

武汉地铁列车信息联控平台设计及应用

向清河¹ 黄 钺² 朱东飞¹

(1. 武汉地铁集团有限公司, 430030, 武汉; 2. 株洲中车时代电气股份有限公司, 412001, 株洲//第一作者, 正高级工程师)

摘 要 基于武汉地铁车辆的运维现状, 研发出适用于地铁运维的列车信息联控平台。阐述了该平台的总体结构、车地无线通信、地面系统技术架构和功能模块的设计思路及实现过程, 实现了针对车辆的实时监控、故障诊断和健康管理, 提升了地铁车辆运维效率, 降低了运维成本。

关键词 地铁列车; 信息联控平台; 设计; 应用

中图分类号 U29-39

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.06.036

Design and Application of Wuhan Metro Train Information Joint Control Platform

XIANG Qinghe, HUANG Cheng, ZHU Dongfei

Abstract Based on the current situation of Wuhan Metro vehicle operation and maintenance, a train information joint control platform applicable to metro operation and maintenance is developed. The design idea and implementation process of the platform overall structure, vehicle-wayside wireless communication, ground system technical architecture and functional modules are expounded. Real-time monitoring, fault diagnosis and health management for vehicles are realized, which improve the efficiency and reduce the cost of vehicle operation and maintenance.

Key words metro vehicle; information joint control platform; design; application

First-author's address Wuhan Metro Group Co., Ltd., 430030, Wuhan, China

1 武汉地铁列车信息联控平台的需求分析

地铁列车的车载数据处理系统主要包括牵引、网络、制动、门控、辅助、空调、信号、PIS(乘客信息系统)等子系统。部分车载子系统的信息仅能在司机室实时显示, 列车状态与故障无法实时传输到地面, 难以精准掌控列车在途状态; 记录数据依赖回库人工下载, 缺乏自动高效的下载手段; 故障诊断专业性强、软件繁杂独立, 无法实现故障的关联分析, 疑难杂症判定时间冗长; 列车故障大多数采取

事后处理, 造成的损失已无法挽回, 严重者还可能造成不良社会影响(如清客、救援等); 对车辆设备或部件的状态难以准确评估, 维修方式大多数采用计划修, 而针对列车全生命周期的维护成本则居高不下; 针对地铁列车运营管理决策缺乏足够的数据与分析结果支撑。

基于上述地铁车辆的运营现状, 针对武汉地铁, 构建列车信息联控平台。该平台应包含以下基本功能:

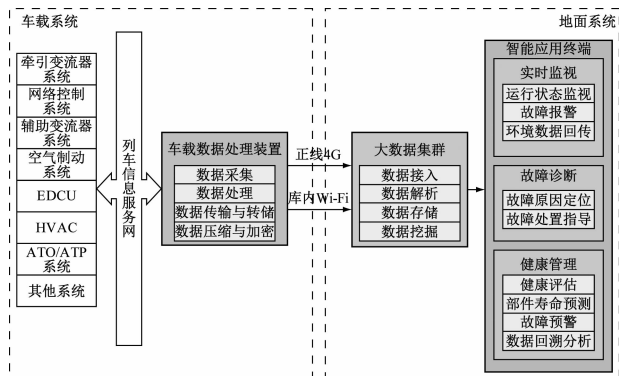
- 1) 车地无线通信: 采集车载数据, 并将其实时传输至地面系统。
- 2) 大数据集群服务: 接入和解析车载数据, 数据存储与查询, 数据挖掘。
- 3) 实时监视: 线路级、车辆级及子系统级状态监视, 实时故障报警, 故障环境数据回传。
- 4) 故障诊断: 快速定位故障原因, 给出故障处置措施。
- 5) 健康管理: 列车健康评估、列车部件剩余使用寿命的预测, 故障预警, 数据回溯分析。

2 武汉地铁列车信息联控平台设计

2.1 列车信息联控平台总体设计

地铁列车信息联控平台包括车载系统和地面系统两大部分^[1]。车载数据通过车地无线通信通道, 实现从车载系统到地面系统的传输。平台总体结构如图1所示。

该平台中, 车载数据处理装置通过信息服务网或其他扩展接口采集车辆关键系统和设备的数据, 并对其进行整理、解析及存储, 同时提供整车统一维护端口, 应用4G(第4代移动通信技术)/WLAN(无线局域网)等无线通信技术, 构建车地实时传输系统, 实现全息化列车状态的动态跟踪监控, 支撑地面系统的智能化应用; 大数据集群负责接入、解析及存储车载实时数据和记录数据, 并集成数据挖掘功能, 为智能应用终端提供服务; 智能应用终端



