

城市轨道交通智能运维车载子系统的研究与应用

彭俊玮, 蒋国涛, 文 林
(中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 城市轨道交通(简称“城轨”)智能运维车载子系统作为智慧城轨建设下的关键子项, 目前呈现多样化、地域化发展趋势。文章对其主流功能需求和关键技术进行了梳理, 并通过平台化、模块化的思路对其天线馈系统、车载装置及运维网进行了系统设计, 使系统具有较强的通用性、灵活性和可扩展性。文中以中车株洲所的城轨智能运维车载子系统为例, 对应急处置、故障预测和健康管理、5G 通信等技术在实际应用中的情况进行了介绍, 并对智能运维车载子系统的未来发展进行了展望。

关键词: 城市轨道交通; 智能运维; 5G 通信; 网络安全; 故障预测和健康管理

中图分类号: U279.3

文献标识码: A

文章编号: 2096-5427(2021)05-0026-07

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2021.05.005

Research and Application of Intelligent Operation and Maintenance Onboard Subsystem for Urban Rail Transit

PENG Junwei, JIANG Guotao, WEN Lin
(CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: As a key component of smart urban rail construction, onboard subsystem of urban rail transit intelligent operation and maintenance is currently showing a trend of diversified and regionalized development. This paper introduces its mainstream functional requirements and key technologies, and its system design of antenna feeder system, vehicle-mounted device, and operation and maintenance network is carried out through a platform and modular approach, and made it with strong versatility, flexibility and scalability. In the paper, it takes the urban rail intelligent operation and maintenance on-board subsystem by CRRC Zhuzhou Institute Co.,Ltd. as an example, introduces the actual application of emergency response, fault prediction and health management, 5G communication and other technologies, and prospects for future development of intelligent operation maintenance onboard subsystem.

Keywords: urban rail transit; intelligent operation and maintenance; 5G communication; network security; PHM (prognostics and health management)

0 引言

《中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要》于 2020 年 3 月 12 日正式发布实施, 其将智慧城市轨道交通(简称“城轨”)建设作为交通强国建设的战略突破口、智慧城市建设的先导工程、城轨高质量发展

的主要抓手和城轨行业自主创新发展的平台^[1]。智能运维作为智慧城轨建设下的一项关键课题, 是推进城轨信息化、智能化、智慧化且有效确保城市轨道交通安全、稳定、高效、经济地运营^[2]的重要举措之一。

近 10 年来, 我国城轨发展迅速, 在大数据、云计算、物联网、移动通信及人工智能等技术逐渐成熟并在各行各业拥有良好应用基础的大背景下, 智能运维已经逐步走上深入发展、推广运用的“快车道”。其在信息化方面有着更好的基础和更高的要求, 从开始的京、沪、穗等城市^[1]先行进行智能运维相关

收稿日期: 2021-08-08

作者简介: 彭俊玮(1990—), 男, 工程师, 主要从事轨道交通信息化技术、智能化技术研究。

科学研究和示范应用，到近几年智能运维系统几乎成为所有新建城轨的标配，且诸多城市对既有城轨线路也有着改造并加装智能运维系统的迫切需求。由于各地城轨建设所处区域的政治、经济条件和环境不同，城轨智能运维系统呈现多样性和地域性的特征。为了使智能运维车载子系统具备对既有系统的高兼容性、对潜在需求的高扩展性、对不同环境的高适应性，从系统到部件及器件必须采用平台化和模块化的设计思路并结合当地实际情况及人员使用习惯对运维管理模式、系统运行环境等进行差异化设计。

国内，目前智能运维车载子系统已普遍具备车载数据采集、数据处理分析、数据在途无线传输、库内离线文件批量转储及数据安全方面的功能，并进行了深度应用；同时在 5G 和 WiFi6 等新兴无线通信技术、寿命预测和故障预警等故障预测和健康管理（prognostics health management, PHM）技术、流媒体数据采集处理、离线数据高速转储技术、网络安全技术等方面也进行了深入研究与探索，并在诸多项目中实现了批量装车。国外，阿尔斯通、西门子等公司在列车状态预测修、寿命检测与管理等方面已经有成熟的产品与服务。

