

- 中文核心期刊
- 中国科技核心期刊
- RCCSE中国核心学术期刊

ISSN 1671-6833  
CN 41-1339/T  
CODEN ZDXGAN

# 郑州大学学报

工学版

JOURNAL OF ZHENGZHOU UNIVERSITY  
ENGINEERING SCIENCE

2016.2

第37卷 第2期  
Vo1.37 No.2  
2016年3月出版

ISSN 1671-6833



郑  
州  
大  
学  
学  
报  
(工  
学  
版)

二〇一六年三月  
第二期(第三十七卷总第一百四六期)

目 次

信号与控制工程

- 多目标进化算法及其在电力环境经济调度中的应用综述…… 肖俊明, 周 谦, 瞿博阳, 韦学辉( 1 )
- 基于 Delta 算子时变时延网络控制系统的  $H_{\infty}$  滤波 …………… 张端金, 刘 雪, 范 鑫( 10 )
- 不确定 T-S 模糊系统的跟踪控制器设计 …………… 张恒艳, 高中文, 李文龙, 宋伟伟, 黄 玲( 15 )
- 极限学习机优化及其拟合性分析…………… 王 杰, 裴群康, 彭金柱( 20 )
- 并联式支路光伏发电系统的研究与仿真…………… 许 天, 陈小强( 25 )
- 基于 FPGA 的电能质量监测装置设计…………… 江 政, 周 勇, 陈雪美, 吕娜伟( 29 )
- WSN 中基于梯度和粒子群优化算法的分级簇算法 …………… 阎新芳, 严晶晶, 冯 岩( 33 )
- 基于投票极限学习机的人脸识别混合算法研究…………… 陈铁军, 蔡金收, 郭 丽( 37 )

材料与化学工程

- 均匀化退火对纯铝系负极箔坯料显微组织的影响…………… 赵红亮, 吴 迪, 翁康荣, 胡冠奇( 42 )
- 中间退火工艺对 AA5052 铝合金板成形性能的影响 …………… 卢广玺, 周 崇, 关绍康, 辛潇洋( 46 )
- PSN-PZT 陶瓷及其在加速度传感器中的应用研究 …………… 詹自力, 李亚丰, 陈翔宇, 陈克城( 50 )
- 静电纺丝法制备钇掺杂的 ZnO 及其对丙酮的气敏特性研究 ……………  
…………… 冯秋霞, 于 鹏, 王 兢, 李晓干( 54 )
- 基于物联网的声表面波传感器阵列检测系统研究 ……………  
…………… 刘鑫璐, 王 文, 潘 勇, 邵晟宇, 穆 宁( 58 )
- 人工冻融软弱土融沉特性研究 …………… 庄惠敏, 杨 平, 何文龙( 62 )
- 基于大尺度重组竹试件各向轴压力学性能研究…… 李海涛, 苏靖文, 魏冬冬, 张齐生, 陈 国( 67 )
- 有机朗肯循环系统的实验研究和性能分析 ……………  
…………… 魏新利, 李明辉, 马新灵, 侯中兰, 孟祥睿, 闫艳伟( 73 )

其他

- 大跨连续梁桥施工膺架的设计研究…………… 李 宇, 杨 赐, 李 琛, 高 亮, 王 洁( 77 )
- 大型箱体零件结构拓扑优化设计研究…………… 秦东晨, 杜 鹏( 82 )
- 卫星岛式内嵌双环形交叉口概念设计…………… 郑元勋, 李 桐( 87 )
- 基于光栅结构的碲化镉太阳能电池吸收层设计…………… 孙晓红, 张 琳, 李文阳, 郭敏强( 92 )

---

**CONTENTS**

**【Electrical Engineering】**

- Multi-objective Evolutionary Algorithm and Its Application in Electric Power Environment Economic Dispatch .....  
..... **XIAO Junming , ZHOU Qian , QU Boyang, WEI Xuehui** ( 1)
- H-infinity Filtering for Networked Control Systems with Time-varying Delay Using Delta Operator Approach .....  
..... **ZHANG Duanjin, LIU Xue, FAN Xin** ( 10)
- The Design of Tracking Controller for T-S Fuzzy Systems with Uncertainty .....  
..... **ZHANG Hengyan, GAO Zhongwen, LI Wenlong, SONG Weiwei, HUANG Ling** ( 15)
- The Optimization of the Extreme Learning Machine and Fitting Analysis .....  
..... **WANG Jie, CHANG Qunkang, PENG Jinzhu** ( 20)
- Research and Simulation of Parallel Branch Photovoltaic Power Generation System ..... **XU Tian, CHEN Xiaoqiang** ( 25)
- Design of a Power Quality Monitoring Device Based on FPGA .....  
..... **JIANG Zheng, ZHOU Yong, CHEN Xuemei, LÜ Nawei** ( 29)
- Gradient and Particle Swarm Optimization Based Hierarchical Cluster Algorithm in WSN .....  
..... **YAN Xinfang, YAN Jingjing, FENG Yan** ( 33)
- Research on Hybrid Face Recognition Algorithm Based on Voting Extreme Learning Machine .....  
..... **CHEN Tiejun, CAI Jinshou, GUO Li** ( 37)

**【Material and Chemical Engineering】**

- Influence of Homogenization Annealing on Microstructure of Pure Aluminum Cathode Foil Stock .....  
..... **ZHAO Hongliang, WU Di, WENG Kangrong, HU Guanqi** ( 42)
- Influence of Intermediate Annealing on Bending Performance of AA5052 Aluminum Alloy Sheet .....  
..... **LU Guangxi, ZHOU Chong, GUAN Shaokang, XIN Xiaoyang** ( 46)
- Studies on PSN-PZT Ceramics and Its Application in the Acceleration Sensor .....  
..... **ZHAN Zili, LI Yafeng, CHEN Xiangyu, CHEN Kecheng** ( 50)
- Preparation and Acetone Sensitivities of Y-doped ZnO Nanofibers by Electrispinning .....  
..... **FENG Qiuxia, YU Peng, WANG Jing, LI Xiaogan** ( 54)
- Design of the Poison Gas Detection System with IOP and Surface Acoustic Wave Sensor Array .....  
..... **LIU Xinlu, WANG Wen, PAN Yong, SHAO Shengyu, MU Ning** ( 58)
- Study on Thaw Settlement Behavior of Soft Frozen Soil ..... **ZHUANG Huimin, YANG Ping, HE Wenlong** ( 62)
- Comparison Study on Parallel Bamboo Strand Lumber under Axial Compression for Different Directions Based on the Large Scale .....  
..... **LI Haitao, SU Jingwen, WEI Dongdong, ZHANG Qisheng, CHEN Guo** ( 67)
- Experimental Investigation and Performance Analysis of Organic Rankine Cycle System .....  
..... **WEI Xinli, LI Minghui, MA Xinling, HOU Zhonglan, MENG Xiangrui, YAN Yanwei** ( 73)

**【Others】**

- Research on Design for Constructive Rack of Long-span Continuous Beam Bridge .....  
..... **LI Yu, YANG Ci, LI Chen, GAO Liang, WANG Jie** ( 77)
- A Research for Structural Design of Large-scale Box Parts Based on Topology Optimization .....  
..... **QIN Dongchen, DU Peng** ( 82)
- The Conceptual Design of Satellite Island Type Embedded Double Circular Intersection .....  
..... **ZHENG Yuanxun, LI Tong** ( 87)
- Structural Design of Absorption Layer in CdTe Solar Cells Based on Grating Structure .....  
..... **SUN Xiaohong, ZHANG Lin, LI Wenyang, GUO Minqiang** ( 92)

文章编号: 1671-6833(2016)02-0001-09

# 多目标进化算法及其在电力环境经济调度中的应用综述

肖俊明, 周 谦, 瞿博阳, 韦学辉

(中原工学院 电子信息学院, 河南 郑州 450007)

**摘 要:** 电力系统能源供应对现代社会至关重要, 而电力系统环境经济调度问题的科学、有效解决是实能源供应的保障. 多目标进化算法在求解电力系统环境经济调度问题方面具有独特的优势. 本文按时间顺序首先对多目标进化算法做了介绍, 其次对多目标进化算法在电力系统环境经济调度问题中的应用进行了讨论, 总结了近年来科学工作者的研究内容, 并对此领域以后可能的发展方向进行了展望.

**关键词:** 多目标优化; 多目标进化算法; 电力系统运行调度; 经济环境调度

**中图分类号:** TM732

**文献标志码:** A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.201510023

## 0 引言

优化问题的求解过程是指通过特定方法获得目标函数的最优解, 实际生活中许多问题都可视为优化问题. 当优化的目标函数为一个时, 称为单目标优化; 当优化的目标函数有两个或两个以上时, 称为多目标优化. 多目标优化问题的解是由一组帕累托(Pareto)最优解组成的集合, 集合中的各个元素称为 Pareto 最优解或非劣最优解<sup>[1]</sup>.

起初, 对于优化问题的求解有: 线性规划、非线性规划、非线性方程组等求解方法. 由于进化算法(evolutionary algorithms, EA)可处理非线性且非凸的优化问题, 并且对具体问题的要求较少, 因此被广泛的运用到工程、生物学、金融、社会科学等领域<sup>[2-3]</sup>. EA之所以非常适合于解决多目标优化问题是因为它不仅具有很强的鲁棒性, 而且它可以在一次运行中产生多个最优解. 多目标进化算法(multi-objective evolutionary algorithms, MOEA)是在EA基础上发展而来的用于解决多目标优化问题的算法. 从上世纪90年代中后期起, MOEA一直是进化计算领域研究热点之一<sup>[4-7]</sup>.

电力系统能源供应对社会发展至关重要, 现今社会对能源供应的依赖愈加强烈. 如何运用科

学有效的技术和方法解决电力系统运行的调度问题引起了国内外学者的关注<sup>[8-10]</sup>. 电力系统运行调度问题是指保证系统安全稳定和电能质量满足标准的条件下, 最大限度地提高电力生产和传输效率, 降低燃料消耗以及供电成本, 其本质为复杂的优化问题. 早期, 电力系统的调度问题主要集中在机组组合及启停(unit commitment, UC)的优化问题上, 其目的为确定各机组在某一调度周期中各时段上的运行状态. 常规的调度问题一般采用系统运行成本最小作为优化目标<sup>[11]</sup>, 却忽略了能源消耗对环境和社会可持续发展的负面影响.

全球环境问题日益严峻, 保护生态环境已成为全人类的共识. 环境经济调度(environmental economic dispatching, EED)受到了广泛关注, 仅需对现有调度策略稍做修改, 就能兼顾环保和经济两个因素, EED问题是一个非线性、非凸的多目标优化问题. 对于EED问题, 早期的解决是利用约束条件法或加权系数法等方法将多目标问题转化为单目标问题, 然后利用传统的优化方法进行求解, 每次仅能得到一种权重情况下的最优解, 且权值对结果的影响较大, 计算结果难以令人满意<sup>[12]</sup>. 近年来, 由于启发式优化算法在解决多目标问题时的突出表现, 针对EED问题的研究逐渐

收稿日期: 2015-10-12; 修订日期: 2015-12-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61473266); 中国博士后科学基金资助项目(2014M552013)

作者简介: 肖俊明(1960—), 男, 河南郑州人, 中原工学院教授, 主要从事电气控制等研究, E-mail: xiaojunming528@163.com.

通讯作者: 瞿博阳(1984—), 男, 河南焦作人, 中原工学院副教授, 主要从事智能优化算法等方面的研究.

引用本文: 肖俊明, 周谦, 瞿博阳, 等. 多目标进化算法及其在电力环境经济调度中的应用综述[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 1-9.



转向利用多目标进化算法来获得更科学、合理的调度方案。

## 1 多目标进化算法

### 1.1 多目标优化问题及其数学描述

多目标优化问题是指在满足一定约束条件下,同时求解一组目标之间相互冲突的最大或者最小值的问题。

多目标优化问题的数学描述如下:

$$\begin{aligned} \min: & y = (f_1(x), \dots, f_m(x)), m = 2, 3, \dots, M \\ \text{s. t: } & \begin{cases} g_j(x) \geq 0, j = 1, 2, \dots, J \\ h_k(x) = 0, k = 1, 2, \dots, K \\ x_i^L \leq x_i \leq x_i^U, i = 1, 2, \dots, D. \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $x$  为  $D$  维决策变量;  $y$  为目标函数;  $M$  为优化目标总数;  $f_m(x)$  为第  $m$  个子目标函数;  $g(x)$  与  $h(x)$  分别为不等式和等式约束条件;  $x_i^L$  和  $x_i^U$  为向量搜索的上、下限。

### 1.2 典型的多目标进化算法

#### 1.2.1 基于 GA 的多目标算法

(1) 矢量评价遗传算法 (VEGA). 矢量评价遗传算法 (VEGA) 由 SCHAFER 于 1984 年提出<sup>[13]</sup>, 该算法首次实现了遗传算法与多目标优化问题的结合. 该算法针对每一个目标产生一个子种群, 在每一代进化过程中个体的评价机制仅限于本种群内, 而不考虑其他目标, 个体的选择采用轮盘赌机制。

(2) 多目标遗传算法 (MOGA). 1993 年, FONSECA 和 FLEMING 提出 MOGA<sup>[14]</sup>, 该算法在每一代进化中, 对每个个体划分等级, 非支配个体的等级为 1, 其它个体等级为支配该个体的数目加 1, 每一个个体的适应度值采用插值法分配。

(3) 基于小生境帕累托遗传算法 (NPGA, NPGA-II). NPGA 是小生境算法与 GA 思想相结合的产物<sup>[15]</sup>. 其优点是适用于大多数的多目标优化问题. 2001 年, ERICKSON 等人提出了 NPGA-II<sup>[16]</sup>. 该算法运用轮盘赌选择机制, 采用小生境技术选取进入下一代的个体。

(4) 非支配排序遗传算法 (NSGA, NSGA-II). 1994 年, SRINIVAS 和 DEB 基于 Goldberg 的非支配思想提出 NSGA<sup>[17]</sup>, 非支配思想的目的就是将进化过程中的个体配置在全部帕累托最优解空间, 实现解的多样性. 2002 年, DEB 等人在 NSGA 算法的基础上提出 NSGA-II<sup>[18]</sup>. 相比于 NSGA, NSGA-II 的优点包括: ①提出快速非支配排序算法, 降低了计算的复杂度; ②采用精英策略,

保证优良的个体在进化过程中不会被丢弃, 从而提高了优化结果的精度; ③采用拥挤度比较算子, 保证种群的多样性。

#### 1.2.2 基于 DE 的多目标算法

1995 年, 文献 [19] 为解决无约束单目标优化问题提出了差分进化 (differential evolution, DE) 算法, DE 操作流程与遗传算法相同: 变异、交叉和选择. DE 中变异部分采用所选择变异个体之间加权差分向量产生新个体. 2003 年, XUE 等人基于非支配概念提出多目标差分算法 (MODE)<sup>[20]</sup>, 该算法在变异部分加入扰动分项, 扰动的大小随进化代数的增大而减小, 从而加强对局部最优解的搜寻. 为了解决差分算法中两个参数  $F$ 、 $CR$  不易选择的问题, 2009 年, WANG 等人提出多目标自适应差分算法 (MOSADE) 解决多目标优化问题<sup>[21]</sup>. 算法中 DE 两参数  $F$ 、 $CR$  采用自适应的方法在预先设定的范围内取值。

#### 1.2.3 基于 PSO 的多目标算法

粒子群优化算法是 1995 年由 KENNEDY 和 EBERHART 受自然界中鸟群、鱼群等的启发提出的启发式智能优化算法. 在将 PSO 拓展为多目标优化的过程中, 如何运用全局和局部最优粒子来指导整个粒子群的搜索是关键问题. 2004 年, COELLO 等人提出了多目标粒子群算法 (MOPSO)<sup>[22]</sup>, 该算法引入了自适应网格机制, 变异部分不仅包含当前粒子群个体的搜索信息, 还加入了变量范围因素, 以此加强对整个变量范围内解的搜索. 2007 年, TRIPATHI 等人提出时变的多目标粒子群优化算法 (TV-MOPSO)<sup>[23]</sup>, 算法中两个重要参数惯性因子和加速系数均随着迭代代数自适应变化. 将进化过程中搜索到的非支配解经过轮盘赌的方式进行选择, 以此作为全局最优的粒子群更新方法, 并且提出基于最近邻域的多样性参数, 该参数值作为粒子个体的适应度值。

#### 1.2.4 基于人工免疫系统的多目标算法

人工免疫系统是受免疫学启发, 模拟免疫学功能解决复杂优化问题的算法. 免疫学与人工智能有密切联系, 是人工智能方法灵感的重要源泉. 2004 年, COELLO 等人提出多目标免疫系统算法 (MISA)<sup>[24]</sup>, 该算法采用帕累托支配概念、自适应网格机制来维持外部集合中的个体数量, 并且对父代个体运用两种不同的变异策略. 2008 年, GONG 等人提出非支配邻域免疫算法 (NNIA)<sup>[25]</sup>, NNIA 采用一种基于非支配概念的个体选择方法, 根据个体的拥挤程度进行比例克隆

复制,随后运用新的重组、变异操作方法,以此加强对当前 Pareto 前沿面中较稀疏区域的搜索,该算法在求解高维多目标优化问题方面具有良好的性能。

### 1.2.5 基于 MOEA/D 的多目标算法

ZHANG 等在 2007 年将数学规划方法和进化算法结合起来,提出了基于分解的多目标进化算法<sup>[26]</sup>。该算法将整个 Pareto 最优前沿的逼近问题分解为一定数量的单目标优化问题,然后用进化算法同时求解这些子问题。

### 1.2.6 其它多目标算法

除了上述的多目标优化算法之外还有许多,其中强度帕累托进化算法(SPEA、SPEA-II)在电力系统调度方面的应用较多,因此仅对二者进行介绍。SPEA 是由 ZITZLER 与 THIELE 在 1999 年提出<sup>[27]</sup>,SPEA 采用外部档案来存储每一代产生的非支配解,称为非支配解集,当外部种群的个体数目超过设定值时,则用聚类技术来删减个体。ZITZLER 等人于 2001 提出 SPEA 的改进版本—SPEA-II<sup>[28]</sup>,在 SPEA 的基础上对适应度分配、个体搜索方向以及外部集合的更新方法等 3 方面进行改进。

## 2 多目标进化算法在电力环境经济调度(EED)中的应用

早在 1994 年,TALAQ 等人提出同时考虑经济/环境的优化策略<sup>[29]</sup>:①将污染物( $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$ 等)排放量最小作为优化目标,将成本作为约束条件;②将成本最小作为优化目标,将污染物排放量作为约束条件;③将污染物排放与成本的加权和作为优化目标等策略。该方法虽然同时考虑了经济与环境因素,但未能给出二者在不同权重下的调度方案。近年来,国内外学者将 MOEA 应用于电力系统环境经济调度问题中,取得了很多有价值的成果,充分体现 MOEAs 在电力系统调度领域中的巨大潜力<sup>[30]</sup>。传统 EED 问题的主流解决思路如下:在满足系统负荷要求与一定的约束条件下,将提供决策方案所需要的费用成本、污染物排放量作为优化目标,采用 MOEAs 进行求解。其数学模型如下所示。

### (1) 优化目标

#### ①燃料费用<sup>[31]</sup>:

$$F_{\text{cost}} = \sum_{i=1}^N (a_i + b_i P_{gi} + c_i P_{gi}^2) \quad (2)$$

式中: $N$  为系统中火电机组的台数; $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  分别为火电机组  $i$  的运行费用系数; $P_{gi}$  为第  $i$  台火电机组的有功出力。

#### ②污染排放量<sup>[31]</sup>:

$$E_{\text{cost}} = \sum_{i=1}^N (d_i + e_i P_{gi} + f_i P_{gi}^2 + \zeta_i \exp(\lambda_i P_{gi})) \quad (3)$$

式中: $d_i$ 、 $e_i$ 、 $f_i$ 、 $\lambda_i$ 、 $\zeta_i$  分别为火电机组  $i$  的污染气体排放系数。以上为两种典型的优化目标,除此之外还可将有功功率损失<sup>[32]</sup>、系统运行风险<sup>[33]</sup>等作为优化目标。

### (2) 约束条件

①系统功率平衡约束如式(4)所示,式中  $P_D$  为负荷有功功率; $P_{\text{loss}}$  为系统网损<sup>[31]</sup>。

$$\sum_{i=1}^N P_{gi} - P_D - P_{\text{loss}} = 0 \quad (4)$$

#### ②机组出力约束<sup>[31]</sup>

$$P_{gi}^{\min} \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{\max} \quad (5)$$

式中: $P_{gi}^{\min}$ 、 $P_{gi}^{\max}$  为第  $i$  台机组的最小和最大出力。

#### ③支路传输功率约束<sup>[31]</sup>

$$S_{Li} \leq S_{Li}^{\max}, i = 1, 2, \dots, N_L \quad (6)$$

式中: $S_{Li}$ 、 $S_{Li}^{\max}$  分别代表线路  $i$  的传输功率及其上限; $N_L$  为线路条数。除以上几种约束外,还有机组爬坡速率、机组运行禁止区间以及正、负旋转备用容量等<sup>[34]</sup>约束条件。

### 2.1 MOEAs 在传统的 EED 问题中的应用

由于早期 MOEA 在耗时与应用方面的限制,1997 年 SRINIVASAN 等人提出采用一种混合启发式进化算法对多目标 EED 问题进行求解<sup>[30]</sup>,从而提高解的可行性并减少计算时间。

2003 年 ABIDO 提出将 NPGA 运用于多目标 EED 问题<sup>[35]</sup>,采用模糊隶属度函数得到最优折中解。随后 ABIDO 又分别将 NSGA<sup>[36]</sup>、SPEA<sup>[37]</sup> 用于解决同一问题,对于现实约束方面,文献[36–37]均加入传输线路的安全性约束。作者通过采取多样性保持机制、分类聚集等机制获得了更加广泛的帕累托解集。

同年,HARRY 将带有精英保留策略的 NSGA-II 用于解决 EED 问题<sup>[38]</sup>。在考虑传输功率损失情况下,满足功率平衡、发电机输出功率等约束条件下进行求解,并将该方法分别在三发电机组系统下与禁忌搜索算法、六发电机组系统与模糊控制遗传算法(FCGA)作比较。结果表明带有精英保留策略的 NSGA-II 具有较快的求解速度。

2004 年 ZHANG 等人提出了一种模糊多目标

遗传算法(FMOGA)<sup>[32]</sup>,采用三目标机制来解决EED问题,目标分别是:燃料成本、污染物排放量、总有功功率损失,并采用模糊评价因子对适应度进行调整,一方面保证获得结果的多样性,另一方面可以消除不同目标值的边界差异对结果的影响.同年ZHAO等人同样运用以上3种目标采用MOPSO进行求解<sup>[39]</sup>,该文章中加入了多样性保护与加强全局搜索能力机制以提高解的质量.

2005年,在文献[38]基础上再次运用NSGA-II解决EED问题<sup>[40]</sup>,在随机与确定两种方法下进行求解.在确定问题的情况下分为两种策略:忽略系统功率损失和考虑功率损失.在随机方法下,考虑功率损失的同时又分为3种子情况:①各个发电机输出功率在给定平均值情况下随机变化,系统负荷固定;②各个发电机输出功率与系统负荷均在给定平均值情况下随机变化;③各个发电机输出功率、系统负荷以及污染物排放系数均在给定平均值情况下随机变化.作者详细分析了电力系统调度问题成本、排污量的实际值超过计划值的原因,给操作者提供更精确的决策依据.

2006年ABIDO同时将3种多目标进化算法NSGA, NPGA与SPEA用于解决电力系统调度问题<sup>[41]</sup>,并且提出一种评价多目标算法性能的标准,该标准包括3方面内容:①算法所得非支配解与帕累托最优前沿间的距离越小越好;②所得解应具有好的分布性;③非支配解的范围应尽量广,该标准为后期不同算法间的评价提供了衡量指标.同年GUESMI等人为解决EED的耗时问题<sup>[31]</sup>,提出了两步走的策略,首先采用NSGA-II对不同负荷条件下的调度问题进行求解,其次借用第一步的结果采用神经网络的方法得到调度决策,最后对该方法的有效性进行了验证.

2008年VENKATESH等人提出EED问题的2个新提法<sup>[42]</sup>:①经济环境的联合调度问题(combined economic emission dispatch, CEED)为一个双目标优化问题,分别为成本与 $\text{NO}_x$ 排放量;②经济环境调度问题(economic emission dispatch, EED)为一个3目标优化问题,分别为成本、 $\text{NO}_x$ 以及 $\text{SO}_2$ 排放量.作者采用MOEP分别对以上问题进行求解并与NSGA-II进行比较.结果表明:该算法在解决以上2问题时具有良好性能,可获得分布广泛、准确的帕累托前沿. AGRAWAL等人提出基于模糊聚类的粒子群算法(FCPSO)<sup>[43]</sup>,该算法中加入自适应变异、模糊聚类、多样性保持等机制来获得更加广泛、均匀的帕累托

前沿.

2009年SUN等人针对电力公司提出一种3目标的优化调度方法<sup>[33]</sup>.3目标分别为:系统运行风险、利润(成本中将电机的启、停费用考虑在内)、排污量.采用多目标非支配排序差分算法(NSDE)进行求解并与NSGA-II进行比较.该算法实现了非支配排序与差分算法的结合,并且对个体的拥挤距离机制与变异操作进行了改进,避免了算法的早熟与搜索不均,结果表明NSDE具有较好的收敛速度与求解精度.

2010年CAI等人提出多目标混沌蚁群算法(MOCASO)<sup>[44]</sup>,该算法采用Pareto支配解决多目标优化问题,运用模糊理论、适应度共享机制以及扰动因子提高算法性能. WU等人采用与文献[32]相同的3目标策略,运用MODE解决EED问题<sup>[45]</sup>.文章中引入精英保留策略、基于熵的拥挤度计算等方法,实现了拥挤度的更准确计算,从而在一定程度上提高了算法的性能.

对于EED优化问题, BASU采用MODE进行解决<sup>[46]</sup>. SIVASUBRAMANI提出采用一种新的多目标和声搜索算法(MOHS)进行求解<sup>[47]</sup>; PANIGRAHI等采用多目标细菌觅食算法(MOBF)对问题进行解答<sup>[48]</sup>.

2012年ZHANG等人针对EED问题采取一种改进MOPSO的BB-MOPSO(bare-bones multi-objective particle swarm optimization)算法<sup>[49]</sup>,该算法将BB-PSO拓展至多目标优化问题,并将结果通过空间矩阵(spacing metric)以及二集合覆盖度(two-set coverage)与其它多种多目标算法进行对比.结果表明:通过种群更新以及变异等策略上的改进,算法的搜索能力与稳定性都有相应提高. NIKNAM等人提出一种增强的萤火虫群(EFA)算法针对热、电混合系统的EED问题进行求解<sup>[50]</sup>,算法中加入自适应概率的变异策略以及智能种群数量的方法,并在4种不同的情形下与萤火虫算法(FA)、增强萤火虫算法(EFA)等对比来验证其有效性.

2013年GHASEMI提出一种改进的多目标交互蜂群杂交算法(IHBMO)<sup>[51]</sup>,采用成本、污染排放和功率损失3目标优化策略,考虑发电机组阀点效应情况下,在IEEE-30/118系统与MODE、MOPSO等进行比较,结果表明:算法的搜索能力得到显著增强. AFZALAN与JOORABIAN提出一种新的占优多目标遗传算法(ev-MOGA)<sup>[34]</sup>.在包含频率偏差、功率损失、有功功率限制、以及发

电机禁止区间等更加切合实际情况的约束条件下,采取燃料、备用容量成本以及污染排放量为目标的两目标优化方法进行求解. NIKNAM 等人采用一种分种群的差分算法解决 EED 问题<sup>[52]</sup>. 该算法分为3个阶段,各阶段进化代数均为最大进化代数的1/3,首先各种群之间独立进化,其次是种群之间互相交流阶段,最后是各种群合并一致进化阶段.

2015年 WU 等人提出一种有效的协同多目标粒子群进化( efficient co-evolutionary multi-objective particle swarm optimizer , ECMPSO) 算法<sup>[53]</sup>,该算法在 PSO 的基础上加入动态蜂群技术、三级更新策略以及外部档案集合的跳跃策略以提高解的性能. 在解决 EED 问题上与多目标人工蜂群算法( MOABC)、多目标综合学习粒子群优化算法( MOCLPSO) 和采用差分策略的基于分解的多目标进化算法( MOEA/D-DE) 进行对比.

由于电力系统的重要性,近年来对传统 EED 问题研究也相对较多,但解决 EED 问题时的优化目标不尽相同. 大多采用成本与污染物排放作为双目标优化问题进行求解,但也包含有功功率损失最小或者风险最小等的3目标优化思路;约束条件也由系统功率平衡、机组出力约束等基本约束转向包含禁行区间、有功功率、无功功率、功率传输损失、备用旋转容量等更切合实际的约束;对多目标优化问题,算法更新策略方面也由起初的帕累托支配转向非支配排序、基于分解的方法. 为了提高解的准确性,动态自适应机制、模糊理论、基于熵的拥挤度计算等方法也不断引入.

## 2.2 MOEAs 在包含新能源 EED 问题中的应用

随着环保意识加强以及科学的发展,包含风能、太阳能等可再生绿色能源的调度策略显得愈加有意义<sup>[54]</sup>. 风、光等清洁能源的接入无疑加大了电力系统调度问题的难度.

2006年 WANG 等人将风能作为能源之一<sup>[55]</sup>,采用 MOPSO 算法,提出了一种包含风能的风险定量方法,首先将风险与成本作为优化目标来解决 EED 问题,并分析了不同容量的风电接入情况之间的对比,其次运用了包含风险、成本与污染物排放的3目标优化策略.

2009年 BRINI 等人将风能、太阳能、发电机组作为能源采用 SPEA 算法对 EED 问题进行求解<sup>[56]</sup>,并借助神经网络在一定程度上实现实时电力系统调度.

2010年, KUO 将风能、发电机组为优化对

象<sup>[57]</sup>,采用成本与污染物排放双目标优化对 EED 问题进行求解. 文章采用新编码技术的 SPEA 算法实现了大功率风能接入情况下的优化调度,且在约束条件中加入了发电机的禁止运行区间、发电机爬坡速率限制等约束条件.

2014年 MAN-IM 等人针对含有风电接入的 EED 问题提出采用非支配排序的粒子群优化( NSPSO) 算法进行解决<sup>[58]</sup>. 将风险与成本作为优化目标,在成本中加入风电预测误差惩罚部分,充分考虑了风电接入对系统安全性的影响. ZHU 等人采用 MOEA/D 算法针对含有风电场的 EED 问题进行求解<sup>[59]</sup>. 作者采用基于多目标机会约束规划,建立含风电场 EED 的随机优化模型,并利用风电出力的分布函数对模型进行确定性转化,并在标准测试系统上与 NSGA-II、MODE、模糊化多目标粒子群算法( FMOEP) 的优化结果进行对比. 结果表明 MOEA/D 算法对于带约束的 EED 问题可以获得较好的调度方案.

同年 DECKMYN 等人针对含有柴油发电机、燃料电池、光伏电池、风机的微网 DEED 问题<sup>[60]</sup>,提出了一种满足系统负荷要求的经济/环境实时调度方案. 该方案采用多目标遗传算法进行求解,并通过具体的实例作为研究对象,验证所提方案的有效性. ADHVARYU 等人采用了一种新的仿生虾群( krill herd, KH) 算法解决含有风电的热、电混合供电系统调度问题<sup>[61]</sup>.

## 2.3 MOEAs 在动态 EED 问题中的应用

在电力系统调度优化问题中,由于电力系统负荷的变化性,动态环境经济调度( dynamic economic emission dispatch , DEED) 也逐渐成为了研究的热点<sup>[62]</sup>.

2007年 BASU 提出一种基于模糊满意度的进化算法<sup>[63]</sup>,将 DEED 问题视为成本与排污量两目标优化问题,该方法可以根据不同的运行状况为决策者提供更科学、合理的方案. 同年, DEB 等人提出采用基于两种策略( DNSGA-II-A, DNSGA-II-B) 改进的 NSGA-II<sup>[64]</sup>算法解决 DEED 问题,假设负荷变化后在算法运行一代的时间内保持不变,所提出方法在一定程度上可解决实时的 DEED 问题.

2008年 BASU 提出运用 NSGA-II 解决 DEED 问题,详细给出了十机组发电系统 24 h 的调度计划<sup>[65]</sup>.

2011年 LEE 等提出量子遗传算法( QGA) 解决带有阀点、禁行区间因素的 DEED 问题<sup>[66]</sup>,作

者在传统发电机的基础上加入了风电能源,并分别在不同真实场景下与进化规划(EP)、遗传算法(GA)等方法进行比较.结果表明所提算法可以实现实时解决 DEED 问题,具有良好的实用性. ABARGHOOEE 等人在解决 DEED 问题时<sup>[67]</sup>,针对加入风能的随机性问题,提出基于风电预测的多目标优化,采用基于模糊满意度的 PSO 算法进行求解.

2013 年 BAHMAN 等人提出一种新的模糊自适应学习粒子群算法(FALPSO)<sup>[68]</sup>,针对含有风电场的 DEED 问题进行求解. FALPSO 算法中加入模糊自适应方法、模糊自适应更新策略等方法,作者采用随机规划的模型来解决风电场的随机性.

### 3 结论

近年来,针对电力系统运行调度问题,学者们做出了更切合实际的研究:①根据电网运时的污染因素,采取环境保护调度;②根据电网负荷情况,采取稳定约束调度;③根据电网传输需求,采取实时以及运转备用容量调度;④考虑电网新能源接入,采取基于预测的机会约束规划机制;⑤根据多电网的调度范围以及用户的特殊需求,制定跨区域以及针对供、需求双方的调度新策略;⑥根据地域环境,制定了包含可再生能源的多种独立分布式电源调度策略.

随着电网的不断发展,电网容量也不断增加,用户对电能质量的要求也越来越高,在满足电网安全运行的情况下,除了经济、环境因素外,电网运行时的质量问题也亟待解决;电力系统问题从成本、环境的双目标优化发展为包含功率损失、风险以及稳定性等提高供电质量的多目标优化,在不断加入符合现实条件的约束同时,引入了新能源,这些使得电力系统调度问题变得愈加复杂.

多目标进化算法由于其在电力、金融、工业设计等诸多领域的广泛应用,得到了更为快速的发展.从二十世纪九十年代 VEGA 首次实际运用,到现如今各种具有优越性能的 MOEAs 算法不断出现,使得需要同时满足多个系统目标要求,且附带大量约束条件的电力系统问题得到了更为智能、科学的解决.加入风、光等新能源的 DEED、DEED 问题,由于风、光电能受地理位置、环境因素以及实时性的影响较大,如何解决风、光电源以及 DEED 的不确定性是现如今科学工作者研究的关键,考虑供需双方共同决策的跨地域智能调度

问题有待进一步的研究.

### 参考文献:

- [1] 肖晓伟,肖迪,林锦国,等.多目标优化问题的研究概述[J].计算机应用研究,2011,28(3):805-808.
- [2] GAMARRA C, GUERRERO J M. Computational optimization techniques applied to microgrids planning: A review [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2015(48):413-424.
- [3] LIANG J, QU BY. Large-scale portfolio optimization using multi-objective dynamic multi-swarm particle swarm optimizer [C] // IEEE Symposium on swarm intelligence. Singapore: IEEE, 2013:1-6.
- [4] ZITZLER E, DEB K. Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: empirical results [J]. Evolutionary computation, 2000,8(2):173-195.
- [5] QU BY, SUGANTHAN P N. Multi-objective evolutionary algorithms based on the summation of normalized objectives and diversified selection [J]. Information sciences, 2010,180(17):3170-3181.
- [6] 王欣,秦斌,阳春华,等.基于混沌遗传混合优化算法的短期负荷环境和经济调度[J].中国电机工程学报,2006,26(11):128-133.
- [7] 张春江,CHEN T K,高亮,等.基于分解的多目标进化算法在工程优化中的应用[J].郑州大学学报(工学版),2015,36(6):38-46.
- [8] 王振浩,李文文,陈继开,等.基于改进自适应遗传算法的分布式电源优化配置[J].电测与仪表,2015,52(5):30-34.
- [9] BERIZZI A, BOVO C, INNORTA M, et al. Multiobjective optimization techniques applied to modern power systems [C] // IEEE power engineering society winter meeting. Columbus: IEEE, 2001,3:1503-1508.
- [10] MOUSA A A, KOTB K A. A hybrid optimization technique coupling an evolutionary and a local search algorithm for economic emission load dispatch problem [J]. Applied mathematics, 2011,2(7):890-898.
- [11] ONGSAKU W, PETCHARAKS N. Unit commitment by enhanced adaptive lagrangian relaxation [J]. IEEE trans on power systems, 2004,19(1):620-628.
- [12] 朱永胜,王杰,瞿博阳,等.采用基于分解的多目标进化算法的电力环境经济调度[J].电网技术,2014,38(6):1577-1584.
- [13] SCHAFFER J D. Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms [C] // In Proceedings of the first International Conference on Genetic Algorithms. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum, 1985:93-100.

- [14] FONSECA C M C, FLEMING P J. Genetic algorithms for multiobjective optimization: formulation, discussion and generalization [C]//The 5th international conference on genetic algorithms, San Mateo, CA: Morgan Kaufman, 1993: 416–423.
- [15] HORN J, NAFPLIOTIS N, GOLDBERG D E. A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization [C]//Proceedings of the first IEEE conference on evolutionary computation. Orlando, FL: Evolutionary Computation, 1994: 82–87.
- [16] ERICKSON M, MAER A, HORN J. The niched pareto genetic algorithm 2 applied to the design of groundwater remediation systems [C]//International conference on evolutionary multi-criterion optimization, Lecture notes in computer science, Berlin: Springer, 2001: 681–695.
- [17] SRINIVAS N, DEB K. Multi-objective optimization using non-dominated sorting in genetic algorithms [J]. Evolutionary computation, 1994, 2(3), 221–248.
- [18] DEB K, PRATAB A, AGARWAL S, et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II [C]//The 6th international conference, Paris: Springer Berlin Heidelberg, 2000: 849–858.
- [19] STORN R, PRICE K. Differential evolution—a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces [J]. Journal of global optimization, 1995, 11(4): 341–359.
- [20] XUE F, SANDERSON A C, GRAVES R J. Pareto-based multi-objective differential evolution [C]//Proceedings of the 2003 congress on evolutionary computation. Piscataway, NJ: IEEE, 2003: 862–869.
- [21] WANG Y N, WU L H, YUAN X F. Multi-objective self-adaptive differential evolution with elitist archive and crowding entropy-based diversity measure [J]. Soft computing, 2010, 14(3): 193–209.
- [22] COELLO C A, PULIDO G T, LECHUGA M S. Handling multiple objectives with particle swarm optimization [J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2004, 8(3): 256–279.
- [23] TRIPATHI P K, BANDYOPADHYAY S, Pal S K. Multi-objective particle swarm optimization with time variant inertia and acceleration coefficients [J]. Information sciences, 2007, 177(22): 5033–5049.
- [24] COELLO COELLO C A, CORETES N C. Solving multi-objective optimization problems using an artificial immune system [J]. Genetic programming and evolvable machines, 2005, 6(2): 163–190.
- [25] GONG M G, JIAO L C, DU H F, et al. Multi-objective immune algorithm with nondominated neighbor-based selection [J]. Evolutionary computation, 2008, 16(2): 225–255.
- [26] ZHANG Q F, Li H. MOEA/D: a multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition [J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2007, 11(6): 712–731.
- [27] ZITZLER E, THIELE L. Multiobjective evolutionary algorithms: A comparative case study and the strength Pareto approach [J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 1999, 3(4): 257–271.
- [28] ZITZLER E, LAUMANN S, M, THIELE L. SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm [R], Tech. rep., Computer Engineering and Networks Laboratory (TIK), Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2001: 95–100.
- [29] TALAQ J H, FERIAL, EL-HAWARY M E. A summary of environmental/economic dispatch algorithms [J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 1994, 9(3): 1508–1516.
- [30] SRINIVASAN D, TETTAMANZI A G B. An evolutionary algorithm for evaluation of emission compliance options in view of the Clean Air Act Amendments [J]. IEEE transactions on power systems, 1997, 12(1): 336–341.
- [31] GUESMI T, ABDALLAH H H, TOUMI A. New approach to solve multiobjective environmental/economic dispatch [J]. Journal of electrical systems, 2006, 2(2): 64–81.
- [32] ZHANG P X, ZHAO B, CAO Y J, et al. A novel multi-objective genetic algorithm for economic power dispatch [C]//39th International universities power engineering conference, Bristol, UK: IEEE, 2004, 1: 422–426.
- [33] SUN H J, PENG C H, GUO J F, et al. Non-dominated sorting differential evolution algorithm for multi-objective optimal integrated generation bidding and scheduling [C]//IEEE international conference on ICIS, Shanghai: IEEE, 2009: 372–376.
- [34] AFZALAN E, JOORABIN M. Emission, Reserve and economic load dispatch problem with non-smooth and non-convex cost functions using epsilon-multi-objective genetic algorithm variable [J]. Electrical power & energy systems, 2013, 52(11): 55–67.
- [35] ABIDO M A. A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective environmental/economic dispatch [J]. Electrical power & energy systems, 2003, 25(2): 97–105.
- [36] ABIDO M A. A novel multiobjective evolutionary for

- multiobjective environmental/economic dispatch [J]. Electric power systems research, 2003( 65) : 71 – 78.
- [37] ABIDO M A. Environmental/Economic power dispatch using multiobjective evolutionary algorithms [J]. IEEE transactions on power systems, 2003, 18( 4) : 1529 – 1537.
- [38] RUGHOOPUTH, HARRY C S, AH KING R T F. Environmental/economic dispatch of thermal units using an elitist multiobjective evolutionary algorithm [C]// IEEE international conference on industrial technology: IEEE, 2003, 1: 48 – 53.
- [39] ZHAO B, CAO Y J. Multiple objective particle swarm optimization technique for economic load dispatch [J]. Journal of Zhejiang university science A: science in engineering, 2005, 6( 5) : 420 – 427.
- [40] AH KING R T F, RUGHOOPUTH, HARRY C S, et al. Evolutionary multi – objective environmental economic dispatch: Stochastic versus deterministic approaches [C]//The third international conference on EMO – 2005. Mexico : Springer Berlin Heidelberg , 2005: 677 – 691.
- [41] ABIDO M A. Multiobjective evolutionary algorithms for electric power dispatch problem [J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2006, 10( 3) : 315 – 329.
- [42] VENKATESH P, LEE K Y. Multi-objective evolutionary programming for economic emission dispatch problem [C]// Power and energy society general meeting – conversion and delivery of electrical energy in the 21st century, Pittsburgh, PA: IEEE, 2008: 1 – 8.
- [43] AGRAWAL S, PANIGRAHI K B, TIWARI M K. Multiobjective particle swarm algorithm with fuzzy clustering for electrical power dispatch [J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2008, 12( 5) : 529 – 541.
- [44] CAI J, MA X Q, LI Q, et al. A Multi-objective chaotic ant swarm optimization for environmental/economic dispatch [J]. International journal of electrical power & energy systems, 2010, 32( 5) : 337 – 344.
- [45] WU L H, WANG Y N, YUAN X F, et al. Environmental/economic power dispatch problem using multi-objective differential evolution algorithm [J]. Electric power systems research, 2010, 80( 9) : 1171 – 1181.
- [46] BASU M. Economic environmental dispatch using multi-objective differential evolution [J]. Applied soft computing, 2011, 11( 2) : 2845 – 2853.
- [47] SIVASUBRAMANI S, SWARUP K S. Environmental/ economic dispatch using multi-objective harmony search algorithm [J]. Electric power systems research, 2011, 81( 9) : 1778 – 1785.
- [48] PANIGRAHI B K, PANDI V R, SHARMAR, et al. Multiobjective bacteria foraging algorithm for electrical load dispatch problem [J]. Energy conversion & management, 2011, 52( 2) : 1334 – 1342.
- [49] ZHANG Y, GONG DW, DING ZH. A bare-bones multi-objective particle swarm optimization algorithm for environmental/economic dispatch [J]. Information sciences, 2012, 192( 6) : 213 – 227.
- [50] NIKNAM T, AZIZIPANAH A R, ROOSTA A, et al. A new multi-objective reserve constrained combined heat and power dynamic economic emission dispatch [J]. Energy, 2012, 42( 1) : 530 – 545.
- [51] GHASEMI A. A fuzzified Multi objective interactive honey bee mating optimization for environmental/economic power dispatch with valve point effect [J]. Electrical power & energy systems, 2013, 49: 308 – 321.
- [52] NIKNAM T, MOJARRAD H D, FIROUZI B B. A new optimization algorithm for multi-objective economic/emission dispatch [J]. International journal of electrical power & energy systems, 2013, 46( 3) : 283 – 293.
- [53] WU DQ, LIU L, GONG X J, et al. An efficient co-evolutionary particle swarm optimizer for solving multi-objective optimization problems [C]//27th Chinese control and decision conference ( CCDC ), Qingdao : IEEE, 2015: 1975 – 1979.
- [54] 袁铁江,晁勤,李义岩,等. 大规模风电并网电力系统经济调度中风电场出力的短期预测模型 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30( 13) : 23 – 27.
- [55] WANG L F, SINGH C. Tradeoff between risk and cost in economic dispatch including wind power penetration using particle swarm optimization [C]//International conference on power system technology, Chongqing: IEEE, 2006: 1 – 7.
- [56] BRINI S, ABDALLAH H H, OUALI A. Economic dispatch for power system included wind and solar thermal energy [J]. Leonardo journal of sciences, 2009, 8( 14) : 204 – 220.
- [57] KUO C C. Wind energy dispatch considering environmental and economic factors [J]. Renewable energy, 2010, 35( 10) : 2217 – 2227.
- [58] MAN-IM A, ONGSAKUL W, SINGH J G, et al. Multi-objective economic dispatch considering wind generation uncertainty using non-dominated sorting particle swarm optimization [C]// 2014 International conference and utility exhibition on green energy for sustainable development ( ICUE ), Pattaya: IEEE,

- 2014: 1 – 6.
- [59] ZHU Y S, WANG J, QU B Y. Multi-objective economic emission dispatch considering wind power using evolutionary algorithm based on decomposition [J]. International journal of electrical power & energy systems, 2014, 63(12): 434 – 445.
- [60] DECKMYN C, VANDOORM T L, MORADZADEH M, et al. Multi-objective optimization for environmental scheduling in microgrids [C] // 2014 IEEE PES general meeting | conference & exposition, National Harbor, MD : IEEE, 2014: 1 – 5.
- [61] ADHVARYYU P K, CHATTOPADHYAY P K, BHATTACHARJYA A. Economic emission dispatch of wind power integrated combined heat and power system [C] // 2014 Eighteenth National Power Systems Conference (NPSC), Guwahati: IEEE, 2014: 1 – 6.
- [62] BASU M. Particle swarm optimization based goal – attainment method for dynamic economic emission dispatch [J]. Electric power components & systems, 2006, 34(9): 1015 – 1025.
- [63] BASU M. Dynamic economic emission dispatch using evolutionary programming and fuzzy satisfying method [J]. International journal of emerging electric power systems, 2007, 8(4): 1 – 15.
- [64] DEB K, BHASKARA U R N, KARTHIK S. Dynamic multi-objective optimization and decision-making using modified NSGA-II: A case study on hydro-thermal power scheduling [C] // 4th international conference, EMO 2007, Matsushima : Springer Berlin Heidelberg, 2007: 803 – 817.
- [65] BASU M. Dynamic economic emission dispatch using nondominated sorting genetic algorithm-II [J]. International journal of electrical power & energy systems, 2008, 78(2): 140 – 149.
- [66] LEE J C, LIN W M, LIAO G C, et al. Quantum genetic algorithm for dynamic economic dispatch with valve-point effects and including wind power system [J]. Energy power & energy system, 2011 (33): 189 – 197.
- [67] ABARGHOEE R A, AGHAEI J. Stochastic dynamic economic emission dispatch considering wind power [C] // Power engineering and automation conference (PEAM), Wuhan : IEEE, 2011: 158 – 161.
- [68] BAHMANI F B, FARJAH E, AZIZIPANAH A R. An efficient scenario-based and fuzzy self-adaptive learning particle swarm optimization approach for dynamic economic emission dispatch considering load and wind power uncertainties [J]. Energy, 2013, 50(2): 232 – 244.

## Multi-objective Evolutionary Algorithm and Its Application in Electric Power Environment Economic Dispatch

XIAO Junming, ZHOU Qian, QU Boyang, WEI Xuehui

(School of Electric and Information Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

**Abstract:** The power supply is vital for modern society while environmental economic dispatch of power system provides an effective solution to this problem. Multi-objective evolutionary algorithms have their unique advantages in solving power system environment economic dispatch problem. In this paper, the multi-objective evolutionary algorithms are briefly introduced in chronological order and then the applications of multi-objective evolutionary algorithms in environment economic dispatch are presented. In addition, some future research directions of this field are also discussed.

**Key words:** multi-objective optimization; multi-objective evolutionary algorithm; power system dispatch; economic environment dispatch



## 基于 Delta 算子时变时延网络控制系统的 $H_\infty$ 滤波

张端金, 刘雪, 范鑫

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 研究了具有时变时延的网络控制系统滤波问题, 设计了一个  $H_\infty$  滤波器使得时变时延系统保持稳定, 基于 Delta 算子, 使得连续域的设计方法可直接应用于离散域的设计. 首先对时变时延的网络控制系统进行建模, 构造了滤波误差系统, 然后采用 Lyapunov-Krasovskii 泛函的方法, 保留了经常被忽略的有用时延项, 对网络控制系统的  $H_\infty$  滤波器误差系统进行性能分析, 再通过一组线性矩阵不等式给出了使滤波误差系统渐近稳定的充分条件, 并且得到了  $H_\infty$  滤波器的设计方法及导数表达式, 最后通过数值例子表明本文方法的有效性.

**关键词:** 网络控制系统;  $H_\infty$  滤波; Delta 算子; 时变时延

**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.201405039

### 0 引言

网络控制系统(NCS)是以互联网为传输媒介,旨在实现信息共享、传输以及控制,具有消耗成本低,使用灵活,维护较容易等特点<sup>[1]</sup>.在信号处理和控制决策的具体实现方面,状态估计具有非常重要的作用,进而关于网络控制系统的滤波问题得到了广泛的关注. $H_\infty$ 滤波拥有很好的鲁棒性能,并且有很高的估计精度<sup>[2]</sup>.关于网络控制系统的 $H_\infty$ 滤波研究也越来越多,文献[3]深入研究了基于网络的离散时间 Markov 跳跃系统的 $H_\infty$ 滤波.文献[4]探讨了同时带有混合时滞和数据包丢失的不确定非线性网络系统的 $H_\infty$ 滤波问题.但是,这些都只是分别在离散或者连续的情形下得出的结论,并未有一个方法将离散域和连续域的情况统一起来.

澳大利亚控制学家 GOODWIN 等提出了一种新的离散化连续系统的方法 Delta 算子<sup>[5]</sup>,在快速采样时能够使离散模型趋近于连续模型,Delta 算子方法具有以下显著特点<sup>[6]</sup>:当采样周期趋近于零时,Delta 算子系统所得结果与连续情形下的相应结果基本保持一致;其系统采样周期呈现为

显示参数特征,这为分析不同采样周期控制系统的性能提供了极大的方便,在实现系统采样过程中,提供了良好的数字特征.

时延会降低系统性能,导致系统不稳定,是研究网络控制系统不可忽视的问题.文献[7]讨论了一类具有时延的网络系统的 $H_\infty$ 滤波问题.文献[8]研究具有长时延及丢包的网络控制系统的 $H_\infty$ 鲁棒滤波.这些现有的研究成果均是在时延固定的情形下得到的,但是在实际应用中,时延是随时间变化的,因此研究时变时延的 NCS 具有重要意义.

笔者研究基于 Delta 算子的网络环境下存在时变时延系统的 $H_\infty$ 滤波.通过采用 Lyapunov-Krasovskii 泛函的方法,对网络控制系统的 $H_\infty$ 滤波器误差系统进行性能分析,并以线性矩阵不等式的形式呈现了时变时延网络控制系统稳定的条件,进而通过数值例子证明了所设计滤波器的有效性能且能满足 $H_\infty$ 性能指标.

### 1 问题描述

Delta 算子<sup>[5]</sup>的定义式如下:

$$\delta x(t) = \begin{cases} d(x)/d(t), & h=0 \\ [x(t+h) - x(t)]/h, & h \neq 0 \end{cases}$$

收稿日期: 2014-05-20; 修订日期: 2015-02-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61471323); 河南省教育厅科学技术研究重点资助项目(14A120004)

作者简介: 张端金(1966—),男,湖北荆州人,郑州大学教授,博导,主要从事网络系统故障检测与滤波研究, E-mail: djzhang@zzu.edu.cn.

引用本文: 张端金,刘雪,范鑫.基于 Delta 算子时变时延网络控制系统的 $H_\infty$ 滤波[J].郑州大学学报(工学版), 2016,37(2): 10-14.

式中: $h$ 是采样周期,当 $h=0$ 时,系统是连续系统; $h \neq 0$ 时,系统是离散系统. Delta算子可以将离散系统和连续系统统一起来.

假设一个Delta算子描述的时变时延离散系统表示如下:

$$\begin{cases} \delta \mathbf{x}(k) = \mathbf{A}_\delta \mathbf{x}(k) + \mathbf{A}_{d\delta} \mathbf{x}(k - \mathbf{d}(k)) + \mathbf{B}_\delta \mathbf{u}(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C} \mathbf{x}(k) + \mathbf{C}_d \mathbf{x}(k - \mathbf{d}(k)) + \mathbf{D} \mathbf{u}(k - \mathbf{d}(k)) \\ \mathbf{z}(k) = \mathbf{L} \mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x}(k) \in \mathbf{R}^n$ 为被控对象状态变量; $\mathbf{y}(k) \in \mathbf{R}^r$ 为对象输出向量; $\mathbf{z}(k) \in \mathbf{R}^q$ 为需要估计的信号向量; $\mathbf{u}(k) \in \mathbf{R}^p$ 为干扰输入向量; $\mathbf{A}_\delta$ 、 $\mathbf{A}_{d\delta}$ 、 $\mathbf{B}_\delta$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{C}_d$ 、 $\mathbf{D}$ 、 $\mathbf{L}$ 均是具有适当维数的已知实常数矩阵; $\mathbf{d}(k)$ 是状态时滞,且 $\mathbf{d}(k)$ 满足

$$0 < d_m \leq \mathbf{d}(k) \leq d_M. \quad (2)$$

滤波器状态方程为:

$$\begin{cases} \delta \hat{\mathbf{x}}(k) = \mathbf{A}_f \hat{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{B}_f \hat{\mathbf{y}}(k) \\ \hat{\mathbf{z}}(k) = \mathbf{L}_f \hat{\mathbf{x}}(k) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\hat{\mathbf{x}}(k)$ 为滤波器状态; $\hat{\mathbf{z}}(k)$ 为真实状态 $\mathbf{z}(k)$ 的估计值; $\hat{\mathbf{y}}(k)$ 为滤波器输入; $\mathbf{A}_f$ 、 $\mathbf{B}_f$ 、 $\mathbf{L}_f$ 为适维矩阵,为待定的滤波器系数矩阵.

定义如下状态向量

$$\begin{cases} \xi(k) = [\mathbf{x}^T(k), \hat{\mathbf{x}}^T(k)]^T \\ \alpha(k) = [\mathbf{u}^T(k), \mathbf{u}^T(k - \mathbf{d}(k))]^T \\ \mathbf{e}(k) = \mathbf{z}(k) - \hat{\mathbf{z}}(k) \end{cases}$$

由Delta算子系统方程(1)和滤波器状态方程(3)得到系统状态方程为

$$\delta \xi(k) = \Phi_1 \xi(k) + \Phi_{1d} \xi(k - \mathbf{d}(k)) + \Gamma_1 \alpha(k). \quad (4)$$

其中:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \begin{bmatrix} \mathbf{A}_\delta & 0 \\ \mathbf{B}_f & \mathbf{A}_f \end{bmatrix}; \Phi_{1d} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{d\delta} & 0 \\ \mathbf{B}_f \mathbf{C}_d & \mathbf{A}_f \end{bmatrix}; \\ \Gamma_1 &= \begin{bmatrix} \mathbf{B}_\delta & 0 \\ 0 & \mathbf{B}_f \mathbf{D} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

设滤波误差系统为 $\mathbf{e}(k) = \mathbf{z}(k) - \hat{\mathbf{z}}(k)$ .

