

- 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

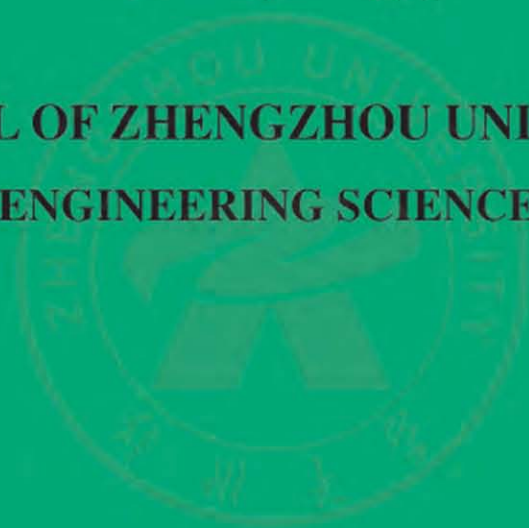
CN 41-1339/T

CODEN ZDXGAN

# 郑州大学学报

工 学 版

JOURNAL OF ZHENGZHOU UNIVERSITY  
ENGINEERING SCIENCE



## 2018.5

第39卷 第5期

Vo1.39 No.5

2018年9月出版

ISSN 1671-6833



9 771671 683182



# 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 凌(清华大学)

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)

刘国际(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 涛(北京航空航天大学)

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 静(郑州大学)

董 林(郑州大学)

臧双全(郑州大学)

王亚明(郑州大学)

王宗敏(中原工学院)

左其亭(郑州大学)

刘 波(中国科学院数学与系统科学研究院)

刘金盾(郑州大学)

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 冰(郑州大学)

张少军(郑州大学)

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)

梁长浩(合肥物质科学院)

韩一帆(郑州大学)

潘复生(重庆大学)

## 目 次

### 智能计算

- 菌群优化方法及其应用研究综述 ..... 晏晓辉, 朱云龙, 张智聪, 吕赐兴, 李 帅, 蚁文洁( 1 )
- 考虑多滑动窗口的中继卫星调度模型及启发式算法 ..... 何敏藩, 朱燕麒, 贾学卿( 11 )
- 基于编辑传播的多源图像表观迁移 ..... 刘世光, 宋志超( 22 )
- VR + 药效团: 一种交互可视的虚拟筛选系统 .....  
..... 何高奇, 龚博杰, 陈 诚, 郁明强, 卢兴见, 李洪林( 28 )
- 一种基于 RGB-D 的人体关节点定位方法 ..... 张青建, 韩建平( 33 )
- 基于多元媒体数据的教育舆情情绪可视化 ..... 梁翊涛, 王长波( 39 )
- 面向联合作战的网电对抗态势可视化系统设计与实现 ..... 张 阳, 司光亚, 王艳正( 45 )
- 图像去模糊的自适应交替方向乘子重叠组稀疏方法 .....  
..... 王 杰, 李胜光, 宋一帆, 白 珂, 马天磊( 52 )
- 位置数据稀疏约束下的疑犯时空位置预测 ..... 段 炼, 党兰学, 李 铭, 高 超, 朱欣焰( 58 )
- 基于改进的 LSTM 深度神经网络语音识别研究 ..... 赵淑芳, 董小雨( 63 )
- 基于自动编码器和 SVM 的轴承故障诊断方法 ..... 雷文平, 吴小龙, 陈超宇, 林辉翼( 68 )

### 机械工程

- 基于差速驱动的 AGV 驱动单元分析与改进设计 ..... 赵华东, 江 南, 雷超帆( 73 )
- 搅拌罐内基于 EDEM-FLUENT 耦合的多相流混合数值模拟 ..... 王建明, 邱钦宇, 何讯超( 79 )

### 土木与材料

- 不同掺合料对土坯墙泥浆抗压强度影响研究 ..... 童丽萍, 李 聪( 85 )
- 机场道面沥青加铺结构分区域差异设计研究 .....  
..... 李炜光, 国 洋, 汤 豆, 郑敏楠, 延丽丽, 杨婉怡( 91 )

---

**CONTENTS**

**【Computational Intelligence】**

- A Review of Bacterial Optimization and Its Applications .....  
..... **YAN Xiaohui, ZHU Yunlong, ZHANG Zhicong, LÜ Cixing, LI Shuai, YI Wenjie** ( 1 )
- Scheduling Model and Heuristic Algorithm for Tracking and Data Relay Satellite Considering Multiple Slide Windows .....  
..... **HE Minfan, ZHU Yanqi, JIA Xueqing** ( 11 )
- Multi-source Image Appearance Transfer Based on Edit Propagation ..... **LIU Shiguang, SONG Zhichao** ( 22 )
- VR + Pharmacophore: An Interactive and Visual Virtual Screening System .....  
..... **HE Gaoqi, GONG Bojie, CHEN Cheng, YU Mingqiang, LU Xingjian, LI Honglin** ( 28 )
- A Method of Positioning the Human Body Joints Based on RGB and Depth Information .....  
..... **ZHANG Qingjian, HAN Jianping** ( 33 )
- Visualization of Public Opinion Emotion in Education Based on Multiple Media Data .....  
..... **LIANG Yitao, WANG Changbo** ( 39 )
- Design and Implementation of Cyberspace War Situation Visualization System for Joint Operations .....  
..... **ZHANG Yang, SI Guangya, WANG Yanzheng** ( 45 )
- Image Deblurring Using Adaptive Alternate Direction Multiplier Overlapping Group Sparsity Method .....  
..... **WANG Jie, LI Shengguang, SONG Yifan, BAI Ke, MA Tianlei** ( 52 )
- Spatiotemporal Prediction of Suspect under Location Data Sparsity Constraint .....  
..... **DUAN Lian, DANG Lanxue, LI Ming, GAO Chao, ZHU Xinyan** ( 58 )
- Research on Speech Recognition Based on Improved LSTM Deep Neural Network .....  
..... **ZHAO Shufang, DONG Xiaoyu** ( 63 )
- The Application of SVM Based on Auto-encoder in Bearing Fault Diagnosis .....  
..... **LEI Wenping, WU Xiaolong, CHEN Chaoyu, LIN Huiyi** ( 68 )

**【Mechanical Engineering】**

- The Analysis and Improved Design of a New AGV Drive Unit Based on Differential Driving .....  
..... **ZHAO Huadong, JIANG Nan, LEI Chaofan** ( 73 )
- Numerical Simulation of Multi-phase Flow Mixing in Stirring Tank Based on EDEM-FLUENT Coupling .....  
..... **WANG Jianming, QIU Qinyu, HE Xunchao** ( 79 )

**【Civil Engineering and Material Engineering】**

- Study on the Influence of Different Admixtures on Compressive Strength of Adobe Wall Mud .....  
..... **TONG Liping, LI Cong** ( 85 )
- Study on Regional Difference Design of Asphalt Overlay in Airport Pavement .....  
..... **LI Weiguang, GUO Yang, TANG Dou, ZHENG Minnan, YAN Lili, YANG Wanyi** ( 91 )



## 菌群优化方法及其应用研究综述

晏晓辉<sup>1</sup>, 朱云龙<sup>2</sup>, 张智聪<sup>1</sup>, 吕赐兴<sup>2</sup>, 李 帅<sup>1</sup>, 蚁文洁<sup>3</sup>

(1. 东莞理工学院 机械工程学院, 广东 东莞 523808; 2. 东莞理工学院 电子工程与智能化学院, 广东 东莞 523808; 3. 深圳大学 管理学院, 广东 深圳 518060)

**摘 要:** 菌群优化是近年新提出的一种群体智能优化方法. 在介绍几种典型菌群优化方法的基础上, 着重对细菌觅食算法的相关文献进行了关键词分析, 结合关键词及原始细菌觅食算法的不足, 从参数与结构优化、多算法混合、算子改善、多目标优化改造等4个方面对菌群优化方法的改进研究进行了综述. 同时, 对其在各典型工程领域的应用进行了介绍. 最后, 对菌群优化方法的发展方向进行了分析展望.

**关键词:** 群体智能; 优化计算; 菌群优化; 算法改进

**中图分类号:** TP183

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.05.010

### 0 引言

群体智能(swarm intelligence, SI)算法是近年来智能计算和优化领域的热门方向. 自20世纪90年代起, 学者们从蚁群觅食、鸟类飞行、蜂群分工合作、萤火虫发光吸引、鱼群结伴游弋等行为中受到启发, 先后提出多种群体智能算法<sup>[1-5]</sup>, 并在许多数值优化和工程优化问题上进行了测试应用. 对于传统运筹学方法难以求解的大规模组合优化问题, 群体智能算法能在较短时间内求得较好的满意解, 展现出极大的优越性.

菌群优化是基于细菌群体的优化行为而提出的一类新型群体智能方法. 早在20世纪中期, 生物学家就通过显微镜观察到细菌的移动并非随意, 而是具有一定的规律. 1960年, Alder深入研究了大肠杆菌的分子机制, 提出了细菌的趋化性机理. 1974年, Bremermann在文献中指出了细菌趋化行为用于优化的可能性<sup>[6]</sup>. 1990年 Bremermann根据细菌内部的反应机制以及细菌与环境的相互作用机制提出了细菌趋化优化模型, 并将其用于神经网络训练<sup>[7]</sup>. 随后, 许多学者对细菌行为用于优化展开了研究, 其中比较成功的细菌

优化算法有细菌趋化算法(bacterial chemotaxis algorithm, BC)<sup>[8]</sup>、细菌觅食算法(bacterial foraging optimization, BFO)<sup>[9]</sup>和近年来提出的磁性细菌算法(magnetotactic bacteria optimization algorithm, MBOA)<sup>[10]</sup>, 而基于这些算法的改进和应用研究也一直未曾间断.

以最有代表性的BFO算法为例, 2000—2017年, 在Web of Science数据库以“bacterial foraging optimization”为关键词可搜索到学术文献781篇(数据截至2017年9月28日), 每年的文献数量如图1所示. 由图1可以看出, 相关研究热度一直稳步攀升. 从文献的国度来看, 主要集中在印度、美国、英国和伊朗, 如图2所示.

与粒子群算法等成熟群体智能算法相比, 基于菌群的优化研究还处在初步阶段. 基本BFO算法的优化能力也与标准PSO算法有一定差距. 然而, 与鸟群、鱼群等其他生物群体相比, 细菌个体结构和行为简单, 但群体种类及特性多变, 不同菌群之间的相互关系多样且复杂, 符合智能涌现的非线性、多样性要求. 在多层次群体建模上可能更具优势. 此外, 菌群快节奏的生命演化周期也适合优化模拟, 值得进一步深入研究. 目前, 国内外关

收稿日期: 2018-03-01; 修订日期: 2018-04-02

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB1004000004); 国家自然科学基金资助项目(61703102); 广东省自然科学基金资助项目(2015A030310274、2015A030313649); 广东省科技计划资助项目(2015A010103021)

作者简介: 晏晓辉(1985—), 男, 湖北黄冈人, 东莞理工学院副教授, 博士, 主要从事群体智能研究, E-mail: yanxh@dgut.edu.cn.

通信作者: 朱云龙(1967—), 男, 江苏南通人, 东莞理工学院教授, 博士, 主要从事智能制造研究, E-mail: ylzhu85@sina.com.

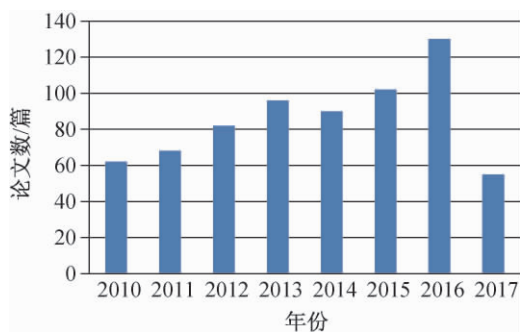


图1 历年 BFO 算法相关文献数量

Fig.1 Quantity of literatures relevant to BFO algorithm in past few years

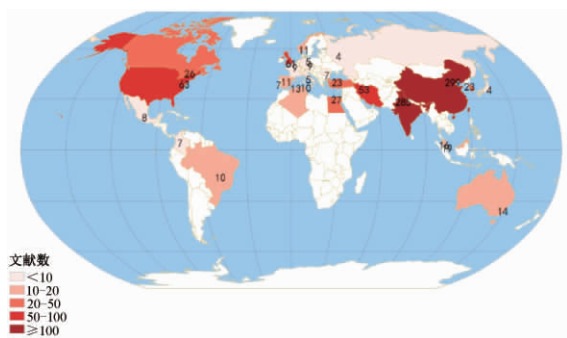


图2 细菌觅食算法相关研究国家分布

Fig.2 National distributing situation of literatures relevant to BFO algorithm

于菌群优化的综述文章较少,武林娟、高金凤的两篇综述文章<sup>[11-12]</sup>均从算法理论、算法改进、算法混合、算法应用 4 个方面进行了综述,但分析较少,缺乏系统性.李娜等对细菌觅食算法的进展进行了回顾,但应用部分的综述较为简单,改进建议也仅从改进算法现有的 3 个操作着手<sup>[13]</sup>.外文文献也仅有几篇关于 BFO 算法的综述:其中 1 篇为 Hernandez 等在 2013 年 CEC 会议上的论文,集中讨论 BFO 算法在约束数值优化上的应用<sup>[14]</sup>;另外 2 篇为牛奔等在 2010 年 ICIC 国际会议上的论文<sup>[15-16]</sup>,分别对 BFO 算法从背景、发展、应用和挑战 4 方面进行了综述.从图 1 可以看出,近年来关于菌群优化的研究也有大幅增长,因此,笔者拟对近几年的菌群优化研究内容和发展方向进行系统的梳理,以期为本领域的学者提供一个更为清晰的思路.

基于 781 篇文献的标题,笔者对其进行了词频分析,去掉介词以及“bacteria”“foraging”“optimization”“algorithm”等与 BFO 直接相关的单词,再用高词频词汇与“bacterial foraging optimization”做主题组合查询,文献数量排序如图 3 所示.

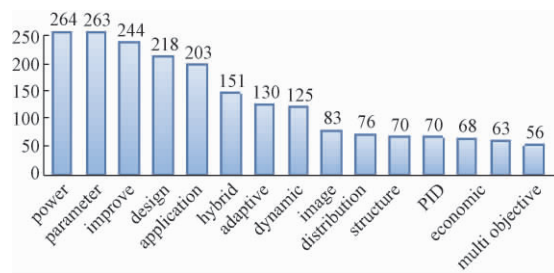


图3 相关文献高频关键词

Fig.3 High frequency key words in relevant literatures

从关键词组合的主题文献数量来看,文献的研究点主要集中在算法改进和应用上.而诸如“power”“parameter”“hybrid”“adaptive”“dynamic”“image”“structure”“PID”“economic”“multi objective”“operator”等关键词也表明了算法改进和应用的主要方向和场景.下文将从基本菌群优化方法、菌群优化方法改进研究和菌群优化方法应用研究 3 个方面展开综述,进而探讨菌群优化方法的发展方向.

## 1 基本菌群优化方法

### 1.1 BC

细菌趋化算法 BC 的早期研究是基于 Berg、Brown 和 Dahlquist 提出的细菌趋药性微观模型.在此基础上,S. D. Müller 等人结合最新研究,提出了 BC 算法<sup>[8]</sup>.实际上,BC 算法并非基于细菌群体,而是基于对细菌单个个体运动觅食行为的模拟.细菌不断地感受它周围的环境变化并利用它过去的经验和当前状态来调节下一步行动策略,从而寻找最优解.在 BC 算法中,细菌对引诱剂的反应运动遵守如下的假设:①细菌的运动轨迹是由一系列连续的直线组成,并且由运动方向和移动距离两个参数决定;②细菌在进行下一步运动要改变运动方向时,向左转和向右转的概率相同;③细菌在各段相邻轨迹间的夹角由概率分布来决定.

BC 算法在迭代过程中,细菌仅利用它上一步或上几步的位置信息来确定下一步的移动,其实质是一种近似梯度的随机搜索方法.

### 1.2 BFO

2002 年,模拟细菌群体的觅食和繁殖行为,Passino 提出了细菌觅食优化算法 BFO<sup>[9]</sup>.算法从初始化一组随机解开始,将细菌的位置表示为问题的潜在解,通过模拟菌群的趋化(chemotaxis)、繁殖(reproduction)和迁徙(elimination-dispersal)行为来改变细菌的位置,从而进行

优化.

原始 BFO 算法的结构为 3 层循环嵌套结构. 主要参数包括: 迁移次数  $N_{ed}$ 、繁殖次数  $N_{re}$ 、趋化次数  $N_c$ , 分别控制迁徙、繁殖和趋化的次数. 此外, 还有种群规模  $S$ 、迁移概率  $P_{ed}$ 、最大前进次数  $N_s$  等.

趋化操作是 BFO 算法的核心层. 在趋化环节, 细菌个体按照如下公式来更新其位置,

$$\theta^i(j+1, k, l) = \theta^i(j, k, l) + C(i) \phi(j); \quad (1)$$

$$\phi(j) = \Delta(i) / \sqrt{\Delta^T(i) \Delta(i)}, \quad (2)$$

式中:  $\theta^i(j, k, l)$  代表第  $i$  个细菌个体在第  $l$  次迁徙、第  $k$  次繁殖、第  $j$  次趋化中的位置;  $C(i)$  代表细菌个体  $i$  的趋化步长;  $\phi(j)$  为第  $j$  次趋化中随机生成的趋化方向, 为一单位向量, 如公式 (2). 当细菌通过上述公式, 位置得到改善时 (如函数适应度变优), 细菌个体可以按照上述公式继续前进一步, 直到位置变差或达到最大前进次数  $N_s$ . 趋化操作可以实现细菌向更为有利的生存环境移动, 获得较优的位置.

每进行  $N_c$  次趋化操作, 就进行一次繁殖操作. 根据在这一轮趋化中的适应度总和来进行排序, 适应度总和较高的一半个体被认为是获得了充足的营养, 在原位置进行分裂复制; 另一半个体执行消亡操作, 从种群中移除. 繁殖操作通过优胜劣汰, 来加快收敛.

每进行  $N_{re}$  次繁殖操作, 就进行一次迁徙操作. 所有细菌个体以概率  $P_{ed}$  进行迁徙, 被移到解空间中一随机位置. 迁移操作可以在一定程度上避免算法陷入局部最优, 以免早熟.

$N_{ed}$  次迁徙操作完成后, 算法结束, 输出最优解.

此外, BFO 算法还模拟了细菌的群聚行为. 菌群觅食过程中, 每个细菌个体除按照自己的方式搜索食物外, 还会收到其他个体发出的引力信号, 若是吸引力信号, 则个体会游向种群中心; 若是排斥力信号, 则保持个体与个体之间的安全距离. 细菌间聚集作用的数学表达式如公式 (3) 所示,

$$J_{cc}(\theta, P(j, k, l)) = \sum_{i=1}^S J_{cc}(\theta, \theta^i(j, k, l)) = \sum_{i=1}^S [-d_{\text{attract}} \exp(-w_{\text{attract}} \sum_{m=1}^D (\theta_m - \theta_m^i)^2)] + \sum_{i=1}^S [-h_{\text{repellant}} \exp(-w_{\text{repellant}} \sum_{m=1}^D (\theta_m - \theta_m^i)^2)]. \quad (3)$$

### 1.3 MBOA

磁性细菌优化算法 (magnetotactic bacteria optimization algorithm, MBOA) 是哈尔滨工业大学莫宏伟等根据细菌的趋磁性提出的一种优化方法<sup>[10]</sup>. 磁性细菌是对地球磁场和外部磁场敏感, 可以沿着磁力线方向和氧气浓度梯度方向运动的一类特殊细菌的总称. 该趋磁现象最早由生物学家 Blakemore 于 1975 年发现<sup>[17]</sup>. 经研究, 这类细菌具有趋磁性的原因是其体内存在磁小体. 磁小体的主要成分为磁铁矿 ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$  等), 呈细小颗粒状被包裹在蛋白膜中. 该类细菌通常包含多个磁小体组成的磁小体链, 因而整个细菌类似于生物磁针, 能感应磁力线并通过鞭毛摆动沿其方向运动. 此外, 磁小体链还能起到利于细菌能量收集、调剂胞内氧化还原数值大小等作用. 关于磁性细菌的研究在文献 [18] 中有详细论述, 在此不作过多介绍. 2013 年, 莫宏伟教授根据磁性细菌的特征提出了 MBOA 算法. 在 MBOA 中, 将每个具有磁小体的细菌看作解空间中的一个解. 其求解过程为磁小体调整适应磁场的过程, 而最终具有最小净磁能的磁小体即为所求的最优解. 算法首先初始化, 在求解空间内随机生成一系列磁小体个体; 其后, 根据细胞间的相互作用计算磁小体力矩; 接着, 对磁小体实施拓展操作以获得新的力矩; 然后, 对磁小体的力矩进行调整替换, 重复上述计算、拓展和调整过程直到算法满足结束条件.

在原始 MBOA 的基础上, 莫宏伟团队及其他学者对 MBOA 进行了一系列研究, 提出了基于最优个体指导的 MBOA 算法<sup>[19]</sup>、基于力矩迁移的 MBOA 算法<sup>[20]</sup>、趋磁性细菌多目标算法<sup>[21]</sup>等, 并将这些算法应用于多峰优化、约束优化等数值优化问题以及移动机器人路径规划等工程问题<sup>[22-23]</sup>.

## 2 菌群优化方法改进研究

结合上述菌群优化的关键词分析和其相关性, 笔者将从参数与结构改进、多算法混合改进、算子改进和多目标优化改造等 4 个典型方面展开菌群优化方法改进研究综述. 需要说明的是, 同一篇文献也可能综合用到下面的多种改进方法.

### 2.1 参数与结构改进

参数改进是群体智能算法改进的常见方式<sup>[24]</sup>. 与粒子群算法、遗传算法等经典算法相比, 原始 BFO 算法有  $N_{ed}$ 、 $N_{re}$ 、 $N_c$ 、 $P_{ed}$ 、 $N_s$ 、 $C(i)$  等主

要参数,聚集操作中还有 4 个参数,参数个数较多,不利于控制。

BFO 算法参数较多的原因之一是采用了 3 层循环嵌套结构。如果  $N_{ed}$ 、 $N_{re}$ 、 $N_c$  等参数设置不当,可能在不合适的时间进行繁殖、消亡与迁徙等操作,从而影响算法的收敛性。在一些改进的菌群优化算法中,去掉了趋化-繁殖-迁徙 3 层嵌套,将繁殖和迁徙作为趋化的并行步骤来进行<sup>[25]</sup>。基于该算法结构的改进算法可以去掉  $N_{ed}$ 、 $N_{re}$ 、 $N_c$  等参数。

BFO 算法中另外一个重点参数改进为趋化步长  $C(i)$ 。现有的群体智能算法都是通过种群的进化迭代来实现最优解的改进。进化迭代在算法执行的过程中表现为种群中各个体在解空间中的位置更新。不同算法基于所模拟的不同生物行为,其具体更新公式各不相同。其中,主要包括两大类:基于相对位置的更新和基于绝对位置的更新,表 1 为几种典型群体智能算法的更新公式。

表 1 典型算法位置更新公式比较

Tab. 1 Comparison of position updating equation to several classic algorithms		
算法	更新公式	类型
GA	父本交叉	相对
PSO	$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1}$ $v_i^{t+1} = \omega v_i^t + c_1 r_1 (pbest_i - x_i^t) + c_2 r_2 (gbest - x_i^t)$	相对
ABC	$v_{i,j} = x_{i,j} + \phi(x_{i,j} - x_{i,j}) \text{ (候选)}$	相对
BFO	$x_i^{j+1} = x_i^j + C(i) \phi(j)$	绝对
FA	$x_i = x_i + \beta \beta_0 e^{-\gamma y^2} (x_i - x_j) + \alpha(rand - 0.5)$	相对 + 绝对

由表 1 可以看出,GA、PSO、ABC 等算法都采用的是基于相对位置的更新,通过个体之间的组合或差异来产生新的个体。原始的 BFO 和 FA 算法中采用了基于绝对位置的更新。BFO 算法中,细菌个体在确定游动角度后,沿该角度以步长  $C(i)$  向前游动。FA 算法中,随机项  $\alpha(rand - 0.5)$  是以一个常数  $\alpha$  乘以一个  $(-0.5, 0.5)$  的随机数<sup>[26]</sup>。在基于相对位置的更新中,种群中的个体的前期差异大,算法趋向于全局搜索,后期差异小,算法趋向于局部开发,能动态地平衡算法的多样性和收敛性。在基于绝对位置的更新中,个体更新中使用指定的步长。该类方法在局部搜索上有一定的优势,但若步长设置不当,在前期可能搜索的范围不够,后期难以收敛,文献[27]的研究证实了这一点。为弥补上述菌群优化中基于绝对位

置更新带来的缺点,很多学者对趋化步长  $C(i)$  进行了改进。其中,大部分学者采用了基于动态下降或自适应的步长。

作者在前期的研究中,抛弃了趋化-繁殖-迁徙 3 层嵌套,改为对细菌的生命周期进行建模,根据细菌个体在优化过程中的营养获取和流失动态地进行分裂、死亡和迁徙,并在趋化步长线性下降的基础上根据营养值动态地改变其步长,取得了较好的效果<sup>[27]</sup>。牛奔等提出了(structure-redesign-based bacterial foraging optimization, SRBFO)算法,将原始的 BFO 算法中 3 层嵌套改为单层循环,并重新设计了繁殖、消亡和迁徙操作,进一步简化算法的结构,在投资组合优化的实验中证明了该算法优于 PSO 算法<sup>[28]</sup>。Tan 等提出了一种自适应结构重构的细菌觅食算法(adaptive structure-redesigned-based bacterial foraging optimization, ASRBFO),在 ASRBFO 中,采用自适应的趋化步长,用个体的当前位置、历史最优位置、所有细菌的平均位置等信息来计算细菌的趋化步长。通过该方法,算法收敛速度和精度优于其他对比算法<sup>[29]</sup>。在对 BFO 改进的研究中,大多数文献都有涉及对趋化步长的改进。

## 2.2 多算法混合改进

与其他优秀算法的思想或算子结合也是算法改进的一大途径。自菌群算法提出以来,许多学者在这方面展开了研究。

Manikandan 等针对不同蛋白质序列分析中多目标多序列对比带来的计算量大的问题,将 BFO 算法和 GA 算法结合,提出一种 BFO-GA 算法来实现高效比对。实验结果表明,该算法优于多种传统的序列对比算法以及 ABC、PSO 等经典智能算法<sup>[30]</sup>。Chen 等结合 BFO 算法和 PSO 算法提出一种 BFPSO 算法,用于神经模糊分类器的参数优化<sup>[31]</sup>。该算法在局部搜索中采用 BFO 的趋化操作,在全局搜索中采用 PSO 的搜索方法,取得了较好的效果。Emre 等将 BFO 算法中的趋化操作与差分进化算法(differential evolution, DE)结合,提出一种趋化差分进化算法,在 CEC2014 测试集上的测试结果表明,该算法优于原始的 BFO 算法<sup>[32]</sup>。杜鹏桢等提出一种混合蜂群算法的自适应细菌觅食算法。在该算法中,借鉴人工蜂群算法的雇佣蜂行为,设计出一种雇佣蜂趋化算子。此外,在原趋化的基础上提出自适应步长趋化算子。算法根据种群的多样性在两种趋化算子中进行自适应切换<sup>[33]</sup>。Manjith 将 BFO 算法和改进的布谷

鸟搜索算法(cuckoo search, CS)结合,用于解决认知无线电的频道估计误差最小化问题.测试结果表明,该算法得到的导频序列优于其他算法<sup>[34]</sup>.Wu等提出一种BF-PSO-FSVC模型,将BFO和PSO算法结合,用于优化模糊支持向量机的未知参数,从而提高分类器的精度,更好地鉴别心电图信号的疲劳状态<sup>[35]</sup>.

在算法混合的研究中,与遗传算法和粒子群算法的混合居多.其他一些新兴智能算法也有涉及.在算法混合中经常利用BFO算法的框架或趋化算子.趋化算子“改进则继续试探一次”的思想可以较好地调整计算资源的分配,在潜在的最优解附近加强局部搜索.

### 2.3 算子改进

BFO算法的核心是趋化操作<sup>[36]</sup>.因此算子改进最多的是趋化算子的改进.在2.1节中已经提到一些关于趋化步长的改进.此外,还有一些研究是针对趋化算子中的翻转方向或新个体生成公式的改进.

Yang等提出了一种BFOCC算法.该算法采用了新的趋化算子:每个细菌随机选择一个标准基向量作为趋化方向来游动或翻转,从而减少各维度之间的相互干扰.另外,该算法还引入了一个新设计的共轭算子来加强细菌之前的信息交换,提高算法的收敛性<sup>[37]</sup>.Meng等在BFO的趋化操作中引入了变异因子,在每次迭代中,细菌个体以一定概率被选择并进行变异.经测试,采用小波变异的方法效果最为理想.该改进的算法被用于阵列综合问题<sup>[38]</sup>.Hernandez等提出了一种改进的菌群优化算法用于四杆机构的综合优化.该改进的菌群优化算法在趋化操作中引入了两种游动算子.其中,一种倾向于全局搜索,另一种则加强在细菌个体附近的邻域搜索.通过这两种游动因子,细菌在搜索过程中能找到更好的解<sup>[39]</sup>.Zhao等在趋化操作中引入混沌搜索算子来增强细菌个体的活跃水平,拓展其搜索空间,用以解决置换流水线调度优化问题<sup>[40]</sup>.

除趋化算子外,也有一些学者对细菌觅食算法的繁殖、迁徙等其他算子进行改进.

Svrakov对BFO算法的繁殖算子进行了分析,将繁殖算子与进化算法的选择进行了类比.分析表明,一个稳定的繁殖活动有助于细菌的快速收敛<sup>[41]</sup>.Mai等对BFO算法中的消亡-迁徙操作进行了改进,引入了一个自适应的迁徙概率,根据细菌个体的适应度来确定其是否迁徙.算法还在

趋化移动后加入了一个PSO算法的学习算子.实验表明改进后的算法具有更好的收敛速度和收敛精度<sup>[42]</sup>.Liu等针对BFO算法中迁徙操作随机性太强这一缺点,引入了信息素来控制细菌的迁徙.此外,在繁殖算子中加入了柯西变异来增强算法的全局搜索能力.测试结果表明,该算法能提高收敛速度,并避免陷入局部最优<sup>[43]</sup>.

### 2.4 多目标优化改造

经典群体智能算法提出之初大多用于单目标优化问题.对其进行改造使之能适用于多目标优化问题也是算法改进的一大方向.

Tan等人提出一种基于全面学习策略的多目标细菌觅食算法,用于电力系统分配的多目标优化.算法通过非支配排序和拥挤距离来保持非支配解集的多样性.此外,算法还采用了全面学习策略来增强BFO的搜索能力,并在繁殖操作中采用了基于健康值排序的方法来提高菌群的质量<sup>[44]</sup>.Zhou等建立了抽水蓄能水电站的导叶关闭计划优化模型.该模型综合考虑单位转速的上升速度,每个液压单元特定节点的压力以及各种复杂的液压和机械约束等多个优化目标,采用了一种增强的细菌觅食优化-重力搜索算法来对其进行求解.该算法采用了种群重建、自适应的选择趋化算子及局部搜索策略,并使用外部存档来保存精英解集,较好地解决了优化问题<sup>[45]</sup>.

多序列对比问题(multiple sequence alignment, MSA)是计算生物学和生物信息学中经常遇到的一类多目标优化问题.Rani等提出多目标细菌觅食算法(multi-objective bacterial foraging optimization, MO-BFO)对其进行求解.测试结果表明,该多目标细菌觅食算法优于其他对比算法<sup>[46]</sup>.牛奔等人提出一种多目标菌群优化算法,该方法综合采用健康值排序和帕累托支配机制来实现多目标优化.此外,通过一定概率保留边界非可行解来保持种群的多样性.算法通过多样性和总逼近距离来评估非支配前沿的优劣,结果表明了该算法的有效性<sup>[47]</sup>.在另一种多目标菌群优化算法中,牛奔等还将邻域搜索引入到多目标细菌优化算法中,采用基于环形拓扑和星形拓扑的两种邻域搜索来提高非支配前沿的精度和多样性<sup>[48]</sup>.Yi等采用多目标细菌觅食算法来解决最大化电流效率、最小化能量损耗和全氟化碳生成量的电解铝生产优化问题.作者首先建立了一个面向任务的优化框架,并采用并行细胞熵方法来评估非支配解集的进化状态.该多目标优化方法

采用基于非支配存档进化法和自适应觅食方法来平衡优化过程中非支配前沿的分布性和收敛性<sup>[49]</sup>. Kaur 提出了一种精英多目标细菌优化算法,该算法采用精英保持策略来求解多标准网格调度问题.实验测试表明,算法优于多目标 PSO 算法和 NSGA-II 等经典多目标优化算法<sup>[50]</sup>.

总的来说,基于菌群的多目标优化方法在多目标的处理上大多都借鉴了 PESA-II 和 NSGA-II 等经典第二代多目标优化算法,例如精英外部存档、用于拥挤距离的适应度分配等,并在占优机制、进化策略等方面进行了改进补强.

### 3 菌群优化方法应用研究

除数值优化外,基于菌群的优化方法还被应用于许多工程优化问题中.排名第一的关键词“power”即为其在电力系统中的应用,“application”的词频也排名第四.其他关键词“dynamic”“image”“PID”等高频词也展示了它在动态优化、图像处理、PID 控制优化等工程领域中的应用.

除“power”外,关键词“dynamic”“economic”“PID”很大一部分指向的应用领域也为电力系统的动态经济调度(dynamic economic dispatch, DED)和 PID 稳定性控制等优化问题.电力系统优化是智能算法应用的一个热门方向<sup>[51]</sup>,前文提到的文献[44-45]也均为电力系统中的应用.

此外, Azizipanah 综合考虑电力系统的最优动态优化问题中存储约束、禁止区域、阀点效应等约束,建立了一个非线性、非凸、不平滑、多模态、变量相关、不可微的模型,采用细菌觅食算法-简化群优化混合方法来对该问题进行求解<sup>[52]</sup>. Krishan 等提出一种混合的细菌觅食-差分算法,用于电力系统稳定器的设计优化.算法在较宽范围的系统条件和操作下进行了测试,以确保其鲁棒性.特征分析及不同干扰下的时域响应证明了它的有效性<sup>[53]</sup>. Tripathy 等将一种改进的 BFO 算法用于存在多电力系统稳定器和多可控串了联补充电容器的多机电力系统 Hopf 分叉失稳的参数控制优化<sup>[54]</sup>. Nasiruddin 等将细菌觅食算法用于两个地区整合的多源发电站的自动发电机组控制<sup>[55]</sup>.

除电力系统外,还有一些学者将菌群优化算法用于动态环境下机器人路径规划<sup>[56-57]</sup>、机器人沿墙导航控制<sup>[58]</sup>、车辆路径规划<sup>[59]</sup>、制造单元动态调度问题<sup>[60]</sup>、动态投资组合优化<sup>[61-62]</sup>、信息动态路由优化<sup>[63]</sup>等动态优化问题.

在图像处理领域, BFO 算法在图像分类、边缘处理、图像配准、图像压缩等技术问题上也有广泛的应用.

文献[64]在径向基函数神经网络中整合了 BFO 算法,用于图像分类优化,在对参数进行系列调试后,该算法能有效且稳健地解决图像分类问题. Tang 等利用改进的 BFO 算法解决图像处理中多级阈值处理问题.在该算法中,趋化环节借鉴了 PSO 的算子来增强寻优能力,在繁殖环节中采用了精英保存策略.通过最大化 Tsallis 阈值函数得到优化解<sup>[65]</sup>. Pan 等人针对传统边缘处理算法依赖初值且可能产生不连续边缘的问题,提出了一种基于 BFO 的边缘检测算法用于细胞图像的处理<sup>[66]</sup>. Verma 等采用 BFO 算法和最小核值相似区法构建一种模糊系统用于图像边缘检测.其中,用 BFO 算法来优化模糊隶属函数和增强模糊算子的参数<sup>[67]</sup>. Bermejo 等将细菌觅食算法用于基于灰度的医学图像配准(image registration, IR)问题<sup>[68]</sup>,并对细菌觅食算法在图像配准的应用进行了深入研究,通过大量对比发现,细菌觅食算法在该问题上优于其他对比算法<sup>[69]</sup>. Sanyal 等将一种变种群的细菌觅食算法用于基于模糊矢量量化的图像压缩问题.该算法能够有效减少训练和重构之间的平均失真问题,采用变化的种群比原始 BFO 的固定种群更为有效<sup>[70]</sup>.

在 PID 控制方面,如前文所述, BFO 在电力系统的稳定性控制、负载频率控制、自动电压调节器稳压控制等问题中有很多应用.除此之外,菌群优化方法也被应用到很多其他控制问题中.

Abdelkarim 提出一种混合的细菌觅食-粒子群优化算法,并将其用于耦合精馏过程中的解耦和控制参数优化.时域结果分析表明,相对于传统 PID 控制方法有显著的改进<sup>[71]</sup>. Arya 等采用细菌觅食算法对多区域互连传统/重构电力系统模糊控制器的增益进行了优化<sup>[72]</sup>. Li 为了改善可变风量空调系统的变风量性能,提出了一种基于细菌觅食算法的 PID 控制策略.首先建立一个非线性的 PID 控制模型并分析其参数,然后用 BFO 算法对参数进行调整优化<sup>[73]</sup>. 陈东宁等结合粒子群和细菌觅食算法,提出一种混合算法.采用粒子群的位置更新公式来指导菌群的趋化方向,并将其用于材料试验机液位置伺服系统的 PID 控制器参数寻优,取得了较好的效果<sup>[74]</sup>.

此外,随着近几年机器学习和大数据技术的兴起,菌群优化在这些方面的应用也大幅增加.以



“bacterial foraging optimization”和“machine learning”作主题组合查询一共有文献 30 篇,全部为 2007 年之后的,其中 2014—2017 年 20 篇,占比 66.6%。

Kora 等采用混合的 BFO 和 PSO 算法,进行心电图信号的特征选择,将特征值作为 Levenberg-Marquard 神经网络分类器的输入,从而诊断束支传导阻滞,以进行心脏疾病的诊断<sup>[75]</sup>。Wang 等人提出了一种离散的细菌觅食算法用于微阵列基因表达癌症数据分类中的特征选择。针对基因表达癌症数据因高维难以分类的问题,通过离散细菌优化算法选择合适的特征以进行数据降维<sup>[76]</sup>。Panda 等提出一种自适应交叉细菌觅食算法,采用自适应的趋化来提高寻优效率,并引入交叉因子来加强邻域搜索。该算法被用于人脸识别,以进行数据降维,从而获得人脸识别分析数据中的最优主成分<sup>[77]</sup>。Wu 等提出一种基于细菌觅食算法的混合高斯支持向量分类机,用于肌电图信号的疲劳分类。在这一过程中,用细菌觅食算法来进行高斯支持向量机的参数优化<sup>[78]</sup>。

综上,随着细菌优化算法的不断改进,其在工程问题上的应用也越来越多。

#### 4 菌群优化方法发展方向展望

从上述菌群优化的算法改进和应用来看,在过去十几年中,基于菌群优化的研究有了长足的进步。参数改善、多算法混合、算子改善等将依然是算法改进研究的重要方向。然而,现有研究也还有一些内容有所欠缺,值得我们继续深入研究。

细菌及菌群行为特征提取的多样化。从菌群优化研究来看,目前研究主要还是以 BFO 算法作为基础展开,其核心模拟的是大肠杆菌的趋化行为。除该趋化性和莫宏伟教授 MBOA 算法的趋磁性外,少有对细菌其他特性的模仿。而自然界中的细菌种类繁多,行为特性也各不相同,如何继续提取一些其他细菌或菌群的典型特征,如细菌的诱导剂分泌、pH 值改造,菌群的拮抗、合作现象等以用于优化,是细菌优化方法改进的一个突破方向。

多种群多层次建模。现有的菌群优化方法大多是单一种群,采用相对统一的进化规则和信息交互规则。从自组织的角度看,不利于智能的涌现。利用上述菌群间协作、竞争、拮抗等生物现象建立多层次的拓扑结构及信息交互,并在不同菌群内部采用不同的进化规则,从而保持一定的多

样性、非线性和种群进化动力,可能能够更好地促进智能的涌现,以达到优化的目的。目前,一些学者已经展开了多种群粒子群算法的研究<sup>[79-80]</sup>。而多菌群的优化研究较少,尚在起步阶段,值得进一步深入研究。

基于相对位置的更新。在 2.1 节中已经对比了基于相对位置更新和绝对位置更新的区别,也指明了基于绝对位置更新存在的不足。原始 BFO 算法采用基于绝对位置更新的趋化操作,虽然很形象地模拟了细菌趋化觅食的生物现象,但不利于算法的收敛。在 2.1 节的算法改进中,有部分文献借鉴了 PSO、DE 等算法的算子用个体的相对位置来确定趋化方向,并在趋化步长上采用了一些自适应的方法,但均为通过对趋化步长的控制来平衡全局开发和局部搜索,其本质仍是绝对位置更新。合理改进趋化操作,使之直接采用基于相对位置的更新方式,可能会使菌群优化方法的寻优能力得到新的飞跃。

应用范围的进一步扩展。从应用领域的统计情况来看,目前菌群优化方法在电力系统的优化控制上应用占比非常高,在一些新兴领域也有一些运用,但还不够发散。随着算法的优化能力进一步加强,可以预见的是,菌群优化算法的应用范围也会越来越广。

#### 5 结论

对菌群优化方法进行了介绍,结合近几年的相关文献,从参数与结构改进、多算法混合改进、算子改进和多目标优化改造 4 个方面对算法改进进行了系统论述,并介绍了其在电力系统、动态优化、图像处理、PID 控制和机器学习等工程领域的应用情况。结合现有研究的趋势和存在的不足,对未来发展方向提出了展望。

#### 参考文献:

- [1] COLORNI A, DORIG M, MANIEZZO V. Distributed optimization by ant colonies [C] // Proceedings of the 1st European Conference on Artificial Life, 1991: 134 - 142.
- [2] EBERCHART R C, KENNEDY J. Particle swarm optimization [C] // Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks, 1995, 4: 1942 - 1948.
- [3] KARABOGA D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization [C] // Technical Report-tr 06, Erciyes University, Engineering Faculty, Comput-

- er Engineering Department, 2005.
- [4] YANG X S. Firefly algorithms for multimodal optimization [C] // Proceedings of the 5th International Conference on Stochastic Algorithms: Foundations and Applications, Sapporo, Japan, 2009, 5792: 169 – 178.
  - [5] 李晓磊, 邵之江, 钱积新. 一种基于动物自治体的寻优模式: 鱼群算法 [J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22(11): 32 – 38.
  - [6] BREMERMAN H J. Chemotaxis and optimization [J]. Journal of the franklin institute, 1974: 397 – 404.
  - [7] BREMERMAN H J, ANDERSON R W. An alternative to back propagation: a simple rule for synaptic modification for neural net training and memory [C] // Internal Report, Dept. of Maths, University of California, Berkeley, 1989.
  - [8] MULLER S D, MARCHETTO J, AIRAGHI S, et al. Optimization based on bacterial chemotaxis [J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2002, 6(1): 16 – 29.
  - [9] PASSINO K M. Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control [J]. IEEE control systems magazine, 2002(22): 52 – 67.
  - [10] MO H W, LIU L L, XU L F, et al. Research on magnetotactic bacteria optimization algorithm [C] // The Fifth International Conference on Advanced Computational Intelligence, Nanjing, China, 2012, 423 – 428.
  - [11] 武林娟, 胡桂武, 陈建超. 菌群优化算法研究综述 [J]. 湖北师范学院学报(自然科学版), 2012, 32(4): 10 – 14.
  - [12] 高金凤, 车伟伟, 吴林乔. 菌群优化算法研究综述 [J]. 数字技术与应用, 2013(10): 128 – 129.
  - [13] 李娜, 雷秀娟. 细菌觅食优化算法的研究进展 [J]. 计算机技术与发展, 2014(8): 39 – 44.
  - [14] HERNANDEZ O B, MEZURA M E, POZOS P. A review of the bacterial foraging algorithm in constrained numerical optimization [C] // IEEE Congress on Evolutionary Computation, Cancun, Mexico, 2013: 2695 – 2702.
  - [15] NIU B, FAN Y, TAN L J, et al. A review of bacterial foraging optimization part I: background and development [J]. Communications in computer and information science, 2010(93): 535 – 543.
  - [16] NIU B, FAN Y, TAN L J, et al. A review of bacterial foraging optimization part II: applications and challenges [J]. Communications in computer and information science, 2010(93): 544 – 550.
  - [17] BLAKEMORE R P. Magnetotactic bacteria [J]. Science, 1975(190): 377 – 379.
  - [18] DAVILA A F. Magnetotactic bacteria [M]. Springer Berlin Heidelberg, 2015: 956 – 957.
  - [19] MO H W, LIU L L, XU L F, et al. Research on magnetotactic bacteria optimization algorithm based on the best individual [J]. Communications in Computer and Information Science, 2014, 472(1): 318 – 322.
  - [20] MO H W, LIU L L, ZHAO J. A new magnetotactic bacteria optimization algorithm based on moment migration [J]. IEEE/ACM transcomputbiolbioinform, 2017(99): 15 – 26.
  - [21] 徐志丹. 趋磁性细菌多目标优化算法 [J]. 控制与决策, 2016, 31(5): 829 – 834.
  - [22] MO H W, XU L F. Magnetotactic bacteria optimization algorithm for multimodal optimization [C] // 2013 IEEE Symposium on Swarm Intelligence, Singapore, Singapore, 2013: 240 – 247.
  - [23] MO H W, XU L F, LUO C. Magnetic bacterial optimization algorithm for mobile robot path planning [J]. Bio-inspired computing-theories and applications, 2016: 334 – 339.
  - [24] 朱云龙, 申海, 陈瀚宁, 等. 生物启发计算研究现状与发展趋势 [J]. 信息与控制, 2016, 45(5): 600 – 614.
  - [25] YAN X H, ZHANG Z C, GUO J W, et al. A modified bacterial foraging optimization algorithm for global optimization [J]. Lecture notes in computer science, 2016(9771): 627 – 635.
  - [26] YANG X S. Nature-inspired metaheuristic algorithms [M]. Luniver Press, 2008.
  - [27] YAN X H, ZHU Y L, ZHANG H, et al. An adaptive bacterial foraging optimization algorithm with lifecycle and social learning [J]. Discrete dynamics in nature and society, 2012, 27(5): 20 – 26.
  - [28] NIU B, BI Y, XIE T. Structure-redesign-based bacterial foraging optimization for portfolio selection [J]. Lecture notes in computer science, 2014(8590): 424 – 430.
  - [29] TAN L J, YI W J, YANG C, et al. Adaptive structure-redesigned-based bacterial foraging optimization [J]. Lecture notes in computer science, 2016(9772): 897 – 907.
  - [30] MANIKANDAN P, RAMYACHITRA D. Bacterial foraging optimization-genetic algorithm for multiple sequence alignment with multi-objectives [J]. Scientific reports, 2017, 7(1): 8833.
  - [31] CHEN C H, SU M T, LIN C J, et al. A hybrid of bacterial foraging optimization and particle swarm optimization for evolutionary neural fuzzy classifier [J]. International journal of fuzzy systems, 2014, 16(3):



- 422–433.
- [32] 杜鹏桢,唐振民,孙研. 一种混合蜂群算法的自适应细菌觅食优化算法[J]. 计算机工程, 2014, 40(7): 138–142.
- [33] EMRE Y, ALTUN O. Hybrid achievement oriented computational chemotaxis in bacterial foraging optimization: a comparative study on numerical benchmark[J]. *Soft computing*, 2015, 19(12): 3647–3663.
- [34] MANJITH R. A hybrid of BFO and MCS algorithms for channel estimation of cognitive radio system[J]. *Arabian journal for science and engineering*, 2016, 41(3): 841–852.
- [35] WU Q, MAO J F, WEI C F, et al. Hybrid BF-PSO and fuzzy support vector machine for diagnosis of fatigue status using EMG signal features[J]. *Neurocomputing*, 2016(173): 483–500.
- [36] CHEN H N, ZHU Y L, HU K Y, et al. Bacterial colony foraging algorithm: combining chemotaxis, cell-to-cell communication, and self-adaptive strategy[J]. *Information sciences*, 2014, 273(3): 73–100.
- [37] YANG C, JI J, LIU J, et al. Bacterial foraging optimization using novel chemotaxis and conjugation strategies[J]. *Information sciences*, 2016, 363(C): 72–95.
- [38] MENG Y, REN Z L, TIAN Y B. Array synthesis based on mutational bacterial foraging optimization algorithm[C]// *International Conference on Computer Science and Information Engineering*, Bangkok, Thailand, 2015, 220–226.
- [39] HERNANDEZ O B, POZOS P, MEZURA M E, et al. Two-swim operators in the modified bacterial foraging algorithm for the optimal synthesis of four-bar mechanisms[J]. *Computational intelligence and neuroscience*, 2016, 29(15): 18–22.
- [40] ZHAO F, LIU Y, SHAO Z, et al. A chaotic local search based bacterial foraging algorithm and its application to a permutation flow-shop scheduling problem[J]. *International journal of computer integrated manufacturing*, 2016, 29(9): 962–981.
- [41] SVRAKOV D, NIKOLOV S, KIROV M. Stability analysis of the reproduction operator in bacterial foraging optimization[J]. *Theoretical computer science*, 2010, 411(21): 2127–2139.
- [42] MAI X F, LI L. An enhanced bacterial foraging optimization with adaptive elimination-dispersal probability and PSO strategy[C]// *International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, Changsha, China, 2016, 161–166.
- [43] LIU X, HUANG L, CHANG X. The bacteria foraging algorithm for global optimization based on pheromone[C]// *International Conference on Service Systems and Service Management*, Guangzhou, China, 2015, 1–7.
- [44] TAN L J, WANG H, ZHANG F, et al. A multiobjective bacterial optimization method based on comprehensive learning strategy for environmental/ economic power dispatch[J]. *Lecture notes in computer science*, 2016(9713): 400–407.
- [45] ZHOU J, XU Y, ZHENG Y, et al. Optimization of guide vane closing schemes of pumped storage hydro unit using an enhanced multi-objective gravitational search algorithm[J]. *Energies*, 2017, 10(7): 911.
- [46] RANI R R, RAMYACHITRA D. Multiple sequence alignment using multi-objective based bacterial foraging optimization algorithm[J]. *Bio systems*, 2016(150): 177–189.
- [47] NIU B, WANG H, WANG J, et al. Multi-objective bacterial foraging optimization[J]. *Neurocomputing*, 2013(116): 336–345.
- [48] NIU B, LIU J, CHEN J, et al. Neighborhood learning bacterial foraging optimization for solving multi-objective problems[J]. *Lecture notes in computer science*, 2016(9713): 433–440.
- [49] YI J, HUANG D, FU S, et al. Multi-objective bacterial foraging optimization algorithm based on parallel cell entropy for aluminum electrolysis production process[J]. *IEEE transactions on industrial electronics*, 2016, 63(4): 2488–2500.
- [50] KAUR M. Elitist multi-objective bacterial foraging evolutionary algorithm for multi-criteria based grid scheduling problem[C]// *International Conference on Internet of Things and Applications*, Pune, India, 2016: 431–436.
- [51] 肖俊明,周谦,瞿博阳,等. 多目标进化算法及其在电力环境经济调度中的应用综述[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 1–9.
- [52] AZIZIPANAH A R. A new hybrid bacterial foraging and simplified swarm optimization algorithm for practical optimal dynamic load dispatch[J]. *International journal of electrical power & energy systems*, 2013, 49(1): 414–429.
- [53] KRISHAN R, VERMA A. Robust tuning of power system stabilizers using hybrid intelligent algorithm[C]// *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Boston, USA, 2016: 1–5.
- [54] TRIPATHY M, MISHRA S. Coordinated tuning of PSS and TCSC to improve Hopfbifurcation margin in multi-machine power system by a modified bacteria foraging algorithm[J]. *International journal of electrical power*

- & energy systems, 2015( 66) : 97 – 109.
- [55] NASIRUDDIN I, BHATTI T S, HAKIMUDDIN N. Automatic generation control in an interconnected power system incorporating diverse source power plants using bacteria foraging optimization technique [J]. Electric power components & systems, 2015, 43( 2) : 189 – 199.
- [56] HOSSAIN M A, FERDOUS I. Autonomous robot path planning in dynamic environment using a new optimization technique inspired by bacterial foraging technique [J]. Robotics & autonomous systems, 2015 ( 64) : 137 – 141.
- [57] 蒲兴成, 赵红全, 张毅. 细菌趋化行为的移动机器人路径规划 [J]. 智能系统学报, 2014( 1) : 69 – 75.
- [58] LIN C J, LIN H Y. Mobile robot wall-following control using a fuzzy cerebellar model articulation controller with group-based strategy bacterial foraging optimization [J]. International journal of advanced robotic systems, 2017, 14( 4) : 1 – 13.
- [59] 谭立静, 王红, 牛奔. 基于 ACLBFO 算法的车辆路径规划 [J]. 系统工程, 2015, 33( 4) : 120 – 125.
- [60] NOURI H. Development of a comprehensive model and BFO algorithm for a dynamic cellular manufacturing system [J]. Applied mathematical modelling, 2016, 40( 2) : 1514 – 1531.
- [61] TAN L J, NIU B, WANG H, et al. Bacterial foraging optimization with neighborhood learning for dynamic portfolio selection [J]. Lecture notes in computer science, 2014, 8590: 413 – 423.
- [62] 牛奔, 毕莹, 郭晨. 结构重组的细菌觅食优化算法及其在投资组合问题上的应用 [J]. 中国管理科学, 2014, 22( S1) : 205 – 211.
- [63] MANGAIARKARASI S, KARNAN M. Bacteria foraging optimization problem for dynamic shortest path routing problem in mobile Adhocnetwork [J]. International journal of applied engineering research, 2015, 10( 3) : 6933 – 6944.
- [64] YASMINA T A, HADRIA F. A hybrid bacterial foraging optimization algorithm and a radial basic function network for image classification [J]. Journal of information processing systems, 2017, 13( 2) : 215 – 235.
- [65] TANG K, XIAO X, WU J, et al. An improved multi-level thresholding approach based modified bacterial foraging optimization [J]. Applied intelligence, 2017, 46( 1) : 1 – 13.
- [66] PAN Y S, XIA Y, ZHOU T, et al. Cell image segmentation using bacterial foraging optimization [J]. Applied soft computing, 2017( 58) : 770 – 782.
- [67] VERMA O P, PARIHAR A S. An optimal fuzzy system for edge detection in color images using bacterial foraging algorithm [J]. IEEE transactions on fuzzy systems, 2017, 25( 1) : 114 – 127.
- [68] BERMEJO E, VALSECCHI A, DAMAS S, et al. Bacterial foraging optimization for intensity-based medical image registration [C] // 2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation, Sendai, Japan, 2015: 2436 – 2443.
- [69] BERMEJO E, CORDÓN O, DAMAS S, et al. A comparative study on the application of advanced bacterial foraging models to image registration [J]. Information sciences, 2015( 295) : 160 – 181.
- [70] SANYAL N, CHATTERJEE A, MUNSHI S. Fuzzy VQ based image compression by bacterial foraging optimization algorithm with varying population [C] // 2015 Third International Conference on Computer, Communication, Control and Information Technology, Hooghly, India, 2015: 1 – 6.
- [71] ABDELKARIM N, MOHAMED A E, EL-GARHY A M, et al. A new hybrid BFOA-PSO optimization technique for decoupling and robust control of two-coupled distillation column process [J]. Computational intelligence & neuroscience, 2016, 65( 11) : 17 – 28.
- [72] ARYA Y, KUMAR N. Design and analysis of BFOA-optimized fuzzy PI/PID controller for AGC of multi-area traditional/restructured electrical power systems [J]. Soft computing, 2017( 21) : 1 – 18.
- [73] LI C. The optimization of PID control strategy in VAV system based on bacterial foraging algorithm [C] // 2016 IEEE international conference on network-based information systems, Ostrava, Czech Republic, 2016: 303 – 306.
- [74] 陈东宁, 张国峰, 姚成玉, 等. 细菌群觅食优化算法及 PID 参数优化应用 [J]. 中国机械工程, 2014, 25( 1) : 59 – 64.
- [75] KORA P, KALVA S R. Hybrid bacterial foraging and particle swarm optimization for detecting bundle branch block [J]. Springerplus, 2015, 4( 1) : 1 – 19.
- [76] WANG H, JING X, NIU B. A discrete bacterial algorithm for feature selection in classification of microarray gene expression cancer data [J]. Knowledge-based systems, 2017( 126) : 8 – 19.
- [77] PANDA R, NAIK M K. A novel adaptive crossover bacterial foraging optimization algorithm for linear discriminant analysis based face recognition [J]. Applied soft computing, 2015, 30( C) : 722 – 736.