注:ATO为列车自动运行;ATP为列车自动防护;HVAC为空调系统;EDCU为电子门控单元。

图1 武汉地铁列车信息联控平台总体结构

Fig.1 The overall structure of Wuhan Metro train information joint control platform

提供针对列车的实时状态监视、故障诊断、车辆健康管理等智能化应用功能。

2.2 车地无线通信总体设计

为了使车辆运营人员掌握更多、更准确的实时车载信息,提高运营管理效率,车载数据采集覆盖了牵引、制动、辅助、车门、旅客信息、空调、网络、走行等多个子系统,实现车辆数据的融合和处理;以数据为基础,结合整车逻辑,对数据进行预处理,实现对故障的识别和预警。

另外,数据形式包括实时数据与离线文件数据,实时数据又包含实时状态数据与实时故障数据。因此,在车地数据传输通道层面,实时数据和关键性数据通过4G与地面交互,且这些数据通过安全生产网进行传输,记录文件数据通过库内通道与地面交互。车地无线通信总体设计如图2所示。

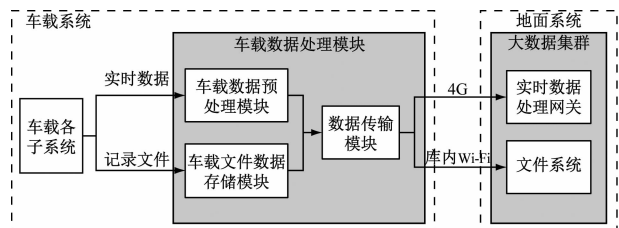


图2 车地无线通信总体设计

Fig.2 Overall design of vehicle-wayside wireless communication

在车地无线通信传输策略方面,针对实时状态数据,采用UDP(用户数据包协议)固定周期向地面系统发送列车状态报文,其中车载部分为客户端,地面部分为服务器。针对故障报警数据,同样采用UDP向地面系统发送故障报警报文。当故障

状态发生变化时,车载部分立即将故障代码信息发送到地面数据服务器,按重发固定次数来执行,每次间隔固定时间,确保地面系统及时获取故障信息。

2.3 地面系统技术架构设计

2.3.1 地面系统技术架构的设计原则

武汉地铁列车信息联控平台的设计出发点是针对城市轨道交通的大容量、高速率及多种类的大数据进行实时和批处理分析,通过分析及诊断结果,结合领先的数据可视化方案,为日常城市轨道交通车辆的运维提供实时状态监视、故障诊断、故障预警及车辆健康评估等实用功能。因此,本系统最大的特征是一个针对不同类型使用者的大数据处理、分析及展示的信息联控系统,且高性能与高可靠性是整个系统设计中需要着重关注与解决的方面。基于上述分析,本系统采用微服务架构来实现^[2]。微服务架构是近年来被成功应用到大型高并发系统的一种软件系统架构,其特点如下:

1) 通过拆分服务的方式实现系统的组件化。将传统的单块系统进行拆分、解耦,形成一些细粒度的、可独立演进的组件。

2) 去除复杂的进程通信机制,使用轻量级的通信方法(如REST(表征性状态转移)API(应用程序编程接口)),业务逻辑由每个服务来处理。

3) 通过服务微小化,增强了系统的敏捷性;以及增加了新功能、应对变化需求的能力。

4) 技术上,不同的微服务也可以采用不同的技术来实现。可充分发挥各种技术的优势,例如:Java是强类型面向对象语言,有着很好的生态圈,适合开发整体的业务逻辑;python在数据分析、机器学习领域有着很好的应用,适合开发预测性分析引擎服务等。

2.3.2 地面系统技术分层架构设计

武汉地铁列车信息联控平台的架构有3层构成:

1) 平台层:使用容器技术来抽象隔离底层的硬件及操作系统,使上层服务和中间件不需关注具体使用的硬件,只需指定每个服务所需的资源。通过容器编排平台,进一步简化了资源的分配及调度,便于实现按需增减硬件资源。

2) 中间件层:提供上层应用所需要的基础服务,如HDFS(大数据存储引擎)、关系型数据库、非关系型数据库、分布式的数据流式及批处理引擎、消息队列等。借助于平台层的容器及编排系统做

到自动部署,通过 API,使得数据库及消息队列与其他应用服务进行交互。

3) 应用服务层:实现整个系统的业务功能,采用微服务来拆分业务,减少业务间的耦合度;每个微服务部署在单独的容器内,可以独立伸缩,满足不同的业务量需求,具有很好的弹性。微服务可以自动注册、自动发现,可以负载均衡,也便于管理及监控。