本文主要针对智能运维车载子系统的需求分析、系统设计、关键技术、系统功能、典型应用等进行了相关阐述，并对其未来的发展进行了展望。

1 系统需求分析

智能运维车载子系统从系统架构层面考虑，需要配置智能运维车载天馈系统（简称“天馈系统”）、智能运维车载平台装置（简称“车载装置”）和智能运维列车网络（简称“列车运维网”）。其中，天馈系统用于实现上、下行数据传输；车载装置用于实现数据汇聚和相关智能化场景的应用；列车运维网承载多种通信业务数据的传输任务，为车载装置与列车各系统之间的数据双向传输建立物理通道，如以太网、多功能列车总线（multifunction vehicle bus, MVB）及 CAN 总线等等，从而实现与列车各子系统的信息交互。

从功能层面上分析，智能运维车载子系统需要具备数据采集、数据分析计算、数据存储和传输、边界安全防护及人机接口等功能，且需要满足但不限于以下要求：

（1）天馈系统

天馈系统应配置高性能全向天线或定向天线，以实现公网和专网频段的覆盖；同时支持多频段的合

路器，将移动通信频段和 WLAN 频段进行合路。

（2）车载装置

数据采集，涉及列车控制与管理系统（train control and management system, TCMS）数据、关键三方子系统运维数据和音视频流媒体数据。不同线路的列车的不同子系统存在着不同的数据通信接口，所以车载装置需要支持不同通信接口的兼容，包括硬件层面的电气接口和软件层面的协议栈等的支持，主要的通信接口包括以太网、MVB，HDLC，RS485/RS422，CAN 及 DIO 等通信接口。

数据处理，需要配置高性能中央处理单元，具备对采集数据的处理、传输及存储等功能，可高效实现智能化相关应用。

数据传输，需要配置 3G/4G/5G 模块、WLAN 模块等通信模块，完成车地数据快速交互和转储。

定位授时，需要配置 GPS/BD 模块，实现列车的定位和授时。

网络安全，需要配置防火墙模块，实现内外网的安全隔离与防护。

数据存储，需要配置大容量、稳定、可靠的存储介质，以实现数据的长时间存储。

电源，需满足 110 V 电源输入和 5 V/24 V 电源输出要求。

2 系统设计

智能运维车载子系统的架构如图 1 所示，车载装置通过列车运维网完成数据的采集，涉及网络控制系统、牵引传动系统、门控系统、走行系统、制动系统、弓网监测系统、乘客信息系统（passenger information system, PIS）及空调系统等。针对采集的数据，车载装置进行相应的数据分析处理并完成上层应用功能（如状态监控、事件识别、故障诊断、故障预警、应急处置、专家诊断及寿命预测等），同时车载平台装置通过天馈系统完成车地之间的互联互通。

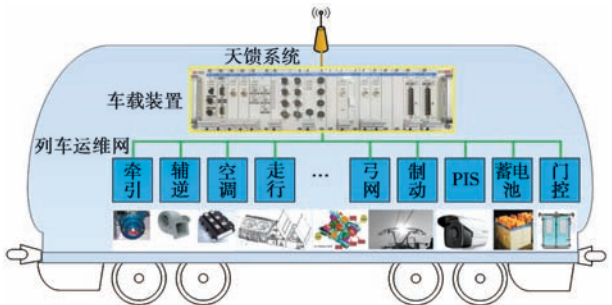


图 1 系统架构

Fig. 1 System architecture

2.1 车载装置设计

车载装置的设计需要采用模块化和平台化的思路，以支持业务模块的增加和删减，既要支持复杂场景下的高级业务场景和功能需求以及个性化延伸，也需要支持基本功能的应用。图 2 示出中车株洲电力机车研究所有限公司（简称“株洲所”）研制的一种车载装置。其采用模块化、集成化的机箱式设计，背板采用总线方式进行数据通信，电源板支持 110 V 输入和 DC 5 V, DC 24 V 输出，不仅拥有主控电路板（简称“板”）、无线通信板、以太网交换板、防火墙板、PHM 板、大容量存储板和 MVB 通信板，还支持 CAN 通信板、DIO 通信板等众多扩展板卡，同时可提供灵活多变的配置方案以适应各种业务场景的功能需求。其中主控板主要完成相关基础应用功能的实现；无线通信板支持 3G/4G/5G/WLAN 的无线通信及 GPS/BD 的卫星定位功能；以太网交换板提供 100 Mb/s, 1 000 Mb/s 带宽的数据交换，并支持速率、全双工 / 半双工、线序 (MDI/MDIX) 的自适应和强制模式；防火墙板实现边界防护和网络安全隔离；PHM 板主要实现对关键部件的故障预警、专家诊断、寿命预测等对算力要求较高的功能应用；大容量存储板采用工业固态硬盘并支持 TB 级的数据存储。



