

- 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

## 2018.2

第39卷 第2期  
Vo1.39 No.2  
2018年3月出版



# 郑州大学学报

工 学 版

JOURNAL OF ZHENGZHOU UNIVERSITY  
ENGINEERING SCIENCE

## 编 委 会

### 特邀编委:

申长雨(中国科学院院士)

何季麟(中国工程院院士)

张孟杰(新西兰惠灵顿维多利亚大学)

刘炯天(中国工程院院士)

金耀初(英国萨里大学)

Kay Chen Tan (香港城市大学)

### 编委会主任:

邵国胜(郑州大学)

### 编委(按姓氏笔画为序):

王亚明(郑州大学)

王忠勇(郑州大学)

公茂果(西安电子科技大学)

叶国田(郑州大学)

刘金盾(郑州大学)

刘春太(郑州大学)

许群(郑州大学)

李杰(同济大学)

吴泽宁(郑州大学)

张冰(郑州大学)

陈伟能(华南理工大学)

陈德良(郑州大学)

单崇新(郑州大学)

贾瑜(郑州大学)

郭院成(郑州大学)

梁长浩(合肥物质科学院)

董林(郑州大学)

潘复生(重庆大学)

王宗敏(中原工学院)

王凌(清华大学)

左其亭(郑州大学)

刘国际(郑州大学)

刘波(中国科学院数学与系统科学研究院)

关绍康(郑州大学)

麦立强(武汉理工大学)

李勇平(上海应用物理所)

张少军(郑州大学)

张涛(北京航空航天大学)

陈静波(郑州大学)

庞新厂(郑州大学)

赵明皞(郑州大学)

高丹盈(河南工程学院)

唐珂(南方科技大学)

梁静(郑州大学)

韩一帆(郑州大学)

臧双全(郑州大学)

## 目 次

### 智能计算

- 基于 FAST 特征点改进的 TLD 目标跟踪算法 ..... 毛晓波, 周晓东, 刘艳红( 1 )
- 一种基于改进适应度的多机器人协作策略 ..... 曾庆山, 冯珊珊( 6 )
- 基于深度卷积神经网络的羽绒图像识别 ..... 杨文柱, 刘 晴, 王思乐, 崔振超, 张宁雨( 11 )
- 基于网络的视觉皮层演化博弈研究 ..... 逯 鹏, 张 微, 李亚萍, 刘素杰( 18 )
- 新型四足步行机器人串并混联腿的轨迹规划与仿真研究 ..... 高建设, 王玉闯, 刘德平, 王保糖( 23 )
- 一种基于共轭梯度法的广义单隐层神经网络 ..... 孙 峰, 龚晓玲, 张炳杰, 柳毓松, 王延江( 28 )
- 基站协作系统中基于 GAMP 算法的 RZFBF 预编码实现 ..... 王忠勇, 冯双丽, 袁正道, 张园园( 33 )
- 基于网络层次分析法的电网发展诊断模型研究 .....  
..... 王正阳, 詹智民, 罗 宾, 刘行波, 李源林, 叶 磊, 陈根永( 39 )

### 土木与交通工程

- 铅-磁流变阻尼器在减震结构中的位置优化 ..... 张香成, 陈 娜, 罗 芳, 赵 军, 徐赵东( 44 )
- SHPB 恒应变率加载试验技术研究 ..... 梁书锋, 武 宇, 刘殿书, 李晓璐, 张会歌( 50 )
- 棕麻纤维加筋砂的三轴试验研究 ..... 马 强, 邢文文, 李丽华, 胡 兴( 56 )
- 胶粉改性土-膨润土固结压缩特性试验 ..... 何 俊, 颜 兴, 胡晓瑾, 王小琦( 61 )
- 废胎胶粉与 HDPE/SBS 三掺复合改性沥青性能研究 ..... 何 锐, 黄 鑫, 耿九光, 陈华鑫( 67 )
- 紊流强度与积分尺度对结构平均风压与脉动风压雷诺数效应影响研究 .....  
..... 白 桦, 郭聪敏, 刘健新( 73 )

### 材料工程

- $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2/\text{USY}$  催化纤维素醇解制备乙酰丙酸乙酯 ..... 常 春, 安 冉, 孔鹏飞( 80 )
- 退火温度对 Nb 掺杂  $\text{TiO}_2$  薄膜结构与性能的影响 ..... 苏雷生, 林 钰, 董 林, 辛荣生( 86 )
- 利用废渣一次烧结制备微晶玻璃釉面砖的研究 ..... 卢红霞, 吕泽刚, 程向前, 辛 玲, 侯铁翠( 92 )

CONTENTS

【Computational Intelligence】

- Improved TLD Object Tracking Algorithm Based on FAST Feature Points .....  
..... MAO Xiaobo, ZHOU Xiaodong, LIU Yanhong ( 1 )
- A Multi-robot Cooperative Strategy Based on Improved Fitness Function ..... ZENG Qingshan, FENG Shanshan ( 6 )
- Down Image Recognition Based on Deep Convolution Neural Networks .....  
..... YANG Wenzhu, LIU Qing, WANG Sile, CUI Zhenchao, ZHANG Ningyu ( 11 )
- Research on Evolutionary Game of Visual Cortex Networks ..... LU Peng, ZHANG Wei, LI Yaping, LIU Sujie ( 18 )
- Research on Trajectory Planning and Simulation on the Serial-parallel Leg of a Novel Quadruped Walking Robot .....  
..... GAO Jianshe, WANG Yuchuang, LIU Deping, WANG Baotang ( 23 )
- An Efficient Generalized Single Hidden Layer Neural Networks Based on Conjugate Gradient Method .....  
..... SUN Feng, GONG Xiaoling, ZHANG Bingjie, LIU Yusong, WANG Yanjiang ( 28 )
- The Realization of RZFBF Pre-coding Based on GAMP Algorithm for Base Station Cooperation System .....  
..... WANG Zhongyong, FENG Shuangli, YUAN Zhengdao, ZHANG Yuanyuan ( 33 )
- Research of the Index Model of Power Grid Development Diagnosis Based on ANP .....  
..... WANG Zhengyang, ZHAN Zhimin, LUO Bin, LIU Xingbo, LI Yuanlin, YE Lei, CHEN Genyong ( 39 )

【Civil Engineering and Construction Engineering】

- Position Optimization of Lead Magnetroheological Damper in Energy Dissipation Structural .....  
..... ZHANG Xiangcheng, CHEN Na, LUO Fang, ZHAO Jun, XU Zhaodong ( 44 )
- Study on SHPB Techniques of Constant Strain Rate Loading .....  
..... LIANG Shufeng, WU Yu, LIU Dianshu, LI Xiaolu, ZHANG Huige ( 50 )
- Study on Flax Fiber-reinforced Sand by Triaxial Test ..... MA Qiang, XING Wenwen, LI Lihua, HU Xin ( 56 )
- Consolidation Properties of Ground Rubber Modified Soil-bentonite Backfills .....  
..... HE Jun, YAN Xing, HU Xiaojin, WANG Xiaoqi ( 61 )
- Properties of Composite Modified Asphalt with HDPE/SBS/Waste Tire Powder Mixed .....  
..... HE Rui, HUANG Xin, GENG Jiuguang, CHEN Huaxin ( 67 )
- Study on the Effect of Turbulence Intensity and Integral Scale on the Reynolds Number Effect for the Surface Wind Pressure of  
Rectangular Structure ..... BAI Hua, GUO Congmin, LIU Jianxin ( 73 )

【Material Engineering】

- Alcoholysis of Cellulose into Ethyl Levulinate Catalyzed by  $SO_4^{2-}/ZrO_2/USY$  .....  
..... CHANG Chun, AN Ran, KONG Pengfei ( 80 )
- Influence of Annealing Temperature on Structure and Properties of Nb-doped  $TiO_2$  Thin Films .....  
..... SU Leisheng, LIN Yu, DONG Lin, XIN Rongsheng ( 86 )
- Study on Glazed Tile of Glass-ceramic from Waste Residue Prepared by Direct Sintering Process .....  
..... LU Hongxia, LYU Zegang, CHENG Xiangqian, XIN Ling, HOU Tiecui ( 92 )

文章编号: 1671-6833(2018)02-0001-05

# 基于 FAST 特征点改进的 TLD 目标跟踪算法

毛晓波, 周晓东, 刘艳红

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** TLD 是近年来出现的一种较为新颖的长时间目标跟踪算法, 它与传统的跟踪算法区别在于将传统的检测算法和跟踪算法结合起来, 通过学习模块来学习目标特征, 从而进行有效跟踪. 笔者针对算法跟踪器无法可靠跟踪均匀选取的特征点的问题, 提出一种基于 FAST 特征点改进的 TLD 目标跟踪算法, 保证所选特征点能够被正确可靠跟踪, 提高跟踪器的精度. 针对跟踪过程中学习模块的模板累积效应明显, 实时性降低的问题, 采用一种动态模板管理机制. 在模板数量达到阈值时, 通过比较模板与当前目标的相似度, 删除特定模板, 保持模板数量恒定. 实验表明, 改进后的算法具有更高的跟踪精度和实时性.

**关键词:** TLD; 长时间; 目标跟踪; 特征点

**中图分类号:** TP391.4      **文献标志码:** A      **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.02.001

## 0 引言

目标跟踪是计算机视觉领域的重要研究内容, 可以理解为在已知目标先验信息情况下, 在视频序列中持续地对目标的位置、形状和运动状态进行发现的过程. 同时, 目标跟踪也一直是计算机视觉的难点之一<sup>[1]</sup>, 除了光照变化, 障碍物遮挡等环境影响, 目标本身的旋转、尺度变化及出视野都对准确地进行目标跟踪造成挑战.

近些年来, 国内外的研究人员根据实际需要提出和实现了多种跟踪算法. 如 meanshift<sup>[2]</sup>、卡尔曼滤波<sup>[3]</sup>、粒子滤波<sup>[4]</sup>等算法, 它们针对特定的场景都有较好的效果. 我们注意到上述算法在跟踪过程中, 随着跟踪误差的逐渐增大及目标本身的大小、形态改变, 尤其是当目标离开视野后又重新回到视野时, 都会造成跟踪失败. 这种随着跟踪时间的延长逐渐导致跟踪失败的算法称为短时跟踪算法. 为了解决这一问题, 与之对应的长时间跟踪算法是我们研究的重点. 为了避免随着时间推移导致跟踪失败, 长时间跟踪算法应该至少具有以下两个特点, 一是能够在跟踪过程中逐渐地减少或保持跟踪误差; 二是在完全遮挡或是出视

野造成跟踪失败后, 具有对目标的重识别能力.

TLD (tracking-learning-detection) 算法<sup>[5]</sup>是近年来十分具有代表性的长时间跟踪算法, 它将传统的跟踪算法和检测算法结合起来, 同时引入在线学习机制, 三者并行运行, 实现长时间跟踪. 然而该算法也存在明显的不足, 如: 算法计算量大, 运行帧率达不到实时应用的标准; 跟踪器均匀选取的点, 在跟踪中可靠性不高; 跟踪过程中模板累积效应明显, 后期运行速率越来越慢等. 针对 TLD 算法的缺点, 已有许多学者提出改进的方法. 周鑫<sup>[6]</sup>和董永坤<sup>[7]</sup>分别对 TLD 的检测部分进行改进, 提高了跟踪效果, 然而算法的最终输出结果是跟踪器和检测器返回目标框的融合, 且跟踪器的结果在 TLD 融合部分占比更大. 文献<sup>[8]</sup>指出, 提高跟踪器的可靠性将对算法整体准确性和鲁棒性提供积极的影响. 邢藏菊<sup>[9]</sup>对跟踪器的归一化互相关匹配进行改进, 减少了跟踪器的计算量, 同时降低了误匹配率, 也取得了不错的效果. 所以针对跟踪器的不足, 对其进行改进也是具有重要研究意义的.

针对 TLD 算法中, 跟踪器均匀选取的点无法在下一步的中值光流法中保证准确跟踪的问

**收稿日期:** 2017-10-08; **修订日期:** 2017-12-11

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61473266); 河南省高校科技创新团队支持计划资助项目(17IRTSTHN013); 2017年度河南省高等学校重点科研资助项目(17A413011)

**作者简介:** 毛晓波(1965—), 男, 河南开封人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事仿生机器视觉研究, E-mail: mail-mxb@zzu.edu.cn.

题,笔者提出采用快速检测的 FAST 特征点替代跟踪器中均匀选取的点,保证选取点的稳定准确跟踪,提高算法的准确性和实时性.针对跟踪后期由于模板累积使得算法后期的匹配过程耗时增加,实时性降低的问题,采用一种动态的模板管理机制,使得模板总量保持稳定,提高算法后期的实时性.

## 1 TLD 算法与分析

### 1.1 TLD 算法简介

TLD 算法是由 Kalal 等人于 2010 年提出的新型跟踪算法,结构如图 1 所示.

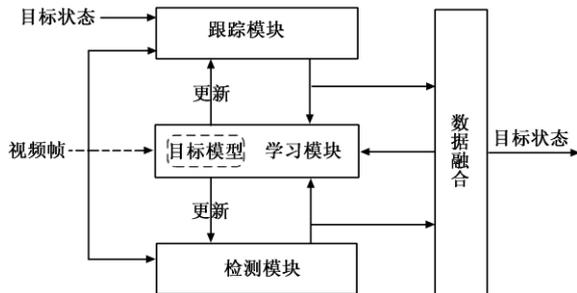


图 1 TLD 算法示意图

Fig.1 TLD algorithm

TLD 跟踪模块的本质是中值流跟踪,是一种增加了跟踪失败校验的 LK 光流法.跟踪模块根据所选目标确定边界框,并在框内生成  $10 \times 10$  的矩形网格,以每个网格的中心位置作为跟踪的特征点,对应一个局部的跟踪器.每个跟踪器采用 LK 光流法跟踪特征点的运动,由于 LK 光流法 3 个假设<sup>[10]</sup>的局限性,当目标完全遮挡或者出视野后,将出现跟踪偏移.由此,采用一种跟踪误差检测机制,通过计算当前图像和被跟踪区域的相似程度(normalized cross correlation, NCC)及前向后向误差(forward-backward error, FB)对每个点的跟踪质量进行评估,去除误差排名前 50% 的点,使用余下的点来评估边界框的状态改变情况,生成新的跟踪窗口,完成一次短期跟踪.

检测模块采用不同尺度的滑动窗口扫描整幅图像,将扫描产生的大量窗口送入级联分类器判别是否存在前景目标.级联分类器由 3 部分组成,依次是方差分类器、集合分类器和最近邻分类器.只有当窗口内的图像依次通过上述 3 种分类器时,窗口才被认为含有前景目标.

学习模块在第一帧初始化检测器,随后采用 P-N 专家产生的正负模板训练检测器.使用 P 专家来寻找目标新的外观变化,使用 N 专家确定检

测器应该忽略的背景部分.通过 P-N 专家的相互作用,提高样本标记的准确性,并在运行时实时更新检测器.在算法的运行过程中,通过检测模块和跟踪模块并行运行,更新目标信息,减少跟踪误差.通过在线学习模块,对产生的新样本进行标签学习,更新检测器.当完全遮挡或者出视野等导致跟踪失败时,由于检测模块的全局扫描能力,在跟踪目标重回视野后具有重识别能力,3 种模块相互配合,共同实现目标的长时间跟踪.

### 1.2 缺陷分析及改进

从上节可以看出,TLD 跟踪算法相对于传统的跟踪算法在长时间目标跟踪上具有较大的优势,然而它也有许多不足之处,下面对它的一些缺陷进行分析并提出改进方法.

#### 1.2.1 跟踪模块分析及改进

尽管这种中值流跟踪方式在实际应用中取得了不错的跟踪效果,但是从理论分析来看,在目标上均匀地选取固定数目的特征点并不能保证这些点能可靠地被 LK 光流法进行跟踪,若选取的特征点处于灰度值变化平缓或者无变化的区域,将给光流法跟踪带来很大的问题.同时如果这些选出的点不能被可靠跟踪,那么也将影响目标跟踪的效率和准确性.针对该问题,笔者采用可用于快速检测的特征角点来替代原算法中均匀选取的点,以获得对目标更好的表现能力,保证可靠跟踪.

常用的特征角点有 SIFT(scale-invariant feature transform)<sup>[11]</sup>,SURF(speed up robust features)<sup>[12]</sup>,Harris<sup>[13]</sup>,FAST(features from accelerated segment test)<sup>[14]</sup>及 BRISK(binary robust invariant scalable key points)<sup>[15]</sup>等.其中 Harris 和 FAST 特征点是简单的单尺度角点,而 SIFT、SURF 和 BRISK 是多尺度特征点,在生成方式上除极值检测外,还需要构造尺度空间、滤波及生成描述子,因此在检测速度上要远低于单尺度角点.多尺度特征点的优点在于对尺度变化不敏感,具有尺度不变性,同时对旋转和亮度变化能保持较强的鲁棒性.借助 opencv 图像处理库,在待测图片为 Eiffel,大小为  $925 \times 650$  时,上述算子的检测时间和检测点数如表 1 所示.经过对比可知,Harris 和 FAST 特征角点的检测速度远远超过多尺度特征点的检测速度,印证了上面的分析.前向后向算法对角点的尺度变化并不敏感.文献[15]指出 Harris 的角点稳定性与经验值  $k$  有关, $k$  值不好确定且浮动较大,这就意味着对于一个跟踪目标,经过

多次尝试效果较好的  $k$  值对另一目标很有可能效果十分糟糕,这种情形将极大地降低算法的稳定性.对于跟踪目标来说,目标框通常只是图像整体很小的一部分,表 1 表明 FAST 角点的检出率比 Harris 高出一个数量级.

表 1 特征角点检测对比

Tab. 1 Feature point detection contrast

角点	SIFT	SURF	Harris	FAST	BRISK
角点个数/个	3 332	3 217	1 123	20 502	2 612
耗时 $t$ /ms	797	644	7	10	70

在实际检测中,目标框的 FAST 角点数最少时仅几十个,如采用 Harris 获取的角点数目只有几个数量级,对于后续的跟踪算法来说太过稀少,所以应选取能检测较多角点的算法.由此,笔者采用 FAST 特征点来取代原算法中均匀选取的点.

FAST 特征点是 Rosten 等人在 SUSAN 角点特征检测方法的基础上,利用机器学习方法提出的,其主要特点是检测速度快.最初的检测方法就是检测在圆环上的 16 个像素点,如果有  $n$  个连续的点比中心像素  $m$  的强度都大或都小的话,这样的中心点就是角点.我们采用 FAST-9 角点检测算法,每个像素  $m$  周围的像素  $m_i, i \in \{1, 2, \dots, 16\}$  的灰度值如图 2 所示,按式(1)将像素  $m$  分为 3 类.

$$S_{m \rightarrow i} = \begin{cases} d, & I_{m \rightarrow i} \leq I_m - n \\ s, & I_m - n < I_{m \rightarrow i} < I_m + n \\ b, & I_m + n \leq I_{m \rightarrow i} \end{cases}, \quad (1)$$

式中:  $I_m$  表示  $m$  点的像素值;  $I_{m \rightarrow i}$  表示  $m$  点第  $i$  个邻接像素点的像素值;  $d$  表示邻接像素点比  $m$  点暗;  $s$  表示邻接像素点与  $m$  有相似的像素值;  $b$  表示邻接像素点比  $m$  点亮.  $n$  为检测阈值,当至少有 9 个邻接的参考像素检测结果均为  $d$  或  $b$  时,则  $m$  点为 FAST 角点.

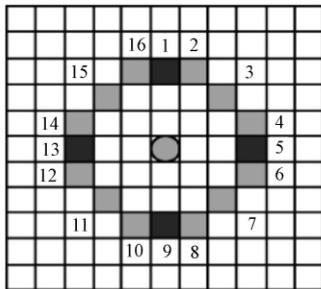


图 2 FAST 检测邻域图

Fig. 2 Schematic diagram of FAST detection field

在获取了跟踪框内目标的 FAST 特征点后,将获得的点送入后续的中值光流法中进行跟踪,跟踪模块结构如图 3 所示.

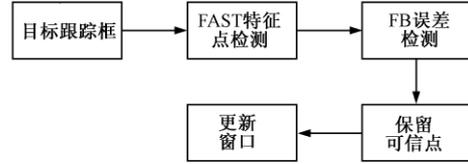


图 3 跟踪模块图

Fig. 3 Tracking module

### 1.2.2 模板累积改进

检测器提取滑动窗口对应的图像块  $p_i$ ,再通过集合分类器后,由最近的邻分类器过滤掉图像块  $p_i$  同目标模型  $M$  之间相似度低的部分.目标模型  $M = \{q_1^+, \dots, q_m^+, q_1^-, \dots, q_n^-\}$ ,其中:  $q_i^+$  表示正模板;  $q_i^-$  表示负模板.算法中定义图像块  $p_i$  和目标模型  $M$  的相似度为

$$S(p_i, M) = 0.5(NCC(p_i, M) + 1), \quad (2)$$

则图像区域和目标区域的最终相似度为

$$S^r(p_i, M) = \frac{\max_{q_i^+ \in M} S(p_i, q_i^+)}{\max_{q_i^+ \in M} S(p_i, q_i^+) + \max_{q_i^- \in M} S(p_i, q_i^-)}. \quad (3)$$

当  $S^r(p_i, M)$  大于阈值  $\theta$  时,则认为图像块  $p_i$  属于前景区域.由此可以看出,随着跟踪程序的运行,正负模板数量不断增加,检测模块的耗时将不断提高,这也是程序运行到中后期实时性下降的主要原因.针对这种因模板累积导致的实时性下降的问题,笔者提出一种动态的模板管理机制.负模板反映的是背景信息,这种信息容易随着周围环境的改变而出现较大的变化,因此更新速度较快.笔者保存最晚加入的负模板样本,当负样本总数达到某个数量时删除最初的负模板样本以及及时更新负模板信息.正模板样本保存的是目标不同状态的前景信息,他们的各个模板应尽量地不一致.使用  $S(p_0, q_i^+)$  表示当前目标图像与正模板的相似性,  $S$  越大表示越相似.对于给定  $m$  个正模板样本数来说,越后加入的模板与当前图像的相似性越高.选取前半部分模板  $\{q_1^+, \dots, q_{m/2}^+\}$ ,计算  $S$ ,取其中最大值对应的模板  $q_j^+$  删去,同时增加后一个正模板.将  $S$  最大值对应的正模板删去是因为后面模板与当前图像的相似性高,删除前面  $S$  值高的模板是为了增加正模板间的差异性.

## 2 试验结果分析

为验证改进算法性能,将原始 TLD(称 TLD)

算法、笔者改进的 TLD 算法(称 TLD+)和文献[16]中采用的具有旋转不变性和尺度不变性的 BRISK 角点改进 TLD 算法(称 BTLD)做对比. 测试环境为 I7-4720HQ @ 2.6 GHz 8 G 内存的 Win10 64 位计算机, 试验软件为 Visual Studio 2015 和 opencv 3.1.0. 测试集为公开的视频序列 Motocross、Car、David、pedestrian2 和 Singer1, 包含了目标遮挡、光照变化、尺度变化、出视野等情形. 定义两个具有代表性的评估准则: ①跟踪成功率(success rate, SR), 是指成功跟踪的帧数占总帧数的比例, 当跟踪框与手工标定的目标框重合率在 50% 以上时, 称为一次成功跟踪; ②帧率(frame per second, FPS)指每秒处理的帧数, 反映算法运行速度.

设定 FAST 特征点的检测阈值  $n = 24$ , 最近邻分类器的阈值  $\theta = 0.6$ , 前向后向误差的阈值  $FBr = 10$ . 另外为了保证试验的客观性, 采用笔者方式指定初始化目标跟踪框, 其余未改进的参数均采用算法原来的参数, BTLD 与笔者改进算法区别仅在于跟踪模块特征点的产生方式不同. 表 2 为 TLD 算法和两种改进算法的跟踪准确率对比. 表 3 为 3 种算法运行帧率对比.

表 2 算法跟踪准确率比较

Tab.2 Tracking accuracy comparison

视频序列	总帧数	成功跟踪帧数/SR		
		TLD	BTLD	TLD+
Motocross 视频	500	420/84.0%	462/92.4%	460/92.0%
Car 视频	945	851/90.0%	867/91.7%	859/90.8%
David 视频	761	761/100.0%	761/100.0%	761/100.0%
Pedestrian2 视频	338	121/36.0%	154/45.5%	146/43.2%
Singer1 视频	351	216/61.5%	267/76.0%	258/73.5%

表 3 算法运行帧率比较

Tab.3 Tracking FPS comparison

视频序列	总帧数	TLD	BTLD	TLD+
		帧率/fps	帧率/fps	帧率/fps
Motocross	500	9.67	3.34	10.41
Car	945	5.16	2.54	6.30
David	761	5.32	2.63	7.51
Pedestrian	338	12.03	6.74	12.5
Singer1	351	7.16	3.41	7.56

由表 2 可以看出, TLD+ 的跟踪准确率高于原 TLD 算法, 而略低于 BTLD 算法. 这是由于

FAST 特征点不具有 BRISK 的尺度不变性, 相对来说对噪声较为敏感. 两者差距不大是因为选取的特征点只是参与到后续的光流跟踪中, 并不涉及特征点匹配. TLD+ 和 BTLD 算法在跟踪精度上与原算法相比都有提高. 图 4 反映了原 TLD 算法和 TLD+ 算法在跟踪视频序列目标时的差异. 第一组(红色跟踪框)表示原 TLD 算法跟踪情况, 第二组(蓝色跟踪框)为同一帧 TLD+ 跟踪情况.



图 4 算法跟踪差异

Fig.4 Tracking algorithms differences

视频 Motocross 中, 在目标平稳运动情况下, 原 TLD 算法和改进的 TLD+ 算法都可以稳定跟踪. 在目标发生较大倾斜、抖动情况下, 原始的算法因为均匀选取的特征点无法有效表述目标特征, 导致跟踪失败, 而改进的 TLD+ 由于稳定性较强的角点, 依然可以进行跟踪. 在视频 Pedestrian2 中, 视频的分辨率较低, 存在较为严重的镜头晃动和出视野情况, 原算法在目标发生形变及出视野后, 不能有效地对后续的目标进行识别, 而改进后的算法能在出视野前后有效跟踪目标. Singer1 视频中光照变化明显, 原算法在目标被强光覆盖后无法继续有效跟踪, 改进的算法借助对光照不敏

感的特征角点仍然可以进行跟踪. 以上试验表明, 结合 FAST 特征点的 TLD 算法可以有效应对目标抖动、偏移、光照变化造成的跟踪失败, 相比于原算法具有更好的鲁棒性.

从表 3 可得, 改进的 TLD + 在实时性上优于原算法和 BTLD. 由于 BTLD 中特征点采用具有抗噪及旋转尺度不变的 BRISK 特征, 其计算过程需要构造尺度空间及滤波的过程, 因此虽然提升了准确性, 但严重牺牲了实时性能. TLD + 的模板累积改进对于跟踪模板数量较多的情况具有较好的效果. 一般来说模板的数量取决于跟踪的时间和跟踪目标变化的差异程度. 对于 Pedestrian2 和 Singer1 帧数较少的视频序列, 模板数量尚达不到阈值要求, 因此模板累积改进对它们的帧率基本没有影响. 对于 Car 视频序列, 虽然帧数较多, 但目标车辆形态缺乏变化, 所获取的模板数量仍然不多, 故而改进对于 Car 视频序列的实时性提高较为有限, 而在 David 视频序列中, 具有较强的光照变化, 目标的状态变化十分明显, 因此获得的模板数量较多, 改进算法的实时性提升较为明显.

### 3 结论

TLD 是近年来较为新颖的长时间跟踪算法, 笔者在它的基础上引入 FAST 特征点取代跟踪模块中均匀选取的点, 提高跟踪的鲁棒性. 对其因模板累积导致的实时性降低问题, 采用动态的模板替换更新机制, 经过多个视频测试集测试表明, 笔者算法相比于原算法在跟踪准确性和实时性方面均有小幅提高, 相比于 BRISK 特征点改进的 TLD 算法, 准确性与其差异微小, 实时性取得较大的提高.

### 参考文献:

- [1] 高文, 朱明, 贺柏根, 等. 目标跟踪技术综述 [J]. 中国光学, 2014, 7(3): 365 - 375.
- [2] 郝向东, 毛晓波, 梁静. ELM 与 Mean Shift 相结合的抗遮挡目标跟踪算法 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(1): 1 - 5.
- [3] WENG S K, KUO C M, TU S K. Video object tracking using adaptive kalman filter [J]. Journal of visual communication & image representation, 2006, 17

(6): 1190 - 1208.

- [4] 宋策. 基于粒子滤波的目标跟踪技术研究 [D]. 长春: 中国科学院大学长春光学精密机械与物理研究所, 2014.
- [5] KALAL Z, MIKOLAJCZYK K, MATAS J. Forward-backward error: automatic detection of tracking failures [C]// International Conference on Pattern Recognition, IEEE Computer Society, Turkey: Istanbul, 2010: 2756 - 2759.
- [6] 周鑫, 钱秋朦, 叶永强, 等. 改进后的 TLD 视频目标跟踪方法 [J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(9): 1115 - 1123.
- [7] 董永坤, 王春香, 薛林继, 等. 基于 TLD 框架的行人检测和跟踪 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(s1): 226 - 228.
- [8] 秦飞, 汪荣贵, 梁启香, 等. 基于关键特征点的改进 TLD 目标跟踪算法研究 [J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(4): 181 - 187.
- [9] 邢藏菊, 温兰兰, 何苏勤. TLD 视频目标跟踪器快速匹配的研究 [J]. 小型微型计算机系统, 2015, 36(5): 1113 - 1116.
- [10] BIRCHFIELD S. Derivation of kanade-lucas-tomasi tracking equation [J]. Unpublished notes, 1997, 44(5): 1811 - 1843.
- [11] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International journal of computer vision, 2004, 60(2): 91 - 110.
- [12] BAY H, ESS A, TUYTELAARS T, et al. Speeded-up robust features [J]. Computer vision & image understanding, 2008, 110(3): 404 - 417.
- [13] HARRIS C. A combined corner and edge detector [J]. Proc alvey vision conf, 1988, 15(3): 147 - 151.
- [14] ROSTEN E, DRUMMOND T. Machine learning for high-speed corner detection [C]// European Conference on Computer Vision. Berlin: Heide berg, 2006: 430 - 443.
- [15] LEUTENEGGER S, CHLI M, SIEGWART R Y. BRISK: binary robust invariant scalable keypoints [J]. Computer vision (ICCV), 2011, 58(11): 2548 - 2555.
- [16] 祝贤坦, 石繁槐. 基于 BRISK 特征点改进的跟踪学习检测方法 [J]. 计算机工程, 2017, 43(2): 268 - 272.

(下转第 17 页)

文章编号: 1671-6833(2018)02-0006-05

# 一种基于改进适应度的多机器人协作策略

曾庆山, 冯珊珊

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 通过对基于适应度的协作策略及其改进方法的研究发现, 针对机器人在两个任务的适应度相同时无法选择出最匹配任务的问题, 提出通过加入与机器人起止位置有关的距离适应度函数, 使得机器人可以选择出最优匹配任务; 同时, 针对外部能力适应度, 采用更符合实际的高斯分布模型来计算适应度. 仿真结果表明, 改进后的算法不仅实现了最优匹配, 而且算法更高效, 更节省能量.

**关键词:** 适应度; 协作策略; 多机器人; 高斯分布; 距离适应度

**中图分类号:** TP242 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.02.003

## 0 引言

多机器人协作策略是多机器人系统执行任务的前提, 也是系统执行效率是否高效的关键, 是组织简单机器人完成复杂任务的核心. 尤其近几年云计算的兴起, 任务分配的相关算法在云调度<sup>[1]</sup>中也发挥了重要的作用, 因此具有重要的研究价值.

目前, 多机器人协作策略研究主要集中于3种方法<sup>[2]</sup>: 市场机制、群体智能和建模法. 在动态环境中, 多机器人系统经常面临任务在不确定的时间和不断变化的位置发布的问题<sup>[3]</sup>. 建模法最主要的优点就是实时性强, 尤其在这种动态情况下, 能较快地针对环境做出合理高效的决策. 董焯斌等<sup>[4]</sup>创建的基于适应度的多机器人协作策略, 在针对动态松散多任务分配方面展现了较好的实时性和灵活性, 且能够在限制任务执行优先级、机器人能力有限<sup>[5]</sup>等情况下完成较优的任务分配, 仿真试验表明, 算法也具有较好的稳定性. 冯晓海等<sup>[6]</sup>通过对该算法的改进, 使用正余切函数作为外部适应度函数, 避免了原始函数中一直归一化计算的问题, 提高了机器人与任务之间适应度计算的稳定性.

## 1 适应度协作策略及其不足

### 1.1 外部适应度算法

外部能力适应度的计算如下:

$$A_{ij}(t) = \begin{cases} \sum_{k \in U_n} W_{j,k} \times L_{i,k}, & \text{如果 } U_n \subseteq U_p \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (1)$$

外部能力适应度的归一化处理方法,

$$\bar{A}_{ij}(t) = A_{ij}(t) / \max A_{ij}(k), \quad 0 \leq \bar{A}_{ij}(t) \leq 1. \quad (2)$$

该算法很好地建立了任务的内部状态和外部联系, 在机器人选择任务过程中, 任务的内部状态即内部适应度保持不变, 不会因为机器人的不同而改变. 这也说明, 机器人选择任务的关键在于它与任务的外部适应度, 外部适应度的设置是否合理将直接影响到任务分配的效果. 显然, 外部适应度过度依赖全局信息且频繁进行归一化的过程增加了系统的复杂度, 降低了稳定性.

### 1.2 正余切外部适应度算法

正余切外部适应度如下:

$$P(t) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \operatorname{arccot} \left( \frac{E_r}{E_t} - 1 \right), & (E_t \leq E_r) \\ \frac{2}{\pi} \operatorname{arctan} \left( \frac{E_r}{E_t} - 1 \right), & (E_t > E_r) \end{cases}, \quad (3)$$

式中:  $E_r$  为机器人的实际能力;  $E_t$  为任务的实际需求能力.

改进的方法提高了算法的独立性, 但也存在一些不合理: 改进的外部适应度在较符合能力要求的范围内适应度值下降较快, 在远超过能力的范围内适应度值保持较大值且下降缓慢. 在计算适应度前, 系统是有开关控制变量的, 当机器人能力不足时, 不进行适应度计算,

收稿日期: 2017-11-02; 修订日期: 2017-12-29

作者简介: 曾庆山(1963—), 男, 湖北武汉人, 郑州大学教授, 博士, 主要研究方向为智能控制理论、复杂系统的建模与控制、分数阶微分控制等, E-mail: qszeng@126.com.

它必须与其他机器人的能力进行加和、并操作后才能进行适应度的计算<sup>[7]</sup>. 在进行加和、并操作时,把能力不足时的适应度作为联合的依据不能保证联合的机器人组合与任务最优匹配,因此,对机器人能力不足时的外部适应度计算是多余的.

## 2 改进的外部适应度

### 2.1 改进外部能力适应度

在机器人能力满足任务需求时,计算能力适应度时,一般要求在较符合能力要求的范围内,能力适应度较大且区分明显;在远超出能力要求的范围内,能力适应度较小. 为实现这一要求,笔者设计了基于高斯分布模型的外部能力适应度函数,如下式:

$$N_{ij} = \exp\left(-\frac{(L(i) - W(j))^2}{2 \times W(j)^2}\right), L(i) \geq W(j), \quad (4)$$

式中:  $L(i)$  为机器人  $R_i$  的实际能力水平;  $W(j)$  为任务  $T_j$  的实际能力需求. 其仿真对比如图 1、2.

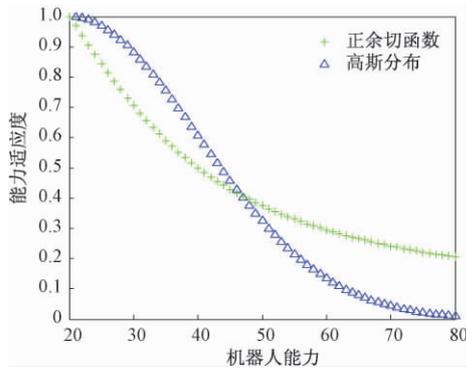


图 1  $W = 20$  时的适应度值对比

Fig.1 Fitness comparison when  $W = 20$

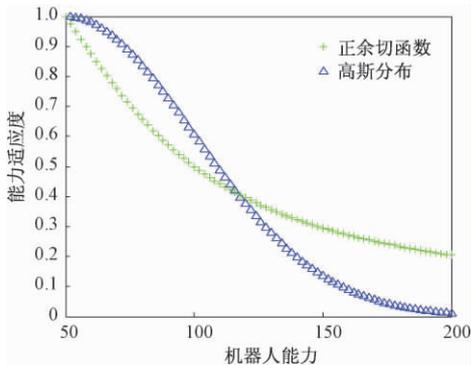


图 2  $W = 50$  时的适应度值对比

Fig.2 Fitness comparison when  $W = 50$

从图 1、2 可以看出,在任务的能力需求是 20(50) 时,机器人在 40(100) 以内的适应度要

比反余切函数的大,超过 40(100) 以后,适应度迅速减小,比反余切函数要小得多,可以保证其它能力在任务选择中占据主导,选择任务的匹配度更高. 算法的计算只与该任务的能力需求和当前机器人的能力有关,不受系统里其它因素的影响,确保算法的独立性、稳定性和可延展性.

### 2.2 距离适应度策略

图 3 为机器人不合理的任务选择. 如图 3 所示,机器人起止位置异地,当 A 选择任务 1 后, B 对 1、2 两个任务的适应度相同,按照原适应度算法的选择原则,由于 1 任务的编号在前,则机器人 B 将选择任务 1,导致任务 2 漏选,从位置上看机器人 B 选择任务 2 更合理. 显然,外部适应度如果只包含能力的匹配而不包含位置的匹配是不合理的,由此考虑加入机器人的代价<sup>[8]</sup>.

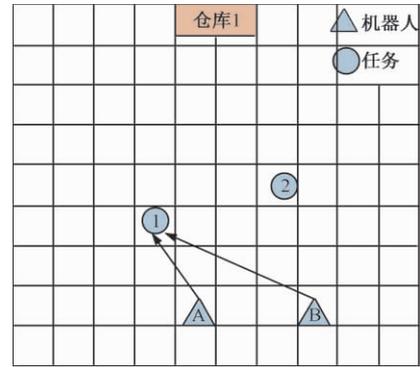


图 3 机器人不合理的任务选择

Fig.3 The unreasonable task selection of robots

基于此,笔者在外部适应度的结构中加入了与机器人起止位置有关的距离适应度函数,

$$Fdis_{ij} = \begin{cases} \frac{Ldis - RTdis(ij)}{Ldis}, & \text{机器人起止异地} \\ \frac{RTdis(ij)}{Ldis}, & \text{机器人起止同地} \end{cases}, \quad (5)$$

式中:  $Fdis$  为距离适应度;  $Ldis$  为任务空间的最大距离,一般在任务之前就已经确定;  $RTdis(ij)$  为机器人  $R_i$  与任务  $T_j$  之间的距离.

外部适应度函数改为:

$$A_{ij} = W_n \cdot N_{ij} + W_f \cdot Fdis_{ij}, \quad (6)$$

式中:  $W_n + W_f = 1, 0 < W_n < 1, 0 < W_f < 1$ .

任务分配中,不仅涉及到任务执行的时间效率,还要考虑机器人的能量消耗问题,只有这样才能保证任务是最优分配. 为方便计算,给出多机器人执行任务的能量消耗计算公式,

$$E(i) = E_i \cdot \sum_{j=1}^n (LT_{ij}), n = 1, 2, 3, \dots, T_n, \quad (7)$$

$$E_i = L_i / 2, \quad (8)$$

式中:  $E(i)$  为机器人  $R_i$  执行完所有任务的能量消耗;  $E_i$  为机器人  $R_i$  每行走 1 m 消耗的能量, 与机器人的能力水平  $L_i$  相关, 机器人能力水平越大, 则单位消耗的能量越大;  $LT_{ij}$  为机器人  $R_i$  执行任务  $T_j$  的行走路程。

改进后的算法与之前的算法相比有如下优点。

①改进后, 针对图 3 中的问题, 由于加入了距离适应度, 使得机器人 B 对任务 2 的适应度更大, 从而选择出了更合理且更优的任务。

②机器人起止位置异地. 当机器人对任务的其他适应度相同时, 机器人距离任务越近, 则适应度越大. 这样, 机器人可以缩短一次返回行走的距离, 节约时间. 尤其是在大规模的任务分配中, 将大大减少执行时间, 如图 4 所示. 图 4 中机器人 A 要将任务 1、2 送到仓库 1. 改进前 A 的任务执行顺序为:  $A \rightarrow 1 \rightarrow \text{仓库 1} \rightarrow 2 \rightarrow \text{仓库 1}$ , 则机器人 A 的行程为 21.59 m; 改进后 A 的执行任务顺序为:  $A \rightarrow 2 \rightarrow \text{仓库 1} \rightarrow 1 \rightarrow \text{仓库 1}$ , 机器人 A 的行程为 18.10 m, 缩短了行程。

③机器人起止位置相同. 当机器人对任务的其他适应度相等时, 距离越远的适应度越大. 我们一般认为, 当机器人与任务能力最匹配时达到资源的充分利用. 因此, 让最优匹配的机器人选择更远距离的任务, 让过匹配的机器人去执行较近的, 这样, 在总行走距离相等的情况下, 总体节约了能量. 如图 4, 让机器人 B、C 分别将任务 1、2 送到仓库 1. 其中, B 对两任务的适应度相同且属于最优匹配, C 对两任务是属于过匹配. 改进前分配结果为:  $B \rightarrow 1, C \rightarrow 2$ ; 改进后分配结果为:  $B \rightarrow 2, C \rightarrow 1$ . 根据公式(7) 计算可知改进后更节省能量, 证明如下。

已知:  $0 < L(B) < L(C), 0 < LT_1 < LT_2$ ,  $LT_1$ 、 $LT_2$  代表仓库 1 分别到任务 1、2 的距离。

改进前的能量消耗:

$$E(B) = L(B) / 2 \cdot LT_1, E(C) = L(C) / 2 \cdot LT_2, \\ E1 = L(B) / 2 \cdot LT_1 + L(C) / 2 \cdot LT_2.$$

改进后的能量消耗:

$$E(B) = L(B) / 2 \cdot LT_2, E(C) = L(C) / 2 \cdot LT_1, \\ E2 = L(B) / 2 \cdot LT_2 + L(C) / 2 \cdot LT_1.$$

$$\Delta E = E1 - E2$$

$$= L(B) / 2 \cdot LT_1 + L(C) / 2 \cdot LT_2 -$$

$$(L(B) / 2 \cdot LT_2 + L(C) / 2 \cdot LT_1) = \\ (L(B) - L(C)) (LT_1 - LT_2) / 2 > 0. \\ \text{证毕.}$$

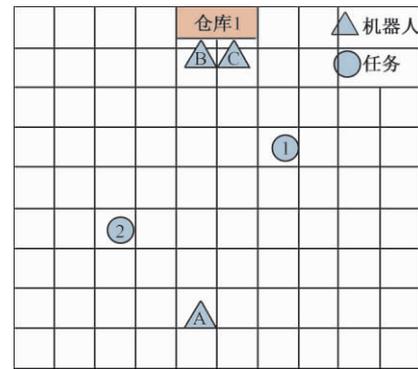


图 4 机器人和任务分布图

Fig. 4 The distribution of robots and tasks

### 3 仿真试验

以搬运任务进行验证, 在一个  $10 \times 10$  m 的空间内, 配备有 4 个机器人, 为进行对比仿真验证, 每个机器人的能力水平各不相同, 机器人起始位置也不相同, 任务的能力需求、位置、数量也各不相同, 在执行任务期间, 机器人均以  $0.24$  m/s 的速度行进, 仿真试验分别对不同组合的任务进行分配和结果分析。

表 1 是机器人的初始参数, 其中,  $R_i$  是机器人编号;  $RPosX$ 、 $RPosY$  是机器人坐标;  $L$  是机器人能力水平;  $CKPos$  是仓库位置. 表 2 是任务的一些初始参数,  $T_j$  是任务编号;  $P$  是任务优先级;  $I$  是子任务总量;  $I_c$  是子任务完成量;  $A_i$  是当前选择本子任务的机器人数量;  $L_{up}$  是允许机器人上限<sup>[9]</sup>;  $L_{dn}$  是允许机器人下限;  $W$  是任务能力需求;  $TPos$  是任务坐标. 初始时, 起止位置异地. 内部适应度参数设置为  $W_s = 0, W_p = 0.8, W_r = 0.2$ , 第一次任务选择时, 要保证机器人尽量选择较近的任务, 参数设置为:  $W_n = 0.2, W_f = 0.8$ , 接下来的参数设置为  $W_n = 0.5, W_f = 0.5$ .

表 1 机器人初始参数

Tab. 1 The initial parameters of robots

$R_i$	$RPosX$	$RPosY$	$L$	$CKPos$
1	3	1	30	5, 10
2	5	1	20	5, 10
3	7	1	40	5, 10
4	9	1	20	5, 10

表 2 任务初始参数

Tab. 2 The initial parameters of tasks

$T_j$	$P$	$I$	$I_c$	$A_c$	$L_{up}$	$L_{dn}$	$W$	$TPos$
1	1	3	0	0	4	1	10	3,5
2	1	5	0	0	6	1	20	5,8
3	1	4	0	0	5	1	30	9,3
4	1	4	0	0	5	1	30	7,5
5	1	3	0	0	3	1	10	8,3
6	1	3	0	0	2	1	20	4,6

针对此次试验,我们假设不考虑机器人之间的避碰耗时,机器人在执行任务中能力保持不变,机器人依次进行任务选择.为了保证试验的可靠性和严谨性,笔者特意设计了没有适应度相同的情况和有两个任务适应度相同位置不同的情况,这两个任务分别是任务 3 和 4. 试验分别以任务组合(1、2、3), (1、2、3、4), (1、2、3、4、5), (1、2、3、4、5、6) 进行 4 组仿真试验.为了验证试验的有效性,试验还分别用原始适应度算法、正余切改进的适应度算法进行了仿真试验验证,试验结果如表 3.

表 3 执行任务时间对比

Tab. 3 The contrast of task execution time

$R_{num} = 4$	$T = 3$	$T = 4$	$T = 5$	$T = 6$
原算法	111	179	180	205
正余切	100	180	185	201
本算法	99	168	168	180

从表 3 可以看出,  $T = 3$  时,任务中没有适应度相同的任务,原始适应度算法比正余切改进的算法、笔者改进的算法运行时间都要长;当  $T = 4 \sim 6$  时,任务中有一组会出现刚开始适应度相同的情况,此时笔者改进的算法运行时间明显小于原始算法和正余切改进的算法,说明改进的算法有效且效率更高.

根据仿真试验,可以得到每个机器人的行走距离及能力大小,然后通过公式(7)可以计算出所有任务执行结束后每个机器人的总能量消耗,3种方法的统计结果如表 4~6 所示.

由以上 3 组的能量计算可看出,笔者改进的算法能量消耗最低,即使在  $T = 3$  时,正余切改进的算法和笔者算法执行时间相差无几,但能量消耗却大于笔者改进的算法,由此证明笔者改进的算法也实现了能量的消耗最低.

表 4 原算法的能量消耗

Tab. 4 The energy consumption of the original algorithm

$R_i$	$E_i$	$R_i$ 的行走距离			
		$T = 3$	$T = 4$	$T = 5$	$T = 6$
		1	15	30.34	46.06
2	10	27.50	27.46	57.16	57.42
3	20	26.92	57.08	57.18	57.14
4	10	35.24	35.24	50.82	52.90
总能量 $E1$		1 621	2 460	2 916	3 221

表 5 正余切算法的能量消耗

Tab. 5 The energy consumption of tanagent cotangent algorithm

$R_i$	$E_i$	$R_i$ 的行走距离			
		$T = 3$	$T = 4$	$T = 5$	$T = 6$
		1	15	30.16	46.08
2	10	31.56	31.48	49.24	54.72
3	20	26.86	57.10	57.12	57.06
4	10	31.32	31.28	58.70	64.06
总能量 $E2$		1 618	2 461	2 913	3 180

表 6 笔者改进算法的能量消耗

Tab. 6 The energy consumption of the improved algorithm

$R_i$	$E_i$	$R_i$ 的行走距离			
		$T = 3$	$T = 4$	$T = 5$	$T = 6$
		1	15	30.18	48.10
2	10	25.52	25.50	49.16	56.76
3	20	26.88	53.28	53.30	57.16
4	10	31.28	31.26	49.78	54.50
总能量 $E3$		1 558	2 355	2 777	3 113

## 4 结论

主要研究了基于改进适应度的多机器人协作策略,针对适应度算法的外部能力匹配度不够理想的问题,提出了高斯分布模型来计算机器人的能力匹配度.仿真表明,笔者算法更符合匹配度的要求,且保证了算法的独立性与延拓性.针对出现适应度相同的任务时,机器人可能无法选择出最合理任务的问题,通过加入与机器人起止位置有关的距离适应度,不仅解决了适应度相同时依次分配带来的不合理,提高了算法分配合理性,而且任务的执行效率也明显提升,保证能量消耗最低,在松散多机器人环境中,该算法优于改进前的算法.

## 参考文献:

- [1] 王俊英,颜芬芬. 基于概率自适应蚁群算法的云任务调度方法[J]. 郑州大学学报(工学版),2017,38(4):51-56.
- [2] 张崑,刘淑华. 多机器人任务分配的研究进展[J]. 智能系统学报,2008,3(2):115-120.
- [3] CHEN Y, MAO X J, HOU F, et al. Combining re-allocating and re-scheduling for dynamic multi-robot task allocation [C] // IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Budapest: IEEE, 2016: 000395-000400.
- [4] 董炆斌,蒋静坪. 基于适应度的多机器人任务分配策略[J]. 浙江大学学报(工学版),2007,41(2):272-277.
- [5] MITICHE H, BOUGHACI D, GINI M. Efficient heuristics for a time-extended multi-robot task allocation problem [C] // International Conference on New Technologies of Information & Communication, 2015: 1-6.
- [6] 张万绪,冯晓海,赵江波,等. 改进适应度的异构多机器人任务分配[J]. 西北工业大学(自然科学版),2013,43(1):22-26.
- [7] 柳林,季秀才,郑志强. 基于市场法及能力分类的多机器人任务分配方法[J]. 机器人,2006,28(3):337-343.
- [8] 韦兆文,区云鹏,闫俊燕. 一种改进的动态合同网协议[J]. 计算机工程与应用,2007,43(36):208-211.
- [9] LERMAN K, GALSTYAN A. A general methodology for mathematical analysis of multi-agent systems [R]. Los Angeles: USC information sciences technical report ISI-TR-529,2001.

## A Multi-robot Cooperative Strategy Based on Improved Fitness Function

ZENG Qingshan, FENG Shanshan

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

**Abstract:** This study focused on the fitness-based cooperative strategy and its improvement method. It was found that the problem of the most matching task could not be decided when the robot had the same fitness tasks. By adding the distance fitness function related to the robot's starting and ending position, the robot could choose the best matching task. At the same time, more realistic Gaussian distribution model was used to calculate the fitness of the external ability. The simulation results showed that the improved algorithm could not only achieve the optimal matching, but also be more efficient and energy saving than before.

**Key words:** fitness; cooperative strategy; multi-robot; heterogeneity; distance fitness

文章编号: 1671-6833(2018)02-0011-07

## 基于深度卷积神经网络的羽绒图像识别

杨文柱, 刘 晴, 王思乐, 崔振超, 张宁雨

(河北大学 网络空间安全与计算机学院, 河北 保定 071002)

**摘 要:** 由于图像中羽绒形态及其多样性, 传统的图像识别方法难以正确识别羽绒分拣图像中的羽绒类型, 其识别精度也难以达到实际生产的要求. 为解决上述问题, 构造了一种用于羽绒类型识别的深度卷积神经网络, 并对其权值初始化方法进行了改进. 首先利用视觉显著性模型提取羽绒图像的显著部分, 然后将图像的显著部分输入到稀疏自动编码器中进行训练, 得到一组符合数据集统计特性的卷积核集合. 最后采用 Inception 及其变种模块实现深度卷积神经网络的构造, 通过增加网络深度来提高网络的识别精度. 试验结果表明, 用所构造的深度卷积神经网络对羽绒图像识别的精度较传统卷积神经网络的提高了 2.7%, 且改进的权值初始化方法使网络的收敛速度提高了 25.5%.

**关键词:** 深度卷积神经网络; 权值初始化; 稀疏自编码; 视觉显著性; 图像识别

**中图分类号:** TP183; TP391.41      **文献标志码:** doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.02.015

### 0 引言

正确识别监控图像中的羽绒类型, 是基于机器视觉<sup>[1-2]</sup>的羽绒分拣技术的关键. 在羽绒监控图像中, 同一类型的羽绒形态千差万别, 不同类型的羽绒形态也有相似, 这使得传统的图像识别技术难以正确识别监控图像中的羽绒类型, 其识别精度也难以达到实际生产的要求(正确率不小于 90%). 深度卷积神经网络<sup>[3]</sup> (deep convolutional neural networks, DCNN) 是一种基于特征学习的图像识别方法, 其泛化能力较传统的图像识别方法有了明显提高, 因此在最近几年, 基于 DCNN 的图像识别方法取得了举世瞩目的成绩. 基于特征学习的图像识别方法不需要事先指定应该提取的特征, 而是通过迭代学习的方式寻找最适合分类的特征. 将 DCNN 应用于图像识别任务时, 不仅可以提高识别精度, 还可以避免人工提取特征造成的人力和时间浪费, 同时满足在线检测的需要.

近年来识别效果好的 DCNN 结构有 Alex-Net<sup>[4]</sup>、VGGNet<sup>[5]</sup>、GoogleNet<sup>[6]</sup>、ResNet<sup>[7]</sup> 等. DC-

NN 在图像识别分类<sup>[8]</sup>、目标检测<sup>[9]</sup>、目标跟踪<sup>[10]</sup>、文本识别<sup>[11]</sup>、语音识别<sup>[12]</sup> 等方面都取得了很好的成绩. 这些网络中权值初始化方法大部分采用随机初始化, 如小随机数初始化<sup>[4]</sup>、Xavier 初始化<sup>[13]</sup>、MSRA 初始化<sup>[14]</sup> 等. DCNN 的训练方式是有监督训练, 所以训练时需要大量有类标的数据来进行权值的更新调整. 但当图像数据集较小时容易造成网络的前几层无法得到充分训练等问题, 针对该问题的主要解决方案是对网络的卷积核进行无监督预训练, 以得到尽可能符合数据集统计特性的卷积核集合. 文献[15]通过训练一个稀疏自动编码器, 对网络第一层卷积核权值进行初始化, 在原图随机切取小块作为稀疏自动编码器的输入, 训练得到的权值就是对随机切取小块的一种稀疏表达; 同时, 小块的选取极为重要, 若识别目标在原图中占比较小, 随机切取的小块取到背景的可能性较大, 这样训练得到的卷积核对网络收敛贡献甚微.

针对以上问题, 设计实现了一种用于识别羽绒图像的 DCNN, 并利用视觉显著性模型和无监督预训练的方法对其权值进行预训练, 以提高网

收稿日期: 2017-11-04; 修订日期: 2017-12-15

基金项目: 国际合作专项基金资助项目(2013DFA11320); 河北省自然科学基金资助项目(F2015201033、F2017201069); “云数融合、科教创新”基金课题(2017A20004)

作者简介: 杨文柱(1968—), 男, 河北保定人, 河北大学教授, 博士, 主要从事机器视觉研究, E-mail: wenzhuayang@163.com.

络收敛速度和对羽绒图像的识别精度. 首先利用视觉显著性模型从原始图像中提取其显著部分, 将显著部分截取指定规格的小块输入至稀疏自动编码器中进行无监督预训练, 得到 DCNN 第一层的卷积核, 将训练好的卷积核集合输入到针对羽绒图像识别的 DCNN 中; 网络结构采用了 Inception 模块及其变种模块<sup>[6,16]</sup> 来提高网络的效率, 并通过增加网络的宽度和深度来提高网络识别精度; 最后利用 softmax 分类器实现对羽绒类型的识别.

## 1 网络权值初始化及其改进

### 1.1 常用的权值初始化方法

DCNN 的权值初始化主要是对卷积层和输出层的卷积核参数和偏置进行初始化. 权值初始化关系到 DCNN 的训练时长, 优秀的初始权值会使网络以较快的速度达到权值最优, 从而提高训练速度. 偏置项通常初始化为一个较小的常数或 0, 卷积核参数初始化通常采用随机初始化方法. 目前常用的随机初始化方法有小随机数初始化、Xavier 初始化和 MSRA 初始化等. 小随机数初始化是将参数初始化为小的随机数, 打破对称性, 使得权值服从均值为 0、标准差为 0.01 的高斯分布, 但当随机数取值太小时, 就会有明显的弊端——反向传播过程中梯度很小, 对较深的网络更是会造成梯度弥散的问题, 同时参数收敛速度也会降低. 针对小随机数初始化方法存在的问题, Xavier 等人提出权值服从均值为 0、方差为  $1/n$  的均匀分布 ( $n$  为输入神经元的数量), 可以提高网络训练的收敛速度. 为了使其更适用于 ReLU 激活函数, MSRA 初始化对 Xavier 初始化进行了改进, 其权值服从均值为 0、方差为  $2/n$  的高斯分布.

