350,400 m,衬砌内径为 5.85 m,衬砌外径为 6.35 m,衬砌、透水层、排水孔 渗透系数不变,计算得到 3 个断面涌水量,如表 3 所示.

由表 3 可知:基于量化修正渗透系数的轴对称解求得涌水量与有限元法计算的涌水量比较接近,所以,复合衬砌采用量化修正渗透系数预测涌水量是可行的.

表 3 涌水量对比

Tab. 3 Comparative analysis of the tunnel water inflow							
工况	$k_{ m r}/\mu{ m m}$ • s <sup>-1</sup>	H/m	$K_1^*$ /nm • s <sup>-1</sup>	$Q_1 \times 10^{-5} \mathrm{m}^3 \cdot (\mathrm{m} \cdot \mathrm{s})^{-1}$	$Q_2$ / $ imes$ 10 <sup>-5</sup> m <sup>3</sup> • (m • s) <sup>-1</sup>		
1	0.320	300	8.25	9.13	8.57		
2	0.345	350	12.60	13.60	12.10		
3	0.369	400	13.40	17.80	14.50		

上述方法是基于双线隧道,根据涌水量相等的原则,进行反算得到的衬砌量化量化修正渗透系数, 当应用于单线隧道时,亦可采用相同的思路进行分析,但是衬砌量化修正渗透系数应该按照上述步骤重 新进行计算分析.

# 5 结论

1) 将设置有排导系统的复合衬砌进行简化处理,得到了一个均匀透水的简化衬砌的量化修正渗透 系数,为复合衬砌涌水量的预测提供了有效的方法.

2)提出了复合衬砌量化修正渗透系数 K<sup>\*</sup> 的概念及计算方法,进而得到了依据整体衬砌的轴对称 解计算复合衬砌涌水量的计算方法.

3) 通过六盘山隧道实际工程3个工况涌水量预测验证,发现3种围岩级别的工况下,量化修正渗

透系数法计算的涌水量与有限元法计算的涌水量比较接近,表明在一定条件下,这种新方法预测涌水量 是可行的.

4)分析两种复合衬砌涌水量的大小关系,并且得到了作用在衬砌仰拱、拱顶、边墙等部位的水压力 大小的变化特征,与常规计算的水压力分布有所不同.

### 参考文献:

- [1] KRAHN J. Seepage modeling with SEEP/W[EB/OL]. [2011-2-26]. http://www.geo-Slope.com.
- [2] 郭瑞,周晓军.水底隧道复合式衬砌水压力影响因素分析[J].铁道标准设计,2014,58(4):78-82.
- [3] 王建宇. 隧道围岩渗流和衬砌水压力荷载[J]. 铁道建筑技术, 2008(2): 1-6.
- [4] 吴治生,张杰. 岩溶隧道涌水影响因素、预测方法及危害分析[J]. 铁道工程学报,2011(11),58-61.
- [5] 邓捷. 拖乌山湿地下穿隧道涌水量预测分析[J]. 公路交通科技, 2011(12): 210-212.
- [6] 郭牡丹,王述红.基于流固耦合理论的隧道涌水量预测[J].东北大学学报:自然科学版,2011,32(5):745-748.
- [7] 王秀英,王梦恕,张弥.计算隧道排水量及衬砌外水压力的一种简化方法[J].北方交通大学学报,2004,28(1):8-10.
- [8] 杜朝伟,王梦恕,谭忠盛.水下隧道渗流场解析解及其应用[J]. 岩石力学与工程学报,2011(9):3567-3573.
- [9] 王俊林,马艳.土工织物透水特性试验研究[J].中国水土保持,2007(8):27-28.
- [10] 张志强,何本国,何川.水底隧道饱水地层衬砌作用荷载研究[J]. 岩体力学,2010(8):2445-2470.
- [11] 朱祖熹,路明,柳献.隧道防排水设计与施工[M].北京:中国建筑工业出版社,2012:313-338.
- [12] 蒋忠信. 隧道工程与水环境的相互作用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 121-127.

# Calculation on the Calculation Method of Tunnel Water Inflow Based on Quantitative Correction Coefficient of Permeability Composite Lining

DING Xiao-ping<sup>1</sup>, LIU Zhao<sup>2</sup>, SHI Bao-tong<sup>2</sup>, HUANG Man<sup>2</sup>

Ningxia Highway Construction Authority, Yinchuan 750002, China;
 CCCC First Highway Consultants Company Limited, Xi'an 710075, China)

Abstract: Assuming that the two uniform seepage tunnel lining and constant water inflow, the water inflow was calculated in the tunnel with composite lining waterproofing sheet and drainage system by the water inflow axisymmetric solution. Through the back analysis, a quantitative correction coefficient of permeability of composite lining  $K^*$  is obtained, the feasibility and accuracy of this method is verified by the actual project Liu-pan mountain long tunnel, providing favorable conditions for the composite lining inflow calculation.

Keywords: composite lining; tunnel; coefficient of permeability; water inflow; calculation method

(责任编辑:陈志贤 英文审校:方德平)
**文章编号:**1000-5013(2015)04-0467-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.04.0467

# 电子垃圾拆解场周边环境多氯萘污染检测

## 秦小军,陈群利

(贵州工程应用技术学院 生态工程学院,贵州 毕节 551700)

摘要: 使用高分辨气相色谱质谱仪,采用同位素稀释技术对电子垃圾拆解场及其周边土壤和沉积物两种环境介质进行采样检测分析.检测结果表明:电子垃圾拆解场对周边环境有明显的多氯萘(PCNs)污染影响,周边土壤介质 PCNs 检出质量比为 95.9~702 ng · kg<sup>-1</sup>,沉积物介质 PCNs 检出质量比为 56.2~75.0 ng · kg<sup>-1</sup>;检出的 PCNs 同族物中,污染贡献较大的主要是 MO-CNs 和 Di-CNs 等低氯代 PCNs,为 58.5%,其次是 Hexa-CNs,为 10.5%;电子垃圾拆解场对周边环境 PCNs 污染主要贡献源是电子垃圾焚烧过程,污染传播的 主要渠道为大气 PCNs 沉降作用.研究结果表明:电子垃圾拆解场对周边环境有着明显的 PCNs 污染影响,尤 其是低氯代 PCNs 污染,而控制其污染的关键点是电子垃圾焚烧处置过程污染控制.

关键词: 多氯萘;电子垃圾拆解场;垃圾焚烧;同位素稀释

**中图分类号:** X 53 文献标志码: A

多氯萘(polychlorinated naphthalenes, PCNs)是一类基于萘环上的氢原子被氯原子所取代的共平面异构体的总称,共75种.当萘环2,3,7,8取代位有3~4个氯被取代时,就会和二噁英类化合物一样表现出类似的毒性.目前,已经被确证具有二噁英毒性的PCNs同族物共计23种.随着国际社会的普遍关注,PCNs在2013年被建议增列在"关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约"优先控制的污染物名单.环境中PCNs污染来源主要有两类:有意生产和无意生产.随着人类对PCNs环境危害性的了解,有意生产在世界大多数国家和地区已经被禁止.环境介质中PCNs污染物主要来源于工业生产活动伴随的无意生产,如在垃圾焚烧、金属冶炼和化工生产等过程中均会无意产生PCNs<sup>[1-4]</sup>.研究表明:在一些典型的无意生产污染区域,PCNs的毒性贡献甚至比PCDD/Fs和多氯联苯(PCBs)还要高<sup>[5]</sup>.电子垃圾拆解场是多氯萘污染的典型区域,其场内大量的电缆、各种油类泄漏和部分电子垃圾废品焚烧,都能带来多氯萘污染.目前,对电子垃圾拆解场环境污染的研究多集中在PCDD/Fn和PCBs,对PCNs的研究 鲜见报道.本文对于某电子垃圾拆解场周边环境土壤和沉积物中的多氯萘污染情况进行研究,分析其组分构成、污染水平等,并对其分布的主要影响因素进行探讨.

# 1 材料和方法

#### 1.1 研究区域和样品采集

样品采集区域为浙江省宁波市某电子垃圾拆解场,占地约10000m<sup>2</sup>,拆解场有电子产品回收点5家,周边为成片树林及零星农田,场内有一河流自北往南流过.在该区域设置7个土壤采样点和3个沉积物采样点,各采样点分布如图1所示.

#### 1.2 仪器与试剂

1.2.1 仪器 Auto Sepc Premier TM 型高分辨气相色谱质 谱仪(美国 Waters 公司); ASE300 型快速溶剂萃取仪(美国戴



图 1 采样点位布置图 Fig. 1 Location of sampling sites

**收稿日期:** 2015-06-16

**基金项目:** 贵州省科学技术基金项目(黔科合 J字(2012)2012 号)

通信作者: 秦小军(1981-),男,讲师,博士研究生,主要从事环境科学的研究. E-mail:qinxj01@163.com.

安公司);FDU-2100型埃朗冷冻干燥机(日本 EYELA 公司).

1.2.2 试剂 无水硫酸钠,优质纯,400 ℃烘烤4h后干燥器存放备用;硅胶,80~100目,分析纯(德国 Merck公司);二氯甲烷、正己烷,农残级(德国 Merck公司);壬烷,农残级(美国 Sigma-Aldrich公司); 氧化铝(美国 Sigma-Aldrich公司).

1.2.3 标准品 目标物标准 ECN 5497、提取内标 ECN 5102 和用做进样内标的 68AI-SS 等标准化合物(美国 Wellington 公司);其他 MO-CN, Di-CN, Tri-CN 等标准品(美国 Cambridge Isotope Laboratories, Inc 公司).

#### 1.3 样品处理

1.3.1 采集样品,冷冻干燥 48 h(根据含水量适当调整冻干时间,确保样品干燥)后,研磨粉碎,过 100 目筛后,保存备用.提取时,称取 15 g制备好的土壤和沉积物样品,与适量硅藻土拌匀后,转移置于 ASE 萃取池,添加提取内标,使用二氯甲烷和正己烷(体积比 1:1)混合溶液进行提取,收集提取液备用.

1.3.2 提取液经过脱水,真空浓缩至 2.0 mL 左右后,依次使用多层硅胶柱和氧化铝柱进行净化,样品 净化后再次进行真空浓缩处理,转移至样品瓶,氮吹至近干,添加 0.1 mg・L<sup>-1</sup> 68AI-SS 标准液 100.0 μL,定容后上机分析.

#### 1.4 色谱质谱方法

气相色谱:DB-5 MS 型色谱柱,大小为 60 m×0.25 mm×0.25  $\mu$ m;进样口温度为 280 ℃;不分流进 样,进样体积为 1.0  $\mu$ L;载气流速为 1.0 mL • min<sup>-1</sup>;柱温箱升温程序如下 80 ℃(2 min)  $\xrightarrow{5 \degree C \cdot min^{-1}}$ 180 ℃  $\xrightarrow{3 \degree C \cdot min^{-1}}$  270 ℃(5 min).质谱条件:质谱工作采用 EI<sup>+</sup>模式;HRGC-HRMS 离子源温度为 280 ℃ 倍增器 650:电子发射能量为 35 eV:质谱动态分  $\xrightarrow{800}$  [

℃,倍增器 650;电子发射能量为 35 eV;质谱动态分 辨率大于 10 000.

# 2 结果与分析

#### 2.1 PCNs 污染水平分析

对电子垃圾拆解场土壤和沉积物样品进行检测,结果表明:该电子垃圾拆解场对场地区域及其周 边环境介质存在着明显的 PCNs 污染影响,污染水 平比国内外其他同类污染区域相对较轻.

对采自电子垃圾拆解场的样品进行分析,土壤 样品 PCNs 检出质量比为 95.9~702.26 ng•kg<sup>-1</sup>, 均值为 222.8 ng•kg<sup>-1</sup>;沉积物样品 PCNs 检出质 量比为 56.2~75.0 ng•kg<sup>-1</sup>,均值为 67.2 ng•kg<sup>-1</sup>





polychlorinated naphthalene at each sampling point

量比为 56.2~75.0 ng•kg<sup>-1</sup>,均值为 67.2 ng•kg<sup>-1</sup>.具体各采样点检出质量比(w),如图 2 所示.国内 其他地区和国外部分地区土壤样品沉积物样品检测结果,如表 1 所示.表 1 中:w 为 PCNs 检出质量比. 由表 1 可知:该电子垃圾拆解场周边环境多氯萘检出质量比处于中下水平.