图 2 车载装置
Fig. 2 On board device

2.2 天馈系统设计

设计天馈系统时要考虑 3G, 4G, 5G, LTE, WLAN 及专网（如 LET-R/5G 专网）的频段要求，不仅需要支持国内运营商的制式需求，同时还需考虑欧美、亚洲、南美及非洲等地区的主要运营商移动制式。对于不同的应用场景，所需配置存在诸多不同，如只需要移动公网或 WLAN 需求的，可以不用配置合路器，车载装置通过对应接口直接与天线通信接口连接即可；对于移动 5G 公网通信，基于 MIMO 技术基础，5G 天线需要 2, 4, 8 根馈线不等；对于 5G 专网，则需要定制天线及配套地面基站才能实现车地通信。

2.3 列车运维网设计

列车运维网通常是对既有列车通信网络复用或加装一套列车网络或两者结合的方式进行方案设计，所以列车运维网通常是一种异构型网络，存在着以太网、MVB 总线和 CAN 总线等多种网络。图 3 示出一种较为常见的以太网和 MVB 网的组合方式。其中，MVB 网络为传统型的列车通信网络 (train communication network, TCN)，车载装置可以通过相应的 MVB 接口直接接入 MVB 网，完成控制网的数据采集；以太网为既有的维护网，如果没有维护网，则需要通过加装的方式实现，每个车厢内配置一台二层交换机，构成维护以太网中的节点设备单元，对于单个车厢内采用星型结构，各个子系统，如牵引、走行、空调、门控等子系统通过以太网线与本车厢二层交换机相连；车厢与车厢之间各节点二层交换机设备一般采用环型网或链路聚合网构成列车骨干网络，实现数据的互联互通。

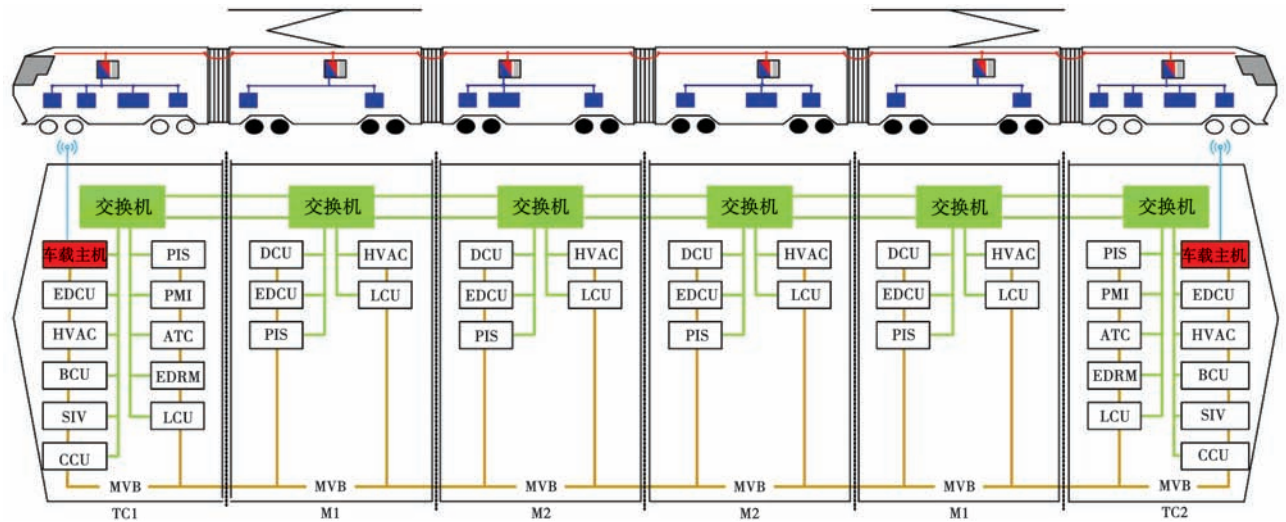


图 3 MVB 和以太网结合的运维网
Fig. 3 MVB and Ethernet combined operation and maintenance network

