

高速公路机电系统多源异构数据实时处理与数字孪生可视化智能运维平台关键技术研究

韩力华

河北邢临高速公路开发有限公司 河北邢台 054000

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

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。

1. 多源异构数据实时处理技术

1.1 多源异构数据采集

高速公路机电系统中的多源异构数据来源广泛，包括设备运行数据、环境监测数据、交通流量数据、视频监控数据以及运维管理数据等^[2]。设备运行数据由各类机电设备（如通信设备、监控摄像机、收费系统终端等）产生，反映设备的工作状态、性能参数等信息；环境监测数据涵盖气象数据（温度、湿度、风速、降水等）、地质数据（地震监测、路基沉降监测等），对机电系统的运行环境进行实时监测；交通流量数据记录高速公路上车辆的通行情况，包括车流量、

车速、车型等信息，与机电系统的运行需求密切相关；视频监控数据通过摄像头采集，用于实时监控高速公路的路况和机电设备的运行状态；运维管理数据则包括设备维护记录、巡检报告、故障报修信息等，反映机电系统的运维历史和管理情况。针对不同类型的数据来源，采用多样化的数据采集技术与方法。对于设备运行数据，利用传感器、数据采集卡等硬件设备，通过有线（如以太网、RS485 等）或无线（如 Wi-Fi、4G/5G 等）通信方式，实时采集设备的运行参数。

1.2 数据传输与同步

为了实现多源异构数据的高效传输与实时同步，构建可靠的数据传输网络和同步机制至关重要。在数据传输网络方面，采用有线与无线相结合的方式，构建高速、稳定的通信网络。对于大量的设备运行数据和视频监控数据，利用光纤以太网进行传输，以保证数据传输的高速率和稳定性；对于部分移动设备（如巡检人员的手持终端）产生的数据，采用 4G/5G 等无线通信技术进行传输，实现数据的随时随地采集与传输。同时，引入边缘计算技术，在靠近数据源头的位置对数据进行初步处理和分析，减少数据传输量，降低网络带宽压力。在数据同步机制方面，采用时间同步技术，确保不同数据源的数据在时间上的一致性。通过部署高精度的时钟服务器，利用 GPS、北斗等卫星授时系统获取精确的时间信号，并将时间同步信息发送至各个数据采集设备和数据处理节点，使所有设备的时钟保持同步。采用数据同步算法，

实现不同数据源之间的数据同步。

1.3 实时数据处理与融合

采集到的多源异构数据存在噪声、缺失值、异常值等问题，且数据格式和结构各异，需要进行实时处理与融合，以提取有价值的信息，为后续的分析和应用提供支持^[3]。在数据预处理阶段，采用数据清洗技术，去除噪声数据和重复数据，提高数据质量。利用滤波算法对传感器采集的数据进行去噪处理，采用查重算法去除重复的记录。对于缺失值，根据数据特点和分布规律，采用均值填充、插值法、机器学习算法预测等方法进行填补。利用统计分析、聚类分析等方法检测和处理异常值，确保数据的准确性和可靠性。针对多源异构数据的特点，采用有效的数据融合技术，实现数据的有机整合。在数据层融合方面，将不同数据源的原始数据直接进行合并和关联，形成统一的数据集合。例如，将设备运行数据和环境监测数据按照时间戳进行关联，分析环境因素对设备运行的影响。在特征层融合方面，先从各个数据源中提取特征，然后将这些特征进行组合和融合，用于后续的分析和建模。

2. 多源异构数据驱动的数字孪生监测平台架构设计

2.1 多源异构数据的采集与融合治理

构建全域感知的数据采集体系，通过物联网传感器网络实时获取机电设备关键运行参数，同步接入气象、地质等外部环境数据，并整合历史运维工单与设备台账。采用数据清洗、标准化转换、语义映射等技术，消除数据格式与语义差异；运用时空对齐算法实现多源数据关联，形成统一的数据资源池，为后续分析提供标准化数据基础。

2.2 高精度数字孪生模型的多维构建

基于BIM技术搭建机电设备与系统的三维几何模型，精准还原物理实体结构与空间布局；结合设备运行机理与历史数据，构建动力学、热力学、故障演化等物理模型，模拟不同工况下的性能变化；利用LSTM、CNN等机器学习算法，挖掘数据特征建立设备健康度评估模型，实现故障的早期预警与趋势预测。

