

基于数字孪生技术的动车组关键部件全生命周期健康管理研究

陈建鹏

中国电子科技集团公司第三十三研究所 山西 太原 030032

摘要: 动车组走行部、制动、牵引系统及轴承等关键部件长期在交变载荷与复杂环境下服役,持续产生结构损耗与性能退化,传统运维方式多聚焦故障检修,存在管控碎片化、状态感知不全面的问题。本文结合动车组关键部件的运行退化特征,结合数字孪生虚实映射、动态迭代的技术特质,构建全生命周期健康管理体系,搭建配套技术体系与多维运行机制。该体系可实现动车组关键部件状态的动态管控与精准研判,补齐传统运维模式的短板,为轨道交通装备智能健康管控提供技术参考。

关键词: 数字孪生; 动车组; 关键部件; 全生命周期; 健康管理

引言: 动车组各类核心关键部件协同支撑列车稳定运行,服役过程中受路况、载荷、温变等多重因素影响,性能呈现规律性衰减,易产生各类隐性损伤。传统健康管理模式仅覆盖单一检修环节,无法贯穿部件完整生命周期,难以捕捉细微性能变化,整体管控精度与系统性偏弱。引入数字孪生技术重构健康管理模式,贯通部件全流程数据与状态管控链路,能够有效提升动车组关键部件运维的系统性与精细化水平。

1 动车组关键部件与数字孪生技术适配性分析

1.1 动车组关键部件运行特性分析

动车组的安全稳定运行依赖多项核心关键部件协同运作,走行部、制动系统、牵引系统与轴承是支撑列车运行的核心结构。各部件拥有独立的结构组成与工作机理,在列车运行体系中承担专属功能,直接影响列车运行的稳定性与安全性。各类部件长期暴露在复杂运行场景中,线路路况的动态变化、持续交变的载荷作用、高低温交替的极端环境,都会对结构性能产生持续影响。长时间服役状态下,部件会产生持续性的性能衰减与结构损耗,状态会跟随运行工况与服役时长产生规律性演变^[1]。不同部件的结构属性与工作模式存在差异,性能退化的形式和速度也具备差异化特征。深入剖析各类关键部件的服役特征与状态变化规律,能够精准锚定健康管理研究的核心研究对象,为后续健康管理体系的搭建筑牢基础。

1.2 数字孪生技术核心特征与运行逻辑

数字孪生技术具备完整的技术架构与成熟的运行机制,拥有区别于传统管控技术的独特核心特征。技术核

心属性集中体现在虚实映射、数据联动、状态更新、动态迭代四个维度,可对物理装备形成全方位的数字化复刻。在机械装备管控领域,该技术可以完成装备运行状态的实时捕捉、生命周期的全程追踪与管理模式的动态优化。依托数字化建模与数据驱动的管控模式,数字孪生技术可以适配各类高端机械装备的精细化管理需求。轨道交通装备对运行精度、安全冗余、管控细度有着极高标准,数字孪生的技术特性可以充分匹配这类高端装备的管控要求,具备应用于动车组健康管理的先天技术优势。

1.3 数字孪生与动车组关键部件健康管理的适配逻辑

动车组关键部件涵盖设计、服役、检修、退役的完整生命周期,各个阶段都存在差异化的健康管控需求。传统健康管理模式的管控视角较为局限,大多聚焦设备故障检修的单一环节,无法覆盖部件全生命周期的管控场景,难以捕捉部件细微的性能变化与隐性损耗,整体管控体系存在明显短板。引入数字孪生技术重构部件健康管理模式,能够弥补传统管控方式的各类缺陷。该技术可以贯穿部件全部生命周期环节,实现全流程数据归集、状态管控与动态管理,构建全新的健康管理逻辑。技术优势可全面覆盖动车组关键部件各个服役阶段,印证技术与轨道交通部件健康管理融合的合理性与可行性。

2 动车组关键部件全生命周期健康管理体系构建

2.1 全生命周期健康管理的层级划分

动车组关键部件拥有完整生命流转链路,从出厂装配正式投入整车搭载,到长期在线服役、常态化日

常运维,最终完成报废退役,各阶段形成连贯且完整的使用寿命。对全周期健康管理进行层级划分,能够根据部件不同阶段的运行属性,梳理差异化的健康管理侧重点,设定匹配阶段属性的管控目标。装配阶段重点确立部件初始装配标准与基础健康参数,搭建后续状态研判的基准依据。服役阶段重点关注长期运行带来的性能衰减与结构损耗,筑牢列车运行安全基础。运维阶段聚焦各类隐性隐患与轻微损伤的排查修复,延缓部件性能退化速度。退役阶段依托全程状态记录完成寿命研判与周期总结^[2]。清晰的层级划分能够打通各阶段管理壁垒,搭建连贯的管控链路,实现全时段、无断层的部件健康管控覆盖。