2.2.3.3 地面系统技术业务架构设计

从业务功能角度来看,地面系统技术架构(见图3)包括:前端 Web(万维网)应用,后端微服务群,大数据处理分析平台,数据接入与储存服务。整个架构以中央的各类微服务集群为中心,以大数据分析处理平台为基础,共同完成整个系统的功能。

微服务群是整个系统的核心,实现了系统的所有业务。每个业务实现成一个微服务,以单实体或多实体的形式运行。单实例或多实例的使用取决于业务的负载,也可以根据负载的变化动态伸缩。逻辑上每个微服务都配有自身专用的数据库,物理层面上可以将其部署到同一个数据库系统中。

大数据分析 & 处理平台为上层业务服务提供数据支撑,对基础数据进行存储和分析,生成各种业务数据表供上层业务使用,以提高业务数据使用的效率和提升用户体验。

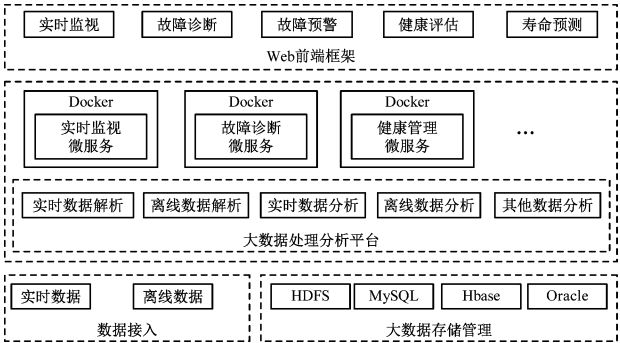
前端 Web 应用独立于后台服务,使用 Angular 框架来实现 SPA(单页应用架构)。使用 Angular 作为前端 Web 应用的底层框架,做到前端 Web 应用充分的组件化,以层级方式来组织页面组件,配合 Angular 的前端路由机制,能很好地满足前端的可定制化页面。

2.4 应用功能模块设计

2.4.1 实时监视模块设计

实时监视系统覆盖了列车的各大系统,包括牵引系统、网络系统、制动系统、信号系统、辅助电源系统、门控系统、空调系统、乘客信息系统等,可实现远程状态监视、环境数据回传等功能。

该模块可实时监测轨道交通线路上所有列车的总体情况:各列车基于地图的位置分布,列车运行状态,列车健康状态,列车的基本信息。系统总览界面显示单线路在线/离线列车统计、各列车故障统计、列车可用率、运行里程统计、载客人流统计及能耗统计等。



注: Docker 为一个开源的、轻量级的容器引擎; HDFS 为被设计成适合运行在通用硬件上的分布式文件系统; MySQL 为关系型数据库管理系统; Hbase 为一个分布式的、面向列的开源数据库; Oracle 为甲骨文公司的一款关系数据库管理系统。

图3 地面系统技术业务架构

Fig. 3 Business architecture of ground system technology

该模块可实时监测单台车所有状态,查看当前列车位置、当日运行里程统计/总里程统计、速度、网压等关键实时数据的波形曲线,各子系统当前的健康状态,整车实时健康状态,以及当前列车故障报警、预警等。并在地面同步车载司机屏,实现车载监视与地面监视数据同步,有助于地面人员实时掌握列车运行工况以及司机的操作情况。

2.4.2 故障诊断模块设计

列车运行故障的诱发原因较为复杂,同时会产生大量的伴生故障与次生故障,导致故障症状错综复杂,且根据人工经验难以确认真实的故障原因。

本系统基于电气原理,结合专家规则与故障诊断逻辑,对故障发生时的伴生现象及相关信号量进行深入分析,以建立每一类故障的诊断模型。

收集大量的现场数据,通过挖掘算法提取各个故障的关键特征量,结合故障模型生成故障波形,通过大数据训练得到故障的诊断算法。

建立专家知识库,存储历史故障的解决方案。梳理了 TCMS(列车控制与管理系统),以及牵引系统、辅助变流系统、充电机等主要部件全部故障的故障树、故障处理措施及故障关联变量等。

在该系统中以故障树的形式展示故障原因及处置意见,并在列车原理图中标注故障发生位置,以提高故障处理效率。用户处置故障后,系统可根据用户的处置情况对模型和算法进行自适应调整,使其在使用过程中日益趋近真实。具体流程如图4所示。