3 关键技术

智能运维车载子系统关键技术主要包括无线通信技术、网络安全技术、故障预测与健康管理技术、多信息融合技术及图像识别技术等。

3.1 无线通信技术

无线通信技术是车地通信的关键所在，其实现了车辆与地面的数据远距离实时传输及双向数据通信。目前城市轨道交通使用的无线通信技术主要包括公众移动通信网络(2G/3G/4G)、无线局域网(WLAN)及专用网络(LTE-R)。

公众移动通信网络覆盖面广，便于复用，无需对线路、段内进行基站建设等工作。对于老旧线路加装改造，采用公众移动通信网络较为便捷，可以实现信息化的快速转型。

WLAN 网通常被部署在段内或站内，其基于 IEEE 802.11 b/g/n 或以上标准，且支持 2.4 GHz 或 5.8 GHz 双波覆盖，主要用于实现离线文件的车地转储。

LTE-R 网络不仅支持 GSM-R 互联互通，同时可承载列控、列调、PIS 系统和视频监控系统(closed circuit television, CCTV)等众多轨道交通业务。LTE-R 网络减少了基站控制器(base station controller, BSC)等中间网元环节，从而减少了通信流中信令的交互过程，降低了延时，提高了通信的稳定性^[3]。

5G 技术作为新一代无线通信技术，增加了频谱效率。其一方面在原有带宽下提供了更高的通信速率；另一方面，采用更高的频段能够缓解频谱资源紧张的现状，实现高速、短距离通信^[4]。轨道交通领域目前 5G 技术的应用还处于初级发展阶段，所采用的方式主要有移动公网 5G 通信和专网 5G 通信两种方式，其千兆级别的传输速率和微秒级别的空中接口延时性能，不仅可以实现列车实时数据、视频流等数据的高密度稳定传输，而且可以对列车离线文件实现车地高速无线转储。

3.2 网络安全技术

列车网络安全是一个系统性的工作，无法靠单一设备实现整车网络安全。作为列车的边界设备，车载装置主要通过加密技术、防火墙技术等手段保护列车信息安全，实现边界防护和访问控制等功能。

加密技术主要分为对称加密、非对称加密和不可逆加密 3 种方式，用于数据安全保护、身份识别及接入认证等，以避免数据的泄露、非法监听及篡改等。

列车的网络接入认证、身份识别通常采用非对称加密和不可逆加密方式；而对于实时数据的传输，则采用对称加密方式。

防火墙技术主要包括基于五元组的包过滤、防攻击扫描、深度报文解析、安全审计、网络地址转换(network address translation, NAT)以及虚拟专用网络(virtual private network, VPN)等技术，实现内外网的安全隔离，保护列车网络。

3.3 故障预测与健康管理技术

列车故障预测与健康管理(PHM)^[5-6]是利用先进传感器进行各系统的数据采集，借助数据挖掘、特征提取、模型推理、深度融合等软件技术手段实现列车故障诊断、故障预测及寿命预测等功能，从而提升检修效率，降低人车比和检修维护成本。车载 PHM 主要针对实时性要求较高的场景，其充分利用边缘节点的天然分布式特点进行实时检测和诊断预警，从而可以更好地保证列车的行车安全。

3.4 多信息融合技术

通过车载装置可以采集到列车各个子系统基本状态、控制、维护及媒体等多源数据，通过对数据进行高效分辨、清洗、重组及关联，获取列车关键事件、运行态势及潜在威胁等有潜在价值的信息，并完成专家诊断^[7]、应急处置及联动分析等相应评估决策。

