

基于数字孪生的高速机电一体化智能运维系统关键技术研究

韩力华

河北邢临高速公路开发有限公司, 河北 邢台 054000

DOI:10.61369/ERA.2026050020

摘 要： 本研究聚焦于高速公路机电系统，深入探索多源异构数据实时处理与数字孪生可视化智能运维平台的关键技术。针对当前高速公路机电系统运维面临的数据处理难题与智能化需求，通过创新的数据处理技术、数字孪生模型构建以及智能运维平台搭建，实现对机电系统的高效管理与精准运维。利用先进的数据融合与实时处理算法，打破数据壁垒，为数字孪生模型提供准确、及时的数据支持。借助数字孪生技术，构建与物理系统高度匹配的虚拟模型，实现对机电系统运行状态的实时监测、故障预测与可视化展示。通过搭建智能运维平台，整合各类运维功能，为高速公路管理部门提供科学决策依据，提升机电系统的可靠性与运维效率，推动高速公路智能化发展^[1]。

关 键 词： 高速公路；机电系统；多源异构数据；数字孪生；智能运维；大数据分析；物联网

Research on Key Technologies of Intelligent Operation and Maintenance System for High-Speed Electromechanical Integration Based on Digital Twin

Han Lihua

Hebei Xinglin Expressway Development Co., Ltd., Xingtai, Hebei 054000

Abstract： This study focuses on the electromechanical system of expressways, delving into the key technologies for real-time processing of multi-source heterogeneous data and the development of a visually intelligent operation and maintenance platform based on digital twin. Addressing the data processing challenges and intelligent demands currently faced in the operation and maintenance of expressway electromechanical systems, this research achieves efficient management and precise operation and maintenance of electromechanical systems through innovative data processing techniques, digital twin model construction, and the establishment of an intelligent operation and maintenance platform. Utilizing advanced data fusion and real-time processing algorithms, it breaks down data barriers and provides accurate and timely data support for the digital twin model. By leveraging digital twin technology, a virtual model highly compatible with the physical system is constructed, enabling real-time monitoring, fault prediction, and visual display of the operational status of the electromechanical system. Through the establishment of an intelligent operation and maintenance platform, various operation and maintenance functions are integrated, providing scientific decision-making support for expressway management departments, enhancing the reliability and operational efficiency of electromechanical systems, and promoting the intelligent development of expressways^[1].

Keywords： expressway; electromechanical system; multi-source heterogeneous data; digital twin; intelligent operation and maintenance; big data analysis; Internet of Things

引言

高速公路机电系统是保障交通运行的核心，涵盖多子系统与精密设备，伴随智能化发展，其产生的多源异构数据（如传感器、视频等结构化、半结构化及非结构化数据）因格式与语义复杂，导致传统运维难以实现精准管理。数字孪生技术虽为机电系统运维提供新思路，但需解决数据实时处理与智能平台搭建难题。开展相关研究，对提升机电系统可靠性、降低运维成本、推动交通行业智能化转型意义重大。国外在高速公路智能化领域先行，于数据融合与数字孪生应用取得成果，但数据处理效率与决策精准性待提升。国内研究发展迅速，在数据处理框架、模型构建等方面有进展，然而存在数据共享难、模型同步性差、决策模型不完善及可视化不足等问题，尚未形成完整技术体系。

一、多源异构数据实时处理技术

（一）多源异构数据采集

高速公路机电系统存在诸多多源异构的数据源头，设备运作数据、环境监测数据、交通流量数据、视频检测数据以及运维守护数据等均属于此类范畴^[2]。设备运作数据来源于各种机电设备（诸如通信设备、检测摄像机、收费系统终端等），这些数据体现设备的工作状况、性能指标等信息；环境监测数据包含气象数据（温度、湿度、风速、降雨量等）、地质数据（地震监测、路基沉降检测等），其用以及时监测机电系统的周围环境；交通流量数据记载高速公路上车辆的行驶情形，涉及车流量、车速、车型等信息，这与机电系统的运作需求紧密相关；视频检测数据经由摄像头收集而来，用来即时观察高速公路的路况以及机电设备的运行情况；运维护数据覆盖设备保养记录、巡视报告、故障报修消息等内容，这些内容显示机电系统的运维历程和守护状况。

