



ISSN 1000-5013

CN 35-1079/N

CODEN HDZIEF

# 华侨大学学报

(自然科学版)

JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY

(NATURAL SCIENCE)

第 36 卷 第 3 期

Vol. 36 No. 3

## 2015

福建·泉州

ISSN 1000-5013



05>



9 771000 501156



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

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

主 编 (Editor in Chief)

乌东峰 (WU Dong-feng)

副主编 (Associate Editor in Chief)

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

编 委 (Members) (按姓氏笔划为序)

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

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

刘   堪 (LIU Gong)      江开勇 (JIANG Kai-yong)

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

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

周克民 (ZHOU Ke-min)      胡日东 (HU Ri-dong)

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

童   昕 (TONG Xin)      蔡灿辉 (CAI Can-hui)

欧阳明安 (OUYANG Ming-an)

编辑部主任 (Director)

黄仲一 (HUANG Zhong-yi)

### 目 次

基于梯度强度立柱的客车侧翻安全性多目标优化设计

..... 周莎, 张勇, 张成, 李奇 (241)

乘用车齿轮齿条式的液压助力转向系统匹配

..... 陈丁跃, 杨励, 贺志璵 (247)

逆向工程的车身三维造型数字化技术

..... 何龙 (252)

冷风油雾润滑对 TC4 铣削过程刀-屑摩擦的影响

..... 王宁昌, 程鑫, 姜峰, 谢鸿 (258)

引导滤波在雾天图像清晰化中的应用

..... 王伟鹏, 戴声奎 (263)

P300 的 BCI 汉字在线输入系统

..... 徐鑫, 方慧娟 (269)

一种采用内预测模式的 HEVC 视频信息隐藏算法

..... 董晓慧, 林其伟, 许东旭 (275)

神经网络预测控制在污水处理溶解氧控制中的应用

..... 张学阳, 项雷军, 林文辉, 郭新华 (280)

从双视图到多视图的协同优化立体视觉匹配算法

..... 王道累, 吴懋亮, 陈军 (286)

旅游大数据的 MapReduce 客户细分应用

..... 汪永旗, 王惠娇 (292)

碱度对动态膜生物反应器处理效果的影响

..... 胡苗苗, 洪俊明, 李尚惠, 戴兰华, 陈向强, 谢小青 (297)

羧基功能化超顺磁性纳米粒子吸附牛血清蛋白的特性

..... 吴志超, 陈国, 苏鹏飞 (303)

萘甲酰胺衍生物 TW918 的合成及体外活性考察

..... 王立强, 雷春花, 邱飞, 杨会 (309)

RNAi 表达载体在哺乳动物中的研究进展

..... 侯莹, 成志云, 王立强, 许瑞安, 唐明 (314)

压剪工况下型钢混凝土柱轴力分配规律试验

..... 王梓懿, 刘阳, 郭子雄, 贾磊鹏, 陈庆猛 (321)

土楼夯土结构受力变形特性的数值模拟

..... 许永贤, 彭兴黔, 梁兰娣 (327)

钢筋-钢管高强混凝土偏心受压柱非线性分析

..... 关萍, 陈兰响, 刘晴晴 (332)

中国工程造价信息化管理趋势

..... 沈华 (338)

沟通与合同对代建制多项目目标管理的影响

..... 王玉芳, 张云波, 祁神军, 项剑平 (343)

城市住区低碳评价指标体系建构

..... 高涛, 王建平, 刘晴 (348)

稳定单叶调和凸函数和星像函数的构造

..... 朱孟坤, 黄心中 (354)

新的递推有界 GM 回归估计算法

..... 成立花, 张俊敏 (359)

CONTENTS

Multi-Objective Optimization Design for Bus Rollover Safety Based on Gradient Strength  
Pillar  
..... ZHOU Sha, ZHANG Yong, ZHANG Cheng, LI Qi (241)

Matching of Hydraulic Power Assisted Steering System in the Gear and Rack Type  
Passenger Vehicle  
..... CHEN Ding-yue, YANG Li, GUO Ze-hong, HE Zhi-ying (247)

Digital Technology of the Auto Body Three-Dimensional Model Based on the Reverse  
Engineering  
..... HE Long (252)

Friction Behavior between Tool and Chip during TC4 Milling with Cold Air Oil Mist  
Jet Lubricant  
..... WANG Ning-chang, CHENG Xin, JIANG Feng, XIE Hong (258)

Application of Guided Filter to Haze Image Sharpening  
..... WANG Wei-peng, DAI Sheng-kui (263)

A P300-Based BCI System for Online Chinese Input  
..... XU Xin, FANG Hui-juan (269)

An Information Hiding Algorithm Based on Intra-Prediction Modes for HEVC  
..... DONG Xiao-hui, LIN Qi-wei, XU Dong-xu (275)

Application of Neural Network Predictive Control to Dissolved Oxygen Control in  
Sewage Treatment Process  
..... ZHANG Xue-yang, XIANG Lei-jun, LIN Wen-hui, GUO Xin-hua (280)

An Algorithm of Stereo Matching Based on Cooperative Optimization from Two Views  
to Multiple Views  
..... WANG Dao-lei, WU Mao-liang, CHEN Jun (286)

Application of Customer Segmentation Based on MapReduce under Big Data of Tourism  
..... WANG Yong-qi, Wang Hui-jiao (292)

Effect of Influent Alkalinity on the Treatment Characteristic of Dynamic Membrane

Bioreactor

..... HU Miao-miao, HONG Jun-ming, LI Shang-hui,  
DAI Lan-hua, CHEN Xiang-qiang, XIE Xiao-qing (297)

Adsorption Properties of Bovine Serum Albumin on Carboxyl-Functioned Superparamagnetic

Nanoparticle

..... WU Zhi-chao, CHEN Guo, SU Peng-fei (303)

Synthesis and *In Vitro* Activity of Naphthamide Derivatives TW918

..... WANG Li-qiang, LEI Chun-hua, QIU Fei, YANG Hui-yong (309)

Research Progress of RNA Interference Expression Vector in Mammals

..... HOU Ying, CHENG Zhi-yun, WANG Li-qiang, XU Rui-an, TANG Ming-qing (314)

Experimental Study on the Axial Force Distribution of SRC Columns under Axial and

Lateral Loads

..... WANG Zi-yi, LIU Yang, GUO Zi-xiong, JIA Lei-peng, CHEN Qing-meng (321)

Numerical Simulation of Tulou Rammed Earth Structure Deformation Characteristics

of Numerical Simulation

..... XU Yong-xian, PENG Xing-qian, LIANG Lan-di (327)

Nonlinear Analysis of Steel Tube Filled With Steel-Reinforced High-Strength Concrete

Column under Eccentric Compression

..... GUAN Ping, CHEN Lan-xiang, LIU Qing-qing (332)

Trend of Construction Cost Information Management in China

..... SHEN Hua (338)

Impact of Communication and Contract on Multi-Project Objective Management under

the Agent Construction System

..... WANG Yu-fang, ZHANG Yun-bo, QI Shen-jun, XIANG Jian-ping (343)

Study on Low Carbon Evaluation Index System of Urban Residential District

..... GAO Tao, WANG Jin-ping, LIU Qing (348)

Construction of Stale Univalent Convex Harmonic Mappings and Starlike Mappings

..... ZHU Meng-kun, HUANG Xin-zhong (354)

A New Recursive Bounded GM-estimator for Regression

..... CHENG Li-hua, ZHANG Jun-min (359)

# 基于梯度强度立柱的客车侧翻 安全性多目标优化设计

周莎, 张勇, 张成, 李奇

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 提出一种新型梯度强度立柱结构,使侧翻时客车立柱不同位置的强度与受力匹配.对梯度立柱分析表明:新型梯度强度立柱结构明显提高了客车侧翻安全性能.结合最优拉丁方实验设计和径向基近似技术,构建了设计响应的高精度近似模型,并采用多目标遗传算法对其寻优.优化结果表明:通过对梯度强度立柱结构的强度与壁厚的合理匹配,不仅使得客车的侧翻安全性得到较大的改善,而且达到了客车轻量化设计的目的.

**关键词:** 客车; 梯度强度; 立柱; 多目标优化; 侧翻安全性

**中图分类号:** U 271.1

**文献标志码:** A

客车侧翻事故是特大交通事故的主体.客车因其所载乘客较多,经常出现群死群伤的现象,造成恶劣的社会影响.因此,对客车侧翻安全性进行研究具有重要意义<sup>[1]</sup>.为了更好地研究客车侧翻事故,国内外都相继出台了客车侧翻实验的法规,较典型的是欧洲的 ECE R66 法规,GB 17578—2013《客车上部结构强度要求及试验方法》详细地规范了客车上部结构强度要求和相关的试验方法<sup>[2-3]</sup>.对于客车侧翻安全性的研究,Su 等<sup>[4]</sup>基于代理模型,利用响应面来实现客车多目标优化;Liang 等<sup>[5]</sup>通过优化每根立柱厚度来改善客车上部结构强度和吸能性;高云凯等<sup>[6]</sup>基于客车上部结构关键零部件截面形状进行侧翻安全性多目标优化.然而,这些研究并未考虑到侧翻过程中侧围立柱不同位置受力不均匀的特点.本文针对这一现象提出一种新型的梯度强度立柱结构,使立柱不同位置的强度与受力匹配,从而减小侧围的挤压变形,提高侧翻安全性.

## 1 客车有限元模型的建立

以某型号全承载大客车为研究对象,并建立该客车的有限元模型,如图 1 所示.模型主要包括车身骨架、底架和车轮等.其他部件如发动机、油箱、蒙皮和座椅等均以集中载荷或均布载荷等效配重的方式加载到对应几何位置的节点上,保证整车有限元模型的质心高度位置和实车的基本吻合,误差控制在 2% 以内<sup>[7]</sup>.基于 ECE R66 法规建立的客车有限元侧翻模型,其主要包括车身部分、翻转平台和地面.并且,为方便评价客车上部结构的强度及安全性,模型依据 ECE R66 定义了乘员的生存空间.

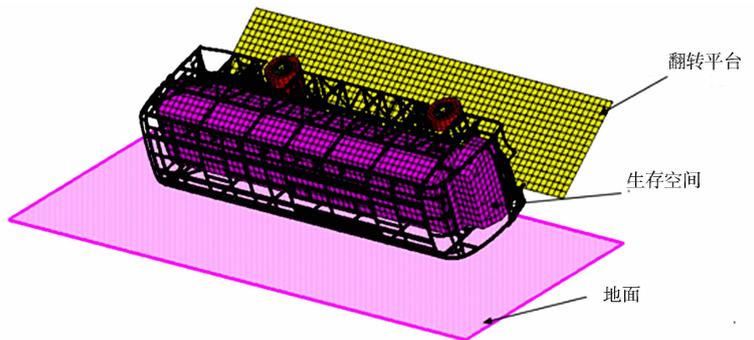


图 1 客车侧翻有限元模型

Fig. 1 Bus rollover finite element model

**收稿日期:** 2014-06-16

**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);中国博士后科学基金资助项目(2014T70613);华侨大学中青年骨干教师科技创新支持计划资助项目(ZQN-PY202)

为了保证乘员安全性,客车侧翻过程中车身部件不能侵入生存空间.整车有限元模型共有 412 967 个单元,419 535 个节点.车身骨架的材料为 Q345,密度为  $7\ 800\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;弹性模量为 210 GPa;泊松比为 0.3;屈服极限为 345 MPa.

## 2 客车侧翻安全性分析及验证

建好的客车侧翻有限元模型采用 LS-DYNA 进行数值仿真分析,整个分析过程从客车撞地瞬间到车身完全离开地面为止,历时 250 ms.侧翻碰撞过程中车身与地面的撞击力,如图 2 所示.由图 2 可知:整个过程有两个波峰值,从开始到 0.008 s 时车身结构与地面发生撞击,此时撞击力达到最大值 1 570 kN;到 0.078 ms 左右时碰撞力达到另一个峰值 551 kN,此时车身变形量达到最大;到 0.215 s 后,碰撞力几乎为零,说明此时车身开始弹离开地面.

碰撞过程中的能量曲线,如图 3 所示.由图 3 可知:整个过程能量守恒,沙漏能所占比例小于 5%.为验证该有限元模型的有效性,结合与该车型结构相近的对标车型的侧翻实验,进行对比分析,结果如表 1 所示.表 1 中:侧翻过程中侧围每根立柱与生存空间的最小距离(入侵量)分别为  $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6, D_7$ .由表 1 可知:对标模型的侧翻初始侵入与当前模型较为吻合,因此,可认为整车模型和分析都是合理、可靠的<sup>[8]</sup>.

侧翻碰撞过程中在立柱上间隔均匀选取 5 个测试点,侧围立柱的应力云图,如图 4 所示.由图 4 可知:侧翻过程中其立柱不同位置的应力水平差别较大.

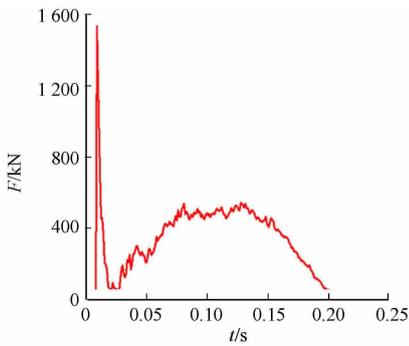


图 2 撞击力曲线

Fig. 2 Impact force curve

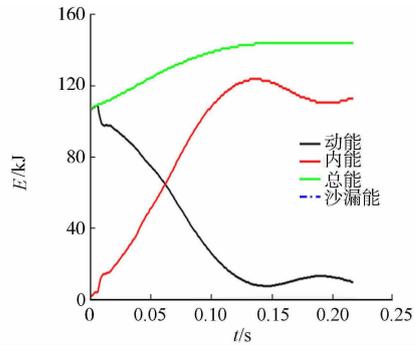


图 3 车身能量曲线

Fig. 3 Body energy curve

表 1 对标模型与当前模型侧翻入侵对比

Tab. 1 Rollover invasion comparison of simulation and experiment model

模型	$D_1/\text{mm}$	$D_2/\text{mm}$	$D_3/\text{mm}$	$D_4/\text{mm}$	$D_5/\text{mm}$	$D_6/\text{mm}$	$D_7/\text{mm}$
仿真模型	-17.15	-38.19	-30.43	-22.70	-19.15	-11.99	-14.76
对标模型	-20.26	-35.52	-30.33	-23.23	-20.75	-13.64	-14.55

侧翻过程中车身结构最大变形,如图 5 所示.由图 5 可知:碰撞过程中,生存空间明显被入侵,不满足 ECE R66 法规要求,因此,需要强化车身上部结构强度来提高客车侧翻安全性能.

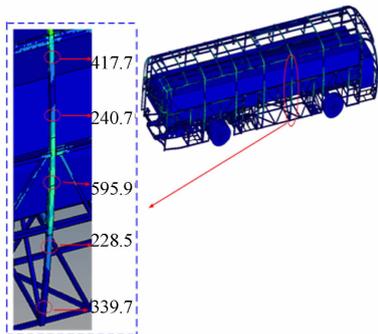


图 4 侧围立柱的应力云图

Fig. 4 Stress nephogram of side wall pillar (MPa)

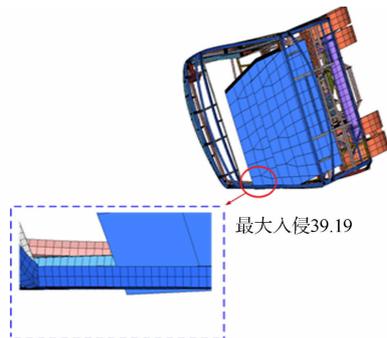


图 5 侧翻入侵示意图

Fig. 5 Schematic view of rollover invasion (mm)

### 3 梯度强度立柱结构侧翻安全性的优化

#### 3.1 设计流程的优化

从客车侧翻过程可以看出:侧围立柱是关键 的承力部件,侧翻碰撞过程中客车立柱不同位置受力相当不均匀.因此,提出了一种新型的梯度强度立柱结构,使立柱不同位置的强度与受力匹配,从而减小侧围的挤压变形,提高侧翻安全性.为了进一步使立柱结构强度分布更加合理,基于客车梯度强度立柱的强度匹配进行客车侧翻安全性的多目标优化流程,如图 6 所示.

#### 3.2 梯度强度立柱结构及侧翻分析

客车梯度强度立柱结构是把立柱均匀分为 6 单元,每个单元强度不一样,且呈梯度变化,客车侧围梯度强度立柱结构示意图,如图 7 所示.

采用热成型方法<sup>[9-10]</sup>加工的梯度强度立柱结构,如图 8 所示.该结构将客车每根立柱均匀分为 6 个单元: $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6$ ,6 个单元的强度沿高度变化.根据热成型的梯度强度立柱结构具有 5 种屈服强度,6 个单元对应的屈服强度为 400,500,650,800,1 000,1 000 MPa.

为了验证梯度强度结构的性能,将初始客车立柱替换为梯度强度立柱,对其进行数值仿真分析,得到的各立柱对生存空间的入侵量,如表 2 所示.表 2 中:负数表示有入侵情况.由表 2 可知:相对于原始模型的侧翻,采用梯度强度立柱结构后的安全性有了明显提高,但立柱对生存空间还有一定的入侵量,因此,仍需要对其进行的优化设计.

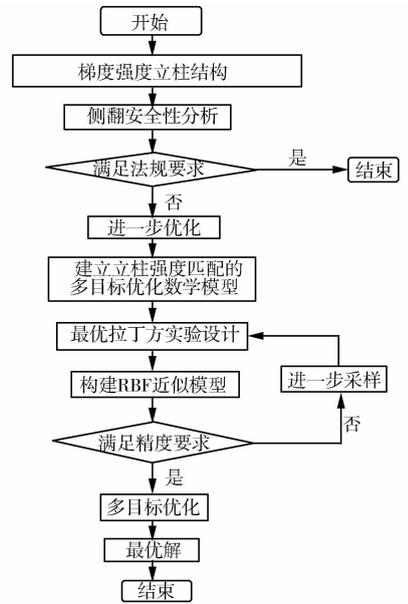


图 6 客车车身多目标优化设计流程图  
Fig. 6 Design flow chart of bus body multi-objective optimization design flow

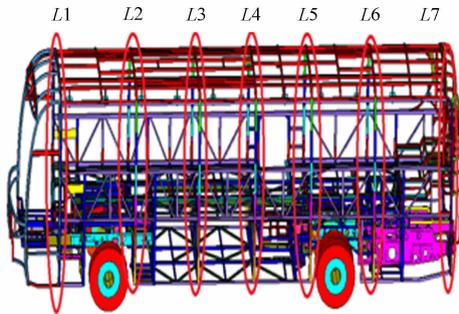


图 7 客车侧围立柱结构示意图

Fig. 7 Bus side wall pillars structure

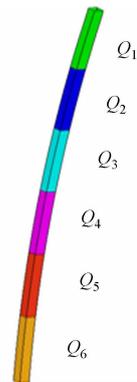


图 8 梯度强度立柱结构

Fig. 8 Gradient strength pillar structure

表 2 立柱对生存空间入侵量

Tab. 2 Pillar on the amount of living space invasion

立柱	$D_1/mm$	$D_2/mm$	$D_3/mm$	$D_4/mm$	$D_5/mm$	$D_6/mm$	$D_7/mm$
初始设计	-17.150	-38.190	-30.430	-22.700	-19.150	-11.990	-14.760
初始梯度立柱	8.279	-5.799	-0.208	-1.400	-2.817	0.821	14.978

#### 3.3 客车侧翻多目标优化数学模型

虽然单目标优化能够改善设计性能,但单目标优化在复杂的设计要求下不能为设计师提供多种可选的设计方案<sup>[11]</sup>.在汽车优化设计中应该综合考虑汽车各方面因素,实现汽车更多性能要求.多目标优化不同于单目标优化,最后所得的最优解不是唯一解,而是一个 Pareto 最优解集或 Pareto 前沿.求解多目标问题实质就是寻求 Pareto 最优解集的过程<sup>[12]</sup>.

客车侧翻过程中,乘客受伤害有两种主要形式<sup>[13]</sup>:被入侵的生存空间对乘客进行的挤压,乘客与车体之间的二次碰撞.因此,为降低客车侧翻时对乘客的伤害,以客车梯度强度立柱结构为优化对象,选取立柱6个单元的屈服强度和每根立柱厚度做为设计变量,以生存空间的侵入量为设计约束,以侧翻碰撞后车身吸收能量和立柱质量为设计目标,建立基于梯度强度立柱结构强度匹配的客车车身多目标优化数学模型,即

$$\left. \begin{aligned} & \text{find } [Q_1, Q_2, \dots, Q_6; t_1, t_2, \dots, t_7]^T, \\ & \text{min } f(x) = [-E, M], \\ & \text{s. t. } D_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, 7, \\ & \quad t_{j,t} \leq t_j \leq t_{j,h}, \quad t = 1, 2, \dots, 7, \\ & \quad Q_1, Q_2, \dots, Q_6 \in [400, 500, 650, 800, 1\ 000]. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)中: $E$ 为侧翻中车身吸收的能量; $M$ 为立柱结构质量; $Q_1, \dots, Q_6$ 为立柱结构6个单元的屈服强度; $t_1, t_2, \dots, t_7$ 为对应的每根立柱厚度;立柱厚度下限 $t_{j,l}$ 为1.5 mm,上限 $t_{j,h}$ 为3.5 mm; $D_i$ 为入侵量.

### 3.4 近似模型的建立

在工程优化问题中,对于一些高度非线性问题,如汽车碰撞分析等,直接利用有限元模型进行优化迭代过程非常耗时.因此,近似模型技术得到了广泛的关注和应用.由于径向基近似模型(radial basis function, RBF)针对客车侧翻碰撞这类高度非线性问题有较好的预测精度和稳健性,因此,基于RBF径向基方法构建了各个响应的近似模型.近似模型的建立包括实验设计采样和近似模型技术两方面<sup>[14]</sup>.

3.4.1 最优拉丁方实验设计 最优拉丁方采样方法能使采样点比较均匀地分布在采样空间,是一种“充满空间”采样技术,用较少的试验点就能真实地反映采样空间信息的特点<sup>[15]</sup>.因此,对客车梯度强度立柱结构6个单元的屈服强度( $Q_1, \dots, Q_6$ )和每根立柱厚度( $t_1, t_2, \dots, t_7$ )进行了60次最优拉丁方采样.

3.4.2 RBF近似模型 RBF是以径向函数为基函数,通过线性叠加的方式构造出来的模型.一般情况下任何函数都可以表示为一组基函数的加权和,可以实现从样本输入到基函数输出之间的一种非线性映射关系<sup>[16]</sup>,其基本数学表达式为

$$y(x) = \sum_{i=1}^n w_i \varphi_i(\|x - x_i\|). \quad (2)$$

式(2)中: $x$ 为设计变量; $n$ 为样本点个数; $w_i$ 为线性叠加权重系数; $\|x - x_i\|$ 为对应预测点和第 $i$ 个样本点之间的欧氏距离;径向函数为 $\varphi_i(\|x - x_i\|)$ .

3.4.3 近似模型的精度检查 近似模型的精度决定了最优结果的可行性,因此,必须开展近似模型精度的验证.采用工程中常用的复相关系数 $R^2$ 检测, $R^2$ 定义<sup>[17]</sup>为

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}. \quad (3)$$

式(3)中: $n$ 为样本数; $\hat{y}_i$ 为第 $i$ 个样本点的近似模型预测值; $y_i$ 为第 $i$ 个样本点的真实值(有限元计算值); $\bar{y}_i$ 为样本均值.

$R^2$ 的值在0到1之间, $R^2$ 越接近1,则表明近似模型的精度越高.通过验算,基于最优拉丁方样本点与RBF近似技术得到的各近似模型的 $R^2$ 值,如表3所示.

由表3可知:所有近似模型的 $R^2$ 值都较接近1,说明近似模型的精度都比较高,可用它来代替有限元模型进行多目标优化.

表3 设计响应的近似模型精度

Tab. 3 Approximate model accuray cof design responses

项目	$D_1/\text{mm}$	$D_2/\text{mm}$	$D_3/\text{mm}$	$D_4/\text{mm}$	$D_5/\text{mm}$	$D_6/\text{mm}$	$D_7/\text{mm}$	$E/\text{kJ}$	$m/\text{kG}$
$R^2$	0.959	0.965	0.978	0.962	0.957	0.95	0.971	0.967	0.999

部分响应的高精度RBF近似模型,如图9所示.

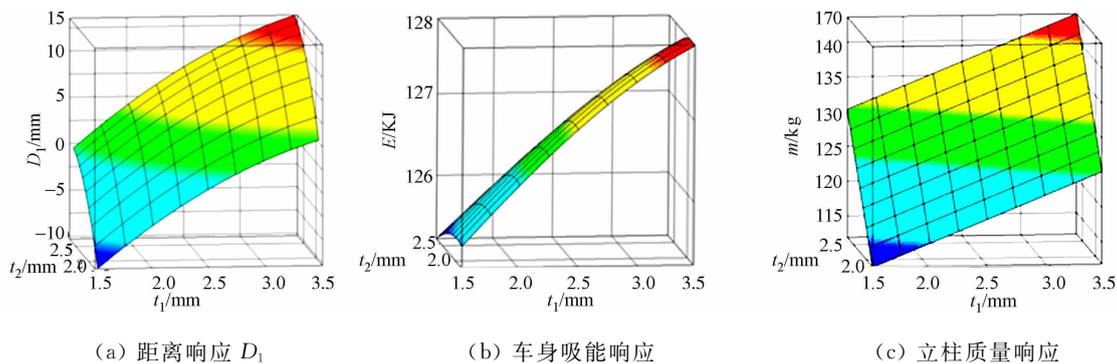


图 9 部分响应近似模型

Fig. 9 Approximate model of partial response

### 4 优化结果与讨论

采用 NSGA-II 对各个响应的近似模型进行多目标寻优, 质量与能量吸收之间的 Pareto 前沿曲线, 如图 10 所示. Pareto 前沿是一个优化解集, 相对单目标优化而言, 它能为工程设计人员提供更多的设计方案, 常根据设计的实际需求和经济性来选取最优设计方案. 图 10 中: 红色标记为在 Pareto 前沿曲线间隔均匀选取的 3 组解.

3 组最优设计变量所对应响应值, 如表 4 所示. 由表 4 可知: 3 组皆满足 ECE R66 法规的要求; 解 1 侧重于车身减重; 解 2 兼顾车身减重和能量吸收; 解 3 侧重于能量吸收. 综合兼顾吸能和轻量化的目的, 最后决定以解 2 为最终解.

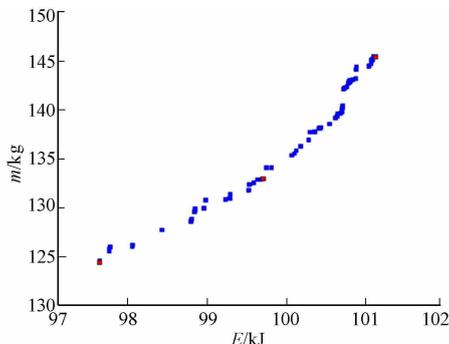


图 10 设计目标的 Pareto 前沿

Fig. 10 Pareto front of design objectives

表 4 3 组 Pareto 最优解对应的响应值

Tab. 4 Three groups of Pareto optimal solutions corresponding response

解序号	$D_1$ /mm	$D_2$ /mm	$D_3$ /mm	$D_4$ /mm	$D_5$ /mm	$D_6$ /mm	$D_7$ /mm	$E$ /kJ	$m$ /kg
初始值	-17.15	-38.19	-30.43	-22.7	-19.15	-11.99	-14.76	103.43	149.7
1	17.54	1.51	6.69	6.83	1.05	0.83	16.61	97.65	124.5
2	12.50	1.05	2.11	4.05	1.42	3.87	18.71	99.77	134.11
3	11.22	0.17	0.14	1.34	3.25	2.21	13.31	101.15	145.51

由于优化后整车重量减轻, 侧翻时初始能量减小及车身变形减小, 车身吸能比优化前减少了, 而乘客与车体发生二次碰撞而受伤害的可能性并没有增大. 初始设计和优化后车身与地面碰撞时的撞击力曲线, 如图 11 所示. 由图 11 可知: 优化后碰撞力峰值比初始模型降低 16.9%, 从而大大降低二次碰撞时对乘员的伤害.

### 5 结论

根据客车侧翻过程中立柱不同位置受力不同的特点, 提出了一种新型梯度强度立柱结构, 把每根立柱强度沿高度方向均匀分为 6 个单元, 使得立柱不同位置强度与受力匹配.

结合最优拉丁方实验设计采样与 RBF 近似技术, 对立柱结构的强度与厚度进行了多目标最优匹配. 优化结果表明: 1) 梯度强度立柱结构能明显提高客车侧翻安全性能; 2) 针对客车侧翻优化问题, 采用 RBF 径向基近似模型有较高的精度, 并大幅提高了优化效率; 3) 梯度强度立柱结构实现立柱结构减

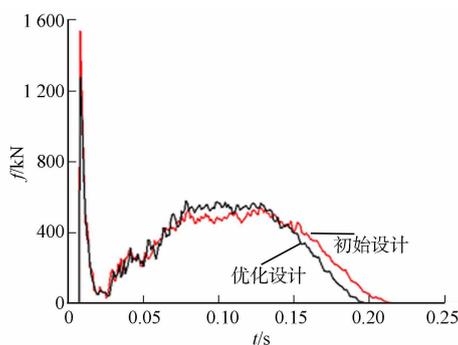


图 11 优化前后碰撞力曲线对比

Fig. 11 Comparison of the collision force before and after optimization

质量 10.4%,达到了轻量化的目的;4) 结合 RBF 模型和 NSGA-II 算法应用于客车侧翻的多目标优化中,得出了 Pareto 最优解集,可以为设计人员提供多套设计方案参考。

### 参考文献:

- [1] 苏鑫,李高波,吕光辉. 长途客车交通事故原因及实例分析[J]. 交通企业管理,2013(8):71-72.
- [2] 中国公路车辆有限公司,金龙联合汽车工业有限公司. GB 7578-2013 客车上部结构强度要求及试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2014:13-18
- [3] 杨瑞峰,樊江顺,崔海涛,等. 基于 ECE R66 法规的某大客车上部结构强度[J]. 公路交通科技,2011,28(10):136-140.
- [4] SU Rui-yi, GUI Lian-gjin, FAN Zi-jie. Multi-objective optimization for bus body with strength and roller safety constraints based on surrogate models[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization,2011,44(3):431-441.
- [5] LIANG C C, LE G N. Optimization of bus rollover strength by consideration of the energy absorption ability[J]. International Journal of Automotive Technology,2010,11(2):173-185.
- [6] 高云凯,张朋,吴锦妍,等. 基于 Kriging 模型的大客车侧翻安全性多目标优化[J]. 同济大学学报:自然自然版,2012,40(12):1882-1887.
- [7] 胡泊,客车侧翻安全性仿真研究及试验验证[D]. 西安:长安大学,2012:55-58.
- [8] 马晓光,王秋林,那景新,等. 客车侧翻结构安全性仿真分析及改进设计[J]. 客车技术与研究,2011,41(8):31-33.
- [9] 高云凯,高大威,余海燕,等. 汽车用高强度钢热成型技术[J]. 汽车技术,2010(8):56-60.
- [10] 林建平,王立影,田浩彬,等. 超高强度钢板热冲压成形研究与发展[J]. 热加工工艺,2008,37(21):140-144.
- [11] ZHANG Yong, SUN Guang-yong, LI Guang-yao. Optimization of foam-filled bitubal structures for crashworthiness criteria[J]. Materials and Design,2012,38:99-109.
- [12] 关志华,寇纪淞,李敏强. 一种改进的非支配排序遗传算法 INSGA[J]. 天津大学学报:自然科学版,2002,35(4):429-434.
- [13] 范子杰,马林,桂良进,等. 大客车侧翻安全性多目标优化[J]. 系统仿真学报,2012,24(5):1109-1113.
- [14] 李恩颖. 近似模型优化体系关键技术研究及应用[D]. 长沙:湖南大学,2009:2-8.
- [15] LIEFVENDAHL M, STOCKI R. A study on algorithms for optimization of latin hypercubes[J]. Journal of Statistical Planning and Inference,2006,136(9):3231-3247.
- [16] 陈国栋. 基于代理模型的多目标优化方法及其在车身设计中的应用[D]. 长沙:湖南大学,2012:12-18
- [17] 廖兴涛,张维刚,李青,等. 响应表面法在薄壁构件耐撞性优化设计中的应用[J]. 研究工程设计学报,2006,13(5):298-302.

## Multi-Objective Optimization Design for Bus Rollover Safety Based on Gradient Strength Pillar

ZHOU Sha, ZHANG Yong, ZHANG Cheng, LI Qi

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

**Abstract:** In order to make the strength of the pillar in different locations match with the impacting force, a new gradient strength pillar structure is proposed in this paper. The rollover simulation analysis for gradient pillar shows that the gradient strength pillar structure obviously improves rollover safety of the bus. The paper establishes high precision approximate models of design response by combining optimal latin hypercube experimental design with radial basis function (RBF) approximation techniques, and multi-objective optimization design is performed based on approximate models of design responses by using the multi-objective genetic algorithm (NSGA-II). The optimization results show that a reasonable match of strength and wall thickness for the pillar structure, not only can improve bus rollover security greatly, but also can achieve the purpose of bus lightweight design.

**Keywords:** bus; gradient strength; pillar; multi-objective optimization; rollover safety

# 乘用车齿轮齿条式的液压助力转向系统匹配

陈丁跃, 杨励, 郭泽红, 贺志瑛

(长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 基于齿轮齿条式液压助力转向系统的重要性,根据总布置输入的数据和实测相关数据计算出转向阻力随车速的变化关系,根据转向阻力的分析计算结果对转向泵和转向器进行搭配,并调整匹配转向机特性曲线和转向油泵特性曲线,优化转向系统输出,满足阻力曲线要求,最终得出一种利用经验公式与理论结合建立系统模型进行匹配分析的有效方法。

**关键词:** 转向系统; 液压助力; 齿轮齿条; 特性曲线; 匹配分析

**中图分类号:** U 463.44

**文献标志码:** A

助力转向系统能使汽车具有较高的机动性与操纵轻便性。目前,乘用车使用最广泛的助力形式是液压助力转向系统,国内各乘用车公司转向系统采用的开发方式还是传统的比匹配法,即利用现成(或同类车型)几组不同的转向系统进行实车试验,通过主观评价在几个系统中优选一种或稍加调整便应用于该车。这种方法存在一定的盲目性,当整车相关参数一旦调整,之前的试验结果就失去意义,需要重新进行匹配,匹配过程费时费力,效果也不好。本文以动力转向系统中的齿轮齿条式液压助力转向系统为研究对象,利用经验公式与理论结合,建立转向系统模型进行匹配分析,确认转向系统的关键参数。

## 1 系统模型的建立

### 1.1 转向泵模型

转向泵(双作用叶片泵)将发动机的动能转换为液压能。低速或停车时,得到液压助力轻松转向操作;高速时,控制液压大小(一般齿轮泵最高压力为 7 MPa),确保转向的安全性。

取发动机转速与转向泵转速的比值为 1:1,转向器活塞直径 48 mm,齿条直径 31 mm,输入轴齿轮半径 11 mm,方向盘最大转速  $3.2\pi \cdot s^{-1}$ ,则转向器最大流量  $Q_{max} = \frac{\pi}{4}(48^2 - 31^2) \times 3.2\pi \times 11 \times \frac{60}{10^6} \times$

$L \cdot \min^{-1} \approx 7 L \cdot \min^{-1}$ ,  $Q_{转向泵} = Q_{转向器}^{[1]}$ 。

根据大多数驾驶员的驾驶习惯作出车速与档位的对应表,如表 1 所示。表 1 中: $v$  为车速; $i_0$  为主减速器传动比; $i_g$  为档位传动比。

表 1 车速档位表

Tab. 1 Table of the vehicle speed and the gear

项目	$v/km \cdot h^{-1}$				
	10	20	30~40	50	60
档位	一	二	三	四	五
$i_0$	4.10	4.10	4.10	4.10	4.10
$i_g$	3.52	2.04	1.40	1.00	0.72

根据公式  $v = 0.377 \times \frac{nR^{[2]}}{i_0 i_g}$ , 可得  $n =$

$\frac{v i_0 i_g}{0.377 R^{[2]}}$ 。假设转向泵流量在  $v = 10 km \cdot$

$h^{-1}$  时达到最大值,最大流量为  $7 L \cdot \min^{-1}$ ;在  $v = 50 km \cdot h^{-1}$  时开始降低; $v = 110 km \cdot h^{-1}$  时达到稳定流量状态,稳定流量为  $5 L \cdot \min^{-1}$ 。由此可得  $V, i_g, i_0, R^{[2]}$  和  $Q$  之间的关系,并绘制出转向泵特性曲线图,如图 1 所示。由图 1 可知:OA 段转向泵流量随着发动机转速的升高而升高;AB 段转向泵流量保持不变;BC 段转向泵流量随着发动机转速的升高逐渐降低;CD 段转向泵流量保持不变。

收稿日期: 2015-01-16

通信作者: 陈丁跃(1960-),男,教授,博士后,主要从事新能源汽车与控制技术,车辆智能化与节能技术,装备及其自动化,智能载运交通工具与运用的研究。E-mail: cdy868@163.com.

## 1.2 齿轮齿条式动力转向器模型的建立

齿轮齿条式动力转向器有简单阀口转阀式和短切口转阀式,文中以短切口阀式为例进行研究.

### 1.2.1 短切口阀式 转向器内的工作油压 $P$ <sup>[3]</sup>为

$$P = \frac{\rho Q^2}{2N^2 C_d^2 W^2 (A_1 - \frac{\pi R \varphi}{180})^2}. \quad (1)$$

式(1)中:液体密度  $\rho=0.872 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$  ( $15^\circ\text{C}$ );经过转向器控制阀的总流量  $Q=7 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ;阀槽数  $N=4$ ;流量系数  $C_d=0.7$ ;阀芯的刃口上加工的圆弧形或平面坡口的轴向长度  $W$  取 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14;阀芯刃口上加工圆弧形或平面坡口宽度  $A_1=0.75 \text{ mm}$ (匹配过程中可改);阀芯半径  $R=10 \text{ mm}$ (匹配过程中可更改)<sup>[1]</sup>;  $\varphi$  为阀芯与阀体瞬间相对转角(即扭杆转角).

由此可得压力  $P$  和阀转角  $\varphi$  在不同  $W$  值下的关系,并绘制出短切口阀转向器特性曲线,如图 2 所示.采用短切口修正刃口,再配合选择扭杆直径,可以得到合理的转向器特性曲线<sup>[3]</sup>.

### 1.2.2 扭杆手力分析 转向时,转向扭杆产生的扭矩 $M_k$ <sup>[4]</sup>为

$$M_k = \frac{G d_1^4 \varphi}{584 L_1}. \quad (2)$$

式(2)中: $G$ 为剪切弹性模量,对于 40C<sub>r</sub>,常用 80.0~85.0 GPa,取  $G=80.0 \text{ GPa}$ ;扭杆直径  $d_1=4.6 \text{ mm}$ (可调整); $\varphi$ 为扭杆转角,即阀芯与阀体瞬间相对转角;扭杆承受扭矩的程度  $L_1=140 \text{ mm}$ (可调整).

转向手力  $F_{\text{手}}$ (转向器齿轮作用于齿条的力)表示为

$$F_{\text{手}} = \frac{M_k}{R_1} = \frac{G d_1^4 \varphi}{584 L_1 R_1}. \quad (3)$$

式(3)中: $R_1$ 为转向器齿轮半径,实测  $R_1=11 \text{ mm}$ .由此可得转向手力( $F_{\text{手}}$ )随扭杆转角( $\varphi$ )的变化关系曲线图,如图 3 所示.

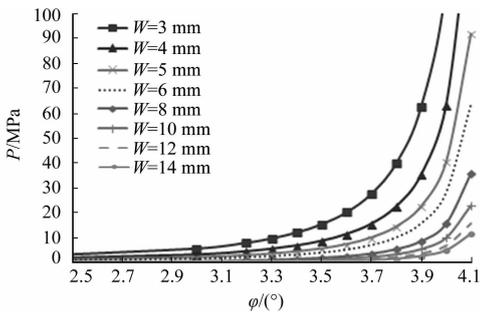


图 2 短切口阀转向器特性曲线

Fig. 2 Steering gear with short incision valve characteristic curve

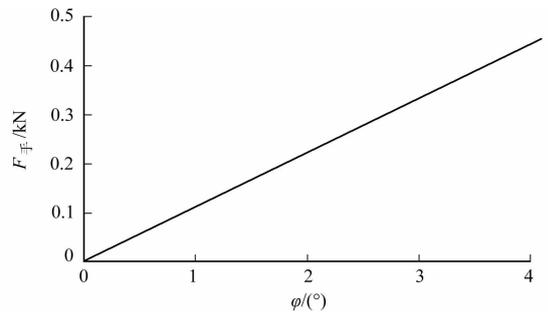


图 3 转向手力随扭杆转角变化曲线图

Fig. 3 Steering wheel force-torsion bar corner characteristic curve

## 2 转向系统匹配计算

### 2.1 转向手力

对于空满载质量变化不大的乘用车,低速行驶时,转向盘输入转矩不高于  $5 \text{ N} \cdot \text{m}$ (已知转向盘半径为  $190 \text{ mm}$ ,经计算可知该转矩对应施加于转向盘的力为  $26.3 \text{ N}$ ),可认为转向轻便(国标规定带助力转向时转向力不得大于  $65 \text{ N}$ );高速行驶时,转向盘输入转矩不低于  $7.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ (经计算可知该转矩对应施加于转向盘的力为  $40 \text{ N}$ ),可认为转向稳定<sup>[5]</sup>.

由此可得:当设计目标为低速(车速  $v \leq 80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ )时,转向手力不大于  $26.3 \text{ N}$ ;高速(车速  $v \geq 90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ )时,转向手力不低于  $40 \text{ N}$ ,如图 4 所示.

总布置输入数据为:整车质量  $2552 \text{ kg}$ ;前轴荷  $1250.5 \text{ kg}$ ;轮胎自由直径  $776 \text{ mm}$ ;轮胎气压  $200 \text{ kPa}$ ;轴距  $2790 \text{ mm}$ ;迎风面积  $2.71 \text{ m}^2$ ;车轮偏置距  $24.094 \text{ mm}$ ;主销内倾角  $12.41^\circ$ ;车轮转角  $36^\circ$ .

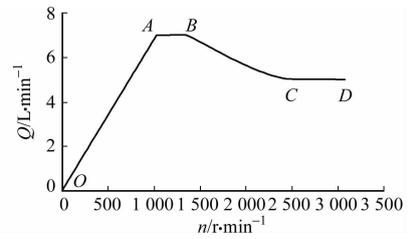


图 1 转向泵特性曲线

Fig. 1 Steering pump characteristic curve

### 2.2 转向阻力矩

转向阻力矩由摩擦阻力矩、转向前轮主动阻力矩和被动阻力矩组成。摩擦阻力矩  $M_{b1}$  是由转向器及传动机构中的摩擦引起的阻力矩, 通常视为常数, 值较小, 且不易获得准确值, 故不予考虑。

2.2.1 转向前轮主动阻力矩(回正力矩  $M_{b2}$ ) 右转向轮受力分析图, 如图 5 所示。转向轮的主要定位角和结构参数为: 转向轮主销后倾角  $\tau$ ; 主销后倾距  $n_K$ ; 偏置距  $r_L = 24.094 \text{ mm}$ ; 转向轮的静力半径  $r_0$ ; 主销内倾角  $\delta = 12.41^\circ$ ; 车轮外倾角  $\gamma$ 。  $M_{b2}$ <sup>[6]</sup> 表示为

$$M_{b2} = G_1 r_L \sin(2\delta) \cdot \sin \theta. \quad (4)$$

式(4)中: 转向轴(即前轴)负荷  $G_1 = 12\ 254.9 \text{ N}$ ; 车轮转角  $\theta = 36^\circ$ 。由此计算可得,  $M_{b2} = 73.6 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

2.2.2 被动阻力矩 被动阻力矩  $M_{b3}$ <sup>[7]</sup> 是由轮胎和路面间的摩擦产生的, 表示为

$$M_{b3} = -F_z \cdot f \cdot \frac{\sqrt{B^2 + L^2}}{4}. \quad (5)$$

式(5)中: 前轴载荷  $F_z = 12\ 254.9 \text{ N}$ ;  $L, B$  为轮胎与地面接触面的长和宽(将轮胎与地面的接触面近似视为矩形);  $f$  为轮胎与地面摩擦系数(由经验取 0.8)。

$F_z$  为前轴载荷减去空气升力( $F_{升}$ )作用于前轴的分力( $F_{前}$ ), 前轴载荷为  $12\ 254.9 \text{ N}$ , 即  $1\ 250.5 \text{ kg}$ 。空气升力随着车速的变化而变化<sup>[2]</sup>, 即

$$F_{升} = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_z. \quad (6)$$

式(6)中: 空气密度  $\rho = 1.2258 \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-4}$ ; 相对车速  $v$  在无风状态下取  $0 \sim 150 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ; 迎风面积  $A = 2.71 \text{ m}^2$ ;  $C_z$  为升力系数, 一般取值为  $-0.4 \sim 0.4$ , 文中取 0.3。

轴距为  $2\ 790 \text{ mm}$ , 假设后轴到车辆重心的距离为  $L_2$ , 则  $G \cdot L_2 = 12\ 254.9 \times 2\ 790, G = 25\ 009.6 \text{ N}$ 。由此可计算出:  $L_2 = 917.5 \text{ mm}$ 。又因为前轴到重心的距离为  $1\ 872.5 \text{ mm}$ , 故升力作用与前轴的分力  $F_{前} = \frac{917.5}{2\ 790} \cdot F_{升}$ 。

由于不考虑系统内部摩擦引起的阻力矩, 所以转向阻力矩  $M_b = M_{b2} + M_{b3}$ , 转向阻力  $F_P = (M_{b2} + M_{b3}) / (\text{齿条到主销的距离}, 140.139 \text{ mm})$ 。由此可得不同车速  $v$  所对应的滚动半径  $R^1, L, B, F_z, M_b$  和  $F_P$ , 绘制出不同车速下所对应的不同转向阻力, 如图 6 所示。

### 3 转向系统匹配分析

系统的匹配过程主要通过改变转向器阀芯刃口上加工的圆弧形或平面坡口的轴向长度  $W$  和转向泵的最大流量与高速时的稳定流量来达到预期目标<sup>[8]</sup>。

不同转向泵的流量随车速  $v$  变化的关系, 如表 2 所示。表 2 中:  $Q_1, Q_2, Q_3$  分别表示 3 种不同转向泵流量。从而得出不同转向泵的流量特性曲线, 如图 7 所示。不同转向泵与转向器的搭配结果所能提供的转向助力和转向阻力之间的关系, 如图 8 所示。

由图 8 可知:  $W = 14 \text{ mm}, Q = 7 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $W = 18 \text{ mm}, Q = 9 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $W = 10 \text{ mm}, Q = 5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ , 这 3 种搭配结果比较接近预期目标。但是对这 3 种搭配结果进行详细分析发现:  $W = 18 \text{ mm}, Q = 9 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  和  $W = 10 \text{ mm}, Q = 5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ , 这两种搭配结果在高速时需要手提供的力比预期的手力偏大; 而  $W = 14 \text{ mm}, Q = 7 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  这种搭配结果能同时满足低速轻便和高速稳定的预期目标。综上所述, 选择对  $W = 14 \text{ mm}, Q = 7 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  的搭配结果进行进一步的详细分析。

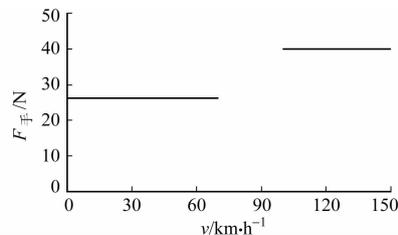


图 4 转向手力目标曲线

Fig. 4 Steering wheel force objective curve

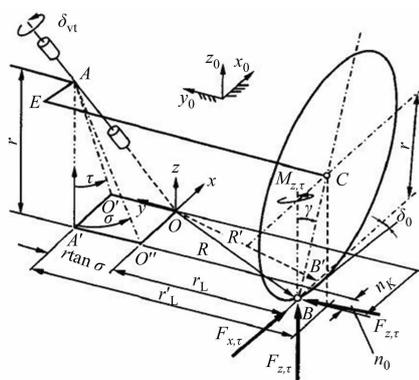


图 5 右转向轮受力分析图

Fig. 5 Stress diagram of the right side steering wheel

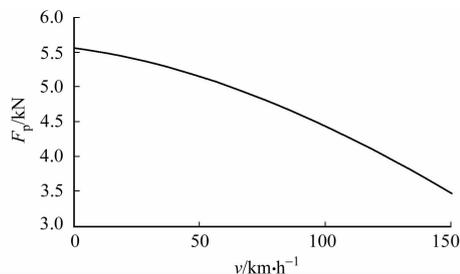


图 6 转向阻力与车速关系图

Fig. 6 Steering resistance and vehicle speed diagram

表2 不同转向泵的流量随车速变化的关系

Tab. 2 Relationships between the flow of the different steering pumps and the vehicle speed

Q	$v/\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$											
	0	10	30	50	60	70	80	90	110	130	140	150
$Q_1/\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	0	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	7.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
$Q_2/\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	0	7.0	7.0	7.0	6.9	6.8	6.4	5.9	5.2	5.0	5.0	5.0
$Q_3/\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	0	5.0	5.0	5.0	5.0	4.3	3.7	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0

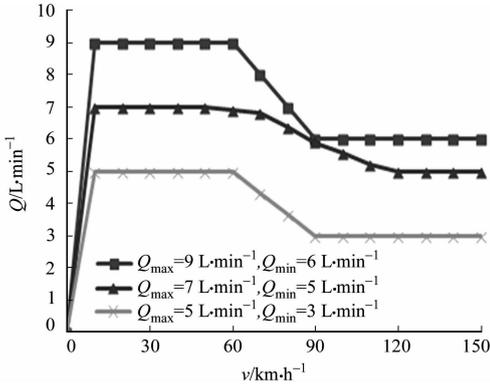


图7 流量随车速变化的关系

Fig. 7 Relationship between the steering pump flow and the vehicle speed

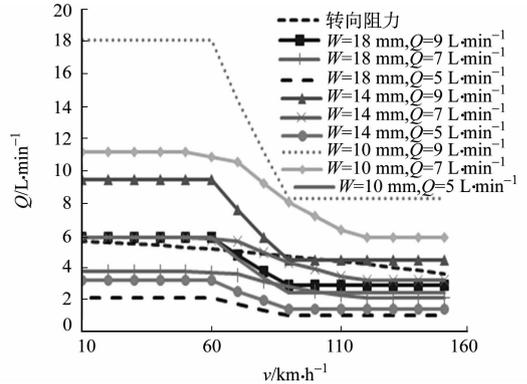


图8 转向助力与转向阻力的关系

Fig. 8 Relationship between the power steering and the steering resistance

转向力( $F_{\text{助}} + F_{\text{手}}$ )在扭杆转角  $\varphi = 4^\circ$  时,转向力和转向阻力随车速变化曲线图,如图9所示。由图9可知:当车速约为  $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  时,转向阻力值开始大于转向力( $F_{\text{助}} + F_{\text{手}}$ ),即转向所需要的力开始增大,转向开始变得沉重;虽然车速达到  $120 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  之后转向手力逐渐减小,但是始终还是比预设的手力值大,所以避免了前文所说的高速时转向盘发飘而引起的危险。

$F_{\text{手}}$  与车速  $v$  之间关系曲线,如图10所示。由图10可知:当车速  $v \leq 80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  时,需要驾驶员作用于转向盘的力为  $25.6 \text{ N}$ ,小于  $26.3 \text{ N}$ ;当车速  $v \geq 90 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  时,需要驾驶员作用于转向盘的力均大于  $40 \text{ N}$ 。由此达到了设计初期预定“低速转向轻便,高速转向稳定”的目标。

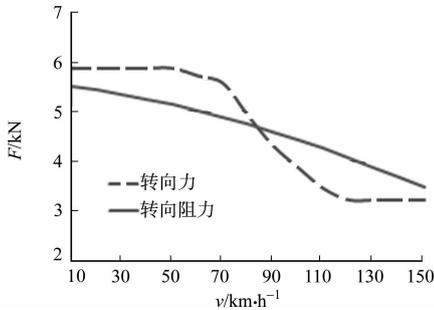


图9 转向力和转向阻力与车速关系曲线

Fig. 9 Relationship between the steering force, the steering resistance and the vehicle speed

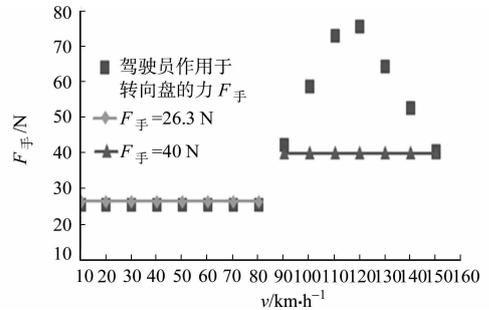
图10  $F_{\text{手}}$  与车速之间关系图

Fig. 10 Relationship between the steering wheel force and the vehicle speed

## 4 转向系统匹配结果及分析

综合上文的匹配过程,得到转向泵的特性曲线,如图11所示;转向器的特性曲线<sup>[9]</sup>,如图12所示。

由计算分析可得转向泵的匹配类型如下:当流量  $v = 10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  ( $n = 1\ 020 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ) 时,达到最大值,最大流量为  $7 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ;当  $v = 50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  ( $n = 1\ 335 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ) 时,开始降低;当  $v = 110 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  ( $n = 2\ 266 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ) 时,达到稳定流量状态,稳定流量为  $5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

由计算分析可得转向器的相关参数如下:阀槽数  $N = 4$ ;流量系数  $C_d = 0.7$ ;阀芯的刃口上加工的圆弧形或平面坡口的轴向长度  $W = 14 \text{ mm}$ ;阀芯刃口上加工圆弧形或平面坡口宽度  $A_1 = 0.75 \text{ mm}$ ;阀芯半径  $R = 10 \text{ mm}$ ;阀芯与阀体瞬间相对转角  $\varphi$  (即扭杆转角) 转动范围为  $0^\circ \sim 4.1^\circ$ 。

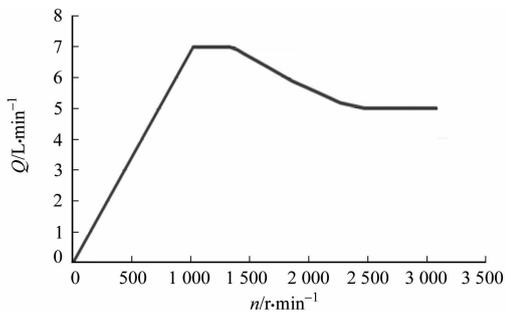


图 11 转向泵特性曲线

Fig. 11 Steering pump flow characteristic

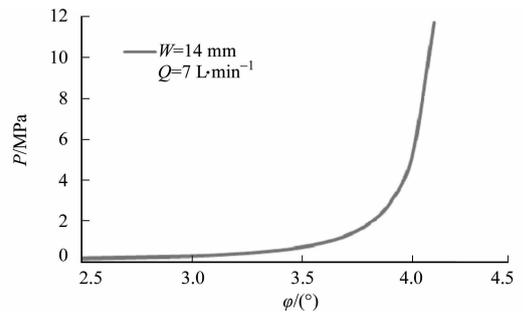


图 12 转向器特性曲线

Fig. 12 Steering gear characteristic

## 5 结束语

在总布置输入的情况下,运用理论分析和经验公式结合的方法,计算转向阻力并得出转向阻力曲线,分析计算并得出转向泵和齿轮齿条动力转向器的特性曲线,对驾驶员作用于转向盘的手力计算分析,将转向泵与转向器的特性曲线和手力合理匹配,以实现转向力大于等于转向阻力的目标<sup>[10]</sup>.文中这种逆向设计与正向设计思路相结合的匹配方法在工程上行之有效,不仅可以提高产品开发效率,而且降低技术风险,为汽车企业节省开销,同时也使广大消费者受益.

### 参考文献:

- [1] 郭孔辉,刘涛.某车液压助力转向系统的试验与仿真[J].吉林大学学报:工学版,2011,41(1):5-11.
- [2] 余志生.汽车理论[M].5版.北京:机械工业出版社,2009:176-182.
- [3] 毕大宁.汽车转向式动力转向器的设计与应用[M].北京:人民交通出版社,1998:42-50.
- [4] 王润琪,周永军,尹鹏.汽车前轮定位及回正力矩和转向力的计算[J].湖南科技大学学报:自然科学版,2012,25(1):42-46.
- [5] 国家质量技术监督局.GB 17675—1999 汽车转向系基本要求[S].北京:中国标准出版社出版,1999:3.
- [6] 郭孔辉.汽车操纵动力学[M].长春:吉林科学技术出版社,1991:256.
- [7] 黄炳华,陈祯福.汽车主动转向系统中转向阻力矩的分析与计算[J].武汉理工大学学报:信息与管理工程版,2008,30(6):912-915.
- [8] WONG T. Hydraulic power steering system design and optimization simulation[C]//SAE 2001 World Congress Detroit, Michigan:[s. n.],2001:116.
- [9] 高峰,刘亚辉.电控液压助力转向系统的初步匹配计算[J].北京航空航天大学学报,2007,33(5):605-607.
- [10] 王宵锋.汽车底盘设计[M].北京:清华大学出版社,2010:341-395.

## Matching of Hydraulic Power Assisted Steering System in the Gear and Rack Type Passenger Vehicle

CHEN Ding-yue, YANG Li, GUO Ze-hong, HE Zhi-ying

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** Based on the importance of the gear and rack type hydraulic power assisted steering system, the relationship between the steering resistance and the vehicle speed is calculated by the overall layout input data and measured data. According to the analysis results of the steering resistance, the steering pump and the steering gear are matched, and the characteristic curves of these two parts are adjusted and matched. Then, the steering system output are optimized, the results meet the requirements of the steering resistance curve. Finally, combining empirical formulas and theories, an effective method which can build system model for matching analysis is obtained.

**Keywords:** steering system; hydraulic power assisted; gear and rack; characteristic curve; matching analysis

# 逆向工程的车身三维造型数字化技术

何龙

(成都航空职业技术学院 航空维修工程系, 四川 成都 610100)

**摘要:** 针对汽车车身设计的特点,提出基于逆向工程技术的车身数字化设计平台框架,并对车身复杂曲面的造型方法和实施逆向工程的关键技术进行研究.首先根据已有的汽车车身外形,采用逆向工程技术和数字化技术,依据 STEP 标准建立起车身数据的统一数据模型,建立相应的工程数据库;然后,通过分布式 PDM 解决数据集成和过程集成,把车身数字化设计系统的各个子系统综合起来,最后,利用网络协议和分布式操作平台,架构车身虚拟数字化设计平台.

**关键词:** 汽车车身;逆向工程;曲面重构;数字化设计;NURBS 曲线;NURBS 曲面

**中图分类号:** U 463.820.2; TP 391.7

**文献标志码:** A

传统的车身设计过程要付出大量的劳动,还存在着精度低、修改调整困难、设计周期长等问题.逆向工程是从一个存在的物理模型构造出与之对应的特征是计算机辅助设计(CAD)仿真模型或实体物理模型的过程<sup>[1-5]</sup>.该技术作为现代复杂工业产品快速设计与批量制造的常见重要技术手段,深受计算机辅助设计及制造领域和现代工程技术届的广泛重视,而数字化设计与制造技术是逆向工程(逆向技术)中的关键技术之一<sup>[6-10]</sup>.近年来,逆向工程在车身设计中得到了广泛的重视.本文提出基于逆向工程技术的车身数字化设计平台框架,并对车身复杂曲面的造型方法和实施逆向工程的关键技术进行研究.

## 1 车身逆向工程三维计算机模型的建立

由于汽车整体车身是由高度复杂的、不规整的三维曲面组成,为了汽车整车设计制图的便利,根据现有参数化曲面理论通常把汽车整体车身划分为较多的相对比较简单、易于输入以及处理的曲面形状,提取这些曲面的有关信息,建立数字化工程数据库,为车身加工制造提供支持<sup>[11-17]</sup>.从油泥模型或者实体车身到建立车身三维计算机模型的流程图,如图 1 所示.

## 2 车身逆向工程三维数据的获取

车身逆向工程的工作过程之一就是整车车身外表面的数字化,而外表面数字化技术方法就是利用现代测量设备获取实物或物理模型的外表面数据<sup>[18-21]</sup>.因此,整车车身外表面数据采集是在整车车身外边面逆向工程设计工程中最基本和必需的一环,只有采集测量数据,才能进行车声曲面对比和误差分析,进一步进行计算机辅助设计中的曲面重新构造.

造型师所设计的油泥物理模型或者实体整车车身外表面模型通常都由极其复杂的自由曲面组成,

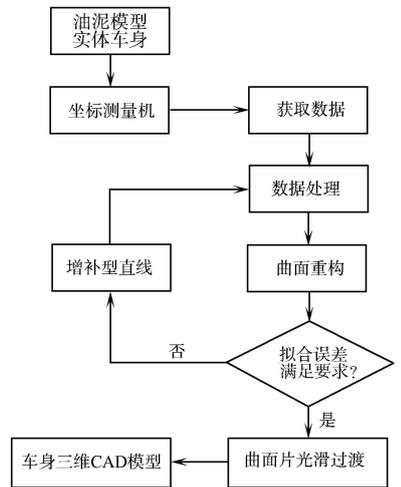


图 1 车身逆向工程流程图  
Fig. 1 Flow chart of the auto body reverse engineering

对其进行设计再现或者直接构建数字化模型是非常困难的,必须依据测量点的数据进行计算机辅助设计曲面建模.此外,被测物理点的分布及密度也会影响到后续几何曲面重新构造的快慢和车身外表曲面的质量.测量的目的是将造型师的设计理念及车身物理模型转化成三维数据点,然后根据数据点重构车身的CAD模型或直接生成CAM模型获取数控加工的轨迹.因此,车身外表面形状的三维空间离散采样速度、精度在逆向工程的工业过程中显得尤为重要.目前,表面数字化测量的实现手段已由过去的手工数字化测量过程转变为以现代测量设备和计算机控制全自动测量过程.

测量设备一般采用三坐标测量仪(CMM),也有一些应用是在数控机床或工业机器人末端加装测量部件来实现数据测量和采集工作.根据测量元器件与被测对象的相对位置关系,可以将测量设备划分为接触式测量和非接触式测量,如图2所示.

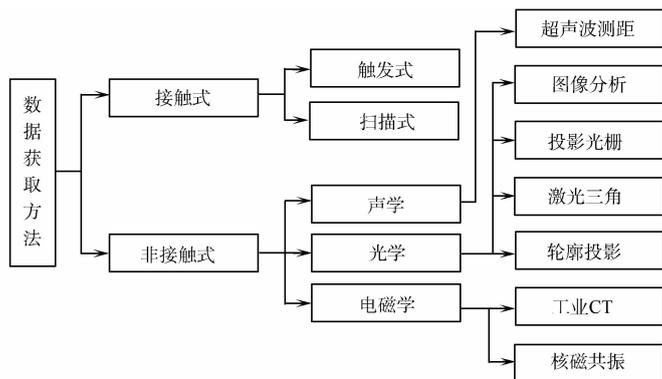


图2 数据采集方法的分类

Fig. 2 Classification of the data collection methods

接触式测量主要包括基于力触发原理的触发式数据测量和连续式数据测量,通过提取测头上的探针与物件表面的接触情况进行数据测量和提取.在接触式测量方法中,三坐标测量仪(CMM)发展较为成熟,使用范围较广.它利用传感器来完成测量探头在物件表面上移动,然后记录下路径点的三维坐标值,由一系列二维测量获取复杂的三维曲面的相应数据.这种数字化测量数据的特点是位置点的高精度和被测点分布的低密度.接触式测量精度高,噪声低、可重复性好,并能按曲面曲率的变化不均匀地布点.但是其测量速度相对较慢、效率低,而且容易受到被测对象材料的限制;探头与被测对象间的摩擦力和接触力的存在也会引起被测对象的弹性变形,从而产生测量的误差,对刚性较差的物件难以做到高精度的测量,需要对探头的半径以及探头的表面损伤进行相应的补偿.此外,由于微细高精度曲面因探头不能触及而无法测量,所以不容易获取连续的三维坐标点.

非接触式测量一般采用光学原理进行数据测量.它是根据结构光三角形测量原理,把激光的光源投射到被测对象的表面;然后,利用光电敏感元器件在另一特定的位置接受激光的反射,根据反射的光点或光条在被测对象上成像的偏移,通过被测对象基于平面、像点和像距等之间的关系取得深度信息.通常典型的测量方法有激光三角测量法、激光测距测量法、结构光测量法等.非接触式测量的特点是测量装置不与被测对象接触,因而可以有比较高的测量速度,并可以测量材质较软的材料,但对被测对象的颜色、光照要求较高.测量方式也决定了非接触式测量的精度较低,后续数据处理过程较为复杂.

从国内目前的逆向工程中的实际应用来看,逆向工程中数据测量手段主要采用三坐标测量仪来实现.随着社会对效率和速度的要求在现代科技、工业设计和工业生产中的地位日益增长,非接触式测量方法和设备在工业设计与生产中的应用会越来越广泛.

### 3 车身逆向工程三维数据的处理

对数字化测量中得到的被测点的数据进行后续处理是逆向工程技术中的关键环节之一.基于逆向工程技术的车身数字化数据处理系统与传统的CAD/CAM系统相比,有两个显著的不同特点<sup>[11]</sup>:一是数据量巨大,测量的扫描点具有大量数据,通常一个小的零部件都有十几万个点,整车车身表面的数据量则可以达到几千万个点,并且密度非常大,常用的计算机辅助设计软件难以处理如此海量的数据;另

一个是测点数据离散,通常将车身逆向工程中测量得到的数据形象地称为点云.数据量大并不意味着能得到比较好的结果,其计算成本也会过高.

点云测量数据与其他各种类型的测量数据相对比,具有以下几个显著的特点:1)点云数据中比较容易出现噪声点,也就是误差很大的点,也会形成某些背景上的无用数据;2)当被测对象较大或三坐标测量仪测量区域不够大时,就要划分为不同区块来测量,这也就必然导致所测量的各个区块点云数据对应的区块坐标系不一致;3)当被测量对象的曲面较粗糙时,点云数据会形成比较大的随机误差;4)点云数据通常为海量,很难直接用于构建曲面,甚至有时是不可能,需要进行过滤、精简;5)虽然数字化系统能够自动地对实物在规定的区域内进行扫描,可是扫描方法往往缺乏一定的智能与灵活性,如在相对平坦的表面获取大量的重复数据点,而在曲面曲率变化较大的区域却没有记录反映曲面特点的关键点.鉴于以上原因,有必要在曲面重构之前先对点云进行数据预处理,以改善数据点的质量和提高了后续曲面重构的效率.

数据的后续处理和分析包括数据误差的修正与数据的规则化.由于被测对象的表面精度的不同,以及测量本身误差、测量设备自身误差等的影响,测量获取的空间三维坐标值一定有着一定范围的误差值.为了得到满足工业实际需要的精度及性能要求的整车车身外形数据,需要依据整车车身外形曲面的几何特性及形成规律,在实施外形曲面重新构造之前,进行三维坐标数值的误差修正.误差修正包括去噪、均化,以及冗余数据的去除、不完整数据的修正补充等处理.数据的规则化就是根据被测对象本身具有的基本特征,将测量获取的三维坐标值的点云数据划分成若干个不同的区块,在各个不同的区块内得到相应数量的截面图形,各截面图形之间的间隔可以不相等.将每个划分得到的截面上的三维坐标数值拟合成一条平滑的曲线.最后将三维坐标值的点云数据修正成为由曲线组成的网格图形.坐标三维数值数据规则化时如果截面分割得很少,就会导致造型与被测对象之间误差很大;而如果界面分割得太多,又会导致造型生产的曲面不平滑,曲面效果不理想.

获取的点云数据后续处理需要完成以下几个方面的工作.

1)点云数据的除噪与滤波,提高数据的规整性和有效性.三维坐标测量设备在扫描获取数据的实际过程中,特别容易受测量的方式、被测对象的物理性质、所处测量环境的温度和湿度等因素的干扰,这就会导致获取的三维坐标数值存在较大误差甚至失真的点.因此在处理三维坐标数值时,首先是删除误差大的数值点和失真点,即直接浏览获取的图形,把与截面上偏离较大的点以及计算机上显示的孤立点删除;然后,运用曲线检查方法,把截面线上的全部坐标点拟合成样条曲线,曲线的阶次应该依据截面的几何外形来确定,一般选取3~4阶;最后,分别计算得出数据点与样条线之间距离,再依据误差控制的大小删除坏点.

2)三维坐标系统的变换.由于三坐标测量设备所测量获取的三坐标值是在该测量设备三坐标系统中的数据,而在三坐标数据后续的计算处理中,通常希望点云三维坐标数据值是对应于原始坐标系统中的三维坐标数据值.但是在实际测量数据中都存在着一定程度的偏离,这就带来测量三维坐标系统与原始三维坐标系统的三坐标系统变换的问题.另外,当被测量对象过大的远离了测量三坐标系统的基准原点,那么点云数据中就会出现一些点的三坐标值很大,导致后面的曲面模型的构建难于处理.为了有利于后续的全部数据计算处理,也需要把坐标数据值进行三坐标系统的相应转换.

3)点云数据的对齐拼接.对于分区域测量的点云数据,为了获取被测对象的全部数据,反映出被测对象的完整面貌,需要将分区域获取的多片点云数据拼接在一起,消除不同测量区域间的重叠区域,也就是点云数据的对齐拼接.常见的数据计算处理方式有两种:一种是采用专门的测量设备去完成各个区快点云数据值的对齐拼接,这样就要设计一个专门用来采集并记录被测对象在测量中的移动数据和转动度数的自动转换平台;另一种是运用专用的计算机数据处理软件实现多区域点云数据的对齐拼接,从而实现重新构造原始模型,这也是目前最常用的多区域点云数据对齐拼接的方法.