2.3 智能运维功能的集成与应用

在数字孪生平台上实现设备运行状态的实时可视化监测，通过颜色编码、动态动画等方式直观展示异常信息，并支持多维度数据穿透查询；基于历史故障数据训练预测模型，结合数字孪生仿真推演故障传播路径，提升故障诊断效

率；建立成本-效益分析模型，综合评估预防性维护、机会维护等策略的经济性，结合交通流量预测制定最优维护计划，实现运维决策的智能化与科学化。

3. 数字孪生模型构建技术

3.1 高速公路机电系统数字孪生模型架构

数字孪生模型是实现高速公路机电系统智能运维的核心，其架构设计应充分考虑机电系统的复杂性和多样性，以及数据处理和分析的需求。数字孪生模型架构主要包括数据层、模型层、服务层和应用层。数据层负责采集、存储和管理多源异构数据，为数字孪生模型提供数据支持。数据层包括各类数据源（如设备传感器、监控系统、管理数据库等）、数据采集设备、数据传输网络以及数据存储系统（如关系型数据库、非关系型数据库、分布式文件系统等）。通过数据采集和传输技术，将多源异构数据汇聚到数据存储系统中，并进行预处理和清洗，确保数据的质量和可用性。模型层是数字孪生模型的核心，包括几何模型、物理模型、行为模型和规则模型等。几何模型用于描述机电设备的外形、尺寸、位置等几何特征，通过三维建模技术（如BIM、3DMAX等）构建逼真的设备模型，为物理模型和行为模型提供几何基础。物理模型基于物理原理和设备运行机制，描述设备的物理特性和运行规律，如电气模型、力学模型、热学模型等，用于模拟设备的物理行为和性能变化。行为模型结合设备的运行逻辑和业务流程，描述设备在不同工况下的行为模式和响应机制，以及各子系统之间的协同工作关系，用于分析系统的运行状态和故障原因。规则模型则包含各种运维规则、故障诊断规则、决策规则等，用于指导数字孪生模型的运行和智能运维的实施^[4]。

3.2 机电系统模型构建与仿真

几何模型是数字孪生模型的基础，用于直观展示机电设备的外观和位置信息^[5]。利用三维建模技术，如BIM（建筑信息模型）技术，对高速公路机电系统的设备、设施进行精确建模。首先，通过实地测量、图纸分析等方式获取设备的几何尺寸、形状、位置等信息；然后，使用专业的三维建模软件，如Revit、3DMAX等，按照实际比例构建设备的三维模型。在建模过程中，注重细节的刻画，包括设备的外壳、接口、指示灯等，以提高模型的逼真度。将各个设备的三维模型进行整合，构建出整个机电系统的三维场景，实现对机电系统的可视化展示。通过几何模型，运维人员

可以直观地了解设备的位置和布局，方便进行设备的巡检和维护。物理模型是数字孪生体映射物理世界的核心支撑，需深度融合机电设备的运行机理与环境交互规律。针对通信基站、监控摄像头、收费终端等关键设备，基于热力学、电磁学及材料力学原理，构建设备运行的物理仿真模型。

3.3 智能运维算法突破

在故障预测方面，本研究基于时序卷积网络（TCN）与注意力机制，构建长时序依赖分析模型^[6]。TCN 通过因果卷积结构捕捉设备运行数据的时间序列特征，注意力机制则聚焦关键参数变化，提升预测精度。在某省际高速公路供配电系统试点中，该算法提前 72 小时预测设备故障的准确率达 85%，较传统机器学习方法提升 25%。维护决策优化采用强化学习框架，以运维成本、服务中断时间、设备寿命为目标函数，动态生成最优维护策略。算法通过模拟不同维护场景（如预防性维护、机会维护、事后维修）的收益与风险，学习最佳决策路径。仿真结果显示，该方法可使运维成本降低 20%–30%，服务中断时长减少 40%^[7]。某区域高速公路网应用该技术后，年度运维费用节约超千万元，设备平均故障修复时间缩短至 45 分钟。

4. 实施策略与保障措施

4.1 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。

4.2 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]。

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.