

城市轨道交通通信智能运维系统体系 构建关键技术研究*

王先磊

(南宁轨道交通运营有限公司, 530025, 南宁)

摘要 [目的] 为设计和构建一个高性能、高可靠性的城市轨道交通通信智能运维系统, 并制定科学的维护策略, 将传统的周期性计划修转变为基于测试分析的状态修和基于评估先验的预知修, 降低设备故障发生的概率和运营成本, 将传统人工运维管理转变为自动化、信息化的智能监测维护方式。[方法] 结合现场实际, 将通信系统和关键设备等物理实体与虚拟实体关联, 研究设备监测和诊断模型, 将多源异构数据融合和分析技术运用于通信系统故障诊断和预测中, 提出设备健康度算法模型和大数据架构, 搭建涵盖“云-数-智”的追踪和评估平台, 为现场开展预诊断维修提供理论依据和验证平台, 提升状态感知覆盖面、诊断和预测准确率, 大幅提高运维质量。[结果及结论] 通信智能运维系统在南宁轨道交通4号线工程化应用中, 实现了全方位设备监控、广泛故障应对机制以及先进的人机互动。工程化应用结果表明, 该通信智能运维系统可提升轨道交通通信设备的智能化运维水平, 可实现从传统定期维护向基于健康度的智能监测和预测性维护转变。

关键词 城市轨道交通; 通信系统; 智能运维体系

中图分类号 U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.20253061

Key Technologies in Intelligent O&M System Construction for Urban Rail Transit Communication

WANG Xianlei

(Nanning Rail Transit Operation Co., Ltd., 530025, Nanning, China)

Abstract [Objective] Aiming to design and construct a high-performance, high-reliability intelligent O&M (operation and maintenance) system for urban rail transit communication and to formulate scientific maintenance strategies, it is necessary to transform traditional periodic scheduled maintenance to condition-based maintenance according to test analysis, and to prior assessment-based predictive maintenance, thereby reducing the probability of equipment failure and operational costs.

Furthermore, it is to shift from traditional manual O&M management to an automated, information-based intelligent monitoring and maintenance approach. [Method] In combination with the on-site practice, associations are established between virtual entities and physical entities such as communication systems and key equipment to investigate equipment monitoring and diagnosis models. The multi-source heterogeneous data fusion and analysis technologies are applied to communication system fault diagnosis and prediction. An equipment health index algorithm model and a big data architecture are proposed, and a tracking and evaluation platform encompassing 'cloud-data-intelligence' is built. This platform provides both a theoretical basis and a validation environment for on-site pre-diagnostic maintenance, enhances the coverage of condition awareness, the accuracy of diagnosis and prediction, thus significantly improving the quality of O&M. [Result & Conclusion] The engineering application of the intelligent communication intelligent O&M system on Nanning Rail Transit Line 4 achieves comprehensive equipment monitoring, extensive fault response mechanism, and advanced human-machine interaction. Application results show that this intelligent communication O&M system enhances the intelligent O&M level of rail transit communication equipment and enables a shift from traditional periodic maintenance to health-based intelligent monitoring and predictive maintenance.

Key words urban rail transit; communication system; intelligent operation and maintenance system

城市轨道交通通信智能运维系统将物理实体与虚拟实体关联, 通过研究设备监测诊断模型, 运用多源异构数据融合分析技术, 提出设备健康度算法模型与大数据架构, 搭建“云-数-智”平台, 为预诊断维修提供支撑, 提升通信系统运维质量。构建通信智能运维系统, 需对机房环境对设备的影响、目

* 广西科技计划项目(桂科 AB22035008, 桂科 AB23075209)

标检测与异常识别、大数据采集与知识图谱构建、通信设备健康度模型等关键技术进行研究。

1 机房环境对机房内设备的影响

研究机房环境对设备的影响,据此提出环境监控与调节策略,保障设备运行。

1) 机房温度。机房温度过高会影响设备稳定性,增加设备故障风险,剧烈温差变化易损坏设备。理想温度为:夏季 $22\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,冬季 $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,变化率 $< 10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。温度每升高 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,设备可靠性下降 25%,温度超 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 可能导致设备故障。若机房温度 t 与机房设备可靠性 $Y(Y \in [0, 100])$ 关联关系 $Y(t)$ (单位为%) 可表示为:

夏季开机时

$$Y(t) = \begin{cases} 100, 20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq t \leq 24\text{ }^{\circ}\text{C} \\ 0.75^{0.1 \times (t-24)} \times 100, 24\text{ }^{\circ}\text{C} < t \leq 84\text{ }^{\circ}\text{C} \\ 0.75^{0.1 \times (20-t)} \times 100, -40\text{ }^{\circ}\text{C} \leq t < 20\text{ }^{\circ}\text{C} \\ 0, t < -40\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ or } t > 80\text{ }^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (1)$$