4)特征提取.CAD建模中的关键要点,它对控制几何物理外形的形状具有极其重要的作用.一般把二次曲面和曲面间的过渡曲面统称为特征曲面,把局部曲面之间的交线和局部曲面的边界统称为特征曲线.这些特征对于重新构造物理模型的质量具有决定性的作用.整车车身外形曲面构造一般都要加入脊线、棱线等几何外形特征线,才有利于提高模型所需要的精度、提高“云点”数据的压缩比例.复杂

几何外形曲面有时需要混入用于过渡的曲面和平面,曲面模型建模前把这些有显著曲率几何特征的曲面取出进行计算和处理,将有利于提升几何曲面模型的精度.几何特征提取依据的是几何曲面曲率变化程度,来识别点云数据值中的棱边、边界和圆弧孔等突变特征,根据估算曲面、曲线上点的几何法向矢量来确定曲面的不连续性几何特征,从而得到几何特征点.然后,通过几何特征点的连接构造特征线和特征面.关于几何特征识别和提取的研究,通常是对物理模型构建中简单几何外形的识别和提取,还没有特别理想的几何形状特征提取与识别方法.

5) 数据精简,去除点云不必要的数据点,减少计算量.数据精简一般是在几何外形曲面曲率变化显著的位置留下较多的三坐标数据点,曲率变化比较小的位置留下比较少的三坐标数据点.不同形式的点云三坐标数据,它的精简方式方法也不同,散乱点云三维坐标数据通常运用随机采样精简;扫描线以及多边形点云三坐标数据运用等量、等间距、弦偏差以及倍率变化等方式精简数据.除此之外点云数据精简的方法还有均匀网格数据精简法和非均匀网格数据精简法.均匀网格数据精简法不改变点的位置,只是选取其中的某些点,可以较好的保留原始数据,这种方法比较适合于需要快速处理的简单表面;非均匀网格数据精简法可以根据被测对象几何形状特征的实际需要来确定网格的密度,能在确保曲面重新构造精度的前提下适当减少数据的数量,该方法较适合处理几何形状变化较大的自由曲面.

## 4 车身逆向工程的曲面重新构造

曲面重新构造是逆向工程中极其重要的工程环节,它的作用是依据数据处理后得到各区块的曲线网格.首先,需要将各区块分别拟合计算出各自的曲面,再利用曲面求交、过渡、拼接、裁剪、延伸和平顺等方法把拟合计算出的曲面连接,得到被测对象的表面形状以及尺寸几何精度内的曲面模型.在实际应用中,评价曲面重新构造的关键性指标是模型的几何不变性、光滑性、精确性.

工程实际中,对自由曲面的数学描述,业界普遍采用非均匀有理B样条曲线(non-uniform rational B-spline, NURBS)方法的数学描述. NURBS比过去的网格建模方法能较好地控制模型表面的曲线度,从而可以构造出更加真实、生动的模型<sup>[5]</sup>.其数学表达式为

$$P(u, v) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n d_{i,j} R_{i,k,j,l}(u, v).$$

式中:  $d_{i,j}$  ( $i=0, 1, \dots, m; j=0, 1, \dots, n$ ) 为呈拓扑矩形阵列的控制顶点网格;  $R_{i,k,j,l}(u, v)$  是双变量有理基函数 ( $C^2$  连续) 且有

$$R_{i,k,j,l}(u, v) = \frac{W_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n W_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)}.$$

其中:  $W_{i,j}$  是与顶点联系的权重因子,初始状态取  $W_{i,j} = 1$ ;  $N_{i,k}(u)$  为  $u$  向  $l$  次规范样条基,一般  $l=3$ ;  $N_{j,l}(v)$  为  $v$  向  $l$  次规范样条基,一般  $l=3$ ; 取重复度为  $r=4$ ; 即

$$\begin{cases} u_0 = u_1 = u_2 = u_3, \\ u_{m+3} = u_{m+4} = u_{m+5} = u_{m+6}. \end{cases}$$

$W_{i,j}$  越大,曲面就越靠近控制顶点,四角顶点处权重因子为非负;曲面拟合的第一步是确定插值曲面的节点矢量.设  $u, v$  两个方向分别获得  $m \times n$  个数据点,则曲面上应有  $(m+3) \times (n+3)$  个控制顶点.因此有

$$\begin{cases} U = \{u_0, u_1, \dots, u_{m+6}\}, \\ V = \{v_0, v_1, \dots, v_{n+6}\}. \end{cases}$$

用积累弦长参数法求  $(u_0, u_{m+3})$  内的节点值,得切点矢量值.则可根据方程求得控制顶点为

$$P(u_{i+3}) = \sum_{j=1}^{i+3} d_j N_{j,3}(u_{i+3}) = P_i.$$

NURBS 曲面能够精确表示解析实体和自由曲面,具有灵活性大、效率和简洁度高等特点. NURBS 曲面与非有理 B 样条曲面都具有同样的凸包性,以及几何不变形性. NURBS 方法已成为自由曲线曲面形状表示方面事实上的标准,是 STEP 标准中描述产品几何形状的唯一方法.曲面重构的流程图,如图

3 所示.

### 5 车身逆向工程的 CAD 建模

车身逆向工程的 CAD 建模方法主要有:参数法建模、基于工程图纸的三维建模方法、三坐标测量建模、车身外表面分块造型,以及基于图像技术的模型重建等<sup>[18]</sup>. 实际应用中,三维参数化造型技术应用最广泛. 参数化建模的本质是实现设计人员与计算机交互式的智能化设计,其主要工作是要在不同的集合元素或特征信息之间构建尺寸的关联或集合特征的约束关系.

当通过测量油泥模型或实物车身进而建立起车身曲面或曲线的参数方程后,以 CAD 软件 UG 为例,生成几何空间曲线的参数方程,其过程<sup>[17]</sup>如下:

- 1) 构建形成三维坐标系统和二维平面坐标系统;
- 2) 选取合适的曲线构成方式;
- 3) 编辑曲线构成数学公式;
- 4) 计算测量数据,生成相应的几何曲线.

### 6 车身数字化设计平台结构框架

面向整车车身设计开发的数字化设计平台结构图,如图 4 所示. 该平台采用开放式的系统架构,一般分为工作层、应用层、协同平台层和基础服务层 4 个层次.

- 1) 基础服务层. 它主要包括汽车外形数据库、产品知识库、网络协议、计算机操作系统等,这些都是该平台架构的主要硬件和软件设施.
- 2) 协同平台层. 它由信息集成平台应用集成接口、过程集成平台流程管理系统、协同工作平台支撑工具和数据管理平台 VPM,PM. 该平台层通常采用标准的、通用的系统软件,实现对系统软件支持的多样化;通过对车身设计过程中,不同类型数据的集中统一管理,制定各软件之间接口的标准,将有关车身三维 CAD 信息分类、封装并存入到车身数据库中,对车身的数字化快速集成设计提供了可能.
- 3) 应用层. 该层由汽车概念设计系统、虚拟油泥造型系统、计算机辅助设计系统、拓扑优化系统、汽车车身气动力学设计系统等构成整车车身数字化设计平台的主体. 系统由一系列专用功能的模块构成,通过调用、协调、控制和集成这些专用功能模块,来实现相应的通用平台.

- 4) 工作层. 这是车身数字化设计平台的集用户界面. 软件界面具有良好的人机交互功能,能够为用户提供尽量多的便利,可以降低技术人员操作的要求,为在汽车企业的应用推广创造条件.

### 7 结束语

文中分析和介绍了实施逆向工程技术各阶段的关键技术,分析逆向工程中不同部分的特点和解决方案,重点讨论 NURBS 曲线曲面理论在车身曲面重构中的应用. 在汽车车身的开发设计中采用逆向工程技术,能够大大地缩短设计开发周期,降低设计费用. 对产品的改进和仿形设计以及对车身复杂型面

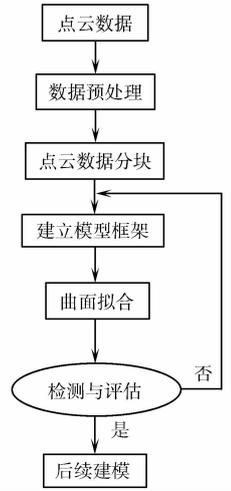


图 3 曲面重构流程图  
Fig. 3 Flow chart of the surface reconstruction

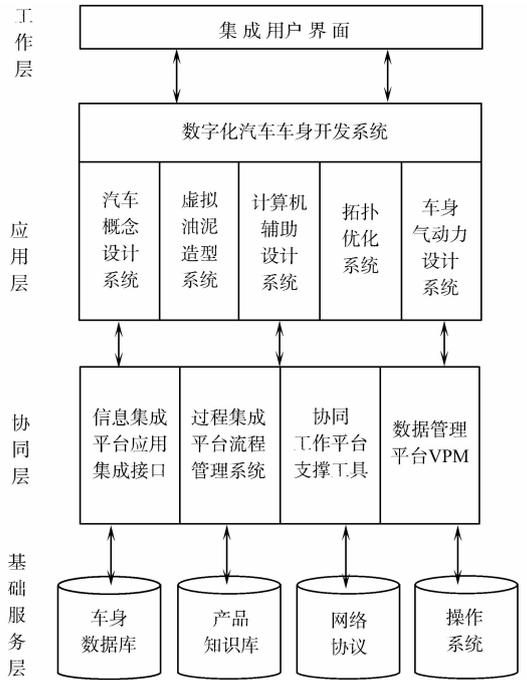


图 4 车身数字化设计平台框图  
Fig. 4 Block diagram of the auto body digital design platform

的数控加工具有较大意义。

### 参考文献:

- [1] 高三德,周济,李志刚,等. CIMS 环境下汽车车身几何建模技术[J]. 计算机集成制造系统: CIMS, 1996(12): 19-22.
- [2] 王明礼,彭文生,周济,等. CAD/CAM 集成环境下汽车车身 CAD 系统的研究与设计[J]. 汽车工程, 1993, 15(2): 19-22.
- [3] 孙林夫. 面向产品开发过程的数字化设计技术研究[J]. 计算机集成制造系统: CIMS, 2003(12): 1088-1091. DOI: 10.13196/j.cims.2003.12.45.sunlf.008.
- [4] 田晓东,史桂蓉,阮雪榆. 复杂曲面实物的逆向工程及其关键技术[J]. 机械设计与制造工程, 2000, 29(4): 1-3, 6.
- [5] 陈浪,秦大同,谢勇. 逆向工程中自由曲面的数字化模型研究[J]. 机械设计与研究, 2002, 18(2): 38-40.
- [6] 黄小平,杜晓明,熊有伦. 逆向工程中的建模技术[J]. 中国机械工程, 2001, 12(5): 539-542.
- [7] 蒋祖信. 自由曲面的三维测量与反求工程[J]. 机电一体化, 2003, 14(4): 15-18.
- [8] 陈勇,刘雄伟. 反求工程 CAD 建模技术[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2001, 22(4): 376-379.
- [9] 柯映林,肖尧先,李江雄. 反求工程 CAD 建模技术研究[J]. 计算机辅助设计与图形学报, 2001, 13(6): 570-575.
- [10] 段明德,马伟,李济顺. 反求工程中实物表面的数字化技术[J]. 矿山机械, 2004, 32(8): 80-81.
- [11] 钟志华,黄海沙,杨旭静. 反求工程中的数据筛选与优化的研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2004, 49(4): 107-113.
- [12] 李康举. 反求工程技术在机械产品设计中的应用[J]. 机械设计与制造, 2006, 44(7): 41-42
- [13] 许文全,何文学,陈国金. 反求工程技术及其应用[J]. 铸造, 2005, 54(8): 749-753.
- [14] 何连英,陈勇. 反求工程在工业设计中的应用[J]. 新疆大学学报: 自然科学版, 2004, 30(1): 81-83.
- [15] 谢斌,谢峰,何升立. 反求工程在汽车覆盖件模具设计与制造中的应用[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2004, 46(12): 70-71.
- [16] 刘之生,黄纯颖. 反求工程技术[M]. 机械工业出版社, 1992: 6-47.
- [17] 高卫民,王宏雁. UG 软件在白车身 CAD 建模中的应用[J]. 汽车研究与开发, 2001, 16(1): 13-17.
- [18] 何杰,孙庆鸿,陈南. 汽车覆盖件 CAD/CAM 逆向工程[J]. 机械设计与制造工程, 2000, 37(5): 40-42.
- [19] 朱浩,方宗德. 汽车外形设计的三维数模重建[J]. 计算机辅助设计与制造, 1999, 6(10): 12-13.
- [20] 李江雄,柯映林,程耀东. 基于实物的复杂曲面产品反求工程中的 CAD 建模技术[J]. 中国机械工程, 1999, 27(4): 38-41.
- [21] 贾志勇,邱士均,贾志强. 车型 CAD 中的曲线和曲面造型[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 1999, 20(2): 111-114.

## Digital Technology of the Auto Body Three-Dimensional Model Based on the Reverse Engineering

HE Long

(Aeronautic Maintenance Engineering Department, Chengdu Aeronautic Polytechnic, Chengdu 610100, China)

**Abstract:** According to the features of auto body contour design, this paper puts forward a framework of digital design platform for auto body based on the reverse engineering technology, and studies the complex surface modeling method of auto body and some key technologies during the application process of the reverse engineering. In the first place, a corresponding engineering database according to the existing auto body shape is established. Then, the various subsystems of the auto body digital design system are colligated through the distributed PDM to solve the data integration and process integration. Finally, using the network protocol and the distributed operation platform, the virtual auto body digital design platform is constructed.

**Keywords:** auto body; reverse engineering; surface reconstruction; digital design; NURBS curve; NURBS surface

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 杨建红)

# 冷风油雾润滑对 TC4 铣削过程刀-屑摩擦的影响

王宁昌<sup>1</sup>, 程鑫<sup>1</sup>, 姜峰<sup>1</sup>, 谢鸿<sup>2</sup>

(1. 华侨大学 制造工程研究院, 福建 厦门 361021;

2. 东方汽轮机股份有限公司, 四川 德阳 618000)

**摘要:** 通过钛合金 TC4 的铣削实验, 研究冷风油雾润滑介质特性及其施加方式对刀具-切屑摩擦行为的影响. 冷风油雾喷嘴布置在刀具将要切入工件前的空行程中, 其润滑效果最好. 当出油量增加到一定值(约  $12 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1}$ ) 时, 刀具-切屑平均摩擦系数不再发生明显变化. 随着钛合金 TC4 铣削速度的提高, 冷风干切削的平均摩擦系数增大, 而冷风油雾切削的平均摩擦系数变化不明显, 且远低于冷风干切削的平均摩擦系数. 结果表明: 油雾载体速度和刀具转速存在一定的匹配关系, 使润滑效果达到最优.

**关键词:** 钛合金; 铣削; 冷风油雾; 润滑; 摩擦系数; 喷嘴; 出油量

**中图分类号:** TG 74

**文献标志码:** A

在钛合金加工中, 冷却润滑介质的合理使用十分重要<sup>[1-3]</sup>. 目前, 钛合金加工主要通过大量浇注冷却液降温, 但由于切削液的膜态沸腾作用和切屑的阻挡<sup>[4]</sup>, 刀具-切屑接触时(工作行程)的冷却效果较差. 当刀具-工件脱离时(空行程), 冷却效果突然增强, 极易造成刀具, 特别是涂层刀具的热疲劳破损<sup>[5]</sup>. 因此, 新型冷却介质和冷却方法在钛合金加工中的应用成为研究的热点<sup>[6]</sup>. 微量润滑技术是最接近实际生产应用的一种冷却润滑方法. 这种技术将润滑介质颗粒混入带有一定压力的气流载体中, 形成气液两相流体喷向切削区域. 研究人员对其应用效果进行了大量的实验研究, 分析不同加工工艺参数对冷却润滑效果的影响<sup>[7]</sup>. 在采用微量润滑技术加工钛合金过程中, 切削区的高温导致润滑介质颗粒到达切削区的难度增加, 润滑油的粘度降低, 从而降低了润滑效果<sup>[8]</sup>. 因此, 很多研究人员利用冷风、氮气等具有保护性质的载体输送润滑介质颗粒, 可以获得较好的冷却和润滑效果<sup>[9-10]</sup>. 现有的研究主要集中在加工工艺参数对微量润滑效果的影响, 而微量润滑系统的相关参数(如喷嘴布置、出油量、载体速度、载体温度等)对微量润滑效果的影响研究较少. 本文通过钛合金 TC4 的铣削实验, 研究冷风油雾润滑介质特性及其施加方式对刀具-切屑摩擦行为的影响.

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料

作为工件材料的钛合金 TC4 是一种  $\alpha+\beta$  双相钛合金, 由于其优越的物理力学性能, 该合金的使用量为 75%~85%. 在钛合金 TC4 中, Al, V 的质量分数分别为 5.5%~6.75%, 3.5%~4.5%; Fe 的质量分数小于 0.25%; O 的质量分数小于 0.2%; 剩余的成分为 Ti. 参考 GB/T 3621-1994《钛及钛合金板材》的技术要求, 钛合金 TC4 采用冷轧退火处理. 在热处理条件下, TC4 基本物理力学参数如下: 密度为  $4.42 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ; 热导率为  $6.7 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ; 比热容为  $526.3 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ ; 最大工作温度为  $315 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 屈服强度为 880 MPa; 抗拉强度为 950 MPa; 弹性模量为 114 GPa; 泊松比为 0.342.

**收稿日期:** 2014-12-18

**通信作者:** 姜峰(1981-), 男, 副教授, 博士, 主要从事切削过程数值仿真技术, 精密、复杂切削刀具设计技术, 材料动态力学性能测试及表征技术, 复杂表面几何、物理特性评价技术的研究. E-mail: jiangfeng@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51475173); 国家科技重大专项(2013ZX04009022); 福建省高校产学研合作科技重大项目(2014H6018); 华侨大学中青年教师科研提升资助计划项目(13J0521)

### 1.2 冷风油雾润滑系统

油雾发生器采用 TL3000 型雾化器(无锡市江苏亚大集团公司), 出油量为  $0 \sim 20 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1}$ , 可调. 采用 CTY-B 型低温切削油, 最低使用温度为  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ . 冷风载体为 CTL-40/0.5 型冷风机(重庆市成田低温加工技术有限公司), 额定流量为  $500 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ , 额定冷风压力为  $0.15 \text{ MPa}$ , 双管喷射. 由于冷风载体的温度和速度随着输送距离的增加而增加, 因此, 通过 KA33 型热丝风速风温计(日本加野公司)测量不同额定冷风压力下, 冷风载体的温度( $\theta$ )和速度( $v_1$ )的变化情况, 测量结果如图 1 所示.

### 1.3 铣削试验

铣削实验在 DAEWOO V500 加工中心上进行. 刀具及刀片规格分别为 Seco R215. 17-2020-16, TPUN 160308 HX; 刀具的前角为  $0^\circ$ ; 后角为  $11^\circ$ ; 刀尖圆弧半径为  $0.8 \text{ mm}$ ; 刃口钝圆半径为  $0.02 \text{ mm}$ . 铣削试验现场如图 2 所示.

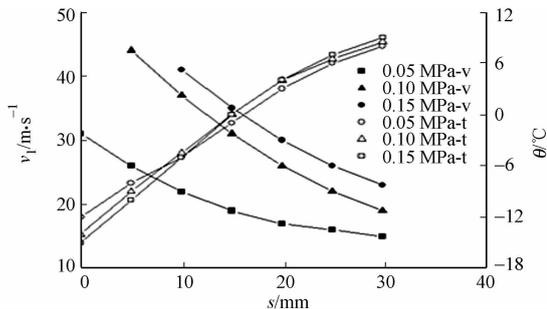


图 1 不同距离和压力对喷雾温度和喷雾速度的影响  
Fig. 1 Effect of different distances and pressures on the spray temperature and the spray speed



图 2 铣削试验现场  
Fig. 2 Milling test site

微量润滑喷嘴到刀具的距离为  $10 \text{ mm}$ ; 冷风载体到达刀具处的最低温度约为  $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 冷风载体的速度分别为  $40, 20, 30, 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 微量润滑系统的出油量分别为  $0$  (只有冷风),  $6, 12, 18 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1}$ . 使用两个油雾喷嘴对加工区域进行冷却润滑. 喷嘴的布置方式, 如图 3 所示. 图 3 中: 指向后刀面的喷嘴位置保持不变, 其轴线为刀具切入点 A 和切出点 B 的连线, 主要对加工过程中后刀面进行润滑冷却; 另一个喷嘴的位置分别布置在刀具切削过程中(布置方式 1), 刀具空行程中(布置方式 2), 刀具切入前(布置方式 3). 为减小刀尖圆弧半径对切削力的影响, 将工件预切为槽型结构(图 2). 试验采用侧壁顺铣的方法进行. 为了计算不同切削条件下的平均摩擦系数, 使用 9275B 型测力仪(德国 Kistler 公司)测量 X, Y 两向切削力(由于刀具的螺旋角为  $0^\circ$ , 且采用侧壁顺铣, Z 向力可忽略). 其中, X 向是刀具的进给方向; Y 向是刀具的径向; 测力仪的采样频率为  $5000 \text{ Hz}$ . 加工工艺参数: 每齿进给量为  $0.1 \text{ mm} \cdot \text{tooth}^{-1}$ ; 轴向切深为  $1.6 \text{ mm}$ ; 径向切深为  $10 \text{ mm}$ ; 切削速度分别为  $40, 60, 80, 100, 120 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ .

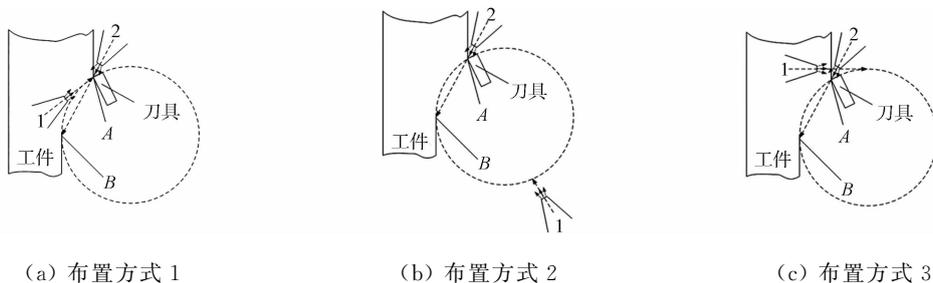


图 3 不同的喷嘴布置方式  
Fig. 3 Different nozzle arrangements

## 2 摩擦系数模型

### 2.1 铣削力坐标变换

铣削力坐标转换, 如图 4 所示. 实验过程中, 测力系统可获得工件坐标系下的切削力, 如图 4(a) 所示. 摩擦系数  $\mu$  则与刀具坐标系下的主切削力  $F_R$  和吃刀抗力  $F_T$  相关, 有

$$\mu = \tan(\alpha + \arctan(F_R/F_T)). \quad (1)$$

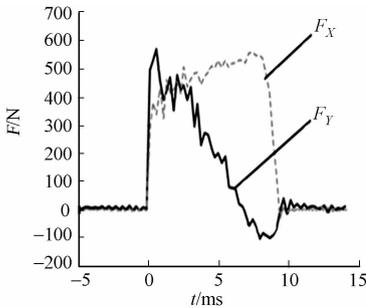
式(1)中: $\mu$ 为平均摩擦系数; $\alpha$ 为刀具前角; $F_T$ 为吃刀抗力; $F_R$ 为主切削力.力的坐标转换可表示为

$$\begin{bmatrix} F_T \\ F_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\gamma - \omega t) & -\cos(\gamma - \omega t) \\ \cos(\gamma - \omega t) & \sin(\gamma - \omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \end{bmatrix}. \quad (2)$$

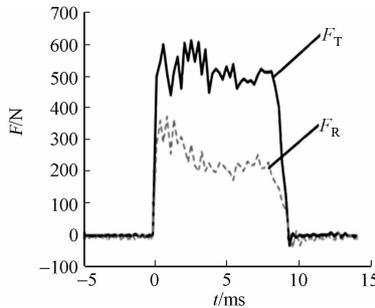
式(2)中: $\gamma$ 为切入角; $\omega$ 为角速度; $t$ 为切削时间.

### 2.2 平均摩擦系数计算

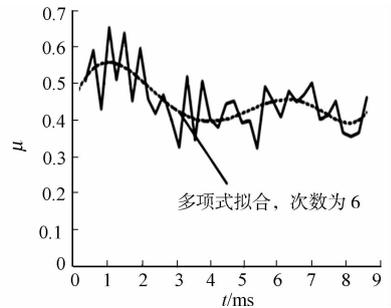
切削速度为  $60 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  铣削过程摩擦系数的计算,如图 5 所示.利用式(2)将铣削力的测量结果(图 5(a))转化到直角切削坐标系下(图 5(b)),再利用式(1)计算得到整个铣削历程的摩擦系数变化(图 5(c)),由此得到平均摩擦系数( $\mu$ ),并将其作为评价润滑冷却条件的指标.



(a) 切削力测量



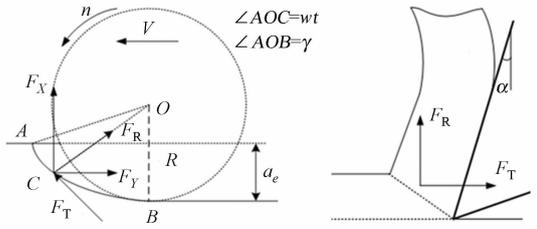
(b) 切削力转化



(c) 摩擦系数

图 5 铣削过程的摩擦系数计算

Fig. 5 Friction coefficient calculation of the milling process



(a) 铣削过程切削力 (b) 正交平面切削力

图 4 铣削力坐标转换

Fig. 4 Milling force coordinate transformation

## 3 结果与分析

### 3.1 喷嘴布置方式对刀具-切屑摩擦行为的影响

在切削过程中,油雾很难到达前刀面,因此,油雾喷嘴布置的主要目的是使刀具在旋转过程中前刀面可以滞留更多的油雾.在油雾液滴喷出到达刀具表面的过程中,存在液滴破碎的现象.液滴在喷出过程中,内部的动力大于液体表面的张力,或者液滴受到撞击形状发生改变后,大液滴会变为小液滴,表面能增加<sup>[11]</sup>.在这个过程中,速度越快对液滴的破碎作用越有利,所以合理布置喷嘴,使刀具前刀面和油雾的冷风载体有最大的相对速度,对提高油雾的滞留有很大帮助.

将喷嘴出油量调至最大,刀具处冷风风速调至约  $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,进行不同切削速度和喷嘴布置形式条件下的铣削试验.刀具-切屑的平均摩擦系数,如表 1 所示.表 1 中: $v_2$ 为切削速度; $\mu$ 为平均摩擦系数.

表 1 不同的喷嘴布置方式下的平均摩擦系数

Tab. 1 Average friction coefficient under the different nozzle arrangements

$v_2 / \text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	$\mu$		
	布置方式 1	布置方式 2	布置方式 3
40	0.312 0	0.301 0	0.311 0
60	0.309 0	0.294 0	0.288 0
80	0.307 0	0.312 0	0.306 0
100	0.331 0	0.315 0	0.320 0
120	0.325 0	0.321 0	0.304 0
平均值	0.316 8	0.308 6	0.305 8

由表 1 可知:油雾喷嘴不同的布置方式对摩擦系数有一定的影响,布置方式 1 的润滑效果最差,布置方式 3 略好于布置方式 2,主要有以下 4 个原因. 1) 由于切屑阻挡作用,布置方式 1 喷向前刀面的喷嘴喷出的油雾并不能很好地到达刀具前刀面,影响了刀具带入到切削区域的油雾量. 2) 在刀具切削过程中,布置方式 1 刀具表面的温度很高,接触到刀具前刀面的油雾很快被气化. 3) 与布置方式 2 相比,

布置方式3刀具和喷嘴的相对速度高,由于液滴的破碎作用,刀具前刀面油雾的粘附效果好.4)布置方式3选择在刀具切入工件的时候供油,此时刀具表面温度最低,油雾的吸附效果好.

上述研究从侧面说明:在最小微量润滑(MQL)加工中,起润滑作用的油雾主要是由刀具带入切削区域的,而在切削过程中,油雾很难渗入到切削区域.后续切削实验的MQL施加均选用布置方式3.

### 3.2 出油量对刀具-切屑摩擦行为的影响

将喷嘴设置为布置方式3,设定不同的出油量,冷风风速约为  $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,在不同的切削速度( $v_2$ )下测定平均摩擦系数,考察出油量对平均摩擦系数( $\mu$ )的影响,结果如图6所示.由图6可知:当雾化器出油量约为  $12 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,继续增加出油量对平均摩擦系数的影响有限.主要原因是出油量增加到一定值后,油雾液滴在刀具表面的粘附达到饱和,继续增加出油量对油雾液滴的粘附作用有限,但是会浪费切削油,并增加工作场所的可吸入有害颗粒.因此,后续切削试验的出油量均设为  $12 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1}$ .当冷风干切削时,平均摩擦系数随着切削速度的增加而显著增加;当MQL切削时,平均摩擦系数变化不显著.

### 3.3 油雾载体速度对刀具-切屑摩擦行为的影响

由图6还可知:当油雾载体速度约为  $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,平均摩擦系数在切削速度为  $40 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 时达到最小值.因此,将油雾载体速度分别设置为  $10, 20, 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,观察不同切削的速度( $v_2$ )下平均摩擦系数( $\mu$ )的变化情况,如图7所示.

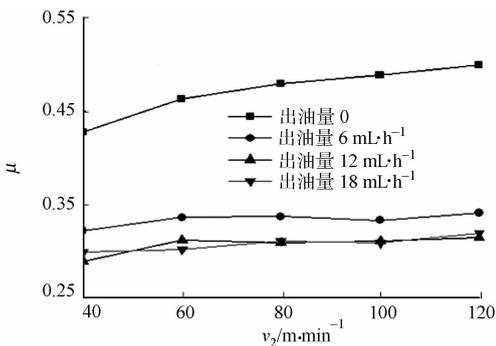


图6 不同的出油量对平均摩擦系数的影响  
Fig. 6 Influence of different spray quantities on the average friction coefficient

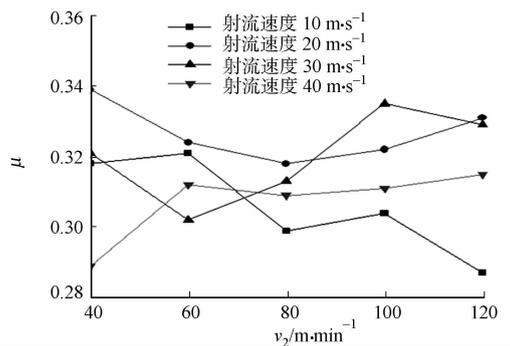


图7 不同的油雾载体速度对平均摩擦系数的影响  
Fig. 7 Influence of different oil mist carrier speeds on the average friction coefficient

由图7可知:切削速度提高时,油雾载体速度需要降低才能达到较好的润滑效果,切削速度和油雾载体速度之间存在一定的匹配关系;不同油雾载体速度对平均摩擦系数的影响无明显规律.这主要是油雾液滴发生破碎后,形成的小液滴与刀具表面发生高速碰撞后出现回弹现象<sup>[11]</sup>,影响了油雾在刀具表面的滞留.同时,油雾载体速度和切削速度的变化影响了切削区固-液两相流场的变化<sup>[12]</sup>,切削区域不同位置的液体滞留和对流现象都有可能发生明显变化,影响了刀具和切屑之间的润滑性能.因此,在MQL加工过程中,油雾载体的速度并非越高越好,油雾载体速度要与切削速度相匹配,而这个匹配机理还需要借助流体力学等方法进行深入研究.

## 4 结论

1) 铣削加工TC4钛合金时,在刀具切入工件前对前刀面进行喷雾给油,刀具-切屑的平均摩擦系数较小,冷风油雾润滑效果最佳.

2) 铣削加工TC4钛合金时,存在一个极限出油量,超过此出油量后,刀具-切屑的平均摩擦系数变化不大,刀具、切屑间摩擦性能的改善不再明显.

3) 随着钛合金TC4铣削速度的提高,冷风干切削的平均摩擦系数持续增大,而冷风油雾切削的平均摩擦系数变化不明显,且远低于冷风干切削时的平均摩擦系数.

4) 油雾载体速度影响了切削区固-液两相流场的速度分布情况,进而影响了冷却润滑效果.对于润滑性能的提升而言,油雾载体速度并非越高越好,油雾载体速度和刀具转速存在一定的匹配关系,使得润滑效果最优,但其匹配机理还需要深入研究.

## 参考文献:

- [1] COURBON C, PUSAVEC F, DUMONT F, et al. Tribological behaviour of Ti6Al4V and Inconel718 under dry and cryogenic conditions: Application to the context of machining with carbide tools[J]. Tribology International, 2013, 66:72-82.
- [2] DONG H, BELL T. Enhanced wear resistance of titanium surfaces by a new thermal oxidation treatment[J]. Wear, 2000, 238(2):131-137.
- [3] MOLINARI A, STRAFFELINI G, TESI B, et al. Dry sliding wear mechanisms of the Ti6Al4V alloy[J]. Wear, 1997, 208(1/2):105-112.
- [4] 杨颖. 低温冷风在绿色加工中应用的若干问题研究[D]. 重庆:重庆大学, 2004:41-47.
- [5] JAHARAH A, CHE H, SITI H, et al. Failure mode analysis of carbide cutting tools used for machining titanium alloy[J]. Ceramics International, 2013, 39(4):4449-4456.
- [6] 姜峰. 不同冷却润滑条件 Ti6Al4V 高速加工机理研究[D]. 济南:山东大学, 2009:35-49.
- [7] ASIF I, HE Ning, IQBAL K, et al. Modeling the effects of cutting parameters in MQL-employed finish hard-milling process using D-optimal method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 199(1/2/3):379-390.
- [8] RAHIM E A, SASAHARA H. A study of the effect of palm oil as MQL lubricant on high speed drilling of titanium alloys[J]. Tribology International, 2011, 44(3):309-317.
- [9] HONG S Y, DING Yu-cheng, JEONG W. Friction and cutting forces in cryogenic machining of Ti-6Al-4V[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2001, 41(15):2271-2285.
- [10] JIANG Feng, LI Jian-feng, RONG Yi-ming, et al. Study of cutting temperature in cold-air milling of Ti6Al4V alloy [C]//41st CIRP Conference on Manufacturing System. Tokyo:[s. n.], 2008:371-376.
- [11] YULE A, DUNKLEY J. Atomisation of melts for powder production and spray deposition[M]. Oxford:Clarendon Press, 1994:30-58.
- [12] TOSHIYUKI O, MASASHI Y, KAZUHIRO F. Air jet assisted machining of nickel-base superalloy[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 61:20-26.

## Friction Behavior between Tool and Chip during TC4 Milling with Cold Air Oil Mist Lubricant

WANG Ning-chang<sup>1</sup>, CHENG Xin<sup>1</sup>, JIANG Feng<sup>1</sup>, XIE Hong<sup>2</sup>

(1. Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Dong Fang Turbine Company Limited, Deyang 618000, China)

**Abstract:** Milling experiments of titanium alloy TC4 with cold air oil mist lubricant have been performed. The effect of the lubricant properties and its applying way on friction behavior between the cutting tool and the chip has been studied. The optimal lubrication effect takes place when the cold air oil mist nozzle is set in the idle stroke before cut-in process. When the spray quantity is up to some value (about  $12 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1}$  in this study), the average friction coefficient between cutting tool and chip has no obvious change. Average friction coefficient increases with the increasing milling speed of the titanium alloy TC4 in the cold air dry cutting, while the average friction coefficient does not change obviously in the cold air oil mist cutting, and it is far lower than the average friction coefficient in the cold air dry cutting. The results show that there is a certain relationship between the spray speed and the milling speed, which makes an optimal lubrication.

**Keywords:** titanium alloy; milling; cold air oil mist; lubricant; friction coefficients; nozzles; spray quantity

(责任编辑: 钱筠      英文审校: 杨建红)

# 引导滤波在雾天图像清晰化中的应用

王伟鹏, 戴声奎

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 根据大气散射物理模型,分析并解决单幅图像去雾的关键问题,以消除雾气对室外机器视觉系统的影响.实验结果表明:利用引导滤波器的局部平滑特性估计大气光幕,可有效克服光晕效应和颜色过饱和现象;通过计算雾气最浓区域的平均值获取大气光强度值,可解决部分图像偏色问题;对复原的图像进行自适应增强处理,提高了图像的整体视觉效果.通过与多种典型的图像去雾算法的比较,说明该方法能更有效地消除图像中的雾气、真实复原场景的对比度和颜色,同时具有很快的执行速度,有利于算法的实时实现.

**关键词:** 雾天图像;引导滤波;去雾算法;大气散射模型;大气光幕;图像增强

**中图分类号:** TP 391.4

**文献标志码:** A

雾天环境下,人们获取的室外图像是经过大气中雾滴、烟霾等吸收及散射之后的退化图像.这些图像的对比度、锐度及颜色保真度均较差,不利于图像特征的提取,难以在户外监控、目标检测与追踪等领域中应用.因此,快速有效的图像去雾对提高视觉系统的可靠性和鲁棒性具有重要意义.近年来,基于先验知识或假设的单幅图像去雾算法已成为当前研究的热点. Tan<sup>[1]</sup>通过扩大复原图像的局部对比度来达到去雾的目的,得到的结果没有从物理模型上恢复真实场景反照率,恢复后的颜色显得过饱和. Fat-tal<sup>[2]</sup>假设介质透射率和场景目标表面投影是局部不相关的,利用 ICA 模型估计透射率,但是复原后的颜色失真较严重. He 等<sup>[3]</sup>基于对大量户外图像数据库的统计规律,提出一种基于暗通道先验的单一图像去雾方法,对一般户外图像取得了很理想的效果.但是,对于大面积白色物体会出现偏差,并且借助抠图算法对透射率进行细化修复具有很高的空间复杂度和时间复杂度.针对此问题,He 等<sup>[4]</sup>提出了引导滤波器替代了抠图算法,该方法显著降低了运算复杂度,由于滤波参数的不恰当设置易引起光晕效应.因此,本文在大气散射模型的基础上,利用低复杂度的引导滤波器对大气光幕进行估计,通过均值计算得到大气光辐射强度,并对复原图像偏暗的问题进行修正,得到清晰无雾的图像.

## 1 雾图成像模型

在机器视觉和计算机图形学中,Narasimhan 等<sup>[5-6]</sup>给出了雾霾天气条件下的雾图成像模型,被广泛地应用于去雾技术的研究,模型描述为

$$I(x) = J(x)t(x) + A(1 - t(x)), \quad (1)$$

式(1)中: $I(x)$ 为有雾图像强度; $J(x)$ 为场景反照率,即清晰无雾的图像; $t(x) = \exp(-\beta d(x))$ 为介质透射率, $\beta$ 为大气散射系数, $d(x)$ 为场景深度; $A$ 为整体大气光辐射强度.去雾的目的就是从  $I(x)$ 中恢复出  $A$ , $t(x)$ 和  $J(x)$ .式(1)中,令

$$V(x) = A(1 - t(x)), \quad (2)$$

式(2)中: $V(x)$ 称为大气光幕,表示环境光对场景成像的附加部分,它的值取决于大气光强度和介质透

**收稿日期:** 2013-12-10

**通信作者:** 戴声奎(1971-),男,副教授,博士,主要从事图像处理、视频分析和模式识别的研究. E-mail: d. s. k@hqu.edu. cn.

**基金项目:** 福建省科技计划重点基金资助项目(2013H0030);中央高校基本科研业务费,国家自然科学基金培育计划专项基金资助项目(JB-ZR1145)

射率. 由于透射率  $t(x)$  与场景深度  $d(x)$  成指数关系, 可知大气光幕的估计图与景深相关.

Tan<sup>[1]</sup> 指出景深具有局部平滑的特性, 即在边缘处会有大的跳变, 除此以外大部分区域都是平滑的. 由此推断, 大气光幕也具有该性质. 综上所述, 假设大气光强度  $A$  在成像环境中是稳定的, 则大气光幕具有如下 2 个特点: 一是仅与目标物体距观测点的距离相关, 与物体的细节纹理无关; 二是在大部分空间中的分布是平滑并且连续的, 仅在边缘景深跳变处产生突变.

## 2 快速去雾新算法

在大气散射模型的基础上, 根据大气光幕的性质, 提出了一种雾天图像复原新方法. 具体可以表示为以下 4 个步骤: 1) 利用引导滤波器的局部平滑特性准确估计大气光幕; 2) 通过计算雾气最浓区域的平均值得到大气光辐射强度; 3) 利用已求得参数恢复场景反照率; 4) 对复原图像进行亮度增强处理.

### 2.1 大气光幕的估计

基于大气光幕的特点, 提取有雾图像中三通道的最小颜色分量  $V_m(x) = \min_{c \in \{R, G, B\}} I^c(y)$ ,  $V_m(x)$  的结果, 如图 1(a) 所示. 由图 1(a) 可以看出: 该结果包含了丰富的边缘细节信息, 其亮度值并不能准确表示原图像的深度信息, 因此需要进一步对  $V_m(x)$  进行处理. 采用灰度开运算操作, 滤除掉  $V_m(x)$  中不必要的纹理细节信息, 同时保持大面积明亮区域和整体的灰度级不变, 得到的结果表示为  $V_{op}(x)$ , 如图 1(b) 所示. 由图 1(b) 可知:  $V_{op}(x)$  的亮度近似体现了原图像的深度信息, 但是块效应严重. 此时, 根据大气光幕的特点, 希望保留  $V_m(x)$  的区域边缘信息和  $V_{op}(x)$  的灰度变化信息, 因此引导滤波器<sup>[4]</sup> 成为首选.

引导滤波器能够在参考图像的引导下, 对输入图像进行滤波处理, 在保留边缘的同时进行良好的平滑操作. 它包括输入图像  $V_{op}(x)$ 、引导图像  $V_m(x)$  和输出图像  $V(x)$ . 其局部线性模型是假定在一个以像素点  $k$  为中心的窗口  $\omega_k$  中, 输出图像是引导图像的局部线性转换, 线性模型表示为

$$V_i = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k|k \in \omega_k} (a_k V_{m,i} + b_k), \quad \forall i \in \omega_k. \quad (3)$$

在滤波窗口  $\omega_k$  中,  $|\omega|$  是像素点总数,  $a_k$  和  $b_k$  为线性转换系数. 在满足线性模型的前提下, 应使输入图像  $V_{op}(x)$  和输出图像  $V(x)$  之间的差值最小化, 即在窗口  $\omega_k$  内, 具有代价函数. 表示为

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in \omega_k} ((a_k V_{m,i} + b_k - V_{op,i})^2 + \epsilon a_k^2). \quad (4)$$

式(4)为线性回归模型, 它的解为

$$a_k = \frac{\frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} V_{m,i} V_{op,i} - \mu_k \bar{V}_{op,k}}{\sigma_k^2 + \epsilon}, \quad b_k = \bar{V}_{op,k} - a_k \mu_k. \quad (5)$$

式(5)中:  $\mu_k$  和  $\sigma_k^2$  分别是引导图像  $V_m(x)$  在滤波窗口  $\omega_k$  内的均值和方差;  $\bar{V}_{op,k} = (\frac{1}{|\omega|}) \sum_{i \in \omega_k} V_{op,i}$ ;  $\epsilon$  是规则化系数.

经式(3)计算得到的大气光幕, 如图 1(c) 所示. 图 1(c) 可知: 输出图像  $V(x)$  保留了引导图像  $V_m(x)$  中的边缘信息(由于局部线性模型), 而亮度信息则与输入图像  $V_{op}(x)$  相似(由于代价函数的最小化).

### 2.2 大气光强度估计

全局大气光辐射强度  $A$  可理解为天空区域的像素最大值, 或者是雾最浓处的像素最大值. 利用文献[3]求得大气光, 对于大部分户外图像都能得到准确的结果. 但是对于含有噪声的雾天图像, 取雾最浓处的像素最大值可能造成一定的误差, 因为该点的像素值可能就是噪声点. 因此, 计算雾最浓区域的平均值作为大气光强度. 具体实现步骤为

- 1) 根据节 2.1 近似体现雾浓度图  $V_{op}(x)$  中, 选取 0.5% 最亮的像素点  $p_{\max}$ ;
- 2) 在雾天图像中搜索  $p_{\max}$  所在区域, 分别计算 3 个颜色分量在这些区域的均值  $A_m$ .

均值计算排除了噪点的影响, 然而降低了雾最浓处的最大值特性. 因此, 引入因子  $\kappa$  进行修正, 从而得到大气光辐射强度, 即

$$A = \min(\kappa A_m, 255). \quad (6)$$

式(6)中: $\kappa$ 的取值为大于1的常数,它直接影响复原图像的质量,若取值太小,则复原图像将会有部分像素值溢出;若取值过大,则复原图像显得偏暗。根据实验统计结果,一般取 $\kappa=1.05$ 。

### 2.3 场景反照率的复原

利用已估计的大气光幕和大气光辐射强度,依据式(2)得到介质透射率表示为

$$t(x) = 1 - \frac{\omega V(x)}{A}. \quad (7)$$

式(7)中:引入去雾强度百分比因子 $\omega$ ,目的是控制去雾后图像远景处的残余雾量,保证复原图像在视觉上的自然效果。文中对大部分图像 $\omega$ 可简单取为99%。式(7)计算得到的结果,如图1(d)所示。



(a) RGB分量最小值 (b) 对图1(a)开运算 (c) 对图1(a),(b)引导滤波 (d) 介质透射率

图1 大气光幕和透射率的估计

Fig. 1 Estimation of atmospheric veil and transmission

将介质透射率 $t(x)$ 代入大气散射模型式(1)中,得到清晰无雾的复原结果为

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A. \quad (8)$$

为了防止在浓雾区域由于噪点影响而出现 $0/0$ 型的不确定值,设定透射率下限值 $t_0$ ,实验中取为0.05。

### 2.4 复原图像的增强

由于雾天环境下物体反射光线的亮度通常低于大气光辐射强度,所以把大气光值作为全局常量处理会导致去雾还原后的图像局部亮度降低,颜色较实际场景偏暗。因此,需要进行自适应增强,使图像的亮度和色调更符合真实情况。Tarel等<sup>[7]</sup>引入色调调整,容易造成颜色的失真。张冰冰等<sup>[8]</sup>利用局部线性拉伸做增强处理,易导致图像中亮度值较高的像素点溢出。

基于人眼视觉系统的局部自适应特性,采用仿生彩色图像增强方法<sup>[9]</sup>对复原后的图像进行调整。该方法主要包括全局亮度调节、局部对比度增强和颜色恢复三个部分。

定义 $J_{\max}(x)$ 为复原图像 $J(x)$ 中三颜色分量的最大值, $J_L(x)$ 为 $J_{\max}(x)$ 经亮度和局部对比度调整后的图像。增强后,图像彩色信息恢复方法为

$$J_E(x) = \frac{J_L(x)}{J_{\max}(x)} J(x). \quad (9)$$

式(9)中:定义 $\alpha(x) = J_L(x) / J_{\max}(x)$ 为点 $x$ 处的比例增强因子,由于是线性操作,恢复后图像的每个像素点的3个颜色分量比例关系保持不变,因此,能较好地维持原始图像的颜色信息。

文中方法复原后以及增强图像的结果,如图2所示。由图2可知:虽然将雾气移除(图2(b)),但是整体亮度偏暗,经过增强后的结果图(图2(c))亮度得到提升,视觉效果更好。



(a) 雾天图像 (b) 复原图像 (c) 对图(b)增强效果

图2 文中方法的复原结果和增强效果

Fig. 2 Recovered result and enhanced effect of proposed method

### 3 实验结果与比较

在一台操作系统为 32 位的 Windows 7, 3.40 GHz 的 AMD Athlon 双核处理器, 系统内存为 2 GB 的普通 PC 机上, 利用 MATLAB 8.0 平台实现文中算法.

为了验证文中算法在执行速度上的优势, 与目前较为流行的去雾算法进行比较. 结果发现, 文中算法处理单幅  $600 \text{ px} \times 400 \text{ px}$  大小的图像, 耗时仅为 0.67 s, 执行时间远小于同一平台测试时 He 算法<sup>[4]</sup>的 3.86 s 以及 Tarel 算法<sup>[7]</sup>的 5.34 s.

当前, 衡量去雾效果的定量评价体系中, 应用较为广泛的是 Hautiere 等<sup>[10]</sup>提出的可见边梯度法. 然而, 采用该方法无法准确判断复原结果是否出现光晕、颜色过饱和以及偏色现象. 因此, 该方法评价的准确性不高, 不具有可靠的参考价值. 所以, 文中通过与目前复原效果较好的单幅图像去雾算法进行视觉感官的主观比较, 验证文中方法在避免上述不足的可行性和优越性.

表 1 给出了文中算法与 He 算法<sup>[3]</sup>计算的大气光值比较, 得到的去雾结果如图 3 所示. 由图 3 可知: 由于 He 算法在含噪声图像中选取了不准确的大气光值, 导致复原结果严重偏色; 而文中基于均值计算的大气光值估计方法简单易行, 复原结果色彩纯正, 相比现有的方法具有更强的鲁棒性.

表 1 大气光亮度值比较

Tab. 1 Atmospheric brightness comparisons

图像	He 算法	文中算法
图 3(a)	(194, 183, 181)	(195, 182, 170)
图 3(d)	(226, 223, 218)	(237, 230, 224)



(a) 雾天图像 1



(b) He 算法结果 1



(c) 文中算法结果 1



(d) 雾天图像 2



(e) He 算法结果 2



(f) 文中算法结果 2

图 3 He 算法与文中算法得到的去雾结果比较

Fig. 3 Comparison of haze removal results between He's algorithm and the proposed algorithm

文中算法与 He 算法的更多比较结果, 如图 4 所示. 由图 4 可知: He 算法<sup>[3]</sup>对大部分图像取得了很好的去雾效果, 但是部分去雾结果整体亮度偏暗(图 4(f)), 通透性及对比度较差(图 4(b)); He 等<sup>[4]</sup>提出引导滤波器用于图像去雾, 处理速度相比文献[3]有了显著提高, 然而该方法在景深突变的边界易产生光晕效应(图 4(g)下部分山峰边缘); 而文中算法在处理景深突变处具有一定的优势, 并且复原图像的对比度较强(图 4(d), (h)).

文中算法与 Fattal 算法和 Tarel 算法的比较结果, 如图 5 所示. 由图 5 可知: Fattal 算法中关于介质透射率局部不相关的假设, 会使去雾后图像的部分区域颜色过饱和(图 5(b)房子颜色偏红), 同时该方法不能很好的处理浓雾图像(图 5(f)城市远景); Tarel 算法执行速度较快, 但是该方法对局部区域的大气光幕估计不准确, 使得复原图像在景深突变区域仍然会残留较多雾气(图 5(c)树叶间缝隙); 而文中方法可有效克服颜色过饱和现象, 去雾的同时自适应增强了图像的亮度, 提高图像质量(图 5(d), (h)).

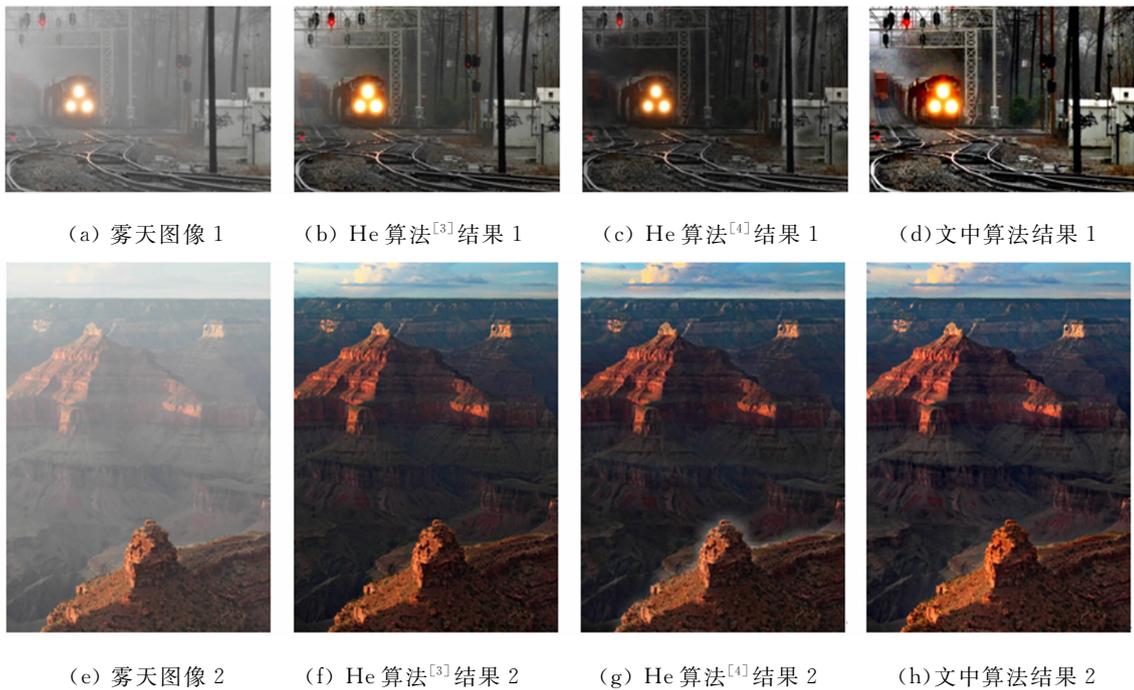


图 4 文中算法与更多 He 算法的比较

Fig. 4 More results comparison between the proposed algorithm and He's algorithm

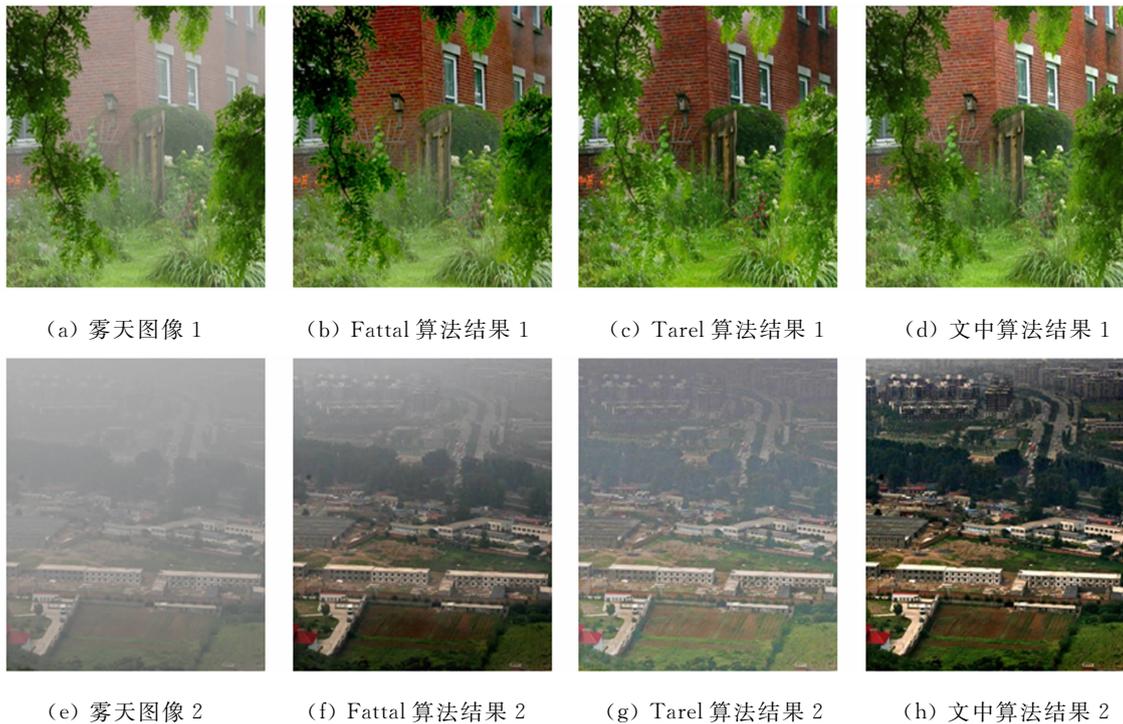


图 5 文中算法与 Fattal 算法和 Tarel 算法的结果比较

Fig. 5 Results comparison between the proposed algorithm, Fattal's algorithm and Tarel's algorithm

### 4 结束语

提出了一种基于引导滤波的雾天图像清晰化方法. 该算法结合大气散射模型, 无需任何场景的附加信息, 自动地恢复无雾图像的最优估计值; 通过计算最浓雾的均值获取大气光辐射强度解决了部分图像颜色失真的问题; 最后对复原图像的自适应增强处理, 提高了图像的整体亮度. 在大量的雾天图像上的实验结果表明: 文中方法在实现更佳去雾效果的基础上, 极大减少资源消耗, 提高了执行速度. 然而本算

法目前还不能解决大气光强度值不连续的情况。因为当太阳光对天空区域的影响非常大时,大气光值作为全局常量的假设将不成立,这是今后值得继续研究的内容。

#### 参考文献:

- [1] TAN R T. Visibility in bad weather from a single image[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Anchorage:IEEE Press,2008:1-8.
- [2] FATTAL R. Single image dehazing[J]. ACM Transactions on Graphics,2008,27(3):1-9.
- [3] HE Kai-ming,SUN Jian,TANG Xiao-ou. Single image haze removal using dark channel prior[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami:IEEE Press,2009:1956-1963.
- [4] HE Kai-ming,SUN Jian,TANG Xiao-ou. Guided image filtering[C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision. Heraklion:Springer,2010:1-14.
- [5] NARASIMHAN S G,NAYAR S K. Removing weather effects from monochrome images[C]//Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Washington D C:IEEE Press,2001:186-193.
- [6] NARASIMHAN S G,NAYAR S K. Contrast restoration of weather degraded images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2003,25(6):713-724.
- [7] TAREL J P,HAUTIERE N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]//Proceedings of the IEEE 12th International Conference on Computer Vision, Kyoto:IEEE Press,2009:2201-2208.
- [8] 张冰冰,戴声奎,孙万源. 基于暗原色先验模型的快速去雾算法[J]. 中国图象图形学报,2013,18(2):184-188.
- [9] 王守觉,丁兴号,廖英豪,等. 一种新的仿生彩色图像增强方法[J]. 电子学报,2008,36(10):1970-1973.
- [10] HAUTIERE N,TAREL J P,AUBERT D,et al. Blind contrast enhancement assessment by gradient ratioing at visible edges[J]. Image Analysis and Stereology,2008,27(2):87-95.

## Application of Guided Filter to Haze Image Sharpening

WANG Wei-peng, DAI Sheng-kui

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

**Abstract:** According to the physical model of atmospheric scattering, this paper analyses and addresses major problems for single image haze removal to eliminate the effects of fog or haze for outdoor machine vision system. The experimental results show that the proposed method overcomes the limits of halo artifacts and over-saturation through estimating the atmospheric veil using the local smoothing characteristics of guided filter. By computing the average values of the most dense haze to obtain the global atmospheric light intensity, this algorithm could adjust the color cast of the image. Finally, a post-processing procedure is adopted to enhance the visual effect of the recovered image. As compared with typical haze removal algorithms, the proposed method achieves good restoration for contrast and color fidelity more effectively and allows a very fast implementation to achieve real-time.

**Keywords:** haze image; guided filter; haze removal algorithm; atmospheric scattering model; atmospheric veil; image enhancement

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:吴逢铁)

# P300 的 BCI 汉字在线输入系统

徐鑫, 方慧娟

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 针对在 P300 的脑-机接口(BCI)汉字输入系统中输入速度较慢的问题,开发了一套新型的汉字拼音输入在线脑-机接口系统.用户界面中设计新型的二级选择模式,减小了用户在实验中的视角转移,并且将自然语言处理(NLP)技术用到此系统中,可以使此套在线系统的正确率和速度都有所提高.实验结果表明:此改进的 P300-BCI 系统汉字输入速率可达  $1.37 \text{ 字} \cdot \text{min}^{-1}$ ,有效地提高了汉字的输入速率;随着用户使用次数增多,系统的效果会进一步得到提高,用户与外界交流将会更加方便快捷.

**关键词:** 脑-机接口;汉字输入系统;二级选择模式;自然语言处理;汉字拼音

**中图分类号:** TP 391.4

**文献标志码:** A

脑-机接口(brain-computer interface,BCI)是一种新的人-机交互方式,其特点在于直接通过人脑来控制外界设备或字符输入,而不用借助外周肌肉.考虑到一个思维正常但有运动障碍的人(如肌萎缩性侧索硬化、严重脊髓损伤或完全瘫痪患者)没有办法和外界进行交流沟通.越来越多的研究者开发基于脑电图(electroencephalograph,EEG)的交互系统,以辅助以上人群<sup>[1-2]</sup>.基于 P300 信号特征的脑-机接口系统具有目标多,个体差异较少的优点.目前在 P300 领域内,具有在线打字功能的 P300-BCI 大多针对英文字母和数字,常见的诱发界面与 Donchin 等<sup>[3]</sup>最早研制的字母矩阵相似,也有一些研究采用不同的字母排列及闪烁方式.但国内能熟练使用英语人群的比例不高,很多患者还不能够自由运用英语表达自己的思想,因此,很多学者开始研究繁体中文范式的 BCI 系统和中文笔画范式的 BCI 系统.香港大学的中文系语言工程实验室利用基于 P300 的繁体中文输入字符系统,最后得到了每分钟 1.1 个中文字的输入的效果<sup>[4]</sup>.浙江大学的吴边设计了基于笔画的汉字输入 BCI 系统,其实验的正确率分布在 0.38~0.84 之间,理论信息传输比特率为  $14.0 \text{ bit} \cdot \text{min}^{-1}$ ,实际有效比特率为  $1.23 \sim 8.80 \text{ bit} \cdot \text{min}^{-1}$ ,基本可以实现汉字的输入<sup>[5]</sup>.但对于用户来说,输入速度较慢,而且现在绝大多数中国人还是习惯使用拼音来打字,只有极少部分人使用笔画输入法打字,因此,设计一个快捷方便的拼音输入系统的任务变得更加迫切.本文首次设计并实现了基于 P300 的简体中文拼音输入 BCI 系统,解决了不懂英语和不习惯笔画输入的受试者的困扰.

## 1 试验方法

### 1.1 受试者

4 名志愿者平均年龄是 23.4 岁,视力正常或矫正到正常,右利手.其中两名为本科生,两名为硕士研究生.被试者在实验开始之前已明确自己的任务,保持头皮干净、情绪稳定、身体状况良好.

### 1.2 信号采集

系统信号采集存储等处理模块采用自建的微软基础类(microsoft foundation classes,MFC)平台,实现 19 导(FP1,FP2,F3,F4,C3,C4,P3,P4,O1,O2,F7,F8,T7,T8,P7,P8,Fz,Cz,Pz)EEG(electroencephalogram)的同步采集.脑电信号被银-氯化银电极制作的电极帽采集,然后经过 UEA-24BZ 型数字放大器(北京市中科新拓仪器有限公司)放大,其中采样频率定为 100 Hz.采用单极导联,参考电极取

于耳垂. 实验期间受试者安静地坐在一张椅子上, 放松身体, 集中注意力, 尽可能减少眨眼及肢体运动.

### 1.3 用户界面

实验分为训练过程和测试过程. 训练期的用户界面, 如图 1 所示. 界面可分为两个部分:  $3 \times 4$  的字母矩阵、目标字符. 测试期的用户界面, 如图 2 所示. 界面可分为 4 个区: 一级选择的字母刺激区(I)、二级选择的候选汉字刺激区(II)、目标拼音区(III)、目标汉字区(IV). 一级选择的字母刺激区按  $3 \times 4$  矩阵排列, 由 26 个英文字母、两个标点符号(“,”、“.”)和两个功能键(“Enter”——一级选择完毕确认, “×”——删除)组成; 二级选择的汉字刺激区里包含了一级选择的字母对应最常见的 11 个汉字和一个候选字换页功能键(“^”——将候选字区换成下一页的候选字); 目标拼音区包含了一级选择得到的目标拼音; 目标汉字区含有二级选择得到的汉字(图 1). 系统处在二级选择期, 此时一级选择的刺激区不会消失, 处于静止状态, 在一定程度上可以使界面更加直观明朗, 使用更加方便.



图 1 训练期的用户界面

Fig. 1 User interface in the training period

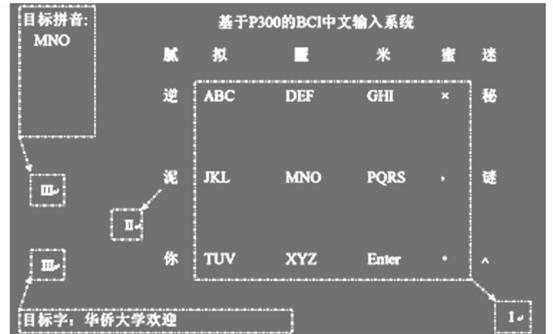


图 2 测试期的用户界面

Fig. 2 User interface in test period

### 1.4 实验过程

整个实验进行 6 d, 前 3 d 是训练期, 后 3 d 是测试期, 实验过程如图 3 所示. 训练期, 训练开始后, 3 s 的准备时间. 屏幕左上方给出目标字母. 然后字母矩阵开始单个单元随机闪烁, 每个单元都重复了 10 次后进入下一个字母的训练, 直到训练字符数达到设定值退出, 受试者每天训练 30 个字母.

测试期, 实验开始有 3 s 的准备时间. 界面上的 12 个按键随机闪烁一次称为一个 Run, 12 个按键都闪烁完一次称为一个 Tri,  $n$  次 Tri 后, 调用数据处理模块后的结果, 查看是否为“Enter”功能按钮, 这一个过程称为 Epoch. 如果不是“Enter”功能按钮, 显示出与这个结果相关联的候选字, 继续下一个字母的选择; 如果是“Enter”功能按钮则进入二级选择状态, 得到的候选字群随机闪烁,  $n$  次 Tri 后, 调用数据处理模块的结果, 并将结果显示在用户界面左下角.

一个中文字被成功选择之后, 返回进入到了下一个中文字环节, 直到达到了事先设定好的字数, 则退出系统. 一个中文字的全过程, 如图 4 所示.

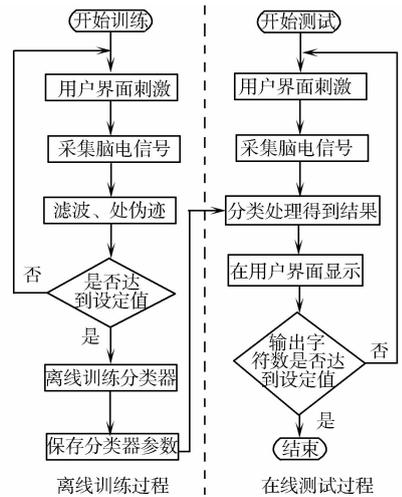


图 3 中文输入系统的实验流程图

Fig. 3 Experimental diagram using Chinese input system

实验开始	准备时间 3 s	word 1										word 2	...	word 7	实验结束						
		拼音选择阶段														汉字选择阶段					
		Epoch 1					...	Epoch $m$ ("Enter" was chosen)								Tri 1		...	Tri $n$		
		Tri 1		...	Tri $n$			Run 1	Run 12	...	Run 1					Run 12					
		Run 1	...		Run 12	...											Tri $n$				

图 4 测试阶段整体流程

Fig. 4 Whole process in the testing phase

测试阶段的打字数设定为 7 个, 且为“华侨大学欢迎你”, 当字数达到设定值时, 系统自动退出. 单个字符闪烁刺激的正确率高于以行列闪烁<sup>[6]</sup>, 系统采用单字符闪烁刺激. 参考刺激间隔时间对系统性能的

影响<sup>[7-9]</sup>, 实验字符闪烁亮暗时间(ms)设置为[75 100], [75 200], [100 100], [100 200]4 组。

## 2 数据处理部分

实验的 BCI 系统的结构, 如图 5 所示。图 5 中包括信号的采集和数据处理部分(预处理、特征提取和分类)。

### 2.1 数据的预处理

第一步, 选择一个 0~700 ms 的 EEG 信号作为分类识别所需的特征; 第二步, 数据的滤波, 将上一步提取出来的数据经过 4 阶切比雪夫低通滤波器进行滤波, 保留频率为 1~15 Hz 的有效部分; 第三步, 数据的降采样, 对数据进行重采样, 按照处理算法的需要, 以一定的数据结构格式对数据进行保存。

### 2.2 特征提取

特征处理是从预处理后的数据中提取出能够最大体现用户意图的信号特征, 叠加平均法是最经典的提取 P300 电位方法。拼音选择阶段的一个 Epoch 区间段中, 将  $n$  次不同 Tri 中的同一个按键闪烁定义为一类, 即有 12 类, 其中每一类有  $n$  个 Run 数据段。叠加平均后, 一个 Epoch 包含 12 个数据段。叠加方式为

$$\overline{\text{Epoch}}_{i,j} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \text{Epoch}_{i,k,j}. \quad (1)$$

式(1)中:  $\overline{\text{Epoch}}_{i,j}$  为第  $i$  个 Epoch 的第  $j$  类平均数据段;  $\text{Epoch}_{i,k,j}$  为第  $i$  个 Epoch 中的第  $k$  个 Tri 中第  $j$  类数据段。叠加平均可以有效地提高信号中的刺激时刻后 300 ms 左右的 P300 特征成分的信噪比(signal to noise ratio, SNR)。汉字选择阶段信号特征的提取方法类似于拼音选择阶段。

### 2.3 分类算法

支持向量机(SVM)在二元分类中表现出很好的分类效果, 广泛地应用于基于 P300 的 BCI 系统的分类。

### 2.4 自然语言处理

自然语言处理就是利用计算机, 对人类特有的书面形式和口头形式的语言进行各种类型处理和加工的技术。自然语言处理要研制表示语言能力和语言应用的模型, 根据这样的语言模型设计各种实用系统<sup>[10]</sup>。一个语言模型通常构建一个字符串  $s$  的概率分布  $p(s)$ , 反映的是一个字符串  $s$  作为一个整体出现的概率。假设

$$s = w_1, w_2, \dots, w_k. \quad (2)$$

其概率计算公式可以表示为

$$p(s) = p(w_1)p(w_2 | w_1)p(w_3 | w_1 w_2) \dots p(w_k | w_1 \dots w_{k-1}). \quad (3)$$

系统采用二元语法模型( $k=2$ ), 利用该语言模型, 找出在线实验中输入目标汉字后续概率大的几个汉字, 并显示在候选区中。这样与前面目标字吻合的汉字就更可能被选中, 可以提高系统的通信速度和正确率。

## 3 结果分析

在训练期内每个受试者都完成 3 组实验, 每个受试者都有 90 字目标字符, 包含了 900 次的 Run, 刺激后 0.7 s 的数据叠加平均后的波形, 如图 6 所示。由图 6 可知: 受试者在 Cz 通道的 P300 波形明显, 波峰大约出现在刺激后的 300 ms 处, 整个波峰的时间区大约分布在 200~480 ms, 目标刺激的幅度值也明显高出非目标刺激的幅度值, 符合文献[11-12]中 P300 特征。实验的范式可以诱发出 P300。图 6 中: 箭头为 300 ms 时 Cz 电极的位置。参考文献[13-15], 最终选择下列通道: Cz, Fz, Pz, P3, P4, O1 和 O2,

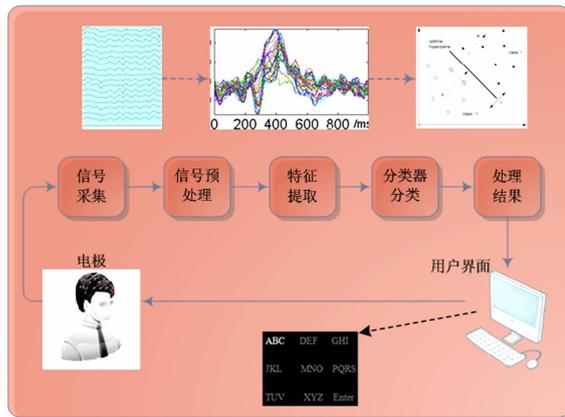


图 5 BCI 系统的结构图

Fig. 5 Structure diagram of a BCI

用于测试过程的分类.