3.5 图像识别技术

图像识别技术一般包括图像输入、图像预处理、特征提取、辨识分析和识别结果输出几个过程^[8]。通过图像识别技术对司机室、客室、路况^[9]、弓网等摄像头的视频流进行分析处理，可以有效支撑弓网检测^[10]、司乘行为检测、火灾检测、障碍物检测^[11]等应用，提升列车在线运营安全和管理效率。

4 系统应用功能

智能运维车载子系统应用功能涉及数据采集与传输、数据存储、应急处置、故障检测、PHM、网络安全、文件转储、司机行为识别及冗余。

4.1 数据采集与传输功能

车载装置通过 MVB, CAN, DIO 和以太网等接口方式实现与列车运维网的有效链接，并周期性地对列车数据进行采集，数据主要包括列车各个子系统的状态数据、控制数据、维护数据及故障数据等；通过协议匹配，实现对各类数据的识别、清洗和重组；

最后通过车地无线网络将数据发送到地面运维服务中心，实现对列车的远程监视。

4.2 数据存储功能

车载装置通常需要将所采集的实时数据和离线数据存储到本地数据库,并保留 30~90 天不等的时间。随着以太网技术在列车中的广泛使用,目前车内传输带宽均达到 100 Mb/s 以上,数据传输能力大大提升,使得 PIS 及弓网等的视频数据也可得以采集和存储,但需要车载装置具备 TB 级的存储能力。

4.3 应急处置功能

针对列车的突发状况,尤其是在正线运营时发生紧急故障,司机通常只能根据应急操作手册或 110 远程指导进行故障排除,沟通效率低,排查故障时间长^[12]。通过在车载装置上设置应急处置功能,能够大大提升列车在突发故障时的处置效率,快速定位故障位置,指导排查,缩短正线应急救援的处理时间。图 4 示出车载装置实现应急处置的基本流程。车载装置需要具备对常见应急故障进行自动诊断的能力,其快速形成故障树,在列车人机交互界面(如司机屏)上提示司机进行逐步相应的操作,并根据司机的操作快速识别处置结果,判断故障是否已消除或需进一步处置。

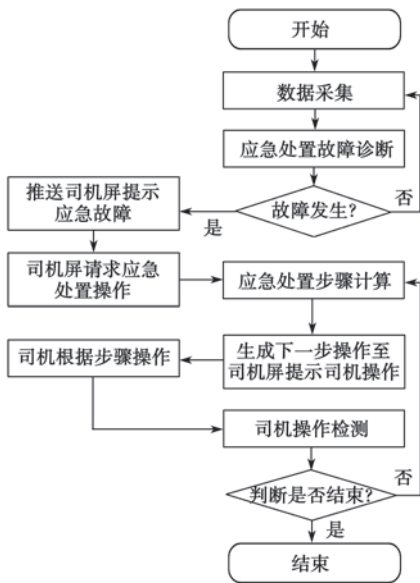


图 4 应急处置基本流程
Fig. 4 Basic flow chart of emergency response

4.4 故障检测功能

通过动态检测 TCMS 对应故障点位的变化,判断列车故障的发生和结束状态,并将故障发生时前后数秒时间内的环境变量、列车基本信息与之关联,形成故障检测结果。车载主机的故障诊断范围包括

牵引、制动、门控、空调及走行等各个子系统发往 TCMS 的所有故障信息。

4.5 PHM 功能

车载级 PHM 主要是通过将实时数据、故障信息及离线文件进行特征提取、融合、关联分析和算法建立模型,最终完成故障的状态监测、诊断和预警,并将结果和维修建议反馈至司机显示屏和地面运维中心,由人工核实后再对车辆或相应设备进行管控和运维操作等,构成“感知-分析-决策-执行”的数据流闭环。图 5 示出车载 PHM 基本处置流程。如针对牵引电机,通过研究电机散热模型,并结合现场电机电流、转速、力矩及温度等参数进行大数据分析,建立电机温度预测模型,对电机滤网堵塞的不同状态进行评估,从而指导电机滤网清洁工作^[13]。

