

火电厂虚拟现实培训系统开发与应用

蒋勇, 李兆男, 丁戈, 安菁菁

国能山西河曲发电有限公司, 山西 忻州 036500

DOI:10.61369/ADA.2025020016

摘要 : 火电厂作为能源供应的核心主体, 对从业人员专业技能与安全意识提出更高要求。传统培训模式存在实操风险高、设备损耗大、认知局限显著等问题, 而虚拟现实 (VR) 技术通过构建三维仿真环境, 为安全可控的实操训练提供了创新解决方案。本研究开发的火电厂 VR 培训系统, 采用分层模块化架构设计, 集成高精度三维建模、物理引擎仿真、多模态交互及动态评估反馈等关键技术。系统涵盖锅炉、汽轮机等核心设备的立体化展示与操作训练, 支持故障模拟、应急演练及多人协同训练场景, 并通过参数化建模与实时渲染优化, 实现复杂工业场景的低延迟、高保真呈现。

关键词 : 虚拟现实技术; 火电厂培训; 分层模块化架构; 多模态交互

Development and Application of Virtual Reality Training System in Thermal Power Plant

Jiang Yong, Li Zhaonan, Ding Ge, An Jingjing

Guoteng Shanxi Hequ Power Generation Co., LTD. Xinzhou, Shanxi 036500

Abstract : As the core of energy supply, thermal power plant puts forward higher requirements for professional skills and safety awareness of employees. The traditional training mode has some problems, such as high practical risk, large equipment loss and significant cognitive limitations. However, virtual reality (VR) technology provides an innovative solution for safe and controllable practical training by constructing 3d simulation environment. The VR training system for thermal power plants developed in this study adopts a hierarchical and modular architecture design, integrating key technologies such as high-precision 3D modeling, physics engine simulation, multimodal interaction and dynamic evaluation feedback. The system covers the three-dimensional display and operation training of core equipment such as boiler and steam turbine, supports fault simulation, emergency drill and multi-person collaborative training scenarios, and realizes the low delay and high fidelity presentation of complex industrial scenarios through parametric modeling and real-time rendering optimization.

Keywords : virtual reality technology; thermal power plant training; hierarchical modular architecture; multimodal interaction

引言

火电厂作为电力系统的核心能源供应主体, 在保障国家能源安全和推动经济发展中发挥着不可替代的作用。随着能源需求的持续增长和技术升级的加速推进, 火电厂对从业人员的专业技能与安全意识提出了更高要求。传统培训模式在实际操作中面临多重挑战: 一方面, 火电机组设备结构复杂、运行环境高温高压, 现场实操培训存在较高安全风险且设备损耗成本显著; 另一方面, 常规理论教学与图纸讲解难以直观呈现设备内部构造与动态运行过程, 导致学员对操作流程和故障处理的认知存在明显局限^[1]。在此背景下, 如何构建一种既能规避实操风险、又能提升培训效果的技术手段, 成为火电厂人才培养亟待解决的课题。

一、火电厂虚拟现实培训系统设计

(一) 系统架构设计

数据层构建的亚毫米级设备模型库 (误差≤0.2mm) 依托三大核心技术:

1. 激光扫描逆向工程工作流: 采用 Faro Focus S350 激光

雷达 (精度±0.1mm) 对百万千瓦机组进行全态扫描, 通过 Geomagic Wrap 实现点云重构 (800 万面片/设备), 并基于 NX 参数化建模生成轻量化 NURBS 曲面 (压缩率 78%)。关键创新在于热变形补偿算法: 根据设备运行温度场 (200~550°C) 预算计算热膨胀系数, 使虚拟模型在高温工况下形变误差控制在 0.3mm 内。

2. 动态知识图谱构建: 操作流程知识库采用图数据库 Neo4j

存储，将2000+操作规程抽象为时空事件链（如“汽轮机冲转→暖机→升速”），节点间关联421种故障模式（如振动超标、油温异常）。通过BERT工业文本分析自动抽取操作要点，知识覆盖度较传统手册提升83%^[2]。

模型层独创物理渲染双引擎协同架构：

物理引擎：基于NVIDIA PhysX 5.0实现多相流仿真，蒸汽阀门开度与流量关系拟合误差<3%（压力0.116MPa工况）。

渲染引擎：采用Unreal Engine 5 Nanite虚拟几何体技术，单场景承载20亿三角面片（相当于整台超临界锅炉）。

分布式渲染：8节点渲染农场通过Frame Synchronization协议同步，每帧渲染耗时从142ms降至23ms（4K@90Hz），延迟波动标准差≤1.8ms。

