



面向地铁车辆长寿命周期维保的智能运维平台方案研究

李明¹, 崔庭琼², 王锡哲¹, 龚娜¹, 张杨², 宁尧¹
(1. 中车数智科技(雄安)有限公司 产品研发中心, 北京 100089;
2. 中车(重庆)智慧轨道交通技术有限公司 数智研究院, 重庆 401121)

摘要: 中国城市轨道交通行业已迈入高质量运营新发展阶段, 城轨运维检修市场规模显著扩大。行业对运用智能运维降低正线故障率、减人增效、降本延寿等需求日益迫切, 即通过精细维修、成本优化管控等系统解决方案, 实现保安全、降成本、提质量、增效益的目标。基于智能运维行业发展现状及地铁公司应用需求, 文章梳理形成了面向业务、应用、数据和技术的4A架构, 制定了简统规范, 可实现细化至最小检修单元的车辆检修构型和物料编码统一, 以及包括日月检、架大修在内的修程修制统一。基于中车工业软件专版, 构建覆盖城轨车辆全生命周期的中国中车统一智能运维平台, 依托智能感知、智能分析、段场管控、智能驾驶舱等核心业务, 打造以状态驱动的设备维护和全生命周期运维成本优化为支撑的中国中车特色运维模式。该模式将在中车长寿命周期维保项目中落地验证, 助力城轨运营企业持续提升运维降本节支效益, 从而为城市轨道交通车辆运营维护质量、效率提升和降低成本提供参考。

关键词: 地铁车辆; 智能运维; 架构设计; 全生命周期; 检修维护; 降本节支; 城市轨道交通

中图分类号: U279; U239.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)05-0128-13

0 引言

中国城市轨道交通发展经历了起步探索、缓慢发展、快速发展和高质量发展4个阶段。截至2024年底, 中国已有58座城市(港澳台地区没有统计在内)开通城市轨道交通, 运营线路总计361条, 运营里程达到12 161 km; 其中41座城市拥有地铁系统, 运营里程达到9 306 km, 城市轨道交通已成为公共交通的骨干力量。当前, 超大城市城市轨道交通率先进入增长稳定期, 整体步入存量优化阶段; 其他城市也逐步进入更新改造期, 车辆运维检修市场规模显著扩大, 这将推动中国中车城轨业务从“增量新造产品”向“存量运维服务”转型。

近年来, 中国城轨行业在绿智融合和协同发展方面取得积极进展, 但同时也面临运维成本居高不下、

地方债务规模攀升等新挑战, 如何实现可持续发展已成为行业焦点。2025年3月, 中国城市轨道交通协会印发《关于促进城市轨道交通企业财务可持续发展的指导意见》^[1], 针对大多数城市地铁运营公司债务规模突破警戒线、客流强度不足加剧亏损等现实问题, 提出要贯彻“公益为本, 经营为要”理念, 通过加强规划引导、合理确定标准、化解债务风险、促进收支平衡等途径, 科学安排项目建设时序、严密防范系统性债务风险、着力保障长期财务可持续。随着城轨运维检修市场规模持续扩大, 行业对运用智能运维降低正线故障率、减人增效、降本延寿等需求日益迫切, 即通过精细维修、成本优化管控等系统解决方案, 实现保安全、降成本、提质量、增效益的目标, 推动城轨业务转型升级与多维度价值创造。高利华等专家提出涵盖检修维护、生产调度、乘务管理、综合管控等业务的车辆段智慧化提升方案, 对提高城市轨道交通运

通信作者: 李明, 男, 博士, 正高级工程师, 长期从事绿色低碳及智能运维技术研究; E-mail: limit_sina@163.com

引用格式: 李明, 崔庭琼, 王锡哲, 等. 面向地铁车辆长寿命周期维保的智能运维平台方案研究[J]. 机车电传动, 2025(5): 128-140.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.05.014.

Citation: LI Ming, CUI Tingqiong, WANG Xizhe, et al. Research on an intelligent operation and maintenance platform solution for long lifecycle maintenance of metro vehicles[J]. Electric drive for locomotives, 2025(5): 128-140.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.05.014.

营企业生产效率、优化资源配置、降低运营成本具有重要意义^[2]。汪峥等^[3]专家设计了一套地铁车辆基地综合自动化管理系统并在成都地铁5号线成功应用,功能涵盖收发车、检车修车、调车、司机派班、站场监控等。丁明辉等^[4]专家基于城市轨道交通运营现状及智慧车辆段业务功能与建设方案研究,面向智慧车辆段建设需求,提出包含调度运行智能化、运维检修信息化、综合管控数字化的数智化方案。

在此背景下,地铁公司对车辆检修维护工作的优化需求越来越高。各城市轨道交通运营企业正逐步从以计划性维修和故障性维修为主、恢复车辆设备可靠性为目标的检修模式,向基于状态预测、兼顾质量和成本效益的均衡维修模式转变。西门子公司提出,在城轨智能运维方面实现成本造修比1:1,车辆平均无运营故障间隔里程从2021年的10万km延长到2023年的33万km;各地运营企业也尝试将日检调整为两日、四日乃至八日一检,并考虑均衡月季年检工作量,减少对线路维保人员的需求。因此,在保障城市轨道交通安全稳定运营的前提下,如何实现运维成本降低与运维管理效率提升,已成为行业亟待解决的问题与使命责任。在信息化系统方面,中国中车内部各子公司虽已具备智能分析系统(PHM)和段场管理系统(MRO)等智能运维解决方案,但各平台在功能、界面、数据标准上差异显著,多偏重数据采集呈现和点状PHM应用,与业主生产系统需求的匹配度不足,尚未形成能有效满足中国中车长寿命运维与业主降本节支需求的统一解决方案;同时,各系统分散建设,缺乏顶层设计与统一管理平台,不同线路或系统的运维信息化综合管理水平参差不齐,亟须构建服务于用户的统一数智化运维服务平台。因此,本文将基于中国中车工业软件专版,构建中国中车统一城轨智能运维平台,打造以状态驱动的设备维护和全生命周期运维成本优化为支撑的中国中车特色运维模式,并在中国中车长寿命周期维保项目中落地验证,助力城轨运营企业持续提升运维领域降本节支效益。

1 案例分析及问题总结

1.1 典型案例

1.1.1 上海地铁18号线/西门子

上海地铁18号线委托西门子承接20年车队数字化全生命周期运维服务,服务范围包括日检及均衡修、列车架大修、故障处理、整改试验及段场设备维护。双方签署的合同包括数字化解决方案(软件平台)与维修交付工作,西门子配置专业工程师团队,依托轨旁车辆视觉检测系统(VEMS)、智能运维平台(Railigent)和检修管理系统(CORMAP)实现车辆检修与维护全过程的闭环管理。其中,VEMS可通过自动化

机器视觉及传感器技术完成车辆外观及关键部件检测,以替代车辆日检项目;Railigent可对列车状态开展与部件寿命及安全相关的在途监测、故障诊断、状态综合分析、趋势预测及故障隐患挖掘;CORMAP则用于对维修及大修活动的监视、计划、控制与执行。双方通过持续动态调整维修管理精度和维修能力,以保障维修质量为核心,强化维修作业过程管控,可实现车辆维修“人、机、料、法、环”的闭环管理。

西门子借助统一运维管理平台构建了“数据管理—数据监控—数据分析—运维服务”的闭环运维模式。用户通过平台门户,可实现对不同对象和类型设备运行性能、故障、配置等数据的浏览、查询,以及任务调度功能;基于定制化数据分析结果,辅助用户高效完成维护、管理及检修工作。该方案覆盖“监控与预测资产状态→准备运维工作→分派任务、设施与工具→执行运维工作→检测与记录→计划性预防工作→优化性预防工作”典型运维 workflow,通过闭环管理推动车辆修程修制持续优化。

1.1.2 北京地铁

张家湾车辆段是北京地铁7号线的列车停放与检修基地,承担全线B型车的停车列检、架修及试车业务。该车辆段智能管控平台以工业互联网架构为基础,配置统一数据中心与网络规划,以车辆检修为核心业务,通过对计划调度、检修作业、生产调度、安全质量、配件库存等业务的信息化管理,实现检修生产各环节信息共享与高效协同;同时依托车载运行数据、车载故障数据、检修数据等各类数据的积累与分析,达成车辆运行、检修、运维管理的有机统一。

张家湾智能管控平台是国内地铁运维领域首个集运营、检修、设备、安全于一体的全流程一站式管控平台。该平台由检修管理、检修设备管理、检修安全管理、数据分析服务等子系统构成,具有良好的扩展性,可根据其他地铁运营检修中心的需求进行功能适配和扩展。各级子系统的功能如下:

