

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

華僑大学学报

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

> 第 36 卷 第 1 期 Vol. 36 No. 1

# 2015



# 《华侨大学学报(自然科学版)》 第六届编辑委员会

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

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

### 编 委 (Members) (按姓氏笔划为序) 王加贤 (WANG Jia-xian) 王全义 (WANG Quan-yi) 叶民强 (YE Min-qiang) 方柏山 (FANG Bai-shan) 刘塨 (LIU Gong) 江开勇 (JIANG Kai-yong) 张认成 (ZHANG Ren-cheng) 吴季怀 (WU Ji-huai) 吴逢铁 (WU Feng-tie) 陈锻生 (CHEN Duan-sheng) 周克民 (ZHOU Ke-min) 胡日东 (HU Ri-dong) 黄心中 (HUANG Xin-zhong) 高轩能 (GAO Xuan-neng) 蔡灿辉 (CAI Can-hui) 童昕 (TONG Xin) 欧阳明安 (OUYANG Ming-an)

编辑部主任 (Director)

黄仲一 (HUANG Zhong-yi)

# 华侨大学学报

(自然科学版)

第36卷第1期

2015 年 1 月

## 总第 141 期

# 目 次

汽车自主驾驶碰撞试验的控制系统设计
Sigma-Delta 调制器的设计与仿真
黄锐敏,杨清河,陈兴,梅丹丹(7)
地市级电网发展诊断体系及综合评价
面向 RTF 文件的 Word 漏洞分析
二维直方图的 HEVC 帧内快速深度决策算法
FPGA组合逻辑程序的 Petri 网建楔方法
4) 全闭 簇 结 构 与 稳 定 性 的 密 度 泛 函 研 密
山亚山灰山的与心人口的山及人山为儿
采用线性预测模型的语音篡改检测
林晓丹(40)
50 L 规模电镀 Fe-P 非晶合金及其组合镀层
王森林,李瑞,洪宏伟,翁建新(45)
医药洁净室的计算流体动力学模拟及实测对比

改性硅藻土的多级 A/O 工艺除磷优化及尾水深度除磷 抗氧化剂阿魏酸自组装金纳米颗粒的体外抗氧化 FRP与砖界面粘结性能的数值分析 水泥基快硬瓷砖胶中铝酸盐复合胶凝体系的试验 采用等效结构参数的混凝土试块弹性模量监测 刚性桥面板天然气管道悬索跨越结构力学性能 延深基坑桩锚加固支护结构力学特性分析 福州地铁1号线典型软土的工程性质 建筑造型理论下景观构筑物的结构隐形作用 我国小城镇滨水区的景观规划策略 响应率法求解二阶部分极点配置问题 局部和稀疏保持无监督特征选择法 非平稳高斯序列最大值与部分和的几乎处处中心极限定理 

期刊基本参数: CN 35-1079/N \* 1980 \* b \* A4 \* 120 \* zh \* P \* ¥8.00 \* 1 000 \* 23 \* 2015-01 \* n

### JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY

(NATURAL SCIENCE)

Vol. 36 No. 1

Sum. 141

Jan. 2015

## **CONTENTS**

Control System Design for Crash Tests of Self-Driving Car ...... FANG Qiu, YANG Fu-qing, YU Jian-bin (1) Design and Simulation of a Sigma-Delta Modulator ..... HUANG Rui-min, YANG Qing-he, CHEN Xing, MEI Dan-dan (7) Comprehensive Evaluation and Development Diagnosis System of the Municipal Power Grid ...... SHI Zhi-ping, SHAN Ti-hua, LIU Wen-feng, ZHANG Xing-ping (11) Research on Word Vulnerability Analysis for the RTF File ..... LE De-guang, ZHANG Liang, ZHENG Li-xin, LI Xin, CHEN Jing-tu (17) Fast Depth Decision Algorithm Based on Two-Dimensional Histogram for HEVC Intra Coding ..... XU Dong-xu, LIN Qi-wei (23) Modeling Method for FPGA Combinational Logic Program Based on Petri Net ..... CHEN Long, HUANG Ying-kun, LUO Ji-liang (29) Density Functional Theory Study of the Structures and Relative Stabilities of Platinum Clusters ..... WU Shan, WANG Huai-qian, LI Jia-qi, LI Ying-yu, YU Yi-nan, HAN Jia (35) Speech Forgeries Detection with Linear Prediction Model ..... LIN Xiao-dan (40) Deposition of the Fe-P Amorphous Alloy in the Scale of 50 L Bath and Its Combinatorial Coatings ..... WANG Sen-lin, LI Rui, HONG Hong-wei, WENG Jian-xin (45) Computational Fluid Dynamics Simulation and Measured Contrast Research of Pharmaceutical Clean Room PENG Hao, LEI Fei (49) Optimization of Phosphorus Removal from Multistage A/O Process with Modified

..... MA Cui, HE Zheng-guang, ZHANG Bi-xi (55)

Diatomite and Advanced Treatment of Phosphorus Removal in Tail Water

In Vitro Antioxidant Activity Study of Ferulic Acid Self-Assembled Gold Nanoparticles Numerical Analysis of Interface Bonding between Fiber Reinforced Polymer and Clay Brick ..... HUANG Yi-hui, LUO Cai-song, HUANG Tian-liang (64) Study of Fast Harden Tile Adhesive Mortar with AC Based Binder System ..... LU Hong, WU Hai-long, WANG Wei-hua (69) Monitoring for Elastic Modulus of Concrete Based on Equivalent Structural Parameters ..... GUO Zhi-gang, SUN Zhi (74) Research on Mechanical Property of Cable-Suspended Structure of Liquefied Natural Gas Pipelines with Rigid Deck Slab ..... CHEN Yu, LIN Zhi-huan (80) Analysis on Mechanical Characteristics of Deepening Excavation Foundation Pit Reinforced by Pile-Anchor Structure ..... GUO Li-qun, CHEN Ya-jun, XU Fang-chao (86) Engineering Properties Study of Typical Soft Soil in Fuzhou Metro Line 1 ..... LIU Ji-feng, LI Xiong-run, CHEN Fu-xing (91) Invisibility of Structure for Landscape Architecture Influenced by the Theory of Architectural Form WANG Yu, CHEN Zhen (97) Strategies of the Waterfront Landscape Planning of Small Towns in China Partial Quadratic Pole Assignment Using the Method of Receptances ..... CHEN Mei-xiang (107) Unsupervised Feature Selection Using Locality and Sparsity Preserving ...... JIAN Cai-ren, CHEN Xiao-yun (111) Almost Sure Central Limit Theorem for Maxima and Partial Sums of Non-Stationary Gaussian Sequence ..... WANG Yuan-fang, WU Qun-ying (116)

Serial Parameters: CN 35-1079/N \* 1980 \* b \* A4 \* 120 \* zh \* P \* ¥8.00 \* 1 000 \* 23 \* 2015-01 \* n

**文章编号:**1000-5013(2015)01-0001-06

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.01.0001

# 汽车自主驾驶碰撞试验的控制系统设计

方道1,2,杨福清1,俞剑斌1

(1. 厦门理工学院 机械与汽车工程学院, 福建 厦门 361024;2. 厦门理工学院 福建省客车先进设计与制造重点实验室, 福建 厦门 361024)

**摘要:** 为降低汽车研发过程的碰撞试验成本和缩短研发周期,对无牵引装置的汽车正面碰撞试验进行系统研究,论述正面碰撞试验车自主控制系统的设计.根据 C-NCAP 碰撞试验法规,对车辆进行了行进方向和行车速度控制的实车试验.结果表明:试验车行进方向与纵向中心线的重合度最大正负偏差分别为+95 mm 和 -105 mm,在汽车碰撞试验法规规定范围±150 mm内,车速快速提高到 64 km・h<sup>-1</sup>后,系统仍能够保证汽车直线稳速行驶,满足现有试验法规的基本要求,具有实用性和推广价值.

关键词: 汽车;控制系统;无人驾驶;碰撞试验;驱动机构

**中图分类号:** U 467.1 文献标志码: A

随着汽车安全法规的日趋严格,整车厂对汽车安全性日益重视,汽车安全性试验也不断提高,汽车 智能化试验研究成为重点之一.无人驾驶汽车是汽车智能化的一种体现,国内外对其开展了很多方面的 研究工作.目前,无人驾驶汽车得到快速发展,但将其应用到汽车碰撞试验中甚少.根据 GB 11551-2003《乘用车正面碰撞的乘员保护》、GB/T 20913-2007《乘用车正面偏置碰撞的乘员保护》等标准的技 术要求,汽车碰撞试验车通常通过交直流电机或液压马达牵引丝绳,利用地面上导轨进行车辆导向.牵 引机构比较复杂,一般只适用于室内试验,需投入昂贵的试验场建设费用<sup>[1]</sup>.目前,国内只有几家大型的 试验场和汽车厂才具备碰撞试验的条件,而且极少人实现任意角度的碰撞试验;再者碰撞前碰撞车辆与 钢丝绳脱钩后处于自由状态,无法准确控制碰撞车速,存在碰撞临界车速的闪差.因此,本文提出一种无 人驾驶汽车碰撞试验控制系统的设计,包括横向控制机构和纵向控制机构设计,经过反复的实车试验验 证,满足现有碰撞法规的基本要求.

### 1 试验方法

利用无人驾驶的汽车碰撞试验方法主要有如下 6 个步骤.

步骤1 选择一块开阔平地以便进行碰撞试验(如室外水泥地面).

步骤2 按碰撞试验标准预设固定壁障.

**步骤3** 在试验车(含台车)的行进方向的中心线设一条黑色标识线,使得该中心线与拟被碰的壁障或车辆形成相应碰撞试验所需要的角度,如图1所示.图1中:α为行进方向与固定壁障的夹角.

**步骤 4** 利用无人驾驶技术,对试验车进行改造,使得试验车能自主进行车辆的横向(前进方向)控制和纵向(车速)控制.改造对象主要包括对转向盘、加速踏板、制动踏板、离合器踏板等.

**步骤5** 在试验车上按标准规定安装试验假人、线束电缆及设备,包括能识别行进方向中心线的前置传感器、后置传感器、无人驾驶控制器、紧急情况处理器等,并进行接线如图2,3 所示.

**步骤6** 在行进方向中心线的起点,发动准备好的试验车,驾驶状态设定为无人驾驶,拨好起始档位,起动已设定好碰撞速度的无人驾驶控制器、紧急情况处理器,就可以开始进行碰撞试验.

**收稿日期:** 2014-09-10

通信作者: 方遒(1967-),男,副教授,博士,主要从事汽车安全与电子控制技术的研究. E-mail:fangq@xmut. edu. cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51305374);福建省科技计划重点项目(2013I0008)









### 2 横向控制机构设计

横向控制是在导向标识的引导下,通过车载传感器检测道路信号,经控制器处理分析,从而控制车辆的转向盘转动,使车辆能够自动行驶在预定的车道上.通过检测车辆相对于期望行驶轨迹的偏移量, 根据一定的数学模型计算出车辆转向盘转角的大小和方向,使车辆按照正面碰撞试验预定的直线轨迹 行驶.利用光电检测来识别黑色标识线,信号通过红外滤波放大后送入无人驾驶控制器 MCU(micro controller unit),经过偏移量以及偏移历程的辨识,再经过模糊 PID(proportion integration differentiation)控制算法得出控制指令.该指令对步进电机进行转向控制,步进电机通过减速齿轮机构传递到试 验车的转向盘上,并不断地修正行驶路径,使试验车无需牵引装置实现车道保持的动态实时控制<sup>[2]</sup>.控 制系统结构,如图 4 所示.

### 2.1 传感器选择

根据《乘用车正面碰撞的乘员保护》的技术要求,正面碰撞试验车偏离理论中心线的偏差不得超过 ±150 mm.碰撞试验车设计要求是样车沿着预设轨道直线行驶,更重要的是如何尽可能快且准确地检 测到轨道,从而修正前轮的转向.行驶轨道一般采用黑白<sup>[3]</sup>两种鲜明对比颜色的材料,采用整体式红外 光电传感器,可靠性好,易于实现.为提高传感器组的测量精度,在每个光电传感器上加装黑色塑胶套 管<sup>[4]</sup>,从而避免相邻光源和太阳光的的干扰.

### 2.2 车载传感器分布和控制原理

车载传感器的分布对试验车行进方向的线性度和试验结果将产生很大的影响,如图 5 所示. 在试验 车的前保险杠和后保险杆中心对称轴上分别安装一组车载红外光电式传感器,每组有 5 个传感器,其安 装位置离保险杆最前端或最后端至少要 100 mm,减少碰撞时传感器对车辆碰撞试验结果的影响.试验 准备过程中,应将试验车摆正放置,前后传感器组的中心一个传感器应照射到黑线中心,无人驾驶控制 器对传感器输出信号进行判断,计算车辆的横向偏差量.

为试验车往左偏,前置传感器 C 和 D 输出低电平信号,此时需调整转向电机使行驶方向往右旋转 一定的角度,再实时调整试验车行驶方向.为提高这种仿人控制模型<sup>[5]</sup>横向控制精度,根据试验上的前 后传感器组相对于黑色胶带中心线的位置计算出车辆行驶的航向角<sup>[6]</sup>.航向角表明,车辆横向运动的趋 势作为控制模型的输入量,明显改善整车横向控制的滞后性.





图 4 控制系统流程图



Fig. 4 Flow chart of control system

充分利用前横向偏差和航向角这2个输入量,引入模糊 PID 控制模型来替代仿人控制模型,建立 基于 PID 控制的数学模型,对步进电机的转动量进行控制.由于车辆驾驶系统中的计算机控制是一种 随机采样控制,软件只能够根据采样时刻的输入偏差值计算出输出控制量,因而对应的积分和微分环节 需要做离散化处理.因此,整车横向控制 PID 模型的控制规律为

Fig. 5

$$u(k) = K_{\rm P}e(k) + K_{\rm I} \sum_{j=0}^{k} e(j) + K_{\rm D} [e(k) - e(k-1)].$$
<sup>(1)</sup>

式(1)中;e(k)为控制模型的偏差输入量; $K_{\rm P},K_{\rm I},K_{\rm D}$ 分别为输入量的比例、积分和微分系数<sup>[7]</sup>.

由式(1)可得前横向偏差控制量  $u_a$  和航向角控制量  $u_a$ : 设经过实验得到的  $u_a$  的控制权值为  $k_{a,a}, u_a$ 的权值为 1-k<sub>a</sub>,则可以得到 PID 控制模型给出的总控制量为

$$u = u_{e} \times k_{e,a} + k_{a} \times (1 - k_{e,a}).$$
<sup>(2)</sup>

根据阿克曼转向几何原理,通过汽车转向盘转角可以计算出汽车行驶转弯半径.无人驾驶控制器根 据减速齿轮的传动比等因素对车辆偏差总控制量进行计算分析.发出指令给转向步进电机进行转向控 制,通过反馈,实时地检测和调整试验车的行驶路径.针对试验车转向的瞬态响应特性,不同的工况(正、 反转和制动)可采用不同的步进电机换向时序、控制目标和运动方程.采用混杂切换原理[8]设计其控制 系统.以转角跟踪性能为控制目标,以车速为影响因子,车速具有时变、滞后等特性.考虑到碰撞试验控 制精度要求,建立合理的隶属函数和恰当的模糊控制规则表,再将去模糊化得出查询表控制转向盘转 向、转速及转角.通过模糊 PID 控制参数,加快系统响应过程的同时消除静态误差,提高控制精度.

#### 纵向控制机构设计 3

试验车的纵向控制系统包括加速踏板、制动踏板和离合器踏板(对手动挡车而言),通过无人驾驶控 制器来协调控制车速.

由于试验车在碰撞试验时,驾驶员座椅上需要放置试验假人、线束电缆及设备,对纵向控制机构安 装提出严格的要求,性能指标如下:1)结构简单,能够安装在狭小的空间内;2)安装通用性好,适合于 不同行程和结构尺寸的踏板机构;3)运动控制简单可靠,定位精度高,运动速度可灵活调整.因此,采用 步进电机驱动加速踏板、制动踏板和离合器踏.加速踏板驱动机构,如图6所示.

在步进电机输出轴上固定一个转动齿轮,它与第一级减速齿轮啮合,传递扭矩并减速,第一级减速 齿轮和和小齿轮在同一个惰轮轴上,小齿轮与第二级减速齿轮啮合,进一步减速增矩,并通过转角传感 器实时拾取踏板的实际位置.转臂通过销钉与第二级减速齿轮轴固定,另外一端通过转轴与内调节杆铰



图 6 加速踏板驱动机构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of accelerator pedal driving mechanism

接,内调节杆上有外螺纹,外调节杆有内螺纹,依据加速踏板上步进电机的最大运动行程决定预调长度. 当踏板踩到最大踏板力时,转臂与内调节杆的角度接近直角.转臂的长度乘以转过的角度的正弦值、再 与转臂和内调节杆的夹角的正弦值的乘积,近似为车辆踏板的行程.步进电机通过齿轮、转臂、转轴和内 外调节杆构成的一个二力杆<sup>[9]</sup>,将旋转运动变成踏板的下压和回收动作,此机构具有类似驾驶员的脚踝 关节一样的柔性,能满足不同踏板尺寸的试验车型.

在试验车碰撞控制系统中,为精确定位碰撞临界车速,需要能够对试验车的制动踏板或离合器踏板 进行智能控制.对于制动踏板驱动机构,要求能够方便调节制动力,保证控制精度;对于离合器踏板驱动 装置,要求具有下压运动速度快,分离彻底,回收速度可方便调节的特点.制动踏板或离合器踏板驱动机 构,如图7所示.采用直线型步进电机通过拉索滑轮机构驱动踏板能方便调节踏板位置,满足制动踏板 或离合器踏板的控制要求.

如果试验车的变速器是自动档的,在开始试验前,试验人员启动发动机并处于怠速状态,放开手刹装置,摆正试验车的车身后,将排挡杆拨到 D 档,而车辆转向则通过步进电机控制回正且制动转向盘. 对于试验车转向的瞬态响应控制在±2°,由于永磁步进电机采用永久性磁铁,即使定子绕组断电也能保持一定力矩,从而制止方向盘转动.

对于手动挡汽车而言,自动换挡驱动机构,如图 8 所示.橡胶套环包住挂档把手上,通过选档机构和 换挡机构支撑.内层选档机构上采用伺服电机通过螺纹传动的方式进行选档操作,而螺牙端部是橡胶套 环的支架,通过拉动挂档把手左右移动进行选档.在选档过程中,为了防止选档机构的晃动,选档支架左 边采用二个光滑轴套进行导向,但需保证支架不会发生脱节并稳定传输动力;对于换挡控制也采用类似 的驱动机构,但考虑到挂档与摘档的力矩较大,换档伺服电机最大扭矩比选档电机大,整个换挡支架通 过螺栓连接固定在试验车排档杆座上.







当要求试验速度 u<sub>a</sub>=64 km・h<sup>-1[10]</sup>,加速度 du/dt≪0.3 时,试验车加速距离 S≥53.75 m 才可满 足加速要求.考虑到各车型发动机动力性能的差异,加速距离可放宽至 150 m,车辆稳速距离控制在 50 m 以上.此时,必须切断发动机动力,且松开制动踏板,压下离合器踏板,挂到空档,确保汽车处于完全 自由状态撞击目标物.因此,为保证试验的准确性和安全性,整个试验跑道应设计在 200 m 以上.

### 4 试验车速的控制

在汽车碰撞试验中,临界车速是汽车碰撞的重要试验参数.无人驾驶控制器通过 CAN(controller area network)总线通讯,在总线上共享车速信号,对纵向控制机构进行反馈控制,不断调整驱动机构电机的转角和转速,保证试验车速的控制精度.为了提高控制试验车速的精确性和可靠性,采用在试验跑道两边每隔一段距离安装对射型光电传感器,通过测量试验车的加速时间,根据加速距离,计算出此时的瞬时车速.将瞬时车速与试验车通过测速点时车速传感器实时传出的车速对比分析,若存在较大误差时,通过车上的无人驾驶控制器调整试验车速.在试验车稳速阶段,试验车距离固定壁障 50 m内,车速必须达到 64<sup>+1</sup>。km•h<sup>-1</sup>.

为了降低试验成本,避免无效的试验碰撞,对试验车实施车速风险控制.通过无人驾驶控制器利用 无线射频技术,将车速信号发射到紧急情况处理器上,实时显示车辆的运行状态;也可通过紧急情况处 理器,人为微量调节车速,精确地控制试验车速.若试验车因动力系统、控制系统等原因在临近固定壁障 时都无法达到试验车速时,紧急情况处理器将发射一个横向控制信号给无人驾驶控制器,发出指令给转 向驱动电机.在试验场上适当地调整转向,只需试验车避开与固定壁障即可,同时将制动踏板机构处于 下压状态,这样可避免无意义地进行碰撞试验,防止发生车辆侧翻等危险,提高试验的可控性.

### 5 实车试验

与现有汽车碰撞方法相比,汽车自主驾驶进行碰撞试验更加符合现实路况的实车碰撞,模拟碰撞现场的重发生,各项性能指标如表1所示.为尽量缩小与试验法规的要求,同时又能体现车辆正面碰撞的安全性、真实性和客观性,室外水平运动跑道的直线长度达到200m以上,风速≪5m・s<sup>-1</sup>,采用起亚千里马自动挡试验车模拟直线行驶.为减小试验成本,暂不考虑与固定壁障碰撞.经过反复的模拟试验,不断地调试控制电机的脉冲频率和个数,最终达到试验法规加速要求.试验结果表明:试验车的纵向中心线与黑色胶带中心线重合度最大偏差分别为+95 mm 和-105 mm,车速加速到正面碰撞规定车速 64 km・h<sup>-1</sup>后,仍能稳速直线行驶.因此,此方案可满足碰撞试验法规的要求.

评价指标	C-NCAP 试验法规要求	对试验方案的更改及说明
左栖事壮	方向盘处于中间位置,	步进电机调整汽车转向,当达到试验车速时,方向盘处
丰衲以衣	踏板处于正常的放松位置	于中间位置,用电机控制踏板,踏板处于正常放松状态
おいちょう	需加装复杂的牵引装置,	无需牵引装置,汽车自主驾驶进行碰撞;
切地叹垣	电机通过绳索拉动汽车行驶	试验场地上铺设垂直固定壁障的黑色胶带
	排空燃油箱中的燃油,运转发动	采用一个比燃油泵稍大的容器装少量的燃油,容器内
	机,并到发动机自然熄火为止	置于燃油箱中,剩余容积注入一定量的水,
它人性的	排空发动机机油、变速箱油、制动液	保持发动机机油、变速箱油、制动液、转向助力液等液
女王性的	等液体,并用水来补偿,	体在最低液位,用沙袋来补偿离最高液位的液体质量;
侄刑	调节水面高度为最高液位,	排空洗涤液、防冻液、空调制冷剂等液体,并用水来补偿
	若碰撞速度未达到试验速度,	对试验车实施车速风险控制,试验人员可操控
	无法避免无效的碰撞	试验车速及方向,可避免无效碰撞
测量系统	测量牵引装置中电机的转速	实时拾取车速信号,车外另有对射型光电传感器校验车速信号
试验准确性	存在碰撞临界车速的闪差	精确控制碰撞速度
计应出本	试验成本昂贵,场地有限,	试验成本较高,若能模块化设计,兼容性更强,
试验成本	试验周期长	成本将降低,场地可选,试验周期短

表 1 系统方案与碰撞试验法规要求对比 Tab. 1 Comparison of the system scheme and the crash test regulation requirements

#### 2015 年

### 6 结束语

利用无人驾驶试验车模拟碰撞车辆,替代传统碰撞试验台上复杂的牵引装置,能够实现车与固定壁 障之间和车与车之间任意角度的碰撞试验.试验场的选取可在室内或宽阔的室外进行,这可以大大降低 汽车厂在汽车研制过程中的碰撞试验成本,缩短整车的开发周期,同时也适合于社会公益机构或鉴定机 构(如汽车召回中心、司法鉴定、技术鉴定等)对汽车碰撞试验的要求,对于整车厂及零部件生产企业具 有一定的实用性和推广价值.

### 参考文献:

- [1] 张金换,杜慧良,马春生,等.汽车碰撞安全性设计[M].北京:清华大学出版社,2010:38-41.
- [2] 吴超仲,王春燕,杨利兵,等.智能公路系统车道保持模糊控制研究[J].公路交通科技,2002,19(2):131-133.
- [3] 冯笑笑,胡佳娟,吴偏偏,等.红外光电传感器的性能分析与应用[J].苏州大学学报:工科版,2012,32(1):11-14.
- [4] 王伟,陈慧,刁增祥,等.基于光电导航无人驾驶电动汽车自动寻迹控制系统研究[J].汽车工程,2008,30(2):137-140.
- [5] 童厚健,吴超仲,吴青,等.基于磁道钉导航的车辆自动驾驶模型的优化设计[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2005,29(5):675-677.
- [6] 姜勇,解晓琳. 汽车自动驾驶的方向与车速控制算法设计[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(34): 10213-10220.
- [7] 陶永华. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2003:1-30.
- [8] 罗石,杨钢,朱长顺,等.车辆瞬态响应试验中转向机器人混杂控制研究[J].车辆与动力技术,2012,4(128):12-15.
- [9] 陈晓冰.基于驾驶机器人的室内汽车排放耐久性试验系统的研究与工程实现[D].南京:东南大学,2005:48-63.
- [10] 中国汽车技术研究中心. C-NCAP 管理规则[S]. 北京:中国标准出版社, 2012:80-90.

### Control System Design for Crash Tests of Self-Driving Car

### FANG Qiu<sup>1,2</sup>, YANG Fu-qing<sup>1</sup>, YU Jian-bin<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Auto Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;

2. Automobile Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture in Fujian Province,

Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

Abstract: In order to reduce the vehicle cost crash test and shorten the development cycle in vehicle research process, in this paper, a towingless vehicle frontal crash test is systematically studied and the autonomous control system is discussed as well. According to C-NCAP crash test standards, travelling direction control experiment and travelling speed control experiment were carried out on the vehicle. Test results indicate that, the maximum positive and negative deviations of the contact ratio between test car travelling direction and longitudinal center line are  $\pm 95$  mm and  $\pm 105$  mm respectively, which are within the range of  $\pm 150$  mm stipulated by car crash test regulations. Meanwhile the system is still able to ensure the test car driving 64 km  $\cdot$  h<sup>-1</sup>, which meets the basicrequirements of existing test regulations and possesses practical and popular value of the system.

Keywords: automobile; controlling system; driverless; crash test; drive mechanism

(责任编辑:陈志贤 英文审校:杨建红)

文章编号:1000-5013(2015)01-0007-04

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.01.0007

# Sigma-Delta 调制器的设计与仿真

黄锐敏1,杨清河2,陈兴2,梅丹丹1

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院,福建 厦门 361021;
 2. 泉州市迈韦通信技术有限公司,福建 泉州 362005)

摘要: 提出一种基于线性系统分析和仿真拟合的 5 阶数字 Sigma-Delta 调制器的设计方法. Simulink 仿真结 果表明:与过采样率为 64 的 4 阶调制器比较,所设计的 5 阶 Sigma-Delta 调制器在过采样率降低到只有 32 的 情况下,输出信噪比可以达到 104 dB,比前者改善了 6 dB.因此,在相同过采样率下,该 5 阶调制器可以得到 更宽的信号带宽.

关键词: Sigma-Delta 调制器; 过采样率; 数模转换; 积分非线性

**中图分类号:** TN 79 **文献标志码:** A

Sigma-Delta 调制技术提供了在超大规模集成电路(VLSI)上实现极高精度模数和数模转换的手段.利用过采样和噪声整形算法,解决在传统模数、数模直接转换方式中遇到的转换精度要求与器件失配误差之间的矛盾,以及抑制差分和积分非线性引起的误差<sup>[1]</sup>.因而在相同工艺误差条件下,能更有效地提高转换器的精度,即提供更高位数的转换器.同时,由于具有抗噪声的优点<sup>[2-6]</sup>,调制技术越来越多地应用在现代的集成整个系统的 VLSI 芯片中.本文将介绍一种基于线性系统分析和仿真拟合的 5 阶数字 Sigma-Delta 调制器的设计方法.

### 1 Sigma-Delta 调制器的线性系统模型

Sigma-Delta 调制器和其他转换器一样,通过在时间上采样和幅度上量化来实现模数和数模转换. 由于幅度上的量化,系统对信号的处理不再具有线性,所以整个 Sigma-Delta 调制器属于非线性系统. 但是,如果输入信号为随机信号,量化的级数足够多,Sigma-Delta 调制器的过采样率远远大于 2,或者 Sigma-Delta 调制器整形滤波器系统传输函数 *H*(*z*)的阶数足够高(大于 2),则量化器带来的量化误差 将平均分布在量化区间上,从而可以近似为平均分布的量化噪声<sup>[7]</sup>.

基于这一假设,可以将 Sigma-Delta 调制器等效 为线性系统模型,如图 1 所示.图 1 中:X 为输入信 号;Y 为输出信号.根据梅森公式,可以得到输出信 号,输入信号和量化器引起的噪声的关系式,即

$$Y(z) = \frac{L_0}{1 - L_1} X(z) + \frac{E(z)}{1 - L_1} = H \cdot \frac{G}{H} X(z) + H \cdot E(z) = G \cdot X(z) + H \cdot E(z).$$

上式中:G为信号系统传输函数;H为噪声系统传输 函数;L<sub>0</sub>为输入信号环路的系统传输函数;L<sub>1</sub>为噪 声整形环路的系统传输函数.

**收稿日期:** 2013-09-04

**基金项目:** 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目,华侨大学科研基金资助项目(12Y0308); 福建省泉州市科 技计划资助项目(2012*Z*98)



图 1 Sigma-Delta 调制器的线性系统模型

Fig. 1 Linear system model of Sigma-Delta modulator

通信作者: 黄锐敏(1971-),男,讲师,博士,主要从事数字信号处理电路的研究. E-mail:huangruimin@hqu. edu. cn.

### 2 Sigma-Delta 调制器的系统传输函数

G(z)具有让基带信号通过而滤掉高频噪声的低通特性,而 H(z)能有效地将量化噪声转移到高频 带.忽略稳定性的要求,理想 L 阶调制器的信号传输函数为 $G(z) = z^{-L}$ ,噪声传输函为数  $H(z) = (1 - z^{-1})^{L}$ ,相应信号基带内的噪声能量为 $\frac{\Delta^{2}}{12} \frac{\pi^{2L}}{(2L+1)} \frac{1}{R_{os}^{2L+1}}$ .其中: $\Delta$ 为量化间隔;过采样率  $R_{os} = f_{s}/(2f)$ .因此,系统的性能是传输阶数 L 和过采样率  $R_{os}$ 的函数, $R_{os}$ 每提高一倍,基带内的噪声功率降低 3(2L+1) dB,相当于同样输入信号强度的情况下,分辨率提高了 L+0.5 位.

根据 Sigma-Delta 调制器的线性系统模型,可以设计不同的系统环路结构 L<sub>1</sub>,从而实现噪声系统传输函数 H(z).级联积分器单环反馈具有结构简单,运算速度快的特点,经常被用在数字 Sigma-Delta 调制器的设计中,如图 2 所示.对于高于1 阶的单环反馈调制器是有条件稳定的系统,所以 H(z)的最大增益 H<sub>inf</sub>一般不能太大,否则系统无法正常工作. H<sub>inf</sub>具体的数值由系统函数的阶数和量化器的量阶决定<sup>[8]</sup>.基于线性系统模型的设计是一种近似方法,所以得到的系统函数最后需要仿真验证.



图 2 级联积分器单环反馈结构的 Sigma-Delta 调制器

Fig. 2 Cascaded integrator single-loop feedback structure Sigma-Delta modulator

H(z)表示为 H(z) = N(z)/D(z),其中:有理函数 N(z),D(z)的根为 H(z)的零点和极点<sup>[9]</sup>.D(z)是取决于  $H_{inf}$ 大小的 [[R 滤波器的传输函数,而 N(z)由零点的分布决定<sup>[8]</sup>.如果让 H(z)的零点均匀地 分布在基带内,而不是都处在 z=1 处,即  $N(z) \neq (z-1)^{L}$ ,则同样增益的 H(z)可以获得更高的信噪 比.由 Matlab 的线性系统和 Sigma-Delta 调制器设计工具,可以综合得到一个 5 阶的噪声系统传输函 数 H(z),即

$$H(z) = \frac{N(z)}{D(z)} = \frac{(z-1)(z^2-1.997\ 2z+1)(z^2-1.992\ 1z+1)}{(z-0.777\ 8)(z^2-1.613z+0.664\ 9)(z^2-1.796z+0.854\ 9)}.$$
 (1)

另外,由图 2 的系统结构,设 c1~5=1,其噪声环路的系统传输函数 L1 表达为

$$L_{1} = \frac{b_{1} + b_{2}(z-1) + b_{3}(z-1)^{2} + b_{4}(z-1)((z-1)^{2} + g_{1}) + b_{5}(z-1)^{2}((z-1)^{2} + g_{1})}{(z-1)((z-1)^{2} + g_{1})((z-1)^{2} + g_{2})}.$$
 (2)

由 
$$L_1 = \frac{H-1}{H} = \frac{N(z) - D(z)}{N(z)}$$
,可知

$$N(z) = (z-1)((z-1)^{2} + g_{1})((z-1)^{2} + g_{2}),$$

$$N(z) - D(z) = b_{1} + b_{2}(z-1) + b_{3}(z-1)^{2} + b_{4}(z-1)((z-1)^{2} + g_{1}) + b_{5}(z-1)^{2}((z-1)^{2} + g_{1}).$$
(3)

为了简化数字电路,实际的零点采用了两个近似:第一,N(z)单位圆上的零点采用 L<sub>1</sub>中单位圆外的零点近似逼近;第二,为了简化反馈回路的乘法运算,反馈系数 g<sub>1~2</sub>用 2 的负幂次 2<sup>-M</sup>(M 为正整数) 来近似,反馈信号的二进制数值只要向左移 M 位,并舍去低 M 位数字就可以实现相应的系数相乘.

虽然以上近似得到零点不是最优的位置,但是能大大简化数字系统的实现,而信噪比的略微下降可 以通过提高  $H_{inf}$ 得到补偿.实际设计中,通过仿真得到的信噪比选择合适的 M,可得到  $g_{1\sim2}$ .由式(1), (3)可得, $g_1 \approx 2-1$ .997 2=0.002 8= $2^{-8.48} \approx 2^{-8}$ ; $g_2 \approx 2-1$ .992 1=0.007 9= $2^{-6.98} \approx 2^{-7}$ .

通过对式(4)左右两端关于 z 各阶幂次对应系数的匹配,可以得到一组关于  $b_{1\sim5}$  的方程,解方程可 以得到以  $b_5$  为归一化因子的  $b_{1\sim5}$  的比例系数.一般可以根据最后一级积分器精度要求的位数确定  $b_5$  的 数值,如  $b_5 = 2^8$ . 利用各级积分器的量化噪声滤波特性,可以使后级的位数逐级递减,而图 2 中  $c_{1\sim5}$ 就是各级用来控制递减程度的增益系数. $1/R_{OS} \ge c_{1\sim5}$ . $b_5$ 和  $c_{1\sim5}$ 确定后, $b_{2\sim5}$ 的数值即可确定, $g_{1\sim2}$ 的数值需要考虑  $c_{1\sim5}$ 而作相应的修正,使最后的环路增益保持不变.所有系数求出后,每级数字积分器的位数,可以通过Matlab的系统模型输入正弦信号仿真得到的最大动态范围来确定.

### 3 多位 5 阶数字 Sigma-Delta 调制器的设计

对于采样率为 32 的 5 阶数字 Sigma-Delta 调制器的设计,由式(1),(3),以及上述提到的近似规则 可得  $g_1 = 2^{-8}, g_2 = 2^{-7}$ .由式(4)可以得到计算  $b_{1\sim 5}$ 的方程,求逆后为

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 4(1-g_1) & 3-g_1 & 2 & 1 & 0 \\ 6-g_1 & 3 & 1 & 0 & 0 \\ 4 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ d_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b'_1 \\ b'_2 \\ b'_3 \\ b'_4 \\ b'_5 \end{bmatrix}.$$
(5)

式(5)中: $d_{1\sim5}$ 为式(4)左端 N(z) - D(z)多项式 4 至 0 次幂的系数.由  $c_{1\sim5} \leq 1/R_{OS} = 2^{-5}$ ,可以确定图 2 中的  $c_1 = c_2 = 2^{-5}$ ,  $c_3 = c_4 = 2^{-4}$ ,  $c_5 = 2^{-8}$ .最后,数字 Sigma-Delta 调制器环路反馈系数  $b_{1\sim5}$ 通过除以归 一化因子  $b'_5$ 和  $c_{1\sim5}$ 得到  $b_5 = \frac{b'_5}{c_5b'_5} = \frac{1}{c_5}$ ,  $b_4 = \frac{b'_4}{c_4c_5b'_5}$ , ...,  $b_1 = \frac{b'_1}{c_1c_2c_3c_4c_5b'_5}$ .

### 4 仿真结果与比较

将  $c_{1\sim5}$ 和  $b_{1\sim5}$ 代入图 2 所示的数字 Sigma-Delta 调制器中,即可得到仿真拟合的 Matlab 模型.表 1 列出了不同 H(z)最大增益  $H_{inf}$ 和输入幅度为 A 的正弦波  $A\sin(0.5n/R_{OS})$ 仿真得到的信噪比  $R_{SN}$ . 仿 真结果如图 3 所示.图 3(a)显示的是数字 Sigma-Delta 调制器的输入和输出波形,图 3(b)显示的是输出 信号的幅度频谱.由图 3(a)可知:调制器的输出,同时也是反馈信号在{±1,±3}之间跳变,具体取值可 以通过对末级积分器的高 2 位二进制数判断得到,即采用的是 2 位的量化器.



表 1 不同 H<sub>inf</sub>和输入幅度 A 仿真结果 Tab. 1 Simulation results of different H<sub>inf</sub> and input amplitude A



### 5 结束语

基于线性系统分析和 Matlab 仿真拟合的 5 阶数字 Sigma-Delta 调制器,能够有效地设计稳定的 Sigma-Delta 调制器.对于 3 阶和 4 阶的 Sigma-Delta 调制器<sup>[10]</sup>,当过采样率等于 32 时,其信噪比分别

为 68.0,73.3 dB;当过采样率等于 64 时,其信噪比分别为 84.2,98.6 dB. 文中设计的 5 阶数字 Sigma-Delta 调制器,在过采样率降低一半的情况下,即等于 32 时,可以获得 104.1 dB 的信噪比,比 3 阶和 4 阶调制器有大于 5 dB 的改善.因此,需要宽带信号 Sigma-Delta 调制器的应用场合,可以考虑使用 5 阶 调制器降低过采样率的要求.

### 参考文献:

- [1] 傅文渊,凌朝东.应用于电流型数模转换器的积分非线性误差优化方法[J].华侨大学学报:自然科学版,2012,33 (44):163-167.
- [2] 杨骁,杨静,凌朝东,等. ADSL 中宽带 ∑△ 调制器的系统设计[J]. 信号处理,2011,27(2):309-312.
- [3] NORSWORTHY S R, SCHREIER R, TEMES G C. Delta-sigma data converters: Theory, design, and simulation[M]. New York: Wiley-IEEE Press, 1996:165-192.
- [4] FRAPPE A,FLAMENT A,STEFANELLI B,et al. An all-digital RF signal generator using high-speed modulators [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits Oct,2009,44(10):2722-2732.
- [5] HUNG T,RODE J,LARSON L, et al. H-bridge class-d power amplifiers for digital pulse modulation transmitters [C] // Digest of IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Hawaii: IEEE Microwave Theory and Techniques Society, 2007:1091-1094.
- [6] LUSCHAS S, SCHREIER R, LEE H S. Radio frequency digital-to-analog converter[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2004, 39(9):1462-1467.
- [7] GRAY R M. Quantization noise spectra[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1990, 36(6):1220-1244.
- [8] SCHREIER R. An empirical study of high-order single-bit delta-sigma modulators[J]. IEEE Tran Circuits and Systems II,1993,40(8):461-466.
- [9] SCHREIER R, TEMES G C. Understanding delta-sigma data converters[M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 2004:219-253.
- [10] HUANG R,LOTZE N,MANOLI Y,On design a high speed sigma delta DAC modulator for a digital communication transceiver on chip[C] // Proceeding of 11th EUROMICRO Conference on Digital System Design Architectures, Methods and Tools. Parma; IEEE Computer Society, 2008; 53-60.

### Design and Simulation of a Sigma-Delta Modulator

### HUANG Rui-min<sup>1</sup>, YANG Qing-he<sup>2</sup>, CHEN Xing<sup>2</sup>, MEI Dan-dan<sup>1</sup>

- (1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
- 2. Quanzhou Maiwei Communication Technology Company Limited, Quanzhou 362005, China)

**Abstract:** This paper introduce a design method for the fifth-order digital Sigma-Delta modulator based on linear systems analysis and simulation fitting. Simulink simulation result shows that compared to the fourth-order modulator of oversampling ratio of 64, the oversampling ratio of the designed fifth-order modulator reduces to only 32, output signal to noise ratio can reach 104 dB, which improves 6 dB over the former design. Therefore, in the same oversampling ratio, this fifth-order modulator can get wider signal bandwidth.

Keywords: Sigma-Delta modulator; oversampling ratio; digital to analog conversion; integral nonlinearity

(责任编辑:陈志贤 英文审校:吴逢铁)

**文章编号:**1000-5013(2015)01-0011-06

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.01.0011

# 地市级电网发展诊断体系及综合评价

史智萍1,单体华1,刘文峰2,张兴平2

(1. 国家电网冀北电力有限公司 经济技术研究院,北京 100045;
 2. 华北电力大学 经济与管理学院,北京 102206)

**摘要:** 结合地市级电网的特点,从电网发展安全与质量、速度与规模、协调性、运行效率及经济效益5个维度 对电网发展进行综合评价,并根据实地调研和数据挖掘方法确定了46个评价指标,从而构建了电网发展评价 与诊断双层结构模型.利用多层次序关系法和模糊综合评价模型对三个样本的城市电网进行实证分析,利用 雷达图从三个层次对电网发展水平进行分析,指出电网发展过程中存在的问题,为进一步促进电网的高效健 康发展提供了决策依据.

**关键词:** 电网;评价指标体系;序关系;模糊数;地市级 中图分类号: TM 727.2 **文献标志码:** A

在我国城镇化建设的进程中,地级市电网与当地社会经济的协同发展起着关键的作用.国内学者针 对我国的电网建设运营评价展开了大量研究,并取得一系列成果[1-17],文献[2]研究了电网企业的特征, 构建了描述可持续发展的指标体系. 文献[3]结合电网建设的特点,建立了电网建设可持续发展评价指 标体系. 文献[4]建立了电网发展指标体系,研究了指标的度量方法. 文献[5]采用鱼骨图及层次分析相 结合的方法对评价指标进行选取,建立配电网综合评价指标体系结构.文献[6]建立地区电网运行方式 评价的指标体系,实现了对地区电网运行方式的全面综合评价.文献[7]基于分层、分类思维方式建立农 村中低压配电网规划指标评估体系. 文献[8-9]从技术性、经济性、社会性和实用化等方面建立智能电网 试点项目评价指标体系框架. 文献[10]采用层次分析法与模糊综合评价相结合的综合评价方法,建立了 电网调度系统安全运行的指标体系. 文献[11]构造了一套包括经济性指标、技术性指标、社会环境指标、 适应性指标、风险性指标在内的较为合理完整的电网规划综合指标体系. 文献「12]从反映配电网建设规 模的主导信息出发,运用统计分析等原理和方法,建立配电网建设规模的定量评估指标体系.文献[13] 从形态结构、技术与管理、运行绩效与绿色发展4个评价维度,提出一套"世界一流电网"的评价指标体 系. 文献[14]依据协调发展的内涵和机理,构建了新能源与智能电网协调发展评价指标体系. 文献[15] 构建了智能配电网三级评估指标体系的初步框架,给出部分重要评估指标的定义和量化公式.文献[16] 构建了针对我国大都市电网特点的综合评价体系,通过大都市电网实例说明指标体系及评价模型的合 理性与适用性. 文献[17]通过逻辑框架法分析,对电网建设项目进行后评价. 本文结合地级市电网运行 的特点,构建具有诊断功能的电网发展评价体系,采取模糊层次法对三地级市电网发展进行综合评价, 为电网规划和改造提供决策依据.

### 1 地市级电网运行及发展诊断体系构建

#### 1.1 诊断指标体系构建

电网是技术密集型产业,电能的发输配供用是同时完成的,保证电网的安全运行并提供合格的电能 是电网运行的首要职能.因此,电网发展的安全与质量是衡量电网发展的基本因素.其次,电网是经济增

**收稿日期**: 2015-01-12

通信作者: 史智萍(1979-),女,高级工程师,主要从事输电网规划与电网诊断评估的研究. E-mail:szp19@163. com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71473083);国家电网冀北电力有限公司经济技术研究院科研基金资助项目(8FE000M14001)

长与社会发展重要的基础设施,电网发展的速度与规模能否支撑当地社会经济发展的需要是电网的重要功能.第三,不同电压等级电网之间的协调运行关系到整个电网的有序、高效运行.因此,电网自身的协调性也是一个重要的分析内容.最后,电网也是资金密集型产业,作为电网投资和建设主体的电网企业必须要提高电网资产的利用效率和盈利能力.因此,电网的发展效率与经营效益对于电网的可持续发展具有重要的意义.

从电网发展速度与规模、电网发展安全与质量、电网发展协调性、电网发展效率和电网经济效益5 个方面(即准则层)对电网的发展进行诊断.在充分调研、征求专家意见的基础上,利用数据挖掘的方法 筛选出46个具体评价指标(即指标层).电网发展诊断的多层次评价指标体系,如表1所示.

表1 地市级电网发展诊断指标体系

		osis index system of Municipal power
准则层	一级指标层	二级指标层
S1 电网	Ⅱ11:主变 N-1 通过率(0.273)	I111:220 kV 主变 N-1 通过率(0.342) I112:210 kV 主变 N-1 通过率(0.336) I113:35 kV 主变 N-1 通过率(0.322)
友展安全	I12:线路 N-1 通过率(0.273)	I121:220 kV 主变 N-1 通过率(0.340) I122:110 kV 主变 N-1 通过率(0.335) I123:35 kV 主变 N-1 通过率(0.325)
与质	I13:10 kV互联率(0.167)	_
量	I14:10 kV 市辖电缆化率(0.167)	_
(0.302)	I15:瓶颈线路占比(0.120)	_
$S_2$	I21:电网发展弹性系数(0.275)	_
电网	I22:10 kV 电网规模合理度(0.211)	-
发展速度	I23:电源消纳水平(0.239)	I231:220 kV 电源消纳水平(0.361) I232:110 kV 电源消纳水平(0.324) I233:35 kV 电源消纳水平(0.315)
ら 規 模 (0.216)	I24:主变容载比(0.275)	I241:220 kV 主变容载比(0.358) I242:110 kV 主变容载比(0.327) I243:35 kV 主变容载比(0.315)
	I31:10 kV 城乡供电能力协调性(0.234)	_
S <sup>3</sup> 电网发展协调性(0.179)	I32:供电半径发散度(0.245)	I321:220 kV 供电半径发散度(0.347) I322:110 kV 供电半径发散度(0.335) I323:35 kV 供电半径发散度(0.318)
	I33:容载比发散度(0.253)	I331:220 kV 容载比发散度(0.335) I332:110 kV 容载比发散度(0.334) I333:35 kV 容载比发散度(0.331)
	I34:各级电网协调度(0.268)	I341:220 kV 各级电网协调度(0.507) I342:110 kV 各级电网协调度(0.493)
	I41:线路最大功率占比 经济输送功率(0.202)	I411:220 kV 线路最大功率占比经济输送功率(0.347) I412:110 kV 线路最大功率占比经济输送功率(0.336) I413:35 kV 线路最大功率占比经济输送功率(0.317)
S4 电网发展效率 (0.162)	I42:线路等效平均功率占比 经济输送功率(0.204)	1421:220 kV 线路等效平均功率占比经济输送功率(0.347) 1422:110 kV 线路等效平均功率占比经济输送功率(0.331) 1423:35 kV 线路等效平均功率占比经济输送功率(0.322)
	I43:主变等效平均功率(0.194)	I431:220 kV 主变等效平均功率(0.341) I432:110 kV 主变等效平均功率(0.339) I433:35 kV 主变等效平均功率(0.320)
	I44:主变最大负载正态分布(0.200)	I441:220 kV 主变最大负载正态分布(0.344) I442:110 kV 主变最大负载正态分布(0.334) I443:35 kV 主变最大负载正态分布(0.322)
	I45:线路最大负载正态分布(0.200)	I451:220 kV 线路最大负载正态分布(0.342) I452:110 kV 线路最大负载正态分布(0.337)

I453:35 kV线路最大负载正态分布(0.321)

Tab. 1	Development	diagnosis	index system	of	Municipal	powe
1 a.b. 1	Development	anagnoono	mach bybtem	01	municipui	pone

	Continue	table	
准则层	一级指标层	二级指标层	
S5	I51:单位电网投资增售电量(0.102)	_	
经	I52:10 kV 及以下配网线损率(0.280)	—	
济动	I53:单位电网资产售电收益(0.152)	_	
益	I54:每万元电网资产运行维护费(0.254)	_	
(0.141)	I55: 废旧设备回收率(0.212)	_	

续表 Continue table

对于电网发展安全与质量,主变和线路的 N-1 通过率及互联率是重要的诊断指标,样本地区涉及 到的电压等级主要包括 220,110,35,10 kV.考虑到当地的电网结构,主变和线路的 N-1 通过率涉及 到前 3 个电压等级,而互联率则主要考虑 10 kV.另外,通过对某地的三个城市进行调研,10 kV 市辖电 缆化率及瓶颈线路占比也是比较重要的指标.

电网发展速度与规模主要反映电网与经济发展、电源装机接入、供应负荷电力等需求的适应性和协调性.筛选出的主要指标包括电网发展弹性系数、电网规模合理度、电源消纳水平以及主变容载比.经过专家讨论并结合当地实际情况,电网规模合理度选用 10 kV 电压等级更符合地市级电网的特点;电源消纳水平和主变容载比则包括 220,110,35 kV.

电网发展协调性主要从4个指标来衡量,即城乡供电能力协调性、反映电网网架密集程度是否合理的供电半径发散度、评价市辖和县域线路容载比分布发散程度的容载比发散度,以及各级电网协调度. 根据专家意见和当地地市级电网的特点.这4个方面分别选择了不同电压等级的线路.

对于电网发展效率,主要从5个方面进行分析,即线路最大功率占比经济输送功率、线路等效平均 功率占比经济输送功率、主变等效平均功率、主变最大负载正态分布和线路最大负载正态分布.对于电 网企业经济效益,文中通过电网的投资、运行、维护、回收4个角度来对电网的经济效益进行有效评价.

#### 1.2 指标模糊隶属度确定及诊断分析

地市级电网发展评价指标体系具有多层次、多指标等特点.利用模糊数和模糊隶属度来直观地指出 某指标所反映的内容是好还是不好.因此,将诊断指标分为5级,即指标的判断集均定为V=(很好,较 好,一般,差,很差).在具体确定不同等级时,以某省不同地市级电力公司同业对标数据作为参考,对各 个指标制定了具体的判断集标准,从而确定了所有指标的模糊隶属度.

为直观地对某指标做出判断,将判断集转 换为等级,即 V = (-3, -33, -34, -35], 级).采用最大隶属度原则确定该指标所属的 等级,若 $b_k = \max_{j} [b_1, b_2, b_3, b_4, b_5]$ , 则认为该指标评价等级为第k级.当出现 $b_i$ 和  $b_k(k=i\pm 1)$ 比较接近时 $\lambda = \max b_j / \sum b_j \leq$ 0.7(其中, $b_i$ 为和 $b_k$ 最接近的值),最大隶属 度原则便失效,则在评价时,令 $\delta = b_k / (b_k + b_i)$ ;当i=k-1时,被评价对象为第 $(i+\delta)$ 级; 当i=k+1时,被评价对象为第 $(k-\delta+1)$ 级. 各指标等级计算结果,如图 1 所示.

如果指标位于第2级以内,说明该指标介 于"很好"和"好"之间,这些指标应该继续保 持.该雷达图非常直观地显示了3个地市级电 网42个诊断指标的状况,为提高管理水平提 供了很好的决策依据.





以城市Ⅲ为例,指标 I111(220 kV 主变 N-1 通过率)等 26 个指标位于该区域.如果指标位于第 2 级和第 3 级之间,说明该指标介于"好"和"一般"之间,这些指标提升的空间较大,对电网的整体发展具

有较大的促进作用. 以城市Ⅲ为例,指标 I14(10 kV 市辖电缆化率)等 17 个指标位于该区间. 如果指标 位于第 3 级以外,说明该指标距离"一般"的水平还有差距. 因此,这些指标是电网发展中的薄弱环节,已 经制约了电网的整体发展.

从图 1 可以看出:只有少数指标位于该区间,如城市Ⅲ有两个指标 I241(220 kV 主变容载比)和 I432(110 kV 主变等效平均功率)位于第 3,4 级之间,这些指标是管理层应该高度关注和重点改进的指标.如果指标评价结果位于第 4 级以外,那说明该指标严重地影响了电网的整体发展,必须立即改进.对于 3 个样本城市电网而言,没有指标落入该区间.

### 2 基于三角模糊数的权重确定

序关系和层次分析法是常用的权重确定方法,但专家通常难以给出一个确定的分数来确定两个因素比较时的相对重要程度,而三角模糊层次分析法利用模糊隶属度的原理可以有效地解决这一问题.

如图 2 所示的三角模糊数,*a*,*b*,*c*(*a*≤*b*≤ *c*)分别表示的是隶属于所属论域的最小可能 值、最可能值和最大可能值,而介于 *a*,*b*,*c* 三 者之间的某一数值 *x* 和隶属度 *y* 的关系满足

 $\begin{array}{ll} x = a + (b - a)y, & x \in [a, b] \\ x = c + (b - c)y, & x \in [b, c] \\ 0, & \ddagger w \end{array} \right\} (1)$ 

将传统层次分析法中的两两因素比较矩

阵中的数值用三角模糊数的方式代替,结果如表2所示.将两两比较矩阵中的数值用三角模糊数代替, 然后

进行权重的计算,具体有如下4个主要步骤.

1) 计算第 i 个目标的模糊综合评价值,即

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{g_1}^j \otimes \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_1}^j\right]^{-1}.$$
 (2)

$$\mathfrak{K}(2) \oplus : \sum_{j=1}^{m} M_{g_{1}}^{j} = \left(\sum_{j=1}^{m} a_{j}, \sum_{j=1}^{m} b_{j}, \sum_{j=1}^{m} c_{j}\right), j = 1, 2,$$
  
$$\dots, m; \left[\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} M_{g_{1}}^{j}\right]^{-1} = \left(\sum_{i=1}^{n} c_{i}\right)^{-1}, \left(\sum_{i=1}^{n} b_{i}\right)^{-1},$$
  
$$\left(\sum_{i=1}^{n} a_{i}\right)^{-1}, i = 1, 2, \dots, n.$$

2) 计算两两模糊数的可能比较值,即

 $V(M_2 \geqslant M_1) = \operatorname{hgt}(M_2 \cap M_1) = \mu_{M_2}(d) =$ 

$$\begin{cases} 1, & b_2 \ge b_1, \\ 0, & a_1 \ge c_2, \\ \frac{a_1 - c_2}{(b_2 - c_2) - (b_1 - c_1)}, & \notin \mathbb{U}. \end{cases}$$
(3)

3) 取最小比较值作为最终值,即有

$$V(M \ge M_1, M_2, \cdots, M_k) = \min V(M \ge M_i), \qquad i = 1, 2, \cdots, k.$$

$$(4)$$

$$(4)$$

$$(4)$$

$$(4)$$

$$(4)$$

$$(4)$$

$$(4)$$

$$(4)$$

$$(4)$$

$$(4)$$

$$(4)$$

$$(4)$$

$$(4)$$

$$(4)$$

$$(4)$$

$$(4)$$

$$(4)$$

$$(4)$$

$$(5)$$

$$(5)$$

$$(5)$$

$$(5)$$

$$(5)$$

$$(6)$$

$$(6)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$(7)$$

$$\boldsymbol{W}' = (d'(A_1), d'(A_2), \cdots, d'(A_n))^{\mathrm{T}},$$

将其标准化,则可以得到标准后的向量为

 $\boldsymbol{W} = (d(A_1), d(A_2), \cdots, d(A_n))^{\mathrm{T}}.$ 

电网发展诊断指标体系涉及指标较多,同时不同电压等级的线路共存形成网络.因此,许多指标都 对应不同的电压等级,比如容载比涉及到不同电压等级的容载比.为清晰地反应诊断体系,构建了三层



图 2 一个三角模糊数

Fig. 2 Triangle fuzzy number

表 2 模糊数转换表

Tab. 2	Conversion scale of	fuzzy number
语义值	三角模糊数	三角模糊倒数
相等	(1,1,1)	(1,1,1)
可能相等	(1/2, 1, 3/2)	(2/3, 1, 2)
略微重要	(1,3/2,2)	(1/2, 2/3, 1)
很重要	(3/2,2,5/2)	(2/5, 1/2, 2/3)
非常重要	(2,5/2,3)	(1/3, 2/5, 1/2)
绝对重要	(5/2, 3, 7/2)	(2/7, 1/3, 2/5)

评价指标体系;同时在计算权重时,对三层诊断指标分别计算权重,计算得到的各层诊断指标的权重如 表1括号中的数值.

