

- 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



2019.1

第40卷 第1期
Vo1.40 No.1
2019年1月出版

ISSN 1671-6833



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

- 基于多特征融合的三维模型检索 张艺琨, 唐 雁, 陈 强(1)
- 一种与时间步长相关的奇异单元细分法 李 源, 张见明, 钟玉东, 千红涛(7)
- Web3D 家居素材库的轻量化技术研究 赵双燕, 贾金原, 周 文(12)
- 基于自适应聚类中心的脑血管分割方法 王 喆, 赵世凤, 田 运, 王学松, 周明全(18)

电气与信息工程

- 采用模块化求解的主动配电网优化运行 张红斌, 王克文(24)
- 基于二阶锥规划的主动配电网动态无功优化 章 健, 熊壮壮, 王明东, 朱永胜(32)
- 基于时序信息分析的 WSN 贝叶斯信誉评价模型 滕志军, 郭力文, 吕金玲, 侯艳权(38)
- 基于 PARAFAC 分解的大规模 MU-MIMO 稀疏信道估计 穆晓敏, 刘亚丽, 张建康, 赵凌霄(44)

交通工程

- 正交各向异性路基路面在移动荷载作用下的空间动力响应 王 博, 张春丽, 祝彦知(50)
- 结构极值响应估计方法的有效性研究 黄孝帝, 顾 颖, 何 军(55)
- 脱空排水管道高聚物修复前后力学特性分析 李 斌, 方宏远, 王复明(62)
- 公路桥梁板式橡胶支座失效标准研究 邬晓光, 贺书磊, 郑 鹏, 殷 悦, 郭志强(67)

其 他

- 动车水箱疲劳振动试验及数值模拟研究 王建明, 李潇潇(72)
- 绕管式换热器壳侧流动及传热模拟与实验研究 吴金星, 刘少林, 彭 旭(77)
- 喷丸表面的最佳粗糙度参数与材料硬度的关系 何声馨, 刘坤坤, 王 锐, 张二亮, 李延民(83)
- 氧化石墨烯/丁苯橡胶复合材料力学性能的分子动力学模拟
..... 孙 斌, 郭 伟, 顾建兵, 米立伟(87)
- 基于深度学习和进化计算的外汇预测与投资组合优化 李章晓, 宋 微, 田 野(92)

CONTENTS

【Computation Intelligence】

- 3D Model Retrieval Method Based on Multiple Feature Fusion **ZHANG Yikun, TANG Yan, CHEN Qiang** (1)
- An Singular Element Subdivision Method Related to Time-Step Length
..... **LI Yuan, ZHANG Jianming, ZHONG Yudong, QIAN Hongtao** (7)
- The Research of Web3D Household Repository Lightweight Technology
..... **ZHAO Shuangyan, JIA Jinyuan, ZHOU Wen** (12)
- Cerebral Vessel Segmentation Based on Adaptive Clustering Centers
..... **WANG Zhe, ZHAO Shifeng, TIAN Yun, WANG Xuesong, ZHOU Mingquan** (18)

【Electrical Engineering and Information Engineering】

- Optimal Operation of Active Distribution Network Using Modular Solution **ZHANG Hongbin, WANG Kewen** (24)
- Dynamic Reactive Power Optimization in Active Distribution Network Based on Second-Order Cone Programming
..... **ZHANG Jian, , XIONG Zhuangzhuang, WANG Mingdong, ZHU Yongsheng** (32)
- WSN Bayes Reputation Evaluation Model Based on Time Series Information Analysis
..... **TENG Zhijun, GUO Liwen, LV Jinling, HOU Yanquan** (38)
- Massive MU-MIMO Sparse Channel Estimation Based on PARAFAC Decomposition
..... **MU Xiaomin, LIU Yali, ZHANG Jiankang, ZHAO Linxiao** (44)

【Construction Engineering】

- 3D Dynamic Response of Infinite Plate on Orthotropic Foundation under Moving Loads
..... **WANG Bo, ZHANG Chunli, ZHU Yanzhi** (50)
- Efficiency Analysis of Structural Extreme Response Estimation Methods **HUANG Xiaodi, GU Ying, HE Jun** (55)
- Analysis of the Mechanical Characteristics of Disengaging Drainage Pipe Before and After Polymer Repairing
..... **LI Bin, FANG Hongyuan, WANG Fuming** (62)
- Study on Failure Standard of Highway Bridge Rubber Bearing
..... **WU Xiaoguang, HE Shulei, ZHENG Peng, YIN Yue, GUO Zhiqiang** (67)

【Others】

- Study on Vibration Fatigue Test and Numerical Simulation of EMU Tank **WANG Jianming, LI Xiaoxiao** (72)
- Study on Numerical Simulation and Experiment on Fluid Flow and Heat Transfer in Shell Side of the Spiral Tube Heat Exchanger
..... **WU Jinxing, LIU Shaolin, PENG Xu** (77)
- The Relationship Between the Optimum Roughness Parameters and the Hardness of the Material
..... **HE Shengxin, LIU Kunkun, WANG Rui, ZHANG Erliang, LI Yanmin** (83)
- Molecular Dynamics Simulation of Mechanical Properties of Graphene Oxide/Styrene Butadiene Rubber Composites
..... **SUN Bin, GUO Wei, GU Jianbing, MI Liwei** (87)
- Exchange Rate Forecasting and Portfolio Optimization Based on Deep Learning and Evolutionary Computation
..... **LI Zhangxiao, SONG Wei, TIAN Ye** (92)

文章编号: 1671-6833(2019)01-0001-06

基于多特征融合的三维模型检索

张艺琨, 唐雁, 陈强

(西南大学计算机与信息科学学院, 重庆 400715)

摘要: 特征的选择、表示和融合是基于多特征三维模型检索技术的关键, 现有成果大多没有兼顾模型的整体和局部, 且特征表示复杂度高. 提出了一种基于多特征融合的三维模型检索方法, 提取 ORB 特征描述模型局部信息, 并在提取 Canny 边缘信息的基础上, 进一步提取形状上下文特征描述全局信息, 融合 ORB 特征和形状上下文特征得到一个新的特征表示三维模型, 通过计算模型相似度得出最终检索结果. 试验结果表明, 本方法能有效提高检索性能.

关键词: 三维模型检索; 多特征; ORB 特征; 形状上下文; 相似度

中图分类号: TP319

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2019.01.002

0 引言

随着三维模型应用领域的不断增加, 提高三维模型的共享率和复用率成为当前的研究热点. 三维模型检索即从海量三维模型中检索出与某一特定模型相似的所有模型的过程. 根据所提取对象的不同, 三维模型检索方法分为基于文本的检索方法和基于内容的检索方法. 基于文本的检索需要人为地为每个模型添加关键字, 它带有很大的主观性; 基于内容的检索是根据三维模型的特征进行检索, 大大减少了人工干预, 是当今的研究热点.

根据提取特征对象的不同, 可将检索方法分为 3 类: 基于拓扑结构的检索方法、基于形状的检索方法、基于图像比较的检索方法. 基于形状的检索方法在效果上直观且稳定, 受到广泛研究. 如 Ankerst 等^[1]提出基于形状直方图的特征提取方法; Paquet 等^[2]用离散小波变换的方法对三维模型的特征进行描述; Osada 等^[3]提出形状分布算法. 单一特征的检索方式不能准确表达模型的信息, 基于多特征检索方法融合局部特征和全局特征, 成为近年来的研究热点. 如 Chen 等^[4]通过融合 Zernike 矩和傅里叶系数检索三维模型; Vranic 等^[5]提出基于轮廓、射线和深度信息的描述子;

Zou 等^[6]基于主面分析和群融合提出了联合形状分布描述子; Li 等^[7]提出一种融合 Zernike 矩变换、傅里叶变换、深度信息和射线的三维模型检索方法.

虽然三维模型检索效率有明显提高, 但仍然存在很多问题, 如局部特征点有效性低, 影响特征点匹配精度; 边缘特征描述方式复杂度, 后续存储量大且计算费时; 局部特征不能表达模型的整体信息, 特征选择没有统一的标准. 针对以上问题, 笔者提出基于多特征融合的三维模型检索方法, 结合快速计算的 ORB 特征和精简的形状上下文特征, 形成更全面的描述模型信息. 对比试验证明本方法有效提升了 N_N 、 F_T 、 S_T 、 E 测度^[8]这 4 个指标值, $P-R$ 曲线也进一步改善, 大大提高检索性能.

1 相关知识

1.1 ORB 特征

ORB(oriented FAST and rotated BRIEF)是由 Rublee 等在 ECCV2011 上提出的一种基于视觉信息的特征点检测与描述算法. 它的主要思想是在特征点附近随机选取若干点对, 将这些点对的灰度值大小组成一个二进制串, 并将这个二进制串作为该特征点的特征描述子. ORB 分为提取具有

收稿日期: 2018-09-20; 修订日期: 2018-11-23

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(XDJK2015C110); 教育部“春晖计划”资助项目(z2011149); 西南大学教育教学改革研究项目(2015JY026)

通信作者: 唐雁(1965—), 女, 重庆人, 西南大学教授, 主要研究方向为智能科学、web 智能、数据挖掘以及数字媒体技术应用研究, E-mail: ytang@swu.edu.cn.

方向的 FAST 特征点和提取具有旋转不变的 BRIEF 特征描述子两个过程. ORB 特征计算速度快, 它的描述子以二进制串形式表示, 不仅节约存储空间, 也大大缩短了匹配时间.

1.2 Canny 算子

Canny 边缘检测算子是 Canny^[9] 于 1986 年提出的一个多级边缘检测算法. 边缘部分集中了图像的大部分信息, 它主要是对灰度变化的度量、检测和定位, 边缘检测需要有效地抑制噪声, 且尽量精确地确定边缘的位置, 因此边缘特征是很有效的整体特征.

1.3 形状上下文描述子

形状上下文是一种基于轮廓的形状描述子, 由 Belongie 等^[10] 在 2002 年提出, 是为轮廓上的像素点提供上下文信息的描述子. 形状上下文描述子的基本思想^[11]: 对于给定的一个形状, 通过边缘检测子获取轮廓边缘, 对轮廓边缘均匀采样得到一组离散的点集 $P = \{p_i | i = 1, 2, \dots, n\}$, 依次选取每个采样点作为参考点. 以其中任意一参考点 p 为例, 以 p 为中心建立极坐标系, 在以 p 为圆心 R 为半径的区域内, 按距离和角度划分区域, 形成靶状. 按照距离和角度统计落入每个区域的点的个数, 形成点的分布直方图 h_p , 称为点 p 的形状上下文. 形状上下文描述子是对轮廓特征点的进一步提取, 提高了特征表示的准确性和有效性.

1.4 匈牙利算法

匈牙利算法最早是由匈牙利数学家 King 提出, 用于解决二分图的最优匹配问题. 1955 年 Kuhn 把上述算法推广用于求解著名的指派问题. 算法的基本步骤如下^[12]:

(1) 对于任意给定的非负系数矩阵 A , 将其进行变换, 使其在各行各列中都出现 0 元素.

(2) 进行试指派, 若能够选出 n 个独立的 0 元素, 就可确定最优置换, 程序终止; 否则转 (3).

(3) 迭代: 利用最少直线覆盖所有 0 元素, 确定系数矩阵中能够找到的最多的独立 0 元素个数, 并在没有被直线覆盖的部分, 确定最小元素 x , 在被直线覆盖的各行减去 x , 在被直线覆盖的各列加上 x 来增减 0 元素的总数, 调转 (2).

2 基于多特征融合的三维模型检索

为了更高效且全面地描述模型特征, 提出基于多特征融合的三维模型检索方法. 对模型多视图投影, 分别对每张投影图提取具有尺度不变性

的 ORB 特征和准确统计轮廓分布的形状上下文特征, 对 ORB 特征匹配点反复剔除迭代, 并计算形状上下文描述子间的相似度, 通过特征融合计算结果. 总体框架如图 1 所示.

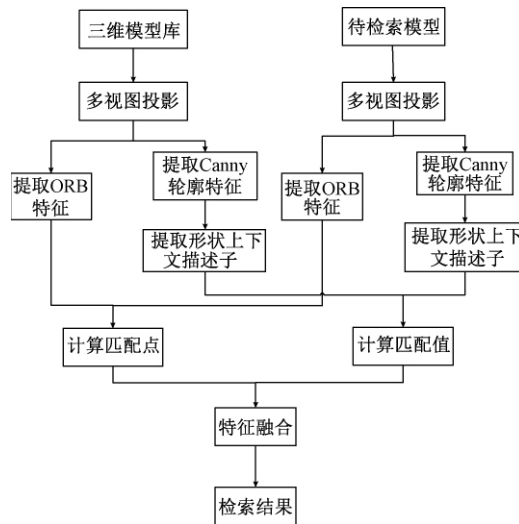


图 1 基于形状上下文的多特征三维模型检索方法框架图

Fig.1 The frame of 3D model retrieval method based on shape context

2.1 多视图投影

基于视图投影对三维模型检索是一种很直观的方法. 单一角度分析三维模型是片面的, 而投影角度过多会造成计算复杂. 笔者分析相关文献^[13] 及对比试验结果, 建立三维模型外围 72 面体, 选取 38 个顶点作为角度, 进行视图采样, 这 38 个角度均匀分布于球部空间. 避免角度冗余的同时, 有效提取模型多个角度的视图信息. 选取杯子模型作为示例, 如图 2 所示, 对该模型的 38 个角度进行多视图投影, 如图 3 所示.



图 2 杯子模型

Fig.2 Cup model

2.2 特征提取

分别提取 ORB 局部特征点、Canny 轮廓特征以及形状上下文描述子.

2.2.1 提取 ORB 特征

ORB 由提取 FAST 特征点和 BRIEF 特征点描述子两部分组成, 并在此基础上进行了改进与优化.

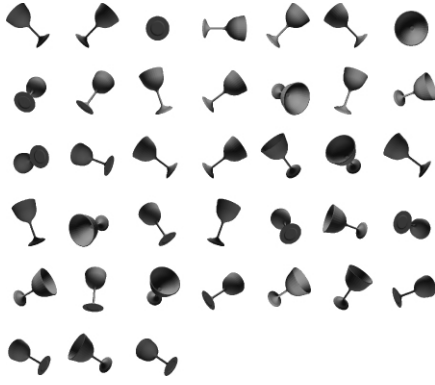


图 3 投影视图

Fig. 3 Projection views

(1) 提取 FAST 特征点. 检测候选特征点周围一圈的像素值, 如果候选点周围邻域内有足够多的像素点与该候选点的灰度值差别够大, 则认为该候选点是一个特征点, 定义为:

$$N = \sum_{x \in \text{circle}(p)} |I(x) - I(p)| > \varepsilon_d, \quad (1)$$

式中: $I(x)$ 为圆周上任意一点的灰度; $I(p)$ 为圆心的灰度; ε_d 为灰度值差的阈值. 如果 N 大于给定阈值, 一般为周围圆圈点的 $3/4$, 则认为 p 是一个特征点. 再计算特征点的主方向, ORB 利用质心来计算, 特征点坐标到质心形成的向量作为该特征点特征向量, 向量角度 θ 定义为 FAST 特征点的方向.

(2) 提取 BRIEF 特征点描述子. 在特征点附近随机选取若干点对组成图像块, 对它们进行旋转, 再把图像块的灰度值二值化后组成一个二进制串, 将这个二进制串作为该特征点的特征描述子. 它的每一位都是由随机选取的两个二进制点进行比较得来的. 如下: S 表示随机点位置 ($2 \times n$ 的矩阵), S_θ 表示旋转后的随机点的位置, 计算如式 (2). 得到新的随机点位置后, 利用积分图像进行二进制编码. ORB 特征是 BRIEF 描述子的一种改进, 具有旋转不变性、尺度不变性和对噪声的鲁棒性.

$$S = \begin{bmatrix} x_1 & \cdots & x_n \\ y_1 & \cdots & y_n \end{bmatrix}; \quad R_\theta = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix};$$

$$S_\theta = S \times R_\theta. \quad (2)$$

ORB 特征点提取如图 4 所示, 圆圈为检测到的特征点.

2.2.2 提取 Canny 轮廓特征

对 38 张视图用 Canny 算子提取轮廓信息. 边缘部分集中了图像的大部分信息, Canny 边缘检测算法的步骤如下.

Step 1: 用高斯滤波器平滑图像;

Step 2: 用一阶偏导的有限差分来计算梯度的幅值和方向;

Step 3: 对梯度幅值进行非极大值抑制;

Step 4: 用双阈值算法检测和连接边缘.

Canny 边缘检测如图 5 所示, (a) 为二维的视图投影, (b) 为 Canny 算子提取到的边缘特征.



图 4 ORB 特征点提取

Fig. 4 ORB feature points detection

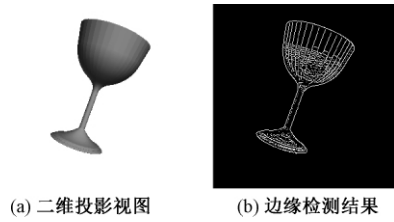


图 5 Canny 边缘检测

Fig. 5 Canny edge detection

2.2.3 提取形状上下文描述子

轮廓不同点处的形状上下文是不同的, 但相似轮廓对应点处形状上下文是相似的. 点 p 的特征直方图的计算方法:

$$h_i(k) = \{ \vec{p} \neq p_i; (\vec{p} - p_i \in B(k)) \}. \quad (3)$$

用 Canny 算子提取模型的轮廓信息后, 采集 n 个代表轮廓点作为采样点, n 值的选取范围在 100 ~ 200 之间, 对采样点建立形状上下文描述子, 区域的划分数量 k 根据试验对比得到. 对每个采样点都可以建立形状上下文描述子, 则每一张视图都可以用一个矩阵来表示:

$$F = \begin{bmatrix} h_1(1) & h_1(2) & \cdots & h_1(k) \\ h_2(1) & h_2(2) & \cdots & h_2(k) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ h_{n-1}(1) & h_{n-1}(2) & \cdots & h_{n-1}(k) \\ h_n(1) & h_n(2) & \cdots & h_n(k) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

2.3 计算相似度

2.3.1 计算 ORB 特征点对

(1) 用匹配器检测特征点对;

(2) 设置阈值, 剔除距离比例相差过大的匹配点;

(3) 判断特征点对之间是不是一一对应关系;

(4) 反复迭代消除错误的匹配.

检测模型间特征点对的数量,对视图进行相对应的检测,统计得到两个模型特征点对的总和作为最终的结果. d 表示局部特征之间的差异度, m 表示两个模型特征点对的个数, d 为:

$$d = \frac{1}{m}. \quad (5)$$

考虑到两个模型特征点对数可能为 0,造成式(5)的分母为 0,对式(5)进行修改:

$$d_A = \frac{1}{m + \varepsilon}, \quad \varepsilon \neq 0. \quad (6)$$

2.3.2 计算形状上下文描述子相似度

选取形状轮廓上任意点 p_j, d_i, h_i 表示点 d_i 的形状直方图, h_j 表示点 p_j 的形状直方图, k 表示区域划分的数量. $C(d_i, p_j)$ 表示两个点之间的相似距离,令 $C_{ij} = C(d_i, p_j)$, 则

$$C_{ij} = C(d_i, p_j) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \frac{[h_i(k) - h_j(k)]^2}{h_i(k) + h_j(k)}. \quad (7)$$

由此可得,两个形状之间的距离为:

$$d_B = \sum_{k=1}^n C(p_i, q_j), \quad (8)$$

使用匈牙利算法,距离值匹配后的数值最小.

2.4 特征融合

对 ORB 特征和形状上下文特征的相似度进行融合,形成新的特征相似度 $D(m_i, m_j)$, 公式为:

$$D(m_i, m_j) = \begin{cases} w_1 \cdot d_A + w_2 \cdot d_B, & i \neq j; \\ 0, & i = j. \end{cases} \quad (9)$$

对 ORB 特征相似度和形状上下文特征相似度赋予不同的权值,分别是 w_1 和 w_2 , $0 < w_1, w_2 < 1$ 且 $w_1 + w_2 = 1$. 对于相同的模型,相似度为 0.

3 试验

3.1 试验环境和数据

硬件环境: Acer Veriton, D4300 Intel(R) Core(TM) i5-3470 CPU @ 3.20 GHz, 8 GB 内存.

软件环境: 64 位的 Windows 10, MatlabR2012b 和 Visual Studio 2013.

试验模型库: SHREC2012GTB^[13] 模型库和普林斯顿大学提供的 PSB 模型库.

SHREC2012GTB 模型库有 60 个类, 总共 1 200 个模型. PSB 模型库有 260 个类, 总共 1 814 个模型, 该库有两个子库组成: 训练库和测试库. 每组都是 907 个模型, 分别包含 90 个和 92 个类, 试验是在 PSB 库的测试集上进行.

3.2 评价标准

采用行业内 5 种评价标准进行对比试验, 分别是:

(1) N_N : 表示返回的第一个模型属于目标类的比例.

(2) F_T : 表示返回的前 $C-1$ (C 为目标类模型的数量) 个模型属于目标类的比例.

(3) S_T : 表示返回的前 $2(C-1)$ 个模型属于目标类的比例.

(4) E : 表示三维模型检索的准确率.

(5) $P-R$ 曲线图: 表示三维模型检索总体的检索效率.

3.3 试验结果

3.3.1 SHREC2012GTB 模型库

本方法 3D model retrieval method based on multiple feature fusion(3DMFF) 与经典算法 LSD-sum 算法(LSD)^[14]、3D model retrieval method based on fourier and shape fusion 算法(3DFSf)^[15]、D2 bounding box normal angle area 算法(DBNAA-DERE)^[13] 和 3DSP-L2_1000_CHi2 算法(3DSP)^[16] 进行对比试验. 前 4 项指标 N_N 、 F_T 、 S_T 、 E 的对比结果如表 1 所示, $P-R$ 曲线的对比情况见图 6.

表 1 SHREC2012GTB 模型库上的试验对比

Tab. 1 Experiment comparison on SHREC2012GTB

	database			%
方法	N_N	F_T	S_T	E
3DMFF	81.9	41.9	53.2	37.6
DBNAA-DERE	81.7	35.5	46.4	18.8
3DFSf	77.8	41.4	51.8	36.8
3DSP	66.2	36.7	49.6	34.6
LSD	51.7	23.2	32.7	22.4

3.3.2 PSB 模型库

本方法 3DMFF 与经典算法 D2 形状分布算法(D2)^[17]、gaussian euclidean distance transform 算法(GEDT)^[18]、spherical extent function 算法(EXT)^[19] 和 shape histogram 算法(SECSHEL)^[20] 进行对比试验.

前 4 项指标 N_N 、 F_T 、 S_T 、 E 的对比结果如表 2 所示, $P-R$ 曲线的对比情况见图 7.

通过对比实验表明, 本章提出的方法在 SHREC2012GTB 库上取得相对好的检索效果. 融合局部特征和全局特征能够更全面地描述模型信息, 大大提高了特征匹配的质量.

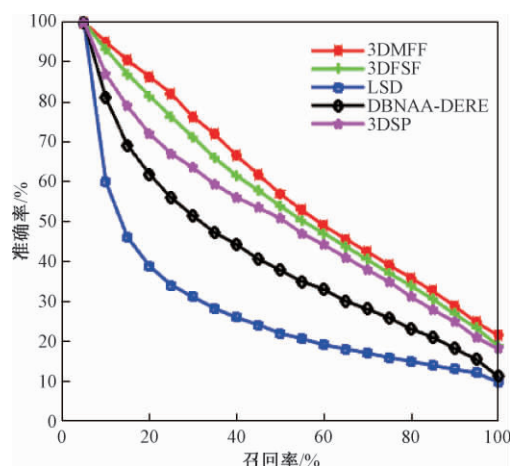
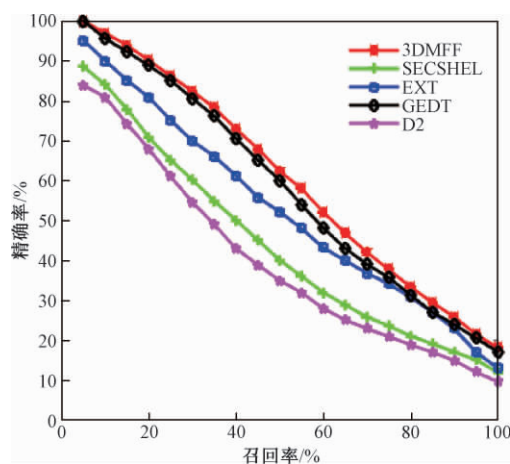
图 6 5 种检索方法的 $P-R$ 曲线Fig. 6 $P-R$ curve of five retrieval methods

表 2 PSB 模型库上的试验对比

Tab. 2 Experiment comparison on PSB database %

方法	N_N	F_T	S_T	E
3DMFF	65.8	35.1	45.5	26.1
GEDT	60.3	31.3	40.7	23.7
SECSHEL	54.6	26.7	35.0	20.9
EXT	54.9	28.6	37.9	21.9
D2	31.3	15.8	23.5	13.9

图 7 5 种检索方法的 $P-R$ 曲线Fig. 7 $P-R$ curve of five retrieval methods

4 总结

笔者针对现有成果在特征选择、表示和融合方面存在的问题,提出基于多特征融合的三维模型检索方法.在 SHREC2012GTB 和 PSB 两个数据库上的对比试验表明,使用该方法检索精度都有提高.但距离加权求和的融合方式不具有通用性且计算复杂,在下一步工作中,考虑将多模态应用于特征融合,将视觉显著性应用到模型提取中,通过深度卷积神经网络进行训练,采用更高效的轮

廓提取方式和局部特征,使模型描述更精准全面.

参考文献:

- [1] ANKERST M, KASTENMÜLLER G, KRIEGEL H P, et al. 3D shape histograms for similarity search and classification in spatial databases [C]//Advances in Spatial Databases. Berlin Heidelberg: Springer, 1999: 207–226.
- [2] PAQUET E, RIOUX M. A content-based search engine for VRML databases [C]//Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington D C: IEEE, 1998: 541–546.
- [3] OSADA R, FUNKHOUSER T, DOBKIN D. Shape distributions [J]. ACM transactions on graphics, 2002, 21(4): 807–832.
- [4] CHEN D, TIAN X, SHEN Y, et al. On visual similarity based 3D model retrieval [J]. Computer graphics forum, 2010, 22(3): 223–232.
- [5] VRANIC D V. DESIRE: a composite 3D-shape descriptor [C]//Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Amsterdam: IEEE, 2005: 4.
- [6] ZOU K S, IP W H, CHEN Z Q, et al. A novel 3D model retrieval approach using combined shape distribution [J]. Multimedia tools and application, 2014, 69(3): 799–818.
- [7] LI B, JOHAN H. 3D model retrieval using hybrid features and class information [J]. Multimedia tools and applications, 2013, 62(3): 821–846.
- [8] SHILANE P, MIN P, KAZHDAN M, et al. The princeton shape benchmark [C]//Proceedings of Shape Modeling Applications. Genova: IEEE, 2004: 167–178.
- [9] CANNY J. A computational approach to edge detection [J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 1986, 8(6): 679–698.
- [10] BELONGIE S, MALIK J, PUZICHA J. Shape matching and object recognition using shape contexts [J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2002, 24(4): 509–522.
- [11] 陈实, 马天骏, 黄万红, 等. 基于形状上下文描述子的步态识别 [J]. 模式识别与人工智能, 2007, 20(6): 794–799.
- [12] KUHN H W. The Hungarian method for the assignment problem [J]. Naval research logistics quarterly, 1955, 2(1): 83–97.
- [13] LI B, LU Y J, LI C Y, et al. A comparison of 3D shape retrieval methods based on a large-scale bench-

- mark supporting multi modal queries [J]. Computer vision and image understanding, 2015, 131: 1 – 27.
- [14] LI B, GODIL A A, AONO M, et al. SHREC'12 Track: Generic 3D Shape Retrieval [C]//Proceedings of the 5th Eurographics Conference on 3D Object Retrieval. Cagliari: Computing Machinery, 2012: 119 – 126.
- [15] 徐平安, 唐雁, 陈强, 等. 融合细节与整体特征的三维模型检索方法 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2015, 37(10): 131 – 137.
- [16] LENG B, DU C, GUO S, et al. A powerful 3D model classification mechanism based on fusing multi-graph [J]. Neurocomputing, 2015, 168: 761 – 769.
- [17] OSADA R, FUNKHOUSER T, CHAZELLE B, et al. Matching 3D models with shape distributions [C]//International Conference on Shape Modelling and Applications. Washington D C: IEEE, 2008: 154 – 166.
- [18] KAZHDAN M, FUNKHOUSER T, RUSINKIEWICZ S. Rotation invariant spherical harmonic representation of 3D shap descriptirs [J]. Eurographics symposium on geometry processing, 2003, 43: 156 – 164.
- [19] 杨文柱, 刘晴, 王思乐, 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.
- [20] WANG F, PENG J, LI Y. Hypergraph based feature fusion for 3-D object retrieval [J]. Neurocomputing, 2015, 151: 612 – 619.

3D Model Retrieval Method Based on Multiple Feature Fusion

ZHANG Yikun, TANG Yan, CHEN Qiang

(College of Computer and Information Science, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: The selection of features, the representation of features, and the mode of fusion were key processes of 3D model retrieval technology. In the paper, a new 3D model retrieval method which was based on multiple feature fusion was proposed. It combined the fast ORB features and the precise shape context features. ORB features described the local information. After extracting the Canny edge information, the shape context features were extracted to describe the global information, then the final similarity was calculated based on shape context features and ORB features. Experimental results demonstrated that our method could effectively improve retrieval performance.

Key words: 3D model retrieval; multiple feature; ORB features; shape context; similarity

文章编号: 1671-6833(2019)01-0007-05

一种与时间步长相关的奇异单元细分法

李源^{1,2}, 张见明², 钟玉东², 千红涛³

(1. 河南师范大学 计算机与信息工程学院, 河南 新乡 453007; 2. 湖南大学 机械与运载工程学院, 湖南 长沙 410082; 3. 河南工学院 机械工程系, 河南 新乡 453003)

摘 要: 奇异积分是边界元法求解物理问题的难点之一, 其精度对计算结果的准确性有很大影响, 单元细分是解决奇异积分的关键. 针对动态分析问题, 提出了一种与时间步长相关的单元细分法. 与传统单元细分法相比, 该方法不仅考虑了源点在单元中的位置, 同时考虑了波动前沿的位置, 能够反映出被积核函数的分段特性, 从而能够更加准确地模拟纵波和横波对单元积分的影响. 两个算例验证了该方法的准确性及其对计算精度的影响. 研究表明: 对于存在奇异性的第一个分析步, 该方法比传统方法的结果误差减小了 15.5%.

关键词: 时域边界元法; 弹性动力学; 奇异积分; 单元细分; 波动前沿

中图分类号: TP391

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.04.010

0 引言

随着计算机技术的飞速发展, 数值分析与仿真技术已经被广泛应用于工业设计和生产过程中, 例如静力学分析^[1]、热力学分析^[2]、裂纹扩展分析^[3]等, 数值计算方法是有效的分析手段之一. 边界元法^[4]利用微分方程的解析基本解作为边界积分方程的核函数, 是一种半解析的数值计算方法, 通常精度较高, 特别是对于求解裂纹等奇异性问题^[5]有天然优势. 但奇异积分则是边界元法求解物理问题时的难点, 当积分场点和源点位于同一个单元内时, 两者距离可能为零, 由于距离因子 r 位于核函数的分母上, 因此 r 趋向于大于 0 时将导致核函数值无穷大, 得到错误的结果, 因此需要采取措施避免场点和源点的重合. 在传统的单元细分法中, 根据奇异单元的形状以及源点在单元中的位置, 将源点与单元中各节点相连接, 原单元被细分为若干个三角形单元, 从而能够避免源点和场点的重合^[6]. Zhang 等^[7-8]曾将该方法与一种新的坐标变换法相结合消除了三维势问题的奇异性, 后来又提出了一种自适应单元细分

法^[9]来提高积分精度. 周焕林等^[10]提出了一种解析积分算法和单元细分相结合的方法解决了二维各向异性位势问题中的近奇异积分.

上述细分法应用于静态问题时计算精度较高. 对于动态问题, 例如笔者所关注的弹性动力学问题^[11-12]基本解更加复杂, 不仅包含空间变量, 还包含时间变量, 且为分段函数(表现为纵波和横波两个波动前沿). 如果仍然采用传统的单元细分法, 则无法将波动前沿对核函数的影响考虑进去, 奇异积分的精度必然会受到影响, 因此笔者根据三维问题中弹性波传播的规律以及核函数的分段特性, 将波速和时间步长考虑在内, 提出了一种新的单元细分法. 结合文献[8]中的坐标变换有效地消除了基本解中的奇异性, 提高了积分的精度, 最后通过两个算例验证该方法的准确性和计算精度.

1 弹性动力学问题的时域边界积分方程

对于均匀、各向同性的线弹性材料而言, 弹性动力学问题的位移运动方程(亦称为控制方程)如下^[12]:

收稿日期: 2018-03-20; 修订日期: 2018-05-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11702087, U1704158); 河南省高等学校重点科研项目(16A520015, 17A520040, 17A520038); 河南省自然科学基金资助项目(162300410177, 182300410130); 河南省科技创新人才项目(184100510003); 河南省科技攻关项目(182102210362); 河南省高校青年骨干教师培养计划项目(2017GGJS041); 河南师范大学博士启动课题(qd15131)

作者简介: 李源(1989—), 女, 河南新乡人, 河南师范大学讲师, 博士, 主要从事计算力学和边界元法研究, E-mail: liyuan2015097@163.com.

$$(\lambda + G) u_{j,ij}(q, t) + G u_{i,ij}(q, t) + \rho b_i(q, t) = \rho \ddot{u}_i(q, t), \quad (1)$$

式中: q 代表弹性体上的任意一点; $i, j = 1, 2, 3$; u_i 代表位移分量; \ddot{u}_i 是位移对时间的二次导数, 也就是加速度; b_i 代表单位质量的体积力; ρ 是材料密度; λ 和 G 是拉梅常数, 表达式如下:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}; G = \frac{E}{2(1 + \nu)}, \quad (2)$$

式中: E 表示弹性模量; ν 表示泊松比。

由于笔者研究的重点为奇异积分处理中的单元细分方法, 而奇异积分主要出现在边界积分中, 因此为了叙述方便, 设问题的初始条件和体积力均为零 (不为零时关于奇异积分的处理仍然是一样的), 此时控制方程 (1) 对应的时域边界积分方程为^[12]:

$$C_{ij}(p) u_j(p, t) = \int_S \int_0^t u_{ij}^s(p, q; \tau, t) p_j(q, \tau) d\tau dS(q) - \int_S \int_0^t p_{ij}^s(p, q; \tau, t) u_j(q, \tau) d\tau dS(q), \quad (3)$$

式中: S 表示弹性体的边界; $u_{ij}^s(p, q; \tau, t)$ 是位移基本解, 表示 t 时刻场点 q 在 j 方向上的位移分量 u_{ij}^s ; 该位移分量是由 τ 时刻源点 p 在 i 方向上的单位集中引起的; $p_{ij}^s(p, q; \tau, t)$ 是面力基本解, 位移和面力基本解的具体表达式可参考文献 [12]; 当源点 p 位于光滑边界时, $C_{ij}(p) = \delta_{ij}/2$, 位于域内时, $C_{ij}(p) = \delta_{ij}$ 。

2 边界积分方程中奇异积分的处理

方程 (3) 中的基本解经过时间离散和积分后称为核函数, 根据该问题位移核函数的表达式作出能表示其变化趋势的示意图, 如图 1 所示。图 1 中在 $r = c_1 \Delta t$ 和 $r = c_2 \Delta t$ 处均发生了函数值的突变 (图 1 中: 横坐标 r 代表场点距离源点的距离; 纵坐标 U_{ij} 代表位移核函数值; c_1 代表纵波的波速; c_2 代表横波的波速; Δt 代表时间步长), 即在波动前沿处核函数值会产生突变。当源点位于积分单元内且 $c_1 \Delta t < d$ (d 代表单元尺寸) 时, 作波动前沿的示意图, 如图 2 所示, 图中由源点 p 产生的两处波动前沿 (虚线圆所示) 将积分单元 (四边形所示) 划分为 1、2、3 三个区域, 这 3 个区域的核函数值不连续, 特别是在 1 号区域的函数值全部为零, 因为波动还未传播到该区域。如果直接按照传统的细分方法进行奇异单元的细分, 则无法将这 3 个区域的不同考虑进去, 必然将导致计算精度的降低。

基于以上考虑, 根据单元尺寸和时间步长之间的关系, 笔者将奇异积分的单元分 3 种情况进

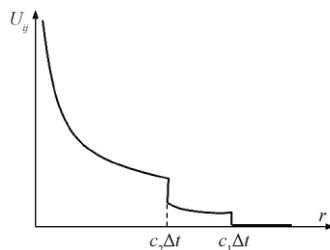


图 1 位移核函数曲线示意图

Fig. 1 Diagram of the displacement kernel function curve

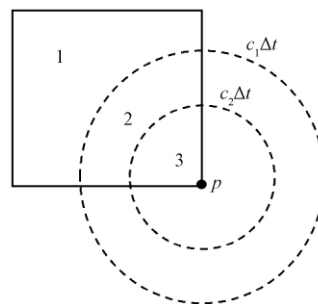


图 2 波动前沿示意图

Fig. 2 Diagram of the wave front edge

行细分。

(1) 当 $c_2 \Delta t \geq d$ 时, 细分方法如图 3 所示, 传统单元细分法采用的就是这种方式, 而在本方法中该细分方式只是其中之一。当源点位于单元的角点上时, 将源点与对角点相连, 如图 3(a) 所示, 原单元被细分为两个三角形子单元; 当源点位于单元的边上时, 如图 3(b) 所示, 将源点与其他两个节点分别相连形成 3 个三角形子单元; 当源点位于单元内时, 如图 3(c) 所示, 将源点与 4 个节点分别相连形成 4 个三角形子单元。在细分后的子单元内积分时, 不会再出现场点与源点重合的情况。第 1 种细分法出现的概率很小, 因为时间步长过大时计算结果的振幅衰减过快, 精度很低。

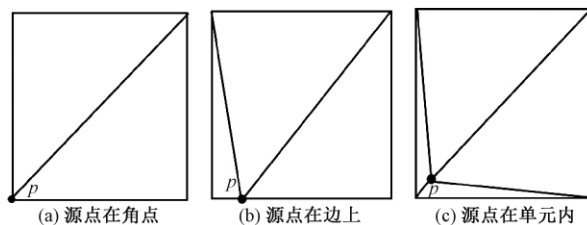


图 3 第 1 种单元细分方式

Fig. 3 The first kind of element subdivision method

(2) 当 $c_2 \Delta t < d < c_1 \Delta t$ 时, 细分方法如图 4 所示。此时纵波波动前沿位于单元外面, 横波波动前沿与单元相交 (图中圆弧形点画线所示)。无论源点位于单元的角点、边上或单元内, 均依据以下步骤进行单元细分: ① 求出波动前沿与单元边界的交点, 根据交点位置划分出一个包含源点的四

边形块(左下角的实线四边形所示);②将源点 p 分别与四边形的各个角点相连接,得到连线与波动前沿的交点,将该交点再与四边形的其他角点相连;③根据左下角的四边形块将积分单元的其他部分划分为 3 个四边形块.最终得到的分块结果如图 4 中实线所示,原单元被分为若干个三角形和四边形块,此时只在包含源点的三角形块中采用奇异积分即可,其他分块区域只需采用近奇异积分或正则积分.

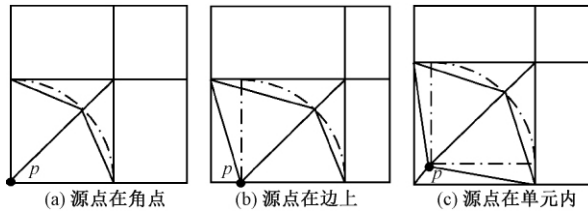


图 4 第 2 种单元细分方式

Fig. 4 The second kind of element subdivision method

(3) 当 $d \geq c_1 \Delta t$ 时, 细分方法如图 5 所示. 此时横波和纵波的波动前沿都与单元相交, 如图中圆弧形点画线所示. 首先按照第二种情况的步骤处理包含横波波动前沿的四边形块; 然后求出纵波波动前沿与单元边界的交点, 根据交点位置将单元的其他部分划分为若干个四边形块, 最终得到的分块结果如图 5 中的实线所示. 同样的, 只在包含源点的三角形块中采用奇异积分即可, 其他分块区域只需采用近奇异积分或正则积分.

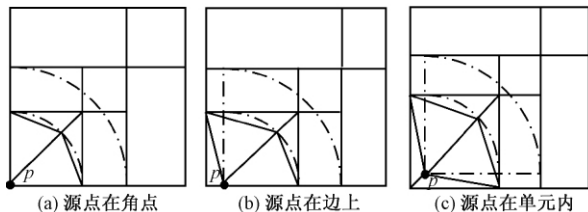


图 5 第 3 种单元细分方式

Fig. 5 The third kind of element subdivision method

与传统的单元细分法相比, 这种改进的方法能够根据波动前沿的位置动态改变单元细分方式, 在被波动前沿波及的区域布置更多的积分点, 得到更高的奇异积分精度, 而在波动前沿还未到达的区域无需布置积分点. 需要注意的是, 奇异积分只发生在第一个分析步, 后面的分析步无需使用单元细分法. 下面将通过两个数值算例对比改进后和改进前计算结果的精度.

3 数值算例

3.1 悬臂梁在 Heaviside 类型载荷下的动态响应

本例以悬臂梁为分析模型, 模型的几何尺寸如图 6 所示. 边界条件: 左端面约束所有方向的自

由度, 右端面施加值为 1 000 Pa 的均布载荷, 载荷为沿 x 轴正方向的 Heaviside 类型的均布力. 材料参数: 弹性模量 $E = 1.1 \times 10^5$ Pa, 密度 $\rho = 2.0$ kg/m³, 泊松比 $\nu = 0$. 当泊松比为 0 时, 该问题可通过理论方法计算出解析解. 因此本例中将泊松比设置为 0, 是为了得到数值解的计算误差, 在程序中仍然将该问题当作三维问题来计算. 根据文献[13]可得到悬臂梁上任意一点任意时刻的位移响应计算公式:

$$u(x, t) = \frac{8pL}{\pi^2 c^2 \rho} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^{(n-1)/2}}{n^2} \cdot \left(1 - \cos \frac{n\pi ct}{2L}\right) \sin \frac{n\pi x}{2L}, \quad (4)$$

式中: $c = \sqrt{E/\rho}$ 是一维问题中弹性波的波速.

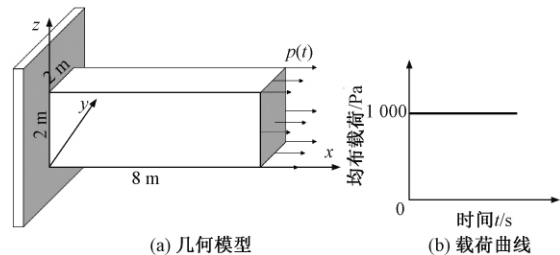


图 6 悬臂梁模型和载荷曲线示意图

Fig. 6 Diagram of the model and load curve of the cantilever beam

采用尺寸为 1 m 的线性四边形单元离散模型. 首先取时间步长 $\Delta t = 0.003 56$ s, 得到前 10 个分析步的计算结果. 表 1 给出了悬臂梁自由端位移的响应, 表中最后一列的数值等于改进前结果的相对误差减去改进后结果的相对误差, 可以看出改进后相对误差明显减小, 尤其是存在奇异积分的第一个分析步结果的相对误差减小了 15.5%. 将结果绘制成曲线, 如图 7 所示. 图 7 中 exact 曲线代表精确解, traditional 曲线代表改进前的结果, improved 曲线代表改进后的结果. 可以明显看出改进后的结果与精确解更加吻合.

表 1 $\Delta t = 0.003 56$ s 时悬臂梁自由端位移随时间的变化
Tab. 1 The displacement of the free end of the cantilever beam with time when $\Delta t = 0.003 56$ s

时间/s	解析解/m	改进前/m	改进后/m	相对误差减小/%
0.003 56	0.007 305	0.008 911	0.006 834	15.5
0.007 12	0.014 877	0.017 395	0.015 632	11.8
0.010 68	0.022 481	0.024 572	0.021 925	6.8
0.014 24	0.030 064	0.032 206	0.029 399	4.9
0.017 80	0.037 655	0.039 362	0.036 280	0.8
0.021 36	0.045 249	0.048 588	0.045 040	6.9
0.024 92	0.052 833	0.056 138	0.052 286	5.2
0.028 48	0.060 429	0.063 772	0.059 771	4.4
0.032 04	0.068 016	0.072 147	0.067 797	5.7
0.035 60	0.075 605	0.080 152	0.075 352	5.6

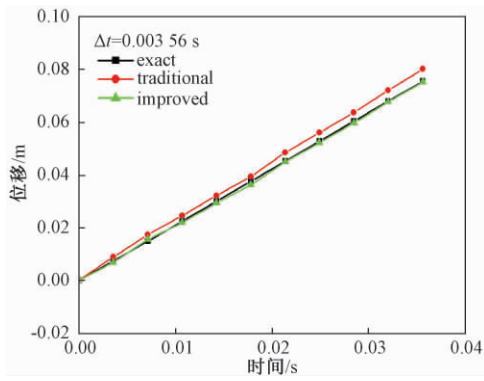


图7 $\Delta t = 0.003\ 56\ \text{s}$ 时改进前后结果的对比曲线
Fig.7 The comparison curves of the results before and after the improvement when $\Delta t = 0.003\ 56\ \text{s}$

将时间步长减小为原来的 $1/2$, $\Delta t = 0.001\ 78\ \text{s}$, 图8给出了该步长下改进前后计算结果的对比. 从图中可以看出, 改进前的结果在某些时刻会出现不稳定的现象, 改进后的结果与精确解更为吻合, 再次验证了本文方法的有效性.

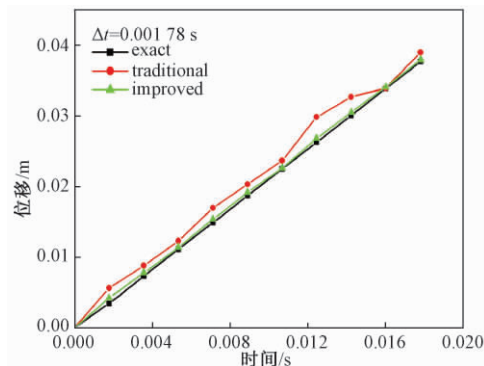


图8 $\Delta t = 0.001\ 78\ \text{s}$ 时改进前后结果的对比曲线
Fig.8 The comparison curves of the results before and after the improvement when $\Delta t = 0.001\ 78\ \text{s}$

3.2 带孔平板在动态载荷下的响应

该问题的分析模型如图9(a)所示, 图9(a)中几何尺寸单位为 mm, 边界条件: 下端面约束所有方向的自由度, 上端面施加随时间变化的均布载荷, 载荷曲线如图9(b)所示, 初始时刻载荷为零, 在 $t = 3.75 \times 10^{-5}\ \text{s}$ 时达到最大值 $118.125\ \text{MPa}$. 模型的材料参数为: 弹性模量 $E = 6.9 \times 10^4\ \text{MPa}$, 密度 $\rho = 2.7 \times 10^{-9}\ \text{kg/mm}^3$, 泊松比 $\nu = 0.3$.

采用尺寸为 $10\ \text{mm}$ 的线性三角形单元离散模型, 该算例无解析解, 将本文的计算结果与有限元分析软件 ABAQUS 的结果进行对比, 为了得到更加准确的对比数据, 将有限元网格尺寸取为 $5\ \text{mm}$.

取 $t = 2.5 \times 10^{-5}\ \text{s}$ 时所有节点的位移值绘制成位移分布云图, 并与有限元位移云图进行比较, 如图10所示, 本文方法的结果云图和有限元法基

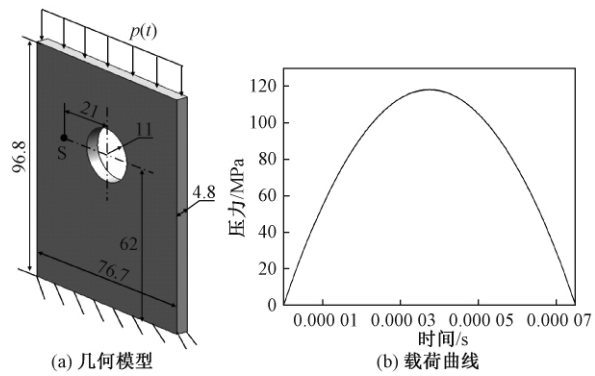


图9 带孔平板的几何模型及载荷曲线示意图

Fig.9 The geometric model and load curve of a plate with a hole

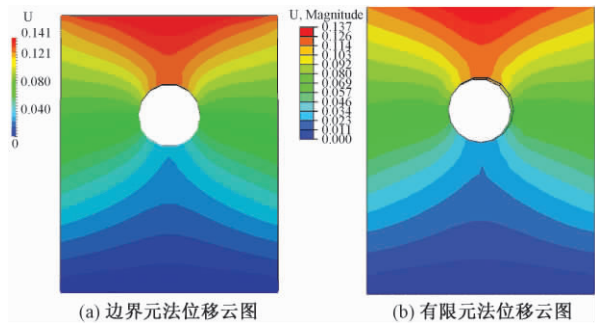


图10 $t = 2.5 \times 10^{-5}\ \text{s}$ 时带孔平板的位移分布云图

Fig.10 The displacement nephogram of the plate with a hole when $t = 2.5 \times 10^{-5}\ \text{s}$

本一致, 再次验证了该方法的正确性.

为了观察小孔附近的应力集中现象, 根据 $t = 2.5 \times 10^{-5}\ \text{s}$ 时所有节点的 mises 应力值绘制成应力分布云图, 并与有限元结果云图比较, 如图11所示, 应力分布与有限元的分析结果基本一致, 可以明显看出小孔附近的应力值最大.

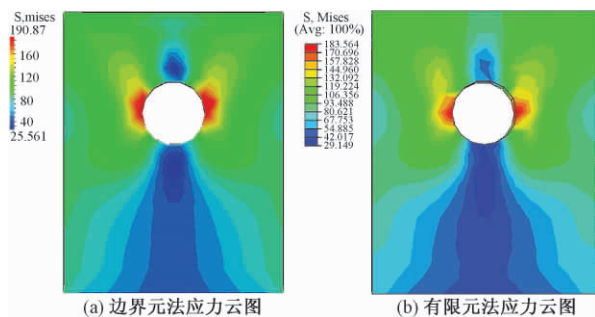


图11 $t = 2.5 \times 10^{-5}\ \text{s}$ 时带孔平板的应力分布云图

Fig.11 The stress nephogram of the plate with a hole when $t = 2.5 \times 10^{-5}\ \text{s}$

4 结论

笔者针对瞬态弹性动力学问题, 采用时域边界元法进行数值求解, 给出了该问题时域边界积分方程的一般形式. 通过研究基本解函数的性质,

提出了一种适用于动态问题的与时间步长相关的奇异单元细分法. 在本研究中, 首先由时间步长和波速计算出两个波动前沿的传播半径, 然后结合源点的位置将奇异积分单元分3种情况进行细分, 细分后再通过坐标变换法消除弱奇异性, 刚体位移法消除强奇异性. 与只考虑源点位置的传统细分法相比, 该方法提高了奇异积分的精度, 从而也提高了最终计算结果的精度. 最后的两个算例也验证了方法的有效性, 结果显示: 对于存在奇异积分的第一个分析步, 结果误差能够减小15.5%; 利用该方法得到的仿真结果能够准确模拟位移和应力的分布与变化.

参考文献:

- [1] 徐赫, 杨怡, 雷志鹏. 蝉翼结构静力学仿真和力学性能分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2017, 38(1): 1-5.
- [2] 李鹤龄, 王文伟, 任金秀. 广义不确定性原理下广义外势中 n 维理想费米气体的热力学性质[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2017, 45(3): 77-83.
- [3] 钱振东, 张勐, 许静. 动水压力对钢桥面环氧沥青铺装裂缝扩展影响[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(6): 48-52.
- [4] 姚振汉, 王海涛. 边界元法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [5] 胡良明, 李宗坤, 周鸿钧. 重力坝坝踵界面裂缝的
- 地震断裂分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2002, 23(3): 101-103.
- [6] BANERJEE P K, BUTTERFIELD R. Boundary element methods in engineering science [M]. London: McGraw-Hill, 1981.
- [7] ZHANG J M, QIN X Y, HAN X, et al. A boundary face method for potential problems in three dimensions [J]. International journal for numerical methods in engineering, 2009, 80(3): 320-337.
- [8] QIN X Y, ZHANG J M, LI G Y, et al. An element implementation of the boundary face method for 3D potential problems [J]. Engineering analysis with boundary elements, 2010, 34(11): 934-943.
- [9] ZHANG J M, LU C J, ZHANG X X, et al. An adaptive element subdivision method for evaluation of weakly singular integrals in 3D BEM [J]. Engineering analysis with boundary elements, 2015, 51: 213-219.
- [10] 周焕林, 牛忠荣, 程长征, 等. 各向异性位势问题边界元法中几乎奇异积分的解析算法[J]. 计算力学学报, 2008, 25(3): 333-338.
- [11] 刘兴业. 边界元法解弹性动力学问题[J]. 地震工程与工程振动, 1988, 8(4): 99-106.
- [12] MANOLIS G D, BESKOS D E. Boundary element methods in elastodynamics [M]. London: Uwin Hyman, 1989.
- [13] 马宏伟, 吴斌. 弹性动力学及其数值方法[M]. 北京: 中国建材出版社, 2004.

An Singular Element Subdivision Method Related to Time-Step Length

LI Yuan^{1,2}, ZHANG Jianming², ZHONG Yudong², QIAN Hongtao³

(1. College of Computer and Information Engineering, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China; 2. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. Department of Mechanical Engineering, Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China)

Abstract: The singular integral was one of the difficult problems for the Boundary Element Method to solve the physical problems. Its precision had great influence on the accuracy of the calculation result. Element subdivision was the key to solve the singular integral. Aiming at the problem of dynamic analysis. An element subdivision method related to time-step length was proposed. Compared with the traditional method, this method not only considered the position of the source point in the cell, but also the position of the wave front, which could reflect the segmentation characteristic of the kernel function. Therefore it could more accurately simulate the impact of longitudinal wave and shear wave on the integral of the element. In this paper, the accuracy of the method and its effect on the calculation accuracy were verified by two examples. The results showed that the error was 15.5% less than that of the traditional method for the first analysis step with singularity.

Key words: time-domain boundary element method; elastodynamic; singular integral; element subdivision; wave front

文章编号: 1671-6833(2019)01-0012-06

Web3D 家居素材库的轻量化技术研究

赵双燕, 贾金原, 周 文

(同济大学 软件学院, 上海 201804)

摘 要: 随着 Web3D 技术的不断发展, 使得人们对基于 Web3D 家居模型的互联网在线即时可视化服务需求激增. 利用轻量化关键技术, 方便快捷地解决了大规模 WebVR 家居模型的处理、传输、重建、实时渲染等问题. 提出了基于 WebVR 的轻量级三维家居素材库在线可视化服务, 详细介绍了该系统对家居模型轻量化的实现过程中一些关键技术, 包括轻量级渐进式网格处理、细粒化处理、基于视点传输等. 结果表明, 新的轻量化框架能够较好地处理模型, 提升了传输速度.

关键词: Web3D; WebVR 家居; 轻量级家居建模; 增量式传输; 轻量级 Web3D 渲染

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2019.01.005

0 引言

互联网+时代已经到来, 而 2017 年正是 VR+元年, Web 在线服务越来越火热. 以往互联网一直以 2D 的形态存在, 但是随着 3D 技术的不断成熟, 在未来的 5 年时间里, 互联网应用将会广泛地以 3D 的方式呈现给用户, 家居模型库作为应用之一将在互联网上以 3D 的形式来让用户体验, 这种体验的真实震撼程度要远超以往的 2D 环境. Web3D 应用需求的急速激增, 以及人们对 3D 场景质量要求的不断提高, 促使 2D 的展示方式在不远的将来被 3D 立体方式所代替, 这将成为一个必然趋势, 但这必须以一种操作简便、成本低、真实感强的 3D 图像建模技术为基础. 市场需求的变化趋势将引领技术的发展方向, 因此, 基于 3D 家居模型的互联网服务也发生了日新月异的变化.

随着虚拟现实和 Web3D 技术的发展, 基于网页的虚拟现实(WebVR)^[1-2]进入了我们的生活, 通过 WebVR 在网页上在线展示大规模虚拟家居场景已越来越受到人们的青睐. 相关方面的研究也相继出现, 但受 WebVR 传输、下载和渲染大规模虚拟家居场景发展缓慢的阻碍, 我们仍面临如下问题:

(1) 对于现存的可用网络带宽, 要实现实时

传输, 需要从服务器端下载的 WebVR 数据总量太大.

(2) 基于计算机图形学的 WebVR 渐进式传输仍然不能保证流畅地浏览 WebVR 家居场景, 尤其当场景较大或多个场景时, 延迟问题将会比较突出.

(3) 尽管大规模的 WebVR 家居场景已经被成功地下载了, 由于受浏览器的弱计算和有限的缓存能力限制, 在浏览器端实时地渲染它们, 这仍然是一个难题.

因此, 如何能在较少影响用户体验质量的前提下, 采用合适的方法, 降低浏览器和服务器端所处理的数据量就显得尤为重要. 为克服上述问题, 笔者拟通过场景中三维模型轻量化处理与流式化传输技术创新、细粒度处理、结合基于谷歌 Draco 压缩传输方法一起来解决所面临的挑战. 笔者在三维模型轻量化处理与流式化传输方面提出了一些新的想法, 鉴于单一的体素特征描述符对于局部特征的提取存在缺失, 加入了新的特征描述符及机器学习作为辅助, 同时对于渐进式网格(progressive meshes, PM)存在的顶点塌陷问题, 提出保留部件边缘约束的方法来保证对曲率的保持, 这样既保证了流式化处理的时间和效率, 又保证了模型的处理效果.

收稿日期: 2018-08-11; 修订日期: 2018-09-23

基金项目: 中央高校基本科研业务费——学科交叉类项目重点项目(20153797)

通信作者: 贾金原(1963—), 男, 山东乐陵人, 同济大学教授, 博士, 主要从事轻量级 3D 建模、虚拟现实及 Web3D 等方面的研究, E-mail: jyjia@tongji.edu.cn.