①智能检修管理。系统实现了检修计划、检修作业工单的自动生成以及检修过程的实时监测与实时追溯,为每辆车建立了完整的履历库,结合车辆运行数据、检修数据等实现了车辆全生命周期状态管理与追踪。此外,检修管理子系统通过与车辆段内其他系统接口联动,简化了调度作业,提升了管理效率。

②检修设备智能管理。系统通过对检修设备状态监控与试验数据的实时采集和分析,实现了检修工具、检修人员、检修任务的立体化管理,以及检修作业无纸化与检修设备状态全周期追踪;同时,系统通过搭载检修设备的智能物联网网关实现了百余种检修设备的数据采集,结合大数据分析和数据挖掘技术实现了对设备的健康评估与状态预测。

③检修安全智能管理。通过安全管理设备和无线

基站等实现了收发车、检修等作业过程中的停送电作业全流程安全信息化管理,保障了人员作业安全合规。系统通过多种安全基础设备联动建立了标准化的安全保障体系,确保了检修人员的安全。

④数据分析服务管理。该系统主要由车载数据回库下载、走行部健康管理等模块组成,车载数据回库下载模块将列车运行状态数据与故障数据采集至智能管控平台的数据仓库,通过数据分析为车辆故障检修提供指导;走行部健康管理模块以车载数据为基础,依托地面部署的故障预测与健康管理(PHM)系统,对车载回库下载的数据进行深度挖掘,并分析车辆运行故障成因、故障发展趋势,为列车的运维决策制定提供支持。

1.1.3 香港地铁

香港地铁有限公司是世界范围内较为优秀的地铁运营公司之一,至今已有40多年历史,其地铁车辆、通信信号、隧道、机电/自动化设备及系统至今仍保持良好的运营服务表现,归根结底与其多年来完善的全生命周期资产管理体系、严格的标准化作业方案以及对修程修制的不断创新优化密不可分。香港地铁还借助架大修等契机推进设备数字化升级改造,成立车辆系统日常表现监控小组(EPPM),采用资产状态及性能评估(ACCA)等手段,结合实时数据监测与分析,在保障安全的前提下实现设备维护周期最优化调整。

以香港地铁电客车智能运维为例,香港地铁根据不同线路和设备运营特点,有针对性地建立了轮轨监测系统、轨旁监测系统、轴箱温度监测系统、弓网监测系统和转向架振动监测系统,对不同线路受电弓、轮对等设备状态进行实时监控,并将收集的数据统一发送至车辆段,再由车辆段根据实时车辆状态优化列车运行计划,降低列车运行风险,提高列车可靠性;同时,大数据将最终被发送至车辆状态监测中心,经监测中心对实时数据进行分析 and 整理后,推动检修模式从“均衡修+故障修”向“状态修”进一步转变,对预防性维修计划、架修和大修修程修制进行调整,在强化设备状态监测的同时延长维修周期,实现全生命周期内资产成本效益评估,以发挥资产的最大价值。

1.1.4 深圳地铁

侨城东车辆段针对列车架大修业务开发了智能运维系统,包括维修流水线、智能装备、智能物流等核心模块。依托该系统,可实时监测列车故障信息及各系统状态数据,车辆应急响应效率提升80%;采用网轨隧综合检测系统等先进检测维护设备,在车辆运行过程中实时检测接触网、轨道、隧道设备的参数,取代75%以上的人工巡检作业,检修效率提升50%,检修人员配置减少10%,电机维修流水线维修效率提升100%。通过推动车辆检修模式从计划修向状态修、均衡修转变,全生命周期维保成本节约10%。

1.2 问题总结

据统计,目前地铁车辆每次架修需扣车约20 d,大修需扣车约35 d;同时地铁公司运维成本中人工成本占比超过50%,架大修的工时工作量远大于日常维保,对地铁公司人员均衡配置造成冲击,因此地铁业主具备推进均衡架大修强烈愿望。根据交通运输部2024年11月发布的《城市轨道交通设施设备运行维护管理办法》,速度不高于120 km/h的列车可执行6年一架修、12年一大修的标准,30年的寿命周期压缩为“两架两大”修程。相较于以往每年定期日常维保(分日、月、季、年检4个周期)、5年一次架修和10年一次大修的修程修制,新规范已减少一次架修。为进一步降低运维成本,各地铁业主正尝试将日检延长至两日、四日甚至八日一检,并均衡月季年检的工作量,以减少对线路维保人员的需求,同时保障车辆运行可靠。针对上述问题,国内学者和技术人员开展了大量研究与实践工作:刘丙林等^[5]专家结合城市轨道交通运营企业的实际需求,搭建地铁车辆智能运维系统架构,提出该系统应涵盖智能检测、生产管理和专家诊断等核心模块。胡佳琦^[6]专家将车辆智能运维系统划分为车-地无线实时传输子系统、轨旁车辆综合检测子系统和车辆维护管理子系统3部分,同时对车辆运维相关技术、管理和标准进行了梳理。刘思等^[7]专家基于国内某地铁公司地铁车辆均衡检修业务,提出一种计及加班安排、时间利用率等要素的地铁车辆均衡检修计划编制算法,形成一种较为通用的排班方案。重庆地铁刘杰^[8]专家以公司管理要求、修程类别和员工休息时间为约束条件,通过统一量纲及赋权,将故障处理时间优化、同类型班组工作量均衡等多目标模型转化为单目标模型,构建检修排班规划模型,优化后故障处理总时间下降36.63%,列检与均衡修工班工作量均衡性显著提升。针对国内日益普及的均衡修模式,杭州地铁邢海福等^[9]专家基于国内外地铁检修经验和杭州地铁运营实际,提出了新型“均衡修”模式,通过对试修期间的故障追踪和可靠性评估,初步验证了其公司车辆“均衡修”模式的可行性。上海地铁陈朝^[10]专家基于列车全寿命周期维护规程的计划、执行、成本等核心管理内容,指出规程是基础、计划是核心、执行是关键、成本是重点,全寿命周期均衡修模式有助于提升列车可用率、可靠性及成本管控能力。昆明地铁苑鹏博等^[11]专家运用故障树分析法确定地铁车辆均衡修的关键检修部件,通过安全性及可靠性分析优化均衡修修程,以提高车辆均衡修作业的检修效率和质量,降低均衡修检修成本。谈哲林^[12]专家运用熵值法、FMECA模型和FAHP法对某地铁车辆的转向架系统进行研究,针对转向架系统中轴端滚动轴承异响提出牵引电机异响维修优化方案,并编制了相应的检修工序文件。

上述工作已初具成效,但仍存在以下主要问题:

①技术方案未统一。国内各地铁公司的智能运维系统技术方案与技术路线不统一,管控业务和颗粒度不均衡,整体质量和效率有待提高。

②集成共享未实现。数据孤岛问题突出,多源异构数据的集成、治理及安全共享存在瓶颈,数据价值未得到充分挖掘。

③数字化程度不足。支撑业务流程自动化的信息化手段与数字化覆盖率需进一步提高,需通过提升装备数字化率,驱动以可靠性分析为核心的段场智能管控系统建设。

④感知分析不够强。受光照、脏污等环境因素影响,轨旁检测报警准确率偏低,健康管理分析准确度不足、误报误判率较高,额外增加状态复核与故障辨识工作量。

⑤业务变革不透彻。修程修制优化逐步落地,但均衡修制度各有差异,面向财务可持续发展的成本管控业务未在各业务流程中有效归集,导致难以开展造修比等关键指标分析及后续业务优化研究。

2 应对方案

中国城市轨道交通行业已经进入高质量运营的新发展阶段,降本节支增效的可持续发展压力凸显。随

着人工智能技术的深度应用,城市轨道交通车辆运维正从传统被动式维护向智能化、预测性方向转型,推动安全、效率与可持续性的全面提升。对标城市轨道交通运营指标体系,城轨行业可持续发展亟须以数智化技术为驱动、以新运维体系为支撑、安全效率成本并重的新运营模式。