表1 国内外部分地区土壤和沉积物 PCNs 污染比较

Tab. 1	PCNs	concentrations	in	soil	and	sediment	samples	from	some	countries	and	regions
							*					

地区	年份	介质	$w/\mathrm{ng}$ • $\mathrm{kg}^{-1}$	参考文献
莱州湾入海口	2011	沉积物	0~5 100	[6]
东江河	2012	土壤	$10\!\sim\!666$	[7]
台州	2007	沉积物	$130 \sim 3.5 \times 10^{5}$	[8]
辽河入海口	2007	沉积物	33~284	[9]
青岛近岸	2007	沉积物	212~1 209	[10]
北美洲安大略湖	2008	沉积物	$21\ 000\!\sim\!38\ 000$	[11]
德国氯碱厂	1997	土壤	$1.79 \times 10^{7}$	[4]
文中地区	2014	土壤	95.9~702.3	_
文中地区	2014	沉积物	56.2~75.0	—

#### 2.2 PCNs 污染分布特征

各采样点污染分布特征为:焚烧区>拆解区>周边土壤>周边沉积物. 污染源对周边环境 PCNs 污染渠道主要是大气 PCNs 沉降作用.

所有采样点中,G2点的多氯萘检出质量比最高(702.3 ng•kg<sup>-1</sup>),G2采样点为电子垃圾焚烧区监控点,垃圾焚烧对 PCNs 的贡献已经被证实,G2点多氯萘检出质量比明显高于其他点.这说明电子垃圾焚烧过程对 PCNs 污染有显著的贡献<sup>[12]</sup>.G1采样点是电子垃圾拆解区,该点检出质量比为 183.6 ng•kg<sup>-1</sup>,明显高于未污染环境土壤(32 ng•kg<sup>-1</sup>),也高于其他周边的采样点.这表明电子垃圾拆解场拆解 过程对环境 PCNs 污染也存在一定的贡献.G3,G4,G5,G6,G7 点为电子垃圾拆解场周边环境采样点,距离焚烧区相对较远;G3,G4,G5 均为菜地,其 PCNs 检出质量比相近,分别为 176.4,142.3 和 161.0 ng•kg<sup>-1</sup>,稍低于 G1;G6(98.4 ng•kg<sup>-1</sup>),G7(95.9 ng•kg<sup>-1</sup>)同样作为周边环境采样点,PCNs 检出 质量比明显小于 G3,G4 和 G5.造成这种差异的主要原因是 G6,G7 采样点为林地,植被遮挡对该区域 PCNs 污染有一定的影响,这从另一角度说明了污染源对周边环境 PCNs 污染的主要途径是大气污染物沉降作用.

沉积物样品 W1,W2 和 W3 的检出质量比分别为 75.0,70.2 和 56.2 ng • kg<sup>-1</sup>,与国内外相同环境 介质中检出质量比(212~1 209 ng • kg<sup>-1[13]</sup>,0.27~2.8 μg • kg<sup>-1[14]</sup>,0.3~0.8 μg • kg<sup>-1[15]</sup>)比较,污 染浓度相对较低.W3 点比 W1 和 W2 的检出质量比较低,应该是河流沿途降解和吸附沉淀作用所致.

#### 2.3 PCNs 同族物组分构成特征

各采样点样品 PCNs 组分构成,整体上有统一的相似性. 低氯代的 PCNs 占据了大比例的组分构成,MO-CNs 和 Di-CNs 所占比例范围是 49.0%~85.9%,平均贡献为 58.5%. 其次是 Hexa-CNs,所占比例范围是 3.3%~18.3%,平均贡献为 10.5%. 高氯代的 PCNs 质量分数相对较低<sup>[15]</sup>. 整体样品组分构成,如图 3 所示. 图 3 中:η为各采样点样品 PCNs 同族体的质量分数. 这与其他学者对土壤和沉积物样品的检测结果一致<sup>[7,9,16]</sup>.

这种样品组分构成,一方面和污染渠道有关,另一方面也和多氯萘本身的物理化学性质存在一定的 关系.有相关研究发现,低氯代的 PCNs 更容易分布在气相中<sup>[17]</sup>.Mari 等<sup>[18]</sup>对工业区和背景区的大气 样品进行了采样分析,发现 MO-CNs 和 Di-CNs 在总检出质量比所占百分比高达 78%.电子垃圾拆解 场周边环境 PCNs 污染多,是大气扩散沉降作用所致.因此,整体上体现出低氯代远高于高氯代比例.另 外,低氯代多氯萘水溶性相对较强,降解速度比高氯代多氯萘低的多,且高氯代的 PCNs 在接受紫外线 照射时,容易在自然界降解为低氯代的 PCNs<sup>[19-20]</sup>.





#### 2.4 PCNs 来源分析

对 PCNs 来源的判定,目前使用较多的是指纹法.这种方法是利用相同来源的 PCNs,具有相同的 同系物组成,进行推测统计.部分 PCNs 多在燃烧产物中存在,在大气环境和工业品中难以发现,如

PCN39,PCN44,PCN48,PCN54,PCN60和PCN70;部分PCN,如PCN39,PCN44,PCN45/36,PCN54, PCN66/67和PCN73,能够在飞灰中合成.这些化合物可以作为燃烧过程的指示物,在某种程度上,表明 其污染来源.

文中研究区域周边无明显 PCNs 污染源,且样品检出的化合物中含有 PCN54,66,67 等化合物.说明无论是土壤样品还是沉积物样品,均受到了电子垃圾焚烧影响.G2 为电子垃圾焚烧区,污染浓度明显高于其他各采样点样品浓度,也反证了这一论断.比较 G2 和其他各土壤样品组分构成,G2 点样品组分构成和其他样品有着明显的区别:其他样品 Di-CNs 检出质量比的质量分数为 2.5%~5.5%,G2 点样品 Di-CNs 的质量分数有了较大的提高,达到了 35.0%.这种明显的差异性表明:除了电子垃圾焚烧来源外,还存在着其他的污染来源,根据现场实际情况,电子垃圾拆解过程应该是 PCNs 污染的另一来源. 推测 G2 点 PCNs 组分构成和其他点位存在显著差异性,主要是其他各点位样品受到拆解过程以及焚烧过程产生的 PCNs 共同作用,而 G2 点焚烧过程污染影响作用更加强烈所致.

### 3 结论

1)该电子垃圾拆解场对周边环境 PCNs 污染存在着显著影响,其附近区域采集的土壤和沉积物样 品均能检测出 PCNs,且检出质量比为 56.23~702.26 ng • kg<sup>-1</sup>,明显高于未污染环境介质.其污染水 平同国内同类研究比较,该电子垃圾拆解场 PCNs 污染处于中低污染水平.部分 PCNs 具有二噁英毒 性,对周边环境的影响可能通过生物蓄积性进一步地放大,需要引起重视.

2)该电子垃圾拆解场各采样点 PCNs 的污染分布规律:焚烧区>拆解区>周边土壤>周边沉积物.这是因为污染源对周边环境 PCNs 污染渠道主要是大气 PCNs 沉降作用.

3) 无论是土壤样品还是沉积物样品,在检出的 PCNs 中,低氯代同族物占据了组分构成主体,Mo-CNs,Di-CNs 的总体质量分数贡献为 58.5%;其次是 Hexa-CNs,总体质量分数贡献为 10.5%;高氯代 的贡献率很低.

4) 电子垃圾焚烧过程是电子垃圾拆解场周边环境 PCNs 污染的主要来源,加强电子垃圾焚烧过程 控制,是解决电子垃圾拆解场 PCNs 污染的关键.

#### 参考文献:

- [1] NIE Zhi-qiang, ZHENG Ming-hui, LIU Wen-bin, et al. Estimation and characterization of PCDD/Fs, dl-PCBs, PC-Ns, HxCBz and PeCBz emissions from magnesium metallurgy facilities in China[J]. Chemosphere, 2011, 85(11): 1707-1712.
- [2] HU Ji-cheng, ZHENG Ming-hui, LIU Wen-bin, et al. Characterization of polychlorinated naphthalenes in stack gas emissions from waste incinerators[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(5): 2905-2911.
- [3] BA T,ZHENG Ming-hui,ZHANG Bing, et al. Estimation and congener-specific characterization of polychlorinated naphthalene emissions from secondary nonferrous metallurgical facilities in China[J]. Environ Sci Technol,2010,44 (7):2441-2446.
- [4] KANNAN K, IMAGAWA T, BLANKENSHIP A L, et al. Isomer-specific analysis and toxic evaluation of polychlorinated naphthalenes in soil, sediment, and biota collected near the site of a former chlor-alkali plant[J]. Environ Sci Technol, 1998, 32(17): 2507-2514.
- [5] PARK H,KANG J H,BAEK S Y, et al. Relative importance of polychlorinated naphthalenes compared to dioxins, and polychlorinated biphenyls in human serum from Korea: Contribution to TEQs and potential sources[J]. Environ Pollut,2010,158(5):1420-1427.
- [6] PAN Xiao-hui, TANG Jiang-hui, CHEN Yin-jun, et al. Polychlorinated naphthalenes (PCNs) in riverine and marine sediments of the Laizhou Bay area, North China[J]. Environ Pollut, 2011, 159(12); 3515-3521.
- [7] WANG Yan, CHENG Zhi-neng, LI Jun, et al. Polychlorinated naphthalenes (PCNs) in the surface soils of the Pearl River Delta, South China: Distribution, sources, and air-soil exchange[J]. Environ Pollut, 2012, 170(11):1-7.
- [8] 王学彤,贾金盼,李元成,等.电子废物拆解区河流沉积物中多氯萘的污染水平、分布特征及来源[J].环境科学学报,2011,31(12):2707-2713.

- [9] ZHAO Xiao-feng, ZHANG Hai-jun, FAN Jing-feng, et al. Dioxin-like compounds in sediments from the Daliao River Estuary of Bohai Sea: Distribution and their influencing factors[J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, 62(5):918-925.
- [10] PAN Jing, YANG Yong-liang, XU Qing, et al. PCBs, PCNs and PBDEs in sediments and mussels from Qingdao coastal sea in the frame of current circulations and influence of sewage sludge[J]. Chemosphere, 2007, 66(10): 1971-1982.
- [11] HELM P A,GEWURTZ S B,WHITTLE D M,et al. Occurrence and biomagnification of polychlorinated naphthalenes and non- and mono-ortho PCBs in Lake Ontario sediment and biota[J]. Environ Sci Technol, 2008, 42(4): 1024-1031.
- [12] SCHUHMACHER M, NADAL M, DOMINGO J L. Levels of PCDD/Fs, PCBs, and PCNs in soils and vegetation in an area with chemical and petrochemical industries[J]. Environ Sci Technol, 2004, 38(7): 1960-1969.
- [13] 杨永亮,潘静,李悦,等.青岛近岸沉积物中持久性有机污染物多氯萘和多溴联苯醚[J].科学通报,2003,48(21): 2244-2251.
- [14] LUNDGREN K, TYSKLIND M, ISHAQ R, et al. Flux estimates and sedimentation of polychlorinated naphthalenes in the northern part of the Baltic Sea[J]. Environ Pollut, 2003, 126(1):93-105.
- [15] KANNAN K, IMAGAWA T, YAMASHITA N, et al. Polychlorinated naphthalenes in sediment, fishes and fisheating waterbirds from Michigan waters of the Great Lakes[J]. Organohalogen Compds, 2000, 47(2):13-16.
- [16] KRAUSS M, WILCKE W. Polychlorinated naphthalenes in urban soils: Analysis, concentrations, and relation to other persistent organic pollutants[J]. Environ Pollut, 2003, 122(1):75-89.
- [17] 刘芷彤,郑明辉.珠江底泥中多氯萘的含量及分布特征研究[C]//持久性有机污染物论坛 2012 暨第七届持久性有机污染物全国学术研讨会论文集.天津:清华大学持久性有机污染物研究中心,2012:98-100.
- [18] MARI M, SCHUHMACHER M, FELIUBADALO J, et al. Air concentrations of PCDD/Fs, PCBs and PCNs using active and passive air samplers[J]. Chemosphere, 2008, 70(9):1637-1643.
- [19] RUZO L O,BUNCE N J,SAFE S, et al. Photodegradation of polychloronaphthalenes in methanol solution[J]. Environmental Contamination and Toxicology, 1975, 14(3): 341-345.
- [20] GULAN M P,BILLS D D,PUTNAM T B. Analysis of polychlorinated naphthalenes by gas chromatography and ultraviolet irradiation[J]. Environmental Contamination and Toxicology,1974,11(5):438-441.