利用无监督预训练对 DCNN 的卷积核权值进行初始化也是常用的权值初始化方法之一. 通过构造一个稀疏自动编码器 (sparse autoencoder, SAE) 对网络权值参数进行预训练, 使得输入层和输出层尽可能保持一致; 在 SAE 训练过程中参数得以更新, 形成符合数据特性的初始值. 自动编码器是一种用于尽可能复现输入信号的神经网络<sup>[17]</sup>. 稀疏自动编码器则是在自动编码器的基础上加入了稀疏限制, 对隐含层进行了约束, 使其变得稀疏.

自动编码器的网络结构如图 1 所示.  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  层分别代表网络输入层、隐含层和输出层. 若

稀疏自编码输入层维度为 6 维, 隐含层节点数量设置为 3, 这样迫使隐含层节点学习得到输入数据的压缩表示方法, 即用 3 维数据重构出 6 维数据.

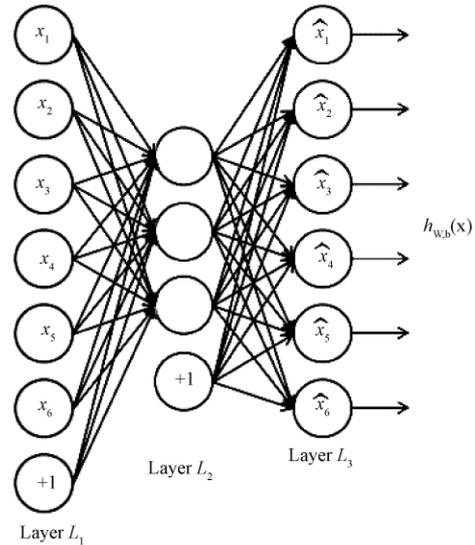


图 1 自动编码器的网络结构

Fig. 1 Network structure of autoencoder

自动编码器损失函数如下:

$$\begin{aligned}
 J(W, b) &= \left[ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m J(W, b; x^{(i)}, y^{(i)}) \right] + \\
 &\quad \frac{\lambda}{2} \sum_{i=1}^{n_1-1} \sum_{j=1}^{s_1} \sum_{k=1}^{s_1+1} (W_{ji}^{(1)})^2 \\
 &= \left[ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left( \frac{1}{2} \| h_{w,b}(x^{(i)}) - y^{(i)} \|^2 \right) \right] + \\
 &\quad \frac{\lambda}{2} \sum_{i=1}^{n_1-1} \sum_{j=1}^{s_1} \sum_{k=1}^{s_1+1} (W_{ji}^{(1)})^2, \quad (1)
 \end{aligned}$$

其中: 第 1 项为均方差项; 第 2 项是权重衰减项, 用于减小权重以防止过拟合.

在计算过程中, 上述损失函数常导致网络收敛很慢, 计算复杂度过高. 稀疏自编码在自动编码器的基础上加入 L1 正则化限制, 使得大部分神经元处于抑制状态, 少数处于激活状态, 使隐含层节点的输出均值尽可能为 0. 稀疏自动编码器的损失函数表示为:

$$J_{\text{sparse}}(W, b) = J(W, b) + \beta \sum_{j=1}^{s_2} KL(\rho \parallel \hat{\rho}_j), \quad (2)$$

其中,  $KL(\rho \parallel \hat{\rho}_j)$  距离表达如下

$$KL(\rho \parallel \hat{\rho}_j) = \rho \log \frac{\rho}{\hat{\rho}_j} + (1 - \rho) \log \frac{1 - \rho}{1 - \hat{\rho}_j}, \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为稀疏性参数, 通常取接近 0 的较小的数;  $\hat{\rho}_j$  为隐含层节点输出均值, 表达式为

$$\hat{\rho}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [a_j^{(2)}(x^{(i)})]. \quad (4)$$

加入稀疏限制使得  $\hat{\rho}_j$  尽可能逼近  $\rho$ , 从而确保多数神经元处于抑制状态, 以增加网络的稀疏性.  $a_j^{(2)}(X)$  为输入向量  $X$  对隐含层单元  $j$  的激活值.

### 1.2 基于视觉显著性和无监督预训练的权值初始化方法

首先利用视觉显著性算法来提取图像的显著部分, 然后随机截取显著部分图像输入至稀疏自动编码器中进行无监督预训练. 采用谱残差算法

(spectral residual approach, SRA) 来获取图像的显著部分, 其主要原理是在原图中将背景剔除, 即得到图像的前景, 也就是图像的显著部分<sup>[18]</sup>, 如图 2 所示. 若 CNN 的第一层卷积操作需要 8 个  $5 \times 5$  大小的卷积核, 那么首先在显著图上随机截取  $N$  个  $5 \times 5$  的小块作为稀疏自编码的输入层, 隐含单元个数设置为 8, 经过稀疏自编码的预训练得到的  $W$  大小为  $25 \times 8$ , 再将  $W$  变为  $8 \times 5 \times 5$  即可得到卷积神经网络第一层卷积核集合  $W$ .

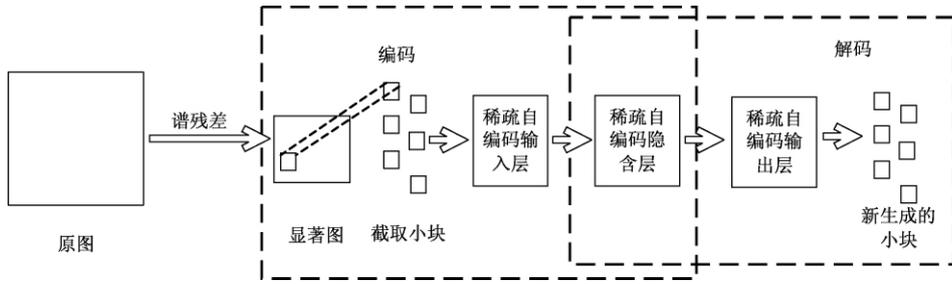


图 2 基于视觉显著性和 SAE 预训练框架

Fig. 2 Training framework based on visual significance and SAE

## 2 基于 DCNN 的羽绒图像识别网络结构

深度卷积神经网络的网络结构对最终的识别精度有着重要的影响. 本文数据集为在生产线上实际采集的羽绒图像经过剪裁后的子图像, 子图像大小均为  $100 \times 100$ , 比 MNIST 和 CIFAR 数据集中图像的分辨率要大很多. 为提高网络效率和识别精度, 采用 Inception 及其变种模块来构建基本网络结构.

Inception 模块的主要特点是在加大了网络深度和宽度的同时不增加计算量, 还提高了计算资源的利用率. Inception 模块结构如图 3 (a) 所示, 由  $1 \times 1$ 、 $3 \times 3$ 、 $5 \times 5$  的卷积操作和  $3 \times 3$  的池化操作组成, 通过设定  $1 \times 1$  卷积核的数量, 实现通道数的降维或升维, 同时对不同通

道的特征进行融合. Inception 模块的优势主要体现在两个方面: ①使用小卷积核在减少网络训练参数的同时降低了网络计算复杂度; ②使用不同大小的卷积核对同一特征图进行特征提取. 随后研究者又提出将较大的卷积核分解成 2 个小卷积核, 如图 3 (b) 所示, 用 2 个  $3 \times 3$  的卷积核代替  $5 \times 5$  的卷积核, 节约了计算时间, 为增加卷积核数目提供便利条件. 图 3 (c) 为 Inception 模块的另一个变形, 经过卷积和池化操作后的特征图大小是前一层的  $1/2$ , 该方法使用了 2 个并行化的模块, 不仅减少了网络的计算量, 还有效地避免了池化所造成的信息损失.

针对羽绒图像识别构造的 DCNN 结构如图 4 所示. 输入层图像大小为  $100 \times 100$ ; C1 层是步长

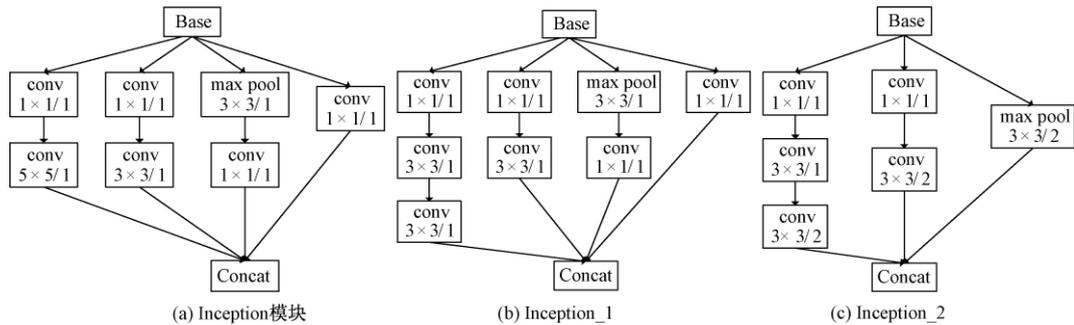


图 3 Inception 模块及其变种

Fig. 3 Inception module and its variants

为2的卷积层,其卷积核大小为 $3 \times 3$ ,本层产生32个大小为 $50 \times 50$ 的特征图;C2层为步长为1的卷积层,卷积核大小为 $3 \times 3$ ,本层产生64个大小为 $48 \times 48$ 的特征图;S1为池化层,采样窗口大小为 $3 \times 3$ ,窗口滑动步长设置为2,本层产生64个大小为 $24 \times 24$ 的特征图. Inception\_1层具体结构如图3(b)所示.采用padding方式进行卷积运算,得到的特征图大小与前一层特征图大小相同,即得到164个大小为 $24 \times 24$ 的特征图. Inception\_2层具体结构如图3(c)所示,得到114个大小为 $12 \times 12$ 的特征图;C3层是步长为1的卷积层,卷积核大小为 $3 \times 3$ ,本层产生64个大小为 $10 \times 10$ 的特征图;FC1层为全连接层,将C3层的

64个特征图连接成一个特征向量;FC2层由8个神经元构成特征向量,对应8种类别输出,FC2全连接层和输出层构成一个softmax分类器.

### 3 试验设计与结果分析

试验环境采用河北大学信息技术中心的超算平台,使用其中一个独立的计算节点,该计算节点配置64个GPU,可大幅提升训练速度. DCNN程序采用基于Python的Tensorflow深度学习框架,而基于视觉显著性和无监督预训练的过程采用MatlabR2016a实现. 数据集为经过剪裁的2300张羽绒图像,图像像素大小均为 $100 \times 100$ ,共8类(5个单独类和3个混合类)如图5所示.

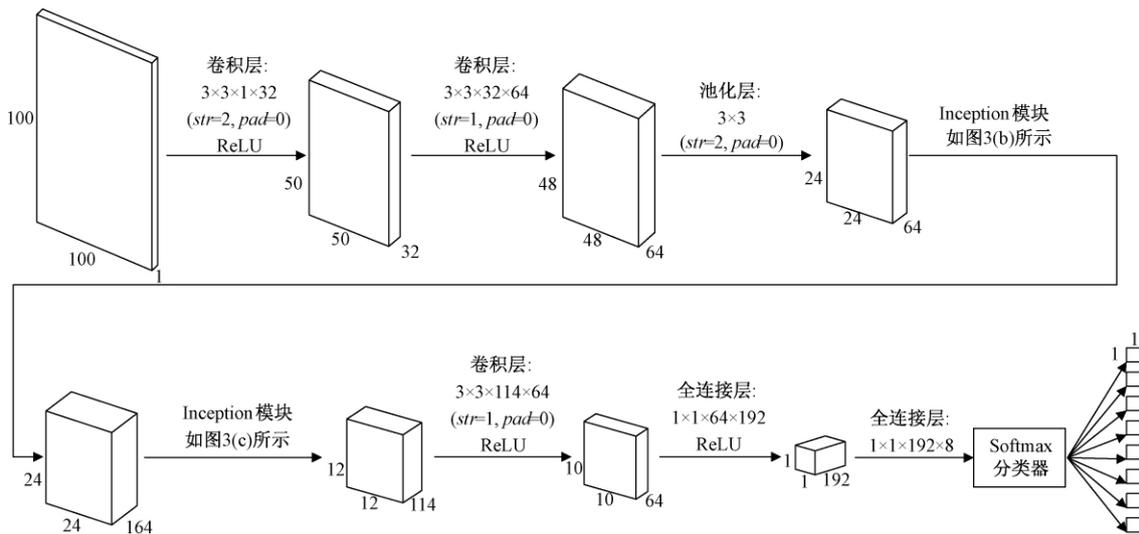


图4 网络结构  
Fig.4 Structure

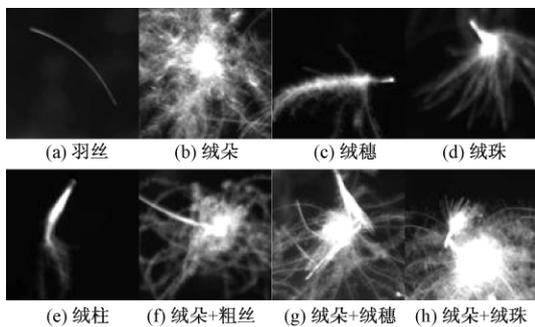


图5 羽绒图像类别  
Fig.5 Categories of down image

#### 3.1 试验步骤

步骤1: 首先利用谱残差模型提取原图显著部分并切割,提取若干张图像显著区域,如图6所示.

步骤2: 因为针对羽绒图像识别提出的框架第一层卷积层需要32个 $3 \times 3$ 的卷积核,故将上

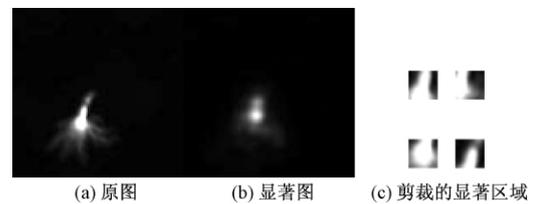


图6 提取图像显著区域

Fig.6 Extracting saliency area from image

一步中得到的若干显著区域随机切取 $N$ 个 $3 \times 3$ 的小块,输入至稀疏自动编码器中,其中,稀疏自动编码器的隐含单元个数设置为32,训练得到的稀疏自动编码器的权值系数大小为 $6 \times 32$ ,将其格式转换为 $32 \times 3 \times 3$ 即可得到DCNN第一层卷积核集合 $W$ ,图7为训练的卷积核集合.

步骤3: 将数据集输入至图4的深度卷积神经网络中训练并测试,得到识别错误率.其中训

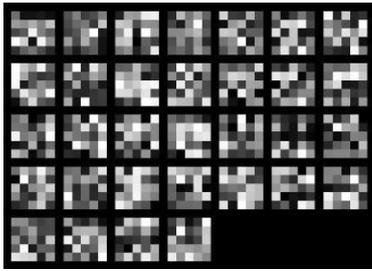


图 7 卷积核集合

Fig.7 Convolutional kernels

练集包含 2 000 张羽绒图像,测试集包含 300 张羽绒图像.

### 3.2 试验结果与分析

本试验利用支持向量机( support vector machine, SVM) 作为传统图像识别分类的代表进行对比试验. 将待识别的图像进行小波变换和图像分割, 提取变换系数的主成分以及分割得到的目标形状特征作为特征向量, 该特征表示能力强、特征维数较低, 对笔者试验数据集有较好的表示能力, 且计算效率较高. 但其计算错误率和训练时长相较于 LeNet-5 卷积神经网络仍然较高, 如表 1 所示.

表 1 支持向量机与卷积神经网络对比实验

Tab.1 The comparison between SVM and CNN

算法	识别错误率/%	训练时长/s
SVM	39.6	79.8
LeNet-5	10.3	46.9

为了验证图 4 网络结构及笔者提出的基于视觉显著性和稀疏自编码预训练的权值初始化方法的有效性, 设计了 6 种不同的试验, 如表 2 所示.

表 2 识别错误率对比

Tab.2 The comparison of identify error rate

算法	数据集迭代次数				
	5	10	15	20	25
LeNet-5	10.3	7.3	7.0	6.3	6.0
LeNet-5 + SAE	8.7	7.0	6.0	5.7	5.3
LeNet-5 + SAE + SR	8.0	6.0	5.7	4.7	4.3
图 4 结构	9.3	7.0	6.0	5.7	5.0
图 4 结构 + SAE	8.3	6.7	5.3	4.7	4.3
图 4 结构 + SAE + SR	7.6	5.7	5.0	4.0	3.3

由表 2 可以看出, 利用稀疏自编码预训练算法对 LeNet-5 网络初始权值进行改进, 较未加入 LeNet-5 的网络降低了对羽绒图像的识别错误率,

说明稀疏自编码预训练对卷积神经网络训练有一定的贡献. 对比加入稀疏自编码预训练算法的 LeNet-5 网络与利用视觉显著性和稀疏自编码算法对 LeNet-5 网络初始权值进行改进, 可以看出加入了视觉显著性和稀疏自编码预训练算法的 LeNet-5 网络进一步降低了识别错误率, 并随着数据集迭代次数的增加而降低.

由表 2 还可以看出, 通过对比图 4 网络结构和经典 LeNet-5 网络对羽绒图像的识别训练, 图 4 网络结构对羽绒图像的识别效果更好, 对比经过稀疏自编码预训练的 LeNet-5 网络, 在数据集迭代 25 次后, 图 4 网络结构对羽绒图像识别有较低的错误率, 说明笔者提出网络结构对羽绒图像识别的有效性; 同时, 在图 4 网络结构中加入稀疏自编码预训练算法, 识别效果也有了一定的提高; 在此基础上加入谱残差算法和稀疏自编码预训练算法对网络权值进行初始化, 在数据集迭代 25 次后, 该网络对羽绒图像的识别正确率达到了 96.7%.

图 8 为 LeNet-5 网络与笔者提出的网络结构针对羽绒图像训练的时间对比曲线. 因羽绒图像易混, 若图像分辨率小将更难区分, 所以本数据集分辨率大小均为 100 × 100. 由图 8 可以看出, 在网络训练中, 笔者提出的网络结构较 LeNet-5 训练时间更短, 收敛速度更快, 且与本机( Linux Ubuntu-16) 训练速度相比, 在超算平台上的训练速度更快.

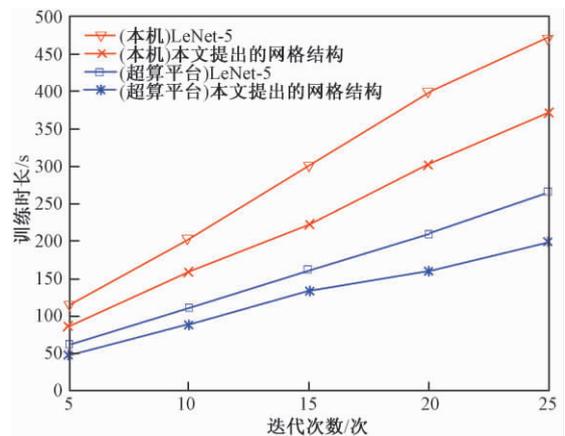


图 8 训练时长

Fig.8 Training time

## 4 结论

针对羽绒图像识别构造了一个深度卷积神经网络, 并对权值初始化方法进行了改进, 主要贡献如下: ①利用视觉显著性模型提取原图显著区域,

并利用显著区域进行无监督预训练,训练得到的权值系数即为 DCNN 卷积核的初始权值. 利用这种初始化方法,在样本数较小的情况下,DCNN 也能以较快速度达到权值最优,且识别精度有所提升;②网络结构主要采用 Inception 模块,适当加大了网络深度和宽度,提高了网络效率和识别精度. 本试验的数据集是经过裁剪的子图像,而实际生产中的图像分辨率极高且图像内容更复杂,如何实现高分辨复杂图像的识别,是下一步将要进行的工作.

### 参考文献:

- [1] 陈继华,李勇,田增国,等. 基于机器视觉的机械式表盘自动读表技术的实现[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(3): 101-105.
- [2] 张震,刘博,李龙. 一种多特征提取及融合的虹膜识别方法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2017, 38(1): 63-67.
- [3] LECUN Y, BOSER B, DENKER J S, et al. Back-propagation applied to handwritten zip code recognition [J]. *Neural computation*, 1989, 1(4): 541-551.
- [4] KRIZHEVSKY A, SUTSKEVER I, HINTON G E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks [C]//*Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*. California: MIT Press 2012: 1097-1105.
- [5] SIMONYAN K, ZISSERMAN A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition [C]//*International Conference on Learning Representations (ICLR)*. San Diego: arXiv: 1409.1556v6 [cs.CV], 2015.
- [6] SZEGEDY C, LIU W, JIA Y, et al. Going deeper with convolutions [C]//*IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Boston: IEEE computer society, 2015: 1-9.
- [7] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Deep residual learning for image recognition [C]//*IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Las Vegas: IEEE computer society, 2016: 770-778.
- [8] IOANNOU Y, ROBERTSON D, SHOTTON J, et al. Training convolutional neural networks with low-rank filters for efficient image classification [J]. *Journal of bacteriology*, 2016, 167(3): 774-783.
- [9] QU L, HE S, ZHANG J, et al. RGBD salient object detection via deep fusion [J]. *IEEE transactions on image processing*, 2017, 26(5): 2274-2285.
- [10] WANG L, OUYANG W, WANG X, et al. STCT: sequentially training convolutional networks for visual tracking [C]// *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Las Vegas: IEEE computer society, 2016: 1373-1381.
- [11] WU Y C, YIN F, LIU C L. Improving handwritten Chinese text recognition using neural network language models and convolutional neural network shape models [J]. *Pattern recognition*, 2016, 65(C): 251-264.
- [12] MITRA V, FRANCO H. Time-frequency convolutional networks for robust speech recognition [C]// *IEEE Automatic Speech Recognition and Understanding (ASRU)*. Scottsdale: IEEE computer society, 2015: 317-323.
- [13] GLOROT X, BENGIO Y. Understanding the difficulty of training deep feedforward neural networks [J]. *Journal of machine learning research*, 2010, (9): 249-256.
- [14] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Delving deep into rectifiers: surpassing human-level performance on ImageNet classification [C]// *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*. Santiago: IEEE computer society, 2015: 1026-1034.
- [15] 王冠皓,徐军. 基于多级金字塔卷积神经网络的快速特征表示方法[J]. *计算机应用研究*, 2015, 32(8): 2492-2495.
- [16] SZEGEDY C, VANHOUCHE V, IOFFE S, et al. Rethinking the Inception architecture for computer vision [C]//*IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Las Vegas: IEEE computer society, 2016: 2818-2826.
- [17] ZENG K, YU J, WANG R, et al. Coupled deep autoencoder for single image super-resolution [J]. *IEEE transactions on cybernetics*, 2016, 47(1): 27-37.
- [18] HOU X, ZHANG L. Saliency detection: a spectral residual approach [C]// *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Minneapolis: IEEE computer society, 2007: 1-8.

## Down Image Recognition Based on Deep Convolution Neural Networks

YANG Wenzhu, LIU Qing, WANG Sile, CUI Zhenchao, ZHANG Ningyu

(School of Cyber Security and Computer, Hebei University, Baoding 071002, China)

**Abstract:** Because of the scale and the various shapes of down in the image, it was difficult for traditional image recognition method to correctly recognize the type of down image and got the required recognition accuracy, even for the Traditional Convolutional Neural Network (TCNN). To solve the above problems, a Deep Convolutional Neural Networks (DCNN) for down image recognition was constructed, and a new weight initialization method was proposed. Firstly, the salient regions of down images were cut from the images using the visual saliency model. Then, these salient regions were used to train a sparse autoencoder and get a collection of convolutional filters, which accord with the statistical characteristics of dataset. At last, a DCNN with Inception module and its variants was constructed. To enhance the recognition accuracy, the depth of the network was deepened. The experiment results indicated that the constructed DCNN increased the recognition accuracy by 2.7% compared to TCNN, when recognizing the down in the images. The convergence rate of the proposed DCNN with the new weight initialization method was improved by 25.5% compared to TCNN.

**Key words:** deep convolutional neural networks; weights initialization; sparse autoencoder; visual saliency; image recognition

---

(上接第 5 页)

## Improved TLD Object Tracking Algorithm Based on FAST Feature Points

MAO Xiaobo, ZHOU Xiaodong, LIU Yanhong

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

**Abstract:** TLD was a new long-term object tracking algorithm in recent years. It is different from the traditional tracking algorithm in that it combined the traditional detection algorithm and the tracking algorithm, and then the learning module was used to study the characteristics of the object. In this paper, an improved TLD object tracking algorithm based on FAST feature points was proposed to ensure that the selected feature points could be tracked correctly and reliably to improve the accuracy of the tracker. At the same time, for the tracking process, the learning module template cumulative effects is obvious, reduced the real-time performance. Using a dynamic template management mechanism, when the number of templates reached the threshold, by comparing the similarity between the template and the current target, the specific template was deleted and the number of templates was kept constant. Experiments results showed that the improved algorithm had higher tracking precision and real-time performance.

**Key words:** TLD; long-term; object tracking; feature point

文章编号: 1671-6833(2018)02-0018-05

## 基于网络的视觉皮层演化博弈研究

逯鹏<sup>1,2</sup>, 张微<sup>1</sup>, 李亚萍<sup>1</sup>, 刘素杰<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 互联网医疗与健康服务 河南省协同创新中心, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 从网络角度研究视觉是一种新思路. 视觉皮层网络存在传播效率和布线代价的矛盾. 从“经济性”原则入手, 通过对视觉皮层网络的模拟、演化, 研究有限能量限制下视觉皮层网络代价和效率的博弈演化规律. 以 V1 区脑沟 15 mm 构建空间视觉网络模型; 以异质性视觉皮层网络演化, 证实信息传播效率和布线代价存在矛盾; 以效率和代价两种混合动力学博弈策略产生合作簇, 验证布线代价和效率的博弈演化规律. 结果表明, 视觉皮层网络存在类复杂网络的动态博弈演化机制, 该结果为一般视觉信息处理研究提供了新途径和方法.

**关键词:** 视觉皮层网络; 传播效率; 布线代价; 演化; 博弈

**中图分类号:** TP2 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.02.014

### 0 引言

传统视觉研究一般以感受野为主要切入点<sup>[1]</sup>, 即通过光刺激特定视野区域, 引起细胞产生动作电位, 获知视觉信息处理规律<sup>[2]</sup>. 随着功能磁共振成像 (fMRI)、脑磁图 (MEG)、脑电图 (EEG) 等非侵入性脑影像技术的完善, 研究者发现通过构建视觉皮层网络研究视觉认知是一种新的途径.

人脑在多维的时间和空间尺度上都是复杂网络<sup>[3]</sup>, 视觉是一个特殊的脑网络. 因此, 采用脑网络的研究方法, 从宏观(脑区)到微观(单个神经元)各层次上刻画和挖掘视觉网络的连接规律是一个重要的研究方向.

文献[4]得到猴视皮层的有向结构连接网络; 文献[5]证实了视觉皮层具有小世界特性; 文献[6]采用计算模型方法研究猕猴皮层结构网络和功能网络的关系. 研究者从网络模拟、演化、进而分析视觉皮层网络内部组织模式, 采用复杂网络技术, 通过被量化的小世界网络揭示脑结构和脑功能的机制和特征<sup>[7-8]</sup>.

笔者着重从视觉网络博弈演化的两个问题深入研究: ①神经连接的建立和维持需要代谢消耗

且希望消耗尽可能地少<sup>[9]</sup>, 即视觉网络中存在最小布线代价和信息传输效率的矛盾点; ②针对消耗和效率之间的折衷开展进一步研究.

视觉皮层的信息交换需要在低维空间中找到尽可能小的布线成本, 用博弈机制研究效率和代价之间的关系对理解视觉信息处理具有重要意义<sup>[10]</sup>. 基于以上问题, 以脑区为节点, 神经元之间的突触为连边, 在严格空间限制下, 构建视觉脑网络模型, 发现并验证视觉皮层演化和博弈规律.

### 1 视觉皮层网络模拟

大脑是一个典型的空间网络<sup>[11]</sup>, 文献[12]提出的空间增长模型可以模拟和真实大脑系统相似的视觉脑网络. 与一般脑网络不同, 在进行视觉皮层网络模拟时需要考虑人脑的特殊性<sup>[13]</sup>. 不同视觉皮层在大脑的不同区域, 分为两种情况.

(1) 节点在同一个区域内.

$$L(m, n) = d(m, n) = \sqrt{(x(m) - x(n))^2 + (y(m) - y(n))^2 + (z(m) - z(n))^2}. \quad (1)$$

(2) 节点在不同区域内.

$$L(m, n) = d(m, n) + \text{deep}(m) + \text{deep}(n). \quad (2)$$

式中:  $d(m, n)$  表示节点之间的线性路径长度;

收稿日期: 2017-10-11; 修订日期: 2017-12-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60841004、60971110、61172152); 郑州市科技攻关资助项目(112PPTGY219-8); 河南省青年骨干教师计划资助(2012GGJS-005)

作者简介: 逯鹏(1974—), 男, 河南郑州人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事复杂视觉图像信息处理、脑-机接口和医疗大数据方面的研究, E-mail: lupeng@zzu.edu.cn.

$deep(m)$  表示节点  $m$  与最近脑沟底部之间的距离. 由于大脑皮层的复杂性,不同大脑的脑沟深度不同,可随机选取  $0 \sim 18 \text{ mm}$  的数值<sup>[13]</sup>,为了统一计算,选取  $15 \text{ mm}$  作为脑沟深度.

采用空间增长限制方法,通过 MNI( montreal neurological institute) 定位神经元坐标,对 V1 区 500 个节点模拟,设置网络参数范围遵循两条准则:①网络是无孤立节点的连通图;②网络密度  $\rho < 50\%$ .

准则①保证网络的连通性,且要求比例因子不能太高. 准则②限制比例因子以适应视觉信息处理的高效率. 根据对视觉皮层网络的模拟,分析不同比例因子 V1 区对应的局部和整体网络小世界特性指数,如图 1 和图 2 所示.

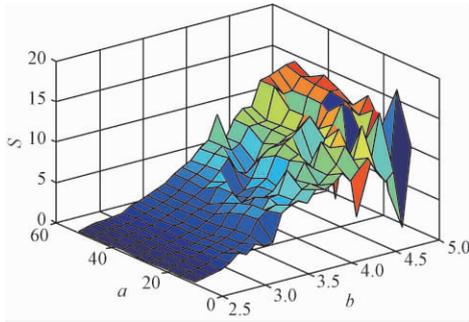


图 1 V1 区局部网络的小世界特性指数  $S$

Fig. 1 The small-worldness  $S$  of local network in V1

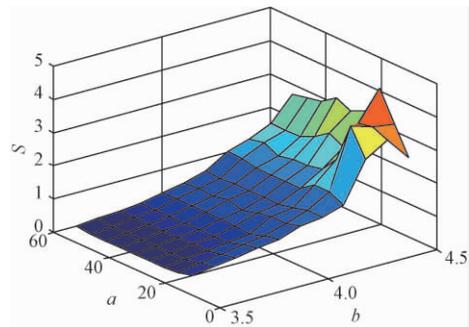


图 2 V1 区整体网络小世界特性指数  $S$

Fig. 2 The small-worldness  $S$  of global network in V1

图 1 中,在  $5 \leq a \leq 50, 3 \leq b \leq 5$  范围内, V1 区对应的网络小世界特性指数  $S > 1$ ,表现出小世界拓扑特性. 图 2 中,在  $3.5 < b < 4.5$  模拟视觉网络呈现小世界特性;  $b < 3$  为完全连通网络;  $b > 4.5$  时,网络被撕裂成独立的社团小网络.

采用 264 个 V1 区数据库信息,设置参数  $b = 4, a = 50$  模拟得到可视化网络,如图 3 所示.

图 3 (a) 表示部分节点连接图,图 3 (b) 表示随机两点的平均路径长度. 计算得到其连边为 945,簇系数  $C = 0.282$ ,随机选取节点 3,其最短

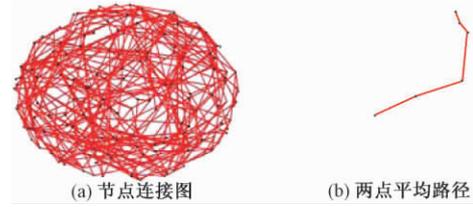


图 3 视觉皮层模拟网络图

Fig. 3 Simulate network graph of visual cortex  
路径长度  $L$  为 5,由簇系数和路径长度可知,网络符合小世界特性.

## 2 视觉皮层网络演化

视觉系统是一个高耗能系统,视觉皮层应尽量降低这种消耗. 降低耗能的方法有两种:节点优先连接到距离最近的节点使布线代价最小化;采用长突触优先连接最小化处理步骤.

网络需要学习和优化来减少整个网络的能量消耗<sup>[14]</sup>. 网络演化规则有随机性和自适应性,新节点可优先连接,与视觉皮层节点连接特性一致. 采用异质性视觉皮层网络演化,对节点、空间和优先连接条件限制,探究不同连接规则下的网络布线代价.

### 2.1 网络演化模型的构建

#### (1) 节点作用范围分布

$$p(r_i) = r_i^{-\alpha} / \sum_j r_j^{-\alpha}, \quad (3)$$

式中:比例因子  $\alpha$  调整作用范围.

#### (2) 空间距离限制

$$r_{\min} \leq d(i, j) \leq r_{\max}. \quad (4)$$

式中:  $r_{\min}$  和  $r_{\max}$  调整节点  $i, j$  间的空间距离.

#### (3) 优先选择条件

$$U(i, j) = R_v^\beta(j) / d^\gamma(i, j). \quad (5)$$

### 2.2 网络演化算法的生成

网络演化算法的生成主要是新节点和新边的生成,计算步骤如下.

#### (1) 设置初始值:初始节点,初始边;

(2) 生成新点:在每一个时间步  $t$ ,随机选取一个旧节点按空间限制规则生成一个新点  $m$ ;

(3) 生成新边:新点  $m$  与  $m_1$  个具有较大优先连接因子的空间邻居连接,新增加边数  $m_1$ ;若空间邻居数  $\omega > m_1$ ,与所有空间邻居相连,新增加边数为  $\omega$ ;

(4) 在同一个时间步  $t$ ,随机选择一个旧节点与尚未连接具有较大优先连接因子数的  $m_2$  个空间邻居连接,网络边数增加  $m_2$  条;若满足条件的空间邻居数  $h < m_2$ ,则与  $h$  个节点相连接;

(5) 设置网络节点  $M = 1\ 000$ , 若  $M < 1\ 000$ , 继续网络演化, 若  $M = 1\ 000$ , 则停止演化;

(6) 通过调整比例因子分析网络拓扑结构.

### 2.3 网络演化结果

设计3种不同优先连接方式的网络演化模型: ①长突触神经元优先连接  $\beta = 1, \gamma = 0$ ; ②混合态连接  $\beta = 1, \gamma = 1$ ; ③距离优先连接  $\beta = 0, \gamma = 1$ . 3种连接方式的小世界特性  $S$  和平均布线代价  $ACW$  随比例因子  $\alpha$  的变化如图4和图5. 其中: 比例因子  $\alpha$  用来调节长短神经元数量比例, 当  $\alpha$  增大时, 短突触神经元增多, 长突触神经元减少, 节点连接短突触神经元概率增加. 设置需符合视觉稀疏特性, 即  $\alpha$  不能无限大, 节点数为1 000, 网络规模为 30 000 m. u., 限制  $\alpha$  的临界范围为 15 000 m. u..

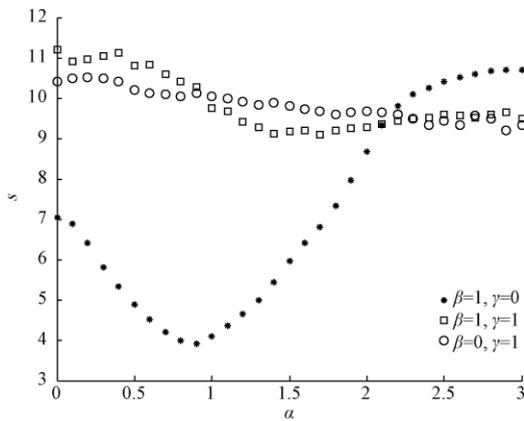


图4 小世界特性变化曲线

Fig. 4 Curve of small-world characteristics

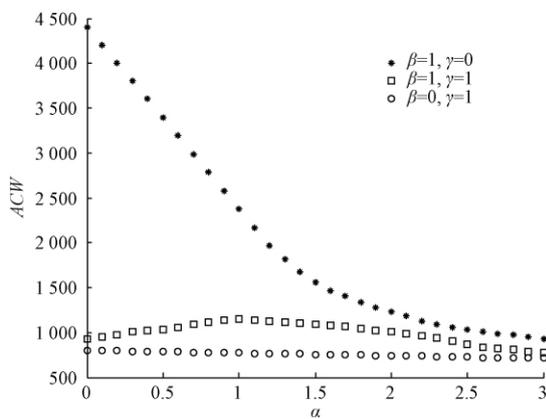


图5 平均布线代价变化曲线

Fig. 5 Curve of average wiring cost

图5表明优先连接方式不同所表现的小世界特性  $S$  也有所不同. 在长突触优先连接时, 随着  $\alpha$  的增加呈U字形变化; 在混合态连接时, 稳定在10左右上下波动状态; 在距离优先连接时, 呈缓慢下降状态. 3种优先连接条件不同程度地影响

小世界最大化. 在长突触神经元连接状态下, 其平均路径长度  $L$  随  $\alpha$  增大而减小, 簇系数  $C$  随  $\alpha$  增大而增大, 具有较明显的小世界特性.

图5表明, 长突触神经元优先连接时, 布线代价随比例因子  $\alpha$  的增加迅速下降; 在混合状态时, 平均布线代价先上升然后下降, 且幅度不明显; 在距离优先连接状态下, 平均布线代价  $ACW$  随  $\alpha$  的增加逐渐减少, 处于比较经济状态. 以上3种连接中, 距离优先连接布线代价最经济, 长突触神经元优先连接机制具有较高的小世界特性. 试验证明, 视觉皮层处理信息存在传播效率和布线代价的矛盾, 二者如何协商权衡, 通过演化博弈进一步探究.

## 3 视觉皮层网络博弈演化

与传统博弈所有个体全部相互接触不同, 博弈演化中个体只与周围少数个体接触. 在博弈中引用网络拓扑, 网络中的节点表示博弈个体, 连边表示与邻居的博弈关系.

(1) 博弈个体: 视觉皮层网络中的节点.

(2) 策略集: 博弈个体根据周围邻居个体上一个时刻策略反思、采用反策略进行一次虚拟博弈, 得到虚拟的总收益, 比较两者收益的大小, 确定收益较大者为个体博弈最佳策略.

(3) 收益矩阵: 根据网络代价和效率判断收益. 当两个节点都合作时, 每个节点的收益为  $b$ , 布线代价为  $c/2$ ; 当一个合作另一个背叛, 合作者和背叛者的收益均为  $b$ , 合作者的布线代价为  $c$ , 背叛者布线代价为 0; 当两个节点都背叛时, 收益均为 0, 布线代价为 0. 同时, 在网络博弈演化中若两者合作, 或者一方合作, 都会增加连接边.

(4) 策略更新: 每个个体在有限时间步进行更新策略.

### 3.1 网络博弈演化规则

将  $N$  个博弈个体置于网络节点上, 每一轮所有个体同时博弈, 个体的总收益为给定的收益矩阵与参加博弈个体博弈后的收益之和. 当一轮博弈完成后, 所有个体根据条件更新自己的策略库, 同时根据策略更新规则更新自身的策略, 进入下一轮的博弈. 重复上述步骤直到网络博弈合作密度稳定则停止博弈.

视觉皮层网络的效率定义为:

$$E_{glob} = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in G} \frac{1}{L_{i,j}}, \quad (6)$$

式中:  $N$  表示网络规模;  $L_{i,j}$  表示节点  $i$  到节点  $j$  的最短路径长度; 效率  $E_{\text{glob}}$  的范围在  $[0, 1]$ .

节点之间的连接需要消耗不同的布线代价, 网络的布线代价定义为:

$$C_G = \frac{\sum_{i \neq j \in G} a_{ij} \gamma(L_{ij})}{\sum_{i \neq j \in G_{id}} \gamma L_{ij}}, \quad (7)$$

式中:  $a_{ij}$  代表邻接矩阵;  $L_{ij}$  代表最短路径;  $\gamma(L_{ij})$  计算给定长度节点之间连接所需的布线代价, 范围  $[0, 1]$ .

网络博弈是以节点的布线代价和信息传输效率来定义收益函数. 收益函数定义为:

$$U = \max(E_{\text{glob}} - C_G), \quad (8)$$

式中: 收益函数  $U$  的范围是  $[0, 1]$ .

个体的策略库更新和策略更新方案如下: 上一时刻采用的策略进行反思, 采用自己的反策略进行一次虚拟的博弈, 得到虚拟的总收益; 比较两者收益的大小, 确定收益较大者为个体博弈所对应的最佳策略, 并安排记忆最佳策略; 个体根据本身有限时间步记忆更新策略.

### 3.2 博弈演化结果

演化开始, 设置网络规模为 1 000 个节点, 且合作者和背叛者各占规模的 50%; 随机分配个体记忆最佳策略; 个体随机选择博弈个体进行博弈; 博弈开始一轮后, 采用同步更新方式对每个个体进行策略更新; 以 500 时间步为时间单位求  $f_c$  平均值, 当  $f_c$  波动幅度在 0.02 以内, 停止博弈; 求最后 1 000 步合作密度平均值, 并改变记忆长度, 进行下一轮博弈; 改变不同的记忆长度  $M$ , 探究记忆性对合作密度  $f_c$  的影响.

不同记忆长度时, 合作密度  $f_c$  随收益函数  $U$  的变化关系如图 6 所示.

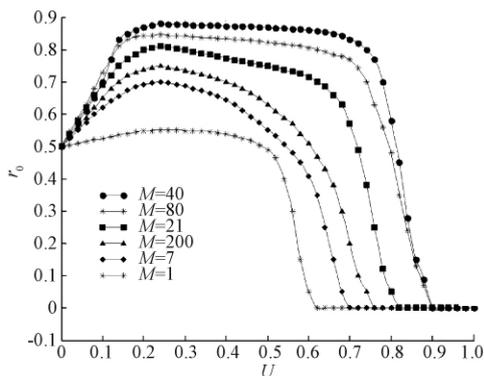


图 6 不同记忆长度合作密度变化曲线

Fig. 6 Curve of cooperative density changing under different memory lengths

网络博弈演化稳定后, 当  $M = 1$  时, 节点没有记忆性, 其合作密度没有明显的幅度变化. 当  $U = 0.5$  时, 合作密度急剧下降, 其布线代价大于效率, 节点表现出背叛性.  $M$  值不断增大有利于合作涌现, 但当  $M$  过大时, 则不利于合作涌现.

随着博弈时间步的增加, 网络合作簇形成的过程也在变化. 取  $M = 7, U = 0.3$ , 如图 7 所示. 图 7 中灰色部分表示个体选择背叛策略, 黑色部分表示个体选择合作策略. 当  $t = 0$  时, 网络还没开始博弈之前, 合作个体和背叛个体均匀分布, 没有合作簇; 当  $t = 200$  时, 合作个体随着网络的博弈演化逐渐聚集到了一起, 具有明显的聚类特性; 当演化时间步达到  $t = 500$  时, 合作程度进一步增加, 具有明显的簇系数.

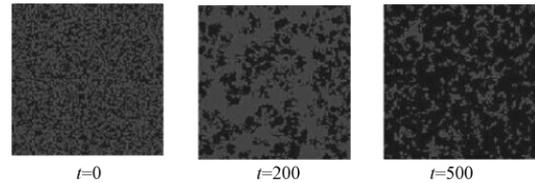


图 7 随着博弈时间步的增加合作簇的形成过程

Fig. 7 Process of collaboration cliques generated by game time steps

## 4 结论

视觉系统是典型的复杂网络. 通过视觉皮层网络的构建、模拟, 得到了与真实视皮层相似的网络模型, 证实了用复杂网络的方法进行研究具有一定的可行性; 通过网络演化, 验证了长突触神经元优先连接和距离优先连接存在矛盾点, 与视觉神经生理一致; 通过网络博弈演化规则, 促进合作簇的生成, 实现了布线代价与效率的折衷. 以网络的思想进行视觉皮层网络模拟、演化、博弈, 为研究视觉信息处理提供了一种新的途径和方法.

### 参考文献:

- [1] 寿天德. 视觉信息处理的脑机制 [M]. 2 版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010.
- [2] 陈科, 尹娇娇, 宋雪梅. 猫 V1 区不同外周整合细胞的经典感受野属性研究 [J]. 生物化学与生物物理进展, 2015, 42(2): 182-188.
- [3] REINEBERG A E, BANICH M T. Functional connectivity at rest is sensitive to individual differences in executive function: a network analysis [J]. Human brain mapping, 2016, 37(8): 2959-2975.
- [4] HORVÁT S, G ÁM ÁUT R, ERCSEY-RAVASZ M, et al. Spatial embedding and wiring cost constrain the

- functional layout of the cortical network of rodents and primates [J]. *Plos biology*, 2016, 14(7): 1–30.
- [5] HILGETAG C C, MEDALLA M, BEUL S F, et al. The primate connectome in context: principles of connections of the cortical visual system [J]. *Neuro image*, 2016, 134: 685–702.
- [6] MIŠIĆ B, BETZEL R F, DE REUS M A, et al. Network-level structure-function relationships in human neocortex [J]. *Cerebral cortex*, 2016, 26(7): 3285–3296.
- [7] PARK H J, FRISTON K. Structural and functional brain networks: from connections to cognition [J]. *Science*, 2013, 342(6258): 579.
- [8] 李亚萍. 视觉皮层网络演化模拟研究 [D]. 郑州: 郑州大学电气工程学院, 2015.
- [9] VAN DEN HEUVEL M P, KAHN R S, GOÑI J, et al. High-cost, high-capacity backbone for global brain communication [J]. *Proceedings of the national academy of science of the USA*, 2012, 109(28): 11372–11377.
- [10] 刘永奎. 复杂网络及网络上的演化博弈动力学研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学机电工程学院, 2010.
- [11] HART M G, YPRMA R J, ROMERO-GARCIA R, et al. Graph theory analysis of complex brain networks: new concepts in brain mapping applied to neurosurgery [J]. *Journal of neurosurgery*, 2016, 124(6): 1665–1678.
- [12] BULLMORE E, SPORNS O. The economy of brain network organization [J]. *Nature reviews neuroscience*, 2012, 13(5): 336–349.
- [13] 赵庆柏. 小世界脑网络的模拟及应用研究 [D]. 大连: 大连理工大学神经信息学研究所, 2009.
- [14] 阎新芳, 王晓晓, 冯岩, 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.

## Research on Evolutionary Game of Visual Cortex Networks

LU Peng<sup>1,2</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, LI Yaping<sup>1</sup>, LIU Sujie<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Collaborative Innovation Center of Internet Medical and Healthcare in Henan, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Research on vision from the perspective of network was a new direction. There was a contradiction between transmission efficiency and wiring cost in visual cortex network. Based on the principle of economy, the evolutionary game laws were proposed between the cost and efficiency under the limitation of energy by simulating the visual cortex network. The visual network model was built upon the sulci of 15mm in V1. The heterogeneous evolution of the visual cortex network confirmed the existence of contradiction between information transmission efficiency and wiring cost. The collaboration cliques generated by mixing the dynamic game strategies of efficiency and wiring cost validate the evolutionary game laws. The evolutionary game laws showed that there existed a dynamic evolutionary mechanism of class complex network in visual cortex network, and provided a new way for ordinary vision information management.

**Key words:** visual cortex network; transmission efficiency; wiring cost; evolution; game

文章编号: 1671-6833(2018)02-0023-05

# 新型四足步行机器人串并混联腿的轨迹规划与仿真研究

高建设, 王玉闯, 刘德平, 王保糖

(郑州大学 机电一体化研究所, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 为了提高四足机器人的载重自重比, 综合了一种新型串并混联四足步行机器人, 并针对其运动过程的冲击问题, 使用了一种基于高次多项式的零冲击足端轨迹规划算法. 该机器人每条腿都是由 3-RRR 并联机构串联一个转动机构组成. 此机构利用 D-H 的方法建立坐标系, 利用足端轨迹规划算法在世界坐标系对串并混联腿的摆动相进行足端轨迹规划, 支撑相利用匀速直线运动进行规划. 根据反解模型, 计算出足端在髋关节全局坐标系下的足端轨迹. 然后, 基于混联腿的运动学逆解用 Matlab 编程计算出串并混联腿的四个驱动函数. 最后, 把单腿模型导入到 ADAMS 中, 添加约束、驱动后, 利用 ADAMS 对串并混联腿进行运动仿真. 结果显示, 该混联腿的足端实现了零冲击规划的目标, 且足端轨迹的速度、加速度平滑. 由此表明仿真结果与理论结果相符, 验证了该算法的合理性和有效性, 为进一步研究四足机器人的步态规划和运动控制奠定了基础.

**关键词:** 串并混联; 四足步行机器人; 足端轨迹规划; Matlab; ADAMS 仿真

**中图分类号:** TP242 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.05.008

## 0 前言

由于仿生机器人同时具有生物和机器人的特点, 所以逐渐在反恐防爆、抢险救灾等不适合由人来承担任务的环境中表现出良好的应用前景<sup>[1-2]</sup>. 步行机器人由于落脚点离散, 在其足端能够达到的范围内可以灵活调整行走姿态, 并合理选择支撑点, 所以对复杂地形和非结构化环境具有更强的适应能力<sup>[3]</sup>, 目前已成为机器人研究的热点领域之一.

在四足机器人中, 其腿部机构多数是串联的, 比较典型的有美国波士顿动力学公司的 BigDog、猎豹 Cheetah 和野猫 Wildcat 等. 这些机器人腿的结构简单, 建模和控制比较容易, 但自重载重比大, 承载能力相对较低. 也有学者利用并联腿机构来设计仿生机器人, 如上海交通大学提出的六足步行机器人的每条腿都是一种典型 3-DOF 的并联机构<sup>[4]</sup>, 燕山大学王洪波等基于并联机构提出了四足两足可重组步行机器人<sup>[5]</sup>. 虽然并联腿机构有自重载重比小、承载能力强、稳定性高的特点, 但是有工作空间小的缺点. 为了克服串联或者并联腿各自的不足, 国内外一些学者对混联机构

做了研究. 在四足仿生机器人方面, 田兴华等<sup>[6]</sup>提出了 3 种类型的 3 自由度混联腿构型, 建立了各自运动学模型和工作空间模型, 并证实了混联腿的优越性.

另一方面, 步行机器人的轨迹规划是机器人能否平稳运动的重要问题. 山东大学的李华<sup>[7]</sup>和南京航空航天大学的马东兴等<sup>[8]</sup>都是对关节空间进行规划控制, 分别实现了步态行走和定点转弯步态. 基于足端轨迹的步态规划是比较常用的方法, 最为典型的是基于复合摆线的足端轨迹规划方法. 文献<sup>[9]</sup>提出了基于摆线的足端轨迹规划方法, 实现了四足机器人 walk 步态的行走. 东北大学柳洪义等在 1994 年用修正组合摆线作为足端轨迹规划, 解决了足端对不平地面的自适应问题, 避免了抬腿时的急动<sup>[10]</sup>. 北京理工大学王立鹏等<sup>[11]</sup>又对复合摆线进行了改进, 降低了足端在行走过程中的冲击力. 山东大学荣学文等<sup>[12]</sup>用了三次多项式作为摆动相的足端轨迹. 华中科技大学程品等<sup>[13]</sup>采用五次多项式对足端摆动相轨迹进行了规划.

笔者使用基于高次多项式的零冲击轨迹规划算法对一种新型四足步行机器人的串并混联腿进行规划, 并对其仿真研究, 仿真结果验证了足

收稿日期: 2017-04-15; 修订日期: 2017-08-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1304510); 郑州大学优秀青年教师发展基金资助项目(1421321076)

作者简介: 高建设(1977—), 男, 河南舞阳人, 郑州大学副教授, 博士, 硕导, 主要从事步行机器人及并联机构学理论与应用研究, E-mail: gao\_jianshe@163.com.

端轨迹的正确性和合理性,为整机的轨迹规划和步态规划研究奠定了基础.

### 1 四足机器人机构描述

提出了一种新型四足步行机器人,其结构如图1所示.该机器人由4个完全相同的机器人腿部机构和运载平台组成.

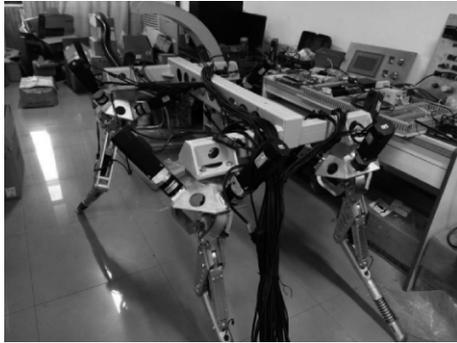


图1 四足机器人样机

Fig.1 The prototype of a quadruped robot

图2为腿部机构,图3为髋关节.每条腿部机构均是由髋关节和膝关节组成,其中髋关节由3-RRR并联机构构成,该并联机构的3个分支九个转动副的轴线相交于动平台的中心,动平台能够实现3个转动自由度;膝关节由大腿和小腿通过转动副连接,这样就能实现整个腿部机构运动所需的4个运动自由度.髋关节采用并联机构,一方面可以提高承载能力;另一方面将3个分支的驱动电机装在背部平台上,可以减轻抬腿运动时的运动惯量,使腿部机构运动轻便灵活.用直线运动电缸实现膝关节的转动运动,增大了膝关节的驱动力矩,提高了膝关节的承载能力.

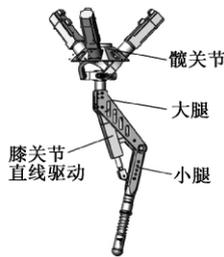


图2 腿部  
Fig.2 Leg

### 2 单腿运动学反解模型

首先建立髋关节的坐标系,再来建立整条腿的坐标系.由于髋关节3个分支完全相同,并且相互之间相差120°,因此,可用D-H方法对其第*i*(*i*=1,2,3)个分支建立坐标系,如图4所示. {A} 为定平

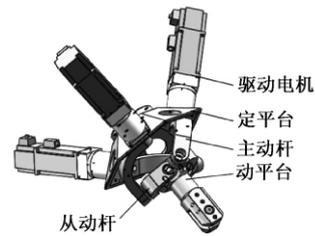


图3 髋关节

Fig.3 Hip joint

台坐标系, {B} 为动平台坐标系,初始位置时两个坐标系重合.图中的 {A<sub>i</sub>}、{B<sub>i</sub>}、{1}、{2} 和 {3} 坐标系的原点都与动平台的中心重合.为了便于表达,将各个坐标系移到各关节的中心点处.

再把髋关节等效成一个球副,与膝关节构成串联机构,则腿部坐标系的建立如图5所示.图5中 {A} 和 {B} 与图4中完全一样, {C} 为膝关节坐标系, L<sub>1</sub> 和 L<sub>2</sub> 分别为大腿和小腿长度. {G} 为世界坐标系,并设足端坐标系与世界坐标系重合,且足端在髋关节全局坐标系下的坐标设为 (P<sub>x</sub>, P<sub>y</sub>, P<sub>z</sub>).