# 考虑多滑动窗口的中继卫星调度模型及启发式算法

何敏藩<sup>1</sup>, 朱燕麒<sup>2</sup>, 贾学卿<sup>3</sup>

(1. 佛山科学技术学院 数学与大数据学院, 广东 佛山 528000; 2. 北京市遥感信息研究所, 北京 100085; 3. 国防科技大学 电子科学学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 高效的调度方法是提高中继卫星系统应用效能的关键. 中继卫星调度主要是根据用户的任务申请, 科学合理地分配中继卫星系统资源, 最大限度地满足各项任务需求, 为中继卫星系统编制最优工作计划. 考虑中继业务中的多滑动时间窗口需求, 构建了中继卫星调度问题的数学规划模型, 以最大化任务完成率和用户期望满足度为目标, 以任务需求约束、资源使用约束作为约束条件. 设计了基于时间自由度的启发式算法, 该算法包括了任务时间自由度评价、任务资源匹配、任务插空和资源更新 4 个算子. 最后, 通过大规模仿真实验验证了算法的有效性.

**关键词:** 中继卫星; 调度; 启发式算法; 优化

**中图分类号:** V57

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.05.020

## 0 引言

跟踪与数据中继卫星 (tracking and data relay satellite, TDRS), 简称为中继卫星<sup>[1-2]</sup>, 主要为中、低轨道的航天器提供数据中继、连续跟踪与轨道测控服务. 中继卫星的出现是 20 世纪航天测控领域的重大突破, 其“天基”设计思想从根本上解决了对中、低轨道航天器测控通信的高覆盖率问题, 减少了地面测控站的数量, 在航天活动中发挥着越来越重要的作用, 也成为未来航天器发展趋势<sup>[3-5]</sup>. 我国的中继卫星系统主要承担载人航天保障、登月计划保障、航天器数据传输以及航天器测控任务, 其中前两项属于频率较低的重大任务, 后两项为常规任务. 对于载人航天保障等重大任务而言, 其执行优先级较高, 中继卫星系统将在任务全过程对其优先提供服务, 因此在中继卫星应用模式及调度方法方面不需要较为复杂的机制. 随着我国国家利益的扩展以及航天器数量的增加, 需要执行大量海外任务. 航天器获取的数据主要通过中继卫星系统实现实时传输和利用. 这使得航天器数据传输与测控的任务需求与日俱增, 用户规模庞大, 调度方案的质量将直接影响任务完成的效果以及中继卫星的使用效能, 这对中继卫星资源的合理调度提出了更

高的要求<sup>[6]</sup>. 需要进一步深入考虑中继卫星应用与用户需求的实际情况, 研究符合实际的中继卫星调度模型以及快速稳定的求解算法.

卫星调度问题是一个具有实践和科学意义的优化问题, 国内外取得了不少的研究成果<sup>[7-9]</sup>. 开彩红等<sup>[10]</sup>针对中继卫星单址天线调度问题, 建立了调度约束规划模型, 提出基于人工蜂群 (ABC) 算法的中继卫星任务调度算法, 并通过仿真数据分析验证了算法的合理性和有效性. 王志淋等<sup>[11]</sup>借鉴时间窗约束的车辆路径问题理论, 提出天线准备时间变长的规划优化问题 (LOPVAPT) 模型, 通过优化天线的扫描路径, 实现天线准备时间的动态最优取值, 并基于蚁群算法进行了实验验证. 林鹏等<sup>[12]</sup>面向空间网络中任务发生的时间和空间随机性, 建立中继卫星系统服务模型, 并提出了一种动态的空间任务调度方法. 利用空间网络拓扑动态变化的特点, 结合空间任务的多优先级和容忍延时特性, 提出一种基于种群联合进化的资源分配算法. 顾中舜<sup>[13]</sup>研究了中继卫星动态调度问题, 建立了中继卫星动态调度框架, 分析了中继卫星工作的约束条件, 提出了任务完成评价指标, 创造性地提出完成任务的收益与完成任务时间窗口的选择有关, 考

收稿日期: 2018-04-19; 修订日期: 2018-05-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61773120、U1501254); 广东省科技计划资助项目 (2015B010131015、2015B010108006); 广东省高等学校国际暨港澳台科技合作创新平台项目 (2015KGJHZ023)

通信作者: 贾学卿 (1981—), 男, 天津人, 国防科技大学博士生, 主要从事机器学习研究, E-mail: xqjia1981@163.com.

虑了任务的具体执行时间在窗口中的分布情况. 陈理江等<sup>[14]</sup>研究了基于时间灵活度的中继卫星调度算法,在已有的调度方案基础上,通过调度插空和任务交换优化原调度方案,该算法机制比较简单,且可以动态调整.

张彦等<sup>[15]</sup>在TDRS动态调度问题求解算法研究中,设计了动态扩展/删除树搜索算法(dynamic extended/delete tree search, DEDTS),该算法在搜索过程中利用基于动态扰动测度的目标值控制删除任务和调整任务的时机,从而更好地体现实际应用的需求. 智能优化算法在求解复杂优化问题上表现出优异性能<sup>[16]</sup>,近年来,蚁群算法(ant colony optimization, ACO)、遗传算法(genetic algorithm, GA)、模拟退火(simulated annealing, SA)等智能优化算法在求解组合优化问题方面显示了较强的能力<sup>[17-19]</sup>,在中继卫星调度问题中也得到了一定的应用<sup>[20]</sup>. 但是从文献的仿真实验来看,对于中继卫星调度问题,智能优化算法只适用于中、小规模场景的求解,面对多中继卫星多用户航天器大规模任务申请时会出现“维数灾”问题,导致智能优化算法性能迅速下降,求解时间也将大大超出实际调度工作要求.

顾中舜<sup>[13]</sup>利用蚁群算法求解中继卫星初始调度模型,并与基于遗传算法和模拟退火算法的计算结果进行了比较,结果表明,蚁群算法在求解时间和求解精度上都明显优于另外两种算法. 方炎申等<sup>[21]</sup>采用基于有效的基因路径的遗传算法来实现中继卫星单址链路任务调度,分析了调度问题中时间窗口的特性,对基本遗传算法进行改进,引入有效基因概念,应用结果表明,采用基于有效基因路径表示的遗传算法求解是合理的. 顾中舜<sup>[13]</sup>比较了蚁群算法、遗传算法和模拟退火算法求解中继卫星初始调度模型的计算结果,最后得出由于模拟退火算法有限度地接受劣解,可以跳出局部最优解,但有计算量过大和控制参数过多的缺点. 开彩红等<sup>[10]</sup>提出了一种基于人工蜂群(artificial bees colony, ABC)算法的中继卫星任务编排算法. 通过在算法的迭代过程中对每个可行调度方案进行评估、邻域操作寻找局部最优调度方案,从而获得全局最优调度方案. 邓博于等<sup>[22]</sup>针对遗传算法容易陷入局部最优和蚁群算法初始信息素匮乏的缺点,提出将遗传和蚁群融合算法应用于中继卫星系统的资源调度问题. 通过改进蚁群算

法信息素的定义,利用基于时间窗口序号编码思想,给出中继卫星资源调度约束条件与目标函数并建立数学模型. Liu等<sup>[23]</sup>研究了基于数据中继卫星的空间网络调度问题,在模型中考虑了天线转动时间. Lin等<sup>[24]</sup>提出了一种非对称路径重连接方法解决中继系统中的工作调度问题. Deng等<sup>[25]</sup>提出初始调度与动态调度相结合求解中继卫星系统的调度问题.

笔者针对中继卫星单址天线调度问题进行研究,主要贡献包括:着眼中继卫星系统应用实际以及用户需求特点,面向多中继卫星多用户航天器大规模调度问题,扩展用户申请的自主性和灵活性,设计基于多滑动窗口用户申请的中继卫星应用模式,允许用户提交多个备选服务窗口,指定天线偏好,使得模型更加符合实际情况;详细分析该应用模式下中继卫星单址天线调度问题的优化目标和约束条件并建立相应的优化调度模型;设计相应的启发式算法求解调度问题;最后通过仿真实验验证该调度方法的有效性.

## 1 中继卫星调度模型

笔者对于中继卫星单址天线调度问题的研究,面向的是多中继卫星多用户航天器的大规模调度问题,该问题有两个主要的输入:任务申请和中继卫星资源. 任务申请即是各用户航天器根据自身需求,向中继卫星相关管理机构提出的对某段时间窗口的占用申请. 中继卫星资源主要指的是中继链路,由于笔者研究的是单址天线的调度问题,中继卫星可以搭载多个单址天线,一个单址天线在同一时刻只能提供一条中继链路,即在同一时刻只能执行一项任务. 因此可以将中继卫星单址天线与链路等同,作为基本资源单位. 本研究中,中继卫星资源输入信息包括多颗中继卫星搭载的多个单址天线的可用时间窗口,以及各中继卫星单址天线对各用户航天器的可见时间窗口. 其中,可用时间窗口由中继卫星相关管理机构发布,可见时间窗口由中继卫星和用户航天器轨道参数决定.

中继单址天线调度问题的输出主要是针对每个中继卫星单址天线的调度方案,可以从任务和天线两个角度进行定义. 从任务角度分析,中继单址天线调度问题的输出即是确定每项任务是否成功调度,若成功调度,确定该任务由哪条天线对其进行服务,以及服务的开始时刻、结束时刻、持续时间等. 从中继卫星天线角度分析,中继单址天线

调度问题的输出即是对每个天线确定周期内的工作计划,具体包括何时开始对哪个用户航天器执行任务,以及任务的结束时刻、持续时间等。

### 1.1 模型假设与符号说明

首先对数学模型中将用到的符号进行说明,如表1所示。

表1 集合符号定义

Tab.1 Definition of used notations

集合符号	含义说明
$R$	中继卫星单址天线集合,中继卫星单址天线 $r \in R$
$T$	已提交任务集合,任务 $t \in T$
$K_t$	任务 $t$ 的备选服务时间窗口集合,任务 $t$ 的第 $k$ 个备选服务时间窗口 $t_k \in K_t$
$L_t$	任务 $t$ 的用户航天器与中继卫星单址天线间的链路集合,任务 $t$ 的用户航天器与中继卫星单址天线链路 $tr \in L_t$
$J_{t,r}$	任务 $t$ 的用户航天器与中继卫星单址天线 $r$ 可见时间窗口集合,可见时间窗口 $tr_j \in J_{t,r}$
$J_r$	中继卫星单址天线 $r$ 可用时间窗口集合,可用时间窗口 $r_l \in J_r$
$adjust$	每项任务开始前中继卫星单址天线对准时间
$rec$	每项任务完成后中继卫星单址天线恢复调整时间
$r_{t,t_k}$	任务 $t$ 的备选服务时间窗口 $t_k$ 指定使用的中继卫星单址天线, $r_{t,t_k} \in R, tr_{t,t_k} \in L_t$
$\bar{r}_{t,t_k}$	任务 $t$ 的备选服务时间窗口 $t_k$ 偏好使用的中继单址卫星天线, $\bar{r}_{t,t_k} \in R, t\bar{r}_{t,t_k} \in L_t$
$start_{t,t_k}$	任务 $t$ 的备选服务时间窗口 $t_k$ 的开始时刻
$forward_{t,t_k}$	任务 $t$ 的备选服务时间窗口 $t_k$ 的开始时刻可前移时段
$backward_{t,t_k}$	任务 $t$ 的备选服务时间窗口 $t_k$ 的开始时刻可后移时段
$d_{t,t_k}$	任务 $t$ 的备选服务时间窗口 $t_k$ 的期望服务时长
$dshort_{t,t_k}$	任务 $t$ 的备选服务时间窗口 $t_k$ 的最短服务时长
$start_{tr_j}$	任务 $t$ 的用户航天器与中继卫星单址天线 $r$ 可见时间窗口 $tr_j$ 开始时刻
$end_{tr_j}$	任务 $t$ 的用户航天器与中继卫星单址天线 $r$ 可见时间窗口 $tr_j$ 结束时刻
$start_{r_l}$	中继卫星单址天线 $r$ 可用时间窗口 $r_l$ 开始时刻
$end_{r_l}$	中继卫星单址天线 $r$ 可用时间窗口 $r_l$ 结束时刻
$x_{t,t_k,r,tr_j,r_l}$	0 ~ 1 变量,表示任务 $t$ 是否选择在备选服务时间窗口 $t_k$ ,中继卫星单址天线 $r$ ,可见时间窗口 $tr_j$ ,可用时间窗口 $r_l$ 内完成
$start_{t,t_k,r,tr_j,r_l}$	任务 $t$ 的备选服务时间窗口 $t_k$ 在中继卫星单址天线 $r$ ,可见时间窗口 $tr_j$ ,可用时间窗口 $r_l$ 下的实际任务开始时刻
$time_{t,t_k,r,tr_j,r_l}$	任务 $t$ 的备选服务时间窗口 $t_k$ 在中继卫星单址天线 $r$ ,可见时间窗口 $tr_j$ ,可用时间窗口 $r_l$ 下的实际任务服务时长
$E_{t,r}$	任务 $t$ 在中继卫星单址天线 $r$ 中实际执行的时间段

### 1.2 中继卫星单址天线周期调度问题的数学规划模型

中继卫星单址天线调度问题,实质上是要建立中继卫星资源与各任务之间的映射关系.其目的是使中继卫星资源在一个调度周期内完成的任务能够最大程度地满足用户的需求.因此,必须对任务和中继卫星资源进行统一管理,通过调度规划,为各项任务分配相应的资源,使调度方案在满足各项约束的条件下达到预期的效果。

在笔者介绍的中继卫星应用模式下,中继卫星单址天线调度问题就是对每项任务申请确定以下6个维度的信息:选择在哪个备选服务时间窗口执行、选择哪个中继卫星单址天线执行、选择该中继卫星单址天线的哪个可用时间窗口执行、选择该中继卫星单址天线与任务所属用户航天器的

哪个可见窗口执行、实际任务开始时刻以及实际任务服务时长,因此,决策变量包括  $x_{t,t_k,r,tr_j,r_l}$ 、 $start_{t,t_k,r,tr_j,r_l}$  和  $time_{t,t_k,r,tr_j,r_l}$ 。

$x_{t,t_k,r,tr_j,r_l}$  为 0 ~ 1 变量,其值确定以下4个维度的信息:选择在哪个备选服务时间窗口执行、选择哪个中继卫星单址天线执行、选择该中继卫星单址天线的哪个可用时间窗口执行、选择该中继卫星单址天线与任务所属用户航天器的哪个可见窗口执行。

优化目标反映了优化问题研究的优化对象的本质.针对中继卫星单址天线调度问题,建立两个优化目标,其中任务完成率最大化是首要优化目标,用户期望满足度最大化是次要优化目标。

#### (1) 任务完成率最大化

在大规模任务申请条件下,不可能所有的任

务申请都得到满足,任务完成率就成为评价调度方案的重要指标,是调度模型的主要优化目标.

$$\text{Max } f_1 = \frac{\sum_{t \in T} \sum_{t_k \in K_t} \sum_{r \in R} \sum_{tr_j \in J_{t,r}} \sum_{r_l \in J_r} x_{t,t_k,r,tr_j,r_l}}{[T]}. \quad (1)$$

(2) 用户期望满足度最大化

最大程度满足用户任务申请的偏好或者

$$\text{Max } f_2 = \frac{\sum_{t \in T} \sum_{t_k \in K_t} \sum_{r \in R} \sum_{tr_j \in J_{t,r}} \sum_{r_l \in J_r} ((x_{t,t_k,r,tr_j,r_l} \cdot \bar{r}_{t,t_k} = r) \vee (x_{t,t_k,r,tr_j,r_l} \cdot r_{t,t_k} = r)) \wedge (time_{t,t_k,r,tr_j} = d_{t,t_k})}{[T]}. \quad (2)$$

中继卫星调度问题主要包含两类约束:任务需求约束和资源使用约束.任务需求约束主要是用户根据其需求,提出的任务申请中包含的约束.

(1) 任务的执行约束.在笔者提出的中继卫星应用模式中,允许用户根据实际需求提交多个备选服务时间窗口,在生成调度方案时,仅选择其中的一个备选服务时间窗口进行调度,不可对任务进行重复安排,并且每项任务仅选择一个中继卫星单址天线执行.根据该约束得到 Constraint 1~2.

Constraint 1: 每个任务仅选择一个备选服务时间窗口,

$$\sum_{t_k \in K_t} x_{t,t_k,r,tr_j,r_l} \leq 1. \quad (3)$$

Constraint 2: 每个任务仅选择一个中继卫星单址天线执行,

$$\sum_{r \in R} x_{t,t_k,r,tr_j,r_l} \leq 1. \quad (4)$$

(2) 任务的服务时间窗口约束.由于任务需求具有很强的时效性,例如遥感卫星获取的某些敏感数据必须通过中继卫星在用户申请的时间段内回传到地面站,因此,中继卫星对任务的服务时间窗口必须在相应的备选服务时间窗口范围内,过早或过晚都会影响任务执行效果,导致任务失败,根据该约束得到 Constraint 3~4.

Constraint 3: 每个任务的实际开始时刻不早于所在备选服务时间窗口的最早开始时刻,

$$start_{t,t_k,r,tr_j,r_l} \geq (start_{t,t_k} - forward_{t,t_k}) \cdot x_{t,t_k,r,tr_j,r_l}. \quad (5)$$

Constraint 4: 每个任务的实际开始时刻不晚于所在备选服务时间窗口的最晚开始时刻,

$$start_{t,t_k,r,tr_j,r_l} \cdot x_{t,t_k,r,tr_j,r_l} \leq start_{t,t_k} + backward_{t,t_k}. \quad (6)$$

期望,可以提高调度方案的服务水平,有利于提升任务执行的质量和效果.因此用户期望满足度是调度模型的另一个优化目标.在笔者的中继卫星应用模式下,用户期望得到满足需要以下两个条件:采用任务备选服务时间窗口指定或偏好的中继卫星天线;采用任务备选服务时间窗口的期望服务时长.

(3) 任务的服务天线约束.如果选择的任务备选服务时间窗口指定了服务的中继卫星天线,则必须使用指定的中继卫星天线为该项目进行服务,使用其他天线则无法满足用户需求,视为任务失败,根据该约束得到 Constraint 5.

Constraint 5: 对于选择指定天线的备选服务时间窗口的任务,执行天线必须满足指定要求,

$$\forall ((r_{t,t_k} \neq \emptyset) \wedge (x_{t,t_k,r,tr_j,r_l} \neq 0)), r = r_{t,t_k}. \quad (7)$$

(4) 任务的服务时长约束.选择的任务备选服务时间窗口包含期望服务时长和最短服务时长,实际调度方案中的任务服务时长应不大于期望服务时长,不小于最短服务时长,根据该约束得到 Constraint 6~7.

Constraint 6: 每个任务的实际服务时长不大于备选服务时间窗口的期望服务时长,

$$time_{t,t_k,r,tr_j,r_l} \leq d_{t,t_k}. \quad (8)$$

Constraint 7: 每个任务的实际服务时长不小于备选服务时间窗口的最短服务时长,

$$time_{t,t_k,r,tr_j,r_l} \geq dshort_{t,t_k}. \quad (9)$$

(5) 中继卫星单址天线能力约束.一个单址天线在同一时刻只能提供一条中继链路,即在同一时刻只能执行一项任务,并且在任务开始之前,中继卫星天线需要根据预先计算结果,提前将天线转动到合适的角度与用户航天器进行对准操作,天线对准需要占用一定时间.在任务执行结束之后,中继卫星天线需要一段时间进行恢复调整,为执行下一项任务做好准备.在进行天线对准操作和天线恢复调整过程中,无法执行任务或进行其他工作,根据该约束得到 Constraint 8.

Constraint 8: 每个中继卫星单址天线任意时刻仅能执行一项工作,

$$\forall r \in R, t1 \in T, t2 \in T, (adjust + E_{n,r} + rec) \cap$$

$$(adjust + E_{t_2,r} + rec) = \emptyset. \quad (10)$$

(6) 可用时间窗口约束. 可用时间窗口由中继卫星相关管理机构发布, 由于任务执行过程不允许中断, 因此中继卫星执行任务相关的所有操作, 包括天线对准、任务执行与天线调整恢复, 必须在中继卫星天线的某个可用时间窗口内完成, 根据该约束得到 Constraint 9 ~ 11.

Constraint 9: 每个任务在中继卫星单址天线的一个可用时间窗口内执行,

$$\sum_{r_l \in J_r} x_{t,t_k,r,tr_j,r_l} \leq 1. \quad (11)$$

Constraint 10: 每个任务开始前的天线对准开始时刻不早于所在单址天线的可用时间窗口的开始时刻,

$$start_{t,t_k,r,tr_j,r_l} - adjust \geq start_{r_l} \cdot x_{t,t_k,r,tr_j,r_l}. \quad (12)$$

Constraint 11: 每个任务结束后的天线调整恢复结束时刻不晚于所在单址天线的可用时间窗口的结束时刻,

$$(start_{t,t_k,r,tr_j,r_l} + time_{t,t_k,r,tr_j,r_l} + rec) \cdot x_{t,t_k,r,tr_j,r_l} \leq end_{r_l}. \quad (13)$$

(7) 可见时间窗口约束. 可见时间窗口由中继卫星和用户航天器轨道参数决定, 在任务执行过程中必须时刻保持中继卫星天线与用户航天器的直视. 由于任务执行过程不允许中断, 因此中继卫星的任务执行过程必须在中继卫星天线与用户航天器的某个可见时间窗口内完成. 任务执行前的天线对准和任务完成后的天线调整恢复操作, 不要求在可见窗口内完成, 根据该约束得到 Constraint 12 ~ 14.

Constraint 12: 每个任务在中继卫星单址天线与用户航天器的一个可见时间窗口内执行,

$$\sum_{tr_j \in J_{t,r}} x_{t,t_k,r,tr_j,r_l} \leq 1. \quad (14)$$

Constraint 13: 每个任务的实际开始时刻不早于所在单址天线与用户航天器的可见时间窗口的开始时刻,

$$start_{t,t_k,r,tr_j,r_l} \geq start_{tr_j} \cdot x_{t,t_k,r,tr_j,r_l}. \quad (15)$$

Constraint 14: 每个任务的实际结束时刻不晚于所在单址天线与用户航天器的可见时间窗口的结束时刻,

$$(start_{t,t_k,r,tr_j,r_l} + time_{t,t_k,r,tr_j,r_l}) \cdot x_{t,t_k,r,tr_j,r_l} \leq end_{tr_j}. \quad (16)$$

笔者建立的中继卫星单址天线周期调度模型为 NP-hard 问题, 考虑多个滑动的备选服务时间窗口、多个中继卫星单址天线、多个可见时间

窗口和多个可用时间窗口, 问题的解空间随着资源与任务数量的增长呈指数激增且面临着组合爆炸的挑战. 模型具有超高的决策变量维度以及复杂的约束条件, 尚不存在按多项式时间复杂度找到全局最优解的算法, 现有通用算法难以直接求解本模型, 对模型求解算法的设计提出了更高的要求.

## 2 基于时间自由度的启发式算法

基于规则的启发式算法, 具有求解速度快、稳定性高的优点, 能够在较短的时间内给出较优的可行解, 求解中继卫星调度问题的有效算法. 笔者设计的基于时间自由度的启发式算法, 考虑到用户的任务申请可以包含多个备选服务时间窗口, 且备选服务时间窗口有可能指定或不指定中继卫星天线. 依据任务申请包含的备选服务时间窗口数量以及指定天线情况, 对任务的时间自由度进行评价, 根据评价结果决定任务调度的优先次序. 在调度理论中, 该算法属于构造性算法, 即依次对任务进行调度, 最终生成较优的可行调度方案.

基于时间自由度的启发式算法主要包括以下4个算法模块: ①任务时间自由度评价; ②任务资源匹配; ③任务插空; ④资源刷新. ①是根据任务的备选服务时间窗口数量及指定天线情况, 评价任务的时间自由度并决定优先次序. ②是根据任务提交的备选服务时间窗口信息, 为任务匹配当前可用时段资源. ③是基于启发式规则, 根据②中任务各备选服务时间窗口与当前可见时间窗口以及当前天线可用时间窗口的匹配结果, 为当前任务安排合适的调度方案. ④是在安排新的任务之后, 对现有可见时间窗口以及天线可用时间窗口进行刷新, 删除已被占用的资源.

### 2.1 任务时间自由度评价

根据任务的备选服务时间窗口数量及指定天线情况, 评价该任务的时间自由度. 一般来说, 提交的备选服务时间窗口数量越多, 不指定天线的备选服务时间窗口数量越多, 任务的时间自由度越高, 任务调度的难度越小, 可以使其获得较低的优先次序, 在算法运行的靠后阶段进行调度.

具体的评价方式为: 首先遍历任务集合  $T$ , 获取最大备选服务时间窗口数量  $win_{\max} = \max\{[K_t], t \in T\}$ ; 然后依次分析任务集合  $T$  中的任务, 获取当前任务  $t$  的备选服务时间窗口数量

$win_t = [K_t]$ , 当前任务  $t$  指定天线的备选服务窗口数量  $win_{assign}$ ; 最后对当前任务  $t$  进行时间自由度评价, 评价公式为:

$$score_t = (win_{max} + 1 - win_t) + (win_{max} - win_t + win_{assign}). \quad (17)$$

对其进行简化, 即

$$score_t = 2 \times (win_{max} - win_t) + win_{assign} + 1. \quad (18)$$

式中:  $score_t$  的取值范围为  $[1, 2 \times win_{max}]$ , 任务  $t$  的时间自由度评价  $score_t$  取值越大, 表明任务  $t$  的时间自由度越低, 将取得较为靠前的调度次序。

## 2.2 任务资源匹配

对于当前处理的任务  $t$ , 遍历其提交的备选服务时间窗口  $K_t$ , 与现有资源进行比对, 得到可以安排的可用时段资源。任务资源匹配需要与当前可见时间窗口和当前天线可用时间窗口分别进行比对, 将匹配得到的可用时段资源分成两类存放: 一类是指定天线的备选服务时间窗口匹配得到的可用时段资源集合, 记为  $taskresource1$ ; 另一类是不指定天线的备选服务时间窗口匹配得到的可用时段资源集合, 并记录其偏好信息, 记为  $taskresource2$ 。

任务资源匹配方法如图 1 所示, 其中  $dtime_{t,t_k}$  是任务  $t$  的备选服务时间窗口  $t_k$  在任务资源匹配时采用的服务时长。

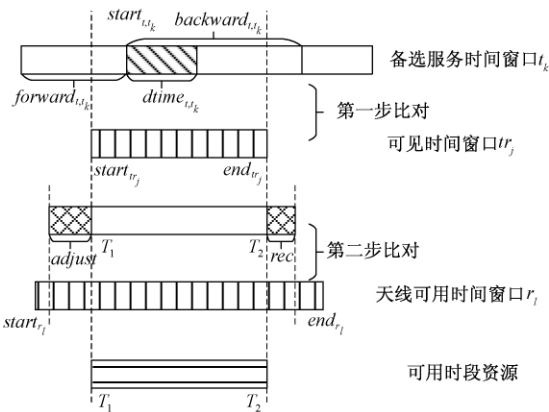


图 1 任务资源匹配方法

Fig. 1 The task-resource matching method

对于当前备选服务时间窗口  $t_k$ , 若  $t_k$  指定中继卫星单址天线, 则首先遍历其指定天线  $r_{t,t_k}$  与该任务用户航天器当前可见时间窗口集合  $J_{t,r}$ . 对于  $J_{t,r}$  中的可见时间窗口  $tr_j$ , 若满足条件

$$\begin{cases} start_{tr_j} \geq start_{t,t_k} + backward_{t,t_k} + dtime_{t,t_k} \\ end_{tr_j} \leq start_{t,t_k} - forward_{t,t_k} \end{cases}, \quad (19)$$

则可见时间窗口  $tr_j$  与当前备选服务时间窗口  $t_k$  无交集, 可直接排除; 对于与  $t_k$  有交集的可见时间窗口  $tr_j$ , 判断其是否满足以下条件:

$$\begin{cases} T_1 = \max\{start_{tr_j}, start_{t,t_k} - forward_{t,t_k}\} \\ T_2 = \min\{end_{tr_j}, start_{t,t_k} + backward_{t,t_k} + dtime_{t,t_k}\} \\ T_2 - T_1 \geq dtime_{t,t_k} \end{cases}, \quad (20)$$

若满足该条件, 则可见时间窗口  $tr_j$  可用, 继续进行下一步比对. 遍历指定天线  $r_{t,t_k}$  的当前可用时间窗口集合  $J_r$ , 对于  $J_r$  中的可用时间窗口  $r_l$ , 若满足条件:

$$\begin{cases} start_{r_l} \leq T_1 - adjust \\ end_{r_l} \geq T_2 + rec \end{cases}, \quad (21)$$

则可用时间窗口  $r_l$  可用. 该步比对加入了任务执行前的天线对准和任务完成后的天线恢复调整时间. 记可用时段资源开始时刻为  $T_1$ , 可用时段资源结束时刻为  $T_2$ , 并同时记录可用时段资源所在中继卫星单址天线, 记入  $taskresource1$ .

对于未指定天线的备选服务时间窗口  $t_k$ , 匹配时要遍历中继卫星单址天线集合  $R$ , 对于某个中继卫星单址天线  $r$ , 其具体匹配方法与上述方法相同, 将备选服务时间窗口  $t_k$  偏好天线信息  $r_{t,t_k}$  一并记入  $taskresource2$ .

## 2.3 任务插空

对于当前处理的任务  $t$ , 根据任务资源匹配算法得到的可用时段资源集合  $taskresource1$  和  $taskresource2$ , 进行任务的安排。

首先判断  $taskresource1$  是否非空, 若其非空, 在其中随机选择一个可用时段资源进行调度, 采用紧前、随机或紧后策略, 转入算法 (2.4) 刷新资源. 任务插空方法如图 2 所示。

其中, 紧前策略

$$\begin{cases} start_{t,t_k,r,tr_j,r_l} = T_1 \\ time_{t,t_k,r,tr_j,r_l} = dtime_{t,t_k} \\ E_{t,r} = [start_{t,t_k,r,tr_j,r_l}, start_{t,t_k,r,tr_j,r_l} + time_{t,t_k,r,tr_j,r_l}] \end{cases}. \quad (22)$$

随机策略

$$\begin{cases} start_{t,t_k,r,tr_j,r_l} = T_1 + random() \cdot (T_2 - T_1 - dtime_{t,t_k}) \\ time_{t,t_k,r,tr_j,r_l} = dtime_{t,t_k} \\ E_{t,r} = [start_{t,t_k,r,tr_j,r_l}, start_{t,t_k,r,tr_j,r_l} + time_{t,t_k,r,tr_j,r_l}] \end{cases}. \quad (23)$$



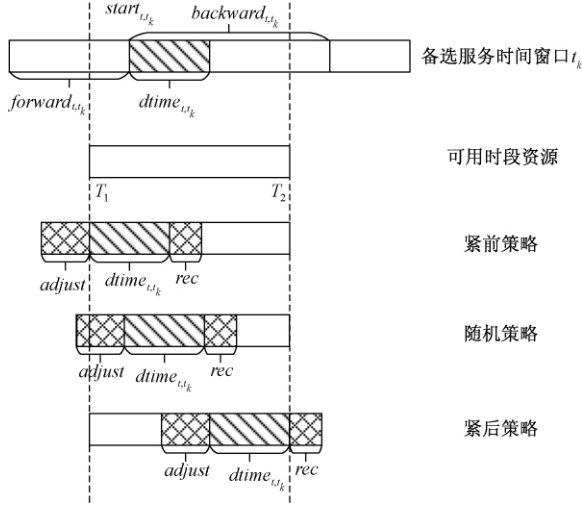


图2 任务插空方法

Fig. 2 Task insertion method

$random()$  为随机生成的  $[0,1]$  的随机数.

紧后策略

$$\begin{cases} start_{t,t_k,r,tr_j,r_l} = T_2 - dtime_{t,t_k} \\ time_{t,t_k,r,tr_j,r_l} = dtime_{t,t_k} \\ E_{t,r} = [start_{t,t_k,r,tr_j,r_l}, start_{t,t_k,r,tr_j,r_l} + time_{t,t_k,r,tr_j,r_l}] \end{cases} \quad (24)$$

若  $taskresource1$  为空集,判断  $taskresource2$  的情况,若其非空,遍历其中的可用时段资源,找出其中天线偏好非空且与可用时段资源所在天线相同的时段.如果存在天线偏好非空且与可用时段资源所在天线相同的时段,在其中随机选择一个进行调度,采用紧前、随机或紧后策略,转入资源刷新操作.若不存在天线偏好非空且与可用时段资源所在天线相同的时段,则在  $taskresource2$  中随机选择一个可用时段资源进行调度,采用紧前、随机或紧后策略,转入资源刷新操作.

若  $taskresource2$  也为空集,则将该任务所有备选服务时间窗口采用的服务时长由期望服务时长改为最短服务时长,转入任务资源匹配操作,重新进行任务资源匹配,得到该任务的  $taskresource1$  和  $taskresource2$ ,并重复上述过程.

若  $taskresource1$  和  $taskresource2$  仍均为空集,则认为当前资源无法完成该任务的调度,当前任务调度失败.

#### 2.4 资源刷新

每当有任务被成功调度,会占用该中继卫星单址天线与本用户航天器以及其他用户航天器的可见时间窗口以及天线可用时间窗口,由于资源的互斥性,需要对可见时间窗口以及

天线可用时间窗口均进行刷新,删除本次调度占用的时段.被占用的时段不仅包括任务的服务时长  $time_{t,t_k,r,tr_j,r_l}$ ,还包括之前的中继卫星天线对准时间  $adjust$  以及随后的恢复调整时间  $rec$ .

对可见时间窗口资源进行刷新时,要遍历该中继卫星单址天线  $r$  对所用户航天器的所有可见时间窗口,对当前处理的可见时间窗口  $tr_j$ ,令

$$\begin{cases} T_3 = start_{t,t_k,r,tr_j,r_l} - adjust \\ T_4 = start_{t,t_k,r,tr_j,r_l} + time_{t,t_k,r,tr_j,r_l} + rec \end{cases} \quad (25)$$

则本次调度所占用的时段与可见时间窗口  $tr_j$  可能存在的情形如图3所示.

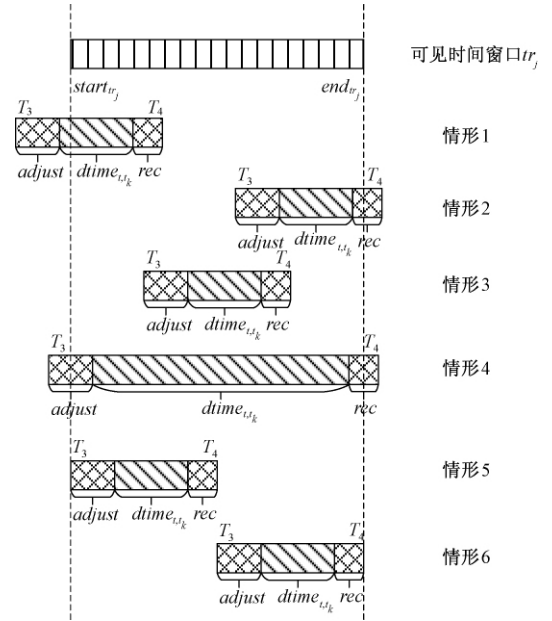


图3 可见时间窗口资源删除及刷新方法

Fig. 3 Method for deleting and updating visible time-windows

针对不同情况的刷新方法如表2所示.

表2 针对不同情况的资源刷新规则

Tab. 2 Resource update rules under different conditions

情形分类	原可见时间窗口刷新结果
$T_3 < start_{tr_j} < T_4 < end_{tr_j}$	$[T_4, end_{tr_j}]$
$start_{tr_j} < T_3 < end_{tr_j} < T_4$	$[start_{tr_j}, T_3]$
$start_{tr_j} < T_3 < T_4 < end_{tr_j}$	$[start_{tr_j}, T_3], [T_4, end_{tr_j}]$
$T_3 \leq start_{tr_j} < end_{tr_j} \leq T_4$	$\emptyset$
$T_3 = start_{tr_j}, T_4 < end_{tr_j}$	$[T_4, end_{tr_j}]$
$start_{tr_j} < T_3, end_{tr_j} = T_4$	$[start_{tr_j}, T_3]$

天线可用时间窗口资源删除及刷新方法与上述方法相同,在此不再赘述.

### 3 仿真实验

#### 3.1 实验设置

实验平台为配置 3.29 GHz Intel Core CPU、8 GB 内存、Windows 7 操作系统的 PC 机,算法在 Matlab 2014 中编程实现.由于采用基于多滑动窗口用户申请的中继卫星应用模式,没有标准测试集可供调用,为完成仿真实验,首先进行中继卫星资源与任务需求场景仿真,生成所需应用场景.在此基础上,对笔者所提算法进行测试.

中继卫星相关管理机构下属 4 颗中继卫星,每颗中继卫星载有 1 副中继卫星单址天线用于执行常规任务,面向的用户部门共下属 20 颗用户航天器.

根据日常工作安排,中继卫星相关管理机构于 2017 年 11 月 25 日发布 2017 年 12 月 1 日 0 时~2017 年 12 月 7 日 0 时的可用中继卫星资源,各用户部门可根据自身工作需要与所属航天器工作情况于 2017 年 11 月 28 日前进行任务申请,允许每项任务申请提交 1~3 个备选服务时间窗口.最终收到 500 个任务申请,中继卫星相关管理机构于 2017 年 11 月 29 日完成周期调度工作,在周期调度方案生成后,2017 年 11 月 30 日有 3 个临时任务申请到达.任务开始前中继卫星单址天线对准时间 10 min,任务结束后中继卫星单址天线恢复调整时间 4 min.

针对以上假定的应用场景,将相关参数整理如表 3 所示.

表 3 应用场景参数设置

Tab.3 The parameter configuration of the application scenario

场景参数	取值
调度周期开始时刻	2017 年 12 月 1 日 0 时
调度周期结束时刻	2017 年 12 月 7 日 0 时
中继卫星单址天线数量	4
用户航天器数量	20
任务申请数量	500
最大备选服务时间窗口数量	3
临时任务数量	3
中继卫星单址天线对准时间	10 min
中继卫星单址天线恢复调整时间	4 min

中继卫星资源主要包括中继卫星单址天线的可用时间窗口,以及各中继卫星单址天线对各用户航天器的可见时间窗口,需仿真相关数据用于后续实验.本案例将 4 个中继卫星单址天线的可用时间窗口设置为 2017 年 12 月 1 日 0 时至 2017 年 12 月 7 日 0 时均可用.对于各中继卫星单址天线对各用户航天器的可见时间窗口,笔者利用 STK 软件设置了相关场景进行仿真,获取相关数据.

#### 3.2 计算结果

利用基于时间自由度的启发式算法对上述案例场景进行测试,其中 1~10 项任务的调度方案如表 4 所示.

表 4 基于时间自由度的启发式算法部分调度结果

Tab.4 Part of the scheduling results of the heuristic algorithm based on time freedom degree

任务编号	所属航天器	是否安排	天线编号	开始时刻	结束时刻	持续时间/s
1	4	1	2	[2017,12,5,15,46,46]	[2017,12,5,15,58,31]	0.008 160 526
2	19	1	4	[2017,12,2,17,34,57]	[2017,12,2,17,52,51]	0.012 437 202
3	20	1	2	[2017,12,2,23,15,28]	[2017,12,2,23,24,53]	0.006 535 57
4	1	1	4	[2017,12,6,10,47,18]	[2017,12,6,11,0,51]	0.009 405 561
5	16	1	2	[2017,12,1,9,10,44]	[2017,12,1,9,21,45]	0.007 642 144
6	17	-1	-1	-1	-1	-1
7	16	-1	-1	-1	-1	-1
8	18	1	3	[2017,12,1,17,21,48]	[2017,12,1,17,40,29]	0.012 972 767
9	5	1	3	[2017,12,2,14,13,50]	[2017,12,2,14,25,25]	0.008 045 782
10	10	1	2	[2017,12,2,22,48,18]	[2017,12,2,22,59,18]	0.007 637 625

表中信息值 -1 表示该项任务由于资源不足未成功调度,时间段数值的单位为天.

算法的主要评价指标数据如表 5 所示.实验结果表明,算法具有很快的运行速度,能够在 2 s 内完成 500 项任务规模场景的周期调度方案,任务完成率可以达到 76.4%,用户期望满足度达到

50.2%,具备较强的可用性,能够满足调度方案快速生成的要求.

#### 3.3 与最大权重任务最先服务算法对比

可以发现基于时间自由度的启发式算法里使用了 4 个灵活的算子,包括任务时间自由度评价、任务资源匹配、任务插空和资源更新,保障算法

表5 基于时间自由度的启发式算法性能指标  
Tab.5 The performance criterion of the heuristic algorithm based on the time freedom degree

评价指标	实验结果
任务申请数量	500
任务完成数量	382
任务完成率/%	76.4
满足用户期望任务数量	251
用户期望满足度/%	50.2
算法运行时间/s	1.797 987

能够快速高效得到中继卫星系统的调度方案. 为了验证算法的有效性, 将其与最大权重任务最先服务算法(highest weight task first service, HWFS)进行比较. 最大权重任务最先服务算法的步骤如下:

Step 1: 对待完成的中继任务根据其权重从大到小排序, 形成任务队列  $Q$ .

Step 2: 然后每次从任务队列  $Q$  中选出权重最大的任务  $t$ .

Step 3: 为任务  $t$  安排最佳服务资源, 从  $Q$  中删除  $t$ . 如果  $Q = \emptyset$ , 算法结束; 否则转 Step 2.

两个算法的计算结果如表6所示. 由表6中的数据可以看出, 在该场景下, HA-TFD 把 HWFS 的任务完成率从 70% 提升到 76.4%, 把 HWFS 的用户期望满足度从 43% 提升到 50.2%, 该对比实验说明, HA-TFD 是一种更加灵活高效的启发式优化算法.

### 3.4 任务规模对算法的影响

为了分析不同任务规模对算法的影响, 本节在任务需求仿真相关参数取值不变的条件下, 设置 100、300、500、800、1 200、1 600 共 6 个不同任务申请数量的任务场景, 分别对基于时间自由

度的启发式算法和基于冲突消解的随机搜索算法进行测试. 每个任务场景进行 20 次重复实验, 对算法性能进行分析, 相关数据如表7所示.

表6 算法比较结果  
Tab.6 Comparison results

评价指标	HA-TFD	HWFS
任务申请数量	500	500
任务完成数量	382	350
任务完成率/%	76.4	70
满足用户期望任务数量	251	215
用户期望满足度/%	50.2	43
算法运行时间/s	1.797 987	1.58 746

表7 不同任务规模下的实验结果

Tab.7 The experimental results of different scales of tasks

任务数量	完成任务数	完成率/%	满足期望任务数	平均期望满足度/%	平均运行时间/s
100	96	96.00	75	75.00	0.400 516
300	269	89.67	187	62.33	1.085 394
500	383	76.60	243	48.60	1.613 374
800	503	62.88	298	37.25	2.369 378
1 200	578	48.17	329	27.42	3.115 182
1 600	616	38.50	374	23.38	3.225 724

### 3.5 用户航天器数量对算法的影响

为了分析不同用户航天器数量对算法的影响, 在任务需求仿真相关参数取值不变的条件下, 仅改变应用场景参数中的用户航天器数量. 设置 4、8、16、20、28、36 共 6 个不同用户航天器数量的任务场景, 分别对基于时间自由度的启发式算法和基于冲突消解的随机搜索算法进行测试. 每个任务场景进行 20 次重复实验, 实验结果如表8所示.

表8 不同用户航天器数量下的实验结果

Tab.8 Experimental results of different numbers of user Spacecraft

用户航天器数量	任务申请数量	平均任务完成数量	平均任务完成率/%	平均满足用户期望任务数量	平均用户期望满足度/%	平均算法运行时间/s
4	500	360	72.0	225	45.0	0.492 058
8	500	385	77.0	235	47.0	0.794 376
16	500	378	75.6	249	49.8	1.383 058
20	500	387	77.4	242	48.4	1.924 824
28	500	394	78.8	250	50.0	2.284 258
36	500	395	79.0	262	52.4	3.018 492

## 4 结论

分析中继卫星单址天线周期调度问题, 考虑多滑动窗口用户申请的中继卫星应用模式, 针对中继卫星单址天线周期调度多目标、多约束的特点, 建立了数学规划模型. 模型最大化任务完成率

和用户期望满足度, 其中任务完成率是最重要的优化目标, 用户期望满足度是次要优化目标. 将周期调度中的任务需求约束、资源使用约束作为模型的约束条件. 提出基于时间自由度的启发式算法, 算法利用任务申请信息在任务调度之前对任务完成难度进行评估, 并以此为依据进行任务调

度优先顺序的安排,提高了启发式算法任务调度的成功率,从而提高了调度方案的质量.笔者创造性地提出基于多滑动窗口用户申请的中继卫星应用模式,大大扩展了用户申请的自主性和灵活性,有利于提高调度方案的质量和中继卫星系统资源的使用效能,对于中继卫星系统实际应用模式的创新具有一定的借鉴意义.基于时间自由度的启发式算法具有求解速度快,算法稳定的优点,适用于应急调度情况和大规模调度场景,其不足之处在于,由于没有引入随机迭代求解策略,求解的质量还有待进一步提高.下一步将继续研究高效智能优化算法求解中继卫星调度问题,提高调度效率和调度方案质量.

### 参考文献:

- [1] 王永刚. 军事卫星及应用概论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [2] ZILLIG D, MCOMBER R, HORNE W. Demand access service for TDRSS users [C]//International Communications Satellite Systems Conference, 2006.
- [3] BRANDEL D L, WATSON W A, WEINBERG A. NASA's advanced tracking and data relay satellite system for the years 2000 and beyond [J]. Proceedings of the IEEE, 1990, 78(7): 1141-1151.
- [4] TELES J, SAMI M V, DOLL C E. Overview of TDRSS [J]. Advances in space research, 1995, 16(12): 67-76.
- [5] 杨红俊. 国外数据中继卫星系统最新发展及未来趋势 [J]. 电讯技术, 2016, 56(1): 109-116.
- [6] 周志鑫, 吴志刚, 季艳. 空间对地观测技术发展及应用 [J]. 中国工程科学, 2008, 10(6): 28-32.
- [7] WU G, WANG H, PEDRYCZ W, et al. Satellite observation scheduling with a novel adaptive simulated annealing algorithm and a dynamic task clustering strategy [J]. Computers and industrial engineering, 2017(113): 576-588.
- [8] WU G, PEDRYCZ W, LI H, et al. Coordinated planning of heterogeneous earth observation resources [J]. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics: systems, 2016, 46(1): 109-125.
- [9] WU G, LIU J, MA M, et al. A two-phase scheduling method with the consideration of task clustering for earth observing satellites [J]. Computers and operations research, 2013, 40(7): 1884-1894.
- [10] 开彩红, 肖瑶, 方青. 基于人工蜂群算法的中继卫星任务调度研究 [J]. 电子与信息学报, 2015, 37(10): 2466-2474.
- [11] 王志淋, 李新明. 跟踪与数据中继卫星系统资源调度优化问题 [J]. 中国空间科学技术, 2015, 35(1): 36-42.
- [12] 林鹏, 晏坚, 费立刚, 等. 中继卫星系统的多星多天线动态调度方法 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2015, 55(5): 491-496.
- [13] 顾中舜. 中继卫星动态调度问题建模及优化技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学信息系统与管理学院, 2008.
- [14] 陈理江, 武小悦, 李云峰. 基于时间灵活度的中继卫星调度算法 [J]. 航空计算技术, 2006(4): 48-51.
- [15] 张彦, 孙占军, 李剑. 中继卫星动态调度问题研究 [J]. 系统仿真学报, 2011, 23(7): 1464-1468.
- [16] WU G, SHEN X, LI H, et al. Ensemble of differential evolution variants [J]. Information sciences, 2018(423): 172-186.
- [17] 常玉林, 汪小淳, 张鹏. 改进蚁群算法在交通分配模型中的应用 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2017, 38(2): 41-44.
- [18] 王俊英, 颜芬芬, 陈鹏, 等. 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.
- [19] 吴秀丽, 张志强. 求解柔性作业车间调度问题的细菌算法对比及改进 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2018, 39(3): 34-39.
- [20] 赵静, 赵尚弘, 李勇军, 等. 中继卫星资源调度问题研究现状与展望 [J]. 电讯技术, 2012, 52(11): 1837-1843.
- [21] 方炎申, 陈英武, 顾中舜. 中继卫星调度问题的 CSP 模型 [J]. 国防科技大学学报, 2005, 27(2): 6-10.
- [22] 邓博于, 赵尚弘, 侯睿, 等. 基于遗传蚁群融合算法的混合链路中继卫星资源调度研究 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7): 2211-2217.
- [23] LIU R, SHENG M, XU C, et al. Antenna slewing time aware mission scheduling in space networks [J]. IEEE communications letters, 2017, 21(3): 516-519.
- [24] LIN P, KUANG L, CHEN X, et al. Asymmetric path-relinking based heuristics for large-scale job scheduling problem in TDRSS [C]//International Conference on Communications & Networking in China, 2014, 115-121.
- [25] DENG B, JIANG C, KUANG L, et al. Two-phase task scheduling in data relay satellite systems [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2018, 67(2): 1782-1793.

## Scheduling Model and Heuristic Algorithm for Tracking and Data Relay Satellite Considering Multiple Slide Windows

HE Minfan<sup>1</sup>, ZHU Yanqi<sup>2</sup>, JIA Xueqing<sup>3\*</sup>

( 1. School of Mathematics and Big Data, Foshan University, Foshan 528000, China; 2. Beijing Institute of Remote Sensing Information, Beijing 100085, China; 3. College of Electrical Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Efficient scheduling algorithm plays a key role in improving the efficacy of tracking and data relay satellite system ( TDRS) . Scheduling of TDRS aims to scientifically allocate TDRS resources according to the task application information from the users, such that maximal task requirements are met and the optimal activity schedule is made for the TDRS system. The mathematical model is constructed for the TDRS scheduling problem with the consideration of multiple slide windows in real-world requirements. The objective of the model is to maximize the task completion rate and the expectation satisfaction degree of users. The involved constraints include task requirement constraints and resource using constraints. A heuristic algorithm based on time freedom degree is proposed to solve the model, which includes four operators, i. e. , evaluation of the time freedom degree of each task, matching between tasks and resources, task insertion and resource update. At last, extensive experimental simulation demonstrates the effectiveness of the proposed algorithm.

**Key words:** tracking and data relay satellite; scheduling; heuristic algorithm; optimization

( 上接第 10 页)

- [78] WU Q, CHEN X, DING L, et al. Classification of EMG signals by BFA-optimized GSVM for diagnosis of fatigue status [J]. IEEE transactions on automation science & engineering, 2017( 99) : 1 – 16.
- [79] LIANG J J, PAN Q K, CHEN T, et al. Solving the blocking flow shop scheduling problem by a dynamic

multi-swarm particle swarm optimizer [J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2011, 55( 5/8) : 755 – 762.

- [80] CHEN H N, ZHU Y L, HU K Y. Discrete and continuous optimization based on multi-swarm coevolution [J]. Natural computing, 2010, 9( 3) : 659 – 682.

## A Review of Bacterial Optimization and Its Applications

YAN Xiaohui<sup>1</sup>, ZHU Yunlong<sup>2</sup>, ZHANG Zhicong<sup>1</sup>, LÜ Cixing<sup>2</sup>, LI Shuai<sup>1</sup>, YI Wenjie<sup>3</sup>

( 1. School of Mechanical Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China; 2. School of Electrical Engineering and Intelligentization, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China; 3. College of Management, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

**Abstract:** Bacterial optimization was a kind of swarm intelligence approach proposed in recent year. In this paper, troduded several typical bacterial optimization algorithms were introduced and the keywords of relevant literatures were analyzed. Based on the frequency of these keywords, the algorithm improvement studies were reviewed. It manly contained four main aspects: parameter and structure improvement, algorithm hybrid, operator improvement, and multi-objective reconstruction. Applications of bacterial optimization on engineering problems were reviewed as well. At last, the research direction in future was prospected.

**Key words:** swarm intelligence; optimization computation; bacterial optimization; algorithm improvement

## 基于编辑传播的多源图像表观迁移

刘世光, 宋志超

(天津大学 计算机科学与技术学院, 天津 300350)

**摘要:** 已有的图像表观迁移方法采用基于块的匹配技术, 要求源图像和目标图像有较高的视觉相似性. 然而, 很多情况下用户很难轻易地找到符合要求的输入图像, 从而大大限制了其应用. 另一方面, 已有的方法大多采用单一的迁移源, 无法较好地处理复杂图像的表观迁移. 针对以上问题, 本文提出了一种基于编辑传播的多源图像表观迁移方法. 首先, 采用基于编辑传播的笔画交互系统在源图像和目标图像中进行简单的标记. 提出一种新的笔画自动修正方法对用户标记的笔画进行分析处理, 获得精确的笔画标记. 然后, 将修正后的笔画标记作为编辑传播中的控制样本, 找到图像中所有与笔画标记相似的区域. 为了解决复杂图像表观迁移问题, 本文设计了基于多源图像的自动迁移算法. 最后, 结合颜色迁移和表观迁移技术, 将对应的颜色或纹理信息迁移到目标图像中, 得到理想的表观迁移结果. 试验结果验证了本文方法的有效性.

**关键词:** 编辑传播; 笔画交互; 多源; 颜色; 纹理; 表观迁移

**中图分类号:** TP391

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.05.008

### 0 引言

图像表观迁移旨在使目标图像能拥有和源图像尽可能相似的视觉表现. 人们对一幅图像表现的感知, 往往包括颜色、纹理以及光照等多个方面. 传统的颜色迁移方法<sup>[1]</sup>考虑图像的颜色信息, 可以成功地将源图像的颜色风格迁移到目标图像上, 例如天空的颜色、草地的颜色等. 但早期的颜色迁移方法, 仅仅着眼于对整幅图像的处理, 当颜色分布的差异过大时, 便无法得到理想的颜色迁移结果. 之后, 研究者提出了许多局部颜色迁移方法<sup>[2]</sup>. 但颜色迁移方法只考虑图像间的颜色信息, 并不能在目标图像中生成需要的新内容. 纹理迁移考虑图像的纹理信息, 可以将源图像中指定的纹理迁移到目标图像中, 但纹理迁移会覆盖原来的像素, 从而破坏图像的原本结构. 近年来, Okura等<sup>[3]</sup>提出了一种结合颜色和纹理信息的图像表观迁移方法. 该方法利用基于块的匹配技术来建立图像间表观迁移的对应关系, 需要源图像和目标图像视觉相似, 而且需要额外的样本图像作迁移源. 当用户无法提供满足需求的源图像和

样本图像时, 该方法要求用户通过 Photoshop 软件进行手动分割, 这大大限制了实际应用, 而且该表观迁移方法使用单一的迁移源, 难以应对复杂图像的表观迁移任务.

为了解决以上问题, 笔者提出一种新的基于编辑传播的多源图像表观迁移方法. 用户通过基于编辑传播的笔画交互系统, 将多源图像中需要的颜色或纹理信息迁移到目标图像中. 笔者提出了一种新的笔画自动修正方法来保证笔画只覆盖用户感兴趣的像素, 可以得到更好的编辑传播效果. 最后利用颜色迁移和纹理迁移技术, 将需要的颜色或纹理信息迁移到目标图像中. 该方法结合了编辑传播和表观迁移方法的优点, 为用户提供了一种方便、充分的图像表观迁移方法.

### 1 相关工作

#### 1.1 表观迁移方法

传统的表观迁移方法包括颜色迁移方法、纹理迁移方法及同时结合颜色迁移和纹理迁移的方法.

收稿日期: 2018-01-27; 修订日期: 2018-03-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61672375、61170118)

作者简介: 刘世光(1980—), 男, 山东临沂人, 天津大学教授, 博导, 研究方向为计算机图形学、可视化仿真、虚拟现实等, E-mail: lsg@tju.edu.cn.

颜色迁移方法主要可以分为3类<sup>[4]</sup>:基于几何的颜色迁移方法<sup>[2]</sup>、基于统计信息的颜色迁移方法<sup>[1,5-6]</sup>和基于用户交互的颜色迁移方法. Reinhard等<sup>[1]</sup>首次提出使用高斯模型和变换矩阵进行图像颜色迁移的方法,该方法简单高效,但是当两幅图像的颜色分布差异比较大时,无法得到自然的颜色迁移结果. Pouli等<sup>[7]</sup>提出一种渐进的颜色迁移方法,利用直方图匹配使源图像和目标图像拥有相似的颜色风格. Nguyen等<sup>[8]</sup>提出一种基于色域的颜色迁移方法,将迁移的色域控制在参考图像的色域范围内,使结果与源图像颜色风格更加相似. Huang等<sup>[9]</sup>提出一种基于移动最小二乘法的颜色迁移方法.