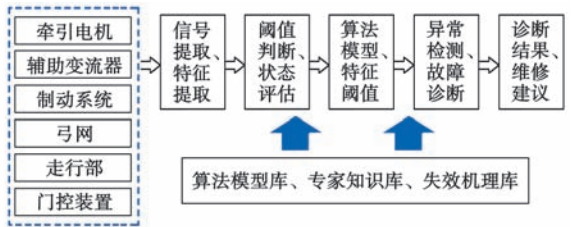


图 5 PHM 处置流程
Fig. 5 Flow chart of PHM disposal

4.6 网络安全功能

车载装置作为车地数据通信的边界设备,存在被外部攻击的风险,从而威胁到车载装置本身以及与之相连的列车内部以太网的网络安全,尤其是在多网融合中,基于列车以太骨干网络 (Ethernet train backbone, ETB) 和列车以太组成网络 (Ethernet consist network, ECN) 的列车网络通信架构下,列车网络安全更为重要。通过在车载装置中配置硬件防火墙板卡,可大大提升列车网络的安全等级,同时也可以实现列车内部安全域和非安全域的隔离,保护列车安全域内资产。图 6 示出防火墙的基本功能。



图 6 防火墙功能
Fig. 6 Functions of firewall

4.7 文件转储功能

对列车关键系统的离线文件及音视频文件进行

文件转储是事后问题分析的关键。目前大多数列车文件转储仍采用传统的人工下载模式，这种方法不仅速度慢、时间长，还存在着人力浪费甚至下载过程中断等问题，难以满足数据高速、高效下载的需求^[14]。通过制定合理的文件下载策略，可以在列车运行途中实时下载关键故障问题的关联离线文件，如弓网故障时刻的前后视频文件，牵引、走行等关键子系统故障时刻前后的记录文件等；当车载装置检测到列车回库后，对整车离线文件进行自动转储，如 TCMS 的离线文件、走行系统离线文件、制动系统离线文件及 PIS 的视频文件等等。

车载装置进行文件转储的数据通道一般有移动公网传输 (4G/5G)、库内 / 站内专网 5G 传输、库内 / 站内 WiFi 传输或通过第三方通道进行传输，如 PIS 系统、信号系统的车地无线通道等。

4.8 司机行为识别功能

通过高清摄像头和图像识技术，检测司机的头部运动、眼皮运动、眼睛闭合频率、凝视方向、打哈欠频率等面部信息^[15]，并进行监控与数据分析，当检测到司机异常行为时（如盹睡、离岗、打电话、吸烟、摄像头遮挡等），实时为司机提供语音提示和警告，同时实时将报警信息推送到地面运维平台，有效预防司机疲劳驾驶等危险行为，保证列车运行安全。

4.9 冗余功能

为保证列车数据传输的稳定性和可靠性，通常在头车和尾车各配置一套车载装置。正常时，默认一台车载装置为主设备进行车地数据无线传输，另一台为从设备处于热备冗余状态，两台车载装置通过心跳交互感知对方状态。当主车载装置发生故障时，从车载装置通过心跳信息判断并进行相应的热备切换。

5 应用实例

目前株洲所研制的智能运维车载子系统已经在国内外众多城市的线路中批量部署应用，并发挥积极作用，如在应急处置效率的提升、整车离线文件转储时间的缩短、PHM 诊断预测准确率的提升等方面，有效推动了城轨车辆维修模式从“计划修”“故障修”到“状态修”的转变。以下分别列举相应的具体项目对其进行说明。

5.1 应急处置功能应用

应急处置功能可用于包括门控系统、制动系统、牵引系统、空压机系统、辅助逆变系统、蓄电池及受

电弓等关键子部件 80 多种应急故障处置。该功能在上海、南京、重庆及广州等多个城市的地铁线路均实现了科研装车 and 批量装车应用。司机根据司机屏界面现场应急处置提示信息进行操作，同时通过实时车地通信将应急故障信息、司机当前操作步骤以及车辆状态信息传输到地面运控中心；地面技术以及调度人员以此进行综合分析，并及时给司机进行操作指导，有效提升了应急故障处置的效率。现场故障处置完成时间一般基本在 1 min 之内，相对于现场考核指标 (5 min)，其处理速度大大加快。