### 3 电网发展运行的模糊综合评价

在对地市级电网发展评价体系的构建中体现为3个层次,故文中构建三级级评价模型,分别利用模型(5)对每层诊断评价指标,进而得到3个地市级电网的综合评价结果.

$$\boldsymbol{B}_i = (b_{i,1}, b_{i,2}, \cdots, b_{i,m}) = \boldsymbol{W}_i \circ \boldsymbol{R} =$$

$$(w_{i,1}, w_{i,2}, \cdots, w_{i,n}) \circ \begin{pmatrix} r_{1,1}, r_{2,1}, \cdots, r_{n,1} \\ r_{2,1}, r_{2,2}, \cdots, r_{n,2}, \\ \vdots, \vdots, \cdots, \vdots \\ r_{n,1}, r_{n,2}, \cdots, r_{n,m} \end{pmatrix}.$$
(5)

式(5)中:W<sub>i</sub> 为各层指标权重向量; **R** 为各层指标模糊隶属度矩阵; b<sub>i</sub> 是综合考虑因素集中所有因素后 判断对象属于第 *j* 个评语 V<sub>i</sub> 的隶属度; B 是属于判断集 V 上的模糊集合; "。"代表合成算子.

为直观地反映评价结果并进行诊断,按前述指标分级办法将评价结果分为六级,并用雷达图标定 3 个城市电网发展整体水平和 5 个准则的评价等级,如图 3 所示.由图 3 可知:城市 I 和城市 II 的电网整 体发展水平比较接近,分别为 1.76 和 1.83 级,介于第 1,2 级之间,即介于"很好"和"较好"之间.但城市 II 电网整体发展水平为 2.25 级,即介于"较好"和"一般"之间.因此,该城市电网整体发展水平需要大力 改进.为进一步诊断各城市电网发展中存在的问题,可以从两个方面对城市电网整体发展进行诊断.

对于城市 I,电网发展安全与质量(S1)、电 网发展速度与规模(S2)、电网发展协调性(S3)和 电网发展效率(S4)4个方面分别位于 1.75,1.85, 1.49和1.63级,都介于"很好"和"较好"之间,这 4个方面发展得比较好.但电网经济效益(S5)的 评价结果为 2.62级,也就是介于第 2,3级之间. 因此,该指标应该有较大的提升空间.

对于城市 II,电网发展速度与规模(S2)和电 网发展协调性(S3)分别位于 1.97 级和 1.88 级, 而电网发展安全与质量(S1)、电网发展效率(S4) 和电网经济效益(S5)分别为位于 2.35 级、2.25 级、2.98 级,即介于"较好"和"一般"之间.因此, 改进这 3 个方面的工作应该是未来的工作重点.

对于城市Ⅲ,电网发展安全与质量(S1)、电



图 3 准则层和电网发展整体水平评价雷达图 Fig. 3 Radar map of criterion layer and the grid development evaluation

网发展速度与规模(S2)和电网经济效益(S5)评价结果分别位于 1.57 级、1.86 级、1.73 级,结果较好比较好,但电网发展协调性(S3)和电网发展效率(S4)分别位于第 2.15 和 2.02 级,也就是介于"较好"和 "一般"之间,大力改进这两个方面应该是该城市电网未来发展的重点.

### 4 结束语

结合地市级电网的特点,首先从电网发展安全与质量、电网发展速度与规模、电网发展协调性、电网 发展效率、电网经济效益5个维度对电网发展进行分析;然后,根据专家建议和数据挖掘的方法筛选了 46个具体指标,构建了电网发展诊断多层评价指标体系.通过计算各指标的模糊隶属度并确定其评价 等级,从而清晰地分析各评价指标的状况.最后,利用三角模糊数确定了评价指标的权重,用模糊综合评 价法对三个城市电网的发展水平进行实证分析.该诊断评价体系可以全面地对电网发展进行评价,并指 出电网发展中需要加强的环节,为管理决策提供依据.

### 参考文献:

- [1] 葛旭波,电网企业可持续发展指标体系及评价方法研究[D].北京:华北电力大学,2007:5-37.
- [2] 李莉,雷宇,葛旭波,等.电网企业可持续发展的指标体系及评价方法[J].电力学报,2007,22(78):1-2.
- [3] 王国威.电网建设项目可持续发展后评价研究[D].北京:华北电力大学,2008:1-23.
- [4] 王志东. 我国电网发展评价指标体系研究[J]. 东北电力大学学报:社会科学版, 2009, 29(4):83-84.
- [5] 韩震煮.城市配电网综合评价体系研究[D].天津:天津大学,2011:16-17.
- [6] 陈轩. 地区电网运行评价指标体系及评价方法研究[D]. 上海:上海交通大学,2011:5-39.
- [7] 朱韬.基于层次分析法的农网评估指标体系研究[D].北京:华北电力大学,2012:10-16.
- [8] 张红斌.智能电网试点项目评价指标体系研究[J].能源技术经济,2010,22(12):11-15.
- [9] 陈安伟.智能电网技术经济综合评价研究[D].重庆:重庆大学,2012:15-70.
- [10] 刘芳,徐文强,陈春歌,等.电网调度系统安全运行评价指标体系研究[J].工业安全与环保,2012,38(5):92-96.
- [11] 蒋国臻. 电网规划综合评价指标体系及方法的研究[D]. 武汉:华中科技大学,2009:6-28.
- [12] 李欣然,刘杨华,朱湘有,等.高压配电网建设规模的评估指标体系及其应用研究[J].中国电机工程学报,2006,26 (17):18-24.
- [13] 范孟华."世界一流电网"评价指标体系[J].中国信息化:学术版,2012,18(9):33-34.
- [14] 代红才.新能源与智能电网协调发展评价指标体系研究[J].能源技术经济,2011,23(5):18-23.
- [15] 王敬敏,施婷.智能配电网评估指标体系的构建[J].华北电力大学学报:自然科学版,2012,39(6):65-70.
- [16] 王琬,刘宗岐,曾博,等. 大都市电网综合指标体系与评价模型[J]. 现代电力,2011,28(4):24-28.
- [17] 陈午,许新宜,王红瑞,等.基于序关系法的北京市水资源可持续利用模糊综合评价[J].水利经济,2014,3(2):19-24.

### Comprehensive Evaluation and Development Diagnosis System of the Municipal Power Grid

### SHI Zhi-ping<sup>1</sup>, SHAN Ti-hua<sup>1</sup>, LIU Wen-feng<sup>2</sup>, ZHANG Xing-ping<sup>2</sup>

(1. Economic Research Institute, State Grid Jibei Electric Power Company Limited, Beijing 100045, China;

2. College of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Combining the characteristics of the municipal power grid, this paper conducts a comprehensive evaluation on the power grid development from five dimensions including power grid safety and power quality, power grid development speed and scale, the coordination of the power grid, operation efficiency and economic benefit of the power grid. We also specify 46 evaluation indicators based on field research and data mining. Thus, this paper proposes a bilayer structure model to evaluation and diagnosis of grid development. Then multi-hierarchy order relation method and fuzzy comprehensive evaluation model are employed to empirical analysis of three sample cities. Finally, radar charts are acquired for analyzing and diagnosing the development level of the power grid from three levels. The empirical results clearly point out problems existed in power grid and provide some policy implications for managers.

Keywords: grid; evaluation index system; order relation; fuzzy number; municipal

(责任编辑:黄仲一 英文审校:吴逢铁)

**文章编号:**1000-5013(2015)01-0017-06

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.01.0017

# 面向 RTF 文件的 Word 漏洞分析

乐德广<sup>1,2</sup>,章亮<sup>2</sup>,郑力新<sup>2</sup>,李鑫<sup>2</sup>,陈经途<sup>3</sup>

(1. 常熟理工学院 计算机科学与工程学院,江苏 苏州 215500;
 2. 华侨大学 工学院,福建 泉州 362021;
 3. 厦门锐思特软件科技有限公司,福建 厦门 361005)

摘要: 针对 Word 软件在富文本格式(RTF)文档解析的漏洞利用攻击,通过对 Word 程序的逆向分析,研究 其在 RTF 文档解析中产生缓冲区溢出漏洞的原理,并提出一种基于指令回溯及特征数据构造的漏洞分析方 法.通过该方法分析 Word 漏洞的触发原因、触发点和触发机制,给出了面向 RTF 文档的缓冲区溢出漏洞的 分析流程.实验测试结果证明:该方法能有效检测出 Word 的 RTF 文档解析漏洞.

关键词: 富文本格式;文档;软件安全; Word 漏洞利用

**中图分类号:** TP 393 **文献标志码:** A

随着互联网应用的普及,软件的安全问题变得日趋严重. 自从 2006 年 Word 办公软件的一个严重 漏洞被发现以来,Office 办公软件的漏洞开始成为网络黑客攻击和利用的工具,而在这些漏洞当中,利 用文件格式解析漏洞的攻击更是层出不穷<sup>[1]</sup>. 国内外的安全研究机构和学者也投入大量的精力研究文 档类漏洞的检测和分析<sup>[2-4]</sup>. 近年来,由于 Office Word 程序在解析富文本格式(rich text format,RTF) 文档时经常会触发漏洞,黑客就可以控制正在运行 Word 的特权用户,因此深入分析 RTF 文档解析过 程显得极为必要.本文在研究 RTF 文档绘图属性的基础上,提出一种基于指令回溯调试及特征数据构 造的 Word 程序漏洞逆向分析方法.

### 1 相关工作

### 1.1 RTF 文档概述

RTF 是微软公司为进行文本和图像信息格式的交换而制定的一种文件格式,它适用于不同的设备、操作环境和操作系统<sup>[5]</sup>. RTF 文件数据格式由未格式文本、控制字、控制符和组构成. 其中,未格式 化本文即单纯的编辑文本,不具有任何格式,是 RTF 文件的正文部分. 控制字是 RTF 用来标记打印控 制符和管理文档信息的一种特殊格式的命令,一个控制字最长 32 个字符. 控制字的使用格式为

\字母序列(分隔符)

其中:每个控制字均以一个反斜杠\开头;字母序列由"a"~"z"的小写字母组成.

组由文本(包括在({})中)、控制字或控制符组成. 左扩符({)表示组的开始,右扩符(})表示组的结束. 每个组包括文本和文本的不同属性. 一个 RTF 文件符合以下语法,即

{File>'{'\ender>\document>'}'

从以上 RTF 文件语法可以看出,RTF 文件包括文件头和文档区.其中,文件头的语法为 〈header〉\rtfN〈charset〉\deffN? 〈fonttbl〉〈filetbl〉? 〈colortbl〉? 〈stylesheet〉? 〈revtbl〉? 文档区的语法为

**收稿日期:** 2014-10-08

通信作者: 乐德广(1975-),男,副教授,博士,主要从事信息安全领域的研究.E-mail:ledeguang@gmail.com.

基金项目: 福建省物联网云计算平台建设基金资助项目(2013H2002);福建省泉州市科技计划项目(2012Z83);福 建省泉州市丰泽区科技计划项目(2013FZ46);华侨大学高层次人才科研启动项目(12Y0357)  $\langle \text{document} \rangle \langle \text{info} \rangle$ ?  $\langle \text{docfmt} \rangle * \langle \text{section} \rangle +$ 

### 1.2 Word 安全性分析

随着 MS Office 系列软件的广泛应用, doc, xls 和 ppt 等文档已经成为日常工作文档的通用传递格 式. Word. exe 程序支持 doc, txt, html, xml, rtf 等数据格式的文件. 由于 Word 支持的文件格式广泛, 不 同文件格式又相当复杂, 因此, 在该程序的设计和处理中不可避免地存在大量漏洞, 如缓冲区溢出漏 洞<sup>[8]</sup>. 缓冲区溢出漏洞包括栈溢出漏洞、堆溢出漏洞、释放后重用漏洞、远程代码执行漏洞等<sup>[7]</sup>.

由于微软发布的 Word 软件存在漏洞的公告中,危害等级为"严重"的漏洞就经常涉及到 RTF 文件.例如,Microsoft Word RTF 文件解析错误代码执行漏洞,Microsoft Word RTF 数据处理远程内存 破坏漏洞,Microsoft Word RTF 文件释放后重用远程代码执行漏洞,Microsoft Office RTF 分析器堆栈 溢出漏洞和 Microsoft Word RTF 解析引擎堆溢出漏洞等<sup>[7]</sup>.因此,文中重点分析 RTF 文档缓冲区溢 出漏洞.

### 2 漏洞分析

### 2.1 RTF 结构

通过对 RTF 的文件头和文档区分析,可以将整个 RTF 文档的结构分成可存数据区域和不可存数据区域两个部分,如图 1 所示.

对 RTF 文档进行重划分,其中在可存数据区域中,pFragments, pSegmentInfo,pVerticies,Themedata,Datastore 等都是容易触发漏 洞的区域,在这些区域中可以填写恶意代码(shellcode).Microsoft Word RTF 文件解析缓冲区溢出漏洞就是解析 RTF 绘图属性 pFragments 时造成的缓冲区溢出漏洞.因此,文中重点研究 Word 程序在解析 RTF 文档绘图属性时产生的缓冲区溢出漏洞.

### 2.2 RTF 绘图属性逆向分析

通过指令回溯调试和特征数据构造方法逆向分析 RTF 的绘图 属性. Word. exe 程序解析该 RTF 文档中的 pFragments 属性时,其 逆向关键代码如图 2 所示.

图 1 RTF 区块分割 Fig. 1 RTF Area Segmentation

图 2 中:源代码是 Word. exe 程序解析 pFragments 属性的关键函数. 在该函数中,方框中的 rep 指 令是将 esi 所指向的 pFragments 属性值数据复制到 edi 所指向的缓冲区. 复制的次数由 mov,eax,ecx 指令中的 ecx 寄存器决定. ecx 寄存器的最大值为 FFFFH,但是在执行 rep 指令进行复制之前,有一个 移位运算 shr ecx 2,所以 ecx 的最大值为 3FFFH,rep 指令复制的最大字节数为 4×3FFFH=FFFCH B. 由图 2 可知:该函数未严格检查 pFragments 属性值所占用的缓冲区空间大小. 因此,需要确定由 rep 指令复制数据的缓冲区大小.

图 2 函数中的 retn 指令返回到该函数的调用指令处<sup>[8]</sup>,如图 3 所示.图 3 中:地址  $0x_{30}F_{0}B_{5}F_{8}$ 处的 call dword ptr ds:  $[ax+0x_{1}C]$ 指令为图 2 的调用函数.通过逆向该函数调用前的栈操作指令可以看

30ED4406		57	push	edi
30ED4407		8B7C24 0C	ROV	edi, dword ptr ss:[esp+0xC]
38ED448B		85FF	test	edi, edi
38ED448D		74 27	je	short 30ED4436
38ED448F		8B4424 08	nov	eax, dword ptr ss:[esp+0x8]
30ED4413		8B48 88	ROV	ecx, dword ptr ds:[eax+0x8]
38ED4416		81E1 FFFF000	and	ecx, 0xFFFF
30ED441C		56	push	esi
38ED441D		8BF1	ROV	esi, ecx
38ED441F		0FAF7424 14	inul	esi, dword ptr ss:[esp+0x14]
30ED4424		0370 10	add	esi, dword ptr ds:[eax+0x10]
30ED4427		8BC1	ROV	eax, ecx
30ED4429		C1E9 02	shr	ecx, 0x2
30ED442C		F3:A5	rep	movs dword ptr es:[edi], dword ptr ds:[esi]
30ED442E	•	8868	ROV	ecx, eax
30ED4430		83E1 03	and	ecx, 0x3
30ED4433		F3:A4	rep	movs byte ptr es:[edi], byte ptr ds:[esi]
38ED4435		5E	pop	esi
30ED4436	>	5F	pop	edi
30ED4437	-	C2 8C88	retn	ØxC
	SIGED44366         SIGED4407           SIGED4408         SIGED4408           SIGED4408         SIGED4408           SIGED4408         SIGED4416           SIGED4416         SIGED4416           SIGED4408         SIGED4416           SIGED4417         SIGED4417           SIGED4418         SIGED4424           SIGED4428         SIGED4429           SIGED4429         SIGED4429           SIGED4423         SIGED4423           SIGED4433         SIGED4433           SIGED4433         SIGED4433           SIGED4435         SIGED4437	SIGEDAAGC           SIEDA408           SIEDA410           SIEDA411           SIEDA424           SIEDA424           SIEDA424           SIEDA424           SIEDA424           SIEDA424           SIEDA424           SIEDA424           SIEDA424           SIEDA433           SIEDA433           SIEDA433           SIEDA4343           SIEDA4343           SIEDA4343	CLEDADOG         -         57           SUEDAHAT         -         85F2         0C           SUEDAHAT         -         85F7         30E0AHAT         -         85F7           SUEDAHAT         -         85F4         30E0AHAT         -         74.27           SUEDAHAT         -         8848.08         30E0AHAT         -         50           SUEDAHAT         -         6F67424.14         30E0AHAT         -         6767424.14           SUEDAHAT         -         0F677424.14         30E0AHAT         -         6767424.14           SUEDAHAT         -         0F677424.14         30E0AHAT         -         6767424.14           SUEDAHAT         -         0F677424.14         -         576         30E0AHAT         -           SUEDAHAT         -         0F677424.14         -         576         30E0AHAT         -         576         30E0AHAT         -         576         30E0AHAT         -         58021         30E0AHAT         -         57144         30E0AHAT         - <t< th=""><th>GUEDAUG         -         57         push           GUEDAUG         -         587C24 0C         nov           GUEDAUG         -         857F         test           GUEDAUG         -         74 27         je           GUEDAUG         -         8842 08         nov           GUEDAUG         -         8843 08         nov           GUEDAUG         -         56         push           GUEDAUG         -         6774 10         add           GUEDAUG         -         6776 10         nov           GUEDAUG         -         6736 10         nov           GUEDAUG         -         7316 10         add           GUEDAUG         -         7316 10         and           GUEDAUG         -         7316 10         and           GUEDAUG         -         7316 10         and           GUEDAUG         -         7316 10         and</th></t<>	GUEDAUG         -         57         push           GUEDAUG         -         587C24 0C         nov           GUEDAUG         -         857F         test           GUEDAUG         -         74 27         je           GUEDAUG         -         8842 08         nov           GUEDAUG         -         8843 08         nov           GUEDAUG         -         56         push           GUEDAUG         -         6774 10         add           GUEDAUG         -         6776 10         nov           GUEDAUG         -         6736 10         nov           GUEDAUG         -         7316 10         add           GUEDAUG         -         7316 10         and           GUEDAUG         -         7316 10         and           GUEDAUG         -         7316 10         and           GUEDAUG         -         7316 10         and

图 2 Word 解析 RTF pFragments 属性关键源代码 Fig. 2 Word key assembly codes for RTF pFragments attribute resolution

30F085DA		E8 C4E8E1FF	call	30D29EA3	
30F0B5DF		FF75 0C	push	dword ptr ss:[ebp+0xC]	
30F0B5E2		8B78 64	nov	esi, dword ptr ds:[eax+0x64]	
30F085E5		8365 F8 88	and	dword ptr ss:[ebp-0x8], 0x0	
30F0B5E9		8B 06	nov	eax, dword ptr ds:[esi]	
30F0B5EB		8D4D F8	lea	ecx, dword ptr ss:[ebp-0x10]	
30F085EE	•	51	push	ecx	
30F0B5EF		BB 0000005	nov	ebx, 0x5000000	
30F0B5F4		56	push	esi	
30F0B5F5		895D F4	ROV	dword ptr ss:[ebp-0xC], ebx	
39F0B5F8		FF50 1C	call	dword ptr ds:[eax+0x1C]	
30F0B5FB	•	8B45 14	nov	eax, dword ptr ss:[ebp+0x14]	
30F0B5FE		FF75 18	push	dword ptr ss:[ebp+0x18]	
30F0B601		8B55 F0	nov	edx, dword ptr ss:[ebp-0x10]	
30F0B604		F7D8	neg	eax	
30F0B606		1800	sbb	eax, eax	
30F0B608		8D4D F8	lea	ecx, dword ptr ss:[ebp-0x8]	
30F0B60B		2301	and	eax, ecx	
30F0B60D		50	push	eax	
3 0F 0B 6 0E		FF75 08	push	dword ptr ss:[ebp+0x8]	

图 3 RTF pFragments 属性值缓冲区大小 Fig. 3 Buffer size of RTF pFragments attribute value



出:在地址 0x30F0BEB 处的 lea ecx dword ptr ss: [ebp-0x10]指令在处理 pFragments 属性的时候,分配一个最大值为 10H B 的缓冲区给地址 0x30F0B5F8 的 call 函数.由图 3 可知: 0x30F0B5F8 处的 call 函数未严格检查 pFragments 属性值所占用的空间大小,当 ecx 的值大于 10H B 时,就会导致图 2 中地址 0x30ED442C 处的 rep 指令在复制 pFragments 属性值数据时产生缓冲区溢出.

由于 ecx 寄存器在程序的执行过程中被反复使用,采用传统的内存断点逆向方法很难确定给 ecx

赋初始值的指令<sup>[9]</sup>.因此,采用一种新的指令回溯逆向方法来确定 ecx 赋初始值的指令.该方法通过追溯给 ecx 赋值的前一条指令,然后给该指令下断点,再通过断点的指令追溯给这条指令赋值的前一条指令,最终确定给 ecx 赋初始值的指令,其逆向关键代码如图 4 所示.由图 4 可知:[ebp-0x8]等于 pFragments 属性值的第 5 和第 6 个字节.当 ja 跳转指令执行跳转时,Word. exe 程序执行的逆向关键代码如图 5 所示.

由图 5 可知:当 ja 跳转指令执行时,eax 直接被赋值为 0,导 致 ecx 最终被赋值为 0.由于 rep 指令所复制的字节数由 ecx 决 定,而 ja 跳转指令决定 ecx 的值.因此,ja 指令是否执行跳转决定 pFragments 属性值数据能否复制至缓冲区,是产生缓冲区溢出 漏洞的条件之一.

	Carr	3154DB18
. 8500	test	eax, eax
. 74 6D	je	short 312428BA
. 66:8B45 ØE	nov	ax, word ptr ss:[ebp+0xE]
. 66:3B45 FC	спр	ax, word ptr ss:[ebp-0x4]
., 77 63	ja	short 312428BA
. 8B75 08	nov	esi, dword ptr ss:[ebp+0x8
. 0FB746 06	ROVZX	eax, word ptr ds:[esi+0x6]
. 8B4E 08	nov	ecx, dword ptr ds:[esi+0x8
. 81E1 FFFF000	and	ecx, 0xFFFF
. ØFAFC1	inul	eax, ecx
. 50	push	eax
. FF76 10	push	dword ptr ds:[esi+0x10]
. E8 ED55A8FF	call	MsoPvFree
. 66:8B45 F8	nov	ax, word ptr ss:[ebp-0x8]
. 66:8946 08	nov	word ptr ds:[esi+0x8], ax
. 0FB745 FC	NOVZX	eax, word ptr ss:[ebp-0x4]
. 68 01010000	push	0x101
. 50	push	eax
	- 74 60 - 66:8845 0E - 66:3845 FC - 77 63 - 8875 08 - 87875 08 - 87875 08 - 87876 08 - 87876 08 - 87876 08 - 87876 08 - 87876 10 - 50 - 576 10 - 58 205588FF - 66:8845 F8 - 66:8946 08 - 068745 FC - 68 01010000 - 50	

图 4 ecx 初始值设置 Fig. 4 Initial value setting of ecx

312428BA	> 43300	xor	eax, eax
312428BC	> 5F	рор	edi
312428BD	. 5E	рор	esi
312428BE	. 5B	pop	ebx
312428BF	. C9	leave	
31242800	L. C2 0800	retn	0x8

#### 图 5 ja 跳转流程

#### Fig. 5 Jump process of ja

根据上面的分析,基于特征数据构造的方法构造 ja 指令,采用不跳转的 pFragments 属性值特征数据,将该数据复制到缓冲区中,通过逆向 Word. exe 继续解析构造的 pFragments 属性值数据,其逆向关键代码如图 6 所示.

由图 6 可知:在 Word. exe 程序将构造好 的 pFragments 属性值数据复制到缓冲区后, 将执行方框中的指令.因此,继续采用基于特 征数据构造的方法让 je 指令分别执行跳转和 不跳转操作.当不产生跳转时,Word. exe 程序 将 执 行 地 址 0x30F0B7CB 处 的 call 30F0B90A,此时 Word. exe 程序不能正常返 回,并最终造成程序直接崩溃;当 je 指令发生 跳转时,Word. exe 程序可以正常执行,并造成 缓冲区溢出.因此,[ebp+10]的特征值为

30F087AF	\$	55	push	ebp
30F0B7B0		8BEC	ROV	ebp, esp
30F0B7B2		83EC 10	sub	esp, 0x10
30F0B7B5		53	push	ebx
30F0B7B6		33DB	xor	ebx, ebx
30F0B7B8		395D 18	спр	dword ptr ss:[ebp+0x10], ebx
3 ØF ØB7BB	••	0F84 0F4A180	je	31090100
30F0B7C1		3BD3	спр	edx, ebx
30F0B7C3		895D F4	ROV	dword ptr ss:[ebp-0xC], ebx
30F0B7C6	•••	74 10	je	short 30F0B7D8
30F087C8		8D4D F4	lea	ecx, dword ptr ss:[ebp-0xC]
30F0B7CB		E8 3A010000	call	3 0F 0B 9 0A
30F087D0		8500	test	eax, eax
30F087D2	••	0F84 FD49180	je	31090105
30F087D8	>	8B4F 08	nov	ecx, dword ptr ds:[edi+0x8]
30F0B7DB		8881	nov	eax, dword ptr ds:[ecx]
30F087DD		56	push	esi
				and the second state of th



Fig. 6 Characteristic data analysis

0000H.该特征值决定了构造的 pFragments 属性值数据能否让程序正常执行,这是产生缓冲区溢出漏洞的另一条件.

通过以上对于 RTF 文档绘图属性 pFragments 逆向分析可以得出:通过 ja 和 je 指令的 2 次正确跳转后, pFragments 属性值数据才能够正确复制到缓冲区,并造成溢出.

### 2.3 Word 解析 RTF 绘图属性漏洞分析流程

根据 2.2 节对 RTF 绘图属性分析,得出缓冲区溢出条件. Word 在解析 RTF 绘图属性时产生溢出 漏洞的流程,如图 7 所示.

由图 7 可知: RTF 文档绘图属性产生 7 个步骤缓冲区溢出的流程.

步骤1 首先,构造一个具有绘图属性的 RTF 文档,例如,test.rtf.

**步骤2** 用 Word. exe 程序打开 RTF 文档.

**步骤3** Word. exe 程序解析 RTF 绘图属性的 sv 属性值数据.

步骤4 判断 RTF 文件绘图属性的 sv 属性值 中是否包含有将 sv 属性值复制到缓冲区中的特征 值数据,例如,[ebp+0xE]≪[ebp-0x4].如包含有 该特征值,则执行步骤5;否则,Word.exe 程序进入 正常数据处理,并结束.

**步骤5** RTF文件绘图属性的 sv 属性值数据 复制到缓冲区中.

**步骤6** 判断 RTF 文件绘图属性的 sv 属性值数据是否包含程序正常返回的特征值数据,例如,





[ebp+10]=0000H.如果包含特征值数据,则执行步骤7;否则,Word.exe程序进入异常数据的处理,并结束.

**步骤7** 判断 RTF 文件绘图属性的 sv 属性值数据的长度是否大于到缓冲区存储空间,例如,[ebp-0x8]>10H.如果复制的 sv 属性值数据长度大于缓冲区存储空间,则造成溢出并触发漏洞;否则 Word. exe 程序进入正常数据处理,并结束.

### 3 实验测试

对 2.3 节提出的 RTF 漏洞分析流程进行实验测试,测试硬件环境分别是 I3-3110 处理器,4 G 内存 的笔记本电脑,I5-4460 型处理器,4 G 内存的台式机,E31225v3 型处理器及 8 G 内存的服务器.操作系 统是 Windows XP SP3,软件是 Office 2003 SP2.首先,基于该流程构造 POC(proof of concept)<sup>[10]</sup>,并 通过 shellcode 证明该漏洞分析流程的有效性.

### 3.1 POC 的构造

根据 RTF 绘图属性漏洞分析的流程可以看出:绘图属性的 sv 属性值是能否触发漏洞的关键,只有在 POC 中构造合适的 sv 才能触发漏洞,造成缓冲区溢出.根据图 7 中步骤 4 的判断条件,构造 sv 属性值为

{\sv1;1;111122223333}

其中:sv的属性值是 111122223333H;第 1,2 个字节构成的 16 进制数为 1111H,第 3,4 个字节构成的 16 进制数为 2222H,即(12)H<(34)H,所以这时可以复制 3333H 长度的 sv属性值数据到缓冲区中.

虽然可以复制指定大小的数据到内存缓冲区中,但是并不知道这些数据能否让 Word. exe 程序正 常执行,而程序能否正常执行也是通过 sv 属性值的特征数据来控制,该特征数据具体是在第 47~50 个 字节处,需要将这 4 个字节置为 0000H,程序才能正常执行.根据图 7 中步骤 6 的判断条件,进一步构造 sv 的属性值为

其中:第1~4个字节判断属性值数据能否复制至缓冲区;第5~6个字节指定拷贝属性值数据的长度; 第7~50个字节是填入缓冲区的属性值数据;第47~50个字节为判断属性值数据能否让 Word. exe 程 序正常执行的特征值数据.

打开构造好的 POC 文档 test. rtf,缓冲区数据如图 8 所示. 由图 8 可知:构造的数据已经成功复制 到缓冲区中,只要合适长度数据就可以造成缓冲区溢出漏洞.

### 3.2 漏洞利用测试

通过构造 shellcode,对漏洞进行利用测试.测试的 shellcode 功能是调用系统命令执行程序 CMD

窗口,所以在构造 shellcode 的过程中重点是自定位、获取 kernel32. dll 基地址以及 API 函数地址<sup>[11]</sup>, 其构造流程,如图 9 所示.

在获取完 kernel32. dll 的基址后,再通过 PE 文件导出函数表的结构可以获取构造 shellcode 所需要的 API 函数的地址,具体构造的 shellcode 机器码为

eb1b5b31c05031c088433553bbad23867cffd331c050bbfaca817

cffd 3e 8e 0 fffff 636 d 642 e 6578 652 02 f 632 07374 617274

构造好 shellcode 后,需要将 Word. exe 程序的 EIP 指针指向 shellcode 入口处,采用 jmp esp 作为跳转地址,跳至 shellcode 处.由于 Windows XP 系统的 jmp esp 指令的跳转地址为 0x7FFA4512<sup>[12]</sup>,将 Word. exe 程序的返回地址通过缓冲区溢出修改为 jmp esp 的跳转地址 0x7FFA4512. 该地址在缓冲区中存储的数据为 1245FA7FH.

RTF 漏洞利用文档的完整数据为

eb1b5b31c05031c088433553bbad23867cffd331c050bbfaca817

cffd3e8e0ffffff636d642e657865202f63207374617274}

其中:90H之后是 shellcode 的填充区域.

最后,将以上构造数据保存成 RTF 文档,并用 Word. exe 程序打开该 RTF 文档,结果如图 10 所示. 由图 10 可知:打开构造好的 POC 文件弹出 CMD 命令行窗口,证明通过提出的漏洞分析流程所构造的 RTF 文档漏洞利用成功.



Fig. 8 Distribution of buffer data

到 9 shellcode 构造流 Fig. 9 Process flow of shellcode

Fig. 10 Utilization result of RTF vulnerability

### 4 结束语

分析了 Office Word 软件所面临的安全威胁,并对 Word 2003 程序在解析 RTF 文档时容易触发漏 洞进行详细分析,提出一种面向 RTF 文档漏洞利用分析的方法,最后通过漏洞利用测试证明该方法的 有效性. 今后,还将针对 WPS Office,Excel,Word 2007 及更高版本程序做进一步研究,并基于 Word 漏 洞分析进一步研究 RTF 文档解析漏洞的补丁加强对 Word 漏洞的攻击防御. 此外,漏洞分析方法虽然 在 Win 32 平台下具有可行性,但是对于其他平台,如 Win 64 或 Linux 平台,还没有进行验证,也需要在 今后的工作中作进一步的验证.

### 参考文献:

- [1] KUHN R, JOHNSON C. Vulnerability trends: Measuring progress[J]. IT Professional, 2010, 12(4):51-53.
- [2] 史飞悦,傅德胜.缓冲区溢出漏洞挖掘分析及利用的研究[J].计算机科学,2013,40(11):143-146.
- [3] 陈恺,冯登国,苏璞睿.基于有限约束满足问题的溢出漏洞动态检测方法[J].计算机学报,2012,35(5):898-909.

- [4] 高志伟,姚尧,饶飞,等.基于漏洞严重程度分类的漏洞预测模型[J].电子学报,2013,41(9):1784-1787.
- [5] Microsoft Corporation. Rich Text Format (RTF) Specification[EB/OL]. [2014-10-08]. http://msdn. microsoft. com/en-us/library/aa140277(office. 10). aspx.
- [6] 李毅超,刘丹,韩宏,等.缓冲区溢出漏洞研究与进展[J].计算机科学,2008,35(1):87-90.
- [7] CHANG Yung-yu, ZAVARSKY P, RUHL R, et al. Trend analysis of the CVE for software vulnerability management[C]//Proceedings of IEEE Third International Conference on Privacy, Security, Risk and Trust (PASSAT) and IEEE Third International Conference on Social Computing (SocialCom). Boston: Institute of Electrical and Electronic Engineers, 2011:1290-1293.
- [8] HUANG Shih-Kun, HUANG Min-Hsiang, HUANG Po-Yen, et al. Software crash analysis for automatic exploit generation on binary programs[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2014, 63(1):270, 289.
- [9] 葛毅,茅兵,谢立.基于内存更新记录的漏洞攻击错误定位方法[J].计算机科学,2009,36(1):253-256.
- [10] FATAUER T S,KHATTAB S,OMARA F A. OverCovert: Using stack-overflow software vulnerability to create a covert channel [C] // Proceedings of IEEE 4th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security. Paris: Institute of Electrical and Electronic Engineers, 2011:1-5.
- [11] AN Zhi-yuan, LIU Hai-yan. Locating the address of local variables to achieve a buffer overflow[C]// Proceedings of IEEE Fifth International Conference on Computational and Information Sciences. Shiyang: IEEE Press, 2013:1999-2002.
- [12] 罗文华.基于逆向技术的恶意程序分析方法[J].计算机应用,2011,31(11):2766-2769.

### Research on Word Vulnerability Analysis for the RTF File

# LE De-guang<sup>1,2</sup>, ZHANG Liang<sup>2</sup>, ZHENG Li-xin<sup>2</sup>, LI Xin<sup>2</sup>, CHEN Jing-tu<sup>3</sup>

1. School of Computer Science and Engineering, Changshu Institute of Technology, Suzhou 362021, China;

2. College of Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;

3. Xiamen Rest Software Technology Company Limited, Xiamen 361005, China)

**Abstract**: According to vulnerability exploitation attack of Word software parsing RTF document, this paper studies the principle of buffer overflow vulnerabilities of Word program parsing RTF document by using the reverse analysis of the Word program, and proposes a new vulnerability analysis method based on instruction backtracking and characterization data construction. Through proposed method, this paper analyzes the triggering reason, triggering point and triggering mechanism of Word vulnerability. The analysis process of buffer overflow vulnerabilities for facing RTF document is obtained. The Experimental testing results show that this method can effectively detect the RTF document parsing vulnerability of word.

(责任编辑:陈志贤

Keywords: rich text format; document; software security; word vulnerability exploit

英文审校:吴逢铁)

**文章编号:**1000-5013(2015)01-0023-06

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.01.0023

# 二维直方图的 HEVC 帧内快速深度决策算法

### 许东旭,林其伟

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 针对高效率视频编码(HEVC)帧内预测高额的计算复杂度,提出一种基于二维直方图的快速深度决策算法.首先,对当前最大编码单元(LCU)采用 3×3 矩阵进行滤波;然后,分别统计原始 LCU 以及滤波后 LCU 的像素分布,生成二维灰度直方图.通过该二维直方图所表征的纹理特征,进行深度的自适应选择,减少 不必要的深度计算.实验结果表明:同原始 HM10.1 相比,文中提出的算法可以节省编码时间 21.6%,同时保 证视频质量几乎不变.

关键词: 高效率视频编码;深度;二维直方图;快速模式选择;编码单元;灰度直方图 中图分类号: TN 919.81 **文献标志码:** A

高效率视频编码(high efficiency video coding, HEVC)是继 H. 264 之后,又一新的视频编码标准. 相比 H. 264, 它引进了大量的创新技术, 即更多编码单元尺寸的选择及更多帧内预测模式的选择. 同 时,创新性地引入了3种新型编码单元的概念:编码单元(coding unit,CU),预测单元(prediction unit, PU),变换单元(transform unit,TU).这些创新技术使 HEVC 相比于 H.264 在提供相同视频质量的同 时,又可节省将近50%比特率<sup>[1]</sup>,但是它也引入了巨大的计算复杂度.如为了得到最优的CU,HEVC需 穷尽地递归搜索 CU,PU,TU 的最优组合<sup>[2]</sup>,同时对于每个 CU 帧内又需要遍历高达 35 种的预测模 式. 所以,现阶段很多学者围绕 CU 尺寸的快速选择以及帧内模式的快速决策这 2 个角度,做了大量的 努力. Silva 等<sup>[3]</sup>利用 5 个滤波模板求得当前 PU 的主要边缘方向,并依据求得的主要边缘方向进一步 减少模式计算的数量. Shen 等<sup>[4]</sup> 对当前编码块与其周围相邻的编码块的空间相关性做了研究. Jiang 等<sup>[5]</sup>利用 Sobel 算子提取当前 CU 的边缘信息,按生成的边缘梯度直方图进一步排除冗余的预测模式. Ting 等<sup>[6]</sup>利用 DCT 变换后的系数进行边缘检测,以此进一步减少模式数量.Xu 等<sup>[7]</sup>的前期工作对基 于自相关函数的快速深度决策算法进行了报导. Zhang 等<sup>[8]</sup>采用 4 个方向的梯度滤波器判断当前 CU 的纹理特征,提前决定当前 CU 是否进行分割. Kim 等<sup>[9]</sup>利用离线设置的率失真代价(rate-distortion cost, RDcost) 阈值, 提前终止某些 CU 的进一步分割. 文献 [8-9] 的主要思想都是采用某种策略终止某 些块的分割进程,即对分割的子树进行修剪.上述这些算法都在一定程度上减少了 HEVC 的编码复杂 度,但 HEVC 仍不利于实时应用,所以有必要进一步研究高效准确的快速算法来优化 HEVC 编码器. 从子树修剪的角度加速 HEVC 的编码器是个好方法,但搜索深度仍然固定.本文从提取当前最大编码 单元(largest coding unit,LCU)内部的纹理特征角度,利用改进的二维直方图法<sup>[10]</sup>,建立二维直方图与 当前 LCU 深度之间的统计关系,提出了一种新的快速深度决策算法.

### 1 HEVC 帧内预测过程

HEVC采用四叉树的递归分割结构,如图1所示.首先,当CU不划分时称为LCU,其尺寸为64× 64,深度为0,对该LCU进行预测编码,得其率失真(rate-distortion,RD)代价.然后,对LCU进行分割, 此时CU的尺寸为32×32,深度为1,同样对当前CU进行预测编码,得其RD代价.若当前CU尺寸为

**收稿日期:** 2013-12-23

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2012J01275)

通信作者: 林其伟(1959-), 男, 副教授, 主要从事 HEVC 中的快速算法的研究. E-mail: qwlin@hqu. edu. cn.

8×8时,即深度为3时,便不再进行分割.接着, 从 8×8 的 CU 尺寸开始,往上进行修剪:比较 4 个 8×8 的 RD 代价是否小于其上一深度对应的 16×16 尺寸 CU 的 RD 代价,若小于,则选择 8× 8的 CU 尺寸:否则,洗择 16×16 尺寸的 CU:如 此比较下去, 直到深度为 0. 最后, 选出具有最小 RD代价的CU作为最终的分割模式.

对于帧内  $2N \times 2N$  的 CU,其对应的 PU 尺 寸只能为  $N \times N$  或  $2N \times 2N$ . 而  $N \times N$  的 PU 在 当前 CU 为 8×8 时,才被允许使用.

同时,在每个深度级上,HEVC 的帧内预测 需在包括 2~34 等 33 种角度预测模式以及 planar 和 DC 模式之间进行率失真优化(rate distor-

Depth=0, 64×64 split 0 1 CU0 2 3 Intra PU Depth=1, 32×32 0 1 CU1 2 3  $2N \times 2N$  $N \times N$ Depth=2, 16×16 0 1 CU2 2 3 Depth=3, 8×8 CU3



tion optimization, RDO)计算后, 选取具有最小 RD 代价的模式作为最优的预测模式. 可见其计算量相 当巨大.为了缓解对 35 种模式进行 RDO 计算所带来的高额计算复杂度,HEVC 进行粗略模式选择 (rough mode decision, RMD) 过程<sup>[11]</sup>:首先,利用 Hadamard 变换代替 RDO 计算; 然后,从 35 种模式中 粗略洗出 N 个具有最小的 Hadamard 代价(即对残差进行 Hadamard 变换求得该残差的变换绝对差值

和,同时考虑需要编码的比特数这两者所花费的代价)作为候 选模式,并且考虑了当前 CU 来自左边与上边 CU 的最有可能 模式(most probable modes, MPMs);最后,对这可能的 N 到 N+2 个候选模式进行 RDO 计算,从中选出代价最小的预测 模式作为最优的模式. 该算法极大地提高了 HEVC 的编码速 度. 帧内总的预测算法流程, 如图 2 所示.

#### 基于二维灰度直方图的快速深度决策算法 2

文中算法之所以考虑二维直方图,是因为普通的一维直 方图只是统计了某一个 LCU 的像素组成,不能反映出该 LCU 所有像素的位置信息及其内部特征.通常一个 LCU 块内部周 围的像素相关性是非常强的,所以要充分利用这些相关性.基 于上述分析,首先,根据当前像素与其周围像素的相关程度 (与当前像素的距离大小)的高低采用不同的权值进行求和, 并通过当前像素与滤波后的像素联立构造二维像素直方图. 可见该二维直方图不仅利用了该像素本身携带的信息,而且 还利用了其周围像素的信息,这在一定程度上可以反映出当 前 LCU 的纹理特征, 然后,利用该提取的纹理特征选择当前 LCU 最有可能的深度范围,跳过不必要的深度计算,加快编码 速度.

### (开始) 一个 LCU 此时 深度为0尺寸为 64×64 的 CU 个CU 遗入-对 35 种模式进行 RMD,从中选择出 N 种最优的候选模式 対由上 模式同时考虑 MPMs, 对这 N 到 N+2 个候选模式进行 RDO 计算,从中选择具有最小 RDcost 的模式作为最优的预测模式 调用递归函数,将 否 深度为3 当前 CU 划分成 4 个子 CU, 深度 +1 或尺寸 /2 是 当前LCU 否全部完成所有 CU的编码 是

图 2 HEVC 的帧内算法流程图 Flowchart of the intra Fig. 2 prediction in HEVC

### 2.1 二维直方图的构造

图像的灰度直方图是统计某一幅图像的灰度级内容,它表达了某一幅图像各个灰度级出现的次数 或者概率.其横轴覆盖的灰度级范围可以表示出当前图像的色调变化情况,纵轴可以表示当前色调范围 内的灰度值数量或者频率.从灰度直方图可以读出该幅图像的很多信息.比如,如果某一灰度级出现的 次数很多,说明组成该幅图像的灰度值种类较少,该幅图像色调比较单一,纹理可能相对平坦;相反,如 果组成该幅图像的灰度级有很多种,说明该幅图像的色调变化剧烈,纹理可能很复杂.由此可知:可以通 过统计当前 LCU 的灰度组成,来判别当前 LCU 是否平坦.因为直观上,一个 LCU 若处于一幅图像的

2015 年



背景区域,那么其纹理应该相对平坦,对于纹理较为平坦的 LCU,一般不可能分割到太小的尺寸;相反, 一个 LCU 若处于图像的边缘或细节区域,那么其纹理应该会相对复杂,此类 LCU 一般要分割到比较 小的尺寸.所以,研究一个 LCU 的纹理特征有助于提前决策出当前 LCU 需要进行 RDO 计算的深度 级,从而跳过不必要的深度计算.

通过构造二维直方图来提取当前 LCU 的纹理特征.因为二维直方图不仅利用了本身的像素信息, 而且也包含了周围像素的信息,这在很大程度上能够表示出当前 CU 的内部纹理特征.而对于纹理比较 复杂的编码块,一般会分割到比较小的尺寸,即比较大的深度,对于此类编码块,可以直接跳过大尺寸分 割时的编码计算;反之亦然.

为了减少计算量,首先对当前 64×64 尺寸的 LCU 分成 16×16 个 4×4 的子块;然后,对每个 4×4 子块的像素进行求平均;最后,对于 64×64 的 LCU,可以得到 16×16=256 个像素值.把由这 256 个像 素所组成的 LCU 记为 P. 通常来讲,距离当前像素越近的像素与当前像素的相关程度应该越高,所以根 据当前像素与其周围像素相关程度的高低分配不同的权值,同时需要满足权值的累加和为 1. 定义矩阵 模板为

$$\boldsymbol{H} = \frac{1}{16} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}.$$
 (1)

利用该模板进行滤波,并把滤波后的 LCU 记为 Q. 取 P 中的任一像素值(记为 X)和 Q 中的任一像素值 (记为 Y),X 与 Y 都属于[0,255]区间内,统计由(X,Y)组成的坐标出现的次数,并把相应坐标出现的次 数记为 Z,可见 Z 属于[0,256]区间内.最后由(X,Y,Z)可以生成当前 LCU 的二维灰度直方图.通过以 上描述可知,该二维灰度直方图不仅考虑了当前像素的信息,还包含了其周围像素的信息.

HEVC 中某个典型的纹理较平坦的 LCU 的二维灰度直方图,如图 3 所示. 由图 3 可知:通过使用 HEVC 的编解码参考软件 HM 10.1,该 LCU 经过 RDO 计算后,最终以当前深度 0 作为最优的深度. HEVC 中某个典型的纹理复杂的 LCU 的二维灰度直方图,如图 4 所示. 由图 4 可知:该 LCU 经过 RDO 计算后,最终分割到了深度 3.图 3~4 有力地证明了之前的假设,即 LCU 的二维灰度直方图确实能在 一定程度上反映出当前 LCU 需要分割到的深度级.









#### 2.2 算法流程

从图 3~4 所示 2 种典型纹理的 LCU 的直方图特征可以进一步发现:对于图 3 的灰度值对应的最 大像素个数是一个较大的值,说明这类平坦的 LCU 主要仅有几种灰度组成,很有可能是平坦的;相反, 对于图 4 比较分散,其灰度值对应的最大像素个数值较小,说明该类 LCU 由多种灰度级构成,该类 LCU 内部的灰度变化可能会比较剧烈.根据这样的特点,考虑选取当前 LCU 生成的二维直方图中灰度 值对应的最大像素个数值,结合设置的阈值进行判断.

经过以上分析及对大量阈值和不同序列进行测试后,基于二维直方图的快速深度决策算法具体有 如下 3 个步骤.

步骤1 对当前 LCU 分成 16×16 个 4×4 的子块,然后对每个 4×4 子块的像素进行求平均,得到

256个像素值.采用式(1)所示的模板对这 256个像素进行滤波,统计由该原始 LCU 以及滤波后的 LCU 的像素分布,构造二维灰度直方图.

步骤2 找出该二维灰度直方图最大的像素个数值,记为 max\_value.

步骤3 判断 max\_value 所属的区间.如果 max\_value < 10,则当前 LCU 的最小深度级设置为 2; 如果  $10 \le \max_value < 30$ ,则当前 LCU 的最小深度级设置为 1; 如果  $30 \le \max_value < 40$ ,则当前 LCU 的最小深度级设置为 1,同时最大深度级设置为 2; 如果  $40 \le \max_value < 50$ ,则当前 LCU 的最大深度 级设置为 2; 如果 max\_value  $\ge 50$ ,则当前 LCU 的最小与最大深度级同时设置为 0.

经过上述分析可知:文中算法是采用 4 个阈值,即 10,30,40,50,将搜索的深度区间分为 5 种,即 [2,3],[1,2,3],[1,2],[0,1,2],[0].可以看出:相比 HEVC 原始帧内预测算法均统一进行 4 个深度级 [0,1,2,3]的 RDO 计算,采用文中算法至少可以减少 1 个深度级的 RDO 计算.若此时减少的刚好是深 度级 3,则可以减少 64 次 CU 的 RDO 计算,减少的编码时间相当可观.

为了证明4个阈值(10,30,40,50)的合理性,取纹理特征互不相同的4个序列,量化参数分别选取 22,27,32,37,统计其命中率,结果如表1所示.通过表1可以看出:基于二维直方图快速深度决策算法 对于测试序列命中率高达90%以上,说明文中算法可精确排除不必要的深度计算.

序列	总的 LCU 块数	错判的 LCU 块数	命中率/%
BasketballDrill	18 200	166	99.1
BQMall	18 200	955	94.8
BlowingBubbles	3 600	19	99.5
BQSquare	3 600	300	91.7

表 1 文中算法命中率 Tab.1 Hit-rates of the proposed algorithm

### 3 实验结果与分析

采用 HM10.1 测试模型,测试的环境为具有 Intel(R) Core(TM)2 Quad CPUQ9400 @2.66 GHz, 4.0 GB 内存的计算机,采用 VS2008 编译器.因为文中只针对帧内编码进行优化,故采用的编码配置为 全帧内编码模式,量化参数(quantization parameter,QP)分别选取 22,27,32,37,序列全部统一编码 50 帧,其余为默认配置<sup>[12]</sup>.

分别选取了 A,B,C,D,E 5 个等级的分辨率共 11 个序列进行测试.需要注意的是,本节所用的 11 个实验序列不与表 1 中的统计序列重合.由于文献[4]同样提出了帧内快速深度决策算法,所以本实验 也实现了文献[4]的快速深度决策算法部分,用以与文中算法进行比较.采用文献[4]和文中算法与原始 HM10.1 比较的实验结果,如表 2 所示.表 2 中:BDBR(Bjøntegaard delta bit rate)与 Y-BDPSNR(Y-Bjøntegaard delta peak signal-to-noise ratio)是文献[13]中提出的评价准则,分别表示在同样的客观质 量下,2 种方法的平均码率节省情况,以及在给定的同等码率下,2 种方法的平均 Y-PSNR(Y-peak signal-to-noise ratio)的差异.

时间改变量 Δt 定义为

$$\Delta t = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^{4} \frac{t_{\text{HM10,1}}(\text{QP}_i) - t_{\text{pro}}(\text{QP}_i)}{t_{\text{HM10,1}}(\text{QP}_i)} \times 100\%.$$
<sup>(2)</sup>

式(2)中: $t_{HM10,1}(QP_i)$ , $t_{pro}(QP_i)$ 分别为原始 HM10.1 和文中算法在不同 QP 值下的编码时间.

由表 2 可知:文中算法与原始 HM10.1 相比,平均 Y-BDPSNR 仅降低 0.036 dB,平均 BDBR 仅增 加 0.865%,同时可以节省 21.6%的编码时间.从表 2 可以进一步看出:文中算法对于像 PartyScene 这 类纹理清晰的序列有较好的预测,基本不会影响其率失真性能,且同时可以减少 23.8%的编码时间.与 文献[4]相比,两者的率失真性能几乎相近,但文中算法编码时间减少量更多,提高了 2.2%.文中算法 是基于当前 LCU 块的内部纹理特征,而文献[4]是基于一帧视频内空间上的连续性,即当前 LCU 块与 周围已编码的 LCU 块最优深度之间满足的较强相关性.所以,文中算法独立于文献[4]的算法,可以与 其进一步融合,更大地减少 HEVC 的帧内编码复杂度.

表 2

Tab. 2 Terrormance comparison between the proposed algorithm and reference [+]								
序列		文献[4]快速深度决策算法			文中算法			
		BDBR/%	Y-BDPSNR/dB	$\Delta t/ rac{0}{0}$	BDBR/%	Y-BDPSNR/dB	$\Delta t/\frac{0}{0}$	
Class A	Traffic	0.800	-0.039	-21.0	0.850	-0.041	-19.6	
$2560 \times 1600$	PeopleOnStreet	0.664	-0.033	-21.0	1.678	-0.085	-19.4	
Class B 1 920×1 080	ParkScene	0.708	-0.027	-22.7	0.704	-0.027	-25.2	
	BasketballDrive	1.932	-0.045	-25.8	1.816	-0.042	-19.8	
	Cactus	0.621	-0.021	-22.8	1.115	-0.038	-23.7	
Class C	PartyScene	0.028	-0.002	-17.8	0.015	-0.001	-23.8	
$832 \times 480$	RaceHorses	0.342	-0.019	-17.1	0.392	-0.021	-21.7	
Class D	BasketballPass	0.989	-0.050	-11.0	0.389	-0.020	-13.5	
$416 \times 240$	RaceHorses	0.107	-0.006	-11.9	0.223	-0.012	-19.4	
Class E	FourPeople	0.644	-0.033	-20.3	1.228	-0.064	-28.4	
$1\ 280{ imes}720$	Vidyo1	1.439	-0.065	-21.6	1.100	-0.050	-23.5	
平均值		0.752	-0.031	-19.4	0.865	-0.036	-21.6	

 Cab. 2
 Performance comparison between the proposed algorithm and reference [4]

文中算法与文献[4]比较的实验结果

Traffic 序列(class A 2 560×1 600)分别采用文中算 法与原始 HM10.1 算法的 RD 曲线,如图 5 所示.由图 5 可知:该序列采用文中算法后的 RD 曲线与采用原始算法 的 RD 曲线几乎重合,即在不同的比特率上,文中算法几 乎与 HEVC 原始算法取得相同的 Y-PSNR,这也进一步 说明文中算法具有较高的命中率.



### 4 结束语

通过构造二维直方图提取当前LCU的纹理特征,并 利用该纹理特征进行深度的自适应选择,跳过不必要的深 度计算.实验结果表明:文中算法可以保证取得与原始 HM10.1几乎相同的率失真性能,同时可以减少编码时间 21.6%,极大地降低了HEVC的编码复杂度;而且,文中



算法独立于现阶段出版的大部分帧内快速算法,可以与其他帧内快速算法融合,进一步减少 HEVC 的 帧内编码复杂度.现阶段所做的研究工作都在快速 CU 尺寸决策的层面上进行,今后的工作将尝试对帧 内 35 种预测模式进行优化,使多种方法融合,以更大地减少 HEVC 的编码复杂度.

### 参考文献:

- [1] HAN G J,OHM J R, HAN W J, et al. Overview of the high efficiency video coding (HEVC) standard[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2012, 22(12):1649-1668.
- [2] BOSSEN F, BROSS B, SUHRING K, et al. HEVC complexity and implementation analysis [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2012, 22(12):1685-1696.
- [3] da SILVA T L, AGOSTINI L V, da SILVA CRUZ L A. Fast HEVC intra prediction mode decision based on EDGE direction information[C]//20th European Signal Processing Conference. Bucharest: IEEE Press, 2012:1214-1218.
- [4] SHEN Li-quan, ZHANG Zhao-yang, AN Ping. Fast CU size decision and mode decision algorithm for HEVC intra coding[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2013, 59(1): 207-213.
- [5] JIANG Wei, MA Han-jie, CHEN Yao-wu. Gradient based fast mode decision algorithm for intra prediction in HEVC [C]//2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks. Yichang: IEEE Press, 2012:1836-1840.
- [6] TING Y C, CHANG T S. Fast intra prediction algorithm with transform domain edge detection for HEVC[C]//A-sia Pacific Conference on Circuits and Systems. Kaohsiung: IEEE Press, 2012:144-147.

- [7] XU Dong-xu, LIN Qi-wei, DONG Xiao-hui. Fast intracoding unit size decision algorithm for high-efficiency video coding[J]. Journal of Electronic Imaging, 2014, 23(1):1-13.
- [8] ZHANG Yong-fei,LI Zhe,LI Bo. Gradient-based fast decision for intra prediction in HEVC[C]// Visual Communications and Image Processing. San Diego: IEEE Press, 2012:1-6.
- [9] KIM J,CHOE Y,KIM Y G. Fast coding unit size decision algorithm for intra coding in HEVC[C]//IEEE International Conference on Consumer Electronics. Las Vegas: IEEE Press, 2013:637-638.
- [10] 谢晶,贾克斌. 一种基于二维直方图的 H. 264/AVC 快速帧内预测判决算法[J]. 电子与信息学报,2005,27(7): 1053-1057.
- [11] ZHAO Liang, ZHANG Li, MA Si-wei, et al. Fast mode decision algorithm for intra prediction in HEVC[C]// Visual Communications and Image Processing. Tainan: IEEE Press, 2011:1-4.
- [12] BOSSEN F. HM 10 common test conditions and software reference configurations[C] // 12th Joint Collaborative Team on Video Coding Meeting. Geneva:[s. n.], 2013: JCTVC-L1100.
- [13] BJONTEGARD G. Calculation of average PSNR differences between RD-curves[C]//13th Video Coding Experts Group Meeting. Austin: ITU-T VCEG. 2001: VCEG-M33.

### Fast Depth Decision Algorithm Based on Two-Dimensional Histogram for HEVC Intra Coding

### XU Dong-xu, LIN Qi-wei

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

**Abstract:** In order to further reduce the great computational complexity for high efficiency video coding (HEVC) intra coding prediction high cost case, a fast depth decision algorithm based on two-dimensional histogram has been proposed in this paper. First, a  $3 \times 3$  matrix is used to filter the current largest coding unit (LCU). Then, a two-dimensional histogram which is based on the distribution of gray values of the original LCU and the filtered LCU can be generated. By using the two-dimensional histogram, some of the depth levels which are unnecessary can be skipped. Experimental results show that the proposed algorithm can save 21.6% of the encoding time on average with negligible loss of coding efficiency compared with the original HM10.1.

