

融合数字孪生的装备运维服务 VR 系统构建与实现

陈清奎¹, 任国华², 金洁¹, 张亚松¹

1. 济南科明数码技术股份有限公司, 山东 济南 250001

2. 济南职业学院, 山东 济南 250100

DOI: 10.61369/SSSD.2025150006

摘 要 : 针对装备内部状态复杂、故障定位效率低、运维服务成本高问题, 提出一种融合数字孪生装备运维服务 VR 系统的构建方法, 系统围绕沉浸式状态查看、故障快速诊断、预测性维护协同需求, 依托数字孪生建模、VR 沉浸式交互、预测性维护算法三大核心技术, 采用“五层架构+五大功能模块”设计, 创建覆盖运维全流程的可视化运维监控平台, 支持运维人员“进入”设备内部, 直观查看运行状态、历史数据和性能趋势。基于上述核心技术和架构体系, 按照“数据采集-模型构建-VR 开发-测试推广”的进程, 探讨该系统的实现路径, 为装备运维的直观化、高效化与智能化发展, 推动装备运维数字化升级提供参考。

关 键 词 : 数字孪生; 虚拟现实; 预测性维护; 运维服务; 状态监控

Construction and Implementation of a VR System for Equipment Operation and Maintenance Services Integrating Digital Twin

Chen Qingkui, Ren Guohua, Jin Jie, Zhang Yasong

1.Jinan Keming Digital Technology Co., Ltd., Jinan, Shandong 250001

2.Jinan Vocational College, Jinan, Shandong 250100

Abstract : Aiming at the problems of complex internal status of equipment, low efficiency of fault location, and high cost of operation and maintenance (O&M) services, this paper proposes a construction method for a VR system for equipment O&M services integrating digital twin. Centering on the needs of immersive status checking, rapid fault diagnosis, and collaborative predictive maintenance, the system relies on three core technologies: digital twin modeling, VR immersive interaction, and predictive maintenance algorithms. It adopts a "five-layer architecture + five functional modules" design to create a visual O&M monitoring platform covering the entire O&M process, supporting O&M personnel to "enter" the interior of equipment to intuitively check operating status, historical data, and performance trends. Based on the above core technologies and architecture system, the paper discusses the implementation path of the system in accordance with the process of "data collection - model construction - VR development - testing and promotion", providing a reference for the intuitive, efficient, and intelligent development of equipment O&M and promoting the digital upgrading of equipment O&M.

Keywords : digital twin; virtual reality (VR); predictive maintenance; operation and maintenance (O&M) services; status monitoring

引言

在工业装备领域, 设备稳定运行和维护是保障生产安全、生产质量的关键。在传统的设备维修或维护工作中, 运维人员需要对照产品的二维图纸, 现场勘查, 甚至需要拆分大量零件, 排查装备风险隐患, 难以及时监测设备内部运行状况^{[1][2]}。在数字化转型进程中, 传统的装备运维模式暴露出一些不足, 存在耗时长、成本高的问题^[3]。而数字孪生技术支持精准复现物理实体对应的虚拟映射, 虚拟现实(VR)技术可以为现实与虚拟交互提供沉浸式场景, 二者融合为装备运维革新提供了方向^[4]。

一、系统需求分析

(一) 沉浸式状态查看需求

系统需以“数字孪生+VR”为核心, 满足以下需求:

1. 支持运维人员通过 VR 设备“进入”装备数字孪生模型内部, 自由漫游至关键部件, 可随时暂停、缩放视角, 清晰观察部

件结构细节与运行状态^[5]。

2. 实时运行参数以可视化形式叠加在虚拟部件上，例如用颜色梯度标注温度，用动态波纹表示振动强度，替代传统文字报表。

3. 支持多设备快速切换，运维人员在 VR 场景中通过界面操作，可直接切换至不同装备的数字孪生模型，无需现场奔波，适配多装备集中管理场景。

（二）故障快速诊断需求

1. 当真实装备出现异常时，数字孪生模型实时高亮标记故障部位，VR 场景中同步显示故障类型与异常特征，帮助运维人员快速定位问题。

2. 点击 VR 中的故障部位，可调取该部件的历史故障记录、过往维修方案，无需手动查询纸质文档或系统台账，缩短故障分析时间。

3. 支持虚拟拆解操作，运维人员可在 VR 中模拟拆解故障部件，观察内部损伤细节，避免现实中盲目拆机导致的二次损伤。

（三）预测性维护协同需求

1. 将装备历史运行数据与数字孪生模型绑定，运维人员通过 VR 手势操作“时间轴”，可直观查看设备不同时间段的运行状态变化，识别性能趋势异常（如部件老化导致的参数渐变）。