1 三维模型的轻量化与流式化

渐进式流式化是一种基于渐进式网格的模型编码方法. 渐进式网格最早由 Hoppe^[3] 提出, 在该方法中将原始的场景模型表示成一个“基网格 (base mesh)”和一系列的“网格增量”. 在场景加载之初, 可直接加载数据量相对较少的、精细度比较低的“基网格”来代替整个场景模型. 随着时间的推移, 将后续接收到的“网格增量”依次合并到当前的“基网格”中, 达到场景模型逐渐精细化到原始场景模型的目的.

在进行渐进式编码时, 算法首先采用“边折叠”的方式对场景模型进行简化处理, 并将整个模型的几何、拓扑等信息的变化进行编码形成编码流. 简化过程在满足终止条件时结束, 此时简化后的模型就表示“基网格”, 简化过程中的每一步形成的编码即为“网格增量”. 在进行解码时, 算法通过“点分裂”的方式将这些“网格增量”逆序合并到“基网格”中, 以恢复原始模型.

然而, 由于渐进式编码压缩本身的特点, 在将其应用于 WebVR 系统中时还需要综合考虑诸如压缩模型本身的几何特征和传输时的丢包处理以及频繁的“网格增量”请求导致服务器的负载加重等问题, 在后续的发展过程中出现了很多改进的新方法. 例如在大规模 3D 模型中寻找重复性组件的想法, 该想法最早是在文献 [4] 中提出的. Cai 等^[5] 采用姿态单位化的方法来查找更多的重复性三维组件, 以此来获得更高的压缩率. Wen 等^[6] 提出的基于体素化的查重方法, 相比较其他采用渐进式网格的非重复三维组件方法, 能获得更高的查重率. Englert 等^[7] 提出了一种轻量化渐进式网格加轻量化渐进式材质的框架. Liu 等^[8] 改进文献 [6] 的方法, 通过语义轻量化将大规模 WebVR 分成一些细粒度块的方法来适应网络传输.

笔者在借鉴前人研究经验的基础上, 对三维模型的轻量化与流式化作出了一些改进, 以期更好地适应当前 WebVR 家居素材库发展的需要.

2 关键技术和成果

2.1 轻量级渐进式网格 (lightweight progressive meshes, LPM) 处理

2.1.1 LM (lightweight meshes) 处理

(1) 预处理. 对输入的三维模型首先要进行预处理, 基于对文献 [3] 中提及的边折叠、点分裂

的 LOD (level of detail) 进行优化, 同时依据三角形网格的连接性对模型进行预处理, 经过预处理后生成模型的基网格, 对所有部件从模型中分离作预处理.

(2) 姿态对齐. 温来祥^[9] 提出的改进的主成分分析 (principal component analysis, PCA) 方法来寻找模型的 3 个主轴, 由于 PCA 3 个主轴方向问题, 提高了姿态单位化带来的姿态对齐效果, 有效区别顶点相同而拓扑不同的模型, 使得姿态对齐的精确度有所提高. 在对模型进行姿态对齐时, 利用启发式的遗传算法搜索最优解, 解决了两模型间的姿态对齐问题. 并考虑了旋转、平移、缩放的调整, 提高了对三维模型进行姿态对齐的时间效率. 通过姿态对齐, 使得三维模型处于同一参考坐标系下, 所提取的模型特征具有几何不变性.

(3) 特征提取. 温来祥^[9] 给出了一种体素特征描述符 (voxel shape descriptor, VSD) 来免疫 PCA 的退化问题和模型的三角化问题. VSD 使用与三维模型表面轮廓相交的体素作为模型特征, 这些体素称为表面体素, 它可以用位序列保存, 当利用位操作时可以提高匹配效率, 但仅采用 VSD 特征进行模型特征提取难免不够全面, 因此笔者提出在 VSD 基础上采用综合特征来提高模型匹配质量和效率, 并加入多个特征如草图、骨架特征、二维光场描述符等, 在此基础上加入机器学习来提高模型部件的匹配精确度. 首先采用 SIFT (scale-invariant feature transform)^[10] 算法提取出局部区域多种特征, 借鉴文献 [11] 使用的 BoF (bag of features) 方法将所有提取出的特征放在一起, 对这些特征向量做聚类分析, 将质心作为类别的代表. 将每个模型的特征在它对应的质心上做直方图, 依据欧氏距离进行类别划分, 采用关键点特征向量的欧氏距离来作为两个草图中关键点的相似性判别度量, 在此基础上使用分类器就可以很容易进行分类. 在聚类过程中, 采用高斯混合模型方法, 对训练的特征库进行多次迭代来对参数进行估计, 并使用支撑向量机分类. 借鉴文献 [11] 中的基于视点的匹配方法来进行模型的匹配, 引入机器学习的方法后, 模型的匹配度得到了提升.

(4) 去重、构造轻量级场景图 (lightweight scene graph, LSG)^[9] 结构. 依据 (3) 中的模型部件的特征描述符, 对各部件进行分类, 形成相应的集合, 对每个集合中的部件进行去重, 形成基于部件的表示方式的集合. 该集合的组织结构形式为轻量级场景图 LSG, 它作为一种有向无环图, 具有层

次和部件重用的双重特性,去掉冗余数据后,原三维模型的数据量很大程度上减少了,并且没有对精度产生影响。

2.1.2 PM 处理

选择 PM 流式化处理,对轻量化预处理后的非重复性部件或单元构件,判断外形是不是曲面,只有曲面才进行 PM 流式化处理,简单形体无需 PM 流式化处理。

对经过去重处理及曲面判断的部件库进行 PM 处理,目前的 PM 是边折叠和点分裂的方法,温来祥^[9]提出的是基于二次误差矩阵(quadric error metric, QEM)的简化方法来生成 PM,该方法可以生成高质量的粗糙模型,将每个唯一部件生成 PM,并用 LSG 来组织,生成了模型的 LPM。但该方法不能使唯一部件的边缘得到很好的保留,内部三角面的连接效果也不好。因此笔者提出了改进的 PM 方法:在 PM 方法基础上对部件边缘保留约束,实现无错位,最终使得计算顶点的时间不受影响,边的曲率尽可能小。该改进的 PM 方法借鉴文献[12]的方法提出了一种新的三角网格简化算法,这种基于全局的简化降低了三角面片的数量而又尽可能地保留了网格表面的整体外观效果,使部件的边缘得到很好的保留。该简化算法的实现不仅考虑到表面网格、预期停止点预测,还将大量的额外参数也考虑在内。这些参数控制和监控简化过程与文献[9]使用的边重叠、点分裂的方法不同,这里提出了半边重叠的概念,半边重叠的操作是通过移动实现的,包含一个顶点和两个边,它将保留的顶点移动到一个新的位置。具体三角网格的简化实现过程如图1所示。

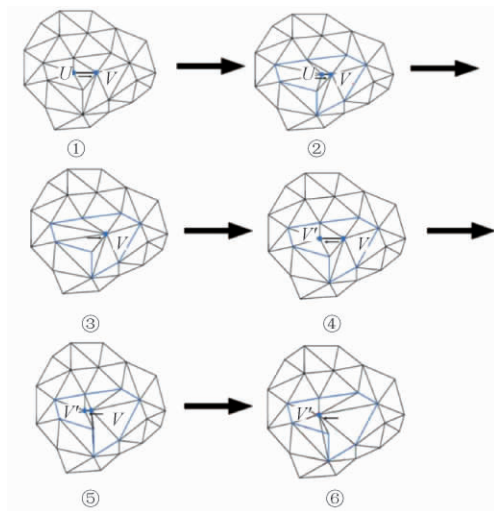


图1 三角网格简化过程

Fig.1 Process of triangular mesh simplification

经过改进的 PM 处理后,在基网格的基础上生成原始模型的渐进式重建信息。经过 LM 和改进的 PM 处理后,三维模型输出自定义的流式化传输格式。具体 LPM 处理流程如图2所示。

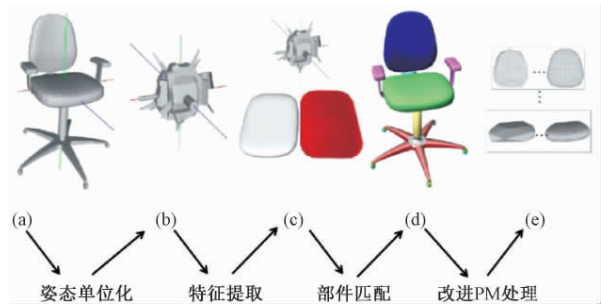


图2 LPM 处理流程

Fig.2 LPM processing flow

LPM 处理流程: (a→b) LM 预处理,姿态单位化,将部件变换到同一坐标系中; (b→c) 对部件进行多特征提取; (c→d) 依据特征描述符进行分类、去重,构造 LSG 组织结构; (d→e) 改进的 PM 处理。

2.2 流式化传输与实时渲染

经过 LPM 处理的模型存储于服务器端,当客户发出请求后,客户端接收来自于服务器端的基网格,进而接收网格增量,最终展现原模型。客户端对接收到的数据进行解析,并存储在 cache 中,依据最近(least recently used)算法。具体实现过程采用 WebGL 和 JS。

2.2.1 细粒度预处理

当用户浏览大规模的 3D 场景时,需要在 Web 端实时渲染这些场景,细粒度预处理的流程是将大规模 3D 场景分解成一些子空间,当漫游进入这个子空间时,作为一个下载和渲染的独立单元,每个子空间是个相对自我封闭的空间。Web 浏览器根据当前视点的位置和方位仅下载对应的子空间。在通过室内场景细粒度化后,整个构筑物的室内数据又分为多个子空间,而对于每个子空间,则以子空间内部的构件为单位,将该子空间作为场景进行索引构建,并将构建完成的索引信息作为该子空间的组织方式。对经过改进的 PM 处理后的模型,原始模型被处理成含有较少数据量的基网格和增量网格两部分。在进行场景漫游时,首先将子空间中的构件处理成基网格数据,并在后续的漫游过程中,根据视点位置,增加相应的增量网格来实时调整该模型的精度,使得在整个漫游过程中,不仅不影响用户体验质量,而且能做到增量数据

的按需处理. 例如, 对于多层多间居室包含许多个房间, 这些房间不能被浏览器一下子渲染出来, 而是被分割成细粒化的一些子空间. 每个子空间仅包含一定数量的组件, 因其相对的空间封闭, 它们可以被实时渲染.

2.2.2 LPM 数据的压缩传输

笔者采用谷歌开发的开源压缩工具 Draco 来进行 LPM 数据的压缩、传输. 谷歌开发的 Draco 是关于点云的编码与压缩的源码, Draco 由谷歌 Chrome 媒体团队设计, 旨在大幅加速 3D 数据的编码、传输和解码. Draco 可以被用来压缩 mesh 和点云数据. 它还支持压缩点 (compressing points)、连接信息、纹理协调、颜色信息、法线 (normals) 以及其他与几何相关的通用属性. 谷歌官方发布的 Draco Mesh 文件压缩率大幅优于 ZIP. Draco 的算法, 它既支持有损模式, 也支持无损模式. 笔者采用 Draco 的无损模式, 保证压缩与传输过程中不丢失数据. 根据谷歌官方公布数据, Draco 有较好的压缩率, 对于较小的模型, 压缩效果提高 15%, 法线的压缩效果提高 40%.

2.2.3 Web 前端的数据解析

对于收到的基网格数据, 采用 direct mapping 的方式直接创建 vertex buffer (VB)、index buffer (IB), 并将数据映射到 WebGL 端, 提升渲染数据的准备效率, 减少准备时间. 增量网格数据采用最小邻近插入的方法, 直接更新到 VB、IB 中, 并更新局部缓冲区, 实现增量渲染.

2.2.4 依据视点部件的优先级进行传输

对于客户端请求的数据, 依据当前的观察者视角, 对数据处理的优先级进行排序, 优先进入客户视野的模型数据优先传输. 根据视线方向与视距来确定初始传输哪些部件以及传输优先级与分辨率, 然后根据当前网络带宽决定适应性打包处理. 不同的物体对人眼的视觉贡献度不同, 由于与视点的距离以及物体自身的体积等原因, 离视点较近、体积较大且不易被遮挡的物体总是更容易被观察到. 因此, 从构件与视点的距离和构件本身的特征出发, 根据视觉贡献度得到构件实体的优先级, 优先级较高的构件实体先于其他构件实体被装载和渲染. 一个包被看作是一个网络传输单元.

2.2.5 高效网页级渲染结构

随着每个子空间模型的组件数量的增多, 使所有的加载时间变长, 从而用户的等待时间

也会相对变长. 笔者实行了一种高效网页级渲染结构, 这种结构利用边加载边渲染的高效率以及轻量级结构带来的低数据提高传输率, 这种多线程模式降低了用户的延迟, 改善了传统的下载-渲染策略会占用用户很长的视觉等待时间的情况. 一旦用户下载数据, 它会分析数据并传递至渲染线程在网页端显示, 这样会降低用户的视觉等待时间.

3 实验部分

开发语言: C++ \JS \WebGL;

测试用例: 普林斯顿 PSB 模型库中部分种类模型及典型模型如 CAD 汽车、服装商品、建筑物房间、家居平台中常规家具模型;

测试环境: 笔记本电脑两台, 服务器端为 Windows 7, Mem 为 8 G, CPU 为 Intel Xeon 2.39 G; 客户端为 Windows 7, Mem 为 8 G, CPU 为 Intel i7-4700MQ, 带宽为 5 MB/s.

3.1 三维模型轻量化与流式化实验

实验前需对测试模型进行格式统一, 转换成 LPM 可以接受的 FBX、OBJ 格式, 进而再对测试模型进行处理.

将本文的轻量化方法与文献 [9] 的方法进行比较, 通过考察识别重复模型部件的能力和数据的压缩率两个指标, 可以发现笔者的方法明显优于文献 [9] 的方法, 具体比较数据如图 3 和表 1 所示.

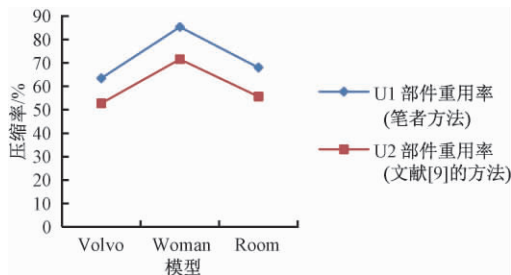


图3 部件重用率比较

Fig.3 Comparison of component reuse rate

表1 对 PSB 模型库中模型进行 LPM 处理后的关键数据

Tab.1 Critical data of PSB models after LPM processing

模型	模型三角面数	处理时间/s	处理压缩率/%	部件重用率/%
Volvo	754 234	29.0	69.83	63.47
Woman	62 342	7.6	89.40	85.30
Room	292 743	13.0	78.35	68.00
PSB 部分模型结果拟合	64 803	7.9	86.73	75.47

从数据中可以看出, LPM 算法对于模型的可扩展性支持较高, 从小规模的模型到大规模的模型均可以进行较好的处理. 算法对模型的处理时间跟模型的规模有相关性, 处理结果中的压缩率与部件重用率也有相关性, 如果模型中的部件重用率较高, 那么对应的压缩效果也越好, 反之对应的压缩效果下降. 这主要是由于在 PM 处理过程中需要存储重建时的信息,

因而会含有部分冗余的信息, 若部件的重用率较高则可在重用的部件上减少重建信息的数量, 因而会有较好的压缩率. 从模型相关性上可以看出, 对于机械、建筑之类对称性或模块化较明显的模型或资源上, 部件的重用率会更高.

3.2 数据压缩与网络传输性能测试

Draco 压缩测试数据处理流程如图 4 所示.

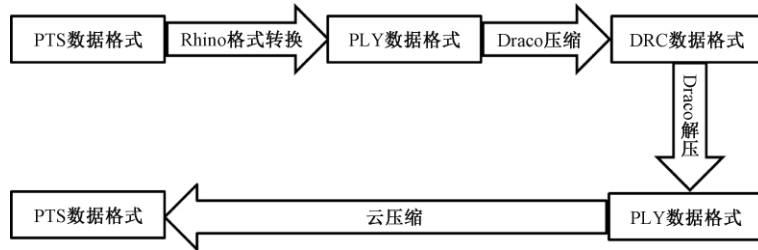


图 4 Draco 压缩测试数据处理流程

Fig. 4 Compressed test data processing flow

(1) Draco 支持的数据源为 .ply 和 .obj 格式. 对于 PTS 数据格式需要先使用 Rhino 转换为 .ply 格式, 然后在 Draco 中进行压缩处理;

(2) Draco 压缩之后的格式为 .drc, 在使用时需要先对 .drc 文件进行解压;

(3) Draco 解压缩出来的格式为 .ply, 不能直接当成点云处理的对象来使用, 需要使用 .ply 再转化为 PTS 格式.

利用 Draco 对 PSB 模型进行测试后发现, 该方法在解压缩和传输时间上效率很高, 节省时间效率约为 11% ~ 22%. 具体的传输率和传输时间等数据如表 2 和表 3 所示.

表 2 利用 Draco 对模型处理的压缩率

Tab. 2 Compressed rate of models processing with Draco

PTS 源文件 大小/MB	源 PLY 文件 大小/MB	由 PLY 转换得 到的 PTS 文件 大小/MB	源 PTS 到转 换后的 PTS 压缩率/%
241	192	215	89.21

表 3 利用 Draco 对模型处理结果

Tab. 3 Result of models processing with Draco

模型	三角 面数/个	压缩传 输时间/s	解压缩 时间/s	直接传输 时间/s	处理时 间/s
Volvo	754 234	1.12	1.30	2.73	0.31
Woman	62 342	0.30	0.95	1.40	0.15
Room	292 743	0.73	0.70	1.90	0.47
Dragon	871 414	1.20	1.53	3.50	0.77

从数据中可以看出, 对于较大规模的模型, 压缩之后传输可以得到较好的性能提升, 而对于较

小的模型, 由于传输并不会成为瓶颈, 因而对应的传输比提升不是太明显. 使用压缩进行数据传输需要在压缩比与传输比之间达成一个平衡, 避免过于依赖传输或过于依赖解压.

3.3 前端解析与渲染效果

笔者对室内家居场景进行了 Web 端解析与渲染, 具体效果如图 5 所示.



图 5 家居场景渲染效果图

Fig. 5 Rendering of house scene

4 结论

笔者基于 WebVR 和成熟的轻量化技术对大规模的三维家居模型的在线可视化服务进行了探索. 笔者提出的新的轻量化框架能够较好地处理模型, 在保证最终渲染质量无损失的情况下, 提升了预处理与传输的速度, 以便在 Web 客户端更好地实现可视化. 但是, 在笔者提出的方法中仍旧存在一些短板, 以下几个方面是我们接下来努力的方向: (1) 增加算法的模型适配性, 现在对汽车等构建重复度较高的模型类型效果会比较好一些, 需要提升 LM 的效果; (2) 建立基于视点的预测加载机制, 提升加载效率; (3) 基于视点的操作在云端来进行.

参考文献:

- [1] BARSOUM E, KUESTER F. WebVR: an interactive Web browser for virtual environments [C]//Stereo-scopic Displays and Virtual Reality Systems XII. Bellingham: Proc of SPIE, 2005: 540 – 547.
- [2] YIN T F, HAN Y, CHEN Y, et al. WebVR-web virtual reality engine based on P2P network [J]. Journal of networks, 2011, 6(7): 990 – 998.
- [3] HOPPE H. Progressive meshes [C]//Proceedings of the 25th Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM, 1996: 99 – 108.
- [4] SHIKHARE D, BHAKAR S, MUDUR S P. Compression of large 3D engineering models using automatic discovery of repeating geometric features [C]//Proceedings of the Vision Modeling and Visualization Conference. India: Juhu, Mumbai, 2001: 233 – 240.
- [5] CAI K, WANG W, CHEN Z, et al. Exploiting repeated patterns for efficient compression of massive models [C]//International Conference on Virtual Reality Continuum and ITS Applications in Industry. New York: ACM, 2009: 145 – 150.
- [6] WEN L X, XIE N, JIA J Y. Client-Driven Strategy of Large-Scale Scene Streaming [C]//Proceedings of International Conference MultiMedia Modeling. Miami: Springer, 2016: 93 – 103.
- [7] ENGLERT M, JUNG Y, KLOMANN M, et al. A streaming framework for instant 3D rendering and interaction [C]//Proceedings of the 21st ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. Beijing: ACM, 2015: 192 – 192.
- [8] LIU X J, XIE N, TANG K, et al. Lightweight for Web3D visualization of large-scale BIM scenes in real-time [J]. Graphical models, 2016, 88: 40 – 56.
- [9] 温来祥. 大规模三维场景的轻量化与流式化传输 [D]. 上海: 同济大学软件学院, 2015.
- [10] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International journal of computer vision, 2004, 60(2): 91 – 110.
- [11] EITZ M, RICHTER R, BOUBEKEUR T, et al. Sketch-based shape retrieval [J]. Acm transactions on graphics, 2012, 31(4): 1 – 10.
- [12] CACCIOLA F. CGAL 4.10-triangulated surface mesh-simplification [EB/OL]. [2018-04-03]. https://doc.cgal.org/latest/Surface_mesh_simplification/index.html#title0

The Research of Web3D Household Repository Lightweight Technology

ZHAO Shuangyan, JIA Jinyuan, ZHOU Wen

(Department of Software Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: With the development of Web3D technology, Web service demand for 3D household models on line application surged. Taking advantage of lightweight technology and so on, the processing, transmission, rebuilding, and real-time rendering problems were solved for large scale WebVR household models. Based on WebVR, this paper put forward the online visual service of Web3D lightweight household models repository was introduced. The detailed process of the lightweight household models, and some related key technologies, including lightweight progressive meshes processing, fine-grained preprocessing, viewpoint based transforming and so on were also introduced. The results showed that lightweight technology could process the household models rapidly.

Key words: Web3D; WebVR household; lightweight household modeling; incremental transmission; lightweight Web3D rendering

基于自适应聚类中心的脑血管分割方法

王 喆^{1,2}, 赵世凤^{1,2}, 田 沅^{1,2}, 王学松^{1,2}, 周明全^{1,2}

(1. 北京师范大学 信息科学与技术学院, 北京 100875; 2. 文化遗产数字化保护与虚拟现实北京市重点实验室, 北京 100875)

摘要: 脑血管分割是血管病变可视化、诊断和定量分析的关键步骤。但由于脑血管几何结构复杂, 所占空间面积小, 因此低对比度区域的血管分割依然是难点。在传统的基于密度的统计方法基础上, 进一步采用基于梯度的自适应聚类中心的 K 均值进行血管提取。首先, 根据磁共振血管成像 (MRA) 图像密度特征用一个瑞利分布和两个高斯分布函数, 分别对背景区域、中间组织区域以及血管区域进行建模, 采用期望最大的方法进行参数估计, 利用后验概率获取血管的主体部分; 之后根据剩余体素中包含血管的部分多为低密度区的细小血管以及血管边界的特点, 对剩余体素进行梯度化处理, 并提出改进的自适应聚类中心的 K 均值方法对剩余体素的梯度数据进行血管的聚类操作。实验结果表明, 对剩余数据梯度化的聚类方法优于传统的仅基于密度的统计方法, 且能更好地获取血管的细小分支及血管的边缘区域。

关键词: 脑血管分割; 有限混合模型; K 均值

中图分类号: TP391

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2019.01.004

0 引言

脑血管疾病是因颅内血液循环障碍而造成脑组织损害的一组疾病, 以急性发病居多, 多表现为半身不遂、言语障碍等。每年有大量的病人忍受着脑血管问题所带来的常见疾病, 例如颈动脉狭窄和动脉瘤等疾病。脑血管疾病如不能被早期诊断, 将会有引发脑中风的危险。组织结构的切分对辅助诊断、治疗和手术规划具有重要的意义。因此, 脑血管的精确检测与分割, 尤其是低密度细小血管的提取, 有助于脑血管疾病的辅助诊断与治疗。

血管造影可以进行体内血管的无创检查。基于 MR 的血管造影是颅内血管评价中最常用的非侵入性成像技术。磁共振血管成像 (MRA) 图像提供了血管与背景之间相对出色的对比度和较高的空间分辨率, 这为血管结构的提取创造了较为丰富的前提条件^[1]。

从复杂数据集准确的可视化和量化的病情状况来看, 分割是一个基本的步骤。国内外学者从未间断对脑血管提取算法的探索。到目前为止, 已有许多 2D 或 3D 的血管分割方法。但绝大多数 2D

算法无法直接用于 3D 数据的分割。3D 血管分割技术大致可分为两类^[2]: 基于活动轮廓模型的方法和基于概率统计的方法。基于活动轮廓模型的方法的基本思想是在图像力的作用下驱动曲线到达物体的边界。活动轮廓模型通常分为参数活动轮廓模型^[3]和几何活动轮廓模型^[4]。几何活动轮廓模型可进一步分为基于边界^[5-6]的模型、基于区域的模型^[7-8]和混合模型^[9-12]。分割曲线的演化通常由最小化某种变分能量泛函来实现。常用的数值计算此类活动轮廓演化的方法是 Osher 等^[13]提出的水平集方法。但此类方法需针对不同的图像设置不同的参数才能获取较好的分割效果, 也即此类算法的性能依赖于所设计的能量函数。

除了活动轮廓模型, 利用统计信息进行图像分割的方法一直是一个活跃的研究领域。统计模型将图像数据中的体素分成血管区域和非血管区域^[14]。从 MRA 数据中提取血管的自适应统计方法由 Wong 等^[15]提出。Hassouna 等^[16]也提出从时间飞跃法 (TOF) 中采用随机模型方法进行分割。Roy 等^[17]提出了利用基于期望最大化的瑞利混

收稿日期: 2018-09-12; 修订日期: 2018-11-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61672103、61472042); 北京市自然科学基金资助项目 (4174094); 青岛市科技计划项目 (2017-4-3-2-xcl)

通信作者: 赵世凤 (1981—), 女, 山东临沂人, 北京师范大学讲师, 博士, 主要从事医学图像处理研究, E-mail: zhao_shifeng@bnu.edu.cn.

合模型的瑞利分类器进行分割. 实验结果表明, 基于统计信息的概率模型在信噪比较低的图像中提高了分割方法的鲁棒性, 但其准确性依赖于底层概率模型的设计.

血管形态结构的复杂性使得单一的算法很难获得满意的分割效果, 目前较为有效的方法是混合分割方法, 这也是血管分割的一个研究趋势. Gao 等^[18]提出了一种基于统计模型的快速活动轮廓模型对脑血管进行分割, 同时为提取 MRA 数据集的三维脑血管提高了曲线演化的效率. Tian 等^[19]结合统计信息及血管形状模型的向量场设计了适合血管的活动轮廓模型进行血管分割. 混合模型算法实验结果是令人满意的, 但对于细小血管的提取依然有提升的空间.

笔者在传统的统计方法基础上, 即采用有限混合模型对体数据密度进行建模, 采用期望最大进行参数估计的方法, 以后验概率的方式提取血管的主体部分, 而对于血管的边缘区域和细小的血管则首先计算其梯度值, 采用基于改进的 K 均值聚类方法对剩余体数据中的血管进行进一步提取.

1 本研究算法

笔者所提出的算法主要由两个部分构成. 第一步由瑞利高斯混合模型提取血管的主体部分; 第二步由改进的 K 均值聚类算法进一步提取血管边界及细小血管部分. 算法过程图如图 1 所示.

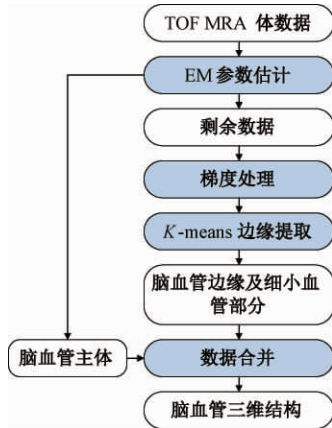


图 1 算法过程图

Fig. 1 Process of the algorithm

1.1 基于有限混合模型的脑血管主体提取

传统的基于统计的方法对时间飞跃法磁共振血管成像 (TOF MRA) 数据进行血管分割时, 首先根据 TOF MRA 数据密度分布特征将体素划分为 3 个区域. 低密度区域对应于脑脊液、骨骼和背

景; 中密度区域对应于脑组织, 包括灰质和白质; 高密度区域主要包括脑血管. 采用高斯分布、瑞利分布或是统一分布 (一般用于 Phase-Contrast MRA 数据) 分别对 3 种密度区域进行建模, 然后采用期望最大算法对模型进行参数估计, 最后将每一体素点的密度值带入混合模型中, 确定该点是否属于血管部分的概率, 从而实现对血管的分割.

笔者对血管主体部分的分割亦是采用传统方式进行. 在这里, 我们首先用瑞利高斯混合模型对体素进行建模, 如式 (1) 所示.

$$\begin{cases} p(I | P, \Theta) = \underbrace{w_B R(I | B, \theta_B)}_{\text{Background}} + \underbrace{w_T G_1(I | M, \theta_T)}_{\text{Tissue Mixture}} + \underbrace{w_V G_2(I | V, \theta_V)}_{\text{Vessel Distribution}}; \\ w_B + w_T + w_V = 1. \end{cases} \quad (1)$$

式中: w_B, w_T, w_V 分别为 3 类分布的权重, 其中下标 B 代表低密度区域, 包括脑脊液、骨骼和背景 (background); T 代表中密度区域, 包括脑组织 (tissue mixture); V 代表高密度区域, 主要包括脑血管 (vessel distribution).

R 为瑞利分布:

$$R = \frac{x}{\sigma_R^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_R^2}\right). \quad (2)$$

$G_k (k=1, 2)$ 为高斯分布:

$$G(I | \mu_k, \sigma_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_k} \exp\left(-\frac{(I - \mu_k)^2}{\sigma_k^2}\right). \quad (3)$$

有限混合模型中包含一个瑞利、两个高斯分布, 分别对应了低、中、高 3 个密度分布区域. 高密度区域包含了目标血管部分. 由此可以将从体数据中分割血管的问题转换为从有限混合模型判断哪些体素属于高密度区域所对应高斯分布的问题. 由于整体分布由几个函数分布混合而成, 无法直接得知每个体素所属的分布, 故而采用期望最大算法 (EM) 对分布函数的参数进行估计.

1.2 基于自适应聚类中心的脑血管边缘提取

完成血管主体部分的初步分割, 我们发现剩余数据中含有部分未分割出的血管边界和细小血管. 由于剩余数据中包含血管的数据量较小, 若再利用密度值进行分割, 存在较大困难. 尽管剩余部分血管的数据量相对于体数据来说较小, 但是目标体素多出现于血管的边界, 因此将该部分数据进行梯度处理, 以提高剩余部分血管边界的对比度, 从而进行下一步分割.

首先将数据按垂直方向分层, 分别在每一层计算数据梯度, 以获取梯度值数据. 因处于边缘处血管的梯度值较大, 为了提取出梯度数据中较亮

的血管部分,笔者采用改进的自适应聚类的 K 均值方法,且是对梯度数据而非密度数据进行聚类,从而找出目标血管。

观察到血管边缘被包含于梯度值较高的部分,因此笔者考虑找到一个梯度值的分水岭,比该分水岭大的部分包含尽可能多的血管,同时比该分水岭小的部分包含尽可能少的血管。笔者通过梯度值表示体素,并通过该梯度值的欧氏距离度量体素之间距离。由于随着聚类中心数目的上升,分水岭存在于 K 均值聚类中心值最大的类别中(尽管聚类中心数目过大会使得分水岭从中心值最大的类别中脱离,但是在较少的类别时,分水岭仍存在于中心值最大的类别中)。因此,笔者通过自动调节聚类数目使得聚类中心值最大的类别包含尽可能多的血管部分,同时包含尽可能少的非血管部分。

随着聚类中心数目逐渐上升,聚类中心值最大的类别包含的非血管部分越来越少,同时在整体上,聚类中心的最大值逐渐增大。观察到在上述过程中,当聚类中心的最大值出现明显上升时,拥有最大值的聚类中心表示的类别包含了较多的血管边缘以及较少的非血管部分。因此,笔者通过调节聚类中心数目不断增大并观察聚类中心最大值的变化,从而识别聚类中心最大值的明显上升。此时,该聚类中心的最大值可以作为上述分水岭对血管边缘进行分割。

1.3 K 均值聚类中心数目的确定

观察数据后发现,剩余数据中血管部分的数值高于其他部分的数值,并且血管部分与非血管部分的数值大小差异相对于非血管部分的内部差异更为明显。上述差异给予提示可通过调节 K 均值聚类中心的数目,找到合适的聚类中心数使得最大的聚类中心作为分水岭取得较好的分割效果。

如图 2 所示,笔者的方法是逐步增加聚类中心点数目,通过观察聚类中心最大值变化的差异来判定合适的聚类中心点数,相应聚类中心的最大值即作为分割的分水岭。 K 均值在 N 簇($cluster$)中心点下进行聚类时,血管部分往往包含于聚类中心较大的簇中。比如,当 $N=2$ 时,由 K 均值计算,将整体数据聚为两类,即 $cluster_1$ 和 $cluster_2$,其聚类中心点分别是 $center_1$ 和 $center_2$ 。其中 $center_1 < center_2$,即 $cluster_1$ 包含了梯度数据中拥有较小值的部分, $cluster_2$ 包含了梯度数据中拥有较大值的部分。

由于血管数据在整体梯度数据中是较亮的部

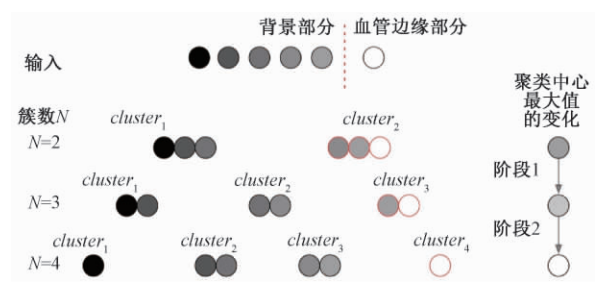


图 2 基于 K 均值血管边缘提取示意图

Fig. 2 Boundary extraction of vessel with K -Means

分,因此 $cluster_2$ 中包含血管数据。但是由于仅仅将整体数据聚成两类,在 $cluster_2$ 中仍包含了大量的非血管部分的数据。因此可以将 $cluster_2$ 中的数据表示为 $nonvessel + vessel$ 两个部分,其中 $nonvessel$ 是非血管数据, $vessel$ 是血管数据。随着聚类数目 N 的增大,在最大聚类中心所对应的 $cluster_N$ 中 $nonvessel$ 的比例逐渐减少, $vessel$ 的比例逐渐上升。从数据特征上看,非血管部分的数据值与血管部分数据值存在较为明显边界,表现在数值上差异较大。因此,当聚类数目 N 上升至 N_{target} ,相应聚类中心点在数值上出现明显的突增,最大中心对应的簇中包含的可以将 N_{target} 对应的聚类中心的最大值作为血管边缘与非血管部分梯度值的分水岭。

因此,寻找目标值的整体算法步骤如下: $nonvessel$ 比例相对较小,而 $vessel$ 比例相对较大,可以将 N_{target} 对应的聚类中心的最大值作为血管边缘与非血管部分梯度值的分水岭。因此寻找目标值的整体算法步骤如下。

输入: 密度梯度数据。

输出: 血管边缘与非血管部分梯度值分水岭。

Step1: 对梯度数据依次聚为 2 类, 3 类, ..., 20 类, 记录每次聚类中心点的最大值的有序序列。

Step2: 对 Step1 中序列的每个数据依次进行两两求差, 并记录差值中的最大值。

Step3: Step2 中的差值 $d = center_j - center_i$, 其中 $center_i$ 和 $center_j$ 属于步骤 Step1 中聚类中心点最大值的集合且 $j = i + 1$ 。当 d 为最大值时, $center_j$ 标值。

2 实验结果与分析

实验所用数据是从海军总医院获取的 TOF MRA 数据, 大小为 $512 \text{ mm} \times 512 \text{ mm} \times 136 \text{ mm}$, 空间分辨率为 $0.69 \text{ mm} \times 0.69 \text{ mm} \times 1.4 \text{ mm}$, $TR = 18 \text{ ms}$, $TE = 2.4 \text{ ms}$ 。测试平台为普通 PC 机, Windows 7, 64 位操作系统。

这里,选择瑞利-高斯模型对体数据密度分布进行建模分析.瑞利-高斯模型的估计参数如表 1 所示.图 3 为提取结果.从图 3(a)可以看出,瑞利-高斯混合模型的误差为 0.179 4.统计方法获取的血管主体部分结果如图 3(b)所示.图 3(c)是在血管主体部分基础上,进一步采用改进自适应聚类中心的 K 均值方法进行血管边缘提取后的效果图.从图 3 可以看出,传统的统计方法所提取的血管主体部分相对较完整,但在血管边缘和细小血管部分有不连续的分支存在.而改进的方法在提取血管边缘和细小血管分支的完整性及连续性方面则有较为明显的提高.

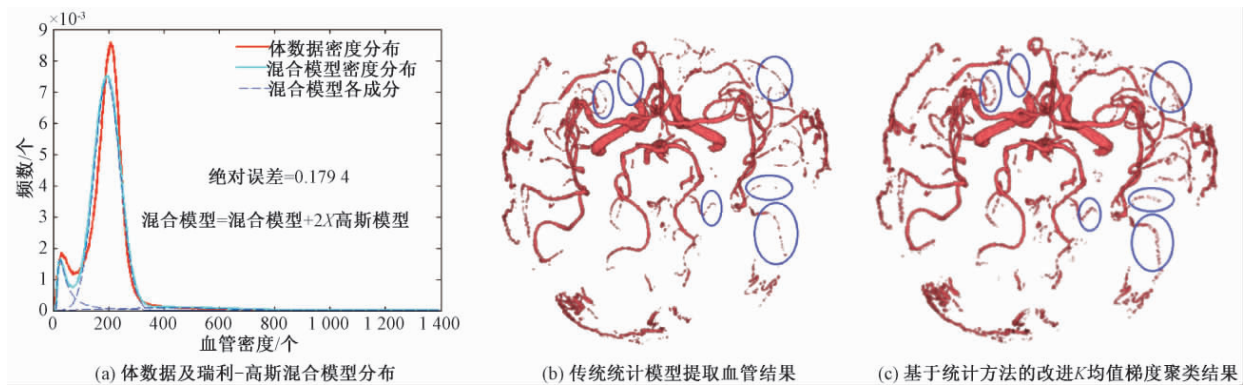


图 3 瑞利-高斯混合分布血管提取结果

Fig.3 Results of Rayleigh-Gauss mixed model

图 4 是两种方法(瑞利-高斯模型方法与改进的方法)的血管提取结果密度统计分布图.其中蓝色部分是第一步,即由基于参数估计的传统统计方法获取血管主体部分的分布情况.红色部分是第二步,即在第一步的基础上采用改进 K 均值的血管边缘提取出的结果分布情况.从图 4 可以看出,传统统计的方法最终的结果是找一个相对合适的全局目标值,使得血管能够尽可能地提取出来.但这个目标值大多是基于数据的密度值的,因而最终的分割结果在密度分布图上可以看到明显的切分点.

但因血管的密度范围分布较广,单纯靠一个基于密度的目标值很难获得完整的血管结构.因此采用了基于梯度的方式来弥补由密度值分割所带来的缺陷.因血管在边缘处才会有较为明显的梯度值,且经过第一步提取后,血管主体部分已获取,剩余部分是密度值较小且与周围组织较为接近的边缘及细小血管部分,只需对此部分重点分析提取即可.因此并非在整个体数据中计算梯度,而是在经过第一步分割之后,对剩余部分的数据进行梯度计算.从图 4 中可以看出,经过 K 均值

表 1 瑞利-高斯混合模型拟合参数

Tab.1 Fitting parameters of Rayleigh-Gauss mixed model

参数	ω	μ	σ
血管部分	0.049 266	422.945 335	214.559 955
中间部分	0.871 902	195.101 546	47.124 292
背景部分	0.078 832	—	35.926 031

在图 3 中也给出了部分改善区域的标记(蓝色).从标记的部分处,即在细小血管处,可以看出,基于改进 K 均值梯度聚类的血管边缘提取方法相比于基于参数估计的统计方法,对细小血管部分的提取效果在视觉上有明显改善.

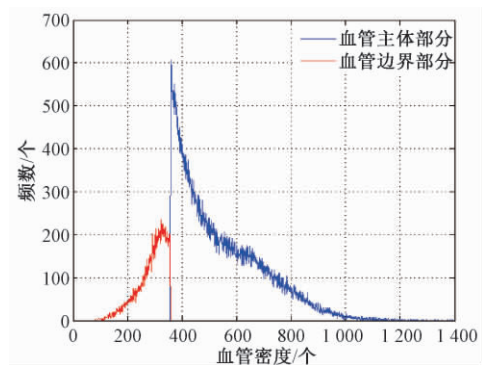


图 4 两步血管提取密度统计分布图

Fig.4 Intensity distribution of two stages of vessel extraction

梯度聚类后的结果,是对蓝色部分的截面处进行明显的补充,而且此部分(红色曲线)也更符合血管的密度值分布(范围广),也使得最终结果的密度分布更加完整.

为了更好地评估算法分割效果的准确率,采用公认的相似性系数 DSC 来评价分割算法.

$$DSC = 2 \times \frac{N\{M \cap G\}}{N\{M\} + N\{G\}} \times 100, \quad (4)$$

式中: M 和 G 分别为算法结果与真实结果; N 为

血管体素个数,当 M 和 G 中的元素都相同时为 1 时,若 M 和 G 没有任何相同元素则为 0. 同时,放射科专家提供了 13 套手动切割的结果作为真实结果,数据如表 2 所示.

表 2 时间飞跃法磁共振血管成像数据参数

Tab.2 TOF MRA parameter

数据编号	尺寸/mm	分辨率/mm	厚度/mm
#1 ~ 2	512 × 512 × 136	0.468 8 × 0.468 8	1.4
#3 ~ 6	512 × 512 × 136	0.699 9 × 0.699 9	1.4
#7 ~ 10	512 × 512 × 177	0.572 9 × 0.572 9	1.4
#11 ~ 13	512 × 512 × 116	0.429 6 × 0.429 6	1.4

此外,笔者所提出的算法还与传统的有限混合模型方法^[16]以及当前流行的基于水平集框架的活动轮廓模型^[19]方法的分割效果进行了对

比. 图 5 给出了其中一套数据的 3 种方法的分割结果. 从图 5 可以看出,对于大的血管,3 种方法都能得到较为满意的结果. 但对于细小血管,传统的有限混合模型出现血管分支间断现象,这是由于细小血管部分的密度值相对较低,在整个体数据中,采用唯一的判别准则很难将此部分提取出来. 而活动轮廓模型,将各种因素融合设计新的能量泛函,利用水平集求解能量函数,能提取出部分细小血管的分支,如图 5(b) 圆角矩形框所示. 而笔者所提出的改进的方法,在细小血管的提取方面相对于统计模型也有不同程度的提高,而且在血管的边缘处,能看到更为明显的效果,此外改进的方法在获取细小血管的连续性方面效果更好.

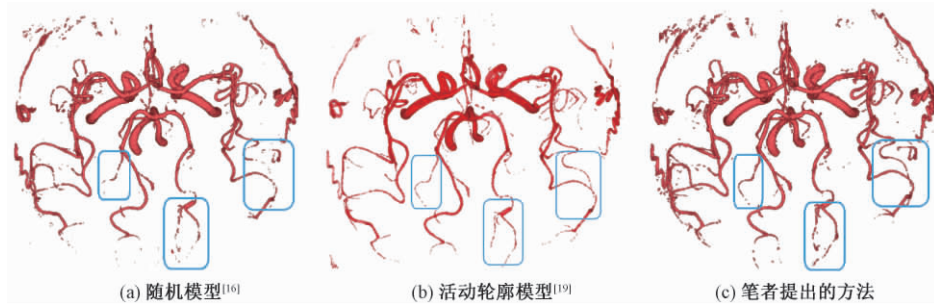


图 5 3 种方法的分割效果

Fig. 5 Extraction results comparison among three method

图 6 给出了 13 套数据的 3 种方法的 DSC 的对比结果. 笔者所提方法的 DSC 平均在 80% 以上,有的数据甚至达到了 94%,比传统统计模型的结果平均高出 10.7%,比活动轮廓模型的结果高出 8.5%. 传统有限混合模型仅基于数据的密度值而并没有考虑像一阶导数等其他因素,且依赖于混合模型的选择. 活动轮廓模型将密度与梯度等参数融

合至统一的能量函数,其分割结果要比有限混合模型的效果好,尤其是在细小血管分支的连续性方面有较为明显的提高. 但活动轮廓模型对整个体数据同时应用密度和梯度值. 而笔者的算法是在前一步密度处理结果的基础上运用梯度进行血管边缘的提取,因此在细小血管分支的连续性及血管的边缘方面优于活动轮廓模型.

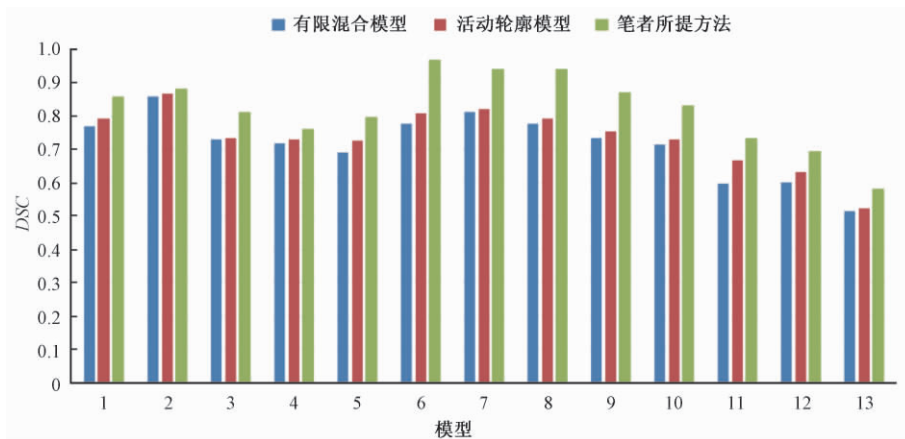


图 6 3 种方法相似性系数 DSC 的比较

Fig. 6 DSC comparison among three methods

3 结论

笔者在有限混合模型的血管分割基础上,提出了一种基于自适应聚类中心的 K 均值梯度聚类方法.该方法首先使用瑞利-高斯混合模型的方法对时间飞跃法磁共振血管成像数据建模,并采用期望最大参数估计的方法获取混合模型的参数,进而利用后验概率提取出血管的主体部分;随后对剩余体素数据进行梯度化处理,并采用改进的 K 均值聚类方法在剩余梯度数据中提取出血管的边缘以及细小血管部分,将两部分结果合并进行可视化处理便可得到血管的三维结构.实验结果表明,笔者进一步采用基于改进自适应聚类中心的梯度聚类方法,不管从视觉上还是精确度上,分割结果在血管的细节部分都有较为明显的改善.在下一步的研究工作中,笔者将融合更多血管几何形态特征,进一步提高血管分割的精度.

参考文献:

- [1] FORKERT N D, SARING D, FIEHLER J, et al. Automatic brain segmentation in time-of-flight MRA images [J]. *Methods of information in medicine*, 2009, 48(5): 399–407.
- [2] ZHAO S, ZHOU M, TIAN Y, et al. Extraction of vessel networks based on multiview projection and phase field model [J]. *Neurocomputing*, 2015, 162: 234–244.
- [3] KASS M, WITKIN A, TERZOPOULOS D. Snakes: Active contour models [J]. *International journal of computer vision*, 1988, 1(4): 321–331.
- [4] CASELLES V, COLL T. A geometric model for active contours in image processing [J]. *Numerische mathematik*, 1993, 66(1): 1–31.
- [5] VASILEVSKIY A, SIDDIQI K. Flux maximizing geometric flows [J]. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2003, 24(12): 1565–1568.
- [6] LI C M, XU C Y, FOX M D. Level set evolution without re-initialization: a new variational formulation [C]//*Proceedings of the 2005 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition*. Washington D C: IEEE, 2005: 430–436.
- [7] CHAN T F, VESE L A. Active contour without edges [J]. *IEEE transactions on image processing*, 2001, 10(2): 266–277.
- [8] SHANG Y, YANG X, ZHU L, et al. Region competition based active contour for medical object extraction [J]. *Computerized medical imaging & graphics*, 2008, 32(2): 109–117.
- [9] SUM K W, CHEUNG P Y S. Vessel extraction under non-uniform illumination: a level set approach [J]. *IEEE transactions on biomedical engineering*, 2008, 55(1): 358.
- [10] LANKTON S, TANNENBAUM A. Localizing region-based active contours [J]. *IEEE transactions on image processing*, 2008, 17(11): 2029–2039.
- [11] TIAN Y, DUAN F, et al. Active contour model combining region and edge information [J]. *Machine vision & applications*, 2013, 24(1): 47–61.
- [12] ZHAO S F, ZHOU M Q, JIA T R, et al. Multi-branched cerebrovascular segmentation based on phase-field and likelihood model [J]. *Computers & graphics*, 2014, 38: 239–247.
- [13] OSHER S, SETHIAN J A. Fronts propagating with curvature-dependent speed: algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations [J]. *Journal of computational physics*, 1988, 79(1): 12–49.
- [14] EL-BAZ A, FARAG A, GIMELFARB G. Cerebrovascular segmentation by accurate probabilistic modeling of TOF-MRA images [C]//*Proceeding of the 14th Scandinavian Conference on Image Analysis*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014: 239–247.
- [15] WONG W C K, CHUNG A C S. Bayesian image segmentation using local iso-intensity structural orientation [J]. *IEEE transactions on image processing*, 2005, 14(10): 1512–1523.
- [16] HASSOUNA M S, FARAG A A, HUSHEK S, et al. Cerebrovascular segmentation from TOF using stochastic models [J]. *Medical image analysis*, 2006, 10(1): 2–18.
- [17] ROY S, CARASS A, BAZIN P L, et al. Consistent segmentation using a rician classifier [J]. *Medical image analysis*, 2012, 16(2): 524–535.
- [18] GAO X, UCHIYAMA Y, ZHOU X R, et al. A fast and fully automatic method for cerebrovascular segmentation on time-of-flight (TOF) MRA image [J]. *Journal of digital imaging*, 2011, 24(4): 609–625.
- [19] TIAN Y, DUAN F, LU K, et al. A flexible 3D cerebrovascular extraction from TOF-MRA images [J]. *Neurocomputing*, 2013, 121(18): 392–400.

采用模块化求解的主动配电网优化运行

张红斌¹, 王克文²

(1. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209; 2. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 对主动配电网运行方式优化, 可以合理安排分布式电源、无功设备和储能设备的运行计划, 提高配电网运行效率. 以配电网运行成本和电压合格率最小为目标, 电网和设备运行要求为约束, 建立主动配电网日前、日内的有功无功协调优化模型; 分析各类待求变量在优化模型中的特点和随时间变化程度, 对连续变量和两类离散变量以及时段进行协调, 建立相应的求解模块; 通过各模块间的迭代实现总体最优. 结合配电网特点的模块化处理方式, 是对传统非线性混合整数动态规划算法的简化, 具有计算资源需求上的明显优势. 通过 118 节点算例的计算分析, 表明了所提算法的可行性和实用性.

关键词: 主动配电网; 日前调度; 有功无功协调; 分布式发电; 可控负荷

中图分类号: TM72 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2019.01.013

0 引言

在主动配电网(active distribution network, ADN)优化调度中, 不仅要考虑有功、无功的不同优化目标, 还需计及分布式电源(distributed generation, DG)、可控负荷(controllable load, CL)、储能系统(energy storage system, ESS)等设备的功率调节以及系统运行的各种约束. 对此多目标非线性规划问题的建模和求解有不同的处理方式^[1-12]. 文献[1]建立基于三相潮流的辐射状配电网多时段有功-无功协调动态优化模型, 采用混合整数二阶锥规划算法进行求解. 文献[2]建立运行成本与越限风险最小的多目标日前优化调度模型, 计及各种 ADN 调度手段, 用理想点法处理多目标模型, 以和声搜索算法为求解工具, 并基于半不变量法随机潮流实现越限风险指标的计算. 文献[3]基于模型预测控制实现主动配电网日前调度、日内滚动调度和实时反馈校正. 在主动配电网调度优化模型中, 可计及较多的影响因素. 文献[4]考虑了光伏发电系统的概率特性, 文献[5]以可控 DG、储能、联络和分段开关为调度手段, 文献[6]用鲁棒优化来处理电价的不确定性, 文献[7]计及了输电和高压配电网网损的影响, 并根据优化模型的特点, 采用适宜的求解算法, 例如二

阶锥规划算法^[1,4]、和声搜索算法^[2,8-9]、微分进化-细胞膜混合算法^[10]、基于微分进化改进的帝国竞争优化算法^[11]等.

在以上分析基础上, 笔者以配电网运行成本和电压合格率最小为目标, 电网和设备运行要求为约束, 建立主动配电网日前、日内的有功无功协调优化模型, 计及了多种 DG、CL、ESS. 根据配电网中各类变量的特点, 建立相应有效实用的求解模块, 通过各模块间的迭代实现总体最优.