**Keywords:** high efficiency video coding; depth; two-dimensional histogram; fast mode decision; coding unit; gray histogram

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:吴逢铁)

**文章编号:**1000-5013(2015)01-0029-06

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.01.0029

# FPGA 组合逻辑程序的 Petri 网建模方法

### 陈珑,黄颖坤,罗继亮

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 针对现场可编程门阵列(FPGA)组合逻辑程序,提出其普通 Petri 网建模方法.首先,将状态变量描述 为库所对,程序中的逻辑运算描述为变迁,从而将系统程序转换为一个普通 Petri 网结构;然后,根据 Petri 网 的动态分析性能,给出系统状态可达图的计算方法,实现了状态可达图等价描述 FPGA 组合逻辑系统运行过 程.研究结果表明:该 Petri 网能够准确地描述变量间的逻辑关系,提出的方法可以为 FPGA 组合逻辑程序的 形式化设计和验证提供建模依据.

关键词: 现场可编程门阵列;组合逻辑;Petri 网;建模方法;状态可达图中图分类号: TP 273.5文献标志码: A

现场可编程门阵列(field-programmable gate array, FPGA)是一种可编程使用的信号处理器件<sup>[1]</sup>. FPGA 具有灵活性强、时序控制能力强、开发周期短和产品上市速度快等优势<sup>[2]</sup>,广泛应用于通信、军 事、医疗和工业控制等重要领域.然而,FPGA 数字系统的分析和设计复杂性随系统规模指数级增长,传 统的测试方法难以保证程序的正确性和可靠性,而形式化验证能够枚举验证每一个状态,因此获得了广 泛关注<sup>[3-5]</sup>,形式化验证的前提是形式化建模方法.FPGA 系统可以抽象为离散事件系统,Petri 网是一 种描述离散事件系统的数学模型,较自动机而言,它能够刻画系统的结构信息,具有更高的建模效率.因 此,FPGA 的 Petri 网建模方法具有重要研究价值.FPGA 的描述语言 VHDL(very-high-speed integrated circuit hardware description language)的形式化建模分析主要分为两个方面:一是利用扩展 Petri 网<sup>[6-7]</sup>和有色 Petri 网<sup>[8-10]</sup>对 FPGA 系统进行建模,这些扩展是针对某一特定的应用,适用范围比较窄, 不具有一般性,并且基于一种 Petri 网模型的分析方法不能应用到另一种模型上去;二是用变迁描述 VHDL 中的执行语句,库所表示语句的执行状态,通过托肯的迁移揭示语句的执行过程<sup>[11-13]</sup>,这些模型 是对程序的整体概况描述,分析能力比较差而且无法揭示变量间的逻辑关系.为此,本文提出了一种将 描述 FPGA 组合逻辑电路的 VHDL 程序转换为普通 Petri 网算法.

### 1 基础知识

#### 1.1 描述组合逻辑电路的 VHDL 程序

电路的 VHDL 描述由两大部分组成<sup>[14]</sup>:1) 以关键字 entity 引导,end entity e\_name 结尾的语句部分,称为 VHDL 的实体,实体描述了电路器件的外部情况及各信号端口的基本性质,如信号流动方向、流动在其上的数据类型等;2) 以关键字 architecture 引导,end architecture a\_name 结尾的语句部分,称为 VHDL 的结构体,结构体描述电路器件的内部逻辑功能和电路结构.

1.2 Petri 🕅 [15-16]

普通 Petri 网是三元组,即 N = (P, T, F),其中, P 为状态库所集合, T 为变迁集合,  $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 表示库所与变迁之间有向弧的集合. Petri 网系统是 $(N, m_0)$ ,其中,  $m_0$  是初始标识. 标识是一个

**收稿日期:** 2014-06-04

- 通信作者: 罗继亮(1977-),男,副教授,博士,主要从事离散事件动态系统的研究. E-mail;illuo@hqu. edu. cn.
- 基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2014J01241);福建省高等学校新世纪优秀人才计划(11FJRC01);福建 省高校杰出青年科研人才培育计划项目(JA10004)

### 2 组合逻辑程序的 Petri 网设计

针对组合逻辑电路的 VHDL 程序,程序实体中是一系列逻辑表达式,输入量和输出量抽象为不同的系统状态.控制变量值的变化抽象为一个事件,以变量间的逻辑关系为研究对象,考虑电路零延迟情况下,FPGA 组合逻辑程序的 Petri 网建模方法.

算法1 从 FPGA 组合逻辑程序到普通 Petri 网的转换算法

输入:组合逻辑电路 VHDL 程序

输出: Petri 网(N,m<sub>0</sub>)

**步骤1** 在程序实体中找出输入量  $X_1, X_2, \dots, X_n$  ( $n \in N^+$ )和输出量  $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$  ( $m \in N^+$ ),从结构体的描述语句中确定变量间的逻辑函数表达式为

$$Y_i = f_i(X_1, X_2, \cdots, X_n), \qquad 1 \leqslant i \leqslant m.$$
<sup>(1)</sup>

为了叙述简便,以下只以一个逻辑输出表达式进行说明,即

$$Y_1 = f_1(X_1, X_2, \cdots, X_n).$$
 (2)

步骤2 通过公式法或卡诺图法对式(2)进行化简得到

$$Y_1 = \bigvee_{g=1}^G \Phi_g(X_1, X_2, \cdots, X_n).$$
(3)

步骤3 对式(3)进行逻辑运算得到

$$Y_{1} = Y_{1} \begin{bmatrix} \bigvee_{g=1}^{G} \Phi_{g}(X_{1}, X_{2}, \dots, X_{n}) \end{bmatrix} + Y'_{1} \begin{bmatrix} \bigcup_{g=1}^{G} \Phi_{g}(X_{1}, X_{2}, \dots, X_{n}) \end{bmatrix}.$$
(4)

步骤4 对式(3)两边同时取非得到

$$Y'_{1} = \left[\bigvee_{g=1}^{G} \Phi_{g}(X_{1}, X_{2}, \cdots, X_{n})\right]'.$$
<sup>(5)</sup>

步骤5 对式(5)进行化简得到

$$Y'_{1} = \bigvee_{l=1}^{L} \phi_{l}(X_{1}, X_{2}, \cdots, X_{n}).$$
(6)

步骤6 对式(6)进行逻辑运算得到

$$Y'_{1} = Y_{1} \begin{bmatrix} \bigvee_{l=1}^{\nu} \psi_{l}(X_{1}, X_{2}, \cdots, X_{n}) \end{bmatrix} + Y'_{1} \begin{bmatrix} \bigvee_{l=1}^{\nu} \psi_{l}(X_{1}, X_{2}, \cdots, X_{n}) \end{bmatrix}.$$
(7)

**步骤7** 分别用一对库所( $P_{X_{j}^{0}}, P_{X_{j}^{1}}$ )(1《j《n)表示每个输入量  $X_{j}$ (1《j《n)的"0"和"1"两种状态;并在每对库所( $P_{X_{j}^{0}}, P_{X_{j}^{1}}$ )(1《j《n)之间分别加上两个变迁  $t_{s}^{+}$ 和  $t_{s}^{-}$ (1《s《n),有向弧集合  $F = {(P_{X_{j}^{0}}, t_{\text{in,s}}^{+}), (t_{\text{in,s}}^{+}, P_{X_{j}^{1}}), (P_{X_{j}^{1}}, t_{\text{in,s}}^{-}), (t_{\text{in,s}}^{-}, P_{X_{j}^{0}})$ }.

步骤 8 用一对库所( $P_{Y_1^0}, P_{Y_1^1}$ )表示输出量  $Y_1$ 的"0"和"1"两种状态,并在库所( $P_{Y_1^0}, P_{Y_1^1}$ )之间加入 两个变迁  $t_{out,1}^+$ 和  $t_{out,1}^-$ ,有向弧集合  $F = \{(P_{Y_1^0}, t_{out,1}^+), (t_{out,1}^+, P_{Y_1^1}^-), (P_{Y_1^1}, t_{out,1}^-), (t_{out,1}^-, P_{Y_1^0}^-)\}.$ 

步骤9 根据式(4)得出: $Y_1$ 从当前状态值"0"变为下一个状态值"1"(即当前托肯在状态库所  $P_{Y_1^0}$ 中转移到库所  $P_{Y_1^1}$ 中时)需要项  $Y'_1 \begin{bmatrix} \bigvee_{g=1}^{G} \Phi_g(X_1, X_2, \dots, X_n) \end{bmatrix} = 1$ ,又存在 G 个变迁  $t_{out,1,g}^+$ (1 $\leq g \leq G$ ).用 双向弧把每项  $\Phi_g(X_1, X_2, \dots, X_n)$ (1 $\leq g \leq G$ )中所涉及的输入量的状态库所与对应的变迁  $t_{out,1,g}^+$ 相连.

**步骤 10** 根据式(7)得出: $Y'_1$ 从当前状态值"0"变为下一个状态值"1"(即当前托肯在状态库所  $P_{Y_1^1}$ 中转移到库所  $P_{Y_1^0}$ 中时)需要项  $Y'_1[\bigcup_{l=1}^{L} \varphi_l(X_1, X_2, \dots, X_n)]=1$ ,又存在 L 个变迁  $t_{out,1,l}(1 \le l \le L)$ .用 双向弧把每项  $\varphi_l(X_1, X_2, \dots, X_n)(1 \le l \le L)$ 中所涉及的输入量的库所与变迁  $t_{out,1,l}(1 \le l \le L)$ 相连接.

在算法 1 中,  $\bigvee_{g=1}^{b} \Phi_{g}(X_{1}, X_{2}, \dots, X_{n})$ 表示有 *G* 个不同的逻辑表达式  $\Phi_{g}(X_{1}, X_{2}, \dots, X_{n})$ 相或, 而每个  $\Phi(X_{1}, X_{2}, \dots, X_{n})$ 式表示某些输入量之间的与、逆与运算, 同理式子  $\bigvee_{l=1}^{L} \varphi_{l}(X_{1}, X_{2}, \dots, X_{n})$ . 若托肯在状态库所  $P_{X_{1}^{0}}(P_{Y_{1}^{0}})$ 中, 表示当前该输入量(输出量)取值为"0"; 相反, 若托肯在状态库所  $P_{X_{1}^{1}}(P_{Y_{1}^{1}})$ 中,则 表示当前该输入量(输出量)取值为"1". 激发任意一个输出变迁  $t_{\text{out},1,g}^{+}(1 \leq g \leq G)$ , 会使得托肯从库所  $P_{Y_{1}^{0}}$ 中移到库所  $P_{Y_{1}^{1}}$ 中, 在逻辑上实现输出量的值从"0"到"1"的转换; 然而激发任意一个输出变迁  $t_{\text{out},1,l}^{-}$
$(1 \leq l \leq L)$ ,会使得托肯从库所  $P_{Y_1^l}$ 中移到库所  $P_{Y_1^l}$ 中,在逻辑上实现输出量的值从"1"到"0"的转换.

## 3 FPGA 组合逻辑系统的状态可达图

系统程序的 Petri 网模型已经建立, Petri 网的动态行为有效模拟了 FPGA 系统行为,揭示了变量 间的逻辑关系.因此,利用 Petri 网的可达图分析法可以进一步分析程序的运行,便于计算机枚举验证 每个状态.但是, Petri 网描述的是一个比 FPGA 系统更复杂的并发系统,理论上只要变迁满足使能条 件就能被激发,这样就会生成很多无关状态.为了避免这样的问题,算法 2 提出了一种可以等价描述 FPGA 组合逻辑系统运行过程的状态可达图的计算方法.

**定义1** 假设 Petri 网系统( $N, m_0$ )是一个 FPGA 组合逻辑程序的 Petri 模型,其中, $T = T_{in} \cup T_{out}$ ,  $T_{e,in} \subset T_{in}, T_{e,out} \subset T_{out}, T_{in}$ 和  $T_{out}$ 分别是输入和输出变迁集合, $T_{e,in}$ 和  $T_{e,out}$ 分别是可使能的输入和输出 变迁集合.

定义 2 假设三元组  $G_{\text{FPGA}} = \langle M, E, W \rangle$ 是 FPGA 组合逻辑系统状态可达图,其中, $M = M_{\text{in}} \bigcup M_{\text{out}}$ ,  $E = E_{\text{in}} \bigcup E_{\text{out}}$ .

集合 M 中的每个节点对应系统的一个状态.其中: M<sub>in</sub>是以实线圈表示节点的输入状态(由激发输入变迁得到的状态)集合; M<sub>out</sub>是以虚线圈表示节点的门级输出状态(由激发输出变迁得到的状态)集合; E 是状态节点间的有向边集合; E<sub>in</sub>是标有输入变迁的实线有向边集合; E<sub>out</sub>是标有输出变迁的虚线 有向边集合; W 是集合 E 到 T 的一个映射,即每条有向边上的变迁标记的集合.

算法2 FPGA 组合逻辑系统状态可达图生成算法如下.

输入:程序的 Petri 网系统

输出:  $G_{\text{FPGA}} = \langle M, E, W \rangle, M = M_{\text{in}} \bigcup M_{\text{out}}, E = E_{\text{in}} \bigcup E_{\text{out}}$ 

步骤1 令  $M_{\text{new}} = \emptyset, M_{\text{old}} = \emptyset, E = \emptyset, W = \emptyset.$ 

步骤 2 将初始状态  $m_0$  标记为"new",并将 $\{m_0\} \rightarrow M_{new}$ .

步骤3 若未计算的系统状态集合  $M_{new} \neq \emptyset$ ,则继续以下操作;否则算法结束,输出  $G_{FPGA} = \langle M, E, W \rangle$ .

步骤 4 从集合 M<sub>new</sub>中任取一个标记为"new"的状态 m.

**步骤 4.1** 若状态 *m* 与可达图已有的其他状态相同,将其标记为"old",则已计算获得的系统状态 集合 *M*<sub>old</sub> = *M*<sub>old</sub> U {*m*},然后转向步骤 4;若状态 *m* 与可达图已有的其他状态不相同,则进行以下操作.

**步骤 4.2** 如果在状态 *m*下,没有使能的输入变迁和输出变迁,则将 *m*标记为"dead end",然后转向步骤 4.如果在状态 *m*下存在使能变迁,此时会有两种情况:一种是存在使能的输入变迁且有使能的输出变迁,则跳转到步骤 5;另一种是只存在使能的输入变迁,则跳转到步骤 6.

步骤 5 只要可使能的输出变迁集合  $T_{e,out} = \{t_{out} | \boldsymbol{m}[t_{out}\rangle\} \neq \emptyset, t_{out} \in T_{out},$ 就要优先激发所有可使能的输出变迁,生成门级输出状态.

步骤 5.1 从集合  $T_{e,out}$ 中任取一个输出变迁  $t_{out}$ ,激发该变迁,生成输出状态  $m'_{out}$ .

步骤 5.2 将  $\{m'_{out}\} \rightarrow M_{out},$ 如果输出状态  $m'_{out}$ 与可达图中已有的状态相同,则  $M_{out} = M_{out} \cup \{m'_{out}\}$ ;否则,从状态 m 到输出状态  $m'_{out}$ 之间画一条虚线有向边,则集合  $E_{out} = E_{out} + \{\langle m, m'_{out} \rangle\};$ 并在 该虚线上标记输出变迁  $t_{out}$ ,则有向边上的变迁集合为 $\{W(\langle m, m'_{out} \rangle) = t_{out}\} \rightarrow W$ ,说明在状态 m 下通过 激发输出变迁  $t_{out}$ 会生成输出状态  $m'_{out}$ .

步骤 5.3 因为从集合  $T_{e,out}$ 中取走了一个使能变迁  $t_{out}$ ,所以  $T_{e,out} = T_{e,out} - \{t_{out}\}$ . 判断集合  $T_{e,out}$ 是否为空集,如果  $T_{e,out} \neq \emptyset$ ,即存在使能输出变迁,则返回步骤 5.1;如果  $T_{e,out} = \emptyset$ ,即不存在使能输出 变迁,则继续以下操作.

步骤 5.4 因为标记为"new"的状态 m 是从集合  $M_{new}$ 中取出的,所以集合  $M_{new} = M_{new} - \{m\}$ ,并返 回步骤 3.

步骤 6 当状态 *m* 下只存在使能的输入变迁,即  $T_{e,in} = \{t_{in} | m[t_{in} \rangle\} \neq \emptyset, t_{in} \in T_{in}, 则继续激发一个 使能的输入变迁,来改变输入状态.$ 

步骤 6.1 从集合 T<sub>e,in</sub>中任取一个输入变迁 t<sub>in</sub>,激发该变迁,生成输入状态 m'<sub>in</sub>.

步骤 6.2 将{ $m'_{in}$ }→ $M_{in}$ ,如果  $m'_{in}$ 与可达图中已有的状态相同,则集合  $M_{old} = M_{old} \cup \{m'_{in}\}$ ;否则 从状态  $m ext{ M} m'_{in}$ 之间画一条实线有向边,则集合为  $E_{in} = E_{in} + \{\langle m, m'_{in} \rangle\}$ ;在该实线上标记输入变迁  $t_{in}$ ,则有向边上的变迁集合为{ $W(\langle m, m'_{in} \rangle) = t_{in}$ }→W,说明在状态 m 下,通过激发输入变迁  $t_{in}$ 会生成 输入状态  $m'_{in}$ .

**步骤 6.2.1** 判断输入状态 *m*<sup>'</sup><sub>in</sub>下是否存在可使能的输出变迁,如果 *m*<sup>'</sup><sub>in</sub>下存在可使能的输出变 迁,则跳转到步骤 6.2.2;否则,跳转到步骤 6.2.5.

步骤 6.2.2 在集合  $T_{e,out} = \{t_{out} | \boldsymbol{m}'_{out}[t_{out}\rangle\} \neq \emptyset, t_{out} \in T_{out}$  中任取一个输出变迁  $t_{out}$ ,激发该变迁, 生成输出状态  $\boldsymbol{m}''_{out}$ .

步骤 6.2.3 将{ $m''_{out}$ }→ $M_{out}$ ,如果  $m''_{out}$ 与可达图中已有的状态相同,则集合  $M_{old} = M_{old} \cup \{m''_{out}\}$ ; 否则,从状态  $m'_{in}$ 到  $m''_{out}$ 之间画一条虚线有向边,则集合为  $E_{out} = E_{out} + \{\langle m'_{in}, m''_{out} \rangle\}$ ;在该虚线上标记输出变迁  $t_{out}$ ,则集合为{ $W(\langle m'_{in}, m''_{out} \rangle) = t_{out}$ }→W,说明在输入状态  $m'_{in}$ 下,通过激发输出变迁  $t_{out}$ 会生成输出状态  $m''_{out}$ .

步骤 6.2.4 集合  $T_{e,out} = T_{e,out} - \{t_{out}\}$ . 判断输入状态  $m'_{in}$ 下的集合  $T_{e,out}$ 是否为空集,如果可集合  $T_{e,out} \neq \emptyset$ ,即存在使能的输出变迁,那么返回步骤 6.2.2;如果集合  $T_{e,out} = \emptyset$ ,即不存在使能的输出变 迁,则继续以下操作.

步骤 6.2.5 因为在状态 *m*下从集合  $T_{e,in}$ 中取走了一个使能输入变迁  $t_{in}$ ,所以  $T_{e,in} = T_{e,in} - \{t_{in}\}$ . 判断集合  $T_{e,in}$ 是否为空集,如果集合  $T_{e,in} \neq \emptyset$ ,即存在使能的输入变迁,那么返回步骤 6.1;如果集合  $T_{e,in} = \emptyset$ ,即不存在使能的输入变迁,则继续以下操作.

**步骤 6.3** 未计算的系统状态集合  $M_{\text{new}} = M_{\text{new}} - \{m\}$ ,并返回步骤 3.

在算法 2 中,  $\langle m, m'_{out} \rangle$ 表示从状态 m 指向  $m'_{out}$ 的一条有向边,  $W(\langle m, m'_{out} \rangle) = t_{out}$ 表示在状态 m 下 通过激发变迁  $t_{out}$ 得到  $m'_{out}$ .  $M_{new}$ 是未计算的状态集合,  $M_{old}$ 是已计算获得的状态集合. 当  $M_{new}$ 中某个可 达状态被计算获得,则将其从  $M_{new}$ 中剔除并添加到  $M_{old}$ 中, 直至  $M_{new}$ 为空集, 算法结束.

根据算法2可知:在某个电路状态下,如果同时存在使能的输入变迁和输出变迁,应当优先激发该 电路状态下所有的输出变迁,得到一个稳定的门级输出状态;如果在某个电路状态下,只存在使能的输 入变迁,则激发一个输入变迁,得到一个稳定的输入状态,通过改变输入量的取值,再判断该输入状态下 是否存在使能的输出变迁.

## 4 实例分析

某化工原料生产反应釜,如图 1 所示.系统启动后,当液位低于 S<sub>1</sub>,V<sub>1</sub> 打开,注入原料 A;当液位到 达 S<sub>1</sub>,V<sub>1</sub> 关闭,同时打开 V<sub>2</sub> 阀,注入原料 B;当液位到达 S<sub>2</sub>,V<sub>2</sub> 关闭,启动 M 加热;当温度值到达 S<sub>3</sub>,M 停止加热,同时打开 V<sub>3</sub> 阀,并且 L 启动计时;一段时间后,定时器 L 关闭,V<sub>3</sub> 关闭,系统回到最初状态. 根据系统要求,某程序员给出图 1 所示反应釜控制系统的部分 VHDL 程序,如图 2 所示.



Fig. 1 A chemical raw materials production reactor

图 2 反应釜控制系统的部分 VHDL 程序 Fig. 2 A part of VHDL program of the reactor 根据算法 1,针对图 2 的反应釜控制系统程序,首先将程序中的每个变量分别用一对库所表示,抽象为运行(on)和休息(off)状态,即逻辑上表示"1"和"0"两个状态;其次在输入变量的库所间加上输入 变迁,在输出变量的库所间加上输出变迁;然后根据逻辑表达式所描述的输出量与输入量间的逻辑关 系,描述出输入量库所与输出变迁间的控制关系;最后由算法 1,将图 2 的系统程序转换为图 3 的 Petri 网模型.根据算法 2,由反应釜控制系统的 Petri 网模型,从某个初始状态开始,分别计算出每个输入状 态下所对应的稳定的输出状态,得到如图 4 所示的系统状态可达图.由图 4 分析可知:系统具有可逆性 和活性,其中每个状态的表现形式为

 $m = \begin{cases} m(p_{S_1,off}), m(p_{S_1,on}), m(p_{S_2,off}), m(p_{S_2,on}), m(p_{S_3,off}), m(p_{S_3,on}), m(p_{V_1,off}), m(p_{V_1,on}), \\ m(p_{V_2,off}), m(p_{V_2,on}), m(p_{M,off}), m(p_{M,on}), m(p_{V_3,off}), m(p_{V_3,on}), m(p_{L,off}), m(p_{L,on}) \end{cases}^T,$ 部分状态标识为

 $m_0 = (1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,0)^{\mathrm{T}},$  $m_2 = (0,1,1,0,1,0,0,1,1,0,1,0,1,0,1,0)^{\mathrm{T}},$  $m_{10} = (0,1,0,1,0,1,1,0,1,0,0,1,1,0,1,0)^{\mathrm{T}},$  $m_{18} = (0,1,0,1,0,1,1,0,1,0,1,0,0,1,1,0)^{\mathrm{T}}.$ 



图 3 反应釜控制系统的 Petri 模型 Fig. 3 Petri net model of the reactor control system



图 4 反应釜控制系统的 Petri 网模型的状态可达图 Fig. 4 State reachable graph of Petri net model for the reactor control system

## 5 结束语

提出了一个完整的将 FPGA 组合逻辑程序自动转换为普通 Petri 网的方法,与现有基于扩展 Petri 网的建模方法相比,文中基于普通 Petri 网的建模方法更具一般性,应用范围更广,对于系统变量间的 逻辑功能关系有更强的分析能力.另外,在考虑电路零延迟的情况下,根据已建好的程序 Petri 网模型, 通过定义新的变迁激发规则,建立一个可以等价描述 FPGA 组合逻辑系统运行过程的状态空间,去掉 一些无关的中间状态,指数级地压缩状态空间,为后续的形式化验证<sup>[17-18]</sup>提高效率.后续工作将利用计 算机通过系统状态可达图对程序进行形式化验证,检测存在逻辑错误的系统程序.

## 参考文献:

- [1] 王芯,孙富明,李磊,等.FPGA设计安全性综述[J].小型微型计算机系统,2010,31(7):1333-1335.
- [2] 杨海钢,孙嘉斌,王慰. FPGA器件设计技术发展综述[J]. 电子与信息学报,2010,32(3):716-718.
- [3] 王彦本.集成电路形式化验证方法研究[J].电子科技,2008,21(8):4-7.
- [4] GHARBI A,KHALGUI M,BEN A S, et al. Optimal model checking of safe control embedded software components [C]//15th Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Bilbao: IEEE Press, 2010:1-8.
- [5] PATIL S, VYATKIN V, SOROURI M, et al. Formal verification of intelligent mechatronic systems with decentral-

ized control logic[C]//17th Conference on ETFA. Krakow: IEEE Press, 2012:1-7.

- [6] 古天龙.组合逻辑电路的 Petri 网仿真分析[J].系统仿真学报,1994,6(2):32-36.
- [7] TSAI J I, TENG C C, LEE C H. Test generation and site of fault for combinational circuits using logic Petri-nets [C]//International Conference on Systems Man and Cybernetics. Taipei: IEEE Press, 2006:8-11.
- [8] 欧阳星明,胡青海.基于有色 Petri 网的逻辑电路仿真模型设计[J].华中科技大学学报:自然科学版,2006,34(3): 18-20.
- [9] BUKOWIEC A, ADAMSKI M. Synthesis of Petri nets into FPGA with operation flexible memories[C]//15th International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems. Tallinn: IEEE Press, 2012:16-21.
- [10] KOKASH N, ARBAB F. Formal design and verification of long-running transactions with extensible coordination tools[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2013, 6(2):186-200.
- [11] OLCOZ S, COLOM J M. A Petri net approach for the analysis of VHDL descriptions [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 1993:15-26.
- [12] WALTER D,LITTLE S,SEEGMILLER N, et al. Symbolic model checking of analog/mixed-signal circuits[C]// Asia and South Pacific Design Automation Conference. Yokohama: IEEE Press,2007;316-323.
- [13] MOUTINHO F,GOMES L. State space generation algorithm for gals systems modeled by IOPT Petri nets[C]// 37th Annual Conference on Industrial Electronics Society. Melbourne, VIC: IEEE Press, 2011:7-10.
- [14] 藩松,黄继业. EDA 技术与 VHDL[M]. 北京:清华大学出版社,2009:42-47.
- [15] LUO Ji-liang, NONAMI K. Approach for transforming linear constraints on Petri nets[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2011, 56(11): 2751-2765.
- [16] DAVID R, ALIA H. Discrete continuous and hybrid Petri nets[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2005:24-40.
- SCHWARICK M, ROHR C, HEINER M. MARCIE-model checking and reachability analysis done efficiently[C]// 8th Conference on Quantitative Evaluation of Systems. Aachen: IEEE Press, 2011:91-100.
- [18] KHALGUI M, MOSBAHI O, LI Z W, et al. Reconfigurable multiagent embedded control systems: From modeling to implementation[J]. IEEE Transactions on Computers, 2011, 60(4):538-551.

# Modeling Method for FPGA Combinational Logic Program Based on Petri Net

# CHEN Long, HUANG Ying-kun, LUO Ji-liang

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

**Abstract**: In the view of field-programmable gate array (FPGA) combinational logic program, this research proposed an ordinary Petri net modeling method. First, a state variable is represented by a pair of places, while a logical operation is described by a transition. Consequently, a system program can be modeled by a common Petri net. Then, based on the dynamic analysis capability of Petri net, the computing method of system state reachable graph is given, and achieved the equivalence description of operational process between state reachable graph and FPGA combinational logic system. The results show that the Petri net can accurately describe the logic of the relationship between variables. The proposed method in this paper can be used for the formal design and verification of FPGA combinational logic program.

Keywords: field-programmable gate array; combinational logic; Petri net; modeling method; state reachable graph

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:吴逢铁)

**文章编号:**1000-5013(2015)01-0035-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.01.0035

# 铂金团簇结构与稳定性的密度泛函研究

## 吴珊,王怀谦,李嘉琪,李颖钰,余逸男,韩佳

(华侨大学 工学院, 福建 泉州 362021)

**摘要:** 采用随机踢球全局优化模型结合密度泛函理论系统,研究了 Pt<sup>\*</sup><sub>0</sub>(2≪n≪9,λ=0,-1)团簇的几何结构 等微观性质,以及这些性质随着团簇尺寸变化的关系与演化规律.通过对计算结果理论的分析发现:中性与阴 性团簇的基态构型在所研究的尺寸范围内更倾向于具有低对称性的三维立体结构;体系的平均结合能均随 着铂金原子个数的增多而增大,阴性团簇平均结合能比相应的中性大;所有电荷态下团簇的离解能、二阶拆分 能都随着铂金原子个数的增加呈现出明显的奇偶交替现象.结果表明:阴性的奇数团簇的稳定性要强于与之 相邻的偶数团簇的稳定性;相反,中性团簇下偶数团簇的稳定性比奇数团簇强.

关键词: 铂金团簇;密度泛函理论;几何结构;稳定性

**中图分类号:** O 469 文献标志码: A

过渡金属团簇以其量子尺寸效应而展现出各种独特的物理和化学性质已越来越被重视. 近年来,由于理论化学计算方法的改进,使得对过渡金属团簇的高精度量子化学计算的研究成为可能<sup>[1]</sup>. 铂金作为一种过渡金属,在纳米技术、材料科学、催化作用、生物科学和医学中有巨大的应用潜力,其微观结构特点和奇异的物理化学性质为制造和发展特殊性能的新材料开辟了一条新的途径. 张材荣等<sup>[2]</sup>利用遗传算法研究了 Pt<sub>n</sub>( $n=2\sim20$ ,n 代表原子个数)团簇的基态结构. 叶子燕<sup>[3]</sup>对低能 Pt 原子及原子团簇与 Pt (100)表面作用的分子动力学模型进行了研究. 张秀荣等<sup>[4-5]</sup>对 Pt<sup>A</sup><sub>n</sub>( $n=2\sim6$ , $\lambda=0$ ,-1,+1, $\lambda$ 表示电荷)团簇的基态结构、稳定性以及电子性质进行了详细系统的理论研究; Sebetci 等<sup>[6]</sup>利用分子动力学结合嵌埋原子模型(EAM)势研究了 Pt<sub>n</sub>( $n=2\sim21$ )团簇的结构及大量能量近简并的低能异构体. Wei 等<sup>[7]</sup>采用密度泛函理论 BPM/Lanl2dz 方法计算 Pt<sub>n</sub>( $n=2\sim13$ ,19,55)是立体结构还是平面结构更稳定进行了研究. 本文采用密度泛函 B3LYP/SDD 计算水平,对 Pt<sup>A</sup><sub>n</sub>( $2 \le n \le 9$ , $\lambda=0$ ,-1) 团簇的几何结构、稳定性等微观性质进行了系统的研究.

## 1 理论方法

基于密度泛函理论方法,选取杂化密度泛函(Becke 三参数交换函数与 Lee-Yang-Parr 相关函数组成的 B3LYP<sup>[9]</sup>杂化泛函)交换相关泛函,并选取使用 Stuttgart-Dresden 赝势相对论基组(SDD).该基组通过有效核势,进行标量相对论效应的修正,适合重金属元素的计算.所有的计算是在 Gaussian 09 程序包下完成的.团簇几何构型的初始猜测对寻找全局最小的基态结构非常重要,初始猜测的结构越合理得到的结果越可靠,并且还可以减少不必要的计算量.利用 Saunders 的"随机踢球"方法<sup>[10]</sup> 搜寻出 Pt<sup>\*</sup><sub>n</sub> (2 $\leq$ n $\leq$ 9, $\lambda$ =0,-1)团簇的最低能结构,该随机搜寻的方法比手工搭建的方法更方便、更合理."随

**收稿日期**: 2014-03-05

- **通信作者:** 王怀谦(1981-),男,副教授,博士,主要从事纳米金属材料电磁结构和光电子能谱理论的研究. E-mail: hqwang@hqu. edu. cn.
- 基金项目: 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项目(JB-ZR1201);福建省高校杰出青年科研人才项目(JA13009);福建省自然科学基金资助项目(2012J05005);福建省新世纪优秀人才支持计划项目(2014 年度)

机踢球"方法的基本思想是把一定尺寸下所有团簇的原子放进一个足够大的球腔里(半径为 R),在 B3LYP/SDD 理论水平下,进行不少于 500 次的随机搜寻,直到没有新的最小能量的结构出现为止,并 根据它们的总能量对这些异构体进行自动排序,将能量最低的结构作为基态.在用"随机踢球"方法优化 过程中,伴随着频率分析计算,确保得到的异构体为极小结构或局域最小结构.此外,自旋多重度对结构 的影响也被考虑在内.为了比较铂金团簇尺寸增长的稳定性,分别定义了平均结合能 E<sub>b</sub>(n)、离解能  $\Delta_1 E(n)$ 和二阶差分能  $\Delta_2 E(n)$ .

平均结合能定义为

$$E_{\rm b}(n) = \left[ (n-1)E({\rm Pt}) + E({\rm Pt}^{\lambda}) - E({\rm Pt}^{\lambda}) \right]/n. \tag{1}$$

离解能定义为

$$\Delta_1 E(n) = E(\operatorname{Pt}) + E(\operatorname{Pt}_{n-1}^{\lambda}) - E(\operatorname{Pt}_n^{\lambda}).$$
<sup>(2)</sup>

二阶差分能定义为

$$\Delta_2 E(n) = E(\operatorname{Pt}_{n-1}^{\lambda}) + E(\operatorname{Pt}_{n+1}^{\lambda}) - 2E(\operatorname{Pt}_n^{\lambda}).$$
(3)

#### 结果和讨论 2

#### 2.1 Pt<sup> $\lambda$ </sup><sub>n</sub>(2 $\leq$ n $\leq$ 9, $\lambda$ =0,-1)团簇的几何结构

对每个尺寸下团簇的可能存在的情况,以及文献[2-8]所报道的结构都给予充分的考虑,2~9各个 团簇尺寸下的3个最优异构体的基本信息,如表1所示.表1中:A表示阴性 Anion;N 代表中性 Neutral.

		Tab. 1 Basic inf	ormation of $Pt_n^{\lambda}$	$(2 \leq n \leq 9, \lambda =$	=0,-1) clus	sters	
团簇	对称性	自旋多重度	$\Delta E/\mathrm{eV}$	团簇	对称性	自旋多重度	$\Delta E/\mathrm{eV}$
3N-A	Cs	3	0	3A-A	$C_{2V}$	4	0
3N-B	Cs	3	1.04	3A-B	$C_{\inftyV}$	2	0.01
3N-C	$C_1$	3	1.19	3A-C	$C_{s}$	4	0.01
4N-A	$C_1$	3	0	4A-A	$C_{s}$	2	0
4N-B	$C_{s}$	1	0.44	4A-B	$C_1$	4	0.33
4N-C	$C_s$	3	1.27	4A-C	$C_{\multimap V}$	2	1.09
5 N-A	$C_1$	3	0	5A-A	$C_1$	4	0
5N-B	$C_{2V}$	1	0.22	5A-B	$C_s$	2	0.47
5N-C	$C_1$	1	0.22	5A-C	$D_{2H}$	2	1.00
6 N-A	$C_1$	3	0	6A-A	$C_1$	2	0
6N-B	$C_1$	1	0.44	6A-B	$C_1$	4	0.30
6N-C	$C_{2V}$	3	0.63	6 A-C	$C_{2V}$	2	3.02
7 N-A	$C_1$	1	0	7A-A	$C_1$	4	0
7N-B	$C_1$	1	0	7A-B	$C_1$	2	0.23
7N-C	$C_1$	1	0	7A-C	$C_1$	2	0.29
8N-A	$C_1$	1	0	8A-A	Cs	2	0
8N-B	$C_1$	3	0.01	8A-B	$C_1$	4	0.11
8N-C	$C_1$	1	0.56	8A-C	$C_1$	4	0.39
9N-A	$C_1$	1	0	9A-A	$C_1$	4	0
9N-B	$C_1$	3	0.24	9A-B	$C_{s}$	4	0.51
9N-C	Cs	3	0.30	9A-C	$C_{3V}$	4	0.55

表1  $Pt_n^{\lambda}(2 \leq n \leq 9, \lambda = 0, -1)$ 团簇基本信息

由表1可以看出:无论是中性还是阴性的基态铂金团簇均倾向于低的自旋多重度.对于中性基态铂 金团簇而言,  $3n=2\sim6$ 时, 自旋多重度为3的原子结构稳定性更高; 而当 $n=7\sim9$ 时, 自旋多重度为1 的原子结构稳定性更高.对于阴性基态铂金团簇而言,不难看出当原子个数为偶数时,稳定性更高的原 子结构更趋向于最低自旋多重度 2;当原子个数为奇数时,自旋多重度为 4 的原子结构更稳定.随着团 簇尺寸的增加,结构的对称性降低.

36

 $Pt_n^{\lambda}(2 \le n \le 9, \lambda = 0, -1)$ 团簇基态构型,如图1所示.从图1不难发现:不同的电荷态对团簇基态结构的影响非常重要,中性和阴性的  $Pt_2$  团簇的最低能异构体均具有  $D_{\infty H}$  直线型结构;中性和阴性的  $Pt_3$  团簇的最低能异构体均具有等边三角形结构,但显然阴性团簇的对称性  $C_{2v}$ 比中性团簇的  $C_s$  更高.

阴性的 Pt<sub>4</sub> 团簇的最低能异构体是一个 C<sub>s</sub> 对称 的菱形结构,中性团簇显然是一个具有低对称性 C<sub>1</sub> 的三角锥结构.中性和阴性 Pt<sub>5</sub> 团簇最低能异构体类 似于一个畸变了的梯形结构.阴性的 Pt<sub>6</sub> 团簇的最低 能异构体是一个五角锥形,中性的则为双锥结构,两 者具有相同的 C<sub>1</sub> 对称性.对于 Pt<sub>7</sub> 团簇,中性和阴性 的最低能异构体具有相同的结构和对称性,可以看 成把一个额外的 Pt 原子放置在 Pt<sub>6</sub> 的低能异构体 中,对称性为 C<sub>1</sub>.阴性的 Pt<sub>8</sub> 团簇的最低能异构体可 看成一个具有 C<sub>s</sub> 的对称截掉顶角的棱台结构,而中 性的基态结构则是一个具有 C<sub>1</sub> 的不规则多边形.阴 性的 Pt<sub>9</sub> 团簇的最低能异构体是 C<sub>1</sub> 的不规则梯形, 中性的则为一个 C<sub>1</sub> 的七角双锥结构.

对于中性基态铂金团簇而言,当n>3时,结构 都具有 $C_1$ 的低对称性,而阴性原子在原子数大于4 的结构上具有 $C_1$ 对称性;但当n=8时是例外,它的 对称性是 $C_s$ .此外,为了讨论铂金团簇的稳定性随着



Pt<sub>n</sub><sup> $\lambda$ </sup> (2 $\leq$ n $\leq$ 9, $\lambda$ =0,-1) clusters

原子个数的变化关系,还计算了团簇的平均键长、平均结合能 E<sub>b</sub>、离解能、二阶差分能 Δ<sub>2</sub>E.

#### 2.2 平均键长

为了更好地比较铂金团簇随着尺寸的变化,选择每个尺寸的中性与阴性基态构型下的 Pt<sup>\*</sup><sub>n</sub>(2≤n≤ 9,λ=0,-1) 团簇进行比较.各种电荷态下 Pt<sup>\*</sup><sub>n</sub> 团簇的平均键长随着铂金原子个数增加的变化趋势,如

图 2 所示.图 2 中:L 表示平均键长.由图 2 可知:中 性情况下,Pt<sub>2</sub>(0.238 nm)到 Pt<sub>5</sub>(0.310 nm)的平均 键长发生了明显的增长,而从 Pt<sub>5</sub> 到 Pt<sub>6</sub>,平均键长 几乎没有发生变化,到 Pt<sub>7</sub>(0.358 nm)取到最大平均 键长,到了 Pt<sub>8</sub>(0.348 nm)却出现了反常的减小,Pt<sub>9</sub> (0.352 nm)出现了增长,但比 Pt<sub>7</sub> 小;阴性的铂金团 簇 Pt<sub>2</sub> (0.247 nm)到 Pt<sub>7</sub> (0.365 nm)的平均键长发 生了明显的增长,且 Pt<sub>7</sub> 取到最大值,Pt<sub>8</sub> (0.359 nm)和 Pt<sub>9</sub> (0.356 nm)依次缩短,阴性团簇的平均键 长大于相应的中性团簇的平均键长,总之,不论是中 性团簇还是阴性团簇,平均键长均先随着团簇尺寸



Fig. 2 Average nearest-neighbor distance

的增加而增大,表明了 Pt-Pt 键强逐渐减弱,而当键长达到 0.035 nm 时,平均键长逐渐趋于稳定,但无 法排除是否存在畸变的情况.

## 2.3 平均结合能、离解能、二阶差分能

Pt<sup>\*</sup><sub>n</sub>(2≤n≤9,λ=0,-1)团簇基态结构下所有原子的平均结合能随着团簇尺寸的增加而变化的关系,如图 3 所示.由图 3 可知:中性和阴性的团簇基态结构的平均结合能均随着团簇尺寸的增加而增加,这与大多数团簇的结合能都是随着团簇变大而增大相同;从增长趋势看,铂金团簇在增长过程中可以继续获得能量,基态铂金团簇的稳定性在增强;当原子数超过 2 个时,中性体系的平均结合能小于相应的阴性体系,表明团簇在得到电子后结构更稳定.由图 3 的曲线趋势推测:当能量到达 2.5 eV 时,平均结合能趋于稳定.

通过计算团簇的离解能  $\Delta_1 E$  和二阶差分能  $\Delta_2 E$  也可以反映团簇的稳定性随着团簇尺寸的变化趋

第1期

势.离解能对于团簇的相对稳定性非常敏感,离解拆分所需的能量越大,团簇的稳定性越高.离解能随着 铂金原子个数的增加的变化关系,如图4所示.







Fig. 3 Average binding energy for platinum clusters

Fig. 4 Dissociation energy for platinum cluster

由图 4 可知:离解能随着尺寸增加表现出明显的奇偶性.对于中性铂金团簇而言,偶数个原子团簇 的稳定性要明显高出相邻的奇数团簇,但 Pt。例外, Pt。是研究的中性铂金团簇中最稳定的构型, 这与团 簇的每个原子的平均结合能的结果是一致的,其次是 Pt。的离解能, Pt。和 Pt。依次次之. 对于阴性的铂 金团簇而言,随着团簇尺寸的增大也呈现出明显的奇偶交变现象,奇数个原子的团簇带电荷团簇的离解 能要大于相应中性团簇的离解能;相反,偶数个原子的体系阴性团簇的离解能却要小于相应的中性团簇 的离解能. 总之,无论是中性还是阴性的铂金团簇离解能的大小都随着铂金原子个数的增加而呈现出了 明显的奇偶交替现象.奇偶交替现象可能归因于团簇的电子层结构,对于闭壳层电子结构体系,其稳定 性大于临近的开壳层体系.

二阶拆分能 Δ<sub>2</sub>E 的大小同样也是表征团簇与相邻两个团簇的相对稳定性,随着铂金原子数目增加

各种电荷态下团簇的二阶差分能的变化趋势,如图 5 所示.由图5可知:随着尺寸的增加,无论是中性的 铂金团簇还是阴性的铂金团簇,  $\Delta_2 E$  表现出明显的 奇偶性;对于中性铂金团簇而言,偶数团簇的值更 高,表明偶数团簇要比其相邻的奇数团簇更稳定;阴 性的铂金团簇表现出了与其相反的计算结果,由奇 数个原子组成的团簇要比其相邻的偶数个原子组成 的团簇更稳定.该结果与前面离解能的分析是一致 的,这表明团簇电荷态的不同对其稳定性的影响是 异常明显的.



图 5 铂金团簇的二解差分能 Fig. 5 Second difference energy for platinum clusters

#### 3 结论

采用密度泛函 B3LYP/SDD 方法,分别研究了中性、阴性 Pt<sub>2</sub>(2 $\leq n \leq 9, \lambda = 0, -1$ )团簇的基态结 构、结合能、二阶差分能,以及随着团簇尺寸增加相应的演变规律.研究结果主要归纳为以下3点.

1) 中性与阴性团簇的基态构型在所研究的尺寸范围内更倾向于具有低对称性的三维立体结构.

2)体系的平均结合能均随着铂金原子个数的增多而增大,阴性团簇平均结合能比相应的中性大.

3)所有电荷态下团簇的离解能、二阶拆分能都随着铂金原子个数的增多而呈现出明显的奇偶交替 现象.结果表明:阴性的奇数团簇的稳定性要强于与之相邻的偶数团簇的稳定性;相反,中性团簇下偶数 团簇的稳定性比奇数团簇强.

#### 参考文献:

- [1] 李春森,曹泽星,吴玮,等,Pd,(n=2~13)团簇的密度泛函理论研究[J].高等学校化学学报,2005,26(1):116-120.
- $\lceil 2 \rceil$ 张材荣,陈宏善,王广厚. Rh,, Pt, (n=2~20)团簇基态结构的遗传算法[J]. 原子与分子物理学报, 2004, 4(1): 235-

239.

- [3] 叶子燕. 低能 Pt 原子及原子团簇与 Pt(100)表面作用的分子动力学模拟[D]. 大连:大连理工大学,2001:6.
- [4] 张秀荣,洪伶俐. Pt, 团簇的结构和稳定性的密度泛函理论研究[J]. 江苏科技大学学报:自然科学版,2009,23(1): 86-90.
- [5] 张秀荣,崔彦娜,洪伶俐,等. M<sup>0,±</sup>(M=Os, Ir, Pt)团簇结构与性质的密度泛函理论研究[J]. 分子科学学报,2009, 25(2):109-115.
- [6] SEBETCO A, GUVENG Z B. Energetics and structures of small clusters: Pt<sub>N</sub>(N=2~21)[J]. J Surf Sci, 2003, 525 (1/2/3):66-84.
- [7] TIAN Wei-quan, GE Mao-fa, SAHU R, et al. Geometrical and electronic structure of the cluster: A density functional study[J]. J Phys Chem A, 2004, 108(17): 3806-3812.
- [8] XIAO Li, WANG Li-chang. Structures of platinum clusters: Planar or spherical[J]. J Phys Chem A,2004,108 (41): 8605-8614.
- [9] BECKE A D. Density-functional thermochemistry III: The role of exact exchange[J]. J Chem Phys, 1993, 98(7): 5648-5652.
- [10] SAUNDERS M. Stochastic search for isomers on a quantum mechanical surface[J]. J Comput Chem, 2004, 25(5): 621-626.

## Density Functional Theory Study of the Structures and Relative Stabilities of Platinum Clusters

WU Shan, WANG Huai-qian, LI Jia-qi, LI Ying-yu, YU Yi-nan, HAN Jia

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

**Abstract:** Based on the combination of saunders kick global minimum stochastic search and density functional theory, the structures, relative stabilities, as well as the relationship of these properties along with the cluster size have been systematically investigated for small bare platinum clusters  $Pt_n^{\lambda}(2 \le n \le 9, \lambda = 0, -1)$ . We found that, with the theoretical analysis of the calculating results: neutral and negative ground state configuration of the cluster in the size of the study in this article are more likely to have low symmetry within the framework of three-dimensional structure; the average binding energy of the system will increase with the increase in the number of platinum atoms, in addition, the average binding enegy of negative clusters larger than the corresponding neutral; calculated dissociation energy and the second difference energy as a function of the cluster size exhibit a pronounced even-odd alternation phenomenon, indicating that odd-numbered clusters keep higher stability compared with their neighboring even-numbered clusters for charged platinum clusters, and the stability of even-numbered clusters is higher than that of the adjacent odd-numbered clusters for neutral platinum clusters.

Keywords: platinum cluster; density functional theory; geometrical structure; stability

(责任编辑:陈志贤 英文审校:吴逢铁)

**文章编号:**1000-5013(2015)01-0040-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.01.0040

# 采用线性预测模型的语音篡改检测

## 林晓丹

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 基于线性预测模型,提出一种通用的语音信号真实性和完整性的鉴别方法.将线性预测残差信号通过 带通滤波器,消除谐波信号分量的干扰.滤波后的原始语音残差信号呈高斯分布,而篡改语音的残差则体现出 明显的超高斯特性,将预测残差的高阶统计特征作为判断篡改的依据.实验结果表明:该方法能够有效实现语 音篡改盲检测,并定位篡改位置;在噪声环境下,与现有方法相比,文中的检测方法具有更高的鲁棒性. 关键词: 篡改检测:线性预测模型;超高斯;高阶统计特征

**中图分类号:** TP 309 \_\_\_\_\_\_文献标志码: A

近年来,由于数字录音设备的广泛应用和音频编辑处理技术的发展,编辑数字录音变得非常容易. 非专业人士也可以轻而易举地修改音频内容而不留下痕迹.数字录音作为法庭举证中一项非常重要的 证据,可能被非法篡改.如果这些伪造音频被利用,将严重影响司法判决的公正.尽管数字签名和数字水 印技术也能为音频的真实性和完整性提供保障,但现有的录音设备大多无法预先嵌入水印或签名信息, 因此,数字语音盲取证技术变得迫在眉睫<sup>[1]</sup>.现有的音频盲取证主要着眼于以下 4 个方面:1)基于电网 频率的分析<sup>[2]</sup>,这是目前最有效的音频盲取证方法,但对使用电池供电的录音设备,例如 MP3、录音笔、 手机等,这种检测方法失去了其有效性;2)基于录音环境的分析<sup>[3-4]</sup>;3)针对特定类型篡改的检测<sup>[5-7]</sup>; 4)分析音频统计特性的变化<sup>[8]</sup>.目前,多数录音设备直接录制的音频都是 wav 格式的数字音频文件,以 原始的波形文件作为检测对象,由于插入、替换、删除、拼接操作,导致音频前后样点相关性减弱,线性预 测残差与原始音频的残差相比出现明显差异.因此,本文通过分析原始音频和篡改音频的线性预测残 差,在对残差信号进行统计分析的基础上,提出一种能够检测并定位篡改位置的语音盲取证方法.

## 1 线性预测残差分析

#### 1.1 线性预测模型

线性预测的基本思想是用若干个过去的语音取样的线性组合来预测当前的语音样值.1个 p 阶的 线性预测模型可表示为

$$\hat{s}(n) = \sum_{i=1}^{p} a_i s(n-i).$$
 (1)

式(1)中:p为预测阶数;s(n)对应n时刻输入的语音样点; $a_i$ 为线性预测系数(LPC); $\hat{s}(n)$ 为线性预测 方法对s(n)的估值.线性预测误差 $\hat{e}(n)$ 为

$$\hat{v}(n) = s(n) - \hat{s}(n) = s(n) - \sum_{i=1}^{p} a_i s(n-i).$$
(2)

线性预测模型的关键在于预测系数  $a_i$  的求解. 通过使预测误差的均方值最小,即满足  $E[\hat{e}(n)]^2$  最小,可解得  $a_i$ . 求取  $a_i$  的过程中,采用 Levinson-Durbin 递推算法对 Yule-Walker 方程组求解,即

收稿日期: 2013-12-19

通信作者: 林晓丹(1983-),女,讲师,博士研究生,主要从事多媒体信号处理及信息安全的研究. E-mail:linxd@gmail.com.

基金项目: 福建省泉州市科技计划项目(2011G7)

$$\begin{bmatrix} R(0) & R(1) & \cdots & R(p-1) \\ R(1) & R(0) & \cdots & R(p-2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R(p-1) & R(p-2) & \cdots & R(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(1) \\ R(2) \\ \vdots \\ R(p) \end{bmatrix}.$$

式(3)中: R(m) = E[s(n+m)s(n)]为 s(n)的自相关序列.

预测系数  $a_i$  可以准确捕获说话人的声道特征,对于录音信号的篡改痕迹,同样可以体现在预测系数上.语音信号在短时间内具有较大的相关性,对语音的篡改操作必然会破坏前后样点的相关性,篡改音频在频谱上也将出现明显的不连续性,最终导致在篡改位置预测系数无法准确表征语音的频谱幅度. 线性预测阶数为 13 时,对一段语音的预测结果如图 1 所示.由图 1 可知:未发生篡改时,线性预测结果能够准确跟踪输入语音的变化;而对于篡改语音,预测结果则无法准确跟踪其变化情况,产生较大的预测误差.为了克服语音能量变化的影响,将线性预测残差信号归一化,即  $e(n) = \hat{e}(n) / \sqrt{E_p}$ .其中:  $E_p$  为求解线性预测系数  $a_i$  时得到的最小均方误差.



图 1 语音线性预测结果

Fig. 1 Linear prediction results of the speech

## 1.2 线性预测残差信号分析

对于原始的语音信号,在计算线性预测系数的过程中,语音信号的短时相关性已被大部分去除,可 认为预测残差和语音信号无关.理论上,理想的残差信号应具有平坦的功率谱.然而,上述结论只有当残 差信号为零均值,且预测阶数足够高的前提下才成立.采样率均为 16 kHz 的原始语音和篡改语音 LPC 残差信号的频域解释,如图 2 所示.图 2 中:S(f)为功率谱.由图 2(a)可知:即使语音未遭受篡改,其预 测残差也不具有平坦的功率谱;残差信号包含的谐波分量非常明显,其频率  $\omega_m$  是语音基频  $\omega_0$  的整数 倍,即  $\omega_m = m \cdot \omega_0$ .考虑到实际录音环境和录音设备可能存在噪声,原始语音的线性预测残差信号 e(n)表示为  $e(n) = w(n) + \sum_{m=1}^{M} a_m \cos(\omega_m n + \theta_m)$ .其中: $a_m, \theta_m$  分别为谐波幅度和相位;M为残差信号中的谐

波数目;w(n)为环境噪声,其带宽为 Bw.





Fig. 2 Power spectrums of LPC residual of the speech

由图 2(b)可知:篡改处的不连续性使预测残差出现了许多新的频率分量,这些频率分量可能包含 新的基音频率,例如,拼接、替换、插入操作引入新的谐波分量.这时残差信号包含原语音的谐波分量、环 境噪声及篡改引入的随机噪声 c(n).其中:c(n)包含的频率成分与原语音的基频无关.新的谐波分量不

单独列出,也包含于 c(n)中.因此,篡改语音的残差表示为  $e(n) = w(n) + c(n) + \sum_{m=1}^{N} a'_m \cos(\omega_m n + \omega_m n)$ 

(3)

 $\theta'_m$ ).其中:篡改语音中原语音残差的谐波数目、幅度和相位可能发生变化,分别记为  $N,a'_m$  和 $\theta'_m$ .

## 2 篡改检测

#### 2.1 残差信号的高阶统计特征

盲检测方法没有原始的语音信号作为参考,且可能存在录音环境和设备噪声,因此,仅从语音信号 功率谱的变化情况很难判断是否出现了篡改.从信号的统计特性出发,对残差信号进行分析.

如果 x(n)是零均值随机序列,其三阶和四阶累积量为  $\gamma_3 = E\{x^3(n)\} = m_3\{0,0\}, \gamma_4 = E\{x^4(n)\} = 3E^2\{x^2(n)\} = m_4\{0,0,0\} - 3m_2^2(0), x(n)$ 的偏度和峰度分别用三阶和四阶累积量测定,即  $\alpha = 1$ 

 $rac{oldsymbol{\gamma}_3}{\lceil m_2\left(0
ight)
ight]^{3/2}},eta{=}rac{oldsymbol{\gamma}_4}{m_2^2\left(0
ight)}.$ 

语音的谐波分量主要集中在中低频范围内.图 2(a)中:原始语音的谐波主要集中在 0~4 000 Hz 的 频带内,这些谐波分量的高阶累积量不为零,将对检测产生干扰.因此,先对残差信号进行带通滤波.带 通滤波器的冲激响应为 h(n),带宽为  $B_m$ .残差信号 e(n)通过带通滤波器后,谐波分量大部分被滤除.因 此,原始语音  $e_0(n)$ 和篡改语音通过滤波器的残差信号  $e_t(n)$ 分别表示为  $e_0(n) = BPF[w(n)]$ , $e_t(n) = BPF[w(n)+c(n)]$ .其中:BPF为带通滤波.通常环境噪声 w(n)具有较大的带宽,即  $B_w \gg B_m$ .因此,残 差信号  $e_0(n)$ 为具有高斯分布的窄带信号, $e_0(n)$ 的高阶统计量为 0. 而篡改信号由于 c(n)的存在, $e_t(n)$ 具有明显的高阶统计量.带通滤波后原始语音和篡改语音残差信号的分布直方图,如图 3 所示.图 3 中: N 为频次.在对大量语音片段测试后发现: $e_t(n)$ 的直方图具有更尖锐的峰值和更长的拖尾,符合超高斯 分布的特性,且  $e_0(n)$ 的分布直方图更接近高斯特性.



