

基于 AR 智能眼镜的电力系统远程协同作业与知识管理应用研究

柯一鸿 王少聪 许文顺 康孝种 陈世阳

国能(泉州)热电有限公司, 中国·福建 泉州 362100

摘要: 随着能源互联网和智能电网建设的深入推进, 电力系统设备的复杂性与运维工作的专业性对现场作业效率与安全性提出了更高要求。尤其在应急抢险和复杂设备检修场景下, 现场人员可能面临经验不足、信息缺失等困境, 亟需后方专家团队的实时远程支持。本文研究并设计了一套部署于电厂内网的远程协同作业系统。该系统以 AR 智能眼镜为核心前端载体, 结合 WEB 及移动终端, 构建起一个以第一人称视角为基础的远程可视化协作平台。后方调度中心、管理人员与领域专家可通过实时音视频通讯、AR 动态标注、实时资料推送等功能, 对前方现场人员进行“沉浸式”指导, 极大提升了应急处置与故障排查的效率和准确性。更进一步, 系统将协作过程中产生的音视频、图像、标注轨迹及操作文件自动归档, 结构化形成知识库案例, 实现了隐性知识的显性化沉淀与共享复用, 从而赋能基层员工, 优化培训体系, 为电力企业数字化转型与智慧运维提供了一套可行的实践路径。

关键词: AR 智能眼镜; 电力系统; 远程协作; 应急指挥; 知识管理; 数字孪生

Research on Remote Collaborative Operation and Knowledge Management Application of Power System Based on AR Intelligent Glasses

Ke Yihong, Wang Shaocong, Xu Wenshun, Kang Xiaozhong, Chen Shiyang

Guoneng (Quanzhou) Thermal Power Co., Ltd, China Fujian Quanzhou 362100

Abstract: With the further development of energy Internet and smart grid construction, the complexity of power system equipment and the professionalism of operation and maintenance work put forward higher requirements for on-site operation efficiency and safety. Especially in emergency rescue and complex equipment maintenance scenarios, on-site personnel may face difficulties such as lack of experience and information loss, and urgently need real-time remote support from the rear expert team. This article studies and designs a remote collaborative work system deployed on the internal network of power plants. The system uses AR smart glasses as the core front-end carrier, combined with WEB and mobile terminals, to build a remote visualization collaboration platform based on first person perspective. The rear dispatch center, management personnel, and field experts can provide immersive guidance to on-site personnel through real-time audio and video communication, AR dynamic annotation, real-time data push, and other functions, greatly improving the efficiency and accuracy of emergency response and fault diagnosis. Furthermore, the system automatically archives the audio, video, images, annotated trajectories, and operation files generated during the collaboration process, forming a structured knowledge base case, realizing the explicit precipitation and sharing reuse of implicit knowledge, empowering grassroots employees, optimizing the training system, and providing a feasible practical path for the digital transformation and intelligent operation and maintenance of power enterprises.

Keywords: AR smart glasses; Power system; Remote collaboration; Emergency command; Knowledge management; Digital twin

0 引言

电力行业是国民经济的基础命脉, 其安全、稳定、高效运行至关重要。火电发电厂等生产设施结构复杂、技术密集, 维护、检修及应急处理工作具有高风险、高难度和专业性强的特点。传统的现场作业模式存在显著痛点: 一

方面, 专家培养耗时长, 一线技术人员常因经验欠缺, 无法独立快速诊断并解决突发性复杂故障; 另一方面, 受限于时空距离, 后方专家亲赴现场成本高昂、耗时漫长, 尤其在恶劣天气或紧急事故下, 延误可能意味着巨大的经济与社会损失。

近年来,增强现实技术与可穿戴设备迅猛发展,为解决上述问题提供了创新性的技术手段。AR 智能眼镜能够将虚拟信息与现实世界进行无缝叠加,并以第一人称视角进行音视频采集与通讯,这使其成为连接现场与后方的理想“桥梁”。通过构建基于 AR 的远程协作系统,专家可以看到现场实景,并通过标注、资料共享等方式进行精准指导,打破地理隔阂。

本次项目建设旨在深入探讨基于 AR 智能眼镜的远程协同系统在电力系统应急响应、远程专家指导及知识管理等方面的具体应用模式、系统架构、实施效益及面临的挑战,为电力行业的智能化升级提供理论参考与实践案例。

1 系统总体架构与功能设计

系统采用“云-边-端”协同架构,部署于电厂内部网络,确保数据安全与通信低延迟。

1.1 系统架构

终端层: AR 智能眼镜:核心现场终端。配备高清摄像头、麦克风、扬声器、显示镜片和传感器。负责采集第一视角现场音视频流,接收并显示后方发送的标注信息、文档资料,实现虚实结合的交互体验。

