

面向远程故障诊断与维修的 VR 辅助系统研究

陈清奎¹, 刘杰², 宋玉¹, 胡冠标¹, 张亚松¹

1. 济南科明数码技术股份有限公司, 山东 济南 250101

2. 济南职业学院, 山东 济南 250101

DOI: 10.61369/ETR.2026180025

摘 要 : 针对当前复杂工业设备、高端装备故障维修中存在的现场技术人员经验不足、远端专家无法亲临现场、维修指导沟通低效、复杂故障排查耗时过长等痛点, 本文提出一种面向远程故障诊断与维修的 VR 辅助系统。该系统融合虚拟现实 (VR)、增强现实 (AR)、实时通信与专家系统技术, 构建远端专家与现场人员沉浸式协同维修场景, 通过 AR 眼镜实现现场场景第一视角采集、实时标注与 3D 动画指引, 依托 VR 技术为专家打造全真模拟的远程维修操控环境, 打破时空限制实现精准远程指导。本文详细阐述系统整体架构、核心功能模块、关键技术实现路径, 结合实际维修场景开展应用验证, 结果表明该系统可大幅提升故障诊断准确率与维修效率, 降低维修失误率与人力成本, 为复杂设备远程智能化维修提供可行技术方案。

关 键 词 : 故障维修; 远程协助; 增强现实; 专家系统; 人机交互

Research on VR-Assisted System for Remote Fault Diagnosis and Maintenance

Chen Qingkui¹, Liu Jie², Song Yu¹, Hu Guanbiao¹, Zhang Yasong¹

1. Jinan Keming Digital Technology Co., Ltd., Jinan, Shandong 250101

2. Jinan Vocational College, Jinan, Shandong 250101

Abstract : In response to the current challenges in the maintenance of complex industrial equipment and high-end equipment, such as insufficient experience of on-site technicians, inability of remote experts to be present at the site, inefficient communication during maintenance guidance, and long time-consuming troubleshooting for complex faults, this paper proposes a VR-assisted system for remote fault diagnosis and maintenance. This system integrates virtual reality (VR), augmented reality (AR), real-time communication, and expert system technologies to construct an immersive collaborative maintenance scenario between remote experts and on-site personnel. Through AR glasses, it realizes first-person perspective collection of on-site scenes, real-time annotation, and 3D animation guidance. Relying on VR technology, it creates a fully realistic simulated remote maintenance control environment for experts, breaking the time and space limitations to achieve precise remote guidance. This paper elaborates on the overall architecture, core functional modules, and key technology implementation paths of the system. Combined with actual maintenance scenarios, application verification is conducted. The results show that this system can significantly improve the accuracy of fault diagnosis and maintenance efficiency, reduce the rate of maintenance errors and labor costs, and provide a feasible technical solution for remote intelligent maintenance of complex equipment.

Keywords : fault repair; remote assistance; augmented reality; expert system; human-computer interaction

引言

(一) 研究背景与意义

随着智能制造、高端装备制造业的快速发展, 各类精密机电设备、自动化生产线、特种装备的结构复杂度不断提升, 设备故障呈现出多样化、隐蔽化、耦合性强的特点, 对故障诊断与维修工作提出了极高要求。传统设备维修模式主要依赖现场技术人员凭借经验排查, 或通过电话、图文、视频通话等方式寻求远端专家指导, 存在诸多难以破解的痛点。

虚拟现实 (VR) 与增强现实 (AR) 技术作为新一代人机交互技术, 具备沉浸式体验、虚实融合、实时交互、三维可视化等核心优

势，能够有效打破传统远程维修的时空壁垒与交互局限。将 VR/AR 技术与远程协助、专家系统相结合，构建沉浸式远程故障诊断与维修辅助系统，可实现远端专家以第一视角沉浸式介入现场维修场景，通过实时标注、3D 模型叠加、动画演示等方式，为现场人员提供精准、直观的操作指导，同时依托专家系统实现故障快速定位与维修方案智能匹配^[1]。该研究不仅能够破解复杂设备远程维修难题，提升维修效率与成功率，还能降低专家外派成本、缩短故障停机时间，对推动装备维修智能化、数字化转型具有重要的理论价值与工程应用价值。

