

长河坝电站 UWB 人员定位系统风险防控研究

李春雷 丰显忠 黄友林 段凯 陈雪松

四川大唐国际甘孜水电开发有限公司 四川省甘孜藏族自治州康定市 626001

摘要: 长河坝电站作为特高土石坝工程面临的复杂安全风险,提出基于 UWB(超宽带)技术的人员定位系统在风险防控中的应用价值。研究通过厘米级定位、工作票解析、电子围栏动态管控等技术,构建“定位-监测-应急”一体化管控体系,解决传统手段存在的数据割裂、响应滞后等问题。工程应用显示,系统使巡检路径偏差率降低 90%,年安全事故减少超 40%,应急响应时间缩短至 3 分钟内。研究为特高坝工程智能化安全管控提供了可复制的技术路径。

关键词: UWB 定位;特高坝工程;风险防控;电子围栏;智能应急

1 引言

长河坝电站作为西南地区典型的特高土石坝工程,坝体高度达 280 米,其复杂的地质条件与高风险作业环境对人员安全管控提出了严峻挑战。当前,电站作业存在人员分布分散、高危区域动态管控难度大、应急响应时效性不足等问题,传统安全管控手段主要依赖人工巡检与固定式视频监控,存在定位精度低(误差 >5 米)、多源数据融合困难、风险识别滞后等缺陷,难以满足特高坝工程全生命周期安全管理的需求。近年来,超宽带(UWB)技术凭借其厘米级定位精度、强抗干扰能力及低时延特性,在工业安全领域展现出显著优势,成为破解特高坝工程安全管控难题的关键技术路径。然而,国内外相关研究多集中于矿山、核电等单一场景的定位应用,缺乏针对特高坝工程复杂环境的系统性解决方案,且现有技术体系尚未形成“精准定位-智能管控-快速应急”的全流程闭环。因此,本研究以长河坝电站为工程背景,聚焦 UWB 技术在特高坝工程安全风险防控中的应用,旨在构建集成人员定位、风险识别与应急响应的一体化管控系统,为行业提供可复制的技术范式与实践参考。

2 UWB 人员定位系统架构设计

2.1 系统总体架构

系统采用分层架构设计,自下而上分为感知层、网络层、平台层与应用层,各层通过标准化接口实现数据交互与功能协同。感知层由 UWB 标签与基站组成,标签佩戴于人员安全帽或腕部,实时发射定位信号;基站部署于坝体、廊道等关键区域,负责信号接收与转发。网络层依托 5G 无线通信与光纤传输技术,构建高带宽、低时延的数据传输通道,确

保定位数据实时上传至平台层。平台层作为核心处理单元,集成定位解算引擎与风险分析模块,通过 TDOA(到达时间差)算法与卡尔曼滤波优化,实现厘米级定位精度,并融合 GIS 地图、工作票系统、视频监控等多源数据,构建三维空间风险模型。应用层面向终端用户,提供管控终端与应急指挥界面,支持人员位置可视化、异常行为告警、应急资源调度等功能,形成“定位-监测-管控-应急”的全流程闭环体系。

2.2 硬件选型与部署

硬件选型兼顾环境适应性与功能需求。基站部署方面,坝体露天区域采用 IP67 防护等级基站,具备防尘防水能力,覆盖半径 80 米,通过三角布局优化信号覆盖;廊道及地下厂房因存在金属屏蔽问题,配置防爆型基站,并增设中继器扩展信号传输距离,确保复杂环境下的定位稳定性。标签设计采用腕带式与安全帽式双形态,支持 IP68 防水与 -20°C ~ 60°C 宽温工作,适应高湿度、温差大的作业环境;标签集成心率、血氧传感器,实时监测人员生理状态,数据异常时自动触发告警。此外,硬件设备均通过抗电磁干扰测试,满足水电站强电磁环境下的稳定运行要求。基站与标签的部署密度根据区域风险等级动态调整,高危区域(如高压配电室)基站间距缩短至 40 米,标签佩戴率强制 100%,确保风险管控无死角。

2.3 软件平台开发

软件平台以定位精度优化与数据融合为核心目标。定位引擎采用 TDOA 算法,通过测量信号到达不同基站的时间差计算人员位置,结合卡尔曼滤波对定位数据进行动态修正,

消除多径效应与噪声干扰,使定位误差稳定在 10–30cm 范围内。数据融合模块集成多源异构数据,将定位信息与 GIS 地图坐标匹配,生成人员实时位置热力图;同步解析工作票系统中的作业范围与权限信息,绑定人员标签与电子围栏,实现越界行为自动识别;联动视频监控系统,对异常停留、聚集等风险行为进行抓拍取证,形成“定位–识别–取证”的证据链。平台还开发应急响应子模块,支持 SOS 一键呼救、生命体征异常告警等功能,自动规划最优救援路径并调度应急资源,显著提升事故处置效率。软件架构采用微服务设计,各模块独立部署与扩展,支持与现有水电站管理系统(如两票管理、门禁系统)无缝对接,降低集成成本。

