

台州 S1 车辆牵引系统状态修应用

(台州唐车轨道交通装备有限公司)

一、背景与挑战

随着城市轨道交通、干线铁路网络化、高密度运营趋势加剧，传统以时间为核心的计划修与事后处置的故障修模式，已无法适配现代轨道交通运维高质量、低成本、智能化的发展需求。轨道车辆牵引系统作为列车动力核心，涵盖牵引变压器、变流器、牵引电机和冷却系统等关键部件，其运行可靠性直接决定列车行车安全、运营效率与乘客出行体验。台州 S1 号线配属列车 31 列，运营最长时长超 15 小时，牵引系统长期处于高负荷、变工况运行状态。线路开通运营以来，一直沿用既定周期检修模式，随着列车服役年限增长，牵引系统故障隐患逐步凸显，运维矛盾日益突出，亟需通过状态修技术革新，破解传统运维瓶颈，构建全生命周期智能运维体系。

计划修模式下，无论部件实际健康状态如何，均按固定周期拆解检修、更换备件，极易造成过度维修，浪费大量人力、物力与时间成本；同时存在部件未到检修周期却提前劣化的情况，引发欠维修问题，导致突发故障，影响正常运营秩序。故障修则属于被动处置，故障发生后易造成列车晚点、停运，严重时引发安全事故，运维应急压力极大。

牵引系统结构复杂、故障模式多样，早期故障信号微弱，易

被运行噪声掩盖，传统监测手段仅能实现简单参数阈值报警，无法精准捕捉早期劣化特征；缺乏多源数据融合分析能力，车载控制数据、传感器数据、检修历史数据相互割裂，难以全面评估部件健康状态，故障定位与寿命预测精度偏低。

二、解决方案与创新点

构建“车载感知-车地传输-地面分析-智能决策-闭环维修”五位一体的牵引系统状态修全流程解决方案，依托 PHM 故障预测与健康管理技术、大数据分析、人工智能算法，打造车地一体化智能运维平台，实现牵引系统全生命周期状态可监测、健康可评估、故障可预警、维修可精准。

（一）系统方案建设

1. 硬件层：车载系统建设

利用列车牵引控制单元（TCU）、列车控制系统（TCMS）信号，实现对牵引变压器冷却系统进出口温度、牵引变流器冷却系统进出口温度、支撑电容、预充电电阻、接触器、牵引电机相电流等核心部件的运行参数、温度、电流、电压、阻值等多维度数据实时采集。

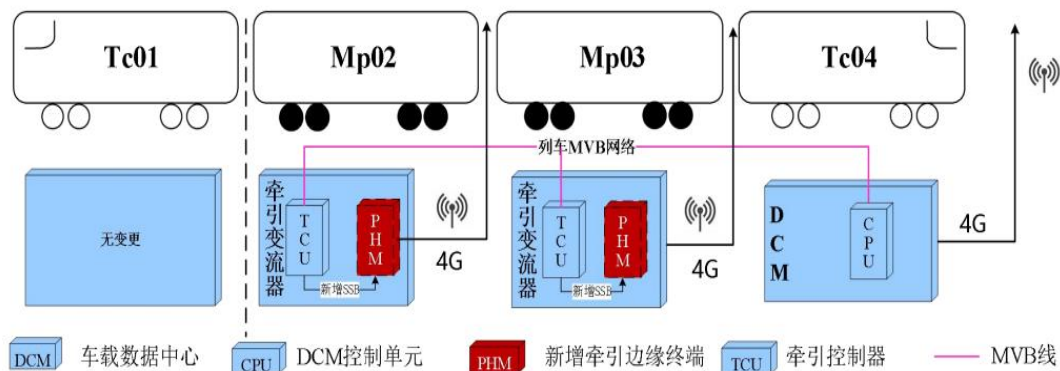


图 1 车载系统建设

2. 数据层：构建多源数据融合平台

打通车载数据、车地无线传输、地面检修数据壁垒，建立牵引系统全生命周期数据库，整合列车运行工况数据、历史故障数据、检修履历数据、部件寿命试验数据，实现数据标准化处理、清洗、存储与共享，为智能分析提供数据支撑。