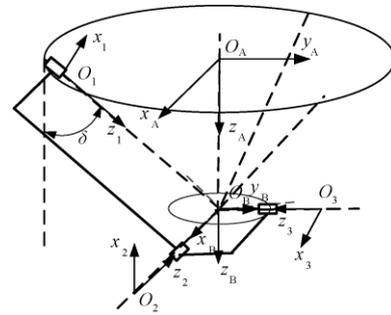


图4 髋关节坐标系

Fig.4 Coordinate system of hip joint

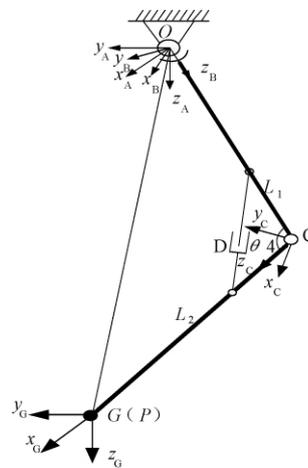


图5 腿部坐标系

Fig.5 Leg coordinate system

根据文献 [14] 得到的串并混联腿的4个驱动表示为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_1 = \arctan \frac{o_x}{s_\delta o_z - c_\delta o_y} \\ \theta_2 = \arctan \left( \frac{(\sqrt{3}n_x - o_x) + \sqrt{3}(\sqrt{3}n_y - o_y)}{\sqrt{3}c_\delta(\sqrt{3}n_x - o_x) + c_\delta(o_y - \sqrt{3}n_y) + 2s_\delta(o_z - \sqrt{3}n_z)} \right) \\ \theta_3 = \arctan \left( \frac{\sqrt{3}(\sqrt{3}n_y + o_y) - (\sqrt{3}n_x + o_x)}{\sqrt{3}c_\delta(\sqrt{3}n_x + o_x) + c_\delta(\sqrt{3}n_y + o_y) + 2s_\delta(\sqrt{3}n_z + o_z)} \right) \\ L = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 - \frac{l_1 l_2 (L_1^2 + L_2^2 - (p_x^2 + p_y^2 + p_z^2))}{L_1 L_2}} \end{array} \right. , \quad (1)$$

其中,

$$\left\{ \begin{array}{l} n_x = \cos \alpha \cos \beta \\ n_y = \sin \alpha \cos \beta \\ n_z = -\sin \beta \\ o_x = \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma \\ o_y = \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma \\ o_z = \cos \beta \sin \gamma \end{array} \right. . \quad (2)$$

式中:  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  为动平台相对于定平台按  $x$ - $y$ - $z$  顺序的  $RPY$  角,且其中  $(\alpha, \beta, \gamma)$  满足

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = \arctan(-p_x/p_y) \\ \beta = 0 \\ \gamma = \arctan\left(\frac{-a\sqrt{p_x^2 + p_y^2} + bp_z}{ap_z + b\sqrt{p_x^2 + p_y^2}}\right) \end{array} \right. , \quad (3)$$

其中,

$$\begin{aligned} a &= L_1^2 - L_2^2 + (p_x^2 + p_y^2 + p_z^2); \\ b &= \sqrt{4L_1^2 L_2^2 - (L_1^2 + L_2^2 - (p_x^2 + p_y^2 + p_z^2))^2}. \end{aligned}$$

用 D-H 方法建立坐标系,描述全局坐标系下足端的表示,则

$${}^A P = {}^A_c T {}^c P, \quad (4)$$

式中:  ${}^A_c T$  表示  $\{A\}$  系到  $\{G\}$  系的变换矩阵,并且可直接由机构参数求出;  ${}^c P$  是足端在  $\{G\}$  系的表示,即足端的轨迹曲线在世界坐标系下的表示.

### 3 串并混联腿的轨迹规划

在四足步行机器人的步态行走中,伴随着支撑相和摆动相的交替进行,同时伴随着躯干的起伏变化<sup>[15]</sup>.单腿足端从着地到再次离地腿部的连续相位变化过程称为支撑相,单腿的足端从抬腿离地开始沿规划轨迹运动到再次落地期间连续的相位变化过程称为摆动相.支撑相承载着机器人的负载并通过腿的相位变化移动机器人的躯干,完成目标方向的移动,其相位由步态的前极限相摆至后极限相;摆动相则由后

极限相摆动至前极限相,摆动相决定着机器人的步幅大小和跨越障碍物时的抬腿高度<sup>[11]</sup>.因此,单腿的轨迹规划包含摆动相和支撑相两个方面的轨迹规划.

#### 3.1 摆动相零冲击轨迹规划

摆动相足端轨迹规划是机器人能够完成步态行走的重要环节.摆动相的运动可以分解成水平运动和竖直运动.笔者基于足端的零冲击思想结合高次多项式规划机器人的足端轨迹,所以在  $y_G$  方向(水平方向)时让其轨迹满足式(5),

$$\left\{ \begin{array}{ll} y = -S/2, & t = 0 \\ y = S/2, & t = T_m \\ \dot{y} = 0, & t = 0 \\ \dot{y} = 0, & t = T_m \\ \ddot{y} = 0, & t = 0 \\ \ddot{y} = 0, & t = T_m \end{array} \right. . \quad (5)$$

上述条件保证运动方向的轨迹在  $t=0$  和  $t=T_m$  时的速度和加速度都等于零,并且足端坐标分别是  $-S/2$  和  $S/2$ ,其中  $S$  为摆动相足端的步幅,  $T_m$  为摆动相的周期.据此可以把  $y_G$  方向的轨迹函数设为五次多项式

$$y = At^5 + Bt^4 + Ct^3 + Dt^2 + Et + F. \quad (6)$$

把式(6)带入式(5)计算得出的位移曲线为

$$y = \frac{6S}{T_m^5}t^5 - \frac{15S}{T_m^4}t^4 + \frac{10S}{T_m^3}t^3 - \frac{S}{2}. \quad (7)$$

同理摆动腿在  $z_G$  方向(竖直方向)上先抬起然后落下,所以在设计时让其轨迹满足式(8),

$$\left\{ \begin{array}{ll} z = 0, & t = 0 \\ z = H, & t = T_m/2 \\ z = 0, & t = T_m \\ \dot{z} = 0, & t = 0 \\ \dot{z} = 0, & t = T_m \\ \ddot{z} = 0, & t = 0 \\ \ddot{z} = 0, & t = T_m \end{array} \right. . \quad (8)$$

式(8)保证了摆动腿在抬腿过程中,足端在  $t=0$  和  $t=T_m$  时速度和加速度为零,并限制了  $t=0$ 、 $t=T_m/2$ 、 $t=T_m$  时足端的位置分别是  $0$ 、 $H$ 、 $0$ ,其中,  $H$  为抬腿高度。

故可以设  $z_c$  方向的轨迹曲线为:

$$z = At^6 + Bt^5 + Ct^4 + Dt^3 + Et^2 + Ft + G. \quad (9)$$

把式(9)代入式(8)可以求得位移曲线:

$$z = -\frac{64H}{T_m^6}t^6 + \frac{192H}{T_m^5}t^5 - \frac{192H}{T_m^4}t^4 + \frac{64H}{T_m^3}t^3. \quad (10)$$

令  $S=90\text{ mm}$ ,  $H=20\text{ mm}$ ,  $T_m=0.5\text{ s}$ , 在摆动腿运动的一个周期内,用 MATLAB 可以计算出足端在  $yoz$  平面内的足端轨迹曲线,如图 6 所示。

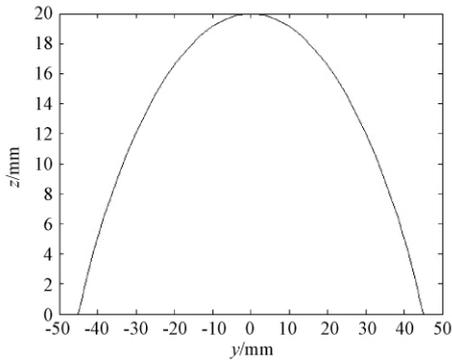


图 6 摆动相在  $yoz$  平面的足端轨迹

Fig. 6 The trajectory of the phase in the  $yoz$  plane

### 3.2 支撑相轨迹规划

支撑相是单腿的足端从着地到再次离地期间腿部的连续相位变化过程. 它承载着机器人的负载并通过腿部的相位变化来移动机器人的躯干,从而完成目标移动. 在规划支撑相时,假设机器人运动过程中腿部足端和地面之间没有相对滑动,躯干始终和地面保持平行,在支撑相时,支撑腿运动推动机体水平向前运动,等效于足端的轨迹水平向后移动. 足端采用匀速直线运动,以减少在运动过程中足端与地面产生相对滑动. 在此基础上进行足端轨迹规划,并利用反解模型求解支撑腿电机的驱动函数。

### 3.3 电机驱动函数

单腿周期是单腿完成摆动相和支撑相的时间. 并且支撑相和摆动相的时间都是  $0.5\text{ s}$ . 轨迹即是单腿的摆动相和支撑相轨迹的顺序执行. 前面已经规划了单腿两个相位的足端轨迹,通过它的运动学反解<sup>[14]</sup>可以计算出各电机的驱动函数. 在单腿机构的髋关节坐标系下,图 7 为膝关节电缸在一个周期内的变化量,图 8 为髋关节 3 个电机随时间的转角变化. 从图 7 和 8 中可以看出,在一个完整的周期内,由机器人单腿运动学反解得

到的电机转角的变化是连续的,说明根据多项式曲线规划的零冲击轨迹规划方案是可行的。

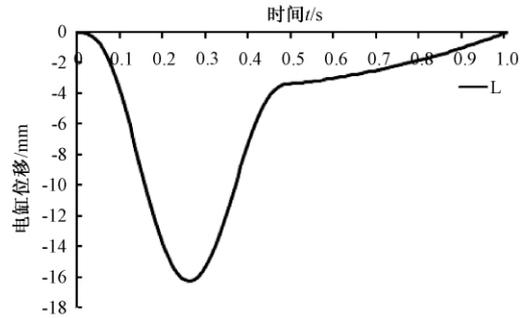


图 7 膝关节电缸在一个周期内的位移变化

Fig. 7 Displacement of the knee joint in one cycle

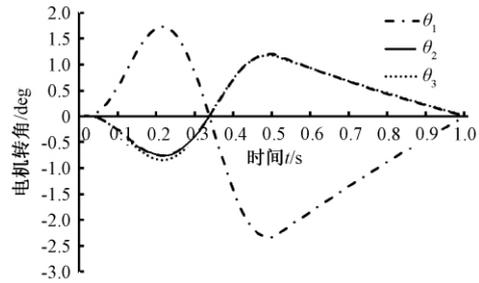


图 8 髋关节 3 个电机在一个周期内转角变化

Fig. 8 Changes of three motors in the hip joint in one cycle

## 4 仿真试验

将串并混联腿的 solidworks 模型另存为 para-solid 格式,然后导入 ADAMS 中,添加各构件的质量、约束和电机驱动以后,进行 ADAMS 仿真. 由于在仿真时足端相对于动平台坐标系绕垂直方式旋转了  $30^\circ$ ,所以仿真结果在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上都有位移、速度、加速度的变化. 在驱动函数的作用下,图 9~11 分别表示了足端一个周期内在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的位移、速度、加速度随时间的变化. 在摆动相时,足端的速度、加速度都是连续的,并且大小与规划的一致,支撑相时做匀速直线运动. 仿真的结果与足端轨迹规划的结果一致. 但是摆动相与支撑相衔接的地方有较大的冲击,所以后续整机步态规

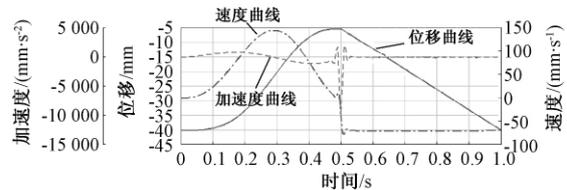


图 9 足端点在  $x$  方向的位移、速度、加速度随时间变化图

Fig. 9 The displacement, velocity and acceleration of the foot end point in the  $x$  direction

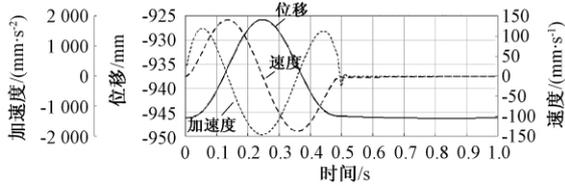


图 10 足端点在  $y$  方向的位移、速度、加速度随时间变化图

Fig. 10 The displacement, velocity and acceleration of the foot end point in the  $y$  direction

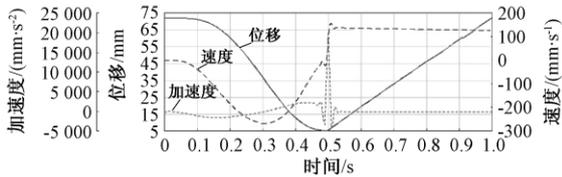


图 11 足端点在  $z$  方向的位移、速度、加速度随时间变化图

Fig. 11 The displacement, velocity and acceleration of the foot end point in the  $z$  direction

划时考虑文献 [11] 提出的以短周期的正弦加速度加以引导,实现从零速到匀速和匀速到零速的平滑过渡,减小支撑相和摆动相间突然加减速造成的冲击。

## 5 结论

提出了一种新型串并混联的四足步行机器人,该机器人的每条腿部机构均是由髋关节和膝关节组成,具有 4 个自由度,髋关节是 3-RRR 并联机构,与膝关节组成串并混联机构。对其在运动过程中出现的冲击问题,使用了一种基于高次多项式的足端零冲击轨迹规划算法。利用 D-H 方法建立坐标系,在世界坐标系下对串并混联腿进行了基于高次多项式的零冲击足端轨迹规划。结合单腿运动学反解求出混联腿的 4 个驱动函数。之后通过 ADAMS 进行运动仿真分析,仿真的结果显示:串并混联腿能够满足规划的动作要求,轨迹的速度和加速度平滑,实现了零冲击的要求。证明了高次多项式曲线的零冲击足端轨迹规划算法的正确性和可行性,为后续整机的步态规划和运动控制奠定基础。

## 参考文献:

[1] 谭民,王硕. 机器人技术研究进展 [J]. 自动化学报,2013,39(7):963-972.

- [2] 王东署,朱训林. 未知环境中考虑姿态稳定性的自主机器人路径规划 [J]. 郑州大学学报(工学版),2014,35(5):31-35.
- [3] SEMINI C, TSAGARAKIS N G, GUGLIELMINO E, et al. Design of HyQ-A hydraulically and electrically actuated quadruped robot [J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part I: journal of systems and control engineering, 2011, 255(6):831-849.
- [4] YANG P, FENG G. A new six-parallel-legged walking robot for drilling holes on the fuselage [J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers part C: journal of mechanical engineering science, 2014,228(4):753-764.
- [5] 王洪波,齐政彦,胡正伟,等. 并联腿机构在四足/两足可重组步行机器人中的应用 [J]. 机械工程学报,2009,45(8):24-30.
- [6] 田兴华,高峰,陈先宝,等. 四足仿生机器人混联腿构型设计及比较 [J]. 机械工程学报,2013,49(6):81-88.
- [7] 李华. 内膝肘式四足机器人步态仿真 [D]. 济南:山东大学机械工程学院,2012.
- [8] 马东兴. 四足机器人步态规划与仿真 [D]. 南京:南京航空航天大学机电学院,2008.
- [9] YOSHIOHRO S, KAZUTOSHI K, YUUIJI H, et al. Foot trajectory for a quadruped walking machine [C]// IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, IROS,1990, vol. 1: 315-322.
- [10] 柳洪义,宋伟刚,彭兆行. 控制步行机足运动的一种方法——修正组合摆线法 [J]. 机器人,1994,16(6):350-356.
- [11] 王立鹏,王军政,汪首坤,等. 基于足端轨迹规划算法的液压四足机器人步态控制策略 [J]. 机械工程学报,2013,49(1):39-44.
- [12] 荣学文. SCalf 液压驱动四足机器人的机构设计与运动分析 [D]. 济南:山东大学控制科学与工程学院,2013.
- [13] 程品,罗欣,顾瀚戈. 四足机器人砂砾地面对角行走控制方法 [J]. 装备制造技术,2014(4):8-12.
- [14] 高建设,李明祥,侯伯杰,等. 新型四足步行机器人串并混联腿的运动学分析 [J]. 光学精密工程,2015,23(11):3147-3160.
- [15] 张秀丽. 四足机器人节律运动及环境适应性的生物控制研究 [D]. 北京:清华大学精密仪器与机械学,2004.

(下转第 38 页)

文章编号: 1671-6833(2018)02-0028-05

# 一种基于共轭梯度法的广义单隐层神经网络

孙峰, 龚晓玲, 张炳杰, 柳毓松, 王延江

(中国石油大学(华东), 山东 青岛 266580)

**摘要:** 单隐层前馈神经网络是一种高效且结构简单的神经网络, 它的一种典型的学习算法就是误差反向传播(error back propagation, BP)算法. 这种算法基于最速下降法原理, 主要缺点是学习速度过慢. 超限学习机(extreme learning machine, ELM)极大地优化了单隐层神经网络的学习速度, 却需要更多的隐层单元来达到与BP网络相当的效率, 这不可避免地使网络结构冗余、测试时间变长. 受到一种结合了ELM和最速下降法思想的USA(upper-layer-solution-aware)算法的启发, 提出一种基于共轭梯度法的单隐层神经网络快速算法, 并把它应用于不同数据库中. 试验结果表明, 在相同网络结构情况下, 本算法的效率要优于ELM和USA算法.

**关键词:** 神经网络; 反向传播; 超限学习机; 共轭梯度法; MNIST

**中图分类号:** TP389.1      **文献标志码:** A      **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.05.011

## 0 引言

人工神经网络是一种模仿人脑神经元的结构和信息传递过程所建立的数学模型, 具有学习、记忆等功能. 近三十年来神经网络得到迅速的发展并在模式识别等领域有着广泛的应用, 尤其在未来智能化城市发展中会起到关键作用. 其中, 应用最广泛的就是采用了反向传播(back propagation)学习算法<sup>[1]</sup>的前馈神经网络, 这种网络也称为BP神经网络, 自1986年被提出之后, 至今仍在神经网络中占据重要地位. 该网络在训练时信息从前向后逐层传播, 而网络中的权重则通过误差反向传播来调整. 这种算法结构简单且能够以任意精度逼近任意非线性函数<sup>[2-3]</sup>, 但也存在一些缺陷: 由于网络收敛速度慢, 导致训练花费时间过长; 由于采用梯度下降法易陷入局部极小值; 易过拟合训练使其泛化能力变差等.

为了加快网络的训练速度, 黄广斌等提出了一种针对单隐层前馈神经网络的快速构建与学习算法<sup>[4]</sup>, 因其快速特性而称之为超限学习机(extreme learning machine, ELM). ELM算法的整个学习过程一次完成, 使得网络训练大大简化, 运算

速度几十倍甚至几千倍于BP算法<sup>[5-6]</sup>, ELM在许多领域都取得了突出成果<sup>[7-9]</sup>. 虽然网络训练效果很好, 但ELM相对于传统的神经网络, 需要更多的隐层节点才能达到同样的训练精度<sup>[10]</sup>. 由于使用大量隐层节点, 计算工作量会大大增加, 特别是样本超高维时, 测试速度明显变慢; 过多的隐层节点也会使网络过拟合而降低泛化能力.

针对ELM存在的问题, 文献[11]提出了用梯度下降法来选择合适权值的upper-layer-solution-aware(USA)算法. 使用最速下降法来更新从输入层到隐层的权值. 它与传统的神经网络的区别在于是用广义逆一步得出, 相当于传统BP算法和ELM算法的结合. 与BP神经网络相比, 它的速度大大提高了; 与ELM算法相比, 它需要的隐层节点数减少了. 相比于ELM, 它在训练上需要浪费一些时间, 但是实际应用中, 往往测试时间比训练时间更加关键, 减少隐层节点数, 有利于缩短测试时间, 更符合实际工程需要.

笔者借鉴ELM的一次学习思想, 提出了一种基于共轭梯度法的快速学习算法, 由于共轭梯度法计算复杂度不高于最速下降法, 但是收敛速度优于最速下降法, 使得笔者算法在保持

**收稿日期:** 2017-07-16; **修订日期:** 2017-09-01

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61305075); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2013FQ004); 教育部博士学科点科研基金资助项目(20130133120014); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(14CX05042A、15CX04065B、15CX05053A、15CX08011A)

**作者简介:** 孙峰(1978—), 男, 山东泰安人, 中国石油大学讲师, 硕士, 主要从事机械工业设计方面的研究, E-mail: sunfeng@upc.edu.cn.

快速这一优势前提下,网络训练精度得到进一步提高.

## 1 ELM 和 USA 算法描述

在介绍笔者算法前,先简单介绍一下 ELM 的基本算法以及 ELM 算法和 BP 算法相结合的 USA 算法.这两种算法都应用于单隐层前馈神经网络且有良好的数值表现,ELM 算法随机赋予输入层到隐层的权值,无需迭代,因此训练时间极快. USA 算法用最速下降法对输入层到隐层的权值进行优化,虽训练时间稍慢,但达到相同网络训练精度所需隐层节点个数要大大少于 ELM.

### 1.1 超限学习机

对于  $N$  个不同的训练样本  $(\mathbf{x}_j, \mathbf{t}_j)$ , 其中输入向量为  $\mathbf{x}_j = (x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jn})^T \in \mathbf{R}^n$ , 理想输出向量为  $\mathbf{t}_j = (t_{j1}, t_{j2}, \dots, t_{jm})^T \in \mathbf{R}^m$ , 若选取单隐层神经网络的隐层节点个数为  $\tilde{N}$  个, 隐层激活函数为  $g(x)$ , 输出层激活函数为简单线性函数  $f(x) = x$ , 那么该网络的实际输出为

$$\sum_{i=1}^{\tilde{N}} \mathbf{u}_i g_i(\mathbf{w}_i \cdot \mathbf{x}_j + b_i), j = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{w}_i = [w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{in}]^T$  为连接输入层到隐层第  $i$  个单元之间的权值;  $\mathbf{u}_i = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im}]^T$  为连接隐层第  $i$  个单元到输出层之间的权值;  $b_i$  为第  $i$  个隐节点的阈值.

如果这个网络可以零误差地学习这  $N$  个样本,即

$$\sum_{i=1}^{\tilde{N}} \mathbf{u}_i g_i(\mathbf{w}_i \cdot \mathbf{x}_j + b_i) = \mathbf{t}_j, j = 1, 2, \dots, N. \quad (2)$$

上式表示成矩阵的形式为:

$$\mathbf{H}\mathbf{U} = \mathbf{T}, \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{H}$  为隐层输出矩阵<sup>[12-13]</sup>.

$$\mathbf{H}(\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_{\tilde{N}}, b_1, \dots, b_{\tilde{N}}, \mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N) = \begin{bmatrix} g(\mathbf{w}_1 \cdot \mathbf{x}_1 + b_1) & \cdots & g(\mathbf{w}_{\tilde{N}} \cdot \mathbf{x}_1 + b_{\tilde{N}}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g(\mathbf{w}_1 \cdot \mathbf{x}_N + b_1) & \cdots & g(\mathbf{w}_{\tilde{N}} \cdot \mathbf{x}_N + b_{\tilde{N}}) \end{bmatrix}_{N \times \tilde{N}}. \quad (4)$$

当输入层到隐层间的权值  $\mathbf{w}_i$  和阈值  $b_i$  给定后,可以求出隐层输出矩阵  $\mathbf{H}$ , 公式(3)就等价于一个求解  $\mathbf{U}$  的线性系统<sup>[14]</sup>. 当隐层节点个数  $\tilde{N}$  等于输入样本数  $N$  时,可以证明  $\mathbf{H}$  以概率 1 可逆,所以该式有唯一解,

$$\mathbf{U} = \mathbf{H}^{-1}\mathbf{T}, \quad (5)$$

即网络可以零误差的拟合训练样本<sup>[12-13]</sup>. 在实际情况中,样本数远多于隐层节点个数,即  $N \gg \tilde{N}$ , 这时可以利用 Moore-Penrose 广义逆来求解,

$$\mathbf{U} = \mathbf{H}^\dagger \mathbf{T}, \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{H}^\dagger = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T$ .

通过以上原理,可以看出 ELM 最大的优点在于它无需迭代,一步就能求出隐层权值  $\mathbf{U}$ .

### 1.2 最速下降法

USA 算法是文献[11]中提出的一种算法.下面简单介绍其原理.

给定训练样本集  $\mathcal{S} = \{(\mathbf{x}_j, \mathbf{t}_j) \mid \mathbf{x}_j \in \mathbf{R}^n, \mathbf{t}_j \in \mathbf{R}^m\}$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ), 选取单隐层神经网络的隐层节点个数为  $\tilde{N}$ , 隐层激活函数  $g(x)$  为 Sigmoid 函数, 输出层激活函数为简单线性函数  $f(x) = x$ , 给定网络的误差函数  $E = \|\mathbf{Y} - \mathbf{T}\|^2 = \text{Tr}[(\mathbf{Y} - \mathbf{T})(\mathbf{Y} - \mathbf{T})^T]$ . 那么该网络的隐层输出矩阵仍为  $\mathbf{H}$ , 隐层到输出层的权值  $\mathbf{U} = \mathbf{H}^\dagger \mathbf{T} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{T}$ . 由此可以看出,从隐层到输出层的权值  $\mathbf{U}$  是从隐层到输入层权值  $\mathbf{W}$  的函数,即可以由  $\mathbf{W}$  确定. 所以在网络训练时,我们在每次迭代中用最速下降的方法更新  $\mathbf{W}$ ,即先求误差函数的梯度,

$$\frac{\partial E}{\partial \mathbf{W}} = \frac{\partial \text{Tr}[(\mathbf{U}^T \mathbf{H} - \mathbf{T})(\mathbf{U}^T \mathbf{H} - \mathbf{T})^T]}{\partial \mathbf{W}}. \quad (7)$$

然后沿负梯度方向优化  $\mathbf{W}$ ,即

$$\mathbf{W} = \mathbf{W} - \eta \frac{\partial E}{\partial \mathbf{W}}, \quad (8)$$

式中:  $\eta$  为学习率.

这样在每次迭代后只优化更新连接输入层和隐藏层的权值  $\mathbf{W}$ , 使误差逐步减小,达到可接受误差或最大迭代次数时迭代结束,得到了优化的网络结构.

## 2 笔者工作

要想降低网络的隐层节点个数,一种有效方法就是对其权值进行优化.从最优化原理来说,优化权值的方法有最速下降法、共轭梯度法、牛顿法等. BP 算法就是采用最速下降法达到优化权值的目的.

### 2.1 共轭梯度法

共轭梯度法是一类效果较好的共轭方向法,最早由 Hestenes 和 Stiefel 提出并用于求解线性方程组<sup>[14]</sup>,后来被 Fletcher 和 Reeves 引入求解无约束最优化问题<sup>[15]</sup>. 共轭梯度法的原理是:在寻优过程中,利用当前点  $\mathbf{x}^k$  处的梯度向量  $\mathbf{g}(\mathbf{x}^k)$  和前一迭代点  $\mathbf{x}^{k-1}$  处的搜索方向  $\mathbf{d}^{k-1}$  对最速下降方向

进行如下修正:

$$\mathbf{d}^k = -\mathbf{g}(\mathbf{x}^k) + \beta_k \mathbf{d}^{k-1}, \quad (9)$$

并保证新的搜索方向  $\mathbf{d}^k$  与之前的搜索方向  $\mathbf{d}^{k-1}, \mathbf{d}^{k-2}, \dots, \mathbf{d}^0$  之间满足共轭关系. 其中, 修正系数  $\beta_k$  的不同又进一步形成了不同的共轭梯度法.

共轭梯度法与最速下降法同样用到一阶导数信息, 但它克服了梯度下降法收敛慢的缺点, 又避免了牛顿法需要存储和计算 Hesse 矩阵并求逆的缺点. 其优点是所需存储量小, 具有有限步收敛性, 稳定性高, 而且不需要任何外来参数.

## 2.2 笔者算法

基于共轭梯度法优化权值的思想, 提出一种训练单隐层前馈神经网络的新算法: 给定  $N$  个不同训练样本  $(x_1, t_1), (x_2, t_2), \dots, (x_N, t_N)$ , 其中  $\mathbf{x}_i = (x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni})^T, \mathbf{t}_i = (t_{1i}, t_{2i}, \dots, t_{mi})^T$ , 则网络的输入节点个数为  $n$ , 输出节点个数为  $m$ . 网络的输入矩阵为  $\mathbf{X}_{n \times N}$ , 理想输出为  $\mathbf{T}_{m \times N}$ . 若隐层节点个数为  $\tilde{N}$ , 则输入层到隐层间的权值矩阵为:

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1\tilde{N}} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2\tilde{N}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{n1} & w_{n2} & \cdots & w_{n\tilde{N}} \end{pmatrix}_{n \times \tilde{N}}. \quad (10)$$

隐层到输出层间的权值矩阵为:

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1m} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{\tilde{N}1} & u_{\tilde{N}2} & \cdots & u_{\tilde{N}m} \end{pmatrix}_{\tilde{N} \times m}. \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial \mathbf{W}} &= \frac{\partial \text{Tr} [(\mathbf{U}^T \mathbf{H} - \mathbf{T})(\mathbf{U}^T \mathbf{H} - \mathbf{T})^T]}{\partial \mathbf{W}} \\ &= \frac{\partial \text{Tr} [([\mathbf{H}\mathbf{H}^T]^{-1} \mathbf{H}\mathbf{T}^T)^T \mathbf{H} - \mathbf{T})([\mathbf{H}\mathbf{H}^T]^{-1} \mathbf{H}\mathbf{T}^T)^T \mathbf{H} - \mathbf{T})^T]}{\partial \mathbf{W}} \\ &= \frac{\partial \text{Tr} [\mathbf{T}\mathbf{T}^T - \mathbf{T}\mathbf{H}^T([\mathbf{H}\mathbf{H}^T]^{-1} \mathbf{H}\mathbf{T}^T)]}{\partial \mathbf{W}} \\ &= \frac{\partial \text{Tr} [([\mathbf{H}\mathbf{H}^T]^{-1} \mathbf{H}\mathbf{T}^T \mathbf{H}\mathbf{T}^T)]}{\partial \mathbf{W}} \\ &= \frac{\partial \text{Tr} [(\sigma(\mathbf{W}^T \mathbf{X}) [\sigma(\mathbf{W}^T \mathbf{X})]^T)^{-1} \sigma(\mathbf{W}^T \mathbf{X}) \mathbf{T}^T \mathbf{T} [\sigma(\mathbf{W}^T \mathbf{X})]^T]}{\partial \mathbf{W}} \\ &= 2\mathbf{X} [\mathbf{H}^T \circ (\mathbf{I} - \mathbf{H})^T \circ [\mathbf{H}^\dagger (\mathbf{H}\mathbf{T}^T) (\mathbf{T}\mathbf{H}^\dagger - \mathbf{T}^T (\mathbf{T}\mathbf{H}^\dagger))] ], \end{aligned} \quad (19)$$

式中:

$$\mathbf{H}^\dagger = \mathbf{H}^T (\mathbf{H}\mathbf{H}^T)^{-1}. \quad (20)$$

本算法采用 F-R 共轭梯度法, 搜索方向为:

那么该网络的隐层输出矩阵为:

$$\mathbf{H} = \mathbf{g}(\mathbf{W}^T \mathbf{X}), \quad (12)$$

式中:  $\mathbf{g}(\cdot)$  为隐层激活函数, 一般选用 Sigmoid 函数. 根据输出值是否包含负值, 分为 Log-Sigmoid 函数和 Tan-Sigmoid 函数, 本算法选用函数值在  $0 \sim 1$  的简单 Log-Sigmoid 函数, 即

$$\mathbf{g}(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}. \quad (13)$$

网络的输出层激活函数为简单线性函数, 则网络的实际输出为:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{U}^T \mathbf{H}. \quad (14)$$

对于确定网络的权值  $\mathbf{U}$ , 可以将网络结构看成一个线性系统,

$$\mathbf{U}^T \mathbf{H} = \mathbf{T}. \quad (15)$$

当  $N = \tilde{N}$  时, 该方程的解为:  $\mathbf{U} = (\mathbf{T}\mathbf{H}^{-1})^T$ . 但是实际情况中, 一般  $N \gg \tilde{N}$ , 这时利用广义逆求解:

$$\mathbf{U} = (\mathbf{H}^T)^\dagger \mathbf{T}^T = (\mathbf{H}\mathbf{H}^T)^{-1} \mathbf{H}\mathbf{T}^T. \quad (16)$$

由于  $\mathbf{H} = \mathbf{g}(\mathbf{W}^T \mathbf{X})$ , 所以隐层到输出层的权值  $\mathbf{U}$  可以看作是输入层到隐层的权值  $\mathbf{W}$  的函数. 本算法采用共轭梯度法来对输入层到隐层之间的权值  $\mathbf{W}$  进行优化. 网络的误差函数可以定义为:

$$E = \|\mathbf{Y} - \mathbf{T}\|^2 = \text{Tr} [(\mathbf{Y} - \mathbf{T})(\mathbf{Y} - \mathbf{T})^T]. \quad (17)$$

首先求误差函数的梯度, 由式(14)和式(17)得:

$$\frac{\partial E}{\partial \mathbf{W}} = \frac{\partial \text{Tr} [(\mathbf{U}^T \mathbf{H} - \mathbf{T})(\mathbf{U}^T \mathbf{H} - \mathbf{T})^T]}{\partial \mathbf{W}}. \quad (18)$$

再将式(16)代入式(18), 得到梯度的计算公式为:

$$\mathbf{d}^k = \begin{cases} -\mathbf{g}^k, & k = 0 \\ -\mathbf{g}^k + \beta_k^{FR} \mathbf{d}^{k-1}, & k \geq 1 \end{cases}, \quad (21)$$

式中:  $\mathbf{g}^k$  即为第  $k$  次迭代的梯度, 修正项系数为:

$$\beta_k^{FR} = \frac{\mathbf{g}(\mathbf{x}^k)^T \mathbf{g}(\mathbf{x}^k)}{\mathbf{g}(\mathbf{x}^{k-1})^T \mathbf{g}(\mathbf{x}^{k-1})}. \quad (22)$$

从输入层到隐层的权值  $\mathbf{W}$  的更新公式为:

$$\mathbf{W}^{k+1} = \mathbf{W}^k + \eta_k \mathbf{d}^k, \quad (23)$$

式中:学习率  $\eta_k$  通过线搜索的方式获得.

### 3 数值试验

将笔者提出的算法与 USA 算法<sup>[11]</sup>、ELM 算法<sup>[4]</sup>在 3 种数据库上进行实数值试验,验证算法效果.为了公平评判算法的性能,网络的初始权值均相同,并重复选取不同的随机初始权值进行 10 次试验,从训练及测试误差(函数拟合)或精度(分类)、训练时间几个方面来评价试验结果(结果为平均值).因为测试时间仅与隐藏层节点数有关,与算法无关,所以在这里不做比较.

#### 3.1 数据库介绍

Sin C 函数表达式为:

$$y(x) = \begin{cases} \frac{\sin x}{x}, & x \neq 0 \\ 1, & x = 0 \end{cases}. \quad (24)$$

Sin C 数据的产生方法为在(-10,10)内随机产生 5 000 组训练样本和 5 000 组测试样本.通过网络在训练集及测试集上的误差可以衡量网络的学习能力.

MNIST 手写数字数据库也是一种衡量分类算法性能的数据库,它源于美国国家标准与技术局收集的 NIST 数据库,数字图像已被标准化为一张 28 × 28 的图片.该数据库以矩阵的形式存放,其中每个样本即每个手写数字都是一个 1 × 784 的向量,向量中的每个元素都是 0 ~ 255 的数字,代表的是该像素点的灰度值. MNIST 数据库一共有 60 000 个训练样本和 10 000 个测试样本.

#### 3.2 试验结果

在 Sin C 数据库上的试验选取网络的隐层节点数为 30,在 Diabetes 数据库上的试验选取网络的隐层节点数为 150,在这两个数据库上 USA 和笔者算法的迭代次数为 10 次.训练及测试结果见表 1 和表 2.可以看出,ELM 算法训练时间最短,符合 ELM 算法原理.笔者算法在训练时间与 USA 算法相当的情况下,训练及测试误差是 3 种算法中最小的,精度是 3 种算法中最高的.

由于 MNIST 数据库较大,分别选取隐层节点数为:64、128、256、512、1 024 进行试验,计算相应的分类精度. USA 和笔者算法的迭代次数为

表 1 不同算法在 Sin C 数据库上的误差比较  
Tab.1 Error comparisons on Sin C for different algorithms

算法	训练误差	测试误差	训练时间/s
ELM	0.129 0	0.056 0	0.087 2
USA	0.128 2	0.055 1	0.123 4
笔者算法	0.121 5	0.036 5	0.123 7

表 2 不同算法在 Diabetes 数据库上的精度比较  
Tab.2 Accuracy comparisons on Diabetes for different algorithms

算法	训练精度/%	测试精度/%	训练时间/s
ELM	79.17	78.64	0.015 4
USA	83.85	79.17	0.154 3
笔者算法	85.42	80.21	0.153 9

15 次.训练及测试结果见表 3.可以看出在时间上本算法虽然没有优势,但是精度相比于其他两种算法有所提高.

表 3 不同算法在 MNIST 数据库上的误差比较  
Tab.3 Error comparisons on MNIST for different algorithms

隐层节点	算法	训练精度/%	测试精度/%	训练时间/s
64	ELM	67.13	67.88	1.251 4
	USA	85.80	84.27	64.975 0
	笔者算法	86.70	85.89	64.884 0
128	ELM	78.32	78.99	1.916 2
	USA	89.71	88.06	189.800 0
	笔者算法	90.40	89.62	191.160 0
256	ELM	85.08	85.55	3.462 2
	USA	92.97	90.82	326.590 0
	笔者算法	93.35	92.68	330.790 0
512	ELM	89.50	89.65	6.694 3
	USA	95.18	93.79	608.980 0
	笔者算法	96.03	95.58	613.320 0
1 024	ELM	92.32	94.68	13.847 0
	USA	98.93	97.86	1 128.750 0
	笔者算法	98.99	98.95	1 137.270 0

从表 3 中一方面可以看出,若要达到相同的测试精度,如 90%,ELM 大约需要 512 个隐节点, USA 算法大约需要 128 个隐节点,而笔者算法大约需要 90 个隐层节点.说明笔者算法在保证相同精度的前提下,可有效地减少了隐层节点数,简化了网络结构,增强了网络的泛化能力.另一方面,对于相同的隐层节点个数,ELM、USA 和笔者算法的测试精度依次增高,且 USA 算法和笔者算法的精度均明显高于 ELM 算法.说明笔者算法在保证

训练时间不是太长的情况下,有效地优化了初始权值,使网络在相同的隐层节点个数下,得到更高的训练精度.

#### 4 结论

针对前馈神经网络中传统算法所需时间过长,而 ELM 算法所需要的隐层节点数过多的缺陷,笔者算法在保证算法训练速度的前提下,有效提高了网络的精度和泛化能力.从各类数据库的试验可以证明,笔者算法是一个更有效的单隐层前馈神经网络学习算法.

#### 参考文献:

- [1] WERBOS P J. Beyond regression: new tools for prediction and analysis in the behavioral sciences [D]. Harvard University, Cambridge, 1974.
- [2] HORNIK K. Approximation capabilities of multilayer feedforward networks [J]. *Neural networks*, 1991, 4 (2): 251 - 257
- [3] LESHNO M, LIN V Y, PINKUS A, et al. Multilayer feedforward networks with a nonpolynomial activation function can approximate any function [J]. *Neural networks*, 1993, 6 (6): 861 - 867.
- [4] HUANG G B, ZHU Q Y, SIEW C K. Extreme learning machine: theory and applications [J]. *Neurocomputing*, 2006, 70(123): 489 - 501.
- [5] BARTLETT P L. The sample complexity of pattern classification with neural networks: the size of the weights is more important than the size of the network [J]. *IEEE trans. Inf. theory*, 1998, 44 (2): 525 - 536.
- [6] WIDROW B, GREENBLATT A, KIM Y, et al. The No-Prop algorithm: a new learning algorithm for multi-layer neural networks [J]. *Neural networks*, 2013 (37): 182 - 188.
- [7] 郝向东, 毛晓波, 梁静. ELM 与 Mean Shift 相结合的抗遮挡目标跟踪算法 [J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2016, 37(1): 1 - 5.
- [8] 王杰, 裴群康, 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.
- [9] 邓万宇, 李力, 牛慧娟. 基于 Spark 的并行极速神经网络 [J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2016, 37(5): 47 - 56.
- [10] ZHU Q Y, QIN A K, SUGANTHAN P N, et al. Evolutionary extreme learning machine [J]. *Pattern recognition*, 2005, 38(10): 1759 - 1763.
- [11] YU D, DENG L. Efficient and effective algorithms for training single-hidden-layer neural networks [J]. *Pattern recognition letters*, 2012, 33(5): 554 - 558.
- [12] HUANG G B, BABRI H A. Upper bounds on the number of hidden neurons in feedforward networks with arbitrary bounded nonlinear activation functions [J]. *IEEE transactions on neural networks*, 1998, 9 (1): 224 - 229.
- [13] HUANG G B. Learning capability and storage capacity of two hidden-layer feedforward networks [J]. *IEEE transactions on neural networks*, 2003, 14 (2): 274 - 281.
- [14] ARMIJO L. Minimization of functions having Lipschitz continuous first partial derivatives [J]. *Pacific journal of mathematics*, 1966(16): 1 - 3.
- [15] GOLDSTEIN A. On steepest descent [J]. *SIAM journal on control*, 1965(3): 147 - 151.

### An Efficient Generalized Single Hidden Layer Neural Networks Based on Conjugate Gradient Method

SUN Feng, GONG Xiaoling, ZHANG Bingjie, LIU Yusong, WANG Yanjiang

(China University of Petroleum, 266580, China)

**Abstract:** The single hidden layer feedforward neural network was efficient with simple structure. Back Propagation Error (BP) algorithm was one of its typical learning algorithm which had one main shortcoming of the slow learning speed because of the use of the steepest descent method. Extreme Learning Machine (ELM) which could greatly accelerate the learning speed of networks was put forward. However, it demanded much more hidden neurons than BP algorithm to get the match accuracy, which led to redundant structure of networks and more testing time. Motivated by the USA (upper-layer-solution-aware) which was a combination of the steepest descent method and ELM, in this paper, we proposed an algorithm based on the conjugate gradient method and train the network on different data sets. The Simulation results showed our algorithm had a better performance than USA and ELM with the same structure of the network.

**Key words:** neural network; back propagation; extreme learning machine; conjugate gradient; Mnist

文章编号: 1671-6833(2018)02-0033-06

# 基站协作系统中基于 GAMP 算法的 RZFBF 预编码实现

王忠勇, 冯双丽, 袁正道, 张园园

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 基站协作系统中, 基于正则化迫零波束赋形(regularized zero forcing beam-forming, RZFBF)的集中式协作预编码能够获得与脏纸编码近似的容量性能, 然而随协作基站数目增多, 集中式协作预编码对回程容量的要求变得极高. 针对该问题, 提出了基于广义近似消息传递(generalized approximate message passing, GAMP)的分布式预编码符号设计方案, 通过相邻基站间的信息交互将全局计算开销分解成许多小的计算任务, 极大地降低了系统对回程容量的要求. 仿真结果表明, 所提算法能够以较低的计算复杂度获得近似于集中式 RZFBF 预编码算法所能达到的系统吞吐量.

**关键词:** 基站协作; 迫零波束赋形; 预编码; 回程容量; 消息传递算法

**中图分类号:** TN911.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.05.003

## 0 引言

随着通信技术的发展, 人们对高速率、大容量通信系统的渴求更加迫切. MIMO(multiple input multiple output)技术的产生, 提高了通信系统的容量, 缓解了日益增长的通信质量要求与有限频谱资源之间的矛盾. 然而在超密集网络中, 由于小区间干扰(inter-cell interference, ICI)的存在使得 MIMO 技术的性能增益受到严重制约, 因此, 如何有效抑制 ICI 从而最大程度地获取目标信号成为密集蜂窝网络的研究热点.

3GPP(3rd generation partnership project)组织讨论最多的抑制 ICI 的方法包括干扰消除<sup>[1]</sup>、干扰随机化、干扰协调<sup>[2-3]</sup>等. 文献[2]通过多个基站(base station, BS)间的联合调度以及预编码来抑制小区间干扰, 可一定程度提高小区边缘用户的吞吐量; 文献[3]研究了上行链路的协作检测和下行链路的协作发送算法, 所提算法可提高系统的和容量. 以上方案由于资源调度方案复杂, 回程容量要求高等原因, 实现较为困难.

近年来, 基站协作方案以其独特的优势引起了研究人员的广泛关注. 在蜂窝下行链路中, 通过基站协作可以将干扰信号转化成有用信号. 集中式基站协作通过一个中央控制单元共享所有的信

道状态信息(channel state information, CSI), 同时执行基站间的协作调度. 在集中式基站协作系统中, 一种简单有效的协作发送算法是基于正则化迫零波束赋形(regularized zero forcing beam-forming, RZFBF)<sup>[4-7]</sup>的预编码方案, 此方案能够近似达到脏纸编码(dirty-paper coding, DPC)<sup>[8]</sup>所能达到的系统容量性能. 理论研究表明: 采用 DPC 可以达到近似无干扰状况下的容量性能. 然而 DPC 是一种非线性预编码技术, 在实际的大规模系统中由于编译码复杂度极高而不被采用. 集中式协作 RZFBF 预编码算法受回程容量的限制以及计算复杂度的影响, 随着协作基站数目增多, 其实现变得极为困难. 因此, 研究人员试图在局部协作基站之间建立通信, 以降低集中式基站协作对回程容量的要求. 基于此目标, 文献[6]将集中式协作 RZFBF 预编码问题转化为虚拟通信模型下的信号估计问题, 在单天线蜂窝系统中, 通过 BP 算法设计发射符号集. 文献[7]则将该方法扩展到 MIMO 系统中, 在 BP 方法的基础上进行近似推导, 提出了基于 AMP(approximate message passing)的分布式 RZFBF 预编码算法, 进一步降低了计算的复杂度, 但其近似推导过程极为复杂.

笔者在多小区 MIMO 系统中, 利用 GAMP

收稿日期: 2017-05-30; 修订日期: 2017-09-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61172086、61571402)

作者简介: 王忠勇(1965—), 男, 江西人, 郑州大学教授, 博士生导师, 主要从事信号处理、控制理论与应用、无线通信系统研究, E-mail: iezywang@zzu.edu.cn.

(generalized approximate message passing) 算法实现了分布式 RZFBB 预编码. 相比集中式协作 RZFBB 预编码, 基于 GAMP 的分布式 RZFBB 预编码实现方法降低了系统对于回程容量的要求以及线路铺设难度. 仿真结果表明, 基于 GAMP 算法的分布式 RZFBB 预编码实现方案经若干次迭代后, 能够获得与集中式 RZFBB 预编码近似的系统容量性能.

## 1 系统模型

在多小区下行链路中, 小区间的干扰是不可避免的. 假设由于距离等原因, ICI 仅来源于相邻小区. 每个小区内配置单基站单用户, 基站天线数为  $N_i$ , 用户天线数为  $M_k$ , 多小区蜂窝系统下行链路干扰模型如图 1 所示.

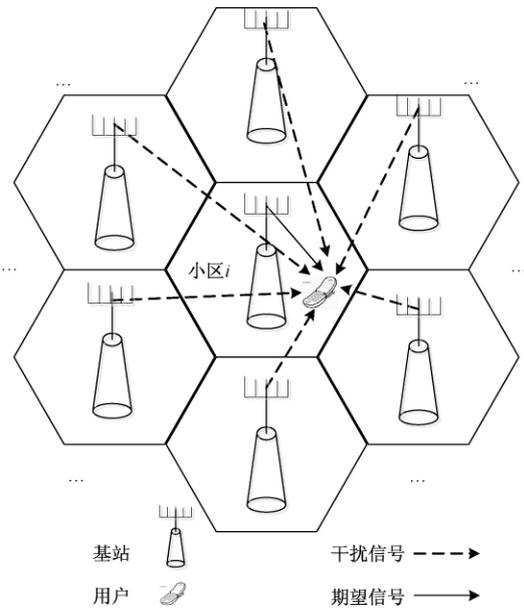


图 1 蜂窝下行链路干扰模型

Fig. 1 Interference model in downlink cellular system

在图 1 中, 以小区  $i$  内用户为例, 它除了接收本小区基站传送信号外, 还会收到其它小区基站发送的信号. 第  $i$  个小区内的用户接收信号为:

$$y_i = H_{i,j}x_i + \sum_{j \in N(i)/i} H_{i,j}x_j + w_i, \quad i = 1, \dots, N. \quad (1)$$

式中:  $x_i$  表示  $i$  小区基站发射信号;  $w_i$  表示加性高斯噪声;  $H_{i,j}$  是  $M_k \times N_l$  的信道矩阵;  $N(i)/i$  表示小区  $i$  的所有相邻小区;  $\sum_{j \in N(i)/i} H_{i,j}x_j$  表示干扰信号. 若系统中小区  $i$  内用户的第  $m$  根天线上的接收信号干燥比 (signal to interference plus noise ratio, SINR) 记作  $SINR_{m,i}$ , 则整个系统的平均吞吐量

$R$  为:

$$R = \frac{1}{N \times M_k} \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^{M_k} \log(1 + SINR_{m,i}). \quad (2)$$

### 1.1 RZFBB 预编码

集中式基站协作预编码系统中, 协作基站联合设计发射信号, 用户收到的来自其他小区的信号被视为有用信号而不是干扰. 在该场景下, 一种应用较广的线性联合预编码为 RZFBB 预编码, 针对所建系统模型, 该预编码矩阵记为  $T$ ,

$$T = KH^H (HH^H + \beta I_M)^{-1}. \quad (3)$$

式中:  $K$  为功率归一化约束因子, 假设信号总功率记作  $P$ , 未作归一化处理的 RZFBB 预编码矩阵为  $\tilde{T} = H^H (HH^H + \beta I_M)^{-1}$ , 则  $K = \sqrt{P} / \|\tilde{T}\|$ ;  $H$  为系统等效 MIMO 信道矩阵;  $\beta$  为正则化参数;  $M$  表示系统中接收天线总数;  $I_M$  表示  $M$  阶单位阵. 在所描述的 MIMO 蜂窝系统模型中, 其等效信道矩阵  $H$  为

$$H = \begin{bmatrix} H_{1,1} & \cdots & H_{1,N} \\ \vdots & H_{k,l} & \vdots \\ H_{N,1} & \cdots & H_{N,N} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中, 当且仅当小区  $k$  与  $l$  为相邻小区时,  $H_{k,l}$  为非零矩阵. 假设  $d$  对应为用户设计的未经预编码的数据符号向量, 则经 RZFBB 预编码后的发射符号集为

$$x = Td = KH^H (HH^H + \beta I_M)^{-1}d. \quad (5)$$

### 1.2 虚拟线性通信系统及因子图模型建立

考虑虚拟线性通信系统:

$$d = Hu + z, \quad (6)$$

式中:  $H$  表示协作系统等效信道矩阵;  $\{u_i\}$  表示虚拟通信系统的发射变量, 满足均值为 0, 方差为 1;  $\{z_i\}$  表示系统的加性高斯噪声变量, 满足均值为 0, 方差为  $\beta$ . 在该系统下, 发射信号变量  $u$  的最小均方误差 (minimum mean square error, MMSE) 估计为

$$\hat{u}_{\text{MMSE}} = H^H (HH^H + \beta I_M)^{-1}d. \quad (7)$$

与式 (5) 相比, 虚拟通信系统中  $u$  的 MMSE 估计量与经 RZFBB 预编码后的发射信号仅相差一个乘数因子  $K$ , 所以 RZFBB 预编码问题可以转化为虚拟通信系统下的发射信号估计问题.

对所建虚拟通信系统, 可利用消息传递算法<sup>[9]</sup>得到  $u$  的 MMSE 估计. 利用消息传递算法进行信号估计时, 需要利用概率推理的方法建立因子图<sup>[10]</sup>模型, 根据贝叶斯准则对变量的全局后验概率密度函数进行因式分解如下:

$$p(\mathbf{u}|\mathbf{d}) \propto p(\mathbf{d}|\mathbf{u}) p(\mathbf{u}) = \prod_{i=1}^N p(\mathbf{u}_i) p(\mathbf{d}_i|\mathbf{u}_{N(i)}). \quad (8)$$

由因式分解建立的因子图模型如图 2 所示.

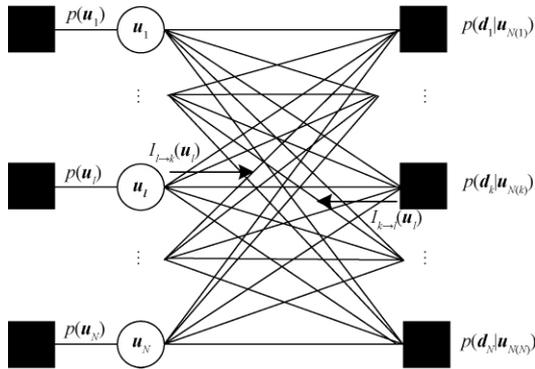


图 2 因子图模型

Fig. 2 Factor graph model

由图 2 可知,因子图由函数节点、变量节点、以及连接两者的边构成. 定义函数节点  $p(\mathbf{d}_k|\mathbf{u}_{N(k)})$  到变量节点  $\mathbf{u}_l$  的消息为  $I_{k \rightarrow l}(\mathbf{u}_l)$ , 相反方向的消息为  $I_{l \rightarrow k}(\mathbf{u}_l)$ . 该因子图中包含  $N$  个多元变量节点  $\mathbf{u}_l, l = 1, \dots, N$ . 函数节点  $p(\mathbf{u}_l)$  表示变量  $\mathbf{u}_l$  的先验分布, 函数节点  $p(\mathbf{d}_l|\mathbf{u}_{N(l)})$  表示似然概率. 每一个变量节点  $\mathbf{u}_l$  均与其对应的先验概率函数节点  $p(\mathbf{u}_l)$  通过边一一连接; 而在变量节点  $\mathbf{u}_l$  和似然函数  $p(\mathbf{d}_k|\mathbf{u}_{N(k)})$  之间, 当且仅当其信道矩阵  $\mathbf{H}_{k,l}$  非零时, 两者之间才通过边连接, 否则两者之间无连接.

## 2 基于 GAMP 算法的发射信号设计

文献 [6] 利用 BP 算法实现了分布式 RZFBF 预编码, 设计出的预编码符号与集中式协作 RZFBF 预编码设计出的发射符号极为接近, 同时由于分布式算法仅在相邻协作基站间进行信息交互, 相比集中式协作预编码极大地降低了系统对于回程容量的要求. 但是, 利用 BP 算法实现 RZFBF 预编码, 每次迭代都需要一个广播处理和收集过程, 函数节点传向变量节点的消息  $I_{k \rightarrow l}(\mathbf{u}_l)$  不仅与用户  $k$  有关, 还与消息要传向哪个变量节点  $l$  有关, 变量节点传向函数节点的消息  $I_{l \rightarrow k}(\mathbf{u}_l)$  的计算亦是如此, 导致 BP 算法的计算复杂度随协作基站数目增多而增大. 文献 [7] 在 BP 算法的基础上利用近似消息传递算法<sup>[11-15]</sup> 实现 RZFBF 预编码设计, 极大地降低了计算的复杂度, 然而其近似推导相当复杂.

从进一步降低计算复杂度和提高系统性能的目标出发, 可利用 GAMP 算法设计发射信号. 为

解决线性系统的信号重构问题, 文献 [11] 提出了 AMP 算法, 在因子图有环的情况下, 该算法较 BP 算法计算复杂度更低, 然而其应用具有一定的局限性. 通常状况下, 当变量具有拉普拉斯先验时, 采用该算法能够取得较好的性能. Sundeep Rangan 在文献 [12] 中提出了 GAMP 算法, 并将其用于随机线性混合模型的估计, 验证了算法的可靠性, 且从理论上讲, GAMP 算法适合任意形式的先验. 针对式 (6) 中的虚拟线性通信系统模型, 为利用 GAMP 算法估计发射信号, 可将其看作是加性高斯白噪声环境下,  $\mathbf{H}$  为线性混合矩阵的线性混合估计问题, 如图 3 所示.

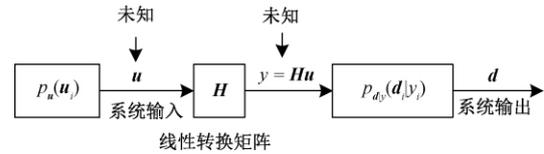


图 3 线性混合估计模型

Fig. 3 Linear mixed estimation model

图 3 中, 输入信号  $\mathbf{u}$  经过线性转换矩阵  $\mathbf{H}$  后输出  $\mathbf{y}$ , 其中  $\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{u}$ , 矢量信号  $\mathbf{y}$  中的每一个元素  $y_i$  通过输出条件转移概率函数  $p_{d_i}(\mathbf{d}_i|\mathbf{y}_i)$  后, 产生一个对应的输出  $\mathbf{d}_i$ , 针对不同的估计模型, GAMP 算法需要定义不同的输入约束函数  $F_{in}(\mathbf{u}, \hat{\mathbf{r}}, \boldsymbol{\mu}^r)$  和输出约束函数  $F_{out}(\mathbf{y}, \hat{\mathbf{p}}, \mathbf{d}, \boldsymbol{\mu}^p)$ , 文献 [12] 中详细介绍了如何根据不同的估计模型选择合适的输入输出约束函数. 针对式 (6) 所描述的系统, 为求解发射信号变量  $\mathbf{u}$  的 MMSE 估计量, 需定义基于 MMSE 估计的 GAMP 算法

$$F_{in}(\mathbf{u}, \hat{\mathbf{r}}, \boldsymbol{\mu}^r) = p_U(\mathbf{u}|\hat{\mathbf{r}}; \boldsymbol{\mu}^r); \quad (9)$$

$$F_{out}(\mathbf{y}, \hat{\mathbf{p}}, \mathbf{d}, \boldsymbol{\mu}^p) = p_{y|d}(\mathbf{y}|\mathbf{d}; \hat{\mathbf{p}}; \boldsymbol{\mu}^p). \quad (10)$$

其中:

$$p_U(\mathbf{u}|\hat{\mathbf{r}}; \boldsymbol{\mu}^r) = \frac{p_U(\mathbf{u}) \text{CN}(\mathbf{u}; \hat{\mathbf{r}}, \boldsymbol{\mu}^r)}{\int_{\mathbf{u}} p_U(\mathbf{u}') \text{CN}(\mathbf{u}'; \hat{\mathbf{r}}, \boldsymbol{\mu}^r)}. \quad (11)$$

$$p_{y|d}(\mathbf{y}|\mathbf{d}; \hat{\mathbf{p}}, \boldsymbol{\mu}^p) = \frac{p_{d_y}(\mathbf{d}|\mathbf{y}) \text{CN}(\mathbf{y}; \hat{\mathbf{p}}, \boldsymbol{\mu}^p)}{\int_{\mathbf{y}} p_{d_y}(\mathbf{d}|\mathbf{y}') \text{CN}(\mathbf{y}'; \hat{\mathbf{p}}, \boldsymbol{\mu}^p)}. \quad (12)$$

基于 MMSE 估计的 GAMP 算法通过定义一组函数  $g_{in}(\cdot)$  与  $g_{out}(\cdot)$  可以实现参数化设计<sup>[15]</sup>, 定义:

$$g_{in}(\hat{\mathbf{r}}, \boldsymbol{\mu}^r) = E_U(\mathbf{u}|\hat{\mathbf{r}}; \boldsymbol{\mu}^r); \quad (13)$$

$$g_{out}(\mathbf{d}, \hat{\mathbf{p}}, \boldsymbol{\mu}^p) = \frac{1}{\boldsymbol{\mu}^p} (E_{y|d}(\mathbf{y}|\mathbf{d}; \hat{\mathbf{p}}; \boldsymbol{\mu}^p) - \hat{\mathbf{p}}), \quad (14)$$

式中:  $E_X(x)$  表示变量  $x$  服从概率分布  $p_X(x)$  时的期望. 选择合适的  $g_{in}$  与  $g_{out}$  后, 将 GAMP 算法应

用于笔者所提的系统模型中.