不同类型的数据来源需采用多种数据采集技术及方法。就设备运行数据而言，利用传感器、数据采集卡之类的硬件设备，凭借有线（比如以太网、RS485等）或者无线（像 Wi-Fi、4G/5G 等）通讯手段，及时获取设备的运行参数。

（二）数据传输与同步

要想达成多源异构数据的高效传递与随时同步，创建可靠的数据传递网络和同步机制十分关键。在数据传递网络这个层面，采取有线结合无线的办法来形成高速又稳定的通信网络。针对众多设备所产生的运行数据以及视频观察数据，经由光纤以太网来执行传递，以此保障数据传递具备高速率和稳定性；而对一些移动设备（比如巡检人员所持的终端设备）产生的数据，则利用 4G 或者 5G 这样的无线通信技术去传递，从而做到数据不论何时何地都能被收集并传送出来。而且，运用边缘计算技术，在接近数据源头的地方先对数据展开初步的分析和处理，这样就可以缩减数据传递的总量，减轻网络带宽所承受的压力。

在数据同步机制上，运用时间同步技术，保证来自不同数据源的数据在时间上具有一致性。设置高精度的时钟服务器，依靠 GPS、北斗等卫星授时系统得到精确的时间信号，再把时间同步信息传达给各数据采集设备和数据处理节点，促使所有设备的时钟维持同步；利用数据同步算法做到不同数据源之间数据的同步。

（三）实时数据处理与融合

所采集的多源异构数据存在噪声、缺失值、异常值等情况，其数据格式与结构各不相同，所以要执行即时处理并加以融合，从而获取有价值的信息，给后面的分析和应用给予支撑^[3]。在数据预处理环节，运用数据清洗技术剔除噪音数据和重复数据，改善数据质量；用滤波算法对传感器所采集的数据实施去噪操作，凭借查重算法删除重复的条目；针对缺失值，依照数据特性及分布情况，采取均值填补、插值法、机器学习算法预测等方式来补全；经由统计分析、聚类分析等手段识别并处理异常值，保障数据的准确性与可靠性。

多源异构数据具有特定属性，要采用合适的数据融合技术达成数据的有机整合。在数据层融合中，把不同数据源的原始数据简单合并并关联起来，创建成统一的数据集，比如按照时间戳把设备运行数据和环境监测数据相关联，以此来剖析环境要素给设备运行造成的影响；在特征层融合的时候，首先从各个数据源获

取特征，接着把这些特征加以整合与融合，用作后面分析和建模的依据。

二、多源异构数据驱动的数字孪生监测平台架构设计

（一）多源异构数据的采集与融合治理

创建全域感知的数据采集体系，依靠物联网传感器网络及时获取机电设备的主要运行参数，也要把气象、地质等外部环境的数据接入进来，还要整合历史运维工单和设备台账信息。利用数据清洗、标准化转换、语义映射等技术，解决数据格式和语义存在的差异；凭借时空对齐算法达成多源数据的关联，创建起统一的数据资源池，给后面的分析给予标准化的数据支撑。

（二）高精度数字孪生模型的多维构建

利用 BIM 技术创建机电设备及系统的三维几何模型，精确再现物理实体结构与空间布局；融合设备运行原理和历史数据，塑造动力学、热力学、故障发展等物理模型，模拟各种工况下的性能变化；采用 LSTM、GNN 等机器学习算法，识别数据特征并形成设备健康度评价模型，达成故障的早期警报和趋势预测。

（三）智能运维功能的集成与应用

在数字孪生平台当中做到设备运行状态随时可见的可视化监测，利用颜色编码、动态动画等形式直观表现异常信息，而且具备立体度数据穿透查询的能力。依照历史故障数据来训练预测模型，把数字孪生仿真与故障流传路径联系起来展开推演，从而改善故障判断的效率；形成成本一效益分析模型，全面考量预防性守护、机会性守护等策略的经济性，再遵照交通流量预测制订出理想的守护计划，达成运维决策的智能化和科学化。