中国中车依托中国中车工业软件专版,构建了覆盖城轨车辆全生命周期的统一智能运维平台,架构如图1所示。该平台聚焦智能预测与健康管理,通过集成物联网、5G通信技术与边缘计算技术,融合多模态数据协同与数字孪生技术,构建多模态数据处理与故障预测模型,实时分析设备历史数据与运行状态,打造“未卜先知”的检修运维模式;同时基于自动化巡检与智能决策支持系统重塑检修维护流程,以智能机器人、无人机替代人工巡检,通过AI知识问答系统快速响应故障处置需求,为检修人员提供维修方案推荐,在提升维修效率的同时,实现全生命周期运维成本的分析与优化。该平台将在中国中车长寿命周期维保项目中落地验证,支撑城轨运营企业在运维领域降本节支30%以上。具体技术路线如图2所示。

从顶层设计指标来看,评价指标应至少包括L1级指标(造修比、平均无故障运营里程)、L2级指标(日常维保辆均人工、日常维保辆均物料、辆均架大修成本、服务可靠度、车辆系统故障率)。

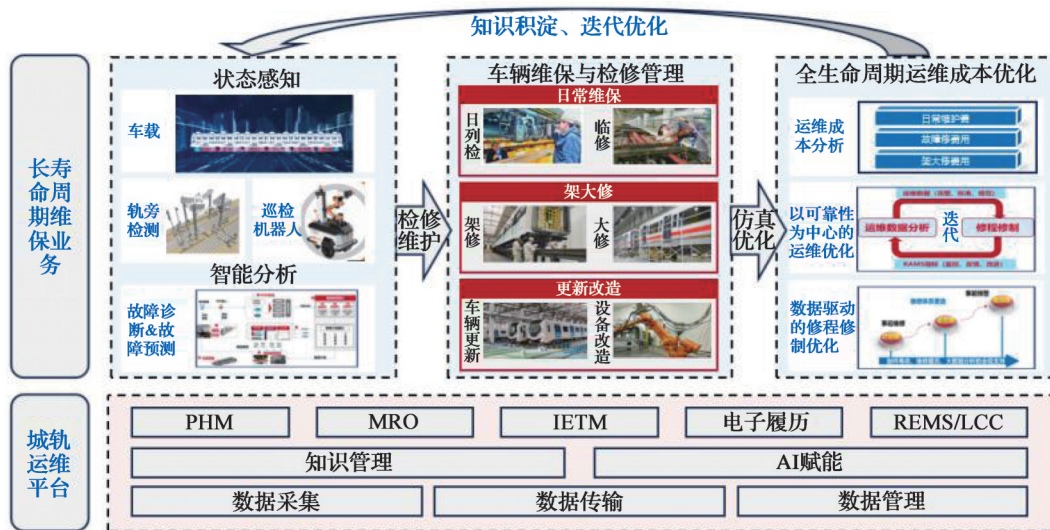


图1 智能运维平台架构

Fig. 1 Intelligent operation and maintenance platform architecture

3 架构设计

依托上述平台架构,本文设计了面向业务、应用、数据和技术的4A架构,分别见图3~图6。通过架构设计、功能场景、用户界面、数据标准、检修工艺和运维代码简统,制定6项简统规范,可实现细化至最小检修单元的车辆检修构型和物料编码统一,以及包括日

月检、架大修在内的修程修制统一;同时,结合运营公司多专业智能运维需求,该平台应具备云平台数据接入与分析功能,形成与信号、供电、站台门等多专业协同的业务架构,避免数据孤岛和多源数据集成问题。