# Pollution Detection of Polychlorinated Naphthalenes in Soils and Sediment near E-Waste Dismantling Sites

# QIN Xiao-jun, CHEN Qun-li

(College of Ecological Engineering, Guizhou University of Engineering Science, Bijie 551700, China)

**Abstract:** The soil and sediment samples collected from the e-waste dismantling were analyzed by the isotope dilution HRGC-HRMS. The results showed that there was obvious polychlorinated naphthalenes (PCNs) pollution of e-waste dismantling field on the surrounding environment, and the mass ratio of PCNs in the soil samples and sediment samples ranged from 95.9 to 702 and 56.2 to 75.0 ng  $\cdot$  kg<sup>-1</sup>, respectively. The Low chlorinated pollutants (MO-CNs and Di-CNs) were the main pollutants with the percentage 58.5%, the second was the Hexa-CNs with percentage 10.5%. The main source of PCNs pollution is the electronic waste incineration process, and the main spread channels of PCNs was the settlement of atmospheric diffusion effect. The research results indicate that the e-waste dismantling field has obvious PC-Ns pollution impact on surrounding environment, especially the low chlorinated PCNs pollution, and the key to control the PCNs pollution of e-waster dismantling is to control electronic waste incineration disposal process.

Keywords: polychlorinated naphthalenes; e-waste dismantling sites; waste incineration; isotope dilution

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:刘源岗)

**文章编号:**1000-5013(2015)04-0472-06

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.04.0472

# 考虑风险偏好的 Stackelberg 博弈模型及 其在 PPP 项目中的数值求解

# 杜杨1,2,丰景春1

(1. 河海大学 商学院,江苏 南京 211100;
 2. 金陵科技学院 建筑工程学院,江苏 南京 211169)

摘要: 研究考虑风险偏好的 Stackelberg 博弈模型和均衡策略,针对公私合作制(PPP)项目补偿决策问题, 根据前后补偿的特点,建立相应的补偿策略数学模型.分别进行集中决策和分散决策分析,得出 PPP 项目的 最优补偿方案.通过数值分析比较和分析私人风险厌恶对于 PPP 补偿机制的影响.研究表明:私人投资者风 险厌恶会导致政府方补偿成本增加.期望收益减少;私人投资者风险厌恶程度会影响补偿的配置方式,厌恶程 度越低越倾向单一补偿,厌恶程度越高越倾向混合补偿.

关键词: Stackelberg 博弈模型;风险偏好;公私合作制项目;政府补偿;决策分析
 中图分类号: C 931; O 29
 文献标志码: A

Stackelberg 博弈模型的主要特点是针对主从决策问题,即从决策者地位不同,将博弈双方分成主动方和从属方.在公私合作制(public-private partnerships,PPP)项目中,两大主体政府与私人投资者明显地位不平等,而双方的决策过程为政府确定投资方案,私人投资者进行策略跟随,完全适合采用Stackelberg 博弈模型进行分析.为了提高模型的实际适用性,博弈主体风险偏好等行为认知因素不能忽略.而现有 PPP 项目补偿研究中,要么将政府补偿当做实物期权<sup>[14]</sup>,要么专注于补偿调节、补偿政策等<sup>[5-10]</sup>,少数关注博弈互动研究又忽视了主体认知的影响<sup>[11]</sup>.因此,本文构建考虑风险偏好的 Stackelberg 博弈模型,并结合 PPP 项目情境设定参数进行求解分析.

## 1 基本博弈模型

考虑主体风险偏好差异的 Stackelberg 博弈模型为

$$\max_{x} E[\pi_{1}(x,y)] = \pi_{1}(x,\xi),$$
s.t.  $x \in \arg \max E[g[\pi_{2}(x,y)]] = \max \pi_{2}^{a}[f_{2}(x,\xi)],$ 
(1)
s.t.  $\max E[\pi[f_{2}(x,\xi)]] \ge \Omega.$ 

式(1)中: $\pi[f_1(\cdot)],\pi[f_2(\cdot)]$ 分别为主动方和从属方的收益函数; $\Omega$ 为从属方的保留效用; $\xi$ 为主动 方对从属方的鼓励或惩罚条件; $g[\pi_2(x,\xi)]$ 为从属方的效用函数; $\pi_2^{\circ}[f_1(x,\xi)]$ 为效用函数  $g[\pi_2(x,\xi)]$ 的确定性等价收益. 假定 Arrow-Pratt 绝对风险规避系数为 $\rho$ ,则  $g[\pi_2(x,\xi)]$ 可表达为

$$g[\pi_2(x,\xi)] = -\exp(-\rho\pi_2(x,\xi)).$$
<sup>(2)</sup>

 $\pi_2^a(x,\xi)$ 可以通过下式求出,即

$$-\exp(-\rho\pi_2^a(x,\xi)) = E\left[-\exp(-\rho\pi_2(x,\xi))\right].$$
(3)

**收稿日期**: 2015-06-16

通信作者: 丰景春(1963-),男,教授,博士,主要从事工程管理和项目管理及其信息化方面的研究. E-mail:feng.jingchun@163.com.

基金项目: 国家社科基金重点资助项目(14AZD024);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014B09014); 中国博士后科学基金资助项目(2014M551498)

# 2 主要假设

假定项目需要的总投资为 *I*<sub>P</sub>,其社会价值为 *V*(*I*<sub>P</sub>),项目价值的系数为 *m*,则 *V*(*I*<sub>P</sub>)=*mI*<sub>P</sub>,*m*>0. PPP 补偿主要包括前补偿(建设期)和后补偿(运营期). 假定公益性部分占项目总投资额比例为 *φ* (0<*φ*<1),*T* 为特许经营期,则单期前补偿为 *S*<sub>e</sub>=*φI*<sub>P</sub>/*T*. 政府许诺给私人投资者 *R*<sub>e</sub> 的基准运营收益,表 达为 *R*<sub>e</sub>=*nI*<sub>P</sub>,*n*>1. 其中:*n* 为基准运营收益率,可由资本资产定价模型(CAPM)进行测算.

后补偿 S。由投资的实际收益与政府许诺的基准收益的差值决定,则单期后补偿为 S。=  $\frac{\theta(nI_p - r_aI_p)}{T}$ .其中: $\theta$ 为运营期补偿系数; $r_a$ 为基于项目投资额的实际运营收益率,其为随机变量无法确定.假定  $\epsilon$ 为外界不确定因素决定的随机扰动量, $\overline{r_a}$ 为收益率的期望值,则 Var( $\epsilon$ )= $\sigma^2$ .

运营期维护成本为 C(I<sub>p</sub>),项目规模越大维护成本越大,且边际成本递增,则可设 C(I<sub>p</sub>)=kI<sub>b</sub>.其中:k,a为投资转换为维护成本的参数,且 k>0,a>1.

## 3 PPP 博弈模型构建

#### 3.1 支付函数

根据以上假设,不考虑资金的时间价值,私人投资者 P 的单期支付函数为

$$\pi_{\rm P} = \frac{R_{\rm a}}{T} + S - \frac{I_{\rm P}}{T} - \frac{C(I_{\rm P})}{T} = \frac{\phi I_{\rm P}}{T} - \frac{I_{\rm P}}{T} - \frac{k I_{\rm P}^{\rm a}}{T} + \frac{\theta n I_{\rm P}}{T} + \frac{(1-\theta) I_{\rm P} r_{\rm a}}{T}.$$
(4)

公共资金有影子价格<sup>[12]</sup>,设影子价格系数为(1+ $\lambda$ )S,且 $\lambda$ >0,则政府G的单期支函数为

$$\pi_{\rm G} = \frac{V(I_{\rm P})}{T} - \frac{R_{\rm a}}{T} + \pi_{\rm P} - (1+\lambda)S = \frac{mI_{\rm P}}{T} - \lambda \frac{\phi I_{\rm P} + \theta nI_{\rm P} - \theta r_{\rm a}I_{\rm P}}{T} - \frac{I_{\rm P}}{T} - \frac{kI_{\rm P}^{a}}{T}.$$
(5)

式(5)中: $\frac{V(I_{\rm P})}{T} - \frac{R_{\rm a}}{T}$ 为项目消费者剩余; $\pi_{\rm P}$ 为生产者剩余; $(1+\lambda)S/T$ 为政府支付的公共资金成本.

#### 3.2 Stackelberg 博弈决策模型

政府方效用函数即为收益函数 
$$g(\pi_G)$$
,而私人投资者需要考虑其风险偏好,其效用函数为 $p(\pi_P) = -\exp(-\rho\pi_P)$ . (6)

式(6)中: $\rho$ 为绝对风险规避系数.易证, $p'(\pi_P) > 0, p''(\pi_P) < 0.$ 

由式(3),(6)和效用函数的递增性易证,私人投资者最大化期望效用等价于最大化等价收益  $\pi_{P}^{A}$ ,即 max  $E[p(\pi_{P})] = \max \pi_{P}^{A} = \frac{\phi I_{P}}{T} - \frac{I_{P}}{T} - \frac{kI_{P}^{a}}{T} + \frac{\theta n I_{P}}{T} + \frac{(1-\theta)}{T}r_{a}I_{P} - \frac{1}{2}\rho I_{P}^{2} \frac{(1-\theta)^{2}}{T^{2}}\sigma^{2}.$  (7)

假定私人投资者的保留效用为ω,则其投资意愿需满足参与约束条件,即

$$\frac{\phi I_{\rm P}}{T} - \frac{I_{\rm P}}{T} - \frac{k I_{\rm P}^a}{T} + \frac{\theta n I_{\rm P}}{T} + \frac{(1-\theta)^-}{T} r_{\rm a} I_{\rm P} - \frac{1}{2} \rho I_{\rm P}^2 \frac{(1-\theta)^2}{T^2} \sigma^2 \geqslant \omega.$$
(8)

政府为风险中性,其期望效用函数与期望收益等价,即

$$\max_{\phi,\theta} E[g(\pi_{\rm G})] = \int (\frac{mI_{\rm P}}{T} - \frac{\lambda\phi I_{\rm P}}{T} - \frac{\lambda\theta nI_{\rm P}}{T} + \frac{\lambda\theta I_{\rm P}r_{\rm a}}{T} - \frac{I_{\rm P}}{T} - \frac{kI_{\rm P}^{a}}{T})f(r_{\rm a})dr_{\rm a} = \frac{mI_{\rm P} - I_{\rm P} - kI_{\rm P}^{a}}{T} - \frac{\lambda\phi}{T} - \frac{\lambda\theta nI_{\rm P}}{T} + \frac{\lambda\theta I_{\rm P}r_{\rm a}}{T}.$$
(9)

# 4 博弈决策分析

#### 4.1 集中决策博弈分析

集中决策是指在 PPP 项目中政府完全掌握主导权,占有更多信息,能够代替私人投资者确定项目 投资额以及补偿方案,并达成社会效益最大化.

根据式(8),(9),并令

$$F(\theta) = \omega + \frac{I_{\rm P}}{T} + \frac{kI_{\rm P}^{a}}{T} + \frac{1}{2}\rho I_{\rm P}^{2} \frac{(1-\theta)^{2}}{T^{2}}\sigma^{2} - \frac{\bar{r}_{\rm a}I_{\rm P}}{T}, \qquad (10)$$

$$E[S] = \frac{\phi I_{\rm P}}{T} + \frac{\theta n I_{\rm P}}{T} - \frac{\theta I_{\rm P} \bar{r}_{\rm a}}{T}.$$
(11)

则集中补偿决策模型可表达为

$$\max_{I_{\rm P}\phi,\theta} E[g(\pi_{\rm G})] = \frac{mI_{\rm P} - I_{\rm P} - kI_{\rm P}^{a}}{T} - \lambda E(S), \qquad (12)$$

s.t. 
$$E(S) = F(\theta)$$
. (13)

结合式(10),(11),(13),有

$$\frac{1}{2}\rho I_{\rm P}^2 \frac{(1-\theta^*)^2}{T^2} \sigma^2 = \omega + \frac{(1-\alpha)kI_{\rm P}^a}{T}.$$
(14)

式(14)代入式(12),可得

$$\max_{\mathbf{p},S^*} E[g(\pi_G)] = \frac{mI_{\mathbf{P}} - I_{\mathbf{P}} - kI_{\mathbf{P}}^a}{T} - \lambda(2\omega + \frac{(2-\alpha)kI_{\mathbf{P}}^a}{T} + \frac{I_{\mathbf{P}}}{T} - \frac{\bar{r}_{a}I_{\mathbf{P}}}{T}).$$
(15)

当式(15)一阶条件等于0时,有最优投资规模策略 I<sup>\*</sup>,可得

$$I_{\rm P}^{*} = \left(\frac{m - \lambda(1 - \bar{r}_{\rm a}) - 1}{(2\lambda - \lambda\alpha + 1)\alpha k}\right)^{1/(\alpha - 1)}.$$
(16)

最优单期补偿为

$$S^* = 2\omega + \frac{(2-\alpha)k(I_{\rm P}^*)^{\alpha}}{T} + \frac{I_{\rm P}^*}{T}\frac{\bar{r}_{a}I_{\rm P}^*}{T}.$$
(17)

其中,单期运营期望补偿和单期建设期补偿分别为

$$S_{o}^{*} = \begin{cases} \frac{(n - \bar{r}_{a})}{T} (\sqrt{\frac{2\omega T^{2} + 2(1 - \alpha)k(I_{P}^{*})^{a}T}{\rho\sigma^{2}}} + I_{P}^{*}), \frac{2\omega T^{2} + 2(1 - \alpha)k(I_{P}^{*})^{a}T}{\rho(I_{P}^{*})^{2}\sigma^{2}} > 1, \\ \frac{(n - \bar{r}_{a})}{T} (I_{P}^{*} - \sqrt{\frac{2\omega T^{2} + 2(1 - \alpha)k(I_{P}^{*})^{a}T}{\rho\sigma^{2}}}), 0 \leqslant \frac{2\omega T^{2} + 2(1 - \alpha)k(I_{P}^{*})^{a}T}{\rho(I_{P}^{*})^{2}\sigma^{2}} \leqslant 1, \\ S_{c}^{*} = 2\omega + \frac{(2 - \alpha)k(I_{P}^{*})^{a}}{T} + \frac{I_{P}^{*}}{T} \frac{\bar{r}_{a}I_{P}^{*}}{T} - S_{o}^{*}. \end{cases}$$
(18)

**命题1** 在集中决策时,项目存在最优投资规模 *I*<sup>\*</sup> 如式(16),并有最优补偿方案如式(17).其中: 最优运营期补偿如式(18);最优建设期补偿如式(19).

由 $\frac{\partial I_{\rm P}^*}{\partial m}$ >0, $\frac{\partial I_{\rm P}^*}{\partial r_{\rm a}}$ >0, $\frac{\partial I_{\rm P}^*}{\partial \alpha}$ <0, $\frac{\partial I_{\rm P}^*}{\partial k}$ <0, $\frac{\partial I_{\rm P}^*}{\partial \lambda}$ <0,可得推论 1.