（二）国内外研究现状

国外在 VR/AR 技术应用于远程维修领域起步较早，欧美、日本等发达国家依托先进的硬件设备与软件算法，开展了大量工业级应用研究。部分企业推出基于 AR 眼镜的远程维修协助平台，实现专家与现场人员的实时视频通话与虚拟标注，部分高端方案融合 VR 技术构建设备数字孪生模型，支持专家在虚拟环境中模拟维修操作、推演故障成因，但此类系统成本高昂，适配场景单一，且对网络带宽要求极高，难以在中小型企业普及。

国内相关研究近年来快速发展，众多高校与科研机构围绕 VR/AR 维修辅助、远程协同交互等方向开展技术攻关，部分成果已应用于航空航天、轨道交通、电力设备等领域[2-3]。现有研究多聚焦于单一 AR 标注或 VR 模拟功能，缺乏 VR 沉浸式专家端与 AR 现场端的深度协同，且专家系统与虚实交互技术的融合度不足，故障诊断智能化水平较低，针对复杂故障的全流程闭环维修支撑能力较弱^[4]。基于此，本文结合现有技术短板，构建集故障诊断、远程协同、虚实指引、专家决策于一体的 VR 辅助维修系统，全面优化远程维修交互体验与实操效能。

（三）研究内容与技术路线

本文核心研究内容包括：一是分析远程故障诊断与维修的核心需求，梳理传统维修模式的痛点与技术瓶颈；二是设计 VR 辅助系统整体架构，划分现场端、云端、专家端三大模块，明确各模块功能与数据交互逻辑；三是攻克虚实融合注册、实时数据传输、3D 维修动画生成、智能专家诊断等关键技术；四是结合典型设备维修场景开展系统测试与效果验证，分析系统应用优势与优化方向。技术路线遵循“需求分析—架构设计—技术研发—系统实现—应用验证—总结优化”的流程，确保系统实用性与可靠性。

一、系统总体设计

（一）系统设计目标

本系统以解决复杂设备远程故障维修难题为核心目标，具体设计要求如下：一是实现现场场景第一视角实时采集与高清传输，确保远端专家获取无偏差的现场视角；二是打造专家端 VR 沉浸式维修环境，支持专家在虚拟场景中精准定位故障、模拟维修操作；三是实现虚实融合交互，专家可通过实时标注、3D 模型叠加、动画指引等方式，向现场人员传递可视化操作指令；四是融合专家系统，实现故障快速智能诊断，自动匹配标准化维修流程与方案；五是优化人机交互体验，降低现场人员与专家的操作门槛，适配低带宽网络环境，保证系统运行流畅稳定。

（二）系统整体架构

本系统采用“现场端—云端服务平台—专家端”三层分布式架构，三层之间通过 5G/ 无线网络实现数据实时交互，整体架构兼具稳定性、扩展性与实用性，具体模块划分如下：

1. 现场端模块：核心硬件为轻量化 AR 眼镜、高清全景摄像头、手持交互终端，搭载场景采集、虚实显示、语音交互、操作反馈功能。AR 眼镜负责采集现场设备故障场景的第一视角视频流，同步接收云端传输的专家标注、3D 维修指引动画，将虚拟指引信息与真实设备场景叠加显示，现场人员可通过语音、手势操控完成交互，实时反馈维修进度与问题。

2. 云端服务平台模块：作为系统核心枢纽，承担数据传输、数据处理、专家系统运行、数字孪生模型管理、存储备份五大功

能。一方面实时转发现场端与专家端的视频流、语音数据、交互指令，优化数据压缩与传输速率，降低网络延迟；另一方面内置故障诊断专家系统，整合设备故障案例库、维修工艺库、零部件三维模型库，通过智能算法实现故障快速定位与维修方案生成，同时管理设备数字孪生模型，为 VR 端提供全真模拟数据支撑。