运维平台统型建设并非推倒重来,还需考虑沿用前期中国中车内部企业及供应商已建设系统中的可复用模块,以降低开发成本。如图6所示,参与平台构建

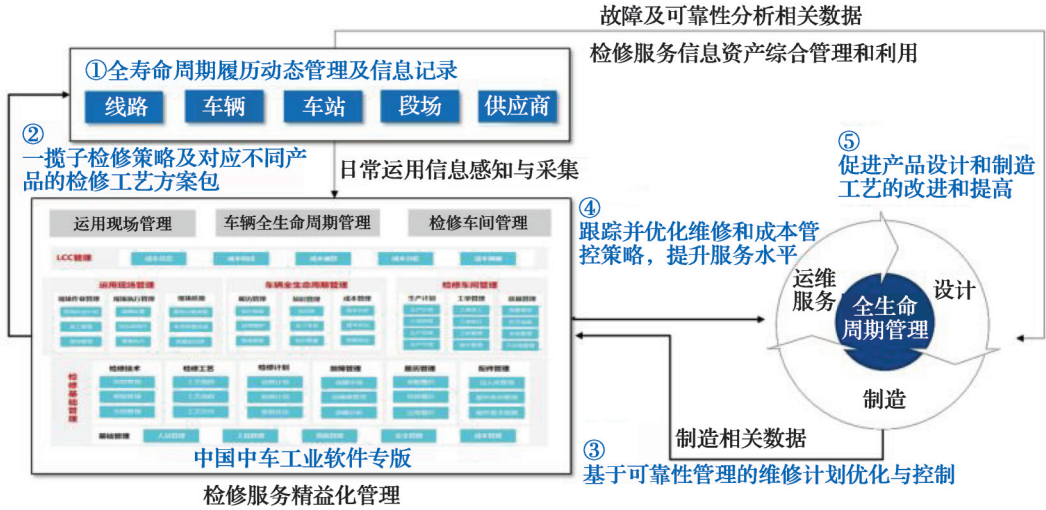


图 2 技术路线

Fig. 2 Technical route

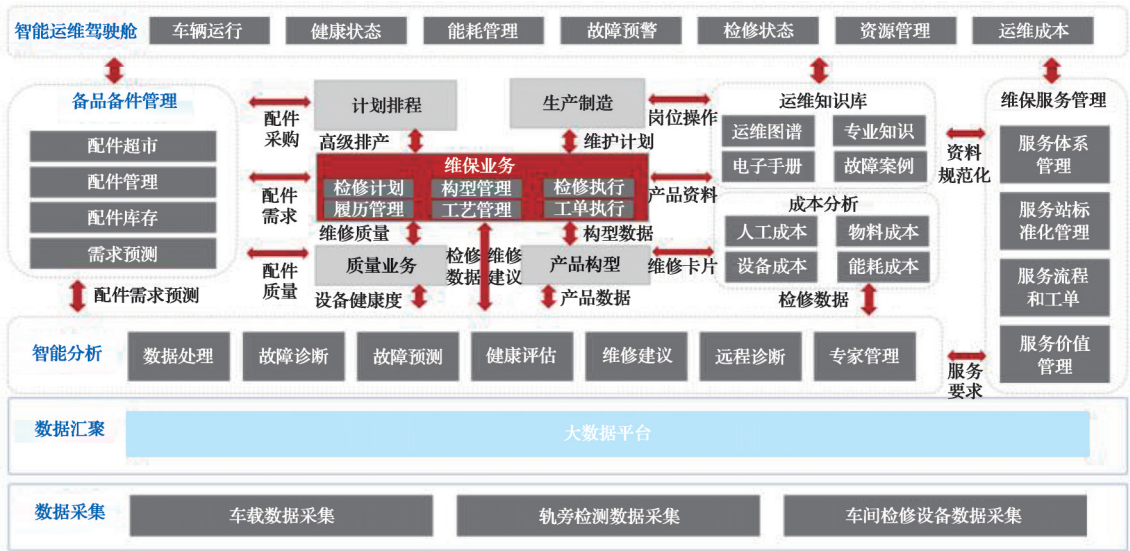


图 3 业务架构

Fig. 3 Business architecture

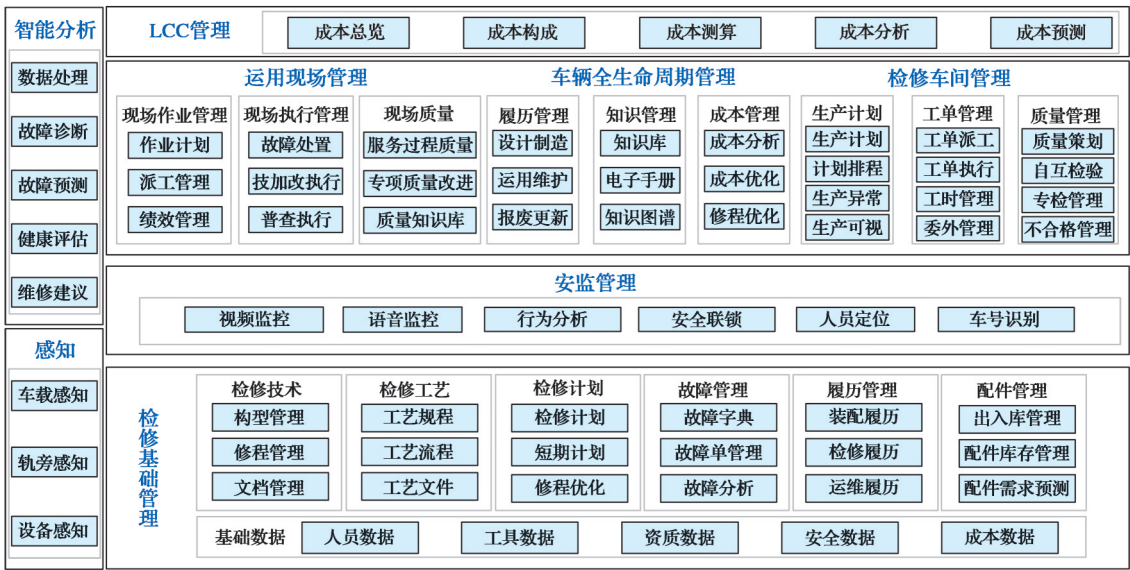


图 4 应用架构

Fig. 4 Application architecture

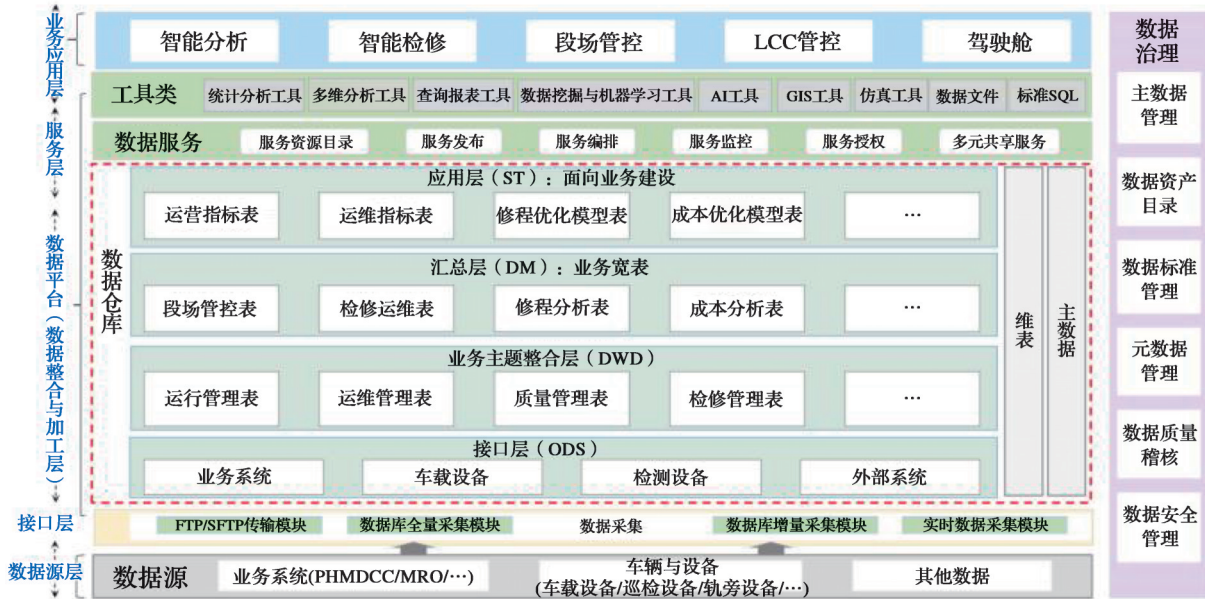


图5 数据架构
Fig. 5 Data architecture

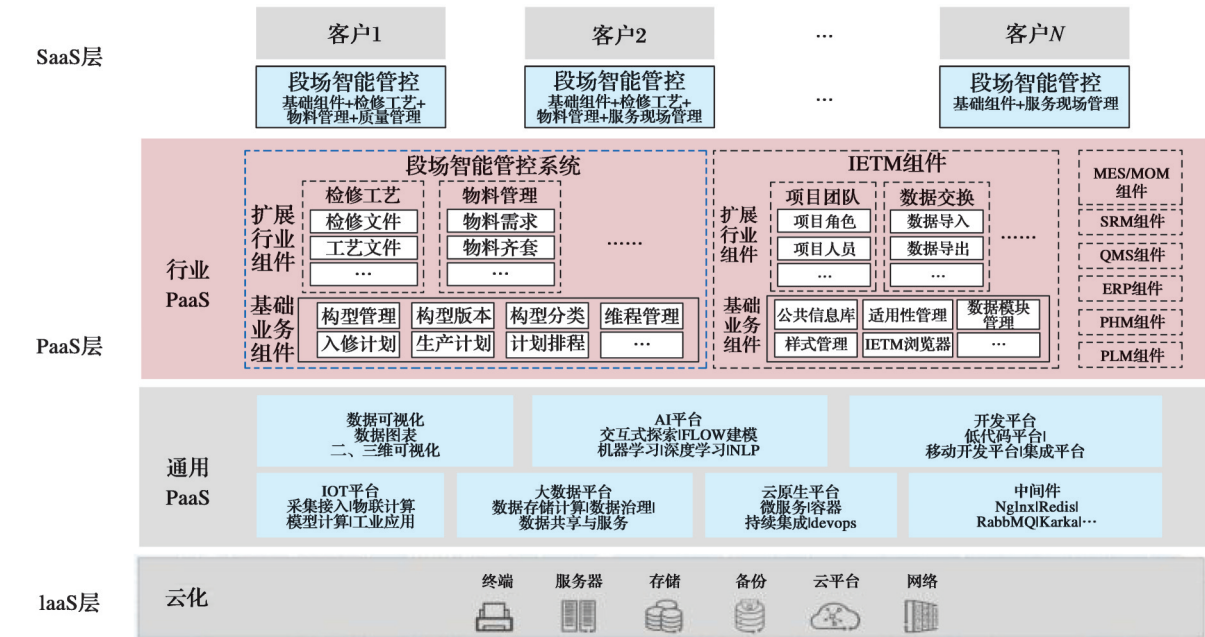


图6 微服务架构开发模式
Fig. 6 Development model of microservices architecture

的单位可提供代码级、组件级软件模块，由数科公司基于中国中车工业互联网技术架构体系进行重构，打造基于微服务架构的智能运维平台。平台建设还应关注以下几个方面：

①降低客户全生命周期运维成本。地铁公司运维成本主要包括人工成本和物料成本，可通过智能化技术实现设备状态的精准监测和预防性维护，减少设备故障和计划外维修次数，在保障车辆可靠性的前提下降低全运营周期的维护和管理成本。具体包括通过延长日检间隔和提升操作人员技能实现合理减员，通过延寿或修程优化减少架大修物料消耗，借助轨旁车辆综合检测、巡检机器人等设备降低日常人工巡检工作

量，最终形成“运用+检修”的全周期降本思路。

②提升车辆可靠性和稳定性。通过数字化、人工智能等新技术和统一的高质量数据模型，不断提升PHM故障预测的准确率，提前识别并处理潜在故障隐患，减少误报和漏报，保障车辆运行的稳定性，减少运行故障，提高整体服务水平和乘客满意度。

③持续满足客户服务质量要求。智能运维可有效提高系统响应速度和运维效率，从而确保轨道交通系统能更高效、更准时地为客户提供服务，进一步增强客户信任感与服务体验。推动客户实施均衡修，将地铁公司车辆30年周期检修的工作量均衡化，降低对运维人员需求的波动冲击。

④呈现中国中车统一的智能运维方案及客户界面。统一各软件功能模块和数据标准，从而在行业内推动精准修。以客户车辆全生命周期数据贯通为目标，统一各业务域数据标准，通过信息化手段规范数据采集，建立统一数据中台集中存储和分析数据，通过数据模型预测推动客户车辆状态修和精准修，为客户提供数据增值服务。

4 关键业务及系统

4.1 智能感知系统

依托车载 PHM 主机及车-地传输、360°外观检测、

踏面缺陷检测、轮对检测、受电弓/受电靴检测、列检机器人及无人机巡检等手段，构建覆盖全网、单线、列车、司机室的多级智能感知体系（图7），实现多场景、多部位、多模态数据的智能感知与初步分析。借助人工智能视觉算法与零部件三维点云处理技术，采用统一的接口与数据标准，实时分析车辆咽喉区/正线过车图像数据，精准识别关键部件状态信息。系统将检测结果反馈至段场智能管控系统，以便快速制定维修方案，引导维修人员精准定位问题部件。目前行业技术水平指标为：故障识别准确率不小于98%，车辆外观日检项点覆盖率不小于90%，系统漏报率不大于3%。

