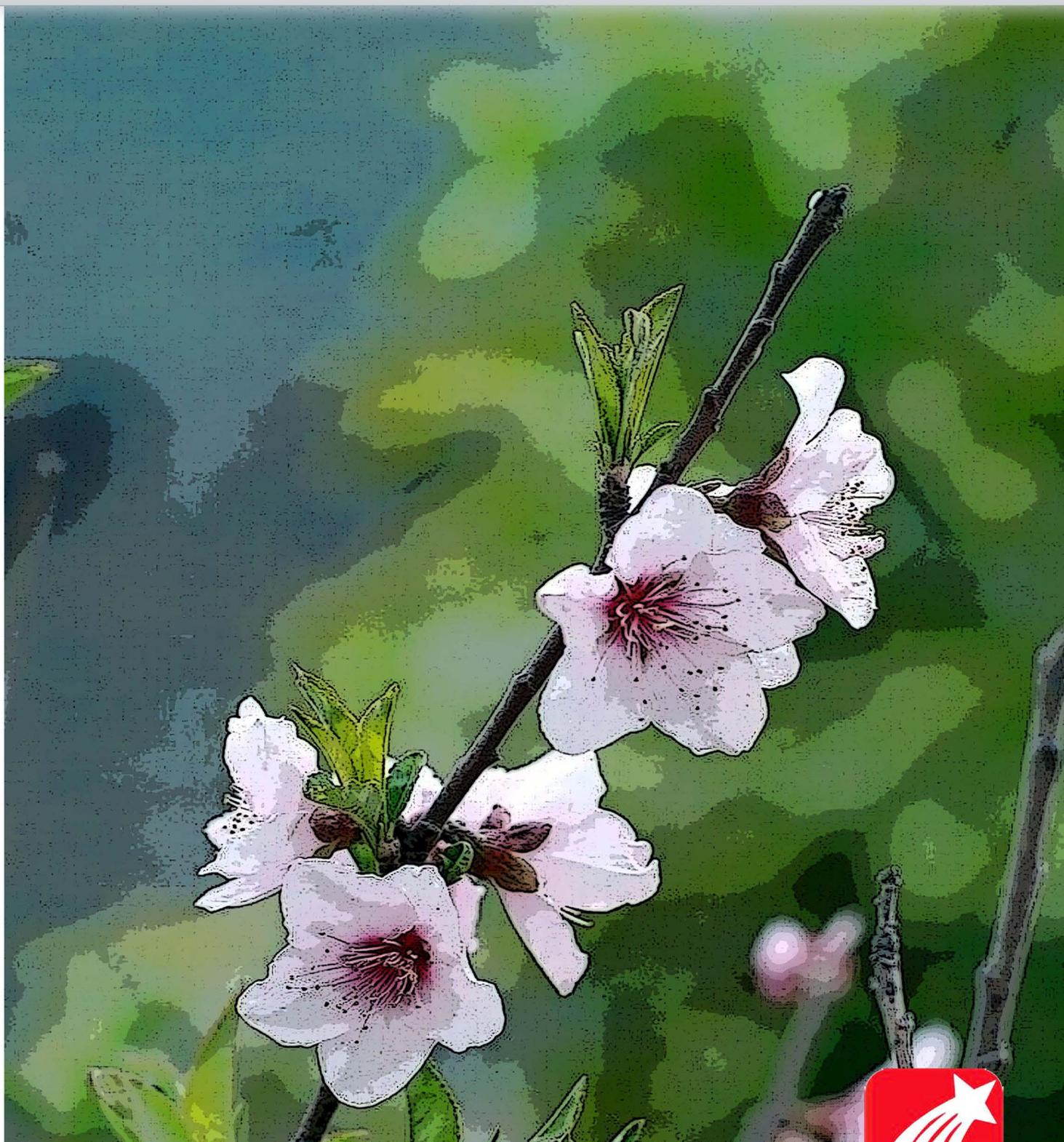


郑州大学学报

(工学版)

2016年06期



目 次

化工与材料工程

- 配方及时间对壳聚糖/聚乙烯醇复合纤维形态的影响 戴品强, 宋来瑞, 崔志香, 王乾廷(1)
- 基于穴番-A 敏感膜的新型声表面波瓦斯传感器 ... 王 文, 胡浩亮, 何世堂, 潘 勇, 张彩红(6)
- 水热法合成微纳米 CuO 及在气体传感器中的应用
..... 胡校兵, 谢祯芳, 谢 骥, 解丽丽, 朱志刚(10)
- 基于 Bruggeman 理论的双金属合金光学特性研究 范春珍, 臧华平, 牧凯军(15)
- 乙二醇-1,4-丁二醇-二乙二醇三元物系气液平衡研究.....
..... 陈卫航, 李怡恩, 张 婕, 蒋元力, 王训道(19)
- 微注射成型 HDPE 制品的结构和力学性能 石素宇, 王利娜, 许文仲, 郑国强, 申长雨(24)

机械工程

- 基于变密度法的清扫车举升油缸支架结构设计与分析..... 邓亚东, 张 坤, 金德先(28)
- 一种基于 PVDF 的微型热释电发电机研究..... 赵江铭, 邱国林, 张海霞(34)
- 基于 TRIZ/FRT/Fuzzy 的产品创新设计研究与应用 李景丽, 徐志刚(38)
- 全矢-ARMA 模型在机械振动强度预测研究的应用.....
..... 韩 捷, 吴彦召, 陈 磊, 郝旺身, 张钱龙(43)

土木及交通工程

- 动水压力对钢桥面环氧沥青铺装裂缝扩展影响..... 钱振东, 张 勳, 许 静(48)
- 压实度和干湿循环对豫东粉土土-水特征曲线的影响 张 涛, 乐金朝, 张俊然(53)
- 基于数值计算的矩形孔蜂窝梁应力分布规律研究..... 王 衡, 陈廷国(58)
- 基于 OpenSees 的高阶非线性桁架单元开发及应用 张俊峰, 高健利(63)
- 气候变化对中原地区桥梁碳化寿命影响研究..... 赵 娟, 李 倍(68)

信息工程

- 基于稀疏超完备的异常行为检测算法..... 逯 鹏, 张利亚, 黄石磊, 李奇航, 张 微(72)
- 基于物体表面正射投影的悬崖点云植被过滤方法
..... 李彩林, 陈文贺, 王江妹, 田鹏艳, 姚吉利(77)
- 基于张量分解的 MIMO 多中继系统半盲信道估计方法 穆晓敏, 刘 越, 李双志, 张建康(83)
- 一种新的基于 HMIPv6 的车载网络移动协议仿真研究 刘书如, 张启坤, 甘 勇(87)

水利与环境工程

- 基于生态环境损失的农业生态系统能值分析..... 王慧亮, 吴泽宁, 郭 溪, 郭瑞丽(92)

CONTENTS

【Chemical Engineering and Material Engineering】

- Effect of Material Formulation and Formed Time on the Morphology of Chitosan/Poly (Vinyl Alcohol) Composite Fiber
..... **DAI Pinqiang, SONG Lairui, CUI Zhixiang, WANG Qianting** (1)
- A New Cryptophane A-Coated SAW Methane Gas Sensor
..... **WANG Wen, HU Haoliang, HE Shitang, PAN Yong, ZHANG Caihong** (6)
- Hydrothermal Synthesis of CuO Micro/Nanoparticles and Their Application in Gas Sensors
..... **HU Xiaobing, XIE Zhenfang, XIE Ji, XIE Lili, ZHU Zhigang** (10)
- Theoretical Calculations on the Light Behavior of Bimetallic Nanoparticles with Bruggeman Theory
..... **FAN Chunzhen, ZANG Huaping, MU Kaijun** (15)
- Vapor-Liquid Equilibrium for Ternary System of Ethylene Glycol-1, 4-Butylene Glycol and Diethylene Glycol
..... **CHEN Weihang, LI Yien, ZHANG Jie, JIANG Yuanli, WANG Xunqiu** (19)
- The Structure and Mechanical Property of Micro-injection Molded HDPE Parts
..... **SHI Suyu, WANG Lina, XU Wenzhong, ZHENG Guoqiang, SHEN Changyu** (24)

【Mechanical Engineering】

- Structure Design and Analysis of the Lifting Hydro-Cylinder Bracket of a Road Sweeper Based on the Variable Density Method
..... **DENG Yadong, ZHANG Kun, JIN Dexian** (28)
- A Micro Pyroelectric Generator Based on PVDF **ZHAO Jiangming, QIU Guolin, ZHANG Haixia** (34)
- Research and Application of Product Innovation Design Based on TRIZ/FRT/Fuzzy **LI Jingli, XU Zhigang** (38)
- Application of FVS-ARMA Model in Mechanical Vibration Intensity Prediction Research
..... **HAN Jie, WU Yanzhao, CHEN Lei, HAO Wangshen, ZHANG Qianlong** (43)

【Civil Engineering and Construction Engineering】

- The Influence of Hydrodynamic Pressure on the Propagation of Steel Bridge Deck Epoxy Asphalt Concrete Pavement Crack ...
..... **QIAN Zhendong, ZHANG Meng, XU Jing** (48)
- Influence of Compaction Degree and Drying-wetting Cycle on the Soil Water Characteristic Curve of Yudong Silt
..... **ZHANG Tao, YUE Jinchao, ZHANG Junran** (53)
- Research on the Stress Distribution of Rectangular Hole Castellated Beams Based on Numerical Calculation
..... **WANG Heng, CHEN Tingguo** (58)
- Development and Application of Higher Order Nonlinear Truss Element in OpenSees Platform
..... **ZHANG Junfeng, GAO Jianli** (63)
- Research on Bridge Carbonation Life Influenced by Climate Change in Central Plains **ZHAO Juan, LI Bei** (68)

【Information Engineering】

- Abnormal Behavior Detection Algorithm Based on Sparse Overcomplete Representation
..... **LU Peng, ZHANG Liya, HUANG Shilei, LI Qihang, ZHANG Wei** (72)
- The Filtration Method of Cliff Point Cloud Vegetation Based on the Surface Orthographic Projection
..... **LI Cailin, CHEN Wenhe, WANG Jiangmei, TIAN Pengyan, YAO Jili** (77)
- Tensor-Based Semi-Blind Channel Estimation Method for Three-Hop MIMO Relay Systems
..... **MU Xiaomin, LIU Yue, LI Shuangzhi, ZHANG Jiankang** (83)
- A New Mobility Protocol in The Vehicular Networks Based on HMIPv6 ... **LIU Shuru, ZHANG Qikun, GAN Yong** (87)

【Water Conservancy and Environment Engineering】

- Emergy Analysis of Agricultural Ecosystem Based on Ecological Environment Loss
..... **WANG Huiliang, WU Zening, GUO Xi, GUO Ruili** (92)

文章编号: 1671-6833(2016)06-0001-05

配方及时间对壳聚糖/聚乙烯醇复合纤维形态的影响

戴品强^{1,2,3}, 宋来瑞¹, 崔志香^{2,3}, 王乾廷^{2,3}

(1. 福州大学 材料科学与工程学院, 福建 福州 350000; 2. 福建工程学院 材料科学与工程学院, 福建 福州 350118; 3. 福建省新材料制备与成形技术重点实验室, 福建 福州 350118)

摘要: 采用静电纺丝技术制备壳聚糖/聚乙烯醇(CS/PVA)复合纤维, 研究其材料配方和配制时间对溶液黏度、电导率和制备获得的CS/PVA复合纤维形态、直径分布及平均直径的影响。结果表明: 壳聚糖的加入增加了CS/PVA混合溶液的黏度和电导率, 且随着配制时间的增长, 溶液的黏度发生明显下降。另外, 随着CS组分含量的增加, 制备获得的CS/PVA复合纤维平均直径明显降低, 且直径分布均匀性增加; 随着溶液配制时间的增长, CS/PVA混合溶液的成纤能力急剧下降。

关键词: 静电纺丝; 复合纤维; 壳聚糖/聚乙烯醇

中图分类号: TQ34 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.03.023

0 引言

壳聚糖(CS)是自然界含量丰富的天然氨基酸多糖类高分子聚合物, 其来源于甲壳素脱乙酰化^[1]。由于CS具有优良的生物降解性、生物相容性和抑菌作用等优点, 已经在生物医学领域被广泛的应用^[2-3]。但由于CS溶液在电纺高压电场的作用下, 聚合物因骨架内离子的排斥力作用而限制了连续纤维的形成且常产生珠状结, 因此仅用CS溶液较难电纺成纤维^[4-6]。为了克服CS较难电纺成丝的缺点, Rebecca等^[7]引入了聚氧化乙烯(PEO)制备CS-PEO复合纤维, 并研究了稀醋酸浓度、聚合物浓度、分子量及溶液存放时间对复合纤维形态及直径影响。另外, 聚乙烯醇(PVA)是一种无毒、无刺激, 具有良好生物相容性及成纤性的亲水性高分子聚合物^[8]。闫尔云等^[9]采用静电纺丝技术制备了壳聚糖/聚乙烯醇(CS/PVA)复合纤维, 但其研究主要为材料对比对复合纤维形态的影响。而另一些研究发现: CS在酸碱等化学条件或超声微波物理条件下会发生降解, 降解产物为低聚壳聚糖和壳寡糖, 其降解产物的亲水性较高, 抑菌效果良好^[10]。目前, 关于CS降解对溶液成纤能力的影响鲜见充分研究。

因此, 笔者采用静电纺丝技术制备CS/PVA

复合纤维, 研究材料配比和溶液配制时间对CS/PVA混合溶液黏度、电导率和成纤能力的影响, 并分析其对制备获得的CS/PVA复合纤维形态、直径分布和平均直径的影响。

1 实验部分

1.1 原料

聚乙烯醇(PVA)粉末(PVA2488, 醇解度88%, 上海影佳实业发展有限公司); 壳聚糖(CS)(脱乙酰度95%, 平均分子量50 000, 合肥博美生物科技有限公司)。

1.2 溶液配制

称取2.5 g PVA溶于25 mL去离子水, 机械震荡12 h, 得到PVA质量浓度为100 g/L的均匀溶液; 称取0.75 g CS溶于25 mL V(冰醋酸)/V(去离子水)为1/99的混合溶剂中, 在60 °C恒温水浴下搅拌12 h, 得到质量浓度为30 g/L的CS均匀溶液; 量取不同上述配制的CS、PVA溶液混合并振荡2 h, 获得体积配比分别为9/1、8/2、7/3、6/4、5/5、4/6、3/7、2/8、1/9的CS/PVA均匀混合溶液。

1.3 溶液黏度和电导率测量

质量浓度100 g/L的PVA、质量浓度为30 g/L的CS和CS/PVA混合溶液的黏度采用NDJ数显

收稿日期: 2015-10-28; 修订日期: 2015-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51303027); 中国博士后科学基金资助项目(2014M560525); 福建省高校科研专项项目(JK2014030)

作者简介: 戴品强(1963—), 男, 福建福州人, 福州大学教授, 博士生导师, 主要从事材料加工研究, E-mail: pqdai@126.com.

黏度计(上海方瑞仪器有限公司)进行测量.上述溶液的电导率分别采用 DDS-11A 型电导率仪(上海盛磁仪器有限公司)进行测量.为了研究材料配方和配制时间对黏度和电导率的影响,笔者分别对不同材料配方和不同溶液配制时间(2 d、3 d、4 d)下的溶液进行测量.

1.4 静电纺丝制备复合纤维

取一定量的纺丝溶液至 10 mL 的注射器中,将注射器安装于 SN-50 微量注射泵并设置进给速率为 0.3 mL/h,将连接注射器的针头(内径 0.8 mm)与高压发生装置相连,并以铝箔纸覆在平板电极上作为接收装置.采用的纺丝电压为 12 kV,收集距离为 13 cm,纺丝针头为 23 G(外径=0.6 mm、内径=0.3 mm),纺丝温度控制为 50 ℃,相对湿度为 40% 左右.

1.5 纤维表征

采用扫描电子显微镜(SEM, S-3400N),在电子束电压为 5 kV 下分析纤维表面形态,观察之前将样品进行喷金处理 30 s.采用 Nano Measure 软件对 SEM 照片进行处理,测算出纤维直径.

2 结果与讨论

2.1 CS/PVA 溶液的性质

图 1 为不同体积配比下 CS/PVA 混合溶液在不同配制时间下的黏度.由图 1 可知,PVA 溶液的黏度不随配制时间的变化而变化,约为 250 mPa·s;而 CS 溶液的黏度随配制时间的增加而明显降低,从配制时间 2 d 时的 610 mPa·s 降至 4 d 时的 380 mPa·s,这主要是由于高分子量的壳聚糖(CS)在酸的作用下发生水解作用而降解为较小分子量的低聚壳聚糖或壳寡糖.另外,在相同的配制时间下,CS/PVA 混合溶液的黏度随着 CS 成分的增加而出现先增加后降低,再增加的变化趋势,这主要是由于高分子溶液的黏度主要与分子链的柔性和高分子链在溶液中的形态有关.在相同的 CS/PVA 材料配方下,随着溶液配制时间的增加,其混合溶液的黏度降低,且 CS 含量越多,黏度降低越明显.主要原因是配制时间的增加导致 CS 降解程度增加,且 CS 含量越多,其降解对 CS/PVA 溶液黏度降低的贡献越大.

图 2 给出了 CS/PVA 溶液黏度变化示意图,图 2A 为 PVA 高分子链在水溶液中分布及形态示意图.当 CS/PVA 材料体积配方为 1/9 和 2/8 时,CS 的加入增加了高分子链在溶剂中所占的体积,因此与 PVA 溶液相比,CS/PVA 溶液黏度增大(如图 2B 所示).当 CS/PVA 材料体积配方为 3/7、4/6、5/5 时,随着 CS 增加,高分子链在溶剂

中所占的体积进一步增加,理论上将导致 CS/PVA 溶液黏度继续增大,但结果却与这一结论相反.这主要是由于此时大量 CS 高分子链穿插于 PVA 高分子链之间,使高分子链间的相互作用力由主要的 PVA 分子链间形成的一O—H—O 氢键改变为 PVA 分子链与 CS 分子链间形成的一O—H—N 氢键,分子间氢键键能的降低,使分子链间的相互作用力降低,分子链柔性增加,从而导致 CS/PVA 溶液黏度有所降低(如图 2C 所示),因此此时分子链的柔性对溶液黏度的影响起主导作用.当 CS/PVA 材料体积配方为 6/4、7/3、8/2、9/1 时,随着 CS 的进一步增加,CS/PVA 溶液分子间相互作用力不再发生变化,但此时高分子链在溶剂中所占的体积继续增加,使其对溶液黏度的影响起主导作用,导致溶液黏度进一步增大(如图 2D 所示).

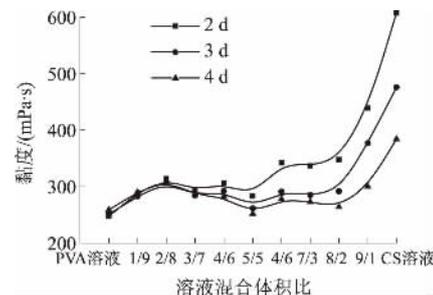


图 1 不同材料配方和配制时间下 CS/PVA 黏度
Fig. 1 Viscosity of CS/PVA solution under different material formulation and formed time

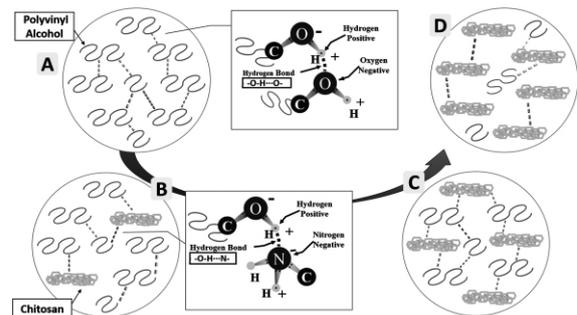


图 2 CS/PVA 溶液黏度变化示意图
Fig. 2 Schematic diagram of viscosity changing for CS/PVA solution

图 3 给出了不同配比下 CS/PVA 溶液在不同配制时间下的电导率.由图 3 可知,CS 溶液具有相对较高的电导率,这是由于 CS 具有聚阳离子电解质的特性所致.在相同的配制时间下,随着 CS 含量的增加,电导率增大.在相同的材料配方下,随着溶液配制时间的增加,其电导率没有明显变化,这说明 CS 降解对混合溶液的电导率没有影响,而仅仅对 CS/PVA 溶液的黏度有影响.

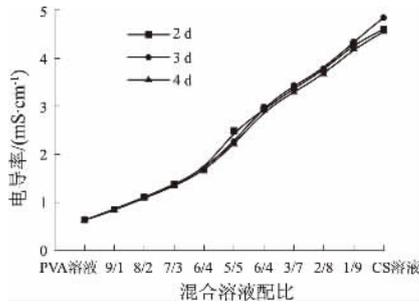


图 3 不同材料配方和配制时间下 CS/PVA 电导率

Fig. 3 Electronic conductivity of CS/PVA solution under different material formulation and formed time

2.2 CS/PVA 复合纤维形态

图 4 为溶液配制时间为 2 d, 不同配比下 CS/PVA 复合纤维 SEM 图. 由于当 CS/PVA 配比为 6/4、7/3、8/2 和 9/1 时无法通过静电纺丝获得复合纤维, 因此仅研究 CS/PVA 配比分别为 5/5 (a)、6/4 (b)、7/3 (c)、8/2 (d)、9/1 (e) 和纯 CS 溶液 (f) 所获得的复合纤维形态. 从 SEM 图中可以看出, 当溶液配制时间为 2 d 时, 各配比的混合溶液都获得了形态良好的复合纤维, 但随着 PVA

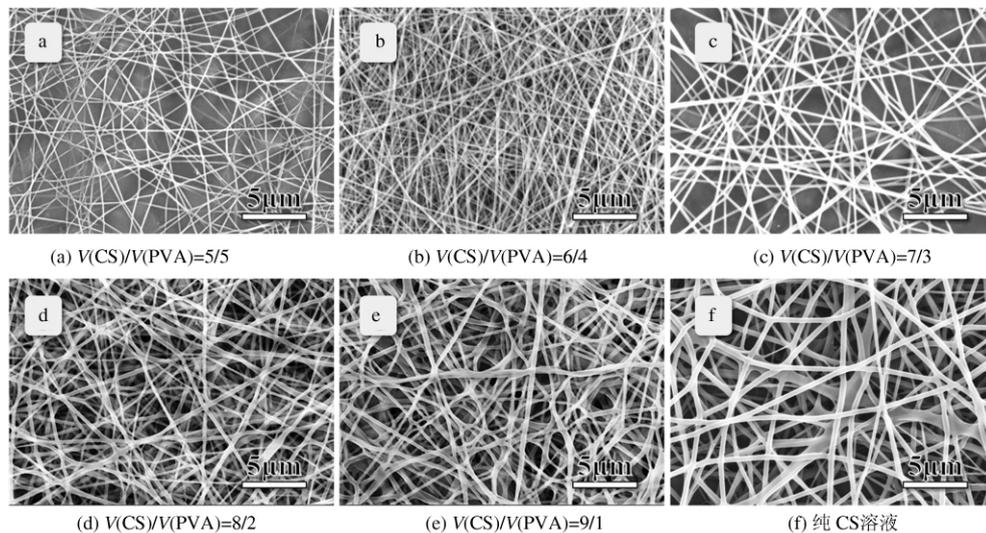


图 4 不同材料配方下 CS/PVA 复合纤维 SEM 图(溶液配制时间 2 d)

Fig. 4 SEM images of CS/PVA composite fibers with different material formulation (solution formed time is 2 d)

图 6 为溶液配制时间 3 d, 不同体积配比下 CS/PVA 复合纤维 SEM 图. 从 SEM 图中可以看出, 当 CS/PVA 体积配比为 8/2、9/1 和纯 CS 溶液时, 仍成功制备获得了形态良好的复合纤维; 当 CS/PVA 配比为 7/3 时, 得到了不连续的复合纤维; 当 CS/PVA 配比为 6/4、5/5 时, 无法获得复合纤维. 这主要是由于, 随着配制时间的延长, 其溶液黏度降低, 且随着壳聚糖含量的增加, 黏度降低趋势增大, 在纺丝过程中导致混合溶液难以抵抗分子间所带电荷力的拉伸和电场产生的库仑力的

在混合溶液中比例的增大, 纳米纤维表面的不光滑性、纤维的粘结现象和纤维的直径增加. 这主要是由于当 PVA 含量较大时, 混合溶液的电导率较低, 在相同的电压和收集距离下, 其电场产生的库仑力较小, 对纤维的分化能力降低, 因此获得直径较大的复合纤维. 而纤维直径越大, 其比表面积越小, 导致纺丝过程中溶剂的挥发越不完全, 因此较易出现粘结现象. 由此可见, 通过改变 CS/PVA 材料配方, 可以改变混合溶液的电导率, 进而影响制备获得的复合纤维形态.

图 5 为溶液配制时间 2 d, 不同配比下 CS/PVA 复合纤维直径分布图. 从图 5 可以看出, 随着壳聚糖含量的增加, CS/PVA 复合纤维直径分布变窄, 且其平均直径降低. 这主要是由于随着壳聚糖含量的增大, CS/PVA 混合溶液的电导率增加, 使得溶液射流的电荷密度变大, 液体中电荷之间的相互排斥作用增强, 对纤维的分化能力提高, 从而导致复合纤维平均直径降低, 且直径分布均匀性提高. 因此, 壳聚糖的加入可以有效地降低复合纤维的平均直径.

排斥作用, 在喷嘴处不能形成稳定连续的射流, 且在表面张力的作用下不稳定的射流收缩成球状出现串珠结构或无法进行成纤. CS/PVA 混合溶液的表面张力随着 PVA 含量的增加而增大.

图 7 为溶液配制时间 3 d, 不同配比下 CS/PVA 复合纤维直径分布图. 从图 7 同样可以看出, 随着壳聚糖含量的增加, CS/PVA 复合纤维的直径分布变窄, 且其平均直径降低. 从图 7(a) ~ 7(d) 与图 5(c) ~ 5(f) 对比可知, 在相同的 CS/PVA 配比下, 随着溶液配制时间的延长, 复合纤维平均直径

下降,这说明 CS/PVA 混合溶液的配制时间对复合纤维形态具有明显的影响.

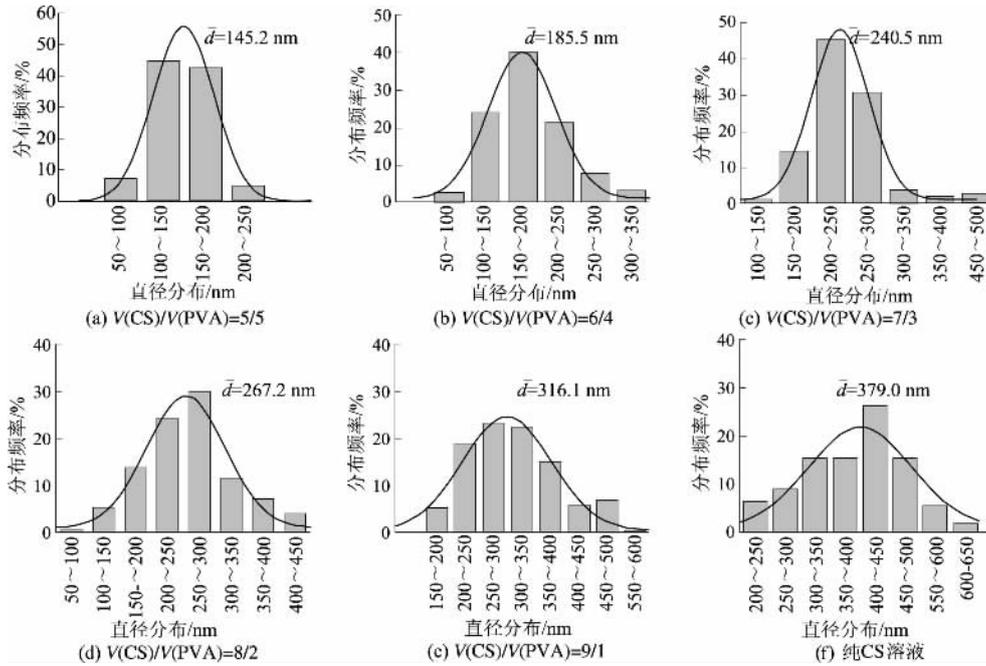


图5 不同材料配方下 CS/PVA 复合纤维直径分布图(溶液配制时间 2 d)

Fig. 5 Diameter distributions of CS/PVA composite fibers with different material formulation (solution formed time is 2 d)

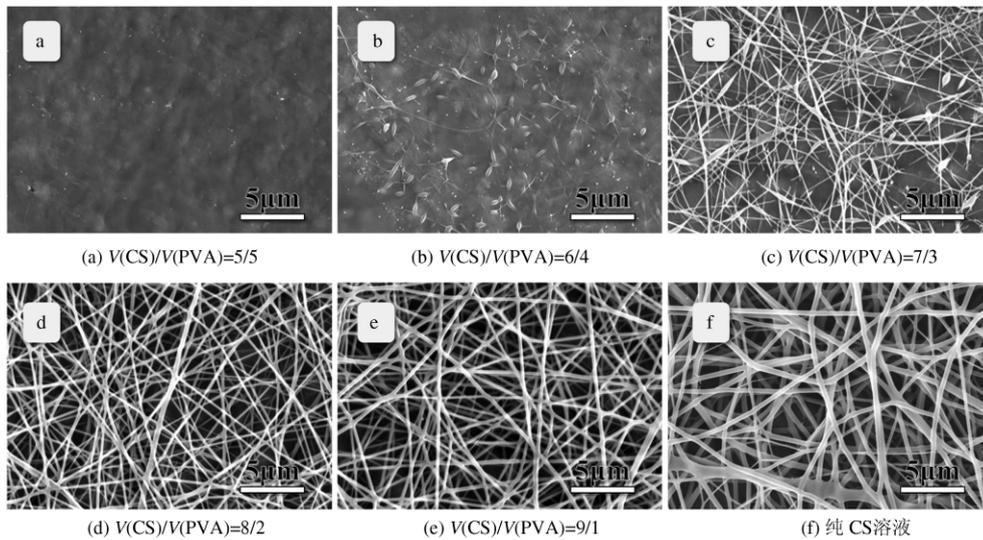


图6 不同材料配方下 CS/PVA 复合纤维 SEM 图(溶液配制时间为 3 d)

Fig. 6 SEM images of CS/PVA composite fibers with different material formulation (solution formed time is 3 d)

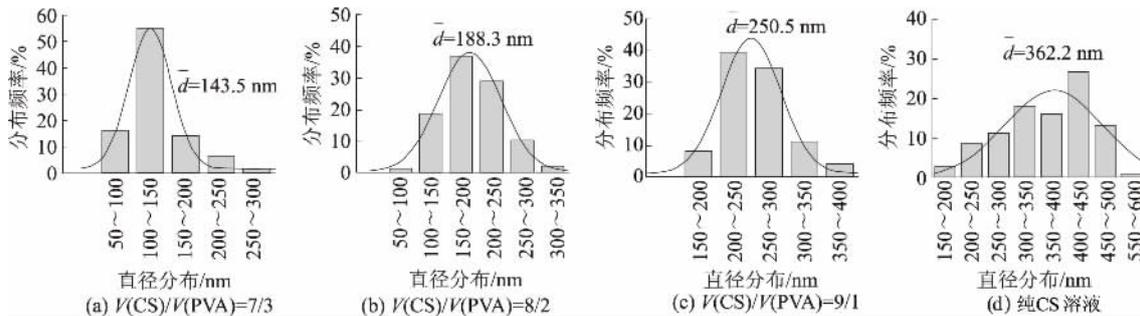


图7 不同材料配方下 CS/PVA 复合纤维直径分布图(溶液配制时间 3 d)

Fig. 7 Diameter distributions of CS/PVA composite fibers with different material formulation (solution formed time is 3 d)

3 结论

通过静电纺丝技术制备获得了CS/PVA复合纤维,并研究了不同材料配方和溶液配制时间对混合溶液黏度、电导率及制备获得的复合纤维形态、直径分布和平均直径的影响.实验结果表明,随着CS含量的增加,CS/PVA混合溶液的电导率明显增加,导致其分化能力增加,从而使制备获得的复合纤维平均直径降低,直径分布均匀性增加;随着溶液配制时间的增加,CS/PVA混合溶液的黏度明显下降,导致其成纤能力下降,同时制备获得的复合纤维平均直径下降.因此,CS/PVA混合溶液的材料配方和配制时间对复合纤维的制备及形态具有明显的影响.

参考文献:

- [1] NILSEN NYGAARD J, STRAND S P, VÅRUM K M, et al. Chitosan: gels and interfacial properties [J]. *Polymers*, 2015, 7(3): 552–579.
- [2] SHALUMON K T, ANULEKH K H, GIRISH C M, et al. Single step electrospinning of chitosan/poly(caprolactone) nanofibers using formic acid/acetone solvent mixture [J]. *Carbohydrate polymers*, 2010, 80(2): 413–419.
- [3] RINAUDOM M. Chitin and chitosan: properties and applications [J]. *Progress in polymer science*, 2006, 31(7): 603–632.
- [4] MIYAZAKI S, ISHII K, NADAI T. The use of chitin and chitosan as drug carriers [J]. *Chemical and pharmaceutical bulletin*, 1981, 29(10): 3067–3069.
- [5] MIN B M, LEE S W, LIM J N, et al. Chitin and chitosan nanofibers: electrospinning of chitin and deacetylation of chitin nanofibers [J]. *Polymer*, 2004, 45(21): 7137–7142.
- [6] BURNS N A, BURROUGHS M C, GRACZ H, et al. Cyclodextrin facilitated electrospun chitosan nanofibers [J]. *RSC Advances*, 2015, 5(10): 7131–7137.
- [7] KLOSSNER R R, QUEEN H A, COUGHLIN A J, et al. Correlation of chitosan's rheological properties and its ability to electrospin [J]. *Biomacromolecules*, 2008, 9(10): 2947–2953.
- [8] QI Y Y, TAI Z X, SUN D F, et al. Fabrication and characterization of poly (vinyl alcohol) /graphene oxide nanofibrous biocomposite scaffolds [J]. *Journal of applied polymer science*, 2013, 127(3): 1885–1894.
- [9] 闫尔云, 范英梅, 郝小原, 等. 聚乙烯醇/壳聚糖复合纳米纤维的制备和性能研究 [J]. *齐齐哈尔大学学报(自然科学版)*, 2013, 29(6): 1–5.
- [10] 刘蒲, 李克让, 张帅. 在离子液体介质中壳聚糖席夫碱衍生物的合成与表征 [J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2013, 34(1): 49–53.

Effect of Material Formulation and Formed Time on the Morphology of Chitosan/Poly (Vinyl Alcohol) Composite Fiber

DAI Pinqiang^{1,2,3}, SONG Lairui¹, CUI Zhixiang^{2,3}, WANG Qianting^{2,3}

(1. School of Materials Science and Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350000, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China; 3. Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Materials Processing and Application, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Chitosan (CS) /poly (vinyl alcohol) (PVA) composite fibers were fabricated by electrospinning in this study. The influences of material formulation and formed time on the viscosity, electrical conductivity and the morphology, average diameter, diameter distribution of CS/PVA composite fiber were investigated. The results showed that, the introduction of CS could increase the viscosity, electrical conductivity of CS/PVA blend solution. And the viscosity of blend solution decreased with the increase of formed time. In addition, the more CS content was, the smaller diameter of CS/PVA composite fiber would be. The fiber-forming capacity of CS/PVA blend solution decreased dramatically as the solution formed time increased.

Key words: electrospinning; composite fiber; chitosan (CS) /poly(vinyl alcohol) (PVA)

文章编号: 1671-6833(2016)06-0006-04

基于穴番-A敏感膜的新型声表面波瓦斯传感器

王文¹, 胡浩亮¹, 何世堂¹, 潘勇², 张彩红³

(1. 中国科学院声学研究所, 北京 100190; 2. 防化研究院 国民核生化灾害防护国家重点实验室, 北京 102205; 3. 山西大学 化学化工学院, 山西 太原 030006)

摘要: 针对现有瓦斯检测与报警技术难以实现瓦斯气体现场检测与报警的现状, 利用笼形超分子材料穴番-A 在常温下对甲烷分子包封特性, 研制了一种以穴番-A 作为敏感膜材料的声表面波瓦斯传感器. 传感器由具有高频率稳定度的 300 MHz 双通道差分式谐振器型振荡器以及涂覆于传感通道器件表面的穴番-A 敏感膜构成. 通过两步合成法制备的穴番-A 以点涂法镀膜于传感器件表面. 试验结果显示, 所研制的新型声表面波瓦斯传感器表现出快速响应 (<10 s)、高灵敏度 (184 Hz/%)、较低检测下限 (理论可达 0.05%) 以及宽动态范围内 (0~5%) 良好的线性特性等特点, 在煤矿井下瓦斯监测与报警中极具应用潜力.

关键词: 声表面波; 瓦斯传感器; 穴番-A; 谐振型振荡器

中图分类号: TB52 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.03.026

0 引言

我国是产煤大国, 全国现有各类煤矿约 2.8 万处. 然而由于缺乏监管和有效的预防措施, 由瓦斯爆炸引起的矿难事故屡屡发生, 因此, 急需建立一种高效可靠的井下煤矿瓦斯监测系统, 以实现矿内瓦斯气体的浓度进行实时、快速、准确的检测与报警. 煤矿中瓦斯气体的主要成分是甲烷, 体积分数约 83%~89%. 当空气中甲烷体积分数超过 5% 时容易发生爆炸. 但其在常温下化学性质较为稳定, 使得室温下的甲烷检测难以实现^[1]. 目前我国广泛使用的甲烷传感器主要包括催化燃烧型、气敏半导体型、红外吸收型等. 前两者需要较高的工作温度, 无法实现室温条件下的甲烷检测, 同时易受外界环境中其他化合物的影响, 检测精度较差^[2-3]. 红外吸收型传感器能够利用甲烷气体对红外光谱的特征吸收进行准确、灵敏的分析, 但设备体积较大, 价格昂贵, 并且易受温度、湿度等外界因素影响, 并不适合井下煤矿的应用^[4]. 近年来, 声表面波技术开始广泛报道于各种有毒有害气体的检测与报警之中^[5-9]. 声表面波是一种基于压电效应在压电晶体表面沉积叉指

电极所激发的沿表面传播声波, 对外围扰动极为敏感, 因此可制成种类繁多的智能传感器. 声表面波气体传感器是其中的典型代表, 具有快速响应、高灵敏度、低成本、微型化以及常温工作等特点. 其基本原理是在声表面波传播路径上涂覆对待测气体具有特异选择性的化学敏感膜, 敏感膜对待测气体吸附直接导致对声表面波传播特性 (速度/幅度) 的扰动, 通过结合振荡器结构以频率信号输出来表征待测气体^[10].

利用声表面波技术进行瓦斯气体的检测鲜有报道, Anisimkim^[11] 曾利用 ZnO 等金属氧化物作为敏感材料开展声表面波瓦斯传感试验, 但由于金属氧化物与甲烷气体反应需要较高的反应温度, 仍无法实现室温下的甲烷检测.

近来, 人们发现一种笼形超分子化合物穴番-A 对甲烷分子有着特异包封效应, 其化学结构如图 1 所示. Garel 等^[12] 的研究表明, 当甲烷分子进入穴番-A 分子的空腔时, 能够通过特定的键合作用形成一个与甲烷分子立体结构一致的三维空穴, 以分子印迹的方式形成类似“钥匙-锁”的一一对应的主体包合物, 从而能够准确地识别甲烷气体. Khoshaman 等^[13] 以及 Sun 等^[14] 将穴番-A 与石英

收稿日期: 2015-12-12; 修订日期: 2016-03-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11374254; 11274340)

作者简介: 王文 (1976—), 男, 湖南沅江人, 中国科学院声学所研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事微声学传感与系统研究, E-mail: wangwenwq@mail.ioa.ac.cn.

晶体微天平 (QCM) 技术相结合, 研制了室温环境工作的新型甲烷传感器, 取得了较好的效果. 但是这种基于 QCM 的瓦斯传感器极易饱和^[15], 试验结果显示, 当甲烷体积分数大于 0.2% 时已趋饱和, 难以满足井下瓦斯的实际检测与报警要求.

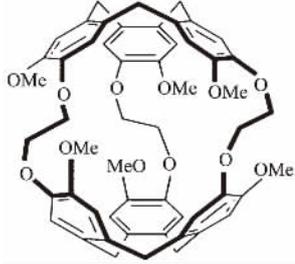


图 1 穴番-A 分子的化学结构

Fig. 1 Chemical structure of Cryptophane-A

将穴番-A 敏感材料与声表面波技术相结合, 通过高频率稳定度双通道差分式谐振器型振荡器的研制、穴番 A 的制备与镀膜, 笔者实现了一种针对井下瓦斯检测与报警的新型高灵敏度声表面波瓦斯传感器. 在室温下对传感器进行的性能评价试验结果显示: 传感器具有高灵敏度、快速响应、良好线性特性以及较宽的动态检测范围等特点, 符合煤矿井下瓦斯气体快速、安全以及稳定的检测与报警需求.

1 传感器结构及工作原理

声表面波瓦斯传感器的基本结构如图 2 所示, 由双通道差分式谐振器型振荡器、穴番-A 敏感膜以及频率信号采集模块构成. 传感器传感通道器件表面涂覆有穴番-A 敏感膜, 另外一个通道则作为参考, 以最大程度上消除测试环境中温度及机械振动对传感器性能的影响. 由于穴番-A 敏感膜对甲烷分子的包封吸附, 导致敏感膜本身质量发生变化, 从而形成对声表面波传播特性的质量负载效应, 引起声传播速度的变化, 继而引起振荡器频率的改变, 最后以差分频率信号输出出来表征待测气体. 频率采集模块用于实现对频率信号的采集与输出, 通过自制界面软件实现对采集的频率信号的实时记录与成图.

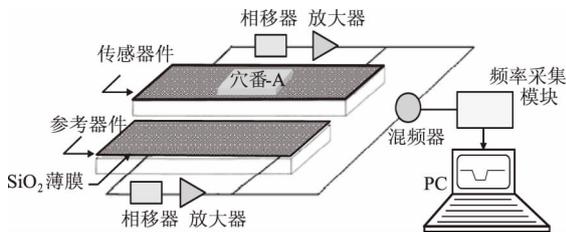


图 2 声表面波瓦斯传感器的基本结构

Fig. 2 The scheme of SAW gas sensor

2 声表面波振荡器研制

笔者研制了中心频率为 300 MHz 的两端对 SAW 谐振器作为振荡器的频控元. 基底材料选用具有良好温度特性的 ST-X 石英晶体, 在其表面以半导体光刻工艺制作厚度为 1 200Å 的铝叉指电极. 随后, 在器件表面溅射 100Å 的 SiO₂ 薄层以保护叉指电极, 谐振器的两叉指换能器间镀有一层面积约为 2 mm² 的铝膜作为敏感膜镀膜区域. 器件设计参数如下: 叉指换能器指条数为 41 对, 反射栅条数为 300, 声孔径为 200λ (λ 为声波长), 两换能器间隔为 120λ. 利用网络分析仪对所研制的谐振器频响特性进行了测试, 如图 3 所示. 从图 3 可以看到, 器件显示出较低的插入损耗 (小于 5 dB) 和较高的品质因数 (约为 3 000). 低损耗和高品质因数的器件有助于提高振荡器的频率稳定性, 从而得到较低的下限.

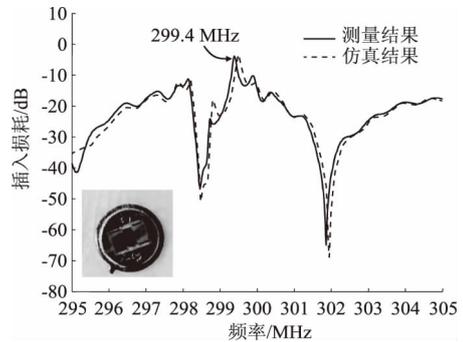


图 3 300 MHz 声表面波谐振器频响曲线

Fig. 3 Frequency response of 300MHz SAW resonator

随后以所研制的两端对 SAW 谐振器为频率控制单元, 结合由放大器、相移器以及混频器构成的振荡电路研制双通道差分式谐振器型振荡器, 并研制了给予 FPGA 的频率信号采集模块, 如图 4 所示. 由于振荡器的频率稳定性直接影响到传感器的检测限及稳定性指标, 因此对振荡器的短期

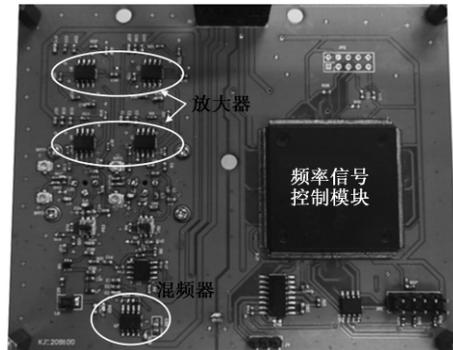


图 4 所研制的差分式 SAW 谐振器型振荡器

Fig. 4 The SAW resonator-oscillator

(以 s 为单位)与中期(以 h 为单位)频率稳定度进行了测试,如图 5 所示.接通电源后传感器进入预热阶段,在此期间输出信号变化幅度较大.约 10 min 后传感器频率变化趋于平稳,1 h 内频率漂移低于 ± 20 Hz,即中期频率稳定度为 ± 20 Hz/h(图 5(a)),其短期频率稳定性如图 5(b)所示,短期稳定性为 ± 1 Hz/s.

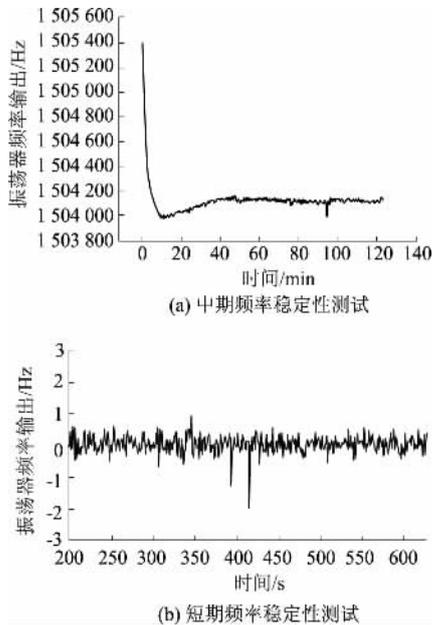


图 5 振荡器中期与短期频率稳定性测试曲线

Fig. 5 Medium-term and short-term frequency stability testing of SAW oscillator

3 穴番 A 敏感膜制备

所用穴番-A 以香草醛为主要原料,通过两步法合成得到^[14].将 3.0 mg 穴番-A、0.3 mg 聚氯乙烯和 0.6 mg 癸二酸二辛酯溶于 2 mL 四氢呋喃,制备成敏感膜溶液.镀膜工艺采用点涂法,用微量注射器取 0.3 μL 溶液滴涂在分立的 SAW 谐振器镀膜区域,之后放入 80 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱内烘烤 40 min,待溶剂完全挥发后在器件表面得到穴番-A 薄膜.由于敏感膜涂覆的质量负载效应以及作为交联剂的癸二酸二辛酯与聚氯乙烯造成的声衰减,导致镀膜后的谐振器产生了约 150 kHz 的频率漂移.之后通过切割、压焊得到分离的 SAW 谐振器.对所制备的穴番-A 敏感膜做了原子力显微镜(AFM)下的表面形貌表征,如图 6 所示.可以看到,点涂法镀膜得到的敏感膜表面比较粗糙,有较大的起伏和气泡,可形成较大的表面接触面积,从而有利于甲烷分子的吸附.

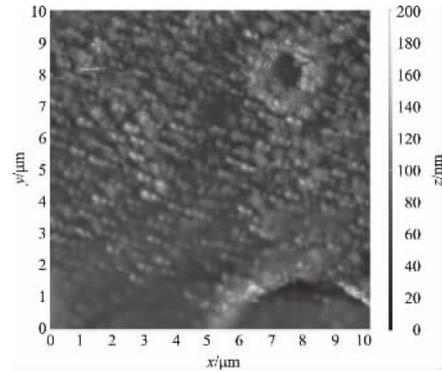


图 6 敏感膜 AFM 表面形貌

Fig. 6 Surface topography of the sensitive film by AFM

4 传感器试验

实际搭建的传感器性能测试平台由 SAW 传感器、密闭气室、双通道大气采样器和 PC 机组成. SAW 传感器放置于密闭气室中,使敏感膜表面能够充分接触到被测气体.大气采样器以 0.5 L/min 的流速将气袋内的气体抽入气室.双通道振荡器的差频信号通过频率信号采频模块转化成数字信号输出到 PC 端进行实时监测.

在传感器试验中,被测气体为体积分数为 5% 甲烷与 95% 氮气的混合气体,交替通入被测气体与干燥氮气,观察输出频率信号的变化情况.重复通入 3 次体积分数为 5% 甲烷后的传感器响应曲线图如图 7 所示.从图 7 可以看到,通入甲烷气体后,传感器频率响应信号约为 1 kHz,当切断甲烷供气通入氮气时,输出信号恢复到原来的位置,响应时间和恢复时间分别约为 12 s 和 20 s.三次实验得到的响应大致相同,显示出传感器具有良好的可重复性.

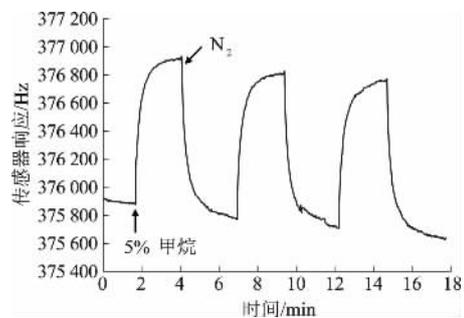


图 7 传感器对体积分数 5% 甲烷的重复性响应测试

Fig. 7 Sensor response to 5% methane concentration

此外,利用所研制的传感器对不同浓度的甲烷气体进行了定量实验.图 8 显示了传感器分别对体积分数为 5% ~ 1% 和 1% ~ 0.2% 内甲烷气体的响应曲线.从图 8 可以看到,当甲烷体积分数降低时,传感器的响应也随之减小.

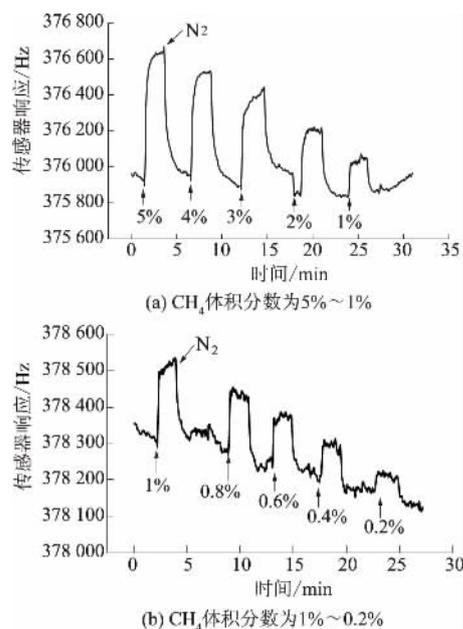


图8 传感器对不同浓度甲烷浓度的响应

Fig. 8 Sensor responses to different CH_4 concentrations

图9为传感器响应随甲烷体积分数的变化关系曲线.由图9可知,传感器表现出良好的线性特性,在0.2%~5%的瓦斯气体体积分数范围内检测灵敏度约为184 Hz/%.当甲烷体积分数为0.2%时,传感器响应信号约为75 Hz.考虑到传感器短期频率稳定度为 ± 1 Hz,因此,传感器的理论检测下限可达0.05%.

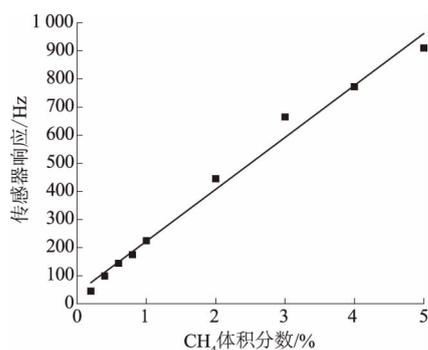


图9 传感器灵敏度测试

Fig. 9 Evaluation of SAW methane gas sensor

5 结论

笔者提出了一种利用笼形超分子材料穴番-A作为敏感材料的室温工作条件的新型SAW瓦斯传感器.试验结果显示,传感器表现出较高的检测灵敏度(184 Hz/%)和较低的理论检测下限(理论可达0.05%)以及较宽的动态测试范围内良好的线性特性,由此验证了室温下穴番-A对甲烷分子具有良好的吸附效果,因此说该传感技术在煤矿井下瓦斯的检测与报警中极具应用潜力.

参考文献:

- [1] 董川,双少敏,李忠平,等.煤矿瓦斯监测新技术[M].北京:化学工业出版社,2010.
- [2] 张正勇,徐定钧,于震,等.热催化气体传感器的特性分析及其设计原则[J].传感技术学报,2008,21(9):1501-1506.
- [3] 丁海东,赵宇龙,孙智,等.氧化物半导体甲烷传感器研究进展[J].煤炭科学技术,2005,33(7):69-71,76.
- [4] 李乐宇,韩晓阳,张涛,等.基于红外吸收原理的甲烷探测器的研究[J].大众科技,2014,16(11):21-24.
- [5] WOHLTJEN H, DESSY R. Surface acoustic wave probe for chemical analysis I introduction and instrument description [J]. Anal Chem, 1979, 51(9):1458-1475.
- [6] 王艳,张淑仪,杨跃涛.基于 In_2O_3 -ZnO复合敏感膜的声表面波室温 H_2 传感器[J].声学技术,2011,30(6):175-176.
- [7] 潘勇,杨柳,刘卫卫.一种用于检测 H_2S 气体的SAW传感器技术[J].化学传感器,2012,32(4):49-52.
- [8] WEN C, ZHU C, JU Y. A novel NO_2 gas sensor using dual track SAW device [J]. Sensors & actuators physical A, 2010, 159(2):168-173.
- [9] 秦墨林,潘勇.SAW技术在化学毒剂检测中的应用[C]//第十届全国化学传感器学术会议论文集.重庆:中国仪器仪表学会,2008:101-102.
- [10] HE S, WANG W, LI S, et al. High-frequency stability oscillator for surface acoustic wave gas sensor [J]. Acoust Sci & Tech, 2009, 30(1):7-12.
- [11] ANISIMKIM V I, PENZA M, VALENTINI A, et al. Detection of combustible gases by means of a ZnO-on-Si surface acoustic wave (SAW) delay line [J]. Sens actuators B, 1995, 23:197-201.
- [12] GAREL L, DUTASTA J, COLLET A. Complexation of methane and chlorofluorocarbons by cryptophane-A in organic solution [J]. Angewandte chemie international edition in English, 1993, 32(8):1169-1171.
- [13] KHOSHAMAN A H, LI P C H, MERBOUH N. Highly sensitive supra-molecular thin films for gravimetric detection of methane [J]. Sens actuators B, 2012, 161(1):954-960.
- [14] SUN P, JIANG Y D, XIE G Z. A room temperature supramolecular quartz crystal microbalance (QCM) methane gas sensor [J]. Sens actuators B, 2009, 141:104-108.
- [15] 温广明,周萍,张彩红,等.一种新型超分子化合物穴番-A合成的改进研究[J].山西大学学报(自然科学版),2008,31(2):218-220.

(下转第23页)

文章编号: 1671-6833(2016)06-0010-05

水热法合成微纳米 CuO 及在气体传感器中的应用

胡校兵, 谢祯芳, 谢 骥, 解丽丽, 朱志刚

(上海第二工业大学 环境与材料工程学院, 上海 201209)

摘要: 以硝酸铜($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$)为原料,以六次甲基四胺($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$)为模板剂,采用水热合成法制备 CuO 微纳米颗粒,通过扫描电镜和 X 射线衍射仪对产物的组成及形貌进行表征,并将合成粉体制成敏感膜,通过静态配气法对产物气敏性能进行研究.结果表明:在硝酸铜和六次甲基四胺的摩尔比为 1:45,水热温度为 110 °C 的条件下,制备出粒径 1~2 μm 大小的纺锤状氧化铜粉体,其中纺锤结构是由 100 nm 左右的纳米片组成.另外,纳米氧化铜对丙酮(CH_3COCH_3)和硫化氢(H_2S)气体有较好的选择性,进一步掺杂 0.25%~1.25% 的贵金属催化剂铂(Pt)后,氧化铜对硫化氢显示出了良好的选择性,且灵敏度有一定程度的提高.

关键词: 气体传感器; 氧化铜颗粒; 水热法; 掺杂

中图分类号: TQ138.11

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.03.022

0 引言

气体传感器属于传感器的一种,它是一种将检测到的气体成分和浓度转换成电信号的传感器^[1].常用的气体传感器分别有半导体气体传感器、催化燃烧式气体传感器、电化学式传感器以及红外气体传感器^[2].目前,应用广泛且技术相对成熟的气敏材料多为 n 型半导体金属氧化物,如 SnO_2 、 ZnO 、 In_2O_3 等, p 型半导体金属氧化物则以禁带宽度仅为 1.2 eV 的 CuO 为代表^[3].目前,纳米氧化铜的制备方法以固相法和液相法为主^[4],近年来,又出现了很多制备纳米氧化铜的新方法,如溶胶凝胶法、络合沉淀法、水热法、微乳液法、激光蒸凝法、回流沉淀法、电化学法等^[5].其中,水热法是指在高温高压下一些氢氧化物在水中的溶解度大于对应的氧化物在水中的溶解度,于是氢氧化物溶于水中同时析出氧化物的方法^[6].水热法的特点是生产成本低、粒子纯度高、分散性好、晶型好且可控制^[7].李冬梅等^[8]以硝酸铜和尿素为原料,采用水热法一步合成了纳米氧化铜粉体,其粒度均匀,平均尺寸在 25~60 nm,并考察了反应温度对粒径的影响.氧化铜作为气敏材料,其灵

敏度和选择性不高,因此需要对 CuO 粉体进一步改性和形貌控制. Li 等^[9]采用水热法合成了氧化铜颗粒和氧化铜板,并研究了其在气体传感器中的应用,结果表明:氧化铜板相比于氧化铜颗粒,对 NO_2 气体有更高的灵敏度. Wang 等^[10]以醋酸铜和氢氧化钠为原料、乙醇为溶剂,采用微波加热的方式制备了形状规则、粒子分布窄、纯度高的纳米 CuO. Wu^[11]等利用碳纳米管为模板剂制备了棒状纳米 CuO 颗粒,其粒径为 250~700 nm.

笔者采用水热法,通过改变硝酸铜和六次甲基四胺的摩尔比以及水热温度寻求最佳的合成条件,在此基础上通过掺杂一定质量分数的贵金属催化剂铂(Pt),并分析了掺杂比例对产物形貌的影响,以及对气敏性能的影响规律.