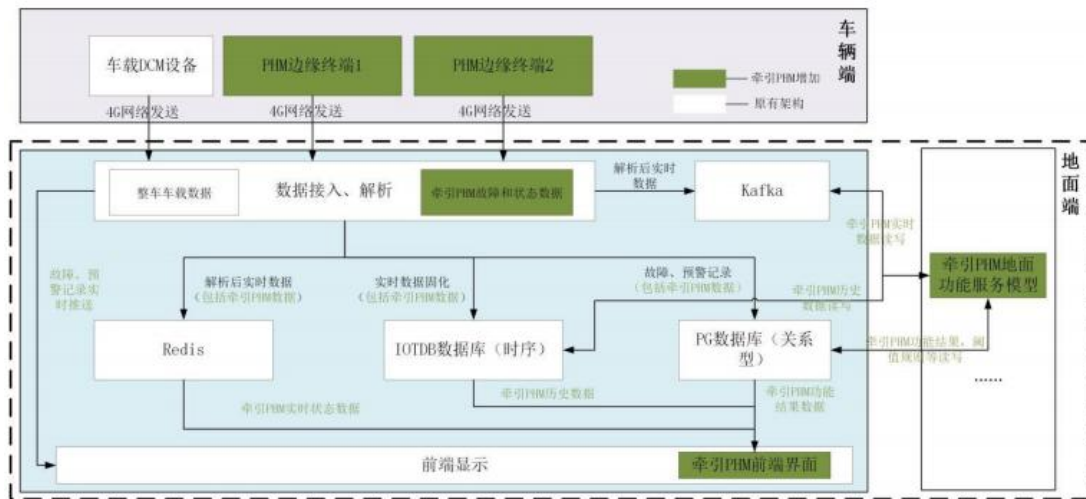


图 2 数据融合平台

3. 算法层：智能分析模型

基于牵引系统失效机理、海量故障样本与加速寿命试验数据，构建部件劣化模型、故障诊断模型、寿命预测模型，实现牵引系统故障精准识别、剩余使用寿命精准预测和状态修，具体模型清单如下表 1 所示。

表 1 模型列表

序号	监测部件	模型名称	模型逻辑及功能	价值场景

1	牵引电机	电机定子绕组绝缘故障预警	基于实时提取的电流故障特征实现定子短路故障预警	精准故障预警
2	供电网	网压电能质量分析	实现对网压总谐波畸变率以及特定次谐波占比的在线分析,实时评估网压电能质量,及时发出异常预警	精准故障预警
3	传感器	传感器故障预警	实现对温度、速度、电压、电流传感器的故障预警	精准故障预警
4	车轮	轮径估算	实现对车轮的轮径估算,用于检测车轮磨损、更换车轮等原因造成轮径参数配置异常,实现异常预警	精准故障预警
5	过压吸收电阻	过压吸收电阻参数软测量	实现对制动电阻的阻值软测量和参数日常状态监测	计划修模式优化
6	预充电	预充电电阻	实现对预充电电阻的	计划修模

	电阻	参数软测量	阻值软测量和参数日常状态监测	式优化
7	预充电接触器	预充电接触器	实时捕捉接触器开通、关断动作，计算动作时间，判断器件开关性能	计划修模 式优化
		开/关性能检测		
8	三相输出接触器	三相输出接触器	实时捕捉接触器开通、关断动作，计算动作时间，判断器件开关性能	计划修模 式优化
		开/关性能检测		
9	外接供电接触器	外接供电接触器	实时捕捉接触器开通、关断动作，计算动作时间，判断器件开关性能	计划修模 式优化
		开/关性能检测		
10	变流器滤网	变流器滤网堵塞程度评估	实时预测变流器温度，并和实际测量温度对比，基于温度差判断变流器滤网堵塞程度	计划修模 式优化
11	电机滤网	电机滤网堵塞程度评估	实时预测牵引电机温度，并和实际测量温度	计划修模 式优化

			对比, 基于温度差判断牵引电机滤网堵塞程度	
12	支撑电容	支撑电容参数软测量	实现对支撑电容参数的软测量和参数日常状态监测	计划修模式优化
13		支撑电容寿命评估	基于支撑电容全寿命周期数据库建立寿命预测模型, 结合容值软测量技术实现电容寿命评估	关键部件寿命评估
14	主接触器	开/关性能检测	实时捕捉接触器开通、关断动作, 计算动作时间, 判断器件开关性能	计划修模式优化
15		主接触器寿命评估	实现对接触器的电寿命评估与机械寿命评估	关键部件寿命评估
16	牵引系统	故障数据回传	实现对异常和故障发生时刻的相关原始数据以及智能分析结果	故障诊断分析

			回传,用于牵引系统故障在线分析	
--	--	--	-----------------	--

4. 应用层：智能运维决策系统

搭建可视化智能运维平台，具备状态监测、故障预警、健康评估、维修工单生成、统计分析等功能，根据部件实际健康状态自动生成差异化检修建议，实现“按需维修”，同时建立维修闭环管理机制，确保故障处置全程可追溯。