冬季开机时

$$Y(t) = \begin{cases} 100, 18\text{ }^{\circ}\text{C} \leq t \leq 22\text{ }^{\circ}\text{C} \\ 0.75^{0.1 \times (t-22)} \times 100, 22\text{ }^{\circ}\text{C} < t \leq 82\text{ }^{\circ}\text{C} \\ 0.75^{0.1 \times (18-t)} \times 100, -42\text{ }^{\circ}\text{C} \leq t < 18\text{ }^{\circ}\text{C} \\ 0, t < -42\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ or } t > 82\text{ }^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (2)$$

关机时

$$Y(t) = \begin{cases} 100, 5\text{ }^{\circ}\text{C} \leq t \leq 35\text{ }^{\circ}\text{C} \\ 0.75^{0.1 \times (t-35)} \times 100, 35\text{ }^{\circ}\text{C} < t \leq 95\text{ }^{\circ}\text{C} \\ 0.75^{0.1 \times (5-t)} \times 100, -55\text{ }^{\circ}\text{C} \leq t < 5\text{ }^{\circ}\text{C} \\ 0, t < -55\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ or } t > 95\text{ }^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (3)$$

2) 机房相对湿度。机房湿度过高或过低均影响设备运行。机房湿度应控制在 45% ~ 65%, 允许范围为 35% ~ 80%。湿度过低会增加静电,湿度过高可能损坏设备。机房相对湿度与设备可靠性的关系如图 1 所示。

3) 机房腐蚀性气体。主要来源于电池组充放电释放的有毒气体。机房内二氧化硫和硫化氢浓度应分别控制在 $0.15\text{ mg}/\text{m}^3$ 和 $0.01\text{ mg}/\text{m}^3$ 以下。

通信智能运维系统通过传感器替代人工巡检,可实时获取上述机房关键环境因素的数据。

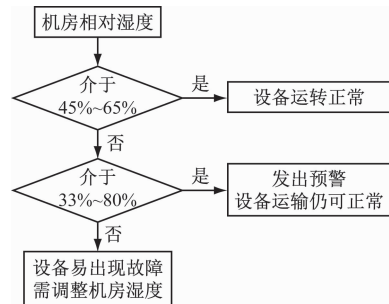


图1 相对湿度与设备可靠性关系

Fig. 1 Relationship between relative humidity and equipment reliability

2 优化图像识别技术实现目标检测与异常识别

机房光线暗,导致图像分辨率降低,且噪声和干扰也会影响图像识别效果。需结合计算机视觉、模式识别、机器学习和深度学习等技术,对图像感知算法进行优化,具体做法如下:

1) 优化基于 FCOS(全卷积一站式目标检测)的目标检测网络,提升低分辨率下的目标检测能力。

2) 使用一种中心化操作函数并为本项目设定特定参数,有效抑制无效噪声干扰引发的低质量预测性物体识别。

3) 采用增加召回率算法,提升低分辨率目标召回率。

优化后的图像感知算法如图 2 所示。通过该图像感知算法,可显著提高通信智能运维系统中巡检机器人对设备指示灯、空开状态等关键图像信息的识别正确率。

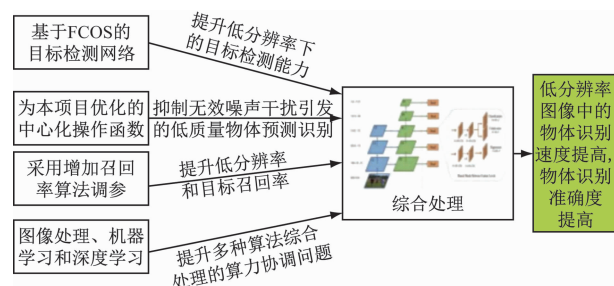


图2 图像感知算法

Fig. 2 Image perception algorithm

3 数据采集与知识图谱构建

研究大数据采集与知识图谱构建,提出统一数据服务模型,整合清洗多源数据,构建知识图谱,结

合推理引擎实现智能分析。

1) 数据采集。系统从 Profibus(非开放协议)、Modbus(开放协议)等异构源实时采集数据,通过映射适配场景、预处理保障质量,增强中间件兼容性,完成清洗整合与标准化,构建统一模型及通用接口。