(1) 输出线性步计算,对  $\forall k, k \in [1:N]$ :

$$\boldsymbol{\mu}_k^p(t) = \sum_{l \in N(k)} \mathbf{H}_{k,l} \mathbf{V}_l(t-1) \mathbf{H}_{k,l}^H; \quad (15)$$

$$\hat{\mathbf{p}}_k(t) = \sum_{l \in N(k)} \mathbf{H}_{k,l} \hat{\mathbf{u}}_l(t-1) - \boldsymbol{\mu}_k^p(t) \hat{\mathbf{s}}_k(t-1), \quad (16)$$

式中: 初始化  $\hat{\mathbf{s}}_k(0) = \mathbf{0}_{M_k \times 1}$ ;  $\mathbf{V}_l(0) = \mathbf{I}_{N_l}$ .

(2) 输出非线性步计算,根据所选定的  $g_{out}$  可得对  $\forall k, k \in [1:N]$  有:

$$\hat{\mathbf{s}}_k(t) = g_{out}(\mathbf{d}_k, \hat{\mathbf{p}}_k(t), \boldsymbol{\mu}_k^p(t)); \quad (17)$$

$$\hat{\boldsymbol{\mu}}_k^s(t) = -\frac{\partial}{\partial \hat{\mathbf{p}}_k(t)} g_{out}(\mathbf{d}_k, \hat{\mathbf{p}}_k(t), \boldsymbol{\mu}_k^p(t)). \quad (18)$$

(3) 输入线性步计算,对  $\forall l, l \in [1:N]$  计算:

$$\boldsymbol{\mu}_l^r(t) = \left( \sum_{k \in N(l)} \mathbf{H}_{k,l}^H \boldsymbol{\mu}_k^s(t) \mathbf{H}_{k,l} \right)^{-1}; \quad (19)$$

$$\hat{\mathbf{r}}_l(t) = \hat{\mathbf{u}}_l(t-1) + \boldsymbol{\mu}_l^r(t) \sum_{k \in N(l)} \mathbf{H}_{k,l}^H \hat{\mathbf{s}}_k(t), \quad (20)$$

式中: 初始化  $\hat{\mathbf{u}}_l(0) = \mathbf{0}_{N_l \times 1}$ .

(4) 输入非线性步计算,根据所选定的  $g_{in}$  可得对  $\forall l, l \in [1:N]$  有:

$$\mathbf{V}_l(t) = \boldsymbol{\mu}_l^r(t) \frac{\partial}{\partial \hat{\mathbf{r}}_l(t)} g_{in}(\hat{\mathbf{r}}_l(t), \boldsymbol{\mu}_l^r(t)); \quad (21)$$

$$\hat{\mathbf{u}}_l(t) = g_{in}(\hat{\mathbf{r}}_l(t), \boldsymbol{\mu}_l^r(t)). \quad (22)$$

最后,利用 GAMP 算法经  $t$  次迭代设计出的  $l$  小区内基站的发射符号集即为  $\hat{\mathbf{u}}_l(t)$ . 观察整个 GAMP 算法实现过程,公式(15)、(18)、(19)的计算仅仅依赖于信道参数  $\{\mathbf{H}_{k,l}\}$ ,故而不需要交互数据符号  $\mathbf{d}_k$ ,且这些参数信息仅在局部协作基站间进行传递,相比集中式协作预编码,这将会极大地降低系统对回程容量的要求.

### 3 试验仿真及算法分析

#### 3.1 算法复杂度分析

在  $N$  小区系统中,BP 算法计算变量节点  $l$  到函数节点  $k$  的消息以及反方向的消息不仅与基站有关,而且与用户有关.所以,每个变量节点  $l$  必须向其所有相关联的用户  $k$  传递消息的均值和方差,总计需要进行  $N^2$  次计算;每个函数节点亦是如此,故而 BP 算法在每一次迭代过程中需要进行  $2N^2$  次计算,随着网络规模的增大,计算复杂度也随之增大.使用 AMP 和 GAMP 方法,变量节点  $l$  传向函数节点  $k$  的消息仅与  $l$  有关而与  $k$  无关,函数节点到变量节点亦是如此,这在很大程度上降低了消息计算的复杂度,每次迭代中仅需  $4N$  次计算.

#### 3.2 算法性能分析

试验仿真参数如下:系统内共计 35 个小区,每个小区配备单基站单用户,基站天线数  $N_l = 4$ ,用户天线数  $M_k = 2$ ,基站位于小区中心位置,小区内的用户随机分布,小区半径为 1 000 m,同小区信道增益为 1,相邻小区间信道增益记作  $\alpha$ . 仿真结果如图 4 和图 5 所示.

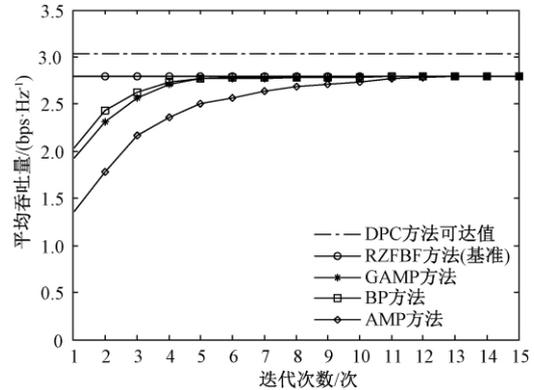


图 4 平均吞吐量与迭代次数的关系曲线图

Fig. 4 Performance of average throughput against the number of iterations

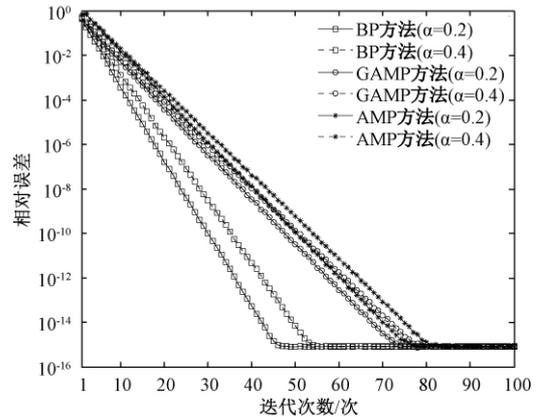


图 5 符号相对误差与迭代次数的关系曲线图

Fig. 5 Performance of relative error versus iterations

图 4 为邻小区信道增益  $\alpha = 0.4$  时,不同预编码符号设计方法下系统平均吞吐量随迭代次数的变化曲线.其中: DPC 方法理论上可达无干扰时的极限容量,然而在实际的大规模 MIMO 场景下,其实现极为困难,这里以无干扰理想情况下的平均吞吐量代表 DPC 编码理论可达值, RZF 线性预编码性能略差,但其实现相对容易.这里将 RZF 预编码算法的可达平均吞吐量作为最佳比较基准,随迭代次数增加,基于消息传递的预编码算法的平均吞吐量也在增加,最终达到饱和.由图 4 以及算法复杂度分析可

知,所提基于 GAMP 算法的发射信号设计与基于 BP 的设计方法相比,具有更低的计算复杂度;与基于 AMP 算法的设计方法相比,具有更快的收敛速度。

图 5 描述了所提算法的收敛性能。仿真图中指标第  $t$  次迭代的相对误差  $e^{(t)} = \|\mathbf{x}^{(t)} - \mathbf{x}\| / \|\mathbf{x}\|$ 。其中,  $\mathbf{x}^{(t)}$  表示分布式预编码算法经  $t$  次迭代后设计出的发射符号集,  $\mathbf{x}$  表示集中式协作 RZFBF 预编码所得发射符号集。由图 5 可知,所提算法在设定的邻小区干扰强度下经多次迭代后能够收敛,且相比基于 BP 算法的预编码设计方法, GAMP 方法具有更低的计算复杂度;相比基于 AMP 的预编码设计方法, GAMP 方法具有更快的收敛速度。

#### 4 结论

多小区蜂窝下行网络中,基站协作可以有效地抑制 ICI。笔者针对密集蜂窝通信系统中存在的 ICI 问题,提出了基站协作场景下基于 GAMP 的分布式 RZFBF 预编码设计方法,通过在相邻小区协作基站间共享 CSI 信息,极大地降低了系统对回程容量的要求。此外,所提方法最终能够以较快的收敛速度达到与集中式协作 RZFBF 预编码近似相同的平均吞吐量性能。

#### 参考文献:

- [1] 李国友,周亚建,原泉,等. 利用干扰消除的协同中继传输方案[J]. 应用科学学报, 2013, 31(2): 111-115.
- [2] 马莉莉. 基于 CoMP 的小区间干扰抑制技术[D]. 西安: 西安电子科技大学通信与信息系统, 2013.
- [3] 孙丽楠. 蜂窝系统基站协作干扰抑制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学信息与通信工程, 2011.
- [4] PEEL C B, HOCHWALD B M, SWINDLEHURST A L. A vector-perturbation technique for near-capacity multiantenna multiuser communication—part I: channel inversion and regularization[J]. IEEE transactions on communications, 2005, 53(1): 195-202.
- [5] SOMEKH O, SIMEONE O, BARNES Y, et al. Cooperative multicell zero-forcing beamforming in cellular downlink channels[J]. IEEE transactions on information theory, 2009, 55(7): 3206-3219.
- [6] NG B L, EVANS J S, HANLY S V, et al. Distributed downlink beamforming with cooperative base stations[J]. IEEE transactions on information theory, 2008, 54(12): 5491-5499.
- [7] WEN C K, CHEN J C, WONG K K, et al. Message passing algorithm for distributed downlink regularized zero-forcing beamforming with cooperative base stations[J]. IEEE transactions on wireless communications, 2014, 13(5): 2920-2930.
- [8] COSTA M. Writing on dirty paper[J]. IEEE transactions on information theory, 1983, 29(3): 439-441.
- [9] KSCHISCHANG F R, FREY B J, LOELIGER H A. Factor graphs and the sum-product algorithm[J]. IEEE transactions on information theory, 2001, 47(2): 498-519.
- [10] 陈恩庆,肖素珍. 基于因子图的 MIMO-OFDM 时变信道估计[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(1): 87-91.
- [11] DONOHO D L, MALEKI A, MONTANARI A. Message passing algorithms for compressed sensing[J]. Proceedings of the national academy of sciences, 2009, 106(45): 18914-18919.
- [12] RANGAN S. Generalized approximate message passing for estimation with random linear mixing[C]//IEEE international symposium on information theory proceedings (ISIT), St. Petersburg, Russia, 2011: 2168-2172.
- [13] VILA J, SCHNITER P, MEOLA J. Hyperspectral unmixing via turbo bilinear approximate message passing[J]. IEEE transactions on computational imaging, 2015, 1(3): 143-158.
- [14] SCHNITER P, RANGAN S. Compressive phase retrieval via generalized approximate message passing[C]//2012 50th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton 2012), Monticello, Illinois, USA, 2012: 815-822.
- [15] BORGERDING M, SCHNITER P, VILA J, et al. Generalized approximate message passing for cosparsity analysis compressive sensing[C]//2015 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Australia, Brisbane: 2015: 3756-3760.

## The Realization of RZFBF Pre-coding Based on GAMP Algorithm for Base Station Cooperation System

WANG Zhongyong, FENG Shuangli, YUAN Zhengdao, ZHANG Yuanyuan

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

**Abstract:** In the base station cooperation system, the centralized cooperative pre-coding based on regularized zero-forcing beam-forming(RZFBF) could obtain a similar capacity performance to that of dirty-paper coding. However, with the number of cooperative base station increasing, the centralized cooperative pre-coding had a quite high requirement for the backhaul capacity. In order to solve this problem, a distributed transmitted signal design scheme based on generalized approximate message passing(GAMP) algorithm was proposed. The scheme decomposed the overall computational cost into many smaller computation tasks by exchanging information between adjacent base stations, which greatly reduced the requirement of backhaul capacity. Simulation results showed that the proposed algorithm could achieve approximate system throughput with the centralized cooperative RZFBF pre-coding at a lower computational complexity.

**Key words:** base station cooperation; zero-forcing beam-forming; pre-coding; backhaul capacity; message passing algorithm

---

(上接第27页)

## Research on Trajectory Planning and Simulation on the Serial-parallel Leg of a Novel Quadruped Walking Robot

GAO Jianshe, WANG Yuchuang, LIU Deping, WANG Baotang

(Mechatronics Institute, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In order to improve the payload-weight ratio, a novel quadruped walking robot was presented. And aiming at the impingement in the process of movement of the quadruped walking robot, a low contact compact trajectory planning method using high order polynomial curve was used. Each leg of the robot was composed of a 3-RRR parallel mechanism which was connected in series with a rotating mechanism. The coordinate system was established based on D-H method. Based on the low contact compact algorithm and the uniform linear motion, the trajectory planning was carried out respectively for the swing phase and the support phase of the foot end of the serial-parallel leg. The trajectory of the foot end in the global coordinate system of the hip joint was calculated according to the inverse solution model. The four driving function of the leg was calculated using Matlab based on the inverse kinematics solution of the hybrid leg's kinematics model. Finally, the leg model was exported into the ADAMS, the motion simulation of the hybrid leg was carried out by using ADAMS after adding constraints and the drive. The result showed that the foot end of the hybrid leg achieved the goal of low impact, and the curve of foot end of the speed and acceleration was smooth. The simulation results were consistent with the theoretical results and the rationality and validity of the algorithm were verified. This research provided the foundation for the further research of robot's gait planning and motion control.

**Key words:** series parallel; quadruped walking robot; trajectory planning; matlab; ADAMS simulation

文章编号: 1671-6833(2018)02-0039-05

## 基于网络层次分析法的电网发展诊断模型研究

王正阳<sup>1</sup>, 詹智民<sup>2</sup>, 罗 宾<sup>2</sup>, 刘行波<sup>2</sup>, 李源林<sup>2</sup>, 叶 磊<sup>2</sup>, 陈根永<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 湖北华中电力科技开发有限责任公司, 湖北 武汉 430077)

**摘 要:** 结合电网发展规律, 从电网自身发展条件及外部因素限制选取影响电网发展的相关指标, 并从电网长期发展的角度, 考虑能源、环境、土地等资源对电网发展的制约, 提出创新型指标; 考虑指标之间的相互联系与相互制约, 运用网络层次分析法对电网发展现状及发展空间进行诊断, 并建立了相应的诊断模型. 通过对算例的诊断结果可知, 该诊断模型可以引导地区能源发展方向, 优化能源结构, 发现电网发展薄弱环节, 评估电网发展空间, 把握发展方向, 是一种合理可行的新型电网发展诊断方法.

**关键词:** 电网; 发展; 诊断; 网络层次分析法; 指标体系

**中图分类号:** TM615

**文献标志码:** A

**doi:** 10. 13705/j. issn. 1671-6833. 2018. 02. 002

### 0 引言

面对复杂严峻的经济形势和艰巨的改革发展任务, 电网作为社会重要基础设施, 应该在继承中创新, 在创新中发展, 为服务国家经济和社会发展作出更大贡献, 因此有必要通过电网发展诊断, 科学评价电网的发展现状和电网的发展空间, 寻找电网发展内在驱动力, 针对电网发展薄弱环节, 提出准确有效的诊断建议, 为电网发展提供技术支撑和决策依据, 促进电网科学发展, 提高电网管理水平<sup>[1]</sup>.

目前, 电网发展诊断逐步受到电力公司和研究人员的重视, 已有学者开展了相关研究工作. 文献[1]结合地市级电网的特点, 从电网安全与质量、速度与规模、协调性、运行效率和经济效益5个维度对电网发展进行综合评价, 并根据实地调研和数据挖掘方法确定了46个评价指标, 从而构建了电网发展评价与诊断双层结构模型. 文献[2]通过借鉴国际电力行业常用的指标体系, 从安全可靠、经济高效、服务优质、绿色低碳、友好互动等5个方面, 筛选了能够表征世界一流电网特质的核心指标, 形成指标体系. 文献[3]将层次分析法和德尔菲法用于电网现状评估中, 并建立了高、中压现状配电网的评

价体系, 着重分析和研究同一层次中各指标的权重求解问题. 文献[4]采用熵权法和密切值法相融合的评估模型, 对配电网评估指标体系进行了科学合理的评价.

笔者通过研究发现, 现有的电网发展诊断指标体系主要在于展示指标数据, 没有考虑指标间的相互联系与制约, 同时诊断的覆盖面还不够全面, 缺乏电网发展与能源资源、环境资源、土地资源等方面关系的指标, 现有的电网发展诊断指标体系还有待完善.

面对电网发展诊断的重大需求, 笔者从电网规模、电网结构、安全可靠、利用效率、设备水平、外部环境6方面<sup>[5-8]</sup>对电网发展现状及发展空间进行诊断, 提出相应的指标分析方法, 形成了基于网络层次分析法<sup>[9-10]</sup>的诊断模型. 用此模型对电网进行诊断, 发现电网发展的薄弱环节, 结合发展形势、经济环境和政策环境, 分析影响电网发展的限制因素, 把握电网发展方向, 明确电网投资重点, 推动电网科学发展.

### 1 电网发展诊断指标体系

影响电网发展的因素分为两类: ①内部限制因素; ②外部限制因素. 结合电网发展特点, 考虑指标间的相互影响与支配, 进行影响因素分析, 通

收稿日期: 2017-12-01; 修订日期: 2018-01-16

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2013M541990); 国家电网公司科技资助项目(20160284A)

通信作者: 陈根永(1964—), 男, 河南禹州人, 郑州大学教授, 主要从事电力系统的教学及科研工作, E-mail: ezzucgy@163.com.

过聚类算法,将指标分为电网规模、电网结构、利用效率、安全可靠、设备水平、外部环境 6 个类

别,下属指标共 39 个. 基于这些指标建立的电网发展诊断体系如图 1 所示.

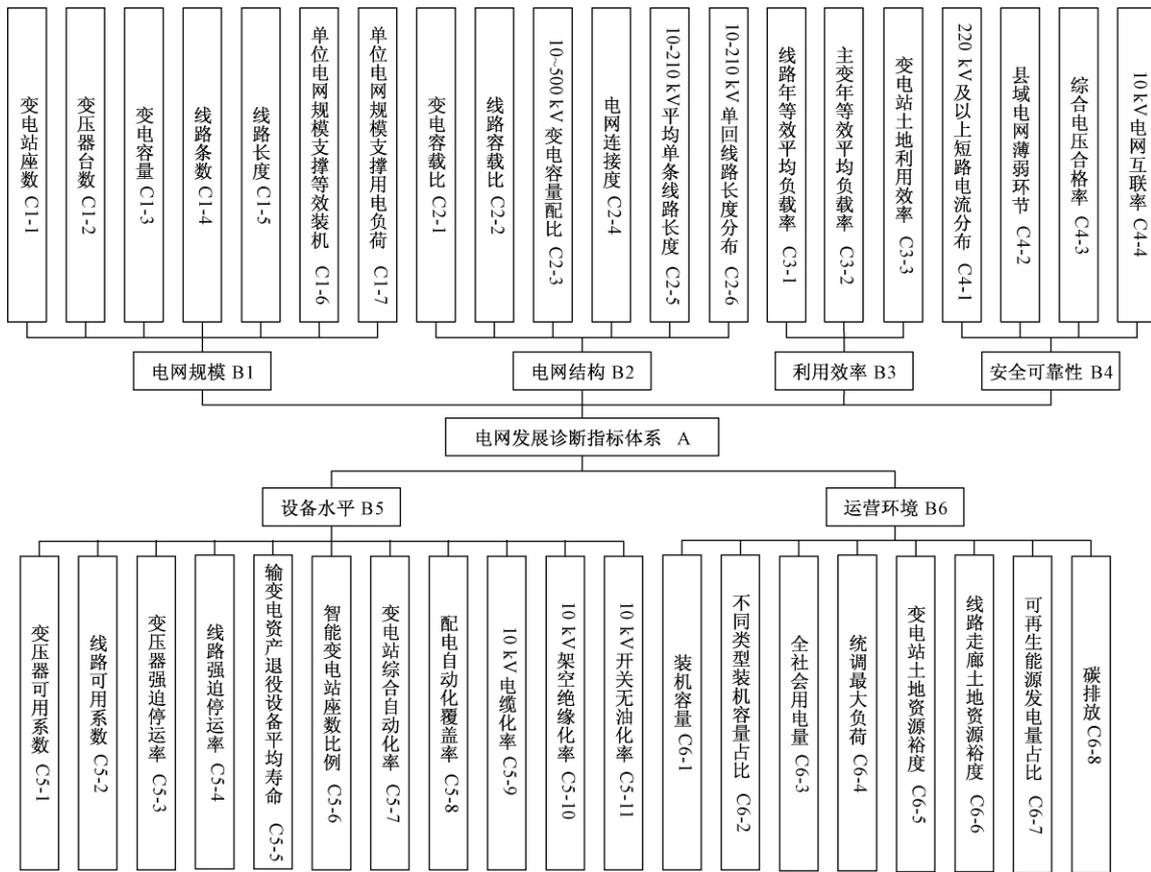


图 1 电网发展诊断指标体系

Fig. 1 The index system of power grid development diagnosis

### 2 网络层次分析法( ANP)

考虑到各个指标间的相互联系与制约,笔者采用网络层次分析法( analytic network process, ANP)对指标体系作进一步研究. 网络层次分析法是美国匹兹堡大学教授萨蒂在层次分析法( AHP)的基础上,于 1996 年提出的一种适应非独立递接层次结构,能够解决存在内部依存和反馈效应的复杂系统的决策方式. 由于网络层次分析法在其网络层中可将问题的相关元素进行聚类而形成元素组,并可随意描述各个元素之间的相关性,即构造出网络结构,尽管建模过程较为复杂,但可以更准确地描述决策问题,因而成为一种更加有效的决策方法.

#### 2.1 ANP 的基本结构

ANP 系统元素分为两个部分: ①由问题目标及决策准则构成的控制层; ②由控制层支配的所有元素构成的网络层,其内部是相互影响的网络结构. 图 2 是典型的 ANP 结构形式.

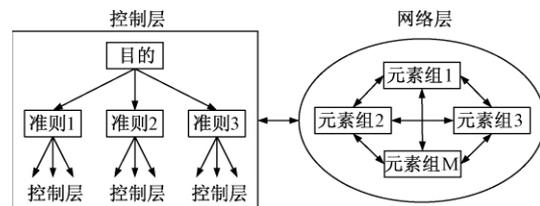


图 2 典型 ANP 的结构形式

Fig. 2 A typical ANP structure

#### 2.2 ANP 的计算步骤

①判断矩阵和排序向量的建立. 使用德尔菲法判断 ANP 系统中各指标的相对重要性,常采用 1—9 标度法作为判断标准.

设 ANP 中控制层元素为  $B_1, B_2, \dots, B_n$ , 网络层元素集有  $C_1, C_2, \dots, C_n$ , 其中  $C_i$  有元素  $e_{ik} (k = 1, 2, \dots, n_j)$ . 首先在控制准则下构造判断矩阵,按照元素集  $C_i$  中的元素对  $e_{jk}$  的影响程度进行两两比较. 然后根据特征根法求得排序向量  $[w_1^{(j)} w_2^{(j)} \dots w_{n_i}^{(j)}]^T$ . 若该特征向量可以通过一致性检验,则将其写成矩阵形式,即可得到局部权重向量矩阵:

$$W_{ij} = \begin{bmatrix} w_{i1}^{(j1)} & w_{i1}^{(j2)} & \cdots & w_{i1}^{(jn_j)} \\ w_{i2}^{(j1)} & w_{i2}^{(j2)} & \cdots & w_{i2}^{(jn_j)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{in_i}^{(j1)} & w_{in_i}^{(j2)} & \cdots & w_{in_i}^{(jn_j)} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

若  $C_j$  中的元素不受  $C_i$  中元素影响, 则  $W_{ij} = 0$ .

②超矩阵的建立. 同理, 将其他元素集元素的内外关系依次进行比较, 可得到由网络层中各元素互相影响的排序向量构成的无权重超矩阵  $W$ .

$$W = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \cdots & W_{1n} \\ W_{21} & W_{22} & \cdots & W_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ W_{n1} & W_{n1} & \cdots & W_{nn} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$W$  的每个元素都是矩阵, 列和是 1, 但  $W$  不是归一化矩阵, 为方便计算需将超矩阵列归一化, 即对  $W$  的元素加权, 得到加权超矩阵.

③加权超矩阵的计算. 在控制层  $B_n$  准则下, 根据网络层各组元素对  $C_j (j = 1, \dots, n)$  的重要

程度进行比较, 得到归一化的排序向量

$$H_j = [h_{1j} \cdots h_{nj}]^T, \quad (3)$$

进而可以得到加权矩阵

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1j} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{n1} & \cdots & h_{nn} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

将矩阵  $H$  和  $W$  相乘即为加权超矩阵  $\bar{W}$ .

④超矩阵  $W$  稳定处理. 计算每个超矩阵的极限相对排序向量

$$W^\infty = \lim_{k \rightarrow \infty} (1/N) \sum_{k=1}^N \bar{W}^k. \quad (5)$$

若该极限收敛且唯一, 则原矩阵对应行的值为各指标的权重. 通过式(5) 计算可得各指标的权重值.

### 3 算例分析

基于上述电网发展诊断模型, 分析指标应用场景, 选取 220 kV 电网适应性评价指标, 构建 220 kV 电网发展诊断指标体系的 ANP 结构, 如图 3 所示.

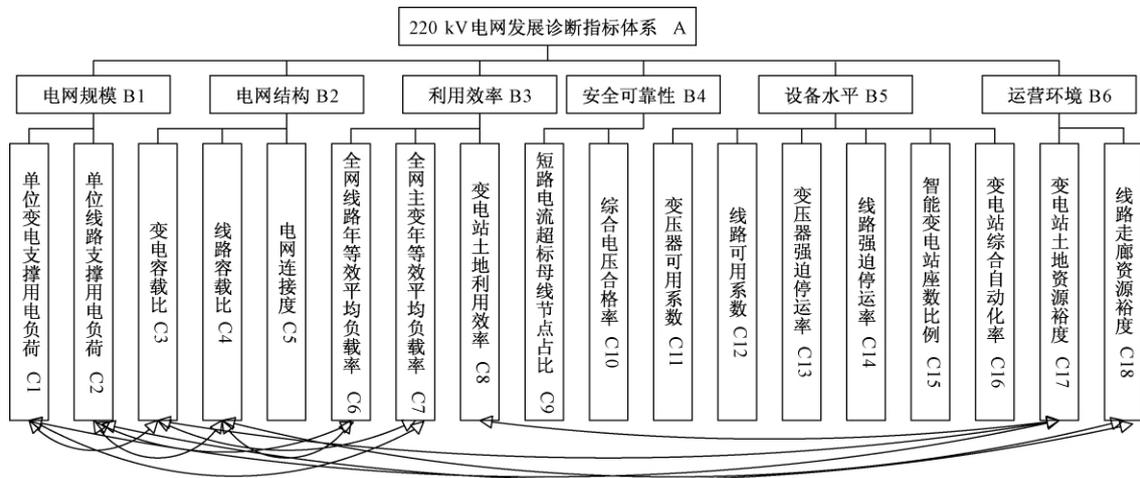


图 3 220 kV 电网发展诊断指标体系的 ANP 结构

Fig. 3 ANP structure of 220 kV power grid development diagnosis index system

图 3 中 C1 与 C3、C7、C17 相关联; C2 与 C4、C6、C18 相关联; C3 与 C7、C17 相关联; C4 与 C6、C18 相关联; C8 与 C17 相关联.

以国家电网公司一体化电网规划设计平台中 2016 年电网规划和实际运行数据为基础(见表 1), 选取河南、湖北、山东、江苏、北京 5 地区 220 kV 电网进行诊断分析. 鉴于部分数据较难收集, 诊断工作将仅基于现有数据展开, 涉及更多指标、更多电压等级的区域电网整体发展诊断分析需进一步加强数据统计收集工作, 其诊断流程是在本算例基础上的扩展.

ANP 计算过程异常繁复, 对于大型系统, 基本无法进行手工计算. 笔者采用基于 ANP 理论的专业计算工具 Super Decisions 软件进行权重计算, 所得各指标权重如表 2 所示.

基于 ANP 的评价得分如表 3 所示. 诊断结果可以从总体上判断 220 kV 电网发展现状. 同时, 由诊断过程中间结果绘制相应的雷达图, 如图 4 所示. 从雷达图可以发现各地区 220 kV 电网的薄弱环节和发展方向.

由表 3 及图 4 可知, 北京 220 kV 电网诊断得分最低, 其中电网规模、电网结构发展略超前

表1 5省2016年220 kV 电网发展诊断相关数据

Tab.1 Power grid development diagnosis index data of five provinces in 2016

指标	区域电网				
	河南	湖北	山东	江苏	北京
单位变电支撑用电负荷/(kW·kVA <sup>-1</sup> )	0.64	0.67	0.51	0.50	0.63
单位线路支撑用电负荷/(kW·km <sup>-1</sup> )	3 240	2 300	3 000	3 100	6 700
变电容载比	1.73	1.92	1.85	1.90	1.80
线路容载比	2.10	3.15	2.05	2.32	2.35
电网连接度	6.10	6.49	5.43	6.31	8.63
全网线路等效平均负载率/%	26.00	21.55	36.23	23.68	24.67
全网主变等效平均负载率/%	31.00	29.43	30.94	33.44	26.80
变电站土地利用效率/(kVA·m <sup>-2</sup> )	25	23	27	28	49
短路电流超标母线节点占比/%	0	0.84	0	0	0
综合电压合格率/%	99.503 5	99.477 5	99.755 5	99.854 5	99.820 0
变压器可用系数/%	100.000 0	99.931 7	99.982 0	99.974 0	99.972 0
线路可用系数/%	99.999	99.835 3	99.846 0	99.939 0	99.934 0
变压器强迫停运率/(次·百年 <sup>-1</sup> )	0	0	0	0	0
线路强迫停运率/(次·百公里年 <sup>-1</sup> )	0.040	0.045	0.140	0.025	0.142
智能变电站座数比例/%	10.40	19.50	15.73	16.81	10.96
变电站综合自动化率/%	100	100	100	100	100
变电站土地资源裕度/%	55	57	53	47	35
线路走廊资源裕度/%	83	77	72	67	56

表2 指标权重计算结果

Tab.2 Calculation result of indexes weight

关键层	控制层		网络层	
	准则	权重	指标	权重
电网规模	0.209	单位变电支撑用电负荷	0.5	
		单位线路支撑用电负荷	0.5	
电网结构	0.171	变电容载比	0.361	
		线路容载比	0.361	
		电网连接度	0.278	
220 kV 电网效率	0.211	全网线路等效平均负载率	0.373	
		全网主变等效平均负载率	0.373	
		变电站土地利用效率	0.254	
电网发展诊断指标体系	0.118	短路电流超标母线节点占比	0.852	
		综合电压合格率	0.148	
		变压器可用系数	0.216	
		线路可用系数	0.216	
设备水平	0.096	变压器强迫停运率	0.224	
		线路强迫停运率	0.224	
		智能变电站座数比例	0.071	
外部环境	0.195	变电站综合自动化率	0.049	
		变电站土地资源裕度	0.65	
		线路走廊资源裕度	0.35	

表3 评价结果

Tab.3 The evaluation results

地区	评分
河南	82.147
湖北	78.412
山东	85.973
江苏	86.316
北京	73.295

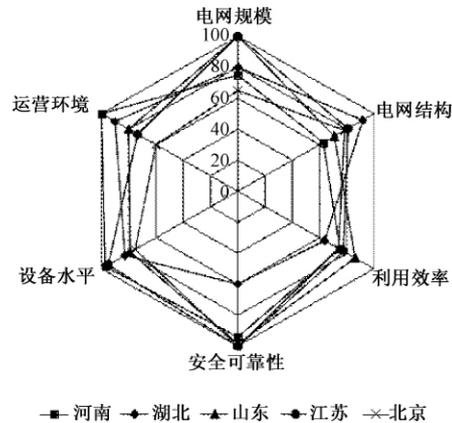


图4 5省电网发展诊断雷达图

Fig.4 Rader of five provinces power grid development diagnosis

于社会经济发展和负荷发展需求. 在发展过程中主要存在中心城区变电站数量不足、电力通道资源匮乏的紧张局面, 建议合理优化分区, 加强网络结构建设, 着重解决变电容量与负荷的空间分布不均和局部地区供电能力不足等问题, 提高电网运行水平. 安全可靠得分最高, 这是因为考虑到首都能源安全大局, 北京电网在发展过程中始终将安全可靠作为发展重心. 电网发展资源裕度从内部来看, 利用效率处于中等水平, 未充分利用已有设备容量, 设备重载和轻载现象同时存在. 下一步建议考虑增加轻载输电变电设备负荷传输, 打通高、低容载比地区的电力传输通道, 同时考虑对部分变电站土

地资源利用效率较低的重载变电站采取合理紧凑的布置方式进行扩建以提高供电能力,并达到节约土地资源、提高土地利用效率的目的。从外部来看,运营环境得分最低,建设环境变化快,可供电网发展所利用的资源裕度较小,为了积极抢占变电站站址、电力管沟、线路廊道等稀缺资源,满足未来负荷飞跃发展的需求,建议该地区加强与政府规划部门协调,争取从政策上保障土地资源的可获得性,并加大 220 kV 电网投资力度,适度超前开展输变电工程建设。

#### 4 结论

笔者结合电网发展特点,从电网自身及外部环境入手,选取电网结构、利用效率、安全可靠、设备水平、外部环境等指标,建立一套电网发展诊断指标体系,并提出相应的指标分析方法,形成电网发展综合诊断模型。通过电网发展诊断,研究电网发展现状,发现电网薄弱环节,寻找电网发展方向,并根据诊断结论制定针对性措施,以保证地区电网健康发展。

#### 参考文献:

- [1] 史智萍,单体华,刘文峰,等. 地市级电网发展诊断体系及综合评价[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2015,36(1): 11-16.
- [2] 徐科,刘明志,张军,等. 世界一流城市电网评价指标体系[J]. 电力建设,2015,36(11): 51-57.
- [3] 李晓辉,张来,李小宇,等. 基于层次分析法的现状电网评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008,36(14): 57-61.
- [4] 卢建昌,王伟. 基于熵权密切值法的配电网评估模型[J]. 华东电力,2013,41(5): 1047-1050.
- [5] 岳云力,黄毅臣,韩锐. 输电网规划综合评价指标体系研究[J]. 智能电网,2014,2(2): 41-45.
- [6] 唐文左,梁文举,李媛媛,等. 大型城市电网结构分析及其对重庆电网的启示[J]. 电力系统及其自动化学报,2014,26(3): 72-75.
- [7] 韩柳,庄博,王智冬,等. 电网利用效率指标研究[J]. 华东电力,2011,39(6): 850-854.
- [8] 徐敏,沈靖蕾,闫震山. 电网规划的多层面协调性的综合评估方法研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016,37(1): 24-28.
- [9] 李金超,李金颖,牛东晓,等. 基于 ANP 的电网企业运营能力评价模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011,39(19): 37-43.
- [10] 马旭东,杨东,聂瑞华,等. 基于 AHP 方法的山区河道截流难度影响因素研究[J]. 水利水电技术, 2017,48(5): 97-101.

### Research of the Index Model of Power Grid Development Diagnosis Based on ANP

WANG Zhengyang<sup>1</sup>, ZHAN Zhimin<sup>2</sup>, LUO Bin<sup>2</sup>, LIU Xingbo<sup>2</sup>, LI Yuanlin<sup>2</sup>, YE Lei<sup>2</sup>, CHEN Genyong<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Hubei Central China Technology Development of Electric Power CO. LTD, Wuhan 430077, China)

**Abstract:** Followed the development law of power grid, the related index of the power grid development based on its own conditions and external factors to establish the diagnosis model by using ANP. By considering the energy, environment put forward, land and other resources on the development of power grid constraints, we innovative index was from the perspective of long-term development of the power grid. Considering the mutual connection and restriction between those indexes, use the model was used to diagnose the present situation and development space of the power grid development. Based on the example of diagnosis, the diagnosis model could guide the development direction of regional power supply, optimize energy structure, find the weak link in the development of power grid, evaluate the development space of grid, and grasp the development direction. It was a reasonable and feasible new type of power grid development diagnostic method.

**Key words:** power grid; development; diagnosis; ANP; index system

文章编号: 1671-6833(2018)02-0044-06

## 铅-磁流变阻尼器在减震结构中的位置优化

张香成<sup>1</sup>, 陈娜<sup>1</sup>, 罗芳<sup>2</sup>, 赵军<sup>1</sup>, 徐赵东<sup>3</sup>

(1. 郑州大学 力学与工程科学学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州财经学院, 河南 郑州 450000; 3. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 铅-磁流变阻尼器(LMRD)是一种能有效减小建筑结构地震响应的新型阻尼器,为提高 LMRD 受控结构的减震效果,以撤掉阻尼器产生的结构最优二次型性能指标损失量为优化目标,在结构中对 LMRD 进行位置优化. 结果表明:以撤掉 LMRD 产生的结构最优二次型性能指标损失量为优化目标时,阻尼器在结构中的最优位置取决于结构自身特性及参数,与地震波关系不大; LMRD 对地震作用下结构的水平位移响应控制效果较为明显,但对加速度响应控制效果不明显.

**关键词:** 铅-磁流变阻尼器; 位置优化; 钢筋混凝土框架; 二次型性能指标; 动力响应

**中图分类号:** TU352 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.02.010

### 0 引言

铅-磁流变阻尼器(lead magneto-rheological damper, LMRD)是本课题组研发的一种半主动控制装置,阻尼力可调,耗能能力强,所需电源较少,控制系统相对简单,可靠性高<sup>[1-2]</sup>. 研究表明:结构的半主动减震控制效果既与装置的力学性能和控制算法有关又与装置的位置有关. 近年来,国外关于磁流变半主动控制装置优化布置的研究已取得一些成果<sup>[3-5]</sup>. 国内徐龙河等对磁流变阻尼器在结构中的位置进行了优化<sup>[6]</sup>,贝伟明等基于改进遗传算法对磁流变阻尼器在高层建筑结构中的位置进行了优化<sup>[7]</sup>,阎石等对磁流变阻尼器位置优化方法进行了对比研究<sup>[8]</sup>,展猛等在空间桁架模型中对不同数量的阻尼器进行了位置优化<sup>[9]</sup>,闫维明等对不规则结构中阻尼器的参数和位置进行了优化<sup>[10]</sup>.

为更好地实现加入 LMRD 的减震效果,以撤掉 LMRD 产生的受控结构最优二次型性能指标损失量作为优化目标,在 El-Centro 波、Taft 波和人工波作用下,采用 MATLAB 软件,对钢筋混凝土框架结构在 LMRD 最优布置、任意布置和未布置多种工况下进行编程和仿真分析,最后将计算

结果进行对比分析.

### 1 LMRD 结构及半主动控制算法

#### 1.1 LMRD 减震结构的运动微分方程

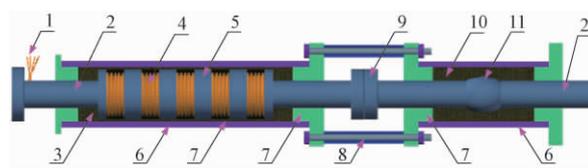
在地震作用下,LMRD 受控结构的动力学方程为:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = -M\ddot{x}_g(t) - HF(t), \quad (1)$$

式中:  $M$  为结构的质量矩阵;  $C$  为阻尼矩阵;  $K$  为刚度矩阵;  $\ddot{x}(t)$  为结构的位移列阵;  $\ddot{x}_g(t)$  为地震加速度;  $I$  为单位列向量;  $F(t)$  为阻尼器的控制力列阵;  $H$  为阻尼器的位置矩阵.

#### 1.2 半主动控制算法

结构中拟设置的 LMRD 如图 1 所示.



1. 导线; 2. 活塞杆; 3. 磁流变液; 4. 线圈; 5. 活塞; 6. 缸桶;  
7. 盖板; 8. 钢管; 9. 连接法兰; 10. 金属铅; 11. 轴凸

图 1 LMRD 结构装配图

Fig. 1 Structure assembly diagram of LMRD

在频率为 0.1 Hz, 振幅 10 mm 的正弦波激励

收稿日期: 2017-10-27; 修订日期: 2018-01-02

基金项目: 国家重点研发计划政府间科技合作重点专项资助项目(2016YFE0125600); 国家自然科学基金资助项目(51408555)

通信作者: 赵军(1971—),男,河南漯河人,郑州大学教授,博士,主要从事工程结构抗震研究, E-mail: zhaoj@zzu.edu.cn.

下,LMRD 在 0.0.6、1.2、1.8、2.4 A 5 级电流下的最大阻尼力测试值分别为 124.22、194.90、249.38、278.19 和 284.49 kN.

采用线性二次型调节器算法<sup>[11-12]</sup>计算结构中 LMRD 的最优控制力  $U(t)$ ,

$$\dot{\mathbf{Z}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{Z}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}(t) + \mathbf{W}\ddot{x}_g(t), \mathbf{Z}(t_0) = \mathbf{Z}_0, \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{Z}(t) = [\mathbf{x}(t) \quad \dot{\mathbf{x}}(t)]^T$  为受控系统的状态

向量;  $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{n \times n} & \mathbf{I}_{n \times n} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}_{2n \times 2n}$  为受控系统

的状态矩阵;  $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{n \times 1} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{H} \end{bmatrix}_{2n \times 1}$  为控制装置位置

指示矩阵;  $\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{n \times 1} \\ -\mathbf{I}_{n \times 1} \end{bmatrix}_{2n \times 1}$  为地震作用列向量.

定义系统的二次型性能指标最小为控制目标,

$$J = \frac{1}{2} \int_0^t [\mathbf{Z}^T(t) \mathbf{Q}\mathbf{Z}(t) + \mathbf{U}^T(t) \mathbf{R}\mathbf{U}(t)] dt + \frac{1}{2} \mathbf{Z}^T(t_f) \mathbf{Q}_0 \mathbf{Z}(t_f), \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{Q}_0$  为对角半正定矩阵;  $\mathbf{Q} = \alpha \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{M} \end{bmatrix}$  为半

正定矩阵;  $\mathbf{R} = \beta \mathbf{I}$  为正定矩阵.  $U(t)$  利用变分法求得:

$$\mathbf{U}(t) = -\mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}\mathbf{Z}(t) = \mathbf{G}\mathbf{Z}(t), \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{G}$  为增益矩阵;  $\mathbf{P}$  由 Riccati 方程求出:

$$\mathbf{P}\mathbf{A} - \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0. \quad (5)$$

最优控制的结果与  $\mathbf{Q}$ 、 $\mathbf{R}$  中  $\alpha$ 、 $\beta$  的取值有关.

由于 LMRD 阻尼力具有一定范围. 因此,需对式(4)的最优控制力  $U(t)$  进行调整,以第  $i$  个 LMRD 为例,

$$F_i = \begin{cases} \operatorname{sgn}(u_i) F_{i,\max}, & U_i \cdot u_i > 0 \text{ 且 } |U_i| < F_{i,\max} \\ U_i, & U_i \cdot u_i > 0 \text{ 且 } F_{i,\min} < |U_i| \leq F_{i,\max} \\ \operatorname{sgn}(u_i) F_{i,\min}, & |U_i| \leq F_{i,\max} \text{ 或 } U_i \cdot u_i \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $F_i$  为 LMRD 的控制力;  $F_{i,\min}$  为 LMRD 的最小阻尼力;  $F_{i,\max}$  为最大阻尼力;  $U_i$  为最优阻尼力;  $u_i$  为 LMRD 两端的位移.

## 2 优化目标

将式(4)代入式(2)和式(3)得:

$$\dot{\mathbf{Z}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{G})\mathbf{Z}(t) + \mathbf{W}\ddot{x}_g(t), \quad (7)$$

$$J = \frac{1}{2} \int_0^t [\mathbf{Z}^T(t) (\mathbf{Q} + \mathbf{Q}_0 + \mathbf{G}^T \mathbf{R}\mathbf{G}) \mathbf{Z}(t)] dt, \quad (8)$$

式(7)可以分解为:

$$\mathbf{Z}(t) = \psi \mathbf{Z}(0) + \int_{t_0}^t \psi(t - \tau) \mathbf{W} d\tau, \quad (9)$$

$$\psi = \exp [(\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{G})t], \quad (10)$$

当撤掉第  $i$  个阻尼器时,位置指示矩阵  $\mathbf{B}$  将产生一损失量  $\Delta \mathbf{B}_i$ ,同时导致二次型性能指标产生损失量  $\Delta J_i$ ,根据泰勒展开式,略去高阶微量,可以求得撤掉第  $i$  个阻尼器时受控结构的二次型性能指标损失量为:

$$\Delta J_i = -\operatorname{tr} [(\mathbf{R}_0 + \mathbf{P}) \mathbf{S}_m \Delta \mathbf{B}_i \mathbf{G}], \quad (11)$$

式中:  $\mathbf{S}_m = \int_0^\infty t \psi^T (\mathbf{Q} + \mathbf{Q}_0 + \mathbf{G}^T \mathbf{R}\mathbf{G}) \psi dt$ ;

$$\mathbf{R}_0 = \mathbf{Z}(0) \mathbf{Z}^T(0); \mathbf{P} = \int_0^\infty \mathbf{W}\mathbf{W}^T dt.$$

式(11)反映了第  $i$  个 LMRD 对结构最优控制的灵敏度.  $\Delta J_i$  越小,说明撤掉的第  $i$  个 LMRD 对受控结构最优控制不敏感或不重要,反之则越敏感或越重要. 因此可根据撤掉阻尼器时得到的  $\Delta J_i$ , 对每个 LMRD 在受控结构中的重要性进行排序. 此外,从式(11)可以看出,  $\Delta J_i$  是在假定受控结构处于弹性状态,并且撤掉 LMRD 后受控结构最优反馈增益矩阵  $\mathbf{G}$  不变的条件下得到的.

## 3 算例及优化过程

采用一栋十二层钢筋混凝土一榀框架对 LMRD 进行位置优化. 结构 1~2 层柱截面尺寸为 0.7 m × 0.7 m; 3~8 层柱截面尺寸为 0.6 m × 0.6 m; 9~12 层柱截面尺寸为 0.5 m × 0.5 m; 边跨长 7.2 m, 梁截面尺寸为 0.3 m × 0.6 m; 中间跨长 5.4 m, 梁截面尺寸 0.25 m × 0.5 m, 结构层高见图 2, 柱底与基础刚性连接.

地震波选用 El-Centro 波(1940 年南北向)、Taft 波(1952 年东西向)两条强震记录 and 人工波,均持时 20 s,地震加速度峰值为 400 gal. 人工波采用三角级数法合成,功率谱密度函数采用金井清模型<sup>[13]</sup>,模型参数  $\omega_g = 15$ 、 $\zeta_g = 0.6$ 、 $S_0 = 74.4$ ,合成的波形见图 3.

## 4 优化结果分析

用 MATLAB 编制了未控及受控结构的弹性时程分析程序,选用 Wilson- $\theta$  法求解结构的动力学方程,并取  $\theta = 1.4$ . 通过程序试算,在 3 条地震波下,控制算法  $\mathbf{Q}$ 、 $\mathbf{R}$  矩阵中  $\alpha = 100$ 、 $\beta = 3 \times 10^{-6}$ .

在上述 3 条地震波下依次撤掉各层 LMRD, 然后根据式(11)计算  $\Delta J_i$ , 并根据计算结果绘制

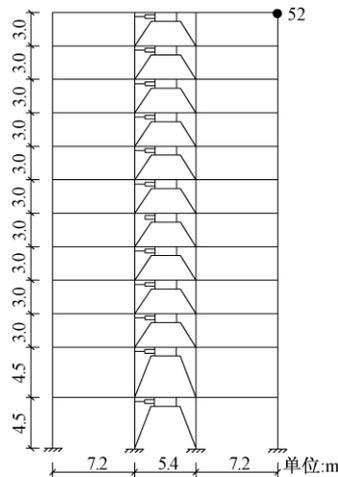


图2 LMRD在钢筋混凝土框架结构中的位置  
Fig.2 Location of LMRD in reinforced concrete frame structure

不同地震波下各层阻尼器对结构最优控制的灵敏

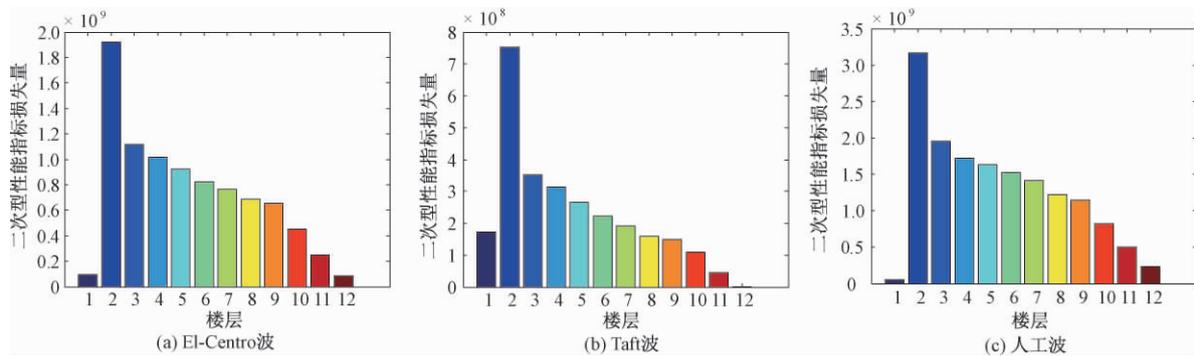


图4 不同地震波下阻尼器对结构最优控制的灵敏度  
Fig.4 The sensitivity of damper on structural optimal control under different seismic waves

此外,在 El-Centro 波作用下,撤掉各层 LMRD 时受控结构二次型性能指标损失量从大到小顺序是:2 层、3 层、4 层、5 层、6 层、7 层、8 层、9 层、10 层、11 层、1 层、12 层. 在 Taft 波和人工波作用下,除 1 层外,撤掉其他层 LMRD 时受控结构二次型性能指标损失量大小顺序与 El-Centro 波作用下的顺序相同. 阻尼器对受控结构最优控制的敏感性大致规律为:除 1 层外,结构下部的阻尼器对受控结构最优控制的灵敏度较大,结构上部的阻尼器对受控结构最优控制的灵敏度较小. 这是因为在地震作用下,框架结构以剪切变形为主,下部结构的剪切变形一般大于上部结构的剪切变形,因此位于结构下部的阻尼器能更好地起到耗能减震作用,其对受控结构最优控制的灵敏度也就越大. 由于算例假定 1 层柱底与基础刚性连接,因此 1 层结构的剪切变形计算结果偏小,进而导致该层阻尼器对受控结构最优控制的灵敏度变小.

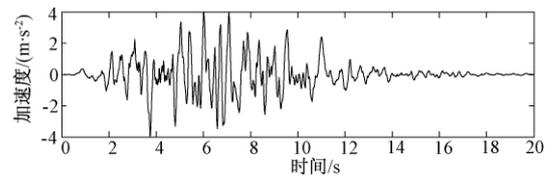


图3 合成的人工地震波  
Fig.3 The synthesis of artificial seismic wave  
度柱状图,如图 4.

从图 4 中可以看出,当撤掉同一阻尼器时,虽然受控结构在不同地震波激励下得到的二次型性能指标损失量的大小相差很大,但在同一地震波下 LMRD 对结构最优控制的敏感性顺序基本相同. 这是因为不同地震波在整个频率段内的能量密度有所差异,它输入到特定受控结构的能量有多有少,并且结构振动能量的总体分布跟结构自身参数有关,并不因地震波的不同而发生较大改变.

### 5 优化结果验证

根据优化结果,按表 1 列出的工况在结构中布置 LMRD,每种工况阻尼器的个数均为 6 个. 在上述 3 条地震波激励下对结构在阻尼器最优布置、任意布置 1、任意布置 2 和未布置(工况 4)工况下进行时程分析,并将计算结果进行了对比分析.

表 1 不同工况下 LMRD 的布置位置

Tab.1 Location of LMRD in structure for different conditions

工况	工况名称	设置阻尼器的楼层					
1	最优布置	2	3	4	5	6	7
2	任意布置 1	1	2	3	4	5	6
3	任意布置 2	1	2	4	5	6	7

图 5 ~ 图 7 分别为 El-Centro 波、Taft 波和人工波激励时,结构在不同工况下顶层 52 号节点的水平位移和加速度时程响应曲线.

从图 5(a) ~ 图 7(a) 可以看出,在整个地震

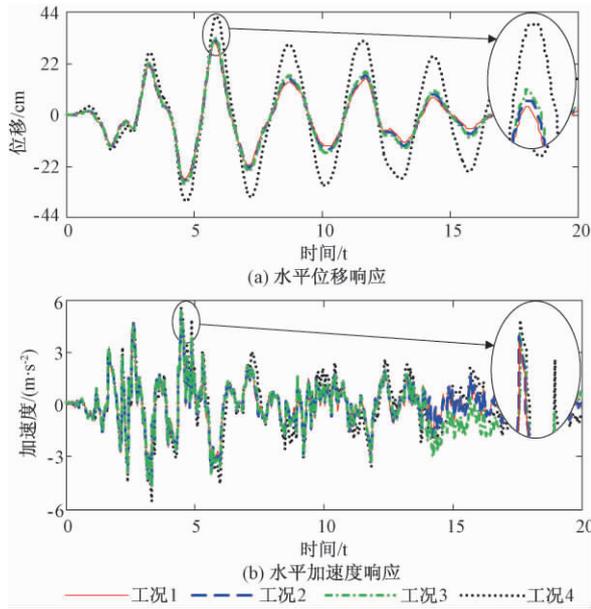


图 5 El-Centro 波下结构顶层 52 号节点的动力响应  
 Fig. 5 Dynamic responses of the No. 52 node on top-floor under El-Centro wave

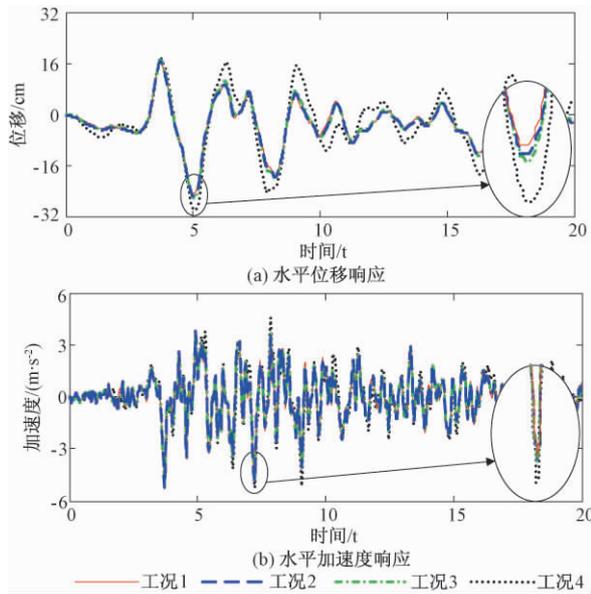


图 6 Taft 波下结构顶层 52 号节点的动力响应  
 Fig. 6 Dynamic responses of the No. 52 node on top-floor under Taft wave

持续时间内,设置 LMRD 结构顶层 52 号节点的水平位移较无控结构明显减小. 在设置 LMRD 的结构中,按工况 1 布置 LMRD 时结构顶层 52 号节点的水平位移响应在整个地震持续时间内最小,然后分别是工况 2 和工况 3. 在 El-Centro 波作用下,工况 1、工况 2、工况 3 和工况 4 对应的 52 号节点最大位移响应分别为 31.00、31.94、33.15 和 41.80 cm. 在 Taft 波作用下,工况 1、工况 2、工况 3 和工况 4 对应的 52 号节点最大位移响应分别为

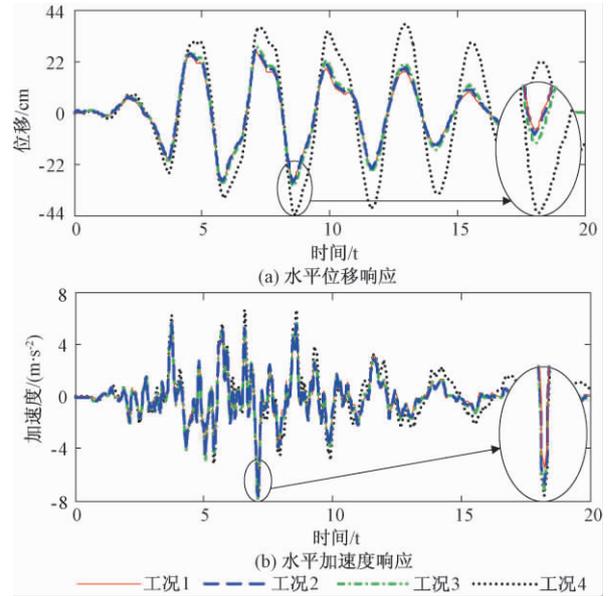


图 7 人工波下结构顶层 52 号节点的动力响应  
 Fig. 7 Dynamic responses of the No. 52 node on top-floor under Artificial wave

25.06、25.54、26.27 和 30.34 cm. 在人工波作用下,工况 1、工况 2、工况 3 和工况 4 对应的 52 号节点最大位移响应分别为 29.07、30.24、32.05 和 43.55 cm. 这说明按优化结果在结构中布置 LMRD 可以使顶层 52 号节点的位移时程响应获得最优的减震控制效果.