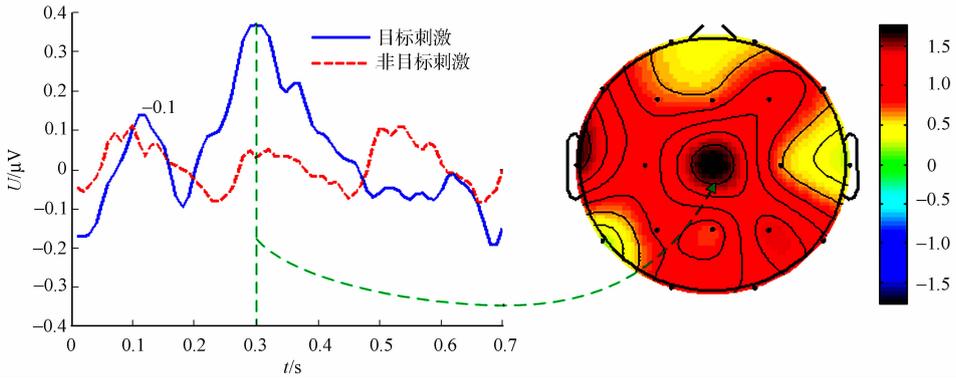
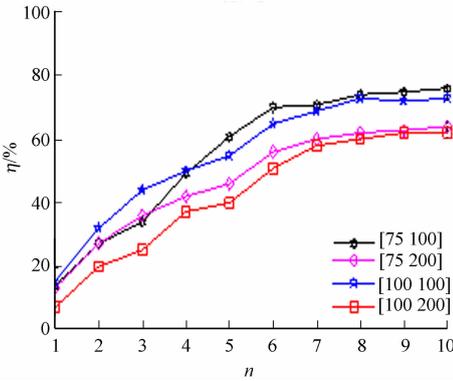


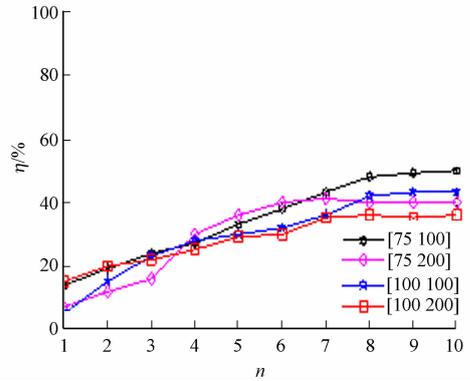
图 6 刺激之后的 0.7 s 的目标和非目标波形以及 P300 成分电压空间分布

Fig. 6 0.7 s waveform of target and no target after stimuli and voltage spatial distribution of P300

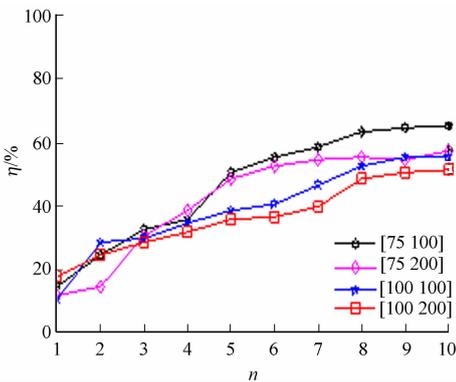
对以上得到的数据进行 10 次 8 折交叉验证,发现对于同一组的刺激间隔,系统的正确率随着字符重复闪烁的次数的增加而增加,如图 7 所示.由图 7 可知:字符重复闪烁次数在 7~10 之间,系统的正确率基本达到稳定, $n$  取 8;4 个受试者在刺激亮暗时间为 [75 100] 这组效果最好,刺激亮暗时间定为 [75 100];存储离线分析系统最高正确率对应的训练模型参数  $W$ ,用于后面的测试阶段的实验.



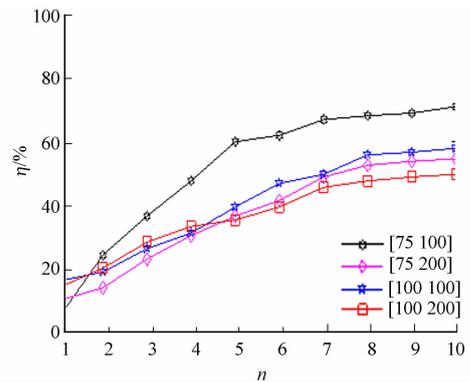
(a) 受试者 1



(b) 受试者 2



(c) 受试者 3



(d) 受试者 4

图 7 字符重复闪烁次数和刺激间隔对系统的正确率的影响

Fig. 7 Effect of the character repeat scintillation frequency and stimulus interval on the accuracy of the system

在线测试阶段里,A 组分别统计出三天内 4 位受试者通过该系统输出目标中文字所花的时间,每分钟打字个数的结果,如表 1 所示.表 1 中:“A 组”表示没有使用自然语言处理技术;“B 组”表示使用自然语言处理技术;“平均”表示将 3 d 相应系统速度进行平均;“平均值”表示将 4 位受试者对应的系统速度进行平均.由表 1 可知:最好的结果是 B 组的受试者 1 在第 3 d 达到了  $1.37 \text{ 字} \cdot \text{min}^{-1}$ ,比 A 组每分钟多打 0.35 个字,比香港大学的系统每分钟多打 0.27 个字.

表 1 系统每分钟打字个数  
Tab.1 Typing number of the system in a minute

受试者	第 1 d		第 2 d		第 3 d		平均	
	A	B	A	B	A	B	A	B
1	0.87	1.08	0.98	1.24	1.02	1.37	0.96	1.23
2	0.71	0.92	0.84	1.07	0.91	1.16	0.82	1.05
3	0.65	0.84	0.77	0.97	0.86	1.04	0.76	0.95
4	0.82	1.01	0.91	1.15	0.97	1.23	0.90	1.13
平均值	0.76	0.96	0.88	1.11	0.94	1.20	0.90	1.13

## 4 讨论

### 4.1 系统准确率

刺激间隔对系统的正确率影响非常明显(图 7),受试者 4 表现得尤为明显,间隔时间为[75 100]的一组高出[100 200]一组的 20%。这表明字符闪烁重复次数和刺激间隔都能够影响系统的性能,在以后的研究中要注意能够影响系统性能的其他因素。

### 4.2 性能

在重复次数和刺激间隔相同的情况下,每位受试者使用相同的系统,却表现出不同系统性能。随着实验天数的增加,受试者的打字速度( $v$ )越来越快,如图 8 所示。从某一角度来说,该系统类似于一种日常生活中的技能,而且该技能是可以训练的,效果会越来越好。

### 4.3 二级模式

由于没有与其他二级模式比较,所以提出的二级模式的优点没有表现出来。接下来工作可以通过其他研究者的二级模式的范式进行比较,研究他们的优缺点。

### 4.4 自然语言处理

由图 8 可知:受试者 1 在 B 组的打字速度高出 A 组  $0.35 \text{ 字} \cdot \text{min}^{-1}$ ,因此,自然语言处理技术可以提高系统的速度。挖掘语言本身的特点和设计简单方便的界面将会是设计在线脑电输入系统的基础。

### 4.5 中文输入系统的下一步优化

中文拼音输入系统是为身体严重瘫痪患者设计的,实验的受试者都是健康正常人群,所以接下来的工作就是将该系统用于医院真正的病人身上。该系统是同步系统,系统最好升级到异步系统,并且寻找更方便的用户界面和更好的分类方法提高系统的正确率和通信速度。

## 5 结束语

提出了一种新的二级模式的实验范式,操作步骤类似于手机输入汉字,用户更加熟悉。参与实验的 4 名受试者都可以通过在线系统进行拼音选择和汉字的选择,基本达到了预期通过拼音打字的目标,使用自然语言处理的二元模型也明显地提高了系统的打字速度和输入效率。

### 参考文献:

[1] LIU Yi-huan, AYAZ H, Onaral B, et al. EEG band powers for characterizing user engagement in P300-BCI[C]//6th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER). San Diego: IEEE Press, 2013: 1066-1069.  
 [2] DIMITRIADIS S I, SUN Y, LASKARIS N A, et al. Effective connectivity patterns associated with P300 unmask differences in the level of attention/cognition between normal and disabled subjects[C]// X III Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing. Seville: Springer International Publishing, 2014: 1710-

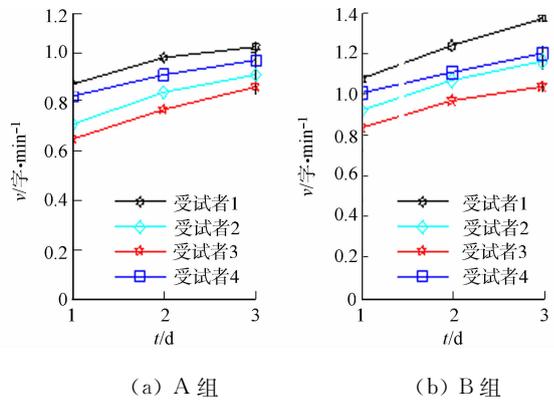


图 8 4 位受试者 3 d 的打字速度

Fig. 8 Typing speed of the four subjects in three days

1713.

- [3] SERBY H, YOM-TPV E, INBAR G F. An improved P300-based brain-computer interface[J]. *Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2005, 13(1): 89-98.
- [4] MINETT J W, PENG Gang, ZHOU Lin, et al. An assistive communication brain-computer interface for chinese text input[C]// 4th International Conference on IEEE Bioinformatics and Biomedical Engineering, Chengdu, IEEE Press, 2010: 1-4.
- [5] LI Yi, ZHANG Jian-hui, SU Yu, et al. P300 based BCI messenger[C]// International Conference on CME ICME. Gold Coast, IEEE Press, 2009: 1-5.
- [6] SELLERS E W, KRUSIENSKI D J, MCFARLAND D J, et al. A P300 event-related potential brain-computer interface (BCI): The effects of matrix size and inter stimulus interval on performance[J]. *Biological Psychology*, 2006, 73(3): 242-252.
- [7] POURATIAN N, SPEIER W, HU Xiao, et al. The effects of stimulus timing features on P300 speller performance [J]. *Clinical Neurophysiology*, 2013, 124(2): 306-314.
- [8] POLICH J. Updating P300: An integrative theory of P3a and P3b[J]. *Clinical Neurophysiology*, 2007, 118(10): 2128-2148.
- [9] DUNCAN C C, BARRY R J, CONNOLLY J F, et al. Event-related potentials in clinical research: Guidelines for eliciting, recording, and quantifying mismatch negativity, P300, and N400[J]. *Clinical Neurophysiology*, 2009, 120(11): 1883-1908.
- [10] 冯志伟. 自然语言的计算机处理[M]. 上海: 上海外语教育出版社, 1996: 26-27.
- [11] WOLPAW J R, BIRBAUMER N, MCFARLAND D J, et al. Brain-computer interfaces for communication and control[J]. *Clinical Neurophysiology*, 2002, 113(6): 767-791.
- [12] BIRBAUMER N. Breaking the silence: Brain-computer interfaces (BCI) for communication and motor control[J]. *Psychophysiology*, 2006, 43(6): 517-532.
- [13] RAKOTOMAMONJY A, GUIGUE V, MALLET G, et al. Ensemble of SVMs for improving brain computer interface P300 speller performances[M]. Warsaw: Springer Berlin Heidelberg, 2005: 45-50.
- [14] SALVARIS M, SEPULVEDA F. Visual modifications on the P300 speller BCI paradigm[J]. *Journal of Neural Engineering*, 2009, 6(4): 046011.
- [15] CORRALEJO R, NICOLÁS-ALONSO L F, ÁLVAREZ D, et al. Assessment of an assistive P300-based brain computer interface by users with severe disabilities[C]// X III Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing, Seville: Springer International Publishing, 2014: 1647-1650.

## A P300-Based BCI System for Online Chinese Input

XU Xin, FANG Hui-juan

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

**Abstract:** To deal with the issue of the slow speed for Chinese input in a P300-based brain-computer interface (BCI), the paper developed a new P300-based BCI system for online Chinese input. By a combination of two-level selection mode and natural language processing methods, the proposed system can not only reduce the user's sight transfers in the experiment, but also improve the accuracy and transfer rate. The experimental results showed that an average input rate of 1.37 characters per minute was attained for above mention P300-BCI system. Besides, the more the system being used, the better the results could be achieved. It will be more convenient to communicate with the outside world for the users with the improved system.

**Keywords:** brain-computer interface; Chinese input system; two-level selection mode; natural language processing; Chinese phonetic alphabet

# 一种采用内预测模式的 HEVC 视频信息隐藏算法

董晓慧, 林其伟, 许东旭

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 针对最新的视频编码标准高效率视频编码(HEVC),提出一种基于帧内模式选择的视频信息隐藏算法.首先,对一幅二值图像进行 Arnold 置乱和 turbo 码编码,形成待嵌入的二值信息序列.然后,结合帧内模式选择过程,调制 I 帧亮度  $16 \times 16$  编码单元最优预测模式的奇偶性来实现信息隐藏.由于只在 I 帧进行信息隐藏,提取时只需部分解码即可提取隐藏信息,无需完全解码与原始视频的参与,实时性较好.实验结果表明:算法对视频质量和比特率的影响较小,且能保证一定的信息隐藏容量,符合视频隐藏算法的基本要求.

**关键词:** 视频信息隐藏; 帧内预测模式; 模式奇偶性; 高效率视频编码

**中图分类号:** TP 391

**文献标志码:** A

随着网络传输技术及多媒体技术的迅速发展,视频已广泛存在于生产和生活的方方面面.然而,多媒体信息安全问题也日趋严重,例如,多媒体作品的版权保护问题、作品内容的完整性认证等,而信息隐藏<sup>[1]</sup>技术是解决这些难题的有效途径之一.此外,目前的视频正向着高清分辨率,甚至  $4K \times 2K$  等超清分辨率发展,现有的视频编码技术已远远不能满足消费者的需求<sup>[2]</sup>,而高效率视频编码(HEVC)尤其适用于处理高清视频<sup>[3]</sup>.因此,研究基于 HEVC 的视频信息隐藏技术具有重要的意义.目前视频信息隐藏算法大多是基于 H.264 和 MPEG 编码标准的.以往最常见的一种方法是在离散余弦变换(DCT)系数上嵌入隐藏信息<sup>[4-7]</sup>,另一种是在运动矢量(MV)上嵌入隐藏信息<sup>[8-10]</sup>.这类方案信息嵌入容量大,且完全不会因为隐秘信息的嵌入而降低 I 帧的视频质量<sup>[11]</sup>.然而,由于 HEVC 较之前的 H.264 编码标准在技术上进行了大量的创新与改进,其特点决定了以往两种常用的信息隐藏方案不可直接用于 HEVC.本文结合 HEVC 独有的帧内预测特点,提出一种基于 HEVC 帧内预测模式修改的视频信息隐藏方案.

## 1 HEVC 帧内预测

### 1.1 HEVC 帧内编码单元结构

HEVC 沿用了 H.264 的混合编码框架<sup>[12]</sup>,通过帧间预测编码和帧内预测编码消除时域空域的相关性.然而,HEVC 没有继续沿用之前的“宏块”这一概念,而是使用编码单元(CU)作为基本的编码结构. CU 的尺寸从  $8 \times 8$  到  $64 \times 64$ ,且 CU 的大小和图像的特性是自适应的.在图像比较平缓的区域,选择较大的 CU,而在图像边缘或纹理复杂的区域,选择较小的 CU,这样有利于提高编码效率.一个 CU 可以包含一个或者多个预测单元(PU).PU 是进行预测运算的基本单元,对于一个帧内  $N \times N$  ( $N \in \{64, 32, 16\}$ ) 的 CU,PU 尺寸只能为  $N \times N$ ;而对于  $N=8$  的 CU,PU 有  $8 \times 8$  或  $4 \times 4$  两种尺寸.

### 1.2 HEVC 帧内预测

在 H.264 中,帧内预测可以去除相邻块之间的空间冗余,取得更为有效的压缩,而 HEVC 的帧内预测技术<sup>[13]</sup>是 H.264 帧内预测过程的扩展和深入. HEVC 在 H.264 基础上增加了帧内预测方向的个

收稿日期: 2014-02-25

通信作者: 林其伟(1959-),男,副教授,博士,主要从事视频编码的研究. E-mail:qwlin@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2012J01275)

数,相较于 H. 264 的 9 种帧内预测方向,HEVC 共有 35 种预测模式,分别为 DC 模式、planar 模式和 33 种角度预测模式. 这使预测方向更加细化,预测结果更加精确,能够更加有效地减少冗余.

HEVC 帧内预测方向,如图 1 所示. 在 planar 模式、DC 模式和 33 种角度预测模式之间进行拉格朗日率失真优化(RDO)计算,比较各个率失真代价(RDcost)后,选取最小代价对应的模式作为最优的预测模式,其计算复杂度相当大. 因此,为了降低编码器的计算复杂度,HEVC 首先进行粗略模式选择(RMD)处理,即对 35 种预测模式分别求解其对应的哈达玛代价,从中选出  $N$  个代价最小的模式,并考虑当前 CU 最可能的模式(MPMs);接着对可能的  $N$  到  $N+3$  个候选模式进行 RDO 计算,从中选出最优的预测模式.

## 2 待嵌入信息预处理

### 2.1 Arnold 置乱

采用  $32 \times 32$  的二值图像作为待嵌入信息,如图 2 所示.

Arnold 变换是俄国数学家 Arnold 提出的,一幅  $N \times N$  的数字图像的二维 Arnold 变换定义为

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \bmod N. \quad (1)$$

式(1)中: $x, y \in \{0, 1, 2, \dots, N-1\}$  为变换前像素的位置; $x', y'$  为变换之后的像素位置;mod 为模运算.

数字图像可以看作一个二维矩阵,经过 Arnold 变换之后,图像的像素位置会重新排列,降低图像的相关性<sup>[14]</sup>,从而达到提高信息安全性的目的. Arnold 置乱在经过若干次迭代后,矩阵会回到最初状态,从而还原出原始图,且周期的大小与  $N$  有关. 对任意的  $N(N > 2)$ ,Arnold 变换的周期为  $T_N^2/2$ <sup>[15]</sup>,对待嵌入图像进行 Arnold 置乱后的图像,如图 3 所示.



图 2 待嵌入图像

Fig. 2 Picture to be embedded

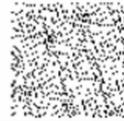


图 3 Arnold 置乱图像

Fig. 3 Arnold transform image

### 2.2 Turbo 码编码

通过编译码器中交织器和解交织器的使用,turbo 码有效地实现了随机性编译码的思想,通过短码和长码的有效结合,可达到距香农理论极限 0.7 dB 以内的极好性能. 一般来说,编码后的视频序列传送到解码端的过程中会遭受各种各样的干扰. 如果在视频编码端嵌入信息,可能造成解码端提取到的信息位产生错误,从而影响隐藏信息提取的正确性. 为了降低这种影响,利用 turbo 码的纠错功能对置乱后的二值信息序列进行编码. 即使提取端出现错误提取,只要错误在 turbo 码的纠错范围之内,还能恢复出正确的隐藏信息.

虽然 turbo 编解码耗时较多,但是文中使用的 turbo 码编码是在隐秘信息的预处理阶段进行的,其计算复杂度并不影响嵌入算法的复杂度和实时性. 同样的,在解码端,turbo 码解码也是在全部提取出嵌入信息之后进行的,因此,也不会影响算法的实时性.

## 3 隐秘信息的嵌入

根据人眼视觉系统的特性,人眼对视频图像中纹理较复杂和亮度较高的区域敏感性较差<sup>[16]</sup>. HEVC 编码标准中,图像比较平坦的区域选择较大的 CU,图像边缘或纹理复杂的区域选择较小的 CU. 最小的  $8 \times 8$  CU 对应的 PU 大小有两种可能的大小,其他尺寸的 CU 对应的 PU 只有一种大小.

为了使算法更加简化,且保证隐藏信息的不可见性,折中选择在  $16 \times 16$  CU 中嵌入隐秘信息. 为了

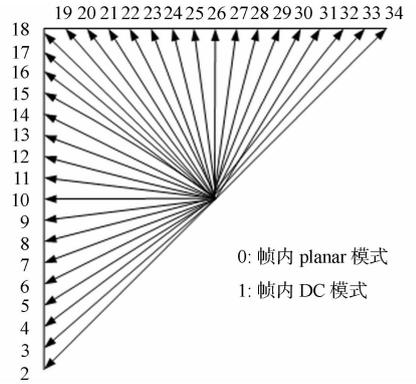


图 1 HEVC 帧内预测方向

Fig. 1 Modes and directional orientations for intrapicture prediction

操作方便,以预测模式的奇偶性进行操作:模式信息{ 2,4,6,⋯,30 }对应“0”;模式信息{ 3,5,7,⋯,31 }对应“1”.这里不考虑模式 0 和 1,一是因为它们都是用在纹理比较平滑的区域<sup>[17]</sup>,二是统计分析表明,选中模式 0 和 1 的概率很高,若强制改为其他模式,势必导致较大的率失真性能损失.

### 3.1 隐秘信息嵌入过程

二值待嵌入信息序列为  $W = \{\omega_i | i=1,2,\dots,M, \omega_i \in \{0,1\}\}$ ,信息的嵌入是在 HEVC 的 I 帧编码过程中进行的,具体有以下 4 个步骤.

**步骤 1** 在 I 帧中从第一个编码树单元(coding tree unit,CTU)开始,找出尺寸为  $16 \times 16$  的 CU.

**步骤 2** 利用率失真开销函数计算出当前  $16 \times 16$  PU 的最优预测模式 best\_pm.

**步骤 3** 如果最优预测模式 best\_pm 为 0 或 1,则跳过当前 PU,不进行隐秘信息嵌入.如果 best\_pm 不为 0 或 1,则按照下面规则修改:如果 best\_pm 的奇偶性与当前待嵌入信息位一致,则保持 best\_pm 不变;如果不一致,就用 sub\_pm 代替 best\_pm.由于 HEVC 模式选择过程中是先进行 RMD 选出几种模式,再进行这几种模式的率失真计算得到最优预测模式,因此,为了保证模式修改前后的奇偶性一定不同,sub\_pm 设置如下:如果 best\_pm 奇偶性与次优模式(即 RDcost 第二小的模式)奇偶性不同,sub\_pm 就为次优模式;如果相同,sub\_pm 就为 best\_pm 两侧相邻的两个模式中残差变换绝对值总和(SATD)较小的那个模式.嵌入过程可表示为

$$wm\_pm = \begin{cases} sub\_pm, & sub\_pm \bmod 2 \neq \omega_i, \\ best\_pm, & best\_pm \bmod 2 = \omega_i. \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中:wm\_pm 为嵌入隐秘信息后 PU 的预测模式; $\omega_i$  为当前 PU 对应的待嵌入信息位.

**步骤 4** 遍历所有的采集传输单元(CTU),直有待隐藏信息全部嵌入完成.

### 3.2 隐秘信息提取过程

隐秘信息提取是嵌入的逆过程,算法只需解码含隐秘信息的视频码流中的帧内亮度预测模式即可,不需要提供原始视频,具体有以下 4 个步骤.

**步骤 1** 对含有隐秘信息的视频码流进行部分解码,得到 I 帧  $16 \times 16$  CU 的所有亮度块的预测模式信息.

**步骤 2** 判断预测模式的奇偶性进行信息提取(模式 0,1 除外,如果解码出来的模式为 0 或 1,就跳过当前 PU),提取过程可表示为

$$\omega'_i = \begin{cases} 0, & de\_pm \bmod 2 = 0; \\ 1, & de\_pm \bmod 2 \neq 0. \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: $\omega'_i$  为提取的隐秘信息位;de\_pm 为解码得到的  $16 \times 16$  CU 的预测模式.

**步骤 3** 重复上述步骤,直到隐秘信息提取完毕或视频码流结束.

**步骤 4** 把提取出来的信息进行 turbo 码解码和 Arnold 反置乱,可还原出原始的隐秘信息.

## 4 实验分析

为了验证该算法的性能,利用 HEVC 测试平台 HM12.0 进行仿真实验.实验中使用 5 个不同分辨率的标准测试序列:PeopleOnStreet, Traffic, ParkScene, BQTerrace 和 Vidy03.参考软件配置参数,如表 1 所示,其余参数均采用默认配置.

表 1 HM 的主要参数配置

Tab.1 Configuration parameters of the HM

参数	配置	参数	配置
Profile	encoder_intra_main	Intra period	4
Sequence type	“I PPP I ...”	QP(Quantization Parameter)	20
Frames to be encoded	40	FrameSkip	0
Frame rate/fps	30	RD optimization	1:on

### 4.1 嵌入信息对视频质量及码率的影响

5 个测试序列在嵌入隐秘信息前后的视频图像,如图 4 所示.图 4(a)~(e)为 5 个测试序列的原始

图像.图 4(f)~(j)为嵌入隐密信息后重建的视频图像.由图 4 可知:在隐密信息嵌入前后,视频质量基本没有变化,主观上证明了该算法的隐密信息满足不可见性.

测试序列的实验结果,如表 2 所示.表 2 中: $R_{PSN}$  为峰值信噪比; $\eta$  为码率变化量; $C$  为嵌入容量; $\delta$  为编码时间变化量;“+”表示嵌入隐藏信息后,相对于原始是增加的;“-”表示嵌入隐藏信息后,相对于原始降低.由表 2 可知: $R_{PSN}$  和码率变化非常微小,从客观上证明了隐密信息的嵌入对视频影响很小;编码时间的变化量也在合理范围内,这是由于编码时间的变化量主要取决于最优预测模式和当前信息位不一致的块的个数多少.实验结果表明:文中算法对编码视频的率失真性能损失几乎可以忽略不计.

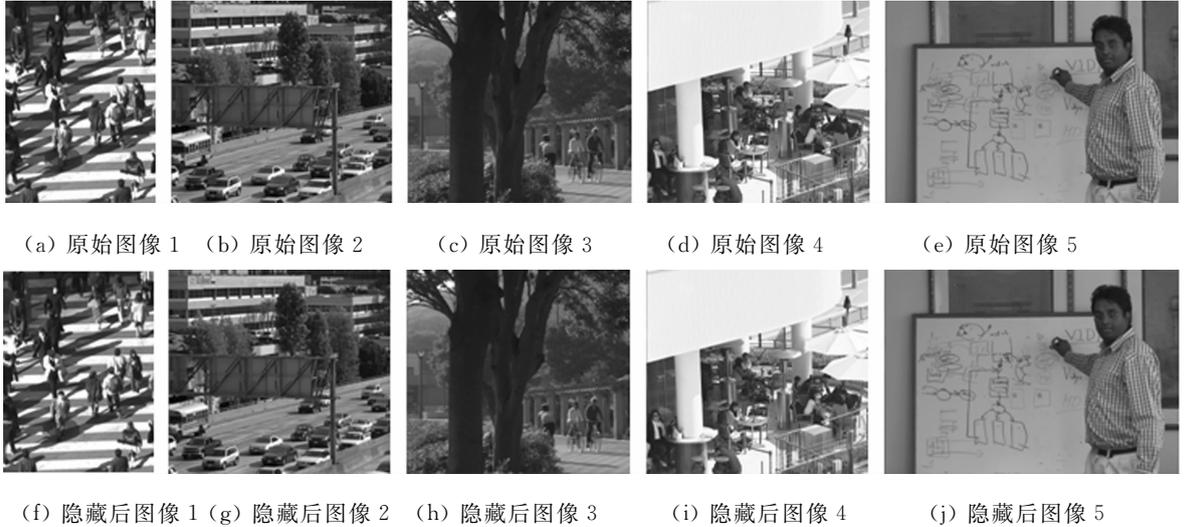


图 4 信息隐藏前后视频图像质量对比

Fig. 4 Comparison of the visual quality between the original and the marked frames

表 2 对测试序列的实验结果

Tab. 2 Experimental result for test sequence

测试序列	$R_{PSN}/dB$	$\eta/\%$	$C/bit$	$\delta/\%$
PeopleOnStreet	+0.000 2	+0.14	4 385	+0.45
Traffic	-0.000 4	+0.15	4 032	+0.73
ParkScene	-0.001 2	+0.07	1 695	+0.92
Vidyo3	-0.000 1	+0.45	1 025	+0.64
BQTerrace	+0.000 6	+0.05	676	+1.07

## 5 结束语

提出一种基于帧内预测模式的 HEVC 视频信息隐藏算法,通过修改  $16 \times 16$  PU 最优预测模式实现信息隐藏,算法操作简单、提取方便.对于一般视频,提取时不需要对视频码流进行完全解码,只需要解码出 I 帧  $16 \times 16$  CU 亮度预测模式即可.实验结果表明:该算法在嵌入隐密信息之后,视频的主客观质量较原始视频基本没有变化,比特率的增加量也很小.略有不足之处在于算法在视频选择上还有一些局限性,对纹理复杂和分辨率较高的视频信息隐藏容量更大,效果也更好,而对纹理平坦且分辨率较低的视频容量较小.因此,今后的工作是研究如何进一步提高算法的视频信息隐藏的容量.

## 参考文献:

- [1] ZHAO Yan-tao. Reversible data hiding based on sorting and histogram modification[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2010(1): 102-106.
- [2] 李恒忠,崔建明,郭勇,等.基于 HEVC 视频标准的熵编码过程[J]. 电脑知识与技术, 2013, 9(14): 3356-3359, 3365.
- [3] 洪佳庆,林其伟.采用 HEVC 的精细可分级编码[J]. 华侨大学学报:自然科学版, 2014, 35(3): 253-256.
- [4] 申金媛,胡青云,刘润杰,等.一种基于 H. 264 压缩域的鲁棒性视频水印算法[J]. 郑州大学学报:工学版, 2013, 34(5): 63-67.

- [5] 刘雅宁. 压缩域视频水印技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2007:197-200.
- [6] 张承乾. 视频信息隐藏分析研究[D]. 天津:天津大学,2009:1453-1458.
- [7] 张维纬,张茹,刘建毅,等. 一种基于 H.264/AVC 的视频可逆脆弱水印算法[J]. 电子与信息学报,2013,35(1):106-112.
- [8] ZHUO Zhao, YU Neng-hai, LI Xue-long. A novel video watermark scheme in compressed domain based on fast motion estimation[C]//Proceedings of ICCT. Beijing:[s. n.],2003:1878-1882.
- [9] ZHANG Jun, MAITRE H, LI Jie-gu, et al. Embedding watermark in MPEG video sequence[C]//Multimedia Signal Processing. Cannes;IEEE Press,2001:535-540.
- [10] DAI Yuan-jun, ZHANG Li-he, YANG Yi-xian. A new method of MPEG video watermarking technology[C]//Proceedings of ICCT. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications Press,2003:1845-1847.
- [11] 陈志玉. 压缩视频安全方法研究[D]. 南京:南京邮电大学,2013:18-20.
- [12] 刘昱,胡晓爽,段继忠. 新一代视频编码技术 HEVC 算法分析及比较[J]. 电视技术,2012,36(20):45-49.
- [13] LAINEMA J, BOSSEN F, HAN W J, et al. Intra coding of the HEVC standard[J]. IEEE Transaction on Circuits and Systems for Video Technology,2012,22(12):1792-1801.
- [14] 李丽丽,孙劲光. SITF 特征区域 Contourlet 域遥感图像水印算法[J]. 信号处理,2012,9(28):1254-1261.
- [15] 张春森,范金健,胡平波. 小波变换和 Arnold 变换的数字水印技术[J]. 西安科技大学学报,2012,32(1):95-100.
- [16] 吴国桢,冯桂. 一种基于 H.264 半脆弱视频水印方案[J]. 通信技术,2012,45(1):112-118.
- [17] 朱秀昌,李欣,陈杰. 新一代视频编码标准:HEVC[J]. 南京邮电大学学报:自然科学版,2013,33(3):1-11.

## An Information Hiding Algorithm Based on Intra-Prediction Modes for HEVC

DONG Xiao-hui, LIN Qi-wei, XU Dong-xu

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

**Abstract:** This paper proposed an information hidden algorithm which was based on high efficiency video coding (HEVC) intra-prediction modes. Firstly, this algorithm uses Arnold transform and turbo coding method to get a binary information sequence to be embedded. Then, combine with the process of intra frame mode selection, we hide information by modulating the best prediction modes' parity of I frame luminance block's coding units. Since the hidden information only be embedded in I frame, during the extraction, only partial decode the steam is needed, we don't need decode the steam completely and don't need original video either. Besides, the real-time performance is good. Experimental results show this algorithm only has a little influence on video quality and bit rate and also can ensure a considerable information hiding capacity. Therefore, it is conform to the basic requirements of video hiding algorithm.

**Keywords:** video information hiding; intra-prediction mode; mode parity; high efficiency video coding

(责任编辑:钱筠 英文审校:吴逢铁)

# 神经网络预测控制在污水处理溶解氧控制中的应用

张学阳<sup>1</sup>, 项雷军<sup>1</sup>, 林文辉<sup>2</sup>, 郭新华<sup>1</sup>

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 泉州市益源环保设备有限公司, 福建 泉州 362021)

**摘要:** 针对污水处理过程溶解氧浓度时变设定值难以控制的问题, 提出一种溶解氧浓度的神经网络预测控制器设计方法. 首先, 在活性污泥法污水处理过程通用机理模型基础上, 利用系统的输入、输出数据, 采用递推学习更新模式, 通过三层 BP 神经网络训练出系统神经网络逼近模型. 然后, 设计满足出水水质指标的溶解氧约束预测控制器. 在考虑溶解氧测量白噪声干扰和进水流量发生阶跃变化情况下, 将所设计的控制器用于污水处理溶解氧浓度的时变设定值跟踪控制. 仿真结果表明: 与传统 PID 控制器相比, 神经网络预测控制器能够显著提高溶解氧跟踪控制性能, 具有更好的自适应性和抗干扰能力.

**关键词:** 污水处理; 神经网络; 溶解氧浓度; 预测控制; 过程控制

**中图分类号:** TP 273

**文献标志码:** A

20 世纪 40 年代, 国外学者就已开始研究污水处理模型, 先后开发出一些简化的活性污泥法模型. 1987 年, 国际水质协会 (IAWQ) 在前人研究的基础上推出了活性污泥 1 号模型 (ASM1), ASM1 是活性污泥模型发展的里程碑, 成为模拟活性污泥系统的强有力工具<sup>[1]</sup>. 溶解氧 (DO) 浓度是活性污泥法污水处理曝气过程中重要的运行控制参数<sup>[2-3]</sup>, 在很大程度上影响着出水水质. 因此, 研究溶解氧浓度控制有着重要的意义和应用价值. 近年来, 国内外学者对此做了较为深入的研究, 提出了一系列的溶解氧浓度控制方法<sup>[4]</sup>, 如 PID 控制<sup>[5]</sup>、模糊控制<sup>[6]</sup>、神经网络控制<sup>[7]</sup> 以及结合前三种方法的优点所提出的综合方法<sup>[8-10]</sup>, 此外还有模型预测控制<sup>[11-12]</sup>、遗传算法<sup>[13-14]</sup> 等. 在满足出水水质要求下, 上述方法基本上能对溶解氧浓度进行控制, 有效跟踪溶解氧浓度设定值. 但是仍存在一些问题, 诸如控制模型受限制前提条件较为苛刻, 或仅能实现溶解氧恒定设定值的跟踪控制, 或较少考虑实际过程中外界因素对系统的干扰. 综合神经网络控制和预测控制两种方法的优点, 基于活性污泥法 ASM1 标准模型, 本文提出一种污水处理溶解氧浓度的神经网络预测控制器 (NNPC) 设计方法, 在考虑溶解氧测量白噪声干扰和进水流量发生阶跃变化情况下, 有效实现溶解氧浓度的时变设定值跟踪控制.

## 1 污水处理系统模型的建立

活性污泥法污水处理工艺流程, 如图 1 所示<sup>[1-2]</sup>. 由图 1 可知: 系统主要由曝气池、曝气系统、沉降池、污泥回流系统和剩余污泥排放系统组成. 生化曝气池是一个混合有液体和固体悬浮物的生物反应器; 沉降池是一个利用重力沉降法将污泥从废水中分离的澄清槽, 去除的污

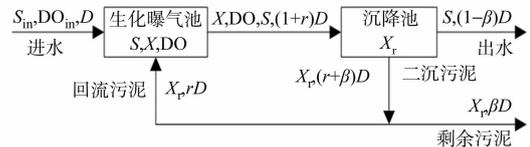


图 1 活性污泥法污水处理工艺流程  
Fig. 1 Schematic representation of the activated sludge sewage treatment process

**收稿日期:** 2014-04-25

**通信作者:** 项雷军 (1979-), 男, 讲师, 博士, 主要从事复杂工业系统建模、控制与优化的研究. E-mail: ljxiang@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 福建省自然科学基金资助项目 (2013J01198); 福建省泉州市科技计划重点项目 (2013Z32)

泥一部分回流到曝气池中, 剩余一部分污泥被排放出去<sup>[2]</sup>。

分析活性污泥法污水处理工艺流程, 采用 ASM1 作为控制对象, 建立污水处理过程数学模型<sup>[3]</sup> 为

$$\frac{dX(t)}{dt} = \mu(t)X(t) - D(t)(1+r)X(t) + rD(t)X_r(t), \quad (1)$$

$$\frac{dS(t)}{dt} = -\frac{\mu(t)}{Y}X(t) - D(t)(1+r)S(t) + D(t)S_{in}, \quad (2)$$

$$\frac{dDO(t)}{dt} = -\frac{K_c\mu(t)}{Y}X(t) - D(t)(1+r)DO(t) + D(t)DO_{in} + K_{La}(DO_s - DO(t)), \quad (3)$$

$$\frac{dX_r(t)}{dt} = -D(t)(\beta+r)X_r(t) + D(t)(1+r)X(t). \quad (4)$$

式(1)~(4)中: 输入变量  $K_{La}$  为氧气传递系数, 利用  $K_{La}$  描述曝气过程,  $K_{La}$  和曝气量  $W(t)$  成正比例关系;  $X(t)$  为微生物质量浓度;  $S(t)$  为底物质量浓度;  $X_r(t)$  为回流污泥质量浓度; 输出变量  $DO(t)$  为溶解氧质量浓度;  $\beta, r$  为反应速率系数;  $Y$  为表现产率系数;  $S_{in}, DO_{in}$  分别为输入底物浓度和输入溶解氧浓度;  $DO_s$  为溶解氧饱和浓度;  $K_c$  为常数。

微生物量增长速率为

$$\mu(t) = \mu_{max} \frac{S(t)}{K_s + S(t)} \frac{DO(t)}{K_o + DO(t)}. \quad (5)$$

式(5)中:  $\mu_{max}$  是最大反应速率;  $K_s, K_o$  分别是与底物的质量浓度、溶解氧的质量浓度有关的常数。

式(1)~(5)中各参数的取值规定如下:  $Y=0.65; \mu_{max}=0.15 \text{ h}^{-1}; \alpha=0.018; \beta=0.2; r=0.6; K_c=0.5; K_o=2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}, K_s=100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}; S_{in}=200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}; DO_{in}=0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}; DO_s=10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}; D(t)=0.1 \text{ h}^{-1}; W=80 \cdot \text{h}^{-1}$ . 变量初始化值如下:  $X(t)=200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}; S(0)=88 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}; X_r(0)=88 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}; X_r(0)=320 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}; DO(0)=0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

## 2 溶解氧神经网络预测控制器的设计

神经网络具有通过学习逼近任意非线性映射的能力, 将神经网络应用于污水处理过程这类典型非线性系统的建模与辨识, 建立污水处理过程的输入输出模型, 可不受非线性模型类的限制, 且便于给出工程上易于实现的学习算法<sup>[15]</sup>. 模型预测控制(MPC)具有 3 个基本特征: 预测模型、滚动优化、反馈校正。MPC 是一种典型的约束优化控制方法, 在复杂工业过程控制中应用广泛<sup>[16]</sup>。但由于模型预测控制方法需要建立被控对象的精确数学模型, 且预测模型的精度对模型预测控制器的性能有较大影响, 故该方法在非线性系统控制中的应用受到限制。

由于污水处理过程具有严重的时滞性、非线性和不确定性。先利用 BP 神经网络对系统进行辨识, 建立预测控制器的逼近模型; 再设计神经网络预测控制器, 通过滚动优化目标值, 最终实现溶解氧浓度的时变设定值跟踪控制。污水处理过程中, 溶解氧的神经网络预测控制系统结构, 如图 2 所示。其中包括神经网络预测模型和神经网络预测控制器, 神经网络预测模型使用过去时刻的输入  $u(k+p-n_u), \dots, u(k+p)$  和输出  $y(k+p-n_y), \dots, y(k+p-1)$  数据, 通过性能指标函数  $J_m(k)$  训练网络, 并用训练好的神经网络逼近模型预测系统未来输出, 神经网络预测控制器通过最小化误差代价函数  $J^c(k)$  计算  $\Delta u(k)$ , 与前一时刻控制量  $u(k-1)$  相加得到此刻控制量最优输入  $K_{La}$ , 从而控制输入在未来一段指定时间内将最优化模型性能, 使系统实际输出  $y(k)$  不断接近期望输出值  $y_r$ 。

### 2.1 神经网络预测模型

利用神经网络辨识系统模型, 设该系统可用离散时间模型描述为

$$y(k) = f[u(k-n_d), \dots, u(k-n_u); y(k-1), y(k-2), \dots, y(k-n_y)]. \quad (6)$$

式(6)中:  $y(k)$  为系数期望输出值;  $n_d$  为系统滞后拍数;  $n_u$  为用于辨识模型的过去时刻输入量个数;  $n_y$

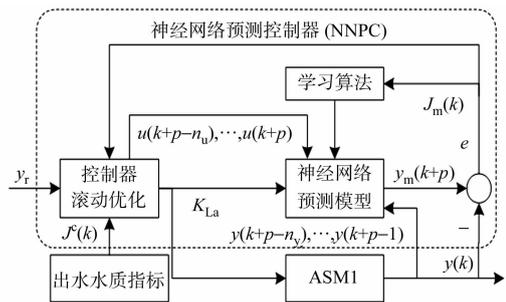


图 2 神经网络预测控制系统结构框图

Fig. 2 Structure of neural network predictive control system

为用于辨识模型的过去时刻输出量个数;  $f(\cdot)$  为非线性拟合函数. 利用递推原理, 根据模型(6)可以预测  $k+1$  时刻输出值, 将得到的  $k+1$  时刻的预测值作为预测模型预测  $k+2$  时刻的输入, 重复使用此模型进行前向多步预测, 预测下一步时, 将之前的预测结果作为预测下一步的输入. 根据模型(6)可以预测  $k+p$  时刻的系统输出值为

$$y_m(k+p) = f[u(k-n_d+p), \dots, u(k-n_u+p); y(k-1+p), y(k-2+p), \dots, y(k-n_y+p)]. \quad (7)$$

采用三层 BP 神经网络训练  $f(\cdot)$ , 包括输入层( $i$  个神经元)、隐含层( $j$  个神经元)和输出层( $h$  个神经元), 建立神经网络模型为

$$\text{输入层} \quad \mathbf{x}_s(k) = [u(k-n_d), \dots, u(k-n_u); y(k-1), y(k-2), \dots, y(k-n_y)]^T, \quad (8)$$

$$\text{隐含层输入} \quad \mathbf{net}_{s,j}(k) = \sum w_{i,j} \times x_{s,i}(k), \quad (9)$$

$$\text{隐含层输出} \quad \mathbf{u}_j = g[\mathbf{net}_{s,j}(k)] = \frac{1}{1 + \exp(-\mathbf{net}_{s,j}(k))}, \quad (10)$$

$$\text{输出层} \quad \mathbf{y}_{m,h}(k) = \sum w_{j,k} \mathbf{u}_j. \quad (11)$$

式(8)~(11)中:  $x_{s,i}(k)$  为输入层第  $i$  个神经元的输入;  $\mathbf{net}_{s,j}(k)$  为隐含层第  $j$  个神经元的输入;  $\mathbf{u}_j$  为隐含层第  $j$  个神经元的输出;  $\mathbf{y}_{m,h}(k)$  为输出层第  $h$  个神经元的输出;  $g(\cdot)$  为隐含层传输函数, 这里取 S 型函数;  $w_{i,j}$  为输入层第  $i$  个神经元到隐含层第  $j$  个神经元的连接权值;  $w_{j,k}$  为隐含层第  $j$  个神经元到输出层第  $k$  个神经元的连接权值.

BP 神经网络在辨识过程中根据输出量误差按照梯度修正法修正权值, 修正权值的过程为

$$\text{预测性能指标函数} \quad J_m(k) = [y(k) - y_m(k)]^2. \quad (12)$$

$$\text{权值更新的方式} \quad w_{i,j}(k+1) = w_{i,j}(k) - \eta \frac{\partial J_m(k)}{\partial w_{i,j}}, \quad (13)$$

$$w_{j,k}(k+1) = w_{j,k}(k) - \eta \frac{\partial J_m(k)}{\partial w_{j,k}}. \quad (14)$$

式(13), (14)中:  $\eta$  为预测模型学习率,  $\eta > 0$ .

通过神经网络的不断学习更新权值, 使预测输出值不断接近实际输出值. 由以上分析可得,  $k+p$  时刻的神经网络学习模型为

$$\text{输入} \quad \mathbf{x}_s(k+p) = [u(k-n_d+p), \dots, u(k-n_u+p), y(k-1+p), y(k-2+p), \dots, y(k-n_y+p)]^T, \quad (15)$$

$$\text{输出} \quad \mathbf{y}_m(k+p). \quad (16)$$

式(15)中:  $u(k), u(k+1), \dots, u(k-n_d+p)$  等参数, 用 NNPC 的预测值代替, 如果超出预测范围, 则以最后的预测值代替.

训练神经网络的数据来源于污水处理数学模型(1)~(4). 通过实验可得: 当输入在  $[0.45, 0.95]$  内时, 输出量即溶解氧浓度可以维持在  $[1.58, 3.97]$  内, 神经网络初始的学习样本通过在给定区间  $[0.45, 0.95]$  内随机输入并测定相应输出的方式获得. 考虑不同单位的数量级差异, 在训练网络之前, 所有数据均须被归一化处理至区间  $[0, 1]$ , 然后用处理后的数据训练神经网络.

通过以上分析, 系统辨识只需要建立一个神经网络, 根据系统过去时刻的输入输出数据, 通过训练建立系统的单步预测模型, 根据式(6), (7), 将多个单步模型串联即可获得多步预测模型.

## 2.2 神经网络预测控制器

采用三层 BP 网络建立神经网络预测控制器, 神经网络预测控制器模型的输入和输出分别为

$$\mathbf{x}_s^c = [u(k-1), y(k), \dots, y(k-n_y+1), y_r(k), y_r(p)]^T, \quad (17)$$

$$\mathbf{U}^c(k) = [u(k), \dots, u(k+1), \dots, u(k+n_c-1)]^T. \quad (18)$$

式(17)~(18)中:  $y_r(k)$  为期望输出值;  $n_c$  为控制时域长度.

神经网络预测控制器模型为

$$\text{输入层} \quad \mathbf{x}_s^c = [u(k-1), y(k), \dots, y(k-n_y+1), y_r(k), y_r(p)]^T, \quad (19)$$

$$\text{隐含层输入} \quad \mathbf{net}_{s,j}^c(k) = \sum w_{i,j}^c \times x_{s,i}^c(k), \quad (20)$$

$$\text{隐含层输出} \quad \mathbf{u}_j^c = g^c[\mathbf{net}_{s,j}^c(k)] = \frac{1}{1 + \exp(-\mathbf{net}_{s,j}^c(k))}, \quad (21)$$

$$\text{输出层} \quad \mathbf{U}_h^c(k) = \sum \mathbf{w}_{j,h}^c \mathbf{u}_j^c. \quad (22)$$

式(19)~(22)中:  $x_{s,i}^c(k)$  为输入层第  $i$  个神经元的输入,  $i=1, 2, \dots, n_y + p + 1$ ;  $\mathbf{net}_{s,j}^c(k)$  为隐含层第  $j$  个神经元的输入;  $\mathbf{u}_j^c$  为隐含层第  $j$  个神经元的输出,  $j=1, 2, \dots, n_{c,j}$ ;  $\mathbf{U}_h^c(k)$  为输出层第  $h$  个神经元的输出,  $h=1, 2, \dots, n_{c,h}$ ;  $g^c(\cdot)$  为隐含层 S 型传输函数;  $\mathbf{w}_{i,j}^c$  为输入层第  $i$  个神经元到隐含层第  $j$  个神经元的连接权值;  $\mathbf{w}_{j,h}^c$  为隐含层第  $j$  个神经元到输出层第  $h$  个神经元的连接权值。

权值更新的方式为

$$\mathbf{w}_{i,j}^c(k+1) = \mathbf{w}_{i,j}^c(k) - \eta^c \frac{\partial J^c(k)}{\partial \mathbf{w}_{i,j}^c}, \quad (23)$$

$$\mathbf{w}_{j,k}^c(k+1) = \mathbf{w}_{j,k}^c(k) - \eta^c \frac{\partial J^c(k)}{\partial \mathbf{w}_{j,k}^c}. \quad (24)$$

式(23)~(24)中:  $\eta^c$  为控制器学习率,  $\eta^c > 0$ 。

在实际污水处理系统中,出水水质是最重要的污水处理指标,而排出的底物浓度是出水水质是否达标的主要检测指标.研究表明,溶解氧浓度控制在  $1.58 \sim 3.97 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  之间,能够满足每日排出的底物浓度不大于  $150 \text{ kg BOD}$  的环保要求<sup>[10]</sup>.因此,研究的溶解氧浓度控制值均约束在此范围内.考虑上述约束条件,建立神经网络预测控制器,最小化性能目标代价函数  $J^c(k)$ ,即

$$\left. \begin{aligned} \min J^c(k) &= \sum_{p=n_d}^{n_p} \|y_m(k+p) - y_r(k+p)\|_{\mathbf{Q}}^2 + \sum_{i=0}^{n_c-1} \|\Delta u(k+i)\|_{\mathbf{R}}^2, \\ \text{s. t.} \quad u_{\min} &\leq u(k+i) \leq u_{\max}, \quad \Delta u_{\min} \leq \Delta u(k+i) \leq \Delta u_{\max}, \\ \mathbf{Q} &= \text{diag}(q_1, \dots, q_n), \quad \mathbf{R} = \text{diag}(r_1, \dots, r_m). \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

式(25)中:  $\mathbf{Q}$  为误差权矩阵;  $\mathbf{R}$  为控制权矩阵;  $n_p$  为预测时域长度;  $n_c$  为控制时域长度.应用预测控制器(25)来计算  $\Delta u(k)$ ,与前一时刻控制量  $u(k-1)$  相加得到此刻控制量最优输入  $K_{1,a}$ ,从而输入控制量在未来一段指定的时间内将最优化模型性能,使系统实际输出  $y(k)$  不断接近期望输出值  $y_r$ .

### 3 控制系统的仿真分析

以基于活性污泥法 ASM1 模型为被控对象,在 Matlab/Simulink 仿真环境中构建污水处理溶解氧神经网络预测控制系统.在仿真过程中,根据实际情况假设:系统连续运行 5 d(即 120 h)内,溶解氧的时变设定值为先由  $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  升高到  $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,再恢复到  $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,接着降低到  $1.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,最后再恢复到  $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .控制系统采样时间  $t$  取为  $0.1 \text{ h}$ ;神经网络预测控制器的预测时域长度  $n_p=10$ ;控制时域长度  $n_c=3$ ,滞后拍数  $n_d=0$ ,  $n_u=2$ ,  $n_y=2$ ;神经网络预测模型选择 4-6-1 结构,神经网络预测控制器选择 2-5-1 结构;神经网络学习速率为  $\eta=0.2$ ,  $\eta^c=0.5$ .

#### 3.1 测量白噪音情况下时变设定值的跟踪控制

假设在溶解氧浓度传感器反馈信号中加入幅值为  $0.01$  的高斯白噪音干扰信号,分别采用传统 PID 控制器和神经网络预测控制器对系统溶解氧浓度( $\rho_{\text{DO}}$ )进行控制仿真,得到的仿真结果如图 3 所示.由图 3 分析可知:在测量白噪音干扰下,传统 PID 控制器出现持续振荡现象,即溶解氧浓度控制波动幅度较大,而神经网络预测控制器对溶解氧浓度的时变设定值跟踪控制超调量小,溶解氧浓度跟踪控制能够保持平稳状态,可有效实现对溶解氧浓度的时变设定值跟踪控制.

#### 3.2 进水流量发生阶跃变化情况下时变设定值跟踪控制

假设系统在  $30 \text{ h}$  时给进水底物质量浓度( $S_{\text{in}}$ )加入大小为  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的阶跃干扰,在  $80 \text{ h}$  时给  $S_{\text{in}}$  加入大小为  $-100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的阶跃干扰,在系统控制器各参数均保持不变的前提下,分别采用传统 PID 控制器和神经网络预测控制器对系统溶解氧浓度( $\rho_{\text{DO}}$ )进行控制仿真,得到仿真结果如图 4 所示.由图 4 分析可知:在进水流量发生阶跃干扰下,神经网络预测控制器对溶解氧浓度的时变设定值跟踪控制引起的超调量小,且能较快恢复到稳定状态,而传统 PID 控制器则出现较大超调量.

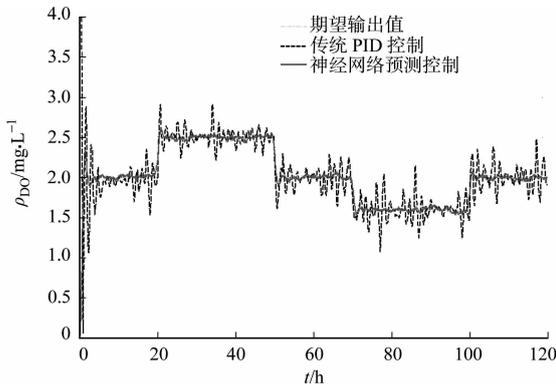


图3 测量白噪音情况下的仿真结果

Fig. 3 Simulation results with white noises in the DO concentration measurements

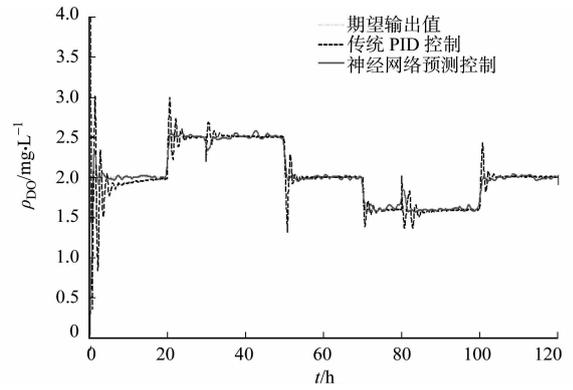


图4 进水流量发生阶跃变化情况下的仿真结果

Fig. 4 Simulation results with step disturbances in the influent

### 3.3 控制性能的量化比较

由图3和图4可以明显看出:对于溶解氧浓度的时变设定值跟踪控制,与传统PID控制器相比较,神经网络预测控制器调节时间短、超调量较小,动态响应速度快,显示了该控制器的有效性和优越性.采用IAE,ISE作为两个积分型性能指标来对控制性能进行测试与量化评价,它们分别定义为

$$IAE = \int_0^{\infty} |y(t) - y_r(t)| dt = \int_0^{\infty} |e(t)| dt,$$

$$ISE = \int_0^{\infty} (y(t) - y_r(t))^2 dt = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt.$$

通常较小的IAE或ISE指标代表更好的控制性能.性能指标量化结果,如表1所示.由表1可知:在不同干扰情况下,神经网络预测控制方法相比于传统PID控制方法,IAE和ISE指标均分别有较大幅度的减小,系统控制性能得到有效改进.

表1 不同控制方法系统性能的比较

Tab. 1 Comparisons of system performance for different control methods

控制方法	IAE		ISE	
	测量白噪音情况下	进水流量阶跃变化情况下	测量白噪音情况下	进水流量阶跃变化情况下
PID	70.130	65.047	41.805	33.486
NNPC	42.027	42.742	23.164	20.179

## 4 结束语

基于活性污泥法污水处理ASM1模型,考虑若干约束条件,设计出神经网络预测控制器,有效实现了污水处理过程溶解氧浓度的时变设定值跟踪控制,并研究了溶解氧浓度传感器测量白噪音和进水流量发生阶跃变化两种干扰情况对溶解氧浓度跟踪控制性能的影响.仿真实验结果表明:针对污水处理溶解氧浓度的时变设定值跟踪控制,考虑外界干扰因素,与传统PID控制器相比,神经网络预测控制器超调量减小,响应快速,明显改善了系统动态控制性能,抑制干扰能力增强,有良好的自学习能力和适应性,为解决污水处理溶解氧浓度时变设定值跟踪控制问题提供了一条很好的途径.

### 参考文献:

- [1] HENZE M. Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3 [M]. London: IWA Publishing, 2000: 13-15.
- [2] KATEBI M R, JOHNSON M A, WILKE J. Control and instrumentation for wastewater treatment plant [M]. London: Springer-Verlag, 1999: 38-41.
- [3] NEJJARI F, BENHAMMOU A, DAHOU B, et al. Non-linear multivariable adaptive control of an activated sludge wastewater treatment process[J]. Int J Adapt Control Signal Process, 1999, 13(5): 347-365.
- [4] 张平, 苑明哲, 王宏. 基于国际评价基准的溶解氧控制方法研究[J]. 信息与控制, 2007, 36(2): 199-203.

- [5] TZONEVA R. Optimal PID control of the dissolved oxygen concentration in the wastewater treatment plant[C]// IEEE AFRICON Conference, Windhoek; IEEE Press, 2007:1-7.
- [6] CHEN J C, CHANG Ni-bin. Mining the fuzzy control rules of aeration in a submerged biofilm wastewater treatment process[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2007, 20(7):959-969.
- [7] 甄博然, 韩红桂, 乔俊飞. 基于增长型神经网络的污水处理过程溶解氧控制[J]. *中南大学学报:自然科学版*, 2009, 40(1):74-79.
- [8] 王小艺, 李万东, 刘载文, 等. 一种模糊 PID-Smith 污水处理的控制方法[J]. *计算机与应用化学*, 2010, 27(6):801-803.
- [9] 付文韬, 武利, 王莉莉, 等. 神经网络 PID 的溶解氧控制系统[J]. *计算机与应用化学*, 2013, 30(10):1135-1138.
- [10] 胡玉玲, 曹建国, 乔俊飞. 活性污泥污水处理系统的模糊神经网络控制[J]. *系统仿真学报*, 2005, 17(10):2541-2544.
- [11] SHEN Wen-hao, CHEN Xiao-quan, PONS M N, et al. Model predictive control for wastewater treatment process with feedforward compensation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2009, 155(1/2):161-174.
- [12] CRISTEA S, DEPRADA C, SARABIA D, et al. Aeration control of a wastewater treatment plant using hybrid NMPC[J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2010, 35(4):638-650.
- [13] 刘载文, 张春芝, 王小艺, 等. 基于遗传算法的污水处理过程优化控制方法[J]. *计算机与应用化学*, 2007, 24(7):959-962.
- [14] HOLENDA B, DOMOKOS E, REDEY A, et al. Aeration optimization of a wastewater treatment plant using genetic algorithm[J]. *Optimal Control Applications and Methods*, 2007, 28(3):191-208.
- [15] 孙增圻, 张再兴, 邓志东. 智能控制理论与技术[M]. 2版. 北京:清华大学出版社, 2011:123-126.
- [16] CAMACHO E F, BORDONS C. Model predictive control, advanced textbooks in control and signal processing[M]. 2nd. London; Springer-Verlag, 2004:3-9.

## Application of Neural Network Predictive Control to Dissolved Oxygen Control in Sewage Treatment Process

ZHANG Xue-yang<sup>1</sup>, XIANG Lei-jun<sup>1</sup>,  
LIN Wen-hui<sup>2</sup>, GUO Xin-hua<sup>1</sup>

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;  
2. Quanzhou Yiyuan Environmental Protection Equipment Company Limited, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** In order to solve the difficult problem of controlling the dissolved oxygen (DO) concentration with time varying setpoint in sewage treatment process, a neural network predictive controller (NNPC) design method for the dissolved oxygen concentration is proposed in this paper. Firstly, based on the general mechanism model of the activated sludge sewage treatment process, by using the input and output data of the system and the recursive learning update mode, the neural network approximation model of the system is trained through three-layer BP neural network. Then the constrained predictive controller of dissolved oxygen is designed in the condition of satisfying effluent water quality indicators. Considering the white noise interference on the dissolved oxygen measurement and the step changing influent flow, the designed controller is applied to the time varying setpoint tracking control of dissolved oxygen concentration in sewage treatment process. Simulation results show that compared to the conventional PID controller, the neural network predictive controller can significantly improve the tracking control performance of dissolved oxygen concentration and has better adaptability and stronger disturbance rejection ability.

**Keywords:** sewage treatment; neural network; dissolved oxygen concentration; predictive control; process control

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:吴逢铁)

# 从双视图到多视图的协同优化 立体视觉匹配算法

王道累, 吴懋亮, 陈军

(上海电力学院 能源与机械工程学院, 上海 200090)

**摘要:** 采用基于视图协同优化算法解决视觉匹配问题, 通过对双视图立体匹配的研究到多视图匹配的推广, 利用视差平面拟合进行多个视差集的合并. 利用奇异值分解法解决线性方程, 建立排除异常点的判别规则, 解决遮挡及稀疏纹理的问题. 实验结果表明: 该协同优化算法是有效的, 提高了匹配的精度.

**关键词:** 立体匹配; 协同优化; 图像分割; 视差平面拟合

**中图分类号:** TP 391.41

**文献标志码:** A

20 世纪 80 年代, Marr 等<sup>[1]</sup>提出了一种使计算机通过二维图像恢复三维场景信息的能力视觉计算理论, 并应用在双目或多目匹配上, 从而奠定了双目或多目立体视觉发展的理论基础. 立体匹配是计算机视觉关键技术之一, 现有解决立体匹配问题的算法主要分为两类: 基于局部约束的算法和基于全局约束的算法<sup>[2-4]</sup>. Wu 等<sup>[5]</sup>采用张量投票算法对 PMVS 中的特征扩展和噪声过滤进行优化. Nguyen 等<sup>[6]</sup>提出局部稠密解码方法, 利用 45° 和 90° 两方向对该方法进行求导, 获得视差图. Xu 等<sup>[7]</sup>提出优化局部自适应算法, 求解图像对视差. 上述算法都是基于局部算法求解视差, 但这类算法对图像噪声较敏感, 对重复纹理区域、遮挡区域和视差不连续区域等往往匹配效果不理想, 错误匹配率较高. 在此基础上, 很多计算机视觉研究专家提出基于全局约束算法, 对整个图像数据信息进行计算, 这样降低对局部区域敏感度, 解决重复纹理的影响, 同时, 也可以求解视差不连续区域, 最终达到全局最优解. 基于全局优化算法的本质是把匹配问题转化为求解能量函数, 然后, 通过求解该能量方程的全局最优解, 并可寻找到匹配点. 全局算法一般有动态规划算法、图割算法<sup>[8]</sup>和人工智能算法等. 本文研究双视图到多视图立体匹配算法, 提出基于全局协同算法解决多视图的匹配问题, 从而准确获得并恢复三维场景深度.

## 1 双目立体视觉匹配

### 1.1 图像分割

在图像分割之前, 通过两个假设: 每个分割区域内的视差值变化细微, 平滑过渡; 只有在分割区域边界存在深度距离的不连续性. 采用 mean-shift 算法<sup>[9]</sup>对参考图像(两幅图像任选一副作为参考图像)进行分割, 能很好满足图像的匹配假设条件.

### 1.2 视差的初始化

由于局部匹配算法速度快、运算简单, 局部匹配算法被用来计算视差初始值, 采用自适应相似算法来计算双视图匹配视差值. 自适应相似算法具体表示为

$$\text{SelfAd}(x, y, d) = (1 - t) | I(x, y) - I'(x + d, y) | +$$

收稿日期: 2015-05-07

通信作者: 王道累(1981-), 男, 讲师, 博士, 主要从事计算机视觉、图像处理和 CAD/CAM 的研究. E-mail: alfredwdl@shiep.edu.cn.

基金项目: 上海发电环保工程技术研究中心项目(11DZ2281700)

$$t(|\nabla_x I(x,y) - \nabla_x I'(x+d,y)| + |\nabla_y I(x,y) - \nabla_y I'(x+d,y)|). \quad (1)$$

式(1)中: $I$ 和 $I'$ 分别代表左右图像中像素坐标 $(x,y)$ 处的灰度; $t$ 表示灰度值差和梯度差之间的权值。

视差值初始化代价方程为

$$C_{\text{data}}(i,j,d) = \sum_{(i,j) \in (i,j)} \text{SelfAd}(x,y,d). \quad (2)$$

$N(x,y)$ 是以像素的 $(x,y)$ 为中心 $5 \times 5$ 的矩形窗,使用WTA(winner-takes-all)方法最小化代价方程,求得像素点 $(x,y)$ 的视差值。

### 1.3 视差图平面拟合

在参考图像分割之后,以分割区域为单位进行视差图平面拟合。由于假设在同一个分割区域内没有太大视差变化,所以分割区域内每一个像素的视差可以用一个模型来表示。Tao等<sup>[10]</sup>给出了视差图平面的拟合方程,每一个分割区域视差模型表示为

$$d(x,y) = ax + by + c. \quad (3)$$

式(3)中: $a,b,c$ 是平面的参数; $d$ 是像素点 $(x,y)$ 相对应的视差值。

对于分割区域内的各个像素点可以表示为

$$\mathbf{A}[a,b,c]^T = \mathbf{B}. \quad (4)$$

式(4)中:矩阵 $\mathbf{A}$ 第 $i$ 行为 $[x_i, y_i, 1]$ ;向量 $\mathbf{B}$ 第 $i$ 行为 $d(x_i, y_i)$ 。

对线性方程(4)进行变换,可得

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} [a,b,c]^T = \mathbf{A}^T \mathbf{B},$$

即有

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m x_i^2 & \sum_{i=1}^m x_i y_i & \sum_{i=1}^m x_i \\ \sum_{i=1}^m x_i y_i & \sum_{i=1}^m y_i^2 & \sum_{i=1}^m y_i \\ \sum_{i=1}^m x_i & \sum_{i=1}^m y_i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m x_i d_i \\ \sum_{i=1}^m y_i d_i \\ \sum_{i=1}^m d_i \end{bmatrix}. \quad (5)$$

通过奇异值(singular value decomposition, SVD)求解,有

$$[a,b,c]^T = \mathbf{A}^T \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{B}. \quad (6)$$

一般情况下,线性方程(5)的对奇异点非常敏感,所以对奇异点进行排除。这里制定3种规则来排除奇异点。

1) 视差相互比较。对左右视图分别通过自适应相似算法就得视差图,然后进行相互比较。给定一个误差阈值 $\xi$ ,如果小于该阈值 $\xi$ ,该像素点为可靠的像素点。

2) 可靠区域判断。在排除奇异点之后,分割区域内的可靠像素点总数是否可以到达构建拟合平面的要求,即构成可靠区域。这里规定可靠像素点总数是整个区域像素点数一半以上。

3) 视差距离判断当前获得视差值与前一次获得值进行比较,在规定的误差范围内,该像素点为可靠像素点。

通过判断之后,当前获得平面参数与前一次获得值进行比较,即

$$|a - a'| + |b - b'| + |c - c'| < \epsilon. \quad (7)$$

如果在规定的误差内,循环结束,或者继续进行参数优化。

### 1.4 视图协同优化视差值

视图协同优化是将一个复杂目标分解为一些相对简单子目标,相连区域对该子目标影响进行优化<sup>[11]</sup>。通过mean-shift分割后视图,如图1所示。图1中: $s_1, s_2, \dots, s_n$ 为分割区域。

设 $E(x)$ 为整幅图像的能量方程,根据协同优化原理,有

$$E(x) = \sum_{j=1}^n E_j(x). \quad (8)$$

式(8)中: $E_j(x)$  ( $j=1,2,\dots,n$ )是第  $j$  个分割区域的能量方程.

将一个复杂的能量分解为相对简单的子能量方程,通过迭代方程,有

$$(1-\kappa)E_j(x) + \kappa_j \sum_{i \neq j} \mu_{ji} E_i(x), \quad j=1,2,\dots,n. \quad (9)$$

式(9)中: $E_i(x)$ 表示第  $i$  个分割区域的能量方程,分割域  $s_j$  ( $j=1,2,\dots,n; i \neq j$ )是分割域  $s_j$  的相连域;  $0 \leq \kappa_j \leq 1$ ,  $0 \leq \mu_{j,1} \leq 1$  分别是相对应的权值.