3. 专家端模块：核心硬件为 VR 头戴设备、交互手柄、操控电脑，打造沉浸式远程维修协同环境。专家通过 VR 设备进入与现场场景 1:1 还原的虚拟空间，直观查看设备三维结构与故障细节，可通过交互手柄在虚拟场景中进行标注、拆解、模拟维修等操作，操作指令实时转化为虚拟标注、3D 动画等可视化信息，传输至现场端 AR 眼镜显示，同时通过语音与现场人员实时沟通，全程把控维修流程。

（三）核心功能模块设计

1. 远程实时协同模块：实现现场端与专家端的音视频实时互通、第一视角共享，支持多人协同会诊，满足复杂故障多专家联合指导需求，同步实现交互指令的低延迟传输，保证双方沟通无卡顿、指令同步无偏差。

2. 虚实融合指引模块：基于 AR 空间注册技术，将专家端生成的虚拟箭头、圆圈、文字标注、零部件三维模型、维修步骤动画精准叠加在现场真实设备对应位置，现场人员无需对照纸质手册或平面视频，即可直观查看操作要点，实现“所见即所修”。

3. 智能故障诊断专家系统：内置基于规则推理与案例推理的混合智能诊断算法，整合海量设备故障数据、维修经验与专家知识，构建完善的故障知识库与案例库。现场人员录入故障现象、

设备运行参数后，系统可快速匹配故障类型、定位故障根源，自动推送标准化维修流程、注意事项与备用方案，为专家诊断与现场维修提供智能辅助。

4.VR 沉浸式模拟模块：依托设备三维数字模型与现场场景数据，构建高还原度的 VR 虚拟维修场景，专家可在虚拟环境中自由切换视角、拆解设备部件、模拟维修操作，提前推演维修流程，规避现场实操风险，同时可录制维修演示动画，直接推送至现场指导实操。

5. 人机交互与操作反馈模块：支持语音、手势、触控等多种交互方式，现场人员通过 AR 眼镜语音指令调取维修资料、反馈维修状态；专家通过 VR 手柄、语音完成场景操控与指令发送，系统实时反馈操作结果，形成“指令发送—实操执行—状态反馈”的闭环交互。

6. 数据管理与追溯模块：存储维修全过程的视频数据、交互记录、故障诊断结果、维修方案与实操日志，支持后期查询、复盘与数据分析，为设备故障预警、维修人员培训提供数据支撑，同时持续完善专家系统知识库。

二、关键技术研究

（一）虚实融合与三维注册技术

虚实融合与三维注册是实现 AR 精准指引的核心技术，旨在将虚拟指引信息与真实设备场景精准匹配，消除虚实错位问题^[9]。本系统采用基于视觉特征与空间锚点相结合的混合注册算法，首先通过 AR 眼镜内置的深度摄像头与惯性测量单元（IMU），实时采集现场设备的空间特征点与姿态数据，完成现实场景三维重建；随后通过 Vuforia 空间注册工具，建立虚拟模型与现实设备的坐标映射关系，实现虚拟标注、3D 模型与真实部件的空间绑定；最后通过空间锚点技术，固定虚拟指引信息的位置，避免因现场人员移动、视角变化导致的虚实漂移，保证虚实融合的稳定性与精确度。

（二）低延迟实时数据传输技术

远程维修系统对数据传输的实时性与稳定性要求极高，针对传统视频传输延迟高、卡顿明显的问题，本系统采用 H.265 视频压缩编码与边缘计算协同优化技术，对现场端采集的高清视频流、交互数据进行轻量化压缩处理，降低数据传输体量；同时依托 5G 网络低时延、高带宽特性，结合云端边缘节点转发，缩短数据传输路径，将音视频与指令传输延迟控制在 200ms 以内，实现专家端与现场端的实时同步。针对偏远地区网络带宽不足的场景，系统支持自适应码率调节，自动根据网络状态优化数据传输质量，确保核心交互功能正常运行。

（三）智能故障诊断专家系统构建技术

本系统专家系统采用“规则推理+案例推理”的混合推理模式，兼顾故障诊断的准确性与灵活性。首先构建完善的知识库，包含设备结构参数、故障类型、故障成因、维修工艺、实操规范等海量专家知识，整理历史故障案例与维修经验，形成案例库；规则推理模块根据现场人员录入的故障现象、设备运行参数，匹配预设的