Fig. 3 Histograms of residual LPC

#### 2.2 语音篡改检测

将待检测的语音信号进行分帧,对语音帧进行预加重、加窗处理,计算各帧的归一化线性预测残差. 第*i*帧残差信号通过上述带通滤波器的输出记为 $e_i(n)$ ,对 $e_i(n)$ 进行高阶累积量分析.利用偏度和峰度 联合特征作为是否篡改的判断依据.根据上述分析,若未经篡改, $e_i(n)$ 的偏度和峰度应接近于零,而篡 改语音由于明显的非高斯特性,其偏度和峰度均偏离零值.因此,计算第*i*帧 $e_i(n)$ 的偏度和峰度,分别 记为 $\alpha(i)$ , $\beta(i)$ ,设置合适的阈值 $\lambda_1$ , $\lambda_2$ 即可进行判断.若 $|\alpha(i)| > \lambda_1$ ,且 $\beta(i) > \lambda_2$ ,则认为在该帧位置发 生了篡改.

## 3 实验结果及分析

为检验算法的有效性,将文中算法性能与文献[7]进行比较.采用 PC 机(连接外置麦克风)、手机、 录音笔、MP3,共录制了4种不同采样率的音频,各为44.1,32.0,16.0,8.0 kHz,每种采样率男声和女 声各25段.从 TIMIT 语音库选取100段语音(16 kHz),将其采样率转换成44.1,32.0,8.0 kHz,即每 种采样率各100段.此外,从互联网下载了如上4种采样率的音频各50段.测试集中每种采样率的未篡 改语音各200段,选取4种采样率的音频各100段分别进行随机删除、拼接、替换和插入,篡改后音频保 持采样率不变,每种采样率的篡改音频各400段.将上述所有篡改和未篡改音频作为测试集(共2400 段语音).虚警率(原始音频误判为篡改音频)和漏警率(篡改音频误判为原始音频)分别记为 nep. nep.

实验中发现线性预测阶数越高,残差信号的相关性越小,检测准确率越高.然而,当预测阶数高达

13 时,随着预测阶数的增大,检测性能无明显提高.因此,选取线性预测阶数为 13,帧长 20 ms,两帧之 间有 50%重叠.设置带通滤波器中心频率为  $f_s/4+500$ ,其中: $f_s$ 为音频采样频率,带宽  $B_m$ 为 1 000 Hz.实验中 $\lambda_1$ , $\lambda_2$  越大,漏警率越高.若 $\lambda_1$ , $\lambda_2$  过小,则虚警率也随之增大,实验选取检测阈值 $\lambda_1$ =0.03,

λ<sub>2</sub>=1.5.不同采样率下文中算法与文献[7]的检测性能,如 表1所示.由表1可知:与文献[7]相比,文中的检测准确率 有所提高.由于文中算法中各帧的时长相同,采样率越高, 语音帧包含的样点数越多,残差信号的相关性越小.因此, 检测准确率随采样率的增大而提高.

不同采样率下检测性能比较 表 1 Tab. 1 Detection results under different sample rates compared with method in  $\lceil 7 \rceil$ 文中算法 文献[7]  $f_{\rm s}/\rm kHz$  $\eta_{\mathrm{FP}}/\%$  $\eta_{\rm FN}/\%$  $\eta_{
m FP}/\%$  $\eta_{\rm FN}/\%$ 44.1 5.5 3.00 17.5 3.25

3.75

7.00

10.25

16.0

20.5

16.5

5.50

9.25

14.75

350

32.0

16.0

8.0

8.0

13.5

17.0

#### 3.1 篡改定位结果

图 4,5 分别为两段不同的篡改语音.图 6,7 分别为对 应于上述篡改语音的残差信号经带通滤波后的偏度和峰 度.由图 6 可知:第 99 帧和第 300 帧的 | α(i) | 和 β(i) 均高

于所设阈值.因此,可判断在该位置发生了篡改.由图7可知:在第300帧附近发生了篡改.



图 4 原始语音与篡改语音 1



图 5 原始语音与篡改语音 2



图 6 篡改定位结果 1





图 7 篡改定位结果 2 Fig. 7 Forgery detection result 2

#### 背景噪声对检测结果的影响 3.2

为了检验文中方法对噪声的鲁棒性,对上述音频添加不同强度的背景噪声.噪声由 Adobe Audition 软件生成,包含两类噪声(白噪声和粉色噪声),用于模拟 环境噪声, 调整噪声强度, 从而得到不同信噪比的含噪语 音.选取每种采样率下的含噪语音各 100 段,分别进行随 机删除、插入、替换、拼接,检测结果如表2所示.表2中: R<sub>SN</sub>为信噪比.由表2可知:文中方法考虑了噪声的统计 特性,因此,检测鲁棒性更高.

表 2 不同信噪比时的检测性能比较 Tab. 2 Detection performance under different noise conditions compared with method in  $\lceil 7 \rceil$ 

$R_{ m SN}/ m dB$	文中	算法	文献[7]		
	$\eta_{ m FP}$ / $^{0}\!\!\!/_{0}$	$\eta_{ m FN}/\%$	$\eta_{ m FP}$ / $\%$	$\eta_{ m FN}$ / $^0\!\!/_0$	
15	16.63	9.44	30.88	12.31	
20	14.37	5.19	26.50	10.44	
30	11.38	3.69	17.87	4.37	

#### 结束语 4

分析了语音信号的线性预测模型残差,并将残差信号的统计特性用于语音的被动取证.原始音频 LPC 残差信号的高阶累积量几乎为零,而篡改音频的预测残差体现出明显的超高斯特性,其高阶累积 量偏离零值.实验结果表明:文中方法对于语音的插入、删除、替换、拼接具有较高的检测可靠性,而且可 以准确定位出篡改位置;与现有算法比较,在噪声环境中,文中方法的检测鲁棒性更好.

#### 参考文献:

- [1] SWATI G, SEONGHO C, KUO C C J. Current developments and future trends in audio authentication J]. IEEE Multimedia, 2012, 19(1): 50-59.
- $\lceil 2 \rceil$ LIU Yu-ming, YUAN Zhi-yong, MARKHAM P N, et al. Application of power system frequency for digital audio authentication J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 1820-1828.
- [3] MALIK H, FARID H. Audio forensics from acoustic reverberation [C] // IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Dallas: IEEE Press, 2010:1710-1713.
- IKRAM S, MALIK H. Digital audio forensics using background noise[C]//IEEE International Conference on Multi- $\lceil 4 \rceil$ media and Expo. Singapore: IEEE Press, 2010: 106-110.
- QIAN Shi, MA Xiao-hong. Detection of audio interpolation based on singular value decomposition[C]// Awareness [5] Science and Technology. Dalian: [s. n. ], 2011:287-290.
- [6] YANG Rui, QU Zhen-hua, HUANG Ji-wu, Exposing MP3 audio forgeries using frame offsets[J]. ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications, 2012, 33(8); 1-20.
- [7] CHEN Jiao-rong, XIANG Shi-jun, Exposing digital audio forgeries in time domain by using singularity analysis with wavelets[C] // Proceedings of the First ACM Workshop on Information Hiding and Multimedia Security. New York:[s. n. ],2013:149-158.

## Speech Forgeries Detection with Linear Prediction Model

## LIN Xiao-dan

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

Abstract: Based on linear prediction model, a general forensic approach aiming to ensure the authenticity and integrity of speech is presented. To eliminate the influence of harmonic components existed in the LPC residual, a band-pass filter is introduced. The original speech residual follows a Gaussian distribution while its forgery counterpart shows a super Gaussian characteristic. Higher order statistics of the LPC residual is applied to forgery detection. Experimental results show the effectiveness of our method in detecting and locating forgery. Results also demonstrate the higher robustness of our detection method in noise environment compared to the state-of-the-art method.

Keywords: forgery detection; linear prediction model; super gaussian; higher order statistics

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 吴逢铁) **文**章编号:1000-5013(2015)01-0045-04

# 50 L 规模电镀 Fe-P 非晶合金及其组合镀层

## 王森林,李瑞,洪宏伟,翁建新

(华侨大学 材料科学与工程学院,福建 厦门 361021)

摘要: 首先,在50L规模镀槽的酸性镀液中,以黄铜为镀件,柠檬酸三钠为络合剂,硼酸为缓冲剂,电沉积 Fe-P 非晶合金镀层. 然后,电镀光亮镍和铬,形成组合镀层 Fe-P/Ni/Cr,并对其进行热处理及中性盐雾实验. 结果表明:厚度分别为12.70,4.40,0.37 um的组合镀层具有强耐腐蚀性能,各镀层间结合力良好,可替代水 暖的半光亮镍镀层.

关键词: Fe-P; 非晶合金; 电沉积; 盐雾实验; 中试试验 **中图分类号:** O 646 文献标志码: A

中高档水龙头一般采用多层镀覆,即在65黄铜(CuZn)上先镀约10μm的半光亮镍,再镀覆薄(2~ 5 μm)的光亮镍,最后镀覆约 0.5 μm 的铬,形成组合镀层(CuZn/Ni(h)/Ni(b)/Cr). 电沉积 Fe-P 非晶 合金镀层具有优异的性能[1-7],有望替代传统的半光亮镍镀层,达到降低水龙头生产成本及节约资源的 目的.目前,电沉积 Fe-P 非晶合金的镀液大多数不加络合剂,为了保证镀层中的 P 含量,并提高镀液的 稳定能力,施镀的 pH 值很低(约1.5),沉积过程中析氢副反应严重,导致得到的合金镀层结构缺陷较 多,进而影响该镀层的耐腐蚀性能<sup>[8-13]</sup>.本文在较佳的电沉积 Fe-P 非晶合金镀液配方<sup>[14]</sup>的基础上,加入 适量的柠檬酸三钠作为络合剂,较大幅度地降低析氢副反应程度,提高所得镀层的质量,并进一步研究 Fe-P 非晶合金的镀液性能和电镀规律.

#### 实验部分 1

#### 1.1 50 L Fe-P 非晶合金电镀

电镀液基本组成:200g·L<sup>-1</sup>FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O:30g·L<sup>-1</sup>NaH<sub>2</sub>PO<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O:60g·L<sup>-1</sup>Na<sub>3</sub>C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub>·  $2H_2O_30 g \cdot L^{-1}H_3BO_3; 20 g \cdot L^{-1}NaCl; 25 g \cdot L^{-1}Al_2(SO_4)_3 \cdot$ 18H<sub>2</sub>O; 3 g • L<sup>-1</sup>抗坏血酸; 0. 05 g • L<sup>-1</sup>十二烷基硫酸钠. 电沉积 条件:电流密度  $J_k$  为 30~50 mA • cm<sup>-2</sup>, 镀液 pH 值为 2.8. 所用试 剂均为分析纯,镀液用蒸馏水配制,pH值用质量分数为10%的 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>和 NaOH 调节,用 pH 计测量.

50 L 规模 Fe-P 电镀装置,如图 1 所示.图 1 中:采用 50 L 规模 电解槽,阴极分别采用3 cm×3 cm 黄铜片或紫铜箔(用于组成和表 面形貌测试),阳极采用大面积 Fe 片(30 cm×40 cm×1 cm,电镀时 用尼龙布包裹).实验前,紫铜箔和黄铜片均经过金相砂纸打磨,超 声碱性除油,去离子水洗,酸洗除去氧化膜,去离子水洗等前处理.



图 1 50 L 规模 Fe-P 电镀装置 Fig. 1 Plating Fe-P device of the scale of 50 L bath

#### 1.2 Fe-P 非晶合金镀层结构表征

用 S-4800N 型场发射高分辨率扫描电镜(日本 Hitachi 公司)观察镀层表面微观形貌:用扫描电镜 附带的 ISIS-300 型能谱仪(英国牛津公司)测定组成分析;用 D/max-RC 型转靶衍射仪(日本理学公司)

**收稿日期**: 2014-12-18

通信作者: 王森林(1962-),男,教授,博士,主要从事电化学和金属表面处理的研究. E-mail:slwang@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省科技计划重点项目(2012H0026)

进行镀层相结构分析,Cu的 Ka 射线扫描速度为 5°• min<sup>-1</sup>.

### 1.3 Fe-P 非晶合金镀层的电流效率及分散能力测量

由于存在副反应,通过一定电荷量后,当一定数量的金属析出时,实际消耗的电荷量(Q<sub>r</sub>)要比按照 Faraday 定律计算所需的理论电荷量(Q<sub>th</sub>)多一些,两者之比称为电流效率(η)<sup>[15]</sup>,即

$$\eta = (Q_{\rm r}/Q_{\rm th}) \times 100\%. \tag{1}$$

在室温下选择一定的电流密度,以2 cm×2 cm 紫铜片为阴极,沉积时间为 20 min,用称量法计算 出电镀前后紫铜片上的镀层质量.

镀液的分散能力是指一定电解条件下,使沉积金属在阴极零件表面上分布均匀的能力.沉积金属的 均匀分布与阴极过电位、溶液电导率、阴极电流密度、电流效率等因素有关.分散能力高的镀液可以使电 沉积镀层均匀分布在零件的所有部位,即镀层厚度均匀.

实验采用哈林槽(远近阴极法)测定法,测定时槽的两端各放一个面积相等的阴极,即2 cm×2 cm 紫铜片,在两阴极之间放入一个与阴极尺寸相同的网状或带孔的 Fe 板做阳极. 远近阴极与阳极的距离 之比为 5 : 1,即  $k = L_1/L_2 = 5$ . 按照一定的工艺规范在适当的电流下沉积一定时间,称量得到远近两个 阴极的净增质量( $m_t, m_n$ ),可得分散能力(TP)<sup>[15]</sup>为

$$TP = \frac{k - (m_f/m_n)}{k - 1} \times 100\%.$$
 (2)

#### 1.4 组合镀层盐雾实验

组合镀层 CuZn/Fe-P/Ni(h)/Cr 在质量分数为 5.0%的氯化钠中进行中性盐雾实验(参照国家标准 GB/T 6461-2002《金属基体上金属和其它无机覆盖层经腐蚀试验后的试样和试件的评级》),检验 其耐腐蚀性能是否达到相应的传统 CuZn/Ni(l)/Ni(h)/Cr 组合镀层要求.

## 2 结果与讨论

#### 2.1 Fe-P 非晶合金镀层的形貌及组成

电沉积条件: $J_{k}$ =45 mA·cm<sup>-2</sup>;镀液 pH 值为 2.8. 在此条件下得到的 Fe-P 合金镀层能谱(EDS) 图谱,如图 2(a)所示.图 2(a)中:Fe 的原子百分比为 71%;P 的原子百分比为 29%.Fe-P 合金镀层的 X 射线衍射(XRD)图谱,如图 2(b)所示.由图 2(b)可知:在 2 $\theta$  约为 45°处,有个馒头状的漫散射峰,说明该 合金镀层为典型的非晶态结构或微晶的混晶结构<sup>[7]</sup>.在此条件下得到 Fe-P 合金镀层的扫描电子显微镜 (SEM)图像,如图 2(c)所示.在图 2(c)中:非晶合金晶胞紧密,晶胞间的裂缝可能是由于电沉积时发生 阴极析氢副反应,使得镀层吸附氢形成内应力造成的<sup>[14,16]</sup>.



Fig. 2 Structure of the Fe-P amorphous alloy coating

## 2.2 Fe-P 非晶合金镀层的电流效率和分散能力

用称量法研究  $J_k$  分别为 40,45,50,60 mA • cm<sup>-2</sup>,沉积 20 min 时的阴极电流效率,用哈林槽法测量镀液分散能力,得到不同电流密度下的电流效率和镀液分散能力,如表 1 所示.

由表1可知:随着电流密度增加,阴极电流效率逐渐减 小,分散能力先增大后减小;当电流密度增大,析氢等副反 应加剧,电流效率减小;当电流密度为50 mA·cm<sup>-2</sup>时,分 散能力最好.在实验过程中,当电流密度为50 mA·cm<sup>-2</sup> 时,基片的边缘会出现少量烧焦的痕迹,所以电流密度选用 45 mA·cm<sup>-2</sup>为宜.

#### 2.3 热处理对 Fe-P 非晶合金镀层的影响

电沉积 Fe-P 非晶合金主要成分是铁,在温度较高的环境中使用会发生氧化,影响合金镀层的硬度和耐腐蚀性能.因此,有必要研究 Fe-P 非晶合金镀层在高温下的热氧化行

为. 在空气中, Fe-P 非面合金经不问温度热处理后的 XR 金经 300 ℃热处理后的结构基本不变, 仍为非晶态结 构; 当 400 ℃时, 合金结构开始发生转变, α-Fe(P) 固溶 体大量生成, Fe<sub>3</sub>P(I-4) 相开始生成, 只有微量的 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 生成; 400 ℃以后, 由于 Fe<sub>3</sub>P(I-4) 相大量生成, 造成合 金镀层不均匀, 合金迅速氧化, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 FeO 大量生成, 合金迅速增量. 因此, 在不经任何处理的情况下, Fe-P 非晶合金不能在 400 ℃以上的有氧环境中使用, 否则, 会由于氧化作用而失去使用价值.

#### 2.4 镀液的补加

每使用 219.6 kC 的电量,或析出 65.8 g 的镀层,需 补加 33.5 g 的 NaH<sub>2</sub>PO<sub>2</sub> • H<sub>2</sub>O,少量抗坏血酸和十二 烷基硫酸钠.

## 2.5 电镀 Fe-P/Ni/Cr 组合镀层的耐腐蚀能力

以黄铜片为基体,电沉积不同组成和厚度(*l*)的组合镀层.这些镀层在质量分数为 5.0%的 NaCl 中性盐雾中经过一定时间(*t*)的腐蚀,其腐蚀情况如表 2 所示.

表 2 不同组成和厚度的组合镀层的盐雾实验结果

Tab. 2 Results of the salt fog experiment with different composition and thickness of the combined coating

序号	组合镀层	$l/\mu { m m}$	t/h	腐蚀情况
1	Fe-P	12.10	72	生锈
2	Fe-P/Ni	11.20,3.50	72	生锈
3	Fe-P/Cr	12.30,1.00	200	生锈
4	Fe-P/Ni/Cr	10.20,4.50,0.35	200	边角少量锈斑
5	Fe-P/Ni/Cr	12.70,4.40,0.37	200	无生锈

由表2可知:第5个组合镀层的抗腐能力最强,且能在质量分数为5.0%的 NaCl 中性盐雾中经200 h 后不腐蚀.综上可知:Fe-P/Ni/Cr 的组合镀层组成的抗腐蚀能力最强,且抗腐蚀能力与镀层的厚度成 正比.此外,该组合镀层经过200℃热处理3h后,各镀层间结合力良好.

## 3 结束语

在 50 L 规模镀槽的酸性镀液中,以黄铜为镀件,柠檬酸三钠为络合剂,硼酸为缓冲剂,电沉积 Fe-P 非晶合金镀层.然后,电镀光亮镍和铬,形成组合镀层.在 400 ℃以下,Fe-P 非晶合金镀层具有良好的耐 热氧化能力;当高于 400 ℃时,镀层耐热氧化能力迅速下降.对 Fe-P/Ni/Cr 组合镀层进行中性盐雾实 验,实验结果表明:组合镀层厚度分别为 12.70,4.40,0.37 μm 时,在质量分数为 5.0%的 NaCl 中性盐 雾中经 200 h 后不腐蚀,具有强的耐腐蚀性能,可替代水暖的半光亮镍镀层.

## 表 1 不同电流密度下电镀 Fe-P 的 电流效率和镀液分散能力

Tab. 1	Current efficience and dispersion
abil	ity of deposition Fe-P coating
	at different current density

$J_{\rm k}/{\rm mA}$ • cm <sup>-2</sup>	$\eta/\%$	TP/ %
40	71.41	71.50
45	70.74	75.87
50	69.62	81.49
60	68.99	76.31

为. 在空气中, Fe-P 非晶合金经不同温度热处理后的 XRD 图谱, 如图 3 所示. 由图 3 可知: Fe-P 非晶合



图 3 Fe-P 非晶合金经不同温度 热处理后的 XRD 图谱

Fig. 3 XRD patterns of the Fe-P amorphous alloy under various temperature heat treatment

## 参考文献:

- [1] KAMEI K, MAEHARA Y. Magnetic properties and microstructure of electrodeposited Fe-P amorphous alloy[J]. J Appl Electrochem, 1996, 26(5): 529-535.
- [2] OSAKA T, TAKAI M, NAKAMURA A. Preparation of soft magnetic Fe-P alloy film by means of electrodeposition method[J]. Denki Kagaku, 1994, 62(5): 453-457.
- [3] TAKAI M, NAKAMURA A, ASA F. Development of ironphosphorus electrodeposition bath for soft magnetic films with high saturation magnetization[J]. Surface Technology, 1994, 45(4): 431-435.
- [4] ZHENG Xiao-mei, HUANG Ling, WU Yun-shi, et al. Electrodeposition and lithium storage performance of amorphous Fe-P alloy electrodes[J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2009, 25(2):317-320.
- [5] 傅静缘,罗泾源.Fe-P非晶合金电沉积镀层的制备及其腐蚀性能[J].钢铁学院学报,1987,9(1):98-104.
- [6] 范云鹰,张英杰,罗少林.电沉积 Fe-P 非晶镀层受热转变[J]. 材料热处理学报,2008,29(4):140-142.
- [7] 王森林,宋运建.Fe-P 非晶合金的电沉积行为及热处理对其结构与性能的影响[J].中国有色金属学报,2012,22 (2):496-503.
- [8] 李庆伦,俞春福,崔永值.电镀 Fe-P 非晶合金研究现状[J].表面技术,1999,28(1):4-5.
- [9] 张远声,龚敏,凌厉为.非晶态 Fe-P 合金电镀液稳定性研究[J].电镀与涂饰,1999,21(1):10-12.
- [10] GULIVETS A N,ZABLUDOVSKII V A, BASKEVICH A S, et al. Thermal stability and heating-induced phase transformations in Fe-P alloys produced by pulsed-current electrolysis[J]. Phys Met Metallogr,2005,99(5):504-507.
- [11] SRIDHARAN K, SHEPPARD K. Electrochemical characterization of Fe-Ni-P alloy electrodeposition[J]. J Appl Electrochem, 1997, 27(10): 1198-1206.
- [12] GAO Cheng-hui. Stability of electrodeposited amorphous Ni-Fe-P alloys[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2006,16(6):1325-1330.
- [13] ZECEVIC S K, ZOTOVIC J B, GOJKOVIC S L, et al. Electrochemically deposited thin films of amorphous Fe-P alloy Part I : Chemical composition and phase structure characterization[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 1998,448(2):245-252.
- [14] 王森林,宋运建.非晶态铁磷合金电镀液及其配制方法:中国,ZL201010101415.X[P].2011-09-21.
- [15] 周绍民.金属电沉积原理和研究方法[M].上海:上海科学出版社,1987:190-201.

# Deposition of the Fe-P Amorphous Alloy in the Scale of 50 L Bath and Its Combinatorial Coatings

## WANG Sen-lin, LI Rui, HONG Hong-wei, WENG Jian-xin

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

**Abstract:** First, in the scale of 50 L acid plating bath with containing critic three sodium as complex agent, boric acid as buffer agent, the brass substrate was electro-plated by Fe-P amorphous alloy coating. And then, the combinatorial coatings (Fe-P/Ni/Cr) was formed with deposition by bright nickel and chromium coating and the thickness of the combinatorial coatings is good by the heat treatment and the salt fog experiments. The results show that the combinatorial coatings have strong corrosion resistant, and could replace the half bright nickel coating with it.

Keywords: Fe-P; amorphous alloy; electro-deposition; salt fog experiment; pilot plant test

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 熊兴泉)

**文**章编号:1000-5013(2015)01-0049-06

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.01.0049

# 医药洁净室的计算流体动力学模拟及实测对比

彭皓<sup>1</sup>, 雷飞<sup>2</sup>

(1. 中国医药集团联合工程有限公司, 湖北 武汉 430077; 2. 华中科技大学 环境科学与工程学院,湖北 武汉 430077)

摘要: 采用计算流体动力学(CFD)模拟,研究3个医药洁净室的气流流型及颗粒物浓度.采用标准 k- ε 双方 程模型,通过模拟颗粒物在洁净室的分布,分析合理的污染物散发位置及散发比例.对比参考发尘量下的结果 与实测数据的差异,根据实测数据确定污染散发量,通过试验不同的单位容积发尘量,计算对应的洁净度,得 到与实测数据吻合最好的单位容积发尘量.在单位容积发尘量为1000 pc • (m<sup>3</sup> • min)<sup>-1</sup>计算条件下,各房间 的模拟结果与实测数据数值比较吻合,且经 CFD 预测的 3 个房间的洁净度变化趋势与实测一致. 关键词: 洁净室;计算流体动力学;污染物;散发位置;洁净度;发尘量

**中图分类号:** TU 834.844; O 35 文献标志码: A

要确保药品的质量,除了应遵照药典规定的特定要求和配方外,还应具有符合要求的生产环境,以 防止生产过程中微粒和微生物的污染、交叉污染,因此,医药洁净室的设计就显得尤为重要,在医药洁净 室中,除了保证工作区的气流组织符合要求外,室内颗粒物浓度即洁净度也必须达到要求的级别<sup>[1]</sup>.计 算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)模拟在洁净室的气流组织设计优化方面已经有不少 研究和工程应用[2-4]. 然而,其中大部分研究仍停留在气流分析和评价上,间接实现对污染的控制,而直 接模拟污染物的去除、污染分布和污染控制的研究较少, 日多是在实验室数据基础上, 仅采用 CFD 模拟 调试数据进行对比[5-7].本文以 CFD 模拟结果作为辅助设计的计算工具,实现洁净室的污染控制.

#### 洁净室的物理模型 1

#### 1.1 洁净室房间模型

为了实现洁净室内部三维湍流数值计算,考虑到计算因素,建立目标洁净室简化物理模型,模拟洁 净室有洁净室 A,B,C,其房间参数如表1所 表1 CFD模拟洁净室的参数

示. 表 1 中: l, d, h 分别为洁净室的长、宽、 高. 根据 3 个洁净室内设施,分别制作洁净室 A,B,C室内设施简化模型,如图1所示.

#### 1.2 边界条件

1.2.1 入口边界条件 人口采用速度入口

Tab. I	Parameters	ot	the	CFD	simulation	ot	the	clean	room

房间	$l \times d \times h/m \times m \times m$	设计洁净度	模型简称
粉碎 225 室	$5.25 \times 4.25 \times 4.20$	B级	洁净室 A
分装 221 室	6.30×5.30×4.20	B/A 级	洁净室 B
暂存 220 室	8.25×4.55×3.00	B/A 级	洁净室 C

边界条件,参数主要包括送风速度、送风温度、湍动能和湍流耗散率.在进口,湍动能和湍流耗散率通常 是未知的,按标准双方程模型分别取 1.0,1.3. 送风速度方向垂直于风口面.

1.2.2 出口边界条件 回风口处的速度可由质量守恒定律和能量守恒定律求得.房间底部的回风口按 充分发展流动的单向化处理,设为充分发展流动(outflow)或压力出口(outflow)边界条件.又由于需要 对回风口的具体风量进行比例的限制,因此,选取充分发展流动边界条件.

**收稿日期:** 2015-01-15

通信作者: 彭皓(1970-),男,高级工程师,主要从事医药洁净厂房无菌生产区环境控制的研究. E-mail: pmt1322@ tom. com.

基金项目: 中国医药集团新产品开发基金资助项目(2011GC02)



(a) 洁净室 A

(b) 洁净室 B

(c) 洁净室 C

图 1 洁净室室内设施简化模型 Fig. 1 Simplified model of clean room indoor facilities

1.2.3 固体壁面边界条件 由于各房间室内温度相同,壁面间无热量传递,天花板、室内墙壁、地面等 作为绝热边界条件处理,取壁面绝热边界条件.

## 1.3 洁净室的网格划分

由于流入流出口对室内空气流场的重要作用,在网格生成时要尽可能准确地反映流入流出的形状 和位置.因课题所研究的洁净室内存在不规则几何形状,故采用结构化网格和非结构化网格相结合的方 式.图 2 为洁净室的网格划分示意图.



Fig. 2 Schematic diagram of grid of clean room

## 2 洁净室的空气流动模型

洁净室内气体的流动在稳定状态下可视为恒定流.同时因室内空气的流速较低,可视为不可压缩流体,满足理想气体状态方程.此外,洁净室内部空气的流动属于湍流流动,必须遵守流动的质量守恒、动量守恒和能量守恒三大规律.模拟的3个洁净室都为混合流洁净室,房间背景流动都为乱流,上送下侧回式,局部为单向层流.

根据室内空气流动特点,在数学模型上做如下4点假设与简化:

1) 室内流体为不可压缩牛顿流体;

2) 室内流体为粘性流体,流体作定常流动,忽略由流体粘性力做功所引起的耗散热;

3) 考虑到洁净室密闭性良好,且在测试期间门窗关闭,故不考虑漏风对房间流场和温度场的影响;

4) 为了简化计算,不考虑气流的能量损失.

由于洁净室内流体的三维流动在恒定不可压缩的条件下满足紊流雷诺(Reynolds)时均方程,其方程表达式为

$$u_{i}\frac{\partial u_{i}}{\partial x_{i}} = f_{i} - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_{i}} + \frac{\partial}{\partial x_{i}}\left[(v + v_{\tau})\left(\frac{\partial u_{i}}{\partial x_{i}}\frac{\partial u_{j}}{\partial x_{i}}\right)\right].$$

综合考虑模型处理的精度和问题解决的耗损,在选择洁净室内流体紊流模型时,采用标准 k-e 双方 程模型.

## 3 CFD 的模拟试验

为了更好地确立目标洁净室的模拟环境,明确洁净室颗粒物浓度的影响因素,通过设置变量的方

式,利用不同边界条件的算例进行试算.经过反复模拟探索计算和分析,确定了最佳的模拟方式.

#### 3.1 边界条件试验

系统边界条件分为风口边界条件和离散相边界条件两部分.最终结果对比发现,各条件下对结果影响不大,趋势较为一致,但为了严格控制风速大小,模拟计算选用速度边界条件,如节1.2 所定边界条件.考虑到离散型模型在反应颗粒物浓度受气流组织影响时可行性良好,故采用离散型(DPM)模型对颗粒物浓度进行模拟.

#### 3.2 颗粒物浓度试验

发尘方式的设置是颗粒物模拟中很重要的一部分,对洁净度和尘粒分布有很大影响.在此选取3种 发尘面,进行颗粒物浓度模拟试验:1)房间四周侧壁面发尘;2)房间四周2m以上侧壁面发尘;3)除 去层流罩的吊顶区域作为发尘面.通过与实测数据对比,以上3种发尘量确定方法并不能达到理想的可 行效果.最终通过查阅《不同送风面积下洁净室浓度场的数值模拟分析》引入不同发尘比例的方式,反复 进行模拟,较好地实现了与实测数据的吻合.

## 4 CFD 模拟工况及结果分析

#### 4.1 污染物散发位置及比例对洁净度的影响

为了探究放散比例对洁净度的影响,选定洁净室 C 作为模拟对象,在 3 种不同的发尘比例情况下 进行模拟.3 种发尘比例(γ)分别为 1:3:10,1:5:100 和 1:5:200,选取工作面高度 1.2 m 作为评 价高度.3 种发尘比例情况下,洁净室 C 房间发尘参数设置,如表 2 所示.表 2 中:Q 为粉尘质量流量;M 为散发量;洁净室单位容积发尘量(G)为 5 000 pc • (m<sup>3</sup> • min)<sup>-1</sup>(pc 为颗粒,下同)<sup>[8]</sup>.

表 2 不同发尘比例下洁净室 C 的参数设置

Tab. 2	Parameter settings of	clean ro	om C under differ	ent dust proportion	18
	$M(\bar{n}_{\rm m})/l_{\rm rg}$	a <sup>-1</sup>	M(墙面)	$/\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	M( H
$Q/Kg \cdot s$	IVI(贝伽)/Kg•	s –			IVI ( JU

24	$O/lra \cdot a^{-1}$	$M(T f t m)/lr g \bullet a^{-1}$	M( 墙 囬)	$M(\pm \pi \pi)/\ln \alpha \cdot \alpha^{-1}$	
/	$Q/Kg \cdot S$	WI(顶砌)/Kg·S	$l \times h$	d  imes h	- WI(迎面)/Kg•S
1 : 3 : 10	$1.54 \times 10^{-10}$	$1.10 \times 10^{-11}$	5.86 $\times 10^{-12}$	$1.06 \times 10^{-10}$	$1.10 \times 10^{-10}$
1 : 5 : 100	$1.54 \times 10^{-10}$	1.45 $\times 10^{-12}$	$1.29 \times 10^{-12}$	2.34 $\times 10^{-12}$	$1.45 \times 10^{-10}$
1 : 5 : 200	$1.54 \times 10^{-10}$	7.47 $\times 10^{-13}$	$6.64 \times 10^{-13}$	$1.20 \times 10^{-13}$	$1.49 \times 10^{-12}$

通过模拟计算,得出3种发尘比例时,1.2 m 工作高度的颗粒物浓度(C)和房间总浓度(C<sub>tot</sub>)的走势 情况,结果如图3所示.具体数值结果,如表3所示.表3中:C<sub>ave</sub>,C<sub>max</sub>分别为室内颗粒物的平均浓度和 最大浓度;C<sub>n</sub>为室内颗粒物的浓度标准值.3500 г

表 3 洁净室 C 的全室洁净度								
Tab. 3 Wł	nole room cl	eanliness of a	elean room	C pc • $m^{-3}$				
γ	$C_{\mathrm{ave}}$	$C_{\max}$	$C_{\rm n}$	$C_{\rm ave} + 2C_{\rm n}$				
1:5:100	2 119	148 085	4 375	10 369				
1:3:10	2 966	134 669	4 696	12 358				
1:5:200	1 739	125 525	4 168	10 075				

综合文献和模拟的结果,建议对洁净室 C 采用围护 结构面源发尘模式,发尘比例 γ=1:5:100.然而在对 洁净室 A,B采用发尘比例 γ=1:5:100 时,模拟所得 1.2 m 处颗粒物平均浓度趋势与实测结果不符.经过反 复探索及验算,对房间内无设备的情况(洁净室 C),计 算中房间内部空间没有发尘面.



图 3 不同发尘比例下模拟输出结果走势图 Fig. 3 Simulation charts output results of different dust proportions

综合分析,采用围护结构发尘模式,发尘比例 γ=1:5:100.对于房间内有设备(洁净室 A,B),房间内部空间有发尘面的,将发尘位置设置在设备上.

## 4.2 污染物散发量对洁净度的影响

选取 γ=1:5:100,参照实测数据(颗粒物平均浓度为 5 000 pc • m<sup>-3</sup>),对相应的边界条件、污染

散发量进行估计,模拟结果如表4所示.计算结果表明:污染散发量与房间的洁净度有线性关系.

表 4 两种发尘量的洁净室 C 模拟全室洁净度

Tab. 4 Simulated whole room cleanliness of clean room C under two kinds of dust contents

项目	$G/\mathrm{pc} \cdot (\mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{min})^{-1}$	$C_{\rm ave}/{ m pc}$ • m <sup>-3</sup>	$C_{\rm max}/{ m pc}$ • m <sup>-3</sup>	$C_{\rm n}/{ m pc} \cdot { m m}^{-3}$	$(C_{\rm ave}+2C_{\rm n})/{\rm pc}\cdot{\rm m}^{-3}$
参考发尘量	5 000	2 119	148 085	4 375	10 869
实测数据反算发尘量	1 250	574	39 292	1 218	3 010

为了进一步确定污染物散发量对洁净度的影响,研究中采用两个方法确定污染散发量,即取洁净室 单位容积发尘量(G),并计算对应的洁净度(C).方法 a:参考《药厂洁净室设计、运行与 GMP 认证》提供 的数值<sup>[8]</sup>,取洁净室单位容积发尘量(G)为 5 000 pc • (m<sup>3</sup> • min)<sup>-1</sup>,在此简称参考发尘量.方法 b:根据 实测数据结果确定污染散发量,以 CFD 模拟结果接近实测数据结果为准,在此简称反算发尘量(G<sub>n</sub>).在 测试平面 1.2 m 下,洁净室 A,B,C 的实测数据分别为 616,212,333 pc • m<sup>-3</sup>.

## 4.3 模拟工况设置

模拟洁净室有 3 个,研究中将洁净室 C 的模拟工况作为分析对象,其他两个洁净室模拟过程相近, 不再重复赘述. 洁净室 C 总风量按设计值 12 034 m<sup>3</sup> · h<sup>-1</sup>(包括散流风口的风量 3 740 m<sup>3</sup> · h<sup>-1</sup>和层流 罩风量 8 294 m<sup>3</sup> · h<sup>-1</sup>),散流风口面积为 0.6 m<sup>2</sup>. 洁净室几何参数及送回风口尺寸位置均为给定值,如 表 5 所示. 表 5 中:l,d,h分别为洁净室的长、宽、高. 选取  $\gamma=1:5:100$ ,污染物参数设置如表 6 所示. 表 6 中:l,d,h分别为洁净室的长、宽、高;V 为房间体积;G 为单位容积空间颗粒浓度;C 为空间颗粒物 浓度;Q 为粉尘质量流量;M 为散发量.

表 5 洁净室 C 的 CFD 几何模型参数

Гаb. 5	CFD	geometric	model	parameters	of	clean	room	C
--------	-----	-----------	-------	------------	----	-------	------	---

项目	l/m	$d/\mathrm{m}$	$h/\mathrm{m}$	数量	位置
房间	4.55	8.25	3.0	_	—
送风口	0.77	0.77	_	5	吊顶
回风口	1.20	0.20	_	5	底面距地面 0.15 m
设备	0.80	0.80	0.6	1	—
层流罩	3.20	2.20	0.5	1	吊顶

表 6 γ=1:5:100 下污染物的参数设置

Tab. 6	Parameter	settings of	pollutants	by $\gamma = 1$	1 <b>:</b> 5 <b>:</b> 100	

房间	$l \times d \times h/m \times m$	u×m 设计洁净度	$V/\mathrm{m}^3$	$G/\mathrm{pc} \cdot (\mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{min})^{-1}$	$C/\mathrm{pc} \cdot \mathrm{m}^{-3}$		
洁净室 A	4.55×8.25>	×3 BA级	112.6	5 000	563 000		
洁净室 B	$6.5 \times 5.3 \times 4$	.2 BA级	140.2	5 000	701 000		
洁净室 C	$4.25 \times 5.25 \times$	4.2 B级	93.7	5 000	465 500		
房间	$O/l_{rg} = a^{-1}$	$M($ <b>西</b> #)/hg • $a^{-1}$	<i>M</i> (墙面	$(j)/kg \cdot s^{-1}$	M( + 如 西) / hg • a <sup>-1</sup>		
	Q/ Kg • S	M( ),/m)/ kg · S	$l \times h$	d  imes h	MI(地面)/Kg。S		
洁净室 A	1.54	1.45	1.29	2.34	1.45		
洁净室 B	1.92	设备表面发尘					
洁净室 C	1.28	设备表面发尘					

## 4.4 参考发尘量模拟结果与分析

对于洁净室 C,工作平面(1.2 m)的颗粒物浓度为1 610 pc·m<sup>-3</sup>.图 4(a)~(g)分别为各截面上颗 粒物浓度分布图.表7为3个房间的全室洁净度及测试平面1.2 m的洁净度汇总表.

表 7 3 个房间的洁净度汇总表

Tab. 7 Cleanliness summary table of three rooms

皮面	算例	$\frac{G/\mathrm{pc} \cdot}{(\mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{min})^{-1}}$	全室洁净度/pc・m <sup>-3</sup>				测试平面洁净度/pc・m <sup>−3</sup>			
厉问			$C_{ m ave}$	$C_{\max}$	$C_{\rm n}$ (	$C_{\rm ave} + C_{\rm n}$ )	$C_{ m ave}$	$C_{\max}$	$C_{\rm n}$	$(C_{\rm ave}+C_{\rm n})$
洁净室 A	设备发尘	5 000	9 206	$2\ 746\ 165$	49 007	107 220	3 685	$1 \ 075 \ 753$	28 185	60 055
洁净室 B	设备发尘	5 000	1 720	$1 \ 636 \ 367$	11 880	25 480	1 352	280 515	7 701	16  754
洁净室 C	$\gamma = 1 : 5 : 100$	2 119	148 085	4 375	10 869	5 000	1 610	47 998	3 527	8 664



53



图 4 各截面上颗粒物的浓度分布

Fig. 4 Concentration distribution of particles on each cross section

从图 4 的各 y 轴截面图可看出:没有排风口的侧墙面,颗粒物无法通过近壁面排除,在没有排风口的墙面中上部,容易形成较明显的涡流区,以致颗粒物在此积累明显,浓度较高.此外,层流罩回风口对颗粒物有较为明显的卷吸作用,在回风口附近存在局部颗粒物浓度偏高的现象.

从图 4 的各 z 轴截面图可看出:在无层流罩覆盖的墙壁角落,有尘粒积累现象;远离层流罩覆盖区域,向排风口移动的趋势,整体排污效果良好.

综合图 4 可知:层流罩覆盖区域,尘粒浓度控制良好,洁净度级别在要求范围内.

## 4.5 反算发尘量下的模拟结果与分析

由参考发尘量模拟结果可以看到,3个房间的洁净度级别均在要求的范围之内,但和实测数据相比

还有一定差距.在此,提出模拟向实测靠拢的方法,根据实测数据结果确定污染散发量,通过试验 不同的单位容积发尘量G,计算对应的洁净度,其 他计算边界条件同参考发尘量工况.由靠拢算例 所得模拟结果,如表 8 所示.

不同的单位容积发尘量下的,气流分布完全 相同,污染分布特点也相同.污染散发量与洁净度 近似成线性关系.在单位容积发尘量 5 000 pc• 表 8 不同单位容积发尘量下测试平面的洁净度

Tab. 8 Test plane cleanliness under different unit volume of dust content  $pc \cdot m^{-3}$ 

法海安	$G/\mathrm{p}$	<b>企</b> 测社田		
伯伊至	5 000	1 250	1 000	-
洁净室 A	3 685	927	671	616
洁净室 B	1 352	303	282	212
洁净室 C	1 610	401	319	333

(m<sup>3</sup>•min)<sup>-1</sup>的参考发尘量计算条件下,各个房间模拟结果符合洁净度的设计标准,但实测工况结果远远优于设计标准,与实测数据并不能合理地适应.在单位容积发尘量1000 pc•(m<sup>3</sup>•min)<sup>-1</sup>反算发尘量的计算条件下,各个房间模拟结果与实测结吻合较好;模拟结果显示,除单位容积发尘量外,研究确定的其他各个边界条件比较合理.

## 5 结论

采用 CFD 方法对洁净室的洁净度进行预测,并与实测数据对比,得出以下 3 点主要结论.

1)不同的污染物散发位置及比例将直接影响到 CFD 模拟结果.对无设备、内部空间没有发尘面的 房间内,围护结构发尘为主,采用的发尘比例为 γ=1:5:100;对于房间内有设备,房间内部空间有发 尘面的情况,将发尘位置设置在设备上.采用以上方式,CFD 模拟结果与实测数据一致.

2) 污染散发量与房间的洁净度有线性关系.采用参考文献给出的发尘量,即单位容积发尘量 5 000 pc • (m<sup>3</sup> • min)<sup>-1</sup>,计算房间的洁净度达到设计标准.但实测洁净度远低于设计标准,与采用单位容积发尘量 1 000 pc • (m<sup>3</sup> • min)<sup>-1</sup>的 CFD 计算结果吻合.说明在现有的工艺水平下,按参考文献给出的发 尘量计算过于保守.数据对比分析,在单位容积发尘量 5 000 pc • (m<sup>3</sup> • min)<sup>-1</sup>计算条件下,参考发尘量 的计算结果能满足洁净室的设计标准,但实测工况结果远远优于设计标准.参考发尘量的方法与实测数 据并不能合理地适应.

3) 在单位容积发尘量 1 000 pc • (m<sup>3</sup> • min)<sup>-1</sup>计算条件下,各房间的模拟结果与实测数据数值比较吻合,且 CFD 预测的 3 个房间的洁净度变化趋势一致与实测一致.说明计算中采用的边界条件应用于这个工程能够很好的预测洁净度,可作为洁净室气流优化提供参考.

#### 参考文献:

[1] 许钟麟. 空气洁净技术原理[M]. 3 版. 北京:科学出版社, 2003: 1-553.

- [2] LIU Jun-jie, WANG Hai-dong, WEN Wen-yong. Numerical simulation on a horizontal airflow for airborne particles control in hospital operating room[J]. Building and Environment, 2009, 44(11):2284-2289.
- [3] ROUAUD O, HAVET M. Numerical investigation on the efficiency of transient contaminant removal from a food processing clean room using ventilation effectiveness concepts[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 68(2):163-174.
- [4] NOH K C,KIM H S,OH M D. Study on contamination control in a minienvironment inside clean room for yield enhancement based on particle concentration measurement and airflow CFD simulation[J]. Building and Environment, 2010,45(4):825-831.
- [5] 黄闻华,魏琪,卢启明. CFD技术在洁净室气流组织设计中的应用[J]. 洁净与空调技术,2006(2):7-11.
- [6] 王科. 洁净室气流组织模拟及优化[D]. 武汉:华中科技大学,2005:54-65.
- [7] 张义军. 浅谈 2010 版 GMP 与洁净厂房[J]. 黑龙江科技信息, 2012(5): 26.
- [8] 许钟麟. 药厂洁净室设计、运行与 GMP 认证「M]. 2版. 上海:同济大学出版社, 2011:1-310.

## Computational Fluid Dynamics Simulation and Measured Contrast Research of Pharmaceutical Clean Room

## PENG Hao<sup>1</sup>, LEI Fei<sup>2</sup>

(1. China National Pharmaceutical Group Corporation, Wuhan 430074, China;

2. School of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In this work, the air flow patterns and particle concentrations of three pharmaceutical clean rooms were studied using computational fluid dynamics (CFD) simulation. A standard k- $\epsilon$  double-equation model was used to simulate the distribution of particles in the clean room and analyze the rational pollutant dissemination position and distribution ratio. By comparing the differences between the results of the referenced dust content and the measured data, the pollution emissions were determined according to the measured data. And the corresponding cleanliness was calculated by changing the dust content per unit volume (DCPUV) to get the best DCPUV value which was in accordance with the experimental data of each room fit well, and the cleanliness of three rooms is consistent with the observed trends by the CFD predictions. **Keywords**: clean room; computational fluid dynamics; pollutant emission; position; cleanliness; dust content

(责任编辑:黄仲一 英文审校:刘源岗)

文章编号:1000-5013(2015)01-0055-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.01.0055

# 改性硅藻土的多级 A/O 工艺 除磷优化及尾水深度除磷

## 马翠,何争光,张碧晰

(郑州大学 水利与环境学院,河南 郑州 450001)

摘要: 硅藻土经过酸洗提纯,加入聚合氯化铝、氯化铁进行表面结构改性.用改性硅藻土处理多级 A/O 工艺 二沉池出水,研究了不同投加量、停留时间、搅拌转速对尾水中磷去除的影响.试验结果表明:在投加量为 500 mg·L<sup>-1</sup>,停留时间为 1.5 h,机械搅拌转速为 12 r·min<sup>-1</sup>时,出水总磷小于 0.5 mg·L<sup>-1</sup>,达到了一级 A 的 排放标准.

关键词: 改性硅藻土;多级 A/O 工艺;深度处理;除磷;尾水
 中图分类号: X 703
 文献标志码: A

水体中的氮磷是微生物的营养源,大量的含磷废水排入水体,引起水体富营养化,最终导致水体出现水华和赤潮现象<sup>[1]</sup>.目前,常用的除磷工艺有化学沉淀法、生物法、吸附法等.其中化学沉淀法产生大量难于脱水污泥,生物法除磷通常出水水质不稳定.吸附法具有较快吸附速度及较强抗干扰能力,成为近年来研究的热点<sup>[2]</sup>.吸附法主要是利用具有大比表面积的吸附材料进行磷的快速吸附.硅藻土就是具有特殊的微孔结构和较大的比表面,表面通常带负电荷<sup>[3]</sup>.加入适量的金属阳离子制成改性的硅藻土,将其定量投加到污水中后,通过脱稳絮凝、物理吸附、沉淀反应等,有效去除废水中的磷<sup>[4]</sup>.本文将改性之后的硅藻土应用于多级 A/O 工艺,探讨除磷效果,为生产实践提供帮助.

## 1 硅藻土的改性

## 1.1 实验装置

采用多级 A/O 工艺的试验装置,如图 1 所示.图 1 中:A 为缺氧区;O 为好氧区;Q 为液体流量计; A/O 工艺为 4 级,每级均有缺氧段和好氧段连接组成,其容积比为 2:3.运行参数各级进水流量均相





Fig. 1 Schematic diagram of multistage A/O process

收稿日期: 2014-10-30

**通信作者:** 何争光(1963-),男,教授,博士,主要从事水处理高级氧化技术的研究. E-mail: hezhengguang163@163. com

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

同,总进水流量为144 L・d<sup>-1</sup>;水温为20℃左右(用恒温加热器控制);水力停留时间平均为12 h;污泥 回流比定为50%;多级 A/O工艺的反应器中污泥质量浓度为3.3 g・L<sup>-1</sup>左右.

机械搅拌澄清池的试验装置,如图2所示.图2中:A为第一絮凝室;B为第二絮凝 室;C为导流室;D分离室.

#### 1.2 试验方法及步骤

采用氯化铁、PAC 对硅藻土(天津光复试 剂厂)改性,通过最终除磷效果确定最佳投配 进水管 比及最佳实验工况.

1)取硅藻土原土和浓盐酸(pH=0.1)按
 1:6的固液比混合并搅拌 12 h,用蒸馏水冲洗至中性,110 ℃下干燥 2 h,研磨过 100 目分目筛,得酸洗硅藻土.

2)采用表面结构法对硅藻土进行改性.
 用磷酸二氢钾水溶液调配模拟含磷污水,pH



图 2 机械搅拌澄清池的装置示意图 Fig. 2 Schematic diagram of mechanical clarifier

值为中性,反应时间 30 min,温度为室温,沉淀时间 45 min,投加量为 0.1 mg · L<sup>-1</sup>.取不同投加量的氯 化铁、PAC 及酸洗硅藻土进行复配,分别测其对磷的去除率,以确定最佳复配比<sup>[5]</sup>.

## 2 多级 A/O 出水的除磷效果

### 2.1 曝气量对除磷效果的影响

在保证化学需氧量(chemical oxygen demand,COD)和氨氮去除效果的前提下,在一定范围内调节 曝气量,研究其对除磷效果的影响<sup>[6]</sup>.在反应器运行过程中,维持进水 COD 值约为 310 mg · L<sup>-1</sup>,总氮 约为 80 mg · L<sup>-1</sup>,总磷约为 5.2 mg · L<sup>-1</sup>,进水 m(C)/m(N)约为 3.8,是低碳氮比污水<sup>[7]</sup>.本次试验选 取的曝气量分别为 0.7,0.5,0.3 m<sup>3</sup> · h<sup>-1[6,8]</sup>,不同曝气量条件下稳定运行 15 d,研究其对总磷去除效 果的影响,结果如图 3 所示.





#### Fig. 3 Total phosphorus removal under different aeration rates

从图 3 可以知道:进水总磷质量浓度为 4.32~6.11 mg • L<sup>-1</sup>,出水总磷质量浓度为 2.33~3.97 mg • L<sup>-1</sup>,曝气量为 0.7,0.5,0.3 m<sup>3</sup> • h<sup>-1</sup>时的平均除磷率分别为 32.67%,38.37%,44.88%;随着曝 气量的降低,除磷率略有上升,但整体来说总磷的去除率不高.

#### 2.2 m(C)/m(N)对除磷效果的影响

在保证 COD 和氨氮去除效果前提下,一定范围内调节 m(C)/m(N),研究其对除磷效果的影响.在反应器运行过程中,将曝气量调整为 0.6 m<sup>3</sup> • h<sup>-1</sup>,维持氨氮约为 70 mg • L<sup>-1</sup>,总磷约为 5.2 mg • L<sup>-1</sup>,通过改变淀粉的投加量来控制 COD 浓度,进而达到调节 m(C)/m(N)的目的<sup>[9]</sup>.本次试验调节 m(C)/m(N)分别为 3,4,6,8,不同 m(C)/m(N)下稳定运行 15 d,研究其对总磷去除效果的影响结果,如图 4



第1期



图 4 不同 m(C)/m(N)下的总磷去除效果

由图 4 可知:随着 m(C)/m(N)的增大,除磷率稳定上升,但在最高除磷率的情况下,出水总磷的平均质量浓度为 1.55 mg • L<sup>-1</sup>,达不到一级 A 排放标准,因而通过深度处理来去除生化出水中的磷是十分有必要的.

## 3 对多级 A/O 出水的深度处理

### 3.1 投加量对尾水的影响

本试验选取投加量分别为 100,200,300,400,500,600 mg • L<sup>-1</sup>,进水流量为 30 L • h<sup>-1</sup>,搅拌速度 为 12 r • min<sup>-1</sup>时,研究机械搅拌澄清池对多级 A/O 工艺二沉池出水的处理效果,每种投加量下稳定运 行 7 d,总磷的去除效果,如图 5 所示.



图 5 不同投加量下尾水中总磷的去除效果

Fig. 5 Removal efficiency of total phosphorus from tail water at different dosages

由图 5 可知:随着投药量的不断增加,机械搅拌澄清池对多级 A/O 工艺二沉池出水中总磷的去除率一直在升高;在投加量为 500 mg • L<sup>-1</sup>时,出水磷的平均值为 0.46 mg • L<sup>-1</sup>,已达到排放标准.

## 3.2 停留时间对尾水的去除影响

停留时间的大小决定了尾水在机械搅拌澄清池中的停留时间的长短,因而是重要的参数之一<sup>[10]</sup>. 试验选取停留时间分别为 1.0,1.5,2.0,2.5 h,改性硅藻土的投加量均为 500 mg • L<sup>-1</sup>,搅拌速度均为 12 r • min<sup>-1</sup>,研究机械搅拌澄清池对多级 A/O 工艺二沉池出水的处理效果,每种停留时间下稳定运行 7 d,其对总磷的去除效果,如图 6 所示.

由图 6 可知:随着停留时间的增大,机械搅拌澄清池对多级 A/O 工艺二沉池出水中总磷的去除率 不断升高,但升高的趋势在逐渐减缓,在停留时间为 1.5 h 时,出水磷已达到排放标准.

## 3.3 搅拌转速对尾水的去除影响

机械搅拌速度是改性硅藻土混凝反应的强度和装置内泥渣循环量的直接反映,是装置的另一个重要的参数<sup>[11]</sup>.试验选取搅拌转速分别为 10,12,15 r • min<sup>-1</sup>,改性硅藻土的投加量均为 500 mg • L<sup>-1</sup>, 停留时间均为 1.5 h,研究机械搅拌澄清池对多级 A/O 工艺二沉池出水的处理效果,不同搅拌转速下稳

Fig. 4 Total phosphorus removal under different m(C)/m(N) ratios







Fig. 6 Removal efficiency of total phosphorus from tail water at different hydraulic retention times 定运行 7 d,其对总磷的去除效果,如图 7 所示.



图 7 不同搅拌转速下尾水中总磷的去除效果

Fig. 7 Removal efficiency of total phosphorus from tail water at different speeds of stirring

由图 7 可知:搅拌转速对装置处理多级 A/O 工艺二沉池出水的总磷去除率的影响较大,过大或过小,都会影响除磷效果;在机械搅拌转速(v)为 12 r • min<sup>-1</sup>时,除磷率相对较高.

## 3.4 经济分析

对于污水处理,改性硅藻土药剂投加量一般为 50 mg • L<sup>-1</sup>,市场价格为 2 000 元 • t<sup>-1</sup>,折合成单位 污水处理的药剂费用为 0.1 元 • t<sup>-1</sup>;铁盐药剂投加量一般为 60 mg • L<sup>-1</sup>,市场价格为 2 400 元 • t<sup>-1</sup>, 折合成单位污水处理的药剂费用为 0.14 元 • t<sup>-1</sup>;PAM 药剂的投加量一般为 10 mg • L<sup>-1</sup>,市场价格为 24 000 元 • t<sup>-1</sup>,折合成单位污水处理的药剂费用为 0.24 元 • t<sup>-1[12]</sup>.

由此可以看出:改性硅藻土较为经济;而且采用改性硅藻土最终产生的污泥与另外药剂产生的污泥 相比,脱水性能较好,从而节省了污泥的处理费用;处理之后含有硅藻土的污泥也可易回收利用,前景广 阔.

## 4 结论

1)试验选取的曝气量为 0.7,0.5,0.3 m<sup>3</sup> • h<sup>-1</sup>,研究不同曝气量对总磷去除效果的影响,进水总磷 质量浓度为 4.30~6.11 mg • L<sup>-1</sup>,出水总磷质量浓度为 2.33~3.97 mg • L<sup>-1</sup>.随着曝气量的降低,除 磷率略有上升,但总的说来总磷的去除率较低.

2) 试验调节 m(C)/m(N)分别为 3,4,6,8,随着 m(C)/m(N)的增大,除磷率稳定上升,但在最高除 磷率的情况下,出水总磷的平均质量浓度为 1.55 mg • L<sup>-1</sup>,不能达标排放,因此,通过深度处理是十分 有必要的.

3)采用机械搅拌澄清池,深度处理尾水时,改性硅藻土的投加量、进水流量、搅拌转速都会影响装置的去除效果.在兼顾经济的原则下,在投加量为 500 mg • L<sup>-1</sup>,停留时间为 1.5 h,机械搅拌转速为 12 r • min<sup>-1</sup>时为最佳工况.此时,对总磷的去除率分别为 79.06%,出水总磷小于 0.5 mg • L<sup>-1</sup>,达到了一级 A 的排放标准.