利用协同原理来优化视差值,首先要构建视差拟合区域的能量方程,该能量方程有三部分组成分别是代价方程、惩罚方程和平滑度方程,具体表示为

$$E_j = E_{j_{\text{data}}} + E_{j_{\text{occ}}} + E_{j_{\text{sm}}}. \quad (10)$$

上式中的各项可分别表示为:

$$E_{j_{\text{data}}} = \sum_{(x,y) \in N_r} c_{\text{data}}(x,y,d); \quad (11)$$

$$E_{j_{\text{occ}}} = \omega_{\text{occ}} \cdot N_{\text{occ}}; \quad (12)$$

$$E_{j_{\text{sm}}} = \sum_{(x,y) \in N_r} s_{\text{sm}}(x,y,d); \quad (13)$$

$$s_{\text{sm}}(x,y,d) = \begin{cases} \gamma \sum_{((x,y),(x',y')) \in N} \text{dis}((x,y),(x',y'))^{-1} \exp[-(\beta I_{(x,y)} - I_{(x',y')})^2], \\ |d^j(x,y) - d^j(x',y')| \geq 1, \\ 0, \quad \text{或其他.} \end{cases}$$

各个参数定义如下: $c_{\text{data}}(x,y,d)$ 的定义同节 1.2;  $\omega_{\text{occ}}$ 为遮挡惩罚系数; $N_{\text{occ}}$ 为区域内遮挡像素数(通过上面 3 个规则判断得到的不可靠像素数); $N_r$ 是可靠区域像素集; $I_{(x,y)}$ 和  $I_{(x',y')}$ 分别是像素点  $(x,y)$ 和  $(x',y')$ 的灰度; $N$ 以像素的  $(x,y)$ 为中心  $5 \times 5$  的矩形窗; $\text{dis}(\cdot)$ 是两像素点欧几里得距离; $\gamma$ 是一个常数; $\beta$ 定义为

$$\beta = (2\langle (I_{(x,y)} - I_{(x',y')})^2 \rangle) - 1. \quad (14)$$

式(14)中: $\langle \cdot \rangle$ 表示在当前区域内的期望值<sup>[12]</sup>.

最后,通过 Powell 方法求解能量方程(9),获得第  $j$  个分割区域的最优视差平面参数  $(a_j, b_j, c_j)$ ,就可以获得优化后视差图.

## 2 多目立体视觉匹配

利用多视图进行立体匹配求视差,给匹配算法提供更多的信息,有利于提高算法的精度,降低匹配的错误率.选择其中一幅为参考图像,该参考图像与其他图像进行两两匹配求得视差图,形成了多个视差集  $(d^{(1)}, d^{(2)}, \dots, d^{(n)})$ ,如何优化合并这一系列视差集将是多视图匹配的关键问题之一.

双视图立体算法有 3 个匹配步骤.

**步骤 1** 对参考图像进行分割.

**步骤 2** 采用自适应相似算法求初始化视差,并求得  $(d^{(1)}, d^{(2)}, \dots, d^{(n)})$ .

**步骤 3** 利用视差平面拟合对多视图视差集进行合并.

对于多视图视差平面拟合,平面模型表示为

$$d^{(i,j)}(x,y) = ax + by + c. \quad (15)$$

式(15)中:第  $j$  个分割域在第  $i$  个视差集中的模型.

对多视差集合并,参考图像第  $j$  个分割域和其他图像所形成视差,其区域内各个像素点的线性方程表示为

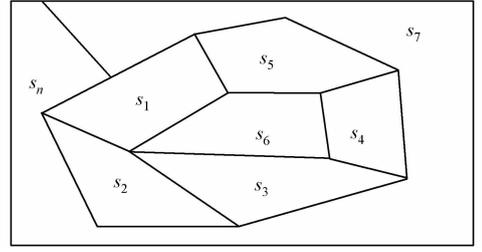


图 1 通过 mean-shift 分割后视图

Fig. 1 Segmented reference image

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_p & y_p & 1 \\ x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_p & y_p & 1 \\ x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_p & y_p & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1^{(1,j)} \\ d_2^{(1,j)} \\ \vdots \\ d_p^{(1,j)} \\ d_1^{(2,j)} \\ d_2^{(2,j)} \\ \vdots \\ d_p^{(2,j)} \\ d_1^{(n,j)} \\ d_2^{(n,j)} \\ \vdots \\ d_p^{(n,j)} \end{bmatrix}. \tag{16}$$

式(16)中:  $p$  是在第  $j$  个分割域中像素点个数;  $d_k^{(i,j)}$  是第  $i$  个视差集的第  $j$  个分割域中第  $k$  个像素点的视差值 ( $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$  和  $k=1, 2, \dots, p$ );  $a, b, c$  是第  $j$  个分割域的拟合平面系数。

从方程(16)获得到第  $j$  个分割域的拟合视差值是各个视差集中该分割域的平均值, 奇异值分解得到视差拟合平面的系数, 即

$$E_{j_{\text{data}}} = \sum_{i=1}^n \left( \sum_{(x,y) \in N_p} c_{\text{data}}(x, y, d_{(x,y)}^{(i,j)}) \right). \tag{17}$$

以此类推, 可以对参考图像的其他分割域进行同样平面拟合, 最后获得整副参考图像的视差图。

线性方程(16)进行奇异点的排除, 同理, 应用双目视图匹配的规则判断获得可靠分割区域. 采用协调优化方法对多视图视差进行优化, 多视图能量方程的建立, 具体定义为双目视图匹配(方程 10), 各个部分具体定义为

$$E_{j_{\text{occ}}} = \sum_{i=1}^n (\omega_{\text{occ}} \cdot N_{\text{occ}}^{(i,j)}), \tag{18}$$

$$E_{j_{\text{sm}}} = \sum_{i=1}^n \left( \sum_{(x,y) \in N_p} s_{\text{sm}}(x, y, d_{(x,y)}^{(i,j)}) \right). \tag{19}$$

各个参数定义如双视图匹配能量方程, 同理, 根据方程(9)定义, 利用 Powell 算法迭代优化得到最优多视图视差。

### 3 实验结果及讨论

#### 3.1 匹配算法流程图

算法具体表述为如下 5 个步骤。

- 步骤 1 视图组输入。
- 步骤 2 选择参考图像进行分割处理。
- 步骤 3 运用局部自适应相似算法计算初始化视差。
- 步骤 4 视差平面拟合, 并根据规则排除奇异点建立可靠区域集。
- 步骤 5 利用协同优化视差平面参数获得最优视差值。

#### 3.2 实验结果

对述的匹配算法的流程图进行运算, 双视图及多视图的视差图采用 Middlebury<sup>[10]</sup>的视图 Tsukuba, Venus, Cones 和 Teddy, 运行结果如图 2 所示. 图 2(a)为原始图(Tsukuba, Venus, Cones 和 Teddy), 图 2(b)为对应的 ground-truth 图, 图 2(c)为建议的双视图匹配算法结果图。

通过执行协同优化匹配算法获得 Tsukuba, Venus, Cones 和 Teddy 的多视图视差图, 如图 3 所示。

各双视图及多视图的算法结果, 如表 1 所示. 表 1 中:  $\eta$  为错误匹配率. 由表 1 可知: 利用协同优化匹配算法对多视图获得错误匹配率最小, 双视图次之, 局部算法获得的初始化视差错误率最大. 这样也



图2 双视图视差图

Fig. 2 Disparity map of binocular stereo matching

充分说明了多视图能提高更多信息,有利于算法改进,减少错误的匹配.局部算法对图像匹配比较敏感,速度虽快,单精确度劣于全局的匹配算法.同时,也比较了GF<sup>[13]</sup>,ST-1<sup>[14]</sup>的双视图错误匹配率.结果表明:匹配算法是可以获得较好的匹配数据,但在参考图 Cones上,算法表现不够好,需要对处理遮挡问题作进一步优化.



图3 多视图视差图

Fig. 3 Disparity map of multi-ocular stereo matching

表1 各方法求得视图差比较

Tab. 1 Compare with results of stereo matching methods

方法	$\eta/\%$			
	Tsukuba	Venus	Cones	Teddy
初始化视差	1.434	1.04	7.76	7.564
双视图协同优化	1.233	0.87	6.94	6.453
多视图协同优化	1.023	0.52	4.87	4.342
GF <sup>[13]</sup>	2.28	0.91	2.90	8.300
ST-1 <sup>[14]</sup>	1.89	0.76	3.64	7.550

## 4 结束语

研究立体视觉匹配算法,利用协调优化对双视图及多视图进行匹配优化.利用SVD方法对线性方程进行求解,同时,在多视图在通过视差平面拟合合并视差集.制定排除奇异点的规则,能很好判断遮挡及非可靠像素点.本算法不仅可以解决双视图匹配问题,也可以推广到多视图立体匹配问题的解决.今后,将对算法进一步改进及提出更好的平面拟合算法.

## 参考文献:

- [1] MARR D, POGGIO T. A computational theory of human stereo vision[C]// Proceedings of the Royal Society of London. London: IEEE Press, 1979: 301-328.
- [2] FAUGERAS O, LONG Q. The Geometry of multiple images[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 1-50.
- [3] FURUKAWA Y, PONCE J. Accurate, dense, and robust multi-view stereopsis[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(8): 1362-1376.

- [4] LHUILLIER M, QUAN Long. Aquasi-dense approach to surface reconstruction from uncalibrated images[J]. Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(3): 418-433.
- [5] WU Tai-pang, YEUNG S K, YA Jia-jia, et al. Quasi-dense 3D reconstruction using tensor-based multi-view stereo [C]//Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, San Francisco: IEEE Press, 2010: 1482-1489.
- [6] VINH D N, DUC D N, SANG J L, et al. Local density encoding for robust stereo matching[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2014, 24(12): 2049-2062.
- [7] XU Ling-feng, OSCAR C A, SUN Wen-xiu, et al. Stereo matching with optimal local adaptive radiometric compensation[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2015, 22(2): 131-135.
- [8] WANG Dao-lei, LIM K B. Obtaining depth map from segment-based stereo matching using graph cuts[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2002, 24(5): 603-619.
- [9] COMANICIU D, MEER P. Mean shift: A robust approach toward feature space analysis[J]. Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(5): 603-619
- [10] TAO H, SAWHNEY H S, KUMAR R. A global matching framework for stereo computation[C]//International Conference on Computer Vision. Vancouver: IEEE Press, 2001: 532-539.
- [11] HUANG Xiao-fei. Cooperative optimization for energy minimization: A case study of stereo matching[EB/OL]. [2014-09-23]. <http://front.math.ucdavis.edu/author/X.Huang,cs.CV/071057>.
- [12] BLAKE A, ROTHER C, BROWN M, et al. Torr, interactive image segmentation using an adaptive GMMRF model [C]//Proceedings European Conference of Computer Vision, Prague, Czech Republic, 2004: 428-441.
- [13] RHEMANN C, HOSNI A, BLEYER M C, et al. Gelautz fast cost-volume filtering for visual correspondence and beyond[C]//Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Colorado Springs: IEEE Press, 2011: 3017-3024.
- [14] MEI Xing, SUN Xun, DONG Wei-ming, et al. Segment-tree based cost aggregation for stereo matching[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Portland: IEEE Press, 2013: 23-28.

## An Algorithm of Stereo Matching Based on Cooperative Optimization from Two Views to Multiple Views

WANG Dao-lei, WU Mao-liang, CHEN Jun

(College of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** The algorithm of stereo matching using cooperative optimization is developed to extract disparity map from image pairs. The procedure of algorithm is generally extended to apply to multiple views from two views. The disparity sets are merged into one by the disparity plane estimation, and the linear equation is solved by singular value decomposition (SVD). And the rules are built to filter out outliers, which can effectively handle the problem of occlusion and textureless. The experimental results show that the effectiveness of our proposal methods and the accurateness of stereo matching.

**Keywords:** stereo matching; cooperative optimization; image segmentation; disparity plane fitting

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 杨建红)

# 旅游大数据的 MapReduce 客户细分应用

汪永旗<sup>1,2</sup>, 王惠娇<sup>3</sup>

- (1. 杭州电子科技大学 自动化学院, 浙江 杭州 310018;
- 2. 浙江旅游职业学院 旅行社管理系, 浙江 杭州 311231;
- 3. 浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 分析 K-means 聚类算法和 Hadoop 云平台的特点,对聚类算法进行改进,给出算法的 MapReduce 实现.通过加速比实验和旅游数据细分实验,验证了算法的有效性和高可扩展性.针对旅游大数据的特点,构建了多指标的 RFM 扩展模型,通过文中算法聚类,得到与预期相近的聚类结果.实验结果表明:文中算法具有较高的实用价值.

**关键词:** 旅游大数据; MapReduce 模型; 聚类; 客户细分

**中图分类号:** TP 39

**文献标志码:** A

在 Web 2.0 技术和移动互联网快速发展等因素的影响下,国内大型旅游 OTA 的业务量以前所未有的速度增长.在黄金周等旅游高峰期,每天的酒店预订量可达到几十万间.伴随着旅游消费产生了大量的过程采集、消费点评和产品推荐等数据,这些数据以各种形式保存到中心服务器上,包括文本、图片、声音、视频等.分阶段地对这些旅游过程中产生的海量数据进行挖掘和分析是对大型线上旅游企业提出的迫切挑战<sup>[1-2]</sup>.目前,我国大型在线旅游企业数据挖掘的数据规模已达 GB 级甚至 TB 级,传统的分析手段已难以满足现实的需要,迫切需要一种针对旅游大数据的客户细分方法,从而可以进行有效的旅游客户细分、旅游客户维护和精准营销等商业活动.本文在应用中改进了 K-means 算法,提出了基于 MapReduce 模型的分布式聚类算法.

## 1 MapReduce 和 Hadoop

MapReduce 是 Google 在 2004 年的 OSDI 会议上提出的分布式并行编程模型,适用于分析处理海量数据集. MapReduce 把并行计算过程抽象为两个函数:映射(Map)和化简(Reduce). MapReduce 就是“任务分解”模型,它通过 Map 把任务分解,用 Reduce 把处理好的结果汇总起来,得到最终结果<sup>[3-4]</sup>.在大数据处理过程中,如果一个数据集可以分解成许多小的数据集,每个小的数据集都可以完全并行地进行处理,那么这个任务就可以用 MapReduce 来处理. MapReduce 的处理过程,如图 1 所示.

Hadoop 是 Apache 组织发布的基于 MapReduce 模型的分布式计算框架.该架构可以在大量廉价硬件设备组成的集群上运行应用程序,为应用程序提供一组稳定可靠的接口,旨在构建一个具有高可靠性和良好扩展性的分布式系统<sup>[5]</sup>.随着云计算的逐渐流行,这一项目被越来越多的企业所运用. Hadoop 的核心是 HDFS, MapReduce 和 HBase<sup>[6]</sup>.

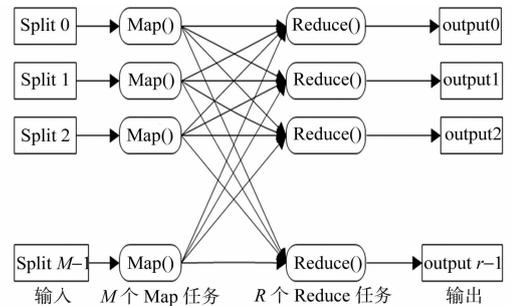


图 1 MapReduce 处理过程  
Fig. 1 Processing of MapReduce

**收稿日期:** 2015-05-07

**通信作者:** 汪永旗(1973-),男,讲师,博士研究生,主要从事旅游电子商务和数据挖掘的研究. E-mail:68279983@qq.com.

**基金项目:** 浙江省自然科学基金资助项目(Y14D060013);浙江省教育厅校企合作项目(FW2013031)

## 2 聚类算法的MapReduce实现

K-means 算法是最经典的划分聚类算法,由于其诸多的优点,被广泛应用于客户细分等聚类应用中<sup>[7]</sup>. 因为 K-means 聚类算法具有可分解和重组的特点,所以也适合于在分布式架构下运行.

### 2.1 K-means 聚类算法及改进

设有  $n$  个对象,划分成  $k$  类,经过  $t$  次迭代,则经典 K-means 算法的时间复杂度为  $O(nkt)$ . 从算法过程可以看出:算法在处理大数据集时是相对有效的,具有较好的扩展性. 计算耗时主要集中在两个环节上:一是计算各对象到中心的距离;二是将对象归类到距离最近的中心点类的过程. 对于后者,如果能减少不必要的比较和计算,则可以有效地节省时间开支. 为此,可以借用三角形三边关系定理的思想简化比较和计算过程. 具体有如下 3 个改进步骤.

**步骤 1** 给定含有  $n$  个对象的数据集  $X$ ,  $c_l$  为  $k$  个初始中心,  $l=1,2,\dots,k$ .

**步骤 2** 计算每个聚类中心的距离  $d(c_i, c_j)$ , 其中,  $i, j=1,2,\dots,k$ .

**步骤 3** 计算对象  $x_i$  与当前所在类中心的距离  $d(x_i, c_m)$ . 考察新的聚类中心  $c_j$ , 如果  $d(c_m, c_j) \geq 2d(x_i, c_m)$ , 说明  $c_j$  不是新的中心, 可以不用计算  $d(x_i, c_j)$ ; 否则, 计算  $d(x_i, c_j)$ , 并与  $d(x_i, c_m)$  比较. 继续步骤 3, 直到将  $x_i$  归属到最近的聚类中心.

该改进算法时间复杂度为  $O(n\beta d)$ . 其中:  $1 \leq \beta \leq k$  是对象到中心点的计算次数. 最好的情况是计算 1 次, 最坏情况下是计算  $k$  次, 当  $n$  较大时, 效率提高是可观的.

### 2.2 算法的MapReduce实现

用 MapReduce 处理的数据应具备以下条件: 大的数据集可以被分成一个个小数据集, 而且这些小数据集可以独立地被并行处理, 不相互影响. 在 K-means 算法中, 计算各对象到中心点的距离是被独立操作的, 各对象之间没有关联<sup>[8]</sup>. 所以, K-means 算法非常适用于分布式并行计算. K-means 算法的编程思路, 如图 2 所示. 由图 2 可知: 在用 MapReduce 处理前, 需将客户数据以行形式存储, 使数据能够分片, 并且各分片间数据不相关, 分片过程可由 Hadoop 完成, 无需另外编程.

**2.2.1 Map 函数设计** Map 函数从特定分块中逐行读取每条记录, 计算它与  $k$  个中心点的距离, 并标明它所属的新中心类别. Map 函数的输入为原始客户数据文件和  $k$  个初始中心点. 原始客户数据以  $\langle \text{key}, \text{value} \rangle$  对表示, 其中: key 为记录相对于文件起始点的偏移量; value 为当前记录各维值组成的字符串. Map 函数的伪码<sup>[9]</sup>如下:

```
public void map(Writable key, Text value, Context context) {
    minDist = MAXDIST;
    for (i=0; i<k; i++) {
        if (dist(value, cluster[i]) < minDist) {
            minDist = dist(value, cluster[i]);
            midClusterID = i;
        }
    }
    context.write(midClusterID, value);
}
```

**2.2.2 Combine 函数设计** Combine 函数作用是对每个 Map 函数产生的结果进行本地化预处理, 从而在 Reduce 时, 减少不必要的通信代价, 以提高整个 MapReduce 的运行性能. Reduce 函数的作用是从所有 Map 函数的结果中统计和计算出各个聚类的新中心. 为了减少通信代价, 可以预先对本地 Map 函数结果进行计算, 得出本地结果中各聚类对象的个数及各维数值之和, 作为 Reduce 函数的输入<sup>[10-11]</sup>.

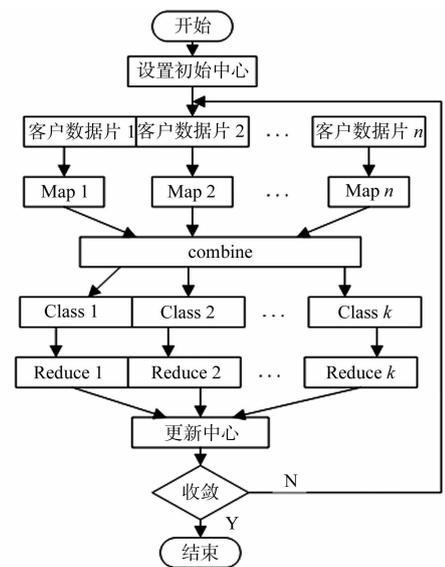


图 2 K-means 算法的 MapReduce 流程

Fig. 2 Process in MapReduce of K-means algorithm

Combine 函数的伪码如下

```
public void combine(Writable key, Text value, Context context) {
    num=0;
    sum: array[1.. dimension];
    while (value.hasNext()) {
        current= value.next();
        num++;
        for (i=0; i<dimension; i++) sum[i]+= current.value[i];
    }
    context.write(key, Text(num,sum)); //输出的 value 字符串包含 num 和数组各个分量
}
```

2.2.3 Reduce 函数设计 Reduce 函数的输入是 combine 函数的输出, key 是聚簇 ID, value 中包含该簇的对象数 num 和这些对象的各维数据之和. Reduce 函数累加同一 key 的各 num 之和, 并求各分量的均值, 得到新的聚类中心, 输出〈key, value〉对<sup>[12]</sup>. Reduce 函数的伪码为

```
public void reduce (Writable key, Text value, Context context) {
    num=0;
    while (value.hasNext()) {
        current= value.next();
        num+= current.getnum();
        for (i=0; i<dimension; i++) sum[i]+= current.value[i];
    }
    for (i=0; i<dimension; i++) mean[i]+= sum[i]/num;
    context.write(key, Text(mean));
}
```

在每次 reduce 之后, 判断偏差是否小于给定的阈值. 如果小于则算法收敛; 否则, 把本轮 reduce 结果作为 map 的输入进行下一轮的迭代.

### 3 实验与分析

#### 3.1 实验环境

文中所用实验平台是由 11 台计算机组成的千兆以太网. 其中: 1 台作为 master; 另外 10 台为 slaves. 各节点硬件配置: 3.2 GHz Intel 双核 CPU; 4 GB 内存. 软件配置: JDK 1.6.0; Hadoop 0.21.0.

实验所用的数据是 46 维的人工数据. 为了测试算法的性能, 实验中构造了不同大小的数据集, 包括 1, 2, 4, 8 G. 采用加速比(speedup)作为主要的算法评价指标.

#### 3.2 集群加速比性能实验

加速比是衡量并行系统优劣及稳定性的重要指标, 是指在并行系统中, 对于同一个任务, 在单处理机上运行时间与在并行系统上处理时间的比率. 一方面, 可以用加速比考察当系统硬件资源增加时, 对相同规模任务的处理能力; 另一方面, 考察处理任务与硬件资源同比近似增加时, 并行系统处理能力.

4 组大小成比例增长的 46 维人工数据的记录数和数据块数, 如表 1 所示. 分别选择了 1, 2, 4, 5, 6 个计算节点, 考量在不断增加计算节点( $n$ )的情况下, 算法的运行时间( $t$ ), 得到运行时间走势图, 如图 3 所示.

由图 3 可知: 随着计算节点的增加, 每个任务的运行时间都有显著地减少, 可见 K-means 算法在 Hadoop 上运行具有较好的加速比, 说

表 1 实验数据

Tab. 1 Experimental data

编号	文件大小/GB	记录数	数据块
a	1.023	2 351 307	33
b	2.052	4 704 832	68
c	3.982	9 379 606	126
d	8.075	18 906 172	260

明了系统的可用性. 另外, 为了考察系统的扩展性, 针对 a, b, c 三组数据, 实验分别选择 2, 4, 8 个节点 ( $n$ ) 进行运算, 得到的运行时间 ( $t$ ), 如图 4 所示. 由图 4 可知: 当数据规模呈正比增长时, 只要相应地增加计算节点, 即可保持系统的相同处理水平, 体现了该 MapReduce 算法的可扩展性.

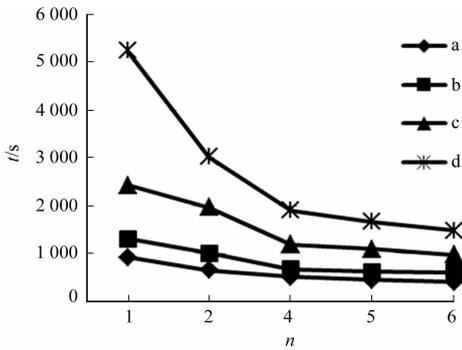


图 3 算法的运行时间走势  
Fig. 3 Running time trend of the algorithm

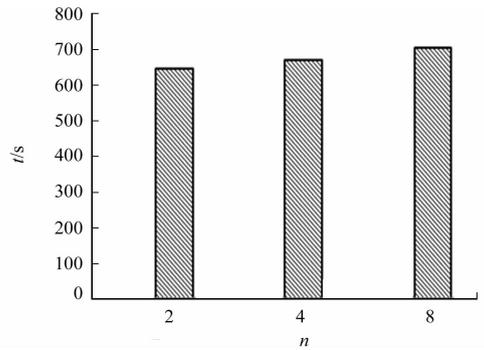


图 4 节点数与数据同比增长下算法的运行时间  
Fig. 4 Running time of the algorithm in same proportion of nodes and data scale

### 3.3 旅游大数据客户细分实验及结果分析

实验数据来自国内某大型在线旅游网站的查询预订、过程跟踪和服务点评等数据. 为了客户细分实验需要, 提取了约 5 200 万条数据, 涵盖了超过 120 万的客户.

首先, 基于在线旅游数据的特点, 在传统 RFM 模型的基础上<sup>[13-14]</sup>, 构建了多指标的 RFM 细分模型, 如表 2 所示. 进行因子分析和权重设置<sup>[15]</sup>, 在对初始数据进行归一化处理后, 交于 Hadoop 集群处理. 经过 MapReduce 算法处理后, 得到 16 个客户聚类, 其中的 4 个聚类在各因子上的得分和客户数 ( $N$ ), 如表 3 所示.

表 2 多指标的 RFM 细分模型

Tab. 2 RFM model including multi index

传统 RFM	改进 RFM
$R$ (recency)	最远消费 $R_l$ , 最近消费 $R_r$
$F$ (frequency)	总体频率 $Freq$ , 月最大频率 $Freq_{max}$ , 月最小频率 $Freq_{min}$
$M$ (monetary)	累计消费金额 $M_{sum}$ , 平均消费金额 $M_{avg}$
$A$ (advice)	累计点评 $A_{sum}$ , 最近点评 $A_{rec}$

由表 3 可知: C2 类是 1 年来一直较活跃的用户, 其消费额很大, 频率也很高, 用户较少, 是公司应该重点维护的企业级客户; C5 类最近很活跃, 但消费额度不大, 应该是在公司点评返现推广活动(公司开展的促销活动)下, 开拓的大量新进客户, 这类客户的网上点评较活跃, 应属于手机 APP 用户, 也是企业未来发展的基石; C8 类客户曾经较活跃, 有较高的消费, 但最近消费很低, 很可能是在今年激烈行业竞争下流失的客户; 数量较大的 C11 类则属于一般价值客户. 以上结果较好地反映了一年来行业的背景和企业决策所产生的影响, 即在线旅游市场竞争加剧; 点评返现措施带来较大业务增长; 移动 APP 推广不仅吸引了大量的新客户, 同时, 在整个业务中的比重也有明显提高. 因此, 分析结果对公司新的决策有较大的参考价值.

表 3 客户聚类

Tab. 3 Customer clustering

类型	fac1	fac2	fac3	fac4	$N$ /千人
C2	0.413	0.526	0.734	0.018	1.7
C5	0.526	0.383	0.121	0.227	131.2
C8	0.012	0.392	0.328	0.072	42.5
C11	0.138	0.176	0.189	0.180	227.2

## 4 结束语

利用 K-means 算法中各对象到中心点的距离是独立运算的特点, 运用三边关系定理的思想改进了对对象归类的过程, 并给出了算法的 MapReduce 实现, 通过加速比实验证明了该算法的可用性可扩展

性。在旅游大数据客户细分应用中,构建了多指标的RFM扩展模型,经过实验,得到了预期结果。文中这种实现方法不仅可以为大型线上旅游企业提供决策支持,同时也是旅游主管部门监控、管理旅游市场的有效方法。今后将对旅游大数据挖掘中的信息安全和隐私保护问题开展研究。

### 参考文献:

- [1] PINTO J. Analyzing Big Data is becoming a key competitive advantage[J]. *Process and Control Engineering*, 2014, 67(5):4.
- [2] 孟小峰,慈祥. 大数据管理:概念、技术与挑战[J]. *计算机研究与发展*, 2013, 50(1):146-165.
- [3] 刘鹏. 实战 Hadoop:开启通向云计算的捷径[M]. 北京:电子工业出版社, 2011:60-74.
- [4] LAM C. Hadoop in action[M]. Greenwich:Manning Publications Co, 2011:65-72.
- [5] SRIRAMA S N, JAKOVITS P, VAINIKKO E. Adapting scientific computing problems to clouds using MapReduce [J]. *Future Generations Computer Systems*, 2012, 28(1):184-192.
- [6] WHITE T. Hadoop: The definitive guide[M]. Sebastopol:O'Reilly Media Inc, 2012:1-39.
- [7] HAN J, KAMBER M, PEI J. Data mining: Concepts and techniques[M]. Burlington:Morgan Kaufmann, 2011:451-456.
- [8] 江小平,李成华,向文. K-means 聚类算法的 MapReduce 并行化实现[J]. *华中科技大学学报:自然科学版*, 2011, 39(1):120-124.
- [9] KHOUSSAINOVA N, BALAZINSKA M, SUCIU D. PerfXplain: Debugging MapReduce job performance[J]. *PVLDB*, 2012, 5(7):598-609.
- [10] DEAN J, GHEMAWAT S. MapReduce: Simplified data processing on large clusters[J]. *Communications of the ACM*, 2008, 51(1):107-113.
- [11] HUGHES, ARTHUR M. Strategic database marketing[M]. New York:McGraw-Hill Inc, 2012:85-104.
- [12] GUO Qi, LI Yan, LIU Tao. Correlation-based performance analysis for full-system MapReduce optimization[C]// *Proceedings of IEEE International Conference on Big Data*. Washington D C: IEEE Computer Society, 2013:753-761.
- [13] CUADROS A J, DOMINGUEZ V E. Customer segmentation model based on value generation for marketing strategies formulation[J]. *Estudios Gerenciales*, 2014, 30(130):25-30.
- [14] KHOBZI H, AKHONDZADEH-NOUGHABI E. A new application of RFM clustering for guild segmentation to mine the pattern of using banks' e-payment services[J]. *Journal of Global Marketing*, 2014, 27(3):178-190.
- [15] KLAS H, BJIRN L, DAG E, et al. Customer segmentation based on buying and returning behaviour[J]. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 2013, 42(10):852-865.

## Application of Tourist Segmentation Based on MapReduce under Big Data of Tourism

WANG Yong-qi<sup>1,2</sup>, Wang Hui-jiao<sup>3</sup>

(1. School of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. Department of Travel Agency Management, Tourism College of Zhejiang, Hangzhou 311231, China;

3. School of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** First, the characteristic of K-means clustering algorithm and Hadoop cloud platform is analyzed in this paper, the improvement of K-means clustering algorithm and its implementation of MapReduce are given. Then, the experiments of speedup and tourist segmentation are given to illustrate the effectiveness and the high scalability of the proposed method. Finally, according to the characteristics of tourism big data, a multi index RFM model is built, the clustering results which are expected indicate that the algorithm is highly practical.

**Keywords:** tourism big data; MapReduce model; clustering; customer segmentation

# 碱度对动态膜生物反应器处理效果的影响

胡苗苗<sup>1</sup>, 洪俊明<sup>1</sup>, 李尚惠<sup>1</sup>, 戴兰华<sup>2,3</sup>, 陈向强<sup>3</sup>, 谢小青<sup>3</sup>

(1. 华侨大学 化工学院, 福建 厦门 361021;

2. 厦门市排水监测站, 福建 厦门 361005;

3. 厦门水务中环污水处理有限公司, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 采用动态膜生物反应器(DMBR)处理生活污水,考察不同进水碱度对 DMBR 处理效果的影响,研究反应器运行过程中运行参数的变化情况.结果表明:当碱度为 25~510 mg·L<sup>-1</sup>时,碱度对出水 COD<sub>C</sub>影响不大,去除率达到 92.46%;进水碱度充足(224~510 mg·L<sup>-1</sup>)时,出水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除率在 98%以上;当进水碱度不足时,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除率下降,DMBR 出水 pH 值的变化滞后于碱度的变化;当碱度在 330~510 mg·L<sup>-1</sup>范围内时,动态膜通量约为 23 L·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>,DMBR 的运行周期可达 39 d,反冲洗后膜通量恢复率为 100%.反应器内的胞外聚合物随着进水碱度的下降而升高,DMBR 反冲洗周期缩短,膜污染趋势加重,当进水碱度下降到 130 mg·L<sup>-1</sup>时,反冲洗周期下降到 10 d.

**关键词:** 动态膜生物反应器;碱度;膜污染;硝化过程

**中图分类号:** X 703

**文献标志码:** A

水体中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 污染是我国水环境污染的一个重要因子.废水中,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除主要通过微生物硝化过程完成,而生物硝化过程需要消耗一定的碱度.近年来,国内外学者在碱度对硝化过程的影响方面开展了大量的研究.Modin 等<sup>[1]</sup>采用双极室微生物燃料电池对进水中的碱度进行再分配,研究了碱度再分配后对硝化作用的影响.Hou 等<sup>[2]</sup>使用流化床生物膜工艺处理煤化工废水,发现 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除率随着碱度剂量比的增加而增加.膜生物反应器可实现水力停留时间和污泥泥龄的分离,有利于硝化菌的富集和硝化过程的进行,是一种高效的生物处理污水技术<sup>[3]</sup>.但膜组件价格昂贵、运行能耗高以及膜污染等问题,严重限制了膜生物反应器(MBR)的推广和应用.动态膜生物反应器(dynamic membrane bioreactor,DMBR)在保留 MBR 优点的同时,采用大孔径网膜代替微滤膜的技术和依靠出水水头差自流出水减小能耗等措施降低工艺成本,而且还具有出水水质好、出水通量大、清洗容易等优点.洪俊明等<sup>[4]</sup>考察了投加颗粒活性炭对膜生物反应器运行过程和处理效果的影响.卢芳芳等<sup>[5]</sup>采用 DMBR 研究了盐度对处理养殖废水脱氮效能的影响.张建等<sup>[6]</sup>考察了 DMBR 中动态膜对污染物的去除效果及动态膜与混合液活性污泥的降解特性.一般的城镇污水碱度值约为 200 mg·L<sup>-1</sup><sup>[7]</sup>,随着城镇生活污水中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 质量浓度的提高,碱度已经成为硝化过程的主要控制因素.本文采用 DMBR 处理工艺,研究在不同进水碱度条件下对 DMBR 处理生活污水的脱氮过程、有机物降解和动态膜污染特性的影响.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置

DMBR 的实验装置由生物反应器和浸没式膜组件组成,如图 1 所示.污水从原水桶由蠕动泵提升进入反应器,使用错流微孔曝气.反应器的有效容积为 12.5 L,其中装有 2 个膜组件,由 PVC 板、滤布

**收稿日期:** 2014-08-04

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

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51078157);国家水体污染控制与治理科技重大专项基金资助项目(2012ZX07313-001-08);福建省厦门科技计划项目(3502Z20131026)

自制而成,尺寸为 $0.17\text{ m}\times 0.25\text{ m}$ ,组件内为PP填料支撑层,所用膜片为孔径 $37\text{ }\mu\text{m}$ 的工业滤布,有效膜面积为 $0.085\text{ m}^2$ .反应器停留时间为 $7\text{ h}$ ,运行期间除了取样检测未排泥.反应器采用重力流出水,与传统的MBR相比减少了蠕动泵抽吸出水,降低了运行成本.当膜过滤压差达到一定值时,使用自来水反冲洗膜组件<sup>[5]</sup>.

## 1.2 进水水质

生活污水采用 $278\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 葡萄糖, $278\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 淀粉, $13.16\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{KH}_2\text{PO}_4$ , $66\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{MgSO}_4$ , $165\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , $6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{CaCl}_2$ , $6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{MnSO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$ 进行配制.此外,通过改变碳酸氢钠的投加量,控制进水的碱度水平(以 $\text{CaCO}_3$ 计)为 $510,430,330,224,130,25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

未驯化的污泥取自某城市污水处理厂氧化沟的好氧段,取回后装入反应器内,开始曝气,溶解氧质量浓度控制在 $3\sim 5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,驯化时间为 $1\text{ w}$ .待出水水质稳定后,进入连续运行阶段,恒定进水流量为 $1.6\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ ,按逐渐降低的碱度梯度开展实验过程.每天定期取进出水,检测 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、总氮、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、硝氮和亚硝氮的质量浓度、碱度以及pH值,并分析反应器内的胞外聚合物(extracellular polymeric substances, EPS)浓度,定期测定反应器膜通量和过滤压差的变化,用来表征动态膜的膜污染程度.

## 1.3 检测方法

$\text{COD}_{\text{Cr}}$ 测定采用快速密闭催化消解法;总氮(TN)的测定采用过硫酸钾氧化紫外分光光度法; $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 的测定采用纳氏试剂分光光度法;硝氮的测定采用紫外分光光度法;亚硝氮的测定采用N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法;EPS的提取方法参照文献<sup>[8]</sup>;蛋白质的测定采用考马斯亮蓝法<sup>[9]</sup>;多糖的测定采用苯酚-硫酸法<sup>[10]</sup>;碱度(ALK)的测定采用酸碱指示剂滴定法;pH值使用pH计进行测定.

# 2 结果与讨论

## 2.1 进水碱度变化对出水碱度与pH值的影响

DMBR运行过程中,在不同进水碱度条件下的进出水碱度和碱度利用率变化,如图2所示.图2中: $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 表示 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 的质量浓度; $\eta$ 为去除率.由图2可知:进水碱度为 $330\sim 510\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,碱度利用率分别为 $67\%, 52\%, 43\%$ ,出水碱度超过 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,说明DMBR处理生活污水的碱度充足;当进水的碱度为 $25\sim 224\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,碱度利用率分别达到 $88\%, 95\%, 95\%$ ,进水的碱度基本完全消耗,出水碱度几乎为0,DMBR开始出现碱度不足的现象.

进出水的pH值在不同碱度条件下的变化情况,如图3所示.由图3可知:当碱度为 $430, 510\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,pH值稳定在 $7.42\sim 8.13$ 之间;进水的碱度低于 $330\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,pH值随着进水碱度的降低而

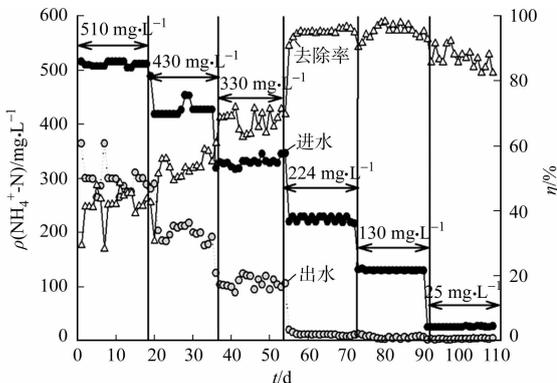


图2 进出水碱度及利用率变化

Fig. 2 Alkalinity and utilization rate of influent and effluent

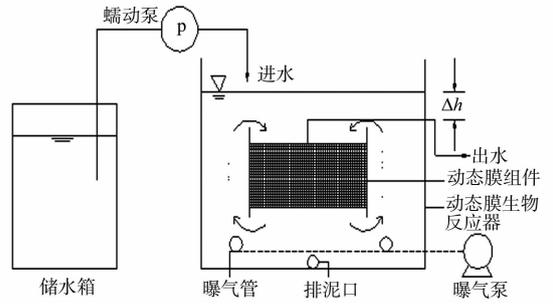


图1 一体式动态膜生物反应器工艺流程图

Fig. 1 Process flow diagram of a submerged dynamic membrane bioreactor

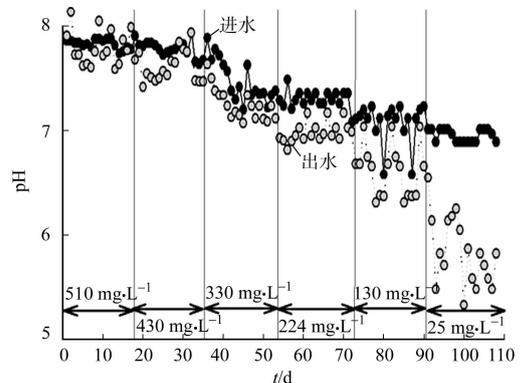


图3 不同碱度条件下进出水pH值变化

Fig. 3 Variation of pH value of influent and effluent under different alkalinity

逐渐降低;当进水碱度为  $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, pH 值下降至 5.33, 出水明显偏酸性. 从 pH 值的变化也可以看出, 碱度对 pH 值的缓冲作用显著, 碱度充足时, pH 值变化不大; 当出现碱度不足时, pH 值的变化要滞后于碱度的变化.

## 2.2 进水碱度变化对污染物去除效果的影响

**2.2.1 对  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  的影响** 不同碱度条件下, 进出水  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  的质量浓度  $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$  及去除率  $\eta$  的变化, 如图 4 所示. 由图 4 可知: 在进水碱度为  $25 \sim 510 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的条件下, 反应器出水的  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  的平均质量浓度约为  $24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 去除率达到 92.46%. 这是由于有机物的降解主要依靠活性污泥中大量的异养菌共同作用完成的<sup>[11]</sup>, 进水碱度的改变使反应器出水 pH 值在 5.33~8.13 之间变化, 部分异养菌可在偏酸的环境下生长, 并对不良酸碱环境的抵抗能力较强, 所以碱度的改变对活性污泥中微生物的有机物利用影响不大. 因此, 进水碱度的变化对  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  的去除率几乎没有影响. 丁国际等<sup>[12]</sup>研究了 7 个隔室的新型一体化工艺处理生活污水的影响因素, 发现碱度充足 ( $290 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 和碱度不足 ( $90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 两种情况下, 碱度对活性污泥的有机物的去除影响不明显, 这与文中的研究结果相一致.

**2.2.2 对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的影响** 在不同的碱度条件下, 对 DMBR 进出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的质量浓度  $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$  及去除率  $\eta$  的影响, 如图 5 所示. 由图 5 可知: 当碱度为  $224 \sim 510 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, DMBR 对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的去除率变化不大, 稳定在 98%~100% 之间; 当碱度为  $130 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的去除率降低到 75%; 当碱度为  $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的去除率仅为 35%. 在硝化反应过程中会产生  $\text{H}^+$ , 使 DMBR 中混合液的  $\text{H}^+$  浓度升高, 从而引起系统的 pH 值降低. 硝化细菌在 pH 值为中性或微碱性条件下活性最强, 硝化过程反应快<sup>[13]</sup>. 充足的碱度可以对混合液 pH 值的变化起缓冲作用. 当碱度为  $220 \sim 510 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 系统的 pH 值维持在 7 以上, 有利于硝化菌的生长, 保证了硝化反应的正常进行, 可使  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  降低到较低的水平. 当碱度为  $130 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 出水的 pH 值降至 6.31, 硝化细菌生长受到抑制; 当碱度为  $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, pH 值降至 5.33, 硝化反应受阻.

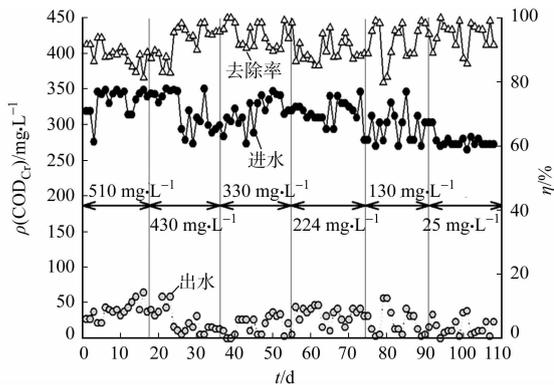


图 4 进出水  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  质量浓度变化

Fig. 4  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  concentration variation of influent and effluent

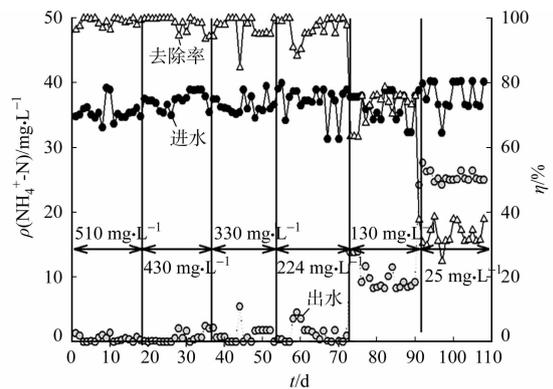


图 5 进出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度变化

Fig. 5  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  concentration variation of influent and effluent

丁国际等<sup>[12]</sup>也发现碱度充足 ( $290 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 时,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除率为 97%; 碱度不足 ( $90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 时, 硝化反应受到抑制,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除率为 71.8%. 因此, 常规城镇生活污水在进水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  为  $35 \sim 40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 碱度基本足够; 若进水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度上升, 硝化过程就会出现碱度不足的情况而受到抑制.

**2.2.3 对  $\text{NO}_x\text{-N}$  的影响** 在不同碱度下, DMBR 出水  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  质量浓度  $\rho(\text{NO}_x\text{-N})$  的变化, 如图 6 所示. 由图 6 可知: 亚硝氮在整个运行过程中的浓度几乎为 0, 说明在 DMBR 中没有发生短程硝化过程. 当碱度为  $224 \sim 510 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 出水硝氮浓度约为  $25.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 碱度充足的条件下 ( $330 \sim 510 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 大部分  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  通过硝化作用转化为硝氮, 出水的硝氮浓度较高. 由于在反应器内存在一定的缺氧区域以及污泥絮体内部由于氧传递受阻形成的缺氧环境, 而反硝化细菌是兼性厌氧菌, 缺氧环境为反硝化细菌提供了生存条件, 使得反硝化作用能顺利进行. 当进水碱度下降到  $130 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 出水硝氮浓度降至  $12.47 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右; 当碱度为  $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 出水硝氮浓度几乎为 0. 在碱度不足的情况下, 由于硝化反应受到碱度不足和 pH 值下降的影响发生了抑制, 硝化作用受阻, 只有少量的

$\text{NH}_4^+\text{-N}$  转化为了硝氮,这部分硝氮通过反应器内存在的缺氧区域内的反硝化作用转化为氮气,被完全去除.

2.2.4 碱度对总氮的影响 在不同的碱度下,DMBR 进出水总氮浓度  $\rho(\text{TN-N})$  及去除率  $\eta$  的变化,如图 7 所示. 由图 7 可知:在不同的进水碱度条件下,反应器对总氮去除率约为 30%,总氮的去除是通过动态膜生物反应器中的微生物硝化过程和反硝化过程来完成. 在进水碱度充足(330, 430, 510  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )时,硝化过程进行较为彻底,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除率较高,出水中含有大量的硝氮,反应器对总氮的去除控制因素主要是反硝化过程;在低碱度(低于 130  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )条件下,硝化过程受到碱度不足和 pH 值下降的影响,硝化反应过程受到抑制,出水中含有大量的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,反应器对总氮的去除主要由硝化作用所控制.

在硝化过程中,每生成 1  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{NH}_4^+\text{-N}$  需要碱度 7.14  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (以  $\text{CaCO}_3$  计);在反硝化过程中,反应 1  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{NO}_3^-\text{-N}$  要生成 3.57  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  碱度<sup>[14]</sup>. 因此,理论消耗碱度( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )计算公式为

$$[c(\text{ALK})]_{\text{理论消耗}} = 3.57 \times ([c(\text{NH}_4^+)]_{\text{进水}} - [c(\text{NH}_4^+)]_{\text{出水}} + [c(\text{NO}_3^-)]_{\text{出水}}). \quad (1)$$

实际消耗碱度( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )的公式为

$$[c(\text{ALK})]_{\text{实际消耗}} = [c(\text{ALK})]_{\text{进水}} - [c(\text{ALK})]_{\text{出水}}. \quad (2)$$

实验过程中,实际碱度消耗和理论碱度消耗  $\rho$ (消耗),如图 8 所示. 从图 8 可以看出:碱度为 330~510  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,碱度的实际消耗量大于理论消耗量. 因此,碱度主要用于硝化作用;当进水碱度为 25, 130, 224  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,碱度的实际消耗量低于理论消耗量,此时硝化过程产生的  $\text{H}^+$  出现累积现象,引起 pH 值的变化. 陈英文等<sup>[15]</sup>发现,每 1  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  氮的实际碱度消耗随出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的增大而减小. 从图 5 可以看出:出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度是逐渐增加的趋势,因此,会出现实际消耗碱度先大于理论消耗量随后又低于理论消耗量的现象. 由此可知:在进水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度为 35  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,实际城镇污水的碱度可以达到较高的利用率;如果继续提高  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度,出水的碱度不足,且 pH 值将出现下降的情况.

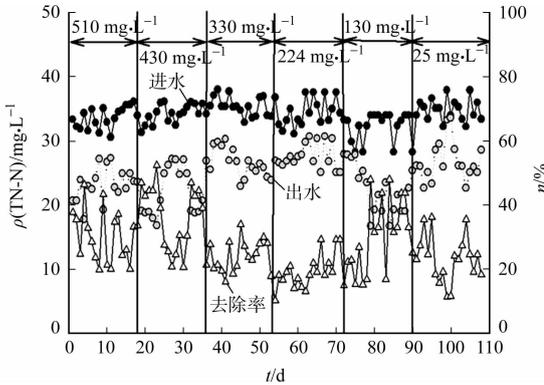


图 7 进出水 TN 质量浓度的变化  
Fig. 7 TN concentration variation of influent and effluent

### 2.3 进水碱度对动态膜污染的影响

DMBR 运行过程中,膜过滤压差( $p$ )和膜通量( $J$ )在不同碱度下的变化,如图 9 所示. 当过滤压差增至 4.8 kPa 时,清洗动态膜组件,表示一个运行周期结束. 由图 9 可知:当碱度在 330~510  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  范围内,反应器运行稳定,膜通量大致稳定在 23  $\text{L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ,过滤压差维持在 3.6 kPa,当过滤压差增至 4.8 kPa 时,膜通量减至 16.9  $\text{L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ,清洗膜组件,运行周期为 39 d;当碱度为 224  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,运行周期减至 20 d;当碱度为 130  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,运行周期减至 10 d;而碱度为 25  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,过滤压差增加到 3.9 kPa,膜通量减小速度加快,迅速降至 14  $\text{L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ,运行周期为 14 d. 由此可见,当

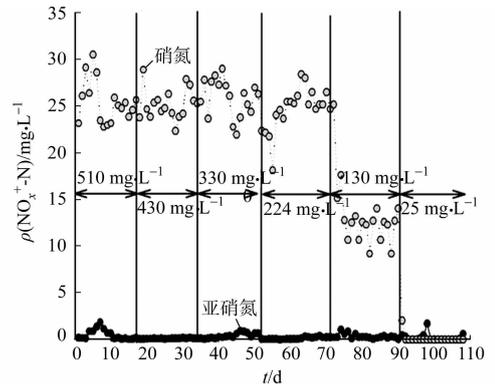


图 6 出水  $\text{NO}_x\text{-N}$  质量浓度的变化  
Fig. 6  $\text{NO}_x\text{-N}$  concentration variation of effluent

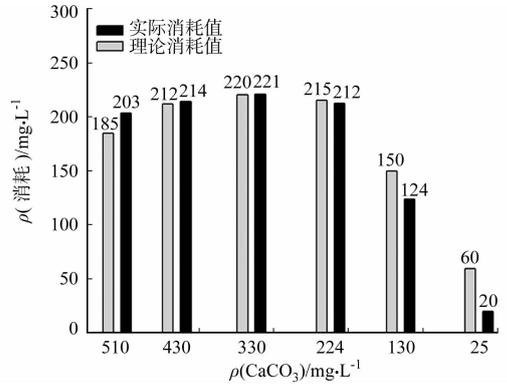


图 8 碱度的实际和理论消耗的变化  
Fig. 8 Variation of alkalinity in the actual and theoretic consumption

进水的碱度不足时,DMBR 的反冲洗周期减小.从图 9 中也可知:反冲洗后膜通量没有降低,恢复率为 100%,这说明该滤布作为动态膜基材的膜通量恢复情况良好.

胞外聚合物(EPS)是在一定环境条件下由微生物,大部分是细菌,分泌于胞外的一些高分子聚合物. EPS 主要由多糖、蛋白质和 DNA 组成<sup>[16]</sup>,对膜污染产生影响的成分主要是多糖和蛋白质.文中考察碱度对 EPS 质量浓度的变化情况,主要通过单位污泥浓度中所含蛋白质和多糖的质量浓度来表征, EPS 质量浓度等于蛋白质和多糖质量浓度之和.刘阳等<sup>[17]</sup>研究发现,随着溶解性 EPS 浓度的增加,膜污染阻力随之增大.

不同碱度下,反应器中 EPS 的质量比  $w(\text{EPS})$  随时间变化,如图 10 所示.由图 10 可以看出:多糖的质量比大于蛋白质的质量比.因此,多糖是 EPS 的主要成分.当碱度为  $130\sim 510\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, EPS 质量比从  $10\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  增至  $38\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ;当碱度为  $25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, EPS 质量比又降至  $35\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  左右.随着进水碱度的下降,DMBR 中的混合液 pH 值也随之下降, pH 值的下降导致混合液中的 EPS 增加.朱哲等<sup>[18]</sup>研究表明,在酸性条件下产生的 EPS 远大于中性和偏碱性条件.

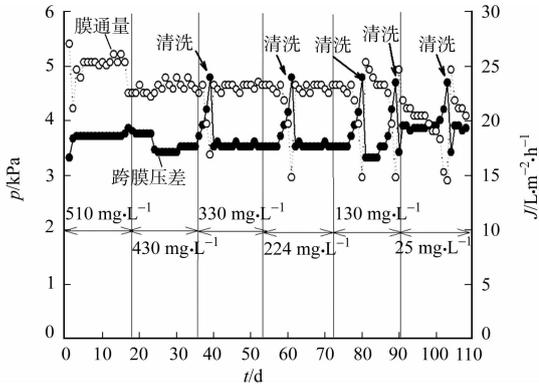


图 9 过滤压差和膜通量变化

Fig. 9 Variation of transmembrane pressure and membrane permeate flux

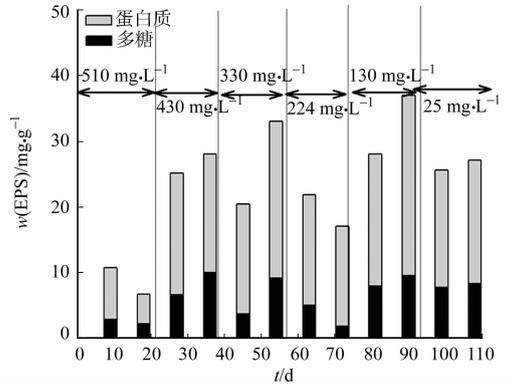


图 10 胞外聚合物的变化情况

Fig. 10 Variation of extracellular polymeric substances concentration

总之,当进水的碱度充足的条件下,反应器中的 EPS 质量浓度较小,动态膜污染较轻,DMBR 反应器运行时间较长,最长运行周期可达到 39 d.随着进水碱度的降低,出现碱度不足时,反应器中的 EPS 显著增加,引起膜污染加剧,导致动态膜组件运行周期下降.

### 3 结论

1) 碱度变化对动态膜生物反应器的  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  去除影响不大,去除率超过 90%.进水碱度在  $330\sim 510\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,碱度充足,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  去除率达到 98%, pH 值基本稳定;当碱度低于  $224\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,反应器出现碱度不足的情况,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除率下降.

2) 当进水的碱度充足的条件下,反应器中的 EPS 质量浓度较小,DMBR 反应器运行周期可达到 39 d.当碱度不足时,反应器中的 EPS 显著增加,导致动态膜组件运行周期下降到 10 d,反冲洗后动态膜通量恢复率为 100%.

### 参考文献:

- [1] OSKAR M, KENSUKE F, KORNEEL R, et al. Redistribution of wastewater alkalinity with a microbial fuel cell to support nitrification of reject water[J]. *Water Research*, 2011, 45(8): 2691-2699.
- [2] HOU Bao-lin, HAN Hong-jun, JIA Sheng-yong, et al. Effect of alkalinity on nitrite accumulation in treatment of coal chemical industry wastewater using moving bed biofilm reactor[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, 26(5): 1014-1022.
- [3] 陈丽丽, 刘宏远. 膜生物反应器在中国的研究进展[J]. *山西建筑*, 2010, 36(18): 164-165.
- [4] 洪俊明, 尹娟. 颗粒活性炭对膜生物反应器脱氮性能的影响[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(1): 75-80.
- [5] 卢芳芳, 洪俊明, 尹娟, 等. 盐度对 DMBR 处理养殖废水脱氮效能的影响[J]. *华侨大学学报: 自然科学版*, 2012, 33

(3):300-303.

- [6] 张建,邱宪锋,高宝玉,等. 动态膜生物反应器中动态膜的作用和结构研究[J]. 环境科学,2007,28(1):147-151.
- [7] 杨志水,姜斌. 城镇生活污水中氨氮的去除研究[J]. 环境工程,2010,28(S1):147-149,156.
- [8] 张海丰,孙宝盛,王亮,等. 贫营养条件下膜生物反应器污泥混合液可滤性分析[J]. 中国环境科学,2009,29(4):368-373.
- [9] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. Analytical Biochemistry,1976,72(1/2):248-254.
- [10] DUBOIS M,GILLES K A,HAMILTON J K, et al. Calorimetric method of determination of sugars and related substances[J]. Analytical Biochemistry,1951,28(3):350-356.
- [11] YANG Li,LAI Ching-ting,SHIEH W K. Biodegradation of dispersed diesel-fuel under high salinity condition[J]. Water Research,2000,34(13):3303-3314.
- [12] 丁国际,刘德永,郑广宏,等. 新型一体化工工艺处理生活污水的影响因素研究[J]. 中北大学学报:自然科学版,2012,33(4):443-452.
- [13] 玄婉茹,单明军,郑春芳,等. pH值和碱度对生物硝化的影响[J]. 染料与化工,2012,43(3):36-38.
- [14] 张自杰. 排水工程[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2000:309-311.
- [15] 陈英文,赵冰怡,刘明庆,等. 碱度指示 MBR 中同步硝化反硝化的研究[J]. 环境工程学报,2010,4(2):273-277.
- [16] ZHANG Bin,SUN Bao-sheng,JIN Min, et al. Extraction and analysis of extracellular polymeric substances in membrane fouling in submerged MBR[J]. Desalination,2008,227(1/2/3):286-294.
- [17] 刘阳,张捍民,杨凤林. 活性污泥中微生物胞外聚合物(EPS)影响膜污染机理研究[J]. 高校化学工程学报,2008,22(2):332-338.
- [18] 朱哲,李涛,王东升,等. pH对活性污泥表面特性和形态结构的影响[J]. 环境工程学报,2008,2(12):1599-1604.

## Effect of Influent Alkalinity on the Treatment Characteristic of Dynamic Membrane Bioreactor

HU Miao-miao<sup>1</sup>, HONG Jun-ming<sup>1</sup>, LI Shang-hui<sup>1</sup>,  
DAI Lan-hua<sup>2,3</sup>, CHEN Xiang-qiang<sup>3</sup>, XIE Xiao-qing<sup>3</sup>

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

2. Xiamen Drainage Monitoring Station, Xiamen 361005, China;

3. General Water of Xiamen Sewage Company Limited, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** Dynamic membrane bioreactor (DMBR) was used to treat domestic sewage. The effect of the influent alkalinity concentration on the DMBR treatment results was investigated, and the parameters of the reactor were tested at the same time. The results showed that, when alkalinity was  $25-510 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , there was little effect on the  $\text{COD}_C$  of the effluent, and the removal efficiency reached 92.46%. When the alkalinity was sufficient, which was  $224-510 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , the ammonia nitrogen removal rate was over 98%; while the alkalinity was insufficient, the ammonia nitrogen removal rate decreased and the effect of pH on the influent of DMBR was lagged behind the alkalinity. When the alkalinity was  $330-510 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , the flux of the dynamic membrane could reach  $23 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  with the cycle of operation about 39 d, and the recovery of the membrane flux was 100%. The extracellular polymeric substances increased with the decrease of the influent alkalinity, which made the inverses washing cycle shorten and the membrane pollution severe. The inverses washing cycle reduced to 10 d when the alkalinity of influent was  $130 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

**Keywords:** dynamic membrane bioreactor; alkalinity; membrane pollution; nitrifying process

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:刘源岗)

# 羧基功能化超顺磁性纳米粒子 吸附牛血清蛋白的特性

吴志超, 陈国, 苏鹏飞

(华侨大学 化工学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 以牛血清白蛋白(BSA)为目标蛋白,考察时间、BSA 质量浓度、pH 值、温度等条件对磁性纳米粒子吸附 BSA 的影响,并对吸附有 BSA 的磁性纳米粒子的解吸附情况进行研究.结果表明:在 25~45 °C 内,温度几乎不影响吸附过程;pH 值为 4.0~4.5 达最大吸附量,该吸附过程满足准一级动力学方程和 Freundlich 等温吸附模型; $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  对其有较强的脱附作用,但粒子与 BSA 之间不是简单的物理相互作用,而是静电相互作用,导致其脱附水平依然较低,仅为 20.06%.

**关键词:** 羧基磁性纳米粒子;牛血清蛋白;吸附;蛋白固定化;动力学

**中图分类号:** O 647

**文献标志码:** A

磁性纳米材料具有较大的比表面积、较好的生物相容性、易分离、具靶向作用、低成本等优点,日益受到科学界的关注<sup>[1-3]</sup>.目前,磁性纳米粒子已逐步应用于污水处理、酶、细胞等生物催化剂的固定化、药物的定向运输、核磁成像等领域<sup>[4-9]</sup>.裸露的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米粒子表面基团较少<sup>[10]</sup>,在固定化酶、细胞等物质时,只能通过简单的物理吸附,存在吸附量较低、吸附力弱的缺点,不能满足实际应用.对其表面进行修饰,通过表面基团改善粒子表面的带电荷疏水特性,能更好地满足固定化蛋白及酶等物质的需要<sup>[10-11]</sup>.表面包裹特殊功能的物质是较常见的磁性纳米粒子修饰方法<sup>[8]</sup>,许多学者对其进行了深入的研究<sup>[12-16]</sup>.然而,当前对表面含羧基的超顺磁性纳米粒子吸附牛血清白蛋白(BSA)的特性研究较少.本实验室通过化学共沉淀法制得  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  粒子,再将其用油酸包裹、 $\text{KMnO}_4$  氧化,制得表面包裹有壬二酸的新型羧基磁性纳米粒子,粒径为 10 nm 左右,在水中具有很好的分散性能,表面分布有较多的羧基功能基团,在水中电离后表面带负电,可跟生物大分子,如蛋白质表面的带正电氨基发生静电相互作用<sup>[17-18]</sup>,进一步研究其吸附性能对它的应用显得尤为重要.BSA 作为一种重要的模式蛋白,在科学研究方面起到重要的作用<sup>[19]</sup>.研究羧基磁性纳米粒子吸附 BSA 的性能,对其作为蛋白药物靶向载体、固定化酶载体和固定化细胞的研究均具有重要的指导意义.本文对实验室最新制得的新型羧基功能化磁性纳米粒子吸附和解吸附牛血清白蛋白的特性进行研究.

## 1 实验部分

### 1.1 材料与仪器

1) 实验材料:羧基磁性纳米粒子(实验室自制,粒径为  $(10 \pm 1)$  nm,羧基为  $(600 \pm 50) \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ ,等电点  $\text{PI}=4.3$ );氯化钠( $\text{NaCl}$ )、磷酸二氢钾( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )、磷酸氢二钾( $\text{K}_2\text{HPO}_4$ )、磷酸( $\text{H}_3\text{PO}_4$ )、工业酒精(质量分数为 95%,广东省汕头市西陇化工有限公司);考马斯亮蓝、牛血清蛋白(分析纯,上海国药集团化学试剂有限公司).

**收稿日期:** 2014-09-23

**通信作者:** 陈国(1978-),男,副教授,博士,主要从事生化反应工程和生化分离工程的研究. E-mail: chenguo@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(20906035);华侨大学中青年教师科研提升资助计划项目(ZQN-PY109)

2) 实验仪器:KQ3200DB型数控超声波清洗器(江苏省昆山市超声仪器有限公司);MODEL828型pH计(美国奥立龙有限公司);WFZ2800-D3B型紫外可见分光光度计(北京瑞利分析仪器公司);8400S型傅里叶红外变换仪(日本岛津仪器公司);DTG-60H型热重分析仪(日本岛津仪器公司)。

## 1.2 实验方法

考察时间、BSA初始质量浓度、pH值、温度对磁性纳米粒子吸附BSA的影响。

1.2.1 时间 取1.5 mL磁流体( $40\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ )加入1.5 mL的NaCl溶液( $90\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ )中,在超声波清洗仪振荡( $40\text{ kHz}$ , $120\text{ W}$ )的条件下,加入3 mL BSA溶液( $2\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ )。在温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,转速为 $150\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的条件下进行吸附实验,分别于2,4,8,16,24,32,40 h取样,检测其BSA的吸附量。

1.2.2 BSA初始质量浓度 取6组1.5 mL磁流体( $40\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ )加入1.5 mL的NaCl溶液( $90\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ )中,在超声波清洗仪振荡( $40\text{ kHz}$ , $120\text{ W}$ )的条件下,加入3 mL质量浓度分别为0.5,1.0,2.0,3.0,4.0,5.0  $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的BSA溶液,在温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,转速为 $150\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下,作用4 h,取样检测其BSA的吸附量。

1.2.3 pH值 配制6组1.5 mL磁流体( $40\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ ),依次加入pH值分别为3.0,3.6,4.2,4.8,5.4,6.0的1.5 mL醋酸盐缓冲液( $0.2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ),超声波清洗仪振荡( $40\text{ kHz}$ , $120\text{ W}$ )的条件下各加入3 mL BSA溶液( $4\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ ),在温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,转速为 $150\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的条件下,作用4 h,检测其BSA的吸附量。

1.2.4 温度 取1.5 mL磁流体( $40\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ )和1.5 mL醋酸盐缓冲液(pH值为4.2,浓度为 $0.2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )混合,超声分散后加入3 mL BSA溶液( $4\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ ),在温度分别为0,25,30,37,45  $^{\circ}\text{C}$ ,转速为 $150\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的条件下,作用4 h,取1 mL反应液磁分离,检测其BSA的吸附量。

## 1.3 解吸附的方法

取磁流体( $40\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ )与醋酸盐缓冲液(pH值为4.2, $0.2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )各5 mL混合,超声分散后,加入10 mL BSA溶液( $4\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ ),在温度为 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,转速为 $150\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的条件下振荡4 h,测上清液中BSA的质量浓度,计算BSA的吸附量。向离心管中加入2 mL NaCl溶液( $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ),振荡2 min,静置10 min后,磁分离,测上清液中BSA的质量浓度。分别使用 $0.2,0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的磷酸二氢钠溶液代替2 mL浓度为 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的NaCl,重复以上实验。

## 1.4 分析方法

1.4.1 BSA质量浓度的测量方法 用去离子水准确配制 $1\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的BSA溶液,分别稀释至20,40,60,80,100,120  $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ ,各取1 mL不同质量浓度的BSA溶液,加入5 mL考马斯亮蓝溶液,漩涡振荡器振荡20 s,静置5 min后,在波长595 nm处,用722型可见光分光光度计测其吸光度值,拟合BSA标准曲线。用考马斯亮蓝法检测BSA的溶液质量浓度。

1.4.2 粒子的红外分析方法 采用KBr压片法对磁性纳米粒子进行红外分析,取一定量干燥的KBr晶体,在玛瑙研钵中研磨成很细的粉末,再加入少量干燥过的样品,继续研磨均匀,然后压片,用Shimadzu 8400S型傅里叶红外变换仪扫描。

1.4.3 粒子的热重分析方法 分别准确称取1 mg干燥过的,吸附有BSA的羧基功能化 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 磁性纳米粒子与羧基磁性纳米粒子样品, $\text{N}_2$ 氛围下,以 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的加热速度,加热至 $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

# 2 结果与讨论

## 2.1 磁性纳米粒子吸附BSA的分析

2.1.1 红外分析 为了验证羧基磁性纳米粒子能与BSA之间发生相互作用,分别对BSA(a)、羧基磁性纳米粒子(b)、吸附BSA的羧基磁性纳米粒子(c)进行红外光谱分析,结果如图1所示。由图1可知:b,c红外波谱图在 $579\text{ cm}^{-1}$ 均有明显的吸收峰,此为 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 的特征峰。 $3480\text{ cm}^{-1}$ 的强宽峰是—OH的伸缩振动峰, $1624\text{ cm}^{-1}$ 是C=O的吸收峰,这些峰在b和c上均出现,表明b,c均有羧基功能化的 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 核。在a,c中,在 $1412,1126,893\text{ cm}^{-1}$ 附近固定有相似峰,表明BSA已被吸附到羧基磁性纳米粒子表面。

2.1.2 热重分析 进一步研究羧基磁性纳米粒子表面吸附 BSA 的情况, 分别对羧基磁性纳米粒子 (a)、BSA-磁性纳米粒子 (b) 进行热重分析, 结果如图 2 所示. 由图 2 可知: 吸附 BSA 之后的磁性纳米粒子有明显的 4 个峰. 其中: 0~200 °C 失去质量的峰主要是由粒子表层水和分子内的结合水的失去引起的; 200~300 °C 失去的质量主要是由物理吸附的 BSA 引起的; 300~490 °C 失去的质量是共价结合的 BSA 的受热分解造成的; 500~750 °C 失去的质量是由内层的壬二酸的分解引起的; 800 °C 之后粒子质量略有增加, 是由于热重分析使用的 N<sub>2</sub> 的纯度不太高, 仍含有少量 O<sub>2</sub>, 高温下将 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 进一步氧化成 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 而引起的.