**推论1** 在集中决策模式下,PPP项目的最优投资规模与项目的社会价值、运营收益期望值呈正相关,与公共资金成本、项目维护成本呈负相关.PPP项目的最优期望补偿大小与建设期投资、维护成本、私人风险成本以及私人投资者风险厌恶程度呈正相关关系,与期望运营收益呈负相关.

由式(17)可知:当 $S^* \neq 0$ 时,有 $\frac{\partial S^*}{\partial r_a} < 0$ , $\frac{\partial S^*}{\partial T} < 0$ , $\frac{\partial S^*}{\partial \omega} > 0$ , $\frac{\partial S^*}{\partial I_P} > 0$ ,以及 $\frac{\partial S^*}{\partial \alpha_a} > 0$ , $\frac{\partial S^*}{\partial k} > 0$ .综上 分析,可得推论 2.

**推论2** 在集中决策模式下,当 PPP 模式适用,即单期补偿 S\* 不为 0 的前提下,单期补偿 S\* 与期 望运营收益、特许运营期呈负相关,与私人投资者保留效用、维护成本、建设投资呈正相关.

#### 4.2 分散决策博弈分析

由于政府并不掌握私人投资者的全部信息,要想达到双方利益协调,还必须从分散决策的角度做博 弈分析.可以采用逆向归纳法求解,首先考虑私人投资者的策略选择,其一阶条件和二阶条件为

$$\frac{\partial \pi_{\rm P}^{\rm A}}{\partial I_{\rm P}} = \frac{\phi}{T} + \frac{\theta(n-\bar{r}_{\rm a})}{T} - \frac{1}{T} + \frac{\bar{r}_{\rm a}}{T} - \frac{\rho I_{\rm P} (1-\theta)^2 \sigma^2}{T^2}, \qquad (20)$$

$$\frac{\partial^2 \pi_{\rm P}^A}{\partial I_{\rm P}} = -\frac{\alpha(\alpha-1)kI_{\rm P}^{\alpha-2}}{T} - \sigma \frac{\rho(1-\theta)^2}{T^2} \sigma^2 < 0.$$
(21)

分散决策第一阶段下,私人投资者的最优策略 I<sub>P</sub>\*\* 由下式给出

$$\rho(1-\theta)^{2}\sigma^{2}I_{\mathrm{P}}^{**} + \alpha k (I_{\mathrm{P}}^{**})^{\alpha-2}T = T[\phi + \theta(n-\bar{r}_{\mathrm{a}}) + \bar{r}_{\mathrm{a}} - 1].$$

$$(22)$$

命题 2 私人投资者存在最优投资策略 I<sub>P</sub>\*\* 满足式(22),且私人投资者的投资水平与建设期补偿

系数,项目特许运营期、运营期补偿系数、基准运营收益率、运营期实际收益率期望值、运营风险和私人 投资者风险态度等影响因素有关.各影响因素之间的相关性,如表1所示.表1中:"0"表示不相关;"+" 表示正相关;"-"表示负相关.

表1 私人投资者最优策略各影响因素的相关性

Tab. I	Correlation of influencing f	factors of private investor	optimal strategy

因素	Т	$\phi$	n			_2	$\bar{r}_{a}$		
			$\theta > 0$	$\theta = 0$	ρ	σ	$\theta \!\!>\!\! 0$	0 <i>&lt;</i> θ<0	
$I_{ m P}^{**}$	+	+	+	0	_	_	_	+	
					θ				
因素	$0 < \theta \leq \frac{n - \bar{r}_{a} + 2 ho\sigma^{2} I_{P}^{* *}}{2 ho\sigma^{2} I_{P}^{* *}}$					$\theta \!\!>\!\! \frac{n\!-\!ar{r}_{\mathrm{a}}+2 ho\!\sigma^{2}I_{\mathrm{P}}^{**}}{2 ho\!\sigma^{2}I_{\mathrm{P}}^{**}}$			
$I_{ m P}^{**}$	+								

#### 4.3 政府博弈分析

分散决策的第二阶段,政府掌握博弈主导权预测到私人投资的最优投资策略 *I*<sup>\*\*</sup>,则政府的优化问题转变为

$$\max_{\theta} E[g(\pi_{\rm G})] = \frac{mI_{\rm P}^{**} - I_{\rm P}^{**} - k(I_{\rm P}^{**})^{\alpha}}{T} - \lambda(\frac{\phi}{T} + \frac{\theta(n - \bar{r}_{\rm a})}{T})I_{\rm P}^{**}, \qquad (23)$$

s.t. 
$$\frac{\phi I_{P}^{**}}{T} - \frac{I_{P}^{**}}{T} - \frac{k(I_{P}^{**})^{a}}{T} + \frac{\theta n I_{P}^{**}}{T} \frac{(1-\theta)}{T} a I_{P}^{**} - \frac{1}{2}\rho (I_{P}^{**})^{2} \frac{(1-\theta)^{2}}{T^{2}} \sigma^{2} = \omega.$$
(24)

将式(24)代回式(23),可得

m

$$\max_{\substack{\phi,\theta}} E[g(\pi_{\rm G})] = \frac{mI_{\rm P}^{**} - I_{\rm P}^{**} - k(I_{\rm P}^{**})^{\alpha}}{T} - \lambda(2\omega + \frac{(2-\alpha)k(I_{\rm P}^{**})^{\alpha}}{T} + \frac{I_{\rm P}^{**}}{T} - \frac{\bar{r}_{\rm a}I_{\rm P}^{**}}{T}).$$
(25)

令式(25)的一阶条件等于 0,可得

$$I_{P}^{***} = \left(\frac{m - \lambda(1 - \bar{r}_{a}) - 1}{(2\lambda - \lambda\alpha + 1)\alpha k}\right)^{1/(\alpha - 1)}.$$
(26)

式(26)中:上标\*\*\*表示政府在分散决策第二阶段的最优策略.易知, $I_{P}^{**}$ 满足式(22),即 $I_{P}^{**} = I_{P}^{**}$ .分散决策下政府方最优补偿设计为

$$\theta^{***} = \begin{cases} \sqrt{\frac{2\omega T^2 + 2(1-\alpha)k(I_{P}^{***})^{a}T}{\rho(I_{P}^{***})\sigma^{2}}} + 1, & \frac{2\omega T^2 + 2(1-\alpha)k(I_{P}^{***})^{a}T}{\rho(I_{P}^{***})^{2}\sigma^{2}} > 1, \\ 1 - \sqrt{\frac{2\omega T^2 + 2(1-\alpha)k(I_{P}^{***})^{a}T}{\rho(I_{P}^{***})\sigma^{2}}}, & 0 \leq \frac{2\omega T^2 + 2(1-\alpha)k(I_{P}^{***})^{a}T}{\rho(I_{P}^{***})^{2}\sigma^{2}} \leq 1. \end{cases}$$

$$\phi^{***} = \frac{2\omega T}{I_{P}^{***}} + (2-\alpha)k(I_{P}^{***})^{a-1} + 1 - \bar{r}_{a}\theta^{***}(n - \bar{r}_{a}). \tag{28}$$

归纳上述分析可得命题3和推论3.

**命题3** 在分散决策下,私人投资者的最优投资策略为 $I_{P}^{**}$ 满足式(22),政府方通过提供参数为 ( $\theta^{**}, \phi^{**}$ )的补偿方案,可诱导出项目的最优投资规模 $I_{P}^{***}$ 如式(26), $\theta^{**}, \phi^{***}$ 可分别由式(27), (28)给出.

**推论3** 补贴方案(θ\*\*\*,φ\*\*\*)可以使 PPP 项目私人投资者和政府的利益达到协调,在满足私人 投资者最优策略的条件下,达到项目的最优投资规模.此时,私人投资者的效用达到其自身的保留效用, (θ\*\*\*,φ\*\*\*)补贴方案下的社会最大净效益也达到最大,形成有效补偿机制.

# 5 数值分析

#### 5.1 风险偏好对激励效能和补偿方式的影响

项目各参数赋值如下:m=2.7; $\lambda=0.5$ ;k=0.1; $\alpha=1.1$ ; $\bar{r}_{a}=1.01$ ; $\omega=1\times10^{8}$ .

根据式(27),(28),使用 Mathematica 9.0 软件作数值分析结果,如图 1,2 所示.图 1,2 中:ρ 为绝对 风险规避系数;θ 为运营期补偿系数.由图 1(a)可知:当私人投资者风险厌恶程度较低时,可以选择采取

完全后补偿(运营期补偿)方式(ø=0);但随着私人投资者厌恶程度加深,必须提高建设期补偿的比例.

当政府财政资金充足或项目预期收益不足时,只要私人投资者厌恶程度合适,政府有可能采取完全 建设期补偿的方式诱导出最优投资规模.由图2可知:随着私人投资者厌恶程度的加深,前补偿降低而 后补偿增加.



Fig. 2 When  $0 \le \theta < 1$ , influence of  $\rho$  changes on  $\theta$  and  $\phi$ 

#### 5.2 私方风险偏好政府效用的影响

由于私人投资者的效用始终为ω,因此,只讨论风险厌恶程度对政府收益的影响.沿用节 5.1 其他 赋值,令ρ<sub>1</sub>=0,ρ<sub>2</sub>=1,可分别得到风险厌恶和风险中性政府期望效益曲线,如图 3 所示.图 3 中:π<sub>G</sub> 为政 府期望收益;*i* 为投资规模.



Fig. 3 Curves of government utility in risk-neutral and risk-aversion respectively

由图 3(a),(b)可知:在设定的参数下,考虑私方风险厌恶在最优投资规模处的政府期望收益要小于风险中性假设下的政府期望收益.当私人投资者保留效用很大或期望运营收益很小时,可能造成无论给出何种补偿方案都无法避免政府效用出现负值的情况,此时,PPP 模式就不再适用.

## 6 结束语

在考虑公私双方风险偏好差异的基础上,针对 PPP 项目补偿问题,构建公私双方的 Stackelberg 博

### 参考文献:

- [1] MASON S P, BALDWIN C Y. Evaluation of government subsidies to large-scale energy projects: A contingent claims approach[J]. Advances in Futures and Options Research, 1988, 33(1):169-181.
- [2] HO S P, LIU L Y. An option pricing-based model for evaluating the financial viability of privatized infrastructure projects[J]. Construction Management and Economics, 2002, 20(2):143-156.
- [3] 李明顺,陈涛,滕敏.交通基础设施 PPP 项目实物期权定价及敏感性分析[J].系统工程,2011,29(3):67-73.
- [4] 郭健. 公路基础设施 PPP 项目交通量风险分担策略研究[J]. 管理评论, 2013, 25(7): 11-19, 37.
- [5] CHEAH C, LIU Ji-cai. Valuing governmental support in infrastructure projects as real options using Monte Carlo simulation[J]. Construction Management and Economics, 2006, 24(5):545-554.
- [6] JUN J. Appraisal of combined agreements in BOT project finance: Focused on minimum revenue guarantee and revenue capagreements[J]. International Journal of Strategic Property Management, 2010, 14(2): 139-155.
- [7] WIBOWO A. Valuing guarantees in a BOT infrastructure project[J]. Engineering, Construction and Architectural Management, 2004, 11(6): 395-403.
- [8] FEARNLEY N, BEKKEN J T, NORHEIM B. Optimal performance-based subsidies in Norwegian intercity rail transport[J]. International Journal of Transport Management, 2004, 2(1):29-38.
- [9] 邓小鹏,熊伟,袁竞峰,等.基于各方满意的 PPP 项目动态调价与补贴模型及实证研究[J].东南大学学报:自然科学版,2009,39(6):1252-1257.
- [10] CHOWDHRURY A N, CHAROENNGAM C. Factors influencing finance on PPP projects in Asia: A legal framework to reach the goal[J]. International Journal of Project Management, 2009, 27(1):51-58.
- [11] 吴孝灵,周晶,彭以忱,等.基于公私博弈的 PPP 项目政府补偿机制研究[J].中国管理科学,2013,21(增刊1):198-204.
- [12] 刘明.中国公共资金边际成本估量与分析[J].财经论丛,2009(6):31-38.