1 主动配电网有功无功优化模型

1.1 日前优化调度模型

日内优化调度阶段的时间间隔 ΔT 为 1 h. 目标函数为日前配电网运行成本最低. 由于主动配电网中分布式电源可能引起的过电压, 将电压因素通过权重系数加入目标函数中, 构成目标函数:

$$\min F_1 = \sum_{t=1}^{N_{LN}} (C_{1,t} + C_{2,t} + C_{3,t} + C_{4,t} + C_{5,t} + C_{6,t} + C_{7,t} + C_{8,t}) + R \sum_{t=1}^{N_{LN}} \sum_{i \in U} (V_{i,t} - V_{i,\lim})^2 \Delta T, \quad (1)$$

其中, $C_{1,t} = K_{\text{grit},t} P_{\text{grit},t} \Delta T$;

$$C_{2,t} = \sum_{i=1}^{N_{\text{DG}}} (K_{\text{DG},i} P_{\text{DG},i,t}) \Delta T;$$

收稿日期: 2018-10-15; 修订日期: 2018-11-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51777105); 国网经济技术研究院自主立项项目(524413170001)

作者简介: 张红斌(1969—), 男, 国网经济技术研究院有限公司高级工程师, 博士, 主要从事智能配电网方面的研究, E-mail: hongbin09172015@163.com.

$$\begin{aligned}
C_{3,t} &= K_{\text{loss},t} P_{\text{loss},t} \Delta T; \\
C_{4,t} &= \sum_{i=1}^{N_{\text{DG}}} [K_{\text{comp}} K_{\text{DG},i} (P_{\text{DG},i,\text{max}} - P_{\text{DG},i,t})] \Delta T; \\
C_{5,t} &= \sum_{i=1}^{N_{\text{CL}}} (K_{\text{CL},i} (P_{\text{CL},i,\text{max}} - P_{\text{CL},i,t}) \Delta T; \\
C_{6,t} &= \sum_{i=1}^{N_{\text{ESS}}} (K_{\text{ESS},i} P_{\text{ESS},i,t}) \Delta T; \\
C_{7,t} &= \sum_{i=1}^{N_{\text{tap}}} (K_{\text{tap}} \Delta N_{\text{tap},i}); \\
C_{8,t} &= \sum_{i=1}^{N_{\text{C}}} (K_{\text{C}} \Delta N_{\text{C},i,t}),
\end{aligned}$$

式中: t 为时刻; ΔT 为时段; N_{IN} 为总时段数; R 为权重系数; $V_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 的电压幅值; $V_{i,\text{lim}}$ 为电压允许范围的边界值,电压越上界时取上界值,越下界时取下界值; U 为电压越线节点的集合; P 为有功功率; K 为费用系数; ΔN 为变化个数; $C_{1,t}$ 为向上级电网净购电成本; $C_{2,t}$ 为向 DG 购电成本; $C_{3,t}$ 为网损成本; $C_{4,t}$ 为削减 DG 有功出力的赔偿成本; $C_{5,t}$ 为对可中断负荷控制成本; $C_{6,t}$ 为 ESS 调节成本; $C_{7,t}$ 为变压器分接头调节成本; $C_{8,t}$ 为并联电容器调节成本。

式(1)将两个不同量纲的目标函数合在一起,权重系数本来不易选取,但此处的第二项描述电压越界程度,因此权重系数 R 应取较大的值,以便最终结果的电压越界量趋近于零,同时不应引起优化过程的收敛稳定性,试算表明,取 $R=1\ 000$ 能满足要求。

优化控制变量包括:可控光伏发电(PV)、风电(WT)的有功、无功出力,其他可控分布式电源(例如沼气发电厂 BG、垃圾电厂 RI)的有功、无功出力,储能设备(ESS)的有功、无功功率、可控负荷(CL)的调节功率、SVC 的无功出力、变压器档位、并联电容器投切状态。

优化控制变量构成向量 $\mathbf{Y}_p, \mathbf{Y}_p$ 可表达为节点电压向量 \mathbf{X} 的显函数。

等式约束为节点功率平衡约束和储能设备时序运行约束:

$$\begin{cases} P_{i0,t} = P_{i,t}; \\ Q_{i0,t} = Q_{i,t}, \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_{i0,t}, Q_{i0,t}$ 分别为第 i 点的给定量。

$$W_{\text{ESS},i,t} = W_{\text{ESS},i,t-1} - P_{\text{ESS},i,t-1} \Delta T. \quad (3)$$

不等式约束有节点电压约束:

$$V_{i,\text{min}} \leq V_{i,t} \leq V_{i,\text{max}}, \quad (4)$$

式中: $V_{i,\text{min}}, V_{i,\text{max}}$ 分别为节点 i 允许的最低和最高运行电压。

支路功率约束:

$$S_{i,\text{min}} \leq S_{i,t} \leq S_{i,\text{max}}, \quad (5)$$

式中: $S_{i,\text{min}}, S_{i,\text{max}}$ 分别为支路 i 允许的最低和最高视在功率。

储能设备的荷电状态、充放电功率上下限和约束:

$$W_{\text{ESS},i,\text{min}} \leq W_{\text{ESS},i,t} \leq W_{\text{ESS},i,\text{max}}; \quad (6)$$

$$P_{\text{ESS},i,\text{min}} \leq P_{\text{ESS},i,t} \leq P_{\text{ESS},i,\text{max}}. \quad (7)$$

光伏发电、风电、沼气发电厂、垃圾电厂等分布式电源的有功无功出力约束:

$$P_{\text{DG},i,\text{min}} \leq P_{\text{DG},i,t} \leq P_{\text{DG},i,\text{max}}; \quad (8)$$

$$Q_{\text{DG},i,\text{min}} \leq Q_{\text{DG},i,t} \leq Q_{\text{DG},i,\text{max}}, \quad (9)$$

式中: $P_{\text{DG},i,t}, Q_{\text{DG},i,t}$ 分别为第 i 个分布式电源第 t 时刻的有功、无功功率。

SVC 的无功出力约束:

$$Q_{\text{SVC},i,\text{min}} \leq Q_{\text{SVC},i,t} \leq Q_{\text{SVC},i,\text{max}}, \quad (10)$$

式中: $Q_{\text{SVC},i,t}$ 为第 i 个 SVC 第 t 时刻的无功功率。

可控负荷的调节功率约束:

$$P_{\text{CL},i,\text{min}} \leq P_{\text{CL},i,t} \leq P_{\text{CL},i,\text{max}}; \quad (11)$$

$$Q_{\text{CL},i,\text{min}} \leq Q_{\text{CL},i,t} \leq Q_{\text{CL},i,\text{max}}, \quad (12)$$

式中: $P_{\text{CL},i,t}, Q_{\text{CL},i,t}$ 分别为第 i 个可控负荷第 t 时刻的有功、无功功率。

并联电容器组数约束:

$$0 \leq N_{c,i,t} \leq N_{c,i,\text{max}}, \quad (13)$$

式中: $N_{c,i,t}$ 为节点 i 处所安装的电容器组数; $N_{c,i,\text{max}}$ 为节点 i 处安装的最大电容器组数。

可调分接头档位数约束:

$$0 \leq N_{\text{tap},i,t} \leq N_{\text{tap},i,\text{max}}, \quad (14)$$

式中: $N_{\text{tap},i,t}$ 为第 i 个变压器的档位值; $N_{\text{tap},i,\text{max}}$ 为第 i 个变压器的档位值的最大值。

优化目标和约束条件中,并联电容器组投切状态、变压器分接头档位为离散变量,其余为连续变量,连续变量可表达为节点电压向量 \mathbf{X} 的显函数。

1.2 日内滚动优化调度模型

日内优化调度阶段的时间间隔 ΔT 为 15 min. 电容器组投切状态、变压器分接头档位采用日前优化结果,不再参与优化。目标函数为下一时段(第 t 时段)内的配电网运行成本加电压越界指标。

$$\begin{aligned} \min F_2 &= C_{1,t} + C_{2,t} + C_{3,t} + C_{4,t} + C_{6,t} + \\ &R \sum_{i \in U} (V_{i,t} - V_{i,\text{lim}})^2 \Delta T. \end{aligned} \quad (15)$$

2 算法求解

在优化控制变量中,变压器档位、并联电容器投切状态为离散变量,且电容器分组投切,其余变量为连续变量。

分支定界法和动态规划法是处理该类多时段非线性混合整数问题的相对准确算法,但庞大的计算量往往使得计算时间过长。

2.1 主动配电网优化调度问题分析

在对主动配电网进行优化调度计算时,第 i 时刻的变压器档位、并联电容器投切状态对 $i+1$ 时刻的运行成本有直接影响;对 $i+1$ 之后时刻的运行成本无直接影响,但通过 $i+1$ 时刻产生间接影响。

储能设备的荷电量要在日前 24 h 内达到充放电的基本平衡。

这些因素使得各时刻之间不能达到相互独立,但主动配电网具有如下特点,可使分支定界法大幅度简化。

(1) 主变之间的解耦关系. 对于与大电网相连的主变,主变在低压侧解列运行,10 kV 网络开环运行. 所以,正常运行时,每台主变单独供电。

(2) 主变低压侧母线并联电容器组之间的解耦关系. 从高压主变所带 10 kV 线路区域来看,考虑并联电容器影响时,各区域之间无相互影响。

(3) 各主变分接头之间的解耦关系. 由于主变之间的解耦关系,在考虑高压主变分接头档位对低压侧影响时,各主变的分接头之间无相互影响。

(4) 对于每个高压主变分接头,尽管有较多档位,但在给定运行方式下,由于 10 kV 侧的运行电压要求,可选用的档位数很有限。

2.2 连续变量优化(模块 1)

为描述方便,优化模型统一简写为:

$$\min F(\mathbf{X}); \quad (16)$$

$$g_i(\mathbf{X}) = 0; \quad (17)$$

$$h_{j,\min} \leq h_j(\mathbf{X}) \leq h_{j,\max}, \quad (18)$$

式中: \mathbf{X} 为某时刻的直角坐标形式的节点电压构成的列向量。

构成扩展拉格朗日函数:

$$\min L = F + \sum_i [\alpha_i g_i(\mathbf{X})] + \sum_{j \in D} [\beta_j |h_j(\mathbf{X}) - h_{j,\lim}|] + \gamma \sum_i [g_i^2(\mathbf{X})] + \gamma \sum_j [h_j(\mathbf{X}) - h_{j,\lim}]^2, \quad (19)$$

式中: α_i, β_j 为拉格朗日乘子; γ 为罚因子; D 为不

满足约束条件的约束编号集合; $h_{j,\lim}$ 为边界值,越上界时取上界值,越下界时取下界值。

式(19)中的连续变量可表达为节点电压向量 \mathbf{X} 的显函数. 优化控制变量构成向量 $\mathbf{Y}_p, \mathbf{Y}_p$ 也可表达为节点电压向量 \mathbf{X} 的显函数。

最优条件为:

$$\nabla L = 0. \quad (20)$$

若对式(19)采用牛顿法求解,需用到二阶海森阵,直接利用式(19)的灵敏度表达,可采用更简捷的拟牛顿法求解。

2.3 并联电容器组投切状态选择(模块 2)

高压变电站 10 kV 母线有并联电容器组. 为了考虑通用性,本项目通过目标函数对电容器节点 k 的无功注入 Q_k 的一阶灵敏度来近似估计该点电容器投切引起的目标函数变化量,以此作为衡量指标 $S_{Q,k}$. 正的指标值说明宜减少该点现有无功补偿量,而负的指标值则说明宜加大无功补偿量. 指标值的大小反映了投切单位补偿量的效果。

对每个时段的所有电容器组采用如下过程处理。

(1) 按指标值 $S_{Q,k}$ 对各点的补偿效果进行排序,并可分为如下两类: (a) 对正值的 $S_{Q,k}$ 按从大到小排序. 考虑可否减少相应母线上的无功补偿量; (b) 对负值的 $S_{Q,k}$ 按从小到大排序. 考虑在这些节点上增加无功补偿量。

(2) 按排序结果对每一方案进行准确的潮流计算,计算式(1)的目标函数在该时段 i 的值 F_{li} , 选取最优方案. 先逐一处理(a)的电容器组退出方案,再处理(b)的投入方案。

(3) 依次进行,确定日前 24 h 内的并联电容器组投切状态。

(4) 在目标函数值 F_{li} 的计算中,计入了电容器状态调节费用,即上一时段的影响。

2.4 变压器分接头档位选择(模块 3)

主要考虑 10 kV 线路根部的主变. 由于 10 kV 网络的辐射性运行结构,各主变 10 kV 侧无耦合关系,对主变分接头档位的选择,可逐台进行. 变压器分接头档位主要影响 10 kV 的运行电压和经济性。

因此,对每个时段的每台变压器分接头档位,采用枚举法计算式(1)的目标函数在该时刻 i 的值 F_{li} , 选取最优档位. 依次进行,完成所有时段的计算。

在目标函数值 F_{li} 的计算中,计入了档位调节

费用,即上一时段的影响。

2.5 离散变量日前状态调整模块(模块 4)

配电网的负荷曲线特性决定了日前 24 h 的主变分接头档位变化趋势。以图 1 为例,日前 24 h 内,主变分接头档位的变化曲线有两处峰值段和两处谷值段,有时可能更多。为减小档位调节成本,尝试降低峰值段的档位、抬高谷值段的档位。

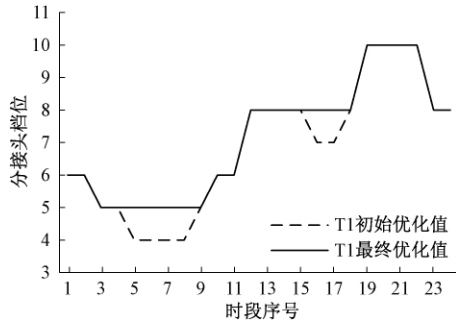


图 1 主变 T1 的分接头档位变化

Fig. 1 Variation of tap position of transformer T1

因此,对每台变压器,可采用如下步骤进行。

(1) 分析档位变化曲线,确定各峰值段、谷值段的范围和值;

(2) 对每一峰值段和谷值段,确定调整方案;

(3) 依次处理各调整方案,对每一方案按连续变量优化模块(模块 1) 计算日前 24 h 的 F_1 的值, F_1 降低时采用该方案,否则放弃。

尽管在模块 1 的连续变量优化过程中,比较的是扩展函数式(19),但此处取计算结束后的 F_1 值。类似地,进行并联电容器组日前投切状态的调整。

2.6 日前调度优化过程

优化过程分为两个阶段:第一阶段为下列步骤的(1)~(4),采用迭代方式确定并联电容器组投切状态、变压器分接头档位的初值;第二阶段为下列步骤的(5)~(7),调整这些离散变量的值。

(1) 按模块 2 选择各时段并联电容器组投切状态;

(2) 按模块 3 选择各时段变压器分接头档位;

(3) 按模块 1 优化各时段的连续变量;

(4) 转(1),直到优化控制变量的变化量小于允许值,转(5);

(5) 按模块 4 调整并联电容器组投切状态、变压器分接头档位的日前状态(其中反复调用模块 1);

(6) 对最终离散变量结果按模块 1 计算连续

变量最终值;

(7) 输出结果。

计及 2.1 节所述的配电网特点,采用模块化迭代处理方式。与传统的非线性混合整数动态规划算法相比,计算的运行方式数大幅度减少,从而减少计算资源的需求。

3 算例分析

3.1 算例系统

按所述算法,使用 Fortran 6.5 编写程序进行计算。所用算例如图 2 所示,在 IEEE 118 节点系统上增加主变和分布式电源、可调负荷。

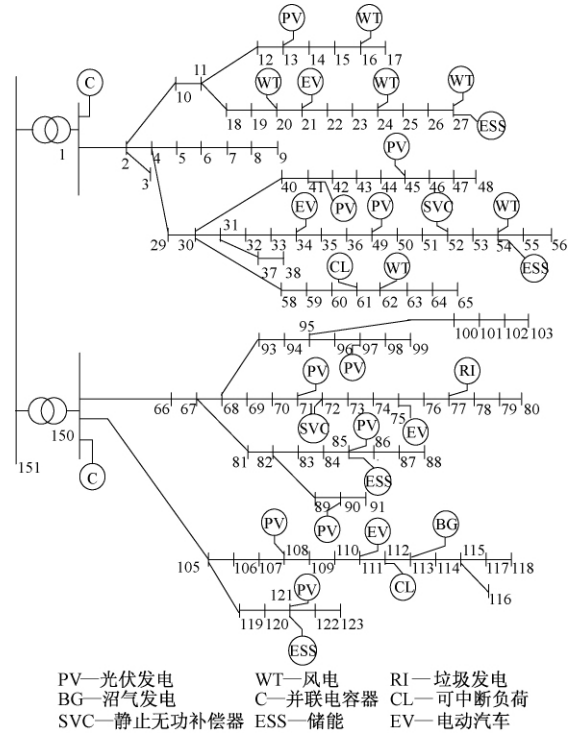


图 2 10 kV 配电网

Fig. 2 10 kV distribution network

图 2 中,线路(1, 2)所联的馈线 1、线路(150, 105)所联的馈线 3 为生活负荷,线路(150, 66)所联的馈线 2 为工业负荷,标准化日运行曲线(均值为 1)如图 3 所示。

110 kV 变电站中,两台变压器参数为 $0.0345 + j0.794 \Omega$,额定电压和分接头为 $110 \pm 8 \times 0.0125/11 \text{ kV}$,高压侧分接头最高电压档位编号为 1,初始运行档位 7。

节点 27、54、85、121 的光电、风电功率均为 1.2 MW,出力可调;其余节点的光电、风电功率均为 0.1 MW,不可调。节点 52、72 的 SVC 容量均为 0.2 Mvar。节点 77 的垃圾电厂、节点 113 的燃气电厂额定功率均为 2 MW,出力可调。节点

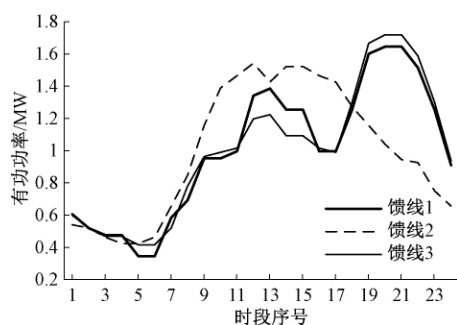


图3 3条馈线负荷标准化日运行曲线

Fig.3 Standardized daily operation curves of three feeder's loads

121、54、85、27 接有储能设备,额定容量均为 $1 \text{ MW}\cdot\text{h}$,最大充放电功率 0.4 MW ,荷电下限 20% ,荷电上限 90% ,荷电初值 40% . 节点 21、33、75、111 的电动汽车日平均负荷均为 0.6 MW . 节点 61、112 的可调负荷功率分别为 $0.55 + j0.35 \text{ MVA}$ 、 $0.49 + j0.42 \text{ MVA}$. 部分标准化日运行曲线如图 4 所示.

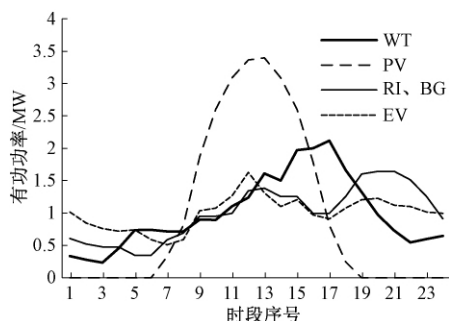


图4 分布式发电和电动汽车标准化日运行曲线

Fig.4 Standardized daily operation curves of distributed generation and electric vehicle

风电上网电价取 $0.60 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,光伏上网电价取 $1.00 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,微型燃气轮机的发电成本为 $0.66 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$. 主动配电网与上级电网间的电能交易采用峰谷平电价制, $1:00 \sim 7:00$ 为 0.49 元 , $8:00 \sim 17:00$ 、 $23:00 \sim 24:00$ 为 0.74 元 , $18:00 \sim 22:00$ 为 0.98 元 . 离散变量调节成本系数^[12]取 $K_{\text{tap}} = 20 \text{ 元}/\text{档}$, $K_c = 2 \text{ 元}/\text{次}$. 其他成本参数: $K_{\text{comp}} = 1.5$, $K_{\text{loss},t} = K_{\text{grit},t}$, $K_{\text{CL},i} = 0.8 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, $K_{\text{ESS},i} = 0.05 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$.

3.2 日前运行方式优化

日前优化阶段的时间间隔 ΔT 为 1 h . 按照第 1、2 节的算法进行计算.

(1) 电容器组. 经第 2.6 节过程(1) 计算得到的并联电容器组投切状态的结果列于表 1 的第 2、3 列,其中 1 表示投,0 表示切. 节点 1 的电容器 C1 对应于馈线 1,全处于切除状态. 节点 150 的电

容器 C2 对应于馈线 2、3. 由于两类负荷曲线的存在,该电容器在高负荷时段投入,但为满足线路电压的要求而在低负荷时段切除.

表1 电容器、变压器分接头状态

Tab.1 State of capacitors and transformer taps

时段 序号	电容器状态		初始优化 档位		最终档位	
	C1	C2	T1	T2	T1	T2
1	0	0	6	6	6	6
2	0	0	6	5	6	6
3	0	0	5	5	5	5
4	0	0	5	5	5	5
5	0	0	4	5	5	5
6	0	0	4	5	5	5
7	0	0	4	5	5	5
8	0	0	4	5	5	5
9	0	0	5	5	5	5
10	0	1	5	6	6	6
11	0	1	6	7	6	7
12	0	1	8	7	8	7
13	0	1	8	7	8	7
14	0	1	8	6	8	7
15	0	1	8	6	8	7
16	0	1	7	6	8	7
17	0	1	7	6	8	7
18	0	1	8	7	8	7
19	0	1	10	9	10	8
20	0	1	10	8	10	8
21	0	1	10	8	10	8
22	0	1	10	8	10	8
23	0	1	8	7	8	7
24	0	1	8	7	8	7

再按第 2.6 节过程(2) 的方法进行调整. 尝试调节 C2 的运行状态,产生两种方案: (a) 第 9 时段开始投入, (b) 第 11 时段开始投入. 目标函数 F_1 均变大,维持原结果.

(2) 变压器分接头档位. 经第 2.6 节过程(1) 确定的两台主变分接头档位结果列于表 1 的第 4、5 列. 两台主变的分接头变化趋势基本一致. 高峰负荷时段取较高档位,抬高 10 kV 侧电压;其他负荷时段取较低档位,减缓 10 kV 线路的过电压.

再按第 2.6 节过程(2) 的方法进行调整. 结果列于表 1 的第 6、7 列. 对 T1 的档位调整如图 1 所示,调整了两处低谷段的档位.

(3) 优化前后指标. 表 2 列出优化前后指标情况. 其中第 1 列为式(1) 中的目标函数,优化时采用第 2 列为式(1) 中的经济指标,即配电网的运行成本,供比较. 优化前的目标函数大于经

济指标,说明有电压越界.电压越界的权重系数为 1 000,以表示对电压越界的较重惩罚.优化后二者接近,基本满足电压要求.通过优化,一天减少运行成本 0.35 万元,其中网损下降 0.36 MW·h.

表 2 优化前后指标

Tab. 2 Indices before and after optimization

优化前			优化后		
目标函数	经济指标/万元	网损/(MW·h)	目标函数	经济指标/万元	网损/(MW·h)
1 418.70	31.68	11.19	35.20	31.33	10.83

表 3 列出优化后其他指标.新能源的平均渗透率为 33.06%,最大渗透率达到 47.97%.

表 3 优化后指标

Tab. 3 Indices after optimization

总发电功率/(MW·h)	分布式发电功率/(MW·h)	总负荷功率/(MW·h)	平均渗透率/%	最大渗透率/%
456.86	156.00	446.03	33.06	47.97

(4) 各时段指标.表 4 列出各时段指标优化前后指标情况.优化前,大部分时段的目标函数 F_1 大于经济指标,例如第 9~12 时段,说明有电压越界现象,优化过程同时处理经济性和电压安全性;在部分时段二者相等,优化的主要工作放在改善经济性,优化后的经济指标下降.优化后,满足电压运行要求.

由于分布式电源运行条件的限制,最小渗透率仅为第 3 时段的 18.54%,最大渗透率为第 16 时段的 47.97%.

(5) 运行电压.图 5 为节点 27 的 24 h 电压.节点 27 为馈线 1 的末端节点之一,接有风力发电机,低负荷时容易出现过电压,所以同时接有储能设备 ESS.节点电压第 11 时段电压最低,在低负荷时段和风机最大出力时段电压较高,例如第 4~6 时段、第 14~17、19 时段.优化后电压满足要求.

(6) 储能设备荷电状态.图 6 给出储能设备荷电状态,图例名的末端数字为所在节点号.初始状态为 40%,低负荷时段充电,高负荷时段放电,最终荷电状态接近于 40%.

3.3 日内滚动优化

日内优化阶段的时间间隔 ΔT 为 15 min,不再对电容器投切状态和变压器分接头档位进行调整,直接取日前优化结果.因此目标函数中不再考虑电容器状态和变压器档位的调整费用.

表 4 各时段指标

Tab. 4 Indices of all time intervals

时段序号	优化前		优化后		
	目标函数 F_1	经济指标/万元	目标函数 F_1	经济指标/万元	渗透率/%
1	47.18	0.66	0.62	0.62	21.10
2	0.64	0.64	0.60	0.60	19.58
3	52.17	0.61	0.58	0.58	18.54
4	0.61	0.61	0.59	0.59	21.83
5	20.20	0.63	0.63	0.63	23.22
6	0.62	0.62	0.62	0.62	23.60
7	0.69	0.69	0.67	0.67	38.81
8	1.06	1.06	1.00	1.00	45.93
9	11.18	1.33	1.31	1.31	46.29
10	180.98	1.43	1.39	1.39	44.29
11	288.22	1.49	1.45	1.45	45.42
12	358.02	1.65	1.65	1.65	42.00
13	1.63	1.63	1.63	1.63	42.42
14	2.34	1.55	1.55	1.55	43.35
15	1.57	1.57	1.57	1.57	42.94
16	23.46	1.44	1.40	1.40	47.97
17	25.88	1.38	1.34	1.34	43.14
18	23.64	1.83	1.83	1.83	33.65
19	197.95	2.12	2.12	2.12	27.29
20	17.96	2.14	2.96	2.16	24.16
21	3.20	2.11	3.03	2.11	23.31
22	6.48	2.00	4.16	2.02	21.35
23	151.83	1.30	1.30	1.30	27.28
24	1.07	1.07	1.07	1.07	25.85

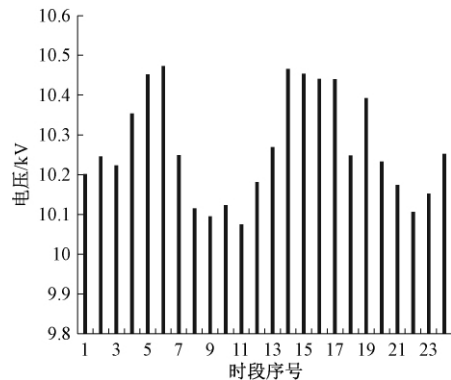


图 5 节点 27 的 24 h 内电压

Fig. 5 Voltages of node 27 in 24 hours

部分时段指标结果列于表 5.目标函数 F_2 同时包含经济性、电压安全性指标,优化时采用,经济指标仅为配电网的运行成本.二者之差描述了电压越界的程度.

由于已采用日前优化的电容器投切状态和变压器分接头档位值,在表 5 中,电压越界状况(第 2、3 列之差)比表 4 中的小得多,说明电压越界问题已不太严重,但仍存在.

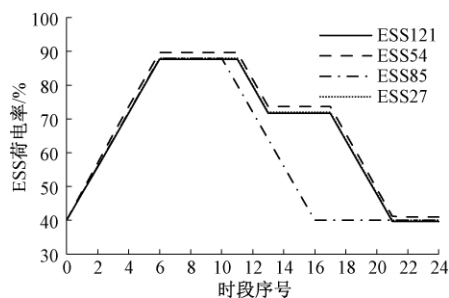


图6 储能设备荷电状态

Fig. 6 Charged state of energy storage equipment

表5 部分时段指标

Tab. 5 Indices of partial time intervals

时段 序号	优化前		优化后		
	目标 函数/ F_2	经济指标/ 万元	目标 函数/ F_2	经济指标/ 万元	渗透率/ %
...					
30	0.28	0.28	0.27	0.27	44.17
31	0.29	0.29	0.29	0.29	45.83
32	0.31	0.31	0.31	0.31	44.87
33	0.33	0.33	0.32	0.32	44.01
34	0.33	0.33	0.33	0.33	43.37
35	0.34	0.34	0.33	0.33	44.31
36	9.50	0.34	0.33	0.33	44.56
37	2.16	0.35	0.34	0.34	42.99
38	9.85	0.35	0.34	0.34	43.24
39	23.84	0.36	0.35	0.35	43.27
...					
60	0.89	0.36	0.35	0.35	44.17
61	5.51	0.35	0.34	0.34	45.44
62	3.85	0.35	0.34	0.34	45.51
63	2.79	0.35	0.34	0.34	45.58
64	3.66	0.34	0.34	0.34	43.49
65	6.51	0.34	0.33	0.33	40.88
66	2.5	0.34	0.34	0.34	39.51
67	1.08	0.34	0.34	0.34	37.29
68	0.58	0.35	0.35	0.35	35.18
69	0.45	0.45	0.45	0.45	33.14
...					

优化的目的是使 F_2 下降. 当无电压越界时, 例如时段 30~34, 优化过程主要使得经济指标下降, 但下降程度各有不同.

当存在电压越界时, 例如时段 38、39, 优化过程需同时考虑经济指标和电压指标. 由于电压指标的权重系数值较大, 使得电压约束优先满足. 甚至在个别极端情况下, 存在 F_2 下降, 但经济指标略有上升的可能.

优化后的运行方式, 均满足各约束条件, 运行成本下降.

4 结论

笔者考虑多种分布式电源、SVC、可控负荷、储能设备, 以配电网运行成本和电压合格率最小建立主动配电网日前、日内的有功无功协调优化模型. 结合配电网和优化模型的特点, 笔者建立相应的有效求解模块, 可实现对优化模型的大幅度简化, 并通过模块间的迭代实现总体最优, 具有计算资源需求上的明显优势, 是一种实用的处理方式.

参考文献:

- [1] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等. 基于混合整数二阶锥规划的主动配电网有功-无功协调多时段优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2575-2583.
- [2] 符杨, 廖剑波, 李振坤, 等. 考虑越界风险的主动配电网日前优化调度及运行[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(21): 6328-6336.
- [3] 任佳依, 顾伟, 王勇, 等. 基于模型预测控制的主动配电网多时间尺度有功无功协调调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1397-1407.
- [4] 张世达, 孙永辉, 卫志农, 等. 考虑可控光伏系统概率模型的主动配电网日前优化调度[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 247-253.
- [5] 尤毅, 刘东, 钟清, 等. 主动配电网优化调度策略研究[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 177-183.
- [6] SOROUDI A, SIANO P, KEANE A. Optimal DR and ESS scheduling for distribution losses payments minimization under electricity price uncertainty[J]. IEEE transactions on smart grid, 2016, 7(1): 261-272.
- [7] 窦震海, 牛焕娜, 高燕, 等. 主动型配电网日前调度策略研究[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 126-133.
- [8] 廖剑波, 李振坤, 符杨. “源-网-荷”相协调的主动配电网经济调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(1): 69-75.
- [9] 曾博, 杨煦, 张建华. 考虑可再生能源跨区域消纳的主动配电网多目标优化调度[J]. 电工技术学报, 2016, 31(22): 148-158.
- [10] 黄伟, 熊伟鹏, 闫彬禹, 等. 不同时间尺度下虚拟微网优化调度策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(19): 12-19.
- [11] 曾鸣, 彭丽霖, 王丽华, 等. 主动配电网下分布式能源系统双层双阶段调度优化模型[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 108-115.
- [12] 周晓娟, 王奎英, 张将. 基于辅助函数思想的城市

高压电网无功优化 [J]. 郑州大学学报(工学版),

2014, 35(4): 79–82.

Optimal Operation of Active Distribution Network Using Modular Solution

ZHANG Hongbin¹, WANG Kewen²

(1. State Grid Economic and Technological Research Institute Co. Ltd., Beijing 102209, China; 2. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: By optimizing the operation mode of the active distribution network, the operation plan of distributed generation, reactive equipment and energy storage equipment could be arranged rationally, and the operation efficiency of distribution network would be improved. The operation cost and the voltage qualification rate in a distribution network were used as the minimize objective, and the operation requirement of power grid and equipment were used as constraints, day-ahead and real-time optimization models with active and reactive power coordination were established. Characteristics of all kinds of variables in the optimization model, and effect degrees of time series in variables were analyzed. Solution modules corresponding to continuous variables, two types of discrete variables, and the coordination between time intervals were established, and the overall optimum was achieved through the iteration among modules. Combined with the characteristics of distribution network, the modular processing method was a simplification of the traditional nonlinear mixed integer dynamic programming algorithm, which has obvious advantages in computing resource demand. The calculation and analysis in the 118-bus example showed that the proposed algorithm was feasible and practical.

Key words: active distribution network; day-ahead scheduling; active and reactive power coordination; distributed generation; controllable load

(上接第 23 页)

Cerebral Vessel Segmentation Based on Adaptive Clustering Centers

WANG Zhe^{1,2}, ZHAO Shifeng^{1,2}, TIAN Yun^{1,2}, WANG Xuesong^{1,2}, ZHOU Mingquan^{1,2}

(1. College of Information Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Key Laboratory of Digital Preservation and Virtual Reality for Cultural Heritage, Beijing 100875, China)

Abstract: Cerebral blood vessel segmentation was a key step in three-dimensional (3D) reconstruction, computer aided diagnosis and quantitative analysis. Due to complex geometric structure, small area percentage, low contrast vessel segmentation was still a challenging problem. Based on traditional statistical method with intensity, an improved K -means algorithm based on self-adapting clustering centers with gradient of remaining voxels preserved from previous step was used for further extraction of thin vessels. Firstly, one Rayleigh distribution and two Gaussian distributions were adapted to model background, tissues and vessel areas, respectively. And EM algorithm was used to estimate parameters for Gaussian distributions. Then posterior probability is used to extract the main body of blood vessels. Secondly, the remaining part containing the low contrast vessel areas and vessel edges was computed for gradient. An improved K -means method with self-adapting clustering centers was proposed to detect those areas. Experiment result demonstrated that our method was better than traditional statistical methods, especially at low contrast branches and vessel edges.

Key words: cerebral vessel segmentation; finite mixture model; K -means

基于二阶锥规划的主动配电网动态无功优化

章 健¹, 熊壮壮¹, 王明东¹, 朱永胜²

(1. 郑州大学 产业技术研究院, 河南 郑州 450001; 2. 中原工学院 电子信息学院, 河南 郑州 450007)

摘 要: 为了提高分布式能源的利用率, 降低网损, 减少电压偏差, 建立了包含储能、分布式电源、分组投电容器组、有载调压分接头以及静止无功补偿器等多种主动管理装置的配电网有功无功协调的动态无功优化多目标模型. 使用层次分析法将多目标转化为单目标, 采用 Big-M 方法将模型线性化, 利用松弛理论松弛凸化为二阶锥规划的形式. 在改进的 IEEE 33 节点上验证模型的有效性和合理性, 利用 Cplex 来求解出各个主动管理装置的投切容量与时刻, 证明了所建模型的合理性.

关键词: 主动配电网; 二阶锥规划; 多目标优化; 无功优化

中图分类号: TM71

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2019.01.003

0 引言

随着分布式电源 (distributed energy resources, DER) 的渗透率不断提高, 分布式电源的不确定性给传统配电网带来了诸多挑战, 如接入点电压升高、系统双向潮流、短路电流升高、分布式电源的消纳等^[1]. 由此主动配电网 (active distribution network, ADN) 概念应运而生, 主动配电网是通过使用灵活的网络拓扑结构来管理潮流, 以便对局部的 DER 进行主动控制和主动管理的配电系统^[2]. 未来的配电网是同时含有多种主动管理装置的配电网, 例如风电、光电、储能系统 (energy storage system, ESS)、分组投切电容器组 (capacitors banks, CB)、静止无功补偿器 (static VAR compensation, SVC)、有载调压变压器 (onload tap changer, OLTC), 如何制定这些主动管理装置的控制策略关系到主动配电网优化运行.

由于主动配电网优化运行的研究中含有很多离散变量和整数变量, 以及配电网潮流等式的非凸, 使得求解过程比较困难, 属于非确定性多项式 (non-deterministic polynomial) 问题, 当前许多智能算法如粒子群算法^[3]、遗传算法^[4]、进化算法^[5]确实能求解这些非凸问题. 但是, 智能算法运用到主动配电网无功优化中, 容易陷入局部最优解且求解速度很慢. 文献[6]建立了以网损为

目标的主动配电网随机无功优化模型, 并用粒子群算法来求解, 且只是将网损作为单目标; 文献[7]建立了考虑网损、电压偏差的配电网随机无功优化模型, 但其没有考虑储能系统. 文献[8-9]考虑到集中调控的不可靠性, 将配电网进行分区来进行无功优化, 使用交替方向乘子法来进行求解, 但考虑的无功控制装置仅仅只限于 DG; 文献[10-11]利用二阶锥规划 (second order cone programming, SOCP) 来求解无功优化问题, 但目标函数仅仅为网损, 比较单一.

针对以上问题, 笔者考虑 DG、ESS、CB、SVC、OLTC 等主动管理装置, 以弃风、弃光、网损、电压偏差为目标函数, 建立了配电网多目标无功优化模型, 然后利用层次分析法将多目标函数转化为单目标函数, 通过对模型进行线性化处理和松弛凸化为二阶锥 (SOCP) 的形式, 再用商业求解器 Cplex 来进行求解, 从而制定出这些主动管理装置的动态投切策略.

1 主动配电网建模

1.1 主动管理装置的建模

1.1.1 储能装置建模

通常情况下储能装置具有削峰填谷、改善电压质量等作用. 笔者主要考虑电量平衡限制、电量剩余限制、充电限制, 忽略储能装置的电量随时间

收稿日期: 2018-09-29; 修订日期: 2018-11-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61873292); 河南省科技攻关项目 (172102210012)

作者简介: 章健 (1963—), 男, 河南郑州人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事电力系统运行与分析和电力系统辨识等方面的研究, E-mail: zhangjian63@zzu.edu.cn.

的损失,其模型为:

$$E_{j,t+1} = E_{j,t} + \eta_{ch,j} P_{ch,j,t} \Delta t - P_{dch,j,t} / \eta_{dch,j} \Delta t, \quad (1)$$

$$E_{j,\max} \cdot 20\% \leq E_{j,t} \leq E_{j,\max} \cdot 90\%, \quad (2)$$

$$M_{ch,j,t} + M_{dch,j,t} \leq 1, \quad (3)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{ch,j,t} \leq P_{ch,j,\max} M_{ch,j,t}; \\ 0 \leq P_{dch,j,t} \leq P_{dch,j,\max} M_{dch,j,t}, \end{cases} \quad (4)$$

式中: $E_{j,t}$ 为 t 时刻第 j 节点上所连接的电量; $P_{ch,j,t}$ 、 $\eta_{ch,j}$ 、 $P_{dch,j,t}$ 、 $\eta_{dch,j}$ 分别为第 j 节点上连接储能装置的充电功率、充电效率、放电功率、放电效率; Δt 为调度时间间隔; $E_{j,\max}$ 为储能装置的最大容量; $M_{ch,j,t}$ 、 $M_{dch,j,t}$ 为 0、1 变量, 保证充放电不能同时进行; $P_{ch,j,\max}$ 、 $P_{dch,j,\max}$ 分别为充放电的最大功率. 式(1)为电量平衡限制; 式(2)为了保证储能装置的寿命设定的电池剩余限制; 式(3)为储能装置的充放电限制, 保证储能装置在调度周期内的某一时刻只能处于充电、放电和不充电也不放电的 3 种状态中的一种; 式(4)为充放电的功率限制.

1.1.2 无功装置建模

(1) 连续的无功调节.

$$Q_{j,\min}^{\text{SVC}} \leq Q_{j,t}^{\text{SVC}} \leq Q_{j,\max}^{\text{SVC}}. \quad (5)$$

(2) 离散的无功调节. 离散的无功调节主要是分组投切电容器组.

$$Q_{j,t}^{\text{CB}} = N_{j,t}^{\text{CB}} Q_{j,\text{step}}^{\text{CB}}, \quad (6)$$

$$N_{j,t}^{\text{CB}} \leq N_{j,\max}^{\text{CB}}, \quad (7)$$

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^{T-1} D_{j,t}^{\text{CB}} \leq D_{j,\text{lim}}^{\text{CB}}; \\ D_{j,t}^{\text{CB}} \in \{0, 1\}, \end{cases} \quad (8)$$

$$-D_{j,t}^{\text{CB}} N_{j,\max}^{\text{CB}} \leq N_{j,t+1}^{\text{CB}} - N_{j,t}^{\text{CB}} \leq D_{j,t}^{\text{CB}} N_{j,\max}^{\text{CB}}, \quad (9)$$

式中: $Q_{j,\max}^{\text{SVC}}$ 、 $Q_{j,\min}^{\text{SVC}}$ 分别为 SVC 发出无功功率的上下限; $Q_{j,t}^{\text{SVC}}$ 、 $Q_{j,t}^{\text{CB}}$ 分别为接在 j 节点上的 SVC、CB 在 t 时刻时的无功功率; $N_{j,t}^{\text{CB}}$ 、 $N_{j,\max}^{\text{CB}}$ 分别为 CB 的投切组数和最大投切组数; $D_{j,t}^{\text{CB}}$ 为调度周期内 CB 投切组数是否改变, 改变为 1, 不改变为 0. 式(5)为 SVC 投切的上下限约束; 式(6)为 CB 的投切容量与投切组数的约束; 式(7)和(8)分别为 CB 的投切组数和投切次数限制约束.

1.1.3 OLTC 的建模

$$U_{i,t} = n_{ij,t} U_{j,t}; \quad (10)$$

$$n_{ij,t} = n_{ij,0} + K_{ij,t} \Delta n_{ij}; \quad (11)$$

$$-K_{ij,\max} \leq K_{ij,t} \leq K_{ij,\max}; \quad (12)$$

$$-2K_{ij,\max} D_{j,t}^{\text{olte}} \leq K_{ij,t+1} - K_{ij,t} \leq 2K_{ij,\max} D_{j,t}^{\text{olte}}; \quad (13)$$

$$\sum_{t=1}^{T-1} D_{j,t}^{\text{olte}} = 1, D_{j,t}^{\text{olte}} \in \{0, 1\}, \quad (14)$$

式中: $K_{ij,\max}$ 为 OLTC 触头最大调节位置; $K_{ij,t}$ 表

示 t 时刻接在 j 节点上 OLTC 触头的位置; n_{ij} 为 i 、 j 节点之间的变比; $n_{ij,t}$ 、 $n_{ij,0}$ 分别为 t 时刻和 0 时刻的变比, $D_{j,t}^{\text{olte}}$ 为二进制变量, 为 1 说明抽头位置改变, 为 0 说明抽头位置不改变. 式(10)为高低侧电压之间与变比的关系; 式(11)为变比与 OLTC 抽头的位置与变比之间的关系; 式(12)为 OLTC 抽头的最大位置限制; 式(13)和式(14)为调度周期内 OLTC 抽头的调节限制.

1.2 目标函数建模

笔者建立多目标模型, 分别考虑网损、弃风和弃光和电压偏差.

(1) 网损.

$$f_{\text{loss}} = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N R_{ij} I_{ij,t}^2 \Delta t. \quad (15)$$

(2) 弃风和弃光.

$$f_{\text{cur}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{\text{DG}}} (P_{i,t}^{\text{pre}} - P_{i,t}^{\text{DG}}) \Delta t. \quad (16)$$

(3) 电压偏差. 笔者将电压限制在一定的区间范围内, 如果越界, 采取罚函数的形式进行惩罚, 具体表达式为:

$$f_u = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{\text{node}}} |U_{i,t}^2 - U_{\text{ref}}^2|, \quad (17)$$

式中: N_{node} 为电网中节点的个数; N 为支路的条数; R_{ij} 为 ij 支路的电阻; $I_{ij,t}$ 为 t 时刻的 ij 支路的电流; Δt 为调度周期时间间隔; N_{DG} 为 DG 的个数; $P_{i,t}^{\text{pre}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{DG}}$ 分别为 i 节点 t 时刻 DG 预测功率和实际发出功率; $U_{i,t}$ 为 i 节点 t 时刻的电压; U_{ref} 为电网中的参考电压.

1.3 运行约束

1.3.1 功率平衡约束

目前在配电网优化控制策略制定中, 配电网潮流形式一般采用 Distflow 支路潮流^[10]形式. 其实质就是流入节点的功率与流出节点的功率平衡.

$$\begin{cases} \sum_{i \in \varphi(j)} [P_{ij,t} - R_{ij} I_{ij,t}^2] - \sum_{k \in \psi(j)} P_{jk,t} = P_{j,t}; \\ P_{j,t} = -P_{j,t}^{\text{DG}} - P_{dch,j,t} + P_{ch,j,t} + p_{j,t}^d, \end{cases} \quad (18)$$

$$U_{i,t}^2 - U_{j,t}^2 = -2(R_{ij} P_{ij,t} + X_{ij} Q_{ij,t}) + (R_{ij}^2 + X_{ij}^2) I_{ij,t}^2, \quad (19)$$

$$\begin{cases} \sum_{i \in \varphi(j)} [Q_{ij,t} - X_{ij} I_{ij,t}^2] - \sum_{k \in \psi(j)} Q_{jk,t} = Q_{j,t}; \\ Q_{j,t} = -Q_{j,t}^{\text{DG}} - Q_{j,t}^{\text{SVC}} - Q_{j,t}^{\text{CB}} + Q_{j,t}^d, \end{cases} \quad (20)$$

$$I_{ij,t}^2 = \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{U_{i,t}^2}, \quad (21)$$

式中: $\varphi(j)$ 是辐射电网中以 j 为末端节点的支路

首端节点集合; $\psi(j)$ 是以 j 为首端节点的支路的末端节点集合; $P_{ij,t}, Q_{ij,t}$ 为 i, j 支路的首端 t 时刻的有功和无功功率; $U_{i,t}, U_{j,t}$ 和 $I_{ij,t}$ 为 t 时刻 ij 节点的电压幅值和 i, j 支路电流幅值; R_{ij}, X_{ij} 为 i, j 支路的电阻和电抗. 式(18) 为有功平衡约束; 式(20) 是保证无功平衡; 式(19) 和(21) 是电压降平衡约束.

1.3.2 电压及电流上下限约束

$$U_{j,\min} \leq U_{j,t} \leq U_{j,\max}; \quad (22)$$

$$0 \leq I_{ij,t} \leq I_{ij,\max}, \quad (23)$$

式中: $U_{j,\min}, U_{j,\max}$ 为电压的上下界; $I_{ij,\max}$ 为电流最大值.

1.3.3 变电站关口约束

主动配电网的功率波动会对输电网的电能质量造成影响, 所以配变口交换功率应该控制在一定的范围内^[10].

$$\begin{cases} P_{0,\min} \leq P_{0,t} \leq P_{0,\max}; \\ Q_{0,\min} \leq Q_{0,t} \leq Q_{0,\max}, \end{cases} \quad (24)$$

式中: $P_{0,\max}, P_{0,\min}$ 为变电站节点的输出功率的上下界, $P_{0,t}$ 为从变电站节点流出的功率.

1.3.4 分布式电源约束

随着分布式电源的发展, 现在越来越多的 DG 可以进行无功调节, 对于 DG 无功方面的控制, 有恒功率和变功率控制, 笔者主要考虑恒功率的控制. θ 为功率因素角.

$$\begin{cases} 0 \leq P_{j,t}^{\text{DG}} \leq P_{j,t}^{\text{pre}}; \\ 0_{j,t}^{\text{DG}} = P_{j,t}^{\text{DG}} \tan \theta. \end{cases} \quad (25)$$

2 模型的转化

2.1 二阶锥模型

由于所建模型是大规模非凸非线性的混合整数规划问题, 现有的诸如智能算法容易陷入局部最优解, 二阶锥规划算法能良好地解决这些问题.

二阶锥的标准形式^[12]:

$$\min_{x_i} \{ c^T x \mid Ax = b, x_i \in K, i = 1, 2, \dots, N \},$$

式中: 变量 $x \in R_N$; 系数常量 $b \in R_M$; $c \in R_N$; $A_{M \times N} \in R_{M \times N}$; K 为二阶锥或旋转二阶锥.

二阶锥:

$$K = \left\{ x_i \in R_N \mid y^2 \geq \sum_{i=1}^N x_i^2, y \geq 0 \right\}.$$

2.2 模型的锥化

令 $I_{ij,t}^2 = \tilde{I}_{ij,t} U_{i,t}^2 = \tilde{U}_{i,t}$, 将式(21) 松弛为:

$$\tilde{I}_{ij,t} \geq \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{\tilde{U}_{i,t}}, \quad (26)$$

然后将式(26) 化为(27).

$$\left\| \begin{matrix} 2P_{ij,t} \\ 2Q_{ij,t} \\ \tilde{I}_{ij,t} - \tilde{U}_{i,t} \end{matrix} \right\| \leq \tilde{I}_{ij,t} + \tilde{U}_{i,t}. \quad (27)$$

对于目标函数 f_u 不满足二阶锥规划的模型, 必须对其进行处理:

$$\text{令 } G_{i,t} = |\tilde{U}_{i,t} - U_{\text{ref}}^2|,$$

添加如下附加约束^[13]:

$$\begin{cases} G_{i,t} \geq 0; \\ G_{i,t} \geq \tilde{U}_{i,t} - (U_{\max}^{\text{thr}})^2; \\ G_{i,t} \geq -\tilde{U}_{i,t} + (U_{\min}^{\text{thr}})^2, \end{cases} \quad (28)$$

式中: $U_{\min}^{\text{thr}}, U_{\max}^{\text{thr}}$ 为电压优化的最小值和最大值.

式(22) 和(23) 相应转化为:

$$\begin{cases} U_0 \underline{U} \leq \tilde{U}_{i,t} \leq U_0 \bar{U}; \\ 0 \leq \tilde{I}_{i,t} \leq \left(\frac{S_L}{U_0} \right)^2, \end{cases} \quad (29)$$

式中: U_0 为配电网的电压等级; \bar{U}, \underline{U} 为各节点电压的上下限; S_L 为线路的最大传输容量. 上述之前的约束经过变形后就变成了二阶锥约束的形式.

相应的式(10) 变成:

$$\tilde{U}_{i,t} = n_{ij}^2 \tilde{U}_{j,t}. \quad (30)$$

由于式(11) 的非线性, 可以处理成如下形式^[14]:

$$K_{ij,t} = \sum_{m=0}^{2K_{ij,\max}} [(m - K_{ij,\max}) B_{m,t}]; \quad (32)$$

$$\sum_{m=0}^{2K_{ij,\max}} B_{m,t} = 1, B_{m,t} \in \{0, 1\}; \quad (33)$$

$$\tilde{U}_{i,t} = \sum_{m=0}^{2K_{ij,\max}} [n_{ij,0} + (m - K_{ij,\max}) \Delta n_{ij}]^2 U_{j,t}^{\text{aux}}, \quad (34)$$

并添加如下约束:

$$U_{j,\min}^2 B_{m,t} \leq U_{j,t}^{\text{aux}} \leq U_{j,\max}^2 B_{m,t}; \quad (35)$$

$$U_{j,\min}^2 (1 - B_{m,t}) \leq \tilde{U}_{j,t} - U_{j,t}^{\text{aux}} \leq U_{j,\max}^2 (1 - B_{m,t}), \quad (36)$$

因此, 式(10) 和(11) 就线性化为(32)、(33)、(34)、(35)、(36).

2.3 目标函数的多目标处理

目前处理多目标模型的方法主要有: 将多目标转化为单目标来求解、帕累托前沿^[15]等方法. 笔者通过对多目标进行加权转化为单目标进行求解. 利用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)^[16]来确定系数.

$$F = w_1 f_{\text{loss}} + w_2 f_{\text{cur}} + w_3 f_u.$$

根据层次分析法算出来权重: $w_1 = 0.6250$,

$w_2 = 0.238\ 5, w_3 = 0.136\ 5$.

2.4 模型求解

经过上述线性化和锥化处理之后,潮流等式 (18) ~ (20) 也将变成线性式,如果不考虑整数变量,模型为二阶锥规划 (SOCP) 模型. 本文由于含有离散变量,无功优化的模型变成了混合整数二阶锥规划模型 (mixed integer second order cone programming, MISOCP), 一些商业软件能快速地求解这种模型,如 Cplex、Gurobi、Mosek.

3 算例分析

3.1 测试环境与算例

为了验证笔者所建的模型的正确性和有效性,在 Yalmip 上建模,在 MATLAB2016b 平台上采用 Cplex 12.7 求解器进行求解. 测试系统的硬件环境是英特尔 Pentium (R) J2900, 4 GB 内存, 64 位 windows 8 操作系统.

笔者在修改的 IEEE 33 节点上进行仿真计算. 图 1 为某地典型的分布式电源和负荷的日运行曲线,风机与光伏接入的位置如表 1 所示^[16]. ESS 的容量为 1 200 kVA, 充放电功率为 240 kW·h, 效率为 0.938 1. SVC 接在节点 25, 补偿范围为 -300 ~ 500 kvar, 为了提高分布式电源的利用率, 将渗透率分别设置为 25%、50%、75%、100%, 观察节点电压是否越界. 分组投切电容器的基本参数如表 2 所示, 电压基准值选择 12.66 kV, 电压的上下限是 0.95 ~ 1.05, 节点电压的优化区间为 0.97 ~ 1.03.

3.2 结果分析

笔者分别就 3 种场景进行分析, 情景 1: 无储能系统, 考虑电压偏差; 情景 2: 有储能系统, 不考

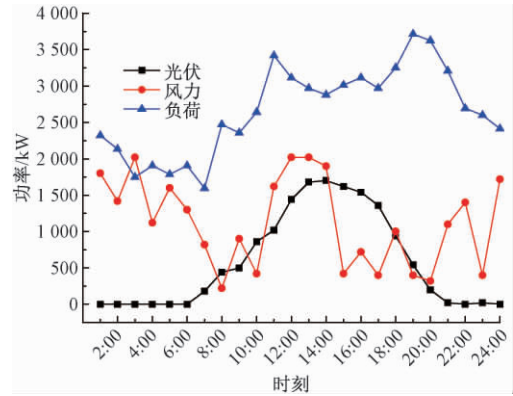


图 1 分布式电源出力 and 负荷曲线

Fig. 1 Curve for load demand and DG output

表 1 DG 的安装位置和参数

Tab. 1 Basic installation parameters of DGS

参数	风机		光伏		
接入节点	13	30	7	10	24
容量/kVA	1 000	1 000	500	500	300

表 2 CB 的安装位置和参数

Tab. 2 Basic installation parameters of CB

接入节点	每组补偿功率/kvar	安装组数	最大投切次数
5	25	6	5
12	25	6	5

虑电压偏差; 情景 3: 有储能系统, 考虑电压偏差. 分别在分布式电源渗透功率为 25%、50%、75%、100% 时, 对上面 3 种情景进行算例分析, 结果如表 3 所示.

从表 3 中通过 B1 和 B3、C1 和 C3、D1 和 D3、E1 和 E3 对比可以看到, 储能装置作为有功参与优化的时候能降低网损和电压偏差. 从 B2 和 B3、C2 和 C3、E2 和 E3、D2 和 D3 中可以看出, 当不将电压偏差作为优化目标时, 可以适当降低网损, 但同时会造成较大的电压偏差, 影响电压质量. 随着

表 3 不同情景下的网损及弃 DG 功率和电压偏差

Tab. 3 The network loss, abandon DG and voltage deviation under different scenarios

渗透率/%	情景	网损/kW	弃风/kW	弃光/kW	电压偏差/pu
25	情景 B1	1 537.0	337.750 1	0.000 186 14	11.542 6
	情景 B2	1 436.6	337.772 9	0.031 1	1 307
	情景 B3	1 494.8	337.750 1	0.000 193 27	3.540 1
50	情景 C1	1 200.3	675.500 3	0.000 412 92	3.646 6
	情景 C2	1 089.2	675.500 3	0.000 399 03	1 492
	情景 C3	1 132.9	675.538 3	0.051 0	0.191 2
75	情景 D1	977.218 0	1 013.3	0.080 7	1.050 7
	情景 D2	839.185 9	1 013.3	0.001 5	1 913
	情景 D3	869.523 3	1 013.3	0.044 2	0.163 5
100	情景 E1	836.762 4	1 486.5	0.001 5	3.046 2
	情景 E2	683.387 0	1 403.3	0.191 8	2 570
	情景 E3	701.6	1 351.0	0.002 0	0.663 7

渗透率的不断提高,分布式电源参与优化时,能改变配电网中的潮流,达到降低网损的目标,但是对弃风和弃光影响不是很大,这是因为笔者所建的储能系统模型只能进行有功调节,不能进行无功调节。

从图2可以看出,在渗透率达到100%时,情景E3时的电压偏差较小,而无储能装置作为有功协调优化时,电压明显偏高,不计及电压偏差时,电压偏差较大。在0:00的时候,由于负荷需求高于分布式电源的出力,导致电压相对较低,在4:00的时候,由于分布式电源出力增大,会抬高电压,在大概中午11:00的时候,由于负荷需求大,电压会下降,在14:00的时候,由于风电出力突然降低,会造成电压降低,在20:00的时候,由于负荷的持续增大,电压会降低到最低点,但是电压都没有越界,保持在较好的状态。

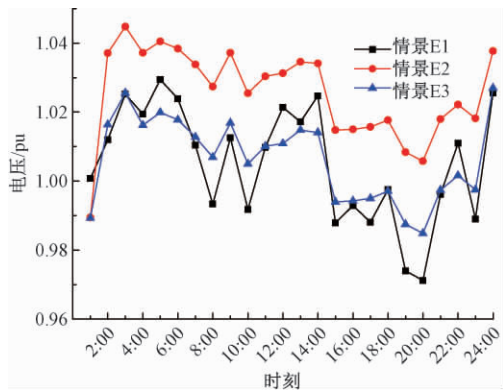


图2 33节点的电压

Fig. 2 Voltage value of 33 node

从图3中可以看出,当渗透率不断增大时,配电网中的电压也增大,但是在笔者所提出的控制策略下,电压没有越界,而是稳定在0.96~1.03 pu之间,充分证明所提出的控制策略的有效性。

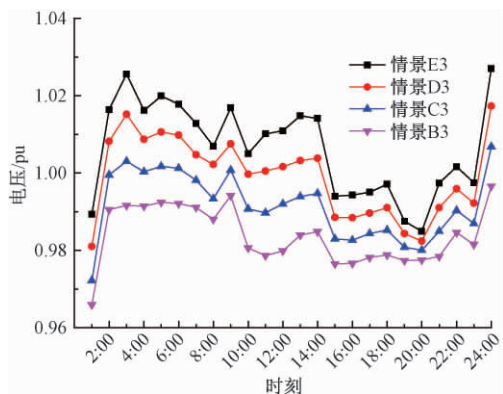


图3 渗透率不同时18节点的电压

Fig. 3 The voltage of 18 nodes with different permeability

图4和图5是渗透率为75%时的控制策略。图4是CB的控制策略;图5是ESS控制策略。从图4可以看出,储能装置会使CB的投切组数减少,切换次数增多,充分证明了储能装置作为有功参与了电压的调节。不考虑电压偏差时,CB的切换组数之间变换也较小,说明不计及电压偏差时,没有利用好CB对电压偏差的调控作用。从图5可以看出,不计及电压偏差量时,储能装置的变化趋势基本一样,电压偏差主要是由CB、OLTC装置来进行控制,储能装置对电压偏差的调控作用不明显。

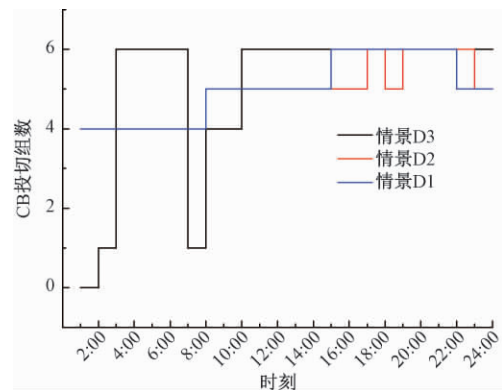


图4 5节点CB的控制策略

Fig. 4 CB control strategy of Node 5

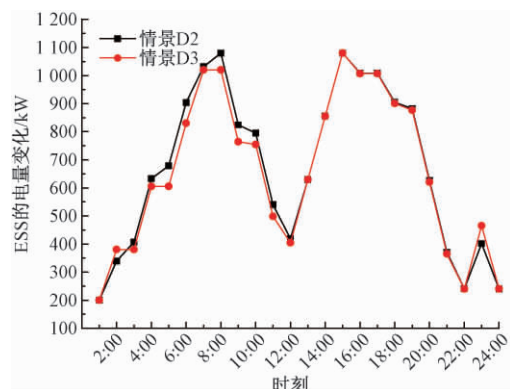


图5 节点33 ESS的控制策略

Fig. 5 ESS control strategy of Node 33

4 结论

(1) 随着分布式电源的渗透率不断提高,其网络损耗不断减小,而弃风量逐渐增大,在笔者提出的控制策略下,电压没有出现越界。

(2) 笔者提出的储能装置的充放电策略能降低网损、电压偏差等;当不将电压偏差作为优化目标时,可以适当降低网损,但是会造成较大的电压偏差,从而影响供电质量。

参考文献:

- [1] 邢海军,程浩忠,曾平良,等. 基于二阶锥规划的间歇性分布式电源消纳研究[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 74-80.
- [2] 范明天,张祖平,苏傲雪,等. 主动配电系统可行技术的研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 36(22): 12-18.
- [3] 徐俊俊,黄永红,王琪,等. 基于自然选择粒子群算法的含DG接入的配电网无功优化[J]. 电测与仪表, 2014, 51(10): 33-38.
- [4] 杨胡萍,李威仁,左士伟,等. 基于改进遗传算法的电力系统无功优化[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(6): 66-69.
- [5] 李鸿鑫,李银红,陈金富,等. 自适应选择进化算法的多目标无功优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 71-78.
- [6] 张世达,孙永辉,赵景涛,等. 基于随机响应面法的主动配电网无功优化[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 30-38.
- [7] 杨德昌,廖文龙,孙雪,等. 基于满意度阈值判定的主动配电网无功优化[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 3003-3010.
- [8] ZHWNG W Y, WU W C, ZHANG B M, et al. A fully distributed reactive power optimization and control method for active distribution networks[J]. IEEE transactions on smart grid, 2016, 7(2): 1021-1033.
- [9] 梁俊文,林舜江,刘明波. 主动配电网分布式无功优化控制方法[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 230-237.
- [10] 刘一兵,吴文传,张伯明,等. 基于混合整数二阶锥规划的主动配电网有功-无功协调多时段优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2575-2583.
- [11] 刘一兵,吴文传,张伯明,等. 基于混合整数二阶锥规划的三相有源配电网无功优化[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 58-64.
- [12] 全然,韦化,简金宝. 求解大规模机组组合问题的二阶锥规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 101-107.
- [13] NICK M, CHERKAOUI R, CHERKAOUI M. Optimal allocation of dispersed energy storage systems in active distribution networks for energy balance and grid support[J]. IEEE transactions on power systems, 2014, 29(5): 2300-2310.
- [14] LI P, JI H, WANG C, et al. A coordinated control method of voltage and reactive power for active distribution networks based on soft open point[J]. IEEE transactions on sustainable energy, 2017, 8(4): 1430-1442.
- [15] 朱永胜,王杰,瞿博阳,等. 采用基于分解的多目标进化算法的电力环境经济调度[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1577-1584.
- [16] SAATY T L. Decision making—the analytic hierarchy and network processes(AHP/ANP)[J]. Journal of systems science and systems engineering, 2004, 13(1): 1-35.

Dynamic Reactive Power Optimization in Active Distribution Network Based on Second-Order Cone Programming

ZHANG Jian¹, XIONG Zhuangzhuang¹, WANG Mingdong¹, ZHU Yongsheng²

(1. School of Industrial Technology Research Institute, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Electronic and Information Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: In order to increase the utilization rate of distributed energy and the to reduce network loss and voltage deviation, the multi-objective model of dynamic reactive power optimization with active and reactive power coordination for the distribution network was proposed in this paper. It consisted of Energy Storage System, Capacitors Banks, Static VAR Compensation, On-load Tap Changer, and distribution generation. The analytic hierarchy process was used to transform the multi-objective into a single target. The Big-M method was used to linearize the model, and the relaxation theory is used to relax the convexity into the form of the second-order cone programming. Case study on the improved IEEE 33 network verified the effectiveness of the proposed model. Cplex was used to get the switching capacity and time each active management device. It was proved that the proposed method in this paper was reasonable.