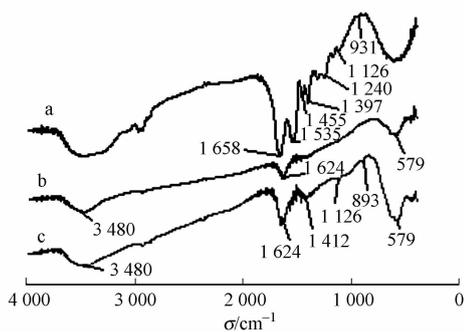


图 1 几种物质红外光谱

Fig. 1 FT-IR spectra of several kinds of materials

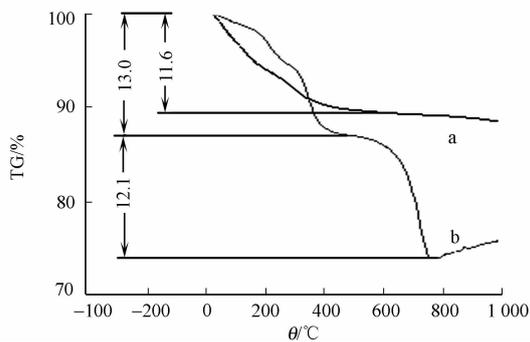


图 2 磁性纳米粒子的 TG 曲线

Fig. 2 TG curves of carboxyl-functionalized and immobilized BSA magnetic nanoparticles

通过比较发现: 羧基功能化磁性纳米粒子总计失去的质量为 11.6%, 而固定 BSA 的磁性纳米粒子其壬二酸失去的质量为 12.1%, 这与羧基磁性纳米粒子上的壬二酸含量基本吻合. 磁性纳米粒子吸附蛋白的量约为其总质量的 13%, 这与下文测定的 BSA 的吸附量基本上相符.

## 2.2 不同条件对磁性纳米粒子吸附 BSA 的影响

2.2.1 时间 时间 (*t*) 对磁性纳米粒子吸附 BSA 过程的影响, 如图 3 所示. 由图 3 可知: 在前 10 min, BSA 吸附量 (*Q*) 迅速增加, 10 min 后基本达到平衡, 之后在 40 mg · g<sup>-1</sup> 磁性纳米粒子上上下波动, 表明磁性纳米粒子吸附 BSA 是个快速的过程. 这是因为 BSA 表面分布有大量的 Lys, Arg, His 等碱性氨基酸残基, 侧链上的氨基与磁性纳米粒子表面的羧基产生静电相互作用. 由于磁性纳米粒子粒径小, 表面无小孔存在, 可迅速完成界面吸附. 因此, 达到吸附平衡时间较短. 该吸附过程满足 Lagergren 一级吸附动力学方程. 经拟合得吸附动力学方程, 即  $Q = -41.045 \cdot \exp(-t/1.414) + 40.84$ . 式中: *Q* 为吸附容量, mg · g<sup>-1</sup>; *t* 为吸附时间, s.

2.2.2 BSA 初始质量浓度 BSA 质量浓度 ( $\rho$ ) 对磁性纳米粒子吸附 BSA 过程的影响, 如图 4 所示. 由图 4 可知: 随着 BSA 初始质量浓度的增加, 吸附量 (*Q*) 迅速增加. 磁性纳米粒子表面的羧基可视为活性吸附位点, BSA 在溶液中的质量浓度和磁性纳米粒子表面的质量浓度差是推动 BSA 纳米粒子表面运动的动力. 在 BSA 初始质量浓度较低时, 若溶液与磁性纳米粒子表面的 BSA 质量质量浓度达到平衡,

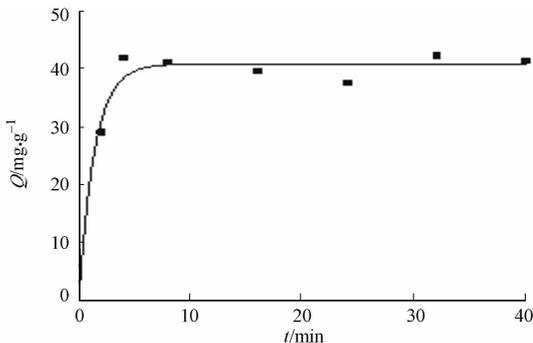


图 3 时间对磁性纳米粒子吸附 BSA 的影响

Fig. 3 Magnetic nanoparticles adsorption of BSA effected by time

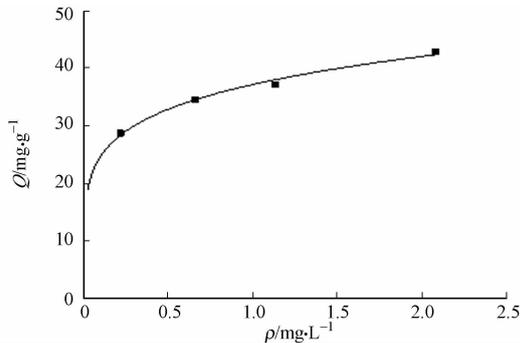


图 4 BSA 浓度对磁性纳米粒子吸附 BSA 的影响

Fig. 4 Magnetic nanoparticles adsorption of BSA effected by BSA concentration

无论表面是否还剩余羧基位点,吸附都将停止.随着BSA质量浓度的增加,磁性纳米粒子表面羧基位点都与BSA作用,当BSA质量浓度达到一定值时,即使继续增大溶液中BSA质量浓度,吸附量也不再增大.该等温吸附过程可由Freundlich吸附方程描述,即 $Q=kc^{1/n}$ .式中: $Q$ 为吸附容量, $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ;  $k$ 为常数,与吸附相互作用、吸附量有关; $c$ 为蛋白质质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ ;  $1/n$ 为常数,反应吸附作用的强度.

经拟合可得 $Q=36.846c^{0.178}$ .  $1/n$ 的数值一般为 $0\sim 1$ ,其数值大小表示质量浓度对吸附量影响的强弱.  $1/n$ 越小,吸附性能越好.当 $1/n$ 为 $0.1\sim 0.5$ 时,易于吸附.实验拟合得到的 $1/n$ 数值为 $0.178$ ,说明磁性纳米粒子对BSA的吸附能力很强.

**2.2.3 pH值** pH值是影响磁性纳米粒子吸附BSA过程的一个重要的因素,它不仅在很大程度上决定了磁性纳米粒子的分散稳定性,也决定了吸附体系中吸附质与吸附剂的表面电荷分布,进而对吸附过程造成巨大的影响. pH值对磁性纳米粒子吸附BSA的影响,如图5所示.由图5可知:随着pH值的增加,BSA吸附量( $Q$ )先增大后减小,呈钟形变化,且吸附量变化明显.因为在缓冲液的吸附体系中,磁性纳米粒子和BSA带电情况由pH值决定.BSA的等电点约为 $4.9$ ,当pH值低于 $4.9$ 时,BSA带正电.磁性纳米粒子等电点约为 $4.3^{[17]}$ ,当pH值高于 $4.3$ 时,BSA带负电.由此可以推断,其吸附量最大时的pH值为 $4.3\sim 4.9$ .由图5还可知:当pH值大于 $4.9$ 时,BSA的吸附量迅速减少,这是由于pH值大于 $4.9$ 时,羧基磁性纳米粒子与BSA带同种电荷相互排斥;在pH值低于 $4.0$ 时,BSA的吸附量迅速减小,这是由于pH值低于 $4.0$ 时,粒子与BSA均带正电,且pH值越小,带电量越大,斥力也越大.

**2.2.4 温度** 当温度( $\theta$ )分别为 $25, 30, 37, 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,磁性纳米粒子吸附BSA的情况,如图6所示.由图6可知:温度为 $25\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,其对磁性纳米粒子吸附BSA的影响不大.这是由于羧基磁性纳米粒子吸附BSA不是简单的物理吸附,而是通过静电吸附.这种吸附力较大,完全可以忽略分子热运动对吸附过程的影响.但是,在实际应用中温度可能会对BSA的活性造成影响.因此,在吸附的过程中,应尽量选择较低的温度<sup>[20]</sup>.与此同时,此温度为大多数酶类的最佳催化的温度区间,说明本粒子适合作为大多数酶类的固定化载体.

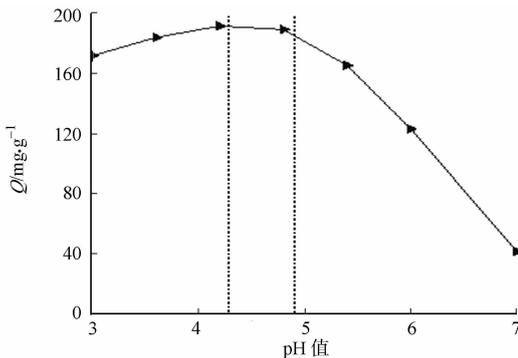


图5 pH值对磁性纳米粒子吸附BSA的影响

Fig. 5 Magnetic nanoparticles adsorption of BSA effected by pH value

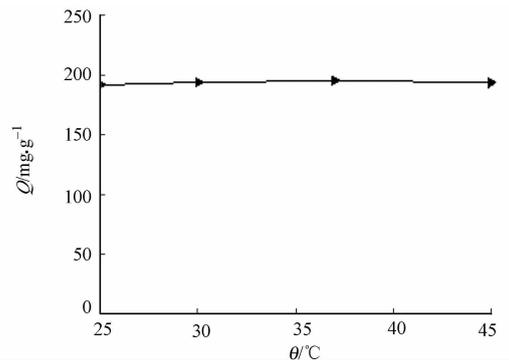


图6 温度对磁性纳米粒子吸附BSA的影响

Fig. 6 Magnetic nanoparticles adsorption of BSA effected by temperature

## 2.3 解吸附的研究

在不同解吸液中,BSA的磁性纳米粒子解吸 $1\sim 3$ 次的情况,如表1所示.解析率( $\eta$ )定义为解析下来的蛋白占吸附蛋白总量的百分率.由表1可知:

NaCl溶液对BSA的解吸附能力比较弱,而 $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ 对BSA的洗脱效果较明显,这是因为BSA被洗脱下来的主要作用力是洗脱溶液的离子强度.离子强度会压缩带电颗粒表面的双电层,降低粒子表面的Zeta电位,从而降低粒子之间的静电相互作用,使BSA和磁性纳米粒子发生分离.而溶液的离子强度的大小除了跟溶液的浓度有关外,还跟溶质电离后形成的离子的价态有关.相同浓度下,NaCl溶液的离子强度远远小于 $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ 溶液的离子强度.同时, $\text{PO}_4^{3-}$ 为负3价,大于 $\text{Cl}^-$ 的负1

表1 不同盐对BSA解吸附

Tab. 1 Desorption of BSA by different salts

解吸液	$\eta/\%$		
	1次	2次	3次
NaCl( $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )	0.12	0.47	0.68
$\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ( $0.2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )	7.71	15.17	17.69
$\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ( $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )	8.85	15.28	20.06

下,NaCl溶液的离子强度远远小于 $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ 溶液的离子强度.同时, $\text{PO}_4^{3-}$ 为负3价,大于 $\text{Cl}^-$ 的负1

价.随着解吸附次数的增加,BSA的解析量明显增加.但是,随着解吸附次数的增加,其解析量增加的大小会逐渐降低<sup>[18,21]</sup>.这说明磁性纳米粒子与BSA的结合是比较牢固的,不易受外界影响,以后用于酶固定化的稳定性较为优良,有利于固定化酶的多次回收利用.

## 2.4 磁性纳米粒子与 BSA 相互作用

BSA与羧基表面功能化的磁性纳米粒子之间主要是静电相互作用.BSA由607个氨基酸组成,其中,碱性氨基酸有赖氨酸、精氨酸、组氨酸,等电点较高,在中性条件下带较多正电荷.碱性氨基酸在BSA中的比例为17%,而酸性较强的谷氨酸与天冬氨酸所占的比例为16.3%.等电点在pH值为5~7附近的其他氨基酸所占比例为65.7%.同时,羧基超顺磁性纳米粒子的等电点约为4.3.在高于等电点的pH值条件下物质带负电,在低于等电点的pH值条件下,物质带正电.在中性条件下,碱性氨基酸带净正电荷,磁性纳米粒子带净负电荷,而其他氨基酸基本上也带负电,此时,只有3种碱性氨基酸与粒子发生静电相互作用,因此,吸附量较小.当pH值为4.2~4.9时,等电点为5~7附近的氨基酸也可与粒子发生相互作用,而大部分氨基酸等电点处于此处,因此,吸附量逐步增大.此外,pH值的变化导致BSA整体净电荷的变化对BSA与磁性纳米粒子的相互接近、BSA构象、BSA与颗粒结合时的取向,粒子的比表面积等也会对吸附过程产生影响.

## 3 结论

1)以BSA为目标蛋白,研究了新型羧基磁性纳米粒子对BSA的吸附情况,考察时间、BSA质量浓度、pH值、温度等条件对磁性纳米粒子吸附BSA的影响,并对吸附有BSA的磁性纳米粒子的解吸附情况进行了研究.

2)经红外和热重结果分析,磁性纳米粒子成功地将BSA吸附在其表面.磁性纳米粒子吸附BSA的最佳条件:BSA质量浓度为 $2\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ ;磁流体质量浓度为 $10\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ ;温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;pH值为4.0~4.5;吸附量最高可达 $190\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 左右.

3)磁性纳米粒子吸附BSA后,可被 $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ 部分洗脱下来,但不能被 $\text{NaCl}$ 洗脱下来,这进一步说明羧基功能化磁性纳米粒子与BSA的相互作用不是简单的物理吸附,而是包含有静电相互作用,这保证了此粒子固定化酶的稳定性,也保证了日后固定酶重复操作的稳定性,以及定向给药的药物缓释.

## 参考文献:

- [1] KODAMA R H. Magnetic nanoparticles[J]. J Magn Magn Mater,1999,200(1/2/3):359-372.
- [2] LAURENT S, FORGE D, PORT M, et al. Magnetic iron oxide nanoparticles: Synthesis, stabilization, vectorization, physicochemical characterizations, and biological applications[J]. Chemical Reviews,2008,108(6):2064-2110.
- [3] SUN Shou-heng, ZENG Hao, ROBINSON D B, et al. Monodisperse  $\text{MFe}_2\text{O}_4$  ( $\text{M}=\text{Fe}, \text{Co}, \text{Mn}$ ) nanoparticles[J]. J Am Chem Soc,2004,126(1):273-279.
- [4] BRIGGER I, DUBERNET C, COUVREUR P. Nanoparticles in cancer therapy and diagnosis[J]. Advanced Drug Delivery Reviews,2002,54(5):631-651.
- [5] GUPTA A K, GUPTA M. Synthesis and surface engineering of iron oxide nanoparticles for biomedical applications [J]. Biomaterials,2005,26(18):3995-4021.
- [6] LEE J H, HUH Y M, JUN Y, et al. Artificially engineered magnetic nanoparticles for ultra-sensitive molecular imaging[J]. Nat Med,2007,13(1):95-99.
- [7] LEWIN M, CARLESSO N, TUNG C H, et al. Tat peptide-derivatized magnetic nanoparticles allow in vivo tracking and recovery of progenitor cells[J]. Nat Biotechnol,2000,18(4):410-414.
- [8] LIU Jing-fu, ZHAO Zhong-shan, JIANG Gui-bin. Coating  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  magnetic nanoparticles with humic acid for high efficient removal of heavy metals in water[J]. Environmental Science and Technology,2008,42(18):6949-6954.
- [9] PANKHURST Q A, CONNOLLY J, JONES S K, et al. Applications of magnetic nanoparticles in biomedicine[J]. J Phys D: Appl Phys,2003,36(13):R167-R181.
- [10] LU An-hui, SALABAS E L, SCHUTH F. Magnetic nanoparticles; Synthesis, protection, functionalization, and application[J]. Angew Chem Int Ed Engl,2007,46(8):1222-1244.

- [11] XU Hua-jian. Magnetic Nanoparticles: Functionalization and application in biotechnology, biomedicine and organic reaction[J]. *Current Organic Chemistry*, 2013, 17(10): 1013-1013.
- [12] BREWER S H, GLOMM W R, JOHNSON M C, et al. Probing BSA binding to citrate-coated gold nanoparticles and surfaces[J]. *Langmuir*, 2005, 21(20): 9303-9307.
- [13] WANG Yu-jun, WANG Xiang-hua, LUO Guang-sheng, et al. Adsorption of bovine serum albumin (BSA) onto the magnetic chitosan nanoparticles prepared by a microemulsion system[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(9): 3881-3884.
- [14] RAVINDRAN A, SINGH A, RAICHUR A M, et al. Studies on interaction of colloidal Ag nanoparticles with bovine serum albumin (BSA)[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2010, 76(1): 32-37.
- [15] SWAIN S K, SARKAR D. Study of BSA protein adsorption/release on hydroxyapatite nanoparticles[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 286(1): 99-103.
- [16] WANG Zhou-lin, YUE Tian-li, YUAN Ya-hong, et al. Kinetics of adsorption of bovine serum albumin on magnetic carboxymethyl chitosan nanoparticles[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2013, 58: 57-65.
- [17] SU Peng-fei, CHEN Guo, ZHAO Jun. Convenient preparation and characterization of surface carboxyl-functionalized Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> magnetic nanoparticles[J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2011, 32(7): 1472-1477.
- [18] NORDE W, GIACOMELLI C E. BSA structural changes during homomolecular exchange between the adsorbed and the dissolved states[J]. *Journal of Biotechnology*, 2000, 79(3): 259-268.
- [19] VOICESCU M, IONESCU S, ANGELESCU D G. Spectroscopic and coarse-grained simulation studies of the BSA and HSA protein adsorption on silver nanoparticles[J]. *J Nanopart Res*, 2012, 14(10): 1-13.
- [20] BUJACZ A. Structures of bovine, equine and leporine serum albumin[J]. *Acta Crystallogr Sect D: Biol Crystallogr*, 2012, 68(10): 1278-1289.
- [21] NADDAF A A, TSIBRANSKA I, BART H J. Kinetics of BSA release from poly (N-isopropylacrylamide) hydrogels[J]. *Chem Eng Process*, 2010, 49(6): 581-588.

## Adsorption Properties of Bovine Serum Albumin on Carboxyl-Functioned Superparamagnetic Nanoparticle

WU Zhi-chao, CHEN Guo, SU Peng-fei

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

**Abstract:** Using bovine serum albumin (BSA) as the target protein, the effect of time, BSA concentration, pH, temperature on magnetic nanoparticles (MNP) of BSA was investigated, as well as the desorption of BSA from the MNP. The results showed that the temperature nearly had no effect on adsorption process when it was 25-45 °C. It reached the max adsorption amount when pH was 4.0-4.5, and the adsorption process fitted the quasi first order kinetic equation and Freundlich isotherm adsorption model. Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> had a strong effect on the desorption process, but the desorption rate was still low of only 20.06%. This is because it is not a simple physical interaction but the electrostatic interaction between the particle and BSA.

**Keywords:** carboxyl magnetic nanoparticles; bovine serum albumin; adsorption; protein immobilization; kinetics

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 刘源岗)

# 萘甲酰胺衍生物 TW918 的合成及体外活性考察

王立强, 雷春花, 邱飞, 杨会勇

(华侨大学 生物医学学院, 福建 泉州 362021)

**摘要:** 合成一系列萘甲酰胺衍生物,初步筛选出先导化合物 TW918,测定其对肿瘤细胞的活性影响,考察其与激酶分子 EGFR 的结合性及对 EGFR 蛋白表达的影响. TW918 结构经<sup>1</sup>H-NMR, <sup>13</sup>C-NMR 和 HR-MS 表征确证. 实验结果表明: TW918 对四种肿瘤细胞均有一定的抑制活性,但对正常细胞的影响较小;分子对接显示 TW918 能以母核喹啉为头,深入占据到 EGFR 的活性口袋中,并与活性残基形成氢键,其最低自由结合能为 -46.1 kJ·mol<sup>-1</sup>; TW918 能以剂量依赖性方式明显抑制四种肿瘤细胞中 EGFR 蛋白的表达.

**关键词:** 萘甲酰胺衍生物; 受体酪氨酸激酶; 抗肿瘤活性; 分子对接

**中图分类号:** R 916

**文献标志码:** A

随着分子医学和分子生物学的发展,抗癌药物的研究已从传统的、非特异的细胞毒药物向作用于多信号传导分子、多环节的选择性靶向抗癌药物发展<sup>[1-2]</sup>. 在各种分子靶点中,蛋白酪氨酸激酶是目前国际上抗肿瘤药物研发的热点<sup>[3]</sup>. 本课题组针对现有酪氨酸激酶抑制剂的空间结构特点<sup>[4-5]</sup>,整合计算机辅助药物设计手段,以及生物电子等排、骨架跨越原理设计合成了一系列结构新颖的活性喹啉类萘甲酰胺衍生物,以期发现具有更高抗癌活性、更低毒性和更高生物利用度的小分子靶向药物. 经前期体外活性验证及结构优化,从中筛选出候选化合物 TW918(a),化学名称为 N-(2-苯胺基)-6-(7-氯喹啉-4-酰氧基)-2-萘酰胺,分子式为 C<sub>26</sub>H<sub>18</sub>ClN<sub>3</sub>O<sub>2</sub>,相对分子质量为 439. 本文主要对 TW918 的合成方法、体外抗肿瘤活性、与 EGFR 蛋白的结合性及抑制作用进行研究.

## 1 实验部分

### 1.1 试剂和仪器

4,7-二氯喹啉、6-羟基-2-萘甲酸和邻苯二胺(百灵威科技有限公司);其他合成试剂(国药集团化学试剂公司);人小细胞肺癌 NCI-H446、人非小细胞肺癌 A549、人食管癌 Eca-109、人肝癌 HepG2、正常人脐静脉内皮细胞 HUVEC 和正常人胚肺成纤维细胞 MRC-5(上海中科院细胞库);正常人肝细胞 LO2 和正常人食管上皮细胞 HEEC(ATCC);RPMI-1640、MEM、F-12K 培养基、胎牛血清、胰蛋白酶(美国 Gibco 公司);二甲亚砜(DMSO)、四氮唑盐(MTT)(美国 Sigma 公司);兔抗人 EGFR 抗体、兔抗人 Actin 抗体、辣根过氧化物酶标记的羊抗兔二抗(美国 Abcam 公司);超敏 ECL 化学发光试剂盒(碧云天生物技术研究所);吉非替尼对照品(大连美仑生物技术有限公司);THF(四氢呋喃)和 DCM(二氯甲烷)经分子筛干燥后直接使用;其他溶剂未特别指出则未经处理.

TLC 硅胶板和柱层析硅胶(青岛海洋化工厂);96 孔细胞培养板(美国 Coring 公司);Q Exactive 型高分辨质谱仪(美国 Thermo 公司);AV400 型核磁共振(德国 Bruker 公司);WRR 熔点仪(上海精密科学仪器有限公司);CO<sub>2</sub> 培养箱(美国 Thermo 公司);Infinite M200 型多功能酶仪(瑞士 Tecan 公司);

**收稿日期:** 2015-02-09

**通信作者:** 王立强(1970-),男,教授,博士,主要从事药剂学和新药开发的研究. E-mail: wlq1599@163.com.

**基金项目:** 福建省自然科学基金资助项目(2010J01208);福建省泉州市科技计划重点项目(2013Z35)

HJ-4 型四联磁力搅拌机(江苏金坛市天竟实验仪器厂);BS224S 型电子天平(德国 Sartorius 公司);Forma-86 °C 超低温冰箱(美国 Thermo 公司);ChemiDoc XRS 型凝胶成像系统、Mini-PROTEAN Tetra C 型垂直板电泳和转膜装置(Bio-Rad 公司)。

## 1.2 TW918 的合成方法

目标化合物 TW918 的合成路线,如图 1 所示。

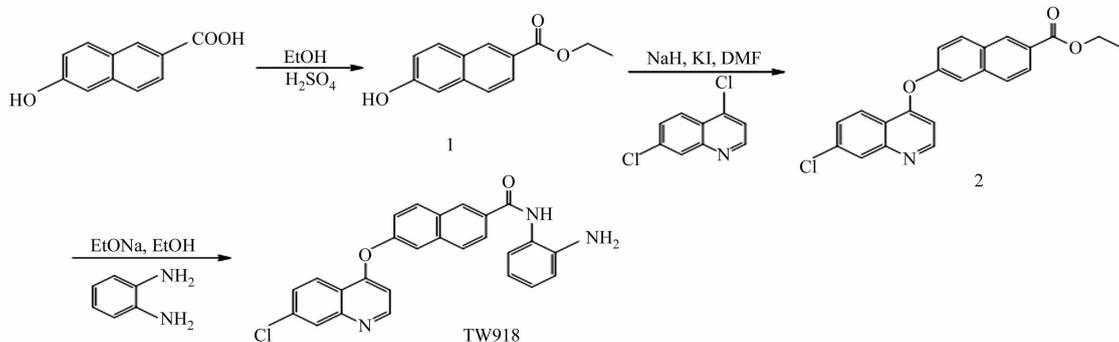


图 1 TW918 的合成路线

Fig. 1 Synthesis route of TW918

1.2.1 6-羟基-2-萘甲酸乙酯(1)的合成 称取 1.88 g(10 mmol)6-羟基-2-萘甲酸溶于 50 mL 无水乙醇,搅拌下加入 4 滴浓硫酸,78~85 °C 加热回流 4~5 h. TLC 监测反应结束后,将反应液冷却,减压除去溶剂,残留物用 10 mL 乙酸乙酯溶解. 饱和碳酸氢钠萃取 3 次,每次 10 mL,收集有机相加入无水硫酸钠静置干燥,30 min 后减压除去溶剂,得到棕色固体(1)1.99 g,产率为 92%. <sup>1</sup>H-NMR (400 MHz, DMSO), $\delta$  值:8.56(d,  $J=8.62$  Hz, 1H), 8.02(dd,  $J=8.61$  Hz, 1.88 Hz, 1H), 7.86(d,  $J=8.46$  Hz, 1H), 7.69(d,  $J=8.50$  Hz, 1H), 7.22(s, 1H), 7.19(dd,  $J=8.72$  Hz, 2.42 Hz, 1H), 6.11(s, 1H), 4.48(q,  $J=7.01$  Hz, 2H), 1.47(t,  $J=7.05$  Hz, 3H). <sup>13</sup>C-NMR (400 MHz, DMSO), $\delta$  值:17.56, 60.05, 125.02, 127.04, 127.13, 129.16, 130.42, 130.64, 131.62, 132.04, 138.39, 142.37, 163.72.

1.2.2 6-(7-氯喹啉-4-醚氧基)-2-萘甲酸乙酯(2)的合成 称取 2.16 g(10 mmol)6-羟基-2-萘甲酸乙酯溶于 50 mL N,N-二甲基甲酰胺(DMF). 冰浴搅拌下,缓慢滴加含有 0.48 g(20 mmol)氢氧化钠(NaH)的 DMF 溶液 5 mL,冰浴搅拌 30 min,撤去冰浴. 待温度恢复至室温,缓慢滴入含有 1.97 g(10 mmol)4,7-二氯喹啉以及 0.33 g(2 mmol)碘化钾(KI)的 DMF 溶液 10 mL,室温搅拌 30 min,110 °C 下反应 6~10 h. TLC 监测反应结束后,减压除去溶剂,加入 15 mL 甲醇超声溶解,重复洗涤 3 次,真空干燥,得白色固体(2)3.20 g,产率为 85%. <sup>1</sup>H-NMR (400 MHz, DMSO), $\delta$  值:8.76(d,  $J=9.02$  Hz, 1H), 8.73(dd,  $J=8.74$  Hz, 2.13 Hz, 1H), 8.36(d,  $J=8.54$  Hz, 1H), 8.14(d,  $J=8.62$  Hz, 1H), 8.04(s, 1H), 7.92(dd,  $J=8.80$  Hz, 2.56 Hz, 1H), 7.73(d,  $J=7.04$  Hz, 1H), 7.62(dd,  $J=7.24$  Hz, 1.86 Hz, 1H), 6.82(s, 1H), 8.06(d,  $J=7.80$  Hz, 1H), 6.84(d,  $J=8.54$  Hz, 1H), 4.40(q,  $J=7.14$  Hz, 2H), 1.39(t,  $J=7.21$  Hz, 3H). <sup>13</sup>C-NMR (400 MHz, DMSO), $\delta$  值:18.72, 60.63, 109.24, 116.07, 119.68, 122.50, 124.21, 126.47, 126.65, 127.73, 128.74, 128.90, 130.24, 131.18, 132.41, 135.61, 139.76, 140.83, 151.02, 156.20, 161.08, 164.46.

1.2.3 N-(2-苯胺基)-6-(7-氯喹啉-4-醚氧基)-2-萘甲酰胺(TW918)的合成 称取 6-(7-氯代喹啉-4-醚氧基)-2-萘甲酸乙酯 3.78 g(10 mmol)溶于 10 mL 乙醇. 冰浴搅拌下,缓慢滴加含有 1.56 g(20 mmol)乙醇钠(NaOEt)的乙醇溶液 5 mL,冰浴搅拌 30 min,撤去冰浴. 待温度恢复至室温,缓慢滴入含有 1.08 g(10 mmol)邻苯二胺的乙醇溶液 10 mL,搅拌 30 min,78~85 °C 下反应 6~10 h. TLC 监测反应完全后,将反应液用饱和碳酸氢钠和食盐水分别萃取 3 次,每次 15 mL. 收集有机相无水硫酸钠干燥 30 min,减压除去溶剂,再将固体与适量硅胶搅拌均匀,以体积比为 3:1 的石油醚:乙酸乙酯为洗脱剂进行硅胶柱层析分离得到白色固体(TW918)3.70 g,产率为 83%,熔点为 165.7~166.4 °C. <sup>1</sup>H-NMR (400 MHz, DMSO), $\delta$  值:9.88(s, 1H), 8.76(d,  $J=5.27$  Hz, 1H), 8.46(d,  $J=9.29$  Hz, 1H), 8.42(d,  $J=9.03$  Hz, 1H), 8.14(d,  $J=2.01$  Hz, 1H), 8.10(d,  $J=8.28$  Hz, 1H), 7.97(d,  $J=2.50$  Hz, 1H), 7.91

(d,  $J=6.78$  Hz, 1H), 7.73(dd,  $J=9.03$  Hz, 2.26 Hz, 1H), 7.68(t,  $J=15.31$  Hz, 8.03 Hz, 1H), 7.62(dd,  $J=2.51$  Hz, 9.29 Hz, 1H), 7.37(brt,  $J=8.03$  Hz, 6.78 Hz, 1H), 7.01(t,  $J=13.80$  Hz, 6.53 Hz, 1H), 6.83(d,  $J=9.03$  Hz, 1H), 6.77(d,  $J=5.27$  Hz, 1H), 6.65(t,  $J=14.81$  Hz, 7.78 Hz, 1H), 5.00(s, 2H).  $^{13}\text{C-NMR}$  (400 MHz, DMSO),  $\delta$  值: 110.88, 113.01, 116.20, 116.40, 121.11, 121.43, 121.82, 121.96, 124.09, 124.65, 125.25, 125.64, 125.97, 127.30, 128.50, 128.78, 133.27, 134.23, 134.62, 136.63, 141.52, 142.99, 151.27, 156.41, 157.04, 163.29. HR-MS (+),  $m/z$  为 440.884 6 ( $[\text{M}+\text{H}]^+$ ,  $\text{C}_{26}\text{H}_{18}\text{ClN}_3\text{O}_2\text{H}^+$  calcd: 440.884 9).

### 1.3 细胞培养

NCI-H446, Eca-109, LO2 和 HEEC 细胞单层接种于含 10% 胎牛血清的 RPMI-1640 培养基; HepG2 和 MRC-5 细胞单层接种于含 10% 胎牛血清的 MEM 培养基; A549 和 HUVEC 细胞单层接种于含 10% 胎牛血清的 F-12K 培养基中, 分别置于 37 °C, 5% 二氧化碳培养箱中培养.

### 1.4 MTT 法测定 TW918 对肿瘤细胞的抑制活性

取对数生长期的 NCI-H446, A549, Eca-109, HepG2, HUVEC, LO2, MRC-5 和 HEEC 细胞用体积浓度为 0.25% 的胰酶消化, 制成  $1 \times 10^4$   $\text{mL}^{-1}$  悬液接种于 96 孔培养板中, 每孔 100  $\mu\text{L}$ . 细胞完全贴壁后, 分别给予不同浓度的 TW918, 每组 3 个复孔, 阳性对照组为吉非替尼(Gefinitib), 阴性对照组为 DMSO. 分别孵育 72 h 后, 每孔加入 5  $\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$  的 MTT 20  $\mu\text{L}$ , 继续培养 4 h, 吸弃培养液, 加入 150  $\mu\text{L}$  DMSO, 振荡 10 min 使结晶物充分溶解, 用酶标仪在 570 nm 处测定各孔的吸光值, 采用 SPSS 17.0 软件计算半数抑制浓度 ( $\text{IC}_{50}$ ). 重复测试 3 次, 取平均值为最终结果.

### 1.5 分子对接软件考察 TW918 与受体激酶 EGFR 的亲合力

运用 AutoDock 4.2.5 软件将 TW918 与受体激酶 EGFR 进行分子对接, 计算 TW918 与 EGFR (PDB ID: 4HJO) 靶蛋白的自由结合能, 模拟在自由结合能最低的情况下化合物与 EGFR 蛋白结合的空间构象, 探讨其与受体间的亲合力, 确定活性腔内与配体结合的关键残基<sup>[8]</sup>.

### 1.6 Western Blot 检测受体激酶 EGFR 蛋白的表达

将 NCI-H446, A549, Eca-109 和 HepG-2 细胞以  $5 \times 10^5$  个  $\cdot$  孔 $^{-1}$  的密度接种于 96 孔板中. 细胞完全贴壁后, 分别给予不同浓度的化合物 (2, 4, 8  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 TW918, DMSO 含量为 0.1%), 阴性对照组给予同体积的 DMSO. 给药 48 h 后吸弃培养基, 用预冷的  $1 \times \text{PBS}$  洗涤细胞 2 次, 每孔加入 150  $\mu\text{L}$  Western 及 IP 细胞裂解液, 冰浴裂解 30 min,  $1\ 000$   $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$  离心 5 min, 收集上清液, 以 12% SDS-PAGE 凝胶电泳分离蛋白质. 电泳后, 将蛋白转印至 PVDF 膜上, 5% 脱脂奶粉封闭后, 一抗 4 °C 封闭过夜, 再以辣根过氧化物酶标记的二抗室温封闭 2 h, ECL 显色液显色 1~2 min, 转移到荧光成像仪内曝光、检测, 实验重复 3 次.

## 2 结果与讨论

### 2.1 TW918 的合成

合成的小分子化合物 TW918 是一种新的喹啉类萘甲酰胺衍生物. 合成反应中, 首先利用无水乙醇保护 6-羟基-2-萘甲酸的羧酸基团; 然后, 将其与 4,7-二氯喹啉进行亲核取代, 再胺解得到 TW918, 其产率为 64.9%. 此法操作简便, 原料便宜易得, 反应效率高, 易于进行工业化生产.

### 2.2 TW918 的体外抗肿瘤活性

采用四氮唑盐 (MTT)<sup>[6]</sup> 还原法, 选择人小细胞肺癌 NCI-H446, 非小细胞肺癌 A549, 食管癌 Eca-109 和肝癌 HepG2 四种肿瘤细胞模型, 以吉非替尼为阳性对照, 对合成的目标化合物进行体外抗肿瘤活性评价, 并以人正常脐静脉内皮细胞 HUVEC、肝细胞 LO2、胚肺成纤维细胞 MRC-5 和食管上皮细胞 HEEC 考察化合物的体外毒性, 结果如表 1 所示. 表 1 中:  $n=3$ ; 与吉非替尼比较, a 表示  $P < 0.01$ , b 表示  $P < 0.001$ .

由表 1 可知: TW918 对 NCI-H446, A549, Eca-109 和 HepG2 四种肿瘤细胞的抑制活性均高于吉非替尼; 其中, 对人非小细胞肺癌 A549 和人肝癌 HepG2 细胞的抑制作用较强, 表明化合物 TW918 可能具有潜在对肺癌、食管癌和肝癌的治疗作用. 但对 HUVEC, LO2, MRC-5 和 HEEC 四种正常细胞而言,

TW918 和吉非替尼对它们的抑制作用明显弱于对肿瘤细胞的作用,预示 TW918 相对较为安全.

表 1 TW918 对肿瘤细胞和正常细胞的体外抗增殖活性 ( $\bar{x} \pm s$ )

Tab. 1 Anti-proliferation activity of TW918 on tumor cells and normal cells *in vitro* ( $\bar{x} \pm s$ )

化合物	$IC_{50}/\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$							
	NCI-H446	A549	Eca-109	HepG2	HUVEC	LO2	MRC-5	HEEC
TW918	$0.88 \pm 0.74^a$	$0.18 \pm 0.57^a$	$1.04 \pm 0.90^b$	$0.39 \pm 0.28^b$	$107 \pm 4.86^b$	$69.1 \pm 2.91^b$	$74.6 \pm 1.86$	$110 \pm 0.86^b$
吉非替尼	$6.58 \pm 1.43$	$3.71 \pm 0.97$	$10.36 \pm 1.27$	$5.37 \pm 0.86$	$83.1 \pm 3.84$	$102 \pm 0.16$	$72.5 \pm 2.73$	$92.1 \pm 1.66$

### 2.3 TW918 与受体激酶 EGFR 的分子对接验证

运用 AutoDock 4.2.5 软件<sup>[7]</sup>模拟底物小分子 TW918 与受体激酶 EGFR 的分子对接,如图 2 所示.结果表明:TW918 能以母核喹啉为头,深入占据到 EGFR 的活性口袋中与 ATP 结合位点结合(图 2),其中萘环结合激酶的疏水区域,喹啉环类似于 ATP 的腺苷片段,与激酶的“铰链区”结合,其最低自由结合能为  $-46.1 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,提示 TW918 可能具有潜在的 EGFR 抑制活性.

一般认为,小分子抑制剂与靶酶结合,起主要相互作用的是抑制剂周围的氨基酸残基,而这些氨基酸残基可认为是活性残基. TW918 与 EGFR 活性残基的对接作用模式,如图 3 所示.由图 3 可知:TW918 上喹啉环与萘环间的醚键氧原子与 LYS721 残基上的氢发生了氢键相互作用,键长约为 0.22 nm. 氢键的形成有利于化合物分子更好地占据靶蛋白分子的活性口袋,提高与靶蛋白结合的紧密性.

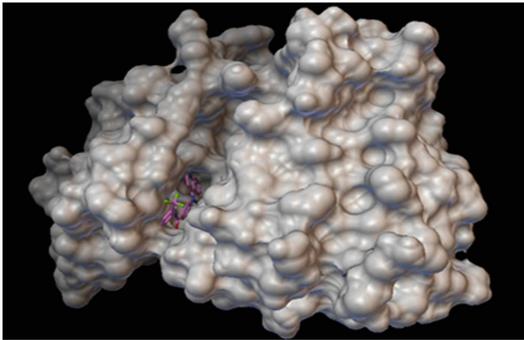


图 2 TW918 与 EGFR 活性位点的立体对接图

Fig. 2 Stereo view of TW918 bound in the active site of EGFR

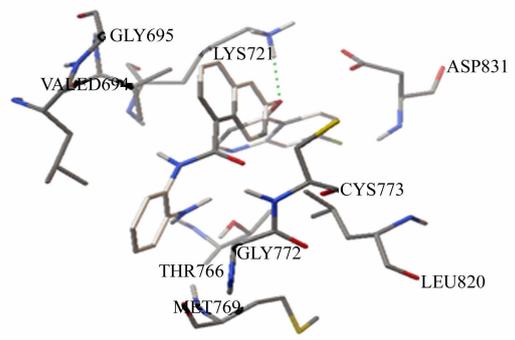


图 3 TW918 与 EGFR 活性残基的对接作用模式

Fig. 3 Docking interaction pattern of EGFR active residues with TW918

### 2.4 TW918 对 EGFR 蛋白表达的抑制作用

采用 Western Blot 研究 TW918 对 SMMC-7721, A549, Eca-109 和 SMMC-7721 细胞 EGFR 蛋白表达的影响,结果如图 4 所示.由图 4 可知:与阴性对照组(DMSO)相比, TW918 能明显抑制四种肿瘤细胞中 EGFR 蛋白的表达,且该结果呈剂量依赖性,验证了分子对接结果,表明该化合物可能通过与受体酪氨酸激酶 EGFR 结合,抑制其表达,从而发挥体外抗肿瘤活性.

## 3 结论

文中合成的小分子化合物 TW918 是一种新的喹啉类萘甲酰胺衍生物,化合物结构经核磁共振氢谱、碳谱和高分辨质谱表征确证. MTT 结果显示: TW918 对肿瘤细胞具有一定的抑制活性,但对正常细胞影响较小. 分子对接结果表明: TW918 能很好地深入 EGFR 蛋白的活性口袋中,并与活性口袋周围的氨基酸残基形成氢键,具有潜在的 EGFR 抑制活性. Western Blot 实验阐明: TW918 能够以剂量依赖性方式抑制 EGFR 蛋白的表达,进一步验证了分子对接结果.

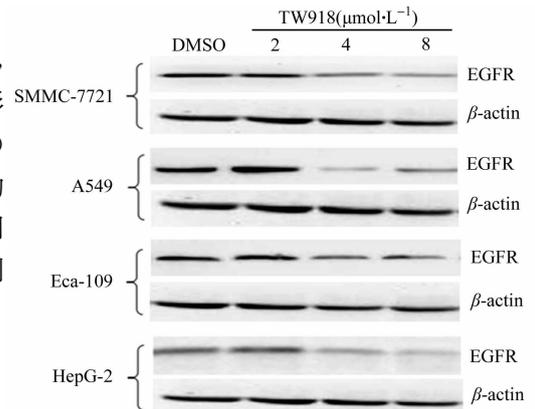


图 4 TW918 对受体激酶 EGFR 蛋白表达的影响

Fig. 4 Effects of TW918 on expression of EGFR protein

文中合成的小分子化合物 TW918 是一种新的喹啉类萘甲酰胺衍生物,化合物结构经核磁共振氢谱、碳谱和高分辨质谱表征确证. MTT 结果显示: TW918 对肿瘤细胞具有一定的抑制活性,但对正常细胞影响较小. 分子对接结果表明: TW918 能很好地深入 EGFR 蛋白的活性口袋中,并与活性口袋周围的氨基酸残基形成氢键,具有潜在的 EGFR 抑制活性. Western Blot 实验阐明: TW918 能够以剂量依赖性方式抑制 EGFR 蛋白的表达,进一步验证了分子对接结果.

综上所述, TW918 可能通过与受体酪氨酸激酶 EGFR 结合, 抑制其表达, 从而发挥体外抗肿瘤活性. 体外筛选和体内药效学评估是评价抗肿瘤候选药物有效性的两个重要指标. 在此基础上, 后续还需要通过更多的体内外实验评价 TW918 的抗肿瘤活性, 同时深入研究其作用机理, 探索是否存在除 EGFR 靶点外的其他作用位点<sup>[9-10]</sup>.

#### 参考文献:

- [1] CHEN Xiao-guang, ZHANG Yi. Recent advance in the study of novel anti-tumor targets and drugs: Aurora kinase and Pin1[J]. Acta Pharm Sin, 2009, 44(3): 264-269.
- [2] 李娟, 李延团, 李晓明, 等. 分子靶向抗肿瘤药物研究进展[J]. 生物技术通讯, 2009, 20(3): 411-416.
- [3] WEI L, MALHOTRA S V. Recent development of cyclic amide (pyridone/lactam) moiety containing heterocycles as protein kinase inhibitors[J]. Curr Med Chem, 2010, 17(3): 234-253.
- [4] YOSHIMURA N, KUDOH S, KIMURA T, et al. EKB-569, a new irreversible epidermal growth factor receptor tyrosine kinase inhibitor, with clinical activity in patients with non-small cell lung cancer with acquired resistance to gefitinib[J]. Lung Cancer, 2006, 51(3): 363-368.
- [5] 姜梦, 刘丹, 兰帅鹏. 喹啉类蛋白酪氨酸激酶抑制剂的研究进展[J]. 化学试剂, 2013, 35(4): 333-336.
- [6] MOON D O, KIM M O, HEO M S, et al. Gefitinib induces apoptosis and decreases telomerase activity in MDA-MB-231 human breast cancer cells[J]. Arch Pharm Res, 2009, 32(10): 1351-1360.
- [7] COSCONATIL S, FORLI A, PERRYMAN A L, et al. Virtual screening with AutoDock: Theory and practice[J]. Expert Opinion on Drug Discovery, 2010, 5(6): 597-607.
- [8] CARMÍ C, CAVAZZONI A, VEZZOSI S, et al. Novel irreversible epidermal growth factor receptor inhibitors by chemical modulation of the cysteine-trap portion[J]. Journal of Medicinal Chemistry, 2010, 53(5): 2038-2050.
- [9] 唐健红, 曾庆友. 阿魏酸异辛酯的绿色合成[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2011, 32(5): 551-553.
- [10] NIE Jian-yun, LIU Xin, JIN Cong-guo, et al. The effect of histone deacetylase inhibitors on cell cycle of breast cancer cell line MCF-7[J]. Clinical Medicine of China, 2009, 25(12): 1238-1240.

## Synthesis and *In Vitro* Activity of Naphthamide Derivatives TW918

WANG Li-qiang, LEI Chun-hua, QIU Fei, YANG Hui-yong

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

**Abstract:** To synthesize a series of naphthamide derivatives and screen out one lead compound TW918, this paper studies its anti-tumor activity *in vitro*, and investigates its ability to bind with kinase and the effect on the expression of EGFR protein. <sup>1</sup>H-NMR, <sup>13</sup>C-NMR and HR-MS confirmed the structure of TW918. The results of MTT assay showed that TW918 had certain inhibitory effects against four types of tumor cells, but had less effects on normal cells. Molecular docking revealed that TW918 could make use of the quinoline as head to occupy the activity pocket of EGFR deeply, and form hydrogen bonds with the active residues of EGFR around it, whose lowest free binding energy was  $-46.1 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ . Western Blot demonstrated that TW918 could inhibit the expression of EGFR in all four types of tumor cells in a dose-dependent manner significantly.

**Keywords:** naphthamide derivatives; receptor tyrosine kinase; anti-tumor activity; molecular docking

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 刘源岗)

# RNAi 表达载体在哺乳动物中的研究进展

侯莹, 成志云, 王立强, 许瑞安, 唐明青

(华侨大学 生物医学学院, 福建 泉州 362021)

**摘要:** 对 RNA 干扰(RNAi)表达载体的非生物与生物递送系统及主流应用进行综述,明确其在基因调控及未来基因治疗领域的应用前景,并指出其在种属特异性及表达效率等方面存在的局限性.对 RNAi 表达载体的结构组成、发展沿革及体内作用机制进行归纳分析,提出基于结构组成和加工机制双重属性的分类方法.

**关键词:** RNA 干扰; 表达载体; 短发夹式 RNA 载体; 微小 RNA 载体; 哺乳动物

**中图分类号:** Q 7

**文献标志码:** A

RNA 干扰(RNAi)是一种由 19~29 个核苷酸(nt)非编码 RNA(ncRNA)引起的靶基因特异性沉默效应,已发展成为基因调控的最有效技术之一. RNAi 表达载体是一种能携带和表达目的小 RNA“基因”的荷载介质,能够很好地弥补化学合成型 RNAi 的不足,实现 RNAi 分子的长效、安全、可控性表达,为个体化和靶向性基因治疗奠定了基础,已被广泛应用于基因调控、功能分析、疾病诊断和基因治疗等方面<sup>[1-3]</sup>.鉴于此,本文以哺乳动物为基础,对已知 RNAi 表达载体的发生发展、构成、作用机制、递送系统及主流应用做一个较为全面的综述.

## 1 发展与分类

### 1.1 发生发展

2002 年,Brummelkamp 等<sup>[4]</sup>首次将小干扰 RNA(siRNA)嵌入至短发夹式骨架中表达,发现其对目的 siRNA 的表达长久而高效,成功构建了第一个 RNAi 表达载体(短发夹 RNA 表达载体、shRNA 载体),标志着第一代 RNAi 表达载体的诞生.但随着研究的深入,shRNA 载体存在的脱靶效应<sup>[5-6]</sup>、细胞毒性和干扰内源性 miRNA 通路<sup>[7]</sup>等问题极大地限制了 shRNA 载体的发展.于是,Zeng 等<sup>[5]</sup>通过模拟内源性 miRNA 的发生通路,成功构建了第二代 RNAi 表达载体(人工微小 RNA 表达载体、amiRNA 载体),并发现其与原始 shRNA 载体相比,具有组织特异性强、毒性低、时间及沉默水平可控等优点.

随着基因治疗的快速发展,开发安全、可控、高效的 RNAi 表达载体日益重要.在 shRNA 载体方面,可以通过载体表达框的优化(如发夹环的序列、结构和大小等)提高载体的安全性和沉默效率<sup>[8-9]</sup>.近期发展起来的双功能 shRNA 表达载体借助 RNAi 的旁路途径促进主体 RNAi 的进行,显著提高了基因沉默效率,弱化了脱靶效应,是目前 shRNA 载体的一种新形式<sup>[10]</sup>.在 amiRNA 载体方面,提高载体表达效率及靶向性、扩充载体使用范围一直是研究的重点,如改造表达骨架的前体结构,在套索结构两侧增添互补碱基,或使侧翼序列错配等<sup>[11-12]</sup>,显著提高了目的小 RNA 在体内的表达效率及沉默效果.鉴于表达骨架的种属特异性及进化保守性,以鼠源<sup>[13]</sup>、鸡源<sup>[14]</sup>为表达骨架的研究也在不断开展,均实

**收稿日期:** 2015-01-05

**通信作者:** 唐明青(1982-),男,副教授,博士,主要从事腺相关病毒基因治疗的研究. E-mail: tangmingqing2222@163.com.

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA020810);国家自然科学基金资助项目(81271692);福建省中青年教育科研项目(JA14020);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JB-JC1004);华侨大学人才引进项目(14BS111)

现了靶基因的有效沉默,为 amiRNA 表达载体的广泛应用奠定了基础.

## 1.2 系统分类

目前, RNAi 表达载体并没有公认的分类标准,学术界和产业界存在多种不同的叫法,如小干扰 RNA (siRNA) 载体<sup>[15]</sup>、短发夹 RNA (shRNA) 载体<sup>[4]</sup>、微小 RNA (miRNA) 载体<sup>[16]</sup>、人工微小 RNA (amiRNA) 载体<sup>[5]</sup>、shRNAmir 载体<sup>[17]</sup>等. 各种载体之间的区别与联系,各自载体的范围和特性的界定成为当前的一大问题,尤其是第一代和第二代载体之间的具体划分标准依然不明确,这将直接干扰今后载体的选择和优化.

## 2 构成与构建及其作用机制

### 2.1 构成与构建

RNAi 表达载体一般由启动子、表达框及辅助元件构成. 其中,表达框是整个载体的核心,包含目的小 RNA 和表达骨架两部分,前者由正义链和反义链构成,后者由连接目的小 RNA 的套索序列及侧翼序列构成. RNAi 表达载体的代表性研究,如表 1 所示.

表 1 RNAi 表达载体的代表性研究

Tab. 1 Representative researches about RNAi expression vector

归属	表达骨架	名称	启动子	靶基因	应用和意义	文献
	5'-GATCCC-antisense-loop(TTCAAGAGA)-sense-TTTTTA-3'	pSUPER	H1	—	抑制哺乳动物基因表达;第一代 RNAi 表达载体,已商品化	[4]
	5'-CCGG-antisense-loop(CTCGAG)-sense-TTTTTG-3'	PLKO. 1	U6	—	构建了第一个 RNAi 文库,已商品化	[18]
shRNA 表达载体	5'-antisense-loop(TGTAAAGCCACAGATGGGA)-sense-TTTTT-3'	AAV1-miSCA1	U6	SCA1	寻找疾病的治疗靶点,减少脑部疾病治疗中的细胞毒性	[19]
	5'-GATCCC-antisense-loop(CCTCTCAA CACTGG)-sense-TTTTTA-3'	anti-HIV shRNAs	H1	HIV-1	抑制 HIV-1 基因表达,观察不同套索结构的表达效率	[8]
	5'-GATCCG-antisense-loop(CTTCCTGTCA)-sense-TTTTTG-3'	pLSL Pmulti-SEN	H1	SESN1/SESN2/SESN3	构建多基因载体,可同时研究多基因功能	[9]
	Pri-miRNA-30a	pCMV-mir-30	CMV-IE	—	抑制基因表达;第二代 RNAi 表达载体,已商品化	[5]
	Pri-mmu-miR-155	SIBR	sCMV	NeuroD1	抑制基因表达,已商品化	[20]
amiRNA 表达载体	5'-TGCTG-antisense-loop(GTTTTGGCCACTGACTGAC)-sense-3'	pSM155	CMV	—	研究哺乳动物基因功能,可弱化细胞毒性及脱靶效应	[11]
	5'-AGCG-antisense-loop(TAGTGAAGCCACAGATGTA)-sense-3'	pSM30	CMV	—	研究哺乳动物基因功能,可弱化细胞毒性及脱靶效应	[11]
	Pri-gga-miR126	pLB2-NP	CAGGS	Renilla luciferase	对抗禽流感病毒,可应用于哺乳动物	[14]

目前, RNAi 表达载体的构建主要有“串联法”和“并联法”. 前者主要针对 siRNA 载体,由两个独立的启动子完成两条串联的目的小 RNA 单链序列的分别表达,对表达骨架依赖性低(或完全不需要),但构建过程复杂且表达效果欠佳,目前应用相对较少,构建过程如图 1(a)所示. 后者主要针对 shRNA 载体、amiRNA 载体及 miRNA 载体,通常由单一启动子完成发夹式目的小 RNA 序列的转录,构建过程简

单,但对表达骨架依赖性强,需要合适的表达骨架方可实现目的小 RNA 的理想表达,是目前主流的载体构建方法,构建过程如图 1(a)所示<sup>[4,8]</sup>.

## 2.2 作用机制

RNAi 表达载体在体内发挥干扰作用主要通过内源性通路和外源性通路两条途径<sup>[21]</sup>.前者主要为 miRNA 和 amiRNA 载体作用通路,通常由组织特异性 Pol-II 启动子诱导 miRNA/amiRNA 的初级产物(Pri-miRNA/Pri-amiRNA)形成,在 Drosha 酶的作用下形成 miRNA/amiRNA 的前体结构(Pre-miRNA/Pre-amiRNA),由出核蛋白(Exportin-5)运输至细胞质,并在 Dicer 酶的加工下形成成熟的 miRNA/amiRNA,在与 RISC-AGO 复合体的共同作用下调控靶 mRNA 的翻译(图 1(b))<sup>[9]</sup>.后者为 shRNA 与 siRNA 载体的作用通路,一般由 Pol-III 启动子诱导转录,形成 siRNA 的前体结构(shRNA),之后在胞质内由 Dicer 类似酶加工形成成熟的 siRNA(而 siRNA 载体转录后直接生成成熟的 siRNA),随后在 RISC-AGO 复合体的共同作用下发挥降解靶 mRNA 的作用<sup>[21]</sup>(图 1(b)).

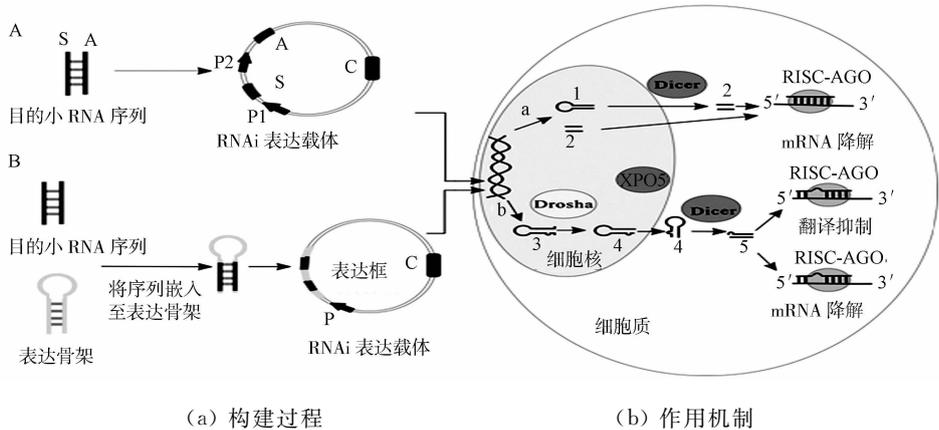


图 1 RNAi 表达载体的构成构建与作用机制

Fig. 1 Construction and mechanism of RNA interference expression vector

## 3 递送系统

### 3.1 非生物载体

纳米颗粒是目前研究较多的非生物递送载体,具有免疫原性低、可被生物体自动分解等特点<sup>[22]</sup>.近期,有研究者采用纳米颗粒载体递送靶向 VEGF-A 的 shRNA 质粒载体,用于抗角膜血管生成,通过基质内注射的方法直接作用于病灶部位,成功抑制了血管生成基因的表达<sup>[23]</sup>.另外,最近的一项研究显示,纳米颗粒递送有望实现抗肿瘤 shRNA 质粒载体的口服递送<sup>[24]</sup>,为口服基因治疗奠定了基础.

### 3.2 细菌载体

近年来,细菌载体被创新性地拉入了 RNAi 表达载体的递送系统行列<sup>[25]</sup>.早期细菌介导的 RNAi 技术在线虫体内应用较多,随后有报道称治疗性细菌能够通过脉管系统进入肿瘤细胞<sup>[26]</sup>.基于此,有研究者将重新构建的大肠杆菌用于哺乳动物细胞中 shRNA 的递送,目前,以此递送系统为基础的一项治疗遗传性结肠癌的项目正处于临床检测阶段<sup>[27]</sup>.除此之外,减毒鼠伤寒杆菌亦可用于递送 shRNA 载体,通过靶向肿瘤细胞表面受体,减少了肿瘤的负荷,提高了受试动物的存活率<sup>[28]</sup>.

### 3.3 病毒载体

病毒载体是 RNAi 表达载体中应用最为广泛的递送系统,主要包括腺病毒、逆转录病毒、慢病毒、腺相关病毒等.其中,腺病毒在基因治疗的临床试验中应用较广,但腺病毒自身可高度表达非编码 RNA,干扰 RNAi 通路的正常进行<sup>[29]</sup>.此外,腺病毒是一类游离型递送系统,只能进行瞬时爆发性表达.

与之相比,腺相关病毒载体介导的 RNAi 则较为稳定,无明显致病性,而且 RNAi 表达框普遍短小的特点正好弥补了此类递送系统包装容量小的缺陷.此外,逆转录病毒与慢病毒均可整合入宿主基因组进行长期表达,在稳定性 RNAi 效应中颇受偏爱<sup>[30]</sup>,对全基因组筛选及基因文库的构建做出了巨大贡献,但其安全性有待进一步完善.

## 4 主流应用

### 4.1 RNAi 文库

RNAi 文库是人工构建且通过 RNAi 抑制众多不同基因表达的混合文库,可用于功能缺陷型生物或细胞库的构建及表型筛选.随着 RNAi 表达载体的发展, RNAi 文库构建中存在的细胞类型限制以及基因沉默持久度的问题均得到了很好的解决,使 RNAi 文库在植物及哺乳动物基因组的研究中<sup>[18]</sup>,尤其在肿瘤细胞多药耐药性<sup>[31]</sup>、特异性药物靶点选择<sup>[32]</sup>等方面得到了广泛地应用.

目前,基于 RNAi 表达载体的 RNAi 文库资源,如表 2 所示.近期,一项 RNAi 的“传感器实验”使强效的 shRNA 分子的大量平行识别成为了可能,并为 amiRNA 型 RNAi 文库的功能性确认提供了新的策略<sup>[33]</sup>.

表 2 基于 RNAi 表达载体的 RNAi 文库资源

Tab. 2 Available sources of RNAi library based on RNAi expression vectors

归属	名称	一般特征					资源途径	文献
		表达骨架	载体	递送系统	启动子	库容量		
shRNA 文库	MISSION TRC 文库	5'-CCGG-antisense-loop(CTCGAG)-sense-TTTTT-3'	pLK O.1	慢病毒	U6	159 000 个构建体, 靶向 16 000 个人源基因和 15 950 个鼠源基因	<a href="http://www.openbiosystems.com">http://www.openbiosystems.com</a>	[18]
	Silence Select 文库	—	—	腺病毒	U6	11 500 个构建体, 靶向人 5 000 施药基因	<a href="http://www.silenceselect.com">http://www.silenceselect.com</a>	[32]
	Hannon 文库	5'-antisense-loop(GAAGCTTG)-sense-TTTTT-3'	pSHA G-MA GIC	逆转录病毒	U6	28 500 个构建体, 靶向 9 600 个人源基因; 9 000 个构建体, 靶向 5 500 个鼠源基因	Cold Spring Harbor Laboratory	[34]
	GeneNet 文库	—	pSIF	慢病毒	H1	200 000 构建体, 靶向 47 400 个人源基因; 150 000 个构建体, 靶向 39 000 个鼠源基因	<a href="http://www.systembio.com/rnai-libraries">http://www.systembio.com/rnai-libraries</a>	—
	DECIPHER 文库	—	pRSI	慢病毒	U6	27 500 构建体靶向人源或鼠源 5 000 个基因	<a href="http://www.decipherproject.net/">http://www.decipherproject.net/</a>	—
	Hannon 文库 V1	miR-30	pSM2	逆转录病毒	U6	100 000 个构建体, 靶向 28 500 个基因	<a href="http://www.openbiosystems.com">http://www.openbiosystems.com</a>	[35]
amiRNA 文库	Hannon 文库 V2	miR-30	pPR IME	逆转录病毒	CMV	20 000 构建体, 靶向 10 000 个基因	<a href="http://www.openbiosystems.com">http://www.openbiosystems.com</a>	[36]
	GIPZ 文库	miR-30	pGIPZ	慢病毒	CMV	96 000 构建体, 靶向 18 200 个基因	<a href="http://www.openbiosystems.com">http://www.openbiosystems.com</a>	[35]
	TRIPZ 文库	miR-30	pTRIPZ	慢病毒	TRE	159 000 构建体, 靶向 16 000 个人源和鼠源基因	<a href="http://www.openbiosystems.com">http://www.openbiosystems.com</a>	—

### 4.2 单基因调控

RNAi 表达载体通过转录获得的功能性序列抑制单基因表达在基因功能研究方面发挥着重要作用,尤其为当前无明显药物治疗效果的疾病提供了一种治疗策略.例如, Zhou 等<sup>[37]</sup>对宫颈癌的发病机理进行体外研究,采用 shRNA 靶向沉默人类乳头瘤病毒原癌基因 E6 和 E7,导致 p53 及 pRB 蛋白大量积累, MCM7 和 p16 蛋白减少,癌细胞的增殖和扩散能力显著降低,揭示了 E6 和 E7 基因在宫颈癌的发生和发展过程中的重要作用,展现了 shRNA 表达载体在基因功能研究中的巨大潜力.但良好的设计是效应分子发挥高效沉默的前提,在此基础上采用多个 shRNA 载体分子靶向同一基因<sup>[38]</sup>,可有效避免非靶向性沉默的发生,使 RNAi 表达载体的应用更加安全可靠.

### 4.3 转基因

转基因动物是 RNAi 表达载体的另一创新性应用. 目前已成功构建的转基因动物主要有转基因大鼠、小鼠、猪、羊等, 其中, 前两者在基础研究中应用较广. 早期, 采用 shRNA 表达载体构建基因敲除小鼠, 存在严重的脱靶效应及细胞毒性<sup>[19]</sup>, 目前已逐渐被 amiRNA 表达载体所替代, 增加了模型的可诱导性及基因沉默的可逆性, 为不同品系转基因动物的构建奠定了基础<sup>[39]</sup>. 转基因动物成功构建的关键在于强效的 RNAi 效应分子及稳定的表达系统. 近期, Dow 等<sup>[40]</sup>通过优化以 miR-30 为表达骨架的 amiRNA 表达载体和 amiRNA 分子设计, 同时结合重组酶介导的盒式策略(RMCE), 进一步挖掘了有效转基因小鼠品系的发展潜力, 为转基因动物的构建提供了一种快速、经济、高效的方法.

## 5 问题与展望

RNAi 技术是继反义寡核苷酸技术和基因敲除技术之后的又一重要的基因调控手段, 也是目前最为普遍和常用的基因调控策略<sup>[1-3]</sup>. RNAi 表达载体实现了干扰性小 RNA 的长效、高效、安全和靶向性表达. 但现有的 RNAi 表达载体还存在诸多问题: 1) 已被关注的 shRNA 载体存在的细胞毒性和干扰内源性 miRNA 通路问题<sup>[5,7]</sup>, amiRNA 载体的种属反应性和表达效率问题<sup>[20]</sup>等; 2) 尚未重视的 RNAi 表达载体的分类界定, 对目的小 RNA 的表达保真性及有效性等问题.

以 RNAi 表达载体的系统分类为例, 实质上, 第一代 shRNA 表达载体和第二代 amiRNA 载体都存在模拟内源性 miRNA 表达骨架的过程, 只不过前者模拟程度较小, 而后者是最大程度的模拟. 由于对两个划时代的 RNAi 表达载体缺乏明确的划分标准, 以致出现 siRNA 载体、shRNA 载体、miRNA 载体、amiRNA 载体和 shRNAmir 载体等多套凌乱的分类名称, 这给将来的载体选择和针对性载体优化工作带来潜在麻烦. 因此, RNAi 表达载体的系统分类不能仅凭其对内源 miRNA 表达骨架的模拟程度而定, 也不能根据其自身的某一结构组成来定, 最好同时结合其结构和功能进行系统分类. 鉴于此, 提出一种基于结构组成和加工机制双重属性的载体系统分类方法: 1) siRNA 载体-载体的表达框为成熟 siRNA, 直接转录产生成熟 siRNA; 2) shRNA 载体-载体的表达框为 shRNA, 转录产物需经 Dicer 类似酶加工产生成熟 siRNA; 3) amiRNA 或 shRNAmir 载体-载体的表达框为 pri-siRNA (即 pri-amiRNA), 转录产物需经 Drosha 和 Dicer 类似酶加工产生成熟 siRNA (即成熟 amiRNA); 4) miRNA 载体-载体的表达框为 pri-miRNA, 转录产物需经 Drosha 和 Dicer 酶加工产生成熟 miRNA.

## 6 结论

对 RNAi 表达载体的非生物与生物递送系统及基因调控、文库构建、转基因等主流应用方面的研究进展进行综述, 对 RNAi 表达载体的结构组成、发展沿革及体内作用机制进行归纳分析, 提出基于结构组成和加工机制双重属性的分类方法. 但是, 该方法在实际操作中还存在一些问题: 1) RNAi 表达载体中各个组件之间或多或少地存在一定的连接序列, 因此很难确定其表达框是 shRNA 还是 pri-miRNA; 2) 需要对每一个 RNAi 表达载体进行加工机制研究. 因此, 较为系统的命名方法有待研究的进一步深入而最终建立.