三、数字孪生模型构建技术

（一）高速公路机电系统数字孪生模型架构

数字孪生模型对于高速公路机电系统智能运维而言非常关键，其架构设计需全面考量机电系统的复杂性与多元性，也要顾及数据处理及分析方面的需求。数字孪生模型架构大致涵盖数据层、模型层、服务层和应用层。其中，数据层承担着收集、存储及管理多源异构数据的任务，给数字孪生模型给予数据支撑。数据层包含多种数据源（譬如设备传感器、监测系统、经营数据库等等）、数据采集设备、数据传递网络以及数据存储系统（比如关系型数据库、非关系型数据库、分布式文件系统等）；依靠数据采集和传递技术，把多源异构的数据整合到数据存储系统当中，再执行预处理和清洗操作，从而保障数据的质量及其可用性。

模型层属于数字孪生模型的核心部分，其中包含几何模型、物理模型、行为模型和规则模型等。几何模型用来表述机电设备的外形、尺寸、位置等几何特性，经由像 BIM、3DMAX 这样的三维建模技术创建逼真的设备模型，给物理模型和行为模型赋予几何根基；物理模型依照物理原理和设备运行机制来阐述设备的物理特性和运行规律，诸如电气模型、力学模型、热学模型等，可以模仿设备的物理行为及其性能的改变情况；行为模型把设备的运行逻辑和业务流程融合起来，讲述设备在不同工作状态下的行为模式、响应机制以及各个子系统间的协作关系，用以剖析系统的运行情况和故障缘由；规则模型覆盖各类运维规则、故障判

断规则、决策规则等，用以引导数字孪生模型的运行以及智能运维的开展^[4]。

（二）机电系统模型构建与仿真

几何模型构成了数字孪生模型的根基，它可直观表现机电设备的外观与位置信息^[5]。采用三维建模技术，比如 BIM（建筑信息模型）技术，针对高速公路机电系统的设备、设施实施精准建模。其一，经由实地测量、图纸分析等途径取得设备的几何尺寸、形状、位置等相关信息；其二，运用专业的三维建模软件，诸如 Revit、3DMAX 等，依照实际比例塑造设备的三维模型。在建模期间，重视对细节的描绘，涵盖设备的外壳、接口、指示灯等方面，从而提升模型的逼真程度。

把各个设备的三维模型加以整合，形成起整个机电系统的三维场景，做到对机电系统的可视化显示。凭借几何模型，运维人员能够直观知晓设备的位置与分布情况，便于执行设备的巡视和保养工作。物理模型是数字孪生体映射物理世界的关键依靠，要深入结合机电设备的运转原理和环境交互规则。对于通信基站、观察摄像头、收费终端这些重要设备，按照热力学、电磁学以及材料力学的原理，创建设备运转的物理模拟模型。

（三）智能运维算法突破

本研究依靠时序卷积网络（TCN）和注意力机制创建起长时序依赖分析模型^[6]。TCN 利用因果卷积结构获取设备运行数据的时间序列特征，注意力机制关注关键参数的改变情况，从而改善预测的精准度。在某省际高速公路供电系统的试点项目里，此算法针对设备故障实施 72 小时之前的预测，其准确率达到 85%，相比于传统的机器学习方法，准确率提升了 25%。而且，针对守护决策执行改良时，利用了加强学习框架，把运维成本、服务中断时延以及设备使用寿命当作目标函数，以此来动态产生理想的守护策略。

算法经由模拟多种守护场景（包含预防性守护、机会性守护、事后修理等）的收益与风险，学习到较好的决策路径。仿真结果表明，这种方法能够削减 20%—30% 的运维成本，并缩减服务中断时延 40%。某区域高速公路网采用此项技术之后，每年节省运维费用上千万，设备平均故障修缮时间也被压缩到 45 分钟。

