

基于数字孪生的电梯检验检测风险预测与可靠性验证研究

张延明

甘肃省特种设备检验检测研究院 甘肃兰州 730050

摘要：电梯作为城市垂直交通的核心设施，其运行安全直接关系到公众出行安全与社会秩序稳定。传统电梯检验检测模式依赖人工操作，存在检测滞后、风险识别不全面、可靠性评估不准确等问题，难以适应现代电梯安全管理的精细化需求。数字孪生技术凭借虚实映射、实时交互、全生命周期仿真等特性，为电梯检验检测提供了全新的技术路径。本文立足电梯运行全流程，分析传统检验检测模式的局限性，构建基于数字孪生的电梯检验检测风险预测与可靠性验证体系，探索技术应用的关键环节与实施路径，旨在提升电梯检验检测的精准度、前瞻性与可靠性，为电梯安全管理提供技术支撑与实践参考。

关键词：数字孪生；电梯；检验检测；风险预测；可靠性验证

引言

电梯维护保养，是指对电梯进行清洁、润滑、调整、更换易损件和检查等日常维护和保养性工作。电梯作为机电类特种设备，既有机械部件，又有电子控制元器件；既有静止部件，又有运动部件。其频繁的使用容易造成较大磨损，如不能得到及时有效的维护保养，容易带来一些安全隐患。为了规范电梯保养行为，电梯安全监察部门根据《中华人民共和国特种设备安全法》《特种设备安全监察条例》，制定了大量统一的电梯相关的安全技术规范和管理办法。传统电梯检验检测以定期人工检测为主，检测人员依据相关标准，通过专业工具对电梯关键部件进行现场检查、测量与试验。这种模式存在明显的局限性：检测周期固定，难以实现对电梯运行状态的实时监测，易出现“检测合格后短期内发生故障”的情况；人工检测依赖检测人员的经验与技能，主观性较强，对隐蔽性风险的识别能力有限；检测数据分散，缺乏系统整合与深度分析，难以对电梯可靠性进行全面评估与长期预测。数字孪生技术通过构建物理实体的虚拟镜像，实现物理世界与虚拟世界的实时数据交互、动态仿真与全生命周期管理。将该技术应用于电梯检验检测，能够打破传统模式的时空限制，实现对电梯运行状态的实时感知、风险的提前预判与可靠性的精准验证。因此，开展基于数字孪生的电梯检验检测风险预测与可靠性验证研究，对推动电梯安全检测技术升级、提升电梯安全管理水平具有重要意义。

一、传统电梯检验检测模式的局限性

（一）检测时效性不足

传统电梯检验检测多采用定期检测制度，检测周期通常以年度或半年度为单位。在两次检测间隔期间，电梯可能因频繁使用、环境变化等因素出现部件磨损加剧、性能下降等问题，而这些潜在风险难以被及时发现，导致检测与实际运行状态脱节，无法实现风险的动态防控。当电梯出现突发故障时，往往只能在事故发生后进行事后检测与维修，缺乏前瞻性的风险预警机制，难以从根源上避免安全事故的发生。

（二）风险识别不全面

电梯结构复杂，涉及机械、电气、控制等多个系统，其运行过程中的风险因素具有隐蔽性、关联性等特点。传统人工检测主要聚焦于直观可见的部件损伤、参数偏差等显性问题，对电梯运行过程中的动态风险，如部件疲劳累积、电气系统隐性故障、控制系统逻辑缺陷等，缺乏有效的检测手段与识别能力^[1]。同时，人工检测难以全面捕捉电梯运行过程中的动态数据，无法对各系统间的协同运行风险进行综合分析，导致部分潜在风险被遗漏，影响电梯运行安全。

（三）可靠性评估缺乏科学性

传统电梯可靠性评估主要基于检测数据中的故障记录与部件使用寿命，采用简单的统计分析方法进行评估，缺乏对电梯运行全生命周期数据的整合与深度挖掘。这种评估方式未能充分考虑电梯运行环境、使用频率、维护质量等个性化因素对设备可靠性的影响，评估结果往

往较为笼统，难以准确反映电梯的实际运行状态与未来可靠性趋势。此外，传统评估方法无法模拟不同工况下电梯的运行状态，难以对电梯的极限承载能力、故障演化路径等进行有效验证，影响可靠性评估的科学性与准确性。

