

基于数字孪生的电梯群运行状态实时仿真与风险预测框架构建

谭忠宏

广东省特种设备检测研究院清远检测院 广东广州 511000

摘要: 数字孪生技术为电梯群运维管理提供了虚实融合的创新思路,能够实现运行状态的精准感知、实时仿真与风险预判。本文构建基于数字孪生的电梯群运行管理框架,首先解析框架的三大构成要素,包括物理电梯群数据采集、虚拟模型构建与虚实数据交互;进而阐述运行状态实时仿真机制,涵盖数据驱动仿真、调度策略模拟与动态评估;最后提出风险预测框架,通过性能退化分析、风险识别与维护策略生成,实现电梯群运维的智能化升级。研究为电梯群安全高效运行提供技术支撑,助力特种设备运维管理的数字化转型。

关键词: 数字孪生; 电梯群; 实时仿真; 风险预测; 预测性维护

1 电梯群数字孪生框架的构成要素

1.1 物理电梯群的多维数据采集

物理电梯群的多维数据采集是数字孪生框架的基础,目标是全面、精准、实时获取电梯群运行数据,为虚拟模型构建与仿真分析提供支撑。数据采集范围涵盖运行参数、部件状态、环境条件与客流信息等维度,形成完整体系。运行参数如速度、启停次数,通过电梯控制系统自带传感器与接口实时获取;部件状态数据关注曳引机等关键部件,在关键位置部署传感器采集振动频率等;环境条件数据包含井道温湿度等,客流信息由轿厢内摄像头采集,为协同调度仿真提供数据。采集时,要确保频率与精度满足需求,运行参数采集频率为1次/秒,关键部件状态数据为10次/秒,同时用边缘计算技术预处理原始数据,提升质量^[1]。

1.2 虚拟电梯群的几何与行为建模

虚拟电梯群模型是物理电梯群的数字化镜像,要实现几何形态与运行行为精准映射,为实时仿真和风险预测提供载体。几何建模依据物理电梯群实际结构,用三维建模技术构建轿厢、曳引系统等部件几何模型,确保尺寸、位置与物理实体一致,同时细化关键部件结构特征,为部件状态仿真提供几何基础。行为建模是让虚拟模型具备物理实体运行特性的核心,基于电梯群运行原理与控制逻辑,构建运动、控制与协同调度行为模型。运动行为模型模拟电梯动作,用动力学方程描述过程,保证与物理电梯运动状态同步;控制行为模型复刻控制逻辑,实现对控制指令精准响应;协同调度行为模型模拟调度策略,能根据客流动态调整方案,为调度

策略优化仿真提供支撑。

1.3 物理实体与虚拟模型的数据交互

物理实体与虚拟模型的数据交互是数字孪生框架核心纽带,要实现数据实时传输、同步更新与双向反馈,构建“物理状态感知–虚拟模型仿真–决策指令下达”闭环链路。数据传输用工业以太网与5G通信结合,物理电梯群实时数据经工业以太网到边缘网关,预处理后通过5G网络传至数字孪生平台,驱动虚拟模型更新状态。数据同步用时间戳对齐机制,保证物理实体与虚拟模型运行状态时间同步,使虚拟模型能实时复刻物理电梯群情况。双向反馈含“物理到虚拟”数据驱动与“虚拟到物理”决策指导,物理数据驱动虚拟模型仿真,虚拟模型仿真结果以指令下发,指导电梯群调整参数或触发维护。数据交互要保障传输安全稳定,用加密技术防泄露,通过断点续传与冗余传输防丢失,确保虚实融合链路可靠运行^[2]。

2 电梯群运行状态的实时仿真机制

2.1 基于实时数据的驱动仿真

实时仿真以物理电梯群的实时数据为驱动,通过虚拟模型动态复刻电梯群的运行状态,实现运行过程的可视化监控与精准模拟。数据驱动过程中,虚拟模型实时接收物理电梯群上传的运行参数、部件状态与客流数据,自动更新模型的运行状态,如轿厢位置随运行参数动态变化,部件温度、振动数据实时映射至虚拟部件模型,客流分布数据在建筑虚拟场景中可视化呈现。

仿真过程中需结合电梯群的动力学特性与控制逻辑,

对运行状态进行精细化模拟。例如，当物理电梯的曳引机振动数据超出正常范围时，虚拟模型会同步呈现曳引机的异常振动状态，并通过动力学仿真分析振动对电梯运行稳定性的影响。同时，仿真系统能够模拟不同运行场景下的电梯群状态，如早高峰客流拥堵、部件轻微故障等场景，为运行效能评估与风险预判提供模拟环境。