可以得到,滤波误差系统状态方程为

$$\begin{cases} \delta \xi(k) = \Phi_1 \xi(k) + \Phi_{1d} \xi(k - \mathbf{d}(k)) + \Gamma_1 \alpha(k) \\ \mathbf{e}(k) = \mathbf{C}_e \xi(k) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{C}_e = [\mathbf{L} \quad \mathbf{L}_f]$ .

设计时变时延NCS的 $H_\infty$ 滤波器,需要同时满足下面条件:(1)能够满足滤波误差系统(5)渐近稳定;(2)能够满足 $H_\infty$ 性能指标,即扰动输入

到误差状态输出的 $H_\infty$ 范数小于一个正数 $\gamma$ ,即

$$\|H_{zu}\|_\infty = \frac{\|\mathbf{e}(k)\|_\infty}{\|\alpha(k)\|_\infty} \leq \gamma.$$

## 2 $H_\infty$ 滤波稳定性分析

为了分析滤波器的 $H_\infty$ 性能,首先给出系统渐近稳定的定义.

定义1<sup>[8]</sup>:如果下列条件成立,一个Delta算子系统是渐近稳定的:

(i)  $V(\mathbf{x}(k)) \geq 0$ ; 当且仅当 $\mathbf{x}(k) = 0$ 时,有 $V(\mathbf{x}(k)) = 0$ .

(ii)  $\delta V(\mathbf{x}(k)) = [V(\mathbf{x}(k+1)) - V(\mathbf{x}(k))]/h < 0$ .

其中 $V(\mathbf{x}(k))$ 是关于 $\mathbf{x}(k)$ 的Lyapunov函数.

为了方便处理下面的定理证明,做出如下引理.

引理1<sup>[9]</sup> (Schur complement lemma) 对于给定的具有适当维数的实对称矩阵 $\mathbf{A}_{11}$ 、 $\mathbf{A}_{22}$ 、 $\mathbf{A}_{12}$ ,则以下3个条件等价:

$$(I) \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{12}^T & \mathbf{A}_{22} \end{pmatrix} < 0;$$

$$(II) \mathbf{A}_{11} < 0, \mathbf{A}_{22} - \mathbf{A}_{12}^T \mathbf{A}_{11}^{-1} \mathbf{A}_{12} < 0;$$

$$(III) \mathbf{A}_{22} < 0, \mathbf{A}_{11} - \mathbf{A}_{12} \mathbf{A}_{22}^{-1} \mathbf{A}_{12}^T < 0.$$

通过定义1中给出的系统稳定的条件,结合使用Lyapunov-Krasovskii函数的方法,给出如下定理.

定理1 由式(5)描述的具有时变时延网络控制系统的滤波误差系统,使得系统满足渐近稳定性和范数有界条件的充分条件是:存在对称正定矩阵 $\mathbf{P}$ 和 $\mathbf{R}$ 满足

$$\begin{bmatrix} \varphi_1 & 0 & h(h\Phi_1 + \mathbf{I})^T \mathbf{P} \Phi_{1d} & 0 & h(h\Phi_1 + \mathbf{I})^T \mathbf{P} \Gamma_1 \\ * & \varphi_2 & 0 & \varphi_3 & 0 \\ * & * & h^2 \Phi_{1d}^T \mathbf{P} \Phi_{1d} & 0 & h^2 \Phi_{1d}^T \mathbf{P} \Gamma_1 \\ * & * & * & \varphi_4 & 0 \\ * & * & * & * & -\gamma^2 \mathbf{I} + h^2 \Gamma_1^T \mathbf{P} \Gamma_1 \end{bmatrix} < 0. \quad (6)$$

式中:

$$\begin{cases} \varphi_1 = (h\Phi_1 + \mathbf{I})^T \mathbf{P} (h\Phi_1 + \mathbf{I}) - \mathbf{P} + \mathbf{C}_e^T \mathbf{C}_e \\ \varphi_2 = ((1 - d_M + d_m)h\Phi_1 + \mathbf{I})^T \mathbf{P} ((1 - d_M + d_m)h\Phi_1 + \mathbf{I}) - \mathbf{R} \\ \varphi_3 = h((1 - d_M + d_m)h\Phi_1 + \mathbf{I})^T \mathbf{P} (1 - d_M + d_m) \Phi_{1d} \\ \varphi_4 = (1 - d_M + d_m)^2 h^2 \Phi_{1d}^T \mathbf{P} \Phi_{1d} \end{cases}$$

证明  $\alpha(k) = 0$ 时,满足系统(5)渐近稳定.构造下面的Lyapunov泛函

$$V(\xi(k)) = \xi^T(k) P \xi(k) + \sum_{d=d_m}^{d_M} \xi^T(k-d) R \xi(k-d) \quad (k-d(k)).$$

式中:  $P, R$  为待定对称正定矩阵. 有

$$\begin{aligned} \delta V(\xi(k)) &= [V(\xi(k+h)) - V(\xi(k))] / h < 0 \\ &= [\xi^T(k+h) P \xi(k+h) + \sum_{d=d_m}^{d_M} \xi^T(k-d+h) R \xi(k-d+h) - \xi^T(k) P \xi(k) - \sum_{d=d_m}^{d_M} \xi^T(k-d) R \xi(k-d)] / h < 0 \end{aligned}$$

当  $h=1$  时,

$$\begin{aligned} \delta V(\xi(k)) &= [\xi^T(k+1) P \xi(k+1) + \sum_{d=d_m}^{d_M} \xi^T(k-d+1) R \xi(k-d+1) - \xi^T(k) P \xi(k) - \sum_{d=d_m}^{d_M} \xi^T(k-d) R \xi(k-d)] \\ &= \xi^T(k+1) P \xi(k+1) - \xi^T(k) P \xi(k) + \xi^T(k-d_M+1) R \xi(k-d_M+1) - \xi^T(k-d_m) R \xi(k-d_m) = \\ &\quad \begin{bmatrix} \xi^T(k+1) \\ \xi^T(k) \\ \xi^T(k-d_m) \\ \xi^T(k-d_M+1) \end{bmatrix}^T \Omega \begin{bmatrix} \xi^T(k+1) \\ \xi^T(k) \\ \xi^T(k-d_m) \\ \xi^T(k-d_M+1) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

其中:  $\Omega =$

$$\begin{bmatrix} (h\Phi_1 + I)^T P (h\Phi_1 + I) - P & 0 \\ * & ((1-d_M+d_m)h\Phi_1 + I)^T P ((1-d_M+d_m)h\Phi_1 + I) - R \\ * & * \\ * & * \\ h(h\Phi_1 + I)^T P \Phi_{1d} & 0 \\ 0 & h((1-d_M+d_m)h\Phi_1 + I)^T P (1-d_M+d_m)\Phi_{1d} \\ h^2 \Phi_{1d}^T P \Phi_{1d} & 0 \\ * & (1-d_M+d_m)^2 h^2 \Phi_{1d}^T P \Phi_{1d} \end{bmatrix}$$

$\delta V(\xi(k)) < 0$  等价于

$$\begin{bmatrix} \xi^T(k+1) \\ \xi^T(k) \\ \xi^T(k-d_m) \\ \xi^T(k-d_M+1) \end{bmatrix}^T \Omega \begin{bmatrix} \xi^T(k+1) \\ \xi^T(k) \\ \xi^T(k-d_m) \\ \xi^T(k-d_M+1) \end{bmatrix} < 0.$$

只需要  $\Omega < 0$ , 上述不等式即可成立, 由不等式 (6), 利用 Schur 补引理可以得到  $\Omega < 0$ , 由此可得使滤波误差系统 (5) 满足是渐近稳定的条件.

设系统初始条件为零, 则  $V(\xi(k))|_{k=0} = 0$ , 考虑如下的式子:

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} [e^T(k) e(k) - \gamma^2 \alpha^T(k) \alpha(k)]. \quad (7)$$

根据系统 (5) 渐近稳定, 得  $V(\xi(k))|_{k \rightarrow \infty} = 0$ ,

$$\text{有: } J = \sum_{k=0}^{\infty} [e^T(k) e(k) - \gamma^2 \alpha^T(k) \alpha(k) + \Delta V(\xi(k))].$$

$$\text{结合式 (5) 得到: } J = \sum_{k=0}^{\infty} \zeta^T(k) \Pi \zeta(k).$$

其中:

$$\zeta(k) = [\xi^T(k+1) \xi^T(k) \xi^T(k-d_m) \xi^T(k-d_M+1) \alpha^T(k)];$$

$$\Pi = \begin{bmatrix} \varphi_1 & 0 & h(h\Phi_1 + I)^T P \Phi_{1d} & 0 & h(h\Phi_1 + I)^T P \Gamma_1 \\ * & \varphi_2 & 0 & \varphi_3 & 0 \\ * & * & h^2 \Phi_{1d}^T P \Phi_{1d} & 0 & h^2 \Phi_{1d}^T P \Gamma_1 \\ * & * & * & \varphi_4 & 0 \\ * & * & * & * & -\gamma^2 I + h^2 \Gamma_1^T P \Gamma_1 \end{bmatrix}.$$

由 (6) 知:  $J < 0$ , 也即:

$$e^T(k) e(k) - \gamma^2 \alpha^T(k) \alpha(k) < 0.$$

有:

$$\frac{e^T(k) e(k)}{\alpha^T(k) \alpha(k)} \leq \gamma^2.$$

$$\text{等价于 } \|H_{zu}\|_{\infty} = \frac{\|e(k)\|_{\infty}}{\|\alpha(k)\|_{\infty}} \leq \gamma.$$

定理得证.

### 3 $H_{\infty}$ 滤波器设计

**定理 2** 对于由式 (1) 描述的具有时变时延的 Delta 离散系统,  $\gamma > 0$ , 若系统初值为 0, 可以由下面的线性矩阵不等式得到对称正定矩阵  $F_1, P_1, R_1, R_3, P_3, F_3$  和矩阵  $F_2, P_2, R_2$ , 则系统是渐近稳定的.

$$\begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{21} & X_{22} \end{bmatrix} < 0. \quad (8)$$

其中:

$$\begin{aligned} X_{11} &= \begin{bmatrix} -F_1^{-1} & -F_1^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (h\Phi_1 + I)^T R_1 + \Gamma_1^T R^T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_1 & -R_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_2^T & -R_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \\ X_{12} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & (h\Phi_1 + I)^T F_1^{-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (h\Phi_1 + I)^T F_1^{-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & ((1-d_M+d_m)h\Phi_1 + I)^T F_1^{-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & ((1-d_M+d_m)h\Phi_1 + I)^T F_1^{-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h\Phi_{1d} F_1^{-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h\Phi_{1d} F_1^{-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (1-d_M+d_m)h\Phi_{1d} F_1^{-1} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

**Fig. 1 Comparison of actual and estimated values**

其中  $z(k)$  为真实值,  $\hat{z}(k)$  为估计值, 可以看出基于 Delta 算子具有时延时滞的网络控制系统的  $H_\infty$  滤波器的设计是有效的.

由结果可以看出, 如果时滞时延范围比较小,  $H_\infty$  扰动抑制度比较小, 则得到的滤波器性能也比较稳定.

## 5 结论

笔者研究了具有时变时延的网络控制系统的滤波问题, 通过 Lyapunov 泛函和  $H_\infty$  滤波方法, 且在离散化系统的时候运用了 Delta 算子的方法, 求解 Lyapunov 泛函时不仅降低了设计的保守性, 所得结果也表明研究方法是可行的, 且时延范围和滤波器性能稳定性呈反向变化.

## 参考文献:

- [1] 游科友, 谢立华. 网络控制系统的最新研究综述[J]. 自动化学报, 2013, 39(2): 101–117.
- [2] MAO Z H, JIANG B. H-infinity fault detection filter design for networked control systems modeled by discrete Markovian jump systems[J]. IET control theory and applications, 2007, 1(5): 1336–1343.
- [3] 介晓娟, 张端金, 汪爱娟. 基于网络的离散时间 Markov 跳跃系统滤波[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(S1): 119–122.
- [4] 赵立英, 窦利亚. 具有随机时滞和丢包的非线性网络控制系统的滤波器设计[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(12): 4224–4231.
- [5] MIDDLETON R H, GOODWIN G C. Improved finite word length characteristics in digital control using delta operator[J]. IEEE trans. on automatic control, 1986, 31(11): 1015–1021.
- [6] ZHANG D J, ZHOU H C. Fault detection of delta operator formulated networked control systems[C]//Proceedings of the 25th chinese control and decision conference, Guiyang, 2013: 1039–1043.
- [7] ZHANG X M, HAN Q L. Robust  $H_\infty$  filtering for a class of uncertain linear systems with time-varying delay[J]. Automatica, 2008, 44(1): 157–166.
- [8] 蔡云泽, 潘宁, 许晓鸣. 具有长时延及丢包的网络控制系统鲁棒滤波[J]. 控制与决策, 2010, 12(1): 1826–1836.
- [9] BOYD S, GHAOUI L E, FERON E. et al. Linear matrix inequalities in systems and control theory[M]. Philadelphia: SIAM, 1994: 11–16.
- [10] HE Y, WANG Q G, LIN C. et al. Delay-range-dependent stability for systems with time-varying delay[J]. Automatica, 2007, 43(2): 371–376.

## H-infinity Filtering for Networked Control Systems with Time-varying Delay Using Delta Operator Approach

ZHANG Duanjin, LIU Xue, FAN Xin

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** This paper is concerned with the problem of filtering for network-based systems with time-varying delay. A filter is designed to ensure the stability of the system. The filtering problems can be studied in the combination form via Delta operator approach. Firstly, a model is constructed, then by using a Lyapunov-Krasovskii function the performance analysis of network-based H-infinity filtering-error systems were proposed by retaining some useful time-delay terms. And a sufficient condition of asymptotically stability for filtering error system and the design method of H-infinity filter are derived in terms of several linear matrix inequalities. A numerical example shows the effectiveness of the proposed approach.

**Key words:** networked control system;  $H_\infty$  filtering; Delta operator; time-varying delay

文章编号: 1671-6833(2016)02-0015-05

## 不确定 T-S 模糊系统的跟踪控制器设计

张恒艳, 高中文, 李文龙, 宋伟伟, 黄玲

(哈尔滨理工大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 研究基于观测器的不确定 T-S 模糊系统的跟踪控制器设计问题. 利用 T-S 模糊方法对含有不确定性的非线性被控对象进行建模, 对于给定代表系统期望状态的参考模型, 在系统状态不可测及不确定项满足有界条件下, 利用并行分布补偿的方法 (parallel distributed compensation) 设计基于观测器的模糊控制器, 保证对于参考模型状态的跟踪, 同时抑制扰动对跟踪误差的影响. 借助 Lyapunov 稳定性定理及舒尔补引理将跟踪控制器的设计问题转化为一组线性矩阵不等式 (linear matrix inequality) 的可行解问题. 该方法简单实用, 仿真实例验证了此种方法的有效性与正确性.

**关键词:** T-S 模糊系统; 不确定性; 观测器;  $H_\infty$  跟踪性能; 线性矩阵不等式 (LMI)

**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.201504057

### 0 前言

在控制理论领域的研究中, 利用 T-S 模糊模型可以实现对非线性系统的逼近, 基于 T-S 模糊控制策略去处理模糊控制系统中存在的非线性具有很大的优势. 近年来, 随着 T-S 模糊理论的不完善, 非线性系统的鲁棒镇定问题成为控制领域研究的重点. 文献 [1-3] 分别针对带有参数不确定, 时滞和非线性项的 T-S 模糊系统的鲁棒镇定问题展开研究, 给出了鲁棒镇定的条件以及控制器的设计方法. 文献 [4] 将模糊系统的鲁棒镇定条件表述为一系列矩阵不等式的可行性问题, 实现了控制器的求解. 在实际应用中, 为了使系统的状态或输出尽可能地接近给定信号, 实现跟踪控制, 必须要设计跟踪控制器来满足系统的控制要求. 文献 [5] 在考虑 T-S 模糊模型建模误差的前提下, 对稳定的线性参考模型实现跟踪控制, 得到了保证跟踪误差系统稳定的约束条件. 在此基础上, 文献 [6] 提出了一种新的  $H_\infty$  性能指标, 研究了受控输出变量中控制系数不为零情况下的跟踪控制问题, 通过对模糊控制器的设计, 实现了状态变量与参考变量的高精度吻合. 文献 [7] 针对系统状态不可测的情况, 设计了基于观测器的跟踪控制器, 实现对系统状态的跟踪. 文献

[8] 研究系统存在有界外部扰动条件下基于状态反馈的  $H_\infty$  渐近跟踪控制器设计问题.

综上, 针对 T-S 模糊不确定系统, 在状态未知条件下的  $H_\infty$  渐近跟踪控制还没有研究, 笔者将探讨这方面的问题. 首先, 基于 T-S 模糊模型对含有不确定性的非线性系统进行建模, 然后给定系统的跟踪参考模型, 在不确定项满足有界的条件下, 设计以模糊观测器为基础的模糊控制器. 通过选取适当的李雅普诺夫函数, 推导出  $H_\infty$  跟踪控制器存在的充分条件, 该条件具有线性矩阵不等式形式, 最后, 通过对相应的线性矩阵不等式 (linear matrix inequality, LMI) 求解, 构造模糊控制器与模糊观测器.

### 1 问题描述

由 T-S 模糊模型描述的不确定非线性系统, 定义规则如下.

规则  $i$ . 如果  $z_1(t)$  是  $F_i^1$ , 且  $z_2(t)$  是  $F_i^2, \dots, z_g(t)$  是  $F_i^g$

$$\dot{x}(t) = (A_i + \Delta A_i)x(t) + (B_i + \Delta B_i)u(t) + d_i(x, t), \quad (1)$$

$$y(t) = C_i x(t) + v(t), \quad i = 1, 2, \dots, r. \quad (2)$$

式中:  $x(t) \in R^n$  为系统的状态向量;  $u(t) \in R^m$  为

收稿日期: 2015-04-24; 修订日期: 2015-08-18

基金项目: 黑龙江省 2014 年度科技资助项目 (12541118)

通讯作者: 黄玲 (1975—), 女, 河南人, 哈尔滨理工大学教授, 博士, 主要从事网络控制系统分析与控制、信号处理 (滤波)、时滞系统研究等, E-mail: mail\_huangling@163.com.

引用本文: 张恒艳, 高中文, 李文龙, 等. 不确定 T-S 模糊系统的跟踪控制器设计 [J]. 郑州大学学报 (工学版), 2016, 37(2): 15-19.

输入向量;  $y(t)$  为系统的输出向量;  $v(t)$  为可测噪声;  $d_i(x, t)$  为外部扰动;  $z_i(t)$  ( $i=1, 2, \dots, g$ ) 是模糊前件变量;  $F_i^j$ ,  $i=1, 2, \dots, r$ ,  $j=1, 2, \dots, g$  是模糊集合,  $r$  是模糊规则数;  $A_i$ 、 $B_i$ 、 $C_i$  为适当维数的常数矩阵;  $\Delta A_i$ 、 $\Delta B_i$  为不确定性, 且满足下面

$$[\Delta A_i \quad \Delta B_i] = E_i \sum_i(t) [F_{ai} \quad F_{bi}]. \quad (3)$$

式中:  $E_i$ 、 $F_{ai}$ 、 $F_{bi}$  为适当维数的常数矩阵;  $\sum_i(t)$  的每个元素 Lebesgue 可测的, 且满足  $\sum_i^T(t) \sum_i(t) \leq I, \forall t$ .

利用单点模糊化、乘积推理、中心加权反模糊化的方法可以得到模糊系统模型

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) [(A_i + \Delta A_i)x(t) + (B_i + \Delta B_i)u(t) + d_i(x, t)]. \quad (4)$$

$$y(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) C_i x(t) + v(t). \quad (5)$$

式中:  $h_i(z(t)) = \mu_i(z(t)) / \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))$ ,

$\mu_j(z(t)) = \prod_{i=1}^g F_i^j(z_i(t))$ ,  $F_i^j(z_i(t))$  是  $z_i(t)$  在模糊集合  $F_i^j$  中的隶属度.  $\mu_i(z(t)) \geq 0$ ,  $\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) = 1, 0 \leq \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \leq 1, i=1, 2, \dots, r$ .

对于系统中的扰动, 引进下面的假设.

**假设 1** 模型(4)中的扰动  $d_i(x, t)$  满足

$$d_i(x, t) = B_i \bar{d}_i(x, t). \quad (6)$$

式中:  $\bar{d}_i(x, t) \in R^m$ , 且  $\|\bar{d}_i(x, t)\| \leq s_i(t)$ ,  $s_i(t) \geq 0$  ( $i=1, 2, \dots, L$ ) 是  $t$  的一致有界连续函数.

为了推导出笔者的结论, 需要借助以下对于有界不确定性的处理方法.

**引理 1**<sup>[9]</sup> 给定适当维数的矩阵  $Y$ 、 $D$  和  $E$ , 其中  $Y$  是对称的, 则有

$$Y + DFE + E^T F^T D^T < 0.$$

对于所有满足  $F^T F \leq I$  的矩阵成立, 当且仅当存在一个常数  $\varepsilon > 0$ , 使得

$$Y + \varepsilon D D^T + \varepsilon^{-1} E^T E < 0. \quad (7)$$

成立.

定义参考模型:

$$\dot{x}_r(t) = A_r x_r(t) + B_r r(t). \quad (8)$$

式中:  $A_r \in R^{n \times n}$  为系统的渐近稳定矩阵;  $B_r \in R^{m \times 1}$  为输入矩阵;  $x_r(t)$  为参考状态;  $r(t)$  为有界参考输入.

观测器采用和被控对象相同的模糊规则, 第  $i$  个规则为:

如果  $z_1(t)$  是  $F_i^1$ , 且  $z_2(t)$  是  $F_i^2, \dots, z_g(t)$  是  $F_i^g$ ,

那么  $\dot{\hat{x}}(t) = (A_i + \Delta A_i) \hat{x}(t) + B_i u(t) +$

$$L_i(y(t) - \hat{y}(t)). \quad (9)$$

$$\hat{y}(t) = C_i \hat{x}(t). \quad (10)$$

全局观测器表示为

$$\dot{\hat{x}}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) [(A_i + \Delta A_i) \hat{x}(t) + (B_i + \Delta B_i) u(t) + L_i(y(t) - \hat{y}(t))]. \quad (11)$$

状态误差定义为  $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ .  $(12)$

则  $\dot{e}(t) = \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t)$

$$= \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \sum_{j=1}^r h_j(z(t)) [(A_i + \Delta A_i - L_i C_j) e(t) - L_i v(t) + B_i \bar{d}_i(x, t)]. \quad (13)$$

采用和被控对象相同的控制规则, 则全局模糊控制器为

$$u(t) = \sum_{j=1}^r K_j [\hat{x}(t) - x_r(t)]. \quad (14)$$

从而得到如下的闭环增广系统:

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z(t)) h_j(z(t)) [\tilde{A}_{ij} + \Delta \tilde{A}_{ij}] \tilde{x}(t) + \tilde{B}_i \tilde{w}(t). \quad (15)$$

式中:

$$\tilde{A}_{ij} = \begin{bmatrix} A_i + B_i K_j & -B_i K_j & -B_i K_j \\ 0 & A_r & 0 \\ 0 & 0 & A_i - L_i C_j \end{bmatrix};$$

$$\tilde{B}_i = \begin{bmatrix} B_i & 0 & 0 \\ 0 & B_r & 0 \\ B_i & 0 & -L_i \end{bmatrix};$$

$$\Delta \tilde{A}_{ij} = \begin{bmatrix} \Delta A_i + \Delta B_i K_j & -\Delta B_i K_j & -\Delta B_i K_j \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta A_i \end{bmatrix};$$

$$\tilde{x}(t) = [x^T(t) \quad x_r^T(t) \quad e^T(t)]^T;$$

$$\tilde{w}(t) = [\bar{d}_i(x, t) \quad r(t) \quad v(t)]^T.$$

对于增广系统(15), 考虑如下  $H_\infty$  扰动抑制性能指标

$$\begin{aligned} & \int_0^{\infty} \{ [x(t) - x_r(t)]^T Q [x(t) - x_r(t)] \} dt \\ &= \int_0^{\infty} \tilde{x}^T(t) \tilde{Q} \tilde{x}(t) dt \leq \tilde{x}^T(0) \tilde{P} \tilde{x}(0) + \\ & \quad \rho^2 \int_0^{\infty} \tilde{w}^T(t) \tilde{w}(t) dt. \end{aligned} \quad (16)$$

式中:  $\tilde{P}$ 、 $\tilde{Q}$  是对称正定的矩阵;

$$\tilde{Q} = \begin{bmatrix} Q & -Q & 0 \\ -Q & Q & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

## 2 基于观测器的模糊跟踪控制设计

**定理 1** 对非线性系统 (15), 如果存在正定对称的矩阵  $\tilde{P}$  和  $\tilde{Q}$  使下面的矩阵不等式

$$(\tilde{A}_{ij} + \Delta \tilde{A}_{ij})^T \tilde{P} + \tilde{P}(\tilde{A}_{ij} + \Delta \tilde{A}_{ij}) + \frac{1}{\rho^2} \tilde{P} \tilde{B}_i \tilde{B}_i^T \tilde{P} + \tilde{Q} < 0. \quad (17)$$

成立, 则系统 (15) 满足  $H_\infty$  跟踪性能 (16).

证 明:  $\int_0^t [\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_r(t)]^T \tilde{Q} [\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_r(t)] dt = \int_0^t \tilde{\mathbf{x}}^T(t) \tilde{Q} \tilde{\mathbf{x}}(t) dt = \tilde{\mathbf{x}}^T(0) \tilde{P} \tilde{\mathbf{x}}(0) - \tilde{\mathbf{x}}^T(t) \tilde{P} \tilde{\mathbf{x}}(t) + \int_0^t \{ \tilde{\mathbf{x}}^T(t) \tilde{Q} \tilde{\mathbf{x}}(t) + \frac{d}{dt} (\tilde{\mathbf{x}}^T(t) \tilde{P} \tilde{\mathbf{x}}(t)) \} dt \leq \tilde{\mathbf{x}}^T(0) \tilde{P} \tilde{\mathbf{x}}(0) + \int_0^t \{ \tilde{\mathbf{x}}^T(t) \tilde{Q} \tilde{\mathbf{x}}(t) + \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \sum_{j=1}^r h_j(z(t)) [(\tilde{A}_{ij} + \Delta \tilde{A}_{ij}) \tilde{\mathbf{x}}(t)]^T \tilde{P} \tilde{\mathbf{x}}(t) + \tilde{\mathbf{x}}^T(t) \tilde{P}(\tilde{A}_{ij} + \Delta \tilde{A}_{ij}) \tilde{\mathbf{x}}(t) + [(\tilde{B}_i \tilde{\mathbf{w}}(t))]^T \tilde{P} \tilde{\mathbf{x}}(t) + \tilde{\mathbf{x}}^T(t) \tilde{P} \tilde{B}_i \tilde{\mathbf{w}}(t) - \rho^2 \tilde{\mathbf{w}}^T(t) \tilde{\mathbf{w}}(t) - \frac{1}{\rho^2} \tilde{\mathbf{x}}^T(t) \tilde{P} \tilde{B}_i \tilde{B}_i^T \tilde{P} \tilde{\mathbf{x}}(t) \} + \frac{1}{\rho^2} \tilde{\mathbf{x}}^T(t) \tilde{P} \tilde{B}_i \tilde{B}_i^T \tilde{P} \tilde{\mathbf{x}}(t) + \rho^2 \tilde{\mathbf{w}}^T(t) \tilde{\mathbf{w}}(t) \} dt \leq \tilde{\mathbf{x}}^T(0) \tilde{P} \tilde{\mathbf{x}}(0) + \int_0^t \{ \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \tilde{\mathbf{x}}^T(t) [(\tilde{A}_{ij} + \Delta \tilde{A}_{ij})^T \tilde{P} + \tilde{P}(\tilde{A}_{ij} + \Delta \tilde{A}_{ij}) + \frac{1}{\rho^2} \tilde{P} \tilde{B}_i \tilde{B}_i^T \tilde{P} + \tilde{Q}] \tilde{\mathbf{x}}(t) + \rho^2 \tilde{\mathbf{w}}^T(t) \tilde{\mathbf{w}}(t) \} dt.$

由定理 1 可得

$$\int_0^t \tilde{\mathbf{x}}^T(t) \tilde{Q} \tilde{\mathbf{x}}(t) dt \leq \tilde{\mathbf{x}}^T(0) \tilde{P} \tilde{\mathbf{x}}(0) + \rho^2 \int_0^t \tilde{\mathbf{w}}^T(t) \tilde{\mathbf{w}}(t) dt.$$

证毕.

**定理 2** 在非线性系统 (15) 中, 如果存在正定对称矩阵  $P_{11}$ 、 $P_{22}$ 、 $P_{33}$ 、 $Q$ 、 $K_j$  及标量  $\varepsilon_i > 0$ , 使下面的线性矩阵不等式成立

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ * & S_{22} & S_{23} \\ * & * & S_{33} \end{bmatrix} < 0. \quad (18)$$

则系统 (15) 满足  $H_\infty$  跟踪性能 (16).

式中:

$$\begin{aligned} S_{11} &= P_{11} A_i + A_i^T P_{11} + P_{11} B_i K_j + K_j^T B_i^T P_{11} + \frac{1}{\rho^2} P_{11} B_i B_i^T P_{11} + Q + \varepsilon_i^{-1} (F_{ai} + F_{bi} K_j)^T (F_{ai} + F_{bi} K_j) + \varepsilon_i P_{11} E_i E_i^T P_{11}; \\ S_{12} &= -P_{11} B_i K_j - Q - \varepsilon_i^{-1} (F_{ai} + F_{bi} K_j)^T (F_{bi} K_j); \\ S_{13} &= -P_{11} B_i K_j + \frac{1}{\rho^2} P_{11} B_i B_i^T P_{33} - \varepsilon_i^{-1} (F_{ai} + F_{bi} K_j)^T (F_{bi} K_j); \\ S_{22} &= A_r^T P_{22} + P_{22} A_r + \frac{1}{\rho^2} P_{22} B_r B_r^T P_{22} + Q + \varepsilon_i^{-1} (F_{bi} K_j)^T (F_{bi} K_j) + \varepsilon_i P_{22} E_i E_i^T P_{22}; \\ S_{23} &= \varepsilon_i^{-1} (F_{bi} K_j)^T (F_{bi} K_j); \\ S_{33} &= P_{33} A_i + A_i^T P_{33} - P_{33} L_i C_j - C_j^T L_i^T P_{33} + \frac{1}{\rho^2} P_{33} B_i B_i^T P_{33} + \frac{1}{\rho^2} P_{33} L_i L_i^T P_{33} + \varepsilon_i^{-1} (F_{bi} K_j)^T (F_{bi} K_j) + \varepsilon_i P_{33} E_i E_i^T P_{33} + \varepsilon_i^{-1} F_{ai}^T F_{ai}. \end{aligned}$$

证 明: 取  $\tilde{P} = \begin{bmatrix} P_{11} & 0 & 0 \\ 0 & P_{22} & 0 \\ 0 & 0 & P_{33} \end{bmatrix}$ ,  $\tilde{Q} =$

$$\begin{bmatrix} Q & -Q & 0 \\ -Q & Q & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{代入式 (17) 后整理得:}$$

$$\begin{bmatrix} M & -P_{11} B_i K_j - Q & N \\ * & R & 0 \\ * & * & T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{11} E_i & 0 & 0 \\ 0 & P_{22} E_i & 0 \\ 0 & 0 & P_{33} E_i \end{bmatrix} \Sigma_i$$

$$\begin{bmatrix} (F_{ai} + F_{bi} K_j) & -F_{bi} K_j & -F_{bi} K_j \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{ai} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (F_{ai} + F_{bi} K_j) & -F_{bi} K_j & -F_{bi} K_j \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{ai} \end{bmatrix}^T$$

$$\Sigma_i^T \begin{bmatrix} P_{11} E_i & 0 & 0 \\ 0 & P_{22} E_i & 0 \\ 0 & 0 & P_{33} E_i \end{bmatrix} < 0$$

式中:  $N = -P_{11} B_i K_j + \frac{1}{\rho^2} P_{11} B_i B_i^T P_{33}$ ;

$$M = P_{11} A_i + A_i^T P_{11} + P_{11} B_i K_j + K_j^T B_i^T P_{11} + \frac{1}{\rho^2} P_{11} B_i B_i^T P_{11} + Q;$$

$$R = P_{22} A_r + A_r^T P_{22} + Q + \frac{1}{\rho^2} P_{22} B_r B_r^T P_{22};$$



$$T = P_{33}A_i + A_i^T P_{33} - P_{33}L_i C_j - C_j^T L_i^T P_{33} + \frac{1}{\rho^2} P_{33} B_i B_i^T P_{33} + \frac{1}{\rho^2} P_{33} L_i L_i^T P_{33}.$$

借助引理 1, 上式可转化为:

$$\begin{bmatrix} M & -P_{11} B_i K_j - Q & N \\ * & R & 0 \\ * & * & T \end{bmatrix} + \varepsilon_i \begin{bmatrix} P_{11} E_i & 0 & 0 \\ 0 & P_{22} E_i & 0 \\ 0 & 0 & P_{33} E_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{11} E_i & 0 & 0 \\ 0 & P_{22} E_i & 0 \\ 0 & 0 & P_{33} E_i \end{bmatrix}^T + \varepsilon_i^{-1} \begin{bmatrix} F_{ai} + F_{bi} K_j & -F_{bi} K_j & -F_{bi} K_j \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{ai} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{ai} + F_{bi} K_j & -F_{bi} K_j & -F_{bi} K_j \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{ai} \end{bmatrix} < 0.$$

通过定义  $S_{ij}, i=1, 2, 3, i \leq j$  上式转化为式(18), 定理得证. 定理给出了状态跟踪控制器存在的充分条件, 可以证明在该条件下, 闭环系统是二次稳定的.

**定理 3** 对 T-S 模糊系统(15)中, 如果存在正定对称矩阵  $\tilde{P}$ , 满足

$$(\tilde{A}_{ij} + \Delta \tilde{A}_{ij})^T \tilde{P} + \tilde{P}(\tilde{A}_{ij} + \Delta \tilde{A}_{ij}) + \frac{1}{\rho^2} \tilde{P} \tilde{B}_i \tilde{B}_i^T \tilde{P} < 0. \quad (19)$$

那么闭环系统(15)二次稳定.

证明: 选取 Lyapunov 函数  $V(t) = \tilde{x}^T(t) \tilde{P} \tilde{x}(t)$ ,  $\dot{V}(t) = \dot{\tilde{x}}^T(t) \tilde{P} \tilde{x}(t) + \tilde{x}^T(t) \tilde{P} \dot{\tilde{x}}(t) \leq \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \sum_{j=1}^r h_j(z(t)) \tilde{x}^T(t) [(\tilde{A}_{ij} + \Delta \tilde{A}_{ij})^T \tilde{P} + \tilde{P}(\tilde{A}_{ij} + \Delta \tilde{A}_{ij}) + \frac{1}{\rho^2} \tilde{P} \tilde{B}_i \tilde{B}_i^T \tilde{P}] \tilde{x}(t).$

采用类似于定理 1 的证明可得  $\dot{V} < 0$ , 则闭环系统(15)二次稳定.

可以看出在式(17)满足的条件下, 式(19)一定满足, 因此条件(18)保证了 T-S 模糊系统(15)二次稳定, 从而说明设计的基于观测器的控制器实现了对于参考模型状态的跟踪. 即被控对象(4)实现了对参考模型(8)状态的跟踪.

定理 2 建立了保证系统(4)实现  $H_\infty$  渐近跟踪参考模型(8)的充分条件, 下面给出求解不等

式的方法.

在定理 2 中暗含  $S_{11} < 0$ , 在  $S_{11}$  的两端同时乘

以  $W_{11} = P_{11}^{-1}$ , 令  $\tilde{K}_j = K_j W_{11}$ ,  $\tilde{Q} = W_{11} Q W_{11}$  有:

$$W_{11} A_i^T + A_i W_{11} + \tilde{K}_j^T B_i^T + B_i \tilde{K}_j + \frac{1}{\rho^2} B_i B_i^T + \varepsilon_i E_i E_i^T +$$

$$\varepsilon_i^{-1} (\tilde{K}_j^T F_{bi}^T + W_{11} F_{ai}^T) (F_{ai} W_{11} + F_{bi} \tilde{K}_j) + \tilde{Q} < 0.$$

利用 Schur 补引理处理后有:

$$\begin{bmatrix} R & B_i & (F_{ai} W_{11} + F_{bi} \tilde{K}_j)^T \\ * & -\rho^2 I & 0 \\ * & * & -\varepsilon_i I \end{bmatrix} < 0. \quad (20)$$

式中:  $R = A_i W_{11} + W_{11} A_i^T + B_i \tilde{K}_j + \tilde{K}_j^T B_i^T + \tilde{Q} + \varepsilon_i E_i E_i^T$ .

根据 Matlab 中的 LMI 工具箱, 对于给定的  $\rho$ , 可以求得  $\varepsilon_i, W_{11}, \tilde{K}_j, \tilde{Q}$  进一步可以求解  $P_{11}, K_j$  和  $Q$ .

同理,  $S_{33} < 0$ , 可以求解出  $P_{33}$  与  $L$ . 将所求解的值代入式(18)可以得到  $P_{22}$  的值.

### 3 仿真实例

含有不确定性的 T-S 模糊系统的参数给定如下:

$$\begin{aligned} A_1 &= \begin{bmatrix} -2 & 0 \\ 1 & -3 \end{bmatrix}; A_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 1 & -4 \end{bmatrix}; B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}^T; B_2 = B_1; C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0.1 \end{bmatrix}; C_2 = C_1; E_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; E_2 = E_1; F_{a1} = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 \\ 0.3 & 0 \end{bmatrix}; F_{a2} = F_{a1}; F_{b1} = \begin{bmatrix} 0 & 2 \end{bmatrix}^T; F_{b2} = F_{b1}; A_r = \begin{bmatrix} -5 & 0 \\ 0 & -5 \end{bmatrix}; B_r = \begin{bmatrix} 1.5 & 0 \end{bmatrix}^T; \rho = 0.1; \sum_i(t) = [\sin t \ 0; 0 \ \cos t]. \end{aligned}$$

选择模糊隶属度函数  $h_1(x_1) = 1 - 0.25x_1^2, h_2(x_1) = 1 - h_1(x_1)$ , 系统的初始状态  $x = [1 \ -1]^T$ , 计算后得到系统的控制器增益与观测器增益分别为:  $K_1 = [0.071 \ -0.073], K_2 = [-0.258 \ 0.028], L_1 = [2.450 \ 0.585]^T, L_2 = [2.485 \ 0.652]^T$ .

系统的仿真曲线如图 1 所示, 跟踪误差如图 2 所示. 可以看出, 相比于文献[1-3], 对于含有不确定性的 T-S 模糊系统, 笔者设计的基于观测器的控制器, 不仅可以使闭环系统鲁棒镇定, 而且可以实现被控对象的状态在满足  $H_\infty$  性能指标  $\rho = 0.1$  的条件下对系统状态的跟踪, 响应时间在 2 000 ~ 2 500 s 之间, 且具有很好的跟踪效果.

### 4 结论

研究了一类以观测器为基础的不确定 T-S

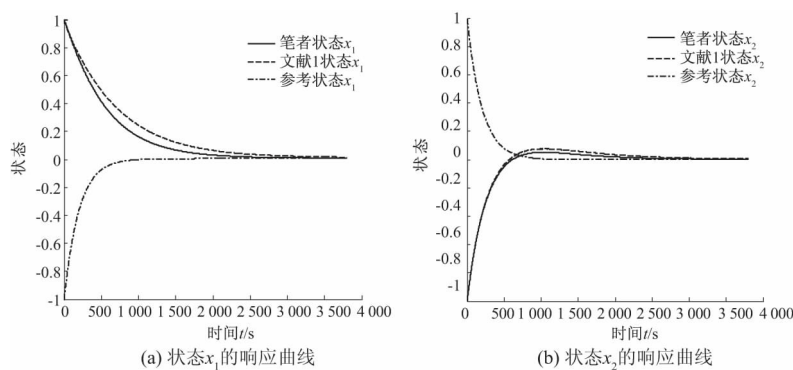


图1 响应曲线

Fig.1 The response curve

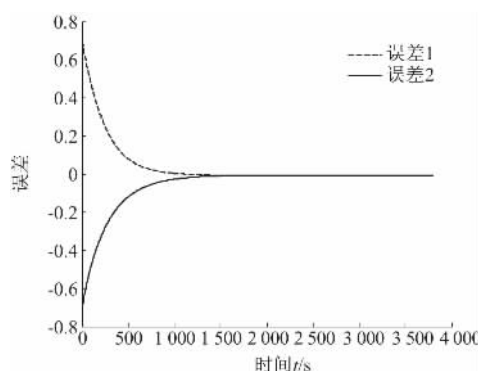


图2 跟踪误差曲线

Fig.2 Tracking error curve

模糊系统的跟踪控制问题. 实现了在系统状态不可测及不确定性有界情况下对系统状态的跟踪, 以及外界扰动的抑制, 并将控制器的设计转化为线性不等式的求解, 步骤简单方便, 仿真实例验证了此种方法的有效性与正确性.

### 参考文献:

- [1] 齐丽, 杨俊友. 基于观测器的不确定 T-S 模糊系统的鲁棒镇定 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(5): 627-630.
- [2] 宋晓娜, 刘磊坡. 一类非线性 T-S 模糊时滞系统的鲁棒观测器型  $H_\infty$  控制器设计 [J]. 物理学报, 2013, 62(21): 1-11.
- [3] 王瑗琇, 张强, 王东云, 等. 基于滑模变结构的 IPMC 跟踪控制系统设计 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(6): 104-107.
- [4] DUAN G R, YU H H. LMIs in Control Systems Analysis Design and Applications [M]. CRC Press, 2013.
- [5] 于洋, 王巍. 基于 T-S 模型的一类非线性系统的鲁棒跟踪控制 [J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2013, 33(4): 220-226.
- [6] 常晓恒, 井元伟, 高曦莹, 刘晓平. T-S 模糊系统  $H_\infty$  跟踪控制设计 [J]. 控制与决策, 2008, 23(3): 329-332.
- [7] TSENG C S, CHEN B S, UANG H J. Fuzzy tracking control design for nonlinear dynamic systems via T-S fuzzy model [J]. IEEE transactions on fuzzy systems, 2001, 9(3): 381-392.
- [8] 王艳华, 王志飞. 一类不确定 T-S 模糊系统的  $H_\infty$  跟踪控制 [J]. 湖北文理学院学报, 2014, 35(8): 11-15.

## The Design of Tracking Controller for T-S Fuzzy Systems with Uncertainty

ZHANG Hengyan, GAO Zhongwen, LI Wenlong, SONG Weiwei, HUANG Ling

(School of Automation, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

**Abstract:** The tracking controller for T-S fuzzy systems with uncertainty is designed based on the observer. T-S fuzzy method is used to model the nonlinear controlled object with uncertainty. For given expected state tracking model, when the state of the system is unmeasurable and the uncertainties are bounded, a fuzzy controller based on the observer is designed by means of parallel distributed compensation (PDC). The controller guarantees that the states of the close-loop system track the states of the reference model, and that the influence of the disturbance is reduced. By Lyapunov stability theorem and Shur Complement Lemma, the design of the tracking controller is transformed into a feasible problem for a set of linear matrix inequalities (LMI). The simulation example is given to testify the validity and efficiency of the proposed method.

**Key words:** T-S fuzzy tracking system; uncertainty;  $H_\infty$  tracking performance; linear matrix inequalities (LMI)

# 极限学习机优化及其拟合性分析

王 杰, 苒群康, 彭金柱

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 运用烟花算法(fireworks algorithm, FWA)优化极限学习机(extreme learning machine, ELM). 首先烟花算法经过多次的迭代, 确定  $M$  个最优的烟花, 并且以极限学习机测试样本的 RMSE 作为烟花算法每次迭代的适应度函数, 达到优化极限学习机的输入权值矩阵和隐含层偏差的效果. 最后根据广义逆求出输出矩阵. 通过对一维  $\sin C$  函数的测试结果表明, 烟花算法优化极限学习机能够以较少的隐含层节点数目达到更高的精度, 比极限学习机的测试误差降低了 29.58%. 在以上基础上又做了对高斯正态分布函数的拟合实验, 验证了烟花算法优化极限学习机比极限学习机拥有更好的拟合性能.

**关键词:** 烟花算法; ELM; 测试误差; 隐含层节点; FWAELM; 拟合性

**中图分类号:** TP183 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.201505001

## 0 引言

传统的神经网络因其强大的非线性拟合能力、很强的鲁棒性和记忆能力被广泛地应用于很多领域. 极限学习机是一种先进的神经网络. 输入权值和隐含层偏差根据输入神经元和隐含层节点数随机生成, 输出权值矩阵根据隐含层输出矩阵的 Moore-Penrose 广义逆计算得到<sup>[1]</sup>. 尽管极限学习机相比于传统的神经网络有很多优点, 但是并不能满足人们对更高精度和更快速度的追求, 因此相继出现了很多优化极限学习机算法. 例如粒子群优化极限学习机和小波核极限学习机等, 分别优化了极限学习机的隐含层节点数和极限学习机的分类性能.

烟花算法研究的开创性论文是由谭营发表于首届国际群体智能大会(ICSI2010). 该论文首次提出了受烟花爆炸启发的群体协同优化算法, 即烟花算法. 烟花算法希望寻求一种求解复杂问题全局最优解的高效方法. 它具有求解复杂问题全局最优解的能力, 故烟花算法可以运用到许多实际应用领域<sup>[2-3]</sup>.

为了获得更高的精度和更好的拟合效果, 笔者提出了用烟花算法优化极限学习机的方法. 并

通过实验证明, 烟花极限学习机(fireworks algorithm extreme learning machine, FWAELM)能够达到更高的精度, 并且所用的隐含层节点数目更少, 对函数的拟合效果更好.

## 1 极限学习机(ELM)

对于  $N$  个不相同的样本  $(x_i, y_i)$ , 其中,  $y_i = [y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{in}]^T \in \mathbf{R}^n$ ,  $y_i = [y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{in}]^T \in \mathbf{R}^n$  具有  $L$  个隐含层节点, 激励函数  $G(x)$  的前馈神经网络的输出可以表示为<sup>[4]</sup>:

$$f(x) = \sum_{i=1}^N \theta_i \cdot G(\alpha_i \cdot x_i + \beta_i) = t_i; \quad (1)$$
$$x_i \in \mathbf{R}^n, \beta_i \in \mathbf{R}^n,$$

式中:  $\alpha_i = [\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \dots, \alpha_{in}]^T \in \mathbf{R}^n$  为输入权值,  $\theta_i = [\theta_{i1}, \theta_{i2}, \dots, \theta_{in}]^T \in \mathbf{R}^n$  为输出权值;  $\beta_i$  是第  $i$  个隐含层单元的偏置;  $\alpha_i \cdot x_i$  是向量  $\alpha_i$  和向量  $x_i$  的内积;  $G$  为隐含层激励函数.

若具有  $L$  个隐含层节点的前馈神经网络以零误差逼近  $N$  个样本, 有  $\sum \|t_i - y_i\| = 0$ , 则存在  $\alpha_i, \theta_i, \beta_i$  使得

$$f(x) = \sum_{i=1}^N \theta_i \cdot G(\alpha_i \cdot x_i + \beta_i) = y_i \quad i = 1, 2, \dots, L. \quad (2)$$

收稿日期: 2015-05-04; 修订日期: 2015-08-20

基金项目: 教育部高等学校博士学科点科研基金资助项目(20124101120001); 河南省教育厅科学技术研究重点资助项目(14A41300); 中国博士后科学基金面上资助项目(2014T70685; 2013M541992)

作者简介: 王杰(1959—), 男, 河南郑州人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事模式识别与智能控制研究, E-mail: wj@zzu.edu.cn.

引用本文: 王杰, 苒群康, 彭金柱. 极限学习机优化及其拟合性分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 20-24.

由矩阵表示为:

$$\mathbf{H}\boldsymbol{\theta} = \mathbf{Y}. \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{H}$  为网络隐含层的输出矩阵.

若前馈神经网络的输入权值和隐含层偏置是随机产生的,则根据 Moore-Penrose 广义逆计算可求得唯一的解

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{H}^+ \mathbf{Y}. \quad (4)$$

求输出权值矩阵就变成了求最小二乘解的问题,只需要求出输入权值的最小二乘解就能完成神经网络的训练.

## 2 烟花算法(FWA)

烟花算法是一种群体智能算法,和粒子群算法相似,通过多次迭代寻求最优解,其过程描述参照文献[2].

烟花算法主要有爆炸算子、变异操作、映射规则和选择策略四大部分组成,其中爆炸算子包括爆炸强度、爆炸幅度、位移变异等操作;变异主要包括高斯变异操作<sup>[5-8]</sup>;选择策略包括有基于距离的选择和随机选择等操作.初始化的每个火花个数由式(5)计算出.在烟花算法中,产生火花个数的公式如下

$$\mathbf{w}_i = m \frac{y_{\max} - f(\mathbf{x}_i) + \varepsilon}{\sum_{i=1}^N (y_{\max} - f(\mathbf{x}_i)) + \varepsilon}. \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{w}_i$  表示第  $i$  个烟花产生的火花个数,参数  $i$  的取值范围为  $1 \sim N$ ;  $m$  是常数,用来限制产生的火花总数;  $y_{\max}$  是当前种群中适应度值最差个体的适应度值;  $f(\mathbf{x}_i)$  表示个体  $\mathbf{x}_i$  的适应度值;参数  $\varepsilon$  是一个极小的常数,以避免出现分母为零的情况<sup>[5-7]</sup>.

为了限制烟花爆炸产生火花的数目太多或太少,我为每一个烟花设定了如下的产生火花数量的限制公式

$$\hat{\mathbf{w}}_i = \begin{cases} \text{round}(a \cdot m), & \mathbf{w}_i < a \cdot m \\ \text{round}(b \cdot m), & \mathbf{w}_i > b \cdot m, a < b < 1. \\ \text{round}(a \cdot m), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\hat{\mathbf{w}}_i$  是第  $i$  个烟花可以产生的火花数量;  $\text{round}()$  是取整函数;  $a$  和  $b$  是给定常数.

## 3 烟花极限学习机(FWAELM)

ELM 的输入权值和隐含层偏差是根据隐含层节点和神经元个数随机产生的,然后计算出输出权值矩阵.随机产生的输入权值和隐含层偏差

只有少部分是比较优越的,其它偏差可能会造成误差偏大,甚至部分输入权值和隐含层偏差值为 0,直接导致隐含层节点无效.

为解决 ELM 存在的以上问题,笔者提出了烟花极限学习机算法. FWA 是一种新型的进化算法,在结果精度和收敛性能上具有很强的优势. FWA 通过爆炸烟花的方式多次迭代选择出最优的输入权值和隐含层偏差矩阵,把最适应输入权值和隐含层偏差组成新的矩阵,然后计算出输出权值矩阵.

### 3.1 优化操作

在实现的过程中对算法进行了诸多的限制操作和变异操作.烟花爆炸范围的计算公式如下

$$\mathbf{S}_i = Z \frac{f(\mathbf{x}_i) - y_{\max} + \varepsilon}{\sum_{i=1}^N (f(\mathbf{x}_i) - y_{\max}) + \varepsilon}. \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{S}_i$  表示第  $i$  个烟花的爆炸范围,即爆炸的火花将在这个范围内随机产生位移,但不能超过这个范围;  $Z$  是常数,表示最大的爆炸幅度;参数  $y_{\max}$  是当前种群中适应度值最好个体的适应度值;  $f(\mathbf{x}_i)$  和参数  $\varepsilon$  的意义与公式(5)相同.

位移操作是对烟花的每一维进行位移,其公式如下

$$\Delta \mathbf{x}_i^k = \mathbf{x}_i^k + \text{random}(0, \mathbf{A}_i). \quad (8)$$

式中:  $\text{random}(0, \mathbf{A}_i)$  表示在幅度  $\mathbf{A}_i$  内生成的均匀随机数.

高斯变异增加了算法的突变性和多样性,表示第  $i$  个个体在第  $k$  维上的位置,此时高斯变异的计算方式如下

$$\mathbf{x}_i^k = \mathbf{x}_i^k \times g. \quad (9)$$

式中:  $g$  是服从均值为 1,方差为 1 的高斯分布的随机数,  $g = N(1, 1)$ .

### 3.2 算法步骤

算法维度大小为  $k = p(d + 1)$ ,  $d$  为输入神经元的个数,  $p$  为隐含层节点数.利用极限学习机计算出输出权值(激励函数选为 'sigmoid'),将训练样本计算出的均方根误差(RMSE)作为烟花算法的适应度值函数.烟花算法的参数设置为  $m = 64$ ,  $a = 0.04$ ,  $b = 0.8$ ,  $Z = 40$ . FWAELM 的算法实现步骤如下所示.

①初始化  $N$  个烟花,确定烟花位置  $\mathbf{H}_i$ ,并根据适应函数计算出最优适应值  $\mathbf{B}$ .

②设置初次迭代次数  $i = 1$ .

③根据公式(5)和(6)计算每一个烟花产生子代火花的个数  $\mathbf{w}_i (i = 1, 2, \dots, N)$ .

④根据公式(7)计算出每一个烟花的爆炸范围  $G_i$ .

⑤根据公式(8)对子代火花进行位移变异,对从  $k$  维中随机选择一定维度进行维度变异,在变异后的火花通过适应度值函数选择最优的火花  $Q_i$ .

⑥随机选择  $m$  个烟花根据公式(9)进行高斯变异,并根据评价函数选出最优的火花  $M_i$ ,把超出爆炸范围的火花通过公式(10)映射到范围之内.

⑦从  $H_i, Q_i, M_i$  中选择最优的  $N$  个火花位置作为下一代火花爆炸位置.

⑧  $i = i + 1$ ; 判断  $i = K$  ( $K$  为最大迭代次数) 是否成立,不成立跳转到式(3)继续循环.

根据上述算法得到最优的火花位置,也就是最优的输入权值矩阵和隐含层偏差,然后根据极限学习机的广义逆求出输出权值矩阵.

#### 4 仿真实验

在论文中采用一维的  $\sin C$  函数拟合实验来检验 FWAELM 的效果,  $\sin C$  函数的表达式为:

$$y(x) = \begin{cases} \frac{\sin x}{x}, & x \neq 0 \\ 0, & x = 0. \end{cases} \quad (10)$$

各选取 5 000 个训练样本集合  $\{x_i, y_i\}$  和测试样本集合  $\{x_i, y_i\}$ , 训练样本和测试样本的  $x_i$  都服从  $(-10, 10)$  区间的均匀随机分布. 为了能够使得线性回归拟合问题更真实, 在训练样本中加入  $[-0.2, 0.2]$  的白噪音, 则训练样本集合为  $\{x_i, y_i + \xi_i\}$ . 而测试样本集合为  $\{x_i, y_i\}$ .

##### 4.1 隐含层节点数目的影响

原理上, 当迭代次数逐渐增加时测试误差减小幅度非常小, 训练时间会增大. 所以迭代次数不宜过大, 适中即可. 设置 FWAELM 的迭代次数为 25, 取 20 次试验结果的平均值(下同). 测试隐含层节点数目对 ELM 和 FWAELM 的影响, 其结果如图 1 所示.

从图 1 可知, 当迭代次数都相同时, FWAELM 比 ELM 测试误差先达到最小值, 且 FWAELM 在隐含层节点数为 10 的时候 RMSE 达到最小值, 而 ELM 在隐含层节点数目为 17 的时候 RMSE 达到最小值. 由此说明 FWAELM 在测试误差最小时所用到的隐含层节点数目比 ELM 少用了 7 个. 并且 FWAELM 比 ELM 最大的优点是前者所能达到的

最小 RMSE 比 ELM 所能达到的 RMSE 降低了 29.58%. 当隐含层节点数逐渐增加到 50 的过程中, ELM 的 RMSE 先减小后逐渐稳定. 而 FWAELM 在隐含层节点数为 10 时达到最小, 到 50 的过程中基本是稳定的.

