

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2020.02.020

# 基于物联网技术的地铁机电设备 全寿命周期管理系统

郝勇奇, 王 俊, 朱 彦, 岳 震, 廉树丽

(北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100161)

**摘 要:** 地铁运营设备种类繁多, 其中机电设备在设备管理中占据重要的地位。而物联网技术的发展实现了多领域、多模块、多方向的信息互联共享, 面对各个维度数据交融建立合理的分析管理平台是今后智慧城市智慧地铁的发展趋势。基于郑州地铁运营的设备管理体系, 拓展全景信息支撑平台、状态监视、在线预警、智能诊断、状态评价、风险预测、检修决策以及绩效评估等方向。搭建地铁机电设备的大数据管理系统框架, 通过现有的数据构成利用机器学习算法有效地进行数据挖掘。同时针对全生命周期成本分析、运维检修决策、风险量化评估 3 个方向进行算法模型分析, 从而获取地铁机电设备的相关潜在规律, 为决策层提供更多有价值的信息。

**关键词:** 物联网; 大数据; 地铁; 全寿命周期; 管理系统

中图分类号: U231.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2020)02-0121-06

## Life Cycle Management System of Metro Electromechanical Equipment Based on Internet of Things Technology

HAO Yongqi, WANG Jun, ZHU Yan, YUE Zhen, LIAN Shuli

(Beijing Urban Construction Design &amp; Development Group Co., Ltd., Beijing 100161)

**Abstract:** There are many kinds of metro operation equipment, among which electromechanical equipment occupies an important position in equipment management. With the development of Internet-of-things technology, multidomain, multimodule, multidirectional information interconnection and sharing are realized. Facing the data fusion of various dimensions, establishing a reasonable analysis and management platform is the future development trend of smart city metros. Based on the equipment management system of Zhengzhou Metro operation, this study expands the direction of panoramic information support platforms, status monitoring, online early warning, intelligent diagnosis, status evaluation, risk prediction, maintenance decisions, and performance evaluation. A framework of a large data management system for metro electromechanical equipment was built, and a machine-learning algorithm was used for effective data mining through the existing data structure. At the same time, the algorithm model was analyzed in three directions — life cycle cost analysis, operation and maintenance decision making, and risk quantification evaluation — to obtain a potential law for metro electromechanical equipment and provide more valuable information for decision makers.

**Keywords:** urban rail transit; network planning; revision; early-stage study

随着城镇化的发展, 轨道交通在城市中扮演着不可或缺的角色<sup>[1-3]</sup>。截至 2018 年年末, 中国内地共计 35 个城市开通轨道交通并投入运营, 运营线路长度达

到 5 766.7 km。而为了提升轨道交通运营的效率, 确保机电设备能够高质量投入使用, 地铁机电设备的管理系统也逐步受到运营人员和研究人员的关注。传统城轨的机电设备多为人工式、经验式以及被动式管理, 需要较大的人力成本, 同时过程复杂繁琐, 降低了管理效率以及地铁的服务质量。现阶段大数据以及互联网技术的日益成熟为智能化的管理系统提供了技术支

收稿日期: 2018-12-21 修回日期: 2019-01-17

第一作者: 郝勇奇, 男, 硕士, 从事轨道交通机电设计工作,  
yongqi\_hao@163.com

撑。基于数据融合、数据清洗、数据分析等多线程的操作使得智能化的管理系统能够更科学地进行设备检修维护管理。

虽然现有一些地铁机电设备的相关研究中涉及物联网<sup>[5]</sup>,但其自身数据融合做得欠妥,往往会造成数据孤岛,影响今后整个地铁智能化和智慧城市前进的脚步。相关功能模块研究可以归为全景信息支撑平台、状态监视、在线预警、智能诊断、状态评价、风险预测、检修决策以及绩效评估等。同时基于现有大数据机器学习算法,针对综合的数据进行深度挖掘,避免了地铁设备信息小区域的信息隔离<sup>[6]</sup>,也解决了物联网监视系统缺乏数据分析和相关成果的问题<sup>[7]</sup>。

