

基于智能监测的水库大坝安全预警系统研究

李苑 朱慧明

广西珠委南宁勘测设计院有限公司 广西 南宁 530001

摘要: 水库大坝安全是水利工程管理的核心,传统监测手段存在数据滞后、预警能力不足等问题。本文基于智能监测技术,构建涵盖结构变形、渗流、应力应变及环境荷载的核心指标体系,结合物联网与大数据分析,设计多级联动智能预警机制,实现大坝安全的实时感知、动态评估与精准预警。通过优化数据采集、传输及预处理技术,提升系统实时性与可靠性,为水库大坝安全管理提供全流程技术支持。

关键词: 智能监测; 水库大坝; 安全预警系统; 多级联动; 系统优化

引言: 水库大坝安全关乎民生与社会稳定。传统监测方式存在数据精度低、时效性差等问题,难以满足现代大坝安全管理需求。智能监测技术凭借高精度、实时性等优势,为解决这些问题提供新途径。开展基于智能监测的水库大坝安全预警系统研究,构建完整体系,实现精准预警与高效应急,保障大坝安全运行。

1 水库大坝安全监测核心指标体系构建

1.1 大坝安全影响因素分析

大坝安全受多重因素综合作用,结构自身特性是安全保障的基础。坝体材料特性直接决定承载能力,混凝土强度在30-60MPa范围内变化,防渗材料耐久性在10-30年周期内逐步衰减,这些参数的变化会逐步影响整体稳定性^[1]。结构完整性更是关键,施工遗留缺陷或长期运行产生的损伤,如裂缝宽度达到5-20毫米时,都可能成为安全隐患的突破口。环境荷载是不可忽视的外部作用。水文情势的剧烈波动,如汛期洪峰冲击、枯水期长期低水位浸泡,会改变坝体受力状态。地质条件的潜在变化,包括坝基沉降、岸坡稳定性演变,可能引发连锁反应。气象因素同样重要,极端高温低温交替、强降雨等都会对坝体产生持续影响。运行荷载的合理控制直接关系安全。蓄水水位的升降速率和极值水平,会使坝体承受不同程度的水压。泄洪工况下水流冲刷力与脉动压力,对坝体下游结构和基础防渗体系构成考验,需纳入重点考量。

1.2 智能监测指标选取原则

科学性是指标选取的首要前提,要求指标与大坝安全状态存在明确内在关联,能够客观反映结构运行本质。敏感性体现指标实用价值,需在安全异常初期就能呈现明显变化,如结构变形指标在变形量达到1-5毫米时就能有所体现,为预警预留充足时间。可测性适配技术发展现状,指标应能通过现有智能监测设备精准获取,兼顾数据稳定性与获取成本。系统性强调指标间协同,

各指标覆盖不同安全维度,相互补充验证,避免监测盲区,形成完整评价体系。

1.3 核心监测指标体系内容

结构变形监测聚焦形态变化,坝体沉降反映竖向受力均衡性,水平位移体现侧向稳定性,裂缝开展情况则直接揭示结构损伤程度,这些指标共同构成坝体安全的直观表征。应力应变监测深入内部状态,坝体内部应力分布反映荷载传递效果,钢筋应力体现受力关键部位承载情况,混凝土应变则关联材料自身性能变化,为结构内部安全判断提供依据。渗流监测关乎防渗安全,渗流量大小直接反映防渗体系有效性,渗流压力变化提示渗流通道发展,渗流水质指标则能早期发现坝体材料溶蚀等问题。环境与荷载监测提供外部背景数据,水位数据为结构受力计算提供基础,降雨量关联水文情势变化,气温影响材料物理性能,波浪压力则反映特殊水文条件下的附加荷载,为综合安全评价提供支撑。

2 基于智能技术的监测数据采集与传输系统

2.1 智能监测感知设备选型与部署

高精度传感器技术是数据采集的核心支撑。GPS北斗定位传感器可实现坝体变形的实时动态追踪,定位精度达到1-5毫米,满足结构变形监测的高精度需求^[2]。光纤传感凭借抗电磁干扰、耐腐蚀等优势,适用于坝体内部应力应变的长期监测,能精准捕捉材料力学性能变化,其测量精度可达1-10微应变。压电传感器则在振动监测中表现突出,可有效感知水流冲击、结构振动等动态信号,其灵敏度可达0.1-10皮库仑/牛顿。物联网终端设备承担数据汇聚与初步处理功能。数据采集模块需具备多接口适配能力,可兼容不同类型传感器输出信号,实现各类监测数据的统一采集。边缘计算节点能够在设备端完成简单数据处理,减少无效数据传输,提升整体系统响应效率。设备优化部署需紧密结合大坝结构特点。在坝