（四）数据利用效率低下

传统电梯检验检测过程中产生的检测数据多以纸质记录或分散的电子文档形式存储，数据格式不统一、缺乏系统性管理，导致数据共享与复用难度较大。这些数据仅用于单次检测报告的编制，未能进行长期积累与深度分析，无法通过数据挖掘发现电梯运行的规律特征、风险演化趋势等有价值信息，数据的潜在价值未能得到充分发挥，难以为电梯的维护保养、升级改造提供科学依据。

二、基于数字孪生的电梯检验检测体系构建

（一）数字孪生模型构建

数字孪生模型是实现电梯检验检测风险预测与可靠性验证的核心基础。以电梯物理实体为原型，构建涵盖机械系统、电气系统、控制系统、安全保护装置等全要素的虚拟孪生模型。在模型构建过程中，通过三维扫描、参数测绘等技术手段，精准采集电梯各部件的几何尺寸、材质属性、安装位置等静态数据，确保虚拟模型与物理实体在结构、参数上完全一致。同时，整合电梯运行过程中的动态数据，包括电梯运行速度、加速度、振动频率、电流电压、部件温度等实时监测数据，建立虚拟模型与物理实体之间的动态映射关系^[2]。通过数据接口实现物理电梯与虚拟模型的实时数据交互，使虚拟模型能够实时模拟物理电梯的运行状态，精准复现电梯的启动、运行、制动等全流程动作，为后续的风险预测与可靠性验证提供精准模型支撑。

（二）数据感知与传输体系搭建

数据感知与传输是数字孪生技术应用的前提条件，旨在实现对电梯运行状态的全面感知与数据的实时传输。在电梯关键部位安装各类传感器，包括振动传感器、温度传感器、压力传感器、位移传感器、电流传感器等，对电梯运行过程中的机械振动、部件温度、结构变形、电气参数等关键数据进行实时采集。搭建高速、稳定的数据传输网络，采用5G、物联网等技术，将传感器采集到的实时数据传输至数字孪生平台。在数据传输过程中，采用数据加密、校验等技术手段，确保数据的安全性与完整性，避免数据丢失或被篡改。同时，建立数据预处理

机制，对传输至平台的原始数据进行清洗、去噪、标准化处理，剔除异常数据，提高数据质量，为后续的风险预测与可靠性分析提供高质量的数据支撑。

（三）风险预测模型构建与应用

基于数字孪生平台积累的电梯运行全生命周期数据，结合机器学习、深度学习等人工智能算法，构建电梯风险预测模型。通过对电梯运行数据的深度挖掘，分析电梯各部件的性能退化规律、故障演化路径与风险影响因素，识别电梯运行过程中的关键风险点。利用虚拟孪生模型对电梯运行状态进行动态仿真，模拟不同工况下电梯的运行过程，预测潜在风险的发生概率与影响范围。例如，通过分析电梯轿厢振动数据与导轨磨损数据，预测导轨的剩余使用寿命与故障发生概率；通过监测电气系统的电流电压波动，识别电路短路、元件老化等潜在风险。当风险预测模型检测到异常数据或预测到风险即将发生时，及时发出预警信号，提醒相关人员采取针对性的防控措施，实现风险的提前预判与主动防控。

（四）可靠性验证方法优化

依托数字孪生技术的全生命周期仿真与虚实交互特性，优化电梯可靠性验证方法。通过虚拟孪生模型对电梯的运行全流程进行模拟验证，包括电梯的启动性能、运行稳定性、制动可靠性、安全保护装置有效性等方面的验证。在虚拟环境中模拟电梯在不同负载、不同运行速度、不同环境条件下的运行状态，测试电梯各系统的协同工作能力与极限承载能力。利用数字孪生平台对电梯故障演化过程进行模拟，分析不同故障模式下电梯的运行状态与安全风险，验证电梯安全保护装置的响应速度与保护效果^[3]。通过虚拟仿真试验，能够在不影响电梯正常运行的前提下，对电梯的可靠性进行全面验证，避免了传统实体试验成本高、周期长、风险大的问题。同时，结合电梯运行全生命周期数据，对电梯可靠性进行动态评估，根据评估结果及时调整维护保养策略，提升电梯的运行可靠性。

三、基于数字孪生的电梯检验检测实施路径

电梯数字孪生模型的构建并非一蹴而就，需结合电梯的类型差异、使用年限长短、实际运行状态等具体情况，制定科学合理的分阶段实施计划，确保技术应用的可行性与实效性。首先，开展全面的前期调研与筛选工作，优先选择运行状态相对稳定、历史数据记录完整、数据可获取性强的电梯作为试点对象。针对试点电梯，