#### 参考文献:

- [1] 杜勤,赵保全,朱家义.水体富营养化控制手段及防治实例[J].工业水处理,2005,25(9):20-22.
- [2] 孙梦,张培玉,张晨.城市污水的除磷技术分析[J].水处理技术,2010,36(8):16-20.
- [3] 潘红霞,杨义,肖传山. 污水处理中硅藻土的应用[J]. 科技资讯, 2010(14): 150-151.
- [4] 王玉芬,时艳,王英杰.复合硅藻土絮凝剂的制备与处理污水试验研究[J].吉林地质,2004,23(3):90-93.
- [5] 张丽芳. 表面改性硅藻土吸附水中活性艳红的研究[J]. 电镀与精饰, 2010, 32(9): 41-43.
- [6] 孙月鹏,王火青,孙广垠,等.不同污泥龄条件下多级 AO 工艺强化生物脱氮性能研究[J].水处理技术,2014,10 (10):47-52.
- [7] 李常留,张兴文,徐鹏飞.阶段流入式多级 A/O 生物脱氮工艺设计及应用[J].环境工程,2010,28(2):45-48.
- [8] 彭峰,彭永臻,马勇. A/O工艺曝气量控制及 pH 和 DO 的变化规律[J].环境工程,2007,25(4):31-37.
- [9] 楼海婷,高航,高俊发.多段多级 AO 工艺在污水处理技术中的探讨[J].水处理技术,2013,9(12):36-38.
- [10] 邱慎初,丁堂堂.分段进水的生物除磷脱氮工艺[J].中国给水排水,2003,19(4):32-36.
- [11] 葛士建,彭永臻.连续流分段进水工艺生物脱氮除磷技术分析及优化控制[J].环境科学学报,2009,29(12):2465-2470.
- [12] 赵崇山,田欣,潘红霞.A/O+硅藻强化新工艺在中小型城镇污水处理中的应用总结[J],环境科学与管理,2010, 35(3):91-95.

# Optimization of Phosphorus Removal from Multistage A/O Process with Modified Diatomite and Advanced Treatment of Phosphorus Removal in Tail Water

MA Cui, HE Zheng-guang, ZHANG Bi-xi

(School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** After acid purification, the diatomite was modified with the mixture of PAC and ferric chloride by surface structure method. The effects of modified diatomite dosage, retention time, and the mechanical stirring speed on the phosphorus removal from tail water were investigated using the modified diatomite to treat the effluent after multistage A/O process. The results showed that the optimal dosage was 500 mg  $\cdot$  L<sup>-1</sup>, the hydraulic retention time was 1.5 h, and the optimum mechanical stirring speed was 12 r  $\cdot$  min<sup>-1</sup>. In this case, the total phosphorus in the effluent was less than 0.5 mg  $\cdot$  L<sup>-1</sup>, and reached the emission standard of A.

Keywords: modified diatomite; multistage A/O process; advanced treatment; phosphorus removal; tail water

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 刘源岗)

文章编号:1000-5013(2015)01-0060-04

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.01.0060

# 抗氧化剂阿魏酸自组装金 纳米颗粒的体外抗氧化

张晗1,李砚超2,姜玉刚2,杜立波2,施维1,刘扬2

(1. 吉林大学 分子酶学工程教育部重点实验室,吉林 长春 130012;2. 中国科学院化学研究所 分子动态与稳态结构国家重点实验室,北京 100190)

摘要: 对纳米阿魏酸抗氧化剂在巨噬细胞上的抗氧化保护作用进行检测,并采用电子顺磁-自旋捕获技术和 光谱法对纳米阿魏酸在细胞水平上清除自由基的能力进行检测.实验结果表明:与抗氧化剂单体相比,纳米阿 魏酸抗氧化剂可以更为有效地清除由细胞外界叔丁基过氧化物(t-BuOOH)刺激所产生的活性氧自由基.同 时,通过光谱法对细胞膜脂质过氧化物指标丙二醛进行检测,证明纳米抗氧化剂可以更为有效地保护经受外 界刺激的巨噬细胞.通过自组装方式可将抗氧化剂纳米化有利于提高抗氧化剂的抗氧化水平. 关键词: 电子自旋共振;抗氧化剂;自旋捕获;纳米金;脂质过氧化

**中图分类号:** O 482.53 **文献标志码:** A

氧化应激是很多慢性疾病如癌症、动脉粥样硬化和神经退行性疾病等的重要诱因之一<sup>[1-2]</sup>. 抗氧化剂对这些疾病的抵御作用吸引学者们对其进行了广泛的研究<sup>[3-5]</sup>,并且促进了用于治疗氧化应激相关疾病的新型抗氧化剂的开发. 抗氧化剂的体内抗氧化活性强弱是其应用于疾病治疗的决定因素之一<sup>[6]</sup>. 因此,目前大部分抗氧化剂研究主要集中于高活性抗氧化剂的设计和合成<sup>[7]</sup>. 然而,尽管已有大量高活性的抗氧化剂出现,但这些抗氧化剂常常伴随着不可预期的细胞毒性等生物相容性问题<sup>[8-9]</sup>. 如何在不改变抗氧化剂功能基团的前提下,增强其抗氧化活性并且最大程度提高其生物相容性,对于抗氧化剂的设计和应用具有重要的意义. Du 等<sup>[10]</sup>为这一问题的解决提供了一种可行的方案,即将抗氧化剂自组装到纳米颗粒表面后,在不改变功能基团的前提下,实现抗氧化活性的提高. 然而该纳米抗氧化剂的生物相容性还不理想,限制了其在生物体内的广泛应用. 为此,在前期工作的基础上,设计并合成了一种聚乙二醇作为配基、阿魏酸功能化的具有高生物相容性的纳米抗氧化剂,进一步检验这一高生物相容性的纳米

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料

试剂.佛波酯(PMA)、L-精氨酸(L-Arg)、N-硝基-L-精氨酸(N-L-Arg)(美国 Sigma 公司);氯金酸 (沈阳市金科试剂厂);微量丙二醛 (MDA) 检测试剂盒(南京碧云天生物科技有限公司);自由基捕获探 针 BMPO 和纳米阿魏酸为本实验室合成;其余试剂均购自北京化学试剂公司.

仪器. Burker ESP 300 型顺磁共振波谱仪; Hitachi UV 3310 型紫外-可见分光光度计.

## 1.2 电子自旋共振(ESR)捕获实验

用含 10% 胎牛血清的 DMEM 完全培养基培养 RAW 264.7 细胞,待细胞生长至 80% 融合度时,消化离心,并用 pH 值为 7.4 的 PBS 缓冲液悬浮,调整细胞密度为 5.0×10<sup>6</sup> cell • mL<sup>-1</sup>. 每孔 1 mL 细胞

**收稿日期:** 2014-07-02

通信作者: 杜立波(1980-),男,副研究员,主要从事自由基与生命科学的研究. E-mail:dulibo@iccas. ac. cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31300697,91227122)

悬液置于 12 孔培养板内,分别设置空白对照组、PMA 对照组和药物保护组,加入相同浓度的 L-Arg(用 PBS 配制,0.1 mmol·L<sup>-1</sup>)孵育 30 min,每组设 3 个重复.药物保护组分别加入阿魏酸(或者纳米阿魏 酸),混匀并孵育 1 min 后,加入 20  $\mu$ g·mL<sup>-1</sup> PMA,随即进行 ESR 测试.

#### 1.3 MDA 测试实验

含 10%胎牛血清的 DMEM 完全培养基悬浮 RAW 264.7 细胞,调整细胞密度为 1.0×10<sup>5</sup> cell • mL<sup>-1</sup>,每孔 3 mL 细胞悬液接种于 6 孔培养板,每组设 3 个重复.待细胞贴壁生长 12 h 后,弃去原培养液,分别加入含一定浓度阿魏酸和纳米阿魏酸的培养基孵育 2 h,之后加入相同浓度的 t-BuOOH(用含 2%胎牛血清的 DMEM 维持培养基配制).作用 1 h 后,裂解细胞,用微量 MDA 测定试剂盒进行检测.

## 2 结果与讨论

#### 2.1 纳米抗氧化剂的体外抗氧化保护实验

PMA 刺激巨噬细胞除产生一氧化氮自由基外,还会产生大量的超氧自由基,而超氧阴离子自由基 又极易与 NO 反应,生成过氧亚硝基自由基,从而造成蛋白和 DNA 的损伤,引起细胞的凋亡<sup>[11-12]</sup>.因此,PMA 刺激巨噬细胞产生超氧自由基可以作为评价细胞产生氧化应激的模型.以此模型为例,检测 了抗氧化剂保护的金纳米颗粒在细胞层面的抗氧化保护效果.

目前,细胞自由基清除效果可用活性氧荧光探针,通过检测细胞活性氧荧光强度的变化来判断<sup>[13]</sup>, 然而金纳米颗粒容易造成荧光的淬灭,会对荧光检测产生干扰<sup>[14]</sup>.因此,采用电子顺磁-自旋顺磁共振 (ESR-spin trapping)法,通过间接检测自旋捕获探针捕获自由基信号强度的变化,实现细胞层面上的抗 氧化保护效果评价.首先,在 BMPO<sup>[15]</sup>存在下,用 PMA 刺激经 *L*-Arg 孵育的巨噬细胞.一方面,刺激细 胞产生 NO (约 1.8 µmol•L<sup>-1</sup>)<sup>[16]</sup>;另一方面,PMA 可以直接刺激 NADPH 酶产生超氧阴离子自由 基. NO 易与超氧阴离子自由基反应形成过氧亚硝酰自由基,而且 NO 与超氧阴离子自由基的反应速率 较快(10<sup>9</sup>(mol•s)<sup>-1</sup>)<sup>[17]</sup>,但使用的 BMPO 捕捉剂的浓度高达 100 mmol•L<sup>-1</sup>,其捕获超氧的速率为 10<sup>2</sup>(mol•s)<sup>-1</sup>[18]</sup>.同时,考虑到刺激产生的 NO 与超氧阴离子之间的扩散速率因素,所以通过 BMPO 捕获实验,仍可以得到超氧阴离子自由基加合物的信号.在此条件下,提前加入 SOD 孵育后,可以明显 地观察到自由基加合物的信号峰消失,进一步说明 BMPO 捕获的是超氧阴离子自由基.

随着 L-Arg 浓度(0~2 mmol·L<sup>-1</sup>)的增加,其超氧自由基加合物的信号也逐渐增加,这表明 PMA 刺激巨噬细胞产生超氧阴离子自由基有可能依赖于 NO 的产生.前期研究中也证明,随着 L-Arg 量的增加,巨噬细胞内产生的 NO 量也逐渐增加<sup>[16]</sup>,而且 NO 的产生与 ROS 的产生有着密切的关系,其浓度每增加 1 倍,ROS 增加约 1.5 倍<sup>[19]</sup>.加入 L-Arg 的抑制剂 N-L-Arg,可以观察到超氧自由基加合物的信号出现了明显的降低,进一步说明 NO 的产生与超氧阴离子自由基的产生有着密切的联系.综上所述,这种由 PMA 刺激巨噬细胞的模型可以用于细胞的抗氧化保护检测.在本实验中,金纳米颗粒的浓度指的是其表面抗氧化剂阿魏酸的总浓度,这样方便与游离抗氧化剂进行抗氧化活性的比较.分别考察不同浓度纳米阿魏酸(Au@Ferulic)和阿魏酸单体对细胞内产生活性氧的浓度效应,如图 1,2 所示.图 1 中:c 是阿魏酸的浓度; I(ESR)是电子自旋共振波谱的强度.图 2 中的 ESR 条件:微波功率为 12.9 mW;信号增益为 1×10<sup>4</sup>;调制幅度为 0.1 mT;扫宽为 10 mT;时间常数为 0.164 s;扫描时间为 84 s.

实验结果表明:只需要 30 μmol・L<sup>-1</sup>的纳米阿魏酸就可以达到细胞内所产生活性氧的半数抑制 率;相反,对于单体而言,其清除活性氧的浓度则需要 150 μmol・L<sup>-1</sup>.由此可知,将阿魏酸包裹在金纳 米颗粒上与阿魏酸单体相比,能够显著提高细胞内活性氧自由基清除速率.

#### 2.2 抑制细胞脂质过氧化实验

为进一步验证 Au@Ferulic 在细胞层面的抗氧化保护效果,利用硫代巴比妥酸(TBA)法对细胞内的脂质过氧化产物丙二醛(MDA)进行了检测,结果如图 3 所示.由图 3 可知:由 t-BuOOH 处理的巨噬细胞组,其 MDA 值增长了 4 倍;而由阿魏酸单体和纳米阿魏酸处理的巨噬细胞,与 t-BuOOH 处理组相比,其 MDA 值分别降低了 39.2%和 60.5%.由此可知:抗氧化剂特别是纳米抗氧化剂,可以明显地抑制 t-BuOOH 引起的细胞脂质过氧化损伤,起到保护细胞免受氧化应激的作用.大量实验表明:金纳米







颗粒易于通过内吞作用进入细胞内,达到在细胞内富集的 作用<sup>[20]</sup>;金纳米颗粒表面 PEG 化也有利于提高金纳米颗 粒在体内的循环时间和药物的生物相容性,进而增加药 效<sup>[21]</sup>.因此,纳米抗氧剂产生高抗氧化活性的原因可能是 抗氧化剂纳米化后更易透过细胞膜进入细胞内,从而快速 发挥抗氧化作用.

## 3 结束语

以设计合成的抗氧化剂阿魏酸保护的金纳米颗粒为 基础,利用电子顺磁-自旋顺磁共振法对其在细胞层面上 的抗氧化效果进行了检测.证明了纳米抗氧化剂可以有效 地抑制由外界刺激所产生的活性氧对细胞的损害.结果表 明:纳米抗氧化剂具有潜在的生物学应用前景,更为重要 的是,通过将抗氧化剂修饰到纳米颗粒表面来制备纳米抗 氧化剂的方式,为新型抗氧化剂的设计和合成提供了一种全新的策略.



图 2 不同浓度纳米阿魏酸和阿魏酸 清除细胞内自由基(O<sub>2</sub>·<sup>-</sup>)的 ESR 谱图 Fig. 2 Cellular free radical (O<sub>2</sub>·<sup>-</sup>) scavenging



### 参考文献:

- [1] HALLIWELL B, GUTTERIDGE J M C. Free radicals in biology and medicine[M]. New York: Oxford University Press, 1999:617-783.
- [2] SIES H. Antioxidants in disease mechanisms and therapy[M]. San Diego: Academic Press, 1997:1-691.
- [3] MARGAILL I, PLOTKINE M, LEROUET D. Antioxidant strategies in the treatment of stroke[J]. Free Radic Biol Med, 2005, 39(4): 429-443.
- [4] PRYOR W A. Vitamin E and heart disease: Basic science to clinical intervention trials[J]. Free Radic Biol Med, 2000,28(1):141-164.
- [5] BURTON G W, INGOLD K U. Vitamin E: Application of the principles of physical organic chemistry to the exploration of its structure and function[J]. Acc Chem Res, 1986, 19(7): 194-201.
- [6] HABTEMARIAM S. Methyl-3-O-methyl gallate and gallic acid from the leaves of peltiphyllum peltatum: Isolation and comparative antioxidant, prooxidant, and cytotoxic effects in neuronal cells[J]. J Med Food, 2011, 14(11): 1412-1418.
- [7] MUKAI K,OKABE K,HOSOSE H. Synthesis and stopped-flow investigation of antioxidant activity of tocopherols: Finding of new tocopherol derivatives having the highest antioxidant activity among phenolic antioxidants[J]. J Org Chem, 1989, 54(3):557-560.
- [8] CERECETTO H, LOLEZ G V. Antioxidants derived from vitamin E: An overview[J]. Mini-Rev Med Chem, 2007,

7(3):315-338.

- [9] NIE Zhou, LIU Ke-jian, ZHONG Chuan-jian, et al. Enhanced radical scavenging activity by antioxidant-functionalized gold nanoparticles: A novel inspiration for development of new artificial antioxidants[J]. Free Radic Biol Med, 2006, 43(9):1243-1254.
- [10] DU Li-bo, SUO Si-qin-gao-wa, WANG Guang-qing, et al. Mechanism and cellular kinetic studies of the enhancement of antioxidant activity by using surface-functionalized gold nanoparticles[J]. Chem Eur J, 2013, 19(4):1281-1287.
- [11] BEDARD K, KRAUSE K H. The NOX family of ROS-generating NADPH oxidases: Physiology and pathophysiology[J]. Physiol Rev, 2007, 87(1):245-313.
- [12] ROTA C, CHIGNELL C F, MASON R P. Evidence for free radical formation during the oxidation of 2',7'-dichlorofluorescin to the fluorescent dye 2',7'-dichlorofluorescein by horseradish peroxidase: Possible implications for oxidative stress measurements[J]. Free Radic Biol Med, 1999, 27(7/8):873-881.
- [13] ERATHODIYIL N, YING J Y. Functionalization of inorganic nanoparticles for bioimaging applications [J]. Acc Chem Res, 2011, 44(S1): 925-935.
- [14] 刘扬,杜立波.中国自由基捕获技术发展 30 年[J].波谱学杂志,2010,27(1):39-50.
- [15] 王广清,杜立波,刘扬,等.链接琥珀酰亚胺的线性硝酮的合成与 ESR 研究[J].波谱学杂志,2010,27(1):80-87.
- [16] LI Hai-tao, HU Jun-gai, XIN Wen-juan, et al. Production and interaction of oxygen and nitric oxide free radicals in PMA stimulated macrophages during the respiratory burst[J]. Redox Report, 2000, 5(6): 353-358.
- [17] AMATORE C, ARBAULT S, BOUTON C, et al. Real-time amperometric analysis of reactive oxygen and nitrogen species released by single immunostimulated macrophages[J]. ChemBioChem, 2008, 9(9):1472-1480.
- [18] VILLAMENA F A, XIA S J, MERLE J K, et al. Reactivity of superoxide radical anion with cyclic nitrones: Role of intramolecular H-bond and electrostatic effects[J]. J Am Chem Soc, 2007, 129(26):8177-8191.
- [19] ZHAO Kai, HUANG Zhen, LU Hong-ling, et al. Induction of inducible nitric oxide synthase increases the production of reactive oxygen species in RAW 264.7 macrophages[J]. Biosci Rep, 2010, 30(4):233-241.
- [20] MA Xiao-wei, WU Yan-yang, JIN Shu-bin, et al. Gold Nanoparticles induce autophagosome accumulation through size-dependent nanoparticle uptake and lysosome impairment[J]. ACS Nano, 2011, 5(11): 8629-8639.
- [21] OH E, DELEHANTY J B, SAPSFORD K E, et al. Cellular uptake and fate of PEGylated gold nanoparticles is dependent on both cell-penetration peptides and particle size[J]. ACS Nano, 2011, 5(8):6434-6448.

## In Vitro Antioxidant Activity Study of Ferulic Acid Self-Assembled Gold Nanoparticles

# ZHANG Han<sup>1</sup>, LI Yan-chao<sup>2</sup>, JIANG Yu-gang<sup>2</sup>, DU Li-bo<sup>2</sup>, SHI Wei<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Molecular Enzymology and Engineering, the Ministry of Education,

Jilin University, Changchun 130012, China;

 State Key Laboratory for Structural Chemisty of Unstable and Stable Species, Institute of Chemistry Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** The antioxidant protection effects of ferulic acid nanoantioxidant on macrophage cells were studied and the free radical—inhibiting activities of ferulic acid nanoantioxidant were determined at the cellular level using electron spin resonance-spin trapping and UV-spectrum method. The results illustrates that the nanoantioxidant could eliminate the reactive oxygen species stimulated by t-BuOOH in cells more effectively than that of antioxidants monomers. Meanwhile, the lipid peroxide detection of malondialdehyde by spectrum method also proved that the nanoantioxidant have a high antioxidant activity on t-BuOOH stimulated macrophage cells. Therefore, it could be concluded that the self-assembled nanoantioxidant have a potential for the enhancement of antioxidant activity.

Keywords: electron spin resonance; antioxidant; spin trapping; gold nanoparticles; lipid peroxide

**文章编号:**1000-5013(2015)01-0064-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.01.0064

# FRP 与砖界面粘结性能的数值分析

黄奕辉<sup>1</sup>,罗才松<sup>2</sup>,黄田良<sup>1</sup>

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;2. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 利用有限元软件 ABAQUS 建立纤维复合材料(FRP)-砖界面分析模型,模拟其粘结应力分布,加载端 荷载-位移曲线及界面应力的传递过程,并与试验结果进行对比分析.结果表明:数值模拟结果与试验结果吻 合较好,采用的 FRP-砖界面计算模型具有可行性;粘结承载力随着 FRP 与砖粘结长度的增加而增加,当粘结 长度达到某一定值后,粘结承载力基本不增长,此时增加粘结长度可改善试件的延性,增加试件的极限位移. 关键词: 纤维复合材料;砖;界面;数值分析

**中图分类号:** TU 398 文献标志码: A

纤维复合材料(FRP)与砌体之间的界面粘结性能对 FRP 加固砌体结构起着至关重要的作用<sup>[1-5]</sup>, 而粘结强度是其决定性因素.FRP-砖的界面粘结性能是两种材料共同工作的关键,其发生的剥离破坏 属于界面破坏问题,牵涉到复杂的几何非线性、材料非线性、裂缝扩张及断裂等力学行为,很难直接量测 界面行为.在试验方面,很难通过试验方法观测界面下砖内部微裂缝的发生及发展过程,进而很难对界 面剥离破坏进行研究和机理讨论;在理论方面,界面非线性行为和砖材料的离散性导致无法获得理想的 解析解<sup>[4]</sup>.为了更深层次地了解 FRP 与砖之间的粘结应力分布规律,并解释其内在机理,本文运用通用 有限元软件 ABAQUS 分析模拟 FRP-砖界面粘结性能.

## 1 复合材料数值分析方法

基于 ABAQUS 的复合材料模型建模是使用内聚力模型模拟裂纹的产生和扩展,在预计产生裂纹 的区域加入内聚力层,即粘结层.粘结界面应力数值分析主要有以下两种方法<sup>[6]</sup>:1)建立完整的结构,

切割出一个薄层来模拟内聚力单元,内聚力单元 与其他单元公用节点,并以此传递力和位移(图 1);2)分别建立内聚力层和其他结构部件的实 体模型,通过"tie"绑定约束,使得内聚力单元两 侧的单元位移和应力协调(图 2).

上述两种方法都可以模拟复合材料粘结界 面的分层失效问题.但是,第一种方法划分网格 比较复杂;第二种方法分配材料属性简单,划分 网格也方便,但装配及"tie" 绑定约束很繁琐.因 此,在实际建模中,应根据实际结构选取较简单



Fig. 1 Common node Fig. 2 Binding through the "tie"

的方法. 文中采用的普通烧结砖和 FRP 属于不同的单元类型,所以选用第二种方法建立 FRP-砖的界面 粘结模型.

**收稿日期:** 2014-10-05

通信作者: 黄奕辉(1962-),男,教授,博士,主要从事结构抗震及加固的研究.E-mail:huangyihui@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51208219); 福建省教育厅科研基金资助项目(JA13218)

## 2 FRP-砖有限元模型的建立

#### 2.1 单元类型的选择

2.1.1 砖单元类型 在仿真模拟分析中,烧结砖采用实体单元 C3D8R.该单元有 8 个节点,每个节点 有 3 个平动自由度,即 UX,UY,YZ 三个方向的线位移.采用实体单元 C3D8R 模拟烧结砖位移计算结 果较精确,不易发生剪切自锁,且当网格发生较大变形时,分析精度不会受到明显影响<sup>[7]</sup>.

2.1.2 纤维布单元类型 纤维布采用壳体 S4R 单元.该单元有 4 个节点,每个节点有沿着 X,Y,Z 轴 平移的 3 个自由度.在 ABAQUS 中,壳体有 5 种截面特性:homogeneous(均匀的),composite(复合的),membrane(膜),surface(表面),general shell stiffness(广义壳刚度)等<sup>[8]</sup>.

2.1.3 界面单元类型 界面层采用 COH3D8 单元.内聚力单元理解为 <u>3</u> 一种准二维单元,看作被一个厚度隔开的两个面.这两个面分别和其他 实体单元连接.内聚力单元只考虑面外的力,包括法向的正应力及 XZ, YZ 两个方向的剪应力<sup>[9-10]</sup>,如图 3 所示.图 3 中:1,3 分别为上下两个连 <u>3</u> 续的实体单元;2 为内聚力单元;4,6 分别为内聚力单元的顶面和底面.

#### 2.2 材料模型的选择

2.2.1 砖材料模型 在 ABAQUS 程序中,砖材料需要输入砖的弹性 模量  $E_m$ ,泊松比  $v_m$ 等参数.其中: $E_m = 784 f_m$ ,烧结砖的强度  $f_m$  通过对 砖进行回弹试验确定<sup>[11]</sup>.砖材料的输入参数:砖的尺寸为 12.8 mm;抗 压强度为 10.035 2 GPa;弹性模量 0.15 N·mm<sup>-1</sup>;泊松比为 0.15.



65

图 3 八节点三维内聚力单元 Fig. 3 Eight node threedimensional cohesive unit

2.2.2 纤维布材料模型 纤维布作为一种正交异性的理想线弹性材 4mmensional concisive unit 料,没有屈服强度,其应力-应变关系是一条直线.当其应力达到极限强度时,纤维布发生破坏.在

ABAQUS程序中,纤维布材料的输入参数:计算厚度为 0.130 mm;抗拉强度为 3.720 GPa;弹性模量为 235 kN•mm<sup>-1</sup>;泊松比为 0.3.

2.2.3 界面层材料模型 应用 Cohesive 单元模拟复合材料界面失效,有两种材料模型:一是基于连续体描述;二是基于 Traction-Separation 描述. 文中采用基于 Traction-Separation 描述方法. 在此方法中,给出了材料达到强度极限前的线弹性段和材料达到强度极限后的刚度软化阶段. 在定义内聚力的力学性能时,要求解出有关内聚力模型的参数,如最大粘结剪应力、界面粘结断裂能和特征位移、最大粘结位移等. 内聚力单元的断裂能和应力随着预定义的张力-位移曲线的不同而变化,当应力减小为零时,单元失效破坏.

损伤准则为 ABAQUS 计算分析提供了一个界面开始破坏时的判决依据. 当模型界面处于损伤准则的情况下,界面开始出现裂纹直至破坏. ABAQUS 为内聚力单元设置了 6 种损伤判断: maxs damage, maxe damage, quads damage, quade damage, maxps damage, maxpe damage. 根据试件所用材料的属性,采用 maxs damage 进行分析. 内聚力单元完全失效的裂纹扩展判据是指单元的断裂能达到临界值, 或者位移值达到最终破坏值. maxs damage 损伤准则的表达式为 max{ $t_n/t_n^0, t_s/t_s^0, t_t/t_t^0$ }=1. 式中:  $t_n^0, t_s^0, t_t^0$ 分别为 I型, II型, III型的最大名义应力.

#### 2.3 建立整体模型

FRP-砖的单元网格划分,如图 4 所示.有限元 计算模型,如图 5 所示.图 5 中:砖和 FRP 的几何 尺寸均与试验构件一致.

## 3 结果与讨论

#### 3.1 粘结承载力模拟值与试验值的比较

文献[12]进行了大量的 FRP-砖界面粘结性能

单剪试验研究,分析了粘结长度、粘结宽度和层数、砖抗压强度、FRP种类、不同粘结树脂等参数对界面 粘结性能的影响.粘结承载力模拟值与试验值的对比,如表1所示.表1中:/为粘结长度;p为砖的平均

图 4 单元网格划分图



Fig. 4 Finite element mesh Fig. 5 Finite element model

图 5 有限元计算模型

强度;n为粘结层数;F,为承载力的试验值;F<sub>t</sub>为承载力的模拟值;n为误差.所有试件的粘结宽度均为 40 mm. 由表 1 可知:模拟得到的粘结承载力与试验值较吻合,只有个别试件的误差相对较大,但也在可 接受的范围内.误差产生的主要原因:试件制作过程的不确定性和试验加载过程中加载速度的不一致 性:砖的离散型和非均质性造成的误差直接影响砖参数的确定,再次产生误差.

Tab. 1 Comparison between experimental results and simulation values

试件编号	试验目的	$l/\mathrm{mm}$	FRP 类型	p/MPa	n	$F_{ m r}/{ m kN}$	$F_{ m th}/ m kN$	$\eta$ / $^{0}$ /0
C1L4W4		40		9.6		5.195 37	4.865 16	6.35
C1L6W4	粘结长	60	CEDD	11.8	1	9.813 43	8.827 92	10.04
C1L8W4	度影响	80	UFKP	12.7	1	11.609 37	9.83377	15.29
C1L10W4		100		13.0		10.166 20	9.429 52	7.25
C2L8W4	粘结层	80	CEDD	12.0	2	12.314 90	12.115 40	1.62
G1L4W4	数影响	100	ULKL	16.3	2	9.813 50	10.684 60	8.88
C2L10W4 G1L6W4				11.8		5.708 50	6.835 40	19.70
		40		13.6		8.830 00	8.065 29	8.66
	砖强度		CEDD	27.2	1	9.086 50	8.752 33	3.68
	的影响		GFKP	11.9	1	8.573 40	8.996 70	4.94
		60		16.7		9.642 40	10.378 40	7.63
				27.5		11.630 70	11.340 10	2.49

## 3.2 粘结面上的应力分布规律

C1L4,C1L6,C1L8 达到粘结承载力时,烧结砖、纤维布、界面层的应力分布云图,如图 6~8 所示. 由图 6~8 可知:在达到粘结承载力时,界面粘结剪应力主要存在于距加载端 20 mm 以上的部分,沿粘 结界面长度方向先慢慢增大,而后逐渐减小,且随着粘结长度的增加,粘结剪应力沿粘结界面长度方向 逐渐减小的区域也相应地增加.由于在载荷加载的后期,粘结界面靠近加载端的区域已经产生了裂纹甚 至剥离,所以在加载端附近的界面剪应力很小.



(a) 烧结砖

(b) 界面层 图 6 C1L4 试件应力分布云图 Fig. 6 Stress distributions of C1L4



(b) 界面层 图 7 C1L6 试件应力分布云图 Fig. 7 Stress distributions of C1L6

(c) FRP 纤维布

(c) FRP 纤维布




由界面层应力分布云图还可知:界面上的粘结剪应力沿粘结层横向不是均匀分布的,在粘结剪应力 沿粘结界面长度方向逐渐增加的区域,中心部分的剪应力大于边缘部分的剪应力;而在粘结剪应力沿粘 结界面长度方向逐渐减小的区域,中心部分的剪应力明显小于边缘部分的剪应力,粘结剪应力大概呈凸 向加载端的圆弧形分布.沿着粘结界面长度方向推进,横向剪应力的部分更趋复杂.

#### 3.3 载荷-位移曲线的比较

在 ABAQUS 的可视化模块中对分析结果进行处理,可得加载端 FRP 中点位置的荷载(F)-位移 (D)关系曲线,如图 9 所示.由图 9 可知:基于 ABAQUS 仿真模拟得到的载荷-位移曲线能够与试验测 得的载荷-位移曲线很好地吻合;粘结承载力随着 FRP 与砖粘结长度的增加而增加,当粘结长度达到某 一定值后,粘结承载力基本不增长,此时增加粘结长度可以改善试件的延性,增加试件的极限位移.



图 9 数值模拟与试验曲线对比



#### 3.4 粘结剪应力传递过程

试件从加载到剥离破坏各阶段,界面上粘结剪应力的传递过程,如图 10 所示.由图 10 可知:随着载荷的增加,粘结剪应力逐渐沿粘结长度方向传递;界面经历弹性阶段、弹性-塑性阶段、弹性-塑性砂段、弹性-塑性动离阶段,并最终发生剥离破坏.以试件 C1L8 为例,粘结剪应力传递过程 有以下 5 个阶段.

1) 载荷为 1. 204 kN,即荷载加载的早期阶段,粘 结应力主要集中在加载端附件区域. 2) 载荷为 2.100~ 5.460 kN时,随着载荷的增加,靠近加载端的界面粘结 应力相应地变大,有效粘结区域也不断扩张,界面处于 弹性阶段. 3) 载荷为 7.700~8.930 kN时,加载端处界





面粘结应力达到极限粘结强度,该处粘结界面进入了软化阶段,粘结应力逐渐变小,有效粘结区域继续向前推移,粘结应力的峰值也朝着背离加载端方向移动,界面处于弹性-塑性阶段.4)载荷为9.430~

10.354 kN时,由于经历前面的几个阶段后,加载端附近已经产生了微小裂纹,继续加载,加载端附近界面粘结应力急剧较小,界面下的微小裂纹也逐渐发展为一条宏观剥离裂纹.当载荷增加非常缓慢的时,这个宏观剥离裂纹逐渐沿粘结长度方向发展,此时有效粘结应力分布区域的长度就是有效粘结长度,界面处于弹性-塑性-剥离状态.5)载荷保持为 10.354 kN,剥离继续发展,有效粘结区域将逐步向自由端移动,直至试件发生剥离破坏.

# 4 结论

1) 基于 ABAQUS 建立的 FRP-砖界面有限元分析模型,成功模拟了 FRP-砖界面粘结应力分布、加 载端荷载-位移曲线和粘结应力的传递过程,并与试验结果进行对比,吻合较好.

2)粘结承载力随着 FRP 与砖粘结长度的增加而增加,当粘结长度达到某一定值后,粘结承载力基本不再增长.由载荷-位移曲线可知:此时增加粘结长度可以改善试件的延性,增加试件的极限位移.

## 参考文献:

- [1] MICHAEL L A, ALAA E E, CHENG J J R, et al. Strengthening of unreinforced masonry walls using FRPs[J]. Journal of Composites for Construction, 2001, 5(2):76-84.
- [2] 王全凤,柴振岭,黄奕辉,等.GFRP 复合材料加固砖墙抗震抗剪承载力[J].华侨大学学报:自然科学版,2009,30 (2):186-190.
- [3] 王欣.纤维复合材料加固砌体墙片的抗震试验研究[D].上海:同济大学,2003:10-50.
- [4] 陆新征.FRP-混凝土界面行为研究[D].北京:清华大学,2004:1-79.
- [5] 王全凤,陈凡,黄奕辉,等.GFRP 加固带壁柱砖墙平面外受荷性能试验[J].华侨大学学报:自然科学版,2007,28 (2):182-187.
- [6] CAMANHO P P, DAVILA C G. Mixed-mode decohesion finite elements for the simulation of delamination in composite materials[J]. National Aeronautics and Space Administration, 2002(6):1-37.
- [7] 蒋超.有限元加筋实体单元求解预应力混凝土梁自振频率方法[J].安徽建筑,2012,4(2):204-205.
- [8] 张建华,丁磊. ABAQUS 基础入门与案例精通[M]. 北京:电子工业出版社,2012:6.
- [9] 马东华. 基于 ABAQUS 中 Cohesive Element 对钢筋混凝土粘结性能的研究[J]. 城市建设理论研究, 2012(8):7-11.
- [10] 马晓峰.有限元分析从入门到精通[M].北京:清华大学出版社,2013:2.
- [11] 刘桂秋,施楚贤. 砌体弹性模量的研究[C]//全国砌体结构与墙体材料基本理论及其工程应用学术会议. 长沙:[出版者不详],2007:122-124.
- [12] 黄奕辉. FRP 与砖界面行为及其应用研究[D]. 厦门:华侨大学,2008:8-34.

# Numerical Analysis of Interface Bonding between Fiber Reinforced Polymer and Clay Brick

# HUANG Yi-hui<sup>1</sup>, LUO Cai-song<sup>2</sup>, HUANG Tian-liang<sup>1</sup>

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

2. College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** A numerical model is proposed to this paper to simulate the bonding stress distribution on the interface between fiber reinforced polymer (FRP) and brick based on finite element software ABAQUS. Using the numerical model, the load-displacement curve and the bonding stress distributions of FRP-brick interface are obtained, which shows the model is feasible. Bond bearing capacity increases with the increase of FRP's bond length. When the bond length reaches a certain value, bond bearing capacity does not increased, but it can improve the ductility of the specimens, and raise the limit displacement.

Keywords: fiber reinforced polymer; brick; interface; numerical analysis

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)

文章编号:1000-5013(2015)01-0069-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.01.0069

# 水泥基快硬瓷砖胶中铝酸盐复合胶凝体系的试验

卢红1,武海龙2,王卫华3

(1. 福建工程学院 土木工程学院,福建 福州 350118;
 2. 凯诺斯(中国)铝酸盐技术有限公司,天津 300457;

3. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 通过改变普通硅酸盐水泥与铝酸盐水泥二元体系的比例,测试瓷砖胶的早期、水养和热养拉伸胶粘强 度的变化趋势,研究两种三元胶凝材料体系对瓷砖胶拉伸胶粘强度的影响.结果表明:以铝酸盐水泥为主的胶 凝材料可满足胶粘强度技术要求.最后,结合其水化结果进行机理分析.

关键词: 硅酸盐水泥;铝酸盐水泥;瓷砖胶;拉伸胶粘强度;复合胶凝体系;快硬性

**中图分类号:** TU 582 **文献标志码:** A

伴随干混砂浆市场的蓬勃发展,水泥基瓷砖胶已经得到了越来越广泛的应用,越来越多的家装公司和工装项目都已经普遍使用水泥基瓷胶作为粘合剂产品发挥粘贴瓷砖的作用<sup>[1-3]</sup>.伴随着瓷砖胶产品的普及,越来越多的专业化产品也被广大客户所要求,其中快硬性修补就是主要的应用方向之一.大型超市、酒店、购物中心、KTV等场所,因为人流量大、闭门时间短,特别需要一种可以快速粘接并且可以尽快达到开放功能的瓷砖胶.本文研发以铝酸盐水泥基为主的瓷砖胶配方,以实现6h拉伸粘接强度达到0.9 MPa,工作时间保持在30 min以上,满足快速修补和快硬需求的快硬性瓷砖胶.

# 1 实验部分

#### 1.1 实验材料

采用国标 48 mm×48 mm 泰陶瓷砖作为测试用标准瓷砖,混凝土界面采用上海增司工贸公司的标 准混凝土板作为测试用基材,各种添加剂采用市售典型产品.铝酸盐水泥(AC)采用凯诺斯公司郑州工 厂生产的 Ternal CC 产品,浅黄色,主要矿物相为 CA,CA2,C12A7,比表面积为 350~400 m<sup>2</sup> • kg<sup>-1</sup>,1 d 抗压强度典型值为 53 MPa.普通硅酸盐水泥(OPC)采用上海海豹 P.O 42.5 等级产品,其主要成分的 质量分数(w)如表 1 所示.

表 1 普通硅酸盐水泥的成分表

Tab. 1 Ingredient list of the ordinary portland cement

成分	$Al_2O_3$	CaO	$\mathrm{SiO}_2$	MgO	$Fe_2O_3$	$\mathrm{SO}_3$	$K_2 O$	$Na_2O$
$w/ \frac{0}{0}$	7.2	56.9	22.9	2.9	2.6	2.0	0.6	0.3

根据 JC/T 547-2005《陶瓷墙地砖胶粘剂》标准要求进行实验测试. 瓷砖的处理方式遵循国家标准 的要求,先将实验陶瓷砖浸水 24 h,沸水煮 2 h,105 ℃烘干 4 h,标准实验条件下至少放置 24 h,实验数 据为 5 块瓷砖测试后的平均值.

#### 1.2 瓷砖胶配比

采用水泥基瓷砖胶配方(质量分数):40%胶凝材料,48%砂,10%重钙粉,1%乙烯-醋酸乙烯胶粉, 0.35%羟丙基甲基纤维素,缓凝剂,促凝剂适量,以40min工作时间为基准调整.其中,胶凝材料总量为

**收稿日期:** 2014-06-16

通信作者: 卢红(1968-),女,讲师,主要从事建筑材料、混凝土外加剂的研究. E-mail:lh\_hong@163. com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51208217);华侨大学中青年教师科技创新计划资助项目(Z14J0020)

18.0

40%,分为二元胶凝材料体系和三元胶凝材料体系.二元胶凝材料体系中铝酸盐水泥质量分数分别为 25.0%,22.2%,20.0%,18.0%,同时降低普通硅酸盐水泥的掺加量保持总体胶凝材料总量为40%;三 元胶凝材料体系中有铝酸盐水泥主导体系和普通硅酸盐水泥主导体系.

0.2

0.1

25.0

f<sub>p</sub>/MPa

# 2 结果与讨论

#### 2.1 二元胶凝材料体系对拉伸胶粘强度的影响

不同养护条件下,考察二元胶凝材料体系(OPC+AC)对拉伸胶粘强度(f<sub>n</sub>)的影响,如图1所示.

从图 1(a)可知:标准养护 6 h 条件下,当复合的二 元胶凝材料体系(OPC+AC)时,虽可以达到快速凝结 硬化的效果,但改变铝酸盐水泥的掺量(w),从 25.0% 调整到 18.0%,6 h 拉伸胶粘强度均低于 0.5 MPa,达不 到标准要求的最低要求值.







Fig. 1 OPC+AC binary cementitious system influence on tensile adhesive strength in different curing 养 6 h 的拉伸胶粘强度值随之降低,即从 0.29 MPa 降低到 0.24 MPa.相比标养条件下,强度有所上升, 普通硅酸盐水泥和铝酸盐水泥在水的养护作用下都会发生更充分的水化反应,生成更完全的水化产物.

从图 1(c)可知:热养 6 h(初凝后烘养至 6 h)条件下,当铝酸盐水泥的掺量从 25.0%调整到 18.0% 时,热养 6 h 的拉伸胶粘强度值和标准养护 6 h 的拉伸胶粘强度值呈一样的变化趋势.即实验数据先增加后减少,强度达到最高值为铝酸盐水泥的掺量 22.2%,其强度 0.52 MPa,而其他的掺量下的强度值集中在 0.3~0.4 MPa 区间内.

在使用铝酸盐水泥的应用场合中,通常被大家所提及的一个问题是强度倒缩或晶型转化<sup>[4]</sup>,在只有 铝酸盐水泥存在的情况下,铝酸盐水泥会水化生成介稳状态的晶型 CAH<sub>10</sub>,C<sub>2</sub>AH<sub>8</sub>.这两个晶型会在高 温、高湿的情况下转化后的稳定晶型的 C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub>,固相体积减少,孔隙率增加,强度降低,造成倒缩.

瓷砖胶的热养温度在 70 ℃,这个温度值已经达到了晶型转化的条件.但是从测试结果看,强度倒缩 的情况不但没有发生,拉伸胶粘强度还有增长.究其原因,这是因为在化学建材的使用场合中,通常都是 胶凝材料共同复合使用.伴随着其他胶凝材料的引入,铝酸盐水泥中的活性矿物相,如 CA,C<sub>12</sub> A<sub>7</sub>, C<sub>4</sub>AF 等会与其他胶凝材料中的活性矿物相反应,不再生成介稳状态的晶型,因而在此没有发生热养后 的强度倒缩,甚至瓷砖脱落等情况的发生<sup>[5]</sup>.

对于 OPC+AC 复合的二元胶凝材料体系,快速硬化做到了,但拉伸胶粘强度值均难于达到 0.5 MPa 的标准要求.因此,二元系统不足以满足早期的拉伸胶粘强度要求.根据对三元胶凝材料系统的研

(a) 标养 6 h

w(AC)/%

20.0

22.2

究,当复合普通硅酸盐水泥,铝酸盐水泥和石膏时,对于铝酸盐水泥为主导的胶凝材料系统应能够满足 标准要求<sup>[6]</sup>.

快硬性瓷砖胶存在一个突出矛盾,既要满足早期的强度的发展,又要满足工作时间的要求.在这种 情况下,铝酸盐水泥主导的三元胶凝材料体系的优势得到体现,即足够的工作时间、初凝终凝时间间距 短、强度的增长迅速.

#### 2.2 三元胶凝材料体系对瓷砖胶性能的影响

三元胶凝材料体系(AC+OPC+C\$:石膏复合使用)是指在胶凝材料中,使用普通硅酸盐水泥 (OPC)、铝酸盐水泥(AC)、石膏(C\$)三种材料复合,通过水化反应,最后生成钙矾石.在三元体系的复 合使用过程中,有两种比例搭配,一种是以普通硅酸盐水泥为主的配方体系,另外一种是以铝酸盐水泥 为主的配方体系,由于胶凝材料的比例不同,最后的水化产物比例亦有差异<sup>[7-8]</sup>,主要表现在钙矾石生成 量的多少.并通过微观检测手段观察水化物物象,对三元胶凝材料体系复合机理进行分析.

采用的三元胶凝材料配方设计为两种,胶凝材料总量控制在瓷砖胶总重的40%以内.配方1是以 普通硅酸盐水泥为主的三元体系,普通硅酸盐水泥22%、铝酸盐水泥12%、石膏6%;配方2是以铝酸 盐水泥为主的三元体系,普通硅酸盐水泥11%、铝酸盐水泥20%、石膏8%.两配方中同时添加适量的 缓凝剂和促凝剂以调整工作时间和凝结时间,可再分散乳胶粉和纤维素醚为普通瓷砖胶的典型掺量.实 验测试结果,如图2所示.

从图 2 的结果可知:以普通硅酸盐水泥为主的三元配方抗压强度略低于以铝酸盐水泥为主的三元 配方,AC 为主的配方抗压强度值在 1 d 就可以达到 10 MPa,突出表现了三元胶凝材料体系早强的技术 特点.同时,抗压强度随着龄期的增加而增长,在标准环境养护到 28 d,抗压强度增长到 20 MPa.

在快硬型瓷砖胶体系中,拉伸胶粘强度指标对现场使用的指导意义更大,是更为关键的技术指标,因此对比了两种不同胶凝材料体系的拉伸胶粘强度的性能表现,图3是拉伸粘接强度的测试结果的性能表现.



adhesive with ternary cementitious system



图 3 三元体系瓷砖胶拉伸胶粘强度



从图 3 的结果可知:以普通硅酸盐水泥为主的配方 6 h 拉伸胶粘强度发展缓慢;水养拉伸胶粘强度 没有增长;在热养拉伸胶粘强度损失很大,这是由于在热养的条件下,砂浆收缩变化很大,导致强度不发 展,在苛刻使用条件下出现了极低的数值.以铝酸盐水泥为主的配方拉伸胶粘强非常突出,性能优异.其 6 h 强度值就可达到接近 1 MPa;随着瓷砖胶龄期增加和浸水养护,强度增长了约 0.5 MPa;在热养测试 条件下,其拉伸胶强度大于 1.0 MPa.

## 3 机理分析

对铝酸盐水泥为主三元胶凝材料体系的早期水化进行了微观分析,以此来观察钙矾石的生成时间 和早期水化的过程.

#### 3.1 加水混合后微观结构

在砂浆加水后 3 min 后取样测试,通过扫描电镜观察水化进行的程度,如图 4 所示.从图 4 可以看出:在加水后的早期阶段,水泥中的活性矿物相开始进行溶解的过程,CA 相已经溶解,并与水生成水化 铝酸四钙(C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub>).水化铝酸四钙的生成有两个可能的来源,即普通硅酸盐水泥中 C<sub>3</sub>A 相的水化和铝酸钙水泥中 CA 相的水化.由于 C<sub>3</sub>A 相的活跃程度要大大的超过 CA 相,因此这里早期 3 min 的 C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub>的来源更多是从普通硅酸盐水泥中 C<sub>3</sub>A 水化而来.即

 $C_3A+Ca(OH)_2+H_2O\rightarrow C_4AH_{13}$ .

同时,从图 4 可看出已经有钙矾石生成.由于 C<sub>3</sub> A 和 CaSO<sub>4</sub> 的溶解,早期有很少的钙矾石已经开始 出现,这些早期形成的微量钙矾石覆盖在水泥颗粒表面,并且形状不完整,生成的量也比较少.

#### 3.2 早期硬化后微观结构

在 6 h 后的瓷砖胶已经具有较高的拉伸胶粘强度,在这个时间点通过扫描电镜测试,观察水化产物的产生情况,如图 5 所示.从图 5 可以看出:在砂浆已经具有很高的拉伸粘结强度时,水化的砂浆内部有大量的钙矾石围绕水泥颗粒生长.即

 $6\mathrm{Ca}^{2+} + 2\mathrm{Al}(\mathrm{OH})_{4}^{-} + 3\mathrm{SO}_{4}^{2-} + 4\mathrm{OH}^{-} + 26\mathrm{H}_{2}\mathrm{O} \rightarrow 3\mathrm{Ca}\mathrm{O} \cdot \mathrm{Al}_{2}\mathrm{O}_{3} \cdot 3\mathrm{Ca}\mathrm{SO}_{4} \cdot 32\mathrm{H}_{2}\mathrm{O}.$ 

图 4 铝酸盐水泥颗粒表面覆盖的 SEM 图 Fig. 4 SEM analysis of aluminate cement particle surface covering 图 5 6 h 铝酸盐水泥为主三元胶凝材料体系 SEM 图 Fig. 5 SEM analysis of aluminate cement dominance ternary cementitious system hydrate for 6 hours

钙矾石的生成让铝酸钙水泥、石膏、普通硅酸盐水泥的水化过程进行得充分、快速;随着 Ca<sup>2+</sup>, SO<sup>2-</sup>等的快速消耗,钙矾石得到更充分的溶解,反应式在不断向右进行的同时也在更多的溶解水化矿 物相<sup>[9]</sup>.因此,硫酸钙、铝酸盐水泥和普通硅酸盐水泥不断的溶解,增加了各个离子的浓度,使成核的速 度更加迅速.

在三元体系中,石膏种类对于水化产物的影响比较小,水化产物的汇总类是相同的,只是生成钙矾 石和其他水化产物存在速度和数量的区别<sup>[10]</sup>.实验中采用的是半水石膏,其溶解速度和溶解度与体系 中铝酸盐水泥和普通硅酸盐水泥匹配,可以达到较好的早期强度.

# 4 结论

通过研究二元、三元胶凝材料体系对瓷砖胶拉伸胶粘强度的影响,得到如下3点主要结论.

1) 二元胶凝材料体系(OPC+AC)通常应用在一些非苛刻需求的快速凝结硬化应用场合,拉伸胶 强度值发展不能满足 6 h 的苛刻需求;二元胶凝材料体系没有负面的影响,强度保持良好,并且在烘养 中强度增长明显.

2) 三元胶凝材料体系(AC+OPC+C\$:石膏复合使用)中,以铝酸盐水泥为主的配方拉伸胶粘强 度表现突出,其6h强度值接近1MPa;水养和热养下,强度值也有不同程度的提高,此配方可以满足快 速凝结硬化低收缩需求的场合;胶凝材料的搭配可以使钙矾石的生成更加充分,并且不会影响开放时间 的需求,调整缓凝剂的添加会更适应不同使用环境的温度要求,满足广泛的使用和施工面积或施工习惯





的取向[11].

3) 从 SEM 微观分析图中可以看到,在水化早期,C<sub>3</sub>A 的溶解速度非常快,产物中有 C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub>生成, 并且有少量的钙矾石开始覆盖在水泥颗粒表面;再进一步水化的过程中,伴随着大量钙矾石的出现发挥 作用,在水化物孔隙中形成了骨架结构,体现出良好的性能.

### 参考文献:

- [1] 科博尔. 先进的瓷砖薄层粘贴技术和瓷砖胶粘剂[J]. 新型建筑材料, 1999(2): 7-9.
- [2] 王培铭. 商品砂浆的研究与应用[J]. 北京:机械工业出版社,2006:11-14.
- [3] 隋同波,文寨军.我国特种水泥的发展及展望[J]. 硅酸盐通报,2005,24(5):52-54.
- [4] 张汉文,陈金川,白瑞峰,等. 矾土水泥混凝土强度下降问题的研究[J]. 硅酸盐学报,1980,8(3):259-269.
- [5] BIER T A, AMATHIEU L. Calcium aluminate cement (CAC) in building chemistry formulations[C]// Con Chem International Exhibition and Conference Conference Proceedings. Düsseldorf: Verlag Für Chemische Industrie, 1997: 29-39.
- [6] 霍世金. 硅酸盐水泥-铝酸盐水泥-石膏三元复合胶凝材料试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2007:35-42.
- [7] MATSCHEI T, LOTHENBACH B, GLASSER F P. Thernmodynamic properties of portland cement hydrates in the system CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-CaSO<sub>4</sub>-CaCO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O[J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(10):1379-1410.
- [8] 张量,李伟.高铝水泥和硅酸盐水泥复合体系凝结硬化性能的试验研究[J].新型建筑材料,2012,39(7):85-88.
- [9] MAIER S. Ternary system: Calcium alumina cement-portland cement-gypsum[C] // Calcium Aluminate cements proceeding of Centenary Conference. Bracknell:IHS BRE Press, 2008:512-526.
- [10] 王培铭. 硅酸盐水泥与铝酸盐水泥混合体系的研究和应用[J]. 材料导报 A:综述篇, 2013, 27(1): 139-143.
- [11] AMATHIEU L,BIER T A,SCRIVENER K L. Mechanisms of set acceleration of Portland cement through CAC addition[C]//Proceedinds of the International Conference on Calcium Aluminate Cements. Edinburgh: IOM Communications Ltd., 2001:303-317.

# Study of Fast Harden Tile Adhesive Mortar with AC Based Binder System

# LU Hong<sup>1</sup>, WU Hai-long<sup>2</sup>, WANG Wei-hua<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Kerneos (China) Aluminate Technologies Company Limited, Tianjin 300457, China;

3. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Changing the ratio of the ordinary portland cement (OPC) to aluminate cement (AC) binary cementitious system ceramic tiles adhesive, the early tensile adhesive strength on conditions of water curing and hot curing were tested. Two types of ternary cementitious system influence on ceramic tiles adhesive tensile adhesive strength were investigated. The results show that aluminate cement dominance ternary cementitious system can meet the technical requests of adhesive strength. At last, the mechanism analysis of the hydration products of AC dominance ternary cementitious system is given.

Keywords: portland cement; aluminate cement; ceramic tiles adhesive; tensile adhesive strength; complex cementitious system; fast setting

(责任编辑:黄仲一 英文审校:方德平)

**文章编号:**1000-5013(2015)01-0074-06

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.01.0074

# 采用等效结构参数的混凝土 试块弹性模量监测

# 郭智刚1,孙智2

(1. 上海应用技术学院 轨道交通学院,上海 201418;2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室,上海 200092)

**摘要:** 基于压电阻抗技术,对混凝土试块弹性模量在固化过程中的发展进行监测实验研究.用阻抗分析仪测 得粘贴在不同配合比的混凝土试块的压电陶瓷片在不同龄期下的电导纳信号,对 28 d 龄期内不同配合比的 混凝土试块进行弹性模量测试.采用共振频率和等效结构参数来评价混凝土固化过程中的变化.通过回归分 析建立等效结构参数与混凝土试块弹性模量之间的关系,监测混凝土弹性模量发展.结果表明:压电阻抗技术 可用来监测混凝土弹性模量在固化过程中的变化.

关键词: 压电阻抗;压电陶瓷;弹性模量;等效结构参数;曲线拟合

**中图分类号:** TU 323.1 **文献标志码:** A

作为混凝土结构设计的重要依据,弹性模量是混凝土的一个主要的力学性质.按照传统的方法,通 常要对混凝土试件进行 28 d标准养护,通过测试,方可获得弹性模量.对于施工现场来说,在获悉弹性 模量之前,常常已经浇灌了某种配合比的大量的混凝土,而不知道它是否满足要求.相反,如果能在浇筑 混凝土后数小时内得到其预期的 28 d弹性模量,就可以采取包括调整配合比等措施控制混凝土的质 量.采用压电阻抗技术预测混凝土的早期弹性模量,对提高施工质量和进度具有实用价值.压电陶瓷 (piezoelectric ceramic,PZT)电-机阻抗技术(electro-mechanical impedance,EMI)以其对结构初始损伤 敏感、对外界环境影响的免疫力强等特点得到了越来越多的关注<sup>[1-4]</sup>. Soh 等<sup>[5]</sup>首次采用 EMI 方法监测 混凝土强度,得出混凝土立方体抗压强度和 EMI 谱的共振频率有很强的关联性. Shin 等<sup>[6-7]</sup>用 EMI 方 法研究了混凝土试块固化过程中强度的变化.研究表明:RMSD(root mean square deviation)指标可用 来评价混凝土强度的变化. Tawie 等<sup>[8]</sup>用 EMI 方法研究了不同混凝土的配合比的影响因素,评价混凝 土强度的变化过程. 蔡金标等<sup>[9]</sup>分别采用表贴式和埋入式压电陶瓷监测混凝土试块强度发展. 但是,以 往的研究只是定性描述混凝土强度的变化,没有注重弹性模量的研究,也没有采用力学模型反映混凝土 在固化过程中的力学行为.本文在以往研究的基础上,针对混凝土早期弹性模量不能确定的情况,对 28 d 龄期内不同配合比的混凝土试块进行弹性模量实验.

# 1 压电阻抗法的工作原理

一维模型模拟 PZT 与混凝土结构之间的相互作用,如图 1 所示. PZT 与混凝土结构耦合作用下的 电导纳公式<sup>[1]</sup>为

$$Y(\boldsymbol{\omega}) = \frac{I}{V} = i\boldsymbol{\omega} \frac{\boldsymbol{\omega}_{a} l_{a}}{h_{a}} \left[ \frac{-T}{\boldsymbol{\omega}_{33}} + \frac{Z_{a}}{Z_{s} + Z_{a}} \right] d_{31}^{2} \overline{E}_{p} \left( \frac{\tan \kappa l_{a}}{\kappa l_{a}} \right) - d_{31}^{2} \overline{E}_{p} \left[ \frac{1}{2} \left[ \frac{Z_{a}}{\kappa l_{a}} \right] \right], \qquad (1)$$

**收稿日期:** 2014-10-13

通信作者: 郭智刚(1984-),男,讲师,主要从事结构健康监测方面的研究. E-mail:zhigangguo@sit.edu.cn.