Key words: active distribution network; second-order cone programming; multi-objective optimization; reactive power optimization

基于时序信息分析的 WSN 贝叶斯信誉评价模型

滕志军¹, 郭力文¹, 吕金玲¹, 侯艳权²

(1. 东北电力大学 信息工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 国网七台河供电公司, 黑龙江 七台河 154600)

摘要: 为了有效降低信道占用对节点信誉评价的影响, 提高信誉评价模型的准确性, 针对数据中断攻击和选择性转发攻击, 结合信道状态对网络的影响, 引入节点行为时间序列和信道状态时间序列, 提出了基于时序信息分析的 TS-BRS 信誉模型. 采用时序分析法, 对两条时间序列匹配分析, 降低信道冲突对信誉评价模型的干扰, 提高模型识别的准确性; 并在信誉值更新中引入适应性维护函数 μ , 加重现阶段节点行为对信誉值的影响, 提高评价模型的适应性. 仿真实验表明, 新的信誉评价模型能有效提升模型的检测率和检测速度. 引入维护函数, 网络中被捕获的恶意节点的信誉值可以更快收敛.

关键词: 无线传感器网络; 时间序列; 贝叶斯理论; 信誉评价; 信道

中图分类号: TN92

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2019.01.007

0 引言

无线传感器网络已经在越来越多的领域应用, 如环境监测、森林防火、智能家居、工业生产、军事监测、医疗领域等^[1]. 但网络节点部署环境的复杂性、节点间灵活自组和拓扑结构变化等, 也导致其易遭受攻击, 破坏网络的正常运行^[2]. 无线传感器网络的内部攻击主要由恶意节点引起, 因此检测与排除恶意节点也成为传感器网络安全的研究重点. 针对内部攻击, 搭建信誉模型是非常有效的方法. 典型的贝叶斯信誉模型将节点的信任度进行量化并建立相应的信任管理机制, 可有效提高网络安全性^[3].

Ganeriwal 等^[4]提出经典的贝叶斯信誉评价模型 BRSN 并应用于无线传感器网络, 该模型将贝叶斯公式与 Beta 分布进行拟合, 通过对 Beta 分布计算其期望值从而得到节点的信誉值. 盛燕^[5]提出了 NRRS 信誉评价模型, 该算法在直接信誉与间接信誉上加入了路径管理, 改进了邻居监测机制. 杨光等^[6]提出 MA&TP-BRSN 评价模型, 通过引入节点行为评价, 为监测节点状态奠定了基础, 改进评价模型消除了评价的单一性, 也让第三方节点评价更加客观. 陈志奎

等^[7]提出基于信任云的传感器网络评估模型, 将节点近期行为通过历史信任云和近期信任云分配权重, 同时利用相似度对权重进行修正. Ouyang 等^[8-9]提出 RD-HBRS 信誉评价模型, 利用联合信息熵对第三方参考信息进行去冗余, 降低网络能耗, 利用高斯径向基函数识别亚攻击节点. 崔慧等^[10]在 WTE 基础上提出数据包技术策略, 利用 MNDSDF 算法检测恶意节点, 使得算法适应度更高. 韩挺等^[11]提出面向 MANET 的多属性路由评价 MDF-Trust, 通过整合网络中的四项属性并分配相应权重来决策网络安全, 有效地反映路由节点状态变化.

上述文献建立的信誉模型为该领域的研究提供了扎实的理论基础, 但针对传感器网络中信道占用问题, 只是通过控制环境参数或分配权重, 效果并不理想. 笔者针对无线传感器网络中信道拥堵所造成的误检, 通过引入时间序列达到检测数据包传递状态和目标节点行为及状态, 搭建基于时序信息分析的 TS-BRS (time-series WSN hierarchical beta reputation system) 模型判定节点行为; 同时引入维护函数维护通信统计量, 完善信誉值模型, 使得被捕获节点可以快速降低其信誉值, 降低恶意节点对网络产生的负面影响.

收稿日期: 2018-09-05; 修订日期: 2018-11-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51277023); 吉林省教育厅“十三五”科学研究规划项目(JJKH20180439KJ)

作者简介: 滕志军(1973—), 男, 吉林吉林人, 东北电力大学教授, 博士, 主要从事无线通信技术研究, E-mail: tengzhijun@163.com.

1 信誉模型建立

TS-BRS 模型依托于成簇式分层网络拓扑结构,网络结构分为汇聚节点(SINK)、簇头节点、普通节点.簇内节点间可进行多跳通信,如图 1 所示.节点信誉值计算采用时序分析法,底层普通节点负责采集目标节点在阶段时间内信道状态信息和节点行为信息,生成相应的时间序列并交由簇头统一匹配运算^[12].簇头节点通过融合簇内各节点时间序列,分析目标节点行为,计算目标节点阶段时间内正常行为和非正常行为,其中非正常行为为分恶意行为与非恶意行为,然后通过贝叶斯公式计算各节点信誉值.节点信誉值管理采用层次化管理模式,信誉值由簇头存储.汇聚节点可以对全局信誉进行查询,跨簇信誉值查询也需要汇聚节点协调完成.

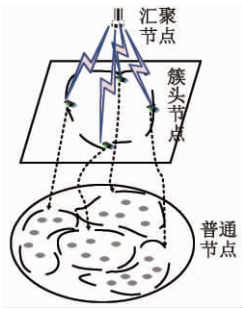


图 1 网络结构

Fig.1 Network structure

由于无线传感器网络允许丢失路由信息,所以只对网络中数据包的传递进行监测,示例路径如图 2 所示.数据包由节点 N_1 经过节点 N_2 传递到节点 N_3 ,节点 N_4 、 N_6 为节点 N_2 的邻居侦听节点,节点 N_5 为节点 N_3 的邻居侦听, A 和 B 为簇内其他节点的集合, $A = \{N_k | k \neq 1, 2, 3, 4\}$, $B = \{N_k | k \neq 1, 2, 3, 5\}$, 其中 $A \cap B \neq \emptyset$.

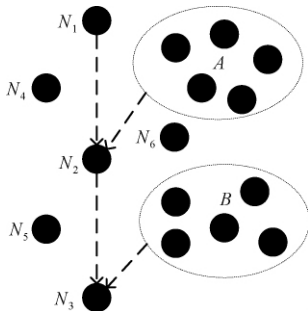


图 2 示例路径

Fig.2 Example path

1.1 贝叶斯信誉评价模型

信誉评价采用贝叶斯信誉模型.通常对一个目标信誉度的评价取决于该目标历史行为记录.

而信誉度亦可以对目标未来行为进行预测^[13].通过数学运算与收集数据的拟合,贝叶斯理论可以描述信誉值的变化规律,利用先验概率事件,更新最近的相关证据,然后对未来行为进行预测.利用贝叶斯信誉分布与 Beta 分布进行拟合,联系示例节点 N_2 信誉评价(见图 2),节点 N_2 的信誉评价函数如下:

$$D_{N_2} = E(f(\alpha_{N_2}, \beta_{N_2})) = \frac{\alpha_{N_2}}{\alpha_{N_2} + \beta_{N_2}}, \quad (1)$$

式中: D_{N_2} 为节点 N_2 的信誉值; α_{N_2} 和 β_{N_2} 分别表示正负级评分,在这里表示节点 N_2 正常通信和恶意通信的次数,其中:

$$f(p; \alpha_{N_1}, \beta_{N_2}) = \frac{\Gamma(\alpha_{N_2} + \beta_{N_2})}{\Gamma(\alpha_{N_2}) \Gamma(\beta_{N_2})} p^{\alpha-1} (1-p)^{\beta-1}, \quad (2)$$

表示节点正常通信的概率密度函数, p 表示节点正常通信的概率.

1.2 时间序列建立与分析

1.2.1 通信行为时间序列

判断节点 N_2 通信行为采用 ACK 两跳回传机制和邻居看门狗机制.当节点 N_1 经由节点 N_2 把信息传递给节点 N_3 ,节点 N_1 会先将数据包保存一段时间,节点 N_2 与节点 N_3 收到数据包会给节点 N_1 发送简单的回执信息.当节点 N_1 收到节点 N_3 的回执信息,则认定数据包传输成功,回执信息由报文头部、源节点地址、转发节点地址、目的节点地址和签名信息构成.

节点 N_1 记录数据包传输成功的次数 n 和生成数据包传输失败的时间序列 TCI_{N_2} ,即没有收到节点 N_3 的回执信息的时间序列.示例序列如下所示:

$$TCI_{N_2} = \begin{bmatrix} t_1 & t_3 & t_4 & t_5 & t_6 & t_7 \\ N_1 & N_1 & N_1 & N_1 & N_1 & N_1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中:第一行为 Δt 内的时间序列;第二行为发送数据包的源节点.

相同方式生成集合 A 内节点记录的通信行为序列 TCA_{N_2} ,示例序列如下所示:

$$TCA_{N_2} = \begin{bmatrix} t_2 \\ A \end{bmatrix}. \quad (4)$$

1.2.2 信道状态及行为时间序列

在图 2 的网络成簇后,节点 N_1 通信半径 R 内的节点为节点 N_1 下一跳的侦听节点,示例节点 N_4 为侦听节点.侦听节点负责侦听目标节点在 Δt 内信道状态和行为并生成信道状态时间序列 $TS4_{N_2}$,示例序列为:

$$TS4_{N_2} = \begin{bmatrix} t_1 & t_2 & t_3 & t_4 & t_5 & t_6 & t_7 \\ A & 0 & 0 & N_1 & N_1 & N_1 & N_1 \\ * & * & * & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: 第一行为 Δt 内的时间序列, 第二行为目标节点 N_2 在 t_i 时刻信道状况. 每个节点有一个侦听邻居表, 当 N_1 广播搜索目标节点 N_2 , N_1 广播半径内的侦听节点查找各自侦听邻居表内是否有目标节点 N_2 , 如有则开始侦听. 从侦听节点 N_1 、 N_2 间的四次握手和两次回执, 到确认第二次回执做一次信道记录, 空闲时刻不做记录. 文中为了说明方便, 空闲时刻记 0. 示例序列 $TS4_{N_2}$ 在 t_1 时刻表示节点 N_2 的信道被集合 A 内的节点占用, t_2 、 t_3 时刻节点 N_4 没有侦听到节点 N_2 有通信行为, t_4 、 t_5 、 t_6 、 t_7 时刻节点 N_2 信道被节点 N_1 占用. 第三行为节点 N_2 收到数据包后的转发行为, 若节点 N_4 侦听到节点 N_1 数据包目的地址为 N_2 , 不做记录. 当目的地址不为 N_2 , 则需要侦听节点 N_2 的转发行为, 有转发行为记为 1, 没有转发行为记 0. 因为空闲时刻记 0, 以及示例路径为 $N_1 \rightarrow N_2 \rightarrow N_3$, 故暂记 $t_1 t_2 t_3$ 时刻转发行为记为* (空), 以方便讨论.

同样生成节点 N_2 由侦听节点 N_6 侦听所生成的时间序列 $TS6_{N_2}$ (见式 6). 为简述方便, 不在示例路径内转发行为都记为*. 经过 Δt 各个侦听节点将侦听的时间序列发送给簇头, 簇头将各节点的时间序列进行时序匹配融合. 如图 2, 将示例路径中的所得的两条时间序列进行时序匹配融合, 生成时间序列 TS_{N_2} (见式 7).

$$TS6_{N_2} = \begin{bmatrix} t_1 & t_2 & t_3 & t_4 & t_5 & t_6 & t_7 \\ A & A & 0 & 0 & 0 & N_1 & N_1 \\ * & * & * & * & * & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

$$TS_{N_2} = \begin{bmatrix} t_1 & t_2 & t_3 & t_4 & t_5 & t_6 & t_7 \\ A & A & 0 & N_1 & N_1 & N_1 & N_1 \\ * & * & * & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

相同方法生成节点 N_3 的融合状态时间序列 TS_{N_3} (见式 8), 同样为简述方便, 不在示例路径内的信道状态和转发行为都记为*. 因为数据包由节点 N_2 传输给节点 N_3 所产生的时间序列会有一定延 ε , 所以在时序匹配时, 节点 N_3 的状态时间序列允许一定时间误差, 其中 $0 < \varepsilon < \nu$, ν 为所允许的最大时间误差.

$$TS_{N_3} = \begin{bmatrix} t_1 + \varepsilon t_2 + \varepsilon t_3 + \varepsilon t_4 + \varepsilon t_5 + \varepsilon t_6 + \varepsilon t_7 + \varepsilon \\ * & * & * & B & N_2 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & * & * \end{bmatrix}. \quad (8)$$

1.2.3 时间序列匹配与分析

经过 Δt , 普通节点将各自记录的通信行为序列和状态行为序列统一发送到簇头节点, 簇头先将各节点序列融合, 示例路径中节点 N_2 的通信行为时间序列为 TCI_{N_2} 和 TCA_{N_2} 的并集, 记为 TC_{N_2} :

$$TC_{N_2} = \begin{bmatrix} t_1 & t_2 & t_3 & t_4 & t_5 & t_6 & t_7 \\ N_1 & A & N_1 & N_1 & N_1 & N_1 & N_1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

结合式 (7) ~ (9) 和示例路径 $N_1 \rightarrow N_2 \rightarrow N_3$ 信息传输失败的所有状况, 通过时序分析法, 可知节点 N_2 在各时刻的详细状态. t_1 时刻显示节点 N_2 与集合 A 内的节点进行通信行为, 由于节点信道被占用, 故不记为节点 N_2 通信失败; t_2 时刻显示数据包传输源节点为集合 A 内的节点, 不在示例路径中, 故先不做统计; t_3 时刻显示源节点 N_1 无法与节点 N_2 进行通信行为, 侦听节点也没侦听到节点 N_2 有其他通信行为, 数据产生中断, 故记为节点 N_2 通信失败; t_4 时刻显示节点 N_2 有正常的转发行为, 节点 N_3 信道与集合 B 内的节点进行通信行为, 子节点信道被占用, 故不记为节点 N_2 通信失败; t_5 时刻显示节点 N_2 有正常的转发行为, 节点 N_3 无通信行为, 且没有正常回复回执信息, 故不记为节点 N_2 通信失败, 节点 N_3 将由节点 N_2 记录通信失败; t_6 时刻显示节点 N_2 没有正常转发行为, 故记为节点 N_2 通信失败; t_7 时刻显示节点 N_2 无法与节点 N_3 进行通信行为, 且节点 N_2 由正常转发行为, 故不记为节点 N_2 通信失败, 节点 N_2 将对节点 N_3 记录通信失败.

1.3 信誉值更新及统计

传感器网络信息传输失败的原因有很多, 环境干扰、信道冲突等都会对数据包传输造成影响, 故将所有的信息传输失败皆视为恶意节点所造成的影响, 会导致节点信誉值较低. 而经由时序分析的侦听过程可以检测出信道占用所造成的干扰, 提高侦听检测的准确性.

节点的信誉值基于节点的历史行为, 可分为正常通信行为、恶意节点行为和信道占用行为, 信道占用行为不进入信誉值评价标准. 当通信次数越多, 现阶段行为的影响力越小. 通过引入维护函数 μ , 见式 (10), 将节点历史信誉值近似约分, 降低历史总通信次数, 增加现阶段行为的影响力, 改变节点信誉值的弹性. 预设定的维护值 θ 的影响由仿真图 7 所示, 具体取值按环境、网络表现等因素, 将在未来的研究中做深入的讨论研究. 联系示例节点 N_2 , 节点信誉值为 D_{N_2} , 见式 (11).

$$\mu = \frac{\theta}{\alpha_{N_2} + \beta_{N_2}}; \quad (10)$$

$$D_{N_2} = \frac{\mu(\alpha_{N_2}) + \Delta\alpha_{N_2}}{\mu(\alpha_{N_2} + \beta_{N_2}) + \Delta\alpha_{N_2} + \Delta\beta_{N_2}}, \quad (11)$$

式中: $\Delta\alpha_{N_2}$ 、 $\Delta\beta_{N_2}$ 分别为节点 N_2 在最近 Δt 内正常通信行为和恶意通信行为的行为增量.

$$\Delta\alpha_{N_2} = \sum_{k=1}^x n_k, \quad (12)$$

式中: x 为 Δt 内所有记录节点 N_2 通信行为的成员节点; n_k 为各成员节点记录节点 N_2 在 Δt 内正常传输数据的次数, 累加求和得出 $\Delta\alpha_{N_2}$ 为簇头统计得出节点 N_2 在 Δt 内正常通信行为总次数.

$$\Delta\beta_{N_2} = \sum_{k=1}^x m_k, \quad (13)$$

式中: m_k 为各成员节点记录节点 N_2 在 Δt 内恶意行为次数, 通过时间序列的融合、匹配, 判断节点的行为, 累加求和得出 $\Delta\beta_{N_2}$ 为簇头统计得出节点 N_2 在 Δt 内恶意通信行为总次数.

簇头统计计算出各节点的信誉值, 主观设定信誉阈值 δ , 当簇内节点信誉值低于信誉阈值, 则簇头广播通知簇内节点将该节点加入通信黑名单, 将各节点信誉值发送到汇聚节点, 以便于信誉值的跨簇查询. 模型的工作流程图如图 3 所示.

2 仿真与分析

采用 MATLAB2016a 搭建仿真环境, 仿真环境设置: 100 m × 100 m 的正方形区域随机分布 100 个节点, 分 4 个簇, 节点通信半径为 20 m. 环

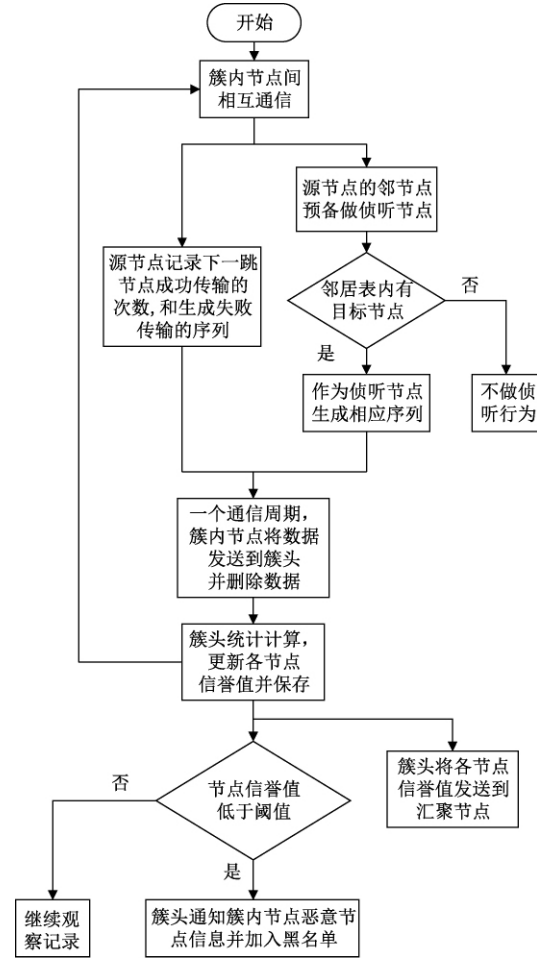


图 3 模型工作流程图

Fig. 3 Model workflow chart

境参数设为 0, 加入信道冲突概率设为 0.1, 除去失效节点和故障节点, 正常节点以百分百相应通信请求. 恶意节点以 0.9 的概率不合作通信请求 (仿真参数如表 1, 初始节点分布见图 4).

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

仿真区域/m	节点个数	节点初始信誉值	分簇内节点数量	通信半径/m	节点通信请求发送次数/(贝·s ⁻¹)	信誉刷新周期/s
100 × 100	100	0.5	25	20	100	60

2.1 节点信誉值变化

仿真实验中节点的信誉值变化情况如图 5, 其中节点 N_{d1} 、 N_{d2} 为恶意节点, N_{d3} 为正常节点, N_{d4} 是有恶意侦听时的正常节点. 图 5 显示恶意节点的信誉值从初始开始逐渐下降, 经过 4 个采样周期后在信誉值趋近于 0.1. 正常节点的信誉值则逐步上升, 并趋近于 1, 而当存在诽谤攻击时, 正常节点的信誉值上升相对缓慢, 经过 4 个采样周期后, 信誉值也趋近于 1.

2.2 维护值 θ 对信誉值的影响

正常节点中途遭遇攻击时, 节点信誉值的变化如图 6 所示. 环境参数设为 0, 信道冲突概率设为 0.1, 采样周期为 100 轮, 恶意节点以 0.9 的概率不合作, 其他参数参照表 1. 图 7 为当存在环境因素影响时, 维护值 θ 对模型误检率的影响.

由图 6 可知, 当节点在第一个采样周期受到攻击后, 维护值越小, 信誉值的收敛速度越快. 由图 7 可知, 当环境因素影响越大, 维护值越小, 模型检测的误差率越大. 当环境因素为 0.25, 维护值为

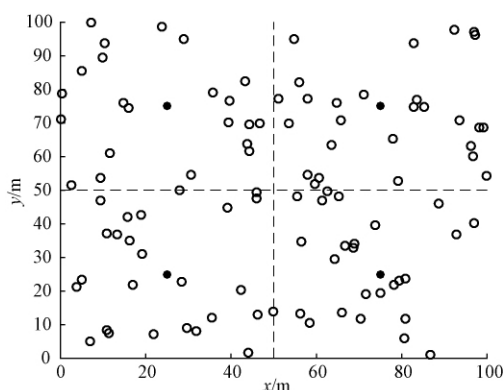


图4 初始节点分布

Fig.4 Initial node distribution

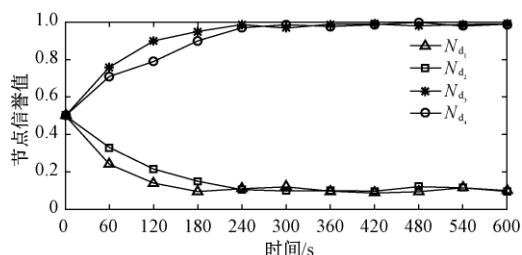
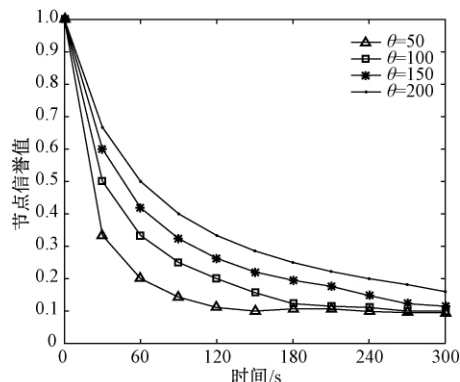
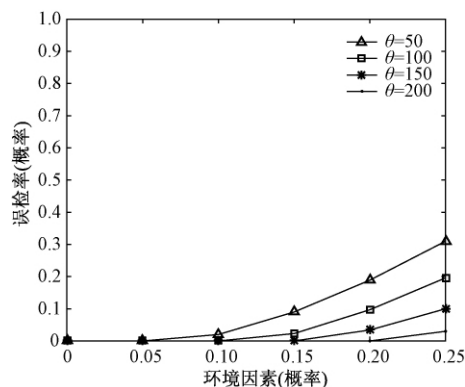


图5 节点信誉值

Fig.5 Node reputation value update

图6 θ 对信誉值影响Fig.6 The influence of θ on the reputation value图7 不同环境因素下 θ 对误检率的影响Fig.7 The effect of different environmental factors on the false detection rate of θ

150 时,模型的误检率在所能接受的范围内. 所以不同的环境因素应当选定相应的维护值,以得到更

快的收敛速度降低恶意节点对网络的影响.

2.3 安全性能分析

关于无线传感器的安全性能,各节点的信誉值是最直观的评价. 若节点信誉值低于先前预设的信誉阈值,则可以判定该节点为恶意节点,进行标记并由簇头节点和 SINK 节点对整个网络内节点进行广播通知. 当传感器网络中恶意节点数量增多,能否快速、准确、有效地识别恶意节点,是辨别信誉模型安全性能的重要标准. 笔者将恶意节点的不合作概率设为 0.8,信誉阈值设为 0.3,信道冲突概率设为 0.1,其他参数参照表 1,与文献 [7] 置信度模型以及文献 [8] RD-HBRS 模型进行安全性能比较,来对比各模型对恶意节点的识别能力(见图 8 和图 9).

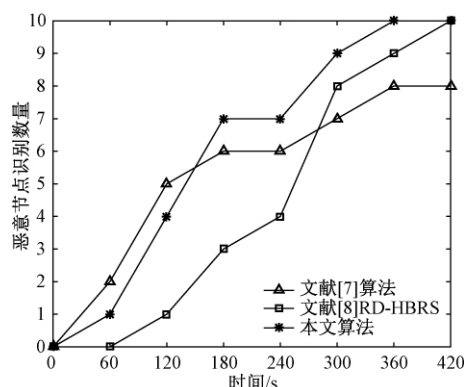


图8 恶意节点识别数

Fig.8 Number of malicious nodes

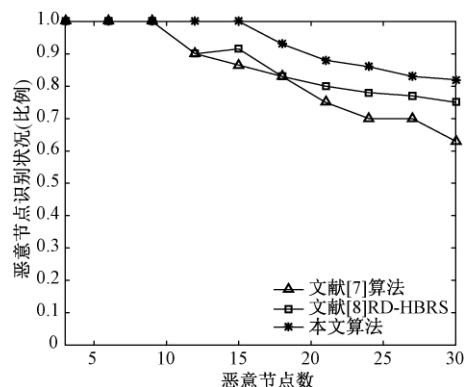


图9 恶意节点识别率

Fig.9 Malicious node recognition rate

由图 8 可知,文献 [7] 置信度模型因为收集大量信誉信息,采样初期识别速度略快于 TS-BRS 模型,文献 [8] RD-HBRS 模型因为采用了去冗余机制,初期识别恶意节点效率不足. 而到采样中期 TS-BRS 模型由于降低了误检率,恶意节点识别效率明显优于其他两种模型. 由图 9 可知,当网络内恶意节点数量不断增多,TS-BRS 模型通过时间序列对节点行为的具体表述,解决因为信道占用问题而产生的误差影响,对于恶意节点的识别率明

显高于其他两种算法.

3 结论

在基于RD-HBRS模型以簇头为中心的分层信誉值管理的基础上,取消了传统模型中第三方信誉评价,引入了目标节点状态行为时间序列以及通信行为时间序列,通过簇头将信息融合统计,得到了相应时间点内目标节点的行为判定,降低了因为网络拥堵所产生的信道占用而使得信誉模型产生误判.同时引入维护函数,完善信誉值模型,使得被捕获节点可以快速降低其信誉值,降低其对网络产生的负面影响.经仿真实验结果表明,TS-BRS信誉评价模型能够有效地提升网络的安全性能,更快、更有效地识别恶意节点.主观阈值设定并不适应复杂的传感器网络,下一阶段将对适应性信誉阈值和亚攻击节点识别进行研究.

参考文献:

- [1] MOOSAVI H, BUI F M. A game-theoretic framework for robust optimal intrusion detection in wireless sensor networks [J]. Information forensics & security IEEE transactions on, 2014, 9(9): 1367–1379.
- [2] 李建坡,钟鑫鑫,徐纯. 无线传感器网络静态节点定位算法综述 [J]. 东北电力大学学报, 2015, 35(2): 52–58.
- [3] 阎新芳,严晶晶,冯岩. WSN中基于梯度和粒子群优化算法的分簇算法 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 33–36.
- [4] GANERIWAL S, SRIVASTAVA M B. Reputation-based framework for high integrity sensor networks [C]//Proceeding of the 2nd ACM Workshop on Security of AD Hoc and Sensor Networks. New York: ACM, 2004: 66–77.
- [5] 盛燕. 无线传感器网络恶意节点识别技术研究 [D]. 哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 2008.
- [6] 杨光,印桂生,杨武. 无线传感器网络安全路由算法的研究与设计 [J]. 计算机科学, 2008, 35(5): 55–59.
- [7] 陈志奎,訾冰洁,姜国海,等. 基于信任云的无线传感器网络信任评估 [J]. 计算机应用, 2010, 30(12): 3346–3348.
- [8] OUYANG X, TIAN B, LI D, et al. A novel hierarchical reputation model for wireless sensor networks [J]. International journal of digital content technology and its applications, 2012, 6(10): 61–69.
- [9] OUYAN X, LI D, ZHANG J Y, et al. Malicious node detection in wireless sensor networks using time series analysis on node reputation [J]. Journal of convergence information technology, 2012, 7(15): 8–16.
- [10] 崔慧,潘巨龙,闫丹丹. 无线传感器网络中基于安全数据融合的恶意节点检测 [J]. 传感技术学报, 2014, 27(5): 664–669.
- [11] 韩挺,罗守山,辛阳,等. 基于动态邻接信任模型的安全路由算法研究 [J]. 通信学报, 2013, 34(6): 191–200.
- [12] 邹春明,杨文月,程亮. 基于ZigBee的智能家居温湿度监测系统的设计 [J]. 东北电力大学学报, 2012, 32(4): 14–17.
- [13] 阎新芳,张晓丹,严晶晶,等. WSN中基于离散人工鱼群的分簇拓扑优化算法 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2017, 38(4): 69–72.

WSN Bayes Reputation Evaluation Model Based on Time Series Information Analysis

TENG Zhijun¹, GUO Liwen¹, LÜ Jinling¹, HOU Yanquan²

(1. Department of Information Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China; 2. State Grid Qitaihe Electric Power Supply Company, Qitaihe City, Heilongjiang Province 154600, China)

Abstract: In order to effectively reduce the influence of channel occupancy on the reputation evaluation of nodes, and to improve the accuracy of the reputation model, to tackle the data interrupt attacks and selective forwarding attacks, a TS-BRS reputation model was presented based on time series information analysis to evaluate the behavior of nodes. Considering the influence of channel state on network node behavior time series and channel state time series. And the adaptive maintenance function μ was also introduced to update reputation value, add the influence of node behavior on reputation value in reappearing stage, and improve the adaptability of evaluation model. The simulation results showed that the new reputation evaluation model could effectively improve the detection rate and detection speed for malicious nodes. The reputation value of a malicious node could converge more quickly.

Key words: wireless sensor network; time series; bayesian theory; reputation evaluation; channel

文章编号: 1671-6833(2019)01-0044-06

基于 PARAFAC 分解的大规模 MU-MIMO 稀疏信道估计

穆晓敏¹, 刘亚丽¹, 张建康^{1,2}, 赵凌霄¹

(1. 郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 东南大学 移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要: 针对大规模 MU-MIMO(多用户多输入多输出)系统中上行链路的信道估计问题,提出了一种基于平行因子(PARAFAC)分解的稀疏信道估计算法. 该算法利用稀疏数学模型构造稀疏信道模型,将稀疏理论与张量分解相结合,对基站端的接收信号进行 PARAFAC 建模. 在满足唯一性分解条件下,利用双线性交替最小二乘(BALS)拟合算法联合估计出多个用户的信号矩阵与信道矩阵. 仿真结果表明:所提算法的估计性能优于经典的正交匹配跟踪算法等稀疏信道估计算法,与基于导频序列的估计方法相比,其信道估计的精度大幅提高;仅需少量导频,降低了导频开销,实现了高频谱效率的通信传输.

关键词: 大规模 MU-MIMO; 稀疏信道; 平行因子分解; 信道估计; 归一化均方误差

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2019.01.010

0 引言

大规模 MIMO(massive multiple input multiple output)技术是未来无线通信系统的关键技术之一^[1-2]. 在实现高频谱效率、功率效率和鲁棒性等方面有巨大的潜力. 大规模 MIMO 系统的信道估计问题引起了研究人员的关注. 特别是无线信道的稀疏性已被作为降低导频开销的方法来提高信道估计性能^[1]. 在大规模 MIMO 系统中,实际信道中包含丰富的多径成分. 用户端在局部散射效应的影响下^[3-4],无线信道往往表现出稀疏多径结构,且大部分的路径增益相当低. 随着带宽和天线数目的增多,收益下降幅度也急剧攀升^[5]. 由于传统信道估计算法(如 LS 算法和 MMSE 算法等)的估计精度较低,无法满足大规模 MIMO 系统对信道估计精度的要求. 为了在不增加导频开销的前提下提高信道估计精度,一些学者提出了稀疏信道估计算法^[6-7]. Dai 等^[8]提出一种时频联合的上行稀疏信道估计算法,该算法利用时域的训练序列和频域的正交导频序列作为时频训练信息,分别估计路径延迟和路径增益,在不增加导频开销的情况下提高信道估计精度. 然而该算法

只适用于时频序列的大规模 MIMO 系统中,这限制了该算法的应用. 文献[9]对于大规模 MIMO 稀疏上行信道的估计,提出了两种基于贪心追踪的压缩感知方法. Wang 等^[10-11]考虑在 FDD 多用户大规模 MIMO 系统中,通过利用空间相关性,在空间-频率域中以稀疏形式建模信道,结合压缩感知理论(compressed sensing, CS),提出一种基于改进的正交匹配追踪(OMP)算法来进行有效信道估计. 与传统信道估计算法相比,该算法不仅运算复杂度较低,而且收敛速度较快. 然而,该算法重构精度较低,仍不能满足系统对信道估计精度的要求,限制了该稀疏信道估计算法的应用. 同时由于将信道建模成一维稀疏向量,一次仅能估计出单个用户的信道状态信息,难以实现多用户的联合信道估计.

综上,考虑到三阶张量分解在无线通信中可以充分利用空、时、频多域信息,通过对接收信号多维矩阵建模,在低运算复杂度情况下只需少量导频序列便能联合估计信道矩阵^[7,12],笔者针对多用户大规模 MIMO 系统的上行链路信道估计问题,提出了一种基于张量分解的联合信道估计方法. 该方法将实际物理信道描述为稀疏表示的虚

收稿日期: 2018-09-05; 修订日期: 2018-11-01

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(61571401); 东南大学移动通信国家重点实验室开发研究基金(2016D02); 河南省科技攻关计划项目(152102310067); 河南省高校科技创新人才资助项目(18HASTIT021)

作者简介: 穆晓敏(1955—),女,河南郑州人,郑州大学教授,博导,主要研究方向为多天线无线通信系统、通信信号处理等, E-mail: iexmmu@zzu.edu.cn.

拟信道,再将基站端的接收信号构建信道矩阵、信号矩阵以及编码矩阵为加载矩阵的 PARAFAC 模型. 在满足张量唯一性分解的条件下,利用双线性交替最小二乘 (bilinear alternating least squares, BALS) 拟合算法进行迭代拟合,来估计多个用户的信道状态信息. 笔者所提信道估计方法能够在极少导频数目的情况下联合估计出多个用户的信号矩阵与信道矩阵,从而降低了导频资源的开销,实现了高频谱效率的通信传输.

1 系统模型

1.1 多用户大规模 MIMO 系统模型

笔者考虑单小区多用户大规模 MIMO 系统上行链路的信道估计问题,在基站端配置 N_b 根天线,服务 K 个单天线用户. 其系统模型如图 1 所示.

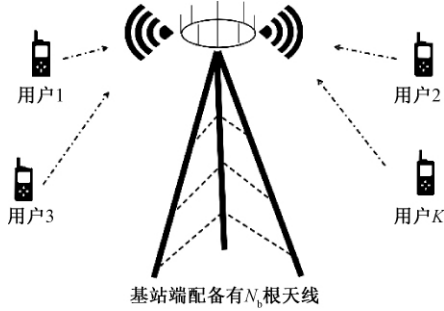


图 1 大规模 MU-MIMO 系统模型

Fig. 1 Massive MU-MIMO system model

在上行链路传输中,其信道估计是在基站进行的. 将用户端到基站端之间对应的信道矩阵表示为 $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N_b \times K}$, K 个用户传送的符号矩阵为 $\mathbf{X}_t \in \mathbb{C}^{K \times N}$. 若假定在整个观测时间内为静态信道,可得在第 t 时隙基站端的接收信号 \mathbf{Y}_t 为:

$$\mathbf{Y}_t = \mathbf{H}\mathbf{X}_t + \mathbf{V}_t, \quad (1)$$

式中: $\mathbf{Y}_t \in \mathbb{C}^{N_b \times N}$ 和 $\mathbf{V}_t \in \mathbb{C}^{N_b \times N}$ 依次表示在第 t ($n = 1, 2, \dots, T$) 个时隙基站端接收到的信号所构成的矩阵与噪声矩阵.

1.2 稀疏信道矩阵模型

用户端到基站端的信道矩阵表示为 $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N_b \times K}$, $\mathbf{h}(n_b, k)$ 表示用户 k 和第 N_b 根接收天线之间的频域等效信道衰落. 假设噪声服从 $CN(0, 1)$ 独立同分布的复高斯噪声. 利用稀疏数学模型将第 K 个用户与基站端的信道 \mathbf{h}_k 表示为^[13]:

$$\mathbf{h}_k = \Phi_k \mathbf{h}_{n_b} \in \mathbb{C}^{N_b \times 1}, \quad (2)$$

式中: \mathbf{h}_k ($k = 1, 2, \dots, K$) 是信道矩阵 \mathbf{H} 的第 k 列向量; $\mathbf{h}_{n_b} \in \mathbb{C}^{L \times 1}$ 为待估计的稀疏矩阵向量. 假设信道稀疏度为 N_b , 即在 L 条路径中最多只有 N_b

条路径的路径增益非零且 $N_b \ll L$.

式 (2) 中的 $\Phi_k \in \mathbb{C}^{N_b \times L}$ 为第 K 个用户的过完备字典矩阵 (在本文中设置 $L = 10N_b$), 表示为:

$$\Phi_k(n_b, l) = \exp[2j\pi(n_b - 1)(l - 1)/L], \quad (3)$$

则用户端到基站端的信道矩阵可以写为:

$$\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_1, \dots, \mathbf{h}_K]. \quad (4)$$

1.3 发送信号矩阵

用户在第 t 个时隙内发送的符号序列矩阵为 $\mathbf{X}_t \in \mathbb{C}^{K \times N}$, 考虑通过 Khatri-Rao 空时 (KRST) 编码来提高信号的抗干扰能力. 首先将第 t 个时隙的信号矩阵 $\mathbf{X}_t \in \mathbb{C}^{K \times N}$ 划分成 N 个符号块矢量表示的形式, $\mathbf{X}_{t,n} \in \mathbb{C}^{K \times 1}$ 表示第 t ($t = 1, 2, \dots, T$) 个时隙的第 n ($n = 1, 2, \dots, N$) 个符号块矢量.

$$\mathbf{X}_n = [\mathbf{x}_{1,n}, \mathbf{x}_{2,n}, \dots, \mathbf{x}_{t,n}, \dots, \mathbf{x}_{T,n}] \in \mathbb{C}^{K \times T}. \quad (5)$$

将符号块矢量左乘选择星座旋转矩阵 $\Theta \in \mathbb{C}^{K \times K}$ ^[14-15], 并将其乘积做对角化处理 $\text{diag}(\Theta \mathbf{x}_{t,n}) \in \mathbb{C}^{K \times K}$.

$$\Theta = \frac{1}{\sqrt{K}} \mathbf{F}_K \text{diag}(1, \alpha, \dots, \alpha^{K-1}), \quad (6)$$

式中: $\mathbf{F}_K \in \mathbb{C}^{K \times K}$ 是 DFT 变换矩阵; $\alpha = \exp(j2\pi/K)$. 最后 $\text{diag}(\Theta \mathbf{x}_{t,n})$ 右乘可以使编码矩阵增加宽度的范德蒙矩阵 $\mathbf{C}^T \in \mathbb{C}^{K \times M}$, 从而实现信号矩阵的预编码处理, 提高信号的抗衰落能力.

综上,可得基站端的接收信号为:

$$\mathbf{Y}_{t,n} = \mathbf{H}_n \mathbf{D}_t [(\Theta \mathbf{X}_n)^T] \mathbf{C}^T + \mathbf{V}_{t,n}, \quad t = 1, 2, \dots, T. \quad (7)$$

式中: $\mathbf{Y}_{t,n} \in \mathbb{C}^{N_b \times K}$, $\mathbf{V}_{t,n}$ 分别指第 n 个符号矢量、第 t 个时隙基站端的接收信号矩阵与噪声矩阵; $\mathbf{H}_n \in \mathbb{C}^{N_b \times K}$ 表示在第 n 个符号块的复合信道矩阵; $\mathbf{D}_t(\cdot)$ 表示将第 t 时隙的发送信号矩阵进行对角化操作. 为简化公式书写,令 $\mathbf{S}_n = (\Theta \mathbf{X}_n)^T \in \mathbb{C}^{T \times K}$.

2 PARAFAC 建模及其唯一性分解条件

2.1 PARAFAC 模型构建

考虑将基站端在第 t 个时隙接收到的信号矩阵沿着时间轴 t 依次堆叠, 形成一组三阶张量接收信号 $\mathbf{Y} \in \mathbb{C}^{N_b \times T \times M}$:

$$\mathbf{Y}(n_b, t, m) = \sum_{k=1}^K h(n_b, k) s(t, k) c(m, k) + \mathbf{V}(n_b, t, m), \quad (8)$$

式中: $\mathbf{Y} \in \mathbb{C}^{N_b \times T \times M}$ 表示第 t ($n = 1, 2, \dots, T$) 时隙、第 m ($m = 1, 2, \dots, M$) 个符号、第 n_b ($n_b = 1, 2, \dots, N_b$) 根天线上的接收信号张量, 以 \mathbf{H} , \mathbf{S} 和 \mathbf{C} 为 3 个因子加载矩阵; $\mathbf{V}(n_b, t, m)$ 表示三阶噪声矩阵.

2.2 PARAFAC 模型唯一性分解条件

根据 PARAFAC 模型的唯一性分解条件可得^[16]:

$$k_H + k_S + k_C \geq 2(K + 1). \quad (9)$$

式中: k_H 、 k_C 和 k_S 分别为矩阵 \mathbf{H} 、 \mathbf{S} 和 \mathbf{C} 的 kruskal 秩(k -秩). 根据 k -秩的定义, 若要 PARAFAC 模型能够唯一性分解, 则必须要有:

$$\min(k_H + k_S + k_C) \geq 2, \quad (10)$$

此时, 在存在尺度模糊和排列模糊的条件下可得:

$$\bar{\mathbf{H}} = \mathbf{H}\mathbf{\Pi}\mathbf{\Delta}_1, \bar{\mathbf{S}} = \mathbf{S}\mathbf{\Pi}\mathbf{\Delta}_2, \bar{\mathbf{C}} = \mathbf{C}\mathbf{\Pi}\mathbf{\Delta}_3, \quad (11)$$

式中: $\mathbf{\Pi} \in K \times K$ 为排列模糊矩阵; $\mathbf{\Delta}_i \in K \times K$ ($i = 1, 2, 3$) 为尺度模糊矩阵, 而且 $\mathbf{\Delta}_1\mathbf{\Delta}_2\mathbf{\Delta}_3 = \mathbf{I}_K$, 其中, 矩阵 \mathbf{C} 满 k -秩, 可得矩阵 $\mathbf{\Pi}$ 为单位矩阵, 由矩阵的性质可知排列模糊矩阵 $\mathbf{\Pi}$ 与尺度模糊矩阵 $\mathbf{\Delta}_i$ 的乘积为单位阵, 可判断 $\mathbf{\Delta}_2$ 同样为单位矩阵, 因此 PARAFAC 模型的排列模糊已被消除. 进而运用自动增益控制(auto gain control, AGC) 算法^[17], 把发送信号矩阵的首行元素设置为 1 来消除尺度模糊.

根据 k -秩的性质可知: \mathbf{H} 、 \mathbf{S} 和 \mathbf{C} 这 3 个因子矩阵满 k -秩, 则式(9)可写成:

$$\min(N_b, K) + \min(T, K) + \min(M, K) \geq 2(K + 1). \quad (12)$$

由式(12)可知, 在 PARAFAC 模型满足唯一性分解的前提下, 可以通过合理的设置基站端天线数目、时隙长度以及编码长度来优化系统参数配置.

3 BALS 拟合算法

3.1 BALS 拟合算法介绍

PARAFAC 模型通常采用三线性交替最小二乘法(trilinear alternating least square, TALS)来对接收信号进行处理. 该算法简单, 应用广泛, 但其存在较多无效迭代, 延长了迭代达到收敛所需要的时间. 因此, 为了提高 TALS 的收敛速度, 将 TALS 中的某个加载矩阵设置为已知, 那么 TALS 算法转化为 BALS 算法^[13]. 同等条件下, BALS 算法所需的迭代次数和单次迭代的计算复杂度都小于 TALS 算法, 且具有更快的收敛速度.

PARAFAC 分解模型按照 Kiers 水平形式展开可得:

$$\begin{cases} \mathbf{Y}_{(1)} = \mathbf{Y}^{N_b \times TM} = \mathbf{H}(\mathbf{C} \odot \mathbf{S})^T + \mathbf{V}_{(1)}; \\ \mathbf{Y}_{(2)} = \mathbf{Y}^{T \times MN_b} = \mathbf{S}(\mathbf{H} \odot \mathbf{C})^T + \mathbf{V}_{(2)}; \\ \mathbf{Y}_{(3)} = \mathbf{Y}^{M \times N_b T} = \mathbf{C}(\mathbf{S} \odot \mathbf{H})^T + \mathbf{V}_{(3)}. \end{cases} \quad (13)$$

采用 BALS 算法对 PARAFAC 分解模型拟合求解. 由于编码矩阵 \mathbf{C} 已知, 因此本节的代价函数为:

$$\phi(\mathbf{H}, \mathbf{S}, \mathbf{Y}_{(1)}, \mathbf{Y}_{(2)}) = \begin{cases} \|\mathbf{Y}_{(1)} - \mathbf{H}(\mathbf{C} \odot \hat{\mathbf{S}})^T\|_F^2; \\ \|\mathbf{Y}_{(2)} - \mathbf{S}(\hat{\mathbf{H}} \odot \mathbf{C})^T\|_F^2, \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\|\cdot\|_F$ 是指 Frobenius 范数, 利用交替最小二乘法^[12], 可以得到信道矩阵 \mathbf{H} 和信号矩阵 \mathbf{S} 的迭代拟合公式:

$$\hat{\mathbf{H}}_{k+1} = \arg \min_{\mathbf{H}} \|\mathbf{Y}_{(1)} - \mathbf{H}(\mathbf{C} \odot \hat{\mathbf{S}})^T\|_F^2 = \mathbf{Y}_{(1)} [(\mathbf{C} \odot \hat{\mathbf{S}})^T]^\dagger; \quad (15)$$

$$\hat{\mathbf{S}}_{k+1} = \arg \min_{\mathbf{S}} \|\mathbf{Y}_{(2)} - \mathbf{S}(\hat{\mathbf{H}} \odot \mathbf{C})^T\|_F^2 = \mathbf{Y}_{(2)} [(\hat{\mathbf{H}} \odot \mathbf{C})^T]^\dagger. \quad (16)$$

利用公式(15)和(16)中的矩阵更新来迭代拟合, 其过程直至收敛, 其性能相对于 ALS 拟合有明显的改善. 同样 BALS 拟合算法在第一次迭代之前, 需要将未知矩阵初始化处理为随机矩阵, 从而避免落入到 BALS 算法中一些特定的慢收敛数据集.

基于 BALS 拟合的迭代算法步骤如下:

步骤 1 给定矩阵 \mathbf{C} , 初始化随机矩阵 $\hat{\mathbf{S}}^{(0)}$ 、 $\hat{\mathbf{H}}^{(0)}$, 设置 $\delta(0) = \infty, i = 1$;

步骤 2 $i \leftarrow i + 1$;

步骤 3 由 $\hat{\mathbf{S}}^{(i-1)}$ 根据式(15)更新 $\hat{\mathbf{H}}^{(i)}$, 由 $\hat{\mathbf{H}}^{(i)}$ 根据式(16)更新 $\hat{\mathbf{S}}^{(i)}$;

步骤 4 计算 $\delta(i) = \|\mathbf{Y}_{(1)} - \hat{\mathbf{H}}^{(i)}(\hat{\mathbf{S}}^{(i)} \odot \mathbf{C})^T\|_F^2$, 如果 $[\delta(i-1) - \delta(i)]/\delta(i) \leq \varepsilon$, 此程序结束, 否则跳到步骤 2.

3.2 算法复杂度分析

本小节用乘法总次数作为评价算法复杂度的指标. 其算法复杂度相对 TALS 算法的复杂度降低, 由式(15)可知, BALS 算法在一次迭代运算中^[18], 估计信道矩阵 \mathbf{H} 所需的乘法次数为 $\frac{11}{3}K^3 + K^2(8TM + 1) + K(N_b TM + TM)$, 估计信号矩阵 \mathbf{S} 所需要的乘法次数为 $\frac{11}{3}K^3 + K^2(8N_b M + 1) + K(N_b TM + N_b M)$, 可得 BALS 算法进行一次迭代运算的复杂度为 $\frac{22}{3}K^3 + K^2(8N_b M + 8TM + 2) + K(2N_b TM + N_b M + TM)$, 而 TALS 算法需要的乘法次数为 $K^3 + 8K^2(N_b M + TM + N_b T + 3) + K(3N_b TM + N_b M + TMN_b T)$. 综合来看, 总体的乘法次数降低, 从而使得算法复杂度降低, 加快了信

道估计的收敛速度,提高了信道估计的性能。

4 仿真结果与分析

4.1 仿真算法性能分析

在仿真过程中,假设信道矩阵与噪声矩阵中的元素都满足独立同分布. 用户端发送符号的功率大小用 E_s 表示,则用户端的发送信号矩阵 $\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 \sqrt{E_s}$,其中, \mathbf{X}_0 是由 QPSK 调制生成的单位能量矩阵,编码方式考虑使用 Khatri-Rao 空时编码来抵抗信道衰落,其中编码矩阵 $\mathbf{C} \in \mathbb{C}^{M \times K}$ 选择截断离散傅里叶变换 (DFT) 矩阵,其中, $m = 1, 2, \dots, M, k = 1, 2, \dots, K$, 且 $M \geq K$. 用归一化均方误差 NMSE 来衡量算法的信道估计性能:

$$NMSE = \frac{1}{T} \left(\sum_{t=1}^T \frac{\|\mathbf{H} - \hat{\mathbf{H}}\|_F^2}{\|\mathbf{H}\|_F^2} \right). \quad (17)$$

式中: $\hat{\mathbf{H}}$ 为信道矩阵的估计值. 设置参数 $N_b = 32, K = T = M = 10$, 实验采用蒙特卡洛仿真并将仿真次数设为 1 000.

从图 2 仿真结果可以看出,在满足唯一性分解条件的前提下,基于张量分解的 BALS 信道估计算法性能明显优于基于导频的信道估计方法。

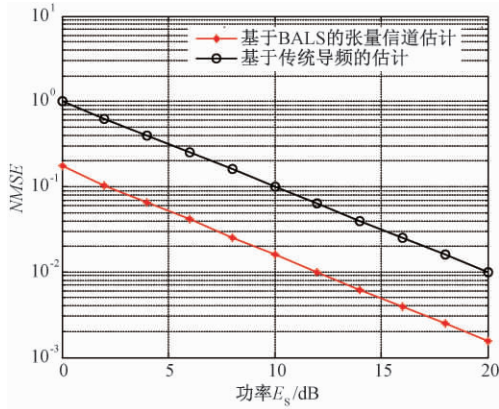


图 2 BALS 算法与导频估计算法的 NMSE 对比
Fig. 2 Comparison of BALS algorithm and pilot estimation algorithm NMSE

图 3 仿真分析了两种信道估计方法的系统误比特率 (BER) 性能. 结果显示 BALS 算法的 BER 性能随着 E_s 的增加,呈现出减小的趋势. 在 $E_s = 20$ dB 时, BALS 算法比基于导频的信道估计方法高出了近 5 dB. 在 BER 取值为 10^{-2} 时, 本文 BALS 方法与理想的信道 (已知信道状态信息) 仅约有 3 dB 的差距。

4.2 算法估计性能分析

本节仿真分析了基站端的天线数目、时间长

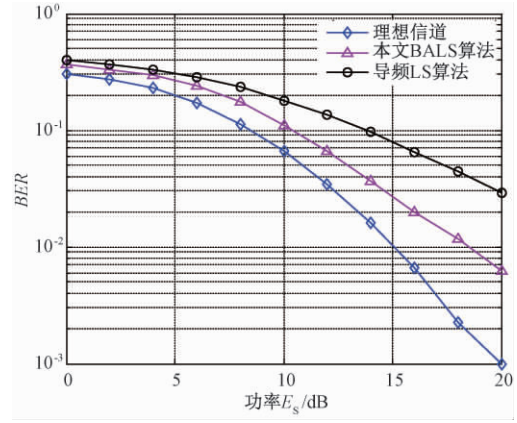


图 3 BSLA 算法的 BER 性能比较

Fig. 3 BER performance comparison of BSLA algorithm

度及编码长度等各个参数的选取对信道估计性能的影响,有助于系统进行合理的参数设置。

图 4 给出了基站端天线数目不同时信道估计的 NMSE. 从图 4 可以看出,随着基站端天线数目的增多,算法估计性能有所提升,随之而来的是复杂度的增加,且性能的提升有限. 因此合理的设置基站端的天线数目对系统整体精度的提高有重大意义。

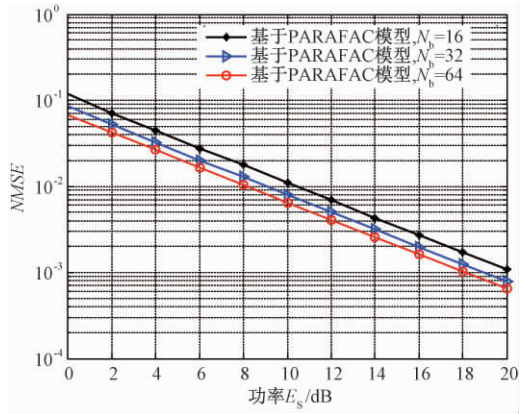


图 4 基站端天线数目对估计性能的影响

Fig. 4 Effect of number of base station antennas on estimation performance

图 5 所示结果验证了所提算法的有效性. 由于利用 PARAFAC 建模,充分利用多维信息,保留了数据结构的整体性,其算法性能明显优于传统的基于导频的信道估计方法;同时较经典的 OMP 算法与 CoSaMP 算法有较为明显的提升. 充分显示了本文方法的有效性,提高了估计精度,且仅需少量导频,提高了系统的传输效率。

图 6 仿真结果分析了参数 $N_b = 32, K = M = 10$ 时, 时隙长度 T 对算法性能的影响. 由图 6 可以看出,当 T 增加时,数据观测时间增长,从而获

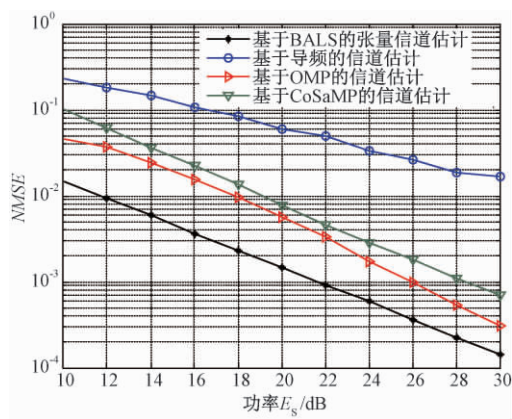


图5 多种算法性能对比

Fig. 5 Comparison on performance of multiple algorithms

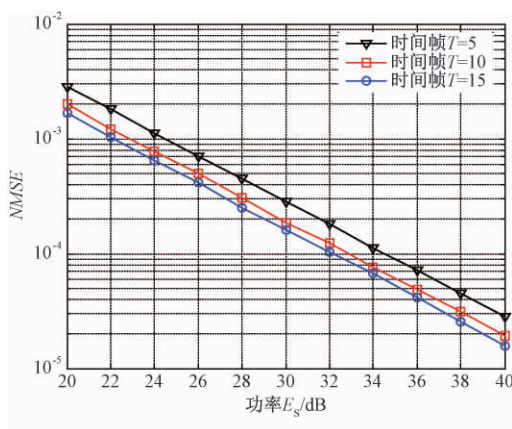


图6 不同时隙长度对信道的 NMSE 的影响

Fig. 6 Effect of different time frame lengths on channel NMSE

得了更多与系统相关的信息,所提算法具有更高的估计精度,但是系统的复杂度也将大幅度增加。

图7给出了 $N_b = 32, K = T = 20$ 时,编码矩阵 C 的编码长度 M 对算法性能的影响,仿真结果表明,随着 M 的增加,编码信息的冗余度得到

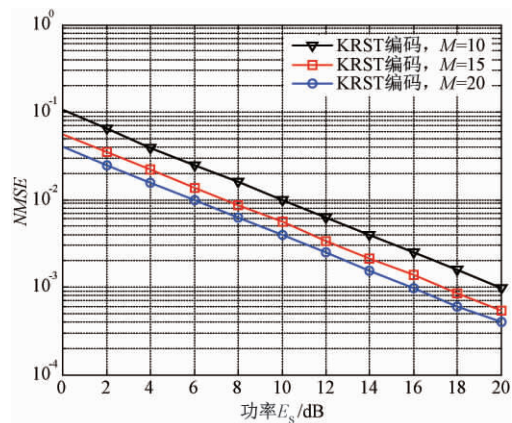


图7 不同时编码长度对信道的 NMSE 的影响

Fig. 7 Effect of different code lengths on channel NMSE

相应的提高,使得信号的抗衰落能力增强,从而使信道估计精度提升.但由于拟合算法的复杂度与 M 有关,无限制地增大 M 来换取性能的提升是不明智的,同时需要兼顾 PARAFAC 模型分解的唯一性条件,在满足存在唯一解的前提下,对参数设置进行折中考虑,以便将此方法更好地发挥作用。

5 结论

笔者针对多用户大规模 MIMO 上行链路的应用场景,提出了一种基于 PARAFAC 模型的稀疏信道估计方案.本方案首先利用稀疏表示的相关数学理论,将信道建模为虚拟的稀疏信道,同时对信号矩阵进行编码,以提高其抗衰落能力.核心工作在于将基站端的接收信号进行 PARAFAC 建模,继而采用 BALS 算法来拟合估计信道矩阵.仿真结果表明,笔者所提稀疏信道矩阵估计方法,在只需要少量导频的情况下,其估计精度优于其他的估计方法,有效地提高了系统的传输性能.笔者将稀疏理论与张量分解相结合,拓宽了 PARAFAC 模型在通信信号处理领域的应用范围,为后续研究打下基础。

参考文献:

- [1] LARSSON E G, EDFORS O, TUFVESSON F, et al. Massive MIMO for next generation wireless systems [J]. IEEE communications magazine, 2014, 52(2): 186-195.
- [2] MASOOD M, AFIFY L H, AL-NAFFOURI T Y. Efficient coordinated recovery of sparse channels in massive MIMO [J]. IEEE transactions on signal processing, 2014, 63(1): 104-118.
- [3] WU S, NI Z, MENG X, et al. Block expectation propagation for downlink channel estimation in massive MIMO Systems [J]. IEEE communications letters, 2016, 20(11): 2225-2228.
- [4] XIE H X, GAO F F, JIN S. An overview of low-rank channel estimation for massive MIMO systems [J]. IEEE access, 2016, 4: 7313-7321.
- [5] ENDRA O. Joint optimization of measurement matrix and sparse dictionary in compressive sensing [C]// 2012 International Conference on Computer and Communication Engineering. Kuala Lumpur: IEEE, 2012: 420-425.
- [6] 方昕,刘云驹,曹海燕,等.大规模 MIMO 系统中低复杂度的稀疏信道估计 [J]. 电信科学, 2016(5): 89-95.