1 实验部分

1.1 试剂与原料

主要试剂与原料包括:硝酸铜($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)、六次甲基四胺($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$)、氯铂酸($\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot (\text{H}_2\text{O})_6$)、无水乙醇,均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司;实验用水均为超纯水,电阻率为 18.2 $\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$.其中硝酸铜作为原料,六次甲基

收稿日期: 2015-12-20; 修订日期: 2016-03-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61471233); 上海高校特聘教授(东方学者)计划; 上海市科委基础研究重点项目(13NM1401300); 上海市教委曙光计划项目(14SG52); 上海市人才基金资助项目(201346)

通信作者: 朱志刚(1977—),男,安徽泾县人,上海第二工业大学教授,博士,主要从事智能传感材料与器件研究, E-mail: zgzh@sspu.edu.cn.

四胺为模板剂,氯铂酸为掺杂原料,去离子水和无水乙醇作为溶剂和清洗剂。

1.2 氧化铜的制备及掺杂

通过改变 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 和六次甲基四胺的摩尔比以及水热温度,寻求最佳的合成条件。

首先以 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 晶体为原料配置 0.1 mol/L $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 溶液,保持水热温度 100 °C 不变,改变硝酸铜和六次甲基的摩尔比,硝酸铜和六次甲基四胺的摩尔比分别为 1:30、1:40、1:45、1:50. 将 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 溶液和六次甲基四胺 ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$) 混合后,磁力搅拌 120 min(保持每次的搅拌速率一致),将搅拌后的溶液分装到 50 mL 规格的反应釜,在设定温度下反应 12 h. 将反应好的溶液分装到离心管中,在 7 000 r/min 的离心机里,离心 10 min,用去离子水清洗,再次离心 10 min 后,用酒精清洗,离心 10 min 后,倒出酒精. 将离心管放入烘箱里,70 °C 下干燥 30 min,得到产物. 重复上述操作得到第一批样品。

最后将 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 和六次甲基四胺 ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$) 的摩尔比固定,在水热温度为 110 °C 条件下掺杂不同质量分数的 Pt,共选择了 5 个掺杂比例(质量分数,下同),分别是 0.25%、0.5%、0.75%、1.0% 和 1.25%,掺杂原料为 1 mmol/L 的氯铂酸溶液. 将氯铂酸溶液和 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 、六次甲基四胺 ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$) 混合搅拌,其余过程同氧化铜的合成,得到掺杂产物。

1.3 测试与表征

采用扫描电子显微镜(S-4800型,日本 Hitachi 公司生产,加速电压为 5.0 kV)对样品的形貌进行分析. 采用 X 射线粉末衍射仪(D8-Advance 型,德国 Bruker 公司生产)扫描样品结构,扫描区间为 10°~80°. 采用静态配气法配制乙醇、二氧化氮、硫化氢、丙酮、苯和甲醛等气样. 采用气敏元件测试仪(WS-30A,郑州炜盛公司生产)对气敏元件进行气敏性能测试. 气敏元件的灵敏度 S 表示元件检测气体中的电阻值 R_g 与在清洁空气中电阻值 R_a 之比。

1.4 气敏元件的制作

在玛瑙研钵中加入少许样品,研磨均匀后加入水调成糊状,用竹签均匀涂到带 Pt 引线的陶瓷管外壁,将涂装好的陶瓷管放在红外线快速干燥器中烘干,其制作过程如图 1 所示. 将烘干后的陶瓷管放入瓷方舟内后,放入台式马弗炉,在 500 °C

下煅烧 2 h. 待自然冷却后,将煅烧后的陶瓷管,加热丝焊接到基座上对应的引线上. 焊接完毕后,将基座插入老化板,再将老化板插入老化台,在 4.4 V 的老化电压下老化 7 d 后待测。

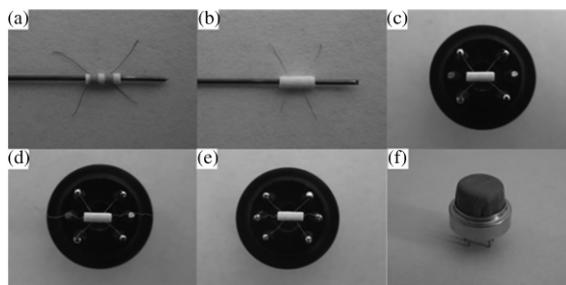


图 1 气体传感器制作步骤示意图

Fig.1 The fabrication process for gas sensor

2 结果与讨论

2.1 结构及形貌表征

为了解水热法合成的 CuO 样品形貌,采用 SEM 对其进行表征. 水热温度为 100 °C,硝酸铜和六次甲基四胺的摩尔比分别为 1:30、1:40、1:45、1:50,CuO 样品的 SEM 照片如图 2 所示。

从图 2 可以看出,产物的形貌以纺锤状为主,当摩尔比为 1:30 时,颗粒均匀性较差,其大小从 100 nm 到 2 μm 不等;当摩尔比为 1:40 时,颗粒均匀性较好,每个三维氧化铜都由片状的微结构组成;在摩尔比为 1:45 的条件下,产物的均匀性最佳,大小在 2 μm 左右. 图 2(e) 为样品 c 增大扫描倍数后的 SEM 照片,表明在摩尔比为 1:45 条件下,产物形貌出现少量花状,由母体呈发散状生长,末端呈絮状;在摩尔比为 1:50 时,产物的形貌则回到大小不一的纺锤状构成。

固定硝酸铜和六次甲基四胺的摩尔比为 1:45,水热合成温度分别为 80 °C、90 °C、110 °C、120 °C,其显微结构的扫描电镜照片如图 3 所示. 由 SEM 图 3 可知,产物的形貌依然以纺锤状为主. 当水热温度为 80 °C,颗粒均匀性较差,每个颗粒依然由片状的微结构组成;当水热温度为 90 °C,颗粒均匀性较一致,颗粒末端有出现针状的趋势;当水热温度为 110 °C 时,产物的均匀性最好,粒径依然为 2 μm 左右,增加放大倍数,发现产物出现少量花状,如图片 3(e) 所示,颗粒表面呈现密集的絮状;当水热温度达到 120 °C,颗粒尺寸一致性最差。

综上所述,在 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 和六次甲基四胺 ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$) 的摩尔比为 1:45,水热温度为 110 °C

下,产物形貌最佳.

对水热合成法掺杂 Pt 的样品进行 SEM 表征,反应条件为 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 和六次甲基四胺($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$) 的摩尔比为 1:45,水热温度为 110°C ,掺杂 Pt 比例分别为 0.25%、0.50%、0.75%、1.00% 和 1.25%,得到 SEM 图片如图 4 所示.

图 4 表明,所有产物的形貌依然以纺锤状为

主,当 Pt 掺杂的比例(质量分数)从 0.25% 增加到 0.75%, CuO 颗粒的均匀一致性增加;当掺杂比例为 0.75% 时,颗粒粒径为 $1\sim 2\ \mu\text{m}$,每个分支为片状结构,末端呈针状;但当掺杂 Pt 比例为 0.75% 到 1.25% 时,产物颗粒的均匀性有所下降.图 4 表明,Pt 掺杂的最佳比例为 0.75%.

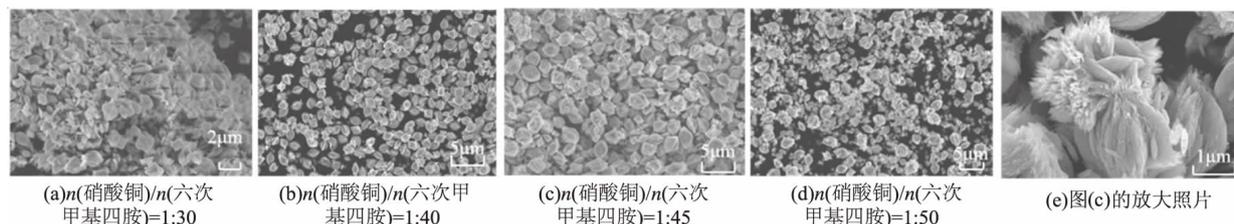


图 2 不同摩尔比下 CuO 显微结构形貌的 SEM 照片

Fig. 2 SEM images of CuO particle with different mole ratio between copper nitrate and aminoform

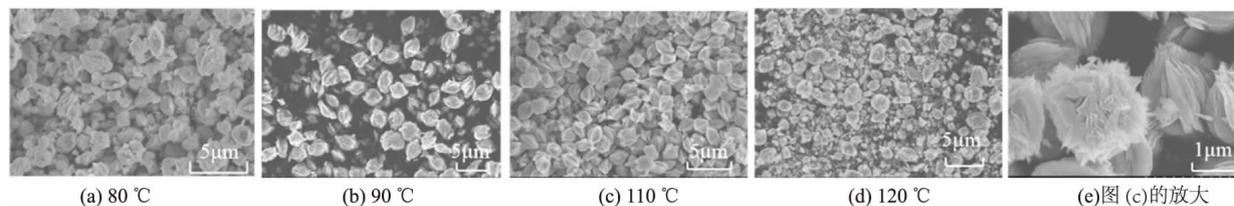


图 3 不同水热合成温度下 CuO 显微结构形貌的 SEM 照片

Fig. 3 SEM images of CuO particle with different hydrothermal synthesis temperature

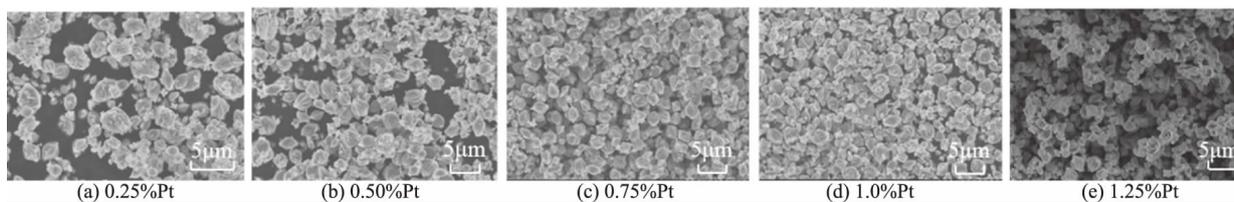


图 4 掺杂 Pt 的 CuO 显微结构形貌的 SEM 照片

Fig. 4 SEM images of CuO particle with different doping ratio

2.2 物相分析

在摩尔比为 1:45 的条件下,对不同水热温度的产物进行 XRD 检测,探测所得样品的物相结构,如图 5 所示.从 XRD 谱图 5 可以看出,所有样品在 2θ 为 36.065° 、 39.202° 和 49.280° 的地方分别出现了 CuO (JCPDS 48-1548) 的 (111)、(002) 和 (-202) 特征峰,其中以 (111) 和 (002) 峰强低而且峰宽窄,说明其结晶度好、晶粒小.随着水热合成温度的提高,(002) 主峰的强度一直在增加,表明合成温度的提高有利于 CuO 颗粒的结晶.图 5 中所有样品没有其他衍射峰,说明制备的 CuO 颗粒纯度较高.此外,掺杂 Pt 质量分数为 0.25% ~ 1.25% 的 CuO 样品 XRD 图谱没有明显变化,可能是由于掺杂量过少,低于 XRD 的检测限(XRD

图谱没有列出).

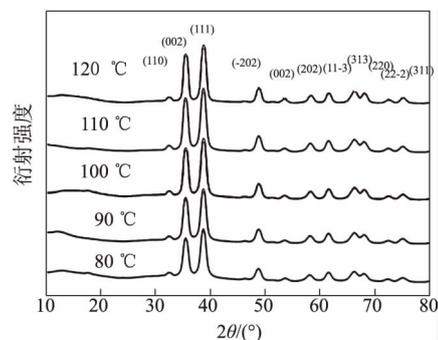


图 5 不同水热合成温度下样品的 XRD 图谱

Fig. 5 XRD patterns of specimens with different hydrothermal synthesis temperatures

2.3 气敏性能

首先将摩尔比固定为 1:45,水热温度为 80°C 、 90°C 、 100°C 、 110°C 、 120°C 的产物分别制

成传感器,考察合成温度对气敏性能的影响结果如图 6 所示。

在元件工作温度为 300 °C 条件下,共测试了 4 种气体,分别为甲醛 (HCHO)、丙酮 (CH₃COCH₃)、硫化氢 (H₂S) 以及二氧化氮 (NO₂),体积分数均为 50 × 10⁻⁶。从图 6 可以看出,未掺杂的氧化铜气敏性能较差,对二氧化氮几乎无响应。当水热合成温度为 110 °C 时,元件对丙酮的灵敏度最高为 0.996;当水热合成温度为 100 °C 时,元件对硫化氢的灵敏度最高为 0.886,且氧化铜对硫化氢的响应时间和恢复时间很好,分别为 12 s 和 25 s。

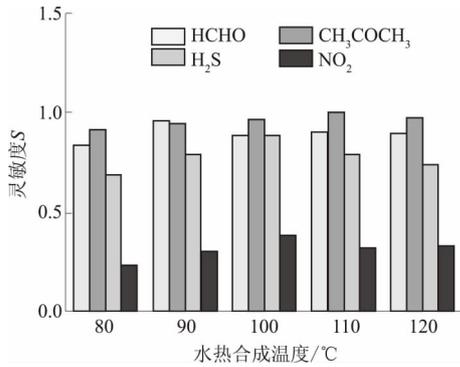


图 6 氧化铜气敏元件对不同气体的灵敏度响应
Fig. 6 Sensitivity of CuO gas sensor to different gases

响应-恢复时间是评价气敏材料的重要参数,越短越好。鉴于氧化铜对丙酮和硫化氢的响应时间和恢复时间都较好,但灵敏度相对较低,笔者继续研究 Pt 掺杂对气敏性能的影响,并针对硫化氢和丙酮的不同浓度做了气敏测试,并得到了相应的响应-恢复曲线,如图 7 和 8 所示。

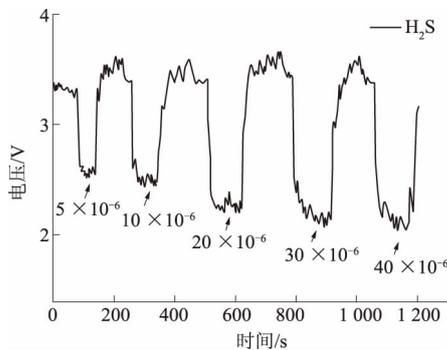


图 7 掺杂 Pt 比例为 0.75% (质量分数) 的气敏元件对不同体积分数硫化氢气体的响应曲线
Fig. 7 Response curve of CuO sensors doped with 0.75% platinum exposed to H₂S with different concentration

从图 7 可以计算得出,通过掺杂 Pt 元件的灵敏度增加到 1.5,比未掺杂的增加 87.5%,且灵敏度随着硫化氢气体体积分数的增加而增大。当硫化

氢体积分数只有 5 × 10⁻⁶ 时,气敏元件的响应时间和恢复时间依然很好,其响应时间和恢复时间分别为 8 s 和 15 s,且随着气体体积分数的增加,元件的响应时间和恢复时间有逐渐缩短的趋势。

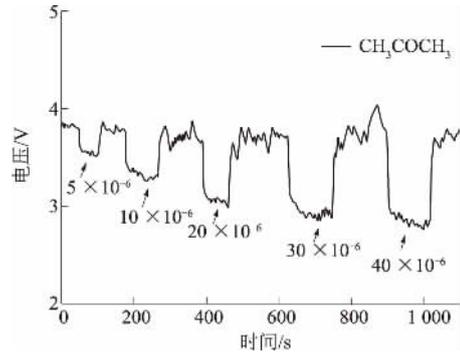
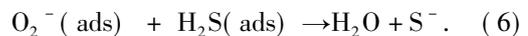
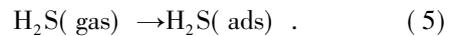
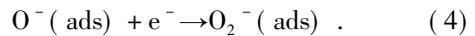
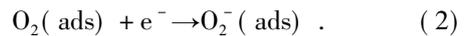
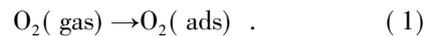


图 8 掺杂 Pt 比例为 0.25% 的气敏元件对不同浓度丙酮的响应恢复曲线
Fig. 8 Response curve of CuO sensors doped with 0.25% platinum exposed to CH₃COCH₃ with different concentration

由图 8 分析计算可知,随着丙酮浓度的增大,元件的响应时间和恢复时间越来越好,在丙酮体积分数为 40 × 10⁻⁶ 时,其响应时间和恢复时间最短分别为 9 s 和 18 s,元件的灵敏度由掺杂前的 0.9 增加到 1.3。此外,掺杂 Pt 的质量分数为 0.75% 的气敏元件对硫化氢的响应最好,而掺杂 Pt 0.25% 的气敏元件对丙酮的响应最好,说明检测不同气体,气敏元件的最佳掺杂比例也有所不同。

2.4 敏感机理

CuO 作为 P 型半导体,当接触到还原性气体如 H₂、H₂S 等,这类还原性气体就会和氧化铜材料表面的吸附氧发生还原反应。以硫化氢为例,反应过程会生成水和硫化铜,这个过程会导致材料中载流子浓度减小,电阻增大。整个反应过程可以表示如下:



当传感器脱离 H₂S 气体重新和空气接触时,一般情况下,氧空位优先吸附材料表面的吸附氧,但氧化铜和硫化氢反应过程中,具有高还原性的硫化氢可取代材料表面的吸附氧与氧化铜反应,生成 Cu₂S 和 SO₂,具体过程如下:



因此,当传感器和空气接触后,材料表面氧空位浓度增加,电阻降低,有利于硫化氢的脱除^[12].

3 结论

本研究采用水热法,以硝酸铜为原料,以六次甲基四胺为模板剂,制备出了粒径为 2 μm 左右,形貌以纺锤状为主的产物. 在硝酸铜和六次甲基四胺的摩尔比为 1:45,水热温度为 110 °C 时,SEM 图片表明产物形貌一致性较好,每个三维氧化铜颗粒由片状的微结构组成,且出现了少量的花状,其末端呈现出发散的絮状. XRD 测试结果表明,所有产物的结晶度都较好且纯度高. 在掺杂一定质量分数的贵金属催化剂 Pt 过后,产物形貌有所变化,当掺杂 Pt 质量分数为 0.75% 时,产物形貌最为均一. 未掺杂的 CuO 样品的气敏测试结果表明,产物对硫化氢和丙酮的选择性相对较好,且具有较快的响应时间和恢复时间. Pt 掺杂过后的产物灵敏度提高 87%,响应时间和恢复时间进一步缩短.

参考文献:

- [1] 徐甲强,韩建军,孙雨安,等. 半导体气体传感器敏感机理的研究进展 [J]. 传感器与微系统, 2006, 25(11): 5-8.
- [2] 刘新,李淑娥. 气体传感器的应用于发展 [J]. 中国西部科技, 2008, 14(7): 13-15.
- [3] 卢崇考. 高分子功能材料及在传感器中的应用 [J].

传感器技术,1997(2): 61-64.

- [4] 陈诚,姚晓婷,朱永恒,等. 亚微米级花状氧化铜粉体的制备及其气敏性能 [J]. 中国粉体技术, 2014, 20(4): 17-27.
- [5] UMADEVI, M. CHRISTY J A. Synthesis, characterization and photocatalytic activity of CuO nanoflowers [J]. Spectrochimica acta part A molecular and biomolecular spectroscopy, 2013, 109(4): 133-137.
- [6] 雷涛,李芬,王艳红,等. 纳米氧化铜粉体的制备及应用研究进展 [J]. 化工进展, 2013, 32(10): 2429-2433.
- [7] 罗明凤,李丽霞,杨毅. 纳米 CuO 制备与应用技术进展 [J]. 纳米材料与结构, 2010, 47(5): 297-303.
- [8] 李冬梅,夏熙. 水热法合成纳米氧化铜粉体及其性能表征 [J]. 化学研究与应用, 2000, 14(4): 484-486.
- [9] LI Yueming, LIANG Jing, TAO Zhanliang, et al. CuO particles and plates: synthesis and gas-sensor application [J]. Materials research bulletin, 2008, 43(8/9): 2380-2385.
- [10] WANG Hui, XU Jinzhong, ZHU Junjie, et al. Preparation of CuO nano particles by microwave radiation [J]. Journal of crystal growth, 2002, 244(1): 89-94.
- [11] WU Huaqiang, WEI Xianwen, WANG Shaoming, et al. Synthesis of copper oxide nano particles using carbon nanotubes as templates [J]. Chemical physics letter, 2002, 364(1): 152-156.
- [12] 邵纯红,孙曙光,张爽,等. 纳米 CuO/ZnO 去除 H₂S 反应条件及机理研究 [J]. 化学工程师, 2010(2): 13-15.

Hydrothermal Synthesis of CuO Micro/Nanoparticles and Their Application in Gas Sensors

HU Xiaobing, XIE Zhenfang, XIE Ji, XIE Lili, ZHU Zhigang

(School of Environmental and Materials Engineering, Shanghai Second Polytechnic University, Shanghai 201209, China)

Abstract: Micro/Nano-particles of CuO were prepared with hexamethylenetetramine template. The composition and morphology of the product were characterized by SEM and X-ray diffraction. The synthetic powder was prepared as sensitive membrane, and its gas sensitivity was studied with a static gas distribution method. The results indicated that the uniform copper oxide powders was synthesized at the 110°C, and the molar ratio between copper nitrate and hexamethylenetetramine was 1:45. The spindle structure was around 1~2 μm, and was composed of 100 nm nanoplates. The sensor had better selectivity with CH₃COCH₃ and H₂S. Copper oxide showed good selectivity to hydrogen sulfide and its sensitivity had a certain degree of improvement after further doping 0.25%~1.25% noble metal catalyst Pt.

Key words: gas sensor; copper oxide particles hydrothermal method; doping

文章编号: 1671-6833(2016)06-0015-04

基于 Bruggeman 理论的双金属合金光学特性研究

范春珍^{1,2}, 臧华平¹, 牧凯军¹

(1. 郑州大学 物理工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 新乡医学院 第一附属医院, 河南 新乡 453100)

摘要: 双金属合金纳米颗粒基于杂化的表面等离子共振特性表现出优异的光学性能, 因而利用 Bruggeman 理论研究双金属合金的光学调控特性, 在准静态近似下计算双金属合金的光学消光系数、吸收系数、反射率和透射率, 通过调节复合双金属合金的体积分数, 体系的共振峰得到有效调节. 结果表明, 该研究方法是一种简单、快速、有效的方法, 不要求解复杂的微分方程, 仅仅通过改变体积分数和颗粒周围的介电常数即可以实现光谱的调节.

关键词: 双金属合金; 表面等离子体共振; 调控性; Bruggeman 理论; 反射率; 透射率

中图分类号: O 441.6 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.06.0001

0 引言

双金属合金纳米颗粒具有不寻常的化学和物理性质, 在催化和生物分子检测领域中具有广泛的应用^[1-3], 其优异的光学特性起因于表面等离子体共振的杂化. 其中, 表面等离子体共振是指在金属表面存在的自由振动的电子与光子相互作用产生的沿着金属表面传播的电子疏密波^[4-9]. 双金属纳米颗粒的表面等离子体共振一般局限在两个单一组分的共振峰之间^[10], 并且这样的共振峰还取决于颗粒的组分、大小和形态. 实验中经常利用化学还原法、微乳液法、激光烧蚀法等方法来制备新型双金属纳米颗粒. 例如, 文献 [11] 通过化学还原方法合成金银和金铜双金属纳米粒子并利用光谱分析其各种成分及其在表面增强拉曼散射中的应用, 利用种子生长法可制备分层的核壳双金属金银纳米颗粒. 文献 [12] 根据金和银的摩尔比率的不同, 利用该类胶体获得苯硫酚和对巯基苯胺的表面增强拉曼信号. 生物模板法合成双金属铁钴纳米复合材料也被系统地进行探讨与研究^[13]. 理论方面, 1908 年 Mie 散射理论的提出是通过求解麦克斯韦方程组得到金属颗粒的消光谱, 之后离散偶极近似法、有限元法都被用来分析颗粒的光吸收特性.

当外加光场入射到贵金属纳米颗粒表面时, 如果外场光子频率与贵金属纳米颗粒的传导电子的整体振动频率相匹配时, 纳米颗粒就会对光子能量产生很强的吸收作用, 实验观察到的吸收光谱会发生很明显的吸收峰, 根据光谱可反映一系列的化学信息, 并广泛用于纳米颗粒的表征. 如何快速有效地判断合成的双金属纳米颗粒结构是现在急需解决的问题. 因此, 通过双金属合金纳米颗粒的实验结果与理论结果进行比较分析, 进而能清晰明确地证明合成的双金属纳米颗粒的结构, 给金银复合颗粒的表征提供了新的分析手段, 因此对于双金属纳米粒子的光学特性的理论研究是非常有必要的.

笔者采用 Bruggeman 有效介质理论研究双金属合金纳米颗粒的光学调控特性, 在准静态近似下计算双金属合金的光学消光系数、吸收系数、反射率和透射率. 计算结果表明, 通过调节复合纳米颗粒的体积分数, 共振峰可以得到有效的调节. 该类可调控的共振波长对于选择合适的激发波长进行拉曼增强的研究具有很好的指导意义.

1 计算方法

光学波段的贵金属纳米颗粒的复介电常数 $\varepsilon_m(\omega)$ 可以通过实验测量的反射谱进行计算并得

收稿日期: 2016-06-06; 修订日期: 2016-09-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11404290); 河南省教育厅重点研究计划项目(15A140014); 河南省科技攻关计划项目(162102210164)

作者简介: 范春珍(1983—), 女, 河南孟州人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事于光学材料的特性研究, E-mail: chunzhen@zzu.edu.cn.

到. 金属的复介电常数 $\varepsilon_m(\omega)$ 通常可以表示为 $\varepsilon_m(\omega) = \varepsilon_r(\omega) + i\varepsilon_i(\omega)$, 包含实部 $\varepsilon_r(\omega)$ 和虚部 $\varepsilon_i(\omega)$. 并且复折射率可以表示为 $N(\omega) = n(\omega) + i\kappa(\omega)$, 其中 $n(\omega)$ 是折射率; $\kappa(\omega)$ 为消光系数. 复介电常数和复折射率之间的关系为 $\varepsilon_m(\omega) = N(\omega)^2$, 因此可得

$$\varepsilon_r(\omega) = n(\omega)^2 - \kappa(\omega)^2. \quad (1)$$

$$\varepsilon_i(\omega) = 2n(\omega)\kappa(\omega). \quad (2)$$

沿 x 方向传播, y 方向极化的平面电磁波, 其电场分量可表示为 $E_y = E_0 e^{i(kx - \omega t)}$, 其中 k 是波矢, $k(\omega) = \frac{\omega N(\omega)}{c}$, 将 $N(\omega)$ 带入 $k(\omega)$ 可以得到:

$$E_y = E_0 e^{-\frac{\omega\kappa(\omega)}{c}} e^{i(\frac{-\omega n(\omega)}{c} - \omega t)}. \quad (3)$$

因此, 吸收系数 $\alpha(\omega)$ 与消光系数 $\kappa(\omega)$ 之间的关系为

$$\alpha(\omega) = \frac{2\kappa(\omega)}{c}. \quad (4)$$

由此可见, 吸收系数与消光系数成正比关系.

当光从一种介质传播到另一种介质时会发生反射和透射. 根据电场在切向方向上的连续性以及电位移矢量在法向方向上的连续性, 求解麦克斯韦方程组可得菲涅尔公式, 反射系数 $R(\omega)$ 和透射系数 $T(\omega)$ 可表示为^[14]

$$R(\omega) = \frac{(n(\omega) + 1)^2 + k(\omega)^2}{(n(\omega) - 1)^2 + k(\omega)^2}. \quad (5)$$

$$T(\omega) = \frac{4}{(n(\omega) - 1)^2 + k(\omega)^2}. \quad (6)$$

通常情况下, 金属颗粒的介电常数表达式可以通过求解谐振子运动方程得到德鲁得模型表示的形式. 然而, 考虑在特定波长下的介电性质时, 为了将理论模型和实验数据进一步符合, 需要添加洛伦兹修正项对德鲁得模型进行修正. 笔者选取更为简便的德鲁得极限模型^[14], 并且在可见光范围内与实验结果^[15] 得到有效的吻合. 因此, 贵金属颗粒的介电形式可表示为

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2(\omega)}{\omega(\omega + i\gamma)} + \sum_{p=1}^2 A_p \Omega_p \cdot \left(\frac{e^{i\varphi_p}}{\Omega_p - \omega - iT_p} + \frac{e^{-i\varphi_p}}{\Omega_p + \omega + iT_p} \right). \quad (7)$$

式中: ε_∞ 为高频介电常数, 即频率为无穷时的介电常数; $\omega_p(\omega)$ 为等离子频率; γ 为衰减因子; ω 为外场频率; φ_p 、 Ω_p 、 A_p 为常数^[14].

利用 Bruggeman 理论可以得到复合双金属纳米粒子的有效介电常数 $\varepsilon_e(\omega)$. Bruggeman 理

论是一种对称理论, 其所描述的两组元可以相互交换, 不影响结果. 并且该理论可以直接类比到多组分结构的复合颗粒. 其表达形式如下:

$$(1-f) \frac{\varepsilon_d(\omega) - \varepsilon_e(\omega)}{\varepsilon_d(\omega) + 2\varepsilon_e(\omega)} + f \frac{\varepsilon_m(\omega) - \varepsilon_e(\omega)}{\varepsilon_m(\omega) + 2\varepsilon_e(\omega)} = 0. \quad (8)$$

对于金银双金属合金纳米颗粒, 选取 f 为贵金属银的体积分数; $(1-f)$ 为贵金属金的体积分数; $\varepsilon_e(\omega)$ 为复合颗粒的有效介电常数; $\varepsilon_m(\omega)$ 为金的介电常数; $\varepsilon_d(\omega)$ 为银的介电常数.

2 结果与讨论

基于贵金属复合纳米颗粒的可控化学合成和表面等离子体共振光学特性的理论研究和实验研究表明, 银颗粒通常在可见光区域内具有很大的活性, 金颗粒在红外区域有很大的活性而近红外区活性有所降低, 制备金银混合的纳米颗粒是两种金属活性的复合. 依靠金属的特性选择一个合适的激发波长是很重要的, 从而可以扩大这类复合金属纳米颗粒在表面增强拉曼散射中的应用范围. 对于金属纳米颗粒而言, 当入射光频率等于自由电子的集体共振的频率时候可以产生表面等离子体共振, 此时在纳米颗粒的光谱结果中会出现该类材料的等离子体共振吸收峰如图 1 和图 2 所示. 金和银贵金属的介电函数在可见光范围内的主要特点为其实部均为负值, 虚部值接近于零. 这正是贵金属纳米粒子在可见光区域内具有特殊光学性质的主要原因, 同时也是引起表面等离子体共振的必要条件. 在可见光范围内, 计算了波长从 300 ~ 800 nm, 单一贵金属、银纳米颗粒的光谱特性, 即金属颗粒的消光系数 $\kappa(\omega)$ 、吸收系数 $\alpha(\omega)$ 、反射率 T 和透射率 R , 如图 1 ~ 2 所示. 其中消光系数图中的小凹峰 (a) 与吸收系数中小的吸收峰 (b) 的位置相对应, 表明金纳米颗粒在 500 nm 处发生共振 (图 1), 银纳米颗粒在 340 nm 处发生共振 (图 2). 金、银纳米粒子的吸收光谱是由金属粒子中电子的集体运动引起的表面等离子体共振吸收产生的. 对于单一金纳米颗粒其反射率接近 0.6, 而其透射率很小, 这也意味着具有较强的吸收, 此时对应的波长在 500 nm, 如图 1(c) 和图 1(d) 所示. 图 2 中计算了单一银纳米颗粒的光学特性, 其结果和图 1 一致, 银纳米颗粒具有较大的反射率, 较小的吸收也发生在其等离子体共振峰的位置处. 根据图 1 和图 2 的计算结果可以发

现,单一组分的贵金属纳米颗粒的消光系数、吸收系数、光散射与反射特性是由其表面等离子体共振决定的.

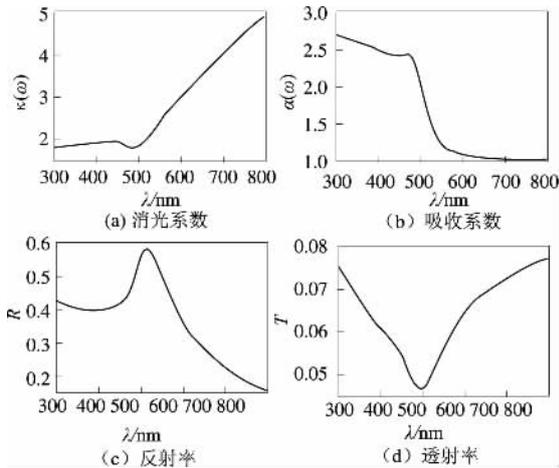


图1 金纳米颗粒的光学特性

Fig. 1 The optical properties of the pure Au nanoparticles are illustrated.

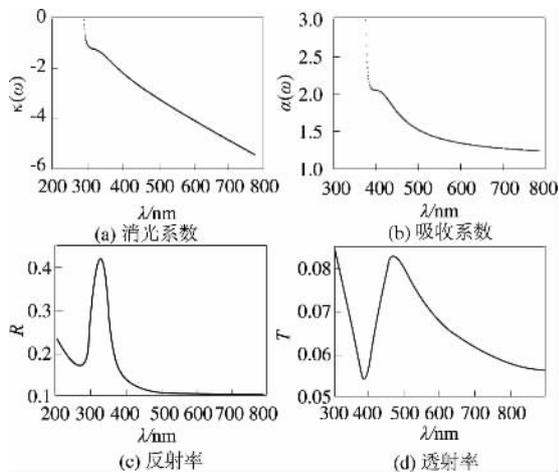


图2 银纳米颗粒的光学特性

Fig. 2 The optical properties of the pure Ag nanoparticles are illustrated.

对于双金属金银纳米颗粒的光学特性,计算结果表明:在300~800 nm波长内,体系存在两个吸收峰,其共振峰位置介于单个银、单个金颗粒吸收峰之间(图3).随着组分比例的变化,金银合金纳米粒子的表面等离子体共振吸收峰会发生改变.该共振峰起源于金属表面自由电子的偶极震荡,并且当改变双金属合金中单一金属成分的体积分数时,其共振峰可以得到有效调节.其中,消光系数随着金属银的成分逐渐增多而增大,如图3(a)所示;而吸收系数随着体积分数的增大发生红移,且出现新的吸收峰,如图3(b)所示.最为显著的是,明显的双共振峰出现在反射率图3(c)和

透射率图3(d)的光谱图中.当体积分数为0.15接近零时,双金属合金基本由银颗粒组成,其共振峰在340 nm处;当体积分数从0.15逐渐增大到0.85接近1时,双金属合金由金组成,其共振峰在500 nm处.因此,我们可以发现,通过调节贵金属颗粒的体积分数,双金属合金的共振峰可以得到有效的调节.由于复合纳米颗粒的光学性质还受到其尺寸、形貌以及周围介电环境的影响,此时需要考虑其形状因子和结构尺寸,其光学特性同样可以得到有效调节.因此,双金属合金纳米颗粒等表面等离子体共振峰位置的可控调节对于实验测得吸收光谱以及表面增强拉曼散射机理的分析都有着很重要的意义.

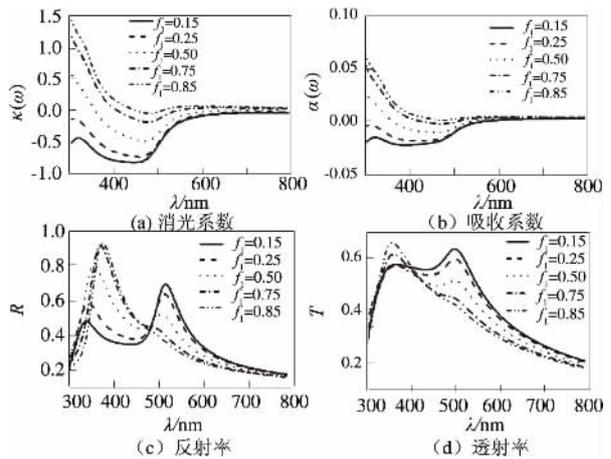


图3 金银双金属纳米颗粒的光学特性

Fig. 3 The optical properties of the AgAu bimetallic nanoparticles are illustrated.

3 结论

利用 Bruggeman 理论研究了复合颗粒的光学调控特性,在准静态近似下计算双金属合金的光学消光系数、吸收系数、反射率和透射率.结果表明,当体积分数接近零时,双金属合金基本由银颗粒组成,其共振峰在340 nm处;当体积分数接近1时,双金属合金由金组成,其共振峰在500 nm处;金银合金颗粒的双共振峰介于340~500 nm,由金属粒子中自由电子的集体运动引起的表面等离子体共振吸收产生的.因此,通过调节贵金属颗粒的体积分数,双金属合金的共振峰可以得到有效的调节.该研究方法的创新在于不需要求解复杂的麦克斯韦方程组,能够快速有效地计算复合金属颗粒的光谱调节特性,并且可调节光谱波长范围,这对于双金属合金在表面增强拉曼散射中的应用即如何有效地选取激发波长提供了很好的

指导意义.

参考文献:

- [1] GOMES J F, GARCIA A C, PIRES C, et al. Impact of the AuAg NPs composition on their structure and properties: A theoretical and experimental investigation [J]. *The journal of physical chemistry C*, 2014, 118 (49): 28868 – 28875.
- [2] TOSHIMA N, YONEZAWA T. Bimetallic nanoparticles—novel materials for chemical and physical applications [J]. *New journal of chemistry*, 1998, 22(11): 1179 – 1201.
- [3] CUI Y, REN B, YAO J L, et al. Synthesis of Ag core Au shell bimetallic nanoparticles for immunoassay based on surface-enhanced raman spectroscopy [J]. *The journal of physical chemistry B*, 2006, 110: 4002 – 4006.
- [4] MULVANEY P. Surface plasmon spectroscopy of nano sized metal particles [J]. *Langmuir*, 1996, 12(3): 788 – 800.
- [5] BOHREN C, HUFFMAN D. Absorption and scattering of light by small particles [M]. New York: Wiley, 1983
- [6] GEHR J G, BOYD R W. Optical properties of nano-structured optical materials [J]. *Chemistry of materials*, 1996, 8(8): 1807 – 1819.
- [7] FUCHS R. Theory of the optical properties of ionic crystal cubes [J]. *Physical review B*, 1975, 11 (4): 1732.
- [8] ZHANG H, OKUNI J, TOSHIMA N. One-pot synthesis of Ag-Au bimetallic nanoparticles with Au shell and their high catalytic activity for aerobic glucose oxidation [J]. *Journal of colloidal interface science*, 2011, 354(1): 131 – 138.
- [9] COHEN R W, CODY G D, COUTTS M D, et al. Optical properties of granular silver and gold films [J]. *Physical review B*, 1973, 8(8): 3689 – 3701.
- [10] 高继宁,任湘菱,唐芳琼. 银/铂双金属中空纳米颗粒的制备及光学性质研究 [J]. *感光化学与光化学*, 2006, 24(5): 360 – 365.
- [11] SRNOVA-SLOUFOVA B, VICKOVA B, BASTL Z. Bimetallic (Ag) Au nanoparticles prepared by the seed growth method: Two-dimensional assembling, characterization by energy dispersive X-ray analysis, X-ray photoelectron spectroscopy, and surface enhanced raman spectroscopy, and proposed mechanism of growth [J]. *Langmuir*, 2004, 20(8): 3407 – 3415.
- [12] LIU X Y, WANG A Q, WANG X D, et al. Au-Cu alloy nanoparticles confined in SBA-45 as a highly efficient catalyst for CO oxidation [J]. *Chemical Communications*, 2008, 27: 3187 – 3189.
- [13] 谢银德,侯保森,赵占中,等. 生物模板法合成铁钴纳米材料的研究 [J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2015, 36(6): 34 – 37.
- [14] LAROCHE A VIAL T. Comparison of gold and silver dispersion laws suitable for FDTD simulations [J]. *Applied physics B*, 2008, 93: 139 – 143.
- [15] JOHNSON P B, CHRISTY R W. Optical constant of noble metals [J]. *Physical review B*, 1972, 6(12): 4370 – 4379.

Theoretical Calculations on the Light Behavior of Bimetallic Nanoparticles with Bruggeman Theory

FAN Chunzhen^{1,2}, ZANG Huaping¹, MU Kaijun¹

(1. School of Physical Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China; 2. The First Affiliated hospital of Xinxian Medical College, Xinxian 453100, China)

Abstract: Bimetallic nanoparticles exhibited optical properties that differ significantly from those of the bulk material due to hybrid surface plasmon resonance. With the quasi-static approximation, the behavior of the light propagation was investigated. Resorting to the Bruggeman theory, the extinction coefficient, absorption coefficient, reflection, transmittance and refraction were theoretically investigated. Our results showed that by tuning the volume fraction of the metallic nanoparticles, its resonant peak could be tuned as accordingly. This calculation method can significantly improve the computing efficiency.

Key words: bimetallic nanoparticles; surface plasmon resonance; tunable; Bruggeman theory; reflection; transmission

文章编号: 1671-6833(2016)06-0019-05

乙二醇-1,4-丁二醇-二乙二醇三元物系气液平衡研究

陈卫航¹, 李怡恩¹, 张婕¹, 蒋元力², 王训道¹

(1. 郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南能源化工集团, 河南 郑州 450046)

摘要: 实验主要测定了 6.67 kPa 下乙二醇-1,4-丁二醇-二乙二醇的三元体系气液相平衡数据. 使用广泛适用的 WILSON、NRTL 和 UNIQUAC 模型对实验数据进行拟合关联, 结果表明: 实验数据与预测数据之间最大平均相对误差为 5.326%, 可以满足工程上分离设计的要求.

关键词: 煤制乙二醇; 三元气液平衡; NRTL 方程; Wilson 方程; UNIQUAC 方程

中图分类号: TQ 013.1; O 642.42 **文献标志码:** A doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.06.017

0 引言

作为一种重要的有机化工原料,乙二醇广泛应用于生产聚酯纤维、防冻剂和非离子表面活性剂等,其中 90% 用于聚酯行业^[1]. 近些年得益于聚酯行业的飞速发展,乙二醇消费也日趋增长,而我国乙二醇的产能严重不足,严重依赖进口,这必将严重影响相关行业的正常发展. 目前,世界上生产乙二醇的方法主要有石油路线^[2]和非石油路线^[1,3-4]两种. 但我国由于石油资源贫乏而煤炭资源相对丰富,因此发展煤制乙二醇技术符合我国发展需求. 然而煤制乙二醇路线中会产生较多的副产物如: 1,4-丁二醇、二乙二醇和 1,6-己二醇等,其中二乙二醇含量较高且具有较好的经济价值,需要将其分离提纯. 乙二醇及其副产物的沸点较高,实际工业生产中采用减压精馏的方法进行分离. 笔者对乙二醇-1,4-丁二醇-二乙二醇物系在 6.67 kPa 下进行气液相平衡数据的实验测定,并利用相关模型进行模拟,为该物系分离工艺的设计提供基础数据.

1 实验部分

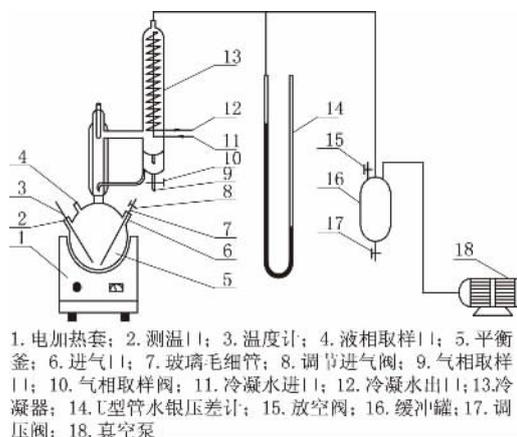
1.1 实验试剂

乙二醇: 分析纯,质量分数 $\geq 99.5\%$,天津市风船化学试剂科技有限公司. 1,4-丁二醇: 分析纯,质量分数 $\geq 99.5\%$,上海晶纯生化科技股份有

限公司. 二乙二醇: 分析纯,质量分数 $\geq 99.5\%$,天津市化学试剂二厂.

1.2 实验装置及操作

实验选用操作简单、稳定性好的气相冷凝循环平衡釜(见下图 1),该装置已经过相关物系验证^[5-7]; 真空泵; U 型管水银压差计; 0~50℃ 和 100~150℃ 温度计各 1 支,使用过程中均已进行零点校正、刻度校正及露颈校正. 实验中,选取低沸点的乙二醇为主体,向其中加入配置好的 1,4-丁二醇与二乙二醇溶液,连接好装置后打开加热套开关与真空泵开关,保持体系内部压力始终维持在 6.67 kPa,当温度稳定后即可认为体系达到平衡状态,继续加热 1.5 h 使体系处于完全平衡



1. 电加热套; 2. 测温口; 3. 温度计; 4. 液相取样口; 5. 平衡釜; 6. 进气口; 7. 玻璃毛细管; 8. 调节进气阀; 9. 气相取样口; 10. 气相取样阀; 11. 冷凝水进口; 12. 冷凝水出口; 13. 冷凝器; 14. U型管水银压差计; 15. 放空阀; 16. 缓冲罐; 17. 调压阀; 18. 真空泵

图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental apparatus

收稿日期: 2016-05-16; 修订日期: 2016-07-20

基金项目: 河南省重大科技专项(豫科计【2011】6号)

作者简介: 陈卫航(1957—),女,湖南湘潭人,郑州大学教授,主要从事化学分离工程研究, E-mail: cwh295@126.com.

状态,记录平衡时的温度值,取样 0.5 mL 进行检测.然后再向平衡釜中加入一定量 1,4-丁二醇与二乙二醇,重复上述操作,得到一系列浓度的气液两相样品.

1.3 分析方法

将得到的气液样品进行色谱检测,并采用归一化法进行定量分析.所用气相色谱为上海科创色谱仪器有限公司 GC-9800 气相色谱仪,分析条件如下:50 m × 0.32 mm × 0.25 μm 的聚乙二醇毛细管柱;FID 检测器;高纯氮载气;柱前压 0.045

MPa;尾吹压力 0.035 MPa;氢气压力 0.03 MPa;空气压力 0.05 MPa;分流流量 60 mL/min;柱箱温度 180 °C;气化室温度 300 °C;检测器温度 280 °C;进样量 0.1 μL.

2 实验结果

实验测定了 6.67 kPa 下乙二醇(1)-1,4-丁二醇(2)-二乙二醇(3)三元物系气液相平衡数据,实验结果见表 1.

表 1 6.67 kPa 下乙二醇(1)-1,4-丁二醇(2)-二乙二醇(3)三元体系气液平衡数据

Tab. 1 The VLE data for the Ethylene glycol(1)-1,4-Butylene glycol(2) and Diethylene glycol(3) ternary system at 6.67 kPa

序号	$T/^\circ\text{C}$	x_1	x_2	x_3	y_1	y_2	y_3
1	126.5	1.000 0	0.000 0	0.000 0	1.000 0	0.000 0	0.000 0
2	128.9	0.962 5	0.021 8	0.015 7	0.989 7	0.006 8	0.003 5
3	129.7	0.926 7	0.044 2	0.029 1	0.979 8	0.013 6	0.006 1
4	129.8	0.851 4	0.099 1	0.049 5	0.959 3	0.030 7	0.010 5
5	130.4	0.704 8	0.157 8	0.1373	0.914 7	0.054 5	0.029 8
6	131.7	0.684 4	0.168 4	0.147 2	0.914 7	0.054 6	0.031 7
7	133.6	0.531 2	0.213 0	0.255 8	0.849 7	0.084 3	0.066 0
8	136.0	0.421 3	0.263 0	0.315 7	0.780 3	0.127 4	0.092 3
9	137.8	0.350 1	0.281 7	0.368 1	0.741 6	0.140 7	0.117 7
10	139.4	0.324 1	0.302 9	0.373 0	0.731 1	0.152 1	0.116 8
11	140.0	0.285 9	0.315 4	0.398 7	0.666 2	0.183 6	0.150 2
12	148.7	0.203 9	0.326 8	0.469 3	0.529 4	0.235 4	0.235 2
13	149.1	0.171 7	0.319 9	0.508 5	0.494 2	0.243 2	0.262 6
14	149.8	0.163 2	0.315 0	0.521 8	0.486 1	0.244 3	0.269 6
15	150.1	0.143 5	0.310 7	0.545 8	0.459 6	0.249 1	0.291 3
16	150.5	0.131 5	0.305 4	0.563 2	0.458 4	0.248 6	0.293 0
17	158.3	0.069 3	0.252 2	0.678 5	0.256 1	0.262 7	0.481 2
18	158.5	0.065 4	0.239 6	0.695 0	0.252 5	0.255 2	0.492 3
19	158.5	0.040 3	0.184 3	0.775 3	0.141 8	0.216 9	0.641 2
20	165.1	0.017 3	0.080 8	0.901 9	0.067 8	0.110 6	0.821 5
21	166.1	0.000 0	0.000 0	1.000 0	0.000 0	0.000 0	1.000 0

注:气液数据均为质量分数.

3 三元体系数据关联

采用 Aspen 软件,选用 WILSON^[8-9]模型、NRTL^[10]模型和 UNIQUAC^[11-12]模型,分别对实验数据进行关联,以检测实验数据与检测结果之间的吻合度.

多元体系 WILSON 方程模型参数表达式如下:

$$\ln A_{ij} = a_{ij} + \frac{b_{ij}}{T} + c_{ij} + d_{ij} \cdot T. \quad (1)$$

多元体系 NRTL 方程模型参数表达式如下:

$$G_{ij} = \exp(-a_{ij} \cdot t_{ij}); \quad (2)$$

$$t_{ij} = a_{ij} + \frac{b_{ij}}{T} + e_{ij} \ln T + f_{ij} T; \quad (3)$$

$$A_{ij} = c_{ij} + d_{ij} \cdot (T - 273.15). \quad (4)$$

多元体系 UNIQUAC 方程模型参数表达式如下:

$$t_{ij} = \exp(a_{ij} + \frac{b_{ij}}{T} + c_{ij} \ln T + d_{ij} T). \quad (5)$$

式中: a_{ij} 、 b_{ij} 、 c_{ij} 、 d_{ij} 、 e_{ij} 及 f_{ij} 分别为各模型二元交互作用参数.

采用阻尼最小二乘法对所选物系的气液平衡数据进行关联,选用目标函数:

$$F = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{T_i^{\text{pre}} - T_i^{\text{exp}}}{\sigma^T} \right)^2 + \left(\frac{y_i^{\text{pre}} - y_i^{\text{exp}}}{\sigma^y} \right)^2 \right]. \quad (6)$$

其中, σ^T 和 σ^y 是温度和气相组成的标准偏差, 代入数据回归得到二元交互作用参数. 笔者所在课题组已经测得该体系中各二元物系的汽液平衡数据, 经热力学一致性检验, 所得数据均符合热力学一致性^[5]. 二元交互作用参数如表2~4所示.

分别采用二元交互作用参数代入 Aspen Plus 对所测得的液相数据进行模拟得到规定条件下的气相预测数据如表5所示. 由模拟所得数据与实验数据进行比较得到其相对误差见表6.

表2 6.67 kPa 下乙二醇(1)-1,4-丁二醇(2) NRTL、WILSON 和 UNIQUAC 模型二元交互作用参数

Tab.2 The interaction parameters of NRTL, WILSON and UNIQUAC models for the Ethylene glycol(1) and 1,4-Butylene glycol(2) at 6.67 kPa

模型	a_{12}	a_{21}	b_{12}/K	b_{21}/K	A
NRTL	-7.955	1.483	3 694	-8 795	0.300
WILSON	0.150	5.956	129.8	-2 795	—
UNIQUAC	2.128	-0.345	-1 019	232.3	—

表3 6.67 kPa 下1,4-丁二醇(2)-二乙二醇(3) NRTL、WILSON 和 UNIQUAC 模型二元交互作用参数

Tab.3 The interaction parameters of NRTL, WILSON and UNIQUAC models for the 1,4-Butylene glycol(2) and Diethylene glycol(3) at 6.67 kPa

模型	a_{12}	a_{21}	b_{12}/K	b_{21}/K	A
NRTL	1.854	1.450	-633.3	-783.3	0.300
WILSON	-1.510	-1.487	761.9	525.3	—
UNIQUAC	-0.615	-0.349	195.0	217.6	—

表4 6.67 kPa 下乙二醇(1)-二乙二醇(3) NRTL、WILSON 和 UNIQUAC 模型二元交互作用参数

Tab.4 The interaction parameters of NRTL, WILSON and UNIQUAC models for the Ethylene glycol(1) and Diethylene glycol(3) at 6.67 kPa

模型	a_{12}	a_{21}	b_{12}/K	b_{21}/K	A
NRTL	-12.410	-0.541	5 608	-592.8	0.300
WILSON	1.036	7.351	-227.4	-3 273	—
UNIQUAC	3.713	-0.144	-1 694	187.1	—

表5 6.67 kPa 下乙二醇(1)-1,4-丁二醇(2)-二乙二醇(3)三元气相预测数据

Tab.5 Predicted vapor data for the Ethylene glycol(1)-1,4-Butylene glycol(2) and Diethylene glycol(3) ternary system at 6.67 kPa

序号	T/°C	NRTL			WILSON			UNIQUAC		
		y_1	y_2	y_3	y_1	y_2	y_3	y_1	y_2	y_3
1	124.6	1.000 0	0.000 0	0.000 0	1.000 0	0.000 0	0.000 0	1.000 0	0.000 0	0.000 0
2	123.9	0.989 3	0.007 2	0.003 5	0.989 5	0.007 4	0.003 1	0.989 2	0.007 3	0.003 6
3	124.3	0.979 4	0.014 3	0.006 4	0.979 8	0.014 5	0.005 6	0.983 4	0.010 5	0.006 0
4	125.1	0.958 5	0.031 3	0.010 2	0.959 1	0.031 6	0.009 2	0.958 6	0.031 4	0.010 1
5	127.0	0.921 4	0.050 3	0.028 2	0.921 9	0.051 1	0.027 0	0.921 8	0.050 3	0.027 9
6	127.3	0.915 4	0.054 2	0.030 5	0.915 7	0.055 0	0.029 3	0.915 8	0.054 1	0.030 1
7	130.2	0.863 3	0.076 8	0.059 9	0.861 6	0.078 4	0.060 0	0.863 1	0.077 2	0.059 8
8	133.1	0.804 1	0.110 1	0.085 8	0.800 9	0.112 1	0.087 0	0.802 9	0.111 0	0.086 1
9	135.6	0.750 6	0.134 3	0.115 0	0.746 9	0.136 3	0.116 9	0.748 7	0.135 6	0.115 8
10	136.7	0.725 1	0.152 3	0.122 6	0.721 3	0.154 2	0.124 5	0.722 9	0.153 7	0.123 4
11	138.4	0.683 5	0.173 0	0.143 6	0.679 8	0.174 6	0.145 6	0.680 8	0.174 6	0.144 6
12	142.9	0.564 1	0.222 7	0.213 3	0.561 7	0.223 2	0.215 1	0.560 8	0.224 4	0.214 8
13	145.1	0.502 5	0.240 5	0.257 1	0.501 1	0.240 3	0.258 6	0.499 2	0.242 0	0.258 7
14	145.7	0.484 5	0.243 5	0.272 0	0.483 6	0.243 1	0.273 3	0.481 4	0.244 9	0.273 7
15	147.2	0.439 7	0.255 8	0.304 5	0.439 5	0.255 1	0.305 4	0.436 9	0.257 1	0.306 0
16	148.2	0.410 2	0.261 8	0.328 0	0.410 7	0.260 7	0.328 6	0.407 8	0.262 8	0.329 4
17	153.9	0.231 9	0.269 3	0.498 8	0.235 0	0.267 4	0.497 6	0.232 1	0.269 0	0.498 9
18	154.4	0.219 3	0.260 2	0.520 4	0.222 6	0.258 4	0.519 0	0.219 8	0.259 9	0.520 3
19	159.1	0.136 0	0.221 1	0.642 9	0.139 5	0.219 7	0.640 8	0.137 5	0.220 6	0.641 9
20	160.4	0.057 5	0.108 5	0.834 0	0.059 9	0.108 0	0.832 1	0.059 0	0.108 3	0.832 7
21	164.2	0.000 0	0.000 0	1.000 0	0.000 0	0.000 0	1.000 0	0.000 0	0.000 0	1.000 0

表6 6.67 kPa下三元体系实验数据与预测数据比较

Tab.6 The comparison between experimental data and predicted data for the ternary system at 6.67 kPa

模型	$ \Delta y_1 $	$ \Delta y_1 $ 的相对误差/%	$ \Delta y_2 $	$ \Delta y_2 $ 的相对误差/%	$ \Delta y_3 $	$ \Delta y_3 $ 的相对误差/%
NRTL	0.012 6	3.601	0.004 9	3.636	0.008 0	4.076
WILSON	0.011 4	3.107	0.004 3	3.535	0.007 8	5.326
UNIQUAC	0.012 5	3.447	0.004 8	4.471	0.008 0	4.108

$$\text{注: } |\Delta y| = \frac{\sum |y^{\text{exp}} - y^{\text{pre}}|}{N}, |\Delta y| \text{的相对误差} = \frac{\sum \frac{|y^{\text{exp}} - y^{\text{pre}}|}{y^{\text{exp}}}}{N} \cdot 100\%$$

由表6可知,实验检测数据与模拟结果之间最大绝对误差为0.012 6,最大相对误差为5.326%。其中,乙二醇与1,4-丁二醇检测数据与模拟结果之间吻合度高于二乙二醇,这是由于在气相组分中重组分相对较少,因此较小的绝对误差就会引起其相对误差较大。但是,3种模型对于乙二醇-1,4-丁二醇-二乙二醇三元物系都有较好的适用性,模拟结果并无明显差异,其结果均可以认为满足工程分离设计的要求。

由实验数据绘制6.67 kPa下乙二醇-1,4-丁二醇-二乙二醇三元物系的气液平衡相图见图2。

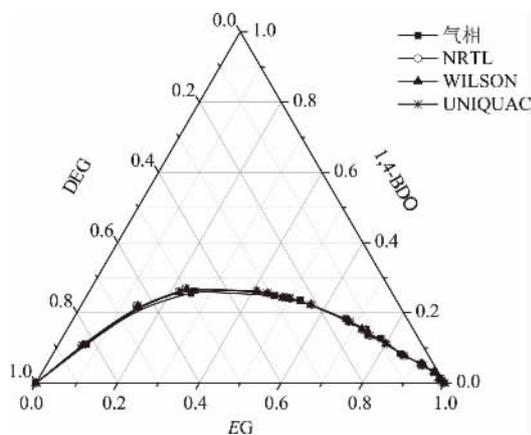


图2 6.67 kPa下乙二醇-1,4-丁二醇-二乙二醇气液相平衡图

Fig.2 VLE diagram for the Ethylene glycol-1,4-Buthylene glycol and Diethylene glycol at 6.67 kPa

4 结论

(1) 实验测定了6.67 kPa下乙二醇-1,4-丁二醇-二乙二醇三元物系的气液平衡数据,与工业实际生产中使用压力比较接近,丰富了化工设计基础数据,具有一定的参考价值,可以认为满足工程上分离设计的要求。

(2) 分别采用了NRTL、WILSON以及UNIQUAC模型对实验数据进行了关联,发现3种模型对实验所用三元物系适用性并无明显差异,实验数据与3种模型模拟数据之间吻合度都较

高,说明3种模型都能很好的适用于该物系。

符号说明:

x ——液相质量分数; $a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij}, e_{ij}, f_{ij}$ ——模型参数;

y ——气相质量分数; σ ——偏差;

F ——目标函数; Δ ——偏差;

T ——温度, $^{\circ}\text{C}$; $||$ ——绝对值;

上标下标

exp——实验值; i, j ——组分;

pre——预测值。

参考文献:

- [1] 黄格省,李振宇,李顶杰.石油和煤生产乙二醇技术现状及产业前景分析[J].化工进展,2011,30(7):1461-1465.
- [2] 何立,肖含,李应成.乙二醇合成技术研究进展[J].工业催化,2006,14(6):11-15.
- [3] 周张锋,李兆基,潘鹏斌.煤制乙二醇技术进展[J].化工进展,2010,29(11):2003-2009.
- [4] 孙玉净,于春梅.我国煤制乙二醇产业化现状与前景[J].化学工业,2012,30(1):49-52.
- [5] 陈卫航,李清亚,蒋元力.乙二醇-1,4-丁二醇二元物系6.67kPa下汽液平衡研究[J].高校化学工程学报,2015,29(1):238-241.
- [6] 陈军航,陈卫航,蒋元力.真空下1,2-丁二醇-乙二醇二元体系汽液平衡数据的测定及关联[J].天然气化工,2013,38(4):55-59.
- [7] 陈卫航,陈军航,蒋元力,等.真空下1,2-丙二醇-乙二醇二元体系汽液平衡研究[J].郑州大学学报(工学版),2013,34(6):36-39.
- [8] GORALI M. Derivation of Wilson equation for GE from association models [J]. Fluid phase equilibria, 1995, 106(1):11-16.
- [9] NAGATA I. Representation of ternary liquid-liquid equilibria by means of modified from the Wilson equation [J]. Thermochemical acta, 1995, 249(1/2):75-87.
- [10] RENON H, PRAUSNITZ J M. Local compositions in thermodynamic excess functions for liquid mixtures [J]. AIChE J, 1968, 14(1):135-144.
- [11] ABRAMS D S, PRAUSNITZ J M. Statistical thermodynamics of liquid mixtures: a new expression for the ex-

cess Gibbs energy of partly or completely miscible systems [J]. *AIChE J*, 1975, 21(1): 116 - 118.
[12] WISNIEWSKA - GOCOWSKA B, MAIANOWSKI S K.