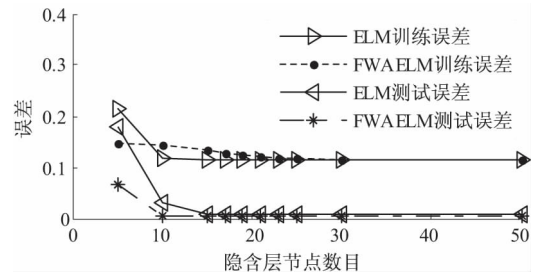


图 1 隐含层节点数目对 FWAELM 和 ELM 影响

Fig. 1 The influence of the number of hidden layer nodes on ELM and FWAELM

本实验还做了相同时间情况下的运行结果分析, 分析表明, ELM 在长的训练时间情况下反复运行, 它的最优误差基本保持不变.

##### 4.2 迭代次数的影响

设定 FWAELM 的隐含层节点数为 10, 迭代次数  $i = 1, 3, \dots, 29$ . 测试迭代次数对 FWAELM 的影响, 其结果如图 2 和图 3 所示. 从图可知, 随着迭代次数增加, FWAELM 的测试误差和训练误差逐渐减小, 当达到一定的迭代次数后, 测试误差缓慢减小, 直到趋于平稳.

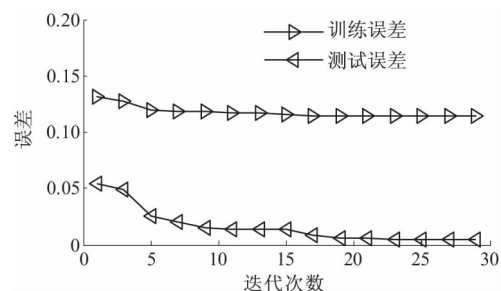


图 2 迭代次数对 FWAELM 误差的影响

Fig. 2 The effect of iteration number on the error

另外, 迭代次数增加也带来训练时间的增加. 考虑到在测试误差减小不明显的情况下多次迭代增加训练时间, 所以设置 23 为烟花极限学习机的最优迭代次数, 即 FWAELM 的隐含层节点为 10, 迭代次数为 23.

##### 4.3 函数拟合性分析

基于上述分析本实验做了 FWAELM 和 ELM 对  $\sin C$  函数的拟合实验, ELM 的结果如图 3 所示, FWAELM 的结果如图 4 所示.

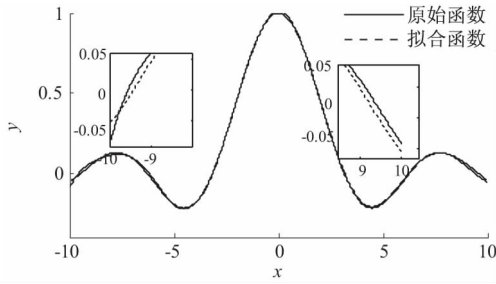


图3 ELM 拟合 sinC 函数

Fig. 3 The fitting curve of ELM for sinC function

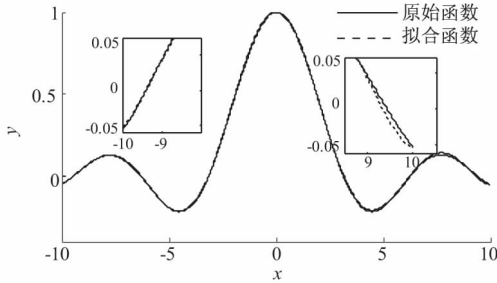


图4 FWAELM 拟合 sinC 函数

Fig. 4 The fitting curve of FWAELM for sinC function

从图3中可知,ELM在 $[-10, 10]$ 拟合过程中,分别在0附近及 $[-10, -6]$ 和 $[8, 10]$ 中间出现了拟合误差较大的情况.图4中,FWAELM在整个拟合过程都比较平稳,出现的误差很小.由此可知,FWAELM的数据拟合效果明显优于ELM的,这也说明FWAELM的预测精度比ELM更高.

在上述对sinC函数拟合实验的基础上又增加了对高斯正态函数的拟合实验. $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}(\frac{x-\mu}{\sigma})^2}$ ,  $-10 \leq x \leq 10$ ,其中令 $\sigma = 1, \mu = 1$ ;并对高斯正态函数做同样的加噪音处理.

各选取5000个训练样本集合 $\{x_j, y_j\}$ 和测试样本 $\{x_j, y_j\}$ ,训练样本和测试样本都服从 $(-10, 10)$ 区间的均匀随机分布.为了使回归拟合问题更真实,在训练样本中加入 $[-0.2, 0.2]$ 的白噪音,则训练样本集合为 $\{x_j, y_j + \xi_j\}$ ,而测试样本集为 $\{x_j, y_j\}$ .

设置FWAELM的隐含层节点数目为10,迭代次数为25,ELM的隐含层节点数目为50,结果如图5和图6所示.

从图5和图6的对比效果看,FWAELM的整个拟合过程相对平稳,而ELM在整个拟合过程中出现的误差相对较大;且FWAELM的拟合效果明显比ELM的拟合效果优越,因此,FWAELM比ELM具有更好的拟合效果.

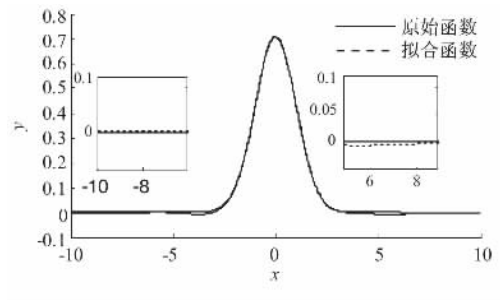


图5 FWAELM 拟合高斯函数实验

Fig. 5 FWAELM fitting curve of Gauss function

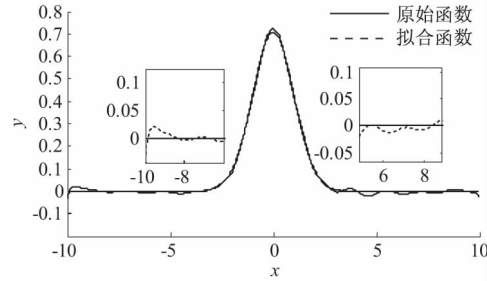


图6 ELM 拟合高斯函数实验

Fig. 6 ELM fitting curve of Gauss function

#### 4.4 算法性能对比

在以上分析的基础上,笔者还做了FWAELM和ELM、支持向量机(SVM)及粒子群优化极限学习机(PSOELM)性能对比.设置FWAELM的隐含层节点数为10,设定迭代次数为23.设置ELM的隐含层节点为50个,100次重复运行后,求最优值.采用'sigmoid'作为ELM的激励函数,迭代次数为25. PSOELM的隐含层节点设置为10,最大迭代次数设置为20. SVM采用libsvm工具包,其SVM的参数采用交叉验证来完成<sup>[8-10]</sup>,结果如表1所示.

表1 算法性能对比

Tab. 1 The performance comparison of algorithm

算法	训练时间/s	训练误差	测试误差
FWAELM	73.00	0.114 3	0.005 0
PSOELM	14.7	0.114 0	0.006 2
ELM	0.031	0.115 1	0.007 1
SVM	0.543 8	0.115 2	0.006 4

从表1中可知,FWAELM的测试误差是最小的,表明运用烟花算法能够降低ELM的测试误差,在4种算法的性能对比中,FWAELM最优. FWAELM只需要10个隐含层节点数目就能达到50个ELM隐含层数目的效果.



## 5 结论

笔者提出运用烟花算法优化极限学习机的方法,采用烟花算法优化 ELM 的输入权值矩阵和隐含层偏差,结合了 FWA 和 ELM 的优点,给出了 FWAELM 的算法实现步骤.通过实验得出如下结论.

(1) 当隐含层节点数目逐渐增加的时候,FWAELM 比 ELM 以更少的隐含层节点达到最小测试误差,而且 FWAELM 的测试误差要比 ELM 的小.前者的训练时间相对后者要长,但是在追求更高精度的情况下,FWAELM 比 ELM 有更高的优越性.

(2) 随着迭代次数增加,FWAELM 的训练误差和测试误差都会减小,当达到一定迭代次数的时候两者不再减小并趋于平稳,随着迭代次数的增加训练时间也会增加.

(3) 运用两种算法分别对一维  $\sin C$  函数和高斯正态分布函数进行拟合分析,表明 FWAELM 比 ELM 拥有更好的拟合性能.

(4) 最后通过 4 种同类算法的最优误差进行性能对比,显示 FWAELM 的测试误差最小.

## 参考文献:

- [1] HUANG G B, ZHU Q Y, Siew Cheekheong. Extreme learning machine: theory and applications [J]. Neurocomputing, 2006, 70(1): 489–501.
- [2] 谭莹, 烟花算法引论 [M]. 北京: 科学出版社, 2015: 4.
- [3] HE W R, MI G Y, TAN Y. Parameter optimization of local-concentration model for spam detection by using fireworks algorithm [C]. Lecture Notes in Computer Science, 2013: 439–450.
- [4] DING K, ZHENG S Q, TAN Y. A GPU-based parallel fireworks algorithm for optimization [C]. Proceedings of the 2013 Genetic and Evolutionary Computation Conference, 2013: 9–16.
- [5] TAN Y, ZHU Y C. Fireworks algorithm for optimization [C]. Lecture notes in computer science, 2010: 355–364.
- [6] ZHENG S Q, ANDREAS J, TAN Y. Enhanced fireworks algorithm [C]. IEEE congress on evolutionary computation, 2013: 2069–2077.
- [7] 阎新芳, 张永坤, 李腾, 等. WSN 中基于非均匀梯度的分簇拓扑算法 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(6): 47–51.
- [8] 王杰, 毕浩洋. 一种基于粒子群优化的极限学习机 [J]. 郑州大学学报(理学版), 2013, 45(1): 100–104.
- [9] 陈其松. 智能优化支持向量机预测算法及应用研究 [D]. 贵阳: 贵州大学信息学院, 2009.
- [10] CHANG C C, LIN C J. LIBSVM: A library for support vector machines [J]. ACM Transactions on intelligent systems and technology, 2011, 2(3): 27.

## The Optimization of the Extreme Learning Machine and Fitting Analysis

WANG Jie, CHANG Qunkang, PENG Jinzhu

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The fireworks algorithm (FWA) is used to optimize the extreme learning machine (ELM) in this paper. Firstly, the FWA gain the M optimal fireworks through many iterations, and the RMSE of the extreme learning machine's test samples is used as the fitness function in each iteration. Secondly, the optimization of the input weights and hidden layer deviation matrix of the extreme learning machine is achieved. Finally, the matrix output is obtained based on the generalized inverse. The test experiment of one-dimensional  $\sin C$  function is conducted. The experimental results show that the fireworks algorithm extreme learning machine achieves higher accuracy with less number of hidden layer nodes, and the test error decreases 29.58% compared with the extreme learning machine. The fitting experiment of Gauss normal distribution function is conducted, and the experiment results further demonstrate that the FWAELM achieves a better fitting effect than the ELM.

**Key words:** fireworks algorithm; ELM; test error; node in hidden layer; FWAELM; fitting

# 并联式支路光伏发电系统的研究与仿真

许天, 陈小强

(兰州交通大学 自动化学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 分布式光伏发电系统受安装方向和角度的影响, 时刻处在不同的光照条件, 采用常规的集中式、串式电气结构的发电系统容易产生热斑问题, 且部分处在低光照条件的电池影响整个系统的性能, 使最大功率点跟踪效率大大降低. 在分析实际屋顶光照情况下, 提出了一种并联式多支路分布式光伏发电系统, 针对并联式多支路结构的电气特点, 分析选取一种有源钳位变换器, 在 MATLAB 环境下构建实验模型并仿真分析. 仿真结果表明, 该系统可有效提高系统抗阴影性能.

**关键词:** 分布式; 光伏发电; 并联式多支路; 有源钳位变换器; 抗阴影性能

**中图分类号:** TM91 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.201505023

## 0 引言

光伏发电技术近年来得到了各国的重视, 发展十分迅速. 其中分布式光伏发电系统装机容量持续增长, 这使得分布式光伏发电结合智能电网技术成为未来电网的发展趋势<sup>[1-4]</sup>. 分布式光伏发电系统具有系统简单、安装灵活等优点, 可安装在办公楼宇、住宅小区等用电端, 且成本较低, 适合民间投资. 然而, 现有的分布式光伏系统多采用固定支架安装, 因光伏阵列的日照情况时刻变化, 致使传统的串联阵列结构容易发生功率损失<sup>[4]</sup>. 笔者通过分析分布式光伏系统安装环境, 提出一种改进的光伏发电系统结构, 有效提升了系统抗阴影能力.

## 1 光伏电池支路的特性及功率损失

光伏阵列的基础元件是光伏电池. 光伏电池的输出特性曲线主要受光伏电池的温度及辐照度影响, 其中温度越高, 开路电压越低, 短路电流变化不明显, 最大功率越低; 辐照度越高, 开路电压变化不明显, 短路电流越大, 最大功率越大. 因此, 光伏电池输出特性受温度影响相对较小<sup>[5-6]</sup>, 而辐照度大幅变化对系统的影响较大.

光伏发电系统使用光伏电池单元串、并联以

获得设计的功率容量. 常见系统结构有集中式、串联式多支路等结构, 使用光伏电池串联可获得高电压. 光伏电池串联需要给光伏电池并联旁路二极管以防止热斑效应<sup>[7-8]</sup>损坏元件, 然而旁路二极管会在发生阴影遮蔽时导通, 致使光伏元件短路, 造成部分功率损失. 此外, 由于光伏电池是电压控制电流源, 出现被短路电池将导致整条串联支路剩余光伏电池工作电压较大地偏离最大功率点电压, 造成更大的损失. 文献显示, 使用相同数量的并联光伏电池和串联光伏电池做比较, 当光伏阵列处在不同辐照度条件时, 串联电池支路的输出功率远小于并联支路<sup>[9-11]</sup>.

## 2 并联式多支路光伏系统

分布式光伏发电系统多安装于屋顶, 采用固定支架安装, 不具备阳光追踪功能. 为充分利用屋顶的光照, 一般会在各斜面安装光伏电池板<sup>[12]</sup>. 各斜面对太阳的角度不同, 既投影面积不同, 形成不同的辐照条件. 同时, 考虑到一天中太阳位置始终在变化, 背阳面甚至出现阴影<sup>[13]</sup>, 附近较高建筑也可能存在遮挡, 因此, 复杂的阳光照射情况始终存在. 除此之外, 串联光伏电池支路的输出特性决定了此类结构在阴影情况下损失大量功率, 采用光伏电池并联可以解决此问题.

收稿日期: 2015-05-11; 修订日期: 2015-08-18

基金项目: 甘肃省科技计划资助项目(145RJZA098)

通讯作者: 陈小强(1966—), 男, 兰州交通大学教授, 博士, 主要从事电磁场与微波技术、计算电磁学研究, E-mail: 13919289637@139.com.

引用本文: 许天, 陈小强. 并联式支路光伏发电系统的研究与仿真[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 25-28.



根据系统功率容量确定并联光伏电池组件的数量,使用 DC/DC 变换器实现升压及最大功率点跟踪功能,使用逆变器将电能并网. 相较串联式支路,并联式支路在复杂光照分布情况下效率较高,更适合于安装在多斜面屋顶,如别墅,或是被高楼包围的建筑上. 然而并联式支路也存在一些问题,需要进一步讨论.

(1) 并联光伏模块时,光伏电池模块输出电流较大,假设有  $n$  块电池并联,如果采用图 1 所示链接方式,则靠近电源变换器的导线将承受  $n$  倍电流,其导线功率损耗

$$P = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6} I^2 R, \quad (1)$$

此时导线上功率损耗巨大,因此需要采用如图 2 所示并联拓扑,将  $n$  条导线接入节点,致使  $n$  块电池并联的导线损耗仅为

$$P = n I^2 R. \quad (2)$$

此外,节点式并联拓扑的故障冗余度要高于链式结构,一条线路断路不会影响其他光伏板的运行.

(2) 并联式支路输出电压为单块光伏组件的标准工作电压,一般小于 50 V,故而需要转换到 220 V/380 V 电网电压,因此对 DC/DC 变换器的要求较高,需要采用针对低压大电流条件的高升压比变换器. DC/DC 变换器分为隔离型和非隔离型,非隔离型变换器为了达到高增益效果,一般需要采用多级变换、输出串联、耦合电感等复杂技术<sup>[14]</sup>,且不满足某些国家关于分布式能源的安全要求. 隔离型变换器分为工频隔离型、高频隔离型,其中工频隔离型变换器需要将光伏组件输出的直流电先逆变为工频交流电,在使用工频变压器变压后需要进行整流,且工频变压器一般铁芯绕组较大,增加了设备成本及损耗;而高频隔离型变换器相比工频变换器具有体积小、质量轻等优点,且容易得到高电压增益,具有一定的优势.

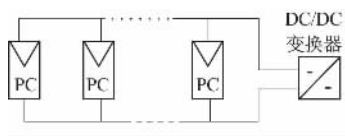


图1 链式拓扑

Fig.1 The chained topology

光伏电池是电压控制电流源,输入电流纹波应尽可能小,因此需要合适的变换器拓扑. 隔离型变换器采用电流馈入型结构可减小变压器匝比,减少漏感,且控制简单. 选择 Boost 型有源箝位型

电流馈入的变换器拓扑,具有效率高,结构简单等优点<sup>[15]</sup>,适合应用于并联式支路结构,其输入纹波电流小,提高低压大电流电源输入的稳定性,提高变换器寿命. 综上,并联式支路光伏发电系统的结构示意图如图 3 所示.

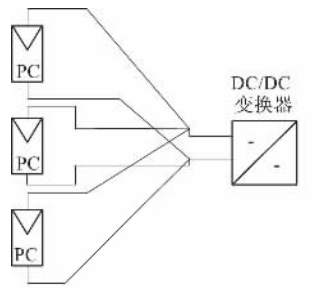
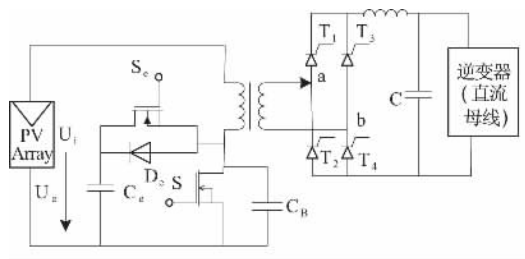


图2 节点式拓扑

Fig.2 The nodal topology



构最大输出功率仅为 381.5 W. 仿真结构图及结果如图 4. 其中串联结构输出为多峰值曲线,其最大功率点为全局最大功率点,对跟踪算法有更高的要求.

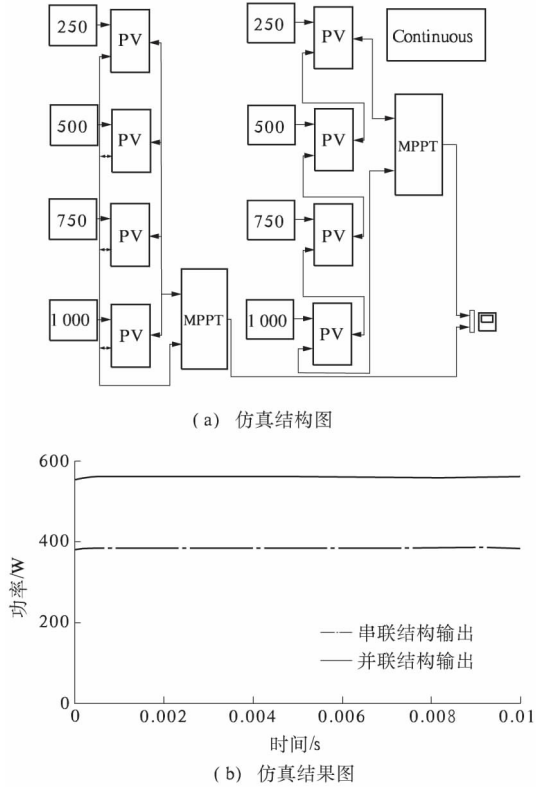


图 4 串并联结构输出比较图

Fig. 4 Series and parallel structure output diagram

### 3.2 验证并联式支路光伏发电系统工作效率

搭建 12 块光伏电池板并联式支路光伏系统前级电路,其仿真接线图如图 5 所示,光伏组件最大功率 3 kW,最大功率点跟踪算法采用固定电压法,电压为开路电压的 78%. 模拟不规则的屋顶安装条件,设置电池板辐照度为 250、500、750 和 1 000 W/m<sup>2</sup>各 3 块,代表不同斜面面对阳光的不同角度;Boost 型有源钳位变换器采用 MOSFET 开关管,MOSFET 管电阻应尽可能小,否则会有大量

功率损失,参考实际已有产品数据,确定仿真参数;辅助开关支路的电容起到储能作用,应尽可能大;高频变压器对光伏系统输入进行升压,该实验设置输出 400 V 直流电以便并入电网配电侧输送电能;使用全桥整流将高频变压器输出的交流电整流,以便进一步逆变或并入直流母线. 仿真的参数如表 2 所示,仿真得到变换器输入输出波形如图 6 所示.

其中输入电压为 28.8 V,输入电流为 54.6 A,输入功率为 1 575.2 W;输出电压为 390.0 V,负载电流为 3.9 A,输出功率为 1 521.0 W,变换后的电能符合要求. 其中变换器的效率为 96.6%. 并且光伏电池接受太阳能功率为 1 788.0 W,实际转化率为 85.0%. 分析表 1 的数据与图 6 的仿真电压可知,不同辐照度下光伏组件最大功率点电压各不相等,而固定电压法的运行电压为固定值,当此固定值偏离全局最大功率点电压时,将导致部分电池偏离最大功率点运行,而由于此时偏离电压相对较小,对全局最大功率的偏离影响较小,因此和串联支路对比,并联式支路的效率仍要比串联支路高出很多. 并且通过选择其他全局跟踪算法,可消除固定电压法造成的偏差,进一步提升跟踪效率.

表 2 仿真实验参数

Tab. 2 Parameters of simulation experiment

实验参数	数值
脉冲频率/kHz	20
脉冲占空比	0.75
开关管电阻/mΩ	0.005
变压器频率/kHz	20
变压器变压比	30/400
钳位电容/nF	60
辅助电容/μF	100
稳压电容/μF	10
负载电阻/Ω	100

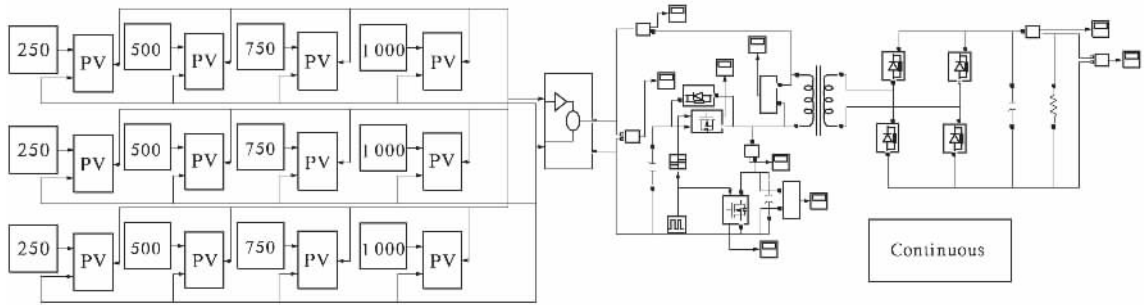


图 5 并联式支路光伏发电系统前级电路仿真图

Fig. 5 Parallel branch photovoltaic system front-end circuit simulation diagram

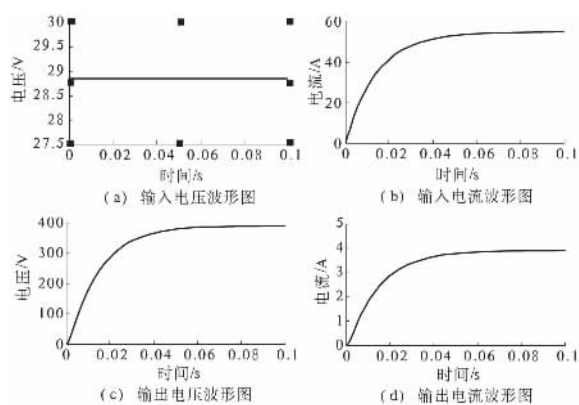


图6 仿真结果图

Fig. 6 The results of simulation diagram

#### 4 结论

提出一种基于并联式支路的分布式光伏系统结构,该结构确保在光照条件不均情况下所有光伏电池都能近似工作在最大功率点;采用 Boost 型有源钳位变换器,在得到高升压比的同时起到隔离电网的作用,具有较高的能量转换效率;系统结构方便扩展,实际工程安装方便,能高效利用建筑表面空间,适合千瓦级分布式光伏发电系统的安装;该系统适用于居民住宅屋顶以及不规则外形建筑等分布式环境。

#### 参考文献:

- [1] 杨涛,曾国宏. 分布式光伏发电引起电压越限的储能解决方案[J]. 电力电子技术, 2013, 47(4): 55-57.
- [2] LI B, LIU T Q, LI X Y. Impact of distributed generation on power system voltage stability [J]. Power system technology, 2009, 33(3): 84-88.
- [3] VEERACHARY M. PSIM circuitoriented simulator model for the nonlinear photovoltaic sources [J]. IEEE trans aerosp electron syst, 2006, 42(2): 735-740.
- [4] PUTTGEN H B, MACGREGOR P R, LAMBERT F C. Distributed generation: semantic hype or the dawn of a new era [J]. IEEE power and energy magazine, 2003 (1): 22-29.
- [5] 张丹,陈华. 光伏阵列拓扑结构对系统输出的影响[J]. 计算机仿真, 2014, 31(5): 125-129.
- [6] 茆美琴,余世杰,苏建徽. 带有 MPPT 功能的光伏阵列 Matlab 通用仿真模型[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(5): 1248-1251.
- [7] 周航. 基于粒子群算法的局部遮阴光伏发电系统 MPPT-T 控制的研究[D]. 天津: 天津大学电气与自动化工程学院, 2009.
- [8] 吴小进,魏学业. 复杂光照环境下光伏阵列输出特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(Z): 162-167.
- [9] 张兴,曹仁贤. 太阳能光伏并网发电及其逆变控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [10] 张立斌. 屋顶分布式光伏发电设计[J]. 华北电力技术, 2014(1): 13-19.
- [11] 陈丹. 直流母线下多逆变器负载局域电力系统的研究[D]. 大连: 大连海事大学轮机工程学院, 2010.
- [12] 刘邦银,梁超辉,段善旭. 直流模块式建筑集成光伏系统的拓扑研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(20): 99-104.
- [13] 王春明,王金全,徐晔,等. 城市住宅小区屋顶并网光伏发电系统的实现[J]. 解放军理工大学学报, 2007, 8(4): 382-386.
- [14] 张雪. 非隔离型光伏并网逆变器高效 MPPT 控制方法研究[D]. 广州: 华南理工大学机械与汽车工程学院, 2012.
- [15] 陈道炼,严仰光. 有源钳位正激变换器的分析与设计[J]. 电气传动, 1999(1): 30-33.

### Research and Simulation of Parallel Branch Photovoltaic Power Generation System

XU Tian, CHEN Xiaoqiang

(School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** Distributed photovoltaic power generation system is affected by installation direction and angle, in different times illuminance condition changes, the conventional structures such as centralized or serial structures of the electrical power generation systems are prone to suffer hot spot phenomenon, the photovoltaic cell which is in low illuminance condition will affect the whole system performance, and the performance of the maximum power point tracking will decrease greatly. This paper analyzes the actual roof illuminance conditions, puts forward a paralleled multi-branch of distributed photovoltaic power generation system, combining photovoltaic cell's own characteristics of series-parallel and roof sunshine distribution to change array structure, according to the electrical characteristics of parallel branch structure, and we choose a kind of active clamped converter, which can improve system's security and shadow resistance. Construct the experimental prototype and the simulate in Matlab, verify that the system can run efficiently when partially shadowed.

**Key words:** distributed; photovoltaic power system; paralleled multi-branch; active clamped converter; shadow resistance

文章编号: 1671-6833(2016)02-0029-04

## 基于FPGA的电能质量监测装置设计

江政, 周勇, 陈雪美, 吕娜伟

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 为了提高电能质量监测的精度和速度, 设计了以FPGA为处理控制核心的监测装置. 硬件部分主要包括信号采集单元、通信单元、电源单元等. 软件方面, 在FPGA上定制了NIO S II的嵌入式核心, 优化了数据并行处理流程, 在FPGA芯片内构建锁相倍频模块和FFT谐波分析算法模块, 实现了对电能质量数据的同步采样和分析. 测试表明, 装置具有响应速度快、测量精度高和实时性能好的特点, 符合国家关于电能质量监测的标准.

**关键词:** 电能质量; 现场可编程门阵列; 快速傅里叶变换

**中图分类号:** TM711 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.201505040

### 0 引言

近年来, 电网中各种不对称性负荷、冲击性负荷和非线性负荷不断增加, 对电能质量造成不同程度的影响, 这些问题已经引起了供电企业和一些敏感用户的关注, 实时和连续地监测电能质量指标是发现和整治电能质量相关问题的前提条件<sup>[1-3]</sup>. 现场可编程门阵列(field-programmable gate array, FPGA)作为专用集成电路领域中的一种半定制电路, 既解决了定制电路的不足, 又克服了原有可编程器件门电路数有限的缺点<sup>[4]</sup>.

从目前已有的基于FPGA的电能质量监测装置来看, 文献[5]采用DSP+FPGA的设计方案, 结合了两者的优点, 但是结构复杂, 不利于装置功能扩展, 产品更新换代困难. 文献[6]和文献[7]的嵌入式核心分别为uC/OS操作系统和ARM-IP核, 两者均能协调装置各个单元的运行, 但在FPGA中代码的移植和开发过程繁琐, 占用较大片内资源, 开发成本高. 笔者仅用FPGA来完成了整个电能质量监测和分析过程, 在FPGA中定制NIO S II的嵌入式核心, 并给出详细检测结果.

### 1 监测装置的硬件设计

监测装置主要由信号采集单元、核心处理单元、通信单元、电源单元及人机交互单元构成. 硬

件采用模块化设计方案, 简化了硬件设计和FPGA的协调控制, 整体设计如图1所示.

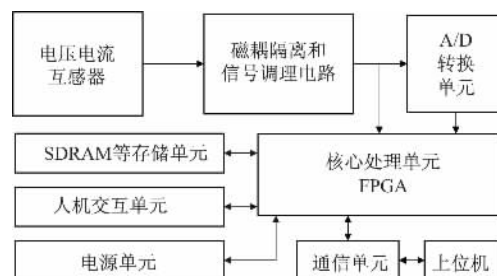


图1 装置的整体框图

Fig.1 Diagram of device

#### 1.1 信号采集单元

装置的电压电流转换电路如图2所示. 设计中采用了两种电压输入范围, 分别为100 V和250 V, 以适应变电站等的PT二次侧电压和普通市电电压测量, 按1 k $\Omega$ /V的比例外串限流电阻, 调节电位器用来测量校准.

以 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 的联接为例, 当 $R_2$ 抽头调节至最左端时,  $U_{a\_100\text{ V}}$  + 测量端口串入的电阻为:

$$\frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} = \frac{190 \times 200}{190 + 200} = 97.44(\Omega). \quad (1)$$

当 $R_2$ 抽头调节至最右端时,  $U_{a\_100\text{ V}}$  + 测量端口串入的电阻为:

$$\frac{(R_1 + R_2) R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{(190 + 20) \times 200}{190 + 20 + 200} = 102.44(\Omega). \quad (2)$$

收稿日期: 2015-05-26; 修订日期: 2015-00-00

通讯作者: 周勇(195—), 男, 河南信阳人, 郑州大学教授, 研究方向为电能质量分析与控制, E-mail: zhouy@zzu.edu.cn.

引用本文: 江政, 周勇, 陈雪美, 等. 基于FPGA的电能质量监测装置设计[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 29-32.



辑单元,因而开发成本极低.与其他处理器系统类似,NIOS II 拥有自己的指令系统、寄存器组、高速缓存和中断处理系统,而且还拥有自定义指令与硬件加速器. NIOS II 软核的开发是基于 HAL (hardware abstraction layer) 的开发.通过 HAL 能够与底层的硬件驱动连接,因为它是一个内核与硬件电路之间的接口层,HAL 所提供的接口函数可以在 C 语言编程中调用.

FPGA 程序包括同步采样模块、NIOS II 核模块、电能质量指标计算与分析模块和数据存储模块.具体流程如图 5 所示.

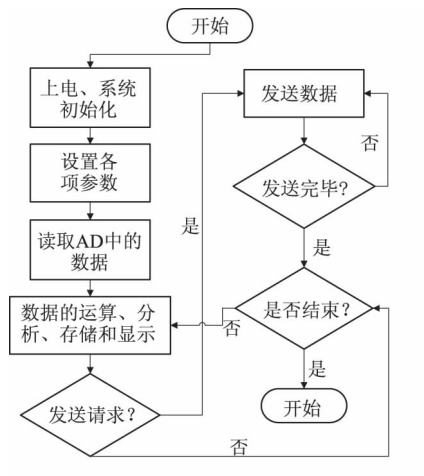


图5 主程序流程图

Fig.5 The main program block diagram

装置上电之后,存储芯片里面的数据会自动加载到 FPGA 中,然后在 NIOS II 的控制下对各个部分进行初始化,控制信号采集单元进行电压电流的数据采样,完成电能质量各项指标运算,最后将分析结果进行保存,判断数据是否需要发送和装置是否继续运行.

## 2.2 FFT 的算法设计

快速傅里叶变换(FFT) 是进行谐波分析的关键<sup>[10]</sup>.单片机和 DSP 芯片都是通过软件编程的方式编写 FFT 算法代码,DSP 至多也是通过芯片内的 MAC 单元进行加速运算,实质上都还属于串行运算,它的算法复杂度是  $O(n \log n)$ . 然而 FPGA 通过并行的乘加单元进行 FFT,只需要经过  $\log n$  级的乘加法运算,运算速度相对提高了  $n$  倍.以 8 个点的 FFT 运算为例,若采用 DSP 芯片或单片机完成的话,要进行 12 次的乘加运算后才能得出计算结果,而通过 FPGA 的并行 FFT 电路实现的话,仅需 3 级乘加法运算,显著地加快了电能质量数据的计算速度.在 FPGA 中利用 Verilog HDL 语言编程实现 FFT 算法,可对输入信号进行快速的谐

波分析,给出它们的幅值与相位.硬件上的并行结构和数据的并行处理流程,使监测装置的性能大大提高,克服了软件串行运行的缺点.

## 3 测试结果及分析

### 3.1 频率测量结果

测试数据和绝对误差如表 1 所示,使用泰克 TDS2012C 数字示波器比较频率测量值.表中  $f_1$  和  $f_2$  分别为示波器测量值和监测装置测量值.

表 1 频率测量测试表

Tab.1 Frequency measurement test table

测量参数	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次
$f_1$ /Hz	49.997	49.996	49.998	49.996
$f_2$ /Hz	49.990	49.991	49.994	49.997
绝对误差/Hz	0.007	0.005	0.004	0.001

由表 1 可知,监测装置与泰克示波器的频率测量的最大绝对误差为 0.007 Hz,测量精度满足国家标准<sup>[11]</sup>的要求.

### 3.2 电压有效值测量结果

由于 JCD4046 测试电源的显示精度为三位半,测试以四位半胜利牌 VC86E 电压表的显示作为电压有效值的测量基准,测量结果如表 2 所示.

表 2 三相电压测量测试表

Tab.2 Three-phase voltage measurement test table

电源电压/V	监测装置测量值/V			相对误差/%		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
120.00	120.15	119.98	120.16	0.13	-0.02	0.13
110.00	110.14	109.94	110.13	0.13	-0.05	0.12
100.00	100.11	99.98	100.08	0.11	-0.02	0.08
90.00	90.05	89.95	90.07	0.06	-0.06	0.08
80.00	80.03	79.88	80.08	0.04	-0.03	0.10
60.00	60.05	60.01	60.03	0.08	0.02	0.05
40.00	40.05	39.96	40.04	0.13	-0.10	0.10
20.00	19.97	19.98	20.03	-0.15	-0.10	0.15

由表 2 可以看出,三相电压的相对测量误差分布在  $-0.15\% \sim 0.15\%$  之间,测量精度满足国家标准<sup>[12]</sup>对 A 级仪表的要求.

### 3.3 电压谐波测量结果

限于 JCD4060 测试电源输出电压所含谐波分量的设定范围为 2~21 次,因此笔者对电压谐波测量的测试只检测电源输出的 2~21 次谐波分量,基波电压设定为 100 V,参考测量仪器为 Fluke345.测试结果表明,当  $U_b$  (各次谐波电压)  $\geq 1\% U_N$  ( $U_N$  为 100 V) 时,最大误差为  $4.7\% U_b$ ,小于  $5\% U_b$ ; 当  $U_b < 1\% U_N$  时,最大误差为  $0.14\%$



$U_N$ , 小于  $0.15\% U_N$ ; 测量精度满足国家标准<sup>[13]</sup>对 B 级仪表的要求。

### 3.4 电压序分量测量结果

根据 JCD4060 测试电源设定三相不对称电压, 可计算出对应的电压序分量(理论计算结果)。检测装置通过 FFT 计算出各相基波分量的幅值和相角, 然后再计算出电压序分量(测试结果)。两者相比, 计算出电压不平衡度的误差分布在  $-0.2\% \sim 0.2\%$  之间, 满足国家标准<sup>[14]</sup>的要求。

## 4 结论

设计的基于 FPGA 的电网电能质量监测装置, 完成了各部分的硬件设计和软件编程。测试结果证明该装置具有响应速度快、测量精度高、实时性能好和操作简单等特点, 不仅能够满足电能质量监测的要求, 而且整个装置的集成度高, 扩展性强, 降低了硬件对设备升级的限制, 方便以后采用新的算法和模块进行升级和更新, 具有较高的实用价值。

### 参考文献:

- [1] 储琨, 马建伟. 基于小波变换的电能质量扰动信号的检测[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(5): 34-36, 64.
- [2] 林海雪. 现代电能质量的基本问题[J]. 电网技术, 2001, 25(10): 5-12.
- [3] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [4] 赵锋, 马迪铭, 孙炜, 等. FPGA 上嵌入式系统设计实例[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008: 26-28.
- [5] 王平, 高阳, 王林泓, 等. 基于 DSP 与 FPGA 的实时电能质量监测终端系统[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 125-129.
- [6] 陈宏. 基于 FPGA 的电能质量监测装置的研究[D]. 东北农业大学工程学院, 2010.
- [7] 袁斌, 朱正伟, 孙广辉, 等. 基于 FPGA 的电能质量监测系统[J]. 电源技术, 2014, 38(12): 2436-2437.
- [8] 周勇, 朱明丽, 杜霞, 等. 基于 DSP + GPRS 的远程在线电能质量监测系统[J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(5): 23-26.
- [9] Altera Corporation. Nios II 世界上最多功能的嵌入式处理器[DB/OL]. 2008.
- [10] 解蕾, 解大, 张延迟. 新型电能质量表的算法及实现[J]. 电测与仪表, 2008, 45(9): 1-4, 10.
- [11] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 电能质量. 电力系统频率偏差: GB/T 15945—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [12] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 电能质量. 供电电压偏差: GB/T 12325—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [13] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 电能质量. 公用电网谐波: GB/T 14549—1993[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- [14] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 电能质量. 三相电压不平衡: GB/T 15543—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

## Design of a Power Quality Monitoring Device Based on FPGA

JIANG Zheng, ZHOU Yong, CHEN Xuemei, LÜ Nawei

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In order to improve accuracy and speed, a power quality monitoring device is designed with field-programmable gate array (FPGA) as the core of processing and controlling. Hardware of the device includes signal acquisition unit, communication unit, power supply unit, etc.. The software includes an NIOS II embedded core with optimized flow of data parallel processing and built-in phase-locked frequency multiplication module and FFT harmonic analysis module for the synchronous sampling and analysis of power quality data. Test results show that the device has advantages of fast response, high accuracy and satisfactory real-time performance, and conforms to the national standards of power quality monitoring.

**Key words:** power quality; field-programmable gate array (FPGA); fast Fourier transform (FFT)

## WSN 中基于梯度和粒子群优化算法的分级簇算法

阎新芳, 严晶晶, 冯 岩

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 为均衡网络中节点的能量消耗, 提出一种分级簇算法——GPHCA. 该算法采用双簇头模式, 利用粒子群优化算法搜寻能量大且到簇成员平均距离小的两个节点作为主簇头和副簇头, 将簇头负担均衡到了两个节点上; 在网关的选择上, 同时考虑能量和转发路径的总距离, 使最终选择的网关在能量和时延上得到均衡. 仿真结果表明, GPHCA 算法能有效延长网络的生命周期.

**关键词:** 无线传感器网络; 梯度; 粒子群算法; GPHCA; 双簇头

**中图分类号:** TP393

**文献标志码:** A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.201505017

### 0 引言

无线传感器网络中节点能量有限且不易补充<sup>[1]</sup>, 所以降低网络能量消耗成为传感网路由协议的首要设计目标. 相对于平面路由协议来说, 分层路由协议有效节省了能量且可扩展性好<sup>[2-4]</sup>. 基于分级簇的拓扑结构作为分层路由的基础<sup>[5-7]</sup>, 能有效减少网络的冗余信息, 降低节点的能量负担, 因此受到广泛关注.

文献[8-9]提出了一种基于梯度的分级簇算法(energy-aware topology control protocol based on gradient, ETBG), 建立了网络中节点到达基站的最小跳数, 但是簇内紧凑性不够, 且对网关节点能量考虑不足. 文献[10]提出一种新的基于粒子群优化的双簇头分簇路由算法(a new dual-cluster heads clustering routing algorithm based on particle swarm optimization, DHCR), 利用粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)进行簇头优化, 但是采用随机的方式进行初始分簇, 簇的可控性不高, 其副簇头虽减轻了主簇头的负担, 但效果不明显. 因此, 为均衡节点的能耗, 笔者提出一种基于梯度和粒子群优化算法的分级簇算法(gradient and particle swarm optimization based hierarchical cluster algorithm, GPHCA), 并在簇内引入新的双簇头模式, 从而提高网络生命周期. 该算法采用分布

式与集中式结合的方式, 节点初步分簇后将信息发送至基站, 在基站对簇头及路径进行优化, 因此, 优化部分并不消耗节点的能量.

### 1 问题描述

笔者采用和文献[9]相同的网络模型和能量模型, 节点的发射半径可调. 由能耗公式可知, 信息发送的能耗和距离呈指数关系, 影响不可忽视. 故在簇头优化阶段, 需要解决的主要问题即是选择剩余能量大且相对处于簇中心的节点作为簇头, 以减少簇成员发送信息的耗能. 构建数学模型如下:

$$f_{CH-1} = \left[ \frac{1}{k} \sum_{i=1}^K E(n_i) \right] / E(CH). \quad (1)$$

$$f_{CH-2} = \max \{ d(CH, n_i) / R \}. \quad (2)$$

$$f_{CH} = \alpha f_{CH-1} + \beta f_{CH-2}. \quad (3)$$

在簇间数据传输阶段要保证簇头的下一跳节点在有较多能量的同时还要处于合适的位置, 故主要优化目标设定如下:

$$f_{rout-1} = E_{aver} / E(n_i). \quad (4)$$

$$f_{rout-2} = [d(CH, n_i) + d(n_i, BS)] / R_0. \quad (5)$$

$$f_{rout} = \alpha f_{rout-1} + \beta f_{rout-2}. \quad (6)$$

式中:  $K$  是簇内节点个数;  $E(CH)$  和  $E(n_i)$  分别是簇头和节点  $i$  的剩余能量;  $d(CH, n_i)$  和  $d(n_i, BS)$  分别是节点  $i$  到簇头和基站的距离;  $R$  是节点

收稿日期: 2015-05-08; 修订日期: 2015-11-05

基金项目: 河南省科技厅基础与前沿研究计划资助项目(152300410023)

作者简介: 阎新芳(1958—), 女, 河南嵩县人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事无线传感网等方面研究, E-mail: iexfyang@zzu.edu.cn.

引用本文: 阎新芳, 严晶晶, 冯岩. WSN 中基于梯度和粒子群优化算法的分级簇算法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 33-36.



的通信半径;  $R_0$  是网络中心到基站的距离, 引入目的是使  $f_{CH-1}$  和  $f_{CH-2}$ 、 $f_{rout-1}$  和  $f_{rout-2}$  在同一数量级;  $E_{aver}$  是所有节点的平均剩余能量;  $\alpha$  和  $\beta$  是权重, 且  $\alpha + \beta = 1$ .  $f_{CH-1}$  是能量因子, 其值越小表示簇头剩余能量越大;  $f_{CH-2}$  是距离因子, 其值越小表示簇越紧凑. 所以,  $f_{CH}$  值越小, 节点越适合做簇头.  $f_{rout-1}$  越小, 簇头下一跳节点的剩余能量越大;  $f_{rout-2}$  越小, 簇头经过下一跳节点到达基站的总距离越小, 能耗也越小, 所以  $f_{rout}$  值越小, 节点越适合做网关.

## 2 粒子群算法简介

粒子群优化算法<sup>[11-12]</sup>是一种基于群体智能的寻优算法. 每一个粒子  $i$  都有一个速度  $v_i$  和位置  $x_i$ . 对于需要优化的问题, 定义一个适应度函数, 粒子到达新的位置后计算当前的适应度函数值, 并以此判断当前解的优劣. 粒子跟踪个体极值  $p_i$  和全局极值  $p_g$  对其速度和位置进行更新, 不断向最优解靠近, 更新方式如下:

$$v_{ij}(t+1) = \omega v_{ij}(t) + c_1 r_1 [p_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2 r_2 [p_{gj}(t) - x_{ij}(t)]. \quad (7)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1). \quad (8)$$

式中:  $\omega$  为惯性权重, 代表对当前速度继承的多少;  $c_1$  和  $c_2$  为学习因子, 分别表示粒子对个体和整个群体知识的认识;  $r_1$  和  $r_2$  为  $(0, 1)$  的随机正数.

## 3 基于 PSO 的分簇路由算法

### 3.1 初步分簇

在分簇之前先按文献[9]的方式以基站为圆心根据节点通信半径将整个网络划分成一个梯度场, 然后采用 ETBG 算法进行初步分簇并选举临时簇头, 临时簇头将所有节点及分簇信息发送至基站.

### 3.2 簇头优化

假设簇内有  $K$  个节点,  $x$  表示实际坐标. 当粒子搜索完簇内所有节点或者达到最大迭代次数的时候算法收敛. 具体步骤如下.

(1) 初始化  $N$  个粒子, 确定其位置  $x$ 、速度  $v$ , 并将其移动到距离最近的节点位置.

(2) 每个粒子以公式(3)作为适应度函数, 计算当前位置的适应度函数值, 即将当前位置节点设为簇头时的  $f_{CH}$  函数值, 并将其和当前位置节点号保存在个体极值  $p_i$  中, 将所有个体极值中  $f_{CH}$  函数值最小的存入全局极值  $p_g$ , 将  $f_{CH}$  值第二小的存入全局次优值  $p_s$ .

(3) 按公式(7)、(8)更新粒子的速度  $v$  和位置  $x$ , 然后计算每个粒子在新位置上的  $f_{CH}$  值, 并将其与  $p_i$  比较, 若优于  $p_i$ , 则将当前位置节点更新为  $p_i$ . 选出  $p_i$  中的最优值, 将其与全局极值  $p_g$  和全局次优值  $p_s$  比较, 将最优的保存为  $p_g$ , 次优的保存为  $p_s$ .

(4) 判断是否达到收敛条件, 如果没有则转到步骤(3).

(5) 将最后输出的全局极值  $p_g$  所在的节点设为当前簇的主簇头, 全局次优值  $p_s$  所在的节点设为副簇头, 完成簇头优化.

### 3.3 形成簇树

由于在数据传输阶段主副簇头是分开工作的, 故需要两条路径来维持簇间信息的传输, 路径选择的规则相同. 在基站运行 PSO 算法, 分别针对主副簇头按以下步骤形成簇树.

(1) 将梯度为 1 的簇头和网关的下一跳节点直接设为 BS, 将其余簇头和网关邻居中梯度比其小的节点放入其  $next hops$  集合作为搜寻范围, 没有梯度比其小的则将同梯度邻居节点放入  $next hops$ .

(2) 将每个  $next hops$  中能量最大的簇头设为下一跳节点; 没有簇头的则以  $next hops$  为搜索范围, 以公式(6)为适应度函数, 运行粒子群算法, 具体规则同 3.2, 将输出的全局极值  $p_g$  所在的节点设为下一跳节点即网关节点.

(3) 查询是否所有的簇头和网关都有了确定的下一跳节点, 如果是, 算法结束, 簇树形成; 如果不是, 跳回步骤(1).

簇树建立之后, 基站保存全网的路由信息, 然后将其广播给所有节点. 收到信息后, 主副簇头分别保存自己的成员节点和下一跳节点信息, 为各成员节点分配 TDMA 传输时隙, 而普通节点则只保存自己的主簇头、副簇头和 TDMA 时隙信息, 避免存储资源浪费.

### 3.4 数据传输方案

经过路由建立阶段, 整个网络建立了主副两条路径, 它们共同分担一轮的数据采集工作. 在数据传输过程中, 网络预先设定每轮的数据传输次数  $times$  和主簇头的工作比例  $coef$ . 前  $coef * times$  次数数据传输中, 主簇头负责簇内信息的收集、融合和转发. 然后, 主簇头退化成普通节点, 副簇头继任簇头完成剩余的数据传输. 数据传输达到预设次数后该轮结束, 网络将进行重新分簇开始下一轮.

#### 4 性能分析

假设在  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$  的检测区域内随机抛洒 100 个节点, 每个节点的通信半径  $R$  设为 30 m, 初始能量 5 J,  $\omega = 0.9$ ,  $c_1 = c_2 = 2$ .

定义第一个节点死亡时采集的数据总轮数为网络的生命周期. 假设  $\text{times} = 1\ 000$  次,  $\text{coef} = 0.6$ ,  $\beta = 0.6$ , 从实验中随机选取 30 轮取均值, 对 GPHCA 与 ETBG 和 EBUCP 3 种算法进行对比分析.

图 1 是节点密度  $N$  对 3 种算法生命周期的影响, GPHCA 算法在节点密度水平处于中度水平时, 优势很大. 主要原因是节点密度适中时, GPHCA 算法能更好的控制簇头能量和簇的紧凑性, 有优化的网关, 且用双簇头模式将簇头任务分配给了两个节点, 故其生命周期明显优于另两个算法. 节点密度过大时, 前两种算法的簇规模增大, 故簇头负担加大, 而 DHCR 算法簇规模变化不大, 故生命周期稳定但是都不长.

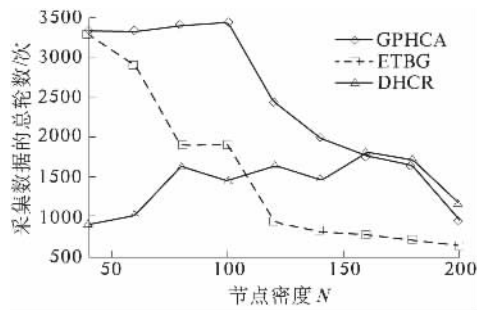


图1 不同  $N$  下的生命周期对比

Fig.1 Comparison of lifetime with different  $N$

图 2 是簇头采集一轮数据的平均能耗. DHCR 算法的副簇头的作用相当于 ETBG 中的网关节点, 故相比之下, GPHCA 算法的双簇头模式更有效地分担了簇头负担.

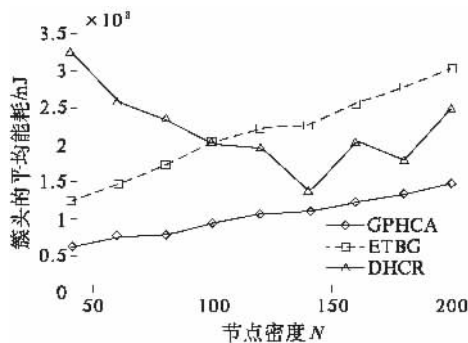


图2 簇头采集一轮数据的平均能耗

Fig.2 Average energy consumption of a round of data collection

图 3 是通信半径  $R$  对 3 种算法生命周期的影响. DHCR 算法的通信半径仅用于使簇头分散开

来, 故其生命周期对  $R$  不敏感. 当  $R$  较小时, GPHCA 算法有效延长了网络的生命周期, 但是当  $R$  较大时优势退化. 主要原因是当  $R$  增加时, 节点可以通信的邻居增多, 簇的平均半径增大, 簇头负担加重, 主簇头任期未滿就已死亡, 故无法发挥双簇头模式的优势. 因此, 适当地降低节点的发射半径, 采取多跳传输模式更有利于延长生命周期.

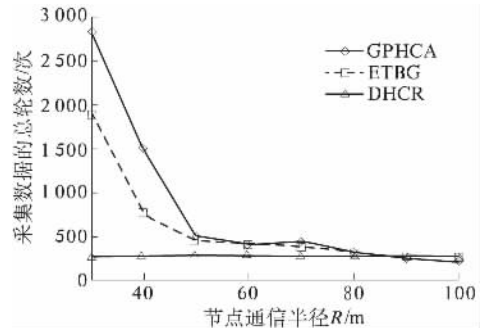


图3 不同  $R$  下的生命周期对比

Fig.3 Comparison of lifetime with different  $R$

GPHCA 算法的效果受主簇头工作比例  $\text{coef}$  的影响, 如图 4 所示. 在  $\text{coef} = 0.55$  时, 生命周期达到最大, 这主要是因为主簇头比副簇头有更好的综合适应度值, 故其承担略多的任务时, 更有利于延长整网的生命周期.

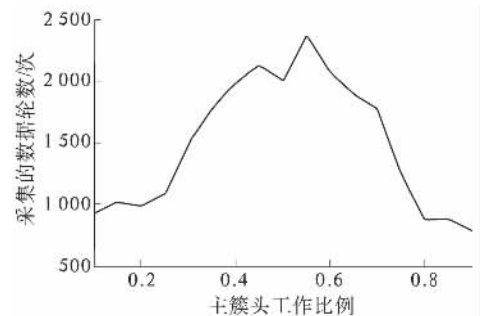


图4  $\text{coef}$  对网络生命周期的影响

Fig.4 Effect of  $\text{coef}$  on lifetime

粒子群算法为随机初始化算法, 其结果有一定波动性, 对 30 次不同节点密度下的实验结果求方差, 结果如表 1 所示. GPHCA 算法针对单个簇进行单独优化且有副簇头辅助工作, 故当某次 PSO 优化结果不理想时, 影响被控制在半个  $\text{times}$  以内, 所以生命周期的波动不超过 500 次.

表1 GPHCA 算法生命周期的方差

Tab.1 Variance of lifetime of GPHCA algorithm

节点密度	60	80	100	120
方差	343.2	194.3	298.7	340.4
节点密度	140	160	180	200
方差	151.4	96.2	22.1	6.6

## 5 结论

提出了一种基于梯度和粒子群优化算法的分簇算法,该算法利用适应度函数将剩余能量和节点到簇头以及基站的距离结合起来,通过粒子群的搜寻找出最佳的节点分任主副簇头和网关,通过适当调节节点的通信半径、主簇头工作比例和数据采集频次等参数,有效降低了簇头的平均能耗,优化了网关节点,均衡了节点能耗.在数据传输阶段,采用双簇头轮换的模式,一次分簇即可生成两条路径,在减小簇头节点负担的同时避免了频繁分簇带来的能量消耗,有效延长了网络的生命周期.