纹理迁移<sup>[10]</sup>指通过合成新的纹理,使两幅图像有类似的表现. 基于样图的纹理合成<sup>[11]</sup>是纹理合成中的主流技术. 赵进超等<sup>[12]</sup>提出了一种 Hadoop 的纹理特征提取方法. Bonneel等<sup>[13]</sup>使用纹理迁移去增强3D模型的表现. Okura等<sup>[3]</sup>首次提出一种颜色迁移和纹理迁移结合的表观迁移方法. 笔者与该方法类似,同时考虑颜色和纹理信息,结合了两种方法的优点.

## 1.2 多源迁移方法

Guo等<sup>[14]</sup>提出了一种基于多标签决策树的多源颜色迁移方法. 但该方法需要大量源图像作为训练集,而且无法使用用户指定的源图像作为迁移源,降低了使用的灵活性. Yao等<sup>[15]</sup>提出了一种基于选择性的多源图像颜色迁移方法. 该方法的选择策略旨在得到更加自然的迁移结果,但在很多情况下并不满足用户的需求.

## 1.3 基于笔画的交互系统与编辑传播方法

近年来,基于笔画的编辑传播技术得到了广泛的研究. 用户只需要用简单的笔画标记,并为笔画指定编辑参数,这些编辑信息就会自动传播到图像中其它的相似区域. Levin等<sup>[16]</sup>提出了第一个编辑传播框架,并完成灰度图像着色工作. 之后,有研究者提出了全局的编辑传播框架<sup>[17]</sup>. An等<sup>[18]</sup>在编辑传播中引入了参考图像来提供编辑信息. 然而,所有的编辑传播方法都假设用户的笔画标记是精确的,即笔画只覆盖用户感兴趣的像素,当笔画标记不满足该假设时,会直接影响最后的传播结果. 因此,Subr等<sup>[19]</sup>和 Sener等<sup>[20]</sup>分别提出了解决这个问题的方法. 但是,由于这两种方法都利用马尔科夫随机场,导致计算复杂度过高. 笔者利用编辑传播的特点,设计了一种简单有效的笔画自动修正方法. 对笔画标记进行分析处理后,将得到的精确笔画用于编辑传播中,得到了更好的传播效果.

## 2 方法概述

图1为笔者方法的流程图. 用户提供一幅待处理的目标图像和多幅源图像,并使用笔画在图像的感兴趣区域上进行标记. 笔画修正过程中,目标图像中的红色方框标记的粉色笔画因不满足要求而被修正. 编辑传播过程将编辑传播结果中与笔画标记相似的区域用相同的颜色显示. 迁移源选择过程将迁移源和目标区域的掩码一一对应起来. 最后为表观迁移过程,通过颜色迁移和纹理迁移技术将源图像中黄绿鲜亮的草地和白云蓝天迁移到目标图像中,得到最终的表观迁移结果.

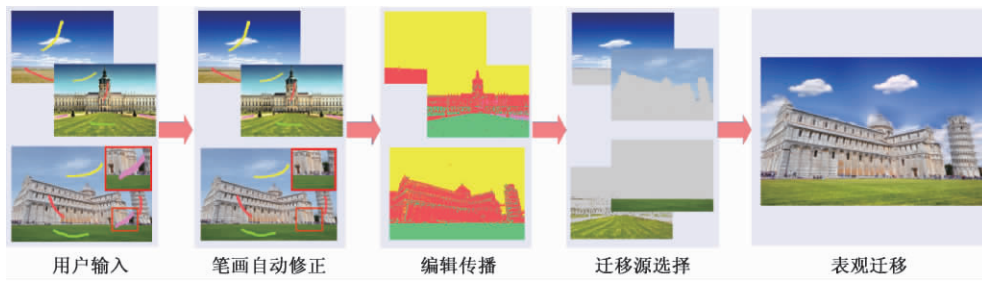


图1 本算法基本流程

Fig.1 The flow chart of our method

## 3 基于编辑传播的多源图像表观迁移

### 3.1 基于编辑传播的笔画交互系统

#### 3.1.1 笔画标记和笔画自动修正

笔者在编辑传播之前先采用一种笔画自动修正的方法对用户标记的笔画进行分析和修正. 使

用 K-means 对图像进行颜色聚类,得到  $K$  个颜色的聚类,使图像中每个像素都获得一个颜色聚类的编号. 记  $\Omega = \{p\}_\theta$  为笔画  $\theta$  覆盖的像素的集合,  $N_\theta$  为笔画  $\theta$  所含的颜色的种类. 笔画的自动修正主要基于以下两个原则: ① 如果一个笔画覆盖的像素包含所有  $K$  个颜色聚类,则该笔画标记无效;



②每一个笔画覆盖的像素中包含的颜色尽可能地少,并且不同笔画之间所含颜色的差距尽可能大.

对于第一个原则,可以由以下公式来表示:

$$P(\theta) = \begin{cases} 1, N_\theta < K, \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中:如果  $P(\theta) = 0$ ,则表示该笔画无效;如果  $P(\theta) = 1$ ,则表示该笔画为有效的标记.无效的笔画不会作为下一步编辑传播的输入数据.

为了保证第二个原则,笔者先确定每个笔画覆盖的所有像素的主要颜色,即  $\Omega = \{p\}_\theta$  中出现次数最多的颜色,记为  $C_\theta$ . 已经作为一个笔画主颜色的颜色不能再作为另一个笔画的主颜色.然后,删除那些出现概率小于 30% 的颜色.图 2(a) 为原始用户笔画标记,(b) 为自动修正后的笔画标记.其中,红色矩形框标记了浅绿色笔画修正前后的结果.

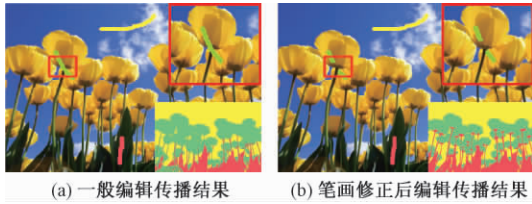


图 2 笔画自动修正与编辑传播

Fig. 2 Automatic modification and edit propagation of strokes

### 3.1.2 编辑传播

编辑传播技术使得图像像素在相似颜色处接受类似的编辑.将编辑传播作为一个最优化的问题,其中用户笔画标记  $g$  作为传播结果  $e$  的约束,最小化以下能量方程<sup>[16]</sup>:

$$\sum_i \sum_j w_j z_{ij} (e_i - g_j)^2 + \lambda \sum_i \sum_j z_{ij} (e_i - e_j)^2, \quad (2)$$

$$z_{i,j} = \exp(-\|f_i - f_j\|^2 / \sigma_a) \cdot \exp(-\|x_i - x_j\|^2 / \sigma_s), \quad (3)$$

式中:  $z_{i,j}$  表示像素  $i$  和像素  $j$  之间的亲和力,衡量像素  $i$  和像素  $j$  的特征向量  $f_i$  和坐标  $x_i$  的相似度;  $f_i$  为像素  $i$  的特征向量,包含其三个通道的颜色信息和位置信息;  $f_j$  为像素  $j$  的特征向量,  $\sigma_a$  和  $\sigma_s$  为编辑传播的控制参数;  $g_j$  为被笔画覆盖的像素  $j$  的值;  $e_i$  为像素  $i$  受到编辑后的结果;  $\lambda$  为两项的权重系数.  $w_j \in [0, 1]$ , 如果像素  $j$  被笔画标记,则  $w_j = 1$ , 未被标记,则  $w_j = 0$ . 式(2) 表示为两项的和,其中第一项是为了保证编辑传播后像素的值  $e$  满足用户笔画给定的像素编辑值  $g$ , 第二项保证最终结果中相似的像素可以得到相似的编辑,通

过最小化式(2) 得到编辑传播的结果.

编辑传播的效果主要由  $\lambda$ 、 $\sigma_a$ 、 $\sigma_s$  3 个参数控制. 试验中,设置  $\lambda = \sum_i w_i / n$ ,  $\sigma_a = 0.2$ ,  $\sigma_s = 0.12$ . 因为直接将笔画的颜色作为指定的编辑进行传播,所以在编辑传播的结果中与笔画标记相似的区域以相同的颜色显示.图 2 每幅图右下角的小图为相应笔画标记的传播结果.从图 2 中可以看出,经过笔画修正后的方法可以更好地将图中的花朵和茎叶区分开.

### 3.2 迁移源选择

笔者使用  $SSIM$ (结构相似性指标) 来衡量源图像和目标图像的相似性.  $SSIM$  值越大表示两幅图像越相似.最大为 1,此时表明两幅图像完全一样.  $SSIM$  的计算公式如下:

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x \mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}, \quad (4)$$

式中:  $\mu_x$  和  $\mu_y$ 、 $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  分别为像素  $x$  和像素  $y$  的均值和标准差;  $\sigma_{xy}$  为像素  $x$  和像素  $y$  的相关系数.为了避免分母为 0,设  $C_1$  和  $C_2$  为非零常数.最后使用两幅图像的  $SSIM$  均值( $MSSIM$ ) 衡量两幅图像的相似性.

### 3.3 表观迁移

为了实现更加充分的表观迁移,笔者同时考虑颜色和纹理这两类表观信息.某一组对应的迁移源和目标区域要判断对其进行颜色迁移还是纹理迁移.这里可以采用自动的方法,规定纹理较丰富的对应区域间进行纹理迁移,纹理不丰富的进行颜色迁移.笔者考虑到用户可能需要将某些纹理迁移到目标图像中纹理并不丰富的区域.例如,将多云的天空迁移到晴朗无云的天空中.自动方法并不能满足用户的需求,所以笔者通过用户指定迁移的类型,然后通过颜色迁移和纹理迁移得到最终的表观迁移结果.

#### 3.3.1 颜色迁移

通过编辑传播得到笔画标记的相似区域后,就可以在对应的区域间进行颜色迁移.利用 Reinhard 等<sup>[1]</sup> 提出的基于统计的颜色迁移方法.将源图像和目标图像转换到  $l\alpha\beta$  颜色空间,对 3 个通道分别进行颜色迁移,然后合并得到颜色迁移结果.迁移公式如下:

$$c_o = \frac{\sigma_s}{\sigma_t} (c_t - \mu_t) + \mu_s, \quad (5)$$

式中:  $c_t$  为目标图像中某一像素的值;  $c_o$  为颜色迁



移后该像素的值;  $\mu_s$  和  $\mu_t$  分别为源图像和目标图像某一通道的均值;  $\sigma_s$  和  $\sigma_t$  为对应通道的标准差. 通过式(5)将目标图像的颜色分布线性变换成与源图像相似的分布.

对上一步得到的对应区域进行颜色迁移, 因此, 需要分别计算对应区域中各通道下的均值和标准差, 然后利用式(5)完成局部颜色迁移.

### 3.3.2 纹理迁移

本节将多源图像中指定区域的纹理迁移到目标图像中. 纹理迁移将区域  $S$  处的纹理迁移到目标区域  $T$  中. 采用由粗到精的迭代方法, 将纹理迁移作为一个基于块的最优化问题, 最小化下面关于  $S$  和  $T$  的能量方程<sup>[21]</sup>:

$$E(T, S) = \sum_{q \in T} \min_{p \in S} (D(Q, P) + \lambda D(\nabla Q, \nabla P)), \quad (6)$$

式中:  $Q = N(q)$  是一个左上角为像素  $q$  的大小为  $\omega \times \omega$  的块. 记  $f$  为一个变换操作, 包括平移、旋转、缩放以及投影变换. 将  $f$  作用于像素  $p$  周围的一个邻域  $N$ , 因此  $P = f(N(p))$  也是一个大小为  $\omega \times \omega$  的块. 每个块都有5个通道: 包括  $l\alpha\beta$  颜色空间下的3个颜色通道和每个像素处光照的2个梯度通道. 在式(6)中为了方便表示, 用  $Q$  (或  $P$ ) 代表该块的3个颜色通道;  $\nabla Q$  (或  $\nabla P$ ) 代表2个光照梯度通道; 参数  $\lambda$  为梯度通道的权重系数;  $D$  用来计算所有通道的距离平方和. 能量方程的两项分别确保迁移后的块出现在和原来块中最相

似的块周围. 笔者使用  $5 \times 5$  大小的块, 并设置梯度权重  $\lambda' = 0.2$ .

## 4 试验结果

笔者采用 C++ 和 Opencv 2.4.8 实现编程. 所有试验在如下配置的计算机上进行: Intel © Core™ i5-4460 处理器, NVIDIA GeForce GTX 745 M 显卡, 8 GB 内存(RAM).

图3为单源图像时笔者的方法与已有表观迁移方法的对比. Reinhard等<sup>[1]</sup>和 Pouli等<sup>[7]</sup>的方法可以成功地将源图像中天空的颜色迁移到目标图像中, 但是由于这两个方法只考虑了图像的颜色信息, 并不能将源图像中的树和草地的表观也同时迁移到目标图像中. Okura等<sup>[3]</sup>的方法同时考虑了颜色和纹理信息, 但是受限于块匹配方法的精度, 该方法并不能准确地得到需要进行纹理迁移的区域, 从而难以得到自然的纹理迁移结果(如图3中红色矩形框标记的区域). 笔者通过编辑传播技术提高了区域分割的准确性, 可以得到更加自然的纹理迁移结果. 文献[3]的天空中出现了灰蒙蒙的效果, 这种不自然的现象也没有出现在笔者的结果中.

图4和图5为笔者方法的试验结果. 从试验结果可以看出, 在表观迁移中结合颜色和纹理信息, 利用两种方法的优点, 能够得到更加充分的表观迁移结果. 而笔者提出的基于编辑传播的交互系统, 很好地支持了这种迁移过程.

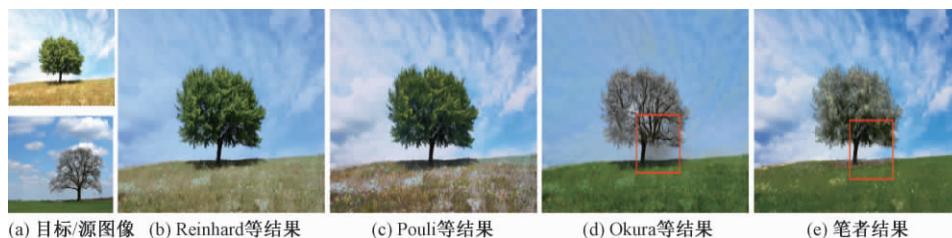


图3 表观迁移结果对比

Fig.3 Comparisons of appearance transfer results among different methods



图4 单源表观迁移结果

Fig.4 The appearance transfer results with a single source image



图5 多源表观迁移结果

Fig.5 The appearance transfer results with multiple source images

笔者使用 Bhattacharya 系数来衡量表观迁移结果与源图像的相似性. 试验中,我们将彩色图像变换到 HSV 颜色空间下,计算 H 通道和 S 通道的二维直方图,通过计算直方图间的 Bhattacharya 距离,来衡量两幅彩色图像的相似性. Bhattacharya 系数值越小表示两幅图像的相似性越高. 图 3(b)~(e) 和源图像的 Bhattacharya 系数分别为 0.762、0.508、0.514 和 0.421. 可以看到,笔者的表观迁移结果和源图像的 Bhattacharya 系数值更小,即笔者的表观迁移结果和源图像的相似性更高. 表 1 为图 4 中表观迁移前后目标图像与源图像的 Bhattacharya 系数. 可以发现,经过笔者的表观迁移,可以使目标图像与源图像更为相似.

表1 表观迁移前后 Bhattacharya 系数对比(图4)

Tab.1 Comparison before and after appearance transfer in terms of Bhattacharya coefficient (Fig.4)

序号	表观迁移前	表观迁移后
第一组	0.793	0.456
第二组	0.732	0.569

## 5 结论

提出了一种基于编辑传播的多源图像表观迁移方法. 该方法结合了编辑传播和表观迁移的优点,使用户可以方便地完成对目标图像的表观迁移. 一方面,通过自动笔画修正方法得到精确的笔画标记,可以更好地建立目标图像和源图像间的对应关系. 另一方面,将表观迁移推广到多源领域,可以满足用户对复杂图像的迁移需求.

笔者的方法适用于大部分图像表观迁移,但是仍有一些限制. 使用基于统计的颜色迁移方法,如果用户指定两个颜色风格差异很大的子区域间进行迁移,将产生不自然的结果,这一点可以通过使用基于其他策略的颜色迁移方法来改进,使得

编辑传播效果更为准确. 随着纹理迁移的方法的发展,笔者方法的迁移效果也会得到进一步改善,此外,笔者也将尝试采用深度卷积神经网络解决图像表观迁移问题.

## 参考文献:

- [1] REINHARD E, ADHIKMIN M, GOOCH B. Color transfer between images [J]. IEEE computer graphics and applications, 2001, 21(5): 34-41.
- [2] HACHEN Y, SHECHTMAN E, DAN B G. Non-rigid dense correspondence with applications for image enhancement [J]. ACM transactions on graphics, 2011, 30(4): 76-79.
- [3] OKURA F, VANHOEY K, BOUSSEAU A, et al. Unifying color and texture transfer for predictive appearance manipulation [J]. Computer graphics forum, 2015, 34(4): 53-63.
- [4] FARIDUL H S, POULI T, CHAMARET C, et al. A survey of color mapping and its applications [C] // Proceedings of the Eurographics Conferences, 2014: 43-67.
- [5] 王少荣, 李华. 一种图像之间的颜色传输方法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(10): 1513-1518.
- [6] 钱小燕, 肖亮, 吴慧中. 模糊颜色聚类在颜色传输中的应用 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(9): 1332-1336.
- [7] POULI T, REINHARD E. Progressive histogram reshaping for creative color transfer and tone reproduction [C] // Proceedings of the International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering, 2010: 81-90.
- [8] NGUYEN R M H, KIM S J, BROWN M S. Illuminant aware gamut-based color transfer [J]. Computer graphics forum, 2014, 33(7): 319-328.

- [9] HUANG Y, LEE J Y, KWEON I S, et al. Color transfer using probabilistic moving least squares [C] // Proceedings of the 27th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2014: 3342 – 3349.
- [10] EFROS A A, FREEMAN W T. Image quilting for texture synthesis and transfer [C] // Proceedings of the SIGGRAPH, 2001: 341 – 346.
- [11] 朱文浩, 魏宝刚. 基于样本的纹理合成技术综述 [J]. 中国图象图形学报, 2008, 13 ( 11 ): 2063 – 2069.
- [12] 赵进超, 朱颢东. 基于 Hadoop 的图像纹理特征提取 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(4): 109 – 113.
- [13] BONNEEL N, PANNE M V D, LEFEBVRE S. Proxy-guided texture synthesis for rendering natural scenes [C] // Proceedings of the Vision Modeling & Visualization Workshop, 2010: 87 – 95.
- [14] GUO Y, LI H, ZHANG W, et al. Multi-source color transfer based on multi-labeled decision tree [C] // Proceedings of the 9th International Conference for Young Computer Scientists, 2008: 820 – 825.
- [15] YAO X, ZOU B, LI H. Selective color transfer with multi-source images [J]. Pattern recognition letters, 2009, 30( 7 ): 682 – 689.
- [16] LEVIN A, LISCHINSKI D, WEISS Y. Colorization using optimization [J]. ACM transactions on graphics, 2004, 23( 3 ): 689 – 694.
- [17] AN X, PELLACINI F. All-pairs appearance-space edit propagation [J]. ACM transactions on graphics, 2008, 27( 3 ): 15 – 19.
- [18] AN X, FAIO P. User-controllable color transfer [J]. Computer graphics forum, 2010, 29( 2 ): 263 – 271.
- [19] SUBR K, PARIS S, SOLER C, et al. Accurate binary image selection from inaccurate user input [J]. Computer graphics forum, 2013, 32( 2 ): 41 – 50.
- [20] SENER O, UGUR K, ALATAN A. Error-tolerant interactive image segmentation using dynamic and iterated graph-cuts [C] // Proceedings of the 2nd ACM International Workshop on Interactive Multimedia on Mobile and Portable Devices, 2012: 9 – 16.
- [21] DARABI S, SHECHTMAN E, BARNES C. Image melding: combining inconsistent images using patch-based synthesis [J]. ACM transactions on graphics, 2012, 31( 4 ): 13 – 15.

## Multi-source Image Appearance Transfer Based on Edit Propagation

LIU Shiguang, SONG Zhichao

( School of Computer Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300350, China )

**Abstract:** Traditional appearance transfer methods automatically took advantage of dense patch matching method and required the source images and exemplar images had higher visual similarity. However, such pairs were rare. Furthermore, existing methods used a single source image, which were unable to deal with complex image appearance transfer. To solve the above problems, a multi-source image appearance transfer was proposed by editing propagation. Firstly user intuitively built regions, which were likely to have similar color statistics by strokes and general precise strokes by a new automatically stroke correction method. Then edit propagation method was employed to find all the pixels with the similar appearance. To deal with the complex image, a multi-source image based automatically transfer method was introduced. Finally, our method performed color transfer or texture transfer between designated regions and generated the result of appearance transfer. Various experimental results verified the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** edit propagation; stroke interaction; multi-source; color; texture; appearance transfer

文章编号: 1671-6833(2018)05-0028-05

## VR + 药效团: 一种交互可视的虚拟筛选系统

何高奇<sup>1,2</sup>, 龚博杰<sup>1</sup>, 陈 诚<sup>1</sup>, 郁明强<sup>1</sup>, 卢兴见<sup>1,3</sup>, 李洪林<sup>2</sup>

(1. 华东理工大学 计算机科学与工程系, 上海 200237; 2. 上海市新药设计重点实验室, 上海 200237;  
3. 上海交通大学 智慧城市协同创新中心, 上海 200240)

**摘 要:** 基于药效团的虚拟筛选技术比传统筛选技术具有更高的准确率、更快的计算速度和更低的研究成本。但分子的微观性和结构复杂性对用户的空间感知和数据分析能力提出了挑战。本文将虚拟现实和药效团计算技术相结合, 基于 Unity3D 引擎和 HTC Vive 设备, 设计实现了一个交互可视的虚拟筛选系统, 主要功能包括分子解析和绘制、药效团计算、基于 HTC Vive 的可视交互。实验表明, 本文提出的交互可视虚拟筛选系统能够为药效团的设计分析带来新的视角, 增强药物设计研究者的交互体验。

**关键词:** 虚拟现实; Unity3D; 药效团; 虚拟筛选; 人机交互

**中图分类号:** TP319

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.05.001

### 0 引言

计算机辅助药物设计 (computer-aided drug design, CADD) 利用计算机快速存取能力和对海量数据的快速分析能力来提高药物设计的效率<sup>[1]</sup>。

药效团虚拟筛选是药物虚拟筛选最流行的方法之一<sup>[2]</sup>。其中基于受体的药效团虚拟筛选方法存在打分函数粗略、忽略蛋白质柔性等缺点<sup>[3]</sup>, 而基于配体的虚拟筛选则优化了打分函数<sup>[4]</sup>。同时, 虚拟筛选过程中分子的微观性和复杂性给用户观察分子结构和数据分析带来了很大的挑战。很多 CADD 软件更多的关注于科学细节而忽略了实用性<sup>[5]</sup>, 所以在软件交互性和信息传达直观性方面存在不足。

因此, 笔者将可穿戴式 VR 技术与微观药物虚拟筛选技术有机结合, 基于 Unity3D 引擎和 HTC Vive 设备, 设计实现了“VR + 药效团”的虚拟筛选系统。该系统主要功能包括: 虚拟环境中分子和药效团的数据解析与建模; 药效团的可视计算过程; 虚拟环境下分子和药效团的交互设计。通过构建“VR + 药效团”的虚拟筛选系统为药效团的设计分析带来新的视角, 增强药物设计者的交互体验<sup>[6]</sup>。

### 1 相关工作

VR 技术与基于配体的药效团虚拟筛选技术<sup>[7]</sup>的结合涉及 3 个主要方面的工作: 基于配体药效团的虚拟筛选、VR 技术应用和交互设备。

基于配体的药效团虚拟筛选技术通过对活性分子的结构和活性数据进行发掘和分析, 提取出重要的药效特征<sup>[8]</sup>, 并利用药效特征发现新化合物的线索<sup>[9]</sup>。

VR 技术是一种可以创建和体验虚拟世界的计算机仿真系统。它具有沉浸感、交互性、构想性等特点, 在军事、教育等宏观领域得到了广泛的应用<sup>[10-11]</sup>。VR 也逐渐应用于药物、生物等微观领域。通过对分子进行三维建模, 用户可以清晰地观察分子的特性并进行实时交互。

目前流行的 VR 交互性设备主要有 Oculus Rift、PS VR、HTC Vive 等。Oculus Rift、PSVR 设备存在一定延迟、追踪距离短等问题。HTC Vive 设备的定位器能同时追踪显示器和手柄的位置, 并且头戴显示器使用一块 2 K 分辨率屏幕降低了画面的颗粒感, 不会产生延迟和眩晕<sup>[11]</sup>。

### 2 VR + 药效团虚拟筛选系统框架

根据上节的综合阐述, 提出了“VR + 药效

收稿日期: 2017-12-22; 修订日期: 2018-03-31

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2016YFA0502300); 国家自然科学基金资助项目 (61602175)

作者简介: 何高奇 (1974—), 男, 安徽桐城人, 华东理工大学副教授, 博士, 主要从事计算机图形学研究, E-mail: hegaoqi@ecust.edu.cn.



团”虚拟筛选系统,使用基于配体的药效团虚拟筛选技术路线,并选用 HTC Vive 作为交互设备,在 VR 环境中解决药效团虚拟筛选过程交互性和可视性不足的问题.系统框架如图 1 所示,主要实现了分子解析与模型构建、药效团计算和 VR 交互等功能.

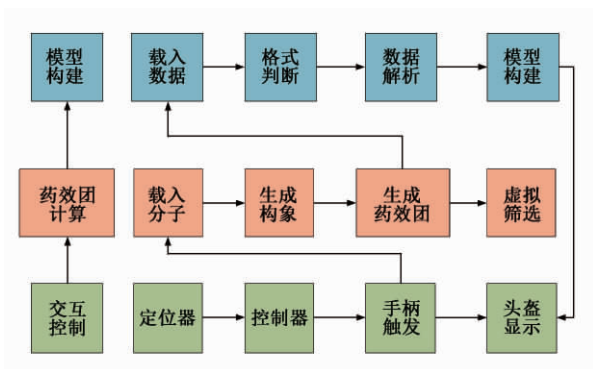


图1 VR+药效团虚拟筛选系统框架

Fig.1 VR + pharmacophore virtual screening system framework

模型构建功能主要包括:①载入数据,系统将用户载入的分子文件作为提问分子;②格式判断,系统通过文件后缀区分分子文件和药效团文件;③数据解析,系统根据不同的文件类型,采用不同的数据提取方式,并将数据记录在文件中;④模型构建,系统根据数据自动构建原子模型和化学键模型并初始化模型属性.

药效团计算功能主要包括:①载入分子,系统将用户选定的分子文件读取到系统中;②生成三维结构,系统使用 OpenBabel 对分子进行三维构建;③生成构象,系统使用多目标优化算法给三维结构的分子生成构象<sup>[12]</sup>;④生成药效团,系统对配体分子提取药效特征及其三维空间结构形成药效团;⑤虚拟筛选,系统将药效团模型在数据库中进行药效特征匹配得到筛选结果.

交互控制功能主要包括:①定位器利用激光和光敏传感器确定运动物体的位置;②控制器通过两个单手操作手柄来进行系统功能的操作;③触发手柄,用户可以通过不同的按钮进行不同的系统操作;④显示头盔可以让用户观察虚拟环境中的分子结构和特性.

### 3 基于配体药效团虚拟筛选

配体分子能够通过自身的化学特征识别生物大分子的活性位点并进行反应.由于结构和化学属性相似的分子具有相似的生物活性.所以系统通过配体的药效特征来找出数据库中功能相似的

化合物或预测新化合物属性.主要功能模块和操作流程如图 2 所示.

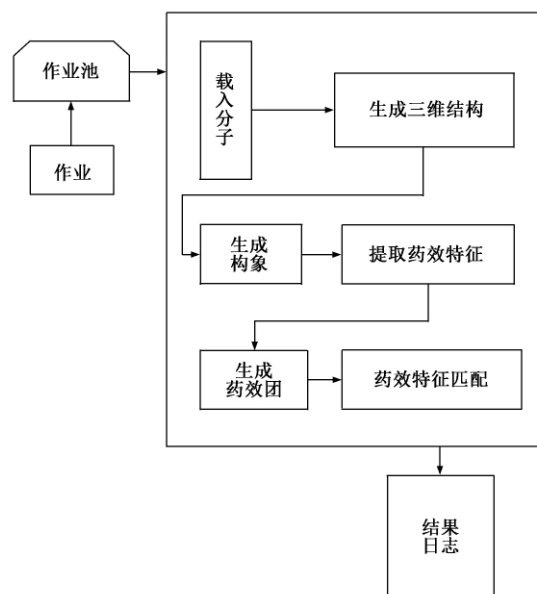


图2 基于配体的药效团虚拟筛选流程图

Fig.2 Ligand-based pharmacophore virtual screening flowchart

用户新建一个作业并载入配体分子后,系统使用 OpenBabel 将分子转化成三维结构.然后将范德华力、二面角扭转力、几何结构差异、回转半径作为 4 个目标函数对分子生成构象.生成构象之后,系统使用华东理工大学刘晓峰老师的构象优化模型来剔除冗余构象<sup>[12]</sup>,具体算法如下.

采用可变能量阈值窗口剔除高能构象<sup>[12]</sup>,

$$E_{\text{cutoff}} = E_w + k \times N_{\text{rot}}, \quad (1)$$

式中:  $E_w$  为能量阈值;  $N_{\text{rot}}$  为可旋转键数目;  $k$  为尺寸因子.

为了剔除几何结构相似的冗余构象,系统将去除所有均方根偏差(RMSD)小于式(2)阈值的构象<sup>[12]</sup>,

$$RMSD_{\text{tol}} = 0.1 + c \times \sqrt{1 + N_{\text{rot}}}, \quad (2)$$

式中:  $c$  为用户定义的尺度因子;  $N_{\text{rot}}$  为分子中可旋转键的数目.

完成构象优化后,系统将对分子构象提取药效特征和空间排列结构形成药效团.最后,系统使用球壳匹配、向量特征匹配筛选出具有药物活性的化合物.

## 4 分子文件解析与绘制

### 4.1 数据文件格式

Mol2 格式分子文件以块为存储单位,两个@

<TRIPOS> ATOM 之间的数据为一个原子信息块,在信息块中,以行为信息记录单位.各数据符号和数据符号代表的意义如表 1 所示.

表 1 分子文件数据  
Tab.1 Molecular file data

数据符号	符号含义
atom_id	原子编号
atom_name	原子名称
x、y、z	坐标
atom_type	原子种类
subst_id	残基名称
charge	电荷
status_bit	状态位
疏水基团	青色药效团特征
氢键给体	绿色药效团特征
氢键受体	紫色药效团特征
O	氧
N	氮
H	氢
C	碳

系统的 Atom 类对 mol2 文件中原子信息初始化并存储. Bond 类对解析获得的化学键信息按照源坐标和目标坐标进行存储.

药效团格式文件和分子格式文件类似,虽然,药效团中的原子都为非标准残基序列的原子,但药效团文件比分子文件仅多了元素符号一个属性.因此,药效团格式文件与 mol2 格式分子文件归为一类,在初始化时稍作区分,即可满足系统需求.

#### 4.2 文件解析

系统通过判别文件格式,采用不同的方法对文件信息进行读取和存储,数据解析流程如图 3 所示.

判断类别:在 mol2 格式中,文件信息以块为单位划分,每一块记录的是一个原子的结构信息.为了便于解析,将药效团转化为 pdb 格式,该格式以行为单位划分,每一行都有信息类别标记.

正则划分:系统进行数据解析时,通过空格正则划分将分隔的信息一一获取.

按类存储:系统将提取的数据添加到对应类别的列表中存储.

判断是否为文件末尾:系统若判断数据是最后一行,则停止数据读取.否则,继续读取数据.

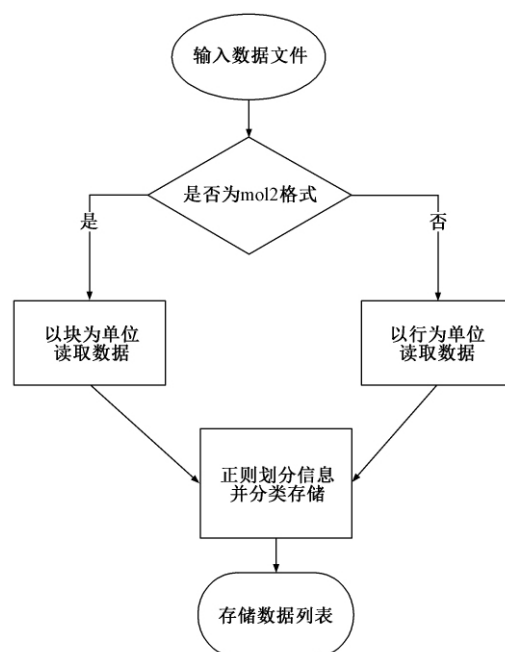


图 3 数据解析流程

Fig.3 Data analysis process

#### 4.3 模型构建

数据解析完成后,系统通过数据列表中的数据完成原子和键模型的绘制工作,模型绘制主要包括以下几步.

获取数据和模型构建:系统根据数据列表里的数据绘制原子和键模型.

命名规则:模板采用原子元素种类命名的方法,保证存储到模板列表中的模板都是唯一的.

查找模板:系统在绘制模型之前先在模板库中查找是否已存在模板.如果存在,执行下一步,否则,新建模板.

设置信息:根据表 1 设置模型的大小、颜色、形状等基本信息.

存储模板:完成原子和键模型绘制之后,系统将模型作为模板存入模板列表.

### 5 系统交互与控制

完成模型绘制后,系统得到的是以单个原子和单个化学键为对象的结构.为了让用户对整个分子操控,系统将模型对象进行分组管理.然后,借助 Stream VR 设备的控制手柄使用户能够对 Unity3D 构建的分子进行旋转、放缩、控制虚拟筛选的流程<sup>[13]</sup>.

在交互过程中,系统对模型进行分组管理和动态更新,以避免虚拟场景中视图的延迟,保证手柄控制分子的移动是在模型分组的基础上对整个分组的坐标进行变换.

## 6 试验部分

### 6.1 模型显示

VR+药效团虚拟筛选系统载入分子 acheligand.mol2,系统构建的三维分子模型如图4所示.用户可以通过头显观察到分子的特性并进行交互式操作.

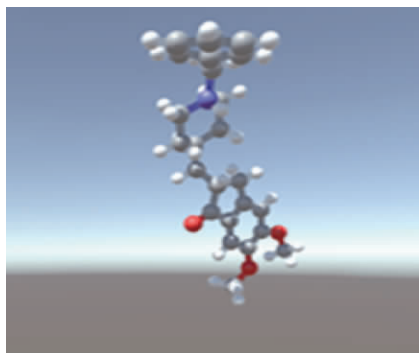


图4 配体分子模型

Fig.4 Ligand molecular model

用户通过 HTC Vive 的控制手柄触发药效团生成操作.转换成 pdb 格式的药效团自动构建的模型如图5所示.

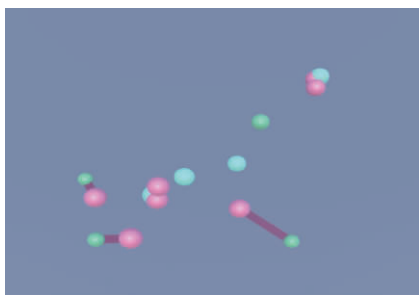


图5 转化成 pdb 格式后的药效团模型

Fig.5 Pharmacophore model after conversion to pdb

系统将药效团与包含 acheligand.mol2 分子的数据库进行匹配.筛选的结果是 acheligand.mol2 分子本身,如图6所示.

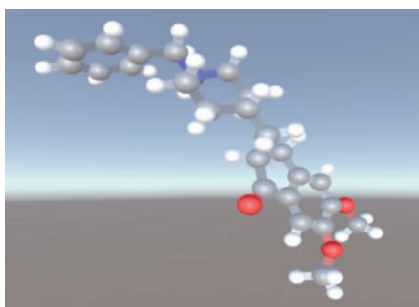


图6 筛选结果分子模型

Fig.6 Screening results molecular model

### 6.2 药效团计算

为了测试药效团计算的可靠性,笔者使用

e4ey7.hypoedit 作为输入药效团,actives\_final.mol2 作为筛选数据库.actives\_final.mol2 分子集文件中共有 464 个分子.设置输出 6 个匹配结果,最后输出打分最高的 6 个分子,虚拟筛选结果如表2所示.

表2 虚拟筛选结果

Tab.2 Virtual screening results

编号	分子名称	分值
1	CHEMBL75953	6.062 02
2	CHEMBL402548	5.516 08
3	CHEMBL139653	5.449 93
4	CHEMBL82243	5.191 41
5	CHEMBL424469	5.112 75
6	CHEMBL279590	5.048 57

通过对筛选结果 6 个分子中的化学特征和提问分子中的化学特征进行对比,发现它们化学特征相似性符合试验分值.说明笔者基于配体进行药效团虚拟筛选的可靠性.

### 6.3 系统体验评测

为了验证 VR+药效团虚拟筛选系统的可靠性,进行了系统体验评测.试验设计如下:8 位受试同学分为 3 组,戴上头盔设备,分别进行时间长度为 1 h、2 h 和 3 h 的操作测试.在测试前和测试后,试验员对参加测试的同学进行了心跳、血压(舒张血压)测量,如图7所示.同时,通过识图游戏和询问来查验使用系统后的眩晕情况.通过测试数据发现,经过长时间操作后,用户各项生理指标均在正常范围内,且均未产生眩晕等症状.实践证明系统在用户体验上有着不错的表现.

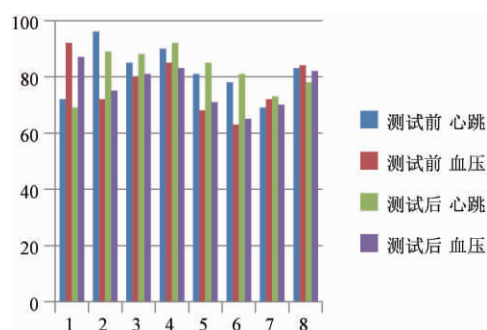


图7 测试前后体验者的心跳、血压数据

Fig.7 Heartbeat and blood pressure before and after test

## 7 结论

将 VR 技术和基于配体的药效团虚拟筛选技术相结合,设计实现了面向药物设计的虚拟交互体验系统.通过对分子文件进行解析和建

模,解决了虚拟现实环境中分子的实时和真实感绘制问题;通过集成多目标优化构象生成算法和基于三角哈希查找匹配算法,在 VR 计算环境中实现并验证了基于配体药效团虚拟筛选技术;利用 HTC Vive 设备设计了交互控制方法,使得用户能够便捷使用“VR + 药效团”虚拟筛选系统. 试验表明所提系统能够增强用户在微观世界探索知识和分析解决问题的体验. 未来将继续对微观分子领域中虚拟环境交互手段和人机交互界面进行改进,进一步提升用户的沉浸感和较长工作时间的用户体验,并在现有可穿戴设备基础上,应用手势识别的研究成果进行功能完善和优化.

### 参考文献:

- [1] CHEN C Y. A novel integrated framework and improved methodology of computer-aided drug design [J]. *Current topics in medicinal chemistry*, 2013, 13 (9): 965 – 969.
- [2] SIJU E N. CADD: Pharmacological approaches in drug and drug discovery [J]. *World journal of pharmacy & pharmaceuticals*, 2017(17): 892 – 908.
- [3] LI H J, LEUNG K S, WONG M H, et al. Correcting the impact of docking pose generation error on binding affinity prediction [M]. Springer international publishing, 2016.
- [4] 黄琦,康宏,张端峰,等. 基于配体、受体和复合物指纹的虚拟筛选方法比较 [J]. *化学学报*, 2011, 69 (5): 515 – 522.
- [5] WANG X, CHEN H, YANG F, et al. Idrug: a web-accessible and interactive drug discovery and design platform [J]. *Journal of cheminformatics*, 2014, 6 (1): 28 – 35.
- [6] 王栋,张晓晴. 基于虚拟现实技术的锻造过程仿真实现 [J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2016, 37 (3): 74 – 78.
- [7] MCGANN M. FRED pose prediction and virtual screening accuracy [J]. *Journal of chemical information & modeling*, 2011, 51(3): 578 – 596.
- [8] 王梦禹. 基于机器学习的药物蛋白虚拟筛选方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学计算机科学与技术学院, 2016.
- [9] 孙银雪. 基于受体和配体的虚拟筛选整合平台研究 [J]. *通化师范学院学报*, 2015, 36(4): 7 – 8.
- [10] 郝艳娥,曾德骅. 虚拟现实(VR)技术在数字化校园建设中的应用及前景展望 [J]. *电子测试*, 2014 (5): 136 – 138.
- [11] 田东. 虚拟现实,从未如此真实 HTC Vive 开发者峰会体验手记 [J]. *微型计算机*, 2016(2): 64 – 67.
- [12] 刘晓峰. 基于多种策略的虚拟筛选程序设计及其在药物发现中的应用 [D]. 北京: 中国科学院大学研究生院, 2010.
- [13] 陶阳. 基于 Unity 在 Android 平台上开发游戏的方法 [J]. *电脑编程技巧与维护*, 2012(19): 73 – 77.

## VR + Pharmacophore: An Interactive and Visual Virtual Screening System

HE Gaoqi<sup>1,2</sup>, GONG Bojie<sup>1</sup>, CHEN Cheng<sup>1</sup>, YU Mingqiang<sup>1</sup>, LU Xingjian<sup>1,3</sup>, LI Honglin<sup>2</sup>

(1. Department of Computer Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. Shanghai Key Laboratory of New Drug Design, Shanghai 200237, China; 3. Smart City Collaborative Innovation Center, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Pharmacophore-based virtual screening technology had higher accuracy, faster computing speed and lower research costs than the traditional screening technology. However, the microcosmic and structural complexity of the molecule posed challenges to the user's spatial perception and data analysis capabilities. In this paper, the virtual reality and pharmacophore computing technology were combined design to interactive visual virtual screening system based on Unity3D engine and HTC Vive device. The main functions of the system included molecular analysis and rendering, pharmacophore calculation, visual interaction based on HTC Vive. Experiments showed that the interactive visual virtual screening system proposed in this paper could bring a new perspective for the design of pharmacophore and enhance the interaction experience of drug design researchers.

**Key words:** virtual reality; Unity3D; pharmacophore; virtual screening; human-computer interaction



# 一种基于 RGB-D 的人体关节点定位方法

张青建, 韩建平

(杭州电子科技大学 计算机学院, 浙江 杭州 310016)

**摘要:** 提出了一种基于 RGB-D 的人体关节点定位方法: 对 Kinect 获取的深度图像滤波膨胀细化处理得到人体骨架线, 根据角点检测算法得到人体骨架线的端点及折点, 然后利用运动目标的跟踪算法对彩色图像中的人脸部跟踪定位, 最后结合人体各刚架比例关系, 定位出人体的 15 个关节点. 试验结果表明, 与直接根据人体各刚件比例关系定位关节点的方法相比, 此方法的关节点平均定位准确率提高了 7%, 其中头节点定位准确率提高了 42%.

**关键词:** RGB-D; Kinect; 图像细化; 角点检测; 脸部跟踪; 关节点定位

**中图分类号:** TP391

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.05.007

## 0 引言

Kinect 不仅价格低廉, 而且能够获取彩色和深度信息, 其深度信息具有抗光照扰动的优势, 因此可用于人体关节点定位. 文献[1]利用目标识别标记出人体模型, 通过分类器定位出人体关节点, 此方法是目前比较先进的关节点定位方法, 但该方法需要大量的训练标记样本. 文献[2]利用深度图像获取人体细化线, 并根据人体刚架比例关系定位出人体关节点, 此方法容易实现, 但定位准确率有待提高.

笔者在文献[2]的基础上, 加入了角点检测及分类、脸部跟踪等内容, 提高了关节点定位的准确性和鲁棒性. 文章首先对深度图像预处理以获取人体骨架线, 从而得到骨架线角点并对角点筛选分类, 然后在彩色图像中对人的脸部跟踪以定位头节点, 最后结合人体各刚件比例关系, 定位出人体关节点, 方法如图 1 所示.

## 1 获取人体骨架线角点及头节点

### 1.1 深度及彩色图像预处理

用 Kinect 摄取彩色图像和深度图像, 由于二者坐标不同, 所以笔者以深度图像的坐标为基准, 实现彩色图像坐标向深度图像坐标对齐<sup>[3]</sup>, 以保证头节点(从彩色图像中获取)和其他关节点(从深度图像中获取)坐标一致. 设置深度图像

的有效景深为 0.8 ~ 3.8 m, 超过此范围的景深, 在彩色图像中予以擦除, 初步排除不必要的像素干扰.

Kinect 直接摄取的深度图像中人体轮廓边缘不光滑, 人体区域内可能有黑洞, 若不对深度图像预处理, 细化后的人体骨架线有毛刺, 甚至导致骨架线变形, 因此需对深度图像进行滤波、膨胀腐蚀等预处理. 首先对深度图像用中值滤波去除噪声<sup>[4]</sup>; 然后对深度图形膨胀腐蚀处理以消除人体区域内的黑洞<sup>[5]</sup>; 最后对深度图像二值化<sup>[6]</sup>处理以减少数据量, 取阈值 128, 大于阈值的像素置为 1, 否则置为 0.

### 1.2 获取人体骨架线及角点

对预处理后的深度图像, 利用 Zhang-Suen 细化算法<sup>[7]</sup>获取人体骨架线, 并对骨架线过滤, 使得骨架线上每两个像素之间有一个空白像素, 然后利用 Shi-Tomasi 角点检测算法<sup>[8]</sup>获取骨架线的角点, 最后将得到的角点分为折点和端点, 并分别存储在 Point1 集合和 Point2 集合中.

### 1.3 定位头节点

在 1.2 节中获取了人体骨架线的角点, 若直接将骨架线的头部端点作为头节点会导致头节点的定位有半个头长的误差, 笔者利用 camshift 运动目标跟踪算法<sup>[9]</sup>获取脸部中心位置, 以此作为头节点. Camshift 跟踪算法分为 3 个步骤来完成, 如图 1 所示.

收稿日期: 2017-12-28; 修订日期: 2018-03-29

作者简介: 张青建(1989—), 男, 河南济源人, 杭州电子科技大学硕士研究生, 主要从事视频图像处理研究, E-mail: zhangqjhenan@163.com.

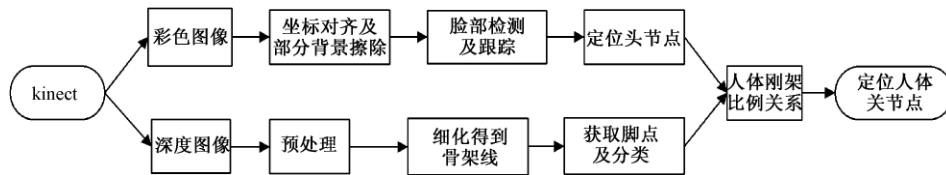


图1 方法流程图

Fig. 1 Flow chat of this paper method

### 1.3.1 获取脸部区域(ROI)的颜色概率分布图

为减少光照影响,首先将彩色图像从 RGB 空间转换到 HSV 空间<sup>[10]</sup>,做出 H 分量直方图,如图 2 所示,直方图代表了 ROI 区域不同颜色在 H 分量上出现的概率,然后将 ROI 区域中每个像素的值用其颜色概率替换,得到颜色概率分布图<sup>[11]</sup>,如图 3 所示。

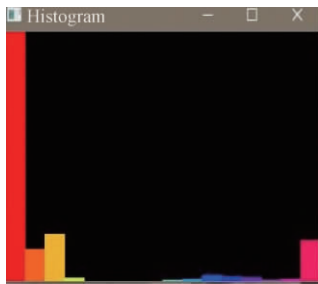


图2 H 分量直方图

Fig. 2 H compont histogram



图3 颜色概率分布图

Fig. 3 The distribution of color probability

### 1.3.2 meanshift 算法路径寻优

Meanshift 算法<sup>[12]</sup>是一种密度函数梯度估计的非参数方法,通过迭代寻优找到概率分布的极值来定位目标.首先在图 3 中选取搜索窗口,计算窗口的质心  $(x_c, y_c)$ ,

$$x_c = M_{10}/M_{00}; y_c = M_{01}/M_{00}, \quad (1)$$

式中:  $M_{00}$  和  $M_{10}$ 、 $M_{01}$  分别是零阶矩和一阶矩,

$$M_{00} = \sum_x \sum_y I(x, y), \quad (2)$$

$$M_{10} = \sum_x \sum_y xI(x, y), \quad (3)$$

$$M_{01} = \sum_x \sum_y yI(x, y). \quad (4)$$

把搜索窗口的中心设置在计算出的质心处,这样窗口的移动引起窗口内容的变化,继续重复

以上定位窗口中心的步骤,直到搜索窗的中心与质心间的距离小于预设的阈值则停止计算<sup>[13]</sup>.