从图 5(b) ~ 图 7(b) 可以看出,在整个地震持续时间内,所有工况对应的结构顶层 52 号节点的水平加速度基本相同. 在 El-Centro 波作用下,工况 1、工况 2、工况 3 和工况 4 对应的 52 号节点最大加速度响应分别为 5.16、5.23、5.22 和 5.56  $m/s^2$ . 在 Taft 波作用下,工况 1、工况 2、工况 3 和工况 4 对应的 52 号节点最大加速度响应分别为 5.27、5.23、5.23 和 5.24  $m/s^2$ . 在人工波作用下,工况 1、工况 2、工况 3 和工况 4 对应的 52 号节点最大加速度响应分别为 7.33、7.55、7.65 和 7.95  $m/s^2$ .

表 2 ~ 表 4 分别为 El-Centro 波、Taft 波和人工波激励时,不同工况对应的楼层最大位移和加速度. 可以看出,在 El-Centro 波、Taft 波和人工波作用下,与未控结构(工况 4)相比,加入 LMRD 后结构各层的最大位移均得到不同程度的降低,其中,工况 1 对应的结构每层最大位移响应降幅最大,其次结构每层最大位移响应降幅较大的分别是工况 2 和工况 3. 这说明按优化结果在结构中布置 LMRD 可以使结构的位移响应获得最优的减震控制效果. 此外,从表 2 ~ 表 4 中还可以看出: 在 3 条地震波作用下,与未控结构(工况 4)相

比,加入 LMRD 后结构各层的最大加速度响应变化并不明显,且无规律可循。

表 2 El-Centro 波下不同工况对应的楼层最大动力响应

Tab. 2 The maximum dynamic responses of each floor in different conditions under El-Centro wave

楼层	最大位移/cm				最大加速度/( $m \cdot s^{-2}$ )			
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
1	2.63	2.69	2.75	3.55	3.35	3.50	3.61	3.40
2	7.47	7.60	7.85	10.03	5.41	5.75	5.55	5.65
3	10.60	10.77	11.24	14.21	5.41	5.64	5.64	5.59
4	13.35	13.53	14.13	17.89	4.83	4.89	5.02	4.95
5	15.84	16.01	16.66	21.10	4.47	4.58	4.75	5.19
6	18.17	18.31	19.03	23.85	4.97	4.95	4.98	4.98
7	20.48	20.69	21.49	26.88	5.06	5.03	5.03	5.19
8	22.97	23.39	24.30	30.66	4.85	4.86	4.85	5.16
9	25.74	26.35	27.37	34.63	4.49	4.47	4.44	4.61
10	28.12	28.88	29.98	37.91	4.17	4.26	4.25	4.62
11	29.90	30.76	31.94	40.33	4.73	4.80	4.79	5.23
12	31.00	31.94	33.15	41.80	5.16	5.23	5.22	5.56

表 3 Taft 波下不同工况对应的楼层最大动力响应

Tab. 3 The maximum dynamic responses of each floor in different conditions under Taft wave

楼层	最大位移/cm				最大加速度/( $m \cdot s^{-2}$ )			
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
1	2.52	2.60	2.69	3.10	1.67	1.90	1.62	1.70
2	6.93	7.08	7.33	8.49	4.28	4.23	4.13	4.35
3	9.76	9.86	10.25	11.79	4.99	4.98	5.07	5.21
4	12.07	12.24	12.71	14.60	4.85	4.86	5.02	5.21
5	14.15	14.35	14.86	17.07	4.98	4.94	5.00	4.88
6	16.09	16.28	16.81	19.34	5.02	5.01	5.03	4.97
7	17.91	18.13	18.67	21.49	4.89	4.89	4.87	4.95
8	19.65	19.97	20.54	23.58	4.89	4.86	4.84	4.97
9	21.52	21.91	22.51	25.82	4.99	5.01	5.12	5.07
10	23.11	23.54	24.17	27.82	5.13	5.16	5.17	5.15
11	24.30	24.76	25.44	29.36	5.23	5.22	5.23	5.17
12	25.06	25.54	26.27	30.34	5.29	5.24	5.25	5.33

表 4 人工波下不同工况对应的楼层最大动力响应

Tab. 4 The maximum dynamic responses of each floor in different conditions under Artificial wave

楼层	最大位移/cm				最大加速度/( $m \cdot s^{-2}$ )			
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
1	3.04	3.25	3.38	4.84	1.97	1.99	1.93	1.98
2	8.32	8.85	9.29	13.27	4.32	4.34	4.26	4.24
3	11.44	12.23	12.86	18.33	5.64	5.68	5.63	5.61
4	13.87	14.69	15.62	22.38	6.13	6.21	6.20	6.26
5	15.73	16.62	17.70	25.57	5.65	5.75	5.79	5.92
6	17.10	17.93	19.14	28.23	5.31	5.23	5.23	5.69
7	19.33	20.05	21.50	31.46	5.01	4.98	5.01	5.41
8	22.04	22.53	24.04	34.45	4.46	4.55	4.59	5.05
9	24.76	25.29	26.64	37.49	4.45	4.61	4.59	5.01
10	26.79	27.39	28.92	40.11	5.23	5.23	5.27	5.72
11	28.13	29.01	30.82	42.19	6.35	6.45	6.53	6.93
12	29.07	30.24	32.05	43.56	7.33	7.55	7.65	7.95

## 6 结论

(1) LMRD 对地震作用下结构的水平位移响应控制效果较为明显,但对加速度响应控制效果不明显.

(2) 以撤掉 LMRD 产生的结构最优二次型性能指标损失量作为优化目标时,LMRD 在结构中的最优位置取决于结构自身参数,与地震波类型关系不大.

(3) 与任意布置相比,LMRD 采用最优布置(工况 1)时,可以最大限度降低结构的水平位移响应,说明优化结果准确、有效.

### 参考文献:

- [1] ZHANG X C, XU Z D. Testing and modeling of a CLEMR damper and its application in structural vibration reduction [J]. *Nonlinear dynamics*, 2012, 70 (2): 1575 – 1588.
- [2] 张香成, 张旭, 徐赵东, 等. 配有铅-磁流变阻尼器的高层 RC 框架结构非线性动力分析 [J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(4): 119 – 125.
- [3] TAKEWAKI I. Optimal damper placement for minimum transfer function [J]. *Earthquake engineering and structural dynamics*, 1997, 26(11): 1113 – 1124.
- [4] POHORYLES D A, DUFFOUR P. Adaptive control of structures under dynamic excitation using magnetorheological dampers: an improved clipped-optimal control algorithm [J]. *Journal of vibration and control*, 2015, 21(13): 2569 – 2582.
- [5] ASKARI M, LI J C, SAMALI B. Cost-effective multi-objective optimal positioning of magnetorheological dampers and active actuators in large nonlinear structures [J]. *Journal of intelligent material systems and structures*, 2017, 28(2): 230 – 253.
- [6] 贝伟明, 李宏男. 磁流变阻尼器在结构减震控制中的位置优化研究 [J]. *工程抗震与加固改造*, 2006, 28(3): 73 – 78.
- [7] 滕军. 相邻结构间控制器位置及控制律的降阶优化方法研究 [J]. *建筑结构学报*, 2003, 24(4): 17 – 24.
- [8] 阎石, 宁欣, 王宁伟. 磁流变阻尼器在受控结构中的优化布置 [J]. *地震工程与工程振动*, 2004, 24(3): 175 – 178.
- [9] 展猛, 王社良, 朱熹育, 等. 空间桁架模型压电摩擦阻尼器半主动优化控制 [J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(8): 50 – 56.
- [10] 闫维明, 杲晓龙, 谢志强. 基于复杂三维有限元模型和鱼群算法的平面不规则结构中位移型阻尼器参数和位置的优化方法 [J]. *工程力学*, 2016, 33(9): 155 – 163.
- [11] 欧进萍. *结构振动控制-主动、半主动和智能控制* [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [12] 刘本学, 蔺超云, 郭沛东, 等. 基于 MATLAB 的汽车线性最优控制主动悬架仿真研究 [J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2016, 37(5): 72 – 76.
- [13] 彭凌云, 周锡元, 李小军. 对已有强震地面运动功率谱模型的改进 [J]. *北京工业大学学报*, 2011, 37(3): 388 – 394.

## Position Optimization of Lead Magnetroheological Damper in Energy Dissipation Structural

ZHANG Xiangcheng<sup>1</sup>, CHEN Na<sup>1</sup>, LUO Fang<sup>2</sup>, ZHAO Jun<sup>1</sup>, XU Zhaodong<sup>3</sup>

(1. School of Mechanics and Engineering Science, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Zhengzhou Institute of Finance and Economics, Zhengzhou 450000, China; 3. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** In this paper, Lead Magnetroheological damper, LMRD, was taken as a kind of new damper designed to reduce effectively the seismic response of structures. The position optimization of LMRD in structure was to improve the damping effect of controlled structure in LMRD, and it was taken the optimal structural quadratic performance index loss produced from removing damper as optimization goal at the same time. The result showed that the optimal position of LMRD in structure was depended on the structural properties and parameters, which had little relevance to the type of seismic wave, when considering the loss of structural optimal quadratic performance index without LMRD as the optimization objective. Also, LMRD could control the horizontal displacement response of structure, under the seismic load, effectively, rather than the acceleration.

**Key words:** lead magnetroheological damper; optimal placement; reinforced concrete frame structure; quadratic performance index; dynamic response

文章编号: 1671-6833(2018)02-0050-06

## SHPB 恒应变率加载试验技术研究

梁书锋, 武 宇, 刘殿书, 李晓璐, 张会歌

(中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 北京 100083)

**摘 要:** 基于对 SHPB 试验系统数据处理原则和 SHPB 试验装置在岩石材料中应用条件等问题的全面分析, 得出了实现恒应变率加载能够有效地解决 SHPB 试验装置在进行岩石类材料冲击试验中存在的应力不均匀和弥散效应等问题的结论; 确定了柱锥形子弹是实现恒应变率加载的有效手段; 对总长 400 mm 的柱锥形子弹的不同形状参数进行模拟分析, 得出了实现花岗岩恒应变率加载的最优柱锥形子弹大小端面比为 0.7, 试件长径比为 0.75~0.82, 子弹最优锥长为 300 mm. 通过与传统圆柱子弹加载波形对比, 从数值模拟和试验两个方面验证了所设计的柱锥形子弹实现了对花岗岩恒应变率的冲击加载.

**关键词:** SHPB; 恒应变率; 应力波; 动态性能

**中图分类号:** O348

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.02.013

### 0 引言

自 1949 年 Kolsky 提出分离式 Hopkinson 压杆以来<sup>[1]</sup>, 这一试验技术得到了长足的发展并日趋完善<sup>[2-4]</sup>, 成为研究材料在高应变率下力学行为的一项经典的测试技术, 恒应变率加载对研究高应变率下材料的本构关系具有非常重要的意义, 因此开展恒应变率试验技术方面的研究显得尤为重要.

在众多实现恒应变加载条件的技术中, 脉冲整形技术早就进入研究者的视线, 并形成了大量的研究成果. 文献 [5] 提出脉冲整形器思想, 通过在霍普金森扭杆冲击端粘贴薄片形整形片的方法, 获得较为理想的试验效果. 国内的徐明利、卢芳云等也从脉冲整形器角度对试样中的应力平衡进行了大量研究. 这些研究表明, 选择合适的整形器能够解决传统霍普金森压杆存在的应力不平衡问题, 而且通过对不同材料不同厚度的整形器进行组合可以在一定程度上实现恒应变率加载<sup>[6-8]</sup>. 文献 [9] 将脉冲整形技术应用在霍普金森压杆上, 提高和改善了岩石应力-应变曲线初始部分的分辨率和精度. 文献 [10] 尝试通过改变子弹的几何形状来研究脆性材料的大尺寸霍普金

森压杆冲击力学试验, 研究表明, 采用半正弦加载波形对研究脆性材料动态力学性能非常有利, 这种加载波形能够有效地消除应力波在波导杆中的弥散, 其平缓的上升沿有足够的时间保证脆性岩石试件建立应力平衡, 并通过数值模拟及电算程序得到子弹的形状. 李夕兵等<sup>[11-14]</sup> 针对试样中应力不均匀、波形弥散等方面的问题, 从改变撞击子弹的形状入手进行了深入的研究, 研究得出双锥形子弹产生的半正弦加载波不仅消除了波形弥散效应, 而且较长的上升沿时间为试样中建立应力均匀条件提供了充足的时间, 进而得出半正弦波是岩石类材料冲击性能试验的合理加载波形. 文献 [15] 认为利用波形整形可减小 Hopkinson 杆实验在撞击过程中产生的高频振荡以及实现试样在受载过程中的恒应变率加载, 并介绍了波形整形技术在 Hopkinson 杆的动态压缩、拉伸、巴西圆盘、弯曲断裂等试验中需注意的问题. 文献 [16] 基于试验和数值模拟方法, 对脆性材料进行 SHPB 试验, 结果表明, 应用脆性材料的 SHPB 试验应考虑惯性引起的径向围压的影响.

上述研究表明, SHPB 实现恒应变率加载主要通过添加整形器和改变子弹形状两种方法, 但是添加整形器实现恒应变率加载在试验重复性方

收稿日期: 2017-10-10; 修订日期: 2017-12-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10272109); 国家教育部高等学校博士学科点专项基金资助项目(20060290009); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2010Q105)

作者简介: 梁书锋(1983—), 男, 山东德州人, 中国矿业大学讲师, 博士, 从事爆破工程和岩石动力学研究, E-mail: spring2008119@sina.com.

面有缺陷, 而通过改变子弹形状来实现恒应变率加载则是可行的. 因此笔者从改变子弹形状入手, 通过数值模拟和试验验证的手段, 研究 SHPB 恒应变率加载技术.

### 1 恒应变率加载实现的判据

“二波法”计算应变率,

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2C_0}{L}\varepsilon_r(t), \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon_r$  为杆中反射波的应变. 若要实现恒应变率加载, 式(1)中  $\varepsilon_r(t)$  应为常数, 在理想状态下波形曲线中反射波形会出现如图 1 所示的平台段.

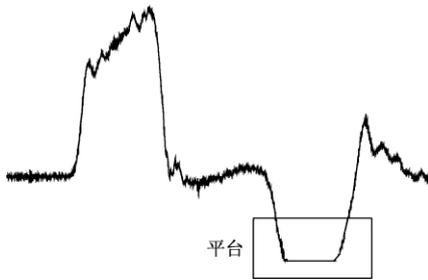


图 1 反射波平台段示意图

Fig. 1 Schematic diagram of reflection wave platform period

笔者所在的课题组在  $\Phi 75$  mm 钢杆系统基础上做了关于异形子弹的相关试验研究, 并得出了以下结论: ①入射波持续时间由子弹的总长度决定, 不会因冲击速度的变化而改变. 变截面子弹能有效地改变入射波形, 随着撞击端由等截面缩小为变截面, 入射波应力峰值降低, 上升区段趋于平缓, 振荡现象减少, 整体趋向钟形波. ②在理想状态下采用柱锥形子弹应该存在平台段, 平台段与入射波宽度的比值与柱段和子弹长度的比值大致相当, 但当长度比值小于等于  $1/3$  平台段消失, 柱锥形子弹只能在固定的时间脉冲内改变上升沿的形状. ③子弹前后形状会对波形造成不同的影响, 前端的形状改变上升沿, 尾部的形状改变下降沿; 前部锥长越长, 波形越平缓, 振荡现象也越少, 但相应的峰值应力会下降. 该项研究为笔者建立  $\Phi 50$  mm 霍普金森压杆恒应变率加载技术提供了思路与数据.

### 2 恒应变率加载的实现

笔者研究恒应变率是基于异形子弹方法开展的, 采用从双试件处理方法演变而来的柱锥形子弹整形技术, 在研究过程中发现这种柱锥形子弹需要满足两个基本原则. ①锥形的小端面截面与

大端面截面面积之比不能过小, 因为如果锥前端界面直径过小入射波便不再是一维的, 而且有可能在脉冲头部到达锥顶之前产生足够大的拉应力, 最终导致锥顶部分断裂, 因此在设计锥形杆的过程中应控制锥体大端面面积与小端面面积的比值, 具体的比值将在下面研究中确定. ②柱锥形子弹所产生的脉冲波上升沿持续时间应保持一定的长度以满足试件应力平衡要求. 以下将对两个原则从理论、数值计算和试验方面进行讨论.

首先是子弹长度的选择, 从笔者所用花岗岩试件的最大长度  $L_s = 41$  mm 为例, 其声速  $5\,069$  m/s, 计算得出子弹长度  $L = 243$  mm. 考虑到今后对其它种类岩石的适用性, 将子弹长度值固定为  $400$  mm, 而柱锥子弹大端面直径设定为  $50$  mm. 柱锥形子弹所产生的脉冲波形是二级分阶段的加载波形, 因此采用柱锥形子弹来实现恒应变率具备合理性. 其设计应服从以下两个原则.

#### 2.1 锥体两端面大小比例关系

图 2 为强间断波阵面传播图.

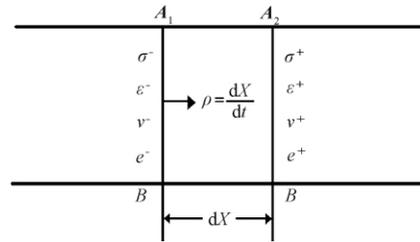


图 2 强间断波阵面传播图

Fig. 2 Discontinuous wave front propagation graph

根据波阵面上的质量守恒定律, 得出公式(2):

$$(\sigma^+ - \sigma^-) A_0 dt = \rho_0 A_0 dX (v^+ - v^-). \quad (2)$$

经简化后可得:

$$[\sigma] = -\rho_0 c [v]. \quad (3)$$

应力波在变截面杆中传播的过程中, 应力波经过截面发生突然变化的界面时, 将会发生反射和透射, 如图 3 所示.

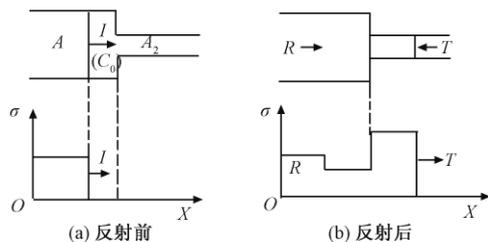


图 3 变截面杆中波的反射与透射

Fig. 3 Reflection and transmission of variable cross-section wave

图3为变截面杆中波的传播反射.根据牛顿第三定律, $A_1$ 、 $A_2$ 两个面上所受的力相等.于是有

$$A_1(\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_R) = A_2(\Delta\sigma_T). \quad (4)$$

根据连续条件, $A_1$ 、 $A_2$ 面接触的地方反射透射后质点速度相等,则有

$$\Delta v_1 + \Delta v_R = \Delta v_T. \quad (5)$$

将式(3)带入式(5)可得

$$\frac{\Delta\sigma_1}{(\rho_0 C_0)_1} - \frac{\Delta\sigma_R}{(\rho_0 C_0)_1} = \frac{\Delta\sigma_T}{(\rho_0 C_0)_2}. \quad (6)$$

联立式(4)、(6)求解可得到:

$$\begin{cases} \Delta\sigma_R = F(\Delta\sigma_1); \\ \Delta v_R = -F(\Delta v_1), \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \Delta\sigma_T = T(\Delta\sigma_1)A_1/A_2; \\ \Delta v_T = nT(\Delta v_1), \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} n = (\rho_0 C_0 A_1) / (\rho_0 C_0 A_2); \\ F = \frac{1-n}{1+n}; \\ T = \frac{2}{1+n}. \end{cases} \quad (9)$$

当界面两侧波阻抗 $\rho_0 C_0 A$ 相同时,应力波仅仅因截面的变化引起反射和透射,此时 $n = A_1/A_2$ .则 $\Delta\sigma_T = T_A \Delta\sigma_1$ .当应力波由杆的大截面传入小截面时, $F = (1-n)/(1+n)$ 小于零,此时杆中透射应力波大于入射应力波.锥形杆可近似看做是一系列面积发生变化的阶梯杆,当压缩脉冲从大端面向小端面传播时,每通过一个截面积变化的面时,透射波都会增强 $T = 2/(1+n)$ 倍,同时反射一个反方向的拉伸波,该拉伸波由小截面向大截面传播过程中将反射一个反方向的增强拉伸.如此反复,随着压缩脉冲向锥顶传播,脉冲头部压缩区的应力波幅值将越来越大.

为进一步验证以上结论,建立长度为400 mm的柱锥杆有限元模型进行数值计算,圆柱段暂定为100 mm,大小端面直径分别为50、35 mm.入射杆、透射杆长度都采用2 000 mm.计算时子弹的加载速度为5 m/s,计算完成后沿柱锥杆长度方向等距离提取单元的应力时程曲线,子弹模型及单元应力时程曲线如图4、图5所示.



图4 柱锥子弹有限元模型

Fig.4 The model of cylinder cone bullet

从图5可以得出,锥前端应力为锥后端应力值的2倍多,这与数值计算结果相近.如果锥前端

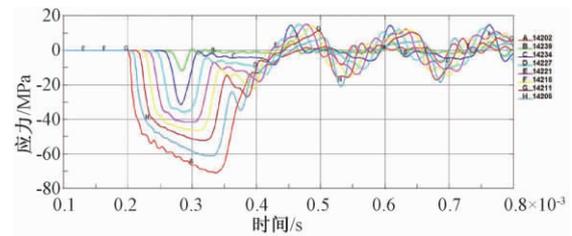


图5 单元应力时程曲线

Fig.5 Element stress time history curve

界面直径过小就有可能在脉冲头部到达锥顶之前产生足够大的拉应力,最终导致锥顶部分断裂,因此在设计锥形杆的过程中应控制锥体大端面面积与小端面面积的比值.从另一个方面,当引入的锥形子弹小端面截面积较小时会造成波的弥散,不满足霍普金森压杆的一维假定.同时根据试验选用花岗岩屈服强度98~245 MPa,以及笔者拟选用锥杆材料7075铝镁合金屈服强度503 MPa,是花岗岩屈服强度的2.05倍,大小截面面积之比为4时,达到初始应力的1.84倍,因此确定直径比为2.由于数例采用阶梯杆近似计算,实际锥形杆中满足要求的直径比小于2.根据数值计算结果,大端面与小端面面积之比不小于4/9,即直径之比大于2/3.

## 2.2 加载波上升沿时间

传统的霍普金森压杆实验采用圆柱形子弹直接撞击加载,加载波形近似方波,上升前沿约为10~20  $\mu\text{s}$ ,对于金属类高阻抗材料,其弹性波速度一般在5 000 m/s左右,即使试件长度超过10 mm,也能在加载波的上升时间内达到应力平衡.对于低阻抗的岩石类材料,材料的波速可能很低,加之所要求的试件长度较长,因此所需达到应力平衡的时间大于20  $\mu\text{s}$ .文献[17]的研究表明,加载波在试件中来回反射3~6次以上可以达到试件的应力平衡要求.对于岩石类材料,例如本研究中的花岗岩,平均波速为5 069 m/s,试件长度为40 mm,据此计算, $t_0$ 为弹性波通过试件的时间,对于花岗岩 $t_0 = 7.89 \mu\text{s}$ ,所以第一段上升沿时间应不小于23.67~47.34  $\mu\text{s}$ .

综上确立柱锥杆两原则:①子弹打击端面与入射杆受击端面直径比值不小于2/3;②入射波一段上升时间大于23.67~47.34  $\mu\text{s}$ ,以满足试件中应力平衡要求.按照此原则设计的子弹如图6所示.

实际使用中,在子弹上面夹套2个聚四氟乙烯环以保证子弹冲击过程中的稳定性.

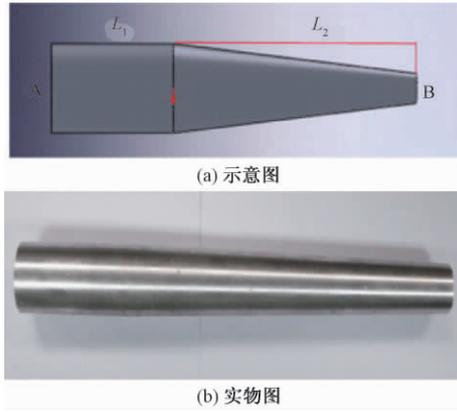


图 6 设计的柱锥形子弹图

Fig. 6 The designed conical-cylindrical bullet

表 1 混凝土 HJC 本构材料参数表

Tab. 1 HJC constitutive material parameters of concrete

参数	取值	参数	取值	参数	取值	参数	取值
密度 / (kg·m <sup>-3</sup> )	2440	$F_c$ / GPa	0.098	$E_{fmin}$	0.01	$K_3$	208
A	0.79	$S_{max}$	7	$P_{crush}$	0.016	$P_{lock}$	0.8
B	1.6	剪切模量 / GPa	14.86	$\mu_{crush}$	0.001	$\mu_{lock}$	0.1
N	0.61	$D_1$	0.04	$K_1$	85	T	0.004
C	0.007	$D_2$	1	$K_2$	-171		

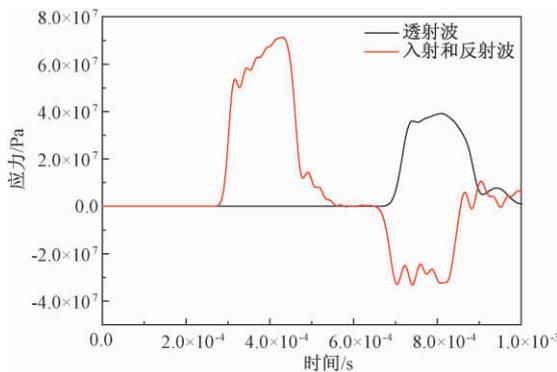


图 7 混凝土 Mat159 在 50-35-300 子弹冲击下波形图 (v = 10 m/s)

Fig. 7 Impact waveform within concrete Mat159 under 50-35-300 bullet (v = 10 m/s)

试样在试验过程中的应变率由入射杆中反射应力波的时间历程确定,也就是说,如果霍普金森压杆试验获得的反射波测试信号除去上升、下降沿外大部分保持平台状,即可认为试样冲击变形过程是在恒应变率条件下发生的,由此可以判定该形状的子弹实现了对试件的冲击恒应变率加载。

### 3.2 试验验证

利用设计的柱锥形子弹对花岗岩试件进行冲击,得出不同冲击速度下波形图,观察上述反射波平台是否出现,并将波形图与原圆柱形子弹不同速度冲击波形图进行对比。图 8、图 9 为柱锥形子弹不同速度冲击波形图。

## 3 恒应变率加载验证

### 3.1 数值计算验证

利用有限元数值分析来验证所设计的柱锥形子弹能够实现岩石类材料的恒应变率加载,数值分析选用描述混凝土本构模型的 HJC 进行计算.其本构模型参数如表 1 所示。

混凝土强度为 30 MPa,子弹以 10 m/s 速度对混凝土进行冲击加载,获取波形如图 7 所示。

从图 7 可以看出,在端面形状 A = 50 mm, B = 35 mm,锥长 300 mm 的子弹冲击下,试件的反射波形平台虽有震荡但总体呈现出直线形式,

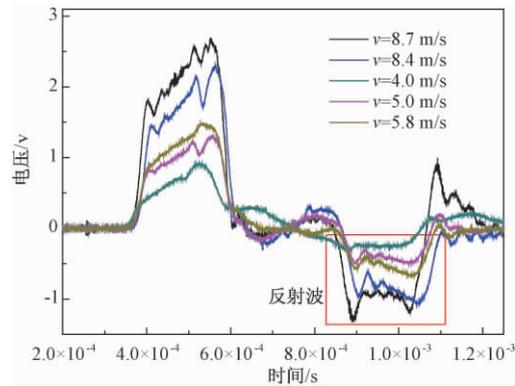


图 8 柱锥形子弹不同速度冲击波形图

Fig. 8 Shock wave of different velocities in cylinder-cone bullet

从图 8~9 可以看出,不同冲击速度下锥形杆获得的反射脉冲基本呈平台状(红色虚方框中)。对于相同的试件,圆柱子弹不同冲击速度产生的反射脉冲形状为“v”字形.通过对比可以看出,笔者设计的柱锥形子弹改善了原圆柱子弹冲击反射波的形状,实现了反射波呈平台状,即实现了冲击恒应变率加载.需要说明的是,试验中所呈现的“平台段”并非本文图 1 所示绝对的平台,这是由于输入、输出杆存在的弯曲变形造成的<sup>[18]</sup>.另外,从统计学的角度来看,在笔者所在教研室该类试验所获得的大量波形中,如图 8 中所示反射波平台状波形所出现的比例占到 77.7%,因此认为恒

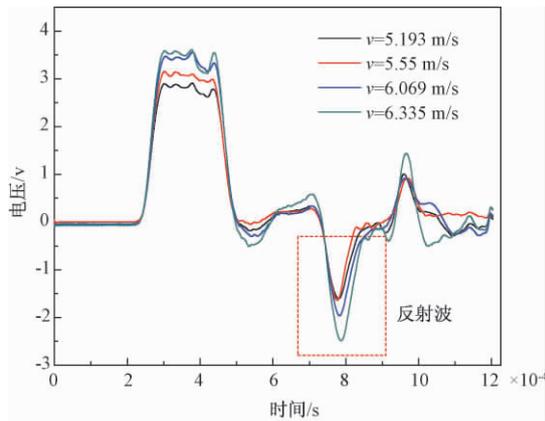


图9 圆柱形子弹不同速度冲击波形  
Fig.9 Shock wave of different velocities in  
cylinder bullet

应变率冲击试验达到良好水平,实现了恒应变率加载。

#### 4 结论

(1) 对传统 SHPB 试验系统、数据处理原则和大直径 SHPB 装置在岩石材料中应用的条件等方面进行了分析,由此确定本试验花岗岩的试件长径比为 0.75 ~ 0.82; 并得出实现恒应变率加载是解决大直径 SHPB 装置弥散效应、应力均匀等问题的有效手段。

(2) 通过对 SHPB 试验入射波整形技术的分析研究,确定了从双试件法演变而来的柱锥形子弹是实现恒应变率加载的有效手段。利用应力波理论及数值计算建立了柱锥形子弹所应遵循的两个原则: ①锥体小端面与大端面直径之比应大于 2/3; ②加载波上升沿时间应满足应力波在试件中传播 3 ~ 6 次时间。根据计算,笔者所采用的花岗岩上升沿时间应大于 23.67 ~ 47.34  $\mu\text{s}$ 。

(3) 运用数值计算手段对总长度 400 mm 柱锥形子弹的不同形状参数进行数值分析,得出适合花岗岩最优柱锥形子弹端面比,小端面直径与大端面直径比为 0.7,该值大于 2/3 满足要求,据此确定大端面直径为 50 mm,小端面直径为 35 mm,并进一步对子弹不同锥长大小进行分析,结合理想弹塑性加载波形,确定最优的锥长为 300 mm。

(4) 从数值模拟和试验两个角度出发,通过与传统圆柱子弹加载波形对比,验证了所设计的柱锥形子弹实现了对花岗岩的恒应变率冲击加载。

#### 参考文献:

- [1] KOLSKY H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading [J]. Proceedings of the physical society of london, 2002, 62 (11): 676 - 700.
- [2] FOLLANSBEE P S,FRANTZ C. Wave propagation in the split hopkinson pressure bar [J]. Journal of engineering materials and technology,1983,105(1): 61 - 66.
- [3] GORHAM D A. A numerical method for the correction of dispersion in pressure bar signals [J]. Journal of physics E: scientific instrumentation, 1983, 16(6): 477 - 479.
- [4] GONG J C, MALVERN L E, JENKINS D A. Dispersion investigation in the split hopkinson pressure bar [J]. Journal of engineering materials and technology, 1990,112(3): 208 - 214.
- [5] DUFFY J, CAMPBELL J D, HAWLEY R H. On the use of a torsional split hopkinson bar to study rate effects in 1100 - 0 aluminum [J]. Journal of applied mechanics,1971, 38(1): 83 - 91.
- [6] FREW D J, FORRESTAL MJ, CHEN W. Pulse shaping techniques for testing elastic-plastic materials with a split Hopkinson pressure bar [J]. Experimental mechanics, 2005, 45(2): 186 - 195.
- [7] FREW D J,FRORRESTABL MJ,CHEN W. Pulse shaping techniques for testing brittle material with a split Hopkinson pressure bar [J]. Experimental mechanics, 2002, 42(1): 93 - 106.
- [8] 卢芳云, W. Chen, D. J. Frew. 软材料的 SHPB 实验设计 [J]. 爆炸与冲击,2002,22(1): 15 - 19.
- [9] CHRISTENSEN R J, SWANSON S R, BROWN W S. Split-Hopkinson-bar tests on rocks under confining pressure [J]. Experimental mechanics, 1972,33(8): 508 - 513.
- [10] LOK T S, LI X B, LIU D, et al. Testing and response of large diameter brittle materials subjected to high strain rate [J]. Journal of materials in civil engineering,2002,14(3): 262 - 269.
- [11] 李夕兵,刘德顺,古德生. 消除岩石动态实验曲线振荡的有效途径 [J]. 中南工业大学学报,1995, 26(4): 457 - 460.
- [12] 刘德顺,李夕兵,杨襄璧. 截面连续变化冲锤与杆撞击的特征线数值计算法 [J]. 中南工业大学学报, 1996, 27(5): 591 - 595.
- [13] 李夕兵,刘德顺,刘爱华. 冲击机械合理加载波形的研究 [J]. 中南工业大学学报,1998, 29(2): 116 - 119.
- [14] 杨卫忠,王博. 基于细观损伤的岩石受压本构关系模型研究 [J]. 郑州大学学报(工学版),2010,31(6): 6 - 9.
- [15] 果春焕,周培俊,陆子川,等. 波形整形技术在 Hop-

- kinson 杆实验中的应用 [J]. 爆炸与冲击, 2015, 35 (6): 881 - 887.
- [16] 卢玉斌, 武海军, 赵隆茂. 脆性材料 SHPB 实验中实现近似恒应变率加载研究 [J]. 西南科技大学学报, 2013, 28(3): 50 - 56.
- [17] RAVICHANDRAN G, SUBHASH G. Critical appraisal of limiting strain rates for compression testing of ceramics in a split hopkinson pressure bar [J]. Journal of American ceramic society, 1994, 77: 263 - 267.
- [18] 叶仁传, 天利, 沈超明. 霍普金森压杆 (SHPB) 实验波形震荡问题的影响与解决方法 [J]. 科学技术与工程, 2014, 14(1): 1 - 4, 9.

## Study on SHPB Techniques of Constant Strain Rate Loading

LIANG Shufeng, WU Yu, LIU Dianshu, LI Xiaolu, ZHANG Huige

(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Constant strain rate loading could effectively solve the stress uniformity and the dispersion effect of the SHPB device in the application of rock-like materials based on a comprehensive analysis of the testing technology on the SHPB data processing principle and the conditions which SHPB device applied in rock material. It was determined that conical-cylindric bullet was an effective way to realize constant strain rate loading. An analysis of different shape parameters was made by means of numerical calculation for the total length of 400 mm conical-cylindric bullet. It was seemed that the optimal area ratio between small end-face and large end-face was 0.7, and the specimen length-diameter ratio of granite was between 0.75 and 0.82. The optimal cone length of the bullet is 300mm. By comparing the waveform with traditional cylindrical bullets, it was proved that the designed conical-cylindric bullet could achieve the constant strain-rate loading of granite was verified from two aspects of numerical simulation and experiments.

**Key words:** SHPB; constant strain rate; stress wave; dynamic behaviors

文章编号: 1671-6833(2018)02-0056-05

## 棕麻纤维加筋砂的三轴试验研究

马强, 邢文文, 李丽华, 胡兴

(湖北工业大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430068)

**摘要:** 利用室内三轴试验研究棕麻纤维加筋土的应力-应变关系特性以及强度特征, 探讨不同棕麻纤维含量和不同围压下棕麻纤维加筋土主应力差以及抗剪强度指标的变化规律, 分析筋材在土体剪切过程中的阻抗机理. 试验结果表明: 棕麻纤维加筋土的强度和抗变形能力较纯砂的有显著增强; 与纯砂相比, 棕麻纤维加筋土的抗剪强度指标有所变化, 内摩擦角和黏聚力均增加, 但内摩擦角增加幅度较小, 黏聚力增幅较大; 在试样含水率和纤维长度一定的情况下, 棕麻纤维加筋土的主应力差、抗剪强度以及抗剪强度指标随着棕麻纤维百分含量的增加呈现先增加后减小的变化趋势, 且存在最佳棕麻纤维含量值.

**关键词:** 三轴试验; 加筋土; 棕麻纤维; 应力-应变关系; 强度指标

**中图分类号:** TU472.2      **文献标志码:** A      doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.02.009

### 0 引言

在土体中使用筋材加筋可以限制土体变形, 增加土体的强度<sup>[1-2]</sup>, 已有的加筋土研究侧重筋材加筋效果. 李金和等<sup>[3]</sup>总结了近20年国内外纤维加筋土研究成果, 介绍了研究纤维加筋土常用试验和理论方法. Wu等<sup>[4]</sup>对剑麻纤维加筋土进行了三轴试验分析, 璩继立等<sup>[5]</sup>运用直剪、无侧限压缩等试验方法研究得到了不同棕榈尺寸和混合方式等情况下加筋黏土的强度特性. 文献[6]研究了随机分布聚丙烯纤维加筋土的力学性能, 邓友生等<sup>[7]</sup>利用无侧限压缩试验研究了聚丙烯纤维对膨胀土强度的影响. 卢浩<sup>[8]</sup>采用模拟试验研究了麦秆纤维加筋边坡在降雨侵蚀下的力学特性, 表明麦秆加筋提高了土体的抗剪强度, 降低了坡面土体的渗透性. 施利国<sup>[9]</sup>和刘芳<sup>[10]</sup>运用三轴试验分别研究了聚丙烯纤维和玻璃纤维加筋土的特性及加筋效果. 目前, 天然纤维加筋尚缺少大范围的试验研究, 理论还不完善. 张艳美等<sup>[11]</sup>试验研究了多因素影响的土工合成纤维土补强机理. 王磊<sup>[12]</sup>采用线弹性模型和剑桥模型, 建立了纤维加筋土的

本构模型, 得到加筋土应力-应变增量表达式, 并结合三轴试验进行验证. 吴燕开<sup>[13]</sup>对剑麻纤维加筋土进行无侧限抗压试验和直接剪切试验, 研究了随机分布剑麻纤维加筋土力学性能. 文献[14]研究了随机分布剑麻纤维的加筋效果, 试验表明剑麻纤维能够增加土体的强度, 提高土体的工程性质. 综上, 棕麻纤维具有一定的强度和韧性, 可作为加筋材料, 目前关于棕麻纤维加筋的研究相对较少.

笔者通过控制纤维含量, 开展不同围压条件下的室内不固结不排水三轴试验, 研究棕麻纤维含量对棕麻纤维加筋土强度的影响规律, 分析棕麻纤维加筋砂的力学特征, 并揭示其工作机理.

### 1 试验材料和方法

#### 1.1 试验材料

试验用砂的基本参数见表1. 加筋材料为棕麻纤维, 取自湖北工业大学校园内棕麻树, 通过系列拉伸试验得到纤维轴向拉力-变形关系曲线, 并对其进行均值化处理, 得到棕麻纤维基本参数见表2.

收稿日期: 2017-09-27; 修订日期: 2017-12-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678223); 湖北省教育厅重点资助项目(D20171402); 湖北工业大学绿色工业科技引领计划项目(YXQN2017001)

作者简介: 马强(1983—), 男, 湖北丹江口人, 湖北工业大学副教授, 博士, 主要从事加筋土方面的研究, E-mail: maqiang927@163.com.

表 1 砂土参数

Tab.1 Parameters of sand

最大干密度 / (g·cm <sup>-3</sup> )	最小干密度 / (g·cm <sup>-3</sup> )	含水率 / %	土粒比重	不均匀系数 C <sub>u</sub>	曲率系数 C <sub>c</sub>	最大孔隙比	最小孔隙比
1.89	1.65	10	2.67	5.40	1.40	0.62	0.41

表 2 棕麻纤维均值化参数

Tab.2 Parameters of flax fiber

纤维长度	纤维直径	界面形态	抗拉强度	模量
20 mm	0.35 mm	近似圆形	127.54 MPa	0.51 GPa

1.2 试验方法

试验采用 TSZ-2 型全自动三轴仪(南京土壤仪器厂有限公司生产)开展不固结不排水(UU)三轴试验,加载速度为 0.50 mm/min.通过控制纤维含量和围压来研究棕麻纤维加筋砂土的力学特性及棕麻纤维含量对加筋效果的影响.

按照《公路土工试验规程》所述扰动土样的

制备程序制备试验土样.所用加筋棕麻纤维直径为 0.1~0.6 mm,统一长度 20 mm.棕麻纤维与砂土拌合均匀,加水搅拌,使试样含水率为 10%,然后养护 24 h,使其含水率稳定.最后统一称取 150 g 土样,采用统一的击实锤从相同高度进行击实,控制试样的击实度为 90%,最终制得试样尺寸为:Φ39.1 mm×70 mm.棕麻纤维取自然风干状态,以纤维含量作为加筋试样的控制影响因素,棕麻纤维加筋含量为其质量百分比,分别取 0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%、1.2%、1.4% 和 1.6%.不同纤维含量下的各组试样均在 100、200 和 300 kPa 进行三轴试验,共进行 24 组试验.

2 试验结果及分析

2.1 主应力差(σ<sub>1</sub>-σ<sub>3</sub>)与轴向应变(ε<sub>1</sub>)的关系

试验结果取试样轴向应变≤15%的数据进行分析研究.图 1 为纯砂和各棕麻加筋土的主应力差与轴向应变的关系曲线.

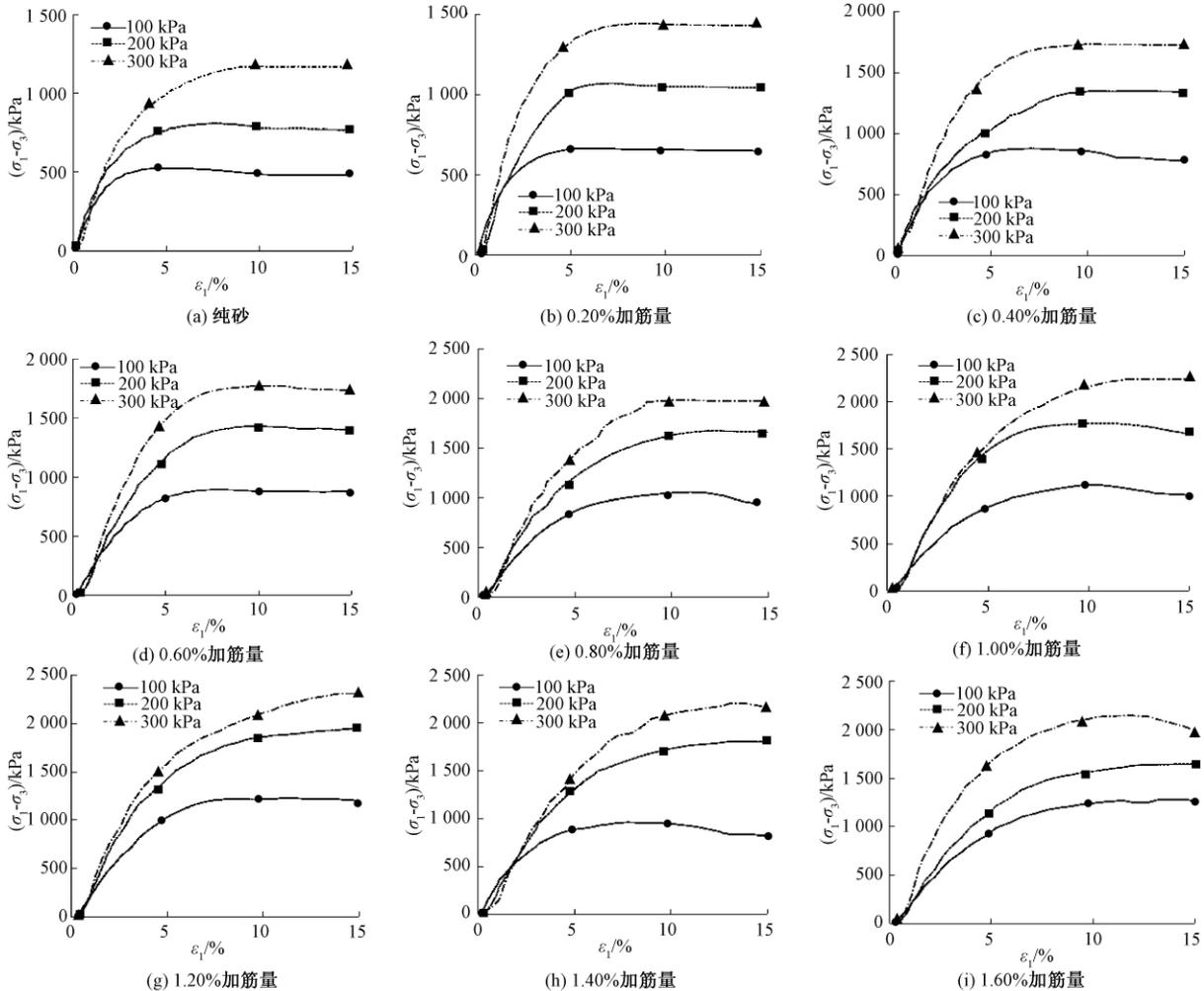


图 1 主应力差值与轴向应变关系曲线

Fig.1 (σ<sub>1</sub>-σ<sub>3</sub>) vs. ε<sub>1</sub> of reinforced sand

由图1可以看出:①试样的主应力差与轴向应变关系曲线呈现应变硬化现象;②在应变 $<2\%$ 时,不同围压下的应力-应变曲线很接近,但随着应变逐渐增加,不同围压下的试样主应力差与轴向应变关系曲线的距离逐渐拉开且不断增加,并在应变大于 $10\%$ 后趋于稳定,说明围压对于主应力差的影响在应变较大时较为显著;③试样峰值主应力差值随着棕麻纤维掺量的增加而有所提升,说明纤维含量影响加筋土的强度和抗变形能力;④与纯砂相比,加入棕麻纤维后加筋土的强度均增加,且棕麻纤维加筋土的峰值主应力差值随着纤维含量的增加呈现先增大后减小的趋势;⑤棕麻纤维含量为 $1.2\%$ 时,加筋土的峰值主应力差值提高最大,加筋效果达到最佳状态。

## 2.2 加筋土的抗剪强度

在 $100$ 、 $200$ 和 $300$  kPa的围压下分别进行试验,根据多组试验得其均值绘制均值摩尔应力圆和相应的应力圆包线.图2为棕麻纤维含量为 $0.6\%$ 的加筋土及纯砂的摩尔应力圆和强度包线.

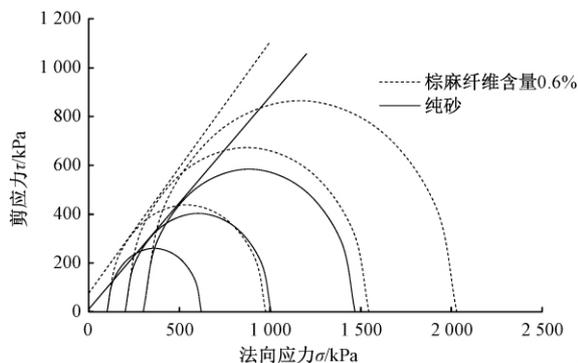


图2 加筋土及纯砂的强度包线

Fig.2 Mohr envelope of reinforced sand and pure sand

从图2可以看出,棕麻纤维加筋土的抗剪强度较纯砂有所提高,棕麻纤维加筋土的黏聚力和内摩擦角均有所增加.

表3为不同棕麻纤维含量的土体黏聚力和内摩擦角数值.与纯砂相比,棕麻纤维加筋土的黏聚力和内摩擦角均有所提高,但黏聚力增加较大,内摩擦角增加较小.

## 2.3 主应力差( $\sigma_1 - \sigma_3$ )与棕麻纤维含量的关系

图3为峰值主应力差值与棕麻纤维含量关系曲线.由图3可以看出,峰值主应力差随着棕麻纤维含量的增加先增加后减小,并且存在峰值,即存在最佳棕麻纤维含量,本次试验测得最佳棕麻纤维含量为 $1.2\%$ .当砂土中棕麻纤维含量较小时,随着棕麻纤维含量的增加,纤维与砂土之间的

表3 抗剪强度指标

Tab.3 Shear strength indexes

棕麻纤维含量/%	抗剪强度指标	
	$c$ /kPa	$\varphi$ /( $^\circ$ )
0.00	11.3	41.06
0.20	14.8	44.77
0.40	21.7	48.12
0.60	22.6	48.77
0.80	26.9	49.12
1.00	27.7	49.21
1.20	29.9	50.19
1.40	29.2	49.39
1.60	21.4	42.29

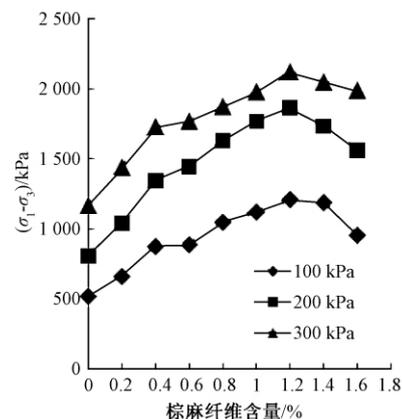


图3 主应力差值与棕麻纤维含量关系曲线

Fig.3 Relationships between  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  and flax fiber

接触面积不断增加,它们之间的摩擦阻力也随之不断增加,棕麻纤维充分发挥其加筋作用,于是主应力差值较纯砂增加,并且该值随着棕麻纤维含量的增加而增大,直到达到峰值.当棕麻纤维含量超过峰值时,由于棕麻纤维含量过多,使得棕麻纤维在土体内堆积,不能与砂土充分接触从而发挥加筋作用,并且形成了一定的“隔断层”,破坏了土体的整体性,从而表现出峰值主应力差值增幅随着棕麻纤维含量增加而下降的现象.

## 2.4 棕麻纤维加筋土补强机理分析

棕麻纤维加筋砂土的补强机理可结合弯曲交织机理和纤维在土中的状态解释<sup>[11]</sup>,图4为弯曲与交织机理示意图,图5为棕麻纤维随机分布示意图.

试样在击实状态下颗粒之间孔隙被压缩,颗粒主要以面面接触为主.当原土中掺入棕麻纤维时,纤维加强了颗粒之间的粘结,有效约束了土颗粒的变形和位移,增加了加筋土的黏聚力,从而提高加筋土的抗剪强度.当掺入量较低时,棕麻纤维在土中以图5(a)和(b)形式较均匀分布,呈现

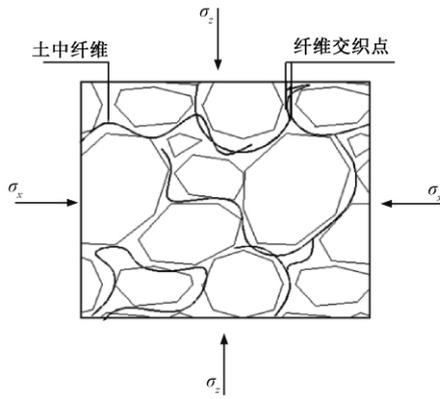


图4 弯曲机理与交织机理示意图

Fig. 4 Bending intercrossing

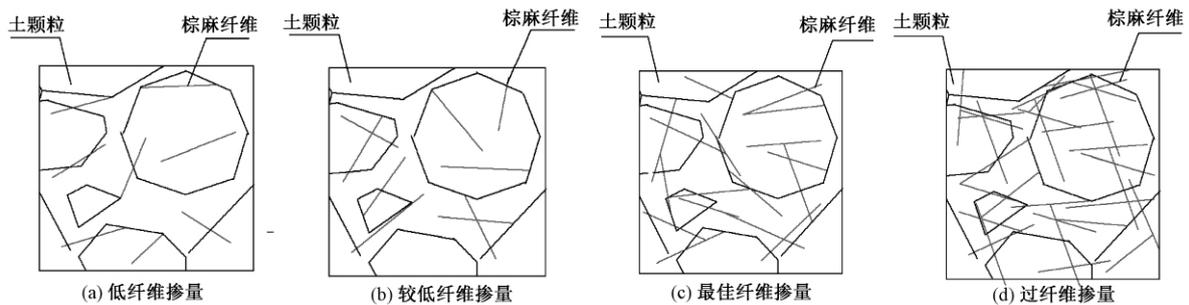


图5 棕麻纤维分布示意图

Fig. 5 Distribution diagram of flax fiber

分布明显变得不均匀,如图5(d)所示,部分纤维在土体中局部集中,没有跟土颗粒接触,并且形成了一定的“隔断层”,破坏了土体的整体性,从而降低抗剪强度。

### 3 结论

通过控制纤维含量,开展不同围压条件下的室内不固结不排水三轴试验,分析棕麻纤维含量对加筋土强度的影响规律,得到以下结论:

(1) 棕麻纤维作为加筋材料,可以提高砂土的强度和抗变形能力,并且这种补强效果在轴向应变较大时比较明显;

(2) 棕麻纤维加筋土的黏聚力和内摩擦角较纯砂都有所增加,但黏聚力增幅较大,内摩擦角增幅较小,符合摩擦加筋理论和准黏聚力理论;

(3) 加筋土抗剪强度随棕麻纤维含量的增加先增大后减小,并存在峰值,峰值对应最佳纤维含量,笔者得到棕麻纤维最佳含量为1.2%;

(4) 棕麻纤维与土体之间的摩擦阻力和纤维形成的纤维网格对土体的空间约束作用提高了加筋土的抗剪强度。

### 参考文献:

[1] 张卫东,王振波,何卫忠. 冻融循环作用下橡胶自密

不相交或者局部相交的状态,此时棕麻纤维加筋的效果主要表现为纤维加强了土体颗粒之间的粘结,纤维受拉增强加筋土的抗剪强度. 当掺入量在最佳掺入量附近时,棕麻纤维在土中以图5(c)形态分布为主,此时纤维相互交错,形成网状结构,进一步形成局部加强体,增加土样的整体性,且纤维之间相互约束,交织处受到外力作用产生位移趋势时,相邻其它纤维可阻止这种趋势,使得外力能够在纤维之间叠加传递,各个方向的纤维都能承受拉力,实现力的分解,促进试样中内力的重分布,充分发挥纤维的加筋作用. 当掺量超过最佳掺入量时,与之前的较低掺量相比,纤维在土体中的

实混凝土力学性能研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2017,38(2): 78-82.

[2] 申俊敏,张军,赵建斌. 土工格栅加筋桥头相邻路堤的受力分析与计算[J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(2): 28-31.

[3] 李金和,郝建斌,陈文玲. 纤维加筋土技术国内外研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 2015,37(3): 319-325.

[4] WU Y K, LI Y B, NIU B. Assessment of the mechanical properties of sisal fiber-reinforced silty clay using triaxial shear tests [J]. The scientific world journal, 2014(13): 1-9.

[5] 璩继立,俞汉林,江海洋. 棕榈丝与麦秸秆丝加筋土无侧限抗压强度比较[J]. 地下空间与工程学报, 2015,11(5): 1216-1220.

[6] PRADHAN P, KAR R, NAIK A. Effect of random inclusion of polypropylene fibers on strength characteristics of cohesive soil [J]. Geotechnical and geological engineering, 2012,30(1): 15-25.

[7] 邓友生,吴鹏,赵明华. 基于最优含水率的聚丙烯纤维增强膨胀土强度研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 349-353.

[8] 卢浩,晏长根,杨晓华. 麦秆纤维加筋土对黄土边坡抗冲刷的试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2016,39(12): 1671-1675.