2. 预测性维护结果以可视化形式呈现，例如用进度条展示部件剩余寿命，用颜色标签标记故障风险等级（高风险红色、中风险黄色、低风险蓝色），辅助制定维护计划。

3. 维护完成后，VR 场景中自动生成维护前后的状态对比，直观呈现维护效果，便于后续运维复盘。

二、系统核心技术支持

系统实现依赖三大核心技术协同，确保“虚拟映射真实、交互直观便捷、维护智能高效”：

（一）装备数字孪生模型构建技术

数字孪生模型是系统的核心载体，需实现“几何一致、物理同源、行为同步”，构建流程分三步：

1. 多维度建模

几何建模：通过激光扫描获取真实装备结构数据，使用专业建模软件构建 1:1 三维几何模型，重点还原关键部件的装配关系、尺寸特征与细节结构（如齿轮齿形、轴承滚道）。

物理建模：为几何模型添加物理属性（如材质硬度、热传导系数、力学约束），确保虚拟部件的受力变形、温度传导、运动规律与真实装备一致。

行为建模：结合设备运行机理（如热力学、动力学规律）与历史运行数据，构建行为模型，实现“真实装备状态变化→数字孪生模型同步响应”^[6]。

2. 实时数据同步

搭建数据传输链路，通过边缘计算网关采集真实装备的传感器数据、控制设备数据，经标准化处理后传输至数字孪生平台，

确保虚拟模型与真实装备的状态实时同步。

3. 模型验证与优化

对比虚拟模型与真实装备的运行状态，调整模型参数（如物理属性、行为逻辑），确保模型能准确反映真实装备的结构特征与运行规律。

（二）VR 沉浸式交互与可视化技术

VR 技术是运维人员与数字孪生模型的交互入口，核心技术包含三部分：

1. 沉浸式环境搭建

采用专业 VR 开发引擎，将数字孪生模型导入后添加环境渲染效果（如设备运行灯光、动态流体动画、空间音效），搭配 VR 头显实现“视觉+听觉”双重沉浸，让运维人员产生“身处设备内部”的真实感^[7]。