### 1.3.3 camshift 跟踪

Camshift 算法是将视频中的每一帧做 mean-shift 运算,并将上一帧搜索窗的大小和中心,作为下一帧 meanshift 算法搜索窗的初始值.如此迭代下去,实现对运动目标的跟踪.在脸部区域跟踪过程中,将窗口的中心位置作为头节点,实现效果如图 4 所示。



图4 脸部跟踪效果图

Fig. 4 The figure of tracing face

## 2 人体关节点定位

### 2.1 中国成年人各部件比例关系

在标准人体骨架模型(如图 5)中剩余的 14 个关节,需要结合骨架线角点和人体各刚件比例关系共同定位得出.《中国成年人人体尺寸》(GB/T 10000—1988)给出了我国成年人人体尺寸的比例关系,如图 6 所示,以此得到笔者所需的人体各刚件比例关系,以  $l$ (头-颈)为基准。

$$\begin{aligned} l(\text{颈-肩}) &= 0.8l(\text{头-颈}), \\ l(\text{肩-肘}) &= 1.5l(\text{头-颈}), \\ l(\text{颈-尾椎}) &= 3.5l(\text{头-颈}), \\ l(\text{尾椎-臀}) &= 0.5l(\text{头-颈}), \\ l(\text{臀-膝}) &= 2l(\text{头-颈}), \\ l(\text{膝-足}) &= 2l(\text{头-颈}), \end{aligned} \quad (5)$$

其中,  $l$ (头-颈)为头节点到颈节点的距离;  $l$ (颈-肩)为颈节点到肩节点的距离;  $l$ (肩-肘)为肩节点到肘节点的距离;  $l$ (肘-手)为肘节点到手节点的距离;  $l$ (颈-尾椎)为颈节点到尾椎节点的距离;  $l$ (尾椎-臀)为尾椎节点到臀节点的距离;

$l(\text{臀-膝})$  为臀节点到膝节点的距离;  $l(\text{膝-足})$  为膝节点到足节点的距离。

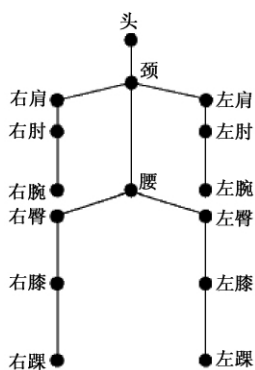


图5 标准人体骨架模型

Fig. 5 Standard human skeleton model

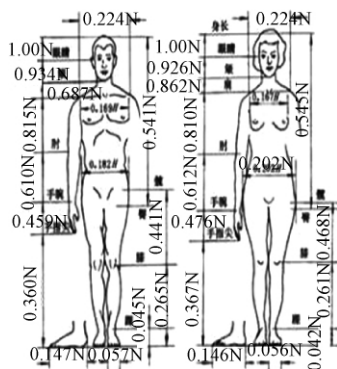


图6 中国成年人人体尺寸比例关系

Fig. 6 The proportion of human body size in China

## 2.2 关节点定位

上文得到的人体各刚件比例关系具有一般性和普遍性,但是个体之间存在差异,针对某一个体,如果仅仅根据此比例关系,定位出的人体关节点位置的准确率有待提高,所以本文中,笔者结合骨架线角点和人体各刚件比例关系共同定位,得出除头节点外的14个人体关节点,具体操作如下。

①头节点. 根据上文 camshift 的脸部跟踪算法获取脸部中心作为头节点的位置,并在端点集合 Point2 中将  $y$  坐标值大于此头节点且距离最近的点,也就是人体细化后得出的头部顶点,从端点集合 Point2 剔除。

②颈节点. 操作①定位了头节点,则在折点集合 Point1 中,到头节点距离最近的点一定是颈节点,以此可以定位出颈节点的坐标,并记录颈节点到头节点的距离为  $l(\text{头-颈})$ 。最后将颈节点从 Point1 集合剔除。

③肩节点. 以颈节点为圆心,以  $l(\text{颈-肩}) \pm 20\%$  的长度为半径画出两个圆,出现在这两圆之间区域的 Point1 集合中的折点则为肩节点。由于肩节点的对称性,找到一侧肩节点,另一侧的肩节

点可以对称定位得出。

④肘节点、尾椎点、臀节点、膝节点. 此3个节点定位方法与肩节点方法类似,不再赘述。

⑤手节点. 经过上几步的节点剔除操作,此时的端点集合 Point2 中只剩下手节点和足节点,在站立状态下,手节点到肘节点的距离小于足节点到肘节点的距离,所以计算 Point2 集合中剩余端点到某一侧肘节点的距离,距离最小的端点即为该侧的手节点。

⑥足节点. 在端点集合 Point2 中,笔者已经剔除了有可能为头部端点的点,手部端点的点,那么剩下的端点只可能属于足节点,由此定位出左右足节点的位置。至此,就完成了人体关节点的定位。

## 3 试验与分析

### 3.1 试验环境

笔者的试验环境是在室内,光线充足,无刺激性强光,背景环境复杂性一般,试验对象是单人,人距离 kinect 约 1.5 m 处正面向对 kinect 成站立姿势,kinect 距地约 1.2 m,使用 kinect 摄取270 帧视频,帧率 30 fps,图像分辨率  $640 \times 480$ ,视频中的试验人作出 4 个基本动作,分别标记为动作1~4。

### 3.2 试验过程

由 kinect 摄取人体的彩色图像和深度图像,如图7和图8显示的是动作1的彩色及深度图像,接着实现彩色图像和深度图像的坐标对齐并对彩色图像擦除部分背景,如图9所示。对深度图像进行滤波膨胀等预处理,如图10所示。对预处理后的深度图像细化处理,得到人体骨架线,如图11所示。若不对深度图像预处理,获得的人体骨架线有较多毛刺,如图12所示,不符合试验要求。获取骨架线的角点,并将得到的角点分为折点和端点,并分别存储在 Point1 集合和 Point2 集合中,如图13所示,其中,红色为端点,蓝色为折点。

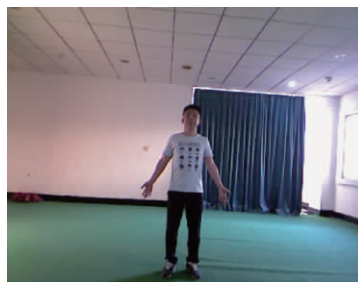


图7 人体彩色图像

Fig. 7 Color image of human body



图 8 人体深度图像

Fig. 8 Depth image of human body

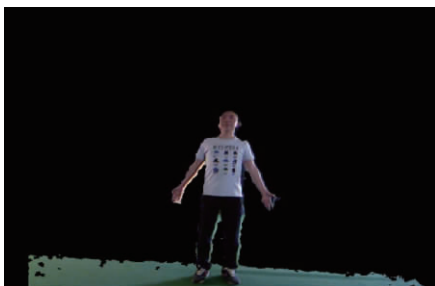


图 9 对彩色图像坐标对齐并擦除部分背景

Fig. 9 Align the color image coordinates and erase part of background



图 10 预处理后的深度图像

Fig. 10 The depth image after pre-processed

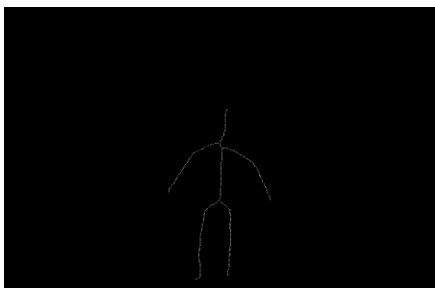


图 11 细化处理得到人体骨架线

Fig. 11 The human skeleton line after Thinning-processed

### 3.3 试验结果

本试验分别获取动作 1~4 对应的预处理后的深度图,人体骨架线角点分类图,关节点定位图,试验效果如图 14~17 所示。

### 3.4 结果分析

从试验效果图可以看出,笔者方法能够定位



图 12 未经预处理得到的人体骨架线

Fig. 12 The human skeleton line without pre-processed

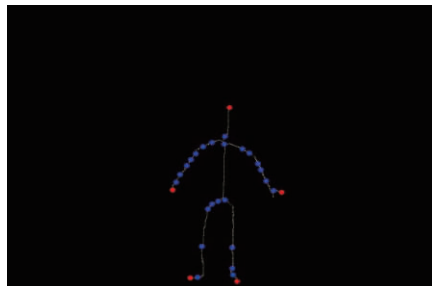


图 13 人体骨架线角点及分类

Fig. 13 The classified corners of human skeleton line

到人体的 15 个关节点. 为了验证本试验关节点定位的准确性,笔者做了两个对比试验: ①以人工标记方式获取的关节点坐标为基准,对比笔者方法与文献[2]的方法(简称对比方法),得出两种方法获取的各关节点的平均像素误差;②以文献[1]的人体关节点定位方法(其功能实现已内置于 kinect 产品当中,是目前比较先进的人体关节点定位方法,简称 kinect 方法)为基准,得出笔者方法定位的各关节点的平均正确识别率。

对比一: 首先对试验人的各个关节点做人工标记,然后在相同的试验条件下,对同一个动作,用笔者方法和对比方法分别获取对应关节点的坐标,再分别计算出两者的坐标与人工标记的对应关节点坐标间的欧氏距离<sup>[14]</sup>,若距离小于 15 个像素,则认定识别正确,否则认定识别失败,得到笔者方法和对比方法的关节点定位平均正确识别率,如图 18 所示。

对比二: 在相同的试验条件下,同一个动作的对应关节点分别以 kinect 方法和笔者方法定位出关节点坐标,并以 kinect 方法获取的关节点坐标为基准,计算出笔者方法定位的关节点坐标与 kinect 方法获取的对应关节点坐标间的欧氏距离,当两者对应关节点坐标间的欧氏距离小于 15 个像素时则认定识别正确,否则认定识别失败,得到笔者方法定位关节点的平均正确识别率,如图 19 所示。

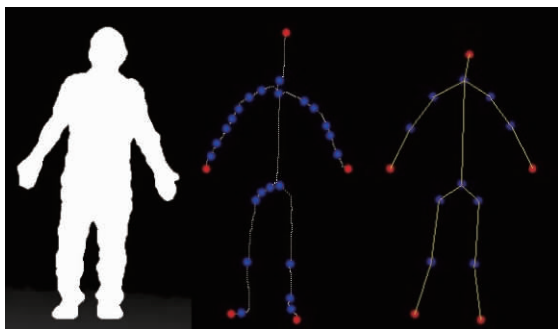


图 14 动作 1  
Fig. 14 Action 1

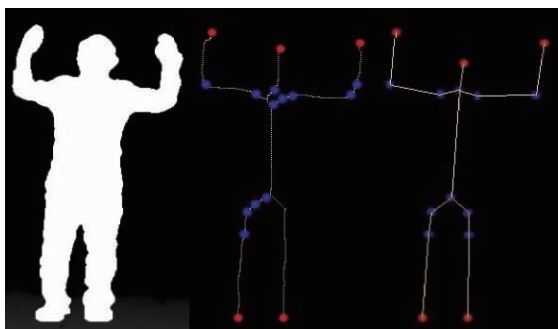


图 15 动作 2  
Fig. 15 Action 2

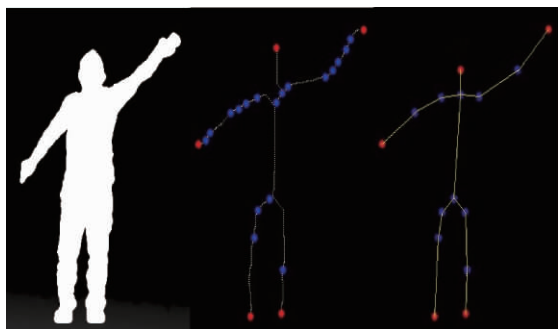


图 16 动作 3  
Fig. 16 Action 3

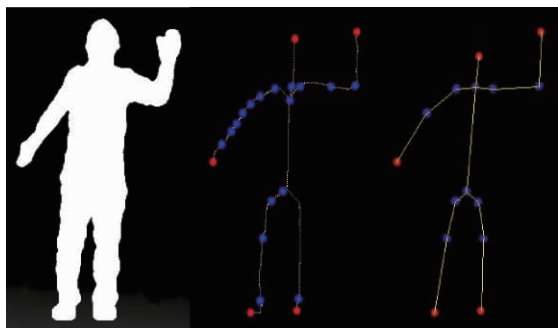


图 17 动作 4  
Fig. 17 Action 4

从图 18 可以看出,相较于对比方法,笔者方法定位头节点的误差明显更小,笔者方法定位的其他关节点的误差也相对较小.对比方法的关节点的平均定位准确率是 69.7%,而笔者方

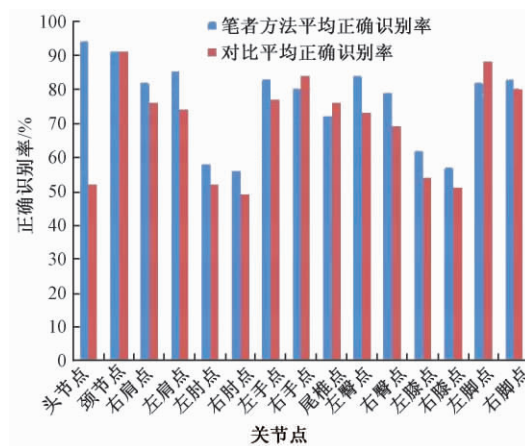


图 18 笔者方法和对比方法的关节点平均正确识别率  
Fig. 18 The correct recognition rate of human joints of the proposed method and the comparison method

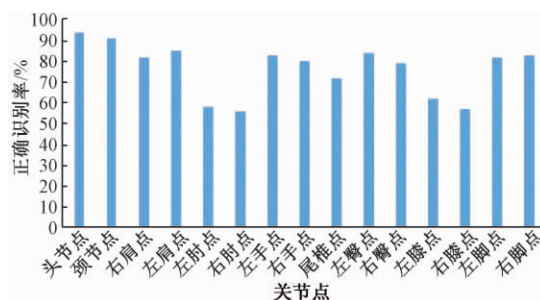


图 19 笔者方法定位的各关节点的平均正确识别率  
Fig. 19 The correct recognition rate of human joints of the proposed method

法的关节点平均定位准确率为 76.5%,整体的定位准确率提高了 7% 左右,其中头节点定位准确率提高效果最为明显,达到了 42%。从图 19 可以看出,笔者方法除肘节点、膝节点、尾椎点外,其他节点的定位相较于 kinect 方法差别不大,基本吻合,尾椎点的定位效果一般,是由于人体细化后得到的尾椎点位置偏下所致.肘节点和膝节点的定位效果不够理想,平均正确识别率在 60% 左右,主要原因是当人体双臂伸展或双膝直立无弯曲站立的姿势下,折点定位的误差较大导致的。

#### 4 结论

提出了一种利用深度图像和彩色图像定位人体关节点的方法,笔者的工作主要做了以下改进。

(1) 通过运动目标跟踪获取人脸部区域中心点作为头节点,防止了直接以骨架线头部端点作为头节点产生的误差。

(2) 获取人体骨架线的角点,并将角点分类为端点和折点,并结合人体刚架比例关系定位出关节点,比直接通过一般性的人体刚架比例关系



定位关节点的方法具有更好的适用性。

笔者提出的人体关节点定位方法,还有较大的改进空间,比如角点检测算法的效率有待提高等。

### 参考文献:

- [1] SHOTTON J, KIPMAN A, et al. Real-time human pose recognition in parts from single depth images [J]. Communications of the ACM, 2013, 56 (1): 116–124.
- [2] 肖秦琨,赵艳,高嵩. 基于 RGB 彩色和深度信息的人体关节点定位 [J]. 国外电子测量技术, 2015 (2): 27–30.
- [3] 余涛. Kinect 应用开发实战用: 最自然的方式与机器对话 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [4] KO S J, LEE Y H. Center weighted median filters and their applications to image enhancement [J]. IEEE transactions on circuits and systems, 1991, 38 (9): 984–993.
- [5] JACKWAY P T, DERICHE M. Scale-Space properties of the multiscale morphological dilation-erosion [J]. IEEE transactions on pattern analysis & machine intelligence, 1996, 18 (1): 38–51.
- [6] 孙少林,马志强,汤伟. 灰度图像二值化算法研究 [J]. 价值工程, 2010 (5): 142–143.
- [7] ZHANG T Y, SUEN C Y. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns [J]. Communications of the ACM, 1984, 27 (3): 236–239.
- [8] SHI J, TOMASI C. Good features to track [C] // 1994 Computer Vision and Pattern Recognition. Seattle: IEEE, 2002: 593–600.
- [9] NOUAR O D, ALI G, RAPHAEL C. Improved object tracking with camshift algorithm [C] // 2006 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Toulouse: IEEE, 2006: 1121–1127.
- [10] SOLEIMANIZADEH S, MOHAMAD D, SABA T, et al. Recognition of partially occluded objects based on the three different color spaces (RGB, YCbCr, HSV) [J]. 3D Research, 2015, 6 (3): 1–10.
- [11] 姚红革,郝重阳,雷松则. 序列图像中彩色目标跟踪的加权颜色分布方法 [J]. 中国图象图形学报, 2009 (1): 99–105.
- [12] COMANICIU D, MEER P. Meanshift: a robust approach toward feature space analysis [J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2002, 24 (5): 603–619.
- [13] GARY B, ADRIAN K. 学习 OpenCV (中文版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [14] WANG L, ZHANG Y, FENG J. On the euclidean distance of images [J]. IEEE transactions on pattern analysis & machine intelligence, 2005, 27 (8): 1334–1339.

## A Method of Positioning the Human Body Joints Based on RGB and Depth Information

ZHANG Qingjian, HAN Jianping

( School of Computer, HangzhouDianzi University, Hangzhou 310016, China)

**Abstract:** In this paper, a method of positioning the human joints based on RGB-D was proposed. The human body skeleton line was obtained by the deep image filtering, dilating and thinning processing of the kinect acquisition, the end and turning points of the human skeleton line were obtained according to the corner detection algorithm. Then tracked and positioned the human's face in the color image, at last the 15 joints of human body were positioned combining with the proportion of the rigid parts of the human body. The results showed that the accuracy of positioning joints of this method was improved by 7% compared with the method of positioning the joints directly according to the proportion of the rigid parts of the human body, and the accuracy of positioning the joint of head was improved by 42%.

**Key words:** RGB-D; kinect; image thinning; corner detection; facing tracking; positioning joints

# 基于多元媒体数据的教育舆情情绪可视化

梁翊涛, 王长波

(华东师范大学 计算机科学与软件工程学院, 上海 200062)

**摘要:** 教育舆情研究在危机公关、舆情引导等领域具有重要作用。目前, 网络已经成为民众发表文章和评论的主要阵地。然而, 如何识别网络教育舆情中的情绪倾向与情绪传播模式, 并且在众多媒体平台中对比分析教育舆情情绪的特点, 是当前舆情研究面临的挑战。针对该挑战, 我们设计实现了教育舆情情绪可视化系统。首先, 根据与目标用户的讨论定义了教育舆情情绪分析的需求; 其次, 利用情绪识别算法识别文本情绪, 并根据情绪传播模型提出了情绪传播算法; 然后, 设计了多个可交互视图, 允许用户进行多媒体平台的对比分析。最后, 基于 2015 年网络教育舆情数据进行案例分析, 表明本文设计的可视化系统能够满足用户需求, 并能支持舆情引导、危机公关中的媒体平台选择。

**关键词:** 教育舆情; 可视分析; 情绪分析; 网络媒体数据; 情绪传播

**中图分类号:** TP391

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.05.002

## 0 引言

舆情是社会民众作为主体, 发表对于时事、新闻、政策等社会态度的总和, 在社会生活中具有重要意义。随着网络的发展, 截至 2016 年 12 月, 我国网民数量已经达到 7.13 亿<sup>[1]</sup>。因此, 网络舆情已经成为舆情研究的主要阵地。研究网络教育舆情有助于引导公众舆论<sup>[2]</sup>, 危机公关, 并可以辅助政府、企业进行决策<sup>[3]</sup>。民众态度是舆情研究的核心领域, 情绪作为民众态度倾向的直观反映, 研究它能够分析网络用户、研判教育形势<sup>[4]</sup>提供切实依据。然而, 大量的网络舆情数据源, 包括门户网站、论坛、博客、自媒体等, 让人们难以选择合适的媒体平台获取信息、发表观点, 或者进行危机公关等舆情管理活动。

因此, 笔者设计开发了一个可视化交互系统, 帮助用户进行教育舆情情绪的网络媒体对比研究。系统允许用户从两个层面对教育舆情进行比较研究。在宏观层面, 系统揭示了教育舆情事件主题和舆情事件的情绪倾向; 在微观层面, 对舆情事件情绪进行多平台的对比分析。

## 1 需求分析

为了充分研究网络教育舆情, 我们曾与教育领域的专家合作进行了网络教育舆情项目的研究<sup>[5]</sup>。相比普通网络舆情, 教育领域的网络舆情具有下列特点<sup>[6]</sup>: ①意见主体的隐匿性, 即民众可以通过匿名的方式在网上表达自己的观点; ②教育客体的特殊性, 即教育对于个体和社会的发展具有重要意义; ③舆情传播的即时性与互动性。由于舆情参与者可以自由交互, 因此教育事件更容易表现出“一边倒”的舆情倾向, 更易产生群体性事件。

### 1.1 数据描述

首先, 通过分布式爬虫技术, 从腾讯网、搜狐网、凤凰网和新浪网 4 个门户网站上爬取了自 2015 年 1 月到 2015 年 12 月共计 2 744 篇文章和与之对应的 34 730 条评论。

### 1.2 用户参与

为了深入分析需求, 我们选择了两类用户: 教育领域专家和无专业知识但关心教育舆情的普通用户, 如教师、家长、网络意见领袖等。我们将领域专家与普通用户组织成为一个志愿者小组, 并与

收稿日期: 2018-02-19; 修订日期: 2018-04-03

基金项目: 上海市科委软科学基金资助项目(17692104400)

通信作者: 王长波(1976—), 男, 湖北随州人, 华东师范大学教授, 博导, CCF 会员, 研究方向为计算机图形学、数字媒体、信息可视化、数据分析、虚拟现实, E-mail: cbwang@sei.ecnu.edu.cn.

小组完成了 3 次线上访谈。

首先,由用户描述他们感兴趣的问题,为第一次访谈定义了在当前教育舆情分析中现存的问题和挑战,然后,为其提供基础的可视化形式,如条形图、折线图等,辅助用户进行问题的初步研究,并记录反馈。第二次访谈,展示根据用户需求所设计的可视化系统原型,测试是否符合用户需求,并收集反馈以改进系统。第三次访谈展示系统的最终版本,并指导用户使用。

### 1.3 提取用户需求

对于整体教育舆情情绪以及舆情事件的研究,不同类型的用户需求不同。如教师、家长希望分析他们关注的单个舆情事件,帮助他们决定哪种媒体平台更适合获取信息;意见领袖希望了解情绪从文章到评论的传播形式,从而帮助他们更有效吸引读者关注;领域专家与教育从业者(如辅导机构创业者等)则想要全面了解教育舆情,从而帮助他们制定决策或商业计划。

我们将用户系统需求总结为以下几点:①从不同层次研究网络媒体数据,例如从所有事件到单个事件;②对比不同媒体平台上文章到评论的情绪传播模式;③针对不同用户,总结最适于其发布、获取教育信息的平台类型。

## 2 多维情绪传播分析

### 2.1 情绪识别及分类

为了分析舆情文本情绪倾向,笔者采用累计情绪词在文本中出现次数的方法,为文档进行打分。根据情绪词典<sup>[7]</sup>将情绪分为 7 个类别,并在领域专家的指导下,将 7 类情绪按照从正面到负面的顺序进行排布:乐、好、惊、哀、惧、恶、怒。此外,为了提高情绪得分的准确度,引入副词的权重计算。文档的 7 维情绪如公式(1)所示:

$$\mathbf{d} = \{e_i = \sum_{j=1}^n \text{score} \times \text{weight} \mid D_1 \leq i \leq D_{\max}, i \in N^+\}. \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{d}$  为一篇文档(文章或者评论)的 7 维情绪得分向量;  $D_1$  与  $D_{\max}$  为要计算的情绪类别索引,  $D_1 = 1, D_{\max} = 7$ , 表示要计算所有 7 种情绪类别;  $e_i$  为某一特定情绪类别的得分,并被标准化;  $j$  为文档中某一类情绪词的数量;  $\text{score}$  为一个情绪词在情绪词典中的分值,根据副词的类型和情感激烈程度,将副词分为  $\text{adv} = \{\text{most}, \text{very}, \text{more}, \text{insufficiently}, \text{ish}, \text{inverse}\}$ , 并在多次试验后将其权重设定为  $\text{weight} = \{2.0, 1.75, 1.5, 1.2, 0.5,$

$-1.0\}$ 。无副词时  $\text{weight}$  默认为 1.0。

文章表示为  $A = \{\mathbf{d}_a, \mathbf{d}_c\}$ ,  $\mathbf{d}_a$  为文章  $A$  的情绪向量,  $\mathbf{d}_c$  为与  $A$  对应评论的情绪向量。一个舆情事件  $E = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ 。在公式(2)中,  $E_1, E_2$  为两个事件,  $D$  为应用欧几里得距离公式计算两个舆情事件之间的情绪距离,用  $D$  衡量事件之间的情绪相似度,

$$D(E_1, E_2) = \sqrt{\sum_{i=D_1}^{D_{\max}} (e_{E_1i} - e_{E_2i})^2}. \quad (2)$$

### 2.2 情绪传播

目前,舆情情绪传播模型主要关注群体情绪对于群体性事件发展的影响力<sup>[8]</sup>,研究包括基于群际情绪理论的情绪层级模型<sup>[9]</sup>;基于系统动力学的负面情绪研究<sup>[10]</sup>等。笔者集中关注不同网络媒体平台上文章到评论的情绪传播,根据与领域专家的讨论,上述传播具有明显的链式结构。因此,基于信息系统生态链模型<sup>[11]</sup>,笔者将网络媒体平台上的情绪传播定义为:情绪从媒体所发表的文章向读者传播,最后以评论的方式展示。研究单个事件中的情绪传播,需要定义情绪传播的类型和衡量情绪传播的效率  $P$ ,

$$P = \left\{ P_i = \frac{e_i}{\sum_{j=D_1}^{D_{\max}} e_j} \mid D_1 \leq i \leq D_{\max}, i \in N^+ \right\}. \quad (3)$$

笔者将情绪传播定义为两类:①同类情绪传播:文章与其评论的主情绪类型一致;②异类情绪传播:文章与其评论的主情绪类型不一致。若文章的主情绪得分小于评论的主情绪得分,则为增量传播,反之为减量传播。

同类情绪传播的效率  $\mu$  计算公式如下:

$$\mu_{\text{同}} = |\mathbf{P}_{a[\text{main}_a]} - \mathbf{P}_{c[\text{main}_c]}|. \quad (4)$$

异类情绪传播的效率计算公式如下:

$$\mu_{\text{异}} = [(|\mathbf{P}_{a[\text{main}_a]} - \mathbf{P}_{c[\text{main}_a]}|) + (|\mathbf{P}_{a[\text{main}_c]} - \mathbf{P}_{c[\text{main}_c]}|)]/2, \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{P}_a$  为文章情绪百分比向量;  $\mathbf{P}_c$  为评论情绪百分比向量;  $\text{main}_a, \text{main}_c$  分别为文章和其评论的主情绪类型索引值。

## 3 系统设计与可视分析

可视化系统包含了 3 个模块:数据处理模块、情绪分析模块、可视化模块。系统结构如图 1 所示。数据预处理模块:从网页上爬取文本数据,使用 LDA 算法<sup>[12]</sup>识别舆情事件。情绪分析模块:识别文本情绪,对情绪进行相关性分析,并应用



MDS 算法<sup>[13]</sup>进行降维显示,分析文章到评论的情绪传播.可视化模块:通过情绪花朵图、情绪传播图等视图对教育舆情情绪进行交互对比分析.

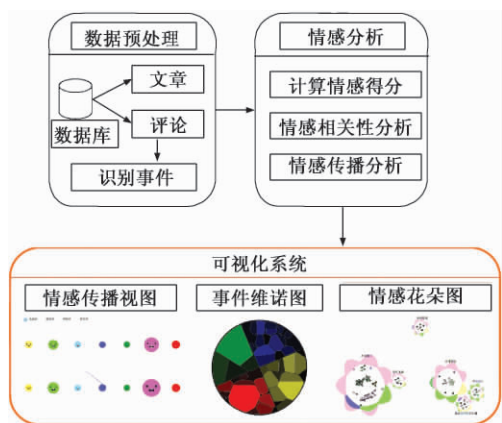


图1 系统结构图

Fig.1 The structure of system

### 3.1 数据预处理

笔者应用 LDA 算法从文档中识别出 91 个教育舆情事件,并根据与领域专家的讨论,总结出 6 个舆情事件主题:校园暴力、高考腐败、禁止中小学生学习补课、学生创业、乡村教育与留守儿童。

### 3.2 可视化设计

可视化系统如图 2 所示,系统包含 5 个可交互视图,允许用户在多个层次上对网络教育舆情进行探索研究。

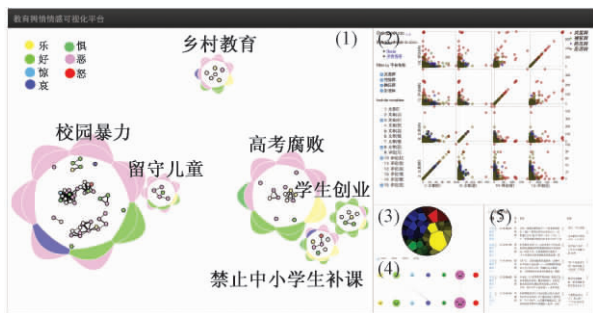


图2 可视化系统图

Fig.2 The overview of system

#### 3.2.1 情绪花朵图

如图 2 中(1)所示,情绪花朵图展示了所有舆情事件的情绪倾向.一朵花表示一个舆情主题,花朵的大小表示主题中舆情事件的数量.花瓣的数量表示每个主题中不同情绪类型百分比,因为情绪分为 7 种类型,所以每朵花有 7 片花瓣.花瓣分为内外两个部分,内侧表示文章情绪,外侧表示评论情绪,内外对比展示出舆情主题文章和评论情绪的差异.为了表示 7 种情绪类型,笔者应用了 Plutchik 情绪轮模型<sup>[14]</sup>,如图 2 中(1)左上角的图

例所示,黄、青、蓝、紫、绿、粉红、红分别代表乐、好、惊、哀、惧、恶、怒 7 种情绪.

以导向布局作为花心,展示舆情主题中事件的情绪相似度聚类.每个节点表示一个舆情事件,节点的颜色表示其主情绪类型.同时,我们使用 2.1 节描述的方法度量事件之间的情绪相似度,如果相似度大于阈值,就在两个事件节点之间添加一条边,由此形成主题中的事件情绪子聚类.通过多次试验,笔者将阈值设置为 0.1.

#### 3.2.2 事件维诺图

为了对比同一事件在不同媒体平台上文档数量、情绪得分的差异,笔者应用了事件维诺图<sup>[15]</sup>.如图 2 中(3)所示,从媒体平台、文章、评论 3 个层次展示.第一层通过颜色划分不同的媒体平台,凤凰网、搜狐网、腾讯网、新浪网分别用红、绿、蓝、黄表示,以颜色亮度表示情绪得分的大小;第二层表示在相应平台上发表的文章;第三层表示文章对应的评论.

#### 3.2.3 情绪传播图

如图 2 中(4)所示,情绪传播图展示同一事件在不同媒体平台上,从文章到评论的情绪传播情况.第一行 7 个圆展示文章的情绪得分,第二行展示评论的情绪得分.情绪传播的效率通过两行圆之间的连线表示.用户可以通过按钮切换不同的媒体平台,对比其情绪传播情况的差异.此外,圆中卡通标记能让用户直观理解不同情绪类型,强化颜色和情绪类型的对应关系.

#### 3.2.4 矩阵散点图

用户可以通过矩阵散点图从所有事件文章与单个事件文章两种层次来分析情绪相关性,如图 2 中(2)所示.在矩阵散点图中,每一个点都代表一篇文章,点击文章点可以在文本视图中查看具体文章与评论.用户可以通过设置矩阵散点图的维度选择想要观察的情绪类型,媒体平台的颜色编码与事件维诺图相同.

#### 3.2.5 文本视图

系统中设计了文本视图,用以展示文章与评论的原始数据,如图 2 中(5)所示.花朵图、事件维诺图、矩阵散点图均可与文本视图进行交互.

## 4 案例分析

笔者采用案例分析法<sup>[16]</sup>对 2015 年全年舆情数据进行分析.首先,向用户展示如何使用系统.然后,根据用户提出的感兴趣的研究问题,选择合适案例进行分析.最后,记录用户的反馈并讨论用

户的分析结果.

#### 4.1 2015 年网络教育舆情情绪分析

2015 年教育舆情花朵图如图 3 所示,其中校园暴力主题在 2015 年相关的舆情事件最多,总体情绪偏向恶.但文章和评论情绪仍然有不同,文章里面有 28.57% 好的情绪,哀占 14.28%;但评论中恶占 85.71%,好占 14.28%,没有哀伤情绪.对于上述情况,领域专家认为出现这种情况的原因是“媒体平台的表达必须客观中立,因此情绪表达较为克制,但用户能够自由评论,对于校园暴力这样的负面话题就体现出恶评.”此外,图中有一个显著倾向于好的话题,即“学生创业”,因为 2015 年,国家出台一系列政策鼓励学生创业,社会各界对于创业都持积极态度.

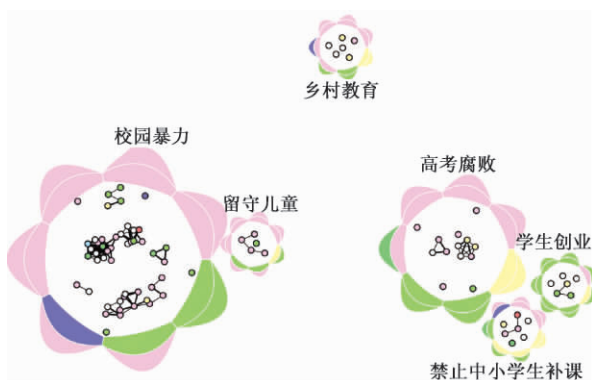


图 3 舆情花朵图

Fig.3 The flower view of public opinion

图 4 为分平台展示的舆情文本矩阵散点图. 腾讯网的文章(散点)数量最多,且分布较其他 3 个平台平均,并无明显的高情绪得分文章.从情绪来说,腾讯网上的“喷子”(不关心事实,只发泄情绪的网民)较多,情绪倾向于负面.

凤凰网的某些点评论(恶)的情绪得分显著较高,其他点都集中在左下角,即除了个别文章受大众广泛关注外,其他文章情绪倾向并不突出.新浪网的分布与腾讯网类似,但相比腾讯网,新浪网的文章(好)、文章(恶)的情绪得分均偏低,即新浪网不倾向于发表情绪倾向强烈的文章.最后,搜狐网的文章情绪得分平均,但评论的得分多为 0,表示在搜狐网上网民的参与度相比其他 3 个平台低.“虽然新浪网上的报道文章较少,但其文章态度明显中立,对我来说是更好的获取信息的平台.”一位用户表示,“搜狐网的参与度太低,即使上面发表评论也不会得到什么反馈.”

#### 4.2 “江西高考替考案”事件分析

江西高考替考案是 2015 年关注热度最高的

舆情事件,搜狐网、新浪网、腾讯网、凤凰网共计有 40 篇文章对此进行了报道.

2015 年 6 月 7 日中午,江西省教育厅接到有人组织替考的举报.经查,外省替考组织在网上招揽高校学生,串通招考办及医院有关工作人员为外省籍考生在江西违规报名、体检,从而实施替考的有组织、有预谋的高考舞弊案件.

通过文本视图对高情绪得分的文章进行分析,发现用户评论共计 529 条,且大部分都是对高考替考行为的批判.然而,虽然评论的情绪恶得分很高,评论的正面得分也较高.其原因首先是存在一些反讽的评论,如“记者装着一副大义凛然的感觉,觉得自己真的很伟大吗?”;其次,也有对于替考卧底记者勇于揭露行为的赞扬,如“这是正能量崛起,有更多这种利国利民的揭发,说明了正义之花处处开放.”其中,“大义凛然”“伟大”“利国利民”,均为正面词汇.因此,评论的正面情绪较高可以总结为以下两个原因:①虽然高考替考案为负面事件,勇于揭发的行为亦值得赞扬;②部分民众评论时惯于使用反讽,其正面词汇在情绪词典方法中会造成误判.

如图 5 所示,情绪传播图展示了不同媒体平台从文章到评论的情绪传播情况.除搜狐网的文章、评论太少,无法体现特征以外,凤凰网、腾讯网、新浪网的文章情绪情况相似:虽然恶的情绪占比较高,但也有一定比例的乐与好.文章到评论的情绪传播却体现出了一定的差异性,凤凰网的评论情绪比文章情绪更加激烈,同时一部分文章(乐)的情绪向评论(哀)传播;腾讯网和新浪网的文章情绪得分均高于评论情绪,显示在这两个平台上用户评论的情绪并不高.

#### 4.3 案例分析总结

总体而言,2015 年教育舆情呈现出负面倾向.除负面事件频发的原因外,无论是从文章发布还是网民评论来看,民众对于负面事件的参与度都比正面事件更高.对媒体平台而言,观点多样化和意见参与度高的网络媒体是更理想的信息发表、获取平台.意见领袖等舆论引导者如果希望获得更多关注,他们会选择凤凰网.想获取信息的用户则偏爱民众参与度更高,情绪倾向分布也更平均的腾讯网.

### 5 结论

笔者首先通过以用户为中心的设计流程,总结了教育舆情情绪分析领域特定的目标和设计原

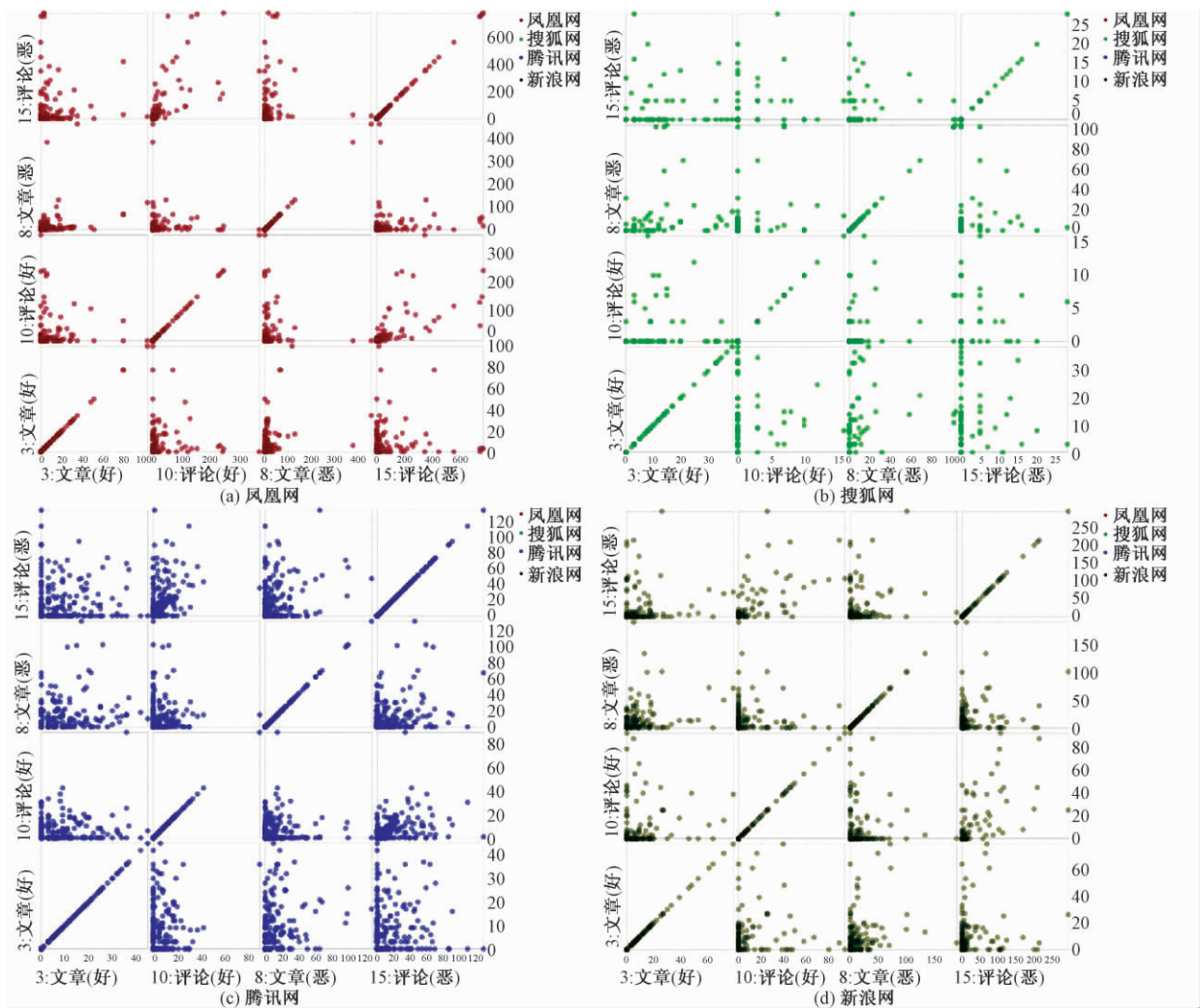


图 4 凤凰网、搜狐网、腾讯网、新浪网情绪矩阵散点图

Fig. 4 The emotion matrix views of Ifeng, Sohu, Tencent, and Sina

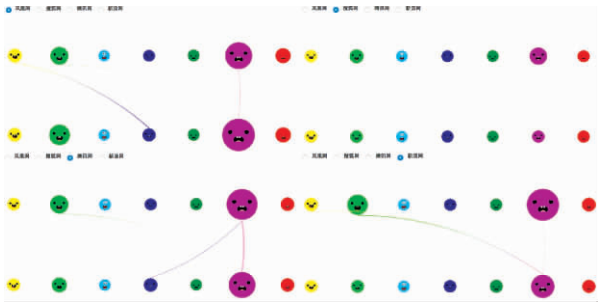


图 5 事件情绪传播图

Fig. 5 The emotion propagation view.

则.其次,对网络舆情文本进行情绪分析,定义了文章到评论的情绪传播类型.再次,设计开发了基于教育舆情情绪的可视化平台,展示教育舆情情绪倾向及不同媒体平台的情绪传播模式,帮助用户选择合适的媒体平台发表、获取信息.最后,案例分析证明了系统的可用性,给舆情情绪分析,媒体比较分析和可视化三者的交叉领域提出了一种新的可能.后续研究将考虑提升文本情绪识别的算法精度,并实时分析显示舆情情绪.

参考文献:

[1] 马捷,胡漠,张世良,等. 网络舆情危机等级评价模型构建及其应用:以廉政网络舆情为例[J]. 情报资料工作,2017(4):36-42.

[2] 姜胜洪. 网络舆情热点的形成与发展、现状及舆论引导[J]. 理论月刊,2008(4):34-36.

[3] 肖文涛,许小美. 新媒体时代的网络舆论现状与引导对策[J]. 行政论坛,2012,19(6):79-84.

[4] 肖宇,许炜,夏霖. 一种基于情绪倾向分析的网络团体意见领袖识别算法[J]. 计算机科学,2012,39(2):34-37+46.

[5] 何晓丰,朱益明,王长波,等. 2015年中国教育网络舆情分析报告[M]. 上海:华东师范大学出版社,2016.

[6] 左明章,国桂环,曾睿. 网络教育舆情的内涵及特点[J]. 中国教育信息化,2011(6):8-11.

[7] 徐琳宏,林鸿飞,潘宇,等. 情绪词汇本体的构造[J]. 情报学报,2008,27(2):180-185.

[8] 汪明艳,陈梅. 社交媒体网络舆情传播影响力研究

- 综述[J]. 情报科学, 2017, 35(5): 171–176.
- [9] 刘志明, 刘鲁. 面向突发事件的群体情绪监控预警[J]. 系统工程, 2010, 28(7): 66–73.
- [10] 李从东, 洪宇翔, 谢天. 基于系统动力学的群体负面情绪动力机制研究[J]. 情报杂志, 2013, 32(5): 38–42.
- [11] 李美娣. 信息生态系统的剖析[J]. 情报杂志, 1998, 17(4): 3–5.
- [12] PAN C C, MITRA P. Event detection with spatial latent Dirichlet allocation [C] // In Proceedings of the 11th Annual International ACM/IEEE, Joint Conference on Digital Libraries, ACM, 2011: 349–358.
- [13] CAMBRIA E, SONG Y, WANG H, et al. Semantic multidimensional scaling for open-domain emotion analysis [J]. IEEE intelligent systems, 2014, 29(2): 44–51.
- [14] PLUTCHIK R. The nature of emotions human emotions have deep evolutionary roots, a fact that may explain their complexity and provide tools for clinical practice [J]. American scientist, 2001, 89(4): 344–350.
- [15] HENRY P, VINES P. Voronoi treemaps in D3 [EB/OL]. <https://cse512-14w.github.io/fp-plvines-djpeter/final/paper-plvines-djpeter.pdf>. (2014-2-13).
- [16] 焦宝臣, 陈诗明, 刘振昌, 等. 研究生管理信息系统应用效果评价研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2017, 38(2): 9–12.

## Visualization of Public Opinion Emotion in Education Based on Multiple Media Data

LIANG Yitao, WANG Changbo

(Department of Computer Science and Software Engineering, East China Normal University, 200062, China)

**Abstract:** The research of public opinion on education had important values in the field of crisis management, public opinion guidance and so on. At present, Internet has become the main channel for people to express their opinions. However, distilling the emotion trend of public opinion and propagation mechanisms of the emotion, and analyzing the characteristics of emotion on multiple media platforms were still challenges. Therefore, a visualization system of emotion on education public opinion was designed. Firstly, the requirements of emotion analysis of public opinion were defined after the discussions with the users. Secondly, the emotion recognition algorithm was used to recognize emotion of text, and the emotion propagation algorithm was proposed based on the emotion propagation model. Thirdly, multiple interactive views were designed, which allows users to do comparative analysis on different online media platforms, and analyzed propagation mechanisms of emotion. Lastly, case studies on network data of education in 2015 showed that the system could meet the requirements of users and effectively support users' selection of media platforms in public opinion guidance and crisis management.

**Key words:** public opinion in education; visual analysis; emotion analysis; network media data; propagation of emotion



文章编号: 1671-6833(2018)05-0045-07

# 面向联合作战的网电对抗态势可视化系统设计与实现

张 阳, 司光亚, 王艳正

(国防大学 联合作战学院, 北京 100091)

**摘 要:** 本文从联合作战对于网电对抗态势可视化系统的能力需求出发, 进行了系统功能分析. 在此基础上, 基于能力视角、服务视角与作战视角, 构建了基于无解的分布式系统体系结构, 并设计了系统的想定生成运行架构与实时运行架构. 本文以基于组件的快速可订制态势驱动技术与基于贴图的多层态势融合可视化技术为例, 研究了系统设计与开发中的关键技术, 并以 C4ISR 系统网电攻防行动为例, 给出了演示示例, 表明了系统的实用性.

**关键词:** 网电对抗; 分布式系统; 快速可订制; C4ISR 系统

**中图分类号:** TP399

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.05.004

## 0 引言

网电空间是信息化发展的产物, 是随着信息技术发展与世界军事变革而出现的新作战领域<sup>[1]</sup>. 网电空间中的军事行动跨越了传统电子对抗和网络对抗意义的攻击, 它将改变以往硬杀伤、硬摧毁的作战方式, 更多地以瘫痪敌方装备, 甚至控制敌方装备为我所用达到特定的威慑和战争目的. 因此, 网电空间已经成为未来信息化战争中一个新的作战领域, 网电对抗将是基于网络信息系统的联合作战所不可或缺的重要作战样式<sup>[1]</sup>.

对于指挥员而言, 虚拟的、人造的网电空间无形无状, 难以把握与理解. 网电空间态势展示借助可视化技术深入挖掘网电对抗的态势信息, 在人与数据、人与人之间实现图像通信, 可以使决策者通览全局, 实现对网电空间态势的及时感知和准确把握. 面向联合作战的网电对抗态势可视化系统是联合作战指挥员筹划与指挥网电对抗行动、评估网电对抗效果的支撑平台, 是争夺网电空间控制权的重要保障<sup>[2-3]</sup>.

目前, 世界各军事强国都在加紧开发与部署网电对抗态势可视化系统, 以此作为争夺制网电空间权的抓手之一, 美国 DARPA “X Plan” 计划<sup>[4-7]</sup> 即是其中代表. 该计划于 2012 年启动, 计

划于 2017 年完成并投入实战应用. “X Plan” 计划是美军网电对抗融入联合作战的基础工具, 将会为联合作战指挥员与网电空间作战人员提供针对各自视角的、专业的、统一的网电对抗态势, 为各级指挥员筹划网电对抗行动提供工具支撑<sup>[8]</sup>. 此外, 2011 年, 加拿大国防科学家将可视分析应用在国防安全防御系统中, 利用可视分析技术对海量数据进行处理, 通过交互手段提高人类对信息的认知能力<sup>[9]</sup>.

笔者采用模块化、组件化思想, 设计了面向联合作战的网电对抗态势可视化系统(CWSVS), 分析了系统的功能与模块组成, 给出了系统的运行架构与软件架构, 研究了系统开发的关键技术, 并给出运行实例.

## 1 基于能力的系统功能需求分析

支撑面向联合作战的网电对抗行动战前筹划、战时组织实施与效能评估<sup>[10]</sup>, 这是系统开发与应用的根本目的, 它对系统应具备的能力也提出了要求, 这些能力要求也决定了系统的功能需求, 如图 1 所示. 具体而言, 系统应具备对可视化演示验证系统管理和控制的能力、应具备针对想定需求构建网电空间环境和态势的能力, 这实际上是从功能的角度提出系统应拥有管理和构建网电对抗态势的功能; 应具备对多种类、多层次网电

收稿日期: 2017-12-10; 修订日期: 2018-03-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1435218)

作者简介: 张 阳(1986—), 男, 河南洛阳人, 国防大学博士生, 主要从事计算机战争模拟研究, E-mail: 361477421@qq.com.

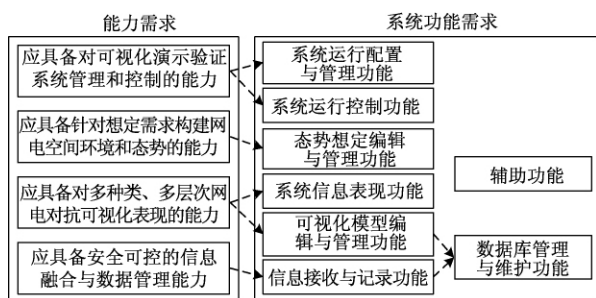


图1 网电对抗态势可视化系统功能需求示意图

Fig.1 Requirements of CWSVS

对抗可视化表现的能力,是要求系统应具有根据任务需求采用丰富可视化表现形式的功能;应具

备安全可控的信息融合与数据管理能力,除要求系统提供信息和数据管理功能,还明确要求系统保证数据安全可控.在这些功能需求基础上,数据库管理与维护和辅助功能等常规需求也应在系统设计中得到实现.

综上所述,网电对抗态势可视化系统需要具备系统运行管理与配置、系统运行控制、态势想定编辑与管理、系统信息表现、可视化模型编辑与管理、信息接收与记录、数据库管理与维护、辅助等8项基本功能.对每项基本功能进行分解,形成系统功能分层模型,如图2所示.

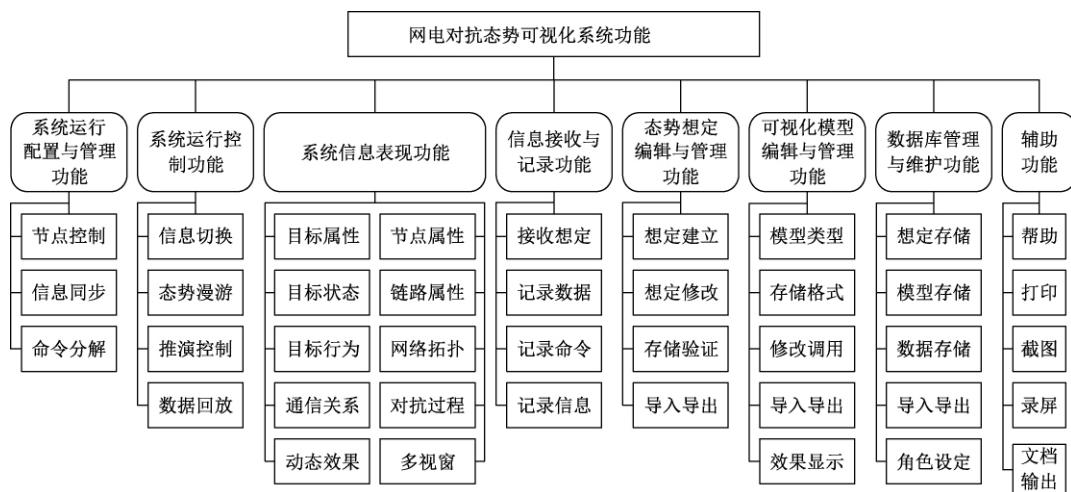


图2 网电对抗态势可视化系统功能分层描述图

Fig.2 Hierarchical function of CWSVS

## 2 系统体系结构与运行架构设计

### 2.1 多视角的系统体系结构设计

由于联合作战网电对抗行动的筹划实施涉及联合作战的指挥人员、网电对抗专业领域的作战人员,以及保障作战行动的系统相关技术人员等多层次多专业人员,不同人员对于网电对抗态势可视化系统的视角区别很大,系统依托于HLA(high level architecture)分布式体系结构<sup>[11]</sup>进行开发与集成,并分别从能力视角、服务视角与作战视角等多角度分析系统的体系结构作为系统设计与开发的指南,如图3所示.

(1) 能力视角(CV).从能力视角而言,系统应该具备系统管理和控制的功能,针对想定需求构建网电空间环境和态势的功能,对多种类、多层次网电对抗可视化表现的功能,安全可控的信息融合与数据管理功能等,具体可参见“系统功能需求分析”.

(2) 服务视角(SvcV).体系结构设计开发环境采用开放的集成框架技术,实现设计成果的快速有效共享,提高设计的重复利用率,减少设计工作量,这里从用户安全管理、用户接口和信息格式标准的角度定义可视化系统体系结构所提供的服务应该最大程度地保证可视化内容采用的是行业标准化数据和规范.

► 用户安全管理参与体系结构设计及使用人员及其权限;

► 用户接口规定、用户操作系统的方式以及系统为用户提供的统一功能(如加入HLA联邦,按需公布订购数据、打印文档、选择性地显示所关注的的数据等);

► 统一信息格式标准,为体系结构在HLA运行上提供统一的数据标准和交换格式.

(3) 作战视角(OV).系统执行特定的可视化功能必须依托于各种网电对抗模型,进而为网电空间作战行动服务.对作战视角而言,网电对抗态势可视化涉及的模型可以分为4种.

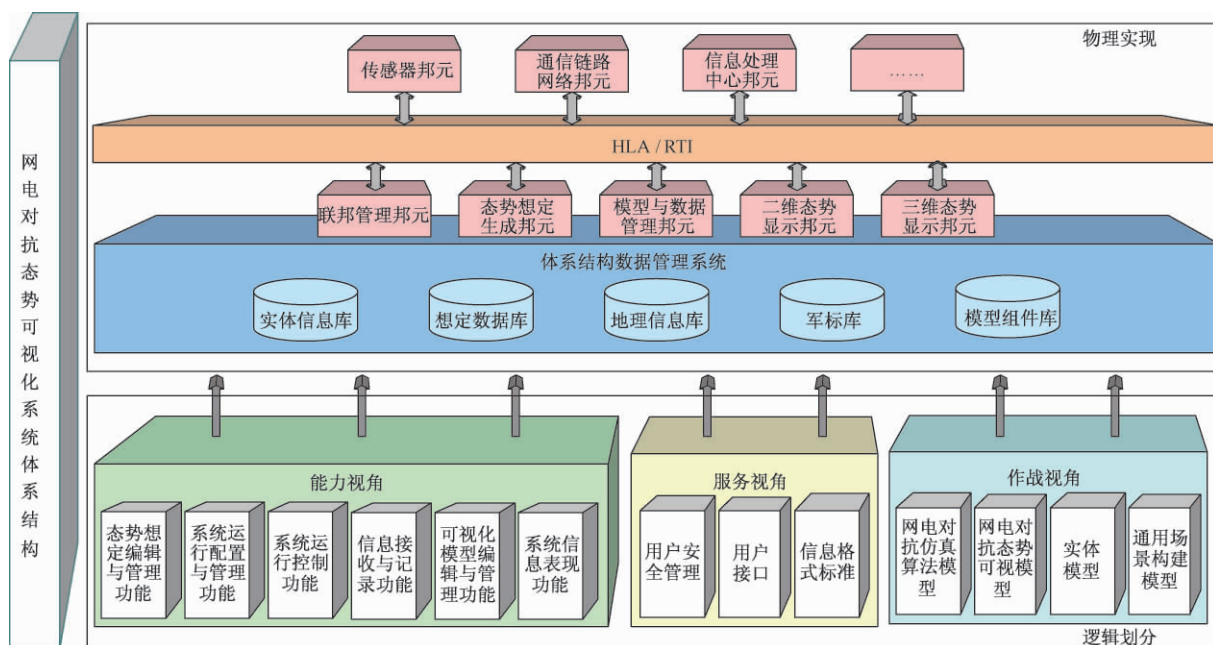


图3 基于多视角的网电对抗态势可视化系统体系结构视图

Fig. 3 Architecture of CWSVS

►实体模型,主要包括三维实体模型、二维军标模型、二维图标模型等,用来在二维或者三维地理信息系统上标示实体;

►网电对抗仿真算法模型,主要包括雷达对抗相关仿真算法、通信对抗相关仿真算法、网络对抗相关仿真算法,这些算法按照一定规则与逻辑组合起来后能够进行对抗行为的仿真推演;

►网电对抗态势可视模型,主要包括雷达对抗态势可视模型、通信对抗态势可视模型,以及网络对抗态势可视模型,用在二维或者三维地理信息系统上以可视化的形式展现网电对抗态势;

►通用场景构建模型,主要包括地形模型、战场环境模型、大气渲染模型、自然环境模型、机动模型等,用以构建逼真的可视化场景,生动表现战场交战效果,能够被许多可视化系统共用。

在模块划分上,系统基于HLA构建分布式的仿真环境,在实体信息库、想定数据库等数据管理系统的支持下,可以划分为联邦管理邦元、态势想定生成邦元、模型与数据管理邦元、二维态势显示邦元、三维态势显示邦元等仿真邦元。

## 2.2 双模式的系统运行架构设计

系统的运行体系架构如图4所示,可以分为想定生成运行架构与系统实时运行架构两种模式。想定生成部分主要用于生成各种想定,供系统实时运行时调用,在仿真运行前完成。主要是

分析网电对抗态势,由数据管理邦元完成入库;数据管理邦元也具有将研究开发的各种可视化技术组件、算法、仿真模型与三维模型保存至数据库的功能,并能够进行库的管理。态势想定生成邦元则综合网电态势的可视化属性与环境信息,设置网电对抗想定,包括各种信源、通信链路和各级信息处理中心可视化属性的设定,可视化技术组件设定、环境信息设定、算法设定、三维模型和仿真模型设定等在系统运行时需要的各种想定。

实时运行架构支持在实时接收网电对抗态势数据或解析回放数据时,实现系统的运行与网电对抗态势的可视化。各系统作为HLA的联邦成员,在联邦管理邦元的控制下运行,其中二维态势显示邦元与三维态势显示邦元可根据想定与配置,设定为红方、蓝方或白方角色,实现多邦元同时加入联邦。

## 3 系统设计与开发关键技术研究

网电对抗态势展示系统的设计与开发涉及网络战、电子战、计算机图形学、数据结构等多领域知识。为实现系统展示效果生动形象、快速准确、布设快捷、响应迅速等目标,需要解决网电对抗态势可视模型构建技术、快速可订制的态势驱动技术、多层态势融合显示技术、系统综合集成技术等关键技术。笔者重点研究基于组件的快速可订制态势驱动技术以及基于贴图的多层态势融合显示

技术.

### 3.1 基于组件的快速可订制态势驱动技术

组件化技术是当前支持软件重用的核心技术,发展迅速并受到高度重视.组件化技术可以将

系统分解成为独立、可复用、可替代的组件,通过组件组合的模式可以有效地减少应用软件新代码数量、缩短开发周期,增强软件应用的适应性、可重用性<sup>[12-14]</sup>.

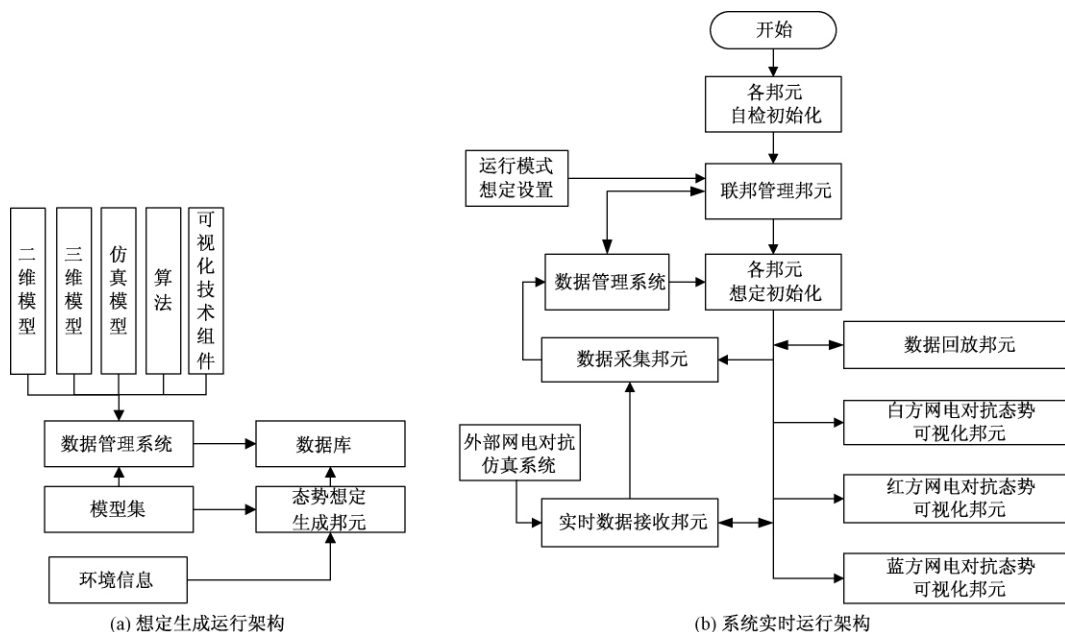


图4 系统运行体系结构图

Fig.4 Runtime architecture of CWSVS

由于网电对抗态势的虚拟性与复杂性,网电对抗态势的可视化必然面临着巨大的计算与显示需求.考虑到实际作战时,不同层次的指挥员关注的网电对抗态势不同,因此系统组成应该灵活,具有较强的可订制性.同时,考虑到未来系统改进与扩充的需要,系统还应具备较强的可扩展性.基于上述3点考虑,采用基于组件技术实现网电对抗态势的快速可订制,根据用户需求迅速组装显示组件,灵活地、自定义地建

构网电对抗态势.根据系统的功能需求,按照组件规模,将态势驱动可视模型划分为顶层组件、基元组件与底层组件3类.这些组件均采用\*.dll形式封装,用户只需按照对外接口定义的格式,输入态势相应数据,就能得到所需要的显示效果.组件相对于用户而言都类似于“黑箱”,用户不需要关心组件的具体实现方式以及仿真算法,便于按照用户的需求进行组装.这3类组件之间的调用关系如图5所示.