A new modification of the UNIQUAC equation including temperature dependent parameters [J]. *Fluid-phase equilibria*, 2001, 180(1/2): 103 - 113.

Vapor-Liquid Equilibrium for Ternary System of Ethylene Glycol-1, 4-Butylene Glycol and Diethylene Glycol

CHEN Weihang¹, LI Yien¹, ZHANG Jie¹, JIANG Yuanli², WANG Xunqiu¹

(1. School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Energy Chemical Industry Group Co., Ltd, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: In this study, isobaric vapor-liquid equilibria (VLE) data for the ternary system of Ethyleneglycol, 1,4-Butylene glycol and Diethylene glycol were measured at 6.67 kPa. The experimental data were correlated by the widely used NRTL, UNIQUAC, and Wilson models, and the results showed that the maximum average relative error between the experimental data and the predicted data was 5.3262%, which could meet the requirement of separation engineering.

Key words: producing glycol by coal; ternary VLE; NRTL equation; WILSON equation; UNIQUAC equation

(上接第 9 页)

A New Cryptophane A-Coated SAW Methane Gas Sensor

WANG Wen¹, HU Haoliang¹, HE Shitang¹, PAN Yong², ZHANG Caihong³

(1. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China; 2. State Key Laboratory of NBC Protection of Civilian, Research Institute of Chemical Defense, Beijing 102205, China; 3. School of Chemistry and Chemical Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: In view of the current situation that the traditional methane sensor technology is difficult to implement the field detection and monitor on methane gas, a novel room-temperature SAW methane gas sensor coated with cryptophane-A sensing interface is proposed by utilizing the supermolecular compound cryptophane-A's specific clathration to methane molecules. The sensor was composed of differential resonator-oscillators with excellent frequency stability, a supra-molecular CrypA coated along the acoustic propagation path, and a frequency acquisition module. The supramolecular CrypA was synthesized from vanillyl alcohol using a three-step method and deposited onto the surface of the sensing resonators via dropping method. Fast response and excellent repeatability were observed in gas sensing experiment, and the estimated detection limit and measured sensitivity in gas dynamic range of 0.2% ~ 5% was evaluated as ~0.05% and ~184 Hz/%, respectively. The measured results indicated the SAW sensor was promising for under-mine methane gas detection and monitor.

Key words: surface acoustic wave; methane gas sensor; cryptophane-A; resonator-oscillators

文章编号: 1671-6833(2016)06-0024-04

微注射成型 HDPE 制品的结构和力学性能

石素宇¹, 王利娜¹, 许文仲², 郑国强², 申长雨²

(1. 河南工程学院 材料与化学工程学院, 河南 郑州 450007; 2. 郑州大学 材料科学与工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 采用微注射成型技术制备了两种不同分子量的高密度聚乙烯(HDPE)制品,考察了不同分子量制品的微结构和力学性能. 拉伸测试结果表明:与低分子量的HDPE制品相比,高分子量制品的拉伸强度提高了77.5%,同时断裂韧性也增大至低分子量的2倍. 综合利用差示扫描量热法(DSC),广角X射线衍射(WAXD),小角X射线散射(SAXS)和扫描电子显微镜(SEM)对制品的微结构进行表征,进一步建立了结构-性能的关系,其中拉伸强度较高主要由于制品内分子链和片晶取向程度的增加;此外,制品内 shish 结构和 shish-kebab 结构数量的增加也有助于拉伸强度的提高,而制品韧性较高则归因于强的交联网络的形成.

关键词: 微注射成型; 高密度聚乙烯; 拉伸强度; 断裂韧性; 分子量

中图分类号: TQ320.66

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.03.024

0 引言

过去几十年,无论在理论研究还是生产实践领域,人们就分子量对高密度聚乙烯(HDPE)制品微结构的影响开展了大量的研究. 四川大学的曹文^[1]通过动态保压注射成型技术制备了3种不同分子量的HDPE制品,对制品的多层次结构进行了表征,并研究了制品的结晶形态及聚合物的分子量对 shish-kebab 串晶结构形成的影响. Wang等^[2]通过水辅注射成型技术制备了两种不同分子量的HDPE制品,对比研究了制品的结晶形态. Sun等^[3]研究了分子量对气辅注射成型HDPE制品结晶形态和取向结构的影响,研究发现不同分子量HDPE制品的不同区域形成不同的晶体结构. Liang等^[4]在研究动态保压注塑成型LLDPE/HDPE复合材料时意外地发现低分子量的HDPE更能提高共混物的取向度. 然而,有关分子量对HDPE制品取向结构及结晶行为的影响仍然是一个有争议的课题,需要更加深入地研究.

微注塑成型(micro-injection molding)技术是在传统注射成型的基础上发展起来的用于制备微制件的新型加工技术. 微注射成型过程特定的物理场必然会影响到聚合物熔体的充填和冷却行为,最终

导致微注射成型制品形态结构和宏观性能的不同. 有关聚合物微注射成型的研究大多集中在成型工艺的优化^[5]、先进成型设备的研发^[6]以及对成型过程的数值模拟分析^[7]方面. 到目前为止,有关微注射成型制品微结构、性能及其关系的研究很少.

笔者通过微注塑成型技术制备了两种不同分子量的HDPE制品,考察了不同分子量微制品的结构及性能,并从制品的形态控制和结构表征的角度探讨了结构-性能的关系,为材料的设计提供了一定的理论基础.

1 实验部分

1.1 实验原料

实验采用两种不同分子量的高密度聚乙烯,分别由大庆石油化工公司(HDPE5000S)和抚顺石油化工公司(HDPE2911)提供. HDPE2911和HDPE5000S的重均分子量分别为 1.3×10^5 g/mol和 3.1×10^5 g/mol.

1.2 样品的制备与表征

1.2.1 试样制备

利用HTF80B-W2型注塑机在相同条件下微注塑成型不同分子量的HDPE制品,成型工艺参数如表1所示,制品的形状、尺寸同文献[8].

收稿日期: 2015-10-24; 修订日期: 2015-12-12

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(51173171); 河南省高校科技创新人才支持计划项目(2012HASTIT002)

作者简介: 石素宇(1982—),女,河南封丘人,河南工程学院讲师,博士,主要从事聚合物成型加工的研究, E-mail: sssmail@126.com.

表1 微注射成型的工艺参数

Tab.1 Processing parameters of micro-injection molding

熔体温 度/℃	模具温 度/℃	注射压 力/MPa	保压时 间/s	冷却时 间/s
260	130	140	10	90

1.2.2 差示扫描量热(DSC)测试

采用美国TA公司的MDSC-2920型热分析仪测试HDPE制品的熔融行为.将3 mg左右的样品(取样如图1)置于热坩埚中,在N₂气氛中,以10℃/min的升温速率从室温升温至150℃,记录其熔融过程的DSC曲线.



图1 微结构表征示意图

Fig.1 The schematic diagram for the microstructure measurements

1.2.3 广角X射线衍射(WAXD)测试

在合肥国家同步辐射实验室进行二维广角X射线衍射(2D-WAXD)测试.X射线入射方向垂直于制品流动方向(图1),X射线波长为0.154 nm,探测器到样品的距离为375 mm.基于测试结果,计算制品的结晶度和分子链取向度^[9].

1.2.4 X射线散射(SAXS)测试

在上海同步辐射实验室进行二维小角X射线散射(2D-SAXS)测试.X射线入射方向同2D-WAXD测试,X射线波长为0.124 nm,接收器和样品之间的距离为5 200 mm.利用Fit2D软件对2D-SAXS图沿(0~360°)方位角平均积分得到一维散射曲线(1D-SAXS).

1.2.5 扫描电子显微镜观察(SEM)

试样于液氮中冷却2 h,沿流动方向脆断后放于配好的刻蚀液中刻蚀4.5 h,刻蚀液由浓硫酸和浓硝酸以及质量分数为0.7%的高锰酸钾组成.刻蚀后的样品分别用双氧水、稀硫酸、高速水和丙酮冲洗干净.在样品的断面作喷金处理,用JEOL JSM-7500F型扫描电镜观察样品的结晶形貌.

1.2.6 拉伸性能测试

按照ASTM D638-03测试标准,采用UTM2203型万能材料实验机在室温下(约25℃)测试试样的拉伸性能,拉伸速率为1 mm/min.对每一组数据,都至少取5根样条进行测试,并对其求平均值.

2 分析与讨论

2.1 拉伸性能测试

图2为微注射成型HDPE制品的应力-应变曲线.由图2可知,HDPE2911和HDPE5000S的拉伸强度分别为27.1 MPa和48.1 MPa,且拉伸强度随分子量的增加显著提高.相对于HDPE2911,HDPE5000S制品的拉伸强度提高了77.5%.对应力-应变曲线所包围的面积进行积分得到试样断裂时的应变能密度.HDPE5000S制品的应变能密度(16.8 MJ·m⁻³)约为HDPE2911的2倍(8.8 MJ·m⁻³).应变能密度越高则材料的韧性越好^[8],由此得出结论:随分子量的增加,微注射成型HDPE制品的拉伸强度显著增加,同时,制品的韧性也提高了2倍.

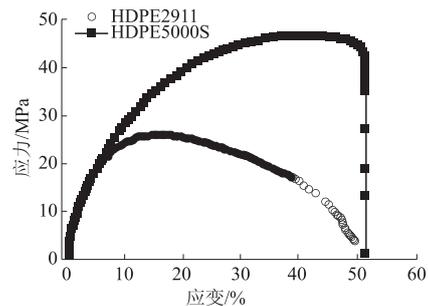


图2 HDPE微制品的应力-应变曲线

Fig.2 The stress-strain curves of HDPE microparts

2.2 微观结构分析

图3(a)是不同分子量HDPE制品的1D-WAXD曲线图,通过分峰拟合得到晶区和非晶区的面积,并计算制品的结晶度.HDPE2911和HDPE5000S的结晶度分别为0.66和0.73,其中高分子量HDPE制品的结晶度较大.对(110)晶面进行0~360°积分得到方位角曲线(图3(b)),计算制品中分子链的取向度.HDPE5000S和HDPE2911的取向度分别为0.73和0.49,高分子量制品中

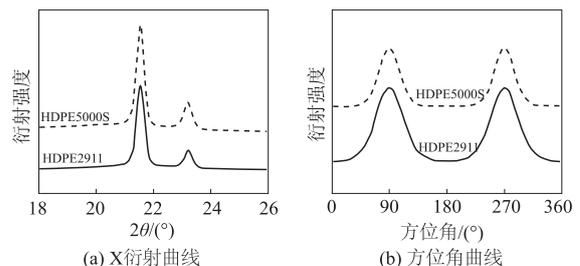


图3 HDPE制品的一维广角X衍射曲线和方位角曲线

Fig.3 1D-WAXD curves and the azimuthal angle profiles of HDPE parts

分子链的取向程度要显著高于低分子量制品。

图4为不同分子量HDPE微制品的2D-SAXS图。由图4可知:两种分子量的制品均在赤道方向出现了弱的散射条纹,对应于shish结构的散射;在子午线方向均出现了两个散射斑,对应于kebab的散射。随着分子量的增大,散射条纹和散射斑强度增加,说明高分子量的制品形成了较多的取向晶体结构,即shish-kebab结构。此外,HDPE5000S的散射条纹较长,说明制品内形成的shish结构的数量增多,散射斑变的更加集中,进而说明HDPE5000S制品中形成的kebab结构沿垂直于流动方向排列的程度增大^[10]。

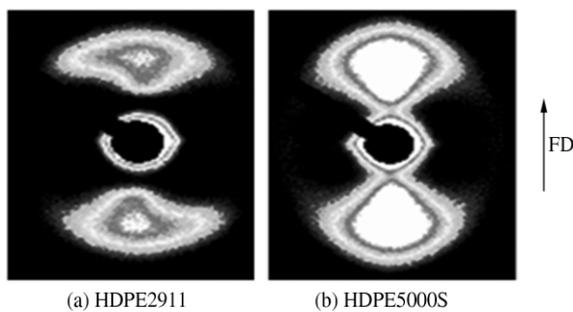


图4 HDPE微制品的2D-SAXS图

Fig. 4 2D-SAXS patterns of HDPE microparts

对2D-SAXS图进行积分得到方位角曲线如图5(a)所示。由图5可以看出,随分子量的增加,方位角曲线峰变得尖锐,说明片晶的取向度增大。对方位角曲线进行高斯拟合,计算片晶的取向度,结果见表2。由表2可知,HDPE2911和HDPE5000S的取向度分别为0.37和0.62,片晶的取向度随分子量的增加而增大。同时对2D-SAXS积分并进行Strbol修正得到K-Z曲线^[11],如图5(b)所示,计算得到一些晶体结构参数如表2所示。由表2可知,随分子量的增加,长周期、晶片厚度和非晶区的厚度都减小。

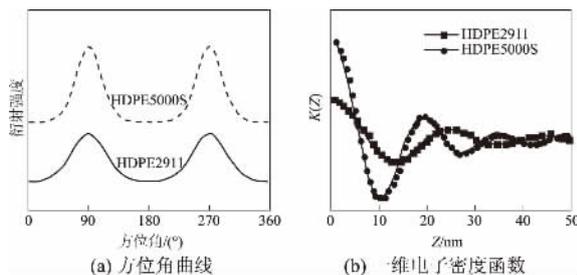


图5 HDPE微制品的方位角曲线和一维电子密度函数

Fig. 5 The azimuthal angle profiles and K-Z curves for the HDPE microparts

表2 X射线散射数据

Tab. 2 The data obtained from SAXS result				
试样	取向度	长周期/nm	晶片厚度/nm	非晶区厚度/nm
HDPE5000S	0.62	19.08	10.42	8.66
HDPE2911	0.37	24.70	14.02	10.68

图6为微注射成型不同分子量HDPE制品的DSC升温曲线。由图6可以看出,HDPE2911的曲线只呈现一个kebab片晶的熔融峰,未观察到shish结构的熔融峰,说明制品中形成的shish结构较少,不足以被检测出来。而HDPE5000S的DSC曲线呈现两个熔融峰:温度较低的熔融峰归因于制品中kebab片晶的熔融,在高于主峰3~5℃出现小的肩峰(箭头所示)则归因于制品中形成shish结构的熔融。应力作用下,只有超过临界相对分子质量的分子链才可能形成shish结构。临界相对分子质量与分子链在应力作用下的松弛时间有关。相对分子质量高的分子链在应力作用下具有较长的松弛时间,更易于形成shish结构。此外,随相对分子质量的增加,kebab的熔融峰向低温方向移动,说明kebab的晶片厚度变薄。WAXD结果表明,HDPE5000S制品的结晶度较高,shish结构的增加和kebab厚度的变薄必然导致制品内形成更多的shish-kebab结构。微注射成型过程中,分子量较高的分子链受到较强的剪切,随剪切应力的增加,制品内形成shish-kebab晶体的直径减小,数量增加,制品内部沿流动方向形成了较多取向的晶体结构。

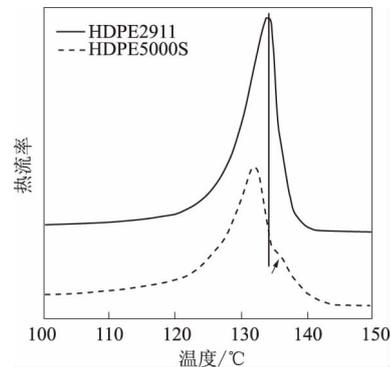


图6 不同分子量HDPE微制品的DSC升温曲线

Fig. 6 DSC heating curves of HDPE microparts with different molecular weights

图7为不同分子量HDPE的扫描电镜图。对于HDPE5000S制品,能清楚地观察到沿流动方向紧密排列的kebab片晶结构,并且HDPE5000S的晶片厚度较薄。HDPE2911制品的SEM图未观察到规整排列的kebab片晶结构,这主要由于kebab

片晶排列与 shish 结构的限制有关, shish 结构数量少会导致 kebab 片晶扭曲^[12]. 由 DSC 结果可知,低分子量的 HDPE2911 形成较少的 shish 结构,从而导致垂直于 shish 方向形成的 kebab 结构可能发生了扭曲.

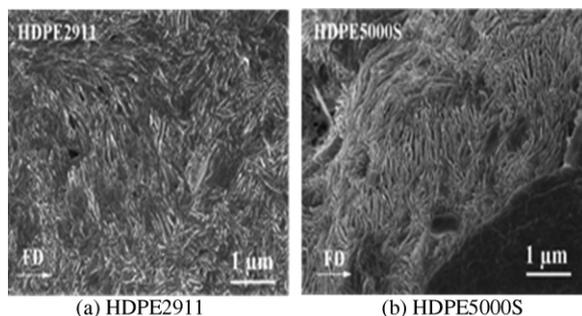


图7 微注射成型不同分子量 HDPE 制品的 SEM 图
Fig.7 SEM images of micro-injection molded HDPE parts with different moldcular weights

2.3 结构与性能之间的关系

通过分析制品微结构和拉伸性能的代表结果,建立了结构与性能之间的联系:高分子量 HDPE 微制品拉伸强度较高,主要由于制品分子链和片晶的取向度增加以及制品内部形成 shish 和 shish-kebab 晶体结构数量的增加;高分子量 HDPE 制品韧性同时增加主要是由于制品内形成 shish-kebab 晶体的数量增加,导致更多的分子链贯穿于晶区和非晶区之间,从而形成较强的交联网络结构,促进应力在晶区和非晶区之间有效传递.

3 结论

采用微注射成型制备了两种不同分子量的 HDPE 制品,考察了制品的形态结构及力学性能.拉伸测试结果显示,高分子量 HDPE 制品同时具有较高的拉伸强度和韧性.通过综合分析微结构的表征结果,阐明了结构-性能之间的关系:拉伸强度增加,主要由于制品内形成较多取向的晶体结构,分子链和片晶的取向度增加;韧性显著提高主要原因在于制品内形成了较强的交联网络结构.

参考文献:

[1] 曹文. 聚烯烃注射成型制品的形态控制和多层次结构[D]. 成都: 四川大学高分子科学与工程学院, 2007.

- [2] WANG B, HUANG H X, LU H Y. Crystal morphology of water-assisted injection molded high-density polyethylene with two different molecular weights [J]. J Macromol Sci Part B, 2011, 50(8): 1615 - 1624.
- [3] SUN N, YANG B, WANG L, et al. Crystallization behavior and molecular orientation of high density polyethylene parts prepared by gas-assisted injection molding [J]. Polym Int, 2012, 61(4): 622 - 630.
- [4] LIANG S, WANG K, TANG C Y, et al. Unexpected molecular weight dependence of shish-kebab structure in the oriented linear low density polyethylene/high density polyethylene blends [J]. J Chem Phys, 2008, 128(17): 174902 - 174910.
- [5] GRIFFITHS C A, TOSELLO G, DIMOV S S, et al. Characterisation of demoulding parameters in micro-injection moulding [J]. Microsystem technologies, 2015, 21(8): 1677 - 1690.
- [6] LANTADA A D, PIOTTER V, PLEWA K, et al. Toward mass production of microtextured microdevices: linking rapid prototyping with microinjection molding [J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2015, 76(5/8): 1011 - 1020.
- [7] 王金莲, 黄庆达, 许忠斌, 等. 微注塑成型技术研究现状与发展[J]. 塑料工业, 2014, 42(8): 16 - 20.
- [8] SHI S Y, PAN Y M, LU B, et al. Realizing the simultaneously improved toughness and strength of ultra-thin LLDPE parts through annealing [J]. Polymer, 2013, 54(25): 6843 - 6852.
- [9] 潘亚敏, 石素宇, 常宝宝, 等. 退火对等规聚丙烯微注射制品性能及结构的影响[J]. 郑州大学学报(工学版), 2013, 34(6): 59 - 62.
- [10] ZHU P G, EDWARD G. Morphological distribution of injection-moulded isotactic polypropylene: a study of synchrotron small angle X-ray scattering [J]. Polymer, 2004, 45(8): 2603 - 2613.
- [11] STROBL G R, SCHNEIDER M J. Model of partial crystallization and melting derived from small-angle X-ray scattering and electron microscopic studies on low-density polyethylene [J]. J Polym Sci Polym Phys, 1980, 18(6): 1361 - 1381.
- [12] NOGALES A, HSIAO B S, SOMANI R H, et al. Shear-induced crystallization of isotactic polypropylene with different molecular weight distributions: in situ small-and wide-angle X-ray scattering studies [J]. Polymer, 2001, 42(12): 5247 - 5256.

(下转第33页)

文章编号: 1671-6833(2016)06-0028-06

基于变密度法的清扫车举升油缸支架结构设计与分析

邓亚东^{1,2}, 张坤^{1,2}, 金德先³

(1. 武汉理工大学汽车工程学院, 湖北 武汉 430070; 2. 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070; 3. 武汉优力汽车技术发展有限公司, 湖北 武汉 430070)

摘要: 为了得到简单可靠的清扫车举升油缸支架结构, 建立了以体积分数(Volume Fraction)为约束条件、以结构加权应变能(Weighted Compliance)为目标函数的变密度法(Variable Density Method)拓扑优化数学模型, 利用线性近似的方法, 分析了采用复合式垃圾箱的道路清扫车在倾倒垃圾过程中油缸支架的受力状况, 确定了举升起始工况和检修工况作为设计油缸支架的主要受力工况. 采用变密度法对油缸支架进行了拓扑优化设计. 在考虑制造工艺可靠性的前提下, 以拓扑优化结果为基础建立了清扫车举升油缸支架的三维模型, 并进行了线性静态分析. 结果表明, 基于变密度法设计的清扫车举升油缸支架结构简单, 占用空间小, 最大应力与最大应变均处于合理范围, 满足使用要求.

关键词: 清扫车; 油缸支架; 变密度法; 加权应变能; 拓扑优化

中图分类号: U463.92 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.06.023

0 引言

道路清扫车作为一种自动收集地面垃圾及尘土的环卫机械, 受到各地环卫部门越来越高的重视. 高压冲洗、自动避障等功能逐渐成为道路清扫车的标准配置. 8 t、16 t 等大中型道路清扫车单次清扫面积大、效率高, 已成为各城市的主力清扫车辆. 市场的巨大需求令国内市场涌现出了许多环卫机械生产企业. 与国外相比, 我国清扫车水平仍有一定差距, 主要表现在以下几点: 一是缺乏核心技术, 高压水泵等零部件基本依赖进口, 风机体积大, 功率低; 二是整车集成能力不足, 倾向保守设计, 导致清扫车整备质量大, 有效载荷低^[1-3]. 在现有条件的基础上, 优化清扫车各系统零部件结构, 对于提高产品质量非常重要. 安息角的存在使清扫车需要举升一定的角度, 才能使垃圾箱内的垃圾完全自动倒出. 由于污水占据了垃圾箱内垃圾的绝大部分, 为保证垃圾箱能够平稳举升, 清扫车一般采用双举升油缸设计方案. 举升油缸上端铰接在垃圾箱底部, 下端通过油缸支架连接于副车架上. 在举升垃圾箱倾倒垃圾的过程中, 垃圾箱

内的垃圾残留量及其位置是无法确定的, 与垃圾的成分(如泥沙与树叶的百分比等)、垃圾与垃圾箱底板的摩擦系数有关, 因此油缸支架承受到的力也无法准确获得. 对于风机中置的清扫车来说, 举升油缸支架与风机前后还需要布置电动隔膜泵、水路控制刀阀、PCL 控制器、吸嘴上吸管、高低压水路、液压油路等各种零部件, 留给垃圾箱举升油缸支架的空间十分有限^[4-5]. 在复杂的空间限制下, 结合举升油缸支架的受力情况, 对举升油缸支架进行合理设计十分必要.

1 基于变密度法的结构拓扑优化方法

结构拓扑优化设计有三个要素: 设计变量、目标函数和约束条件. 解决结构拓扑优化设计问题的过程就是一个在满足约束条件的要求下寻求使目标函数达到理想值的设计变量的过程^[6]. 基于变密度法的结构拓扑优化设计中, 其基本思想是采用有限元方法对结构进行离散, 并假设材料的弹性模量与材料的密度为确定的数学关系, 且每个单元的密度为一个优化设计变量, 其大小在区间 $[0, 1]$ 变化. 常用的插值函数模型有固体各向

收稿日期: 2016-05-30; 修订日期: 2016-07-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51305132); 武汉理工大学重大研究计划和交叉学科创新研究项目(WUT142207005)

作者简介: 邓亚东(1958—), 男, 湖北黄冈人, 武汉理工大学教授, 博士生导师, 主要研究汽车动力学及其控制, 汽车及电动车辆系统分析与设计, E-mail: deydong@sina.com.

同性惩罚微结构模型(Solid Isotropic Material with Penalization, SIMP)和材料属性的合理近似模型(Rational Approximation of Material Properties, RAMP). SIMP密度函数插值模型的数学形式如下:

$$\mathbf{k}^e = (\rho^e)^p \mathbf{k}_0^e. \quad (1)$$

式中: e 为单元编号, $e = 1, 2, \dots, N$; ρ^e 为第 e 个单元的密度; p 为幂惩罚因子; \mathbf{k}_0^e 为第 e 个单元的自然刚度阵; \mathbf{k}^e 为第 e 个单元的刚度阵. 式中引入的幂惩罚因子 p 可以使 ρ^e 尽量向取值区间的两端靠近,减少中间密度单元的出现. 为了防止单元刚度矩阵奇异,一般需要给 ρ^e 设置一个下限,如0.001.

当优化后的单元密度接近0时,表示该单元弹性模量接近0,即该单元对考察的优化工况没有贡献,应被剔除,宏观上表现为一个没有材料分布的小孔;若单元密度接近1,表示该单元的贡献量大,该单元需要优先保留,宏观上表现为承受载荷的实体. 优化的约束条件可以是结构的质量、体积、质量分数、体积分数和频度等;目标函数可以是结构的加权应变能最小、最大应力或最大应变不超过给定值等. 以体积分数为约束条件、以结构加权应变能为目标函数的变密度法拓扑优化设计数学模型可简写为^[7]

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Find } \boldsymbol{\rho} = [\rho^1 \quad \rho^2 \quad \rho^3 \quad \dots \quad \rho^e]^T; \\ \min U = \min_{\rho^e} \sum_{i=1}^M W_i \sum_{e=1}^N (\rho^e)^p (\mathbf{u}^e)^T \mathbf{k}_0^e \mathbf{u}^e; \\ \text{s. t. } \frac{\int_{\Omega} \rho^e d\Omega}{V_0} \leq \varepsilon; \\ \mathbf{F} = \mathbf{k}\mathbf{u}; \\ 0 < \rho_{\min} \leq \rho^e \leq 1. \end{array} \right. \quad (2)$$

式中: U 为结构加权应变能; N 为单元总数; M 为工况总数; i 为工况编号, $i = 1, 2, \dots, M$; W_i 为第 i 个工况的加权系数; \mathbf{u}^e 为第 e 个单元节点位移向量; Ω 为结构的全体设计空间; $\rho^e d\Omega$ 表示第 e 个单元的体积; $\int_{\Omega} \rho^e d\Omega$ 表示优化后的结构体积; V_0 为全体设计空间的初始体积; ε 为体积分数;

式(2)中的第3个方程即表示体积分数约束条件; \mathbf{F} 为结构力向量; \mathbf{k} 为结构总刚度矩阵; \mathbf{u} 为结构位移向量;式(2)中其他参数的含义与式(1)相同.

解决此优化问题的步骤如下所示:

- 离散设计区域,建立有限元模型;
- 确定目标函数和约束条件,定义单元设计

变量并初始化;

c) 对有限元模型进行结构分析,计算各单元刚度矩阵与结点位移;

d) 计算总体结构的应变能及其灵敏度,求解拉格朗日乘子;

e) 利用优化准则法(Optimization Criteria, OC)对设计变量进行迭代计算;

f) 检查约束条件是否满足,若不满足则返回上一步;

g) 对每一步迭代产生的结果进行收敛性检查. 若将目标函数加权应变能作为迭代控制量,则收敛性评判标准为式(2). 若将设计变量定义为迭代控制量,则收敛性评判标准为式(3).

$$\left| \frac{U_j - U_{j-1}}{U_{j-1}} \right| \leq \varepsilon; \quad (3)$$

$$\left| \frac{\rho_j^e - \rho_{j-1}^e}{\rho_{j-1}^e} \right| \leq \varepsilon. \quad (4)$$

式中: U_j 、 U_{j-1} 和 ρ_j^e 、 ρ_{j-1}^e 分别为第 j 和第 $j-1$ 步迭代的加权应变能与单元密度.

h) 若上一步迭代结果收敛,则可得到结构的最优拓扑形式. 若不收敛,则返回至第c)步继续迭代,直至结果收敛^[8].

2 清扫车举升油缸工况分析

图1是与该清扫车举升油缸相关的零部件装配图,复合式垃圾箱处于举升状态. 复合式垃圾箱由前部清水箱和后部垃圾箱组成,二者焊接为一体. 油缸支架的两端分别通过螺栓固定在副车架的横梁上,中部开圆孔. 举升油缸外侧吊耳穿过油缸支架中部的圆孔,传递沿油缸轴线方向的力,每两个油缸支架共同支承一个举升油缸.

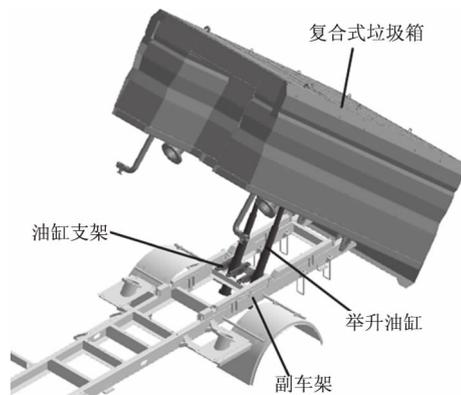


图1 处于举升状态的复合式垃圾箱

Fig. 1 Composite trash bin in the dumping process

清扫车执行清扫作业时,垃圾箱依靠自身重力固定在副车架上,清水箱的存水量由多变少,垃

圾箱里的垃圾逐渐增加. 此时清扫车举升油缸处于非工作状态, 油缸支架基本不受力.

清扫车倾倒垃圾时, 清水箱无水, 垃圾箱处于满载垃圾状态, 三级举升油缸缓慢举升复合式垃圾箱, 垃圾箱门同时打开, 垃圾自动倒出. 倾倒作业完成后, 液压油泵关闭, 复合式垃圾箱在自身重力下缓慢下落, 并最终压紧在副车架上. 举升油缸施加给复合式垃圾箱的力随着垃圾箱中垃圾残留量及垃圾箱举升角度而变化.

在清扫车纵向中心平面内, 以复合式垃圾箱与副车架的铰接点为坐标原点 O , 清扫车前进方向为 X 轴正向, 竖直向上为 Y 轴正向, 建立如图 2 所示的直角坐标系 XOY .

记: G_1 为空载的复合式垃圾箱重量; (X_1, Y_1) 为空载的复合式垃圾箱质心坐标; F_0 为举升油缸沿其轴线方向的力大小; θ 为 F_0 与 Y 轴正向之间的夹角; (X_0, Y_0) 为油缸上支点坐标; G_2 为残留垃圾的总重量; (X_2, Y_2) 为残留垃圾质心坐标; (X_3, Y_3) 为油缸下支点坐标.

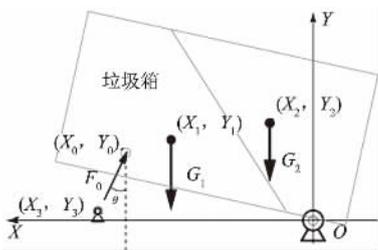


图 2 复合式垃圾箱受力简图

Fig. 2 Force diagram of the composite trash bin

根据设计要求, θ 在垃圾箱举升过程中由 9.21° 增加至 27.61° . 以举升过程中的复合式垃圾箱及其内部垃圾为研究对象. 由于举升过程十分缓慢, 可假设在举升过程中, 研究对象处于静力平衡状态, 对其在 O 点取力矩平衡方程, 有

$$F_0 X_0 \cos \theta + F_0 Y_0 \sin \theta - G_1 X_1 - G_2 X_2 = 0. \quad (5)$$

则可求得

$$F_0 = \frac{G_1 X_1 + G_2 X_2}{X_0 \cos \theta + Y_0 \sin \theta}. \quad (6)$$

根据牛顿第三定律易知, 举升油缸作用于油缸支架上的力大小也为 F_0 . 由于油缸支架宽度较小, 忽略沿支架支撑孔轴线方向上的力的变化, 则单个油缸支架的受力大小为

$$F = \frac{F_0}{4} = \frac{G_1 X_1 + G_2 X_2}{4(X_0 \cos \theta + Y_0 \sin \theta)}. \quad (7)$$

F 与 Y 轴负方向的夹角为 θ . 式(7)中, G_1 为常数, X_1, X_0, Y_0 均可由道路清扫车几何关系表示

为 θ 的函数. 关键的问题在于举升过程中, 垃圾箱内的垃圾残留量及其位置是无法确定的, 与垃圾的成分(如泥沙与树叶的百分比等)、垃圾与垃圾箱底板的摩擦系数有关.

假设在举升过程中, 垃圾残留量与其质心位置随着 θ 线性变化. 举升开始时, 垃圾残留量为清扫车垃圾箱最大有效容积 $V_2 = 4.36 \text{ m}^3$. 假设垃圾在垃圾箱内是均匀分布的, 其密度为 $\rho = 1.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. 取重力加速度 $g = 9.8 \text{ N/kg}$, 则举升初始状态下的垃圾残留量 G_2 为

$$G_2 = V_2 \rho g = 4.36 \times 1.5 \times 10^3 \times 9.8 (\text{N}) = 64\,092 (\text{N}). \quad (8)$$

X_2 的初始值可由相应的三维建模软件求得.

举升初始状态下的 $X_2 = 905.50 \text{ mm}$.

举升结束时, 垃圾箱内的垃圾倾倒完毕, G_2 和 X_2 均为零. 由于假设 G_2 和 X_2 随 θ 线性变化, 易得

$$G_2 = -355.40\theta + 9\,812.49; \quad (9)$$

$$X_2 = -49.21\theta + 1\,358.59. \quad (10)$$

式中: θ 单位为度($^\circ$); G_2 单位为 N; X_2 单位为 mm.

由式(7)、(9)、(10)及 X_1, X_0, Y_0 与 θ 的几何关系, 可求得 F 与 θ 的关系, 计算结果如表 1 所示.

表 1 举升过程中油缸支架受力特性

Tab. 1 Force condition of bracket during lifting

$\theta / (^\circ)$	9.21	13.81	18.41	23.01	27.61
F / kN	64.96	50.76	36.56	22.36	8.15

清扫车在检修过程中, 往往需要举升垃圾箱至最大举升角度. 此时垃圾箱中没有垃圾和清水, 车辆处于空载状态. 此时垃圾箱的工况与举升工况下 $\theta = 27.61^\circ$ 时的状态一致, 油缸支架的受力状态也一致.

取 $\theta = 9.21^\circ$ 时的举升起始工况和 $\theta = 27.61^\circ$ 的检修工况作为计算油缸支架的主要受力工况.

3 油缸支架拓扑优化设计

设计空间是设计变量的集合, 指在拓扑优化设计中需要优化改变其形状的区域^[9]. 非设计空间指在拓扑优化中形状保持不变的区域. 油缸支架依靠 4 个 M14 的螺栓固定在副车架的横梁上(图 3 中 A 区域). 油缸中部的圆孔与举升油缸外侧的吊耳相连(图 3 中 B 区域). 这两个部分是需要保持不变的. 为了尽可能给支架附近的其它零部件保留足够大的布置空间, 支架中间部分的厚度小于该零件最大宽度.

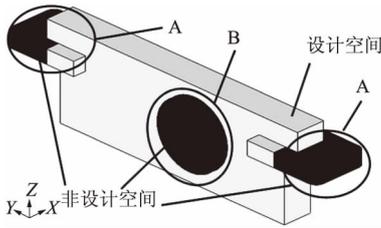


图 3 油缸支架拓扑优化的设计空间(灰色)与非设计空间(黑色)

Fig. 3 Design region and non-design region of the hydro-cylinder bracket

为保证油缸支架在工作过程中的应力和变形处于一定的范围内,定义目标函数为结构的加权应变能(weighted compliance) 最小. 约束条件定义为结构设计空间的体积分数(volume fraction), 其上限设置为 0.3. 定义两种工况具有相等的加权系数 0.5^[10]. 油缸支架采用球墨铸铁 QT500-7 铸造而成,其物理特性如表 2 所示.

表 2 QT500-7 物理特性

Tab. 2 Physical property of QT500-7

弹性模量/GPa	泊松比	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
147	0.3	7 800	320	500

油缸支架左右对称. 为避免蜂窝状结构的出现,定义零件向两侧拔模,最小尺寸设为 A 部分的厚度.

经过 25 次迭代后,拓扑优化设计结果收敛. 将密度 x_i 阈值设置为 0.3,密度大于阈值的单元都需要保留,得到举升油缸支架的拓扑优化结果,如图 4 所示.

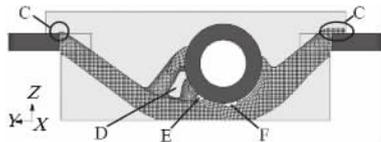


图 4 密度大于 0.3 的拓扑优化区域

Fig. 4 Topology optimization result with density greater than 0.3

4 油缸支架的建模、分析与应用

考虑到制造工艺的可行性,拓扑优化的结果并不能直接作为设计方案,需要经过一定的修改.

注意到图 4 所示的 C 区域,设计空间的高度稍微超出了螺栓孔部分的厚度. 为避免出现应力集中现象,并考虑螺栓安装的方便性,将螺栓孔部分的厚度增大至与其相连的设计空间厚度.

左侧通孔 D 用一个长孔替代. 中间通孔 E 与

右侧通孔 F 由于孔径过小,忽略不计. A 区域与设计空间的两侧采用圆滑过渡连接. 油缸支架设计方案如图 5 所示,单件质量 5.7 kg.

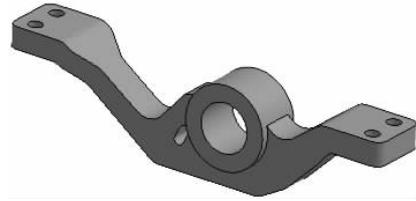


图 5 油缸支架设计方案

Fig. 5 Design plan of hydro-cylinder bracket

对油缸支架进行线性静态分析,分别计算举升起始工况和检修工况下油缸支架的应力分布与变形情况. 油缸支架有限元模型采用一阶四面体网格划分,全局网格尺寸 2 mm,共有节点 52 250 个,实体单元 234 036 个. 有限元分析结果如图 6 至图 9 所示.

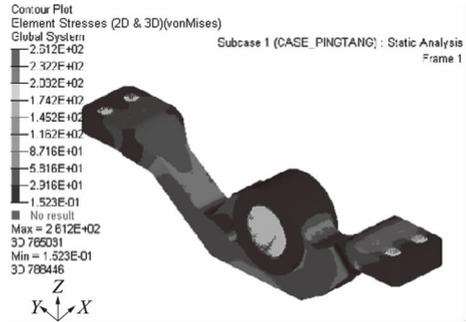


图 6 举升起始工况下的油缸支架应力云图

Fig. 6 Stress diagram of hydro-cylinder bracket in lifting starting condition

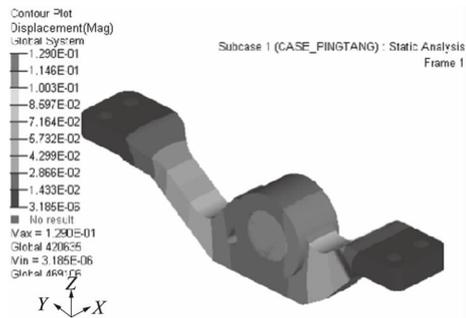


图 7 举升起始工况下的油缸支架应变云图

Fig. 7 Strain diagram of hydro-cylinder bracket in lifting starting condition

从应力云图上看,两种工况下的应力分布都比较均匀,最大应力出现在举升起始工况下 A 区域与油缸支架相连接的部分,应力值为 261.2 MPa,小于材料屈服强度 320 MPa,安全系数为 1.23,满足使用要求^[3]. 从应变云图上看,越靠近支架中间区域,应变越大,最大应变出现在举升起始工况下

支架通孔 D 附近,最大应变值为 0.129 mm,满足使用要求.检修工况的最大应力为 27.9 MPa,最大应变为 0.016 mm,远小于举升起始工况.

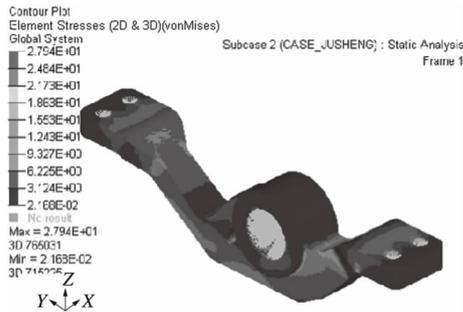


图 8 检修工况下的油缸支架应力云图
Fig. 8 Stress diagram of hydro-cylinder bracket in maintenance condition

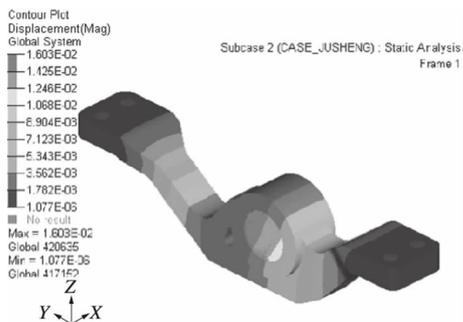


图 9 检修工况下的油缸支架应变云图
Fig. 9 Strain diagram of hydro-cylinder bracket in maintenance condition

采用该设计方案的道路清扫车由湖北随州某专用车厂家生产制造,面向全国销售,目前各地区均未出现与油缸支架相关的质量问题.图 10 所示为清扫车在车间总装和现场调试时的状态.



图 10 清扫车的组装与调试

Fig. 10 Assembling and debugging of the road sweeper

5 结论

(1) 虽然在清扫车倾倒垃圾的过程中,复合式垃圾箱内的垃圾残留量与多种因素有关,但是利用线性近似的方法仍然可以近似计算举升油缸及其支架的受力状况.计算结果表明,油缸支架主要有举升起始工况和检修工况两种主要受力状态,且举升起始工况和检修工况的受力大小相差约一个数量级.

(2) 基于变密度法建立的油缸支架结构拓扑优化数学模型以单元密度为设计变量,其优化结果代表了油缸支架的最佳结构.在此基础上结合制造可靠性设计的油缸支架,其结构简单,应力分布较为均匀,应力处于合理范围内,满足使用要求.

参考文献:

- [1] 樊金曦,陈殿领. 国产道路清扫车技术现状分析[J]. 机械制造, 2013(8): 46-49.
- [2] 葛恒安,祁隽燕. 公路养护的轻骑兵——国内路面清扫车行业发展现状分析[J]. 交通世界, 2005(6): 68-70.
- [3] 周雷青. 国内清扫车概况及使用维护[J]. 中国市政工程, 2008(3): 88-89.
- [4] 张晨光. 清扫车工作装置的匹配性能研究[D]. 西安:长安大学工程机械学院, 2010.
- [5] 张铁山,凌和平. 中型道路清扫车的总体设计与研究[J]. 专用汽车, 2005(2): 18-20.
- [6] 王智文. 汽车轻量化技术发展现状初探[J]. 汽车工艺与材料, 2009(2): 1-5.
- [7] RIETZ A. Sufficiency of a finite exponent in SIMP (power law) methods[J]. Structural & multidisciplinary optimization, 2001, 21(2): 159-163.
- [8] 梁醒培,王辉. 基于有限元法的结构优化设计—原理与工程应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2010.
- [9] 王艳萍,黄友钦,吴玖荣,等. 基于多目标等效风荷载的变截面门式刚架抗风优化[J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(6): 59-63.
- [10] JIANG Zhengyi, HAN Jingtao, LIU Xianghua. OptiStruct application in optimization design of car cabin front suspension bracket[J]. Advanced materials research, 2011, 421: 212-216.

Structure Design and Analysis of the Lifting Hydro-Cylinder Bracket of a Road Sweeper Based on the Variable Density Method

DENG Yadong^{1,2}, ZHANG Kun^{1,2}, JIN Dexian³

(1. School of Vehicle Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan 430070, China; 3. Wuhan Union Vehicle Technology Development Co., Ltd Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to design a simple and reliable lifting hydro-cylinder bracket structure, the topology optimization mathematical model based on the Variable Density Method was established by the volume fraction as constraint conditions and the weighted compliance as objective function. By means of linear approximation method, analyzed the force condition of the lifting hydro-cylinder bracket of a road sweeper with composite trash bin in the dumping process and determined lifting starting condition and maintenance condition as the main force conditions for the design of the lifting hydro-cylinder bracket. The topology optimization design of the lifting hydro-cylinder bracket was carried out by using the Variable Density Method. Considering the reliability of manufacturing process, a three dimensional model of the lifting hydro-cylinder bracket was established based on the topology optimization results, and the linear static analysis of the model was carried out. The final results showed that the lifting hydro-cylinder bracket designed by the variable density method had the advantages of simple structure, small occupied space, the largest stress and maximum strain in reasonable range and met the requirements of the application.

Key words: road sweeper; hydro-cylinder bracket; variable density method; weighted compliance; topology optimization

(上接第 27 页)

The Structure and Mechanical Property of Micro-injection Molded HDPE Parts

SHI Suyu¹, WANG Lina¹, XU Wenzhong², ZHENG Guoqiang², SHEN Changyu²

(1. School of Materials and Chemical Engineering, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 450007, China; 2. School of Material Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The high density polyethylene (HDPE) parts with two different molecular weights were prepared with micro-injection molding. The dependence of microstructure and mechanical properties of samples with different molecular weight were examined. Tensile test indicated that the increase to 77.5% in tensile strength was achieved for HDPE parts with higher molecular weight. At the same time, the toughness of HDPE parts were enhanced about twice as compared with that of lower molecular weight. In this study, microstructure characterizations, including differential scanning calorimetry (DSC), wide-angle X-ray diffraction (WAXD), small-angle X-ray scattering (SAXS) and scanning electronic microscope (SEM) were employed/conducted to investigate the variations of microstructure and further established the relationship between microstructure and mechanical properties. It suggested that the increased molecular and crystalline orientation led to the reinforcement. Formation of more shish and shish-kebab structure was in favor of the enhanced strength as well. The notable improvement of toughness in the higher molecular weight parts should be ascribed to formate a strong physical crosslinking network.

Key words: micro-injection molding; HDPE; tensile strength; fracture toughness; molecular weight

文章编号: 1671-6833(2016)06-0034-04

一种基于 PVDF 的微型热释电发电机研究

赵江铭¹, 邱国林^{1,2}, 张海霞²

(1. 郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 北京大学 微电子学研究院, 北京 100871)

摘要: 依据聚偏氟乙烯(PVDF)薄膜的热释电效应,设计了一种新型的微型热释电发电机.介绍了该发电机的基本结构和工作原理,完成了该发电机的相关实验,并采用有限元方法对该发电机在不同温差下的输出特性进行了分析.实验结果表明,该发电机的输出电压随匹配电阻的增大而增大,而输出电流反之,并且在20℃和40℃温差下最大瞬时输出功率分别为208 μW和475 μW.仿真结果表明,随温差的增大,温度随时间的变化率也会增大,并且在20℃和40℃温差下相应的开路电压为689 V和1 380 V,通过实验论证了该发电机可以作为能量采集的有效手段.

关键词: 聚偏氟乙烯(PVDF);热释电效应;微型发电机

中图分类号: TN384 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.06.015

0 引言

早在2 400多年前,人们就已经发现了电气石的热释电效应^[1].但是直到19世纪末,关于热释电效应定量和理论的研究才开始增多^[2].例如,Bowen等^[3]对用于能量采集的热释电材料和器件进行了系统分析.而在热释电效应的研究当中,对聚偏氟乙烯(PVDF)的研究也得到了广泛关注.例如,张华等^[4]就对PVDF的制备及其应用进行了深入分析.目前,关于PVDF的研究当中,对其压电性能的研究居多,但对其热释电特性却鲜有相关研究.例如,辛毅等^[5]设计了一种基于PVDF的触滑觉传感器,通过PVDF的压电性将运动信号转化成电信号.而刘廷等^[6]设计了一种基于PVDF的微力传感器,通过电荷放大器将PVDF所受到的微力放大并得到电信号.程啟华^[7]对PVDF压电传感器的温度特性研究证实PVDF的热释电效应较强,对传感器精度会产生影响.王芳等^[8]提出了基于热释电效应的能量采集系统的设计,证实了采用热释电效应进行能量采集和存储的可行性.Leng等^[9]首次提出了一种基于PVDF的微型热释电发电机并用于水能量采集,但是该发电机的输出性能仍有继续提升的空间,此外对微型热释电发电机的原理还需进行深

入探究.

笔者基于PVDF薄膜的热释电效应设计了一种新型微热释电发电机.通过测试实验分析了该器件在温度差为20℃和40℃时的输出特性,并通过有限元分析对该发电机在温度差为20℃和40℃的温度及电场变化进行了深入研究.

1 原理分析

热释电效应是指某些晶体在受热时晶体的自发极化随温度的变化而发生改变,从而导致晶体的表面束缚电荷发生改变的一种现象^[8].热释电效应产生的热释电电流可以通过下式来确定^[9].

$$I = pA \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

式中: I 代表热释电电流; p 代表热释电系数; A 代表器件的有效面积; dT/dt 代表温度随时间的变化率.

图1给出了热释电效应的原理简图,图中箭头代表热量的传递方向.当 $dT/dt = 0$ 时,即温度不随时间产生变化,那么晶体的自发极化的强度不会发生改变,因而也就没有热释电电流的产生,也就是 $I = 0$,如图1(a)所示.而一旦温度升高,即 $dT/dt > 0$ 时,那么晶体的自发极化的强度会减小,这时如果将外电路用导线连接,那么电路中

收稿日期: 2016-05-10; 修订日期: 2016-08-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61176103, 91323304, 51475436); 国家“863”计划资助项目(2013AA041102); 北京市自然科学基金资助项目(4141002)

作者简介: 赵江铭(1972—),男,河南新郑人,郑州大学讲师,博士,主要从事微机电系统(MEMS)及其控制技术研究, E-mail: zhaojiangming@126.com.

会有热释电电流产生,如图 1(b) 所示.而当温度升高并最终达到平衡时,由于温度不会继续发生变化,则热释电晶体的自发极化将也不会发生变化,因而相应的就没有热释电电流的产生,如图 1(c) 所示.而如果此时晶体所受到的温度改变,例如将晶体降温,那么晶体的自发极化的强度将会变大,相应的在外电路中也会有热释电电流的产生,直到达到新的平衡,如图 1(d) 所示.

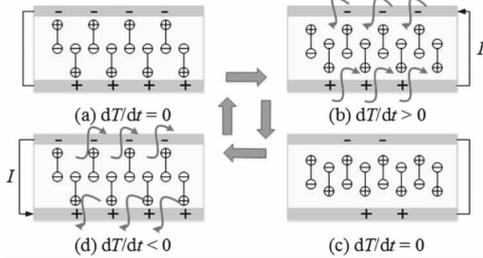


图 1 微型热释电发电机的工作原理图

Fig.1 The working principle of micro pyroelectric generator

2 结构设计

由于热释电效应的产生是基于温度随时间的变化,而自然环境具有恒定的温度梯度,并不会随时间而改变.因此,笔者采用两个盛水的烧杯,而水的温度不同,让器件交替浸入这两个热源,从而实现温度随时间变化^[10].图 2 是微型热释电发电机的结构简图.该发电机主要有 PVDF 薄膜和上下两层聚酰亚胺(PI)组成.首先选取一块大小为 2 cm × 6 cm 的 PVDF 薄膜,随后在薄膜的两面分别粘贴上铜导线并用铜导电胶带固定,最后用 PI 胶带将整个器件封装,并用环氧树脂进行密封.PI 胶带的作用是让器件和水进行隔离,避免器件和水接触而无法正常工作.

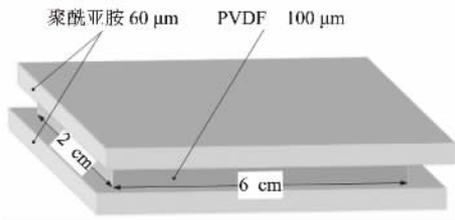


图 2 微型热释电发电机的结构图

Fig.2 The structure of the micro pyroelectric generator

3 实验结果讨论

该发电机在 20 °C 和 40 °C 温差下,匹配电阻为 100 MΩ 时的输出电压如图 3 所示.由实验结果可知,当 $t = 0.3$ s 左右时电压达到最大,相应的输出电压分别为 129 V 和 195 V,而热释电电压的输出周期大约为 2 s.图 4 给出了不同阻值的匹配电阻下,该发

电机的瞬时输出的最大电压和电流.由图 4 可知,该电机输出电压随着匹配电阻的增大而增大,而输出电流的变化趋势相反.图 5 给出了该发电机在不同阻值的匹配电阻下的最大瞬时输出功率.由实验结果可知,当匹配电阻为 80 MΩ 时,瞬时输出功率有一个最大值,在 20 °C 和 40 °C 温度差下的最大瞬时输出功率分别为 208 μW 和 475 μW.

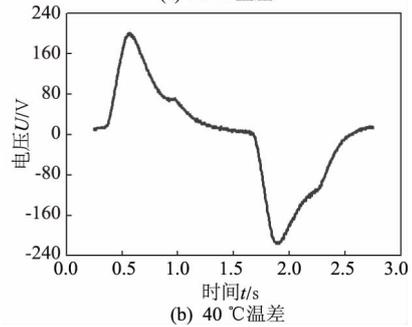
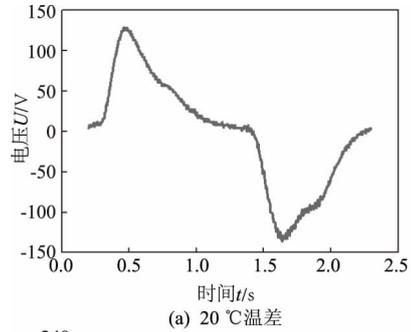


图 3 不同温差下的输出电压

Fig.3 The output voltage under different temperature difference

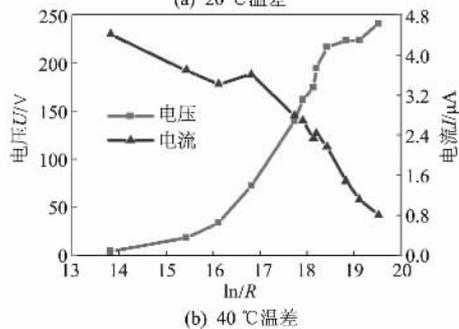
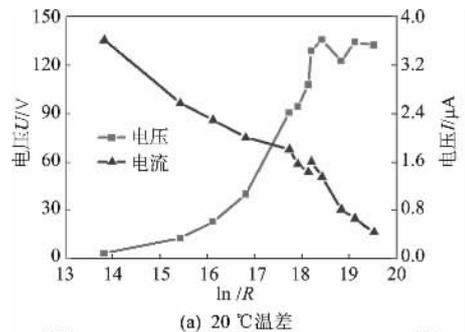


图 4 不同温度差下的输出电压、电流与匹配电阻的关系

Fig.4 The relationship between output voltage, current and matched resistance under different temperature difference

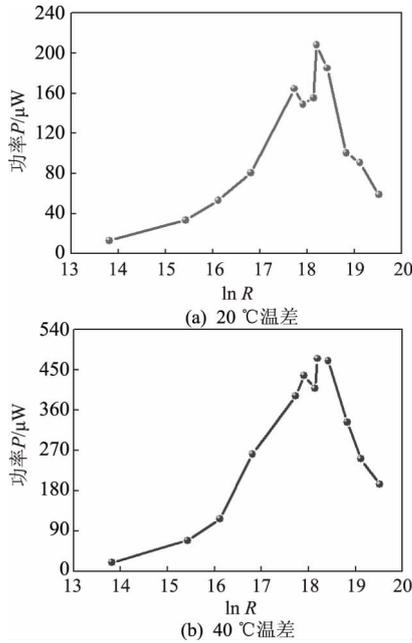


图5 不同温度差下的输出功率
Fig.5 The output power under different temperature difference

4 仿真结果讨论

通过有限元仿真分析了该发电机在 20 °C 和 40 °C 温度差下的温度变化及电压变化. 由公式(1)可以推出器件表面束缚电荷的面密度变化为:

$$\Delta\sigma = \frac{I\Delta T}{A} = P\Delta T. \quad (2)$$

而沿 PVDF 薄膜厚度方向的上下电极间的电压可以表示为:

$$U = Ed = \frac{\Delta\sigma d}{\epsilon_r \epsilon_0} = \frac{pd\Delta T}{\epsilon_r \epsilon_0}. \quad (3)$$

式中: ΔT 代表温度差; E 代表电场强度; d 代表 PVDF 薄膜的厚度; ϵ_r 和 ϵ_0 分别代表相对介电常数和真空介电常数^[9]. 仿真时将器件的上电极接地, 同时选择 PVDF 的表面和中平面作为参考平面. PVDF 的热释电系数 p 取为 $4 \text{ nC} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ^[11].