## 参考文献:

- [1] AKKAYA K, YOUNIS M. A survey on routing protocols for wireless sensor networks [J]. *Ad hoc networks*, 2005, 3(3): 325–349.
- [2] CHANG D, CHO K, CHOI N, et al. A probabilistic and opportunistic flooding algorithm in wireless sensor networks [J]. *Computer communications*, 2012, 35(4): 500–506.
- [3] INTANAGONWIWAT C, GOVINDAN R, ESTRIN D, et al. Directed diffusion for wireless sensor networking [J]. *IEEE/ACM transactions on networking*, 2003, 11(1): 2–16.
- [4] KUILA P, JANA P. Energy efficient clustering and routing algorithms for wireless sensor networks: particle swarm optimization approach [J]. *Engineering applications of artificial intelligence*, 2014(33): 127–140.
- [5] WU Y, LIU W B. Routing protocol based on genetic algorithm for energy harvesting-wireless sensor networks [J]. *IET wireless sensor systems*, 2013, 3(2): 112–118.
- [6] 阎新芳, 张汉, 李良, 等. WSN 中基于负载均衡的 EAMCT-G 优化算法 [J]. *天津大学学报*, 2012, 45(8): 735–739.
- [7] 阎新芳, 王晓晓, 严晶晶, 等. 基于 Q 学习的无线传感网分簇拓扑控制算法 [J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2015, 36(2): 85–88.
- [8] 阎新芳, 段磊, 李腾. 无线传感网中基于梯度的拓扑控制算法 [J]. *计算机工程与应用*, 2011, 47(2): 95–98.
- [9] 王志龙. 无线传感器网络中基于 ETBG 算法的分簇拓扑控制研究 [D]. 郑州: 郑州大学信息工程学院, 2011. 5.
- [10] 解志斌, 于谦, 沈斌, 等. 一种新的基于粒子群优化的双簇头分簇路由算法 [J]. *传感技术学报*, 2013, 26(8): 1135–1139.
- [11] MA D X, MA J, XU P M. An adaptive assistant-aided clustering protocol for WSNs using Niching Particle Swarm Optimization [C]//*Proceedings of the IEEE international conference on software engineering and service sciences*. Washington: IEEE Computer Society, 2013: 648–651.
- [12] KHALIL B, DRISS E. Particle swarm optimization based clustering in Wireless Sensor Networks: The effectiveness of distance altering [C]//*Proceedings of 2012 international conference on complex systems*. Washington: IEEE Computer Society, 2012: 1–4.

## Gradient and Particle Swarm Optimization Based Hierarchical Cluster Algorithm in WSN

YAN Xinfang, YAN Jingjing, FENG Yan

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** A hierarchical clustering algorithm was proposed to balance the nodes' energy consumption in the network. A mode of double cluster heads was adopted to select two cluster heads with sufficient remaining energy and small average distances to the cluster members using particle swarm optimization algorithm. The burden of one cluster head was shared by these two nodes. As for the gateways, the residual energy and the total distance of forwarding path was considered to make sure that the final chosen gateways get well balance between energy and delay. The simulation results show that the GPHCA algorithm can effectively prolong the network lifetime.

**Key words:** wireless sensor networks; gradient; particle swarm optimization; GPHCA; double cluster heads

文章编号: 1671-6833(2016)02-0037-05

## 基于投票极限学习机的人脸识别混合算法研究

陈铁军, 蔡金收, 郭 丽

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 针对小波分析在处理多维图形时不能充分利用数据本身特有几何特征的缺陷, 使用第二代曲波变换(the second generation of curvelet transform, SGCT)方法进行人脸图像的处理, 选取具有最大标准差的尺度层系数, 以完成对人脸图像的特征提取, 同时结合基于双向二维主成分分析(bidirectional two dimensional principal component analysis, B2DPCA)的数据降维, 构造一种基于混合投票机制极限学习机(voting extreme learning machine, VELM)的人脸识别算法. 通过与其他算法的分类结果对比, 证明该算法具有更高的识别正确率.

**关键词:** 曲波变换; B2DPCA; 投票; ELM; 人脸识别

**中图分类号:** TP391.4

**文献标志码:** A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.201505016

### 0 引言

随着计算机技术模式识别领域的不断发展, 生物特征识别技术得到越来越多的关注. 而其中的人脸识别技术正因其易于接受、采集方便等特点广泛应用于安全验证系统、视频会议、人机交互、公安系统<sup>[1]</sup>等领域, 人脸识别方法的研究成为模式识别和人工智能的一个重要方面.

人脸识别的技术很多, 如基于面部几何特征的方法、基于模板匹配的方法、基于子空间分析的方法, 另外还有基于神经网络、支持向量机和变换域的方法<sup>[2]</sup>等. 其中变换域方法中的小波变换, 其变换系数不仅能反映对应频率分量的强度, 而且也能反映其时间位置, 即能提供精准的时域定位和频域定位<sup>[3]</sup>, 因此广泛应用于人脸特征的提取. 文献[4-7]介绍了多种将小波变换与其他方法相结合的人脸识别算法.

由于二维可分离小波仅能表示一维数据的点奇异性, 不能最优地表示二维图像的奇异曲线<sup>[2]</sup>, 而曲波变换不仅具有小波变换的多分辨率特性和时频局域特性, 还具有非常强的方向性和各向异性<sup>[8]</sup>, 可以很好地提取二维图像的几何特征, 保持对曲线的敏感性和对二维图像奇异曲线

的跟踪, 并将图像分解为不同尺度、不同方向的层次, 因而受到广泛关注. 利用曲波变换实现图像分解, 结合主成分分析、二维主成分分析或者核主成分分析对人脸或其他研究对象特征进行降维, 进而可使用神经网络(neural network, NN)、BP神经网络(back propagation neural network, BPNN)进行分类<sup>[9-11]</sup>. 该类方法在分类时存在不同程度的学习速度慢及泛化能力较弱的缺陷, 且需人为设置大量的网络训练参数, 很容易产生局部最优解.

综上所述, 为了充分利用曲波变换的图像分解结果, 最大程度地利用图像有效信息, 降低数据维度, 实现人脸的快速识别分类. 笔者将曲波变换和双向二维主成分分析相结合, 然后使用基于投票机制的极限学习机进行分类, 继而使用人脸数据库 ORL、Yale 等进行试验, 并将该算法与其他使用基本手段的算法进行比较.

### 1 算法描述

#### 1.1 曲波变换

曲波变换用来将图像映射到多尺度多方向上, 图像的信息包含在变换后所得的各尺度层系数中. 第二代曲波变换是曲波变换的一种快速算

收稿日期: 2015-05-07; 修订日期: 2015-08-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41174127); 教育部博士点基金资助项目(20114101110005)

作者简介: 陈铁军(1954—), 男, 河南信阳人, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事复杂系统控制与理论研究, E-mail: tchen@zzu.edu.cn.

引用本文: 陈铁军, 蔡金收, 郭丽. 基于投票极限学习机的人脸识别混合算法研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 37-41.

法,笔者用到的是快速离散曲波变换(fast discrete curvelet transform, FDCT). FDCT 有两种实现方法: USFFT 和 Wrap 算法<sup>[13]</sup>. Wrap 算法比 USFFT 算法去噪效果更好,且运行速度较高,故笔者选用 Wrap 算法. Wrap 算法的主要思想是围绕原点 Wrap 计算,在对任一区域实现时,需要用周期化技术映射到原点的放射区域中,且具有一一对应的映射关系.

通过 Wrap 算法进行曲波变换,并计算各层系数标准差,选定具有最大标准差的尺度层系数作为特征脸,保留原有大部分图像信息,以产生初始特征向量,并以最小的混叠影响加强高频成分定位. 下面以人脸库中选定个体图像为例进行曲波变换系数分析. 其中参数设置为 3 个尺度层、8 个角度方向,经过对图像进行曲波变换,得到变换后的曲波系数. 即原始图像经傅里叶变换后变换

到频域,按频率可将图像分为 3 个部分<sup>[14]</sup>: Coarse 层、Detail 层和 Fine 层. Coarse 层包含的是最内层低频系数; Detail 层包含中间层的中高频系数; Fine 层包含最外层的高频系数. 表 1 分别给出了 ORL 及 Yale 人脸库中的第一个个体图像的各层系数标准差,包含 Coarse 层、Fine 层和 Detail 层 8 个角度. 结果表明: 低频系数标准差最大,远大于其他各层、各角度的标准差,它包含了图像概貌. 其中图 1 为原始图像、Coarse 层及 Fine 层系数重构图像,图 2 给出了 Detail 层中任选 4 个角度的系数重构图像. 从图 1 和图 2 给出的原始图像及各层重构图像也可知,Coarse 层最能表示图像概况,而 Fine 层表示的是图像高频轮廓信息. 故 Coarse 层尺度系数作为 B2DPCA 的特征输入数据是合理的.

表 1 不同数据库各层平均标准差

Tab.1 Mean standard deviation of curvelet subbands in various databases

人脸库	Coarse 层	Detail 层								Fine 层
		L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	
ORL	131.3	10.3	10.5	10.2	10.1	9.8	9.9	10.1	9.9	8.6
Yale	69.9	5.6	5.6	5.2	5.2	5.2	5.2	5.1	5.1	4.0

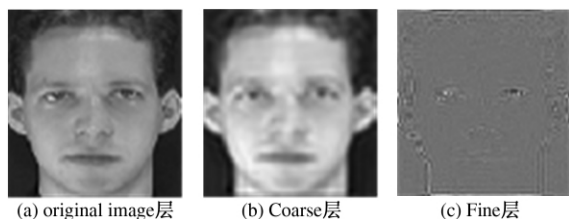


图 1 原始图像、Coarse 层及 Fine 层重构图  
Fig.1 The original image and reconstructed images of the Coarse and Fine layers

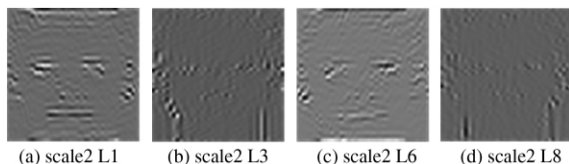


图 2 Detail 层系数 4 个方向系数重构图

Fig.2 The four reconstructed images of the Detail layer

### 1.2 双向二维主成分分析(B2DPCA)

B2DPCA 由 YANG 等人提出<sup>[15]</sup>,是 2DPCA 的改进算法,它克服了 2DPCA 在表示图像时需要更多的协同系数、不利于图像数据存取的弱点. 其主要思想是在行和列 2 个方向上各执行 1 次 2DPAC 运算,大大消除了人脸图像行和列的相关度. 运用新准则选取了更适合于分类的主分量,大

大压缩特征的维数,将其应用于人脸识别,可减少计算复杂度,同时提高分类速度. B2DPCA 是在 2DPCA 算法的基础上实现的,处理过程如图 3 所示.

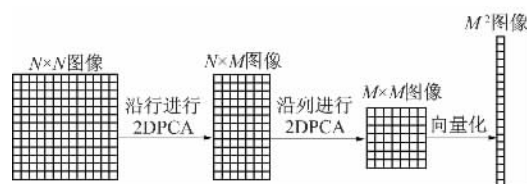


图 3 B2DPCA 处理过程

Fig.3 The process of B2DPCA

### 1.3 投票机制的极限学习机(VELM)

传统优化技术的学习速度很慢,为克服这一缺点,黄广斌等<sup>[16]</sup>提出了一种单隐层前馈神经网络极限学习机. 极限学习机参数设置简单,求解直接,并具有学习速度快且泛化性能好等优点. 但 ELM 的隐节点随机设定,并且在训练过程中保持不变,因此会导致错误划分. 为降低错误划分几率,文献<sup>[17]</sup>中提出了一种投票机制的极限学习机. 使用多个具有相同隐层节点和相同激活函数的单个极限学习机进行训练,而其学习参数是随机独立初始化的. 测试结果为投票数最多的类标签.

如 VELM 中有  $K$  个独立 ELM, 隐节点均设为  $L$ , 激活函数相同, 随机初始化学习参数, 利用所有的训练样本对每个 ELM 进行训练, 得出输出权值; 对于一个测试样本, 用每个训练过的 ELM 进行测试, 得出  $K$  个预测结果, 相同的结果累计记录, 最后将投票最多的类标签视为该测试样本的分类结果. 该算法过程伪代码如表 2 所示.

表 2 VELM 算法

Tab. 2 Algorithmic description of VELM

1. 训练过程
(1) 设置 $k = 1$
(2) 当 $k \leq K$ , 对 $k$ th ELM 随机配置学习参数 $(a_j^k, b_j^k) (j = 1, 2, \dots, L)$
(3) 计算隐层输出矩阵 $H^k$
(4) 计算输出权值 $\beta^k$ : $\beta^k = (H^k)^T T, T$ 为期望输出矩阵
(5) $k = k + 1$
(6) end while
2. 测试过程
(1) for 每个测试样本 $x^t$
(2) 设置 $k = 1$
(3) 当 $k \leq K$ , 使用 $k$ th 学习参数为 $(a_j^k, b_j^k, \beta_j^k)$ 的 ELM 预测该测试样本的标签为 $i, i \in [1, 2, \dots, C]$
(4) 然后 $S_{K,x^t}(i) = S_{K,x^t}(i) + 1$
(5) $k = k + 1$
(6) end while
(7) 测试样本 $x^t$ 的类标签为 $c^t = \arg \max_{i \in [1, 2, \dots, C]} \{S_{K,x^t}(i)\}$
(8) end for

## 2 人脸数据库简介

ORL 人脸库由英国剑桥 Olivetti 实验室拍摄的一系列人脸图像组成, 共有 40 个不同年龄、不同性别和不同种族的被拍对象. 每个对象有 10 幅图像, 共计 400 幅, 图像尺寸是  $92 \times 112$ , 图像背景为黑色. 其中人脸部分表情、细节和姿态均有变化, 其深度旋转和平面旋转可达  $20^\circ$ , 人脸尺寸也有最多 10% 的变化. 该库是目前使用最广泛的标准数据库, 它含有大量的比较结果.

Yale 数据库由耶鲁大学计算视觉与控制中心创建, 包含 15 位志愿者的 165 张图片, 包含光照、表情和姿态的变化. 图像尺寸是  $100 \times 100$ . FERET 人脸库由 FERET 项目创建, 包含 14 051 张多姿态, 均为带光照的灰度人脸图像, 是人脸识别领域应用最广泛的人脸数据库之一. 其中多数人是西方人, 每个人所包含的人脸图像的变化比

较单一. 除此之外, GTech 也是常用人脸库之一.

## 3 实验设置及结果分析

### 3.1 实验设置

先读取所有图像, 将其灰度化处理, 维度缩放为原来的一半; 继而进行曲波变换时的参数设置: 尺度层为 3、角度方向为 8 个, 获得曲波系数; 取 Coarse 层系数进行 B2DPCA 运算, 获得维数压缩后的特征向量; 分别取 50% 作为训练样本, 50% 作为测试样本, 当个体拥有图像数目为奇数时, 取中间数作为训练样本个数; 所有样本进行归一化处理, 激活函数选取 sigmoid. 其中 ELM 的第一层权值为随机产生, 其个数和隐层节点数通过实验来确定.

下面以 ORL 数据库为例进行实验, 并取运行 10 次的平均结果进行分析, 如图 4 所示. 由图 4 可知, 隐节点数从 100 开始递增时, 精度提高较大, 超过 700 后, 增幅较小, 且将隐节点设置越大, 时间开销越多, 因此笔者将其设为 700.

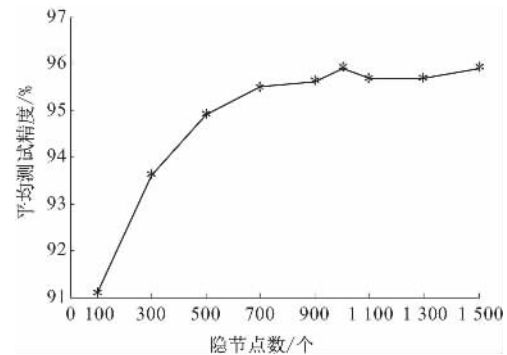


图 4 不同隐节点的测试精度

Fig. 4 Results from various numbers of hide layers

在此基础上对 VELM 中单个 ELM 个数的设置进行实验. 以 700 为隐层节点数, 图 5 记录了不同 ELM 个数下的测试精度. 由图 5 可知, 个数大于 8 后无太大改善. 当单个 ELM 个数增大时, 时间开销大大增加, 故将其个数设置为 8 较为合理.

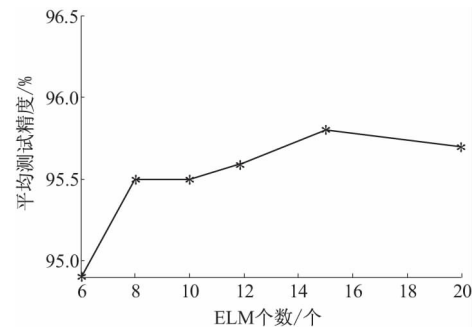


图 5 不同 ELM 个数的测试精度

Fig. 5 Results from various numbers of the single ELM

通过实验对比可得,设定 ELM 个数和隐层节点数分别为 8 和 700,对比算法有 Curvelet + B2DPCA + ELM 和 Curvelet + 2DPCA + VELM; ELM 隐层节点数和激活函数与 VELM 设为一致;所有算法均运行 50 次取平均分类精度。

### 3.2 实验结果分析

首先通过不同人脸数据库的测试精度和标准差比较 3 种不同算法的性能,其次将 Curvelet + 2DPCA + VELM 和 Curvelet + B2DPCA + ELM 的 50 次测试精度分别与 Curvelet + B2DPCA + VELM 的精度作 Wilcoxon 秩和检验,显著性水平设为 0.05,以充分比较分类精度的差异性,Wilcoxon 秩和检验结果标识于对比算法测试精度后侧,如表 3 所示。由表 3 可知,Curvelet + B2DPCA + VELM 算法在 4 个人脸数据库中均取得了最高的测试精度,但与 Curvelet + B2DPCA + ELM 方法相比,在 ORL 和 Yale 人脸库上的测试精度无明显差异,但在 RET 和 GTech 上的测试结果中则是胜出的。其中 Curvelet + 2DPCA + VELM 精度最差,4 组人脸

数据的测试精度均明显低于笔者所提出的算法。由此可见,使用 VELM 和 ELM 分类器对分类结果影响不大,而 2DPCA 和 B2DPCA 的使用可带来大约 5% 的精度差,由此可知,B2DPCA 的利用在该算法中起到了重要作用。除此之外,从标准差上来看,笔者所提出的方法在测试稳定性方面和另外两个方法相比没有明显差别。

为进一步验证笔者算法的性能,下面将 Curvelet + B2DPCA + VELM 与基于白化 PCA 图像重构的特征补偿人脸识别方法(记为 WPCAR)<sup>[18]</sup> 进行比较。图像预处理、运行次数及样本选取比例与前文保持一致。对比结果如表 4 所示。由表 4 可知,就测试精度而言,WPCAR 算法除在 RET 上的测试精度优于笔者算法外,其余 3 类测试精度均较差;RET 测试上的 Wilcoxon 秩和检验结果有同样结论,2 种算法所得结果差异明显。就标准差而言,除在 RET 上的标准差两者相同外,笔者算法能够获得更小数值,因此笔者算法具有更高的稳定性。

表 3 不同算法的测试精度和标准差

Tab. 3 The test accuracy and standard deviation from different algorithms

人脸库	Curvelet + B2DPCA + VELM		Curvelet + 2DPCA + VELM		Curvelet + B2DPCA + ELM	
	精度/%	标准差	精度( Wilcoxon 秩和检验) /%	标准差	精度( Wilcoxon 秩和检验) /%	标准差
ORL	95.1	0.010	90.1( - )	0.013	94.8( ≈ )	0.011
Yale	94.2	0.012	89.2( - )	0.011	93.1( ≈ )	0.010
RET	96.2	0.013	90.8( - )	0.012	94.5( - )	0.012
GTech	95.6	0.014	90.4( - )	0.012	93.2( - )	0.011

注:精度后“+”、“-”及“≈”分别表示该算法与 Curvelet + B2DPCA + VELM 相比,有明显差异且好于该算法、有明显差异且次于该算法、无明显差异。

表 4 与 WPCAR 对比结果

Tab. 4 The comparison results with WPCAR

人脸库	Curvelet + B2DPCA + VELM		WPCAR	
	精度/%	标准差	精度( Wilcoxon) /%	标准差
ORL	95.3	0.011	94.5( ≈ )	0.013
Yale	93.0	0.020	89.2( - )	0.042
RET	95.1	0.010	95.2( + )	0.010
GTech	94.8	0.011	90.4( - )	0.026

## 4 结论

针对小波变换和 2DPCA 在人脸识别上存在的缺陷,笔者提出了一种将第二代曲波变换、B2DPCA 和投票机制的极限学习机相结合的人脸识别算法。通过试验可知,第二代曲波变换对二维及以上图像可以更好地提取其特征,而 B2DPCA

具有较好的降维效果,且笔者算法在测试精度和稳定性方面整体表现良好。

## 参考文献:

- [1] 田晓亮. 基于 Gabor 小波变换和子空间的人脸识别技术研究[D]. 太原: 太原理工大学信息工程学院, 2010.
- [2] 时培培. 基于第二代曲波变换结合改进子空间技术的人脸识别技术研究[D]. 北京: 北京化工大学信息科学与技术学院, 2012.
- [3] LIN J, LI J P, JI M. Robust face recognition by wavelet features and model adaptation[C]//Wavelet analysis and pattern recognition, 2007. Piscataway, NJ: IEEE Computer Society, 2007: 1638 - 1643.
- [4] 王宪, 陆友桃, 宋书林, 等. 基于 Gabor 小波变换与分块 PCA 的人脸识别[J]. 计算机工程与应用, 2012(3): 176 - 178, 231.

- [5] 王朝阳,达飞鹏. 基于多尺度哈尔小波变换的三维人脸识别方法[J]. 系统仿真学报, 2013(7): 1442-1445.
- [6] 赵焕利,王玉德,张学志,等. 小波变换和特征加权融合的人脸识别[J]. 中国图象图形学报, 2012(12): 1522-1527.
- [7] 李孔震,王炳和,娄昊,等. 基于小波变换和二维非负矩阵分解的人脸识别算法[J]. 计算机应用研究, 2013(4): 1275-1277,1280.
- [8] 贾西贝. 基于曲波变换的人脸识别算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学理学院, 2011.
- [9] 朱世交,张南华. 一种基于曲波变换的手势特征提取新方法[J]. 计算机工程与应用, 2006(33): 50-52.
- [10] YE J H, HU D, XIA G M, et al. An advanced BPNN face recognition based on curvelet transform and 2DPCA [C]//Computer science & education, 2013. Piscataway, NJ: IEEE computer society, 2013: 1019-1022.
- [11] MA H, HU F S. The study of human face recognition based curvelet transform and 2DPCA [C]//Information science and engineering, 2010. Piscataway, NJ: IEEE computer society, 2010: 5512-5515.
- [12] MOHAMMED A A, WU Q M J, SID-AHMED M A. Systems application of bidirectional two-dimensional principal component analysis to curvelet feature based face recognition [C]//Systems, man and cybernetics, 2009. Piscataway, NJ: IEEE computer society, 2009: 4124-4130.
- [13] CANDES E, DEMANET L, DONOHO D, et al. Fast discrete curvelet transforms [J]. Multiscale modeling & simulation, 2006, 5(3): 861-899.
- [14] 赵阳. 曲波变换在人脸识别中的应用[D]. 西安: 西安理工大学自动化与信息工程学院, 2011.
- [15] YANG J, ZHANG D. Two-dimensional PCA: a new approach to appearance-based face representation and recognition [J]. IEEE Trans. PAMI, 2004, 26(1): 131-137.
- [16] HUANG G B, ZHU Q Y, SIEW C K. Extreme learning machine: theory and applications [J]. Neurocomputing, 2006, 70(1-3): 489-501.
- [17] CAO J W, LIN Z P, HUANG G B, et al. Voting based extreme learning machine [J]. Information sciences, 2012, 185(1): 66-77.
- [18] 陈素根,尹贺峰. 基于白化 PCA 图像重构的特征补偿人脸识别新方法[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(9): 2853-2856.

## Research on Hybrid Face Recognition Algorithm Based on Voting Extreme Learning Machine

CHEN Tiejun, CAI Jinshou, GUO Li

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In view of the deficiency of wavelet transform that geometrical characteristic of the data can not be fully utilized when multidimensional images' features are detected, this paper applies the second generation of curvelet transform to process facial images. The procedure extracts images' features through choosing the sub-band coefficient with the maximum standard deviation. Then data dimensionality is reduced using the bidirectional two-dimensional principal component analysis (B2DPCA). Combining with the two methods above, this paper constructs a face recognition algorithm based on hybrid voting extreme learning machine (VELM). The experimental results show that the algorithm presents improved performance compared with other algorithms mentioned in terms of recognition accuracy.

**Key words:** curvelet transform; B2DPCA; voting; ELM; face recognition



# 均匀化退火对纯铝系负极箔坯料显微组织的影响

赵红亮<sup>1</sup>, 吴迪<sup>1</sup>, 翁康荣<sup>1</sup>, 胡冠奇<sup>2</sup>

(1. 郑州大学 材料科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 登电集团铝加工有限公司, 河南 登封 452477)

**摘要:** 铸轧纯铝系负极箔坯料存在粗大且分布不均匀的第二相, 均匀化退火对坯料中第二相尺寸和分布有重要影响. 通过均匀化退火实验研究了退火温度和保温时间对纯铝系负极箔冷轧坯料中第二相尺寸和分布的影响. 结果表明: 在保温时间为 10 h 时, 随着退火温度升高, 弯曲带状 FeAl 共晶相逐渐溶解球化, 条状  $\beta$  (FeAlSi) 相分解为短棒状, 当温度升高至 550 °C 时, 针状相 FeAl<sub>3</sub> 开始析出; 在退火温度为 520 °C 时, 随退火时间的延长, 粗大第二相的比例不断减小, 而后趋于稳定; 冷轧变形率为 38.5% 的铸轧纯铝系负极箔冷轧坯料经 520 °C 保温 10 h 退火后可获得较均匀的组织.

**关键词:** 铸轧; 负极箔; 均匀化退火; 显微组织; FeAl<sub>3</sub> 相

**中图分类号:** U463.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.201510047

## 0 引言

铝电解电容器具有价格低、比容高的特点, 广泛应用于电子领域. 铝电解电容器用电子箔, 要求铝箔腐蚀后具有较大的比表面积, 以利于储存电能<sup>[1-2]</sup>. 纯铝系合金箔因具有成本低, 电学性能好的优点作为电容器负极箔材料已得到市场的认可<sup>[3-4]</sup>, 但纯铝系合金中含 Fe、Si 等杂质元素, 存在粗大第二相化合物和晶粒大小不均匀等问题, 粗大第二相粒子或晶界附近位错密度增大, 易引起箔的不均匀腐蚀<sup>[5-7]</sup>. 生产中采用电解铝液直接铸轧生产纯铝系负极箔坯料具有短流程、低能耗的优点, 但铸轧冷速大, 晶粒沿纵向大小不一, 在铸轧板中心层易形成形貌不规则的第二相, 且成分分布不均匀, 从而直接影响负极箔的腐蚀.

热处理可有效控制铝箔坯料中第二相尺寸、形貌及分布<sup>[8]</sup>, 改善组织的均匀性, 不仅有利于进一步加工, 而且能保证成品箔均匀腐蚀. 笔者以纯铝系负极箔冷轧坯料作为研究对象, 研究了均匀化退火温度和保温时间对坯料中第二相尺寸、形貌和分布的影响规律, 尽可能减小第二相的尺寸, 使组织均匀, 提高负极箔的腐蚀性能.

## 1 实验材料及方法

厚度 6.5 mm 的纯铝系铸轧板冷轧为 4.0 mm 厚度板材, 变形率 38.5%, 对冷轧板进行均匀化退火实验, 温度分别为: 460、490、520 和 550 °C; 保温时间分别为 6、8、10 和 12 h. 本实验采用纯铝系合金的化学成分见表 1. 对退火前后的试样经人工研磨、机械抛光后电解抛光, 电解抛光液为高氯酸 + 酒精 (体积比 1:9). 试样经电解抛光后在 DMM-220C 型金相显微镜上进行显微组织和第二相分布观察, 用 Image-Pro Plus 软件分析第二相的尺寸.

表 1 合金化学成分

Tab. 1 Chemical composition of alloy						%
Al	Fe	Si	Cu	Mn	Ti	其他
99.2	0.24	0.04	0.19	—	0.038	<0.01

## 2 结果与讨论

### 2.1 均匀化退火对冷轧板坯显微组织的影响

图 1 为 38.5% 变形率的纯铝系负极箔冷轧板纵断面表层和中心层的显微组织, 从图中可以看出冷轧板表层第二相化合物呈细小颗粒状, 而中心层含有较多条状相和粗大弯曲带状相. 由于

收稿日期: 2015-10-26; 修订日期: 2015-11-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51174177)

作者简介: 赵红亮 (1972—), 男, 河南项城人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事新型铝、镁合金研究, E-mail: zhlwkr@zzu.edu.cn.

引用本文: 赵红亮, 吴迪, 翁康荣, 等. 均匀化退火对纯铝系负极箔坯料显微组织的影响 [J]. 郑州大学学报 (工学版), 2016, 37 (2): 42-45.

铸轧时坯料表层与中心层凝固速度、过冷度的不同造成第二相析出不同,表层过冷度大,凝固速度大,Fe、Si等合金元素更多地固溶于基体,析出第二相较细小;随着凝固向中心层推进,凝固速度降低,合金元素更多地被推到固液界面处,以粗大第二相的形式析出,经38.5%冷轧变形率后,第二相沿轧制方向分布,中心区域的第二相虽发生破碎,但尺寸仍大于表层区域,显微组织呈现不均匀性。

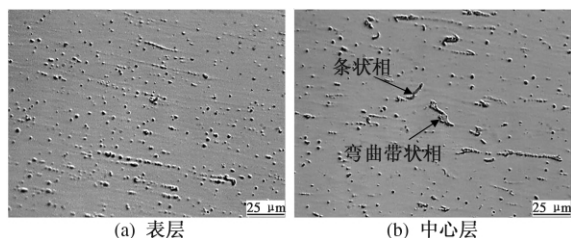


图1 38.5%变形率冷轧板坯的显微组织  
Fig.1 Microstructure of cold rolling plate under 38.5% deformation

利用Image-Pro Plus软件对冷轧板中心层第二相尺寸分布进行统计,其中尺寸在6 μm以上第二相所占比例为52%,2~6 μm的第二相占38%,如图2所示,这反映了冷轧板中第二相尺寸大小分布不均匀。

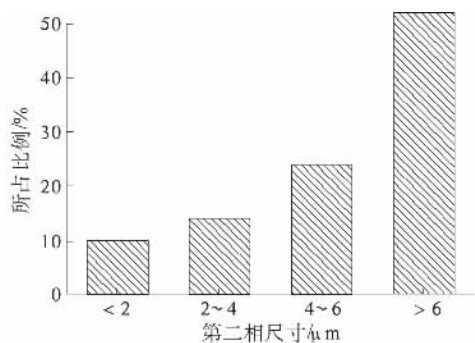


图2 冷轧板中心层第二相尺寸分布  
Fig.2 Size distribution of secondary phase at center layer of cold rolling plate

38.5%变形率的冷轧板经460、490、520和550℃分别退火6、8、10和12h,图3为退火后的显微组织。均匀化退火温度在490℃时,保温12h后基体中仍存在部分粗大第二相,如图3(a)所示。对第二相尺寸进行统计,尺寸在6 μm以上的第二相所占比例为44%,2~6 μm的第二相占42%;退火温度550℃保温6h时,基体中已出现尺寸较大的针状相,如图3(b)所示,此时尺寸在6 μm以上的第二相所占比例为26%,2~6 μm的第二相占57%,可见均匀化退火能够一定程度改

变第二相尺寸分布,结合生产实际,若均匀化退火温度在490℃以下,则均匀化所需时间较长,生产效率低;当退火温度为550℃,退火6h后针状相即迅速长大,考虑到实际批量生产与设备要求,冷轧铝带卷外层与内层升温速率不同,时间太短难以保证内外层同时达到均匀化,因此保温时间不易太短。为研究均匀化温度对冷轧板显微组织的影响,兼顾生产效率和生产可行性选保温时间10h的坯料为研究对象。

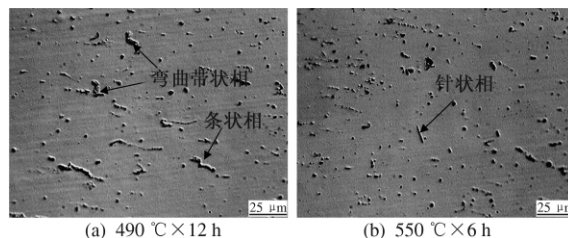


图3 38.5%变形率冷轧板坯均匀化退火后的显微组织  
Fig.3 Microstructure of cold rolling plate under 38.5% deformation after homogenized annealing by different processes

## 2.2 退火温度对纯铝系负极箔冷轧板坯显微组织的影响

图4为变形率38.5%的冷轧板坯在460~550℃之间退火10h后的显微组织;图5为对应各温度下第二相尺寸统计结果。从图4、5中可以看出,随着退火温度升高,中心层弯曲带状相逐渐转化为细小的颗粒相,条状相分解为短棒状,第二相尺寸大小分布也不断变化。据文献[9-11]可知,1xxx铝合金中主要的相有:平衡相 $\alpha$ (FeAl-Si)、FeAl<sub>3</sub>、亚稳相 $\beta$ (FeAlSi)和共晶相FeAl,其中 $\alpha$ (FeAlSi)相呈颗粒状;FeAl共晶相呈弯曲带状; $\beta$ (FeAlSi)呈条状或棒状;而FeAl<sub>3</sub>相为针状。

从图4(a)可以看到,纯铝系负极箔冷轧板坯在460℃均匀化退火时,冷轧坯料中心层仍有条状 $\beta$ (FeAlSi)相和弯曲带状FeAl共晶相存在,这说明弯曲带状FeAl共晶相没有完全溶解球化, $\beta$ (FeAlSi)相也分解不完全,此时根据第二相尺寸统计结果可知,尺寸大于6 μm的第二相所占比例最大,为48%。退火温度在490℃时,基体中颗粒相增多,发生共晶FeAl相向平衡相 $\alpha$ (FeAlSi)转变<sup>[12]</sup>,尺寸大于6 μm的第二相比例有所降低,为45%,但由于温度过低,原子扩散速率较慢,基体中仍然存在较大体积的共晶相, $\beta$ (FeAlSi)相尺寸变化不大,如图4(b)所示。当退火温度在520℃时,共晶相FeAl完全溶解,条状 $\beta$ (FeAlSi)分

解为短棒状,尺寸在  $6\text{ }\mu\text{m}$  以上的第二相所占比例仅为 15%,  $2\sim6\text{ }\mu\text{m}$  的第二相占 72%, 第二相尺寸分布集中,以颗粒状和短棒状为主,如图 4(c). 继续升温至  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 颗粒状相细化,基体中开始析出针状相,大于  $6\text{ }\mu\text{m}$  的第二相所占比例有所增加,说明颗粒状  $\alpha(\text{FeAlSi})$  开始向针状  $\text{FeAl}_3$  相转化,如图 4(d). 针状相  $\text{FeAl}_3$  在后续铝箔加工中容易造成应力集中等缺陷,影响负极箔的腐蚀性能,经均匀化退火,粗大的第二相溶解或分解,同时避免粗大针状相  $\text{FeAl}_3$  出现,使第二相尺寸分布集中,变形率为 38.5% 的冷轧板均匀化退火温度选择在  $520\text{ }^{\circ}\text{C}$  为宜.

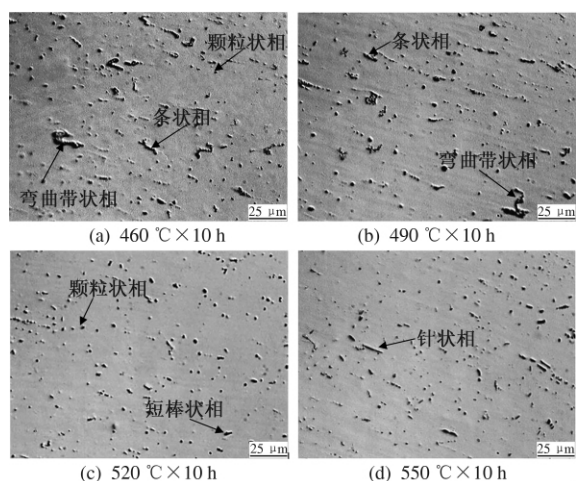


图 4 变形率 38.5% 的冷轧板坯不同温度退火后的显微组织

Fig. 4 Microstructure of cold rolling plate under 38.5% deformation after different homogenization annealing temperature

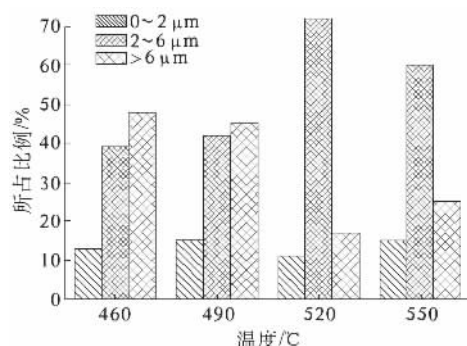


图 5 不同退火温度下第二相尺寸分布

Fig. 5 Size distribution of secondary phase at different annealing temperature

### 2.3 保温时间对纯铝系负极箔冷轧板坯显微组织的影响

图 6 为 38.5% 变形率的负极箔冷轧板坯在  $520\text{ }^{\circ}\text{C}$  退火 6~12 h 后的显微组织; 图 7 为对应各

保温时间下第二相尺寸分布统计. 从图 6 可以看出, 保温时间为 6 h 时, 坯料中心层条状  $\beta(\text{FeAlSi})$  相和弯曲带状  $\text{FeAl}$  共晶相轮廓变清晰, 但并没有明显分解的迹象. 根据第二相尺寸统计结果, 尺寸大于  $6\text{ }\mu\text{m}$  的第二相所占比例为 46%,  $2\sim6\text{ }\mu\text{m}$  的第二相占 39%, 第二相大小不一, 组织均匀性较差, 如图 6(a). 这主要是由于时间太短, 元素得不到充分扩散. 当保温时间为 8 h 时, 弯曲带状  $\text{FeAl}_3$  共晶相开始溶解球化, 条状  $\beta(\text{FeAlSi})$  相已完全分解为短棒状  $\beta(\text{FeAlSi})$ , 如图 6(b). 尺寸大于  $6\text{ }\mu\text{m}$  的第二相所占比例有所下降, 为 35%. 保温时间为 10 h 时, 弯曲带状  $\text{FeAl}_3$  相完全溶解, 颗粒相增多, 同时基体中出现少量短棒状相, 此时尺寸在  $2\sim6\text{ }\mu\text{m}$  的第二相所占比例最大, 为 72%, 第二相均匀分布, 如图 6(c). 继续延长退火时间至 12 h, 基体中第二相以颗粒状相和短棒状相为主, 第二相的尺寸分布无明显变化. 粗大第二相消失, 细小的短棒状相和颗粒相尺寸分布集中, 有利于负极箔的均匀腐蚀, 变形率为 38.5% 冷轧板在  $520\text{ }^{\circ}\text{C}$  均匀化退火时选择 10 h 为宜.

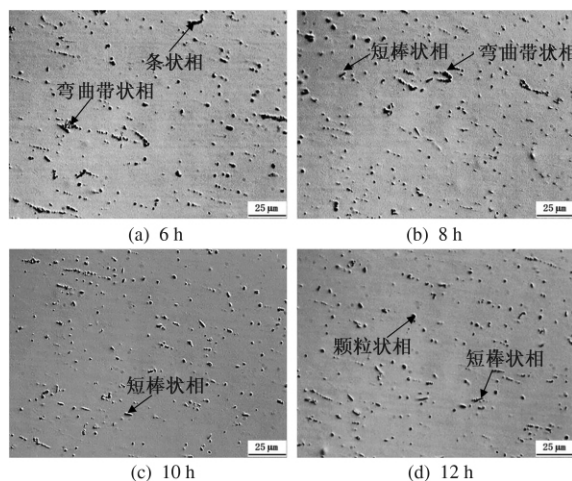


图 6 变形率 38.5% 的负极箔冷轧板坯  $520\text{ }^{\circ}\text{C}$  退火保温不同时间后的显微组织

Fig. 6 Microstructure of cold rolling plate under 38.5% deformation after different homogenization annealing time at  $520\text{ }^{\circ}\text{C}$

### 3 结论

(1) 铸轧纯铝系负极箔冷轧坯料均匀化退火时, 保温 10 h 的情况下, 随着退火温度升高, 粗大的弯曲带状  $\text{FeAl}_3$  相逐渐溶解球化, 颗粒状相增多, 条状相  $\beta(\text{FeAlSi})$  分解为短棒状; 当退火温度升高至  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 基体中析出针状  $\text{FeAl}_3$  相, 易在后续的冷轧过程中引起应力集中等缺陷, 影响负极箔的腐蚀性能.

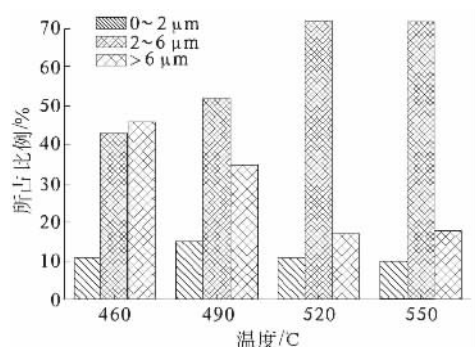


图7 不同保温时间下第二相尺寸分布

Fig.7 Size distribution of secondary phase at different holding time

(2) 冷轧坯料在 520 °C 退火时,随着保温时间延长,粗大第二相的比例不断减少;当保温时间超过 10 h 后,基体中第二相的尺寸分布无明显变化。

(3) 冷轧变形率为 38.5% 的铸轧纯铝系负极箔冷轧坯料最佳均匀化退火工艺为 520 °C 保温 10 h。

### 参考文献:

- [1] 陈宏才. 浅析电解电容器用电子铝箔的消费与生产 [J]. 有色金属加工, 2012, 41(4): 6-9.
- [2] PENG N, LIANG L B, HE Y D, et al. Effect of tunnel structure on the specific capacitance of etched aluminum foil [J]. International journal of minerals met-
- [3] 玉日泉. 铝电解电容器用阴极铝箔腐蚀工艺研究 [D]. 长沙: 中南大学冶金与环境学院, 2013.
- [4] 蔡健, 王百红, 梁慧强, 等. 电解铝液生产电解电容器负极箔的关键技术 [J]. 轻合金加工技术, 2004, 32(9): 17-21.
- [5] 肖亚庆, 张新明, 靳丽, 等. 微观组织对电解电容器铝箔比电容的影响 [J]. 材料导报, 2003, 17(6): 80-83.
- [6] OSAWA N, FUKUOKA K. Pit nucleation behavior of aluminium foil for electrolytic capacitors during early stage of DC etching [J]. Corrosion science, 2000, 42(3): 585-597.
- [7] 朱弘源. 3003 铝合金阴极箔热处理工艺及腐蚀机理的研究 [D]. 长沙: 中南大学机电工程学院, 2013.
- [8] 张静, 潘复生. 铝箔生产中铝箔毛料的组织控制 [J]. 材料导报, 2006, 20(5): 1-5.
- [9] BIROL Y. Interannealing twin-roll cast al-fe-si strips without homogenization [J]. Journal of materials science, 2009, 31(24): 6645-6652.
- [10] 赵红亮, 朱帅, 李怀武, 等. 高温均匀化退火对 1235 双零箔毛料显微组织的影响 [J]. 郑州大学学报 (工学版), 2013, 34(2): 37-39.
- [11] 潘复生, 张静, 汤爱涛, 等. 铝箔材料 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 45-46.
- [12] 刘峰, 唐建国, 祁小红, 等. AA1235 铸轧板的第二相与高温中间退火时的相转变研究 [J]. 热加工工艺, 2013, 42(2): 140-144.

## Influence of Homogenization Annealing on Microstructure of Pure Aluminum Cathode Foil Stock

ZHAO Hongliang<sup>1</sup>, WU Di<sup>1</sup>, WENG Kangrong<sup>1</sup>, HU Guanqi<sup>2</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China;

2. Dengdian Group Aluminum Processing Co. Ltd., Dengfeng 452477, China)

**Abstract:** Coarse and non-uniform secondary phase are located in the cast-rolling cathode foil stock of pure aluminum. The size and distribution of the secondary phase are significantly influenced by homogenization annealing. Effects of temperature and holding time on the secondary phase size and distribution of the cathode foil stock were investigated with the method of homogenization annealing experiments. The result shows: When holding time is 10 h, with the increase of annealing temperature, the strip Fe-Al eutectic phase are gradually dissolved and spheroidal, while the stripy  $\beta$ (FeAlSi) phase are converted into small rod-shaped compounds. Till it's up to 550 °C, the needle-like FeAl<sub>3</sub> phase grow in the matrix; When the temperature is 520 °C, with the increase of holding time, the proportion of the coarse secondary phase is decreased and reached a steady level at last. Finally, at 520 °C/10 h, the microstructure of 38.5% deformation cathode foil stock is desirable.

**Key words:** cast-rolling; cathode foil; homogenization annealing; microstructure; FeAl<sub>3</sub> phase

# 中间退火工艺对 AA5052 铝合金板成形性能的影响

卢广玺, 周 崇, 关绍康, 辛潇洋

(郑州大学 材料科学与工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 采用组织分析和性能检测手段, 研究了不同中间退火工艺对采用高通量连铸连轧技术生产的 AA5052-H32 成品板折弯及成形性能的影响. 结果表明: 优化中间退火工艺可有效提升成品板材的成形性能, 在经 480 ℃ × 8 h 的中间退火后, 成品板材折弯性能最好, 成形性能得到改善; 高温中间退火后, 部分第二相颗粒在高温均匀化的作用下回溶, 对基体的割裂作用降低, 成形性能得以改善.

**关键词:** 高通量连铸连轧; AA5052; 中间退火制度; 成形性能; 折弯性能

**中图分类号:** TG166.3

**文献标志码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.201506023

## 0 引言

由于 AA5052 铝合金具有良好的加工成形性能和中等静态强度, 是铝合金板材集装箱的主要原材料<sup>[1]</sup>. 此外, AA5052 铝合金还用于飞机油箱、仪表、百叶窗类建筑装饰材料及电视机外壳冲制材料等<sup>[2]</sup>. AA5052 铝合金属于不可热处理强化铝合金. 目前, 高流速、短流程、节能环保的高通量连铸连轧工艺已经可以生产 AA5052 铝合金<sup>[3]</sup>, 但该工艺生产的 AA5052-H32 板材成形性能尚有不足, 因此, 通过研究热处理工艺来提高板材成品成形性能具有重大意义.

笔者主要研究中间退火工艺对高通量连铸连轧 AA5052 铝合金板材折弯及成形性能的影响, 制定连铸连轧 AA5052 铝合金冷轧退火工艺, 利用中间退火处理控制其成品显微组织、改善成形性能提供依据.

## 1 试验材料和方法

### 1.1 试验材料

本试验采用厚度为 19 mm 的高通量连铸连轧 AA5052 铝合金铸坯及厚度为 4.5 mm 的 AA5052 热轧板坯进行试验, 合金各组分质量分数见表 1.

表 1 AA5052 铝合金的化学成分

Tab. 1 The chemical composition of AA5052 aluminum alloy

合金	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	其他	Al
AA5052	0.34	0.16	0.1	0.1	2.58	0.1	余量

### 1.2 试验方案

冷轧方案的确定: 4.5 mm 坯料—多道次冷轧至 1.3 mm—中间退火—精轧至 1.1 mm—稳定化退火<sup>[4]</sup>.

企业原中间退火工艺为: 350 ℃ × 2 h, 将其改变为 460 ℃ × 8 h、480 ℃ × 8 h、500 ℃ × 8 h、520 ℃ × 8 h 均匀化退火工艺<sup>[5]</sup>.

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 AA5052 铝合金铸坯显微组织分析

图 1 所示为高通量连铸连轧工艺生产的 AA5052 铝合金 19 mm 厚铸坯固溶物分布情况. 在铸坯上下表层处固溶物均匀分布在基体上, 这种化合物质点弥散、细小(如图 1(a)、(c)所示); 在铸坯中部这种化合物质点变得粗大, 数量减少, 分布不均匀, 更倾向于在晶界聚集, 同时在此区域存在疏松、孔隙等铸造缺陷(如图 1(b)所示).

与传统的热轧开坯生产高性能铝合金的方法相比, 高通量连铸连轧技术具有流程短、效率高、冷

收稿日期: 2015-06-11; 修订日期: 2015-08-28

基金项目: 河南省重大科技专项资助项目(111100310500)

作者简介: 卢广玺(1966—)男, 河南长垣人, 郑州大学副教授, 主要从事新型铝合金加工、焊接方面的研究, E-mail: lugxi@zzu.edu.cn.

引用本文: 卢广玺, 周崇, 关绍康, 等. 中间退火工艺对 AA5052 铝合金板成形性能的影响[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 46-49.

却速度快的工艺特点,并且省去了高温均匀化过程,而 AA5052 铝合金结晶区较宽,合金元素熔点不一,在凝固过程中先凝固的熔体会形成部分枝晶网格骨架,后凝固的低熔点组分容易富集并填充在前期的网格骨架中,最后缓慢冷却至中部,造成铸板坯沿厚度方向成分不均匀,形成偏析<sup>[6-7]</sup>。

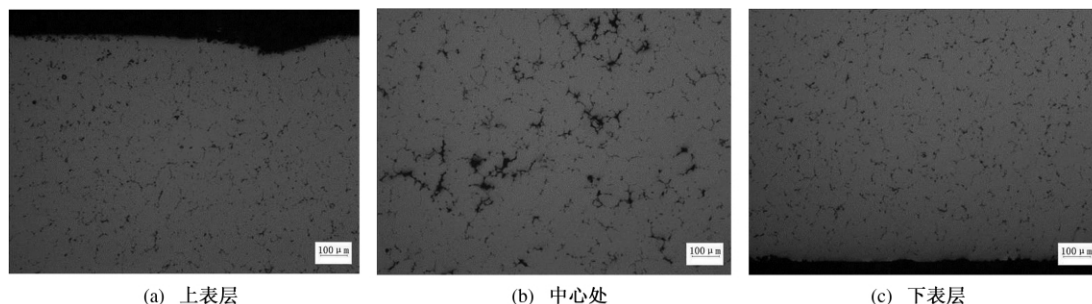


图1 AA5052 铝合金铸坯显微组织

Fig.1 The casting microstructure of AA5052 aluminum alloy

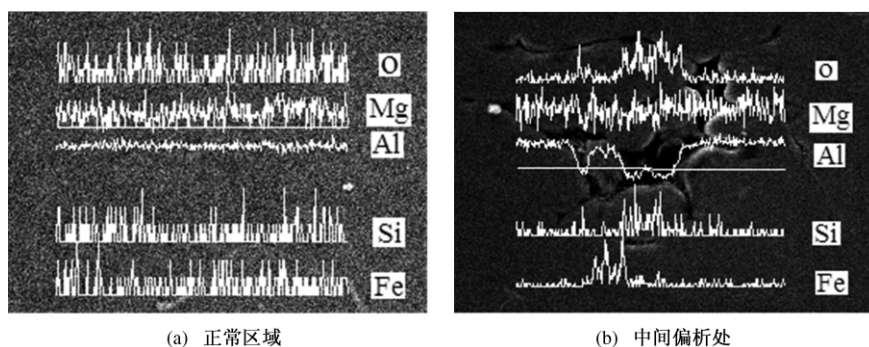


图2 铸坯中间偏析物的线扫描图

Fig.2 Line scan of intermediate segregation in slab

综上所述,高通量连铸连轧工艺的铸造速度较快,且 AA5052 铝合金固液两相区较长,共同影响了该工艺下 AA5052 合金的凝固过程,致使铸板坯沿厚度方向上成分不均匀,出现中心层偏析<sup>[8-9]</sup>;而连铸连轧的生产工艺省去了预热均匀化等工序,不能够消除铸板坯中的成分不均匀及组织偏析情况,中间层偏析物会随着轧制的进行“遗传”到成品板材中,造成成品板材折弯性能不稳定的现象。为改善成品板的成形性能,在后续的中退火工艺中,通过提高退火温度,延长退火时间,可消除板材中的部分偏析。

## 2.2 AA5052-H32 板材成形性能优化及结果分析

参照 1.2 确定的冷轧方案及中间退火制度加工 AA5052-H32 板材,并对这批板材进行成形性能检测,结果如下。

### 2.2.1 折弯性能及杯突值

参照《铝合金产品折弯性能检验标准》进行试验,且对折弯性能进行评级,折弯性能按一、二、

对 19 mm 厚铸板坯中间偏析物进行能谱线扫描分析,其结果如图 2。在正常区域图 2(a) 处,各元素含量峰形一致,而在中间偏析物区图 2(b) 处,Fe、Si、O 元素峰形变化趋势与基体 Al 元素相反,且在此处富集。这说明,在此中间偏析处 Fe、Si、O 元素偏析严重。

三、四、五级划分,其中一级最好,二、三级为合格。杯突试验值  $IE$  可作为材料的胀形成形性能指标,若  $IE$  值大,胀形性能好。实验中,折弯平行试样不少于 5 个,杯突平行试样不少于 3 个,最后取平均值计算。表 2 为不同中间退火工艺对 AA5052-H32 成品的折弯级别和杯突值的影响。

表2 AA5052-H32 成品的折弯性能和杯突值对比  
Tab.2 The bending properties and cup drawing values of AA5052-H32 final product

中间退火工艺	折弯级别	杯突值
350 °C × 2 h(原工艺)	三级	5.89
460 °C × 8 h	二级较轻	6.41
480 °C × 8 h	一级	6.48
500 °C × 8 h	二级	6.41
520 °C × 8 h	二级	5.83

由表 2 可以看出,随着中间退火温度的提高,成品板材折弯性能有所改善。但是中间退火温度过高时,折弯性能又有所下降。采用 480 °C × 8 h 的中间退火方案后成品折弯性能最好,达到一级,



表面无皱纹.不同中间退火工艺对杯突试验值的影响与对折弯性能的影响一致,480 ℃ × 8 h 时,AA5052-H32 成品杯突值达到最大,为 6.48.这说明中间退火制度为 480 ℃ × 8 h 时,AA5052-H32 成品板的冲压胀形性能最好,此时在整个变形区域上应变分布的均匀性较好且抵抗冲压的能力较强.

### 2.2.2 成形性能

对不同中间退火制度下的 AA5052-H32 成品进行成形性能测试,结果如图 3 所示.

应变硬化指数  $n$  值的物理含义是材料均匀变形的能力,塑性应变比  $r$  值是评价金属薄板深冲性能的重要参数<sup>[10]</sup>,对比不同中间退火工艺下的成品  $n$  值、 $r$  值(图 3)得知,480 ℃ × 8 h 时,AA5052-H32 成品  $n$  值、 $r$  值达到最大,分别为 0.289、0.694.这是因为,随着中间退火温度升高,其深冲性能得以改善,但随着中间退火温度的进一步

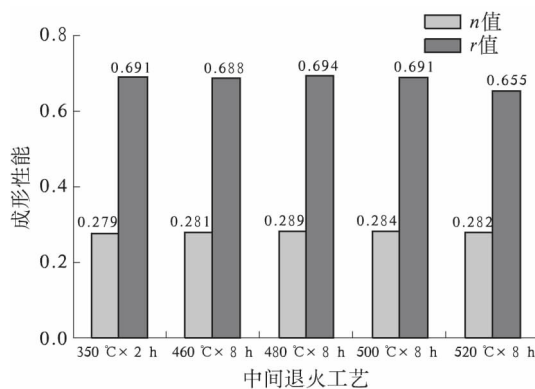


图 3 不同中间退火工艺下的成品成形性能

Fig.3 The forming property of final product under different intermediate annealing process

升高,晶粒尺寸随之长大,影响了其深冲性能.

### 2.2.3 显微组织分析

选取优化中间退火制度前后的试样进行显微组织分析,得出结果如图 4 所示.

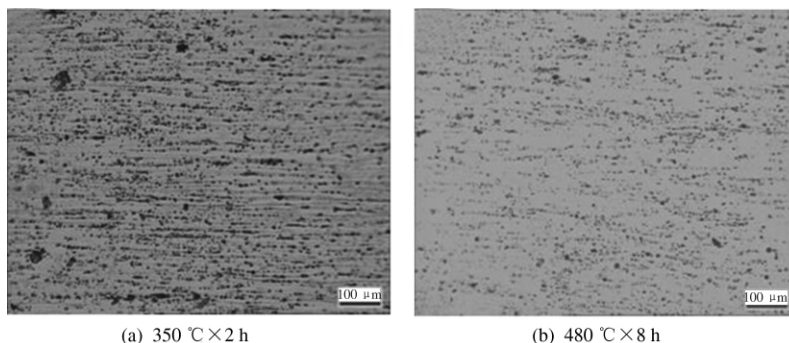


图 4 AA5052-H32 成品板第二相分布

Fig.4 The second phase distribution of AA5052-H32 final product

分析可知,采用 350 ℃ × 2 h 的原中间退火后,第二相颗粒较密集,沿轧向均匀分布,如图 4 (a);采用 480 ℃ × 8 h 的中间退火工艺优化后,成品第二相颗粒数目减少,颗粒尺寸变小,如图 5 (b).这是由于经高温中间退火后,部分第二相颗粒在高温均匀化的作用下有所溶解,对基体的割裂作用降低,故折弯及成形性能有所改善<sup>[11]</sup>.