体关键受力部位、历史变形区域等重点区域加密布设监测点,确保监测覆盖无死角。

2.2 多源数据传输网络构建

传输技术选型采用多技术融合方案。5G/4G技术适用于海量实时数据的高速传输,满足应力应变、变形等关键数据的实时上传需求。LoRa技术以低功耗、广覆盖优势,适合偏远区域环境监测数据的传输。光纤通信则作为核心骨干网络,提供大容量、高稳定的数据传输通道,实现关键监测数据的可靠传输。数据传输的实时性与可靠性需通过多重技术保障。采用跳频通信、信号放大等抗干扰技术,降低复杂电磁环境对传输信号的影响。实施数据加密传输,通过加密算法对传输数据进行处理,防止数据在传输过程中被篡改或泄露。边缘云端数据传输架构注重分层协作。边缘节点先对采集数据进行筛选和预处理,提取有效信息后再上传至云端,减少传输带宽占用。云端则负责数据的集中存储、深度分析和全局管理,形成边缘实时处理与云端综合分析的高效协同模式。

2.3 监测数据预处理技术

数据清洗是提升数据质量的基础环节。通过阈值判断、趋势分析等方法识别异常值,结合历史数据和监测场景对异常数据进行合理修正。采用滤波算法过滤数据噪声,剔除环境干扰带来的无效信息,确保数据真实可靠。数据融合实现多源异构数据的价值挖掘。基于时间同步和空间匹配技术完成多源数据的时空配准,消除数据在时间和空间维度上的偏差。运用数据融合算法整合不同监测维度数据,实现从单一指标监测到综合状态评估的转变。数据压缩助力存储资源优化。采用无损压缩算法确保关键数据完整保留,对非核心数据采用有损压缩方法减少数据体量。结合数据生命周期管理策略,对不同重要程度的数据实行差异化存储,在保障数据可用性的同时降低存储成本。

3 多级联动智能预警机制设计

3.1 预警阈值的动态确定方法

基于监测数据趋势的阈值动态调整是提升预警精度的关键。通过分析历史监测数据的变化规律,建立数据趋势预测模型,实时捕捉指标波动特征^[3]。当监测数据呈现稳定上升或下降趋势时,系统自动调整阈值区间,避免因固定阈值导致的误判或漏判。例如,结构变形指标正常波动范围在1-5毫米,当趋势预测显示变形量将突破5毫米时,系统将阈值调整至6-10毫米。这种动态调整模式能适应大坝运行状态的长期演变,让预警阈值始终与实际安全状况匹配。结合大坝结构特性的阈

值差异化设置需兼顾结构多样性。坝体不同部位的承载能力和受力特点存在差异,在坝踵、坝趾等应力集中区域,阈值设置应更为严格。针对混凝土坝、土石坝等不同坝型,依据材料强度和结构设计标准,制定符合自身特性的阈值标准,确保阈值设置既科学合理又具备针对性。

3.2 多级预警等级划分与响应逻辑

预警等级划分需遵循清晰明确的标准,通常分为一般、较重、严重、特别严重四个层级。划分依据涵盖监测指标偏离程度、变化速率以及可能引发的安全风险范围,每个等级对应明确的风险描述,为后续响应提供直观依据。一般预警对应指标偏离正常值1-3个单位;较重预警对应偏离3-6个单位;严重预警对应偏离6-10个单位;特别严重预警对应偏离10个单位以上。不同预警等级的触发条件与响应流程存在层级差异。一般预警由单一指标轻微偏离引发,启动定期巡查和数据加密监测;较重预警对应多项指标异常,需组织专业人员现场核查;严重预警意味着出现明显安全隐患,立即启动应急值守并制定处置方案;特别严重预警则表明面临重大安全风险,需迅速启动转移安置等最高级别响应措施。

3.3 智能预警信息发布与推送系统

多渠道信息发布构建全方位通知网络。平台弹窗能确保监控中心人员第一时间察觉预警信息,短信通知覆盖不在岗的相关人员,APP推送则可实现预警内容的实时传递和查看。多种渠道相互配合,避免预警信息传递延迟或遗漏。预警信息的精准推送依托职责权限划分体系。针对管理人员推送包含处置建议的综合信息,为决策提供支撑;向一线巡查人员推送具体预警位置和现场核查要求;向普通民众推送安全提示信息,引导做好防护准备。精准推送让信息传递更高效,提升整体响应效率。