# Stackelberg Game Model with Risk Preference and Numerical Solving in the PPP Project Problem

DU Yang<sup>1,2</sup>, FENG Jing-chun<sup>1</sup>

(1. Business School, Hehai University, Nanjing 211100, China;

2. Architectural Engineering Institute, Jinling Institute of Technology, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Based on the game theory and risk preference, the Stackelberg game model and equilibrium strategy are established on decision-making problem for government compensation in public-private partnerships (PPP) project. After centralization and decentralization decision analysis, the optimal plan is obtained. Research results show that the compensation cost and the optimal scale of investment considering the risk preference are more than the risk-neutral hypothesis and the effects on the government's expected revenue are contrary. The research results also show the degree of the private's risk-aversion will affect the configuration mode of the government compensation.

Keywords: stackelberg game model; risk preference; public-private partnerships project; government compensation; decision analysis

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:黄心中)

文章编号:1000-5013(2015)04-0478-06

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.04.0478

# 某些近于凸调和函数的解析性质和系数估计

# 黄赟,黄心中

(华侨大学 数学科学学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 研究单位圆盘 D上某些具有稳定近于凸的调和函数  $f(z) = h(z) + \overline{g(z)}$ 解析部分 h(z)满足 Re{1+ $z\frac{h''(z)}{h'(z)}$ }> $c, -\frac{1}{2} < c \le 0$  时的解析表示和系数估计表达式. 对其复伸张 w(z)为一次多项式时,给出了 f(z)的稳定近于凸的判别条件,并且推广了 Bshouty 和 Nagpal 等的结果. 特别地,当 Re{1+ $z\frac{h''}{h'}$ }> $c, -\frac{1}{2} < c \le 0$ , $w(z) = z^2$  时,估计了  $f = h + \overline{g}$  在单位圆盘上的稳定近于凸半径. 关键词: 调和函数;稳定近于凸;系数估计;单叶半径 中图分类号: O 174.51 文献标志码: A

# 1 预备知识

对定义在平面区域 Ω⊂C上的二阶连续可导复值函数  $f(z) = u(z) + iv(z), z = x + iy \in \Omega,$ 若 Δ $f = 4f_{\overline{z}} = 0$ ,则称 f 为调和的. 这里  $f_{z} = \frac{1}{2}(\frac{\partial f}{\partial x} - i\frac{\partial f}{\partial y}), f_{\overline{z}} = \frac{1}{2}(\frac{\partial f}{\partial x} - i\frac{\partial f}{\partial y}).$ 令  $H = \{f \mid f \ D = \{z : |z| < 1\}$ 上的调和函数,满足  $f(0) = f_{z}(0) - 1 = 0\}.$  对于  $f(z) \in H,$ 都有  $f(z) = h(z) + \overline{g(z)} = z + \sum_{n=2}^{\infty} a_{n}z^{n} + \sum_{n=1}^{\infty} b_{n}z^{n}.$  其中,h(z), g(z)在 D 内是解析的. 记 f(z)的 Jacobian  $D = f_{z}|^{2} - |f_{z}|^{2}, z \in D.$  f(z)是保 向且局部单叶的,当且仅当  $J_{f}(z) > 0,$ 即  $|f_{\overline{z}}| < |f_{z}|, z \in D,$ 则有  $|w(z)| = |\frac{g'(z)}{h'(z)}| < 1,$ 这里  $w(z) = \frac{g'(z)}{h'(z)}$ 称为 f(z)的复伸张. 令  $S_{H} = \{f \mid f \in H \text{ 中单叶保向的函数}\}.$   $S_{H}^{n} = \{f \in S_{H} : f_{\overline{z}}(0) = 0\},$ 则  $S_{H}^{n} \subseteq S_{H}.$  令  $C_{H} = \{f \mid f \in S_{H} \text{ 中的近于凸函数}\},$ 那么  $C_{H} \subseteq S_{H},$ 关于调和近于凸函数的性质,参见文献[1]. 记  $C_{H}^{n} = \{f \in C_{H} : f_{\overline{z}}(0) = 0\}.$ 

Mocanu<sup>[2]</sup>定义了一个函数类: $M = \{f(z) = h(z) + \overline{g(z)} : g'(z) = zh'(z), 对所有 z \in D 满足不等式 Re{1+<math>z\frac{h''(z)}{h'(z)}\} > -\frac{1}{2}$ .同时,提出如下猜想:M中的函数是单叶的. Bshouty 等<sup>[1]</sup>利用解析函数近于 凸的两个引理证明了以上猜想,并在文章中给出更强的结果:对于 M中的调和函数  $f(z) = h(z) + \overline{g(z)},$ 不仅是单叶的,而且是近于凸的.

Nagpal 等<sup>[3]</sup>引入具有正实部的函数,并用对比系数对 *M*中的调和函数  $f(z) = h(z) + \overline{g(z)} = z + \sum_{n=2}^{\infty} a_n z^n + \overline{\sum_{n=2}^{\infty} b_n z^n}$ 做出精确的系数估计: $|a_n| \leqslant \frac{n+1}{2}, |b_n| \leqslant \frac{n-1}{2},$ 等号在  $F(z) = z + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{n+1}{2} z^n + \overline{\sum_{n=2}^{\infty} \frac{n-1}{2} z^n}$ 时达到.

**收稿日期:** 2015-01-05

通信作者: 黄心中(1957-),男,教授,博士,主要从事函数论的研究. E-mail:huangxz@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11471128); 福建省自然科学基金资助项目(2014J01013)

Bshouty 等<sup>[4]</sup>对近于凸单叶调和函数的范围进行推广,利用圆盘的辐角改变量得到更为一般化的 定理,并对满足条件的函数类的伸张偏差范围做出估计.他们证明了以下两个定理.

**定理** A 若 h 是单位开圆盘 D 上的解析凸函数,则调和函数  $f = h + \overline{g}$  是近于凸的,其中,g'(z) = w(z)h'(z),|w(z)| < 1.

**定理 B** 令  $f = h + \overline{g}$  是 D 上的调和函数,  $h'(0) \neq 0$ ,  $\operatorname{Re}\{1 + z \frac{h''(z)}{h'(z)}\} > c$ . 其中,  $-\frac{1}{2} < c \leq 0, z \in D$ . 若在 D 上 | w(z) |  $< \cos(\pi |c|)$ , 则 f 是近于凸函数.

B shouty 等<sup>[5]</sup>提出了如下问题:令  $f = h + \overline{g}$  是 D 上的调和函数, $h'(0) \neq 0$ ,如果  $g'(z) = z^2 h'(z)$ ,满 足 Re $\{1+z\frac{h''(z)}{h'(z)}\} > -\frac{1}{2}$ ,调和函数 f 的单叶性如何.

对于具有稳定近于凸调和函数的研究,今年来有不少进展<sup>[6-8]</sup>.本文利用解析函数近于凸的两个引理,将调和函数的单叶性证明推广到更为一般的函数形式,并对这类函数的系数做出估计,得到一些精确的结果.

### 2 主要结果及证明

令  $Q(D) = \{h(z), h(z) \end{pmatrix} D 上的解析函数,且满足 h(0) = 0, h'(0) = 1, \operatorname{Re}\{1+z\frac{h''(z)}{h'(z)}\} > c, -\frac{1}{2} < c \leq 0\}.$  证明 h(z)具有以下的表示定理.

**定理1**  $h(z) \in Q(D)$ 的充分必要条件是存在正实部函数  $p(z) = 1 + c_1 z + c_2 z^2 + \cdots$ , 使得

$$h(z) = \int_0^z \exp(\int_0^w \frac{(p(\zeta) - 1)k}{\zeta} \mathrm{d}\zeta) \mathrm{d}w.$$

其中:1≪k<3/2.

证明 设函数 h(z),满足 h(0)=0,h'(0)=1, 且

$$\operatorname{Re}\{1 + z \frac{h''(z)}{h'(z)}\} > c, \qquad -\frac{1}{2} < c \leqslant 0.$$

令  $p(z) = 1 + \frac{1}{1-c} \frac{zh''(z)}{h'(z)}$ ,则 p(z)是正实部函数,且 p(0) = 1,有

$$\frac{(p(z)-1)(1-c)}{z} = \frac{h''(z)}{h'(z)}.$$

两边同时积分得

$$h'(z) = \exp\left(\int_0^z \frac{\left[p(\zeta) - 1\right](1-c)}{\zeta} \mathrm{d}\zeta\right).$$

令 k=1-c,1≤k<3/2,两边同时积分得

$$h(z) = \int_0^z h'(w) dw = \int_0^z \exp(\int_0^w \frac{k[p(\zeta) - 1]}{\zeta} d\zeta) dw.$$

反之,设存在正实部函数 p(z),使得 h(z)写成如下形式,即

$$h(z) = \int_0^z \exp(\int_0^w \frac{[p(\zeta) - 1]k}{\zeta} \mathrm{d}\zeta) \mathrm{d}w.$$

其中:1≤k<3/2.则有

$$h'(z) = \exp\left(\int_0^z \frac{\lfloor p(\zeta) - 1 \rfloor k}{\zeta} \mathrm{d}\zeta\right), \qquad h''(z) = k \frac{p(z) - 1}{z} \exp\left(\int_0^z \frac{\lfloor p(\zeta) - 1 \rfloor k}{\zeta} \mathrm{d}\zeta\right).$$

故

$$\operatorname{Re}\{1+z\frac{h''(z)}{h'(z)}\} = \operatorname{Re}\{1+k[p(z)-1]\} = (1-k)+k\operatorname{Re}\{p(z)\} > 1-k.$$

即 Re{1+ $z\frac{h''(z)}{h'(z)}$ }>1-k,且 1- $k \in (-\frac{1}{2},0]$ .

B shouty 等<sup>[1]</sup>已经证得:条件为 w(z) = z,  $\operatorname{Re}\{1 + z \frac{h''(z)}{h'(z)}\} > -\frac{1}{2}$ 时,  $f(z) = h(z) + \overline{g(z)}$ 的单叶性.

当  $w(z) = \alpha, \alpha$  是常数, 且 |  $\alpha$  | <1 时,结论是正确的. 文中的定理 2 将对此进行推广, 证明当  $w(z) = \alpha + \beta z, \alpha$  和  $\beta$  是常数,  $|\alpha| + |\beta| < 1$ , 且 Re{ $1 + z \frac{h''(z)}{h'(z)}$ } >  $c, -\frac{1}{2} < c \leq 0$  时, 单叶性也同样成立.

为此,引入下面引理1,2.

引理 1<sup>[9]</sup> 解析函数 h 定义在 D 上, h 是近于凸的充分必要条件为  $h'(z) \neq 0$ , 且满足

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} \operatorname{Re}\{1 + \operatorname{rexp}(\mathrm{i}\theta) \; \frac{h''(z)(\operatorname{rexp}(\mathrm{i}\theta))}{h'(z)(\operatorname{rexp}(\mathrm{i}\theta))}\} \mathrm{d}\theta > -\pi.$$

其中: $\theta_1 < \theta_2 < \theta_1 + 2\pi$ ;0 < r < 1.

引理 2<sup>[10]</sup> 若调和函数  $f = h + \frac{1}{g}$  满足 |g'(0)| < |h'(0)|, 对于所有  $|\lambda| = 1$ , 解析函数  $h + \lambda g$  都是近于凸的,则 f 也是近于凸的.

定理 2 设  $f(z) = h(z) + \overline{g(z)}$  是单位圆盘 D上的调和函数,满足  $h'(0) \neq 0$ ,有

$$\operatorname{Re}\{1+z\frac{h''(z)}{h'(z)}\} > c.$$

其中: $-1/2 < c \leq 0$ ; $z \in D$ .若 $w(z) = \alpha + \beta z$ , $|\alpha| + |\beta| < 1$ ,则f(z)是单叶近于凸函数.