交互层突破传统VR的消费级局限：

1. 多模态感知矩阵

手势识别：Leap Motion V4结合CNN手势分类器（ResNet18 backbone），支持戴耐高温手套操作（识别率92.7%）。

空间定位：Valve Lighthouse 3.0基站实现10m×10m定位（精度±0.5mm）

触觉反馈：Teslasuit电肌肉刺激（EMS）模拟阀门操作力矩（0.120N·m可调），响应延迟<8ms。

2. 工业通信中枢

借鉴NoC（NetworkonChip）架构设计数据传输协议：

分组交换：将姿态数据（50Hz）、触觉反馈（1kHz）、环境音效（48kHz）划分QoS等级。

流量控制：令牌桶算法保障关键数据带宽（姿态流优先占比70%）。

冗余校验：CRC32+ACK重传使误码率降至10⁻⁹。

在国能台山电厂1000MW超超临界机组实训中，该系统实现：

高危操作模拟：锅炉爆管应急处置训练，通过流体粒子系统实时模拟蒸汽喷射轨迹（计算精度0.5m/s）。

故障复现引擎：基于LSTM预测控制器的异常工况生成，如给水泵汽蚀故障的声纹特征匹配度达96%。

（二）功能模块设计

火电厂虚拟现实培训系统功能模块设计围绕场景构建、操作训练及交互体验展开，通过多维度技术集成实现培训目标。场景模拟模块基于静态图像与三维建模技术构建虚拟电厂环境，涵盖锅炉、汽轮机、发电机等核心设备的立体化展示，并通过参数化设置实现不同运行工况的动态呈现。该模块采用虚拟实景技术，允许用户以第一视角自由漫游虚拟场景，结合热力系统流程图与设备结构剖面图，直观呈现能量转换过程。为增强环境真实性，系统模拟了极端工况下的危险场景，例如锅炉超压、管道泄漏等突发事件，通过动态粒子效果与声音渲染技术强化沉浸感^[3]。这类设计借鉴了极端环境下的遥操作工程机器人系统开发经验，将灾害现场作业场景转化为可控的培训环境，使学员在虚拟空间中学习应对复杂工况的操作流程。

操作训练模块分为基础操作与应急演练两类。基础操作训练通过交互仿真技术实现设备控制面板、阀门调节等标准化操作的模拟，例如水枪灭火训练系统采用Steam VR手柄映射真实工具，结合力反馈装置模拟喷水压力与水流方向控制，使学员掌握灭火剂投放时机与覆盖范围评估。在应急处理训练中，系统预设了多种故障模式，如再热器管束泄漏、蒸汽管道破裂等典型事故场景，要求学员在限定时间内完成故障定位、应急阀门关闭及紧急停机操作。该模块引入了基于时间序列的决策评估机制，根据学员响应速度与操作准确性生成训练报告，为后续能力提升提供数据支持^[4]。

二、系统实现与测试

（一）系统实现过程

本系统采用模块化架构设计，通过分层开发策略逐步实现核心功能。在虚拟场景构建模块中，基于Unreal Engine 4的蓝图系统与C++插件开发相结合，首先利用三维激光扫描技术获取火电厂实际设备的空间坐标数据，通过点云处理生成精确的网格模型。材质系统采用PBR（基于物理的渲染）技术，结合高分辨率贴图与动态光照系统，实现设备表面纹理、金属光泽与环境光遮蔽效果的真实呈现。场景空间布局采用分层加载机制，通过LOD（细节层次）优化技术，在保持视觉保真度的同时确保渲染效率。交互模块开发重点解决多模态输入问题，集成Leap Motion手部追踪传感器与Oculus Rift头部姿态数据，构建基于骨骼IK（反向动力学）的交互骨骼系统。手势识别算法采用机器学习框架TensorFlow训练的分类模型，通过特征提取与动态时间规整（DTW）算法实现20种操作手势的实时识别，误判率控制在3%以内^[5]。物理引擎模块基于Bullet Physics实现设备操作的物理反馈，建立包含刚体动力学、流体模拟与碰撞检测的复合仿真系统，特别针对阀门操作、管道拆装等高频训练场景，开发了定制化的力反馈算法库。数据管理模块采用MySQL时序数据库存储操作日志，通过中间件服务实现与DCS（分布式控制系统）的OPC UA协议对接，实时采集锅炉压力、蒸汽温度等200余项工况参数。

（二）系统测试方法

本研究采用分阶段递进式测试策略，结合黑盒测试与白盒测试方法，构建了涵盖功能完整性、系统稳定性及用户体验的多维度测试体系。在功能测试层面，依据系统模块划分原则设计测试用例，重点验证虚拟场景构建、设备操作仿真、故障模拟与应急处置等核心功能的逻辑一致性与操作流畅性。测试团队通过预定义操作路径与随机化操作组合相结合的方式，确保覆盖所有功能分支与异常处理节点。针对虚拟现实交互特性，专门设计了多传感器协同响应测试项，重点检测手部追踪精度、头部姿态同步延迟以及力反馈装置的响应灵敏度等关键指标。

测试用例设计遵循V模型开发原则，共构建三级测试案例库：单元测试用例236个，覆盖底层算法与接口模块；集成测试用例148个，重点验证各子系统协同工作性能；系统级测试用例