5.2 5G 技术应用

在南京地铁宁句线，5G 技术被充分利用，实现了 5G 毫米波专网和 5G 公网的传输。其中 5G 专网峰值传输带宽超过 1.7 Gb/s，平均传输带宽能达到 1.5 Gb/s 左右（图 7）。专网 5G 的地面基站被分别部署在宁句线的马群站和句容站，基站信号覆盖半径范围可达 300 m 左右，从列车进站、停车到出站的时间大概有 2~3 min 的窗口期，车载无线传输主机通过专用 5G 模块和 5G 天线自动连接地面 5G 基站，通过高效的文件传输策略、断点续传策略自动完成大存储文件 (PIS 视频文件、EDRM 文件等) 的高速转储，实现了 25 GB 文件数据 3 min 内转储完毕的高效传输。

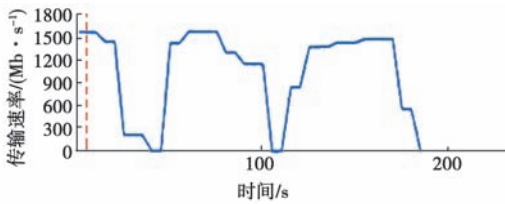


图 7 专网 5G 文件传输速率图
Fig. 7 Transfer rate chart of 5G file in private network

5.3 PHM 应用

PHM 装置目前已经在广州、深圳、上海、郑州及长沙等诸多城市轨道交通线路中被批量装车运用。智能运维车载装置搭载多级 PHM 专用模块，通过开展大量的模拟实验并利用历史数据，建立了各类模型算法，实现了对牵引电机、辅助变流器、充电机及蓄电池等部件的在线诊断、预测和报警，并和地面服务器联动，实现关键子部件全生命周期的健康诊断、状态评估，如电机的绝缘状态预警、滤网堵塞预警、接触器故障预警及联轴节故障预警等等。图 8 示出某地铁牵引电机的谐波脉冲谱波形，系统通过提取磁链的特征频率，实现了牵引电机轴承故障的诊断和提前预警。

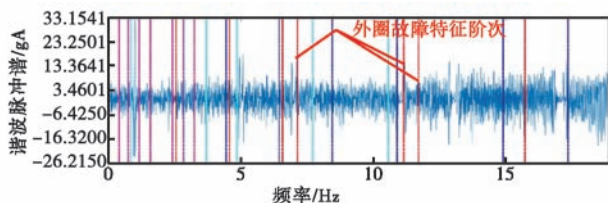


图8 谐波脉冲谱

Fig. 8 Harmonic pulse spectrum

6 结语

智能运维技术目前已经在国内城市轨道交通领域大面积使用,车载子系统作为其关键子系统已经实现了列车的数据汇聚、实时处理及多通道传输等功能,基本步入了信息化和网联化的运维进程。结合网络安全、5G通信、PHM和图像识别等技术,在列车的边界安全防护、故障诊断预警、应急响应、司机行为识别及高速转储等方面进行了深度应用研究,实现了批量装车应用。

智能运维技术的本质依旧是运维,而运维的基础是数据的共享。对智能运维车载子系统而言,保证车地传输数据的完整和安全是其基本职能,但目前无法百分百实现,这是今后深度应用过程中须关注和考虑的问题。一方面,对特定业务场景的深度理解、列车数据的积累和共享有助于推动算法和模型的优化,以更好地适应轨道交通行业需求,提升预测、预警、诊断及健康管理等的准确率;另一方面,与新兴无线通信技术、物联网和城轨云的有机结合,可以有效突破目前在传输速率、带宽及运算能力等方面的瓶颈,提升智能运维能力。另外,提升网络安全防护能力,并使网络符合相关信息安全标准(如信息安全等级保护、IEC 62443-3-3《工业过程测量、控制和自动化网络与系统信息安全》等)也将是智能运维车载子系统的必经之路;同时在司乘音视频监测、精准定位、限界检测、主动防撞、自动驾驶及安全保障等多专业场景的联动分析处理方面,智能运维车载子系统也可以承担更多职责,发挥积极作用。

参考文献:

- [1] 中国城市轨道交通协会. 城轨交通 智慧先行——《中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要》正式发布实施[EB/OL]. (2020-03-12)[2020-06-12]. <http://www.camet.org.cn/xhfb/4683>.
- [2] 王冰,李洋,王文斌,等. 城市轨道交通智能运维技术发展及智能基础设施建设方法研究[J]. 现代城市轨道交通, 2020(8): 75-82.