2.4.3 健康管理模块设计

对列车当前运行里程、使用年限、运行趟次及

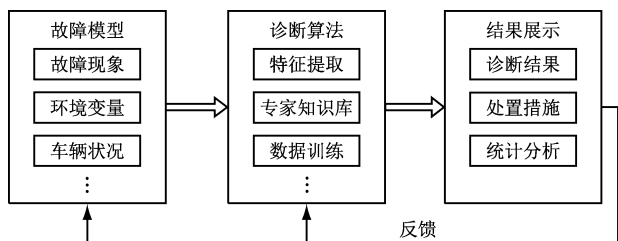


图4 故障诊断模块设计流程

Fig. 4 Design process of fault diagnosis module

各接触器开关闭合次数等设计参数进行统计汇总,并与行业规范制定的设计寿命进行对比,对达到临界值的参数进行标注提醒。

依托大数据技术,对设备的历史运行状态及故障数据进行挖掘,建立设备的故障预警模型,实现设备状态的实时预警。

建立列车各个子系统/部件的健康模型,设计健康评估算法。根据故障严重程度等级,对车辆运营影响、故障扩散范围及故障发生次数等因素进行扣分;根据列车的检修、部件更换等操作进行相应的回分,得到各子系统/部件的健康评分。

根据健康评估分数自动提供不同的处置建议,如维修、更换等;结合各子系统/部件的健康评分及处置建议,对各子系统/部件进行用户评估,为后续子系统/部件的维护提供建议。将各子系统/部件的模型进行整合,得到列车的健康评估算法模型,计算得出整车的健康状态评分,并提供相应的处理意见,如检修、继续运营等。

基于各子系统/部件的健康状态分析,生成线路级/单车的健康趋势统计,并能够查询单个维度对当前子系统/部件的健康评分影响。

3 武汉地铁列车信息联控平台的应用

3.1 实时监视

用户可以通过线路级实时监视模块快速查看当前线路各列车的位置分布,使得所在站点或区间一目了然。选择列车后可了解列车运行状态、列车健康状态,以及列车的基本信息;用户还可以通过实时监控统计来了解线路的整体运营情况,包括在线/离线列车统计、列车故障统计、列车可用率、运行里程统计、载客流量统计及能耗统计等。

3.2 故障诊断

可根据用户查询条件,查看列车的故障诊断列表,包括线路、车型、车号、车厢、子系统、故障码、故障等级、故障名称、故障发生时间、故障处置状态等

信息。针对某条具体故障,选择“故障诊断”,系统根据相关诊断模型进行故障诊断,展示故障诊断过程,得出故障诊断结果。诊断界面显示故障处理措施分布与步骤,该步骤按照诊断结论进行优先级排列。

3.3 健康管理

用户通过列车健康状态总览界面可查看各车辆的总体健康状态,该界面还可以显示当前可用且正常的车辆数、总运行里程,以及当前所有车辆各自的健康状态。通过选择“单车”可进入单车的健康档案,主要包括单车运行里程、运行趟次及综合载重等基础统计信息。

对列车当前运行里程、使用年限、运行趟次及各接触器开关闭合次数等设计参数进行统计汇总,并与行业规范制定的设计寿命进行对比,对达到阈值的参数进行提醒与预警信息推送。

列车健康状态总览界面可自动回放各个时刻整车状态逻辑诊断的情况。可选择当日任意时刻开始回放,同时可以选择某个故障点并展示当前故障点的逻辑诊断情况。

4 结语

本文基于武汉地铁车辆运营维护的现状与需求,提出了列车信息联控平台,并对该平台建设的设计思路、实现过程、功能展示进行了阐述。该系统在武汉地铁进行试点应用后,带来了如下积极的影响:一是通过无线通信技术,将列车车载系统状态信息实时传输到地面,使控制中心实时掌握地铁运营线路上每列列车的设备运行状态;二是构建了一套故障诊断专家库,当出现故障时,后台专家系统可通过远程诊断给出故障类型、故障原因,并及时提供应对措施,确保地铁运营安全与高效;三是通过 TCMS 数据远程在线监测和智能分析,实现列车的健康管理,包括列车实时数据的回溯、列车故障统计、关键部件的寿命预测等内容。后续希望能够基于该平台,不断迭代优化专家诊断库,对多车数据进行关联碰撞分析,探索基于设计参数的寿命预测;基于大数据的寿命预测方法,持续帮助节省人力并降低运营成本,优化设备能耗,提高运营管理效率和运营服务水平。