实时仿真的核心优势在于能够突破物理实体的观测限制，实现电梯群内部状态的可视化呈现，如通过虚拟模型可直观查看电梯井道内导轨的磨损情况、钢丝绳的张力分布等物理层面难以直接观测的状态，为运维人员提供全面的运行状态视图。

2.2 电梯群协同调度策略的模拟

电梯群协同调度策略模拟是实时仿真的重要应用，通过虚拟模型仿真不同调度策略的运行效果，为调度优化提供数据支撑。传统电梯群调度策略多为固定模式，难以根据实时客流变化与电梯状态动态调整，导致运行效率偏低。基于数字孪生的调度模拟能够实时输入客流数据、电梯运行状态数据，仿真不同调度策略下的候梯时长、乘梯时长、电梯能耗、运力利用率等评估指标，筛选最优调度方案。

调度策略模拟涵盖多种典型场景，如早高峰办公楼的上行客流集中场景、商场的分散客流场景、住宅楼的夜间低峰场景等。在早高峰场景中，仿真系统可模拟“分区调度”“高峰优先”等策略，通过对不同策略下的平均候梯时长与电梯满载率，确定最适合当前客流特征的调度方案；在低峰场景中，可仿真“节能调度”策略，通过减少运行电梯数量、调整电梯停靠楼层，降低能耗同时保障基本出行需求。

模拟过程中，虚拟模型能够实时反馈调度策略的执行效果，当某一调度策略导致部分电梯负载过高或候梯时间过长时，仿真系统会及时发出预警，支持运维人员调整调度参数，实现调度策略的动态优化^[3]。

2.3 运行效能的动态评估与可视化

运行效能动态评估与可视化通过构建多维度评估指标体系，结合实时仿真数据，对电梯群的运行效率、能耗水平、安全状态进行量化评估，并以可视化方式呈现，为运维决策提供直观依据。评估指标体系包括运行效率指标（平均候梯时长、平均乘梯时长、电梯利用率）、能耗指标（单位客流能耗、待机能耗）、安全状态指标（部件健康度、故障发生率）等，指标数据均来自虚拟模型的实时仿真结果与物理电梯群

的历史数据对比分析。

可视化呈现采用三维虚拟场景与数据看板相结合的方式，三维虚拟场景直观展示电梯群的运行状态，如轿厢实时位置、门系统开关状态、客流分布热力图等；数据看板以图表形式展示评估指标的实时数值与变化趋势，如候梯时长折线图、电梯能耗柱状图、部件健康度雷达图等。运维人员通过可视化界面可快速掌握电梯群的整体运行效能，识别运行瓶颈，如某部电梯能耗异常偏高、某楼层候梯时间过长等问题，为针对性优化提供方向。

动态评估采用实时计算与周期性汇总相结合的方式，实时计算运行效率与安全状态指标，每小时汇总一次能耗指标，确保评估结果既能反映实时运行状态，又能体现长期运行趋势。

3 电梯群运行风险的预测框架

3.1 关键部件性能退化趋势分析

关键部件性能退化趋势分析是风险预测的核心基础，通过数字孪生框架采集的部件状态数据，结合性能退化模型，预判部件的剩余使用寿命与故障风险。电梯群的关键部件如曳引机、门系统、导轨、钢丝绳等，其性能退化遵循一定的规律，通过分析历史数据与实时监测数据，能够建立性能退化曲线，实现趋势预判。

例如，某小区电梯群的曳引机通过振动传感器采集的振动加速度数据，在正常运行状态下稳定在0.1g~0.3g之间，随着运行时间增加，轴承磨损导致振动加速度逐渐上升，当数据达到0.8g时易出现故障。通过构建曳引机性能退化模型，输入近6个月的振动数据，可拟合出振动加速度随运行时间的变化曲线，预判出该曳引机在当前运行强度下，剩余使用寿命约为3个月，需提前安排维护。

性能退化趋势分析采用数据驱动与机理分析相结合的方法，数据驱动方法通过机器学习算法挖掘历史数据中的退化规律，机理分析方法基于部件的物理特性与磨损机制，确保预测结果的准确性。针对不同部件的退化特性，采用差异化的预测模型，如曳引机、轴承等旋转部件采用振动分析模型，门系统采用开关门次数与故障关联模型，导轨采用磨损量累积模型^[4]。