基于上述存在的问题,笔者搭建地铁机电设备的大数据管理系统框架,通过现有的数据构成,利用机器学习算法有效地进行数据挖掘,从而获取地铁机电设备的相关潜在规律,为决策层提供更多有价值的信息。

## 1 全寿命周期管理

### 1.1 管理平台框架

地铁机电设备全寿命周期管理平台利用现有的物联网技术实现了数据汇集。通过大数据融合和数据挖掘的机器学习算法,为系统提供了形象、全面、直观的指标展示、预警、分析等手段,服务于轨道公司高层决策管理和生产管理的关键岗位<sup>[8-10]</sup>。图1所示为该平台的模型框架,框架底层的数据源的支撑来自于

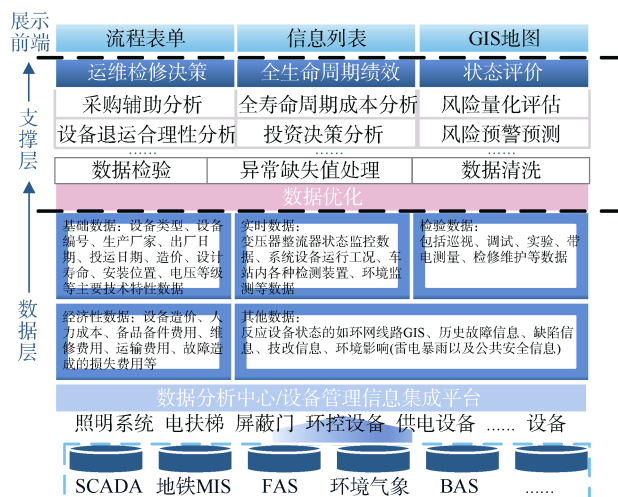


图1 地铁机电设备全寿命周期管理平台框架

Fig. 1 Life cycle management platform framework for metro electromechanical equipment

列车自动控制(automatic train control, ATC)、数据采集与监视控制系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)、电力自动化系统(electrical monitoring and control system, EMCS)、火灾报警系统(fire alarm system, FAS)、相关气象预警等多个专业建网的数据流。将相应数据对应不同设备汇总至数据分析平台,在数据层中把数据大致分为5大类别便于进行相关的数据挖掘。而数据层到支撑层则需要对数据进行相关的预处理,如消缺、检验、剔除等操作,优化后的数据则通过相关功能模块进行分析。最后机器学习算法分析出的相关结论则由前端展示,可通过列表、区域GIS线路地图等方式体现。图2所示为数据优化后的管理系统Web前端,管理平台可通过选择不同线路的不同车站查看不同专业设备的信息,也可通过建立云平台,利用手持终端实现实时的信息互动。



图2 地铁机电设备数据融合GIS可视化

Fig. 2 Metro mechanical and electrical equipment data fusion geographic information system visualization

为进一步细化该平台功能模块,分别从全生命周期成本分析、运维检修决策、风险量化评估3个方面展开,并针对数据源进行相关算法附着,最后提取有价值的信息结论。

### 1.2 全生命周期成本分析算法流程

随着城轨事业的发展,相应设备投资在建设发展中的地位也愈加重要。全生命周期成本分析从宏观角度分析地铁机电设备在整个生命周期所耗费的成本,避免了企业因忽略中后期投资而带来不必要的损失<sup>[11-14]</sup>。同时全生命周期成本在设备采购以及设备资产管理中可以提供对应综合效益最优的决策辅助。全生命周期管理解决了设备全生命运维无法直接与经济性数据挂钩的问题(如人力消耗及时间成本消耗),提供了具有一定参考价值的成本分析;同时解决了设备检修决策