2) 知识图谱构建。基于城市轨道交通跨系统链路结构,建立因子库与时序数据,经知识处理实现根因追溯,支撑数据存储及健康度模型调用。

3) 数据存储与管理。采用分布式高性能数据库存储多源数据,支持权限等操作;运用多种数据库存储异构数据,优化传感器和视频数据存储;借助 Kafka + Redis + ES (Kafka, 消息中间件; Redis, 非关系型数据库; ES, 搜索引擎) 架构提升检索性能。

4) 消息推送机制。系统提供分级与缓存,保障高优先级消息优先推送。

4 设备健康度评价模型

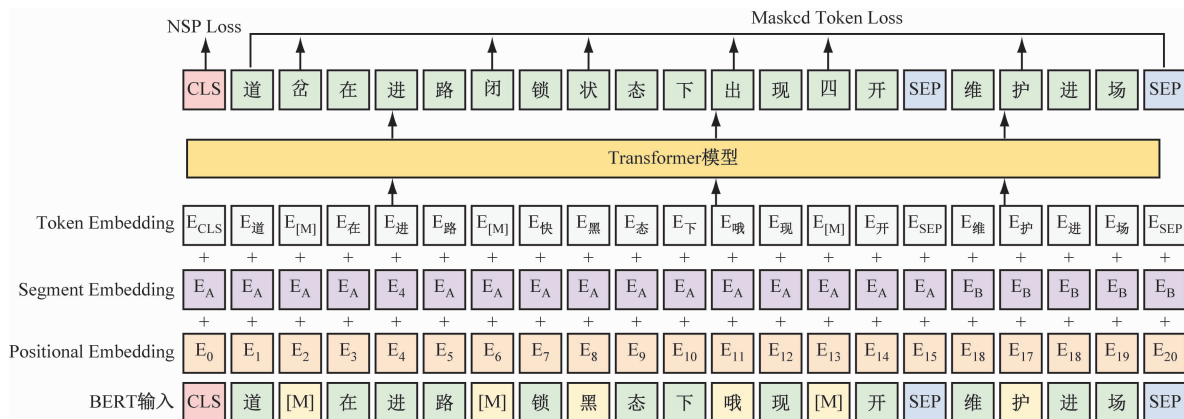
在设备健康度评价模型构建过程中,本文根据城市轨道交通通信系统的特殊性进行了如下研究:

1) 基于通信设备日志的关键信息抽取算法。基于深度学习的文本信息抽取技术逐渐应用于日志分析,可提高关键日志信息提取效率。基于深度学习的日志关键信息抽取方法具体步骤如下:

步骤1 日志标注。采用人工标注或主动学习(Active Learning)方法,标注日志中的关键信息(如“warning”“fail”)。通过“Human-in-the-loop”机制,提高标注效率,优化模型训练数据。

步骤2 预训练模型(Pre-training Model)。预训练模型如图3所示,在大量无标注日志数据上训练预训练模型(如BERT模型),提取日志的语义信息,为后续深度学习建模提供基础。

步骤3 深度网络训练。在预训练模型上 Fine-tune(模型微调)自动信息抽取网络时,引入多阶段学习机制:Fine-tune 前,用自监督学习预训练未标注日志,结合跨域迁移学习和对抗训练,增强模型泛化能力;初始 Fine-tune 后,以增量学习框架配合 EWC 算法,避免遗忘。该模型实现从被动依赖到自主进化,提升复杂场景适应力。



注:CLS—分类;SEP—分隔符;NSP—下一个句子预测任务。

图3 预训练模型示意图(截图)

Fig. 3 Diagram of pre-trained model(screenshot)

2) 有限计算资源场景下的流数据特征提取方法。数据流分析方法架构如图4所示。有限计算资源场景下的流数据特征提取方法具体步骤如下:

步骤1 流数据特征抽取算法设计。

步骤2 针对给定资源限制场景下的 Stream Feature Extraction 算法的特殊设计。以抽取指定数据流指定区间的方差为例,计算公式为:

$$\sigma^2 = (\overline{x^2}) - \bar{x}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i\right)^2 / N}{N} \quad (4)$$

式中:

σ^2 ——数据流指定区间的方差;

x ——数据流指定区间的观测值;

x_i ——数据流指定区间的第 i 个观测值;

N ——数据个数。

步骤3 搭建针对指定流数据分析的大数据架构。该步骤中,需要搭建以 Flink 框架 + Kafka 系统为代表的流数据采集系统,实时搜集系统信息,并通过 Grafana 工具与 Prometheus 架构进行分析与存储,并用 Elastic Search 引擎进行检索。