### 参考文献:

- [1] HUANG H Y, CHIANG B L. siRNA as a therapy for asthma[J]. *Curr Opin Mol Ther*, 2009, 11(6): 652-663.
- [2] WHEELER L A, VRBAMAC V, TRIFONOVA R, et al. Durable knockdown and protection from HIV transmission in humanized mice treated with gel-formulated CD4 aptamer-siRNA chimeras[J]. *Molecular Therapy: The Journal of the American Society of Gene Therapy*, 2013, 21(7): 1378-1389.
- [3] LI Yang, LU Jin-feng, HAN Yan-hong, et al. RNA interference functions as an antiviral immunity mechanism in mammals[J]. *Science*, 2013, 342(6155): 231-234.
- [4] BRUMMELKAMP T R, BERNARDS R, AGAMI R A. System for stable expression of short interfering RNAs in mammalian cells[J]. *Science*, 2002, 296(5567): 550-553.
- [5] ZENG Y, WAGNER E J, CULLEN B R. Both natural and designed micro RNAs can inhibit the expression of cog-

- nate mRNAs when expressed in human cells[J]. *Molecular Cell*,2002,9(6):1327-1333.
- [6] van GESTEL M A,van ERP S,SANDERS L E,et al. shRNA-induced saturation of the microRNA pathway in the rat brain[J]. *Gene Therapy*,2014,21(2):205-211.
- [7] KOZOMARA A,GRIFFITHS J S. Mirbase: Integrating microRNA annotation and deep-sequencing data[J]. *Nucleic Acids Research*,2011(39):D152-D157.
- [8] SCHOPMAN N C,LIU Y P,KONSTANTINOVA P,et al. Optimization of shRNA inhibitors by variation of the terminal loop sequence[J]. *Antiviral Research*,2010,86(2):204-211.
- [9] CHUMAKOV S P,KRAVCHENKO J E,PRASSOLOV V S,et al. Efficient downregulation of multiple mRNA targets with a single shRNA-expressing lentiviral vector[J]. *Plasmid*,2010,63(3):143-149.
- [10] WU Jun-zhu,LIU Shi-he,YU Jian,et al. Vertically integrated translational studies of PDX1 as a therapeutic target for pancreatic cancer via a novel bifunctional RNAi platform[J]. *Cancer Gene Ther*,2014,21(2):48-53.
- [11] WU Jun-zhu,BONSRA A N,DU Guang-wei. pSM155 and pSM30 vectors for miRNA and shRNA expression[M]. Totowa: Humana Press,2009:1-15.
- [12] FELLMANN C,HOFFMANN T,SRIDHAR V,et al. An optimized microRNA backbone for effective single-copy RNAi[J]. *Cell Reports*,2013,5(6):1704-1713.
- [13] YUE Jun-ming,SHENG Yi,REN Ai-xia,et al. A miR-21 hairpin structure-based gene knockdown vector[J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*,2010,394(3):667-672.
- [14] CHEN S C Y,STERN P,GUO Zhu-yan,et al. Expression of multiple artificial microRNAs from a chicken miRNA126-based lentiviral vector[J]. *PloS One*,2011,6(7):e22437.
- [15] LEE N S,DOHJIMA T,BAUER G,et al. Expression of small interfering RNAs targeted against HIV-1 rev transcripts in human cells[J]. *Nature Biotechnology*,2002,20(5):500-505.
- [16] CHEN Chang-zhen,LI Ling,LODISH H F,et al. MicroRNAs modulate hematopoietic lineage differentiation[J]. *Science*,2004,303(5654):83-86.
- [17] SILVA J M,LI M Z,CHANG K,et al. Second-generation shRNA libraries covering the mouse and human genomes [J]. *Nat Genet*,2005,37(11):1281-1288.
- [18] MOFFAT J,GRUENEBERG D A,YANG X,et al. A lentiviral RNAi library for human and mouse genes applied to an arrayed viral high-content screen[J]. *Cell*,2006,124(6):1283-1298.
- [19] BOUDREAU R L,MARTINS I,DAVIDSON B L. Artificial microRNAs as siRNA shuttles: Improved safety as compared to shRNAs *in vitro* and *in vivo* [J]. *Molecular Therapy: The Journal of the American Society of Gene Therapy*,2009,17(1):169-175.
- [20] CHUNG K H,HART C C,AL-BASSAM S,et al. Polycistronic RNA polymerase II expression vectors for RNA interference based on BIC/miR-155[J]. *Nucleic Acids Research*,2006,34(7):e53.
- [21] WILSON R C,DOUDNA J A. Molecular mechanisms of RNA interference[J]. *Annual Review of Biophysics*,2013,42:217-239.
- [22] 陈光伟,王士斌. 纳米载体共载基因与化疗药物用于癌症治疗的研究进展[J]. *药学报*,2013,48(7):1091-1098.
- [23] QAZI Y,STAGG B,SINGH N,et al. Nanoparticle-mediated delivery of shRNA. VEGF-a plasmids regresses corneal neovascularization[J]. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*,2012,53(6):2837-2844.
- [24] HAN Lu,TANG Cui,YIN Chun-hua. Oral delivery of shRNA and siRNA via multifunctional polymeric nanoparticles for synergistic cancer therapy[J]. *Biomaterials*,2014,35(15):4589-4600.
- [25] 陆艳梅,张金文,魏玉洁,等. 罂粟 COR 和 BBE 基因 RNAi 载体构建及烟草转化[J]. *药学报*,2013,48(7):1169-1177.
- [26] MACDIARMID J A,MUGRIDGE N B,WEISS J C,et al. Bacterially derived 400 nm particles for encapsulation and cancer cell targeting of chemotherapeutics[J]. *Cancer Cell*,2007,11(5):431-445.
- [27] KEATES A C,FRUEHAUF J H,XIANG Shuang-lin,et al. Cequent Pharmaceuticals, Inc: The biological pitcher for RNAi therapeutics[J]. *Pharmacogenomics*,2007,8(7):867-871.
- [28] MACDIARMID J A,AMARO-MUGRIDGE N B,MADRID-WEISS J,et al. Sequential treatment of drug-resistant tumors with targeted minicells containing siRNA or a cytotoxic drug[J]. *Nature Biotechnology*,2009,27(7):643-651.
- [29] ANDERSSON M G,HAASNOOT P J,XU N,et al. Suppression of RNA interference by adenovirus virus-associat-

- ed RNA[J]. *Journal of Virology*, 2005, 79(15): 9556-9565.
- [30] 卢善良, 黄轶群, 马旭东. 下调组蛋白去乙酰化酶 1 的表达引起人白血病 HL-60 细胞的分化[J]. *药学报*, 2013, 48(5): 668-674.
- [31] BOREL F, van LOGTENSTEIN R, KOORNNEEF A, et al. *In vivo* knock-down of multidrug resistance transporters ABCC1 and ABCC2 by AAV-delivered shRNAs and by artificial miRNAs[J]. *J RNAi Gene Silencing*, 2011, 7: 434-442.
- [32] van ES H H, ARTS G J. Biology calls the targets: Combining RNAi and disease biology[J]. *Drug Discovery Today*, 2005, 10(20): 1385-1391.
- [33] FELLMANN C, ZUBER J, MCJUNKIN K, et al. Functional identification of optimized RNAi triggers using a massively parallel sensor assay[J]. *Molecular Cell*, 2011, 41(6): 733-746.
- [34] PADDISON P J, SILVA J M, CONKLIN D S, et al. A resource for large-scale RNA-interference-based screens in mammals[J]. *Nature*, 2004, 428(6981): 427-431.
- [35] BOUDREAU R L, MONTEYS A M, DAVIDSON B L. Minimizing variables among hairpin-based RNAi vectors reveals the potency of shRNAs[J]. *Rna*, 2008, 14(9): 1834-1844.
- [36] STEGMEIER F, HU G, RICKLES R J, et al. A lentiviral microRNA-based system for single-copy polymerase II-regulated RNA interference in mammalian cells[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, 102(37): 13212-13217.
- [37] ZHOU J, LI B, PENG C, et al. Inhibition of cervical cancer cell growth *in vitro* and *in vivo* by lentiviral-vector mediated shRNA targeting the common promoter of HPV16 E6 and E7 oncogenes[J]. *Antiviral Research*, 2013, 98(2): 305-313.
- [38] CHUMAKOV S P, KRAVCHENKO J E, PRASSOLOV V S, et al. Efficient downregulation of multiple mRNA targets with a single shRNA-expressing lentiviral vector[J]. *Plasmid*, 2010, 63(3): 143-149.
- [39] VIDIGAL J A, MORKEL M, WITTLER L, et al. An inducible RNA interference system for the functional dissection of mouse embryogenesis[J]. *Nucleic Acids Research*, 2010, 38(11): e122.
- [40] DOW L E, PREMSRIRUT P K, ZUBER J, et al. A pipeline for the generation of shRNA transgenic mice[J]. *Nature Protocols*, 2012, 7(2): 374-393.

## Research Progress of RNA Interference Expression Vector in Mammals

HOU Ying, CHENG Zhi-yun, WANG Li-qiang,  
XU Rui-an, TANG Ming-qing

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

**Abstract:** This paper reviewed the non-biological and biological delivery systems of RNA interference expression vector as well as the major applications, and cleared the application prospect in the area of gene regulation and gene therapy in the future, and also pointed out the limitation in the species-specificity and expression efficiency etc. This paper summarized and analyzed the structure composition and development evolution of the RNAi expression vector as well as the function mechanism *in vivo*, and proposed the classification based on the dual attributes of structure composition and processing mechanism.

**Keywords:** RNA interference; expression vector; small hairpin RNA vector; microRNA vector; mammals

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 刘源岗)

# 压剪工况下型钢混凝土柱轴力分配规律试验

王梓懿<sup>1,2</sup>, 刘阳<sup>1,2</sup>, 郭子雄<sup>1,2</sup>, 贾磊鹏<sup>1,2</sup>, 陈庆猛<sup>3</sup>

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;  
2. 福建省结构工程与防灾重点实验室, 福建 厦门 361021;  
3. 厦门特房建设工程集团有限公司, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 为研究型钢混凝土柱在压剪工况下各部分轴力分配比例随位移角的发展情况,利用已完成的 21 个比例为 1:2 的型钢混凝土(SRC)柱试件的低周往复加载试验数据,计算得到试件中型钢、混凝土及纵筋承担的轴力随位移角变化的规律.研究表明:随位移角的增大,型钢承担的轴力先减小后增大,在大位移角下型钢承担的轴力可占总轴力的 20%~40%.

**关键词:** 型钢混凝土柱;轴力;轴压力系数;型钢

**中图分类号:** TU 398

**文献标志码:** A

型钢混凝土(steel reinforced concrete, SRC)是将型钢和钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)按一定方式组合而形成的一种新型组合结构,具有强度刚度大、抗震性能好等优点,是高层建筑常用的结构形式之一.近年来,国内外学者针对 SRC 基本构件的抗震性能开展了大量试验研究<sup>[1-7]</sup>,取得了丰硕的成果.目前, SRC 结构的正截面承载力计算有 3 种思路:1) 基于外包混凝土折算刚度,并按钢结构设计方法计算<sup>[8]</sup>;2) 考虑钢骨应力分布的影响,截面应变分布基本符合平截面假定,承载能力近似按照钢筋混凝土结构设计方法计算<sup>[9]</sup>;3) 叠加方法.我国行业标准 YB 9082-2006《钢骨混凝土结构技术规程》中对 SRC 柱的正截面承载力计算采用了叠加方法<sup>[10]</sup>.王海荣等<sup>[11]</sup>采用条带法对 SRC 柱达到正截面承载力时的钢骨和 RC 部分承担的轴力进行了计算,在此基础上还提出了一种简化计算方法.这些方法的关键是确定型钢和钢筋混凝土部分的轴力分配规律,但均是针对某一特定状态而言.在水平地震作用下, SRC 柱处于压剪往复作用受力状态,不同位移角下,型钢和钢筋混凝土部分承担的轴力比例会发生变化.目前这方面的研究工作很少,因此,有必要对压剪工况下 SRC 柱截面的轴力分配规律进行研究,为 SRC 柱承载力的简化计算提供参考.本文基于已完成的 21 个 SRC 柱实测数据,对其轴力分配规律进行分析.

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

已完成的 21 个比例为 1:2 的 SRC 柱试件试验加载装置示意图,如图 1 所示,试验参数如表 1 所示.表 1 中: $n_k$  为试验轴压力系数,取  $n_k = N_k / (f_{c,k} A_c + f_{a,y} A_a)$ ,  $N_k$  为试验轴力,  $A_c$ ,  $A_a$  分别为混凝土部分和型钢部分的截面积,  $f_{c,k}$  为混凝土棱柱体抗压强度,取  $f_{c,k} = 0.76 f_{c,u}$ ,  $f_{c,u}$ ,  $f_{a,y}$  分别为混凝土立方体抗压强度和型钢屈服强度;  $l$  为试件边长;  $\rho_a$ ,  $\rho_s$ ,

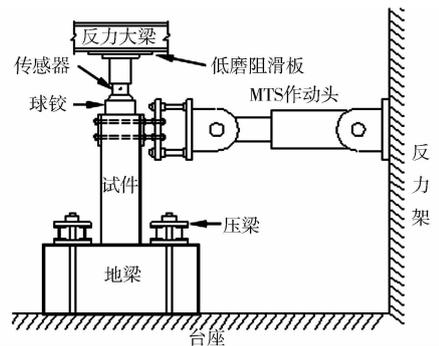


图 1 试验加载装置

Fig. 1 Test setup

收稿日期: 2014-04-22

通信作者: 刘阳(1982-),男,副教授,主要从事工程结构抗震减灾的研究. E-mail: lyliuyang@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51378228, 51178197, 51208219);福建省厦门市建设科技项目(XJK2013-1-2);华侨大学中青年教师科研提升资助计划(ZQN-YX106)

$\rho_v$  分别为配钢率、配筋率和体积配筋率;  $f_{s,y}$  为纵筋屈服强度实测值.

表1 试件参数汇总表

Tab.1 parameters of columns

编号	$n_k$	$N_k/\text{kN}$	$l/\text{mm}$	$\rho_a/\%$	$\rho_s/\%$	$\rho_v/\%$	$f_{a,y}/\text{MPa}$	$f_{s,y}/\text{MPa}$	$f_{c,u}/\text{MPa}$
RC1	0.39	484	250	0	1.45	0.88	393.0	345.0	25.8
SRC1	0.20	697	300	3.95	0.75	1.55	272.4	339.9	34.3
SRC2	0.20	697	300	3.95	0.75	2.42	272.4	339.9	34.3
SRC3	0.20	697	300	3.95	0.75	1.61	272.4	339.9	34.3
SRC4	0.20	697	300	3.95	0.75	2.27	272.4	339.9	34.3
SRC5	0.20	697	300	3.95	0.75	1.61	272.4	339.9	34.3
SRC6	0.20	697	300	3.95	0.75	1.61	272.4	339.9	34.3
SRC7	0.20	697	300	3.95	0.75	1.61	272.4	339.9	34.3
SRC8	0.20	697	300	3.95	0.75	1.55	272.4	339.9	34.3
SRC9	0.39	666	250	2.40	1.45	0.88	393.0	345.0	25.8
SRC10	0.36	609	250	2.40	1.45	0.88	393.0	345.0	25.8
SRC11	0.35	571	250	2.40	1.45	0.88	393.0	345.0	23.8
SRC12	0.38	609	250	2.40	1.45	0.88	393.0	345.0	23.8
SRC13	0.38	837	250	3.52	1.45	0.88	393.0	345.0	31.0
SRC14	0.32	692	250	3.52	1.45	0.88	393.0	345.0	31.0
SRC15	0.11	411	300	4.53	0.75	1.19	309.6	513.4	25.9
SRC16	0.23	882	300	4.53	0.75	1.19	309.6	513.4	25.9
SRC17	0.29	1 096	300	4.53	0.75	1.19	309.6	513.4	25.9
SRC18	0.22	877	300	4.53	0.75	0.78	309.6	513.4	29.0
SRC19	0.23	877	300	4.53	0.75	1.86	309.6	466.1	29.0
SRC20	0.35	1 316	300	4.53	0.75	1.86	309.6	466.1	29.0

## 1.2 试验结果

1.2.1 破坏形态 所有试件均在控制截面区域发生弯曲破坏,且在承载力达到峰值以前具有相似的试验现象.加载至  $1/250$  位移角时,柱的根部出现弯曲裂缝,并随位移角的增大而不断发展;在  $1/100$  位移角时,纵筋屈服,受拉区混凝土弯曲裂缝贯通;在  $1/50 \sim 1/25$  位移角时,受压区混凝土保护层开始出现压酥剥落,试件强度开始出现明显退化;在  $1/20 \sim 1/15$  位移角时,混凝土保护层全部剥落,纵筋压屈,承载力降至峰值荷载的  $80\%$  以下,试验终止.

典型试件的最终破坏形态,如图2所示.



(a) RC1



(b) SRC8



(c) SRC12

图2 典型试件最终破坏形态

Fig.2 Typical failure modes

1.2.2 滞回曲线 典型试件的荷载-位移滞回曲线,如图3所示.由图3可知:在屈服荷载以前,滞回曲线基本为直线,且残余变形较小;在屈服荷载以后,随着位移角的增加,滞回环的面积逐渐增大,强度和刚度开始逐渐出现退化现象.比较几个试件的滞回曲线可以发现:SRC柱具有比RC柱更优越的抗震性能;随着配钢率的增加,滞回环变得越来越饱满,耗能能力增强.

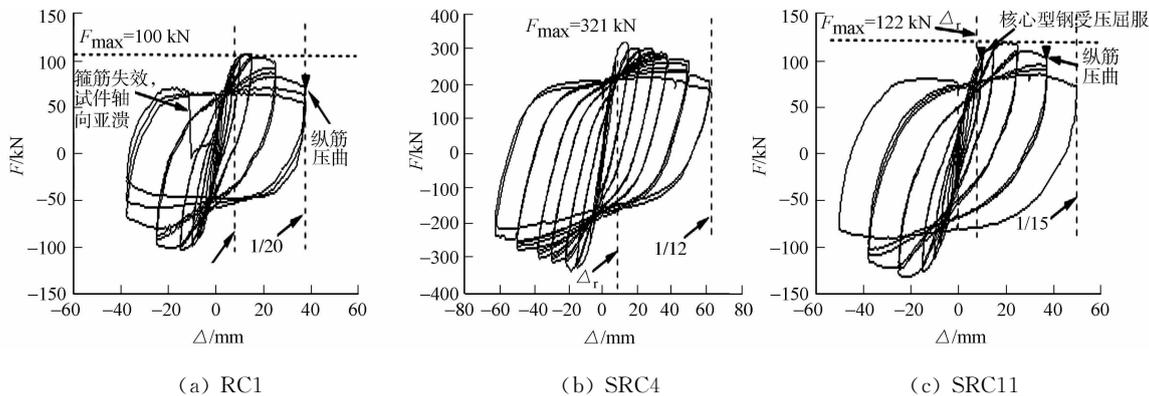


图 3 典型荷载-位移滞回曲线

Fig. 3 Typical  $F-\Delta$  hysteretic curves

## 2 SRC 柱轴力分配计算过程

### 2.1 基本假定

在计算型钢混凝土柱各部分轴力时作以下基本假定:

- 1) 试件截面应变分布符合平截面假定;
- 2) 不考虑混凝土部分的抗拉强度;
- 3) 型钢及纵筋采用理想弹塑性本构关系.

### 2.2 型钢承担轴力的计算

型钢的受力可分为 4 种情况:

- 1) 型钢全截面受压;
- 2) 上翼缘受压, 下翼缘受拉, 腹板部分受压部分受拉;
- 3) 上翼缘受压, 下翼缘受拉, 腹板全截面受压;
- 4) 上翼缘受压, 下翼缘部分受拉部分受压, 腹板全截面受压.

由型钢应变的实测值可知, 型钢的受力为前两种情况. 型钢截面受力, 如图 4 所示. 当型钢全截面受压时, 根据型钢实测应变判断, 此时位移角还较小, 型钢截面的几何特征和受力分布如图 4(a) 和 4(b) 所示. 型钢所受合力为

$$N_a = (t_f b_f \epsilon_1 + t_f b_f \epsilon_2 + \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} t_w b_w) E_s. \quad (1)$$

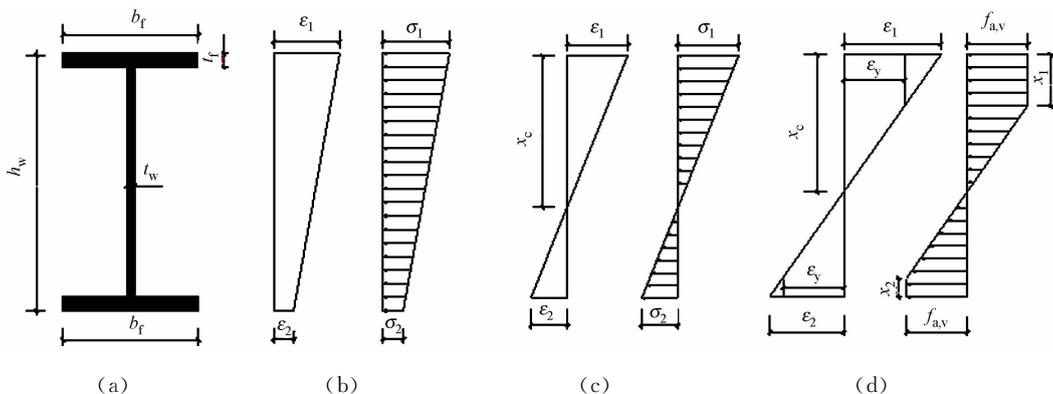


图 4 型钢截面受力简图

Fig. 4 Stress diagram of the shaped steel

当上翼缘受压, 下翼缘受拉, 腹板部分受压部分受拉时, 在较小位移角下型钢尚未达到屈服, 此时型钢的受力分布如图 4(c) 所示. 随着位移角增大, 型钢应变达到屈服应变, 此时型钢的受力分布如图 4(d) 所示. 型钢承担轴力  $N_a$  的公式为

$$N_a = N_{a,y} + N_{a,1}, \quad (2)$$

$$N_{a,y} = \begin{cases} t_f b_f \epsilon_1 E_s + \frac{\epsilon_1}{2} \left( \frac{h\epsilon_1}{\epsilon_1 + \epsilon_2} - t_f \right) t_w E_s, & \epsilon_2 < \epsilon_y, \\ t_f b_f \epsilon_y E_s + (x_1 - t_f) t_w \epsilon_y E_s + \frac{t_w \epsilon_y E_s}{2} \left( \frac{h\epsilon_1}{\epsilon_1 + \epsilon_2} - y_1 \right), & \epsilon_2 < \epsilon_y, \end{cases} \quad (3)$$

$$N_{a,1} = \begin{cases} t_f b_f \epsilon_2 E_s + \frac{\epsilon_2}{2} \left( \frac{h\epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2} - t_f \right) t_w E_s, & \epsilon_2 < \epsilon_y, \\ t_f b_f \epsilon_y E_s + (x_2 - t_f) t_w \epsilon_y E_s + \frac{t_w \epsilon_y E_s}{2} \left( \frac{h\epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2} - y_2 \right), & \epsilon_2 < \epsilon_y, \end{cases} \quad (4)$$

$$x_1 = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_y h}{\epsilon_1 + \epsilon_2}, \quad x_2 = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_y h}{\epsilon_1 + \epsilon_2}. \quad (5)$$

式(2)~(4)中,  $N_{a,y}$  和  $N_{a,1}$  分别为型钢受压区的合力和受拉区的合力;  $\epsilon_y$  为型钢屈服应变;  $x_1$  为型钢受压翼缘应变超出屈服应变  $\epsilon_y$  的值;  $x_2$  为型钢受拉翼缘应变超出屈服应变  $\epsilon_y$  的值;  $h$  为型钢截面高度。

纵筋所承担的轴力  $N_s$ , 由纵筋的实测应变值和纵筋本构关系求得, 混凝土部分所承担的轴力  $N_c$ , 可由总的轴力减去纵筋及型钢承担的轴力求得。

### 3 结果分析

由以上计算公式可求得在不同位移角下各部分所分配的轴力, 典型试件的轴力分配比例随位移角的发展而变化的情况, 如图5所示。采用 YB 9082-2006《钢骨混凝土结构技术规程》建议方法所求得的型钢部分及钢筋混凝土部分轴力分配比例, 分别如图5中用虚线和实线所示。

由图5可知: 由于规范采用的计算方法未考虑不同位移角的影响, 故为一条水平直线; 且由于个别试件轴压比较小, 计算所得型钢部分承担轴力为负值, 最小可达-60%。

文中采用的方法可以更全面, 随试件位移角的发展, 试件各部分承担轴力的比例是变化的, 在位移角为 1/250, 1/50 和 1/25(1/20) 时, 各部分轴力分配比例汇总, 如表2所示。表2中:  $\delta_c$ ,  $\delta_s$ ,  $\delta_{st}$  分别为混凝土部分、型钢部分及纵筋部分所分配的轴力百分比。由于  $\Delta$  在大位移角下纵筋发生较大变形, 其上应变片应变超出量程, 故  $\theta=1/25(1/20)$  时, 表2内存在无效数据。

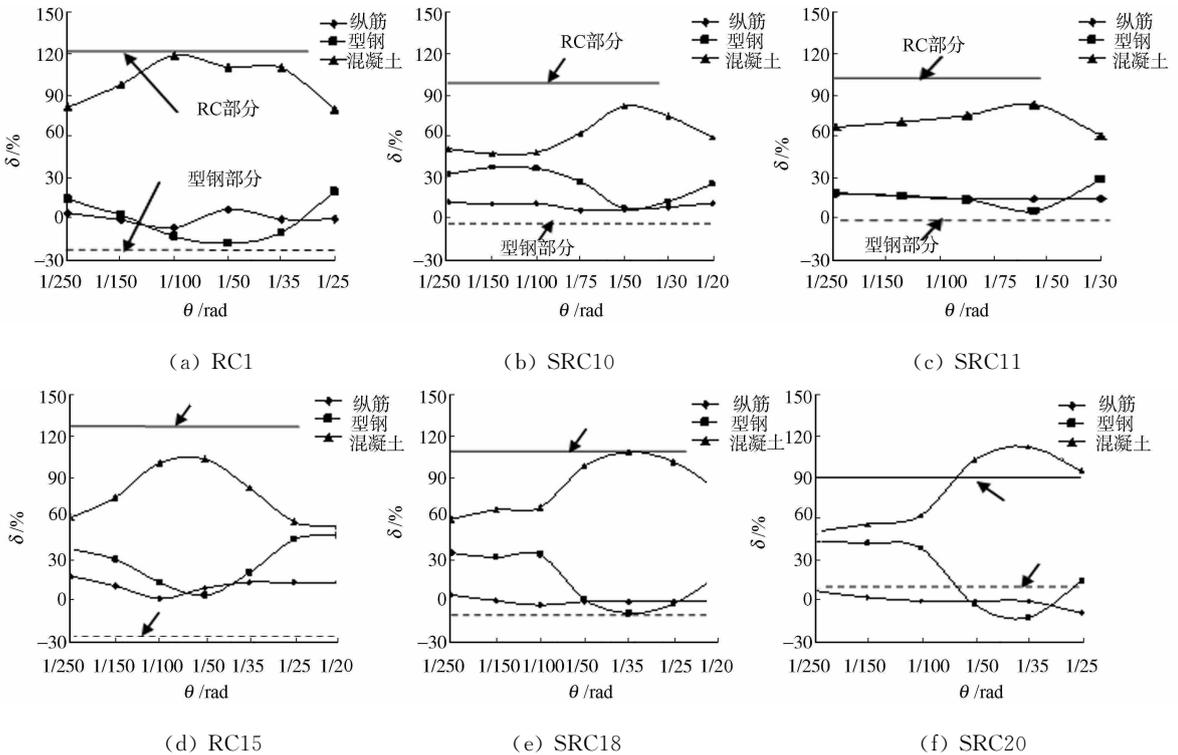


图5 轴力分配结果

Fig. 5 Result of axial force distribution

表2 轴力分配计算结果汇总表  
Tab.2 Calculation results of the axial force distribution

编号	$\rho_n/\%$	$n_k$	$\theta=1/250$			$\theta=1/50$			$\theta=1/25(1/20)$		
			$\delta_c$	$\delta_a$	$\delta_s$	$\delta_c$	$\delta_a$	$\delta_s$	$\delta_c$	$\delta_a$	$\delta_s$
RC1	0	0.39	86.13	0	13.87	83.89	0	16.11	—	—	—
SRC1	3.95	0.20	81.50	14.22	4.28	-17.80	7.00	79.97	20.03	0	
SRC2	3.95	0.20	80.73	13.78	5.49	114.75	-7.97	-6.78	76.80	23.20	0
SRC3	3.95	0.20	85.85	12.25	1.90	116.19	-11.57	-4.62	88.68	11.32	0
SRC4	3.95	0.20	90.79	13.92	-4.71	109.07	-14.23	5.16	95.02	4.98	0
SRC5	3.95	0.20	80.74	17.32	1.94	118.82	-12.94	-5.88	81.84	18.16	0
SRC6	3.95	0.20	81.85	14.86	3.29	147.55	-49.08	1.53	—	—	—
SRC7	3.95	0.20	74.90	18.31	6.79	101.10	-15.70	14.60	83.24	16.76	0
SRC8	3.95	0.20	87.78	11.82	0.40	118.90	-14.22	-4.68	92.19	7.81	0
SRC9	2.40	0.39	81.17	5.10	13.73	74.37	13.82	11.81	—	—	—
SRC10	2.40	0.36	52.21	34.02	13.77	82.81	9.25	7.94	60.50	26.70	12.80
SRC11	2.40	0.35	60.21	21.04	18.75	81.43	4.91	13.66	—	—	—
SRC12	2.40	0.38	78.55	9.46	11.99	86.12	6.79	7.09	—	—	—
SRC13	3.52	0.38	53.24	31.69	15.07	63.40	26.25	10.35	—	—	—
SRC14	3.52	0.32	55.76	37.51	6.73	92.26	10.86	-3.12	—	—	—
SRC15	4.53	0.11	63.11	31.70	5.19	119.82	-13.27	-6.55	54.98	45.02	0
SRC16	4.53	0.23	49.46	44.70	5.84	104.05	-4.05	0	77.93	22.07	0
SRC17	4.53	0.29	49.80	42.64	7.56	97.53	2.47	0	—	—	—
SRC18	4.53	0.22	60.09	35.12	4.79	98.56	1.44	0	81.32	18.68	0
SRC19	4.53	0.23	51.94	40.92	7.14	110.43	-10.43	0	87.57	12.43	0
SRC20	4.53	0.45	50.16	42.48	7.36	102.81	-2.81	0	85.44	14.56	0

### 3.1 不同位移角对轴力分配影响

轴力主要由混凝土和型钢两部分承担,由于拉压部分相互抵消,纵筋所承担的轴力较小,占总轴力的比例一般在10%以内。在1/100位移角以前,型钢所分配的轴力约占总轴力的20%~40%;随着位移角的增大,型钢分配的轴力有所降低,但是变化不大;在位移角大于1/100后,混凝土的抗压能力逐渐得到发挥,型钢参与抗弯,拉压应力相互抵消,导致分担的轴力逐渐减少;位移角在1/50左右的时候,型钢承担的轴力达到最小值,对于轴压力系数较小且配钢率较大的试件,此时混凝土部分承担的轴力甚至超过了总轴力;当位移角大于1/50后,混凝土部分开始压酥破碎并逐步退出工作,型钢承担的轴力逐渐增大;在位移角超过1/20之后,由于型钢柱塑性铰区变形较大,应变测量数据大部分超过有效度数范围。试件SRC15的型钢所承担轴力的比例最大与最小的差值达到58%,说明不同位移角下,型钢与钢筋混凝土部分直接的轴力分配规律变化很大。

### 3.2 轴压力系数对轴力分配影响

在其他条件相同的情况下,对比轴压力系数不同的试件SRC15, SRC18, SRC20可以发现:对于轴压力系数较小的试件SRC15,在位移角为1/100时,型钢部分便已处于整体受拉状态,混凝土分配的轴力较早达到峰值,随着位移角的增加,曲线的下降段较为平缓,最终在1/25~1/20位移角时,型钢承担的轴力达到总轴力的40%以上;对于轴压力系数中等的试件SRC18,在小位移角下型钢和混凝土分配的轴力基本不变,随着位移角的增加,型钢分配的轴力逐渐降低,当位移角达到1/35时,混凝土分配的轴力达到峰值,占总轴力的108%;对于轴压力系数较大的试件SRC20,在小位移角下混凝土与型钢承担了基本相同的轴力,由于试件在1/25位移角时破坏便已较为严重,之后的数据已无法量测。随着轴压力系数的增加,试件SRC10在整个加载过程中型钢都承担了一定比例的轴力,混凝土部分所承担轴力的最大值仅占总轴力的82%。因此,在高轴压力系数下,型钢对试件的抗压承载力具有较大的贡献。

### 3.3 配钢率对轴力分配影响

对典型试件的轴力分配图进行对比分析后发现:虽然试件的配钢率有所不同,但轴力分配曲线的规律基本相同,而且对于不同配钢率的试件,型钢所承担轴力的百分比也相差不大。配钢率最小的试件

SRC10,在整个加载过程中承担了10%~35%的轴压力.

## 4 结论

1) SRC柱中型钢承担了一定比例的轴向力,相当于降低了钢筋混凝土部分的实际轴压比,提高了试件的变形能力和滞回耗能能力.当混凝土压碎退出工作时,型钢承担的轴力比例逐渐增大,保证了试件的轴向承载力,提高了结构的抗倒塌能力.

2) 型钢与钢筋混凝土部分的轴力分配规律随结构层间位移角的增大不断变化,型钢承担的轴力先减小后增大,最大的比例差值超过50%,设计时应考虑轴力分配规律的变化.

3) 大位移角下,型钢承担轴力比例随轴压比的增加和配钢率的增加而增加;小位移角下,型钢承担轴力比例随轴压比和配钢率的变化规律性不明显.

## 参考文献:

- [1] RICLES J, PABOJIAN S. Seismic performance of steel-encased composite columns[J]. Journal of Structural Engineering (ASCE), 1994, 120(8): 2474-2494.
- [2] LI Li, MATSUI C. Effects of axial force on deformation capacity of steel encased reinforced concrete beam-columns [C]// Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering. Sydney: [s. n.], 2000: 1075-1082.
- [3] 叶列平, 方鄂华. 钢筋混凝土构件的受力性能研究综述[J]. 土木工程学报, 2000, 33(5): 1-11.
- [4] 李俊华, 王新堂, 薛建阳. 低周反复荷载作用下型钢高强混凝土柱受力性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(7): 11-18.
- [5] 郭子雄, 林煌, 刘阳. 不同配箍形式型钢混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(4): 110-115.
- [6] 刘阳, 郭子雄. 核心型钢混凝土柱抗震性能及轴压比限值试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(6): 57-66.
- [7] 刘阳, 郭子雄, 林煌. SRC柱塑性铰区域变形性能试验研究[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2011, 31(1): 48-53.
- [8] ECCS. Composite structures[M]. London and New York: The Construction Press, 1981: 34-89.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 138-2001 型钢混凝土组合结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 25-30.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. YB 9082-2006 钢管混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 113-122.
- [11] 王海龙, 江见鲸, 李中立, 等. 钢管混凝土柱正截面强度计算中的轴力分配[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1999, 28(9): 108-111.

## Experimental Study on the Axial Force Distribution of SRC Columns under Bearing Axial and Lateral Loads

WANG Zi-yi<sup>1,2</sup>, LIU Yang<sup>1,2</sup>, GUO Zi-xiong<sup>1,2</sup>,  
JIA Lei-peng<sup>1,2</sup>, CHEN Qing-meng<sup>3</sup>

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

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

3. Xiamen Tefang Construction Engineering Group Company Limited, Xiamen 361000, China)

**Abstract:** Twenty-one 1:2 scale steel reinforced concrete (SRC) columns were tested under cyclic loading to investigate the component of axial force at different story-drift angles. The axial forces carried by the shaped steel, the concrete, and the reinforcement were calculated separately based on the test results. It is indicated that: the axial force carried by the shaped steel decreases initially and then increases with the increase of story-drift angle. The proportion of the axial force carried by the shaped steel is 20%-40% of the total axial force.

**Keywords:** steel reinforced concrete column; axial force; axial compression ratio; shaped steel

# 土楼夯土结构受力变形特性的数值模拟

许永贤, 彭兴黔, 梁兰娣

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 以福建永定土楼中的九盛楼(方形)及侨福楼(圆形)为研究对象,采用 ANSYS 有限元软件,对土楼夯土结构建立整体模型,并通过数值模拟对两种典型的土楼进行对比分析.结果表明:夯土墙体的最大应力在材料实测的峰值应力以下,其结构强度符合要求;圆形土楼的位移和应力随厚度均匀分布,夯筑形式更加合理.同时,分析夯土结构的薄弱部位,为土楼的加固和维护提供依据.

**关键词:** 夯土结构; 福建土楼; 整体模型; 受力变形; 数值分析

**中图分类号:** TU 361

**文献标志码:** A

2008 年,福建土楼被列入《世界文化遗产名录》,广泛分布在闽西和闽南的山区<sup>[1]</sup>,以夯土作为其主要承重结构.在永定县实地调研发现,一些土楼夯土墙体出现错位、沉降甚至坍塌,一些土楼即使局部有加固措施,仍然无法防止整片墙体的变形,由夯土墙体受力变形而导致的土楼荒废、消失的情况与日俱增.国内外虽对夯土结构进行了一定数量的研究<sup>[2-4]</sup>,但大多集中于夯土构件,很少对夯土建筑的整体性能,及其有限元模型进行研究,也没有针对福建土楼的夯土结构特点分析其受力变形特性.基于此,本文对夯土进行抗压试验,利用调研相关数据,在现有荷载作用下建立整体模型,对两类最为典型的土楼进行数值模拟.

## 1 基本假定

1) 均匀性假定.假定墙体为均质材料,不考虑环境造成的墙体收缩、含水率变化等影响<sup>[5]</sup>.

2) 整体性假定.土楼夯土墙体是分层、分段、交错夯筑而成,夯筑时在墙体内放置竹筋、木条等,以增大拉结力,加强夯土墙体的整体性能,建模时可假设每层墙体为一个整体.

3) 底部约束假定.土楼夯土墙体是石基础,夯筑时已采取有效措施以满足石基与夯土间的连接,在此把墙体底部假设为固定端.预留的门洞为大块石板,故假定约束门洞顶部的竖向位移.

4) 墙体厚度均匀假定.土楼夯土墙体厚度随高度增加而递减(主要表现在墙体内部,外部由于阳光等作用,收缩比内部快,墙体略微倾斜),取各层平均厚度为墙体厚度.

## 2 夯土结构的本构关系

土体的材料特性非常复杂(各向异性、硬化、软化等),姚仰平等<sup>[6]</sup>对土的基本特性有综合性的研究,国内外尚无一种本构被公认为可完全描述土的本构关系<sup>[7]</sup>.现有本构模型基本是学者居于某一因素下提出的,如赵杰等<sup>[8]</sup>采用理想弹塑性模型及 Drucker-Prager 屈服准则对土体结构极限承载力进行有限元分析,Bui 等<sup>[9]</sup>运用离散和连续的 SHEAR-BEAM 模型分析夯土的动态特性等.

### 2.1 土楼夯土抗压力学性能

试验土样取自永定县非世遗的民居土楼,选取不同高度的原始夯土块,切割成边长为 70.7 mm 立

收稿日期: 2014-11-17

通信作者: 彭兴黔(1959-),男,教授,博士,主要从事防灾减灾的研究. E-mail: pxq@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178196, 51478197); 国家科技支撑计划项目(2014BAK09B01); 福建省科技计划重点项目(2013Y0067); 福建省自然科学基金资助项目(2013J01193)

方体试块,如图1所示.采用微机控制电子万能试验机WDW-100,其最大载荷为100 kN,试验采用位移控制方式,加载速度为 $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ .试验获得的土楼夯土应力-应变曲线的实测部分,如图2所示.



图1 原状夯土试块

Fig. 1 Original rammed earth block

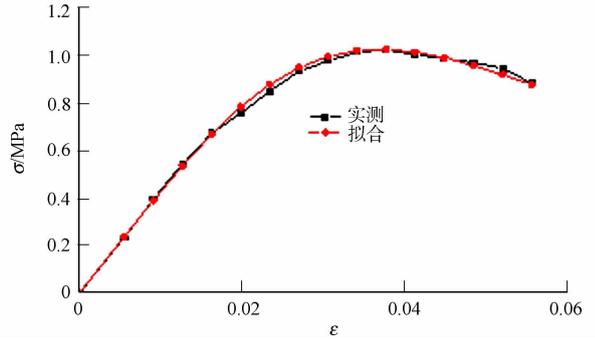


图2 土楼夯土应力-应变曲线

Fig. 2 Tulou rammed earth stress-strain curve

## 2.2 土楼夯土本构关系的确定

试验测得其应力-应变曲线与混凝土应力-应变关系曲线非常接近,且考虑到加载方式,可用增量型的非线性弹性本构来表示其本构关系.文献[10]在通过试验获得所需参数进行数值分析后,也提出须考虑土的非线性弹性特性.这里采用改进的 Saenz 公式建立夯土的本构关系模型<sup>[11]</sup>,即

$$\sigma = \frac{\epsilon}{A + B\epsilon + C\epsilon^2 + D\epsilon^3} \quad (1)$$

式(1)中: $A, B, C, D$ 为待定系数.

$A, B, C, D$ 由以下条件确定:

- 1) 原点处,  $\epsilon = 0, \sigma = 0, E_0 = d\sigma/d\epsilon$ ;
- 2) 峰值点,  $\epsilon = \epsilon_0, \sigma = \sigma_0, d\sigma/d\epsilon = 0$ ;
- 3) 极值点,  $\epsilon = \epsilon_u, \sigma = \sigma_u$ .

根据式(1),可得到夯土本构方程,即

$$\sigma = \frac{E_0 \epsilon}{1 + (R + \frac{E_0}{E_s} - 2) \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right) - (2R - 1) \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^2 + R \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^3} \quad (2)$$

式(2)中: $R = \frac{E_0(\sigma_0 - 1)}{E_s \sigma_u} - \frac{\epsilon_0}{\epsilon_u}$ ;  $E_s = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0}$ ;  $E_0$ 等参数均由夯土抗压试验取得,  $E_0 = 42.5 \text{ MPa}$ ;  $\sigma_0 = 1.03$

$\text{MPa}$ ;  $\epsilon_0 = 0.037$ ;  $\sigma_u = 0.876 \text{ MPa}$ ;  $\epsilon_u = 0.056$ .

将试验参数代入式(2),即得土楼夯土的本构关系,有

$$\sigma = \frac{42.5 \epsilon}{1 - 3.55\epsilon + 233.75\epsilon^2 + 6712.34\epsilon^3} \quad (3)$$

对比式(3)拟合与实测的土楼夯土应力-应变曲线(图2),两者吻合得较好.由此可知:改进的 Saenz 公式可作土楼夯土结构的本构关系,该关系能较好地模拟其受力性能.

## 3 受力变形特性分析

考虑土楼的受力特点、破坏及损伤,采用 Solid 65 单元模拟夯土结构.根据土工试验,夯土密度取为  $1740 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .经抗压试验得弹性模量为  $81 \text{ MPa}$ ,泊松比为  $0.3$ ,峰值应力  $1.0 \text{ MPa}$ .采用多线性随动强化材料模型 KINH 及 W-W 五参数破坏准则<sup>[2]</sup>,开裂、闭合剪力传递系数为  $0.075$  和  $0.5$ .结合对称性,取其  $1/4$  模型计算,夯土有限元模型,如图3所示.

### 3.1 土楼模型的尺寸及荷载

现以九盛楼(方形)和侨福楼(圆形)两座典型的土楼为模拟对象,实测尺寸数据,如表1所示.九盛楼的纵长为  $32.8 \text{ m}$ ,横长为  $33.5 \text{ m}$ ,侨福楼的直径为  $45 \text{ m}$ .

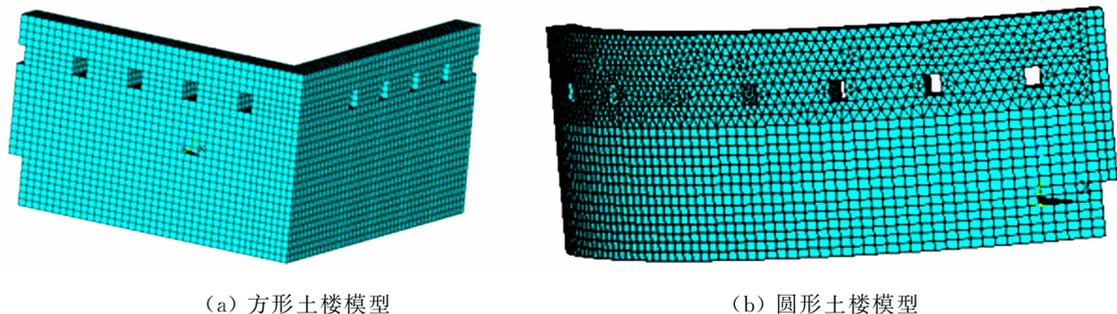


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

土楼主要承受的荷载包括夯土墙、木构件和瓦片的重度, 以及楼面的荷载(此处未考虑风荷载作用). 夯土的重度根据实测取为  $17.052 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ , 木构件的重度取  $5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ . 屋面面积按坡度 4.5 : 10 计算, 屋面荷载采用  $1.214 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ , 楼面活荷载根据规范取值<sup>[12]</sup>. 结合永定土楼相关材料的实测尺寸和数量, 得到九盛楼和侨福楼各层荷载, 如表 2 所示.

### 3.2 九盛楼受力变形特性

计算表明: 方形九盛楼的 1/4 模型在荷载作用下,  $X, Y, Z$  方向的最大位移分别为 2.59, -2.57, -10.10 mm. 结合模型的尺寸, 夯土墙相对变形最大的是竖向位移(即  $Z$  方向), 如图 4(a)所示. 从总位移云图可以看出: 在土楼顶部的纵横墙交界处, 具有较大的相对位移, 且同一高度的位移以墙交界处为轴心成对称发散式缩小, 如图 4(b)所示.

表 1 土楼模型的尺寸

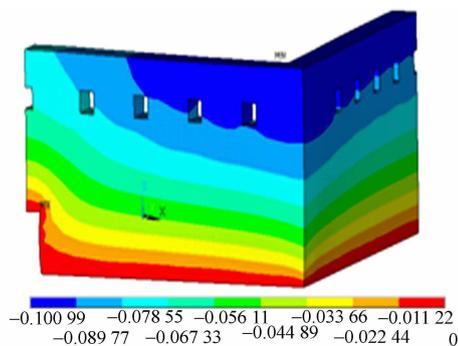
Tab. 1 Size of the Tulou model m

土楼	类型	一层墙高(厚)	二层墙高(厚)	三层墙高(厚)
九盛楼	方形	3.4(1.4)	2.8(1.2)	3.0(1.0)
侨福楼	圆形	3.6(1.3)	2.7(1.0)	3.0(0.7)

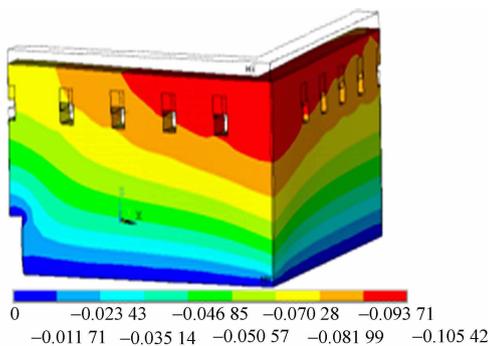
表 2 土楼模型各层荷载

Tab. 2 Each layer load of the Tulou

土楼	model in each storey			MN
	二层荷载	三层荷载	屋盖荷载	
九盛楼	2.068	1.022	1.291	
侨福楼	3.594	1.836	1.139	



(a)  $Z$  方向



(b) 总位移

图 4 方形土楼模型的位移

Fig. 4 Displacement of the square Tulou model

受力方面, 方形土楼在  $X$  方向的应力总体为受压状态, 但横墙、门洞一带均出现拉应力, 如图 5(a)所示.  $Y$  方向仍以受压为主, 但纵墙上出现拉应力, 特别是窗洞上部一带, 如图 5(b)所示.  $Z$  方向上最大压应力在纵横墙交界处, 其值为 0.263 MPa, 小于材料峰值强度, 如图 5(c)所示.

### 3.3 侨福楼受力变形特性

圆形侨福楼的 1/4 模型在荷载作用下,  $X, Y, Z$  方向的最大位移分别为 -3.89, -3.70, -11.25 mm, 夯土墙的主要变形还是竖向位移(即  $Z$  方向), 如图 6(a)所示. 总位移云图表明: 圆形土楼的顶部仍然具有较大的位移, 但与方形土楼相比, 其同一高度的位移基本相同, 位移大小明显沿竖向均匀分布, 越向上位移越大, 如图 6(b)所示. 由图 6(b)可知: 门洞附近墙体的位移分层线整体上扬(即同一高度的位移相对较小), 而从竖向上看, 其位移仍然层次分明.

圆形土楼在  $X$  方向的应力总体为受压状态, 如图 7(a)所示.  $Y$  方向上的应力与方形土楼类似, 在圆

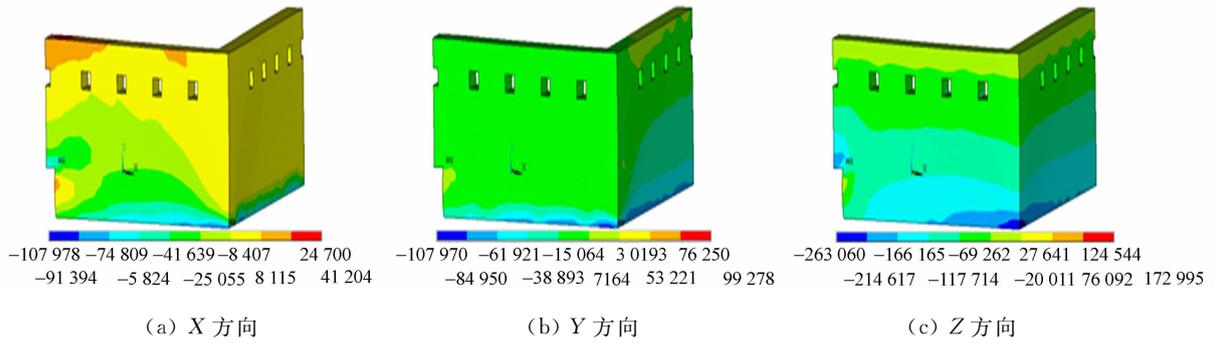


图 5 方形土楼模型的应力

Fig. 5 Stress of the square Tulou model

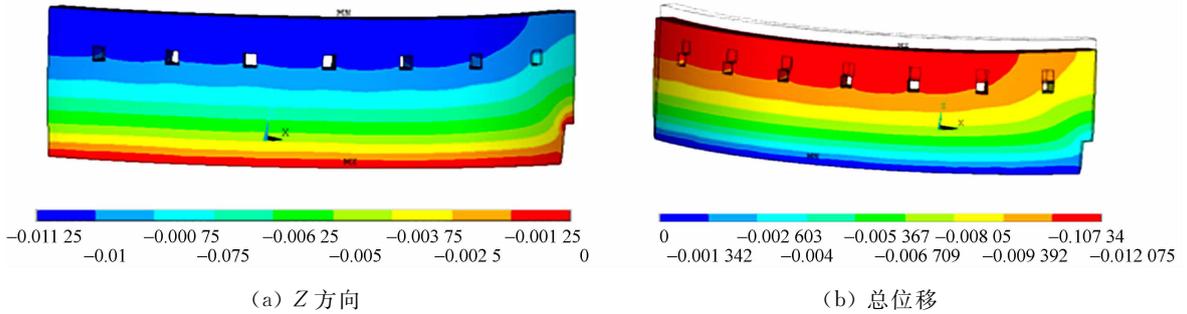


图 6 圆形土楼模型的位移

Fig. 6 Displacement of the circular Tulou model

形土楼的门、窗洞一带有明显拉应力,如图 7(b)所示. 模型 Z 方向整体受压力,最大应力出现在底部且值为 0.304 MPa,小于材料峰值强度,如图 7(c)所示. 与其位移图相似,土楼 Z 方向应力沿竖向分层分布,越向下应力越大. 另外,窗洞下部同一高度的应力略有不同(分层线成波浪状),门洞上部应力相对较大,而门侧应力较小.

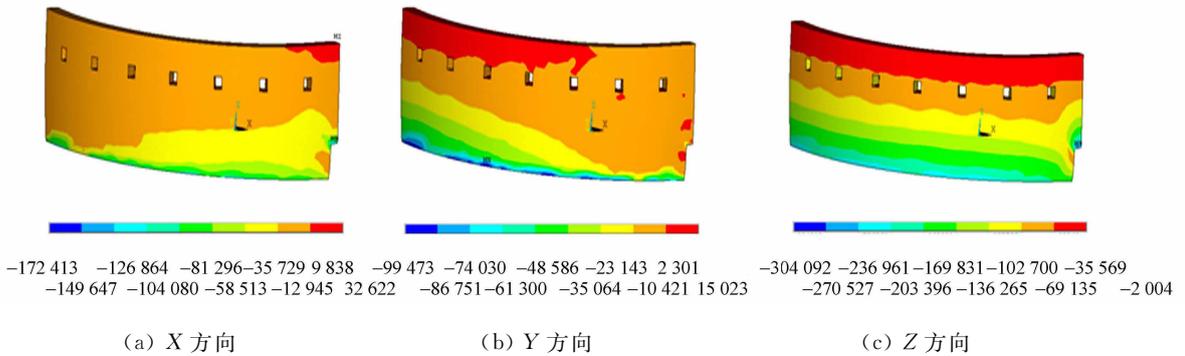


图 7 圆形土楼模型的应力

Fig. 7 Stress of the circular Tulou model

### 4 结论

- 1) 根据夯土抗压试验获得应力应变曲线,结合改进的 Saenz 公式得到土楼夯土的本构关系.
- 2) 方形土楼位移和应力各处差别较大,而圆形土楼位移和应力沿竖向分层分布,在环向形成相对均匀的制约,结合土楼实际厚度随高度的变化,认为圆形土楼材料利用率更高.
- 3) 土楼竖向最大应力(0.263, 0.304 MPa)小于材料峰值应力,结构强度满足要求.
- 4) 门、窗洞口一带出现应力集中,表现为拉应力或同一高度压应力相对减轻. 土楼纵横墙交界处、门洞侧部和窗洞上部等为其薄弱部位. 随着年代的积累、夯土材料力学性能的改变及荷载持续作用,将产生不同程度的拉压裂缝(调研已验证),及时采取相应的加固保护措施.

## 参考文献:

- [1] 花长城,彭兴黔,吴仁伟,等.福建土楼夯土墙风驱雨侵蚀损伤预测研究[J].自然资源学报,2012,27(6):1068-1074.
- [2] 阿肯江·托乎提,亓国庆.基于 Solid 65 和 Solid 45 有限单元的素夯土墙体数值建模及计算分析[J].新疆大学学报:自然科学版,2008,25(4):492-498.
- [3] MANIATIDIS V, WALKER P. Structural capacity of rammed earth in compression[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2008, 20(3): 230-238.
- [4] CIANCIO D, GIBBINGS J. Experimental investigation on the compressive strength of cored and molded cement-stabilized rammed earth samples[J]. Construction and Building Materials, 2012, 28(1): 294-304.
- [5] 张琰鑫,童丽萍.夯土住宅结构性能分析及加固方法[J].世界地震工程,2012,28(2):72-78.
- [6] 姚仰平,张丙印,朱俊高.土的基本特性、本构关系及数值模拟研究综述[J].土木工程学报,2012,45(3):127-150.
- [7] BUI Q B, MOREL J C. Assessing the anisotropy of rammed earth[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(9): 3005-3011.
- [8] 赵杰,邵龙潭.土体结构极限承载力的有限元分析[J].岩石力学与工程学报,2007,26(增刊1):183-189.
- [9] BUI Q B, HANS S, MOREL J C, et al. First exploratory study on dynamic characteristics of rammed earth buildings [J]. Engineering Structures, 2011, 33(12): 3690-3695.
- [10] NOWAMOOZ H, CHAZALLON C. Finite element modelling of a rammed earth wall[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(4): 2112-2121.
- [11] 赵成,阿肯江·托乎提,陈嘉,等.改性土体材料单轴受压本构关系研究[J].新疆大学学报:自然科学版,2010,27(7):123-126.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50009-2012 建筑结构荷载规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012: 14-17.

## Numerical Simulation of Tulou Rammed Earth Structure Deformation Characteristics

XU Yong-xian, PENG Xing-qian, LIANG Lan-di

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

**Abstract:** Using the finite element software ANSYS, the overall structure models of the Tulou rammed earth square Tulou of Jiu-sheng and Circular Tulou of Qiao-fu in Yongding County were established and simulated numerically. The simulation results show that the maximum stress of rammed earth wall is under the measured stress peak of the material, its structural strength meets the performance requirements; in circular Tulou, the distribution of stress and displacement vary uniformly with the thickness of wall, indicating that the circular form is more reasonable. The weak parts of the Tulou rammed earth structure are point out, to strengthen and maintain of the Tulou.

**Keywords:** rammed earth structures; Fujian Tulou; overall model; mechanical deformation; numerical analysis

(责任编辑: 陈志贤      英文审校: 方德平)

# 钢骨-钢管高强混凝土偏心受压柱非线性分析

关萍<sup>1</sup>, 陈兰响<sup>1</sup>, 刘晴晴<sup>2</sup>

(1. 大连大学 建筑工程学院, 辽宁 大连 116622;  
2. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

**摘要:** 为研究钢骨-钢管高强混凝土偏心受压柱的力学性能,采用 ABAQUS 有限元软件分析偏心距、长细比、材料强度等因素对压弯柱力学性能的影响,并对数据回归分析以建立承载力公式.结果表明:基于 ABAQUS 软件所模拟的荷载-变形曲线与试验曲线吻合良好;偏心距、长细比对偏心受压构件的受力性能影响较大,套箍率影响次之,材料强度和型钢截面形状对其影响相对较小;偏心受压承载力公式计算结果与试验结果吻合良好.

**关键词:** 钢骨-钢管高强混凝土; 偏心受压; ABAQUS 软件; 力学性能; 承载力  
**中图分类号:** TU 398 **文献标志码:** A

钢骨-钢管高强混凝土组合柱(STSRHC)充分利用了钢管混凝土和钢骨混凝土各自的力学性能,具有承载力高、刚度大、抗震性能和动力性能好、构件截面尺寸小等优点,有望在高层房屋、高耸结构、桥梁结构、地下结构等中得到应用.2003年,赵大洲等<sup>[1-3]</sup>相继对这种组合柱进行了理论和试验研究,并取得了一定的成果.目前,对钢骨-钢管混凝土柱的力学性能理论研究和实际应用研究还处于研究阶段.实际工程中的组合柱大多处于压弯受力状态,为满足工程设计的需要,本文拟利用有限元软件 ABAQUS 对钢骨-钢管高强混凝土偏心受压柱的力学性能进行研究.

## 1 有限元模型

### 1.1 应力-应变关系模型

核心混凝土本构模型在 ABAQUS 软件中采用塑形损伤模型<sup>[4-5]</sup>,拟采用王连广<sup>[6]</sup>的受压应力-应变关系式,并考虑偏心距对核心混凝土本构的影响<sup>[7]</sup>,最终提出的受压应力-应变关系模型,即

$$\sigma_c = \begin{cases} f_{c,c}(2x - x^2), & x \leq 1, \\ f_{c,c}[1 + q(x^a - 1)], & \theta \geq 1.12, \quad x > 1, \\ f_{c,c}x/[\beta(x-1)^2 + x], & \theta < 1.12, \quad x > 1. \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: $x = \epsilon/\epsilon_0$ ;  $\sigma_c$  为混凝土压应力;  $f_{c,c}$  为核心混凝土抗压强度;  $\beta, q$  和  $a$  为待定参数.

各参数的取值为

$$f_{c,c} = [1 + (-0.054\theta'^2 + 0.4\theta' + 0.32\sqrt{\rho})(24/f'_c)^{0.45}]f'_c;$$

$$\epsilon_0 = \epsilon_{c,c} + [1400 + 800(\frac{f'_c}{24} - 1)](\theta' + 0.37\rho)^{0.2};$$

$$\theta' = k_e\theta;$$

$$k_e = \begin{cases} 1 - e/r_c, & e/r_c \leq 1.0, \\ 0, & e/r_c > 1.0; \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{c,c} &= 1\ 300 + 12.5 f'_c; \\ \beta &= (2.36 \times 10^{-5})^{[0.25+(\theta-0.5)^7+(\rho-0.2)^5]} f'_c{}^2 \times 3.51 \times 10^{-4}; \\ q &= \frac{\theta'^{0.545} + \rho^{0.3}}{1 + \theta' + 2\rho}; \\ \alpha &= 0.1\theta' - 0.3\rho. \end{aligned}$$

上式中: $\theta=A_t f_{t,y}/A_t f_t$ 为套箍率; $\theta'$ 为修正套箍率; $e$ 为偏心距; $k_e$ 为径向应力梯度函数; $\rho=A_s f_{s,y}/A_c f_c$ 为配骨指标; $A_t, A_s$ 和 $A_c$ 分别为钢管、钢筋和混凝土的面积; $f_{t,y}, f_{s,y}, f_c$ 和 $f'_c$ 分别为钢管屈服强度、型钢屈服强度、混凝土轴心抗压强度和混凝土圆柱体抗压强度; $\epsilon_{c,c}$ 为 $f_{c,c}$ 所对应的混凝土压应变。

混凝土受拉的应力-应变关系模型及钢材的材料模型采用文献[8]提供的模型。

### 1.2 单元选取和网格划分

考虑到收敛性和准确性,加载板、钢管、钢筋和混凝土均采用8节点减缩积分格式的三维实体单元(C3D8R)。拟采用细化网格的方式对网格的收敛性进行分析,当计算停止时,重新调整网格密度以提高收敛性。各部件的单元划分示意图,如图1所示。

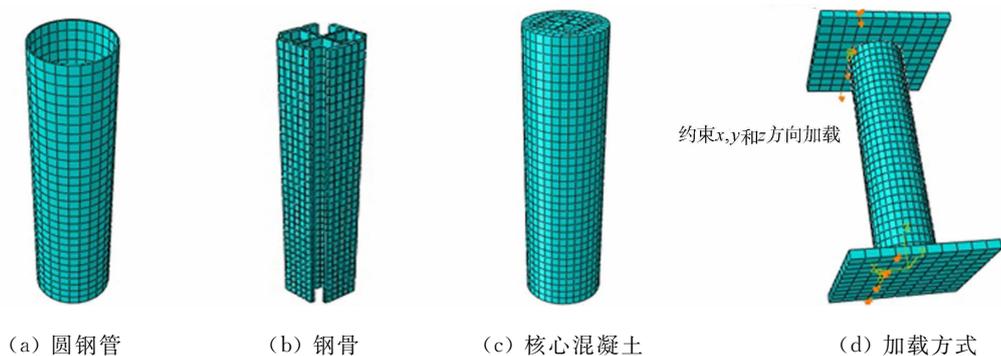


图1 钢管-钢管混凝土有限元模型和加载方式

Fig.1 Finite element model and loading form of STSRHC

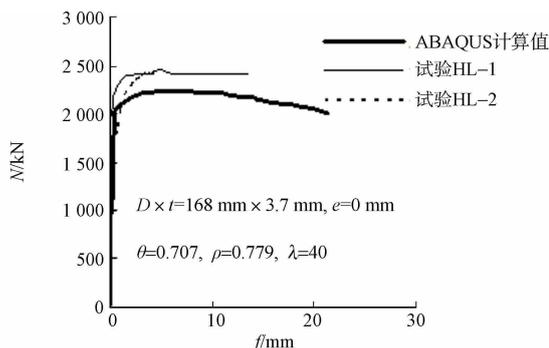
### 1.3 接触面处理和边界条件

钢管与混凝土之间的法向接触采用“硬”接触,界面切向力模型采用库伦摩擦模型<sup>[9]</sup>,摩擦系数为0.6;其他部件的接触采用“Tied”接触,并采用位移加载方式,利用增量迭代法求解方程;构件的边界条件如图1(d)所示。

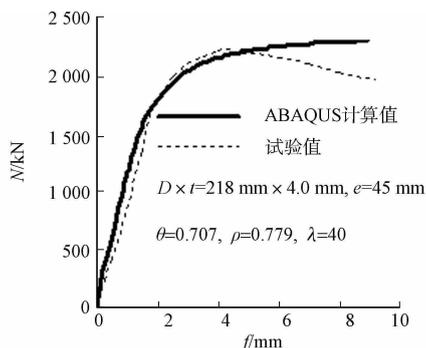
## 2 计算值与试验值

选用文献[1]中的试件HL、文献[10]中的SE1,SE2和SE5和文献[11]中的LE1为参考构件,构件的参数、试验结果值和有限元计算结果,如图2所示。图2中: $D$ 为钢管直径; $t$ 为钢管壁厚度; $L_0$ 为构件计算长度; $\lambda$ 为长细比, $\lambda=4L_0/D$ 。

由图2可知:计算值与试验值整体吻合良好。出现误差的主要原因是试验中构件的实际边界条件和材料很难与有限元模型完全符合。



(a) HL-1/HL-2



(b) SE1

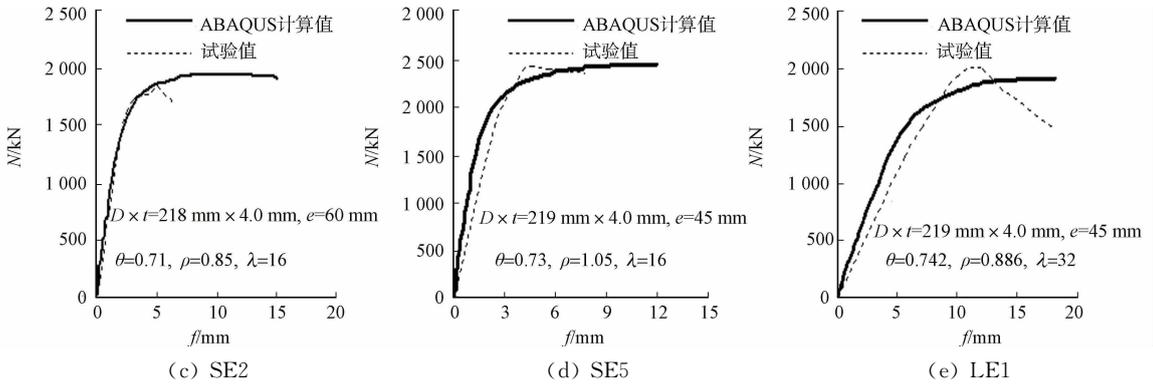


图 2 承载力数值计算值与试验值比较

Fig. 2 Comparisons between calculation results and experimental results

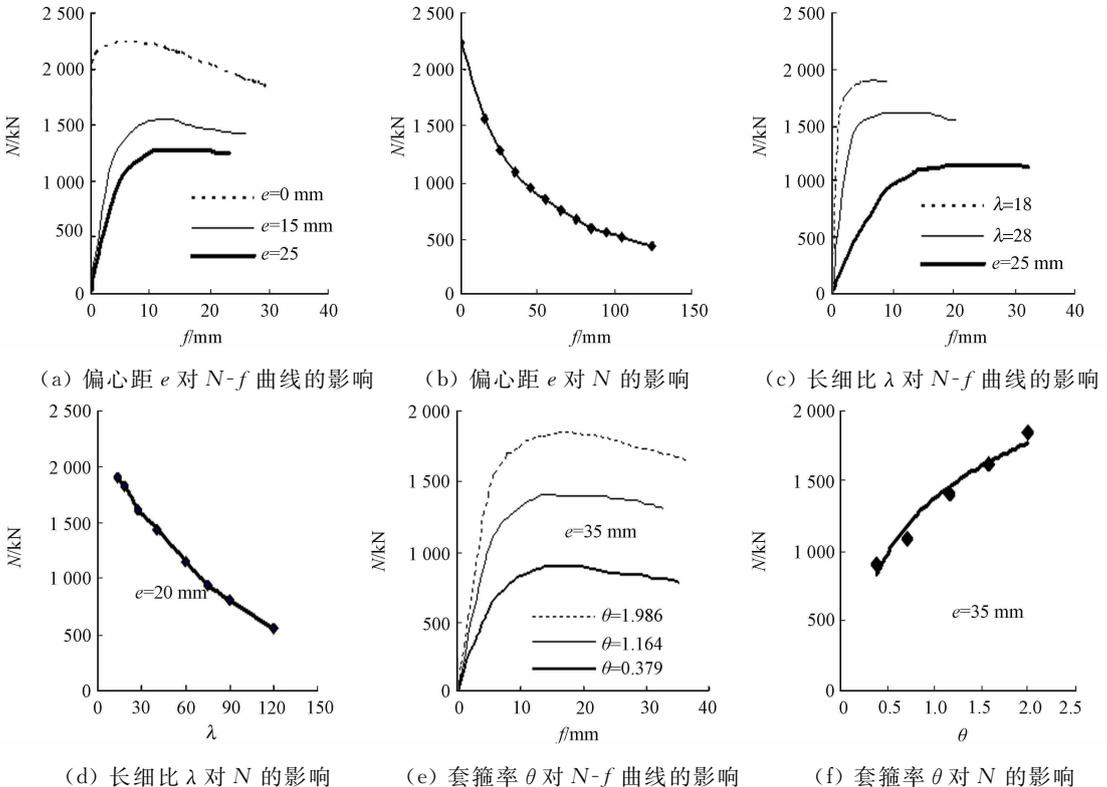
### 3 参数分析

选用试件 HL 为参考构件, 分别改变偏心距( $e$ )、长细比( $\lambda$ )、套箍指标( $\theta$ )、配骨( $\rho$ )和混凝土强度( $f_{c,u}$ ), 分析各参数对其压弯力学性能和承载力的影响, 结果如图 3 所示. 当分析钢骨截面指标( $I_s/I_c$ )对其压弯力学性能和承载力的影响时, 选取的构件参数为  $D \times t \times L_0 = 308 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 3850 \text{ mm}$ ,  $\theta = 0.381$ ,  $\rho = 0.722$ , 结果如图 3(f) 所示. 图 3 中:  $I_s$  为钢骨截面惯性矩;  $I_c$  为混凝土截面惯性矩. 由图 3 可以得到以下 5 点主要结果.

1) 偏心距对偏压柱的力学性能和承载力影响最为明显. 随着偏心距增大, 承载力下降幅度较大, 侧向挠度在承载力一定情况下明显增大. 这主要是由于随偏心距的增加, 全截面由全部受压逐渐变为部分受拉, 而核混凝土的抗拉作用较小, 受拉部分混凝土提前破坏, 承载力逐渐降低. 因此, 钢骨-钢管混凝土并不适合作为大偏心受拉构件使用.

2) 长细比对偏压柱的力学性能和承载力的影响也相对较为显著. 随长细比增加, 偏压柱的挠度增长较快, 承载力下降也较为明显, 这主要是由于组合柱的失稳导致的.

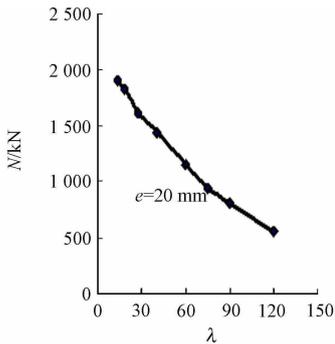
3) 套箍率和配骨率对偏压组合柱的力学性能和承载力有一定程度影响. 承载力随着这两个指标的



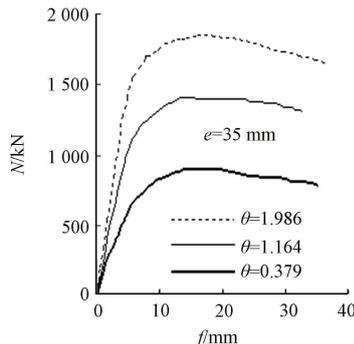
(a) 偏心距  $e$  对  $N-f$  曲线的影响

(b) 偏心距  $e$  对  $N$  的影响

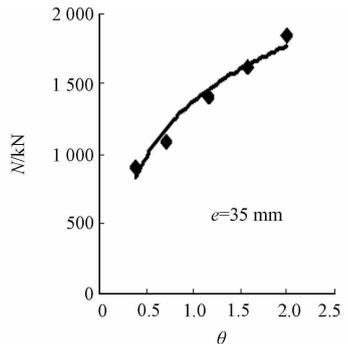
(c) 长细比  $\lambda$  对  $N-f$  曲线的影响



(d) 长细比  $\lambda$  对  $N$  的影响



(e) 套箍率  $\theta$  对  $N-f$  曲线的影响



(f) 套箍率  $\theta$  对  $N$  的影响

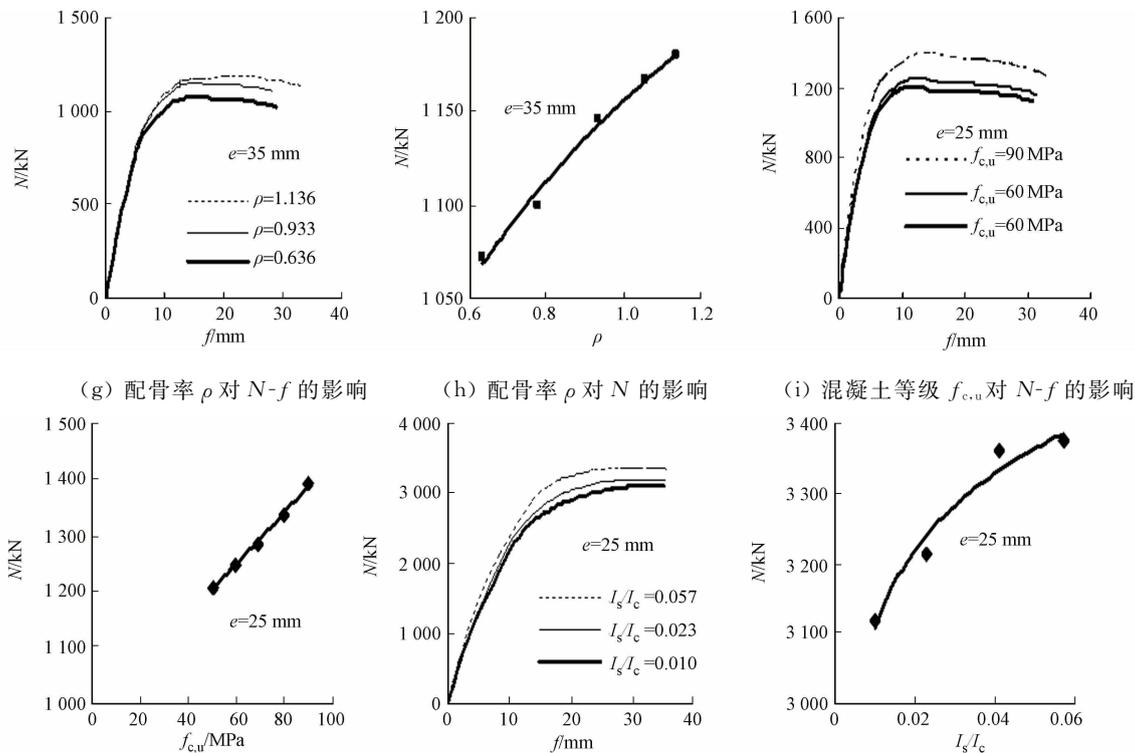


图 3 不同参数对荷载-挠度曲线和承载力的影响

Fig. 3 Influence of different parameters on load-deflection and bearing capacity

增大而增大,且套箍率的影响幅度相对配骨率较为明显.这主要是由于钢管对混凝土有一定程度的约束,混凝土受约束后,其承载力得到提高,且钢管的截面惯性矩较大,钢管的抗弯承载力相对钢管较高.