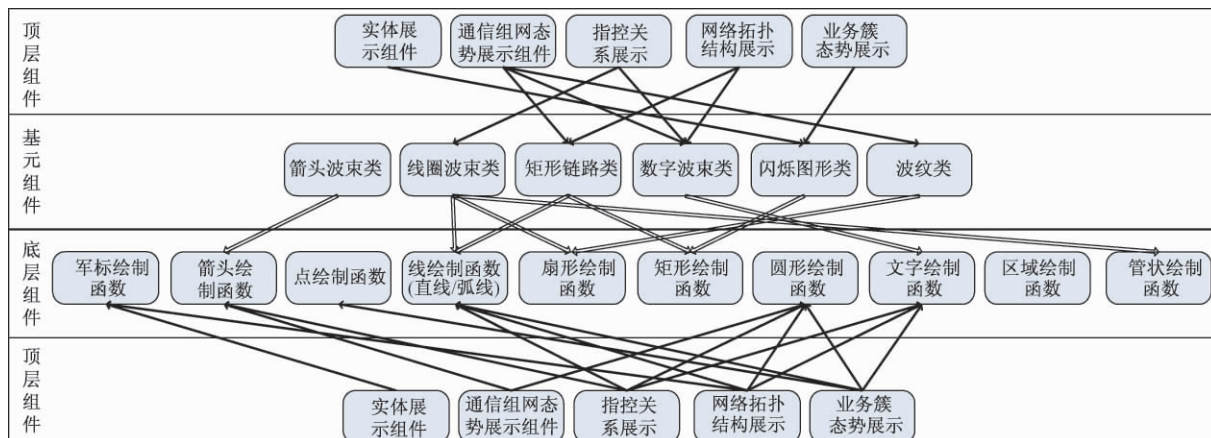


图5 三层组件调用关系图

Fig.5 Three-tier component relations of CWSVS



底层组件的构建需要开发人员结合二维地理信息系统,采用 GDI + 与 GDI 图形接口函数开发二维显示图形,或结合三维地理信息系统,采用 OpenGL 与 DirectX 图形接口函数开发三维显示图形;基元组件调用相应的底层组件实现网电对抗态势基元绘制;顶层组件结合二维或者三维地理信息系统,调用底层组件与基元组件实现网电对抗态势的绘制。

### 3.2 基于贴图的多层态势融合可视化技术

网电对抗态势层次按照用户关注点,可以划分为物理层、协议层与业务层 3 层。这 3 层分类标准与用户在联合作战中所处的层次也是对应的,一般而言,联合作战层次指挥员更关注网电对抗的物理层态势,而网电对抗专业领域人员更关注协议层与业务层态势。这 3 层态势并不是彼此孤立的,需要将 3 层态势进行融合显示,从而给指挥

员提供关于网电对抗的整体态势情况,便于揭示物理层、协议层与业务层的态势级联与随动关系,进一步挖掘网电对抗态势信息<sup>[15-17]</sup>。

多层态势融合可视化的表现形式,是在单个视窗内同时展现多个层的态势信息,并能以一种简洁明了的方式展现出来,不但能够重点展示各个层的主要信息,还能展示这种信息之间的关联关系。

在单视窗内同时展示多层态势实际上是一种三维效果,笔者采用 OpenGL 图形接口<sup>[18-19]</sup>进行绘制,实现多层融合可视化,具体思路是:首先,采用 OpenGL 接口开发融合显示邦元,支持图形三维显示、视点操作等功能;其次,加载物理层、协议层与业务层的态势图,并将其转换为纹理贴图;最后,在融合显示邦元中加载纹理贴图,如图 6 所示。

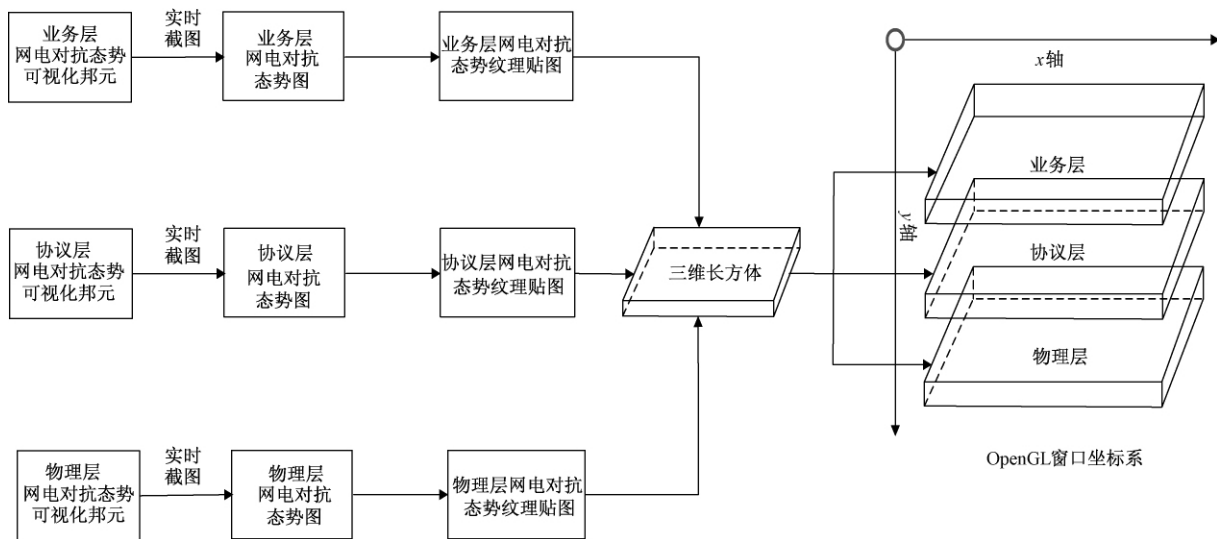


图 6 基于贴图的多层态势融合可视化技术示意图

Fig. 6 Multi-level situation fusion visualization technology based on texture mapping of CWSVS

为了更好地实现可视化,构建长方体作为各层态势图的“底板”,长方体采用面填充模式,并且填充颜色透明度较大,给观察者一种浮动的感觉。同时,将多层纹理贴图在  $y$  轴方向上间隔一定距离,使得观察者能够同时观察到多层的效果。

基于贴图的多层态势融合可视化技术的具体步骤为:

STEP 1: 将各层网电对抗态势可视化邦元的当前态势实时截图,生成各层网电对抗态势图,转到 STEP 2;

STEP 2: 将各层态势图生成各层对应的纹理贴图,转到 STEP 3;

STEP 3: 将各层纹理贴图与三维长方体进行绑定,从而把纹理贴图加载在长方体的上表面,转

到 STEP 4;

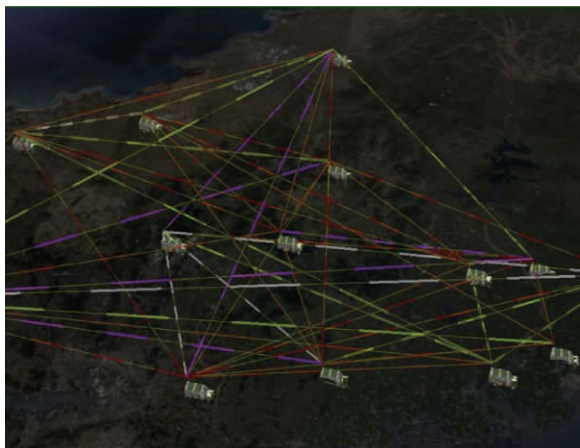
STEP 4: 在三维显示平台上,以一定间隔显示绑定各层纹理贴图的长方体,形成多层融合的立体效果。

## 4 系统演示示例

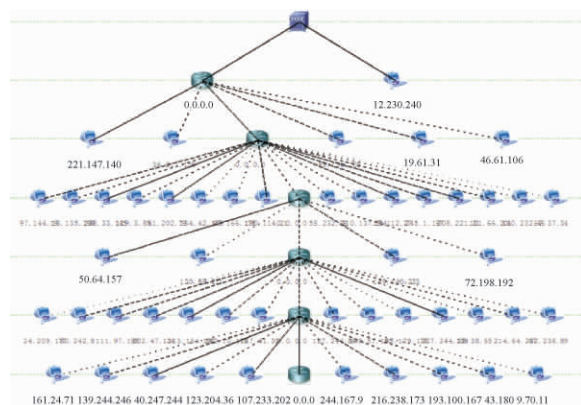
C4ISR 系统是联合作战的重要支撑,是基于网络信息系统的体系对抗所必须依赖的信息源泉与决策中枢。笔者给出以 C4ISR 系统为攻防背景的网电对抗行动的可视化效果作为网电对抗态势可视化系统的演示实例。这里仅以物理层通信链路、协议层网络拓扑、业务层指控关系以及多层态势融合可视化效果为例,如图 7 所示。网电对抗态势可视化系统可视化效果生动形象、内容丰富,能

够根据用户需求快速订制态势,可扩展性佳,能够支持网电对抗效果的快速开发与展示,并成功应

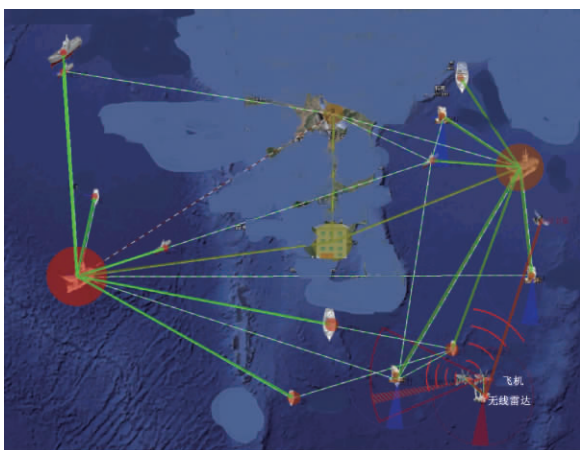
用于某次重大演训任务以及某项重点课题演示汇报中,受到指挥员与业内专家的一致好评。



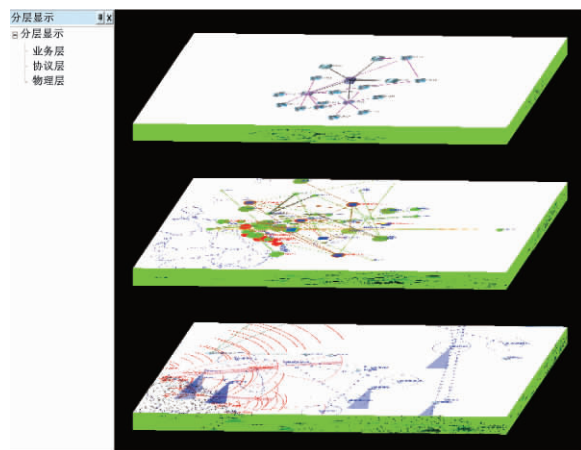
(a) 物理层通信链路可视化效果图



(b) 协议层网络拓扑可视化效果图



(c) 业务层指控关系可视化效果图



(d) 多层态势融合可视化效果图

图 7 可视化系统效果图

Fig. 7 Visualization effect of CWSVS

## 5 结论

网电对抗态势可视化系统综合运用多种可视化手段与技术,能够为面向联合作战的网电对抗提供辅助决策工具,帮助指挥员多视角、多层次分析网电对抗态势。笔者基于能力视角分析了网电对抗态势可视化系统的需求,给出了系统的体系结构设计及运行架构设计,研究了基于组件的快速可订制态势驱动技术与基于贴图的多层态势融合可视化技术等系统关键技术,并以 C4ISR 系统网电攻防为例,给出了演示示例,表明了系统设计的合理性与实用性。

## 参考文献:

- [1] U. S. Air Force. Cyberspace operations-air force doctrine document (AFDD) 3-12 [R]. Cerny: center for doctrine development and education, 2010.
- [2] ENDSLEY. Theoretical underpinning of situation awareness, a critical review [R]. New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, 2000.
- [3] SCOTT C E T, STEPHEN M, RICHARD Bejtlich. Network Attack Visualization and Response Through Intelligent Icons [C] // IEEE, 2009, 8 (1): 2062 - 2068.
- [4] DARPA. Foundational Cyber Warfare (Plan X) [R]. USA: Washing DC, 2012.
- [5] 郭宏生. 网络空间安全战略 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2016: 100 - 110.
- [6] 黄维真, 何荷. 从战略视角看美军“X 计划” [J]. 军事学术, 2013, 11(1): 73 - 75.
- [7] 范虎巍, 范乘斌, 温柏华. 美国网络战“X 计划”的实施及启示 [J]. 装备, 2013, 20(3): 75 - 76.
- [8] MARTIN C L. Cyberdeterrence and Cyberwar [R]. RAND. 2009.
- [9] DAVID J D. The U. S. Navy's Vision for Information

- Dominance [R]. Naval Information Dominance, 2010.05.
- [10] 王艳正, 司光亚, 荣明. 网络空间武器装备网络化效应建模研究 [J]. 系统仿真学报, 2013, 25(8): 1906 – 1910.
- [11] 杨杰, 李晨. 基于 HLA 的地域通信网对抗仿真系统研究 [J]. 系统仿真学报, 2012, 24(3): 696 – 699.
- [12] PHIL S. The Visual Organization [M]. USA: John Wiley & Sons Ltd, 2014.
- [13] SCHREIBER-EHLE S, KOCH W. The JDL model of data fusion applied to cyber-defence-a review paper [C] // 2012 Workshop on Sensor Data Fusion: Trends, Solutions, Applications, SDF 2012, 2012.
- [14] 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 – 22.
- [15] RYAN N, CHRISTOPHER E D. Cyber operations research and network analysis (CORONA) enables rapidly reconfigurable cyberspace test and experimentation [J]. M&S Journal Summer, 2013, 30(15): 140 – 143.
- [16] COLEMAN M K, PARKER D S. Aesthetics-based graph layout for human consumption [J]. Software-practice and experience, 1996, 26(12): 1415 – 1438.
- [17] HOLME P, SARAM J. Temporal networks [J/OL]. Physics Reports( S0370-4573) [2012]. doi: 10.1016/j.physrep.
- [18] RICHARD S W, NICHOLAS H, GRAHAM S, et al. OpenGL SuperBible [M]. USA: Addison Wesley Professional, 2007.
- [19] 王栋, 张晓晴. 基于虚拟现实技术的十字轴锻造过程仿真 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(3): 74 – 77.

## Design and Implementation of Cyberspace War Situation Visualization System for Joint Operations

ZHANG Yang, SI Guangya, WANG Yanzheng

(Academy of Joint Operation, National Defence University, Beijing 100091, China)

**Abstract:** In this paper, the system function analysis was carried out based on the capability demand of the joint operation for Cyberspace War Situation Visualization System( CWSVS) . Then, a distributed system architecture based on HLA was constructed based on the capability perspective, service perspective and operational perspective, and the scenario generating architecture and real-time running architecture were designed. The component-based rapid and customizable situation driven technology and the map-based multi-layered dynamic fusion visualization technology were taken as the key technology examples. At last, the cyberspace of fensive and defensive operations against the C4ISR system was given as an typical example, and the utility of the system was demonstrated.

**Key words:** cyberspace war; distributed system; rapid and customizable; C4ISR system

# 图像去模糊的自适应交替方向乘子重叠组稀疏方法

王 杰, 李胜光, 宋一帆, 白 珂, 马天磊

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 图像去模糊技术是图像处理领域的一个重要组成部分. 由于重叠组稀疏全变差(OGSTV)正则化不仅具有保留边缘的特性, 而且能够抑制阶梯效应的产生, 正逐渐地应用到图像去模糊问题中. 利用交替方向乘子(ADMM)方法来求解重叠组稀疏全变差模型时, 其惩罚因子对去模糊问题的影响较大, 且不易调节, 故笔者在优化模型时根据复原出的图片自适应地调整惩罚因子. 该方法在保证计算速度的同时, 自适应地复原出最佳图片, 并保证了算法的鲁棒性. 实验结果表明, 本文方法在PSNR、SNR、相对误差等评价方法上均优于其他复原模型.

**关键词:** 去模糊; 全变差; 重叠组稀疏; ADMM; 自适应

**中图分类号:** TP391.9

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.05.017

## 0 引言

随着科学技术的发展, 图像成为越来越重要的信息传播媒介. 然而图像在形成、传送和储存的过程中, 由于一些不可抗拒的因素, 会产生图片污染进而造成图片退化, 即模糊图片<sup>[1-2]</sup>. 通常, 图像在退化过程中可用下面模型进行近似,

$$g = h \otimes f + n, \quad (1)$$

式中:  $f$  为清晰图片;  $g$  为观察到的图片;  $n$  是零均值高斯白噪声;  $h$  为点扩散函数;  $\otimes$  是卷积算子. 图像复原技术是一个病态问题, 通常使用正则化技术去解决这个问题, 通过最小化下式的变分问题来复原清晰图像  $f$ ,

$$\min_f \left\{ \frac{1}{2} \|g - Hf\|_2^2 + \alpha \varphi(f) \right\}, \quad (2)$$

式中: 第一项通常被称为保真项, 用来保存图像的最大信息, 此部分可以通过最大后验估计推导出来<sup>[3]</sup>; 第二项被称为正则化项, 通过改善正则化项使复原的图像更清晰. 正则化参数  $\alpha > 0$ .

正则化项  $\varphi(f)$  的选取对复原出的图像质量有着至关重要的影响. Rudin 等<sup>[4]</sup>提出一种全变差方法, 用  $\varphi(f) = \|\nabla f\|_1$  表示正则化项. 这种方法能够比较好地保存图像的边缘信息, 然而会产生阶梯效应. 为了减弱复原图片的阶梯效

应并且保存图像的边缘信息, Lysaker 等<sup>[5]</sup>提出了一种用二阶全变差正则化项取代原始全变差正则化项的方法. Chan 等<sup>[6]</sup>提出了一种混合的全变差公式, 将一阶和二阶全变差混合使用. 也有其他学者采用更高阶的全变差公式, 然而阶次越高, 改进后的模型就越复杂, 计算难度也会随之增加, 产生一些不良效应. Huang 等<sup>[7]</sup>通过引入辅助变量来代替真实图片, 提出了一种快速总变差(Fast-TV)最小化方法. Liu 等<sup>[8]</sup>和 Shi 等<sup>[9]</sup>采用重叠组稀疏正则化项恢复噪声损坏图像, 在减轻阶梯效应方面非常有效. Bai 等<sup>[10]</sup>提出了一种基于交替方向乘子法求解全变差正则化的模型, 该模型对去除椒盐噪声非常有效, 但对于随机噪声效果一般. 赖明倩等<sup>[11]</sup>提出了一种全范数全变差的算法, 既保留了边缘效果又减弱了阶梯效应.

全变差正则化方法能够较好地保留图像的边缘信息, 但会产生阶梯效应, 所以要对正则化项进行改进以便减弱阶梯效应. 采用重叠组稀疏全变差函数(OGSTV)代替正则化项, 该方法曾被用来去除一维噪声<sup>[12]</sup>, 能够保留边缘特性, 并且减弱阶梯效应. 重叠组稀疏全变差通常是利用交替方向乘子(ADMM)方法来进行求解. 但在求解过程中, 其惩罚因子对复原效果有较大影响, 且一般由

收稿日期: 2017-11-17; 修订日期: 2018-04-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61773351)

作者简介: 王 杰(1959—), 男, 河南周口人, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事智能控制研究, E-mail: wj@zzu.edu.cn.

经验选取,不易调出最佳效果,所以笔者提出了一种自适应交替方向乘子法来求解该模型,在复原图片的过程中根据复原情况能够实时地调节ADMM的惩罚因子.该算法不仅能够保存图像的边缘特性,并且能够克服全变差的阶梯效应.此外,自适应交替乘子法比经典的交替乘子法更具有鲁棒性,第3节的试验证明了该算法的高效性.

## 1 预备知识

### 1.1 重叠组稀疏

定义一个在两维信号  $W \times W$  上的点组  $\tilde{s}_{(i,j),W}$ .  $\tilde{s}_{(i,j),W}$  是以  $(i,j)$  为中心,  $W \times W$  为窗的连续采样. 通过堆叠  $\tilde{s}_{(i,j),W}$  的列向量可以得到一个向量  $S_{(i,j),W}$ ,  $S_{(i,j),W} = \tilde{s}_{(i,j),W}(:)$ . 用重叠组稀疏函数 (OGS) 定义的正则化项变为:

$$\phi(S) = \sum_{i,j=1}^n \|S_{(i,j),W}\|_2, \quad (3)$$

所以对应的全变差公式的正则化项变为:

$$\phi(s) = \phi(\nabla_x s) + \phi(\nabla_y s). \quad (4)$$

### 1.2 OGSTV

通过引入定义的重叠组稀疏正则化项,图像复原公式(2)可转换为:

$$\min_f \left\{ \frac{1}{2} \|g - Hf\|_2^2 + \alpha(\phi(\nabla_x f) + \phi(\nabla_y f)) \right\}. \quad (5)$$

对于图片中的每个像素值都有一定的范围约束  $P_\Omega = [p_l, p_u]$ , 这种约束被称为黑箱约束<sup>[13]</sup>. 通过引入一些辅助变量  $v_x, v_y, z$ , 将式(5)转化为有约束问题,

$$\min_f \left\{ \frac{1}{2} \|g - Hf\|_2^2 + \alpha(\phi(v_x) + \phi(v_y)) + P_\Omega(z) \right\} \\ \text{s.t. } v_x = \nabla_x f, v_y = \nabla_y f, z = f. \quad (6)$$

相应的增广拉格朗日函数为:

$$L(f, v_x, v_y, z) = \frac{1}{2} \|g - Hf\|_2^2 + \alpha(\phi(v_x) + \phi(v_y)) + P_\Omega(z) + \mu^T \{ (\nabla_x f - v_x) + (\nabla_y f - v_y) + (f - z) \} + \frac{\sigma}{2} \{ \|\nabla_x f - v_x\|_2^2 + \|\nabla_y f - v_y\|_2^2 + \|f - z\|_2^2 \}, \quad (7)$$

式中:  $\mu$  是拉格朗日乘数;  $\sigma > 0$  是惩罚因子. 式(7)可以用ADMM算法进行求解.

## 2 自适应ADMM-OGSTV

在式(7)中,  $\sigma$  通常是由经验选取. 但试验证明其值选取的大小对图片恢复质量有着至关重要

的影响. 所以提出了一种自适应正参数  $\sigma$  的选取方法. 对式(7)进行变形得,

$$L(f, v_x, v_y, z) = \frac{1}{2} \|g - Hf\|_2^2 + \alpha(\phi(v_x) + \phi(v_y)) + P_\Omega(z) + \frac{\sigma}{2} \{ \|\nabla_x f - s_1\|_2^2 + \|\nabla_y f - s_2\|_2^2 + \|f - s_3\|_2^2 \}, \quad (8)$$

式中:  $s_1 = v_x - \frac{\mu}{\sigma}$ ;  $s_2 = v_y - \frac{\mu}{\sigma}$ ;  $s_3 = f - \frac{\mu}{\sigma}$ .

利用ADMM算法对式(8)进行求解可得复原图片  $f$  的迭代公式为(文献[14]中给出了相应的求解过程),

$$f^{k+1} = \argmin \frac{1}{2} \|g - Hf^k\|_2^2 + \frac{\sigma}{2} \{ \|\nabla_x f^k - s_1^k\|_2^2 + \|\nabla_y f^k - s_2^k\|_2^2 + \|f^k - s_3^k\|_2^2 \}. \quad (9)$$

由式(9)可以容易地看出图片复原迭代公式是以  $S_i, i = 1, 2, 3$  为步长的梯度下降. 为了证明  $\sigma$  值变化对  $f$  的影响, 令  $\sigma$  为自变量, 其他参数为常量, 可得,

$$f = \argmin \Phi(\sigma), \quad (10)$$

$$\Phi(\sigma) = a + \frac{\sigma}{2} \sum_i \|x_i + \frac{\mu}{\sigma}\|_2^2, \quad (11)$$

式中:  $a = \frac{1}{2} \|g - Hf\|_2^2$ ;  $x_1 = (\nabla_x f - v_x)$ ;  $x_2 = (\nabla_y f - v_y)$ ;  $x_3 = (f - z)$ . 对  $\Phi(\sigma)$  进行求导可得,  $\Phi(\sigma)$  在  $[0, \frac{\mu}{x_{\max}}]$  内单调递减. 其中  $x_{\max} = \max\{\|\nabla_x f - v_x\|_2, \|\nabla_y f - v_y\|_2, \|f - z\|_2\}$ . 由于在  $[0, \frac{\mu}{x_{\max}}]$  内增大  $\sigma$  会减小  $\Phi(\sigma)$ , 越小的  $\Phi(\sigma)$  值会复原出更好的图片  $f$ . 区间的范围随着迭代发生变化, 不易选取一个通用范围, 所以笔者选取一个非常小的  $\sigma$  值作为初值, 以  $\sigma = \gamma\sigma$  进行迭代增加,  $\gamma > 1$  为步长参数.

为了在图片复原过程中根据复原情况进行自适应的迭代, 以空间欧式距离作为复原前后相似度度量得,

$$\Delta^{k+1} = (\|f_2^{(k+1)} - f^{(k)}\| + \|v_x^{k+1} - v_x^k\|_2 + \|v_y^{k+1} - v_y^k\|_2). \quad (12)$$

当  $\Delta^{k+1} < \varepsilon$ ,  $\varepsilon$  为任意小常数, 图像复原迭代过程中图片再无变化, 迭代终止. 在迭代过程中根据  $\Delta^k$  实时调整  $\sigma^k$  值, 做如下定义,

$$\sigma^{k+1} = \begin{cases} \gamma\sigma^k & \Delta^{k+1} \geq \eta\Delta^k \\ \frac{\sigma^k}{\gamma} & \Delta^{k+1} \leq \frac{1}{\eta}\Delta^k \\ \sigma_k & \frac{1}{\eta}\Delta^k < \Delta^{k+1} < \eta\Delta^k \end{cases}, \quad (13)$$

式中:  $\eta$  为大于 1 的常数, 对于相应的  $s_{1,2,3} = (v_x, v_y, z) - \frac{\mu}{\sigma}$ , 当图片相似度很小时 (即  $\Delta^{k+1} \geq \eta\Delta^k$ ), 增大  $\sigma$  值, 即可增大步长  $s$ , 加快迭代速度; 当图片相似度很大时 (即  $\Delta^{k+1} \leq \frac{1}{\eta}\Delta^k$ ), 减小  $\sigma$  值, 即可减小步长  $s$ , 对复原图片进行微调; 当图片相似度变化很小时 (即  $\frac{1}{\eta}\Delta^k < \Delta^{k+1} < \eta\Delta^k$ ), 保持  $\sigma$  值不变, 即保持  $s$  值不变进行迭代. 自适应 ADMM-OGSTV 算法具体流程如下.

自适应 ADMM-OGSTV 算法

初始化:  $v_x^0, v_y^0, z^0, \mu^0, \sigma^0, k = 0$

迭代:

$$\textcircled{1} f^{k+1} = \arg \min \frac{1}{2} \|g - Hf^k\|_2^2 + \frac{\sigma^k}{2} \{ \|\nabla_x f^k - s_1^k\|_2^2 + \|\nabla_y f^k - s_2^k\|_2^2 + \|f^k - s_3^k\|_2^2 \}$$

$$\textcircled{2} v_x^{k+1} = \arg \min_{v_x} \alpha \phi(v_x) + \frac{\sigma^k}{2} \{ \|\nabla_x f^k - s_1^k\|_2^2 \}$$

$$\textcircled{3} v_y^{k+1} = \arg \min_{v_y} \alpha \phi(v_y) + \frac{\sigma^k}{2} \{ \|\nabla_y f^k - s_2^k\|_2^2 \}$$

$$\textcircled{4} z^{k+1} = \arg \min_z P_\Omega(z) + \frac{\sigma^k}{2} \{ \|f^{k+1} - s_3^k\|_2^2 \}$$

⑤ 通过式 (13) 计算  $\sigma^{k+1}$

$$\textcircled{6} \mu^{k+1} = \mu^k + \sigma^{k+1} \{ (\nabla_x f^{k+1} - v_x^{k+1}) + (\nabla_y f^{k+1} - v_y^{k+1}) + (f^{k+1} - z^{k+1}) \}$$

$$\textcircled{7} s_1^{k+1} = v_x^{k+1} - \frac{\mu^{k+1}}{\sigma^{k+1}}, s_2^{k+1} = v_y^{k+1} - \frac{\mu^{k+1}}{\sigma^{k+1}},$$

$$s_3^{k+1} = f^{k+1} - \frac{\mu^{k+1}}{\sigma^{k+1}}$$

⑧  $k = k + 1$

停止: 满足迭代条件

### 3 试验与结果

为了更加充分地验证本算法, 笔者选取不同尺度的图片进行测试, 所有测试图片如图 1 所示, 其中图 Goldhill 尺寸为  $512 \times 512$ , 图 Lena 尺寸为  $256 \times 256$ .

在试验过程中, 分别对测试图片进行了两种高斯模糊, 模糊核为  $7 \times 7$  记为模糊核 1; 模糊核



图 1 测试图片

Fig. 1 The picture for test

为  $21 \times 21$  记为模糊核 2, 高斯函数标准差均为 2. 两种运动模糊, 位移像素为 10, 偏移角度为  $30^\circ$ , 记为模糊核 3; 位移像素 20, 偏移角度为  $45^\circ$ , 记为模糊核 4, 偏移角度均为逆时针方向, 论文以下内容采用此简记方式. 笔者方法和最新的 Fast-TV 算法<sup>[7]</sup>、TVFN 算法<sup>[11]</sup>和 OGSATV-ADM4 算法<sup>[8]</sup>进行了对比. 为了保证对比的公平, 所有算法的迭代终止条件为  $\varepsilon = 1 \times 10^{-5}$ , 其他条件为其论文中证明的最优条件. 笔者方法经试验证明参数  $\gamma$  取 1.01, 参数  $\eta$  取 1.09; 重叠组稀疏窗, 选取  $W = 3$ , 文献 [15] 已验证其最优性. 实验环境为 Windows 7, 64 位 Intel Core i5-3230 CPU 2.5 GHz, MATLAB 版本为 2014 a.

笔者对恢复出来的图片进行质量评价时, 使用的是 3 种常用的评价方法, 相对误差 (RE)、峰值信噪比 (PSNR) 和信噪比 (SNR), 使用这 3 种方法<sup>[7]</sup>比较容易和其他算法进行对比. 模糊信噪比<sup>[7]</sup> (BSNR) 为试验附加噪声.

#### 3.1 ADMM 计算步长的影响

采用交替方向乘子法去优化重叠组稀疏正则化模型时, 为了验证正项惩罚参数  $\sigma$  对复原图片性能的影响, 笔者选取图片 Goldhill 在模糊核 1 附加  $BSNR = 40$  的零均值高斯噪声情况下, 绘制了信噪比在不同  $\sigma$  值的曲线, 具体如图 2 所示.

由图 2 可知, 不同  $\sigma$  对复原图片的 SNR 影响是至关重要的, 即使  $\sigma$  发生非常微小的变化也能对复原结果产生巨大的影响. 通过手动调节  $\sigma$  不仅费时, 而且不易找出最佳  $\sigma$  值. 所以笔者提出一种自适应调节方法, 在迭代过程中根据复原图片  $f^k$  和  $f^{k+1}$  进行实时的调节, 这样不仅易于操作, 而且复原效果更好.

#### 3.2 自适应步长复原效果

为了验证自适应步长的复原效果, 笔者对不同尺寸图片进行了仿真, 模糊和复原效果如图 3 所示. 图 3(a)、3(c) 中依次为模糊核 1 至 4, Goldhill、Lena 的退化图像, 对于每种模糊类型都加入



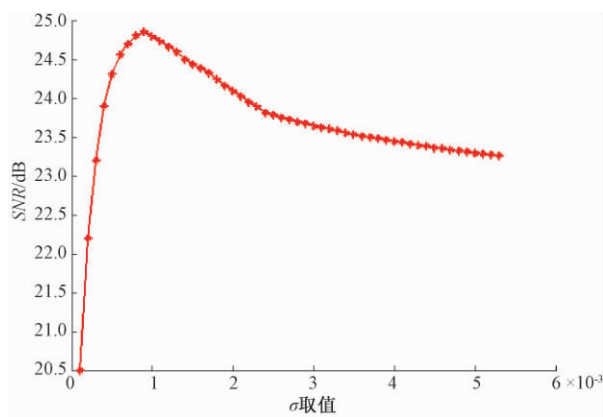
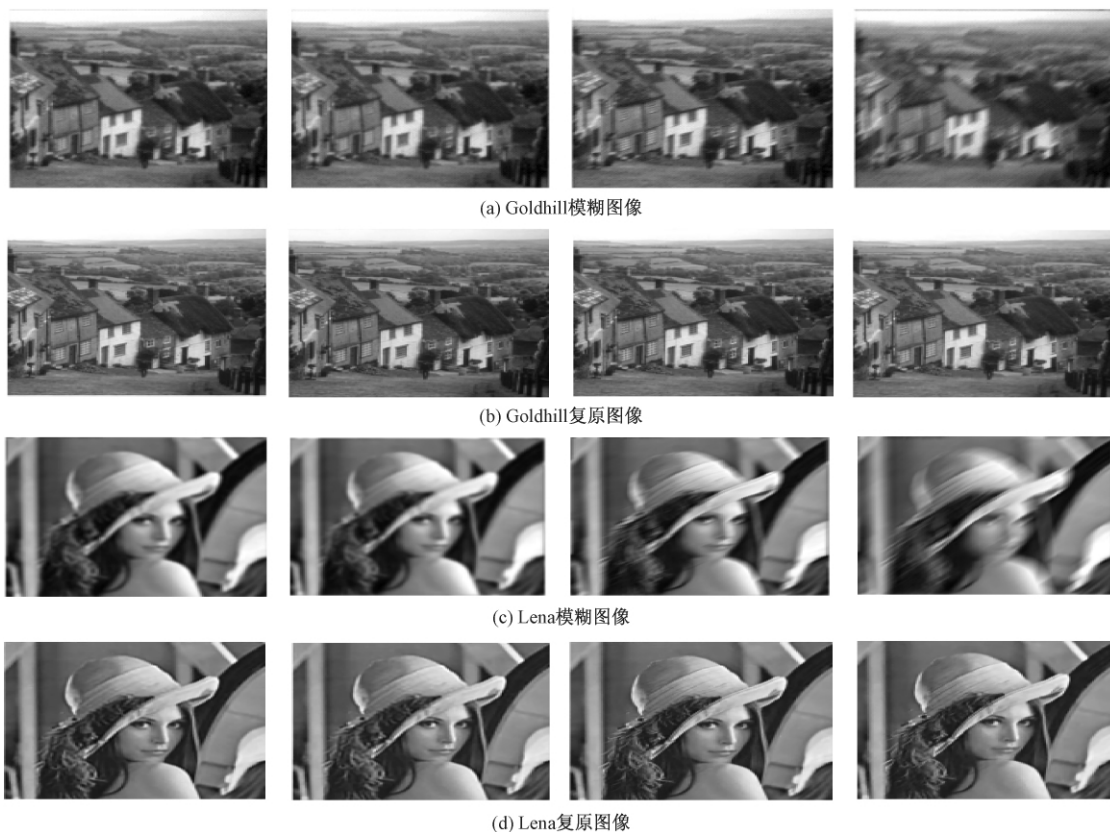
图2 不同 $\sigma$ 值复原图片的SNR值Fig. 2 SNR values of the picture at different  $\sigma$  values

图3 Goldhill 和 Lena 不同模糊和复原图片

Fig. 3 Different blur and restore pictures of Goldhill and Lena

为进一步验证笔者所提方法的优越性,选取 Goldhill 在模糊核 1 情况下,各算法的迭代结果对比如图 4 所示. 笔者算法在获取最佳结果时迭代次数最少,证明了所提算法加速过程的有效性. 由于 Fast-TV、TVFN、OGSATV-ADM4 和笔者算法辅助变量储存空间<sup>[16]</sup>依次为  $O(5mn)$ 、 $O(6mn)$ 、 $O(6mn)$  和  $O(8mn)$ , 所以笔者算法在自适应迭代过程中消耗一些时间.

各算法的计算时间迭代结果如图 5 所示. 由图 5 可知,笔者算法获得最佳结果的计算时间略

了  $BSNR = 40$  的零均值高斯噪声. 图 3(b)、3(d) 为相应的复原效果图. 从人眼感官上,复原出的图片既保留了边缘特性又消除了阶梯效应,对于不同尺寸的图片在不同模糊类型和不同模糊核上均取得了较好结果.

### 3.3 算法对比

为了验证笔者所提算法的优越性,依次用算法 Fast-TV、TVFN、OGSATV-ADM4 和本文算法对不同尺度图片在不同模糊类型和不同模糊核下,对复原图片进行了对比,对比结果如表 1 所示. 由表 1 可知,笔者所提算法的  $PSNR$ 、 $SNR$  和  $RE$  均优于其他算法,不过在复原时间上略长于 Fast-TV 和 OGSATV-ADM4,但保证了复原效果.

长,然而所提算法本身具有加速过程且复原结果具有很大提升,即使相比原算法多用 0.14 s 也是具有研究价值的.

各算法在不同模糊情况下的复原效果如图 6 所示. 图 6 选取 Goldhill 在模糊核 1 和 Lena 在模糊核 4 情况下的模糊图片. 在图 6 第一行中,我们可以观察到 Fast-TV 和 TVFN 在箭头所指处都产生了块状效应即阶梯效应,OGSATV-ADM4 在一定程度上避免了阶梯效应. 笔者所提算法不仅避免了阶梯效应,而且相比 OGSATV-ADM4 更

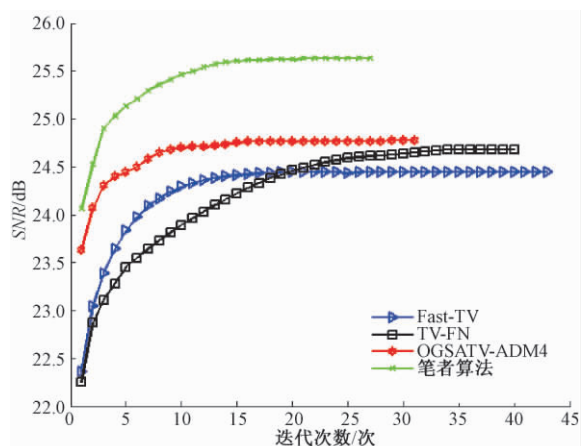


图4 Goldhill SNR 在迭代次数上的迭代结果

Fig. 4 The SNR iteration results of Goldhill over iterations

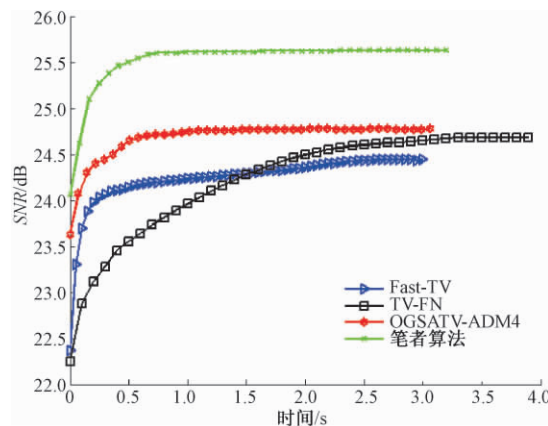


图5 Goldhill SNR 在计算时间上的迭代结果

Fig. 5 The SNR iteration results of Goldhill over time

表1 4种方法与不同模糊核的性能对比

Tab. 1 Comparison of the performance of four methods with different blurring kernel

图片模糊核		Goldhill				Lena			
		模糊核 1	模糊核 2	模糊核 3	模糊核 4	模糊核 1	模糊核 2	模糊核 3	模糊核 4
Fast-TV	PSNR/dB	30.77	30.05	34.16	31.08	30.22	29.41	35.09	32.19
	SNR/dB	24.41	23.94	27.79	24.44	23.06	22.23	27.40	24.93
	RE	0.063	0.067	0.045	0.060	0.070	0.077	0.043	0.057
	时间/s	<b>2.96</b>	<b>3.55</b>	<b>1.74</b>	<b>2.66</b>	<b>1.23</b>	<b>1.79</b>	<b>1.13</b>	<b>1.25</b>
TVFN	PSNR/dB	30.95	30.32	34.37	31.24	30.47	29.50	35.34	32.31
	SNR/dB	24.68	23.99	27.93	24.59	23.25	22.30	27.69	25.02
	RE	0.060	0.065	0.043	0.059	0.069	0.075	0.040	0.056
	时间/s	3.91	5.35	2.61	4.08	2.11	3.37	1.74	1.86
OGSATV-ADM4	PSNR/dB	31.14	30.60	34.58	31.33	30.63	30.12	35.78	32.38
	SNR/dB	24.77	24.23	28.22	24.96	23.79	23.22	28.87	25.47
	RE	0.058	0.061	0.039	0.056	0.067	0.069	0.036	0.053
	时间/s	3.07	3.75	1.81	3.01	1.49	2.08	1.35	1.61
笔者算法	PSNR/dB	<b>32.00</b>	<b>30.77</b>	<b>35.46</b>	<b>32.24</b>	<b>31.46</b>	<b>30.52</b>	<b>36.35</b>	<b>33.47</b>
	SNR/dB	<b>25.63</b>	<b>24.40</b>	<b>29.10</b>	<b>25.87</b>	<b>24.55</b>	<b>23.62</b>	<b>29.44</b>	<b>26.56</b>
	RE	<b>0.052</b>	<b>0.060</b>	<b>0.035</b>	<b>0.051</b>	<b>0.059</b>	<b>0.066</b>	<b>0.034</b>	<b>0.047</b>
	时间/s	3.21	3.96	1.93	3.14	1.58	2.15	1.46	1.68

符合人眼观测效应. 在图6第二行中, 我们可以观察到, 在箭头所指处笔者所提算法更加清晰, 并且在图片放大时对比算法都不同程度地产生了阶梯效应. 通过试验证明, 所提算法对不同尺度的图片在不同模糊类型和不同的模糊核下复原效果均优于对比算法, 不仅恢复出了很好的边界, 而且能够很好地避免阶梯效应.

#### 4 结论

笔者研究了基于重叠组稀疏全变差正则化的图像去模糊算法. 为了解决相应的最小化问题, 提出了一种自适应交替方向乘子算法来求解该模

型, 该方法在复原图片的过程中根据复原情况能够实时地调节 ADMM 的惩罚因子. 通过试验证明该方法的有效性. 与其他算法相比具有较高的峰值信噪比和信噪比, 并且具有较小的相对误差. 笔者提出的算法不仅能够保存边缘特性, 而且能够避免阶梯效应. 由于笔者所研究算法是非盲去模糊方法, 在未来工作中可能把此算法扩展到盲去模糊问题中.

#### 参考文献:

- [1] 王东署, 谭达佩, 韦晓琴. 基于发育网络的人脸朝向识别研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37





图6 算法对比

Fig. 6 Algorithm comparison

- (5): 23 – 27.
- [2] 杨文柱,刘晴,王恩东,等. 基于深度卷积神经网络的羽绒图像识别[J]. 郑州大学学报(工学版), 2018, 39(2): 11 – 17.
- [3] BESAG J, YORK J, MOLLIE A. Bayesian image restoration, with two application in spatial statistics [J]. Annals of the institute of statistical mathematics, 1991, 43(1): 1 – 20.
- [4] RUDIN L, OSHER S, FATEMI E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms [J]. Phys d, 1992(60): 259 – 268.
- [5] LYSAKER M, LUNDERVOLD A, TAI X C. Noise removal using fourth order partial differential equation with applications to medical magnetic resonance images in space and time [J]. IEEE Transactions on image processing, 2003, 12(12): 1579 – 1590.
- [6] CHAN T F, MARQUINA A, MULET P. High-order total variation-based image restoration [J]. SIAM Journal on scientific computing, 2000, 22(2): 503 – 516.
- [7] HUANG Y, NG M K, WEN Y W. A fast total variation minimization method for image restoration [J]. Multiscale model simul, 2008, 7(2): 774 – 795.
- [8] LIU J, HUANG T Z, SELESNICK I W, et al. Image restoration using total variation with overlapping group sparsity [J]. SCI Inf, 2015, 295(C): 232 – 246.
- [9] SHI M, HAN T, LIU S. Total variation image restoration using hyper-laplacian prior with overlapping group sparsity [J]. Signal processing, 2016(126): 65 – 76.
- [10] BAI M, ZHANG X, SHAO Q. Adaptive correction procedure for TVL1 image deblurring under impulse noise [J]. Inverse problem, 2016, 32(8): 085004.
- [11] 赖明倩,蔡光程. 基于交替方向乘子的全变差图像复原[J]. 计算机技术与发展, 2017, 27(4): 60 – 63.
- [12] SELESNICK I W, CHEN P Y. Total variation denoising with overlapping group sparsity [C]. IEEE ICASSP, 2013: 5696 – 5700.
- [13] CHAN R H, MA J. A multiplicative iterative algorithm for box-constrained penalized likelihood image restoration [J]. IEEE Image process, 2012, 21(7): 3168 – 3181.
- [14] BOYD S, PARIKH N, CHU E. Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers [J]. Trends Mach, 2011, 3(1): 1 – 122.
- [15] LIU G, HUANG T Z, LIU J, et al. Total variation with overlapping group sparsity for image deblurring under impulse noise [J]. SCI CG1EL, 2015, 10(4): e0122562–e0122562.
- [16] WEN Y W, CHAN R H, ZENG T Y. Primal-dual algorithms for total variation based image restoration under Poisson noise [J]. Science China mathematics, 2016, 59(1): 141 – 160.

(下转第78页)

文章编号: 1671-6833(2018)05-0058-05

## 位置数据稀疏约束下的疑犯时空位置预测

段 炼<sup>1,2</sup>, 党兰学<sup>3</sup>, 李 铭<sup>4</sup>, 高 超<sup>5</sup>, 朱欣焰<sup>6</sup>

(1. 广西师范学院 地理科学与规划学院, 广西 南宁 530001; 2. 广西师范学院 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 广西 南宁 530001; 3. 河南大学 计算机与信息工程学院, 河南 开封 475001; 4. 南昌大学 空间科学与技术研究院, 江西 南昌 330031; 5. 警用地理信息技术公安部重点实验室, 江苏 常州 213000; 6. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079)

**摘 要:** 低强度的社会活动监控方式, 使警方难以准确掌握疑犯的社会时空移动模式, 也限制了嫌疑人排查及拦截围堵等警务行动的有效性. 为此, 本文基于张量联合分解位置(tensor collective decomposition location prediction, TCDLP)模型, 在疑犯时空位置数据的稀疏约束下, 估算疑犯个体在任意时段的空间分布概率. 该方法利用三维张量表达各疑犯在多个时空节点上的访问强度, 基于张量分解算法, 融合多源社会环境数据所刻画的区域间关联性, 解算出该张量中的缺失值, 进而获取各疑犯的潜在时空分布模式. 实验使用包含了241个疑犯、约1.9万个位置记录的真实疑犯位置数据集进行模型测试, 结果表明, 本方法优于其他位置预测方法.

**关键词:** 疑犯时空预测; 张量分解; 犯罪预测; 位置预测

**中图分类号:** P208

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.05.003

### 0 引言

疑犯位置预测对探明疑犯作案时空规律、评估案发位置与疑犯关联性等警务需求有重要的应用价值<sup>[1]</sup>. 但由于位置探测源(如旅店登记系统、进出港登记系统、ATM机等)数量和类型有限, 警方仅能获取到他们稀疏的位置数据<sup>[2]</sup>, 严重影响了疑犯位置预测的准确性. 在犯罪地理学中, 已有研究基于犯罪个体的系列犯罪位置序列, 基于平均作案距离<sup>[3]</sup>、路网结构<sup>[4]</sup>, 利用距离衰减函数<sup>[4]</sup>、贝叶斯公式<sup>[5]</sup>和动力学模型<sup>[6]</sup>等, 估算锚点(住址或未来犯罪地点等)<sup>[7]</sup>在空间上的出现概率. 然而, 这些研究既没有考虑数据稀疏性的影响<sup>[8]</sup>, 也极少考虑时间因素. 近年来, 基于车辆定位数据<sup>[9]</sup>、Wi-Fi信号<sup>[10]</sup>、公共交通数据<sup>[11]</sup>、人员轨迹数据<sup>[12]</sup>和地理社交网络 check-in 数据<sup>[13]</sup>等的位置预测成为研究热点. 然而, 疑犯位置数据较这些数据更加稀疏, 也不存在好友关系等数据以

提高预测精度. 为应对以上挑战, 笔者融合疑犯群体的统计先验知识和社会环境信息, 基于张量联合分解方法来估算疑犯在所有时空节点上的驻留概率.

### 1 问题描述

疑犯位置数据集包括了W市2012年1月至2012年6月间241名疑犯的18754个轨迹点. 将研究区域网格化, 获得 $g \times g$ 网格,  $G = \{p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_{g \times g}\}$ . 本文中 $g = 100$ , 每个网格覆盖的范围约为 $256 \text{ m} \times 224 \text{ m}$ <sup>[9]</sup>. 如图1所示.

利用各时段(笔者将一天划分为12个时段, 每个时段为2小时)不同疑犯在各网格上的驻留次数, 构建三维张量 $Q \in U \times G \times T$ , 表达“疑犯-位置-时段”的相互关系, 如图2所示. 其中,  $U$ 为疑犯数量;  $G$ 为网格数量;  $T$ 为时段数量. 由于疑犯位置数据的稀疏性,  $Q$ 中仅有1%的项才具有数值. 因此, 需解决的问题是: 估算 $Q$ 内所有缺失项.

收稿日期: 2018-02-01; 修订日期: 2018-03-27

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(41401524); 广西自然科学基金资助项目(2015GXNSFBA139191); 警用地理信息技术公安部重点实验室开放课题资助项目(2016LPGIT03); 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室系统基金资助项目(2014BGERLXT14); 广西高校科学技术研究项目(KY2015YB189、KY2016YB281); 河南理工大学国家测绘局矿山重点实验室开放基金资助项目(KLM201409)

**作者简介:** 段 炼(1981—), 男, 湖南祁阳人, 广西师范学院副教授, 博士, 主要研究方向为时空数据挖掘与犯罪时空预测, E-mail: wtusm@163.com.

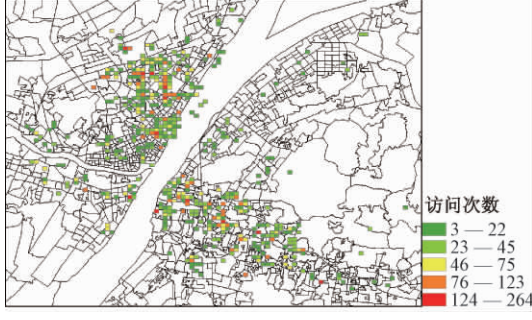


图1 网格化后的疑犯空间分布强度

Fig.1 Spatial distribution of suspects visiting density

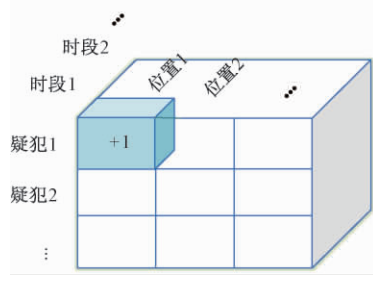


图2 “疑犯-位置-时段”张量

Fig.2 “Suspect-location-time” tensor

## 2 系统流程

本方法具体流程如图3所示.首先,构建“疑犯-位置-时间”张量 $Q$ .其次,抽取所有疑犯在不同时空节点驻留的统计信息,构建“疑犯-位置”矩阵与“位置-时间”矩阵,表达疑犯对各时空节点的访问模式.再将人口、路网和POI等信息按照网格尺度汇集,形成“位置-特征”矩阵,并利用出租车轨迹数据构建“位置-位置”矩阵,通过这两个矩阵描述位置间的关联性.最终,对以上张量和矩阵进行协同分解,计算出“张量 $Q$ 中的缺失值”,实现疑犯个体的时空预测.

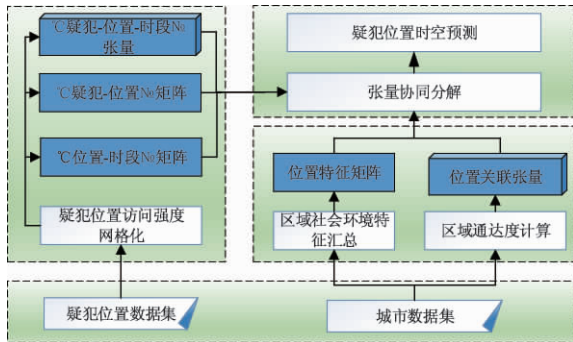


图3 系统架构图

Fig.3 System architecture

### 2.1 疑犯群体的位移特征抽取

基于疑犯位置数据,构建“疑犯-位置”矩阵 $E \in U \times G$ ,其中, $U$ 为疑犯总数; $G$ 为网格总数.该

矩阵刻画各疑犯的全局空间分布模式.

为获得所有疑犯的全局时空分布模式,构建“位置-时间”矩阵 $D \in G \times T$ ,其中, $G$ 表示位置数量; $T$ 表示一天内的所有时段数量. $D$ 中第 $i$ 行和第 $j$ 列的项 $D(i,j)$ 表示所有疑犯在 $j$ 时段访问 $i$ 位置的次数.

### 2.2 位置特征抽取

#### 2.2.1 位置-特征矩阵

具有类似社会经济环境的区域往往对疑犯具有类似的吸引力.笔者涉及的社会经济环境信息包括4个部分:POI特征集 $Fp$ 、路网特征集 $Fr$ 、房屋特征集 $Fb$ 和人口统计特征集 $Fc$ .据此,构建“位置-特征”矩阵 $C \in G \times (p+r+b+c)$ ,其中, $G$ 表示位置总数; $p$ 、 $r$ 、 $b$ 和 $c$ 分别表示 $Fp$ 、 $Fr$ 、 $Fb$ 和 $Fc$ 集的特征个数.特别的,对于category类型的属性,将其转变为1和0表示的one-hot向量结构.

①POI特征. POI特征 $Fp$ 包括:该位置内POI的空间密度以及12个类型的POI数量共13个特征.为体现区域独有的社会经济环境特性.借鉴TF-IDF方法,将位置 $i$ 中类型为 $j$ 的POI数量 $q_{ij}$ 转换为POI类型重要度 $Y_{ij}$ ,

$$Y_{ij} = \frac{q_{ij}}{\sum_j q_{ij}} \log \frac{|G|}{|\{q_i: q_{ij} > 0\}|}, \quad (1)$$

其中, $o$ 为POI类型数量; $|G|$ 表示位置总数; $|\{q_i: q_{ij} > 0\}|$ 表示具有POI类型 $j$ 的位置个数.

②路网特征. 路网特征 $Fr$ 包括:该位置内的路口数量和5个等级(高速公路、一级公路、二级公路、三级公路及四级公路)的道路长度,共6个指标.

③建筑物特征. 笔者抽取的房屋特征 $Fb$ 包括:楼房密度、5类房屋(住宅型、商业性、行政型、工业型、其他)的数量分布、3类高度(低层、多层、高层)房屋的数量分布,共9个指标.

④人口统计特征. 人口统计特征 $Fc$ 涉及10个指标,分别是人口密度、4个年龄段(18岁以下、18~40岁、40~60岁、60岁以上)的人口数量分布、5类教育程度(文盲、初中、高中、大学、研究生)的人口分布.

#### 2.2.2 位置可达性张量

位置间的空间邻近性和通勤强度体现了位置之间的疑犯转移倾向或流动的便捷程度.下面利用出租车数据表达位置间的时态通勤强度,再结合空间邻近性,计算位置间的时空可达度.

设  $v_{ij}$  为  $t$  时段下从位置  $i$  到达位置  $j$  的出租车数量,  $v'_{ij}$  为  $t$  时段下从位置  $j$  出发到达位置  $i$  的出租车数量,  $d_{ij}$  为两位置的空间距离, 则两位置在  $t$  时段下的关联度为:

$$p_{ij} = \frac{v_{ij} + v'_{ij}}{d_{ij}}. \quad (2)$$

基于上式, 构建张量  $P \in T \times G \times G$ , 将  $p_{ij}$  作为  $P$  中的项, 得以刻画位置和位置之间的空间可达度.

### 3 多源数据融合下的张量分解

结合矩阵因子分解和张量因子分解方法计算出  $Q$  中的所有缺失项, 以获取疑犯个体在任意时空节点的驻留概率. 张量  $Q$  可因此分解为:

$$Q \approx S \times U \times J \times T. \quad (3)$$

其中, 核张量 (core tensor)  $S \in d^u \times d^g \times d^t$ , 疑犯低阶潜在因子矩阵 (low rank latent factors matrix)  $U \in U \times d^u$ 、位置低阶潜在因子矩阵  $J \in G \times d^l$  和时间低阶潜在因子矩阵  $T \in T \times d^t$ ,  $d^u \leq u$ ,  $d^l \leq g$ ,  $d^t \leq t$  (本文  $d^u = d^l = d^t$ ).

“疑犯-位置”矩阵  $E$  可因此分解为  $U$  和  $J^T$  的乘积, 即:

$$E \approx U \times J^T. \quad (4)$$

同理, “位置-时间”矩阵  $D \approx J \times T^T$ , “位置-特征”矩阵  $C \approx I \times P$  ( $P \in d^l \times (p+r+c)$ ); 位置可达性张量  $P \approx W \times J \times J^T$ , 其中  $W \in d^l \times d^l \times d^l$ ,  $d^l \leq G$ ,  $d^l \leq T$  (本文中  $d^l = d^l$ ).