- [9] 施利国,张孟喜,曹鹏. 聚丙烯纤维加筋灰土的三轴强度特性[J]. 岩土力学,2011,32(9):2721-2728.
- [10] 刘芳,孙红,葛修润. 玻璃纤维土的三轴试验研究[J]. 上海交通大学学报,2011,45(5):762-766.
- [11] 张艳美,张旭东,张鸿儒. 土工合成纤维土补强机理试验研究及工程应用[J]. 岩土力学,2005,26(8):1323-1326.
- [12] 王磊,朱斌,李俊超. 一种纤维加筋土的两相本构模型[J]. 岩土工程学报,2014,36(7):1326-1333.
- [13] 吴燕开,牛斌,桑贤松. 随机分布剑麻纤维加筋土力学性能试验研究[J]. 水文地质工程地质,2012,39(6):77-81.
- [14] PRABAKAR J, SRIDHAR R S. Effect of random inclusion of sisal fiber on strength behavior of sand[J]. Construction and building materials, 2002, 16(2):123-131.

## Study on Flax Fiber-reinforced Sand by Triaxial Test

MA Qiang, XING Wenwen, LI Lihua, HU Xin

(School of Civil Engineering and Architecture, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

**Abstract:** Triaxial test were carried out to research the stress-strain relationship and strength property of flax fiber-reinforced sand. The variation of shear strength indexes of flax fiber-reinforced sand in different flax fiber content and different confining pressure was investigated. And the frictional mechanism between the flax fiber and sand in the shearing process was studied. The laboratory test results showed that, the strength and the capacity for resisting the deformation of flax fiber-reinforced sand were better than those of pure sand. Compared with the pure sand, the shear strength indexes of flax fiber-reinforced sand were changed, the cohesive and friction angle were increased, while the friction angle increased relatively less, the cohesive force increased greatly; in the certain number of rate of water and fiber length, the value of deviator stress, shear strength and cohesion firstly increased and then decreased with the increase of flax fiber content, and there existed an optimum fiber content.

**Key words:** triaxial test; reinforced sand; flax fiber; stress-strain relationship; strength index

文章编号: 1671-6833(2018)02-0061-06

## 胶粉改性土-膨润土固结压缩特性试验

何俊, 颜兴, 胡晓瑾, 王小琦

(湖北工业大学 土木与建筑工程学院, 湖北 武汉 430068)

**摘要:** 为增强土-膨润土防渗帷幕对污染物的吸附能力, 以废旧轮胎胶粉为土-膨润土防渗帷幕的改性剂, 开展胶粉改性土-膨润土材料的固结试验, 研究胶粉特征和模拟渗滤液对固结压缩性质的影响规律。研究表明: 胶粉改性土-膨润土为中~高压缩性土; 由于胶粉颗粒具有不同于黏土颗粒的压缩性和憎水性特征, 随着胶粉掺入比的增加, 土样的压缩性增强, 固结速度加快; 胶粉尺寸较大时, 土样的压缩性较大、固结速度较快; 当胶粉掺入比一定时, 模拟渗滤液作用下土样液限降低、结合水量减小、结合水膜变薄, 使土样压缩性减小、固结速度加快。

**关键词:** 胶粉改性土-膨润土; 固结系数; 压缩系数; 模拟渗滤液

**中图分类号:** TU43 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.02.008

### 0 引言

随着我国汽车工业的迅猛发展, 废旧轮胎数量急剧增加。据统计, 2015年我国约产生废旧轮胎3.3亿条, 重1200万吨, 并以每年8%~10%的速度增长, 而无害化利用率仅60%<sup>[1]</sup>。废旧轮胎橡胶具有质轻、渗透性和吸附能力强等特点, 是性质优良的土工材料, 大量应用于路基、边坡加固、挡土墙或桥台轻质填料等土木工程中, 也被作为排水、渗滤液处理、日覆盖、隔热等材料应用于垃圾填埋场中, 效果良好<sup>[2-3]</sup>。目前仍有大量未被利用的废旧轮胎被露天堆放在垃圾填埋场, 橡胶的降解非常缓慢, 严重污染环境和威胁人体健康, 研究废旧轮胎资源化利用具有重要意义。

在垃圾填埋场防渗以及污染场地修复工程中, 防渗帷幕应用广泛, 常见的防渗帷幕有黏土-膨润土系、水泥膨润土系和混凝土防渗帷幕等<sup>[4]</sup>。其中, 土-膨润土系防渗帷幕价格低廉、防渗效果良好, 但其抗化学腐蚀性能较差, 因此土-膨润土系防渗帷幕的工程性能受到影响。朱伟等<sup>[5]</sup>发现, 0.2 mol/L CaCl<sub>2</sub> 溶液渗透时, 砂-黏土混合土渗透系数相比自来水时都有不同程度的增大, 但增大倍数没有超过10。文献[6-7]发现, 强酸、强碱作用可改变黏土的结构, 从而改变黏土的工

程性质。文献[8]研究 NaCl、CaCl<sub>2</sub>、MgCl<sub>2</sub> 对掺入10%和20%膨润土的混合土的影响, 发现随着溶液浓度增大, 压缩指数减小。文献[9]研究 Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 对高岭土-膨润土系防渗帷幕固结压缩性能的影响, 发现压缩指数随铅浓度增大而减小。

添加改性材料是提高土-膨润土系防渗帷幕吸附性能的常用方法。由于土-膨润土的固结压缩性质对其渗透性和厚度都有重要影响, 而渗透性和厚度决定了防渗帷幕中污染物的运移特性, 进而影响防渗帷幕的有效性<sup>[10]</sup>, 因此, 对改性土-膨润土防渗帷幕固结压缩性质的研究非常重要。研究发现, 沸石和活性炭颗粒对改性材料的固结和渗透性影响不大<sup>[11-13]</sup>; 利用废旧轮胎胶粉对土-膨润土系防渗帷幕进行改性可有效提高对有机污染物 VOC 的吸附能力<sup>[14]</sup>。但由于胶粉本身变形较大<sup>[15]</sup>, 胶粉改性土-膨润土防渗帷幕的固结压缩性如何, 尤其是在填埋场渗滤液作用下胶粉特征对变形和固结性质的影响规律还不清楚。

为提高土-膨润土防渗帷幕材料对有机污染物的吸附能力, 以废旧轮胎胶粉作为土-膨润土的改性材料, 开展胶粉改性土-膨润土材料的一维固结试验, 研究模拟渗滤液作用下胶粉特征对土-膨

收稿日期: 2017-10-08; 修订日期: 2017-12-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678224); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划资助项目(T201605)

作者简介: 何俊(1977—), 女, 湖北工业大学教授, 博士, 从事环境岩土工程方面的研究, E-mail: hjunas@163.com.

润土固结压缩性质的影响规律,为胶粉改性土-膨润土防渗帷幕的应用打下基础。

## 1 试验方案

### 1.1 试验材料

选用粗细两种尺寸的橡胶颗粒,其中细橡胶颗粒粒径小于 0.55 mm,粗橡胶颗粒粒径小于 1.40 mm,其颗粒分布曲线见图 1. 根据《土的工程分类标准》细橡胶颗粒为粗砂-细砂粒组,粗橡胶颗粒为粗砂粒组,均属于级配不良砂. 按照美国 ASTM D6270—98 的定名,所选用的材料属于橡胶颗粒( granulated rubber) 中的胶粉( ground rubber). 胶粉的比重为 1.20, 风干含水率为 0.

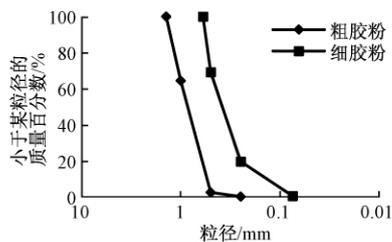


图 1 废旧轮胎胶粉级配曲线

Fig.1 Grading curves for waste tire ground rubber

考虑到工程实际中土料的差异性,选用应用较普遍的商用高岭土作为防渗帷幕的原位土. 高岭土为水洗 S180-0 型,其中  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量分别为 46.36% 和 40.0%, 并含有少量  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{K}_2\text{O}$ . 高岭土粒度为 44  $\mu\text{m}$ , 比重为 2.70, 风干含水率为 1.5%; 液限和塑限分别为 35.2% 和

22.4%, 为低液限黏土; 采用 BET 法测得高岭土的比表面积为 3.88  $\text{m}^2/\text{g}$ .

膨润土选用粉末状钠基膨润土,其粒度为 38  $\mu\text{m}$ , 蒙脱石含量为 85%~90%. 膨润土风干含水率为 14.1%, 液限和塑限分别为 232.0% 和 43.0%, 为高液限黏土; 膨润土的比表面积为 66.36  $\text{m}^2/\text{g}$ .

城市生活垃圾填埋场中的渗滤液是一种污染负荷高、成分复杂的有机废水,其性质变化范围大,可分为无机污染物和有机污染物两大类. 由于  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Cl}^-$  是填埋场渗滤液中常见的污染物离子,苯酚是我国环保部门优先控制的污染物<sup>[16]</sup>, 笔者选择 0.05 mol/L 的  $\text{CaCl}_2$  和 1 g/L 的苯酚代表渗滤液中无机污染物和有机污染物,用其混合溶液模拟渗滤液进行试验,并与自来水试验进行对比.

### 1.2 试验方法

根据前期坍落度试验,取满足 110 mm 坍落度要求对应含水率为控制含水率(见表 1). 按照 0%、7.5%、15.0%、25.0% 的掺入比(胶粉与风干高岭土质量比),将胶粉与高岭土混合均匀,加入分别用自来水和模拟渗滤液配置的膨润土浆,搅拌均匀后密封,养护 7 d. 膨润土浆液采用膨润土与液体按照质量比 5:100 配置. 可以看出,110 mm 坍落度对应含水率随胶粉掺入比的增加略有减小.

由于粗胶粉颗粒尺寸大于 0.5 mm,而界限含水率试验适用于粒径小于 0.5 mm 颗粒组成的土,故只对细胶粉混合土按照土工试验规程(SL 237—1999)进行界限含水率试验,见表 1.

表 1 坍落度试验结果汇总

Tab.1 Summary of slump test results

土样	胶粉掺入比	110 mm 对应 含水率	液限		塑限	
			自来水	模拟渗滤液	自来水	模拟渗滤液
高岭土-膨润土	0	45.7	37.99	36.78	20.65	20.73
细胶粉改性 土-膨润土	7.5	44.6	36.99	36.22	20.32	21.01
	15.0	44.3	36.53	34.83	21.39	21.24
	25.0	42.9	35.71	34.68	20.75	20.32
粗胶粉改性 土-膨润土	7.5	46.1	—	—	—	—
	15.0	44.5	—	—	—	—
	25.0	43.6	—	—	—	—

依据土工试验规程(SL 237—1999),将土样装入直径 61.8 mm、高 20 mm 的环刀,振捣去除土样内的气泡,抽气饱和 24 h 后进行固结试验. 模拟渗滤液拌和的土样进行固结试验时,将固结室中注入模拟渗滤液,用塑料薄膜罩在固结仪上

以防模拟渗滤液挥发. 以 24 h 为周期,逐次加载 12.5、25.0、50.0、100.0、200.0、300.0 和 400.0 kPa, 计量每级压力下土样的变形量,得到压缩和固结指标.

采用吴凤彩提出的容量法<sup>[17]</sup>,取高岭土和膨

润土颗粒,分别用自来水和模拟渗滤液进行吸附结合水试验.将干燥土样装入盛有定量水的容量瓶,根据容量瓶液面的变化计算吸附结合水量  $w$ ,即

$$w = \frac{\rho_e \rho}{\rho_e - \rho} \cdot \frac{\Delta V}{m_s} \quad (1)$$

式中: $\rho_e$  为吸附结合水的平均密度,  $\text{kg/m}^3$ ,取  $1.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ;  $\rho$  为室温 ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 时自由水的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\Delta V$  为自由水转化为结合水时水体积的变化量;  $m_s$  为干燥土样质量.

## 2 试验结果分析

### 2.1 胶粉特征对土样压缩、固结性质的影响

#### 2.1.1 胶粉特征对压缩性的影响

图 2 为胶粉改性土样的压缩系数  $a$  与压力  $P$  的关系曲线(3 种掺入比时规律相同,以掺入比为 25.0% 时的数据为代表).由图 2 可以发现:①压缩系数随压力增大而减小,表明随着压力增大,胶粉改性土样骨架逐渐被压密、抵抗变形的能力逐渐增强;②相同压力下粗胶粉改性土样压缩系数大于细胶粉改性土样,胶粉尺寸较大时土样的压缩性较大;③100 ~ 200 kPa 压力下胶粉改性土样的压缩系数为  $0.39 \sim 0.80 \text{ MPa}^{-1}$ ,属于中~高压缩性土.

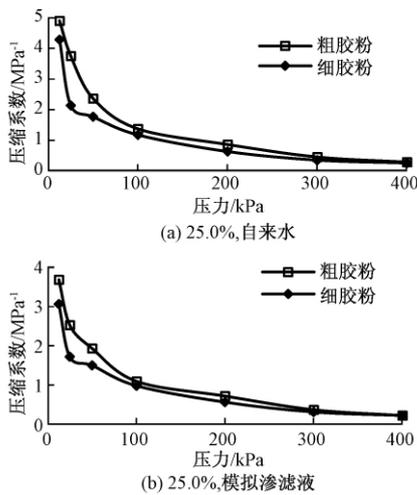


图 2 不同尺寸胶粉改性土样压缩系数与压力的关系  
Fig.2 Relationship between compressibility coefficient and pressures for soils modified with different size rubber

图 3 为压缩率与掺入比及液限的关系.其中  $C_c$  为压缩指数,  $e_0$  为初始孔隙比,压缩率可以用来消除初始含水率(或初始孔隙比)的影响<sup>[11]</sup>.由图 3 可以看出,不同胶粉尺寸和试验用水情况

下,压缩率在 0.06 ~ 0.12 变化,与文献 [11 - 12] 得到的土-膨润土防渗帷幕材料压缩率范围一致.当胶粉掺入比一定时,试验用水和胶粉尺寸的变化导致土样压缩率有一定差异,试验的离散性导致差异的规律性不强,总体来看,压缩率随胶粉掺入比的增加呈增大趋势.图 3(c) 为压缩率与土液限的关系.由图 3(c) 可以看出,压缩率随液限的增大而减小,与文献 [11 - 12] 的结果相反.其原因在于胶粉颗粒与土颗粒存在一定的差异:作为粗砂-细砂粒组成的胶粉颗粒加入到土中引起液限降低(见表 1),由于胶粉颗粒与文献 [11] 和文献 [12] 中的活性炭及沸石等改性材料不同,混合土压缩时除了孔隙被压缩以外,胶粉颗粒本身也可能被压缩<sup>[18]</sup>,故掺入量越大土样的压缩性越强,因此出现压缩率随液限增大而减小的现象.

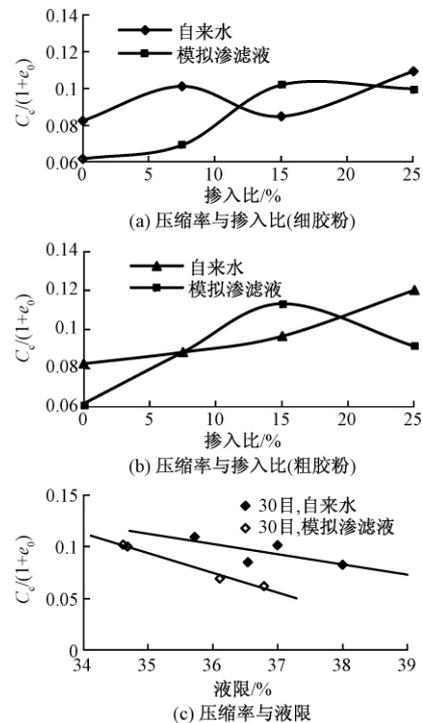


图 3 压缩率与掺入比及液限的关系  
Fig.3 Relationship between compression rate and mixing ratio or liquid limit

#### 2.1.2 胶粉特征对固结性质的影响

图 4 为不同尺寸胶粉改性土固结系数  $C_v$  与压力关系曲线,图 5 为不同掺入比胶粉改性土固结系数与压力关系曲线.由图 4、图 5 可以看出:①胶粉改性土固结系数在  $0.5 \times 10^{-3} \sim 6.8 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ ,与文献 [13] 中沸石改性土-膨润土材料的试验结果接近.②土样固结系数随着压力的增加呈现出先增大后减小的趋势,与正常固结粘土的变化规律一致<sup>[19]</sup>.固结系数与渗透系数成正

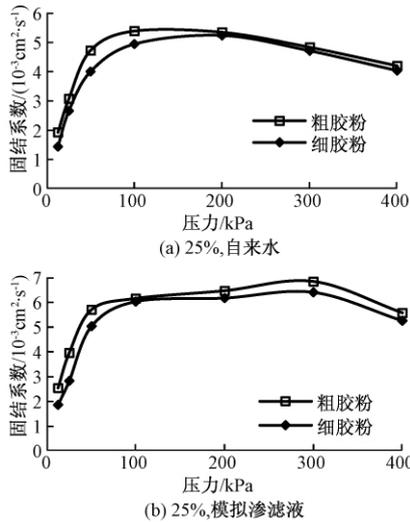


图4 不同尺寸胶粉改性土样固结系数与压力的关系  
Fig.4 Relationship between consolidation coefficient and pressures for soils modified with different size rubber

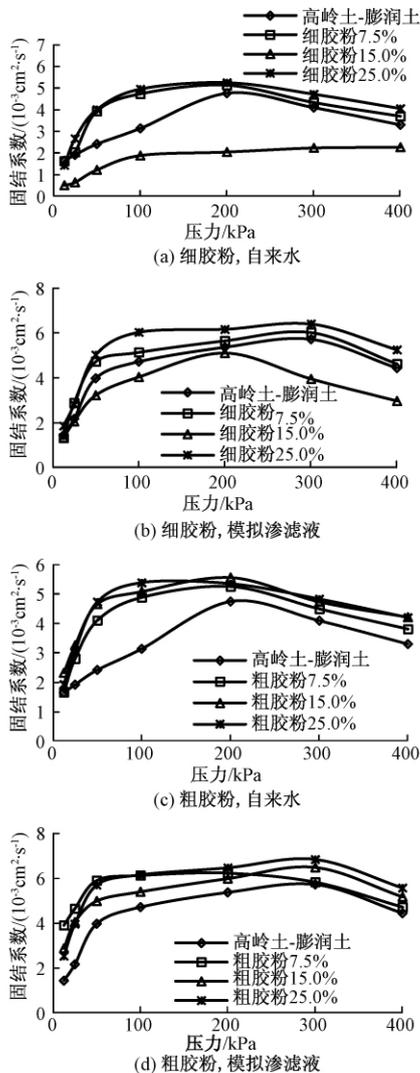


图5 不同掺入比胶粉改性土样固结系数与压力的关系  
Fig.5 Relationship between consolidation coefficient and pressures at different rubber mixing ratio

比、与压缩系数成反比. 随着压力增大, 压缩系数和渗透系数均减小. 当压力较小时, 压缩系数减小相对较快(见图2), 固结系数随压力增大而增大; 当压力较大时, 压缩系数减小速度减慢, 而随着孔隙压缩、自由水排出, 结合水占主要地位, 渗透系数减小更显著, 固结系数随压力增大而有所降低. ③粗胶粉改性土固结系数略大于细胶粉改性土, 表明胶粉尺寸大有助于加速土样固结. ④除少数数据点外, 随着胶粉掺入比的增加, 胶粉改性土固结系数有增大的趋势, 表明土样固结速度随着胶粉掺入比的增加而加快.

## 2.2 模拟渗滤液对土样压缩、固结性质的影响

### 2.2.1 模拟渗滤液对压缩性质的影响

图6为自来水和模拟渗滤液作用下胶粉改性土压缩系数与压力关系曲线. 由图6可以看出, 两种情况下胶粉改性土压缩系数均随压力增大而减小. 当胶粉掺入比相同时, 模拟渗滤液条件下土样的压缩系数略小于自来水条件下的对应值, 前者压缩性较小, 与文献[8-9]试验规律相同; 两种情况下压缩系数最大相差1.7倍, 但压力增至400 kPa时压缩系数基本一致.

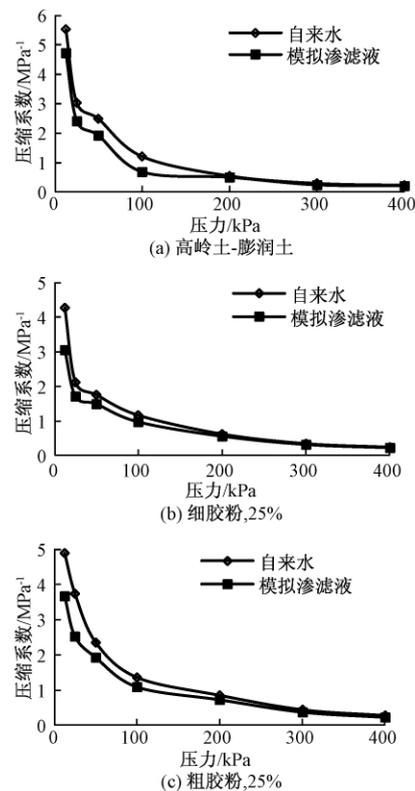


图6 不同溶液作用下胶粉改性土压缩系数与压力的关系

Fig.6 Relationship between compressibility coefficient and pressures under different solutions

2.2.2 模拟渗滤液对固结性质的影响

图 7 为不同试验用水情况下胶粉改性土固结系数与压力关系的代表性曲线. 由图 7 可以看出, 两种情况下固结系数随压力的变化规律一致, 均随压力增大先增大后减小. 当胶粉掺入比相同时, 模拟渗滤液条件下土样固结系数均大于自来水条件下的对应值, 前者为后者的 1.0 ~ 3.2 倍, 表明模拟渗滤液作用下土样的固结速度增快.

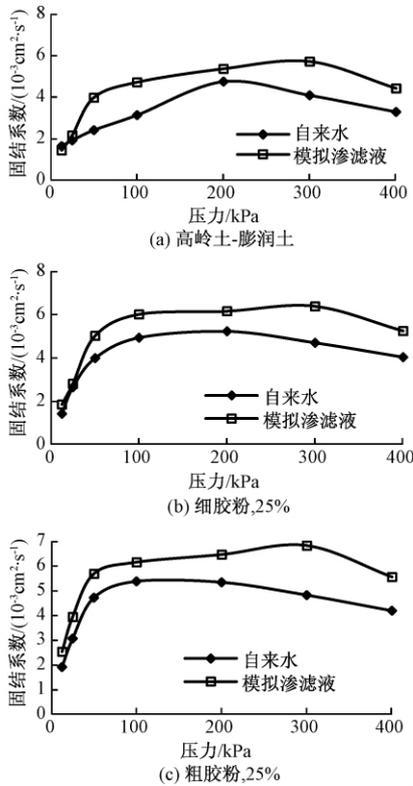


图 7 不同溶液作用下胶粉改性土固结系数与压力的关系

Fig.7 Relationship between consolidation coefficient and pressures under different solutions

2.3 讨论

总体而言,随着胶粉掺入量增加,土样的压缩性增强、固结速度增快. ①胶粉颗粒自身的压缩性大于黏土颗粒<sup>[18]</sup>,故土样的压缩性随胶粉掺入比的增加而增大;而胶粉粒径大于黏土颗粒,导致土样固结速度增快. ②由表 1 可知,不同掺入比时,110 mm 塌落度对应含水率变化范围为 42.9% ~ 46.1%;土样含水率虽然变化不大,但由于胶粉具有憎水性(其吸水率仅 1.1% 左右)<sup>[18]</sup>,造成胶粉掺入比越大土样中黏土颗粒含水率越高,压缩性增强. ③由表 1 可知,细胶粉改性土 110 mm 塌落度对应含水率约为土样液限的 1.2 倍,土样处于流塑状态,孔隙中存

在一定量的自由水. 由表 1 和图 8 可以看出,当胶粉掺入比增加时,土样液限减小,而液限大致反映土中结合水量,因此孔隙中结合水量减少而自由水量增多,自由水更容易被排出,固结速度增快.

以上分析还发现,模拟渗滤液作用下土样压缩性稍小,固结速度增快. 其原因可从液限和结合水的变化来分析. 图 8 为液限与胶粉掺入比的关系曲线,图 9 为模拟渗滤液对吸附结合水量的影响. 从图 8 可知,当掺入比相同时模拟渗滤液条件下,液限比自来水条件下小 0.77% ~ 1.7%. 从图 9 可知,在模拟渗滤液作用下高岭土吸附结合水量减小 2.2%,膨润土减小 39.2%. 因此,模拟渗滤液中  $\text{Ca}^{2+}$  与土中  $\text{Na}^+$  发生离子交换,液限降低、结合水量减小,结合水膜厚度变薄,使土颗粒团聚,压缩性降低;自由水含量相对增大,导致固结速度加快.

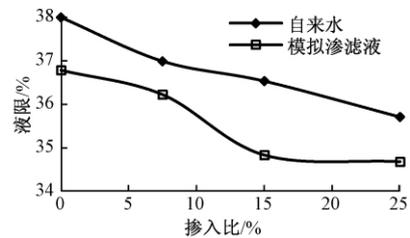


图 8 液限与胶粉掺入比的关系曲线

Fig.8 Relationship between liquid limit and rubber mixing ratio

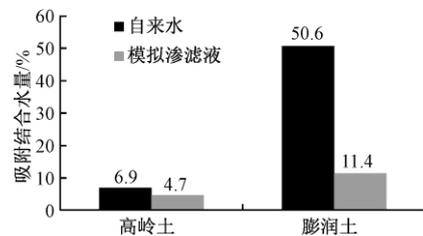


图 9 模拟渗滤液对吸附结合水量的影响

Fig.9 Effect of simulated leachate on adsorbed water

3 结论

(1) 在 100 ~ 200 kPa 压力下,胶粉改性土压缩系数为  $0.39 \sim 0.80 \text{ MPa}^{-1}$ ,属于中~高压缩性土;由于胶粉颗粒具有不同于黏土颗粒的压缩性和憎水性,胶粉改性土的压缩性随胶粉掺入比增加而增大;胶粉尺寸较大的改性土压缩性较大,粗胶粉改性土的压缩系数约为细胶粉改性土的 1.2 ~ 1.4 倍.

(2) 胶粉改性土固结系数为  $0.5 \times 10^{-3} \sim$

$6.8 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ , 随压力增加呈现先增大后减小的趋势; 随着胶粉掺入比增加, 土样液限减小, 孔隙中自由水量增大, 胶粉改性土的固结速度加快; 粗胶粉改性土的固结系数略大于细胶粉改性土。

(3) 当胶粉掺入比一定时, 模拟渗滤液的作用使土样压缩系数减小, 固结系数增大, 其主要原因在于模拟渗滤液中  $\text{Ca}^{2+}$  与土中  $\text{Na}^+$  发生离子交换, 使液限降低、结合水量减小、结合水膜厚度变薄, 导致土样压缩性减小、固结速度加快。

(4) 在本文条件下, 胶粉和模拟渗滤液对土-膨润土材料的压缩系数和固结系数有一定影响, 但在土-膨润土防渗帷幕材料常见范围之内。为确定合理的胶粉掺入量, 还需增加胶粉掺入比、选用实际渗滤液进行试验, 并结合渗透性和吸附性综合确定。

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 中国资源综合利用年度报告(2014) [R/OL]. [http://www.sdpc.gov.cn/xwzx/xwfb/201410/t20141009\\_628793.html](http://www.sdpc.gov.cn/xwzx/xwfb/201410/t20141009_628793.html).
- [2] EDIL T B. A review of mechanical and chemical properties of shredded tires and soil mixtures [J]. *Recycled materials in geotechnics*, 2005(127): 1-21.
- [3] 李丽华, 马强, 王翠英, 等. 废旧轮胎颗粒水泥混合土三轴试验研究 [J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2014, 35(4): 33-35.
- [4] 詹良通, 刘伟. 垃圾填埋场污染物击穿竖向防渗帷幕时间的影响因素分析及设计厚度的简化计算公式 [J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(11): 1-10.
- [5] 朱伟, 徐浩青, 王升位, 等.  $\text{CaCl}_2$  溶液对不同黏土基防渗墙渗透性的影响 [J]. *岩土力学*, 2016, 37(5): 1224-1230.
- [6] DAPPOLONIA D J. Soil-bentonite slurry trench cutoffs [J]. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 1980, 106(4): 399-417.
- [7] YEO S, SHACKELFORD C D, EVANS J C. Membrane behavior of model soil-bentonite backfills [J]. *Geotechnical and geoenvironmental engineering*, 2005, 131(4): 418-429.
- [8] SHARIATMADARI N, SALAMI M, KARIMPOUR-FAED M. Effect of inorganic salt solutions on some geotechnical properties of soil-bentonite mixtures as barriers [J]. *International journal of civil engineering*, 2011, 9(2): 103-110.
- [9] 范日东, 杜延军, 陈左波, 等. 受铅污染的土-膨润土竖向隔离墙材料的压缩及渗透特性试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(5): 841-847.
- [10] 何俊, 胡晓瑾, 阮晓晨, 等. 两种土压力水平下防渗帷幕的防污能力 [J]. *水利水电科技进展*, 2017, 37(2): 63-67.
- [11] DU Y J, FAN R D, LIU S Y, et al. Workability, compressibility and hydraulic conductivity of zeolite-amended clayey soil/calcium-bentonite backfills for slurry-trench cutoff walls [J]. *Engineering geology*, 2015, 195: 258-268.
- [12] MALUSIS M A, BARBEN E J, EVANS J C. Hydraulic conductivity and compressibility of soil-bentonite backfill amended with activated carbon [J]. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 2009, 135(5): 664-672.
- [13] HONG C S, SHACKELFORD C D, MALUSIS M A. Consolidation and hydraulic conductivity of zeolite-amended soil-bentonite backfills [J]. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 2012, 138(1): 15-25.
- [14] PARK J K, KIM J Y, EDIL T B. Mitigation of organic compound movement in landfills by shredded tires [J]. *Water environment research*, 1996, 68(1): 4-10.
- [15] REDDY K R, STARK T D, MARELLA A. Beneficial use of shredded tires as drainage material in cover systems for abandoned landfills [J]. *Practice periodical of hazardous, toxic, and radioactive waste management*, 2010, 14(1): 47-60.
- [16] 陈永贵, 张可能, 邓飞跃, 等. 粘土固化注浆帷幕对渗滤液中苯酚的吸附性能研究 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2009, 40(1): 243-247.
- [17] 吴凤彩. 粘性土的吸附结合水测量和渗流的某些特点 [J]. *岩土工程学报*, 1984, 6(6): 84-93.
- [18] 李朝晖. 废轮胎颗粒与黄土混合物岩土工程特性研究 [D]. 兰州: 兰州大学土木工程与力学学院, 2011.
- [19] 林鹏, 许镇鸿, 徐鹏, 等. 软土压缩过程中固结系数的研究 [J]. *岩土力学*, 2003, 24(1): 106-108.

(下转第85页)

文章编号: 1671-6833(2018)02-0067-06

# 废胎胶粉与 HDPE/SBS 三掺复合改性沥青性能研究

何锐<sup>1,2</sup>, 黄鑫<sup>2</sup>, 耿九光<sup>1,2</sup>, 陈华鑫<sup>2</sup>

(1. 甘肃省道面工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730030; 2. 长安大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710061)

**摘要:** 为了改善普通胶粉改性沥青的性能缺陷, 本研究采用 SK-90# 基质沥青和 HDPE-SBS-废胎胶粉材料制备复合改性沥青, 选择 SBS 百分掺量、胶粉百分掺量、HDPE 百分掺量、剪切速度、剪切时间和剪切温度 6 个试验变量, 通过正交试验来探讨复合改性沥青的最佳改性参数, 并采用方差分析法对其针入度、软化点、5℃延度、黏度和弹性恢复率 5 种技术指标进行分析, 得出各变量对复合改性沥青性能的影响规律, 得到较优制备方案, 并对其性能进行了分析。结果表明: SBS 掺量对软化点和弹性恢复率影响最大; HDPE 掺量对针入度影响较大; SBS 和 HDPE 掺量对延度都具有影响; 各改性剂掺量和剪切温度对旋转黏度的影响基本相同。较优制备方案为: 改性剂 HDPE 百分掺量为 1.5%, SBS 百分掺量为 5%, 废胎胶粉百分掺量为 20%, 剪切温度 165℃, 剪切速率 4 500 r/min, 剪切时间 45 min。较优制备方案下, 改性沥青的高温稳定性和低温抗裂性大大提高, 同时自身黏度增大使其与集料的黏附性增强, 提高了抗车辙能力和抗水损害能力; 较高的弹性恢复率保证了改性沥青的抗裂性能。

**关键词:** 复合改性沥青; 正交试验; 方差分析; SBS; 废胎胶粉; HDPE

**中图分类号:** U414

**文献标志码:** A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.02.006

## 0 引言

随着我国公路行业的发展和汽车数量的急剧增加, 对路面性能的要求也越来越高, 同时废旧轮胎的处理问题越来越严重。据统计, 我国 2014 年前半年已产生超过 1 000 万吨废旧轮胎<sup>[1]</sup>。采用废胎胶粉制备改性沥青不仅可以提高沥青路面的抗车辙和抗疲劳等性能<sup>[2-3]</sup>, 还可以缓解废旧轮胎对环境的污染<sup>[4]</sup>, 减少噪声并提高抗滑性<sup>[5-6]</sup>。废胎胶粉由于热稳定性差而难以储存<sup>[7-8]</sup>, 其来源广泛更是导致改性结果参差不齐<sup>[9]</sup>。为了在不降低路面性能的基础上节约成本, 很多学者对 PE/SBS 复合改性沥青混合料进行研究后发现, PE 和 SBS 复合改性可以较大地提高其高温性能、力学性能和抗水损害能力, 但低温性能和抗疲劳性能有所降低<sup>[10]</sup>。废胎胶粉和 PE 复合改性沥青具有很高的储存稳定性<sup>[11]</sup>。而 SBS 和废胶粉复合改性沥青的温度敏感性低, 具有良好的低温抗裂性, 提高了抗裂、抗车辙性能<sup>[12]</sup>。

3 种不同的改性剂虽然经过两两复掺可以改

善沥青的部分性能, 但仍然存在上述的一些缺陷。因此, 为了达到既改善沥青性能又节约成本保护环境的目的, 本试验在前人研究的基础上尝试采用 HDPE、SBS、废胎胶粉三掺复合改性的方式, 以正交试验制备复合改性沥青, 通过方差分析和极差分析考察工艺参数和改性剂掺量对改性沥青性能的影响规律, 并得到较优的制备方案, 对进一步研究和应用具有积极意义。

## 1 试验部分

### 1.1 原材料

**基质沥青:** 本研究采用韩国 SK-90# 沥青作为基质沥青, 按照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》测定针入度、软化点和延度, 主要技术指标如表 1 所示。

**SBS:** 本研究采用 YH-4310 热塑性丁苯橡胶 SBS。

**废胎胶粉:** 本研究采用粒径为 180 μm 的废旧胶粉, 由子午线轮胎采用常温粉碎法制备而成。

收稿日期: 2017-08-15; 修订日期: 2017-11-16

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(310831162001、310831161001); 广西科技计划项目(桂科 AC16380112)

作者简介: 何锐(1984—), 男, 长安大学副教授, 博士, 研究方向为道路材料与结构, E-mail: heruia@163.com.

表1 SK-90# 沥青指标

Tab. 1 The indicators of SK-90# asphalt

技术指标	实测值	规范值
25 °C 针入度/0.1 mm	96.0	80~100
软化点(环球法)/°C	47.2	≥42
5 °C 延度/cm	11.2	—

HDPE: 本研究采用大庆石化出产的高密度聚乙烯 HDPE, 物理性能如表 2 所示.

表2 高密度聚乙烯 HDPE 的物理性能

Tab. 2 Physical properties of high density polyethylene HDPE

指标	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	拉伸强 度/MPa	熔体流动速度/ (g·(10 min) <sup>-1</sup> )	断裂伸 长率/%
结果	0.951	24	0.95	500

## 1.2 试验方案

HDPE/SBS/废胎胶粉复合改性沥青由 3 种改性剂与基质沥青混合改性而成, 在选择改性工艺时, 应兼顾 3 种改性剂单一改性基质沥青的制备方法. 考虑到胶粉改性沥青的“干法”和“湿法”改性方法, PE 改性沥青的直剪共混法、高速剪切法和胶体磨法<sup>[13-14]</sup> 以及 SBS 改性沥青的溶胀、剪切、发育 3 阶段改性方法<sup>[15]</sup>. 综合 3 类改性方法, 结合现有仪器设备, 确定改性工艺为溶胀、高速剪切、发育 3 个步骤<sup>[16]</sup>. 拟定改性剂掺量与工艺参数 5 水平 6 因素表, 如表 3 所示.

表3 性能影响因素水平表

Tab. 3 Performance impact factor level table

水平	SBS 掺量/ %	胶粉 掺量/ %	HDPE 掺量/ %	剪切 时间/ min	剪切 速率/ (r·min <sup>-1</sup> )	剪切 温度/ °C
1	1	4	0.0	15	4 000	170
2	2	8	1.5	30	4 500	175
3	3	12	3.0	45	5 000	180
4	4	16	4.5	60	5 500	185
5	5	20	6.0	75	6 000	190

根据表 3 的正交因素水平表拟定试验方案, 并确定实验步骤如下: 保持沥青温度在 140 °C 左右以便取用; 在 140 °C 下加入 SBS 和 HDPE 溶胀 10 min; 在高速剪切时前 10 s 加入废胎胶粉后按照设定工艺参数进行高速剪切; 剪切后放入烘箱中在 160 °C 下发育 1 h, 制得复合改性沥青.

## 2 试验结果

按照前述试验方案和制备流程进行改性沥青的制备, 各个评价指标测试结果整理如表 4

所示.

表4 指标试验结果表

Tab. 4 Indicator test results table

试验	25 °C 针 入度/ (0.1 mm)	5 °C 延 度/ cm	软化 点/ °C	黏度/ (Pa·s)	弹性恢 复率/ %
1	69.2	11.2	47.2	0.9	15
2	54.9	12.9	51.1	2.8	14
3	50.1	6.9	62.6	3.3	27
4	46.2	11.0	57.0	11.7	34
5	45.6	9.0	67.2	15.6	24
6	55.3	7.7	79.2	1.9	28
7	44.4	14.0	55.9	5.5	33
8	43.7	10.3	64.9	8.5	24
9	42.5	5.6	72.8	24.1	40
10	62.7	5.5	83.9	6.5	41
11	36.1	13.7	62.6	4.1	38
12	47.1	5.0	63.1	7.6	14
13	37.2	6.8	83.8	32.3	51
14	50.0	5.5	96.9	14.0	48
15	51.7	19.8	79.2	25.7	54
16	55.0	17.4	67.8	4.4	52
17	38.3	26.4	68.4	28.0	48
18	57.2	7.1	90.4	5.8	46
19	49.9	26.0	66.3	34.6	58
20	48.6	18.0	86.2	30.8	49
21	37.4	18.1	92.5	31.4	53
22	51.4	7.3	93.1	9.5	60
23	51.1	35.0	77.2	29.3	55
24	55.2	21.5	86.4	14.2	55
25	51.2	20.8	92.7	55.4	58

## 3 性能指标评价分析

为了确定不同工艺参数和改性剂掺量对改性沥青性能的影响, 得到复合改性沥青的较优制备方案, 采用方差分析对试验结果进行考察.

### 3.1 针入度

针入度作为沥青性能三大指标之一, 反映了沥青的软硬程度、稠度和黏结力等性能. 根据正交试验结果对针入度进行方差分析, 并对显著性因素进行极差分析, 结果如表 5 和图 1 所示. 自由度为 2 且临界值均确定, 不再赘述.

由表 5 和图 1 可以看出, HDPE 掺量是影响复合改性沥青针入度的主要因素. 随着 HDPE 掺量的增加, 针入度总体呈现逐渐减小的趋势. 这是因为 HDPE 本身属于弹性体, 具有较高的刚性和韧性, 因而随着掺量的增加, 改性沥青整体的硬度也得到了提高. 在 HDPE 掺量为 3.0% 和 4.5%

表 5 针入度方差分析表

Tab. 5 Penetration variance analysis table

因素	偏差平方和	$F_{比}$	显著性
SBS 掺量	197.252	4.542	—
胶粉掺量	77.276	1.779	—
HDPE 掺量	886.492	20.411	显著
剪切时间	194.592	4.480	—
剪切速率	43.432	1.000	—
剪切温度	107.148	2.467	—

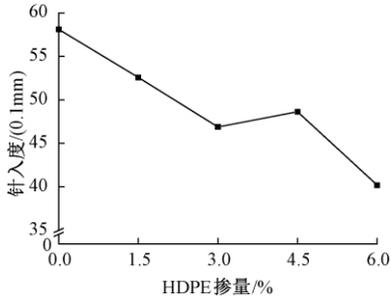


图 1 针入度随显著因素变化曲线

Fig. 1 The penetration curve with the significant factor 时,针入度出现基本相同的情况,这可能是受到其它工艺参数的影响导致的。

3.2 软化点

软化点也是沥青性能三大指标之一,反映了沥青的高温稳定性,分析结果如表 6 和图 2 所示。

表 6 软化点方差分析表

Tab. 6 Softening point variance analysis table

因素	偏差平方和	$F_{比}$	显著性
SBS 掺量	2 576.033	8.840	显著
胶粉掺量	721.349	2.475	—
HDPE 掺量	618.553	2.122	—
剪切时间	345.317	1.185	—
剪切速率	291.381	1.000	—
剪切温度	330.864	1.135	—

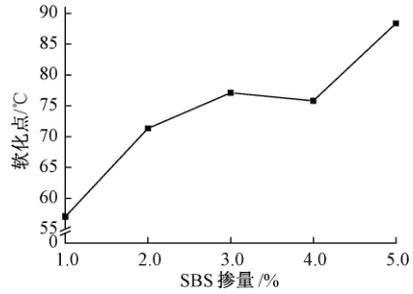


图 2 软化点随显著因素变化曲线

Fig. 2 The softening point curve with the significant factor

由表 6 和图 2 可以看出,SBS 掺量是影响复合改性沥青软化点的主要影响因素.随着 SBS 掺量的增加,软化点总体呈现上升的趋势.这是因为 SBS 作为一种高分子聚合物,其分子链行为可以随着温度变化而变化,当温度升高时,其分子链可以伸长发生流动,当温度降低时,又会交联重新缠绕形成网状结构.因此,SBS 的掺量越大,改性沥青的网状结构程度越高,整体的耐高温性能就越好.在 SBS 掺量为 3.0% 和 4.0% 时,软化点出现同针入度一样的特点,可能是由于其他工艺参数导致的。

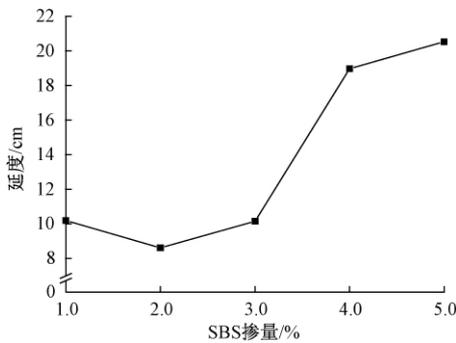
3.3 延度

延度是反映沥青低温抗裂性的重要指标.分析结果如表 7 和图 3 所示。

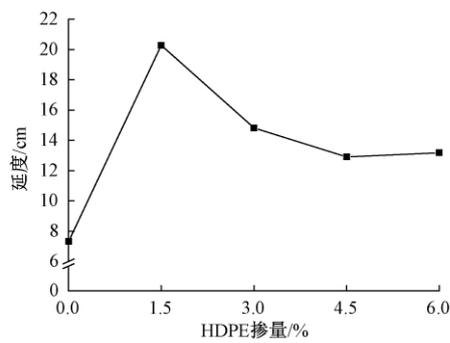
表 7 延度方差分析表

Tab. 7 Ductility variance analysis table

因素	偏差平方和	$F_{比}$	显著性
SBS 掺量	626.260	85.322	非常显著
胶粉掺量	7.340	1.000	—
HDPE 掺量	430.828	58.696	显著
剪切时间	13.516	1.841	—
剪切速率	203.020	27.659	—
剪切温度	218.828	29.813	—



(a) 延度随SBS掺量变化曲线



(b) 延度随HDPE掺量变化曲线

图 3 延度随显著因素变化曲线

Fig. 3 The ductility curves with the significant factors

由表7和图3可以看出,SBS掺量和HDPE掺量分别是影响复合改性沥青延度的主要影响因素和次要影响因素.随着SBS掺量的增加,延度总体上呈增大的趋势.随着HDPE掺量增加,延度出现先增大后减小的趋势,结合HDPE对针入度的影响,复合改性沥青可能因为HDPE掺量的增加逐渐变硬从而失去延性,而SBS分子链本身的线性结构和弹性在低温时起到良好的抗拉作用,从而提高了改性沥青的低温性能.

### 3.4 旋转黏度

沥青的旋转黏度可以反映沥青在外力作用下抵抗变形的能力.当温度达到150℃时,SBS改性

沥青黏度与剪切速率无关<sup>[17]</sup>,因此试验采用布洛克菲尔德黏度计测定改性沥青在135℃下的表观黏度,分析结果如表8和图4所示.

表8 旋转黏度方差分析表

Tab.8 Viscosity variance analysis table

因素	偏差平方和	$F_{比}$	显著性
SBS掺量	1 468.990	23.019	较显著
胶粉掺量	1 069.794	16.763	显著
HDPE掺量	1 051.006	16.469	显著
剪切时间	222.182	3.482	—
剪切速率	63.818	1.000	—
剪切温度	729.338	11.428	显著

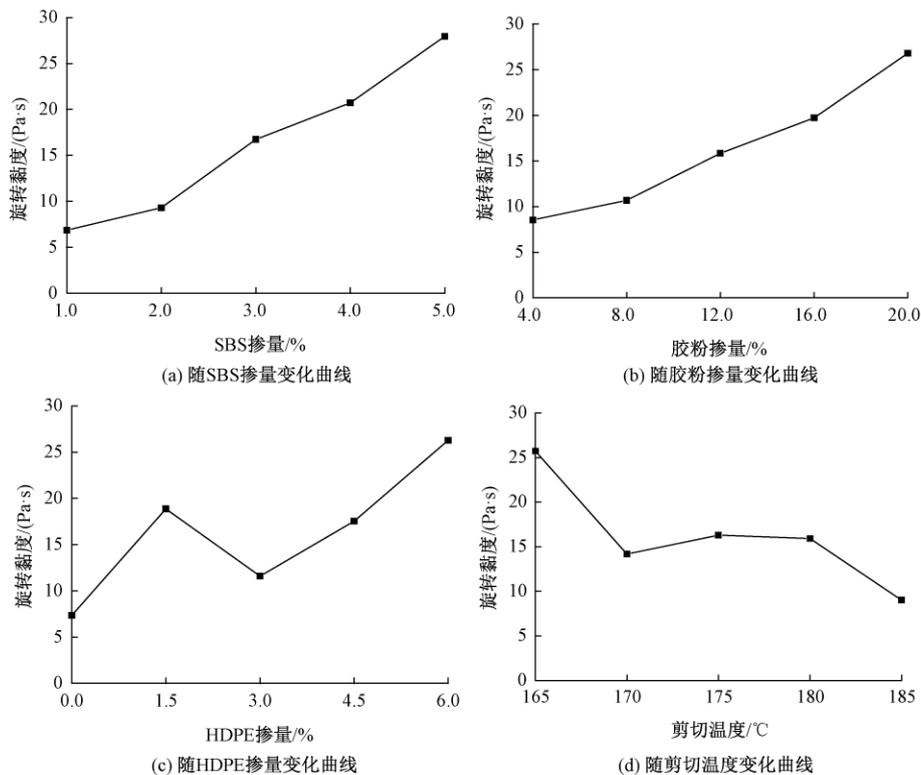


图4 旋转黏度随显著因素变化曲线图

Fig.4 The rotational viscosity curves with the significant factors

表8和图4可以看出,改性剂的掺量和剪切温度对复合改性沥青的表观黏度都具有一定的影响,其中SBS掺量影响最大.随着各个改性剂掺量的增加,表观黏度总体上呈增大的趋势.但随着剪切温度的升高,表观黏度呈现不断下降的趋势.这是因为增加外掺剂掺量大大提高了改性沥青整体的稠度,而剪切温度提高则使外掺剂在制备过程中更容易溶解和剪切,从而降低了黏度.

### 3.5 弹性恢复率

弹性恢复率可以考察沥青内部体系的团聚力,评价其弹性恢复性能,分析结果如表9和图5所示.

表9 弹性恢复率方差分析表

Tab.9 Elastic recovery rate variance analysis table

因素	偏差平方和	$F_{比}$	显著性
SBS掺量	3 574.960	28.070	显著
胶粉掺量	598.960	4.703	—
HDPE掺量	138.560	1.088	—
剪切时间	264.560	2.077	—
剪切速率	127.360	1.000	—
剪切温度	703.810	5.526	—

由表9和图5可以看出,SBS掺量对复合改性沥青的弹性恢复率影响最大.随着SBS掺量的增加,弹性恢复率不断提高.改性沥青弹性恢复率

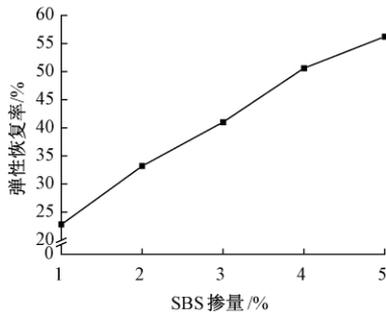


图 5 弹性恢复率随显著因素变化曲线

Fig. 5 The elastic recovery rate curves with the significant factors

的提高主要是因为 SBS 本身线性结构和弹性在拉伸过程中起到了抗拉和恢复作用。

综上所述,HDPE 掺量对复合改性沥青的针入度影响最大,HDPE 掺量越大,复合改性沥青针入度越低;SBS 掺量对复合改性沥青的软化点影响最大,且在试验掺量范围内,掺量越大软化点也越大。以软化点为考察指标时,SBS 掺量应为 5.0%。SBS 和 HDPE 掺量共同影响复合改性沥青的延度,延度随 SBS 掺量的增加而增大,随 HDPE 掺量的增加先增大后减小。以延度为考察指标时,SBS 掺量应为 5.0% 且 HDPE 掺量应为 1.5%。SBS 掺量对复合改性沥青的弹性恢复率的影响与软化点相同,掺量也应取 5.0%。另外,各改性剂掺量以及剪切温度对旋转黏度有影响,胶粉掺量可取 20%,剪切温度可取 165 ℃。与改性剂掺量相比,剪切时间对复合改性沥青性能的影响很小,从试验结果来看,剪切时间可取 45 min,剪切速率可取 4 500 r/min。

在较优制备方案下,HDPE/SBS/废胎胶粉三掺复合改性沥青的整体性能均有所提高,如表 10 所示。其针入度大约在 55 左右,软化点在 90 ℃左右,具有良好的高温稳定性;同时 5 ℃延度不低于 20 cm,具有良好的低温抗裂性;旋转黏度在 20 Pa·s 左右,高温下优秀的抗变形能力使其抗车辙能力、与集料的黏附性以及抗水损害能力大大提高;弹性恢复率高达 60%,抗裂性能也得到提高。

表 10 较优制备参数条件下复合改性沥青性能表

Tab. 10 Performance table for optimum preparation parameters

性能	针入度/ (0.1 mm)	软化点/ ℃	5 ℃延 度/cm	旋转 黏度/ (Pa·s)	弹性 恢复 率/%
较优方案	55	90	20	20	60

## 4 结论

(1) HDPE/SBS/废胎胶粉复合改性沥青制备工艺中各个工艺参数对其性能的影响均不相同,不能单独考虑某一因素或者以一个指标作为衡量标准。

(2) SBS 掺量对复合改性沥青的软化点和弹性恢复率影响最大;HDPE 掺量对复合改性沥青的针入度影响较大;SBS 和 HDPE 掺量都对复合改性沥青的延度有影响;各改性剂掺量和剪切温度对旋转黏度的影响基本相同。

(3) 综上所述,得到较优制备方案为:改性剂 HDPE 掺量为 1.5%,SBS 掺量为 5.0%,废胎胶粉掺量为 20%,剪切温度为 165 ℃,剪切速率为 4 500 r/min,剪切时间为 45 min。此时,改性沥青的高温稳定性、低温抗裂性、抗车辙能力和抗水损害能力得到提高。

(4) 各改性剂掺量对复合改性沥青的影响比较大,使得工艺参数对其影响不够明显。下一步可以在最佳掺量的基础上,抛开掺量对各个工艺参数进行研究。

## 参考文献:

- [1] 王小龙. 废胶粉/SBS 双复合改性沥青及路用性能研究[D]. 西安: 长安大学公路学院, 2016.
- [2] HAN L L, ZHENG M L, WANG C T, et al. Current status and development of terminal blend tyre rubber modified asphalt [J]. Construction and building materials, 2016(128): 399-409.
- [3] WANG S F, CHENG D X, XIAO F P, et al. Recent developments in the application of chemical approaches to rubberized asphalt [J]. Construction and building materials, 2017(131): 101-113.
- [4] 徐鸣明, 张壮, 杨晨, 等. 胶粉掺量及存储时间对橡胶沥青技术性质的影响 [J]. 中外公路, 2015, 35(5): 273-275.
- [5] 曹萍, 单宝龙, 王雷, 等. 苯乙烯焦油对橡胶改性沥青性能的影响 [J]. 精细石油化工, 2012, 29(2): 77-80.
- [6] 程源. 废胶粉应用前瞻 [J]. 合成橡胶工业, 2001, 24(2): 65-66.
- [7] 向丽. 废橡胶粉/SBS 复合改性沥青的机理和性能研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东)化学工程学院, 2011.
- [8] 康爱红, 肖鹏, 马爱群. 废胶粉改性沥青存储稳定性研究 [J]. 中外公路, 2007, 27(3): 205-207.
- [9] 李关龙. SBS/废胶粉改性沥青性能的研究 [D]. 上

- 海: 华东理工大学化工学院, 2016.
- [10] 杨朋, 张肖宁. PE 和 SBS 复合改性沥青混合料路用性能 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 40(10): 4044 - 4049.
- [11] 于凯, 刘力, 余强, 等. 废轮胎胶粉和废 PE 复合改性沥青性能研究 [J]. 环境工程学报, 2010, 4(3): 690 - 692.
- [12] 杨平文, 杨元武, 曹贵. SBS 复合改性橡胶沥青性能研究 [J]. 公路交通科技(应用技术版), 2015, 11(11): 115 - 127.
- [13] 程培峰, 史书铨. HDPE 改性沥青实验室制备工艺及性能研究 [J]. 中外公路, 2014, 32(2): 233 - 238.
- [14] 田健君, 杜群乐, 李文清, 等. 关于高密度聚乙烯改性沥青的几个问题 [J]. 上海公路, 2011, 18(4): 57 - 59.
- [15] 牛冬瑜, 韩森, 陈凯, 等. 加工工艺关键参数对 SBS 改性沥青性能影响 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2014, 34(3): 8 - 16.
- [16] 史书铨. HDPE - 胶粉改性沥青及其应力吸收层混合料性能研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学交通学院, 2014: 14 - 26.
- [17] 徐鸥明, 韩森, 牛冬瑜, 等. 测试条件对 SBS 改性沥青表观黏度影响研究 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(1): 84 - 86.

### Properties of Composite Modified Asphalt with HDPE/SBS/Waste Tire Powder Mixed

HE Rui<sup>1,2</sup>, HUANG Xin<sup>2</sup>, GENG Jiuguang<sup>2</sup>, CHEN Huaxin<sup>2</sup>

(1. Pavement Engineering Technology Research Center of Gansu Province, Lanzhou 730030, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** To study the optimum preparation process of HDPE/SBS/waste tire powder mixed with three kinds of modified asphalt, SK-90 # asphalt was used to select SBS content, powder content, HDPE content and Shear rate, shear time and shear temperature to prepare compound modified asphalt. The results were analyzed by variance analysis method. The influence of each test variable on the performance of composite modified asphalt was obtained, and the optimal preparation scheme was obtained. The results showed that the SBS content had the greatest effect on the softening point and the elastic recovery rate. The content of HDPE had a great effect on the penetration. The SBS and HDPE content had an influence on the ductility. The content of the modifier and the shear temperature the effect of rotational viscosity was essentially the same. The optimum preparation scheme was as follows: the content of HDPE was 1.5%, the content of SBS was 5%, the content of waste tire was 20%, the shear temperature was 165 °C, the shear rate was 4 500 r/min, the shear time was 45min. Under the optimal preparation scheme, the high temperature stability and low temperature crack resistance of the modified asphalt were greatly improved, and the viscosity of the modified asphalt was increased and the adhesion to the aggregate was enhanced, which improved the anti-rutting ability and the ability of resisting the water resistance. The elastic recovery rate could ensure the crack resistance of modified asphalt.