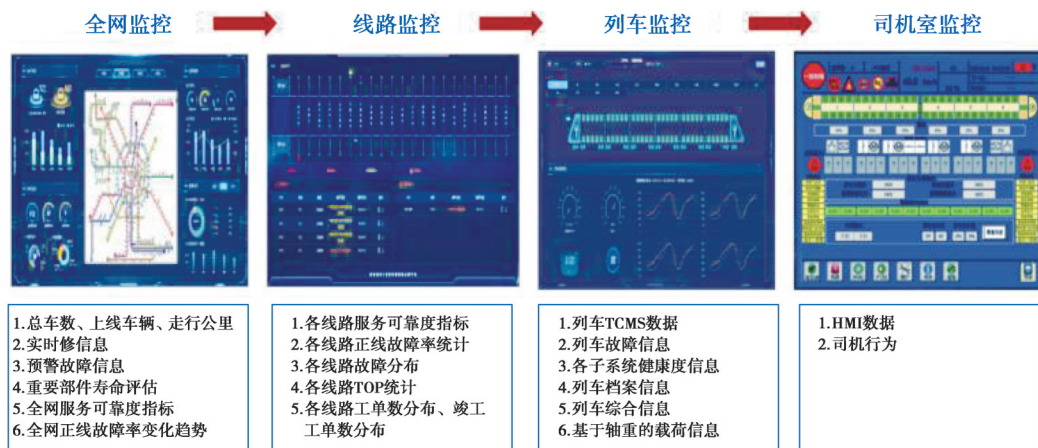


图7 智能感知系统数据

Fig. 7 Data of intelligent perception system

4.2 智能分析系统

针对地铁车辆六大子系统的实时数据，先清洗再进行深入分析，运用数据与知识融合的人工智能手段构建 PHM 算法模型，依依托运维知识及故障诊断理论，实现子系统状态检测、故障诊断与寿命预测；同时，围绕车载关键零部件构建关联数据库，借助积累的数据制定设备诊断预警规则，提升车辆运用效率。在此基础上，建立以产品运维构型为核心的故障层级结构，基于故障诊断树快速定位故障。

4.2.1 健康管理

基于机理模型、专家经验知识和数据驱动建模，搭建数据标准统一、预警代码统一的牵引/辅助、车门、空调、制动系统、走行部、受流系统、蓄电池的 PHM 模型，实现列车状态在线监测、故障诊断与健康评估，目前 PHM 预警准确率可达 90% 以上。健康管理技术路线如图 8 所示，其整合了列车状态监测、轨旁综合检测和巡检机器人检测等全方位状态感知数据，通过列车状态及健康度智能分析，向维保支撑系统输出故障预警信息及检修建议。

4.2.2 全生命周期履历构建

对车辆研发设计、生产制造、维护维修及报废处

置等阶段的数据与文件进行全生命周期管理，支撑车辆检修维护效率提升、运行故障追溯及成本归集优化。以产品构型为核心，构建全生命周期数据电子履历（图9），通过“一车一档”“一件一档”等功能，支撑产品多维度质量与成本分析优化。

4.2.3 全生命周期运维成本分析

结合智能分析系统和段场智能管控系统的相关业务数据，按照统一的运维构型，对日常维保、架大修和更新改造等业务进行全生命周期成本分析，从人力工时、物料配件、工装工具等方面梳理维保业务节支降耗技术措施；同时，系统展示各车辆不同层级的购买、安装、拆卸、更换、改造与处置成本，构建面向造修一体化、“产品+服务”的全生命周期成本管理体系，如图 10 所示。

从研发设计、生产制造、运维检修到报废更新等阶段，对全生命周期费用及各费用单元估计值进行结构性分析研究，如图 11 所示。基于既有维保方案与优化模型，优化日常维保和架修作业流程，从可靠性、可用性、可维护性、安全性/全生命周期成本（RAMS/LCC）角度，提出检修维护工艺、修程修制管理、作业人员技能等优化方案，如图 12 所示。

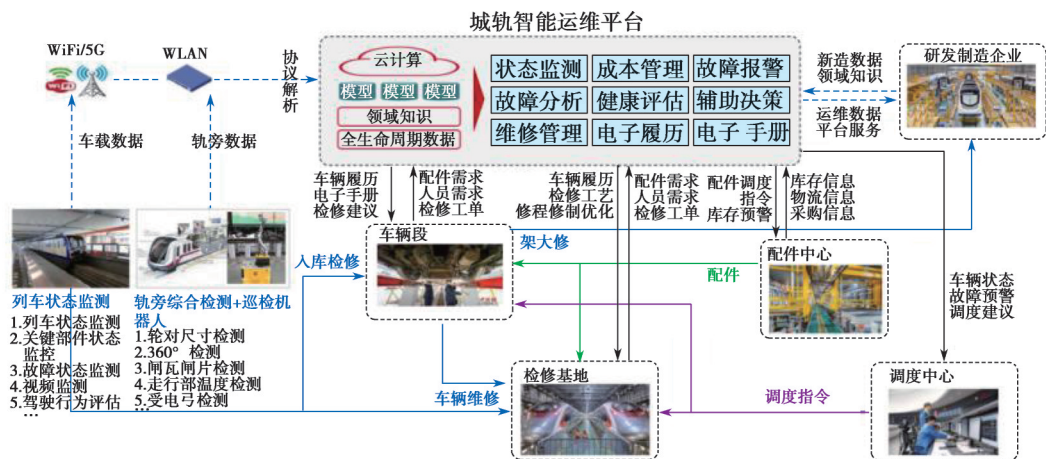


图8 健康管理技术路线
Fig. 8 Technical route of health management

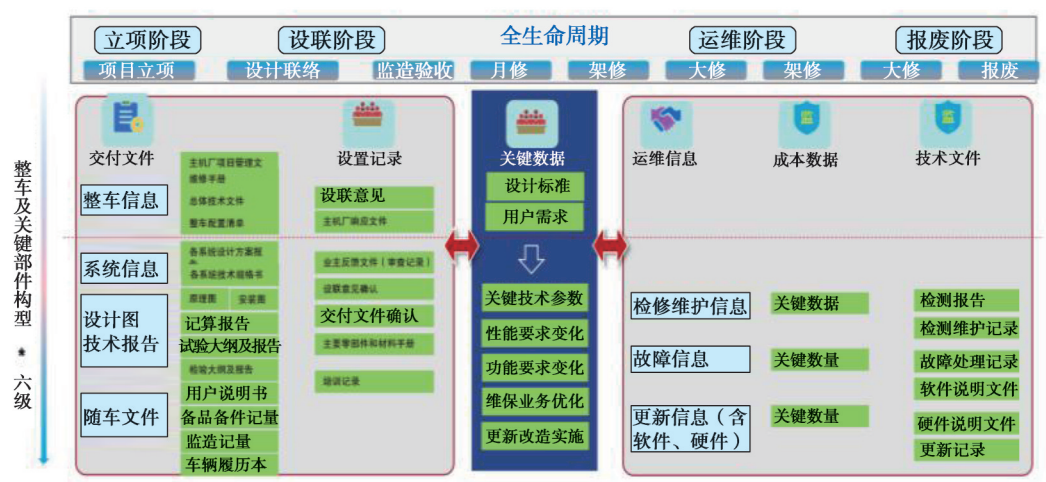


图9 全生命周期履历构建
Fig. 9 Full lifecycle record generation

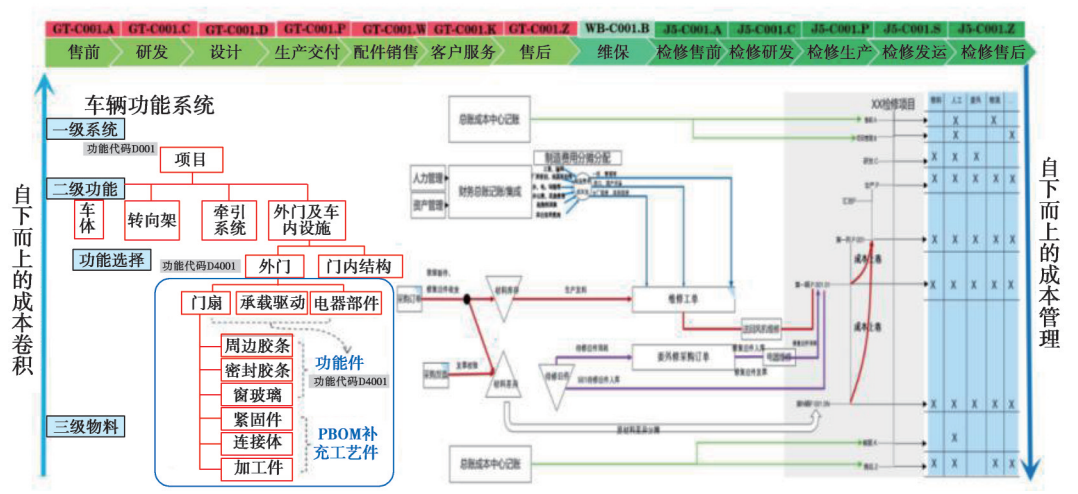


图10 全生命周期成本管理体系
Fig. 10 Full lifecycle cost management system

4.3 段场智能管控系统

基于微服务架构,采用“云+端”部署方式,围绕车辆检修、运用调度等核心业务,打造集调度、检修、设备、安全管控于一体的全流程一站式综合管控平台,实现段场全专业、全业务流程的信息化管控。对不同