基金项目: 铁道部科技研究开发计划项目(2012G003-E);上海市科技启明星跟踪项目(09QH1402300);同济大学 土木工程防灾国家重点实验室自主研究课题资助项目(SLDRCE09-B-15)

$$Z_{a} = \frac{\overline{E}_{p} w_{a} h_{a}}{i \omega l_{a}} \cdot \frac{\kappa l_{a}}{\tan \kappa l_{a}}.$$
 (2)

式(1),(2)中: $Y(\omega)$ 为导纳值,能够在 PZT 上测得;I,V分别 为 PZT 的输出电流和电压; $Z_a, Z_s$ 分别为 PZT 和本体结构的 压电阻抗值; $w_a, l_a, h_a$ 分别为 PZT 的宽度、长度和厚度; $\omega$  为 所加激励的角频率; $\kappa = \sqrt{\omega^2 \rho/E_p}, \rho$ 为压电陶瓷的密度; $\overline{E_p} = E_p(1+i\eta)$ 为电场强度  $E_s$ 为零(或常数)时的复弹性模量, $\eta$ 为 机械损耗因数; $d_{31}$ 为压电应变常数; $\overline{\omega_{33}}^T = \omega_{33}^T$ ( $i+i\eta$ )为应力  $T_1$ 为零(或常数)时的复介电常数, $\delta$ 为介电损耗因数.

式(1)中的第一项是 PZT 本身的导纳值,随频率的增加而 逐渐增大;第二项混凝土试块的阻抗 Z<sub>s</sub> 发生变化,而 PZT 粘 贴在混凝土试块上,本身的阻抗 Z<sub>s</sub> 是不变的,因此,混凝土试 块的阻抗值 Z<sub>s</sub> 唯一地决定第二项的数值变化.因此,可以认 为任何导纳信号的改变都是由混凝土试块引起的.

# $V = v \sin(\omega t)$

图 1 PZT-本体结构相互作用的一维模型 Fig. 1 One-dimensional impedance-based model of a PZT patch interacting with a host structure

# 2 结构机械阻抗

实际结构是很复杂的,结构阻抗并不知道.因此,将混凝土试块等效成一个机械系统,而这个等效机 械系统可以理想化为由基本元件(质量、弹簧和阻尼)并联或串联的等效系统<sup>[10]</sup>,通过系统的等效参数 可以确定 PZT-混凝土主体结构系统的参数,从而对混凝土强度发展进行监测.基本元件的机械阻抗为

$$Z_m = i_{\omega}m. \tag{3}$$

$$Z_{\kappa} = -ik/\omega, \qquad (4)$$

$$Z_c = c. (5)$$

式(3)~(5)中: $Z_m$ , $Z_K$ , $Z_C$ 分别为质量元件、弹簧元件和阻尼元件的阻抗值;m为质量;K为刚度;C为 阻尼.

将这些元件按一定规律连接起来,使之能够代表力学模型,又可用于压电阻抗法的计算.其多个阻抗元件并联计算法则为

$$Z_{\rm p} = \sum_{i=1}^{n} Z_i, \qquad (6)$$

多个阻抗元件串联计算法则为

$$\frac{1}{Z_{\mathrm{s}}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{Z_{i}}.$$

# 3 实验过程

#### 3.1 实验设备

试验采用英国 Wayne Kerr 公司生产的 WK6500B 型精密阻抗分析仪来测量 PZT 的电导纳,仪器如图 2 所示.对于 EMI 测量来说,PZT 测量的频率范围在不同的结构有不同的感应范围.研究表明<sup>[2]</sup>:低于 70 kHz 或高于 500 kHz 的频率范围不适合用于健康监测.因此,所有的试验选择的频率范围为 100~400 kHz,采用频率点数为 1 600 个.

(7)

图 2 阻抗分析仪 Fig. 2 Impedance analyzer

# 3.2 实验材料及试件制作

根据规范制作3组强度等级混凝土试块,每组13个试块,共39个试块.每组1个试块中尺寸为150 mm×150 mm×150 mm,12 个尺寸为100 mm×100 mm×300 mm.尺寸为150 mm×150 mm×150 mm的试块用来测从第3d起每天 PZT 的压电导纳信号.其中:12个尺寸为100 mm×100 mm×300 mm 试块用来测在第 3,7,14,28 d 的混凝土弹性模量. 混凝土试块材料及配合比,如表 1 所示. PZT 材料尺寸为 10.0 mm×10.0 mm×0.2 mm;密度  $\rho$  为 7 450 kg·m<sup>-3</sup>;介电常数  $\epsilon_{33}^{T}$ 为 1.859×10<sup>-8</sup> F·m<sup>-1</sup>;压电常数  $d_{31}$ 为-1.85×10<sup>-10</sup> m·V<sup>-1</sup>;弹性模量  $E_{p}$ 为 66.7 GPa;机械损耗因子  $\eta$ 为 0.029 7;介电损耗因子  $\delta$ 为 0.02.

K WORTZELL

Гаb. 1 Concrete mix propo	ortion
---------------------------	--------

参数	Mix A	Mix B	Mix C
水泥强度/MPa	42.5	32.5	32.5
混凝土的类型	碎石混凝土	碎石混凝土	碎石混凝土
粗骨料最大粒径/mm	20	20	20
塌落度/mm	$35 \sim 50$	$35 \sim 50$	$35 \sim 50$
配合比(水:水泥:砂:石子)	0.41 : 1 : 1.271 : 2.466	0.41 : 1 : 1.157 : 2.465	0.55 : 1 : 1.876 : 3.335
质量比	25 : 65 : 85 : 160	25 : 65 : 78 : 160	27 : 50 : 95 : 166

# 4 实验结果

#### 4.1 压电导纳谱分析

3种混凝土标号分别在 3,7,14,28 d 得到的导纳谱,如图 3 所示.由图 3 可知:随着混凝土龄期的增加,PZT 导纳谱曲线渐渐的往右边漂移,峰值对应的共振频率增大,但幅值不断地减小;PZT 测得的 3 种混凝土标号导纳谱共振频率是在 150~250 kHz 之间.因为随着混凝土龄期的增加,混凝土开始固化,弹性模量增加.固化过程促使了混凝土试块增加了额外的刚度,从而使 PZT 的导纳谱发生偏移.这说明了 EMI 技术可以用来监测混凝土弹性模量的变化.





Fig. 3 Three EMI spectra for concrete specimen during curing

阻抗分析仪不仅仅可以直接显示导纳谱,还可以显示导纳谱的共振频率.图4为不同配合比的混凝 土共振频率随着龄期的变化而变化图.由图4可知:这3种配合比的共振频率随着龄期的增长而增大.

为了评估混凝土弹性模量的变化,分别测得不同配合比混凝土试块在 3,7,14,28 d 的弹性模量.不同配合比下随龄期变化而变化的弹性模量,如图 5 所示.由图 5 可知:弹性模量在第 3,7,14 d 增幅最大,而 28 d 的增幅比较小.这跟 PZT 测得的共振频率偏移在固化过程中的现象一致.进一步说明了EMI 技术可以用来监测混凝土弹性模量的变化.

不同水泥强度和配合比的混凝土从 3~28 d 的变化也不相同, Mix A 的强度在 3 种混凝土中是最大的. Mix A 和 Mix B 具有相同的水灰比,但由于水泥强度的不同,混凝土试块的弹性模量和 PZT 测量的共振频率偏移也不相同. 水泥强度越高,混凝土试块的弹性模量和 PZT 测量的共振频率偏移也越大. 类似的, Mix B 和 Mix C 具有相同的水泥强度,但由于水灰比的不同,其弹性模量和 PZT 测量的共振频率偏移也表频 率偏移也不相同. 水灰比越高,混凝土试块的弹性模量和 PZT 测量的共振频率偏移却越小.

#### 4.2 结构阻抗模型分析

由式(1),提取混凝土试块的阻抗.对提取的混凝土试块 Mix A 在第 3 d 的导纳谱进行力学模型分



图 4 不同配合比的共振频率随龄期变化而变化图



图 5 不同配合比下的弹性模量发展

Fig. 4 Effect of curing age on resonant frequency Fig. 5 Elastic modulus development for all mixes 析,发现力学模型 4<sup>[11]</sup>得到的混凝土试块等效阻抗谱与由实验结果提取的混凝土试块阻抗谱吻合度很高,如图 6 所示.力学模型是由质量元件、弹簧元件和阻尼元件并联组成的等效混凝土力学模型,如图 7 所示.



图 6 实验和等效机械阻抗图

(8)

Fig. 6 Plots of experimental and equivalent mechanical impedance 混凝土结构等效阻抗为

x = c,  $y = m\omega - k/\omega$ .

Mix C 和 Mix B 与 Mix A 类似,这里不再列出.

不同配合比下的混凝土试块等效结构参数图,如图 8 所示. 由图 8 可知:跟共振频率类似,随着龄期的增长,混凝土试块的等效阻尼、刚度参数也随之增大;等效阻尼和刚度在第 7,14 d 改变 很大;混凝土试块的等效参数增长的趋势和混凝土试块的弹性模 量增长的趋势类似.因此,通过监测结构等效结构参数的变化来 评判混凝土早期的弹性模量.

图 7 混凝土的等效机械系统 Fig. 7 Equivalent mechanical system for the concrete specimen

C

#### 4.3 经验曲线拟合分析

以上结果表明:等效结构参数只能定性的描述混凝土试块的

弹性模量在固化过程中的变化,还不能做到定量的精确描述.因为等效结构参数与混凝土试块的弹性模量在龄期内的变化有很大的关联,可以建立混凝土试块的相对弹性模量(S/S<sub>a</sub>)与相对等效结构参数指标之间的数学公式关系,从而可以预测混凝土弹性模量在固化过程中变化.根据传统的回归分析表明指数函数是最合适的曲线拟合函数,即

$$S/S_{u} = c_{1} \cdot \exp(c_{2}x). \tag{9}$$

式(9)中:x为相对等效结构参数;c1和 c2分别为经验拟合系数.

相对等效刚度  $\delta K/K$  计算公式为  $\delta K/K = (K_i - K_{28})/K_{28}, i = 3, 7, 14; K_i$  为第 i 天的等效刚度;  $K_{28}$  为第 28 d 的等效刚度,由式(8)计算得到.相对等效阻尼计算公式与相对等效刚度相同.



77



(a) 随龄期变化而变化的等效阻尼

#### (b) 随龄期变化而变化的等效刚度

#### 图 8 不同配合比下的等效结构参数图

Fig. 8 Plots of Equivalent structural parameters under different mix proportion

采用确定系数 r<sup>2</sup> 来判断拟合曲线对测量值的拟合程度,r<sup>2</sup> 越高表明拟合曲线对测量值的拟合程度 越高.确定系数 r<sup>2</sup> 的计算公式为

$$r^{2} = 1 - \frac{\sum_{i}^{n} (y_{i} - f_{i})^{2}}{\sum_{i}^{n} (y_{i} - \frac{1}{n} \sum_{i}^{n} y_{i})^{2}}.$$
(10)

式(10)中:yi 为测量值;fi 为用拟合公式计算的拟合值;n 为测量点的数目.

图 9(a)为以等效阻尼参数为指标的曲线拟合图,图 9(b)为以等效刚度参数为指标的曲线拟合图. 由图 9 可知:所有配合比的确定系数 *r*<sup>2</sup> 都比较高.



图 9 经验曲线拟合

Fig. 9 Empirical curve fitted for concrete elastic modulus

# 5 结论

采用 PZT 对不同龄期的混凝土试块进行压电阻抗分析,得到以下 3 个结论.

1)随着混凝土龄期的增长,PZT测得的压电导纳发生有规律的变化.PZT导纳谱曲线渐渐的往右 边漂移,峰值对应的共振频率增大,但幅值不断地减小.峰值的变化趋势反映了28d龄期内混凝土弹性 模量的变化规律.

2)采用等效结构模型来提取的混凝土试块的等效阻抗谱,根据提取的等效阻尼参数和等效刚度参数指标来评判混凝土试块在龄期中的变化,发现随龄期的增长,混凝土试块的等效阻尼和刚度的变化和 混凝土试块的弹性模量呈现出一致的趋势,说明混凝土试块的等效阻尼和刚度的变化可以反映混凝土 龄期内弹性模量的变化.

3) 用指数函数建立混凝土试块的相对弹性模量与等效结构参数之间的关系,几乎所有配合比的确 定系数 r<sup>2</sup> 都比较高,可以初步预测混凝土弹性模量在固化过程中变化.

# 参考文献:

- [1] CHEN Liang, SUN Fan-ping, ROGERS C A. Coupled electro-mechanical analysis of adaptive material systems-determination of the actuator power consumption and system energy transfer[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1994, 5(1):12-20.
- [2] PARK G, SOHN H, FARRAR C R, et al. Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward[J]. Shock and Vibration Digest, 2003, 35(6):451-463.
- [3] GIURGIUTIU V. Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors[M]. London: Elsevier, 2008: 363-367.
- [4] VENU G M, CHEE K S. Application of electromechanical impedance technique for engineering structures: Review and future issues[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2010, 21(1):41-59.
- [5] SOH C K, BHALLA S. Calibration of piezo-impedance transducers for strength prediction and damage assessment of concrete[J]. Smart Materials and Structures, 2005, 14(4):671-684.
- [6] SHIN S W, QURESHI A R, LEE J Y, et al. Piezoelectric sensor based nondestructive active monitoring of strength gain in concrete[J]. Smart Materials and Structures, 2008, 17(5):1-8.
- [7] SHIN S W, OH T K. Application of electro-mechanical impedance sensing technique for online monitoring of strength development in concrete using smart PZT patches[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(2): 1185-1188.
- [8] TAWIE R,LEE H K. Monitoring the strength development in concrete by EMI sensing technique[J]. Construction and Building Materials,2010,24(9):1746-1753.
- [9] 蔡金标,吴涛,陈勇.基于压电阻抗技术监测混凝土强度发展的实验研究[J].振动与冲击,2013,32(2):124-128.
- [10] HIXSON E L. Mechanical impedance: Shock and vibration handbook [M]. New York: McGRAW-HILL, 1988: 147-149.
- [11] BHALLA S, SOH C K. Structural health monitoring by piezo-impedance transducers []: Applications[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2004, 17(4): 166-175.

# Monitoring for Elastic Modulus of Concrete Based on Equivalent Structural Parameters

# GUO Zhi-gang<sup>1</sup>, SUN Zhi<sup>2</sup>

(1. School of Railway Transportation, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China;

2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract**: An experimental study to monitoring elastic modulus of concrete during curing process was presented based on piezoelectric impedance method. The piezoceramic (PZT) patch was attached on the concrete specimen to collect the monitoring signal. The electro-mechanical admittance spectra of surface bonded PZT patch were collected using an impedance analyzer by sweeping the frequency. Meanwhile, the elastic modulus of concrete was tested during curing process. The resonant frequency and equivalent structural parameters were conducted for evaluating the change of elastic modulus in concrete during curing process. A regression analysis was conducted to establish the empirical relationship between the relative elastic modulus gain of concrete and equivalent structural parameters. The established empirical formula is used for concrete elastic modulus monitoring via EMI spectra. The results tell that the piezoelectric impedance technique is a practical and reliable nondestructive test method for concrete elastic modulus gain monitoring.

Keywords: piezoelectric impedance; piezoceramic; elastic modulus; equivalent structural parameters; curve fit

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)

文章编号:1000-5013(2015)01-0080-06

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.01.0080

# 刚性桥面板天然气管道悬索 跨越结构力学性能

# 陈誉,林智寰

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 建立刚性桥面板天然气管道悬索跨越工程原型的有限元计算模型,并对有限元计算模型进行静力、模态和清管反应的有限元分析.结果表明;在成桥状态下,与设计资料对比,悬索跨越结构的整体位移曲线满足设计精度要求;天然气管道悬索跨越结构的前3阶模态均为平面内桥身的振动,直到第4阶才出现主缆的振动,在第6阶出现桥面板的平面外振动;清管球通过跨越结构时间为110,120 s的跨中竖向位移-清管球位置曲线发展完整,两个波峰和一个波谷并且整个的曲线形状同静力分析的形状大致相同;随着清管球经过全桥的时间不断减小,曲线发展得越来越不完整,第一个波谷出现的位置也不断地向坐标轴的右边推移,第二个波峰没有出现,其中通过时间为30,40 s的曲线甚至没有出现第一个波谷.

关键词: 天然气管道;悬索跨越结构;刚性桥面板;力学性能;数值分析;模态分析;清管球

中图分类号: TU 392.3 文献标志码: A

与简单的吊杆式柔性桥面板天然气管道悬索跨越结构相比,桁架式刚性桥面板悬索跨越结构能够 实现更大的跨越及较小的位移,是目前采用较多的天然气管道跨越结构型式. 悬索跨越结构在天然气长 输管道当中具有相当重要的地位,而刚性桥面板天然气管道悬索跨越结构的安全性是一个十分重要的 问题[1-12]. 文献[3]提出了天然气管道悬索跨越结构的静力、风荷载,以及清管作用下的计算和设计方 法. 文献[4]提出了天然气管道悬索跨越结构的具体抗震计算方法及实用抗震构造. 文献[5]提出天然气 管道悬索跨越结构的具体施工方法. 文献[6]围绕长输油气管道悬索跨越工程的抗震能力和健康诊断技 术,利用理论分析、模型实验和数值模拟手段进行了较为系统的研究. 文献「7〕建立了悬索管道跨越结构 分析的有限元模型,获得了结构的自振频率、振型,以及清管时跨越结构的动态力学特性,文献[8]建立 悬索管道跨越结构有限元模型,利用 ANSYS 软件进行模拟静力及动力计算,并对比分析通过振动台实 验和现场动力测试实验收集数据. 文献 [9] 制作了缩尺比例为1:8 的试验模型,对试验模型进行了完好 状态和3种模拟损伤状态下的输入白噪声和不同强度的 El-Centro 波的动力性能试验. 文献 [10] 应用 ANSYS 有限元程序,建立长输管道悬索跨越工程有限元计算模型,对有限元计算模型进行静力、模态 和地震反应的有限元分析.目前关于天然气管道悬索跨越结构静力、动力分析和计算的研究成果均针对 吊杆式的柔性桥面板跨越结构,有关由桁架组成的刚性桥面板悬索跨越结构的研究成果较少.本文建立 西气东送普光气田天然气管道悬索跨越结构的有限元分析模型,对模型进行静力分析,并与经典的悬索 弹性模型计算结果进行对比,然后进行悬索跨越结构的模态和清管动力反应分析.

# 1 有限元建模

普光天然气管道后河悬索跨越结构的主跨全长为180 m,两个边跨分别为20,32 m.全桥矢跨比为 1:9.主塔结构采用钢桁架塔形式,东西塔采用对称形式,塔结构高度均为26 m,由角钢和圆钢管组成.

**收稿日期:** 2014-08-10

通信作者: 陈誉(1978-),男,副教授,博士,主要从事钢结构的研究. E-mail:kinkingingin@163.com.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51478047, 51278209);华侨大学中青年教师科研提升计划资助项目(ZQN-PY110) 主塔基础采用桩基础跨越两岸,各设塔架基础一座.东西主塔承台高程相同,主塔与承台为铰接连接.天 然气管道架设于桥身上,管道在沿桥身方向是可以自由移动的.设计主缆型号为 PES5-121(JT/6-94), 直径为 71 mm.设计风索型号为 PES5-37,直径为 45 mm.主缆、吊索和风索拉索均采用 φ16-1670 单股 镀锌钢丝绳,钢丝绳两端采用热铸锚头连接.跨越两岸设重力式主缆锚固墩各一座,东岸为钢筋混凝土 和灌注桩结构,西岸为钢筋混凝土结构.跨越两岸各设置两个风索锚固,均为钢筋混凝土和灌注桩结构. 普光气田天然气悬索跨越结构实际原型与有限元模型的对比,如图 1 所示.



(d) 主塔有限元模型

(e)管道原型 图1 刚性桥面板天然气管道悬索跨越结构



Fig. 1 Cable-suspended structure of liquefied natural gas pipelines with rigid deck slab

根据天然气管道悬索跨越结构的受力特性,考虑选用有限元分析软件 ANSYS 单元库中的 Link 10 单元模拟主缆,Beam 4 单元模拟桁架桥面板和主塔,Shell 93 单元模拟天然气管道. 建模过程中的难点 主要是主塔的边界约束、天然气管道与桁架的连接以及主缆分别在不同阶段的线形. 主塔支座原型与有 限元模型的对比,如图 2 所示. 管道与桥面滚轴支座,如图 3 所示.



(a) 原型



(b) 有限元模型

图 2 主塔支座原型与有限元模型对比

Fig. 2 Comparison between the practical structure and finite element model

由图 2(a)可知:主塔并不是完全固结的,而是放松了桥身方向的转动,放松的是绕 Z 轴转动的约束.图 2(b)是模型中的主塔支座的约束.图 2(b)中:绿色的约束表示位移方向的约束;黄色的约束是转动的约束.由 2(b)可以看出:将 3 个方向的位移和绕 X,Y 方向的转动约束,放松 Z 轴方向转动约束,是符合实际情况的.

由图 3(a)可知:管道与桥身桁架的约束为管道的 Y,Z 轴的位移与该约束点上的桥身桁架是相同

的.由图 3(b)可知:有限元模型中采用约束耦合自由度的方法,将该约束点上桥身桁架节点与油管节点的 Y,Z自由度耦合起来,绿色的标志就是耦合自由度的标志.

整个建模过程如下:1)建立空缆悬索模型(包括线形和空缆状态下主缆的应力);2)建立出吊杆, 桥身桁架和输油管道模型;3)打开 ANSYS 软件中几何非线性和应力刚化命令,并考虑缆索的几何非 线性和应力刚化敏感,将载荷子步设定为 20步.







(b) 有限元模型

图 3 管道与桥面滚轴支座 Fig. 3 Connection pipeline and deck slab

# 2 结构模态分析

对悬索跨越结构的模态分析主要是采用 Block-Lancz 法. Lanczos 算法是用一组向量来实现 Lanczos 递归计算. 该方法对于大型复杂结构有速度快精度较高的优点. 计算时,求解从频率谱中间位置到 高频段范围内的固有频率的收敛速度同求解低阶频率的速度一样快. 求解取前 10 阶的模态作为此悬索 结构的主要模态. 各阶模态的变形,如图 4 所示.



Fig. 4 First 10 modes of cable-suspended structure

天然气管道悬索跨越结构前 10 阶模态的自振频率、自振周期和振动形态,如表 1 所示.前 3 阶均为 平面内桥身的振动,直到第 4 阶才出现主缆的振动,在第 6 阶出现桥面板的平面外振动.

表1 天然气管道悬索跨越结构模态一览表

Tab. 1 Modes of cable-suspended structure

模态阶数	自振频率	自振周期/s	描述
1	0.008 2	122.399	平面内桥身1阶对称
2	0.010 4	96.154	平面内桥身1阶反对称
3	0.017 4	57.471	平面内桥身2阶对称
4	0.018 5	54.054	主跨缆索1阶平面外相反方向对称振动
5	0.019 2	52.083	主跨缆索1阶平面外相同方向对称振动
6	0.021 0	47.619	平面外桥身1阶反对称
7	0.024 7	40.486	主跨缆索1阶平面外相反方向反对称振动
8	0.025 3	39.526	主跨缆索 1 阶平面外相同方向反对称振动
9	0.027 7	36.101	平面内桥身 2 阶反对称
10	0.031 2	32.051	平面内桥身3阶对称

# 3 悬索结构清管动力响应

清管球在天然气管道中是一个不规律的移动过程,必然会使悬索跨越结构本身产生振动.可以把清 管球荷载考虑成两种情况的荷载,一种是匀速常量力,另一种是匀速简谐力.匀速常量力就是把清管球 荷载考虑为一个力本身大小不随时间变化,但是力的位置按照匀速通过整个悬索桥,匀速简谐力就是不 但力的位置是匀速通过桥梁的,同时力的大小也是按照简谐振动变化的.以下只讨论将清管球荷载简化 为匀速常量力时管道悬索跨越结构的动力响应.

清管球考虑为实心橡胶,橡胶的密度为 0.8~1.3 kg•m<sup>-3</sup>,这里取最大值为 1.3 kg•m<sup>-3</sup>,并考虑 清管球塞满整个天然气管道,即清管球的半径同油气管道的内径为 160 mm,整个清管球压力为 217 N, 考虑简化为 220 N.

因为这些荷载都是在使用阶段出现的,故要把悬索跨越结构在成桥阶段的主缆的内力作为初始应 力施加到结构中,并在分析过程中先把自重荷载按照阶跃加载的方式加载,自重荷载加载完后,整个结 构的各个杆件都会有自重内力,在这个基础上再施加清管球荷载.

因为清管球荷载考虑为匀速常量力,清管球荷载在匀速通过管道时,由于需要进行有限元分析,因此,节点之间的是无法加载的,只有将节间荷载转化为节点荷载.将在节点间单元匀速运动的力转化为 节点力就是一个节点上大小匀速变化的力.因为在清管球的清管行径的过程中,在每个节点上的力都可 以考虑成好像是突然施加上来的,因此,考虑用瞬态分析来分析这一清管过程.

在有限元分析的过程中发现跨中节点 的位移同整个清管球荷载经过全桥的时间 有很大的关系,因为该桥的自振周期从1 到10阶分布在30~120 s之间,因此,考虑 清管球经过全桥的时间也控制在30~120 s之间,且每隔10 s分析一次.通过全桥时 间控制在30~120 s之间的跨中节点在整 个分析过程中平面内垂直于桥面的跨中竖 向位移图,如图5 所示.

由图 5 可知:所有的曲线都有第一个 波峰,这第一波峰是在清管球走到 1/4 跨 左右位置时出现的,这和静力分析是大致 相同的;但是只有 50~120 s 时的曲线有出



图 5 跨中节点竖向位移-清管球位置曲线 Fig. 5 Vertical displacement-location of pigging ball curves of middle span

现明显的第一个波谷,40 s的曲线第一个波谷不明显,30 s曲线没有第一个波谷,在有出现第一个波谷

的曲线中,出现的位置点也不像前面出现第一个波峰那样集中;120 s的曲线第一个波谷出现在跨中节 点位置,120 s之前曲线的第一个波谷出现位置是不断向坐标轴右边移动的,一直到 30 s的曲线没有出 现第一个波峰,而前面的静力分析是出现在跨中位置的;第二个波峰只有 110,120 s的曲线有出现,出 现的位置在清管球到 3/4 跨的位置.

清管球通过悬索时间从 30~120 s 的变化过程中:30~100 s 曲线中整个跨中节点的竖向正向的位

移幅度是不断变大的,100~120 s的变化过程中竖 向正向位移幅度有开始减小的趋势.在整个 30~120 s的变化过程中,竖向负向位移幅度都是不断变大 的;对于有出现第二波峰的曲线,第二个波峰都比第 一个波峰的位移幅度大;80~100 s的曲线虽然没有 出现第二波峰,但是其达到的最大正向位移也比第 一波峰大.

110,120 s曲线的同静力影响线对比,如图 6 所示.由图 6 可知:清管球通过跨越结构时间为 110, 120 s与全桥的第一阶自振周期相接近,因此,整体 位移曲线发展完整出现两个波峰和一个波谷,并且 整个的曲线形状同静力分析的形状大致相同.清管



curves and static influence line curve

球通过跨越结构时间为 50~100 s 的曲线随着清管球经过全桥的时间减小,曲线发展的越来越不完整, 出现第一波谷的位置也不断的向坐标轴的右边推移,没有出现第二波峰,其中通过时间为 30,40 s 的曲 线甚至没有出现第一波谷.第二波峰之所以会比第一波峰的位移幅度更大,是因为通过时间为 110,120 s 接近结构的第一振型自振周期,产生的共振放大作用.建议清管球通过管道悬索的时间控制在较短的 30,40 s 清管球对悬索跨越结构的影响最小.

# 4 结论

通过对天然气管道悬索跨越结构有限元分析模型的进行静力分析,并与经典的悬索弹性模型计算 结果进行对比,以及悬索跨越结构的模态和清管动力反应分析,可以得出以下4点主要结论.

1) 在有限元分析时将主缆的预应力作为设计变量,而主缆各个节点在完成阶段时的最大位移作为 状态变量,进行结构优化设计使其状态变量最小,即可保证其当前阶段和完成阶段的线形一致.

2)按照抛物线建立的模型在完成阶段的曲线有按照悬链线变形的趋势,说明在主缆自重荷载作用下,按照悬链线分析主缆比按照抛物线分析更具有优势.

3)该工程天然气管道悬索跨越结构前3阶模态均为平面内桥身的振动,直到第4阶才出现主缆的振动,在第6阶出现桥面板的平面外振动.

4)该工程天然气管道悬索跨越结构中清管球通过跨越结构时间为110,120 s的跨中Y向位移-清管球位置曲线发展完整,出现两个波峰和一个波谷并且整个的曲线形状同静力分析的形状大致相同;随着清管球经过全桥的时间不断的减小,曲线发展的越来越不完整,出现第一波谷的位置也不断的向坐标轴的右边推移,没有出现第二波峰,其中30,40 s的曲线甚至没有出现第一波谷.

#### 参考文献:

- [1] 高建,王德国,何仁洋.基于 ANSYS 的悬索跨越管道地震时程响应分析[J].西南石油大学学报:自然科学版,2010, 32(1):155-159.
- [2] 李冰,黄丽华,雷刚.大跨度悬索管道桥的 ANSYS 有限元分析综述[J]. 防灾减灾工程学报,2010,30(9):262-263.
- [3] 中华人民共和国住房城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫局.GB 50459-2009 油气输送管道跨越 工程设计规范[S].北京:中国计划出版社,2009:15-19.
- [4] 中华人民共和国住房城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫局.GB 50470-2008 油气输送管道线路 工程抗震设计规范[S].北京:中国计划出版社,2009:7-10.

- [5] 中华人民共和国住房城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫局.GB 50460-2008 油气输送管道跨越 工程施工规范[S].北京:中国计划出版社,2009:2-4.
- [6] 王金国.管道悬索跨越结构抗震能力和健康诊断研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2005:37-42.
- [7] 王恩青. 悬索式管桥静力、清管及地震分析研究[D]. 北京:北京化工大学,2007:10-12.
- [8] 张峰. 悬索式管道跨越结构计算方法分析[D]. 大庆:大庆石油学院, 2007: 36-49.
- [9] 王金国,丁阳.模拟损伤状态下长输管道悬索跨越结构抗震性能的试验研究[J]. 地震工程与工程振动,2006,26 (8):192-198.
- [10] 王金国,丁阳.长输管道悬索跨越结构静动力性能的有限元分析[J].工程力学,2007,24(8):173-177.
- [11] 罗喜恒. 悬索桥缆索系统的数值分析法[J]. 同济大学学报:自然科学版,2004,32(4):441-446.
- [12] 罗喜恒,肖汝诚,项海帆.空间缆索悬索桥的主缆线形分析[J].同济大学学报:自然科学版,2004,32(10):1349-1354.

# Research on Mechanical Property of Cable-Suspended Structure of Liquefied Natural Gas Pipelines with Rigid Deck Slab

# CHEN Yu, LIN Zhi-huan

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

**Abstract:** The finite element model of engineering prototype of cable-suspended structure of liquefied natural gas pipelines with rigid deck slab is established, and the static, modal and pigging response are carried out. The whole displacement curve of cable-suspended structure under dead load, meets the design accuracy by comparison with the design data; The first three rank modes of cable-suspended structure of liquefied natural gas pipelines are in-plane vibration of bridge, the vibration of main cables appears at the fourth rank, the out-plane vibration of bridge deck appears at the sixth rank. Mid-span vertical displacement-position of pigging ball curve of pigging ball taking 120 s and 110 s to cross suspended structure develops completely, appearing two wave crests and one trough, and the shape of whole curve is similar to the shape of static analysis. With the time of pigging ball through bridge decreases, the development of curve is more and more incomplete, the position of the first trough moves continuously to the right of axis, the second wave crest does not appear, when the crossing bridge's time is 30 s or 40 s, the curve of even does not appear the first trough.

Keywords: liquefied natural gas; cable-suspended structure; rigid deck slab; mechanical property; numerical analysis; modal analysis; pigging ball

(责任编辑:陈志贤 英文审校:方德平)

**文章编号:**1000-5013(2015)01-0086-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.01.0086

# 延深基坑桩锚加固支护结构力学特性分析

# 郭力群,陈亚军,徐芳超

(华侨大学土木工程学院,福建厦门 361021)

**摘要:** 运用 Zsoil 有限元软件建立桩锚支护延深开挖基坑数值模型,对加固支护结构连梁的节点连接形式、 截面尺寸、支护平台宽度、二级支护桩的桩径和桩间距以及嵌入比等影响因数进行分析.结果表明:连梁节点 连接形式,支护平台宽度对控制延深开挖基坑支护结构的受力和变形有明显影响.

关键词: 延深开挖;加固支护结构;力学特性;数值模拟

**中图分类号:** TU 473 文献标志码: A

由于设计方案调整等种种原因,在基坑支护结构施工后,工程项目需增加开挖深度,出现基坑的二次开挖.既有基坑的二次开挖支护技术属于基坑工程的加固技术,目前已有不少基坑工程在已有支护结构基础上进行延深加固的成功案例<sup>[14]</sup>.不少学者采用有限元数值分析对二次开挖的加固效果进行了研究<sup>[5-10]</sup>,但基坑二次开挖支护对基坑的影响因素或受力机理方面的研究相对较少.本文以某基坑工程为背景,运用 Zsoil 有限元软件,对二次支护结构加固的影响因素进行分析,分析其受力变形规律,以得到指导类似工程的有益结论.

# 1 有限元模型的建立

#### 1.1 工程背景

长沙某广场基坑原建筑结构是按照两层地下室设计的,原支护方案采用桩锚支护结构.由于建筑设 计变更,将原有的两层地下室改为3层地下室,必须采用相 应的支护加固措施.以 PQ 断面为例,原2层地下室基坑开 挖深度为9.7 m,设计变更后的基坑总开挖深度为15 m,开 挖深度产生较大的改变.

基坑工程延深开挖的支护结构加固形式采用人工挖孔 桩结合预应力锚杆,并设置钢筋混凝土连梁与原有的支护 桩连接形成的整体支护体系,基坑支护剖面图如图 1 所示. 一,二级支护桩桩径 d=1 000 mm,桩间距 s=2 000 mm;支 护桩的桩顶设置冠梁,其截面尺寸为 1 200 mm×800 mm; 腰梁尺寸为 800 mm×800 mm;连梁尺寸为 800 mm×700 mm,各个构件的砼强度均为 C30.



图 1 支护结构剖面图

Fig. 1 Cross-section of supporting structure

#### 1.2 有限元模型

基坑模型采用平面应变模型,如图2所示,模型的二维尺寸为70m×30m.土体采用小应变土体硬 化模型 HSS(hardening soil model with small strain stiffness). HSS 模型能够反映土体的小应变硬化 特性,能够合理地模拟基坑开挖变形.锚杆、连梁、支护桩视为线弹性材料,基本模型中连梁与一级支护 桩的节点连接方式考虑为铰接形式.

**收稿日期:** 2014-06-09

通信作者: 郭力群(1970-),男,副教授,主要从事岩土工程的研究. E-mail:guoliqun@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51208218)

#### 表1 土体 HSS 模型计算参数

Tab. 1 Calculation parameters of HSS model

土层	地层名称	$\gamma/kN$ • $m^{-3}$	$c/\mathrm{kPa}$	$arphi/(\degree)$	$E_{\rm oed}/{ m GPa}$	$E_{50}/{ m GPa}$	$E_{ m u,r}/ m GPa$	$E_{0}/\mathrm{GPa}$
1	素填土	16.0	12	10	3.0	4.5	13.5	67.5
2	粉质粘土	19.5	25	16	6.5	6.5	19.5	97.5
3	粉砂	19.5	0	20	12.3	12.3	36.9	184.5
4	圆砾	21.0	0	30	13.5	13.5	40.5	202.5
5	粉土	19.5	32	16	6.3	6.3	18.9	94.5
6	强风化泥质粉砂岩	22.0	45	22	36.0	36.0	108.0	540.0
7	中风化泥质粉砂岩	22.0	45	35	45.0	45.0	135.0	675.0

根据实际施工工况,基坑开挖支护模拟工况如下:施作一级支护 桩→降水→开挖第1层土→施作第一层锚杆→开挖第2层土→施作 第2层锚杆→开挖第3层土→施作第3层锚杆→开挖第4层土→施 作第4层锚杆→开挖到原基坑坑底标高→施作连梁+二级支护桩+ 第5层锚杆→开挖基坑到新的坑底标高处.

# 2 加固体影响参数

#### 2.1 连梁的影响

2.1.1 连梁节点连接形式 通过连梁连接新增支护桩与原支护桩, 以确保支护结构的整体性.但在实际工程中,前、后排桩之间的连接



图 2 有限元模型 Fig. 2 Finite element model

构造方式比较复杂,连梁与支护桩之间的节点连接形式将影响加固后支护结构的受力变形特性.连梁与一级、二级支护桩之间有4种不同的连接形式:1)连梁与一、二级支护桩刚接;2)连梁与一、二级支护桩 铰接;3)连梁与二级支护桩刚接,与一级支护桩铰接;4)连梁与一级支护桩刚接,与二级支护桩铰接. 当连梁与支护桩之间的连接节点形式为刚接节点时,刚节点限制了节点处的转动自由度,支护桩的弯矩 能够通过连梁与支护桩的刚节点进行合理的传递分配;当连梁与支护桩之间的连接节点形式为铰接节 点时,铰接节点只限制了节点处的平动自由度,则连梁只能承受轴向力,不传递弯矩.

水平位移和弯矩如图 3 所示.由图 3 可知:当连梁两端与支护桩的节点连接形式为刚性连接时,较 好地控制一级支护桩的整体水平变形和二级支护桩的桩顶位移,一级支护桩的最大位移为 43.2 mm, 二级支护桩的最大位移为 25.8 mm;当连梁两端与支护桩的节点连接形式都为铰接时,一、二级支护桩 的桩体变形都有较大增加,一级支护桩的最大位移为 47.5 mm,二级支护桩最大位移为 27.8 mm.



Fig. 3 Horizontal displacement and bending moment of piles under various coupling types 对于一级支护桩,4种连接形式对其桩体在连梁以上部分的弯矩值非常接近,而当连梁与一级支护桩的节点连接形式为刚性连接时,会使一级支护桩的弯矩在连梁处发生较大突变,连梁以上部分的最大弯矩为 870.2 kN·m,连梁以下部分的最大弯矩为1336 kN·m,使得连梁以下部分产生过大的受力,

若桩身配筋不足时容易产生断桩破坏.综合以上考虑,连梁两端与支护桩的连接形式宜采用与一级支护 桩铰接,二级支护桩刚接的连接形式,既能控制变形,还能改善桩体的受力情况.

2.1.2 连梁截面尺寸 连梁截面按 400 mm×400 mm,600 mm×600 mm,800 mm×800 mm 变化,改 变连梁的刚度进行分析,如图 4 所示.由图 4 可知:连梁截面变化对一、二级支护桩的水平位移和弯矩的 影响较小.因此,连梁刚度对基坑的变形和受力影响较小,但连梁截面的设置需要满足梁构造配筋要求.



Fig. 4 Horizontal displacement and bending moment of piles under various size of coupling beams

# 2.2 平台宽度的影响

一、二级支护桩之间土的宽度(平台宽度)取值为 2.0,2.5,3.0,3.5,4.0 m,水平位移和弯矩如图 5 所示.随着平台宽度的增长,一级支护桩的最大位移由 2.0 m 时的 43.6 mm 减少为 4.0 m 时的 36.6 mm,二级支护桩的最大位移由 2.0 m 时的 26.4 mm 减少为 4.0 m 时的 17.5 mm,平台宽度的增加能够较大程度地减小支护桩的整体水平位移.因此,平台宽度的变化对一级支护桩的弯矩的影响不大.二级支护桩的弯矩随着平台宽度的增长,其最大弯矩由 2.0 m 时的 1 341.4 kN·m 减少为 4.0 m 时的 980 kN·m,影响较大.因此,当场地存在足够空间时,增加平台宽度,可显著的减少支护桩的整体变形和改善二级支护桩的受力情况.



图 5 不同平台宽度支护桩的水平位移和弯矩图



## 2.3 二级支护桩的影响

2.3.1 二级支护桩的桩径 选取桩径为 0.8,1.0,1.2,1.4,1.6,1.8,2.0 m 的常用的排桩,水平位移 和弯矩如图 6 所示.由图 6 可知:随着二级支护桩桩径的增加,桩身刚度增加,一、二级支护桩的最大水 平位移呈先减小后增大的变化趋势,且二级支护桩的最大位移不断向桩顶移动,在桩径达到 1.4 m 后, 最大位移出现在桩顶处,随后桩径的增加对二级支护桩最大位移的变化较小.因此桩径的增加能减小二 级支护桩的位移,但对一级支护桩效果不理想,且桩径达到某一临界点对二级支护桩的位移影响较小. 与此同时,桩身弯矩的变化较大,且二级支护桩弯矩的增长速度大于一级支护桩.综上所述,桩径的增加

Fig. 7





(a) 一级桩的水平位移 (b) 二级桩的水平位移 (c) 一级桩的弯矩 (d) 二级桩的弯矩 图 6 不同二级支护桩桩径下支护桩的水平位移和弯矩图

Fig.6 Horizontal displacement and bending moment of piles under various diameters of second stage piles 2.3.2 二级支护桩的桩间距 二级支护桩桩间距按 1.5,2.0,2.5,3.0,3.5,4.0 m 变化,由计算结果 得出:二级支护桩桩间距的变化对一级支护桩的受力变形影响不大,二级支护桩的桩身最大水平位移由 二级支护桩桩间距 *s*=4.0 m 时的 30.0 mm 减小为 *s*=1.5 m 时的 25.3 mm,影响较小;二级支护桩桩 间距的减小会增加一级支护桩的弯矩(变化幅度较小),较大程度地减小二级支护桩的桩身弯矩,桩的最 大弯矩由 *s*=4.0 m 时的 1 954 kN • m 减小为 *s*=1.5 m 时的 1 128 kN • m. 这是由于桩间距的增大,使 得单根支护桩需要承受更大的内力.





2.3.3 二级支护桩的嵌入比 二级支护桩嵌入比(η=(L-h)/L)按 0.6,0.8,1.0,1.2,1.4 变化,水平 位移和弯矩如图 8 所示.由图 8 可知:二级支护桩嵌入比 η 的变化对一级支护桩和二级支护桩的受力、



Fig. 8 Horizontal displacement and bending moment of piles under various embedded ratio of second stage piles

变形影响较小,这是由于二级支护桩的嵌固土层为硬土层,嵌入深度足够时便不会影响到上部结构的受力变形.因此,当嵌固土层为硬土层时,二级支护桩嵌入比对基坑的变形和受力影响较小,二级支护桩的嵌入深度能够提供足够的嵌固力即可满足要求.

# 3 结论

在采用 Zsoil 软件建立基本分析模型的基础上,分析和探讨了连梁的节点形式、截面尺寸、平台宽度、二级支护桩的桩径、间距、嵌入比等对支护桩的受力变形的影响,得到如下 5 个结论.

1) 连梁与支护桩间连接形式对支护桩的受力变形影响较大,连接形式以连梁与一级支护桩铰接, 与二级支护桩刚接为宜.

2) 连接平台宽度的增加可显著地减少支护结构的整体变形,改善支护桩的受力.

3) 二级支护桩桩径的增加,并不能较好地控制一、二级支护桩的位移,桩身弯矩的却变化较大.因此,改变桩径不是控制位移的最合理方法.

4) 二级支护桩桩间距的变化对一级支护桩的受力和变形影响不大,而桩间距的减小能够减小二级 支护桩的最大位移,并能显著改善二级支护桩的受力情况.

5) 二级支护桩桩端嵌固的土层为硬土时,嵌入比变化对一、二级支护桩的受力和变形影响较小.

## 参考文献:

- [1] 吴铭炳,戴一鸣,林颖孜,等.基坑加深的加固措施及其效果[J]. 岩土工程学报,2010,32(增刊2):459-462.
- [2] 李冰河. 粉砂土地基既有超大基坑加深的支护技术及效果分析[J]. 建筑结构,2011,41(5):104-107.
- [3] 刘兴旺,陈卫林,李志飙,等.某大型工程施工阶段地下室加层的基坑支护技术[J].建筑结构,2012,42(8):104-106.
- [4] 李胜杰. 支护结构完成后基坑加深的加固技术[J]. 四川建筑, 2013, 33(1): 69-71.
- [5] 顾赞勇,胡安峰,陈博浪.二级联合支护结构深基坑整体稳定性分析[J].结构工程师,2012,28(5):111-117.
- [6] 刘婺,刘书波.基坑临时加深双层围护结构破坏研究[J].建筑结构,2013,43(增刊2):605-608.
- [7] 陈亚军,郭力群,徐芳超.基坑延深开挖复合支护结构有限元模拟[J].华侨大学学报:自然科学版,2013,34(3):316-319.
- [8] 孙巍,范益群,黄新刚.外滩交通枢纽大型地下空间开发中几个关键问题研究[J].市政技术,2009,27(增刊2):3-9.
- [9] 郑晏华.上海外滩通道综合改造工程中特大基坑的分幅施工技术[J].建筑施工,2010,32(12):1187-1188.
- [10] BENZ T. Small strain stiffness of soils and its numerical consequences[D]. Stuttgart: University of Stuttgart, 2006: 147-149.

# Analysis on Mechanical Characteristics of Deepening Excavation Foundation Pit Reinforced by Pile-Anchor Structure

# GUO Li-qun, CHEN Ya-jun, XU Fang-chao

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

**Abstract:** The deepening excavation foundation pit is required to reinforce the original supporting structure. The reinforced supporting structures are designed based on experience, and are not understanding the mechanical characteristics and influencing factors. The numerical model of deepening excavation reinforced by pile-anchor structure is established by the FEM software Zsoil to study the influence of various factors on force and deformation characteristics, including the factors are as follows: the coupling form and stiffness of coupling beams; the platform width; the embedded ratio, spacing, stiffness of second-stage piles. The results show that the coupling form of coupling beams and the platform width have a significant effect on the force and deformation of deepening excavation foundation pit.

Keywords: deepening excavation; reinforced supporting structure; mechanical characteristics; numerical simulation

(责任编辑:陈志贤 英文审校:方德平)

**文章编号:**1000-5013(2015)01-0091-06

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.01.0091

# 福州地铁1号线典型软土的工程性质

刘纪峰1,李雄润2,陈福星1

(1. 三明学院 建筑工程学院, 福建 三明 365004;
 2. 福建省顺安建筑工程有限公司, 福建 莆田 351200)

摘要: 为研究福州地铁1号线典型软土的工程性质及其影响,用电子显微镜进行了典型软土试样的扫描、X 射线衍射分析及室内物理力学试验.基于工程地质条件和施工经验,就软土对地层环境影响进行了 ABAQUS 数值模拟分析.研究结果表明:该软土是由含有较大孔隙的微团聚颗粒组成,不同放大倍数图像具有一定的自 相似特征,试样含石英成分,工程性质较差;盾构隧道开挖 20 m 后,沉降历时 800 d 的地层沉降和管片应力符 合工程实际,地表最大沉降达 18.5 mm,且没有完全收敛.

关键词: 福州地铁1号线;典型软土;盾构隧道;地层沉降;管片应力;固结效应;数值模拟 中图分类号: TU 94.39 **文献标志码:** A

我国东南沿海地区广泛分布的海相沉积淤泥和淤泥质软土对工程建设提出了很大挑战<sup>[16]</sup>.软土受施工扰动后的长期固结特性对城市地铁重大工程建设的安全性、稳定性构成严重影响和潜在威胁<sup>[78]</sup>. 针对这一课题,国内外采用的方法大致可分为两大类:一是不考虑施工过程的预测方法,包括经验法和 理论解析法<sup>[910]</sup>;二是部分考虑施工过程的预测方法,包括各种数值模拟和物理实验<sup>[11-13]</sup>.考虑施工围 岩扰动等因素,复杂软土层暗挖隧道引起的地层变形往往比实际预测的更为严重<sup>[14-15]</sup>,而目前对该难题 尚缺乏深入系统研究.福州地铁1号线纵贯福州市中心城区,线路全长约29.24 km,全部埋深20~30 m,隧道埋深范围内有10.2~15.0 m 层厚的流塑状态的淤泥、多层饱和状态的黏土或淤泥质黏土,地下 水位埋深2.10~3.60 m.上部土层存在的厚度较大的高压缩性饱和软土,将对盾构隧道施工环境控制 构成较大挑战.控制不好,极易导致城市生命线工程损害事故,造成严重的经济损失与社会影响.本文为 探索解决该问题,对福州地铁1号线典型软土的工程特性进行试验研究,并在此基础上,采用 ABAQUS 有限元数值模拟,分析典型软土长期固结效应对环境影响.

# 1 典型软土的物理力学性质

#### 1.1 扫描电子显微镜微细观试验

考虑到主要影响地铁沉降的土层为淤泥③1,故电子显微镜(SEM)试验及 X 射线衍射试验仅针对 该层.在福州地铁 1 号线始发井基坑,采用薄壁取土器深取淤泥③1 的典型软土试样,将其风干到一定 程度,并加工成 5~8 mm 见方的小块.将小块放入干燥箱完全干燥后,送试验室检测.20 件土样品均在 低真空模式原始状态通过放大 500~5 000 倍观察表面微观形貌.测试仪器为 EVO 18 型高分辨率场发 射扫描电镜(德国卡尔蔡公司),其主要技术参数为:3.0 nm@30 kV,2.0 nm@30 kV,4.5 nm@30 kV 的分辨率;0.2~30 kV 的加速电压;5~100 万倍的放大倍数;10~400 Pa 的压力范围;X 射线;8.5 mm AWD;35°出射角.受篇幅限制,取成像较好具有代表性的 #6 样品,放大不同倍数,SEM 测试结果,如图 1 所示.

**收稿日期:** 2014-06-24

通信作者: 刘纪峰(1979-),男,副教授,博士,主要从事城市地下工程的研究. E-mail:ph\_dliujifeng@126.com.

基金项目: 福建省科技计划重点项目(2012Y0062);福建省高等学校学科带头人培养计划项目(FETU);国家级大学生创新创业训练计划项目(201311311007)



(a) 500 倍



(b) 1 000 倍



(c) 3 000 倍

(d) 5 000 倍

图 1 典型软土 SEM 图像



由图 1 可以看出:福州地铁 1 号线典型软土主要是由团聚状颗粒组成,颗粒间有较大孔隙,在饱和 状态下受盾构隧道施工扰动,孔隙中水不能短时间内排出,产生较大的超孔隙水压力;伴随着超孔隙水 压力的消散,软土将产生较大的次固结变形,应在隧道施工和地铁运营时充分考虑这一问题.另外,从不 同放大倍数的 6 号样品 SEM 检测结果来看,该类软土结构具有一定的自相似特征,可借助分形理论研 究其孔隙分形分维数和力学性质之间的联系<sup>[15-17]</sup>.

# 1.2 X射线衍射分析试验

福州地铁1号线典型软土的部分 X 射线衍射分析结果,如图2 所示.由图2 可知:试样1,2 的衍射 峰基本一致,衍射强度也基本相同,说明试样1,2 所表现的物质的机构基本相同,或者可以认代表同一 组分物质.对比 SY/T 6210-1996《沉积岩中粘土矿物总量和常见非粘土矿物 X 射线衍射定量分析方 法》<sup>[18]</sup> 附录 A2 常见矿物的 X 射线衍射图谱,可知试样1,2 包含石英成分,这和 SEM 试验结果是一致 的,从试样的 SEM 图像上也可以看到石英晶体.





### 1.3 工程性质试验

根据 GB 50307-1999《地下铁道、轻轨交通岩土工程勘察规范》、GB 50021-2001《岩土工程勘察规

范》(2009 年版)、JGJ 83-1991《软土地区工程地质勘察规范》、JGJ 89-1992《原状土取样技术标准》和 GB/T 50123-1999《土工试验方法标准》,针对福州地铁 1 号线某始发井不同土层特性,分别采用静压 法和锤击法取用质量等级为 I~II 级的原状土样.通过室内常规试验项目和一定数量的三轴固结不排 水(CU)试验、三轴不固结不排水(UU)试验和固结回弹试验,得出典型软土的工程性质,如表 1 所示. 表 1 中: $\gamma$ 表示重度;C 表示固结快剪黏聚力; $\varphi$  固结快剪内摩擦角;C<sub>U</sub> 表示三轴 UU 黏聚力; $\varphi_U$ /表示三 轴 UU 内摩擦角;C<sub>CU</sub>表示 CU 黏聚力; $\varphi_{CU}$ 三轴 CU 表示内摩擦角;C'表示 CU 黏聚力; $\varphi'_U$ 表示三轴 CU 内摩擦角.

表 2 中:w 为水的质量分数;  $\gamma$  为重度; e 为孔隙比; W<sub>L</sub> 为液限; W<sub>P</sub> 为塑限; K<sub>V</sub> 为渗透系数; K<sub>H</sub> 为 渗透系数;  $a_{0.1\sim0.2}$  为压缩系数; E<sub>\$0.1~0.2</sub> 为压缩模量; q<sub>u</sub> 为无侧限抗压强度; S<sub>L</sub> 为灵敏度; ①为固结快剪 指标; ②为未标明渗透系数; ③为未测定指标. 由表 2 可知: 对比其他地区的软土工程性质, 福州地铁 1 号线 ③<sub>1</sub> 淤泥具有较高的水的质量分数、较低的重度、较大的孔隙比和液限、较小的渗透系数, 黏聚力和 内摩擦角(在对比的 5 个地区中, 上述指标仅好于深圳软土的), 同时具有较大的压缩系数、较小的压缩 模量和较高的灵敏度. 相对而言, 整体上工程性质较差.

表 1 试验实测典型软土的工程性质表

Tab. 1 Experimental engineering properties of typical soft so	Tab. 1	Experimental	engineering	properties	of	typical	soft	soil
---	--------	--------------	-------------	------------	----	---------	------	------

编号	名称	$\gamma/kN$ • m <sup>-3</sup>	$C/\mathrm{kPa}$	$arphi/(\degree)$	$C_{\rm U}/{ m kPa}$	$arphi_{ m U}/(\degree)$	$C_{\rm CU}/{ m kPa}$	$arphi_{ m CU}/(\degree)$	$C'/\mathrm{kPa}$	$arphi'/(\degree)$
$(3)_1$	淤泥	15.7	8.7	12.3	11	2.2	24	14.3	15	23.1
4	粉质黏土	18.8	20.3	17.8	34	13.1	48	20.6	38	25.7
$(5)_1$	淤泥质黏土	16.8	13.0	12.0	21	7.6	35	17.8	22	24.6

福州地铁1号线典型软土和其他地区软土的工程性质对比,如表2所示[3-6].

表 2 不同地区软土工程 1	性质对b	¢
----------------	------	---

Tab. 2 Comparison of engineering properties among soft soils in different areas

地区	土层名称	$w/v_0$	$\gamma/kN  \cdot  m^{-3}$	е	$W_{\rm L}/\%$	$W_{ m P}$ / $\%$	$K_{ m V}/$ nm • s <sup>-1</sup>	$K_{\rm H}/$ nm • s <sup>-1</sup>
)의 YN	淤泥	50.3~74.5	14.8~16.6	1.44~2.10	45.0~65.6	26.3~42.	2 0.236~0.4	520.313~0.404
伯卯	淤泥质黏土	43.5~54.2	16.4~17.2	1.25~1.54	41.6~50.0	24.5~29.	2 - 3	0.394
上海	淤泥质粉质黏土	36.0~49.7	17.1~18.6	1.00~1.36	29.6~40.1	16.3~23.	1 20.000	$\sim$ 50.000 $^{\odot}$
上母	淤泥质黏土	40.0~59.6	16.4~17.9	1.12~1.67	34.4~50.2	17.4~25.	1 2.000	$\sim 4.000^{\circ}$
宁油	淤泥质粉质黏土	34.4~51.4	17.0~18.6	1.00~1.42	29.3~46.6	20.2~29.	6 0.300	$\sim$ 0.900 $^{\odot}$
1 102	淤泥质黏土	37.5~58.1	16.5~18.1	1.06~1.50	32.8~50.2	13.2~26.	2 0.200	$\sim 2.200^{\circ}$
东营	东营软土	33.3~56.6	16.3~18.2	0.99~1.59	26.9~37.3	11.4~20.	0	—
深圳	深圳软土	83.7~92.4	14.7~15.0	2.33~2.51	46.9~55.5	—	1.800	$\sim 6.000^{2}$
地区	土层名称	C/kPa	$arphi/(^{\circ})$	$\alpha_{0.1\sim0.2}/N$	${ m MPa}^{-1} ~ E_{ m S0.1} \sim$	$_{0.2}/MPa^{-1}$	$q_{ m u}/{ m kPa}$	$S_{ m t}$
道 배	淤泥	4.0~16.0	8.5~16.	5 1.01~1	1.98 1.5	2~2.46	230.0~460.0	42.0~70.0
1田 八丁	淤泥质黏土	7.0~13.0	11.0~18.	0 0.39~0	<b>.</b> 90 <b>2.</b> 7	4~5.50	—	—
上海	淤泥质粉质黏土	8.5~14.2	12.1~28.	0 0.30~1	1.03 2.2	$0 \sim 5.97$	—	25.0~35.0
上母	淤泥质黏土	11.5~15.7	8.5~16.	9 0.55 $\sim$ 1	1.65 1.3	$2 \sim 3.58$	—	30.0~40.0
合油	淤泥质粉质黏土	8.0~33.9	7.0~28.	0 0.2~1	. 17 2.0	8~8.48	—	20.0- 50.0
丁叔	淤泥质黏土	7.8~32.6	6.2~13.	6 0.49∼1	1.58 1.6	9~4.97	_	50.0~30.0
东营	东营软土	9.0~32.0	2.26~14.	6 0.16~0	0.96 2.4	9∼12.55	_	_
深圳	深圳软土	5.3~7.1	1.6~4.2	2 –	1.6	0~1.70	_	_

# 2 长期固结效应

# 2.1 数值模型概述

数值模拟软件采用大型商业有限元软件 ABAQUS 6.11-2 版本<sup>[19]</sup>.双线隧道线间距为 12.5 m;隧 道内径为 6.2 m;隧道埋深 20 m;盾构面支护压力为 125 kPa;盾尾注浆压力为 0.2 MPa;土与管片的摩 擦系数 0.2;地下水埋深 3.3 m<sup>[7-12.20]</sup>.建模原则:取一半对称双线隧道建模,以节省计算时间;三维模型 考虑隧道开挖的施工过程引起地表移动的时空效应问题;基于福州地铁1号线某区间隧道岩土工程勘 察报告结果,土层厚度、力学参数和地下水位的选取,如表3所示;考虑地下水的影响,按照地下水位和 水压影响的水土合算计算初始地应力;考虑盾构施工过程的同步注浆和壁后注浆对围岩的加固作用,管 片及注浆体和围岩共同承载,管片厚350 mm,弹性模量30 GPa.