图6显示的是在仿真时间 $t = 0.3 \text{ s}$, 温度差分别为 20 °C 和 40 °C 时热释电发电机的温度分布图. 从图6可以看出, 温度的变化是层状分布的. 图7显示的是仿真时间从 0 s 到 1 s 变化时, 在 20 °C 和 40 °C 温差下的器件表面和中平面的温度变化曲线. 图7显示温度随时间的变化是非线性的. 同时也发现, 器件中平面的温度变化要低于表面, 但是发现两者的差别不大. 分析图7的结果可知, 当仿真时间 $t = 0.3 \text{ s}$ 时, 整个器件的最大温度变化分别为 14 °C 和 28 °C. 由这两个数据及公式(2)和(3), 通过仿真可得图8的结果. 由图8可知, 20 °C 和 40 °C 温差下器件的最大开路电压分别为 689 V 和 1 380 V. 通过有限元分析可以更加

清晰地了解该发电机的工作原理和输出特性.

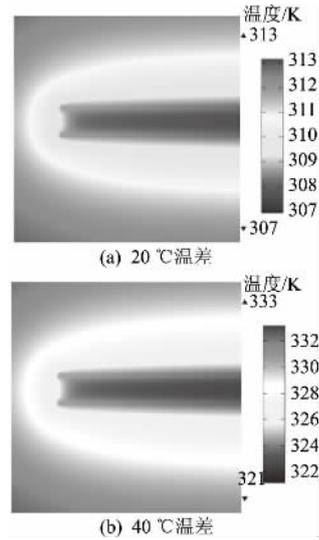


图6 不同温度差下的温度分布图
Fig.6 The temperature distribution under different temperature difference

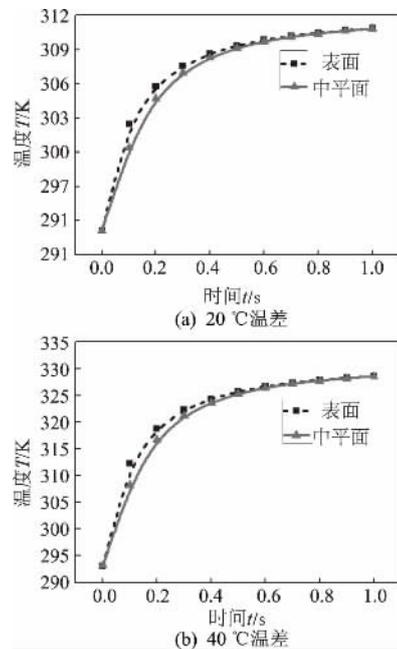


图7 不同温度差下的温度变化曲线
Fig.7 The temperature variation curve under different temperature difference

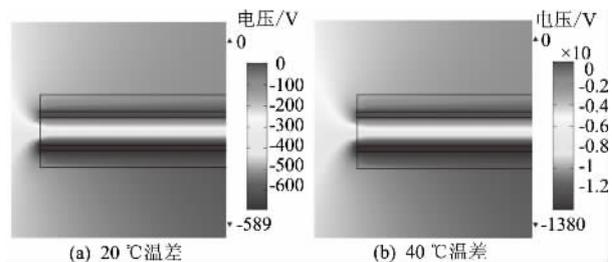


图8 不同温度差下的电势分布图
Fig.8 The potential distribution under different temperature difference

5 结论

(1) 实验结果表明,该发电机的输出电压随匹配电阻的增大而增大;输出电流反之,瞬时输出功率在匹配电阻为 $80 \text{ M}\Omega$ 时达到最大。

(2) 仿真结果表明,温度的变化是非线性的,高温下的温度随时间的变化率要更高,因此其输出电压也要高。

(3) 输出电压的有限元仿真结果与实验结果在具体数值上存在一定的差距,其原因主要有两个方面:实际的热传导影响;实验温度差要低于理论仿真结果。因此该研究仍有可以提升的空间。

参考文献:

- [1] 李景德,雷德铭,沈文彬. 热电系数及其精确测量方法 [J]. 物理, 1984(7): 407-409.
- [2] 候识华,宋世庚,陶明德. 热释电材料及其应用 [J]. 电子元件与材料, 2000, 19(6): 26-28.
- [3] BOWEN C R, TAYLOR J, LEBoulBAR E, et al. Pyroelectric materials and devices for energy harvesting applications [J]. Energy & environmental science, 2014, 7(12): 3836-3856.
- [4] 张华,张桂芳. 压电和热释电聚合物 PVDF 及其应用 [J]. 天津工业大学学报, 2002, 22(1): 35-39.
- [5] 辛毅,杨庆雨,郑浩田,等. PVDF 触滑觉传感器结构及其调理电路设计 [J]. 压电与声光, 2014, 36(1): 76-78.
- [6] 刘廷,吴晓军,赵河明. PVDF 微力传感器的设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2014(10): 7-9.
- [7] 程啟华. PVDF 压电传感器温度特性研究 [J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2009, 7(3): 68-72.
- [8] 王芳,李焕焕,韩文超,等. 基于热释电传感器的能量采集系统设计 [J]. 功能材料与器件学报, 2012, 18(5): 387-390.
- [9] LENG Q, CHEN L, GUO H Y, et al. Harvesting heat energy from hot/cold water with a pyroelectric generator [J]. Journal of materials chemistry A, 2014(2): 11940-11947.
- [10] SEBALD G, GUYOMAR D, AGBOSSOU A, et al. On thermoelectric and pyroelectric energy harvesting [J]. Smart materials & structures, 2009, 18(12): 125006-125013.
- [11] 谢娜,秦岚. 三维柔性触觉/热觉传感器设计与仿真 [J]. 传感器与微系统, 2015, 34(2): 106-108.

A Micro Pyroelectric Generator Based on PVDF

ZHAO Jiangming¹, QIU Guolin^{1,2}, ZHANG Haixia²

(1. School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Based on the pyroelectric effect of polyvinylidene fluoride (PVDF) film, a new micro pyroelectric generator was designed. The basic structure and working principle of the generator were introduced, corresponding experiments were completed and output characteristics of the generator under different temperature differences were analyzed through finite element method. The experimental results showed that the output voltage increased with the increase of the matched resistance and the output current was vice versa. The maximum instantaneous output power under $20 \text{ }^\circ\text{C}$ and $40 \text{ }^\circ\text{C}$ temperature difference was $208 \text{ }\mu\text{W}$ and $475 \text{ }\mu\text{W}$, respectively. The simulation results show that with the increase of the temperature difference, the changing rate of temperature with time increased. The respective open-circuit voltage under $20 \text{ }^\circ\text{C}$ and $40 \text{ }^\circ\text{C}$ temperature difference was 689 V and 1380 V . The simulation and experiment proved that the generator could be used as an effective means of energy harvesting, which would give guidance for further research in the future.

Key words: PVDF; pyroelectric effect; micro generator

文章编号: 1671-6833(2016)06-0038-05

基于 TRIZ/FRT/Fuzzy 的产品创新设计研究与应用

李景丽, 徐志刚

(山东大学 机械工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 为快速产生有效创新方案, 提出了一种基于发明问题解决理论 (TRIZ)、未来现实树 (Future Reality Tree, FRT)、模糊综合评价 (Fuzzy) 的集成方法. 该方法通过绘制产品的功能模型图阐明产品设计中存在的潜在问题; 结合发明问题解决理论, 将潜在问题抽象化, 并产生可能的创新方案; 为提高评价效率, 利用未来现实树对各个方案进行初步评估, 并清楚表达产品创新设计的目标; 应用模糊综合评价法确定最优方案组合. 最后, 以一个蛙式打夯机的创新设计实例验证了该方法的可行性.

关键词: 功能模型图; TRIZ; FRT; 模糊评价

中图分类号: TU112 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.03.034

0 引言

如何快速产生有用的创新方案是产品创新设计的关键, 也是企业和各国学者关注的热点. 因此, 国内外学者提出了一些设计方法, 如头脑风暴法、发明问题解决理论 (TRIZ) 及约束理论 (TOC) 等. 然而, 每一种方法都有局限性, 方法的集成成为产品创新设计过程的重要手段, Chou^[1] 提出了一种基于 TRIZ/Concept mapping/Fuzzy 的集成方法, 该方法利用基于语义技术完成新产品的的设计, 并用空气净化器的应用实例验证了该方法的适用性; 张建军等^[2] 提出了一种基于 TOC/TRIZ/Fuzzy 的集成方法, 并用番茄输送带的应用实例验证了该方法的有效性; Stratton^[3] 提出了将 TRIZ 与 TOC 结合使用的方法.

为了快速产生有效的方案, 笔者提出了一种基于 TRIZ/FRT/Fuzzy 的集成方法, 该方法利用基于知识的分析工具加快新创意的产生, 并提供一种更有效的评价方法, 最后, 用蛙式打夯机的实例验证了该方法的可行性.

1 TRIZ、FRT 及 Fuzzy 的概述

1.1 TRIZ 理论

TRIZ 是针对创新问题找到解决方案的一种科学方法论, 它提供了矛盾矩阵、物质-场分析、功

能分析等分析工具以及用于解决相应问题的基于知识的工具. 例如, 使用 4 个分离原理解决物理矛盾、40 个发明原理解决技术矛盾、76 个标准解解决功能不理想的问题等^[4-6], 通过使用这些工具, 可以产生很多可能的方案.

1.2 FRT 未来现实树

未来现实树 (Future Reality Tree, FRT)^[7] 描述了注入后的未来前景图, 采用自底向上的方式, 验证新方案的注入是否能够实现期望的结果或者是否造成新的不良结果. FRT 有两个重要作用: 一是对方案进行初步评估, 通过方案的注入来预测系统将要产生的效应; 二是及时发现方案实施可能造成的负面效应, 并采取措施来防止或者消除负面效应. 将创新设计方案作为“注入”插入到相应的问题上, 得到相应的 FRT 图如图 1 所示.

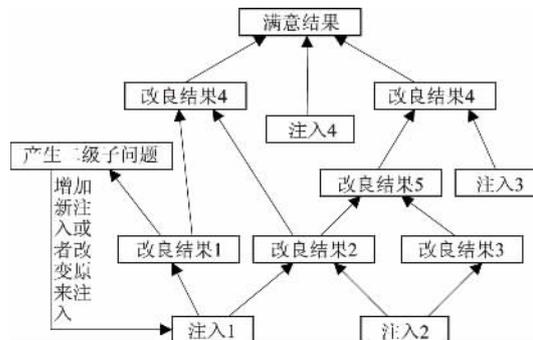


图 1 FRT 构造模式

Fig. 1 Structure model of FRT

收稿日期: 2015-10-06; 修订日期: 2015-12-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61272017)

通信作者: 徐志刚 (1966—), 男, 山东济南人, 山东大学教授, 博士, 主要从事 TRIZ 理论、非流形体建模和设施布局规划研究, E-mail: zhgxu@sdu.edu.cn.

图 1 中每个“注入”为一个方案,经过逐层注入使问题逐层得到解决,最终实现期望结果。

若“注入”后实现期望结果,则该“注入”有效;若“注入”后能实现期望结果,但产生二级子问题,则该“注入”无效,需更改“原注入”或者增加“新注入”以解决子问题。

1.3 模糊综合评价法

模糊综合评价^[8]是根据模糊关系、评价准则和实验数据,并通过评价准则对被评价对象隶属等级的程度进行量化分析。

(1) 确定评语集 A 。

$$A = (a_1, a_2, \dots, a_m) = (\text{好}, \text{一般}, \text{差})$$

(2) 确定评价因素集 T 。

$$T = (t_1, t_2, \dots, t_n) = (\text{创新性}, \text{可行性}, \dots)$$

(3) 确定权重向量集 W 。

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$$

式中: $0 < w_i < 1$, 且 $\sum_{i=1}^n w_i = 1$, w_i 表示第 i 个评价指标下的权重系数。

(4) 确定隶属度和单因素评价矩阵. 对单个指标 t_i 的评价,得到单因素评价矩阵

$$R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im})$$

(5) 计算综合评价矩阵 B (将权重考虑进去)。

$$B = W \cdot R = (b_1, b_2, \dots, b_m)$$

式中: $b_j = \sum_{i=1}^n w_i r_{ij} \quad (j = 1, 2, \dots, m)$ 。

2 基于 TRIZ/FRT/Fuzzy 的产品创新设计

首先根据物质-场分析法建立待设计产品的功能模型,找出产品设计潜在的问题并将问题标准化,结合 TRIZ 中的分析工具得到可能的创新方案;然后利用 FRT 对得到的创新方案进行初步评估从而将明显不好的方案舍去,并将相似方案合并;最后通过 Fuzzy 评价确定最优方案组合,其过程如图 2 所示。

(1) 问题定义. 利用物质-场分析法建立待改进产品的功能模型,进而找到现有产品的潜在问题。

(2) 问题分类及工具选择. 在定义问题之后,将问题分为三类:物理冲突、技术冲突和不理想的功能结构,并选择相应的 TRIZ 工具。

(3) 产生可能的方案. 根据 TRIZ 工具得到通用解,设计人员给出相应的解决方案。

(4) 初步评价方案. 绘制产品的未来现实树,

找出图中的无效注入,通过改变原注入或者增加新注入来消除不良效应,不能消除的将被否决,并将相似的注入合并。

(5) 方案评价及最优方案组合的确定. 利用模糊综合评价法来评价有效注入,确定最优方案组合。

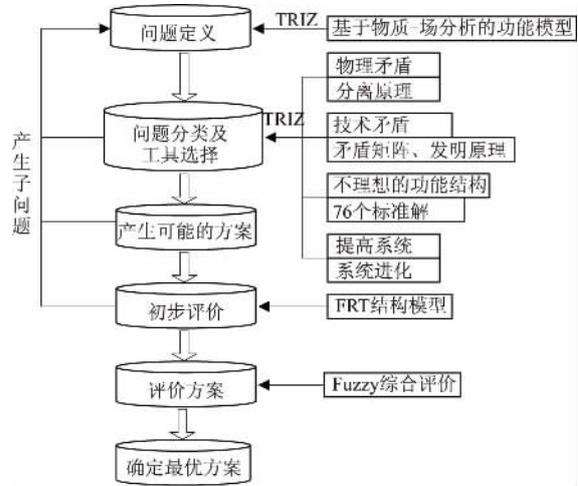


图 2 基于 TRIZ/FRT/Fuzzy 的产品创新设计流程图
Fig. 2 Flow chart of product innovation design based on TRIZ/FRT/Fuzzy

3 实例验证

在传统蛙式打夯机的基础上对其进行创新,设计一款低能耗、低劳动强度、低噪音和低振动的“四低”蛙式打夯机。

3.1 问题定义

根据蛙式打夯机创新设计的目的建立其功能模型图,如图 3 所示. 问题可描述如下。

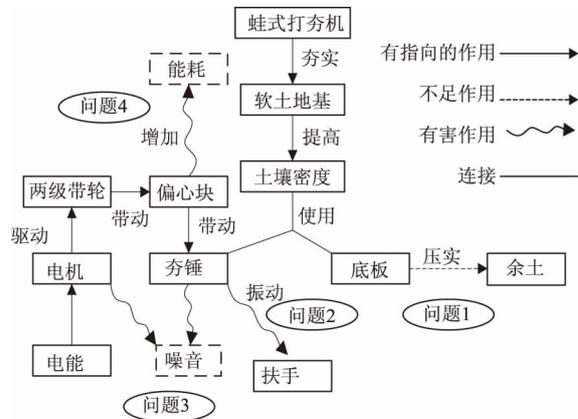


图 3 蛙式打夯机的功能模型图
Fig. 3 Function model chart of frog rammer

问题 1: 在夯实软土地基时,蛙式打夯机每夯实地基一次,就会有多余的土在底板前方,一部分

由底板压实,一部分挡在底板前方,积土分布的不均匀性将导致蛙式打夯机偏移,从而需要人工将其拉回原方向,劳动强度大.

问题2:偏心块的转动产生的横向离心力带动打夯机向前移动,产生横向振动;夯锤升降产生垂直方向振动;另外,电机的转动也会产生一定的振动.

问题3:蛙式打夯机在工作的过程中由于电机的转动、打夯机的前移及夯锤的升降产生巨大的噪音.

问题4:由于偏心块的笨重导致蛙式打夯机启动较慢,能耗较大.

3.2 问题分类及 TRIZ 工具选择

问题1可看作不理想的功能结构,可使用76个标准解解决此类问题.从图3可以看出,问题1属于非有效完整功能,问题1及解决问题1的物质-场分析模型如图4所示.

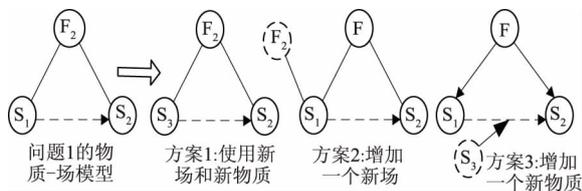


图4 问题1及解决问题1的物质-场分析

Fig. 4 Material and field analysis of problem 1 and the solving of problem 1

问题2与问题3相同,都可以看作技术冲突,提高打夯机打击力度的同时会增加振动和噪音.其中改善参数为10,恶化参数为31.

问题4可看作一组物理冲突,偏心块质量大时提供的离心力大,打击力力度大,但会导致打夯机启动缓慢,能耗较大.可采用分离原理的空间分离来解决问题.

3.3 方案产生

问题1:根据图4的提示,给出以下几个可能的方案.①方案1增加一个新物质,在夯架上增加一个小夯锤,位于底板前方,在大夯锤夯实地基的同时,小夯锤夯实地基前方积土.②方案2增加一个新物质:在底板前方安装“前扫结构”,由凸轮和齿轮齿条组成,凸轮安装在中间轴的两端,凸轮和弹簧共同作用带动齿条的往复移动,进而带动齿轮的往复转动,齿轮和摆杆做成一体的结构,进而扫除积土.③方案3增加一个新场和一个新物质:在底板前方安装小电机,小电机带动风扇吹走多余的土.

产生子问题1.1:小电机的安装位置.

问题2:使用矛盾矩阵解决问题,根据其查询结果给出以下几个方案:①方案4增加中介物:在电机下增加减振垫吸收由电机转动产生的振动.②方案5反向:增加一个与现有偏心块转向相反的偏心块抵消横向离心力,进而抵消横向振动.③方案6增加中介物:在扶手处安装减振材料,吸收传递过来的振动.

产生子问题2.1:打夯机不能靠离心力自动前行.

问题3:使用矛盾矩阵中的发明原理,根据查询结果给出一种可能的解决方案:方案7增加中介物:增加电机罩,降低因电机转动产生的噪音.

问题4:属于物理矛盾,采用分离原理来解决问题,根据空间分离原理给出以下几种可能的方案:①方案8分离原理(分离):使偏心块可移动,当偏心块向上转动时,偏心块自身向上移动;当其向下转动时,偏心块自身向下移动.②方案9分离原理(局部质量):偏心块做成中空的,在里面添加磁性钢球,在偏心块靠近轴孔出安放磁铁.

3.4 方案的初步评估

创新方案确定后,建立蛙式打夯机的未来现实树如图5所示,每一个方案为一个“注入”,判断方案的实施是否能够解决相应的问题.例如“注入1”即判断方案1的实施是否能够解决问题1,若能够解决则注入有效;若注入后产生子问题,则注入无效,可修改原注入、增加新注入或者放弃该方案的实施,具体情况应具体分析.

从图5中可以看出方案1、2、4、6、7、8、9能够解决相应问题,为有效“注入”,而方案3、5产生了子问题,为无效“注入”.方案3可通过增大底板面积来安装新的电机,但该方案能耗大、效率低且电机和风扇的转动增加了噪声和振动,故放弃该方案.方案5使水平方向离心力的消失,导致打夯机不能靠水平离心力前进,而靠人工推动打夯机前行,大大增加了劳动强度,故不实施.

由上面的分析可知,方案3和5应舍弃,方案4和6属于相似方案,合并在一起表示为方案46,下面只需对剩下的6个方案进行评价.

3.5 Fuzzy 综合评价

(1) 确定评语集.评语集 $A = (\text{好}, \text{一般}, \text{差})$.

(2) 建立评价因素集.

$$T = \begin{pmatrix} \text{创新性 } t_1, \text{经济性 } t_2, \text{可行性 } t_3 \\ \text{相关性 } t_4, \text{材料使用量 } t_5 \\ \text{材料回收率 } t_6, \text{噪声污染 } t_7, \text{振动污染 } t_8 \end{pmatrix}$$

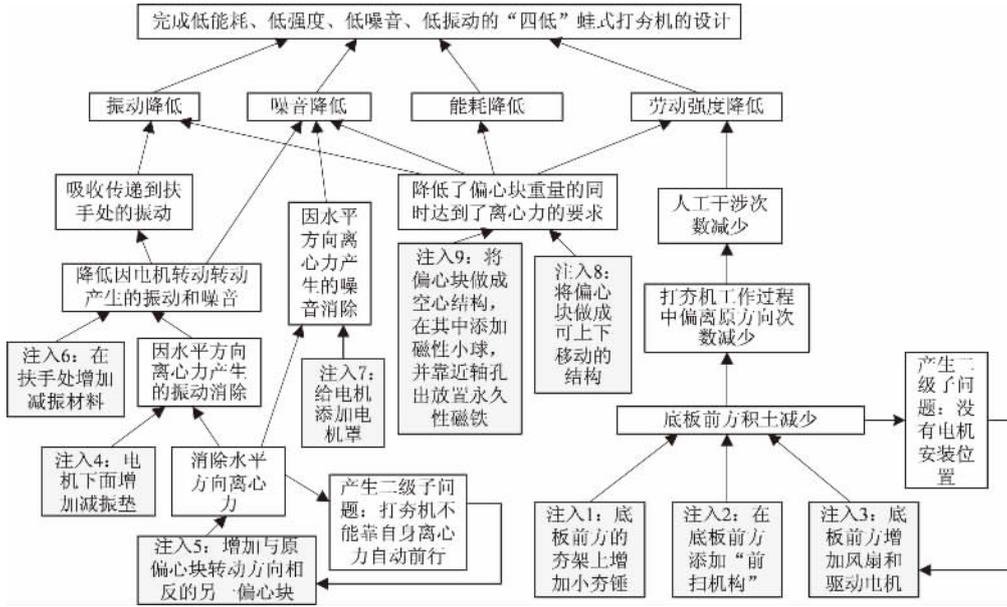


图 5 蛙式打夯机的未来现实树

Fig. 5 The future reality tree of frog rammer

(3) 确定权重向量集. 依据层次分析法, 给出判断矩阵:

$$U = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 3 & 1 \\ \frac{1}{3} & 1 & 1 & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & 1 & 1 & \frac{1}{3} \\ 1 & 3 & 3 & 1 \end{bmatrix}, \text{ 计算权重 } w_1 = 0.375, \text{ 同理}$$

可得 $w_2 = 0.125, w_3 = 0.125, w_4 = 0.375$; 同一因素下的因子可认为同等重要, 具有相同的权重, 因此, 权重向量集可表达为 $W = \left(\frac{w_1}{3}, \frac{w_1}{3}, \frac{w_1}{3}, w_2, \frac{w_3}{2}, \frac{w_3}{2}, \frac{w_4}{2}, \frac{w_4}{2} \right) = (0.125, 0.125, 0.125, 0.125, 0.0625, 0.0625, 0.1875, 0.1875)$.

(4) 建立模糊评价矩阵. 假设由 10 位专家在评价因子经济性下对方案 1 进行评价, 其评价结果如表 1 所示.

表 1 经济性指标下 10 位专家对方案 1 的评价结果

Tab. 1 Evaluation results of 10 experts on the scheme 1 under the economic index

因素	等级		
	好	一般	差
经济性	3	5	2

从表 1 可以得到方案 1 在经济性指标下的单因素判断矩阵 $R = [0.3, 0.5, 0.2]$, 同理得到 6 个方案的模糊评价矩阵:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.5 & 0.2 \\ 0.8 & 0.2 & 0 \\ 0.9 & 0.1 & 0 \\ 0.8 & 0.2 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 \\ 0.3 & 0.4 & 0.3 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 \\ 0.4 & 0.3 & 0.3 \end{bmatrix}, R_2 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.1 \\ 0.2 & 0.2 & 0.6 \\ 0.3 & 0.2 & 0.5 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 \\ 0.1 & 0.1 & 0.8 \\ 0.2 & 0.2 & 0.6 \\ 0.2 & 0.4 & 0.4 \\ 0.2 & 0.3 & 0.5 \end{bmatrix},$$

$$R_{4,6} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.4 & 0.5 \\ 0.9 & 0.1 & 0 \\ 0.8 & 0.2 & 0 \\ 0.5 & 0.3 & 0.2 \\ 0.7 & 0.3 & 0 \\ 0.2 & 0.3 & 0.5 \\ 0.8 & 0.2 & 0 \\ 0.7 & 0.2 & 0.1 \end{bmatrix}, R_7 = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.4 & 0.3 \\ 0.8 & 0.2 & 0 \\ 0.7 & 0.3 & 0 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 \\ 0.5 & 0.3 & 0.2 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 \\ 0 & 0.2 & 0.8 \\ 0.8 & 0.2 & 0 \end{bmatrix},$$

$$R_8 = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.3 & 0.1 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 \\ 0.7 & 0.3 & 0 \\ 0.7 & 0.2 & 0.1 \\ 0.5 & 0.3 & 0.2 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 \\ 0 & 0.2 & 0.8 \\ 0.2 & 0.2 & 0.6 \end{bmatrix}, R_9 = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.3 & 0 \\ 0.5 & 0.3 & 0.2 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 \\ 0.7 & 0.3 & 0 \\ 0.8 & 0.1 & 0.1 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 \\ 0.2 & 0.2 & 0.6 \end{bmatrix}.$$

(5) 确定模糊综合评价矩阵及最优方案组合. 确定每个方案的模糊评价矩阵后, 根据公式 (2) 得到每个方案的综合评价矩阵:

$$B_1 = [0.55625, 0.30625, 0.1375],$$

$$B_2 = [0.295\ 25, 0.289\ 00, 0.425\ 75],$$

$$B_{4,6} = [0.637\ 50, 0.162\ 50, 0.200\ 00],$$

$$B_7 = [0.524\ 25, 0.265\ 50, 0.210\ 25],$$

$$B_8 = [0.436\ 75, 0.253\ 00, 0.310\ 25],$$

$$B_9 = [0.557\ 00, 0.270\ 75, 0.172\ 25].$$

从模糊综合评价矩阵中可看出:方案1和方案2相比,方案1较好;方案4、6及方案7都是很不错的方案,可实施;方案8和9相比,方案9更优.最终得到最优方案组合 $\Omega = (\text{方案1, 方案4/6, 方案7, 方案9})$.

4 结论

TRIZ、FRT与Fuzzy结合使用能够有效辅助产品的创新设计,根据物质-场分析法建立了产品功能模型找到产品设计中潜在的问题,且结合TRIZ分析工具得到了相应的创新设计方案,并利用FRT对产生的方案进行初步的评估并将相似方案合并成一个方案,继而应用模糊综合评价方法找出最优方案组合,最后用蛙式打夯机的创新设计验证了方法的可行性.

参考文献:

[1] CHOU J R. An ideation method for generating new

product ideas using TRIZ, concept mapping, and fuzzy linguistic evaluation techniques [J]. *Advanced engineering informatics*, 2014, 28(4): 441-454.

- [2] 张建军,陈旭晖,张利,等.集成TOC/TRIZ/Fuzzy的产品概念设计方法的研究[J].*机械设计与科学*, 2011,30(7):1154-1158.
- [3] STRATTON R, MANN D. Systematic innovation and the underlying principles behind TRIZ and TOC [J]. *Journal of materials processing technology*, 2003, 13(9):120-126.
- [4] 袁峰,丁泽新,朱俊.基于TRIZ的传动片送料装置研究设计[J].*郑州大学学报(工学版)*, 2012,33(6):88-91.
- [5] 陈思源,彭伟,姚春燕.基于TRIZ理论的新型线锯缠绕设备创新设计[J].*机械设计与制造*, 2013(1):4-6.
- [6] 檀润华. TRIZ及应用技术创新过程与方法[M].北京:高等教育出版社,2010:1-18.
- [7] 刘晓敏,檀润华.约束理论中当前现实树与冲突解决图表驱动创新设计研究[J].*中国机械工程*, 2008,19(12):1442-1445.
- [8] 王正如,梁晋,王立忠,等.基于模糊综合评价的车身曲面品质分析[J].*中国机械工程*, 2011, 22(6):748-751.

Research and Application of Product Innovation Design Based on TRIZ/FRT/Fuzzy

LI Jingli, XU Zhigang

(School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: To effectively generate novel and useful product ideas, a new method based on theory of the invention problem solving (TRIZ), the future reality tree (FRT) and fuzzy evaluation was presented. The aims of the proposed method were: 1) to identify potential problems through the product function model; 2) to abstract potential problems and generate novel product ideas by means of the theory of invention problem solving; 3) to develop an effective evaluation method and clearly describe the goal of product innovation using future reality tree as preliminarily evaluation tool; and, 4) to get promising product ideas with fuzzy evaluation techniques. Finally, the innovative design of frog ramming machine was used to illustrate the feasibility of this new method.

Key words: function model; TRIZ; FRT; fuzzy

文章编号: 1671-6833(2016)06-0043-05

全矢-ARMA 模型在机械振动强度预测研究的应用

韩捷, 吴彦召, 陈磊, 郝旺身, 张钱龙

(郑州大学 振动工程研究所, 河南 郑州 450001)

摘要: 单通道预测方法由于获取振动信息不完善, 导致预测结果一致性差, 从而不能很好地实现故障的预测. 通过全矢谱获得的频谱结构具有唯一性的特点, 能够很好地弥补单通道的不足, 在此基础上, 将时序预测方法 ARMA 模型与全矢谱技术相结合, 提出了全矢-ARMA 模型, 并把该方法应用到机械振动强度预测研究中. 实验表明, 该方法预测结果与实际较吻合.

关键词: 全矢谱; ARMA 模型; 强度预测; 信息融合; 时序预测方法

中图分类号: TH16; TP277 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.06.024

0 引言

趋势预测是机械设备预知维修中重要的组成部分, 通过预测可以对设备的故障早知道, 从而避免重大事故的发生. 1927年, Yule 提出了时序的 AR 模型, 用于预测 Walker 在 1931 年也用 AR 模型进行了预测. 此后, 逐步发展了 ARMA 模型、多维 ARMA 模型、非平稳时序模型、非线性时序模型等. 时序分析另一个突破为谱分析, 产生了与传统的 Fourier 谱不同的现代谱. 1967年, Burg 在对地震信号的分析与处理中, 提出了最大熵谱 (MES). 1968年, Parzen 提出了 AR 模型谱. 1973年, Pisarenko 提出了 Pisarenko 谱, 在谐波上面迭加白噪声进行谱分析. 1981年, Shore 论述了最小交叉谱. 笔者采用的预测方法是时间序列预测模型中的 ARMA 模型, 由于时间序列分析方法在金融经济、气象水文、机械振动等众多领域都有应用, 相对比较成熟^[1-2]. 之前很多学者通过单通道的数据信息进行预测, 效果不是很理想. 由于旋转机械转子的涡动特性, 在同一截面传感器安装的方位发生变化, 就会得到同一转子下不同的振动信息, 也就是通过一个传感器无法获得较为全面的转子振动信息, 从而使接下来的预测无法进行.

为了解决通过单一传感器不能获得唯一的机械设备振动信息的问题, 韩捷教授^[3-5]提出了采用同一截面两个互相垂直的探头同步进行测量,

再结合同源信息融合技术提出了全矢谱技术. 这一技术利用了旋转机械的回转特性, 巧妙地将同一截面的两个互相垂直的振动信号进行融合, 结果好比一个虚拟探头在不断移动测得该截面最大的振动强度值. 通过该技术可以保证在同一截面下的频谱结构不会随着两个互相垂直的传感器沿圆周方向安装方位的不同而变化. 全矢谱技术不仅改进了传统分析方法在分析振动信号判断故障时由于信息不完善造成误判的缺陷, 而且也做到了与传统的数据处理分析方法相兼容.

综上所述提出了基于全矢-ARMA 模型的机械振动强度预测方法, 并与单通道的时间序列预测方法加以比较验证.

1 预测模型的全矢数值计算

把转子的涡动看成是各谐波频率下两个方向的组合运动, 其涡动轨迹是各谐波频率下的椭圆, 并定义这些椭圆的长半轴为振动强度的主振矢, 短半轴为振动强度的副振矢, 而转子在各谐波频率下的涡动强度即主振矢是对故障判断和识别的基本依据^[3-5].

韩捷教授不但提出了全矢谱技术, 并且给出了其全新的快速稳健算法, 该算法依据 FT 变换的奇偶共轭推导出, 其主振矢即涡动椭圆的长半轴 R_{LK} 、副振矢即涡动椭圆的短半轴 R_{SK} , 如公式 (1) 所示:

收稿日期: 2016-06-25; 修订日期: 2016-08-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51405453); 河南省教育厅科学技术研究重点项目 (13A460673).

通信作者: 韩捷 (1958—), 男, 河南郑州人, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为设备状态监测与智能诊断技术, E-mail: hj_em@163.com.

$$\begin{cases} R_{LK} = X_{pk} + X_{rk} = \\ \frac{1}{2N} [|Z_k| + |Z_{N-k}|] (k=0,1,2,\dots,N/2-1); \\ R_{SK} = X_{pk} - X_{rk} = \\ \frac{1}{2N} [|Z_k| - |Z_{N-k}|] (k=0,1,2,\dots,N/2-1). \end{cases} \quad (1)$$

式中: X_{pk} 为正进动圆半径; X_{rk} 为反进动圆半径; $\{Z_k\}$ 为 $\{Z_n\}$ 的 Fourier 变换; $\{Z_n\}$ 是由序列 $\{x_n\}$ 、 $\{y_n\}$ 构成的复序列, 即 $\{Z_n\} = \{x_n\} + j\{y_n\}$, 其中 $\{x_n\}$ 、 $\{y_n\}$ 分别是 x 、 y 方向上采样得到的离散序列。

有了这个快速稳健的算法, 就不需要对两个通道的数据分别进行 FT 变换, 而是对两个通道构成的复序列进行一次 FT 变换, 通过公式 (1) 就可以得到各谐波频率下的主振矢。现在看来是将各谐波频率下的复杂计算简化为复 Fourier 变换, 使计算量成倍减少同时也较稳健, 另外也和传统的数据处理分析方法相兼容。如果在测量时由于某些原因导致一个传感器的数据失效, 那么该算法依然成立, 完全满足在线检测分析要求。

2 ARMA 模型分析方法

ARMA 模型是分析时间序列比较全面的方法, 由自回归模型 (AR 模型) 与滑动平均模型 (MA 模型) 组合而成。根据时间序列模型的特性可知, ARMA 模型适合对均值为零的平稳随机序列建模, 然而实际的建模对象往往既包含平稳的随机部分, 又含有确定的非随机分量。因此, 在进行时间序列建模时, 首先需要对观测数据序列进行平稳化处理, 使非平稳的数据序列转化为均值为零的平稳随机序列^[1-2]。时间序列的建模过程如图 1 所示。

ARMA 模型有很多参数估计的方法, 本文采用概念上简单明了, 避开 ARMA 建模中大量的繁杂计算, 建模速度快的长自回归模型计算残差法。该算法有两次建模, 先建 AR(p) 再建 ARMA(n, m), AR(p) 参数估计采用了运算速度较快的 burg 算法; ARMA(n, m) 模型参数估计用了方法简单、参数估计无偏、精度高的最小二乘法。模型适用性检验准则使用的是 Akaike 信息准则的 BIC 准则。时间序列 ARMA(n, m) 模型:

$$\begin{aligned} x_i &= \sum_{i=1}^n \varphi_i x_{i-i} - \sum_{j=1}^m \theta_j a_{i-j} + a_i; \quad (2) \\ a_i &\sim NID(0, \sigma_a^2). \end{aligned}$$

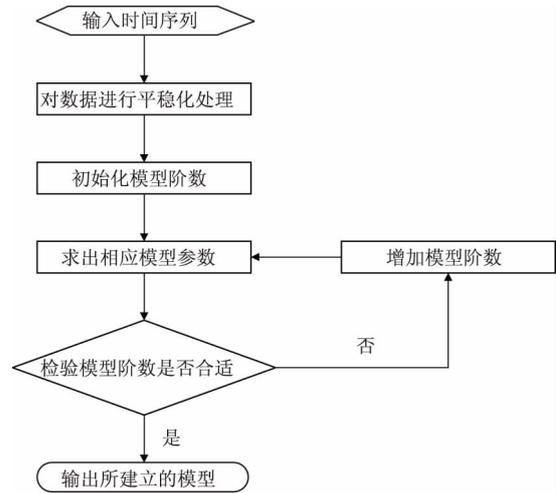


图 1 时间序列的建模过程

Fig. 1 Modeling process of time series

模型参数估计如下: 根据 Akaike 信息准则确定 AR 模型阶数 p , 再由 burg 算法得到模型参数 $\varphi_i (1, 2, \dots, p)$ 后, 由 AR(p) 模型计算残差序列:

$$a_t = x_t - \sum_{i=1}^p \varphi_i x_{t-i} \quad (t = p+1, p+2, \dots, N). \quad (3)$$

由式 (3) 可得到从 $t = p+1$ 至 $t = N$ 的残差序列 $\{a_t\}$, 将 $\{a_t\}$ 带入式 (2), 可得到如下矩阵方程:

$$Y = X\beta + A.$$

式中:

$$Y = [x_{p+m+1} \ x_{p+m+2} \ \dots \ x_N]^T;$$

$$A = [a_{p+m+1} \ a_{p+m+2} \ \dots \ a_N]^T;$$

$$\beta = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n - \theta_1 - \theta_2 \dots - \theta_m]^T;$$

$$X = \begin{bmatrix} x_{p+m} & x_{p+m-1} & \dots & x_{p+m-n+1} & a_{p+m} & a_{p+m-1} & \dots & a_{p+1} \\ x_{p+m+1} & x_{p+m} & \dots & x_{p+m-n+2} & a_{p+m+1} & a_{p+m} & \dots & a_{p+2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{N-1} & x_{N-2} & \dots & x_{N-n} & a_{N-1} & a_{N-2} & \dots & a_{N-m} \end{bmatrix}.$$

由矩阵方程可知, 模型参数 $\beta = (X^T X)^{-1} X^T \cdot Y$, 矩阵 X 与 Y 中 x_i, a_i 均为已知, 可求得模型参数 β 。由求得的模型参数建立 ARMA 模型, 然后计算由此模型得到的预测值与实际值的误差, 根据这些误差求得 BIC 值。依次修改模型的阶数得到不同的预测模型, 求得各个模型的 BIC 值, 然后取较小的 BIC 值对应的阶数和参数建立合适的 ARMA 模型。

ARMA(n, m) 模型的 BIC 准则表达式为:

$$BIC = N \ln \sigma_a^2 + (p+q+1) \ln N + \text{常数}.$$

3 全矢-ARMA 预测模型的建立^[6-11]

基于全矢谱技术和时间序列分析方法建立如

下预测模型。

Step1. 假设有 N_1 对等时间间隔的实际数据组成的数组,每对数组存放着两个通道的振动数据,每组数据长度为 N_2 即采样点数,令数组的两个元素分别为 $\{x_{ij}\}$ 、 $\{y_{ij}\}$ ($i=0,1,2,\dots,N_1-1$; $j=0,1,2,\dots,N_2-1$)。

Step2. 运用全矢数值计算方法,构造数组 $\{z_{ij}\} = \{x_{ij}\} + i\{y_{ij}\}$, 然后对构造的新复数数组的每一行进行 FFT 变换求得 $\{z_{ik}\}$,再由式(1)求其主振矢频谱序列 R_{ik} , $R_{ik} = \frac{1}{2N} [|Z_{ik}| + |Z_{i,N-k}|]$ ($i=0,1,2,\dots,N_1-1$; $k=0,1,2,\dots,N_2/2-1$)。

Step3. 针对每个频率 k 点即 $\{R_{ik}\}$ 构造一时间序列,依据 ARMA(n, m) 模型建立新的预测模型即全矢-ARMA 预测模型:

$$R_{i,k} = \sum_{i=1}^n \varphi_i R_{i-i} - \sum_{j=1}^m \theta_j a_{i-j} + a_i \quad (k=0,1,2,\dots,N_2/2-1).$$

4 试验研究

在某电厂汽轮机的轴承上采集振动数据,汽轮机的转速为 2 990 r/min,工频为 49.8 Hz. 试验步骤如下:①在泵轴承位置装上两个相互垂直的电涡流位移传感器,调整采样频率为 1 600Hz,采样长度为 1 024 点,进行双通道同步采集,每隔 2 h 采集一组数据共采集数据 60 组.②利用全矢谱算法求出每组数据的主振矢频谱,并将其放入数组 $R[60][400]$.③从前 50 个频谱图上得到五倍频以内所有频率点幅值,根据每个频率点下的 50 个数据建立合适的 ARMA 模型,利用该模型单步预测第 51 到 56 个频谱图。

下面以一倍频的主振矢作为原始数据建立全矢-ARMA 模型,其他各个频率点的建模过程和一倍频的建模一样.由图 2(a) 可以看出,振动信号的特征信号非平稳、非线性、规律性较差,直接对其进行预测模型不好确定,精度不高,因此需对其信号进行平稳化处理以及零化处理,处理后的信号图如图 2(b)、(c) 所示。

根据 AR 模型的偏自相关系数截尾性以及 MA 模型的自相关系数截尾性,由图 3 可以初步确定,ARMA 模型的阶数为 $n=5$ 与 $m=2$,然后根据 BIC 准则最终确定 ARMA 模型的阶数为 $n=5$ 与 $m=4$. BIC 值变化图如图 4 所示.其他频率点的模型阶数选取原则与其一样. x 通道与 y 通道的波形对比和频谱对比如图 5 和图 6 所示。

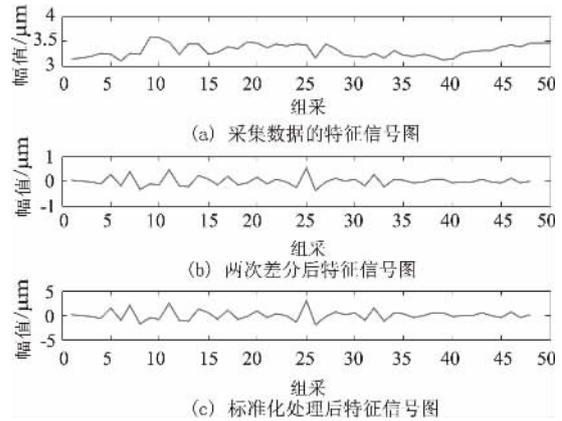


图 2 特征信号图以及处理后的信号图

Fig. 2 Characteristics signals and signals after processing

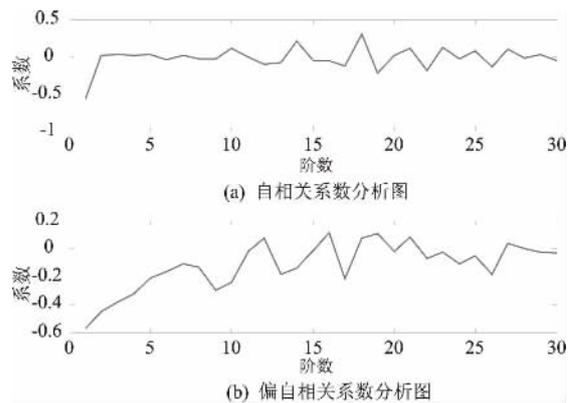


图 3 自相关系数与偏自相关系数分析图

Fig. 3 Autocorrelation coefficient and partial autocorrelation coefficient analysis charts

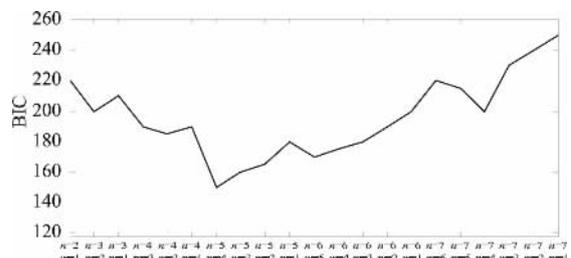


图 4 BIC 值变化图

Fig. 4 The change chart of BIC value

由图 5 和图 6 可以看出, x 通道与 y 通道的波形图与频谱图存在着明显的差异性,因此 x 通道与 y 通道任何一个通道振动信号都不能准确反映转子振动的实际情况,通过单一通道的振动数据进行振动强度的分析是片面的、不准确的. 而将两个通道的振动数据通过同源信息融合技术与全矢谱技术进行全矢数值计算得到的全矢谱具有频谱结构唯一性,能够准确反映出转子振动的最大强度. 全矢谱图如图 7 所示。

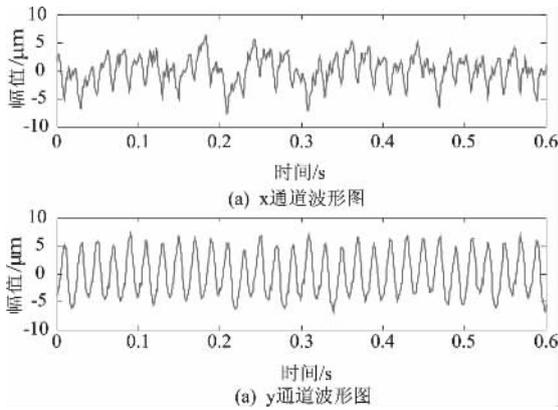


图5 x通道与y通道波形对比图

Fig. 5 The waveform comparison charts x and y channel

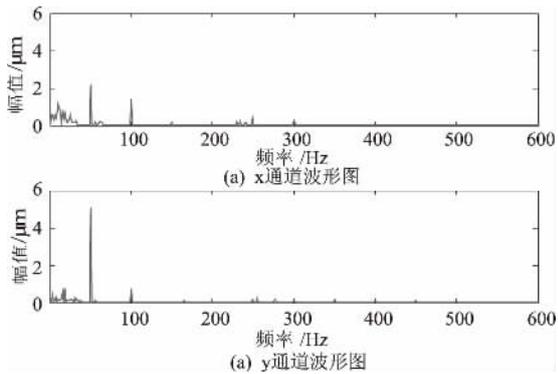


图6 x通道与y通道频谱对比图

Fig. 6 The spectrum comparison charts x and y channel

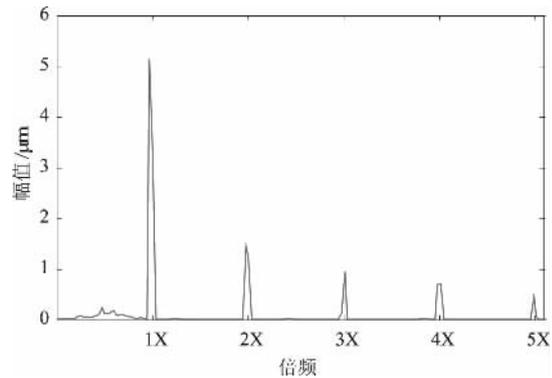


图7 振动信号的全矢频谱图

Fig. 7 The full vector spectrum of vibration signals

第51到56组实际数据的全矢频谱结果以及预测得到的全矢频谱结果如表1所示. 不进行全矢数值计算,通过ARMA模型分别对两个单通道进行预测得到的频谱结果如表2和表3所示,然后与全矢-ARMA模型预测的结果(表1)进行对比.

结果表明:通过全矢数值计算得到的频谱结构唯一,并且能够准确反映转子的最大振动强度,因此全矢-ARMA模型能够进行振动强度的预测,得到预测频谱之后可以对设备进行故障的预分

析.而两个方向单通道的频谱具有差异性,不能准确反映转子的振动信息,因此不能通过单通道预测进行故障的预分析.

表1 全矢-ARMA模型单步预测误差

Tab.1 Single-step prediction error of FVS-ARMA model

比较项	1X	2X	3X	4X	5X
实际值/ μm	6.063 9	1.198 3	0.690 5	0.490 3	0.224 5
预测值/ μm	6.166 5	1.265 4	0.699 2	0.485 1	0.227 2
平均绝对误差/ μm	0.043 9	0.018 7	0.007 8	0.004 6	0.005 8
平均相对误差	0.71%	1.53%	1.10%	0.96%	2.50%

表2 x通道单步预测误差

Tab.2 Single-step prediction error of x channel

比较项	1X	2X	3X	4X	5X
实际值/ μm	4.498 0	1.693 1	0.604 2	0.622 6	0.202 7
预测值/ μm	4.477 4	1.618 1	0.596 1	0.641 4	0.199 1
平均绝对误差/ μm	0.040 9	0.034 6	0.016 0	0.012 4	0.003 9
平均相对误差	0.91%	2.08%	2.66%	1.98%	1.92%

表3 y通道单步预测误差

Tab.3 Single-step prediction error of y channel

比较项	1X	2X	3X	4X	5X
实际值/ μm	3.484 7	1.252 9	0.680 3	0.688 5	0.255 0
预测值/ μm	3.582 3	1.204 1	0.688 0	0.685 6	0.260 5
平均绝对误差/ μm	0.062 1	0.018 1	0.005 4	0.004 0	0.006 4
平均相对误差	1.77%	1.46%	0.78%	0.58%	2.47%

之前有学者用全矢-AR模型对设备状态趋势进行预测,预测结果平均绝对误差为0.016 1,平均相对误差为2.494 2%^[8].倍频预测误差如表1~3所示,由表1数据可以看出,全矢-ARMA模型预测的平均相对误差为0.71%,预测误差小、精度高.由于全矢-ARMA模型在各个频率处都有较高的预测精度,因此预测出的频谱结构也较为准确,有了频谱结构,从而能够实现对故障的预测分析.

通过以上的实验验证可以看出,全矢-ARMA模型预测比单通道预测的结果一致性好,频谱结构预测准确并具有唯一性,有利于故障预测技术的应用.

5 结论

(1)全矢-ARMA模型预测解决了单通道预测信息不完善,频谱结构不唯一的缺陷,实现了频谱

结构的预测,并且有较好的预测结果.

(2) 全矢-ARMA模型预测能够准确地预测出转子振动的最大强度,因此实现了振动强度的早预测,从而减少重大事故的发生.

(3) 根据故障机理由频谱可以知道故障类型,通过全矢-ARMA模型预测的全矢谱图能够实现故障的预分析,从而提前做好维修的准备.

参考文献:

- [1] 杨叔子,吴雅,轩建平,等. 时间序列分析的工程应用(上册) [M]. 武汉:华中科技大学出版社,2007.
- [2] 易丹辉. 时间序列分析方法及应用 [M]. 北京:中国人民大学出版社,2011.
- [3] 韩捷,石来德. 全矢谱技术及工程应用 [M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [4] 韩捷,张瑞林. 旋转机械故障机理及诊断技术 [M]. 北京:机械工业出版社,1997.
- [5] 韩捷,石来德. 旋转机械的全信息能量谱分析方法研究 [J]. 机械强度,2003,25(4): 364-368.
- [6] 樊碧波,韩捷,张晓冬. 基于全矢谱的旋转机械谱强度预测技术研究 [J]. 机械设计与制造,2010(11): 217-219.
- [7] 韩捷,石来德,董辛旻. 旋转机械虚拟探头融合检测技术研究 [J]. 中国工程机械学报,2007,5(2): 204-209.
- [8] 李永耀,韩捷,陈磊,等. 基于AR-Kalman的机械设备状态趋势预测方法研究 [J]. 制造业自动化,2014(12): 95-96,120.
- [9] AKAIKE H. Maximum likelihood identification of gaussian autoregressive moving average models [J]. Biometrika, 1973,60(2): 102-110.
- [10] GOLDMAN P, MUSZYNSKA A. Application of full spectrum to rotating machinery diagnostics [J]. Orbit, 1999(3): 17-21.
- [11] BOX G E P, JENKINS G M, REINSEL G C. Time series analysis: forecasting and control [M]. San Francisco: Wiley,1976.

Application of FVS-ARMA Model in Mechanical Vibration Intensity Prediction Research

HAN Jie, WU Yanzhao, CHEN Lei, HAO Wangshen, ZHANG Qianlong

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

Abstract: Considering incomplete vibration information that leading to poor consistency of predictive results, single-channel prediction method cannot realize accurate prediction of machine fault. While by obtaining spectral structure with unique characteristics, full vector spectrum (FVS) can well make up for the deficiency of single-channel. Further the prediction method of FVS-ARMA model was proposed in this paper, which combined ARMA model with full vector spectrum technology. It was applied to predict the mechanical vibration strength. Experiments showed that prediction results of this method were identical to the practical effects.

Key words: full vector spectrum; ARMA model; strength prediction; information fusion; time-series forecasting method

文章编号: 1671-6833(2016)06-0048-05

动水压力对钢桥面环氧沥青铺装裂缝扩展影响

钱振东¹, 张 勳¹, 许 静²

(1. 东南大学 智能运输系统研究中心, 江苏 南京 210096; 2. 国家知识产权局 专利局专利审查协作江苏中心, 江苏 苏州 215000)

摘 要: 钢桥面环氧沥青混凝土铺装发生裂缝病害后, 水渗入裂缝, 病害不断扩展. 研究动水压力对钢桥面环氧沥青混凝土铺装裂缝的扩展作用, 采用 ABAQUS 建立带裂缝的钢桥面环氧沥青混凝土铺装体系模型, 模拟不同温度、不同铺装裂缝长度、宽度、深度及数量等条件, 并通过数值分析铺装裂缝尖端的 J 积分值表征裂缝发展趋势. 研究表明, 动水压力越大, 铺装裂缝尖端的 J 积分值越大, 动水压力对裂缝扩展的作用越明显; 铺装层温度在 $0 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 温度越高, 铺装裂缝尖端的 J 积分值越大, 动水压力对裂缝扩展的作用越明显; 动水压力对裂缝扩展的作用, 受铺装裂缝长度、宽度影响大, 受铺装裂缝深度、纵向裂缝数量影响小; 同一动水压力作用下, 网状裂缝更容易发生裂缝扩展.

关键词: 环氧沥青混凝土铺装; 动水压力; 裂缝尺寸; 裂缝尖端 J 积分; 裂缝扩展

中图分类号: U443.33 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.03.028

0 引言

环氧沥青混凝土是我国钢桥桥面常用的沥青混凝土铺装材料之一, 其中裂缝病害是钢桥面环氧沥青混凝土铺装的典型病害形式. 当环氧沥青混凝土铺装层开裂后, 雨水渗入裂缝, 在行车荷载的作用下水在裂缝内形成动水压力, 不断冲刷铺装层, 引发裂缝扩展进而导致防水粘结层的损害与钢板的腐蚀. 现有研究主要是对普通沥青路面进行动水压力与孔隙水压力的理论推导、现场实测和数值模拟, 得到轮胎在水膜上驶过时产生的动水压力与孔隙水压力的大小. 李志刚等^[1]基于 Hankel 和 Laplace 积分变换, 得到动水压力的轴对称弹性解. 周长红等^[2]对饱和的沥青路面动水压力进行时间和空间分布的计算. 高俊启等^[3-4]通过实测发现, 动水压力随车速度的增大呈几何增长. 董泽蛟等^[5]通过建立饱和沥青路面孔隙水压力模型, 对水作用的力学机理进行研究. 而对钢桥面上孔隙率较小的环氧沥青混凝土铺装表面动水压力及其对沥青铺装裂缝扩展的研究尚处于起步阶段.

由于钢桥面铺装用环氧沥青混合料的孔隙率

在 $1\% \sim 3\%$, 环氧沥青混凝土铺装层结构内部几乎不发生渗水, 但一旦开裂, 在行车荷载作用下, 水在环氧沥青混凝土铺装裂缝内形成动水压力, 容易发生裂缝扩展. 笔者采用数值模拟的方法建立带裂缝钢桥面环氧沥青混凝土铺装体系模型, 通过 J 积分有效评价沥青混合料的抗裂性能^[6-7], 计算不同温度、铺装裂缝尺寸及数量等条件下铺装裂缝尖端的 J 积分, 研究动水压力对钢桥面环氧沥青混凝土铺装裂缝的扩展作用.

1 数值分析模型的建立

1.1 带裂缝钢桥面铺装体系模型

笔者采用 ABAQUS 建立钢桥面环氧沥青混凝土铺装体系模型, 取局部正交异性板结构模型, 纵桥向取 3 跨(4 块横隔板), 横桥向取 7 个 U 型加劲肋, 如图 1 所示. 肋宽、高、厚、间距分别为 280、280、8、600 mm, 横隔板厚和间距分别为 14.3 mm, 铺装层厚 600 mm, 钢板厚 16 mm, 钢桥面铺装体系模型详细参数如表 1 所示. 根据实际工程的调研情况, 桥面铺装的主要裂缝为横向拉应力控制的纵向裂缝, 位于 U 型加劲肋肋边顶部铺装层上表面^[8]. 本模型选取钢桥面最常见的纵向

收稿日期: 2015-10-29; 修订日期: 2015-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178114)

作者简介: 钱振东(1969—), 女, 江苏南通人, 东南大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事桥面铺装技术研究及新型沥青路面材料和结构研究, E-mail: qianzd@seu.edu.cn.

裂缝,其横向位置在 U 型加劲肋边顶部铺装层上表面,对裂缝形状进行简化,如图 2(a) 所示. 采用三点法对钢桥面环氧沥青混凝土铺装体系模型进行三维裂缝剖分,钢桥面铺装模型中裂缝尖端的网格划分如图 2(b) 所示.