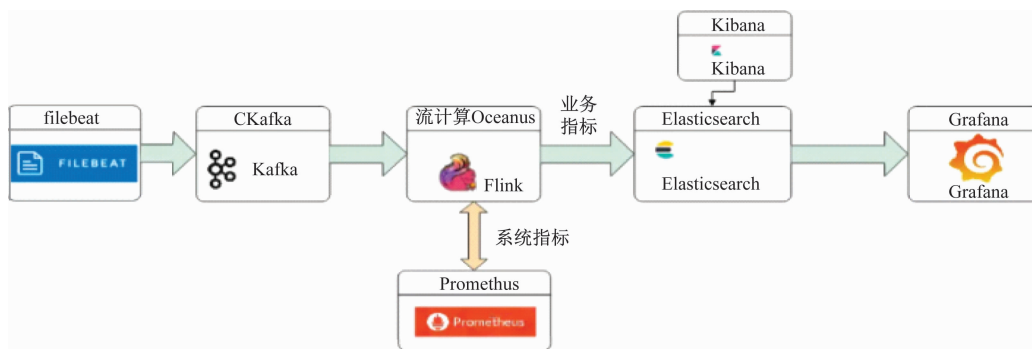


图4 数据流分析方法架构示意图(截图)

Fig. 4 Diagram of data stream analysis method architecture (screenshot)

3) 通过日志分析和流数据采集获取设备运行关键信息。基于设备当前状态、历史数据及符合帕累托分布的寿命阶段评估健康度,将其转化为异常检测问题,计算数据偏离程度并归一化。结合日志、实时数据与异常检测,实现机房设备健康监测分析。

以 CPU(中央处理器)为例,设备健康度评估算法具体步骤如下:

1) 特征提取。从 CPU 负载时序数据中提取特征,判断当前 CPU 运行状态是否异常。

2) 异常检测。使用 Isolation Forest(孤立森林)算法分析 CPU 负载数据,如图 5 所示。

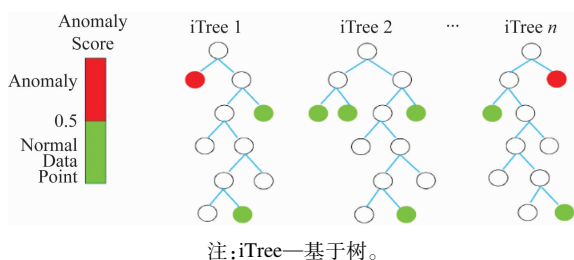


图5 Isolation Forest 算法示意图(截图)

Fig. 5 Diagram of Isolation Forest algorithm(screenshot)

3) 阈值选择。根据查全率(Recall)和查准率(Precision)设定合理的阈值。查全率高能检测出更多故障,但可能增加误报;查准率高则减少误报,但可能漏掉一些故障。

通信智能运维系统全面管理设备基础信息、运行数据、维修记录等多维度数据,经实时监控与分析评估设备健康,预测寿命并预警故障。基于分析结果,系统针对检修周期、内容及设备更换改造等提供精准建议,实现全平台智慧化管理,保障设备稳定运行、降本增效。但因缺乏标准化规范且需大量数据验证,目前建议该系统仅作辅助,运维安全

决策仍以运维人员群体决策为主。

南宁城市轨道交通 4 号线通信智能运维系统上线后,故障响应时间缩短 71%,处置效率提升 39%。173 项业务实现自动化,87 项可间接替代人工,优化或取消检修项 586 项,整体协调联动效率提升 40% 以上。

5 结语

基于对机房环境、对机房内设备影响因素的分析,对图像识别、数据采集与数据管理、设备健康度评价模型等关键技术的研究,构建了通信智能运维系统。该系统能够提升轨道交通通信设备的智能化运维水平,可实现从传统定期维护向基于健康度的智能监测和预测性维护转变。

参考文献

- [1] 袁志骞. 上海城市轨道交通通信系统智能运维需求分析[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(11): 23.
YUAN Zhiqian. Requirement analysis of Shanghai urban rail transit communication system intelligent operation and maintenance [J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(11): 23.
- [2] 武永恒, 付观华, 胡寿建, 等. 城市轨道交通多专业智能运维系统设计与研究[J]. 铁路计算机应用, 2024, 33(7): 70.
WU Yongheng, FU Guanhua, HU Shoujian, et al. Multi-professional intelligent operation and maintenance system for urban rail transit[J]. Railway Computer Application, 2024, 33(7): 70.
- [3] 蔡宇晶, 高凡, 孟宇坤, 等. 城市轨道交通设备智能运维系统设计与关键技术研究[J]. 铁路计算机应用, 2023, 32(7): 79.
CAI Yujing, GAO Fan, MENG Yukun, et al. Design of intelligent operation and maintenance system for urban rail transit equipment and study on its key technologies[J]. Railway Computer Application, 2023, 32(7): 79.
- [4] 张潇帅. 基于 Zabbix 的城市轨道交通智能运维体系集中监控平台建设[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(增刊 1): 110.