证明 考虑解析函数  $F(z) = h(z) - \lambda g(z)$ ,其中, $|\lambda| = 1$ ,则

 $F'(z) = [1 - \lambda(\alpha + \beta z)]h'(z), \qquad F''(z) = [1 - \lambda(\alpha + \beta z)]h''(z) + (-\lambda\beta)h'(z).$ 显然,在单位圆盘 D 上 F'(z) \neq 0,则

$$\operatorname{Re}\{1+z\frac{F''(z)}{F'(z)}\} = \operatorname{Re}\{1+z\frac{h''(z)}{h'(z)}\} + \operatorname{Re}\{\frac{\lambda\beta z}{\lambda(\alpha+\beta z)-1}\}.$$

其中

其中:记  $P_{\zeta}(\theta) = \frac{1 - |\zeta|^2}{|\exp(i\theta) - \zeta|^2}$ 为 Poisson 核. 则有  $\int_{\theta_1}^{\theta_2} \operatorname{Re}\{1 + z \frac{F''(z)}{F'(z)}\} d\theta = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \operatorname{Re}\{1 + z \frac{h''(z)}{h'(z)}\} d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \frac{1 - |\zeta|^2}{|e^{i\theta} - \zeta|^2}\right) d\theta >$  $c(\theta, -\theta) + \frac{1}{2} \left((\theta, -\theta)\right) - \frac{1}{2} \int_{\theta_1}^{2\pi} P_{\zeta}(\theta) d\theta >$ 

$$c(\theta_2 - \theta_1) + \frac{1}{2}(\theta_2 - \theta_1) - \frac{1}{2}\int_0^{2\pi} P_{\zeta}(\theta) d\theta >$$
$$-\frac{1}{2}(\theta_2 - \theta_1) + \frac{1}{2}(\theta_2 - \theta_1) - \pi = -\pi.$$

因此, $F(z) = h(z) - \lambda g(z)$ 是近于凸的.由于  $g'(0) = \alpha h'(0)$ ,根据引理 2, $f(z) = h(z) + \overline{g(z)}$ 是稳 定近于凸调和函数.

对于这一类函数,可以通过下面的定理对其系数进行估计.

**定理3** 设  $f(z) = h(z) + \overline{g(z)}$  是定义在单位圆盘 D 上的调和函数, f,g 可以表示为 h(z) = z +

 $a_2 z^2 + a_3 z^3 + \cdots, g(z) = b_1 z + b_2 z^2 + b_3 z^3 + \cdots, w(z) = \alpha + \beta z,$   $\exists z = 0, z = 0,$ 

$$\operatorname{Re}\{1+z\frac{h''(z)}{h'(z)}\} > c, \qquad -\frac{1}{2} \leqslant c \leqslant 0.$$

其中:z∈D,则有系数估计

$$\begin{cases} a_1 = 1, \\ |a_n| \leqslant \prod_{i=1}^{n-1} (1 - \frac{2c}{i+1}), \quad n \ge 2. \end{cases}$$

也可表示为

$$\begin{cases} a_{1} = 1, \\ | a_{2} | \leq 1 - c, \\ | a_{n} | \leq \frac{2(1 - c)}{(n - 1)n} \left[ \prod_{i=1}^{n-2} \left( 1 + \frac{2(1 - c)}{i} \right) \right], \quad n \geq 3 \end{cases}$$

b. 的系数估计为

$$|b_n| \leq (|\alpha| + \frac{n-1}{n-2c} |\beta|) [\prod_{i=1}^{n-1} (1 - \frac{2c}{i+1})], \qquad n \geq 2.$$

定义单位圆盘 D上的一个函数  $p(z)=1+\frac{1}{1-c}\frac{zh(z)}{h'(z)}$ . 证明

由于 h(z)在单位圆盘上局部单叶,函数  $p(z)=1+c_1z+c_2z^2+\cdots$ 是 D 上具有正实部的解析函数. 因此,  $|c_n| \leq 2$  对于  $n=1,2,\cdots$ 都成立. 根据[p(z)-1](1-c)h'(z)=zh''(z), 对比  $z^n$  的系数得到 (n+1)1) $na_{n+1} = (1-c) \sum_{k=1}^{n} ka_k c_{n+1-k}, n = 1, 2, \dots$ . 则有

$$(n+1) \mid a_{n+1} \mid = \frac{1-c}{n} \mid \sum_{k=1}^{n} k a_k c_{n+1-k} \mid \leq \frac{2(1-c)}{n} \sum_{k=1}^{n} k \mid a_k \mid.$$

 $\sharp \oplus : a_1 = 1; |a_2| \leq 1-c; |a_3| \leq \frac{1-c}{3}(3-2c).$ 

故可证得  $|a_n| \leq \frac{2(1-c)}{(n-1)n} [\prod_{i=1}^{n-2} (1 + \frac{2(1-c)}{i})], n \geq 3.$ 下面证明上述系数估计有另外的表达形式. 当  $n \geq 3$  时, 有

$$|a_n| \leq \frac{2(1-c)}{(n-1)n} \left[\prod_{i=1}^{n-2} (1+\frac{2(1-c)}{i})\right] =$$

$$\begin{split} \frac{2(1-c)}{(n-1)n} [1+2(1-c)] \cdot [\prod_{i=1}^{n-3} (1+\frac{2(1-c)}{i+1})] = \\ \frac{2(1-c)(3-2c)}{(n-1)n} [\prod_{i=1}^{n-3} (\frac{i+3-2c}{i+1})] = \\ \frac{(2-2c)(3-2c)}{(n-1)n} [\prod_{i=1}^{n-3} (\frac{i+3}{i+1})(1-\frac{2c}{i+3})] = \\ \frac{(2-2c)(3-2c)}{(n-1)n} \cdot \frac{(n-1)n}{6} [\prod_{i=1}^{n-3} (1-\frac{2c}{i+3})] = \\ (\frac{2-2c}{(n-1)n} (\frac{3-2c}{3}) [\prod_{i=3}^{n-1} (1-\frac{2c}{i+1})] = \prod_{i=1}^{n-1} (1-\frac{2c}{i+1}) \\ = (\frac{2-2c}{2}) (\frac{3-2c}{3}) [\prod_{i=3}^{n-1} (1-\frac{2c}{i+1})] = \prod_{i=1}^{n-1} (1-\frac{2c}{i+1}) \\ \stackrel{\text{ and }}{=} 2 \text{ bt}, |a_2| \leqslant 1-c \text{ bt}$$
 满足上式,即可得到系数估计的另一种形式

$$\begin{cases} a_1 = 1, \\ |a_n| \leqslant \prod_{i=1}^{n-1} (1 - \frac{2c}{i+1}), \quad n \ge 2. \end{cases}$$

接下来考虑 $|b_n|$ 的范围,根据  $g'(z) = (\alpha + \beta z)h'(z)$ ,对比  $z^n$  的系数关系,有 $(n+1)b_{n+1} = \alpha(n+1)a_{n+1} + \beta na_n$ ,则有

$$\begin{split} | b_{n+1} | &= | \alpha a_{n+1} + \frac{n}{n+1} \beta a_n | \leq | \alpha | | a_{n+1} | + \frac{n}{n+1} | \beta | | a_n | \leq \\ &| \alpha | \left[ \prod_{i=1}^n (1 - \frac{2c}{i+1}) \right] + \frac{n}{n+1} | \beta | \left[ \prod_{i=1}^{n-1} (1 - \frac{2c}{i+1}) \right] = \\ &\left[ \prod_{i=1}^{n-1} (1 - \frac{2c}{i+1}) \right] \left[ | \alpha | + \frac{\frac{n}{n+1}}{1 - \frac{2c}{n+1}} | \beta | \right] = \\ &(| \alpha | + \frac{n}{n+1 - 2c} | \beta |) \left[ \prod_{i=1}^n (1 - \frac{2c}{i+1}) \right]. \end{split}$$

$$\mathbb{P} \stackrel{\text{def}}{=} n \geq 2 \text{ Bf}, | b_n | \leq (|\alpha| + \frac{n-1}{n-2c} |\beta|) \left[ \prod_{i=1}^{n-1} (1 - \frac{2c}{i+1}) \right]. \end{split}$$

定理3证毕.

当 $|\alpha|=0$ , $|\beta|=1$ ,且 $c=-\frac{1}{2}$ 时,文献[3]中的系数估计是定理3的一种特殊结论,故在该条件下,以上估计是精确的.

Bshouty 等<sup>[5]</sup>提出一系列的问题和猜想.其中,问题 3.14 提出当满足条件 Re{ $1+z\frac{h''(z)}{h'(z)}$ }>一 $\frac{1}{2}$ ,  $w(z)=z^2$  的情况下, $f(z)=h(z)+\overline{g(z)}$ 的最大叶数为多少.定理 4 估计了当  $w(z)=z^2$  时,f 的稳定近于凸半径,部分回答了这一问题.

定理 4 设  $f(z) = h(z) + \overline{g(z)}$  是定义在单位圆盘 D 上的调和函数, $h'(0) \neq 0$ ,满足

$$\operatorname{Re}\{1+z\frac{h''(z)}{h'(z)}\} > c, \quad -\frac{1}{2} < c \leq 0, \quad z \in D.$$

当  $w(z) = z^2$  时,调和函数 f(z)的稳定近于凸半径  $r \ge \sqrt{(1+2c)/(5+2c)}$ . 证明 考虑解析函数  $F(z) = h(z) - \lambda g(z)$ ,其中, $|\lambda| = 1$ ,那么

 $F'(z) = (1 - \lambda z^2)h'(z), \qquad F''(z) = (1 - \lambda z^2)h''(z) + (-2\lambda z)h'(z).$ 显然,在 D 上 F'(z) \neq 0,故

$$\operatorname{Re}\{1+z\frac{F''(z)}{F'(z)}\} = \operatorname{Re}\{1+z\frac{h''(z)}{h'(z)}\} + 2\operatorname{Re}\{\frac{\lambda z^2}{\lambda z^2-1}\}.$$
$$\frac{\lambda z^2}{\lambda z^2} + \frac{\lambda z^2}{\lambda z^2} = 1 - \frac{1-|\lambda z^2|^2}{\lambda z^2-1}$$

 $\sharp \oplus : 2\operatorname{Re} \{ \frac{\lambda z^2}{\lambda z^2 - 1} \} = \frac{\lambda z^2}{\lambda z^2 - 1} + \frac{\lambda z^2}{\lambda z^2 - 1} = 1 - \frac{1 - |\lambda z^2|^2}{(1 - \lambda z^2)(1 - \overline{\lambda} z^2)}.$ 

令 z=rexp(i
$$\theta$$
),可得  

$$2\operatorname{Re}\left\{\frac{\lambda z^{2}}{\lambda z^{2}-1}\right\} = 1 - \frac{1-r^{4}}{1+r^{4}-2\operatorname{Re}\left\{\lambda z^{2}\right\}} \ge 1 - \frac{1-r^{4}}{1+r^{4}-2\mid\lambda z^{2}\mid} = 1 - \frac{1-r^{4}}{1+r^{4}-2r^{2}} = -\frac{2r^{2}}{1-r^{2}}$$
当 $|z| < \sqrt{(1+2c)/(5+2c)}$ 时,有  

$$\int_{\theta_{1}}^{\theta_{2}} \operatorname{Re}\left\{1+z\frac{F''(z)}{F'(z)}\right\} d\theta > \int_{\theta_{1}}^{\theta_{2}} \left(c-\frac{2r^{2}}{1-r^{2}}\right) d\theta = \left(c-\frac{2r^{2}}{1-r^{2}}\right)(\theta_{2}-\theta_{1}) \ge \left[c-\frac{2\frac{1+2c}{5+2c}}{1-\frac{1+2c}{5+2c}}\right](\theta_{2}-\theta_{1}) = -\frac{1}{2}(\theta_{2}-\theta_{1}) \ge -\pi.$$

其中: $\theta_1 < \theta_2 < \theta_1 + 2\pi$ .

从而, $f(z) = h(z) + \overline{g(z)}$ 至少在 $|z| < \sqrt{(1+2c)/(5+2c)}$ 内为稳定近于凸的.