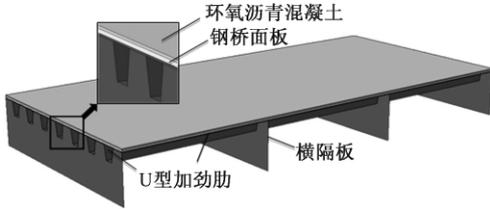


图 1 钢桥面环氧沥青混凝土铺装体系模型
Fig. 1 Model of steel bridge deck epoxy asphalt concrete pavement

表 1 钢桥面铺装模型参数

Tab. 1 Parameters of steel deck pavement model

钢板参数		环氧沥青混凝土铺装层参数			
弹性模量 /MPa	泊松比	密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	厚度 / mm	模量 / MPa	泊松比
2.1×10^5	0.3	7.8×10^3	30 + 30	1 000	0.25

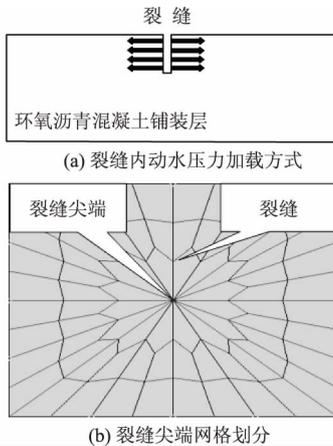


图 2 裂缝的设置
Fig. 2 Crack setting

1.2 动水压力荷载作用方式

李宗利等^[9] 研究表明,裂缝内水压力可作为外荷载施加到结构上. 鲁连军等^[10] 的研究表明,动水压力在裂缝边缘处以垂直于裂缝边缘的方向为主. 对铺装裂缝内动水压力进行简化,动水压力在裂缝处的具体加载方式如图 2(a) 所示.

陈昊^[11] 对动水压力的实测与计算结果表明,当车辆行驶速度在 40 ~ 100 km/h 变化时,路面动水压力值从 0.087 MPa 到 0.402 MPa 不等. 笔者动水压力取 0.1、0.2、0.3、0.4 MPa 进行计算.

1.3 J 积分计算结果输出

J 积分是弹塑性断裂力学中常用的断裂参

数,用以度量裂纹顶端应力应变场强度,可作为带裂纹弹塑性构件断裂的启裂判据,J 积分值越接近带裂纹构件的临界 J 积分值 J_{IC} ,构件裂纹越容易发生扩展^[12]. 笔者拟根据不同条件下带裂缝钢桥面铺装体系模型中裂缝尖端 J 积分值的大小,评价动水压力对钢桥面环氧沥青混凝土铺装裂缝扩展的影响程度.

对模型裂缝进行剖分后,在 ABAQUS 软件 interaction 模块 special-crack-assign seam 中对裂缝的长度和宽度进行定义;在 step 模块中将 domain 设为 contour integral,并设置 number of contour 为 3,然后定义裂缝尖端 J 积分的输出;裂缝尖端输出的 J 积分有 3 个,在后处理 dat 文件中读取裂缝尖端的 J 积分并取其平均值^[13].

2 动水压力作用下钢桥面环氧沥青混凝土铺装裂缝尖端应力场强度分析

2.1 不同温度条件下 J 积分的变化规律

实测资料显示,由于钢箱梁箱体内不通风、散热速度慢,当环境温度为 34 °C 时,桥面铺装层及钢板表面温度可达到 65 °C 以上;0 °C 以下,钢桥面铺装层会出现结冰,不在本文研究范围之内.

陈先华^[14] 在不同温度条件下进行了复合梁弯曲响应研究,钢桥面环氧沥青混凝土铺装层模量与温度的对应表如表 2 所示. 当铺装层温度大于 35 °C 时,环氧沥青混凝土铺装层在复合体系中模量为 200 MPa.

表 2 温度与模量对应表

Tab. 2 The relationship between temperature and modulus

温度 /°C	0	5	10	15	20	25	30	35
模量 /MPa	4 200	4 050	3 800	3 200	3 000	1 000	600	200

本文研究的铺装层温度范围为 0 ~ 35 °C,裂缝尺寸为长度 200 mm、深度 30 mm、宽度 2 mm. 笔者计算钢桥面铺装裂缝在不同动水压力、温度条件下,裂缝尖端 J 积分的变化规律,分析动水压力对钢桥面环氧沥青混凝土铺装裂缝扩展的影响,结果如图 3 所示.

由图 3 可知,动水压力越高,铺装裂缝越易于扩展. 动水压力为 0.1、0.2 MPa 时,裂缝尖端 J 积分值随温度的升高而增大,温度越高动水压力对裂缝扩展的作用越明显. 动水压力为 0.3、0.4 MPa 且在 0 ~ 30 °C 时,裂缝尖端 J 积分随温度的升高而变大,温度越高动水压力对裂缝扩展的作

用越明显;温度超过 30 °C 时, J 积分达到峰值. 之后裂缝尖端 J 积分减小. 温度为 30 °C 时, 即钢桥面环氧沥青铺装层温度在 0 ~ 30 °C, 动水压力作用导致裂缝尖端 J 积分随着温度升高而增大, 温度越高动水压力对裂缝扩展的作用越明显; 在冬季过后开春季节存在裂缝的铺装层需要做好养护, 抑制裂纹扩展; 铺装层温度超过 30 °C 时, 动水压力对裂缝扩展影响的可能性和程度相对复杂.

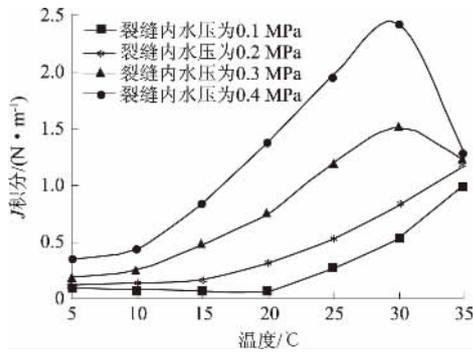


图3 不同温度下裂缝尖端 J 积分变化曲线图

Fig.3 J integral of crack tip under different temperatures

2.2 不同裂缝尺寸下 J 积分的变化规律

2.2.1 裂缝深度不同时 J 积分的变化规律

钢桥面环氧沥青混凝土铺装层的厚度一般为 50 ~ 60 mm. 根据表 2 选取常温时环氧沥青混凝土铺装层模量为 1 000 MPa, 裂缝长度 200 mm, 裂缝宽度 2 mm, 裂缝深度分别为 10、20、30、40、50 mm, 计算在不同裂缝深度、动水压力作用下裂缝尖端 J 积分, 进而分析动水压力对钢桥面环氧沥青混凝土铺装层裂缝扩展的影响, 结果如图 4 所示.

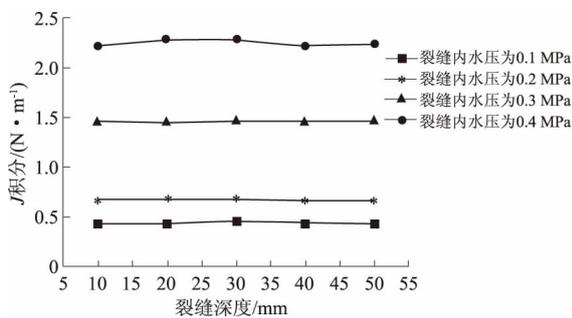


图4 裂缝尖端 J 积分随裂缝深度变化曲线图

Fig.4 J integral of crack tip under different crack depths

由图 4 可以看出, 同一动水压力作用下, 钢桥面环氧沥青铺装层裂缝深度的变化对裂缝尖端 J 积分影响幅度不大, 且裂缝尖端 J 积分都在裂缝深度为 30 mm 时达到最大, 动水压力对裂缝扩展的作用最明显, 故裂缝深度不作为评价钢桥面环氧沥青混凝土铺装层养护时机的依据.

2.2.2 裂缝长度不同时 J 积分的变化规律

根据实际调研可知, 钢桥面环氧沥青混凝土铺装层裂缝的长度一般在 200 mm 以内^[13], 根据表 2 选取常温时环氧沥青混凝土铺装层模量为 1 000 MPa, 裂缝深度 20 mm, 裂缝宽度 2 mm, 裂缝长度分别为 30、50、100、150、200 mm, 计算在不同裂缝长度、动水压力作用下裂缝尖端 J 积分, 进而分析动水压力对钢桥面环氧沥青混凝土铺装层裂缝扩展的影响, 结果如图 5 所示.

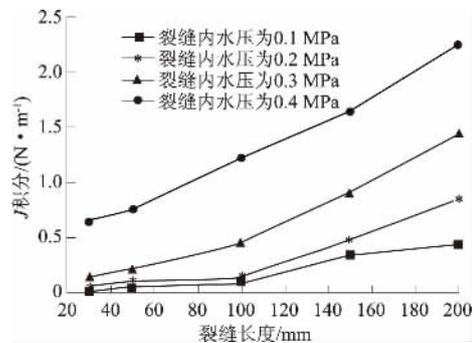


图5 裂缝尖端 J 积分随裂缝长度变化曲线图

Fig.5 J integral of crack tip under different crack lengths

由图 5 可知, 同一动水压力作用下, 裂缝尖端 J 积分随裂缝长度的增加近似呈线性增长; 且不同动水压力下, J 积分随裂缝长度增大而增大的趋势基本一致, 裂缝长度越大动水压力对裂缝扩展的作用越明显. 裂缝长度可作为评价钢桥面环氧沥青混凝土铺装层养护时机的指标.

2.2.3 裂缝宽度不同时 J 积分的变化规律

根据实际调研, 钢桥面环氧沥青混凝土铺装层裂缝宽度在 1 ~ 5 mm 左右^[15], 根据表 2 选取常温时环氧沥青混凝土铺装层模量为 1 000 MPa, 裂缝长度 200 mm, 深度 20 mm. 选取裂缝宽度分别为 1、2、3、4、5 mm, 计算在不同裂缝宽度、动水压力作用下裂缝尖端 J 积分, 进而分析动水压力对钢桥面环氧沥青混凝土铺装层裂缝扩展的影响, 结果如图 6 所示.

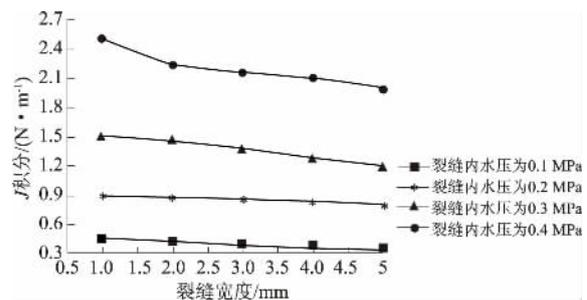


图6 裂缝尖端 J 积分随裂缝宽度变化曲线图

Fig.6 J integral of crack tip under different crack widths

由图6可以看出,同一动水压力下裂缝尖端 J 积分随裂缝宽度的增大而变小,动水压力为0.3、0.4 MPa时,裂缝宽度从1 mm增大到5 mm,裂缝尖端 J 积分分别减小了25.1%和21.2%,此时裂缝宽度的变化对动水压力下裂缝扩展的影响较明显.动水压力为0.1、0.2 MPa时, J 积分随裂缝宽度增加而减小的幅度在5%左右.因此裂缝宽度应作为评价钢桥面环氧沥青混凝土铺装层养护时机的依据.

分析随裂缝宽度的增大时 J 积分变化规律.裂缝内动水压力为0.1 MPa,铺装裂缝宽度为1 mm情况下,铺装层表面横向拉应力云图如图7所示.由图7可以看出,铺装层表面最大横向拉应力0.098 MPa,位于裂缝长度方向的两端.经计算,裂缝宽度为2、3、4、5 mm时,铺装层表面最大横向拉应力也都出现在裂缝的两端,分别为0.102、0.116、0.118、0.127 MPa.

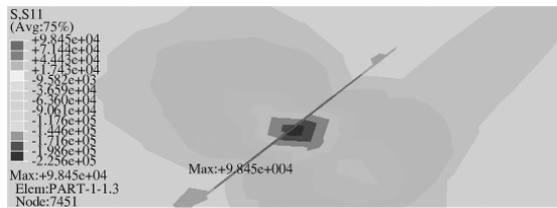


图7 铺装层表面拉应力云图

Fig.7 Cloud graph of pavement surface tensile stress

综上所述,铺装裂缝宽度增加时,铺装层表面最大横向拉应力均出现在裂缝的两端并逐渐增大,且裂缝尖端 J 积分值逐渐减小.即铺装裂缝宽度增加时,动水压力易使裂缝向长度方向扩展,且动水压力作用下裂缝向深度方向扩展的趋势变小;铺装裂缝宽度越小,若裂缝内动水压力越大,动水压力越容易使铺装裂缝沿深度方向发生扩展,铺装裂缝越容易发展为穿透型裂缝.

2.3 多条裂缝情况下 J 积分的变化规律

钢桥面环氧沥青混凝土铺装裂缝与裂缝之间会相互影响,根据表2选取常温时铺装层模量为1 000 MPa,裂缝长度200 mm,深度30 mm,宽度2 mm.裂缝组合为:①两条相距为70 mm的平行纵向裂缝;②三条两两相距为70 mm的平行纵向裂缝;③两条相距为70 mm的平行纵向裂缝,并且在纵向拉应力集中位置处增加一条横向裂缝.分别计算裂缝尖端 J 积分,并与单条裂缝计算结果相比较,分析不同裂缝宽度、动水压力下动水压力对钢桥面环氧沥青混凝土铺装裂缝扩展的影响,结果如表3所示.

表3 不同种类裂缝组合时 J 积分值

Tab.3 J integral under different kinds of crack

裂缝组合	动水压力/MPa			
	0.1	0.2	0.3	0.4
单条纵向裂缝	0.435	0.621	0.847	2.214
两条纵向裂缝	0.437	0.623	0.849	2.220
三条纵向裂缝	0.438	0.624	0.853	2.225
两条纵向,一条横向裂缝	0.455	0.628	0.854	2.235

由表3可以看出,纵向裂缝数量越多,裂缝尖端 J 积分越大,但变化幅度较小,这说明纵向裂缝的数量不大影响动水压力对裂缝扩展的作用;但当铺装层出现横向裂缝时, J 积分值比同等数量纵向裂缝情况下的 J 积分值大,这说明动水压力作用下网状裂缝更容易发生裂缝扩展.

3 结论

(1) 钢桥面环氧沥青铺装层温度在0~30℃范围内时,动水压力作用导致裂缝尖端 J 积分随着温度升高而增大,温度越高动水压力对裂缝扩展的作用越明显,在冬季过后开春季节存在裂缝的铺装层需要做好养护,抑制裂纹扩展;铺装层温度超过30℃时,动水压力对裂缝扩展影响的可能性和程度相对复杂.

(2) 钢桥面环氧沥青铺装层裂缝深度的变化对裂缝尖端 J 积分的影响幅度较小,裂缝深度为30 mm时,动水压力对裂缝扩展的作用最明显;裂缝长度越大,动水压力对裂缝扩展的作用越明显;裂缝宽度增加时,裂缝易向长度方向扩展;裂缝宽度越小,裂缝内动水压力越大,动水压力越容易使裂缝沿深度方向发生扩展,裂缝越容易发展为穿透型裂缝.

(3) 裂缝长度和宽度可作为评价钢桥面环氧沥青混凝土铺装层养护时机的指标,而裂缝深度不适合作为评价钢桥面环氧沥青混凝土铺装层养护时机的指标.

(4) 纵向裂缝的数量变化时,动水压力对裂缝扩展的作用变化不明显;而动水压力作用下网状裂缝更容易发生裂缝扩展.

参考文献:

- [1] 李志刚, 邓小勇. 动载作用下沥青路面内部孔隙水压力的轴对称弹性解[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2008, 38(5): 804-810.
- [2] 周长红, 陈静云, 王哲人, 等. 沥青路面动水压力计算及其影响因素分析[J]. 中南大学学报(自然

- 科学版), 2008, 39(5): 1100 - 1104.
- [3] 高俊启, 盛余祥, 张世铎, 等. 动水压力作用下沥青路面渗水量影响分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(2): 266 - 270.
- [4] 姜旺恒, 张肖宁, 李智. 基于动水压力模拟试验的沥青混合料水损坏力学机理[J]. 中国公路学报, 2011, 24(4): 21 - 25.
- [5] 董泽蛟, 谭忆秋, 曹丽萍, 等. 水-荷载耦合作用下沥青路面孔隙水压力研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(10): 1614 - 1617.
- [6] 刘敬辉, 王端宜, 刘宇. 采用J积分对沥青混合料抗裂性能进行评价[J]. 固体力学学报, 2010, 31(1): 16 - 22.
- [7] 刘栋, 李立寒. 沥青混合料抗裂性能评价指标的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2012(4): 503 - 507.
- [8] 钱振东, 罗剑, 敬淼淼. 沥青混凝土钢桥面铺装方案受力分析[J]. 中国公路学报, 2005, 18(2): 61 - 64.
- [9] 李宗利, 任青文, 王亚红. 岩石与混凝土水力劈裂缝内水压分布计算[J]. 水力学报, 2005, 36(6): 656 - 671.
- [10] 鲁连军, 孙逢春, 安申法, 等. 水力裂缝内流场分布的有限元分析[J]. 北京理工大学学报, 2004, 24(1): 27 - 30.
- [11] 陈昊. 路面动水压力光纤传感测量与模拟分析研究[D]. 南京: 南京航空航天大学道路与铁道工程, 2009.
- [12] 陆毅中. 工程断裂力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1987.
- [13] 廖公云, 黄晓明. ABAQUS有限元软件在道路工程中的应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 2008.
- [14] 陈先华. 基于复合梁的钢桥面铺装层疲劳特性研究[D]. 南京: 东南大学交通学院, 2006.
- [15] 钱振东, 何长江. 钢桥铺面裂缝快速修复材料性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2008, 38(2): 255 - 259.

The Influence of Hydrodynamic Pressure on the Propagation of Steel Bridge Deck Epoxy Asphalt Concrete Pavement Crack

QIAN Zhendong¹, ZHANG Meng¹, XU Jing²

(1. Research Center of Intelligent Transportation System, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Patent Examination Cooperation Jiangsu Center of the Patent Office Ispo, Suzhou 215000, China)

Abstract: After cracks appear on steel bridge deck epoxy asphalt concrete pavement, the water would seep into cracks which would lead to crack propagation. This paper studied the impact of hydrodynamic pressure on the propagation of steel bridge deck epoxy asphalt concrete pavement crack. ABAQUS was utilized to build a model of steel bridge deck epoxy asphalt concrete pavement with crack. The J integral of pavement crack under different temperatures, different pavement crack widths, different pavement crack lengths, different pavement crack depths and different number of pavement cracks were calculated. The impact of hydrodynamic pressure on steel bridge deck epoxy asphalt concrete pavement crack propagation was discussed. The results indicated that when hydrodynamic pressure increased, the J integral of pavement crack tip increased, and the effect of hydrodynamic pressure on crack propagation was more obvious. When the temperature was within the range of 0°C to 30°C , the increase of temperature would lead to the increase of J integral of pavement crack tip and the effect of hydrodynamic pressure on crack propagation would be more obvious. The effect of hydrodynamic pressure on the crack propagation changed obviously under different crack lengths and widths, while the effect of hydrodynamic pressure on the crack propagation changed unobviously under different crack depths and different number of longitudinal crack. Pattern cracking was easy to propagate under the same hydrodynamic pressure.

Key words: epoxy asphalt concrete pavement; hydrodynamic pressure; size of crack; J integral of crack tip; crack propagation

文章编号: 1671-6833(2016)06-0053-05

压实度和干湿循环对豫东粉土土-水特征曲线的影响

张涛^{1,2}, 乐金朝¹, 张俊然³

(1. 郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南交通职业技术学院 建筑工程系, 河南 郑州 451400; 3. 华北水利水电大学 河南省岩土力学与结构工程重点实验室, 河南 郑州 450045)

摘要: 用 GCTS 公司土-水特征压力板仪对不同压实度和多次干湿循环后的豫东粉土进行的土-水特征曲线试验. 试验结果表明: 当吸力小于 100 kPa 时, 土-水特征曲线的脱湿和吸湿曲线具有明显的滞回特性; 当吸力大于 100 kPa 时, 滞回特性不明显. 土-水特征曲线用含水率和吸力关系表示时, 含水率随着压实度和干湿循环次数的增大, 脱湿和吸湿曲线均向左下方偏移; 土-水特征曲线用饱和度和吸力关系表示时, 脱湿和吸湿曲线随着压实度的增加均向右上方偏移, 并随着干湿循环次数的增加向左下方偏移. 用 Matlab 中的 Lsqcurvefit 函数对试验数据进行拟合并得到 Van Genuchten 模型中的拟合参数.

关键词: 豫东粉土; 土-水特征曲线; 压实度; 干湿循环; 预测

中图分类号: U416.1 **文献标志码:** A doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.03.027

0 引言

传统的公路工程设计大部分都是依据饱和土力学原理, 而实际工程中路基土大部分以非饱和状态存在, 亟待用非饱和理论对路基土进行深入研究. 土-水特征曲线(简称 SWCC) 是研究非饱和土力学性质的核心^[1], 对解决非饱和土公路路基工程问题具有重要的意义. 压实度和干湿循环作用对土-水特征曲线的影响, 已有很多学者进行了大量的研究. 王协群等^[2]、张雪东等^[3]、汪东林等^[4]、叶灵敏等^[5]等研究了压实度对不同土体土-水特征曲线的影响; 刘奉银等^[6]、杨俊等^[7]、乐金朝等^[8]研究了干湿循环作用的影响. Ng 和 Pang^[9]、Ho^[10]研究了多次干湿循环的土-水特征曲线. 张俊然等^[11]结合已有的数据总结了脱湿曲线和吸湿曲线随着干湿循环次数的变化规律, 提

出了能预测多次干湿循环后土-水特征曲线的方法. 但对河南东部地区粉土(简称豫东粉土)在干湿循环和不同压实度下的土-水特征曲线的试验研究尚未开展. 笔者采用的是美国 GCTS 公司生产的土-水特征曲线固结仪, 由 Fredlund SWCC 装置和加载系统两部分组成. GCTS 非饱和土固结仪通过轴平移技术控制基质吸力, 试验中试样通过排水管与外界相连, 它既可做非饱和土的压缩试验, 也可作为压力板仪测定土-水特征曲线.

1 土样的基本性质与试样制备

1.1 土样的基本性质

土样取自豫东地区, 取土深度约为 3 m, 主要物理力学性质指标如表 1 所示, 颗粒分布曲线如图 1 所示. 按照《公路土工试验规程》的分类, 试验用土属于低液限砂质粉土.

表 1 豫东地区粉土基本物理指标

Tab. 1 Basic physical properties of Yudong silt

颗粒比重 G_s	液限 $w_L / \%$	塑限 $w_p / \%$	塑性指数 I_p	最大干密度 $\rho_d / (g \cdot cm^{-3})$	最优含水率 $w_{opt} / \%$
2.70	24.5	19.0	5.5	1.72	12.7%

收稿日期: 2015-10-20; 修订日期: 2015-12-28

基金项目: 河南省交通运输厅科技计划项目(2014K44); 河南省教育厅科学技术研究重点项目(14B580001; 16B580001)

通信作者: 乐金朝(1965—), 男, 河南信阳人, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事岩土工程及道路工程研究工作, E-mail: yuejc@zzu.edu.cn.

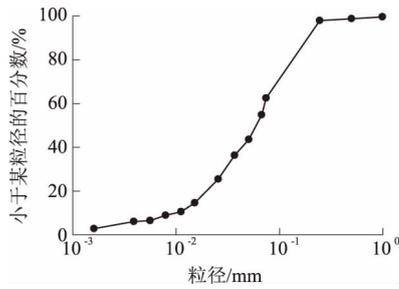


图1 豫东粉土的粒径分布曲线

Fig. 1 Grain size distribution curve of Yudong silt

1.2 试样制备

将土样碾压后过孔径 2.0 mm 的筛,烘干、冷却后配置成目标含水率的土样,密闭 24 h;用静压实法将土样压制成标准的环刀样,初始高度为 2 cm,直径为 6.18 cm.在压实过程中,控制试样的压实度分别为 90%、93%、96%,所对应的干密度分别为 1.55、1.61、1.64 g/cm³.试样制成后用真空泵进行抽真空饱和,试样的初始状态见表 2.

表 2 试样的初始状态

Tab. 2 The initial state of the specimens

试样编号	压实度/%	初始干密度 $\rho_{d0}/(g \cdot cm^{-3})$	初始孔隙比 e_0
1#	90	0.744	1.55
2#	93	0.679	1.61
3#	96	0.649	1.64
4#	93	0.679	1.61

1.3 试验方案

土-水特征曲线试验均是在净应力为 0 kPa 的状态下进行的.首先将制作的饱和试样装入 GCTS 非饱和固结仪中,施加设定的吸力,具体吸力路径如表 3 所示.试样 1#~3#分别进行了不同压实度下土-水特征曲线的脱湿和吸湿过程;而试样 4#进行了 3 次控制吸力的脱湿和吸湿过程.

表 3 吸力路径

Tab. 3 Suction paths

路径类型	吸力路径
脱湿过程	1 kPa→10 kPa→20 kPa→40 kPa→80 kPa→160 kPa→320 kPa→480 kPa
吸湿过程	480 kPa→320 kPa→160 kPa→80 kPa→40 kPa→20 kPa→10 kPa→1 kPa

2 试验结果及分析

2.1 压实度对土-水特征曲线的影响

图 2 为试样 1#~3#的土-水特征曲线,其含水率、饱和度均随着吸力增加而降低,随着吸力降低而增加,由于“瓶颈效应”的存在,使脱湿曲线与吸湿曲线存在明显的滞回效应,脱湿曲线总是高

于吸湿曲线.当吸力小于 100 kPa 时,土-水特征曲线的脱湿和吸湿曲线具有明显的滞回特性;当吸力大于 100 kPa 时,滞回特性不明显.

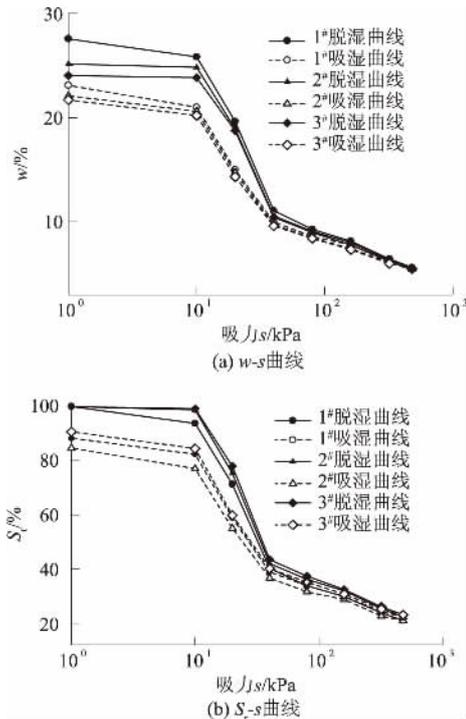


图 2 不同压实度下豫东粉土的土-水特征曲线

Fig. 2 Soil water characteristic curves of different compaction degrees

图 2(a) 表明:随着压实度的增加,脱湿曲线和吸湿曲线均右向左下移动的趋势,即在吸力相同时,压实度小的比压实度大的试样含水率高.当吸力大于 100 kPa,压实度对土-水特征曲线的影响不明显. Romero 和 Vaunat^[12] 也获得了类似结果.由图 2(b) 可知,随着压实度的增加脱湿曲线和吸湿曲线均向右上方移动,即当吸力相同时,饱和度随着压实度的增大而增大,与 Sun 等^[13] 得到的试验结论类似.

2.2 干湿循环次数对土-水特征曲线的影响

图 3 为试样 4#经历 3 次干湿循环的土-水特征曲线.用含水率-吸力表示和用饱和度-吸力表示,试样 4#的含水率、饱和度均随着吸力增加而降低,脱湿曲线与吸湿曲线也存在明显的滞回效应.当吸力小于 100 kPa 时,脱湿和吸湿曲线具有明显的滞回特性;当吸力大于 100 kPa 时,其滞回特性不明显.

由图 3 可知:随着干湿循环次数的增加脱湿与吸湿曲线均向左下方偏移;滞回圈面积随着干湿循环次数的增加而减小.首次干湿循环对滞回圈大小影响较大,而干湿循环 2、3 次后的滞回圈

变化不大,这与 Ng 和 Pang^[9]、Ho 等^[10] 得到的试验结果类似. 主要原因是反复干湿循环作用下土样孔隙内可能残存气泡,从而阻止水分进入孔隙,而孔隙内的气泡量趋于稳定^[6],这样逐渐减弱了干湿循环产生的影响;经过多次干湿循环后,孔隙结构趋于稳定,土-水特征曲线基本处于稳定状态,受干湿循环的影响小.

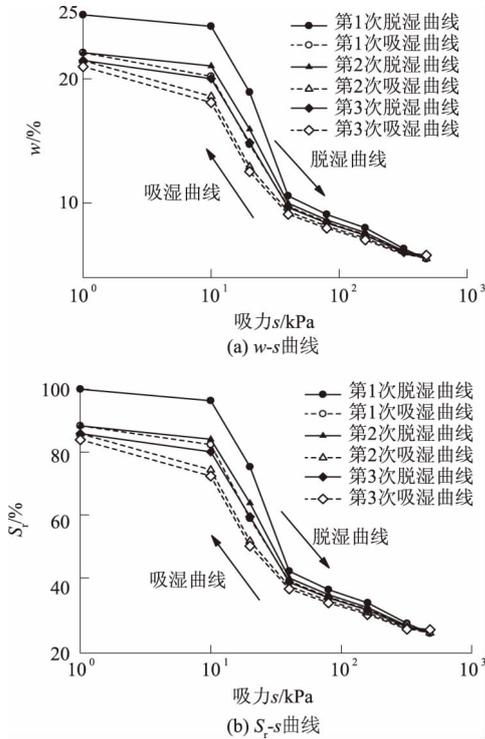


图 3 豫东粉土经历多次干湿循环的土-水特征曲线
Fig.3 Soil water characteristic curve of Yudong silt experienced wetting and drying cycles

3 SWCC 的曲线拟合及预测方法

用 Van Genuchten 模型^[14] 对粉土的实测土-水特征曲线进行了拟合.

$$w = \frac{w_s}{[1 + (\psi/a)^n]^m} \quad (1)$$

式中: w 是吸力 ψ 对应的重力含水率; w_s 是饱和重力含水率; a 、 n 、 m 是模型拟合参数.

3.1 不同压实度的 SWCC 的曲线拟合及预测

用 Matlab 中的 Lsqcurvefit 函数对试验数据进行拟合并得到 Van Genuchten 模型拟合参数,参见文献 [15]. 不同压实度作用下的土-水特征试验数据点拟合的曲线见图 4,拟合参数见表 4.

从表 4 和图 4 可以看出,其拟合度均在 98% 以上,拟合效果良好. Van Genuchten 模型中的拟合参数 a 、 n 均随着压实度的增加呈非线性增加;而拟合参数 m 随着压实度的变化不大.

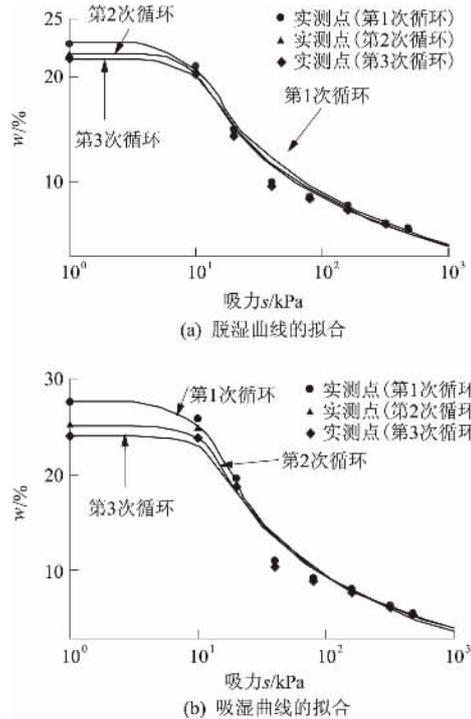


图 4 不同压实度作用下土-水特征曲线的拟合
Fig.4 Fitting SWCC curves for different compaction degrees

表 4 不同压实度下试样的土水特征曲线的拟合参数
Tab.4 Fitting parameters of SWCCs for different degree of compaction

曲线类型	试样编号	压实度/%	拟合参数			拟合度
			a	n	m	
脱湿曲线	1#	90	7.23	30.36	0.01	0.987
	2#	93	7.98	32.79	0.01	0.985
	3#	96	8.95	40.02	0.01	0.990
吸湿曲线	1#	90	6.33	18.14	0.02	0.986
	2#	93	6.58	19.38	0.02	0.993
	3#	96	6.71	26.73	0.02	0.991

根据已知脱湿和吸湿曲线 Van Genuchten 模型中拟合参数随压实度的变化规律,建立与压实度有关的函数,具体表达式为:

$$a_d = 10.214d^{3.3158}; \quad (2)$$

$$a_w = 0.123d^{1.076}; \quad (3)$$

$$n_d = 0.203 \ln d + 0.210; \quad (4)$$

$$n_w = -0.002d^2 + 0.112d - 0.363. \quad (5)$$

式中: d 为压实度; a_d 、 n_d 为脱湿曲线拟合参数; a_w 、 n_w 为吸湿曲线拟合参数.

将式(2)、(4)代入式(1)中,得到预测不同压实度下土-水特征曲线的脱湿曲线表达式为

$$w = \frac{w_s}{[1 + (\psi/10.214d^{3.3158})^{(0.203 \ln d + 0.210)}]^m} \quad (6)$$

将式(3)、(5)带入式(1)中,得到预测不同压实度下土-水特征曲线的吸湿曲线表达式为

$$w = \frac{w_s}{[1 + (\psi/0.123d^{1.076})^{(-0.002d^2 + 0.112d - 0.363)}]^m} \quad (7)$$

根据公式(6)、(7),可预测豫东粉土任意压实度的土-水特征的脱湿和吸湿曲线,如图4所示。

3.2 干湿循环多次的 SWCC 的曲线拟合及预测

用 Matlab 中的 Lsqcurvefit 函数对试验数据拟合得到 Van Genuchten 模型拟合参数. 不同干湿循环次数的土-水特征试验数据点拟合的曲线如图5所示,其拟合的参数具体见表5. 从表5和图5可知,拟合效果良好, Van Genuchten 模型中的拟合参数 a 、 n 均随着干湿循环次数的增加呈非线性减小;而 m 随着干湿循环次数的变化不大. Van Genuchten 模型中参数 a 与空气进气值有关,在反复干湿循环下,试样表面会出现些裂隙,气体进出导致试样的进气值减小。

根据已知脱湿和吸湿曲线 Van Genuchten 模型中拟合参数随干湿循环次数的变化规律,建立与干湿循环次数有关的函数,具体表达式为:

$$a_d = 0.347N^2 + 49.92N - 175.9; \quad (8)$$

$$a_w = 30.69e^{-0.53N}; \quad (9)$$

$$n_d = 6.304e^{-0.04N}. \quad (10)$$

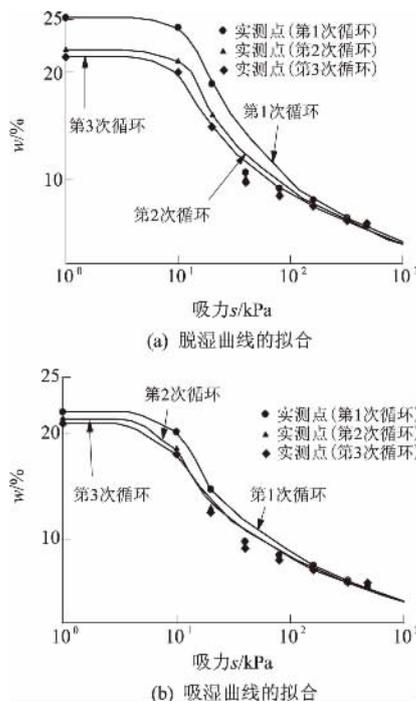


图5 干湿循环时土-水特征曲线的拟合

Fig.5 Fitting SWCC curves during drying-wetting cycles

表5 干湿循环时土-水特征曲线的拟合参数

Tab.5 Fitting parameters of SWCCs during drying-wetting cycles

过程	循环次数	拟合参数			拟合度
		a	n	m	
脱湿过程	1	8.059	44.67	0.02	0.991
	2	7.87	24.21	0.02	0.988
	3	6.77	20.66	0.02	0.987
吸湿过程	1	6.42	20.35	0.02	0.984
	2	4.98	14.22	0.02	0.990
	3	4.42	12.07	0.02	0.989

$$n_w = 13.35e^{-0.12N}. \quad (11)$$

式中: N 表示干湿循环次数.

将式(8)、(10)带入式(1)中,得到预测干湿循环多次土-水特征曲线的脱湿曲线表达式:

$$w = \frac{w_s}{\{1 + [\psi/(0.347N^2 + 49.92N - 175.9)]^{6.304e^{-0.04N}}\}^m} \quad (12)$$

将式(9)、(11)带入式(1)中,得到预测干湿循环多次土-水特征曲线的吸湿曲线表达式:

$$w = \frac{w_s}{[1 + (\psi/30.69e^{-0.53N})^{13.35e^{-0.12N}}]^m} \quad (13)$$

根据公式(12)和(13),可预测干湿循环多次的豫东粉土土-水特征曲线脱湿曲线和吸湿曲线。

4 结论

(1) 豫东粉土的土-水特征曲线的脱湿和吸湿曲线具有明显的滞回特性,当吸力大于 100 kPa 时滞回特性不明显. 土-水特征曲线用含水率和吸力关系表示时,含水率随着压实度和干湿循环次数的增大,脱湿和吸湿曲线均向左下方偏移;土-水特征曲线用饱和度和吸力关系表示时,脱湿和吸湿曲线随着压实度的增加均向右上方偏移,而随着干湿循环次数的增加向左下方偏移。

(2) 脱湿与吸湿曲线间的滞回圈面积随干湿循环次数的增加而减小,首次干湿循环对滞回圈影响较大,而随后干湿循环对滞回圈影响很小。

(3) 通过建立 Van Genuchten 模型的参数与压实度或干湿循环次数的函数关系,提出了可以预测不同压实度和干湿循环多次后的豫东粉土土-水特征曲线的方法。

参考文献:

[1] XU Y F, SUN D A. Determination of expansive soil strength using a fractal model [J]. Fractals, 2001, 9 (1): 51 - 60.

- [2] 王协群, 邹维列, 骆以道, 等. 考虑压实度时的土水特征曲线和温度对吸力的影响 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 368-372.
- [3] 张雪东, 赵成刚, 蔡国庆, 等. 土体密实状态对土-水特征曲线影响规律研究 [J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1463-1468.
- [4] 汪东林, 栾茂田, 杨庆. 重塑非饱和黏土的土-水特征曲线及其影响因素研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 751-756.
- [5] 叶灵敏. 干湿循环作用下非饱和粉土路基的工程特性研究 [D]. 郑州: 郑州大学水利与环境工程学院, 2014: 28-37.
- [6] 刘奉银, 张昭, 周冬, 等. 密度和干湿循环对黄土土-水特征曲线的影响 [J]. 岩土力学, 2011, 32(Z2): 132-136.
- [7] 杨俊, 童磊, 张国栋. 干湿循环效应对风化砂改良膨胀土 CBR 特性影响研究 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(2): 19-23.
- [8] 乐金朝, 李新明, 乐旭东. 钢渣稳定土的水稳性试验研究 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2010, 31(2): 18-21.
- [9] NG C W W, PANG Y W. Experimental investigations of the soil-water characteristics of a volcanic soil [J]. Journal canadian geotechnical, 2000, 37(6): 1252-1264.
- [10] HO K M Y, TSE J M K, NG C W W. Influence of drying and wetting history and particle size on state-dependent soil water characteristic curves (SDSWCCs) [C]//Proc 3rd Asian Conference on Unsaturated Soils. Nanjing: Science press, 2007: 213-218.
- [11] 张俊然, 许强, 孙德安. 多次干湿循环后土-水特征曲线的模拟 [J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 689-695.
- [12] ROMERO E, VAUNAT J. Retention curve of deformable clays [C]//TARANTINO A, MANCUSO C. In experimental evidence and theoretical approaches in unsaturated soils. Rotterdam, Netherlands: Balkema. 2000: 91-106.
- [13] SUN D A, SHENG D C, SLOAN S W. Elastoplastic modelling of hydraulic and stress-strain behaviour of unsaturated compacted soils [J]. Mechanics of materials, 2007, 39(3): 212-221.
- [14] VAN GENUCHTEN M T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. America journal of soil science society, 1980, 44: 892-898.
- [15] 谭晓慧, 余伟, 沈梦芬, 等. 土-水特征曲线的试验研究及曲线拟合 [J]. 岩土力学, 2013, 34(Z2): 51-56.

Influence of Compaction Degree and Drying-wetting Cycle on the Soil Water Characteristic Curve of Yudong Silt

ZHANG Tao^{1,2}, YUE Jinchao¹, ZHANG Junran³

(1. School of Water Conservancy and Environment Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Architectural Engineering Department, Henan Vocational and Technical College of Communications, Zhengzhou 451400, China; 3. Henan Province Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics and Structural Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: A series of the soil-water characteristic curve (SWCC) tests for Yudong silt with different compaction degree and wetting-drying cycles were conducted by the pressure plate apparatus with the GCTS model. The test results showed that the SWCC curves had obvious hysteresis phenomenon during the drying and wetting cycles when the value of the suction was less than 100 kPa. While the value of the suction was greater than 100 kPa, the SWCC hysteresis phenomenon was not obvious. The SWCC was expressed by the relations between suction and water content, the SWCC curves have a shift to the bottom and left trend with the increase in the compaction degree and drying-wetting cycles. When the SWCC is expressed by the relations between suction and saturation, the SWCC curves had a shift to the top and right trend with the increase in the compaction degree, while the SWCC curves had a shift to the bottom and trend with the increase in the wetting-drying cycles. The Lsqcurvefit function of the Matlab was adopted for fitting of the SWCC curves to get the fitting parameters of the Van Genuchten model. Through the relations between the fitting parameters and the compaction degree or drying-wetting cycles, the practical methods were proposed to predict the Yudong silt SWCC with different compaction degree or drying-wetting cycles.

Key words: compaction degree; drying-wetting cycle; Yudong silt; soil water characteristic curve; prediction

文章编号: 1671-6833(2016)06-0058-05

基于数值计算的矩形孔蜂窝梁应力分布规律研究

王 衡, 陈廷国

(大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 通过有限元软件 ANSYS 对矩形孔蜂窝梁进行弹性分析, 研究蜂窝梁应力分布规律, 主要包括桥墩横截面正应力和剪应力分布、桥墩纵截面正应力分布及梁桥横截面正应力分布. 另外, 详细研究了跨高比、孔高比、长高比和距高比等因素对墩心横截面正应力和剪应力分布的影响.

关键词: 矩形孔蜂窝梁; 有限元; 应力分布; 影响因素

中图分类号: TU391 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.03.029

0 引言

蜂窝梁是一种新型钢结构构件, 有两种常用制作方法: 一种是将工字钢或 H 型钢按照一定的折线或弧线进行切割, 然后错位焊接而成^[1]; 另一种是直接在工字钢或 H 型钢的腹板上开孔制成. 与原型实腹梁相比, 承载力相同时, 蜂窝梁能够节省钢材 25% ~ 30%, 且质量轻、安装方便^[2-4]. 蜂窝梁开孔也为铺设管道提供了便利.

蜂窝梁包括空腹和实腹部分, 如图 1 所示, 在空腹部分处, 由上翼缘(或下翼缘)和部分腹板组成的 T 型截面称为梁桥; 整个实腹部分称为桥墩, 桥墩中心简称墩心; 梁桥和桥墩连接处称为桥趾^[5]. 矩形孔蜂窝梁孔洞高度为 d , 孔洞长度为 a , 孔洞之间的距离为 s , 蜂窝梁高度为 h , 长度为 l , 则孔高比 d/h 、长高比 a/h 和距高比 s/h 是影响蜂窝梁受力性能的主要因素^[6].

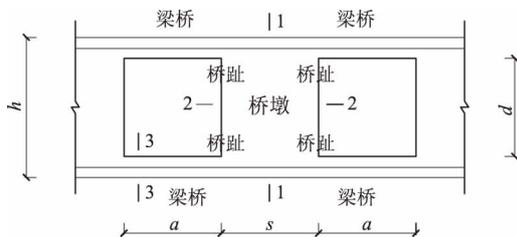


图 1 矩形孔蜂窝梁各部分名称

Fig. 1 Name of parts in the rectangular hole castellated beam

相对于国外, 国内对蜂窝梁的研究较晚^[7-8], 且在规范中没有相应的设计条文, 这在很大程度上制约了蜂窝梁的工程应用^[9]. 所以笔者对矩形孔蜂窝梁应力分布规律进行了研究, 其结果可为工程设计提供参考.

1 有限元建模

笔者采用有限元软件 ANSYS 对蜂窝梁建模计算^[10], 选择 I10 工字钢, 根据不同参数要求在腹板上进行开孔而制成蜂窝梁.

蜂窝梁模型采用壳单元 shell93 模拟^[2]. 笔者只对蜂窝梁弹性阶段进行受力分析, 建模时忽略了焊缝及残余应力对结构的影响. 其中蜂窝梁采用 Q235 钢, 材料弹性模量取 200 GPa, 泊松比取 0.3, 屈服强度为 235 MPa.

采用控制变量法分析各因素对蜂窝梁墩心横截面应力分布的影响, 分别计算了 $d/h = 0.3 \sim 0.8$ 、 $a/h = 0.3 \sim 1.2$ 、 $s/h = 0.3 \sim 1.2$ 时的应力分布. 如图 2 所示矩形孔蜂窝梁有限元模型.

2 应力分布规律

蜂窝梁应力分布与实腹梁的不同之处, 主要体现在以下几个断面(图 1 所示), 即桥墩横截面(1-1 断面, 截面为工字型)、桥墩纵截面(2-2 断面, 截面为矩形)、梁桥横截面(3-3 断面, 截面为 T 形).

收稿日期: 2015-11-20; 修订日期: 2016-01-19

通信作者: 陈廷国(1957—), 男, 辽宁大连人, 大连理工大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事大型及新型结构研究, E-mail: chentg@dlut.edu.cn.

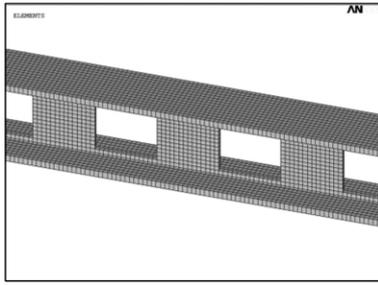


图 2 矩形孔蜂窝梁有限元模型

Fig. 2 The finite element model of rectangular hole castellated beams

2.1 桥墩横截面正应力和剪应力分布

取 $d/h = a/h = s/h = 0.7$ 、 $l/h = 14$ 的简支蜂窝梁进行详细研究,在跨中施加 1 kN 的集中荷载.取 $7l/10$ 处桥墩中心横截面为初始位置,沿着梁长方向每隔 0.01 m 取一个断面,提取各节点应力.为方便分析,将各断面应力转化为截面单位弯矩(或单位剪力)作用下的正应力(或剪应力),如图 3 所示为部分断面单位弯矩下的正应力曲线,图 4 为部分断面单位剪力下的剪应力曲线.结果表明:在墩心横截面两侧对称位置,正应力近似对称分布,剪应力分布近似相同;桥墩各横截面应力分布规律不同;距离孔口越近,应力集中越明显,在桥趾附近区域产生较大的正应力和剪应力;墩心横截面正应力分布不符合平截面假定,通过回归分析,正应力分布近似为三次曲线,剪应力分布为二次曲线,表达式分别为

$$\sigma_x = [-7.01 (y/h)^3 - 0.65 (y/h)] \sigma_0 \quad (1)$$

$$\tau = [-21.45 (y/h)^2 + 2.83] \tau_0 \quad (2)$$

式中: y 为验算点距离截面形心的高度, m; h 为梁高, m; σ_x 为正应力, MPa; σ_0 为按当量实腹梁(与桥墩横截面相同的实腹梁)计算截面单位弯矩下产生的最大正应力; τ 为剪应力, MPa; τ_0 为按当量实腹梁计算截面单位剪力下产生的最大剪应力.

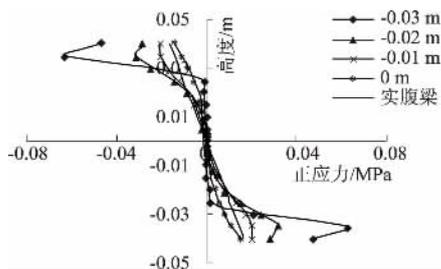


图 3 桥墩横截面单位弯矩下的正应力曲线
Fig. 3 Normal stress curve of pier cross section at unit moment

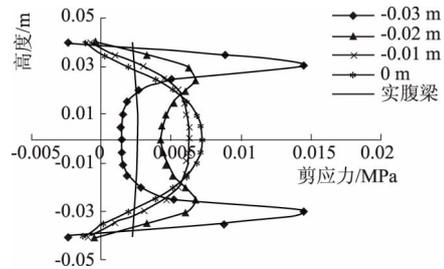


图 4 桥墩横截面单位剪力下的剪应力曲线
Fig. 4 Shearing stress curve of pier cross section at unit shear

取 $d/h = a/h = s/h = 0.7$ 的蜂窝梁进一步分析,当集中荷载作用于梁上任一位置时,墩心横截面正应力和剪应力分布规律不变;当两个对称集中荷载作用时,纯弯段梁和非纯弯段梁上墩心横截面正应力分布规律仍然相同,非纯弯段梁上墩心横截面剪应力分布规律也相同.由此得出,墩心横截面正应力和剪应力分布与荷载位置无关.

对于浅梁,当蜂窝梁孔数改变,即梁跨高比 l/h 改变时,墩心横截面正应力和剪应力分布几乎不变;而对于深梁,应力分布却发生了改变,图 5 和图 6 所示分别为不同跨高比时墩心横截面正应力和剪应力分布.由此得出:在计算蜂窝浅梁($l/h > 5$)时,墩心横截面正应力和剪应力分布与跨高比无关.

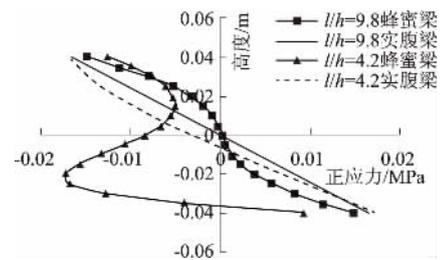


图 5 不同跨高比时正应力分布
Fig. 5 Normal stress distribution under different span-depth ratios

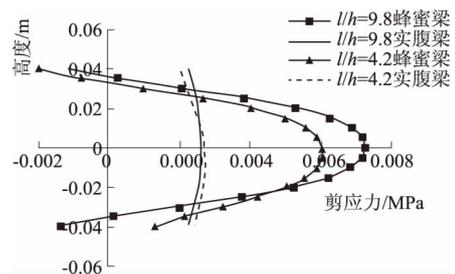


图 6 不同跨高比时剪应力分布
Fig. 6 Shearing stress distribution under different span-depth ratios

取 $a/h = s/h = 0.7$ 不变,分别计算孔高比

$d/h = 0.3 \sim 0.8$ 时的应力分布情况,如图 7 和图 8 所示分别为不同孔高比时墩心横截面正应力和剪应力分布. 由图可知: 孔高比越小,墩心横截面正应力分布越趋近于线性,但正应力最大值相差不大; 剪应力峰值均出现在腹板中心,随着孔高比减小,剪应力峰值减小; 当孔高比趋近于零时,应力分布与实腹梁近似相同.

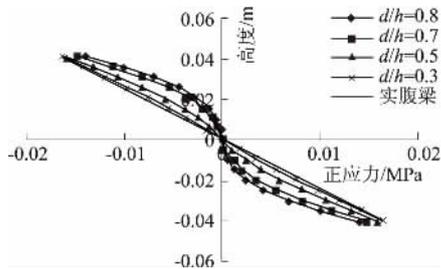


图 7 不同孔高比时正应力分布

Fig. 7 Normal stress distribution under different width-depth ratios

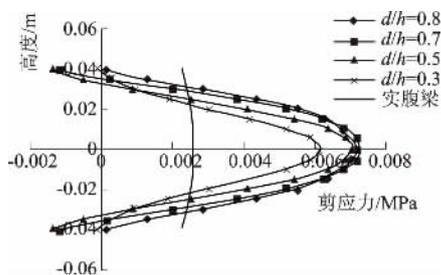


图 8 不同孔高比时剪应力分布

Fig. 8 Shearing stress distribution under different width-depth ratios

取 $d/h = s/h = 0.7$ 不变,分别计算长高比 $a/h = 0.3 \sim 1.2$ 时的应力分布情况,如图 9 和图 10 所示分别为不同长高比时墩心横截面正应力和剪应力分布. 由图可知: 长高比对墩心横截面正应力分布影响很小,而对剪应力分布影响较大; 随着长高比增大,剪应力峰值变大; 当长高比趋近于零时,应力分布与实腹梁近似相同.

取 $d/h = a/h = 0.7$ 不变,分别计算距高比 $s/h = 0.3 \sim 1.2$ 时的应力分布情况,如图 11 和图 12 所示分别为不同距高比时墩心横截面正应力和剪应力分布. 由图可知: 距高比越大,墩心横截面正应力分布越趋近于线性,但正应力最大值相差不大; 在距高比较小时,腹板靠近中心部分区域正应力几乎为零; 距高比对剪应力分布影响较大,距高比越大,剪应力峰值越小,但减小速率变小,剪应力分布越均匀; 当距高比趋近于无穷时,应力分布与实腹梁近似相同. 所以,在工程设计时,蜂窝梁孔洞之间的距离不宜过小.

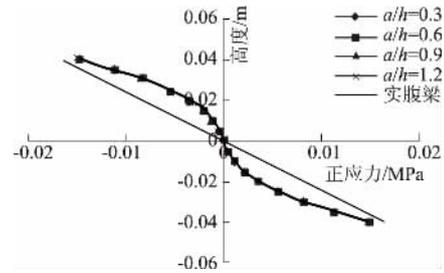


图 9 不同长高比时正应力分布

Fig. 9 Normal stress distribution under different length-depth ratios

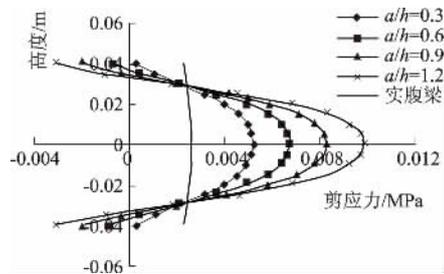


图 10 不同长高比时剪应力分布

Fig. 10 Shearing stress distribution under different length-depth ratios

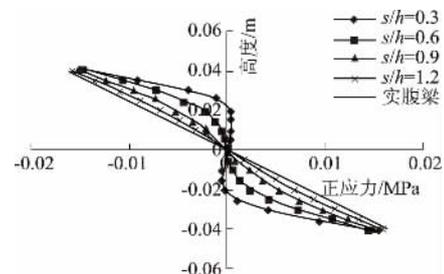


图 11 不同距高比时正应力分布

Fig. 11 Normal stress distribution under different space-depth ratios

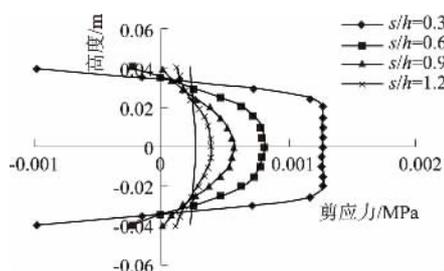


图 12 不同距高比时剪应力分布

Fig. 12 Shearing stress distribution under different space-depth ratios

2.2 桥墩纵截面正应力分布

取 $d/h = a/h = s/h = 0.7, l/h = 14$ 的蜂窝梁进行研究,为消除集中荷载作用位置应力集中的影响,在距离支座和集中荷载较远位置,即选择 $7l/10$ 处桥墩进行分析. 沿着桥墩高度方向,每隔 0.01 m 取一个纵截面分析正应力. 计算发现,在

腹板中心上下对称位置处桥墩纵截面正应力为对称分布,所以选取一半桥墩详细分析,图 13 所示为以桥墩高度中心为坐标原点的各纵截面正应力分布.然后将各纵截面上的应力进行积分,求出截面弯矩,图 14 所示为沿高度方向桥墩纵截面弯矩分布.

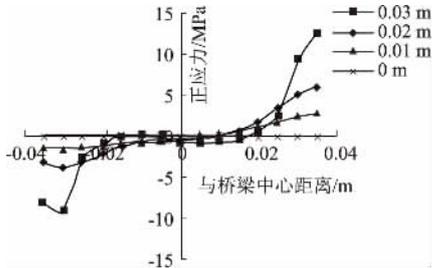


图 13 桥墩不同高度处的纵截面正应力分布
Fig. 13 Normal stress distribution of pier longitudinal section at different heights

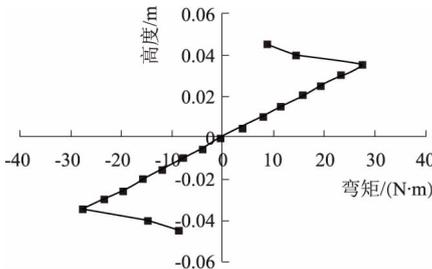


图 14 沿蜂窝梁高度方向桥墩纵截面弯矩分布
Fig. 14 Bending moment distribution of pier longitudinal section along the height direction

根据图 13 不难发现:沿着梁高方向,不同高度处桥墩纵截面正应力分布为非线性,且截面最大正应力出现在孔洞附近.而由图 14 可知:沿着梁高方向,在 $-d/2 \sim d/2$ 范围内,桥墩纵截面弯矩为线性分布,桥墩腹板中心处纵截面弯矩为零.在费氏空腹桁架法原理^[3]中,假设桥墩中心为反弯点,通过以上分析,验证了该假设的正确性,可为蜂窝梁挠度计算方法研究提供参考.

2.3 梁桥横截面正应力分布

取 $d/h = a/h = s/h = 0.7, l/h = 14$ 的蜂窝梁进行研究,提取 $3l/4 + a/2$ 段梁桥各横截面上正应力分析,结果发现:梁桥横截面正应力呈线性分布,仅在桥趾附近有点差异.图 15 所示为沿着孔洞长度方向,梁桥翼缘正应力分布.根据费氏空腹桁架法原理^[3],假设梁桥中心为反弯点,梁桥横截面正应力由两部分组成:梁弯矩正应力和剪力引起的次弯矩正应力.

