

基于 UWB 的长河坝电站安全风险管控系统研究

黄友林

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：长河坝电站作为世界级特高土石坝工程，其深厚覆盖层、高地震烈度及狭窄河谷等复杂条件对安全风险管控提出严苛要求。传统定位技术因精度不足、抗干扰能力弱等问题难以满足实际需求。本研究基于超宽带（UWB）技术，结合长河坝电站特殊环境，构建高精度、实时化、智能化的安全风险管控系统。通过部署 UWB 定位基站与智能标签，实现人员、设备、物资的厘米级定位与动态追踪；融合电子围栏、视频联动、生命体征监测等功能，形成“事前预防—事中预警—事后追溯”的全流程管控体系。系统在长河坝电站的工程应用中，显著降低巡检路径偏差率与安全事故发生率，验证了其技术可行性与经济性，为特高坝工程安全管控提供了创新范式。

关键词：UWB 定位；特高土石坝；安全风险管控；电子围栏；长河坝电站

1 引言

长河坝电站作为大渡河干流第 11 级电站，以 240m 坝高、79.3m 深厚覆盖层及 9 度地震烈度成为世界级工程，其建设难度远超同类项目。特高土石坝面临坝基渗漏、坝体变形、高地震风险等多重挑战，传统安全管控依赖人工巡检与经验判断，存在效率低、响应慢、盲区多等问题。UWB 技术凭借厘米级定位精度、强抗干扰能力及低时延特性，成为解决复杂工程场景安全管控难题的关键技术。UWB 技术应用：国内外在工业、医疗、物流等领域广泛探索 UWB 定位，但在水电工程中应用较少，且多集中于单一功能（如人员定位）。安全风险管控研究：现有研究多聚焦于风险识别模型（如专家经验法、概率统计法）或单因素分析（如溃坝模式、可靠度评估），缺乏多因素耦合与动态管控方法。长河坝工程特殊性：其深厚覆盖层、高地震烈度及狭窄河谷条件对定位精度、系统稳定性提出更高要求，需定制化解决方案。设计 UWB 定位系统架构，开发安全风险管控软件，集成电子围栏、视频联动、生命体征监测等功能，构建全流程管控体系。实现人员 / 设备厘米级定位，降低巡检偏差率与事故发生率，提升应急响应效率，形成可复制的特高坝工程安全管控模式。

2 UWB 定位技术原理与系统设计

2.1 UWB 技术原理与优势

超宽带（Ultra-Wideband, UWB）定位技术是一种基于纳秒级非正弦波窄脉冲的无线通信与定位方法。其核心原理

是通过发送和接收极窄脉冲信号，利用信号在空间传播过程中的时间差或时间差分实现距离测量。TOA 算法通过测量信号从发射端到接收端的单程传播时间计算距离，需收发端严格时钟同步；TDOA 算法则通过测量信号到达不同接收端的时间差计算位置，对时钟同步要求较低。实际应用中，采用 TOA/TDOA 混合算法可综合两者优势，通过多基站协同解算提升定位精度。UWB 技术具有显著优势：其定位精度可达厘米级，远优于传统蓝牙、WiFi 等米级定位技术；信号频宽超过 500MHz，具备强抗金属干扰能力，可穿透非金属障碍物；数据传输时延低于 100ms，满足实时性要求；系统可用性达 99.9%，支持高并发定位需求。这些特性使其高度适配水电站复杂环境，尤其适用于坝体廊道、高压配电室等金属密集、电磁干扰强的场景。

2.2 系统架构设计

系统采用分层架构设计，由硬件层、软件层与数据层构成闭环管控体系。硬件层部署 UWB 定位基站与智能标签，基站支持 IP67 防护等级，可抵御水电站高湿度、粉尘环境；标签采用腕带式或安全帽式设计，集成防爆认证模块，确保作业人员安全。软件层包含三大核心模块：定位引擎基于混合算法解算坐标，支持动态路径规划；可视化平台集成 GIS 地图，实时展示人员位置、轨迹及分布热力图；风险管控模块配置电子围栏规则，支持自定义区域属性（如生效时间、告警模式），并与视频监控系统联动，实现越界行为自动抓拍。数据层构建多维度数据库，规则库存储安全管控策略，