- [7] YANG N, XIN S, LI Z. Decision aided uplink compressive channel estimation for massive MIMO systems [J]. *Wireless personal communications*, 2017, 96 (1): 153 – 162.
- [8] DAI L L, WANG Z C, YANG Z X. Spectrally efficient time-frequency training OFDM for mobile-scale MIMO systems [J]. *IEEE journal on selected areas in communications*, 2013, 31 (2): 251 – 263.
- [9] MANSOOR B, NAWAZ S J, GULFAM S M. Massive-MIMO sparse uplink channel estimation using implicit training and compressed sensing [J]. *Applied sciences*, 2017, 7(1): 63 – 68.
- [10] WANG A, WANG Y, JIANG L. Improved sparse channel estimation for multi-user massive MIMO systems with compressive sensing [C] // *International Conference on Wireless Communications & Signal Processing*. Nanjing: IEEE, 2015: 1 – 5.
- [11] 穆晓敏, 刘越, 李双志, 等. 基于张量分解的 MIMO 多中继系统半盲信道估计方法 [J]. *郑州大学学报 (工学版)*, 2016, 37(6): 83 – 86.
- [12] RAIMONDI F E D, COMON P. Tensor DoA estimation with directional elements [J]. *IEEE signal processing society*, 2017, 24(5): 648 – 652.
- [13] 王忠勇, 郭秋歌, 王法松, 等. 基于分层模型的 SC-FDE 系统低复杂度稀疏信道估计 [J]. *信号处理*, 2015, 31(9): 1106 – 1111.
- [14] RONG Y, KHANDAKER M R A, XIANG Y. Channel estimation of dual-hop MIMO relay system via parallel factor analysis [J]. *IEEE transactions on wireless communications*, 2012, 11(6): 2224 – 2233.
- [15] SIDROPOULOS N D, BUDAMPTI R S. Khatri-Rao space-time codes [J]. *IEEE transactions on signal processing*, 2002, 50(10): 2396 – 2407.
- [16] KRUSKAL J B. Three-way arrays: rank and uniqueness of trilinear decompositions, with application to arithmetic complexity and statistics [J]. *Linear algebra & its applications*, 1977, 18(2): 95 – 138.
- [17] 张日升. 平行因子技术在 DOA 估计中的应用研究 [D]. 吉林大学通信工程学院, 2007.
- [18] RAJHI M, COMON P, HARSHMAN R. Enhanced line search: a novel method to accelerate parafac [J]. *SIAM journal on matrix analysis and applications*, 2008, 30(3): 1128 – 1147.

Massive MU-MIMO Sparse Channel Estimation Based on PARAFAC Decomposition

MU Xiaomin¹, LIU Yali, ZHANG Jiankang^{1,2}, ZHAO Linxiao¹

(1. School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: For the channel estimation problem of the uplink in a large-scale MU-MIMO systems, a sparse channel estimation algorithm based on parallel factor (PARAFAC) decomposition was proposed. In this paper, a sparse mathematical model was used to construct a sparse channel model, and sparse theory was combined with tensor decomposition to perform PARAFAC modeling of the received signal at the base station. Under the condition of uniqueness decomposition, a bilinear alternating least squares (BALS) fitting algorithm was used to jointly estimate the signal matrix and the channel matrix of multiple users. The simulation results showed that the proposed algorithm had better estimation performance than the classical orthogonal matching tracking algorithm and other sparse channel estimation algorithms. Compared with the pilot sequence based estimation method, the accuracy of channel estimation was greatly improved. Only a small amount of pilot was needed. The pilot overhead was reduced, and high spectral efficiency communication transmission was realized.

Key words: massive MU-MIMO; sparse channel; parallel factorization; channel estimation; normalized mean square error

正交各向异性路基路面在移动荷载作用下的空间动力响应

王 博¹, 张春丽^{1,2}, 祝彦知³

(1. 郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001; 2. 中原工学院 信息商务学院, 河南 郑州 450007;

3. 中原工学院 建筑工程学院, 河南 郑州 450007)

摘 要: 基于薄板理论建立了直角坐标系正交各向异性弹性地基上覆无限大弹性板的路基路面三维空间力学模型, 推导了板和地基在移动荷载作用下稳态响应的微分方程. 采用坐标变换、Fourier 变换求解偏微分方程, 得到了移动荷载作用下无限大板的动力响应的解析解. 采用 MATLAB 软件编制了相应的计算程序, 对路面板表面作用移动矩形谐振荷载进行算例分析, 研究了地基参数对板位移的影响规律. 结果表明, 考虑土体的正交各向异性更能准确描述路基路面相互作用的动力响应.

关键词: 正交各向异性地基; 移动荷载; 弹性板; 动力响应

中图分类号: TU443

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.04.013

0 引言

在实际工程中, 移动荷载并非直接作用在地基表面, 而是通过路面将荷载分布到地基表面. 路基路面动力学问题一直受到国内外学者的关注, 文献[1-3]用解析法、文献[4-5]利用半解析方法、文献[6]利用模型试验与数值仿真方法、文献[7]利用有限元软件研究了路基路面动力响应问题. 文献[8]通过现场测试揭示了行车荷载下沥青路面和地基的动力影响规律. 文献[9]研究了横观各向同性地基上无限板的稳态振动, 并用数值结果表明, 采用各向同性介质的动力学模型, 不能准确描述具有明显各向异性特性地基的动力性能, 需要建立更符合实际情况的各向异性地基模型来研究移动荷载作用下路基路面的动力响应. 文献[10-12]研究了正交各向异性地基及覆无限大板的平面应变问题的动力响应. 对移动荷载作用下地基板的动力响应问题, 目前研究工作主要集中在对各向同性或横观各向同性地基的动力研究, 以及正交各向异性地基平面应变问题研究, 但动荷载作用下正交各向异性无限大板的空间动力响应鲜见报道.

笔者建立正交各向异性弹性地基上覆无限大弹性板的路基路面三维空间力学模型, 研究在车辆荷载作用下板和地基的动力响应. 对移动矩形谐振荷载作用下公路路面板动力稳态问题进行了算例分析, 研究了土体参数对板位移的影响规律.

1 直角坐标系下的振动方程

1.1 力学模型

车辆移动荷载函数一般能通过傅里叶级数展开为若干个简谐荷载之和. 笔者把车辆荷载简化为匀速移动均布矩形简谐荷载, 用 Kirchhoff 小变形无限大弹性薄板来模拟路面, 用弹性半空间来模拟路面以下的土体.

假设薄板受横向荷载 $q(x_1, y_1, t) =$

$$\begin{cases} q_0 e^{i\omega t}, & |x_1 - ct| \leq b, |x_2| \leq l; \\ 0, & \text{其他,} \end{cases}$$

以速度 c 沿 x_1 轴正向移动, 则在板底必有地基反力 $p(x_1, y_1, t)$, 根据作用力与反作用力定律, 在地基表面同样有作用力 $p(x_1, y_1, t)$, 且方向相反, 如图 1 所示.

1.2 坐标变换

如图 1 所示, $Ox_1y_1z_1$ 为固定坐标系, 根据文献[12], 引入以速度 c 沿 x_1 轴正向运动的移动坐

收稿日期: 2018-02-17; 修订日期: 2018-04-10

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51509274); 河南省高等学校青年骨干教师资助计划项目(2015GGJS-277); 河南省高等学校重点科研项目计划资助(17B560016); 河南省自然科学基金资助项目(162300410341); 中原工学院信息商务学院校级科研项目(ky1803)

通信作者: 张春丽(1979—), 女, 河南商丘人, 中原工学院副教授, 博士, 主要从事岩土和地下结构研究, E-mail: chun-li168@163.com.

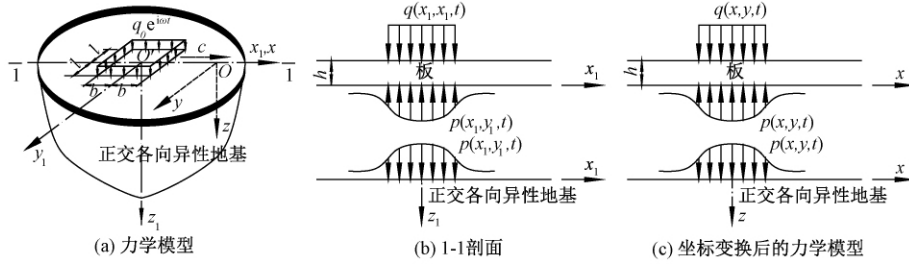


图 1 半空间上覆无限大弹性板的力学模型

Fig.1 Mechanics model of elastic plate on half space

标系 $Oxyz$, 可以使问题得到简化, 则坐标变换为:

$$\begin{cases} x = x_1 - ct; \\ y = y_1; \\ z = z_1. \end{cases} \quad (1)$$

各变量在移动坐标系下可以表述为:

$$\Psi(x_1 - ct, y_1, z_1, t) = \Psi(x, y, z) e^{i\omega t}; \quad (2a)$$

$$\dot{\Psi}(x_1 - ct, y_1, z_1, t) = (i\omega\Psi - c\Psi_x) e^{i\omega t}; \quad (2b)$$

$$\ddot{\Psi}(x_1 - ct, y_1, z_1, t) = (c^2\Psi_{xx} - 2i\omega c\Psi_x - \omega^2\Psi) e^{i\omega t}, \quad (2c)$$

式中: Ψ 为任意变量; $\dot{\Psi}$ 为对时间 t 的一阶导数; $\ddot{\Psi}$ 为对时间 t 的二阶导数.

1.3 基本方程

笔者仅分析稳态动力响应问题, 弹性地基上弹性地基板在动力荷载作用下的运动微分方程:

$$D\nabla^4 w + m\left(c^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - 2i\omega c \frac{\partial w}{\partial x} - \omega^2 w\right) = q - p, \quad (3)$$

式中: $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ 为弹性板的抗弯刚度, E 、 μ 、 h 分别为板的弹性模量、泊松比和厚度; m 为无限大平板单位面积内的质量; w 为地基上薄板的挠度.

对于正交各向异性弹性地基上作用动荷载的空间问题, 有方程:

对于正交各向异性弹性地基上作用动荷载的空间问题, 有方程:

$$\begin{cases} \left(c_{11} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + c_{66} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + c_{55} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) u_x + (c_{12} + c_{66}) \frac{\partial^2 u_y}{\partial x \partial y} + \\ (c_{13} + c_{55}) \frac{\partial^2 u_z}{\partial x \partial z} = \rho \left(c^2 \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} - 2i\omega c \frac{\partial u_x}{\partial x} - \omega^2 u_x \right); \\ \left(c_{66} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + c_{22} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + c_{44} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) u_y + (c_{12} + c_{66}) \frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial y} + \\ (c_{23} + c_{44}) \frac{\partial^2 u_z}{\partial y \partial z} = \rho \left(c^2 \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} - 2i\omega c \frac{\partial u_y}{\partial y} - \omega^2 u_y \right); \\ \left(c_{55} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + c_{44} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + c_{33} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) u_z + (c_{13} + c_{55}) \frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial z} + \\ (c_{23} + c_{44}) \frac{\partial^2 u_y}{\partial y \partial z} = \rho \left(c^2 \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} - 2i\omega c \frac{\partial u_z}{\partial z} - \omega^2 u_z \right); \end{cases} \quad (4)$$

$$\sigma_x = c_{11} \frac{\partial u_x}{\partial x} + c_{12} \frac{\partial u_y}{\partial y} + c_{13} \frac{\partial u_z}{\partial z}; \quad (5a)$$

$$\sigma_y = c_{12} \frac{\partial u_x}{\partial x} + c_{22} \frac{\partial u_y}{\partial y} + c_{23} \frac{\partial u_z}{\partial z}; \quad (5b)$$

$$\sigma_z = c_{13} \frac{\partial u_x}{\partial x} + c_{23} \frac{\partial u_y}{\partial y} + c_{33} \frac{\partial u_z}{\partial z}; \quad (5c)$$

$$\tau_{yz} = c_{44} \left(\frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \right); \quad (5d)$$

$$\tau_{zx} = c_{55} \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right); \quad (5e)$$

$$\tau_{xy} = c_{66} \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right); \quad (5f)$$

式中: u_x 、 u_y 、 u_z 分别表示沿移动坐标系 x 、 y 、 z 方向的位移; σ_x 、 σ_y 、 σ_z 、 τ_{yz} 、 τ_{zx} 、 τ_{xy} 为土体应力分量; c_{11} 、 c_{12} 、 c_{13} 、 c_{22} 、 c_{23} 、 c_{33} 、 c_{44} 、 c_{55} 、 c_{66} 为正交各向异性地基的 9 个相互独立的弹性常数.

2 振动方程的求解

2.1 边界条件

弹性地基半空间表面边界条件为:

$$\lim_{|x| \rightarrow \infty} u_x^{(k)}(x, y, z) = 0, \quad k = 0, 1, \dots, (n-1); \quad (6a)$$

$$\lim_{|y| \rightarrow \infty} u_y^{(k)}(x, y, z) = 0, \quad k = 0, 1, \dots, (n-1). \quad (6b)$$

对于简谐荷载, 所有分量均有因子 $e^{i\omega t}$, 因此为了书写方便, 在求解时先略去因子 $e^{i\omega t}$. 当板置于地基上并与之共同工作时, 板底面与地基表面的垂直位移相同, 同时板与地基光滑接触^[13], 则有应力和变形协调边界条件:

$$\sigma_z(x, y, 0, t) = -p(x, y); \quad (6c)$$

$$\tau_{zx}(x, y, 0, t) = 0; \quad (6d)$$

$$\tau_{yz}(x, y, 0, t) = 0; \quad (6e)$$

$$u_z(x, y, 0, t) = w(x, y, t). \quad (6f)$$

2.2 求解方程

对坐标 x 、 y 的 Fourier 变换定义如下:

$$\bar{f}(\xi, \eta, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y, z) e^{-i(\xi x + \eta y)} dx dy; \quad (7a)$$

相应的逆变换为:

$$f(x, y, z) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{f}(\xi, \eta, z) e^{i(\xi x + \eta y)} d\xi d\eta, \quad (7b)$$

式中: ξ, η 为 Fourier 变换参数.

对板的动力方程式(3)做关于 x, y 的 Fourier 变换, 得到

$$\bar{w} = \frac{\bar{q} - \bar{p}}{L}, \quad (8)$$

式中: $L = D(\xi^2 + \eta^2)^2 + m(-c^2\xi^2 + 2\omega c\xi - \omega^2)$.

对弹性半空间体的动力方程式(4)同样做 Fourier 变换, 并改写成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} \end{bmatrix} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \begin{bmatrix} \bar{u}_x \\ \bar{u}_y \\ \bar{u}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & B_{13} \\ 0 & 0 & B_{23} \\ B_{13} & B_{23} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{u}_x \\ \bar{u}_y \\ \bar{u}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{u}_x \\ \bar{u}_y \\ \bar{u}_z \end{bmatrix} = 0, \quad (9)$$

式中: $A_{11} = -c_{55}; A_{22} = -c_{44}; A_{33} = -c_{33}; B_{13} = -i\xi(c_{13} + c_{55}); B_{23} = -i\eta(c_{23} + c_{44}); D_{11} = c_{11}\xi^2 + c_{66}\eta^2 + \rho(-c^2\xi^2 + 2\omega c\xi - \omega^2); D_{12} = \xi\eta(c_{12} + c_{66}); D_{22} = c_{66}\xi^2 + c_{22}\eta^2 + \rho(-c^2\xi^2 + 2\omega c\xi - \omega^2); D_{33} = c_{55}\xi^2 + c_{44}\eta^2 + \rho(-c^2\xi^2 + 2\omega c\xi - \omega^2)$.

设方程(9)的解为:

$$[\bar{u}_x \quad \bar{u}_y \quad \bar{u}_z]^T = [G_1 \quad G_2 \quad G_3]^T e^{\lambda z}. \quad (10)$$

把式(10)代入方程(9)得特征方程:

$$a_1\lambda^6 + a_2\lambda^4 + a_3\lambda^2 + a_4 = 0, \quad (11)$$

式中: $a_1 = A_{11}A_{22}A_{33}; a_2 = D_{11}D_{22}D_{33} - D_{33}D_{12}^2; a_3 = D_{11}A_{22}A_{33} + A_{11}A_{22}D_{33} - A_{11}B_{23}^2 + A_{11}D_{22}A_{33} - B_{13}^2A_{22}; a_4 = D_{11}D_{22}A_{33} + D_{11}A_{22}D_{33} + A_{11}D_{22}D_{33} + 2B_{13}D_{12}B_{23} - D_{11}B_{23}^2 - A_{33}D_{12}^2 - B_{13}^2D_{22}$.

特征方程(11)为复系数一元六次方程, 其根为 $\pm\lambda_1, \pm\lambda_2, \pm\lambda_3, (\text{Re}[\lambda_j] \geq 0, j = 1, 2, 3)$, 可表示为:

$$\lambda_1^2 = -\frac{a_2}{3a_1} + \Theta - \frac{xx}{3\Theta}; \quad (12a)$$

$$\lambda_2^2 = -\frac{a_2}{3a_1} + \psi\Theta - \frac{xx}{3\psi\Theta}; \quad (12b)$$

$$\lambda_3^2 = -\frac{a_2}{3a_1} + \psi^2\Theta - \frac{xx}{3\psi^2\Theta}, \quad (12c)$$

式中: $\Theta = \left(-\frac{\gamma\gamma}{2} + \sqrt{\frac{\gamma\gamma^2}{4} + \frac{xx^3}{27}}\right)^{\frac{1}{3}}$;

$$\psi = \frac{-1 + \sqrt{3}i}{2}; xx = \frac{a_3}{a_1} - \frac{1}{3}\left(\frac{a_2}{a_1}\right)^2, \gamma\gamma = \frac{2}{27}\left(\frac{a_2}{a_1}\right)^3 - \frac{1}{3}\frac{a_2a_3}{a_1^2} + \frac{a_4}{a_1}.$$

对于 $z \geq 0$ 的正交各向异性半空间的动力分析问题, 当 $z \rightarrow \infty$ 时, u_x, u_y, u_z 均应趋于零, 则矩阵方程(9)的解为:

$$\bar{u}_x = -\sum_{j=1}^3 \alpha_j F_j e^{-\lambda_j z}; \quad (13a)$$

$$\bar{u}_y = -\sum_{j=1}^3 \beta_j F_j e^{-\lambda_j z}; \quad (13b)$$

$$\bar{u}_z = \sum_{j=1}^3 F_j e^{-\lambda_j z}, \quad (13c)$$

式中: $\alpha_j = [A_{22}B_{13}\lambda_j^3 + (B_{13}D_{22} - B_{23}D_{12})\lambda_j]/\Delta_j; \beta_j = [A_{11}B_{23}\lambda_j^3 + (B_{23}D_{11} - B_{13}D_{12})\lambda_j]/\Delta_j, \Delta_j = -(A_{11}D_{22} + A_{22}D_{11})\lambda_j^2 - A_{11}A_{22}\lambda_j^4 + D_{12}D_{12} - D_{11}D_{22}; F_j (j = 1, 2, 3)$ 为待定系数.

利用应力、应变和位移之间的关系, 可以得到应力变量的表达式:

$$\begin{cases} \bar{\sigma}_x = -c_{11}i\xi \sum_{j=1}^3 \alpha_j F_j e^{-\lambda_j z} - c_{12}i\eta \sum_{j=1}^3 \beta_j F_j e^{-\lambda_j z} - c_{13} \sum_{j=1}^3 \lambda_j F_j e^{-\lambda_j z}; \\ \bar{\sigma}_y = -c_{12}i\xi \sum_{j=1}^3 \alpha_j F_j e^{-\lambda_j z} - c_{22}i\eta \sum_{j=1}^3 \beta_j F_j e^{-\lambda_j z} - c_{23} \sum_{j=1}^3 \lambda_j F_j e^{-\lambda_j z}; \\ \bar{\sigma}_z = -c_{13}i\xi \sum_{j=1}^3 \alpha_j F_j e^{-\lambda_j z} - c_{23}i\eta \sum_{j=1}^3 \beta_j F_j e^{-\lambda_j z} - c_{33} \sum_{j=1}^3 \lambda_j F_j e^{-\lambda_j z}; \end{cases} \quad (13d)$$

$$\begin{cases} \bar{\tau}_{yz} = c_{44}[i\eta \sum_{j=1}^3 F_j e^{-\lambda_j z} + \sum_{j=1}^3 \beta_j \lambda_j F_j e^{-\lambda_j z}]; \\ \bar{\tau}_{zx} = c_{55}[\sum_{j=1}^3 \alpha_j \lambda_j F_j e^{-\lambda_j z} + i\xi \sum_{j=1}^3 F_j e^{-\lambda_j z}]; \\ \bar{\tau}_{xy} = c_{66}[-i\xi \sum_{j=1}^3 \beta_j F_j e^{-\lambda_j z} - i\eta \sum_{j=1}^3 \alpha_j F_j e^{-\lambda_j z}]. \end{cases} \quad (13e)$$

对边界条件式(6c) ~ (6f) 做关于 x, y 的 Fourier 变换, 可以求得:

$$\bar{\sigma}_z(\xi, \eta, 0, t) = -\bar{p}; \quad (14a)$$

$$\bar{\tau}_{zx}(\xi, \eta, 0, t) = 0; \quad (14b)$$

$$\bar{\tau}_{yz}(\xi, \eta, 0, t) = 0; \quad (14c)$$

$$\bar{u}_z(\xi, \eta, 0, t) = \bar{w}(\xi, \eta, t). \quad (14d)$$

将式(14a) ~ (14c) 代入式(13d) ~ (13e), 并令线性方程组系数为:

$$\begin{cases} p_j = c_{13}i\xi\alpha_j + c_{23}i\eta\beta_j + c_{33}\lambda_j; \\ q_j = \alpha_j\lambda_j + i\xi; \\ r_j = \beta_j\lambda_j + i\eta, \end{cases} \quad (15)$$

则待定系数 $F_j (j = 1, 2, 3)$ 为:

$$\begin{cases} F_1 = \bar{p} \cdot (q_3r_2 - q_2r_3) / \Delta; \\ F_2 = \bar{p} \cdot (q_1r_3 - q_3r_1) / \Delta; \\ F_3 = \bar{p} \cdot (q_2r_1 - q_1r_2) / \Delta, \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\Delta = p_3q_2r_1 + p_1q_3r_2 + p_2q_1r_3 - p_2q_3r_1 - p_3q_1r_2 - p_1q_2r_3$.

将式(16)代入式(13c), 得到地基的竖向位移为:

$$\bar{u}_z = \frac{\bar{p}}{\Delta} [(q_3r_2 - q_2r_3) e^{-\lambda_1 z} + (q_1r_3 - q_3r_1) e^{-\lambda_2 z} + (q_2r_1 - q_1r_2) e^{-\lambda_3 z}]. \quad (17)$$

将式(8)和式(17)代入位移边界条件(14d), 推出地基反力即接触应力的大小为:

$$\bar{p} = \frac{\bar{q} \cdot \Delta}{\Delta + L \cdot (q_3r_2 + q_1r_3 + q_2r_1 - q_2r_3 - q_3r_1 - q_1r_2)}. \quad (18)$$

板挠度为:

$$\bar{w} = \frac{\bar{q}}{L + \Delta / (q_3r_2 + q_1r_3 + q_2r_1 - q_2r_3 - q_3r_1 - q_1r_2)}. \quad (19)$$

对薄板作用的横向荷载做关于 x, y 的 Fourier 变换, 可以求得:

$$\bar{q} = \frac{4q_0 \sin(\xi b) \sin(\eta l)}{\xi \eta}. \quad (20)$$

对式(13)、(18)、(19)、(20)施加关于 x 和 y 的 Fourier 逆变换, 就可以得到移动谐振荷载作用下正交各向异性介质在直角坐标系下响应的积分形式解. 由于文章篇幅有限, 仅给出板位移的积分表达式:

$$w = \frac{e^{i\omega t}}{\pi^2} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{L + \Delta / (q_3r_2 + q_1r_3 + q_2r_1 - q_2r_3 - q_3r_1 - q_1r_2)} \cdot \frac{q_0 \sin(\xi b) \sin(\eta l)}{\xi \eta} e^{i(\xi x + \eta y)} d\xi d\eta. \quad (21)$$

3 算例分析

算例模型如图 1 所示, 给出移动谐振荷载作用下某公路路面板位移影响数值结果. 作用在板上的荷载半长度 $b = 0.075$ m, $l = 0.075$ m, 峰值 $q_0 = 100$ kPa, 荷载频率 $f = 16$ Hz, 移动速度 $c = 35$ m/s. 板弹性模量 3.0×10^{10} Pa, 泊松比 0.15,

板厚 0.25 m, 密度 2400 kg/m³. 土体弹性参数 $E_x = 50$ MPa, $\mu_{xy} = 0.25$, $G_{yz} = 20$ MPa, $G_{zx} = 24$ MPa, $G_{xy} = 15$ MPa, $\rho = 1815$ kg/m³. 引入描述土体正交各向异性参数之间的比例系数 $k_m (m = 1, 2, 3, 4)$, 令 $E_y = k_1 E_x$, $E_z = k_2 E_x$, $\mu_{xz} = k_3 \mu_{xy}$, $\mu_{yz} = k_4 \mu_{xy}$. 当 $k_m = 1$ 时, 土体为各向同性.

μ_{ij} 本身变化不大, 它对动力响应的影响可以忽略不计^[13], 取 $k_3 = 1.2$, $k_4 = 1.6$. 弹性系数 $c_{11} \sim c_{55}$ 和 E_i, μ_{ij}, G_{ij} 之间的关系见文献[14].

图 2 和图 3 分别为 $k_2 = 0.8$, 仅改变 k_1 时的板位移沿 x 方向的波形图 ($y = 0$) 和 y 方向的波形图 ($x = 0$), 图 4 和图 5 分别给出 $k_1 = 1.2$, 仅改变 k_2 时的板位移在 x 方向的波形图 ($y = 0$) 和在 y 方向的波形图 ($x = 0$), 其中 $k_m = 1$ 对应的图形表示各向同性土体时的板变形.

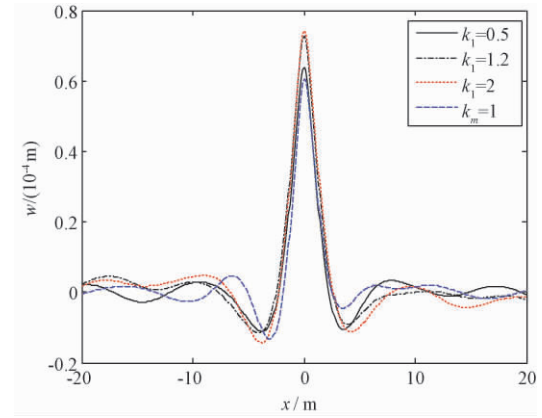


图 2 不同土体 E_y 时板位移在 x 方向的波形 ($y = 0$)

Fig. 2 Plate deformation curves in the direction of x due to different $E_y (y = 0)$

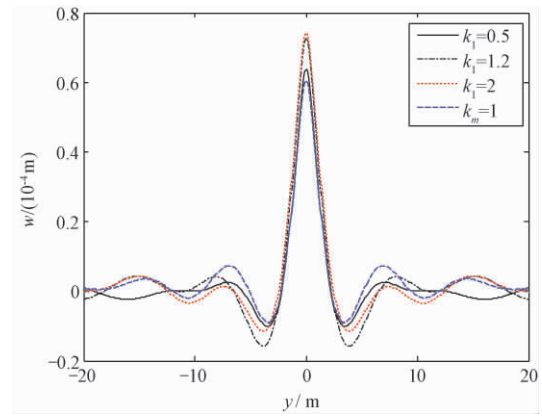


图 3 不同土体 E_y 时板位移在 y 方向的波形 ($x = 0$)

Fig. 3 Plate deformation curves in the direction of y due to different $E_y (x = 0)$

从图 2~5 可以看出, 土体的各向异性对板沿 x 和 y 方向的位移都有较大影响. 在 x 方向的波形中, 负的最大位移均出现在荷载作用范围外的

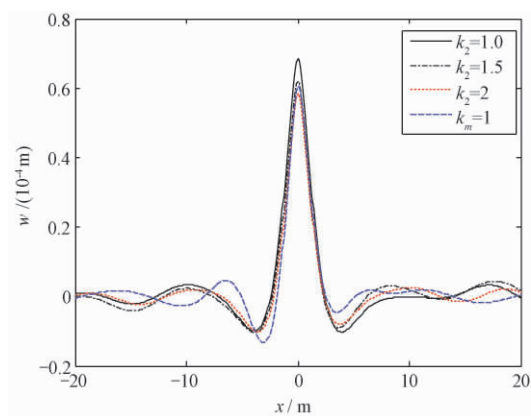


图4 不同土体 E_z 时板位移在 x 方向的波形($y=0$)

Fig. 4 Plate deformation curves in the direction of x due to different E_z ($y=0$)

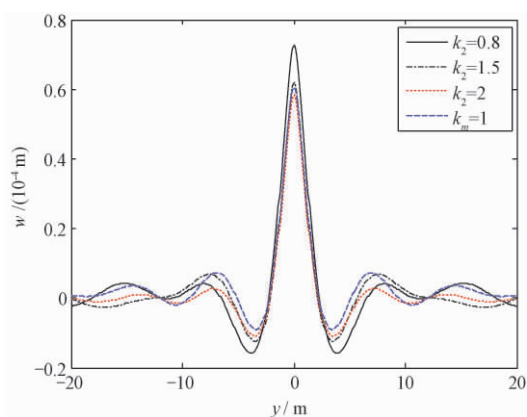


图5 不同土体 E_z 时板位移在 y 方向的波形($x=0$)

Fig. 5 Plate deformation curves in the direction of y due to different E_z ($x=0$)

左侧,曲线不对称;在 y 方向的波形中,板位移曲线关于 $y=0$ 对称.随着 k_1 即 E_y 的增加,板位移最大值略有增加,各向同性时的最小, $k_1=1.2$ 和 $k_1=2$ 时的曲线在离荷载作用中心点约 2 m 范围内非常接近.随着 k_2 即 E_z 的增加,板位移的最大值却明显减小,各向同性时的值仅大于 $k_2=2$ 的值.离荷载中心点较远处的板位移曲线有明显的振动,但是振幅较小并趋于平缓,且在某些范围内有负值出现.如果板的变形过大,可以适当增加土体 z 向的弹性模量 E_z ,或者减小 y 向的弹性模量 E_y .

4 结论

笔者研究了移动谐振荷载作用下正交各向异性地基上覆无限大板的空问动力响应问题,得到了动力响应的积分形式解.对移动谐振荷载作用下公路路面板动力稳态问题进行了算例分析并进行了参数分析,研究了土体参数对板

位移影响规律.数值分析结果表明:(1)考虑土体的正交各向异性更能准确描述路基路面相互作用的动力响应;(2) E_y 对板变形影响很小,而 E_z 对板变形的影响却很大,要综合考虑各种因素设计合适的地基弹性模量.

参考文献:

- [1] ACHENBACH J D, KESHA S P, HERRMANN G. Moving load on a plate resting on an elastic half space [J]. Journal of applied mechanics, 1967, 34(4): 910-914.
- [2] SNEDDON I N, GLADWELL G M L, COEN S. Bonded contact of an infinite plate and an elastic foundation [J]. Letters in applied engineering sciences, 1975, 3: 1-13.
- [3] 郭晶晶. 不同弹性地基板的力学响应分析 [J]. 交通科技, 2015(2): 87-89.
- [4] 曹志刚,蔡袁强,徐长节. 移动车辆荷载作用下路面的动力响应 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(4): 777-781.
- [5] 曹彩芹,李诚诚,李华. 移动荷载作用下路面板与饱和弹性地基的动力响应 [J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2014, 46(2): 204-209.
- [6] 陈恩利,刘永强,赵进宝. 移动荷载作用下路面动力响应试验研究 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(16): 62-67.
- [7] 蒋建国,何金龙,梁洪涛. 移动荷载作用下沥青路面结构时程响应分析 [J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(2): 84-89.
- [8] 张浩,杨玲,郭院成. 交通荷载作用下低填道路软土地基的动力响应分析 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2017, 38(1): 11-15.
- [9] 王小岗. 横观各向同性饱和地基上无限板的稳态振动 [J]. 力学与实践, 2007, 29(1): 42-46.
- [10] ITOU S. Stresses produced in an orthotropic half-plane under a moving line load [J]. International journal of solids and structures, 2016, 100/101: 411-416.
- [11] ZHANG C L, WANG B, ZHU Y Z, et al. Research of dynamic response of orthotropic elastic media under harmonic loads [J]. Advances in engineering research, 2016, 65: 379-384.
- [12] 张春丽,王博,祝彦知. 移动荷载下正交各向异性地基无限大板的动力响应 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39(2): 352-358.
- [13] 朱照宏,王秉纲,郭大智. 路面力学计算 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1985.
- [14] 张晓霞,周柏卓. 正交各向异性材料弹性本构关系分析 [J]. 航空发动机, 1997, 23(1): 20-25.

(下转第61页)

文章编号: 1671-6833(2019)01-0055-07

结构极值响应估计方法的有效性研究

黄孝帝, 顾颖, 何军

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: 基于广义极值分布和移位广义对数正态分布的加速模拟方法能够有效估计随机荷载作用下结构响应的极值分布. 为了调查这两种加速模拟方法在结构极值响应尾部分布估计中的效率, 详细讨论了基于响应样本的广义极值分布和移位广义对数正态分布的参数估计过程, 对比分析了这两种加速模拟方法在估计随机变量极值分布的尾部、线性结构随机响应极值分布的尾部和非线性结构随机响应极值分布的尾部中的计算费用和数值精度, 给出了这两种加速模拟方法的相对特点和适用范围, 为结构极值响应的估计提供方法选择方面的建议.

关键词: 结构随机振动; 极值响应; 估计方法; 有效性分析

中图分类号: TU311.4

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.04.012

0 引言

我国现行国家规范规定的结构设计方法为半概率极限状态设计方法. 半概率极限状态设计方法是基于极限状态函数(或称为功能函数) $Z = R - S$ 进行研究的^[1], 其中, 随机变量 R 和 S 分别代表抗力和(全部)荷载效应的极值. 当考虑荷载的时变特性时, 荷载效应极值 S 为结构随机动力响应的最大值, 即 $S = \max_{0 \leq t \leq T} Y(t)$, 其中, $Y(t)$ 为结构的线性或非线性随机响应, T 为结构振动分析所考虑的持时.

结构极值响应 $S = \max_{0 \leq t \leq T} Y(t)$ 估计的主要困难在于分布尾部的估计. Monte Carlo 模拟方法适用于具有确定性解的任何结构, 是进行结构极值响应估计最常用的方法^[2]. 然而, 为得到极值分布的尾部, Monte Carlo 模拟方法的计算费用极其昂贵, 不是一种最佳的方法. 为了提高尾部估计的效率, 人们提出了加速模拟方法. Naess 等^[3] 基于结构随机响应平均穿越率函数的尾部行为, 提出一种结构极值响应估计的加速模拟方法; Balesdent 等^[4] 提出基于空间自协方差最佳插值法的加速模拟方法; Taflandis 等^[5] 提出基于移动最小均方根响应面的加速模拟方法; Grigoriu 等^[6] 假

设结构极值响应服从广义极值分布, 提出结构极值响应估计的加速模拟方法; He 等^[7] 假设结构极值响应近似服从移位广义对数正态分布, 提出结构极值响应估计的加速模拟方法. 上述加速模拟方法中的后两种, 在结构极值响应估计中, 表现出良好的数值稳定性、计算效率和计算精度.

除了模拟方法, 人们也提出了其他类型的结构极值响应估计方法. Michaelov 等^[8] 假设结构极值响应分布等价于随机响应穿越事件的分布, 提出非平稳高斯激励下线性结构极值响应的估计方法. He^[9] 利用结构响应穿越事件的 Poisson 分布假定, 由 Rice 穿越率计算式和结构响应及其导数的联合分布, 建立了结构非线性响应的极值估计方法. 相对而言, 这些非模拟方法的计算效率要低于加速模拟方法.

笔者的主要目的为对 Grigoriu 等提出的加速模拟方法和 He 等提出的加速模拟方法进行对比研究, 对比分析这两种加速模拟方法的计算效率和计算精度, 为进行结构极值响应估计提供算法选择方面的建议和参考.

1 加速模拟方法的一般流程

加速模拟方法的基本思想是预先假设结构极

收稿日期: 2018-02-20; 修订日期: 2018-04-15

基金项目: 工信部高技术船舶科研项目深水半潜式支持平台研发——平台振动与噪声控制技术研究项目; 上海市自然科学基金项目(16ZR1417300); 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0805500)

通信作者: 何军(1968—), 男, 河北唐山人, 上海交通大学副教授, 博士, 主要从事结构可靠度和工程抗震研究, E-mail: Junhe@sjtu.edu.cn.

值响应服从某类分布,再通过建立基于样本的分布参数估计方法,然后利用随机模拟方法生成有限容量的响应样本,从而估计出分布参数及结构极值响应分布.与直接模拟方法相比,加速模拟方法需要更少的响应样本估计极值响应的分布尾部,从而提高了结构极值响应尾部估计的效率.另一方面,因为加速模拟方法在本质上仍然属于一种随机模拟方法,因此,该类方法也适用于任何具有确定性解的结构随机振动问题,具有广泛的工程适用性.

目前的加速模拟方法主要有两种:一种是 Grigoriu 等提出的基于广义极值分布假定的加速模拟方法;另一种是 He 等提出的基于移位广义对数正态分布的加速模拟方法.这两种算法具有相同的流程,如图 1 所示.这两种加速模拟方法的区别之处在于采用了不同的极值分布假设及其参数估计方法.关于 GEV 和 SGLD 的函数形式和参数估计方法,将分别在本文的第 2 小节和第 3 小节进行详细介绍.

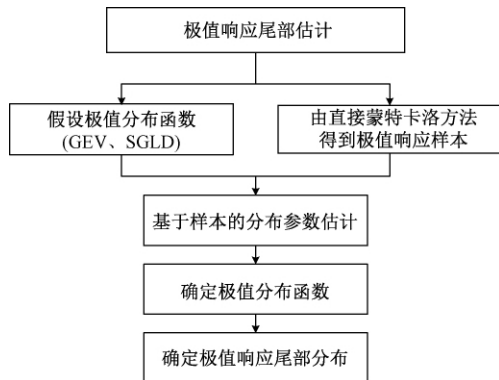


图 1 加速模拟方法流程图

Fig. 1 Flow chart of accelerated simulation method

2 GEV 分布及其参数估计

令 m 个离散时间点处结构随机响应 $Y(t)$ 的值为 Y_1, Y_2, \dots, Y_m , 则 $\{Y_i\}_{i=1}^m$ 构成随机序列. 定义 $\{Y_i\}_{i=1}^m$ 的极值 $M_m = \max \{Y_1, Y_2, \dots, Y_m\}$, 则 M_m 即为结构随机响应 $Y(t)$ 的极值, 也即极限状态函数中的 S . 考虑平稳过程 $Y(t)$, 根据极值理论, 若 Y_1, Y_2, \dots, Y_m 是独立的, 或者, 虽然为相依的, 但满足条件 $D(u)$ 和 $D(u_m)$ [8], 那么, 概率 $P[M_m - b_m]/a_m < y]$ 渐进服从广义极值分布 $G(y)$:

$$G(y) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{y - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-\frac{1}{\xi}} \right\}, \quad (1)$$

式中: $\mu \in \mathbf{R}$ 、 $\sigma > 0$ 和 $\xi \in \mathbf{R}$ 分别为位置参数、尺度参数和形状参数.

GEV 函数的定义域为 $\{y: 1 + \xi(y - \mu)/\sigma > 0\}$. 当 ξ 趋于 0 时, $G(y)$ 趋于 Gumbel 分布.

目前存在多种 GEV 的参数估计方法, 在其加速模拟方法中, Grigoriu 等采用了最大似然法进行参数估计. GEV 的对数似然函数为:

$$l(\mu, \sigma, \xi) = - \sum_{i=1}^{n_b} \left(1 + \frac{\xi(z_i - \mu)}{\sigma} \right)^{-1/\xi} - \left(1 + \frac{1}{\xi} \right) \cdot \sum_{i=1}^{n_b} \lg \left(1 + \frac{\xi(z_i - \mu)}{\sigma} \right) - \mu \lg \sigma, \quad (2)$$

式中: n_b 为响应样本数.

当 $\xi = 0$ 时, 上述似然函数可以简化为:

$$l(\mu, \sigma) = - \sum_{i=1}^{n_b} \frac{(z_i - \mu)}{\sigma} - \sum_{i=1}^{n_b} \exp \left(\frac{(z_i - \mu)}{\sigma} \right) - n_b \lg \sigma. \quad (3)$$

使似然函数取最大值的参数 μ 、 σ 、 ξ 值为 GEV 分布参数的最大似然估计.

需要说明: 在笔者采用的数学软件 Mathematica 中, 不需要确定参数 a_m 和 b_m , 直接由独立样本估计 $P(M_m < y) = G(y)$ 确定分布参数.

3 SGLD 及其参数估计

移位广义对数正态分布 (SGLD) 由移位对数正态分布和指数幂分布构成, 用于近似具有一定偏态系数和峰度系数的分布 [9]. 因此, 适用于近似结构极值响应的分布. SGLD 的累积分布函数:

$$G(y) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{sgn} \left(\frac{y - b}{\theta} - 1 \right) \cdot g \left(\frac{1}{r}, \frac{1}{r} \left| \frac{\ln \frac{y - b}{\theta}}{\sigma} \right|^r \right), \quad b < y < \infty, \quad (4)$$

式中: b 为位置参数; θ 为尺度参数; σ 、 r 为形状参数.

虽然 SGLD 有 4 个参数, 但独立参数只有 σ 和 r , 因为 b 和 θ 可由参数 σ 和 r 的值确定 [9]. 为了有效估计参数 σ 和 r , 确保尾部估计的精确性, He 等提出了一个两支撑点方法. 两支撑点方法假设由样本估计出极值响应的两个较大超越概率 $P_1 = 0.1$ 和 $P_2 = 0.01$ 及其响应样本点 y_1 和 y_2 , 从而得到下面的非线性方程:

$$1 - P_1 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{sgn} \left(\frac{y_1 - b}{\theta} - 1 \right) \cdot g \left(\frac{1}{r}, \frac{|\ln(y_1 - b)/\theta|/\sigma}{r} \right). \quad (5)$$

$$1 - P_2 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{sign} \left(\frac{y_2 - b}{\theta} - 1 \right) \cdot g \left(\frac{1}{r}, \frac{|\ln(y_2 - b)/\theta|/\sigma}{r} \right). \quad (6)$$

利用参数 σ 和 r 与 b 和 θ 的关系式,由迭代方法求解方程(5)和(6),可得到 SGLD 的参数估计值,进而得到结构极值响应的近似分布 SGLD. 因为可由较少的响应样本估计概率 P_1 和 P_2 , 因此,提高了结构极值响应及其分布尾部的估计效率,加速了随机模拟的收敛速度.

4 两种加速模拟方法的有效性调查

4.1 调查研究 1

定义结构响应过程为 $Y(t)$, 由 m 个离散时间点处的响应值构成序列 $\{Y_i\}_{i=1}^m$, 极值 $Y = M_m = \max\{Y_1, Y_2, \dots, Y_m\}$, 验证序列 $\{Y_i\}$ 为独立同分布序列时加速模拟方法, 估计响应极值分布的可行性及有效性. 当独立同分布序列 $\{Y_i\}$ 的边缘分布为已知分布时, 容易得到极值的理论分布, 对比分析两种加速模拟方法所得响应极值的近似分布尾部.

若假设独立同分布序列 $\{Y_i\}_{i=1}^m$ 的边缘分布分别为高斯分布、指数分布、柯西分布, 其累积概率函数 $F(y)$ 分别为 $\int_{-\infty}^y \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx$,

$1 - \exp(-y)$ 、 $1/2 + (1/\pi) \tan^{-1} y$, 则可以得到极值分布概率 $P(y; m) = P(\max_{1 \leq i \leq m} \{Y_i\} < y) = P(M_m < y)$ 的理论解为 $F(y)^m$. 当 m 趋近于无穷时, $F(y)^m$ 收敛于 0 或 1, 为了避免极限分布的退化, 通过适当规范化即引入规范化常数列 $a_m > 0$ 、 $b_m > 0$, 使得 $P((M_m - a_m)/b_m < y)$ 为非退化分布, 即 $P[(M_m - a_m)/b_m < y] = F(b_m y + a_m)^m$ 为精确解^[8]. 规范化常数列 a_m 和 b_m 依赖于边缘分布类型与 m 大小, 当边缘分布分别为高斯分布、指数分布、柯西分布时, 其规范化系数 $a_m = (2 \ln m)^{-1/2}$ 和 $b_m = 1/a_m - (1/2) a_m (\ln(\ln m) + \ln 4\pi)$; $a_m = 1$ 和 $b_m = \ln m$; $a_m = 1/\tan(\pi/m)$ 和 $b_m = 0$.

根据极值定理可得, 当 m 充分大时, 对于独立同分布序列, 其概率 $P[(M_m - b_m)/a_m < y]$ 渐进服从广义极值分布 $G(y)$, 其中 $a_m > 0$ 、 $b_m > 0$ 为规范化序列, 如上可得, $G(y)$ 与序列边缘分布有关, 当边缘分布为高斯分布和指数分布时, $G(y)$ 为 $\exp[-\exp(-y)]$, 当为柯西分布时, $G(y)$ 为 $\exp(-1/y)$. 由此可得, $P(M_m < y)$ 渐进于广义极值分布的理论参数值. $P(M_m < y)$ 的理论值和估计值如表 1 所示.

表 1 基于样本和通过极值理论得到 $P(M_m < y)$ 的估计值及理论值

Tab. 1 Based on the sample and the extreme value theory the estimate and the theoretical value of $P(M_m < y)$

分布类型	μ		σ		ξ	
	理论值	估计值	理论值	估计值	理论值	估计值
高斯分布	3.116 5	3.087 4	0.269 0	0.298 2	0	-0.089 5
指数分布	6.907 8	6.887 9	1.000 0	1.001 4	0	0.014 7
柯西分布	318.470	-320.243	318.470	325.440	1.000	1.014

采用基于广义极值分布 (GEV) 假定的加速模拟方法估计独立同分布序列的极值分布, 假设极值分布服从广义极值分布 (GEV), 通过 Monte Carlo 的加速模拟方法估计响应极值分布, 假设极值分布服从移位广义对数正态分布 (SGLD), 通过 Monte 模拟得到 n_b 组独立的序列值 $\{Y_i\}_{i=1}^m$, m 为序列离散点个数, 得到 n_b 个独立的 $M_m = \max\{Y_1, Y_2, \dots, Y_m\}$ 极值样本. 在结构极值响应估计中, n_b 代表结构响应过程样本函数的个数, m 代表在 m 个离散时间点上记录样本函数的响应值. 选取 $n_b = 2\,000$, $m = 1\,000$, 然后通过参数估计方法得到 $P(M_m < y)$ 参数估计值, 如表 1 所示. 由表 1 中可以看出, 通过小样本得到参数估计值与理论近似解十分吻合.

采用基于移位广义对数正态分布 (SGLD) 假定 Carlo 模拟得到 $n_b = 2\,000$ 个响应极值样本, 然

后估计分布参数, 如表 2 所示.

表 2 基于样本得到 $P(M_m < y)$ 为 SGLD 的参数值

Tab. 2 Based on the sample the parameter values of SGLD of $P(M_m < y)$

分布类型	σ	r	θ	b
高斯分布	0.483 0	3.200 9	0.740 4	2.428 7
指数分布	1.566 8	0.250 3	4.480 0	2.833 3
柯西分布	—	—	—	—

最后, 图 2 给出了当边缘分布为高斯分布、指数分布、柯西分布时极值分布的精确解和基于广义极值分布 (GEV)、移位广义对数正态分布 (SGLD) 假定的加速模拟方法、基于 20 000 个样本的 Monte Carlo 方法的对比结果.

图 2 中结果表明, 两种加速模拟方法对于理想平稳过程的极值估计在尾部区域内有着较好的

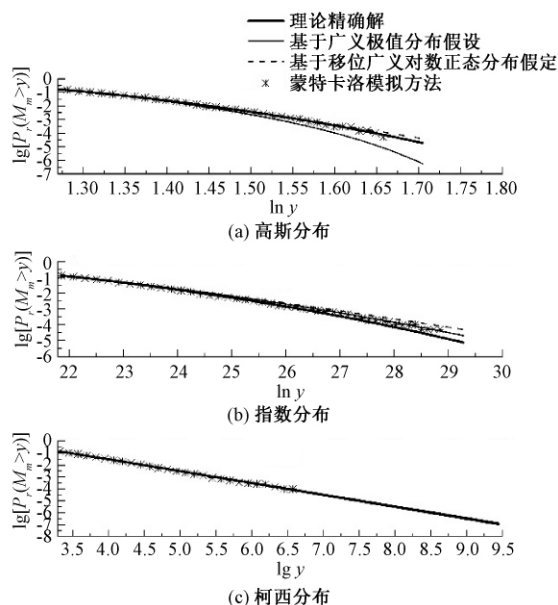


图2 加速模拟方法、蒙特卡洛方法和理论精确解的对比结果

Fig.2 The comparison between accelerated simulation methods and MC method and exact probability

计算精度和效率. 而 GEV 模型对边缘分布为高斯分布时拟合较差, 其余分布结果较好, 特别是对于柯西分布, 与理论分布基本一致. 而 SLGD 模型对于尾部情况较 GEV 模型更好, 但是无法得到边缘分布为柯西分布时的分布参数, 其加速模拟方法都有各自适用范围.

4.2 调查研究 2

验证线性振子在随机激励作用下加速模拟方法拟合响应极值分布的精确性及有效性. 考虑单自由度线性振子受到高斯白噪声激励作用, 采用加速模拟方法得到振子位移响应及绝对值的极值分布尾部, 然后与通过直接 Monte Carlo 模拟得到分布尾部对比.

取 $Y(t)$ 为结构位移响应, 该结构动力方程定义为:

$$\ddot{Y}(t) + 2\zeta_0 w_0 \dot{Y}(t) + w_0^2 Y(t) = f(t), t > 0, (7)$$

式中: $w_0 = \pi$; $\zeta_0 = 0.05$; 激励输入 $f(t)$ 是谱密度为 $\frac{1}{100}\pi$ 的高斯白噪声.

取结构随机响应 $Y(t)$ 的持续时间 $t = 20$, 间隔时间 $t = 0.02$, $t_{i+1} = t_i + t$, 取 $m = 20/0.02 = 1\,000$ 个离散时间点处 $Y(t)$ 的值及绝对值构成序列 $\{Y_i\}_{i=1}^m$ 和 $\{|Y|_i\}_{i=1}^m$, 定义响应极值 $Y = M_m = \max(Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$ 或 $Y = \max(|Y|_1, |Y|_2, \dots, |Y|_m)$, 则可得结构响应及响应绝对值的失效概率分布为 $P(y; m) = P(M_m > y)$. 取 n_b

组独立的结构响应样本函数 $Y_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, n_b$), 则可以得到 n_b 个独立的极值样本.

在白噪声激励作用下, 经历足够长的时间后, 结构位移响应方差由小变大, 最后趋于稳定, 结构位移响应 $Y(t)$ 由非平稳过程过渡到平稳过程. m 个离散时间点处结构随机响应 $Y(t)$ 的值 $\{Y_i\}_{i=1}^m$ 构成平稳序列, 但 Y_1, Y_2, \dots, Y_m 之间存在相依关系. 当 $Y(t)$ 进入到平稳过程后, 其自相关函数为:

$$R_y(\tau) = \pi S_0 e^{-\xi w_0 \tau} [\cos(w_d \tau) + \xi w_0 \sin(w_d \tau) / w_d] / 2\xi w_0^3, (8)$$

式中: w_0 为振子固有频率; w_d 为有阻尼固有频率; ξ 为阻尼比; S_0 为谱密度. 由于 $Y(t)$ 为高斯过程, 对于 $\tau \rightarrow \infty$, 可得 $R_y(\tau) \lg \tau \rightarrow 0$, 可得序列 $\{Y_i\}$ 满足 $D(u)$ 和 $D(u_m)$ [8], 可得位移响应极值分布渐进于广义极值分布. 采用基于广义极值分布假定的加速模拟方法估计响应 $Y(t)$ 的极值分布, 通过 Monte Carlo 模拟得到 2 000 个极值响应样本, 然后通过参数估计方法得到广义极值分布参数, 如表 3 所示.

表3 广义极值分布的参数值
Tab.3 The parameter values of GEV

样本序列	样本数量	μ	σ	ξ
$\{Y_i\}$	2 000	0.104 7	-0.125 7	0.027 1
$\{ Y _i\}$	2 000	0.113 6	-0.107 3	0.027 7

对于位移响应绝对值, 由于无法得到较长时间后随机响应过程的自相关函数的表达式, 不能直接给出序列 $\{|Y|_i\}$ 是否满足 $D(u)$ 和 $D(u_m)$. 于是在采用基于广义极值分布假定的加速模拟方法估计响应 $Y(t)$ 绝对值的极值分布, 首先假设响应绝对值的极值分布服从广义极值分布, 同样, 通过 Monte Carlo 模拟得到 $n_b = 2\,000$ 个极值响应样本, 然后通过参数估计方法得到广义极值分布参数值, 如表 3 所示.

采用基于移位广义对数正态分布 (SGLD) 假定的加速模拟方法估计响应极值分布, 假设极值分布服从移位广义对数正态分布 (SGLD), 通过 Monte Carlo 模拟得到 $n_b = 2\,000$ 个位移响应极值样本及位移响应绝对值极值样本, 然后估计分布参数, 具体数据如表 4 所示.