## 3 结论

(1) 高通量连铸连轧工艺下铸造速度较快,且 AA5052 铝合金固液两相区较长,共同影响了合金的凝固过程,致使铸板坯沿厚度方向上成分不均匀,出现中心层偏析,影响了 AA5052 合金的成形性能;

(2) 采用 480 ℃ × 8 h 的中间退火方案,可使 AA5052-H32 成品折弯性能最好,成形性能均得到优化;

(3) 经高温中间退火后,部分第二相颗粒在高温均匀化的作用下有所溶解,对基体的割裂作用降低,故折弯及成形性能有所改善.

## 参考文献:

- [1] 王祝堂,任柏峰,周涛. 中国铝板带箔加工设备现状及发展方向[J]. 上海有色金属, 2004, 25(3): 128-132.
- [2] 潘复生,张丁非. 铝合金及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [3] 蔡辉. 5052 铝合金材料研究进展[J]. 铝加工, 2011, 203(6): 33-39.
- [4] 王宇星. 连铸连轧 5052 H32 板材的工艺研究[J]. 铸造技术, 2013, 34(11): 1548-1550.
- [5] 马运安,孙恒杰. 改善 5052 合金软状态板材深冲性能的工艺革新[J]. 轻合金加工技术, 2005, 33(7): 25-26.
- [6] FORBORD B, ANDERSSON B, INGVALDSEN F, et

- al. The formation of surface segregates during twin roll casting of aluminum alloy [J]. *Materials science and engineering*, 2006( 415): 12 – 20.
- [7] SLAMOVA M, KARHK M, ROBERT F. Differences in microstructure and texture of Al-Mg Sheets produced by twin-roll continuous casting and by direct-chill casting [J]. *Materials characterization*, 2003( 49): 231 – 240.
- [8] 贾伴江,陈邦峰. 显微共晶偏析对 ZL205A 合金力学性能的影响 [J]. *材料工程*, 2008( 2): 1 – 4.
- [9] 赵婧婧. 5052 铝合金微合金化及均匀化退火工艺研究 [D]. 重庆: 重庆大学材料科学与工程学院, 2014.
- [10] 杜坤. 5052 铝合金冷轧薄板室温拉深成形回弹研究 [D]. 鞍山: 辽宁科技大学材料与冶金学院, 2014.
- [11] 易成,关绍康,卢广玺,等. 退火工艺对铸轧 5052 铝合金组织和性能的影响 [J]. *材料热处理学报*, 2011, 32( 4): 52 – 57.

## Influence of Intermediate Annealing on Bending Performance of AA5052 Aluminum Alloy Sheet

LU Guangxi, ZHOU Chong, GUAN Shaokang, XIN Xiaoyang

( College of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The influence of different intermediate annealing processes on bending and forming performance of AA5052 – H32 sheet by high-throughput continuous casting and rolling was investigated by texture analysis and performance testing. The results show that: the optimized intermediate annealing process can effectively improve the formability of final products. By annealing at 480℃ for 8 h, the bending performance of final plate reaches the best, forming performance is also improved. Intermediate annealing at high temperature can dissolve part of the second phase by the effect of high temperature homogenization, and improve the formability of sheet.

**Key words:** high-throughput continuous casting and rolling; AA5052; intermediate annealing process; forming performance; bending performance



文章编号: 1671-6833(2016)02-0050-04

## PSN-PZT 陶瓷及其在加速度传感器中的应用研究

詹自力, 李亚丰, 陈翔宇, 陈克城

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 利用传统固相烧结法制备了  $0.02\text{Pb}(\text{Sb}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3-0.98\text{Pb}_{1-2x}\text{Ba}_x\text{Sr}_x(\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47})\text{O}_3$  压电陶瓷 (其中  $x=0.02, 0.03, 0.04, 0.05$ )。讨论了不同 Ba、Sr 复合掺杂量及烧结温度对陶瓷结构和电性能的影响。结果显示, 当  $x=0.04$ , 烧结温度为  $1\,260\text{ }^\circ\text{C}$  时, 压电陶瓷的性能最佳, 其中  $d_{33}=615\text{ pC/N}$ ,  $\varepsilon_{33}/\varepsilon_0=2\,224$ ,  $\tan\delta=2.11\%$ ; 然后把这个配方的陶瓷片安装到传感器中, 测试其电荷灵敏度、最大横向灵敏度比和最大线性误差, 电荷灵敏度为  $2.72\text{ pC}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$ , 最大横向灵敏度比小于  $5\%$ , 最大线性误差为  $2.97\%$ , 符合通用振动测试类型传感器使用要求。

**关键词:** 加速度传感器; PSN-PZT; 压电陶瓷

**中图分类号:** TM282

**文献标志码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.201511023

### 0 引言

在工程技术中, 常常会遇到机械振动的问题。为了消除或减小振动, 就需要有一系列精确可靠的振动测量仪器, 比如压电加速度传感器<sup>[1]</sup>。压电加速度传感器又称压电加速度计或压电加速度表。世界上首次实现压电加速度传感器商品化的时间是 1943 年, 由丹麦的 Brüel & Kjær 公司设计<sup>[2]</sup>。

最近几年, 随着压电加速度传感器、压电变压器和压电马达等各类压电陶瓷驱动器的出现, 需要压电材料具有更高的压电常数、介电常数及高稳定性<sup>[3]</sup>。为了提高加速度传感器的灵敏度, 改变压电陶瓷片的压电常数  $d_{33}$  是关键<sup>[4]</sup>, 一般 PZT 基压电陶瓷的压电常数比较高。PZT 基压电陶瓷的准同型相界附近可以增加它的压电效应<sup>[5]</sup>, 准同型相界可以通过 XRD 观察出来。因为 PSN-PZT 压电陶瓷谐振频率的时间稳定性和温度稳定性非常好<sup>[6]</sup>, 所以它适合用在压电加速度传感器上。一般可以通过掺杂来提高压电陶瓷材料的性能, 所以笔者同时掺杂了碱土金属  $\text{Ba}^{2+}$ 、 $\text{Sr}^{2+}$ , 通过实验得到  $\text{Ba}^{2+}$ 、 $\text{Sr}^{2+}$  最佳掺杂量和最优烧结温度。采用这种配方陶瓷片组装的加速度计, 电荷灵

敏度、最大横向灵敏度比和最大线性误差都能达到通用振动测试类传感器的使用要求, 故该压电陶瓷材料可以用在压电加速度传感器上。

### 1 实验部分

#### 1.1 主要原料

$\text{Pb}_3\text{O}_4$  (纯度  $\geq 97\%$ , 青岛弘中元有限公司);  $\text{ZrO}_2$  (纯度  $\geq 99.5\%$ , 宜兴新兴铝业);  $\text{TiO}_2$  (高纯金红石型电子级, 仙桃市中星电子材料有限公司);  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  (分析纯, 纯度  $\geq 99\%$ , 上海试四赫维化工有限公司);  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  (高纯试剂, 纯度  $\geq 99.99\%$ , 国药集团化学试剂有限公司);  $\text{BaCO}_3$  (分析纯, 纯度  $\geq 99\%$ , 国药集团化学试剂有限公司);  $\text{SrCO}_3$  (分析纯, 纯度  $\geq 99\%$ , 国药集团化学试剂有限公司)。

#### 1.2 设备与仪器

电子天平: HZT-A3000, 福州华志科学仪器有限公司; 行星式四头快速球磨机: KQM-X4/B, 咸阳金宏通用机械有限公司; 恒温干燥箱: 101A-5, 上海祖发实业有限公司; 高温电炉: ECFI-18-14, 上海广益高温技术实业有限公司; 液压机: 南通国龙锻压设备有限公司; 准静态测量仪: ZJ-3AN, 中国科学院声学研究所; 宽频 LCR 数字电桥:

**收稿日期:** 2015-11-12; **修订日期:** 2015-12-27

**基金项目:** 国家新型电子元器件专项 (2008-1436); 河南省产学研合作资助项目 (142107000003); 河南省教育厅重点资助项目 (14A5300)

**作者简介:** 詹自力 (1965—), 男, 河南信阳人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事纳米材料和气敏元件研究, E-mail: zhanzili@zzu.edu.cn.

**引用本文:** 詹自力, 李亚丰, 陈翔宇, 等. PSN-PZT 陶瓷及其在加速度传感器中的应用研究 [J]. 郑州大学学报 (工学版), 2016, 37(2): 50-53.

TH2816A,常州市同惠电子有限公司; X 射线衍射仪: D8 Advance, 德国布鲁克 (Bruker) AXS 公司; 扫描电子显微镜: JSM-7500F, 日本电子株式会社; 压电加速度传感器测试系统: 江苏联能电子技术有限公司。

### 1.3 压电陶瓷的制备

压电加速度传感器中的压电陶瓷圆环片的配方为  $0.02\text{Pb}(\text{Sb}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3 - 0.98\text{Pb}_{1-2x}\text{Ba}_x\text{Sr}_x(\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47})\text{O}_3$ , 令  $x = 0.02, 0.03, 0.04$  和  $0.05$ 。按照传统的固相反应法来制备, 即将各物料按摩尔比混合, 球磨 6 h, 放入  $110^\circ\text{C}$  干燥箱中, 烘干 24 h, 过筛压块后在  $900^\circ\text{C}$  下预烧, 再次球磨烘干, 加 PVA 造粒后压成圆柱状,  $750^\circ\text{C}$  排胶, 然后烧结, 令烧结温度  $T = 1\ 220, 1\ 240, 1\ 260$  和  $1\ 280^\circ\text{C}$ , 保温 2 h, 烧结好的样品经过切片、打孔、研磨成外径 6 mm、内径 3.4 mm、厚度 0.92 mm 的圆环片, 再用丝网印刷镀银,  $790^\circ\text{C}$  烧银, 最后在  $110^\circ\text{C}$  硅油中施加 3 kV/mm 的场强极化 20 min, 静置 24 h 后测试其性能。

### 1.4 性能与表征测试

采用宽频 LCR 数字电桥测量样品的电容  $C$  和介质损耗  $\tan \delta$ , 相对介电常数  $\varepsilon_{33}/\varepsilon_0$  [7] 可以利用公式 (1) 得出。

$$\frac{\varepsilon_{33}}{\varepsilon_0} = \frac{Ct}{\varepsilon_0 A} \quad (1)$$

式中:  $C$  为电容值;  $t$  为试样厚度;  $A$  为试样的面积;  $\varepsilon_0$  为真空介电常数, 且  $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ 。采用准静态测量仪测量压电常数  $d_{33}$ 。采用 X 射线衍射仪对材料进行物相和结构分析, 使用石墨单色器,  $\text{CuK}\alpha$  靶, 40 kV, 40 mA, 扫描速度  $12^\circ/\text{min}$ 。采用扫描电子显微镜分析样品的显微结构。

## 2 结果与讨论

### 2.1 XRD 分析

图 1 为  $1\ 260^\circ\text{C}$  烧结保温 2 h 时, 不同  $\text{Ba}^{2+}$ 、 $\text{Sr}^{2+}$  复合掺杂的 PSN-PZT 陶瓷粉末的 X 射线衍射图谱。由图可以知道, 该陶瓷试样的主晶相均对应纯钙钛矿 XRD 标准谱, 没有发现其他杂相存在, 这说明  $\text{Ba}^{2+}$ 、 $\text{Sr}^{2+}$  基本可以全部固溶到 PSN-PZT 系统中, 而且衍射峰形比较尖锐, 这说明陶瓷的结晶状况较好。准同型相界是指四方相和三方相共存的一个区域, 两相能量接近, 但是晶体结构不同。由  $2\theta = 45^\circ$  附近可以看出, 当  $x$  在  $0.03 \sim 0.05$  时, 衍射峰发生了明显的分裂, 说明三方相和四方相共存, 陶瓷试样处于准同型相界。由于

$\text{Ba}^{2+}$ 、 $\text{Sr}^{2+}$  的半径与  $\text{Pb}^{2+}$  的半径不同, 所以它们的取代一定会引起晶胞结构某种程度的畸变。

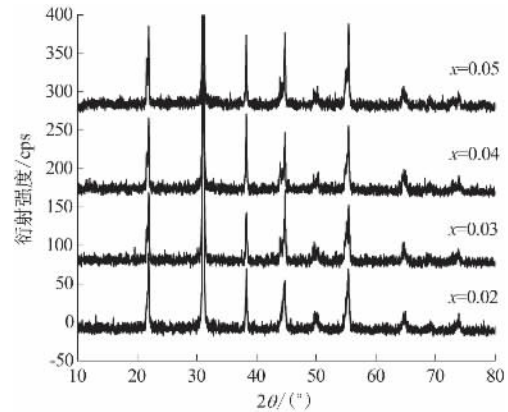


图1 不同 Ba、Sr 掺杂量的 PSN-PZT 陶瓷的 XRD 图谱  
Fig.1 XRD patterns of PSN-PZT ceramic with various Ba and Sr contents

### 2.2 Ba 和 Sr 掺杂量的变化对 PSN-PZT 陶瓷性能的影响

图 2 是在烧结温度  $1\ 260^\circ\text{C}$  时, 不同  $\text{Ba}^{2+}$ 、 $\text{Sr}^{2+}$  复合掺杂量  $x$  对 PSN-PZT 陶瓷的  $d_{33}$ 、 $\varepsilon_{33}/\varepsilon_0$  和  $\tan \delta$  影响的关系曲线。由图 2 可以看出, 随着  $\text{Ba}^{2+}$ 、 $\text{Sr}^{2+}$  复合掺杂量  $x$  的增加,  $d_{33}$  是先增大再减小, 在  $x = 0.04 \text{ mol}$  时,  $d_{33}$  达到最佳值  $615 \text{ pC/N}$ 。而天津大学的王晓娜 [8] 研究的  $\text{Ba}^{2+}$  掺杂的 PSN-PZT 的性能中  $d_{33} = 467 \text{ pC/N}$ ; 肇庆捷成电子科技有限公司的姜知水等 [9] 研究的  $\text{Sr}^{2+}$  掺杂的 PSN-PZT 的性能中  $d_{33} = 360 \text{ pC/N}$ , 这表明  $\text{Ba}^{2+}$ 、 $\text{Sr}^{2+}$  复合掺杂比它们分别单独掺杂的性好。  $\varepsilon_{33}/\varepsilon_0$  一直增大, 但后来增加幅度非常小, 和  $d_{33}$  的变化趋势比较一致,  $\tan \delta$  是先减小再增大, 最后又减小。这是因为  $\text{Ba}^{2+}$ 、 $\text{Sr}^{2+}$  的半径和  $\text{Pb}^{2+}$  的半径相近 ( $\text{Ba}^{2+}$  的半径为  $143 \text{ pm}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$  的半径为  $127 \text{ pm}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  的半径为  $132 \text{ pm}$ ), 而且它们的化合价相等。  $\text{Ba}^{2+}$ 、 $\text{Sr}^{2+}$  在晶胞中取代  $\text{Pb}^{2+}$  的位置后, 不会破坏晶胞的电中性 (即晶胞内正负电荷数目相等), 也不会破坏氧八面体结构。另一方面,  $\text{Ba}^{2+}$ 、 $\text{Sr}^{2+}$  的半径和  $\text{Pb}^{2+}$  的半径又有一定的区别, 它们取代  $\text{Pb}^{2+}$  后, 必然会引起晶格结构的畸变, 那么在极化处理时就有利于电畴的 (尤其是  $90^\circ\text{C}$  畴) 转向, 压电性能就会有所提高 [10]。晶格畸变会使整个晶体结构活动性增强, 使四方相向三方相转变比较容易, 这样就进入了准同型相界, 这时压电性能最佳。  $\tan \delta$  的增加是因为电畴转向容易, 以致增加了电畴之间的摩擦, 增加了因发热而产生的能量损耗。但是, 应该注意的是, 合理地选取取代

元素的加入量,加入量太少,改性效果不明显,加入量过多,晶格结构又有向三方相转化的趋势,以致性能反而下降.所以在  $x=0.04$  时,PSN-PZT 陶瓷的性能表现最好.

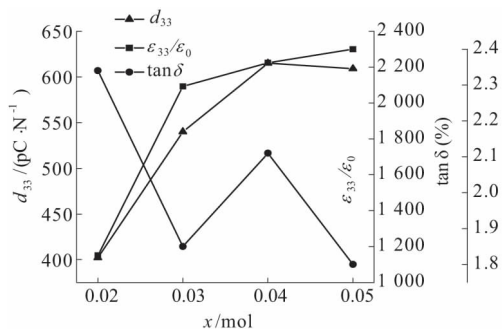


图2 PSN-PZT 陶瓷的  $d_{33}$ 、 $\epsilon_{33}/\epsilon_0$  和  $\tan \delta$  随 Ba 和 Sr 掺杂量的关系

Fig. 2 The  $d_{33}$ 、 $\epsilon_{33}/\epsilon_0$  and  $\tan \delta$  of PSN-PZT ceramics as a function of Ba and Sr doping

### 2.3 烧结温度的变化对 PSN-PZT 陶瓷性能的影响

图3是在  $\text{Ba}^{2+}$ 、 $\text{Sr}^{2+}$  复合掺杂量  $x=0.04$  mol 时,不同烧结温度对 PSN-PZT 陶瓷的  $d_{33}$ 、 $\epsilon_{33}/\epsilon_0$  和  $\tan \delta$  影响的关系曲线.由图3可以看出,随着烧结温度的升高, $d_{33}$  和  $\epsilon_{33}/\epsilon_0$  是先增大再减小, $\tan \delta$  是先减小再增大.在  $1260^\circ\text{C}$  以下,晶粒的尺寸比较小,气孔比较多;当温度升高到  $1260^\circ\text{C}$  时,物质的迁移速率提高,这时陶瓷烧结进行的比较完全,晶粒生长较佳,气孔减少,所烧成的陶瓷致密度良好,所以这时  $d_{33}$  和  $\epsilon_{33}/\epsilon_0$  出现最大值.但是温度进一步升高,粒界移动速度加快,铅挥发严重,系统内就产生了大量的气孔,而且晶粒过大,会使晶粒之间结合较差, $d_{33}$  和  $\epsilon_{33}/\epsilon_0$  的值又出现了降低.介质损耗  $\tan \delta$  与致密度和畴壁的运动有关,在  $1220 \sim 1260^\circ\text{C}$  时,致密度占主要地位,这期间致密度比较低,所以  $\tan \delta$  降低,而在  $1260 \sim 1280^\circ\text{C}$  时,畴壁的运动占主要地位,这时畴壁运动比较激烈,所以  $\tan \delta$  又升高了.因此,本试验中的最佳烧结温度为  $1260^\circ\text{C}$ .

### 2.4 微观结构分析

图4是  $1260^\circ\text{C}$  烧结后不同  $\text{Ba}^{2+}$ 、 $\text{Sr}^{2+}$  掺杂量的 PSN-PZT 陶瓷表面的 SEM 图.从图4可以看出,多面体形状很明显,其中以固相烧结为主;有一部分球状颗粒,有液相烧结的机制;表面有一些云雾状物质,可能是断裂过程的晶粒内部.当  $x=0.02$  时,晶粒大小分布不均匀;当  $x=0.03 \sim 0.05$  时,晶粒长得较均匀.原因是当  $x=0.03 \sim 0.05$

时,该物相在准同型相界附近.四个样品都有较好的致密度,这是因为在 PSN-PZT 型压电陶瓷中, $\text{Ba}^{2+}$ 、 $\text{Sr}^{2+}$  置换  $\text{Pb}^{2+}$  后,会使晶格各向异性降低,所以陶瓷比较致密.

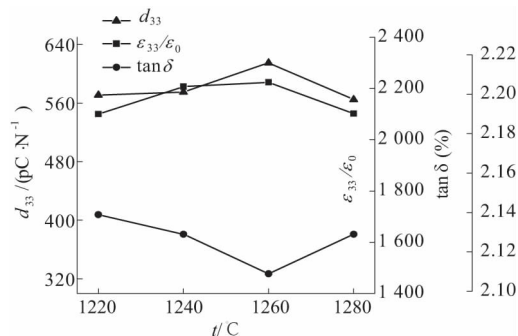


图3 PSN-PZT 陶瓷的  $d_{33}$ 、 $\epsilon_{33}/\epsilon_0$  和  $\tan \delta$  随烧结温度的变化

Fig. 3 The  $d_{33}$ 、 $\epsilon_{33}/\epsilon_0$  and  $\tan \delta$  of PSN-PZT ceramics as a function of sintering temperature

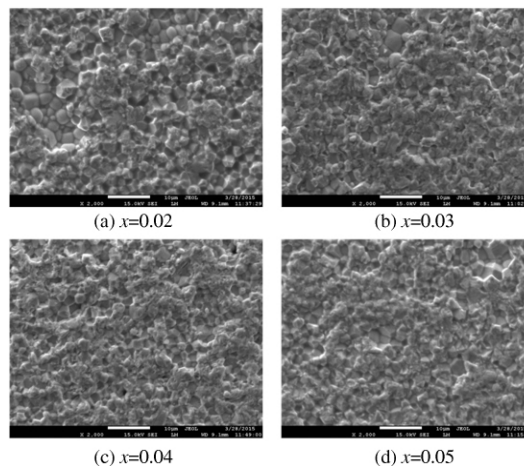


图4 不同 Ba、Sr 掺杂量的 PSN-PZT 陶瓷的 SEM 图

Fig. 4 SEM images of PSN-PZT ceramic with various Ba and Sr contents

### 2.5 传感器灵敏度测试

选取上述最佳的压电陶瓷片,即配方为  $0.02\text{Pb}(\text{Sb}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3 \cdot 0.98\text{Pb}_{0.92}\text{Ba}_{0.04}\text{Sr}_{0.04}(\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47})\text{O}_3$ ,把它装入郑州易度传感技术有限公司的加速度传感器中,再把传感器固定在振动台上,利用江苏联能电子技术有限公司的仪器测试它的电荷灵敏度和最大横向灵敏度比,结果显示:电荷灵敏度为  $2.72 \text{ pC}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ ,最大横向灵敏度比小于  $5\%$ ,均符合通用振动测试类型传感器的使用要求;值得注意的是,在传感器装配过程中,需要仔细调整两块压电陶瓷片的相对位置,最大横向灵敏度比才能达到使用要求.

### 2.6 线性误差测试与计算

振动加速度由标准加速度传感器测振系统控

制,选择8个加速度值来进行测试,利用比较标定法计算出电荷灵敏度,就可以得到线性误差. 加速度值在10、20、40、60、80、100、120、140  $\text{m/s}^2$ 时的测试结果见表1.

表1 不同加速度下的电荷灵敏度

Tab.1 Charge sensitivity under different accelerations

加速度 $a/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	灵敏度 $K/(\text{pC} \cdot \text{ms}^{-2})$
10	2.71
20	2.72
40	2.71
60	2.70
80	2.85
100	2.82
120	2.85
140	2.86

先求得各个加速度的灵敏度  $K_i$  的平均值  $K$

$$K = \sum_{i=1}^n K_i / n, (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

线性误差  $\delta$  可按下式计算出

$$\delta = \left| \frac{K - K_i}{K} \right| \times 100\% \quad (3)$$

最大线性误差为:  $\delta_{\max} = 2.97\%$

### 3 结论

(1) 在  $0.02\text{Pb}(\text{Sb}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3 - 0.98\text{Pb}_{1-2x}\text{Ba}_x\text{Sr}_x(\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47})\text{O}_3$  配方中,当  $\text{Ba}^{2+}$ 、 $\text{Sr}^{2+}$  掺杂量  $x = 0.04$ ,烧结温度为  $1\ 260\ ^\circ\text{C}$  时,压电陶瓷的性能最佳,其中  $d_{33} = 615\ \text{pC/N}$ ,  $\varepsilon_{33}/\varepsilon_0 = 2\ 224$ ,  $\tan \delta = 2.11\%$ ;

(2) 压电加速度传感器使用上述压电陶瓷片,传感器的电荷灵敏度为  $2.72\ \text{pC}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ ,最大横向灵敏度比小于  $5\%$ ,最大线性误差为  $2.97\%$ ,满足通用振动测试类传感器的使用要求.

### 参考文献:

- [1] 谭祖根. 振动测量仪器[J]. 力学学报,1976(1):60-66.
- [2] 唐旭辉. 压电加速度计有限元模型及其应用研究[D]. 秦皇岛:燕山大学电气工程学院,2012.
- [3] 冯小东,蹇胜勇,刘相果. A位取代对PZN-PNN-PZT压电陶瓷性能的影响[J]. 压电与声光,2014,36(1):100-102.
- [4] 潘玉安,曹荣祥,曹良足,等. 压电陶瓷传感器灵敏度的研究[J]. 压电与声光,2005,27(2):128-130.
- [5] KALEM V, CAM I, TIMUÇIN M. Dielectric and piezoelectric properties of PZT ceramics doped with strontium and lanthanum [J]. Ceramics International, 2011, 37(4):1265-1275.
- [6] 田中哲郎. 压电陶瓷材料[M]. 北京:科学出版社,1982.
- [7] 王春娟. PMN-PZN-PZT四元系压电陶瓷显微结构与电性能的研究[D]. 西安:西北工业大学材料学院,2004.
- [8] 王晓娜. PSN-PZT压电陶瓷的性能研究[D]. 天津:天津大学材料学院,2011.
- [9] 姜知水,欧明,田维,等. 锆钛酸铅B位铋锑复合取代改性的压电陶瓷. 103360069 A[P]. 2013-10-23.
- [10] 许煜寰. 铁电与压电材料[M]. 北京:科学出版社,1978.

## Studies on PSN-PZT Ceramics and Its Application in the Acceleration Sensor

ZHAN Zili, LI Yafeng, CHEN Xiangyu, CHEN Kecheng

(School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The piezoelectric ceramic wafer is a core component of the piezoelectric accelerometer sensor. In this paper, the  $0.02\text{Pb}(\text{Sb}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3 - 0.98\text{Pb}_{1-2x}\text{Ba}_x\text{Sr}_x(\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47})\text{O}_3$  piezoelectric ceramic (where  $x = 0.02, 0.03, 0.04, 0.05$ ) was prepared by using the conventional solid-phase sintering. The influence of Ba and Sr complex dopings and sintering temperatures on the structures and electrical properties of ceramic was discussed. The results show that the piezoelectric ceramic arrives at its optimum performance ( $d_{33} = 615\ \text{pC/N}$ ,  $\varepsilon_{33}/\varepsilon_0 = 2\ 224$ ,  $\tan \delta = 2.11\%$ ) when  $x$  is 0.04 and the sintering temperature is  $1\ 260\ ^\circ\text{C}$ ; After installing the ceramic wafer made by this formula into the sensor, the test shows that the charge sensitivity is  $2.72\ \text{pC/ms}^{-2}$ , the maximum transverse sensitivity ratio is less than  $5\%$  and the maximum linearity error is  $2.97\%$ , which complies with the operating requirements of the common vibration sensor.

**Key words:** acceleration sensor; PSN-PZT; piezoelectric ceramic

文章编号: 1671-6833(2016)02-0054-04

# 静电纺丝法制备钇掺杂的 ZnO 及其对丙酮的气敏特性研究

冯秋霞<sup>1,2</sup>, 于 鹏<sup>1</sup>, 王 兢<sup>1</sup>, 李晓干<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学 电子科学与技术学院, 辽宁 大连 116023; 2. 大连东软信息学院 电子工程系, 辽宁 大连 116023)

**摘 要:** 为改善 ZnO 对丙酮的气敏响应, 采用静电纺丝法, 利用 PVP/Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O/Y(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O 等制成的前驱液, 制备了钇掺杂的 ZnO 纳米纤维, 通过 XRD、SEM 等表征手段对制备的纯 ZnO 和掺杂的 ZnO 样品进行了表征分析. 将制备的纯 ZnO 和钇掺杂的 ZnO 纳米纤维制成电阻型气体传感器. 气敏测试结果表明, Y 掺杂有效改善了 ZnO 纳米纤维对丙酮气体的敏感特性. 在 440 ℃ 时, 对  $1 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$  (体积分数) 丙酮具有良好的响应, 响应时间为 14 ~ 40 s, 恢复时间为 20 ~ 55 s, 对于  $100 \times 10^{-6}$  丙酮的响应值约为 70 ( $S = R_a/R_g$ ), 并且对于乙醇、氨气、甲醇、甲醛、甲苯、苯有较好的选择性. 同时分析了该材料对丙酮的敏感机理.

**关键词:** 静电纺丝法; ZnO 纳米纤维; 钇掺杂; 丙酮传感器

**中图分类号:** TP212 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.201511028

## 0 引言

近年来, ZnO 一直以其优良的电学、催化和光电性质而备受关注. 作为重要的 II-VI 族半导体材料, ZnO 已经被广泛研究. 将其应用于气敏传感器材料中, 它对多种还原性、氧化性气体具有良好的气敏响应, 比如对 CO、H<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub>、丙酮等. 然而, 基于 ZnO 的传感器也存在一些问题, 比如响应低, 工作温度高, 不能测试较低浓度气体等<sup>[1-3]</sup>.

掺杂杂质元素是改善材料电学等特性的方法之一<sup>[4]</sup>, 也是增强气敏特性的方法之一<sup>[5]</sup>, 例如 SAHAV 等制备的 Al 掺杂 ZnO 的 LPG(液化石油气)传感器, 在工作温度 300 ℃ 下, 响应增加了 1 ~ 2 个数量级<sup>[6]</sup>. NIU 等人利用 Fe、Co 和 Cr 来改善纯 ZnO 的气敏特性, 制备得到的 ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 对 Cl<sub>2</sub> 表现出较高的气敏响应和较好的选择性<sup>[7]</sup>. 此外, Y、Pd 等金属也被用来改善 ZnO 的气敏特性, 特别是掺入 Y 元素后, ZnO 的电学、化学以及气敏特性都有明显的变化<sup>[8-11]</sup>.

笔者通过静电纺丝法对 Y 掺杂的 ZnO 纳米纤维进行制备, 并对其气敏特性进行研究.

## 1 试验方案

实验中所有原材料都是分析纯. Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 和 Y(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O 分别提供 Zn 源及 Y 掺杂, 纯 ZnO 和 1% (原子比) 的 Y 掺杂浓度的 Y-ZnO 被同时制备. 将 1 g Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 与一定量的 Y(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O 溶于 4 mL DMF(N,N-Dimethylformamide) 与 5 mL 乙醇中, 磁力搅拌 1 h 得到澄清溶液. 然后将 1 g PVP(polyvinyl pyrrolidone) 加入以上溶液中, 将该混合物再进行磁力搅拌 12 h, 即得到静电纺丝的前驱液, 静电纺丝前将该前驱液在室温下静置老化 1 h, 如图 1 所示. 在 18 kV 高压下, 针头与铝箔接收板距离为 13.5 cm 进行静电纺丝, 用推进器控制注射器的进液速度为 0.2 mL/h, 得到纯 ZnO 或 1% Y 掺杂 ZnO 纤维的前驱物. 最后将前驱物置于马弗炉中, 在空气条件下 500 ℃ 焙烧 3 h 得到白色的纳米纤维材料.

图 2 为纯 ZnO 和 1% Y 掺杂 ZnO 的扫描电镜 (SEM) 照片. 生成的纯 ZnO 纳米纤维的直径约为 300 ~ 500 nm, 掺杂 1% Y 的 ZnO 直径为 200 nm 左右, 两种纳米纤维都由几十纳米的小颗粒组装而成. 整个纳米纤维呈现多级结构, 这样的结构有利

收稿日期: 2015-11-13; 修订日期: 2016-01-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61176068、61131004、61574025、61474012)

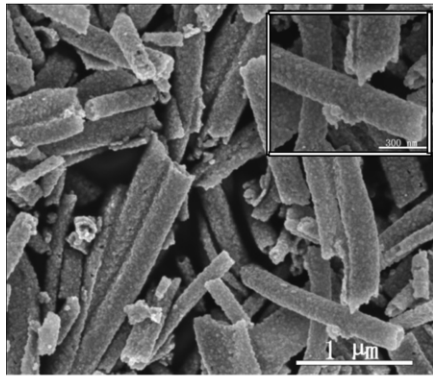
作者简介: 冯秋霞(1981—), 女, 山西大同人, 大连理工大学博士生, 主要从事气敏材料及气敏传感器的研究, E-mail: fengqiuxia@neusoft.edu.cn.

引用本文: 冯秋霞, 于鹏, 王兢, 等. 静电纺丝法制备钇掺杂的 ZnO 及其对丙酮的气敏特性研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 54-57.

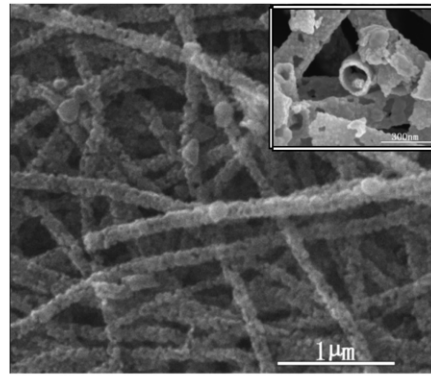


于增大敏感材料的比表面积,便于气体在材料中的扩散.图3为EDX图谱,可知所得的材料中含有 Zn、O 和 Y 元素,其中 Pt 是用来增强材料导电性.

用 X 射线衍射仪(XRD)表征纯 ZnO 和质量分数 1% Y 掺杂 ZnO 的晶体物相结构如图4所示. ZnO 的峰较强,基本看不到含 Y 的峰,可能与掺杂量较少有关<sup>[12-13]</sup>.通过 Scherrer 公式估算得到纯 ZnO 晶粒平均尺寸为 44 nm,含质量分数 1% Y 的 ZnO 平均粒径为 37 nm,可以看出 Y 的掺杂抑制了 ZnO 晶粒的生长.



(a) 纯 ZnO 的 SEM 图



(b) 1% 掺杂 ZnO 的 SEM 图

图2 纯 ZnO 和 1%Y 掺杂 ZnO 的 SEM 图及其放大图

Fig.2 SEM images of pure and 1% Y-doped ZnO nanofibers and their high-magnification images

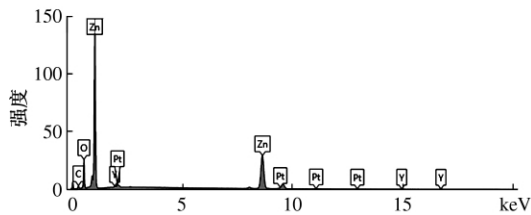


图3 1%Y 掺杂 ZnO 的 EDX 图

Fig.3 EDX spectra of 1% Y-doped ZnO nanofibers

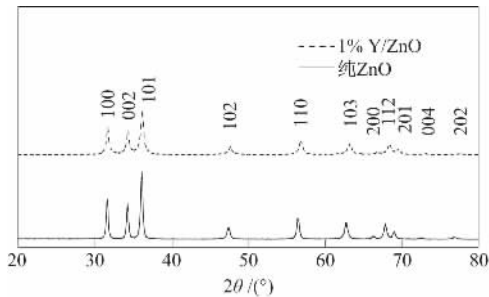


图4 纯 ZnO 与 1%Y 掺杂 ZnO 的 XRD 对比

Fig.4 XRD patterns comparison of pure ZnO nanofibers and 1% Y-doped ZnO nanofibers

## 2 传感器的制备与气敏特性测试

将制备好的 ZnO 或 Y 掺杂的 ZnO 纳米纤维

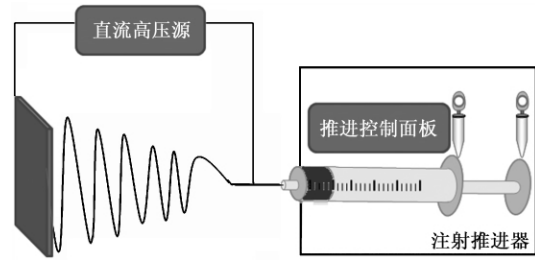


图1 Y 掺杂 ZnO 纳米纤维装置示意图

Fig.1 Schematic view of the setup for electrospinning of the Y-ZnO nanofibers

材料与去离子水混合均匀,均匀地涂抹在带有 2 个 Au 电极以及 Pt 引线的中空陶瓷管上,一根 Ni-Cr 加热丝可以穿过陶瓷管.将涂抹好的器件放在红外灯下干燥 5 min,然后在马弗炉中 300 °C 下焙烧 2 h,使电极与敏感材料充分接触.将加热丝的两端以及陶瓷管上的 4 个 Pt 电极引线焊接在六角底座上,制成气敏元件.将元件在 300 °C 下老化 7 d.笔者采用静态配气系统(50 L 配气箱)测试气敏元件的特性,按所需气体浓度计算出对应液体的体积,注入到测试箱内的加热丝上,液体挥发得到不同浓度的挥发性测试气体,测试数据的采集及响应计算由计算机自动控制.传感器的响应定义如公式(1)所示<sup>[14]</sup>.其中  $R_a$  为传感器在空气背景中的电阻,  $R_g$  为传感器在目标气体中的电阻.

$$S = \frac{R_a}{R_g} \quad (1)$$

图5显示了纯 ZnO 和质量分数 1% Y 掺杂的 ZnO 在不同温度下对  $100 \times 10^{-6}$  丙酮的响应对比,其中 1% Y 掺杂的 ZnO 纳米纤维传感器工作电阻较大为 50 MΩ 左右,而纯 ZnO 纳米纤维传感器的电阻为 3 MΩ 左右.这可能是由于 Y 的掺杂

增加了 Zn 等缺陷, Y/ZnO 禁带宽度随着 Y 的掺杂而增加<sup>[15]</sup>. 2 个样品起初都随着温度升高到 440 °C 达到了最大值响应, 随着温度进一步上升, 对丙酮的响应开始下降, 确定传感器的最佳工作温度为 440 °C. 这个过程与敏感气体在半导体传感器表面的吸附与脱吸附过程有关, 当温度较低时敏感材料的化学活性很低, 所以响应也低, 随着温度升高, 其响应逐渐增大, 当温度太高时, 吸附的气体分子在未与敏感材料作用前由于高温而脱离其表面, 导致响应下降<sup>[16-17]</sup>.

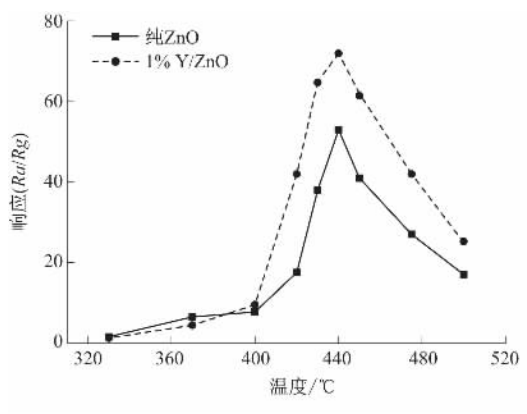


图 5 纯 ZnO 和 1%Y 掺杂的 ZnO 在不同温度下对  $100 \times 10^{-6}$  丙酮的响应

Fig. 5 Responses of pure and 1% Y-doped ZnO nanofibers to acetone of  $100 \times 10^{-6}$  at different temperatures

在 440 °C 下 1% Y 掺杂的 ZnO 对  $1 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$  丙酮的响应如图 6 所示. 传感器的响应时间大约为 14 ~ 40 s, 恢复时间为 20 ~ 55 s. 传感器表现出较高的响应, 比如对  $100 \times 10^{-6}$  丙酮响应达到 70 左右.

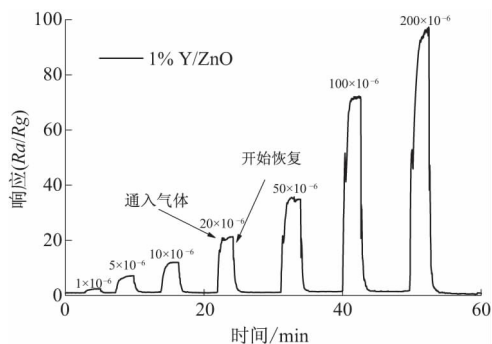


图 6 在 440 °C 下 1%Y 掺杂的 ZnO 纳米纤维传感器对  $1 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$  丙酮的响应

Fig. 6 Responses of 1% Y-doped ZnO nanofibers based sensor to acetone of  $1 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$  at 440 °C

选择性对于气敏传感器来说非常重要, 这里分别测试了 1% Y 掺杂的 ZnO 纳米纤维传感器对

体积浓度为  $20 \times 10^{-6}$  的乙醇、甲醇、甲苯、苯、氨水和丙酮的响应值, 测试结果如图 7 所示, 除乙醇外, 该传感器对丙酮的响应大概是其他气体的 4 倍以上, 是乙醇的 2 倍, 具有较好的选择性.

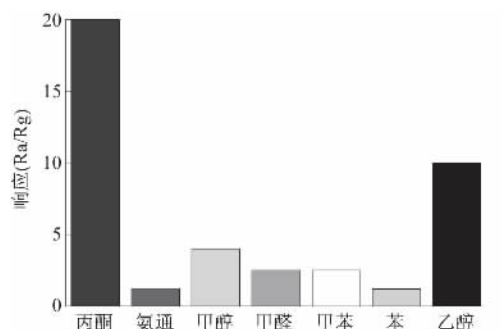


图 7 1%Y 掺杂 ZnO 对体积浓度为  $20 \times 10^{-6}$  不同气体的响应

Fig. 7 Responses of 1% Y-doped ZnO nanofibers to different gases of  $20 \times 10^{-6}$

根据以上测试结果可以看出, 传感器响应的提高与 Y 的掺杂关系密切, 作为催化剂, Y 促进了还原性气体丙酮失去电子催化氧化为  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ , Y 的掺杂带来了更多缺陷位, 成为响应过程中的反应活性位<sup>[18]</sup>, Y 掺杂的 ZnO 纳米纤维材料所具有的多级结构使得材料比表面积增大, 也是响应得以提升的有效因素. 在本实验中, 同时也注意到随着 Y 含量升高, Y 掺杂 ZnO 纳米纤维材料的气敏响应没有进一步增大(结果未列出), 还需要在今后的工作中进一步研究.

### 3 结论

通过静电纺丝法成功制备了纯 ZnO 以及质量分数为 1% Y 掺杂的 ZnO 纳米纤维, 并对其制备的传感器进行气敏特性的测试, 结果表明 Y 的掺杂增强了 ZnO 对  $1 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$  丙酮的响应, 同时传感器也对其他气体, 包括乙醇、氨气、甲醇、苯、甲苯、甲醛等有很好的选择性. 气敏特性的增强主要归因于 Y 的催化作用, 促进丙酮的催化氧化.

### 参考文献:

- [1] ZHANG Y, XU J Q, XIANG Q, et al. Brush-like hierarchical ZnO nanostructures: synthesis, photoluminescence and gas sensor properties [J]. Journal of physical chemistry C, 2009, 113(9): 3430-3435.
- [2] BAL A K, SINGH A, BEDI R K. Characterization and ammonia sensing properties of pure and modified ZnO films [J]. Applied physics A, 2010, 103(2): 497-503.

- [3] YOUN S K, RAMGIR N, WANG C Y, et al. Catalyst-free growth of ZnO nanowires based on topographical confinement and preferential chemisorption and their use for room temperature CO detection [J]. *Journal of physical chemistry C*, 2010, 114(22): 10092–10100.
- [4] 李洪涛,王彪,郅惠博. Y 掺杂  $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$  的高温电学性能[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2014, 35(4): 45–47.
- [5] YAMAZOE N. New approaches for improving semiconductor gas sensors [J]. *Sensors and actuators B*, 1991(5): 7–19.
- [6] SAHAY P P, NATH R K. Al-doped zinc oxide thin films for liquid petroleum gas (LPG) sensors [J]. *Sensors and actuators B: chemical*, 2008, 133(1): 222–227.
- [7] NIU X S, DU W P, DU W M. Preparation and gas sensing properties of  $\text{ZnM}_2\text{O}_4$  ( $M = \text{Fe}, \text{Co}, \text{Cr}$ ) [J]. *Sensors and actuators B: chemical*, 2004, 99(2/3): 405–409.
- [8] WEI S H, YU Y, ZHOU M H. CO gas sensing of Pd-doped ZnO nanofibers synthesized by electrospinning method [J]. *Materials letters*, 2010, 64(21): 2284–2286.
- [9] JIA T K, WANG W M, LONG F, et al. Synthesis, characterization and luminescence properties of Y-doped and Tb-doped ZnO nanocrystals [J]. *Materials science & engineering, B: advanced functional solid-state materials*, 2009, 162(3): 179–184.
- [10] KAUR R, SINGH A V, SEHRAWAT K, et al. Sol-gel derived yttrium doped ZnO nanostructures [J]. *Journal of non-crystalline solids*, 2006, 352(23/25): 2565–2568.
- [11] SON D H, KIM D H, KIM J H, et al. Effects of addition of Ta and Y ions to InZnO thin film transistors by sol-gel process [J]. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 2013, 13(6): 4211–4215.
- [12] ZHENG J H, SONG J L, JIANG Q, et al. Enhanced UV emission of Y-doped ZnO nanoparticles [J]. *Applied surface science*, 2012, 258(18): 6735–6738.
- [13] HEO S, SHARMA S K, LEE S, et al. Effects of Y contents on surface, structural, optical, and electrical properties for Y-doped ZnO thin films [J]. *Thin solid films*, 2014(558): 27–30.
- [14] YAO P J, WANG J, CHU W L, et al. Preparation and characterization of  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_3$  materials and their formaldehyde gas-sensing properties [J]. *Journal of materials science*, 2012, 48(1): 441–450.
- [15] WANG P, HE J F, GUO L X, et al. The electronic structures and optical properties of yttrium-doped zinc oxide with zinc interstitial defects calculated by first-principles [J]. *Materials science in semiconductor processing*, 2015(36): 36–42.
- [16] YAMAZOE N, FUCHIGAMI J, KISHIKAWA M, et al. Interactions of tin oxide surface with  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{H}_2$  [J]. *Surface science*, 1979, 86(2): 335–344.
- [17] GHASDI M, ALAMDARI H. CO sensitive nanocrystalline  $\text{LaCoO}_3$  perovskite sensor prepared by high energy ball milling [J]. *Sensors and actuators B: chemical*, 2010, 148(2): 478–485.
- [18] LIU L, LI S C, ZHUANG J, et al. Improved selective acetone sensing properties of Co-doped ZnO nanofibers by electrospinning [J]. *Sensors and actuators B: chemical*, 2011, 155(2): 782–788.

## Preparation and Acetone Sensitivities of Y-doped ZnO Nanofibers by Electrispinning

FENG Qiuxia<sup>1,2</sup>, YU Peng<sup>1</sup>, WANG Jing<sup>1</sup>, LI Xiaogan<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;

2. Department of Electronic Engineering, Dalian Neusoft University of Information, Dalian 116023, China)

**Abstract:** To improve the sensing properties of ZnO to acetone, Y-doped ZnO nanofibers have been successfully synthesized by an electrospinning method which used  $\text{PVP}/\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{Y}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  et al as the precursor. The samples of pure and Y-doped ZnO nanofibers were characterized by XRD, SEM et. The resistive-type gas sensors were fabricated using the as-prepared pure and Y-doped ZnO nanofibers. Sensing properties of the sensors were investigated. The results obtained have shown that the sensing properties of ZnO nanofibers to acetone were effectively improved by Y doping. At 440 °C, the sensors based on Y-doped ZnO showed high response to acetone of  $1-200 \times 10^{-6}$  with response time of 14–40 s and recovery time of 20–55 s. The response to acetone of  $100 \times 10^{-6}$  can reach to as high as 70 ( $S = R_a/R_g$ ). It also showed good selectivity to several potential interferent gases such as ethanol, ammonia, benzene, formaldehyde, toluene, and methanol. The sensing mechanism was briefly discussed.

**Key words:** electrospinning; ZnO nanofibers; Y dopant; acetone sensor



文章编号: 1671-6833(2016)02-0058-04

# 基于物联网的声表面波传感器阵列检测系统研究

刘鑫璐<sup>1</sup>, 王文<sup>1</sup>, 潘勇<sup>2</sup>, 邵晟宇<sup>2</sup>, 穆宁<sup>2</sup>

(1. 中国科学院声学研究所, 北京 100190; 2. 防化研究院, 北京 102205)

**摘要:** 针对目前日益突出的公共安全和生产安全问题的突发性和不确定性, 提出了将声表面波传感器阵列与物联网技术相结合的毒害气体检测系统, 并给出了毒害气体检测系统的设计方案, 分别从物联网技术和声表面波技术两方面验证了系统的可行性, 该系统采用了 ZigBee 通信技术和 GPS 定位手段, 利用涂覆不同敏感膜的 4 通道声表面波传感器阵列及相应的数据处理算法, 实现了对  $H_2S$ 、 $SO_2$  等毒害气体的检测和报警, 组建了成熟的便于定位的传感器网络, 系统经过实验验证达到了预期的设计目标。

**关键词:** 声表面波; 物联网; 气体传感器阵列; ZigBee; GPS

**中图分类号:** TB52 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.201512003

## 0 引言

随着全球工业化步伐不断加快, 日益扩大的工业生产产生的各种各样的毒害气体对人类的危害也愈加严重. 特别是毒害气体的生产、运输和使用中存在较大的突发性和不确定性危险, 威胁着生产者和居民的人身安全. 此外随着人类健康和安全意识的不断提高, 人们开始对室内外空气质量, 车内空气污染等公共领域的安全越发关注, 迫切需要能够监测、预警、应对公共和生产安全事件的科技手段<sup>[1]</sup>.

近些年便携式的气体传感设备不断发展, 技术手段也各有特点, 其中声表面波传感技术以其灵敏度高、成本低、体积小等优点在气体传感领域发展较为成熟, 同时结合目前广泛应用的物联网技术, 研究设计基于物联网的声表面波传感器阵列毒害气体检测系统, 实现具有定位、采集、报警功能的在线检测网络, 在生产和公共安全领域具有较大的应用和市场前景.

## 1 物联网相关技术

ZigBee 技术作为物联网中主要通信基础, 是一种低复杂度、低功耗、低速率、低成本、网络容量大、节点体积小的双向无线通讯技术, 凡是具有上

述特征或要求的场合都可应用. 随着物联网行业的快速发展, 对 ZigBee 技术的探索也越来越深入, 特别是根据 ZigBee 网络的特点, 发展出采用 ZigBee 的室内区域定位技术更是开拓了 ZigBee 的应用领域. ZigBee 目前已经广泛的应用到工业过程控制、设备遥感遥控、智能交通系统和医疗与健康监护等多个领域<sup>[2]</sup>.

随着 ZigBee 协议框架的发展, 目前在 470 MHz 和 2.4 GHz 频段上拓展了 ZigBee 的应用条件, 特别是在 470 MHz 频段上, 有效传输距离可以到的 1 200 m, 这对于 ZigBee 在户外环境的应用具有重要意义<sup>[3]</sup>.

此外物联网技术中的重要组成部分, 全球定位系统 GPS 以其具有的全天候、高精度和自动测量的特点, 作为先进的测量手段和新的生产力, 已经融入了国民经济建设和社会发展等各个应用领域<sup>[4-5]</sup>.

## 2 声表面波气体传感技术

声表面波(SAW)气体传感器是 Wohltjen 于 1979 年提出来的<sup>[6]</sup>, 其基本结构原理如图 1.

在一块压电基片上使用半导体工艺制作 2 个叉指换能器, 分别为发射换能器和接收换能器, 还有两个反射栅分别在叉指换能器两侧, 形成双端

收稿日期: 2015-12-01; 修订日期: 2016-01-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11374254、11274340)

作者简介: 刘鑫璐(1987—), 中国科学院助理研究员, 从事声表面波传感器系统应用研究.

引用本文: 刘鑫璐, 王文, 潘勇, 等. 基于物联网的声表面波传感器阵列检测系统研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 58-61.

对声表面波谐振器,通过放大器的正反馈构成振荡回路,并将产生的频率信号输出<sup>[7]</sup>.

由于声表面波器件本身对气体并不会产生敏感作用,需要在声表面波器件的两个叉指换能器之间涂覆具有气体选择性的聚合物薄膜涂层,通过这种聚合物涂层对待测气体的吸附作用,引起器件中声表面波传播速度变化,最终体现为声表面波振荡器的输出频率变化,以此来实现在对于气体的检测<sup>[8-9]</sup>.

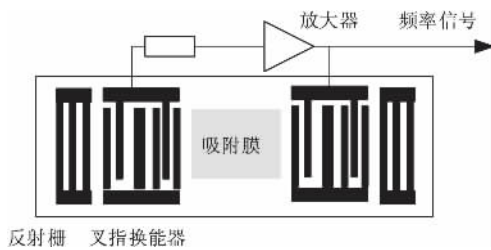


图 1 声表面波气体传感器原理图

Fig. 1 Diagram of the surface acoustic wave gas sensor

随着传感技术的发展,单个气体传感器的应用具有一定局限性,不能满足复杂环境下的气体检测,为了摒除检测的局限性,发展起来的采用模式识别等数据处理方法的传感器阵列形式逐渐成熟,并成为解决复杂环境下气体检测的趋势.

### 3 系统设计

#### 3.1 系统架构

系统将物联网技术中的 ZigBee 和 GPS 与声表面波气体传感器阵列结合,构建由主控中心和传感器终端组成的实时在线监测传感器网络,其系统结构如图 2 所示.

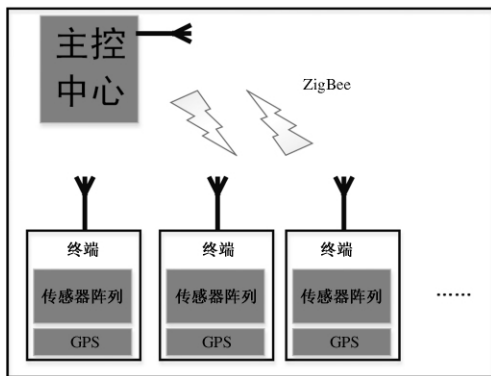


图 2 系统架构图

Fig. 2 Diagram of system structure

在系统的主控中心中,主要完成对传感器终端的命令连接、传感器数据获取;对所有连接到主控中心的传感器终端进行实时监控,包括对各个

传感器终端的位置信息定位,传感器采集数据显示和检测结果报警.

在系统的传感器终端中,首先完成声表面波气体传感器的制备,然后采用振荡电路的形式产生传感器信号.利用处理器实现对传感器数据采集,以及包括数据预处理,数据处理方法的建立,气体识别等功能.即传感器终端可以脱离主控中心独立运行,集成的数据处理算法可以进行被测气体的识别,进行实时的被测物判别,并对超限浓度的被测气体进行报警.当主控中心请求连接时,终端附加定位信息,通过通信部分与系统主控中心进行数据交换.

#### 3.2 主要功能设计

(1) 声表面波气体传感器的制备.目前系统主要应用于环境气体的检测,大气中毒害气体主要是  $\text{SO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{NO}_2$  等以及工业生产中遇到的  $\text{NH}_3$ ,故选择的气体敏感膜材料为 TEA、PECH、谷氨酸盐酸盐和 BSP.

表 1 中列出了敏感膜材料与其敏感气体的对应关系.

表 1 敏感膜材料与被测气体对应关系

Tab. 1 Corresponding relationship between sensitive materials and unknown gas

敏感膜材料	BSP	谷氨酸盐酸盐	PECH	TEA
敏感气体	$\text{NO}_2$	$\text{NH}_3$	$\text{SO}_2$	$\text{H}_2\text{S}$

利用 4 种敏感膜材料进行声表面波气体传感器的制备.为保证制备的传感器具有良好的性能一致性,通常采用膜材料旋涂的方式制做,即是将制作完成的声表面波器件晶元整体旋转抛洒涂覆,这样得到的传感器敏感膜厚度均匀,传感器器件性能一致性好,便于传感器更新替换.

(2) 声表面波气体传感器终端硬件设计.传感器终端电路的构成原理图如图 3.

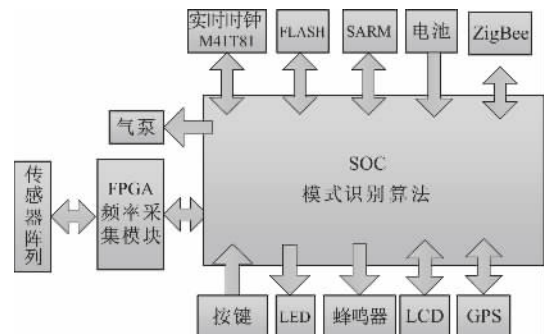


图 3 传感器终端结构框图

Fig. 3 Diagram of sensor devices

传感器阵列是利用放大器和移向网络构建 5

路声表面波气体传感器振荡电路,其中4路为声表面波气体传感器,另1路为未涂覆敏感膜的空白声表面波器件,其作用是对传感器系统进行温度补偿,结构框图如图4.