的智能辅助问题, 提供决策的大数据分析参考。

利用大数据平台构建全生命周期成本具有全系统、全费用、全过程的特点, 在数据分析中有效地规避了传统计算过程中异常及缺失值造成的影响。将不同设备计算所得全生命周期成本(life cycle cost, LCC)规格化后, 利用 K-means 聚类分析可以获得不同设备类型在不同阶段所投入的资产比例(供决策层调整侧重资产投入方向), 同时获取与厂商相关的信息, 也为采购部门提供决策辅助, 最后按地区将 LCC 排序, 可以由管理中心清晰获取不同线路、不同专业相关设备

在整个生命周期中所需的投资。

地铁机电设备的 LCC 包括从设备购置、安装、运行、检修、改造直至报废全过程所发生的费用。主要包括机电的初始投资成本(IC)、运行成本(OC)、检修维护成本(MC)、故障成本(FC)和退役处置成本(DC)。如图 3 所示, 针对地铁机电设备细化了不同生命段的成本构成。

$$LCC = IC + OC + MC + FC + DC \quad (1)$$

式中: IC、OC、MC、FC 和 DC 分别对应地铁机电设备的投资、运行、维护、故障和废弃造成的成本。

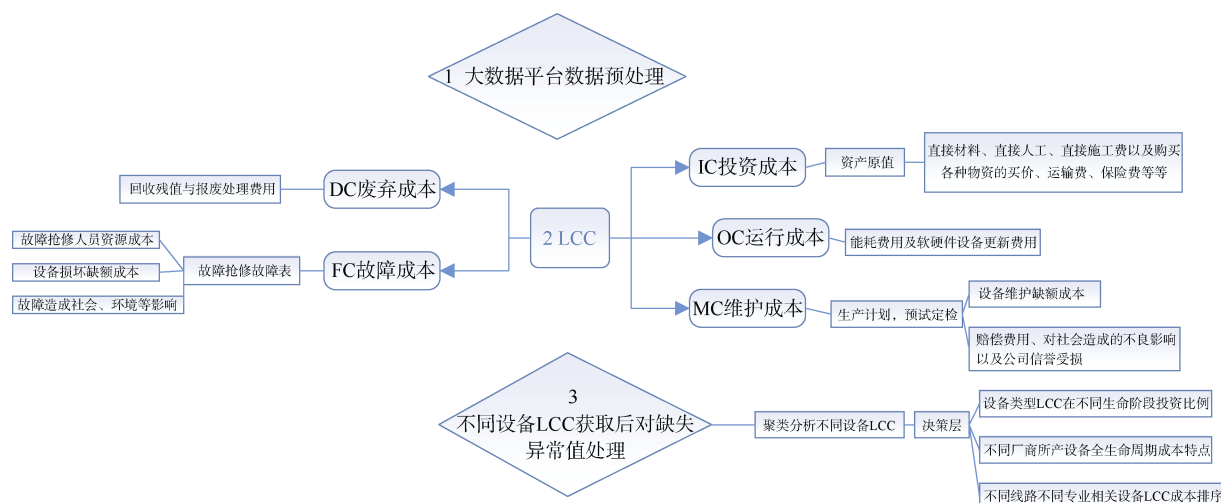


图 3 全生命周期成本分析算法流程

Fig. 3 Life cycle cost analysis algorithm flow

## 2 运维检修决策

### 2.1 数据融合及算法流程

由于智能化管理平台相对独立, 地铁机电设备的管理存在信息孤岛, 同时数据多维, 传统信息系统难以满足高效分析的要求。利用大数据技术手段统筹不同信息数据, 从全维度上提供机电设备的运维决策方案。

如图 4 所示, 首先将设备相关的数据进行融合预处理, 提取故障的设备数据故障表及相关数据, 利用 FC 故障成本计算方式计算该设备货币化的风险值。提取故障表中的设备数据, 利用大数据 C5.0/ RoughSets (粗糙集) 算法以货币化的风险值作为目标获取能够在线衡量不同设备风险值的模型<sup>[15-19]</sup>。该量化模型中的状态检测也是重要的构成部分, 需要有效的偏差及严重程度度的量化体现。