车型检修作业实施结构化、标准化管理,根据故障情况和日常检修维护计划对修程修制进一步优化,厘清全生命周期运维成本。通过对车辆研发设计、生产制造、维护维修和报废处置等阶段数据和文件进行全生命周期管理,支撑车辆检修维护效率提升、运行故障追溯和成本归集优化;同时,对日常维保、架大修和

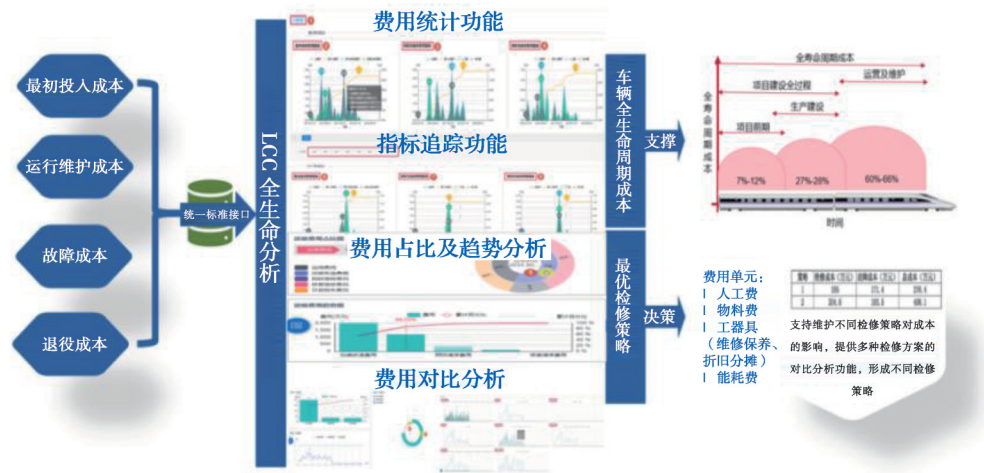


图 11 全生命周期成本分析
Fig. 11 Full lifecycle cost analysis

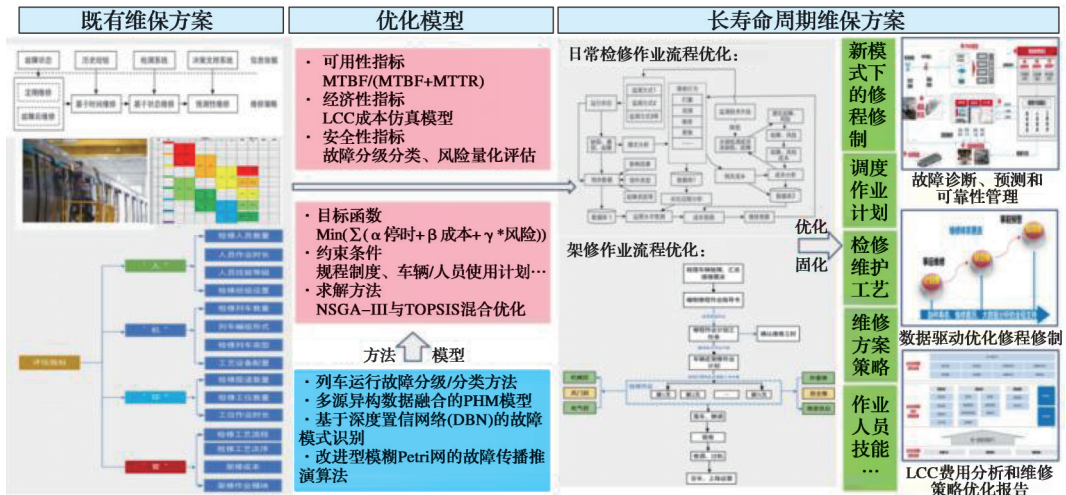


图 12 维保方案持续优化
Fig. 12 Continuous optimization of maintenance plan

更新改造等业务进行全生命周期成本分析，助力维保业务节支降耗。

4.3.1 日常维保

基于实时感知的状态数据和检修计划进行车辆段调度控制中心（DCC）生产智能调度，实现日常维保

作业动态调度和成本归集优化，如图 13 所示。

4.3.2 架大修

基于列车构型、智能排程和工艺优化，实现架大修作业精益生产和成本归集优化，如图 14 所示。考虑到国内地铁车辆架大修基地多为多线共享共用，多个

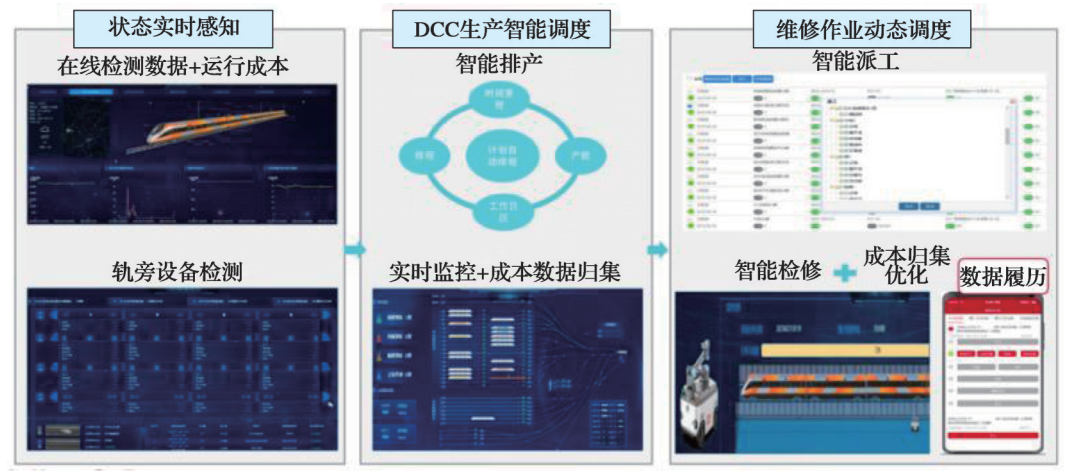


图 13 日常维保作业
Fig. 13 Daily maintenance operations

城市已启动整个线网内车辆基地整合与维修资源共享, 通过接入基地内工艺设备状态数据、合理复用人员/检修设备及提升管理水平, 实现生产排程智能化以及多线车辆同步架大修的工艺优化。