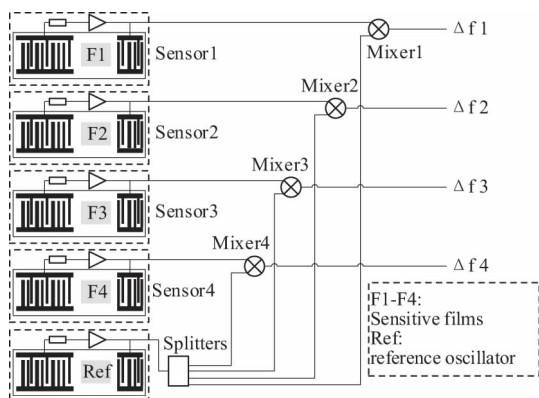


图4 传感器阵列结构图

Fig. 4 Diagram of sensor array

通过FPGA采集传感器阵列的信号并发送到SoC, SoC通过内部分数据处理算法对数据进行预处理、算法验证、判定完成对被测气体的识别,并根据设定的报警阈值进行报警.

当传感器终端收到主控中心的数据请求时,终端整合采集到的传感器数据和定位信息,上传到主控中心.

#### 4 系统实现

系统中的声表面波气体传感器采用300 MHz的谐振器形式设计,涂覆TEA、PECH、谷氨酸盐酸盐和BSP4种敏感膜,采用有源振荡器的电路结构,通过嵌入式处理器将传感器阵列的响应数据进行实时采集、处理和分析,并与主控中心进行通信.传感器终端经过集成采用内部自带的气泵进

行气体采集. 控制中心由带有ZigBee通信主节点的笔记本电脑及相应上位机软件构成. 系统整体实现如图5.



图5 系统实物图

Fig. 5 Diagram of system

(1) 系统定位与通信测试. 系统中的传感器终端可独立运行监测,也可由一个控制中心对5台传感器终端进行控制,获取相应的传感器数据和位置信息.

系统在室外进行了ZigBee无线通信与GPS定位的功能验证,主控中心上对传感器终端的定位情况如下图6,其中所有地图为谷歌离线地图. 由上可见,系统完全实现了控制中心对传感器终端的控制和传感器终端定位信息的上传.

(2) 系统气体实验测试. 在实验室条件下,对5台传感器终端分别进行 $\text{SO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{NH}_3$ 气体的检测,气体浓度均为系统预期检出下限5 mg/L,将每个传感器实时采集的频率结果汇总如下图7. 表2中汇总了5台传感器终端对4种被测气体的响应值以及报警情况.

由此可见声表面波气体传感器可对低浓度的被测毒害气体有迅速而明显的频率响应,传感器系统具有较低的检出限,具有较强的实际应用价值.

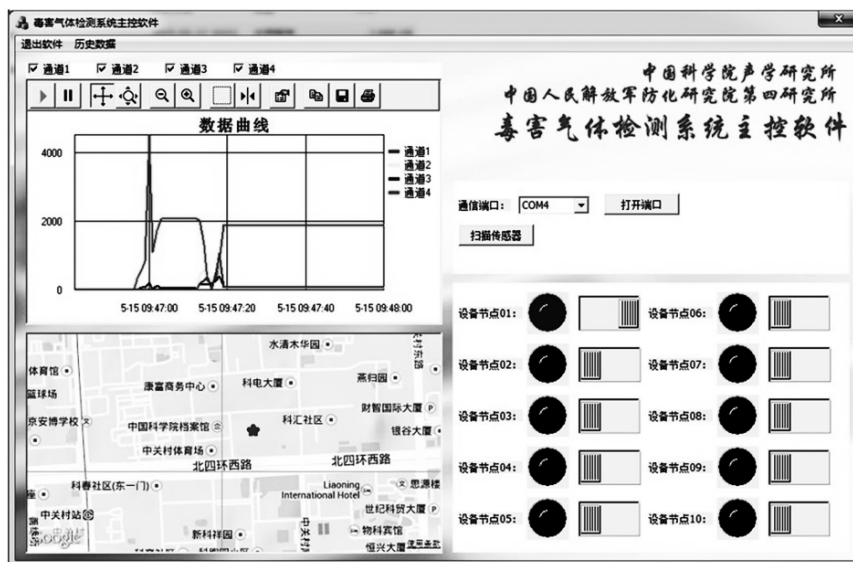


图6 控制中心定位信息显示图

Fig. 6 Diagram of location information on the control center

表2 传感器终端的气体响应列表

Tab.2 List of gas response from the sensor terminal

终端气体	1#	2#	3#	4#	5#
H <sub>2</sub> S	286 Hz	283 Hz	378 Hz	276 Hz	297 Hz
SO <sub>2</sub>	196 Hz	177 Hz	245 Hz	165 Hz	185 Hz
NH <sub>3</sub>	605 Hz	643 Hz	718 Hz	593 Hz	636 Hz
NO <sub>2</sub>	868 Hz	834 Hz	905 Hz	815 Hz	850 Hz
检测结果	报警	报警	报警	报警	报警

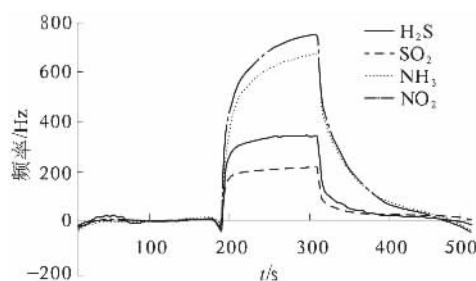


图7 传感器响应结果

Fig.7 Result of sensor response

## 5 结论

采用物联网技术的声表面波传感器阵列毒害气体检测系统的设计与实现不仅使得声表面波气体传感器技术的应用领域得到了拓宽,也填补了物联网在复杂环境气体检测领域的空白,系统的试制成功对公共安全和生产安全领域环境在线实时检测具有重大意义。

## 参考文献:

[1] 施文.有毒有害气体检测仪器原理和应用[M].北

京:化学工业出版社,2009:1.

- [2] 刘涛涛.基于 ZigBee 技术的设备状态监测与故障诊断系统设计[D].中北大学机械工程与自动化学学院,2014.
- [3] 高福友.无线网络前端设备社区安防系统研究[J].郑州大学学报(工学版),2011,32(4):120-124.
- [4] 孙玉胜.浅析山区静态 GPS 控制网高程拟合问题[J].新疆有色金属,2011,34(5):23-24.
- [5] 牟乃夏,钟士金,王复明,等. GPS 控制点在公路电子地图中的应用[J].郑州工业大学学报(自然科学版),2001,22(2):89-91.
- [6] 邹小红,郭成海,史瑞雪.声表面波气体传感器的设计[J].化学传感器,2000,20(3):6-11.
- [7] 肖鸣山,宋道仁.声表面波器件基础[M].山东科学技术出版社,1980:1.
- [8] 骆国芳,吕晖,曹丙庆,等.声表面波气体传感器化学敏感膜研究进展[J].分析仪器,2007(3):1-5.
- [9] 杨楷,李志刚,景玉鹏,等.声表面波气体传感器的研究进展[J].电子元件与材料,2008,27(9):26-30.

## Design of the Poison Gas Detection System with IOP and Surface Acoustic Wave Sensor Array

LIU Xinlu<sup>1</sup>, WANG Wen<sup>1</sup>, PAN Yong<sup>2</sup>, SHAO Shengyu<sup>2</sup>, MU Ning<sup>2</sup>

(1. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Research Institute of Chemical Defense, Beijing 102205, China)

**Abstract:** In view of the increasingly prominent problem of sudden and uncertainty of the public security and production safety, toxic gas detection system with surface acoustic wave sensor array and Internet of things technology is proposed in this paper. It presents a design scheme of toxic gas detection system, and verifies the feasibility of the system respectively from the Internet of things technology and acoustic surface wave technology. The system realizes gas detection and alarm by using ZigBee, GPS, and the different sensitive coating film 4 channel surface acoustic wave sensor array and the corresponding data processing algorithm and so on. It has formed a mature facilitate localization of sensor network. Through the experiment the system achieves the expected goal.

**Key words:** surface acoustic wave; the Internet of things; gas sensor array; ZigBee; GPS

文章编号: 1671-6833(2016)02-0062-05

# 人工冻融软弱土融沉特性研究

庄惠敏, 杨平, 何文龙

(南京林业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210037)

**摘要:** 随着人工冻结法在地铁建设中的广泛应用, 控制工后融沉已成为软弱地层冻结需要解决的难题. 以苏州地铁典型软弱土层为研究对象, 通过室内试验研究, 得出不同补水条件下原状土开放融沉系数大于封闭融沉系数; 融前卸载加压方式下, 融沉系数随上部荷载增大呈指数型减小; 无黏性重塑土融沉系数与原状土接近, 黏性土重塑后融沉系数变大, 其差值随该土灵敏度增大而增大; 对于非饱和黏土和淤泥质粉质黏土, 开放冻融条件下融沉系数与干密度变化关系均存在临界干密度, 对应土体融沉系数最小.

**关键词:** 人工冻土; 融沉系数; 补水条件; 荷载; 干密度

**中图分类号:** TU445

**文献标志码:** A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.201506022

## 0 引言

软弱地层地铁建设中, 联络通道施工常需进行地层加固, 加固方法有旋喷桩、深层搅拌桩、人工冻结法等, 其中人工冻结法在软土地层中加固效果显著<sup>[1-5]</sup>. 冻结法形成的冻结壁强度高, 可有效隔绝地下水对施工的影响, 但冻结易使地层产生冻胀融沉现象, 引起联络通道和隧道主线的不均匀沉降, 从而使隧道产生弯曲变形、接缝错开, 发生漏水漏泥现象, 最终造成邻近建筑物倾斜和开裂、地下管线破坏等危害<sup>[6-8]</sup>. 如南京地铁四号线穿越的淤泥质粉质黏土补水条件下的融沉系数可达 16.08%<sup>[9]</sup>, 故对于这种软弱土层, 冻结法施工后的融沉控制尤为重要.

地处长三角的苏州地区土层较为软弱, 因此在地铁联络通道建设中常使用冻结法加固土层. 目前, 对多次冻融循环条件下的人工冻土研究较多, 主要分析了冻融特性<sup>[10]</sup>、渗透特性<sup>[11]</sup>等与冻融次数之间的关系; 对单次冻融, 主要研究了不同因素对人工冻土的抗压强度<sup>[12]</sup>、抗剪强度<sup>[13]</sup>等物理力学特性以及动力特性<sup>[14]</sup>的影响, 而不同因素对冻土的融沉特性影响研究甚少. 因此, 针对不同补水条件、不同荷载条件, 取苏州地铁典型土层

原状土进行融沉特性研究, 并配制不同干密度的重塑土, 从理论上研究分析干密度与融沉系数之间的关系, 以更好地对冻结法施工后的融沉进行控制.

## 1 试验研究内容及方法

### 1.1 研究内容

以苏州地铁典型软弱土层③黏土、④<sub>1</sub>粉土、④<sub>2</sub>粉砂、⑤淤泥质粉质黏土(取自苏州轨道交通一号线滨河路站)为研究对象, 对各土层原状土进行不同补水条件(开放和封闭系统)、不同荷载条件下的融沉特性研究; 对原状土和重塑土相同含水率、相同干密度以及相同冻融条件下的融沉系数进行对比研究; 对重塑土进行不同干密度对其融沉系数的影响规律研究; 并从理论上分析其规律变化的内在机理.

### 1.2 试验方法

试验用土的基本物理参数见表 1. 其中, 试样尺寸  $\phi 80 \text{ mm} \times H 50 \text{ mm}$ , 试验仪器采用南京林业大学研制的冻胀融沉仪, 示意图如图 1. 试验前先将土样放在  $1^\circ\text{C}$  恒温环境下恒温处理 6 h, 具体根据 GB/T50123—1999《土工试验方法标准》进行不同条件下的冻胀融沉试验<sup>[15]</sup>.

收稿日期: 2015-06-11; 修订日期: 2015-08-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478226); 江苏省高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 庄惠敏(1989—), 女, 江苏徐州人, 南京林业大学硕士研究生, 研究方向: 环境岩土与地下工程, E-mail: 15295575668@163.com.

通讯作者: 杨平(1964—), 男, 南京林业大学教授, 博士生导师, 主要从事岩土与地下工程教学与研究, E-mail: yangping@njfu.edu.cn.

引用本文: 庄惠敏, 杨平, 何文龙. 人工冻融软弱土融沉特性研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 62-66.

表 1 试验土样基本物理参数  
Tab. 1 Physical indexes of the soil

土质	深度 $h/\text{m}$	含水率 $\omega/\%$	密度 $\rho$ $/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	干密度 $\rho_d$ $/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	塑性指数 $I_p$	液性指数 $I_L$	灵敏度系数 $S_t$
③黏土	2.6 ~ 8.7	30.1	1.91	1.468	13.80	0.71	1.9
④ <sub>1</sub> 粉土	5.3 ~ 8.0	28.9	1.93	1.497	8.33	1.35	—
④ <sub>2</sub> 粉砂	7.8 ~ 10.4	25.0	1.96	1.568	—	—	—
⑤淤泥质粉质黏土	7.3 ~ 18.4	33.7	1.90	1.421	12.40	0.99	3.4

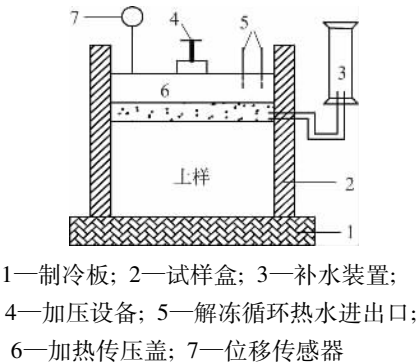


图 1 冻胀融沉仪示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of the frozen and thaw instrument

补水条件为封闭系统(冻结时不补水)和开放系统(冻结时补水),当试样中开始出现冻结锋

面时进行第一次补水,随后持续单向补水;荷载条件为加载和无载,加载时采用融前卸载方式,通过固结仪改装的杠杆式加压系统对土体进行加压;冻结冷端温度均为  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 试样冻结完成后,关掉制冷板电源,启动  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  热水循环系统进行解冻.

2 融沉特性试验结果与分析

融沉系数计算公式如下:

$$\alpha_0 = \frac{\Delta h_0}{h_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $\alpha_0$  为冻土融沉系数,%;  $\Delta h_0$  为冻土融化下沉量,mm;  $h_0$  为冻土初始高度,mm.

各土层原状土不同条件下的融沉系数结果见表 2.

表 2 原状土不同条件下的融沉系数  
Tab. 2 The thaw settlement of soil in different conditions

土层	补水条件	加载/kPa	融沉系数 $\alpha_0/\%$	土层	补水条件	加载/kPa	融沉系数 $\alpha_0/\%$
③黏土	封闭系统	无	9.15	④ <sub>2</sub> 粉砂	封闭系统	无	3.49
		无	14.00			无	5.01
		25	10.83			50	4.83
	开放系统	50	5.12		开放系统	100	3.26
		100	5.24			160	2.50
		160	3.19			240	1.68
		240	1.72			320	0.65
④ <sub>1</sub> 粉土	封闭系统	无	10.70	⑤淤泥质粉质黏土	封闭系统	无	11.24
		无	15.00			无	14.96
		50	8.83			50	6.54
	开放系统	100	5.20		开放系统	100	5.70
		160	3.11			160	4.92
		240	2.63			320	2.34
		320	2.05			400	0.78

2.1 原状土不同补水条件下的融沉特性

对无荷载作用相同含水率的各土层原状土进行封闭和开放系统条件下单向冻胀融沉试验,其融沉系数比较见图 2.

由图 2 可见,黏土、粉土、粉砂和淤泥质粉质黏土开放融沉系数均大于封闭融沉系数,增长量

分别为 4.85%、4.30%、1.52% 和 3.72%,其增长量排序为黏土 > 粉土 > 淤泥质粉质黏土 > 粉砂.

土体冻胀是由于土中的水冻结成冰体积增大,土中水分包括孔隙水和冻结时的水分迁移,孔隙水冻结成冰,自身体积增大 9%,水分迁移聚集在冻结锋面处,形成冰透镜体,使体积增大 1.09



倍. 因此, 在初始含水率相同的条件下, 开放系统中有水源不断补给, 水分增加且迁移作用大, 使土样产生较大冻胀, 从而产生较大融沉. 同时, 在相近含水率条件下粉砂融沉系数小于其他土层. 原因是砂土颗粒大, 颗粒间黏聚力小, 土中孔隙水毛细作用弱, 导致水分迁移动力小, 致使砂土补水冻胀不明显; 而粉土和黏性土中颗粒较细, 冻结过程中已冻区对土中未冻水有较强的吸附力, 使得水分积聚冻结, 体积膨胀增大. 由此可知, 对软弱土层进行加固时可用砂土换填, 在砂土层使用人工冻结法加固, 效果明显.

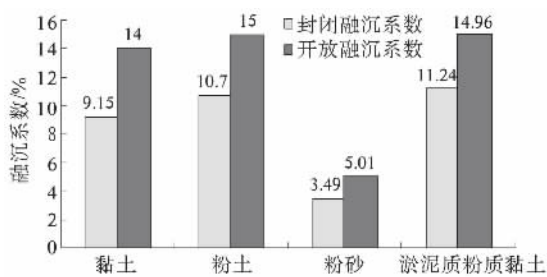


图2 各原状土层不同补水条件下融沉系数比较

Fig. 2 The thaw settlement coefficient of soil with water supply or not

## 2.2 原状土不同荷载条件下的融沉特性

人工冻结法施工地层上方已有荷载会对工后的融沉特性造成影响, 为此研究了融沉系数与上部荷载关系, 如图3所示. 其中补水条件均为开放系统.

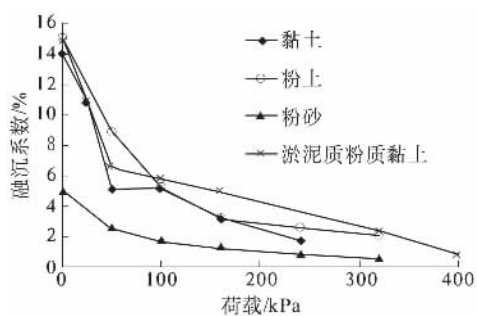


图3 融沉系数与上部荷载关系曲线

Fig. 3 The relationship between thaw settlement coefficient and upper load

由图3可见, 对于苏州典型的4种土层, 其融沉系数均随荷载的增大而减小, 经回归, 得减小规律呈指数型变化, 具体关系式如表3所示. 且上部荷载小于100 kPa时融沉系数随荷载变化较大, 大于100 kPa之后变化减小, 说明初期荷载对土体融沉影响较大.

究其原因主要为: ①随着外部附加压力的增

加, 土颗粒间接触应力变大, 土中水分相态转换受到影响, 使冻土中未冻水含量增加, 参与冻胀的水分减少, 因而冻土整体冻胀融沉作用减弱; ②外部荷载作用引起土内水分重分布, 未冻土中水分向冻结锋面的迁移量减小, 从而减小了冻胀, 同时土体融化下沉时进行卸载, 致使融沉系数减小; ③单向冻结自下而上, 荷载作用自上而下, 温度梯度引起的水分迁移与应力梯度引起的水分迁移部分抵消, 使上部荷载增大时冻胀量减小, 相应的融沉系数随之减小.

表3 不同土层融沉系数与上部荷载关系式

Tab. 3 The relationship between thaw settlement coefficient and upper load

土层	关系式	相关系数 $R$
③黏土	$\alpha_0 = 11.612e^{-0.008p}$	0.924
④ <sub>1</sub> 粉土	$\alpha_0 = 11.523e^{-0.006p}$	0.909
④ <sub>2</sub> 粉砂	$\alpha_0 = 8.298e^{-0.008p}$	0.964
⑤淤泥质粉质黏土	$\alpha_0 = 11.991e^{-0.006p}$	0.932

由以上规律可知, 采用人工冻结法施工时, 对施工部位上方进行冻结时加压、融化时卸压的方式处理, 可有效控制冻结法施工后的融沉.

## 2.3 原状土与重塑土融沉特性对比

对苏州地铁典型土层原状土与重塑土进行融沉特性对比试验, 各土层相同含水率、干密度条件下的原状土与重塑土融沉系数对比见表4, 补水条件均为开放系统.

表4 各土层原状土与重塑土融沉系数

Tab. 4 The thaw settlement coefficient contrast of undisturbed and remolded soil

土层	重塑条件	含水率 $\omega / \%$	干密度 $\rho_d / (g \cdot cm^{-3})$	融沉系数 $\alpha_0 / \%$
③黏土	原状	30.1	1.468	14.00
	重塑	30.1	1.470	15.26
④ <sub>1</sub> 粉土	原状	28.9	1.497	15.00
	重塑	29.0	1.500	15.11
④ <sub>2</sub> 粉砂	原状	25.0	1.568	5.01
	重塑	25.0	1.560	5.03
⑤淤泥质粉质黏土	原状	33.7	1.421	14.96
	重塑	33.0	1.420	18.32

由表4可知, 无黏性土层粉土和粉砂相同条件下原状土融沉系数与重塑土融沉系数非常接近; 而黏土和淤泥质粉质黏土重塑后产生了较大变化, 且原状土融沉系数均小于重塑土融沉系数, 黏土和淤泥质粉质黏土重塑土融沉系数分别为原状土的1.09倍和1.22倍.

究其原因,粉土和粉砂土颗粒大,砂粒间缺少黏聚力,因而重塑后不会造成结构性的破坏影响;而天然黏性土中土颗粒与孔隙的形状和排列是有序的,颗粒之间存在黏结力,即黏性土有着很强的结构性,重塑后土体结构遭到破坏,其融沉特性受到影响.另外,从灵敏度的角度分析,土体灵敏度反应土体强度因结构破坏而降低的程度,灵敏度越高,土颗粒间胶结稳定性越强,则重塑后土体结构受到破坏越严重.淤泥质粉质黏土灵敏度3.4,大于黏土的1.9,相应淤泥质粉质黏土的融沉系数变化也大,说明灵敏度越高,对土体融沉特性影响越大.

因此,对于无黏性土和灵敏度较小的黏性土,重塑后对其融沉系数影响不大,可用重塑土代替原状土来研究其融沉特性.

#### 2.4 不同干密度对融沉特性的影响研究

土体加固在最佳干密度时压实效果最好,据此可对软弱地层进行有效加固,同时,干密度也是影响土体融沉特性的重要因素,对苏州地铁黏土和淤泥质粉质黏土进行了不同干密度的融沉试验.补水条件均为开放系统,冻结冷端温度为 $-10^{\circ}\text{C}$ ,试验条件和结果见表5.

表5 不同干密度重塑土融沉系数  
Tab.5 The thaw settlement coefficient of different dry density

土层	含水率 $\omega/\%$	干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	融沉系数 $\alpha_0/\%$
③黏土	23	1.40	11.43
	23	1.42	10.50
	23	1.44	10.00
	23	1.46	9.94
	23	1.48	10.26
	23	1.50	10.81
⑤淤泥质粉质黏土	25	1.40	13.94
	25	1.42	12.81
	25	1.44	12.78
	25	1.46	13.36
	25	1.48	13.85
	25	1.50	14.00

图4为融沉系数与干密度关系曲线.由图4可见,相同含水率条件下,两种土质的融沉系数与干密度关系曲线类似,均存在一个临界干密度,其对应最小融沉系数.当干密度 $<$ 临界干密度时,随干密度增大,融沉系数减小;相反,随干密度增大,

融沉系数增大.

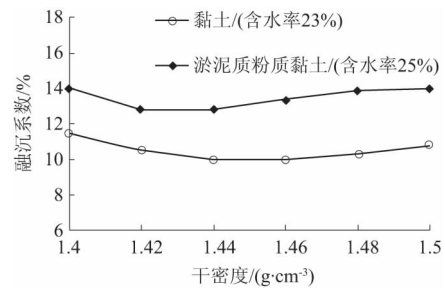


图4 融沉系数与干密度关系曲线

Fig.4 The relationship between thaw settlement coefficient and dry density

究其原因,当干密度小于临界干密度时,土中孔隙率较大,又因为黏性土冻结时水分迁移作用显著,使其冻胀量增大,随后土体融化不仅包括自由水排出引起的下沉,还包括土体自重应力引起的下沉,因此干密度较小时,干密度越小融沉系数越大.当干密度大于临界干密度时,孔隙率变小,因自重应力引起的下沉不再明显;从土体热传导能力的角度,干密度越大,土体热容量越大,热传导能力减弱,使非饱和冻土降温减慢<sup>[16]</sup>.由此可以解释,在补水条件下冻结时,干密度越大,土体冻结降温越慢,冻结锋面移动越慢,因此水分迁移增多,冰透镜体体积增大,且非饱和冻土孔隙水冻结成冰也增多,使得土体体积膨胀增大,最终造成冻胀率及融沉系数增大.

临界干密度与土质、含水率等冻结融化条件有关,随以上条件变化而变化.对苏州黏土和淤泥质粉质黏土不同干密度条件下的融沉试验数据进行回归,得融沉系数与干密度关系如下.

黏土:  $\alpha_0 = 476.79\rho_d^2 - 1388.2\rho_d + 1020.4$ . (2)

淤泥质粉质黏土:

$\alpha_0 = 378.57\rho_d^2 - 1092.1\rho_d + 800.68$ . (3)

适用范围:  $1.4\text{ g/cm}^3 < \rho_d < 1.5\text{ g/cm}^3$ .

通过上式求得,黏土和淤泥质粉质黏土的临界干密度分别为  $1.456\text{ g/cm}^3$  和  $1.442\text{ g/cm}^3$ .

### 3 结论

(1) 各土层单向冻胀融沉的开放系统融沉系数均大于封闭系统,③黏土、④<sub>1</sub>粉土、④<sub>2</sub>粉砂和⑤淤泥质粉质黏土开放系统较封闭系统的融沉系数增长量分别为4.85%、4.30%、1.52%和3.72%.

(2) 融前卸载加压方式下,土体融沉系数随上部荷载增大呈指数型减小,且荷载小于100 kPa时对土体融沉特性影响较大.



(3) 原状土与重塑土对比试验结果表明,无黏性重塑土融沉系数与原状土接近,黏性土灵敏度大小直接影响重塑后融沉系数的变化,灵敏度越高,对土体融沉特性影响越大;对于无黏性土和灵敏度较小的黏性土,重塑后对其融沉系数影响不大,可用重塑土代替原状土进行融沉试验。

(4) 对于非饱和黏土和淤泥质粉质黏土,开放系统补水条件下融沉系数与干密度变化关系均存在临界干密度,其值大小分别为  $1.456 \text{ g/cm}^3$  和  $1.442 \text{ g/cm}^3$ 。

### 参考文献:

- [1] 秦爱芳,李永和. 人工土层冻结法加固在盾构出洞施工中的应用[J]. 岩土力学,2004,25(S2): 449-452.
- [2] 杨平,余才高,董朝文,等. 人工冻结法在南京地铁张府园车站的应用[J]. 岩土力学,2003,24(S2): 388-391.
- [3] KONRAD J M. Prediction of freezing-induced movements for an underground construction project in Japan[J]. Canadian geotechnical journal, 2002, 39(6): 1231-1242.
- [4] 方江华,张志红,张静钰,等. 人工冻结法在上海轨道交通四号线修复工程中的应用[J]. 土木工程学报,2009,42(8): 124-127.
- [5] 张婷,杨平. 人工冻结法在地铁建设中的应用与发展[J]. 森林工程,2012,28(6): 74-78.
- [6] LI G Y, YU Q H, MA W, et al. Laboratory testing on heat transfer of frozen soil blocks used as backfills of pile foundation in permafrost along Qinghai-Tibet electrical transmission line[J]. Arabian journal of geosciences, 2015, 8(5): 2527-2535.
- [7] 岳丰田,张水宾,李文勇,等. 地铁联络通道冻结加固融沉注浆研究[J]. 岩土力学,2008,29(8): 283-286.
- [8] 李述训,南卓铜. 冻融作用对系统与环境间能量交换的影响[J]. 冰川冻土,2002,24(2): 109-115.
- [9] 孙谷雨. 南京地区典型土层人工冻土物理力学性能研究[D]. 南京: 南京林业大学土木工程学院,2013.
- [10] 梁波,张贵生,刘德仁. 冻融循环条件下土的融沉性质试验研究[J]. 岩土工程学报,2006,28(4): 1213-1217.
- [11] FOULI Y, CADE-MENUN B J, CUTFORTH H W. Freeze-thaw cycles and soil water content effects on infiltration rate of three Saskatchewan soils[J]. Canadian journal of soil science, 2013, 93(4): 484-496.
- [12] 贺俊,杨平,何文龙,等. 苏州地铁典型土层冻土力学特性研究[J]. 水文地质工程地质,2010,37(5): 72-76.
- [13] 马玲,齐吉琳,余帆,等. 冻结砂土三轴试验中颗粒破碎研究[J]. 岩土工程学报,2015,37(3): 544-550.
- [14] HE P P, CUI Z D. Dynamic response of a thawing soil around the tunnel under the vibration load of subway[J]. Environmental earth science, 2015, 73(5): 2473-2482.
- [15] 国家质量技术监督局. 土工试验方法: GB/T 50123-1999[S]. 北京: 中国计划出版社,2000.
- [16] 吴礼舟,许强,黄润秋,等. 非饱和黏土的冻胀融沉过程分析[J]. 岩土力学,2011,32(4): 1025-1028.

## Study on Thaw Settlement Behavior of Soft Frozen Soil

ZHUANG Huimin, YANG Ping, HE Wenlong

(College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** With the extensive application of the artificial freezing method in subway construction, the thaw settlement controlling has become a problem to be solve in soft-soil freezing. The typical soft soil in Suzhou subway is taken as the research object. Related conclusions are obtained on the basis of the laboratory tests, which are as follows. The thaw-settlement coefficients with water supply are larger than those without, and it decreases exponentially with the increase of upper loads under the condition of loads removed before melting. The clay's thaw-settlement becomes larger after remolded and the difference increases with soil's higher sensitivity, while the non-cohesive soil has little change. As for the unsaturated clay and muddy silty clay, there existed a critical dry density between thaw-settlement coefficient and dry density change with water supply. And this corresponds to the minimum thaw-settlement coefficient.

**Key words:** artificial frozen soil; thaw-settlement coefficient; water source supply; load; dry density

文章编号: 1671-6833(2016)02-0067-06

## 基于大尺度重组竹试件各向轴压力学性能研究

李海涛<sup>1</sup>, 苏靖文<sup>1</sup>, 魏冬冬<sup>2</sup>, 张齐生<sup>1</sup>, 陈 国<sup>1</sup>

(1. 南京林业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210037; 2. 江西飞宇竹业集团有限公司, 江西 奉新 330700)

**摘 要:** 对大尺度重组竹试件进行了3个方向轴心受压试验研究与分析,探讨了其破坏机理及所测参量之间的相互关系. 竹重组材的受压破坏属于延性破坏,沿3个方向的破坏过程均经历弹性阶段、弹塑性阶段、塑性阶段和破坏阶段;但破坏阶段有所区别. 试件各向受压的最终破坏形态较接近,均出现沿对角线方向的主裂缝. 顺纹方向的实测抗压强度、弹性模量和泊松比值最大,离散性较大;横纹方向Ⅰ的抗压强度稍大于横纹方向Ⅱ的抗压强度,但其弹性模量和泊松比均比横纹方向Ⅱ对应的值要小. 基于试验结果,给出了各个方向抗压强度、弹性模量和泊松比相互之间对应的关系.

**关键词:** 竹材重组材; 轴心抗压; 破坏机理; 抗压强度; 弹性模量; 泊松比

**中图分类号:** TU398

**文献标志码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.201412053

### 0 引言

重组竹是将竹材<sup>[1-3]</sup> 疏解成通长的、相互关联并保持纤维原有排列方式的疏松网状纤维束,再经干燥、施胶、组坯成型后热压而成的板状或其他形式的材料<sup>[4-6]</sup>. 这种材料强度高,材质均匀,长度、密度可根据需要任意控制,加工性能好,可满足建筑结构对材料物理力学性能的需求. 不少学者<sup>[4-14]</sup> 对竹重组材的制造、加工及基本力学性能展开了初步研究,但目前国内外没有重组竹相关试验标准及建筑设计标准,在建筑上的应用研究较少,大量基本理论还没建立,人类对这种材料的破坏机理和本构模型的了解很有限. 现有研究多数基于小尺度试件. 苏靖文等<sup>[4]</sup> 对重组竹轴心受压柱进行了试验研究与分析. 李海涛等<sup>[5]</sup> 对重组竹偏心受压柱进行了试验研究与分析. 张俊珍等<sup>[6]</sup> 对重组竹横纹抗压强度和顺纹抗压强度进行了试验研究与分析,但所选择的尺寸截面仅为20 mm×20 mm. 重组竹应用到建筑领域的梁柱构件中,均以大尺度试件为主,而在大尺度下,重组竹的受压力学性能如何鲜有文献报道. 试件尺寸越大,所含缺陷越多,其破坏机理同小尺寸有所区

别,并且尺寸越大越能反映重组竹的整体力学性能. 基于此,笔者对重组竹三个方向轴心受压力学性能展开了试验研究与分析,借以探讨重组竹的破坏机理.

### 1 试验情况

#### 1.1 试件设计与制作

试验用毛竹产自江西奉新,竹重组材的生产厂家为“江西省飞宇竹业集团有限公司”. 设计试件尺寸为100 mm×100 mm×100 mm,共18个,根据加载方向不同,将其分成3组,每组6个试件. 3个加载方向见图1,其中1为顺纹方向(竹纤维束方向),2为横纹方向Ⅰ(原竹筒弦向),3为横纹方向Ⅱ(原竹筒径向). 为了保证试件材性

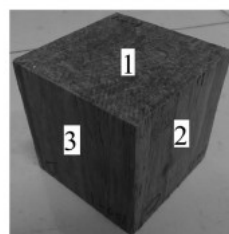


图1 竹重组材试件

Fig.1 Parallel bamboo strand lumber specimen

收稿日期: 2014-12-29; 修订日期: 2015-04-19

基金项目: 教育部博士点基金资助项目(20123204120012); 住建部科技资助项目(2014k4023); 江苏省住建厅科技项目(JS2012ZD34); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 李海涛(1982—),男,河南临颖人,南京林业大学副教授,博士后,主要从事竹木结构、混凝土结构、复合材料结构等相关研究工作, E-mail: lhaitao1982@126.com.

引用本文: 李海涛, 苏靖文, 魏冬冬, 等. 基于大尺度试件重组竹各向轴压力学性能研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 67-72.

稳定,统一选取梢部原竹制作竹重组材短柱试件.实测的密度为  $990.2 \text{ kg/m}^3$ ,实测含水率为 7.8%.

### 1.2 试验加载制度

依据 GB/T 50329—2012<sup>[15]</sup> 进行加载制度设计和试验.试验现场图如图 2.试件加载初期采用荷载控制,当荷载达到极限荷载大约 80% 左右,改为位移控制.试验从加载到破坏所用时间控制在 5~10 min.试件就位后,首先进行几何对中,使加载的作用线和构件的几何中心对齐,以保证轴压,然后通过预加载来检测仪器是否工作正常并减少系统误差.

### 1.3 测点布置

试件 4 个侧面中间位置均粘有两个应变片(见图 2),用以测量 4 个面中间点竖向和横向的应变变化.本次试验采用非接触式激光位移计(LDS,见图 2)来测试件的轴向变形.试验采用的

加载仪器为 100 t 电液伺服万能试验机,采集仪器为 TDS530 数据自动采集系统.

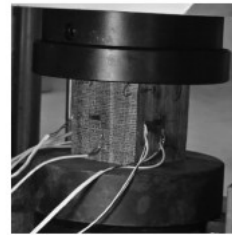


图 2 试验现场图

Fig.2 Real test photo

## 2 试验结果与分析

所有试件顶面标示有“\*”.顺纹方向,以一个侧面(弦向)记为 A 面,围绕试件竖直方向轴线顺时针依次标上 A、B、C、D.横纹方向 I 和 II,均以一侧面(顺纹)记为 A 面,围绕试件竖直方向轴线顺时针依次标上 A、B、C、D.主要试验结果见表 1.

表 1 试验结果

Tab.1 Test results

试件编号	极限承载能力/kN	实测面积/ $\text{mm}^2$	极限强度/ MPa	弹性模量/ MPa	A 面(C 面) 泊松比	B 面(D 面) 泊松比
1-100-1	625.1	10 112	61.8	11 640	0.270	0.205
1-100-2	692.0	10 089	68.6	11 208.5	0.275	0.340
1-100-3	639.5	10 058	63.6	12 238.3	0.315	0.280
1-100-4	622.0	10 066	61.8	11 656.3	0.470	0.395
1-100-5	718.6	10 111	71.1	13 051.8	0.275	0.550
1-100-6	638.5	10 084	63.3	10 510.4	0.270	0.365
2-100-1	234.3	10 222	22.9	886.9	0.141	0.042
2-100-2	274.6	10 100	27.2	834.3	0.098	0.031
2-100-3	255.6	10 095	25.3	960.0	0.153	0.033
2-100-4	240.0	10 081	23.8	842.6	0.168	0.023
2-100-5	261.6	10 127	25.8	834.3	0.160	0.035
2-100-6	244.0	10 128	24.1	712.4	0.111	0.021
3-100-1	216.9	9 955.6	21.8	1536.7	0.165	0.055
3-100-2	190.0	10 110	18.8	1 488.0	0.200	0.045
3-100-3	220.1	10 030	21.9	1 669.7	0.329	0.061
3-100-4	209.2	9 928.5	21.1	1 567.7	0.302	0.071
3-100-5	225.2	9 924.9	22.7	1 723.8	0.191	0.057
3-100-6	211.9	9 842.3	21.5	1 707.8	0.203	—

### 2.1 顺纹方向

选取典型试件 1-100-6 描述其破坏过程如图 3 所示.在加载初期,材料基本处于弹性状态,试件表面无明显现象,四侧面中心的应变值基本相等;随着荷载的增加,试件由弹性阶段逐步进入弹塑性阶段,试件表现出一定的塑性变形,刚度有所降低,变形渐趋明显;当荷载增加至极限承载力附近时,可听到明显竹丝劈裂声,仔细观察发现试件

D 表面左下角和右上角距离侧面边大约 25 mm 范围内出现多条细微裂缝,B 表面沿左上角右下角对角线方向也出现细微裂缝;当荷载稍过峰值后,D 面两个部位的裂缝均向试件中部扩展,B 面沿左上角右下角对角线方向裂缝增加,发生明显局部竹纤维弯曲和错位.继续加载,B 面和 D 面沿另外一条对角线方向也开始出现明显裂缝及竹纤维弯曲和错位现象,并且 A 面和 C 面靠近顶面和

底面的竹纤维均发生外凸. 从加载仪器上取下试件,发现顶面和底面均出现开裂. 从图3 试件1-100-6的最终破坏图可看出,试件主要发生以局部纤维弯曲为主的破坏,并且套箍效应沿着A面、C面方向表现较明显.

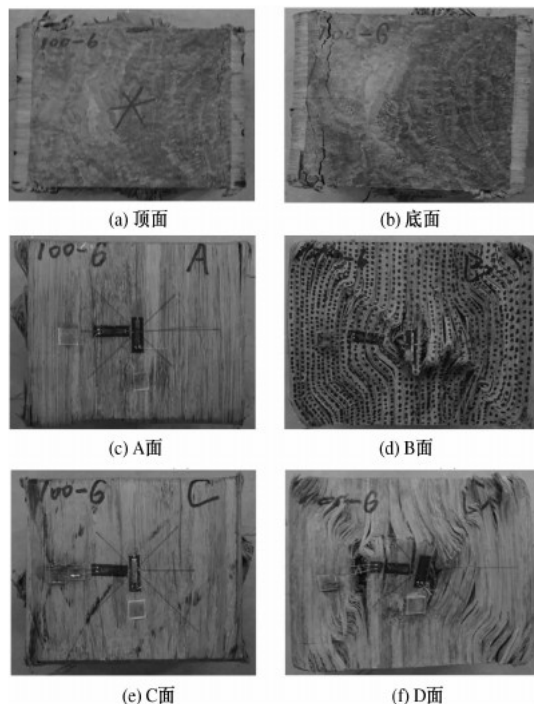


图3 顺纹受压典型破坏形态(1-100-6)

Fig.3 Typical failure mode for compression parallel to grain (1-100-6)

## 2.2 横纹方向 I

选取典型试件2-100-1描述其破坏过程如图4所示. 加载初期,同顺纹方向受压类似,材料基本处于弹性状态,试件表面无任何明显现象;随着荷载增加,试件由弹性阶段逐步进入弹塑性阶段,试件表现出一定的塑性变形,刚度有所降低,变形渐趋明显;当荷载增加至极限承载力90%左右时,试件D面距底边30 mm左右位置开始出现细微裂缝,A面右上角和C面左上角也出现细微裂缝;当荷载增加至极限承载力附近时,A面和C面沿对角线出现的裂缝开始增大并向侧面中心发展,从D面可看到明显开裂;继续加载,D面首先出现裂缝的地方,竹纤维向外翘出,B面下部分距底边大约20~30 mm以内出现明显开裂,A面左上角、左下角及右下角对角线附近均出现明显开裂,并向试件侧面中心发展. 最后,试件发生过大轴向变形(大于15 mm)的情况下停止加载. 从加载仪器上取下试件,发现顶面和底面也出现明显

开裂. 从试件2-100-1的最终破坏图可以看出,顶部和底部的加载板对试件B面、D面方向有明显的套箍效应.



图4 横纹受压 I 典型破坏形态(2-100-1)

Fig.4 Typical failure mode for compression perpendicular to grain I (2-100-1)

## 2.3 横纹方向 II

选取典型试件3-100-4描述如图5所示. 加载初期,同前述类似,材料基本处于弹性状态;随着荷载的增加,试件由弹性阶段进入弹塑性阶段,试件表现出一定的塑性变形,刚度有所降低,变形渐趋明显;当荷载增加至极限承载力90%左右时,A面左上角和C面右上角附近开始出现细微裂缝;当荷载增加至极限承载力附近时,A面左上角和C面右上角沿对角线出现的裂缝开始增大并向侧面中心发展,同时A面右下角和C面左下角也出现明显裂缝,D面顶边附近可看到明显开裂;继续加载,D面顶边部分竹纤维向外翘出,A面左下角和C面右下角附近也出现明显裂缝,并且A面和C面对角线方向的裂缝均向试件侧面中心发展. 最后,试件发生过大轴向变形(大于15 mm)的情况下停止加载. 从加载仪器上取下试件,发现顶面和底面与B面和D面交接的边附近也出现明显开裂. 从试件3-100-4的最终破坏图可看出,顶部和底部的加载板对试件B面、D面方向有明显的套箍效应.

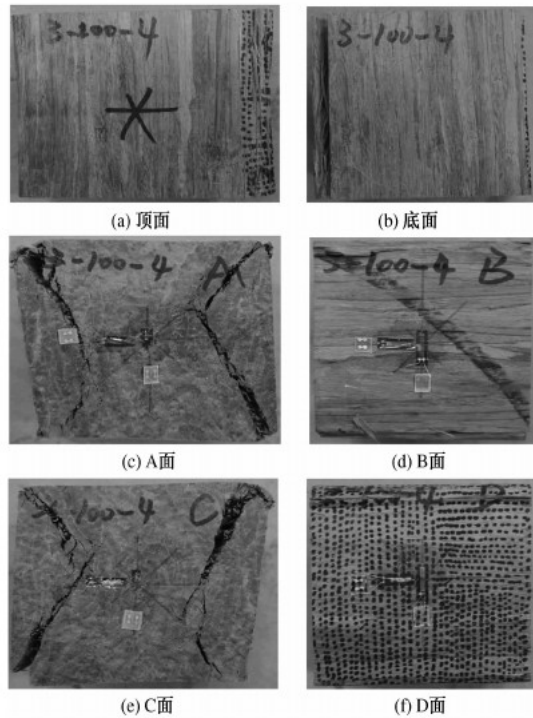


图5 横纹受压Ⅱ典型破坏形态(3-100-4)  
Fig. 5 Typical failure mode for compression perpendicular to grain Ⅱ(3-100-4)

### 3 综合分析

#### 3.1 抗压强度对比

重组竹顺纹方向、横纹方向Ⅰ、横纹方向Ⅱ的抗压强度平均值分别为 65.0、24.9、21.3 MPa,标准偏差分别为 3.87、1.55、1.34 MPa,变异系数分别为 0.059 6、0.062 4、0.062 9,具有 95% 保证率的强度特征值为 58.7、22.3、19.1 MPa。很明显,竹材顺纹方向抗压强度最大,但是同另外两个方向相比,其试验结果的离散性较大;横纹方向Ⅰ的抗压强度比横纹方向Ⅱ的抗压强度要大。基于试验结果 3 个方向的抗压强度标准值关系式可以用式(1)、式(2)和式(3)表示,其中  $f_{sck}$ 、 $f_{h I ck}$ 、 $f_{h II ck}$  分别为顺纹、横纹方向Ⅰ、横纹方向Ⅱ对应的抗压强度标准值。

$$f_{sck} = 2.63 f_{h I ck}, \quad (1)$$

$$f_{sck} = 3.07 f_{h II ck}, \quad (2)$$

$$f_{h II ck} = 0.857 f_{h I ck}. \quad (3)$$

#### 3.2 弹性模量对比

重组竹顺纹方向、横纹方向Ⅰ、横纹方向Ⅱ的弹性模量平均值分别为 11 717.5、845.1、1 615.6 MPa,标准偏差分别为 869.2、81.0、97.9 MPa,变异系数分别为 0.074 2、0.095 9、0.060 6,其具有 95% 保证率的强度特征值为 10 287.7、711.9、

1 454.5 MPa。同抗压强度类似,顺纹方向弹模最大并且离散性较大;同抗压强度不同的是,横纹方向Ⅱ的弹模比横纹方向Ⅰ的弹模要大。基于试验结果,3 个方向的弹性模量标准值关系式可以用式(4)、式(5)和式(6)表示,其中  $E_{sck}$ 、 $E_{h I ck}$ 、 $E_{h II ck}$  分别为顺纹、横纹Ⅰ、横纹Ⅱ对应的弹模标准值。

$$E_{sck} = 14.45 E_{h I ck}, \quad (4)$$

$$E_{sck} = 7.07 f_{h II ck}, \quad (5)$$

$$E_{h II ck} = 2.04 f_{h I ck}. \quad (6)$$

#### 3.3 A 面(C 面)泊松比对比

重组竹顺纹、横纹Ⅰ、横纹Ⅱ的 A 面(C 面)泊松比平均值分别为 0.313、0.139、0.232,标准偏差分别为 0.079、0.028、0.067,变异系数分别为 0.253、0.203、0.289,具有 95% 保证率的强度特征值为 0.182、0.092、0.122。同弹模类似,顺纹 A 面(C 面)泊松比最大并且具有较大离散性;横纹Ⅱ的 A 面(C 面)泊松比比横纹Ⅰ的 A 面(C 面)泊松比要大,但离散性也较大。基于试验结果,3 个方向的 A 面(C 面)泊松比标准值关系式可以用式(7)、式(8)和式(9)表示,其中  $v_{sckAC}$ 、 $v_{h I ckAC}$ 、 $v_{h II ckAC}$  分别为顺纹、横纹Ⅰ、横纹Ⅱ对应的 A 面(C 面)泊松比标准值。

$$v_{sckAC} = 1.98 v_{h I ckAC}, \quad (7)$$

$$v_{sckAC} = 1.49 v_{h II ckAC}, \quad (8)$$

$$v_{h II ckAC} = 1.33 v_{h I ckAC}. \quad (9)$$

#### 3.4 B 面(D 面)泊松比对比

重组竹顺纹方向、横纹方向Ⅰ、横纹方向Ⅱ的 B 面(D 面)泊松比平均值分别为 0.356、0.031、0.058,标准偏差分别为 0.117、0.007 8、0.009 4,变异系数分别为 0.328、0.253、0.163,其具有 95% 保证率的强度特征值为 0.164、0.018、0.042。同 A 面(C 面)泊松比类似,顺纹方向 B 面(D 面)泊松比最大并且具有较大离散性;横纹方向Ⅱ的 B 面(D 面)泊松比比横纹方向Ⅰ的 B 面(D 面)泊松比要大。基于试验结果,3 个方向的 B 面(D 面)泊松比标准值关系式可以用式(10)、式(11)和式(12)表示,其中  $v_{sckBD}$ 、 $v_{h I ckBD}$ 、 $v_{h II ckBD}$  分别为顺纹、横纹方向Ⅰ、横纹方向Ⅱ对应的 B 面(D 面)泊松比标准值。

$$v_{sckBD} = 9.11 v_{h I ckBD}, \quad (10)$$

$$v_{sckBD} = 3.9 v_{h II ckBD}, \quad (11)$$

$$v_{h II ckBD} = 1.33 v_{h I ckBD}. \quad (12)$$

所有试件 3 个方向的抗压强度、弹性模量、泊松比的对比图见图 6~图 9。由表 1 及图 6~图 9 可明显看出,3 个方向相比,不管是抗压强度,还

是弹性模量和泊松比,均是顺纹方向的实测值最大,但是顺纹方向数据离散性较大;两个横纹方向相比,横纹方向 I 的抗压强度稍大于横纹方向 II 的抗压强度,但是横纹方向 II 的弹性模量和泊松比均比横纹方向 I 对应的值要大。

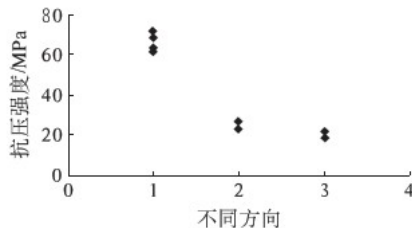


图6 抗压强度比较

Fig. 6 Compression strength comparison

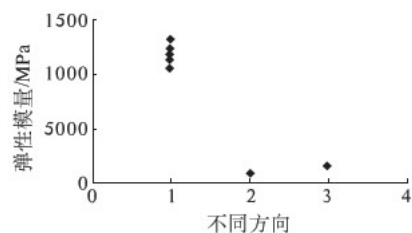


图7 弹性模量比较

Fig. 7 Elastic modulus comparison

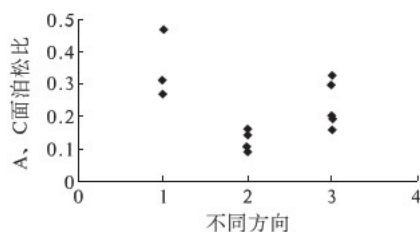


图8 A、C面泊松比比

Fig. 8 Poisson's ratio comparison for face A and C

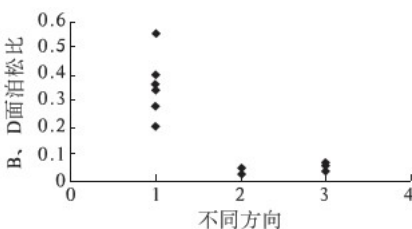


图9 B、D面泊松比比

Fig. 9 Poisson's ratio comparison for face B and D

### 3.5 典型荷载轴向变形曲线对比

典型荷载—位移曲线对比见图10。由图10可看出,沿3个方向的破坏过程类似,均经历弹性阶段、弹塑性阶段、塑性阶段和破坏阶段;但是对于破坏阶段,顺纹方向受压破坏和两横纹方向受压破坏有区别。顺纹方向的破坏阶段可以分为荷载下降阶段、荷载残余阶段,荷载轴向变形曲线在变形为4 mm左右进入下降段;两横纹方向的破

坏阶段荷载虽有下降,但较少,且随着加载的继续,变形增加明显,荷载降低很少或基本保持不变。两横纹方向的试件,一直到加载结束都没出现明显下降段。另外,顺纹荷载轴向变形曲线弹性阶段的斜率最大,横纹 II 对应的斜率其次,横纹 I 对应的斜率最小;同样荷载增量下,顺纹方向产生的变形最小,横纹 II 其次,横纹 I 最大,这说明顺纹方向的弹性模量最大,横纹 II 其次,横纹 I 最小,同实测结果保持一致。

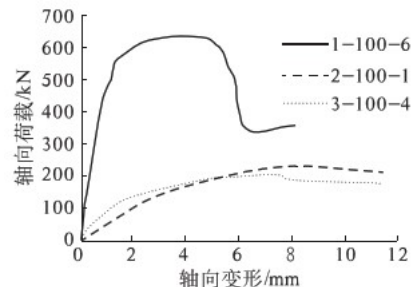


图10 典型荷载—位移曲线对比

Fig. 10 Typical load-displacement curves comparison

## 4 结论

(1) 沿3个方向的受压破坏过程均经历弹性阶段、弹塑性阶段、塑性阶段和破坏阶段。顺纹方向受压破坏阶段还可分为荷载下降阶段、荷载残余阶段;对于两个横纹方向,破坏阶段荷载虽均有下降,但下降较少,且随着加载的继续,变形增加明显,荷载降低很少或基本保持不变。

(2) 整体上讲,沿着3个方向加载,试件的最终破坏形态比较接近,均为强度破坏,都出现沿对角线方向的主裂缝。

(3) 顺纹方向的实测抗压强度、弹性模量和泊松比值最大,但是顺纹方向数据的离散性较大;横纹方向 I 的抗压强度稍大于横纹方向 II 的抗压强度,但是横纹方向 II 的弹性模量和泊松比均比横纹方向 I 对应的值要大。

(4) 基于试验结果,给出了各个方向抗压强度、弹性模量和泊松比相互之间对应的关系。

## 参考文献:

- [1] 李海涛,苏靖文,张齐生,等.侧压竹材集成材筒支梁力学性能试验研究[J].建筑结构学报,2015,36(3):121-126.
- [2] 苏靖文,李海涛,杨平,等.竹复成材方柱墩各向轴压力学性能研究[J].林业科技开发,2015,29(4):45-49.
- [3] 陈国,张齐生,黄东升,等.胶合竹木工字梁受弯

- 性能的试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(5): 72-79.
- [4] 苏靖文, 吴繁, 李海涛, 等. 重组竹柱轴心受压试验研究与分析[J]. 中国科技论文, 2015, 10(1): 39-41.
- [5] 李海涛, 苏靖文, 张齐生, 等. 竹材重组材柱偏心受压试验研究与分析[J]. 建筑材料学报, [2015-03-13]. <http://www.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20150313.1054.022.html>.
- [6] 张俊珍, 任海青, 钟永, 等. 重组竹抗压与抗拉力学性能的分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2012, 36(4): 107-111.
- [7] 魏洋, 骆雪妮, 周梦倩. 纤维增强竹梁抗弯力学性能研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, 38(2): 11-15.
- [8] 魏万姝, 覃道春. 不同竹龄慈竹重组材强度和天然耐久性比较[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2011, 35(6): 111-115.
- [9] 关明杰, 朱一辛, 张心安. 重组木与重组竹抗弯性能的比较[J]. 东北林业大学学报, 2006, 34(4): 20-21.
- [10] 吴秉岭, 余养伦, 齐锦秋, 等. 竹束精细疏解与炭化处理对重组竹性能的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, 38(6): 115-120.
- [11] 秦莉. 热处理对重组竹材物理力学及耐久性能影响的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院学位论文, 2010.
- [12] LI H T, ZHANG Q S, HUANG D S, et al. Compressive performance of laminated bamboo[J]. Composites part B: engineering, 2013, 54(1): 319-328.
- [13] LI H T, SU J W, ZHANG Q S, et al. Mechanical performance of laminated bamboo column under axial compression[J]. Composites part B: engineering, 2015, 79: 374-382.
- [14] KIM Y J, MOTOAKI O, TOSHIMINE Y. Study on sheet material made from zephyr strands V: Properties of zephyr strand board and zephyr strand lumber using the veneer of fast-growing species such as poplar[J]. Journal of wood science, 1998, 44(1): 438-443.
- [15] 木结构试验方法标准: GB/T 50329-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

## Comparison Study on Parallel Bamboo Strand Lumber under Axial Compression for Different Directions Based on the Large Scale

LI Haitao<sup>1</sup>, SU Jingwen<sup>1</sup>, WEI Dongdong<sup>2</sup>, ZHANG Qisheng<sup>1</sup>, CHEN Guo<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

2. Jianxi Feiyu Bamboo Industry Group co., LTD, Fengxin 330700, China)

**Abstract:** In order to investigate the axial compression damage mechanism and the relationship between the test parameters for three directions, the experimental study on parallel bamboo strand lumber (PBSL) based on the large scale was conducted in this paper. The axial compressive failure for the PBSL belongs to the ductile damage. Except for the different damage stage, the whole failure process for specimens along three directions are similar with each other and can be divided into four stages: elastic stage, elastic-plastic stage, plastic stage and failure stage. The final failure mode for the three directions are similar with each other which is the main crack appeared along the diagonal. With large discreteness, the compressive strength, modulus of elasticity and Poisson's ratio for the parallel to grain direction are biggest among three directions. The compressive strength for the perpendicular to grain direction I is bigger than that for II while the modulus of elasticity and Poisson's ratio for direction I is smaller than that for II. Based on the test analysis of the results, the relationship between the compressive strength, modulus of elasticity and Poisson's ratio for three main directions were proposed for the PBSL under axial compression.