2.2 健康管理体的构建原则

动车组轨道交通场景对运行安全有着严苛标准,健康管理体的搭建需要深度结合行业管控要求,结合数字孪生技术独有属性确立规范化构建原则。整体性原则要求管理体系覆盖部件全部生命流程,统筹单一部件的状态变化与整车运行的整体关联。动态性原则适配部件服役状态的持续变化特征,让管理模式跟随设备状态完成灵活调整。实时性原则保障各类运行数据高效更新,维持健康管控的精准度与时效性。闭环性原则搭建完整的管理链路,完成状态采集、数据处理、管控落地的完整流程。体系搭建全程落实全周期覆盖核心要求,充分考量不同关键部件的结构特征与损耗差异,平衡单体设备管控与整车系统管控的内在联系,筑牢体系架构的科学性、系统性与场景适配性。

2.3 基于数字孪生的健康管理整体架构

依托数字孪生技术的运行优势,结合动车组关键部件的健康管控需求,可搭建专属的全生命周期健康管理整体架构。整套架构划分为数据层、映射层、管控层、应用层四大核心模块,各模块相互衔接、有序联动,共同支撑整套体系稳定高效运行。数据层负责各类运行数据、状态参数的归集与规整,为整体架构运转提供扎实的数据支撑。映射层依托数字化建模手段搭建物理部件的数字模型,完成实体设备运行状态的数字化复现。管控层统筹各类数据资源与模型信息,落地全周期健康管控的核心职能。应用层承接顶层管控逻辑,落地各类健康管理实操工作。清晰界定各层级的功能定位,梳理内部运行逻辑与层级衔接规则,能够搭建起虚实互通、动态迭代、全域可控的一体化健康管理体系框架。

3 基于数字孪生的动车组关键部件健康管理关键技术体系

3.1 动车组关键部件多源状态数据融合技术

数字孪生模型的稳定运转与动态更新,需要充足、规范、可靠的状态数据作为底层支撑。动车组关键部件在服役过程中会产生涵盖振动、温度、压力、转速在内的多维度运行信息,各类数据来源不同、格式不同,属于典型的异构数据。开展多源状态数据融合技术研究,能够梳理各类数据的采集规范与处理标准,建立统一的数据整合逻辑^[3]。对零散分布的运行数据进行归集整理与标准化转换,统一数据格式与统计口径,消除不同数据源之间的壁垒。规范的数据处理流程可以保障模型输入信息的规范性与准确性,夯实数字孪生体系稳定运行的数据基础,为物理部件与数字模型之间的信息对应提供可靠保障。

3.2 动车组关键部件数字孪生实体映射技术

完整、精准的虚实映射是数字孪生体系构建的核心基础。针对动车组关键部件复杂的结构形态与多变的服役场景,可从结构实体、运行状态、服役环境三个维度搭建数字化映射体系。技术研究重点聚焦几何形态的精准复刻、运行参数的完整转化、环境变量的有效录入,让数字模型可以完整还原物理部件的真实运行情况。搭建兼顾静态结构特征与动态运行特征的一体化映射体系,覆盖部件固有结构与运行过程中的各类动态变化。完善的虚实对应关系能够支撑数字模型持续更新迭代,保持数字化载体对物理部件的真实还原能力。

3.3 部件健康状态动态辨识与趋势研判技术

数字孪生体积累的海量时序数据,为部件健康状态识别提供了充足的数据基础。动态辨识技术可以依托模型留存的完整运行数据,搭建适配动车组关键部件的健康状态识别机制。这套机制可以针对部件不同运行工况完成状态特征提取,区分正常运行信号与异常波动信号,精准捕捉设备运行中的状态差异。结合部件长期积累的历史服役数据与当下产生的实时运行数据,搭建科学的状态演化研判逻辑。依托数据变化规律挖掘部件性能的演变走向,提前识别隐性异常与缓慢的性能衰减,完成健康管理的前置化管控。

3.4 全生命周期健康状态动态更新技术

动车组关键部件的服役状态始终处于动态变化过程,检修作业、部件更替、工况切换都会改变设备的运行参数与结构状态。搭建适配全生命周期的动态更新技术体系,能够针对各类动态事件建立对应的模型迭代规则。根据部件实际状态变化,调整数字孪生体的运行参数、结构信息与状态标签,让数字化载体可以真实反映部件当下的服役水平。持续更新的模型信息能够贯穿部件完整生命流程,支撑全周期动态化健康管控模式落