3.4 预警与应急处理的联动接口设计

预警系统与应急管理平台的数据交互需遵循统一标准。明确数据格式、传输协议和交互频率,确保预警信息能快速准确导入应急管理平台,实现监测数据与应急资源信息的无缝对接,为应急处置提供全面数据支撑。数据交互频率可达1-10次/分钟。基于预警信息的应急措施智能建议模块可提升处置科学性。结合预警等级、预警部位和历史处置案例,自动生成针对性应急措施建议。该模块能辅助管理人员快速制定处置方案,减少决策时间,为及时化解安全风险提供技术支持。例如,对于一般预警,建议加强监测;对于较重预警,建议组织专家会商;对于严重预警,建议启动应急预案;对于特别严重预警,建议立即疏散人员。

4 系统性能优化与可靠性保障

4.1 系统实时性优化

数据采集与处理的并行计算技术是提升系统响应速度的核心手段。通过构建多线程采集框架，将不同监测点、不同类型的数据采集任务分配至独立线程，实现多源数据的同步采集，避免单一任务阻塞导致的采集延迟^[4]。线程数量可根据监测点数量设置为4-32个。数据处理环节引入分布式计算架构，将海量数据拆分为10-100个子任务，分配至不同计算节点并行处理，大幅缩短数据从采集到分析的整体耗时，为实时预警提供高效数据支撑。模型推理速度的优化方法需兼顾精度与效率。对智能分析模型进行轻量化改造，通过剪枝、量化等技术减少模型参数规模，降低计算资源占用。采用模型推理加速引擎，对计算过程进行优化调度，提升指令执行效率。同时提前缓存常用模型的推理结果模板，在相似监测场景下直接调用，进一步缩短推理响应时间，确保预警判断及时高效。

4.2 系统稳定性与容错能力设计

设备故障的自动检测与冗余备份机制为系统稳定运行提供双重保障。通过实时监测设备运行状态参数，结合故障特征库进行比对分析，实现传感器、采集模块等设备故障的自动识别与定位，并立即触发报警通知维护人员。关键监测点位部署冗余设备，当主设备发生故障时，备用设备通过无缝切换技术自动接管工作，确保监测数据采集不中断，维持系统连续运行。网络中断时的本地数据缓存与恢复策略可避免数据丢失。在边缘计算节点配置大容量本地存储模块，当网络连接中断时，采集数据自动存储至本地，同时启动断网重连监测机制。网络恢复后，系统按照数据生成时间顺序，将缓存数据批量上传至云端，并与云端数据进行比对校验，补全数据断点，确保数据完整性不受网络波动影响。

4.3 系统安全性保障

数据安全需通过加密存储与权限控制构建防护体系。采用对称加密算法对采集数据、分析结果等核心数据进行加密处理后再存储，防止数据被非法读取。建立精细化访问权限管理机制，根据岗位需求设置不同数据访问权限，明确数据查看、修改、导出等操作的权限边界，确保数据操作可追溯，从源头避免数据泄露风险。系统安全依赖全方位的防攻击防入侵防护体系。部署防火墙、入侵检测系统等安全设备，对网络访问行为进行实时监测，拦截非法访问请求和恶意攻击流量。定期对系统进行安全漏洞扫描与修复，更新安全防护策略，强化操作系统、数据库等基础组件的安全配置。通过安全审计机制记录系统操作日志，为安全事件追溯和分析提供依据，保障系统运行环境安全可靠。

结束语

基于智能监测的水库大坝安全预警系统，通过构建全面指标体系、完善数据采集传输、设计多级联动预警机制及优化系统性能，实现了对大坝安全的实时、精准监测与预警。该系统有效提升了大坝安全管理水平，为保障大坝安全运行提供了有力支撑，在水利工程领域具有重要应用价值，有助于减少大坝安全事故带来的损失。

参考文献

- [1]李亚峰.智能监测技术在水利大坝安全预警系统中的应用与创新研究[J].中国水运,2025(10):40-42.
- [2]刘光彪,李少林,戴领,等.藻渡水库工程安全智能分析预警系统设计与应用[J].水利水电快报,2025,46(11):121-125,133.
- [3]何成斌.小型水库智能化云监测预警分析系统的搭建[J].水科学与工程技术,2023(3):93-96.
- [4]王曼丽.水库安全运行自动化监测管理系统设计研究[J].水上安全,2024(6):70-72.