WANG B, LI Y, WANG W B, et al. Research on development of urban rail transit intelligent operation and maintenance technology

and intelligent infrastructure construction method[J]. Modern Urban Transit, 2020(8): 75-82.

- [3] 高志远. LTE-R 通信系统可靠性分析与研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
 - [4] 林凌. 浅谈 5G 技术及应用前景[J]. 中国新通信, 2019(17): 121-123.
 - [5] 张宝珍,曾天翔. PHM: 实现 F-35 经济可承受性目标的关键使能技术[J]. 航空维修与工程, 2005(6): 20-23.
- ZHANG B Z, ZENG T Q. PHM: The Key Enabler to F-35's Affordability[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2005(6): 20-23.
- [6] 潘莹. 故障预测和健康管理技术在地铁车辆运维中的应用[J]. 控制与信息技术, 2020(4): 91-95.
- PAN Y. Application of Fault Predication and Health Management in Metro Vehicle Operation and Maintenance[J]. Control and Information Technology, 2020(4): 91-95.
- [7] 吕龙. 高速动车组故障诊断专家系统总体设计[J]. 城市轨道交通研究, 2018(2): 99-101.
- LYU L. Overall Design of Expert System for High-speed EMU Fault Diagnosis[J]. Urban Mass Transit, 2018(2): 99-101.
- [8] 耿庆田. 基于图像识别理论的智能交通系统关键技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
 - [9] 刘邦繁,张慧源,李晨,等. 基于车载激光雷达的机车可通行区域检测[J]. 控制与信息技术, 2021(4): 78-82.
- LIU B F, ZHANG H Y, LI C, et al. Locomotive Passable Area Detection Based on Onboard LiDAR[J]. Control and Information Technology, 2021(4): 78-82.
- [10] 刘世望,胡云卿,林军. 基于机器视觉的高速铁路吊弦断裂与松弛故障监测[J]. 控制与信息技术, 2021(4): 66-71.
- LIU S W, HU Y Q, LIN J. Machine Vision Based Monitoring of Breakage and Slack Fault for High Speed Railway Dropper[J]. Control and Information Technology, 2021(4): 66-71.
- [11] 曾祥,蒋国涛,鲍纪宇,等. 基于车载激光雷达的隧道内障碍物检测[J]. 控制与信息技术, 2021(1): 1-8.
- ZENG X, JIANG G T, BAO J Y, et al. Detection of Obstacles in Tunnel Based on Vehicle-borne LiDAR[J]. Control and Information Technology, 2021(1): 1-8.
- [12] 文林,张轶,彭辉,等. 一种智能地铁车载应急处置系统[J]. 控制与信息技术, 2019(5): 63-67.
- WEN L, ZHANG Y, PENG H, et al. An Intelligent On-board Emergency Disposal Prompt System for Metro Trains[J]. Control and Information Technology, 2019(5): 63-67.
- [13] 刘可安,戴计生,徐海龙. 城轨车辆关键部件状态修技术与系统解决方案[J]. 机车电传动, 2020(4):1-7.
- LIU K A, DAI J S, XU H L. Condition Repair Technology and System Solutions for Key Components of Urban Rail Vehicles[J]. Electric Drive for Locomotive, 2020(4):1-7.
- [14] 王永军. 基于 5G 技术的机车大容量无线转储系统研究[J]. 控制与信息技术, 2020(4): 39-43.
- WANG Y J. Research on Large-capacity Wireless Dump System for Locomotive Based on 5G Technology[J]. Control and Information Technology, 2020(4): 39-43.
- [15] 熊群芳,林军,岳伟,等. 基于深度学习的疲劳驾驶状态检测方法[J]. 控制与信息技术, 2018(6): 91-95.
- XIONG Q F, LIN J, YUE W, et al. A Method of Fatigue Driving State Detection Based on Deep Learning[J]. Control and Information Technology, 2018(6): 91-95.