移动终端:作为辅助终端,现场人员可通过手机接入系统,在无 AR 眼镜时补充使用。

WEB 终端:后方专家、管理员通过 PC 浏览器登录系统平台,无需安装特定软件,便捷接入协作会话。

网络层:利用电厂内部的 5G 专网,保障音视频数据、控制信令的低延时、高带宽、安全可靠传输。内网部署有效隔离了外部风险,满足电力行业对网络安全的高要求。

平台服务层:协同服务引擎:提供实时音视频通信、AR 动态标注、屏幕共享、文件传输等协作能力。

会话管理服务:负责创建、管理协作会话,分配用户角色与权限。

媒体处理服务:对音视频流进行转码、录制、压缩和流媒体分发。

知识库服务:对录制协作过程进行存储、编目、索引和智能分析,形成案例知识库。

应用层: 远程协作应用:面向现场人员和后方专家的主要操作界面。

知识库管理应用:供知识管理员进行案例的审核、分类、标签化管理。

系统管理应用:负责用户、设备、权限及系统监控的综合管理后台。

1.2 核心功能模块

实时音视频通讯:建立现场与后方之间的高清、稳定、低延迟的双向音视频通话,后方专家共享现场人员的“第一视角”,全面感知环境细节。

AR 动态标注与空间锚定:后方专家可在实时视频流上直接进行绘制(如箭头、圆圈、文字注释),这些标注信息能够空间锚定在具体设备或位置上。当现场人员移动视角时,标注会随之稳定地“粘附”在真实物体上,指导极其精准直观,避免了“向左转”“那个红色的开关”等模糊指令。

实时资料推送与共享:专家可即时调取并推送设备图纸、操作手册、安全规程、历史故障记录等文档至前线人员的 AR 眼镜或移动端屏幕上,现场人员可边看指导边查阅资料。

全过程记录与复盘:系统自动录制整个协作过程的音视频、标注轨迹、语音对话及传输的文件,生成完整的数字工作档案。

知识库生成与调用:自动生成:录制结束后,系统可自动生成案例日志,并支持手动添加故障描述、解决方案、关键步骤等文本信息,形成一个结构化的知识案例。

智能检索:一线员工在日常工作中遇到类似问题时,可通过关键词、设备型号、故障代码等在知识库中进行检索,快速调取历史案例视频进行学习模仿,实现“即需即用”的精准赋能。

2 网络安全与统一身份认证管理

部署于电厂内网的 AR 远程协作系统,其网络安全性与用户管理机制是保障系统可靠运行、防止敏感信息泄露的重中之重。电力行业作为关键信息基础设施,必须遵循“安全第一、纵深防御”的原则,构建涵盖终端接入、网络传输、平台数据及用户访问的全方位安全防护体系。

2.1 终端接入安全

AR 眼镜及移动终端作为系统前端入口,其接入安全是第一道防线。系统采用多重身份验证机制确保终端使用者的合法性。除传统的用户名密码外,支持生物特征识别登录(如扫脸登录),通过终端前置摄像头采集操作人员面部特征,与后台预存授权信息进行比对,实现安全、便捷的身份认证。

2.2 网络传输安全

所有系统内数据通信均限于电厂内部网络域,与互联网物理隔离进行安全数据交换。采用端到端加密技术,对实时音视频流、标注指令及文件传输数据进行加密,确保

即使数据包被截获也无法被解密破译。通过部署于网络边缘的安全网关和入侵检测系统,实时监控异常流量和非法访问行为,及时告警并阻断。

2.3 统一身份认证与权限管理

为规避多系统多账号带来的安全风险和管理复杂性,本系统设计与电厂现有的数字办公平台 IMS 实现统一身份认证深度对接。所有用户账户信息、组织架构数据由权威源统一同步与管理,实现单点登录(SSO)。员工使用同一数字身份凭证即可安全访问 AR 协作系统,杜绝了账号冗余和弱口令问题。

系统内置强大的基于角色的访问控制模型。系统管理员可根据用户的岗位职责(如现场操作员、检修班长、安全专家、调度员等),在后台精细分配数据访问和功能操作权限。例如:普通巡检人员仅有发起呼叫和查看推送资料的权限;专家用户拥有标注、推送资料及调阅知识库的权限;而知识管理员则具备案例审核与发布的高级权限。这种最小权限原则有效限制了数据越权访问风险。

2.4 数据安全性与审计溯源

全面的日志审计系统记录所有用户的登录、操作、会话发起与结束等关键事件,形成不可篡改的审计流水,满足电力行业对安全操作的可审计性与可追溯性监管要求。

3 在电力系统应急与远程指导中的应用场景

3.1 应急抢险与故障排查

当发生突发故障现场巡检人员佩戴 AR 眼镜迅速抵达故障点,后方应急指挥中心和专家团队同步接入系统。

应用流程:

现场人员通过第一视角将故障设备状态、仪表读数、告警信息实时传回。专家团队多方会诊,通过 AR 标注精准指示需要检查的测点、需要操作的阀门或需要紧固的接线端子。甚至可以调出该设备的三维数字模型叠加在现实设备上,指导内部结构的排查。这极大地缩短了故障定位和决策时间,避免了因沟通误差导致的误操作风险。