四、实施策略与保障措施

（一）完善标准规范与数据共享机制

当前高速公路机电系统数据管理存在显著的标准缺失与共享

壁垒问题。不同设备厂商采用私有协议采集数据，导致传感器输出格式、通信接口、编码规则差异巨大；交通管理部门、运维单位与设备供应商间缺乏数据交互规范，形成“信息孤岛”。例如，某省境内不同路段的监控系统因协议不兼容，无法实现视频数据的跨区域调取，严重制约应急指挥效率。为此，亟需制定《高速公路机电系统数据采集与交换标准》，统一数据采集频率、传输协议（如 MQTT、CoAP）、存储格式（JSON/XML）及安全认证机制，推动异构系统间的互操作性。在数据共享机制建设方面，需建立多方参与的协同管理平台^[8]。通过区块链技术实现数据操作的不可篡改与可追溯，保障数据主权与安全；制定数据分级分类管理办法，明确敏感数据（如收费交易记录）与公开数据（如设备运行状态）的共享权限；鼓励地方交通管理部门与科技企业合作，搭建区域性数据共享中心，推动设备运行数据、维修记录、交通流量等信息的互通互联，为智能运维提供数据基础。

（二）强化技术研发与人才培养

高速公路机电系统智能运维技术仍面临数据安全风险高、模型跨场景适应性差等瓶颈。在技术研发层面，需重点突破数据加密传输、隐私计算（如联邦学习）等安全技术，确保多源数据融合过程中的信息安全；针对不同地域、不同设备型号的差异，研究数字孪生模型的泛化方法，如通过迁移学习减少模型对特定场景数据的依赖。建议由政府牵头，组织高校（如东南大学、长安大学）、科研机构（交通运输部科学研究院）与龙头企业（华为、阿里云）成立联合实验室，围绕边缘计算与云端协同、多模态数据融合算法等关键技术开展攻关。人才培养方面，需构建“产学研用”一体化教育体系。高校应开设“智慧交通运维”“数字孪生技术”“交通大数据分析”等交叉学科课程，将机电系统原理、物联网技术、机器学习算法等知识融合教学；此外，定期举办技术研讨会与技能竞赛，促进从业人员技术交流与能力提升^[9]。

五、结束语

基于多源异构数据与数字孪生技术构建的高速公路机电系统智能运维平台，通过数据融合、模型仿真与智能决策，实现了运维模式从被动响应向主动预防的转变。未来，随着 5G、人工智能技术的发展，该平台可进一步集成自动驾驶、车路协同等场景需求，为智慧交通建设提供更强大的技术支撑^[10]。同时，需持续关注数据安全与隐私保护，确保系统稳定可靠运行。

参考文献

- [1] 裴丽. 高速公路智能交通监控系统的关键技术探讨 [J]. 中国科技期刊数据库 工业 A, 2024(7): 178–181.
- [2] 曹英闯. 基于物联网的智能前端设备采集终端浅析 [J]. 中国交通信息化, 2022(10): 156–159.
- [3] 刘亮. 城市轨道交通工程施工设备维护维保模式探析 [J]. 人民公交, 2024(24): 179–181.
- [4] 王永帝. 基于 RFID 的高速公路机电设备监控系统研究与应用 [J]. 交通世界, 2024(36): 178–181.
- [5] 葛海霞. 数据中心内高效数据通信架构的设计与实现 [J]. 移动信息, 2024, 46(12): 88–91.
- [6] 曹亚植. 高速公路机电系统的智能运维技术应用研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (引文版) 工程技术, 2025(1): 62–65.
- [7] 翟文君. 高速公路机电工程智慧供电系统的设计与应用 [J]. 机电信息, 2025(2): 41–44.
- [8] 徐健. 智能监控系统在绿色工业建筑施工中的应用 [J]. 佛山陶瓷, 2025, 35(1): 92–94.
- [9] 林树伟. 智慧林业管理模式在森林资源管护中的应用探讨 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 自然科学, 2025(1): 38–41.
- [10] 郭威, 吴华瑞, 郭旺, 顾静秋, 朱华吉. 特色农产品设施环境下品质智能管控技术研究现状与展望 [J]. 智慧农业 (中英文), 2024, 6(6): 44–62.