在运维检修决策中根据风险量化值排序提取风险

值靠前的设备组, 然后在该组中由专家根据经验对设备的状态、设备寿命以及运维检修进行评分, 评分靠前的则提升检修优先级, 最后由约束条件来进一步调整运维检修策略。

根据 C5.0 可以获得影响不同设备风险值的决策树, 根据树的节点可以看出使得设备风险值增加的影响因素, 为进一步运维检修提供参考。在大数据的关联性分析过程中, 可在风险的量化评估模块中将故障案例进行综合, 利用 Apriori 算法关联分析可以获得频繁集, 关联规则的支持度可以表示不同集合间的关联互联程度<sup>[20-21]</sup>, 从而获取影响设备故障的相关频繁集, 也可以看出使得设备风险值增加的影响因素。

### 2.2 状态评价量化

在状态监测中可根据实时状态量的偏差程度和严重程度反映设备的状态评价, 其中状态量的差异性评判设备状态的重要依据。设  $n(n \geq 5)$  次测量中, 若某个状态量  $X$  的当前试验值的平均值为  $\bar{x}$ , 样本标准差

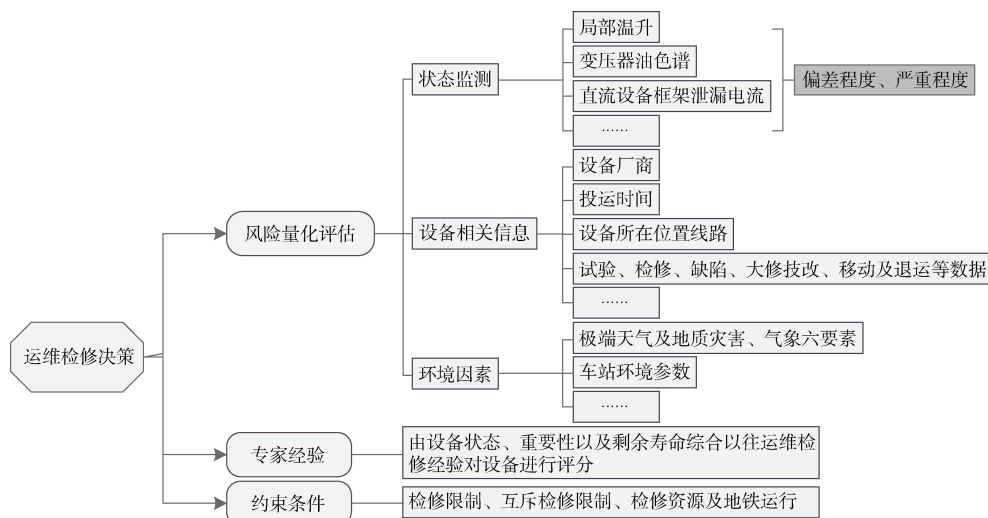


图4 运维检修决策模型框架

Fig. 4 Framework of operation maintenance decision-making model

为  $S$ ；被评估设备的当前试验值为  $\theta_x$ ，对于偏差性劣化状态参量，差异性劣化度为

$$d_c(\theta_x) = \begin{cases} 0 & |\theta_x - \bar{x}| \leq mS \\ \left( \frac{|\theta_x - \bar{x}|}{rS - mS} \right)^k & mS < |\theta_x - \bar{x}| < rS \\ 1 & |\theta_x - \bar{x}| \geq rS \end{cases} \quad (2)$$

式中， $m$  值根据  $n$  的大小选取，见表 1。

表 1 状态量偏差程度评价参数选取

Tab. 1 Selection of evaluation parameters for deviation degree of state quantity

| $n$       | $m$  | $r$  |
|-----------|------|------|
| 5         | 2.02 | 3.36 |
| 6         | 1.94 | 3.14 |
| 7         | 1.89 | 3    |
| 8         | 1.85 | 2.9  |
| 9         | 1.83 | 2.82 |
| 10        | 1.81 | 2.76 |
| 11        | 1.79 | 2.72 |
| 13        | 1.77 | 2.65 |
| 15        | 1.75 | 2.6  |
| 20        | 1.72 | 2.53 |
| 25        | 1.71 | 2.49 |
| 35        | 1.69 | 2.44 |
| $\geq 45$ | 1.68 | 2.41 |