参考文献

[1] 路向阳,李东林,李雷,等.智慧城轨下智慧车辆装备技术的研

- 究与展望[J]. 机车电传动, 2018(6):1.
- LU Xiangyang, LI Donglin, LI Lei, et al. Study and prospect of equipment technology for smart rolling stock in smart urban rail transit system[J]. Electric Drive for Locomotives, 2018(6):1.
- [2] 黄嘉,唐振华. 地铁运营管理的信息化建设[J]. 都市快轨交通, 2014(5):21.
- HUANG Jia, TANG Zhenhua. Informatization construction of metro operation management[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2014(5):21.
- [3] 王志伟. 基于云平台的地铁列车无线监控系统[J]. 铁道车辆, 2018(11):19.
- WANG Zhiwei. Metro train wireless monitoring system based on cloud platform[J]. Rolling Stock, 2018(11):19.
- [4] 任富争,李如石,张红星,等. 地铁列车智能化预警系统的研究[J]. 铁道机车车辆, 2018(6):112.
- REN Fuzheng, LI Rushi, ZHANG Hongxing, et al. Research on metro train intelligent early-warning system[J]. Railway Locomotive & Car, 2018(6):112.
- [5] 郭永锋. 地铁车辆实时可视化监控平台的研究[J]. 科技创新与应用, 2019(15):70.
- GUO Yongfeng. Research on metro vehicle real-time visualized monitoring platform[J]. Technology Innovation and Application, 2019(15):70.
- [6] 李松峰,王洋,姚伟国,等. 基于大数据的城市轨道交通运维信息化技术应用[J]. 铁路技术创新, 2018(2):75.
- LI Songfeng, WANG Yang, YAO Weiguo, et al. Informatization technology application of urban rail transit operation and maintenance based on big data[J]. Railway Technical Innovation, 2018(2):75.
- [7] 顾政华,李旭宏,朱彦东,等. 地铁运营管理维保模式的市场化战略探讨[J]. 都市快轨交通, 2005(1):18.
- GU Zhenghua, LI Xuhong, ZHU Yandong, et al. Discussion on marketing strategy of metro operation management maintenance model[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2005(1):18.
- [8] 侯文军. 地铁车辆故障智能处理系统研究[J]. 现代城市轨道交通, 2019(5):25.
- HOU Wenjun. Study on metro vehicle fault intelligent treatment system[J]. Modern Urban Rapid Transit, 2019(5):25.
- [9] 李启磊,李臣明,冯新颖,等. 地铁列车安全运行的远程诊断技术[J]. 城市轨道交通研究, 2015(8):142.
- LI Qilei, LI Chenming, FENG Xinying, et al. New remote diagnosing technique for safe rail vehicle operation[J]. Urban Mass Transit, 2015(8):142.

(收稿日期:2020-03-26)

(上接第 185 页)

备用车载 ATC 系统接管后,无需制动至停车状态即可缓解紧急制动回路,制动缸产生的 20% ~ 30% 的压力值将在 2 ~ 5 s 内缓解。备用车载 ATC 控制系统同时发出牵引授权信号及牵引命令,且在 2 ~ 5 s 后施加牵引力。此时列车恢复至 ATC 系统切换前的运行状态,不会对列车运行效率产生影响。

4 结语

为实现信号双端冗余系统的无缝切换,车辆需从零速信号、紧急制动信号及牵引制动控车信号进行优化设计,避免车载设备故障进入冗余切换期间信号状态丢失而影响列车正常运行。此方案已在南京、合肥、杭州等多个城市的轨道交通项目中得到成熟运用。通过车辆控制电路优化设计保证信号系统冗余切换的可用性、稳定性,进而提高列车的服务质量,同时也为其他设计人员提供参考和借鉴。

参考文献

- [1] 王志东. 城市轨道交通主用与备用车载控制器冗余切换方案研究[J]. 城市轨道交通研究, 2018(增刊1):17.
- WANG Zhidong. On the redundant switchover scheme of on-board controller in urban rail transit signal system[J]. Urban Mass Transit, 2018(S1):17.
- [2] 杨阳. 地铁信号系统车载故障的影响分析[J]. 工程建设与设计, 2019(18):100.
- YANG Yang. Influence analysis of vehicle fault in metro signal system[J]. Engineering Construction & Design for Project, 2019(18):100.
- [3] 龚海文. 城市轨道交通信号系统冗余技术分析[J]. 电子世界, 2013(20):25.
- GONG Haiwen. Analysis of redundancy technology of urban rail transit signaling system[J]. Electronics World, 2013(20):25.
- [4] 阳六兵. 城市轨道交通车载 ATC 控制系统冗余方式对比分析[J]. 现代城市轨道交通, 2019(11):30.
- YANG Liubing. Comparative analysis of redundancy modes of on-board ATC control system in urban rail transit[J]. Modern Urban Rail Transit, 2019(11):30.

(收稿日期:2020-04-13)