可见,  $Q$  与  $E$ 、 $D$ 、 $C$  及  $P$  共享了潜在因子矩阵  $U$ 、 $J$  和  $T$ ;  $P$  也与  $E$ 、 $D$  以及  $C$  共享了潜在因子矩阵  $J$  和  $T$ . 依据这些信息交互关系, 得到融合疑犯位移、社会经济环境和位置可达性数据的张量因子分解目标函数:

$$\begin{aligned} L(Q, S, W, U, J, T, P) = & \frac{1}{2} \|Q - S \times U \times J \times T\|^2 + \\ & \frac{\lambda_1}{2} \|P - W \times J \times J^T \times T\|^2 + \frac{\lambda_2}{2} \|E - U \times J^T\|^2 + \\ & \frac{\lambda_3}{2} \|D - J \times T^T\|^2 + \frac{\lambda_4}{2} \|C - I \times P\|^2 + \\ & \frac{\lambda_5}{2} (\|S\|^2 + \|W\|^2 + \|U\|^2 + \|J\|^2 + \|T\|^2 + \|P\|^2). \end{aligned} \quad (5)$$

其中,  $\|\cdot\|$  为 Frobenius 范数 (norm); ( $\|S\|^2 + \|W\|^2 + \|U\|^2 + \|J\|^2 + \|T\|^2 + \|P\|^2$ ) 作为正则惩罚项以防止模型过拟合;  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$ 、 $\lambda_4$  和  $\lambda_5$  分别为目标函数中相应项的权重值, 以表达各项在目

标函数中的重要程度, 当它们都为 0 时, 目标函数退化成普通的 tucker 分解形式 (tucker decomposition). 由于没有数值解析方法 (closed-form solution) 能计算出该目标函数的全局最优解, 我们基于 PARAFAC-style 张量分解方法<sup>[14]</sup> 找出该目标函数的最优解.

### 4 试验与分析

试验硬件配置为 Intel (R) Core (TM) i777003.6 GHz (4 核), 16 GB 内存的计算机, 操作系统为 Windows 7, 软件采用 MATLAB2016a 和 TensorToolbox 包<sup>[17]</sup>. 采用均方根误差和 top- $k$  最近距离作为模型性能的评价指标, 其中: 均方根误差 (RMSE) 为预测值与真实值之间的误差累加均方根,

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^G (\hat{y}_t - y_t)^2}{G}}, \quad (6)$$

式中:  $\hat{y}_t$  为  $Q$  第  $t$  个项的预测值;  $y_t$  为真实值. 由于 baseline 方法中一些模型的输出结果为概率值, 因此这些模型不采用该指标进行比较.

Top- $k$  最近距离 ( $SED@k$ ): 目标位置与前 top- $k$  个预测结果的最小距离.

$$SED@k = \min [dis(\hat{y}_t, y_t)], t = 1, \dots, k. \quad (7)$$

该指标越小越好, 本文中  $k = 10$ . 两网格间的距离为它们的中心间距.

#### 4.1 比较方法

笔者所提方法称为 TCDLP. Baseline 方法.

①时态约束下的 Kriging 克吕格插值法 (TK): 基于每个时间槽内空间邻近位置的访问次数作为目标位置的访问次数.

②层次 Pitman-Yorprocess 语言统计模型 (HPHD): 描述用户在各位置上的语义时间访问强度. 该方法无法对未知位置建模.

③HOSVD<sup>[15]</sup>: 仅对“疑犯-位置-时间”张量进行因子分解来获取其缺失值.

试验采用交叉验证, 随机从疑犯位置数据集抽取 70% 为训练数据, 20% 位验证数据, 10% 作为测试数据.

#### 4.2 模型性能比较

TCDLP 的参数  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \lambda_5 = 0.05$ , 各潜在因子数量  $k = 10$ . 表 1 为各模型在 RMSE 和 SED@10 上的性能. 笔者提出的模型在这 3 个指标上都优于其他 3 种方法, 说明融合多源城市社会经济环境数据对疑犯时空节点估算是有效的. TK 的



各项指标性能值均为最差,说明在数据稀疏情况下,空间邻近性还无法充分刻画疑犯位置分布的时空模式.基于矩阵/张量分解的方法(如 TCDM 和 HOSVD)的各项性能指标均超过了 TK,这表明,位置间的环境相似性能为疑犯时空分布模式的挖掘提供有效信息.由于 HPHD 给出的结果为概率形式,因此无法对其进行 RMSE 指标测试.

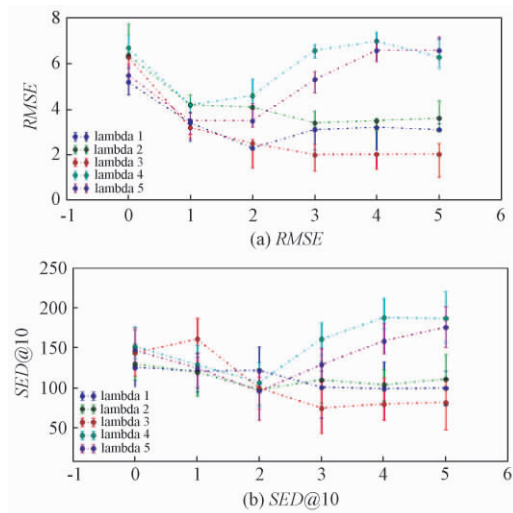
表 1 各模型的预测性能

Tab.1 Models performances, by “mean  $\pm$  std”.

模型	RMSE 指标	SED@10 指标
TK	4.64 $\pm$ 1.43	124 $\pm$ 65
HPHD	—	108 $\pm$ 62
HOSVD	3.53 $\pm$ 0.63	92 $\pm$ 59
TCDLP	2.04 $\pm$ 0.82	81 $\pm$ 58

#### 4.3 TCDLP 参数影响分析

让  $\lambda_1 \sim \lambda_5$  在 0 ~ 10 变化,观察 TCDLP 方法在 RMSE 和 SED@10 两个指标的变化,如图 4 所示.验证各外部环境信息  $E$ 、 $D$ 、 $C$  和  $P$  对疑犯位置预测性能的影响.由图 4 可知,集成了外部环境信息后,模型预测性能有了较大提升, RMSE 和 SED@10 的变化较大;但随着各参数的增加,相对于 RMSE、SED@10 的变化幅度不大,这再次验证了疑犯的社会活动趋向于集聚性.随着  $\lambda_3$  的增加,模型的 RMSE 和 SED@10 都有明显提升,说明位置间的社会环境相似性对疑犯社会移动具有显著的影响.然而,一旦  $\lambda_4$  和  $\lambda_5$  增加到一定数值,模型的 RMSE 急速下降, SED@10 也有一定的上升,这可能是疑犯位置关联性数据中存在噪声,  $\lambda_4$  和  $\lambda_5$  的增加放大了这样的噪声,造成模型性能降低.

图 4  $\lambda_1 \sim \lambda_5$  对 RMSE 和 SED@10 的影响Fig.4 Impact of  $\lambda_1 \sim \lambda_5$  on RMSE and SED@10

## 5 结论

提出基于张量协同分解模型估算疑犯的潜在时空分布概率算法.该算法引入社会环境信息,通过张量和矩阵的联合分解估算疑犯位置时空分布,缓解了疑犯位置数据的稀疏性.基于真实疑犯位置跟踪数据的实验结果表明,笔者所提算法在 RMSE 和 SED@10 两个指标上分别平均高于其他 baseline 方法 50% 和 18%.今后的工作将对疑犯进行分类,如盗窃类、抢劫类等,针对不同犯罪类型特点设计算法,进一步提高算法的精度.

## 参考文献:

- [1] Office of the privacy commissioner of canada [EO/BL]. Available online: <https://www.priv.gc.ca/en/> (accessed on 10th Mar, 2016).
- [2] 孙楠. 警用多源数据轨迹分析系统设计与实现[J]. 测绘科学, 2013, 38(5): 51–53.
- [3] CHEN N C, WEI S, SONG D W. Prediction of series criminals: An approach based on modeling [C] // International Conference on Computational and Information sciences, 2010: 72–75.
- [4] KENT J D, LEITNER M. Incorporating land cover within bayesian journey-to-crime estimation models [J]. International journal of psychological studies, 2012, 4(2): 120–140.
- [5] BAUMGARTNER K C, FERRARI S, SALFATI C G. Bayesian network modeling of offender behavior for criminal profiling [C] // IEEE Conference on Decision and Control, 2005: 2702–2709.
- [6] MOHLER G O, SHORT M B. Geographic profiling from kinetic models of criminal behavior [J]. Siam journal on applied mathematics, 2012, 72(1): 163–180.
- [7] MARTINEAU M, ERIC B. Journey to murder: Examining the correlates of criminal mobility in sexual homicide [J]. Police practice and research. 2016, 17(1): 68–83.
- [8] YANG A M, WU R J, WU H M, et al. The Research of Tree Topology Model for Growth of Natural Selection and Application in Geographical Profile for Criminal [C] // Information Computing and Applications International Conference, 2010, 106: 383–390.
- [9] BRÉBISSEON A D, SIMON É, AUVOLAT A, et al. Artificial neural networks applied to taxi destination prediction [C] // European Conference on Principles of Data Mining and Knowledge Discovery, 2015.
- [10] SONG L, KOTZ D, JAIN R, et al. Evaluating location predictors with extensive wifi mobility data [C] //

- Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, IEEE, 2004, 2 (4): 1414 – 1424.
- [11] YUAN N J, WANG Y, ZHANG F, et al. Reconstructing individual mobility from smart card transactions: A space alignment approach [C] // International Conference on Data Mining, IEEE, 2014, 44 (2): 877 – 886.
- [12] 胡燕, 朱晓瑛, 马刚. 基于 K-Means 和时间匹配的位置预测模型 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2017, 38(2): 17 – 20.
- [13] JURGENS D, FINETHY T, MCCORRISTON J, et al. Geolocation prediction in twitter using social networks: a critical analysis and review of current practice [C] // AAAI, 2015: 129 – 141.
- [14] CICHOCKI A, ZDUNEK R, PHAN A H, et al. Non-negative matrix and tensor factorizations: applications to exploratory multiway data analysis and blind source separation [J]. Wiley publishing, 2009, 25 (Q2): 1 – 3.
- [15] VERVLIET N, DEBALS O, SORBER L, et al. Tensorlab 3.0 [CP/OL]. <https://www.tensorlab.net/>.

## Spatiotemporal Prediction of Suspect under Location Data Sparsity Constraint

DUAN Lian<sup>1,2</sup>, DANG Lanxue<sup>3</sup>, LI Ming<sup>4</sup>, GAO Chao<sup>5</sup>, ZHU Xinyan<sup>6</sup>

(1. School of Geographical Sciences and Planning, Guangxi Teachers Education University, Nanning 530001, China; 2. Education Ministry Key Laboratory of Environment Evolution and Resources Utilization in Beibu Bay, Guangxi Teachers Education University, Nanning 530001, China; 3. College of Computer and Information Engineering Henan University, Kaifeng 475001, China; 4. Institute of Space Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 5. Key Laboratory of Police Geographic Information Technology, Ministry of Public Security, Changzhou 213000, China; 6. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** Due to the low monitoring intensities on key tracking persons( suspects) , the police suffered from the very small amounts of suspect social location data, which was hard to effectively reveal the social mobility patterns of suspects, and restrict the police action validity for suspects filtering and crime blockading etc. Facing this data sparsity challenge, a novel Tensor Collective Decomposition Location Prediction ( TCDLP) model was proposed, to estimate the latent visiting intensity at an arbitrary spatiotemporal node. Specifically, it modeled the visiting intensities of suspects with 3D tensor, where the three dimensions stood for suspects, locations, and time slots respectively. Then, the missing entries in the tensor would be filled through a multi-data fusion tensor decomposition approach, which integrated the correlations of locations and suspects relying on multiple social environment data. So by supplementing the visiting intensities in this tensor, the social spatiotemporal distribution pattern for each suspect could uncovered. TCDLP was evaluated by using a real-world suspect dataset collected from 241 suspects over 6 months with about 19 thousands location records, showing our model outperformed state-of-the-art approaches to the problem.

**Key words:** suspect spatiotemporal prediction; tensor decomposition; crime prediction; location prediction

文章编号: 1671-6833(2018)05-0063-05

# 基于改进的 LSTM 深度神经网络语音识别研究

赵淑芳, 董小雨

(太原科技大学 计算机科学与技术学院, 山西 太原 030024)

**摘 要:** 当前基于 LSTM 结构的神经网络语言模型中, 在隐藏层引入了 LSTM 结构单元, 这种结构单元包含一个信息储存较久的存储单元, 对历史信息有良好的记忆功能。但 LSTM 中当前输入信息的状态不能影响到输出门最后的输出信息, 对历史信息的获取较少。针对以上问题, 笔者提出了基于改进的 LSTM (long short-term memory) 网络模型建模方法, 该模型增加从当前输入门到输出门的连接, 同时将遗忘门和输入门合成一个单一的更新门。信息通过输入门和遗忘门将过去与现在的记忆进行合并, 可以选择遗忘之前累积的信息, 使得改进的 LSTM 模型可以学到长时期的历史信息, 解决了标准 LSTM 方法的缺点, 具有更强的鲁棒性。采用基于改进的 LSTM 结构的神经网络语言模型, 在 TIMIT 数据集上进行模型测试, 结果表明, 改进的 LSTM 识别错误率较标准的 LSTM 识别错误率降低了 5%。

**关键词:** 长短时记忆 (LSTM); 深度神经网络; 语音识别

**中图分类号:** TP39

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.02.004

## 0 引言

N-Gram 语言模型是一种简单有效的统计语言模型, 因其简单、易用、高效, 在实际应用中一直发挥重要作用。N-Gram 语言模型将词看作离散的符号, 容易出现数据稀疏问题。随着 N-Gram 语言模型阶数的增长, 需要估计的参数数量会急剧增加并存在数据稀疏问题, 无法有效利用长距离的上下文信息, 且无法捕捉词与词之间的相似性<sup>[1]</sup>。

基于神经网络语言模型的连续空间建模方法首先基于分布式假设条件, 通过投影矩阵将离散的词映射到连续空间, 形成相应的词矢量 (word embedding) 特征, 以此为基础, 将分布式的上下文矢量信息输入到神经网络, 并在输出层预测下一个词出现的概率<sup>[2-3]</sup>。

递归神经网络语言模型输入层不仅包含了当前输入, 而且加入了当前词的全历史词信息。递归神经网络语言模型理论上可以考虑无限个历史词信息, 但是随着不断引入新词, 存在记忆衰退严重问题, 针对这一问题, 有学者提出了基于 LSTM 结构的神经网络语言模型。LSTM-DNN 语言模型在隐藏层引入了 LSTM 结构单元<sup>[4-5]</sup>, 这种结构单

元包含将信息储存较久的存储单元, 这个记忆单元被一些特殊的门限保护<sup>[6-7]</sup>, 可以选择性地记忆网络误差回传参数, 对历史信息有良好的记忆功能。

由于 LSTM 中当前 CEC 的状态不能影响到输出门的最后输出信息, 所以笔者增加从当前 CEC 到输出门的连接更好地控制每一内存单元输出多少信息, 将遗忘门和输入门合成一个单一的更新门。信息通过输入门和遗忘门将过去与现在的记忆进行合并, 长短时记忆神经网络可以选择遗忘之前累积的信息, 这样改进的 LSTM 模型可以学到长时期的历史信息, 具有更强的鲁棒性。笔者采用基于改进的 LSTM 方法, 解决了 LSTM 方法的缺点, 在 TIMIT 数据集上, 错误率降低了 5%。

## 1 神经网络

人工神经网络 (artificial neural network, ANN) 是一种应用类似大脑神经突触链接的结构进行信息处理的数学模型, 由大量的节点 (神经元) 和相互之间的加权连接构成。每个节点代表一种特定的输出函数, 称为激励函数 (activa-

收稿日期: 2017-05-26; 修订日期: 2017-08-28

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (61202163); “十二五”山西省科技重大专项资助项目 (20121101001); 山西省教研项目 (J2017078)

**作者简介:** 赵淑芳 (1978—), 河北唐山人, 太原科技大学副教授, 主要从事图像处理、人工智能和软件工程等研究, E-mail: zsf166@163.com.



tion function)<sup>[8-9]</sup>. 每两个节点间的连接都代表一个通过该连接信号的加权值, 称为权重 (weight), 这相当于神经网络的记忆. 网络的输出则根据网络的连接方式、权重值和激励函数的不同而不同.

人工神经网络特别适合因果关系复杂的非确定性推理、判断、识别和分类等问题. 可以通过预先提供的一批相互对应的输入输出数据, 分析掌握两者潜在的规律, 最终根据这些规律, 用新的输入数据来推算输出结果<sup>[10]</sup>. 人工神经元是一个多输入/单输出的非线性元件, 其模型如图 1 所示.

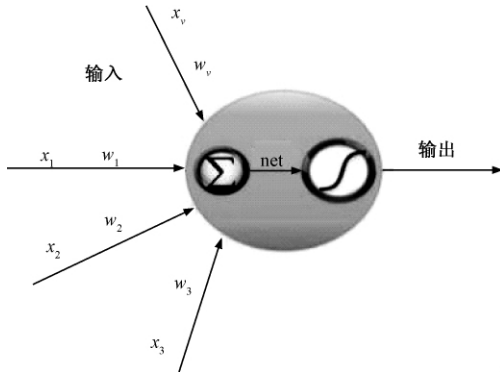


图 1 人工神经元模型

Fig. 1 Artificial neuron model

## 2 LSTM 深度学习基本思想

### 2.1 标准 LSTM 基本思想及模型构建

相比前馈型神经网络 DNN, 循环神经网络 (recurrent neural network, RNN) 在隐层上增加了一个反馈连接, 可以通过循环反馈连接看到前面所有时刻的信息, RNN 通过反馈连接将之前信息的记忆保留在中间的隐藏节点中, 影响网络的输出<sup>[11]</sup>. 在传统的循环神经网络中, 参数训练使用随时间进行反向传播 (backpropagation through time, BPTT) 算法, 假设循环神经网络在每个时刻  $t$  都有一个监督信息, 损失为  $J_t$ , 则整个序列的损失为:

$$\sum_{t=1}^T J_t. \quad (1)$$

损失  $J$  关于  $U$  的梯度可以用链式法则得到,

$$\frac{\partial J}{\partial U} = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^t \frac{\partial h_k}{\partial U} f'(h_k) \frac{\partial y_t}{\partial h_t} \frac{\partial J_t}{\partial y_t},$$

$$f(h_i) = \prod_{i=k+1}^t U^T \text{diag}(f'(h_{i-1})). \quad (2)$$

定义

$$\gamma = \| U^T \text{diag}(f'(h_{i-1})) \|. \quad (3)$$

公式 (3) 即为  $\gamma^{t-k}$ , 若  $\gamma < 1$ , 当  $(t-k) \rightarrow \infty$  时,  $\gamma^{t-k} \rightarrow 0$  会出现梯度消失. 当传播的时间比较长时, 网络权重更新缓慢, 参数训练时梯度需要随着时间进行反向传播, 存在梯度爆炸和消失问题, 无法体现 RNN 的长期记忆效果, 因此需要一个存储单元来存储记忆, LSTM 模型由此被提出.

长短时记忆网络 (LSTM network) 又称长短时记忆循环神经网络 (LSTM RNN), 在深度学习中使用比较广泛.

(1) 在长短时记忆神经网络 (long short-term memory neural network, LSTM) 中, 引入一组称为记忆单元 (memory units) 的循环连接子网络来替换传统网络中的隐层节点. 用一个记忆细胞来进行线性的反馈传递.

(2) 引入门机制 (gating mechanism) 控制信息的累积速度, 提供对记忆细胞的写、读和重置操作, 遗忘门  $f_t$  控制每一个内存单元需要遗忘多少信息, 用来选择忘记过去某些信息<sup>[12]</sup>. 输入门  $i_t$  控制每一个内存单元加入多少新的信息, 用来记忆现在的某些信息. 输出门  $O_t$  控制每一个内存单元输出了多少信息<sup>[13]</sup>.

信息通过输入门和记忆门将过去与现在的记忆进行合并, 输出门最后输出信息. LSTM 通过“控制门”的结构来去除或者增加信息到细胞状态<sup>[14]</sup>, 让信息选择式通过. 长短时记忆神经网络可以选择遗忘之前累积的信息, 这样 LSTM 模型可以学到长时期的历史信息.

在  $t$  时刻, 记忆单元  $C_t$  记录了到当前时刻为止的所有历史信息, 并受 3 个“门”控制: 输入门  $i_t$ , 遗忘门  $f_t$  和输出门  $O_t$ . 3 个门的元素值在  $[0, 1]$  之间. 在  $t$  时刻 LSTM 的更新方式如下:

$$i_t = \sigma(W_i x_t + U_i h_{t-1} + V_i c_{t-1}), \quad (4)$$

$$f_t = \sigma(W_f x_t + U_f h_{t-1} + V_f c_{t-1}), \quad (5)$$

$$O_t = \sigma(W_o x_t + U_o h_{t-1} + V_o c_{t-1}), \quad (6)$$

$$\bar{C}_t = \tan h(W_c x_t + U_c h_{t-1}), \quad (7)$$

$$C_t = f_t \odot C_{t-1} + i_t \odot \bar{C}_t, \quad (8)$$

$$h_t = O_t \odot \tan h(C_t). \quad (9)$$

标准长短时记忆网络就是一种包含许多扩展记忆块的循环神经网络模型. 长短时记忆网络模型如图 2 所示.

### 2.2 改进的 LSTM 方法的基本思想

笔者在改进长短时记忆结构的基础上, 将改进的结构应用于语音识别系统中, 与基于 LSTM 模型的语音识别系统进行对比<sup>[15]</sup>.

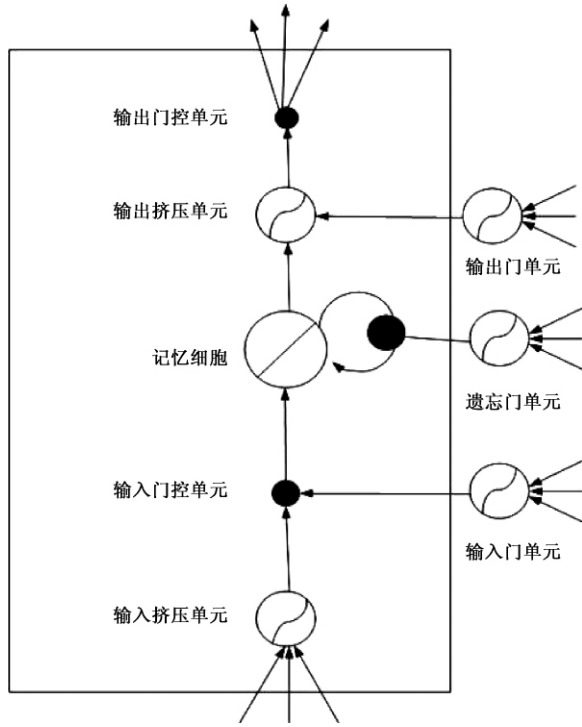


图2 长短时记忆神经网络模型

Fig.2 Neural network model for long and short duration memory

LSTM中,当前输入信息的状态不能影响输出门的输出信息,增加当前输入门到输出门的连接,更好地控制每一内存单元输出多少信息。

将遗忘门和输入门合成了一个单一的更新门,耦合遗忘和输入门限由之前的LSTM分开确定什么忘记、添加什么新的信息变为一同做出决定。在输入的时候才进行遗忘,在遗忘某些信息时才将新值添加到状态中<sup>[16]</sup>。长短时记忆神经网络可以选择遗忘之前累积的信息,这样改进的LSTM模型可以学到长时期的历史信息,具有更强的鲁棒性。改进的长短时记忆神经网络模型LSTM如图3所示。

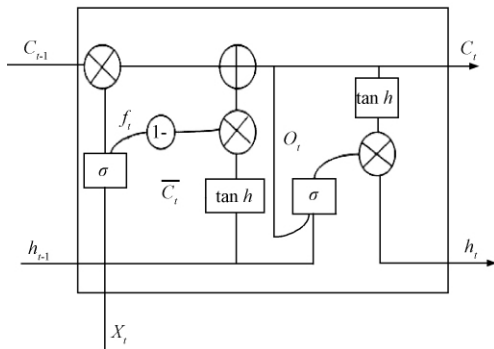


图3 改进的长短时记忆神经网络模型LSTM

Fig.3 Improved short duration memory neural network model LSTM

在 $t$ 时刻LSTM的更新方式如下:

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, X_t] + b_f), \quad (10)$$

$$O_t = \sigma(W_o \cdot [C_t, h_{t-1}, X_t] + b_o), \quad (11)$$

$$\bar{C}_t = \tanh[W_c \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_c], \quad (12)$$

$$C_t = f_t \cdot C_{t-1} + (1 - f_t) \cdot \bar{C}_t, \quad (13)$$

$$h_t = O_t \cdot \tanh(C_t). \quad (14)$$

### 2.3 改进的LSTM训练过程

改进的LSTM递归神经网络参数训练使用BPTT算法。

设在 $t$ 时刻,网络的输入向量为 $x(t)$ ,隐含向量是 $h(t)$ ,网络的输出向量是 $o(t)$ 。用 $V$ 表示输入层与隐含层之间的连接权值, $U$ 表示隐含层与隐含层之间的连接权值, $W$ 表示隐含层与输出层之间的连接权值, $b$ 和 $a$ 分别表示隐含层和输出层的偏置。

$h^l(t)$ 表示第 $l$ 个样本在 $t$ 时刻的隐含变量; $o^l(t)$ 表示第 $l$ 个样本在 $t$ 时刻的输出变量; $\delta^l(v^l(t))$ 表示第 $l$ 个样本在 $t$ 时刻输出层的误差反向信号变量; $\delta^l(u^l(t))$ 表示第 $l$ 个样本在 $t$ 时刻隐含层的误差反向信号向量,  $\frac{\partial L_N}{\partial W}$ 、 $\frac{\partial L_N}{\partial V}$ 和 $\frac{\partial L_N}{\partial U}$

分别表示对权值 $W$ 、 $V$ 和 $U$ 的偏导; $\frac{\partial L_N}{\partial a}$ 、 $\frac{\partial L_N}{\partial b}$ 分别表示对偏置 $a$ 和 $b$ 的偏导。

首先随机初始化所有的权值和偏置,初始化

$$\frac{\partial L_N}{\partial W}, \frac{\partial L_N}{\partial V}, \frac{\partial L_N}{\partial U}, \frac{\partial L_N}{\partial a}, \frac{\partial L_N}{\partial b} = 0.$$

随着时间 $t$ 从1到 $T$ 正向传播,对第 $l$ 个样本在 $t$ 时刻的隐含变量和输出变量进行定义。在 $t=0$ 时刻,定义隐含变量都为0,随着时间的展开,更新样本在 $t$ 时刻的隐含变化量和输出变量。 $h^l(t) = f(u^l(t)) = f(Vx^l(t) + Uh^l(t-1) + b)$ ,  $(1 \leq t \leq T)$ ;

$$o^l(t) = g(u^l(t)) = f(Wh^l(t) + a). \quad (16)$$

随着时间 $t$ 从 $T$ 到1反向传播,计算第 $l$ 个样本在 $t$ 时刻输出层的误差反向信号变量和隐含层的误差反向信号变量。对权值 $w$ 、 $v$ 、 $u$ 和偏置 $a$ 、 $b$ 的偏导进行更新。

$$\delta^l(v^l(t)) = (o^l(t) - y^l(t)) \cdot g'(v^l(t)), \quad (17)$$

$$\delta^l(u^l(t)) = [(W)^T \delta^l(v^l(t))] \cdot f'(u^l(t)), \quad (18)$$

$$\frac{\partial L_N}{\partial W} = \frac{\partial L_N}{\partial W} + \sum_{l=1}^N \delta^l(v^l(t)) (h^l(t))^T, \quad (19)$$

$$\frac{\partial L_N}{\partial V} = \frac{\partial L_N}{\partial V} + \sum_{l=1}^N \delta^l(u^l(t)) (x^l(t))^T, \quad (20)$$

$$\frac{\partial L_N}{\partial U} = \frac{\partial L_N}{\partial U} + \sum_{l=1}^N \delta^l(u^l(t)) (h^l(t-1))^T, \quad (21)$$

$$\frac{\partial L_N}{\partial a} = \frac{\partial L_N}{\partial a} + \sum_{l=1}^N \delta^l(v^l(t)), \quad (22)$$

$$\frac{\partial L_N}{\partial b} = \frac{\partial L_N}{\partial b} + \sum_{l=1}^N \delta^l(u^l(t)). \quad (23)$$

每次更新网络中的所有权值和偏置.

### 3 实验设计与结果分析

在实验中使用两层的 LSTM 递归神经网络和改进的 LSTM 神经网络,每层节点数为 1 024,该 LSTM 递归神经网络模型参数数量为 16.0 Million,在 TIMIT 数据集上进行实验.输入为 36 维的 MFCC 原始声学特征. MFCC 特征提取中帧长取 256,窗函数使用汉明窗.使用动量梯度下降学习函数,动量更新设置为 0.5,时延第一层设置为 -1,第二层设置为 -2.在 TIMIT 数据集上将训练好的模型进行测试,如表 1 所示.基于改进 LSTM 递归神经网络语音识别系统的错误率  $TER$  为 56.0%,与两层的 LSTM 递归神经网络相比较降低了 5.0%,表明改进的 LSTM 识别准确率显著高于标准 LSTM 的准确率.

表 1 基于改进 LSTM 递归神经网络语音识别系统

Tab.1 A speech recognition system based on improved LSTM recurrent neural network

系统描述	$TER / \%$
LSTM-RNN	61.0
改进 LSTM-RNN	56.0

笔者设计的实验中,对 LSTM 与改进的 LSTM 进行测试,比较不同迭代次数的 LSTM 和改进 LSTM 的准确率.迭代次数设置为 1~10 次,随着迭代次数的增加,识别的准确率同时增加,改进的 LSTM 准确率高于 LSTM 的准确率.比较不同迭代次数的 LSTM 和改进 LSTM 的准确率的实验结果如图 4 所示.

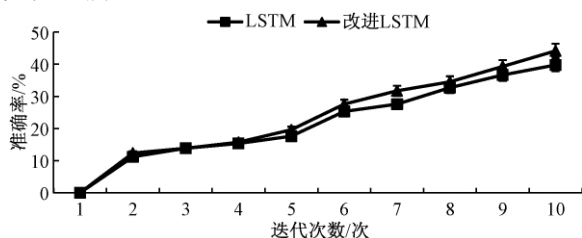


图 4 比较不同迭代次数的 LSTM 和改进 LSTM 的准确率

Fig.4 Compare the LSTM of different iterations and the accuracy of the improved LSTM

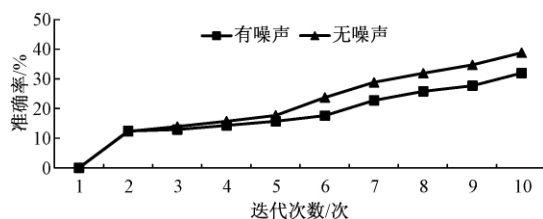


图 5 在有噪声和无噪声环境中对标准的 LSTM 进行测试的识别准确率

Fig.5 identification accuracy of test for standard LSTM in a noisy and noiseless environment

在有噪声和无噪声环境中对标准的 LSTM 进行测试,随着迭代次数的增加,识别准确率上升,在无噪声环境中测试标准的 LSTM 的准确率普遍高于在有噪声环境中测试的准确率.在有噪声和无噪声环境中对标准的 LSTM 进行测试的识别准确率如图 5 所示,结果表明改进的 LSTM 识别错误率较标准的 LSTM 识别错误率降低了 5%.

在有噪声和无噪声环境中对改进的 LSTM 进行测试,随着迭代次数的增加,识别的准确率上升,在无噪声环境中测试改进的 LSTM 的准确率普遍高于在有噪声环境中测试的准确率.在有噪声和无噪声环境中对改进的 LSTM 进行测试的识别准确率如图 6 所示.

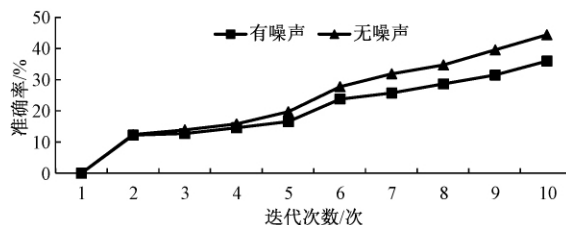


图 6 在有噪声和无噪声环境中对改进的 LSTM 进行测试的识别准确率

Fig.6 identification accuracy of test for improved LSTM in a noisy and noiseless environment

### 4 结论

提出了基于改进的 LSTM 递归神经网络系统,增加从当前 CEC 到输出门的连接,更好地控制每一内存单元输出多少信息,将遗忘门和输入门合成了一个单一的更新门.信息通过输入门和遗忘门将过去与现在的记忆进行合并,长短时记忆神经网络可以选择遗忘之前累积的信息,这样改进的 LSTM 模型可以学到长时期的历史信息,具有更强的鲁棒性.采用基于改进的 LSTM 方法,在 TIMIT 数据集上进行实验.基于改进的 LSTM 递归神经网络系统有效地提升了识别率,提高了语音识别系统的鲁棒性.

## 参考文献:

- [1] LEI Y, SCHEFFER N, FERRER L. A novel scheme for speaker recognition using a phonetically-aware deep neural network [C] // Proc of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. 2014: 1695 – 1699.
- [2] SAK H, SENIOR A, BEAUFAYS F. Long short-term memory recurrent neural network architectures for large scale acoustic modeling [J]. Computer Science, 2014 (11): 338 – 342.
- [3] SAKH, SENIOR A, BEAUFAYS F. Long short-term memory recurrent neural network architectures for large-scale acoustic modeling [C] // Proc of Annual Conference of International Speech Communication Association. 2014: 338 – 342.
- [4] HINTON G, DENG L, YU. Deep neural networks for acoustic modeling in speech recognition [J]. IEEE signal processing magazine, 2012, 29(6): 82 – 97.
- [5] 陶佰睿, 郭琴, 苗凤娟, 等. 基于自适应 mel 滤波器组的 MFCC 特征提取的 SOC 设计 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(3): 11 – 15.
- [6] 余凯, 贾磊, 陈雨强, 等. 深度学习的昨天、今天和明天 [J]. 计算机研究与发展, 2013, 50(9): 1799 – 1804.
- [7] 史笑兴, 顾明亮, 王太君, 等. 一种时间规整算法在神经网络语音识别中的应用 [J]. 东南大学学报, 1999, 29(5): 47 – 51.
- [8] CHEN K, YAN Z J, HUO Q. Training deep bidirectional LSTM acoustic model for LVCSR by a context sensitive-chunk BPTT approach [R]. In Proceedings of Interspeech, 2015.
- [9] CHEN X, WANG Y Q, LIU X Y, et al. Efficient gpu-based training of recurrent neural network language models using spliced sentence bunch [R]. Proceedings of Interspeech, 2014.
- [10] PASCANU R, GULCEHRE C, CHO K, et al. How to construct deep recurrent neural networks [C]. Ar Xiv: 1312.6026, 2013.
- [11] 孙志军, 薛磊, 许阳明, 等. 深度学习研究综述 [J]. 计算机应用研究, 2012, 29(8): 2806 – 2810.
- [12] SCHMIDHUBER J. Deep learning in neural networks: An overview [J]. Neural networks, 2015(61): 85 – 117.
- [13] DU J, DAI L R, HUO Q. Synthesized stereo mapping via deep neural networks for noisy speech recognition [C] // 2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Washington DC: IEEE, 2014: 1764 – 1768.
- [14] XU Y, MO T, FENG Q. Deep learning of feature representation with multiple instance learning for medical image analysis [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Washington DC: IEEE, 2014: 1626 – 1630.
- [15] ABDEL-HAMID O, MOHAMED A, JIANG H, et al. Applying convolutional neural networks concepts to hybrid NN-HMM model for speech recognition [C] // In Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2012: 4277 – 4280.
- [16] BAHDANAU D, CHO K, BENGIO Y. Neural machine translation by jointly learning to align and translate [C]. arXiv preprint arXiv: 1409.0473, 2014.

## Research on Speech Recognition Based on Improved LSTM Deep Neural Network

ZHAO Shufang, DONG Xiaoyu

(Institute of Computer Science and Technology, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** The language model based on neural network LSTM structure, the LSTM structure used in the hidden layer unit, the structure unit comprises a storage unit to store information for a long time, which has a good memory for historical information. But the LSTM in the current input information state does not affect the final output information of the output gate, get less historical information. To solve the above problems, this paper puts forward based on improved LSTM (long short-term memory) modeling method of network model. The model increases the connection from the current input gate to the output gate, and simultaneously combines the oblivious gate and the input gate into a single update gate. The door keeper input and forgotten past and present memory consolidation, can choose to forget before the accumulation of information, the improved LSTM model can learn the long history of information, solve the drawback of the LSTM method is more robust. This paper uses the neural network language LSTM model based on the improved model on TIMIT data sets show that the accuracy of test. The results illustrate that the improved LSTM identification error rate is 5% lower than the standard LSTM identification error rate.

**Key words:** long-short term memory (LSTM); deep neural network; speech recognition

文章编号: 1671-6833(2018)05-0068-05

## 基于自动编码器和 SVM 的轴承故障诊断方法

雷文平, 吴小龙, 陈超宇, 林辉翼

(郑州大学 机械工程学院 振动工程研究所, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 支持向量机(support vector machine, SVM)应用于轴承故障诊断前,首先要提取轴承的特征信号.在以往的特征信号提取中,往往是依据已有的知识模型进行特征筛选.随着近年来深度神经网络(deep neural network, DNN)的应用与推广,自动编码器(auto-encoder, AE)在特征提取方面的优势尤为突出.作为一种无监督的学习方式,AE能够基于数据驱动提取信号的特征值,使得特征提取不再依赖于先验知识,从而让整个故障诊断过程更具智能化.本文运用改进的AE、去噪自动编码器(denoising auto-encoder, DAE),进行轴承信号特征提取,并用SVM进行故障诊断.最终与基于经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)能量熵的SVM对比,反映具有无监督学习方式的DAE-SVM在轴承故障诊断方面的优越性,诊断准确率接近100%.

**关键词:** 支持向量机; 自动编码器; 无监督特征提取; 经验模态分解; 信息熵; 故障诊断

**中图分类号:** TH133.33

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.05.013

### 0 引言

基于SVM的轴承故障诊断本质上是一种模式识别. SVM作为一种经典的分类器,不断地被优化并应用于各种生物信息学、模式识别等问题中<sup>[1]</sup>. Mohammed等提出了基于自适应群体智能(self-adaptive cohort intelligence, SACI)算法的特征选择和SVM模型选择的混合方法,以减小特征冗余从而降低分类计算复杂度,提高SVM的准确性. 姚亚夫等<sup>[2]</sup>将轴承振动信号EMD后得到的瞬时能量熵用于SVM的分类诊断,经过实验验证,该方法能够有效地识别轴承正常状态、内圈故障、外圈故障以及滚珠故障.

从文献[1,2]可以看出,为了提高识别、诊断能力,提取到合理、明显的故障特征是运用SVM进行分类的重要环节. 最近,文献[3]提出了一种基于多目标优化(multi-objective optimization, MO)的EMD方法,任子晖等<sup>[4]</sup>将局部均值分解(local mean decomposition, LMD)加以改进,都取得了更好的特征提取效果. HUANG等<sup>[5]</sup>运用各阶本征模函数(intrinsic mode function, IMF)的时

频熵(time-frequency entropy)实现了对原信号能量分布的准确描述. 此外特征提取也可以通过神经网络实现,神经网络能够灵活地处理数据,在模式识别、分类、预测等方面被广泛地应用,在处理工业大数据方面有广阔的应用前景<sup>[6]</sup>,使机械的故障诊断更加智能化. 其中自动编码器(auto-encoder, AE)作为一种无监督的自学习网络,实现了信号的重构与特征提取,三层网络结构使得输出层的编码矢量成为输入层数据的特征表示<sup>[7]</sup>. Hinton等<sup>[8-9]</sup>提出由深度学习(deep learning, DL)理论构建的DNN,就是先将多个无监督学习的AE串联,构成DNN的多层网络框架进行数据特征提取;然后通过误差反向传播(back propagation, BP)算法的有监督学习,对上述各层AE进行参数调整,使整个DNN具备识别、诊断能力<sup>[10]</sup>.

AE的应用是DL中的重要组成部分. 神经网络中的AE隐含层是一个编码器加上一个解码器,输入数据经过隐含层的编码和解码,到达输出层时,确保输出的结果尽量与输入数据保持一致. 这样做使得维度较低的隐含层能够抓住输入数据的特点,使其特征保持不变. 笔者根据AE本身的

收稿日期: 2018-02-17; 修订日期: 2018-04-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51405453); 河南省高等学校精密制造技术与工程重点学科开放实验室开放基金资助项目(PMTE201301A)

作者简介: 雷文平(1977-),男,郑州大学副教授,博士,主要从事转子动平衡以及转子动力学、故障诊断等相关科研工作, E-mail: lwp@zzu.edu.cn.

特点将 DAE 与 SVM 相结合,以提高 SVM 在轴承故障诊断中的识别能力,并与运用轴承振动信号各阶 IMF 能量熵来进行 SVM 的故障诊断效果对比,体现本方法的优越性.

## 1 相关技术原理

### 1.1 AE 原理

AE 的结构如图 1 所示,分为编码网络 (coding network) 与解码网络 (decoding network).

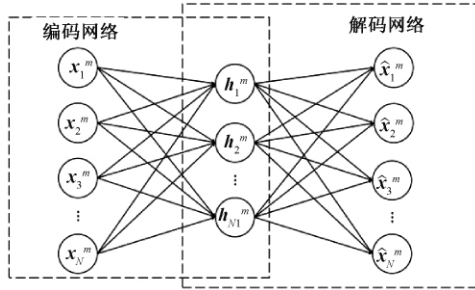


图 1 AE 结构图

Fig. 1 Structure of AE

AE 的输入数据与输出目标是相同的,就是将向量组  $\{x^m\}$  通过编码变成低维的  $\{h^m\}$ ,  $\{h^m\}$  再经过反编码转换回  $\{\hat{x}^m\}$ . 如果在这个过程中输入  $\{x^m\}$  与输出  $\{\hat{x}^m\}$  一致,则认为编码矢量  $h^m$  很好地重构了  $x^m$ . 则上述过程中,自动编码器的输出结果表示为:

$$h^m = f(Wx^m + b), \quad (1)$$

对特征提取结果  $h^m$  进行反编码可得:

$$\hat{x}^m = g(W'h^m + d), \quad (2)$$

最后通过规划  $\{x^m\}$  与  $\{\hat{x}^m\}$  的误差最小问题,求解  $\{W, b\}$ 、 $\{W', d\}$  等参数,

$$\min_{\{W, b\}, \{W', d\}} L(x, \hat{x}) = \min_{W, b} \left( \frac{1}{m} \|x - \hat{x}\|_2 \right), \quad (3)$$

式中:  $f, g$  分别是编码网络和解码网络的激活函数;  $\{W, b\}$ 、 $\{W', d\}$  是网络对应的连接权值和偏置. 上述训练过程的目的是得到  $\{W, b\}$ , 用以实现对任意高维向量  $X$ , 提取到其特征表示  $H$ ,

$$H = f(WX + b). \quad (4)$$

### 1.2 多层 DAE 结构

考虑到实际应用中的复杂情况,为了进一步增加 AE 学习的鲁棒性,将用于重构学习的一部分数据随机添加符合一定统计特征的噪声,然后使得 AE 能够根据噪声的特点估计出没有添加噪声的原始数据,进而提高 AE 的抗干扰能力,这便是去噪自编码器的核心思想<sup>[11]</sup>.

向  $x^m$  中加噪声,可以是将其中的一部分数据随机置零,或者是按照二项随机分布向  $x^m$  中添加

噪声<sup>[12]</sup>,含有噪声的数据表示为  $x_0^m$ . 则 DAE 的训练目标调整为:

$$\min_{\{W, b\}, \{W', d\}} L(x^m, g(W'f(Wx_0^m + b) + d)). \quad (5)$$

一个多层 DAE 的特征提取过程如图 2 所示.

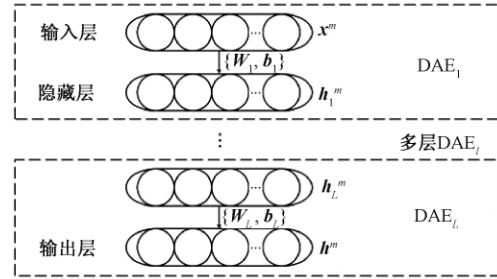


图 2 多层 DAE 的特征提取过程

Fig. 2 Feature extraction process of multi-layer DAE

在经过  $m$  组数据的迭代训练后,获得隐层权值  $W$  以及偏置  $b$ ,便可用于多层 DAE 特征提取模型的参数初始化. 多层 DAE 结构即是 DNN 最基本的结构框架(如图 2 所示),它是由一系列训练好的 DAE 编码网络实现的特征深度提取. 其中第  $l$  层 DAE 特征提取过程为:

$$H_l = f_l(W_l H_{l-1} + b_l). \quad (6)$$

## 2 具体实施方式

### 2.1 特征提取的具体实施方式

运用多层结构的 DAE 网络,通过无监督学习,实现了轴承运转状态的特征提取. 即多层 DAE 特征提取是将该时刻轴承振动频谱作为图 2 中多层 DAE 网络框架的输入,依次对各层 DAE 依据图 1 所述的方式进行参数回归,最终得到该时刻的特征向量  $h^m$ .

为了使提取到的特征具备很好的稀疏性, DAE 的训练目标可进一步演变为:

$$\min_{\{W, b\}, \{W', d\}, k, \xi} [L(x^m, g) + k \sum_{i=1}^m L_{\text{sparse}}(\xi | h_i)], \quad (7)$$

式中:  $k$  稀疏惩罚系数;  $h_i$  表示 DAE 隐藏层第  $i$  个节点的输出;  $\xi$  为一较小的常数,且稀疏控制条件为:

$$L_{\text{sparse}}(\xi | h_i) = \xi \log \frac{\xi}{h_i} + (1 - \xi) \log \frac{1 - \xi}{1 - h_i}. \quad (8)$$

通过以上的改进, DAE 提取特征的稀疏性得以保证,且不增加额外的训练时间. 多层 DAE 的建立及特征提取实现流程如图 3 所示.

### 2.2 训练 SVM 的具体实施方式

如图 3 所示,轴承的状态特征通过 DAE 提取出来后,接着被用于 SVM 的训练和诊断. 将这些特征作为训练样本,并将轴承的 6 种工作状态按

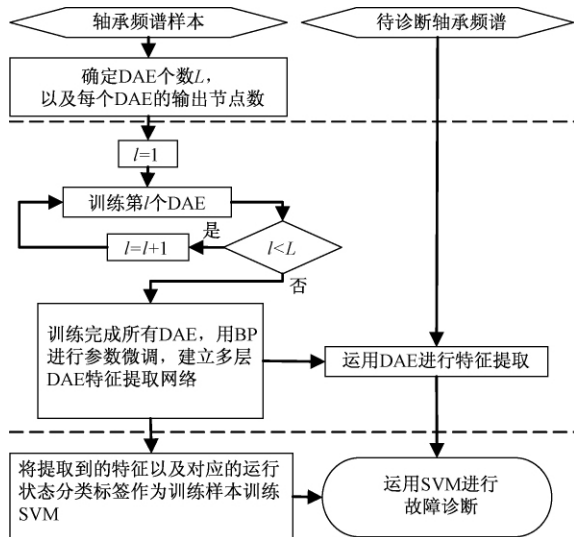


图3 基于DAE的SVM轴承故障诊断流程图

Fig. 3 SVM bearing fault diagnosis flowchart based on DAE

表1中的编号作为SVM的分类标签,进行SVM的训练,使之具有故障诊断的能力.

表1 SVM故障分类标签

Tab. 1 Fault classification label of SVM

轴承工作状态	SVM 分类标签	符号 表示
无故障	0	○
滚动体故障	2	◇
内圈故障	1	□
与载荷方向夹角为0°的外圈故障	4	+
与载荷方向夹角为90°的外圈故障	3	*
与载荷方向夹角为180°的外圈故障	5	▽

### 3 效果对比试验

本试验数据来自美国西储大学轴承数据中心,以12 000 Hz为采样频率,采集电机驱动端轴承不同类型故障的信号.轴承故障程度不一,且电机转速为1 730~1 797 rad/min.

随机选取每种故障类型不同故障程度的振动信号.分别用EMD能量熵和DAE进行特征提取.其中EMD能量熵是指先将信号分解成为若干个IMF分量,设第*i*阶IMF分量的能量为 $E_i$ ,且令<sup>[13]</sup>:

$$p_i = \frac{E_i}{\sum E_i}, \quad (9)$$

则其能量熵为:

$$T_i = - \sum_{j=1}^N p_i \ln p_i. \quad (10)$$

将各阶IMF的能量熵作为轴承运转状态的

表征,达到特征提取的目的,还可以通过剔除某些阶的IMF分量以实现降噪和减少特征冗余.

选取相关性较强的前12阶IMF分量的能量熵作为提取到的EMD能量熵特征向量;同样地,运用上文提出的DAE将原信号频谱进行特征自提取,为使两种方法更具可比性,设定最后一层DAE的输出节点(即上文中 $h^m$ 的长度)也为12.因此,得到每个故障信号的EMD能量熵特征、DAE提取特征均是维度为12的向量.

#### 3.1 提取特征的直观对比

为了直观地观察两种方法提取到的各类故障特征聚集情况,对提取到的特征分别做主成分分析(principal component analysis, PCA),将维度为12的特征向量转换到三维坐标系中.分别如图4、图5所示.

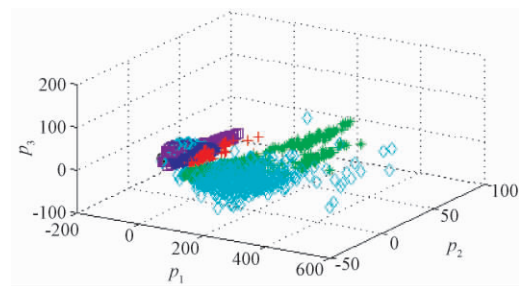


图4 EMD能量熵特征提取分布

Fig. 4 Distribution of EMD energy entropy feature extraction

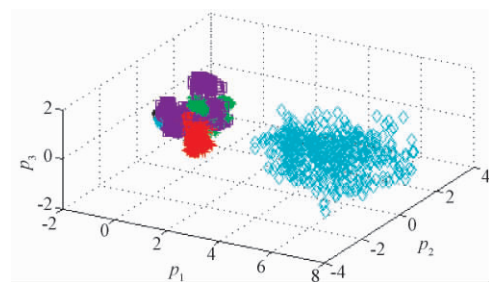


图5 DAE特征提取分布

Fig. 5 Distribution of DAE feature extraction

由图4、图5可以看出,基于DAE特征提取的不同故障特征分布聚散情况较为分明(其中▽数据聚集在被其他数据遮挡着的另一侧).在这两种特征提取方法的基础上,最终运用SVM分别实现等维空间内故障特征的分类.

#### 3.2 故障诊断效果对比

先分别用两种特征提取方式提取到的、包含了不同故障类型的600组12维(12×600)特征向量及其对应的故障类型标签训练SVM.再用两种建立好的特征提取模型,实现6 100组代表轴承不同故障类型的测试数据特征提取,并根据提取



到的 6 100 组故障特征( 12 × 6 100) 诊断其故障类型,对比结果见表 2.

表 2 不同特征提取方法的故障诊断效果对比

特征提取方式	方法结构	训练时间	平均准确率 / %
EMD 能量熵	将得到的 EMD 能量熵直接用于 SVM 分类计算	主要取决于 EMD 分解所用的时间	91. 5
DAE	振动频谱经过隐藏层节点数为 5120-450-12 的三层 DAE 网络,实现特征提取,然后进行 SVM 分类计算	多层 DAE 网络训练好之后,能够直接、快捷地提取特征	99. 7

图 6 为 6 100 组测试数据,其中纵坐标表示故障对应的分类标签编号( 参照表 1),横坐标表示测试数据组数. 基于两种不同的特征提取方法的 SVM 故障诊断结果如图 7 所示.

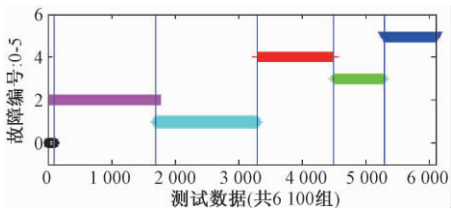


图 6 各测试数据的故障类型  
Fig. 6 The types of fault of test data

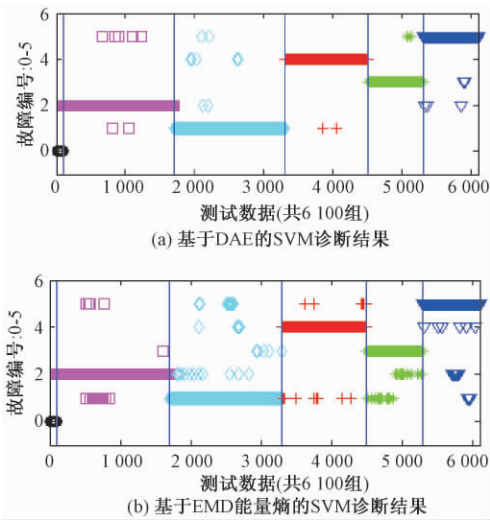


图 7 轴承故障诊断结果  
Fig. 7 The bearing fault diagnosis results

由图 7 可以看出,基于 DAE 特征提取的 SVM 故障诊断明显比基于 EMD 能量熵特征提取的 SVM 诊断准确率高. 在 6 100 组测试数据中,前者出现不到 50 例诊断错误,且经观察分析,误诊故障与实际发生的故障极为相近. 由此可以判断 DAE 是一种更具优势的特征提取方法.

4 结论

本方法主要是针对故障诊断领域,运用基于无监督学习、数据驱动的故障特征提取,来提

高诊断精度. 试验证明 DAE 这一完全自适应的提取方法能够明显起到特征提取的作用,由于 DAE 在特征提取中良好的鲁棒性,避免了由于数据变化而需要建立复杂的特征提取模型;另外,在此基础上建立的故障诊断方法,其诊断精度得到显著的提高. 这一方法是直接以轴承的频谱作为输入的,能够通过 AE 自动地提取故障特征来实现轴承数据的预处理,因此与其他故障诊断方法中需要人为地设计数据预处理方式的情况相比,更显智能化.

本方法并未具体阐述却有研究价值的方面:可以讨论通过一定的方法改善、规范化 DAE 训练过程中加噪参数、DAE 层数、各层输出节点数等,有望达到更高的识别精度.

参考文献:

[1] ALADEEMY M, TUTUN S, KHASAWNEH M T. A new hybrid approach for feature selection and support vector machine model selection based on self-adaptive cohort intelligence [J]. Expert systems with applications, 2017 ( 88) : 118 – 131.

[2] 姚亚夫,张星. 基于瞬时能量熵和 SVM 的滚动轴承故障诊断 [J]. 电子测量与仪器学报,2013,27( 10) : 957 – 962.

[3] GUO T, DENG Z M. An improved EMD method based on the multi-objective optimization and its application to fault feature extraction of rolling bearing [J]. Applied acoustics, 2017( 127) : 46 – 62.

[4] 任子晖,渠虎,王翠,等. 基于补充总体局部均值分解的轴承故障诊断方法 [J]. 郑州大学学报( 工学版),2018,39( 3) : 62 – 66 .

[5] HUANG Y, WANG K, ZHOU Q, et al. Feature extraction for gas metal arc welding based on EMD and time-frequency entropy [J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2017 ( 2 ) : 1 – 10.

[6] LEI Y G, JIA F, LIN J, et al. An intelligent fault diagnosis method using unsupervised feature learning to-

- wards mechanical big data [J]. IEEE Transactions on industrial electronics, 2016, 63 ( 5 ) : 3137 – 3147.
- [7] BENGIO Y. Learning deep architectures for AI [M]. Foundations and trends in machine learning, 2009, 2 ( 1 ) : 1 – 127.
- [8] HINTON G E, SALAKHUTDINOV R R. Reducing the dimensionality of data with neural networks [J]. Science, 2006, 313 ( 5786 ) : 504 – 507.
- [9] KRIZHEVSKY A, SUTSKEVER I, HINTON G E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks [C] // International Conference on Neural Information Processing Systems, Curran Associates Inc. 2012: 1097 – 1105.
- [10] JIA F, LEI Y G, LIN J, et al. Deep neural networks: A promising tool for fault characteristic mining and intelligent diagnosis of rotating machinery with massive data [J]. Mechanical systems & signal processing, 2016 ( 72 ) : 303 – 315.
- [11] ERHAN D, BENGIO Y, COURVILLE A, et al. Why does unsupervised pre-training help deep learning? [J]. Journal of machine learning research, 2010, 11 ( 3 ) : 625 – 660.
- [12] VINCENT P, LAROCHELLE H, BENGIO Y, et al. Extracting and composing robust features with denoising auto-encoders [C] // Proceedings of the 25th International Conference on Machine Learning, ACM, 2008: 1096 – 1103.
- [13] 郑近德,程军圣,杨宇. 多尺度排列熵及其在滚动轴承故障诊断中的应用 [J]. 中国机械工程, 2013, 24 ( 19 ) : 2641 – 2646.