最后, 图 3 对比了基于广义极值分布 (GEV)、移位广义对数正态分布 (SGLD) 假定的加速模拟方法估计线性振子响应, 如图 3(a) 所示, 响

表 4 移位广义对数正态分布的参数值

Tab. 4 the parameter of SGLD

样本 序列	样本 数量	σ	r	θ	b
$\{Y_i\}$	2 000	0.101 95	1.591 7	-1.382 4	1.499 4
$\{ Y_i \}$	2 000	0.020 6	1.469 4	-1.293 6	1.401 3

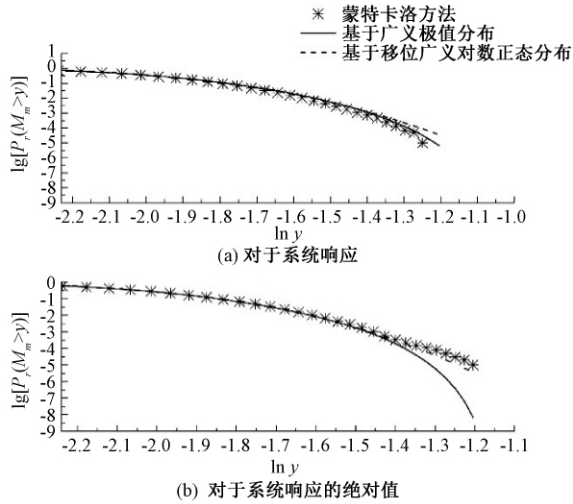


图 3 加速模拟方法估计线性振子响应极值分布与蒙特卡洛方法对比结果

Fig. 3 The comparison between accelerated simulation methods and MC method for estimating the extreme distribution of linear oscillator response

应绝对值极值分布结果与基于 20 000 个样本的 Monte Carlo 结果,如图 3(b) 所示。

图 3 表明,两种加速模拟方法对于线性结构下受随机激励作用的结构响应极值估计有较好的效率和精度,SGLD 模型与极值分布尾部有着更好的拟合.对于随机响应为平稳过程时,且无论是否满足相依关系,从拟合结果来看,GEV 模型都与极值分布拟合较好。

4.3 调查研究 3

验证非线性单自由度振子在随机地震激励作用下加速模拟方法拟合响应极值分布的精确性及有效性.考虑非线性单自由度振子受到 Kanai-Tajimi 随机地震波激励作用,采用加速模拟方法得到振子位移响应及响应绝对值的极值分布尾部,然后与通过直接 Monte Carlo 模拟得到分布尾部对比。

其结构动力方程为:

$$\ddot{Y}(t) + 2\zeta_0 w_0 \dot{Y}(t) + f_s = f(t), \quad (9)$$

式中: $Y(t)$ 为结构位移响应; $w_0 = \pi$; $\zeta_0 = 0.05$. 层间滞变恢复力 f_s 定义为:

$$f_s = k[\alpha Y + (1 - \alpha) Z], \quad (10a)$$

$$Z = -\gamma | \dot{Y} | Z | Z |^{n-1} - \beta \dot{Y} | Z |^n + A \dot{Y} \quad (10b)$$

式中: $\alpha = 0.05$ 代表非线性参数; $k = \pi^2$; Y 和 Z 分别为层间弹性和滞变位移, Z 由 Bouc-Wen 滞变法定义; $n = 3$; $A = 1$; $\gamma = \beta = A/(2x_y^n)$, 取层间屈服位移 x_y 为 0.75。

取 $f(t)$ 为 Kanai-Tajimi 随机地震波激励,其功率谱密度函数为:

$$S(w) = S_0 \frac{w_f^4 + 4w_f^2 \zeta_f^2 w^2}{(w^2 - w_f^2)^2 + 4w_f^2 \zeta_f^2 w^2}, \quad (11)$$

式中: $S_0 = 0.016 7$; $w_f = 15.7$; $\zeta_f = 0.6$ 。

取持续时间 $t = 20$, 每隔 $\Delta t = 0.02$ 取结构响应 $Y(t)$ 值及绝对值构成响应序列 $\{Y_i\}$ 和 $\{|Y_i|\}$, 通过 Monte Carlo 模拟得到数量 $n_b = 2 000$ 组结构反应值序列 $\{Y_i\}$ 和 $\{|Y_i|\}$, 最后得到 2 000 个响应及响应绝对值的极值样本. 分别采用基于移位广义对数正态分布(SGLD)和广义极值分布(GEV)假定的加速模拟方法估计响应极值分布,假设极值分布分别服从广义极值分布(GEV)和移位广义对数正态分布(SGLD),通过样本估计方法得出 GEV 和 SGLD 参数,如表 5、6 所示。

表 5 广义极值分布的参数值

Tab. 5 The parameter values of GEV

样本序列	样本数量	μ	σ	ξ
$\{Y_i\}$	2 000	0.246 6	0.062 8	-0.132 4
$\{ Y_i \}$	2 000	0.267 3	0.059 6	-0.124 8

表 6 移位广义对数正态分布的参数值

Tab. 6 The parameter values of SGLD

样本 序列	样本 数量	σ	r	θ	b
$\{Y_i\}$	2 000	0.017 4	1.732 3	3.983 0	-3.708 0
$\{ Y_i \}$	2 000	0.018 6	1.839 3	3.726 2	-3.431 6

最后,图 4 对比了基于广义极值分布(GEV)、移位广义对数正态分布(SGLD)假定的加速模拟方法估计非线性振子响应,如图 4(a) 所示,响应绝对值的极值分布的结果与基于 20 000 个样本的 Monte Carlo 结果,如图 4(b) 所示。

图 4 表明,两种加速模拟方法对于非线性结构下受随机激励作用下的结构响应极值估计也有较高的效率和精度,显示了两种方法适用广泛,其中 SGLD 模型显示了更好的计算精度.而采用广义极值分布的加速模拟方法,虽然无法确定响应

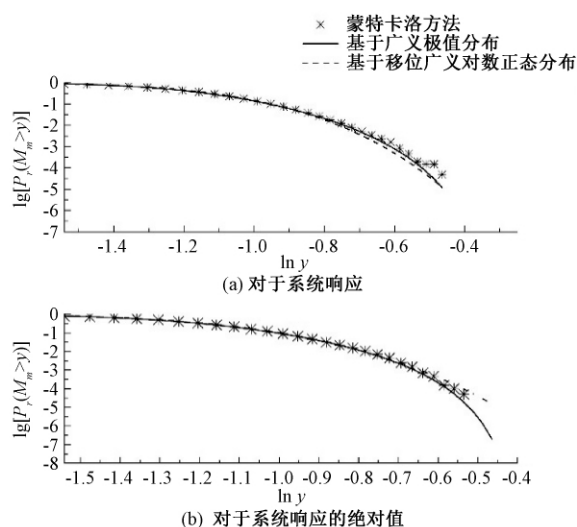


图4 加速模拟方法估计非线性振子响应极值分布与蒙特卡洛方法对比结果

Fig. 4 The comparison between accelerated simulation methods and MC method for estimating the extreme distribution of nonlinear oscillator response

是否满足广义极值分布的适用条件,且未能解决不满足相依关系的平稳过程的极值分布估计的理论问题,但是尾部拟合情况依然较好,仍可以建议作为极值分布估计的有效方法。

5 结论

笔者对比分析了基于广义极值分布和移位广义对数正态分布的加速模拟方法,验证了两种方法在解决估计结构响应极值分布的有效性,避免了直接蒙特卡洛模拟中计算费用过大和效率过低的问题。通过理想分布和单自由度振子模型,证明了该方法能高效地达到微小失效概率至 $10^{-3} \sim 10^{-6}$,满足结构设计及可靠度研究要求,适用于一般结构随机振动问题,具有广泛的工程适用性。通过理论和应用的研究,得到的主要结论有:

(1) 笔者通过分析两种加速模拟方法,GEV模型和SGLD模型相比于直接蒙特卡洛模拟,效率能达到10倍以上,计算精度在 10^{-3} 以上,其两种方法均适用于结构随机响应极值分布尾部估计。

(2) GEV模型基于极值定理,对满足一定条

件的序列极值分布有着严格的理论证明,对于一般情况,无法给出完整的理论分析证明,但是从笔者分析发现,GEV对一般情况仍有较好的计算精度与效率。SGLD模型是根据SGLD分布能拟合多种分布,以此来拟合极值分布。

(3) 在对结构响应极值分布估计中,在同等计算效率下,SGLD精度优于GEV,而且不受条件限制,但对于样本方差过大、均值过大的特殊情况,无法得出分布参数。

参考文献:

- [1] 赵国藩. 工程结构可靠性理论与应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1996.
- [2] SHINOZUKA M. Monte Carlo solution of structural dynamics [J]. Computers and Structures, 1972, 2: 855 - 874.
- [3] NAESS A, GAIDAI O. Monte Carlo methods for estimating the extreme response of dynamical systems [J]. Journal of engineering mechanics, 2008, 134 (8): 628 - 636.
- [4] BALESDENT M, MORIO J, MARZAT J. Kriging-based adaptive importance sampling algorithm for rare event estimation [J]. Structural safety, 2013, 44: 1 - 10.
- [5] TAFLANDIS A A, CHEUNG S H. Stochastic sampling using moving least squares response surface approximations [J]. Probabilistic engineering mechanics, 2012, 28: 216 - 224.
- [6] GRIGORIU M, SAMORODNITSKY G. Reliability of dynamic systems in random environment by extreme value theory [J]. Probabilistic engineering mechanics, 2014, 38: 54 - 69.
- [7] HE J, GONG J H. Estimate of small first passage probabilities of nonlinear random vibration systems by using tail approximation of extreme distributions [J]. Structural safety, 2016, 60: 28 - 36.
- [8] MICHAELOV G, LUTES LD, SARKANI S. Extreme value of response to nonstationary excitation [J]. Journal of engineering mechanics, 2001, 127(4): 352 - 63.
- [9] HE J. Approximate method for estimating extreme value responses of nonlinear stochastic dynamic systems [J]. Journal of engineering mechanics, 2015, 141 (7): 04015009.

Efficiency Analysis of Structural Extreme Response Estimation Methods

HUANG Xiaodi, GU Ying, HE Jun

(College of Naval Architecture and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The accelerated simulation method based on generalized extreme value distribution and shift generalized lognormal distribution was proposed to effectively estimate the extreme value distribution of structural response under random loading. In order to investigate the efficiency of the two accelerated simulation methods in the estimation of the tail of the distribution of structural extreme response, the parameter estimation process of generalized extreme value distribution and shift generalized lognormal distribution based on simulated samples was discussed in detail in this paper. A comparative analysis of these two kinds of accelerated simulation method about computational cost and accuracy in the estimate of the tail of the extreme value distribution of the random variable, the tail of the extreme value distribution of the random response of the linear structure, and the tail of the extreme distribution of the stochastic response of the nonlinear structure was made. The characteristics and applicable scope of the two accelerated simulation methods were given. In the end, the suggestion on how to choose two accelerated simulation methods was given.

Key words: structural random vibration; extreme responses; estimation methods; efficiency analysis

(上接第 54 页)

3D Dynamic Response of Infinite Plate on Orthotropic Foundation under Moving Loads

WANG Bo¹, ZHANG Chunli^{1,2}, ZHU Yanzhi³

(1. College of Water Conservancy and Environmental Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. College of Information & Business, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: The mechanics model of the infinite elastic plate on orthotropic foundation were established under the rectangular coordinate system. And the dynamic equations of plate and foundation were derived under moving loads based on the thin plate theory. By means of the coordinate transformation and Fourier integral transform, the integral forms of dynamic responses of plate and foundation were obtained. Numerical example was given on condition that harmonic vibrating rectangular load was applied on the pavement plate surface. The calculation procedure was performed by MATLAB software. Studies were conducted to investigate the effect of the soil orthotropic parameters on the plate displacements. The results showed that the dynamic response of the subgrade and pavement interaction could be accurately described by considering the orthogonality of the soil.

Key words: orthotropic foundation; moving loads; elastic plate; dynamic responses

文章编号: 1671-6833(2019)01-0062-05

脱空排水管道高聚物修复前后力学特性分析

李 斌^{1,2,3}, 方宏远^{1,2,3}, 王复明^{1,2,3}

(1. 郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001; 2. 重大基础设施检测修复技术国家地方联合工程实验室, 河南 郑州 450001; 3. 水利与交通基础设施安全防护河南省协同创新中心, 河南 郑州 450001)

摘 要: 高聚物注浆技术是一种经济高效的排水管道渗漏脱空处置方法, 但修复后管道力学性能恢复状态尚不明确. 基于 ABAQUS 软件建立了道路结构、路基土体及管道相互作用的三维有限元模型, 对比分析了正常管道、脱空管道和高聚物修复管道在交通荷载作用下的纵、环向力学特性. 结果表明, 交通荷载对其作用位置两侧 6 m 和 4 m 范围内管道的应力和变形影响显著, 影响程度与荷载大小呈正相关; 各管节处 Mises 应力高度不连续; 交通荷载为 1.0 MPa 时管道受力和变形明显大于交通荷载为 0.5 MPa 时; 高聚物修复管节脱空后管道受力和变形均恢复到了正常管道水平, 达到了可靠有效的修复效果. 研究成果为实施针对性管道修复提供了理论依据.

关键词: 排水管道; 底部脱空; 交通荷载; 高聚物注浆技术; 力学特性

中图分类号: TU992

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.04.014

0 引言

排水管道是现代城市不可或缺的基础设施. 随着城市规模不断发展, 排水管道建设规模不断扩大. 截至 2015 年, 我国大中城市排水管道总长度已超过 50 万公里. 然而, 随着排水管道使用寿命的增加, 管道老化严重, 由此引发的地面塌陷等事故频发.

排水管道传统修复方式主要是开挖更换, 此方法浪费资源且对附近居民生活造成严重干扰. 高聚物注浆技术是一种基于高聚物材料的基础设施快速维修技术^[1]. 其原理是将双组分聚合物材料注入管壁外侧, 材料反应后迅速膨胀固化, 从而达到封堵渗漏、填充脱空的目的, 如图 1 所示. 目前, 该技术已成功应用于多种构筑物加固修复项目中^[2-3].

交通荷载作为作用在市政管网上方最主要和最频繁的荷载, 是造成管网病害的主因之一, 国内外学者围绕交通荷载作用下地下管道力学响应开展了大量研究. Rakitin 等^[4]实施了交通

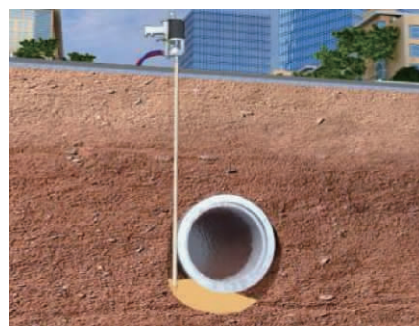


图 1 填充管道脱空和封堵渗漏

Fig. 1 Filling the disengaging and sealing the leakage

荷载作用下大口径钢筋混凝土管离心试验, 对管节处的力学响应进行了深入研究, 结果表明, 交通荷载作用位置处管节垂直位移最大; 在离心试验的基础上, Xu 等^[5]开展了有限元分析, 其模拟结果与试验结果吻合良好; Meesawasd 等^[6]基于有限元计算, 对交通荷载作用下管道的应力分布进行了详细讨论, 认为交通荷载能够显著影响管道力学性能; Alzabeebee 等^[7]通过建立三维有限元模型, 对英国现行管道设计方法进行了验证, 对管径和最大垂直位移之间的

收稿日期: 2018-01-20; 修订日期: 2018-05-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0802400); 国家自然科学基金资助项目(5167853); 国家自然科学基金青年基金资助项目(41404096); 河南省科技攻关项目(152102310066); 郑州大学优秀青年教师发展基金资助项目(1621323001)

通信作者: 王复明(1957—), 男, 河南周口人, 郑州大学教授, 中国工程院院士, 主要从事基础设施致灾机理与检测修复技术研究, E-mail: fuming573@126.com.

关系进行了讨论;吴小刚等^[8]基于 Euler-Berhoulli 弹性地基梁模型对交通荷载作用下管道的位移响应进行了解析计算;王直民^[9]采用 1/4 车辆振动模型,分析了管道在车辆荷载作用下应力分布规律.徐建国等^[10-11]开展了高聚物修复地下管道沉降与脱空渗漏的研究,结果表明,高聚物修复材料对管道沉降和脱空渗漏有良好的修复效果.

笔者在统筹考虑道路结构、路基土体及管道有机整体和管节接触非线性的基础上,利用 ABAQUS 有限元软件建立了三维数值模型,开展交通荷载作用下正常管道、底部脱空管道和高聚物修复后管道的力学特性研究.

1 有限元模型

1.1 模型参数

模型尺寸采用长×宽×高=12 m×10 m×8 m,道路结构分为面层、基层、底基层和路基,如图 2 所示.其中面层、基层和底基层材料采用线

弹性本构,土体采用 M-C 弹塑性本构,材料参数如表 1 所示,管材为 C30 混凝土管,采用混凝土损伤塑性模型,整个管道模型由 6 节管组成,每节有效长度为 2 m,内径 1.0 m,壁厚 0.1 m,埋深 2 m.在图 2(a) 所示处设置一处长 1 m、深 0.1 m 的半环形区域模拟管底脱空.图 3 为 1/2 模型网格,经网格敏感性分析,结合计算机性能,选择管道网格尺寸为 0.1 m,土体网格采用从边界到管道位置逐渐加密的方法.图 4 为单个管节模型.

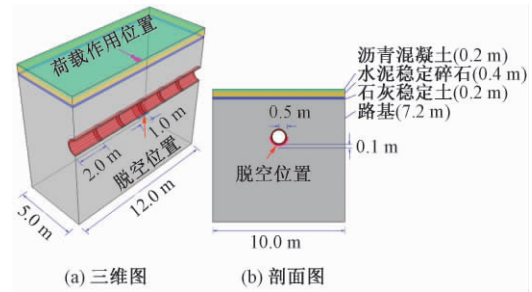


图 2 计算模型图

Fig. 2 Calculation model

表 1 材料参数表

Tab. 1 Material parameters

材料	密度 $\rho /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 E / MPa	泊松比	黏聚力 C / kPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	剪胀角 $\Delta\varphi / (^\circ)$
沥青混凝土 AC20	2 420	1 200	0.30	—	—	—
水泥稳定碎石 CTB	2 360	1 500	0.25	—	—	—
石灰稳定土	2 200	500	0.35	—	—	—
压实土	2 000	80	0.35	30	30	0
粉质黏土	2 000	100	0.27	40	22	0
高聚物	400	165	0.20	—	—	—

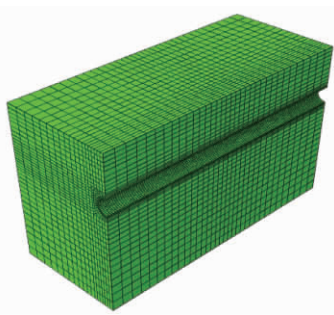


图 3 1/2 结构网格

Fig. 3 1/2 structure mesh

1.2 接触面模型

在土体与管道、高聚物与管道、管节承口和插口接触位置设置接触单元,用来模拟管道和土体及高聚物的相互作用.切向接触采用罚函数,法向采用硬接触.设 F_H 和 F_V 分别为接触单元间的摩擦力和法向力; F'_H 为接触面未发生滑移时的摩擦力; K_t 为黏性系数; K_n 为法向刚度; u 为切向位

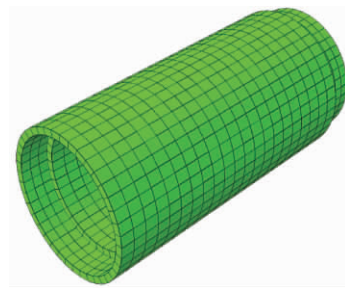


图 4 管节

Fig. 4 The ppe segment

移; d 为法向接触距离,则有:

$$F_H = \begin{cases} K_t u; \\ F'_H, \end{cases}$$

$$F_V = \begin{cases} K_n d, & d < 0; \\ 0, & d > 0. \end{cases}$$

目前,我国管道设计规范仍将交通荷载按静载来考量.假定车辆轴距为 2.0 m,将交通荷载简

化为作用在 $0.213\text{ m} \times 0.50\text{ m}$ 区域内的均布荷载,荷载作用位置如图 2 所示.

2 数值模拟及结果分析

本节将交通荷载设置为 0.5 MPa 和 1.0 MPa ,作用在管节 3 正上方,分析不同交通荷载对管道力学响应的影响.

沿管顶正上方纵向取路径,图 5 和图 6 分别为两种交通荷载下管顶 Mises 应力和竖向位移对比曲线.

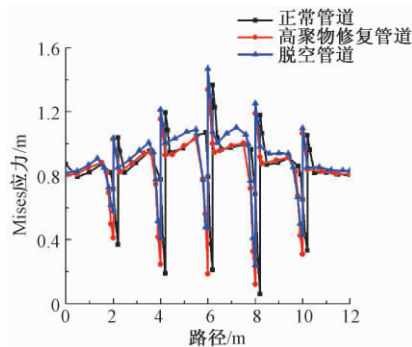


图 5 管顶 Mises 应力对比曲线(0.5 MPa)

Fig. 5 Comparison of the Mises stress(0.5 MPa)

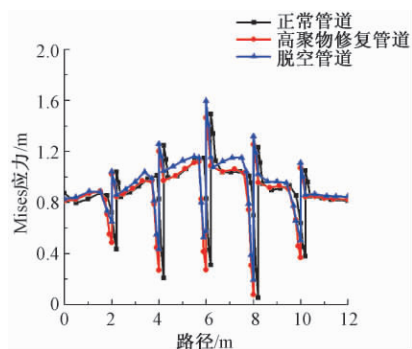


图 6 管顶 Mises 应力对比曲线(1.0 MPa)

Fig. 6 Comparison of the Mises stress(1.0 MPa)

从图 5 和图 6 可以看出,管顶 Mises 应力并不严格关于荷载作用位置对称. Mises 应力沿荷载作用位置两侧呈递减趋势,且交通荷载为 1.0 MPa 时 Mises 应力从荷载作用位置两侧递减趋势明显大于交通荷载为 0.5 MPa 时. 此外,交通荷载对其作用位置两侧 6 m ($0 \sim 6\text{ m}$ 、 $6 \sim 12\text{ m}$) 范围内的管道影响较大,且交通荷载越大,影响也越大. 三种状态管道 Mises 应力曲线在管节处高度不连续,说明交通荷载作用下管道破坏的危险点位于管节处. 对比图 5 和图 6,脱空管道 Mises 应力明显大于正常管道和高聚物修复管道,且正常管道和高聚物修复管道 Mises 应力极为接近,说明脱空对管道受力影响较大且高聚物材料对脱

空起到了有效修复. 当交通荷载为 1.0 MPa 时,脱空管道在管节 3(即脱空位置)处的 Mises 应力比交通荷载为 0.5 MPa 时大 0.4 MPa 左右,比正常管道和高聚物修复管道大 0.2 MPa 左右.

两种交通荷载下管顶竖向位移对比曲线如图 7 和图 8 所示. 从图 7 和图 8 可以看出,交通荷载作用位置两侧 4 m ($2 \sim 6\text{ m}$ 、 $6 \sim 10\text{ m}$) 范围内沉降明显,说明交通荷载对其作用位置两侧 4 m 范围内管道的沉降影响较大. 0.5 MPa 时脱空管道最大沉降值约为 0.3 mm ,其他两种管道最大沉降值约为 0.28 mm , 1.0 MPa 时脱空管道最大沉降值约为 0.83 mm ,其他两种管道约为 0.53 mm .

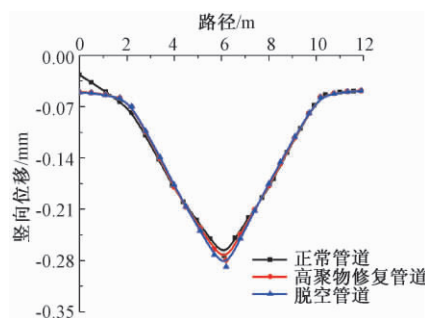


图 7 管顶竖向位移对比曲线(0.5 MPa)

Fig. 7 Comparison of the vertical displacement (0.5 MPa)

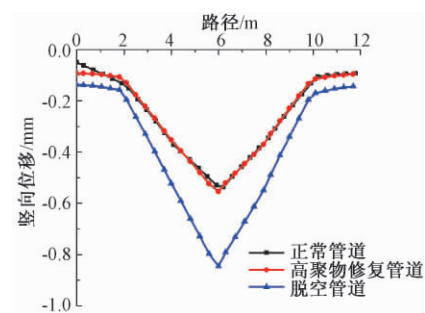


图 8 管顶竖向位移对比曲线(1.0 MPa)

Fig. 8 Comparison of the vertical displacement (1.0 MPa)

取脱空处承插口环形路径对其 Mises 应力进行分析,图 9 和图 10 为承口 Mises 应力对比曲线 (0° 、 90° 、 180° 分别代表管顶、管侧和管底,角度沿管周顺时针增大). 从图 9 和图 10 可以看出,两种交通荷载作用下三种状态管道承口处 Mises 应力分布基本一致,管侧 (90°) 应力最大,管顶 (0°) 最小. 交通荷载为 0.5 MPa 和 1.0 MPa 时,脱空管道管底 Mises 应力分别在 $157.5^\circ \sim 202.5^\circ$ 区域及 $135^\circ \sim 225^\circ$ 区域内大于其他两种状态管道,其余区域均小于其他两种状态管道,说明脱空处管节(管节 3)在交通荷载作用下发生了小幅度的转

动,使承口管底区域出现应力集中,且应力集中区域随着交通荷载的增大而增大。

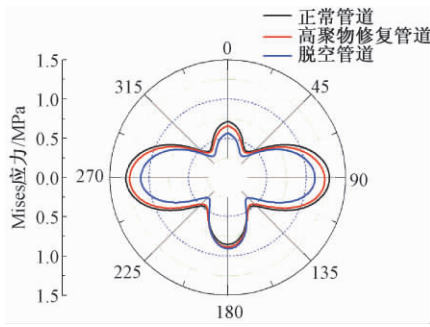


图9 承口 Mises 应力对比(0.5 MPa)

Fig.9 Comparison of the Mises stress at the bell(0.5 MPa)

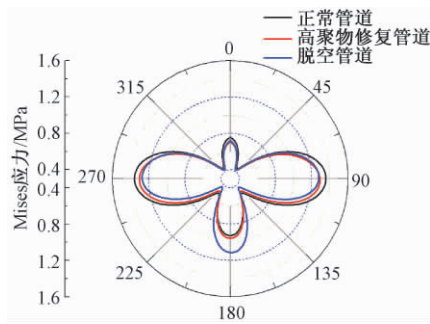


图10 承口 Mises 应力对比(1.0 MPa)

Fig.10 Comparison of the Mises stress at the bell(1.0 MPa)

图11和图12为插口Mises应力对比曲线。从图11和12中可以看出,0.5 MPa交通荷载下插口处管顶(0°)和管底(180°)Mises应力最大,管侧(90°、270°)最小,1.0 MPa交通荷载作用下管顶(0°)最大,管侧(90°、270°)最小。0.5 MPa交通荷载作用下脱空管道整个环向Mises应力均小于其他两种状态的管道,1.0 MPa时除管顶略大于其他两种状态管道外,其余区域均小于其他两种状态管道,在管底135°~225°区域内表现更为明显,其原因是脱空处管节转动导致承插口发生相对滑动,此时应力主要集中在承口底部,而插口在承口内部,受力反倒最小。

对比图9~12正常管道与高聚物修复管道以及高聚物修复管道与脱空管道环向Mises应力,可以看出高聚物材料填充脱空后管道脱空处的环向应力恢复到了正常管道的水平,说明高聚物材料能有效修复管道脱空。

3 结论

基于ABAQUS建立了埋地管道三维有限元模型,通过计算,对比了不同大小交通荷载作用

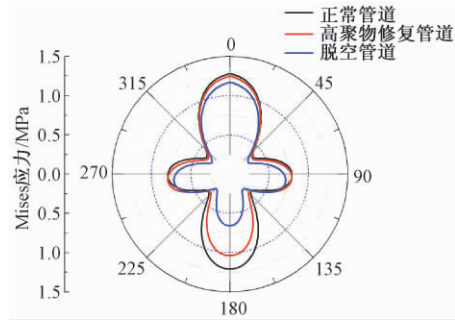


图11 插口 Mises 应力对比(0.5 MPa)

Fig.11 Comparison of the Mises stress at the spigot(0.5 MPa)

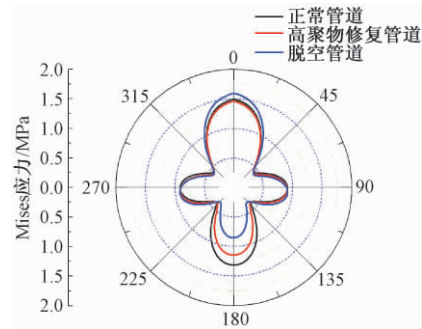


图12 插口 Mises 应力对比(1.0 MPa)

Fig.12 Comparison of the Mises stress at the spigot(1.0 MPa)

下三种状态管道的力学和位移响应,得出如下结论:

(1) 由于管节承插口的非对称性,管顶纵向Mises应力和竖向位移曲线并不严格关于荷载作用位置对称。

(2) 交通荷载对其作用位置两侧6 m和4 m范围内的Mises应力和竖向位移影响显著,影响程度与交通荷载大小成正比。

(3) 各管节处Mises应力相对于管身明显增大且不连续,说明交通荷载作用下管道破坏的潜在点位于管节处,实际工程中应将承插口施工作为重点关注对象。

(4) 交通荷载作用下脱空管道纵向Mises应力、竖向位移均比正常管道大,说明含缺陷地下排水管道受交通荷载影响较大。

(5) 交通荷载大小对管道应力和变形影响显著,表征重载车辆对路面结构及下方构筑物存在较大危害。

(6) 高聚物修复脱空管道后其纵向Mises应力、竖向位移和环向Mises应力均大幅减小,说明高聚物修复脱空管道后其受力更趋合理,管道也更加安全稳定,达到了可靠有效的修复效果。

参考文献:

- [1] WEI Y, WANG F M, GAO X, et al. Microstructure and fatigue performance of polyurethane grout materials under compression [J]. Journal of materials in civil engineering, 2017, 29(9): 04017101.
- [2] 李嘉,王博,张景伟,等. 高聚物注浆材料动力特性试验研究[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(2): 198-203.
- [3] SHI M S, WANG F M, LUO J. Compressive strength of polymer grouting material at different temperatures [J]. Journal of wuhan university of technology-Mater Sci Ed, 2010, 25(6): 962-965.
- [4] RAKITIN B, XU M. Centrifuge testing to simulate buried reinforced concrete pipe joints subjected to traffic loading [J]. Canadian geotechnical journal, 2015, 52(11): 1762-1774.
- [5] XU M, SHEN D, RAKITIN B. The longitudinal response of buried large-diameter reinforced concrete pipewith gasketed bell-and-spigot joints subjected to traffic loading [J]. Tunnelling and underground space technology, 2017, 64: 117-132.
- [6] MEESAWASD N, BOONYASIRIWAT C, KONGNU-AN S, et al. Finite element modeling for stress analysis of a buried pipeunder soil and traffic loads [C]// Industrial engineering and engineering management (IEEM). Bali: IEEE, 2016: 385-390.
- [7] ALZABEEBEE S, CHAPMAN D, JEFFERSON I, et al. The response of buried pipes to UK standard traffic loading [J]. Proceedings of the institution of civil engineers-geotechnical engineering, 2016, 170(1): 38-50.
- [8] 吴小刚,吴军,宋洁人. 交通荷载下管道的位移响应分析初探[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 14-15.
- [9] 王直民. 交通荷载作用下埋地管道的力学性状研究[D]: 杭州: 浙江大学建筑工程学院, 2006: 1-154.
- [10] 徐建国,胡会明,李松涛,等. 地下管道脱空渗漏高聚物注浆抬升修复与数值分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(3): 35-40.
- [11] 徐建国,胡会明,钟燕辉,等. 地下管道沉降与脱空高聚物注浆修复数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(5): 1165-1172.

Analysis of the Mechanical Characteristics of Disengaging Drainage Pipe Before and After Polymer Repairing

LI Bin^{1,2,3}, FANG Hongyuan^{1,2,3}, WANG Fuming^{1,2,3}

(1. College of Water Conservancy & Environmental Engineering, Zhengzhou University. Zhengzhou 450001, China; 2. National Local Joint Engineering Laboratory of Major Infrastructure Testing and Rehabilitation Technology, Zhengzhou 450001, China; 3. Collaborative Innovation Center of Water Conservancy and Transportation Infrastructure Safety, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Polymer grouting technology was a kind of economical and efficient method for leakage pipeline. However, the application of this technology for the restore statue of the mechanical properties of the pipe after repairing was not yet clear. In this paper, the three-dimensional numerical model of the road structure, sub-grade and pipe-soil interaction were established by the ABAQUS software. The longitudinal and circumferential mechanical properties of normal pipe, disengaging pipe and polymer-repaired pipe under traffic load were compared and analyzed. The results showed traffic load had obvious influence on the pipe stresses and deformations in the range of 6 m and 4 m on both sides of its position, and the influence was positively correlated with the amplitude of traffic load. The stresses at the bell and spigot joints were highly discontinuous. When traffic load was 1.0 MPa, the stresses and deformations of the pipe are obviously greater than that of traffic load is 0.5 MPa; The stresses and deformations of the pipe recovered to the normal pipe level after the disengaging was repaired by the polymer, and a reliable and effective repairing effect was achieved. The research results provided a theoretical basis for the implementation of targeted pipe repair.

Key words: drainage pipe; disengaging pipe; traffic load; polymer grouting technology; mechanical characteristics

文章编号: 1671-6833(2019)01-0067-05

公路桥梁板式橡胶支座失效标准研究

邬晓光¹, 贺书磊¹, 郑鹏¹, 殷悦¹, 郭志强²

(1. 长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 山西省高速公路集团有限责任公司, 山西 太原 030006)

摘要: 通过对山西省3条高速公路上的板式橡胶支座进行现场调研, 确定了该类型支座存在的主要病害问题是支座局部脱空和支座剪切变形。然后通过单轴拉伸试验、双轴拉伸试验和平面剪切试验得出运营桥梁支座实际的特性参数。通过建立板式橡胶支座的有限元模型, 分析得出橡胶支座的极限脱空率和极限剪切角。最后通过软件试算, 模拟局部脱空和剪切变形两种病害同时存在的情况下支座的受力, 拟合出板式橡胶支座在两种病害同时作用下的失效判别公式和失效曲线, 如果局部脱空和剪切变形的组合满足失效判别公式或者在失效曲线范围之外, 说明支座失效。研究得出的失效标准可以为板式橡胶支座的更换提供依据, 具有较高的工程应用价值。

关键词: 公路桥梁; 板式橡胶支座; 局部脱空; 剪切变形; 失效标准

中图分类号: U448.14 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2019.01.001

0 引言

随着我国高速公路通车里程的不断增加, 公路桥梁也得到了很大的发展。板式橡胶支座由于其构造简单、用钢量少、加工制造容易、安装方便、成本低廉等优点^[1-2], 自20世纪60年代在我国首次应用于公路桥梁上以来, 得到了很大的发展, 在中小跨径桥梁中有着广泛的应用^[3-4]。然而, 由于板式橡胶支座在桥梁工程造价中所占比例很小, 一般不会引起工程管理和技术人员的重视, 在使用过程中极易成为桥梁结构的薄弱环节, 产生病害的概率较高。据高速公路管养单位介绍, 受当地大温差气候以及重载交通的影响, 山西省公路桥梁板式橡胶支座病害问题严重, 几乎95%的桥梁都存在着支座问题, 因支座未及时更换造成的经济损失多达100多万元。因此对支座的失效标准进行研究有着很大的意义, 但查找现有的相关文献发现, 关于这方面的研究很少。袁磊等^[5]基于橡胶总应变对板式橡胶支座的失效条件进行判别, 刘利^[6]利用FEA软件对支座出现病害的情况进行了模拟分析。这些研究仅仅对支座的单一病害分别进行

研究, 然而在实际中, 支座的病害往往是同时出现的, 因此笔者在现场调研的基础上, 对支座常见病害同时存在时的失效标准进行研究。

1 板式橡胶支座的病害调研

为确定公路桥梁板式橡胶支座的主要病害类型, 课题组对山西省太佳高速公路、平榆高速以及吕环高速3条高速公路上共计150座大中型桥梁上方便观察到的8769个板式橡胶支座的病害情况进行了现场调研, 发现山西省高速公路桥梁支座存在的主要病害包括支座局部脱空、支座剪切变形、支座破损、支座开裂、支座位置串动和附属构件的病害, 支座主要病害统计如表1所示。

表1 支座病害统计表

Tab.1 Pad bearing disease statistics

支座病害	支座数量/ 个	占支座总数的 比例/%
支座局部脱空	1 421	16.2
剪切变形	1 114	12.7
支座破损	491	5.6
支座开裂	544	6.2
支座位置串动	377	4.3
附属构件病害	185	2.1

收稿日期: 2018-09-13; 修订日期: 2018-10-26

基金项目: 山西省交通运输厅科技资助项目(2017-4-37); 国家自然科学基金资助项目(50908017E080505)

作者简介: 邬晓光(1961—), 男, 湖北英山人, 长安大学教授, 博士, 主要从事桥梁结构分析、施工监控系统研究及桥梁检测与评估等研究, E-mail: wxgwst.cn@126.com.

由表 1 可知, 支座剪切变形病害和局部脱空病害出现的频率最高, 因此笔者只对支座局部脱空和支座剪切变形进行研究. 支座局部脱空会使支座局部压应力增大, 同时脱空部位与外界环境接触, 容易导致橡胶老化. 吕梁环城高速郭家沟 1 号大桥支座病害如图 1 所示.



图 1 吕梁环城高速郭家沟 1 号大桥支座病害
Fig. 1 The pad bearing disease of the No. 1 bridge of the Guo jia gou

支座出现脱空现象后, 将无法起到支撑作用, 上部结构的荷载无法传递下来, 这直接改变了桥梁的受力状态. 脱空时支座出现偏心受压和应力集中现象, 容易导致支座开裂、变形过大甚至压坏, 同样对桥梁结构的安全产生不利影响. 支座的剪切变形主要指由于混凝土的收缩徐变、温度变化以及汽车制动力等因素导致的梁体长度的变化. 在运营阶段发生剪切变形是正常的, 支座通过剪切变形来承受上部结构传递的水平荷载, 若剪切变形未超限, 则支座的剪切变形满足要求, 反之则不满足, 无法正常使用^[7].

2 运营支座橡胶的性能试验

石马沟 2 号大桥位于汾阳至邢台高速公路平榆至榆社段, 起止桩号为 K18+860~K140+850, 2012 年建成通车, 在 2015 年桥梁检测时被评为平榆高速上唯一一座三类桥, 是平榆高速上病害问题最严重的一座桥梁. 笔者以该桥的圆形板式橡胶支座 GYZ 400 mm×84 mm 作为研究对象进行研究.

由于已经使用了一段年限, 该桥支座的橡胶

层可能由于老化等现象使支座的特性受到影响, 为了得到可靠的橡胶支座的特性参数, 在实验室对从运营 5~7 a 的实桥取下来的橡胶支座进行单轴拉伸试验、双轴拉伸试验和平面剪切试验^[8-12]. 剪切试验过程图如图 2 所示.



图 2 平面剪切试验过程图

Fig. 2 Process diagram of plane shear test

对试验结果进行整理分析, 得到图 3 所示的应力-应变曲线^[13]. 从图 3 可以看出, 在各力学性能试验中, 随着应变的增大, 橡胶支座的应力也随之增大, 但是应力不是线性增长, 说明橡胶材料是非线性的, 在后续分析中需要考虑这一点. 本次试验数据可用于后续有限元建模分析过程中定义支座橡胶材料, 考虑橡胶老化等因素的影响, 真实反映运营实桥支座的力学特性, 以确保有限元模型能够更加准确地模拟支座受力.

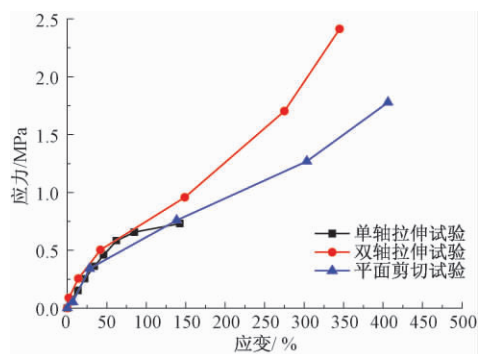


图 3 试验结果拟合曲线图

Fig. 3 Fitting curves of test results

3 板式橡胶支座有限元分析

3.1 有限元模型的建立

笔者利用有限元软件来模拟分析板式橡胶支座^[14-15], 模型如图 4 所示. 由于支座橡胶材料属于一种超弹性材料, 同时具有材料非线性和几何非线性两种特性. 在模拟其力学性能时, 常采用

Yeoh 模型和 Mooney-Rivlin 模型两种模型,其中 Yeoh 模型可以更好地模拟支座橡胶的力学特征^[4].考虑到橡胶的不可压缩性,采用三维八节点杂交单元 C3D8H 来模拟,对于钢板部分,采用三维八节点实体单元 C3D8 来模拟.为减少计算所需要的迭代次数,每层钢板与橡胶之间的接触类型选择绑定约束形式.加载时,在支座下表面进行固结处理,在上表面有效承压面积内施加竖向荷载.

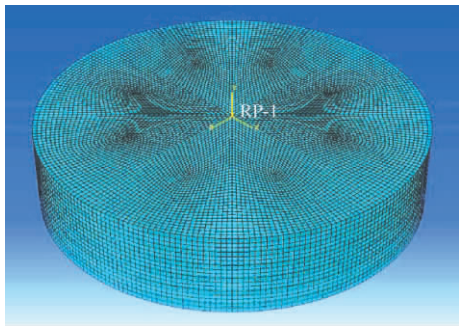


图 4 支座模型

Fig. 4 The pad bearing model

查阅 JTG 3362—2018《公路桥梁板式橡胶支座》, GYZ 400 mm × 84 mm 板式橡胶支座的形状系数为 8.86, 根据 JTG D62—2004《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》计算, 在标准设计强度 10 MPa 作用下的竖向压缩变形应为 1.268 mm. 给模型施加 10 MPa 的竖向应力, 竖向压缩变形值为 1.257 mm, 与按照规范计算所得的 1.268 mm 偏差较小. 对于板式橡胶支座 GYZ 400 mm × 84 mm, 支座竖向压缩变形的限值为 $0.07t_e = 0.07 \times 53 \text{ mm} = 3.71 \text{ mm}$.

3.2 两种病害分别存在时的有限元模型分析

(1) 支座局部脱空. 当支座竖向受力不均匀时, 表面出现偏压, 其表面压力由均匀分布逐渐转变为三角形分布, 严重时将出现局部脱空现象. 支座发生脱空时, 脱空部分将不承受竖向荷载, 全部竖向荷载由未脱空部分承担. 为模拟支座局部脱空病害对其受力性能的影响程度, 分别计算偏压使脱空率为 0%、5%、10%、15% 及 20% 时支座边缘的最大应力, 并在有限元模型中按该应力施加三角形分布的荷载, 模拟各工况下板式橡胶支座的压缩变形和应力水平, 模型分析结果见表 2.

从表 2 可以看出, 在设计标准强度 10 MPa 作用下, 支座脱空率从 0 增大到 20% 过程中, 支座的压缩变形和应力水平都随之增加, 其中支座竖向压缩变形并未超过限值. 当脱空率为 15% 时, 内部橡胶层的最大拉应力达到 18.77 MPa, 已

表 2 支座局部脱空时的变形及应力

Tab. 2 Deformation and internal force of pad bearing when it is empty

支座脱空率/ %	竖向最大 压缩变形/mm	橡胶层最大 拉应力/MPa
0	1.257	8.25
5	1.408	11.52
10	1.608	14.92
15	1.831	18.77
20	2.063	23.81

经超过了 JTG 3362—2018《公路桥梁板式橡胶支座》中规定的橡胶抗拉强度限值 17 MPa, 说明此时支座已经不能正常使用. 脱空率在 10% ~ 15% 之间, 支座已经失效. 经试算, 当脱空面积为 13% 时, 内部橡胶层的最大拉应力为 17.10 MPa, 因此, 可认为支座的极限脱空率为 13%.

(2) 支座剪切变形. 板式橡胶支座在使用过程中, 同时承受竖向荷载和水平荷载作用, 使支座产生水平方向变形, 参考文献[4], 在评价运营状态支座受力时可将剪切角正切值限值适当放宽至 1.0, 故在模型中不断调整水平应力大小, 分别使支座的剪切角度正切值 $\tan \alpha$ 为 0、0.5、0.7、1.0 时, 在规范规定的标准设计强度 10 MPa 竖向应力作用下, 板式橡胶支座的压缩变形和应力水平的模型分析结果见表 3.

表 3 支座剪切变形时的变形及应力

Tab. 3 Deformation and internal force of bearing shear deformation

支座剪切角度 正切值 $\tan \alpha$	竖向最大 压缩变形/mm	橡胶层最大 拉应力/MPa
0	1.257	8.25
0.5	1.512	13.31
0.7	1.803	17.26
1.0	2.012	21.36

从表 3 可以看出, 在设计标准强度 10 MPa 作用下, 支座的剪切角度正切值从 0 增大到 1.0 过程中, 支座的压缩变形和应力水平都随之增加, 其中支座竖向压缩变形并未超过限值. 当支座的剪切角度正切值为 0.7 时, 内部橡胶层的最大拉应力达到 17.26 MPa, 跟规范规定橡胶抗拉强度限值 17 MPa 相差不大, 这也符合规范中所规定的橡胶支座正常使用剪切角的限制条件 $\tan \alpha \leq 0.7$.

3.3 两种病害共同存在时的有限元模型分析

由上述计算结果可知, 支座局部脱空的失效标准为脱空率达到 13%, 支座剪切变形的失效标准为剪切角度正切值达到 0.7. 但是在现场调研

过程中,公路桥梁的板式橡胶支座的病害并不只是单一的局部脱空或者剪切变形,一般情况下,这两种病害往往是同时出现的,因此需要对二者共同作用下的支座受力进行研究,确定同时存在这两种病害的支座的失效标准。

利用有限元软件进行试算,当支座的剪切角度正切值 $\tan \alpha$ 分别 0、0.1、0.3、0.5、0.7 时,支座脱空率达到多少可以使支座内部橡胶层的最大拉应力达到 17 MPa,即支座无法正常使用,经过大量的试算,得到表 4 结果。

表 4 支座失效标准试算表

Tab. 4 Test table of support failure standard

支座剪切角度 正切值 $\tan \alpha$	支座脱空率 / %	橡胶层最大 拉应力 / MPa
0	13	17.10
0.1	9	17.07
0.3	4	17.13
0.5	1	16.96
0.7	0	17.26

利用数学软件,将上表中的坐标点拟合出 GYZ 400 mm × 84 mm 圆形板式橡胶支座在局部脱空和剪切变形共同存在的情况下的失效判别公式和失效曲线,如图 5 所示。横坐标表示支座的剪切角度正切值,纵坐标表示支座脱空率(%)。如果局部脱空和剪切变形组合在曲线范围之内,说明支座处于安全使用状态。反之,则说明支座已经失效。

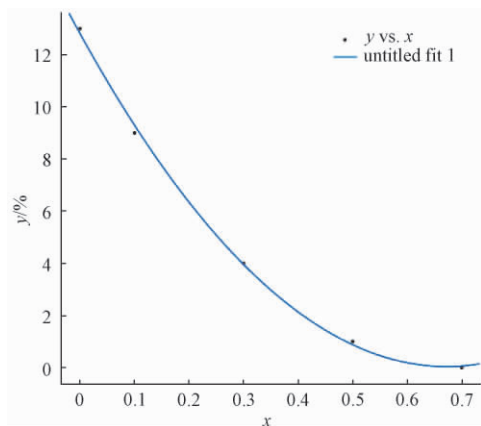


图 5 局部脱空和剪切变形共同存在时的支座失效曲线图

Fig. 5 The pad bearing failure curves of local and shear deformation

根据拟合曲线拟合出支座在局部脱空和剪切变形病害共同存在时的失效判别公式:

$$y > 28.27x^2 - 38x + 12.81, \quad (1)$$

式中: x 表示支座的剪切角度正切值; y 表示支座脱空率, %。

当二者的组合满足式(1)时,说明支座不能

正常使用,已经失效。

4 结论

(1) 公路桥梁板式橡胶支座存在的病害包括支座局部脱空、支座剪切变形、支座破损、支座开裂、支座位置串动和附属构件的病害。其中,支座局部脱空病害和剪切病害出现的频率最高。

(2) 支座局部脱空的失效标准为脱空率 13%, 支座剪切变形的失效标准为剪切角度正切值达到 0.7, 当超过这个数值时, 支座内部橡胶层的最大拉应力超过规范所要求的限值, 支座失效。

(3) 在支座局部脱空和剪切变形病害共同存在的情况下, 笔者得到的判别公式和拟合曲线可以判断支座是否失效, 如果局部脱空和剪切变形组合符合判别公式或者在曲线范围之外, 说明支座已经失效; 反之, 说明支座可以正常使用。

参考文献:

- [1] 包杰. 斜曲连续梁桥板式橡胶支座设计关键技术研究[D]. 西安: 长安大学公路学院, 2015: 7-8.
- [2] 郭红梅, 周燕, 张凯, 等. 大跨连续梁桥桩基础的减隔震分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(1): 70-74.
- [3] 李建中, 汤虎, 管仲国. 中小跨径板式橡胶支座梁桥新型隔震系统[J]. 中国公路学报, 2015, 28(3): 35-43.
- [4] 吴刚, 王克海, 李冲, 等. 板式橡胶支座摩擦滑移特性参数分析[J]. 土木工程学报, 2014, 47(S1): 108-112.
- [5] 袁磊, 庄军生, 张勇, 等. 基于橡胶总应变的板式橡胶支座失效条件判据[J]. 铁道建筑, 2015, 496(6): 27-30.
- [6] 刘利. 在役公路桥梁板式橡胶支座病害分析及对策研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院铁道建筑研究所, 2012: 38-63.
- [7] 陶俊. 支座失效对桥梁结构的影响及失效标准研究[D]. 西安: 长安大学公路学院, 2015: 5-6.
- [8] 李昌荣. 抗横移板式橡胶支座力学性能实验研究及数值分析[D]. 广州: 华南理工大学土木与交通学院, 2012: 27-30.
- [9] STEELMAN J S, FAHNESTOCK L A, FILIPOV E T, et al. Shear and friction response of nonseismic laminated elastomeric bridge bearings subject to seismic demands[J]. Journal of bridge engineering, 2013, 18(7): 612-623.
- [10] TOPKAY C. Analysis of specimen size effects in inclined compression test on laminated elastomeric bearings[J]. Engineering structures, 2004, 26(8):

- 1071 – 1080.
- [11] TOPKAY C, JOSEPH A Y. Test method for determining the shear modulus of elastomeric bearings [J]. Journal of structural engineering, 2002, 128 (6): 797 – 805.
- [12] 刘亚东,田杰. 橡胶隔震支座拉伸性能试验研究 [J]. 建筑科学, 2015, 31(7): 63 – 67.
- [13] NAJM H, PATEL R, NASSIF H. Evaluation of laminated circular elastomeric bearings [J]. Journal of bridge engineering, 2007, 12(1): 89 – 97.
- [14] 李冰,王少华,严情木. 基于 ABAQUS 非线性接触分析的球型支座转动性能及结构分析 [J]. 铁道建筑, 2012, 465(11): 10 – 13.
- [15] 李瑞. 板式橡胶支座本构试验及抗震性能研究 [D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室, 2016: 31 – 41.

Study on Failure Standard of Highway Bridge Rubber Bearing

WU Xiaoguang¹, HE Shulei¹, ZHENG Peng¹, YIN Yue¹, GUO Zhiqiang²

(1. Laboratory for Bridge and Tunnel of Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Shanxi Province Highway Group Co. Ltd., Taiyuan 030006, China)

Abstract: In a on-site examination on the plate type elastomeric pad bearings on three expressways in Shaanxi Province, the main problems of this type of pad bearings were local cavitation and bearing shear deformation. Then the uniaxial tensile test, biaxial tensile test and plane shear test were carried out to obtain the actual characteristic parameters of bridge bearing. By establishing a finite element model of the plate rubber bearing, the ultimate void ratio and ultimate shear angle of the rubber bearing were obtained. Finally, through the software trial calculation, the simulation the force of the pad bearings was conducted with both the local cavitation and the shear deformation, the failure identification formula and the failure curve of the rubber bearing in the plate under the simultaneous action of the two diseases were fitted. If the combination of partial void and shear deformation satisfied the failure criteria or was outside the failure curve range, the bearing failure was indicated. The failure criterion obtained in this paper could cast extra light on the basis for the replacement of the plate rubber bearing, and were of great engineering application value.

Key words: highway bridge; plate type elastomeric pad bearings; local cavitation; shear deformation; failure standard

动车水箱疲劳振动试验及数值模拟研究

王建明, 李潇潇

(山东大学 机械工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 轨道车辆及车载设备大量使用焊接结构, 其在振动载荷作用下的疲劳破坏通常发生在焊缝处. 针对动车水箱焊缝疲劳寿命开展随机振动台架试验及数值仿真研究. 在台架试验中, 按试验规范输入强化加速度随机振动自功率谱, 检验该水箱是否满足疲劳寿命的要求. 在进行数值模拟研究中, 按试验工况条件建立水箱疲劳寿命仿真模型, 其中将振动试验的激振信号作为仿真的输入载荷, 采用壳单元建立水箱构件及焊缝的有限元模型, 通过附加质量等效内部液体, 根据 BS7608 标准确定相应焊缝的 $S-N$ 曲线, 采用名义应力法预测水箱焊缝在试验工况下的疲劳寿命. 仿真所得焊缝失效部位及疲劳寿命与振动台架试验结果基本吻合, 说明该焊缝疲劳寿命预测方法的正确性, 为焊接结构疲劳设计提供有效的分析算法.

关键词: 焊缝疲劳寿命; 名义应力法; 振动试验; $S-N$ 曲线; 数值模拟

中图分类号: TQ324

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.04.011

0 引言

焊接为各工业领域广泛使用的构件连接方式, 由于焊接过程需使填充材料熔化使基材承受严重的热负荷, 导致焊缝周围材料出现局部不均匀的微结构, 形成不同的机械性能, 使焊缝处出现应力集中及残余拉应力, 故焊缝处的疲劳强度通常较母材低^[1-4]. 焊缝疲劳寿命预测为当前疲劳领域研究热点, Motarjemi 和 Lotsberg 等^[5-6]通过对不同类型的焊接接头进行正弦载荷疲劳试验, 证实焊缝穿透尺寸与焊喉裂纹扩展速率成正比. 阳清泉、惠延波等^[7-8]利用 fatigue 软件自带的刚/柔焊缝 $S-N$ 曲线对车架焊缝进行疲劳评估. Bertini 等^[9]基于名义应力法, 研究单一角焊缝在扭转载荷作用下的抗疲劳性能. 郭政和邹艳妮等^[10-11]用等效结构应力法, 分析单一对接接头在正弦波形加载条件下焊缝的疲劳寿命. 赵磊等^[12]分析了不同吊装工况下吊具的 T 型焊缝熔透深度对结构疲劳寿命的影响. Rao 和 Zhou 等^[13-14]采用等效结构应力法和 IIW 焊接疲劳评估标准对铝合金车身在不同工况下的疲劳寿命进行预测.

现有学者大多针对简单焊接试样通过试验或

数值仿真方法对焊接疲劳性能进行评估^[15-18], 而针对复杂工程结构的焊缝疲劳寿命的试验及仿真分析较少. 笔者以动车水箱为研究对象, 该水箱结构由上盖板、内胆下体、内部防波板、吊耳、扣筋及加强筋板等构件焊接而成, 在强化台架振动试验中, 其高应力区焊缝极易发生断裂失效, 故针对该结构焊缝开展疲劳寿命仿真及试验研究十分必要, 可为类似焊接结构的疲劳设计提供有效分析算法.

1 焊缝疲劳分析理论

1.1 试验原材料

目前针对焊缝疲劳评估标准主要有: ①英国钢铁结构疲劳评估标准 (BS7608); ②日本标准 (JISE4207); ③国际焊接学会标准 (IIW2003) 等. 其中 BS7608 标准适用于评估屈服强度小于 700 MPa 的焊接钢结构, 根据焊接接头形式、局部应力集中、不连续尺寸、加工要求、潜在裂纹位置、应力方向和残余应力等影响因素, 将焊缝分为 B、C、S、D、E、F、F2、G、W 9 个等级, 文献 [19] 中给出了相应 9 个焊缝等级的试验 $S-N$ 曲线, 如图 1 所示.

BS7608 标准中各级焊缝 $S-N$ 曲线方程为:

$$\lg N = \lg C_0 - d\sigma - m \lg S_r, \quad (1)$$

收稿日期: 2018-03-22; 修订日期: 2018-05-20

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, 主要从事计算力学方面的研究, E-mail: wangjianming@sdu.edu.cn.

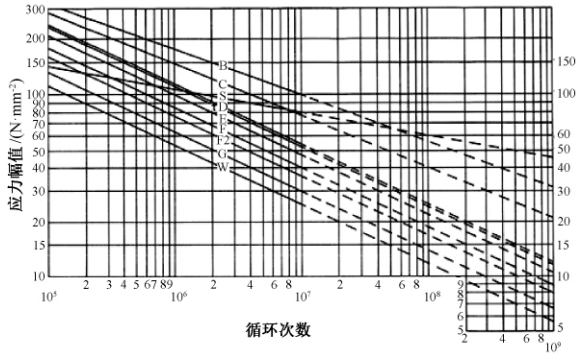


图 1 不同等级焊缝试验 S-N 曲线

Fig.1 Different grades of weld test S-N curve

式中: N 为焊缝达到疲劳失效的循环次数; C_0 为焊缝 S-N 曲线的相关常数; d 为应力低于平均值的标准偏差; σ 为焊缝 S-N 曲线的标准偏差; m 为焊缝 S-N 曲线的反向斜率; S_r 为焊缝应力变化范围。

式(1)适用于各类钢结构,不同等级焊缝所对应的焊缝参数如表 1 所示. 该水箱焊缝主要包括搭接焊缝、角焊缝和 T 型焊缝,其焊缝类型分别属于 B 级、F 级和 W 级,计算时可选用相应的焊缝 S-N 曲线。

根据焊缝类型和应力水平 S_{ri} ,由图 1 中的 S-N 曲线可得相应的疲劳循环次数 N_i :

$$N_i = \frac{C_{d1}}{S_{ri}^m}, \quad S_{ri} > S_0 \quad (2)$$

表 1 不同等级焊缝 S-N 曲线参数

Tab.1 S-N curve parameters for different grades of welds

等级	C_0	$\lg C_0$	$\ln C_0$	m	$\lg \sigma$	$\lg \sigma$	C_2	$S_0 (N = 10^7)$
B	2.343×10^{15}	15.369 7	35.390 0	4.0	0.182 1	0.419 4	1.01×10^{15}	100
C	1.082×10^{14}	14.034 2	32.315 3	3.5	0.204 1	0.470 0	4.23×10^{13}	78
D	3.988×10^{12}	12.600 7	29.014 4	3.0	0.209 5	0.482 4	1.52×10^{12}	53
E	3.988×10^{12}	12.516 9	28.821 6	3.0	0.250 9	0.577 7	1.04×10^{12}	47
F	1.726×10^{12}	12.237 0	28.177 0	3.0	0.218 3	0.502 7	0.63×10^{12}	40
F2	1.231×10^{12}	12.090 0	27.838 7	3.0	0.227 9	0.524 8	0.43×10^{12}	35
G	0.566×10^{12}	11.752 5	27.061 4	3.0	0.179 3	0.412 9	0.25×10^{12}	29
W	3.289×10^{12}	11.566 2	26.632 4	3.0	0.184 6	0.425 1	0.16×10^{12}	25
S	2.130×10^{23}	23.328 4	53.715 6	8.0	0.504 5	1.161 7	2.08×10^{12}	82
T	4.577×10^{12}	12.660 6	29.152 0	3.0	0.248 4	0.572 0	1.46×10^{12}	53

$$\lg N = 12.660\ 6 - 0.248\ 4d - 3\lg S_r$$

2 水箱随机振动疲劳试验

动车组在行驶过程中,由于起制动及转向等加速度作用,其上的车载设备(如水箱等)将受到纵向、垂向及横向振动载荷,故要求对车载设备进行随机振动台架试验,验证其结构及焊缝设计及制造质量是否满足使用要求. 根据 GB/T 21563—

$$N_i = \frac{C_{d2}}{S_{ri}^{m+2}}, \quad S_{ri} \leq S_0 \quad (3)$$

式中: C_{d1} 、 C_{d2} 分别为图 1 中 10^7 (拐点) 循环次数之前和之后曲线所对应的常数; N_i 为焊缝疲劳失效循环次数。

当焊缝应力发生变化时,可通过雨流计数计算各级应力对应的疲劳循环次数,根据 Miner 线性累积损伤理论,认为该焊缝在各级应力作用下的疲劳损伤是独立的,其总疲劳损伤可线性累加,即:

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_n}{N_n} = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i}, \quad (4)$$

式中: n_i 为对应当前载荷水平的疲劳寿命; N_i 为焊缝疲劳失效循环次数。

当 $\sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} = 1$ 时,认为该焊缝疲劳失效. 在随

机载荷作用下,采用线性累积理论可得到焊缝疲劳寿命为:

$$N = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{N_i} \cdot \frac{n_i}{n}}, \quad (5)$$

式中: $\frac{n_i}{n}$ 为一个采样时长范围内应力值为 S_{ri} 出现次数占总次数的百分比; N_i 为对应 S_{ri} 的疲劳失效循环次数。

2008《轨道交通机车车辆设备冲击和振动试验标准》,为缩短试验时间,要求车载设备在增强振动载荷作用下,保持 5 h 完好无损,以等效该设备在实际载荷作用下正常工作 25 a. 本试验采用 MPA3436/h1 859 A 电动振动台架,频率范围为 5~2 000 Hz,将水箱 4 个吊耳固定在试验台上,并在该处施加振动激励,在水箱的两侧面的中心

位置分别安装两个加速度传感器以拾取振动响应信号,水箱现场安装如图2所示。



图2 水箱安装图

Fig. 2 Tank installation diagram

根据 GB/T 21563—2008,在试验中输入随机振动激励曲线,如图3所示,该曲线属于频域振动信号。根据水箱质量及 GB/T 21563—2008 中的相关公式可确定随机振动试验的激励频率范围: f_1 为 2.5 Hz, f_2 为 75 Hz,并能确定图3中 ASD 标称曲线数: $ASD_{2.5}$ 为 $0.260 (m/s^2)^2/Hz$, ASD_5 和 ASD_{20} 均为 $2.068 (m/s^2)^2/Hz$, ASD_{75} 为 $0.148 (m/s^2)^2/Hz$ 。图4为图3频域随机振动激励曲线对应的时域加速度信号,表示每一时刻对应一个加速度幅值,由于随机振动疲劳数值模拟只能载入时域载荷,该时域信号是后续数值模拟的重要激励曲线。

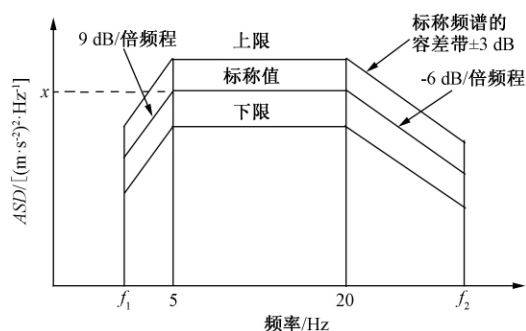


图3 I类A级车体激励功率谱

Fig. 3 Class I and A vehicle motivation power spectrum

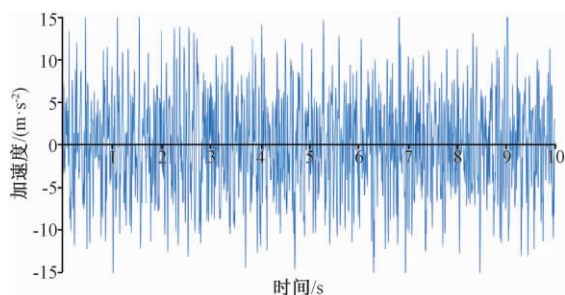


图4 激励加速度时域信号

Fig. 4 Excitation acceleration time domain sign

图5为施加在吊耳处4个加速度激励信号的实测曲线图,从图5中可以看出,吊耳处实测的加速度激励与规范中标称激励曲线图3一致,其中红色箭头所指为标称值激励曲线。图6为固定在水箱两侧加速度传感器拾取的振动响应信号曲线,由图6可以看出,水箱振动响应加速度峰值对应的频率为 20.625 Hz,其加速度功率谱密度峰值为 $259.59 (m/s^2)^2/Hz$ 。

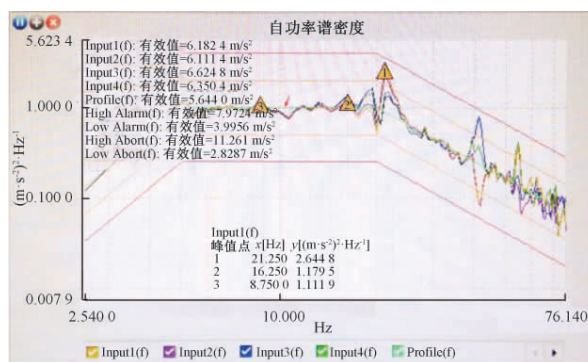


图5 激励加速度功率谱密度

Fig. 5 Excitation acceleration power spectral density

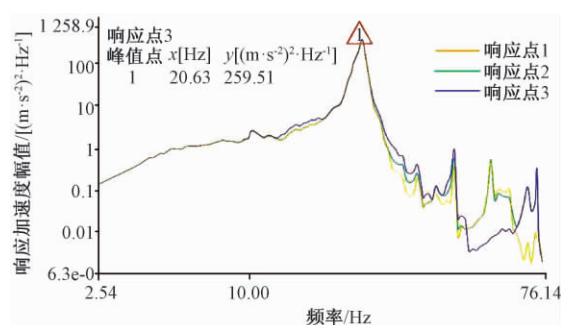


图6 响应加速度功率谱密度

Fig. 6 Response acceleration power spectral density

该随机振动试验持续 15 min 后,水箱上盖板与内胆下体连接焊缝处出现裂纹,导致内部液体流出,如图7所示,说明此处焊缝疲劳寿命远未达到试验要求。以下将针对该试验工况,通过有限元建模,仿真分析该水箱母材及各焊缝的疲劳寿命,为设计能满足该振动台架试验要求的焊接水箱提



图7 焊缝失效结果图

Fig. 7 Weld failure results

供有效分析方法.