**Key words:** composite modified asphalt; orthogonal test; variance analysis; SBS; waste tire powder; HDPE

文章编号: 1671-6833(2018)02-0073-07

# 紊流强度与积分尺度对结构平均风压与脉动风压 雷诺数效应影响研究

白桦, 郭聪敏, 刘建新

(长安大学公路学院公路大型结构安全教育部工程中心, 陕西西安 710064)

**摘要:** 常规低雷诺数风洞试验得到的试验结果可能因为结构存在雷诺数效应产生误差, 风洞试验时, 紊流风特性参数的不当模拟可能导致这种误差进一步增大. 本文在风洞中采用格栅紊流, 分别形成了紊流强度相同但积分尺度不同与积分尺度相同但紊流强度不同的几种局部紊流风场, 以此来研究矩形结构表面风压雷诺数效应, 以及紊流强度与积分尺度对表面风压雷诺数效应的影响. 结果表明: 平均风压与脉动风压雷诺数效应在迎风面最小, 背风面最大, 侧风面次之. 积分尺度与紊流强度增大会导致雷诺数效应敏感区域的平均风压数值变化幅度进一步增大. 积分尺度对脉动风压雷诺数效应的影响较平均风压小, 尤其在背风面. 紊流强度对脉动风压雷诺数效应影响很小.

**关键词:** 土木工程; 风洞试验; 雷诺数效应; 紊流积分尺度; 紊流强度

**中图分类号:** U448.27; TU317.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.02.005

## 0 引言

建筑结构位于大气边界层风场中, 随着建筑高度增大, 对风的敏感性会逐渐增强. 目前高耸与大跨屋盖结构抗风性能研究主要依赖风洞试验. 受模型尺寸和试验风速限制, 风洞试验时的雷诺数数量级与实际结构雷诺数数量级存在明显差异, 可能会导致某些气动响应测量误差. 李加武研究了极端桥梁断面雷诺数效应, 指出传统低雷诺数风洞试验得出的测力试验结果偏保守<sup>[1]</sup>. 为了弄清楚雷诺数效应会给土木结构风洞试验结果带来哪些影响, 国内外学者进行了大量研究. Barre 以诺曼底桥为研究对象, 制作了三种不同缩尺比模型, 研究雷诺数效应的影响, 得到的三分力系数曲线不一致, 特别是升力系数曲线, 这表明升力系数对雷诺数较敏感<sup>[2]</sup>. 金挺通过试验发现扁平流线形断面雷诺数效应比较突出, 随雷诺数变化, 三分力系数变化幅度约为 50%<sup>[3]</sup>. Schewe 通过钝体断面尾流形状研究雷诺数效应, 认为雷诺数效应同样会使钝体断面产生 30% 左右的变化幅度<sup>[4]</sup>. Tieleman 研究了紊流风特性参数对钝体结构表面

风荷载的影响, 结果表明, 只要模型的特征尺寸大于 2 倍紊流积分尺度, 则积分尺度的影响会很小, 但紊流强度反映了小尺度紊流的作用, 对模型负压区结果的影响非常明显, 需要严格模拟<sup>[5]</sup>. Edward 通过研究紊流控制方法抑制试验时的雷诺数效应<sup>[6]</sup>. Matsubara 研究指出, 在低雷诺数 ( $Re \leq 4000$ ) 情况下, 也会产生大尺度的波动, 从而影响结构表面压力分布<sup>[7]</sup>. 李加武等人通过大比例尺节段模型试验, 研究了较大雷诺数数量级的流线形断面与钝体断面三分力系数, 指出雷诺数效应对流线形桥梁断面影响较钝体断面大, 紊流或增大模型表面粗糙度可以有效抑制雷诺数效应, 特别是阻力系数<sup>[8-9]</sup>. 华旭刚对输电塔进行了研究, 发现紊流积分尺度会使风振系数结果偏保守, 并给出了紊流积分尺度修正系数<sup>[10]</sup>. 卢占斌采用不同紊流参数的局部紊流场对 CAARC 模型进行试验, 发现紊流强度与积分尺度均会对风洞试验结果产生影响<sup>[11]</sup>.

虽然风洞试验时的雷诺数数量级偏小很多, 但可以通过大量的比对试验, 尝试找到雷诺数效应的影响规律. 前述学者的研究表明, 风洞试验

收稿日期: 2017-10-11; 修订日期: 2017-12-09

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2014M560737); 中国博士后科学基金特别资助项目(2016T90876); 桥梁结构抗风技术交通行业重点实验室开放基金资助(KLWRTBMC10-01)

作者简介: 白桦(1979—), 男, 甘肃西和人, 长安大学高级工程师, 博士后, 长安大学公路学院, 从事桥梁抗风研究, Email: baihua9810@163.com.

时,雷诺数效应可能会对试验结果产生影响.产生雷诺数效应的根本原因可能是风特性参数的变化导致结构表面风压分布规律发生变化.为了研究这些影响,笔者制作了两个不同缩尺比模型,在风洞中采用格栅模拟了16种不同的局部紊流风场,分别形成了紊流强度相同但积分尺度不同和积分尺度相同但紊流强度不同的几种风场,以此来研究矩形结构雷诺数效应,以及紊流强度与积分尺度对矩形结构雷诺数效应的影响.

### 1 风洞试验

#### 1.1 试验流场

试验设计如图1和表1、表2所示.



图1 格栅风场

Fig.1 Turbulence field of grilles

表1 各工况紊流强度

Tab.1 The turbulence intensity of different schemes

格栅宽度/ cm	格栅中心孔尺寸/cm				%
	60	40	30	20	
25	35.1	37.9	33.4	37.5	
20	31.7	25.8	23.3	29.1	
15	25.6	25.9	20.9	18.2	
10	22.3	17.8	17.3	18.6	

表2 各工况紊流积分尺度

Tab.2 The turbulence integral scale of different schemes

格栅宽度/ cm	格栅中心孔尺寸/cm				m
	60	40	30	20	
25	0.122 4	0.294 0	0.255 5	0.384 4	
20	0.118 9	0.408 6	0.203 1	0.775 4	
15	0.104 9	0.307 2	0.291 9	0.285 6	
10	0.100 6	0.078 5	0.101 1	0.239 5	

#### 1.2 试验模型

制作两种尺度模型,最小尺度模型为横截面尺寸为10 cm的正方形,高30 cm.大尺度模型是小尺度模型的2倍,外形相同,等比例放大.风速相同时,大尺度模型雷诺数是小尺度模型的2倍,模型分区示意如图2所示.图3为各分区测点布

置图,两种尺度模型测点的相对位置保持一致.试验照片如图4所示.为保证数据稳定性,试验风速选择8 m/s与10 m/s两种,每个风速下采集3组数据,将6组数据取平均.试验装置选择美国PSI公司电子压力扫描阀,采样频率312.5 Hz,采样时长60 s.

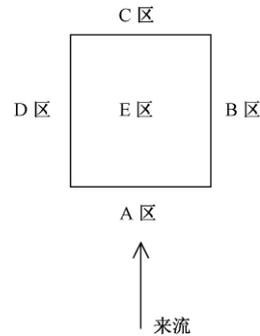


图2 模型分区示意

Fig.2 Model partition

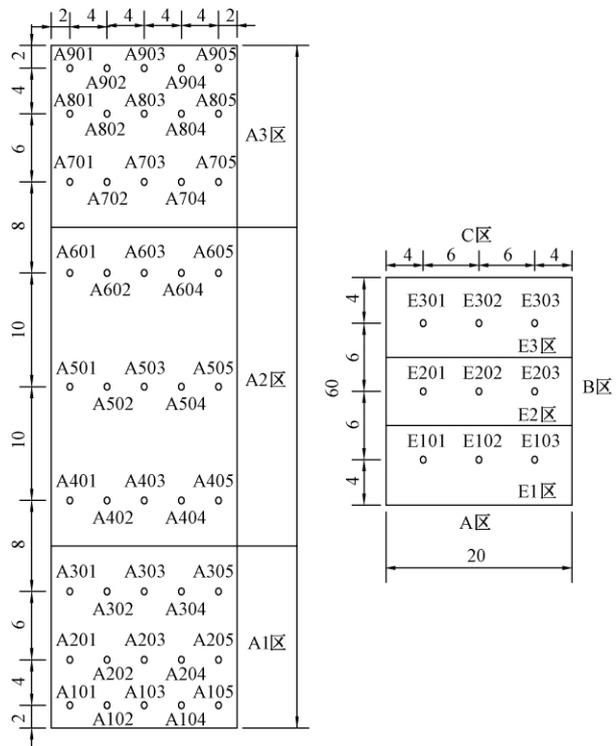
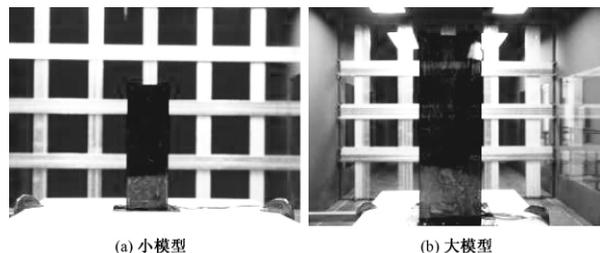


图3 模型测点

Fig.3 Measuring point arrangement



(a) 小模型

(b) 大模型

图4 模型试验照片

Fig.4 Photos of model test

### 1.3 数据处理

各测点无量纲压力系数可按式 (1) 计算,

$$C_{pi} = \frac{P_i - P_\infty}{P_0 - P_\infty}, \quad (1)$$

式中:  $C_{pi}$  为测点  $i$  处的压力系数;  $P_i$  为作用在测点  $i$  处的压力;  $P_0$  和  $P_\infty$  分别是试验时参考高度处的总压和静压. 本试验参考点高度取模型顶部位置. 由风压系数时程可分别得到平均风压和脉动风压.

## 2 试验结果及分析

### 2.1 风场不变时平均风压雷诺数效应

由于矩形结构表面极值风压通常出现在迎风面及背风面中部区域, 限于篇幅, 笔者主要分析模型第 5 行与第 3 列风压雷诺数效应. 图 5 为第 5 行与第 3 列测点位置示意图. 图 6 为在格栅 10 ~ 20 风场中第 5 行与第 3 列平均风压系数随雷诺数变化情况.

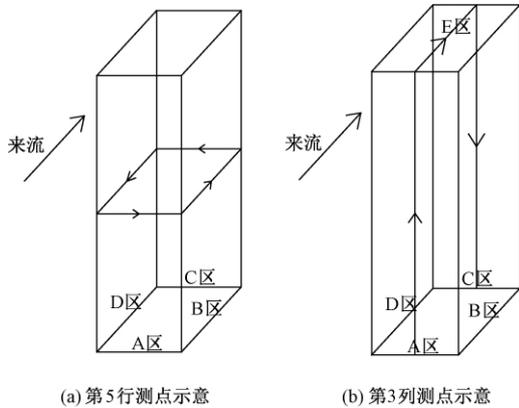


图 5 模型第 5 行与第 3 列位置示意

Fig. 5 Measuring point arrangement of the fifth line and the third column of the model

由图 6 可见, 平均风压在迎风面呈中间变化小, 两侧变化大的现象. 如雷诺数由  $6.7 \times 10^4$  增大到  $1.33 \times 10^5$ , A503 测点平均风压由 1.20 增大到 1.22, 变化幅度 1.67%, 位于第 5 行两侧的 A501 测点和 A505 测点变化幅度分别是 6.17% 和 7.14%. 第 3 列也呈中间变化小, 顶部和底部变化大的现象, 如第 3 列中部区域 A403 与 A603 测点变化幅度分别为 0.79% 和 1.59%, 底部区域 A103 测点减小 6.4%, 顶部区域 A903 测点减小 5.6%. 表明在模型的边界区、棱角区受气流分离等现象影响, 平均风压系数对雷诺数更加敏感. 与侧面、背风面比, 雷诺数增大 2 倍, 迎风面平均风压系数变化很小, 最大变化幅度不超过 7%. 侧面雷诺数增大 2 倍, 平均风压系数变化的幅度

在 10% ~ 20%. 背风面变化幅度最大约 30% ~ 40%. 背风面会受来流紊流、特征紊流、涡脱、再附等因素影响, 导致流场最复杂, 所以雷诺数效应最明显, 这与迎风面不同位置雷诺数效应敏感程度相吻合.

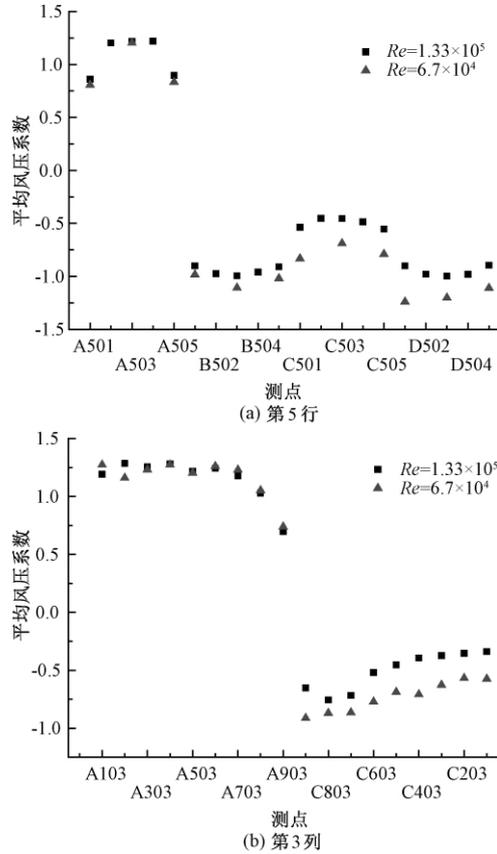


图 6 平均风压系数随雷诺数变化情况

Fig. 6 Variation of mean wind pressure coefficient changing with Reynolds number

### 2.2 紊流积分尺度对平均风压雷诺数效应的影响

为研究低雷诺数变为高雷诺数后试验数值的波动幅度, 定义雷诺效应因子  $T$ , 如式 (2) 所示.  $T_n(Re_1 - Re_2) = 100 \times C_n(Re_2) / C_n(Re_1)$ , (2) 式中:  $Re_1$  代表低雷诺数;  $Re_2$  代表高雷诺数. 下标  $n$  可以为 mean、rms、t, 分别表示平均风压系数、脉动风压系数、体型系数.

表 3 为雷诺数增大 2 倍后, 在两种不同积分尺度(紊流强度相同)流场中, 第 5 行与第 3 列测点平均风压系数雷诺效应因子. 由表 3 可见, 在迎风面 A 区, 紊流积分尺度变化对雷诺效应因子影响不明显, 平均风压系数在两种不同积分尺度流场中变化幅度很小, 最大不超过 5%. 侧面 B 区、D 区与背风面 C 区雷诺效应因子较 A 区增大, 说明在流场较复杂的侧风区与背风区, 雷诺数

效应会变得较敏感. 紊流积分尺度增大,使 B 区、D 区、C 区雷诺效应因子增大的幅度变大. 侧风面 B 区、D 区不同位置增大幅度约 3% ~ 15%, 背风面 C 区增大幅度最大, 约 10% ~ 20%. 说明积分尺度增大会导致雷诺数效应敏感区域的平均风压数值变化幅度进一步增大. 雷诺数效应越明显, 紊流积分尺度的影响越大.

表 3 积分尺度对第 5 行和第 3 列测点  $T_{mean}$  ( $6.7 \times 10^4 \sim 1.33 \times 10^5$ ) 影响

Tab. 3 Effect of integral scale on the  $T_{mean}$  ( $6.7 \times 10^4 \sim 1.33 \times 10^5$ ) of measuring point in fifth line and third column

测点	积分尺度		测点	积分尺度	
	0.10 m	0.24 m		0.10 m	0.24 m
A501	-4.35	6.17	A103	1.06	-6.3
A503	-4.04	1.67	A303	-1.01	2.44
A505	-3.21	7.14	A503	-4.04	1.67
B501	-8.89	-8.16	A703	2.33	-4.07
B503	-6.12	-10.81	A803	8.45	-1.9
B505	-7.69	-10.78	A903	6.12	-5.41
C501	-12.9	-34.94	C903	-8.7	-28.57
C503	-16.36	-34.78	C803	-19.12	-12.64
C505	-17.19	-30.38	C703	-10.94	-16.28
D501	-19.15	-27.42	C503	-16.36	-34.78
D503	0	-16.67	C303	-22.45	-41.27
D505	-1.05	-19.82	C103	-15.91	-40.35

2.3 紊流强度对平均风压雷诺数效应的影响

表 4 为雷诺数增大 2 倍后, 在 3 种不同紊流强度(积分尺度相同)的流场中, 矩形结构表面分区体型系数雷诺效应因子, 由表 4 可见, 迎风面 A 区(正压区)雷诺效应因子随紊流强度增大逐渐减小, 在紊流强度 35% 的流场中, 迎风面 A1 ~ A3 区体型系数基本不受雷诺数效应影响, 不同尺度模型得到的体型系数基本保持不变. 在侧风面、背风面及顶面(负压区)雷诺效应因子均随紊流强度增大而增大, 在紊流强度 35% 的流场中, 矩形结构负压区体型系数雷诺数效应比较明显. 分析原因, A 区处于迎风面, 直接受来流紊流的影响, 受结构尺度影响较小. 侧风面与背风面的负压区除了受来流紊流影响, 结构尺度自身造成的特征紊流也会影响. 特征紊流受结构外形影响, 来流经过结构表面产生涡脱、分离、再附等绕流现象. 来流紊流强度越大, 造成的特征紊流紊流程度越强. 顶面、背风面、侧风面负压区均会受到绕流、尾流的影响, 所以这些区域的体型系数表现出雷诺数效应,

结构尺度变化后, 导致特征紊流发生变化, 从而影响到负压区的体型系数. 模型尺度越大, 紊流强度变化导致负压区的体型系数变化幅度也越大.

表 4 紊流强度对分区体型系数  $T_i$  ( $6.7 \times 10^4 \sim 1.33 \times 10^5$ ) 影响

Tab. 4 Effect of turbulence intensity on the  $T_i$  ( $6.7 \times 10^4 \sim 1.33 \times 10^5$ ) of partition shape coefficient

分区	紊流强度 17%	紊流强度 22%	紊流强度 35%
A1	-12.16	-8.75	-3.30
A2	5.41	5.19	0.00
A3	12.73	10.53	0.00
B1	-6.67	-2.35	20.00
B2	3.06	6.45	22.22
B3	7.00	12.63	29.21
C1	22.00	18.18	42.86
C2	18.33	16.98	40.00
C3	15.94	15.87	43.64

2.4 风场不变时脉动风压雷诺数效应

图 7 为格栅 10 ~ 20 风场中第 5 行与第 3 列脉动风压系数随雷诺数变化情况. 与平均风压系数雷诺数效应类似, 在迎风面脉动风压系数变化

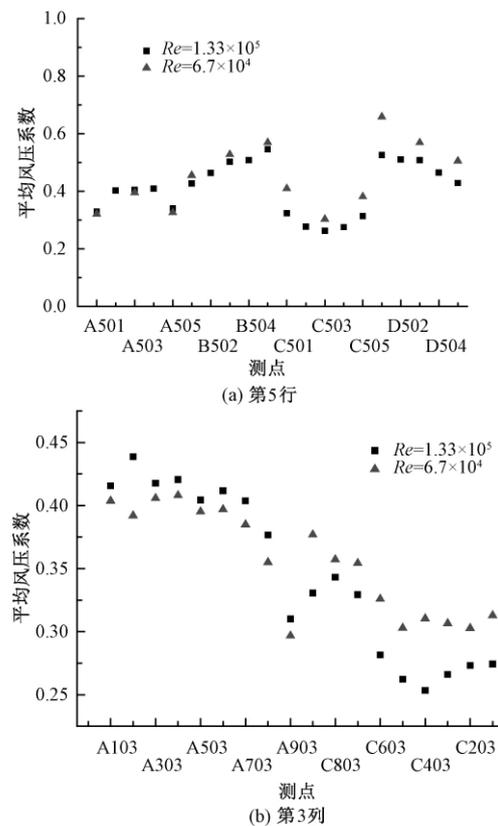


图 7 脉动风压系数随雷诺数变化情况  
Fig. 7 Variation of fluctuating wind pressure coefficient changing with Reynolds number

幅度很小,最大变化幅度为 9.5%,出现在 A903 测点,迎风面各位置也呈现中间小,两侧及顶部、底部区域稍大的趋势.侧风面与背风面随雷诺数增大脉动风压系数变化幅度较迎风面明显增大,背风面变化幅度稍大于侧风面.负压区的脉动风压系数随雷诺数增大呈减小趋势.脉动风压的雷诺数效应敏感区与平均风压雷诺数效应敏感区一致.

### 2.5 紊流积分尺度对脉动风压雷诺数效应的影响

表 5 为雷诺数增大 2 倍后,积分尺度变化对第 5 行与第 3 列测点脉动风压系数雷诺效应因子的影响.由表 5 可见,积分尺度变化后,迎风面脉动风压系数雷诺效应因子均不大.迎风面中部区域当来流积分尺度为 0.10 m 时,脉动风压系数随雷诺数增大而减小,积分尺度增大为 0.24 m 时,脉动风压系数随雷诺数增大而增大.分析原因,从积分尺度与模型尺寸比例关系看,小模型的横截面尺寸是 0.10 m 的正方形,所以 0.10 m 与 0.24 m 的来流紊流积分尺度均比模型的特征尺寸大,可以将模型“包裹”起来.大模型的特征尺寸是 0.20 m,是 0.10 m 积分尺度的 2 倍,这就导致 0.10 m 的来流积分尺度无法完全覆盖大模型,积分尺度所形成的涡团影响范围与模型尺寸之间的相对比例关系发生变化,导致涡脱、再附等流场影响区域发生变化,导致大、小模型迎风面不同区域雷诺效应因子变化趋势产生差异.

表 5 积分尺度对第 5 行和第 3 列测点  $T_{rms}$  ( $6.7 \times 10^4 \sim 1.33 \times 10^5$ ) 影响

Tab.5 Effect of integral scale on the  $T_{rms}$  ( $6.7 \times 10^4 \sim 1.33 \times 10^5$ ) of measuring point in fifth line and third column

测点	积分尺度		测点	积分尺度	
	0.10 m	0.24 m		0.10 m	0.24 m
A501	-7.69	3.13	A103	0.00	5.00
A503	-3.34	0.00	A303	-7.14	2.44
A505	-4.55	3.03	A503	-3.34	0.00
B501	-11.76	-6.52	A703	-3.85	5.26
B503	-9.76	-5.66	A803	0.00	8.57
B505	-9.09	-3.51	A903	9.52	3.33
C501	-15.38	-21.95	C903	-8.00	-13.16
C503	-10.53	-13.33	C803	-13.04	-5.56
C505	-18.52	-18.42	C703	-9.09	-5.71
D501	-15.22	-19.70	C503	-10.53	-13.33
D503	-8.89	-10.53	C303	-10.53	-12.90
D505	-10.53	-15.69	C103	-10.00	-12.90

侧风面与背风面负压区的脉动风压系数随雷

诺数增大呈减小趋势.来流积分尺度增大会导致脉动风压变化的幅度稍微增大,与积分尺度对平均风压雷诺效应因子影响相比,积分尺度变化对脉动风压的影响程度较平均风压小,尤其是背风面.

### 2.6 紊流强度对脉动风压雷诺数效应的影响

图 8 为紊流强度对矩形结构分区脉动风压系数的影响,由图 8 可见,增大紊流强度会使各区脉动风压系数也增大.背风面与侧风面脉动风压系数增大的幅度明显较迎风面小.迎风面顶部 A3 区域的脉动风压系数随紊流强度的变化幅度最大,位置越高对紊流强度变化越敏感.矩形结构迎风面中上部位置是正压极值出现的位置,而此区域的脉动风压系数对紊流强度非常敏感,所以试验时紊流强度的不当模拟可能导致脉动风压结果误差增大.背风面脉动风压系数对紊流强度的敏感程度最小,侧风面敏感程度居于两者之间.

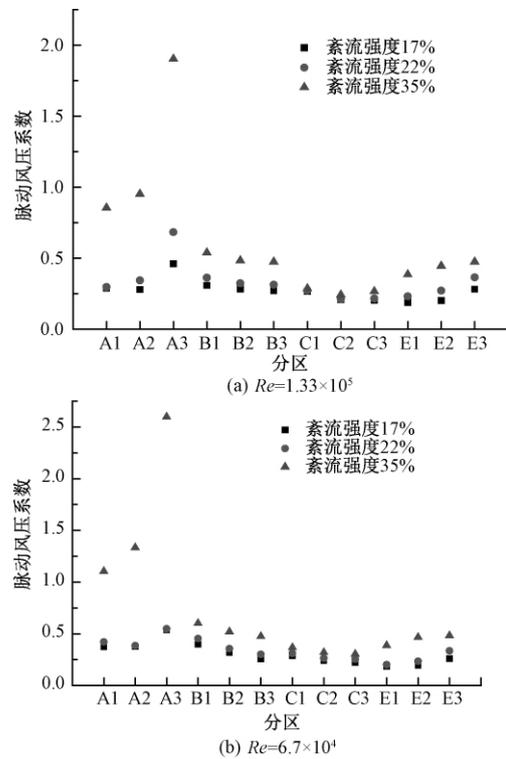


图 8 不同分区脉动风压系数  
Fig.8 Fluctuating wind pressure coefficient of different partition

图 9 为紊流强度对迎风面与背风面测点脉动风压时程影响情况,由图 9 可见,背风面脉动风压系数对紊流强度的敏感程度较迎风面小很多.A905 测点处于顶角边缘位置,此处会受到涡脱、边界层分离、再附等特征紊流影响,所以对来流紊

流强度非常敏感. 矩形结构外形简单, 特征紊流影响的范围与程度相对较小. 对外形更加复杂的结构, 可以预测风洞试验时紊流强度模拟误差会导致更大的脉动风压系数误差.

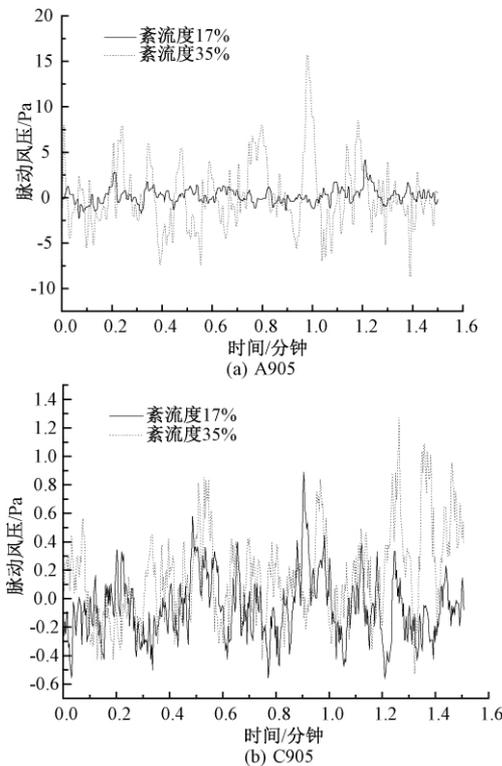


图9 迎风面与背风面测点脉动风压时程

Fig. 9 Time history of fluctuating wind pressure on the windward and leeward sides

表6为雷诺数增大2倍后, 紊流强度变化对脉动风压系数雷诺效应因子的影响. 由表6可见, 迎风面脉动风压雷诺效应因子较侧风面与背风面大. 紊流强度增大后使脉动风压系数增大的幅度

表6 紊流强度对分区脉动风压系数  $T_{rms}$  ( $6.7 \times 10^4 \sim 1.33 \times 10^5$ ) 影响

Tab. 6 Effect of turbulence intensity on the  $T_{rms}$  ( $6.7 \times 10^4 \sim 1.33 \times 10^5$ ) of partition fluctuating wind pressure coefficient

分区	紊流强度 17%	紊流强度 22%	紊流强度 35%
A1	22.70	29.86	22.55
A2	25.87	11.08	28.62
A3	14.20	24.48	26.77
B1	22.46	20.38	10.53
B2	11.32	9.31	7.11
B3	5.16	4.19	0.29
C1	7.59	12.10	22.18
C2	13.55	18.71	24.40
C3	8.28	14.84	12.75

没有明显规律, 基本不受模型尺度影响, 表明紊流强度对脉动风压系数雷诺数效应影响很小. 矩形结构表面不同位置脉动风压对紊流强度的敏感程度不同, 脉动风压大小主要取决于来流紊流强度, 与模型尺度无关.

### 3 结论

(1) 平均风压与脉动风压雷诺数效应在迎风面最小, 背风面最大, 侧风面次之.

(2) 积分尺度增大会导致雷诺数效应敏感区域的平均风压数值变化幅度进一步增大. 雷诺数效应越明显, 紊流积分尺度的影响越大.

(3) 来流紊流强度越大, 模型负压区平均风压系数的雷诺数效应越大; 模型尺度越大, 紊流强度变化导致负压区的体型系数变化幅度也越大.

### 参考文献:

- [1] 李加新, 林志兴, 项海帆. 极端桥梁断面雷诺数效应研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2003, 24(2): 22-25.
- [2] BARRE C, BARNAUD G. High Reynolds number simulation techniques and their application to shaped structures model test, wind Engineering Thomas Telford, London, 1993.
- [3] 金挺, 林志兴. 扁平箱形桥梁断面斯特罗哈数的雷诺数效应研究[J]. 工程力学, 2006, 23(10): 174-179.
- [4] SCHEWE G. Reynolds number effects in flow around more-or-less bluff bodies [J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamic, 2001, 89(2): 91-97.
- [5] TIELEMAN H W. Wind tunnel simulation of the turbulence in the surface layer, the proceedings of the 6<sup>th</sup> U. S. National Conference on Wind Eng. Vol. 2 March 8-10 1989 Univ. of Houston.
- [6] HURST E, YANG Q, CHUNG Y M. The effect of Reynolds number on turbulent drag reduction by streamwise travelling waves [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2014, 759(12): 28-55.
- [7] MATSUBARA M, HORII S, YOSHIYUKI S, et al. Very-large-scale fluctuations in turbulent channel flow at low Reynolds number [J]. International journal of heat and fluid flow, 2016, 31(1): 12-18.
- [8] 李加武, 张宏杰, 韩万水. 斜拉桥风致响应的雷诺数效应[J]. 中国公路学报, 2009, 22(2): 42-47.
- [9] 白桦. 影响桥梁及建筑结构风洞试验结果若干因素研究[D]. 西安: 长安大学公路学院, 2012.
- [10] 华旭刚, 陈政清, 杨靖波, 等. 大缩尺比气弹模型

风洞试验紊流积分尺度修正 [J]. 建筑结构学报, 2010,31(10): 55-61.

[11] 卢占斌, 魏庆鼎. 网格紊流 CAARC 模型风洞实验 [J]. 空气动力学学报. 2001,19(3): 16-23.

## Study on the Effect of Turbulence Intensity and Integral Scale on the Reynolds Number Effect for the Surface Wind Pressure of Rectangular Structure

BAI Hua, GUO Congmin, LIU Jianxin

(Research Center of Highway Large Structure Engineering on Safety, School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** The experimental results obtained from the conventional low Reynolds number wind tunnel test may name errors due to the Reynolds number effect. And the improper simulation of turbulent wind parameters may lead to further increase of the error in the wind tunnel test. By using grille turbulence in the wind tunnel, a serial of local turbulent wind fields were formed with the same turbulence intensity but different integral scale and with the same turbulence integral scale but different intensity. This paper examined the Reynolds number effect for the surface wind pressure of rectangular structure and the effect of turbulence intensity and integral scale on the Reynolds number effect for the surface wind pressure. The results showed that the Reynolds number effect of the mean wind pressure and the fluctuating wind pressure was the lowest in the windward side, the maximum in the leeward side and the second in the crosswind. The increase of the turbulence integral scale and intensity would lead to the further increase of the mean wind pressure's rangeability in the sensitive region of the Reynolds number effect. The influence of the integral scale on the Reynolds number effect of the fluctuating wind pressure was smaller than that of the mean wind pressure, especially on the leeward side. And the turbulence intensity had little effect on the Reynolds number effect. The fluctuating wind pressure on the structure surface was mainly dependent on the turbulence intensity of the inflow, which was independent of the scale of the model.

**Key words:** civil engineering; wind tunnel test; Reynolds number effect; turbulence integral scale; turbulence intensity

文章编号: 1671-6833(2018)02-0080-06

# SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/ZrO<sub>2</sub>/USY 催化纤维素醇解制备乙酰丙酸乙酯

常春, 安冉, 孔鹏飞

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 采用沉淀-浸渍法制备 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/ZrO<sub>2</sub>/USY 固体酸催化剂, 并考察其在乙醇介质中催化纤维素转化合成乙酰丙酸乙酯(EL)的影响因素. 结果表明, 400 °C 焙烧 3 h 的质量百分数为 10% 的 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/ZrO<sub>2</sub>/USY 催化剂表现出最佳活性, 在反应温度 200 °C, 反应时间 3 h, 催化剂用量为 10 g/L 的条件下, EL 产率达到 38.1 mol%. 以果糖、葡萄糖、蔗糖和菊糖为原料时, 转化生成乙酰丙酸乙酯的产率分别为 50.77 mol%、39.55 mol%、44.87 mol% 和 43.59 mol%. 采用 XRD、FT-IR、BET、NH<sub>3</sub>-TPD 和 TG-DTA 等对催化剂进行表征. 制备的固体酸催化剂重复使用 4 次仍可保持较好的催化活性.

**关键词:** SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/ZrO<sub>2</sub>/USY; 纤维素; 催化; 醇解; 乙酰丙酸乙酯

**中图分类号:** TQ352 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.05.010

## 0 引言

乙酰丙酸酯是重要的生物质基化合物, 被广泛应用于食品、医药、农药、橡胶、涂料和运输等行业<sup>[1-2]</sup>. 乙酰丙酸酯可以通过生物质衍生物如乙酰丙酸或糠醇为原料制备, 此方法通常能得到较高的乙酰丙酸产率和选择性<sup>[3-4]</sup>. 乙酰丙酸酯可以通过生物质直接醇解合成, 此方法具有工艺简单、过程条件容易控制等优点<sup>[5]</sup>. 固体酸由于具备产品易分离、可重复使用和环境污染少等优点, 越来越受到人们的青睐<sup>[6]</sup>. 开发高活性的固体酸催化剂是当前利用生物质制备乙酰丙酸酯的重点和难点.

文献[7]对价格低廉的蒙脱石(Montmorillonite, MMT)进行硫酸化处理以提高酸位点数量和酸度, 其中 20-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/MMT(用 20% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 处理 MMT)表现出较好的催化效果, 在最优条件下催化醇解葡萄糖和果糖转化生成乙酰丙酸甲酯的产率分别为 48% 和 65%. 孙培勤等<sup>[8]</sup>以超稳 Y 型分子筛为催化剂, 在乙醇中催化纤维素醇解制备 EL, 通过工艺优化, EL 摩尔产率可达 14.95%. 分子筛具有较大的比表面积, 具有独特的孔道结构, 将介孔材料的结构优势与超强酸的酸性特征结合起来, 将有望得到更具应用前景的介孔固体

超强酸材料.

本试验将 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/ZrO<sub>2</sub> 负载于 USY 分子筛上, 并将其用于催化转化纤维素生成 EL, 并对纤维素醇解的工艺条件进行了考察.

## 1 试验

### 1.1 试验原料与试验装置

纤维素(粒径 90 μm)、果糖(≥ 99%)、菊糖(生化试剂)、乙酰丙酸乙酯(分析纯), 上海阿拉丁有限公司; 无水乙醇(分析纯)、正辛醇(分析纯), 天津风船试剂有限公司; 葡萄糖(分析纯)、蔗糖(分析纯), 天津科密欧化学试剂有限公司; USY 分子筛(工业级), 天津南化催化剂公司. 高压釜(100 mL, 河南予华仪器有限公司)和 GC1690 气相色谱仪(杭州科晓化工仪器设备有限公司).

### 1.2 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/ZrO<sub>2</sub>/USY 催化剂的制备

称取一定质量的 USY 分子筛加入到一定浓度的 ZrOCl<sub>2</sub>·8H<sub>2</sub>O 溶液中, 搅拌, 用浓氨水调节该乳浊液的 pH 至 9~10, 陈化 24 h 后抽滤, 蒸馏水洗涤至无 Cl<sup>-</sup>(用 AgNO<sub>3</sub> 溶液检测), 120 °C 烘干, 研细, 得到固体粉末. 将固体粉末置入 0.5 mol/L (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中浸渍搅拌 1 h, 烘干研细, 400 °C 焙烧 3 h, 即得 x% SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/ZrO<sub>2</sub>/USY(记为 x% SZ-USY, x 为 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/ZrO<sub>2</sub> 的质量百分数).

收稿日期: 2017-07-17; 修订日期: 2017-09-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21176227); 河南省基础与前沿技术研究资助项目(162300410007)

作者简介: 常春(1973—), 男, 河南郑州人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事生物质能源化研究, E-mail: chunchang@zzu.edu.cn.

### 1.3 试验步骤

将一定质量的纤维素、40 mL 无水乙醇和一定量的固体酸催化剂加入到高压反应釜中,于设定温度下反应一定时间,反应产物经真空抽滤分离,液相产物用气相色谱分析;固相残渣在马弗炉中 400 °C 焙烧 4 h 进行活化。

### 1.4 催化剂的表征

XRD 分析采用德国 Bruker D8 Advance 型 X 射线衍射仪,  $\text{Cu K}_\alpha$  射线,镍单色器,工作电压 40 kV,工作电流 40 mA,步长 0.02°。FT-IR 表征采用美国 Nicolet200 傅立叶红外光谱仪,光谱范围:  $4\ 500\ \text{cm}^{-1} \sim 400\ \text{cm}^{-1}$ ;分辨率:  $4\ \text{cm}^{-1}$ ,溴化钾压片。 $\text{N}_2$  物理吸附采用 ASAP 2420-4MP 型(美国 Micromeritics)全自动比表面及孔隙度分析仪对样品的比表面积、孔容和孔径进行测试。 $\text{NH}_3$ -TPD 采用天津先克公司 TP 5090E 型全自动化学吸附仪。TG-DTA 在 DTG-60 差动热分析仪(日本岛津公司)进行,在氮气(30 mL/min)气氛下,以  $10\ \text{°C}/\text{min}$  升温至 800 °C。

### 1.5 产物分析及计算

采用气相色谱内标法测定产物 EL 的含量。EL 产率摩尔百分数定义:

$$\text{EL 产率} = \frac{m_1/M_1}{m_0/M_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:  $m_0$  和  $m_1$  分别为原料碳水化合物和 EL 的质量, g;  $M_0$  和  $M_1$  分别为原料碳水化合物和 EL 的摩尔质量, g/mol。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同 $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$ 负载量的影响

在纤维素浓度为 20 g/L,催化剂为 10 g/L,反应温度为 220 °C,反应时间为 2 h 的条件下,考察不同  $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$  负载量对 EL 产率的影响,结果如表 1 所示。随着  $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$  负载量的增加,EL 的产率逐渐下降。为分析这一变化的原因,对不同  $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$  负载量的分子筛催化剂进行 XRD 和 FT-IR 表征。

图 1 为不同负载量催化剂的 XRD 和 FT-IR 谱图。由图 1(a) 看出,在  $2\theta$  为  $5^\circ \sim 35^\circ$ 、 $12.0^\circ$ 、 $15.7^\circ$ 、 $18.8^\circ$ 、 $20.6^\circ$ 、 $23.9^\circ$ 、 $27.4^\circ$  和  $32.8^\circ$  处出现明显的衍射峰,这些特征峰对应 zeolite Y 分子筛,当  $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$  负载量为 10% 时,催化剂仍保持 USY 的晶体结构,几乎看不到  $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$  的特征峰,表明  $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$  高度分散在载体 USY 上。随着负载量的增加,USY 的衍射峰逐渐消失,这是

表 1 不同负载量  $\text{SZ-USY}$  催化纤维素合成 EL

Tab.1 Synthesis of ethyl levulinate from cellulose using different  $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$  loading over USY

催化剂	催化剂用量/(g·L <sup>-1</sup> )	EL 产率/(mol%)
USY	10	19.1
10% SZ-USY	10	38.2
20% SZ-USY	10	35.6
40% SZ-USY	10	34.5

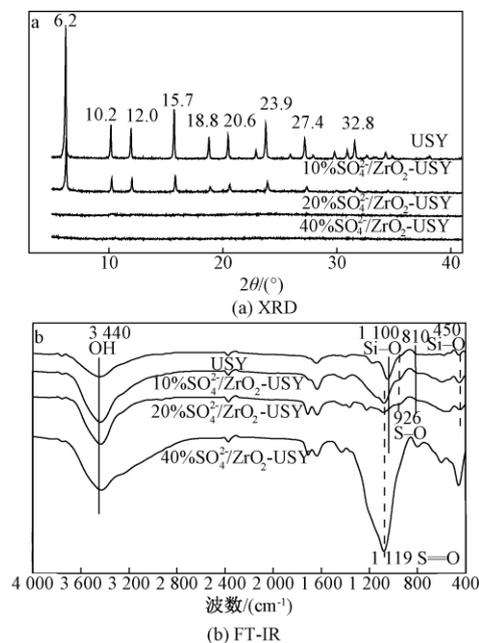


图 1 不同负载量催化剂的 XRD、FT-IR 谱图  
Fig.1 XRD patterns and FT-IR spectra of catalysts with different  $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$  loading

因为大量的  $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$  堆积在载体内壁和表面,使孔形发生了变化<sup>[9]</sup>。同时,由于过量的  $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$  负载会覆盖分子筛的酸活性位点,降低负载催化剂的催化活性,因此, $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$  的负载量为 10% 最佳。

图 1(b) 为催化剂负载前后的红外光谱图。如图 1(b) 所示,在  $450$ 、 $810$  和  $1\ 100\ \text{cm}^{-1}$  附近是 Si—O 键产生的特征峰<sup>[10]</sup>,在  $1\ 119\ \text{cm}^{-1}$  和  $926\ \text{cm}^{-1}$  附近分别是 S=O 键和 S—O 键的对称伸缩振动峰<sup>[11]</sup>,在  $3\ 440\ \text{cm}^{-1}$  附近是 O—H 的伸缩振动峰。由此可以推断, $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$  成功负载到 USY 分子筛上。随着负载量的增加,USY 在  $1\ 100\ \text{cm}^{-1}$  附近的 Si—O 吸收峰减弱,由  $1\ 100\ \text{cm}^{-1}$  红移至  $1\ 119\ \text{cm}^{-1}$ ,与 S=O 的吸收峰重合,这可能是  $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$  和载体之间的相互作用引起的。这种相互作用随着  $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$  负载量的增加而增强,10% 的  $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$  对分子筛骨架硅铝比的

影响较小。

## 2.2 催化剂的表征

### 2.2.1 比表面积分析(BET)

USY 分子筛负载改性前后的  $N_2$ -物理吸附结

果如表 2 所示. 负载  $SO_4^{2-}/ZrO_2$  后的 SZ-USY 的平均孔径增大至 7.29 nm, 但比表面积和孔容均降低, 这是因为部分  $SO_4^{2-}/ZrO_2$  分散在 USY 孔道内外或孔口, 造成孔堵塞。

表 2 改性前后分子筛的表面积及孔隙

Tab. 2 Surface area and porosity of zeolites before-after modification

样品	BET 表面积/ ( $m^2 \cdot g^{-1}$ )	外表面积/ ( $m^2 \cdot g^{-1}$ )	介孔孔容/ ( $m^3 \cdot g^{-1}$ )	微孔孔容/ ( $m^3 \cdot g^{-1}$ )	平均孔径/ nm	介孔孔径/ nm
USY	789.637 0	69.605 8	0.083 7	0.296 8	1.927 5	4.919 5
10%SZ-USY	64.958 9	20.483 5	0.043 9	0.019 1	3.881 8	7.285 0

### 2.2.2 氨气吸附-脱附( $NH_3$ -TPD)

图 2 为  $NH_3$ -TPD 谱图. 从图 2 看出, USY 催化剂出现 2 个脱附峰: 150 ~ 250  $^{\circ}C$  间的脱附峰对应弱酸中心, 350 ~ 450  $^{\circ}C$  间的脱附峰对应强酸中心. 而 SZ-USY 催化剂除了弱酸峰和中强酸峰外, 在 550 ~ 620  $^{\circ}C$  间呈现明显的高温脱附峰, 表明经过负载改性后, 虽然总酸量减少(由 1.191 mmol/g 降到 1.035 mmol/g), 但负载催化剂的酸强度增强, 这有利于纤维素醇解生成 EL 反应的进行。

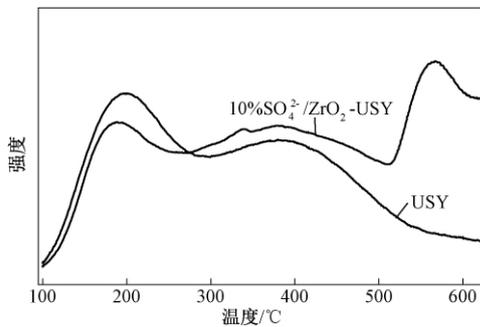


图 2 催化剂 USY 和 10%SZ-USY 的  $NH_3$ -TPD 谱图

Fig. 2  $NH_3$ -TPD profiles of USY and 10%SZ-USY zeolite catalysts

### 2.2.3 吡啶红外分析(Py-IR)

图 3 为催化剂的原位吡啶吸附红外光谱. 由图 3 可见, USY、10% SZ-USY 催化剂样品的红外光谱中都具有 Lewis 酸 ( $1450\text{ cm}^{-1}$ ) 和 Bronsted 酸 ( $1540\text{ cm}^{-1}$ ) 的特征峰. 随着测试温度的升高, 催化剂在  $1450\text{ cm}^{-1}$  吸收峰强度变化不大,  $1540\text{ cm}^{-1}$  吸收峰强度变化明显, 说明两者的 Lewis 酸以强酸为主、Bronsted 酸以弱酸中心为主. 同时具备 Lewis 酸和 Bronsted 酸的特性, 使得 USY 和 10% SZ-USY 能有效催化纤维素醇解合成 EL. 根据吡啶吸附红外光谱中  $1450\text{ cm}^{-1}$  和  $1540\text{ cm}^{-1}$  吸收峰面积计算出不同温度下的酸强度数值, 结果见表 3. 经过  $SO_4^{2-}/ZrO_2$  的负载后, 催化剂的 B、L 酸位均有所减少. 但是由于负载催化剂的

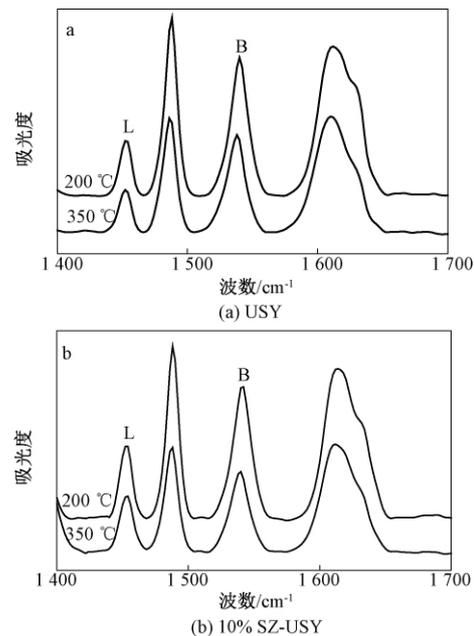


图 3 催化剂的吡啶吸附红外光谱

Fig. 3 The Py-IR spectra of USY, 10%SZ-USY

表 3 催化剂 USY 和 10%SZ-USY 的 B 酸和 L 酸

Tab. 3 Bronsted and Lewis acidities of USY and 10%SZ-USY

催化剂	温度/ $^{\circ}C$	B 酸/ ( $mmol \cdot g^{-1}$ )	L 酸/ ( $mmol \cdot g^{-1}$ )	B/L
USY	200	0.416	0.082	5.063
	350	0.308	0.067	4.623
10%SZ-USY	200	0.242	0.066	3.689
	350	0.149	0.052	2.893

酸强度增加, 促进了 10% SZ-USY 催化纤维素醇解, 从而提高了 EL 的产率, 这一结果与  $NH_3$ -TPD 的讨论相符。

### 2.2.4 热重分析(TG-DTA)

图 4 为 10% SZ-USY 的 TG-DTA 分析. 如图 4 所示, 10% SZ-USY 固体酸催化剂在低于 200  $^{\circ}C$  时出现脱物理吸附水的吸热峰, 200 ~ 800  $^{\circ}C$  过程中未有新峰出现, 说明负载催化剂在高温条件下未

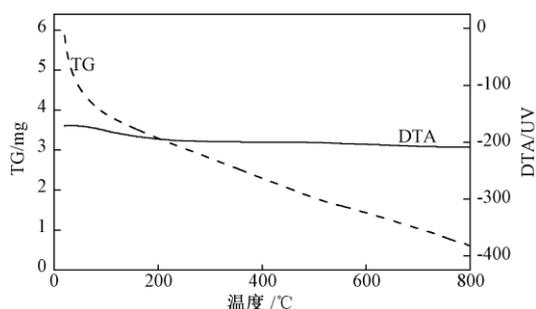


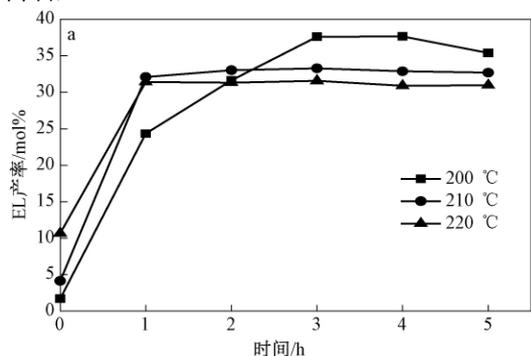
图4 10%SZ-USY的TG、DTA分析

Fig. 4 TG analysis and DTA analysis of 10% SZ-USY catalysts

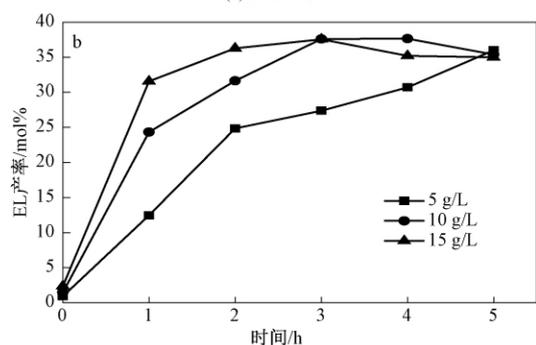
出现分子筛骨架结构的崩塌峰,由此表明 10% SZ-USY 催化剂具有较高的热稳定性.

### 2.3 工艺条件优化

在纤维素浓度为 20 g/L, 催化剂为 10 g/L, 反应时间为 2 h 条件下, 考察反应温度和催化剂用量对 EL 产率的影响, 结果如图 5 所示. 在初始 1 h, EL 的产率随着温度的升高而增加. 随后, 当反应温度为 210 °C 和 220 °C 时, 随着时间的延长, EL 的产率略有降低. 当反应温度为 200 °C 时, EL 的产率先增加后下降, 在 3 h 时达到最大, 为 38.1 mol%. 这是因为反应初始, 升高温度有利于加快反应速率, 随着温度升高, 反应体系的副反应加剧, 伴随着腐殖质的增多, EL 高温下分解<sup>[12]</sup>, 从而导致 EL 产率降低.



(a) 反应温度



(b) 催化剂用量

图5 不同条件对乙酰丙酸乙酯产率的影响

Fig. 5 Effect of different reaction conditions on ethyl levulinate yield

如图 5(b) 可见, EL 产率随着催化剂用量的增加而增大. 当催化剂用量为 5 g/L 时, EL 的产率随着反应时间的延长而增大. 当催化剂用量为 10 和 15 g/L 时, EL 产率随着时间的延长先增大后减小, 在 3 h 时 EL 产率达到最大值. 这是因为随着催化剂用量的增加, 催化剂提供的酸活性位点增加, 促进了纤维素的醇解. 当催化剂达到一定程度后, 酸活性位点不再是反应的限制因素, 随着反应时间的延长, 过量的催化剂反而会加剧副反应发生, 从而导致 EL 产率降低.

### 2.4 催化剂的回收利用

反应后的催化剂经干燥焙烧活化, 在原料加入量为 20 g/L, 催化剂加入量为 10 g/L, 反应温度为 200 °C, 反应时间为 3 h 的条件下, 考察催化剂回收次数对 EL 产率的影响, 结果如图 6 所示. 随着循环次数的增加, EL 产率略有降低, 催化剂回收利用 4 次时, 10% SZ-USY 催化纤维素醇解制备 EL 的产率依然在 30 mol% 以上, 表明该催化剂具有良好的可重复利用性.

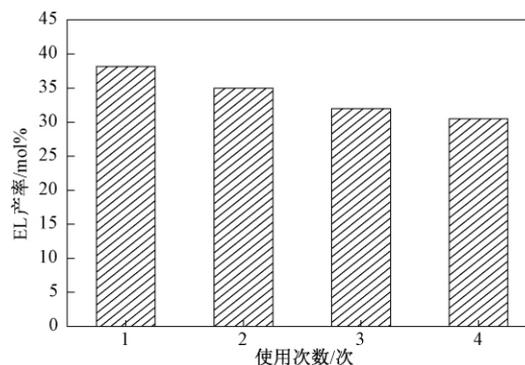


图6 催化剂回收次数对乙酰丙酸乙酯产率的影响

Fig. 6 Effect of recycle time of catalyst on ethyl levulinate yield

图 7 为回收催化剂的 XRD 图. 第一次回收的催化剂 XRD 衍射峰没有显著变化, 表明使用一次的催化剂晶体结构基本保持不变; 而第 3、4 次回收利用的催化剂的衍射峰强度有所减弱, 这是因为随着回收次数的增加, 催化剂表面积碳量逐渐增加, 从而降低了 10% SZ-USY 催化剂的结晶度, 这也是回收催化剂造成 EL 产率下降的主要原因.

### 2.5 不同原料的影响

在原料加入量为 20 g/L, 催化剂为 10 g/L, 反应温度为 200 °C, 反应时间为 3 h 的条件下, 考察 10% SZ-USY 固体酸一步法催化其它碳水化合物醇解生成 EL 的效果, 结果如图 8 所示. 果糖转化生成 EL 的产率最高, 为 50.8 mol%; 葡萄糖转化

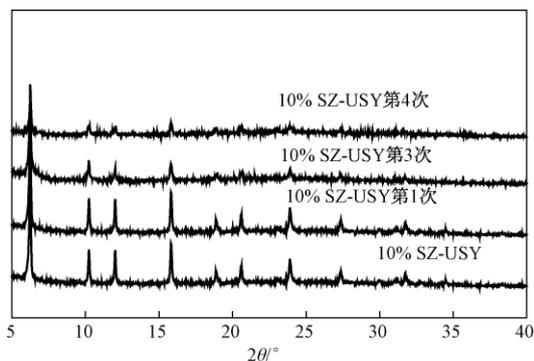


图7 催化剂使用前后的 XRD 图

Fig. 7 XRD spectra of before-after load catalysts

生成 EL 的产率为 39.6 mol%, 明显低于果糖; 蔗糖转化生成 EL 的产率为 44.9 mol%, 介于葡萄糖和果糖之间; 菊糖转化生成 EL 的产率为 43.6 mol%, 与果糖比较接近; 纤维素结构稳定, 不溶于乙醇, 使得纤维素的醇解反应较其他糖类更为复杂<sup>[13]</sup>. 在本试验中, 10% SZ-USY 固体酸催化纤维素醇解, EL 产率可达到 38.1 mol%, 表明 10% SZ-USY 负载型催化剂能够有效地催化纤维素转化生成 EL.

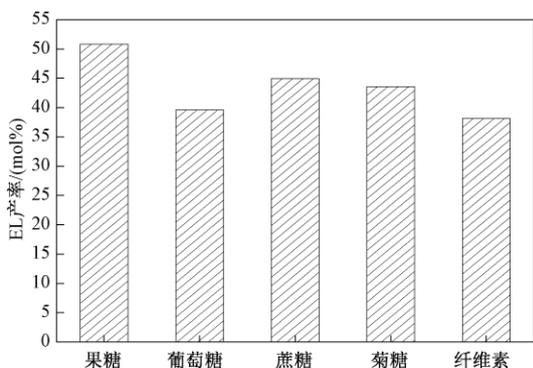


图8 不同原料转化生成乙酰丙酸乙酯

Fig. 8 Effect of various carbohydrates on ethyl levulinate yield

### 3 结论

(1) 制备了不同负载量的  $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2\text{-USY}$ , 催化纤维素转化生成 EL, 其中以 10%  $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2\text{-USY}$  的催化活性最佳. 对催化剂进行 XRD、FT-IR、BET、 $\text{NH}_3\text{-TPD}$  和 TG-DTA 表征. 结果表明,  $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$  成功负载到 USY 上, 且制备的  $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2\text{-USY}$  固体酸能有效地催化纤维素醇解制备 EL.

(2) 在纤维素加入量为 20 g/L, 催化剂用量为 10 g/L, 反应温度为 200 °C, 反应时间为 3 h 条件下, 催化纤维素转化生成 EL 的产率为 38.1 mol%. 催化剂使用 4 次后, EL 产率仍保持

在 30 mol% 以上. 制备的固体酸催化剂对催化果糖、葡萄糖、蔗糖和菊糖醇解生成 EL 具有良好的适用性.