假定蜂窝梁空腹截面受到的剪力为 V_i ,则孔洞上下两个梁桥横截面各承担剪力 $V_i/2$;以孔洞

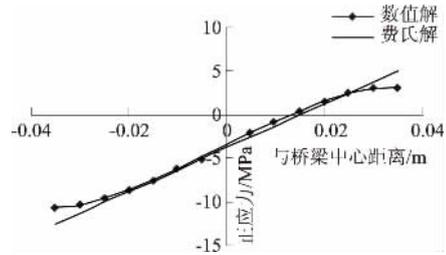


图 15 沿孔洞长度方向梁桥翼缘正应力分布
Fig. 15 The flange normal stress distribution of beam bridge along the longitudinal direction of holes

中心断面为坐标原点,设梁桥上任一位置与坐标原点距离为 x_i ,则由剪力引起的次弯矩为 $V_i x_i / 2$;所以梁桥横截面上正应力可表示为

$$\sigma = \frac{M_i y}{I_z} + \frac{V_i x_i y'}{2 I_T} \quad (3)$$

式中: M_i 为以蜂窝梁为计算结构,验算截面位置所受的弯矩; y 为验算位置距离蜂窝梁截面形心的高度; I_z 为蜂窝梁空腹截面惯性矩; y' 为验算位置距离梁桥 T 型截面形心的高度; I_T 为梁桥 T 型截面惯性矩.

由图 15 可知,利用式(3)计算所得梁桥翼缘正应力分布与数值计算结果比较接近,验证了该式的正确性,同时可为蜂窝梁挠度计算方法研究提供参考.

3 结论

利用有限元软件 ANSYS 对矩形孔蜂窝梁应力分布进行了研究,得出如下主要结论:

- (1) 由于受到孔洞影响,蜂窝梁上的应力分布与实腹梁有很大区别,在计算分析时应加以区分.
- (2) 蜂窝梁桥墩横截面正应力和剪应力分布与距离孔洞远近有密切关系,距离孔口越近,应力集中越明显.墩心横截面正应力分布不符合平面假定,而是接近三次曲线;剪应力分布为二次曲线,腹板中心剪应力最大,两边较小.
- (3) 墩心横截面正应力和剪应力分布与荷载作用位置、跨高比无关,而孔高比、长高比和距高比对应力分布影响较大.孔高比越小、长高比越小、距高比越大,墩心横截面应力分布越接近与实腹梁.
- (4) 桥墩纵截面正应力分布与高度有关,为非线性分布,但纵截面弯矩在孔洞范围内沿梁高方向呈线性分布,桥墩中心为反弯点.
- (5) 梁桥横截面正应力呈线性分布,并且由

梁弯矩正应力和剪力次弯矩正应力叠加而成,从而验证了费氏空腹桁架原理对梁桥正应力计算的正确性.

参考文献:

- [1] 贾连光, 孙宏达, 王春刚. 蜂窝式钢框架结构抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2012, 29(7): 147-153.
- [2] 李鹏飞, 姚谦峰. 蜂窝梁应力和挠度计算方法[J]. 建筑结构, 2011, 42(2): 52-55.
- [3] 倪富生, 胡泰祥, 胡嗣元, 等. 蜂窝梁的应力分布及设计计算探讨[J]. 工业建筑, 1984, 24(8): 27-35.
- [4] 王洪范, 王立新. 蜂窝梁的应用和计算方法[J]. 工业建筑, 1994, 24(8): 3-4.
- [5] 曾欢艳. 考虑孔高比和距高比正六边形孔蜂窝梁挠度计算研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2013.
- [6] 蒋上. 正八边形孔蜂窝梁的挠度计算研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2011.
- [7] 罗烈, 罗晓霖. 蜂窝梁设计规范的比较研究[J]. 建筑钢结构进展, 2005, 7(2): 43-47.
- [8] CHEN J K, KIM B, LI L Y. Analytical approach for transverse vibration analysis of castellated beams[J]. International journal of structural stability and dynamics, 2014, 14(3): 96-100.
- [9] 刘鑫. 考虑孔况影响的蜂窝梁设计计算研究[D]. 长沙: 中南大学土木工程学院, 2006.
- [10] CHUNG K F, LIU T C H, KO A C H. Investigation on vierendeel mechanism in steel beams with circular web openings[J]. Journal of contractual steel research, 2001, 57(5): 467-490.

Research on the Stress Distribution of Rectangular Hole Castellated Beams Based on Numerical Calculation

WANG Heng, CHEN Tingguo

(School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: According to the elastic analysis of rectangular hole castellated beams by using the finite element software ANSYS, the stress distribution of castellated beams was studied, which mainly included normal stress and shearing stress distribution of pier cross section, normal stress distribution of pier longitudinal section and normal stress distribution of beam bridge. In addition, the factors affecting the normal stress and shearing stress distribution of the center of pier cross section were studied in detail, which contained span-depth ratio, width-depth ratio, length-depth ratio and space-depth ratio. The research could provide reference for engineering design.

Key words: rectangular hole castellated beam; finite element; stress distribution; factor

文章编号: 1671-6833(2016)06-0063-05

基于 OpenSees 的高阶非线性桁架单元开发及应用

张俊峰, 高健利

(郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 对于大跨度的空间桁架结构, 准确模拟非线性状态后的力学行为非常重要. 基于 UL 法的增量微分方程, 详细推导了空间桁架单元考虑几何非线性的高阶刚度矩阵, 通过 OpenSees 开放平台, 开发了高阶非线性桁架单元, 给出了单元的实现方式、静力和动力计算的 TCL 命令流程和迭代过程的非线性算法, 通过几种桁架结构的非线性静力和地震作用下的非线性动力对比分析, 表明采用本文方法实现的单元能够准确模拟桁架结构的强非线性性能.

关键词: 空间桁架; 几何非线性; 高阶刚度矩阵; OpenSees; 二次开发

中图分类号: TU375 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.03.025

0 引言

大跨度桁架结构的施工过程以及使用寿命期内的变形与内力都具有明显的几何非线性, 需要精确的几何非线性理论, 为此许多学者进行了大量研究, Bathe^[1]、Crisfield^[2]提出了几种解决几何非线性的单元微分方程; Greco 等^[3]提出了用节点坐标描述应变并用最小势能原理建立空间桁架的非线性有限元方程, 但是这些方法的局限性在于仅适用于大位移、小应变问题, 且列式复杂, Greco 等^[4]又在其基础上引入了 Logarithmic 应变修正了这一问题; Thai 等^[5]对同时考虑几何和材料非线性的空间桁架结构的后屈曲行为做了研究; Shi 等^[6]对同时考虑几何材料非线性的空间桁架结构的动力行为做了研究; 喻莹等^[7]提出了有限质点法分析空间桁架结构动静非线性问题的思路. 这些研究分别从坐标系统、非线性有限元方程列法、结构的动力与静力等方面研究了几何非线性对空间桁架的影响, 对研究桁架的非线性行为有十分重要的意义. 但这些理论还不完善, 并且在实现途径上是基于自编的程序, 不便于推广应用, 笔者用更新的拉格朗日方法、更新格林应变张量、第二 Piola-Kirchhoff 应力张量, 详细推导了空间桁架高阶刚度矩阵, 并在开源软件 OpenSees 平台上编制了相应的桁架单元, 给出了实现过程和

相应的非线性算法以及 TCL 命令流程, 为大跨度桁架结构的非线性静力和动力分析提供了很好的实现方式和途径.

1 空间非线性桁架单元刚度矩阵

1.1 空间桁架非线性方程

在更新的拉格朗日增量分析中, 用 3 种基本的构形来表示物体的运动状态: C_0 表示初始未变形的构形, C_1 是已知的参考构形, C_2 是变形后的构形. 对于桁架来说, 只考虑轴向变形, 则更新的拉格朗日增量方程为^[8]

$$\int_V E e_{xx} \delta e_{xx} dV + \int_V E \eta_{xx} \delta e_{xx} dV + \int_V E e_{xx} \delta \eta_{xx} dV + \int_V E \eta_{xx} \delta \eta_{xx} dV + \int_V \tau_{xx} \delta \eta_{xx} dV = {}^2R - {}^1R. \quad (1)$$

式中: e_{xx} 是线性格林应变增量; η_{xx} 是非线性格林应变增量; ${}^1\tau_{xx}$ 是初始正应力; 2R 和 1R 分别代表外荷载在 C_2 构形和 C_1 构形下所做的虚功.

空间桁架单元的位移分量如图 1 所示, 单元内任一点的位移 (u, v, w) 可以用形函数 $[N]$ 来表示^[8]:

$$\begin{cases} u = u_a \left(1 - \frac{x}{L}\right) + u_b \frac{x}{L} = [N_u] \{d\}; \\ v = v_a \left(1 - \frac{x}{L}\right) + v_b \frac{x}{L} = [N_v] \{d\}; \\ w = w_a \left(1 - \frac{x}{L}\right) + w_b \frac{x}{L} = [N_w] \{d\}. \end{cases} \quad (2)$$

收稿日期: 2015-10-28; 修订日期: 2015-12-26

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(142102310345)

作者简介: 张俊峰(1981—), 男, 河南洛阳人, 郑州大学讲师, 博士, 主要从事空间钢结构非线性研究, E-mail: zhangjunfeng@zzu.edu.cn.

式中: $\{d\}$ 为端节点位移向量; L 是桁架单元长度; $u_a, v_a, w_a, u_b, v_b, w_b$ 分别代表单元端点三个方向上的位移。

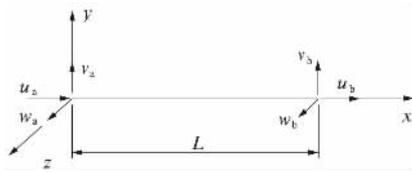


图1 桁架单元的位移分量

Fig. 1 Displacement components of a truss element

格林应变增量可写成线性部分和非线性部分, $\varepsilon_{xx} = e_{xx} + \eta_{xx}$, 将式(2)代入, 得

$$e_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} = [N_u'] \{d\}; \quad (3)$$

$$\eta_{xx} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] = \frac{1}{2} (\{d\}^T [N_u']^T [N_u] \{d\} + \{d\}^T [N_v']^T [N_v] \{d\} + \{d\}^T [N_w']^T [N_w] \{d\}). \quad (4)$$

假想单元节点只有集中荷载, 而对于分布荷载可以用静力平衡节点荷载来代替. 这样, 将方程(3)和(4)代入(1)中, 得

$$\begin{aligned} & \{\delta d\}^T \int_V E [N_u']^T [N_u'] \{d\} dV + \\ & \{\delta d\}^T \int_V \frac{E}{2} [N_u']^T \{d\}^T ([N_u']^T [N_u'] + [N_v']^T [N_v'] + [N_w']^T [N_w']) \{d\} dV + \\ & \{\delta d\}^T \int_V E ([N_u']^T [N_u'] + [N_v']^T [N_v'] + [N_w']^T [N_w']) \{d\} [N_u'] \{d\} dV + \\ & \{\delta d\}^T \int_V \frac{E}{2} ([N_u']^T [N_u'] + [N_v']^T [N_v'] + [N_w']^T [N_w']) \{d\} \{d\}^T + \\ & ([N_u']^T [N_u'] + [N_v']^T [N_v'] + [N_w']^T [N_w']) \cdot \\ & \{d\} dV + \{\delta d\}^T \int_V \sigma_0 ([N_u']^T [N_u'] + [N_v']^T [N_v'] + [N_w']^T [N_w']) \{d\} dV = \\ & \{\delta d\}^T (\{^2f\} - \{^1f\}). \end{aligned} \quad (5)$$

1.2 高阶非线性桁架单元刚度矩阵

利用虚位移原理, 由(5)可以推出桁架单元的有限元方程为

$$([k_e] + [k_g] + [s_1] + [s_2] + [s_3]) \{d\} + \{^1f\} = \{^2f\}. \quad (6)$$

式中: $\{^1f\}$ 为 C_1 构形对应的初始力; $\{^2f\}$ 为 C_2 构形对应的总力。

由式(5)可得方程(6)中各刚度矩阵为

$$\begin{cases} [k_e] = \int_V EA [N_u']^T [N_u'] dx; \\ [k_g] = P \int_L ([N_u']^T [N_u'] + [N_v']^T [N_v'] + [N_w']^T [N_w']) dx; \\ [s_1] = \int_L \frac{EA}{2} [N_u']^T \{d\}^T ([N_u']^T [N_u'] + [N_v']^T [N_v'] + [N_w']^T [N_w']) dx; \\ [s_2] = \int_L EA ([N_u']^T [N_u'] + [N_v']^T [N_v'] + [N_w']^T [N_w']) \{d\} [N_u'] dx; \\ [s_3] = \int_L \frac{EA}{2} ([N_u']^T [N_u'] + [N_v']^T [N_v'] + [N_w']^T [N_w']) \{d\} \{d\}^T \cdot \\ \quad ([N_u']^T [N_u'] + [N_v']^T [N_v'] + [N_w']^T [N_w']) dx. \end{cases} \quad (7)$$

式中: $[k_e]$ 是线性刚度矩阵; $[k_g]$ 是几何刚度矩阵, 由每个增量步的轴力 P 决定; $[s_1]$ 和 $[s_2]$ 是与单元增量位移线性相关的矩阵; $[s_3]$ 是与单元增量位移二阶相关的矩阵^[9].

1.3 高阶刚度矩阵的对称形式

刚度矩阵的对称与否直接影响到计算程序实现的效率. 由式(7)得到的刚度矩阵 $[s_1]$ 和 $[s_2]$ 是非对称的, 而矩阵 $[s_1]$ 和 $[s_2]$ 的和可以看作是 $[k_1]/2$, 该矩阵是对称的^[10]. 由式(7)和其组成部分对应的刚度矩阵可以看出: 刚度矩阵 $[s_2]$ 和 $[s_3]$ 之和等效于 $[k_g]$ 矩阵, 因此可以写出 $[s_2]$ 和 $[s_3]$ 的等效刚度矩阵 $[s_2]_{eq}$ 和 $[s_3]_{eq}$. 由矩阵 $[s_1]$ 和 $[s_2]$ 的和减去 $[s_2]_{eq}$ 就得到了 $[s_1]$ 的等效矩阵 $[s_1]_{eq}$, 从而刚度矩阵由原来的非对称形式转换成了对称形式。

2 高阶非线性桁架单元的开发与应用

2.1 高阶非线性桁架单元的开发

OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation) 是应用于地震工程研究的开源有限元程序, 由美国国家自然科学基金资助、太平洋地震工程研究中心研发, 它是用面向对象的语言进行开发的, 而且代码公开, 因此可以协同开发新单元、新材料等^[11].

为了校核并更加方便地使用推导的高阶桁架单元, 基于 OpenSees 软件平台, 在 element 基类上派生了 nonlinearTruss3D 类, 并和 uniaxialMaterial 类关联, 以方便调用 uniaxialMaterial 类的材料信息, 该单元类参与模型的建立, 并将模型添加到 Domain 类中, Domain 类和 Analysis 类关联, 从而完成整个分析过程。

2.2 TCL 调用 nonlinearTruss3D 单元流程

OpenSees 调用 nonlinearTruss3D 单元进行静力和动力分析的流程如图 2 所示,分析时采用 Tool Command Language (TCL) 语言进行建模、分析、输出.

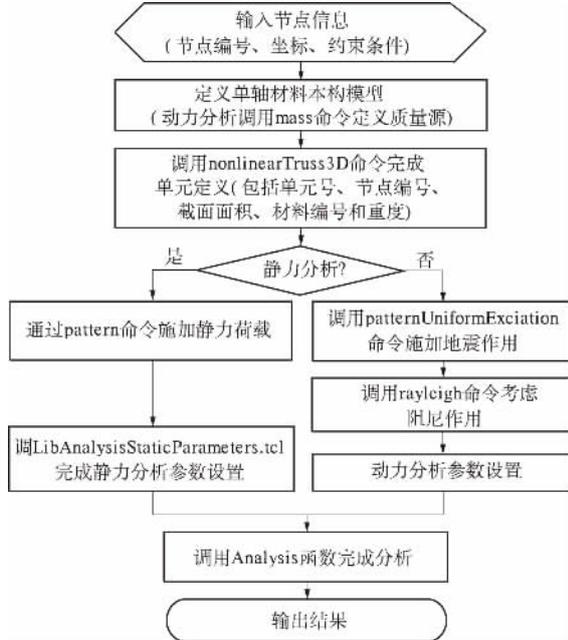


图 2 OpenSees 计算流程图

Fig. 2 Computational flow chart in OpenSees

2.3 非线性分析算法

调用高阶非线性桁架单元 nonlinearTruss3D 进行非线性分析的增量迭代算法流程如图 3 所示.分析中,首先调用 uniaxialMaterial 类获得材料的切线刚度 E ,计算单元刚度矩阵 K_e ,组装形成结构的总体刚度矩阵 K_g ,某一荷载增量下,结构的完整非线性分析工作需要多次迭代,迭代结束的判断条件为总体结构不平衡力 P_u 足够小.

3 算例分析

为了验证开发的高阶非线性桁架单元 nonlinearTruss3D 在 OpenSees 平台上进行静力和动力分析的准确性,笔者对 4 个经典算例进行了数值模拟,包括平面和空间桁架的静力和动力分析.为了准确追踪其非线性行为,静力分析采用弧长法,动力分析采用 Newmark 直接积分和 Newton-Raphson 迭代结合算法.

3.1 六角星桁架静力分析

Thai 等^[12] 对一个六角星桁架进行了分析,该桁架有 24 根杆件,所有杆件的截面面积 A 和弹性模量 E 都相同, $A = 0.1 \text{ cm}^2$, $E = 2.034 \times 10^7 \text{ N/cm}^2$,边缘假定为铰接.

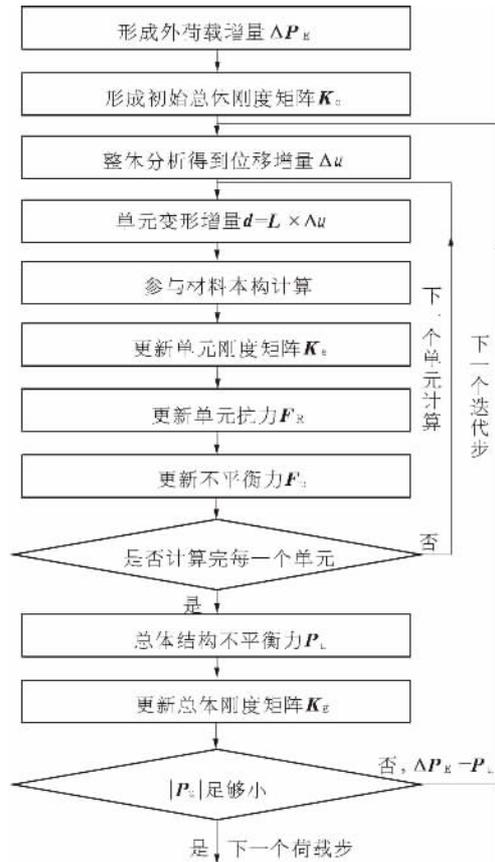


图 3 增量迭代流程图

Fig. 3 Flow chart of incremental – iterative solution

采用 nonlinearTruss3D 单元计算得到结构顶部节点的荷载-位移曲线,与文献 [12] 的对比如图 4 所示,两者相差不超过 1%.

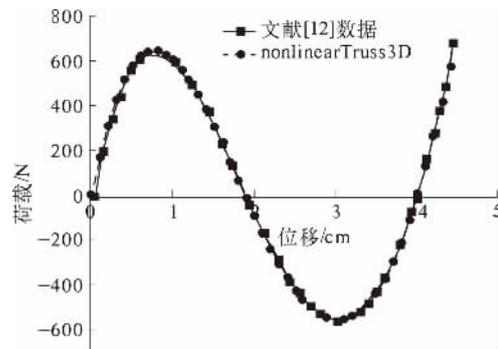


图 4 顶部节点 1 竖向位移

Fig. 4 Vertical displacement of the top node

3.2 测地圆顶桁架静力分析

Thai 等^[12] 对某测地圆顶桁架进行了分析,该桁架包含 156 根杆件,所有杆件的截面相同,面积 $A = 650 \text{ mm}^2$,材料弹性模量 $E = 6.895 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$,测地圆顶桁架顶部节点处承受集中荷载 P ,测地圆顶桁架的边缘假定为铰接,桁架的高度由方程 $x^2 + y^2 + (z + 7.2)^2 = 60.84 \text{ m}$ 确定.

采用 nonlinearTruss3D 单元计算得到顶部节

点的荷载-位移曲线,与文献[12]的对比如图5所示,二者相差不超过1%.

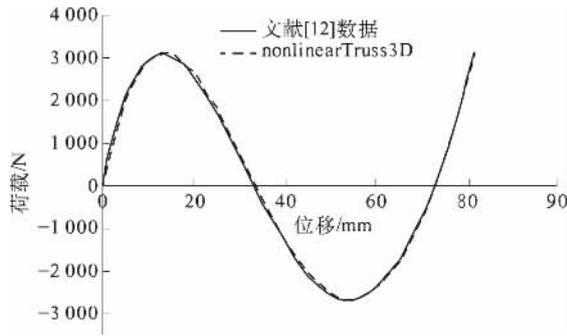


图5 顶部节点竖向位移

Fig. 5 Vertical displacement of the top node

3.3 悬挂桁架动力分析

Thai等^[13]对某悬挂桁架进行了分析,该桁架由两根相同的杆件组成,面积为 $A = 314.16 \text{ cm}^2$,材料弹性模量 $E = 2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$,自由节点的集中质量 $m = 5.0 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{mm}$,地震波采用EL-Centro波.

采用nonlinearTruss3D单元对该结构进行弹性时程分析得到自由节点的时程位移曲线与文献[13]的对比如图6所示.可以算出,二者最大相差不超过1%.

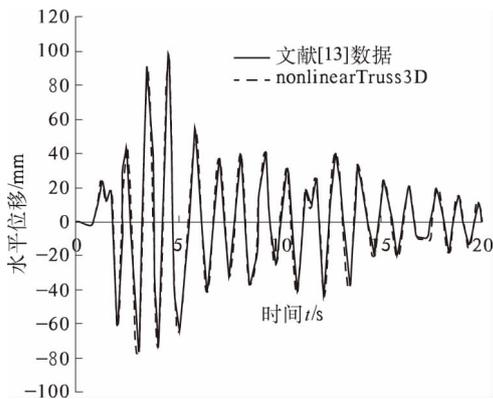


图6 自由节点的时程位移曲线

Fig. 6 Time-history displacement curve of free node

3.4 空间桁架动力分析

Thai等^[13]对一单跨三层空间桁架进行了分析,竖向平面构件采用 $L5 \times 5 \times 5/16$ 截面,水平面构件采用 $L4 \times 4 \times 1/4$ 截面,弹性模量 $E = 200 \text{ GPa}$,每层的集中质量为 $m = 50 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{mm}$,基底承受水平地震作用,地震波采用EL-Centro波.

用nonlinearTruss3D单元对该空间桁架进行弹性时程分析得到顶层节点的时程位移曲线,与文献[13]的对比如图7所示.

从图7可以得出,采用nonlinearTruss3D单元得到的空间桁架各层峰值位移和文献[13]的对

比,相差最大不超过3%.

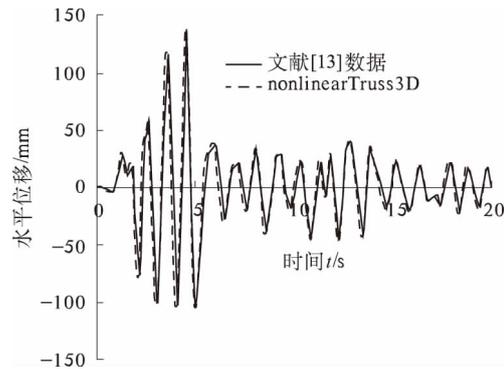


图7 顶层节点时程位移曲线

Fig. 7 Time-history displacement curve of roof node

4 结论

(1) 基于更新拉格朗日构形的增量虚位移原理推导出空间桁架单元的高阶非线性刚度矩阵.

(2) 基于OpenSees软件平台,在element单元基类上派生了nonlinearTruss3D类,开发了高阶非线性空间桁架单元.

(3) 基于OpenSees软件平台,给出了采用nonlinearTruss3D单元进行非线性静力和动力分析的模块化分析流程和增量迭代流程.

(4) 通过4个平面和空间桁架结构算例的非线性静力和动力分析,验证了开发的nonlinearTruss3D单元具有很高的精度,可以很好模拟结构的非线性静力和动力反应.

参考文献:

- [1] BATHE K J. Finite element procedures [M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1996.
- [2] CRISFIELD M A. Non-linear finite element analysis of solids and structures [M]. Chichester West Sussex, England: John Wiley & Sons, 1991.
- [3] GRECO M, GESUALDO F A R, VENTURINI W S, et al. Nonlinear positional formulation for space truss analysis [J]. Finite elements in analysis and design, 2006, 42(12): 1079-1086.
- [4] GRECO M, FERREIRA I P. Logarithmic strain measure applied to the nonlinear positional formulation for space truss analysis [J]. Finite elements in analysis and design, 2009, 45(10): 632-639.
- [5] THAI H T, KIM S E. Large deflection inelastic analysis of space trusses using generalized displacement control method [J]. Journal of constructional steel research, 2009, 65(10/11): 1987-1994.
- [6] SHI H, SALIM H, SHI Y, et al. Geometric and material

- nonlinear static and dynamic analysis of space truss structures [J]. Journal of mechanics based design of structures and machines, 2015, 43(1): 38–56.
- [7] 喻莹, 许贤, 罗尧治. 基于有限质点法的结构动力非线性行为分析[J]. 工程力学, 2012, 29(6): 63–69.
- [8] LEU L J, YANG Y B. Effects of rigid body and stretching on nonlinear analysis of trusses [J]. Journal of structural engineering, 1990, 116(10): 2582–2598.
- [9] YANG Y, KUO S. Theory and analysis of nonlinear framed structures [M]. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1994.
- [10] CHAJES A, CHURCHILL J E. Nonlinear frame analysis by finite element method [J]. Journal of structural engineering, 1987, 113(6): 1221–1235.
- [11] MCKENNA F, FENVES G L. Introducing a new element into OpenSees [R]. Berkely: PEER, University of California, 2000.
- [12] THAI H T, KIM S E. Large deflection inelastic analysis of space trusses using generalized displacement control method [J]. Constructional steel research, 2009, 10(11): 1987–1994.
- [13] THAI H T, KIM S E. Nonlinear inelastic time-history analysis of truss structures [J]. Constructional steel research, 2011, 67(12): 1966–1972.

Development and Application of Higher Order Nonlinear Truss Element in OpenSees Platform

ZHANG Junfeng, GAO Jianli

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

Abstract: For long – span space truss structures, it was very important to accurately simulate the nonlinear performance. Based on the increment of UL method of differential equation, the stiffness matrix of the space truss considering geometric nonlinear was deduced. The high order nonlinear truss element was developed in the OpenSees platform. The realization of the element, the static and dynamic calculation of TCL command flow and the nonlinear algorithm of iterative process were put forward. Several kinds of truss structure under the action of nonlinear static and seismic nonlinear dynamic analysis were carried out. And the results showed that the element could reflect the strong nonlinear behavior of trusses.

Key words: space truss; geometric nonlinear; higher order stiffness matrix; OpenSees; secondary development

文章编号: 1671-6833(2016)06-0068-04

气候变化对中原地区桥梁碳化寿命影响研究

赵娟, 李倍

(上海应用技术大学 城市建设与安全工程学院, 上海 201418)

摘要: 针对气候变化背景下的混凝土碳化问题, 以郑少高速南水北调大桥辅线桥为研究对象, 依据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)最新研究报告, 建立郑州地区在高、低两种碳排放情景下气候边界模型. 基于该模型研究了温度、大气湿度以及二氧化碳浓度在未来100年间的发展规律, 以此来预测辅线桥主梁和桥墩的碳化寿命, 最后通过与恒定气候参数下的碳化寿命计算结果进行对比. 结果表明: 气候变化将在一定程度上影响中原地区桥梁碳化进程, 高排放情景下主梁和桥墩的碳化寿命较之于低排放情景将缩短13%左右.

关键词: 气候变化; 桥梁; 混凝土; 碳化; 边界模型

中图分类号: TU528.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.06.021

0 引言

桥梁工程一直是国家重要的基础建设工程, 而钢筋腐蚀是导致混凝土桥梁性能劣化的主要根源之一. 在一般内陆环境下, 钢筋腐蚀主要由混凝土碳化引起, 混凝土碳化进程不仅与混凝土原材料、施工因素有关, 很大程度上受气候环境条件的影响.

混凝土碳化耐久性一直是研究热点, 然而在气候变化日趋显著的背景下, 针对气候变化可能给混凝土耐久性带来的影响的研究较少^[1]. Yoon^[2]第一次考虑了气候变化对混凝土碳化的影响, 建立了CO₂浓度变化的碳化模型, 但并未将显著影响混凝土碳化系数的温湿度因素考虑在内. Talukdar等人^[3]依据IPCC气候研究报告预测了不同碳排放模式下加拿大混凝土结构物的碳化深度, 但其假设环境相对湿度是恒定不变的. Hassan^[4]以月平均温度及相对湿度代表实际气候条件, 研究表明: 在混凝土耐久性评估中考虑实际气候条件非常重要.

笔者以实际工程郑少高速南水北调大桥辅线桥为依托, 根据最新IPCC气候研究报告对21世纪全球气候变化的预测, 模拟郑州地区21世纪气候条件发展趋势并建立随时间变化的混凝土碳化气

候边界模型, 采用文献[5]建议的碳化模型预测出该桥梁主梁及桥墩的碳化寿命, 分析探讨气候变化给我国中原地区桥梁碳化寿命产生的影响.

1 中原地区气候预测模型

郑州市地处华中地区, 是我国中部重要城市, 中原经济区核心, 交通发达, 地理位置重要. 辅线桥连接郑州市航海路和郑少高速公路, 是郑州市西南方向的出口, 于2013年建成通车. 就气候条件而言, 郑州市位于大陆性暖温带, 具备典型的中原地区气候特点, 四季分明, 冷暖适中, 依据近十年郑州市气候记录数据, 其年平均气温15.4℃, 相对湿度67%.

1.1 温度模型

最新发布的IPCC第五次评估报告^[6]从多方面进一步证实和支持了全球气候变暖这一毋庸置疑的结论. 报告针对未来社会经济发展、能源改善状况等因素提出了4种具有代表性的气候排放情景(RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5)及其对21世纪全球气候的影响规律. 其中RCP8.5和RCP2.6分别代表高、低排放情景; RCP4.5和RCP6.0介于两者之间. 研究表明, 郑州地区年平均气温变化与全球气温变化趋势一致, 即总体呈上升趋势, 年平均最高气温及最低气温均有所上

收稿日期: 2016-06-19; 修订日期: 2016-09-01

基金项目: 上海市教委创新项目(14YZ142); 国家自然科学基金资助项目(51408361)

作者简介: 赵娟(1977—), 女, 河南开封人, 上海应用技术大学副教授, 博士, 主要从事混凝土耐久性研究, E-mail: zhaajuan_sit@163.com.

升.图1为基于RCP2.6和RCP8.5两种排放情景下郑州市21世纪气温发展曲线.从图中可以看出,在最环保的RCP2.6排放情景下,气温上升幅度平缓,到本世纪末气温比世纪初上升1.2℃左右;在高排放情景下,气温上升较明显,到世纪末将会有接近4℃的温度增幅,两种情景都不同程度地区别于本世纪初的温度平均水平.

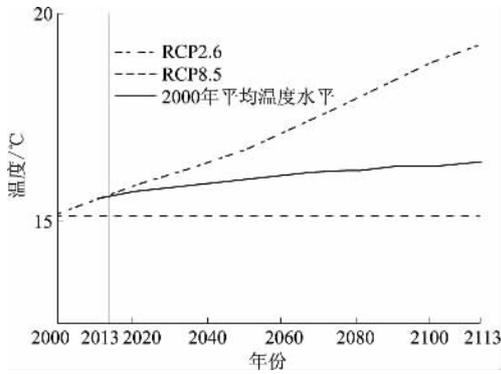


图1 21世纪郑州市年平均温度发展曲线

Fig.1 The average temperature development curve of zhengzhou in the 21st century

依据郑州市21世纪年均温度的发展曲线,针对辅线桥的服役周期,建立该区域2013~2113年100年间的温度边界模型,见式(1).

RCP2.6情景:

$$T(t) = 4.44E-07t^3 - 1.39E-04t^2 + 0.02t + 15.53. \quad (1a)$$

RCP85情景:

$$T(t) = 6.51E-07t^3 + 2.40E-05t^2 + 0.03t + 15.54. \quad (1b)$$

式中: $T(t)$ 为年平均温度; t 为时间.

1.2 湿度模型

环境相对湿度对混凝土碳化速率同样有显著影响^[7].相对湿度较高或较低,会使碳化速率变慢,环境相对湿度在50%~70%时,混凝土碳化速率最快.目前,科研人员尚未对气候变化引起的21世纪一百年间环境相对湿度发展趋势达成共识,Vuille等^[8]预测环境相对湿度将会以每10年0%至2.5%的速度上升.而文献^[9]通过分析加拿大历年相对湿度变化发现,1950~2000年全国平均相对湿度下降了6%,由此可见,环境相对湿度在不同区域呈现不同的变化规律.

陈彬彬^[10]通过分析河南省1960~2004年相对湿度的变化特征及蒸发量的变化特征指出:河南全省45年间平均相对湿度呈上升趋势,以0.417%/10a的速率递增,且进入本世纪初后,增

湿趋势明显.从全省分布来看,相对湿度减少的区域主要集中在南部及西北部地区,郑州市位于河南省中部,中部和东部地区增湿显著,相对湿度增加的中心值45年来达到了5%~6%.

基于上述研究,假设郑州市年均相对湿度线性增长,以2013年相对湿度均值为基础,建立该区域2013~2113年相对湿度边界模型如下:

$$RH(t) = 0.0417\%t + 66\%. \quad (2)$$

式中: $RH(t)$ 为年平均相对湿度,%; t 为时间, a.

1.3 CO₂浓度模型

IPCC第五次评估报告给出了4种气候排放情景下21世纪全球CO₂浓度的发展趋势,报告预测全球CO₂浓度将从2000年的725增加到2100年的1838,并极可能会达到1964.图2为基于报告数据模拟的高低两种排放情景下21世纪全球CO₂浓度发展曲线.在最好的低排放情景下,由于能源结构调整,温室气体排放减少,清洁高效资源技术的采用等有利因素下,全球CO₂浓度将在2060年达到峰值后缓慢下降;在高排放情景下,全球CO₂浓度上升趋势明显,到本世纪末的CO₂浓度将是世纪初的2.5倍.

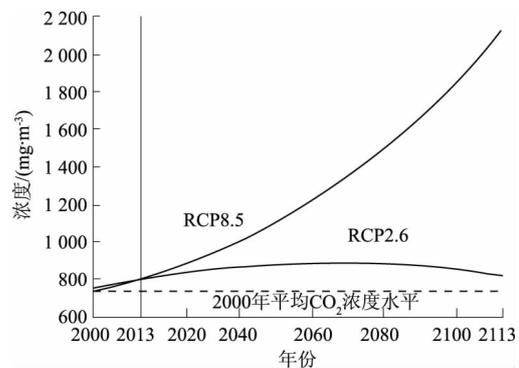


图2 21世纪全球CO₂浓度发展趋势

Fig.2 Global CO₂ concentration trends in the 21 century

此外,环境CO₂浓度受场地及周边环境影响显著,停车场、公路路面等地CO₂浓度一般较高,市区CO₂浓度高于郊区,因此引入修正系数 k_{site} ^[11]来体现其之间的差异:

$$k_{site} = \frac{\text{具体区域CO}_2\text{浓度值}}{\text{同时期全球CO}_2\text{浓度基准值}}. \quad (3)$$

表1为国内外根据城市、郊区和农村地区CO₂浓度记录计算出的三类地区 k_{site} 的统计值.对于城市高速桥梁来说,其主梁桥面因长期受到汽车尾气排放的不利影响,碳化威胁及程度是大于桥墩的,因此结合实际情况,此处主梁 k_{site} 取1.10,桥墩 k_{site} 取1.07.

表1 k_{site} 统计数据^[11]Tab.1 Statistical parameters for k_{site}

地点	样本大小	平均值
全球平均值测点	—	1.00
农村	3	1.05
郊区	5	1.07
城市	8	1.14

基于全球 CO_2 浓度变化值,建立高低两种排放情景下适用于碳化预测模型的 CO_2 浓度边界条件,时间为 2013 ~ 2113 年,见式(4) ~ (5)。

$$C_{\text{CO}_2}(t) = k_{\text{site}} \cdot \varphi_{\text{CO}_2}(t). \quad (4)$$

RCP2.6 情景:

$$\varphi_{\text{CO}_2}(t) = 6.05\text{E-}04t^3 - 0.1t^2 + 4.93t + 803.4. \quad (5a)$$

RCP8.5 情景:

$$\varphi_{\text{CO}_2}(t) = 18.9\text{E-}05t^3 + 0.06t^2 + 5.01t + 802.4. \quad (5b)$$

式中: $C_{\text{CO}_2}(t)$ 为 CO_2 浓度, mg/m^3 ; k_{site} 为修正系数; $\varphi_{\text{CO}_2}(t)$ 为全球平均 CO_2 浓度, mg/m^3 ; t 为时间, a.

2 案例计算

郑少高速南水北调大桥辅线桥位于郑州市航海路连接线与南水北调总干渠相交处,为大跨径预应力混凝土连续-刚构组合桥梁,全长 310.2 m,设计基准期为 100 a,于 2013 年建成通车.辅线桥主梁采用 C55 高性能混凝土,保护层厚度为 30 mm,桥墩采用 C40 混凝土,保护层厚度为 45 mm.

文献[5]提出混凝土保护层厚度、碳化残量和碳化速度表示的混凝土碳化模型如下:

$$\Omega_c = \{c - x_0 - X(t) \geq 0\}. \quad (6)$$

式中: Ω_c 为混凝土碳化寿命预测模型; c 为混凝土保护层厚度, mm; x_0 为碳化残量, mm; $X(t)$ 为混凝土碳化深度, mm.

当碳化残量与碳化深度之和大于混凝土保护层厚度时即认为混凝土已达到碳化寿命.

文献[5]将徐善华模型^[12]和牛荻涛模型^[13]分别用于计算辅线桥主梁和桥墩的碳化残量及碳化深度的均值和方差并代入式(6)的碳化模型.结果表明:辅线桥主梁和桥墩将分别在服役 28 a 及 30 a 后碳化寿命结束,即钢筋开始腐蚀.

在文献[5]的研究计算过程中,碳化模型中的气候参数(温度、湿度、 CO_2 浓度)均取郑州地区的气候平均值.但根据前文所述,气候条件将在未来几十年发生较大幅度的变化,影响混凝土桥梁碳化进程,故笔者采用模拟真实气候条件参数的数值模型计算桥梁碳化寿命将更加符合实际情况,更具有参考价值.

表2、表3为采用本文建立的气候模型替代气候均值计算的辅线桥主梁及桥墩碳化残量和碳化深度值以及文献[12]计算结果数值;表4为辅线桥主梁及桥墩最终碳化寿命.

结果表明:在考虑气候条件随时间变化的前提下,低排放情景下的辅线桥主梁及桥墩将分别在服役 31 a 和 36 a 后碳化寿命结束,钢筋开始腐蚀;而高排放情景下,主梁和桥墩的碳化寿命较之于低排放情景缩短 13%,可见气候变化将给我国中原地区桥梁碳化寿命带来一定程度的影响.

表2 混凝土碳化残量平均值/标准差

Tab.2 Average values and standard deviation of concrete carbonation residual values

服役时间 t/a	文献[12]		RCP2.6 情景		RCP8.5 情景	
	主梁碳化残量	桥墩碳化残量	主梁碳化残量	桥墩碳化残量	主梁碳化残量	桥墩碳化残量
25	22.5/2.0	29.2/3.0	22.5/2.0	29.2/3.0	22.5/2.0	29.2/3.0
30	22.5/2.0	29.2/3.0	22.5/2.0	29.2/3.0	22.5/2.0	29.2/3.0
35	22.5/2.0	29.2/3.0	22.8/2.0	29.6/3.0	22.8/2.0	29.6/3.0
40	22.5/2.0	29.2/3.0	22.8/2.0	29.6/3.0	22.8/2.0	29.6/3.0

表3 混凝土碳化深度平均值/标准差

Tab.3 Average values and standard deviation of concrete carbonation depth values

服役时间 t/a	文献[12]		RCP2.6 情景		RCP8.5 情景	
	主梁碳化深度	桥墩碳化深度	主梁碳化深度	桥墩碳化深度	主梁碳化深度	桥墩碳化深度
25	3.8/2.0	8.7/3.8	3.5/1.9	7.9/3.5	3.8/2.0	8.4/3.7
30	4.2/2.2	9.5/4.1	3.9/2.1	8.6/3.8	4.2/2.3	9.4/4.1
35	4.5/2.4	10.3/4.5	4.2/2.2	9.1/4.0	4.6/2.5	10.3/4.5
40	4.8/2.6	11.0/4.8	4.4/2.3	9.7/4.3	5.1/2.7	11.3/5.0

表4 主梁及桥墩碳化寿命

Tab.4 Carbonation life for beam and pier^a

预测模型	主梁碳化寿命	桥墩碳化寿命
文献[12]	28	30
本文 RCP2.6	31	36
本文 RCP8.5	27	31

此外,RCP8.5情景下计算结果和文献[5]计算结果几乎相同,本文气候模型中RCP8.5情景下的气候参数均是随时间变化的变量,温湿度取值均比文献[5]中的确定参数有所提高,导致两者的最终预测寿命相近的原因在于:文献[5]的碳化模型中CO₂浓度影响系数 k_{CO_2} 取值偏大,统一选取了最不利取值1.4,而在CO₂浓度随时间增长较快的RCP8.5情景下, k_{CO_2} 值在前期仅为1.33左右,后期才达到或者超越1.4,进而导致两种计算结果较为相近;然而对于CO₂浓度增长较缓的RCP2.6情景, k_{CO_2} 值在整个计算过程中均未超过1.3,致使最终碳化寿命比文献[8]的计算结果延缓了数年,从而进一步体现出本气候模型对不同气候发展情况的精确响应。

因此,在全球气候变化的大背景下,综合评估气候变化条件下的桥梁碳化寿命更为合理,文献[5]中的计算结果虽与气候政策中最不利RCP8.5情景计算结果相近,但用于评价环保型气候发展模式下的混凝土碳化寿命则过于保守。

3 结论

(1) 在气候变化大背景下,结合最新气候预测报告以及郑州市实际气候条件,建立了该市考虑未来气候发展的混凝土碳化边界模型。该气候模型具有普适性,可以依据不同区域的实际气候条件建立不同区域气候边界模型,为研究该区域混凝土碳化进程提供边界条件。

(2) 以实际工程郑少高速南水北调大桥辅线桥为依托,应用笔者提出的考虑气候变化的气候边界模型计算其主梁及桥墩的碳化寿命,并与气候参数恒定条件下的计算结果进行对比,结果表明:气候变化将较大程度影响以辅线桥为代表的我国中原地区混凝土桥梁碳化进程,在不同的气候发展模型下,桥梁碳化寿命将有明显区别,因此为准确评估不同气候政策下混凝土桥梁碳化寿命,建议应用笔者提出的基于气候变化综合碳化边界模型。

参考文献:

- [1] TALUKADR S, BANTHIA N, GRACE J R. Carbonation in concrete infrastructure in the context of global climate change-part 1: Experimental results and model development [J]. *Cement & concrete composites*, 2012(34): 924-930.
- [2] YOON I S, COPUROGLU O, PARK K B. Effect of global climate change on carbonation progress of concrete [J]. *Atmos environ*, 2007,41(34): 7274-7285.
- [3] TALUKADR S, BANTHIA N, GRACE J R, et al. Carbonation in concrete infrastructure in the context of global climate change-part 2: Canadian urban simulations [J]. *Cement & concrete composites*, 2012(34): 931-935.
- [4] HASSAN J E, BRESSOLETTE P, CHATEAUNEUF, et al. Reliability-based assessment of the effect of climatic conditions on the corrosion of RC structures subject to chloride ingress [J]. *Engineering structure*, 2010,32(90): 3279-3287.
- [5] 江莹莹. 预应力混凝土桥梁剩余使用寿命预测[D]. 郑州: 郑州大学土木工程学院, 2014.
- [6] IPCC. Working group I contribution to the IPCC fifth assessment report, climate change 2013: The physical science basis: summary for policymakers [R/OL]. [2013-10-28]. http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5SPM_Approved27Sep2013.pdf.
- [7] 闫宏生. 混凝土碳化因素敏感性研究 [J]. *工业建筑*, 2014,44(1): 94-97.
- [8] VUILLE M, BRADLEY R S, WERNER M, et al. 20th century climate change in the tropical Andes: observations and model results [J]. *Climate change*, 2003,59(1/2): 75-99.
- [9] WIJINGAARDEN W A, VINCENT L A. Examination of discontinuities in hourly surface relative humidity in Canada during 1953-2003 [J]. *Geophys Res*, 2005, 110: D22102.
- [10] 陈彬彬. 河南省气候变化及其与木本植物物候变化相互关系研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 2007.
- [11] 彭里政俐, MARK G S. 气候变化对中国钢筋混凝土基础设施碳化腐蚀及破坏风险的影响 [J]. *土木工程学报*, 2014,47(10): 61-69.
- [12] 徐善华. 混凝土结构退化模型与耐久性评估 [D]. 西安: 西安建筑科技大学土木工程学院, 2003.
- [13] 牛荻涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.

(下转第82页)

文章编号: 1671-6833(2016)06-0072-05

基于稀疏超完备的异常行为检测算法

逯鹏, 张利亚, 黄石磊, 李奇航, 张微

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 视频异常行为检测的核心问题是如何从海量数据中理解行为. 提出一种新的基于视觉稀疏超完备表示机制的特定场景中视频异常行为检测算法, 针对视频中感兴趣的点提取局部有效信息, 提高数据处理效率. 首先, 提取训练样本的时空兴趣点, 计算局部时空特征; 其次, 将该特征输入稀疏超完备模型, 训练得到一组稀疏基; 然后, 利用上述基对待测视频进行重构, 通过局部时空特征重构的差异实现异常行为检测; 最后, 提出对不同视频的稀疏基更新算法. 标准数据库的实验表明, 该算法能够有效解决异常行为检测问题, 检测准确率高, 错误警报率低.

关键词: 异常行为检测; 稀疏超完备; 时空兴趣点

中图分类号: TP2 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.03.031

0 引言

视频中异常行为检测是目前计算机视觉的研究热点. 常用的方法是模型学习, 根据学习形成的数学统计模型或已知的先验模型, 找到视频行为的最佳匹配模型^[1]. 例如, 隐马尔可夫模型(HMMs)、动态贝叶斯网络(DBNs)、条件随机场模型(CRF)等经典模型, 以及一些在经典模型基础上进行改进的方法, 如STR匹配方法^[2]、主题隐马尔可夫模型方法^[3]和融合声音与视频信息的隐随机场模型^[4]等.

然而, 提取高度详细特征信息则会导致计算复杂度呈指数增长^[5]. 因此, 如何在保证提取足够的有效特征信息的基础上减少计算量是视频异常行为检测要解决的关键问题. 事实上, 根据检测任务仅提取少量关键特征^[6], 能有效提高算法的效率. 而人类视觉系统的稀疏响应能够从包含大量冗余的场景中快速提取有效信息, 解决了高维、海量数据的实时处理问题, 这为目标检测、异常行为检测等问题提供了减少数据存储量和计算量的新思路^[7]. 文献[8]利用该思路建立了基于稀疏超完备表示的目标检测算法, 实现了非结构化二维图像场景中的目标检测. 在此基础上, 解决运动目标的异常行为检测问题则需要增加时间维度.

基于该思路, 针对特定场景的视频异常行为检测任务, 笔者以包含视频高层语义的时空兴趣点作为切入点, 提取视频的局部特征信息, 建立稀疏超完备计算模型, 设计感受野学习和异常行为检测等关键算法, 通过多类型视频异常行为检测, 验证模型和算法的有效性.

1 时空兴趣点的提取与描述

如何表示视频序列及行为并建立可计算数学模型, 是异常行为检测要解决的首要问题. 目标跟踪和模型匹配是行为表示的常用方法, 但都需要提取高度详细的轮廓信息^[9], 这很难直接通过包含噪声信号的真实视频实现. 时空兴趣点(spatial temporal interesting point, STIP)只提取视频的局部特征而不是全局特征作为数据处理基础, 能有效解决该问题.

时空兴趣点即视觉关注的焦点, 针对视频三维场景特点, Laptev^[10]将二维图像中的Harris角点检测算子扩展到三维空间, 提出了时空兴趣点的概念, 不仅包含人体动作姿态的空间信息, 还包含运动的动态时间信息, 开始了时空局部特征点在视频领域的研究. 图1为针对皇家理工学院行为数据库^[11](KTH数据库)视频段的时空兴趣点提取结果. 可以发现, 打拳动作的STIP集中在手

收稿日期: 2015-10-28; 修订日期: 2016-01-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60841004, 60971110, 61172152); 河南省青年骨干教师资助计划(2012GGJS-005)

作者简介: 逯鹏(1974—), 男, 河南滑县人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事复杂视觉图像信息处理、脑机接口、复杂网络等研究, E-mail: lupeng@zzu.edu.cn.

臂上,而跑步动作的 STIP 则集中在腿、胳膊和头部这些运动的部位。

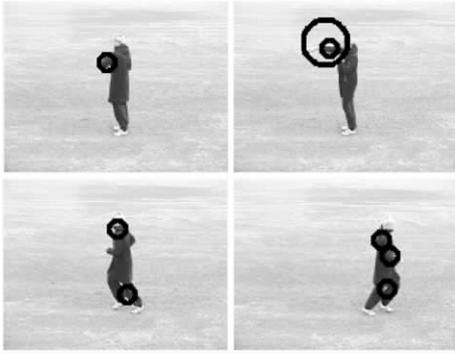


图1 时空特征点的提取结果

Fig.1 Results of extracting STIP

获得 STIP 后,结合周围时空信息构建 STIP 描述符,完成异常行为语义描述,形成特定行为特征.为同时表示行为的静态和动态特征,采用梯度信息(HOG)和光流信息(HOF)的组合特征作为描述符。

将 HOG/HOF 描述符推广到三维视频的动作识别中,具体方法如下:采用多尺度时空滑动窗,如图2,在每个 STIP 周围取一定大小的时空块,所取时空块为 $\Delta_x(\tau) = 8\tau, \Delta_x(\delta) = \Delta_y(\delta) = 18\delta$,空间维度 $\delta = 1$,时间维度 $\tau = 2.5$.再将每个时空块划分为 $n_x \times n_y \times n_z$ 的网格,网格是更小的胞体积.对于每个胞体积,计算4维 HOG 和5维 HOF.每个时空块中,胞体积个数是18 ($3 \times 3 \text{ pixels} \times 2 \text{ frames}$),那么其 HOG 特征为72维,而 HOF 特征为90维,HOG/HOF 特征共162维。

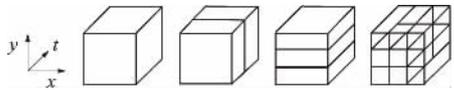


图2 时空滑动窗

Fig.2 Spatial temporal slipping window

据此,视频序列就可以用 HOG/HOF 特征表示为用 $\mathbf{X} = \{\mathbf{X}_1, \dots, \mathbf{X}_n\}$, n 为检测出的 STIP 个数;而 $\mathbf{X}_i = \{\mathbf{X}_i^1, \dots, \mathbf{X}_i^{n_i}\}$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 表示单个事件, $n_i = 18$ 为时空滑动窗内胞体积个数。

2 基于稀疏超完备的异常行为检测

特定场景下正常行为与异常行为的 HOG/HOF 特征存在差异,通过对特征数据的处理可以检测出视频中的异常行为.据此,视频异常行为检测可转化为超完备稀疏编码的问题。

视频异常行为检测整体基本思想是:首先,定

义特定环境下何种行为为正常行为(如机场的进口处定义行人进入为正常行为,行人出去则为异常行为),提取出无异常行为的视频序列 STIP,在每个 STIP 周围计算其特征描述符 \mathbf{X}_i ;其次,将 \mathbf{X}_i 输入稀疏超完备模型进行训练,生成包含预定义的正常行为的稀疏基 \mathbf{W} , \mathbf{W} 的列向量是用来重构信号的特征基;然后,提取待测视频的 STIP 和 HOG/HOF 局部特征 \mathbf{X}' ,计算 \mathbf{X}' 关于 \mathbf{W} 最优表示的重构误差,通过重构误差判断视频中的异常行为.需要指出的是,稀疏编码模型常见的输入是一个向量,而此处输入却是一个事件,包含时间和空间局部信息,是一簇向量。

2.1 稀疏超完备计算模型

视觉稀疏表示的图像可以逼近分解为:基函数集合分解系数的线性组合。

$$\mathbf{I} = \sum_{i=1}^m \mathbf{A}_i s_i + \mathbf{N}. \quad (1)$$

式中: \mathbf{I} 代表图像; \mathbf{A}_i 是视皮层 V1 区感受野特征基向量,为 n 维列向量; m 是基向量的个数; s_i 表示神经元对不同基图像的响应系数,对应主视皮层 V1 区简单细胞神经元的活动状态; \mathbf{N} 是高斯噪声; \mathbf{A}_i 与 s_i 均未知。

在视觉超完备机制下特征矩阵维数应大于图像数据的维数,即 $m > n$,此时 $\mathbf{A}_{m \times n}$ 为超完备集不可逆,使 \mathbf{I} 的稀疏分解是需要组合搜索的 NP-Hard 问题.为得到合理解,采用在能量模型基础上,最大化稀疏性来最优估计基函数 \mathbf{W} .用非归一化对数似然函数来定义该能量模型:

$$\log L(\mathbf{x}; \mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_n) = -\log Z(\mathbf{W}) + \sum_{i=1}^n G_i(\mathbf{w}_i^T \mathbf{x}). \quad (2)$$

式中: \mathbf{x} 是单个样本数据; $\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_n]$,

$Z(\mathbf{W}) = \int \prod_{i=1}^n \exp(G_i(\mathbf{w}_i^T \mathbf{x})) d\mathbf{x}$ 是 \mathbf{w}_i 的归一化常数; $G_i(u) = -\alpha_i \log \cosh(u)$ 为 s_i 的对数概率密度,是 s_i 的稀疏性测度之和; \mathbf{w}_i 为待估计参数; α_i 也为未知数,随着 \mathbf{w}_i 同时进行估计。

对于 T 个样本数据 $\mathbf{x}_i (i = 1, 2, \dots, T)$,则样本概率密度函数的对数似然函数:

$$\log L(\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_n; \mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_T) = T \log |\det(\mathbf{W})| + \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^T G_i(\mathbf{w}_i^T \mathbf{x}_t). \quad (3)$$

采用得分匹配直接估计 \mathbf{w}_k ,感受野 $\mathbf{w}_k = (w_{k1}, \dots, w_{kn})$ 约束为单位化形式.为简化 $Z(\mathbf{W})$ 的计算,取数据向量的对数密度函数 $\log p(\mathbf{x})$,由此定义得分函数为:

$$\psi(\mathbf{x}; \mathbf{W}, \alpha_1, \dots, \alpha_m) = \nabla_x \log p(\mathbf{x}; \mathbf{W}, \alpha_1, \dots, \alpha_m) = \sum_{k=1}^m \alpha_k \mathbf{w}_k g(\mathbf{w}_k^T \mathbf{x}). \quad (4)$$

g 是 G 的一阶导数, $g = G'$. 将数据得分函数和模型得分函数的平方距离作为目标函数:

$$J = \sum_{k=1}^m \alpha_k \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T g(\mathbf{w}_k^T \mathbf{x}(t)) + \frac{1}{2} \sum_{j,k=1}^m \alpha_j \alpha_k \mathbf{w}_j^T \mathbf{w}_k \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T g(\mathbf{w}_k^T \mathbf{x}(t)) g(\mathbf{w}_j^T \mathbf{x}(t)). \quad (5)$$

通过最小化 $J(\mathbf{w})$, 求得最优参数 \mathbf{w} 估计值:

$\hat{\mathbf{w}} = \arg \min_{\mathbf{w}} J(\mathbf{w})$. 采用梯度下降学习算法极小化该目标函数, 就可以得到参数 \mathbf{w} 的一致性估计. 最速下降准则为:

$$\mathbf{w}(t) = \mathbf{w}(t-1) - \eta(t) \frac{\partial J(\mathbf{w})}{\partial \mathbf{w}} \Big|_{\mathbf{w}=\mathbf{w}(t-1)}. \quad (6)$$

式中: 学习速率 $\eta(t)$ 是负梯度方向步长, 由此得到感受野的超完备集表示. 正常行为的稀疏基 \mathbf{W} 是根据公式(5)最优化目标函数 $J(\mathbf{w})$ 的结果. 对于超完备稀疏编码模型 $\mathbf{S} = \mathbf{W}\mathbf{X}$, \mathbf{W} 学习算法如下所示.

输入: 样本视频特征数据集 \mathbf{X} ;

输出: 稀疏基 \mathbf{W} .

具体步骤:

(1) 去除 \mathbf{x}_i 的局部均值;

(2) 用 PCA 对 \mathbf{X} 白化、降维, 并投影到白化空间 $\mathbf{Z} = \mathbf{V}\mathbf{X}$;

(3) 初始化 \mathbf{W}_s 为单位阵; 开始迭代过程;

(4) 计算 $\mathbf{Y} = \mathbf{W}_s \times \mathbf{Z}$;

(5) 计算初始点梯度 $J(\mathbf{w}(0))$, 沿负梯度方向移动, 对 $t = 1, 2, \dots$, 按公式(6)最小化 \mathbf{W} , 并归一化为单位向量; 更新参数 α ;

(6) 如果 $\text{norm}(\Delta \mathbf{W}) < \varepsilon$ 则停止迭代; 否则, 返回步骤 4;

(7) 停止学习, 将 \mathbf{W}_s 反投影到原视频空间得 $\mathbf{W} = \mathbf{W}_s \mathbf{V}$;

(8) 算法结束.

2.2 异常行为检测算法

对于待测事件 \mathbf{X}' , 最小化目标函数 $J(\mathbf{w})$, 定义最优化结果 $J(\mathbf{X}', \mathbf{w})$ 为重构误差. 正常行为的特征能够通过 \mathbf{W} 进行表达, 重构误差比较小. 包含异常行为的视频特征通过 \mathbf{W} 进行表达的重构误差相对较大, 故可以通过重构误差判断视频中的异常行为. 如果重构误差大于阈值, 如式(7)所示, 则判断为异常行为; 否则为正常行为.

$$J(\mathbf{X}', \mathbf{w}, \alpha) > \xi. \quad (7)$$

阈值 ξ 的大小可根据检测异常行为的灵敏度需要设定. 正常行为视频通过稀疏基表达时也会产生较小的重构误差, 阈值 ξ 的设定越接近正常行为的重构误差, 检测的灵敏度越高; 阈值越偏离正常行为的重构误差, 检测的灵敏度越低. 算法流程如图 3 所示.