模型尺寸长×宽×厚为80 m×40 m×60 m,满足边界条件,建模完成后共有85 034 个 C3D8R 单元,91 078 节点.对③1~⑤1 盾构施工扰动比较明显的软土层,用 Cap Creep 模型模拟蠕变效应导致的次固结沉降.综合考虑施工和运营前期的软土沉降和数值模拟运算时间问题,模拟时间选择2年2个月,即800 d.

层序	名称	$ ho/{ m kg}$ • ${ m m}^{-3}$	$P_{\rm V}/{ m MPa}$	$P_{\rm J}/{ m MPa}$	$C/\mathrm{kPa}$	φ/(°)	h/m
1	杂填土	1 700	4.63	2.16	9.2	11.7	3.3
2	黏土	1 650	4.68	0.93	25.4	6.5	1.2
$(3)_1$	淤泥	1 602	1.26	0.82	11.0	2.2	12.8
4	粉质黏土	1 918	9.76	4.52	34.0	13.1	5.9
$(5)_1$	淤泥质黏土	1 714	3.73	2.24	21.0	7.6	2.5
6	碎卵石	2 200	16.56	8.53	0	30.0	5.8
$\overline{O}$	粉质黏土	1 980	10.32	5.17	36.0	17.6	4.5
9	碎卵石	2 200	18.75	9.12	0	30.0	4.4

表 3 土体的物理力学性质

Tab. 3	Physical	and	mechanical	properties	of	soft	soil
1 00.0	1 my orear	c.r.c.	meenamean	properties	· · ·	0010	

表 3 中:ρ 为密度,土体密度按该层土试样测试结果较大值选取,以充分考虑自身质量影响; P<sub>v</sub> 为体积模量; P<sub>J</sub> 为剪切模量; m 为层厚.

ABAQUS中的地应力平衡通过特殊方法进行处理.首先,进行重力载荷作用下的变形分析,得到 土体的沉降和应力分布;其次,再将上述计算的结果作为初始状态施加到模型上,进行地应力平衡分析. 施加重力计算,即可得到在重力作用的下的应力分布和沉降.通过此种方法,可以很精确地得到任何土 质的初始地应力平衡状态.初始地应力平衡结果,如图 3 所示.

基于初始地应力平衡的状态,模拟后续的开挖过程,开挖为 20 m,每掘进1m作为一个分析步.利用变化模型功能控制管片 的添加以及土体的开挖过程.在初始地应力平衡中,将所有管片 都杀死,然后在开挖过程中激活;在开挖过程中,将土体杀死.土 体与管片考虑为有限滑移,摩擦系数为0.2.利用 ABAQUS 中独 有的压力穿透功能,将0.2 MPa 的注浆压力施加于管片和土体 上,将125 kPa 的支护压力施加在支护面上.

#### 2.2 分析结果

图 4 为沉降历时 800 d 的土体沉降云图,由图 4 可以得到以下 3 点结论.

 1) 典型软土地层中盾构隧道开挖地层沉降具有明显的时空效应,距盾构隧道开挖面的距离越长、 盾构上方土体固结时间越久,地层沉降越大.

2) 受土体开挖卸荷和施工扰动多因素影响,管片安装完成后,隧道底部围岩隆起,最大隆起值达 24.5 mm,隧道上方围岩沉降,800 d 的最大沉降值达-18.6 mm.

3) 较近距离的双线盾构隧道,受沉降槽叠加影响,地表最大沉降发生在双线隧道之间的部位, ABAQUS有限元数值模拟分析结果与类似工程实测结果一致<sup>[9-10]</sup>.

隧道开挖 20 m 后,沉降历时 800 d 的管片应力,如图 5 所示,由图 5 可知:隧道开挖完成后,上下左 右 4 个方位的管片受力较大,上下左右 45°方位的管片受力较小,这与类似工程实测结果吻合<sup>[21]</sup>.

盾构隧道开挖 20 m 后,沉降历时 800 d 的隧道顶部和双线隧道中间地表两个测点的沉降曲线,如 图 6 所示.图 6 中:1 为隧道顶部地表沉降曲线;2 为双线隧道中间地表沉降曲线.由图 6 可知:隧道顶部 地表沉降达-15.3 mm,双线隧道中间地表沉降达-18.6 mm,历时 800 d,但两测点的沉降并没有完全



图 3 数值模型初始应力平衡结果 Fig. 3 Initial stress balance result of numerical model

第1期





800 d after tunnel excavation



收敛,说明该类软土受施工扰动后,将存在较长时期的次固结沉降,次固结沉降值较大且不均匀,容易在 地铁隧道投入运行之后,造成周边建(构)筑物沉降开裂、隧道自身开裂渗水.与福州地铁1号线工程地 质条件类似的上海地铁,已经遇到了类似问题.因此,在隧道施工和投入运营之后,要充分考虑该类软土

的工程特性及其可能造成的破坏,采取针对性的措施加以预防.

# 3 结论

分别采用扫描电子显微镜(SEM)、X 射线 衍射分析、室内物理力学试验和 ABAQUS 有 限元数值模拟分析方法,从不同方面研究了福 州地铁1号线埋深范围内存在的较厚层典型 软土的工程性质及其施工扰动后对地层环境 的影响.通过研究,可以得出如下3点结论.

福州地铁1号线埋深范围内存在的较
 原始の 説記 由金石統十孔階的常用取簡約



after 800 d tunnel excavation

厚的③1 淤泥,由含有较大孔隙的微团聚颗粒组成,试样包含石英成分,试样的不同放大倍数图像具有 一定的自相似特征.对比其他地区软土,③1 淤泥水的质量分数、孔隙比、液限、压缩系数和灵敏度较高, 重度、渗透系数、压缩模量、黏聚力和内摩擦角较小,工程性质较差,如不采取加固措施,施工和运营阶段 对该层的扰动将造成其长期次固结沉降,危及工程安全.

2) 盾构隧道开挖具有明显的时空效应,管片安装完成后,隧道底部围岩最大隆起值达 24.5 mm,隧 道上方围岩最大沉降值达-18.6 mm,地表最大沉降发生在双线隧道中间部位;上下左右 4 个方位的管 片受力较大,上下左右 45°方位的管片受力较小,数值模拟结果符合工程实际.

3) 沉降历时超过 26 个月,但相关地表监测点的沉降并没有完全收敛,说明该类软土受施工扰动后,将存在较长时期数值较大且不均匀的次固结沉降,容易引起周边建(构)筑物损害和隧道管片自身开裂渗水之类的工程问题.因此,应在盾构隧道设计、施工和运营各环节采取针对性的措施加以预防,确保工程安全.

## 参考文献:

- [1] 翁升,马时冬.福建高速公路软土特征及处理方法[J].华侨大学学报:自然科学版,2002,23(1):61-64.
- [2] 俞缙,王艳芳,宋博学.复合土钉支护的软土基坑开挖有限元模拟分析[J].华侨大学学报:自然科学版,2011,32 (2):212-217.
- [3] 简文彬,李润. 福州轨道交通建设中的岩土工程问题[J]. 工程地质学报,2010,18(5):748-753.
- [4] 易坤津.上海地区与宁波地区软土工程特性分析[J].浙江建筑,2012,29(5):30-32.
- [5] 颜庆智,付长波,饶江,等.东营软土工程特性及参数相关方程[J].中国石油大学学报:自然科学版,2010,34(3): 130-133,139.

- [6] 丘建金,文建鹏.深圳地区滨海软土工程特性及加固技术[J].工程地质学报,2008,16(4):567-571.
- [7] 朱启银,叶冠林,王建华,等.软土地层盾构隧道长期沉降与施工因素初探[J].岩土工程学报,2010,32(增刊2): 509-512.
- [8] 葛世平,廖少明,陈立生,等.地铁隧道建设与运营对地面房屋的沉降影响与对策[J].岩石力学与工程学报,2008, 27(3):550-556.
- [9] 林存刚,张忠苗,吴世明,等.软土地层盾构隧道施工引起的地面隆陷研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(12): 2583-2592.
- [10] 孙玉永,周顺华,宫全美.软土地区盾构掘进引起的深层位移场分布规律[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(3): 500-506.
- [11] 徐前卫,朱合华,廖少明,等.软土地层土压平衡盾构法施工的模型实验研究[J].岩土工程学报,2007,29(12): 1849-1857.
- [12] 林志斌,李元海,赵耀强,等.地下水对软土盾构隧道施工的影响规律分析[J].地下空间与工程学报,2012,8(2): 375-381.
- [13] 竺维彬, 鞠世健. 地铁盾构施工风险源及典型事故的研究[M]. 广州:暨南大学出版社, 2009:8.
- [14] LIAO Shao-ming, LIU Jian-hang, WANG Ru-lu, et al. Shield tunneling and environment protection in Shanghai soft ground[J]. Tunnel Underground Space Technology, 2009(24):454-465.
- [15] 王宝军,施斌,唐朝生.基于 GIS 实现黏性土颗粒形态的三维分形研究[J]. 岩土工程学报,2007,29(2):309-312.
- [16] 唐益群,张曦,赵书凯,等.地铁振动荷载作用下隧道周围饱和软黏土分形研究[J].土木工程学报,2007,40(11): 86-91.
- [17] 严继华.广州地铁复杂岩土性状分析与研究[D].北京:中国矿业大学,2005:6.
- [18] 中国石油天然气总公司.沉积岩中粘土矿物总量和常见非粘土矿物 X 射线衍射定量分析方法[S].北京:石油工 业出版社,1995:12.
- [19] 马晓峰. ABAQUS 6.11 中文版有限元分析从入门到精通[M]. 北京:清华大学出版社,2013:2.
- [20] 张凤祥,朱合华,付德明.盾构隧道[M].北京:人民交通出版社,2004:9.
- [21] 叶飞,何川,王世民.盾构隧道施工期衬砌管片受力特性及其影响分析[J].岩土力学,2011,6(6):1801-1806,1812.

# Engineering Properties Study of Typical Soft Soil in Fuzhou Metro Line 1

# LIU Ji-feng<sup>1</sup>, LI Xiong-run<sup>2</sup>, CHEN Fu-xing<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Sanming University, Sanming 365004, China;

2. Fujian Province Shunan Engineering Construction Company Limited, Putian 351200, China)

**Abstract:** To investigate the engineering properties of typical soft soil at Fuzhou Metro Line 1 and its influence to environment, some tests were conducted, such as the scanning electron microscope, X-ray diffraction analysis, physical and mechanical experiments, respectively. Based on the engineering geology and construction parameters, the ABAQUS numerical simulation analysis about soft soil influence to environment was presented. The results show that: the soft soil consists of voids and micro soil aggregates, and there exist the self-similar characteristic among the samples with different magnifications. The soft soil contains quartz crystal, with poor engineering properties. The calculation ground settlement and tunnel segments stress after 20 m excavation and 800 d consolidation agree with the similar engineering surveyed results. The max settlement of ground surface is 18.5 mm, which is not completely converged.

**Keywords:** Fuzhou Metro Line 1; typical soft soil; shield tunnel; ground settlement; segment stress; consolidation effect; numerical simulation

(责任编辑:陈志贤 英文审校:方德平)

**文章编号:**1000-5013(2015)01-0097-06

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.01.0097

# 建筑造型理论下景观构筑物的结构隐形作用

王瑜<sup>1,2</sup>,陈震<sup>3</sup>

(1. 南京航空航天大学 艺术学院,江苏 南京 211106;
 2. 东南大学 建筑学院,江苏 南京 210096;
 3. 江苏开放大学 传媒艺术系,江苏 南京 210036)

**摘要:** 通过归纳、总结和系统解析结构隐形于建筑造型背后的被迫与无奈,以及结构对建筑造型的积极反馈,选取景观构筑物这种功能相对单一,与结构高契合度的特殊的建筑类型为例进行深入论证.研究结果表明:结构的被动隐形仅是对建筑造型的一种适应性策略,推动结构形态与建筑造型的整合进而达到你中有我,我中有你的相互消隐才是积极主动的对策.

关键词: 景观构筑物;建筑造型;结构;隐形

**中图分类号:** TU 201 **文献标志码:** A

建筑造型理论围绕其研究对象即有形的建筑实体,所传达的在于精神与物质上的双重意义表现,既 与美学相关,亦与科学技术有关.当今对建筑造型的理解更多地集中在美学层面,从理论分析到设计实 践皆是如此.从近些年散见于各类书籍、杂志中对于景观构筑物具体项目的介绍即可窥见一斑,其内容 往往围绕建筑造型的理念来源、设计语言和表现形式等形象描述,极少深入触及构筑物的结构构思与技 术优势,形成一种偏重建筑造型之美学价值的舆论导向.特别是在我国目前的景观构筑物设计中,不少 设计师痴迷于追求建筑造型的奇伟瑰丽,却轻视结构或根本对结构知识知之甚少,缺乏对结构原理、材 料、构造、节点、建造等全方位的思考.这种剥离和忽视建筑造型背后之技术支撑的观点实则是对该理论 的一种误读,与当下景观构筑物数量激增、类型多样,以及在环境中地位不断提升的现状,形成一种不对 等的关系,且严重阻碍了景观构筑物设计的进一步发展.本文借建筑造型理论下结构隐形的表象,深入 揭示结构隐形作用的实质,以期为景观构筑物的研究和实践注入理性的活力.

# 1 建筑造型理论简述

建筑造型属于造型艺术中的一类,其含义一般分为广义和狭义两个层次.就广义而言,它是指建筑 创作的整个过程和各个方面;就狭义而言,它是指构成建筑形象的美学形式.在建筑界,建筑造型常常是 指后一种含义<sup>[1]</sup>.构成造型的最基本条件包括点、线、面、体和空间5种,它们是塑造建筑造型的基本元 素,发挥着各自不同的造型构图作用,产生不同的视觉效应,不仅可直接将其视为建筑节点与构件的原 型,甚至建筑整体都可视作元素本身.

建筑造型之"形"变化万千,给予观者视觉上的美感是不变的追求,按照美的规律来创造是不变的原则.建筑造型之美来自作品中点、线、面、体、空间、色彩等要素通过某种排列方式所产生的美的关系;结构形态之美源自材料使用讲究效率、工程建设要求经济的艺术思想,两者出发点不同,最终呈现美的效果也迥异.现实中,建筑形体与建筑空间的塑造更多的归结为形式美学的问题,对建筑的技术性考量退隐于次要地位,以至于结构形态的技术内核也被加以弱化、剥离,而有意识强化其表面的美学特征,结构技术自觉或不自觉的呈现出消隐的态势.建筑造型理论的研究已颇为成熟并成为范式得以推广,加之结构技术强有力的支撑,极大地拓展了建筑造型自由发挥的余地,而不再是建筑形体的制约因素.在建

**收稿日期:** 2014-05-26

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(NR2012022)

通信作者: 王瑜(1980-),女,讲师,博士,主要从事建筑技术科学、环境设计的研究. E-mail:jodewang@163. com.

筑系统中,结构对其他元素的控制力愈发减弱,对于建筑空间、建筑形式所具有的积极意义逐渐退化.然而,结构隐形的实质并不是忽视甚至无视结构、否认结构对建筑的塑造力.设计实践中常为了达到特定的设计意图而刻意为之,既有结构被迫隐形的百般无奈,也有结构谦逊地隐形背后对造型的积极反馈.

# 2 被动适应的结构隐形

#### 2.1 隐于精神性需求

建筑物之"形"已演变至人类意识认定的属性.这种属性一方面作用于力学、数理或时间上;另一方 面作用于心理、物理或生理上.在建筑空间精神性需求的激励下,几何形体要对空间形态进行强化处理, 结构关系须为抽象的点、线、面和体造型元素的提炼让步.结构技术上实则毫无推陈出新之处,反而可能 以偏离结构逻辑的姿态出现.换言之,令人惊叹的并非出自于结构之复杂有机关系的精妙呈现,而是来 自于对真实的结构关系的模糊混淆.

由密斯设计完成闻名于世的巴塞罗那博览会德国馆,基本上无任何功能的限制,仅供人作短时间休息与参观之用,当属于景观构筑物中的经典力作.结构本是钢框架,却最终表现为一个柱与板片元素并置的建筑形式.在这个建筑中,屋面吊顶不仅至关重要,而且非同寻常,因为它已经不是一般意义上的吊顶,而是以吊顶为手段,将屋面完全从框架关系中分离出来,转化为与框架结构迥然不同且赫然并存的板片元素的一部分<sup>[2]</sup>.对实际的结构传力关系及其连接构造的掩饰恰是密斯有意为之的结果.这其中有当时当地的经济条件和建造状况的无奈,有建构表达并非是结构受力关系呈现的密斯的个人方式,也有将风格派绘画以长和方为基本母题的几何形体转译为空间中的映现来进行平面组织和墙体布局的艺术追求.屋面、墙体、基座和玻璃板片被抽象成水平视野中单纯的几何形体即面,十字柱和玻璃的边框则被抽象成线.密斯并非就感兴趣建造的真实,他感兴趣的是表达的真实.密斯之所以被认定是理性的,是因为宁愿相信方的、简单的事物,是理性的标记;而弯曲的,复杂的事物是非理性的标记.但是当追查那些能贴上理性标签的事物时,高度发达的辨识能力却只不过是在行使某种偏见.密斯是如何一方面隐藏了理应表明荷载传递关系的机械结构,另一方面能保持着表现结构的真实与理性的名声.为了看上去像概念上的结构,一个承重的结构必须无耻地否认它承受荷载的事实<sup>[3]</sup>.罗宾•埃文斯对密斯的评价虽显偏激,但就德国馆而言,却揭示了其结构隐于所谓理性的精神追求的真相.

#### 2.2 隐于形体与表皮的模糊关系

建筑表皮不再作为建筑结构与围护系统必需的结合体,而是日益脱离承重结构的束缚,仅起填充与 分割空间之用,成为相对独立的表现要素,获得形体表达上的自由.尤其是数字技术与建筑学的碰撞和 交融,使建筑师几乎无任何限制地进行各种形式的设计,复杂的形体应运而生.当建筑造型愈发出人意 料、表皮的自我呈现愈发光怪陆离之时,作为"骨"的承重结构本体则默默地隐匿于"皮"之后,在形体与 表皮亲密而模糊的关系间,在建筑师精心推敲的结构与表皮、空间与环境的关系间选择了消隐,在或平 和或张扬的外表下透露出结构自得其乐的态度.

Sherbourne Common 展亭位于加拿大安大略湖多伦多滨水区.做工精良的镀锌板拼接成由屋面到 外立面完整而致密的覆层,实现复杂的三维形体,为展亭披上了一层柔软而富有质感的表皮.镀锌板的 应用不仅表达了对往日滨水区工业带的致敬,也显现了对公众健康之关注.展亭外立面上所覆的镀锌板 均是经过防腐处理、未曾抛光的,如图1(a)所示.考虑到公众视觉上的舒适性,同时可以历经风雨的洗 礼依旧保持原貌,其门洞下方的部位则覆以抛光过的镀锌板,保证此空间光线的充足,如图1(b)所示. 表皮之下真正的结构则是钢框架结构,相对单纯的结构关系被极富动感与表现力的表皮所掩盖,形体所 具有的丰富和饱满与表皮性质息息相关,不禁令人联想到弗兰克·盖瑞惯用的设计手法.

#### 2.3 隐于建筑造型的大量复制

某种结构形式在应用初期具有相当的创新性与实效性,对于建筑造型的更新具有革命性与先导性的意义.然而,当其被无限制地复制并充斥于各个角落时,模式化的生产与设计使得该结构形式成为约定俗成的套路,审美疲劳的出现往往促成人们对结构的轻视.社会需求的大量增加导致结构形式在一定时期内的批量生产而无暇顾及自身的改进与更新,结构形式失去了最初技术创新的原动力,沦为不假思索、不断套用的公式.当对结构的熟练掌握与运用能够解决更多建筑造型问题时,结构对于建筑造型的



(a) 外立面所覆未经抛光的镀锌板



(b) 门洞下方所覆抛光过的镀锌板

图 1 加拿大多伦多滨水区的 Sherbourne Common 展亭 Fig. 1 Sherbourne Common pavilion on Toronto's waterfront in Canada

制约力越来越小,积极意义逐渐退化,在现实的运用中自发趋于消隐.

设计实践中,建筑师对于结构的考量更多地聚焦在柱网的排布、相关规范的简单套用,柱网所依托的框架结构似乎成为应对所有建筑造型 问题万能的法则.曾在19世纪末20世纪初的建筑运动中为建筑造型带 来革新与巨变的框架结构体系,已慢慢失去了对人们感官上的刺激.由 此建构起的廊架据已司空见惯,如图2所示.甚至当年在国内盛极一时 的张拉膜结构凉亭,也因盲目地大量复制、滞后的技术发展的以及不当 的管理维护而不见了昔日的光辉,令人对其视而不见.

#### 2.4 隐于装饰性的视觉要求

此类建筑虽采用某种表达结构的方法,以便体现技术的力量,但实际上却从事了一种与结构逻辑不相匹配的视觉程序<sup>[4]</sup>.换言之,其满足的视觉上的要求是与结构要求相互矛盾的,真实的结构被隐藏起来,暴露出来的是不合理的、有缺陷的或虚假的结构.结构设计几乎完全是由视觉因素决定的,常以牺牲结构有效性为代价.在很多使用裸露结构来

表达技术革新思想的建筑艺术中,已采取的形状和可视手段自身都不是适合于功能需要的技术范例<sup>[4]</sup>. 作为当地重要景观节点的郑州郑东新区六合桥,如图3所示,醒目的是两个大小不一且形如蝴蝶翅 膀的拱肋,看似颇具结构表现力但实际上仅是单纯追求形式感的装饰性构件,与桥身整体结构受力无 关,以伪装的斜拉索结构来掩饰真实的梁柱结构.



(a) 六合桥



(b) 示意图

图 3 郑州郑东新区六合桥及示意图 Fig. 3 Liuhe bridge in Zhengdong new district of Zhengzhou

# 3 积极反馈的结构隐形

## 3.1 隐性的技术支撑

无论结构在建筑造型中如何的弱化与隐形,以及出于以上何种缘由的退隐,结构为建筑造型提供有



图 2 钢筋混凝土框架结构廊架 Fig. 2 Porch of reinforced concrete frame structure

99

效的骨架和支撑,提供建筑造型得以彰显的物质附着物,都是无可争辩的事实.建筑造型以自身特有的 构成语汇将结构规律进行美学诠释,达到建筑形体与建筑空间的完美呈现,但视觉层面上,结构并非一 定要暴露出来才能证明其存在的意义,而是以一种隐性而巧妙的方式决定或影响着整体的建筑造型,实 现结构技术与建筑造型的协同合作,表现自身的艺术潜能.可以看到的结构体必须是美的.即使是结构

体被隐藏起来,作品整体美的价值也应在某种程度上由内部结构的 承载力、经济性体现出来. 骨架本身虽没有什么魅力,但是它是用自 身所具有的间接的表现形式来提高整体建筑的诗意<sup>[5]</sup>. 结构并不依 赖于观者对其直观的感知方式,事实上却存在着难以或者无法直接 感知的现象,即需要观者从理性的角度进行深入分析而非浮于表面. 图 4 所示墨西哥城国立人类学博物馆的庭院由一面积巨大的悬挑的 钢筋混凝土伞盖所遮蔽,支承柱体量相对较小其柱身装饰以精美的 浮雕,悬挑结构方式被有意识地弱化,整个伞盖仿佛漂浮于空中,而 其力度感却让人联想到与力抗衡的结构.



图 4 墨西哥城国立人类学 博物馆庭院里的伞盖 Fig. 4 Canopy of the national museum of anthropology in Mexico

#### 3.2 显性的合为一体

美观是结构形态与建筑造型共同的追求,从某种意义上而言具 有相通性,而现实运作却受到不同的法则所支配.两者的合为一体是

在结构形态富有效率与取得经济性的基础上,发掘结构形态对于建筑造型的形式策动力,达到结构形态 与建筑造型的有机整合,最终实现建筑形式真、善、美的统一.所谓显性,即是视觉层面结构的裸露,直观 地参与到建筑造型的构成中,观者经由明晰可辨的结构来感知力的传递,建筑与结构之间呈现更为密切 的关系,你中有我,我中有你,难以剥离.视觉层面上,结构本身虽可见可知可感,而结构形态与建筑造型 的相互交织,既可以说是互为彼此而显现,亦是相互消隐,这一情形普遍存在于具有建筑与结构高契合 度特性的景观构筑物之中.参照英国学者安格斯•麦克唐纳总结的结构与建筑形式之间的关系,根据两 者整合的程度不同,可分为以下几种情形.

3.2.1 结构作为造型 建筑造型完全由结构实体组成,由纯技术标准决定,结构不仅起到承载力流的作用,而且作为建筑形体的全部.建筑美感纯粹源于结构的技术动因.诸如充气结构、悬索结构、张拉膜结构和壳体结构等均可直接作为建筑造型来应用.由伦佐•皮阿诺联合ARUP工程事务所设计完成的IBM欧洲巡展临时展亭,如图5所示,一系列自支撑的三铰拱组成建筑物的主体外观,次构件是叠层榉木支杆和系杆,由聚碳酸酯棱锥相连接,采用铝制连接件将这些构件拧在一起.透明的棱锥不仅作为结构构件将拱顶塑造成形,还充当了建筑物的表皮.依托结构自身的完善设计成就了建筑造型的美观<sup>[6]</sup>.





(a) 展亭



图 5 IBM 欧洲巡展临时展亭 Fig. 5 IBM travelling pavilion

在当前数字技术的语境下,随着复杂性思想的发展,结构愈发积极地融入到整体建筑生成的系统过 程中.以UG,CATIA,Proe为代表的三维结构有限元计算软件成为各种非线性建筑实践的重要依赖对 象,其与CAD无缝对接集成的特点极大地提高了设计水平和效率,结构俨然贯穿于建筑造型形成全过 程的一条主线.从设计之初的条件分析到设计成果的媒介展示,再到建造过程中的反馈调整,均服务于 结构逻辑的物质表现,而建筑造型则是结构推理水到渠成的必然结果,结构的鲜明特征成就了建筑造型 无可替代的标识意义.

2010年,在芬兰坦佩雷市所完成的实验性木结构展亭——直边展亭(straight edge pavilion),即是 在数字技术促成下的产物.该展亭长 10.9 m,宽 7.9 m,高 4.6 m,其具有强烈视觉冲击力与侵入性的建 筑造型在校园当中格外醒目.依靠算法程序的计算和定位,立方体块各片段相对的两边以非正交方式交 接在一起组成该展亭的双曲表面.电脑数控切割在短短的两天内实现了 519 块各不相同、厚度为 7 mm 的胶合板构件的切割和标注,依照预先精心设计的蒙太奇组合顺序将这些构件组装起来,呈现于世人面 前,如图 6 所示.作为结构构件的立方体块的规则和重复与它们所塑造出的复杂建筑形体的不规则偏转 之间取得了一种审慎的平衡关系.

3.2.2 结构产生造型 结构要求强烈地影响建筑造型.建筑造型由结构形式产生,能够充分满足结构 的要求,但对于结构的态度仅仅是积极认可、忠实表现并有效利用,所用的建筑语言是慎重的,没有对结 构技术的过分描述与表达,有时结构本身并不一定是完全裸露的.位于中国昆山悦丰岛有机农场里的一 处采摘亭,为钢结构的梁柱体系,如图7所示,结构构件在建筑室内部分被竹木条格栅的吊顶完全掩藏, 在室外的挑檐部分则由银色金属格栅所遮罩,若隐若现地显露出结构钢梁.尽管结构未形成大量的裸露 构件,而轻盈与通透的建筑造型终究要受到结构的影响,结构形式与建筑美学价值相融合.这并不是在 歌颂技术,而是在设计中利用了必要的技术.



Fig. 6 Straight edge pavilion in Tampere, Finland

3.2.3 经过装饰的结构 被采取的建筑形态是由结构骨架所产生, 建筑很少因为视觉原因采取更多的措施,只是对结构稍微做一些可 视性的调整,即装饰一下来体现建筑形式,结构未曾被装饰形式所掩 饰.伦敦滑铁卢车站国际铁路中转站的火车棚,其形式与铁轨的蜿蜒 走势、站台的非对称布局以及火车的高度相契合.屋面由一系列三铰 拱组成,顶铰的位置偏向一边,正位于弯矩为零、压力与拉力转换之 处,也成为内部结构和外部结构反转的转接点.西侧屋面全部覆盖以 玻璃,使结构得到完整的呈现,又面向主干道,可向来往的旅客展示 威斯敏斯特议会和泰晤士河的风采(图 8).

3.2.4 结构作为装饰 设计过程是由视觉因素而不是由技术因素 所驱动,如果从技术标准来判断,其结构性能往往是不甚理想的.来 自于非建筑学领域的视觉词语,如从宇航工业借用来的措辞,将建筑 结构的应用引向了象征意义的道路上.它们所依托的技术适用于具 体的要求,有着特定的适应背景.往建筑上转让的情况通常只是表现 在引人注目的构件的形象和外观上而不是技术本身<sup>[4]</sup>.麦克唐纳一



图 7 江苏昆山悦丰岛有机农场采摘亭 Fig. 7 Harvest pavilion in Kunshan, Jiangsu



图 8 伦敦滑铁卢车站 国际铁路中转站 Fig. 8 Waterloo internationa railway station in London

针见血地指出,伦敦的劳埃德总部大厦的入口雨棚的结构即是象征性的应用.构成雨棚结构的弯曲钢构 件与其上所开的圆形减重孔,非常类似于飞机结构中的主机身构件(图 9).这种构件适应航空技术中减 轻重量的要求,用于此处却与悬挑结构的受力机制相违背.因 此,此类情形中的结构即便清晰可见并符合建筑艺术的审美 情趣,但技术意义上则不尽如人意.

# 4 结束语

建筑造型理论将复杂的建筑问题加以简化,旨在为理论 研究与创作实践提供更为直观的视角,却有意或无意地将结 构置于被弱化、被隐形的境地.为突出建筑造型,结构或借用 虚假的替身来掩饰真实的自我,或主动淡出人们的视线,其隐 形多出于各种无奈与被迫.但这仅是结构隐形作用的一方面, 另一方面结构对于建筑造型隐性的技术支撑以及与建筑造型 显性的合为一体则显现出结构隐形作用的主动性,积极地作



图 9 伦敦劳埃德总部大厦入口雨棚 Fig. 9 Canopy of Lloyds headquarters building in London

用和反馈于建筑造型,进而推动结构形态与建筑造型的整合朝着良性方向发展.对于结构隐形作用的认识,不应仅仅停留在被建筑造型掩盖的看似消隐的表面,隐形背后的技术源泉与整合力量将会为设计带 来深层次与长足的驱动力.

#### 参考文献:

[1] 史春珊,孙清军.建筑造型与装饰艺术[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社,1988:1.

- [2] 王骏阳.《建构文化研究》译后记(中)[J].时代建筑,2011(5):140-147.
- [3] 汤凤龙."匀质"的秩序与"清晰的建造":密斯·凡·德·罗[M].北京:中国建筑工业出版社,2012:67.
- [4] 麦克唐纳 A J. 结构与建筑[M]. 陈治业,等译. 北京:中国水利水电出版社,2003:69,72.
- [5] 斋藤公男.空间结构的发展与展望:空间结构设计的过去,现在,未来[M].季小莲,等译.北京:中国建筑出版社, 2006:202.
- [6] KRONENBURG R. Portable architecture: Design and technology[M]. Boston: Birkhauser Verlag AG, 2008:27.

# Invisibility of Structure for Landscape Architecture Influenced by the Theory of Architectural Form

WANG Yu<sup>1,2</sup>, CHEN Zhen<sup>3</sup>

(1. Arts College, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. School of Architecture, Southeast University, Nanjing 210096, China;

3. Department of Media Arts, Jiangsu Open University, Nanjing 210036, China)

**Abstract**: Two different situations are analyzed: one is that structure is forced by architecture form to become invisible; another is that the structure responds to architectural form positively. A series of Landscape Architectures perform as good examples for these views mentioned above, for their simplex function and high integration with structure. The conclusion is presented that the invisibility of structure just plays a passive role in adaptation to architectural form, while the positive way is to push forward the integration of structural form and architectural form.

Keywords: landscape architecture; architectural form; structure; invisibility

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)
**文章编号:**1000-5013(2015)01-0103-04

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.01.0103

# 我国小城镇滨水区的景观规划策略

# 朱建国1,2,金倩2

(1. 平凉医学高等专科学校,甘肃 平凉 744000;
 2. 湖南城市学院 建筑与城市规划学院,湖南 益阳 413000)

**摘要:** 讨论我国小城镇滨水区景观规划的实践情况,并从中发现问题,总结经验教训,合理运用到实际的项目操作中,并提出适宜我国小城镇滨水区景观规划的谋划策略.研究表明:该策略模式对于我国大部分小城镇具有普适性,当然不同地区的小城镇的实际情况不同,可根据当地的具体情况调整模式的内容,故具有一定的指导弹性.

关键词: 小城镇; 滨水区; 景观规划; 公共空间 中图分类号: TU 984.12 文献标志码: A

滨水区作为城市明发展的重要标志之一,在今天城市快速化进程中,不断地更新着它的功能及形式,以更适合城市发展模式.我国的滨水区开发建设实践高潮大约是从 20 世纪八九十年代开始的.随着工业化的发展,城市经济逐步攀升,但各类城市问题也日益出现并严重起来.近几年来,国内许多小城镇越来越意识到滨水区开发的重要性,纷纷开始投入到城镇滨水区环境整治、用地功能更新和滨水区开发新建的热潮中<sup>[1]</sup>.提出了遵循"适当均布原则"和"景观原则",形成点、线、面结合的绿地系统<sup>[2]</sup>.例如,浙江嘉兴滨水区、绍兴两湖地区、福建九峰镇、湖南凤凰古镇滨水空间、贵州荔波县樟江滨水区等城镇滨水区景观规划设计,都取得了比较令人满意的成果.本文讨论我国小城镇滨水区景观规划的实践情况,提出适宜我国小城镇滨水区景观规划的谋划策略.

### 1 我国小城镇滨水区的景观规划特点

#### 1.1 充分挖掘水资源特质,展现城市特色水体

城市水体资源和绿地资源一样极具开发潜力,只要合理进行规划建设,就可以充分展现出城市的个 性特色和形象魅力.对于我国目前迅猛的城市发展现状,快节奏的城市生活方式,以及高负荷的工作环 境而言,拥有一片城市自然水域会显得弥足珍贵.我国目前很多城市都着力对城市的水体资源进行特色 挖掘,力求使其成为展现和提升城市形象的一张名片,既从某种程度上改善了千城一面的城市建设现 状,又提升了整个城市的知名度.

例如,浙江嘉兴早在唐代的时候就已经有着规模巨大的河网、河道密集、布局整齐,是个景色秀美的 江南水乡城市.到了现代,嘉兴市滨水区景观规划设计利用江南水乡独特的水系分布及流动特征,打造 了小桥流水、古道西风般的唯美滨水区景观.滨水区绿化尽可能地扩大沿河绿化,形成连续性绿化带,用 绿色来勾画嘉兴古城轮廓,延续城市文脉.同时,以良好的绿色空间、优化的景观环境质量,体现现代化 水乡城市的新形象<sup>[3]</sup>.既展现了独一无二的江南城市滨水区景观之韵味,亦为市民和游客创造了一个轻 松愉快的休闲游乐场所.

#### 1.2 完善城市功能,打造全面而完整的城市结构体系

滨水区作为城市公共空间的一部分,具有城市开放空间的属性并承担了相应的城市空间职能. 滨水 区景观不仅是城市绿地系统的一部分,也是城市道路交通、城市经济带、城市文化休闲娱乐区等各种类

**收稿日期:** 2015-01-20

通信作者: 朱建国(1959-),男,教授,博士,主要从事小城镇景观规划设计的研究.E-mail:307418051@qq.com.

基金项目: 教育部人文社会科学基金资助项目(12YJA790035)

型城市功能结构的完善、丰富和延伸.目前,国内城市发展迅猛,城市的综合实力日益上升,现有的城市 格局已远远不能满足城市继续发展的需求,诸多城市开始重视滨水区景观的各项功能的开发,这为滨水 区景观规划建设创造了良好的前景与资本.

绍兴县位于浙江省中北部,是江南一带著名的水乡小镇.伴随着老城区空间拥挤、功能混杂、配套不 足等问题的日益严重,绍兴县提出了以瓜渚湖和大小坂湖为中心的"两湖"区域规划建设方案.其功能定 位包括了居住、商贸、旅游、休闲等,以功能的混合来强化 24 h 城市的概念,在宜人的滨水空间中为人们 创造了生活、工作、娱乐、休闲等多种活动机会.瓜渚湖片区主打城市的商业、休闲、娱乐、度假等功能,集 中布置在环湖地带,为市民和外来者提供了购物消费、休闲娱乐、商务会议、贸易洽谈的场所;大小坂湖 主要体现湖岛结合的自然开敞空间特色,配置游憩休闲、文教体育及生态人居等功能<sup>[4]</sup>.

#### 1.3 规划生态滨水区,建立城市滨水景观生态安全格局

滨水区景观规划需要从景观环境空间的整合入手,建立多层次的滨水区景观生态安全格局.我国城 市正面临着水体污染、绿色植被遭受破坏等环境问题,自然生态景观的保护与恢复迫在眉睫.必须识别 并占领具有战略意义的关键性空间位置和联系,建立滨水区景观生态安全格局.

在滨水区建立景观生态安全格局,进行合理有效的滨水区生态规划,有利于防治和控制各种自然地 质灾害,同时可以防止城市各种污染对滨水区景观生态环境的影响与破坏等.

泸溪县位于湖南省西部、湘西土家族苗族自治州东南方,是一个典型的湘西少数民族小城镇.泸溪 不仅历史悠久,人杰地灵,文化底蕴深厚,而且风景毓秀,自然环境优美,有着丰富的山水、动植物等资 源,是全国生态建设示范县.但是由于经济实力相对较弱,缺乏合理的控制和引导,导致近几年来自然生 态景观受到一定程度的破坏,对当地居民的生活和旅游业造成了不利的影响.在泸溪县滨水景观的规划 设计中,重点考虑了泸溪县滨水区景观的保护问题,确定并贯彻了自然生态优先的原则.其中包括了构 架城市生态走廊,实现景观的可持续发展;划定、预留完整的滨水自然生态的发展空间,保护滨水生物的 多样性;建立相应的评价体系,以提高城镇整体环境质量,维护生态平衡,等等<sup>[5]</sup>.

### 2 我国小城镇滨水区的景观规划存在的问题分析

西方大多数国家由于进行了比较彻底的产业革命,城市化水平较高,城市形态较稳定,进入了自我 完善的阶段.故其滨河公共空间的建设也就处于一种稳定的有机发展状态中.目前,国内小城镇滨水区 景观规划建设大多参考和借鉴国内大城市或发达国家城镇滨水区景观规划实践的经验,一些地区没有 充分考虑我国当前的国情和当地的实际状况,实践中存在着以下几点问题.

#### 2.1 滨水区开发模式的盲目性

国内小城镇的经济发展水平大多不高,滨水区作为一块区位优势明显且尚未充分开发的板块,被很 多小城镇政府觊觎已久.成功的滨水区规划和建设为城镇带来的巨大效益是显而易见的,更加促使众多 小城镇滨水区开发的热度不断升高,这其中包含了两种开发模式:自下而上和自上而下.然而,这两种模 式在实践中却都存在着盲目开发的误区.

自下而上的开发模式的主要背景因素是城市快速发展导致内部用地空间不足,使得滨水地带成为 城市开发建设的热点区域.这是一种被动的发展趋势,虽然通过置换滨水区的土地、改善滨水区景观质 量等,推动了滨水区的再开发,但是这种开发模式却具有一定的局限性,它所关注的因素更多集中在物 质性的城市经济建设中.在这种动力机制下,相应的规划开发活动只是一种应急补救型的措施,不仅可 能导致社会经济不能长久发展,还可能导致自然环境资源在开发建设者急功近利的心态下遭到破坏,违 背人与自然和谐相处的可持续发展原则.

自上而下的开发模式往往出于小城镇开发建设的痼疾——政绩工程的目的.很多小城镇领导意识 到滨水区开发的巨大潜力及可能带来的光辉影响力,积极开展滨水区空间的形象改造与重塑,大力推进 滨水区各项工程建设.这种发展模式具有主动性,并且政府领导者的决策权是这种模式的动力机制中的 关键因素.一些小城镇的领导受到某些功利因素的影响,把公众的意愿抛之脑后,盲目追求大规模、大尺 度的形象工程,消耗了大量的人力物力财力,却没能给社会、经济和环境等带来良好的效益,反而造成了 宝贵的土地、空间、环境等资源的浪费,对小城镇的发展实为一种非常不好的影响.

#### 2.2 缺乏对城市传统文化的继承

城市滨水景观是自然景观与人文景观的有机结合,是突显城市个性特色的重要地段.然而,目前很 多小城镇盲目模仿、生搬硬套国内外大城市滨水区景观设计手法,做出的方案毫无特色可言,主要体现 在两方面:一方面是盲目追崇现代化的处理手法,忽视了当地的地域性特色,造成了各地滨水区方案千 篇一律,布局和空间感雷同枯燥、缺乏新意,即将现代化和民族文化、地方文化对立起来,而忽视了当地 特色的体现,缺少空间的可识别性<sup>[6]</sup>;另一方面,忽视了当地的历史传统文化背景.

滨水区景观可以反映一定时期下某地区的城市特色风貌和居民的经济、精神、伦理、审美等各种价值观,这些是城市宝贵的非物质文化遗产.有些滨水区还保留有历史遗迹、历史建(构)筑物等城市物质文化遗产,这些都是城市无价的财富.但是,许多小城镇在滨水区景观规划设计过程中忽视甚至无视传统文化与地域特色的意义,没有将两者很好地融合起来.有的对存留的历史古迹不加考虑,在其周边任意大规模的开发,使得历史文物与滨水区景观氛围格格不入,有的甚至对其一律拆除,损毁了大量有价值的文化遗产.城市传统文化在滨水区景观规划中得不到继承,甚至遭受破坏.

#### 2.3 公共空间的不连续

公共空间的不连续主要体现在不能全面可及、开敞空间缺乏且不连续、滨水岸线不连续,以及亲水 空间设计落后四个方面.

全面可及是所有滨水开发项目的目标之一. 然而,许多小城镇滨水区并未向全市全面敞开,对形成 整个城镇的公共绿地系统造成很大的阻碍. 一方面来说,很多小城镇滨水区开发普遍存在着严重的圈地 现象,部分滨水区空间被开发商纳入自己的私有领域中,外人不能自由出入,造成了滨水空间景观的隔 断;另一方面是与城市的其他开放空间没有很好的过渡和衔接,一些大体量的高层建筑阻碍了人们到达 滨水区,而且也遮挡了人们与滨水区的视线连接,缺乏足够大的开敞面让公众可以轻松感知和到达滨水 区. 此外,还有一个不能忽视的方面,那就是缺少能够便捷抵达滨水区的连贯的公共步行通道,人们前 往滨水区的步行路线往往被车行道路打断.

作为城市开放空间的一部分,滨水区自身的开敞空间明显不足.许多小城镇滨水区景观规划设计了 大量的滨水景观道,却没有足够的可以承载各种游憩、休闲娱乐活动的空间节点,导致滨水区景观的使 用率大打折扣.有的滨水区虽然规划了相应的开敞活动空间,却与城市其他开敞空间联系不够,不能一 同构建起完整的城市开放空间体系;或是多个滨水区的开敞空间用地功能过于单一,彼此之间没有合理 的衔接过渡.这些都使得滨水区景观资源不能很好地融入城市公共开放空间体系.

小城镇滨水区景观规划的岸线处理也显得不尽人意.一些传统工业、商业及居住用地占据了大部分 的滨水土地,滨水岸线的连续性受到破坏,公众无法获得真正的"亲水"体验.

小城镇滨水区景观的设计大多照搬套用国内外城市的成功案例,加上自身水平有限,对滨水空间的 改造和重建尚未完全脱离曾经防洪防旱的传统思路.这使得很多小城镇滨水区亲水空间的设计要么不 伦不类、生硬呆板,与滨水区乃至整个城市空间格格不入;要么平铺直叙、手法平庸落后,毫无特色可言.

#### 3 我国小城镇滨水区的景观规划思路

#### 3.1 调整生态要素并整治景观环境,确立景观生态安全格局

根据当地的实际情况,对滨水区现有的生态要素进行整合、修复、适当增减等合理调整,例如摈弃传 统硬质堤岸的设计手法,采用生态河岸的处理方式等,保证滨水区景观的自然生态性.对于存在问题的 滨水区景观环境,不论自然还是人文景观,要采取合适的力度进行整治,恢复和改善滨水区景观的环境 风貌.同时,要充分认识到滨水区景观的生态脆弱性,识别并确立相应的景观生态安全格局,加强滨水区 景观对自然地质灾害的防御能力,并避免城市活动对滨水区景观造成的负面影响.

#### 3.2 完善城镇用地功能,合理统筹城镇整体空间结构

对滨水区景观进行正确的定位,注重滨水区对城市用地功能的调整与完善,考虑滨水区用地的综合 利用开发.事实上,工厂、仓储业、码头或火车站曾经占据的城市核心位置,往往具有宽裕的空间功能转 换可能性,而且代价低廉,拆迁量小<sup>[7]</sup>.因此,可以将它们转变为包含居住、商务商业、文化娱乐、旅游休 闲等多种功能的综合性用地空间,融入多元化的景观要素,打造滨水区空间的活力点.同时,合理兼顾并 统筹滨水区景观的空间要素与城市整体空间结构,如绿地系统、水系统、交通系统等之间的关系.

#### 3.3 打造与环境协调、可持续发展的滨水经济带(区)

通过改善滨水区空间环境质量及提高自然、人文景观的规划设计,创造优美动人的滨水区景观带, 同时注重公共服务设施的配套建设,提升滨水区景观的观赏与旅游价值.功能的多元化,自然景观的生 态化,旅游功能的强化等,势必成为土地价值提升、吸引投资、拉动内需的强有力因素,有效带动和促进 城镇经济的发展.在这个过程中,要特别注重开发建设与环境保护之间的协调,不断改善滨水区景观环 境质量,创造宜居怡人的自然和人文景观.着力整治存在问题的滨水区景观,采取合理手段避免滨水区 景观的不适当改造与不合理开发.利用政府的监控和引导力,保证滨水区环境与经济的可持续发展.

#### 3.4 融入传统文化及营造地域性特色,提升城镇形象

在小城镇滨水区景观规划的过程中,应当充分尊重当地的历史文脉与传统文化,妥善处理现代城市 文明与历史传统文化之间的关系,保护历史遗迹,传承并延续传统文化,做到新旧的有机结合.应当充 分挖掘当地的地域性特色,注重营造富有当地特色的滨水区景观的环境氛围.努力将滨水区景观打造成 城镇向外界宣传自己的名片,充分展现城镇的个性魅力,提升城镇的整体形象.

#### 4 结束语

通过对小城镇景观规划策略模式的研究,营造生态、人文、活力并重的滨水景观具有显著作用.文 中讨论我国小城镇滨水区景观规划的实践情况,并从中发现问题;同时,提出适宜我国小城镇滨水区景 观规划的谋划策略,对于我国大部分小城镇建设具有一定的普适性.

#### 参考文献:

- [1] 张峰.国内外城市滨水区发展趋势分析[J].港口经济,2008(8):47-49.
- [2] 郭燕沫.小城镇滨河景观更新与建设的研究与探索:以河南省汝南县汝河段更新为例[D].西安:西安建筑科学大学,2009:27-28.
- [3] 秦卫永,陈婵,殳世平.水乡城市滨水景观设计初探:以浙江省嘉兴为例[J].小城镇建设,2007(4):45.
- [4] 张勇,吴文鑫.小城市滨水地区开发策略研究:以绍兴县"两湖"区域为例[C]//2008 中国城市规划年会论文集.大连:大连出版社,2008:27-35.
- [5] 张岚.湘西小城镇滨水区景观保护和开发[D].长沙:中南林业科技大学,2005:55-56.
- [6] 张志,于志光.城市滨水区景观设计探析[J].城市研究,1999(2):24-32.
- [7] BENNETT P. Marking the river connection[J]. Landscape Architecture, 2001(2): 33-35.

# Strategies of the Waterfront Landscape Planning of Small Towns in China

# ZHU Jian-guo<sup>1,2</sup>, JIN Qian<sup>2</sup>

(1. Pingliang Medical College, Pingliang 744000, China;

2. College of Architecture and City Planning, Hunan City University, Yiyang 413000, China )

**Abstract:** The practical situations about the waterfront landscape planning of small towns in China were discussed, some problems were found, experience was summarized, and lesson was learned from the planning. Based on these results, the actual projects can be operated more reasonably. Furthermore, this paper also focused on proposing appropriate strategies about the waterfront landscape of small towns in China. There exists universality among, these strategy patterns. The contents of the planning patterns can be adjusted according to the specific local situation of the small towns in different areas. So these strategy patterns have certain flexibility.

Keywords: small town; waterfront; landscape planning; public space

(责任编辑:黄仲一 英文审校:方德平)

**文章编号:**1000-5013(2015)01-0107-04

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.01.0107

# 响应率法求解二阶部分极点配置问题

#### 陈梅香

(华侨大学 数学科学学院, 福建 泉州 362021)

**摘要:**给出一种求解多输入二阶控制系统的最小范数部分极点配置问题的新算法.该算法将部分极点配置问题转化为数值优化问题,使得在只有系统响应率的前提下,实现极点配置,同时保证得到的反馈矩阵的范数 最小.数值实验的结果表明:该算法是可行性的.

关键词: 极点配置;最小范数;响应率;二阶控制系统
 中图分类号: O 241.6
 文献标志码: A

# 1 预备知识

二阶控制系统为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{B}\mathbf{u}(t).$$
(1)

式(1)中:正定矩阵  $M \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为质量矩阵;半正定矩阵  $C \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为阻尼矩阵;半正定  $K \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为刚度矩 阵; $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 为输入矩阵;关于时间 t 的 n 维向量 x(t)和 u(t)分别为状态向量和控制向量.取

$$\boldsymbol{u}(t) = \boldsymbol{F}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}(t).$$
<sup>(2)</sup>

式(2)中: $F \in \mathbb{R}^{n \times m}$ , $G \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 称为反馈矩阵; $F^{T}$ 表示矩阵 F的转置.若有

 $(\lambda_k^2 \boldsymbol{M} + \lambda_k \boldsymbol{C} + \boldsymbol{K}) \boldsymbol{v}_k = 0, \qquad k = 1, 2, \cdots, 2n,$ (3)

则称( $\lambda_k$ , $v_k$ )为开环系统  $P(\lambda) = \lambda^2 M + \lambda C + K$  的特征对.式(3)中: $\lambda_k$ 称为特征值; $v_k$ 称为特征向量.若有 ( $\mu_k^2 M + \mu_k (C - BF^T) + (K - BG^T))w_k = 0$ ,  $k = 1, 2, \cdots, 2n$ , (4)

则称( $\mu_k$ , $w_k$ )为闭环系统  $P_c(\lambda) = \lambda^2 M + \lambda (C - BF^T) + (K - BG^T)$ 的特征对.

部分极点配置问题就是给定 p个数 $\mu_1$ ,…, $\mu_p$ ,求得反馈矩阵  $F \in \mathbb{R}^{n \times m}$ , $G \in \mathbb{R}^{n \times m}$ ,使得  $\mu_1$ ,…, $\mu_p$ 将 开环系统的 p 个特征值 $\lambda_1$ ,…, $\lambda_p$  替换,成为  $P_c(\lambda)$ 的特征值.而  $P_c(\lambda)$ 剩余的 2n-p 对特征对满足

 $\mu_k = \lambda_k$ ,  $w_k = v_k$ ,  $k = p+1, p+2, \dots, 2n$ . (5) 式(5)中:( $\lambda_k$ , $v_k$ )为开环系统  $P(\lambda)$ 的特征对,即开环系统剩余的 2n-p 对特征对仍为闭环系统的特征 对,也把它称为保持无溢出性.

当 m>1,系统为多输入系统时,反馈矩阵 **F** 和 **G** 的解不唯一<sup>[1-8]</sup>.因此,可以选取使反馈矩阵的范数  $J = \frac{1}{2} \| \mathbf{F} \|^2 + \frac{1}{2} \| \mathbf{G} \|^2$  为最小的解.其中: || • || 指矩阵的 Frobenius 范数,将它称为最小范数的部分极点配置问题.这种情况下得到的闭环系统可以尽量的减少能量的消耗及噪声的影响.

目前,已有不少求解最小范数的部分极点配置问题的数值方法<sup>[1-2]</sup>,都需要用到系统的矩阵 *M*,*C*, *K*.但是在实际应用中,可能已从实验中测量得到系统的响应率,即

$$H(s) = (s^2 \mathbf{M} + s\mathbf{C} + \mathbf{K})^{-1}.$$
(6)

而系统的矩阵 *M*,*C*,*K* 是未知的. Ram 等<sup>[8]</sup>提出只需利用响应率求解部分极点配置问题,但其求出的 *F* 和*G* 的解不唯一. 因此,本文提出一种只需利用响应率求解最小范数的部分极点配置问题的数值方法.

收稿日期: 2014-10-20

通信作者: 陈梅香(1984-),女,讲师,博士,主要从事计算数学的研究. E-mail:mxchen@hqu. edu. cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11271308);华侨大学高层次人才科研启动项目(12BS225);华侨大学中青年教师科研提升计划资助项目(ZQN-PY201)

## 2 定理及其证明

假设{ $\mu_1$ ,…, $\mu_p$ }  $\cap$  { $\lambda_1$ ,…, $\lambda_{2n}$ } = Ø, { $\lambda_1$ ,…, $\lambda_p$ }  $\cap$  { $\lambda_{p+1}$ ,…, $\lambda_{2n}$ } = Ø. 控制矩阵 **B** 是列满秩的,而且 ( $P(\lambda)$ ,**B**)对于  $\lambda_1$ ,…, $\lambda_p$  是部分可控的,即

$$\operatorname{rank}(P(\lambda_i), \boldsymbol{B}) = n, \qquad i = 1, \cdots, p.$$
(7)

对于所讨论的部分极点配置问题,先给出定理1.

**定理1** 设( $\lambda_k$ ,  $v_k$ )为开环系统  $P(\lambda)$ 的特征对,  $(\mu_k$ ,  $w_k$ )为闭环系统  $P_c(\lambda)$ 的特征对, 若式(5)成立, 即  $\mu_k = \lambda_k$ ,  $w_k = v_k$ . 则

$$(\boldsymbol{\lambda}_{k}\boldsymbol{v}_{k}^{\mathrm{T}},\boldsymbol{v}_{k}^{\mathrm{T}}) \begin{pmatrix} \boldsymbol{F} \\ \boldsymbol{G} \end{pmatrix} = 0.$$
(8)

证明  $(\mu_k, \mathbf{w}_k)$ 为闭环系统  $P_c(\lambda)$ 的特征对,且  $\mu_k = \lambda_k, \mathbf{w}_k = \mathbf{v}_k$ ,故有

$$(\lambda_k^2 \mathbf{M} + \lambda_k (\mathbf{C} - \mathbf{B}\mathbf{F}^{\mathrm{T}}) + (\mathbf{K} - \mathbf{B}\mathbf{G}^{\mathrm{T}}))\mathbf{v}_k = 0$$

移项得

$$(\lambda_k^2 \boldsymbol{M} + \lambda_k \boldsymbol{C} + \boldsymbol{K}) \boldsymbol{v}_k = \boldsymbol{B} (\lambda_k \boldsymbol{F}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}) \boldsymbol{v}_k$$

又( $\lambda_k$ , $v_k$ )为开环系统  $P(\lambda)$ 的特征对,即

$$(\lambda_k^2 \boldsymbol{M} + \lambda_k \boldsymbol{C} + \boldsymbol{K}) \boldsymbol{v}_k = 0.$$

因此,

$$\boldsymbol{B}(\boldsymbol{\lambda}_{k}\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}})\boldsymbol{v}_{k}=0.$$

因为是 B 列满秩的,故有

$$(\boldsymbol{\lambda}_k \boldsymbol{F}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}) \boldsymbol{v}_k = 0.$$

即

$$(\boldsymbol{\lambda}_k \boldsymbol{v}_k^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{v}_k^{\mathrm{T}}) \begin{pmatrix} \boldsymbol{F} \\ \boldsymbol{G} \end{pmatrix} = 0$$

另外,由文献[1]有定理2.