通过三维扫描、参数测绘等技术完成基础虚拟模型搭建，同时在关键部位安装各类传感器，搭建完善的数据感知系统，实现对电梯运行速度、振动频率、部件温度、电气参数等关键数据的全面采集与实时监测。在试点运行阶段，持续跟踪电梯的运行状态，不断积累海量的运行数据与检测数据，建立动态数据库。基于积累的数据，对虚拟模型的参数设置、仿真算法进行反复调试与优化，修正模型与物理实体之间的偏差，逐步提升模型的仿真精度与可靠性，确保虚拟模型能够精准复现电梯的实际运行状态与故障演化规律^[4]。待试点项目运行成熟、技术效果得到验证后，总结成功经验与实施路径，逐步扩大应用范围，将数字孪生技术推广至不同类型、不同使用年限的电梯检验检测中。通过规模化的应用与数据积累，进一步优化模型算法与数据处理机制，形成可复制、可推广的技术方案，推动整个电梯检验检测体系向智能化、精准化方向全面升级。

（一）加强技术融合与平台建设

数字孪生技术在电梯检验检测中的应用需要多学科、多技术的协同支持。加强数字孪生技术与人工智能、大数据、物联网、三维建模等技术的融合，提升风险预测的准确性与可靠性验证的科学性。构建统一的数字孪生电梯检验检测平台，整合数据采集、模型仿真、风险预测、可靠性评估等功能模块，实现对电梯检验检测全流程的一体化管理。同时，建立数据共享机制，推动电梯制造企业、检验检测机构、维护保养单位等多方主体的数据共享与协同合作，实现电梯全生命周期数据的整合利用，为电梯检验检测、维护保养、升级改造等提供全面的数据支撑。

（二）完善标准规范与人才培养

建立健全基于数字孪生的电梯检验检测标准规范体系，明确数字孪生模型构建、数据采集、风险预测、可靠性验证等环节的技术要求、操作流程与质量标准，规范技术应用行为，确保检验检测结果的客观性与准确性。加强专业人才培养，培养一批既掌握电梯检验检测专业知识，又熟悉数字孪生、人工智能、大数据等新技术的复合型人才^[5]。通过高校专业设置优化、企业内部培训、行业交流合作等多种方式，提升相关人员的技术应用能力与综合素养，为基于数字孪生的电梯检验检测技术推广与应用提供人才保障。

（三）强化实践应用与持续优化

将基于数字孪生的电梯检验检测技术应用于实际电梯安全管理中，在实践中检验技术的可行性与有效性。结合实际应用过程中发现的问题，对数字孪生模型、风险预测算法、可靠性验证方法等进行持续优化与改进，提升技术的适配性与实用性。同时，加强对技术应用效果的跟踪与评估，分析技术应用对电梯安全事故发生率、维护保养成本、运行可靠性等方面的影响，总结推广成功经验，逐步完善基于数字孪生的电梯检验检测体系，推动电梯安全管理向智能化、精细化方向发展。

结论

传统电梯检验检测模式在时效性、风险识别、可靠性评估等方面存在明显局限性，难以满足现代电梯安全管理的需求。数字孪生技术作为一种新兴的智能化技术，为电梯检验检测提供了全新的解决方案。通过构建电梯数字孪生模型、搭建数据感知与传输体系、建立风险预测模型与优化可靠性验证方法，能够实现对电梯运行状态的实时感知、风险的提前预判与可靠性的精准验证，有效提升电梯检验检测的质量与效率。在实践中，需分阶段推进模型构建与数据积累，加强技术融合与平台建设，完善标准规范与人才培养，强化实践应用与持续优化。未来，随着数字孪生技术的不断发展与完善，其在电梯检验检测领域的应用将更加深入广泛，有望推动电梯安全检测技术实现跨越式发展，为公众出行安全提供更坚实的保障。

参考文献

- [1] 张涛. 电梯日常检测存在的问题及措施分析[J]. 现代制造技术与装备, 2025, 61(08): 124-126.
- [2] 顾海瑞. 基于数字孪生的长期服役电梯异常振动预警方法研究[D]. 中国计量大学, 2024.
- [3] 胡豪. 基于数字孪生的智慧社区电梯可视化监测方法研究[D]. 中国计量大学, 2023.
- [4] 李聪林. 基于数字孪生的电梯运行监测方法研究[D]. 中国计量大学, 2023.
- [5] 张越宏, 袁昭成, 米雨阳, 杨文辉. 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, 34(01): 49-51.