3 风险防控关键技术研究

3.1 人员定位与行为监测技术

人员定位与行为监测是风险防控的基础环节,其核心在于通过高精度定位与智能分析技术实现人员状态实时感知与风险预警。系统基于 UWB 厘米级定位能力,结合 GIS 地理信息系统构建三维空间模型,动态展示人员实时位置、移动轨迹及区域热力分布,支持历史轨迹回放与停留时间统计,为作业行为分析提供数据支撑。行为监测模块采用机器学习算法,基于历史数据训练异常行为识别模型,通过分析人员移动速度、方向、停留时长等特征,自动检测异常停留、路线偏离、单独作业等风险行为。例如,当人员在高压配电室等高危区域停留超时,或偏离预设巡检路线时,系统立即触发告警并推送至管控终端。电子围栏技术进一步强化高危区域管控,支持多边形、圆形等灵活围栏配置,通过权限绑定实现“区域–人员–时间”三维管控,当人员越界或进入未授权区域时,系统联动视频监控抓拍现场画面,并生成包含时间、位置、人员信息的告警日志,为事后追溯提供依据。

3.2 作业风险智能管控技术

作业风险智能管控技术聚焦于工作票执行与巡检流程的标准化与自动化,通过技术赋能减少人为疏忽引发的安全风险。系统创新性地提出“两票融合”机制,自动解析工作票中的工作地点、作业内容、安全措施等关键信息,将其与人员定位标签绑定,构建“人员–任务–区域”动态关联模型。当人员实际位置偏离工作票指定范围时,系统立即触发越界告警,并联动视频监控系统抓拍现场画面,确保作业严格按照票执行。巡检优化模块基于定位数据与路径规划算法,生成覆盖所有检查点的最优巡检路线,通过标签振动提示引导人

员按序执行,避免漏检或重复检查。巡检过程中,系统自动记录检查时间、位置及设备状态数据,生成标准化巡检报告,替代传统纸质记录,提升巡检效率与数据可靠性。此外,系统支持巡检任务动态调整,当突发设备故障或安全隐患时,可实时重新规划巡检路线,优先排查高风险区域,实现巡检资源的精准投放。

3.3 应急响应与生命保障技术

应急响应与生命保障技术是风险防控的最后一道防线,其目标是在事故发生时快速定位受困人员、评估风险等级并启动救援流程。系统为每位人员配备集成 SOS 求救功能的 UWB 标签,当遇到紧急情况时,人员可通过长按标签按钮触发一键呼救,后台系统 30 秒内定位求救人员位置,并自动通知附近救援人员与应急指挥中心,同步推送人员基本信息、历史轨迹及周边环境数据,为救援决策提供支持。生命体征监测功能通过标签内置的心率、血氧传感器,实时采集人员生理数据,当检测到心率异常(如过高或过低)、血氧饱和度低于安全阈值时,系统自动分级告警(黄色预警提示关注,红色预警启动应急响应),并联动医疗资源(如急救箱、AED 设备)位置信息,引导救援人员快速施救。灾难响应模块与环境监测系统深度集成,当发生地震、洪水等灾害时,系统自动接收环境传感器数据,快速定位受影响区域,结合人员实时位置生成最优撤离路线,并通过标签振动、语音提示引导人员逃生,同时将撤离进度反馈至应急指挥中心,确保救援资源精准调配。

4 工程应用与效果验证

4.1 长河坝电站应用场景

长河坝电站作为特高土石坝工程,其复杂的地质条件与高风险作业环境对安全管控系统提出了严苛要求。系统覆盖范围涵盖坝体、廊道、厂房、高压配电室等 20 余个关键区域,共部署 UWB 基站 200 个,其中坝体露天区域采用 IP67 防护等级基站,间距 80 米;廊道及地下厂房因存在金属屏蔽问题,配置防爆型基站并增设中继器,确保信号全覆盖。系统深度整合现有业务系统,通过标准化接口与两票管理系统、视频监控平台、门禁系统实现数据互通,形成“定位–管控–应急”一体化平台。例如,工作票中的作业范围、人员权限等信息自动同步至定位系统,当人员实际位置偏离工作票指定区域时,系统立即触发越界告警并联动视频抓拍;门禁系统与定位标签绑定,未授权人员进入高危区域时自动阻止并报警。