在基于故障模式的状态评估指标的基础上，结合单状态量的严重程度评估结果，一个故障模式  $m$  的危急度  $C_m$  可以由与其相关的  $n$  个单状态量表征其发生的概率综合，即

$$C_m = \sum_{i=1}^n c_i - \sum_{1 \leq i < j \leq n} c_i c_j + \sum_{1 \leq i < j < k \leq n} c_i c_j c_k + \cdots + (-1)^{n-1} c_1 c_2 c_3 \cdots c_n \quad (3)$$

式中： $c_i$  为单状态量； $i$  表征严重程度。

若设备某部件发生任何一种故障模式，则该部件就处于故障状态，同一部件的各故障模式间存在串联关系，从而可得部件  $i$  严重程度与各故障模式严重程度间的关系

$$c_{c_i} = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - c_i) \quad (4)$$

式中： $c_{c_i}$  为部件  $i$  的危机程度， $c_i$  为该部件共  $n$  个故障模式中的第  $j$  个故障模式的严重程度，若假设同一部件的各故障模式  $K$  相同，从而可将  $R_{c_i}$  记为  $R_{c_i}(K)$ 。

### 3 采购辅助与设备投退运合理性分析

#### 3.1 基于 AHP 框架的采购辅助模型

随着城市轨道交通的发展，相关机电设备的采购问题也尤为突出。在采购的过程中既要包含管理层的主观目的性，也要对选择承担一定的风险，既要考虑设备的经济性也要考虑设备的可靠性。为此利用大数据从多个角度构建科学的采购评价体系尤为重要。

对每款设备在不同年份、不同地域、不同污染环境下的表现情况进行大数据分析，结合采购规范，构建采购辅助系统，针对不同地区、不同电压等级、不同预算等条件下，帮助用户推荐最合适的设备，并给出不同设备的建议排名以供备选。图 5 所示为采购评分模型，利用构建的全生命周期成本以及货币化风险



的方案, 结合其他相关因素, 利用模糊层次分析法 (analgtic hierarchy process, AHP)构造采购辅助综合性

评价体系, 利用模糊理论确定不同属性的隶属度, 科学地构建评价体系。

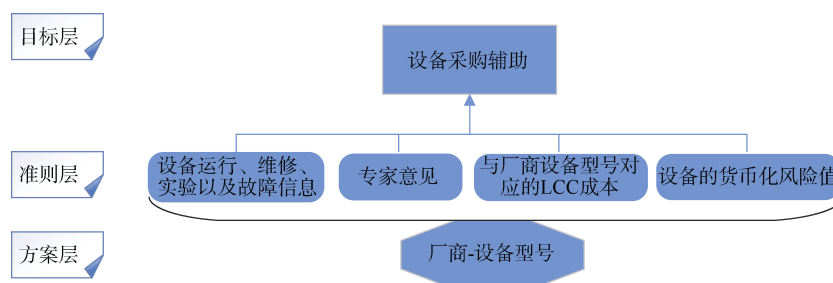


图5 采购评分系统

Fig. 5 Procurement scoring system

同时, 在采购辅助系统中基于相关性分析结果, 大数据可视化展示全局数据之间潜在的周期性和相关性, 发掘如缺陷、故障、生产计划、厂商、型号(分年份)、环境、GIS 等之间的两两相关性, 找寻普通理论分析未曾察觉的潜在规律, 如缺陷与厂商、年份、线路的分布关系、运维对故障率的影响等。

### 3.2 超期设备退运合理性分析

大城市的发展过程中伴随着地铁的建设, 而现有的地铁运营存在设计时间过早、机电设备投运过早以及设备更新过快等问题。国内 1965 年就开始建设了第一条地铁线路, 因此随着时间的推移不断会有地铁线

路存在以上问题。正如电力系统中变电所相关主变往往超期运行一样, 地铁机电设备也会面临这个问题。因此为了更好地针对机电设备进行投退运和更新换代, 针对超期机电设备运行的合理性进行分析是必要的。

