数字孪生下医疗设备的运行优化与预测性维护

郭晏平
无锡市第五人民医院　江苏 无锡　214000

摘　要　目的：探讨数字孪生技术在医疗设备运行优化与预测性维护中的应用价值。方法：选取2022年1月至2024年6月无锡市第五人民医院60台医疗设备作为研究对象，随机分为对照组和观察组各30台。对照组采用传统定期维护策略，观察组采用基于数字孪生的预测性维护策略，比较两组设备故障率、平均故障间隔时间（MTBF）、维护成本、设备利用率、故障响应时间及维护准确率。结果：观察组设备故障率、维护成本、故障响应时间均低于对照组，MTBF、设备利用率、维护准确率均高于对照组,差异有统计学意义（$P<0.05$）。结论：基于数字孪生的预测性维护策略能显著降低医疗设备故障率，提高设备利用效率，降低维护成本，值得临床推广应用。

关键词　数字孪生；医疗设备；预测性维护；运行优化

Operation Optimization and Predictive Maintenance of Medical Equipment Based on Digital Twin

Guo Yan-ping
Wuxi Fifth People's Hospital, Wuxi 214000, Jiangsu Province, China

Abstract　Objective: To explore the application value of digital twin technology in the operational optimization and predictive maintenance of medical equipment. Methods: A total of 60 medical devices in Wuxi Fifth People's Hospital from January 2022 to June 2024 were selected as the study subjects. They were randomly divided into a control group and an observation group, with 30 devices in each group. The control group adopted a traditional periodic maintenance strategy, while the observation group adopted a predictive maintenance strategy based on digital twin technology. The equipment failure rate, mean time between failures (MTBF), maintenance costs, equipment utilization rate, failure response time, and maintenance accuracy were compared between the two groups. Results: The observation group showed lower equipment failure rates, maintenance costs, and failure response times, and higher MTBF, equipment utilization rates, and maintenance accuracy compared to the control group, with statistically significant differences ($P<0.05$). Conclusion: The predictive maintenance strategy based on digital twin technology can significantly reduce the failure rate of medical equipment, improve equipment utilization efficiency, and lower maintenance costs, making it worthy of clinical promotion and application.

Key words　Digital Twin; Medical Equipment; Predictive Maintenance; Operational Optimization

医疗设备是现代医疗服务体系的核心支撑，其运行状态直接影响医疗服务质量与患者安全。传统医疗设备维护多采用定期保养或故障后维修模式，存在维护时机不精准、资源浪费、突发故障难预防等问题，导致设备停机时间长、维护成本高、医疗服务中断等不良后果[1]。数字孪生技术作为新一代信息技术，通过构建物理设备的虚拟映射模型，实现设备全生命周期的实时监测、仿真分析与优化决策。近年来，数字孪生技术在工业制造、航空航天等领域已取得显著成效，但在医疗设备管理领域的应用研究尚处于起步阶段[2]。本研究旨在构建基于数字孪生的医疗设备运行优化与预测性维护体系，探索其在降低故障率、提升设备效能、优化维护策略方面的实际效果，为医疗设备智能化管理提供新思路和科学依据。

1　资料与方法

1.1 一般资料

选取2022年1月至2024年6月无锡市第五人民医院功能科、手术室、ICU等科室配置的60台医疗设备作为研究对象，采用随机数字表法分为对照组和观察组，每组30台。对照组中心电图机3台，监护仪15台，呼吸机5台，超声诊断仪3台，除颤仪4台；设备使用年限3～8年，平均使用年限（5.2±1.6）年；A级科室分布12台，B级科室分布18台；设备原值8万～45万元，平均原值（22.5±12.3）万元；年均使用频次1 200～4 500次，平均使用频次（2 680±950）次。观察组中心电图机4台，监护仪15台，呼吸机4台，超声诊断仪3台，除颤仪4台；设备使用年限3～9年，平均使用年限（5.4±1.8）年；A级科室分布11台，B级科室分布19台；设备原值7万～48万元，平均原值

（23.2 ± 13.1）万元；年均使用频次1 100 ~ 4 800次，平均使用频次（2 650 ± 1 020）次。两组设备在类型分布、使用年限、科室分布、设备原值、使用频次等基线资料比较，差异无统计学意义（$P > 0.05$），具有可比性。