地,实现健康管理工作的长效化、精细化运转。

4 基于数字孪生的动车组关键部件全生命周期健康管理运行机制

4.1 全生命周期健康数据闭环管控机制

动车组关键部件全周期健康管理对数据规范性、完整性有着严格标准,搭建覆盖完整生命周期的数据闭环管控机制,可充分适配这类管理标准。规范数据采集、逻辑处理、归档存储、动态更新的整套运行流程,建立标准化的数据治理体系^[4]。传统运维模式下,部件不同阶段数据分散存储于不同业务系统,阶段之间存在明显的信息断层。全新的闭环机制可以打破各类数据壁垒,串联部件前期设计参数、线路服役信息、日常运维记录以及退役阶段状态资料。各类数据资源可在管理体系内部完成有序流转与重复调用,充分挖掘设备全周期运行蕴含的状态特征与演变规律。规范稳定的数据链路能够持续为健康状态研判、风险预判与管理策略优化提供扎实的数据保障。

4.2 分层分级健康管控运行机制

动车组整车结构体系中,各类关键部件承担不同的运行职能,对行车安全的影响程度各不相同,运行损耗与性能退化的表现形式也存在区别。依据部件安全优先级与实时健康状态的差异化特征,搭建分层分级的健康管控运行机制。针对不同部件类别以及不同服役时段的设备属性,细化对应的管控流程与评判标准。结合设备运行风险高低制定差异化管控策略,对核心承载部件增设更多管理节点,对运行状态稳定的常规部件执行基础管控规范。分层分类的管理模式能够规避粗放管理带来的管控疏漏,提升管理工作的精细度与指向性,完成真正意义上的精准化健康管理。

4.3 健康管理动态响应与迭代优化机制

动车组关键部件长期处于复杂多变的线路工况中,运行参数会随环境载荷、运行时长、作业强度产生动态变化。适配复杂工况的健康管理动态响应机制,可精准应对设备运行滋生的参数偏移、性能波动、隐性损耗等异常现象,设置专属的管控触发与处置流程,及时完成运行状态的干预与矫正。长年累积的设备运行台账,能够清晰呈现部件性能衰减的演变规律,可为长效体系迭

代优化提供支撑。工作人员可以持续修整数字孪生模型的虚实映射规则,更新健康状态识别标准,完善全周期健康管控流程,让管理体系始终适配设备不断变化的服役特征。

4.4 全生命周期协同管控运行机制

动车组关键部件健康管理涉及生产装配、日常运维、故障检修、状态管控多个业务模块,模块独立运行容易造成管理链路断裂、资源无法互通。打通多环节业务壁垒,构建多维度联动的协同健康管理运行机制。整合各模块的业务流程与数据资源,建立贯穿设备全生命周期的管理链路。推动数字孪生管控平台适配轨道交通运维体系的运行逻辑与业务规范,融入行业现有的运维管理架构。多业务协同的运行模式能够整合全周期管控资源,打通各阶段管理链路,形成覆盖完整服役周期、贯穿全部业务环节的一体化部件健康管理模式。

结束语

轨道交通装备运维体系的智能化转型,是行业长期深耕的核心方向。将数字孪生技术深度嵌入动车组关键部件的健康管控流程,可打破传统分段运维的边界限制,让部件从装配下线到报废拆解的每一段状态变化都能被精准捕捉、动态追踪。这套融合虚实联动特性的管控模式,能把零散的运维数据转化为可落地的状态研判依据,让部件性能衰减的细微趋势提前纳入管控视野,推动健康管理从被动故障修复转向主动状态维护,为轨道交通装备的长期安全稳定运行提供扎实的技术支撑。

参考文献

- [1] 张海柱,傅扬原,饶大伦,等.基于数字孪生的动车组转向架性能监测方法[J].铁道科学与工程学报,2026,23(3):1354-1369.
- [2] 周明星.基于AR技术的高铁动车组关键部件自主修质量管控系统研究[J].铁道建筑技术,2024(11):10-14,73.
- [3] 陈哲,夏清,李永华,等.高速动车组全生命周期RAMS设计优化与关键技术[J].铁路技术创新,2025(3):131-139.
- [4] 冯国斌,严皓,关吉瑞,等.数字孪生动车组模型构建方法及其应用方案研究[J].智慧轨道交通,2026,63(3):15-22.