89个，聚焦于培训场景的全流程仿真效果。在测试数据生成方面，采用场景参数随机化技术，通过蒙特卡洛方法生成300组包含不同设备状态、环境参数和故障组合的测试场景，确保测试条件的充分多样性^[6]。特别针对火电厂典型事故案例，构建了包含锅炉爆管、汽轮机超速、电气系统短路等12类高危工况的专项测试集。

三、研究结果与分析

(一) 系统应用效果展示

本研究开发的虚拟现实（VR）培训系统在火电厂实操培训场景中完成了多轮测试与应用验证，通过三维建模精度、交互响应速度、多模态数据融合等核心指标的量化分析，验证了系统的实际应用价值。系统运行时，学员佩戴头戴式显示设备后可进入1:1还原的虚拟火电厂场景，界面分辨率稳定达到4K级别，场景刷新率保持在90Hz以上，有效减少了眩晕感。在锅炉操作培训模块中，系统通过高精度三维建模还原了火电厂主控室及关键设备的物理细节，操作手柄的六自由度交互技术使阀门调节、仪表读取等动作响应延迟低于20ms，显著提升了操作的真实感。

多感官交互设计在高压设备巡检场景中展现出显著优势。测试数据显示，当系统同步触发振动反馈装置与环境音效时，学员对设备异常状态的识别准确率提升至92.3%，较传统视频培训提高18.7个百分点。例如，在汽轮机轴承温度异常案例中，系统通过热成像叠加、警报音效定位和触觉振动反馈三重提示机制，使学员平均故障定位时间缩短至25秒，较传统培训方式降低40%^[7]。眼动追踪数据显示，多模态反馈使学员视觉注意力集中度提高26%，表明系统有效强化了操作流程的关键节点认知。

(二) 用户反馈分析

本研究通过问卷调查、半结构化访谈及系统操作日志分析等

多维度方法，对32名火电厂技术人员及培训管理人员进行了为期3个月的跟踪调研。数据显示，系统整体满意度评分为4.2/5，其中85%的受访者认为虚拟现实（VR）培训显著提升了设备操作认知效率。在技术性能方面，系统在设备操作仿真模块的平均响应时间为0.8秒，符合工业级实时交互标准，但复杂场景切换时存在12%的用户报告轻微延迟现象，经技术团队排查主要源于本地渲染资源分配策略，已在迭代版本中优化。

从培训效果维度看，参与测试的用户在虚拟环境中完成锅炉点火、汽轮机故障排查等典型操作任务的平均耗时较传统教学模式缩短37%，且首次操作失误率降低至15%^[8]。认知负荷量表测量结果显示，系统提供的三维空间导航指引和操作步骤高亮提示功能有效缓解了用户的认知负担，78%的用户认为该设计显著提升了操作信心。但在设备拆解演示环节，有23%的用户反馈剖面动画切换频率过高导致空间定位困难，建议增加分步控制选项。

四、结论

本研究针对火电厂传统培训模式中存在的安全风险高、实训资源有限、培训效果难以量化等问题，构建了基于虚拟现实技术的火电厂培训系统，通过多维度实证分析验证了其有效性。系统开发过程中采用三维建模技术还原了火电厂典型设备结构与运行场景，并基于Unity3D引擎实现了交互式操作模块与故障模拟功能。研究结果表明，该系统通过沉浸式场景重构、多自由度操作反馈以及实时数据可视化，有效解决了传统培训中设备原理抽象、操作流程难以复现等痛点，显著提升了培训对象对机组结构、运行逻辑及应急处置流程的认知深度。在功能模块设计方面，系统整合了设备拆解演示、工艺流程推演、事故应急演练三大核心模块，其中动态粒子系统与物理引擎的耦合应用，使蒸汽管道泄漏、主汽门卡涩等典型故障的模拟精度达到工程级要求。

参考文献

- [1] 郑甫燕,任建兴,潘卫国,等.火电厂典型故障虚拟仿真实验构架设计[J].高等工程教育研究,2019(S01):3.
- [2] 安为.基于虚拟现实技术的火电厂安全培训系统[D].长沙理工大学,2023.
- [3] 阎光伟,李莹莹.火电厂培训及检修管理三维仿真系统设计[J].中国科技信息,2021,(11): 6163.
- [4] 刘清亮,张志强,官伟基,刘志全,王俊强,张敬,张灯.火电厂百万机组三维虚拟检修培训系统建设研究[J].电力设备管理,2020,(03): 114116.
- [5] 王信海.以需求驱动智慧电厂建设 推动发电行业高质量发展[J].企业管理,2019(S01):2.
- [6] 郑鹏,朱玉辉,廖开友,吴迅,罗彬,刘晶.虚拟现实技术在电厂安全生产培训管理中的实践[J].重庆电力高等专科学校学报,2024, 29 (03): 2326.
- [7] 张祖辉,孔竟.基于虚拟现实的电厂智慧维护培训仿真系统[J].工程建设与设计,2021,(03): 127130.
- [8] 张自朋,田萍,李凤龙,赵东杰,孙龙昊,邵瑞博.基于数字孪生技术的特高压直流换流站仿真培训系统的研究[J].电工技术,2023,(06): 8790.