- ZHANG Xiaoshuai. Construction of urban rail transit intelligent operation-maintenance system centralized monitoring platform based on Zabbix[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(S1): 110.
- [5] 刘纯洁, 王大庆. 超大规模城市轨道交通网全寿命周期健康管理系统研究[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(5): 7.
- LIU Chunjie, WANG Daqing. Life cycle health management system of super-large scale urban rail transit network[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(5): 7.
- [6] 李杰, 徐启禄. 基于云平台的城市轨道交通智能运维系统设计与应用[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(8): 213.
- LI Jie, XU Qilu. Design and practice of urban rail transit intelligent operation and maintenance system based on cloud platform[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(8): 213.
- [7] 陶小婧. 城市轨道交通通号专业设备故障智能化研究[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(增刊1): 7.
- TAO Xiaojing. Intelligent operation and maintenance for urban rail transit signal professional equipment failure[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(S1): 7.
- [8] 李三江, 江智麟, 林意为, 等. 基于随机森林算法的地铁通信系统健康度动态评估方法[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(6): 265.
- LI Sanjiang, JIANG Zhilin, LIN Yiwei, et al. Dynamic health evaluation method for metro communication system based on random forests algorithm[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(6): 265.
- [9] 汤逸敏. 利用“浴盆曲线”研判设备更新时机[J]. 数码设计, 2021(21): 117.
- TANG Yimin. Using the 'bathtub curve' to determine the timing of equipment updates[J]. Digital Design, 2021(21): 117.
- [10] 周志林. 轨道交通智能运维与创新平台建设[J]. 运输经理世界, 2021(20): 102.
- ZHOU Zhilin. Intelligent operation and maintenance of rail transit and construction of innovation platform[J]. Transport Business China, 2021(20): 102.
- [11] 李沁蔚. 我国城市轨道交通发展现状与对策建议[J]. 黑龙江科技信息, 2016(29): 245.
- LI Qinwei. The development status and countermeasures of urban rail transit in China[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2016(29): 245.
- [12] 周杰. 智慧城市轨道交通发展模型的构建及其发展趋势探讨[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(6): 7.
- ZHOU Jie. Construction of smart urban rail transit development model and development trend[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(6): 7.
- [13] 胡寿建, 吴荣斌, 王亚坤, 等. 城市轨道交通信号智能运维系统设计与研究[J]. 军民两用技术与产品, 2023(1): 48.
- HU Shoujian, WU Rongbin, WANG Yakun, et al. Design and research of intelligent operation and maintenance system for urban rail transit signals[J]. Dual Use Technologies & Products, 2023(1): 48.
- [14] 李传建. 城市轨道交通信号智能运维系统的设计与应用[J]. 设备管理与维修, 2023(8): 10.
- LI Chuanjian. Design and application of intelligent operation and maintenance of urban rail transit signal system[J]. Plant Maintenance Engineering, 2023(8): 10.
- [15] 倪弘韬, 胡佳乔, 吴强, 等. 面向城市轨道交通智能运维的数据耦合性与独立一致性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(5): 6.
- NI Hongtao, HU Jiaqiao, WU Qiang, et al. Research on data coupling and independent consistency for urban rail transit intelligent operation-maintenance[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(5): 6.
- [16] 潘佳鹏, 迟宝全. 城市轨道交通信号系统智能运维平台研究[J]. 现代城市轨道交通, 2024(11): 21.
- PAN Jiapeng, CHI Baoquan. Research on the intelligent operation and maintenance platform for urban rail transit signal system[J]. Modern Urban Transit, 2024(11): 21.
- [17] 袁若岑, 计时磊, 黄颖俊, 等. 城轨信号智能运维系统研究[J]. 价值工程, 2025, 44(2): 105.
- YUAN Ruocen, JI Shilei, HUANG Yingjun, et al. Research on intelligent operation and maintenance system of urban rail signal[J]. Value Engineering, 2025, 44(2): 105.
- 收稿日期:2025-02-21 修回日期:2025-03-25 出版日期:2025-07-10
Received:2025-02-21 Revised:2025-03-25 Published:2025-07-10
· 通信作者:王先磊,高级工程师, wangxianlei@nngdjt.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www.umt 1998.tongji.edu.cn