#### 参考文献:

- [1] BSHOUTY D,LYZZAIK A. Close-to-convexity criteria for planar harmonic mappings[J]. Complex Analysis and Operator Theory, 2011, 5(3):767-774.
- [2] MOCANU P T. Injectivity conditions in the complex plane[J]. Complex Anal Oper Theory, 2011, 5(3): 759-766.
- [3] NAGPAL S, RAVICHANDRAN V. On a subclass of close-to-convex harmonic mappings[J]. Complex Variables and Elliptic Equations, 2014, 59(2):204-216.
- [4] BSHOUTY D, JOSHI S S, JOSHI S B. On close-to-convex harmonic mappings [EB/OL]. [2012-1-11]. http://dx. doi. org/10. 1080/17476933. 2011. 647002.
- [5] BSHOUTY D, LYZZAIK A. Problems and conjectures in planar harmonic mappings[J]. J Analysis, 2010, 18:69-81.
- [6] HERNÁNDEZ R, MARTÍN M T. Stable geometric properties of analytic and harmonic functions[J]. Math Proc Camb Phil Soc, 2013, 155(2): 343-359.
- [7] 石擎天,黄心中.调和映照与其剪切函数的单叶性[J].华侨大学学报:自然科学版,2013,34(3):334-338.
- [8] 王其文,黄心中.在微分算子作用下调和函数的单叶半径估计[J].华侨大学学报:自然科学版,2014,35(2):227-231.
- [9] KAPLAN W. Close-to-convex schlicht functions[J]. Mich Math J, 1952, 1(2): 169-185.
- [10] CLUNIE J, SHEIL-SMALL T. Harmonic univalent functions[J]. Ann Acad Sci Fenn Ser A I Math, 1984, 9:3-25.

# On the Analytic Properties and Coefficient Estimate for Close-to-Convex Harmonic Mappings

# HUANG Yun, HUANG Xin-zhong

(School of Mathematical Sciences, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: Research analytic representing formula and coefficient estimates for h(z) with  $\operatorname{Re}\{1+z\frac{h''(z)}{h'(z)}\}>c$ ,  $-\frac{1}{2}<c\leqslant$ 

0, where h is the analytic part of harmonic mappings  $f(z) = h(z) + \overline{g(z)}$  that are stable close-to-convex property on unit disk D. If the dilatation function w(z) is a linear function, the stable close-to-convex criterion is proved. The results improve the one made by Shouty and Nagpal. Moreover, we also obtain the stable close-to-convex radius estimate for f =

 $h + \overline{g}$  with  $\operatorname{Re}\{1 + z \frac{h''(z)}{h'(z)}\} > c$ ,  $-\frac{1}{2} < c \leq 0$  and  $w(z) = z^2$  on the unit disk D.

Keywords: harmonic mapping; stable close-to-convex; coefficient estimate; univalent radius

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 黄心中)

**文章编号:**1000-5013(2015)04-0484-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.04.0484

# 一类调和映照的系数估计

# 阙玉琴,陈行堤

(华侨大学 数学科学学院, 福建 泉州 362021)

**摘要:** 在单叶调和映照的系数猜想的基础上,获得单叶调和映照在第二复伸张满足标准化条件下的系数估计,结果渐进于单叶函数的系数估计,建立了两个猜想的联系,并获得此类映照的增长和覆盖定理.

**关键词:** 单叶调和映照;稳定调和映照;系数估计;增长定理 中图分类号: O 174.55 **文献标志码:** A

# 1 预备知识

若 f(z)为定义在单位圆盘  $D = \{|z| < 1\}$ 上的调和映照,则存在 D 上的两个解析函数h(z)和 g(z), 使得  $f(z) = h(z) + \overline{g(z)}$ ,且称 h(z)和 g(z)为 f 的解析元和反解析元<sup>[1-11]</sup>.由 Lewy<sup>[6]</sup>定理知,调和映照 f 在单位圆上局部单叶当且仅当

 $J_f = |h'|^2 - |g'|^2 \neq 0.$ 

若  $J_f > 0$ ,则 f 为单位圆盘上的保向调和映照,其第 2 复伸张为  $\omega(z) = g'(z)/h'(z)$ ,且在单位圆内 满足  $|\omega(z)| < 1.S_H$  表示单位圆盘上的单叶保向调和映照且具有展式,即

$$h(z) = z + \sum_{n=2}^{\infty} a_n z^n, \qquad z \in D,$$

$$g(z) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n z^n, \qquad z \in D$$
(1)

的全体. 记  $S_H^0 = \{ f \in S_H : f_{\overline{z}}(0) = 0 \}.$ 

经典的单叶解析函数类,即

 $S = \{ f = h + \overline{g} \in S_H : g(z) \equiv 0, z \in D \}.$ 

1985 年, de Branges<sup>[4]</sup>证明了 Bieberbach 猜想, 当  $n \ge 2$  时,  $|a_n| \le n$ . 1984 年, Clunie 等<sup>[1]</sup>提出了规范化单叶调和映照的系数猜想 A.

**猜想 A** 如果  $f = h + g \in S_{H}^{\circ}$ , 且 h 和 g 的表达式为(1), 那么不等式

$$|a_{n}| \leq \frac{(n+1)(2n+1)}{6}, \\|b_{n}| \leq \frac{(n-1)(2n-1)}{6}, \\|a_{n}| - |b_{n}| \leq n$$
(2)

对所有的  $n \ge 2$  成立. 当 f(z)为调和 Koebe 函数,即

$$K(z) = \frac{1 - \frac{1}{2}z^2 + \frac{1}{6}z^3}{(1 - z)^3} + \left(\frac{\frac{1}{2}z^2 + \frac{1}{6}z^3}{(1 - z)^3}\right)$$
(3)

**收稿日期:** 2014-10-27

通信作者: 陈行堤(1976-),男,副教授,博士,主要从事函数论的研究. E-mail: chxtt@hqu. edu. cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11471128);福建省自然科学基金计划资助项目(2014J01013);华侨大学中 青年教师科研提升资助计划(ZQN-YX110)

时,等号成立.

这个猜想在 S<sup>0</sup><sub>H</sub> 一些子类是成立的,如凸、星象、近于凸、典型实和沿一个方向凸的单叶调和映照 类<sup>[1,10-11]</sup>.记

 $S_{H}^{0}(S) = \{h + \overline{g} \in S_{H}^{0} : h + \exp(i\theta)g \in S, \forall - \underline{\sharp} \in \mathbf{R}\},\$ 

 $S_H(S) = \{ f = f_0 + b_1 \overline{f}_0 : f_0 \in S^0_H(S), b_1 \in D \}.$ 

2014年, Ponnusamy 等<sup>[8]</sup>证明了猜想 A 在类  $H^0_H(S)$ 也是正确的, 即定理 A.

**定理 A** 设  $f = h + g \in S_{H}^{\circ}(S)$ ,式(1)为 h 和 g 的表达式,则对所有的  $n \ge 2$ ,式(2)成立.这是  $S_{H}^{\circ}(S)$ 类系数的精确上界,当 f 为调和 Koebe 函数 K(z)时,等号成立.

2013年,Hernández 等<sup>[7]</sup>提出了稳定性理论.如果调和映照  $f = h + \overline{g}$  单叶(凸)且对于所有的  $\theta$  有  $f_{\theta} = h + \exp(i\theta)\overline{g}$  单叶,则称 f 是稳定单叶(凸);而且还证明了若调和映照  $f = h + \overline{g}$  稳定单叶当且仅当 解析函数 F = h + g 稳定单叶.不是所有的调和映照都是稳定单叶的,比如调和 Koebe 函数只在  $\theta = \pi$  时 成立. 2014年,Ponnusamy<sup>[8]</sup>提出了一个猜想:对于每一个  $f = h + \overline{g} \in S_{H}^{\circ}(S)$ ,一定存在一个  $\theta$  使得  $h + \exp(i\theta)g \in S$ .

文中继续研究 S<sup>n</sup><sub>H</sub>(S)类调和映照,利用第2复伸张的标准化条件,得到渐进于经典的单叶解析函数 类 S 的系数估计.

### 2 主要定理及证明

**定理1** 假设单位圆盘上的保向调和映照  $f=h+g\in S_{H}^{0}(S)$ , h和g的表达式满足式(1),其第2复 伸张为 $\omega(z)$ 满足 $\omega(0)=0, \omega'(0)=0, \omega''(0)=0, \dots, \omega^{(m-1)}(0)=0, \omega^{(m)}(0)\neq 0.$ 

当 n≤m 时,有

 $|a_n| \leq n, \quad b_n = 0.$ 

当 $n=m+k, k=1, 2, 3, \dots$ 时,有

$$\left( \mid a_{m+k} \mid \leqslant m+k + \frac{k(k+1)(2k+1)}{6(m+k)}, \\ \mid b_{m+k} \mid \leqslant \frac{k(k+1)(2k+1)}{6(m+k)}. \right)$$

特别地,当 *m*→∞时, $|a_n| \leq n$ ;当 *m*=1 时, $|a_n| \leq (n+1)(2n+1)/6$ , $|b_n| \leq (n-1)(2n-1)/6$ . 证明 因为  $f = h + g \in S^0_H(S)$ ,所以存在一个 $\theta$ ,使得

$$arphi=h+\exp(\mathrm{i} heta)g=z+\sum_{n=2}^{\infty}(a_n+\exp(\mathrm{i} heta)b_n)z^n=z+\sum_{n=2}^{\infty}arphi_nz^n\in S.$$

由 de Branges 定理,当  $n \ge 2$  时,  $|\varphi_n| \le n$ . 因为 f 为保向的调和映照,所以  $\omega(0) = 0$ ,且对于所有的  $z \in D$ ,有

$$|\omega(z)| < 1$$

而且有

$$\varphi' = h'(1 + \exp(\mathrm{i}\theta)\omega) = 1 + \sum_{n=2}^{\infty} n\varphi_n z^{n-1},$$

所以有

$$\begin{cases} h' = \frac{\varphi'}{1 + \exp(i\theta)\omega}, \\ g' = \frac{\varphi'\omega}{1 + \exp(i\theta)\omega}. \end{cases}$$

因为 $\omega(z)$ 满足 $\omega(0)=0, \omega'(0)=0, \omega''(0)=0, \dots, \omega^{(m-1)}(0)=0, \omega^{(m)}(0)\neq 0,$ 所以有

$$\omega(z) = \sum_{n=m} c_n z^n.$$

又由于

$$\frac{1}{1 + \exp(\mathrm{i}\theta)\omega} = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp(\mathrm{i}\theta)^n,$$
$$\frac{\omega}{1 + \exp(\mathrm{i}\theta)\omega} = \frac{1}{\exp(\mathrm{i}\theta)} \left(\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \exp(\mathrm{i}\theta)\omega^n\right),$$

所以,可令

$$\frac{1}{1+\exp(\mathrm{i}\theta)\omega} = 1 + \sum_{n=m+1}^{\infty} w_{n-1} z^{n-1},$$
$$\frac{\omega}{1+\exp(\mathrm{i}\theta)\omega} = \sum_{n=m+1}^{\infty} v_{n-1} z^{n-1}.$$

因为|ω(z)|<1,由从属原理,有

$$\begin{cases} \frac{1}{1 + \exp(\mathrm{i}\theta)\omega} < \frac{1}{1-z} = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} z^n, \\ \frac{-\exp(\mathrm{i}\theta)\omega}{1 + \exp(\mathrm{i}\theta)\omega} < \frac{z}{1-z} = \sum_{n=1}^{\infty} z^n. \end{cases}$$

根据 Rogosinski 定理<sup>[9]</sup>,对所有的 n,有

$$\mid w_{n-1} \mid \leqslant 1$$
,  $\mid v_{n-1} \mid \leqslant 1$ .