定理 2 给定矩阵  $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ , p个自共轭的特征值 $\{\mu_k\}_{k=1}^{\ell}$ , 若 F和G满足

$$\det((\mu_j \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} H(\mu_j), \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} H(\mu_j)) \begin{pmatrix} \boldsymbol{F} \\ \boldsymbol{G} \end{pmatrix} - \boldsymbol{I}_m) = 0.$$
(9)

那么,  $\{\mu_k\}_{k=1}^p$ 为  $P_{\mathfrak{c}}(\lambda)$ 的 p 个特征值, 即 det( $P_{\mathfrak{c}}(\mu_j)$ )=0. 式(9)中:  $\mathbf{I}_m$  指  $m \times m$  的单位矩阵.

具体证明见文献[1]的定理 1.

综合定理 1,2,给定 p 个数  $\mu_1, \dots, \mu_p$ ,矩阵  $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ ,响应率  $H(\mu_i), i=1, \dots, p$  及开环系统的 2n - p 对特征对 $(\lambda_j, v_j), j = p+1, \dots, 2n$ . 最小范数部分极点配置问题可转化为关于变量  $F \in \mathbb{R}^{n \times m}, G \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 的优化问题,即

$$\min \frac{1}{2} \| \mathbf{F} \|^{2} + \frac{1}{2} \| \mathbf{G} \|^{2},$$
s. t.  $\det((\mu_{j}\mathbf{B}^{\mathsf{T}}H(\mu_{j}), \mathbf{B}^{\mathsf{T}}H(\mu_{j})) \begin{pmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{G} \end{pmatrix} - \mathbf{I}_{m}) = 0, \quad j = 1, \cdots, p,$ 

$$(10)$$

$$(\lambda_{j}\mathbf{v}_{j}^{\mathsf{T}}, \mathbf{v}_{j}^{\mathsf{T}}) \begin{pmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{G} \end{pmatrix} = 0, \quad j = p+1, \cdots, 2n.$$

令  $Y = \begin{pmatrix} F \\ G \end{pmatrix}$ ,则式(10)可转化为

$$\min f(\mathbf{Y}) := \frac{1}{2} \| \mathbf{Y} \|^{2},$$
s. t.  $g(\mathbf{Y}) = 0,$ 
 $h(\mathbf{Y}) = 0.$ 

$$(11)$$

式(11)中: $g(\mathbf{Y}) = (g_1(\mathbf{Y}), \cdots, g_p(\mathbf{Y}))^{\mathsf{T}}; h(\mathbf{Y}) = (h_1(\mathbf{Y}), \cdots, h_{2n-p}(\mathbf{Y}))^{\mathsf{T}}.$ 且

$$g_{i}(\mathbf{Y}) = \det((\mu_{i}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}H(\mu_{i})), \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}H(\mu_{i}))\boldsymbol{Y} - \boldsymbol{I}_{m}), \qquad i = 1, \cdots, p,$$

$$h_{i}(\mathbf{Y}) = (\lambda_{i}\boldsymbol{v}_{i}^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{v}_{i}^{\mathrm{T}})\boldsymbol{Y} = 0, \qquad j = p+1, \cdots, 2n.$$

$$(12)$$

在优化问题(11)中,其目标函数是一个凸函数,满足约束条件的解的集合是一个凸集.因此,优化问题(11)的 KKT 条件为求解  $Y \in \mathbb{C}^{2n \times m}$ , $\xi_i \in \mathbb{C}$ , $i = 1, \dots, p, \eta_i \in \mathbb{C}^m$ , $j = 1, \dots, 2n - p$ ,使得

$$\begin{pmatrix} \nabla f(\mathbf{Y}) + \boldsymbol{\xi}_1 \nabla g_1(\mathbf{Y}) + \dots + \boldsymbol{\xi}_p \nabla g_p(\mathbf{Y}) + \nabla h_1(\mathbf{Y}) \eta_1 + \dots + \nabla h_{2n-p}(\mathbf{Y}) \eta_{2n-p} \\ g(\mathbf{Y}) \\ h(\mathbf{Y}) \end{pmatrix} = 0.$$
(13)

记为  $F(\mathbf{Y},\boldsymbol{\xi},\boldsymbol{\eta}) = 0.$  其中,

$$\nabla f(\mathbf{Y}) = \mathbf{Y},$$

$$\nabla g_i(\mathbf{Y}) = \boldsymbol{\phi}_i^{\mathrm{T}} \mathrm{adj}(\boldsymbol{\phi}_i \mathbf{Y} - \mathbf{I}_m)^{\mathrm{T}}, \quad \boldsymbol{\phi}_i = (\mu_i \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} H(\mu_i), \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} H(\mu_i)), \quad i = 1, \cdots, p,$$

$$\nabla h_{j-p}(\mathbf{Y}) = (\lambda_j \boldsymbol{v}_j^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{v}_j^{\mathrm{T}})^{\mathrm{T}}, \quad j = p+1, \cdots, 2n,$$

$$\boldsymbol{\xi} = (\boldsymbol{\xi}_1, \cdots, \boldsymbol{\xi}_p), \quad \boldsymbol{\eta} = (\eta_1, \cdots, \eta_{2n-p}).$$

$$(14)$$

式(14)中:adj(•)表示矩阵的伴随矩阵.

由此,最小范数部分极点配置问题最终可转化为求解非线性方程  $F(Y,\xi,\eta) = 0$ .而对于非线性方程  $F(Y,\xi,\eta) = 0$ .而对于非线性方程  $F(Y,\xi,\eta) = 0$ ,可以用经典的 Gauss-Newton 或 trustregion-reflective 法<sup>[9-10]</sup>来求解.

在非线性方程  $F(Y,\xi,\eta) = 0$  中,需要用剩余的 2n - p 个特征向量  $\{v_k\}_{k=p+1}^{2n}$ . 由 $(\lambda_j^2 M + \lambda_j C + K)v_j = H(\lambda_j)^{-1}v_j = 0$  可知,2n - p 个特征向量可以由响应率  $H(\lambda_j)$ 求解出来,而不需要系统矩阵 M, C, K. 因此,提出的算法只需利用响应率就可以求解最小范数的部分极点配置问题.

#### 3 数值实验

为了更直接地呈现所考虑的二阶系统,直接给出系统的矩阵 *M*,*C*,*K*. 但在算法的运行过程中,用的 是系统相应的响应率 *H*(λ<sub>*j*</sub>).

例1 首先考虑文献[8]中的例子.设

$$\boldsymbol{M} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{C} = \begin{pmatrix} 5 & -5 \\ -5 & 5 \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{K} = \begin{pmatrix} 10 & -5 \\ -5 & 10 \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{B} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & -2 \end{pmatrix}.$$

将前 *p*=2 个绝对值最小的自共轭特征值用{-1±*i*}替换,其余的特征值保持不变,由提出的算法 可得最小范数解为

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} 1.1 & 2.2 \\ -1.1 & -2.2 \end{pmatrix}, \qquad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} 2.1 & 4.2 \\ -2.1 & -4.2 \end{pmatrix}.$$

闭环特征值的误差为

$$\|\det(\mu_k^2 \boldsymbol{M} + \mu_k (\boldsymbol{C} - \boldsymbol{B}\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}}) + (\boldsymbol{K} - \boldsymbol{B}\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}))\| \leqslant 6 \times 10^{-15}.$$

反馈矩阵 **F** 和 **G** 的范数  $J_1 = \frac{1}{2} \| \mathbf{F} \|^2 + \frac{1}{2} \| \mathbf{G} \|^2 = 28.1001$ . 而在文献[8]的例 2 中,得到的反馈 矩阵的解为

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} -4 & -2 \\ -8 & -4 \end{pmatrix}, \qquad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} 6 & 3 \\ 12 & 6 \end{pmatrix}.$$

**F**和**G**的范数 $J_2 = \frac{1}{2} \| \mathbf{F} \|^2 + \frac{1}{2} \| \mathbf{G} \|^2 = 162.5.$ 因此,提出的算法所求得的反馈矩阵的范数比文 献[8]的例 2 中的小得多.

例2 将文中的算法与 Bai-Chen-Datta<sup>[1]</sup>的算法进行比较. 设

$$\boldsymbol{M} = 4\boldsymbol{I}_{n}, \quad \boldsymbol{C} = 4\boldsymbol{I}_{n}, \quad \boldsymbol{K} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{G} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

取 n=10,并将前 p=2 个绝对值最小的特征值用{-0.1,-0.2}替换,而其余的特征值保持不变. 由文中的算法得出的解的范数为 || F || =1.687 2, || G || =1.078 6,闭环特征值的误差为

$$\|\det(\mu_k^2 \boldsymbol{M} + \mu_k (\boldsymbol{C} - \boldsymbol{B}\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}}) + (\boldsymbol{K} - \boldsymbol{B}\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}))\| \leq 2 \times 10^{-10}.$$

而 Bai-Chen-Datta 的算法得出的解的范数为 || **F** || =1.410 4, || **G** || =1.389 1, 闭环特征值的误差为

 $\| \det(\mu_k^2 \boldsymbol{M} + \mu_k (\boldsymbol{C} - \boldsymbol{B} \boldsymbol{F}^{\mathrm{T}}) + (\boldsymbol{K} - \boldsymbol{B} \boldsymbol{G}^{\mathrm{T}})) \| \leq 2.3 \times 10^{-12}.$ 

文中的算法与 Bai-Chen-Datta 的算法相比,所得解的范数差值不大,因此与 Bai-Chen-Datta 的算法 一样,都能达到取最小范数解的要求.但是,Bai-Chen-Datta 的算法需要用到系统矩阵 M 和K,而文中算 法只需用到响应率.

#### 参考文献:

- [1] BAI Zheng-jian, CHEN Mei-xiang, DATTA B N. Minimum norm partial quadratic eigenvalue assignment with time delay in vibrating structures using the receptance and the system matrices[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(4):780-794.
- [2] BAI Zheng-jian, DATTA B N, WANG Jin-wei. Rubust and minimum norm partial quadratic eigenvalue assignment in vibrating systems: A new optimization approach[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 24(3): 766-783.
- [3] BAI Zheng-jian, CHEN Mei-xiang, YANG Jin-ku. A multi-step hybrid method for multi-input partial quadratic eigenvalue assignment with time delay[J]. Linear Algebra and Its Applications, 2012, 43(7):1658-1669.
- [4] CHU E K. Pole assignment for second-order systems [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2002, 16(1): 39-59.
- [5] DATTA B N, ELHAY S, RAM Y M. Orthogonality and partial pole assignment for the symmetric definite quadratic pencil[J]. Linear Algebra and Its Application, 1997, 257:29-48.
- [6] DATTA B N, ELHAY S, RAM Y M, et al. Partial eigenstructure assignment for the quadratic pencil[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 230(1): 101-110.
- [7] DATTA B N,LIN Wen-wei, WANG J N. Robust partial pole assignment for vibrating structures with aerodynamic effect[J]. IEEE Trans Automatic Control, 2006, 51(12):1979-1984.
- [8] RAM Y M, MOTTERSHEAD J E. Multiple-input active vibration control by partial pole placement using the method of receptances[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 40(2):727-735.
- [9] Jr DENNIS J E. Nonlinear least-squares [C] // State of the Art in Numerical Analysis. London: Academic Press, 1977:269-312.
- [10] COLEMAN T F,LI Y. An interior trust region approach for nonlinear minimization subject to bounds[J]. SIAM Journal on Optimization, 1996, 6(2):418-445.

### Partial Quadratic Pole Assignment Using the Method of Receptances

# CHEN Mei-xiang

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

**Abstract:** A new method is proposed to solve minimum norm partial pole assignment of the multi-input second order control system. We consider the minimum norm partial pole assignment problem as a numerical optimization problem. By this new method, we only need the receptances which are available by measurements. The results of numerical experiments demonstrate the effectiveness of the propose method.

Keywords: pole assignment; minimum norm; receptances; second order control system

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:黄心中)

**文章编号:**1000-5013(2015)01-0111-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.01.0111

# 局部和稀疏保持无监督特征选择法

简彩仁,陈晓云

(福州大学 数学与计算机科学学院, 福建 福州 350116)

**摘要:** 利用局部保持投影和稀疏保持投影来刻画数据的本质结构,结合 L<sub>2.1</sub>范数的组稀疏性来选择特征,提出一种新的针对高维小样本数据集的无监督特征选择算法.实验表明:局部和稀疏保持无监督特征选择法是一种有效的无监督特征选择方法;平衡参数对实验结果有较大的影响.

关键词: 局部保持投影;稀疏保持投影;高维小样本;无监督;特征选择;聚类 中图分类号: TP 311; TP 371 **文献标志码**: A

数据维数灾难普遍存在于模式识别的许多应用中.高维数据集不仅限制传统模式识别方法的应用, 还会显著地增加内存和时间开销.特征选择是解决这些问题的有效手段之一<sup>[1]</sup>.特征选择旨在选择一些 相关的特征代表原始的高维数据,而剔除一些不相关的特征.基于聚类的特征选择法<sup>[2]</sup>,利用聚类算法 将数据聚类,用得到的类别信息指导特征选择.然而,由此获得的判别信息是不可靠的.近年来,随着流 形学习的兴起,学者提出了新的无监督特征选择方法,如拉普拉斯得分<sup>[3]</sup>、多簇特征选择方法<sup>[4]</sup>等.利用 L<sub>2.1</sub>范数的组稀疏性,学者提出了许多嵌入型的特征选择方法,如稀疏限制的无监督最大化边缘的特征 选择法<sup>[5]</sup>、局部和相似保持嵌入特征选择法<sup>[6]</sup>.这些方法应用在高维小样本数据时,需要求解大规模的 特征值问题,不利于问题的求解.而联合特征选择和子空间学习法<sup>[7]</sup>、联合局部保持投影和*L*<sub>2.1</sub>范数构 造的特征选择,可以克服大规模特征值的问题.本文提出一种基于局部保持投影和稀疏保持投影的无监 督特征选择方法,并利用 L<sub>2.1</sub>范数的组稀疏性质,通过正则化 L<sub>2.1</sub>范数来选择特征.

### 1 相关工作

局部和稀疏保持无监督特征选择法利用局部保持投影和稀疏保持投影来刻画数据的本质结构.

#### 1.1 局部保持投影

给定数据集  $X \in \mathbb{R}^{m \times n}$ ,局部保持投影(LPP)<sup>[8]</sup>的目标函数定义为

$$\min\sum_{i,j} \| \mathbf{y}_i - \mathbf{y}_j \|^2 W_{i,j}.$$
<sup>(1)</sup>

式(1)中: $y_i = V^T x_i$ ; $W = W_{i,j}$ 为相似矩阵.

最小化目标函数可以使降维后的样本保持原空间的距离.常见的相似矩阵定义是热核函数.经过简 单的代数运算,LPP 求解如下优化问题,即

$$\min_{\mathbf{V}} \quad Tr\left(\mathbf{V}^{\mathsf{T}} \mathbf{X} \mathbf{L} \mathbf{X}^{\mathsf{T}} \mathbf{V}\right), \tag{2}$$

s. t. 
$$V^{\mathrm{T}} X D X^{\mathrm{T}} V = I$$
.

式(2)中:V为投影矩阵;D为对角矩阵, $D_{i,i} = \sum W_{i,j}$ ;L为图拉普拉斯矩阵,L = D - W.

1.2 稀疏保持投影

稀疏保持投影(SPP)<sup>[9]</sup>用样本稀疏重构每一个样本 x; < X, 得到求解稀疏表示系数的模型为

**收稿日期:** 2014-07-01

通信作者: 陈晓云(1970-),女,教授,博士,主要从事数据挖掘、模式识别的研究. E-mail:c\_xiaoyun@21cn. com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11301084);福建省自然科学基金资助项目(2014J01009)

$$\begin{array}{c} \min_{\boldsymbol{s}_{i}} \| \boldsymbol{s}_{i} \|_{1}, \\ \text{s. t.} \quad \boldsymbol{x}_{i} = \boldsymbol{X} \boldsymbol{s}_{i}, 1 = \sum_{i} \boldsymbol{s}_{i}. \end{array} \right\}$$
(3)

式(3)中:  $\| \cdot \|_1$ 为 1-范数;  $s_i = [s_{i,1}, \dots, s_{i,n}]$ ,  $s_{i,j}$ 反映了  $x_i$ 和  $x_j$ 之间的关系. 因此, 将  $S = (s_{i,j})_{n \times n}$ 视为仿射权矩阵是合理的. SPP 旨在寻找保持稀疏关系的投影, SPP 的目标函数为

$$\min_{\mathbf{V}}\sum_{i=1}^{n} \|\mathbf{V}^{\mathsf{T}}\mathbf{x}_{i} - \mathbf{V}^{\mathsf{T}}\mathbf{X}\mathbf{s}_{i}\|^{2} \mathbf{Tr}(\mathbf{V}^{\mathsf{T}}\mathbf{X}(\mathbf{I} - \mathbf{S} - \mathbf{S}^{\mathsf{T}} + \mathbf{S}^{\mathsf{T}}\mathbf{S})\mathbf{X}^{\mathsf{T}}\mathbf{V}).$$
(4)

式(4)中:V为投影矩阵.为避免平凡解,通常引入正交约束 $V^{T}XX^{T}V$ ,V可以通过求解广义特征值问题  $X(I-S-S^{T}+S^{T}S)X^{T}v=\lambda XX^{T}v$ 得到.

#### 2 局部和稀疏保持投影特征选择

#### 2.1 目标函数

将式(2)的局部保持项和式(4)的稀疏保持项相结合,得到目标函数为

$$\min_{\mathbf{V}} \alpha Tr(\mathbf{V}^{\mathsf{T}} \mathbf{X} \mathbf{L} \mathbf{X}^{\mathsf{T}} \mathbf{V}) + (1 - \alpha) Tr(\mathbf{V}^{\mathsf{T}} \mathbf{X} (\mathbf{I} - \mathbf{S} - \mathbf{S}^{\mathsf{T}} + \mathbf{S}^{\mathsf{T}} \mathbf{S}) \mathbf{X}^{\mathsf{T}} \mathbf{V}).$$
(5)

引入 L<sub>2,1</sub>范数来选择有利于保持局部性和稀疏性的相关特征,且为避免平凡解,引入正交约束 V<sup>T</sup>XX<sup>T</sup>V,得到局部和稀疏保持投影特征选择模型,即

$$\min_{\mathbf{V}} \alpha Tr(\mathbf{V}^{\mathsf{T}}\mathbf{X}\mathbf{L}\mathbf{X}^{\mathsf{T}}\mathbf{V}) + (1-\alpha)Tr(\mathbf{V}^{\mathsf{T}}\mathbf{X}(\mathbf{I}-\mathbf{S}-\mathbf{S}^{\mathsf{T}}+\mathbf{S}^{\mathsf{T}}\mathbf{S})\mathbf{X}^{\mathsf{T}}\mathbf{V}) + \lambda \|\mathbf{V}\|_{2,1},$$
s. t.  $\mathbf{V}^{\mathsf{T}}\mathbf{X}\mathbf{X}^{\mathsf{T}}\mathbf{V} = \mathbf{I}.$ 
(6)

式(6)中: $\alpha$  为平衡参数,用于平衡局部性和稀疏性; $\lambda$  为正则参数;  $\|V\|_{2,1}$ 定义为  $\sum_{i=1}^{m} (\sum_{j=1}^{d} |V_{i,j}|^2)^{1/2}$ . 当获得投影矩阵 V 后,可以利用  $v_i$  的 2 范数,即  $\|v_i\|_2$  来选择特征,其值越大表示该特征越重要.

#### 2.2 模型求解

式(6)可以写为

$$\min_{\mathbf{V}} \quad Tr(\mathbf{V}^{\mathsf{T}} \mathbf{X} \mathbf{A} \mathbf{X}^{\mathsf{T}} \mathbf{V}) + \lambda \| \mathbf{V} \|_{2,1}, \\
\text{s. t.} \quad \mathbf{V}^{\mathsf{T}} \mathbf{X} \mathbf{X}^{\mathsf{T}} \mathbf{V} = \mathbf{I}.$$
(7)

式(7)中: $A = \alpha L + (1 - \alpha)(I - S - S^{T} + S^{T}S)$ .式(7)可以利用广义特征值问题求解.但是,当 X 是高维小样本数据时,式(7)需要求解大规模的特征值问题,且会造成矩阵不可逆的问题.

类似于文献[7],采用分步求解的方法避免上述困难.令Y=XTV,有

$$\begin{array}{c}
\min_{\mathbf{V}} \quad Tr\left(\mathbf{Y}^{\mathrm{T}}\mathbf{A}\mathbf{Y}\right), \\
\mathrm{s.t.} \quad \mathbf{Y}^{\mathrm{T}}\mathbf{Y} = \mathbf{I}
\end{array}$$
(8)

式(8)的解为 $Y^* = [y_1, \dots, y_d]$ ,其为A的最小d个特征值对应的特征向量.求解如下的问题得到式(7)的解,即

$$\begin{array}{c} \min_{\mathbf{V}} \| \mathbf{V} \|_{2,1}, \\ \text{s. t.} \quad \mathbf{Y}^* = \mathbf{X}^{\mathrm{T}} \mathbf{V}. \end{array} \right\}$$
(9)

该问题可用拉格朗日乘子法迭代求解[7].拉格朗日函数为

$$L(\mathbf{V}) = \|\mathbf{V}\|_{2,1} - \mathbf{Tr}(\mathbf{\Gamma}^{\mathsf{T}}(\mathbf{X}^{\mathsf{T}}\mathbf{V} - \mathbf{Y}^{*})).$$
(10)

对V求导得

$$\frac{\partial L(\mathbf{V})}{\partial \mathbf{V}} = 2\mathbf{D}\mathbf{V} - \mathbf{X}\mathbf{\Gamma} = 0.$$
(11)

式(11)中: $D_{i,i}=1/(2 \| v_i \|_2), v_i \neq 0$ ,当 $D_{i,i}=0$ 时,用一个较小的正数替代,确保**D**可逆<sup>[8]</sup>.不难求得 **Г** = 2(**X**<sup>T</sup>**D**<sup>-1</sup>**X**)<sup>-1</sup>**Y**<sup>\*</sup>, (12)

将式(12)代入式(11),可得

$$\mathbf{V} = \mathbf{D}^{-1} \mathbf{X} (\mathbf{X}^{\mathrm{T}} \mathbf{D}^{-1} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{Y}^{*} \,. \tag{13}$$

由式(12),(13)交替迭代直至收敛,可得投影矩阵 V.通过上述讨论可以得到局部和稀疏保持投影 无监督特征选择法(LSP).Input:数据矩阵 X;Output:特征子集.1)计算拉普拉斯矩阵 L 和稀疏表示矩 阵 S;2)通过式(8)计算最小 d 个广义特征值对应的特征向量 Y\*;3)求解式(9)得到投影矩阵 V;4)将 ‖ v<sub>i</sub> ‖ 2 降序排列,选取前 p 个特征构成特征子集.

#### 3 实验分析

相似矩阵通过 $W = (|S| + |S^T|)/2$ 计算.其中:S为稀疏矩阵,可以避免近邻数量的选择;平衡参数  $\alpha = 0.8$ .选用数据方差(DV)、拉普拉斯得分(LS)<sup>[3]</sup>、多簇特征选择方法(MCFS)<sup>[4]</sup>、联合特征选择和子 空间学习法(JFSSL)<sup>[7]</sup>作为对比方法.LS,MCFS和JFSSL的近邻数量取5,MCFS,JFSSL和LSP的降 维维数 d 取类别个数.通过对选取的特征子集进行聚类分析,对比聚类准确率(ACC)来验证特征选择 的有效性.实验环境为 Windows 7 系统,内存为2 G,用 Matlab 2010b 编程实现.

对给定样本,令r<sub>i</sub>和s<sub>i</sub>分别为聚类算法得到的类标签和样本自带的类标签,则聚类准确率<sup>[10]</sup>为

$$ACC = \frac{\sum_{i=1}^{n} \delta(s_i, \operatorname{map}(r_i))}{n}.$$
(14)

PIE

式(14)中:n为样本总数; $\delta(x,y)$ 为函,当x=y时,其值为1,否则,为0;map( $r_i$ )为正交函数,将每一个 类标签 $r_i$ 映射成与样本自带的类标签等价的类标签. 表1 数据集描述

3.1 数据集

选用 6 个公开数据集进行实验,如表 1 所示.表 1 中:DL-BCL,LUNGCANCER,LEUKEMIA,TOX 为基因表达数据集;ORL,PIE 为图像数据集.

#### 3.2 实验结果与分析

应用每种方法选取特征子集,选取的特征个数依次设为{5, 10,15,…,95,100},采用 K-means 对选取的特征子集进行聚类 分析,运行 20 次.各种方法的平均聚类准确率,如表 2 所示.聚类 准确率与特征数量(n)的关系,如图 1 所示.

数据集	样本	特征数	类别
DLBCL	77	5 469	2
LUNGCANCER	203	12 600	5
LEUKEMIA	72	5 327	3
TOX	171	5 748	4
ORL	100	10 000	10

100

10 000

10

%

Tab. 1 Summary of data sets

表 2 平均聚类准确率 Tab. 2 Average clustering accuracy

数据集 一	ACC							
	LSP	JFSSL	MCFS	DV	LS	ALL		
DLBCL	75.32	60.78	64.22	68.83	65.78	68.83		
LUNGCANCER	80.74	64.70	63.47	50.02	51.18	52.71		
LEUKEMIA	76.04	66.88	62.78	56.25	47.15	62.50		
TOX	45.09	45.85	40.85	40.03	40.64	40.94		
ORL	74.65	72.95	68.85	50.20	66.45	67.00		
PIE	49.40	38.21	42.83	25.52	26.26	30.00		

由表 2,图 1 可知:局部和稀疏保持投影无监督特征选择法具有良好的特征选择能力,除 TOX 数据 集外,其聚类准确率的平均值最高.与 MCFS 和 JFSSL 相比,LSP 的聚类效果更为理想,这说明稀疏保 持性质也可以刻画数据的本质结构.与 DV 和 LS 相比,因为 DV 和 LS 只考虑独立的计算每个特征的 得分,而忽略了特征之间的相互作用,所以考虑特征之间的关系可以提高聚类准确率.此外,用 LSP 进 行特征选择与保留全部特征(ALL)可以明显地提高聚类的准确率.因此,利用局部和稀疏保持投影构 造的无监督特征选择法是有效的.

#### 3.3 参数讨论

平衡参数 α 在{0,0.1,0.2,...,0.9,1.0} 变化时,平均聚类准确率的情况,如图 2 所示.由图 2 可知: 总体上,平衡参数 α 对 LSP 的影响是明显的;当 α 为 0.6~0.9 时,LSP 的聚类准确率在较高的水平上 保持相对稳定.在这一范围内稀疏保持项的比重较大,说明稀疏保持项可以提高特征选择的能力.





Fig. 2 Clustering accuracy of different  $\alpha$ 

## 4 结束语

提出局部和稀疏保持无监督特征选择法,利用局部保持投影和稀疏保持投影来刻画数据的本质结构,利用 L<sub>2,1</sub>范数的组稀疏性来筛选特征.实验结果表明:LSP 是一种有效的无监督特征选择方法.LSP 方法的平衡参数 α 对实验结果有较大的影响,如何自适应地选取该参数将在今后的研究中给出.

#### 参考文献:

- [1] 徐峻岭,周毓明,陈林,等.基于互信息的无监督特征选择[J].计算机研究与发展,2012,49(2):372-382.
- [2] 张莉,孙钢,郭军.基于 K-均值聚类的无监督的特征选择方法[J].计算机应用研究,2005,22(3):23-24.
- [3] HE Xiao-fei, CAI Deng, NIYOGI P. Laplacian score for feature selection [C] // Advances in Neural Information Processing Systems. Vancouver: [s. n. ], 2005:507-514.
- [4] CAI Deng, ZHANG Chi-yuan, HE Xiao-fei. Unsupervised feature selection for multi-cluster data[C]// Proceedings of the 16th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. Washington DC: ACM, 2010:333-342.
- [5] YANG Shi-zhun, HOU Chen-ping, NIE Fei-ping, et al. Unsupervised maximum margin feature selection via L<sub>2,1</sub>norm minimization[J]. Neural Computing and Applications, 2012, 21(7):1791-1799.
- [6] FANG Xiao-zhao, XU Yong, LI Xue-long, et al. Locality and similarity preserving embedding for feature selection [J]. Neurocomputing, 2014, 128, 304-315.
- [7] GU Quan-quan, LI Zhen-hui, HAN Jia-wei. Joint feature selection and subspace learning[C]// The 22nd International Joint Conference on Artificial Intelligence. Barcelona: [s. n. ], 2011;1294-1299.
- [8] HE Xiao-hui, NIYOGI P. Locality preserving projections[C] // Proceedings of the 17th Annual Conference on Neural Information Processing Systems. Columbia:[s. n. ],2003:153-160.
- [9] QIAO Li-shan, CHEN Song-can, TAN Xiao-yang. Sparsity preserving projections with applications to face recognition[J]. Pattern Recognition, 2010, 43(1): 331-341.
- [10] CAI Deng, HE Xiao-fei, WU Xiao-yun, et al. Non-negative matrix factorization on manifold [C] // Proceedings of International Conference on Data Mining. Pisa: IEEE Press, 2008:63-72.

# Unsupervised Feature Selection Using Locality and Sparsity Preserving

# JIAN Cai-ren, CHEN Xiao-yun

(College of Mathematics and Computer Science, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

**Abstract:** By locality preserving projection and sparsity preserving projection to represent the intrinsic geometrical structure of the data set and use the group sparse of  $L_{2,1}$  norm, one new unsupervised feature selection method for high-dimensionality small sample data set is proposed. Experimental results show that the method is effective and sensitive to balance parameter.

**Keywords**: locality preserving projection; sparsity preserving projection; high-dimensionality small sample; unsupervised; feature selection; clustering

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 黄心中)

**文章编号:**1000-5013(2015)01-0116-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.01.0116

# 非平稳高斯序列最大值与部分和的 几乎处处中心极限定理

# 汪园芳,吴群英

(桂林理工大学理学院,广西桂林 541004)

**摘要:** 假设{X<sub>n</sub>,n≥1</sub>}为标准化非平稳高斯序列,在协方差和常数列{u<sub>n,i</sub>,1≤i≤n,n≥1}满足适当的条件下,获得了最大值与部分和的几乎处处中心极限定理,并优化了臧庆佩所获得的结果. 关键词: 几乎处处中心极限定理;最大值与部分和;非平稳高斯序列;收敛性 中图分类号: O 22.4 **文献标志码:** A

独立同分布的随机变量序列的部分和形式的几乎处处中心极限定理首次被 Brosamler<sup>[1]</sup>和 Schatte<sup>[2]</sup>引入并证明. 设 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 是一列独立同分布的随机变量序列,令 $S_n = \sum_{k=1}^n X_k, \{a_k, a_k > 0\}, \{b_k\}$ 是常数数列,满足

$$a_k(S_k-b_k) \xrightarrow{d} G.$$

上式中:G为分布函数.

对于G的任意连续点 x 都有

$$\lim_{n\to\infty}\frac{1}{\ln n}\sum_{k=1}^n\frac{1}{k}I(a_k(S_k-b_k)\leqslant x)=G(x).$$

上式中:*I*(•)为示性函数.

Fahrner 等<sup>[3]</sup>及 Cheng 等<sup>[4]</sup>将部分和形式的几乎处处中心极限定理推广到最大值形式的几乎处处 中心极限定理. Csaki 等<sup>[5]</sup>将几乎处处中心极限定理应用到平稳高斯列. Dudzinski<sup>[6]</sup>将部分和形式的几 乎处处中心极限定理推广到部分和与最大值的形式,记

$$M_n = \max_{1 \leq i \leq n} X_i, \qquad S_n = \sum_{i=1}^n X_i, \qquad \sigma_n = \sqrt{\operatorname{Var}(S_n)}.$$

对任意  $x, y \in \mathbf{R}$ ,有

$$\lim_{n\to\infty}\frac{1}{\ln n}\sum_{k=1}^n\frac{1}{k}I(a_k(M_k-b_k)\leqslant x),\qquad \frac{S_k}{\sigma_k}\leqslant e^{-\tau}\Phi(y).$$

上式中: $I(\cdot)$ 为示性函数; $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数.

Zang<sup>[7]</sup>将部分和与最大值的几乎处处中心极限定理从平稳的高斯序列推广到非平稳的高斯序列, 本文在 Zang<sup>[7]</sup>的基础上将权重从 1/k 推广到 exp( $\ln^{\beta} k$ )/k. 记  $X_1, X_2, \dots, X_n$  为标准化的非平稳高斯序 列,有

$$M_n = \max_{1\leqslant i\leqslant n} X_i, \quad S_n = \sum_{i=1}^n X_i, \quad \sigma_n = \sqrt{\operatorname{Var}\left(S_n
ight)}, \quad d_k = rac{\exp(\ln^eta k)}{k}, \quad 0\leqslant eta < rac{1}{2}.$$

记 $a_n \sim b_n$ 表示当 $n \rightarrow \infty$ 时, $a_n/b_n \rightarrow 1$ , $a_n \leqslant b_n$ 表示当 $n \rightarrow \infty$ 时,存在常数K > 0使 $a_n \leqslant K b_n$ .

**收稿日期:** 2014-05-21

通信作者: 吴群英(1961-),女,教授,博士,主要从事极限理论的研究. E-mail:wqy666@glut.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11361019);广西省研究生教育创新计划资助项目(YCSZ2014158)

#### 主要结果 1

假定{X<sub>n</sub>,n≥1}为标准化非平稳高斯序列,其协方差阵中的元素 r<sub>i,i</sub>满足 定理1  $0 \leqslant r_{i,j} \leqslant \rho_{|i-j|}, \quad i \neq j.$ 

且对任意 n≥1,有

$$ho_n\leqslant 1$$
 ,  $ho_n=O(1/n^{1+arepsilon})$  ,  $arepsilon>0$ 

如果常数列 $\{u_{n,i}\}$ 满足  $n \rightarrow \infty$ ,对某  $\tau \ge 0$ ,有

$$\sum_{i=1}^n (1 - \Phi(u_{n,i})) \to \tau,$$

并且对常数 c>√2,有

$$\max_{1\leq i\leq n} u_{n,i} \geqslant c \ln^{1/2} n,$$

则对任意  $x \in \mathbf{R}$ ,有

$$\lim_{n\to\infty}\frac{1}{D_n}\sum_{k=1}^n d_k I(\bigcap_{i=1}^k (x_i \leqslant u_{n,i}), \frac{S_k}{\sigma_k} \leqslant x) = e^{-\tau} \Phi(x).$$
(1)

如果对于  $d_k$ ,式(1)成立,则当  $d_k^*$  满足 0《 $d_k^*$ 《 $d_k$ ,  $\sum_{k=1}^{\infty} d_k^* = \infty$  时,式(1)也成立. 当  $\beta = 0$  时,文中 的定理1就是文献「7]中的定理.

#### 几个引理 2

**引理** 1<sup>[8]</sup> 设  $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots$  为一列有界的随机变量序列,如果存在  $\epsilon > 0$  使得

$$\operatorname{Var}(\sum_{k=1}^n d_k \boldsymbol{\xi}_k) \ll D_n^2 (\ln D_n)^{-(1+\varepsilon)}$$

成立,则有

引理

$$\lim_{n\to\infty}\frac{1}{D_n}\sum_{k=1}^n d_k(\boldsymbol{\xi}_k-\boldsymbol{E}\boldsymbol{\xi}_k)=0.$$

上式中:  $D_n = \sum_{k=1}^n d_k$ ;  $d_k = \exp(\ln k)^{\beta} / k$ .

**引理 2**<sup>[9]</sup> 设{ $X_n, n \ge 1$ }为标准正态变量, $r_{i,j} = Cov(X_i, X_j)$ ,则对任意的实数  $u_i, i = 1, 2, \dots, n$ ,有

$$|P(\bigcap_{j=1}^{n} \{X_{j} \leqslant u_{j}\}) - \prod_{j=1}^{n} P(X_{j} \leqslant u_{j})| \ll \sum_{1 \leqslant i < j \leqslant n} |r_{i,j}| \exp(-\frac{u_{i}^{2} + u_{j}^{2}}{2(1+|r_{i,j}|)}).$$
  
**3**<sup>[7]</sup> 在定理 1 的条件下,对 1 《 *k* < *n*,任意 *y* < **R**,存在 *y*>0 有

$$P(\bigcap_{i=k+1}^{n} \{X_{i} \leqslant u_{n,i}\}, \frac{S_{n}}{\sigma_{n}} \leqslant y) - P(\bigcap_{i=1}^{n} \{X_{i} \leqslant u_{n,i}\}, \frac{S_{n}}{\sigma_{n}} \leqslant y) \ll (\frac{k}{n})^{\gamma} + \frac{1}{\ln^{\gamma} n},$$
$$\left| \operatorname{Cov}(I(\bigcap_{i=1}^{k} \{X_{i} \leqslant u_{k,i}\}, \frac{S_{k}}{\sigma_{k}} \leqslant y), I(\bigcap_{i=k+1}^{n} \{X_{i} \leqslant u_{n,i}\}, \frac{S_{n}}{\sigma_{n}} \leqslant y)) \right| \ll (\frac{k}{n})^{\gamma} + \frac{1}{\ln^{\gamma} n}.$$
it if  $n \neq x$  if  $[7]$  if  $\mathfrak{A}$ 

$$P(\bigcap_{i=k+1}^{n} \{X_{i} \leqslant u_{n,i}\}, \frac{S_{n}}{\sigma_{n}} \leqslant y) - P(\bigcap_{i=1}^{n}) \{X_{i} \leqslant u_{n,i}\}, \frac{S_{n}}{\sigma_{n}} \leqslant y\} \ll (\frac{k}{n})^{\gamma} + \frac{1}{\ln^{\gamma} D_{n}},$$
  
$$|\operatorname{Cov}(I(\bigcap_{i=1}^{k} \{X_{i} \leqslant u_{k,i}\}, \frac{S_{k}}{\sigma_{k}} \leqslant y), I(\bigcap_{i=k+1}^{n} \{X_{i} \leqslant u_{n,i}\}, \frac{S_{n}}{\sigma_{n}} \leqslant y))| \ll (\frac{k}{n})^{\gamma} + \frac{1}{\ln^{\gamma} D_{n}}.$$
  
$$r \operatorname{dr}[8] = 1$$

由文献[8]可知

$$D_n \sim \frac{1}{\beta} \ln^{1-\beta} n \exp(\ln^{\beta} n), \qquad \ln D_n \sim \ln^{\beta} n.$$
 (2)

由式(2),引理得证.

**引理 4**<sup>[10]</sup> (Toeplitz 引理) 设实数 $\{x_n; n \ge 1\}$ 满足

$$\lim_{n\to\infty}x_n=x\in\mathbf{R},$$

如果 x=0,并且实数阵列 $\{a_{n,k};n \ge 1,k \ge 1\}$ 符合条件

$$\sup_{n\geqslant 1}\sum_{k=1}\mid a_{n,k}\mid <\infty\,,\qquad \lim_{n
ightarrow\infty}a_{n,k}=0\,,\quad k\geqslant 1\,,$$

则有

$$\lim_{n \to \infty} \sum_{k=1}^{\infty} a_{n,k} x_k = x.$$
  
如果  $x \neq 0$ ,则在上面的条件下,再加上  $\lim_{n \to \infty} \sum_{k=1}^{\infty} a_{n,k} = 1$  这个条件,仍然有  
 $\lim_{n \to \infty} \sum_{k=1}^{\infty} a_{n,k} x_k = x.$ 

# 3 定理1的证明

证明 当 $\beta=0$ 时,文献[7]已经给出证明,因此,只需证明 0< $\beta$ <1/2 这种情况下成立即可. 当 0 $\leq r_{i,j} \leq \rho_{|i-j|}$ 时,有

$$\sigma_n = \sqrt{n + 2 \sum_{1 \leqslant i < j \leqslant n} r_{i,j}} \geqslant \sqrt{n} \, ,$$

对任意  $n \ge 1, \varepsilon > 0, \rho = O(\frac{1}{n^{1-\varepsilon}}), 有$ 

$$\operatorname{Cov}(X_{i}, \frac{S_{n}}{\sigma_{n}} = \frac{1}{\sigma_{n}}) = \frac{1}{\sigma_{n}} \operatorname{Cov}(X_{i}, \sum_{j=1}^{n} X_{j}) = \frac{1}{\sigma_{n}} \operatorname{Cov}(X_{i}, X_{i} + \sum_{i \neq j} X_{j}) \leqslant \frac{1}{\sqrt{n}} + \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{i \neq j} r_{i,j} \ll \frac{1}{\sqrt{n}} + \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{t=1}^{n-1} \rho_{t} \leqslant \frac{1}{\sqrt{n}}.$$
(3)

因此,存在 $\delta$ 和 $n_0$ ,对任意 $n > n_0$ ,有

$$\sup_{1 \leq i \leq n} \operatorname{Cov}(X_i, \frac{S_n}{\sigma_n}) < \delta < 1.$$
(4)

设 $Y_n$ 是一标准化随机变量,且与 $S_n/\sigma_n$ 有有相同的分布,并且与 $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 相互独立,则由正态比较引理和式(4)得

$$|P(\bigcap_{i=1}^{n} (X_{i} \leqslant u_{n,i}), \frac{S_{n}}{\sigma_{n}} \leqslant y) - P(\bigcap_{i=1}^{n} (X_{i} \leqslant u_{n,i})P(Y_{n} \leqslant y))| \leqslant$$

$$\frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{i=1}^{n} \operatorname{Cov}(X_{i}, \frac{S_{n}}{\sigma_{n}}) \exp(-\frac{u_{n,i}^{2}}{2(1-\delta)}) \leqslant \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{i=1}^{n} \exp(-\frac{u_{n,i}^{2}}{2(1-\delta)}).$$

定义  $v_n$ ,使 1- $\Phi(v_n)=1/n$ ,由文献[9]知

$$\exp(-\frac{v_n^2}{2} \sim \frac{\sqrt{2\pi} v_n}{n}, v_n \sim \sqrt{2} \ln^{1/2} n).$$
 (5)

再由定理1的条件1,对某常数  $c > \sqrt{2}$ ,  $\min_{1 \le i \le n} u_{n,i} \ge c \ln^{1/2} n$ ,根据式(5),则有  $u_{n,i} \ge v_n$ .由式(4)知

$$1/(1+\delta) - 1/2 > 0$$
,  $0 < \delta' < 1/(1+\delta) - 1/2$ ,

再由式(5)可得

$$|P(\bigcap_{i=1}^{n} (X_{i} \leqslant u_{n,i}, \frac{S_{n}}{\sigma_{n}} \leqslant y) - P(\bigcap_{i=1}^{n} (X_{i} \leqslant u_{n,i})P(Y_{n} \leqslant y))| \leqslant \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{i=1}^{n} \exp(-\frac{u_{n,i}^{2}}{2(1+\delta)}) \ll \sqrt{n} \exp(-\frac{v_{n}^{2}}{2(1+\delta)}) \leqslant \frac{(\sqrt{2\ln n})^{1/(1+\delta)}}{n^{1/(1+\delta)-1/2}} \ll \frac{1}{n^{\delta}} \to 0, \quad n \to \infty.$$
(6)

在定理1的条件下,由文献[9]知 $P(\bigcap_{i=1}^{n}(X_i \leq u_{n,i})) \rightarrow e^{-\tau}, 则$ 

$$\lim_{n\to\infty}P(\bigcap_{i=1}^n(X_i\leqslant u_{n,i}),\frac{S_n}{\sigma_n}\leqslant y)e^{-\tau}\Phi(y).$$

再根据引理 4,得到

$$\lim_{n \to \infty} \frac{1}{D_n} \sum_{k=1}^n d_k P\left(\bigcap_{i=1}^n \left(X_i \leqslant u_{n,i}\right), \frac{S_n}{\sigma_n} \leqslant y\right) e^{-\tau} \Phi(y).$$
<sup>(7)</sup>

所以要证明定理1,只要转换成证明

$$\lim_{n \to \infty} \frac{1}{D_n} \sum_{k=1}^n d_k (I \bigcap_{i=1}^k (X_i \leqslant u_{n,i}), \frac{S_k}{\sigma_k} \leqslant y) - P((\bigcap_{i=1}^k (X_i \leqslant u_{n,i}), \frac{S_k}{\sigma_k} \leqslant y)) = 0.$$
(8)

根据引理 1,要证明式(8),只要证明存在某  $\varepsilon > 0$ ,对任意  $y \in \mathbf{R}$ ,使

$$\operatorname{Var}\left(\sum_{k=1}^{n} d_{k} I\left(\bigcap_{i=1}^{k} \left(X_{i} \leqslant u_{n,i}\right), \frac{S_{k}}{\sigma_{k}} \leqslant y\right)\right) \ll \frac{D_{n}^{2}}{\left(\ln D_{n}\right)^{\left(1+\epsilon\right)}}.$$
(9)

 $\operatorname{tr} \xi_k = I(\bigcap_{i=1}^k (X_i \leqslant u_{n,i}), \frac{S_k}{\sigma_k} \leqslant y) - P(\bigcap_{i=1}^k (X_i \leqslant u_{n,i}), \frac{S_k}{\sigma_k} \leqslant y),$ 则

$$\operatorname{Var}\left(\sum_{k=1}^{n} d_{k} I\left(\bigcap_{i=1}^{k} \left(X_{i} \leqslant u_{n,i}\right), \frac{S_{k}}{\sigma_{k}} \leqslant y\right)\right) \ll \sum_{k=1}^{n} d_{k}^{2} E\left(\xi_{k}^{2}\right) + 2 \sum_{1 \leqslant k < l \leqslant n} d_{k} d_{l} \mid E\xi_{k}\xi_{l} \mid =: T_{1} + T_{2}.$$
(10)

因为 $\xi_k$ 有界,所以 $E(\xi_k^2)$ 也有界,  $\exp(\ln^{\beta} x) = \exp(\int_1^x \frac{\beta \ln^{\beta-1} t}{t} dt), \beta < 1/2.$ 当 $t \to \infty$ 时,  $\beta \ln^{\beta-1} t \to 0$ ,即  $\exp(\ln^{\beta} x)$ 为慢变化函数,则

$$T_1 \ll \sum_{k=1}^n d_k^2 = \sum_{k=1}^n \frac{\exp(2\ln^\beta k)}{k^2} < \sum_{k=1}^\infty \frac{\exp(2\ln^\beta k)}{k^2} < \infty.$$
(11)

下面再来估计 T2,首先来估计 | E(ξkξl) |. 由引理 3 推出

$$|E(\xi_{k}\xi_{l})| = \left| \operatorname{Cov}(I(\bigcap_{i=1}^{k} (X_{i} \leqslant u_{k,i}), \frac{S_{k}}{\sigma_{k}} \leqslant y), I(\bigcap_{i=1}^{l} (X_{i} \leqslant u_{l,i}), \frac{S_{l}}{\sigma_{l}} \leqslant y)) \right| \leq \left| \operatorname{Cov}(I(\bigcap_{i=1}^{k} (X_{i} \leqslant u_{k,i}), \frac{S_{k}}{\sigma_{k}} \leqslant y), I(\bigcap_{i=1}^{l} (X_{i} \leqslant u_{l,i}), \frac{S_{l}}{\sigma_{l}} \leqslant y) - I(\bigcap_{i=k+1}^{l} (X_{i} \leqslant u_{l,i}), \frac{S_{l}}{\sigma_{l}} \leqslant y) \right| + \left| \operatorname{Cov}(I(\bigcap_{i=1}^{k} (X_{i} \leqslant u_{k,i}), \frac{S_{k}}{\sigma_{k}} \leqslant y), I(\bigcap_{i=k+1}^{l} (X_{i} \leqslant u_{l,i}), \frac{S_{l}}{\sigma_{l}} \leqslant y) \right| \leq E \left| I(\bigcap_{i=1}^{l} (X_{i} \leqslant u_{l,i}), \frac{S_{l}}{\sigma_{l}} \leqslant y) - I(\bigcap_{i=k+1}^{l} (X_{i} \leqslant u_{l,i}), \frac{S_{l}}{\sigma_{l}} \leqslant y) \right| + \left| \operatorname{Cov}(I(\bigcap_{i=1}^{l} (X_{i} \leqslant u_{k,i}), \frac{S_{k}}{\sigma_{k}} \leqslant y), I(\bigcap_{i=k+1}^{l} (X_{i} \leqslant u_{l,i}), \frac{S_{l}}{\sigma_{l}} \leqslant y) \right| + \left| \operatorname{Cov}(I(\bigcap_{i=1}^{l} (X_{i} \leqslant u_{k,i}), \frac{S_{k}}{\sigma_{k}} \leqslant y), I(\bigcap_{i=k+1}^{l} (X_{i} \leqslant u_{l,i}), \frac{S_{l}}{\sigma_{l}} \leqslant y)) \right| (\frac{k}{l})^{\gamma} + \frac{1}{\ln^{\gamma} l},$$
 (12)  
$$T_{2} \ll \sum_{1 \leqslant k < l \leqslant n} d_{k} d_{l} ((\frac{k}{l})^{\gamma} + \frac{1}{\ln^{\gamma} l}) \leqslant \sum_{1 \leqslant k < l \leqslant n} d_{k} d_{l} \frac{1}{\ln^{\gamma} l} = : T_{21} + T_{22}.$$
 (13)

由定理1的条件知

$$0 < \beta < \frac{1}{2}.$$

$$\begin{aligned} & \left\langle \varepsilon = \frac{1-2\beta}{2\beta} \right\rangle_{0}, \underbrace{\mathbb{M}}_{2\beta}^{1} = 1 + \varepsilon. \, \operatorname{tr}_{\alpha}(13) \operatorname{\mathfrak{F}} \\ & T_{2,1} \ll \sum_{1 \leqslant k < l \leqslant n} \frac{\exp(\ln^{\beta} k)}{k^{1-\gamma}} \frac{\exp(\ln^{\beta} l)}{l^{1+\gamma}} \ll \sum_{l=1}^{n} \frac{\exp(\ln^{\beta} l)}{l^{1+\gamma}} \sum_{l=1}^{n} \frac{\exp(\ln^{\beta} k)}{k^{1-\gamma}} \leqslant \\ & \sum_{l=1}^{n} \frac{\exp(2\ln^{\beta} l)}{l^{1+\gamma}} \sim \int_{1}^{n} \frac{\exp(2\ln^{\beta} x)}{x} dx = \\ & \int_{0}^{\ln n} \exp(2y^{\beta}) dy \sim \int_{0}^{\ln n} \frac{\exp(2y^{\beta})y^{1-\beta}}{2\beta} dy \leqslant \\ & \ln^{1-\beta} n \exp(2\ln^{\beta} n) \ll \frac{D_{n}^{2}}{(\ln D_{n})^{(1-\beta)/\beta}} \ll \\ & \frac{D_{n}^{2}}{(\ln D_{n})^{1/2\beta}} \frac{1}{(\ln D_{n})^{(1-2\beta)/2\beta}} \leqslant \frac{D_{n}^{2}}{(\ln D_{n})^{1+\varepsilon}}. \end{aligned}$$

$$\end{aligned}$$

取 0 $< \epsilon < \gamma/\beta - 2$ ,再根据式(2)推出

$$T_{2,2} \ll \sum_{l=1}^{n} \frac{\exp(\ln^{\beta} l)}{l(\ln^{\gamma} l)} \sum_{k=1}^{l} \frac{\exp(\ln^{\beta} k)}{k} \leqslant$$

$$\sum_{l=1}^{n} \frac{\ln^{1-\gamma} l \exp(2\ln^{\beta} l)}{l} \sim \int_{1}^{n} \frac{\ln^{1-\gamma} x \exp(2\ln^{\beta} x)}{x} dx =$$

$$\int_{0}^{\ln n} y^{1-\beta} \exp(2\ln^{\beta} y) dy \sim \int_{0}^{\ln n} (\frac{\exp(2y^{\beta}) y^{2-\gamma-\beta}}{2\beta}) dy \ll$$

$$\ln^{2-\gamma-\beta} n \exp(2\ln^{\beta} n) \ll \frac{D_{n}^{2}}{(\ln D_{n})^{(\gamma-\beta)/\beta}} \ll \frac{D_{n}^{2}}{(\ln D_{n})^{1+\epsilon}}.$$
(15)

结合式(10)~式(15),则式(9)成立.由引理1,则式(8)成立.再根据式(7),定理1得证.

#### 参考文献:

- BROSAMLER G A. An almost everywhere central limit theorem[J]. Math Proc Camb Philos Soc, 1988, 104(3): 561-574.
- [2] SCHATTE P. On strong versions of the central limit theorem[J]. Math Nachr, 1988, 137(1):249-256.
- [3] FAHRNER I, STADTMULLER U. On almost sure central max-limit theorems
   [J]. Statist Probab Lett, 1998, 37 (3):229-236.
- [4] CHENG Shi-hong, PENG Liang, QI Yong-cheng. Almost sure convergence in extreme value theory [J]. Math Nachr, 1998, 190(1):43-50.
- [5] CSAKI E, GONCHIGDANZAN K. Almost sure limit theorems for the maximum of stationary Gaussian Sequences
   [J]. Statist Probab Lett, 2002, 58(2):195-203.
- [6] DUDZINSKI M. The almost sure central limit theorems in the joint version for the maxima and sums of certain stationary Gaussian sequences[J]. Statist Probab Lett, 2008, 78(4): 347-357.
- ZANG Qing-pei. Almost sure central limit theorem for a non-stationary sequence [J]. J Inequ Appl, 2010, 10:1155-1163.
- [8] WU Qun-yin. Almost sure central limit theory for products of sums of partial sums[J]. Appl Math J Chinese Univ, 2012,27(2):169-180.
- [9] LEADBETTER M R, LINDGREN G, ROOTZEN H. Extremes and related properties of random sequences and processes[M]. New York: Springer, 1983:84-85.
- [10] 吴群英. 混合序列的概率极限理论[M]. 北京:科学出版社, 2006: 89-90.

# Almost Sure Central Limit Theorem for Maxima and Partial Sums of Non-Stationary Gaussian Sequence

# WANG Yuan-fang, WU Qun-ying

(College of Science, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Suppose  $\{X_n, n \ge 1\}$  is a standardized non-stationary Gaussian sequence. The almost sure central limit theorem for maxima and partial sums is derived under some conditions on the covariance function and the constant sequence  $\{u_{n,i}, 1 \le i \le n, n \ge 1\}$ . The result generalizes the one obtained by Zang Qing-pei.

Keywords: almost sure central limit theorem; maxima and partial sums; non-stationary Gaussian sequence; convergence

(责任编辑:陈志贤 英文审校:黄心中)

# 《华侨大学学报(自然科学版)》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.hdxb.hqu.edu.cn)在线投稿.

#### 《华侨大学学报(自然科学版)》编辑部

- ·《中文核心期刊要目总览》
- · ISTIC 中国科技核心期刊
- · RCCSE 中国核心学术期刊
- ·全国优秀科技期刊
- ·中国期刊方阵"双效期刊"
- ·华东地区优秀期刊
- ·中国科技论文在线优秀期刊

# 本刊被以下国内外检索期刊和数据库列为固定刊源

- •美国《化学文摘》(CAS)
- •波兰《哥白尼索引》(IC)
- •"STN 国际"数据库
- 中国科学引文数据库
- 中国期刊网
- 万方数据库
- 中国机械工程文摘
- 中国物理文摘
- 中国生物学文摘
- 中国数学文摘

#### 华侨大学学报(自然科学版)

Huaqiao Daxue Xuebao(Ziran Kexue Ban) (双月刊, 1980 年创刊)

第 36 卷 第 1 期 (总第 141 期) 2015 年 01 月 20 日

主管单位:	福	建	省	教	育	厅
主办单位:	华		侨	大		学
	(	国 福	百建 厦	〔门 3	61021	1)
编辑出版:	华侨	大学	学报 自	然科学	版编辑	昏部
(	电	话:0	595-22	269254	5	
	电子信	盲箱:jo	ournal	@hqu.	edu. c	n
l	XX	址: v	www.h	dxb. ł	nqu. ed	u. cn
主 编:	乌	东山	夆			
印刷:	泉	州彫	龟报	印	刷厂	
国内发行:	福到	建省	泉州	市 邮	政 局	
订购处:	全日	国各土	地邮	政 局	(所)	
国外发行:	中国	国出版	对外	贸易总	急公司	
(北京 782 信箱,邮政编码 100011)						
ISSN 1000-5013						

- ·俄罗斯《文摘杂志》(AJ, VINITI)
- ·荷兰《文摘与引文数据库》(Scopus)
- 中国学术期刊综合评价数据库
- 中国科技论文统计期刊源
- •中国学术期刊(光盘版)
- 中文科技期刊数据库
- 中国力学文摘
- 中国化学化工文摘
- 中国无线电电子学文摘

#### JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY

( NATURAL SCIENCE ) ( Bimonthly, Started in 1980 )

Vol. 36 No. 1 (Sum. 141) Jan. 20, 2015

Competent Authority: Department of Education of Fujian Province Sponsor: Huaqiao University (Xiamen 361021, Fujian, China) Edited and Published by Editorial Department of Journal of Huaqiao University (Natural Science) [Tel: 0595-22692545 E-mail: journal@hqu. edu. cn Http://www. hdxb. hqu. edu. cn] Editor in Chief: WU Dong-feng Distributed by China Publication Foreign Trading Corporation (P. O. Box 782, Beijing, 100011, China) 2 34-41 日本日本の一名の元/期

刊

**号:** <u>国内邮发 34-41</u> 国外 NTZ 1050

代

国内定价:  $\frac{8.00}{48.00}$  元/年