4) 混凝土强度在偏心距相对较小时,对组合构件的力学性能和抗弯承载力有一定影响,极限承载力和抗弯刚度随混凝土等级的提高而逐渐变大.

5) 钢管的截面形式对偏压柱的影响幅度相对较小,但随着其截面惯性矩的增加,组合构件的承载力也相应提高.这主要是由于惯性矩增加可以提高抗弯承载力,延缓混凝土受拉破坏,构件整体受压承载力得到提高.

## 4 承载力计算方法

《钢管混凝土结构设计与施工规程》采用经验系数法给出钢管混凝土柱偏心受压承载力公式,《钢-混凝土组合结构设计规程》采用了轴力-弯矩相关关系法给出钢管混凝土的偏压承载力公式.文中采用钢管混凝土承载力计算方法,推导钢管-钢管混凝土组合柱偏压承载力公式.

### 4.1 经验系数法

采用经验系数法<sup>[8]</sup>得出组合柱的压弯承载力式  $N_u$ ,有

$$N_u = K\varphi_1\varphi_e N_0 \tag{2}$$

式(2)中: $N_0$ 为钢管-钢管混凝土轴压短柱承载力计算值; $\varphi_1$ 为长细比影响系数; $\varphi_e$ 为偏心率影响系数; $K$ 为偏心率对紧箍力的影响系数.

短柱轴压承载力公式和各系数的取值分别为

$$N_0 = f_c A_c (1 + 1.8\theta + \rho); \tag{3}$$

$$\varphi_e = \begin{cases} 1/(1 + 1.85e/r_c), & e/r_c \leq 1.55, \\ 0.4/(e/r_c), & e/r_c > 1.55; \end{cases} \tag{4}$$

$$\varphi_1 = \begin{cases} 1, & \lambda \leq 1.6, \\ (1 - \alpha \sqrt{L_0/D - 4}) [1 + (I_s/I_c)^{1.4}], & 16 < \lambda \leq 120; \end{cases} \tag{5}$$

$$K = \sqrt{1 - 0.317(e/r_c)^{0.538}} \tag{6}$$

式(3)~(6)中: $r_c$ 为钢管的内径;长细比限制在120以内,满足工程中柱的长细比范围(一般为20~80); $\alpha$ 为与长细比大小有关的参数.各参数取值,如表1所示.

表1  $\alpha, \lambda$ 取值

Tab.1 Values of  $\alpha$  and  $\lambda$

$\lambda$	16~25	25~30	30~50	50~80	80~90	90~120	120
$\alpha$	0.050	线性内插	0.080	线性内插	0.115	线性内插	0.135

为验证公式的正确性,选取文献[10-11]的试验值与经验公式法计算值进行对比,结果如图4所示.

比较结果可知,简化公式计算值与试验值吻合良好(计算值与试验值比值的平均值为0.958,均方差为0.058),且偏于安全.

### 4.2 轴力-弯矩相关关系法

从安全和实用的角度出发,可将  $N/N_0(\eta)-M_u/M_0(\xi)$  曲线关系简化为二折线模型<sup>[11]</sup>,模型如图5所示.图5中: $N$ 为实测压弯承载力, $M_u$ 为构件在偏心荷载下的抗弯承载力; $\eta$ 和 $\xi$ 分别为  $N/N_0$  和  $M_u/M_0$  的简化值.模型方程为

$$\begin{cases} N/\varphi_1 N_0 + b/(M/M_0) = 1, & N_u/N_0 > \varphi_1 - b, \\ M_u/M_0 = 1, & N_u/N_0 \leq \varphi_1 - b. \end{cases} \tag{7}$$

式(7)中: $b=0.315+0.58\exp(\frac{-2.5}{2\theta+\rho})$ ;  $M_u$ 为弯矩;  $M_0$ 为构件纯弯承载力<sup>[12]</sup>,  $M_0=r_m W_{s,c,s} f_{s,c,s}$ ,  $r_m$ 为塑形发展系数,  $r_m=(-0.4047\theta+1.70\sqrt{\theta})[-0.40+1.110\rho-0.847\rho^2](I_s/I_c)^{0.056}$ ,  $W_{s,c,s}$ 为构件的截面抵抗矩,  $W_{s,c,s}=\pi D^3/32$ ,  $f_{s,c,s}$ 为构件的屈服强度,  $f_{s,c,s}=(1.392+B\theta+C\theta^2+E\rho)f_c$ ,  $D$ 为钢管的直径;  $B, C, E$ 为与材料强度的有关参数,  $B=0.1759f_{t,y}/235+0.974$ ,  $C=0.0309-0.1038f_c/20$ ,  $E=0.156f_{s,y}/235+0.479$ .

为了验证公式的正确性,选取文献[10]中试件SE1,SE2和SE3,以及文献[11]中试件LE1和LE2为参考构件,验证结果如图6所示.由图6可知:试验结果、有限元结果和基于相关关系法建立的简化公式计算结果整体吻合良好.

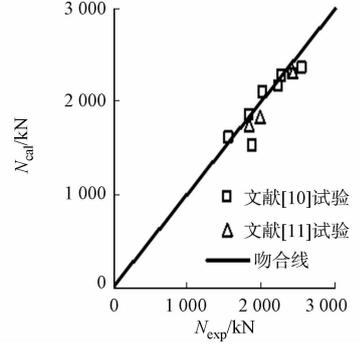


图4 承载力计算值与试验值的比较  
Fig.4 Comparison of experimental and calculated results on ultimate bearing capacity

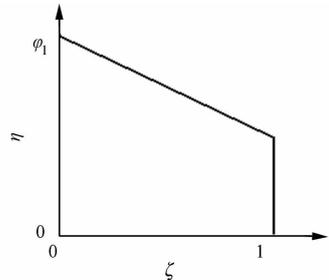


图5  $N/N_0(\eta)-M/M_0(\xi)$ 曲线  
Fig.5 Curve of  $N/N_0(\eta)-M/M_0(\xi)$

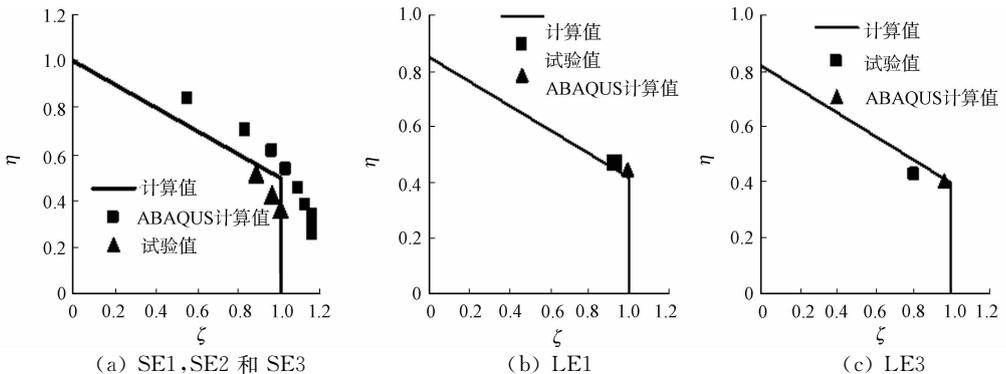


图6 简化公式的验证  
Fig.6 Validation of the simplified formula

## 5 结论

综上所述,可得出3点结论.

1) 通过选择合理的力学模型,利用 ABAQUS 有限元软件对钢骨-钢管高强混凝土偏压柱的力学性

能和承载力进行分析,所得计算结果与试验结果整体吻合良好。

2) 对影响偏压柱的力学性能和承载力的因素进行分析,偏心距和长细比是影响其力学性能和承载力的关键因素。

3) 通过有限软件进行的数值分析和参考以往的研究成果,基于经验系数法和轴力-弯矩相关系数法,分别建立钢骨-钢管混凝土偏压柱极限承载力简化公式,其计算结果与试验结果吻合较好。

#### 参考文献:

- [1] 赵大洲. 钢骨-钢管高强度混凝土组合柱力学性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2003:1-46.
- [2] 关萍,王清湘,赵德深. 钢骨-钢管混凝土组合柱压弯性能试验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2003,22(3):329-332.
- [3] 王连广,刘晓,常江. 钢管钢骨高强混凝土偏心受压承载力试验研究[J]. 工程力学,2010,27(2):124-129.
- [4] LEE J, FENVES G L. Plastic damage model for cyclic loading of concrete structures[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(8): 892-900.
- [5] LUBLINER J, OLIVER J, OLLER S, et al. A plastic-damage model for concrete[J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25(3): 299-329.
- [6] 王兵,王连广,刘晓. 钢管钢骨轴压短柱受力全过程分析[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版,2009,25(1):128-132.
- [7] SUSANTHA K, GE H, USAMI T. Uniaxial stress-strain relationship of concrete by various shaped steel tubes[J]. Engineering Structures, 2001, 23(10): 1331-1347.
- [8] 韩林海. 钢管混凝土结构:理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2007:1-300.
- [9] 张岩,张安哥,陈梦成,等. 圆钢管混凝土轴压长柱有限元分析[J]. 哈尔滨工业大学学报:自然科学版,2007,39(增刊1):94-98.
- [10] 杨山波. 钢骨-钢管混凝土偏压短柱承载力试验研究[D]. 长沙:湖南大学,2009:1-52.
- [11] 彭丽纯. 钢骨-钢管混凝土偏压长柱承载力试验研究[D]. 长沙:湖南大学,2009:1-60.
- [12] 陈兰响,关萍. 基于分层组合法推导钢骨-钢管高强混凝土纯弯承载力[J]. 水利与建筑工程学报,2015,13(1):51-55.

## Nonlinear Analysis of Steel Tube Filled with Steel-Reinforced High-Strength Concrete under Column Eccentric Compression

GUAN Ping<sup>1</sup>, CHEN Lan-xiang<sup>1</sup>, LIU Qing-qing<sup>2</sup>

(1. College of Civil and Architecture Engineering, Dalian University, Dalian 116622, China;

2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

**Abstract:** To analyze the mechanical properties of steel tube filled with steel-reinforced high-strength concrete (STSRHC) column under eccentric loading, analysis of eccentricity, slender ratio, material strength on eccentrically compression were conducted by the finite element software ABAQUS, and the formula of bearing capacity were establish by regression. The ABAQUS calculation results agree well with and experimental ones. Slender ratio and eccentricity influence significantly the eccentrically compressed mechanical properties, the influence of stirrup ratio is less than the influence of slender ratio and eccentricity, and influence of the material strength and the shape of steel is the smallest; the calculation results by the formula are in good agreement with the experimental results.

**Keywords:** steel tube filled with steel-reinforced high-strength concrete; eccentric compression; ABAQUS soft; mechanical properties; bearing capacity

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)

# 中国工程造价信息化管理趋势

沈华<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 经济与管理学院, 上海 200092;

2. 上海城市管理职业技术学院 土木工程与交通学院, 上海 200438)

**摘要:** 分析我国工程造价管理行业信息化的现状及存在的不足, 讨论造价管理信息化的必要性, 并在此基础上分析我国工程造价信息化管理未来的发展趋势. 研究表明: 现阶段我国工程造价管理和信息技术的结合程度较低, 国内的信息技术能力仍然具有很大的创新空间; 信息技术与工程造价的高度结合是工程造价信息化管理的发展趋势.

**关键词:** 工程造价; 信息化; 趋势; 造价管理

**中图分类号:** TU 723.3

**文献标志码:** A

目前, 国内几乎所有工程项目在前期预算、建设管理、养护运营、决算管理与评价等管理活动中, 均采用了数字信息化等计算机技术<sup>[1-2]</sup>. 我国的工程建设正处于急速增长时期, 建设规模大、发展速度快, 工程造价管理的信息化不但能使造价管理科学化, 而且在一定程度上可以提高造价管理过程中的工作效率, 降低工作人员的劳动强度. 受当前技术水平与管理体制等因素的影响, 与发达国家相比, 我国的信息化管理水平比较落后. 因此, 通过对相关文件与政策的解析, 本文分析了我国工程造价管理信息化的发展趋势.

## 1 工程造价管理信息化水平

我国工程预算行业虽然起源较早, 但是受社会经济发展水平等因素制约没有形成独立学科. 十一届三中全会以后, 社会主义市场经济体制逐步完善, 特别是经济建设快速发展, 促进了工程造价管理行业的进步. 20 世纪末, 我国工程造价行业开始步入信息化时代<sup>[3]</sup>. 随着信息化建设的开展, “十一五”规划期间信息技术在工程造价管理工作中的应用水平得到大幅提升<sup>[4]</sup>.

工程造价的现代化体现在信息传递的速度和准确性等方面, 我国工程造价信息化管理工作的进步主要表现在以下 3 个方面.

1) 开发使用了上百种工程造价管理方面的软件, 这些软件涵盖了建设项目的审核结算与统计等管理工作, 能够实现人机使用统计、钢筋消耗统计以及工程量清单等功能<sup>[5]</sup>. 工程造价管理软件的开发与应用促进了建设工程造价管理质量的提升, 增强了造价管理的工作效率.

2) 国内部分省市为了加快区域经济建设步伐<sup>[6]</sup>, 逐步启动了信息标准化建设项目, 制定出一系列建设工程造价数据信息交换规定, 实现了工程造价数字信息的共享, 为我国工程造价的信息化发展打下良好的基础.

3) 现阶段造价管理信息化网络平台的构建已经初步展开, 计算机技术促进了数字信息的网络分享与接收, 完善了工程造价的预决算和管理工作, 实现了办公自动化.

**收稿日期:** 2015-05-07

**通信作者:** 沈华(1981-), 男, 讲师, 博士研究生, 主要从事建筑工程造价、工程项目管理的研究. E-mail: qit0316@126.com.

**基金项目:** 上海教育发展基金会资助项目(10CGB13)

## 2 工程造价信息化管理存在的不足

目前,我国已经建立起以网络平台为核心的工程造价数字化框架,完善了工程造价的信息化管理机制.然而,由于我国的信息化管理还处于发展的初期,与发达国家相比,仍然存在较大的差距与较多的问题.我国工程造价信息化管理主要存在以下6个不足.

### 2.1 信息化管理理念不先进

受早期计划经济体制的影响,国内工程造价管理行业普遍没有重视造价管理的信息化.当前,工程造价管理的信息化基本停留在项目的估算、概算与工程的预算、决算相互分离等方面,信息化管理理念陈旧落后.此外,国内多数企业未将工程造价管理流程与信息化过程同步,只是把信息化的进程作为管理的结果对待,没有充分认识信息化建设对企业内部核心竞争能力的意义.这种管理观念难以适应当前急剧变化的市场.

### 2.2 信息化管理体制不健全

目前,我国的工程造价信息化进程还处于发展初期,对工程造价信息化管理体系的指导和监督缺乏有效的机制,主要体现在两个方面.1)国内不同地区管理方式的差异,导致个别地区信息化管理的深度与广度都比较落后,甚至出现管理混乱的现象,以致整个造价管理行业的平均水平低下,信息资源不能得到充分的利用与共享.2)法律、法规的作用在我国工程管理行业收效甚微,且亟需完善,行业规章制度也存在问题,其落实不到位等现象普遍发生,影响了信息化管理的发展.

### 2.3 信息化管理设施不完备

工程造价信息化管理的进步离不开计算机技术的发展,适合工程造价业务发展的网络通讯设备、专业软件及信息化设备仍在持续探索之中,相关基础设施的建设仍然不成熟,不能很好地满足信息化管理的要求.此外,我国建设项目一直将工程的设计与施工作为资金的主要投入点,没有足够重视信息化管理,导致工程造价信息化管理的基础建设处于相对薄弱的地位.

### 2.4 行业工作人员专业素质普遍较低

信息平台的建设与运行离不开专业的信息化技术人才,工程造价管理信息化与员工的技能、受教育水平密切相关.然而,从我国目前工程造价行业的实际就业情况来看,大部分从业人员都毕业于投资管理、工程经济等经济类专业,工程造价专业的技术人才不足一半,而且本科毕业生仅有三分之一<sup>[7]</sup>.工程造价信息管理人才十分匮乏,导致工程造价的信息化管理作用有限,严重阻碍了信息化管理的发展.

### 2.5 信息资源处理手段落后

现阶段,我国的信息采集技术与信息处理方法落后于社会信息市场的需求程度,导致信息的收集周期长、信息含量少,且收集的信息代表性不高,不能有效地进行数据资源处理.此外,国内完善的造价管理信息化网络平台尚未建成,工程造价信息的远程加工与传递工作十分困难,信息资源处理效率较低,许多资源不能及时更新,影响了信息处理工作的正常进行.

### 2.6 信息公共网络设置的不足

对全国住建部标准定额司负责的中央级造价信息网和31个省市进行调查,由调查结果可知:目前我国还有7个省会城市没有建立造价信息公共网络.

工程造价信息网栏目设计统计分布图,如图1所示.图1中: $\eta$ 为各项信息栏目设置百分率;1为造价交流平台;2为新技术、新材料;3为工程实例;4为指数信息;5为指标信息;6为价格信息;7为计价依据;8为政务信息.

由图1可知:计价依据和政务信息更新较慢,政策法规信息比较全面;价格信息和指数信息较差,且大多数的指数信息和价格信息在信息网络上都没有公开.因此,通过比较典型的造价工程实例可知:信息公共网络在现代化技术以及新材料、造价交流平台等方面还有很大的改进空间.

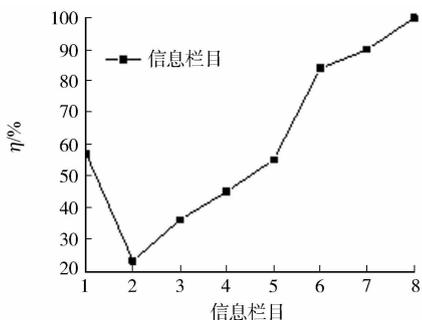


图1 工程造价信息网栏目设计统计分布图  
Fig. 1 Statistical distribution of engineering cost information net program design

### 3 工程造价信息化管理的必要性

工程建设项目劳动密集、分工细致,其过程包括项目审批、施工图设计、建设施工等多个阶段,具有工程周期长、施工信息量大的特点.传统的工程造价管理需要耗费大量人力与物力,而且预算编制工作的准确性不足、效率极低,信息技术的发展很大程度上改变了这种现状.现阶段,工程造价信息化管理的必要性主要体现在以下4个方面.

1) 信息化管理有利于加强管理服务.造价管理信息化网络平台的构建可以促进工程造价信息化的普及,有利于加强市场的管理服务.工程造价管理体系的关键在于工程造价动态信息的跟踪以及能够及时反馈到平台,建立并完善造价信息系统,促进信息资源的共享.此外,工程造价信息资源的共享使其更好地为工程建设市场服务,可以为建设项目的业主、设计方、监理方、施工方以及材料供应方等参与单位提供各类信息,包括单位工程造价、各类材料价格等.建设工程参与方的造价信息交流,如图2所示.由图2可知:信息化管理能够打破个体企业原有的独立模式,将单独企业融入到整个工程造价行业,加强市场的管理与服务,对相关企业的商务信息交流以及企业内部的管理具有重要意义.

2) 信息化管理有利于编制工程定额.定额编制软件工作性能强大、简单实用,且具有较好的针对性.定额编制软件的工作页面与计价表页面一致,只需用鼠标在屏幕上进行点选,就可以对计价表进行添加、修改与删除等命令.造价管理专业软件的应用,改变了以往人工作业方式耗费大量人力、物力的现象,极大提高了定额的编制效率.此外,编制人员可以根据软件的自检功能,迅速发现计价表中的不合理数据,对结果进行适时调整,保证定额数据的准确性.

3) 信息化管理有利于降低工程造价.目前,建设工程项目中材料设备费的支出占全部费用支出的比例超过60%,而且这一比例有逐年增加的趋势<sup>[8]</sup>.因此,控制建设工程材料设备费对实现工程造价管理的合理化具有重要意义.定额价格是确定工程造价的主要依据,而定额价格一般由管理部门负责制定.然而,由于传统工程造价管理的信息交流不通畅,致使该价格不能被有效监督.建立完善的造价管理信息化平台,能够有效改变上述现象,实现工程材料价格的信息化交流,为施工单位提供业内相关厂家的材料设备报价.购买方对材料的造价信息有详细的了解,能够选择最合适的材料和设备,有效降低工程造价.

4) 信息化管理有利于信息资源的积累.已完结工程的造价信息是进行造价管理工作的原始资料,这类资料经过整理与分析能为企业将来的投标提供报价信息参考.经过造价管理信息平台的共享,得到相应的价格指标及变动规律,为上级部门控制投资与编制定额提供依据.造价信息的累积是招投标体系的基础工作,系统进行工程造价信息资料的积累与利用,对招投标管理及系统地掌控整个工程信息具有重要意义.

### 4 未来的发展方向

目前,工程造价行业的业务需求与业务规模正逐步扩大,需要处理的数据量也日趋增多.如何降低工程造价管理的成本,提升管理质量与管理效率,加大信息的利用与分享成为工程造价信息化管理的目的.从长远发展的角度来说,现阶段我国工程造价管理和信息技术的结合程度较低,国内的信息技术能力仍然具有很大的创新空间.信息技术与工程造价的高度结合是造价信息化的发展趋势,工程造价信息化管理的发展方向主要包括以下4个方面.

1) 完善现代化的信息化管理理念,健全信息管理体制.随着网络化的发展,工程建设信息化的任务越来越紧迫.建设项目的大规模化、复杂化使建设项目存在大量的信息,传统的管理方法没有办法管理如此多且复杂的信息.高度发展的政策环境与市场经济,必将促进信息化管理理念与管理体制做出及时

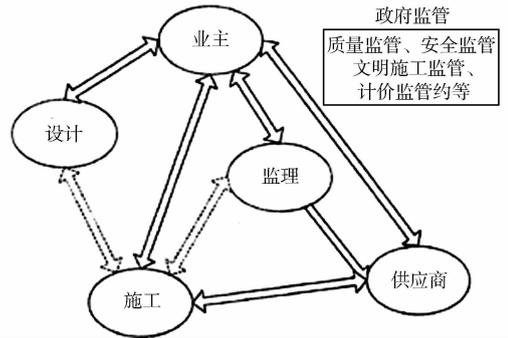


图2 建设工程参与方的造价信息交流  
Fig. 2 Information exchange among the participants of construction project cost

合理的调整,使信息化管理的政策环境与管理体制进行完善.将来信息化管理体制上除了工程建设项目业主、设计方、监理方、施工方以及供应方等参与单位的信息资源沟通外,还包括工程造价软件与电子商务的科学管理与应用.在这个基础上建立的信息化体系,能够确保信息化管理工作的顺利开展.此外,必须加强法律、法规建设,使国内的工程造价法律体系与国际接轨.工程造价是建设项目的一个重要环节,必须使我国造价管理的信息化更加规范化、国际化.当前,国家相继实施了《招标投标法》和《建筑法》,越来越重视建设行业的规范化.21世纪以后,国家更加注重与国际社会的合作,这更加迫切地要求建设项目的国际化、工程造价管理的国际化,只有充分掌握了解国际上有关工程造价信息化管理的法规、惯例、标准等,才有可能按国际惯例进入国际市场,真正完善我国现代化的信息化管理理念.

2) 融合其他完备的信息辅助系统,基础管理设施更加先进.面对当今飞速发展的社会,工程造价管理的基础在于管理设施与辅助系统的完善.造价管理系统必须有效地与企业信息管理、计算机辅助施工系统等其他的相关设备相互融合,才可以实现工程管理的自动化运行,提升工程造价信息管理的时效性.当前,计算机技术已广泛用于工程设计与相应的工程造价确定工作,利用计算机进行工程造价主要在施工图预算、工程量计算与套用定额等阶段,但工料分析与工程造价等的计算,尤其是对项目初步设计概算与前期估算的软件开发还有待进一步进行.因为造价确定不同阶段的目的差异,数据详略也不同.因此,必须尽可能地找出不同阶段造价的信息化接口,为不同阶段造价确定的软件开发与应用提供无缝连接的通道.目前,国内工程造价行业的特点主要是基础定额与工程量清单相结合的方式,需要造价软件具有多元化的特点.将来要开发出基础定额与工程量清单并存、交叉的专业造价软件系列,使之能合理方便地为工程造价信息化管理服务.

3) 进行现有技术人员的培训,人才队伍建设更加合理.在我国社会主义经济体制下,工程造价管理活动已经逐渐从被动变为主动,在变化过程中,还有相当多的障碍和矛盾存在,如人才的需求以及专业程度与企业之间的矛盾等.人力资源对任何工作的开展都至关重要,工程造价管理更是这样,现阶段我国急需解决的问题是“人”,如何在短时间内培养一批能够满足现代化造价管理的人才当前的首要工作.加大从业人员的培养力度,关键是高等院校应该承担起培养现代工程造价信息化管理人才的重任,使所培养的毕业生逐渐摆脱传统的概预算层次,培养成为具有责任心强,并且能够全面把握工程造价信息化管理动态信息的全方面人才.注重培养信息化的理念,注重学科的建设,加强高层次的人才质量监督,不仅要求对工程造价行业了如指掌,而且对相关学科也应做到拿来会用的境地.例如,计算机学、法律学、经济管理学等科学,技术人员都应该通晓.此外,在未来几年,要想在工程建设中将信息化管理的作用发挥出来,必须根据工程造价信息化管理的需求,进行合理的培训与教育措施.通过对现有技术人员的技术培训、网络教育等再教育措施,可以为我国培养出一批既懂工程造价又懂信息技术的复合型业务人才,为日后的造价信息平台的建设与运行提供保障.

4) 建立造价资料累积与分析系统,信息处理技术更加先进.要实现工程造价资料的积累、分析与储存,需要建立造价资料累积与分析系统,这一系统中最关键的就是标准化基础数据库的建立<sup>[9]</sup>.标准化基础数据库的运行,如图3所示.上述标准化基础数据库包括建设工程项目各实施阶段的工程造价信息.工程造价信息资料经过一定技术处理,可以通过打包压缩、转换格式等过程存储在基础数据库中,为建设项目的各参与方提供各类信息查询使用.累积与分析系统既应包括造价相关数据和材料的消耗量等,还应包含与工程相关的信息,如项目名称、结构类型等,以及与设计相关的一些内容和承建单位的内容.依据这些数据资料,能够有效地动态分析工程建设期间,项目所发生的费用材料等的变化,进而总结出工程项目在建设期间的工程造价的变化规律,分段分析工程所发生费用的变化情况,根据信息平台所提供的信息,将在建项目的造价与已建项目的实时造价进行动态对比,预期项目造价的走势.工程项目建设是一个庞大的体系<sup>[10]</sup>,采用计算机网络手段,及时掌握在建项目的成本和进

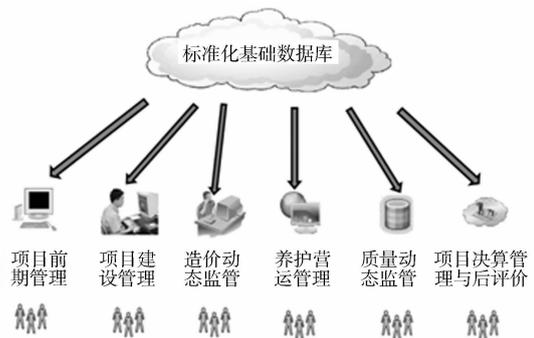


图3 标准化基础数据库

Fig. 3 Standardized basic database

步

度,并进行沟通,使参与单位能够及时地掌握工程的造价信息,保证项目合理有序地进行.我国工程管理现有措施总体比较完整<sup>[11]</sup>,累积与分析系统能对造价管理的信息资料进行全面、动态的收集、加工、传输与使用,能有效地预测未来造价信息化发展的变化与趋势,从而管理和控制工程造价管理的全过程.

## 5 结束语

分析我国工程造价管理现状,提出我国工程造价管理信息化存在的问题以及发展趋势,详细地分析了工程造价信息化管理工作流程,对推动我国建设项目管理方法的整体发展具有重要意义.工程造价的信息化进程能够极大地提高信息资源的处理效率,为企业的现代化运营提供方便.我国的工程建设量堪称世界之最,信息化管理促进了工程造价行业的历史性变革.工程造价信息化管理程度的高低在一定程度上决定了企业未来的竞争力,完善、积极的信息化手段能够为企业的发展提供有效的推动力.因此,以管理信息化为主导思想的管理活动是未来工程造价行业发展的重要方向.

### 参考文献:

- [1] 吴学军,胡温频,郭树元.关于大型建设项目全生命周期投资控制的探讨[J].武汉理工大学学报:信息与管理工程版,2005,27(6):133-136.
- [2] 关桂凤.工程造价信息化管理探讨[J].科技创新与应用,2012,22(2):123-125.
- [3] 黄琳.浅析工程造价管理信息化建设发展对策[J].城市建设理论研究,2012,37(2):54-56.
- [4] 张军霞.工程造价管理信息系统的现状及思考[J].山西建筑,2007,33(9):252-253.
- [5] 邵瑞,张建高.工程造价信息化管理发展的问题及趋势探究[J].山西建筑,2009,35(5):232-233.
- [6] 邵良杉,王志强.动态工程造价管理信息系统[J].煤炭学报,2007,32(6):664-667.
- [7] 吴伶俐.我国当前工程造价信息化管理[J].管理世界,2013,435(9):78-79.
- [8] 何蔚燕.工程造价管理的特点及进行信息化管理的必要性分析[J].江西建材,2014(133):268.
- [9] 舒昌俊.建设工程造价信息管理系统集成研究[D].武汉:武汉理工大学,2013:34-40.
- [10] 侯祥朝.工程项目结构分解的优化及应用[J].华侨大学学报:自然科学版,2002,23(3):263-266.
- [11] 章凌云,黄奕辉,张云波.工程质量管理及工程质量保证担保[J].华侨大学学报:自然科学版,2005,26(3):275-278.

## Trend of Construction Cost Information Management in China

SHEN Hua<sup>1,2</sup>

(1. School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. School of Civil Engineering and Transportation, Shanghai Technical College of Urban Management, Shanghai 200438, China)

**Abstract:** The present situation of informatization of engineering cost management in our country and its shortage are analyzed, the informatization necessity of cost management information is discussed. Based on this discussion, the development trend of the engineering cost information management in our country in future is investigated. It's shown that: at present, the integration level between the engineering cost management and information technology is low in our country, the domestic information technology can be innovated greatly; high combination between information technology and the engineering cost will be the development trend of engineering cost informatization management.

**Keywords:** project cost; informatization; trend; cost management

(责任编辑:钱筠 英文审校:方德平)

# 沟通与合同对代建制多项目目标管理的影响

王玉芳, 张云波, 祁神军, 项剑平

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 从沟通管理和合同管理两个维度提炼出影响多项目目标管理的 15 个关键因素. 基于三方面假设, 应用结构方程模型, 构建沟通管理与合同管理对代建制多项目目标管理的影响结构模型. 对代建制相关研究者及代建制多项目建设参与方的高层管理者进行问卷调查, 定量分析沟通管理、合同管理与多项目目标管理三者之间的关系. 研究表明: 沟通管理和合同管理对目标管理有显著的正向影响; 合同管理与沟通管理之间有显著的相关关系.

**关键词:** 沟通管理; 合同管理; 目标管理; 多项目管理; 代建制

**中图分类号:** TU 72

**文献标志码:** A

为提高管理水平与投资效益, 代建制模式下的建设工程开始以项目组合与项目集的多项目形式出现. 多项目管理在国内还处于起步阶段<sup>[1]</sup>, 在实际工程建设中, 项目间协调沟通失灵、合同管理复杂、质量进度难控制等问题频发. 目前的研究主要集中在代建制的理论、制度、标准、风险等方面. 此外, 一些学者针对在代建制项目中起着重要作用的沟通管理、合同管理、目标管理、组织管理等方面进行研究<sup>[2-7]</sup>. 然而, 已有的研究均是针对代建制项目的沟通管理、合同管理、目标管理的某一方面, 且仅为单项目管理, 并未考虑多项目中管理层面之间的关系和影响. 与一般建设项目相比, 代建制项目利益相关主体的管理、合同关系更为复杂, 项目沟通和协调的成本和难度相应增加. 因此, 目标管理、合同管理和沟通管理在代建制多项目管理中尤为关键. 本文从沟通管理和合同管理两个维度分析其对代建制多项目管理的影响机理, 并结合结构方程模型, 定量分析三者之间关系.

## 1 代建制多项目目标管理影响因素

多项目管理以长期性组织为对象, 通过项目群管理或项目组合管理对组织中多个项目进行全生命周期的管理. 多项目管理建立在一般项目管理的基础上, 但又与一般的单项目管理有很大的区别. 无论是通过项目组合管理, 还是项目群管理来实现多项目管理, 其目标都是通过单项目管理来实现.

文中研究的代建制多项目是以项目管理公司为代建单位, 多个业主的项目群, 即一个代建单位面临着多个业主, 同时也面对着多个总承包商. 其中: 每一个总承包商承包该代建制项目群中的一个项目或一个项目群, 且这些项目群或项目共同由多个业主所有<sup>[8]</sup>. 因此, 代建制多项目管理是指代建制模式下一组具有共同目标体系, 且相互间具有相似性的多个项目的项目群管理活动. 代建制多项目目标管理影响因素, 主要有以下 3 点.

### 1.1 合同管理维度

合同管理是指合同管理主体对工程项目合同的管理, 对建设工程合同关系进行组织、指导、协调及监督, 保证工程合同的贯彻实施等一系列管理活动. 代建制多项目的主要特点是参与单位众多, 众多参

收稿日期: 2014-07-10

通信作者: 张云波(1962-), 男, 教授, 博士, 主要从事项目管理的研究. E-mail: zhangyb@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71303082); 福建省自然科学基金青年创新基金资助项目(2012J05095); 中央高校基本科研业务专项资金资助项目(11QZR06)

与单位从自身的利益出发,通过分工协作,完成建设项目目标.因此,合同管理是项目的核心,多项目管理的合同体系则更为复杂.合同管理维度的指标因素构成及界定,如表1所示.

表1 合同管理维度的指标因素构成及界定

Tab.1 Index factors of contract management dimensions and definition

观测变量	变量界定
程序性条款(A1)	变更和审批程序、项目各方信息往来程序等复杂、冗长与否都影响项目的建设
价款的支付方式和取费标准(A2)	业主的支付能力,合同价款的分段支付是否合理,如何支付预付款、里程碑付款的分期划分及支付时间如何确定
违约争议解决(A3)	违约责任、争议解决方法等条款,索赔的申报、索赔款的批准和支付、争端的仲裁申报、仲裁机关及法律依据,在代建制模式下的多项目中可能存在风险
代建管理费取费模式(A4)	采取固定价格时,可能导致代建单位积极性不高,工作不努力;采取节约奖励时,可能导致代建单位提高概算、减少工程范围等问题;采取违约罚款时,可能导致代建单位无能力赔偿等问题
责任义务不对等、不明确(A5)	多项目的参与方多,关系复杂,合同各方风险分担与责任、权利、义务等责任不对等、不明确则可能产生风险;且代建方与项目其他参建方签订的合同的风险却是业主承担,业主风险较大
变更的标准和程序的多样化(A6)	多业主对工程项目的要求不同,并且对工程变更的标准不一致,对变更程序的要求多样化,导致工程项目索赔处理更具困难,承包商积极性受挫
索赔和变更的及时性、不规范化、不公平性(A7)	多业主、多项目下,往往出现索赔和变更的及时性、不规范化、不公平性,可能导致工程项目的索赔实施被差异化对待,影响工程项目建设的进度、成本和质量三大目标

## 1.2 沟通管理维度

沟通管理是项目的核心内容之一.项目组织内部及项目利益相关者之间的沟通效果和沟通效率至关重要,关系到代建制多项目管理能否有效、顺利地实现预期目标.代建制多项目管理中的沟通包括项目人员与客户之间的沟通,项目组内部的项目成员之间的沟通,还包括代建方的管理人员之间,代建方与多业主之间,承包商之间,承包商对专业承包商与劳务分包商,分包商之间,多业主之间的沟通.沟通管理维度的指标变量<sup>[8]</sup>的构成及界定,如表2所示.

表2 沟通管理维度观测变量构成及界定

Tab.2 Index factors of communication management dimensions and definition

观测变量	变量界定
代建方的管理人员的沟通、协调能力不足(B1)	代建单位对多项目之间的协调能力不足(空间和时间上),导致管理混乱;处理各方的利益与冲突
承包商之间相互协调能力差(B2)	承包商内部的分包,如各个班组,协调时管理能力出现问题
承包商对专业承包商与劳务分包商的协调能力差(B3)	多项目并行施工,总承包商对专业承包商与劳务分包商的协调、沟通能力不足,导致工程在时间和空间上的冲突而影响进度
分包商之间的相互合作能力差(B4)	分包商延迟退场造成其他项目的延期进场、多项目界面之间的不协作性,导致整个多项目的延期、工程质量差及投资增加
代建方档案、资料收集不足或管理不当(B5)	多项目档案、资料收集的复杂性,致使代建方档案或资料收集不足导致索赔困难
信息化建设不成熟(B6)	代建制不同于以往的项目管理模式,新模式下的多项目的建设信息化发展不成熟及其利用率的情况可能影响多项目的建设
代建方对多业主的需求分解(B7)	代建方是否能准确地分解多个业主的差异化需求
业主间的要求和利益冲突(B8)	业主的要求影响其他业主的利益

## 1.3 目标管理维度

在代建制多项目中,多项目导致代建项目各参与方关系更加复杂,代建制项目更具复杂性、多样性、可变性,从而导致代建项目各参与方的项目目标差异化.因此,在代建制多项目的建设实施过程中必须



表6 路径系数和拟合指数  
Tab.6 Path coefficients and fit indices

假设	路径	标准路径系数	标准误差	t 值	P 值
H1	合同管理↔沟通管理	0.708	0.050	4.866	* * *
H2	合同管理→目标管理	0.324	0.092	2.909	* *
H3	沟通管理→目标管理	0.675	0.139	5.211	* * *

### 3 模型结果分析

#### 3.1 潜变量的荷载分析

3.1.1 合同管理维度 在影响合同管理维度的7个因素中,由于代建管理费取费模式(A4)与责任义务不对等、不明确(A5)的荷载系数小于0.5,修正过程中剔除这两个因素.变更的标准和程序的多样化(A6)对合同管理的影响程度最大,标准化路径系数为0.692,其次是索赔和变更的及时性、不规范化、不公平性(A7),影响力度为0.621;影响力度最小的是价款的支付方式和取费标准(A2),标准化路径系数为0.502.由此可知:在合同管理方面,应注重变更和索赔,建立合理的变更标准,规范化变更程序,同时兼顾索赔和变更的时效性、规范性和公平性.在价款的支付和取费标准上,大部分被调查者认为其对合同管理方面的影响相当较弱,但也是不可忽视的因素.

3.1.2 沟通管理维度 在影响沟通管理维度的8个因素中,信息化建设不成熟(B6)和业主间的要求和利益冲突(B8)的荷载系数小于0.5,在模型修正过程中剔除这两个因素.承包商之间相互协调能力差(B2)对沟通管理的影响程度最大,标准化路径系数为0.671;影响力度最小的是代建方档案、资料收集不足或管理不当(B5),标准化路径系数为0.501.这说明在代建制多项目目标管理中,多个承包商之间的相互协调能力是关键问题.虽然结果显示代建方档案、资料收集不足或管理不当并非影响很大,但是在多项目管理中,为更好地控制目标管理,应该做好档案管理与资料管理这方面的沟通管理工作.因此,加强沟通管理,可以将项目管理中的沟通协调工具进行有效组合,建立一套有效的沟通管理机制,尽可能满足各参建方的差异化需求,确保代建项目顺利、有序地开展,发挥代建模式的优势.

#### 3.2 潜变量的路径分析

3.2.1 合同管理与沟通管理 假设H1)反映了合同管理与沟通管理之间的关系.实证结果表明:合同管理与沟通管理存在相关联关系,关联度为0.708,假设成立.在合同管理内容中,最容易被忽视且不容易把握的是沟通管理.同样,代建制多项目合同管理中的有效沟通也是为了预防和减少合同争端,提高合同各方共赢的机会.在合同管理中,需要以合同与事实为依据,通过有效的沟通渠道,营造良好的沟通环境,才能加快信息的传递,减少合同管理的工作量,提升管理效率,进一步提升合同管理的效率和效果;而沟通管理遵循合同进行有效的沟通协调工作,沟通管理与合同管理两者相互影响.

3.2.2 合同管理与目标管理 假设H2)反映了合同管理与多项目目标管理的关系.实证结果表明:合同管理对目标管理有显著的正向影响,影响程度为0.324,假设成立.这说明当其他条件不变时,每提升1个单位的合同管理,将提升0.324个单位的目标管理.合同管理贯穿于项目实施的全过程,合同管理在当代项目管理中已成为与进度管理、质量管理、成本管理等同样重要的管理职能.代建制模式下合同管理与常规模式相比具有特殊性,各地采用的合同类型也不尽相同.因此,在更具复杂化、多样化、差异化的代建制多项目建设管理中,一切工作以合同为依据,加强合同管理,协调好各参建方的关系,重视对多项目建设管理的四控制、两管理、一协调,从而高效地达到节约建设资金、保证工期、控制投资的目的.

3.2.3 沟通管理与目标管理 假设H3)反映了沟通管理对目标管理的关系.实证结果表明:沟通管理对目标管理有显著的正向影响,影响程度为0.675,假设成立.这说明当其他条件不变时,每提升1个单位的沟通管理,将提升0.675个单位的目标管理.代建项目各参建方之间的关系更为复杂,处理好工程项目代建管理过程中出现的各种矛盾和冲突是确保代建制项目进度、成本、质量三大目标的实现的关键.同时,各参与方的要求和期望存在差异,而且在看待问题及如何实现项目目标上也存在较大的差异.因此,代建项目各参与方需重视沟通管理,提高信息传递的效率和准确性,使项目按预定的目标实现.

## 4 结论

从定量的角度探索合同管理、沟通管理和目标管理三者之间的关系,研究结果证实以下3点结论.

1) 合同管理与沟通管理对目标管理直接影响程度值分别为 0.324, 0.675, 相对而言沟通管理的影响程度高于合同管理.

2) 合同管理与沟通管理之间存在较为显著的双向关联效应,其数值达到了 0.708.

3) 在代建制多项目管理中,为有序、高效地实现项目目标,必须着重构建有效的沟通管理机制,同时重视合同管理,充分发挥代建制的优势.

文中研究的是合同管理与沟通管理对代建制多项目目标管理的影响程度,还可以进一步加入组织管理、采购管理、集成管理等研究其相互影响关系,这也是今后研究的方向.

### 参考文献:

- [1] 陈忠林. 建设工程多项目管理的思考[J]. 宏观经济管理, 2013(8): 68-69.
- [2] 张伟, 朱宏亮. 政府投资项目代建制下的信息沟通与披露机制[J]. 中国港湾建设, 2008, 4(2): 72-76.
- [3] 任远. 代建方的工程项目冲突与沟通管理[J]. 中国工程咨询, 2010, 115(4): 51-53.
- [4] 张茂盛, 时宏艳. 浅谈水利工程代建制模式下的合同管理[J]. 中国水能及电气化, 2013, 99(6): 12-14.
- [5] 钱驰, 李启明, 吴伟巍, 等. 基于博弈理论的代建项目合同激励、约束条件分析[J]. 工程管理学报, 2013, 27(5): 18-22.
- [6] 王洪强, 钱忠勤. 代建制项目合同管理问题研究[J]. 建筑经济, 2008(增刊 2): 265-267.
- [7] 尹贻林, 赵进喜, 钟炜. 效用理论下的代建人成本-进度-质量激励方案[J]. 武汉理工大学学报: 信息与管理工程版, 2012, 34(3): 390-393.
- [8] 祁神军, 王玉芳, 张云波, 等. 基于结构方程模型的代建制多项目管理风险分析[J]. 科技进步与对策, 2013, 30(23): 68-72.

## Impact of Communication and Contract on Multi-Project Objective Management under the Agent Construction System

WANG Yu-fang, ZHANG Yun-bo, QI Shen-jun, XIANG Jian-ping

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

**Abstract:** Fifteen key factors affecting objective management are extracted from two dimensions, both the communication and contract management. Based on three aspects of assumptions, the structural model of the impact of communication and contract management on objective management of multi-project management under the agent construction system is established by applying structural equation models. The relationships among communication management, contract management and objective management of multi-project are analyzed quantitatively, through questionnaire survey on scholars studying the agent construction system and excellent agent construction system multi-project managers. The result shows that both the communication management and the contract management have the positive remarkable influence to the objective management, and there is significant correlation between the communication management and the contract management.

**Keywords:** communication management; contract management; objective management; multi-project management; agent construction system

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)

# 城市住区低碳评价指标体系建构

高涛, 王建平, 刘晴

(中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 从城市住区的低碳评价的目标单一性、评价量化性等特点出发,对城市住区低碳评价体系的目标进行设计.确定规划设计阶段、施工(竣工验收)阶段和运行使用阶段作为进行城市住区评价的三个主要时期,同时选取住区生命周期、各阶段、各主要能源系统共计 10 个低碳评价对象,并设定相应的低碳指数作为评价指标.在对各个评价指标的分析中,确定各个评价对象碳排放的模拟预测值或实际值的计算方法,同时明确相应基准排放值的确定方法,完成相应低碳指标的计算.最后,以构建的基准值作为分界点,将相关评价对象的低碳评价分级划分成七个梯度.

**关键词:** 城市住区;碳排放;评价体系;低碳指数

**中图分类号:** X820.2; X321

**文献标志码:** A

联合国环境规划署(UNEP)于 2009 年发布的《建筑与气候变化》报告指出,在全球范围内,建筑消耗了全球能源的 40%左右,并造成了 30%左右碳排放.全球的所有建筑中,住宅建筑所占的比例占 60%以上,消耗的能源和产生的碳排放约占能源消耗总量和碳排放总量的 20%<sup>[1]</sup>. 在我国的城镇住房的建设型式,住区型式占有很大比例,新建的城市房屋建筑中约 60%是以住区型式建设的<sup>[2]</sup>,巨大的保有量和建设量意味着巨大的能源消耗和碳排放,使城市住区成为实现建筑领域节能减排、低碳发展的重要领域.如何对城市住区碳排放情况进行合理可靠的评价,是城市住区低碳发展研究中的重要问题.本文以城市住区为研究对象,构建城市住区低碳评价的方法和体系.

## 1 城市住区低碳评价指标框架的设计

城市住区低碳评价体系的要素包括低碳评价指标和评价标准.城市住区因所处环境不同,其能源资源消耗量及相应的标准也不同,在进行住区低碳评价时,应该根据城市住区所处地域环境等,设立不同的评价指标和基准.同时,住区因其建设规模、建筑类型、使用年限等不同,导致碳排放量也不大相同.所以,对城市住区相关评价对象进行低碳评价需要在相同的评价基准上进行.

文中选择各评价对象的单位面积年平均碳排放量作为相关评价对象低碳评价的基准,采用低碳指数作为评价指标进行相关低碳评价.即在三个不同的评价时期采用各个评价对象的模拟、预测或实际碳排放量与相应的评价标准进行比较,利用评价对象碳排放基准值与模拟、预测或实际碳排放量的差值与基准值的比值方式进行确定.城市住区低碳评价各对象的低碳指数  $L$  为

$$L = \frac{E_B - E_A}{E_B} \times 100\%.$$

式中: $L$  为住区低碳评价对象的低碳指数; $E_A$  和  $E_B$  分别为住区低碳评价对象单位面积年碳排放的模拟值(预测值或实际值)和基准值,  $\text{kg} \cdot (\text{a} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ .

选取生命周期低碳指数、建材生产低碳指数、建设施工低碳指数、运行使用低碳指数、用水低碳指数、绿化固碳指数、用能低碳指数、采暖低碳指数、制冷低碳指数、照明低碳指数作为住区生命周期、各个阶段和各碳源碳汇系统的低碳评价指标.城市住区低碳评价体系评价时期及评价指标,如图 1 所示.

**收稿日期:** 2015-05-08

**通信作者:** 高涛(1982-),男,博士研究生,主要从事低碳建筑、建筑碳排放的研究. E-mail: gaotaogao@163.com.

**基金项目:** 住房和城乡建设部软科学研究项目(2011-R1-15);教育部人文社科基金资助项目(11YJCZH125)

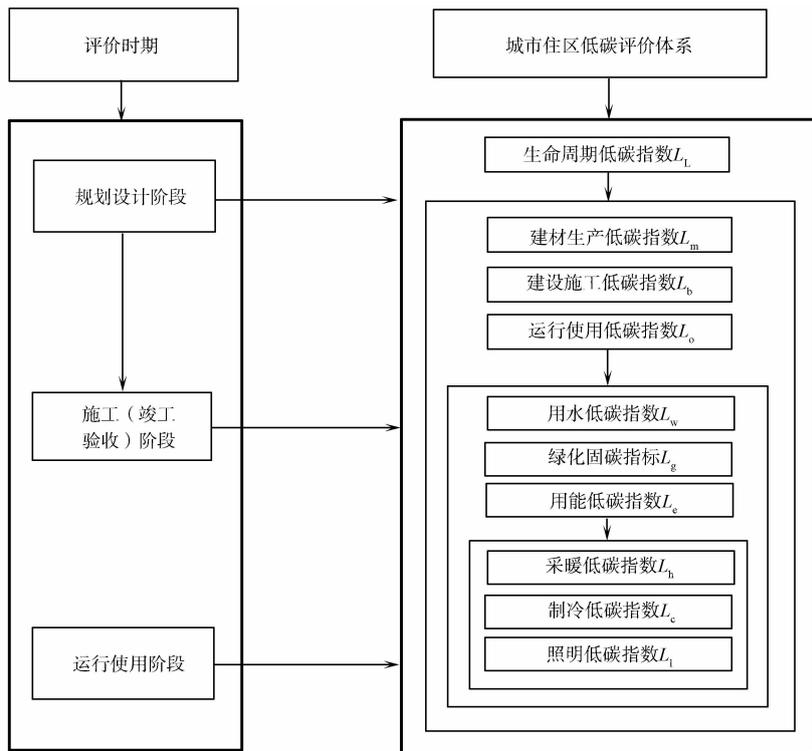


图 1 城市住区低碳评价体系评价时期及评价指标框架

Fig. 1 Evaluation period and evaluation index of urban residential district carbon evaluation system

## 2 城市住区生命周期碳排放分析

城市住区的碳排放包含在城市住区生命周期的各个阶段和各个功能系统中, 根据对城市住区评价指标分析, 作如下 4 个假定:

- 1) 生命周期碳排放主要由包括建材生产、建设施工和运营使用碳排放构成;
- 2) 运营使用碳排放主要包括给排水系统、用能系统和绿化系统固碳;
- 3) 给排水系统碳排主要包括给水系统和污水系统碳排放;
- 4) 用能系统碳排放主要包括采暖系统、制冷系统和照明系统碳排放。

由此可得城市住区生命周期、各阶段及个碳源碳汇系统单位建筑面积年碳排放量关系, 分别为

$$\begin{cases} E_L = E_m + E_b + E_o, & E_o = E_w + E_g + E_e, \\ E_w = E_s + E_d, & E_e = E_h + E_c + E_l. \end{cases}$$

式中:  $E_L, E_m, E_b, E_o, E_w, E_g, E_e, E_s, E_d, E_h$  和  $E_c$  分别为生命周期、建材生产、建设施工、运行使用、给排水系统、绿化固碳、用能系统、给水系统、污水系统、采暖系统和制冷系统的单位建筑面积年碳排放量,  $\text{kg} \cdot (\text{a} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ 。

## 3 城市住区施工低碳指数分析

### 3.1 建材生产低碳指数分析

建材碳排放量受建材生产厂家的制约, 不同的生产工艺和技术会造成建材生产碳排放量的不同, 即

$$L_m = \frac{\sum E_{m,B,i} - \sum E_{m,i}}{\sum E_{m,B,i}} = \frac{\sum W_i \times [f_{i,B}(1 - \alpha_i) + \alpha_i f_{i,B,r}] - \sum W_i \times [f_i(1 - \alpha_i) + \alpha_i f_{i,r}]}{A_0}$$

式中:  $E_{m,B,i}, E_{m,i}$  分别为第  $i$  种建材生产过程中碳排放量基准值和实际碳排放量,  $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $W_i$  为住区

建筑第  $i$  种建材使用总量,  $\text{kg}$ ;  $f_{i,B}, f_{i,B,r}$  分别为第  $i$  种建材生产过程和回收过程中的碳排放因子基准值,  $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $\alpha_i$  为第  $i$  种建材的回收率,  $\%$ ;  $f_i, f_{i,r}$  分别为第  $i$  种建材实际生产过程和回收过程中的碳排放因子,  $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $A_0$  为住区建筑总面积,  $\text{m}^2$ .

建材生产过程中, 碳排放系数可通过厂商提供的实际数据或由相关研究结论<sup>[3-5]</sup>获得, 而建材生产碳排放基准值、回收率及再生产碳排放因子, 可参考《中国绿色地碳住区技术评估手册》<sup>[6]</sup>和相关研究结论<sup>[7-8]</sup>进行设定. 部分建材的生产碳排放因子基准值( $f_{i,B}$ )、回收率( $\alpha_i$ )及再生产碳排放因子( $f_{re}$ ), 如表 1, 2 所示.

表 1 部分建材的生产过程碳排放因子基准值

Tab. 1 Carbon emission factor benchmark value of some building materials during production process

建材	钢材	铝材	水泥	玻璃	混凝土 C30	混凝土 C35	混凝土 C40	加气混凝土砌块
$f_{i,B}/\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	2.00	9.50	0.73	1.40	0.27	0.29	0.31	0.17

### 3.2 建设施工低碳指数分析

一般住区建筑施工的能源消耗中, 电力资源约占能源消耗总量的 75% 以上<sup>[9-10]</sup>. 为实现对建筑施工能耗和碳排放的控制, 国内部分省市, 如上海, 江苏、湖南等地区均以电力消耗量为控制指标. 因此, 文中采用建设施工阶段由电力使用引起的碳排放量作为建设施工低碳指标  $L_b$  的评价措施, 即

$$L_b = \frac{E_{b,B} - E_c}{E_{b,B}} = \frac{Q_{b,B}f_b/(a \cdot A_0) - Q_b f_b/(a \cdot A_0)}{Q_{b,B}f_b/(a \cdot A_0)} = \frac{Q_{b,B} - Q_b}{Q_{b,B}}$$

式中:  $E_{b,B}, E_b$  分别为建设施工用电引起的单位建筑面积年碳排放量基准值和实际值;  $Q_{b,B}, Q_b$  分别为单位建筑面积建设施工用电量基准值和实际值,  $\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $f_b$  为电力能源碳排放因子,  $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $a$  为建筑使用年限,  $\text{a}$ .

对于建设施工用电引起的单位建筑面积年碳排放量基准值, 可以根据各地公布的建设施工能耗用电限制确定. 如, 湖南长沙规定的房屋建筑施工用电能耗为  $100 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{万元}^{-1}$ , 根据中国统计年鉴查询长沙市 2014 年住宅平均造价约为  $2\,519 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-2}$ , 由此确定长沙市住宅单位建筑面积建设施工用电量基准值约为  $25.19 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$ .

## 4 运行阶段低碳指数分析

### 4.1 用水系统低碳指数分析

假设生活污水排水量和生活用水量相同的, 二者的基准值也相同, 故用水低碳指数可以用给水系统或污水系统碳排放量的模拟值和基准值计算. 以给水系统为例, 可得

$$L_w = \frac{(E_{s,B} + E_{d,B}) - (E_s + E_d)}{(E_{s,B} + E_{d,B})} \times 100\% = \frac{E_{s,B} - E_s}{E_{s,B}} \times 100\%$$

式中:  $L_s$  为给水系统低碳指数;  $E_{s,B}, E_s$  分别为给水系统引起的单位建筑面积年碳排放量基准值和模拟值(或实际值);  $E_{d,B}, E_d$  分别为污水系统引起的单位建筑面积年碳排放量基准值和模拟值(或实际值).

由于生活中炊事、洗衣等用水量难以确定, 文中主要考虑洁具用水量及其污水排水量. 因此, 住区住宅给水和污水排水量分别为

$$W_s = W_d = \frac{Q_z n_z D_z}{1\,000 \cdot A_0}$$

式中:  $W_s, W_d$  分别为单位建筑面积年生活用水的用水量和污水排水量,  $\text{m}^3 \cdot (\text{a} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ ;  $Q_z$  为各卫生器具日均用水量,  $\text{L} \cdot (\text{人} \cdot \text{d})^{-1}$ ;  $n_z$  为住区居住人数,  $\text{人}$ ;  $D_z$  为年用水天数, 可取  $D_z = 365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ . 由此, 可以计算得出给水系统的单位面积年碳排放量为

$$E_s = W_s \times f_s$$

表 2 部分建材的回收率及再生产碳排放因子基准值

Tab. 2 Carbon emission factors of recovery rate and the benchmark value of reproduction of some building materials

参数	钢材	铝材	玻璃
$\alpha_i/\%$	95	95	80
$f_{re}/\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.80	0.57	0.49

式中: $W_s$ 为住宅单位面积年生活用水的用水量, $\text{m}^3 \cdot (\text{a} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ ;  $f_s$ 为给水系统的碳排放因子, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ [6].

《建筑给水排水设计规范》中根据不同的建筑类别和卫生器具设置给出了不同的用水定额  $W_{s,B}$ ,由此可以计算出住宅建筑给水量基准值。需要注意的是,卫生器具用水约占建筑给水总量的 21% 左右<sup>[11]</sup>。所以,计算给水系统用水基准值时,需要按照此比例对相关规范和标准给出的基准值进行修正,即  $E_{s,B} = 0.21 \times W_{s,B} f_s$ ,此时,则有

$$L_w = \frac{E_{s,B} - E_s}{E_{s,B}} \times 100\% = \frac{0.21 \times W_{s,B} f_s - W_s f_s}{0.21 \times W_{s,B} f_s} \times 100\% = \frac{0.21 \times W_{s,B} - W_s}{0.21 \times W_{s,B}} \times 100\%.$$

## 4.2 绿化固碳指数分析

绿化是住区生命周期中重要的碳汇形式,可以调节空气湿度、滞留粉尘、提高住区环境质量。绿化固碳量及绿化固碳指数主要受绿化面积、绿植种类、栽种方式等因素影响<sup>[12-13]</sup>,即有

$$L_g = \frac{S_g - S_{g,B}}{S_{g,B}} \times 100\%.$$

式中: $S_g, S_{g,B}$ 分别为住区单位建筑面积年绿化固碳量及其基准值, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ .

参考《中国绿色低碳住区技术评估手册》住区不同栽种方式植物 40 a 绿化固碳量,即

$$S_g = \frac{\sum S_i \cdot X_i}{40 \cdot A_0}.$$

式中: $S_i$ 为不同栽种方式的植物面积, $\text{m}^2$ ;  $X_i$ 为单位面积不同栽种方式植物 40 a 的  $\text{CO}_2$  固定量, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ .

我国《绿色建筑评价标准》中规定,住区的绿地率不得低于 30%,人均公共绿地面积不低于  $1 \text{ m}^2$ 。同时,根据《中国绿色低碳住区技术评估手册》,绿化 40 a 对  $\text{CO}_2$  的固定量基准值为  $600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,即每年绿化对  $\text{CO}_2$  的固定量应为  $15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。所以,住区单位建筑面积年绿化固碳量基准值为

$$S_{g,B} = 0.3 \times 15 \times S_0 / A_0 = 4.5 \times S_0 / A_0.$$

式中: $S_0$ 为住区用地面积, $\text{m}^2$ .

## 4.3 用能低碳指数分析

4.3.1 采暖系统低碳指数分析 采暖系统是住区使用阶段中能耗和产生碳排放量较大的系统之一,尤其是严寒和寒冷地区。采暖系统能耗、碳排放量及低碳指数主要受住区所处的气候环境、住区建筑围护结构性能、采暖系统效率等因素影响,即有

$$L_h = \frac{E_{h,B} - E_h}{E_{h,B}} \times 100\% = \frac{Q_{h,B} f_{h,B} - Q_h f_h}{Q_{h,B} f_{h,B}} \times 100\%.$$

式中: $E_{h,B}, E_h$ 分别单位建筑面积年采暖系统碳排放基准值和模拟值(或实测值);  $Q_{h,B}, Q_h$ 分别为单位建筑面积年采暖系统耗能量基准值和模拟值(或实测值), $\text{kg} \cdot (\text{a} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ ;  $f_{h,B}, f_h$ 分别为采暖系统能耗基准值和实际值所采用的能源碳排放因子, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

采暖系统能耗量主要受住区所处的气候环境、住区建筑围护结构的设计等因素影响,可以通过相关计算、软件模拟和实测确定采暖系统能耗的模拟值和实际值。结合相应能源的碳排放因子,可以得出采暖系统的单位面积年碳排放量。对于采暖系统能耗量基准值,可以根据国家和各省市地区颁布的针对不同气候区域的居住建筑节能设计规范等文件,如《严寒、寒冷地区居住建筑节能设计标准》等,选择规定的采暖系统能耗限值作为对不同地区采暖系统能耗量基准值。

4.3.2 制冷系统低碳指数分析 制冷系统也是住区能耗和碳排放量较大系统之一、尤其是南方地区。与采暖系统类似,制冷系统能耗、碳排放量及低碳指数主要受住区所处的气候环境、住区建筑围护结构性能、制冷系统效率等因素影响,即有

$$L_c = \frac{E_{c,B} - E_c}{E_{c,B}} \times 100\% = \frac{Q_{c,B} f_{c,b} - Q_c f_c}{Q_{c,B} f_{c,b}} \times 100\%.$$

式中: $E_{c,B}, E_c$ 分别为单位建筑面积年制冷系统碳排放基准值和模拟值(或实测值);  $Q_{c,B}, Q_c$ 分别为单位建筑面积年制冷系统耗能量基准值和模拟值(或实测值), $\text{kg} \cdot (\text{a} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ ;  $f_{c,b}, f_c$ 分别为制冷系统能耗

基准值和实际值所采用的能源碳排放因子,  $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

制冷系统能耗量也可以通过相关计算、软件模拟和实测确定制冷系统能耗的模拟值和实际值, 结合相应能源的碳排放因子, 可以得出制冷系统的单位面积年碳排放量. 与采暖系统不同, 在我国发布相关节能设计标准中对居住建筑制冷系统能耗量的基准值并未进行直接给出相关的规定. 其中:《严寒、寒冷地区居住建筑节能设计标准》将制冷系统的基准值设定忽略, 而《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》、《夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准》则均提出建立与拟评价居住建筑完全相同, 并符合节能设计标准相关要求的参考建筑模型. 通过计算或计算机模拟等手段确定参考建筑的空调制冷耗电量, 此时的耗电量即为住宅空调制冷耗能量的基准值.

4.3.3 照明系统低碳指数分析 照明系统的能耗、碳排放及其低碳指数, 主要受到灯具的功率、光通、流明等性能影响<sup>[14]</sup>, 则有

$$L_1 = \frac{E_{1,B} - E_1}{E_{1,B}} \times 100\%.$$

式中:  $L_1$  为照明系统低碳指数;  $E_1$  为单位面积照明系统年碳排放量模拟值或实测值;  $E_{1,B}$  为单位面积照明系统年碳排放量基准值.

由 GB 50034-2004《建筑照明设计标准》并结合相应的碳排放因子, 可以计算得出照明系统的单位面积年碳排放量为

$$E_1 = 365 \times 10^{-3} \times n \cdot \text{LPD} \times f_1.$$

式中:  $n$  为每日照明时间, h; LPD 为照明功率密度,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $f_1$  为电力碳排放因子,  $\text{kg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ .

GB 50034-2004《建筑照明设计标准》中, 将居住建筑照明功率密度目标值设定为  $6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . 因此, 在满足照度标准值的前提下, 假设照明时间  $n = 8 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ , 电力碳排放因子为  $f = 0.81 \text{ kg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ , 则照明系统单位面积年碳排放量基准值为

$$E_{1,B} = 0.81 \times (8 \times 6 \times 365 \times 10^{-3}) = 0.81 \times 17.52 = 14.25 \text{ kg} \cdot (\text{a} \cdot \text{m}^2)^{-1}.$$

通过对采暖系统、制冷系统和照明系统碳排放量的分析, 用能低碳指数可以通过这三个系统的碳排放总量与三个系统碳排放量的基准值总量进行比较获得. 因此, 用能低碳指数为

$$L_e = \frac{(E_{h,B} + E_{c,B} + E_{1,B}) - (E_h + E_c + E_1)}{(E_{h,B} + E_{c,B} + E_{1,B})} \times 100\%.$$

同样的, 通过对用水系统、用能系统和绿化系统的碳排放和固碳情况分析, 运行阶段低碳指数可以通过采暖系统碳排放、制冷系统碳排放、照明系统碳排放、给排水系统碳排放, 绿化固碳量与相应的基准值总量进行比较获得. 因此, 用能低碳指数为

$$L_o = \frac{(E_{h,B} + E_{c,B} + E_{1,B} + E_{s,B} + E_{d,B} - S_{g,B}) - (E_h + E_c + E_1 + E_s + E_d - S_g)}{(E_{h,B} + E_{c,B} + E_{1,B} + E_{s,B} + E_{d,B} - S_{g,B})} \times 100\%.$$

## 5 城市住区生命周期低碳指数分析

通过对住区建材生产、建设施工和运行使用碳排放情况的分析, 给出了住区相关阶段和相关系统的碳排放模拟值、实际值, 以及住区相关阶段和相关系统碳排放基准值的确定方法. 由此进一步可以得出城市住区生命周期低碳指数为

$$L_L = \left( 1 - \frac{\sum E_{m,i} + E_b + E_h + E_c + E_1 + E_s + E_d - S_g}{\sum E_{m,B,i} + E_{c,B} + E_{h,B} + E_{c,B} + E_{1,B} + E_{s,B} + E_{d,B} - S_{g,B}} \right) \times 100\%.$$

## 6 城市住区低碳评价结果的应用

在对住区生命周期、各阶段及各主要能耗系统等对象碳排放情况的进行分析评价, 得到确定结果后, 可以对结果经过分级控制或达标控制来对城市住区的低碳程度进行认证. 分级范围或是达标与否, 无法通过评价体系自身界定, 必须经由评价体系设计者决定.

由于城市住区的低碳评价对象众多, 需要根据不同情况对评价对象设置不同评级标准. 文中采用分

级方式直观地反映住区各评价对象的低碳程度,将不同评价对象的低碳等级分为差级( $L < -30\%$ )、较差( $-30\% \leq L < -15\%$ )、次级( $-15\% \leq L < -5\%$ )、合格( $-5\% \leq L \leq 5\%$ )、良好( $5\% < L \leq 15\%$ )、优良( $15\% < L \leq 30\%$ )、优秀( $L > 30\%$ )共7个梯度,简洁直观地表现评价对象的低碳程度。

目前国内关于城市住区低碳评价的相关研究较少,文中构建的城市住区低碳评价体系还是一个初步的框架。对于该评价体系未来的发展与应用,可考虑将相关的评价对象进一步扩展,使城市住区低碳评价进一步完善。同时,可以考虑将该评价体系与城市住区的绿色、生态、可持续等评价体系结合,促进城市住区实现低碳、绿色、可持续发展。

#### 参考文献:

- [1] 中国城市科学研究会. 绿色建筑(2010)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2010:3-4.
- [2] 王静. 城市建筑绿色评估体系的应用与优化[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2010:16-17.
- [3] 罗智星,杨柳,刘加平,等. 建筑材料 CO<sub>2</sub> 排放计算方法及其减排策略研究[J]. 建筑科学,2011,27(4):1-8.
- [4] 张涛,姜裕华,黄有亮,等. 建筑中常用的能源与材料的碳排放因子[J]. 中国建设信息,2010(23):58-59.
- [5] 张涛,吴佳洁,乐云. 建筑材料全寿命期 CO<sub>2</sub> 排放量计算方法[J]. 工程管理学报,2012,26(1):23-26.
- [6] 聂梅生,秦佑国,江亿. 中国绿色低碳住区低碳技术评估手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2011:78-79.
- [7] 李兵. 低碳建筑技术体系与碳排放测算方法研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012:138-139.
- [8] 燕艳. 浙江省建筑全生命周期能耗和 CO<sub>2</sub> 排放评价研究.[D]. 杭州:浙江大学,2011:44-45.
- [9] 鲍安红,彭力. 重庆高层住宅建筑施工用电控制指标研究[J]. 西南大学学报:自然科学版,2014,36(4):169-172.
- [10] 孙邦君,连健. 建筑施工现场用电量及其节能潜力分析[J]. 建筑电气,2011(2):47-51.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50555-2010 民用建筑节能设计标准[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2010:8-9.
- [12] 宋华伟,丰剑利. 绿色住宅的固碳技术与应用[J]. 华中建筑,2011(6):77-79.
- [13] 郭新想. 居住区绿化植物固碳能力评价方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2010:10.
- [14] 史典阳,黄晖,任艳,等. 三种电光源生命周期环境影响分析[J]. 照明工程学报,2014,25(5):120-123.