纳入标准：在用临床普通设备；使用年限3年以上；具备基础数据接口；科室同意参与研究；设备技术档案完整；设备运行状态稳定。

排除标准：报废或封存设备；数据接口缺失或损坏的设备；近期计划更新或淘汰的设备；缺乏历史维护记录的设备；频繁发生故障影响正常使用的设备；无法进行状态监测的设备。

1.2 方法

对照组采用传统定期维护策略，按照设备制造商推荐的维护周期，每季度进行一次常规保养，每年进行一次全面检修，发生故障时进行应急维修，由医学工程部门制订年度维护计划，定期派遣工程师或联系厂家工程师进行现场维护，记录维护内容、更换部件及设备运行参数。

观察组采用基于数字孪生的预测性维护策略。第1阶段为数字孪生模型构建，利用三维建模技术构建设备的几何模型和物理模型，集成设备结构参数、性能参数、工作原理等多维信息，形成设备的虚拟镜像；部署边缘计算网关，对接设备自带传感器及额外安装的温度、振动、电流等监测传感器，实现设备运行数据的实时采集，采集频率为10次/s，数据类型包括设备运行状态、关键部件工作参数、环境参数等200余项指标；建立设备运行数据库，存储历史运行数据、故障记录、维护记录等，为模型训练提供数据支撑。第2阶段为预测模型建立，基于机器学习算法构建设备健康状态评估模型，采用支持向量机、随机森林、长短期记忆网络等多种算法，对设备健康度进行量化评分；建立故障预测模型，通过分析设备运行参数的变化趋势、异常波动特征，识别潜在故障征兆，预测故障发生时间和故障类型；设置预警阈值体系，将设备健康状态分为正常、注意、警告、故障4个等级，当参数超出阈值范围时自动触发预警。第3阶段为维护策略优化，系统根据预测结果自动生成维护建议，包括维护时机、维护内容、备件需求等；医学工程部门接收预警信息后，评估维护紧急程度，制订个性化维护方案，在设备故障前1 ~ 2周安排预防性维护；对于紧急预警，立即启动应急响应机制，调配维护资源；维护完成后，将维护数据反馈至数字孪生系统，实现模型的持续优化和自学习。第4阶段为运行优化管理，通过数字孪生平台实现设备运行的可视化监控，管理人员可实时查看所有设备的运行状态、负荷情况、健康度评分;基于设备利用率和预约情况，优化设备排班和检查流程，提高设备使用效率；定期生成设备运行分析报告，为设备采购、更新、配置优化提供决策依据。

1.3 观察指标

比较两组设备故障率（12个月内发生故障次数/设备台数 × 100%）、平均故障间隔时间（MTBF，设备正常运行总时间/故障次数）、维护成本（包括人工成本、备件成本、停机损失等构成的年度总成本）、设备利用率（实际使用时间/可用时间 × 100%）、故障响应时间（从故障发生到维护人员到达现场的平均时间）、维护准确率（准确识别并解决故障的维护次数/总维护次数 × 100%）。

1.4 统计学方法

采用SPSS 26.0统计软件进行数据分析。计量资料以（$\bar{x} \pm s$）表示，组间比较采用独立样本t检验；计数资料以例数或百分率表示，组间比较采用χ^2检验。$P < 0.05$为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 两组设备运行指标比较

观察组设备故障率低于对照组，MTBF长于对照组，设备利用率高于对照组，差异均有统计学意义（$P < 0.05$），见表1。

表1 两组设备运行指标比较

组别	n	故障率（%）	MTBF（h）	设备利用率（%）
对照组	30	18.67 ± 3.24	1245 ± 186	72.35 ± 6.82
观察组	30	8.93 ± 2.16	2168 ± 243	86.52 ± 5.47
t		13.486	− 16.325	− 8.762
P		< 0.05	< 0.05	< 0.05

2.2 两组设备维护效果比较

观察组维护成本低于对照组，故障响应时间短于对照组，维护准确率高于对照组，差异均有统计学意义（$P < 0.05$），见表2。

表2 两组设备维护效果比较

组别	n	维护成本（万元/年）	故障响应时间（min）	维护准确率（%）
对照组	30	3.85 ± 0.72	87.35 ± 12.46	76.83 ± 8.52
观察组	30	2.26 ± 0.54	32.58 ± 8.73	94.67 ± 4.28
t		9.652	19.647	− 9.873
P		< 0.05	< 0.05	< 0.05

3 讨论

医疗设备作为医疗服务的关键基础设施，其稳定运行直接关系到诊疗质量与患者安全。传统的预防性维护虽然能在一定程度上降低故障风险，但存在维护时机选择依赖经验、资源利用效率低、突发故障难以预防等局限性[3]。数字孪生技术通过