3.2 复杂设备检修与安装指导

对于大型机组大修、新设备首次安装等复杂作业,往往需要厂家专家或公司顶尖技工在场指导。本系统可有效减少专家差旅,实现“一对多”支持。

应用流程:现场检修班组成员作业时,远在千里外的专家如同站在其身后。专家可逐步指导拆卸顺序、力矩要求、校准标准,并将关键参数、图纸直接推送到视野中。AR 标注能清晰指明安装对位点、螺栓紧固顺序等,保障了检修工艺的标准化和高精度。

3.3 检修作业中的远程专家质检应用

在设备检修完成后,质量控制是确保设备能否安全可靠投入运行的关键环节。传统质检往往需要资深专家现场核查,效率低下且受限于人员调度。通过 AR 智能眼镜,专家可进行远程实时质检。

应用流程:现场工作人员在完成检修作业后,佩戴 AR 眼镜对检修部位进行全方位扫描。后方质检专家通过实时视频流,详细检查设备组装状态、密封完整性、螺栓紧固标记线是否对齐、接地线连接是否合规等细节。专家可利用 AR 标注功能,在视频画面中直接圈出存疑部位,要求现场人员重新检查或紧固。同时,系统可自动调用检修作业标准手册,将关键质检条目推送到现场视野中,指导工人逐项核对并确认。所有质检过程被自动记录并存档,形成可追溯的电子质检报告,极大提升质检效率和准确性,确保设备检修质量达到投运标准。

3.4 巡检过程中的远程专家异常判断应用

日常设备巡检是发现潜在缺陷、预防故障发生的重要措施。但巡检人员可能对某些异常征兆不敏感或缺乏判断经验,导致隐患未能及时上报。通过 AR 眼镜,巡检人员可随时与专家建立连接,实现异常情况的远程实时诊断。

应用流程:巡检人员按计划路线进行设备巡视,当发现设备存在异音、振动、渗漏、异味等异常现象但无法确定其严重程度时,可立即通过 AR 眼镜发起远程协助请求。专家接入后,通过第一视角观察现场情况,并结合实时传输的设备红外热像、振动频谱等数据(如通过外接传感器),辅助判断异常原因和风险等级。专家可指导巡检人员进一步测量关键参数(如温度、电流等),并利用 AR 标注功能在设备上标识出需重点监控的区域或测量点。对于确认的异常,专家可立即给出临时处置意见并上报消缺计划,从而将故障消灭在萌芽状态,避免事态扩大。所有异常判断和处理过程被记录并自动录入知识库,为后续类似情况提供处置范例。

3.5 安全作业监督与验收

管理人员和安全员无需亲临每一个高风险作业现场,即可实现远程安全监督。

应用流程:在进行高压开关操作、高空作业、受限空间作业时,安全员通过现场人员或固定监控点的 AR 视角,远程核对安全措施是否到位(如接地线悬挂、安全围栏设置),实时纠正不安全行为。作业完成后,亦可远程进行验收检查,提高工作效率。

3.6 新员工培训与技能传承

系统积累的知识库成为了企业宝贵的无形资产，变革了传统的培训模式。

应用流程：新员工在上岗前或处理不熟悉设备时，可通过 AR 眼镜或 PC 端直接点播知识库中的相关案例视频。他们能以第一视角“重现”专家处理问题的全过程，包括看到的场景、听到的分析和进行的操作，学习效果远胜于纸质手册或传统视频。这加速了新手到专家的成长过程，有效解决了资深技工“师傅”短缺的难题。

4 结语

本研究设计并论证了基于 AR 智能眼镜的远程协同作业系统在电力系统中的深度应用。该系统通过构建一个连接前方现场与后方专家的沉浸式协作桥梁，显著提升了应急响应速度、复杂作业的准确性和安全性，降低了专家差旅成本和人员技能门槛。更为重要的是，系统将每一次远程协作过程转化为可复用、可追溯的结构化知识资产，构建了企业智慧知识库，实现了知识的沉淀、共享与传承，为电力企业的数字化转型提供了强大动能。

未来，随着 5G-A/6G、人工智能、数字孪生等技术的成熟，该系统的能力将进一步增强：AI 可以实时分析视

频流，自动识别设备类型、状态并提示潜在风险；与数字孪生平台深度融合，专家可在虚拟孪生体上进行演练和方案模拟，再将最优方案“下发”至现实世界指导作业，最终实现电力系统运维全过程的智能化、无人化和智慧化。

参考文献：

- [1] 王磊, 李俊, 张强. 增强现实技术在智能电网运维中的应用研究综述[J]. 电力系统自动化, 2022,46(10):1-13.
- [2] Azuma R. T. A survey of augmented reality[J]. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 1997, 6(4): 355-385.
- [3] 国家发改委, 国家能源局. “十四五”现代能源体系规划[Z]. 2022.
- [4] 陈浩, 刘洋, 胡敏. 基于 5G 和 AR 技术的远程智能巡检系统在变电站的应用[J]. 电力信息与通信技术, 2021,19(5):78-84.
- [5] Palmarini R., et al. A systematic review of augmented reality applications in maintenance[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 49: 215-228.

作者简介：柯一鸿(1992.04-), 男, 汉族, 福建泉州, 工程师, 本科, 研究方向: 控制工程、智能电厂建设研究。