### 参考文献:

- [1] 孙培勤, 李博, 常春. 固体酸催化生物质制备乙酰丙酸酯的研究进展 [J]. 化工新型材料, 2012, 40 (6): 9-11.
- [2] 常春, 朱伟娜, 候胜利, 等. 纤维素在乙醇介质中直接生成乙酰丙酸乙酯的研究 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2013, 34(5): 104-108.
- [3] KUWAHARA Y, FUJITANI T, YAMASHITA H. Esterification of levulinic acid with ethanol over sulfated mesoporous zirconosilicates: influences of the preparation conditions on the structural properties and catalytic performances [J]. Catalysis today, 2014 (237): 18-28.
- [4] NEVES P, LIMA S, PILLINGER M, et al. Conversion of furfuryl alcohol to ethyl levulinate using porous aluminosilicate acid catalysts [J]. Catalysis today, 2013(218): 76-84.
- [5] MELERO J A, MORALES G, IGLESIAS J, et al. Efficient conversion of levulinic acid into alkyl levulinates catalyzed by sulfonic mesostructured silicas [J]. Applied catalysis A: general, 2013 (466): 116-122.
- [6] ZHAO S Q, XU G Z, CHANG C, et al. Direct production of Ethyl levulinate from carbohydrates catalyzed by H-ZSM-5 supported phosphotungstic Acid [J]. Bioresources, 2015, 10(2): 2223-2234.
- [7] XU X L, ZHANG X L, ZOU W J, et al. Conversion of carbohydrates to methyl levulinate catalyzed by sulfated montmorillonite [J]. Catalysis communications, 2015(62): 67-70.
- [8] 孙培勤, 赵世强, 常春, 等. 固体酸 USY 催化纤维素生成乙酰丙酸乙酯的实验研究 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(3): 22-26.
- [9] 李博, 常春, 朱伟娜, 等. 固体酸催化纤维素生成乙酰丙酸乙酯的试验研究 [J]. 太阳能学报, 2015, 36(7): 1768-1772.
- [10] NANDIWALE K Y, GAHANA G C, BOKADE V V. Phosphonated USY, a promising catalyst for the development of environmentally benign biodiesel (methyl acetate) process [J]. Journal of energy chemistry, 2015, 24(3): 285-290.
- [11] HU X, LIEVENS C, LARCHER A, et al. Reaction pathways of glucose during esterification: effects of reaction parameters on the formation of humin type poly-

- mers [J]. *Bioresource technology*, 2011, 102 ( 21 ): 10104 – 10113.
- [12] DADI A P, VARANASI S, SCHALL C A. Enhancement of cellulose saccharification kinetics using an ionic liquid pretreatment step [J]. *Biotechnology and bioengineering*, 2006, 95( 5 ): 904 – 910.
- [13] WATANABE H. The study of factors influencing the depolymerisation of cellulose using a solid catalyst in ionic liquids [J]. *Carbohydrate polymers*, 2010, 80 ( 4 ): 1168 – 1171.

## Alcoholysis of Cellulose into Ethyl Levulinate Catalyzed by $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2/\text{USY}$

CHANG Chun, AN Ran, KONG Pengfei

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

**Abstract:** Solid acid catalyst  $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2/\text{USY}$  was prepared by precipitation-dipping method. And the effects of different parameters on the conversion of cellulose to ethyl levulinate were also investigated. The results showed that 10%  $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2/\text{USY}$  presented the highest catalyst activity when calcined at 400 °C for 3 h, and the high yield ( 38. 1 mol% ) of EL was obtained at 200 °C for 3 h, with a catalyst dosage of 10 g/L. EL yields of 50. 77 mol% , 39. 55 mol% , 44. 87 mol% and 43. 59 mol% could be obtained from fructose, glucose, sucrose and inulin, respectively. The catalysts were characterized by XRD, FT-IR, BET,  $\text{NH}_3$ -TPD and TG-DTA. The prepared solid acid catalyst could be recycled and reused four times with good catalytic activity.

**Key words:**  $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2/\text{USY}$ ; cellulose; catalyze; alcoholysis; ethyl levulinate

( 上接第 65 页)

## Consolidation Properties of Ground Rubber Modified Soil-bentonite Backfills

HE Jun, YAN Xing, HU Xiaojin, WANG Xiaoqi

( College of Civil and Architectural Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

**Abstract:** The waste tire ground rubber was used as a modified material, to enhance the contaminants adsorption capacity of soil-bentonite backfill. Based on the consolidation tests of soil-bentonite modified with ground rubber, the effects of ground rubber and simulated leachate on consolidation and compression properties were studied. The soil-bentonite modified with ground rubber was medium to high compressibility soil. As ground rubber particles had different compressibility and hydrophobicity from clay particles, the compressibility and consolidation velocity of the samples increased slightly with the increase of rubber mixing content. For the sample modified with bigger ground rubber, the compressibility and consolidation velocity were larger. When the rubber mixing content is constant, simulated leachate would decrease the liquid limit, the combined water and the thickness of absorbed water, which would reduce the compressibility and increase the consolidation velocity of the sample.

**Key words:** soil-bentonite modified with ground rubber; coefficient of consolidation; coefficient of compressibility; simulated leachate

文章编号: 1671-6833(2018)02-0086-06

## 退火温度对 Nb 掺杂 TiO<sub>2</sub> 薄膜结构与性能的影响

苏雷生<sup>1</sup>, 林 钰<sup>2</sup>, 董 林<sup>1</sup>, 辛荣生<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 材料科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南教育学院 化学系, 河南 郑州 450014)

**摘要:** 采用磁控溅射法在玻璃衬底上制备了 Nb 掺杂 TiO<sub>2</sub> 透明导电薄膜, 通过 X 射线衍射(XRD)、原子力显微镜(AFM)、紫外可见光谱(UV-Vis)及双电测四探针仪对薄膜的结构和性能进行了表征。结果表明: 退火温度 250 °C 以上时, 得到锐钛矿相 Nb 掺杂 TiO<sub>2</sub> 薄膜, 且薄膜结构和光电性能随温度升高而改善; 300 °C 时薄膜可见光透过率最高可达 80%, 电阻率降至  $2.5 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ ; 当温度升至 350 °C 时, 薄膜晶体开始出现金红石相, 光电性能也随之下降。另外, Nb 掺杂有利于降低 TiO<sub>2</sub> 薄膜晶体的晶相转变温度; 掺杂后 TiO<sub>2</sub> 薄膜的吸收限发生蓝移现象, 并且随着退火温度改变, 薄膜吸收限产生蓝移的程度有所不同。

**关键词:** 温度; Nb 掺杂; TiO<sub>2</sub> 薄膜; 结构; 光电性能

**中图分类号:** TN304.055

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.02.011

### 0 引言

透明导电薄膜由于具有性能稳定、价格低廉, 具有宽禁带、可见光透过率高、电阻率低等优点, 所以被广泛用于平面显示、太阳能电池、电致变色镜、热镜、智能窗和薄膜电池等领域<sup>[1-3]</sup>。

Nb 掺杂 TiO<sub>2</sub> (即 NTO) 薄膜是一种新型的透明导电材料。研究人员发现锐钛矿相 Nb 掺杂的 TiO<sub>2</sub> 薄膜具有和 ITO 薄膜类似的光电性能<sup>[4]</sup>。与传统透明导电材料 ITO (铟锡氧化物) 相比, NTO 薄膜具有高折射率和高化学稳定性; 而且 Ti 资源丰富, 在地壳的储量约是 In 的 10 万倍, 有望替代需大量消耗稀有金属 In 的 ITO 薄膜材料, 广泛应用于光电器件领域<sup>[5]</sup>。近年来, 在 NTO 薄膜材料研究方面已取得了一些进展, 文献 [6] 首次报告了 NTO 薄膜具有高的光电特性; 文献 [7] 研究了用射频磁控溅射法制备 NTO 膜, 在 400 ~ 700 nm 波长范围内透过率达 80% 以上; 文献 [3] 使用直流磁控溅射法在玻璃衬底上制备了 NTO 薄膜, 电阻率降到  $9.5 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ , 可见光透过率达到 75% 以上。国内在 Nb 掺杂 TiO<sub>2</sub> 薄膜研究方面的文献报导不多, 有关薄膜结构与性能的一些问题仍有待深入研究。

实验室制备 Nb 掺杂 TiO<sub>2</sub> 薄膜的方法很多, 常见的有磁控溅射法<sup>[8]</sup>、脉冲激光沉积法<sup>[5]</sup>、溶胶凝胶法<sup>[10]</sup>以及化学气相沉积法<sup>[5]</sup>等。在这些制备方法中, 磁控溅射法具有溅射速率高、衬底温度低、可控性好和易于获得大面积均匀薄膜等优点, 因此采用磁控溅射技术制备锐钛矿相的 TiO<sub>2</sub> 纳米薄膜已成为近些年该研究领域的主要方法。

笔者采用磁控溅射法在玻璃衬底上镀制了 NTO 透明导电薄膜, 探讨了退火温度对 Nb 掺杂 TiO<sub>2</sub> 薄膜结构及性能的影响, 为进一步提高 NTO 薄膜性能提供研究依据。

### 1 试验部分

#### 1.1 薄膜材料制备

溅射装置: CS-300 磁控溅射镀膜机 (如图 1); 靶材: 纯度均为 99.99% 的 TiO<sub>2</sub> 陶瓷靶、Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 陶瓷靶和 Ti 金属靶; 衬底: 普通载玻片。

衬底玻璃首先用有机溶剂清洗, 然后用去离子水超声清洗两遍。将衬底装入真空室后, 抽真空至  $5 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ , 通入纯度为 99.999% 的氩气。调节真空室气体压强到预定值, 先将靶材预溅射 10 min 消除所有黏附物, 再通入少量纯度为

收稿日期: 2017-10-11; 修订日期: 2017-12-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11674290); 河南省科技厅科技攻关资助项目(142102210068)

通信作者: 辛荣生(1959—), 男, 辽宁抚顺人, 郑州大学副教授, 主要从事功能薄膜材料研究, E-mail: xinrongsheng@zzu.edu.cn.

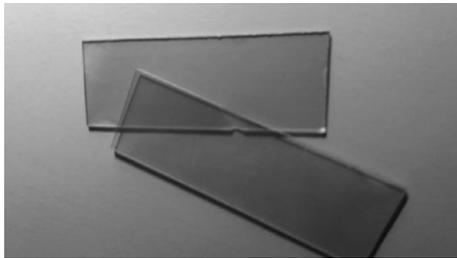


图 1 CS-300 磁控溅射镀膜机

Fig. 1 CS-300 magnetron sputtering film plating machine

99.999% 的氧气,然后按一定的比例同时溅射 TiO<sub>2</sub>、Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 Ti 靶,溅射总功率为 200 W 左右.

溅射结束后,将样品(见图 2)放入 ZKL-1F 型自动控温石英管式炉中,分别在 100、250、300 和 350 °C 的空气中对 Nb 掺杂 TiO<sub>2</sub> 薄膜进行退火.

图 2 Nb 掺杂 TiO<sub>2</sub> 透明导电薄膜Fig. 2 Nb-doped TiO<sub>2</sub> transparent conductive thin films

## 1.2 薄膜表征测试

SDY-5 型双电测四探针仪测薄膜电阻,1800 系列紫外-可见分光光度计测透射光谱,X'Pert PRO 衍射仪测 XRD 图谱,SPM-9500J3 原子力显微镜表征薄膜形貌,JSM-6700F 型扫描电镜测薄膜厚度.

薄膜附着力测试:2 cm 宽专用透明胶带粘在膜层表面,迅速垂直拉起后,没有脱膜现象.

老化性能表征:分别做了低温和湿热试验,薄膜透光率损失 < 1%.

## 2 结果与讨论

### 2.1 结构特性

图 3 为不同退火温度下制备的 Nb 掺杂 TiO<sub>2</sub> 薄膜的 XRD 图谱.图 3 表明,退火温度在 100 °C 时,TiO<sub>2</sub> 薄膜为非晶态.随着温度升高到 250 °C,位于  $2\theta = 25.26^\circ$  的(101) 衍射峰和  $2\theta = 55.08^\circ$  的(211) 衍射峰都变得尖锐,在此温度下的薄膜已形成锐钛矿结构的晶态.温度继续升高至 300 °C 时,(101) 峰增强,(211) 峰减弱,晶体按(101)

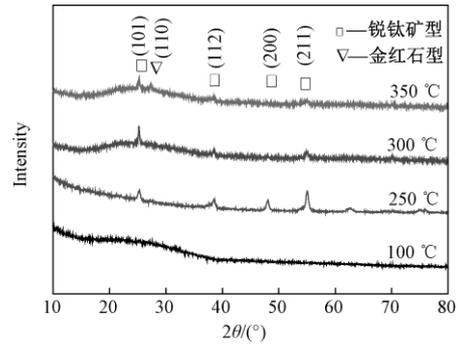


图 3 不同退火温度下 NTO 膜的 XRD 图谱

Fig. 3 XRD spectrum of NTO film in different temperature

向择优生长加强.当退火温度升至 350 °C 时,(101) 峰减弱,同时在  $2\theta = 27.30^\circ$  处出现了金红石结构的(110) 衍射峰,晶体结构开始从锐钛矿向金红石转变,形成混合相.

对于纯 TiO<sub>2</sub> 薄膜,退火温度在 400 °C 左右出现锐钛矿相,600 °C 左右出现金红石相<sup>[11]</sup>,由上述结果可见,Nb 掺杂降低了 TiO<sub>2</sub> 的晶型转变温度,有利于促进 TiO<sub>2</sub> 薄膜锐钛矿型或金红石型结构的形成<sup>[12]</sup>.另外,杂质 Nb 的掺入导致了 TiO<sub>2</sub> 锐钛矿相(101) 峰位和金红石相(110) 峰位分别比理论上的  $25.5^\circ$  和  $27.5^\circ$  要小<sup>[11]</sup>,这是由于 Nb 的原子半径大于 Ti 原子,掺杂后原子间距变大所致,也间接说明 Nb 原子已被有效地掺入到 TiO<sub>2</sub> 之中<sup>[13]</sup>.根据 Scherrer 公式<sup>[5]</sup>,可估算出 Nb 掺杂 TiO<sub>2</sub> 薄膜的平均晶粒尺寸,结果见表 1.

表 1 不同退火温度下 NTO 膜的晶粒尺寸和表面粗糙度  
Tab. 1 Grain size and surface roughness of NTO film in different annealing temperature

温度/°C	晶粒尺寸/nm	粗糙度/nm
100	—	1.601
250	A20.70	3.619
300	A35.50	3.720
350	A42.61/R13.44	3.775

注:A 为锐钛矿相;R 为金红石相.

从表 1 可以看出,随着退火温度的升高,TiO<sub>2</sub> 薄膜锐钛矿相晶粒尺寸逐渐变大,说明薄膜结晶度提高<sup>[14]</sup>.到 350 °C 时出现了锐钛矿和金红石的混合相,此时金红石相晶粒尺寸较小,只有 13.44 nm,但锐钛矿相晶粒尺寸进一步长大.表 1 中晶粒尺寸增大的情况,与 TiO<sub>2</sub> 薄膜随退火温度升高其平均晶粒直径呈指数规律变化的报导吻合<sup>[11]</sup>.

### 2.2 表面形貌

图 4 显示了 Nb 掺杂 TiO<sub>2</sub> 薄膜在不同退火温

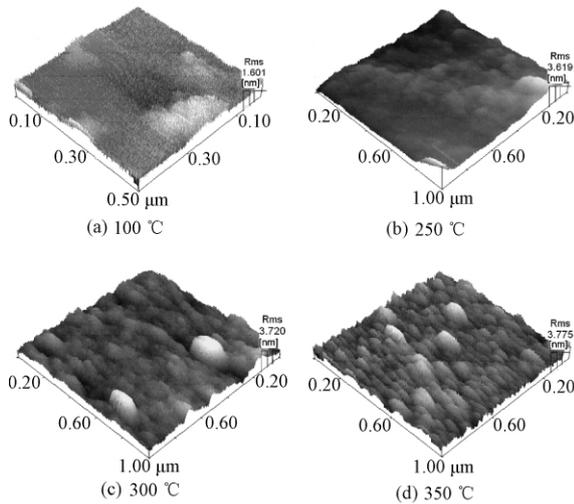


图4 不同温度下 NTO 膜的 AFM 图  
Fig. 4 AFM images of NTO film in different temperature

度下原子力显微镜 (AFM) 的三维形貌图.

由图4可见,温度100 °C时,薄膜表面颗粒尺寸非常小;随着温度升高,薄膜表面形貌有所改善、大面积连续凸起或凹陷的情况明显减少,颗粒逐渐变为球状结构、且更加清晰、尺寸变大,颗粒边界间隙减小、排列更为紧密,由此说明薄膜的结晶度明显提高.薄膜呈连续状均匀分布,表明该 Nb 掺杂 TiO<sub>2</sub> 透明导电薄膜的成膜状态较好.

根据 AFM 图给出的 Nb 掺杂 TiO<sub>2</sub> 薄膜在不同退火温度下的均方根粗糙度 Rms 也列在表1中.可以看出,温度100 °C时 Rms 很小;250 °C以后,随着温度的升高,薄膜表面粗糙度逐渐增大;结合 XRD 分析结果可知,此时薄膜已是锐钛矿型晶体,到350 °C时开始出现金红石型晶体,根据 XRD 图谱中衍射峰强度和混合相 TiO<sub>2</sub> 薄膜中锐钛矿相质量分数公式<sup>[12]</sup>可以算出,此时锐钛矿相 TiO<sub>2</sub> 含量为62.27%,所以350 °C时薄膜的表面粗糙度并不因出现金红石相而比300 °C时的纯锐钛矿相低.上述情况均说明,随着温度的升高, TiO<sub>2</sub> 薄膜晶体粒径尺寸增大,结晶度提高,这与 XRD 图谱分析的结果完全一致.

### 2.3 紫外可见透射光谱

图5为不同退火温度下 Nb 掺杂 TiO<sub>2</sub> 薄膜在紫外-可见光区的透射光谱.

图5中出现的 TiO<sub>2</sub> 薄膜透射率波动是由于干涉造成的,其中的波峰与波谷分别对应于干涉增强和减弱,而不同退火温度下波峰与波谷位置的偏移与 TiO<sub>2</sub> 薄膜的折射率变化有关<sup>[14]</sup>.

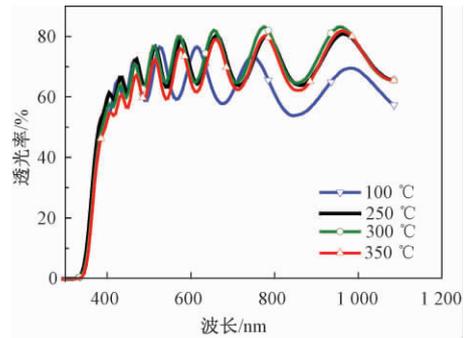


图5 不同温度下 NTO 膜的透射光谱  
Fig. 5 Transmittance of NTO film in different temperature

从图5透射光谱可见,在低于400 nm附近的波段内,透射率急剧下降,这是 TiO<sub>2</sub> 在紫外波段带间跃迁引起的本征吸收所致<sup>[14]</sup>.波长大于400 nm的可见-近红外光范围内,薄膜的透射率较高,最高可达80%以上.在550~580 nm波长的狭窄可见光区域内,不同退火温度下 Nb 掺杂 TiO<sub>2</sub> 薄膜的透射率见表2.

表2 不同温度下 NTO 膜的可见光透过率和光学带宽  
Tab.2 Visible light transmittance and optical band gap of NTO film in different temperature

温度/°C	透射率/%	光学带宽/eV
100	59.2~63.9	—
250	64.7~78.9	3.392
300	68.4~80.0	3.412
350	61.4~76.0	3.385

由表2可以看出,退火温度从100 °C升到300 °C过程中,薄膜可见光透过率逐渐提高,直到350 °C时开始下降.这说明一方面随着温度升高, TiO<sub>2</sub> 薄膜结晶度提高,其对光的散射和吸收作用减弱<sup>[15]</sup>,从而提高了薄膜的可见光透过率,薄膜紫外-可见光谱随退火温度的变化与上述结构形貌的变化情况相吻合;另一方面,由于350 °C时出现了金红石相,所以又使薄膜的透射率有所下降<sup>[8]</sup>.

### 2.4 禁带宽度

根据透射率  $T$ 、反射率  $R$ 、薄膜厚度  $d$  与吸收系数  $\alpha$  之间的关系

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left( \frac{1-R}{T} \right),$$

可直接测试得到薄膜的吸收光谱.

对于 TiO<sub>2</sub> 薄膜按间接跃迁模型,薄膜的光学带宽由如下的 Tauc 公式决定<sup>[14]</sup>:

$$\alpha h\nu = A (h\nu - E_g)^{1/2},$$

式中:  $h\nu$  是光子能量;  $E_g$  为光学带宽.

通过作  $(\alpha h\nu)^2$  与  $h\nu$  的关系曲线,在其吸收限附近再作切线反向延长至  $h\nu$  轴,其交点即为薄膜的禁带宽度  $E_g$ ,见图 6.

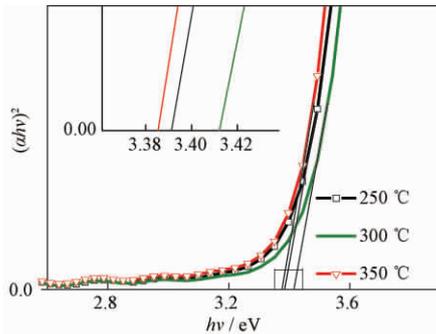


图 6 不同温度下 NTO 膜的光学带宽

Fig. 6 Optical band gap of NTO film in different temperature

由图 6 得到的不同退火温度下 Nb 掺杂 TiO<sub>2</sub> 薄膜的光学带宽,也一并列在表 2 中.与纯 TiO<sub>2</sub> 锐钛矿相和金红石相 3.2、3.0 的带宽相比较,Nb 掺杂 TiO<sub>2</sub> 薄膜的禁带宽度有明显的蓝移<sup>[15]</sup>.300 °C 温度退火后禁带宽度最大,达到 3.412 eV,这是由 Burstein-Moss 迁移效应引起的<sup>[16]</sup>.随着退火温度升高,晶体结晶性改善,薄膜晶体中载流子浓度增加,增加的载流子填充到导带中较低的能级,使价带电子跃迁到导带中的较高能级,从而使禁带宽度变大<sup>[16]</sup>,蓝移说明该 NTO 薄膜为 n 型掺杂.

同时也可以看到,在 250 °C 下得到的 Nb 掺杂 TiO<sub>2</sub> 薄膜禁带宽度要小于 300 °C 下得到的带宽,因这时晶体结晶较差,使薄膜载流子浓度降低,导致该薄膜半导体费米能级下移,从而使价带顶的电子能以更少的能量进入导带,使光学带宽变小,这仍然符合 Burstein-Moss 效应<sup>[17]</sup>.

另外,薄膜在 350 °C 退火时的禁带宽度却进一步减小,说明虽然这时薄膜晶体结晶性较好,但具有金红石型的 TiO<sub>2</sub> 薄膜与纯锐钛矿型的薄膜相比,仍然有更小的禁带宽度<sup>[18]</sup>.

## 2.5 薄膜电学性能

薄膜电阻 ( $R_s$ ) 与其电阻率 ( $\rho$ ) 和膜厚 ( $d$ ) 的关系为:  $\rho = R_s \cdot d$ .

薄膜厚度见图 7 的 SEM 断面图.图 7 显示薄膜厚度为 700 nm 左右.分别测试不同退火温度下的薄膜电阻,并按上式计算电阻率.图 8 为不同退火温度下 Nb 掺杂 TiO<sub>2</sub> 薄膜的电阻率关系曲线.

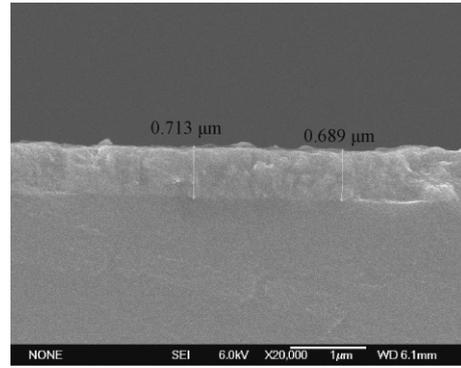


图 7 NTO 薄膜的 SEM 断面图

Fig. 7 SEM section images of NTO thin film

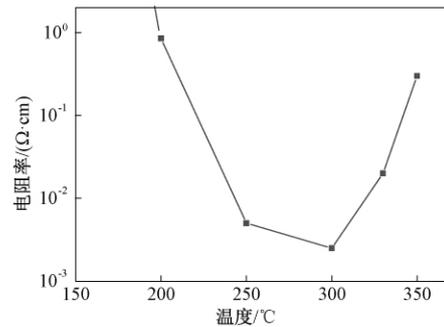


图 8 不同温度下 NTO 膜的电阻率

Fig. 8 Resistivity of NTO film in different temperature

由图 8 可见,退火温度在 200 °C 以下时,电阻率非常高,因这时 TiO<sub>2</sub> 薄膜为非晶态.随温度升高到 200 ~ 250 °C 时,电阻率急剧下降,在此温度范围内薄膜已由非晶态逐渐转为晶态,薄膜中载流子浓度有所增加,所以提高了 Nb 掺杂 TiO<sub>2</sub> 薄膜的导电性.

温度继续升高至 250 ~ 300 °C 时,电阻率缓慢下降,到 300 °C 时降到  $2.5 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$  的最低值,分析认为,这时薄膜因结晶度提高,在载流子浓度增加的同时,载流子迁移率也会有所增大<sup>[19]</sup>,综合来看,此时锐钛矿相 TiO<sub>2</sub> 晶体的结构以及所含的电活性杂质和氧空位为 Nb 掺杂 TiO<sub>2</sub> 薄膜提供了最佳的导电性能.

当退火温度升至 300 ~ 350 °C 时,电阻率又快速上升,这是因为退火温度过高,虽然薄膜结晶度趋于完美会使载流子迁移率继续增大而提高导电性<sup>[19]</sup>,但由于电活性 Nb 杂质浓度和氧空位浓度因氧化而有所减小,以及部分锐钛矿型晶体结构开始向金红石型转变,总体上会使 Nb 掺杂 TiO<sub>2</sub> 薄膜的电阻率迅速上升.

## 3 结论

采用磁控溅射法制备了 Nb 掺杂 TiO<sub>2</sub> 薄膜,

并测量分析了在不同退火温度下的薄膜结构及其光电特性. 退火温度 250 °C 以上时, 得到锐钛矿相 NTO 薄膜, 且薄膜结构性能随温度升高而变好; 到 300 °C 时, 薄膜晶体结晶度和晶粒尺寸均较佳, 此时可见光透过率高达 80%, 电阻率可降至  $2.5 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ ; 当温度升至 350 °C 时, 薄膜晶体结晶度进一步提高, 但因在空气下高温退火, 并开始出现金红石相, 反而使 Nb 掺杂  $\text{TiO}_2$  薄膜的光电性能下降.

Nb 掺杂降低了  $\text{TiO}_2$  薄膜由无定形转变为锐钛矿相和锐钛矿相转变为金红石相的相变温度; 同时, 掺杂后也使  $\text{TiO}_2$  薄膜的吸收限向短波方向移动, 即产生蓝移现象, 并且随着退火温度的改变, 薄膜吸收限产生蓝移的程度有所不同.

总之, 不同的退火温度能改变 Nb 掺杂  $\text{TiO}_2$  薄膜的晶体结构以及薄膜的光电性能.

### 参考文献:

- [1] 冯娟娟, 赵小如, 刘凯, 等. 新型透明导电氧化物薄膜 Nb-TiO<sub>2</sub> 的研究进展 [J]. 材料工程, 2009, 37(9): 84-88.
- [2] GORDON R G. Criteria for choosing transparent conductors [J]. MRS bull, 2000, 175(6): 52-57.
- [3] YAMADA N, HITOSU G T, KASAI J, et al. Transparent conducting Nb-doped anatase TiO<sub>2</sub> (TNO) thin films sputtered from various oxide targets [J]. Thin solid films, 2010, 518(11): 3101-3104.
- [4] QUINONEZA C, VALLEJOA W, GORDILLOB G. Structural, optical and electrochemical properties of TiO<sub>2</sub> thin films grown by APCVD method [J]. Applied surface science, 2010, 256(13): 4065-4071.
- [5] 张彬, 王伟丽, 牛巧利, 等. H<sub>2</sub> 气氛退火处理对 Nb 掺杂 TiO<sub>2</sub> 薄膜光电性能的影响 [J]. 物理学报, 2014, 63(6): 1-6.
- [6] FURUBAYASHI Y, HITOSU G T, YAMAMOTO Y, et al. A transparent metal: Nb-doped anatase TiO<sub>2</sub> [J]. Appl Phys Lett, 2005, 86(25): 1-3.
- [7] EAGEN M A G, AIKEL M F V H, MATTHEW S D, et al. RF magnetron sputter deposition of transparent conducting Nb-doped TiO<sub>2</sub> films on SrTiO<sub>3</sub> [J]. J Appl Phys, 2007, 101(3): 1-4.
- [8] EUFINGER K, TOMASZEWSKI H, DEPLA D, et al. The DC magnetron sputtering behavior of TiO<sub>2-x</sub> targets with added F<sub>2</sub>O<sub>3</sub> or Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [J]. Thin solid films, 2006, 515(2): 683-686.
- [9] HITOSU GI T, UEDA A, NAKAO S, et al. Fabrication of highly conductive T<sub>1-x</sub>Nb<sub>x</sub>O<sub>2</sub> polycrystalline Films on glass substrates via crystallization of amorphous phase grown by pulsed laser deposition [J]. Appl Phys Lett, 2007, 90(21): 1-3.
- [10] VISHWAS M, SHARMAB S K, RAOB K N, et al. Influence of surfactant and annealing temperature on optical properties of sol-gel derived nano-crystalline TiO<sub>2</sub> thin films [J]. Spectrochimica acta part A. 2010, 75(3): 1073-1077.
- [11] 孟凡明, 周明飞, 蔡琪, 等. 纳米 TiO<sub>2</sub> 薄膜的制备与表面形貌研究 [J]. 真空科学与技术, 2008, 28(1): 72-77.
- [12] WANG S F, HSU Y F, LEE Y S. Microstructural evolution and optical properties of doped TiO<sub>2</sub> films prepared by RF magnetron sputtering [J]. Ceramics international, 2006, 32(2): 121-125.
- [13] 周传仓, 张飞鹏, 张忻, 等. Sb 掺杂对 SnO<sub>2</sub> 薄膜光电性能的影响研究 [J]. 电子元件与材料, 2016, 35(8): 23-26.
- [14] 王军, 刘莹, 丁红燕. 溅射法制备 TiO<sub>2</sub> 薄膜的耐腐蚀性 [J]. 材料工程, 2014, 42(12): 34-38.
- [15] 宣天美, 孙健武, 葛美英, 等. 氧化铜掺杂氧气锌气敏材料的制备及气敏性能研究 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2017, 38(2): 88-91.
- [16] 李文英, 钟建, 张柯, 等. 退火对 ZnO/Cu/ZnO 透明导电薄膜性能的影响 [J]. 材料工程, 2015, 43(1): 44-48.
- [17] 李玲, 薛涛, 宋忠孝, 等. 氧分压对直流磁控溅射 IGZO 薄膜特性的影响 [J]. 真空科学与技术, 2015, 35(10): 1254-1258.
- [18] MORLLAS R M, MARCOS J S, ANDRES A, et al. Optical Properties of nanometric TiO<sub>2</sub> clusters deposited on thin films by high pressure sputtering [J]. Surface and coatings technology, 2010, 204(12/13): 1893-1897.
- [19] 杨啸威, 杨文豪, 于仕辉, 等. 溅射压强对 AZO 透明导电薄膜性能的影响 [J]. 电子元件与材料, 2014, 33(1): 9-11.

## Influence of Annealing Temperature on Structure and Properties of Nb-doped TiO<sub>2</sub> Thin Films

SU Leisheng<sup>1</sup>, LIN Yu<sup>2</sup>, DONG Lin<sup>1</sup>, XIN Rongsheng<sup>1</sup>

(1. School of Material Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Department of Chemistry, Henan Education Institute, Zhengzhou 450014, China)

**Abstract:** Nb-doped TiO<sub>2</sub> transparent conductive thin films were prepared on Glass substrates by magnetron sputtering method. The structure and the properties of the films were characterized by using X-ray diffraction ( XRD ) , atomic force microscope ( AFM ) , UV-Vis spectroscopy and four probe resistance tester. The results showed that the anatase phase Nb-doped TiO<sub>2</sub> thin films were obtained when the annealing temperature above 250°C , also the structure and the photoelectric properties were improved with the temperature increased. The best visible light transmissivity reached to 80% and resistivity dropped to  $2.5 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$  when temperature at 300°C. As the annealing temperature were risen to 350°C , the films began to appear rutile phase , then the photoelectric properties were decreased. Moreover Nb doping was beneficial to reduce the crystal phase transformation temperature of the TiO<sub>2</sub> thin film. The Nb-doped TiO<sub>2</sub> thin film absorption edge also produced blue shift, and the blue shift degree of the thin films absorption edge was different with the change of annealing temperatures.

**Key words:** temperature; Nb-doped; TiO<sub>2</sub> thin film; structure; photoelectric property

文章编号: 1671-6833(2018)02-0092-05

## 利用废渣一次烧制制备微晶玻璃釉面砖的研究

卢红霞<sup>1</sup>, 吕泽刚<sup>1</sup>, 程向前<sup>1</sup>, 辛玲<sup>2</sup>, 侯铁翠<sup>1</sup>

(1. 郑州大学材料科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南易成新能源股份有限公司, 河南 开封 475000)

**摘要:** 以工业废弃高炉渣为主要原料, 采用一次烧制法制备了微晶玻璃釉面砖. 高炉渣的组成为 CaO、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、少量 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 及 TiO<sub>2</sub> 等. 当高炉渣粒度为 3.3 μm, 原料配比为高炉渣 80wt%、钾长石 10wt%、滑石 10wt% 时, 800 °C 保温 30 min, 1 160 °C 保温 1.5 h 制得样品. 样品的吸水率为 0.12%, 显微硬度为 6.5 GPa, 抗弯强度为 128 MPa, 满足 GB/T3810 对釉面砖性能要求. 微晶玻璃主晶相为硅灰石(含少量钙长石), 晶粒 1 μm 左右, 晶体形貌为球状和针状.

**关键词:** 高炉渣; 一次烧制法; 微晶玻璃; 釉面砖

**中图分类号:** TB32 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.05.014

### 0 引言

釉面砖吸水率低、易清洁、美观大方, 是一种被广泛应用的建筑装饰材料, 目前釉面砖在生产及应用中存在一些问题: ①由于国家对资源与环境的要求越来越高, 致使釉面砖的原料(诸如黏土、石英等天然矿物)越来越受限制; ②现有陶瓷釉面砖表面为玻璃态釉, 其力学性能有待提高; ③釉面砖的制备多采用二次施釉, 需两次烧制, 工艺繁琐耗能. 另外, 随着工业和经济发展, 废渣排放逐年增多, 粗略估计每年工业废渣排放量达 10 亿吨, 主要用来铺路及烧制水泥, 附加值低<sup>[1]</sup>. 多数工业废渣属于硅酸盐类物质, 如高炉渣、粉煤灰及尾矿等, 含有制备陶瓷及釉的原料成分. 近几十年来, 研究者就工业废渣制备釉及微晶玻璃建材做了多方面的研究和尝试, 在釉面砖方面, 殷海荣等<sup>[2]</sup>采用二次烧制法研制出磷渣釉面砖; 滕方雄<sup>[3]</sup>采用低温二次烧制法制备出赤泥陶瓷釉面砖; 徐晓虹等<sup>[4]</sup>通过低温一次快烧法研制出硅灰石质废渣釉面砖; 本课题组前期已尝试利用废渣制备出了性能良好的微晶玻璃釉<sup>[5]</sup>. 在微晶玻璃方面, 文献[6-7]用熔融法制备出高炉渣微晶玻璃建材; 程金树等<sup>[8]</sup>添加钽铌尾矿, 采用熔融烧

制法制造出微晶玻璃. 目前的研究仍存在以下问题: ①利用废渣制备微晶玻璃建材多是采用工艺较为复杂熔融法或熔融烧制法, 坯釉需要二次制备或烧制; ②研究集中在微晶玻璃基体或微晶玻璃釉, 多是分别制备. 因此, 探究一种制备工艺简单、废渣利用率高、兼具微晶玻璃和釉面砖优点的新型微晶玻璃釉面砖是很有必要的.

高炉渣是一种炼铁产生的玻璃态废渣, 含有 CaO、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等生产釉面砖的组分, 并含少量 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub> 等微晶玻璃形核剂, 笔者尝试以高炉渣为主要原料, 采用一次烧制工艺制备微晶玻璃釉面砖, 简化了工艺, 提高釉层的力学性能, 且节约资源, 具有较好的经济效益和社会效益.

### 1 试验部分

#### 1.1 主要试验原料

高炉渣(湖南某钢铁集团有限公司), 钾长石(郑州陶瓷材料公司), 滑石(郑州陶瓷材料公司), 具体成分如表 1 所示. 由表 1 可知, 高炉渣含有微晶玻璃及釉面砖的成分<sup>[9]</sup>, 且含少量形核剂, 钾长石是一种较强的助熔剂, 滑石主要起引入更多的 SiO<sub>2</sub> 和 MgO 的作用, 也有一定的助熔效果.

收稿日期: 2017-05-25; 修订日期: 2017-08-19

基金项目: 河南省科技攻关资助项目(132102310302)

作者简介: 卢红霞(1969—), 女, 郑州大学教授, 博士, 主要从事先进陶瓷材料及工业废弃物资源利用的研究,  
E-mail: luhx@zzu.edu.cn.

## 1.2 试验过程

### 1.2.1 微晶玻璃釉面砖的制备

按照设计的釉面砖样品配方,分别精确称取经过预处理的高炉渣、钾长石、滑石,然后利用高能球磨机(SPEX8000M, SPEX, America)混合5 min,使粉料混合均匀后装入模具中,压制成型,然后严格按照制定的烧结工艺曲线进行试验,从而获得所需的釉面砖样品。

### 1.2.2 表征及性能测试

采用X荧光光谱仪(XRF-1700, Shimadzu, Japan)对高炉渣的化学成分进行分析.利用激光粒度分析仪(Zetasizer 3000HS, Marlvern, England)测定不同球磨时间下原料颗粒的粒度.采用X射线衍射仪(XD-3,北京普析通用仪器有限公司)分析样品的物相.采用扫描电子显微镜(FE-SEM, Nova 230, FEI Company, Japan)观察所得样品的微观形貌.样品的吸水率和体积密度采用阿基米德排水法测量.利用维氏硬度计(HV0.2,上海钜晶精密仪器制造公司)对表面抛光后的样品进行显微硬度测试.将样品加工成 $3 \times 4 \times 36$  mm的试条,表面研磨后抛光,采用万能试验机(Z030, Zwick/Roell, Germany)测试抗弯强度.采用溶液浸泡法测试样品的耐化学腐蚀性能,耐酸及耐碱性能测试所用的溶液分别为体积分数为1%盐酸溶液和1%氢氧化钠溶液。

表1 高炉渣、钾长石和滑石的化学组成

原料名称	feldspar and talc						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
高炉渣	32.34	15.11	36	7.46	—	1.05	1.2
钾长石	69.63	15.32	0.55	0.64	9.66	—	0.04
滑石	57.21	—	—	30.65	—	—	0.3

## 2 结果与讨论

### 2.1 高炉渣的研究及其含量对釉面砖性能的影响

图1为高炉渣的XRD图谱和DSC曲线.从图1(a)中可看出,高炉渣的XRD呈馒头峰,表明高炉渣为玻璃态.从图1(b)中可知,高炉渣在850℃附近有一个放热峰,即高炉渣的析晶峰,据此确定烧结样品时的晶化温度在800~850℃。

在确定了基础玻璃化学组成范围条件下,固定滑石质量分数为5%,高炉渣的加入量为60~90%,其余为长石.在800℃析晶30 min,1160℃烧结1.5 h制得样品.图2和图3为高炉渣不同

含量时釉面砖的吸水率、显气孔率、抗弯强度及显微硬度的变化.由图2、图3可知,随着高炉渣含量的增加,样品的吸水率及显气孔率先减小后增大,而抗弯强度和显微硬度先增大后减小.当高炉渣质量分数为60%时,样品的抗弯强度低于35 MPa,吸水率高于1.8%,这是由于高炉渣含量少而助熔剂过多,样品玻璃相太多导致性能变差.当高炉渣质量分数为80%时,抗弯强度为53 MPa,随后抗弯强度迅速下降,吸水率上升,这说明随着高炉渣含量继续增加,析出了大量晶粒,在高温下形成的玻璃相较少,导致晶粒之间的结合程度降低,所以表面存在大量开气孔,力学性能严重下降,吸水率变大.样品的显微硬度值为4.3~5.5 GPa,高于釉面砖对硬度的要求.当高炉渣质量分数为80%时,吸水率为0.8%,硬度为5.5 GPa。

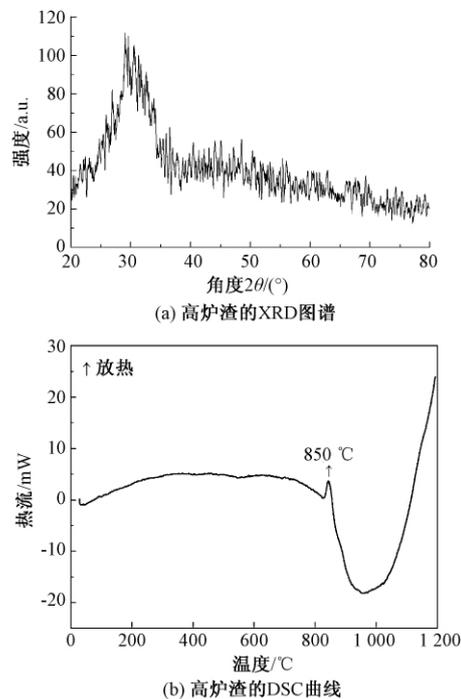


图1 高炉渣的XRD图谱和DSC曲线  
Fig.1 XRD pattern and DSC curve of blast furnace slag

样品断面的SEM照片如图4所示.从图4中可以看出,90wt%高炉渣的样品内部具有一些孔洞,玻璃相含量少,晶粒呈等轴状,这种结构的晶粒结合性差.65wt%高炉渣样品存在大量的大气孔,因为钾长石和滑石等助熔剂多,形成了大量的液相,且析出的晶体增大了玻璃相的黏度,低温时玻璃体黏度太高,残留的大量气体不能及时在高温阶段排出,导致大气孔逐渐增多,在气孔邻近区

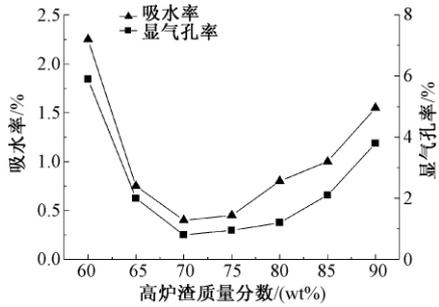


图2 不同高炉渣质量分数的釉面砖样品吸水率和显气孔率

Fig.2 Water absorption and apparent porosity of glazed tile with different slag content

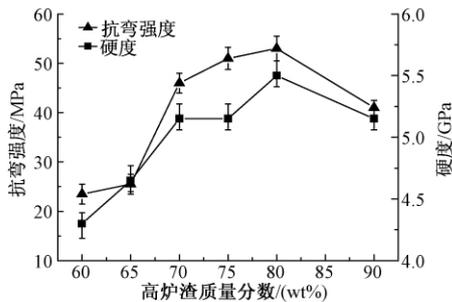


图3 不同高炉渣质量分数的釉面砖样品抗弯强度和显微硬度

Fig.3 Flexural strength and micro-hardness of glazed tile with different slag content

域容易产生应力集中,并且样品有效荷载面积减少,从而导致样品强度变低.从图4(c)中可以发现,除了等轴晶粒外,样品内部还生成了针状晶体,这种微观形貌说明含量80wt%高炉渣的样品性能最佳.

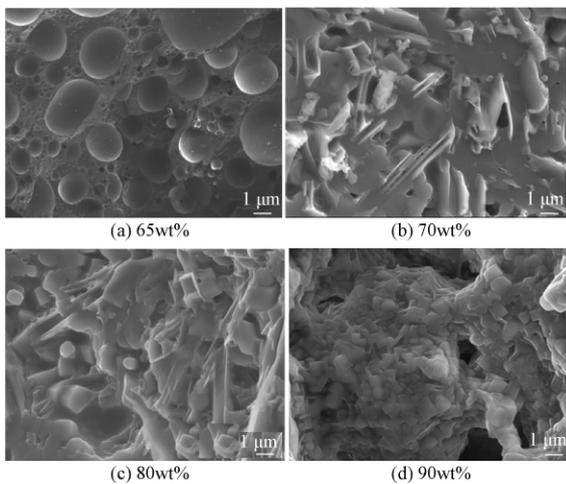


图4 不同高炉渣质量分数的釉面砖样品 SEM 图  
Fig.4 SEM photos of glazed tile with different slag content

图5是高炉渣含量分别为65%、70%、75%及80%的XRD图谱.从图5中可以看出,4种样品的主晶相都为硅灰石.随着高炉渣含量的增加,钙长石次晶相逐渐增多,这主要是因为钙长石的化学式为Ca<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>SiO<sub>7</sub>,高炉渣中含有较多的CaO,高炉渣在配方中所占的比例增多时,含有的CaO也相应的增多,形成的钙长石也就增多.此外,硅灰石相的衍射峰随着高炉渣含量的增加而变强,这表明,高炉渣含量增加后样品的析晶能力增强.

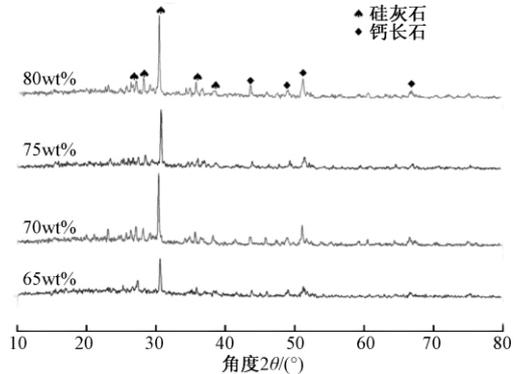


图5 不同高炉渣质量分数的釉面砖样品 XRD 图谱  
Fig.5 XRD patterns of glazed tile with different slag content

### 2.2 滑石含量对釉面砖性能的影响

固定高炉渣为80wt%,钾长石及滑石总量为20wt%,通过加入5wt%、10wt%、15wt%、20wt%的滑石逐步替代钾长石,分析滑石对样品的物化性能及力学性能的影响,结果如图6、图7所示.

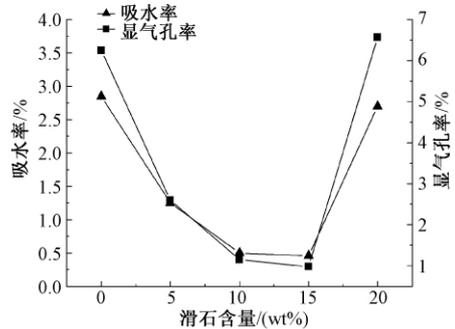


图6 滑石加入量对样品吸水率、显气孔率的影响

Fig.6 The effect of amount of talc on water absorption and apparent porosity of sample

由图6可知,随着滑石加入量的增加,吸水率及显气孔率先减小后增大,这说明滑石也有助熔效果,适量的滑石可以降低釉面砖的吸水率.当滑石加入量为10wt%时,样品的吸水率低至0.5%.从图7可看出,随着滑石加入量的增加,样品的抗

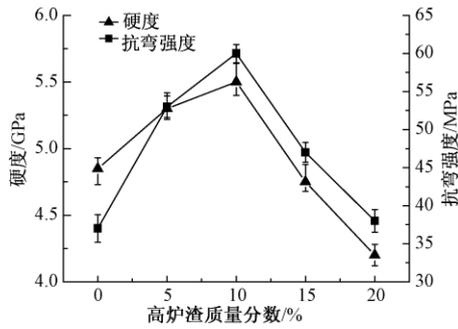


图 7 滑石加入量对样品抗弯强度、显微硬度的影响  
Fig.7 The effect of amount of talc on flexural strength and micro-hardness of sample

弯强度及显微硬度先升高后降低. 当滑石用量为 10wt% 时, 样品的抗弯强度值为 60 MPa, 显微硬度值为 5.5 GPa. 最后, 同时考虑吸水率、硬度和抗弯强度的测试值, 滑石的最佳添加范围为 5wt% ~ 10wt%, 本试验确定滑石适宜添加量为 10wt%.

由以上分析可知, 当高炉渣的含量为 80%, 钾长石为 10wt%, 滑石为 10wt% 时, 制得的样品吸水率为 0.5%, 抗弯强度为 60 MPa, 显微硬度为 5.5 GPa. 对此样品的耐酸碱测试可知, 耐酸性为 0.02%, 耐碱性接近于零, 满足 GB/T3810 釉面砖性能要求(抗弯强度  $\geq 35$  MPa, 吸水率  $\leq 3\%$ , 耐酸性  $\leq 0.2\%$ ).

2.3 粒度对釉面砖性能的影响

表 2 为不同高能球磨时间高炉渣粉体平均粒度和比表面积, 图 8 为釉面砖的 SEM 图. 从表 2 可以知道, 高能球磨最佳时间是 30 min, 此时高炉渣粉体的粒度最小, 比表面积最大. 在一定时间内, 粉体粒度随着球磨时间的延长而减小, 但超过 30 min 之后, 球磨 45 min 时粉体粒度反而增大. 这是因为粉体粒度超过一临界值后, 表面能和活性将急剧增大, 粉体颗粒容易发生团聚, 使粉体粒度反而变大, 无法达到应有的效果.

表 2 不同高能球磨时间高炉渣粉体平均粒度和比表面积

Tab.2 The average particle size and the specific surface area of slag powder with different ball milling time

编号	高能球磨时间/min	平均粒度/ $\mu\text{m}$	比表面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$
1	0	5.12	0.872 0
2	15	4.43	1.732 0
3	30	3.27	2.568 2
4	45	3.59	2.234 3

由图 8 可看出, 样品晶粒大小为 1  $\mu\text{m}$  左右,

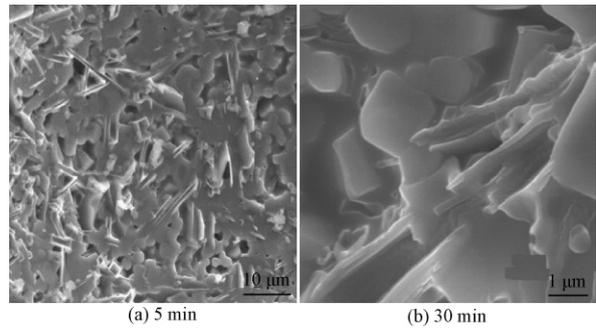


图 8 不同高能球磨时间制备的釉面砖的 SEM 图  
Fig.8 The SEM photos of glazed tiles prepared by different ball milling time

球磨 5 min 时的样品有少量气孔, 球磨 30 min 后制备的样品微观结构好, 有更多的玻璃相. 玻璃相体积分数大概是 60%, 表明形成了微晶玻璃釉, 并且晶体呈球状和针状均匀地分布在玻璃基体中, 样品结构致密, 晶粒与玻璃体结合紧密, 样品的吸水率低至 0.12%, 抗弯强度为 128 MPa, 维氏硬度值达 6.5 GPa, 具有优良的性能.

表 3 是实验所制备的微晶玻璃釉面砖与大理石、花岗岩和釉面砖国家标准的比较. 由表 3 可见, 利用高炉渣制备的微晶玻璃釉面砖的性能优于大理石和花岗岩, 并满足釉面砖的国家标准.

表 3 釉面砖与其他建材和国家标准指标对比  
Tab.3 The comparison between performance indicators of glazed tiles, other building materials and national standard

性能指标	釉面砖	大理石	花岗岩	国家标准 GB/T3810
吸水率/%	0.12	0.3 ~ 0.5	0.5 ~ 0.8	$\leq 3$
显微硬度/GPa	6.5	1.5 ~ 4.5	2 ~ 5	$\geq 4$
抗弯强度/MPa	128	13 ~ 15	15 ~ 38	$\geq 35$
耐酸性/%	$\leq 0.03$	$\leq 10.2$	$\leq 1.0$	$\leq 0.2$
耐碱性/%	$\leq 0.01$	$\leq 0.3$	$\leq 0.1$	$\leq 0.2$

3 结论

(1) 以玻璃态工业废高炉渣为主要原料, 通过原料及工艺调配, 采用一次烧结法制备高炉渣微晶玻璃釉面砖是可行的.

(2) 高炉渣及滑石的添加量均有最佳值, 加入滑石可以降低样品的吸水率及显气孔率, 提高抗弯强度及显微硬度, 但过多的滑石会使性能降低, 高能球磨有利于减小高炉渣的粒度, 但球磨时间要适宜.

(3) 高炉渣经高能球磨 30 min, 粒度为

3.3  $\mu\text{m}$ , 添加少量钾长石(10wt%)、滑石(10wt%)时,800  $^{\circ}\text{C}$  晶化 30 min,1 160  $^{\circ}\text{C}$  烧结 1.5 h,制得的微晶玻璃釉面砖的吸水率为 0.12%,显微硬度为 6.5 GPa,抗弯强度为 128 MPa,满足 GB/T 3810 对釉面砖性能的要求,性能优于大理石和花岗岩等装饰建材。

(4) 微晶玻璃釉面砖结晶相为硅灰石及钙长石,晶粒尺寸为 1  $\mu\text{m}$  左右,多为球状和针状,有利于釉面砖性能的提高,玻璃相体积分数约为 60%。

### 参考文献:

- [1] 马胜钢,何宗海,刘晓瑞,等. 立式磨粉机磨粉灰工艺及设备[J]. 郑州大学学报(工学版),2015,36(1):119-121.
- [2] 殷海荣,王瑞生. 利用水淬磷渣研制陶瓷墙地砖[J]. 陶瓷工程,1998,32(4):21-22.
- [3] 滕方雄. 赤泥质环保型建筑陶瓷的制备及烧结机理的研究[D]. 武汉:武汉理工大学材料学院,2008.
- [4] 徐晓虹,吴建锋,王国梅,等. 低温一次快烧硅灰石质釉面砖的研制[J]. 景德镇陶瓷,1997,2(7):1-4.
- [5] 何曼. 微晶玻璃釉的制备及晶化行为研究[D]. 郑州:郑州大学材料学院,2012.
- [6] FRANCIS A A, ABDEL RAHMAN M K, Daoud A. Processing, structures and compressive properties of porous glass-ceramic composites prepared from secondary by-product materials [J]. Ceramics international, 2013, 39(6):7089-7095.
- [7] DING L F, NING W, WANG Q W, et al. Preparation and characterization of glass-ceramic foams from blast furnace slag and waste glass [J]. Materials letters, 2015, 141: 327-329.
- [8] 何峰,程金树,李钱陶,等. 钼泥尾矿在烧结微晶玻璃中的应用研究[J]. 玻璃,2003,30(1):3-5.
- [9] HE M, LU H X, CAI Y, et al. Effect of flux content on the fabrication and performance of anorthite based glass-ceramic glazes for recycling of industrial solid wastes [J]. Glass technology: european journal of glass science and technology part A, 2013, 30(1):3-5.

## Study on Glazed Tile of Glass-ceramic from Waste Residue Prepared by Direct Sintering Process

LU Hongxia<sup>1</sup>, LYU Zegang<sup>1</sup>, CHENG Xiangqian<sup>1</sup>, XIN Ling<sup>2</sup>, HOU Tiejue<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Yicheng New Energy Co. Ltd, Kaifeng 475000, China)

**Abstract:** Glazed tiles of glass-ceramics were prepared by direct sintering using blast furnace slag as main raw material. The results showed that the composition of blast furnace slag was glass phase, which chemical composition was  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , a little of  $\text{TiO}_2$ , and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . When particle size was 3.3  $\mu\text{m}$ ; the content of blast furnace slag was 80wt%, potassium feldspar was 10wt%, talc was 10wt%; crystallizing at 800  $^{\circ}\text{C}$  for 30 min and sintering at 1 160  $^{\circ}\text{C}$  for 1.5 h. The sample's water absorption was 0.12%, micro-hardness was 6.5 GPa; flexural strength was 128 MPa, which met the GB performance requirement of glazed tile. The main crystal phase of glass-ceramics was wollastonite( contain a little of anorthite). Crystal size was about 1  $\mu\text{m}$  and the morphology of crystal was globular and needle-like.

**Key words:** blast furnace slag; direct sintering; glass ceramic; glazed tile

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39卷 第2期 总第158期 2018年3月10日

Journal of Zhengzhou University  
(Engineering Science)

Bimonthly (Started in 1980)

Vol.39 No.2 Sum No.158 Mar.10, 2018

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 山西同方知网印刷有限公司  
发行范围 国内外公开发刊  
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 Shanxi Tongfang Knowledge Network 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: 20.00元

邮发代号: 36-232