3 水箱焊缝疲劳数值模拟

3.1 有限元模型

该水箱是由不同厚度的不锈钢板材焊接而成,其中水接触部分为 316 L 不锈钢,其他部分为 304 不锈钢. 利用 HYPERMESH 软件建立包括焊缝的水箱有限元模型,单元类型为四节点壳单元,将其内部的水处理为附加质量,分布在水箱内壁,单元尺寸为 10 mm,单元总数为 87 560,焊缝采用刚性壳单元,其厚度取 $t/\sqrt{2}$ (t 为母材厚度),焊缝角度为 45° ,焊缝模型定义如图 8 所示,图中红色线为定义的焊缝单元,其他颜色表示水箱结构的板壳单元. 施加垂向 9.8 m/s^2 重力加速度模拟重力场. 水箱 4 个吊耳底面为基础激励的输入部位,分别输入垂向基础激励加速度信号,如图 4 所示.

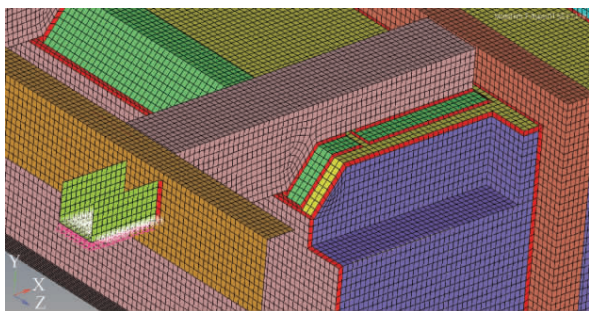


图 8 焊缝有限元模型

Fig. 8 Finite element model of weld

3.2 有限元模型

将 HYPERMESH 建立的有限元模型导入 FATIGUE 软件,使用全寿命疲劳分析模块对水箱及焊缝进行疲劳寿命计算. 根据水箱母材及各焊缝类型设置相应的 $S-N$ 曲线,该水箱焊缝包括角焊缝、搭接焊缝及 T 型焊缝,分别对应 F 级、B 级、D 级焊缝 $S-N$ 曲线,设置 goodman 系数,计算水箱母材及焊缝疲劳寿命.

图 9 为水箱的等效应力图,从图 9 可以看出,水箱最大应力为 103 MPa,位于水箱上盖板与内胆下体的焊缝连接处. 图 10 为水箱母材及各焊缝的疲劳寿命分布图,图中青蓝色部分为水箱母材的疲劳寿命,其疲劳循环次数接近 2×10^{22} 次,从图 10 可以看出,母材的疲劳寿命远远大于焊缝处的疲劳寿命. 图 11 为该水箱所有焊缝的疲劳寿命分布图,其中上盖板与内胆下体焊缝连接处循环次数最低,发生在图 9 中最大等效应力处,其最低循环次数为 20 000 次. 由图 6 可知,水箱实测最大响应频率为 20.625 Hz,该频率对应的振动周

期为 0.048 s,据此可得 20 000 次循环对应的焊缝疲劳寿命约为 16 min,与试验结果基本吻合,由此验证该疲劳寿命分析方法及结果的正确性及有效性,说明该数值模型及分析方法可有效用于此类焊接结构的疲劳寿命分析及预测.

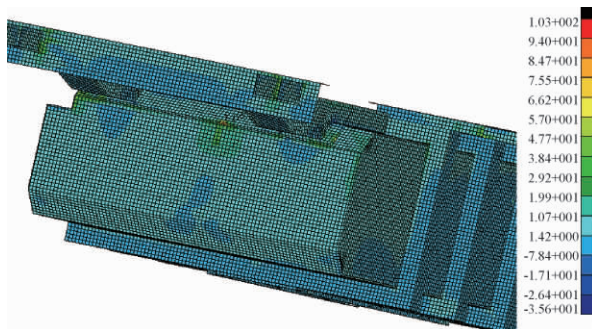


图 9 结构等效应力分布图

Fig. 9 Structural equivalent stress results

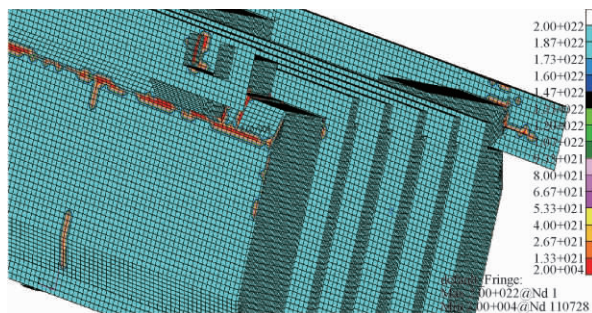


图 10 结构疲劳寿命分布图

Fig. 10 Structural fatigue life results

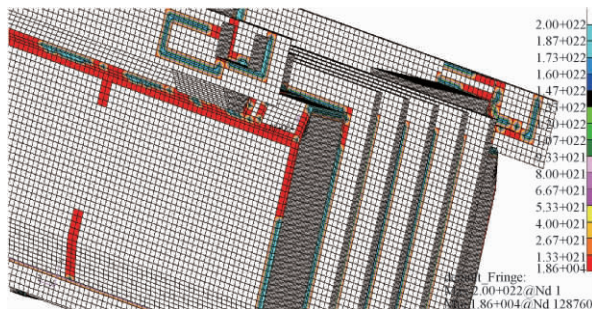


图 11 低寿命焊缝分布图

Fig. 11 Weld fatigue life results

4 结论

笔者以动车水箱实际焊接结构为研究对象,通过振动台架试验和有限元数值模型对其疲劳寿命进行试验和仿真研究. 其中台架试验仅持续 15 min,就发生上盖板与内胆下体处焊缝失效而漏水,说明该水箱疲劳寿命远未达到试验要求. 为今后设计能满足该振动台架试验要求的焊接水箱提供有效分析方法,根据该台架试验工况建立焊接水箱疲劳寿命分析有限元模

型,基于名义应力法针对不同类型的焊缝设置相应的 $S-N$ 曲线,计算在随机振动载荷作用下,结构母材及焊缝的疲劳寿命,并与振动台架试验结果对比,两者的失效部位及疲劳寿命基本吻合,说明该数值模型及仿真算法合理有效.利用该方法可在前期设计中及时发现低寿命焊缝发生部位,预测其疲劳寿命,并可基于仿真结果,合理规划焊缝布局,优化焊接结构,使其能顺利通过类似的强化振动疲劳试验,为焊接结构的疲劳寿命设计提供有效分析方法.

参考文献:

- [1] LEE C H, JANG G C, PARK H C, et al. Effect of vibration during welding on the fatigue strength of structural steel weldments [J]. *Solid state phenomena*, 2007, 124/125/126: 1329 – 1332.
- [2] ZHANG Y H, MADDOX S J. Investigation of fatigue damage to welded joints under variable amplitude loading spectra [J]. *International journal of fatigue*, 2009, 31(1): 138 – 152.
- [3] BRUDER T, STÖRZEL K, BAUMGARTNER J. Fatigue assessment of seam welds of automotive components by local stress approaches [J]. *Materialwissenschaft und werkstofftechnik*, 2010, 39 (10): 726 – 733.
- [4] GAO Y H, ZHAO W Z. Adaptive optimization with weld fatigue constraints based on surrogate model for railway vehicles [J]. *Mechanics based design of structures and machines*, 2014, 42(2): 244 – 254.
- [5] MOTARJEMI A K, KOKABI A H, BURDEKIN F M. Comparison of fatigue life for T and cruciform welded joints with different combinations of geometrical parameters [J]. *Engineering fracture mechanics*, 2000, 67 (4): 313 – 328.
- [6] LOTSBERG I, WÄSTBERG S, ULLE H, et al. Fatigue testing and $S-N$ data for fatigue analysis of piles [J]. *Journal of offshore mechanics and arctic engineering*, 2010, 132: 041602 – 1.
- [7] 阳清泉, 谷正气, 米承继, 等. SF33900 型矿用自卸车车架疲劳寿命分析 [J]. *汽车工程*, 2012, 34 (11): 1015 – 1019.
- [8] 惠延波, 王宏晓, 冯兰芳, 等. 基于 MSC. fatigue 的某轻型客车车架疲劳寿命分析 [J]. *郑州大学学报 (工学版)*, 2013, 34(1): 87 – 90.
- [9] BERTINI L, CERA A, FRENDI F. Experimental investigation of the fatigue resistance of pipe-to-plate welded connections under bending torsion and mixed mode loading [J]. *International journal of fatigue*, 2014, 68(9): 178 – 185.
- [10] 郭政, 王会利, 黄才良. 基于 Fe-safe 的 K 形对接焊缝疲劳分析 [J]. *沈阳大学学报 (自然科学版)*, 2013, 25(6): 499 – 501.
- [11] 邹艳妮, 李耀, 罗东. 等效结构应力法在高强度钢疲劳寿命预测中的应用 [J]. *机械科学与技术*, 2015, 34(8): 1298 – 1301.
- [12] 赵磊, 张昭, 王松, 等. 燃油箱吊座焊缝的强度和疲劳有限元分析 [J]. *计算机辅助工程*, 2015, 24 (1): 7 – 11.
- [13] RAO K B, ANOOP M, RAGHAVA G, et al. Probabilistic fatigue life analysis of welded steel plate railway bridge girders using $S-N$ curve approach [J]. *Proceedings of the institution of mechanical engineers part journal of risk and reliability*, 2013, 227 (4): 385 – 404.
- [14] ZHOU X, CHEN B Z, LIU L. An assessment of two methods for fatigue life prediction of an aluminum alloy car body [C] // *International Conference on Transportation Engineering*. Dailan: ICTE, 2015: 2234 – 2242.
- [15] GORASH Y, COMLEKCI T, MACKENZIE D. Comparative study of FE-models and material data for fatigue life assessments of welded thin-walled cross-beam connections [J]. *Procedia engineering*, 2015, 133: 420 – 432.
- [16] SAVAIDIS G, MALIKOUTSAKIS M. Advanced notch strain based calculation of $S-N$ curves for welded components [J]. *International journal of fatigue*, 2016, 83: 84 – 92.
- [17] 苏有华. 基于主 $S-N$ 曲线法的典型钢桥焊接节点疲劳寿命评估 [D]. 兰州: 兰州理工大学土木工程学院, 2014.
- [18] 兆文忠, 魏鸿亮, 方吉, 等. 基于主 $S-N$ 曲线法的焊接结构虚拟疲劳试验理论与应用 [J]. *焊接学报*, 2014, 35(5): 75 – 78.
- [19] BS7608. Code of practice for fatigue design and assessment steel structures [S]. *British Standards Institution*, 1993.

(下转第 82 页)

绕管式换热器壳侧流动及传热模拟与实验研究

吴金星, 刘少林, 彭旭

(郑州大学 化工与能源学院节能技术研究中心, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对绕管式换热器的结构参数, 建立不同管径($6\text{ mm} < d_0 < 14\text{ mm}$)、不同层间距($2\text{ mm} < S_2 < 4.5\text{ mm}$)和不同轴向间距($2\text{ mm} < Z < 14\text{ mm}$)的绕管式换热器的两层绕管几何模型. 以水为换热介质, 应用 Fluent 中 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型对绕管式换热器的壳侧流体的流动及换热特性进行了数值模拟, 分析了管径、层间距和轴向间距对努赛尔数、场协同数、焓损失率和综合换热性能评价因子的影响. 结合数值模型制作了实验模型并开展了性能测试, 将测得的实验数据和模拟结果进行了对比, 结果表明, 在研究范围内, 当管径为 6 mm 、层间距为 3.5 mm 、轴向间距为 14 mm 时, 综合换热性能评价因子有最大值, 温度差值、压力降模拟结果与实验数据相差 $1\sim 4\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $0.8\sim 1.2\text{ kPa}$.

关键词: 绕管式换热器; 强化换热; 数值模拟; 换热性能评价

中图分类号: TQ051

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2019.01.006

0 引言

绕管式换热器是一种新型高效换热器, 它以安全、高效、占地面积小和单位体积换热面积大等特点受到了众多研究者和消费者的青睐^[1]. 阳大清等^[2]采用数值模拟的方法对缠绕管式换热器壳侧流动进行分析, 发现绕管式换热器壳侧流体流动时, 流线呈弯曲状; 魏江涛等^[3]、贾金才^[4]通过数值模拟的方法对绕管式换热器壳侧流体的流动和传热进行了研究, 对其内部结构进行了优化, 结果表明, 随着径向比增大、轴向比减小, 传热系数逐渐减小, 而缠绕角、缠绕圈数对传热系数影响较小; Lu 等^[5]应用数值模拟的方法对绕管式换热器的壳侧流体流动状况进行了研究, 并根据研究结果整合出努赛尔数 Nu 、阻力系数 f 的关联式; Ghorbani 等^[6]采用实验的方法分析了螺旋管缠绕直径比、螺旋节距在不同雷诺数 Re 下对壳侧换热系数的影响, 拟合出了在不同努赛尔数下, 特征长度的求解公式.

笔者对前人的研究结果进行分析发现, 绕管式换热器中换热管的管径、轴向间距及层间距是影响换热器壳侧换热性能的主要因素. 为了使绕管式换热器得到较好的换热效果, 针对上述 3 个

因素建立了不同的几何模型, 并进行了数值模拟, 用换热器的综合换热性能评价因子和焓理论对其进行了分析评价, 最后将模拟结果与实验数据进行对比.

1 模型建立

1.1 几何模型及网格验证

建立如图 1(a) 中所示的不同管径($6\text{ mm} < d_0 < 14\text{ mm}$)、不同层间距($2\text{ mm} < S_2 < 4.5\text{ mm}$)和不同轴向间距($2\text{ mm} < Z < 14\text{ mm}$)的绕管式换热器的局部结构几何模型, 换热管缠绕两层, 每层 6 根同时缠绕, 内外层换热管的缠绕方向相反, 各个参数对应的绕管式换热器位置如图 1(b) 所示.

1.2 物理模型和数学模型

根据实际情况对物理模型进行合理假设: ①流体为不可压缩流体, 物性参数不随温度变化; ②流体的流动剪应力大于重力作用, 故忽略重力影响; ③流体的流动及传热过程均为稳态; ④忽略热辐射的影响; ⑤流体与壁面之间为无滑移壁面.

1.3 边界条件和计算方法

壳侧流体流动复杂且包含湍流, 采用 SIM-PLC 算法进行压力-速度耦合, 差分格式采用二

收稿日期: 2018-09-20; 修订日期: 2018-11-02

基金项目: 河南省重点科技攻关项目(162102210006)

作者简介: 吴金星(1968—), 男, 河南郑州人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事强化传热及节能技术研究, E-mail: wujx@zzu.edu.cn.

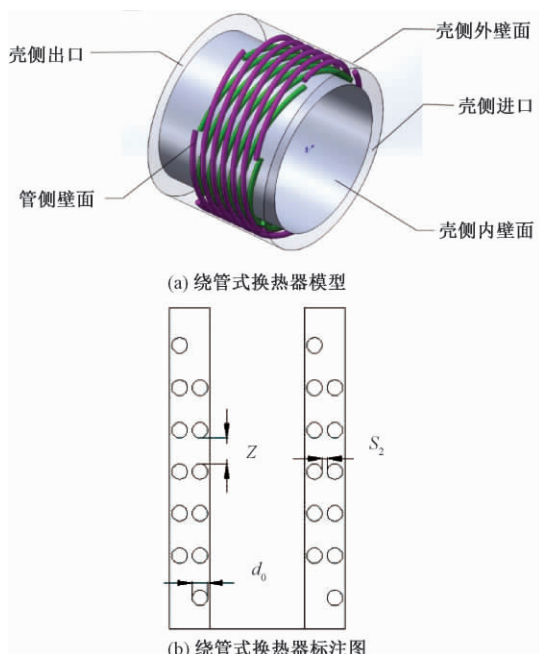


图1 绕管式换热器的局部结构几何模型及具体尺寸

Fig.1 The local structure geometry model and the specific size of spiral tube heat exchanger

阶迎格式,设置收敛精度为 10^{-6} ,边界条件如下。

进口:壳侧进口(inlet)边界类型为速度进口,速度范围为 $0.23 \sim 1.1 \text{ m/s}$,设置进口温度为 293 K 。

出口:壳侧出口(outlet)的边界类型为压力出口。

壁面:壳侧内外壁面设定为无滑移的绝热边界,管侧壁面设定为恒壁温,温度为 360 K 。

2 计算结果与分析

2.1 湍流模型验证

Fluent 提供的 $k-\epsilon$ 模型包括: Standard $k-\epsilon$ 模型、RNG $k-\epsilon$ 模型、Realizable $k-\epsilon$ 模型。为了验证这 3 种湍流模型在模拟中的正确性,分别采用以上 3 种模型计算努赛尔数 Nu ,表 1 所示为不同模型模拟结果与螺旋流道时壳侧努赛尔数 Nu 关联式中^[7-9]计算结果的对比,关联式如式(1)所示。在文献[7]中,壳侧流体的流动轮廓可近似认为是流体流过螺旋形通道外侧,与本数值模拟中湍流的流动状态及大致流型相同,不同点在于在文献[7]中,螺旋管管径及管间距均小于本数值模拟。从表 1 中可以看出,Realizable $k-\epsilon$ 模型模拟结果和文献中关联式的计算结果最为接近。因此本次模拟采用 Realizable $k-\epsilon$ 模型。

$$Nu = 0.27 Re^{0.63} Pr^{0.36}, Re < 200\ 000. (1)$$

表 1 3 种湍流模型的计算结果

Tab.1 Calculation results of three turbulence models

模型	标准 $k-\epsilon$	湍流 $k-\epsilon$	可实行的 $k-\epsilon$	Nu 关联式 中计算结果
Nu	125.29	116.20	122.83	122.77

2.2 结果分析

(1) 不同管径条件下的结果分析。图 2 所示为垂直流动方向(a)和沿着流动方向(b)截面的速度矢量图,从(a)中可以看出,在垂直流动方向截面上形成大量的速度漩涡、二次流;从(b)中可以看出,不同层之间的流体发生剧烈的相互掺混。流体在流动过程中形成的速度漩涡及流体的相互掺混,对换热管壁附近的流体形成巨大的冲刷作用,使边界层变薄,传热热阻减小。

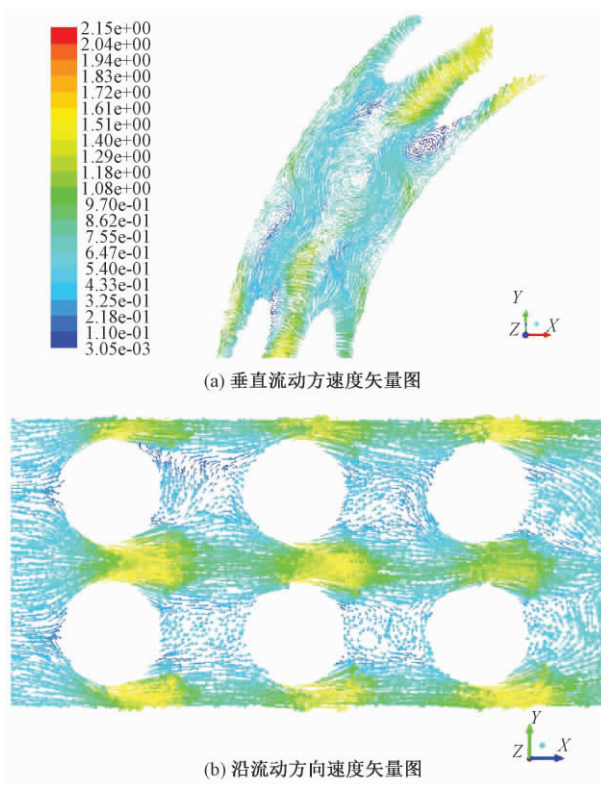


图2 壳侧不同截面的速度矢量图

Fig.2 Velocity vector diagram of different sections of the shell side

图 3 为绕管式换热器在实验的管径范围内的 Nu 的变化曲线,图 4 为场协同数的变化曲线,从图 3、4 中可得努赛尔数 Nu 和场协同数随着换热管管径的增大而减小,所以说管径越小,壳侧流体的换热系数越大。场协同数^[10-11]表示壳侧流体的速度场和温度梯度场协同程度,其值越大说明整个流场的换热效果越好。随着管径变大,场协同数呈逐渐减小趋势,所以说管径越小换热器的换热效果越好。

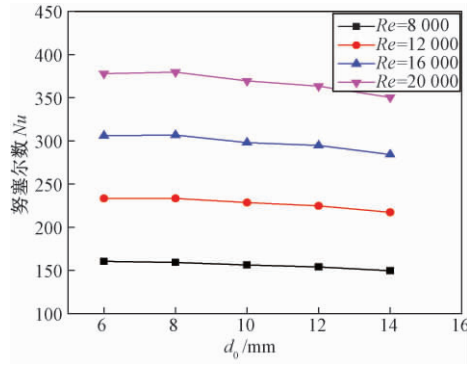
图 3 努塞尔数 Nu 与管径关系

Fig. 3 Influence of diameter on Nusselt number

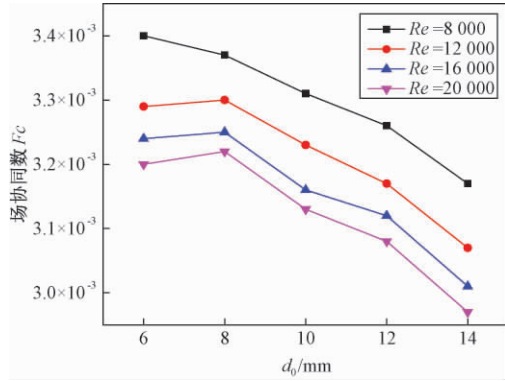


图 4 场协同数与管径关系

Fig. 4 Influence of diameter on synergetic number

焓损失率^[10]和焓热阻^[12-13]分别表示的是换热过程中损失的焓占换热过程流入总焓的比例和单位换热量下的焓耗散. 图 5 是绕管式换热器在不同管径条件下焓损失率随管径和 Re 的变化关系图. 从图 5 可以看出, 随着换热管管径的增大, 焓损失率呈增大的趋势, 其值越大, 说明换热过程中的热量损失越多, 热阻越大, 对换热过程越不利. 该结论同样验证了前文中在研究的管径范围内小管径换热器的换热系数较大的结论.

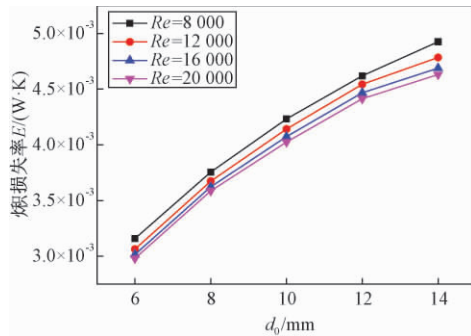
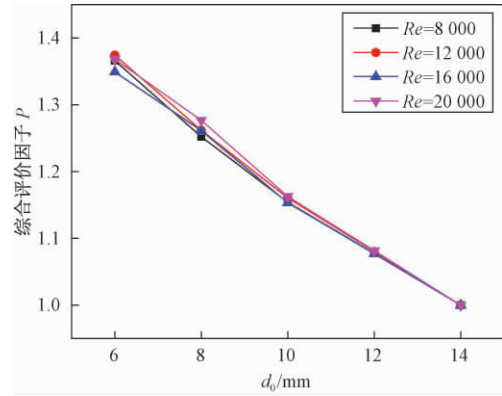


图 5 焓损失率与管径的关系

Fig. 5 Influence of diameter on entransy

图 6 为绕管式换热器的壳侧流体在不同管径下换热器的综合换热性能评价因子 P 的变化曲线. 从图 6 中可以看出, 在相同的 Re 条件下, P 值

随着管径的减小而增大, 说明换热管径越小, 强化换热效果越好, 换热器的综合换热性能越好.

图 6 综合评价因子 P 与管径的关系Fig. 6 Influence of diameter on P

综上可以看出, 换热管径在 $6 \text{ mm} < d_0 < 14 \text{ mm}$ 的范围内, 当 $d_0 = 6 \text{ mm}$ 时, 换热器的综合换热性能最优.

(2) 不同层间距条件下的结果分析. 图 7 为不同层间距的绕管式换热器壳侧流体在不同 Re 条件下努塞尔数 Nu 的变化曲线. 从图 7 可以看出, 在相同 Re 条件下, 不同层间距换热器的 Nu 变化不大, 所以说缠绕管的层间距对 Nu 影响不大. 当层间距相同时, Nu 随 Re 的增大呈变大趋势, 因为当 Re 增大时, 流体速度变大, 流体在管壁附近的冲刷作用增强, 边界层变薄, 从而达到强化传热的效果. 图 8 为绕管式换热器在不同层间距条件下场协同数 F_c 的变化曲线. 从图 8 中可以看出, 在一定 Re 的情况下, 随着层间距 S_2 变大, 场协同数 F_c 先变大后减小, 当 S_2 为 3 mm 时, F_c 有极大值, 此时换热效果最好.

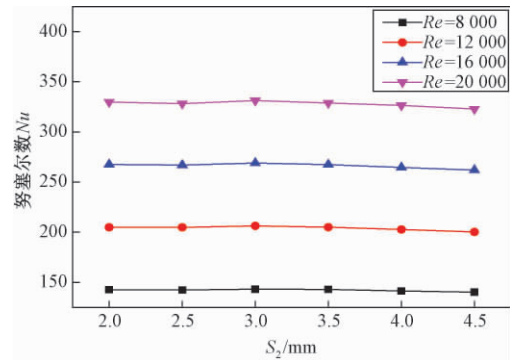
图 7 Nu 与层间距关系

Fig. 7 Influence of thickness bar on Nusselt number

图 9 为绕管式换热器层间距 S_2 和 Re 与综合换热性能评价因子 P 的变化关系图. 从图 9 可以看出, 在一定 Re 的情况下, 当层间距 S_2 增大时, P 值先达到最大值, 而后逐渐减小, 最大值在

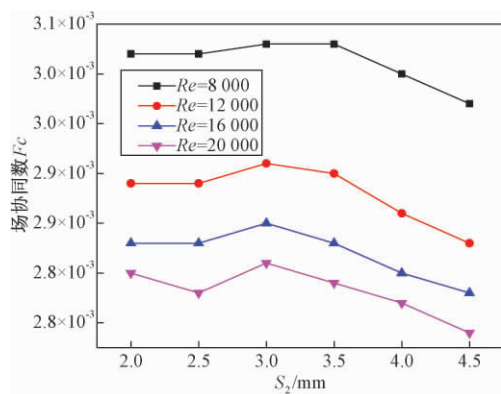
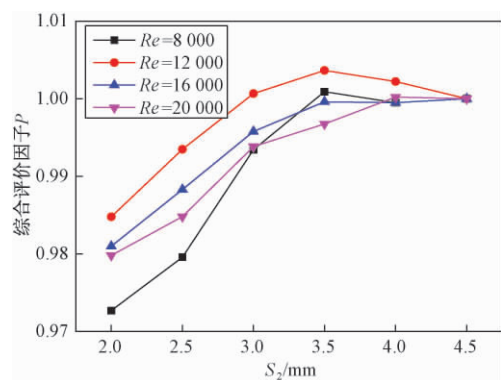


图 8 场协同数与层间距关系

Fig. 8 Influence of thickness bar on synergetic number

图 9 综合评价因子 P 与层间距的关系Fig. 9 Influence of thickness bar on P

3.5 mm 处出现,此时换热性能最优。

(3) 不同轴间距条件下的结果分析. 图 10 为绕管式换热器轴向间距 Z 和 Re 与 Nu 的变化关系图. 从图 10 中可知,在一定 Re 的情况下, Nu 随 Z 值的增大而增大; 在相同轴向间距的情况下,随着 Re 的变大, Nu 逐渐变大. Nu 越大表示换热器的换热效果越好,所以,绕管式换热器的轴向间距越大对换热越有利。

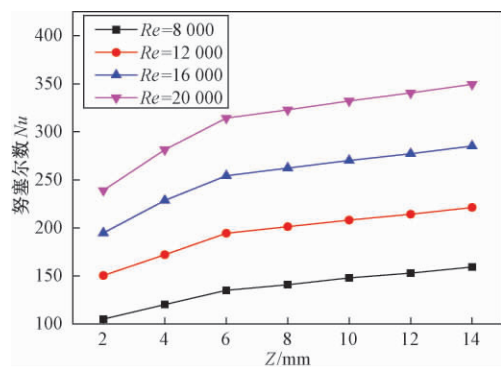
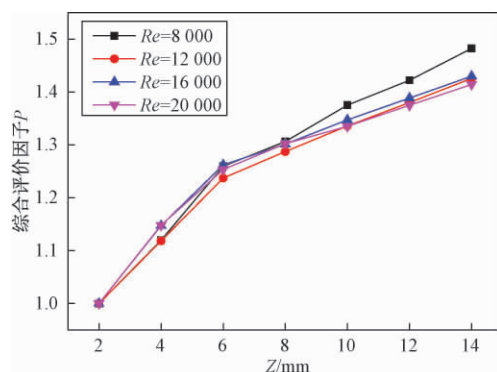
图 10 Nu 随轴向间距的变化关系图

Fig. 10 Influence of tube pitch on Nusselt number

图 11 为绕管式换热器轴向间距 Z 和 Re 与综合换热性能评价因子 P 的变化关系图. 从图 11 中

可知,在相同 Z 值的情况下,随着 Re 增大, P 值变化不明显,在一定 Re 的情况下,随着轴向间距 Z 的变大, P 值逐渐增大,当 $Z = 14$ mm 时达到最大值,此时换热性能最优。

图 11 P 值随轴向间距的变化曲线图Fig. 11 Influence of tube pitch on P

3 绕管式换热器模拟结果实验验证

为了检验前文中数值模拟方法的正确性,笔者搭建了绕管式换热器实验台,并对其换热性能进行实验研究. 通过数值模拟结果和实验结果的对比,证明数值模拟方法的准确性。

3.1 绕管式换热器换热性能实验测试

绕管式换热器性能实验测试平台如图 12 所示,本测试平台主要由冷水循环系统、蒸汽循环系统、数据采集系统和换热装置系统 4 个模块组成. 热源为蒸汽,冷却介质为温度为 20 ℃ 的自来水,实验过程中改变热侧蒸汽和冷水侧的冷水流量,通过数据采集系统收集管、壳侧进出口温度和压力变化,计算出换热器的传热系数,从而达到测试换热性能的目的。



图 12 换热器性能实验测试平台

Fig. 12 Experimental test platform for heat exchanger

3.2 模拟与实验结果对比分析

设定换热器壳侧水流量为 1.5 ~ 7 m³/h,壳侧水流速为 0.23 ~ 1.1 m/s,壳侧水温为 293 K,此时壳侧冷水 Re 在 2 800 ~ 13 000 范围内变化,

图 13 为绕管式换热器温度变化量的实验值和模拟值的对比图。从图 13 可知,当 Re 相同时,实验值均高于模拟值,相差 $1 \sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$,造成误差的原因是:模拟过程中设置壁面边界条件是绝热的,而实验中会有热量向外界传递,二者相对误差在 $17\% \sim 26\%$ 之间,在工程应用上数值模拟和实验结果之间的误差在 $\pm 30\%$ 以内认为是可以接受的^[14],且随着 Re 变大,误差逐渐减小。

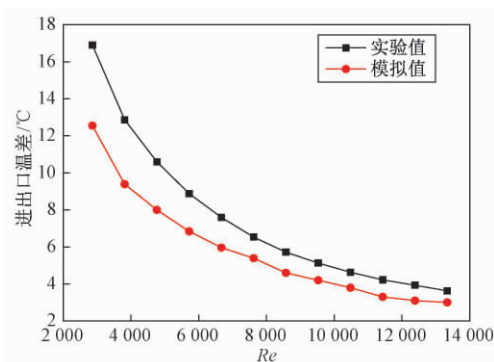


图 13 温度变化量随 Re 变化曲线图

Fig. 13 Influence of Reynold number on temperature difference

图 14 为绕管式换热器压力降的实验值和模拟值的对比图。从图 14 中可知,当 Re 相同时,压力降模拟结果与实验数据相差 $0.8 \sim 1.2\text{ kPa}$ 。

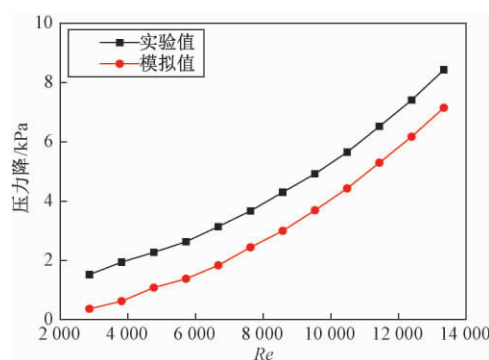


图 14 压力降随 Re 变化曲线图

Fig. 14 Influence of Reynold number on pressure drop

通过本节对绕管式换热器的传热性能的模拟结果与实验数据进行对比,发现壳侧流体温度变化、压力降实验和模拟结果的相对误差在工程应用的允许区间内,证明前文中的 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型对绕管换热器壳侧流体流动及传热过程数值模拟的准确性。

4 结论

(1) 模拟研究表明,在垂直流体流动方向截面上,壳侧流体会形成大量的速度漩涡、二次流,不同层

之间的流体会发生剧烈的相互掺混。

(2) 在研究范围内,随着换热管径增大、换热管轴向间距减小,换热器的综合换热评价因子逐渐变小,随着层间距增大,综合换热评价因子呈先增大后减小的趋势。

(3) 实验研究表明,在相同 Re 下,模拟值比实验值整体偏低,温度差值、压力降模拟结果与实验数据相差 $1 \sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.8 \sim 1.2\text{ kPa}$ 。

参考文献:

- [1] 吴金星,李亚飞,张灿灿,等. 绕管式换热器的结构形式分析及应用前景 [J]. 压力容器,2014,31(2): 38-42.
- [2] 阳大清,周红桃. 绕管式换热器壳侧流场流动与传热的数值模拟研究 [J]. 压力容器,2015,32(11): 40-46.
- [3] 魏江涛,曾桃. 缠绕管换热器壳程传热特性的数值研究 [J]. 化学工程与装备,2015(2): 21-23.
- [4] 贾金才. 几何参数对绕管式换热器传热特性影响的数值研究 [J]. 流体机械,2011,39(8): 33-37.
- [5] LU X, ZHANG G P, CHEN Y T, et al. Effect of geometrical parameters on flow and heat transfer performances in multi-stream spiral-wound heat exchangers [J]. Applied thermal engineering, 2015, 89: 1104-1116.
- [6] GHORBANI N, TAHERIAN H, GORJI M, et al. Experimental study of mixed convection heat transfer in vertical helically coiled tube heat exchangers [J]. Experimental thermal & fluid science, 2010, 34(7): 900-905.
- [7] LU X, DU X P, ZENG M, et al. Shell-side thermal-hydraulic performances of multilayer spiral-wound heat exchangers under different wall thermal boundary conditions [J]. Applied thermal engineering, 2014, 70(2): 1216-1227.
- [8] 古新,秦晓柯,王永庆,等. 倾斜折流栅式换热器壳程流体流动与传热特性 [J]. 化工进展,2017,36(10): 3584-3589.
- [9] KHARAT R, BHARDWAJ N, JHA R S. Development of heat transfer coefficient correlation for concentric helical coil heat exchanger [J]. International journal of thermal sciences, 2009,48(12): 2300-2308.
- [10] HE Y L, TAO W Q. Numerical studies on the inherent interrelationship between field synergy principle and entransy dissipation extreme principle for enhancing convective heat transfer [J]. International journal of heat and mass transfer, 2014,74: 196-205.
- [11] 过增元. 换热器中的场协同原则及其应用 [J]. 机

- 械工程学报, 2003, 39(12): 1-9.
- [12] CHEN Q, LIANG X G, GUO Z Y. Entransy theory for the optimization of heat transfer—A review and update [J]. International journal of heat and mass transfer, 2013, 63(15): 65-81.
- [13] GUO Z Y, ZHU H Y, LIANG X G. Entransy—a physical quantity describing heat transfer ability [J]. International journal of heat and mass transfer, 2007, 50(13): 2545-2556.
- [14] 吴金星, 王超, 王明强, 等. 内置扭带管内湍流流动与传热数值模拟 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2017, 38(3): 10-14.

Study on Numerical Simulation and Experiment on Fluid Flow and Heat Transfer in Shell Side of the Spiral Tube Heat Exchanger

WU Jinxing, LIU Shaolin, PENG Xu

(Research Center of Energy-saving Technology of School of Chemical and Energy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The two layers tube model of spiral tube heat exchanger with different tube diameter ($6\text{ mm} < d_0 < 14\text{ mm}$), different thickness of space bar ($2\text{ mm} < S_2 < 4.5\text{ mm}$), and different tube pitch ($2\text{ mm} < Z < 14\text{ mm}$) was studied for the structure parameters of the spiral tube heat exchanger. Water was used as the heat transfer fluid, and the numerical simulation research about the characteristics of heat transfer and flow of the shell side fluid of the spiral tube heat exchanger was carried out by using Realizable $k-\varepsilon$ model of Fluent software. The influence of tube diameter, thickness of space bar and tube pitch on Nusselt number, synergetic number, entransy loss rate, entransy thermal resistance, and comprehensive heat transfer performance evaluation factor was analyzed. The experimental model was made by combining the numerical model; and the performance test was carried out. The research results showed that the comprehensive heat transfer performance evaluation factor of the spiral tube heat exchanger could reach the maximum when the pipe diameter was 6 mm, the thickness bar was 3.5 mm, and tube pitch was 14 mm. The difference between the simulation results and the experimental data of temperature and pressure drop was $1 \sim 4\text{ }^\circ\text{C}$, $0.8 \sim 1.2\text{ kPa}$.

Key words: spiral tube heat exchanger; heat transfer enhancement; numerical simulation; heat transfer performance judgment

(上接第 76 页)

Study on Vibration Fatigue Test and Numerical Simulation of EMU Tank

WANG Jianming, LI Xiaoxiao

(School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Welded structures were commonly used for railway vehicles and equipment. Fatigue failure of welded structures with fluctuating loads usually occurred at weld seams. So Random Vibration Bench Test and Numerical Simulation for Fatigue Life of Welded EMU Tank were studied. Through the bench test, the acceleration power spectrum of the structure was input, simulating the random vibration of water tank fatigue conditions to get the tank vibration time domain signal. It was regarded as a fatigue simulation of the input load. The finite element model of tank and weld was established by shell element, and the internal liquid was equivalent by the additional mass method. According to BS7608 standard, different weld grade $S-N$ curves were selected, prediction of fatigue life of water tank is based on nominal stress approach under test conditions. The simulation results show that fatigue failure site and fatigue life of weld in tank was similar to those that in the experimental tests of random vibration. This research proved the correctness of the fatigue life prediction method of weld, and could provide a theoretical reference for the fatigue design of the welded structures for EMU tank.

Key words: the fatigue life of weld; nominal stress approach; vibration test; $S-N$ curves; simulation

文章编号: 1671-6833(2019)01-0083-04

喷丸表面的最佳粗糙度参数与材料硬度的关系

何声馨, 刘坤坤, 王 锐, 张二亮, 李延民

(郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 对喷丸表面的复杂轮廓特征进行分析和表征, 选取最能表征表面形貌的三维粗糙度参数, 并探究其与材料硬度之间的关系. 采用相同的喷丸工艺参数对 316、420、2205 3 种不锈钢进行喷丸处理, 采用 27 个常用粗糙度参数进行表征, 通过方差分析, 选出最优形貌参数 S_q , 再结合 S_a 进行多尺度分析, 得出最优评价尺度为 800 μm . 测量 3 种材料的原始表面硬度, 结合各自的 S_q 值进行分析. 结果表明, S_q 是最优表面形貌参数, 其最能表征喷丸表面的复杂轮廓特征, S_q 与原始硬度之间存在反比关系, 随材料硬度的增加而减小.

关键词: 喷丸; 三维粗糙度; 硬度; 多尺度分析.

中图分类号: TG580.692

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.04.009

0 引言

喷丸硬化是一种常用的机械表面处理方法, 广泛应用于汽车和航空航天领域, 以提高长期服役于高应力工况下金属零件的抗疲劳性能, 如飞机引擎压气机叶片、汽车传动系统零件等的抗疲劳性能^[1-3]. 在喷丸过程中, 无数钢丸连续且高速喷射, 锤打到零件表面, 从而在表面产生残余压应力层. 每当一颗钢丸撞击金属零件表面上时, 都会形成一个凹陷, 改变材料表面形貌. 在喷丸技术的研究过程中, 研究人员对使用的各种表面变形技术和表面变形材料的表面粗糙度的演变的研究越发感兴趣, 例如喷丸硬化、球抛光、激光冲击喷丸^[4-6]和超声波喷丸硬化^[7-9], 进行了特定变形过程加工参数对材料表面粗糙度影响的研究, 例如 Mordyuk 等^[10]评估了超声喷丸硬化的持续时间对材料粗糙度的影响.

表面测量学是当今制造业一个非常重要的领域, 对于精密仪器的零部件, 其表面测量就显得尤为重要. 二维平均粗糙度是描述粗糙度时最常使用的参数. 然而, 这一参数无法全面地表征复杂表面轮廓的所有特征, 因此, 对三维粗糙度评定参数的研究就成了必然, 并且已成为当今粗糙度研究领域中的一个重要方向. 同样地, 表面形貌从传

统的二维表征转变为三维综合表征, 研究人员针对各种特定的表面应用, 提出了许多三维粗糙度参数, 形成了所谓的“参数爆炸”的局面^[11-12], 这妨碍了表面形貌评价工作的开展. 因此, 需要选择最合适的表面粗糙度参数来表征已经表面变形的材料的表面性状.

本研究采用多尺度分析的方法, 搜索最佳的表面粗糙度参数和最佳评价尺度. 多尺度分析方法可以更好地反映材料的表面性能, 并找到最佳评价尺度, 同时有助于寻找喷丸表面最佳粗糙度表征参数与材料硬度之间的关系.

1 材料和方法

1.1 材料和加工参数

实验使用的材料为 316、2205、420 不锈钢, 样品规格为 25 mm × 10 mm × 10 mm. 其化学成分(以质量分数计)如表 1 所示.

首先将所有样品研磨、抛光以获得镜面效果, 然后使用转台式喷丸机对试样进行喷丸处理. 喷丸工艺参数如下: 压力 0.15 MPa, 流量 5 kg/min, 丸粒参数 CCW23 / 0.6 mm / 670 HV, 角度 85°, 喷丸距离 220 mm, 覆盖率 100%. 喷丸强度: 316 为 0.086 mmA; 420 为 0.088 mmA; 2205 为 0.089 mmA.

收稿日期: 2018-01-12; 修订日期: 2018-04-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51650110502); 河南省高等学校重点科研项目(15A460030)

作者简介: 何声馨(1982—), 女, 马来西亚人, 郑州大学副教授, 博士, 主要研究方向为抗疲劳制造, E-mail: shein0807@qq.com.

表 1 材料化学成分
Tab.1 Chemical composition of material

不锈钢牌号	C	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	P	S	N
316	≤0.08	16.0~18.0	10.0~14.0	2.0~3.0	1.0	2.0	0.045	0.030	—
420	0.04	16.21	0.15	—	0.30	0.35	0.015	0.002	—
2205	0.021	22.10	5.16	3.06	0.51	1.22	0.022	0.010	0.17

1.2 实验过程

使用三维非接触式光学轮廓仪(NPFLEX, Bruker Nano Inc, USA) 测量喷丸表面粗糙度, 选择 2.5 倍目镜, 测量工作距离为 3.48 mm, 使用白光光源, 扫描速度为 1 倍. 为获取可靠的测量数据和统计特征, 对每个试样的表面形貌进行多次采样, 以 1.2 mm×0.9 mm 的区域作为基本图元, 由 16 个基本图元以 20% 的重叠度拼接在一起, 构成尺寸为 2.2 mm×1.8 mm 的大尺寸拼接测量图像, 每个试样均拍摄 10 张大尺寸拼接测量图像.

使用微米力学测试系统(PB1000, NANOVEA, USA), 在室温下对每个未喷丸样品表面分别进行 3 次压痕测试, 得到原材料硬度值.

1.3 结果测量

材料表面的轮廓特征在数学本质上可视为一

个非平稳随机过程, 其由不同频带的谐波分量构成, 具有多尺度特征. 表面形貌中的粗糙度、波纹度和形状误差成分主要区别在于其所占的频带不同, 利用不同的带通滤波器可以将粗糙度、波纹度和形状误差从表面形貌中分离出来. 通过非下采样 Contourlet 分解变换, 表面形貌可被分解成不同尺度、不同方向的子带, 各尺度上的子带表示相应频带的表面形貌信息^[13]. 取出的表面形貌的微观几何特征用于各种形貌评定参数的计算, 这有效克服了传统评定方法单一性缺陷.

本研究为了描述试样的形貌, 使用商用表面分析软件 MountainsMap 进行分析处理, 得到表面形貌图片, 从中选择最佳评价尺度, 并计算了 27 个表面粗糙度参数, 主要分为: 幅度参数^[14]、功能体积参数^[15]、空间参数^[15]、混合参数^[14]、特征参数^[15], 具体如表 2 所示.

表 2 表面形貌参数
Tab.2 Surface roughness parameters

幅度参数	功能体积参数	空间参数	混合参数	特征参数
算术平均偏差 S_a ; 均方根偏差 S_q ; 高度分布偏度 S_{sk} ; 高度分布峭度 S_{ku} ; 峰顶最大高度 S_p ; 谷底最大深度 S_v ; 十点高度 S_z .	材料体积 V_m ; 空隙体积 V_v .	最速衰减自相关长度 S_{al} ; 表面的纹理方向 S_{dl} ; 表面的结构形状比率 S_{dr} .	表面均方根斜率 S_{dq} ; 展开界面面积比率 S_{dr} .	峰值密度 S_{pd} ; 定义区域内峰值的主曲率的算术平均值 S_{pc} ; 五点山谷高度 S_{sv} .

2 结果与讨论

2.1 最优形貌参数的选择

采用方差分析^[16] 确定描述喷丸表面的最优形貌参数. 获得各形貌参数的统计量 F 值, 对得到的 F 值进行排序, 得到如图 1 所示的统计量的数值对形貌参数的排序. 由图中可知排序第一的参数是均方根偏差 S_q , 表明 S_q 是表征喷丸表面形貌的最优参数.

2.2 最佳评价尺度的选择

使用表面分析软件 MountainsMap 分析处理得到的表面形貌图片, 填充非测量点, 去除形状并设置界限. 在此基础上, 选择不同的评价尺度并

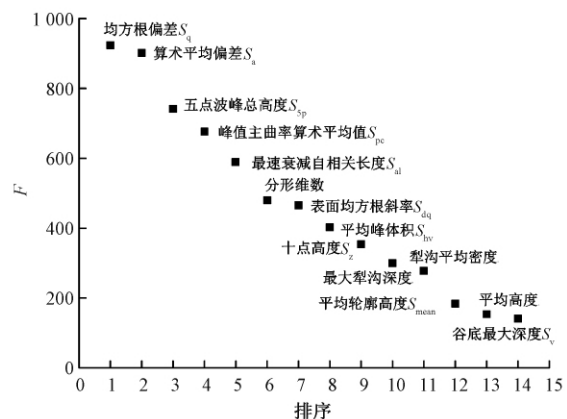


图 1 表征喷丸表面的形貌参数的排序

Fig.1 Classification order of the morphological parameters of the shot peening surface

计算其对应的表面三维粗糙度参数组. 选择最基本的两个粗糙度参数 S_q (均方根偏差) 和 S_a (算术平均偏差), 研究其与评价尺度之间的关系, 结果如图 2 所示. 从图 2 中可以看出, 当评价尺度小于 $800\ \mu\text{m}$ 时, S_q 和 S_a 的数值随着评价尺度的增大而明显增大, 当评价尺度大于 $800\ \mu\text{m}$ 时, S_q 和 S_a 趋于稳定, 不再有显著变化. 故选择 $800\ \mu\text{m}$ 作为最佳评价尺度.

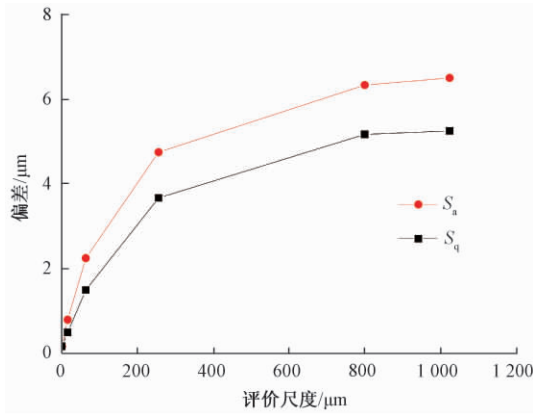


图 2 S_a 和 S_q 随评价尺度的变化

Fig. 2 Varieties of S_a and S_q with evaluation scales

2.3 表面纹理处理

在最佳评价尺度 $800\ \mu\text{m}$ 下生成 3D 表面图像并对其进行 motif 分形处理, 结果如图 3 所示. 分析表明, 喷丸处理后的样品, 在同样大小的观测区域内, 316 的撞击坑明显偏深, 平均深度为 $5.34\ \mu\text{m}$, 其次为 420, 深度为 $5.09\ \mu\text{m}$, 2205 不锈钢最浅, 深度为 $4.68\ \mu\text{m}$.

2.4 硬度测量

使用微米力学测试系统 (PB1000, NANOVEA, USA), 在室温下对每个未喷丸样品表面分别进行 3 次硬度测量, 求其平均值, 测量结果如表 3 所示. 因此, 316、420、2205 不锈钢的原始硬度分别为 224、325、336 Hv.

表 3 样品材料原始硬度

Tab. 3 Hardness of sample material Hv

不锈钢 牌号	第一次测 量硬度	第二次测 量硬度	第三次测 量硬度	平均测 量硬度
316	226	224	223	224
420	333	326	315	325
2205	326	339	343	336

2.5 最优形貌参数 S_q 与硬度的关系

均方根偏差 S_q 属于幅度参数. 综合分析每个试样拍摄的 10 张大尺寸拼接图像, 提取每张图像中的 S_q 数值, 与样品材料原始硬度结合起来进行

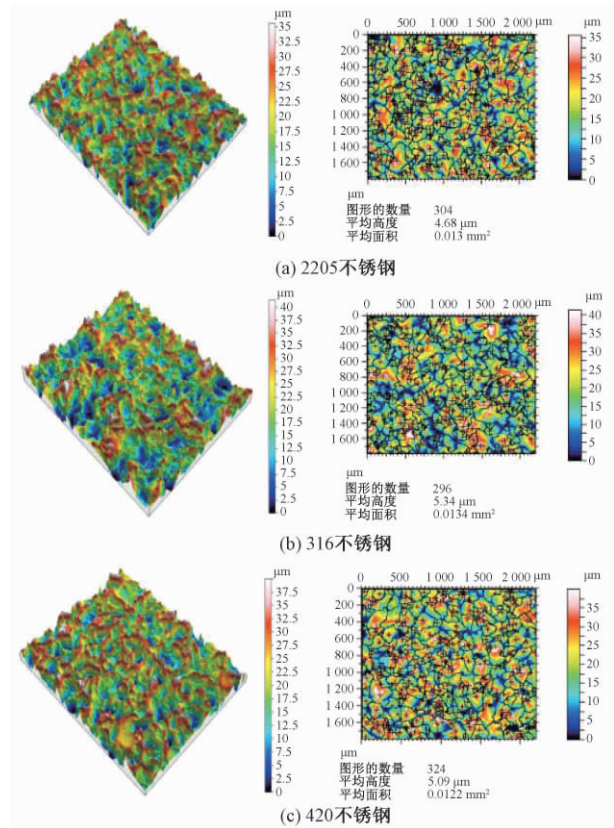


图 3 3 种试样的 3D 表面图像和分析

Fig. 3 3D images and corresponding graphical analysis of three samples

分析, 分析结果如图 4 所示, 316、420 和 2205 3 种不锈钢的 S_q 分别为 9.70 、 8.61 、 $6.96\ \mu\text{m}$. 由图 4 可以看出, S_q 与未经处理的原始材料硬度之间存在线性关系, 随着材料硬度的增加, S_q 会随之减小.

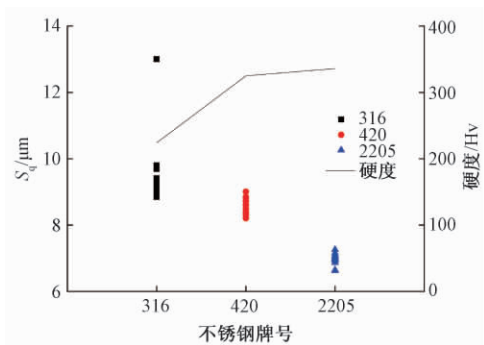


图 4 最优形貌参数 S_q 与硬度之间的关系

Fig. 4 The relationship between the optimal morphological parameters S_q and the hardness

3 结论

笔者基于多尺度分析了不同型号不锈钢经喷丸处理后表面的最优形貌表征参数的选择, 考虑了 6 个评价尺度和 27 个常规的三维粗糙度参数. 以不同评价尺度下各粗糙度参数的变化规律和表

面形貌图像选取最优评价尺度 $800\ \mu\text{m}$,并在最优评价尺度下,采用方差分析确定描述喷丸表面的最优形貌参数.根据统计量 F 的数值对形貌参数进行排序.排序第一的参数是均方根偏差 S_q ,表明 S_q 是表征喷丸表面形貌的最优参数,与广泛使用的算术平均偏差 S_a 相比, S_q 能更好地刻画喷丸表面形貌.同时发现 S_q 与未经处理的原始材料硬度之间存在反比关系,随着材料硬度的增加 S_q 会随之减小.