图 6 所示为超期机电设备依旧运行的合理性分析 (也可转变为超期机电设备退运合理性分析), 总体思路为分析超期前与超期后的差异, 若超期后有关设备的数据差异较明显, 则说明该设备在超期后的表现确实不佳, 若超期后设备仍能像超期前一样的状态运行, 则可为了节约成本依旧使得主变超期运行。

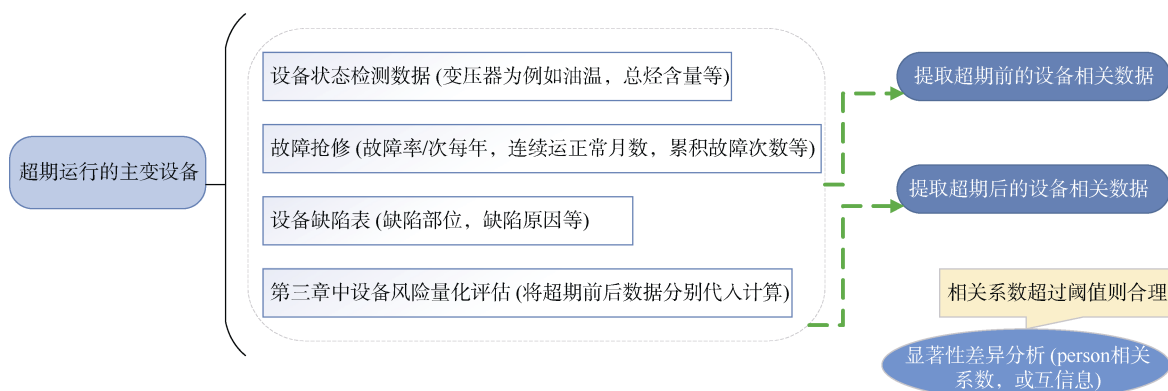


图6 超期运行设备分析

Fig. 6 Analysis of overrun equipment

为了最后检验两组数据的显著性差异则需将相关的类别数据化(如缺陷部位, 缺陷原因等)。其中设备风险评估主要借助风险评估方案, 但输入数据分为超期前数据和超期后数据两组。获取两组对应的相关数据后需要借助 Person 相关系数或者相互信息来分析两组数据的相关性。若结果表明两组数据相关性较强, 则表示设备超期后与超期前相比并未造成什么不好的

影响, 可依旧超期运行。

## 4 结语

智慧城市的发展影响着人们出行方式的变化, 而地铁在城市发展中处于不可或缺的地位, 因此针对地铁机电设备的智能管理也是应需而生。依照郑州市轨道交通机电管理框架, 基于物联网实现数据融合并利用大数据相关机器学习算法构建全景信息支撑平台、

状态监视、在线预警、智能诊断、状态评价、风险预测、检修决策以及绩效评估等。为了更好地细化数据分析平台的相关模型,从全生命周期成本分析、运维检修决策、风险量化评估3个方面进行展开。通过该平台更好地实现了地铁机电设备的管理,为决策层以及相关技术人员提供了多维度更全面的支持。