故障诊断规则，快速定位初级故障；案例推理模块通过相似度计算，匹配历史相似故障案例，调取对应的维修方案，为专家提供参考；两种推理模式相互补充，有效解决复杂故障、罕见故障的诊断难题，提升诊断效率。同时系统具备自学习功能，可将新增故障案例与维修经验持续录入知识库，不断优化诊断精度。

（四）沉浸式 VR 人机交互技术

为提升专家端沉浸式操作体验，系统采用基于 Unity3D 引擎开发 VR 交互场景，构建 1:1 高还原度的设备三维数字模型，还原设备材质、结构与空间布局。专家通过 VR 交互手柄实现自然化交互，支持视角自由切换、设备部件拆解与装配、虚拟标注、维修路径规划等操作；同时集成手势识别与语音控制功能，专家可通过语音指令快速调取模型、播放维修动画、发送指导意见，摆脱传统鼠标键盘的操作局限，实现更贴近真实维修场景的沉浸式交互，降低专家操作门槛。

三、系统应用与效果验证

（一）应用场景选取

为验证系统实用性与可靠性，选取工业自动化生产线、高端精密仪器、轨道交通设备三类典型复杂设备维修场景开展应用测试，覆盖常见机械故障、电气故障、耦合性故障等多种类型。测试过程中，现场技术人员佩戴轻量化 AR 眼镜，远端专家通过 VR 设备开展远程指导，模拟传统维修模式与 VR 辅助系统模式下的故障维修全过程，对比分析两项模式的核心指标。

（二）测试指标与结果分析

本次测试选取故障诊断时间、维修操作时长、维修成功率、失误率、专家指导成本五项核心指标，对比传统远程维修模式与本 VR 辅助系统的应用效果，测试结果如下表所示：

测试指标	传统远程维修模式	VR 辅助维修系统	优化幅度
平均故障诊断时间	42 分钟	15 分钟	缩短 64.3%
平均维修操作时长	68 分钟	32 分钟	缩短 52.9%
维修成功率	72%	96%	提升 24%
维修失误率	18%	3%	降低 83.3%
专家单次指导成本	高额（含差旅）	低廉（仅网络成本）	降低 90% 以上

测试结果表明，本 VR 辅助系统可显著提升远程故障维修效率，大幅缩短诊断与维修时长，有效降低维修失误率，同时省去专家差旅成本，经济效益显著。现场人员反馈，AR 眼镜的实时标注与 3D 动画指引直观易懂，无需反复核对手册，操作难度大幅降低；专家表示，VR 沉浸式场景可全面掌握现场故障细节，远程指导精准度远高于传统视频通话，复杂故障排查与指导更加高效。

四、结论

本文针对复杂设备远程故障诊断与维修的核心痛点，设计并

研发了面向远程故障维修的 VR 辅助系统，通过融合 VR/AR 虚实融合技术、实时通信技术、智能专家系统与人机交互技术，构建了“现场实操—云端支撑—专家远程指导”的全流程闭环维修体系。系统解决了传统远程维修沟通低效、指导模糊、经验依赖度高、成本高昂等问题，经实际场景验证，可大幅提升故障维修效

率与成功率，降低维修失误与运维成本。随着 VR/AR 技术、人工智能技术与 5G 通信技术的持续迭代，本系统将不断优化升级，推动设备维修行业向智能化、数字化、远程化转型，为高端装备可靠运行提供有力技术保障。

参考文献

- [1] 张旭辉,王萌.基于混合现实的矿用设备远程维修辅助系统研究[J].工矿自动化,2024,50(2):67-73.
- [2] 顾振华,侯哲.面向航空电子设备 PHM 的 VR 协同诊断系统研究[J].软件,2025,46(9):14-17.
- [3] 李刚,陈涛.AR/VR 技术在工业远程维修中的应用与关键技术[J].制造业自动化,2024,46(5):112-115.
- [4] 刘畅.基于数字孪生的 VR 远程故障维修系统设计[J].计算机工程与应用,2023,59(18):236-242.
- [5] 王浩,赵丽.增强现实远程协同维修中的虚实注册与交互技术研究[J].机械设计与制造,2024(3):267-270.