**Key words:** PBSL; axial compression; damage mechanism; compressive strength; modulus of elasticity; Poisson's ratio



文章编号: 1671-6833(2016)02-0073-04

# 有机朗肯循环系统的实验研究和性能分析

魏新利, 李明辉, 马新灵, 侯中兰, 孟祥睿, 闫艳伟

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 对以自主设计的向心透平为膨胀机的有机朗肯循环低品位热能发电系统进行实验研究, 结果表明: 蒸发器的焓损失都是最大的, 其次是冷凝器和向心透平, 透平入口压力 0.397 MPa、入口温度 100.58 °C 时, 蒸发器焓损失为 3.81 kW, 占总焓损失 50.64%, 冷凝器和透平焓损失为 2.88 和 0.82 kW, 分别占 38.25% 和 10.89%。在实验基础上, 用 Aspen7.3 模拟增加回热器对系统性能的影响, 结果显示: 热源温度和蒸发温度不变时, 有回热器的 ORC 系统热力性能优于基本 ORC 系统。

**关键词:** 有机朗肯循环; R123; 实验研究; 流程模拟; 热力分析

**中图分类号:** TK123

**文献标志码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.201412027

## 0 引言

受能源结构制约, 我国工业生产中, 存在着大量余热资源, 尤其是 150 °C 以下的低温余热, 品位低, 很难进行生产再利用<sup>[1]</sup>。有机朗肯循环(organic rankine cycle, 简称 ORC) 采用低沸点有机工质, 将低品位热能转换为高品质电能, 是低温余热利用的有效途径。有机工质多采用干流体, 膨胀后处于过热区, 不会侵蚀膨胀机叶片, 所以在低温热能发电方面得到了广泛应用<sup>[2]</sup>。

近年来, 国内外学者对 ORC 系统的性能进行了很多研究与分析。SOMAYAJI C. 等<sup>[3]</sup> 用焓轮法和拓扑法对热源温度为 300 °C, 蒸发压力为 2.5 MPa 的基本 ORC 进行焓分析, 得到: 蒸发器是具有最高影响系数(63.6%) 和最大焓损失(40 kW) 的部件, 其次是膨胀机。ONDER KASKA 等<sup>[4]</sup> 对以 R245fa 为工质、废热源驱动的 ORC 系统进行能效分析, 结果表明: 蒸发器、膨胀机、冷凝器和工质泵的焓损失依次降低, 系统热效率和焓效率均随蒸发压力增大而增大。ROY 等<sup>[5]</sup> 对以 R123 为工质有回热的 ORC 低温余热发电系统进行实验研究, 得到: 透平进口压力 2.7 MPa, 冷凝温度 27.82 °C 时, 带回热的 ORC 系统热效率、焓效率及透平输

出功率最大。刘杰<sup>[6]</sup> 对余热温度为 100 °C 左右、R245fa 为工质的 ORC 系统进行实验研究, 得到: 采用中间换热器, 蒸发器焓效率由 63.8% 提升到 72.41%, 系统热力学完善度由基本 ORC 的 71.38% 增加到 81.84%。罗向龙<sup>[7]</sup> 等对以 R245fa 为工质、温度低于 110 °C 的低品位热能发电系统进行焓分析, 得到 ORC 系统焓效率和热效率分别为 45.07% 和 7.78%。

笔者以自行研发向心透平为膨胀机, R123 为工质, 以 110 °C 左右工业余热为回收对象, 搭建了 ORC 低温余热发电实验台。并用热力学第一、第二定律, 对系统进行实验研究和性能分析, 对优化后方案进行讨论与分析。

## 1 ORC 低品位热能发电系统

### 1.1 系统的原理

图 1 为实验系统流程图。如图所示, ORC 低品位热能发电系统由 3 个子系统组成: 热源(导热油代替) 系统、ORC 主系统和循环水系统。

### 1.2 系统的热力学性能分析

性能分析时, 视系统工质为稳定流动。

(1) 有机工质在蒸发器中吸收热量  
蒸发器的热效率为

收稿日期: 2014-12-11; 修订日期: 2015-04-19

基金项目: 煤燃烧国家重点实验室开放基金资助项目(FSKLCC1410); 河南省重点科技攻关计划项目(142102210072)

作者简介: 魏新利(1956—), 男, 河南辉县人, 郑州大学教授, 博导, 主要从事生物质能利用、低温余热发电等研究。

通讯作者: 马新灵(1977—), 女, 河南南阳人, 郑州大学讲师, 博士, 主要从事低温余热发电研究, E-mail: xinlingma@zzu.edu.cn.

引用本文: 魏新利, 李明辉, 马新灵, 等. 有机朗肯循环系统的实验研究和性能分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 73-76.



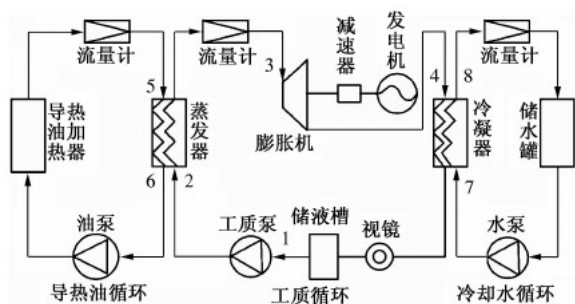


图1 有机朗肯循环实验系统流程图

Fig.1 Experimental schematic diagram of ORCs

$$\eta_e = \frac{q_m (h_3 - h_2)}{\rho q_v (h_5 - h_6)} \quad (1)$$

焓损失为

$$\Delta E_e = (E_5 - E_6) - (E_3 - E_2) = \rho q_v [h_5 - h_6 - T_0 (s_5 - s_6)] - q_m [h_3 - h_2 - T_0 (s_3 - s_2)] \quad (2)$$

焓效率为

$$\eta_{e,ex} = \frac{E_3 - E_2}{E_5 - E_6} = \frac{q_m [h_3 - h_2 - T_0 (s_3 - s_2)]}{\rho q_v [h_5 - h_6 - T_0 (s_5 - s_6)]} \quad (3)$$

(2) 工质在向心透平内膨胀做功等熵效率为

$$\eta_t = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \quad (4)$$

焓损失为

$$\Delta E_t = (E_3 - E_4) - W_t = q_m [h_3 - h_4 - T_0 (s_3 - s_4)] - q_m (h_3 - h_4) \quad (5)$$

焓效率为

$$\eta_{t,ex} = \frac{W_t}{E_3 - E_4} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_4 - T_0 (s_3 - s_4)} \quad (6)$$

(3) 有机工质进入冷凝器中放热热效率为

$$\eta_c = \frac{q_w (h_8 - h_7)}{q_m (h_4 - h_1)} \quad (7)$$

焓损失为

$$\Delta E_c = (E_4 - E_1) - (E_8 - E_7) = q_m [h_4 - h_1 - T_0 (s_4 - s_1)] - q_w [h_8 - h_7 - T_0 (s_8 - s_7)] \quad (8)$$

焓效率为

$$\eta_{c,ex} = \frac{E_8 - E_7}{E_4 - E_1} = \frac{q_w [h_8 - h_7 - T_0 (s_8 - s_7)]}{q_m [h_4 - h_1 - T_0 (s_4 - s_1)]} \quad (9)$$

(4) 工质进入工质泵内升压等熵效率为

$$\eta_p = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (10)$$

焓损失为

$$\Delta E_p = W_p - (E_2 - E_1) = q_m (h_2 - h_1) - q_m [h_2 - h_1 - T_0 (s_2 - s_1)] \quad (11)$$

焓效率为

$$\eta_{p,ex} = \frac{E_2 - E_1}{W_p} = \frac{h_2 - h_1 - T_0 (s_2 - s_1)}{h_2 - h_1} \quad (12)$$

(5) 有机朗肯循环系统热效率为

$$\eta_{cycle} = \frac{h_3 - h_4 - (h_2 - h_1)}{h_3 - h_2} \quad (13)$$

焓损失为

$$\Delta E_{cycle} = \Delta E_e + \Delta E_t + \Delta E_p + \Delta E_c \quad (14)$$

焓效率为

$$\eta_{cycle,ex} = \frac{W_t - W_p}{E_5 - E_6} = \frac{q_m [h_3 - h_4 - (h_2 - h_1)]}{\rho q_v [h_5 - h_6 - T_0 (s_5 - s_6)]} \quad (15)$$

式中:  $E_i$  为状态点  $i$  的焓, kW;  $W_t$  为膨胀机输出功, kW;  $W_p$  为泵耗功, kW;  $h_i$  为比焓值, kJ/kg;  $s_i$  为比熵值, kJ/(kg · K);  $T_0$  为环境温度, K;  $q_w$ 、 $q_m$  分别为冷却水和有机工质流量, kg/s;  $q_v$  为导热油体积流量, m<sup>3</sup>/h;  $\rho$  为导热油密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\eta_e$ 、 $\eta_c$ 、 $\eta_{cycle}$  分别为蒸发器、冷凝器及系统热效率;  $\eta_t$ 、 $\eta_p$  分别为向心透平和泵的等熵效率;  $\Delta E_e$ 、 $\Delta E_c$ 、 $\Delta E_t$ 、 $\Delta E_p$ 、 $\Delta E_{cycle}$  分别为蒸发器、冷凝器、膨胀机、泵和系统焓损失, kW;  $\eta_{e,ex}$ 、 $\eta_{c,ex}$ 、 $\eta_{t,ex}$ 、 $\eta_{p,ex}$ 、 $\eta_{cycle,ex}$  分别为蒸发器、冷凝器、膨胀机、泵和循环系统焓效率。

## 2 实验研究

### 2.1 实验简介

搭建了以自行研发的向心透平为膨胀机的 ORC 低品位热能发电实验台, 实验采用 R123 做工质, 研发的向心透平参数如表 1 所示。

表1 向心透平的主要参数

Tab.1 Main parameters of radial inflow turbine

参数名称	数值
额定转速/(r · min <sup>-1</sup> )	59 400
叶轮出口外径/mm	34
叶轮出口内径/mm	19
叶轮叶片数/个	12
静叶片数/个	17
额定膨胀功率/kW	2.77
透平等熵效率/%	70.3

### 2.2 实验结果与分析

实验运行, 调节热源温度和有机工质流量, 改变系统工况参数。稳定运行后, 记录一组实验数据。表 2 为热源温度 111.26 °C, 透平入口压力 0.397 MPa, 向心透平转速为 51 452 r/min 时, 循环系统各状态点(图 1 所示) 工况参数。

表 2 中, R123 及循环水数值由软件 Refprop 9.0 查得, 导热油数值由文献 [8] 拟合曲线计算获得, 根据表 2 计算系统性能分析如表 3 所示。

改变操作条件, 热源温度为 106.71 °C, 透平入口压力 0.423 MPa、温度 74.39 °C, 转速 46 657 r/min 时, 系统性能分析如表 4 所示。

表 2 实验系统稳定运行时的状态参数

Tab. 2 State parameters of experimental system

状态点	温度/℃	压力/ MPa	焓/ (kJ·kg <sup>-1</sup> )	熵/(kJ· kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
1	20.41	0.118	220.65	1.072 7
2	20.74	0.424	220.92	1.072 9
3	100.58	0.397	447.15	1.738 6
4	76.76	0.150	432.72	1.748 7
5	111.26	0.270	243.32	0.747 4
6	91.85	0.270	197.85	0.621 6
7	19.96	0.180	83.89	0.295 8
8	30.36	0.180	127.39	0.441 6

表 3 工况 1 下系统的性能分析

Tab. 3 Performance analysis of system  
for the condition 1

设备	效率/%	焓效率/%	焓损失/kW
蒸发器	96.86	69.29	3.81
膨胀机	80.53	82.97	0.82
工质泵	77.78	78.29	0.016
冷凝器	96.01	25.15	2.88
ORC 系统	6.26	31.57	7.526

表 4 工况 2 下系统的性能分析

Tab. 4 Performance analysis of system  
for the condition 2

设备	效率/%	焓效率/%	焓损失/kW
蒸发器	97.34	69.19	3.67
膨胀机	82.79	83.33	0.32
工质泵	76.92	77.45	0.017
冷凝器	97.69	34.12	2.31
ORC 系统	7.29	36.94	6.317

上述实验工况工质流量高于设计值,与透平设计工况有较大差异,所以实际输出功率高于额定设计功率,前期透平性能研究已验证<sup>[9]</sup>. 证明设计的向心透平可在偏离工况下正常运行.

由表 3、4 可看出,蒸发器焓损失是最大的. 主要是外部(散热)焓损失和内部焓损失共同作用的结果. 散热焓损失是换热过程中导热油和有机工质以辐射和对流方式向周围环境散热造成的. 内部焓损失主要为蒸发器内传热焓损失,是由于蒸发器中 R123 和导热油两种工质的传热温差大造成的,如工况 1 条件下,导热油的出口温度为 91.85℃,而 R123 的入口温度仅 20.74℃. 所以,要降低蒸发器不可逆损失,首先蒸发器保温措施要做好,最重要是降低导热油出口温度.

冷凝器焓损失其次,主要是由于冷凝器中循环水与透平出口过热有机工质之间较大传热温差造成的. 为此,可在膨胀机出口与蒸发器入口管路中增加回热器,待乏气降低温度后再进入冷凝器,同时可提高进入蒸发器的有机工质温度,间接地

降低了蒸发器内的传热温差和不可逆性.

相对蒸发器和冷凝器,透平焓损失率要小得多,说明透平不是 ORC 系统中能效损失的主要设备. 而向心透平的等熵效率分别为 80.53%、82.79%,都高于设计值 70.3%,说明研发的透平性能是相当不错的.

3 模拟分析

实验结果分析知,系统不可逆损失主要是蒸发器和冷凝器内换热过程中较大的温差造成的. 为此在乏气进入冷凝器之前,先通过回热器预热进入蒸发器的液体,然后再进入冷凝器;经冷凝的液体,升压后进入回热器吸收乏气的热量,再送入蒸发器与余热源换热,图 2 为乏气回热循环系统流程图.

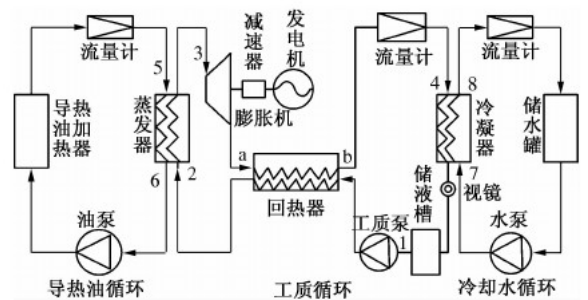


图 2 乏气回热的有机朗肯循环系统流程图

Fig. 2 Schematic diagram of ORCs with recuperator

用 Aspen Plus7.3 流程模拟软件按工况 2 参数模拟,进行数据处理得到系统热效率为 7.22%,焓效率为 36.72%,和实验值相比相对误差分别为 0.96% 和 0.60%,在允许误差范围内,可看出模拟结果是可靠的.

为使模拟工况与实验研究尽量一致,取导热油入口温度 110℃,工质在回热器中温升为 6℃,质量流量 1.442 kg/s;膨胀机和泵等熵效率分别取 0.78、0.85,有机工质 R123 质量流量为 0.26 kg/s. 蒸发器出口工质过热度为 1℃.

图 3 为基本有机朗肯循环系统和加上回热器后系统热效率和焓效率随蒸发温度变化情况. 图中可看出,热源温度一定,有乏气回热的 ORC 系统热效率和焓效率明显比基本 ORC 要高,蒸发温度为 88℃,乏气回热系统热效率和焓效率比基本 ORC 系统分别提高了 3.62% 和 3.71%. 热效率高,是蒸发器内工质吸热量降低,膨胀机输出功率不变引起的;增加回热器,膨胀机出口过热度较高的乏气经回热器换热后,过热度降低,而泵加压后的工质,进入蒸发器时温度较基本 ORC 高,因此系统不可逆性降低,焓效率提高.

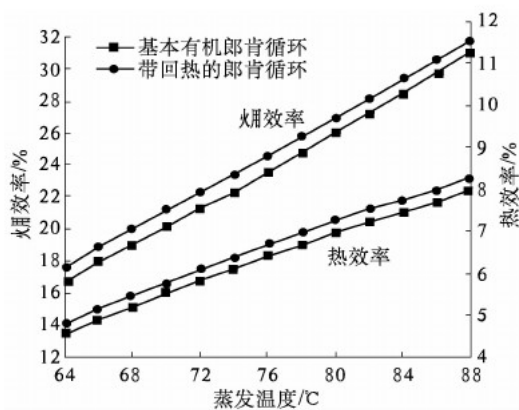


图3 两种循环热效率和㊦效率  
随蒸发温度的变化关系

Fig.3 Variation of thermal efficiency and exergy efficiency of two cycles with evaporating temperature

#### 4 结论

对以 R123 为工质、110 °C 左右的导热油为热源、向心透平为膨胀机的 ORC 余热发电系统进行了实验研究,然后用 Aspen7.3 模拟了增加回热器对系统性能影响。

(1) 根据实验数据,对系统各设备进行㊦分析得到,蒸发器㊦损失最大,主要是由蒸发器中 R123 和导热油两种工质的传热温差较大造成的,其次是冷凝器、向心透平、工质泵。

(2) 热源温度为 110 °C、蒸发温度为 88 °C 时,有回热的 ORC 系统热效率和㊦效率比基本 ORC 系统分别提高了 3.62% 和 3.71%。

### Experimental Investigation and Performance Analysis of Organic Rankine Cycle System

WEI Xinli, LI Minghui, MA Xinling, HOU Zhonglan, MENG Xiangrui, YAN Yanwei

( School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The experimental study was carried out to test the performance of organic Rankine cycle waste heat power generation system by using radial inflow turbine as expander. The result shows that exergy loss of the evaporator is the biggest, the next is the condenser and radial inflow turbine; when inlet pressure of the turbine is 0.397 MPa and inlet temperature is 100.58 °C, exergy loss of the evaporator reaches to 3.81 kW, accounting for 50.64% of the total exergy loss, that of the condenser and radial inflow turbine are 2.88 kW and 0.82 kW, accounting for 38.25% and 10.89% of the total exergy loss, respectively. Based on experimental investigation, making simulation about the effects of adding regenerator on the performance of the system, it turns out that when temperature of the heat source and evaporating temperature is the same, thermal performance of the ORCs with regenerator is better than the basic ORCs.

**Key words:** organic Rankine cycle( ORC ); R123; experimental investigation; process simulation; thermodynamic analysis

#### 参考文献:

- [1] 严雨林,王怀信,郭涛,等. 中低温地热发电有机朗肯循环系统性能的实验研究[J]. 太阳能学报, 2013,34(8): 1360-1365.
- [2] 刘强,段远源,宋鸿伟. 生物质直燃有机朗肯循环热电联产系统的热力性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2013,33(26): 60-67.
- [3] SOMAYAJI C. First and second law analysis of organic rankine cycle [D]. USA: Mississippi State University, 2008.
- [4] ONDER K. Energy and exergy analysis of an Organic Rankine for power generation from waste heat recovery in steel industry [J]. Energy conversion and management, 2014,7(1): 108-117.
- [5] 刘杰. 低温热源驱动的小型有机朗肯循环研究[D]. 上海: 上海交通大学机械与动力工程学院, 2011.
- [6] ROY J P, ASHOK M. Parametric optimization and performance analysis of a regenerative Organic Rankine Cycle using R-123 for waste heat recovery [J]. Energy, 2012,39(1): 227-235.
- [7] 罗向龙,徐乐,谭立峰,等. R245fa 有机朗肯循环余热发电系统火用分析[J]. 节能技术, 2012,30(2): 131-136.
- [8] LI J, PEI G, LI Y Z, et al. Energetic and exergetic investigation of an organic Rankine cycle at different heat source temperatures [J]. Energy, 2012, 38(16): 85-95.
- [9] 马新灵,孟祥睿,魏新利,等. 有机朗肯循环低品位热能发电系统向心透平的设计与性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2014,34(14): 2289-2296.

# 大跨连续梁桥施工膺架的设计研究

李宇<sup>1</sup>, 杨赐<sup>1</sup>, 李琛<sup>2</sup>, 高亮<sup>3</sup>, 王洁<sup>4</sup>

(1. 长安大学 公路学院 旧桥检测与加固技术交通行业重点试验室, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 建筑学院, 陕西 西安 710064; 3. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048; 4. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 以某大跨连续梁桥施工膺架为工程背景, 先采用有限元软件对原图纸和荷载方案进行校核, 发现其承载能力不足的缺点后, 对施工膺架的碗扣支架、贝雷梁、横向支撑梁、钢管立柱进行了设计, 并用有限元软件对设计后的施工膺架各个构件进行了强度和稳定性验算。结果表明: 在保证造价经济的前提下, 设计后的桥梁施工膺架在承载力方面得到很大提高, 满足桥梁施工要求。

**关键词:** 大跨连续梁桥; 施工膺架; 设计; 有限元

**中图分类号:** U442.5

**文献标志码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.201505033

## 0 引言

桥梁施工膺架法<sup>[1-3]</sup>是指混凝土梁式桥可在落地式膺架(也称脚手架)上现浇或拼装预制节段。目前, 很多学者对该法进行了研究, 胡汉舟等<sup>[4]</sup>对京沪高铁南京大胜关长江大桥施工技术进行了总结, 提出了针对膺架法的修正建议; 王政兵, 李红旗<sup>[5]</sup>基于万州长江大桥钢梁架设方案, 对膺架法的关键技术进行了研究; 李德坤等<sup>[6]</sup>对长寿长江大桥钢梁架设方案及关键技术进行了研究, 提出了适合该桥的膺架法; 王东辉、覃勇刚<sup>[7]</sup>对南京大胜关长江大桥钢梁架设及其膺架施工的关键技术进行了研究; 靳春尚等<sup>[8]</sup>开展了粉房湾长江大桥钢桁梁支架拼装施工技术的研究, 提出了改进的膺架施工法; 汪芳进<sup>[9]</sup>对武广客运专线东平水道桥钢梁架设施工方法进行了设计。笔者以某大跨连续梁桥施工膺架项目部提供的原图纸和荷载方案为工程背景, 开展了针对承载能力不足的施工膺架的设计研究。

## 1 方案设计及其有限元模型

首先利用 Midas Civil 对原方案进行计算分

析, 结果表明: 原方案的碗扣支架、贝雷梁、横向支撑梁的强度和稳定性均无法满足要求<sup>[10-17]</sup>。因此, 笔者对原图纸进行了设计, 并给出了如下的设计方案。

### 1.1 材料参数

贝雷梁材料参数如表1所示, 其中: 16Mn 钢容许剪应力 $[\tau] = 120 \text{ MPa}$ , 容许正应力 $[\sigma] = 210 \text{ MPa}$ ; Q345 钢容许剪应力 $[\tau] = 145 \text{ MPa}$ , 容许正应力 $[\sigma] = 250 \text{ MPa}$ , Q235 钢容许剪应力 $[\tau] = 120 \text{ MPa}$ , 容许正应力 $[\sigma] = 205 \text{ MPa}$ ; 方木容许剪应力 $[\tau] = 1.2 \text{ MPa}$ , 容许弯应力 $[\sigma] = 11 \text{ MPa}$ , 弹性模量 $E = 9 \times 10^3 \text{ MPa}$ 。

表1 贝雷梁材料参数表

Tab.1 Material parameters of bailey beam

构件	材料	断面面积/cm <sup>2</sup>	容许承载力/kN
弦杆	16Mn	2 × 12.7	560
竖杆	16Mn	9.52	210
斜杆	16Mn	9.52	171.5

### 1.2 碗扣支架的设计

碗扣支架原方案为步距 1.2 m, 横距 0.6 m, 纵距 0.6 m。按照《建筑施工扣件式钢管脚手架安

收稿日期: 2015-05-23; 修订日期: 2015-08-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51408042); 陕西省教育厅专项科研项目(15JK1422); 西安市建设科技项目(SJW2014012); 陕西省自然科学基金面上项目(2015JM5156)

作者简介: 李宇(1982—), 男, 福建福州人, 长安大学副教授, 硕士生导师, 博士后, 主要从事桥梁抗震及抗风研究, E-mail: liyu@chd.edu.cn.

引用本文: 李宇, 杨赐, 李琛, 等. 大跨连续梁桥施工膺架的设计研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 77-81.

全技术规范》及设计荷载,碗扣支架的应力验算不能通过.所以,笔者将原方案调整为步距 0.6 m,横距 0.6 m,纵距 0.4 m(如图 1).

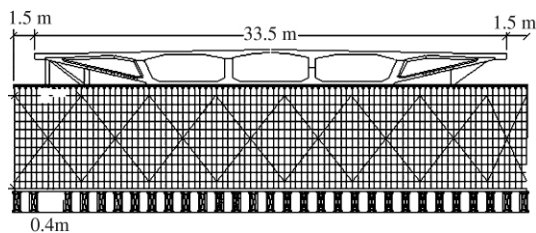


图 1 碗扣支架设计方案示意图

Fig. 1 Optimization scheme for bowl buckle stents

### 1.3 贝雷梁的设计改进

由于在设计荷载作用下,原方案的贝雷梁应力验算不能通过.故提出图 2 的改进方案:①将贝雷梁横向间距由原来的 2 m 调整为 1.2 m,同时贝雷梁顺桥向的支承位置稍作移动;②贝雷梁在中间区域 6 处支承位置(端部两拼支承除外)竖杆进行加强,补焊 2 [10 槽钢进行补强.

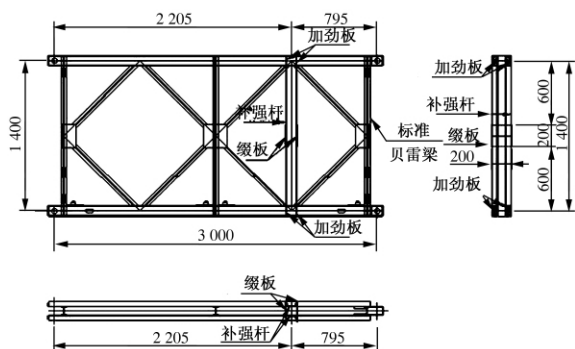


图 2 贝雷梁支承处加强示意图

Fig. 2 Strengthening scheme for bailey beam

### 1.4 横向支撑梁的设计

由于在设计荷载作用下,原方案的横向支撑梁的应力验算不能通过.所以,本研究建议将横向支撑梁由原来 3 拼 I36a 工字钢调整为 3 拼 I50a 工字钢.(备注:横向支撑梁采用 2 拼 I50a 工字钢和 3 拼 I50a 工字钢计算均能够满足要求.但是,采用 3 拼 I50a 工字钢最小安全系数可以达到 2.23,所以建议横向支撑梁采用 3 拼 I50a 工字钢.)

### 1.5 钢管立柱设计

设计方案:由于原方案的钢管立柱计算稳定安全系数不足,故建议沿顺桥向增加一排钢管立柱,顺桥向钢管立柱间距有所改变,如图 3 所示.

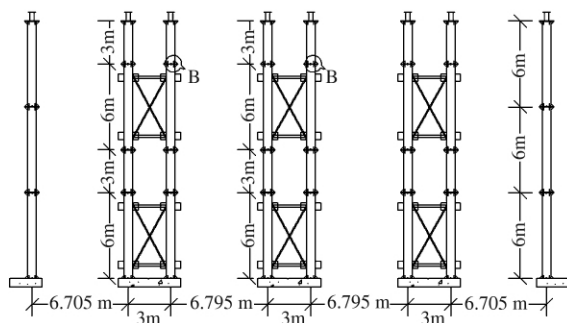


图 3 钢管立柱设计方案示意图

Fig. 3 Optimization scheme for steel tube columns

## 2 有限元分析模型

### 2.1 整体支架有限元模型

图 4 为采用计算软件 Midas Civil 建立的整体支架有限元模型.利用空间梁单元模拟了贝雷梁、横向支撑梁、立柱等部件,各立柱底部固结,贝雷梁与立柱之间采用刚臂连接,进而计算了结构的应力、内力和变形.

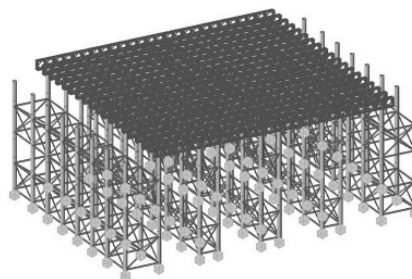


图 4 整体支架有限元模型

Fig. 4 The whole stents model

### 2.2 贝雷梁有限元模型

贝雷梁材料、截面相关参数选取参考《装配式公路钢桥多用途使用手册》<sup>[1]</sup>.贝雷梁的上下弦杆截面采用 2 [10 槽钢,腹杆截面采用 I8 工字钢,贝雷梁在中间区域 6 处支承位置(端部两拼支承除外)竖杆进行加强,补焊 2 [10 槽钢进行补强.一片贝雷梁的有限元模型如图 5 所示,主要是采用空间梁单元模拟贝雷梁的每一根杆件,支撑处的边界条件采用固结来处理.

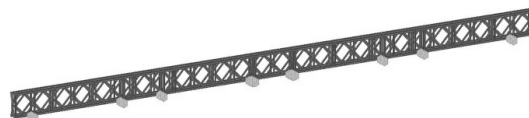


图 5 一片贝雷梁有限元模型

Fig. 5 Bailey beam model

### 2.3 钢管立柱有限元模型

如图 6 所示,钢管立柱截面为  $\Phi 600 \times 12$  mm,立柱和支撑梁都采用空间梁单元建立有限元

模型,立柱底部约束为固结. 通过 Midas Civil 分别进行了钢管立柱的稳定性和强度验算.

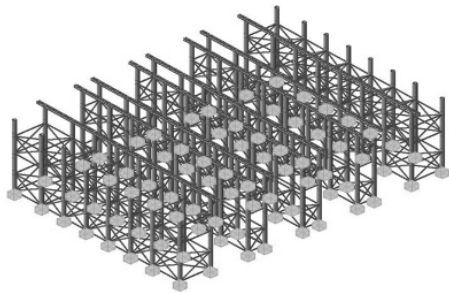


图 6 立柱有限元模型  
Fig.6 Column model

2.4 施加荷载

整体支架验算荷载组合如表 2 所示,表中分别给出了碗扣支架、贝雷梁、横向支撑梁、钢管立柱对

应的验算荷载组合. (1) 梁体容重取  $26.5\text{ kN/m}^3$ , 施加均布荷载:  $1\ 423.1 \times 26.5/33.5/50 = 22.51\text{ kN/m}^2$ . (2) 碗扣支架: 采用  $\varphi 48\text{ mm} \times 3.5\text{ mm}$  碗扣式脚手架,顺桥间距  $0.5\text{ m}$ ,横桥间距  $0.5\text{ m}$ ,支架最大高度  $7\text{ m}$ . 材料 Q235 钢,荷载  $4.08\text{ kN/m}^2$ . (3) 贝雷梁荷载: 单排单层每格自重为  $9\text{ kN}$ ,  $9 \times 2 \times 19/50/33.5 = 0.2\text{ kN/m}^2$ . (4) 施工荷载: ①施工人员、机械为  $2.0\text{ kN/m}^2$ ; ②混凝土振捣器为  $2.0\text{ kN/m}^2$ ; ③横向风力为  $1.0\text{ kN/m}^2$ ; ④纵向风力为  $0.4\text{ kN/m}^2$ ; ⑤模板重为  $2.0\text{ kN/m}^2$ ; ⑥方木重为  $2.0\text{ kN/m}^2$ . (注: 根据施工现场条件,得到以上施工临时荷载. 由于①、②这两部分荷载直接查取规范得到的,建议将这两部分荷载分别乘以 2.5 的系数用于验算荷载组合). (5) I20a 工字钢横向分配梁荷载:  $0.59\text{ kN/m}^2$ .

表 2 验算荷载组合表  
Tab.2 Load combination for checking

组合编号	验算状态	荷载组合	附注
组合 1	承载能力极限	$1.2(D1 + D2 + D3 + D4) + 1.4(2.5L1 + 2.5L2)$	验算碗扣支架
组合 2	承载能力极限	$1.2(D1 + D2 + D3 + D4 + D5) + 1.4(2.5L1 + 2.5L2)$	验算贝雷梁
组合 3	承载能力极限	$1.2(D1 + D2 + D3 + D4 + D5 + D6) + 1.4(2.5L1 + 2.5L2)$	验算横向支撑梁
组合 4	承载能力极限	$1.2(D1 + D2 + D3 + D4 + D5 + D6 + D7) + 1.4(2.5L1 + 2.5L2)$	验算钢管立柱

注: D1: 梁体自重; D2: 碗扣支架自重; D3: 模板自重; D4: 方木自重; D5: I20a 工字钢横向分配梁自重; D6: 贝雷梁自重; D7: I50a 工字钢横向支撑梁自重; L1: 施工人员、机械; L2: 混凝土振捣器.

3 设计方案的验算结果

3.1 贝雷梁的计算结果

取最不利上部贝雷梁弦杆结果,如图 7~9 所示,从图 7 中可知,贝雷梁弦杆最大应力为  $62.6$

MPa. 取最不利上部贝雷梁弦杆结果,从图 8 中可知,贝雷梁斜腹杆最大应力为  $87.6\text{ MPa}$ . 取最不利上部贝雷梁弦杆结果,从图 9 中可知,贝雷梁竖直腹杆最大应力为  $144.7\text{ MPa}$ . 经检算,上部贝雷梁的受力满足规范要求,如表 3 所示.

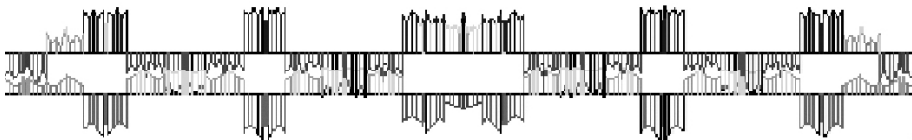


图 7 组合 2 作用 - 上部贝雷梁弦杆应力图  
Fig.7 Stress of bailey beam model under combination 2



图 8 组合 2 作用 - 上部贝雷梁竖直腹杆应力图  
Fig.8 Stress of vertical rod under combination 2



图 9 组合 2 作用 - 上部贝雷梁斜腹杆应力图  
Fig.9 Stress of oblique rod under combination 2

表 3 上部贝雷梁支架计算结果汇总表

Tab. 3 Calculation results for bailey beam model

杆件	弦杆			竖杆		斜杆	
贝雷片	轴力/kN			组合应力/MPa		跨中挠度/mm	
计算值	58.7	62.6	2.77	103.2	144.7	60.8	87.6
容许值	560	210	—	171	210	171	210
安全系数	9.54	3.35	—	1.66	1.45	2.81	2.40

### 3.2 横向支撑梁的计算结果

计算结果如图 10~13 所示. 从图 10~11 中可知, 横向支撑梁的最大弯矩为  $663.1 \text{ kN} \cdot \text{m}$ , 最大剪力为  $842.3 \text{ kN}$ . 从图 12 中可知, 横向支撑梁

的最大组合应力为  $106.2 \text{ MPa}$ . 从图 13 中可知, 横向支撑梁的最大剪应力为  $52.4 \text{ MPa}$ . 从图 10~13 和表 4 可知, 横向支撑梁 1#~8# 受力满足要求, 横向支撑梁 1#~8# 受力满足要求.

图 10 组合 3 作用 - 横向支撑梁弯矩图/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ )

Fig. 10 Moment of lateral beams under combination 3

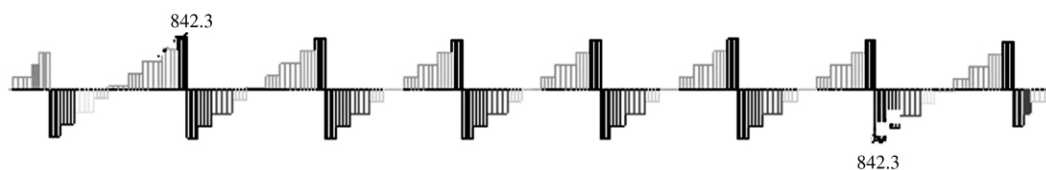


图 11 组合 3 作用 - 横向支撑梁剪力图/kN

Fig. 11 Shear of lateral beams under combination 3



图 12 组合 3 作用 - 横向支撑梁组合应力图/MPa

Fig. 12 Stress of lateral beams under combination 3

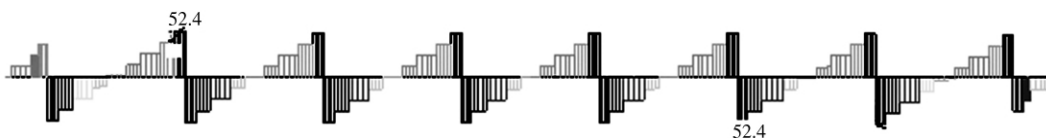


图 13 组合 3 作用 - 横向支撑梁剪应力图/MPa

Fig. 13 shear stress of lateral support beams

表 4 横向支撑梁计算结果汇总表

Tab. 4 Calculation results for lateral support beams

横向支撑梁编号	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	容许值	最小安全系数
组合应力/MPa	59.8	96.0	106.2	76.5	76.5	106.2	96.0	59.8	210	1.98
剪应力/MPa	29.5	47.4	52.4	37.7	37.7	52.4	47.4	29.5	120	2.29

### 3.3 钢管立柱的计算结果

钢管立柱轴力最大位置发生在 3#、6# 立柱处, 最大值为  $1\,674.3 \text{ kN}$ , 满足稳定性验算要求. 横向支撑梁的最大组合应力  $76.5 \text{ MPa} < [\sigma] = 170 \text{ MPa}$ , 安全系数为 2.22, 满足强度验算要求.

中间钢管立柱顶最大竖向位移  $DZ = -6.888 \text{ mm}$ . 综上所述, 钢管立柱强度、稳定性满足要求.

## 4 结论

膺架法是混凝土梁式桥现浇或拼装预制节段

常采用的方法.参考某大跨连续梁桥施工膺架的原图纸和荷载方案,针对其承载能力不足的问题,对施工膺架进行了设计.并用有限元软件对设计后的施工膺架的碗扣支架、贝雷梁、横向支撑梁、钢管立柱进行强度和稳定性验算,结果表明:在保证经济造价的前提下,设计后的桥梁施工膺架在承载力上面得到很大的提高,满足桥梁施工要求.因此,所提出的针对大跨连续梁桥施工膺架的设计方案的设计和验算方法可以为同类工程提供参考.

## 参考文献:

- [1] 范立础. 预应力混凝土连续梁桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 1988.
- [2] 雷俊卿. 桥梁悬臂施工与设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [3] 黄土柏, 郝俊峰, 徐海军. 拱形塔悬索斜拉组合结构桥梁的设计与施工[J]. 桥梁建设, 2010, 40(1): 45-48.
- [4] 胡汉舟, 文武松, 秦顺全, 等. 京沪高速铁路南京大胜关长江大桥技术总结[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2011.
- [5] 王政兵, 李红旗. 万州长江大桥钢梁架设方案及关键技术[J]. 桥梁建设, 2003, 33(S1): 1-3.
- [6] 李德坤, 朱云翔, 李芳军. 长寿长江大桥钢梁架设方案及关键技术研究[J]. 铁道标准设计, 2003, 47(S1): 122-124.
- [7] 王东辉, 覃勇刚. 南京大胜关长江大桥钢梁架设及关键技术[J]. 桥梁建设, 2009, 39(3): 5-8.
- [8] 靳春尚, 王殿永, 刘康, 等. 粉房湾长江大桥钢桁梁支架拼装施工技术[J]. 桥梁建设, 2012, 42(S1): 76-80.
- [9] 汪芳进. 武广客运专线东平水道桥钢梁架设施工设计[J]. 铁道标准设计, 2009, 53(4): 50-52.
- [10] 路桥集团第一公路工程局. 桥涵施工技术规范: JTJ041—2000[S]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [11] 北京钢铁设计研究总院. 钢结构设计规范: GB50017—2003[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
- [12] 冶金工业部建筑研究总院. 钢结构工程施工质量验收规范: GB50205—2001[S]. 北京: 中国计划出版社, 2002.
- [13] 中国建筑科学研究院. 建筑结构荷载规范: GB50009—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [14] 周水兴. 路桥施工计算手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [15] 黄绍金, 刘陌生. 装配式公路钢桥多用途使用手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [16] 李静斌, 陈淮, 葛素娟. 支座更换顶升方案对小箱梁桥结构性能的影响[J]. 郑州大学学报(工学版), 2010, 31(1): 40-43.
- [17] 李杰, 陈淮, 王艳. 曲弦下承式钢管混凝土桁梁桥改造方案分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(2): 33-37.

## Research on Design for Constructive Rack of Long-span Continuous Beam Bridge

LI Yu<sup>1</sup>, YANG Ci<sup>1</sup>, LI Chen<sup>2</sup>, GAO Liang<sup>3</sup>, WANG Jie<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Communications for Bridge Detection & Reinforcement Technology, School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Architecture, Chang'an University, Xi'an Shanxi 710064, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 4. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** The original drawings and load plans of one constructive rack of long-span continuous beam bridge are checked by using FEA software. Shortage of carrying capacity of this constructive rack is found. So, optimization design for this constructive rack is suggested to redesign the bowl buckle stents, bailey beams, lateral support beams and steel tube columns. Then, the FEA software is used to check the strength and stability of every members of constructive rack. The following conclusions are obtained: on the premise of economy build price, the carrying capacity of optimized constructive rack is increased to meet the demands of construction. The optimization and checking method proposed in this paper, can provide some meaningful reference for other similar projects.

**Key words:** long-span continuous beam bridge; constructive rack; design; FEA



# 大型箱体零件结构拓扑优化设计研究

秦东晨, 杜 鹏

(郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 大型箱体零件在机械设备中使用广泛, 主要依靠传统经验设计而成, 结构笨重. 采用 SIMP 变密度法, 以柔顺度最小化为目标, 体积为约束, 建立了大型箱体零件结构的拓扑优化数学模型. 利用密度过滤和灰度过滤处理, 解决了拓扑优化过程中数值不稳定问题. 使用 OC 准则求解获得不同载荷工况下的拓扑结构, 通过结构综合获得大型箱体零件新型结构, 并用有限元方法验证该结构的可行性和实用性, 为大型箱体零件的结构设计提供了一种有益的指导.

**关键词:** 大型箱体零件; 拓扑优化; 变密度法; 惩罚因子; 过滤函数

**中图分类号:** TH122

**文献标志码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.201505028

## 0 引言

大型箱体零件是指机械设备中体积、重量较大, 内部有筋板布置, 承受一定载荷的壳体结构零件, 是装备制造业重要基础件之一, 例如机床床身、桥式起重机主梁等. 目前, 大型箱体零件结构设计主要采用类比和经验等传统设计手段, 零件结构笨重. 拓扑优化能够进行结构大幅度减重设计和创新设计, 许华旻<sup>[1]</sup>等对惯性载荷下的飞行模拟器大臂使用导重法进行拓扑优化研究, 减轻了结构重量; 刘书田<sup>[2]</sup>等对大口径空间光学反射镜的筋板位置进行拓扑优化, 获得了合理的筋板布局. 拓扑优化已经成为工程设计领域重要的研究课题.

大型箱体零件拓扑优化方面, 雷少敏等<sup>[3]</sup>使用拓扑优化对多载荷工况下的铣床横梁筋板布局进行了研究; 秦东晨<sup>[4]</sup>等对桥式起重机主梁进行了拓扑优化. 研究较多采用商用有限元软件中的优化模块, 拓扑优化过程难以进行精确控制和修改.

笔者通过已有程序使用拓扑优化理论深入研究大型箱体零件结构设计. 根据受力将大型箱体零件抽象为简支梁, 使用 SIMP 变密度法建立大型箱体零件优化模型, 研究其求解存在的问题, 分

析载荷位置变化下的结构特征, 最后综合成一个新大型箱体零件结构, 并采用有限元方法验证该结构的可行性和实用性.

## 1 变密度法(SIMP)

### 1.1 基本思想

SIMP 变密度法由 Mlejnek 等<sup>[5]</sup>在 1993 年提出, 基本思想是假定存在一种密度可变的材料, 在材料密度和材料弹性模量之间建立关系, 以单元材料密度为设计变量, 将拓扑优化问题转化为材料最优分布问题. SIMP 变密度法通过下面公式建立材料密度和弹性模量之间的关系.

$$E_i = E_i(x_i) = x_i^p E_0, x_i \in [0, 1]. \quad (1)$$

式中:  $E_0$  为材料弹性模量;  $x_i$  为第  $i$  块离散后单元体密度;  $p$  为惩罚因子.

### 1.2 惩罚因子选择

变密度法中材料密度在 0~1 连续变化, 优化后结构会存在密度为中间值的区域, 这种区域无法加工, 需要尽量抑制. 惩罚因子  $p$  的作用是对设计变量中间密度值进行惩罚. 根据公式(1), 假设材料弹性模量  $E_0 = 2.0 \times 10^5$  MPa, 图 1 表示惩罚因子大小对弹性模量的影响: 随着惩罚因子数值增大, 中间密度向弹性模量区间两头靠拢, 达到惩罚效果.

收稿日期: 2015-05-19; 修订日期: 2015-09-01

基金项目: 2015 年度国家科技支撑计划资助项目(2015BAF06B06)

作者简介: 秦东晨(1965—), 男, 河南温县人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事机械强度及结构优化设计、虚拟样机、CAD/CAE/CAM 集成等研究, E-mail: deqin@zzu.edu.cn.

引用本文: 秦东晨, 杜鹏. 大型箱体零件结构拓扑优化设计研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 82-86.

结构拓扑优化结果会受惩罚因子数值改变的影响. 当惩罚因子  $p$  取值大于某值后, 结构优化结果是错误的<sup>[6]</sup>, 如图2. 当  $p=5$  时简支梁优化模型趋向于杆状结构, 不符合工程要求. 因此, 对于简支梁模型, 惩罚因子取值为3较合适.

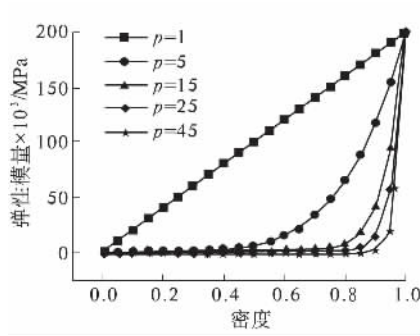


图1 惩罚因子作用

Fig.1 The effect of penalization power

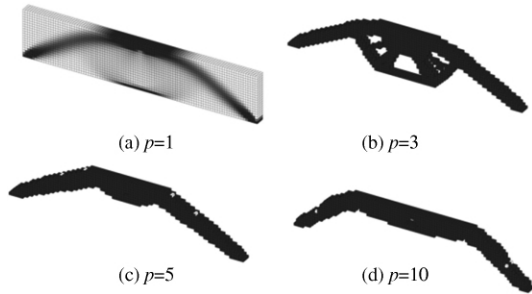


图2 不同惩罚因子对简支梁优化结果影响

Fig.2 Different penalization power's effect on the simply supported beam's optimization results

## 2 拓扑优化模型建立

简支梁使用有限单元法进行离散, 每个离散单元都有一个密度  $x_i$ , 所有密度变量组成一个设计空间

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n]^T. \quad (2)$$

式中:  $n$  为离散简支梁中单元数量.

对离散简支梁, 使用整体柔顺度最小化为目标函数, 体积为约束建立优化模型

$$\begin{aligned} \min \quad & c(\mathbf{X}) = \mathbf{F}^T \mathbf{U}(\mathbf{X}) \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} v(\mathbf{X}) = \mathbf{X}^T \mathbf{V} - \bar{v} \leq 0 \\ 0 < \mathbf{X}_{\min} \leq \mathbf{X} \leq 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{F}$  为施加的力, 力的大小、方向和作用位置确定, 与设计空间中设计变量无关;  $\mathbf{U}(\mathbf{X})$  为节点位移;  $\mathbf{V} = [v_1, \dots, v_n]^T$  为单元体积向量;  $\bar{v}$  为期望体积, 使用总体积乘期望体积百分比得到;  $\mathbf{X}_{\min}$  为防止奇异性发生设置的最小值.

## 3 灵敏度分析

对于优化模型, 灵敏度分析是寻优过程必不可少的部分. 其中体积偏导数如下

$$\frac{\partial v(\mathbf{X})}{\partial x_i} = \frac{\partial (\mathbf{X}^T \mathbf{V} - \bar{v})}{\partial x_i} = v_i. \quad (4)$$

式中:  $v_i$  为第  $i$  块单元体积.

体积约束灵敏度为每个单元的原始体积, 在这里是一个常量.

由于载荷  $\mathbf{F}$  与设计变量无关, 对有限元公式

$$\mathbf{K}(\mathbf{X}) \mathbf{U}(\mathbf{X}) = \mathbf{F}. \quad (5)$$

两边求偏导得到

$$\frac{\partial \mathbf{K}}{\partial x_i} \mathbf{U} + \mathbf{K} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_i} = 0. \quad (6)$$

目标函数两边偏导

$$\frac{\partial c}{\partial x_i} = \frac{\partial \mathbf{U}^T}{\partial x_i} \mathbf{K} \mathbf{U} + \mathbf{U}^T \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial x_i} \mathbf{U} + \mathbf{U}^T \mathbf{K} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_i}. \quad (7)$$

将式(6)代入式(7)得到

$$\frac{\partial c}{\partial x_i} = -\mathbf{U}^T \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial x_i} \mathbf{U}. \quad (8)$$

根据有限元理论, 整体刚度矩阵

$$\mathbf{K}(\mathbf{X}) = \sum E_i(x_i) \mathbf{k}_i^0. \quad (9)$$

对上式偏导

$$\frac{\partial \mathbf{K}(\mathbf{X})}{\partial x_i} = p x_i^{p-1} E_0 \mathbf{k}_i^0. \quad (10)$$

将式(10)代入式(8), 得到目标函数灵敏度

$$\frac{\partial c}{\partial x_i} = -\mathbf{u}_i^T [p x_i^{p-1} E_0 \mathbf{k}_i^0] \mathbf{u}_i. \quad (11)$$

目标函数灵敏度可以在单元层面进行计算, 减小了求解过程的复杂度. 灵敏度分析也为寻优过程的迭代求解和数值过滤提供了基础.

## 4 过滤函数

拓扑优化会产生数值不稳定现象, 常见有棋盘格、网格依赖. 如图3中简支梁模型, 左图网格划分为  $100 \times 20 \times 4$ , 右图网格划分为  $10 \times 2 \times 4$ . 图3中模型没有使用数值过滤技术, 两种网格划分后的优化结果出现了棋盘格, 并且两者网格疏密不同产生的优化结构也不同, 网格依赖使结构制造可能性和可靠性下降.

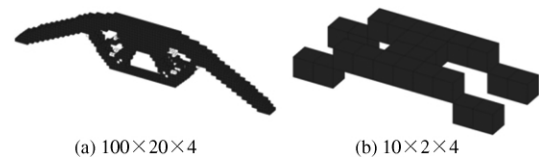


图3 数值不稳定现象

Fig.3 Numerical instabilities

棋盘格和网格依赖一般同时出现,能抑制棋盘格的方法也能抑制网格依赖问题<sup>[7]</sup>.一种常用抑制这些问题的方法是在优化过程中进行材料密度过滤<sup>[8]</sup>.密度过滤使用下列函数

$$\tilde{x}_i = \frac{\sum_{j \in N_i} H_{ij} v_j x_j}{\sum_{j \in N_i} H_{ij} v_j} \quad (12)$$

式中:  $N_i$  表示单元  $x_i$  的相邻单元.

灰度过滤方法<sup>[9]</sup>是另一种常用方法.灰度过滤是一种非线性方法,是通过修改 OC 准则来实现的

$$x_i^{\text{new}} = \begin{cases} \max(0, x_i - m), & \text{如果 } x_i B_i^\eta \leq \max(0, x_i - m) \\ \min(1, x_i + m), & \text{如果 } x_i B_i^\eta \geq \min(1, x_i - m) \\ (x_i B_i^\eta)^q, & \text{其它情况} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $\eta$  是 OC 准则中的一个参数,代表数值阻尼系数,取 0.3;  $q$  是灰度过滤参数,通常情况下  $q$  取 2,当取值为 1 时就是经典 OC 准则.

不同过滤方法对拓扑优化结果有一定影响,如图 4.与不使用过滤函数相比,使用过滤时棋盘格现象得到一定遏制,结构更加清晰;单独使用时密度过滤效果较好,而灰度过滤结果仍然出现棋盘格,因此灰度过滤不适合单独使用;联合使用两种过滤方法与单独使用密度过滤方法相比,两者结果有一定差别.鉴于过滤函数的作用分析,针对简支梁采用密度过滤、密度与灰度过滤联合两种方法进行优化.

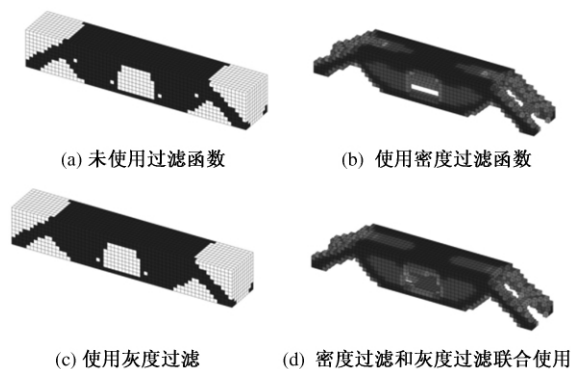


图 4 过滤方法对优化影响

Fig. 4 Different filters' impact on the results

## 5 不同工况拓扑优化结构与分析

大型箱体零件根据几何形状和受力分析可以简化为空心简支梁模型.为凸显大型箱体零件内

部结构布置,对大型箱体零件拓扑设计使用离散后的实心简支梁模型.

实心简支梁模型尺寸为  $10 \times 1 \times 1$  m,材料为 Q345,弹性模量为  $2.0 \times 10^5$  MPa,泊松比为 0.3,结构安全系数为 1.4,材料许用应力为 246 MPa,力跨中时许用挠度为 12.5 mm.根据大型箱体零件支撑位置分析,简支梁底部左右两条边被约束.

大型箱体零件承受载荷具有不确定性,而根据优化模型将载荷简化为确定量计算.由理论力学得到,当载荷在简支梁中部时,结构处于最危险工况;当载荷在两端时,结构变形最小.考虑载荷位置不同,模型承受 4 种工况: ① 载荷位于简支梁中部; ② 载荷位于距左端 1/4 处; ③ 载荷位于距右端 1/4 处; ④ 载荷同时位于简支梁中部、距左端 1/4 处和距右端 1/4 处.

对该简支梁在不同工况下使用不同过滤函数得到的结果如图 5.其中左边一列使用密度过滤得到,右边一列使用密度过滤和灰度过滤联合方法得到;图中字母标号对应上述工况字母标号,每一行工况相同.

4 种工况下两种不同过滤方法得到的结构具有一些共同特征.结构整体都呈现梯形形状,且可以分为两大部分:中间主体结构 and 左右两端支撑结构.由于简支梁上部承受载荷,模型中间主体部分呈现上宽下窄的梯形结构,并且前后腹板中心位置出现了较大的梯形孔洞.左右两端支撑结构的上下材料被去除.4 种工况下上盖板位置没有出现孔洞.在同种工况的结构图中,深黑色部分布局基本相同.深黑色代表了受力较大的单元,是模型优化后的主体结构,可以在其位置加上筋板结构来增强结构强度.