2. 自然交互功能开发

手势交互：集成手势捕捉模块，支持抓取、缩放、滑动等操作，运维人员可通过手势操控虚拟模型（如移动部件查看细节、切换数据界面）。

语音交互：对接语音识别接口，支持语音指令触发功能（如“显示部件温度趋势”“调取故障记录”），适配双手忙碌时的操作场景。

触觉反馈：针对关键操作（如螺栓拧紧、部件拆卸），通过 VR 手柄的触觉模块模拟振动反馈，提升操作真实感。

3. 运维数据可视化设计

将抽象数据转化为 VR 场景中的直观元素：

状态参数：用动态图标表示设备运行状态（如旋转图标反映电机转速、闪烁图标提示异常）；

趋势数据：在 VR 空间生成三维趋势图，运维人员可“走近”查看不同时间段的参数变化；

预警信息：故障预警以“悬浮弹窗+警示音”呈现，包含故障部位、风险等级、建议处理方向。

（三）预测性维护算法技术

预测性维护是系统的智能核心，实现流程分三步：

1. 数据预处理

对采集的原始数据（如温度、振动、转速）进行清洗（过滤异常值、填补缺失值）、降噪（去除干扰信号）、标准化处理，为后续分析提供高质量数据。

2. 特征提取

从预处理后的数据中提取故障相关特征，包括时域特征（如参数均值、峰值）、频域特征（如特征频率、谐波幅值）、趋势特征（如参数变化斜率）。

3. 预测模型构建与部署

结合机理模型与机器学习模型，前者基于设备物理规律判断参数是否异常，后者通过历史故障数据学习“特征→故障类型”“特征→剩余寿命”的关联关系；

将训练完成的模型集成至数字孪生平台，实时分析设备数据并输出预测结果，同步推送至 VR 场景^[8]。

三、系统总体设计

系统采用“分层架构 + 功能模块”设计，确保职责清晰、数据流转顺畅，覆盖运维全流程：

（一）系统分层架构

系统从下至上分为5层，各层功能与核心组件如下：

架构层级	核心功能	关键组件 / 技术
感知层	采集真实装备实时数据	各类传感器（温度、振动、转速）、PLC、边缘计算网关
数据层	存储、清洗、管理数据	数据库（时序数据库、关系数据库）、数据清洗模块、数据标准化模块
模型层	构建与更新数字孪生模型	几何模型库、物理引擎、行为模型、预测性维护算法模块
VR 应用层	实现沉浸式交互与功能	VR 开发引擎、手势 / 语音交互模块、数据可视化模块、VR 头显
用户层	面向不同角色提供服务	运维操作员（实时监控、故障排查）、运维管理员（数据管理、流程管控）、新手学员（VR 培训）

图：系统架构

各层数据流转逻辑：感知层→数据层（传输实时采集数据）；数据层→模型层（提供清洗后的数据支撑模型运行）；模型层→VR 应用层（输出模型与预测结果）；VR 应用层→用户层（通过 VR 设备提供交互入口）。