## Study on Low Carbon Evaluation Index System of Urban Residential District

GAO Tao, WANG Jin-ping, LIU Qing

(School of Mechanical and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** Based on the characteristics of single goal, quantization of low-carbon evaluation of urban residential district, goals of low carbon evaluation system was designed. The planning and design stage, construction (final acceptance) stage and the operational stage are selected as three major evaluate stages of urban residential district evaluation system. Meanwhile, select life cycle, each stage, the main energy system etc. are selected as 10 evaluate object, and set the appropriate low-carbon index is set for them. The method of simulation value and actual value of carbon emissions of each object is built, and each low carbon index is calculated. Based on the cut-off point established, the low carbon evaluation is divided to seven gradients.

**Keywords:** urban residential district; carbon emissions; evaluation system; low-carbon index

(责任编辑:黄仲一 英文审校:方德平)

# 稳定单叶调和凸函数和星像函数的构造

朱孟坤, 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  $D = \{z \mid |z| < 1\}$  上的调和凸映照和调和星像映照的几何性质. 利用单叶调和映照剪切构造, 通过单叶解析  $k$ -凸函数, 构造了一类  $D$  上具有稳定的单叶调和凸像映照和星像映照, 所得结果改进并且推广了 Hernández 等的结果.

**关键词:** 剪切构造;  $k$ -凸函数; 稳定调和凸像映照; 稳定调和星像映照

**中图分类号:** O 174.51

**文献标志码:** A

## 1 预备知识

单位圆盘  $D = \{z \mid |z| < 1\}$  上的复值调和映照可表示为  $f(z) = h(z) + \overline{g(z)}$ , 其中,  $h(z)$ ,  $g(z)$  为在  $D$  上的解析函数. Lewy<sup>[1]</sup> 证明了单连通区域  $\Omega$  上的调和映照  $f(z) = h(z) + \overline{g(z)}$  是局部单叶的, 当且仅当它的  $J_f(z) = |h'(z)|^2 - |g'(z)|^2 \neq 0$ , 当  $J_f(z) > 0$  时, 称  $f(z)$  是保向的; 否则, 称  $f(z)$  为反向的. 如果  $\Omega$  上的单叶调和映照  $f(z)$  满足  $|g'(z)/h'(z)| \leq t < 1$ ,  $t$  为常数, 则  $f(z)$  为  $\Omega$  上的调和拟共形映照.

关于拟共形映照的性质, 可见文献[2]. 如果  $f(z) = h(z) + \overline{g(z)} = z + \sum_{n=2}^{\infty} a_n z^n + \overline{\sum_{n=2}^{\infty} b_n z^n}$  为  $D$  上的单叶调和映照, Clunie 等<sup>[3]</sup> 提出了系数猜想,  $|a_n| \leq \frac{(n+1)(2n+1)}{6}$ ,  $|b_n| \leq \frac{(n-1)(2n-1)}{6}$ , 极值映照可

由  $K(z) = \frac{z - \frac{1}{2}z^2 + \frac{1}{6}z^3}{(1-z)^3} + \overline{\frac{\frac{1}{2}z^2 + \frac{1}{6}z^3}{(1-z)^3}}$  达到. 该猜想在单叶调和映照的一些子集上成立, 但在整个集合

上成立与否仍未得到证明. 近年来, 许多学者对该猜想做了大量的研究<sup>[4-7]</sup>. 文献[8-9]研究了单叶调和映照成为调和拟共形映照的性质. Hernández 等<sup>[10]</sup> 研究了单叶调和映照的稳定性问题, 围绕调和映照及解析函数的稳定单叶性及稳定几何性质进行深入研究, 对以上猜想的解决做了大量工作.

定义在  $D$  上的保向单叶调和凸映照  $f(z) = h(z) + \overline{g(z)}$ , 对任意  $\lambda \in \partial D$ , 若  $f_\lambda(z) = h(z) + \lambda \overline{g(z)}$  都是  $D$  上的单叶凸映照, 则称  $f(z)$  为  $D$  上的稳定调和凸映照 (SHC); 如果  $f_\lambda(z) = h(z) + \lambda \overline{g(z)}$  都是  $D$  上的单叶星像映照, 则称  $f(z)$  为  $D$  上的稳定调和星像映照 (SHS\*). Hernández 等<sup>[10]</sup> 研究  $D$  上  $k$ -凸解析函数的水平剪切函数  $f(z) = h(z) + \overline{g(z)}$  为稳定调和凸映照的问题, 证明了如下定理.

**定理 A** 对任意的  $\lambda$  且  $|\lambda| = 1$ , 保向调和映照  $f_\lambda(z) = h(z) + \lambda \overline{g(z)}$  为  $D$  上的调和凸映照的充分必要条件, 是  $F_\lambda(z) = h(z) + \lambda \overline{g(z)}$  为  $D$  上凸解析函数.

**定理 B** 若  $f(z) = h(z) + \overline{g(z)}$  是  $D$  上的保向单叶稳定调和凸映照, 则对任意的  $\lambda \in \overline{D}$ , 有  $h(z) + \lambda \overline{g(z)}$  都是  $D$  上的凸函数. 特别地, 当  $\lambda = 0$  时,  $h(z)$  是  $D$  上的单叶凸函数.

**定义 1**  $D$  上局部单叶解析函数  $\varphi(z) = z + \sum_{n=2}^{\infty} a_n z^n$  称为  $k$ -凸解析函数, 若  $\varphi(z)$  满足

$$\operatorname{Re}\left\{1+z \frac{\varphi''(z)}{\varphi'(z)}\right\} \geq k > 0, \quad |z| < 1. \tag{1}$$

特别地, 当式(1)中的非负常数  $k$  不存在时, 称  $\varphi(z)$  为 0-凸函数.

基于定理 A, B, Hernández 等<sup>[10]</sup>还证明了定理 C.

**定理 C** 设  $\varphi(z)$  为一个  $k$ -凸解析函数, 则存在  $\mu \in D$ , 当  $|\mu|$  充分小时, 由方程组

$$\left. \begin{aligned} h(z) - g(z) &= \varphi(z), & z \in D, \\ g'(z)/h'(z) &= \mu z, & z \in D \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

构造出来的调和映照  $f(z) = h(z) + \overline{g(z)} \in \text{SHC}$ .

定理 C 只是个定性的结论, 它只给出了当  $|\mu| \leq \frac{k}{k+1+\sqrt{1+2k}}$  时, 由式(2)构造的  $f(z) = h(z) + \overline{g(z)} \in \text{SHC}$ . 对于给定的  $k$ -凸解析函数  $\varphi(z)$ , 找到  $\mu$  的确切范围, 使构造的调和映照  $f(z) = h(z) + \overline{g(z)}$  为稳定单叶调和凸映照, 是有待解决的问题. 相应于单叶函数的 Alexander 定理, Hernández 等<sup>[10]</sup>证明了定理 D.

**定理 D** 定义在单位圆上的解析函数  $h(z), g(z), H(z)$  以及  $G(z)$  满足如下关系, 即

$$zh'(z) = H(z), \quad zg'(z) = -G(z),$$

则  $f(z) = h(z) + \overline{g(z)} \in \text{SHC}$  的充分必要条件是  $F(z) = H(z) + \overline{G(z)} \in \text{SHS}^*$ .

根据以上研究成果, 寻找在什么条件下使得  $f(z) = h(z) + \overline{g(z)} \in \text{SHC}$  或  $\text{SHS}^*$ , 是个相当有趣的问题. 文中将改进定理 C 的结果, 并相应地找到一类稳定调和星像映照.

## 2 主要结果及证明

由  $k$ -凸解析函数的定义可知:  $0 \leq k \leq 1$ . 当  $k=1$  时, 恒等映照  $\varphi(z) = z$  为  $D$  上的 1-凸解析函数. 构造一类  $k$ -凸解析函数, 使得  $0 \leq k \leq 1$ . 记函数  $\varphi(z) = z + \frac{1}{4+\alpha}z^2$ , 其中,  $\alpha$  为任意正实数. 易证  $\varphi(z)$  在  $D$  上单叶解析. 由调和映照的最小模原理可得

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}\left\{1+z \frac{\varphi''(z)}{\varphi'(z)}\right\} &= \operatorname{Re}\left\{1+\frac{2z}{4+\alpha+2z}\right\} = \\ &= \frac{1}{2}\left(\frac{4+\alpha+4z}{4+\alpha+2z}+\frac{4+\alpha+4\bar{z}}{4+\alpha+2\bar{z}}\right) = \\ &= \frac{(4+\alpha)^2+6(4+\alpha)\operatorname{Re}\{z\}+8|z|^2}{(4+\alpha)^2+4(4+\alpha)\operatorname{Re}\{z\}+4|z|^2} \geq \frac{\alpha}{\alpha+2} > 0. \end{aligned}$$

故  $\varphi(z)$  为  $\frac{\alpha}{\alpha+2}$ -凸解析函数, 当  $z \rightarrow -1$  时,  $k \rightarrow \frac{\alpha}{\alpha+2}$ . 当  $\alpha=0$  时,  $\varphi(z)$  为 0-凸解析函数; 当  $\alpha \rightarrow \infty$  时,  $\varphi(z)$  为 1-凸解析函数.

**定理 1** 存在一个  $\varphi_0(z)$  为  $D$  上的单叶解析凸函数, 由方程组

$$\left. \begin{aligned} H(z) - G(z) &= \varphi_0(z), & z \in D, \\ G'(z) &= \mu z H'(z), & z \in D, \quad 0 < |\mu| < 1 \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

构造的调和映照  $F(z) = H(z) + \overline{G(z)} \notin \text{SHC}$ .

证明 取  $\varphi_0(z) = z + \frac{1}{4}z^2$ , 显然  $\varphi_0(z)$  为  $D$  上的 0-凸函数. 那么满足式(3)的解  $F(z) = H(z) + \overline{G(z)}$ , 有

$$H(z) = \frac{2\mu+1}{2\mu^2} \log \frac{1}{1-\mu z} - \frac{z}{2\mu}, \quad G(z) = H(z) - z - \frac{z^2}{4}.$$

记  $\tilde{F}_\lambda(z) = H(z) + \lambda G(z)$ ,  $\lambda \in \partial D$ , 易知  $\tilde{F}_\lambda(z)$  在  $D$  上单叶解析. 又因为  $|\lambda|=1, 0 < |\mu| < 1$  且  $z \in D$ , 可知  $\tilde{F}'_\lambda(z) = H'(z)(1+\lambda\mu z) = \frac{(2+z)(1+\lambda\mu z)}{2(1-\mu z)} \neq 0$ . 根据调和映照最小模原理可得

$$\min_{z \in D} \operatorname{Re}\left\{1+z \frac{\tilde{F}''_\lambda(z)}{\tilde{F}'_\lambda(z)}\right\} = \min_{z \in D} \operatorname{Re}\left\{1+z \frac{H''(z)+\lambda G''(z)}{H'(z)+\lambda G'(z)}\right\} \leq$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}\left\{1 - \frac{H''(-1) + \lambda G''(-1)}{H'(-1) + \lambda G'(-1)}\right\} = \\ \operatorname{Re}\left\{1 - \frac{1 + 2\mu - \lambda\mu^2}{(1 + \mu)(1 - \lambda\mu)}\right\} = \operatorname{Re}\left\{\frac{1}{1 + \mu} - \frac{1}{1 - \lambda\mu}\right\}. \end{aligned} \quad (4)$$

记  $\mu = \rho \exp(i\theta)$ ,  $|\rho| < 1$ , 令  $\lambda = \exp(-i\theta)$ , 则式(4)恒小于等于零. 故当  $0 < |\mu| < 1$  时,  $\tilde{F}_\lambda(z)$  为非凸单叶解析函数, 根据定理 A,  $F(z) = H(z) + \overline{G(z)} \notin \text{SHC}$ , 证毕.

由定理 1 可知: 对于定理 C, 只有当  $\varphi(z)$  为  $k$ -凸函数时, 由式(3)构造的调和映照  $f(z) = h(z) + \overline{g(z)}$  才有可能为稳定凸的. 为此, 将  $\mu$  的取值范围精确化, 方便构造出更多的 SHC 类函数.

**定理 2** 设  $\varphi(z)$  是  $D$  上的  $k$ -凸解析函数 ( $k > 0$ ), 则对于  $\mu \in D$  且满足  $|\mu| \leq \frac{k}{1 + \sqrt{1 + k^2}}$ , 由方程组

$$\left. \begin{aligned} h(z) - g(z) &= \varphi(z), & z \in D, \\ g'(z)/h'(z) &= \mu z, & z \in D \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

构造出来的单叶保向调和映照  $f(z) = h(z) + \overline{g(z)} \in \text{SHC}$ .

**证明** 定义  $\varphi_\theta(z) = h(z) - \exp(2i\theta)g(z)$ ,  $\omega(z) = \mu z$ . 根据定理 A, 只需验证函数  $\varphi_\theta(z)$  在  $D$  内对于任意的  $\theta \in (0, \pi)$  为凸解析函数. 利用  $\varphi(z)$  为  $k$ -凸解析函数这个假设以及凸解析函数的特点, 可得到

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}\left\{1 + z \frac{\varphi''_\theta(z)}{\varphi'_\theta(z)}\right\} &= \operatorname{Re}\left\{1 + z \left(\frac{\varphi''(z) + (1 - \exp(2i\theta))g''(z)}{\varphi'(z) + (1 - \exp(2i\theta))g'(z)}\right)\right\} = \\ &= \operatorname{Re}\left\{1 + z \left(\frac{\varphi''(z) + (1 - \exp(2i\theta))g''(z)}{\varphi'(z) + (1 - \exp(2i\theta))g'(z)} - \frac{\varphi''(z)}{\varphi'(z)} + \frac{\varphi''(z)}{\varphi'(z)}\right)\right\} = \\ &= \operatorname{Re}\left\{1 + z \frac{\varphi''(z)}{\varphi'(z)}\right\} + \operatorname{Re}\left\{\frac{z(1 - \exp(2i\theta))(g''(z)\varphi'(z) - g'(z)\varphi''(z))}{\varphi'^2(z) + (1 - \exp(2i\theta))g'(z)\varphi'(z)}\right\} = \\ &= \operatorname{Re}\left\{1 + z \frac{\varphi''(z)}{\varphi'(z)}\right\} + \operatorname{Re}\left\{\frac{z(1 - \exp(2i\theta))(g''(z)h'(z) - g'(z)h''(z))}{h'^2(z)(1 - \exp(2i\theta)\omega(z))(1 - \omega(z))}\right\} \geq \\ &= k + \operatorname{Re}\left\{\frac{z(1 - \exp(2i\theta))\omega'(z)}{(1 - \exp(2i\theta)\omega(z))(1 - \omega(z))}\right\} = \\ &= k + \operatorname{Re}\left\{\frac{(1 - \exp(2i\theta))\mu z}{(1 - \exp(2i\theta)\mu z)(1 - \mu z)}\right\} = \\ &= k + \operatorname{Re}\left\{\frac{1}{1 - \mu z}\right\} - \operatorname{Re}\left\{\frac{1}{1 - \exp(2i\theta)\mu z}\right\} \geq \\ &= k + \frac{1}{1 + |\mu z|} - \frac{1}{1 - |\exp(2i\theta)\mu z|} \geq \\ &= k + \frac{1}{1 + |\mu|} - \frac{1}{1 - |\mu|} = k - \frac{2|\mu|}{1 - |\mu|^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

当  $|\mu| \leq \frac{k}{1 + \sqrt{1 + k^2}}$  时, 式(6)恒大于零, 从而由式(5)构造出来的调和映照  $f(z) = h(z) + \overline{g(z)} \in$

SHC. 下面通过具体的例子构造 SHC 函数.

**例 1** 令  $\varphi(z) = z$ , 则  $\varphi(z)$  为 1-凸函数, 由定理 2 可知: 仅当  $|\mu| \leq \sqrt{2} - 1$  时, 满足式(5)的解  $f(z) = h(z) + \overline{g(z)} \in \text{SHC}$ . 分别取  $\mu = \frac{3}{10}$ ,  $\mu = \sqrt{2} - 1$ ,  $\mu = 1/2$ , 可得  $f_{\frac{3}{10}}(z) = \frac{20}{3} \operatorname{Re}\left\{\log \frac{10}{10 - 3z}\right\} - \bar{z}$ ,  $f_{\sqrt{2}-1}(z) = 2(\sqrt{2} + 1) \operatorname{Re}\left\{\log \frac{1}{1 - (\sqrt{2} - 1)z}\right\} - \bar{z}$ ,  $f_{\frac{1}{2}}(z) = 4 \operatorname{Re}\left\{\log \frac{2}{2 - z}\right\} - \bar{z}$ . 通过 Mathematica 软件, 它们将  $D$  分别映成的区域, 如图 1 所示. 图 1 中: Re 表示实部; Im 表示虚部.

通过探究定理 2 发现,  $\omega(z) = \mu z$  的形式并不是固定的, 对此还可作如下推广.

**推论 1** 设  $\varphi(z)$  为  $D$  上的  $k$ -凸解析函数 ( $k > 0$ ). 则对于  $\mu \in D$  且满足  $|\mu| \leq \frac{k}{n + \sqrt{k^2 + n^2}}$ , 由方程组

$$\left. \begin{aligned} h(z) - g(z) &= \varphi(z), & z \in D, \\ g'(z)/h'(z) &= \mu z^n, & z \in D \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

构造出来的单叶保向调和映照  $f(z) = h(z) + \overline{g(z)} \in \text{SHC}$ .

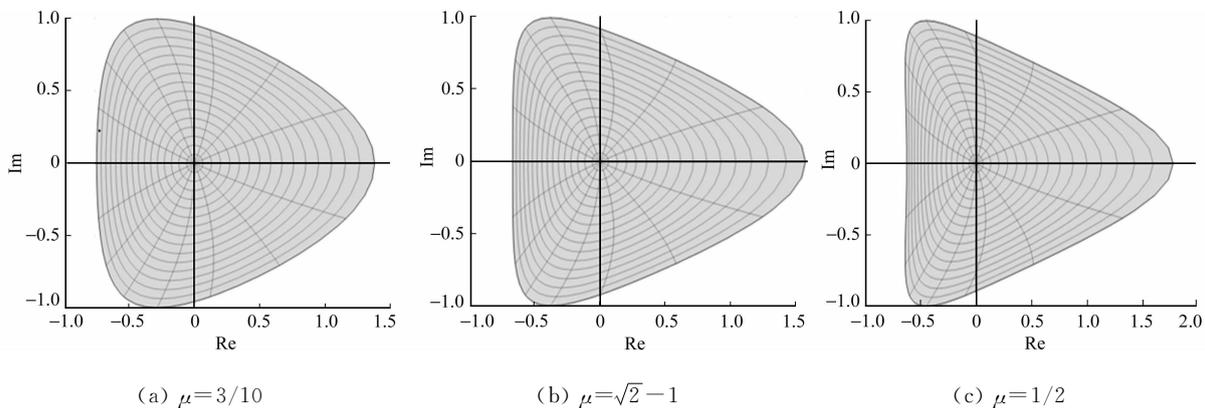


图 1 单位圆盘  $D$  经过  $f_\mu(z)$  映照后的图像

Fig. 1 Function  $f_\mu(z)$  maps  $D$  onto the domains respectively

**例 2** 令  $\varphi(z) = z + \frac{1}{6}z^2$ , 则  $k = \frac{1}{2}$  且  $|\mu| \leq \sqrt{17} - 4$ , 取  $\mu = \frac{3}{25}$ , 得到方程组

$$\begin{cases} h(z) - g(z) = z + \frac{1}{6}z^2, & z \in D, \\ \frac{g'(z)}{h'(z)} = \frac{3}{25}z^2, & z \in D \end{cases}$$

的解, 即  $f(z) = \operatorname{Re}\left\{\frac{5\sqrt{3}}{3}\log\frac{30\sqrt{3}+18z}{30\sqrt{3}-18z} - \frac{25}{9}\log\left(1 - \frac{3}{25}z^2\right)\right\} - \overline{z} - \frac{1}{6}\overline{z}^2$ . 通过 Mathematica 软件  $f(z)$  将  $D$  映成的区域, 如图 2 所示.

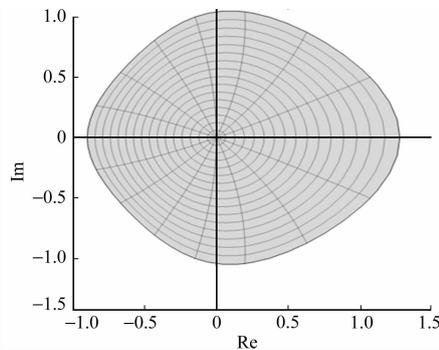


图 2 单位圆盘  $D$  经  $f(z)$  映照后的图像

Fig. 2 Function  $f(z)$  maps  $D$  onto the domain

**定理 3** 设  $\varphi(z)$  是定义在  $D$  上的  $k$ -凸解析函数. 则对于  $\mu \in D$  且满足  $|\mu| \leq \frac{k}{1 + \sqrt{k^2 + 1}}$ , 使调和映照  $f(z) = h(z) + \overline{g(z)}$  为  $D$  上关于原点的稳定调和星像映照, 其中,  $h(z), g(z)$  分别满足  $h(z) = \frac{z}{1 - \mu z^2}\varphi'(z), g(z) = -\frac{\mu z^2}{1 - \mu z^2}\varphi'(z)$ .

证明 记

$$\begin{cases} H(z) = \int_0^z \frac{h(\zeta)}{\zeta} d\zeta = \int_0^z \frac{1}{1 - \mu\zeta} \varphi'(\zeta) d\zeta, \\ G(z) = \int_0^z \frac{g(\zeta)}{\zeta} d\zeta = \int_0^z \frac{\mu\zeta}{1 - \mu\zeta} \varphi'(\zeta) d\zeta \end{cases}$$

由简单计算可得,  $H(z) - G(z) = \varphi(z), G'(z)/H'(z) = \mu z$ . 由定理 2 可知  $F(z) = H(z) + \overline{G(z)}$  为  $D$  上的稳定调和凸映照, 又因为  $zH'(z) = h(z), zG'(z) = -g(z)$  且  $h(0) = g(0) = 0$ , 由定理 D 可知  $f(z) = h(z) + \overline{g(z)}$  为  $D$  上的关于原点的稳定调和星像映照.

**例 3** 对于  $D$  上的 1-凸解析函数  $\varphi(z) = z$ . 取  $\mu = \frac{1}{4}$ . 根据定理 3 可得  $h(z) = \frac{4z}{4-z}, g(z) = -\frac{z^2}{4-z}$ , 故  $f(z) = \frac{4z}{4-z} - \frac{\overline{z^2}}{4-z}$ .

通过 Mathematica 软件,  $f(z)$  将  $D$  映成的区域, 如图 3 所示. 类比推论 1, 很容易得到如下推论.

**推论 2** 设  $\varphi(z)$  为  $D$  上的  $k$ -凸解析函数, 则对于  $\mu \in D$  且满足  $|\mu| \leq \frac{k}{n + \sqrt{k^2 + n^2}}$ , 使调和映照  $f(z) = h(z) + \overline{g(z)}$  为  $D$  上关

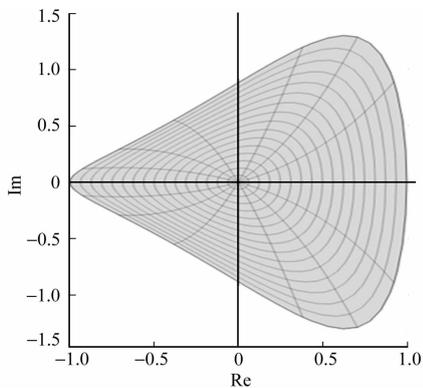


图 3 单位圆盘  $D$  经  $f(z)$  映照后的图像

Fig. 3 Function  $f(z)$  maps  $D$  onto the domain

于原点的稳定调和星像映照. 其中,  $h(z), g(z)$  分别满足  $h(z) = \frac{z}{1-\mu z^n} \varphi'(z), g(z) = \frac{\mu z^{n+1}}{1-\mu z^n} \varphi'(z)$ .

推论 2 可根据推论 1、定理 3 及定理 D 直接得出.

文献[10]中证明了:若  $f(z) = h(z) + \overline{g(z)} \in \text{SHC}$ , 则对于所有非负整数  $n$ , 都有  $||a_n| - |b_n|| \leq \max\{|a_n|, |b_n|\} \leq |a_n| + |b_n| \leq 1$ . 极值映照可由  $f(z) = \frac{z}{1-z}$  达到. 相应于定理 2 可以得到, 若  $f(z) = h(z) + \overline{g(z)} = z + \sum_{n=2}^{\infty} a_n z^n + \overline{\sum_{n=2}^{\infty} b_n z^n}$  由式(5)构造, 通过系数比较得到  $|a_n| \leq 1, |b_n| \leq \frac{n-1}{n} \frac{k}{1+\sqrt{1+k^2}}, n \geq 2$ .

### 参考文献:

- [1] LEWY H. On the non-vanishing of the Jacobian in certain one-to-one mappings [J]. Uspekhi Mat Nauk, 1948, 3(2): 216-219.
- [2] AHLFORS L V. Lectures on quasiconformal mappings[M]. New Jersey: Van Nostrand Princeton, 1966: 15-22.
- [3] CLUNIE J. SHEIL-SMALL T. Harmonic univalent functions[J]. Ann Acad Sci Fenn Ser (A), 1984, 9(1): 3-25.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 潘旭玲, 黄心中. 一类单位圆盘上单叶调和映照的延拓定理[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2013, 34(6): 701-705.
- [7] BSHOUTY D, LYZZAIK A. Problems and conjectures in planar harmonic mappings[J]. J Analysis, 2010, 18: 69-81.
- [8] 黄心中. 单位圆到水平条形无界区域的调和拟共形映照[J]. 数学学报: 中文版, 2014, 57(7): 875-880.
- [9] HUANG Xin-zhong. Harmonic quasiconformal mappings on the upper half-plane[J]. Complex Variables and Elliptic Equations, 2013, 58(7): 1005-1011.
- [10] HERNÁNDEZ R, MARTÍN M J. Stable geometric properties of analytic and harmonic functions[J]. Math Proc Camb Phil Soc, 2013, 155(2): 343-359.
- [11] DUREN P. Univalent functions[M]. New York: Springer-Verlag, 1983: 40-45.
- [12] DUREN P. Harmonic mappings in the plane[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004: 29-56.

## Construction of Stable Univalent Convex Harmonic Mappings and Starlike Mappings

ZHU Meng-kun, HUANG Xin-zhong

(School of Mathematical Sciences, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** Studying the geometric properties of stable univalent convex harmonic mappings and starlike harmonic mappings in  $D = \{z \mid |z| < 1\}$ , we construct one class of stable univalent convex and starlike harmonic mappings in  $D$  by the way of shear constructure with  $k$ -convex analytic functions. Our results improve and generalize the results obtained by Hernández, etc.

**Keywords:** shear constructure;  $k$ -convex mapping; stable convex harmonic mapping; stable starlike harmonic mapping

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 黄心中)

# 新的递推有界 GM 回归估计算法

成立花<sup>1</sup>, 张俊敏<sup>2</sup>

(1. 西安工程大学 理学院, 陕西 西安 710048;  
2. 西安建筑科技大学 理学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 提出一种新的递推有界广义极大似然类(GM)回归估计器,新估计器所用的风险函数基于更一般的框架,并采用有界 M-估计函数.设计一个新的权函数拒绝或降低异常点对估计结果的影响,并增加一个增广项,提出一种具有较强自适应能力的面向自回归(AR)模型参数估计的算法.仿真结果表明:提出的 GM 回归估计器及面向 AR 模型的算法对异常点不利影响(主要来自于回归变量中的加性异常点)的抑制效果均优于其他 GM 估计器;在参数不做任何调整的情况下,面向 AR 模型的算法对非平稳环境下的估计具有良好的估计精度和收敛性.

**关键词:** GM 估计器;鲁棒估计;AR 模型;加性异常点

**中图分类号:** TN 911.7; O 241.2; N 945.14

**文献标志码:** A

最小二乘法(LS)和递推的最小二乘法(RLS)是系统辨识中重要的算法.然而,在实际应用中,由于各种干扰因素的存在,辨识所需的数据往往会被污染,包含数量和类型均未知的异常点.这些异常点使估计精度降低,甚至完全失效.解决这一问题通常有两种方式:从数据中找出异常点并剔除掉,用剩余的数据进行辨识;发展替代 LS 和 RLS 的鲁棒回归算法.由于后者简便实用,备受学者关注,已发展出了许多算法<sup>[1-9]</sup>.在自回归模型的参数估计中,数据中的异常点通常被分为两个基本类<sup>[10]</sup>:加性异常点(第一型的异常点)与革新异常点(第二型的异常点).革新异常点在系统运行过程中遵循了真实系统的关系,因此,就系统的辨识而言,其不利影响较小.然而,当数据中包含较大的加性异常点型杠杆点时,这些算法的估计性能会严重下降,甚至失效.针对广义极大似然类(GM)估计器中存在的问题,本文提出新的递推有界 GM 回归估计算法.

## 1 问题描述

考虑模型  $y_i = \mathbf{x}_i \boldsymbol{\beta} + v_i, i = 1, 2, \dots, n$ . 其中:  $\boldsymbol{\beta} = [b_1, b_2, \dots, b_p]^T$ ;  $y_i$  是第  $i$  时刻响应变量观测值;  $\mathbf{x} = [x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,p}]$ ;  $v_i$  是相互独立,且尺度参数  $\sigma$  未知的干扰项.所用的数据记作  $(\mathbf{X}_n, \mathbf{Y}_n)$ . 其中:  $\mathbf{X}_n = [\mathbf{x}_1^T, \mathbf{x}_2^T, \dots, \mathbf{x}_n^T]^T, \mathbf{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$ . 获得第  $n$  时刻的参数估计  $\hat{\boldsymbol{\beta}}_n$  后,第  $i$  时刻相应的残差记作  $r_{n,i} = y_i - \mathbf{x}_i \hat{\boldsymbol{\beta}}_n$ . 而在迭代法中,相应于起始估计  $\hat{\boldsymbol{\beta}}_n^{(0)}$  在第  $i$  时刻的残差记作  $r_{n,i}^{(0)} = y_i - \mathbf{x}_i \hat{\boldsymbol{\beta}}_n^{(0)}, i = 1, 2, \dots, n$ .

采用文献[9]中的一般框架,并加以改进的风险函数为

$$J_n(\boldsymbol{\beta}) = \sum_{i=1}^n \lambda^{n-i} \rho\left(\frac{r_{n,i}}{\sigma d(\mathbf{x}_i)}\right) d^2(\mathbf{x}_i) \xi(\mathbf{x}_i) \sigma^2. \quad (1)$$

式(1)中: $\lambda$  为遗忘因子,  $0 < \lambda \leq 1$ ;  $d(\mathbf{x}_i), \xi(\mathbf{x}_i)$  为待定函数;  $\rho(\cdot)$  是一个改进于 Huber 函数的有界 M-估计函数,即

**收稿日期:** 2015-01-11

**通信作者:** 成立花(1973-),女,副教授,主要从事领域泛函分析、估计理论及应用的研究. E-mail: 178529238@qq.com.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(11101323);陕西省教育厅自然科学基金(12JK0879)

$$\rho(t) = \begin{cases} t^2/2, & |t| \leq M_1, \\ M_1 |t| - M_1^2/2, & M_1 < |t| \leq M_2, \\ M_2 M_1 - M_1^2/2, & M_2 < |t|. \end{cases}$$

上式中:  $M$  为常值参数. 新估计器是式(1)的解.

### 2 新的 GM 估计器

相应于式(1)的“正规方程”为

$$\sum_{i=1}^n \lambda^{n-i} \psi\left(\frac{r_{n,i}}{\sigma d(\mathbf{x}_i)}\right) d(\mathbf{x}_i) \xi(\mathbf{x}_i) \alpha \mathbf{x}_i^T = 0. \tag{2}$$

式(2)中:  $\psi = \rho'$ .

定义权函数为

$$\omega(t) = \begin{cases} 1, & |t| \leq M_1, \\ M_1 \text{sign}(t)/t, & M_1 < |t| \leq M_2, \\ 0, & M_2 < |t|. \end{cases}$$

上式中:  $\text{sign}(\cdot)$  是符号函数. 因此, 式(2)可写为

$$\sum_{i=1}^n \lambda^{n-i} \omega\left(\frac{r_{n,i}}{\sigma d(\mathbf{x}_i)}\right) \xi(\mathbf{x}_i) \mathbf{x}_i^T r_{n,i} = 0. \tag{3}$$

用矩阵形式描述, 有

$$\mathbf{X}_n^T \mathbf{A}_n \mathbf{W}_n \mathbf{Y}_n = \mathbf{X}_n^T \mathbf{A}_n \mathbf{W}_n \mathbf{X}_n \boldsymbol{\beta}_n. \tag{4}$$

式(4)中:  $\mathbf{A}_n = \text{diag}(\lambda^{n-1}, \lambda^{n-2}, \dots, \lambda^{n-i}, \dots, 1)$ ;  $\mathbf{W}_n = \text{diag}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_i, \dots, \omega_n)$ ,  $\omega_i = \omega\left(\frac{r_{n,i}}{\sigma d(\mathbf{x}_i)}\right) \xi(\mathbf{x}_i)$ .

定义

$$\mathbf{P}_n = (\mathbf{X}_n^T \mathbf{A}_n \mathbf{W}_n \mathbf{X}_n)^{-1}, \tag{5}$$

由式(4)可得

$$\boldsymbol{\beta}_n = \mathbf{P}_n \mathbf{X}_n^T \mathbf{A}_n \mathbf{W}_n \mathbf{Y}_n. \tag{6}$$

式(5), (6)是新算法的基础公式.

为确定  $d(\mathbf{x}_i)$  和  $\xi(\mathbf{x}_i)$  的具体形式, 定义 3 个矩阵, 有

$$\begin{aligned} \widetilde{\mathbf{H}}_n &\triangleq \mathbf{X}_n \mathbf{P}_n \mathbf{X}_n^T, \\ \widetilde{\mathbf{H}} \mathbf{W}_n &\triangleq \widetilde{\mathbf{H}}_n \mathbf{A}_n \mathbf{W}_n, \\ \mathbf{H} \mathbf{W}_n &\triangleq (\mathbf{W}_n)^{1/2} \mathbf{A}_n^{1/2} \widetilde{\mathbf{H}}_n \mathbf{A}_n^{1/2} (\mathbf{W}_n)^{1/2}. \end{aligned}$$

上式中:  $(\mathbf{W}_n)^{1/2} = \text{diag}(\sqrt{\omega_1}, \sqrt{\omega_2}, \dots, \sqrt{\omega_n})$ ;  $(\mathbf{A})^{1/2} = \text{diag}(\sqrt{\lambda^{n-1}}, \sqrt{\lambda^{n-2}}, \dots, 1)$ . 一般地, 这 3 个矩阵具有如下 4 个性质: 1)  $\widetilde{\mathbf{H}}_n$  是对称, 但非幂等的; 2)  $\widetilde{\mathbf{H}} \mathbf{W}_n$  是幂等, 但非对称的; 3)  $\mathbf{H} \mathbf{W}_n$  是幂等对称的, 且其对角元素  $h\omega_i$  的范围为  $0 \leq h\omega_i \leq 1$ ; 4)  $\widetilde{\mathbf{H}} \mathbf{W}_n$  的对角元素  $\widetilde{h}\omega_i$  的范围为  $0 \leq \widetilde{h}\omega_i \leq 1$ .

**引理<sup>[11]</sup>** 设  $\mathbf{X}_n^T \mathbf{X}_n$  可逆, 则矩阵  $\mathbf{H}_n = \mathbf{X}_n (\mathbf{X}_n^T \mathbf{X}_n)^{-1} \mathbf{X}_n^T$  为幂等对称矩阵, 且其对角元素  $h_i$  的范围为  $0 \leq h_i \leq 1$ . 矩阵  $\mathbf{H}_n$  的对角元素通常被用来检测杠杆点.

证明 性质 1), 2) 的结论很容易得到, 所以只需证明性质 3) 即可.

假设  $\overline{\mathbf{W}}_n$  是  $\mathbf{W}_n$  中非零的相应部分,  $\overline{\mathbf{A}}_n, \overline{\mathbf{X}}_n$  分别是  $\mathbf{A}_n, \mathbf{X}_n$  中相应于  $\overline{\mathbf{W}}_n$  的部分, 且类似于普通最小二乘法中  $\mathbf{X}_n^T \mathbf{X}_n$  是可逆的假设. 新估计器中假定  $\overline{\mathbf{X}}_n^T \overline{\mathbf{X}}_n$  是可逆的, 式(5)可简化为  $\mathbf{W} \mathbf{P}_n = (\overline{\mathbf{X}}_n^T \overline{\mathbf{A}}_n \overline{\mathbf{W}}_n \overline{\mathbf{X}}_n)^{-1}$ . 而  $\overline{\mathbf{A}}_n^{1/2}, \overline{\mathbf{W}}_n^{1/2}$  的乘积是非奇异的, 令  $\mathbf{D} = (\overline{\mathbf{W}}_n)^{1/2} \overline{\mathbf{A}}_n^{1/2} \overline{\mathbf{X}}_n$ , 在  $\mathbf{H} \mathbf{W}_n$  中相应于  $\overline{\mathbf{W}}_n$  的部分  $\overline{\mathbf{H}} \mathbf{W}_n$  可以表示为

$$\overline{\mathbf{H}} \mathbf{W}_n = (\overline{\mathbf{W}}_n)^{1/2} \overline{\mathbf{A}}_n^{1/2} (\overline{\mathbf{X}}_n^T \overline{\mathbf{A}}_n \overline{\mathbf{W}}_n \overline{\mathbf{X}}_n)^{-1} \overline{\mathbf{X}}_n^T \overline{\mathbf{A}}_n^{1/2} (\overline{\mathbf{W}}_n)^{1/2} = \mathbf{D}_n (\mathbf{D}_n^T \mathbf{D}_n)^{-1} \mathbf{D}_n^T.$$

根据性质 1),  $\mathbf{H} \mathbf{W}_n$  是幂等对称的, 且其对角元素  $\overline{h\omega_j}$  的范围为  $0 \leq \overline{h\omega_j} \leq 1$ . 又因为  $\mathbf{H} \mathbf{W}_n$  中相应于权重为 0 的对角元素也是 0, 所以对于  $\mathbf{H} \mathbf{W}_n$  的所有对角元素, 有  $0 \leq h\omega_j \leq 1$ .

下面分析基于式(5), (6)的残差特性.

**定理** 残差  $r_{n,i}$  的方差  $(\sigma_\lambda^{(i)})^2$  与  $\widetilde{h}\omega_i, \sigma^2$  之间满足  $(\sigma_\lambda^{(i)})^2 \leq (1 - \widetilde{h}\omega_i)\sigma^2$ .

**证明** 根据式(6), 残差向量的形式有

$$\mathbf{r}_n = \mathbf{Y}_n - \mathbf{X}_n \mathbf{P}_n \mathbf{X}_n^T \mathbf{A}_n = (\mathbf{I}_n - \mathbf{X}_n \mathbf{P}_n \mathbf{X}_n^T \mathbf{A}_n \mathbf{W}_n) \mathbf{Y}_n = (\mathbf{I}_n - \widetilde{\mathbf{H}} \mathbf{W}_n) \mathbf{Y}_n. \tag{7}$$

式(7)中:  $\mathbf{I}_n$  为  $n$  阶单位矩阵.

在观测噪声为独立同分布的假设之下, 残差向量  $\mathbf{r}_n$  的协方差矩阵为

$$\text{cov}(\mathbf{r}_n) = (\mathbf{I}_n - \widetilde{\mathbf{H}} \mathbf{W}_n) \sigma^2 (\mathbf{I}_n - (\widetilde{\mathbf{H}} \mathbf{W}_n)^T) = (\mathbf{I}_n - \widetilde{\mathbf{H}} \mathbf{W}_n - (\widetilde{\mathbf{H}} \mathbf{W}_n)^T) + \widetilde{\mathbf{H}} \mathbf{W}_n (\widetilde{\mathbf{H}} \mathbf{W}_n)^T \sigma^2. \tag{8}$$

于是残差  $r_{n,i}$  的方差为

$$(\sigma_\lambda^{(i)})^2 = (1 - 2\widetilde{h}_i \lambda^{n-i} \omega_i + \sum_{j=1}^n (\lambda^{n-j})^2 \widetilde{h}_{i,j}^2 \omega_j^2) \sigma^2. \tag{9}$$

式(9)中:  $\widetilde{h}_{i,j}$  是  $\widetilde{\mathbf{H}}_n$  的第  $i$  行第  $j$  列的元素;  $\widetilde{h}_i$  表示其对角线上的相应元素. 注意到  $(\lambda^{n-j}) \leq \lambda^{n-j}, j=1, 2, \dots, n$ , 且  $0 \leq \omega_j \leq 1$ , 易得

$$(\sigma_\lambda^{(i)})^2 \leq (1 - 2\widetilde{h}_i \lambda^{n-i} \omega_i + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n \lambda^{n-j} \widetilde{h}_{n,j}^2 \omega_j + (\lambda^{n-i})^2 \widetilde{h}_i^2 \omega_i^2) \sigma^2. \tag{10}$$

又根据  $\widetilde{\mathbf{H}} \mathbf{W}_n$  的幂等性, 可知其对角元素与其他元素的关系, 有

$$\widetilde{h}\omega_i = \widetilde{h}_i \lambda^{n-i} \omega_i = \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n \lambda^{n-j} \widetilde{h}_{i,j}^2 \omega_j + (\lambda^{n-i})^2 \widetilde{h}_i^2 \omega_i^2. \tag{11}$$

因而, 把式(11)代入式(10), 可得

$$(\sigma_\lambda^{(i)})^2 \leq (1 - \widetilde{h}\omega_i) \sigma^2 = (1 - \widetilde{h}\omega_i) \sigma^2. \tag{12}$$

由性质 4), 又因为式(12)右边是非负的, 考虑到在权重矩阵和遗忘因子确定的情况下,  $\widetilde{h}\omega_i$  是关于  $\mathbf{x}_i$  的函数, 取  $d\mathbf{x}_i = \sqrt{1 - \widetilde{h}\omega_i}, 0 \leq \widetilde{h}\omega_i < 1$ , 并定义一个统计量  $\bar{t}_i = r_{i,n} / (\hat{\sigma}_n \sqrt{1 - \widetilde{h}\omega_i})$ . 考虑到  $\mathbf{H}_n$  的对角元素  $h_i$  是  $\widetilde{h}\omega_i$  的特殊形式, 且对普通的最小二乘法而言,  $h_i$  有检测回归变量中异常点的功能. 为了避免  $\widetilde{h}\omega_i$  的值接近 1 时, 造成计算上的误差, 定义  $\xi(\cdot)$  函数为

$$\xi(\mathbf{x}_i) = \begin{cases} 1, & \widetilde{h}\omega_i < K, \\ 0, & \text{其他.} \end{cases}$$

上式中:  $K$  为可调的参数. 该参数确定数据  $\mathbf{x}_i$  是否为异常点. 如果  $\widetilde{h}\omega_i < K$ , 认为  $\mathbf{x}_i$  是正常的; 否则, 认为  $\mathbf{x}_i$  是异常的. 为方便, 将  $\xi(\mathbf{x}_i), d(\mathbf{x}_i)$  分别记作  $\bar{\xi}(\widetilde{h}\omega_i), \bar{d}(\widetilde{h}\omega_i)$ .

新递推估计器采用一步迭代法推导. 假定在  $n-1$  时刻的权矩阵  $\mathbf{W}_{n-1}$  和相关的估计  $\hat{\boldsymbol{\beta}}_{n-1}, \mathbf{P}_{n-1}$  已经得到, 那么相应的式(5), (6)可以表示为

$$\mathbf{P}_{n-1} = (\mathbf{X}_{n-1}^T \mathbf{A}_{n-1} \mathbf{W}_{n-1} \mathbf{X}_{n-1})^{-1}, \tag{13}$$

$$\hat{\boldsymbol{\beta}}_{n-1} = \mathbf{P}_{n-1} \mathbf{X}_{n-1}^T \mathbf{A}_{n-1} \mathbf{W}_{n-1} \mathbf{Y}_{n-1}. \tag{14}$$

此时, 初始权重矩阵取  $\mathbf{W}_n^{(0)} = \text{diag}(\text{diag}(\mathbf{W}_{n-1}), 1)$ , 而  $\hat{\boldsymbol{\beta}}_n, \mathbf{P}_n$  的初始估计为

$$\mathbf{P}_n^{(0)} = (\mathbf{X}_n^T \mathbf{A}_n \mathbf{W}_n^{(0)} \mathbf{X}_n)^{-1} = (\lambda \mathbf{X}_{n-1}^T \mathbf{A}_{n-1} \mathbf{W}_{n-1} \mathbf{X}_{n-1} + \mathbf{x}_n^T \mathbf{x}_n)^{-1} = (\lambda \mathbf{P}_{n-1}^{-1} + \mathbf{x}_n^T \mathbf{x}_n)^{-1}, \tag{15}$$

$$\hat{\boldsymbol{\beta}}_n^{(0)} = \mathbf{P}_n^{(0)} \mathbf{X}_n^T \mathbf{A}_n \mathbf{W}_n^{(0)} \mathbf{Y}_n = \mathbf{P}_n^{(0)} (\lambda \mathbf{X}_{n-1}^T \mathbf{A}_{n-1} \mathbf{W}_{n-1} \mathbf{Y}_{n-1} + \mathbf{x}_n^T \mathbf{y}_n) = \mathbf{P}_n^{(0)} (\lambda \mathbf{P}_{n-1}^{-1} \hat{\boldsymbol{\beta}}_{n-1} + \mathbf{x}_n^T \mathbf{y}_n) = \tag{16}$$

$$\mathbf{P}_n^{(0)} ((\mathbf{P}_{n-1}^{(-0)} - \mathbf{x}_n^T \mathbf{x}_n) \hat{\boldsymbol{\beta}}_{n-1} + \mathbf{x}_n^T \mathbf{y}_n) = \hat{\boldsymbol{\beta}}_{n-1} + \mathbf{P}_n^{(0)} \mathbf{x}_n^T (\mathbf{y}_n - \mathbf{x}_n \hat{\boldsymbol{\beta}}_{n-1}).$$

式(15), (16)中:  $\mathbf{P}_n^{(-0)}$  为  $\mathbf{P}_n^{(0)}$  的逆矩阵.

令  $\mathbf{A} = \lambda \mathbf{P}_{n-1}^{(-1)}, \mathbf{C} = \mathbf{I}_p, \mathbf{B} = \mathbf{D}^T = \mathbf{x}_n^T$ , 并将矩阵的逆的公式  $(\mathbf{A} + \mathbf{BCD})^{-1} = \mathbf{A}^{-1} - \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} (\mathbf{DA}^{-1} \mathbf{B} + \mathbf{C}^{-1})^{-1} \mathbf{DA}^{-1}$  应用于式(15), 则  $\hat{\mathbf{P}}_n^{(0)}$  的递推计算公式变为

$$\mathbf{P}_n^{(0)} = \frac{1}{\lambda} \mathbf{P}_{n-1} (\mathbf{I}_p - \frac{\mathbf{x}_n^T \mathbf{x}_n \mathbf{P}_{n-1}}{\lambda + \mathbf{x}_n \mathbf{P}_{n-1} \mathbf{x}_n^T}). \tag{17}$$

迭代开始后, 需要计算再加权矩阵  $\widetilde{\mathbf{W}}_n$ . 此时, 只对  $\omega_n$  进行更新, 保持  $\mathbf{W}_n^{(0)}$  中的相应元素不变, 即取  $\widetilde{\mathbf{W}}_n = \text{diag}(\text{diag}(\mathbf{W}_{n-1}), \omega_n)$ . 由于  $\lambda^0 = 1, \omega_n^{(0)} = 1$ , 易知  $\widetilde{h}_n^{(0)} = \widetilde{h}\omega_n^{(0)} = \mathbf{x}_n \mathbf{P}_n^{(0)} \mathbf{x}_n^T, \bar{h}_n^{(0)} = \frac{r_{n,n}^{(0)}}{\hat{\sigma} \sqrt{1 - \widetilde{h}_n^{(0)}}}$ . 因此,

$w_n = w(\tilde{t}_n^{(0)})\tilde{\xi}(\tilde{h}_n^{(0)})$ . 一个更好的做法是将  $W_n^{(0)}$  的对角元素都进行更新. 然而, 为了得到递推的计算公式, 这种做法不得不放弃. 但是, 引入的遗忘因子和所用 M-估计函数的有界性可以降低这种影响.

在推导  $P_n, \hat{\beta}_n$  的递推计算公式时, 除  $D = w_n x_n$  不同外, 其他做法类似于式(16), (17)的推导, 可得

$$P_n = \frac{1}{\lambda} P_{n-1} (I_p - \frac{x_n^T w_n x_n P_{n-1}}{\lambda + w_n x_n P_{n-1} x_n^T}), \tag{18}$$

$$\hat{\beta}_n = P_n X_n^T \Lambda_n \tilde{W}_n Y_n = \hat{\beta}_{n-1} + P_n w_n x_n^T (y_n - x_n \hat{\beta}_{n-1}). \tag{19}$$

式(16)~(19)形成了递推有界广义极大似然类(RBGM)回归估计器. 为了降低计算量, 新估计器还可以描述为

输入:  $\hat{\beta}_{n-1}, P_{n-1}, (x_n, y_n)$ ;

输出:  $\hat{\beta}_n, P_n$ ;

1) 令  $P_\lambda = \frac{1}{\lambda} P_{n-1}, q_n = x_n P_{n-1} x_n^T, Q_n = x_n^T x_n P_{n-1}, X_y = x_n^T (y_n - x_n \hat{\beta}_{n-1})$ ;

2)  $P_n^{(0)} = P_\lambda (I_p - \frac{Q_n}{\lambda + q_n}), \beta_n^{(0)} = \hat{\beta}_{n-1} + P_n^{(0)} X_y$ ;

3)  $w_n = w(\tilde{t}_n^{(0)})\tilde{\xi}(\tilde{h}_n^{(0)})$ ;

4)  $P_n = P_\lambda (I_p - \frac{w_n Q_n}{\lambda + w_n q_n}), \hat{\beta}_n = \hat{\beta}_{n-1} + w_n P_n X_y$ .

### 3 AR 模型参数估计算法

在观测数据中含有有大量加性异常点的情况下进行 AR 模型参数估计时, RBGM 也是有偏的. 为此, 需要对其进行必要的改造, 把面向 AR 模型参数估计的算法记作 AR-RBGM.

首先, 用  $\tilde{x}_n, \tilde{\beta}_n$  替换 RBGM 中的  $x_n, \beta_n, \tilde{\beta}_n = [b_1, b_2, \dots, b_p, \eta_1], \tilde{x}_n = [y_{n-1}, y_{n-2}, \dots, y_{n-p}, \epsilon_{n-1}]$  ( $\eta_1$  为增广参数,  $\epsilon_{n-1}$  为增广变量). 在初始化时,  $\epsilon_{n-1}$  和  $\eta_1$  都赋 0 值. 在运行期间,  $\eta_1$  随着算法自动更新.

其次, 增加一个加性异常点的检测过程. 在此过程中涉及两种残差的计算, 一是不包括增广项的  $r_{n,n}$ , 二是包括增广项的残差  $\tilde{r}_{n,n} = y_n - \tilde{x}_n \tilde{\beta}_n$ . 在当前  $n$  时刻的估计已经得到后, 假设以前的加性异常点的影响已经体现在增广项里, 且当前的观测数据不是加性异常点, 那么相应的接受域为  $|\tilde{r}_{n,n}| \leq \gamma \hat{\sigma}_n$ , 而相应的拒绝域为  $|\tilde{r}_{n,n}| > \gamma \hat{\sigma}_n$ . 其中:  $\gamma$  是个可调常数, 一般取 1.5 左右即可. 据检验结果可知: 如果拒绝了假设, 则认为  $y_n$  是加性异常点, 其影响应该体现在增广项中, 相应地取  $\epsilon_n = r_{n,n}$ ; 否则, 取  $\epsilon_n = 0$ . 此外,  $\hat{\sigma}_n$  是用  $\tilde{r}_{n,i}$  替换  $r_{n,j}$  后, 通过式(20)计算得到的, 而在用 RLS 进行启动的阶段, 可直接用 med 估计, 也可以借用先验估计结果.

在 AR 模型参数估计时, 无论数据中包含或不包含异常点, 异常点是革新或加性, AR-RBGM 中的参数都无须重置. 另外, RBGM 和 AR-RBGM 追踪系统突变的能力主要依赖于遗忘因子的大小, 当需要追踪突变时, 遗忘因子相对取小一点, 如 0.99 等; 不需要追踪突变时, 遗忘因子则取得相对大一点, 如 0.999 或 0.999 9 等. 在估计精度和对突变的追踪能力方面需要折中取舍.

### 4 仿真实验

在实验中, 假定需要辨识的真实系统为

$$z_i - 1.2z_{i-1} + 0.52z_{i-2} = e_i. \tag{20}$$

式(20)中:  $e_i$  为相互独立同分布的随机变量, 且  $e_i \sim N(0, \sigma_1^2)$ . 该模型已经在文献[5, 10]中被用来检验 M 和 GM 估计器的鲁棒性.

在观测值的仿真实验中, 如果第一型异常点出现, 相应的观测值  $y_i$  用  $y_i = z_i + v_i$  进行模拟. 其中:  $v_i \sim (1 - \kappa_1) \times "0" + \kappa_1 \times N(0, \sigma_2^2)$ , 如果第二型异常点出现, 相应的观测值  $y_i$  通过把式(21)中的  $e_i$  替换为另一个随机变量  $n_i$ , 并令  $y_i = z_i$  进行模拟. 其中:  $n_i \sim N(0, \sigma_1^2) + \kappa_2 \times N(0, \sigma_3^2)$ . 在仿真实验中, 设计了 4 种更加复杂的情形, 观测数据如表 1 所示. 每一种情形都将整个过程分成 3 个阶段, 并且假定第一型异常点或者第二型异常点分别出现在某一个阶段.

在所有情形中, 取  $\sigma_1^2 = 25, \kappa_1 = 0.05, \kappa_2 = 0.05, \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = 400$ . 采用对数化平均相对误差 (LMRE) 来刻画估计精度及收敛性, 即

$$LMRE(n) = 20 \log_{10} \left( \left( \sum_{m=1}^M \|\hat{\beta}_m^{(n)} - \beta\|_2 / \|\beta\|_2 \right) / M \right). \quad (21)$$

式(21)中:  $M$  为程序运行的次数;  $\beta$  为系统的真实参数;  $\hat{\beta}_m^{(n)}$  为在第  $m$  次运行时,  $n$  时刻  $\beta$  的估计.

实验中用经典的 RLS 和另外两种递推的 GM 估计器 RGM<sup>[8]</sup> 和 RKW<sup>[4]</sup> 做了比较. 在没有异常点的情况下这几种估计器的表现, 如图 1 所示. 图 1 中: LMRE 为对数化平均相对误差;  $n$  为时序. 在比较时, 每种估计器都进行了参数调整以使其表现尽可能达到最好. 具体地, 对 RLS,  $\lambda = 0.9999$ ; 对 RGM,  $\lambda = 0.9999, c = 2.8, P(0) = 100I_2$ ; 对 RKW,  $P(0) = A^{-1}(0) = 100I_2, \lambda = 0.9999, c = 2, a = 5$ ; 对 RBGM 和 AR-RBGM,  $\lambda = 0.9999, N_{\text{initial}} = 10, \lambda_c = 0.98, \gamma = 1.5, L = 20, K = 0.85, M_1 = 1.88, M_2 = 2.41$ . 为了方便比较, 所有的初始尺度估计中,  $\sigma_0 = 5$ . 实验结果表明: 在此情形下, 除了 AR-RBGM 的表现稍差以外, 其他估计器表现相当. 因为 AR-RBGM 中的增广项改变了原始模型的结构, 对其性能产生了有限的影响.

表 1 4 种情形的观测数据

Tab. 1 Four types of observed data

情形	第一阶段	第二阶段	第三阶段
1	无异常点	无异常点	无异常点
2	无异常点	第一、二型异常点	第一型异常点
3	第二型异常点	第一型异常点	无异常点
4	第一型异常点	第二型异常点	无异常点

非平稳环境(情形 2~4)下估计性能比较, 如图 2~4 所示. 图 2~4 中: LMRE 为对数化平均相对误差;  $n$  为时序. 由图 2, 3 可知: 即使当加性异常点出现在算法已达到或者接近稳定状态时, RLS, RGM, RKW 完全失效, 而 RBGM 对这些影响抑制效果是明显的, 但精度仍然不高; AR-RBGM 能在各种情形下都保持较高的精度和收敛性, 其精度与没有异常点时的精度差别很小. 由图 4 可知: 对加性异常点出现在初始阶段的情形, 仍然是 AR-RBGM 保持较高精度和良好收敛性, 其他估计器全部失; 加性异常点出现在起始阶段时, AR-RBGM 的相应的指标会变大一点, 这主要是受到非鲁棒启动算法 RLS 的影响.

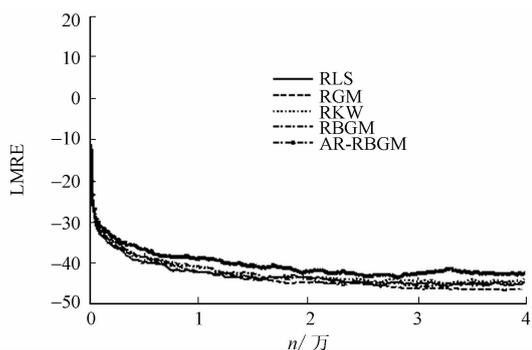


图 1 平稳环境(情形 1)下估计性能比较

Fig. 1 Performance comparison of the algorithm for the stability environment (case 1)

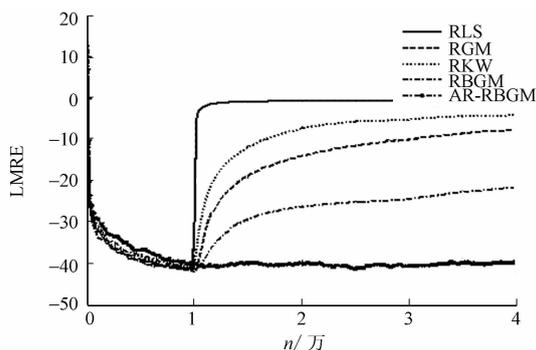


图 2 非平稳环境(情形 2)下估计性能比较

Fig. 2 Performance comparison of the algorithm for the instability environment (case 2)

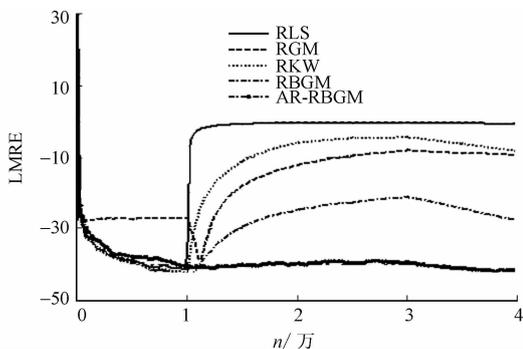


图 3 非平稳环境(情形 3)下估计性能比较

Fig. 3 Performance comparison of the algorithm for the instability environment (case 3)

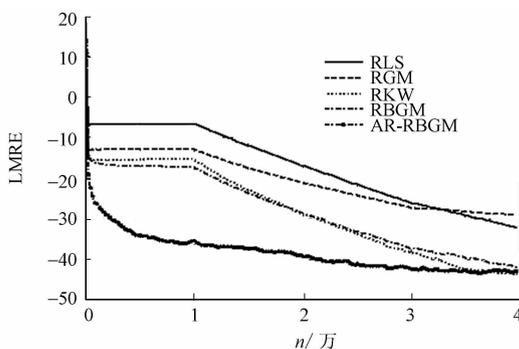


图 4 非平稳环境(情形 4)下估计性能比较

Fig. 4 Performance comparison of the algorithm for the instability environment (case 4)

## 5 结束语

改进 GM 估计器的一般框架,提出一种新的递推 GM 回归估计器(RBGM),并针对 AR 模型参数估计提出了 AR-RBGM. RBGM 和 AR-RBGM 均能对回归变量中的加性异常点的影响起到抑制作用,特别是 AR-RBGM 能在非平稳环境下实现自适应的估计,并保持良好的精度和收敛性.新估计器还可以进行改进,一方面,鲁棒的启动算法可以提高性能;另一方面,可进一步推广到 ARMA 模型参数的估计中,从而获得相应的鲁棒算法.然而,由于 AR-RBGM 引入了增广变量,增加了额外的计算量.

### 参考文献:

- [1] HUBER P J. Robust regression: Asymptotics, conjectures and monte carlo[J]. *Annals of Statistics*, 1973, 1(5): 799-821.
- [2] CAMPBELL K. Recursive computation of M-estimates for the parameters of a finite autoregressive process[J]. *The Annals of Stat*, 1982, 10(2): 442-453.
- [3] ANTOCH J, EKBLÖM H. Recursive robust regression computational aspects and comparison[J]. *Computational Statistics and Data Analysis*, 1995, 19(2): 115-128.
- [4] SEJLING K, et al. Methods for recursive robust estimation of AR parameters[J]. *Computational Statistics and Data Analysis*, 1994, 17(5): 509-536.
- [5] PHAM D S, ZOUBIR A M. A sequential algorithm for robust parameter estimation[J]. *IEEE Signal Processing Lett*, 2005, 12(1): 21-24.
- [6] VEGA L R, REY H, BENESTY J, et al. A robust recursive least squares algorithm[J]. *IEEE Trans Signal Process*, 2009, 57(3): 1209-1216.
- [7] KRASKER W S, WELSCH R E. Efficient bounded-influence regression estimation[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1982, 77(379): 595-604.
- [8] GRILLENZONI C. Recursive generalized M-estimators of system parameters[J]. *Technometrics*, 1997, 39(2): 211-224.
- [9] ENGIUND J E. Recursive versions of the algorithm by Krasker and Welsch[J]. *Sequential Analysis*, 1991, 10(3/4): 211-234.
- [10] MARONNA R A, MARTIN R D, YOHAI V J. *Robust statistics: Theory and methods*[M]. West Sussex: John Wiley & Sons, 2006: 888-889.
- [11] ROUSSEEUW P J, LEROY A M. *Robust regression and outlier detection*[M]. New York: Wiley, 1987: 340-347.

## A New Recursive Bounded GM Estimator for Regression

CHENG Li-hua<sup>1</sup>, ZHANG Jun-min<sup>2</sup>

(1. College of Science, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2. College of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** A new recursive bounded GM estimator for regression is proposed. Unlike other GM estimators, the new estimator is based on one more general framework and uses a cost function with bounded M-estimate function. The new estimator, in effect, is a recursive one-step iteration solution of the "normal equations" corresponding to the cost function. In the new estimator, a weight function is designed to reject or to reduce the influence of the outliers. Furthermore, by introducing an augment variable, the proposed estimator is modified to a very adaptive version for the estimation of autoregressive parameters. The simulation results show that both the proposed estimator and its modification are more effective than other related estimators in suppressing the adverse influence of outliers; the proposed estimator, with the same settings, can keep a high accuracy and stable convergence performance in a variety of non-stationary environments.

**Keywords:** generalized maximum likelihood type estimator; robust estimation; autoregressive parameters; additive outliers

# 《华侨大学学报(自然科学版)》征稿简则

《华侨大学学报(自然科学版)》是华侨大学主办的,面向国内外公开发行的自然科学综合性学术刊物.本刊坚持四项基本原则,贯彻“百花齐放,百家争鸣”和理论与实践相结合的方针,广泛联系海外华侨和港、澳、台、特区的科技信息,及时反映国内尤其是华侨大学等高等学府在基础研究、应用研究和开发研究等方面的科技成果,为发展华侨高等教育和繁荣社会主义科技事业服务.本刊主要刊登机械工程及自动化、测控技术与仪器、电气工程、电子工程、计算机技术、应用化学、材料与环境工程、化工与生化工程、土木工程、建筑学、数学和管理工程等基础研究和应用研究方面的学术论文,科技成果的学术总结,新技术、新设计、新产品、新工艺、新材料、新理论的论述,以及国内外科技动态的综合评论等内容.

## 1 投稿约定

- 1.1 作者应保证文稿为首发稿及文稿的合法性;署名作者对文稿均应有实质性贡献,署名正确,顺序无争议;文稿中所有事实均应是真实的和准确的,引用他人成果时,应作必要的标注;不违反与其他出版机构的版权协议及与其他合作机构的保密协议;无抄袭、剽窃等侵权行为,数据伪造及一稿两投等不良行为.如由上述情况而造成的经济损失和社会负面影响,由作者本人负全部责任.
- 1.2 自投稿日期起2个月之内,作者不得另投他刊.2个月之后,作者若没有收到反馈意见,可与编辑部联系.无论何种原因,要求撤回所投稿件,或者变更作者署名及顺序,需由第一作者以书面形式通知编辑部并经编辑部同意.
- 1.3 作者同意将该文稿的发表权,汇编权,纸型版、网络版及其他电子版的发行权、传播权和复制权交本刊独家使用,并同意由编辑部统一纳入相关的信息服务系统.
- 1.4 来稿一经刊用,作者须按规定交纳版面费,同时编辑部按篇一次性付给稿酬并赠送该期刊物.本刊被国内外多家著名文摘期刊和数据库列为收录刊源,对此特别声明不另收费用,也不再付给稿酬.
- 1.5 其他未尽事宜,按照《中华人民共和国著作权法》和有关的法律法规处理.

## 2 来稿要求和注意事项

- 2.1 来稿务必具有科学性、先进性,论点鲜明、重点突出、逻辑严密、层次分明、文字精练、数据可靠.
- 2.2 论文题名字数一般不超过18字,必要时可加副题.文中各级层次标题要简短明确,一般不超过15字,且同一层次的标题应尽可能“排比”.
- 2.3 署名作者应对选题、研究、撰稿等作出主要贡献并能文责自负,一般以不超过3名为宜.作者单位应标明单位、所在城市、省份及邮政编码.
- 2.4 摘要应包括研究的目的、使用的方法、获得的结果和引出的结论等,应写成独立性短文且不含图表和引用参考文献序号等.其篇幅一般以150~250字左右为宜,关键词以4~8个为宜.
- 2.5 量和单位符号等要符合国家标准和国际标准.
- 2.6 能用文字说明的问题,尽量不用图表;画成曲线图的数据,不宜再列表.图表应有中英文标题.
- 2.7 参考文献仅选最主要的,且已公开发表的,按规范的内容、顺序、标点书写列入,并按其在文中出现的先后次序进行编号和标注.参考文献不少于10篇,未公开发表的资料不引用.
- 2.8 英文摘要尽可能与中文摘要对应,包括题目、作者姓名、作者单位、摘要、关键词.用过去时态叙述作者工作,用现在时态叙述作者结论,并符合英文写作规范.
- 2.9 文稿首页地脚处依次注明收稿日期;通信作者为可联系作者的姓名、出生年、性别、职称、学历、研究方向、电子邮件地址;基金项目为课题资助背景及编号,可几项依次排列.
- 2.10 投稿请直接登陆学报网站([www.hdxh.hqu.edu.cn](http://www.hdxh.hqu.edu.cn))在线投稿.

- 《中文核心期刊要目总览》
- ISTIC 中国科技核心期刊
- RCCSE 中国核心学术期刊
- 全国优秀科技期刊
- 中国期刊方阵“双效期刊”
- 华东地区优秀期刊
- 中国科技论文在线优秀期刊

## 本刊被以下国内外检索期刊和数据库列为固定刊源

- 美国《化学文摘》(CAS)
- 波兰《哥白尼索引》(IC)
- “STN 国际”数据库
- 中国科学引文数据库
- 中国科技论文统计期刊源
- 中国学术期刊(光盘版)
- 中文科技期刊数据库
- 中国力学文摘
- 中国生物学文摘
- 中国数学文摘
- 俄罗斯《文摘杂志》(AJ, VINITI)
- 荷兰《文摘与引文数据库》(Scopus)
- 德国《数学文摘》(Zbl MATH)
- 中国学术期刊综合评价数据库
- 中国期刊网
- 万方数据库
- 中国机械工程文摘
- 中国化学化工文摘
- 中国无线电电子学文摘
- 中国物理文摘

华侨大学学报(自然科学版)

JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY

Huaqiao Daxue Xuebao ( Ziran Kexue Ban )

( NATURAL SCIENCE )

( 双月刊, 1980 年创刊 )

( Bimonthly, Started in 1980 )

第 36 卷 第 3 期 ( 总第 143 期 ) 2015 年 05 月 20 日

Vol. 36 No. 3 ( Sum. 143 ) May 20, 2015

主管单位: 福建省教育厅

**Competent Authority:** Department of Education of Fujian Province

主办单位: 华侨大学

**Sponsor:** Huaqiao University ( Xiamen 361021, Fujian, China )

( 中国福建厦门 361021 )

编辑出版: 华侨大学学报自然科学版编辑部

**Edited and Published by** Editorial Department of Journal of Huaqiao University ( Natural Science )

电话: 0595-22692545  
电子信箱: journal@hqu.edu.cn  
网址: www.hdxh.hqu.edu.cn

Tel: 0595-22692545  
E-mail: journal@hqu.edu.cn  
Http://www.hdxh.hqu.edu.cn

主 编: 乌 东 峰

**Editor in Chief:** WU Dong-feng

印 刷: 泉州晚报印刷厂

**Distributed by** China Publication Foreign Trading Corporation

国内发行: 福建省泉州市邮政局

( P. O. Box 782, Beijing, 100011, China )

订购处: 全国各地邮政局(所)

国外发行: 中国出版对外贸易总公司

( 北京 782 信箱, 邮政编码 100011 )

刊 号: ISSN 1000-5013  
CN 35-1079/N

代 号: 国内邮发 34-41  
国外 NTZ 1050

国内定价: 8.00 元/期  
48.00 元/年