因此有

$$\begin{aligned} \varphi' \frac{1}{1 + \exp(\mathrm{i}\theta)\omega} &= (1 + \sum_{n=2}^{\infty} n\varphi_n z^{n-1})(1 + \sum_{n=m+1}^{\infty} w_{n-1} z^{n-1}) = \\ 1 + \sum_{n=m+1}^{\infty} w_{n-1} z^{n-1} + \sum_{n=2}^{\infty} n\varphi_n z^{n-1} + \sum_{n=2}^{\infty} n\varphi_n z^{n-1} \sum_{n=m+1}^{\infty} w_{n-1} z^{n-1} = \\ 1 + \sum_{n=2}^{m} n\varphi_n z^{n-1} + \sum_{n=m+1}^{\infty} (n\varphi_n + w_{n-1}) z^{n-1} + \sum_{n=m+2}^{\infty} (\sum_{l=2}^{n-m} l\varphi_l w_{n-l}) z^{n-1} = \\ 1 + \sum_{n=2}^{m} n\varphi_n z^{n-1} + ((m+1)\varphi_{m+1} + w_m) z^m + \sum_{n=m+2}^{\infty} (n\varphi_n + w_{n-1} + \sum_{l=2}^{n-m} l\varphi_l w_{n-l}) z^{n-1} = \\ 1 + \sum_{n=2}^{m} n\varphi_n z^{n-1} + ((m+1)\varphi_{m+1} + w_m) z^m + \sum_{n=m+2}^{\infty} (n\varphi_n + w_{n-1} + \sum_{l=2}^{n-m} l\varphi_l w_{n-l}) z^{n-1} = \\ 1 + \sum_{n=2}^{\infty} n\varphi_n z^{n-1} + ((m+1)\varphi_{m+1} + w_m) z^m + \sum_{n=m+2}^{\infty} (n\varphi_n + w_{n-1} + \sum_{l=2}^{n-m} l\varphi_l w_{n-l}) z^{n-1} = \\ 1 + \sum_{n=2}^{\infty} n\varphi_n z^{n-1} + ((m+1)\varphi_{m+1} + w_m) z^m + \sum_{n=m+2}^{\infty} (n\varphi_n + w_{n-1} + \sum_{l=2}^{n-m} l\varphi_l w_{n-l}) z^{n-1} = \\ 1 + \sum_{n=2}^{m} n\varphi_n z^{n-1} + ((m+1)\varphi_{m+1} + w_m) z^m + \sum_{n=m+2}^{\infty} (n\varphi_n + w_{n-1} + \sum_{l=2}^{n-m} l\varphi_l w_{n-l}) z^{n-1} = \\ 1 + \sum_{n=2}^{m} n\varphi_n z^{n-1} + ((m+1)\varphi_{m+1} + w_m) z^m + \sum_{n=2}^{m-m+1} n\varphi_n z^{n-1} + (m+1)\varphi_n z^m + \sum_{l=2}^{m-m+1} n\varphi_l w_{m-l} z^{m-1} + \sum_{l=2}^{m-m+1} n\varphi_l w_{m-l} z^m + \sum_{l=2}^{m-m+1} n\varphi_l w_{m-l}$$

当n=m+1时,有

 $|(m+1)a_{m+1}| = |(m+1)\varphi_{m+1} + w_m| \leq (m+1)^2 + 1, 所以 |a_n| \leq n+1/n.$ 当  $n=m+k, k=2,3, \cdots$ 时,有

$$|(m+k+1)a_{m+k+1}| = |(m+k+1)\varphi_{m+k+1} + w_{m+k} + \sum_{l=2}^{k+1} l\varphi_l w_{m+k+1-l}| \leq (m+k+1)^2 + 1 + \sum_{l=2}^{k+1} l^2 = (m+k+1)^2 + \frac{(k+1)(k+2)(2k+3)}{6},$$

从而有

$$|a_{m+k}| \leqslant m+k+\frac{k(k+1)(2k+1)}{6(m+k)}.$$

又因为

$$g' = \frac{\varphi'\omega}{1 + \exp(i\theta)\omega} = (1 + \sum_{n=2}^{\infty} n\varphi_n z^{n-1}) (\sum_{n=m+1}^{\infty} v_{n-1} z^{n-1}) = \sum_{n=1}^{\infty} n\varphi_n z^{n-1} \sum_{n=m+1}^{\infty} v_{n-1} z^{n-1} = \sum_{n=m+1}^{\infty} (\sum_{l=1}^{n-m} l\varphi_l v_{n-l}) z^{n-1} = \sum_{k=0}^{\infty} (\sum_{l=1}^{k+1} l\varphi_l v_{m+k+1-l}) z^{m+k}.$$
  
= 1. 因此, 当  $n < m$  时,  $b_n = 0$ .

当 $n=m+k, k=0,1,2,\cdots$ 时,有

$$|(m+k+1)b_{m+k+1}| = |\sum_{l=1}^{k+1} l\varphi_l v_{m+k+1-l}| \leq \sum_{l=1}^{k+1} l^2 = \frac{(k+1)(k+2)(2k+3)}{6}$$

所以

$$|b_{m+k}| \leq \frac{k(k+1)(2k+1)}{6(m+k)}$$

特别地,当 *m*→∞时,  $|a_{m+k}| \leq m+k$ , 即  $|a_n| \leq n$ ,  $|b_n| = 0$ , 其为解析函数类的系数估计; 当 *m*=1,  $|a_n| \leq (n+1)(2n+1)/6$ ,  $|b_n| \leq (n-1)(2n-1)/6$ , 其为 Ponnusamy 的  $S_H^0(S)$ 类的系数估计.

由于解析函数 S 类的子类凸函数的系数估计为当 *n* ≥2 时系数的模小于等于 1,所以类似定理 1 的 证明得到.

推论1 假设  $f = h + g \in S_{H}^{\circ}(C)$ ,其中, $h \approx \pi g$  满足式(1)且第2复伸张 $\omega(z)$ 满足式(4),则当 $n \leq m$ 时,有

$$|a_n| \leq 1$$

当 $n=m+k, k=1, 2, 3, \cdots$ 时,有

$$|a_{m+k}| \leq 1 + k(k+1)/2(m+k).$$

特别地,当 $m \rightarrow \infty$ 时, $|a_n| \leq 1$ ;当m = 1时, $|a_n| \leq (n+1)/2$ .

**推论 2** 假设  $f=h+g \in S_H(S)$ ,其中 h 和 g 满足式(1),则当 n < m 时,有

$$|a_n| \leqslant n, |b_n| \leqslant n.$$

当  $n=m+k, k=0,1,2,\cdots$ 时,有

$$\begin{cases} \mid a_n \mid \leq n + \frac{k(k+1)(2k+1)}{3n}, \\ \mid b_n \mid \leq n + \frac{k(k+1)(2k+1)}{3n}. \end{cases}$$

证明 设  $f_0 = h_0 + \overline{g}_0 \in S_H^0(S)$ ,其中: $h_0 = z + \sum_{n=2}^{\infty} a_{0n} z^n$ , $g_0 = \sum_{n=2}^{\infty} b_{0n} z^n$ ,且其第 2 复伸张  $\omega_0(z)$ 满足  $\omega_0(0) = 0, \omega'_0(0) = 0, \dots, \omega_0^{(m-1)}(0) = 0, \omega_0^{(m)}(0) \neq 0, 则$ 

$$f = f_0 + b_1 \overline{f}_0 = h_0 + b_1 g_0 + \overline{g_0 + b_1 h_0} \in S_H(S), \quad b_1 \in D.$$

由定理1,当n<m时,有

$$|a_{0,n}| \leqslant n, \qquad |b_{0,n}| = 0.$$

当
$$n=m+k, k=0,1,2,\cdots$$
时,有

$$\begin{cases} \mid a_{0,n} \mid \leq n + \frac{k(k+1)(2k+1)}{6n}, \\ \mid b_{0,n} \mid \leq n + \frac{k(k+1)(2k+1)}{6n}. \end{cases}$$

所以,当n<m时,有

$$\begin{cases} \mid a_n \mid \leqslant \mid a_{0,n} \mid + \mid b_{0,n} \mid \leqslant n + \frac{k(k+1)(2k+1)}{3n} \\ \mid b_n \mid \leqslant \mid a_{0,n} \mid + \mid b_{0,n} \mid \leqslant n + \frac{k(k+1)(2k+1)}{3n}. \end{cases}$$

### 3 结果的运用

 $S_H(S)$ 类有下列的性质:若 $f \in S_H(S)$ ,则函数为

$$(f+c\overline{f})/(1+cb_1) \in S_H(S).$$

$$F(z) = \frac{f(\frac{z+\zeta}{1+\overline{\zeta}z}) - f(\zeta)}{(1-|\zeta|^2)h'(\zeta)} \in S.$$

此性质称为线性不变. 定理 B 为  $S_H$  类调和函数的增长和覆盖定理<sup>[3]</sup>.

**定理 B** 假设  $\alpha$  是所有函数  $f \in S_H$  类第二项系数  $|a_2|$  的上确界,则对于每个函数  $f \in S_H^\circ$  满足

$$\frac{1}{2\alpha} \left[1 - \left(\frac{1-r}{1+r}\right)^{\alpha}\right] \leqslant |f(z)| \leqslant \frac{1}{2\alpha} \left[\left(\frac{1-r}{1+r}\right)^{\alpha} - 1\right], \quad r = |z| < 1.$$

特别地,每个函数  $f \in S^{\circ}_{H}$  包含一个  $1/2\alpha$  圆.

定理1证明了第2复伸张满足式(4)的 S<sup>0</sup><sub>H</sub>(S)类的精确系数估计,作为定理1的运用,可以证明第2复伸张满足式(4)的条件下 S<sup>0</sup><sub>H</sub>(S)类的精确系数估计.利用定理 B,给出一个 S<sup>0</sup><sub>H</sub>(S)类更优的增长和 覆盖定理.

定理2 对每一个复伸张满足式(4)的  $f \in S^{\circ}_{H}(S)$ ,当 m > 1时,满足下面的不等式,即

$$\frac{r}{(1+r)^2} \leqslant \mid f(z) \mid \leqslant \frac{r}{(1-r)^2}, \quad r = \mid z \mid < 1.$$

特别地,此类映照包含了一个1/4圆.

#### 参考文献:

- [1] CLUNIE J G, SHEIL-SMALL T. Harmonic univalent functions[J]. Ann Acad Sci Fenn Ser A L, 1984, 9(1): 3-25.
- [2] DUREN P. Univalent functions[M]. New York: Springer-Verlag, 1983: 17-21.
- [3] DUREN P. Harmonic mappings in the plane[M]. Cambridge Cambridge University Press, 2004:86-110
- [4] de BRANGES L. A proof of the Bieberbach conjecture[J]. Acta Math, 1985, 154(1/2): 137-152.
- [5] GREINER P. Geometric properties of harmonic shears[J]. Comput Methods Funct Theory, 2004, 4(1):77-96.
- [6] LEWY H. On the non-vanishing of the Jacobian in certain one-to-one mappings[J]. Bull Amer Math Soc, 1936, 42 (1):689-692.
- [7] HERNÁNDEZ R, MARTÍN M J. Stable geometric properties of analytic and harmonic functions[J]. Math Proc Camb Phil Soc, 2013, 155(2): 343-359.
- [8] PONNUSAMY S, KALIRAJ A S. On the coefficient conjecture of clunie and sheil-small on univalent harmonic mappings [DB/OL][2014-03-22]. http://arxiv.org/abs/1403.5619.
- [9] ROGOSINSKI W. On the coefficients of subordinate functions[J]. Proc London Math Soc, 1990, 42(1):237-248.
- [10] SHEIL-SMALL T. Constants for planar harmonic mappings[J]. J London Math Soc, 1990, 42(1):237-248.
- [11] WANG Xiao-tian, LIANG Xiang-qian, ZHANG Yu-qin. Precise coefficient estimates for close-to-convex harmonic univalent mappings[J]. J Math Anal Appl, 2001, 263(2):501-509.

## On the Coefficient Estimates for One Subclass of Harmonic Mappings

# QUE Yu-qin, CHEN Xing-di

(School of Mathematical Sciences, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** We study the coefficient estimates of a subclass of harmonic mappings, which second complex dilatations satisfy some normal condition. The result is asymptotic to the estimates of univalent analytic functions, the relationship of the coefficient conjecture of these two class mappings is established. We also obtain the growth and covering theorem for this class of mappings.

Keywords: harmonic mapping; stable harmonic mapping; coefficient estimate; distortion theorem

# 《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 prices 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
- 中国科技论文统计期刊源
- •中国学术期刊(光盘版)
- 中文科技期刊数据库
- 中国力学文摘
- 中国生物学文摘
- 中国数学文摘

# 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 36 卷 第 4 期 (总第 144 期) 2015 年 07 月 20 日

主管单位: 福 硉 省 教 奆 厅 主办单位: 华 侨 大 学 (中国福建厦门 361021) 编辑出版: 华侨大学学报自然科学版编辑部 话: 0595-22692545 电 电子信箱: journal@hqu. edu. cn XX 址: www. hdxb. hqu. edu. cn 编: 乌 东 峰 ŧ EП 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)

- •俄罗斯《文摘杂志》(AJ, VINITI)
- ·荷兰《文摘与引文数据库》(Scopus)
- ·德国《数学文摘》(Zbl MATH)
- 中国学术期刊综合评价数据库
- 中国期刊网
- 万方数据库
- 中国机械工程文摘
- 中国化学化工文摘
- 中国无线电电子学文摘
- 中国物理文摘

## JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY

( NATURAL SCIENCE )

	( Bimonth	ly, Started in	1980	))	
Vol.	36 No.4	(Sum. 144)	Jul.	20,	2015

Competent Authority: Department of Education of Fujian Province Sponsor: Huaqiao University (Xiamen 361021, Fujian, China) Edited and Published by Editorial Department of Journal of Huaqiao University (Natural Science) Tel: 0595-22692545 E-mail: journal@hqu. edu. cn Http://www.hdxb. hqu. edu. cn] Editor in Chief: WU Dong-feng Distributed by China Publication Foreign Trading Corporation (P. O. Box 782, Beijing, 100011, China)

 

 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:
  $\frac{8.00}{48.00}$  元/期