（二）系统核心功能模块

围绕运维“监控 - 诊断 - 预测 - 维护 - 培训”全流程，设计覆盖运维全流程的5大功能模块：

1. 装备状态实时监控模块

功能1：三维可视化监控。VR 场景中展示装备数字孪生模型，实时叠加运行参数，支持局部放大、内部漫游，清晰查看部件状态。

功能2：异常报警联动。当设备参数异常或预测风险超标时，VR 中故障部位高亮闪烁，触发语音报警，同时推送报警信息至运维人员终端。

功能3：多设备集中管理。VR 场景中生成设备列表或缩略矩阵，点击即可切换至对应装备的监控界面，实现多装备统一管理^[9]。

2. 故障诊断与定位模块

功能1：故障自动标记。设备出现异常时，数字孪生模型自动高亮故障部位，VR 中显示故障类型与异常特征。

功能2：历史数据溯源。点击故障部位可调取该部件的历史运行数据、过往故障记录、同类维修方案，辅助故障分析。

功能3：虚拟拆解验证。支持在 VR 中模拟拆解故障部件，观察内部损伤细节，为维修方案制定提供依据。

3. 预测性维护模块

功能1：剩余寿命可视化。VR 中用直观形式（如进度条）展

示关键部件剩余寿命，标注寿命预判依据。

功能2：维护计划生成。根据预测结果自动生成维护建议（如维护时间、所需备件、操作步骤），运维人员可在 VR 中确认并同步至管理系统。

功能3：维护效果评估。维护完成后，VR 中对比维护前后的设备状态与参数变化，生成评估报告。

4.VR 运维培训模块

功能1：虚拟拆装训练。搭建无风险的部件拆装场景，新手可反复练习，系统记录操作过程并反馈错误。

功能2：故障模拟训练。模拟各类常见故障，新手需完成故障排查、方案设计、模拟维修，系统实时评估方案合理性与操作正确性。

功能3：专家流程学习。调取专家录制的标准化运维流程，新手通过跟随观察、分步学习掌握操作细节，支持慢放、暂停、重复观看。

5. 运维数据统计分析模块

功能1：多维度报表生成。VR 中生成运维数据报表（如故障类型分布、维护完成情况），支持三维查看与数据下钻（如从整体数据查看具体设备详情）。

功能2：趋势分析。展示设备性能长期变化趋势（如参数波动、故障频率），辅助识别共性问题与优化方向。

功能3：数据导出与分享。支持将 VR 中的报表、趋势图导出为通用格式，便于运维总结与团队协同。

四、系统实现步骤

系统落地遵循“数据准备→模型构建→VR 开发→测试优化→推广应用”的流程，确保各环节衔接顺畅：

（一）真实装备数据采集与预处理

完成传感器选型与部署，根据装备关键部件的运维需求，安装适配的传感器（如温度、振动传感器），确保数据采集覆盖核心运维场景。

搭建数据传输链路，部署边缘计算网关，实现传感器、控制设备与数据存储模块的连接，完成数据标准化与预处理（清洗、降噪）。

（二）数字孪生模型构建与验证

开展装备几何建模，通过扫描与软件建模生成1:1三维几何模型，还原关键部件细节与装配关系。

添加物理属性与行为逻辑，构建物理模型与行为模型，确保虚拟装备的运行规律与真实一致。

对比虚拟模型与真实装备的状态，调整模型参数，完成模型验证与优化。

（三）VR 交互环境开发与功能集成

搭建 VR 开发环境，将数字孪生模型导入 VR 引擎，添加环境渲染、空间音效等沉浸效果^[10]。

开发交互功能，集成手势捕捉、语音识别、触觉反馈模块，实现自然交互操作。

集成核心功能模块（监控、诊断、预测、培训），确保各模块数据互通、功能联动。

（四）系统测试与优化

功能测试：验证各模块功能是否达标（如故障报警准确性、虚拟拆装流畅性），记录并修复功能缺陷。

性能测试：测试系统的实时性（虚拟与真实装备的同步延迟）、稳定性（长时间运行无异常）、兼容性（适配不同 VR 设备）。

用户体验优化：收集运维人员反馈，调整交互逻辑、界面设计，降低操作门槛，提升使用流畅度。

（五）试点应用与全面推广

选择典型装备开展试点应用，组织运维人员使用系统，收集实际应用中的问题与改进建议。

根据试点反馈优化系统，完善功能细节与操作体验，验证系

统在实际运维场景中的价值。

试点效果达标后，逐步推广至更多装备，开展运维人员培训，建立系统日常运维机制，确保长期稳定运行。

五、结语

基于数字孪生的装备运维服务 VR 系统，通过“虚拟映射真实、沉浸式交互、智能预测”，从根本上解决了传统运维“看不见、查得慢、维护贵”的痛点。系统设计紧扣运维场景需求，技术实现覆盖全流程，为装备运维提供了“直观化、高效化、智能化”的新路径。未来，随着 AI、轻量化 VR 等技术的发展，系统将进一步突破技术瓶颈，向“低成本、易普及、强协同”方向迭代，成为装备运维服务的核心工具，助力企业实现运维效率提升与成本优化。

参考文献

- [1] 刘伟, 蔡莹乾, 文莉雅. 数字孪生技术在应急通信链路可视化运维平台中的应用 [J]. 信息与电脑 (理论版), 2024, 36(21): 153-155.
- [2] 张丹. 基于数字孪生的工业设备故障诊断系统设计与实现 [J]. 软件, 2024, 45 (12): 140-143.
- [3] 胡琳, 郭楠, 韩丽. 装备数字孪生应用探索与标准化研究 [J]. 信息技术与标准化, 2024, (06): 8-13+24.
- [4] 马岳. 基于数字孪生技术的机电一体化平台虚拟生产线与虚拟调试系统设计研究 [J]. 造纸装备及材料, 2024, 53 (11): 115-117.
- [5] 卫乾, 杜秋明, 马凯蒂, 等. 面向虚拟巡检的数字孪生可视分析系统 [J]. 电气时代, 2024, (08): 30-35.
- [6] 肖翌, 廖琴, 杨钦文, 等. 基于虚拟现实的轨道交通车辆数字孪生仿真系统 [J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27 (03): 135-139.
- [7] 葛嘉, 时寒冰, 侯建伟. 基于 VR 技术的水电站运维仿真系统设计 [J]. 微型电脑应用, 2024, 40 (01): 45-48+54.
- [8] 宫瑞哲, 饶丰, 任楠, 等. 堆垛机的数字孪生系统可视化模型搭建与实现 [J]. 制造业自动化, 2022, 44(04): 154-157.
- [9] 吴文豪, 陈国兵, 杨自春. 数字孪生技术在船舶装备运维中的应用及挑战 [J]. 舰船科学技术, 2022, 44 (08): 139-144.
- [10] 赖传可, 胡荣群. VR 技术在船舶数字孪生运维系统中的应用 [J]. 舰船科学技术, 2021, 43 (22): 211-213.