构建物理设备的高保真虚拟模型，实现物理世界与数字世界的实时交互，为医疗设备管理提供了全新的技术路径。本研究结果显示，基于数字孪生的预测性维护策略在多项关键指标上显著优于传统维护方式，验证了该技术在医疗设备管理领域的应用价值。

观察组设备故障率较对照组降低52.2%，MTBF延长74.1%，这一显著差异源于数字孪生系统的多维度实时监测与智能预测能力。系统通过部署多类型传感器网络，实现对设备运行状态、关键部件性能参数、工作环境等200余项指标的高频次采集，相比传统维护仅在固定时间点进行检测，数字孪生能够捕捉设备性能的动态变化趋势和异常波动[4]。基于机器学习的故障预测模型，通过训练历史故障数据和运行参数的关联关系，能够提前1～2周识别潜在故障征兆，如心电图机导联电极接触阻抗异常、监护仪传感器信号衰减、呼吸机压力传感器漂移、超声探头晶片性能下降等早期劣化信号。这种“未病先防”的维护模式，将被动应对转变为主动干预，在设备性能劣化尚未发展为完全故障前实施针对性维护，有效避免了突发停机事件[5]。

维护成本的显著降低是数字孪生技术应用的重要经济效益体现。观察组年均维护成本较对照组降低41.3%。设备利用率提升19.6%反映了数字孪生系统在运行优化方面的综合效能。通过实时监控各设备的负荷状态和预约排班情况，系统能够智能推荐检查时段分配，避免部分设备过载运行而其他设备闲置的资源错配现象。健康状态评估功能为设备使用决策提供依据，当某台设备健康度评分下降至警告级别时，可提前调整检查安排，将非紧急检查转移至状态良好的备用设备，既保证了诊疗连续性，又为问题设备争取了维护时间窗口[6]。可视化运行监控平台使管理层能够全局掌握设备资源配置效率，为优化设备采购计划、科室间设备调配、检查流程再造提供数据支撑。

故障响应时间缩短62.7%得益于智能预警机制和维护资源的前置部署。数字孪生系统在检测到异常参数时自动触发预警，通过移动终端即时推送给医学工程师，相比传统模式依赖操作人员发现异常后层级上报，响应链条大幅缩短。预测性维护使工程师能够提前准备所需备件、技术资料和专用工具，到达现场后可直接开展维护作业，避免了传统故障维修中的诊断时间消耗和备件等待延误。对于复杂故障，系统基于故障知识库提供辅助诊断建议和维修指导，降低了对工程师经验水平的依赖，提高了首次修复成功率[7]。维护准确率提升23.2%体现了数字孪生技术在故障诊断精准性方面的优势。传统维护中，工程师主要依靠经验判断和有限的现场检测数据，存在误判和漏判风险。数字孪生系统整合了设备全生命周期的运行数据、维护记录、故障案例，构建了设备专属的健康档案和知识图谱[8]。

4 结论

综上所述，基于数字孪生的医疗设备运行优化与预测性维护策略能够显著降低设备故障率，延长平均故障间隔时间，提高设备利用率，降低维护成本，缩短故障响应时间，提升维护准确率，为医疗机构提供了一种高效、经济、智能的设备管理新模式，具有重要的临床应用价值和推广前景，值得在更大范围内应用实践。

参考文献

[1]张琦.基于数字孪生技术的机械自动化设备虚拟调试与运行优化研究[J].现代工业工程,2025(10):19-21.

[2]韩松,贺严,杨佳,等.基于数字孪生技术的医疗设备故障预测与风险管控平台研发[J].中国医学装备,2025,22(8):125-129,135.

[3]林雨嘉,李金海,宁焕生,等.数字孪生技术在智慧医疗与健康领域的技术、应用与挑战综述[J].工程科学学报,2025,47(9):1812-1824.

[4]欧洋,邵艳梅.医疗数字孪生技术的利维坦式隐忧与思考[J].医学与哲学,2025,46(8):12-17.

[5]王松华.5G数字孪生在智慧医疗系统中的应用模式研究[J].中国宽带,2025,21(10):145-147.

[6]张翔.基于数字孪生技术的医疗网络数据安全保护系统设计[J].智能物联技术,2025,57(1):71-74.

[7]欧洋,邵艳梅.医疗数字孪生技术中的异化问题与消解策略[J].昆明理工大学学报(社会科学版),2024,24(4):40-47.

[8]胡碧荣,张维钰,卞晓悦.数字孪生技术发展现状及在医疗领域的应用研究[J].中国科技纵横,2024(18):23-29.

（本文编辑 王 冬）