## 参考文献

- [1] 梁宁慧,刘新荣,曹学山,等.中国城市地铁建设的现状和发展战略[J].重庆建筑大学学报,2008,30(6):81-85.  
LIANG Ninghui, LIU Xinrong, CAO Xueshan, et al. Present situation and developing strategy of urban subway construction in P.R. China[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008, 30(6): 81-85.
- [2] 潘海啸,汤葐,吴锦瑜,等.中国“低碳城市”的空间规划策略[J].城市规划学刊,2008(6):57-64.  
PAN Haixiao, TANG Yang, WU Jinyu, et al. Spatial planning strategy for “Low Carbon Cities” in China[J]. Urban planning forum, 2008(6): 57-64.
- [3] 邱丽丽,顾保南.国外典型综合交通枢纽布局设计实例剖析[J].城市轨道交通研究,2006,9(3):55-59.  
QIU Lili, GU Baonan. Analysis of typical layout design in foreign integrated trans port hub[J]. Urban mass transit, 2006, 9(3): 55-59.
- [4] 中国城市轨道交通协会.2018年中国内地城轨交通线路概况[J].城市轨道交通,2019(1):10-15.
- [5] 胡海霞.浅析地铁环境与设备监控系统[J].机电工程技术,2017,46(8):77-78.  
HUA Haixia. Analysis of the subway environment and equipment monitoring system[J]. Mechanical & electrical engineering technology, 2017, 46(8): 77-78.
- [6] 夏景辉,陈昌进,曲泽超,等.地铁站台门系统设备健康管理研究与应用[J].都市轨道交通,2018,31(1):149-153.  
XIA Jinghui, CHEN Changjin, QU Zechao, et al. Equipment health management in subway platform door system[J]. Urban rapid rail transit, 2018, 31(1): 149-153.
- [7] 江锦涛.轨道交通自动扶梯与电梯物联网监视系统[J].都市轨道交通,2018,31(3):108-113.  
JIANG Jintao. Discussion on IoT monitoring system of urban rail transit escalator and elevator[J]. Urban rapid rail transit, 2018, 31(3): 108-113.
- [8] 赵建松.天津地铁动态数据库在关联模式下数据挖掘技术研究[D].天津:天津理工大学,2009.  
ZHAO Jiansong. Tianjin metro dynamic database in the data mining technology research association mode[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2009.
- [9] 王金环,李艳,魏维.基于大数据分析的地铁信息服务新架构研究[J].科技经济导刊,2018,26(4):17-18.
- [10] 姜海超,高明亮,高珊,等.数据挖掘在地铁维保项目管理中的应用[J].中外企业家,2018(1):44.
- [11] 段功玲.全生命周期成本管理[D].武汉:武汉大学,2017.  
DUAN Gongling. The whole life cycle cost management[D]. Wuhan: Wuhan University of Engineering, 2017.
- [12] 马丽华.地铁设备全生命周期管理分析[J].装备制造技术,2014(1):261-263.  
MA Lihua. The analysis of the life cycle management of the metro equipment[J]. Equipment manufacturing technology, 2014(1): 261-263.
- [13] 赵列远,刘卫红.地铁设备全生命周期管理系统功能探讨[J].中国建设信息,2011(3):57-59.
- [14] 王瑾.地铁工程全生命周期造价的确定与控制[J].铁路工程造价管理,2008(5):10-14.  
WANG Jin. Cost determination and control of whole life cycle for metro projects[J]. Railway engineering cost management, 2008(5): 10-14.
- [15] 田文英.机器学习与数据挖掘[J].石家庄职业技术学院学报,2004,16(6):30-32.  
TIAN Wenying. Machine learning and data mining[J]. Journal of Shijiazhuang Vocational Technology Institute, 2004, 16(6): 30-32.
- [16] 刘刚.数据挖掘技术与分类算法研究[D].南京:信息工程大学,2004.  
LIU Gang. Data mining technology and the classification algorithms[D]. Nanjing: Information Engineering University, 2004.
- [17] 马昕.粗糙集理论在数据挖掘领域中的应用[D].杭州:浙江大学,2003.  
MA Xin. The application of rough set theory in data mining field[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [18] 郭亚宁,冯莎莎.机器学习理论研究[J].中国科技信息,2010(14):208-209.
- [19] 孔怡青.半监督学习及其应用研究[D].无锡:江南大学,2009.  
KONG Yiqing. A semi-supervised learning and its application research[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009.
- [20] 陈小燕.机器学习算法在数据挖掘中的应用[J].现代电子技术,2015,38(20):11-14.
- [21] 唐振坤.基于Spark的机器学习平台设计与实现[D].厦门:厦门大学,2014.  
TANG Zhenkun. Based on the Spark machine learning platform design and implementation[D]. Xiamen: Xiamen University, 2014.

(编辑:王艳菊)