此外,系统集成 GIS 地图与三维建模技术,直观展示人员位置、设备状态及风险区域,为管理人员提供全局视角的决策支持。

4.2 系统测试与验证

系统测试分为功能验证与性能验证两个阶段。功能验证方面,选取 1693 份历史工作票作为测试样本,验证系统对作业范围、人员权限的解析准确率。测试结果显示,系统解析准确率达 98.7%,定位误差稳定在 $\leq 30\text{cm}$ 范围内,满足特高坝工程厘米级定位需求。越界告警响应时间测试中,模拟人员进入未授权区域,系统从检测到越界到触发告警并推送至管控终端的平均耗时 < 1 秒,视频联动抓拍成功率 $> 99\%$,确保风险事件可追溯。巡检优化功能测试中,系统根据设备分布自动生成最优巡检路线,引导人员按序执行,巡检报告生成耗时从传统方式的 15 分钟缩短至 < 2 分钟,且报告内容包含定位数据、设备状态及异常记录,实现巡检流程标准化。性能验证方面,系统在 200 人同时在线、基站负载率 80% 的极端条件下,定位延迟仍控制在 $< 200\text{ms}$,满足实时性要求。

4.3 应用效果分析

系统应用后,长河坝电站安全管控效率与风险防控能力显著提升。效率提升方面,巡检路径偏差率从传统方式的 35% 降至 3.2%,关键设备漏检率从 8% 降至 1% 以下,巡检人员日均步行里程减少 20%,劳动强度大幅降低。风险降低方面,系统通过实时定位与行为监测,提前识别并干预异常行为,年安全事故数量由应用前的 12 起减少至 7 起以下,事故率下降 41.7%;其中,高压配电室误入事故、单独作业风险等高危事件实现零发生。应急响应方面,系统与应急指挥中心深度联动,当触发 SOS 求救或灾难响应时,3 分钟内完成人员定位、资源调度与路线规划,较传统方式的 12 分钟缩短 75%;人员清点效率从人工核查的 30 分钟提升至 6 分钟内完成,清点准确率达 100%。此外,系统通过生命体征监测功能,累计发现心率异常事件 23 起,其中 5 起为潜在心脑血管疾病前兆,及时干预避免了严重后果。经济性方面,系统减少因安全事故导致的设备损坏、停机损失等直接经济损失约 300 万元/年,综合投资回报周期缩短至 2.3 年,具有显著的推广价值。

5 结论与展望

本研究针对特高坝工程安全管控需求,提出基于 UWB

厘米级定位技术的全流程闭环管控系统架构,通过工作票解析与电子围栏动态绑定、人员行为智能分析、应急响应联动等核心技术创新,实现了“定位-监测-预警-处置”一体化管控,有效解决了传统系统数据割裂、风险识别滞后等问题。工程应用验证表明,系统在长河坝电站部署后,巡检路径偏差率降低至 3.2%,关键设备漏检率降至 1% 以下,年安全事故数量下降 41.7%,应急响应时间缩短至 3 分钟内,显著提升了安全管控效率与风险防控能力,具有行业推广价值。然而,当前系统仍存在局限性:其一,风险评估模型以静态参数为主,未充分融合设备老化、地震余震等时变因子,动态风险感知能力有待增强;其二,定位算法在复杂金属屏蔽环境下精度波动,需进一步优化。未来研究可引入基于深度学习的动态风险评估模型,结合设备状态监测数据实现风险实时量化;同时探索多源融合定位技术(如 UWB+惯性导航),提升复杂场景下的定位鲁棒性。此外,系统可拓展至多坝群协同管控场景,通过数字孪生技术构建“物理-数字”双胞胎模型,实现跨区域风险联动预警与智能决策优化,推动高危工程安全管理向智能化、精细化方向演进,为能源、矿山等行业的安全生产提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 周北北.长河坝电站砂石系统扩容改造实践[J].四川水利,2016,37(5):79-81.
- [2] 王宁,樊鹏.长河坝电站左岸高边坡施工方案设计[J].黄河水利职业技术学院学报,2008,20(4):14-16.
- [3] 张志敏,王志刚,曹东勇.某当地材料高坝堆石体现状工程特性研究[J].中国水运(下半月),2013,13(6):280-282.
- [4] 雷世兵,王启国,邓争荣,等.特高坝地基深大断裂活动性与筑坝工程地质问题研究[J].工程地质学报,2016,24(4):682-692.
- [5] 黄润秋,许模,范留明,等.某高坝工程坝肩侧裂结构面基本特征及量化模型研究[J].工程地质学报,2003,11(2):113-119.
- [6] 周建平,王浩,陈祖煜,等.特高坝及其梯级水库群设计安全标准研究 I:理论基础和等级标准[J].水利学报,2015(5):505-514.

作者简介:李春雷 1984 年 3 月 男 汉 山东省泰安市 大学本科 高级工程师 研究方向:网络安全及信息化管理