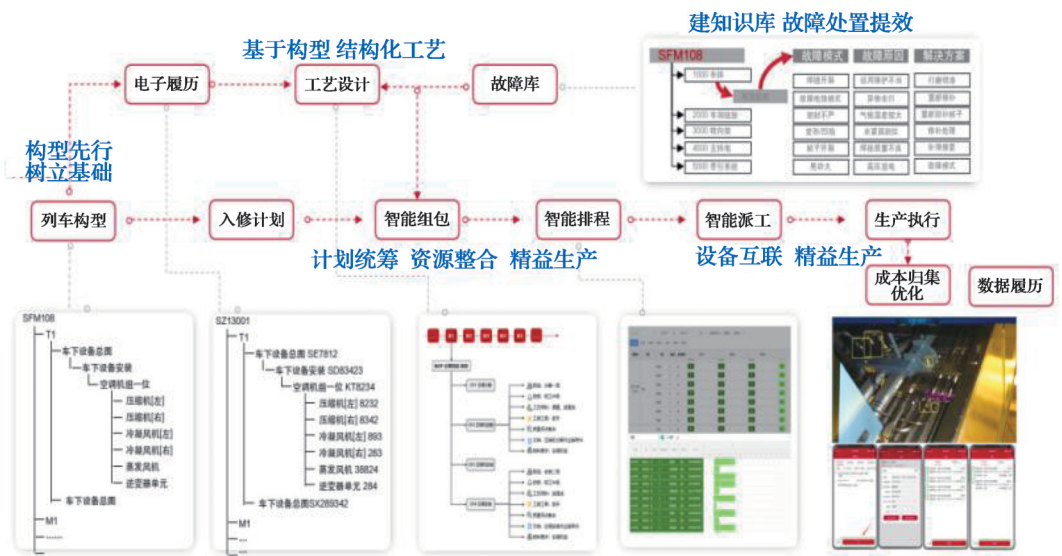


图 14 架大修作业
Fig. 14 Un-wheeling repair and overhaul operations

4.3.3 更新改造
通过工艺优化和经济性维修策略, 针对行车故障、乘客需求、技术升级、智能改造等场景进行更新改造成本优化, 如图 15 所示。

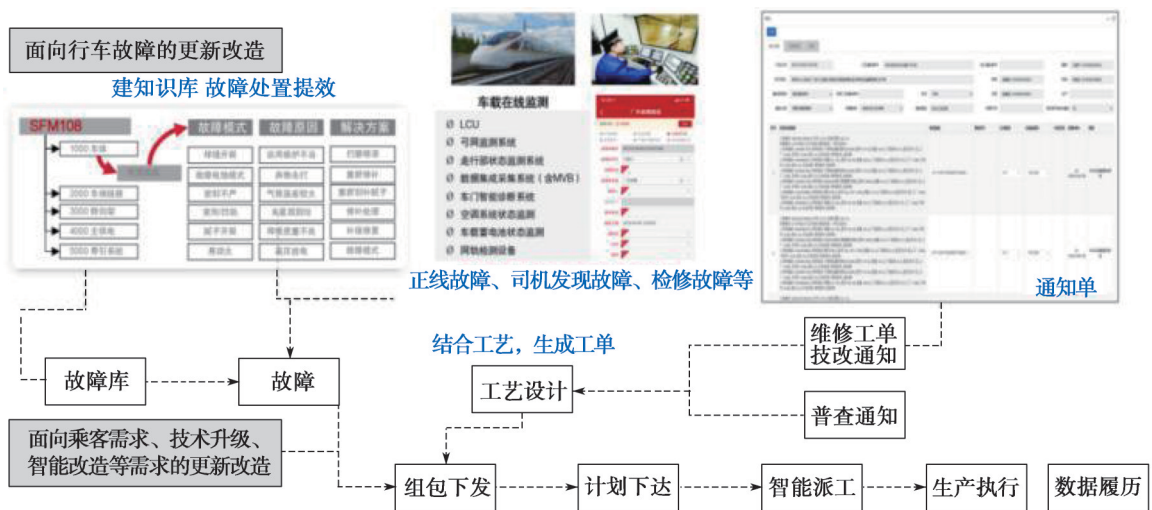


图 15 更新改造业务
Fig. 15 Renewal and transformation business

4.4 智能运维驾驶舱

构建功能界面统一的智能运维驾驶舱系统, 为客户展示车辆运行、健康状态、能耗管理、故障监测与预警、检修状态、资源管理、运维成本、应急指挥与决策支持等核心运营信息, 如图 16 所示。通过数据治理与数据贯通, 实现车辆运维阶段全流程数据资产累积, 逐步形成中国中车与客户共享的产品全寿命周期数据资产, 为城轨运营企业提供一站式数据运维增值服务。系统在满足用户整体一致性需求的同时, 充分兼顾中国中车各下属企业个性特征, 在客户端与中国中车下属企业端实现两级部署, 确保服务统一基础上

的车辆核心数据在企业内部私有化部署。系统嵌入中国中车专属应用商店, 依据中国中车统一标准部署, 支持客户远程云端应用。针对功能需求, 智能运维驾驶舱总体架构如图 17 所示。

驾驶舱设计包含综合管理模块、运营主题模块、车辆运维主题模块、应急管理模块、视频智能联动、后台管理模块、智能应用模块等 7 项核心功能; 同时通过构建统一服务门户打破信息孤岛, 实现多源异构系统集成与数据共享。针对智能运维驾驶舱, 结合 3 个专项子功能具体分析如下:

①线网运营主题模块, 结合分类业务指标, 实现基础类、客流类、运行类、票务类、安全类、服务类、

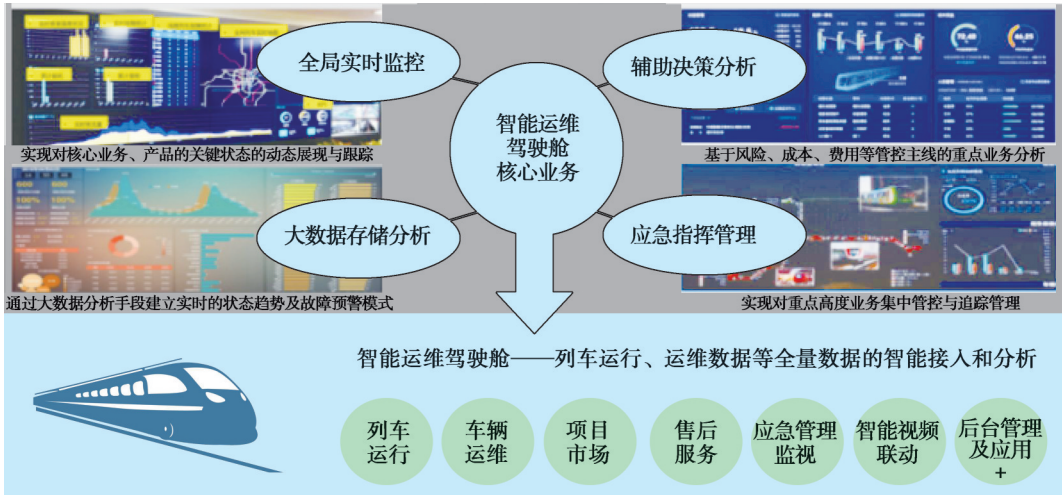


图 16 智能运维驾驶舱示意图
Fig. 16 Schematic diagram of intelligent O&M cockpit

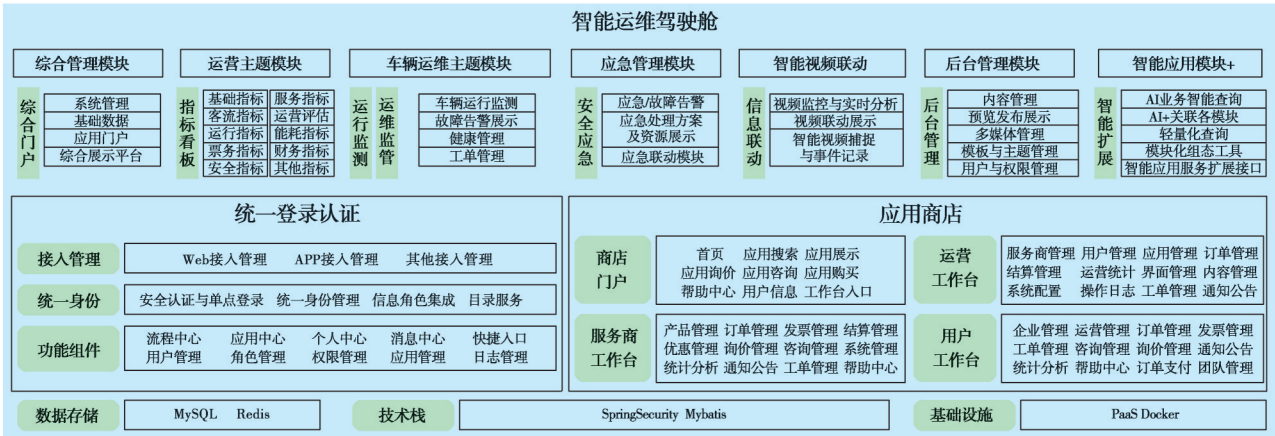


图 17 总体架构图
Fig. 17 Overall architecture diagram

运营评估类、能耗类、财务类以及其他数据等关键运营指标的智能统计分析、预测预警和可视化展示。

②车辆运维主题模块，实现车辆运行监测、故障告警展示、健康管理、工单管理等应用的集成与调用；通过展示车辆/场段的运维相关信息，完成列车运行监视、车辆状态监测、故障信息呈现；实现围绕车辆运维的关键设备、检修状态、成本信息、人员工单等业务指标的统一监控。

③智能应用模块，集成包含 AI 业务智能查询、AI+关联各模块（含 AI 训练及测试服务）、轻量化查询（基础业务报表）、模块化组态工具（生成式智能展示）、智能应用服务扩展接口等子系统。