关键字库解析工作票描述, 电子围栏库动态绑定人员权限, 支持千人级并发定位需求。各层通过标准化接口协同, 形成“感知-传输-处理-决策”完整链条。

2.3 关键技术实现

针对水电站特殊环境, 系统实现三项关键技术突破。其一为抗干扰优化, 采用频宽 500MHz 以上信号设计, 通过扩频技术降低电磁干扰影响, 结合多径效应抑制算法, 确保信号在金属密集区域的稳定传输。其二为混合定位算法, 针对老旧电站改造场景, 融合 UWB 与卫星定位 (GPS/北斗) 或蓝牙技术, 在无 UWB 信号覆盖区域自动切换定位模式, 实现全厂区无缝覆盖。其三为多维定位支持, 开发零维 (区域感知)、一维 (狭长通道) 及二维 (平面区域) 定位模型: 零维定位通过基站信号强度判断人员是否进入指定区域; 一维定位利用双基站时间差解算沿通道的线性坐标; 二维定位采用三边测量法, 通过至少三个基站解算平面坐标。三种模式动态切换, 满足坝体廊道、厂房、户外作业等多样化场景需求。

3 长河坝电站安全风险管控需求分析

3.1 工程环境与风险特征

长河坝电站作为土石坝水电工程, 其工程环境与风险特征呈现显著特殊性。地质条件方面, 坝址区覆盖层厚度达 79.3 米, 以第四系冲积物为主, 透水性强, 导致坝基渗漏风险突出。坝体长期受库水压力作用, 可能引发局部沉降或位移, 需通过高精度监测技术实时捕捉变形特征; 廊道结构复杂, 裂缝发育易形成渗漏通道, 需结合分布式光纤传感与定位技术实现渗漏点快速定位。地震风险方面, 电站所在区域地震基本烈度为 9 度, 要求安全管控系统具备抗震设计 (抗震设防烈度 ≥ 9 度) 与快速响应能力, 确保地震发生时人员定位、设备状态等关键数据实时传输。作业场景方面, 电站涉及设备检修、高压配电室操作、狭窄通道巡检等高危作业, 其中设备检修需严格管控作业人员与带电设备的安全距离, 高压配电室操作需防止误入带电间隔, 狭窄通道巡检需避免人员滞留或逆行, 均需通过精准定位技术实现行为轨迹追溯与风险预警。

3.2 现有管控手段局限性

当前电站采用的安全管控手段存在显著局限性。人工巡检依赖巡检人员经验, 效率低下且存在盲区, 难以覆盖坝体廊道、地下厂房等复杂区域, 巡检周期长导致风险发现滞后。传统定位技术方面, GPS 在室内环境信号衰减严重, 无

法满足地下空间定位需求; 蓝牙 /WiFi 定位精度仅为米级, 难以满足特高坝对变形监测的厘米级要求, 且易受金属结构干扰导致数据波动。系统集成方面, 两票管理系统、视频监控平台、门禁系统等孤立运行, 数据格式不统一、传输协议不兼容, 导致风险事件发生时无法快速联动响应。例如, 人员越界行为需人工比对门禁记录与视频画面, 延误处置时机; 设备故障报警需手动调取定位信息, 影响应急效率。现有手段已无法满足土石坝安全管控的精细化、实时化需求。

3.3 UWB 系统需求定义

基于工程风险特征与现有手段局限, UWB 定位系统需满足以下核心需求: 功能层面, 需实现厘米级定位精度, 支撑坝体变形监测与高危作业管控; 配置电子围栏功能, 对禁入区域、危险设备设置动态边界, 越界时触发声光告警并推送至管理终端; 集成视频联动模块, 定位数据触发监控摄像头自动跟踪, 实现“定位-视频-告警”闭环; 增加生命体征监测功能, 通过智能标签采集人员心率、体温等数据, 异常时主动报警; 支持 SOS 一键求救, 便于人员遇险时快速呼救; 优化巡检路径规划, 结合定位数据生成最优巡检路线, 减少无效移动。性能层面, 定位误差需控制在 30 厘米以内, 数据更新频率不低于 1 次/秒, 系统可用性达 99.9% 以上, 支持千人级并发定位需求。兼容性层面, 需与现有两票管理系统、视频监控平台、门禁系统无缝对接, 通过标准化接口实现数据互通, 构建“定位-管控-应急”一体化安全管控体系。

4 基于 UWB 的安全风险管控系统实现

4.1 人员定位与行为监测

系统通过 UWB 定位标签与基站协同实现厘米级实时定位, 结合 GIS 地图构建三维空间模型, 动态展示人员位置、运动轨迹及区域分布热力图。定位数据更新频率达 1Hz, 支持历史轨迹回放与统计分析功能, 可按时间、区域、人员等多维度生成可视化报告。行为分析模块基于机器学习算法, 构建异常行为识别模型: 通过分析人员停留时长、移动速度、轨迹重复率等参数, 自动识别异常停留 (如长时间滞留高压设备区)、偏离路线 (如未按巡检路径移动)、单独作业 (如无监护人员进入危险区域) 等风险行为。系统配置多级告警机制, 当检测到岗位偏离、超时作业或人员消失时, 立即触发声光告警并推送至管理终端, 同步记录事件时间、位置及人员信息。电子围栏功能支持动态配置, 管理员可通过可视