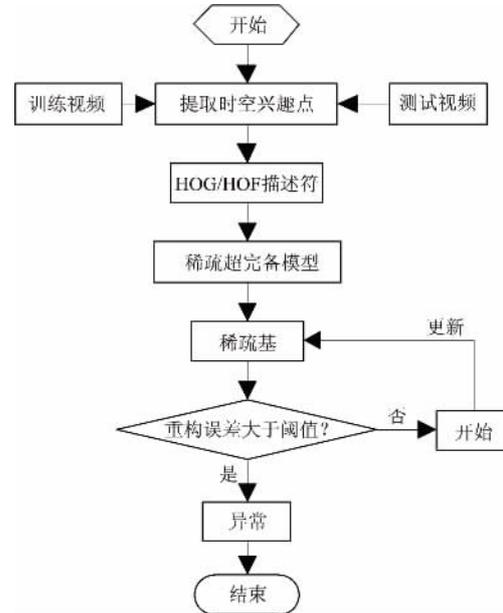


图 3 整体算法流程图

Fig. 3 The whole algorithm flow chart

2.3 稀疏基更新算法

由于视频环境因素的动态性, 最初训练获得的稀疏基, 在后续视频异常行为检测中就可能不是最优基. 因此, 采用稀疏基更新算法, 将已判断为正常的行为加入新的稀疏基. 对于已检测的视频中 τ 个时空块, 为节省数据的内存空间及优化计算速度, 稀疏基更新算法采用随机梯度下降法, 新稀疏基 \mathbf{W}_τ 由 $\mathbf{W}_{\tau-1}$ 和 \mathbf{X}_τ 计算得出, 如式(8):

$$\mathbf{W}_\tau = \prod_C [\mathbf{W}_{\tau-1} - \frac{\eta}{t} \nabla_D l(\mathbf{X}_\tau, \mathbf{W}_{\tau-1})]. \quad (8)$$

式中: $l(\mathbf{X}_\tau, \mathbf{W}_{\tau-1}) = \frac{1}{2} \sum_{j=1, \dots, n_\tau} \|\mathbf{X}_\tau^j - \mathbf{W}_{\tau-1} \alpha_\tau^j\|_2^2$;

η 为学习率; \prod_C 为 C 正交影.

3 实验结果及分析

目前对异常行为的检测, 多数定位于简单的肢体运动. 而在实际应用中通常需要结合特定场景判断行为异常. 为此本文结合一定场景设计实验. 表 1 为重构误差值和异常行为检测结果.

实验视频数据取自 P. M. Jodoin 和 Adam 数据库, 分别对 Canoe、Subway Exit 和 Subway Entrance 三段视频做出异常检测. 源代码开发工具

为 MatlabR2010b 和 STIP1.1. Matlab 工具用于形成稀疏基和计算重构误差, STIP1.1 用于提取时空兴趣点, 并用高维特征表示.

表 1 重构误差值和异常行为检测结果
Tab.1 Reconstruction error and the result of abnormal behavior detection

训练视频段	待测视频段	重构误差	异常行为检测结果
Canoe 无船只经过	无船只	0.53	正常
	有船只	1.62	异常
Subway Entrance	行人进去	3.25	正常
	行人出去	5.51	异常
subway exit	行人出去	3.38	正常
	行人进去	5.32	异常

取 Adam 两段视频(地铁进口, 96 min; 地铁出口, 43 min) 的前 10 min 进行异常行为检测, 本文算法与文献 [12] 及 [7] 检测结果如表 2 所示.

可以看出, 本文算法不但异常行为发现率高, 而且产生错误警报率低.

表 2 地铁进口与出口处视频异常行为分析结果
Tab.2 The result of video abnormal behavior detection on subway exit and Subway entrance

算法	地铁进口		地铁出口	
	出站人数	错误警报	进站人数	错误警报
真实视频	21	—	9	—
文献 [12]	17	4	9	2
文献 [7]	21	4	9	0
本文算法	21	1	9	0

图 4 ~ 图 6 为异常行为检测结果. 图 4 中, 水面上无船只经过为正常情况, 当出现行驶船只检测出异常. 图 5 和图 6 分别为地铁进口和出口视频异常行为检测结果. 图中进口处, 出现行人出站时检测出异常; 而出口处则相反.



图 4 水面船只运动视频异常行为检测

Fig.4 The video abnormal behavior detection of moving boat on water



图 5 地铁进口视频异常行为检测

Fig.5 The video abnormal behavior detection of subway entrance



图 6 地铁出口视频异常行为检测

Fig.6 The video abnormal behavior detection of subway exit

4 结论

基于视觉稀疏超完备计算理论, 提出一种新的异常行为检测算法. 由实验结果可知, 通过时空兴趣点、梯度和光流局部信息特征细致描述物体

的运动属性, 进而利用稀疏超完备方法, 能够准确的检测出视频中的异常行为. 验证了该算法适用于特定场景的异常行为检测, 表明算法的可行性和有效性. 群体异常行为检测也是计算机视觉领域的重要前沿课题^[13], 后续工作是研究这种方法

对于群体异常行为检测的效果和方式.

参考文献:

- [1] POPOOLA O P, WANG K J. Video-based abnormal human behavior recognition—a review [J]. *IEEE Trans Syst Man Cybern*, 2012, 42(6): 865–878.
- [2] RYOO M S, AGGARWAL J K. Spatio-temporal relationship match: Video structure comparison for recognition of complex human activities [C]//*IEEE International Conference on Computer Vision*. New York, USA: IEEE Press, 2009: 1593–1600.
- [3] 朱旭东, 刘志镜. 基于主题隐马尔科夫模型的人体异常行为识别[J]. *计算机科学*, 2012, 39(3): 251–255.
- [4] LIN J, SUN Y, WANG W Q. Violence detection in movies with auditory and visual cues [C]//*Computational Intelligence and Security*. Los Alamites, USA: IEEE Press, 2010, 561–565.
- [5] UMAKANTHAN S, DENMAN S, FOOKES C, et al. Semi-binary based video features for activity representation [C]//*IEEE International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications*. New York, USA: IEEE Press, 2013: 1–7.
- [6] ZHAO B, LI F F, XING E P. Online detection of unusual events in videos via dynamic sparse coding [C]//*IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2011: 3313–3320.
- [7] CONG Y, YUAN J S, LIU J. Sparse reconstruction cost for abnormal event detection [C]//*IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. New York, USA: IEEE Press, 2011: 3449–3456.
- [8] 逯鹏, 张姗姗, 刘驰, 等. 基于稀疏超完备表示的目标检测算法[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(6): 1273–1278.
- [9] BREGONZIO M, XIANG T, GONG S G. Fusing appearance and distribution information of interest points for action recognition [J]. *Pattern Recognition*. 2011, 45(3): 1220–1234.
- [10] LAPTEV I, LINDEBERG T. Space-time interest points [C]//*In Proceedings of the International Conference on Computer Vision*. Los Alamites, USA: IEEE Press, 2003: 432–439.
- [11] SCHULDT C, LAPTEV I, CAPUTO B. Recognizing human actions: a local SVM approach [C]. *ICPR*, Los Alamites, USA: IEEE Press, 2004: 32–36.
- [12] ADAM A, RIVLIN E, SHIMSHONI I, et al. Robust real-time unusual event detection using multiple fixed-location monitors [J]. *IEEE Trans on Pattern Anal Mach Intell*, 2008, 30(3): 555–560.
- [13] 逯鹏, 梁玉, 陈树伟. 基于角点动能的视频群体异常行为检测[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2015, 36(3): 20–24.

Abnormal Behavior Detection Algorithm Based on Sparse Overcomplete Representation

LU Peng, ZHANG Liya, HUANG Shilei, LI Qihang, ZHANG Wei

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

Abstract: The focus question of video abnormal behavior detection was how to illustrate the behavior correctly through analysis of huge amounts of data. A new algorithm was proposed based on visual sparse overcomplete representation mechanism to extract local effective information about the interest points in the video of specific scenario, which could improve the efficiency of data processing. Firstly, the algorithm extracted the local spatial temporal interesting points (STIP) in training samples. At the same time it calculated the local spatial temporal characteristics. Then it put the characteristics into sparse overcomplete representation model to get a set of sparse matrix after training. Finally, it reconstructed the query video using the aforementioned matrix to detect abnormal behavior through the reconstruction error of local spatial temporal characteristics. In addition, the updated algorithm of sparse matrix function for different videos was proposed. Experiment results on standard database showed that our algorithm could detect abnormal behavior effectively and with higher accuracy and lower false alarm.

Key words: abnormal behavior detection; sparse overcomplete representation; spatial temporal interesting points

文章编号: 1671-6833(2016)06-0077-06

基于物体表面正射投影的悬崖点云植被过滤方法

李彩林, 陈文贺, 王江妹, 田鹏艳, 姚吉利

(山东理工大学 建筑工程学院, 山东 淄博 255049)

摘要: 悬崖陡坡是地形图重要的地貌要素, 该要素在生态环境工程建设和地质灾害的防治等方面具有非常重要的作用, 而悬崖植被的遮挡不利于悬崖观测和数据处理. 提出一种悬崖植被过滤方法, 该方法主要基于物体表面正射投影原理, 首先将原始采集的悬崖三维点云转换到以悬崖表面为 xy 平面、垂直于悬崖面的方向作为 z 轴的空间直角坐标系中; 然后在 xy 平面上划分格网, 分格网拟合曲面建立局部数字地面模型(DTM), 通过设置合理的距离阈值剔除植被点; 最后将过滤保留下来的悬崖岩石点经过投影反变换, 映射到原始空间坐标系中. 对实际悬崖点云数据进行实验分析, 结果表明, 基于物体表面正射投影的悬崖点云植被过滤方法是可行的、有效的.

关键词: 三维激光扫描; 悬崖点云; 植被过滤; 物体表面正射投影; DTM

中图分类号: P237 **文献标志码:** A doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.06.005

0 引言

地形三维激光扫描仪具有获取数据速度快、精度高、无需接触即可获取大面积密集点云数据的一系列优点, 广泛应用于工业设备形变测量、山体滑坡、实体变形监测等方面, 其中悬崖、滑坡体的形变监测是其中相对活跃的一个研究领域^[1-4]. 针对悬崖、滑坡体形变监测, 目前常用的手段是利用三维激光扫描仪获取悬崖、滑坡体表面三维点云数据. 在获取地势陡峭、表面复杂、植被覆盖广的滑坡体表面数据时, 会出现非地形点比重大、点云密度分布极不均匀的情况^[5], 这种情况加大了点云数据处理的工作量, 同时增加了工作难度. 过滤即保留地面点, 去除非地面点. 通过点云过滤, 得到相应的数字产品. 目前在点云滤波方面已经有了大量的研究, 也取得不少滤波方面的研究成果. 李等^[5]研究了基于密集点云的双重滤波方法, 主要运用到了局部区域增长法; Liu等^[6]对居民区的 Lidar 点云数据进行树冠过滤提取, 经过区域增长算法和多次反射方法取得较理想的效果; Sui等^[7]提出基于改进的数学形态学

的 LiDAR 点云数据滤波算法; 文献 [8] 提出一种网格分块与移动最小二乘法的植被分类算法; Brodu等^[9-10]提出利用不同尺度下点云的维度信息进行分类的算法; 文献 [11] 提出一种点云数据全自动滤波算法; Kobler等^[12]提出一种迭代过滤的算法. 以上算法多适用于机载雷达数据, 同时过滤选择的基准面是地面, 所以以高程突变信息进行植被、建筑物滤波, 而悬崖的坡面很陡, 植被沿坡面生长, 且与岩体裂隙交错, 植被激光点云数据沿高程不具有突变信息, 因此, 对地面激光扫描仪获得的悬崖点云数据过滤并不适用. 针对悬崖植被点云过滤存在的问题, 笔者在已有研究基础上, 提出了一种基于物体表面正射投影的悬崖点云植被过滤方法(Orthographic Projection based on Object Surface, 简称 OPOS), OPOS 的基本技术思想是将悬崖点投影到以悬崖表面作为投影面、悬崖表面法向作为 z 轴的三维空间直角坐标系中, 然后在 xy 平面上分块进行曲面拟合建立局部 DTM 模型, 采用距离阈值法进行悬崖上植被及附属物体的过滤, 最后将悬崖岩石点经过投影反变换, 映射到原空间坐标系. 通过实验, 并结合具体工程实

收稿日期: 2016-07-20; 修订日期: 2016-09-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41601496); 山东省高等学校科技计划项目(J15LN32); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2014DL001); 四川省地理国情监测工程技术研究中心资助项目(GC201512); 山东理工大学青年教师发展支持计划项目(4072-114016)

作者简介: 李彩林(1985—), 男, 安徽安庆人, 山东理工大学讲师, 博士, 主要研究方向为数字摄影测量与计算机视觉、数字图像处理, E-mail: licailin@whu.edu.cn.

例,表明 OPOS 方法是有效的、可行的.

1 基于物体表面正射投影原理

激光点云中每个数据点都具有空间三维坐标 (x, y, z) , 点云数据处理的实质就是依据数据点间的空间几何关系, 在相应规则下实现空间变换与判断. 对于较大区域悬崖点云数据, 空间三维坐标可能会包含非常多的数据点, 既影响数据处理效率, 也会使数据处理结果的可靠性得不到保障, 为计算方便, 有必要将陡峭地形转化为缓和地形. 因此, 本文提出一种物体表面正射投影变换的方法.

基于物体表面正射投影原理是在原始点云数据中取悬崖上距离相隔较大的三个点建立三维空间直角坐标系, 并依据六参数数学模型和罗德里格矩阵求出正射投影变换参数, 悬崖上两个空间点的坐标转换的关系系数, 并由此进行坐标转换, 完成悬崖点云数据的正射投影.

1.1 用空间三点建立平面直角坐标系

A, B, C 为悬崖原始数据上所取的三点, 如图 1 所示, 并按逆时针编号, 其坐标系经常是国家测量坐标系, A, B, C 投影后对应点为 a, b, c . 投影后的三维坐标系选择是 a 为原点, a 到 b 的方向为 x 轴方向, 建立右手三维空间直角坐标系 $o-xyz$ (物体表面正射坐标), 如图 2 所示. 此时, 3 个点的 z 坐标全为 0, 其坐标表达为: $a(0, 0, 0), b(S_1, 0, 0), c(S_3 \cos \theta, S_3 \sin \theta, 0)$. 式中的 $S_i (i=1, 2, 3)$ 是由空间坐标计算的空间距离, θ 为 Δabc 的顶角. 物体表面正射投影关系就是两个三维坐标系之间的关系, 也就是根据三个公共点, 求解 6 个三维坐标转换参数.

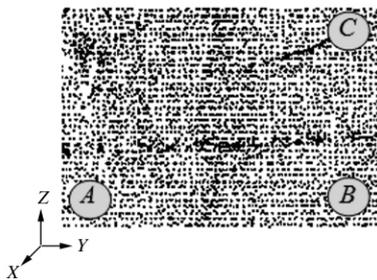


图 1 原始点云数据取点样图

Fig. 1 Selected point from the original point cloud data

1.2 物体表面正射投影关系的确定

根据参考文献 [13-14], 物体表面正射投影关系为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + \mathbf{R} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}. \quad (1)$$

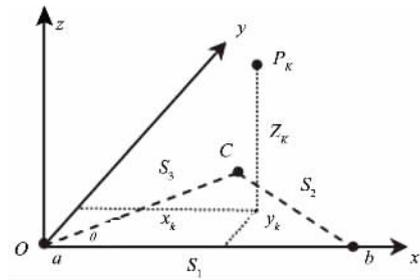


图 2 空间三点建立直角坐标系

Fig. 2 A rectangular coordinate system is established by three points in space

式中: $\mathbf{R} = (\mathbf{I} + \mathbf{S})(\mathbf{I} - \mathbf{S})^{-1}$; \mathbf{S} 为反对称矩阵; \mathbf{I} 为 3 阶单位矩阵. \mathbf{S} 的表达形式为

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & -c & -b \\ c & 0 & -a \\ b & a & 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

式(1)中, $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 为平移参数; \mathbf{R} 为旋转矩阵, 由三个旋转角的函数构成, 也可由反对称矩阵 \mathbf{S} 的三个元素 a, b, c 构成, 根据文献 [14], 其计算公式为

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta_H} \begin{bmatrix} -u_2 u_3 & -u_3 v_2 & -u_2 w_2 \\ u_2 v_3 & v_2 v_3 & v_2 w_3 \\ -u_3 w_2 & -v_2 w_2 & -w_2 w_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{21} - x_{21} \\ Y_{21} - y_{21} \\ Z_{31} - z_{31} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

式中,

$$\begin{aligned} u_2 &= X_B - X_A + S_1, \\ v_2 &= Y_B - Y_A, \quad w_2 = Z_B - Z_A, \\ u_3 &= Z_C - Z_A + S_3 \cos \theta, \\ v_3 &= Y_C - Y_A + S_3 \sin \theta, \\ \Delta_H &= u_3 v_2 w_2 - u_2 v_3 w_2, \quad w_3 = 0. \end{aligned}$$

将前面计算得到的 a, b, c 的值, 带入相应的公式解算出旋转矩阵 \mathbf{R} . 所以, 平移参数 $[\Delta X \quad \Delta Y \quad \Delta Z]^T$ 的值为

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} - \mathbf{R} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}. \quad (4)$$

在这里, $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 和 a, b, c 称为物体表面正射投影参数, 简称投影参数.

1.3 物体表面正射投影反变换

由投影坐标系的坐标计算测量坐标系的坐标的过程称为物体表面正射投影反变换, 公式(4)反变换为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{R}^T \begin{bmatrix} x - \Delta X \\ y - \Delta Y \\ z - \Delta Z \end{bmatrix}. \quad (5)$$

2 植被过滤

点云过滤的目的,就是获取悬崖岩石表面点,并过滤掉植被等非悬崖岩石表面点.由于区域比较大,为了实现点对云数据的快速处理,有必要进行分块处理并建立对应的索引,同时为进一步精确处理,对每一分块区域进一步细分.因为悬崖表面在局部细节上表现为空间二次曲面的特性,由局部地形点拟合的曲面能较好地反映出该区域的地形特征,则选取每个细分区域的地形最低点拟合局部曲面建立DTM,进而通过计算每个悬崖点云数据点到建立的DTM曲面的距离,通过经验阈值,过滤植被点云.

(1) 在物体表面正射投影坐标系内,将平面分成2.5米方格,采用二十五叉树的方法对各方格建立相应的索引,如图3所示.

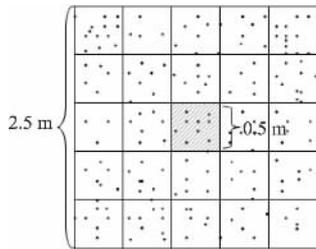


图3 空间索引原理图

Fig. 3 Spatial index principle diagram

(2) 对每一方格,进行0.5米分区处理,在每一个分区中选取小区的最低点,每一个分块由25个最低点拟合曲面,建立一个DTM模型.

(3) 对所有的方格建立DTM模型,形成分块的DTM数据.

(4) 求取每个网格内悬崖点云数据点到建立的DTM曲面的距离,根据经验阈值(植被点云的过滤效果与所选距离阈值密切相关,当选取过大时,会导致部分植被点云未被过滤干净;当选取过小时,会导致少量地面点云被误过滤掉.本文在确定距离阈值时,结合当前悬崖点云数据的点位精度和曲面拟合精度,通过多组实验验证,距离阈值一般采用3倍点位精度,可以得到比较好的过滤效果),将允许范围内的点云数据保留,删除允许范围外的点云数据.

通过上述步骤即可以获取悬崖表面的岩石点云数据.

3 实验及分析

3.1 数据来源

为了验证本文方法的可行性,在IDL环境下

实现了该算法.本实验所用数据来自泸溪县城东南沅江江岸的悬崖石刻工程,测绘悬崖立面图的目的是进行石刻工程论证、设计、调查悬崖岩石产状,以开发本地区的旅游资源,崖壁南北距离约1.5公里,如图4.在自主开发的软件EEXLT环境中进行点云数据预处理,主要包括离群点去除、点云去噪、数据精简,相关预处理方法也比较常规,离群点去除是通过计算每个点到其k近邻点的平均距离,然后根据平均距离值大小判断离群点;点云去噪是运用基于曲率特征的方法去除噪声点;数据精简的方法则运用了基于法向矢量距离累加的方法.预处理后,将悬崖点云数据分成十二块区域分别使用正射投影法进行植被过滤,取得较好效果.



图4 悬崖展示图

Fig. 4 Cliff display chart

3.2 植被过滤

本次实验中使用正射投影坐标转换的原理将原始点云数据(见图5(a))坐标转换成正射投影面坐标系中的坐标^[13-14],如图5(b).为区分哪些是悬崖表面岩石点,哪些是非岩石点,实验时使用自主开发的EEXLT软件中专门浏览地形的圆柱浏览器CYLVIEWER,将悬崖上植被和探照灯等地物信息暴露,如图5(c),红色为悬崖表面岩石点云数据,蓝色为悬崖表面上非岩石点云数据.

再对正射投影后的点云数据进行金字塔分区坐标排序,金字塔坐标分区即对点云数据以不同的边长分区,可进行多重滤波提升植被过滤效果.建立平面分辨率为2.5m、0.5m、0.1m的金字塔索引数据库,选取每分区内的最低点建立DTM,过滤掉悬崖上的植被等非岩石点,见图6(a).将处理后的点云数据进行正射投影的坐标反变换,获取悬崖表面岩石点云数据,见图6(b).

3.3 EEXLT与LasaStudio软件的处理效果比较

比较中使用同一点云数据,见图5(a).打开LasaStudio.exe,新建工程,填写工程属性,导入航空点云数据,选择控高度制网格大小1m,迭代次数2次,阈值18%,将悬崖原始点云数据直接进行过滤,结果见图7.图8为导入经正射投影变换后的点云数据效果图.经过自主开发的EEXLT软件处理的点云数据图如图6(b)所示.

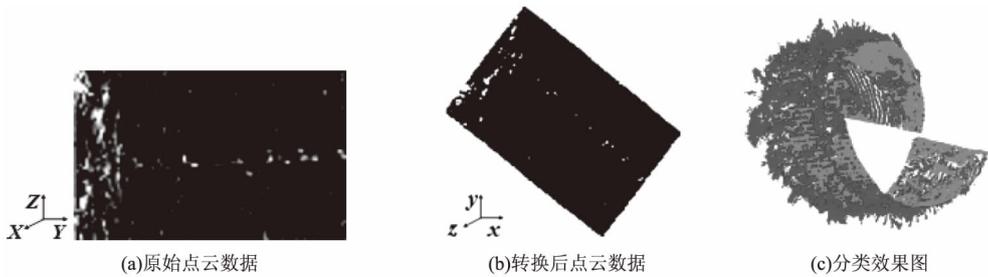


图5 EEXLT点云处理

Fig.5 Point cloud processing using EEXLT

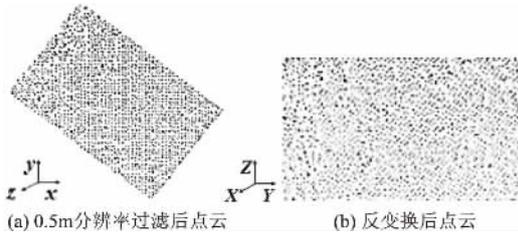


图6 植被过滤及点云反变换后结果图

Fig.6 Point cloud of vegetation filtration and inverse transform under 0.5 m resolution

由7、图8分析可以得出,有无运用正射投影方法进行点云植被过滤,其结果相差较大,不经过正射投影,运用LasaStudio软件进行点云植被过滤的效果不是很理想.同时,由图6(b)、图8结果可以看出,运用本文的点云植被过滤方法相较于LasaStudio基于双边滤波的过滤方法,效果相对较好.由此,针对悬崖地形的植被过滤,本文探究的基于物体表面正射投影的悬崖点云植被过滤方法,滤除非地形点、保留地形点的精度及效果更好.

3.4 算法分析比较

为进一步验证本文方法的有效性,将本文方法与目前较为经典的一种迭代过滤算法进行比较

分析^[12],采用两组悬崖点云数据进行植被过滤实验,原始数据分别如图9(a)和图10(a)所示.

利用迭代过滤方法和本文方法对宝剑山点云进行植被过滤后,地形点和植被点叠加显示效果图分别如图9(b)、(c)所示,图中的白色部分表示悬崖表面地形点,灰色部分表示植被点.图11为区域放大图,可以看出,两种方法的植被分类



图7 LasaStudio 未经正射投影点云处理效果图

Fig.7 Point cloud data processing effect chart using LasaStudio without orthographic projection



图8 LasaStudio 经正射投影点云数据处理效果图

Fig.8 Point cloud data processing effect chart using LasaStudio with orthographic projection



图9 宝剑山点云植被过滤效果图比较

Fig.9 Comparison of vegetation filtration effect chart of Baojian mountain



图10 白鹤山点云植被过滤效果图比较

Fig.10 Comparison of vegetation filtration effect chart of Baige mountain

结果差别较大,结合宝剑山悬崖植被实际分布情况,表明经过迭代过滤方法得到的植被大致呈条状分布,与宝剑山悬崖植被实际分布情况不符.通过图 11(a) 放大图可以进一步看出,迭代过滤方法将很多的植被点归类为地形点,同时将很多地形点错误地归类为植被点,达不到悬崖植被过滤的要求,同时也验证了迭代过滤算法一般适合于过滤基准面为地面的情况,不适合悬崖植被过滤的情况.而利用笔者提出的算法可以准确地对悬崖表面地形点和植被点进行分类,较好地实现悬崖植被的过滤,见图 9(c) 和图 11(b) 所示.

利用迭代过滤方法和本文方法对第二组数据(白鸽山点云数据)进行植被过滤,过滤后的结果分别如图 12 所示.可以看出,分类结果差别依旧很大,图 12(a) 植被占据了大部分,不符合白鸽山植被的实际分布情况.因此,结合植被分布实际情况,得出本文算法的植被过滤结果比较理想.

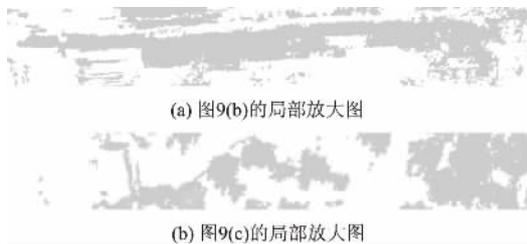


图 11 宝剑山植被过滤局部放大图比较

Fig. 11 Comparison of vegetation filtration local enlarged chart of Baojian mountain

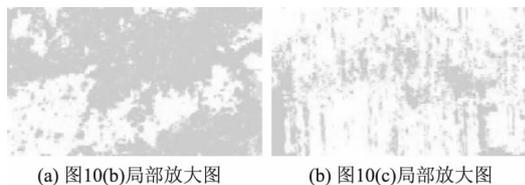


图 12 白鸽山植被过滤局部放大图比较

Fig. 12 Comparison of vegetation filtration local enlarged chart of Baige mountain

综合两组悬崖植被点云数据分析可以得出,迭代过滤算法不适用于悬崖植被点云过滤,因为其依据地面为过滤基准面;而本文的算法由于坐标转换则较好地过滤了悬崖植被点云.

4 结论

笔者基于原始悬崖点云数据,首先选取相隔距离较大的三个点构成三维空间直角坐标系,并将悬崖坐标进行转换,完成悬崖点云数据的正射投影;然后,进行金字塔坐标分区,在每一区内选择高程最低点作为该区的 DTM 点,并进行 DTM

的建立,实现植被点云过滤的目的;最后通过反变换将植被过滤后的悬崖点云数据坐标还原,最终实现悬崖点云数据的过滤.

本文方法的一个重点是对悬崖点云进行正射投影和进行金字塔分区.对悬崖点云进行正射投影,使之能够像平地般进行点云拟合过滤,而金字塔分区则得到多重滤波的结果,使植被过滤的效果得到大大的提高.

本文方法虽可实现对陡崖的植被等非地面点的过滤,但需依据实际地形条件选择合适的分辨率(分区的大小)来建立 DTM.若分辨率过小,则部分地面点可能会被过滤掉;若分辨率过大,则非地面点不能得到有效的过滤,达不到过滤的效果.

参考文献:

- [1] PROKOP A, PANHOLZER I-L. Assessing the capability of terrestrial laser scanning for monitoring slow moving landslides [J]. *Natural hazards and earth system sciences*, 2009, 9: 1921 - 1928.
- [2] SUI L, WANG X, ZHAO D, et al. Application of 3D laser scanner for monitoring of landslide hazards [C] // *Ispcr Symposium*. 2008: 277 - 282.
- [3] OPPIKOFER T, JABOYEDOFF M, BLIKRA I, et al. Characterization and monitoring of the aknes rockslide using terrestrial laser scanning [J]. *Natural hazards and earth system sciences*, 2009, 9: 1003 - 1019.
- [4] 褚宏亮, 殷跃平, 曹峰, 等. 大型崩滑灾害变形三维激光扫描监测技术研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2015, 42(3): 128 - 134.
- [5] 李永强, 吴立新. 陡坡密集点云双重滤波方法研究 [J]. *地理与地理信息科学*, 2011, 27(1): 7 - 10.
- [6] LIU J P, SHEN J, ZHAO R, et al. Extraction of individual tree crowns from airborne LiDAR data in human settlements [J]. *Mathematical and computer modeling*, 2011, 10: 1 - 12.
- [7] SUI Lichun, ZHANG Yibin, LIU Yan, et al. Filtering of airborne LIDAR point cloud data based on the adaptive mathematical morphology [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(4): 390 - 396.
- [8] LIU Changjun, LI Jian, DING Liuqiang, et al. A point clouds filtering algorithm based on grid partition and moving least squares [J]. *Procedia engineering*, 2012(3): 476 - 483.
- [9] BRODU N, LAGUE D. 3D terrestrial LiDAR data classification of complex natural scenes using multi-scale dimensionality criterion: applications in geomorphology [J]. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 2012(68): 121 - 134.

- [10] LAGUE D, BRODU N, LEROUX J. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: application to the rangitikei Canyon (NZ) [J]. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 2013(82): 10-26.
- [11] 李健, 方宏远, 崔雅博, 等. LIDAR 点云数据全自动滤波算法研究 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(1): 92-96.
- [12] KOBLER A, PFEIFER N, PETER O, et al. Repetitive interpolation: a robust algorithm for DTM generation from aerial laser scanner data in forested terrain [J]. Remote sensing of environment, 2007, 108: 9-23.
- [13] 姚吉利. 三维坐标转换的静态滤波模型 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2005, 30(9): 825-828.
- [14] 姚吉利, 韩保民, 杨元喜. 罗德里格矩阵在三维坐标转换严密解算中的应用 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2006, 31(12): 1094-1096.

The Filtration Method of Cliff Point Cloud Vegetation Based on the Surface Orthographic Projection

LI Cailin, CHEN Wenhe, WANG Jiangmei, TIAN Pengyan, YAO Jili

(School of Architecture Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: Cliff and steep slope are important landscape elements of topographic map, and these elements play a very important role in the construction of the ecological environment and prevention of geological disasters, etc. However, it is unfavorable to observe and process data because of vegetation occlusion on cliff. In this paper, we present a cliff vegetation filtration method based on the principle of surface orthographic projection. Firstly, transform the original three dimensional point cloud of cliff to the spatial cartesian coordinate system, whose xy plane is the cliff face and z -axis is perpendicular to the direction of the cliff surface. Then the grid on the xy plane is divided to establish local grid Digital Terrain Model (DTM) by fitting surface, and the vegetation points can be extracted through setting a reasonable distance threshold. Finally, after inverse projection transformation, cliff rocky points preserved are mapped to the original spatial coordinate system. The experimental analysis using actual cliff point cloud data shows that the cliff point cloud vegetation filtering method based on the surface orthographic projection is feasible and effective.

Key words: 3D laser scanning; cliff point cloud; vegetation filtration; surface orthographic projection; DTM

(上接第71页)

Research on Bridge Carbonation Life Influenced by Climate Change in Central Plains

ZHAO Juan, LI Bei

(School of Urban Construction and Safety Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

Abstract: This paper aimed to explore the concrete carbonation problem under climate change, based on bridge connecting Zhengshao Highway to Hanghai Road project, by simulating climate boundary models in high emission situation and low emission situation of Zhengzhou according to the latest research report by Intergovernmental Panel on Climate Change. The model predicted carbonation life of beam and pier by setting up development trends of temperature, humidity and CO_2 concentration in the next 100 years according to models. Compared with carbonation life calculated by constant climate parameters. The results showed that climate change would affect bridge carbonation process in central plains to a certain extent. Compared with low emissions situation, carbonation life of beam and piers would be shortened about 13% in high emissions situation.

Key words: climate change; bridge; concrete; carbonation; boundary model

文章编号: 1671-6833(2016)06-0083-04

基于张量分解的 MIMO 多中继系统半盲信道估计方法

穆晓敏, 刘越, 李双志, 张建康

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对多输入多输出三跳中继系统, 提出了一种基于张量分解的半盲信道估计方法. 该方法通过对接收信号构造基于张量分解的 PARAFAC 和 PARATUCK2 模型, 通过两阶段的迭代算法拟合张量模型. 两阶段迭代算法利用 ALS 拟合 PARAFAC 模型估计复合信道和发送信号, 并利用 TALS 拟合 PARATUCK2 模型并行估计三跳信道矩阵. 与已有的信道估计方法相比, 该方法只需少量的导频序列便能并行估计三跳信道矩阵, 不仅可以避免误差叠加, 而且提高了系统的频谱利用率, 仿真结果验证了其有效性.

关键词: MIMO 多中继系统; 半盲信道估计; 张量分解; 两阶段迭代算法

中图分类号: TN92 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.03.030

0 引言

多输入多输出 (Multiple Input Multiple Output, MIMO) 中继通信能扩展无线网络的覆盖面积, 提高整个通信链路的有效性和可靠性^[1-2], 因此 MIMO 中继技术在无线通信领域得到了广泛关注. 当 MIMO 中继系统的中继节点的处理能力有限时, 放大转发 (Amplify and Forward, AF) 策略由于实现简单而被广泛应用. MIMO 中继系统的编码设计、系统链路的可靠性等都依赖于各个链路的信道状态信息 (Channel State Information, CSI) 的准确度. 因此, 精确的信道估计技术在 MIMO 中继系统信中具有非常重要的意义.

在两跳 MIMO 中继系统中, 可以用基于导频的最小二乘 (Least Square, LS) 方法估计信道矩阵. 然而在多跳中继系统中, LS 估计方法虽能估计 CSI, 但存在误差累积^[3-4], 并且当接收端天线数小于发送端天线数时无法有效估计信道矩阵. 近年来, 张量分解被广泛应用于信号处理和信道估计领域^[5-9], 文献 [6-9] 探究了基于平行因子分析 (Parallel Factor Analysis, PARAFAC) 的信道估计方法, 与基于导频的 LS 信道估计方法相比, 这种方法避免了误差叠加. 然而针对三跳的 MIMO 系统, 基于 PARAFAC 方法不能同时分离三跳

的信道矩阵. 文献 [3-9] 只考虑两跳中继, 为了增加网络的覆盖面积以及抵制深度衰落, 有必要引入多跳 MIMO 中继系统, 但上述文献的方法并不全适用于多跳的 MIMO 中继系统.

针对三跳 MIMO 中继系统, 文献 [10] 的方法需要在信源多次发送导频序列, 降低了整个系统的频谱利用率; 笔者提出了基于张量分解的 MIMO 中继系统半盲信道估计方法, 所提算法对接收信号建立 PARAFAC 和 PARATUCK2 分解模型, 利用两个阶段的迭代算法. 第一阶段用交替最小二乘 (ALS) 拟合 PARAFAC 模型, 联合估计复合信道和发送信号; 第二阶段用三线性交替最小二乘 (TALS) 拟合 PARATUCK2 模型, 同时估计三跳信道矩阵. 与文献 [10] 相比, 笔者所提算法只需少量的导频便可同时估计各个链路的信道矩阵, 提高了系统的频谱利用率.

1 系统与信号模型

1.1 系统模型

考虑三跳 MIMO AF 中继系统, 如图 1 所示, 信源发送的信息经过第一层中继放大转发到第二层中继, 再由第二层中继放大转发到信宿. 信源、第一层中继、第二层中继和信宿分别配置 M_s 、 M_1 、 M_2 和 M_D 根天线. 信源到中继 R_1 、中继

收稿日期: 2015-11-28; 修订日期: 2016-01-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61271421); 国家自然科学基金青年科学基金资助项目 (61301150)

作者简介: 穆晓敏 (1955—), 女, 河南郑州人, 郑州大学教授, 博士生导师, 主要从事多天线无线通信系统、信号处理等研究, E-mail: iexmmu@zzu.edu.cn.

R_1 到 R_2 、中继 R_2 到信宿的信道矩阵分别为 $\mathbf{H}_{sr} \in M_1 \times M_s$ 、 $\mathbf{H}_{rr} \in M_2 \times M_1$ 、 $\mathbf{H}_{rd} \in M_D \times M_2$ 。假设系统信道矩阵和噪声矩阵均服从均值为 0, 方差为 1 的独立同分布复高斯变量。但由于长距离的路径损耗, 不考虑直连链路。

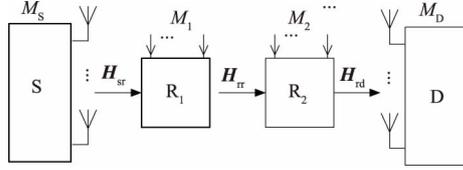


图1 三跳 MIMO AF 中继系统框图

Fig.1 The three-hop MIMO AF relay system

信源和信宿的通信过程分为三个阶段, 第一个阶段信源发送信号矢量 $\mathbf{s}(t) \in M_s \times 1$ 到中继 R_1 ; 第二个阶段中继 R_1 放大转发第一阶段接收的信号到中继 R_2 ; 在第三阶段中继 R_2 放大转发第二阶段接收的信号到信宿, 信宿接收的信号为

$$\mathbf{y}_{rd}(t+2) = \mathbf{H} \cdot \mathbf{s}(t) + \bar{\mathbf{v}}(t+2). \quad (1)$$

其中, $\bar{\mathbf{v}}(t+2) = \mathbf{H}_{rd}\mathbf{J}\mathbf{H}_{rr}\mathbf{G}\mathbf{v}_{sr}(t) + \mathbf{H}_{rd}\mathbf{J}\mathbf{v}_{rr}(t+1) + \mathbf{v}_{rd}(t+2)$, $\mathbf{H} = \mathbf{H}_{rd}\mathbf{J}\mathbf{H}_{rr}\mathbf{G}\mathbf{H}_{sr}$. $\mathbf{G} \in M_1 \times M_1$ 和 $\mathbf{J} \in M_2 \times M_2$ 分别为中继 R_1 和 R_2 的放大矩阵; $\mathbf{v}_{sr}(t)$ 、 $\mathbf{v}_{rr}(t+1)$ 和 $\mathbf{v}_{rd}(t+2)$ 分别表示在中继 R_1 、中继 R_2 和信宿的噪声矢量。

1.2 信号模型

考虑 KRST(Khatri-Rao space-time) 编码^[11], 信源分 N 个符号块发送信号, 假设在整个观测时间信道状态信息是静态不变的, 根据式(1)和 KRST 的编码规则, 在 $n(n=1, 2, 3, \dots, N)$ 个符号块、第 $t(t=1, 2, 3, \dots, T)$ 个时隙目的节点接收到的信号为

$$\mathbf{Y}_{t,n} = \mathbf{H}_n \mathbf{D}_t(\mathbf{A}_n) \mathbf{C}_0^T + \mathbf{V}_{t,n}. \quad (2)$$

式中, $\mathbf{A}_n = (\Theta \mathbf{S}_n)^T \in T \times M_s$. 其中 $\mathbf{S}_n \in M_s \times T$ 表示在第 n 个符号块的信号矩阵; $\Theta \in M_s \times M_s$ 为星座旋转矩阵^[11]; \mathbf{C}_0 为范德蒙生成矩阵^[11]; $\mathbf{D}_t(\mathbf{A}_n)$ 表示用矩阵 \mathbf{A}_n 的第 t 行作为生成矩阵的主对角元素, 其他元素为 0; $\mathbf{H}_n = \mathbf{H}_{rd}\mathbf{J}\mathbf{H}_{rr}\mathbf{G}\mathbf{H}_{sr}$ 表示在第 n 个符号块的复合信通矩阵; $\mathbf{G}_n \in M_1 \times M_1$ 和 $\mathbf{J}_n \in M_2 \times M_2$ 分别表示在 n 个符号块和第 t 个时隙 R_1 和 R_2 的放大矩阵。

2 张量建模及其唯一性分析

2.1 PARAFAC 模型及其唯一性分析

把式(2)中 T 个矩阵沿着 t (第三维)方向堆叠, 可以形成一组三维的张量信号 $\mathbf{H}_n \in M_D \times K \times T$,

通过分析接收信号可表达为

$$\mathbf{y}_n(m_D, k, t) = \sum_{m_s=1}^{M_s} h_n(m_D, m_s) c_0(k, m_s) \cdot a_n(t, m_s) + v_n(m_D, k, t). \quad (3)$$

其中, $h_n(m_D, m_s)$ 表示矩阵 \mathbf{H}_n 中第 m_D 行的第 m_s 列元素。根据参考文献[6-8], PARAFAC 的分解唯一必须满足以下条件:

$$\min(M_s, M_D, M_1, M_2) + \min(T, M_s) + \min(K, M_s) \geq 2M_s + 2. \quad (4)$$

由式(4)可以看出, 通过调整 M_s 、 T 和 M_D 均可使不等式成立。因此, 要满足唯一性条件, 可在发送信号的时隙数与收发天线数之间进行折中。

2.2 PARATUCK2 模型及其唯一性分析

基于 PARAFAC 模型可以估计复合信道矩阵 \mathbf{H}_n , 然后基于 PARATUCK2 模型可以并行估计各链路的信道矩阵。定义复合信道为

$$\mathbf{H}_n = \mathbf{H}_{rd} \mathbf{D}_n(\mathbf{F}) \mathbf{H}_{rr} \mathbf{D}_n(\mathbf{E}) \mathbf{H}_{sr}. \quad (5)$$

其中, $\mathbf{D}_n(\mathbf{F}) = \mathbf{J}_n$, $\mathbf{D}_n(\mathbf{E}) = \mathbf{G}_n$. 矩阵 $\mathbf{E} \in N \times M_1$ 和 $\mathbf{F} \in N \times M_2$ 的第 n 行元素分别包含第 n 个符号块的两个中继的放大因子。

等式(5)符合张量的 PARATUCK2 分解模型^[5,10], 把式(5)中 N 个复合信道堆叠到一起, 可以形成一组三维张量 $\mathbf{H} \in M_D \times M_s \times N$. 为了同时估计三跳信道矩阵, 需对三维张量 $\mathbf{H} \in M_D \times M_s \times N$ 进行展开和矢量化操作。根据 PARATUCK2 模型^[10]的 3 种展开形式, 式(5)的 3 种展开形式为

$$\text{vec}(\mathbf{H}^{(1)}) = \mathbf{W}_1 \text{vec}(\mathbf{H}_{rr}). \quad (6)$$

$$\mathbf{H}^{(2)} = (\mathbf{I}_N \otimes \mathbf{H}_{rd}) \mathbf{W}_2 \mathbf{H}_{sr}. \quad (7)$$

$$\mathbf{H}^{(3)} = (\mathbf{I}_N \otimes \mathbf{H}_{sr}^T) \mathbf{W}_3 \mathbf{H}_{rd}^T. \quad (8)$$

式中: $\mathbf{W}_1 = [(\mathbf{E}^T \odot \mathbf{F}^T)^T \otimes (\mathbf{H}_{sr}^T \otimes \mathbf{H}_{rd})]$; $\text{vec}(\cdot)$ 表示矢量化操作, 即矩阵按列进行堆栈; “ \otimes ”和“ \odot ”分别表示矩阵的 Kronecker 和 Khatri-Rao 积^[5], \mathbf{W}_2 和 \mathbf{W}_3 分别为

$$\mathbf{W}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{Z}_N \end{bmatrix} \in M_2 N \times M_1, \mathbf{W}_3 = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_1^T \\ \vdots \\ \mathbf{Z}_N^T \end{bmatrix} \in M_1 N \times M_2.$$

其中, $\mathbf{Z}_n = \mathbf{D}_n(\mathbf{F}) \mathbf{H}_{rr} \mathbf{D}_n(\mathbf{E}) \in M_2 \times M_1$. 式(6)~(8)分别分离 \mathbf{H}_{rr} 、 \mathbf{H}_{sr} 和 \mathbf{H}_{rd} , 用 TALS 拟合可并行估计三跳信道矩阵。由式(6)~式(8)可知, 用 TALS 拟合时, 必须满足式(9)张量分解唯一时^[10], $M_D M_s N \geq M_1 M_2$, $M_D N \geq M_1$, $M_s N \geq M_2$. (9)

对于传统三阶段 LS 信道估计方法^[10], 各节点的天线数要求 $M_D \geq M_2 \geq M_1$, 而本文所提算法在各节点天线数的设置(参见式(9))宽松了接

收端对天线数的限制.

3 两阶段迭代拟合算法

算法分两个阶段,首先用 ALS 迭代算法拟合 PARAFAC 模型估计复合信道矩阵 \mathbf{H}_n ; 其次用 TALS 迭代算法拟合 PARATUCK2 模型同时估计三跳信道矩阵. 基于 PARAFAC 模型^[12] 的两种展开形式为

$$\mathbf{Y}_{n, M_D \times K T} = \mathbf{H}_n (\mathbf{A}_n \odot \mathbf{C}_0)^T + \mathbf{V}_{n, (1)}. \quad (10)$$

$$\mathbf{Y}_{n, T \times M_D K} = \mathbf{A}_n (\mathbf{C}_0 \odot \mathbf{H}_n)^T + \mathbf{V}_{n, (2)}. \quad (11)$$

ALS 算法首先初始化随机矩阵 $\hat{\mathbf{A}}_n^{(0)}$, 对于每次迭代, 根据式 (10) 和式 (11), 用 LS 拟合更新信道矩阵 \mathbf{H}_n :

$$\hat{\mathbf{H}}_n = \mathbf{Y}_{n, M_D \times K T} ((\hat{\mathbf{A}}_n \odot \mathbf{C}_0)^T)^\dagger. \quad (12)$$

式中: $(\cdot)^\dagger$ 表示矩阵的伪逆运算.

第二个阶段用 TALS 迭代算法拟合 PARATUCK2 模型, 初始化随机矩阵 $\hat{\mathbf{H}}_{rd}^{(0)}$ 、 $\hat{\mathbf{H}}_{tr}^{(0)}$. LS 拟合式 (7) 可以得到信道矩阵 $\hat{\mathbf{H}}_{sr}$:

$$\hat{\mathbf{H}}_{sr} = ((\mathbf{I}_N \otimes \hat{\mathbf{H}}_{rd}) \hat{\mathbf{W}}_2)^\dagger \mathbf{H}^{[2]}. \quad (13)$$

得到 $\hat{\mathbf{H}}_{sr}$ 后, 利用式 (8), 由 LS 拟合可得到:

$$\hat{\mathbf{H}}_{rd}^T = ((\mathbf{I}_N \otimes \hat{\mathbf{H}}_{sr}^T) \hat{\mathbf{W}}_3)^\dagger \mathbf{H}^{[3]}. \quad (14)$$

得到 $\hat{\mathbf{H}}_{sr}$ 和 $\hat{\mathbf{H}}_{rd}$ 后, 利用式 (6) 更新 \mathbf{h}_{tr} , 得

$$\text{vec}(\hat{\mathbf{H}}_{tr}) = (\hat{\mathbf{W}}_1)^\dagger \text{vec}(\mathbf{H}^{[1]}). \quad (15)$$

第一阶段 (ALS 算法):

(1) 矩阵 \mathbf{C}_0 已知, 初始化随机矩阵 $\hat{\mathbf{A}}_n^{(0)}$.

(2) $i \leftarrow i + 1$.

(3) 由 $\hat{\mathbf{A}}_n^{(i-1)}$ 根据式 (12) 更新 $\hat{\mathbf{H}}_n^{(i)}$.

(4) 计算 $\delta(i) = \|\mathbf{Y}_{n, M_D \times K T} - \hat{\mathbf{H}}_n^{(i)} (\hat{\mathbf{A}}_n^{(i)} \odot \mathbf{C}_0)^T\|$. 如果 $[\delta(i-1) - \delta(i)]/\delta(i) \leq \varepsilon$ (ε 为收敛条件), 第一阶段程序结束, 然后继续第二阶段拟合. 否则跳到 (2).

第二阶段 (TALS 算法):

(5) 矩阵 \mathbf{E}, \mathbf{F} 已知, 初始化随机矩阵 $\hat{\mathbf{H}}_{rd}^{(0)}$,

$\hat{\mathbf{H}}_{tr}^{(0)}$. 计算 $\hat{\mathbf{W}}_2^{(0)}$ 和 $\hat{\mathbf{W}}_3^{(0)}$.

(6) $i \leftarrow i + 1$.

(7) 根据式 (7)、式 (8) 和式 (6) 分别更新

$\hat{\mathbf{H}}_{sr}^{(i)}$ 、 $\hat{\mathbf{H}}_{rd}^{(i)}$ 和 $\hat{\mathbf{h}}_{tr}^{(i)} = \text{vec}(\hat{\mathbf{H}}_{tr}^{(i)})$.

(8) 计算 $\gamma(i) = \|\mathbf{H}^{[2]} - (\mathbf{I}_N \otimes \hat{\mathbf{H}}_{rd}^{(i)}) \hat{\mathbf{W}}_2^{(i)} \hat{\mathbf{H}}_{sr}^{(i)}\|$, 如果 $[\gamma(i-1) - \gamma(i)]/\gamma(i) \leq \varepsilon$ 程序结束; 否则, 跳转到步骤 (6).

4 仿真与分析

仿真的基本参数设置为: $\varepsilon = 10^{-6}$; 信源的发射功率为 P_s , 中继的发射功率 $P_{r1} = P_{r2} = 30$ dB. 假定系统噪声和信道矩阵均服从均值为 0 方差为 1 的独立同分布复高斯随机变量. 中继的放大矩阵在接收端已知, \mathbf{E} 和 \mathbf{F} 选择服从 $[-1, 1]$ 均匀分布的随机序列, 目的是使中继的放大因子在每个符号块中都有随机相位^[10]. 编码方式考虑 KRST 编码^[11], KRST 编码可以使系统获得大的分集增益和编码增益, 信源发送的信号由正交相移键控 QPSK 调制生成. 所提算法的性能由归一化均方误差 (NMSE) 衡量, 假设 $\mathbf{H}_c = \mathbf{H}_{rd} \mathbf{H}_{tr} \cdot \mathbf{H}_{sr}$ 为级联信道矩阵, NMSE 可以定义如式 (16) 所示, 其中 M 为蒙特卡洛仿真次数. 信道矩阵 \mathbf{H}_{rd} , \mathbf{H}_{tr} 和 \mathbf{H}_{sr} 的 NMSE 定义与式 (16) 类似.

$$\text{NMSE} = \frac{1}{M} \left(\sum_{m=1}^M \frac{\|\mathbf{H}_c - \hat{\mathbf{H}}_c\|_F^2}{\|\mathbf{H}_c\|_F^2} \right). \quad (16)$$

图 2 比较了笔者所提算法和传统算法及文献 [10] 所提算法的 NMSE 性能, 其中基于导频的 LS 估计算法信道矩阵 \mathbf{H}_{tr} 和 \mathbf{H}_{rd} 的 NMSE 不随 P_s 的变化而变化. 因此, 图中只显示了传统 LS 方法 \mathbf{H}_{sr} 的 NMSE. 由仿真结果可知, 所提算法与文献 [10] 相比性能接近. 但是文献 [10] 基于 PARATUCK2 分解的信道估计方法需要信源发送大量的导频序列, 而本文笔者所提算法只需少量的导频序列, 既节省导频的开销, 又提高了整个系统的频谱利用率.

图 3 考察了发送符号块数 (N) 对系统性能的影响. 由仿真结果可知, 随着 N 的增加系统 NMSE 估计性能提高, 这是因为由式 (6) ~ (8) 和式 (16) 分别计算信道矩阵和系统的归一化均方误差, 均与 N 有关. 其物理意义为: 当 N 增加时, 所构造的 PARATUCK2 模型中的信道相关信息增多, 数据观测时间长, 因此提高了系统估计精度. 然而当 N 增加时, 三阶张量的维数增加, 式 (6) ~ (8) 展开后矩阵的维数却随着 N 的增大而增大, 因此这种估计精度的提高是以高的计算复杂度为代价的.

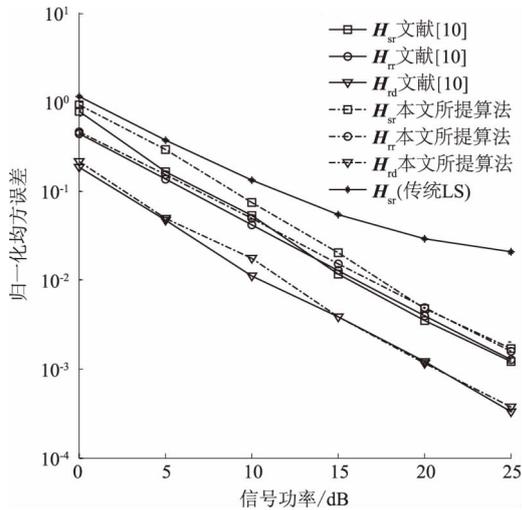


图2 不同符号功率下的信道归一化均方误差
Fig. 2 NMSE versus P_s

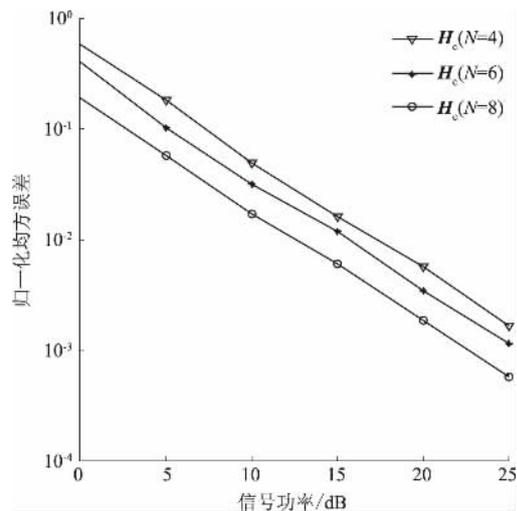


图3 不同符号功率下信道归一化均方误差
Fig. 3 NMSE versus P_s

5 结论

针对三跳 MIMO AF 中继系统的信道估计问题,基于张量的 PARAFAC 和 PARATUCK2 分解提出了一种半盲信道估计方法.该方法能联合估计各链路的信道矩阵和发送信号,与传统的基于导频的 LS 信道估计方法相比,首先本文所提算法不存在误差叠加,其次宽松了接收端对天线数的限制,并且在发射端只需少量的导频序列就能并行估计各个链路的信道状态信息,提高了系统的频谱利用率.除此之外,寻找新的迭代拟合算法将是下一步工作的重点.

参考文献:

[1] MO R H, CHEW Y H, YUEN C. Information rate

- and relay precoder design for amplify-and-forward MIMO relay networks with imperfect channel state information [J]. IEEE Trans Vehicular, 2012, 61(9): 3958-3968.
- [2] RONG Y. Optimal joint source and relay beam forming for MIMO relays with direct link [J]. IEEE Commun Lett, 2010, 14(5): 390-392.
- [3] KONG T, HUA Y B. Optimal channel estimation and training design for MIMO relays [C]//Pacific Grove, CA, IEEE Signals, Systems and Computers, Asilomar, USA: IEEE press 2010: 663-667.
- [4] KONG T, HUA Y B. Optimal design of source and relay pilots for MIMO relay channel estimation [J]. IEEE Tran on Signal Process, 2011, 59(9): 4438-4446.
- [5] XIMENES L R, FAVIER G. PARAFAC-P semi-blind receivers for two-hop cooperative MIMO relay systems [J]. IEEE Trans on Signal Process, 2014, 62(14): 3604-3615.
- [6] RONG Y, KHANDAKER M R A, XIANG Y. Channel estimation of dual-hop MIMO relay system via parallel factor analysis [J]. IEEE Trans on Wireless Comm, 2012, 11(6): 2224-2233.
- [7] DU J H, YUAN C W, ZHANG J B. Low complexity PARAFAC-based channel estimation for non-regenerative MIMO relay systems [J]. IET Commun, 2014, 8(12): 2193-2199.
- [8] FERNANDES C A R, DE ALMEIDA A L F, DA COSTA D B. Unied tensor modeling for blind receivers in multiuser uplink cooperative systems [J]. IEEE Signal Process Lett, 2012, 19(5): 247-250.
- [9] DE ALMEIDA A L F, FERNANDES C A R, DA COSTA D B. Multiuser detection for uplink DS-CDMA amplify and forward relaying systems [J]. IEEE Signal Process Lett, 2013, 20(7): 697-700.
- [10] HAN X, DE ALMEIDA A L F, YANG Z. Channel estimation for MIMO multirelay systems using a tensor approach [J]. Eurasip J Adv Sign Process, 2014(1): 1-14.
- [11] SIDIROPOULOS N D, BUDAMPATI R S. Khatri-Rao space-time codes [J]. IEEE Trans on Signal Process, 2002, 50(10): 2396-2407.
- [12] 张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 596-600.