## The Application of SVM Based on Auto-encoder in Bearing Fault Diagnosis

LEI Wenping, WU Xiaolong, CHEN Chaoyu, LIN Huiyi

( Vibration Engineering Research Institute, School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The fault feature should be extracted before the SVM was applied to the bearing fault diagnosis. In the previous feature signal extraction, it was based on the existing knowledge model. With the application and promotion of DNN in recent years, AE had a special advantage in feature extraction. As an unsupervised learning method, AE could extract the features of the signal based on data driven, making the feature extraction no longer depends on prior knowledge, and the whole fault diagnosis processed more intelligent. In this paper, the improved AE、DAE, were used to extract the features of the bearing signals, and the fault diagnosis was carried out by SVM. Finally, by compared with the SVM based on EMD energy entropy feature extraction, the superiority of DAE-SVM with unsupervised learning method was reflected in bearing fault diagnosis, and its diagnostic accuracy was nearly 100% .

**Key words:** SVM; auto-encoder; unsupervised feature extraction; EMD; energy entropy; fault diagnosis

文章编号: 1671-6833(2018)05-0073-06

# 基于差速驱动的 AGV 驱动单元分析与改进设计

赵华东, 江南, 雷超帆

(郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 商用自动导引车 (AGV) 通常采用链传动机构进行动力传动, 其车轮的固定结构可以视为悬臂式结构. 因此, 容易发生驱动轮“外掰”和启停“冲击”问题, 这限制了 AGV 在频繁和快速加速或减速过程中的精确运动. 本文以某公司设计的 AGV 为例, 通过反复试验和数值模拟, 从结构和受力分析入手, 找出了产生这种现象的原因: 驱动单元的“L”形悬挂机构引起了较大的应力, 使各个零部件的接触间隙放大; 链传动机构的使用使 AGV 在频繁启停或正反向运动时, 容易在链轮和链条之间形成间隙. 之后从工程角度提出了新的驱动单元结构, 解决了上述问题, 同时大幅减小了机构中的应力, 提高了传动精度, 为 AGV 的设计提供了一种更实用、更优化的驱动结构.

**关键词:** AGV; 简支式直连; 驱动单元; 传动效率和精度; 仿真分析; 工程应用

**中图分类号:** TH122; TH22

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.05.012

## 0 引言

随着我国人工成本的逐渐升高, 对产品质量, 自动化、柔性生产的要求提高, 商用自动导引车 (AGV)<sup>[1]</sup> 作为智能制造和柔性生产的关键环节, 因其能实现高效、经济、灵活的无人化生产, 广泛应用于工厂自动化生产线、仓储物流、机场和港口的物料传送<sup>[2-3]</sup>.

近年来, 国内外研究人员对 AGV 的结构和运动进行了大量的研究. 王殿君等通过四轮差速原理, 运用 ADAMS 软件分析了 AGV 转弯过程<sup>[4]</sup>. 刘国刚通过 ANSYS 仿真, 对 AGV 车架进行了轻量化设计<sup>[5]</sup>. 夏田等通过建立 AGV 的静力学和动力学模型, 采用 Matlab/Simulink 建立了仿真模型并仿真了一个驱动轮静止另一个转动的运动方式<sup>[6]</sup>. 刘治华等通过疲劳理论, 采用 ADAMS 和 NCODE 分别对轨道车飞碟游乐设备的驱动轴进行了动力学和疲劳仿真分析, 并得出驱动轴的寿命云图<sup>[7]</sup>.

笔者以某公司设计的一款悬臂结构、链传动的 AGV 为例, 研究驱动轮“外掰”和启停“冲击”的问题. 该 AGV 的工况为: 8 小时工作制, 用于轴承内外圈自动化生产线上将码垛完成后的轴承内

外圈及托盘, 转移到智能仓储的对应入口处, 然后返回等待托盘再次装满, 如此往复. 其中轴承内外圈及托盘总重量为 168 kg. AGV 平均循环周期为 42 min. 工厂路面为环氧地坪漆. 笔者通过反复试验和建模仿真分析的方法, 确定了“外掰”及“冲击”的原因, 提出了一种新的结构, 且对新机构进行了校核. 从结构应力, 传动效率和精度上进行对比分析, 验证了新机构的合理性.

## 1 问题分析

### 1.1 结构与现象描述

该 AGV 车身长 600 mm, 宽 500 mm, 高 300 mm, 为差速驱动、六轮布局形式, 结构如图 1 所示.

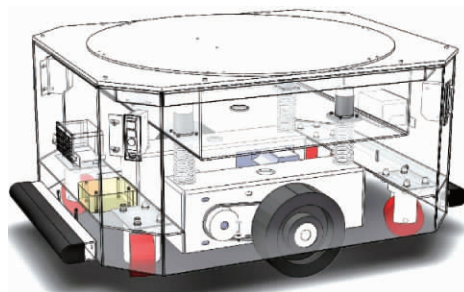


图 1 AGV 整体结构图

Fig. 1 The whole structure of AGV

小车车体总质量为 57.15 kg, 最大载重量为

收稿日期: 2018-01-30; 修订日期: 2018-04-07

基金项目: 国家自然科学基金民航联合基金重点项目 (U1333201)

作者简介: 赵华东 (1978—), 男, 河南开封人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事机械设计及理论方面研究, E-mail: huadong@zzu.edu.cn.

200 kg, 驱动单元部分质量为 24.34 kg, 最大运行坡度  $5^\circ$ , 最大运行速度 1 m/s, 运行方向为双向. 小车车身与从动轮直接连接, 和驱动单元通过弹簧和导轨滑块连接在一起. 这样驱动轮始终着地, 防止因制造误差或地面不平导致打滑, 造成小车运动失真, 且有减震<sup>[8]</sup>的作用.

由于 AGV 小车壳体侧面板不可拆卸, 故将 AGV 小车空载置于高于地面的平台上, 在车轮外侧面与地面处固定一角尺作为参照标尺. 然后在 AGV 车身上逐渐加载 200 kg 重物, 通过观察车轮外侧面与角尺间的间隙变化进行试验. 观察到满载时, 驱动轮与地面接触处因受力而向外倾斜, 即驱动轮“外掰”, 如图 2 所示.

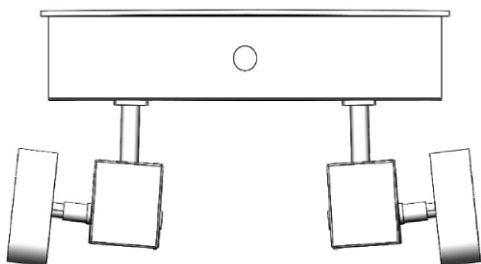


图 2 “外掰”现象示意图

Fig. 2 Sketch of the phenomenon of “outside breaking”

试验时将 AGV 断电侧翻放置, 用较小力拨动驱动轮时, 车轮在一定的范围内转动, 但驱动电机并未产生相应转动, 而是链轮轮齿在链节距的空隙中晃动. 在 AGV 启停时会出现因机构空隙产生的明显冲击, 即启停“冲击”. 针对上述现象, 分别从结构受力和传动机构特点进行分析, 找出导致该现象的原因, 并提出了新的驱动单元机构.

## 1.2 静力分析

### 1.2.1 静应力预测

由材料力学知识可知: AGV 驱动单元是一个“L”形的悬臂结构, 如图 3 所示, 将在接触点 A 处、B 处和 C 处形成较大的应力集中<sup>[9]</sup>. 为进一步确定应力较大的区域, 现进行有限元分析.

### 1.2.2 有限元分析

(1) 简化模型和定义材料. 本机构用 SolidWorks Simulation 进行有限元仿真分析<sup>[10-11]</sup>. 为保证结果可靠, 将模型中不影响受力的部分进行简化, 只保留驱动轮轮轴、驱动单元壳体、圆柱导轨和与之接触的壳体进行有限元分析. 材料的弹性模量为 210 GPa、密度为  $7\,800\text{ kg/m}^3$ 、屈服强度为 220 MPa, 选择普通碳钢材料.

(2) 设定边界条件. 小车重力完全施加在驱

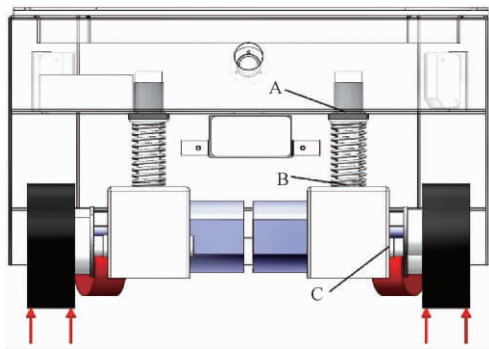


图 3 驱动单元受力示意图

Fig. 3 Force diagram of driving unit

动单元上, 故为分离出的驱动单元添加平面约束, 使其只能沿竖直方向运动. 添加弹性支撑代替车轮. 与直线轴承相接触的直线导轨添加“接触”约束. 动力壳体与直线轴承之间的弹簧用“弹簧”来代替. 效果如图 4(a) 所示.

(3) 添加载荷. 满载时驱动单元上的等效质量为 232.81 kg, 重力加速度取  $9.806\,65\text{ m/s}^2$ . 室内平地上运动, 选择载荷系数为 1.2. 载物台上重物放置区内施加载荷  $2\,739.7\text{ N}$ . 车轮与地面接触的摩擦系数选为 0.25. 先利用无摩擦仿真得出接触面正压力, 再在接触面添加等效摩擦力  $342.5\text{ N}$ .

(4) 划分单元格. SolidWorks Simulation 为保证对各种几何体和面的网格划分的通用性, 统一采用一阶四面体、二阶四面体、一阶三角形、二阶三角形进行网格划分, 且大量试验保证了算法的可靠性和效率. 对于非压力容器的薄板件, 在进行网格划分时推荐使用单层二阶四面体进行网格划分结果更优<sup>[12-13]</sup>. 故本仿真统一采用二阶实体四面体进行板件和实体的网格划分.

总体采用基于曲率的网格, 雅可比点数为 4 点, 调整好单元格的精度进行网格划分<sup>[14]</sup>, 未细化区域最大单元格为  $28.545\,5\text{ mm}$ , 最小单元格为  $5.709\,1\text{ mm}$ , 增长比率为 1.6.

对关注的区域进行单元格的细化. 选取应力集中区的零件和边界线: 直线轴承、驱动轮轴、动力单元壳体、导轨和动力壳体边线, 使用网格控制进行网格划分.

细化部分最大网格为  $5.119\,26\text{ mm}$ , 最小网格为  $3.358\,93\text{ mm}$ . 网格节总数为 946 585, 单元总数为 644 846. 驱动单元模型网格划分, 如图 4(b) 所示.

(5) 进行有限元分析. 运行有限元解算器进行解算, 得出等效应力分布云图, 如图 5 所示.



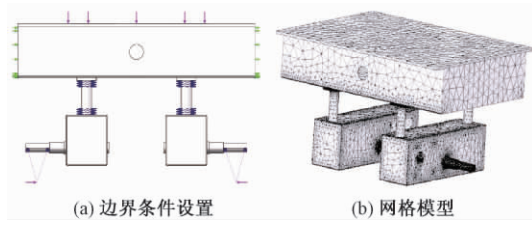


图4 边界条件和网格模型

Fig. 4 Boundary conditions and grid model

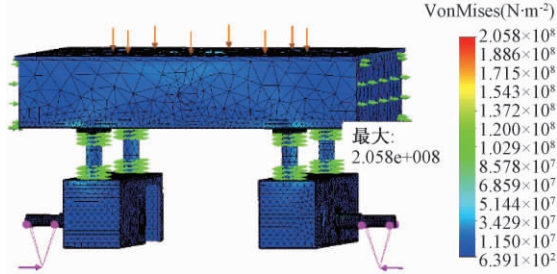


图5 原系统等效力分布图

Fig. 5 Equivalent stress distribution diagram

### 1.2.3 结果分析

利用 Simulation 的设计洞察功能以颜色着重显示出应力较大的区域,如图6所示。

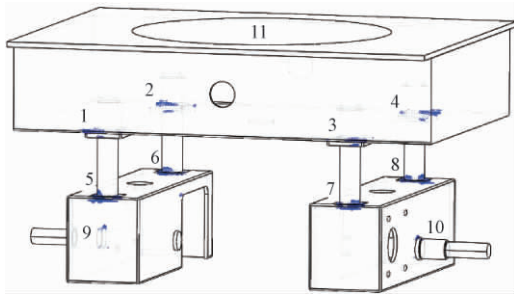


图6 应力较大区域

Fig. 6 Larger stress area

从图6中可以看到,标号1~10处是应力较大区域,11代表上壳体。其平均应力、最大应力、均方根值见图7。最大应力出现在4处,为205.8 MPa,而材料的屈服强度为220.6 MPa,安全系数仅为1.07。一般车辆设计要求重要部位的安全系数大于等于2。

驱动单元“L”形悬臂结构引起了过大局部应

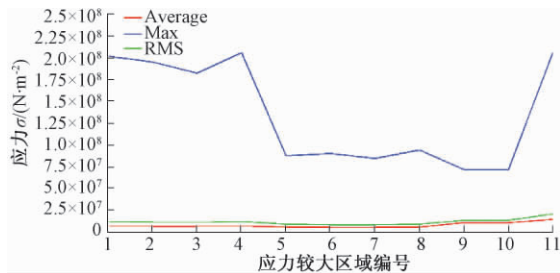


图7 原系统应力较大区域数据图

Fig. 7 Large stress area data diagram

力,同时,这样的结构会将车体接触处的各个间隙进一步放大,使车轮的“外掰”现象更加明显。

### 1.3 传动结构分析

在AGV启停时,有明显的因机构间隙引起的位移,即“空隙冲击”现象,将影响AGV的运动精度。AGV底部实物结构如图8所示。

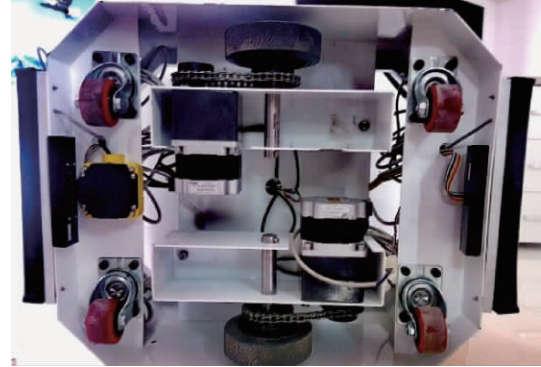


图8 AGV底部实物结构图

Fig. 8 Physical bottom structure of AGV

AGV的驱动电机与驱动轮之间靠链传动连接,而链传动在有双向运动时会引起较大的冲击。在非连续运动时,没有二次定位机构的辅助,常常会有“蹿动”,丢失精度。

## 2 新型驱动单元结构设计

### 2.1 AGV驱动单元设计

#### 2.1.1 方案设计

针对AGV运行中遇到的上述问题,新的机构需要避免车轮的长悬臂和链传动,同时考虑两个驱动轮的间距与干涉,以及成本问题,并要求能对应力状况、可靠性有所改善。

将驱动轮轴由悬臂梁结构改为简支梁的形式,驱动轮轴两端通过轴承与驱动壳体连接在一起。同时,将原有电机改为弧锥直角式中空减速电机,使电机和驱动轮轴直接相连。该连接方式将避免因悬臂结构产生的弯矩,同时省去中间的链传动环节,传动精度、传动效率都有所提高。

#### 2.1.2 选型设计

AGV运动时沿运动方向上所受的加速度阻力、斜坡阻力、风阻、滚动摩擦阻力和静摩擦提供的驱动力满足方程<sup>[15]</sup>:

$$F_k = F_a + F_G + F_R + F_D, \quad (1)$$

$$F_a = \delta m \frac{dV}{dt}, \quad (2)$$

$$F_G = mg \sin \alpha, \quad (3)$$

$$F_D = \frac{C_D \rho_a A V^2}{2}, \quad (4)$$

式中:  $F_k$  为静摩擦提供的驱动力;  $F_a$  为等效加速度阻力;  $F_G$  为坡度阻力;  $F_R$  为车轮滚动摩擦阻力;  $F_D$  为空气阻力;  $\delta$  为旋转质量的换算系数;  $m$  为车体和货物总质量;  $V$  为速度;  $t$  为时间;  $\alpha$  为坡度角, 当坡度角较小时有  $\sin \alpha = \alpha$ ;  $C_D$  为风阻系数;  $\rho_a$  是空气密度, 为  $1.2258 \text{ kg/m}^3$ ;  $A$  为迎风面积。

对小车单个驱动单元的驱动轮进行受力分析可得方程:

$$F_k R_k = M_k, \quad (5)$$

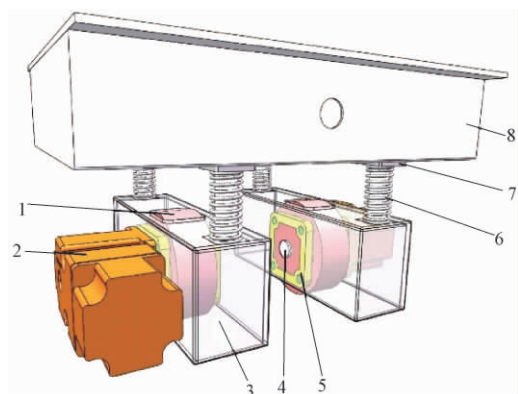
$$F_R = f_R G, \quad (6)$$

式中:  $R_k$  为车轮半径;  $M_k$  为车轮上驱动力矩;  $F_R$  为车轮滚动摩擦阻力;  $f_R$  为滚动摩擦系数;  $G$  为单个驱动轮上承受的车体和重物的总重力。

通过上式的受力分析, 计算出驱动力矩、额定转速、减速比和各传动件、连接件电机参数。通过对设计寿命和传动精度及最大扭矩的要求, 计算选择了轴承、键、轴和一些连接件的相应型号<sup>[16]</sup>。

## 2.2 新型驱动单元模型建立

根据设计的加工件和选用的标准件尺寸, 建立 AGV 驱动单元的三维模型。其结构如图 9 所示。



1—驱动轮; 2—驱动电机; 3—驱动壳体; 4—驱动轮轴;  
5—法兰轴承; 6—弹簧; 7—直线轴承; 8—车身上壳体

图 9 新型动力单元结构图

Fig. 9 Structure of new type of power unit

驱动单元使用简支梁式直连驱动电机的形式有效避免了驱动单元的整体弯矩, 降低了材料应力, 进而避免了满载运行时车轮大幅“外掰”问题。由于电机的安装孔可以调节, 电机直连的方式并没有让电机承受来自径向的压力, 而且这种连接方式提高了传动的精度和可靠度。

## 3 驱动单元对比分析

### 3.1 应力分析对比

为深入研究新机构的应力, 现对新驱动单元

进行有限元分析。①模型简化和材料定义与原驱动单元相同。②设定边界条件时, 代替车轮的弹性支撑按车轮实际接触位置添加, 其他设置和原驱动单元相同。③添加载荷, 设置和原驱动单元相同。④划分单元格。细化零件按推荐良好品质设置, 最大网格为  $5.28438 \text{ mm}$ , 最小网格为  $3.39031 \text{ mm}$ 。划分网格后, 节总数为 924 859, 单元总数为 627 313, 如图 10 所示。⑤运行解算得到仿真结果如图 11 所示。应力较大区域数据如图 12 所示。改进前后应力较大区域数据对比如图 13 所示。

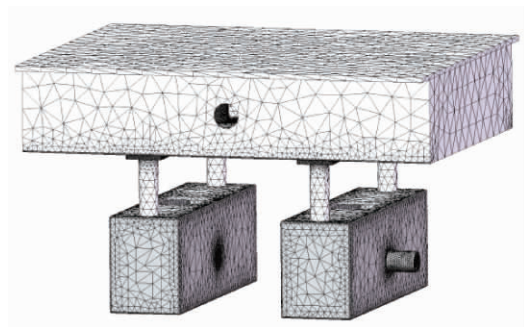


图 10 驱动单元网格模型

Fig. 10 The mesh model of driving unit

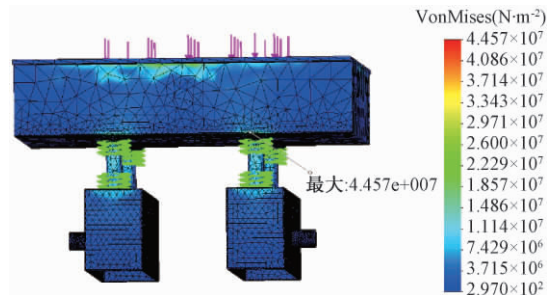


图 11 改进系统等效应力分布图

Fig. 11 Equivalent stress distribution diagram

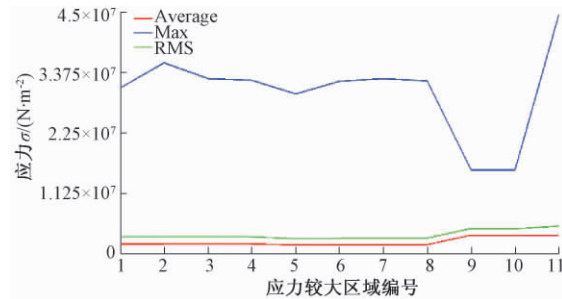


图 12 改进系统应力较大区域数据图

Fig. 12 Large stress area data diagram

由 AGV 新型驱动单元的结构模型等效应力分布云图和应力较大区域对比图可以看到, 在材料、尺寸、分析条件一样的情况下, 新的驱动单元最大的应力出现在 3 号区域附近, 为  $44.57 \text{ MPa}$ , 远远小于原有驱动单元的最大应力  $205.8 \text{ MPa}$ ,



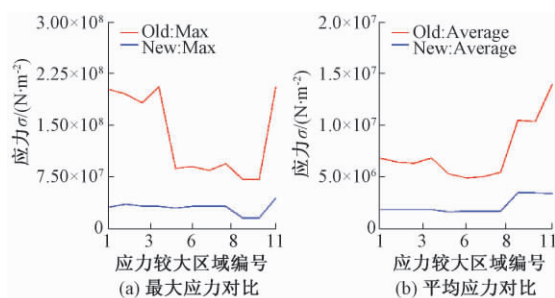


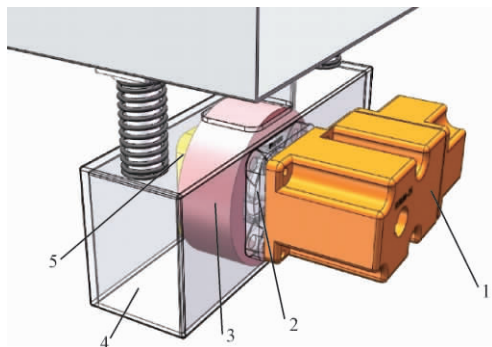
图13 应力较大区域数据对比图

Fig.13 Large stress area data comparison diagram

同时也远远小于材料的屈服强度220.6 MPa。此时,新机构的安全系数大大增加,为4.95,满足安全系数大于等于2的要求。改进后应力集中区域最大应力值和平均应力值都有明显下降。其他条件不变时,结构的变化使最大应力降低为原来的21.66%,这为AGV车体的轻量化设计提供了较大空间。

### 3.2 精度分析对比

在新的驱动单元中,避免使用大间隙传动机构滚子链的使用,使用弧锥直角空输出轴减速电机与驱动轮直接相连。在减速器上选用弧锥直角空输出轴的减速器,使连接的空间减小,方便两个驱动单元单体间距调整。经计算选型的弧锥直角减速电机的减速比为5,传动级数为2级,较少的传动环节和较低的传动级数能有效地减小传动中由各机构接触间隙形成的误差。其结构如图14所示。



1—弧锥直角空输出轴减速电机; 2—驱动轮轴;  
3—驱动轮; 4—驱动壳体; 5—法兰轴承

图14 新型动力单元单侧结构图

Fig.14 New power unit unilateral structure

与原来驱动单元相比,新驱动单元消除了“空隙冲击”现象,同时减少了中间传动的环节,消除了中间环节的误差,同时减少了误差积累,使传动的精度大大提高。

## 4 结论

新驱动单元在受力上,避免了“外掰”问题,

使最大应力降低了78.34%,机构安全系数提升了4.63倍;改进了传动机构,降低了传动级数,减小了传动间隙,提高了传动系统的精度;在制造成本上,减少了机加工量,提高了机构可靠性,降低了设计加工成本和维护更换成本。结果表明,新型驱动单元解决了传统驱动单元车轮“外掰”和传动机构“大空隙”问题,为AGV驱动单元的设计提供了一种方便、可靠的结构。

## 参考文献:

- [1] 昆明船舶设备集团有限公司,北京起重运输机械设计研究院. GB/T 30030—2013 自动导引车(AGV)术语[S]. 北京:中国标准出版社,2014.
- [2] 任云星,马世杰. AGV+工业机器人在精密搬运中的应用[J]. 山西电子技术, 2016,186(3): 51-52.
- [3] NERADILOVA H, FEDORKO G. Simulation of the supply of workplaces by the AGV in the digital factory [J]. Procedia engineering, 2017, 192(6): 638-643.
- [4] 王殿君,关似玉,陈亚,等. 双驱双向AGV机器人运动学分析及仿真[J]. 制造业自动化, 2016,38(3): 42-46.
- [5] 刘国刚. 重载AGV轻量化设计研究[J]. 制造业自动化, 2014,36(5): 101-103.
- [6] 夏田,李医中,金超,等. 差速转向的AGV动力学分析及仿真[J]. 煤矿机械, 2012,33(3): 63-64.
- [7] 刘治华,刘博见,许伟超,等. 飞碟游乐设备驱动轴疲劳失效分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2017, 38(5): 91-96.
- [8] 蒋小龙. AGV差速驱动单元的减震结构设计[J]. 机械工程与自动化, 2017, 200(1): 142-143.
- [9] 范本隽,陈安军. 简明工程力学教程[M]. 北京:科学出版社,2010: 143-160.
- [10] 李耀明,田进,赵湛,等. 联合收割机行走底盘变速箱齿轮的疲劳分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 106-110.
- [11] 李立顺,李红勋,孟祥德. 基于Solidworks Simulation的随车吊吊臂整体有限元分析[J]. 制造业自动化, 2011,33(5): 114-115.
- [12] 陈超祥,胡其登. SOLIDWORKS Simulation 基础教程[M]. 北京:机械工业出版社,2016.
- [13] 苗玉刚,赵峰,何斌. 基于Solid works Simulation的工装压板有限元分析及优化设计[J]. 煤矿机械, 2015,36(11): 192-194.
- [14] STATEN M, CANANN S. Post refinement element shape improvement for quadrilateral meshes [J]. American society of mechanical engineers, applied mechanics division, AMD, 1997,220(6): 9-16.

[15] 龚贤武,唐自强,吴德军. 两档纯电动汽车动力传动系统参数设计与仿真[J]. 郑州大学学报(工学版),2015,36(3):39-43.

[16] 濮良贵,纪明刚. 机械设计[M]. 北京:高等教育出版社,2006.

## The Analysis and Improved Design of a New AGV Drive Unit Based on Differential Driving

ZHAO Huadong, JIANG Nan, LEI Chaofan

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

**Abstract:** Commercial automatic guided vehicles (AGV) usually used chain transmission mechanism for power transmission, and the fixed structure of the wheel could be considered as cantilever structure. Therefore, the problem of wheels "tilting" and start-stop "shocking" easily occurs, which limited the accurate movement of the AGV during frequent and rapid acceleration or deceleration. In this paper, AGV designed by a company was taken as an example. Through repeated tests and numerical simulations, the structure and force analysis were used to find out the reasons for this phenomenon. The larger stress was caused by the "L"-shaped suspension mechanism, which magnified the contact gaps of each component; the use of the chain transmission mechanism could make it easy for the AGV to form gaps between the sprocket and the chain when the AGV started, stopped, moved forward, backward frequently. Then a new drive unit structure was put forward from the engineering point of view, which could solve the above problems, at the same time greatly could reduce the stress in the mechanism, could improve the transmission precision, and could provide a more practical and optimized driving structure for the design of AGV.

**Key words:** AGV; simply supported straight connection; drive unit; transmission efficiency and accuracy; finite element; engineering applications

---

(上接第 57 页)

## Image Deblurring Using Adaptive Alternate Direction Multiplier Overlapping Group Sparsity Method

WANG Jie, LI Shengguang, SONG Yifan, BAI Ke, MA Tianlei

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

**Abstract:** Image deblurring technology played an important role in the image processing field. Total variables regularization with overlapping group sparsity was gradually applied to the image deblurring problem. It could preserve image edge characteristics and suppress the generation of the staircase effect. When using the alternate direction multiplier (ADMM) method to solve the overlapping group sparsity total variables model, the penalty factor could greatly influence the deblurring process and it was not easy to adjust. Therefore, a method was proposed to adaptively adjust the penalty factor according to the recovered image when the model was being optimized. This method adaptively restored the best picture and ensured the robustness of the algorithm while guaranteeing the speed of calculation. Experimental results showed that the proposed method outperformed other recovery models in terms of PSNR, SNR, relative error and other evaluation indices.

**Key words:** deblurring; total variation; overlapping group sparsity; ADMM; adaptive

文章编号: 1671-6833(2018)05-0079-06

# 搅拌罐内基于 EDEM-FLUENT 耦合的多相流混合数值模拟

王建明, 邱钦宇, 何讯超

(山东大学 机械工程学院, 山东 济南 250061)

**摘 要:** 利用 EDEM-FLUENT 联合仿真, 采用 VOF (Volume of Fluid) 法和欧拉-拉格朗日模型, 组成离散固体与连续的液相和气相的混合模型, 对搅拌罐内固-液-气三相流动进行数值模拟, 探究固体颗粒在搅拌罐内的运动状态和自由液面对其分散的影响. 基于 FLUENT 软件的 VOF 法对气-液连续相建模, 很好地捕捉气液分界面, 模型更接近实际工况, 直观显示自由液面的变化; 基于离散元法使用软件 EDEM 对固体颗粒进行离散单元建模, 通过两软件的联合仿真直观模拟固体颗粒在罐内的位置信息和运动情况, 得到的固体颗粒分散情况与利用欧拉法得到的结果一致.

**关键词:** 搅拌; 多相流; EDEM-FLUENT 联合仿真; 气液分界面

**中图分类号:** TF351.5; TF704.3

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.05.015

## 0 引言

在液体环境中添加固体催化剂可以催化液体环境中的化学反应, 这是工业上常用的提高生产效率的做法, 但是单纯添加固体催化剂可能会产生固体催化剂在液体中的漂浮或沉降, 所以需要搅拌使固体催化剂游离在液体环境, 这一过程的固体、液体甚至气体的混合状态会因催化剂的性质或搅拌的参数而有所不同, 对此, 国内外学者展开了诸多研究. 在计算固-液两相流混合问题时, 多数学者将固体相和液体相均视为连续的流体, 通过获取各相的浓度及分布状况来描述混合效果, 这种替代方法忽视了离散介质的形状、粒径及其相互作用<sup>[1]</sup>. 曾彤等开展水模实验研究, 主要分析搅拌器转速及浸没深度与固体颗粒卷吸数量和卷吸高度的关系, 并得到最优的搅拌器转速和浸没深度的阈值<sup>[2]</sup>. 童长仁等采用滑动网格法和 VOF 法, 对容器形状、有无挡板和挡板宽度等影响自由液面形状的因素进行研究, 结果表明: 在无挡板圆柱形容器中, 自由液面漩涡深度与搅拌器转速呈近似线性关系, 有无挡板的方形容器均能抑制水平环流造成的漩涡<sup>[3]</sup>. 杨锋苓等以中心和偏心无挡板搅拌槽为研究对象, 首次采用分离涡模型和 VOF 法研究搅拌槽内湍流状态下的自由

表面及流场特性, 发现仿真结果稍低于文献中的实验结果, 证明该方法适用于研究搅拌槽内自由表面的流动问题<sup>[4]</sup>. 高玉米针对 KR 法搅拌罐内的流动问题, 运用 FLUENT 软件进行数值仿真, 采用 VOF (volume of fluid) 法捕捉自由液面漩涡, 结果表明: 液面漩涡随搅拌时间逐渐形成, 由搅拌初期的不规则波动发展到后来具有一定深度、稳定的抛物线状漩涡, 液面漩涡的形成对实现固体颗粒与流场的充分混合有积极影响<sup>[5]</sup>. Glover 等使用 VOF 法和剪应力传输模型对搅拌槽内的湍流流动和多相流混合情况进行仿真分析, 发现自由表面的速度严重影响槽内固体相的浓度分布<sup>[6]</sup>. 李良超等通过使用双电导电极探头测量槽壁附近的液相速度, 开展搅拌槽固液两相体系混合的试验研究, 结果表明: 当槽内固相浓度较低时, 固相离底悬浮所需的临界液相速度仅与其尺寸、形状及密度等因素有关, 而与桨型、桨的离底间隙等因素无关<sup>[7]</sup>. 杨敏官等采用试验方法主要研究搅拌器转速、叶轮离底高度和固相浓度等因素对两相流混合效果的影响, 结果表明: 槽底中心位置和罐壁区域会产生物料堆积; 较低的叶轮离底高度有利于槽内固体颗粒的混合<sup>[8]</sup>. Tamburini 等采用非侵入式的 LSIA 技术测量了固-液两相体系中的固体颗粒浓度, 发现固体颗粒主要聚集在叶轮平面

收稿日期: 2017-12-27; 修订日期: 2018-03-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51375267)

作者简介: 王建明 (1962—), 男, 山东济南人, 山东大学教授, 博士, 研究领域为计算力学及喷丸强化技术, E-mail: wangjianming@sdu.edu.cn.

上方和下方的两个环形面内,当粒子质量或浓度较大时该现象更为明显<sup>[9]</sup>.张强强采用 DEM-CFD 耦合技术对多种颗粒模型在水中的沉降过程展开数值研究,通过对颗粒运动过程的跟踪,得到颗粒下落和回弹过程中随时间变化的竖向高度和速度,仿真结果与实验结果有较好的一致性<sup>[10]</sup>.

大多数学者在固-液两相流数值研究中将固体颗粒视为另一连续相,以固相和液相的浓度分布评判固-液混合效果,显然离散的固体颗粒与连续流体相的物理特性差别显著.笔者首次应用 EDEM-FLUENT 联合仿真技术进行搅拌操作中固-液-气三相流数值建模,其中固体颗粒采用离散元法建模,水和空气采用连续流体相建模,使用 VOF 模型捕捉气液分界面,据此可获得固体颗粒的运动轨迹和流场特征参数的动态仿真结果,以便于对工艺效果进行直观显示并做相应评价.

## 1 固-液-气多相流混合模型

### 1.1 EDEM 参数设置

(1) 固体颗粒参数设置. EDEM-FLUENT 耦合模型属欧拉-拉格朗日模型,其中用欧拉法控制液体和空气的连续介质,而用拉格朗日法控制离散相的固体颗粒,假设采用等直径、同材质的固体颗粒, EDEM 软件会根据提供的颗粒直径和密度计算出质量和体积.利用 ICEM 软件划分好的网格导入 EDEM Geometry 选项卡中,设置重力加速度.在搅拌操作中,需要考虑不同离散形式的固体之间的相互碰撞以及固体与罐壁碰撞,故在 EDEM 软件中使用 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型.搅拌罐和固体颗粒参数设置如表 1 所示.

表 1 EDEM 软件中搅拌罐和固体颗粒的属性设置

Tab.1 The properties set of stirred tank and solid particle in EDEM

名称	数值
连接模式	赫兹明德林连接
粒子泊松比	0.25
粒子剪切模量 / Pa	1e+06
粒子密度 / (kg·m <sup>-3</sup> )	30
粒子直径 / mm	1
几何泊松比	0.4
几何剪切模量 / Pa	7e+10
粒子间复原系数	0.5
粒子间静摩擦系数	0.5
粒子间动摩擦系数	0.01
粒子-几何复原系数	0.5
粒子-几何静摩擦系数	0.5
粒子-几何动摩擦系数	0.01

(2) 颗粒工厂设置.在搅拌操作环节中,固体颗粒从颗粒工厂进入搅拌罐,为了模拟该进入过程,在自由液面上方 40 mm 处设置 4 个对称分布的直径为 160 mm 的球形颗粒工厂,考虑到颗粒数目受计算能力限制,设置每个颗粒工厂在 1 s 内随机产生 500 个固体颗粒,颗粒通过自由落体运动下落到液面上.

(3) 时间步长设置.固体颗粒在发生接触碰撞过程中,以瑞利波形式消耗的能量占总能耗的 70%,在 EDEM 中将时间步长设为 2~5 s.

(4) 建立耦合连接.将 EDEM 中关于耦合接口的工具窗口打开,选择 Start,使 EDEM 处于监听耦合信号状态,等待与 FLUENT 建立连接.

### 1.2 FLUENT 参数设置

(1) 加载 edem\_udf 耦合文件.调用 FLUENT 中 Define 菜单下的 Compiled 命令加载 edem\_udf 文件夹.

(2) 模型及数值算法设定.采用非结构四面体单元进行网格划分,将网格模型导入到 FLUENT 中,并做网格质量检测.由于要捕捉气-液相的分界面探究自由液面的变化对固体分散的影响,使用 VOF 模型,设置空气为第一相,液体为第二相,在气-液分界面处设置标准大气压,搅拌罐顶部设置为压力出口,将罐体侧壁及底面定义为无滑移壁面边界条件;将位于静区域中的搅拌轴定义为运动壁面边界条件,其绝对转速与动区域一致;将动区域搅拌器壁面定义为运动壁面边界条件,其相对转速设为零,即搅拌器与动区域网格同步旋转.

(3) 耦合模型设置.在 FLUENT 的 Model 选项卡中选择 edem couple 模型,选用拉格朗日耦合模型,将固体模型视为离散的固体相.耦合区域为整个流体域,包括动区和静区两部分,采用默认的松弛因子.由于需要考虑液体与固体颗粒之间的曳力和液体对固体颗粒的浮力,故选择 Ergunand Wen & Yu 曳力模型和固-液两相升力模型.

### 1.3 仿真模型验证

为验证上述仿真模型的正确性,开展了相应的水模试验研究,该水模试验装置如图 1 所示,搅拌罐直径为 523 mm,液体深度为 414 mm,搅拌器直径为 203 mm,潜入深度为 276 mm,叶片数目为 4 片,转速为 160、240、320 r/min,通过在搅拌罐侧壁竖立标尺,分别测量自由液面稳定状态下的漩涡深度和漩涡高度,并与相应参数数值模拟结果

进行比较.



图1 水模试验装置

Fig. 1 Water model experiment device

图2为水模试验和数值模拟得到的漩涡深度及高度随转速变化图.从图2可以看出,数值模拟和水模试验得到的自由液面漩涡深度和漩涡高度基本一致,其中两者的最大相对误差仅为3.1%、6.5%.该对比结果验证了上述数值模型的正确性和有效性.

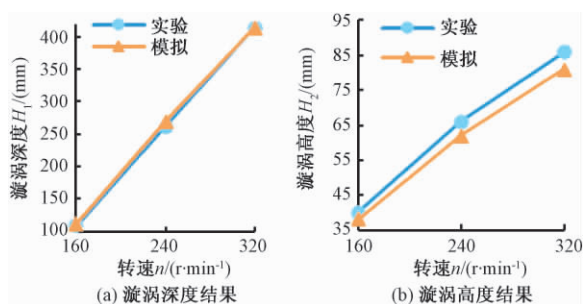


图2 数值模拟与水模试验结果对比

Fig. 2 Comparison between water model experience and numerical simulation

对图2中数值模拟曲线进行多项式拟合,分别得到漩涡深度和漩涡高度随转速变化的多项式表达,

$$H_1 = 1.906n - 195.8, \quad (1)$$

$$H_2 = 0.269n - 4.167. \quad (2)$$

## 2 耦合模型仿真结果及分析

### 2.1 自由液面变化和流速场分布

基于 EDEM 与 FLUENT 联合仿真的方法,在 FLUENT 中使用 VOF 法捕捉气液分界面,在 EDEM 中使用离散元模型追踪固体颗粒群的运动过程.为了探究该耦合模型中自由液面漩涡深浅和流速场对离散化固体颗粒运动规律的影响,首先讨论自由液面的变化过程.

图3是在4叶搅拌器转速为160 r/min,浸没深度为214 mm工况下,通过 FLUENT 软件获取

的不同时刻下自由液面变化过程,蓝色部分为空气,红色部分为冷态水.由图3可以看出,整个搅拌过程中存在明显且均匀的带状气液分界面,初始时刻自由液面保持静止,随着搅拌操作的持续进行,自由液面逐渐下凹,呈V字形,自由液面的漩涡底部延伸至搅拌器叶轮上表面后达到稳定状态.

图4为上述工况下的搅拌罐内流速场矢量图.由图4可以看出,罐内叶轮四周流速分布相对均匀,在叶端处存在径向射流,在运动至搅拌罐壁时形成上下两部分回流,向上流动的液体受卷吸向液面处流动,向下流动的液体大部分返回至叶轮处继续循环,小部分液体在壁面涡流的带动下构成一个循环.搅拌器叶轮正下方存在流动死区,严重阻碍了固体颗粒与此处液体的混合.

### 2.2 固体颗粒分布变化

通过基于离散元 EDEM 软件和 FLUENT 软件的联合仿真,可获取单个颗粒或颗粒群在不同时刻的位置、速度和受力等信息.

图5为上述工况下,通过 EDEM 软件获取的不同时刻下固体颗粒在搅拌罐内的分布状况图.由图5可以看出,在初始时刻,离散的固体颗粒从液体表面随着搅拌过程的逐渐进行,自由液面逐渐下凹,固体颗粒在浮力和液面波形作用下聚集在漩涡中心处,并开始沿搅拌轴向下运动;当自由液面漩涡底部延伸至搅拌器叶轮上方时,随水流运动下沉的固体颗粒被叶轮打散,然后沿叶轮径向向外运动;当颗粒运动受到搅拌罐壁的阻碍时,沿罐壁分成上下两股流动;向上流的固体运动至液面处,再次被卷入漩涡中,开始新一轮循环流动;向下流的固体颗粒在随流体运动过程中,一小部分颗粒受到浮力与搅拌罐壁碰撞的影响做无序运动,大部分颗粒则被重新卷吸到搅拌器叶轮处,进而被叶轮打散,开始新一轮循环流动.由此可以看到,在多相流混合搅拌罐内,固体颗粒在搅拌器作用下形成4股主要的循环流动.

### 2.3 固体颗粒分布统计

为了直观分析固体颗粒在搅拌罐内的分散特点,利用 EDEM 软件建立 Grid Bin Group,将稳定流场划分成等体积的  $3 \times 1 \times 4$  网格区域,如图6所示.考虑到流场的对称分布,选取 A、B、C、D、E、F 6个网格区域统计0~10 s各区域内的颗粒数目,统计结果如图6、图7所示.



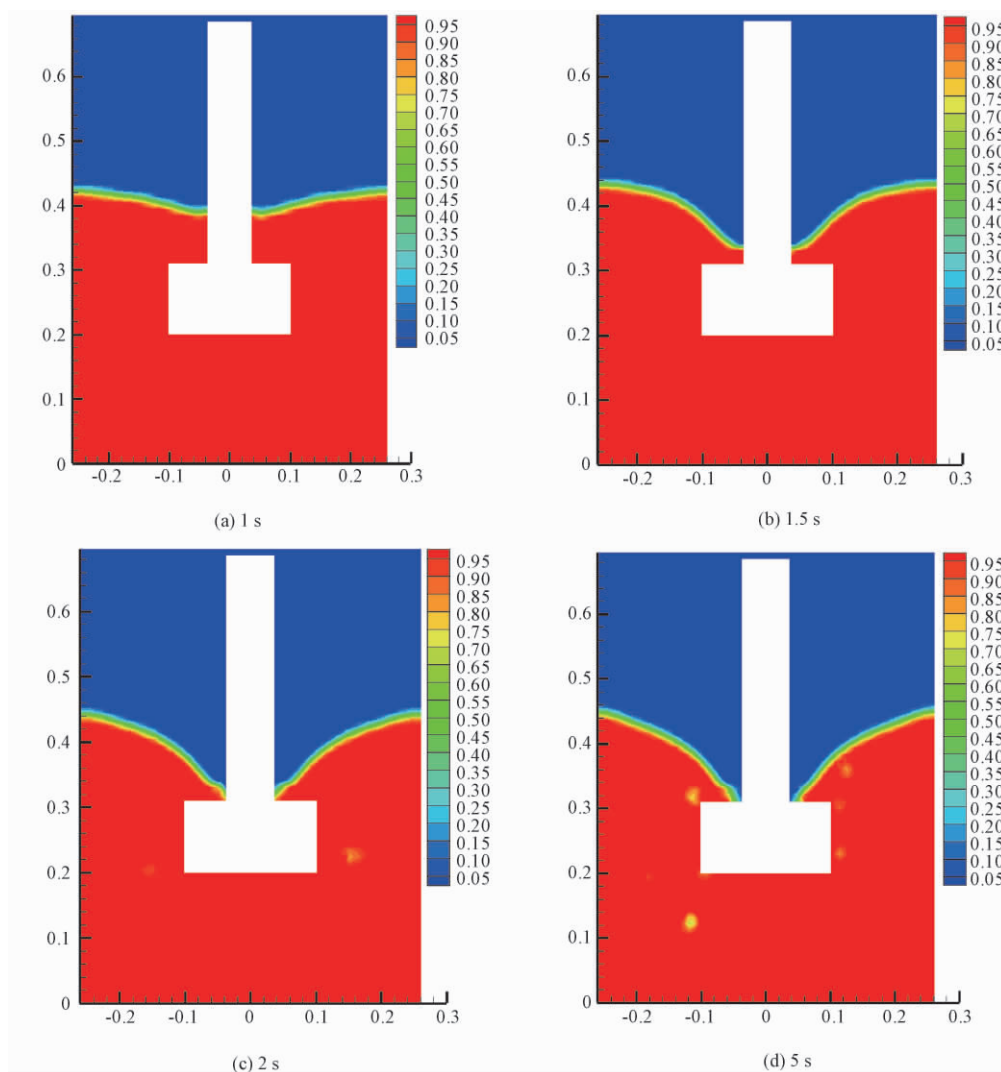


图3 不同时刻的自由液面变化图

Fig.3 Free surface changes at different time

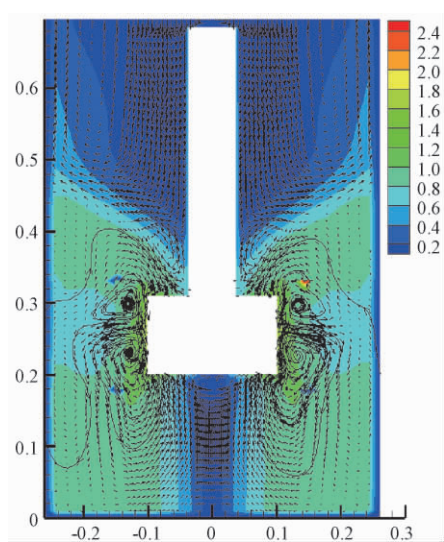


图4 XOZ 断面流速场矢量图

Fig.4 Velocity field vector at XOZ section

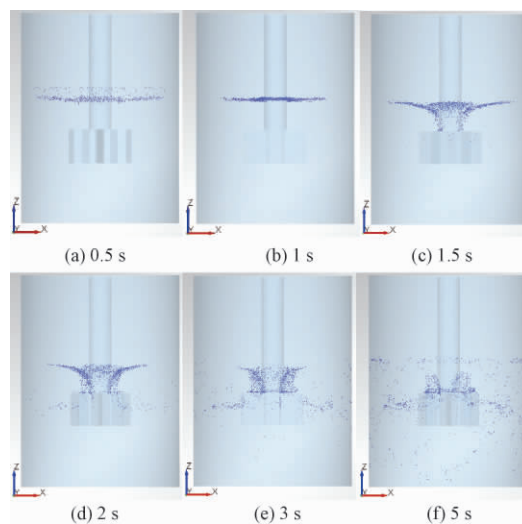


图5 不同时刻固体颗粒位置分布图

Fig.5 Solid particle position distribution at different time



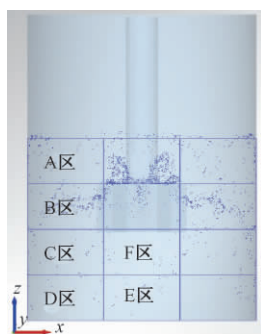


图6 搅拌流场区域划分

Fig. 6 Regional division for stirring flow field

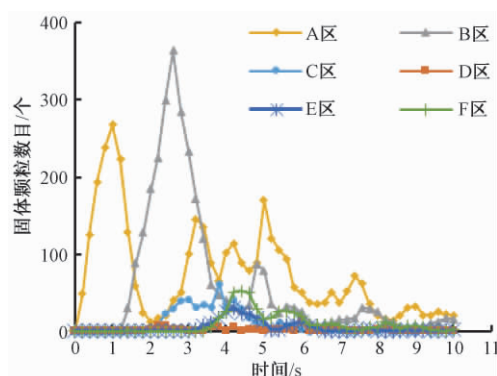


图7 不同区域固体数目随时间的变化

Fig. 7 The number of solid agents in different areas changes with time

网格 A 区域是液面靠近搅拌罐壁的区域,在初始时刻,固体颗粒以每秒 500 粒的产生速度从颗粒工厂自由下落,在 1 s 时达到最大值.当颗粒向搅拌轴附近聚集,并随自由液面漩涡下潜时,网格 A 区域中的颗粒数目逐渐减少.当固体再次向液面聚集时,A 区域中的固体颗粒数目逐渐增多.

网格 B 区域靠近搅拌器叶轮端部,当自由液面漩涡底部延伸至叶轮上部,固体被打散并沿径向排出,进入 B 区.当 B 区的颗粒运动至搅拌罐壁时,将分流成向上进入 A 区和向下进入 C 区的两部分.

网格 C 区域靠近搅拌器叶轮左下方,由于固体颗粒密度较小,沿径向排出的固体颗粒受到搅拌罐壁阻碍时,大部分颗粒上浮至 A 区域,约 1/3 的颗粒进入 C 区域,使得固体颗粒在搅拌器叶轮上方的数目比下方多.

网格 D 区域为搅拌罐底部,网格 E、F 区域位于搅拌器叶轮的下方,受流动死区的影响,这 3 个区域内的固体颗粒数目相对较少.

图 8 为多相流混合模型中,采用欧拉-欧拉法将固体颗粒视为拟流体,通过初始时刻平铺

式投放固体颗粒得到稳定状态下固体浓度分布图,与笔者基于 EDEM-FLUENT 耦合模型下得到的不同区域固体颗粒数目统计结果比较可知,稳定时刻下二者的固体颗粒分散规律基本一致,即固体颗粒主要分布在搅拌器叶轮周围的扇形区,且搅拌罐上部分布的固体浓度较下部大,而受到流动死区的影响,叶轮正下方固体颗粒浓度极低.

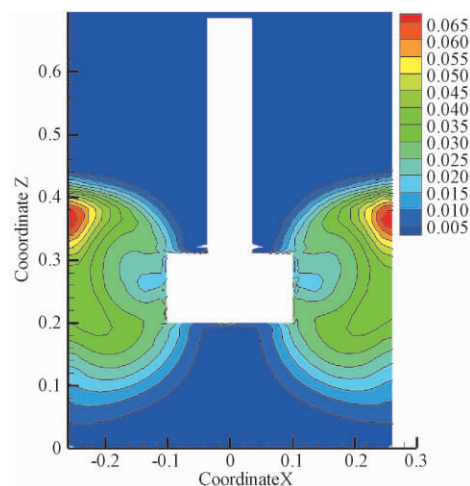


图8 平铺式工况下固体浓度分布云图

Fig. 8 Solid state distribution cloud map under tile condition

## 2.4 单个固体颗粒运动轨迹

利用 EDEM 软件可以提取单个颗粒随时间变化的运动轨迹,观察不同固体颗粒的不同运动轨迹;图 9(a)展示了固体颗粒从颗粒工厂下落后受搅拌作用,随自由液面漩涡下移,在碰撞搅拌器叶轮后,被打散沿径向排出,在受到搅拌罐壁阻碍后,向上运动至液面,并在此后继续被液体卷吸,进入循环流动.图 9(b)展示了被搅拌器叶轮径向排出的固体颗粒在接触到搅拌罐壁后,开始沿罐壁向下运动的轨迹,并在流场带动下返回至叶轮,进行下一轮循环流动.

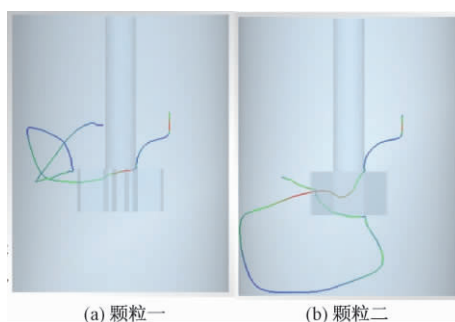


图9 单个颗粒运动轨迹

Fig. 9 Motion trajectory of single particle

### 3 结论

研究表明: EDEM-FLUENT 耦合技术可以运用到搅拌罐内多相流混合数值模拟中,其模型更接近实际工况,通过对自由液面、流场和固体颗粒分散的分析可知,固体颗粒分散形式受自由液面漩涡位置和流场的影响,当自由液面漩涡底部延伸至搅拌器叶轮处,固体颗粒被打散,且受到流场径向流特点的影响沿径向排出.该多相流混合过程较为复杂,只有将固体颗粒处理成离散相才更符合实际,才能得到包括单个固体颗粒运动轨迹在内的更加直观和丰富的仿真结果.通过对流场内固体颗粒数目的统计可知,基于 EDEM-FLUENT 耦合的固-液混合数值模型,得到的固体颗粒分散情况与利用欧拉法得到的结果相一致,对于轻密度的固体颗粒,其在搅拌器叶轮上部分布范围较广,在搅拌罐底部和叶轮正下方的流动死区固体的数目较少或浓度极低.

### 参考文献:

- [1] 黄波,陈晶晶. 基于 CFD-EDEM 重介质旋流器内煤颗粒运动特性分析[J]. 煤矿机械, 2015, 36(7): 268-270.
- [2] 曾彤,欧阳德刚,李具中,等. 铁水罐 KR 机械搅拌式脱硫水模试验研究及应用[J]. 冶金信息导刊, 2007(3): 27-29.
- [3] 童长仁,黄金堤,李俊标,等. 基于 Fluent 的自由液面搅拌流场数值模拟[J]. 能源研究与管理, 2010(4): 33-35.
- [4] 杨锋琴,周慎杰,张翠勋. 无挡板搅拌槽内的自由表面湍流流场研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(2): 179-183.
- [5] 高玉米. KR 法铁水脱硫罐内铁水流动数值模拟[J]. 科技致富向导, 2012(9): 377-378.
- [6] GLOVER G M C, FITZPATRICK J J. Modelling vortex formation in an unbaffled stirred tank reactors[J]. Chemical engineering journal, 2007, 127(1): 11-22.
- [7] 李良超,张仲敏,黄雄斌. 固液搅拌槽内近壁区液相速度研究[J]. 北京化工大学学报, 2005, 32(1): 33-38.
- [8] 杨敏官,来永斌. 搅拌槽内固液悬浮特性的试验研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(6): 186-192.
- [9] TAMBURINI A, CIPOLLINAL A, MICALÉ G, et al. Particle distribution in dilute solid liquid unbaffled tanks via a novel laser sheet and image analysis based technique[J]. Chemical engineering science, 2013(87): 341-358.
- [10] 张强强. 基于 DEM-CFD 耦合的颗粒在水中沉降过程仿真分析[D]. 长春: 吉林大学生物与农业工程学院, 2014.

## Numerical Simulation of Multi-phase Flow Mixing in Stirring Tank Based on EDEM-FLUENT Coupling

WANG Jianming, QIU Qinyu, HE Xunchao

(School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** By means of EDEM-FLUENT simulation and VOF( Volume of Fluid) method and Euler-Lagrangian model, a mixture model of discrete solid, continuous liquid and gas phase was constructed to simulate the three-phase flow with solid-liquid-gas in a stirring tank. The effect of the moving state of solid particles in stirring tank and free liquid level were explored. The gas-liquid continuous phase modeling based on VOF method using FLUENT software could capture gas-liquid interface well and the model was closer to the actual working condition. Based on the Discrete Element Method ( DEM) , the discrete element modeling of solid particles was established and its position information in the tank was simulated intuitively by the joint simulation of the two software. The dispersion of solid particles was consistent with the results obtained by Euler method.