区别于传统面向业务展示的可视化大屏驾驶舱系统，本驾驶舱借助 AI 智能化服务功能升级，通过模块化配置工具，可实现业务单元的快速定义，完成业务看板，实现新业务应用的敏捷上线与发布；同时构建智能应用服务扩展接口，既打通统一数据服务（DaaS）接口，又建立生成式智能驾驶舱能力纳管及场景配置平台，实现数据服务与智能应用的灵活扩展和个性化配置。

5 结束语

本文面向地铁车辆全生命周期运营维护需求，提出中国中车统一的长寿命周期智能运维平台方案，形成包含智能感知系统、智能分析系统、段场智能管控系统、智能运维驾驶舱系统等核心模块的整体解决方案，可实现客户端与中国中车下属企业端的系统集成和数据贯通。通过智能运维系统的落地实施，能够有效提升客户运营维护效率、降低运营维护成本、提高运营维护质量。随着人工智能与地铁运维相关产品技术的快速发展，未来地铁车辆智能运维还将在以下方面取得更大进步：

①修程修制优化。以降低车辆全生命周期运维成本、提升车辆可靠性与稳定性为目标，基于关键系统/部件的状态感知数据，研究牵引/辅助系统、网络、制动、车门等关键系统的失效机理，建立基于数字孪生的运维模型，评估其可靠性与剩余使用寿命。开展故障根因分析，系统研究基于退化性能的寿命预测方法，形成关键部件使用寿命及全寿命周期动态调整的 RCM

(以可靠性为中心的维修)评价方法,在此基础上逐步推进修程修制优化。

②维保方案持续优化。构建以列车维修和运用成本最小化为目标的均衡修优化模型,解决传统维修策略下城市轨道交通列车高强度运用与频繁维修的冲突问题,从检修维护工艺、修程修制、作业人员技能等维度实现维保方案的持续优化。

③赋能城市轨道交通运营。未来将以车辆为核心,应用人工智能和数字孪生等技术,推动从车辆运维向全场景运营的跨越。除运维管理外,实现行车组织、乘务管理、站务管理、段场调度全场景的数据融合与业务优化,进一步降低运营综合成本。

参考文献:

- [1] 中国城市轨道交通协会. 中国城市轨道交通协会关于促进城市轨道交通企业财务可持续发展的指导意见[J]. 城市轨道交通, 2025(3): 10-14.
China association of metros. Guiding opinions of the China urban rail transit association on promoting the financial sustainable development of urban rail transit enterprises[J]. Urban rail transit, 2025(3): 10-14.
- [2] 高利华, 李明, 丁明辉. 地铁车辆段智慧化提升建设需求分析与方案研究[J]. 现代城市轨道交通, 2024(12): 36-42.
GAO Lihua, LI Ming, DING Minghui. Construction demand analysis and scheme research for the intelligent upgrading of metro depot[J]. Modern urban transit, 2024(12): 36-42.
- [3] 汪峥, 王孔明, 范琪, 等. 地铁车辆基地综合自动化管理系统设计[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(10): 166-170.
WANG Zheng, WANG Kongming, FAN Qi, et al. Design of integrated automation management system for metro vehicle depot[J]. Urban mass transit, 2020, 23(10): 166-170.
- [4] 丁明辉, 魏运, 朱鸿涛, 等. 北京地铁智慧车辆段方案研究[J]. 智慧轨道交通, 2024, 61(1): 61-67.
DING Minghui, WEI Yun, ZHU Hongtao, et al. Study on the intelligent car depot program of Beijing subway[J]. Smart rail transit, 2024, 61(1): 61-67.
- [5] 刘丙林, 朱佳, 李翔宇. 城市轨道交通车辆智能运维系统探索与研究[J]. 现代城市轨道交通, 2019(6): 16-21.
LIU Binglin, ZHU Jia, LI Xiangyu. Exploration and research on intelligent operation and maintenance system of urban rail transit vehicles[J]. Modern urban transit, 2019(6): 16-21.
- [6] 胡佳琦. 上海市轨道交通车辆智能运维系统研究与应用[J]. 现代城市轨道交通, 2019(7): 5-9.
HU Jiaqi. Research and application of intelligent operation and maintenance system for Shanghai rail transit vehicles[J]. Modern urban transit, 2019(7): 5-9.
- [7] 刘思, 刘思漪, 朱乾鏊, 等. 一种地铁车辆均衡修检修计划编制算法[C]//2024中国工业设备智能运维技术大会论文集(下). 杭州: 中国机械工业联合会, 2024: 14-17.
LIU Si, LIU Siyi, ZHU Qianliu, et al. An algorithm for compiling the maintenance plan of balanced maintenance of metro vehicles[C]//Proceedings of the 2024 China Industrial Equipment Intelligent Operation and Maintenance Technology Conference (Part II). Hangzhou: China Machinery Industry Federation, 2024: 14-17.
- [8] 刘杰. 基于故障数据的重庆地铁车辆检修排班计划优化研究[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(11): 120-125.
LIU Jie. Crew scheduling optimization for maintenance of Chongqing metro vehicles based on fault handling time[J]. Railway transport and economy, 2021, 43(11): 120-125.
- [9] 邢海福, 郭正海. 杭州地铁车辆“均衡修”维修模式研究与实践[J]. 现代城市轨道交通, 2020(2): 21-25.
XING Haifu, GUO Zhenghai. Research and practice of balanced repair maintenance mode for metro vehicles in Hangzhou[J]. Modern urban transit, 2020(2): 21-25.
- [10] 陈朝. 上海轨道交通列车全寿命周期均衡修模式研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(增刊1): 1-7.
CHEN Chao. Full life cycle balanced maintenance mode of Shanghai rail transit train[J]. Urban mass transit, 2023, 26 (Suppl 1): 1-7.
- [11] 苑鹏博, 梁朝晖, 朱路祥, 等. 基于安全性及可靠性分析的地铁车辆均衡修修程优化[J]. 电力机车与城轨车辆, 2022, 45(2): 130-134.
YUAN Pengbo, LIANG Zhaohui, ZHU Luxiang, et al. Optimization of balanced maintenance schedule for metro vehicles based on safety and reliability analysis[J]. Electric locomotives & mass transit vehicles, 2022, 45(2): 130-134.
- [12] 谈哲林. 基于熵值法和AHP法的X地铁车辆系统FMECA分析及检修规程优化[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
TAN Zhelin. The FMECA analysis and maintenance procedure optimization of X metro vehicle system based on entropy and AHP method[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022.

Research on an intelligent operation and maintenance platform solution for long lifecycle maintenance of metro vehicles

LI Ming¹, CUI Tingqiong², WANG Xizhe¹, GONG Na¹, ZHANG Yang², NING Yao¹

(1. CRRC Digital Intelligence Technology (Xiongan) Co., Ltd., Beijing 100089; China

2. CRRC Chongqing Co., Ltd., Chongqing 401121, China)

Abstract: China's urban rail transit industry has entered a new stage emphasizing on high-quality operation, driving significant growth in the market size of urban rail operation and maintenance (O&M). Against this backdrop, industrial demand has increased for intelligent O&M to reduce main-line failure rates, shrink payrolls, increase efficiency, reduce costs and extend service life. This requires the implementation of systematic solutions such as refined maintenance and cost optimization and control to ensure safety, cut costs, improve quality, and enhance overall benefits. This paper presents a 4A architecture oriented to business, application, data and technology, which was established from current advances in intelligent O&M and the application requirements of metro operators. Under this framework, simplified and unified standards are proposed. The system unifies vehicle maintenance configurations down to the smallest maintenance units and material codes and standardizes maintenance classes and systems, including daily and monthly inspections, un-wheeling repairs and overhauls. Integrated into CRRC Industrial Software (Special Edition), the solution yields a CRRC unified intelligent O&M platform that covers the entire lifecycle of urban rail vehicles. Relying on core capabilities such as intelligent perception, intelligent analysis, depot control, and intelligent cockpit, this platform implements a CRRC-specific O&M model supported by condition-driven equipment maintenance and full-lifecycle O&M cost optimization. This model will be implemented and validated in CRRC's long-lifecycle maintenance project, supporting continuous enhancement of O&M benefits through cost reduction and expense saving for urban rail transit operators. The study outcomes provide a reference for improving O&M quality and efficiency and for reducing costs of urban rail transit vehicles.

Keywords: metro vehicles; intelligent O&M; architecture design; full lifecycle; inspection and maintenance; cost reduction and expense saving; urban rail transit