参考文献:

- [1] LIU K K, HILL M R. The effects of laser peening and shot peening on fretting fatigue in Ti-6Al-4V coupons [J]. Tribology international, 2009, 42(9): 1250 - 1262.
- [2] GAO Y K, WU X R. Experimental investigation and fatigue life prediction for 7475-T7351 aluminum alloy with and without shot peening-induced residual stresses [J]. Acta material, 2011, 59(9): 3737 - 3747.
- [3] 程远存. W6Mo5Cr4V2 钢传动轴强度与疲劳寿命分析[D]. 武汉: 武汉理工大学材料科学与工程学院, 2010.
- [4] MASAKI K, OCHI Y, MATSUMURA T, et al. Effects of laser peening treatment on high cycle fatigue properties of degassing-processed cast aluminum alloy [J]. Materials science engineering A, 2007, 468 - 470: 171 - 175.
- [5] MOSTAFA A M, HAMEED M F, OBAYYA S S. Effect of laser shock peening on the hardness of AL - 7075 alloy [J/OL]. Journal of king saud university-science, (2017-01-07) [2018-02-03]. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2017.07.012>.
- [6] LU Q F, SU Q, WANG F, et al. Influence of laser shock peening on irradiation defects in austenitic stainless steels [J]. Journal of nuclear materials, 2017, 489: 203 - 210.
- [7] LIU G, LU J, LU K. Surface nanocrystallization of 316L stainless steel induced by ultrasonic shot peening [J]. Materials science and engineering A, 2000, 286 (1): 91 - 95.
- [8] PANDEY V, SINGH K J, CHATTOPADHYAY K, et al. Influence of ultrasonic shot peening on corrosion behavior of 7075 aluminum alloy [J]. Journal of alloys and compounds, 2017, 723: 826 - 840.
- [9] ZHU L H, GUAN Y J, WANG Y J, et al. Influence of process parameters of ultrasonic shot peening on surface roughness and hydrophilicity of pure titanium [J]. Surface & coatings technology, 2017, 317: 38 - 53.
- [10] MORDYUK B N, PROKOPENKO G I. Ultrasonic impact peening for the surface properties' management [J]. Journal of sound and vibration, 2007, 308: 855 - 866.
- [11] 李志强. 表面微观形貌的测量及其表征[D]. 重庆: 重庆大学机械工程学院, 2006.
- [12] 李玉玺. 三维表面粗糙度参数表征及其软件系统实现[D]. 洛阳: 河南科技大学机电工程学院, 2011.
- [13] 炊明伟, 冯有前, 王崴, 等. 非下采样 Contourlet 变换在表面形貌评定中的应用[J]. 表面技术, 2013, 42 (1): 123 - 126.
- [14] 李惠芬, 蒋向前, 李柱. 三维表面功能评定技术发展综述[J]. 工具技术, 2002, 36(2): 8 - 11.
- [15] International organization for standardization: ISO standard 25178 [S]. ISO copyright office: Switzerland, 2012.
- [16] 田兵. 单因素方差分析的数学模型及其应用[J]. 阴山学刊, 2013, 27 (2): 24 - 27.

The Relationship Between the Optimum Roughness Parameters and the Hardness of the Material

HE Shengxin, LIU Kunkun, WANG Rui, ZHANG Erliang, LI Yanmin

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

Abstract: To analyze and characterize the complex profile of shot peening surface, the three-dimensional roughness parameter was selected, which could best characterize the surface morphology, and the relationship between the roughness parameters and the hardness of the material was explored. Three types of stainless steel (respectively 316, 420 and 2205) were shot under the same shot peening parameters. 27 commonly used three-dimensional roughness parameters were used to characterize the surface morphology. The optimal surface morphological parameter was selected by variance analysis. Then the optimal evaluation scale ($800\ \mu\text{m}$) was identified by multi-scale analysis combined with S_a . The conclusion that S_q was the optimal surface topography parameter, which best characterized the complex contours of the shot peening surface. There was inverse relation between S_q and the hardness of untreated raw material. With the hardness of the material increasing, S_q decreased.

Key words: shot peening; three-dimensional roughness; hardness; multi-scale analysis

文章编号: 1671-6833(2019)01-0087-05

氧化石墨烯/丁苯橡胶复合材料力学性能的分子动力学模拟

孙 斌, 郭 伟, 顾建兵, 米立伟

(中原工学院 材料与化工学院, 河南 郑州 451191)

摘 要: 利用分子动力学模拟和 ReaxFF 反应力场, 考察了加入氧化石墨烯后丁苯橡胶(SBR)的力学性能, 包括杨氏模量、硬度、摩擦性能等. 模拟结果表明, 加入氧化石墨烯后, 复合材料的杨氏模量相比于纯丁苯橡胶提高 77%, 硬度提高 20.30%, 摩擦系数降低 18%, 磨损率降低 38%. 通过计算摩擦过程中氧化石墨烯和丁苯橡胶之间氢键能和结合能的变化, 提出了摩擦性能增强的机制. 在摩擦过程中, 丁苯橡胶基体和氧化石墨烯之间的结合能逐渐增大, 结合能增大的原因之一是氢键作用的增强. 结合能的增大使得应力能够很好地从丁苯橡胶基体转移到强度更高的氧化石墨烯上, 从而提高复合材料的摩擦性能.

关键词: 氧化石墨烯; 丁苯橡胶; 分子动力学; 力学性能; 复合材料

中图分类号: TB332

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2019.01.008

0 引言

近年来, 碳基纳米填料如碳纤维、碳纳米管、石墨烯等广泛地应用到聚合物复合材料的力学改性中. 其中, 氧化石墨烯(graphene oxide, GO) 作为一类新型的纳米填料, 越来越受到研究人员的关注^[1-2]. 氧化石墨烯是石墨烯的衍生物, 和纯石墨烯相比, 它含有许多官能团, 如羧基、羟基、羰基等. 这些含氧官能团的存在, 使得氧化石墨烯片能够很好地分散在水和聚合物基质中, 并且能够保留材料的力学性能^[3].

丁苯橡胶是应用最广泛的通用橡胶品种, 广泛应用于轮胎、胶带、电线电缆、医疗器具等领域^[4]. 但到目前为止, 关于氧化石墨烯/丁苯橡胶纳米复合材料体系的研究非常少. 笔者利用分子动力学模拟和 ReaxFF 反应力场, 考察了氧化石墨烯/丁苯橡胶纳米复合材料的拉伸性能、硬度和耐摩擦性能. 和 Frankland、Chawla 等^[5-6]的研究相比, 笔者的研究的创新之处有两个方面. 一方面是使用 Aryanpour 等^[7]开发的 ReaxFF 反应力场, 它能够准确的模拟化学反应中键的生成和断裂. 大量的研究表明, ReaxFF 反应势函数在模拟聚合物体系力学性能方面具有较高的准确性^[8]. 另一方面是使用氧化石墨烯

作为增强材料, 而不是石墨烯或氢功能化石墨烯.

1 计算方法

1.1 模型的建立

利用 Materials Studio 软件, 笔者构建了纯丁苯橡胶和氧化石墨烯/丁苯橡胶复合材料两种模型, 如图 1(a) 和 1(b) 所示. 模拟盒子的尺寸为 $3.50\text{ nm} \times 3.50\text{ nm} \times 3.50\text{ nm}$. 纯丁苯橡胶模型包含 10 条丁苯橡胶分子链, 每条分子链包含 30 个结构单元, 其中 1,3-丁二烯和苯乙烯单体的比例为 1:1^[9]. 图 1(c) 为丁苯橡胶结构简式. 纯丁苯橡胶模型由 Materials Studio 软件的 Amorphous Cell 模块构建完成, 结构为非晶态, 密度设定为 0.98 g/cm^3 . 在丁苯橡胶模型的中间, 删去一定厚度 (0.70 nm) 的原子, 将氧化石墨烯片嵌入其中, 构建了氧化石墨烯/丁苯橡胶复合材料模型, 如图 1(b) 所示. 为了使氧化石墨烯较好地与丁苯橡胶复合, 氧化石墨烯的尺寸设定为 $2.50\text{ nm} \times 2.50\text{ nm}$, 包含有羟基 ($-\text{OH}$)、羰基 ($-\text{C}=\text{O}-$)、羧基 ($-\text{COOH}$) 和环氧基 ($-\text{CH}(\text{O})\text{CH}-$) 等含氧基团, 见图 1(d). 各种基团的数量和分布见参考文献 [9]. 大量的实验分析表明, 图 1(d) 中氧化石墨烯的结构更具有普遍性^[10].

收稿日期: 2018-08-20; 修订日期: 2018-10-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21671205; U1407103)

作者简介: 孙斌(1976—), 男, 河南郑州人, 中原工学院教授, 博士, 主要研究方向为材料物理和材料计算, E-mail: sunbin7610@sina.com.

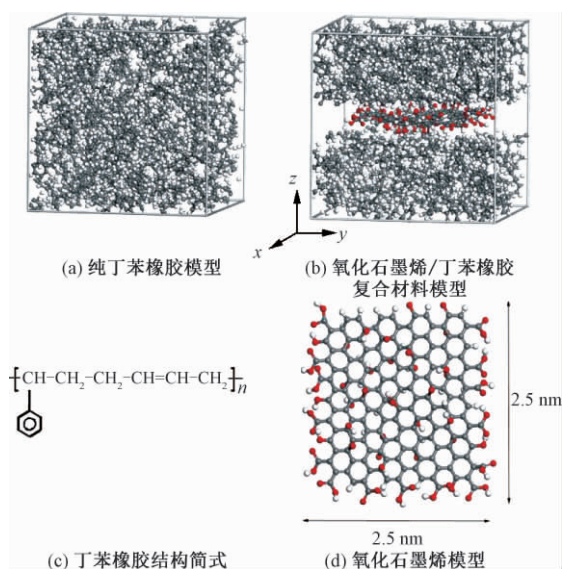


图1 计算模型

Fig.1 Calculation model

1.2 单轴拉伸模拟

分子动力学模拟软件 Lammmps 具体的模拟步骤如下: 模型建立后, 首先利用共轭梯度法对模型进行能量最小化处理, 再利用 Nose-Hoover 热浴法控制体系在室温 293 K 下弛豫 50 ps 达到平衡态, 同时控制体系各方向上压力为 1 个大气压. 对弛豫后的模型沿 y 轴方向施加均匀的拉伸应变, 应变率为 $1 \times 10^8 /s$, 每次应变为 0.000 1, 每加载一次应变后弛豫 5 000 步, 分子动力学模拟的时间步长为 0.10 fs, 即弛豫时间为 0.50 ps. 重复此加载和弛豫过程, 直到应变达到 60%. 在拉伸过程中只对拉伸方向(y 轴) 设置周期性边界, 其他方向(x 轴和 z 轴) 为自由边界. 体系应力的计算使用的是维里应力计算方法^[11]:

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{\alpha=1}^N \left(\frac{1}{2} \sum_{\beta=1}^N r_{\alpha\beta}^i F_{\alpha\beta}^j - m^\alpha v_i^\alpha v_j^\alpha \right), \quad (1)$$

式中: i, j 表示应力的方向; α, β 代表原子序号; m 和 v 分别是原子 α 的质量和速度; $r_{\alpha\beta}$ 和 $F_{\alpha\beta}$ 分别代表原子 α 和 β 之间的距离和力; V 是系统总体积; N 是体系内的原子个数.

1.3 硬度和摩擦性能的模拟

为了全面考察加入氧化石墨烯后丁苯橡胶力学性能的变化, 笔者计算了纯丁苯橡胶和氧化石墨烯/丁苯橡胶复合材料两种模型的硬度和摩擦性能. 采用的模拟方法见参考文献[7], 具体模拟步骤如下: 首先建立了铁针-丁苯橡胶-铁块模型, 如图2所示. 在图2中, 最上面的是铁针, 尺寸为 $0.40 \text{ nm} \times 0.40 \text{ nm} \times 2 \text{ nm}$. 中间是构建好的纯丁苯橡胶模型, 见图2(a), 氧化石墨烯/丁苯橡胶复

合材料模型, 见图2(b). 这里的纯丁苯橡胶和复合材料模型已经进行过1.2节所述的能量最小化和弛豫平衡处理. 图2中的最下层是铁块, 尺寸为 $3.50 \text{ nm} \times 3.50 \text{ nm} \times 1 \text{ nm}$. 在模拟中, 各个方向均采用周期性边界条件.

在进行硬度模拟时, 对铁针沿 $-y$ 方向施加3个大小不同的冲击载荷, 分别是 0.12、0.24 和 0.36 kJ/(mol·nm). 然后测量铁针压入丁苯橡胶中的深度, 把此作为压痕深度 h .

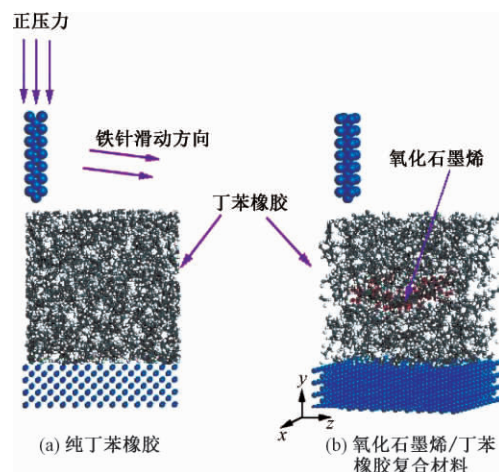


图2 用于硬度和摩擦力计算的铁针-丁苯橡胶-铁块3层模型胶复合材料

Fig.2 A three-layer model of iron needle-SBR-iron block for hardness and friction calculation

在进行摩擦性能模拟时, 首先将铁针沿 $-y$ 方向缓慢移动到聚合物表面, 对铁针施加一定的正压力使铁针同时向 $-y$ 方向和 z 方向移动, 移动速度分别是 0.000 1 nm/fs 和 0.000 25 nm/fs. 在移动过程中, 记录下铁针最顶部原子的受力 (f_x, f_y, f_z), 根据公式 $\mu = F/N$ (μ 为摩擦系数, F 为摩擦力, N 为正压力) 计算出摩擦系数. 摩擦过程结束后, 由于吸附作用, 铁针会将一部分丁苯橡胶分子链带走, 依据带走的分子链的多少, 可以计算出磨损率 I :

$$I = N_{Fe} / N_{tot}, \quad (2)$$

式中: N_{Fe} 是被铁针带走的碳原子数量; N_{tot} 是摩擦之前橡胶中碳原子的总数.

笔者还计算了摩擦过程中丁苯橡胶和氧化石墨烯之间结合能的变化, 计算公式如下:

$$U_{int} = U_{tot} - U_{GO} - U_{SBR}, \quad (3)$$

式中: U_{int} 为氧化石墨烯和丁苯橡胶之间的结合能; U_{tot} 为氧化石墨烯/丁苯橡胶复合材料的势能; U_{GO} 为氧化石墨烯的势能; U_{SBR} 为丁苯橡胶的势能.

2 结果与讨论

2.1 拉伸性能

图 3 是纯丁苯橡胶和复合材料两种模型的应力-应变曲线. 由于应力波动较大,我们对两条曲线进行了线性拟合. 从图 3 可以看出,加入氧化石墨烯后,复合材料的杨氏模量明显增大. 纯丁苯橡胶的杨氏模量为 9.80 MPa,而氧化石墨烯/丁苯橡胶复合材料的杨氏模量达到 17.30 MPa. 相比于纯丁苯橡胶,复合材料的杨氏模量提高了 77%. 图 3 的结果与其他实验及计算机模拟的结果是一致的^[6,12]. 一般认为,氧化石墨烯的增强机制主要是氧化石墨烯的比表面积特别大,达到 2 600 m²/g. 如此大的表面积使得氧化石墨烯与聚合物基体的接触面积也很大,结合能很强,这使得应力能够很好地从基体传递到氧化石墨烯,从而增大了聚合物链抵抗变形的能力. 此外,这种结合作用也限制了聚合物链的局部运动,进而阻止了聚合物基体中裂纹的产生和扩展^[13].

2.2 硬度计算

利用 1.3 节所述的模拟方法,笔者计算了两种模型的硬度. 表 1 是纯丁苯橡胶和氧化石墨烯/丁苯橡胶复合材料在不同载荷下的压痕深度 h . 可以看出,两种模型的压痕深度 h 均随载荷的增大而增加. 当载荷从 0.12 kJ/(mol·nm) 增加到 0.36 kJ/(mol·nm),纯丁苯橡胶压痕深度从 0.162 nm 增加到 1.057 nm,氧化石墨烯/丁苯橡胶复合材料的压痕深度从 0.123 nm 增加到 0.871 nm. 这表明添加氧化石墨烯后,复合材料的硬度增大,压痕深度比纯丁苯橡胶的平均减

小 20.3%.

表 1 纯丁苯橡胶和氧化石墨烯/丁苯橡胶复合材料在不同载荷下的压痕深度

正压力/ (kJ·mol ⁻¹ ·nm ⁻¹)	压痕深度/nm		降低率/%
	丁苯橡胶	复合材料	
0.12	0.162	0.123	24
0.24	0.548	0.445	19
0.36	1.057	0.871	18

2.3 摩擦性能

依据橡胶摩擦性能测试的原理,笔者建立了铁针-丁苯橡胶-铁块 3 层模型来计算不同体系的摩擦性能,包括摩擦系数、磨损率等. 此外,还考察了摩擦过程中氧化石墨烯和丁苯橡胶之间结合能和氢键能的变化以及铁原子(铁针中的铁)-碳原子(丁苯橡胶和氧化石墨烯/丁苯橡胶中的碳)的径向分布函数(RDF),以此来考察氧化石墨烯和丁苯橡胶间的相互作用机制.

图 4(a)和(b)分别是铁针摩擦过纯丁苯橡胶和氧化石墨烯/丁苯橡胶后的模型快照图. 如 1.3 节所述,根据摩擦力公式 $\mu = F/N$,通过记录摩擦过程中铁针顶端原子在 3 个方向上的受力 f_x, f_y, f_z ,我们可以计算摩擦系数 μ . 这里, $|f_y|$ 等于正压力 N , $|f_z|$ 等于摩擦力 F . 计算结果见表 2. 需要说明的是,表 2 给出的摩擦系数是不同阶段摩擦系数的算术平均值,即当 $t = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12$ ps 时,计算摩擦系数,然后求算术平均值. 表 2 还给出了两种不同模型的磨损率.

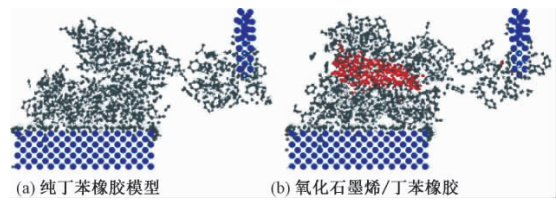


图 4 纯丁苯橡胶和氧化石墨烯/丁苯橡胶摩擦后的 3 层模型快照

Fig. 4 After friction process three-layer model snapshot of pure SBR and GO/SBR

表 2 纯丁苯橡胶和氧化石墨烯/丁苯橡胶的摩擦系数及磨损率

材料	摩擦系数 μ	磨损率 $I/\%$
纯丁苯橡胶	0.55	20.00
复合材料	0.45	12.40

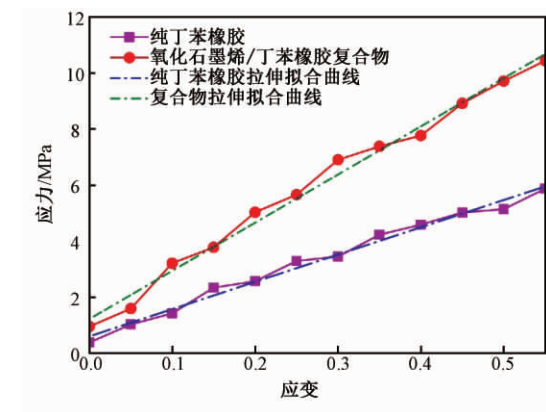


图 3 纯丁苯橡胶和氧化石墨烯/丁苯橡胶复合材料的应力-应变曲线

Fig. 3 The stress-strain curves of pure SBR and GO/SBR composites

从表 2 可以看出,加入氧化石墨烯后,复合材料的摩擦系数和磨损率分别降低了 18% 和 38%,这说明加入氧化石墨烯后,丁苯橡胶的耐磨损性能增强.为了考察氧化石墨烯对丁苯橡胶基体摩擦性能增强的机理,笔者计算了摩擦过程中氧化石墨烯和丁苯橡胶之间结合能的变化,如图 5 所示.

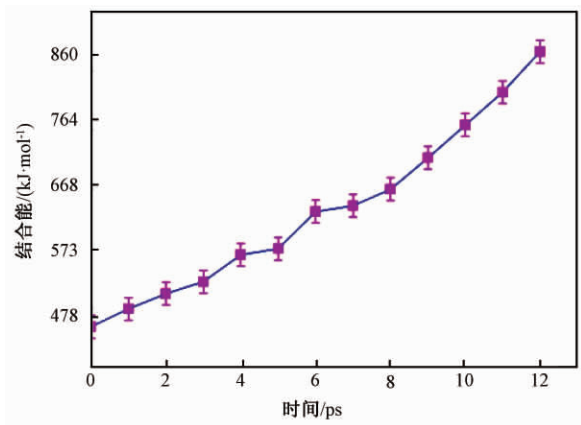


图 5 摩擦过程中氧化石墨烯和丁苯橡胶之间的结合能

Fig. 5 The variation of interaction potential energy between GO nanosheet and SBR matrix during the course of friction process

从图 5 可以看出,在摩擦过程中,氧化石墨烯和丁苯橡胶基体间的结合能从 463.45 kJ/mol 增加到 867.18 kJ/mol,增加了 87%.也就是说,当材料受到摩擦力作用后,聚合物链和氧化石墨烯之间发生了更多的吸附作用或其他非键相互作用,从而使整个体系达到更稳定的状态.在 Chawla 等^[6]的研究中,所用的增强填料为石墨烯,研究表明这种相互作用是电磁力和范德华力.而在笔者的研究中,由于氧化石墨烯含有大量的含氧官能团,所以除了电磁力和范德华力之外,氧化石墨烯中的氧原子极有可能会和丁苯橡胶中的氢原子形成氢键.为了验证这种假设,我们计算了摩擦过程中氧化石墨烯和丁苯橡胶间氢键能的变化,如图 6 所示.从图 6 可以看出,随着摩擦时间的增加,氢键能逐渐增大,从 28.7 kJ/mol 增大到 89.3 kJ/mol,其主要原因是由于铁针产生的压力使氧化石墨烯分子和丁苯橡胶分子链距离更近,产生更多的氢键,从而氢键能增大.据此可以得出,在摩擦过程中,丁苯橡胶与氧化石墨烯间结合能增加的原因之一是氢键作用的增强.

笔者还计算了摩擦过程结束后,即图 4(a) 和 4(b) 铁针中的铁原子和丁苯橡胶及氧化石墨烯/丁苯橡胶复合材料中碳原子间的径向分布函数(RDF),结果见图 7.从图 7 可以看出,纯丁苯橡胶

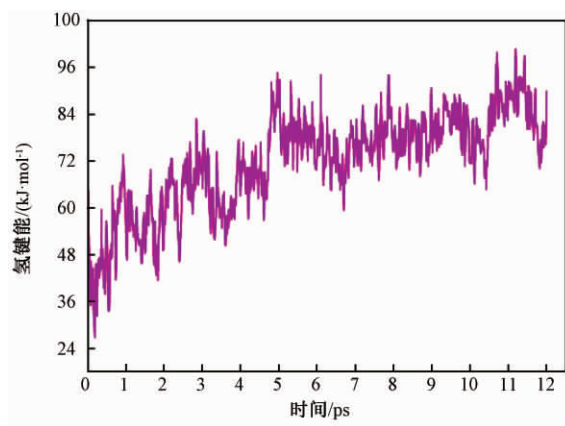


图 6 摩擦过程中氧化石墨烯和丁苯橡胶之间氢键能的变化

Fig. 6 The variation of hydrogen bond energy between GO and SBR during the course of friction process

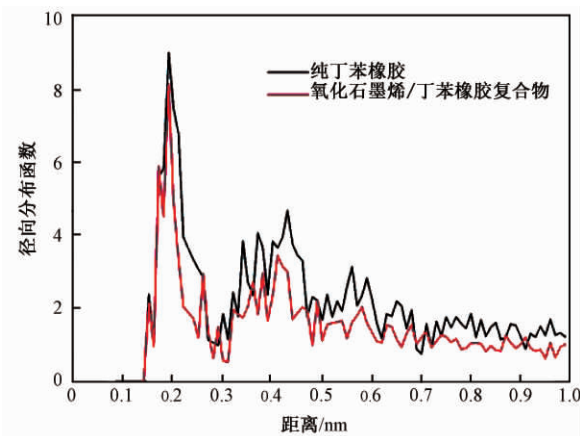


图 7 铁针中的铁原子和丁苯橡胶及氧化石墨烯/丁苯橡胶复合材料中碳原子间的径向分布函数

Fig. 7 Radius distribution function between iron atoms in the iron needle and carbon atoms in the pure SBR or GO/SBR composites

的 RDF 值要略高于复合材料的,这说明在氧化石墨烯/丁苯橡胶复合材料中,和铁棒发生吸引作用的丁苯橡胶分子要少一些.这个结论也可以很直观地从图 4(a)、(b) 看出.这个结果也再次证明,加入氧化石墨烯后,丁苯橡胶基体和氧化石墨烯之间发生了更多非键相互作用和氢键作用,导致基体和填料间结合能的增加,这也正是氧化石墨烯/丁苯橡胶复合材料摩擦性能增强的微观机理.

3 结论

笔者利用分子动力学模拟和 ReaxFF 反应力场,研究了加入氧化石墨烯后丁苯橡胶的力学性能及其增强机理.单轴拉伸模拟表明,加入氧化石墨烯后,复合材料的杨氏模量比纯丁苯橡胶提高了 77%.并建立了铁针-丁苯橡胶-铁块 3 层模型,考察了复合材料的硬度和摩擦性能.计算结果表

明,加入氧化石墨烯后,复合材料的硬度提高20.30%,摩擦系数和磨损率分别降低18.20%和38%。笔者还计算了摩擦过程中氧化石墨烯和丁苯橡胶之间结合能及氢键能的变化,提出了摩擦性能增强的机理。在摩擦过程中,丁苯橡胶基体和氧化石墨烯之间的结合能逐渐增大,结合能增大其中的一个原因是氢键作用的增强。结合能的增大使得应力能够很好地从丁苯橡胶基体转移到强度更高的氧化石墨烯上,从而提高复合材料的耐磨性能。

参考文献:

- [1] 杨永岗,陈成猛,温月芳,等. 氧化石墨烯及其与聚合物的复合[J]. 新型炭材料, 2008, 23(3): 193–200.
- [2] 罗亚萍,邱兆文. 氧化石墨烯-水和乙二醇混合基纳米流体对氢发动机散热影响研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2018, 39(4): 25–29.
- [3] 李国兴,赵景珊,孙科,等. 原位聚合制备聚氨酯/氧化石墨烯纳米复合材料的力学性能和热稳定性研究[J]. 材料研究学报, 2014, 28(12): 901–908.
- [4] 赵玉中,李毅,王桂轮,等. 国内外丁苯橡胶发展态势分析[J]. 弹性体, 2003, 13(4): 55–60.
- [5] FRANKLAND S J V, HARIK V M, ODEGARD G M, et al. The stress-strain behavior of polymer-nanotube composites from molecular dynamics simulation[J]. Composites science & technology, 2003, 63(11): 1655–1661.
- [6] CHAWLA R, SHARMA S. A molecular dynamics study on efficient nanocomposite formation of styrene-butadiene rubber by incorporation of graphene[J]. Graphene technology, 2018, 3,(2/3/4): 25–33.
- [7] ARYANPOUR M, DUIN A C T V, KUBICKI J D. Development of a reactive force field for iron-oxy-hydroxide systems[J]. The journal of physical chemistry A, 2010, 114(21): 6298–6307.
- [8] COMPTON O C, CRANFORD S W, PUTZ K W, et al. Tuning the mechanical properties of graphene oxide paper and its associated polymer nanocomposites by controlling cooperative intersheet hydrogen bonding[J]. ACS nano, 2012, 6(3): 2008–2019.
- [9] ANTONLERF, HEYONG HE, MICHAEL FORSTER A, et al. Structure of graphite oxide revisited[J]. Journal of physical chemistry B, 1998, 102(23): 4477–4482.
- [10] GAO W, ALEMANY L B, CI L, et al. New insights into the structure and reduction of graphite oxide[J]. Nature chemistry, 2009, 1(5): 403–408.
- [11] AWAD I, LADANI L. Mechanical integrity of a carbon nanotube/copper-based through-silicon via for 3D integrated circuits: a multi-scale modeling approach. [J]. Nanotechnology, 2015, 26(48): 485705.
- [12] WANG J, JIA H, TANG Y, et al. Enhancements of the mechanical properties and thermal conductivity of carboxylated acrylonitrile butadiene rubber with the addition of graphene oxide[J]. Journal of materials science, 2013, 48(4): 1571–1577.
- [13] 戴静,郎美东. 氧化石墨烯/PMMA 和表面官能化的石墨烯/PMMA 复合材料的制备及其力学性能的研究[J]. 化学学报, 2012, 70(11): 1237–1244.

Molecular Dynamics Simulation of Mechanical Properties of Graphene Oxide/Styrene Butadiene Rubber Composites

SUN Bin, GUO Wei, GU Jianbing, MI Liwei

(School of Materials and Chemical Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 451191, China)

Abstract: Using molecular dynamics simulation and ReaxFF reactive force-field, the mechanical properties of graphene oxide(GO)/styrene butadiene rubber (SBR) composites, including young's modulus, hardness and friction properties, were investigated in this paper. The simulation results showed that compared with pure SBR, the young's modulus of composites increased by 77%, hardness increased by 20.3%, friction coefficient decreased by 18%, and wear rate decreased by 38%. By calculating the variation of hydrogen bond energy and interaction energy between GO and SBR during the friction process, the mechanism on enhancing friction performance was proposed. In the process of friction, the interaction potential energy between SBR matrix and GO increased gradually. One of the reasons for the increase of interaction potential energy was the enhancement of hydrogen bonds energy. The increase of the interaction potential energy made the stress transfer well from the SBR matrix to the graphene oxide with higher intensity, thus improving the friction properties of the composites.

Key words: graphene oxide; styrene butadiene rubber; molecular dynamics simulation; mechanical properties; composite material

文章编号: 1671-6833(2019)01-0092-05

基于深度学习和进化计算的外汇预测与投资组合优化

李章晓¹, 宋 微¹, 田 野²

(1. 徽商职业学院 会计系, 安徽 合肥 230022; 2. 安徽大学 计算机科学与技术学院, 安徽 合肥 230601)

摘 要: 利用深度学习和进化计算技术来分别实现对外汇价格的预测与投资组合优化. 首先, 利用循环神经网络建立汇率预测模型, 用来预测外汇产品的价格并计算期望收益率. 接着建立了一个双目标的投资组合模型, 即最大化期望收益率与最小化风险. 为了更接近真实的外汇交易市场, 该模型中允许买空与卖空, 并考虑了点差对收益的影响. 基于多个外汇产品的期望收益率与投资组合模型, 利用多目标进化算法来搜索出最优的投资组合. 在多个外汇产品的真实历史数据上的结果表明, 该方法能够实现在外汇交易市场中的盈利.

关键词: 外汇预测; 投资组合优化; 循环神经网络; 进化算法

中图分类号: F830.92

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2019.01.014

0 引言

外汇交易市场是世界上最大的金融市场之一. 对汇率的预测可以为投资者提供有效的决策参考, 从而能够增加收益并减小风险^[1]. 然而, 汇率时刻受到经济、政治、社会、国际局势等多种因素的综合影响, 因此外汇预测与投资组合优化是一个非常重要且极具挑战性的研究课题^[2].

随着计算机与人工智能技术的发展, 许多机器学习模型被用于外汇预测任务中. 例如, Galeshchuk^[3]利用前馈神经网络预测了3个外汇产品的每日及每月汇率; Liu等^[4]采用支持向量机预测了4个外汇产品的每日汇率; 而 Kuan等^[5]比较了前馈神经网络与循环神经网络在汇率预测上的性能. 为了增强学习模型在外汇预测任务中的精度, 一些进化算法被用于提升学习模型的性能. 例如, 马骊等^[6]利用人工鱼群算法来优化支持向量机的超参数以预测人民币对九种货币的汇率; Inthachot等^[7]采用遗传算法来选取最佳的金融指标作为神经网络的输入; 而 Dinh等^[8]利用多目标进化算法建立了一个集成模型来预测4个外汇产品的汇率.

另一方面, 进化算法在投资组合优化中也表现出了较好的应用潜力. 例如, Skolpadungket

等^[9]利用多目标遗传算法来进行投资组合优化, Branke等^[10]利用一种新型的多目标进化算法来优化一个具有许多约束的投资组合模型. 李章晓等^[11]将带决策者偏好的多目标遗传算法用于投资组合优化中, 并获得了指定区域的最优投资组合.

尽管机器学习和进化计算技术已被成功地用于外汇预测和投资组合优化中, 但大部分现有工作只采用了较早的机器学习模型与进化算法. 为了提升外汇预测的精度与投资组合优化的效果, 笔者采用近些年来提出的深度学习模型和新型进化算法分别用于外汇预测和投资组合优化. 另外, 为了更接近真实的外汇交易市场, 笔者建立了一个双目标的投资组合模型, 其中允许买空与卖空, 并考虑了点差对收益的影响.

本文方法的流程如图1所示. 首先, 利用循环神经网络GRU^[12]对每个外汇产品建立汇率预测模型, 并预测外汇产品的价格和计算相应的期望收益率. 接着, 基于多个外汇产品的期望收益率与投资组合模型, 利用多目标进化算法ARMOEA^[13]来搜索出最优的投资组合. 为了证实本文方法的性能, 在4个外汇产品EUR/CHF、EUR/GBP、GBP/USD和USD/CAD的真实历史数据上进行回测. 实验结果表明, 本文方法能够实现在外汇交易市场中的盈利.

收稿日期: 2018-05-09; 修订日期: 2018-08-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61672033); 安徽省质量工程教学研究项目(2016jyxm0993)

通信作者: 田野(1991—), 男, 安徽六安人, 安徽大学讲师, 博士, 主要从事进化多目标优化方面研究, E-mail: field910921@gmail.com.

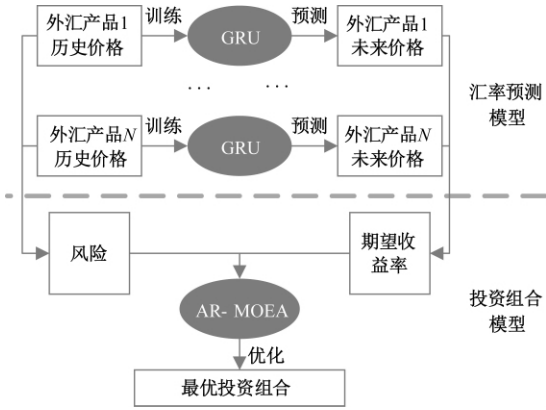


图 1 本文方法的流程

Fig. 2 Procedure of the proposed approach

1 相关工作

1.1 循环神经网络

循环神经网络和卷积神经网络是深度学习的两个主要技术^[14]. 由于循环神经网络具有记忆历史输入的能力,它常被用于具有序列输入的机器学习任务中,例如语音识别^[15]和文本产生^[16]. 在序列预测任务中,循环神经网络较之传统前馈神经网络的最大优点在于前者的输入仅为序列中当前时刻的特征,而传统神经网络的输入需要为前 k 个时刻的所有特征,且 k 通常难以确定.

传统循环神经网络的一个缺点是它只能记忆短期的历史输入^[17]. 为了解决这一问题, LSTM^[18] 加入了特殊的记忆单元(隐层)来显式记录历史信息,它被证实可以记录较长的历史输入,并因此成为目前最为流行的循环神经网络. 笔者将采用与 LSTM 类似的循环神经网络 GRU^[12] 来构建汇率预测模型. GRU 与 LSTM 有着类似的记忆功能,但前者具有更为简单的网络结构(LSTM 有 4 个隐层而 GRU 有 3 个隐层),且被证实有一些任务上具有更快的收敛速度^[19].

1.2 多目标进化算法

多目标进化算法已成功应用于许多科研和工程领域,例如数据挖掘^[20]和无人机任务规划^[21]. 利用进化算法来求解多目标优化问题的优势在于它无需知道待优化函数的具体表达形式,且待优化函数可以是多峰、不可导甚至是离散的. 传统方法(如二次规划)无法求解一些具有非凸搜索空间的投资组合模型,但多目标进化算法仍然能求解它们^[10].

自 VEGA^[22] 于 1985 年被提出以来,已有数以百计的进化算法被成功用于求解各类多目标优化问题. 笔者将采用一个最近被提出的多目标进

化算法 AR-MOEA^[13] 来优化本文中的投资组合模型. AR-MOEA 利用遗传算子产生子代,并利用基于指标的选择算子来更新种群. 该算法的特点在于它可以在进化过程中不断更新用于计算指标的参考点集,从而使得种群可以拥有更好的收敛性与分布性. 实验结果证实,AR-MOEA 在不同测试问题上能够取得比其他多目标进化算法更加稳定的结果^[13].

2 本文方法

2.1 基于 GRU 的外汇预测

笔者采用 GRU 对每个外汇产品建立汇率预测模型. 该模型的输入 x_t 为第 t 个小时内每分钟的汇率,即

$$x_t = (x_{t,1}, x_{t,2}, \dots, x_{t,60})^T. \quad (1)$$

其中, $x_{t,i}$ 为第 t 小时第 i 分钟的收盘价. 该模型的输出 y_{t+1} 为第 $t+1$ 个小时最后一分钟的收盘价,即

$$y_{t+1} = x_{t+1,60}. \quad (2)$$

此外,为了便于模型训练,所有的输入和输出数据在训练之前将会被标准化,即减去所有数据的均值并除以所有数据的标准差.

总而言之,该模型利用前一小时内每分钟的汇率信息来预测一小时后的汇率,因此,该外汇产品的期望收益率 p 可以由下式得到:

$$p = \frac{y_{t+1}}{x_{t,60}} - 1. \quad (3)$$

显然,当 $p > 0$ 时,期望收益率为正,应该执行买空操作;反之期望收益率为负,应该执行卖空操作. 值得一提的是,由于点差(即同一时刻买入价格高于卖出价格)的存在,当期期望收益率 p 小于点差时,不应执行任何买空或卖空操作.

2.2 基于 AR-MOEA 的投资组合优化

根据 Markowitz 的投资组合理论^[23],基本的投资组合优化问题是一个双目标的优化问题,即最大化期望收益率与最小化风险,其中最重要的参数即每个外汇产品的期望收益率. 在本文方法中,该期望收益率由 2.1 节建立的 GRU 模型预测得到.

大部分现有工作中的投资组合模型为^[10]:

$$\begin{cases} \max f_1(\mathbf{w}) = \mathbf{p}^T \mathbf{w}; \\ \min f_2(\mathbf{w}) = \mathbf{w}^T \mathbf{C} \mathbf{w}; \\ \text{s. t. } \mathbf{w}^T \mathbf{e} = 1; \\ 0 \leq w_i \leq 1, \end{cases} \quad (4)$$

式中: 目标 f_1 为总期望收益率; 目标 f_2 为风险; \mathbf{w} 为每个外汇产品上的投资权重; \mathbf{e} 为单位向量; \mathbf{p}

为所有外汇产品的期望收益率向量; \mathbf{c} 为所有外汇产品的期望收益率的协方差矩阵.

为了接近真实的外汇交易市场,笔者所建立的投资组合模型允许买空与卖空,并考虑了点差对收益的影响.具体来说,本文中的投资组合模型为:

$$\begin{cases} \max f_1(\mathbf{w}) = \mathbf{p}^T \mathbf{w} - \|\mathbf{w}\|^T \boldsymbol{\theta}; \\ \min f_2(\mathbf{w}) = \mathbf{w}^T \mathbf{c} \mathbf{w}; \\ \text{s. t. } \|\mathbf{w}\|^T \mathbf{e} \leq 1; \\ -1 \leq w_i \leq 1, \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\boldsymbol{\theta}$ 为多个外汇产品的点差向量. 通过比较公式(4)与(5)可知,本文中的期望收益率减去了点差部分,同时放宽了每个外汇产品上的投资权重的限制. 在公式(4)中, $\mathbf{w}^T \mathbf{e} = 1$ 要求必须进行投资; 而公式(5)中 $\|\mathbf{w}\|^T \mathbf{e} \leq 1$ 则不强制进行投资,这在期望收益率小于点差时是必要的. 在公式(4)中, $0 \leq w_i \leq 1$ 只允许买空,而公式(5)中 $-1 \leq w_i \leq 1$ 既允许买空,又允许卖空.

由汇率预测模型获得期望收益率后,便可以根据公式(5)计算总期望收益率. 另一方面,由于本文方法基于外汇产品价格的实时单步预测,故无法得到未来期望收益率序列以计算风险. 因此,笔者利用所有外汇产品前 100 h 的历史收益率的协方差矩阵来计算风险. 最后,利用 AR-MOEA 求解公式(5)中的双目标优化问题得到一组投资组合方案,并选取期望收益率最大的 10% 的投资组合方案的均值作为最终的投资组合方案.

3 实验结果

3.1 实验设置

为了验证本文方法的效果,本节将在 4 个外汇产品的真实历史数据上进行回测,即 EUR/CHF(欧元兑瑞士法郎)、EUR/GBP(欧元兑英镑)、GBP/USD(英镑兑美元)和 USD/CAD(美元兑加元). 如图 2 所示,实验选取每个外汇产品连续 8 760 h 共 525 600 min 的收盘价,其中前 8 000 h 的数据用作训练集、后 760 h 的数据用作测试集. 另一方面,GRU 和 AR-MOEA 的参数设置见表 1.

3.2 外汇预测结果

本文方法在 4 个外汇产品的测试集上的均方误差(MSE)和预测结果见图 3. 从图中可以看出,本文模型预测的价格曲线大致与真实的价格曲线

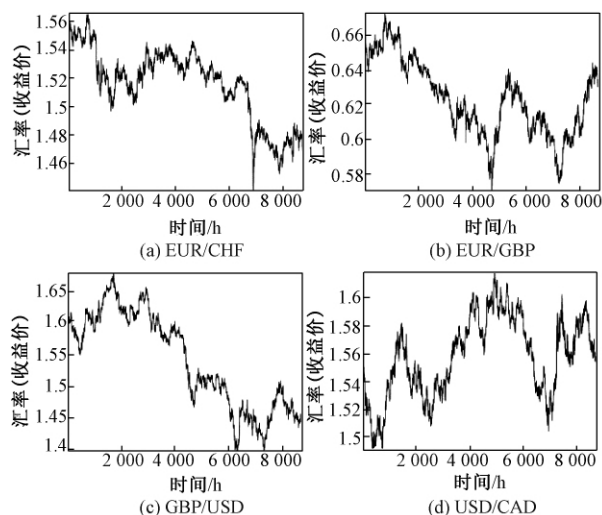


图 2 4 个外汇产品的历史数据

Fig. 2 Historical data of four instruments

相同,且模型的均方误差在 1×10^{-6} 附近,最小值能够达到 6×10^{-7} . 因此,笔者采用的基于 GRU 的预测模型可以较为准确地预测各个外汇产品的价格.

表 1 GRU 和 AR-MOEA 的参数设置

Tab. 1 Parameter settings of GRU and AR-MOEA

GRU 参数	
学习率	0.1
动量	0.95
隐层大小	20
输出层激活函数	线性
minibatch 大小	100
dropout 概率	0.5
AR-MOEA 参数	
种群大小	100
迭代次数	100
交叉算子	模拟二进制交叉
变异算子	多项式变异
交叉概率	1.0
变异概率	0.25
distribution index	20

为了更直观地展示本文方法的预测性能,图 4 给出了本文方法在 4 个外汇产品的测试集上的累积收益率. 其中每个外汇产品的点差均设置为 1×10^{-4} . 从图 4 中可以看出,本文方法最终在所有外汇产品上均能盈利. 其中在 EUR/CHF 上的收益率最高,达到了 2.75%,即年化收益率约为 31.70%. 注意实际交易会受点差波动、市场关闭、手续费等影响,因此实际收益率会比上述理论值低. 总而言之,笔者提供了一种有效的汇率预测模型.

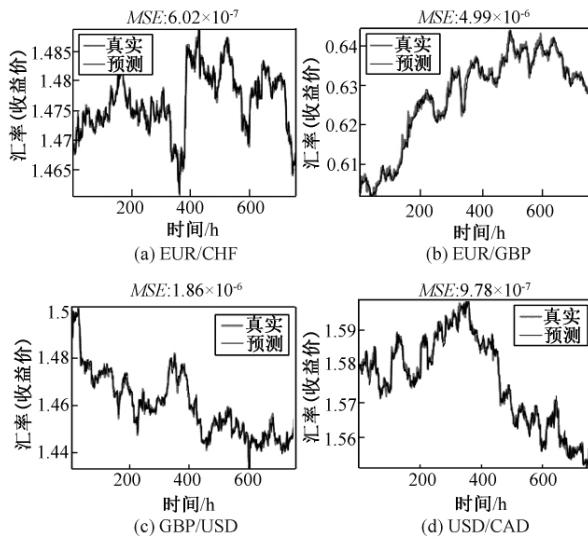


图 3 4 个外汇产品上的预测结果

Fig.3 Forecasting results on four instruments

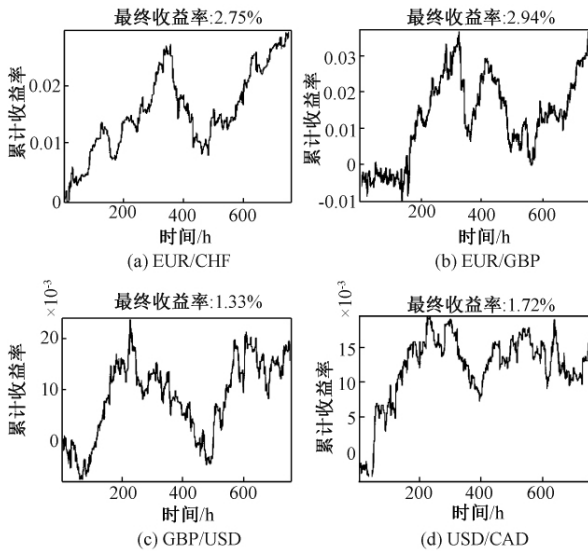


图 4 4 个外汇产品上的收益率

Fig.4 Yields on four instruments

3.3 投资组合优化结果

图 5 给出了由 AR-MOEA 得到的投资组合对应的累积收益率,其中每个外汇产品的点差同样设置为 1×10^{-4} 。注意每个小时均需要运行一次算法来搜索出当前时刻的最优投资组合。通过比较图 4 和图 5 可以看出,单个外汇产品的收益率随着时间有所波动,但由 AR-MOEA 得到的投资组合在大部分时间段均能盈利。更重要的是,投资组合的最终收益率为 4.55%,远高于单个外汇产品的最高收益率 2.75%。以上实验结果可以证实本文的投资组合模型的有效性。

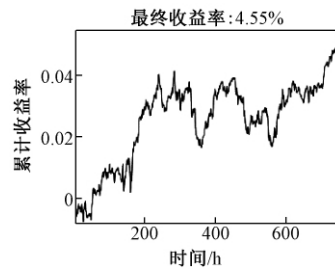


图 5 AR-MOEA 得到的投资组合的收益率

Fig.5 Yield of the portfolio obtained by AR-MOEA

4 结论

为了更好地预测外汇产品的价格并提供最佳的投资组合,笔者利用循环神经网络 GRU 与多目标进化算法 AR-MOEA 分别用于外汇预测与投资组合优化任务。笔者首先基于每个外汇产品的历史价格利用 GRU 来预测其期望收益率,然后基于得到的期望收益率建立投资组合模型,并利用 AR-MOEA 得到最优的投资组合方案。在 4 个外汇产品的回测上表明,本文方法可以较好地预测外汇产品的价格,同时投资组合模型可以得到比单一外汇产品更高的收益率。

参考文献:

- [1] STEPNIKA M, CORTEZ P, DONATE J P, et al. Forecasting seasonal time series with computational intelligence: on recent methods and the potential of their combinations [J]. Expert systems with applications, 2013, 40(6): 1981–1992.
- [2] AGHION P, BACCHETTA P, RANCIRE R, et al. Exchange rate volatility and productivity growth: the role of financial development [J]. Journal of monetary economics, 2009, 56(4): 494–513.
- [3] GALESHCHUK S. Neural networks performance in exchange rate prediction [J]. Neurocomputing, 2016, 172: 446–452.
- [4] LIU L X, WANG W J. Exchange rates forecasting with least squares support vector machine [C]//Proceedings of the 2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering. Hubei: IEEE, 2008: 1017–1019.
- [5] KUAN C M, LIU T. Forecasting exchange rates using feedforward and recurrent neural networks [J]. Journal of applied econometrics, 1995, 10(4): 347–364.
- [6] 马骊, 李阳, 樊锁海. 改进人工鱼群算法在外汇预测和投资组合中的应用 [J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(5): 1256–1266.
- [7] INTACHOT M, BOONJING V, INTAKOSUM S. Artificial neural network and genetic algorithm hybrid intelligence for predicting Thai stock price index trend

- [J]. Computational intelligence and neuroscience, 2016: 3045254.
- [8] DINH T T H, VU V T, BUI T L. A multi-objective ensemble learning approach based on the non-dominated sorting differential evolution for forecasting currency exchange rates [C]//Proceedings of the 2016 Eighth International Conference on Knowledge and Systems Engineering. Hanoi: IEEE, 2016: 96 – 102.
- [9] SKOLPADUNGKET P, DAHAL K, HARNPORNCHAI N. Portfolio optimization using multi-objective genetic algorithms [C]//Proceedings of the 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation. Singapore: IEEE, 2007: 516 – 523.
- [10] BRANKE J, SCHECKENBACH B, STEIN M, et al. Portfolio optimization with an envelope-based multi-objective evolutionary algorithm [J]. European journal of operational research, 2009, 199(3): 684 – 693.
- [11] 李章晓, 宋薇, 张兴义. 基于带决策者偏好多目标优化的证券组合投资研究 [J]. 合肥师范学院学报, 2015, 33(3): 37 – 40.
- [12] CHO K, MERRIËNBOER B V, BAH DANAU D, et al. On the properties of neural machine translation: encoder-decoder approaches [J]. arXiv preprint arXiv: 1409.1259, 2014.
- [13] TIAN Y, CHENG R, ZHANG X, et al. An indicator based multi-objective evolutionary algorithm with reference point adaptation for better versatility [J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2018, 22(4): 609 – 622.
- [14] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep learning [J]. Nature, 2015, 521: 436 – 444.
- [15] GRAVES A, MOHAMED A R, HINTON G. Speech recognition with deep recurrent neural networks [C]//Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Vancouver: IEEE, 2013: 6645 – 6649.
- [16] SUTSKEVER I, MARTENS J, HINTON G. Generating text with recurrent neural networks [C]//Proceedings of the 28th international conference on machine learning Bellevue, 2011: 1017 – 1024.
- [17] GRAVES A, SCHMIDHUBER J. Framewise phoneme classification with bidirectional LSTM and other neural network architectures [J]. Neural networks, 2005, 18(5): 602 – 610.
- [18] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long short-term memory [J]. Neural computation, 1997, 9(8): 1735 – 1780.
- [19] CHUNG J, GULCEHRE C, CHO K H, et al. Empirical evaluation of gated recurrent neural networks on sequence modeling [J]. arXiv preprint arXiv: 1412.3555, 2014.
- [20] ZHANG X, DUAN F, ZHANG L, et al. Pattern recommendation in task-oriented applications: A multiobjective perspective [J]. IEEE computational intelligence magazine, 2017, 12(3): 43 – 53.
- [21] 刘广瑞, 王庆海, 姚冬艳. 基于改进人工蜂群算法的多无人机协同任务规划 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2018, 39(3): 51 – 55.
- [22] SCHAFFER J D. Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms [C]//Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms. Hillsdale: Association computing Machinery, 1985: 93 – 100.
- [23] MARKOWITZ H M. Portfolio selection [J]. Journal of finance, 1952, 7: 77 – 91.

Exchange Rate Forecasting and Portfolio Optimization Based on Deep Learning and Evolutionary Computation

LI Zhangxiao¹, SONG Wei¹, TIAN Ye²

(1. Department of Accounting, Huishang Vocational College, Hefei, Anhui 230022; 2. School of Computer Science and Technology, Anhui University, Hefei 230601)

Abstract: The techniques in deep learning and evolutionary computation were adopted to forecast the exchange rate and to optimize the portfolio respectively. Firstly, recurrent neural network is used to build an exchange rate forecasting model, to forecast the price of instrument and to calculate its expected yield. Then, a bi-objective portfolio model is built, i. e., maximizing the expected yield and minimizing the risk. For approximating the real market, the proposed model could allow long and short selling, and could also consider the influence of spread. Based on the expected yields of multiple instruments and the proposed portfolio model, a multi-objective evolutionary algorithm was adopted to search for the optimal portfolio. According to the back test on the historical data of multiple instruments, it was verified that the proposed approach could make profit in the exchange market.

Key words: exchange rate forecasting; portfolio optimization; recurrent neural network; evolutionary algorithms

《郑州大学学报(工学版)》征稿简则

1. 刊登内容

本刊主要刊登机械、电气、信息、水利、化工、土木、交通、材料、环境工程等学科领域的学术论文。

2. 投稿要求

(1) 原创性论文,有创新性,主题明确、结构完整、论据可靠、论证合理、层次分明、逻辑严密、文字精炼、可读性强。

(2) 投稿具有合法性,不存在抄袭、剽窃、侵权等不良行为;来稿未在任何正式出版物上公开发表过,不允许一稿多投。

(3) 请严格遵守国家有关保密规定,不泄漏国家机密。

(4) 稿件请用 Word 编辑排版,若系基金资助课题,请在首页地脚处注明(包括项目编号)。

(5) 文稿格式要求规范、项目齐全,按顺序给出:题目(一般不超过 20 字),作者(包括工作单位含二级机构、邮编),摘要(包括研究的目的、方法、结果和结论四要素,200~300 字,内容应具体、准确,切忌空洞和主观评价),关键词(3~8 个),中图分类号,正文(包括图、表,6000 字左右为宜),参考文献,英文信息(摘要与中文摘要一一对应,包括英文题目、作者姓名、单位、地址、邮编及关键词),并在首页地脚处注明第一作者和/或通信作者简介(包括出生年、性别、籍贯、职称、学位、研究方向、电子邮箱和电话)。

(6) 物理量的符号和法定计量单位必须符合国家标准、国际标准。例如,物理量的符号用斜体,单位要用正体;矩阵、向量、矢量、张量等,用黑斜体表示。

(7) 文中图、表只附必要的,图、表应有中、英文图题和表题,小图、表宽度不超过 75 mm,大图、表宽度 120~150 mm;插图的纵、横坐标的标目(物理量的符号和单位)要齐全;表格采用三线表。应按标准方式标注,如:时间的标注方式应为 t/s 或 t/min 或 t/h ,速度的标注方式应为 $v/(m \cdot s^{-1})$ 。

(8) 参考文献须在文中标引,并按在文中引用的次序排序;按照 GB/T 7714—2015 著录:

期 刊 [序号] 作者. 题名[J]. 刊名,年,卷(期):起止页码.

专 著 [序号] 作者. 题名[M]. 出版地:出版社,出版年:起止页码.

学位论文 [序号] 作者. 题名[D]. 保存地:保存单位(包括二级学院/系),年份.

论文集 [序号] 作者. 题名[C]. 出版地:出版者,出版年:起止页码.

析出文献 [序号] 作者. 题名[C]//源文献. 出版地:出版者,出版年:起止页码.

标 准 [序号] 起草单位. 标准编号 标准名称[S]. 出版地:出版社,出版年.

专 利 [序号] 专利所有者. 题名:专利号[P]. 日期.

电子文献 [序号] 作者. 电子文献题名[J/OL]. 刊名,年,卷(期):起止页码. 发表或更新日期/引用日期(任选). 电子文献的出版或可获得地址.

3. 投稿方法

请登录《郑州大学学报(工学版)》网站(<http://gxb.zzu.edu.cn/>)进行在线投稿(需要先注册)。同一篇稿件只需投稿一次,以免系统给出多个编号,如果要修改请登录按照提示提交修改稿。若需查询稿件处理状况,请通过“作者登录”进行查询。

4. 作者须知

本刊实行三审制,双盲式同行评议。一般审稿周期为 6 周左右,论文刊发以后给作者赠送当期样刊。本刊已经加入“中国知网”、“万方数据——数字化期刊群”等数据库和检索机构,所付作者稿酬中已包含其著作权使用费,不再另付。如作者不同意,请在来稿时说明,本刊将做适当处理。本刊编辑部使用“科技期刊学术不端文件检测系统”,请作者规范投稿,维护自身及期刊的良好声誉,如果造成“重复发表”,将择期发出撤消论文通告,并在今后 5 年内拒收来稿,通报作者单位,取消论文效用。

5. 联系地址

通信地址:(450001) 郑州市高新区科学大道 100 号郑州大学学报(工学版)编辑部

联系电话:0371—67781276 / 67781277, E-mail: gxb@zzu.edu.cn

本刊被下列数据库及文摘收录:

- 美国《化学文摘》(CA)
- 俄罗斯《文摘杂志》(AJ)
- 英国《科学文摘》(SA)
- 美国《数学评论》(MR)
- 美国《剑桥科学文摘》(CSA)
- 波兰《哥白尼索引》(IC)
- 《中国学术期刊(光盘版)》
- 《中国科技论文统计源》
- 《中文科技期刊数据库》
- 《中国期刊网》
- 《中国学术期刊综合评价数据库》
- 《万方数据系统》
- 《中国机械工程文摘》
- 《中国数学文摘》
- 《中国化学化工文摘》
- 《中国无机分析化学文摘》
- 《中国力学文摘》
- 《中国物理文摘》
- 《工程机械文摘》
- 《中国学术期刊文摘》
- 《电子科技文摘》

郑州大学学报(工学版)
Zhengzhou Daxue Xuebao (Gongxueban)

双月刊 (1980年创刊)

第40卷 第1期 总第163期 2019年1月10日

Journal of Zhengzhou University
(Engineering Science)

Bimonthly (Started in 1980)

Vol.40 No.1 Sum No.163 Jan. 10, 2019

主管单位 河南省教育厅
主办单位 郑州大学
出版单位 《郑州大学学报(工学版)》编辑部
电子信箱 gxb@zzu.edu.cn
地 址 河南省郑州市科学大道100号(450001)
电 话 (0371)67781276 67781277
主 编 李燕燕
副 主 编 梁 静
印刷单位 山西同方知网印刷有限公司
发行范围 国内外公开发行
征 订 处 全国各地邮政局
发行单位 河南省邮政发行局

Administrated by The Education Department
of Henan Province
Sponsored by Zhengzhou University
Edited & Published by Editorial Board of Journal of
Zhengzhou University
E-mail gxb@zzu.edu.cn
Address No.100 Science Avenue, Zhengzhou 450001, China
Telephone (0371)67781276 67781277
Chief Editor LI Yanyan
Executive Chief Editor LIANG Jing
Printed by Shanxi Tongfang Knowledge Network Printing Co., Ltd
Distributed by Publishing Trading Corporation,
P.O.B.782, Beijing 100011, China

中国标准刊号: ISSN 1671-6833
CN 41-1339/T

定价: 20.00元

邮发代号: 36-232