(下转第96页)

文章编号: 1671-6833(2016)06-0087-05

一种新的基于 HMIPv6 的车载网络移动协议仿真研究

刘书如, 张启坤, 甘勇

(郑州轻工业学院 计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 车载网络信息技术的高速发展对移动过程中信息交换提出新的挑战, 针对域内及域间频繁切换所产生的绑定更新信令开销大、数据包发送时间延长的问题, 提出了一种新的车载网络移动协议, 该协议通过改进的 HMIPv6 指针传递算法 (EPF-HMIPv6), 对切换过程中的数据发送路由进行优化。仿真实验结果表明, 该算法在绑定更新开销、数据包发送开销等方面均优于现有的车载网络移动管理算法。

关键词: 车载网络; 指针传递; 移动管理; 分层次移动 IPv6

中图分类号: TP393.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.03.032

0 引言

车载网络的迅速发展对移动管理算法提出了一个新的挑战。车辆频繁地从一个基站移动到另一个基站, 从一个系统切换到另一个系统, 这种频繁的切换会影响到数据包的丢失率和会话的连续性, 因此, 车载网络中如何降低移动切换过程中注册消息的开销、降低因切换所带来的时延一直是研究的热点。

针对该问题, IETF 工作组提出了 MIPv6 协议, MIPv6 把移动管理协议分为局部移动和全局移动。但是 MIPv6 没有对局部范围内的移动, 也就是域内移动提出更好的解决方法, 而是把域内移动和域间移动用相同的处理方法。

为了解决局部移动的问题, IETF 提出了分层次 HMIPv6^[1] 协议。HMIPv6 建议选择最远的 MAP, 这样可以降低重新注册的开销, 这种算法适合高速移动的车载网络。但是对于低速的移动车载网络, 该算法是低效的。还有一个问题就是该算法对于时延要求比较高的车载网络来说不太适合, 并且该算法可能会造成所有移动车载注册到同一个 MAP, 结果该 MAP 就可能成为网络瓶颈。

针对 HMIPv6 存在的问题, 研究者们提出了不同的解决方案。文献 [2] 中建议了一种改进的 MAP 选择算法, 主要是考虑 MAP 的负载均衡。文献 [3] 中提出基于移动速度来选择 MAP, 快速移

动的车辆选择最远的 MAP, 而慢速移动的车辆选择最近的 MAP, 但是对于介于两者之间的情况, 并没有给出一个很好的解决方法。

针对车载网络移动管理协议, 国内很多学者也进行了深入的研究。国防科技大学宋宏斌等针对城市车辆网络的移动性管理^[4], 提出了利用本地访问频率和邻居节点访问频率构建收益函数的方法, 通过建立车辆网络场景并模拟验证了该收益函数下的数据缓存的优越性。文献 [5] 提出了一种基于 IPv6 的城市车载网移动切换协议。该协议在移动过程中由家乡地址唯一标识, 无须转交地址, 因此节省了转交地址配置时间和代价, 从而缩短了移动切换时间, 降低了移动切换代价。文献 [6] 评估了不同协议在高速车载网络环境中的性能, 结果表明相比于低速环境, 高速环境对四类协议性能均有严重的影响。文献 [7] 提出了一种面向分层移动 IPv6 网络的动态指针推进机制, 移动锚点可以依据管理域的大小, 动态的调整指针推进机制, 该方案可以有效降低分层移动 IPv6 的开销, 但是未对该协议在车载网络中的性能进行评估和分析。

在数字蜂窝通信网络中, 指针传递算法^[8] 能够有效降低信令开销。文献 [9] 在 HMIPv6 的基础上, 实现了指针传递算法, 主要思路是在 MAP 之间建立指针链, 因此在 MAP 域间切换的时候, 该算法可以有效降低发往家乡代理 HA 的注册信令

收稿日期: 2015-10-09; 修订日期: 2015-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61340059)

作者简介: 刘书如(1979—), 男, 河南南阳人, 郑州轻工业学院讲师, 主要从事网络移动性研究, E-mail: maillsr@163.com.

开销。但是当 MAP 域足够大时,域间切换发生的频率并不高,所以该算法的性能就不能充分体现。另外,该算法也没有进行路由优化。

笔者在上述研究基础上,结合车载网络本身的特点,提出一种新的基于 HMIPv6 的车载网络移动协议,将指针传递算法引入到车载网络中,对指针传递算法中的路由进行了优化,并建立分析模型,最后给出了仿真分析结果。

1 一种新的车载网络移动协议

1.1 EPF-HMIPv6 算法

在分层次移动 IPv6 (HMIPv6) 网络的基础上,结合车载网络移动性特征,提出一种新的指针传递算法,称为 EPF-HMIPv6 算法。在 HMIPv6 网络中,一个 MAP 覆盖的范围比较大,里面包含了很多访问路由器,MAP 域间切换要远少于 MAP 域内切换。因此,EPF-HMIPv6 算法把指针传递链建立在访问路由器 AR 之间,而不是像其他的指针传递算法^[10],把指针链建立在 MAP 之间,从理论上说,EPF-HMIPv6 能够更加有效的降低一个 MAP 域内频繁切换时所产生的流量负载。为了更好的适应车载网络的特性,EPF-HMIPv6 还考虑了车载网络中车载网络移动快和慢两种情况,分别来评估该算法的性能。

1.1.1 MAP 域内切换绑定更新过程

如图 1 所示,在 EPF-HMIPv6 算法中,每一个访问路由器都维持一个指针链表。在该表中,每一行有三个字段:第一个字段是移动终端 MN 的家乡地址;第二个字段是 MN 目前所处的 AR 范围内所取得的转交地址(LCoA);第三个字段是 MN 在新的 AR 所取得的下一个转交地址。

EPF-HMIPv6 算法绑定更新过程如下:

(1) MN 首先在第一个访问路由器 AR 上完成初始化注册,此时 AR1 的指针链表值分别为 LCoA1 和 NULL;

(2) 如果 MN 移动到 AR2, MN 首先给 AR1 发送一个绑定更新消息,意思是在 AR1 和 AR2 之间建立传递指针链;

(3) AR1 收到绑定更新消息后,更新其指针链表,表中的下一个字段的值改为 LCoA2。同时,AR1 发送一个绑定更新确认消息给 MN;

(4) 当 MN 收到确认消息后, MN 把其指针链表长度变量 L 加 1;

(5) 整个绑定更新过程完成后, AR1 指针链表中的值为 LCoA1 和 LCoA2。而 AR2 指针链表的

值为 LCoA2 和 NULL。

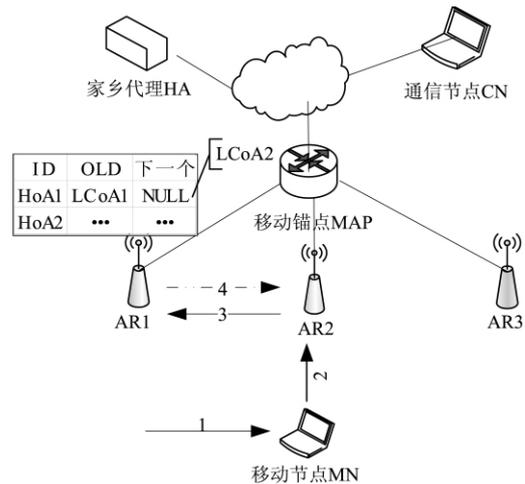


图 1 车载网络

Fig. 1 The process of movement in vehicle network

绑定更新过程中, MN 始终记录一个指针链长度值 L , 如果 L 小于预先设置好的一个阈值 K , 就执行上述绑定更新过程。如果 L 等于 K 或者 MN 从一个 MAP 切换到了另一个 MAP 域, 那么此时绑定更新消息就按照 HMIPv6 中的流程, 发送给 MAP, 并且长度值 L 重新设置为 0。

1.1.2 EPF-HMIPv6 路由优化

如图 2 所示, 当 CN 向 MN 发送一个数据包的时候, 整个数据包转发过程描述如下:

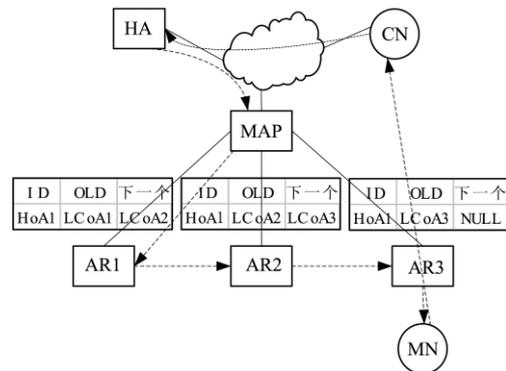


图 2 算法路由优化

Fig. 2 Route optimization algorithm

(1) 首先 CN 发送数据包到 MN 的家乡代理 HA, 依据 HA 中记录的 MN 的 RCoA, 也就是 MAP 的地址, 把数据用隧道封装方式发送到 MAP;

(2) MAP 收到该数据包, 根据 MAP 中记录的 MN 的 LCoA 信息, 进行数据封装发送;

(3) MAP 首先把数据包发送到地址 LCoA1 处, 也就是发送给 AR1;

(4) AR1 查询自己指针链表中的下一个字段值, 如果下一个字段值为空, 表明可以直接把数据

发送给 MN.

(5) 当 MN 收到来自 CN 的数据包后, MN 需要发送绑定更新到 MAP 和 CN, 目的是让对方知道自己最新的 CoA. 同时, 还需要重新初始化自己的指针链长度变量 L 的值. 以后的通信过程就可以实现 MN 与 CN 直接通信, 从而优化了路由, 也减少了数据发送时延.

2 性能分析

2.1 运行速度评估

车载网络中运行车辆, 可以看作是 EPF-HMIPv6 算法模型中的移动终端 MN, 车辆的移动, 相当于 MN 在 AR 路由器之间切换^[11]. 为了尽量降低 MN 在移动过程产生的绑定更新消息开销以及尽可能减少数据发送时延, 需要考虑到节点移动特性^[12]. EPF-HMIPv6 算法中, 把 MN 分为两类: 快速移动节点和慢速移动节点.

当 MN 进入到一个新的 AR 子网时, 可以用 MN 在前一个子网的驻留时间来评估在新的 AR 子网的驻留时间.

这里采用指数加权移动平均 EWMA 算法来评估子网驻留时间. 具体计算方法如下:

$$EM(t) = \alpha Y(t) + (1 - \alpha) EM(t-1). \quad (1)$$

式中: $EM(t)$ 表示 t 时刻的估计值; $r(t)$ 表示 t 时刻测量值; $\alpha (0 < \alpha < 1)$ 表示对于历史测量值权重系数.

根据上述计算结果, MN 比较最新的驻留时间和预先设置好的一个阈值 δ , 如果大于 δ , 那么该车载定义为快速移动车载; 否则的话, 被定义为慢速移动车载. 对于快速移动车载, 发送带有 RCoA 地址的绑定更新消息给 CN; 而慢速移动车载发送带有 LCoA 地址的绑定更新消息给 CN. 对于快速移动车载来说, 通过该方法, 可以有效降低绑定更新开销; 同时, 对于慢速移动车载来说, 能够有效地避免 MAP 的转发数据包开销.

2.2 流体流动模型

为了模拟车载在网络中的移动, 采用了流体流动模型^[13], 该模型中车载移动方向是均匀的分布在整個范围内, 该模型适合表达具有高移动性、有方向性的变化.

在域内切换过程中, 定义 λ_s 为每一个会话过程中穿越子网的数字, 计算公式如下所示:

$$E(\lambda_s) = \lfloor \frac{2 \cdot v}{\sqrt{\pi \cdot S}} \rfloor. \quad (2)$$

式中: v 表示车载移动平均速度; S 表示子网面

积. 同样的道理, 如果 D 表示 MAP 域面积, 那么每一个会话穿越的域的数量计算方法如式 (3) 所示.

$$E(\lambda_d) = \lfloor \frac{2 \cdot v}{\sqrt{\pi \cdot D}} \rfloor. \quad (3)$$

2.3 网络模型

图 3 是一个车载网络拓扑示意图, 移动节点表示为 MN, 通信节点表示为 CN, 访问路由是 AR, 移动锚点是 MAP. MN 的移动采用上述流体流动模型来模拟.

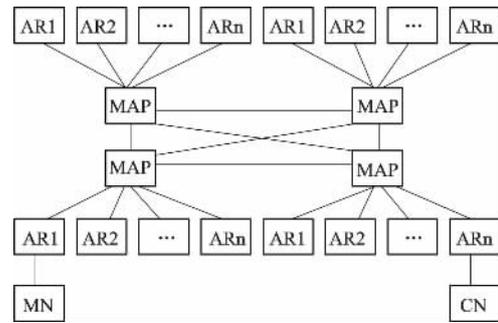


图3 网络拓扑示意图

Fig.3 Network topology diagram

2.4 HMIPv6 开销计算

为了评估算法性能, 有以下几个约定: $E(L_s)$ 表示平均会话长度; B_{HA} 表示到 HA 的绑定更新开销; B_{MAP} 表示到 MAP 的绑定更新开销; B_F 表示到前一个 AR 的绑定更新开销. θ 表示路由优化之前发送的数据包占一个会话的总数据包的比例, 值为 0.2.

P_{NRO} 表示从 CN 到 MN 的未经路由优化的数据包发送开销; P_{RO} 表示从 CN 到 MN 的经路由优化的数据包发送开销; P_F 表示从当前 AR 到前一个 AR 的数据包发送开销.

HMIPv6 算法绑定更新消息开销计算如下所示:

$$C_{BU}^{HMIPv6} = E(\lambda_d) B_{HA} + B_{CN} + E(\lambda_s) B_{MAP}. \quad (4)$$

数据包发送开销可以表示为

$$C_{PD}^{HMIPv6} = \theta \cdot E(L_s) P_{NRO}^{HMIPv6} + (1 - \theta) E(L_s) P_{RO}^{HMIPv6}. \quad (5)$$

2.5 EPF-HMIPv6 开销计算

EPF-HMIPv6 绑定更新开销计算如下所示:

$$C_{BU}^{EPFHMIPv6} = C_{BU}^{PF} + P_{LCoA} \mu_C T_{BU} B_{CN}. \quad (6)$$

式中: C_{BU}^{PF} 表示指针链算法开销^[14]; μ_C 是车载穿越子网的速度; T_{BU} 表示一个绑定更新周期, 那么在一个绑定更新周期内穿越子网数为 $\mu_C \cdot T_{BU}$. 数据包发送开销计算如公式 (7) 所示:

$$C_{PD}^{EPF-HMIPv6} = \theta \cdot E(L_S) \left(P_{NRO}^{HMIPv6} + \frac{k}{2} P_F \right) + (1 - \theta) \cdot E(L_S) \left((1 - P_{LCoA}) P_{RO}^{HMIPv6} + P_{LCoA} P_{RO}^{MIPv6} \right). \quad (7)$$

3 仿真结果

3.1 车载移动速度对绑定更新开销影响

图4给出了车载运行速度和绑定更新开销的关系.从图4得出,无论是哪种算法,随着运行速度的增加,绑定更新开销都在增加,这是因为随着速度加快,穿越域内不同子网以及域间切换都更加频繁,所以绑定更新总体开销都会增加.但是相比于HMIPv6和MAP-AOP^[3]算法,EPF-HMIPv6算法表现更加优秀,也就是说,车载网络中运用EPF-HMIPv6指针传递算法更加合适.

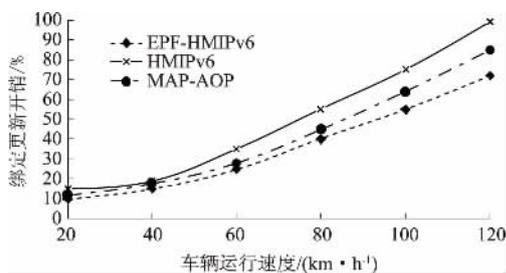


图4 车载运行速度与绑定更新开销关系

Fig. 4 The relationship between the binding update cost and vehicle running speed

3.2 SMR 对开销影响

图5中给出了SMR对总开销影响的示意图,纵坐标显示的是相比于MIPv6来说总的开销比例.当SMR^[15]采用不同值时,HMIPv6、MAP-AOP、EPF-HMIPv6算法表现出不同的结果.

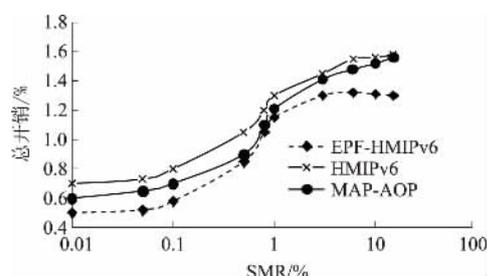


图5 SMR与总开销的关系

Fig. 5 The relationship between SMR and the total costs

从图5中可以看出,随着SMR增大,总开销一直在增加.当SMR小于1时,也就是说相对于会话速度来说,移动速度是主要影响因素,无论是HMIPv6、MAP-AOP还是EPF-HMIPv6都能显著降低网络总开销.但是,当SMR大于1时,这3种算

法的总开销都会明显增加,主要是因为当通信会话速度占主要地位时,虽然HMIPv6、MAP-AOP和EPF-HMIPv6 3种算法都能够降低绑定更新开销,但是会增加数据包发送开销.但是从图中可以得出,EPF-HMIPv6算法更适合于移动速度快,但是会话速度不是很快的车载网络.

3.3 指针链长度与SMR

图6表明了SMR和最优指针链长度之间的关系.当SMR值小时,相比于会话到达速度来说,移动速度是主要的影响因素,因此,降低绑定更新消息开销比降低数据包发送开销更加重要.也就意味着,指针链长度应该被加长,这样就可以有效降低绑定更新消息开销.反之,当SMR增大时,表明会话到达速度占据主导因素,因此应该通过降低指针链长度,从而来降低数据包发送开销.因此,随着SMR的增加,最优指针链长度值在减小.

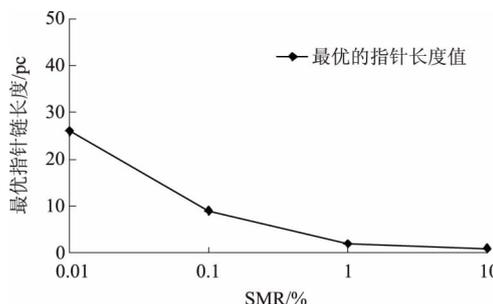


图6 SMR与最优指针链长度关系

Fig. 6 The relationship between SMR and the length of pointer chain

4 结论

针对车载网络的特点,结合现有指针链算法,本文提出了一种改进的适合车载网络的指针链算法,并对数据包发送路由进行了优化,分析及仿真结果都表明该算法相比与现有算法在绑定更新开销、数据包发送开销方面表现更好,但是该算法对于进行域间切换时,与现有算法没有明显差异,在今后研究工作中,对于MAP域范围比较小的情况下的车载网络移动管理协议需要进一步深入研究.

参考文献:

- [1] 马芳,吉星.一种优化分层式移动IPv6路由算法研究[J].郑州大学学报(工学版),2015,36(3):125-128.
- [2] CHEN Yenwen, HUANG Mingjen. Study of heuristic MAP selection and abstraction schemes with load balance in HMIPv6[J]. Wireless personal communica-

- tions, 2011, 57(2):217–232.
- [3] TAO Ming, YUAN Huaqiang, WEI Wenhong. Active overload prevention based adaptive MAP selection in HMIPv6 networks [J]. *Wireless networks*, 2014, 20(2):197–208.
- [4] 宋宏斌,肖晓强,徐明,等. 一种城市车辆网络中的数据缓存算法 [J]. *计算机应用*, 2010, 30(1):121–123.
- [5] 王晓喃,钱焕延. 基于 IPv6 的城市车载网移动协议 [J]. *计算机应用研究*, 2013, 30(10):3051–3060.
- [6] 杨卫东,李洋,沈策. 相关移动 IPv6 协议在车辆网络环境中的性能评估 [J]. *计算机应用与软件*, 1990, 26(12):212–215.
- [7] 杨怡,董永强. 面向分层移动 IPv6 网络的动态指针推进机制 [J]. *软件学报*, 2011, 22(1):164–176.
- [8] LI Y N, CHEN I R. Design and performance analysis of mobility management schemes based on pointer forwarding for wireless mesh networks [J]. *IEEE transactions on mobile computing*, 2011, 10(3):349–361.
- [9] PACK S, LEE B, KWON T, et al. A pointer forwarding scheme with mobility-aware binding update in Mobile IPv6 networks [J]. *Computer communications*, 2008, 31(5):873–884.
- [10] RAMADAN S M, EI S A, MARIE M, et al. Location management in PCS networks by caching two-level forwarding-pointers [J]. *Wireless personal communications*, 2007, 41(1):57–75.
- [11] ROS F J, MARTINEZ J A, RUIZ P M. A survey on modeling and simulation of vehicular networks: Communications, mobility, and tools [J]. *Computer communications*, 2014, 43(1):1–15.
- [12] MORAVEJOSHARIEH A, MODARES H. A proxy MIPv6 handover scheme for vehicular Ad-hoc networks [J]. *Wireless personal communications*, 2014, 75(1):609–626.
- [13] DUTTA N, MISRA I S. Fluid flow and random walk mobility model for wireless mobile network research: a review [J]. *Advanced materials research*, 2012, 75(1):403–408.
- [14] SON S, JEONG J. Cost-effective handoff scheme based on mobility-aware dual pointer forwarding in proxy mobile IPv6 networks [J]. *Advanced materials research*, 2014, 3(1):57–67.
- [15] PACK S, KWON T. A mobility-based load control scheme in hierarchical mobile IPv6 networks [J]. *Wireless networks*, 2010, 16(2):545–558.

A New Mobility Protocol in The Vehicular Networks Based on HMIPv6

LIU Shuru, ZHANG Qikun, GAN Yong

(School of Computer and Communication Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The frequent inter-domain or intra-domain movement of vehicles in vehicular networks may lead to large binding update costs and packet delivery costs. In order to solve this problem, an improved pointer forwarding scheme (EPF-HMIPv6) was developed in this paper. The scheme was based on the existing pointer forwarding scheme in cellular networks, and the routing of packets was optimized. To evaluate the performance of the proposed scheme, analytical expressions were derived for binding update cost, signaling overhead caused by HMIPv6 and EPF-HMIPv6 handovers. The simulation results showed that the proposed scheme was better than the existing mobility management protocols in vehicular networks.

Key words: vehicular network; pointer forwarding; mobility management; HMIPv6

文章编号: 1671-6833(2016)06-0092-05

基于生态环境损失的农业生态系统能值分析

王慧亮, 吴泽宁, 郭溪, 郭瑞丽

(郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对目前研究中没有考虑生态环境损失的问题, 提出了基于生态环境损失的农业生态系统能值分析研究思路和方法. 以郑州市为例, 计算了郑州市 2000~2009 年农业生态系统的能值投入和产出, 以及农业生态环境能值损失和相关能值指标. 结果显示, 郑州市近 10 年农业生产造成的平均生态环境损失为 2.44×10^{21} sej, 占能值产出的 15.47%, 与现有国内外研究认为农业外部成本占农业收入的 6%~30% 的结论基本吻合; 系统能值产出在扣除农业生态环境损失后, 平均净能值产出率从 2.86 下降到 2.45, 平均可持续发展指数从 1.19 下降到 1.01, 说明农业生态环境损失对系统生产效率和可持续影响显著.

关键词: 生态环境损失; 农业生态系统; 能值分析; 郑州市

中图分类号: S51; F326.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.06.025

0 引言

人类通过农业生产, 干涉和利用自然生态系统, 与其形成最广泛最有生命活力的物质循环和能量转换过程^[1]. 然而, 现代农业因长期的高强度土地利用和过量工业辅助能投入, 导致土壤养分失衡、有害物质积累、生物多样性衰退等农业生态环境恶化^[2], 影响农业生态系统的存续, 因此其可持续评价成为当今国内外研究的热点^[1-2]. 能值分析方法由于其可以统一度量各种生态流的优点被广泛应用于农业生态系统可持续研究^[5-7], 但大多数研究只考虑系统的经济产出, 忽视了农业生产的生态环境影响, 以致于长期以来农业生产重视工业辅助能的高投入, 片面追求经济高产出, 扰乱了自然生态系统的物质循环和能量转换平衡^[5]. 因此, 在进行农业生态系统能值分析时, 关注农业生态环境损失显得尤其必要. 笔者以郑州市为例, 在考虑农业生态环境损失的情况下, 提出了农业生态环境损失的能值计算方法, 建立了系统生产效率和运行状况的能值评价模型, 以期揭示郑州市农业生产造成的生态环境损失问题, 为实现郑州市农业生态系统可持续发展目标提供理论参考.

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

郑州位于河南省中部偏北, 属北温带季风型气候, 地势西高东低, 境内土壤自西向东分布为棕壤土、红黏土、褐土、潮褐土、潮土等. 郑州市地貌复杂、土壤类型多, 雨量适中, 适宜多种农作物的生长, 主要有小麦、玉米、红薯、大豆、水稻、谷物、棉花、花生、烟叶、白菜、大葱、土豆、西瓜等. 郑州市现代农业水平较高, 近些年农业生态环境问题日益突出.

1.2 研究方法

1.2.1 生态系统能量流动过程

农业生态系统能量流是各种自然能量流和人力、土壤有机质等环境资源, 化肥、农药、电力、机械等工业辅助能, 人力、畜力、有机肥、种子等可更新有机能的总和. 系统产出主要是农林牧渔等经济产品, 同时, 农业生产会对生态环境造成污染和破坏, 造成生态环境损失.

1.2.2 农业生态环境损失的能值计算方法

农业生态环境损失, 指人类现代农业生产活动带来的生态环境污染和破坏, 主要包括资源耗竭、环境污染、生态平衡等三个方面.

(1) 资源耗竭计算方法. 资源耗竭损失, 主要

收稿日期: 2016-06-08; 修订日期: 2016-08-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379191, 51509223); 国家博士后面上基金资助项目(2015M572116)

通信作者: 吴泽宁(1963—), 男, 河南光山人, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事水资源系统优化规划与管理, E-mail: zeningwu@zzu.edu.cn.

计算农业生产中投入而未被利用的自然资源及工业辅助能的流失价值,包括农业用水、化肥、农药和农膜等,以及农业生产活动耦合作用造成的水土流失.即表达式(1):

$$L_r = \sum_i^n r_i(1 - u_i) + r_{sw} \cdot \tau_{sw}. \quad (1)$$

式中: L_r 为资源耗竭损失, sej; r_i 为农业生态系统投入的第 i 种资源能值, sej; u_i 为第 i 种资源的利用率, %; n 为资源种类数; r_{sw} 为水土流失量, kg; τ_{sw} 为流失水土的太阳能值转换率, sej/kg. 农业用水利用系数取 52%^[6]; 氮肥及复合肥的作物利用率取 35%, 磷肥的作物利用率取 11%^[7], 研究区钾肥投入不足, 认为施用钾肥被充分利用; 农药利用率取 30%^[8]; 农用地膜平均回收率取 58%^[8]; 水土流失会带走氮、磷、钾等大量养分, 流失水土的太阳能值转换率取 1.71×10^{12} sej/kg^[3]. 根据郑州市农业生产情况, 化肥的环境污染损失为 2.65×10^{11} sej/kg; 根据单位畜产品能值产生污水量的数量关系^[2], 估算得到研究区养殖污水量, 结合水污染损失能值转换率 7.49×10^{12} sej/m³^[9], 计算养殖污水造成的生态环境损失.

(2) 环境污染计算方法. 环境污染损失, 主要计算种植业中化肥导致的水体、土壤、大气污染和畜牧业中养殖污水造成的环境损失. 即表达式(2):

$$L_e = q_f \cdot l_f + q_w \cdot \tau_w. \quad (2)$$

式中: L_e 为环境污染损失, sej; q_f 为化肥施用量, kg; l_f 为单位化肥施用的环境成本, sej/kg; q_w 为畜牧业排放污水量, m³; τ_w 水污染损失能值转换率, sej/m³.

(3) 生态失衡计算方法. 生态失衡损失, 主要计算生物多样性减少损失和人体健康影响. 此处只考虑生物多样性的减少损失, 以人类取用水资源造成野生动物能值损失进行简化计算, 即

$$L_b = w_s \cdot l_s + w_g \cdot l_g. \quad (3)$$

式中: L_b 为生态失衡损失, sej; w_s 为地表水化学能, J; l_s 为取用单位地表水的野生动物损失能值, sej/J; w_g 为地下水化学能, J; l_g 为取用单位地下水的野生动物损失能值, sej/J. 笔者参考美国佛罗里达大学环境政策中心的相关研究成果^[10], 取用地表水会造成野生动物能值损失 1.12×10^5 sej/J, 取用地下水会造成野生动物能值损失 2.55×10^5 sej/J.

总的农业生态环境损失 L 可表示为:

$$L = L_r + L_e + L_b. \quad (4)$$

1.2.3 基于生态环境损失的农业生态系统能值评价

建立基于生态环境损失的农业生态系统能值评价模型, 计算公式为:

$$EYR_L = \frac{Em_Y - L}{Em_F}. \quad (5)$$

$$ESI_L = \frac{EYR_L}{ELR}. \quad (6)$$

式中: EYR_L 为考虑农业生态环境损失的能值产出率; Em_Y 为系统产出能值; Em_F 为系统反馈能值. 净能值产出率 (EYR), 是衡量系统生产效率的主要指标, EYR 值越大, 表明系统生产效率越高.

式(6)中, ESI_L 为考虑农业生态环境损失的可持续发展指数; ELR 为环境负载率. 可持续发展指数 (ESI), 是考察系统可持续性的能值指标, $ESI < 1$ 意味着系统长期不可持续; $1 \leq ESI < 10$ 表明系统富有活力和发展潜力; $ESI \geq 10$ 说明系统经济不发达^[8].

2 结果与分析

2.1 郑州市农业生态系统能值分析

按照能值分析的概念及步骤^[5], 编制郑州市农业生态系统能值投入产出表见表1, 对其进行投入和产出及结构分析.

2.1.1 能值投入分析

由表1可知, 2000~2009年郑州市农业生态系统总能值投入平均值为 78.90×10^{20} sej, 其中可更新环境资源、不可更新环境资源、不可更新工业辅助能、可更新有机能的能值投入比例依次为 11.81%、11.50%、58.34% 和 18.35%. 可见, 郑州市农业生产主要依靠大规模的不可更新工业辅助能投入. 环境能值中, 可更新资源为太阳能、风能、雨水和地球旋转能, 可更新资源的能值比例从 13.71% 波动下降到 8.69% 左右, 这是由于近年来现代农业技术的推广致使农业用水呈逐年减少的趋势造成的. 但地下水能值占农业用水能值的 71.01%, 加剧了地下水水位下降; 同时, 研究区渠系防渗较差, 平均灌溉水利用系数仅为 0.52^[11]. 不可更新资源为表土层损失, 占总能值投入比例在 10.67%~11.95% 之间, 略微有所增加, 总体变化不大, 与郑州市长期重视耕地保护密切相关, 耕地占补平衡为系统的可持续发展提供了稳定的物质基础支持.

表1 郑州市农业生态系统能值投入产出

项目	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	10年平均
能值投入	76.01	76.71	79.98	79.74	80.79	79.98	79.24	79.73	77.44	79.37	78.90
可更新资源	10.42	9.36	10.78	10.75	10.47	9.6	8.9	7.91	6.73	8.25	9.32
有效降水	1.59	1.10	1.49	2.04	1.65	1.62	1.43	1.12	1.24	1.34	1.46
地表水	1.80	2.05	1.47	1.43	1.00	1.01	0.97	0.88	0.79	0.99	1.24
地下水	7.03	6.21	7.82	7.28	7.82	6.97	6.49	5.90	4.70	5.93	6.61
不可更新资源	8.23	8.18	9.38	9.3	9.29	9.29	9.3	9.29	9.26	9.24	9.08
不可更新工业辅助能	40.59	42.84	43.94	44.79	45.3	45.87	46.11	49.64	50.3	50.95	46.03
电力	16.09	17.49	18.12	18.43	18.59	19.04	18.75	21.60	22.01	22.71	19.28
机械	9.71	9.75	10.19	10.92	11.10	11.21	11.42	11.65	12.25	12.25	11.05
柴油	1.58	1.74	1.58	1.75	1.72	1.81	1.86	1.88	1.91	1.91	1.78
氮肥	4.12	4.08	4.06	3.88	3.90	3.81	3.87	3.82	3.73	3.75	3.90
磷肥	7.20	7.80	7.96	7.69	7.68	7.58	7.71	8.01	7.73	7.62	7.70
钾肥	0.33	0.35	0.37	0.35	0.34	0.32	0.33	0.34	0.34	0.34	0.34
复合肥	1.49	1.55	1.57	1.70	1.88	2.01	2.08	2.25	2.26	2.28	1.91
农药	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06
农膜	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
可更新有机能	16.77	16.33	15.88	14.9	15.73	15.22	14.94	12.9	11.15	10.95	14.48
能值产出(Em_v)	107.85	117.03	126.07	141.43	158.96	159.56	210.93	217.2	240.3	259.13	173.85
种植业产品	44.38	46.01	45.59	46.36	47.45	49.29	50.26	50.49	50.79	53.03	48.36
林产品	0.41	0.41	0.71	0.1	0.09	0.1	0.11	0.03	0.06	0.05	0.21
畜产品	58.57	64.54	73.1	88.2	104.01	100.89	149.52	153.98	175.19	191.56	115.96
渔产品	4.49	6.07	6.67	6.77	7.41	9.29	11.04	12.7	14.25	14.49	9.32

2000~2009年,不可更新辅助能值投入比例在74.79%~79.36%,为郑州市农业生态系统的主要输入能值,说明来自于社会经济系统的投入有所增加.其中,电力和机械比重较大,属于高品质能值投入,伴随着农业科技的发展,依托自然环境资源,结合大量以石化能源为原料的化肥、农药、农膜等社会经济资源的使用,促使农业生产获得高产量,同时也加剧了能源危机和对自然生态环境的破坏.2007年,郑州市耕地每公顷化肥施用量高达688.83 kg/hm²,比国际公认225 kg/hm²的环境安全上限^[2]的3倍还多,作物利用率较低,造成化肥养分大量流失和环境污染.而且,氮磷钾施用比例1:0.54:0.23,与世界平均水平1:0.5:0.48^[11]相比,钾肥投入明显不足,养分投入比例不平衡,影响作物产量.农药和农膜能值投入比重尽管只有0.17%,但在土壤中残留率较高,破坏土壤结构影响作物生长.可更新有机能主要是人力、畜力、有机肥和种子种苗,人力在可更新有机能中的平均比例为59.01%,为下降趋势,说明研究区农业现代化水平提高较快.

2.1.2 能值产出分析

郑州市农业生态系统能值产出见表1,2000~

2009年郑州市农业生态系统能值总产出为173.85×10²⁰ sej,其中种植业、林业、牧业、渔业产品能值所占比重依次为27.82%、0.12%、66.70%、5.36%.可见,畜牧产品能值在总能值产出中占了一半以上,在农业产业结构中占主导地位,且呈逐年上升趋势.种植业产品能值在总能值产出中位居第二,但呈逐年下降趋势.畜产品能值产出高于种植业产品能值产出,表明人们对肉类、蛋类产品需求较大,生活水平得到提高.渔产品在能值产出中所占比重较小,这是由郑州市天然水资源条件决定的.林产品在能值产出中所占比重极小,和郑州市保护森林的生态环保政策、严禁砍伐林木密切相关.

2.2 郑州市农业生态环境损失分析

根据农业生态环境损失分类及计算方法,计算出2000~2009年郑州市平均农业生态环境损失,见图1.由图1可知,郑州市近10年农业生产造成的生态环境能值损失整体上呈下降趋势,主要原因是随着农业科技水平的提高,部分农业资源能值投入降低、利用水平提高.其中,资源耗竭能值损失在农业生态环境损失中的比例最大,生物多样性和环境污染次之.2000~2009年郑州市

平均农业生态环境损失与平均能值产出比例约为 14.04%,与国内外已有研究认为农业外部性成本占农业收入的 6%~30%的结论基本吻合^[12]。

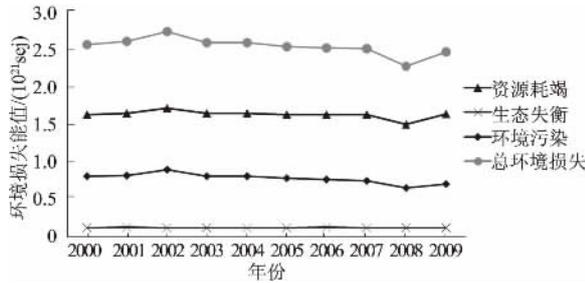


图 1 2000~2009 年郑州市农业生态环境能值损失
Fig. 1 Emery loss of agricultural ecological environment in Zhengzhou from 2000 to 2009

2.3 基于生态环境损失的郑州市农业生态系统能值评价指标比较分析

农业生产造成的生态环境损失应计入系统能

值产出之中,即“系统产出”扣减“环境成本”后才是系统真实的能值产出. 计算 2000~2009 年郑州市农业生态系统净能值产出率和可持续发展指数,结果见表 3. 根据表 2 计算,近 10 年郑州市农业生态系统净能值产出率 (EYR) 提高了 122.72%,说明系统生产效率显著提高;可持续发展指数 (ESI) 大致呈波动增加趋势,说明系统可持续性有所增强. 考虑生态环境损失后,净能值产出率 (EYR_L) 和可持续发展指数 (ESI_L) 均比传统能值分析中该指标值有明显下降,近 10 年分别平均下降 15.47%. 其中,可持续发展指数在 2000~2003 年小于可持续临界点 1,说明农业生态环境损失对系统生产效率和可持续性影响显著. 由此可见,采用传统能值分析法,对系统生产过程中的资源及其利用耦合作用分析不够深入,对系统能值产出考虑不够周全.

表 2 郑州市农业生态系统能值评价指标

Tab. 2 Emery indices of of Zhengzhou agricultural ecosystem

能值指标		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	10 年平均
净能值产出率	EYR	1.88	1.98	2.11	2.37	2.60	2.61	3.46	3.47	3.91	4.19	2.86
	EYR _L	1.45	1.55	1.66	1.95	2.19	2.22	3.06	3.09	3.56	3.81	2.45
环境负载率	ELR	1.80	1.99	2.00	2.11	2.08	2.22	2.33	2.83	3.33	3.14	2.38
可持续发展指数	ESI	1.05	1.00	1.05	1.12	1.25	1.18	1.49	1.23	1.17	1.33	1.19
	ESI _L	0.81	0.78	0.83	0.92	1.05	1.00	1.32	1.09	1.07	1.22	1.01

3 结束语

针对目前农业生态系统能值分析中缺乏生态环境损失研究的问题,本文将生态环境损失纳入农业生态系统能值产出,进而考察系统生产效率及状态,旨在提出一种农业生产的生态经济评价思路. 笔者仅考虑了农业用水、化肥、农药、农膜等对农业生态系统能值产出的影响,计算结果表明,笔者提出的基于生态环境损失的农业生态系统能值分析方法具有一定的可行性;同时,郑州市今后农业生产应减少不可更新资源的投入并提高利用效率,充分利用好可更新资源. 但是,笔者对于其他因素未作过多研究,引用数据未必十分精确,难免会使研究结果有一定的误差,仍需要进一步深入研究,以期为农业生产的能值投入和产出分析的合理性提供依据,为农业生产活动调整提供决策参考.

参考文献:

[1] 翟胜,王巨媛,张二勋,等. 农业生态系统可持续性

评价研究 [J]. 地域研究与开发, 2010, 29 (1) : 124 - 129.
 [2] 范小杉,高吉喜. 中国农业生态经济系统能值利用现状及其演变态势 [J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24 (7) : 1 - 9.
 [3] 赵桂慎,姜浩如,吴文良. 高产粮区农田生态系统可持续性的能值分析 [J]. 农业工程学报, 2011, 27 (8) : 318 - 323.
 [4] ZHU Y, ZHOU J, LI S. Analysis on the emery structure and ecoefficiency of the agricultural ecoeconomic system in Hunan [J]. Energy Procedia, 2011 (5) : 1597 - 1602.
 [5] 蓝盛芳,钦佩,陆宏芳. 生态经济系统能值分析 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 366 - 386.
 [6] 雷宏军,刘鑫,徐建新. 郑州市水资源可持续利用的模糊综合评价 [J]. 灌溉排水学报, 2008, 27 (2) : 77 - 81.
 [7] 赖力,黄贤金,王辉,等. 中国化肥施用的环境成本估算 [J]. 土壤学报, 2009, 46 (1) : 63 - 69.
 [8] 杨曙辉,宋天庆,陈怀军,等. 现代农业生产方式与技术体系对生态环境的影响 [J]. 农业环境与发展, 2010 (1) : 1 - 7.

- [9] 吕翠美. 区域水资源生态经济价值的能值研究 [D]. 郑州: 郑州大学水利与环境学院, 2009: 117-118.
- [10] Center for Environmental Policy. Lecture10-emergy evaluation of environmental alternatives [EB/OL]. <http://www.emergysystems.org/lectures.php>, 2011-09-28/2012-04-10.
- [11] 石元亮, 王玲莉, 刘世彬, 等. 中国化学肥料发展及其对农业的作用 [J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 852-864.
- [12] FARE R, GROSSKOPF S, WEBER W L. Shadow prices and pollution costs in U. S. agriculture [J]. Ecological economics, 2006, 56(1): 89-103.

Emergy Analysis of Agricultural Ecosystem Based on Ecological Environment Loss

WANG Huiliang, WU Zening, GUO Xi, GUO Ruili

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

Abstract: Emergy analysis of agriculture ecosystem was a hot topic of academic group nowadays. Concerned with the loss of ecological environment, an improved emergy analysis of agriculture ecosystem was proposed based on the calculation of agriculture ecological environment loss. Taking Zhengzhou as the example, this paper discussed how to apply it to practice. The results showed that the average ecological environmental loss of Zhengzhou from 2000 to 2009 was 2.44×10^{21} sej, accounting for 15.47% of economic emergy out of agriculture ecosystem. The method was rational for its conclusion was in agreement with the domestic and international research results, the proportion of agricultural externality to agricultural income was 6% ~ 30%. Given the agriculture ecological environment loss subtracted from economic emergy output, the average Net emergy yield ratio EYR_L fallen from 2.86 to 2.45, and the average emergy sustainable indices ESI_L from 1.19 to 1.01, indicating that the influence of ecological environmental loss on eco-efficiency and performance of system was significant.

Key words: ecological environmental loss; agriculture ecosystem; emergy analysis; Zhengzhou

(上接第 86 页)

Tensor-Based Semi-Blind Channel Estimation Method for Three-Hop MIMO Relay Systems

MU Xiaomin, LIU Yue, LI Shuangzhi, ZHANG Jiankang

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

Abstract: A novel semi-blind channel estimation was devised to jointly estimate the channel matrices of all links in a three-hop multiple-input multiple-output relay system. A PARAFAC and a PARATUCK2 tensor model of the received signal were constructed, and the proposed algorithm used a two-stage iterative fitting algorithm for tensor model. The ALS algorithm was used to fit the PARAFAC tensor model in the process of estimating the compound channel matrix. Then the TALS algorithm was used to fit the PARATUCK2 tensor model in the process of extracting all the sub-channel matrices. The proposed algorithm could loose the limitation on the number of antennas at the destination node. Moreover, compared with existing methods, the proposed algorithm could avoid error propagation as well as improve the spectral efficiency with few pilots. Numerical examples demonstrated the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: MIMO multi-relay system; Semi-blind channel estimation; tensor decomposition; two-stage iterative algorithm

郑州大学学报(工学版)

第 37 卷

2016 年 11 月

二〇一六年总目次

电气工程

- 基于 ELM 与 Mean Shift 的抗遮挡目标跟踪算法 毛晓波, 郝向东, 梁 静(1 - 1)
- 基于行为策略的铝电解建模控制研究 陈铁军, 黄 超, 张 瑾(1 - 6)
- 一种基于 HHT 的短期电价组合预测方法 廖晓辉, 周 冰, 杨冬强, 武 杰(1 - 10)
- 三电平有源电力滤波器的非奇异终端滑模电流跟踪控制 王 杰, 何向东, 彭金柱(1 - 15)
- 基于发育网络的复杂背景下人脸识别 王东署, 郑光璞(1 - 19)
- 电网规划的多层面协调性的综合评估方法研究 徐 敏, 沈靖蕾, 闫震山(1 - 24)
- 基于 LMD 法的电力系统暂态扰动检测技术研究 韩剑鹏, 鲁改凤, 曹文思(1 - 29)
- 多目标进化算法及其在电力环境经济调度中的应用综述
..... 肖俊明, 周 谦, 瞿博阳, 韦学辉(2 - 1)
- 并联式支路光伏发电系统的研究与仿真 许 天, 陈小强(2 - 25)
- 基于 FPGA 的电能质量监测装置设计 江 政, 周 勇, 陈雪美, 吕娜伟(2 - 29)
- 永磁直驱风力发电系统最大风能捕获滑模控制 刘艳红, 赵景隆(4 - 1)
- 振动对 TBM 液压泵泵轴受力及疲劳寿命影响分析 杨忠炯, 董 栋(4 - 6)
- 电气化铁路单三相组合式变压器电气特性分析 夏焰坤(4 - 11)
- 基于改进蚁群算法的专用输电工程电气设备优化选型 江岳文, 钱佳琦(4 - 15)
- 考虑土壤电离的接地装置冲击特性分析 李景丽, 郭丽莹, 武东亚, 王磊磊, 李渊博(4 - 20)
- 混沌调制技术降低无线充电系统 EMI 水平研究 高金峰, 余 亚, 张旭辉, 司丞坤(5 - 62)
- 低碳型 35 kV GIS 的气室电场强度计算及结构优化 程 显, 王海燕, 闫广超, 焦连曜(5 - 67)

化工与材料工程

- 石墨填充聚四氟乙烯复合材料的拉伸试验研究
..... 靳遵龙, 郭月明, 李 赵, 王定标, 王永庆(1 - 84)

II

- 均匀化退火对纯铝系负极箔坯料显微组织的影响····· 赵红亮, 吴迪, 翁康荣, 胡冠奇(2-42)
- 中间退火工艺对 AA5052 铝合金板成形性能的影响····· 卢广玺, 周崇, 关绍康, 辛潇洋(2-46)
- PSN-PZT 陶瓷及其在加速度传感器中的应用研究····· 詹自力, 李亚丰, 陈翔宇, 陈克城(2-50)
- 静电纺丝法制备钇掺杂的 ZnO 及其对丙酮的气敏特性研究·····
····· 冯秋霞, 于鹏, 王兢, 李晓干(2-54)
- 基于物联网的声表面波传感器阵列检测系统研究·····
····· 刘鑫璐, 王文, 潘勇, 邵晟宇, 穆宁(2-58)
- 有机朗肯循环系统的实验研究和性能分析·····
····· 魏新利, 李明辉, 马新灵, 侯中兰, 孟祥睿, 闫艳伟(2-73)
- 基于质子传导机理的四氮唑分子间氢键研究····· 李惠萍, 于秀丽, 高鹏杰, 毛楨东(3-27)
- SAPO-56 分子筛的晶化区研究····· 詹予忠, 董贺新, 董佳佳, 宋孟璐, 韩丽(3-32)
- 草乌多糖金属配合物的制备、表征与抗癌活性研究·····
····· 张茜, 芮瑞, 李佩佩, 冯翠宁, 雷强, 龙跃(3-36)
- 基于微加热器平台的高性能甲烷传感器····· 郭联峰, 许宗珂, 段国韬, 李铁(3-40)
- 基于 COMSOL Multiphysics 的静电纺丝电场分析····· 刘正华, 王兢, 杜海英(3-44)
- 铜掺杂氧化锡的制备及其气敏性能研究····· 胡骏, 葛美英, 尹桂林, 杨帆, 何丹农(3-48)
- 氧化锌一维纳米棒的低温制备及其气敏性能····· 樊慧庆, 马龙涛, 黄丽梅(3-52)
- 铁锡复合氧化物催化合成 ϵ -己内酯····· 章亚东, 马永丽, 马金玲, 赵岩岩, 贾金峰(4-26)
- $Al_2(SO_4)_3$ 催化纤维素生成乙酰丙酸乙酯的实验研究····· 常春, 孔鹏飞, 赵世强(4-31)
- 基于聚酰胺树枝状分子的 QCM 甲醛传感器研究····· 陈杨, 李志鑫, 段智明, 徐甲强(4-36)
- 稳定性铅镁白云石合成材料的制备、结构和性能研究·····
····· 孟维, 马成良, 葛铁柱, 赵飞, 钟香崇(4-40)
- 利用废弃硒鼓墨粉制备 $\gamma-Fe_2O_3$ 气敏材料····· 章雨勤, 程知萱, 张源, 胡鹏飞, 徐甲强(4-44)
- 石墨烯-氧化钛复合氨敏感材料的制备与特性研究·····
····· 叶宗标, 郑伟健, 太惠玲, 谢光忠, 蒋亚东(4-49)
- 车载甲烷巡检仪的光路优化设计与系统实现·····
····· 李志刚, 陈海永, 詹自力, 王书潜, 郑国锋(4-53)
- 沥青混合料动态响应的试验条件影响及其主曲线研究·····
····· 栗培龙, 饶文宇, 冯振刚, 李建阁(5-1)

- 干湿循环作用下盐分对桥墩混凝土耐久性影响实验研究 孙增智, 田俊壮, 杨 凯, 张 雷, 陈华鑫(5 - 6)
- 镧掺杂 AlPO_4 -5 沸石的合成及湿敏性能研究 王炉煜, 祝 焯, 高利苹, 徐甲强(5 - 12)
- 用于 UV 树脂改性的可溶性聚酰亚胺的制备工艺 石晓华, 颜少鸽, 张炜婕(5 - 17)
- 盆景状 ZnO 的制备及气敏性能研究 张永辉, 刘春彦, 刘焕楨, 巩飞龙, 李 峰(5 - 23)
- 高速逆流色谱法分离红色西瓜瓤粗提物中番茄红素 阮宝玉, 赵文恩(5 - 43)
- 配方及时间对壳聚糖/聚乙烯醇复合纤维形态的影响 ... 戴品强, 宋来瑞, 崔志香, 王乾廷(6 - 1)
- 基于穴番-A 敏感膜的新型声表面波瓦斯传感器 王 文, 胡浩亮, 何世堂, 潘 勇, 张彩红(6 - 6)
- 水热法合成微纳米 CuO 及在气体传感器中的应用 胡校兵, 谢祯芳, 谢 骥, 解丽丽, 朱志刚(6 - 10)
- 基于 Bruggerman 理论的双金属合金光学特性研究 范春珍, 臧华平, 牧凯军(6 - 15)
- 乙二醇-1,4-丁二醇-二乙二醇三元物系气液平衡研究 陈卫航, 李怡恩, 张 婕, 蒋元力, 王训道(6 - 19)
- 微注射成型 HDPE 制品的结构和力学性能 ... 石素宇, 王利娜, 许文仲, 郑国强, 申长雨(6 - 24)

信息工程

- 基于因子图的 MIMO-OFDM 时变信道估计 陈恩庆, 肖素珍(1 - 87)
- LIDAR 点云数据全自动滤波算法研究 李 健, 方宏远, 崔雅博, 范 涛(1 - 92)
- 基于 Delta 算子时变时延网络控制系统的 H_∞ 滤波 张端金, 刘 雪, 范 鑫(2 - 10)
- 不确定 T-S 模糊系统的跟踪控制器设计 张恒艳, 高中文, 李文龙, 宋伟伟, 黄 玲(2 - 15)
- 极限学习机优化及其拟合性分析 王 杰, 裘群康, 彭金柱(2 - 20)
- WSN 中基于梯度和粒子群优化算法的分级簇算法 阎新芳, 严晶晶, 冯 岩(2 - 33)
- 基于投票极限学习机的人脸识别混合算法研究 陈铁军, 蔡金收, 郭 丽(2 - 37)
- 一种基于合约的认知网络协作频谱共享策略 穆晓敏, 师光强, 刘 颖, 杨守义(3 - 1)
- 基于双缓冲队列的海量地形数据并行处理方法 陈小潘, 渠润涛, 赵亚萌, 王 鹏, 陈玉林(3 - 6)
- 基于自适应 Mel 滤波器组的 MFCC 特征提取的 SOC 设计 陶佰睿, 郭 琴, 苗凤娟, 李青龙(3 - 11)

- 基于 WordNet 的本体查询方法研究····· 陈淑鑫, 张凌宇(3 - 16)
- 基于压缩特征的稀疏表示运动目标跟踪····· 张红梅, 温荟然, 张向利, 李鹏飞(3 - 21)
- 电镀电源双环控制系统设计····· 刘 平, 徐 瀚, 臧甲杰, 陈睿科(4 - 86)
- 雾霾污染下基于混沌性的图像去雾算法改进····· 睢 丹, 张亚利, 杨 杰(4 - 91)
- 基于 Spark 的并行极速神经网络····· 邓万宇, 李 力, 牛慧娟(5 - 47)
- OFDMA 系统多业务频谱切换策略的 CPN 建模及性能评价·····
····· 陆彦辉, 李兆平, 韩书君, 杨守义(5 - 57)
- 基于稀疏超完备的异常行为检测算法····· 逯 鹏, 张利亚, 黄石磊, 李奇航, 张 微(6 - 72)
- 基于物体表面正射投影的悬崖点云植被过滤方法·····
····· 李彩林, 陈文贺, 王江妹, 田鹏艳, 姚吉利(6 - 77)
- 基于张量分解的 MIMO 多中继系统半盲信道估计方法·····
····· 穆晓敏, 刘 越, 李双志, 张建康(6 - 83)
- 一种新的基于 HMIPv6 的车载网络移动协议仿真研究····· 刘书如, 张启坤, 甘 勇(6 - 87)

机械工程

- TBM 盘形滚刀破岩过程的数值研究····· 张银霞, 江志强, 段留洋, 王 栋, 刘治华(1 - 75)
- QT280 拖挂式牵引机牵引轮结构分析与优化····· 刘竹丽, 周 浩, 侯东红(1 - 79)
- 大型箱体零件结构拓扑优化设计研究····· 秦东晨, 杜 鹏(2 - 82)
- 卫星岛式内嵌双环形交叉口概念设计····· 郑元勋, 李 桐(2 - 87)
- 基于虚拟现实技术的十字轴锻造过程仿真····· 王 栋, 张晓晴(3 - 74)
- 全矢支持向量回归频谱预测方法····· 李凌均, 陈 超, 韩 捷, 陈 宏(3 - 78)
- 基于 LMS 的怠速状态方向盘振动试验研究····· 王若平, 黄 杰(3 - 83)
- 针-网式离子风发生器的散热研究····· 王 静, 蔡忆昔, 包伟伟, 李慧霞(3 - 88)
- 基于压电阻抗技术的铝梁损伤定位试验研究····· 李 成, 陈功轩, 铁 瑛, 牛冬冬(4 - 82)
- 基于 MATLAB 的汽车线性最优控制主动悬架仿真研究·····
····· 刘本学, 蔺超云, 郭沛东, 栗良玉(5 - 72)
- 纯电动汽车白车身耐撞性拓扑优化设计方法····· 雷正保, 刘助春, 廖 卓(5 - 77)
- 特殊螺纹套管接头柱面/球面密封结构有限元分析····· 朱 强, 杜 鹏, 王建军, 秦东晨(5 - 82)

- 凹坑型非光滑单元体排列方式对汽车气动阻力影响分析…………… 谢金法, 张靖龙(5 - 86)
- 基于变密度法的清扫车举升油缸支架结构设计与分析…………… 邓亚东, 张 坤, 金德先(6 - 28)
- 一种基于 PVDF 的微型热释电发电机研究…………… 赵江铭, 邱国林, 张海霞(6 - 34)
- 基于 TRIZ/FRT/Fuzzy 的产品创新设计研究与应用 …………… 李景丽, 徐志刚(6 - 38)
- 全矢-ARMA 模型在机械振动强度预测研究的应用……………
…………… 韩 捷, 吴彦召, 陈 磊, 郝旺身, 张钱龙(6 - 43)

土木及交通工程

- 多指标约束下齿轮传动机构模糊可靠性优化设计…………… 胡启国, 谢国宾, 罗天洪, 度 奎(1 - 34)
- 纯电动赛车复合电源动力系统控制研究…………… 贺伊琳, 许世维, 刘 瑞, 谢学飞(1 - 40)
- 最小二乘复指数法在排气管试验模态分析中的应用…………… 曾发林, 许 凯(1 - 45)
- 基于离散-连续耦合方法的土工格室加筋碎石承载能力数值模拟……………
…………… 汪海年, 张 然, 周 俊, 刘 玉, 尤占平(1 - 49)
- 基于有限元法的某 SUV 后部碰撞分析研究…………… 胡雪芳(1 - 54)
- 大跨连续梁桥施工膺架的设计研究…………… 李 宇, 杨 赐, 李 琛, 高 亮, 王 洁(2 - 77)
- SRC 柱-钢梁混合框架抗震性能研究…………… 楚留声, 崔中敏, 张俊峰, 赵 军(3 - 56)
- 基于通行效率最优的交叉口控制方式优选…………… 沈家军, 王 群(3 - 60)
- 基于地基系数法的横向受荷桩通解研究…………… 贺拴海, 贺小卫(3 - 64)
- 钢-砼混合梁斜拉桥的颤抖振时域分析…………… 李 宇, 李 钊, 李 琛(3 - 69)
- 干湿循环条件下水泥改性膨胀土变形和强度试验……………
…………… 王建磊, 王艳巧, 杨广栋, 张扬帆, 姜宏雨(4 - 62)
- 煤直接液化残渣改性沥青及其混合料性能评价……………
…………… 季 节, 王 迪, 石越峰, 徐世法, 索 智(4 - 67)
- 高速铁路斜拉桥与 T 型钢构协作体系车桥耦合振动分析……………
…………… 罗 浩, 郭向荣, 唐俊峰, 岳 健, 刘 泽(4 - 72)
- 高性能灌浆料维修空心板桥铰缝的足尺试验研究…………… 闫卫红, 付立军, 赵 军(4 - 77)
- 冻融环境下混凝土结构耐久性研究综述…………… 郑元勋, 杨培冰, 康海贵(5 - 27)
- 考虑含筋率影响的弯矩增大系数计算方法…………… 林上顺, 陈宝春(5 - 33)

- 端部质量对有无损伤悬臂梁的模态影响分析…………… 闫安志, 陶天增, 张振华(5 - 39)
- 动水压力对钢桥面环氧沥青铺装裂缝扩展影响…………… 钱振东, 张 勳, 许 静(6 - 48)
- 压实度和干湿循环对豫东粉土土-水特征曲线的影响 …………… 张 涛, 乐金朝, 张俊然(6 - 53)
- 基于数值计算的矩形孔蜂窝梁应力分布规律研究…………… 王 衡, 陈廷国(6 - 58)
- 基于 OpenSees 的高阶非线性桁架单元开发及应用 …………… 张俊峰, 高健利(6 - 63)
- 气候变化对中原地区桥梁碳化寿命影响研究…………… 赵 娟, 李 倍(6 - 68)

水利与环境工程及其他

- 水库蓄水对库岸边坡稳定性的影响…………… 宋丹青, 王 丰, 梅明星, 刘鹏飞(1 - 60)
- 建筑废弃泥浆真空预压方法处理试验研究 …… 魏雁冰, 范明桥, 林生法, 徐 镡, 吴志强(1 - 65)
- 具有硬壳层的涵洞地基极限承载力分析…………… 马 强, 朱 健, 邢文文, 胡 兴(1 - 70)
- 人工冻融软弱土融沉特性研究 …………… 庄惠敏, 杨 平, 何文龙(2 - 62)
- 基于大尺度重组竹试件各向轴压力学性能研究 ……………
…………… 李海涛, 苏靖文, 魏冬冬, 张齐生, 陈 国(2 - 67)
- 基于光栅结构的碲化镉太阳能电池吸收层设计…………… 孙晓红, 张 琳, 李文阳, 郭敏强(2 - 92)
- 折叠变形磁刺激圆形线圈空间磁场分析…………… 张春兰, 逯 迈, 陈小强, 魏孔炳(3 - 92)
- 南水北调中线工程潮河段征迁安置风险分析…………… 李宗坤, 吴赛, 李定斌, 张西辰(4 - 57)
- 变焦相机自标定方法研究…………… 赵书俊, 段绍丽, 张晓芳, 李 磊, 刘晓旻(5 - 91)
- 基于生态环境损失的农业生态系统能值分析…………… 王慧亮, 吴泽宁, 郭 溪, 郭瑞丽(6 - 92)