3.2 潜在运行风险的识别与评估

潜在运行风险的识别与评估基于性能退化趋势分析结果，结合电梯群运行场景，全面识别可能引发故障的风险因

素，并评估风险等级。风险识别涵盖部件故障风险、运行调度风险与环境影响风险三类。部件故障风险由性能退化趋势分析直接得出，如曳引机振动超标风险、门系统开关故障风险等；运行调度风险包括客流高峰时的运力不足风险、电梯负载不均导致的过度损耗风险等；环境影响风险如井道内湿度超标导致的部件锈蚀风险、粉尘过多导致的机械卡滞风险等。

风险评估采用风险矩阵法，从风险发生的可能性与影响程度两个维度，将风险等级划分为低、中、高三个级别。可能性基于性能退化趋势、历史故障数据与运行场景分析确定，影响程度根据故障对电梯运行的影响范围、严重程度与修复成本确定。例如，曳引机故障发生可能性为高，且故障会导致电梯停运、影响全楼居民出行，修复成本高，因此评估为高风险；井道湿度超标导致部件锈蚀的可能性为中，影响仅为部件寿命缩短，修复成本低，评估为中风险。

风险识别与评估过程实时进行，当虚拟模型监测到物理电梯群的部件状态数据异常或运行场景发生变化时，立即更新风险等级，并在可视化界面中以不同颜色标识，提醒运维人员重点关注高风险项。

3.3 预测性维护策略的生成与推送

预测性维护策略的生成与推送基于风险评估结果，结合电梯群的运行计划与维护资源，制定精准的维护方案并及时推送至运维管理系统。维护策略包括维护时间、维护内容、维护方式与应急措施四个方面，确保维护工作的针对性与高效性。

维护时间的确定以部件剩余使用寿命为依据，结合电梯群的运行高峰时段，避开早高峰、晚高峰等出行密集时段，选择夜间或节假日进行维护，减少对用户出行的影响。例如，针对预判剩余寿命为3个月的曳引机，结合小区电梯运行规律，将维护时间定在周末夜间10点至次日凌晨6点。维护内容根据风险原因确定，如曳引机振动超标需进行轴承更换与润滑处理，门系统开关故障需检修传动机构与传感器。

维护方式分为在线监测维护与停机维护，对于轻微故障风险，可通过远程调整运行参数、在线监测状态等方式进行维护；对于高风险故障，需安排停机维护，确保维护效果。

应急措施针对维护过程中可能出现的突发情况制定，如维护期间电梯无法及时恢复运行时，启用备用电梯或提供临时出行指引。

维护策略生成后，通过数字孪生平台推送至运维人员的移动端APP与后台管理系统，明确维护任务与时间节点，并实时跟踪维护进度。维护完成后，将维护数据录入数字孪生系统，更新部件性能参数与退化模型，为后续风险预测提供数据支撑，形成“预测—维护—更新”的闭环管理^[5]。

4 结语

基于数字孪生的电梯群运行状态实时仿真与风险预测框架，通过物理电梯群数据采集、虚拟模型构建与虚实数据交互，实现了运行状态的实时仿真与精准监控；通过性能退化趋势分析、风险识别与评估，实现了潜在风险的提前预判；通过预测性维护策略生成与推送，实现了运维管理的精准高效。该框架打破了传统电梯群运维的被动模式，推动运维管理向数字化、智能化、主动化转型，有效提升了电梯群运行的安全性与高效性，降低了运维成本与故障发生率。该框架的构建与应用，为特种设备运维管理提供了可借鉴的数字孪生解决方案，有助于推动电梯行业的数字化转型与高质量发展。在实际应用中，需结合不同建筑的电梯群配置与运行特点，优化模型参数与算法，持续提升框架的适应性与准确性，为电梯群的安全稳定运行提供更有力的技术保障。

参考文献：

- [1] 张越宏,袁昭成,米雨阳,等.电梯安全评估数字孪生试验平台的搭建[J].中国电梯,2023(4):37–39.
- [2] 王乐,王璇,李菊峰,等.数字孪生技术在电梯行业中的应用探索[J].中国特种设备安全,2021,37(6):6.
- [3] 陈尧.基于数字孪生技术的定制电梯设计方法研究[D].五邑大学,2022.
- [4] 张越宏,袁昭成,米雨阳,等.数字孪生技术在电梯智能运维中的应用探索[J].中国电梯,2023.
- [5] 李宏宇,康献民,谢啊奋,等.产品设计域数字孪生模型演化过程及方法研究[J].机床与液压,2023,51(19):65–71.