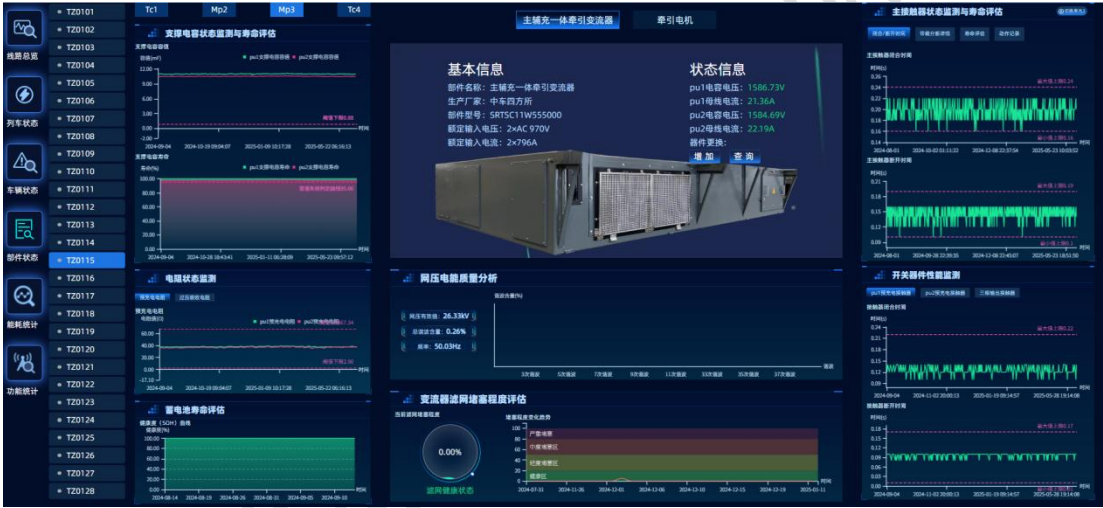


图 3 智能运维决策系统

(二) 创新点

1. 全生命周期技术管理

结合算法模型与大数据挖掘算法，构建牵引系统冷却维护、接触器和支撑电容等核心部件的劣化规律模型，突破传统仅靠阈值报警的短板，精准预测部件节点和剩余使用寿命，为数字化精准预防性维修提供科学依据。

2. 维修模式转变

基于状态评估结果，打破固定周期检修模式，建立“状态修”的新型运维模式，健康状态良好部件延长检修周期，劣化部件提前介入维修，实现维修资源最优配置。

3. 全流程闭环管理标准

编制牵引系统状态修技术方案、评估标准、检修作业指导书，建立从数据采集到维修验收的全流程标准化体系，填补行业牵引系统状态修实施规范空白，实现状态修规模化、规范化落地。

三、成果与效益

（一）应用成果

1. 优化牵引系统修程修制，滤网清洁类维护由原来的月度维护变为状态维护，周期超1年避免过度维修，同时实现故障提前处置，牵引系统突发故障率下降30%，列车运营可靠性显著提升；

2. 人力成本节约：列车牵引系统年均检修工时减少35%，全生命周期节约人工成本超200万元；

3. 备件成本降低：基于性能预测实现备件精准采购，减少牵引系统备件库存积压，库存周转率提升15%；

4. 运维效率提升：避免因牵引系统故障导致的列车晚点、停运，减少运营损失，牵引系统运维处置效率提升40%；

（二）社会效益

1. 推动轨道车辆运维行业从“经验驱动”向“数据驱动、智能决策”转型，引领轨道交通运维智能化、绿色化、高效化发展方

向。

2. 减少因过度维修产生的零部件浪费与能源消耗，践行低碳环保理念，助力轨道交通行业可持续发展。

四、可复制性和展望

（一）可复制性

1. 技术推广范围广：本项目研发的状态修技术体系、智能运维平台，横向可推广到轨道车辆制动系统、车门系统和空调系统等关键系统，纵向适配城轨地铁、动车组、干线机车等各类轨道车辆牵引系统，可根据不同车型、运营场景快速适配优化，无需大规模硬件改造，实施门槛低；

2. 应用模式成熟：形成从前期调研、方案设计、系统部署、调试运行到运维管理的全流程实施方法论，可快速向国内各地地铁运营公司、铁路运维单位复制推广。

（二）未来展望

1. 进一步融合数字孪生、边缘计算、5G+工业互联网等新技术，构建牵引系统数字孪生模型，实现虚拟与现实同步映射，提升故障预测与健康管理的精度；

2. 以牵引系统状态修为基础，逐步将状态修技术拓展至制动系统、车门系统、走行部等车辆关键系统，构建整车全系统状态修体系，实现轨道车辆全生命周期智能运维。

五、项目团队

本项目由台州唐车轨道交通装备有限公司、中车唐山机车车

辆有限公司、中车四方所机车车辆有限公司联合组建专业团队，团队成员涵盖车辆运维、电气技术、大数据分析、人工智能、标准制定等多个领域，具备丰富的理论研究、技术研发与现场实施经验，是一支结构合理、专业互补、执行力强的复合型团队。

姓名	项目角色	项目任务	单位
李俊	项目牵头人	总体人去组织及项目协调。	台州唐车轨道交通装备公司
马青军	技术总负责	负责状态修技术的开发、验证及应用	中车唐山机车车辆有限公司
范泽辉	项目执行	状态修验证应用	台州唐车轨道交通装备公司
郭培斌	项目执行	大数据分析及算法模型的构建	中车唐山机车车辆有限公司
李旭	项目执行	大数据分析及算法模型的构建	中车四方所机车车辆有限公司
闫海斌	项目执行	状态修验证应用	台州唐车轨道交通装备公司