化界面设置圆形、多边形或线性围栏,定义生效时间、告警模式(如进入告警、离开告警)及权限等级,对高压配电室、坝体渗漏监测区等高危区域实施分级管控,未授权人员接近时系统自动锁定并报警。

4.2 作业风险智能管控

系统深度融合两票管理制度,通过自然语言处理技术自动解析工作票中的工作地点、作业内容及安全措施描述,建立人员-设备-区域的动态绑定关系。当定位数据与工作票范围不匹配时(如人员进入非授权设备区),系统立即触发越界告警,并联动视频监控系统调取现场画面,辅助管理人员核实风险。视频联动模块采用智能分析算法,对无权限出入、人卡分离、未佩戴安全帽等违规行为进行实时识别,事件发生时自动抓拍并存储至证据库,支持按时间、类型、人员等条件快速检索。巡检优化功能基于定位数据与设备台账,生成覆盖关键监测点的最优巡检路线,通过标签振动提示引导人员按序执行,系统自动记录巡检时间、位置及完成状态,生成标准化巡检报告。相比传统人工巡检,该功能使巡检路径偏差率降低 90%,关键设备漏检率降至 1% 以下,有效减少因人为疏忽导致的事故隐患。

4.3 应急响应与生命保障

应急响应模块集成 SOS 一键求救功能,当人员遭遇险情时,长按标签求救键 3 秒即可触发紧急报警,系统立即锁定求救人员位置,并在 GIS 地图上标注求救点,同步推送至应急指挥中心及附近救援人员。生命体征监测功能通过标签内置的生物传感器,实时采集心率、血氧饱和度、体温等数据,当检测到异常值(如心率持续 >120 次/分或血氧 $<90\%$)时,系统自动分级告警,轻度异常推送健康提醒,重度异常启动应急救援流程。灾难响应模块与电站环境监测系统深度集成,当发生地震、溃坝等突发事件时,系统自动接收传感器数据,快速定位受影响区域人员分布,结合疏散路径算法生成最优撤离路线,并通过标签振动、语音播报等方式引导人员逃生。同时,系统启动人员清点功能,30 秒内完成全厂区人员状态核查,为应急指挥提供精准数据支持。

4.4 系统集成与测试验证

硬件部署方面,针对长河坝电站复杂环境,采用分层覆盖策略:坝体区域部署高防护等级(IP67)基站 200 个,间距 50-80 米确保信号连续;廊道及地下厂房采用防爆型基站,结合中继器解决金属屏蔽问题;智能标签选用腕带式

与安全帽式双形态,支持 IP68 防水与 -20°C ~ 60°C 宽温工作。软件测试阶段,通过 1693 份历史工作票验证工作地点自动解析功能,解析准确率达 98.7%,定位误差稳定在 10-30cm 区间,99.9% 的数据包时延低于 100ms。工程应用效果显示,系统上线后巡检路径偏差率从 35% 降至 3.2%,年安全事故数量由 12 起减少至 7 起以下,应急响应时间从平均 12 分钟缩短至 3 分钟内。此外,系统与现有两票管理、视频监控、门禁等系统实现数据互通,通过标准化 API 接口完成业务流整合,形成“定位-管控-应急”一体化安全管控体系,显著提升电站安全管理水平。

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 技术的全流程风险管控系统架构,通过厘米级实时定位、工作票自动解析与电子围栏动态绑定等技术创新,实现了人员行为监测、作业风险智能管控及应急响应的闭环管理。工程应用表明,该系统有效解决了传统管控手段存在的数据割裂、定位精度不足等问题,显著提升了巡检效率与应急响应速度,年安全事故率降低超 40%,验证了其在实际工程中的可行性与推广价值。然而,系统当前对时变风险因子(如设备老化、地震余震)的动态评估能力仍需完善,未来可结合深度学习算法优化定位解算精度,并拓展至多坝群协同管控场景。随着数字孪生技术的发展,该系统有望与物理工程深度融合,构建“物理-数字”双胞胎模型,推动高危工程安全管理向预测性维护与智能决策方向升级,为行业提供可复制的智能化解决方案。

参考文献:

- [1] 王波. 浅谈 UWB 定位技术[J]. 中国新技术新产品,2011(23):47-47.
- [2] 史刘强,付江涛. 基于 UWB 定位系统设计[J]. 电子设计工程,2019,27(15):161-165.
- [3] 汤洪洁,李俊. 特高土石坝超长距离变形监测技术研究[J]. 水利水电快报,2023,44(2):66-72.
- [4] 胡良明,杨涛,张志飞,等. 长河坝特高土石坝爆炸动力响应分析[J]. 人民长江,2020,51(10):173-176.
- [5] 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.

作者简介: 黄友林 1988 年 9 月 男 汉 四川省德阳市 大学本科 工程师 研究方向:水电设备管理