**Key words:** stirring; multiphase flow; EDEM-FLUENT joint simulation; gas-liquid interface

# 不同掺合料对土坯墙泥浆抗压强度影响研究

童丽萍, 李 聪

(郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 开展泥浆立方体抗压强度试验, 以研究不同含量粗砂、石灰对泥浆立方体抗压强度的影响及其之间的相关关系, 寻找不同掺合料的最优配合比, 为土坯墙的建造改良和加固提供理论数据. 试验结果表明: 随着粗砂含量的增加, 试块抗压强度呈现先增大后减小的趋势; 掺和石灰对试块抗压强度略有提高, 随石灰含量的增加, 试块抗压强度变化不明显. 泥浆抗压强度与掺合料之间呈良好的 3 次多项式关系.

**关键词:** 土坯墙; 泥浆; 掺合料; 立方体试块; 抗压强度

**中图分类号:** TU521.3

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.05.009

## 0 引言

随着自然资源的大量消耗, 生态环境日益恶化, 气候变暖、能源危机等引起人们重视, 可持续发展的建筑理念深入人心<sup>[1]</sup>. 土坯建筑是一种良好的绿色建筑形式, 其材料无需烧结, 取之自然, 碳排放少, 节能环保, 具有良好的生态性能, 它既是传统文化的传承与保护, 又能适应旅游业等新兴产业<sup>[2-4]</sup>. 在人们日益为生态环境担忧, 倡导可持续发展的今天, 它以独特的生态性能引起了学术界的广泛关注<sup>[5]</sup>.

泥浆是砌筑土坯墙体的主要材料, 对提高土坯墙体整体受力性能具有重要作用<sup>[6]</sup>. 近年来, 专家学者对泥浆的材料特性进行了大量的研究并取得一定的研究成果. 根据研究成果, 骨料种类及含量、含水率、石灰、纤维等添加料对泥浆立方体试块的抗压强度具有显著影响<sup>[7-10]</sup>. 然而由于生土材料地域不同, 其矿物含量离散性较大, 现阶段对掺合料耦合作用影响及敏感性研究较少, 泥浆强度对土坯砌体及墙体受力性能研究较为匮乏, 不同掺合料对土坯墙泥浆抗压强度的机理影响不明确<sup>[11-13]</sup>, 因此研究不同掺合料对泥浆抗压强度的影响, 进而研究不同掺合料泥浆对土坯砌体及墙体的影响是很有必要的.

笔者通过土坯墙泥浆抗压强度试验, 以稻草

含量为定量, 以粗砂、石灰为变量, 分析试验的破坏过程及结果, 研究不同掺合料对泥浆抗压强度的影响, 给出泥浆的合理配合比, 为进一步研究不同掺合料泥浆对土坯墙受力性能提供参考.

## 1 试验概况

### 1.1 试验材料

试验制备了 25 种土样, 分别在天然土中添加定量的稻草和不同含量的粗砂和石灰. 土料和稻草取自河南省郑州市, 稻草长度为 2~3 mm, 粗砂采用水洗砂, 试验前土料用孔径 5 mm 的筛网过筛, 水洗砂用孔径 0.5 mm 和 2 mm 的土工筛过筛.

### 1.2 试件制作

参照《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T 70—2009), 结合目前生土材料的研究, 选边长为 100 mm 的立方体试块抗压强度作为生土材料的标准尺寸, 每组制作 5 个. 天然土样与稻草(掺合量为 0.5%<sup>[14]</sup>)、粗砂、石灰配合比(与土质量比)如表 1 所示.

采用精确度为 0.5 g 的电子秤称量土样、稻草、粗砂以及石灰, 用三角铲拌合均匀后, 加入水搅拌均匀, 控制含水率在 35% 左右<sup>[15]</sup>. 塑料试模内涂刷薄层机油, 将拌制好的泥浆一次性装满 100 mm 混凝土试模, 用人工振捣方法, 捣棒均匀

收稿日期: 2018-02-19; 修订日期: 2018-04-05

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划课题资助项目(2015BAL03B03)

作者简介: 童丽萍(1960—), 女, 陕西周至人, 郑州大学教授, 博导, 主要从事村镇综合防灾与建筑节能研究和传统营造技术的保护与创新研究, E-mail: tongliping@zzu.edu.cn.

地由边缘向中心按螺旋方式插捣 25 次,使泥浆高出试模顶面 6 ~ 8 mm,待表面水分稍干后,用土工刀将高出试模部分的泥浆沿顶面刮去并抹平<sup>[16]</sup>.制作完成后静置 48 h,然后对试块进行拆模、编号、称重.试块拆模后应在实验室常温下养护 28 d,养护完后称重,并用游标卡尺测量各试件的长宽高.

表 1 土样配比及试件个数

Tab.1 Proportion of soil sample and number of specimens

试件组号		泥浆掺合料的参量/%		
		稻草	粗砂	石灰
A		0.5	—	—
B		0.5	30、40、50、60	—
C		0.5	—	2、4、6、8
D	D1	0.5	30	2、4、6、8
	D2	0.5	40	2、4、6、8
	D3	0.5	50	2、4、6、8
	D4	0.5	60	2、4、6、8

### 1.3 试验步骤

泥浆立方体试块抗压强度试验,采用 300 kN 电液伺服万能试验机,可自动记录试件的荷载和位移,试验时选择量程为 0 ~ 20 kN.进行抗压强度试验时,首先将试件放置在试验机的下压板上,使加载面中心与试件中心对正,若试件表面不平整,采用细砂找平.在正式加载前预压一次,预压荷载 0.5 ~ 1.5 kN,以保证试件与加载面紧密接触.试件放置完成后,采用荷载控制的加载方法进行连续加载,加载速率 0.03 ~ 0.05 kN/s,控制试件 6 ~ 10 min 破坏,记录破坏现象及破坏荷载.

## 2 试验结果与分析

### 2.1 稻草因素影响

图 1 为稻草试块抗压强度试验破坏过程,在试件加载初期,荷载与位移成线性比例关系,此阶段为弹性阶段.当加载至破坏荷载的 45% ~ 55% 时,有轻微的脆裂声,此时试件内部的稻草部分被拉裂.随着荷载的增加,脆裂声密集,试件表面出现细微裂缝,如图 1(a).裂缝一般首先出现在试块的边角部位,此时试块上部开始掉渣,接着边缘土体有崩落现象,有稻草裸露至外部,如图 1(b).接近破坏荷载时,表面裂缝多而细并上下贯通;达到破坏荷载后,试件没有立刻破坏,此时仍然具有一定的承载能力,稻草的作用得以发挥;当荷载急剧下降至破坏荷载的 75% 左右时,下降速度变

慢,试件大部分被压崩,试件破坏[如图 1(c)],试验结束.

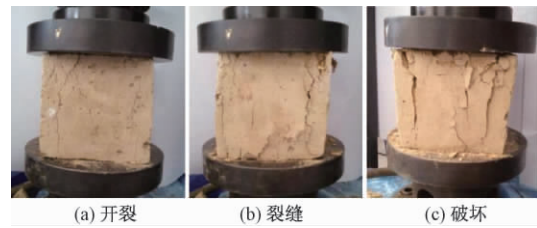


图 1 掺合稻草试块抗压强度试验破坏过程

Fig.1 Failure process of rice straw-mixed specimens for compressive strength tests

掺合稻草泥浆立方体试块抗压强度试验结果如表 2,其荷载位移曲线及拟合曲线如图 2 所示.从表 2 中可以看出,添加稻草的泥浆立方体试块抗压强度为 0.91 ~ 1.23 MPa,平均值为 1.08 MPa.图 2 表明,试块经历了弹性阶段、开裂阶段、破坏阶段,其破坏过程和混凝土类似.在试件加载初期,荷载位移曲线呈直线,斜率较小,有一个压密阶段,此阶段持续时间较短.拟合曲线中 AB 段趋近于直线,试件土体处于弹性变形阶段;BC 段成凸形,试件土体开始屈服,产生微裂缝、鼓胀,并进一步发展;曲线 C 点为峰值(位移为 3 mm 左右),试件达到破坏荷载;曲线 CD 段呈下降趋势,裂缝发展迅速,试件破坏.

表 2 A 组试块抗压强度试验结果平均值

Tab.2 Average compressive strength of the cube specimens group A

编号	破坏荷载 / kN	破坏位移 / mm	抗压强度			
			数值 / MPa	平均值 / MPa	标准差	变异系数
A1	11.63	3.52	1.23			
A2	8.91	1.54	0.91			
A3	11.01	2.24	1.12	1.08	0.104	0.097
A4	10.85	2.83	1.11			
A5	10.15	2.64	1.04			

### 2.2 粗砂含量影响

图 3 为稻草粗砂试块抗压强度试验破坏过程,由于试块中同样掺加了重量比 0.5% 的稻草, B 组试块与 A 组破坏现象类似.当加载至破坏荷载的 55% ~ 70% 时,表面出现开裂裂缝,开裂荷载与 A 组试块相比较,裂缝除出现在试块边角部位及偏向边缘处外,还明显出现在试块中部,如图 3(a)、(b) 所示.随着荷载的增加,试块上部边缘处有少量土块掉落,裂缝逐渐增多并缓慢发展至贯通,此时稻草被拉结,断裂声密集;达到破坏

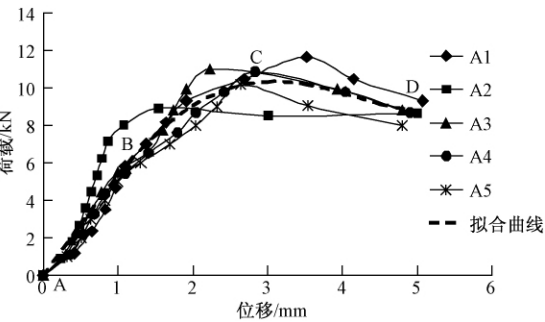


图 2 A 组立方体试块荷载-位移曲线及拟合曲线  
Fig.2 Load-displacement curves and fitting curves of the cube specimens in group A

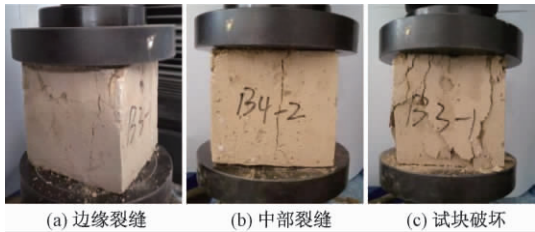


图 3 掺合稻草粗砂试块抗压强度试验破坏过程  
Fig.3 Failure process specimens with rice straw and rough sand during compressive strength tests

荷载后,试块裂缝急剧增宽,但没有立即溃散,仍然有一定的承载力;继续加载,试块四周崩裂,呈现延性破坏,如图 3(c)所示。

以 B2 组掺合 40% 的粗砂为例具体分析试验结果,如表 3 和图 4 所示。分析可知,曲线 AB 段斜率较小,试件土体处于压密阶段,内部空隙变小;曲线 BC 段趋近于直线,试件土体处于弹性变形阶段;加载至破坏荷载的 65% 左右,荷载随位移增长速度变缓,CD 段呈凸形,试件土体开始屈服,产生微裂缝、鼓胀,并进一步发展;曲线 D 点为峰值(位移为 3 mm 左右),试件达到破坏荷载;曲线 DE 段呈下降趋势,裂缝发展迅速,试件破坏。

表 3 B2 组试块抗压强度试验结果平均值  
Tab.3 Average compressive strength of the specimens in group B2

编号	破坏荷载 / kN	破坏位移 / mm	抗压强度			
			数值 / MPa	平均值 / MPa	标准差	变异系数
B2-1	13.95	3.38	1.44			
B2-2	13.12	2.34	1.33			
B2-3	13.91	2.92	1.44	1.45	0.134	0.093
B2-4	16.14	1.92	1.64			
B2-5	13.34	2.69	1.39			

不同粗砂含量的试块抗压强度试验结果如表 4,不同粗砂含量立方体荷载位移拟合曲线如

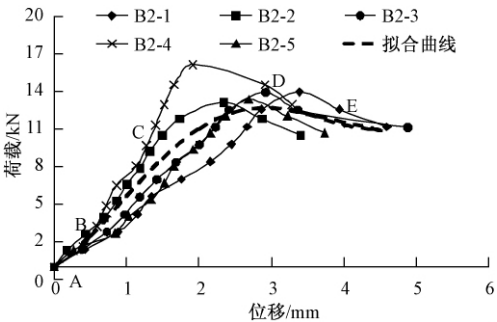


图 4 B2 组立方体试块荷载-位移曲线及拟合曲线  
Fig.4 Load-displacement curves and its fitting curves of the cube specimens in group B2

图 5。由表 4 可知,不同粗砂含量的试块抗压强度为 1.21 ~ 1.45 MPa,相对 A 组提高了 12.0% ~ 34.3%。由图 5 可知,当粗砂含量为 30% ~ 40% 时,随着含砂量的增高,立方体试块抗压强度增大,说明粗砂在土体中起到一定的骨架作用,增加了土体之间的咬合力,从而增大土体抗压能力。当掺加粗砂比例为 40% 时,试块破坏荷载达到最大,此时试块具有一定的压密阶段,变形能力增加显著。当粗砂含量为 40% ~ 60% 时,试块破坏荷载逐渐降低,有两个原因:一是粗砂所占体积较大,加之有稻草的存在,两种掺合料没有与土体形成良好的黏结,内部存在空隙,导致试块强度降低;二是粗砂含量较大,加载过程中,粗砂与土体之间产生的微裂缝增多,使试块强度降低。

表 4 B 组试块抗压强度试验结果平均值  
Tab.4 Average compressive strength of the specimens in group B

编号	破坏荷载 / kN	破坏位移 / mm	平均值 / MPa	标准差	变异系数
B1	13.03	2.63	1.33	0.089	0.067
B2	14.09	2.65	1.45	0.134	0.093
B3	12.98	2.39	1.32	0.080	0.061
B4	11.817	3.388	1.21	0.082	0.068

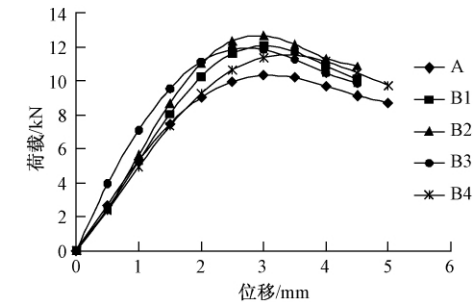


图 5 不同粗砂含量立方体试块荷载-位移拟合曲线  
Fig.5 Load-displacement curves of the cubic specimens with different coarse sand content



对掺合粗砂试块抗压强度与粗砂含量进行回归分析,发现试块抗压强度与粗砂含量  $x(0 \leq x \leq 60\%)$  呈现良好的 3 次多项式关系,如式(1)所示:

$$y = -0.000\ 01x^3 + 0.000\ 6x^2 - 0.001\ 1x + 1.078\ 9, \\ R^2 = 0.965\ 5. \quad (1)$$

### 2.3 石灰含量影响

图 6 为掺合稻草石灰试块抗压强度试验破坏过程.试块在加载初期,同样经历弹性阶段,当加载至破坏荷载的 40%~55% 时,试件发出轻微的脆裂声,此时内部稻草轻微拉裂,由于石灰凝结硬化,试块表面土体脆性较大,表面崩裂如图 6(a)所示.随着荷载增加,内部形成贯通裂缝并急剧增加,当达到破坏荷载后,土体崩落加剧,试件迅速破坏.由于稻草的拉结作用,试块整体呈延性破坏,但表面土体破坏现象与 A 组、B 组有所不同,呈层状崩落,如图 6(b)所示.

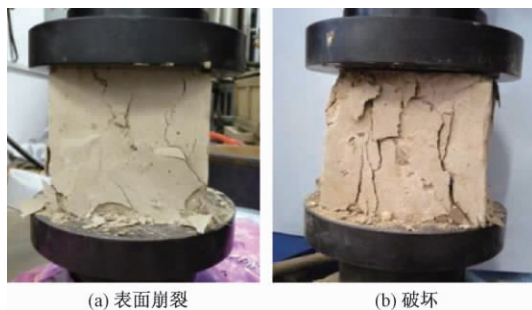


图 6 掺合稻草石灰试块抗压强度试验破坏过程

Fig. 6 Failure process of the specimens with rice straw and lime during the compressive test

掺合不同石灰的试块试验结果如表 5 和图 7 所示.从图 7 可知,掺合石灰的泥浆立方体试块,经历弹性、屈服、破坏 3 个阶段,与添加粗砂的试块相比,无明显压密阶段,说明石灰的硬化作用增加了试块的脆性,导致试块延性减小.

表 5 C 组试块抗压强度试验结果平均值

Tab. 5 Average compressive strength of the specimens in group C

编号	破坏荷载 / kN	破坏位移 / mm	抗压强度		
			平均值 / MPa	标准差	变异系数
C1	11.18	2.16	1.17	0.100	0.085
C2	11.56	3.57	1.19	0.038	0.032
C3	11.73	2.34	1.20	0.064	0.054
C4	11.41	2.69	1.18	0.130	0.110

分析表 5 可知,随着石灰含量的增大,试件抗

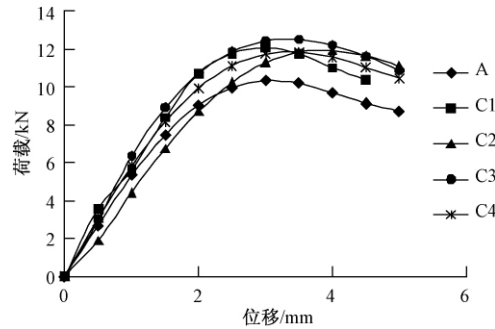


图 7 不同石灰含量立方体试块荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves of the cube specimens with different lime contents

压强度呈现先增大后减小的趋势.石灰含量为 2%~6% 时,试块抗压强度增加约 8.0%~11.2%,说明石灰在试块养护过程中,吸收了部分水分,加快试块固结硬化,增加试块强度;石灰含量为 6%~8% 时,试块抗压强度反而略微减少,是由于石灰含量增大,养护过程中吸收的水分增加,减少了试块的固结水分,固结速度过快,土体内的胶结材料不能充分发育.从整体看,石灰含量的变化对试块抗压强度影响较小.

对掺合石灰试块抗压强度与石灰含量进行回归分析,发现试块抗压强度与石灰含量  $x(0 \leq x \leq 8\%)$  呈现良好的 3 次多项式关系,

$$y = 0.000\ 3x^3 - 0.007\ 7x^2 + 0.056x + 1.080\ 4, \\ R^2 = 0.997\ 1. \quad (2)$$

### 2.4 粗砂石灰含量影响

图 8 为稻草粗砂石灰试块抗压强度试验破坏过程,D 组试块和 B 组试块破坏现象类似,加载初期为弹性阶段,无明显现象,随着荷载增加,同样是边缘土体或中部首先出现细微裂缝,内部稻草拉结发出轻微脆裂声,但由于粗砂起骨架作用的同时石灰具有凝结硬化作用,造成试块破坏过程

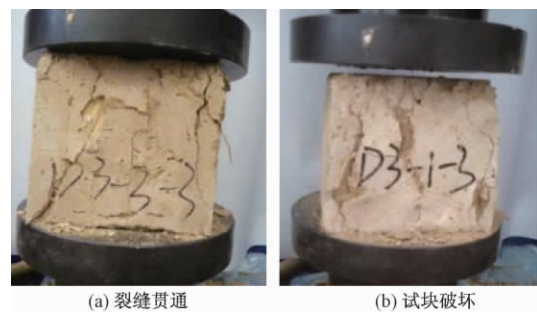


图 8 掺合稻草粗砂石灰试块抗压强度试验破坏过程

Fig. 8 Failure process of the specimens with rice straw, sand and lime during the compressive strength tests



中延性明显减小,经历弹性阶段后,试块两侧裂缝贯通速度加快,如图 8( a),快速达到破坏荷载,之后土块崩落,试块破坏,如图 8( b)。

掺合不同含量粗砂和石灰的试块抗压强度试验结果如表 6 所示,不同粗砂含量、石灰含量与试块抗压强度关系如图 9。

表 6 D 组试块抗压强度试验结果平均值

Tab. 6 Average compressive strength of the specimens group D

编号	破坏荷载 / kN	破坏位移 / mm	抗压强度		
			平均值 / MPa	标准差	变异系数
D1-1	11.56	2.05	1.19	0.230	0.193
D1-2	10.72	2.22	1.11	0.199	0.180
D1-3	13.19	2.54	1.36	0.132	0.097
D1-4	12.39	2.34	1.27	0.231	0.182
D2-1	12.07	2.20	1.25	0.110	0.088
D2-2	13.66	2.20	1.40	0.121	0.086
D2-3	14.87	2.17	1.53	0.122	0.080
D2-4	13.15	2.89	1.35	0.057	0.042
D3-1	11.46	2.25	1.17	0.176	0.150
D3-2	14.04	3.17	1.45	0.083	0.057
D3-3	13.15	2.30	1.34	0.094	0.070
D3-4	12.69	1.81	1.31	0.248	0.190
D4-1	10.91	3.40	1.11	0.180	0.162
D4-2	12.32	2.21	1.27	0.209	0.164
D4-3	12.51	2.08	1.30	0.090	0.069
D4-4	12.13	2.81	1.23	0.173	0.140

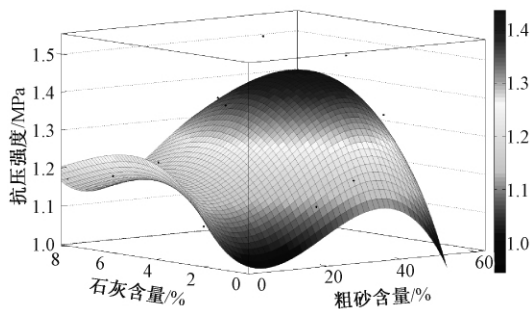


图 9 不同石灰、粗砂含量与试块抗压强度关系图

Fig. 9 Relationship between the coarse sand content of different lime and compressive strength of test block

同时掺合粗砂和石灰时,材料之间相互作用机理较为复杂,从表 6 可以看出,掺合不同含量粗砂石灰的试块,抗压强度为 1.11 ~ 1.53 MPa。当粗砂含量为 40%、石灰含量 6% 时,试块抗压强度最大,为 1.53 MPa。由图 9 可知,在相同石灰含量下,试块抗压强度随粗砂含量增加基本呈先减少再增加再减少的趋势。以石灰含量 6% 为例说明其原因:粗砂具有一定的棱角和硬度,当粗砂含量

较小时,骨架作用没有充分发挥,降低了试块抗压强度;随粗砂含量增加,粗砂与掺合石灰的土体之间咬合作用得以发挥,试块抗压强度增大;当粗砂含量为 40% ~ 60% 时,粗砂体积比较大,由于粗砂与土体之间形成的微裂缝增多,粗砂骨架作用提高的强度小于裂缝降低的强度,随着粗砂含量增加,试块抗压强度降低。

为综合分析石灰和粗砂两变量的相关性,对试验数据进行回归分析,试块抗压强度  $z$  与粗砂含量  $x$  ( $0 \leq x \leq 60\%$ )、石灰含量  $y$  ( $0 \leq y \leq 8\%$ ) 呈 3 次多项式关系,

$$z = -8.865e^{-6}x^3 + 1.183e^{-3}y^3 - 1.507e^{-5}x^2y - 2.205e^{-4}xy^2 + 7.936e^{-3}x^2 - 2.694e^{-2}y^2 + 3.377e^{-3}xy - 0.0219x + 0.0179y + 0.8616, \\ R^2 = 0.8109. \quad (3)$$

### 3 结论

笔者通过系列试验研究了不同含量掺合料下土坯墙泥浆立方体试块抗压强度,得出以下主要结论。

(1) 添加稻草的试块,抗压强度平均值为 1.08 MPa,破坏位移较大,达到破坏荷载后没有立即崩裂溃散,仍具有一定承载力,破坏形式为延性破坏。

(2) 随着粗砂含量的增加,试块抗压强度呈现先增大后减小的趋势。掺合粗砂含量在 40% 左右时,对试块破坏荷载影响较大,一定程度上提高试块变形能力。试块抗压强度与粗砂含量呈现良好的 3 次多项式关系,受粗砂含量影响显著。

(3) 掺合石灰对试块抗压强度略有提高,石灰含量为 6% 时,抗压强度值最大。试块抗压强度与石灰含量呈现良好的 3 次多项式关系。

(4) 掺合粗砂石灰的试块,粗砂含量 40%、石灰含量 6% 时,试块抗压强度提高较大,变形能力无明显变化。不同粗砂石灰含量下,试块抗压强度与粗砂含量 ( $0 \sim 40\%$ )、石灰含量 ( $0 \sim 6\%$ ) 呈 3 次多项式关系。

### 参考文献:

- [1] 王毅红,梁捷,张项英,等. 我国生土结构研究综述[J]. 土木工程学报, 2015, 48(5): 98-107.
- [2] 李蜜. 传统村落民居生土建筑营造工艺及其优化应用研究[D]. 重庆: 重庆大学材料科学与工程学院, 2016.
- [3] 王沛钦,郑山锁,柴俊,等. 走向生土建筑结构[J]. 工业建筑, 2008, (3): 101-105.

- [4] ALLINSON D, HALL M. Hygrothermal analysis of a stabilised rammed earth test building in the UK [J]. *Energy and buildings*, 2010, 42(6): 845–852.
- [5] 吴锋. 土坯房屋基本力学和抗震性能的试验研究 [D]. 大连: 大连理工大学土木工程学院, 2013.
- [6] TAUCER F, JOHN E. ALARCON, et al. 2007 August 15 magnitude 7.9 near the coast of Central Peru: analysis and filed mission report [J]. *Bull earthquake Eng*, 2009, 7(1): 1–70.
- [7] 丛欣峰, 阿肯江·托呼提, 黄斌, 等. 土坯砌体轴心受压力学性能试验研究 [J]. *工程抗震与加固改造*, 2015, 37(1): 95–99+90.
- [8] 张延年, 马建飞. 改性生土坯抗压性能试验研究 [J]. *山东大学学报(工学版)*, 2015, 45(4): 57–63.
- [9] IIIAMPAS R, CHARMPIIS D C, IOANNOU I. Laboratory testing and finite element simulation of the structural response of an adobe masonry building under horizontal loading [J]. *Engineering structures*, 2014 (80): 362–376.
- [10] WU F, LI G, Li H N, et al. Strength and stress-strain characteristics of traditional adobe block and masonry [J]. *Materials and structures*, 2013, 46(9): 1449–1457.
- [11] 赵成. 改性土坯砌体抗压强度试验研究 [D]. 新疆: 新疆大学建筑工程学院, 2010.
- [12] VEGA P, JUAN A, GUERRA M I, et al. Mechanical characterization of traditional adobes from the north of Spain [J]. *Construction and building materials*, 2011, 25(7): 3020–3023.
- [13] PIATTONI Q, QUAGLIARINI E, LENCI S. Experimental analysis and modeling of the mechanical behaviour of earthen bricks [J]. *Construction and building materials*, 2011, 25(4): 2067–2075.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 161—2008 镇(乡)村建筑抗震技术规程 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [15] 国家质量技术监督局, 中华人民共和国建设部. GB/T 50123—1999 土工试验方法标准 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [16] 中华人民共和国建设部. JGJ/T 70—2009 建筑砂浆基本性能试验方法标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.

## Study on the Influence of Different Admixtures on Compressive Strength of Adobe Wall Mud

TONG Liping, LI Cong

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

**Abstract:** In order to study the influence of coarse sand and lime with different contents on the compressive strength of the mud cube and the correlation between them, the compressive strength test of the mud cube were carried out, and the optimal mixing ratio of different admixtures was found to provide theoretical data for the improvement and reinforcement of the adobe wall. The experimental results showed that the compressive strength of the specimen increased first and then decreases with the increase of coarse sand content. The compressive strength of the test block was slightly improved by adding lime. with the increase of lime content, the compressive strength of the test block had no obvious change. There was a good polynomial relationship between the compressive strength of the slurry and the admixture.

**Key words:** adobe wall; mud; additive; cube test pieces; compressive strength

文章编号: 1671-6833(2018)05-0091-06

## 机场道面沥青加铺结构分区域差异设计研究

李炜光<sup>1</sup>, 国洋<sup>1</sup>, 汤豆<sup>2</sup>, 郑敏楠<sup>3</sup>, 延丽丽<sup>4</sup>, 杨婉怡<sup>5</sup>

(1. 长安大学公路学院, 陕西西安 710061; 2. 中交一公院深圳分院, 广东深圳 518000; 3. 陕西交通职业技术学院, 陕西西安 710018; 4. 抚顺市交通工程质量与安全监督处 辽宁抚顺 113009; 5. 北京首发公路养护工程有限公司, 北京 102613)

**摘要:** 针对飞机在飞行区不同区域行驶状态的极大差异造成的沥青加铺结构局部区域早期变形破坏, 本文基于 ABAQUS 软件平台分析了大型飞机荷载、温度及行驶速度变化下加铺结构的剪应力、剪应变及永久变形规律, 表明在重载、高温、低速耦合作用下沥青加铺层受力及变形将处于极限不利状态. 而通过合理安排材料类型组合及厚度可以明显降低平行滑行道、联络道的早期轮辙病害, 改善道面服务水平. 因此, 在现有设计方法的基础上, 提出以容许剪应力及容许轮辙为验算指标的飞行区不同区域沥青加铺结构差异设计方法.

**关键词:** 机场道面; 沥青加铺层; 耦合作用; 剪应力(变); 轮辙; 差异化设计

**中图分类号:** U416.02 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.05.011

## 0 引言

白改黑加铺是在不停航要求下机场水泥混凝土道面养护的首选方案, 但是, 近年来很多道面加铺后, 在平行滑行道、联络道及跑道上出现很多轮辙、推移及拥包等病害, 严重影响飞行安全<sup>[1]</sup>.

目前机场加铺结构设计中平行滑行道、联络道、跑道的结构组合及材料类型基本相同, 并没考虑和模拟荷载作用下加铺层变形累积过程和轮辙控制指标<sup>[2]</sup>, 此外, 也没有考虑不同区域飞机行驶特性的不同对加铺结构内受力及变形的影响<sup>[3]</sup>. 基于此, 针对飞机在不同飞行区的行驶特性, 研究沥青加铺层的力学响应及轮辙形成规律, 进而提出针对不同行驶条件下, 以轮辙控制为目的的加铺结构差异化设计方法与指标.

## 1 应力应变分析

### 1.1 道面结构及材料参数

为了寻求应力、应变在加铺结构中的分布规律, 采用我国某大型民用机场的道面加铺结构及材料参数, 如表1所示, 设计飞机采用 B747-400.

表1 道面结构及材料参数

Tab.1 Pavement structure and material parameters

道面结构层	厚度/cm	弹性模/MPa	泊松比 $\mu$
SMA-13 上面层	5	1 500	0.25
AC-20 下面层	8	1 200	0.25
水泥混凝土面层	38	34 000	0.15
二灰碎石上基层	18	1 500	0.20
二灰砂砾下基层	18	1 300	0.25

### 1.2 模型尺寸及荷载作用位置

旧水泥混凝土路面板所采用的平面尺寸为板长 $\times$ 板宽 $=5\text{ m}\times 5\text{ m}$ , 接缝宽度为 $1\text{ cm}$ , 土基不建立实体模型采用 Foundation 弹性基础代替. 在道面横向 $x$ 向(垂直于飞机行驶方向)控制 $x$ 向位移, 在道面纵向 $y$ 向(飞机行驶方向)控制 $y$ 向位移. 按照 ABAQUS 定义如下:  $x$ 向上为 XSYMM 对称边界条件, 即  $U_x = UR_y = UR_z = 0$ .  $y$ 向上为 YSYMM 对称边界条件, 即  $U_y = UR_x = UR_z = 0$ . 模型底部采用弹性基础模拟土基支撑作用, 其反应模量  $k = 80\text{ MN/m}^3$ . 为节省计算时间和避免发生奇异, 采用三维 8 节点减缩积分单元<sup>[4]</sup>.

对有接缝的旧水泥混凝土板沥青加铺结构, 其最不利荷位仍位于接缝处一侧板的纵向边缘中

收稿日期: 2018-01-29; 修订日期: 2018-03-25

基金项目: 交通运输部建设科技基金资助项目(2013318J09230); 河南省交通运输厅科技基金资助项目(2012D11)

作者简介: 李炜光(1971—), 男, 山西黎城人, 长安大学教授, 博士, 主要从事道路结构与材料的教学与科学研究工作, E-mail: wgli@chd.edu.cn.

部. 为缩短计算时间, 在荷载作用处网格划分尺寸较细, 并逐渐向边界处扩展, 面层网格划分尺寸较小, 向基层逐渐增大. 道面加铺结构网格划分模型如图 1.

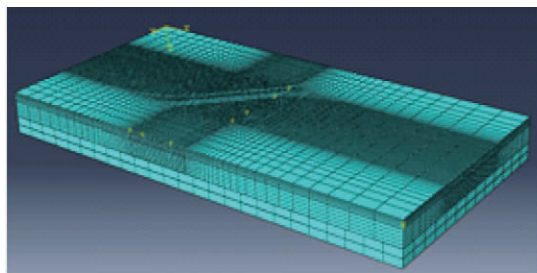


图 1 道面结构网格划分模型

Fig. 1 Mesh model of pavement structure

### 1.3 参数影响分析

剪应力及剪应变是沥青加铺结构产生失稳流动轮辙和推移的主要诱因, 所谓对轮辙破坏的分析, 主要是对结构层内剪应力及混合料抗剪强度的分析, 通过对剪应力及剪应变的计算分析, 了解加铺结构内应力分布特征, 从而在定量分析的基础上优化加铺结构组合设计及材料选取. 在接缝处沥青面层剪应力(变)较其他位置大, 所以剪应力(变)计算位置选取为接缝处<sup>[5]</sup>. 在此, 分析外部影响因素(大型飞机荷载、温度、行驶速度)变化时的应力应变变化规律, 结果如图 2~4 所示.

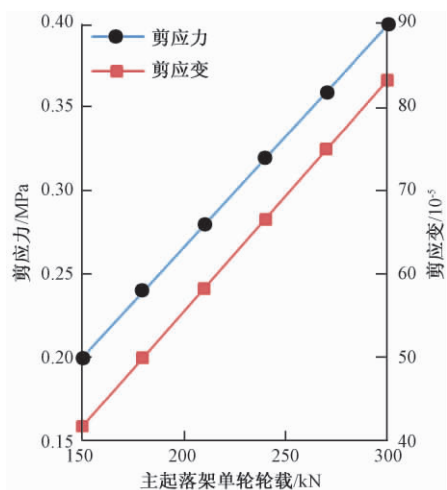


图 2 剪应力(变)随主起落架单轮轮载变化规律

Fig. 2 The change law of shear( strain) with wheel load

从图 2 中可以看出, 加铺层内最大剪应力、剪应变均随主起落架单轮轮载的增加而呈线性增长, 轮载增大 1 倍, 其剪应力、剪应变也增大 1 倍.

从图 3 可见, 温度从 20 ℃ 升至 50 ℃, 最大剪应力呈线性降低 10%, 但最大剪应变则呈幂函数的形式增大 168%. 所以, 夏季失稳型轮辙是内部

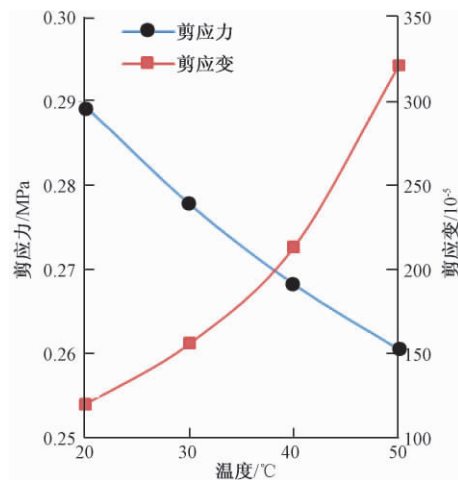


图 3 剪应力(变)随温度变化规律

Fig. 3 The change law of shear( strain) with temperature

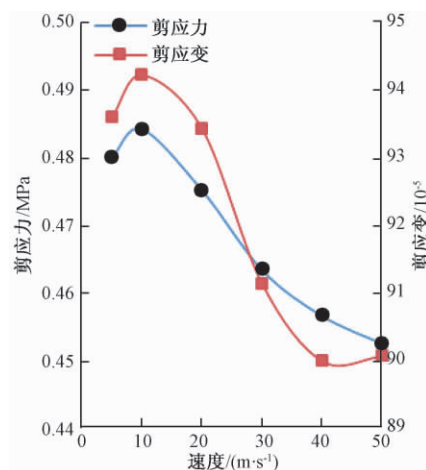


图 4 剪应力(变)随速度变化规律

Fig. 4 The change law of shear( strain) with speed

抵抗变形能力降低所致, 改善材料的温度敏感性是延缓轮辙产生和发展的有效措施之一<sup>[6-7]</sup>.

从图 4 可见, 速度为 50 m/s 时, 剪应力和剪应变分别比 10 m/s 时降低 93% 和 95.6%. 较低行驶速度时, 加铺层最大剪应力及剪应变处于一个较高的水平, 但随着速度的逐渐增加其值逐渐降低, 并趋于平缓. 同时, 相同的条件下, 荷载在低速行驶区域的作用时间将是高速行驶区域的几十倍, 大大增加了低速行驶区域发生病害的可能.

从上述荷载、温度及行驶速度变化对剪应力、剪应变的影响规律可以看出, 平行滑行道及联络道正是处于重载、高温、低速三相耦合作用下, 造成其加铺层内剪应力、剪应变急剧增大, 从而处于极限不利受力状态, 导致早期轮辙变形破坏. 飞机在跑道上的高速行驶状态则极大地降低了荷载作用时间, 延缓了早期轮辙变形的发生. 在进行加铺结构设计时, 可以根据飞机轴载、当地温度以及最

低滑行速度等因素,控制不同飞行区域的最大剪应力,有效缓解平行滑行道和联络道轮辙病害尤为重要。

## 2 永久变形分析

沥青混合料是一种变形特性依赖于温度、应力及时间的黏弹塑性材料,本节采用 ABAQUS 中自有的时间硬化蠕变模型模拟沥青加铺层永久变形<sup>[8]</sup>。

### 2.1 永久变形规律

假定飞机在平行滑行道、联络道上的平均行驶速度为 5 m/s,跑道上平均行驶速度为 50 m/s. 本节采用数值模拟方法计算加载 50 000 次后平行滑行道、联络道及跑道的沥青加铺层随主起落架单轮轮载、温度变化的永久变形规律,其结果如图 5~6 所示。

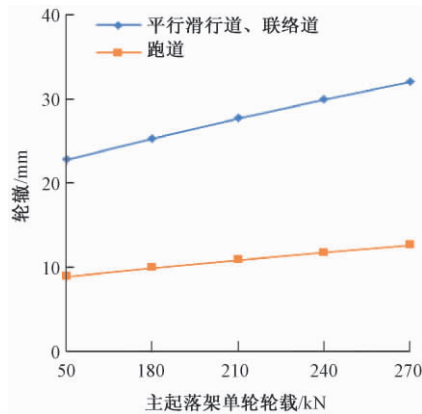


图 5 各区域轮辙随轮载变化规律

Fig. 5 The change law of rut with wheel load in different area

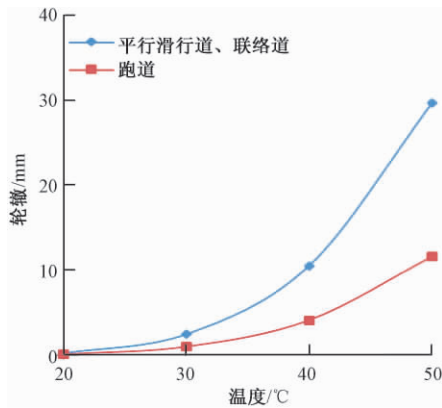


图 6 各区域轮辙随温度变化规律

Fig. 6 The change law of rut with temperature in different area

从图 5 中可以看出,随着主起落架单轮轮载逐渐增大,飞行区各区域轮辙基本呈线性增大,

单轮轴载越大,平行滑行道、联络道与跑道之间的轮辙差值越大. 单轮轮载 240 kN、行驶速度 5 m/s 的轮辙深度为 150 kN、50 m/s 下的 3.6 倍. 从图 6 可以看出,随着温度升高,飞行区各区域轮辙基本呈幂函数形式增长,并且随着温度的升高平行滑行道、联络道与跑道间的轮辙差越来越大. 50 °C、行驶速度 5 m/s 下的轮辙深度比 20 °C、50 m/s 下高出 329 倍,比 30 °C、50 m/s 下也高出 30 倍。

可见,沥青加铺道面面层敏感温度约为 30 °C. 在日间持续高温时段,重载飞机飞行是轮辙迅速发展的重要条件<sup>[9]</sup>. 而我国南方地区夏季气温可达到 35 °C 以上,而沥青道面的表面温度常能达到 60 °C 以上<sup>[10]</sup>,加之重载、低速的耦合作用,轮辙快速产生和发展. 因此,通过控制高温时段重载飞机飞行或适当提高最低滑行速度,有利于减少平行滑行道和联络道轮辙病害。

### 2.2 材料类型及厚度组合影响

本节所采用的材料类型为改性 AC-20、SMA-13 及 HMAC 3 种沥青混合料,组合形式分为 4 种,面层的模量逐渐增加<sup>[11]</sup>. 其中 20 °C 下 HMAC 的模量为 2 150 MPa,路面结构组合如表 2 所示. 4 种结构组合下飞行区各区域加铺结构加载 50 000 次后轮辙深度如图 7、8 所示。

表 2 路面结构组合

厚度/cm	组合 1	组合 2	组合 3	组合 4
5	SMA-13	SMA-13	SMA-13	HMAC
8	AC-20	SMA-13	HMAC	HMAC
38	旧水泥混凝土板			
18	二灰稳定碎石			
18	二灰稳定砂砾			

从图 7、8 中可以看出,4 种结构组合下轮辙深度随速度的增加呈幂指数函数降低,尤其是在低于 10 m/s 的低速慢行状态下,其永久变形量处于较高水平. 4 种路面结构组合中,随着面层材料模量的增加,抗车辙能力也逐渐增强. 抗车辙性能最好的是组合 4,采用双层 HMAC,但目前我国对 HMAC 的研究还不够成熟,没有成熟的经验可以借鉴,在机场道面结构设计时并没有得到非常多的应用<sup>[12-13]</sup>. 抗车辙能力最差的为组合 1,是目前最常用的结构组合形式,采用 SMA-13 + AC-20,具有良好的耐磨性和易修复性,相对 HMAC 来说,施工和设计方法较为成熟,并且,其加铺结构的永久变形累积量较小,可以满足跑道的使用

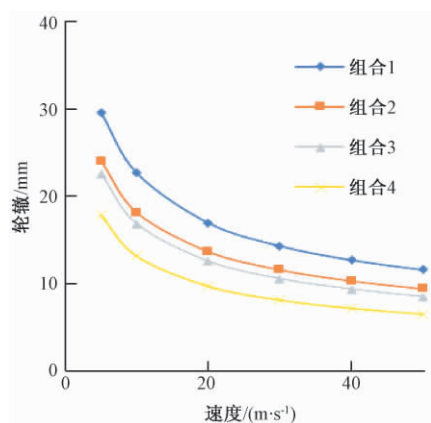


图 7 不同结构组合下轮辙随速度变化规律  
Fig.7 The change law of rut with speed when structure combinations are different

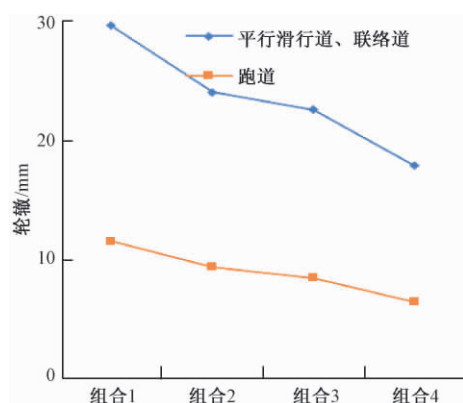


图 8 不同结构组合下飞行区不同区域轮辙深度  
Fig.8 The depth of rut at different flight area when structure combinations are different

要求,因而被广泛的应用<sup>[14]</sup>.但是并不能满足高温、重载、低速三相耦合作用下的行驶状态,平行滑行道和联络道上轮辙病害问题依然严重.因此,在加铺结构设计时,可以通过改变材料,提高其下面层模量,降低其累积变形量.

沥青加铺层厚度从 11 cm 增大到 21 cm 后(按 2 cm 递增),飞行区不同厚度时轮辙随速度变化和不同区域永久变形规律如图 9、10 所示.

从图 9、10 可以看出,随着厚度的逐渐增大,加铺结构轮辙变形逐渐增大并趋于平缓.厚度的增大对平行滑行道及联络道永久变形增加较为明显,对跑道则相对较小.可见,加铺层宜设置在 13 ~ 15 cm 范围内,不增加成本的同时可以满足跑道的要求,现有的加铺结构厚度基本满足.飞机在平行滑行道、联络道上行驶时,则需要考虑与跑道行驶状态的差异,加铺层厚度尽量不超过 13 cm,以降低轮辙病害发生概率<sup>[15]</sup>.

逐渐增加下面层模量或减小下面层厚度时,不同结构组合,在荷载作用 50 000 次后,平行滑

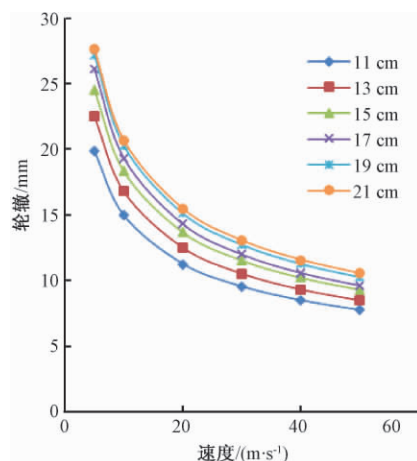


图 9 不同厚度下轮辙随速度变化规律  
Fig.9 The change law of rut with speed at different thickness

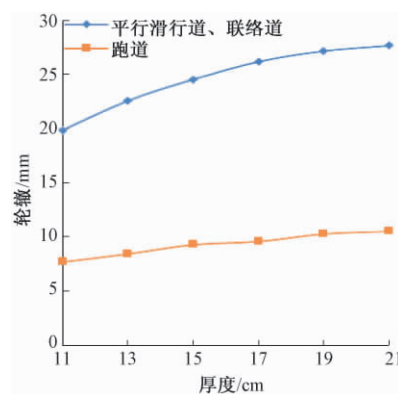


图 10 轮辙随厚度变化规律  
Fig.10 The change law of rut with thickness

行道、联络道轮辙与跑道轮辙深度的关系如表 3 所示<sup>[16]</sup>.

表 3 不同结构组合下不同区域轮辙深度关系  
Tab.3 The relation of rut depth at different area when structure combinations are different

结构组合	平行滑行道、联络道轮辙与跑道轮辙倍数关系
5cmSMA + 8cmAC	2.57 倍
5cmSMA + 8cmHMAC	1.96 倍
5cmSMA + 6cmHMAC	1.72 倍
5cmHMAC + 6cmHMAC	1.38 倍

表 3 进一步表明,采用不同的加铺厚度和模量组合,轮辙深度的差异非常大.因此,加铺结构设计时,通过控制轮辙深度的方式,控制飞行区不同区域加铺结构的厚度和模量是非常有必要的.对于平行滑行道、联络道,采用高模量沥青混合料可以显著降低荷载长时间作用下产生的轮辙;在满足结构性能或功能要求的前提下,可适当降低平行滑行道、联络道加铺层厚度来降低其使用期



内永久变形。

### 3 差异设计方法与设计指标

机场跑道沥青加铺层结构在大型飞机的反复作用和自然因素的不断影响下逐渐出现损坏,特别是在平行滑行道和联络道低速行驶时,大大加大了重载作用时间,致使轮辙病害快速出现和发展。通过上述对剪应力、剪应变和永久变形的分析可知,可以通过控制荷载、温度、速度等因素,最大剪应力和最大轮辙深度的方法,缓解平行滑行道和联络道上轮辙病害尤为严重的问题。因此,在现有设计方法的基础上提出以容许剪应力及容许轮辙为验算指标的飞行区不同区域沥青加铺结构差异设计方法<sup>[17]</sup>。

#### 3.1 剪应力验算指标

沥青加铺层在荷载反复作用下,层内剪应力超过了其极限状态,产生剪切流动变形,所以需要控制加铺层内的剪切应力<sup>[18-19]</sup>。而容许剪应力则是根据其所用材料的极限抗剪强度 $\tau_s$ 得到的,二者之间的关系为:

$$\tau_R = \frac{\tau_s}{K_s}, \quad (1)$$

式中: $K_s$ 为道面结构安全系数,与设计使用期荷载作用次数和所用材料有关。

由此可得,加铺结构在设计使用期内荷载反复作用下不同区域应满足以下控制指标,

$$\begin{cases} \tau_P \leq \tau_{RP} \\ \tau_L \leq \tau_{RL} \\ \tau_H \leq \tau_{RH} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $\tau_{RH}$ 、 $\tau_{RL}$ 、 $\tau_{RP}$ 分别为平行滑行道、联络道及跑道容许剪应力。

#### 3.2 轮辙验算指标

永久变形计算方法是各种机型的荷载作用次数转化为设计机型的作用次数,得出设计飞机在设计使用期内荷载作用的总的作用次数,然后结合飞行区不同区域的行驶特性得出不同区域的作用时间,再利用蠕变曲线得出不同区域的总轮辙量,最后看轮辙量是否满足轮辙控制指标的要求,

$$\begin{cases} RD_H \leq [RD]_{RH} \\ RD_L \leq [RD]_{RL} \\ RD_P \leq [RD]_{RP} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $RD_H$ 、 $RD_L$ 、 $RD_P$ 分别为滑行道、联系道、跑道总轮辙量; $[RD]_{RH}$ 、 $[RD]_{RL}$ 、 $[RD]_{RP}$ 分别为滑行道、联络道、跑道容许轮辙量。

#### 3.3 设计流程

机场旧水泥混凝土道面沥青加铺结构不同区域差异设计流程如图11所示。

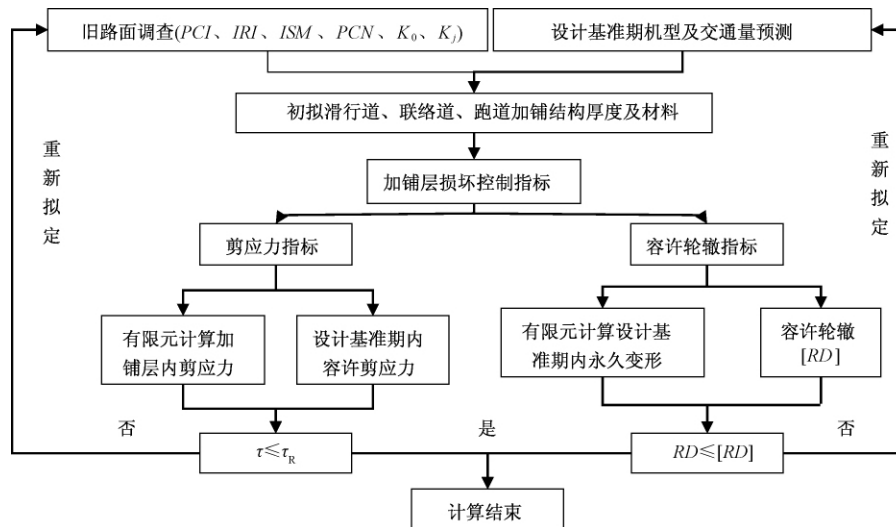


图11 机场加铺结构差异化设计流程

Fig. 11 The differential design process of airport asphalt overlay structure

### 4 结论

(1) 在重载、高温条件下,平行滑行道和联络道上低速行驶,加大荷载作用时间,致使轮辙病害迅速发生和发展。

(2) 适当提高加铺层模量、降低加铺层厚度可以减缓轮辙病害的发展。

(3) 针对平行滑行道、联络道和跑道上飞机行驶特性差异,结合我国现有规范,提出以容许剪应力及容许轮辙为验算指标的飞行区不同区域沥

青加铺结构差异设计方法。

## 参考文献:

- [1] 林小平. 复杂条件下机场跑道沥青加铺层结构设计原理与方法[D]. 上海: 同济大学交通工程运输学院, 2007.
- [2] 赵鸿铎, 陈峙昂. 中美机场水泥混凝土道面加铺厚度设计方法对比分析[J]. 华东交通大学学报, 2016, 33(4): 10-17.
- [3] 中华人民共和国行业标准. MH 5010—1999 民用机场沥青混凝土道面设计规范[S]. 北京: 中国民用航空总局, 2000.
- [4] 李巧生, 王德荣, 李杰, 等. 水泥混凝土道面结构在多轮荷载作用下的响应分析[J]. 振动与冲击, 2010, 29(2): 75-78.
- [5] 汤豆. 基于典型病害的机场旧水泥混凝土道面沥青加铺结构研究[D]. 西安: 长安大学公路学院, 2016.
- [6] EAPA. Airfield uses of asphalt[R]. Netherlands: European Asphalt Pavement Association, 2003.
- [7] US. Department of Transportation Federal Aviation Administration. ACNo: 150/5320-6D Airport Pavement Design and Evaluation[S]. Washington DC: U S Department of Transportation Federal Aviation Administration, 1995.
- [8] 刘建兰, 王朝辉, 王选仓. 旧沥青路面加铺层结构层间工作状态研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2009, 30(3): 90-93.
- [9] 蔡靖, 李岳, 孙钦刚. 温度场下的机场柔性道面转弯区轮辙规律研究[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(1): 186-194.
- [10] 李巧生, 任安, 李刚, 等. 应急机场沥青道面高温稳定性试验研究[J]. 后勤工程学院学报, 2010, 26(2): 22-24+96.
- [11] 钱振东, 孟凡奇, 曾靖. 高性能沥青混凝土机场道面结构[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2015, 45(3): 575-580.
- [12] 赵锡娟. 高模量沥青混凝土材料组成及路用性能研究[D]. 西安: 长安大学材料学院, 2009.
- [13] 胡亮. 高模量沥青混合料(HMAC-20)在徐明高速公路江苏段的应用研究[J]. 上海公路, 2017(3): 34-36.
- [14] 王福华, 吴启祥. SMA 沥青混合料应用中存在问题的改进措施[J]. 城市道桥与防洪, 2017(9): 53-56.
- [15] 李郁, 王健. 应用有限元计算机场道面结构适应厚度[J]. 公路与汽运, 2012(2): 117-120.
- [16] 袁玉卿, 刘凤利, 王选仓. 旧水泥路面沥青加铺层间防裂抗拉强度指标研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(2): 28-32.
- [17] 刘文. 机场沥青道面设计指标及方法研究[D]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2008.
- [18] 马翔, 倪富健, 顾兴宇. 复合式机场道面结构设计方法[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(2): 36-40.
- [19] 张晗. 水泥混凝土机场跑道沥青加铺层性能研究[D]. 南京: 东南大学交通学院, 2016.

## Study on Regional Difference Design of Asphalt Overlay in Airport Pavement

LI Weiguang<sup>1</sup>, GUO Yang<sup>1</sup>, TANG Dou<sup>2</sup>, ZHENG Minnan<sup>3</sup>, YAN Lili<sup>4</sup>, YANG Wanyi<sup>5</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710061, China; 2. Shenzhen Branch of the First Highway Survey and Design Institute, Shenzhen 518000, China; 3. Shaanxi Transportation Vocational Technical College, Xi'an 710018, China; 4. Fushun City Traffic Engineering Quality and Safety Supervision Department, Fushun 113009, China; 5. Beijing's First Road Maintenance Engineering Co., Ltd., Beijing 102613, China)

**Abstract:** According to the early partial deformation failure, which was caused by great difference of the traveling state in different flighting areas, based on ABAQUS software platform, this paper analyzed the change law of shear stress, shear strain and permanent deformation when aircraft load, temperature and driving speed were changed. It showed that the force and deformation of asphalt overlay would be in the limit under the coupling effect of three kinds of heavy load, high temperature and low speed. By reasonable design of material type combination and thickness, the early rutting of parallel taxiway and liaison road could be significantly reduced, and the service level of pavement could be improved. Thus, based on the existing design, this paper presented a design method for different regions of asphalt overlay in airport pavement, that the allowable shear stress and allowable rut for checking index.

**Key words:** airport pavement; asphalt overlay; coupling effect; shear stress (strain); rutting; differential design