2 种过滤函数得到的结果也有不同特征.使用密度过滤后,4 种工况模型下盖板消失,中间结构横截面变成倒 U 字形;而使用密度和灰度联合过滤后,下盖板存在,横截面是一个口字型.而且由于模型中加载的是竖直向下载荷,不存在其它方向分量,因此这两种截面结构稳定性都较好.但实际载荷工况中载荷会有横向分量,这时口字型结构稳定性较好.因此,下盖板的存在还是必要的.

## 6 结构综合与分析

考虑到大型箱体零件通常为空心结构,根据上述优化结构的特征分析,在空心箱体的相应部位去除材料,得到大型箱体零件一个新结构,如图 6.



图 5 不同工况不同过滤函数简支梁拓扑优化结果

Fig. 5 Simply supported beam's topology optimization results with different loads and filters

建立新结构有限元模型,获得其在不同工况下变形和应力,分析是否符合工程要求.同时建立实心简支梁和空心简支梁模型,3 种模型对比分析得出载荷在简支梁中部时处于最危险工况.求解该工况下实心简支梁模型、空心简支梁模型和新结构的变形和应力,得到表 1、图 7、图 8.3 种模型最大变形依次增大,新结构变形最大,为 4.85 mm,但在许用挠度 12.5 mm 内.应力方面,最大应力依次增大,新结构应力最大,为 103 MPa,在许用

应力 246 MPa 内,并且从应力图可以看出新结构应力较前两种模型更为均匀,符合拓扑优化材料利用率最大化思想.

新结构体积只有实心简支梁的 22.5%,是空心简支梁的 62.5%.在同等材料密度下,体积减少意味着结构重量减轻.这说明新结构大大减轻了重量,同时在最危险工况下也能满足工程设计要求,因此新结构是具有可行性和实用性的.

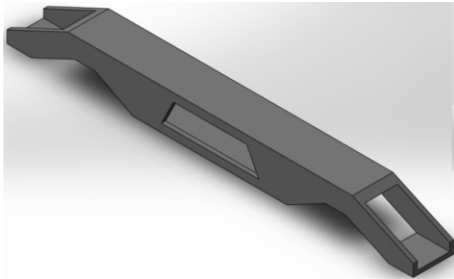


图 6 大型箱体零件新结构

Fig. 6 The new structure of large-box parts

表 1 最危险工况最大变形和应力对比

Tab. 1 Structural deformations and stresses in the most dangerous working conditions

项目	实心简支梁模型	空心简支梁模型	新结构
变形/mm	0.86	1.53	4.85
最大应力/MPa	56.60	81.90	103.00
体积/m <sup>3</sup>	10.00	3.60	2.250

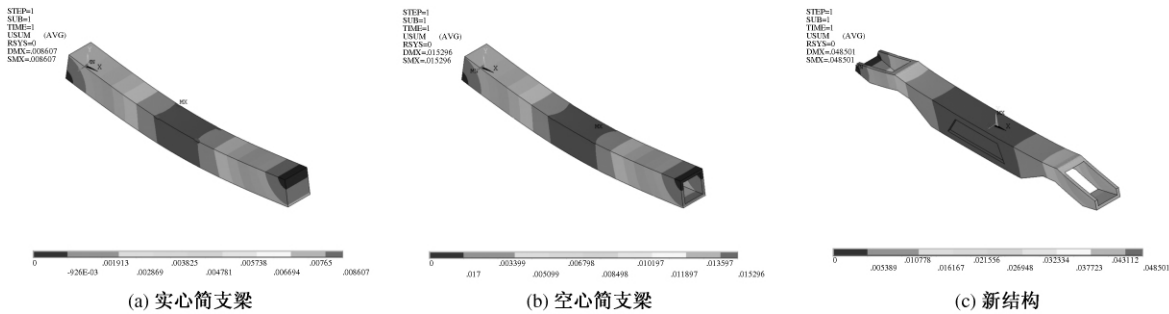


图 7 最危险工况变形图

Fig. 7 Structural deformations in the most dangerous working conditions

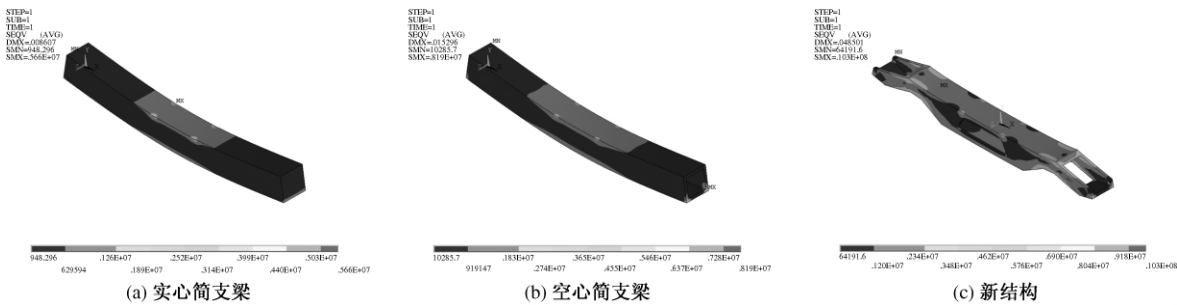


图 8 最危险工况应力图

Fig. 8 Stresses in the most dangerous working conditions

## 7 结论

(1) 惩罚因子大小对优化结果有重要影响,且惩罚因子并不是越大越好,应该选取合适值.对于简支梁模型,惩罚因子选为 3 较合适.

(2) 过滤函数种类不同会对结构产生一定的影响.对简支梁模型,灰度过滤单独使用效果不佳,而与密度过滤联合使用可以获得较优的拓扑结构.

(3) 载荷作用位置不同会得到不同优化结构,优化结构中存在一些共同结构特征,可以用来指导大型箱体零件设计.

(4) 新结构符合工程要求,是大型箱体零件拓扑优化设计的产物,为大型箱体零件结构设计提供了一种有益的指导.

## 参考文献:

- [1] 许华旻,关立文,王立平,等. 惯性载荷下飞行模拟器大臂结构的拓扑优化[J]. 机械工程学报, 2014, 50(9): 14-23.
- [2] 刘书田,胡瑞,周平,等. 基于筋板式基结构的大口径空间反射镜构型设计的拓扑优化方法[J]. 光学精密工程, 2013, 21(7): 1803-1810.
- [3] 雷少敏,唐华平,朱维南. 3ZX 平面铣床横梁有限元分析及优化研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2011, 32(3): 60-63.
- [4] 秦东晨,闫利利. 桥式起重机箱型主梁的结构优化设计[J]. 矿山机械, 2010, 38(12): 48-51.
- [5] MLEJNEK H P, SCHIRRMACHER R. An engineer's approach to optimal material distribution and shape finding[J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 1993, 106(1/2): 1-26.
- [6] 陈祥,刘辛军. 基于 RAMP 插值模型结合导重法求解拓扑优化问题[J]. 中国机械工程, 2012, 48(1): 135-140.
- [7] 左孔天,王书亭,陈立平,等. 拓扑优化中去除数值不稳定性的算法研究[J]. 机械科学与技术, 2005, 24(1): 86-93.
- [8] BRUNS T E, TORTORELLI D A. Topology optimization of non-linear elastic structures and compliant mechanisms[J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 2001, 190(26/27): 3443-3459.
- [9] GROENWOLD A A, ETMAN L F P. A simple heuristic for grayscale suppression in optimality criterion-based topology optimization[J]. Structural and multidisciplinary optimization, 2009, 39(2): 217-225.
- [10] AAGE N, ANDREASSEN E, LAZAROV B S. Topology optimization using PETS: an easy-to-use, fully parallel, open source topology optimization framework[J]. Structural and multidisciplinary optimization, 2015, 51(3): 565-572.
- [11] LIU K, TOVAR A. An efficient 3D topology optimization code written in Matlab[J]. Structural and multidisciplinary optimization, 2014, 50(6): 1175-1196.

## A Research for Structural Design of Large-scale Box Parts Based on Topology Optimization

QIN Dongchen, DU Peng

(School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The large-scale box parts are widely used in mechanical equipments. Because the design of large-scale box parts mainly rely on traditional experience, the structure is cumbersome. An optimization model to the large scale box parts, in which the compliance is minimized subjected to volume constraint, is established based on SIMP method. And the density filter and the gray scale filter are used to avoid the numerical instabilities that will occur in the optimization process. After loading the load in different positions of the large scale box parts respectively and using OC criteria to solve each condition, the optimal structures are obtained. Then, an optimal topology configuration is obtained by combining different optimal structures above, and its validity and practicability are tested by FEM. This research provides a useful guide for the design of the large scale box parts.

**Key words:** large scale box part; topology optimization; SIMP; penalization power; filter function

文章编号: 1671-6833(2016)02-0087-05

# 卫星岛式内嵌双环形交叉口概念设计

郑元勋, 李 桐

(郑州大学 水利与环境学院交通系, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 为了消除环形交叉口的冲突点、减少交织区车流量和左转与调头车辆行驶距离,在现有卫星岛式环形交叉口的基础上提出:将单一环形交叉改为内外双环形交叉;改变卫星岛式环形交叉口的分流方式.据此进行了卫星岛式内嵌双环形交叉口概念设计,且基于两者对比及模拟分析发现:在造价和用地相当的情况下,卫星岛式内嵌双环形交叉口不但可以保留卫星岛式环形交叉口带来的优势,且能消除其在车辆由卫星岛驶入中心岛时产生的冲突点,同时通过不同的分流方式避免了交织段车流量集中、车辆绕中心岛顺时针行驶(与常规驾驶习惯不符)以及部分路段对向行驶的问题,从而提高路段通行能力.

**关键词:** 卫星岛;内嵌;双环形;交织量;交叉口设计

**中图分类号:** U412.35

**文献标志码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.201504053

## 0 引言

在我国道路交通建设中,环形交叉口的运用较为广泛.环形交叉口通过采用渠化交通的方法,避免了交叉路口因红绿灯造成的周期性阻滞,同时将冲突点转变为交织点增加行车的安全性.但由于采用环形交叉设计车辆只能沿同一个方向行驶,使得交织区车流量大大增加,进而使得车辆右转、左转通行量下降,同时也造成调头与左转车辆绕行距离远<sup>[1-2]</sup>.针对这种情况,诸多学者提出相应的解决方案,其中较为成熟的为张超、郑元勋提出的卫星岛式环形交叉口设计<sup>[3]</sup>,但是也存在明显弊端:①车辆由卫星岛驶入中心岛时存在危害大的冲突点;②减少交织区车流量不明显,且对于调头和左转车辆较多的路口,造成交织段集中、交织段短等问题;③车辆绕中心岛顺时针行驶不符合驾驶习惯,同时车辆在部分路段会与右转车辆对向行驶,不安全性增加.因此,笔者以卫星岛式环形交叉为基础提出卫星岛式内嵌双环形交叉设计理念,并进行构型设计,分析其交通组织方式及环道的交通流线.

## 1 卫星岛式环形交叉口的运行特征

### 1.1 卫星岛式环形交叉口的提出与概念

卫星岛式环形交叉通过在道路末端、环形交

叉口前增设卫星岛和分离右转车道的措施将回头车辆、左转车辆与右转车辆分开,同时在卫星岛中部再通过中心岛将回头车辆与左转车辆分离,从而达到减少交织区车流量以及缩短左转车辆绕行距离的目的<sup>[4]</sup>.

### 1.2 卫星岛式环形交叉口的独特优势

卫星岛式环形交叉口的构成及交通流线如图1所示(以三岔口为例).以甲处的车辆为例:车流在道路末端进行第一次分流,将右转车辆与左转车辆和调头车辆分开.右转车辆沿独立的右转车道直接右转,不与其他方向车流产生任何交织.

左转车辆和调头车辆从车流中分离出去后,进入卫星岛B的环道行驶.在环道中部的交织区段车流进行第二次分流,将左转车辆和调头车辆分开.调头车辆与中心岛驶出的车辆进行第一次汇流后继续沿卫星岛B的环道行驶,最后在甲-1段与丙处的右转车辆进行第二次汇流,至此调头车辆调头结束.

左转车辆在卫星岛环道中部与调头车辆分流后,通过变换车道进入中心岛环道.左转车辆进入中心岛环道后按顺时针行驶,当行驶到左侧路口时再通过交织区变化车道进入丙的卫星岛环道,并与丙的调头车辆进行汇流行驶.最后在丙-5段与乙处驶来的右转车辆进行汇流,至此左转车

收稿日期: 2015-04-22; 修订日期: 2015-08-23

基金项目: 河南省交通运输厅科技攻关项目(2013-2-42); 河南省交通运输厅科技项目(2014K37-2)

作者简介: 郑元勋(1978—),男,河南驻马店人,郑州大学副教授,博士,博士后,主要从事结构耐久性、结构监控、检测及加固等研究, E-mail: yxzheng@zzu.edu.cn.

引用本文: 郑元勋,李桐.卫星岛式内嵌双环形交叉口概念设计[J].郑州大学学报(工学版),2016,37(2):87-91.

辆行驶结束.

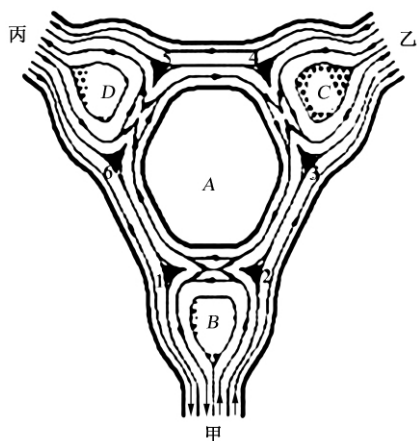


图1 三岔口卫星岛式环形交叉口的交通流线

Fig. 1 Divergence satellite island style Roundabout traffic flow lines

卫星岛式环形交叉与传统环形交叉相比,在不增加分合流次数的情况下缩短了左转车辆和调头车辆的行驶距离,并且在一定程度上减少了参与交织的车辆,且左转车辆直接左转.

### 1.3 卫星岛式环形交叉口的限制

卫星岛式环形交叉口虽然在一定程度上提高了交叉口的通行能力,但从卫星岛驶入中心岛的车辆与中心岛驶出的车辆会产生冲突点,同时在较短的交织段内造成密集的交织量和分流汇流点,而且为追求缩短左转车辆行驶路程,使车辆绕中心岛顺时针行驶与常规的驾驶习惯不符以及在部分车道会出现对向行驶的现象,增加了行车的不安全性,降低了通行能力,从而不能很好改善传统交叉口车流速度慢,通行能力低的问题<sup>[5]</sup>.

## 2 卫星岛式内嵌双环形交叉口概念设计

### 2.1 设计目标

针对当前平面交叉设计中的运行缺陷和普遍存在的问题,确定设计目标和设计准则.

(1) 消除车辆由卫星岛驶入中心岛时产生的冲突点,减小中心岛与卫星岛交界处车辆交织量<sup>[6]</sup>.

冲突点是目前对交通干扰最严重的因素,通过改变设计方法来消除产生的对交通干扰非常大的冲突点,将会进一步提升交叉口的通行效率.同时,若能通过采用不同的分流方式减少在交织段的交织量,也会进一步提高车辆的通行能力<sup>[7]</sup>.

(2) 避免车辆绕中心岛顺时针行驶和在部分车道出现对向行驶的现象.司机的驾驶习惯以及

心理因素也会对车辆的行驶造成一定的影响,如果能够使设计符合常规行驶习惯,就会给司机营造较为良好的驾驶环境,提高驾驶的安全性<sup>[8]</sup>.

### 2.2 构型设计

基于上述目标,对卫星岛式环形交叉口做出以下改进:(1) 将中心岛由单一环形交叉变为双环形交叉;(2) 改变现有的分流方式;(3) 对内环形进行进出口的分离<sup>[9]</sup>.针对改进的地方,较以三岔口为例加以介绍,如图2所示.

### 2.3 交通流的分析

图2是三岔路口卫星岛式内嵌双环形交叉口的交通流线图,现以甲处驶入的车流为例进行分析.

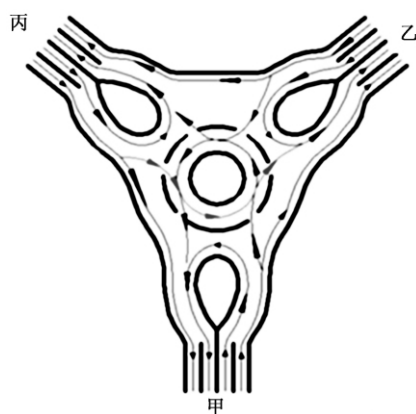


图2 卫星岛式内嵌双环形交叉口的交通流线图

Fig. 2 Satellite Island embedded double roundabout traffic flow chart

车流在道路末端进行第一次分流,将调头车辆分离出去.调头车辆绕卫星岛行驶,绕行一周后实现调头.调头车辆行驶中不存在任何分流点,只在卫星岛末端与其他方向驶来的右转车辆和由内环出来的左转车辆进行一次合流,不存在交织段.与卫星岛式环形交叉相比之下,通过改变分流方式,在不增加调头车辆行程的前提,避免调头车辆与其他方向车辆的交织,消灭了交织段产生的冲突点,增加了行车的安全性确保了调头车辆的快速安全行驶.

左转与右转车辆在进入外环后进行分流,右转车辆在外环直接右转,左转车辆进入内环行驶.右转车辆的行驶与卫星环岛式交通基本一致.左转与右转车辆分离后进入内环沿逆时针行驶.在不增加分流、汇流点的情况下,将进行汇流、分流的车量由左转+调头变为只有左转,这样就减少了交织区的行车压力,从而增加环形交叉口的通行能力.同时通过控制内环的进出点,也避免了卫



星岛环形交叉在进入中心岛时产生的较为集中的交织区及冲突点,从而进一步提高通行能力.

该设计不足之处在于延长了部分左转车辆的行程. 通过内环行驶的左转车辆相比传统交叉口,其行程还是有较显著缩短,且不与右转车辆发生交织. 在分流车辆、减小交织段的交织量等方面,卫星岛式内嵌双环形交叉口设计均占优.

图 3 为十字路口的交通流线图. 观察易得,该方案实现了调头、右转和左转车辆三者分离. 显然对于解决左转、调头车辆绕行距离远,中心岛交织段车流量大等问题更加有利.

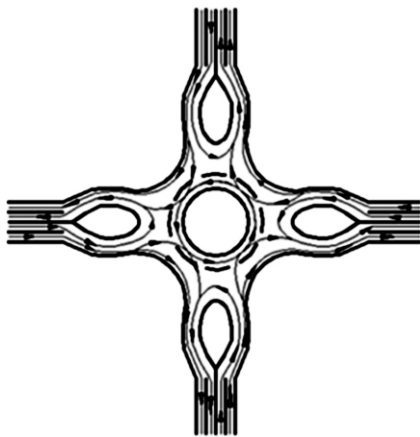


图 3 四路交叉路口的交通流线图

Fig.3 Traffic flow chart four intersections

3 基于 PTV-VISSIM 的仿真分析

3.1 仿真模型-VISSIM

VISSIM 是常用的一种微观的、基于时间间隔和驾驶行为的仿真建模工具. 它可以用以分析各种交通条件下,城市交通和公共交通的运行情况. 笔者选用 VISSIM5.0 版本进行仿真,仿真流程图如图 4 所示.

为了对比分析,通过设置监测断面来输出系统车辆行程时间、排队长度和平均延误等指标.

3.2 内嵌式双环形交叉口仿真优化

根据图 4 所示仿真优化方法及图 2 的基本模型对三岔口内嵌式双环形交叉口进行模型建立,

并进行如下假设和参数输入. 假设 1: 所有车辆在驶入交叉口前,均已变换到规定车道;假设 2: 所有车辆按文中所规定交通行驶规则行驶;假设 3: 该环交不考虑交通信号控制、行人以及非机动车车辆的行驶;假设 4: 车辆组成、车辆类型以及期望行驶速度等都根据现有环形交叉口状况进行拟定.

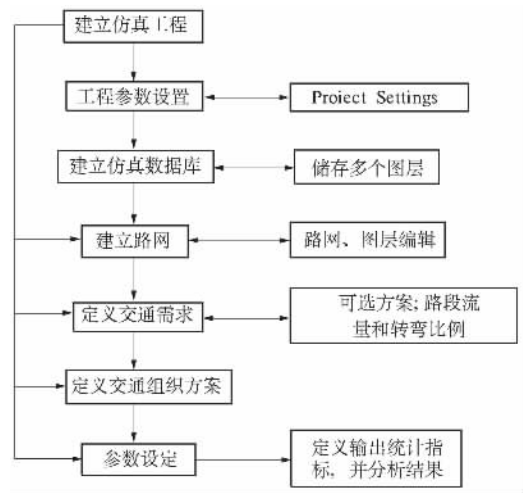


图 4 VISSIM 交通仿真流程图

Fig.4 Flowchart of Transportation Simulation Based on VISSIM

交叉口输入流量状况如表 1 所示. 根据我国现有环形交叉口现状,规定该路段平均车速  $V=30\text{ km/h}$ . 仿真运行输出结果如表 2~表 4 所示.

表 1 交叉口交通量

Tab.1 Traffic volume of the intersection veh/h

甲		乙		丙	
右转	383	右转	383	右转	383
左转	192	左转	192	左转	192
调头	200	调头	170	调头	170
总计	775	总计	745	总计	745

3.3 传统环形交叉口仿真优化

传统三岔口环形交叉的基本假定与参数输入保持与三岔口内嵌式双环形交叉口相一致. 传统三岔口环形交叉的仿真输出数据如表 5~7 所示.

表 2 行程时间

Tab.2 Traffic travel time

时间	行程时间	车辆数	行程时间	车辆数	行程时间	车辆数	行程时间	车辆数	行程时间	车辆数	行程时间	车辆数
编号	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6
100	12.6	4	14.1	6	12.8	1	8.0	2	7.9	3	9.3	2
200	14.2	6	13.2	6	13.2	6	8.4	8	9.2	4	9.1	5
300	16.6	8	15.3	5	15.3	10	8.1	2	9.9	5	9.6	10

续表 2 行程时间  
Tab.2 Traffic travel time

时间	行程 时间	车辆数	行程 时间	车辆数	行程 时间	车辆数	行程 时间	车辆数	行程 时间	车辆数	行程 时间	车辆数
400	13.8	5	12.7	9	12.7	3	11.1	7	7.4	1	8.9	6
500	14.9	5	13.6	6	13.6	4	9.4	5	8.0	2	10.9	2
600	16.6	7	14.2	8	14.2	5	9.4	4	8.0	7	8.8	4

注:行程时间为车辆通过检测区段的起点至离开终点的时间间隔;车辆数为在时间间隔内驶过所选断面的车辆数量;编号为所选检测断面;该试验记录车辆类型均为全部;时间为每 100 s 检测输出一次.

表 3 排队长度  
Tab.3 Queue Length

时间	平均	最大	停车	平均	最大	停车	平均	最大	停车
编号	1	1	1	2	2	2	3	3	3
100	0	0	0	0	6	2	0	0	0
200	0	7	2	0	0	0	0	0	0
300	1	13	3	0	5	3	0	0	0
400	0	0	0	0	0	0	0	0	0
500	0	7	2	0	6	1	0	0	0
600	1	12	3	0	6	3	0	6	1

注“平均”为在时间间隔中的平均排队长度“最大”为在时间间隔中最大排队长度“停车”为排队车辆的停车次数.

表 4 延误时间

Tab.4 Delay

时间	平均延误时间
编号	1
100	0.7
200	0.5
300	1.8
400	0.2
500	1.1
600	2.2
全部	1.2

### 3.4 数据对比分析

通过上述输出数据的对比分析,可以看出,在同样的交通组成和交通状况下,采用内嵌式双环形交叉口设计时,车辆通过交叉口的行程时间有较明显的缩短,同时相同时间内通过的车辆数也得到提升,此外车辆行驶在交叉口时的平均排队长度和平均延误都有了明显的改善.综合上述分析,可以看出内嵌式双环形交叉口比传统环形交叉口具有明显优势,提高了交叉口的通行效率.

表 5 传统三岔口环形交叉行程时间

Tab.5 Traditional roundabout of divergence traffic travel time

时间	行程 时间	车辆数	行程 时间	车辆数	行程 时间	车辆数	行程 时间	车辆数	行程 时间	车辆数	行程 时间	车辆数
编号	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6
100	19.6	3	21.2	6	20.1	1	24.9	1	25.7	3	23.7	2
200	20.4	7	31.6	6	104.5	1	26.5	7	24.8	2	24.3	4
300	24.4	8	27.9	5	148.2	1	39.9	3	36.3	6	28.8	9
400	27.6	5	25.8	8	124.3	4	31.1	8	38.8	2	27.0	7
500	21.8	5	21.8	7	66.0	9	29.7	3	27.7	2	27.9	3
600	21.6	7	25.8	8	42.3	3	30.6	5	34.5	5	27.5	3

注:行程时间为车辆通过检测区段的起点至离开终点的时间间隔;车辆数为在时间间隔内驶过所选断面的车辆数量;编号 1、2 等为所选检测断面;该试验记录车辆类型均为全部;时间 100、200 等为每 100 s 检测输出一次.

表 6 传统三岔口环形交叉排队长度

Tab.6 Traditional roundabout of divergence queue Length

时间	平均	最大	停车	平均	最大	停车	平均	最大	停车
编号	1	1	1	2	2	2	3	3	3
100	1	11	2	0	0	0	1	15	2
200	1	11	2	0	0	0	7	22	4
300	2	17	4	8	27	3	3	21	4
400	3	31	2	2	21	1	3	17	5
500	1	11	2	1	21	1	1	15	3
600	1	11	2	6	35	7	3	21	3

表7 传统三岔口环形交叉延误时间

Tab.7 Traditional roundabout of divergence delay s

时间 编号	平均延误时间
100	1.1
200	11.9
300	14.7
400	29.5
500	20.9
600	7.4
全部	15.5

#### 4 结论

卫星岛式内嵌双环形交叉口概念设计通过增设内环形、改变卫星岛式环形交叉的分流方式以及对进出内外环形进行调控的方法,在不进行立体交叉设计的前提下达到了解决传统交叉口左转和调头车辆绕行距离远、交织区车流量大的难题。同时也规避了卫星岛式环形交叉设计中出现的冲突点、车辆沿中心岛顺时针行驶以及中心岛交织段集中和车流量大行车速度慢的问题,为现代化交叉口平面设计提供了新的设计理念。

#### 参考文献:

- [1] 王昊,王炜,陈峻. 非信号控制交叉口通行能力及延误特性[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2007,35(1): 114-117.
- [2] 郑晨,郑长江. 公交车车速诱导研究与应用[J]. 郑州大学学报(工学版), 2013,34(1): 19-22.
- [3] 张超,郑元勋. 卫星岛式环形交叉口的概念设计[J]. 公路, 2013,9(9): 51-54.
- [4] 张金水. 道路勘测与设计[M]. 上海: 同济大学出版社, 2009.
- [5] 郭瑞军,林柏梁. 环形交叉口交织区车流运行特性的研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2010,10(3): 29-34.
- [6] 杨锦冬,杨晓光,彭国雄. 环形交叉口交通控制模式研究[J]. 公路交通科技, 2000,17(6): 47-51.
- [7] 李小帅. 城市大型平面交叉口交通组织优化研究[D]. 北京: 北京交通大学交通运输学院, 2009.
- [8] 杨静,景国勋. 驾驶员的心理因素对其可靠性的影响分析[J]. 交通标准化, 2009,198(6): 86-88.
- [9] 顾九春. 平面交叉口左转交通组织革新设计的进展及启示[J]. 中外公路, 2006,4(8): 224-227.

### The Conceptual Design of Satellite Island Type Embedded Double Circular Intersection

ZHENG Yuanxun, LI Tong

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

**Abstract:** In order to eliminate the conflict of circular intersections, reduce the traffic flow of weaving areas and the travel distance of the vehicles turning left or back, some improvement ideas are put forward based on the analysis of the advantages and disadvantages of the existing satellite island type circular intersection: such as changing the single circular intersection into the internal and external double loop type; altering the shunt way of circular intersection of satellite island type. Comparing the conceptual design of satellite island type embedded double circular intersection with the satellite island type circular intersection, it can be seen that, in the case of similar costs and occupied area, satellite island type embedded double circular intersection can not only maintain the advantages of the original one but also eliminate the conflict which arising from the vehicles' travels from the satellite island to central island. Meanwhile, the conceptual design avoids the excessive traffic flow in the weaving areas, the situations that vehicles drive around the satellite island type circular intersection clockwise( not in accordance with the conventional driving habits) and vehicles' driving in opposite direction, as result, the road traffic capacity is improved.

**Key words:** satellite island; embedded; double ring; mixed amount; intersection design

## 基于光栅结构的碲化镉太阳能电池吸收层设计

孙晓红, 张琳, 李文阳, 郭敏强

(郑州大学 信息工程学院 河南省激光与光电信息技术重点实验室, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 设计了一种吸收层为双填充比矩形光栅结构的碲化镉薄膜太阳能电池, 利用时域有限差分法对矩形光栅和双填充比矩形光栅碲化镉吸收层在 250 ~ 1 000 nm 入射波长范围内的吸收效率进行分析. 实验结果表明: 相比于平板型吸收层, 单填充比和双填充比矩形光栅结构的吸收效率均有较大提高; 双填充比矩形光栅在整个可见光范围内的吸收率整体得到提高, 其对可见光的平均吸收率相比于平板型至少提高 10%. 可见通过优化太阳能电池吸收层的结构, 光子在光栅内的随机反射增加了光在吸收层的作用时间和距离, 提高了薄膜太阳能电池的光电转换效率.

**关键词:** 太阳能电池; 光栅; 时域有限差分法; 吸收层; 碲化镉

**中图分类号:** O431 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.201505039

### 0 引言

可持续发展是 21 世纪人类面临的一个重大问题. 新型的可再生能源, 如太阳能、风能、水电等清洁能源越来越受到人们的青睐. 太阳能不释放任何对大气有害的气体, 是一种清洁能源<sup>[1]</sup>. 在可再生能源的研究中, 太阳能电池是一个非常重要的研究领域<sup>[2]</sup>. 有关数据显示: 预计到 2025 年, 光伏能源将占人类总能源的 22% 左右, 到 21 世纪中期, 太阳能发电将达到能源市场的 30% 以上<sup>[3]</sup>.

目前太阳能电池光电转换效率不高主要是由于光子流失. 造成光子流失的主要原因有: ①吸收层的材料对光的吸收率小; ②吸收层本身的结构不利于光电转换<sup>[4]</sup>. 对于第一个原因, 应尽量减少光在入射面的反射, 同时提高光子的主动吸收能力<sup>[5]</sup>, 可选用光电转换效率高的材料. 提高效率, 降低成本一直是光伏(PV)材料的研究重点<sup>[6]</sup>. 薄膜太阳能电池的研究及其应用是当今光伏领域的热点, 碲化镉(CdTe)薄膜是一种发展较快的太阳能电池吸收层材料<sup>[7]</sup>. 碲化镉材料制成的太阳能电池具有直接能隙, 其能隙值为 1.45 eV, 正好位于理想太阳能电池的能隙范围内, 并具有

很高的吸光系数, 成为可以获得高效率理想太阳能电池的材料之一<sup>[8]</sup>. CdTe 易沉积成大面积的薄膜, 并且 CdTe 薄膜太阳能电池的制造成本较低, 已成为美、德、日、意等国研发的主要对象<sup>[9]</sup>.

针对第二个问题可以设计出具有高吸收率的太阳能电池吸收层结构. 太阳能电池总的吸收效率等于各层吸收效率之和<sup>[10]</sup>, 笔者主要对吸收层结构进行优化设计. 近年来, 在太阳能电池中加入光栅结构来提高吸收率成为一个非常热门的话题, 光栅结构可以提高太阳能电池的吸收效率<sup>[11]</sup>. 通过设计矩形光栅型结构, 利用时域有限差分法, 计算吸收层的吸收率. 然后进一步在矩形光栅结构的基础上优化填充比和碲化镉介质厚度, 设计双填充比光栅的吸收层结构, 探究其对吸收率的影响.

### 1 吸收层模型的 FDTD 法分析

吸收层主要采用碲化镉材料, 碲化镉是一种化合物半导体, 属于 II-VI 族化合物, 性能稳定, 是直接带隙半导体, 光吸收强, 其禁带宽度与地面太阳光谱有很好的匹配, 最适合于光电能量转换, 所以具有更高的光电转换效率. 碲化镉材料的折射率与入射波长成非线性关系, 图 1 为碲化镉材

收稿日期: 2015-05-26; 修订日期: 2015-08-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11104251)

作者简介: 孙晓红(1970—), 女, 河南郑州人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事光通信研究, E-mail: iexhsun@zzu.edu.cn.

引用本文: 孙晓红, 张琳, 李文阳, 等. 基于光栅结构的碲化镉太阳能电池吸收层设计[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 92-96.

料在 250 ~ 1 000 nm 对应的色散关系曲线,这里采用其复折射率,  $n$  为折射率实部,  $k$  为折射率虚部。

图2为二维的沿  $x$  方向无限延伸的矩形光栅结构,模型的背景介质为空气,即上部和下部均为空气层,中间层为矩形光栅结构,光栅的厚度为  $h$ ,光入射角为  $\theta$ ,光栅的周期为  $T$ ,填充比为  $f$ ,即在一个晶格周期内碲化镉介质的宽度为  $f \times T$ 。笔者研究在 TE 和 TM 偏振分量光垂直( $\theta = 0$ )入射条件下得到的结果。

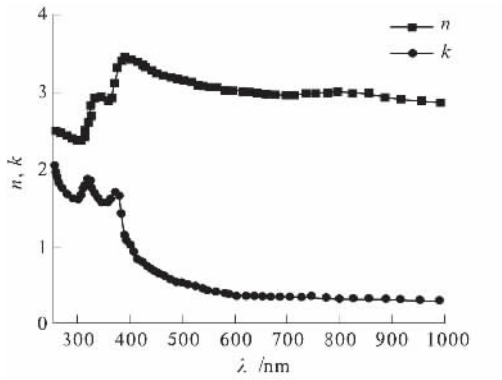


图1 碲化镉材料的折射率实部  $n$  和虚部  $k$

Fig.1 Refractive index  $n$  and extinction coefficient  $k$  of CdTe

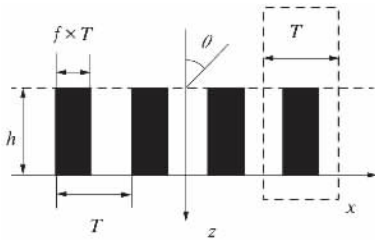


图2 矩形光栅结构吸收层

Fig.2 The structure of rectangular grating in the absorption layer

时域有限差分法是把 Maxwell 旋度方程在时间和空间领域上进行差分化,将电磁场进行空间和时间的离散化,得到电磁场演化的迭代方程组,实现在一定体积内和一段时间上对连续电磁场的数据取样压缩<sup>[12]</sup>。通过计算电场以及磁场随时间的变化情况,进而得出空间电磁场的时间演化过程。利用时域有限差分法对该模型进行数值计算,Maxwell 旋度方程为

$$\begin{cases} \nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} \\ D = \varepsilon E \\ \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ B = \mu H \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon$  为介电常数;  $\mu$  为磁导系数。对方程组(1)进行归一化处理,得到

$$\begin{cases} \nabla \times H = \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \frac{\partial D}{\partial t} \\ D = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} E \\ \nabla \times E = -\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \frac{\partial B}{\partial t} \\ B = \frac{\mu}{\mu_0} H \end{cases} \quad (2)$$

在各向同性介质中,式中:  $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ ;  $\mu = \mu_0 \mu_r$ 。

FDTD 方法是一种研究电磁场问题的时域数值方法,它在解决复杂外形、非均匀介质、时域、宽带散射和辐射系统的电磁问题时具有独特的优越性<sup>[13]</sup>。用差分代替微分作为根本出发点,根据 Yee 氏网格中各个场量的分配直接将麦克斯韦旋度方程转化成差分方程组,在空间和时间上完成电磁场问题的离散。笔者在不同的边界区域上运用电磁场边界条件,求解 TE 和 TM 偏振分量下的吸收层吸收效率。

## 2 实验模拟及分析

### 2.1 平板型与矩形光栅型结构吸收率对比

相对于平板型结构来说,把吸收层雕刻成矩形光栅结构,使得太阳能电池与光的接触面积增大,并且光在电池内部经过多次反射,以增加光路长度;同时产生的衍射效应使电池表面反射减弱,从而增加吸收率<sup>[14]</sup>。

实验模拟的矩形光栅周期  $T = 400$  nm,碲化镉介质厚度  $h = 300$  nm,填充因子  $f = 0.7$ 。图3为光垂直入射时,在碲化镉介质厚度相同的情况下,平板型结构和矩形光栅结构随波长变化的吸收率曲线。从图3中可以看出,在 250 ~ 1 000 nm 波长范围内,平板型结构在 TE 模式和 TM 模式下的吸收率曲线基本重合,在 TE 模式和 TM 模式下矩形光栅结构的平均吸收率整体上都高于平板型结构的吸收率,其中在 TE 模式下平均高出约 5%,TM 模式下平均高出约 10%。

### 2.2 填充比对矩形光栅结构的影响

矩形光栅的填充比对吸收层的吸收效率有很大的影响。光栅槽宽度不同,结构表面附近的电磁场强分布会有显著的变化<sup>[15]</sup>。图4为矩形光栅周期  $T = 400$  nm,厚度  $h = 300$  nm 时,TE 和 TM 模式下不同填充比的平均吸收率变化曲线。

从图4可以看出,随着填充比增加,矩形光栅结构的吸收率在 TE 模式和 TM 模式下呈先升高,后稍有下降的趋势。在填充比为 0.7 时,两种模式

下吸收率基本相同,约为75%;在TE模式下,填充比为0.6时,最大平均吸收率为76.71%;在TM模式下,填充比为0.8时,最大平均吸收率为75.69%。由以上分析可知,矩形光栅的吸收效率不仅与介质材料有关,填充比 $f$ 也是一个重要的影响因素。综合填充比对矩形光栅平均吸收效率的影响,可以设计出平均吸收效率在整个波段范围内较高的吸收层结构。

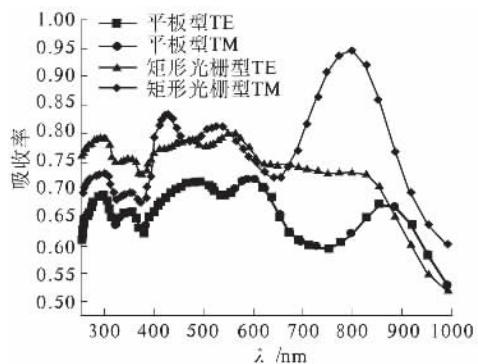


图3 平板型和矩形光栅结构的吸收率对比图

Fig. 3 The absorption efficiency of non patterned and rectangle grating structure

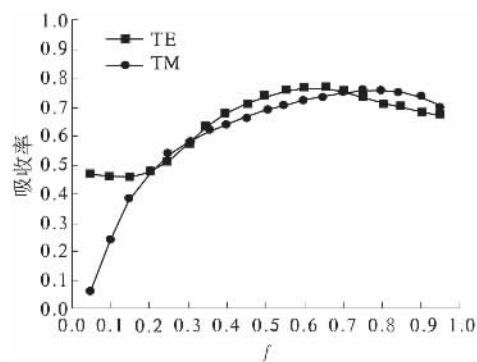


图4 不同填充比平均吸收率曲线( $h = 300$  nm)

Fig. 4 The average absorption efficiency of different filling ratio ( $h = 300$  nm)

### 2.3 双填充比矩形光栅设计与优化

基于对矩形光栅填充比的研究,设计了具有

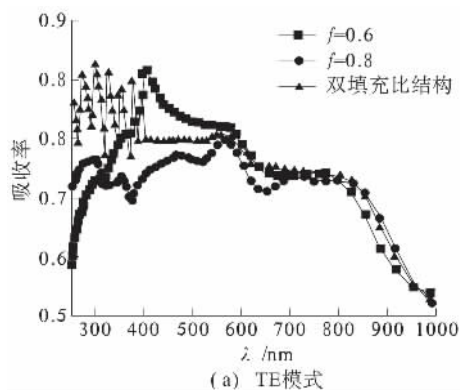


图6 单填充比和双填充比矩形光栅结构吸收率

Fig. 6 The absorption efficiency of the structure of single filling ratio and double filling ratios

双填充比的矩形光栅吸收层结构。这里吸收层的填充比选取 $f_1 = 0.6$ 和 $f_2 = 0.8$ 。在介质厚度 $h = 300$  nm,光栅周期 $T = 400$  nm,填充比为0.6时,在TE模式下有最大的平均吸收率;填充比为0.8时,在TM模式下有最大的平均吸收率。在每个光栅单元内,选取光栅的填充比0.6和0.8交错排列,如图5所示,其中 $f_1 = 0.6, f_2 = 0.8$ 。这样综合了填充比为0.6和0.8时的吸收率优势,提高了TE模式和TM模式下在250~1000 nm范围内整个波段的平均吸收率。图6为在碲化镉厚度 $h = 300$  nm时,双填充比结构与填充比为0.6和0.8时在TE模式和TM模式下的吸收率对比图。从图6可以看出,双填充比结构显著提高了在短波长范围内的吸收率,在中长波段双填充比结构的吸收率在部分波长范围内虽稍低于单填充比结构的吸收率,但总体来看,双填充比结构的平均吸收率高于单填充比结构的吸收率。

计算碲化镉厚度 $h = 300$  nm时,在250~1000 nm波长范围内的平均吸收率,可以得到双填充比结构的平均吸收率在两种模式下相对于平板型和单填充比光栅结构均有所提高。双填充比结构的设计使得在TE模式下的平均吸收率达到75.41%,在TM模式下的平均吸收率达到78.92%,且在TE模式下最高可达到92.58%,在TM模式下最高可达93.53%。

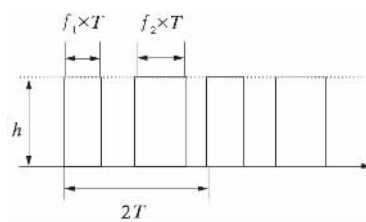
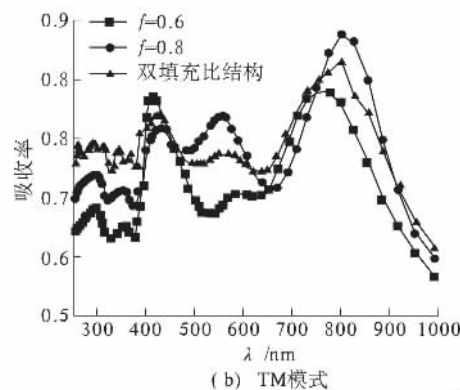


图5 双填充比矩形光栅结构( $f_1 = 0.6, f_2 = 0.8$ )

Fig. 5 The structure of double filling ratios rectangular grating ( $f_1 = 0.6, f_2 = 0.8$ )





除了填充比以外,矩形光栅的厚度也会对吸收率有影响.图7所示为碲化镉厚度  $h$  从 50 ~ 1 000 nm 对应的 TE 和 TM 模式下双填充比矩形光栅结构的平均吸收率曲线.

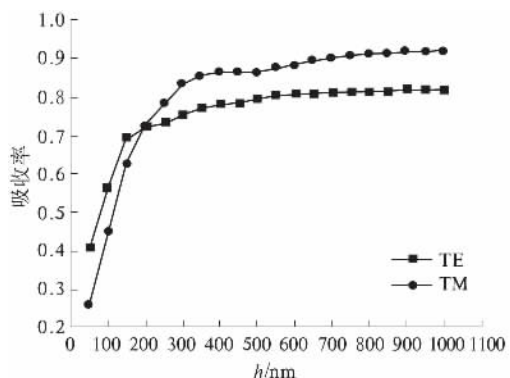


图7 不同厚度的双填充比光栅的平均吸收率

Fig.7 The average absorption efficiency of different thickness of double filling ratios rectangular grating

从图7中可看出,随着矩形光栅的厚度从 50 nm 增加到 300 nm,在 TE 模式和 TM 模式下,平均吸收率随着厚度的增加显著提高,在厚度为 200 nm 时,两种模式下的吸收率基本重合,在 250 ~ 1 000 nm 的平均吸收率可达到 72.49%;当矩形光栅的厚度大于 300 nm 时,在 TE 模式和 TM 模式下平均吸收率虽有增加,但增加的趋势变缓,总体来看仍是厚度越大,平均吸收率越高.两种模式相比,在厚度大于 200 nm 时,TM 模式下的平均吸收率要大于 TE 模式下的平均吸收率.综上分析,双填充比  $f_1 = 0.6$ 、 $f_2 = 0.8$  对应的矩形光栅结构的吸收率随着光栅厚度的增加而增加,但在厚度大于 300 nm 时,平均吸收率的增加幅度越来越小,约高出 10%.

### 3 结论

笔者设计了一种新型的双填充比矩形光栅吸收层结构,该结构是基于碲化镉作为光栅的填充材料.碲化镉材料的使用增加了太阳能电池在长波长范围内的吸收效率.通过时域有限差分法分析了双填充比矩形光栅结构的吸收率,在填充比为 0.6、0.8 依次重复排列的矩形光栅结构中,当厚度均为 200 nm 时,在 TE 模式和 TM 模式下的平均吸收率均可达到 72% 以上,最高可达 90% 以上.在此基础上通过对光栅厚度的模拟与分析,发现厚度小于 300 nm 时,随着厚度增加,两种模式下的平均吸收率均有显著提高;厚度 300 nm 以上时,随着厚度增加,两种模式下的平均吸收率增加

缓慢,TE 模式下平均吸收率接近 80%,TM 模式下平均吸收率接近 90%.光栅结构和平板型结构相比,由于光子在吸收层内的多次反射和散射<sup>[16]</sup>,增加了作用时间和距离,有效增强了光场强度,提高了太阳能电池的吸收效率.该研究结果为制备高效率太阳能电池吸收层结构提供了参考依据.

### 参考文献:

- [1] DAS N, CHAROENPITAKS K, ISLAM S. Analysis of incident light angles on nano-grating structure for minimizing reflection losses in GaAs solar cells [C] //Power engineering conference (AUPEC), 2013 Australasian Universities. IEEE, 2013: 1-6.
- [2] DAS N, ISLAM S. Optimization of nano-grating structure to reduce the reflection losses in gaas solar cells [C] //Universities power engineering conference (AUPEC), 2012 22nd Australasian. IEEE, 2012: 1-5.
- [3] 刘震. 金属纳米等离子体增强硅薄膜太阳能电池光吸收 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 1-49.
- [4] 耿浩珂, 孙晓红, 张旭, 等. 基于光栅结构薄膜太阳能电池吸收层结构设计和优化 [J]. 光子学报, 2014, 43(12): 1223003-1-5.
- [5] RAHMAN F N, KHALIL M I, LATIF T, et al. Performance enhancement of thin-film c-Si solar cell with group III-V material grating structures [C] //Applied electrical engineering and computing technologies (AEECT), 2013 IEEE Jordan Conference on. IEEE, 2013: 1-5.
- [6] MUNGAN E S, DONGAONKAR S. From process to modules: end-to-end modeling of CSS-deposited CdTe solar cells [J]. Photovoltaics, IEEE 2014, 4(3): 954-961.
- [7] 王启明, 褚君浩, 郑有炘. 太阳能电池发展现状及性能提升研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [8] BANAI R, BLISSETT C, BUURMA C, et al. Polycrystalline CdTe solar cells on buffered commercial TCO-coated glass with efficiencies above 15% [C] //Photovoltaic specialists conference (PVSC), IEEE, 2011: 003410-003414.
- [9] 张榕, 周海平, 陈红. 碲化镉薄膜太阳能电池及其溅射制备 [J]. 材料导报, 2006, 20(11): 47-50.
- [10] 郝宇, 孙晓红, 孙焱, 等. 基于光栅结构的碲化镉高效率吸收层设计 [J]. 发光学报, 2013, 34(6): 769-775.
- [11] ZAIDI S H, GEE J M, RUBY D S. Diffraction grating structures in solar cells [C] //Photovoltaic specialists



- conference, 2000. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE. IEEE, 2000: 395 – 398.
- [12] 陈跃飞, 李南, 李响, 等. FDTD 模拟软件电磁建模模块的研究和实现 [J]. 现代电子技术, 2007, 30 ( 11 ): 24 – 26.
- [13] 黄纪军, 马兴义, 栗毅, 等. 复杂目标的 FDTD 几何 – 电磁建模方法 [J]. 微波学报, 2005, 21( S1 ): 44 – 48.
- [14] 杨理理, 宣益民, 韩玉阁, 等. 光栅表面太阳能电池吸收特性及其优化 [J]. 工程热物理学报, 2011, 32( 5 ): 816 – 818.
- [15] 黄少茹, 鲁拥华, 王沛, 等. 填充比对金属光栅与介质光栅激发表面等离子波的不同影响 [J]. 量子电子学报, 2013, 30( 2 ): 225 – 230.
- [16] JI L, THOMAS M A, CUI J, et al. Blazed pyramidal gratings for enhanced light trapping in very thin film solar cells [J]. Photovoltaic specialists conference ( PVSC ), 2012( 38 ): 338 – 341.

## Structural Design of Absorption Layer in CdTe Solar Cells Based on Grating Structure

SUN Xiaohong, ZHANG Lin, LI Wenyang, GUO Minqiang

( School of Information Engineering, Henan Key Laboratory of Laser and Opto-electric  
Information Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China )

**Abstract:** A thin-film solar cell with a grating of double filling ratios in the layer was designed. The structure of double filling ratios is to increase the absorption in the CdTe thin-film layer. By applying FDTD method, the absorption efficiency in the range of 250 ~ 1 000 nm has been analyzed for CdTe layer with rectangular and rectangular with double filling ratios grating. The results show that the absorption efficiency of the single filling ratio and double filling ratios grating structures can be improved relative to the flat absorption layer. The average absorption rate of double filling ratios grating increased by at least 10% over non patterned in the range of almost all visible spectrum. The results indicate that, by designing the structure, random reflection photonic in grating increases the effect of time and distance in the light absorption layer, and finally improves the photo electric conversion efficiency of the thin-film solar cell.

**Key words:** solar cells; grating, FDTD( finite-difference time-domain ); absorption layer; CdTe

# 《郑州大学学报(工学版)》征稿简则

## 1. 刊登内容

本刊主要刊登机械、电气、信息、水利、化工、土木、交通、材料、环境工程等学科领域的学术论文。

## 2. 投稿要求

(1) 原创性论文,有创新性,主题明确、结构完整、论据可靠、论证合理、层次分明、逻辑严密、文字精炼、可读性强。

(2) 投稿具有合法性,不存在抄袭、剽窃、侵权等不良行为;来稿未在任何正式出版物上公开发表过,不允许一稿多投。

(3) 请严格遵守国家有关保密规定,不泄漏国家机密。

(4) 稿件请用 Word 编辑排版,若系基金资助课题,请在首页地脚处注明(包括项目编号)。

(5) 文稿格式要求规范、项目齐全,按顺序给出:题目(一般不超过 20 字),作者(包括工作单位含二级机构、邮编),摘要(包括研究的目的、方法、结果和结论四要素,200~300 字,内容应具体、准确,切忌空洞和主观评价),关键词(3~8 个),中图分类号,正文(包括图、表,6000 字左右为宜),参考文献,英文信息(摘要与中文摘要一一对应,包括英文题目、作者姓名、单位、地址、邮编及关键词),并在首页地脚处注明第一作者和/或通信作者简介(包括出生年、性别、籍贯、职称、学位、研究方向、电子邮箱和电话)。

(6) 物理量的符号和法定计量单位必须符合国家标准、国际标准。例如,物理量的符号用斜体,单位要用正体;矩阵、向量、矢量、张量等,用黑斜体表示。

(7) 文中图、表只附必要的,图、表应有中、英文图题和表题,小图、表宽度不超过 75 mm,大图、表宽度 120~150 mm;插图的纵、横坐标的标目(物理量的符号和单位)要齐全;表格采用三线表。应按标准方式标注,如:时间的标注方式应为 t/s 或 t/min 或 t/h,速度的标注方式应为  $v/(m \cdot s^{-1})$ 。

(8) 参考文献须在文中标引,并按在文中引用的次序排序;按照 GB/T 7714—2015 著录:

期 刊 [序号] 作者. 题名[J]. 刊名,年,卷(期):起止页码.

专 著 [序号] 作者. 题名[M]. 出版地:出版社,出版年:起止页码.

学位论文 [序号] 作者. 题名[D]. 保存地:保存单位(包括二级学院/系),年份.

论文集 [序号] 作者. 题名[C]. 出版地:出版者,出版年:起止页码.

析出文献 [序号] 作者. 题名[C]//源文献. 出版地:出版者,出版年:起止页码.

标 准 [序号] 起草单位. 标准编号 标准名称[S]. 出版地:出版社,出版年.

专 利 [序号] 专利所有者. 题名:专利号[P]. 日期.

电子文献 [序号] 作者. 电子文献题名[J/OL]. 刊名,年,卷(期):起止页码. 发表或更新日期/引用日期(任选). 电子文献的出版或可获得地址.

## 3. 投稿方法

请登录《郑州大学学报(工学版)》网站(<http://www.zdxbgxb.com>)进行在线投稿(需要先注册)。同一篇稿件只需投稿一次,以免系统给出多个编号,如果要修改请登录按照提示提交修改稿。若需查询稿件处理状况,请通过“作者登录”进行查询。

## 4. 作者须知

本刊实行三审制,双盲式同行评议。一般审稿周期为 6 周左右,论文刊发以后给作者赠送当期样刊。本刊已经加入“中国知网”、“万方数据——数字化期刊群”等数据库和检索机构,所付作者稿酬中已包含其著作权使用费,不再另付。如作者不同意,请在来稿时说明,本刊将做适当处理。本刊编辑部使用“科技期刊学术不端文件检测系统”,请作者规范投稿,维护自身及期刊的良好声誉,如果造成“重复发表”,将择期发出撤消论文通告,并在今后 5 年内拒收来稿,通报作者单位,取消论文效用。

## 5. 联系地址

通信地址:(450001) 郑州市高新区科学大道 100 号郑州大学学报(工学版)编辑部

联系电话:0371—67781276 / 67781277, E-mail: gxb@zzu.edu.cn

本刊被下列数据库及文摘收录:

- 美国《化学文摘》(CA)
- 俄罗斯《文摘杂志》(AJ)
- 英国《科学文摘》(SA)
- 美国《数学评论》(MR)
- 美国《剑桥科学文摘》(CSA)
- 波兰《哥白尼索引》(IC)
- 《中国学术期刊(光盘版)》
- 《中国科技论文统计源》
- 《中文科技期刊数据库》
- 《中国期刊网》
- 《中国学术期刊综合评价数据库》
- 《万方数据系统》
- 《中国机械工程文摘》
- 《中国数学文摘》
- 《中国化学化工文摘》
- 《中国无机分析化学文摘》
- 《中国力学文摘》
- 《中国物理文摘》
- 《工程机械文摘》
- 《中国学术期刊文摘》
- 《电子科技文摘》

**郑州大学学报(工学版)**  
**Zhengzhou Daxue Xuebao (Gongxueban)**  
双月刊 (1980年创刊)  
第37卷 第2期 总第146期 2016年3月10日

**Journal of Zhengzhou University**  
**(Engineering Science)**  
**Bimonthly (Started in 1980)**  
**Vol.37 No.2 Sum No.146 Mar.10, 2016**

**主管单位** 河南省教育厅  
**主办单位** 郑州大学  
**出版单位** 《郑州大学学报(工学版)》编辑部  
**电子信箱** gxb@zzu.edu.cn  
**地 址** 河南省郑州市科学大道100号(450001)  
**电 话** (0371)67781276 67781277  
**主 编** 李燕燕  
**副 主 编** 梁 静  
**印刷单位** 河南金河印务有限公司  
**发行范围** 国内外公开发售  
**征 订 处** 全国各地邮政局  
**发行单位** 河南省邮政发行局

**Administrated by** The Education Department  
of Henan Province  
**Sponsored by** Zhengzhou University  
**Edited & Published by** Editorial Board of Journal of  
Zhengzhou University  
**E-mail** gxb@zzu.edu.cn  
**Address** No.100 Science Avenue, Zhengzhou 450001, China  
**Telephone** (0371)67781276 67781277  
**Chief Editor** LI Yanyan  
**Executive Chief Editor** LIANG Jing  
**Printed by** Henan Jinhe Printing Co., Ltd.  
**Distributed by** Publishing Trading Corporation,  
P.O.B.782, Beijing 100011, China

中国标准刊号: **ISSN 1671-6833**  
**CN 41-1339/T**

定价: 10.00元

邮发代号: 36-232