

水库复杂地质条件下灌浆参数数据传输与监控难点及解决方案

王新林

塔城市水资源中心 新疆 塔城 834700

摘要: 水库大坝基础灌浆施工深埋于复杂地质环境中, 地层非均匀性与裂隙无序分布使作业呈现动态可调特征。本文针对坝基深层施工场景, 深入分析了电磁干扰、长线信号衰减、多类数据时序错位及密闭空间信道覆盖不足等传输难点, 同时探讨了非均质地层采集精度缺陷、动态管控衔接断裂、工况变化控制适配不足及多工序协同短板等监控困局。在传输与控制两个维度提出了抗干扰优化、信号增益调整、高灵敏度分布式采集及多工序一体化联动等方案, 为复杂地质条件下灌浆施工数据全链路管理提供了有效技术路径。

关键词: 复杂地质条件; 灌浆施工; 数据传输; 过程监控; 协同控制

引言: 水库大坝基础灌浆施工长期面对复杂地质环境带来的技术挑战, 地层构造非均匀性与裂隙分布无规律性使灌浆作业始终处于动态变化状态。施工过程高度依赖实时工况数据进行精细化管控, 但坝基深层电磁干扰强烈、传输链路损耗显著、多源数据时序易错位, 数据传输稳定性难以保障。同时, 非均质地层导致参数采集精度不足, 地质工况持续演变使固定管控模式适配性下降, 多工序独立运行加剧了协同控制难度, 梳理核心难点并提出解决路径对提升施工质量管控水平意义重大。

1 大坝基础复杂地质灌浆施工与数据传输控制体系

1.1 大坝基础复杂地质灌浆施工工艺特性

大坝基础埋藏于深层地下环境, 地质构造存在显著的非均匀性与复杂性, 岩土体密实程度存在明显空间差异, 裂隙发育形态杂乱且分布无固定规律^[1]。灌浆作业依托原生地层结构开展, 施工推进过程需要适配多样的地层结构状态, 适配不同裂隙开度与岩土性状对应的作业模式。地下隐蔽施工环境无法直观观测浆液扩散与地层填充状态, 作业开展过程需要依托实时工况数据调整施工状态。地层结构的多层交错分布形式, 让灌浆作业呈现分层分区的施工特征, 不同作业区域的岩土渗透能力存在较大差异。施工工况会随地层改造进程持续变动, 作业运行状态具备较强的动态可调属性。

1.2 大坝基础灌浆施工数据传输与控制组成模块

大坝基础灌浆施工的数据传输与控制体系依托多类功能单元搭建完整运行框架, 各单元各司其职且形成紧密衔接的运行链路。现场采集单元负责捕捉灌浆作业全过程的工况信息, 收录压力流量施工时长等关键运行参数。数据转运单元搭建地下作业区域与地面操控终端的

信息通道, 承接各类原始数据的输送流转工作。数据处理单元对采集的原始信息进行筛选梳理与规整处理, 清除无效干扰信息, 提纯有效工况数据。工况调控单元依托处理后的精准数据, 完成灌浆设备运行参数的动态调整。状态巡检单元持续监测各功能单元的运行状态, 保障整体体系稳定运行, 规避运行异常引发的施工偏差。

1.3 大坝基础灌浆全过程数据传输与闭环控制逻辑

大坝基础灌浆施工的整体运行依托完整的闭环控制逻辑实现精细化管控。现场布设的传感设备持续采集灌浆作业的实时工况数据, 各类有效数据通过专属传输链路输送至后台处理终端。后台系统对接收的工况数据开展智能分析与状态判别, 匹配施工现场的地质运行状态。系统生成对应的调控指令并输送至现场施工设备, 完成设备运行状态与施工参数的动态调整。调整后的全新施工工况会持续生成新的监测数据并完成信息回传, 形成持续循环的信息交互链路。

2 大坝基础复杂地质灌浆施工数据传输核心难点

2.1 坝基复杂地层电磁与环境干扰导致传输波动

坝基灌浆施工现场设备密集度高, 灌浆泵、搅拌机、变频控制柜、线缆等各类机电设备集中运行, 持续产生变频电磁辐射与电流杂波, 极易干扰现场数据传输信号。复杂坝基地质结构多样, 岩土、砂石、夹层土体导电性参差不齐, 会改变施工现场电磁场分布, 造成信号传输稳定性变差^[2]。同时, 户外及基坑施工环境温湿度波动大、扬尘水汽多、施工振动频繁, 这类常态化现场工况会持续扰动有线、无线传输链路。多重干扰因素叠加, 会造成灌浆压力、流量等核心参数传输数据跳动、断连、波动失真, 且现场干扰具备随机性、无规律性,

常规简易调试方式无法彻底消除,严重影响数据传输的稳定性与连续性。

2.2 坝基深层灌浆孔道长线传输信号衰减失真

水库坝基灌浆施工覆盖范围广,灌浆作业点位分散,现场监测设备、传感线路布线距离普遍较长,普遍存在长线缆传输损耗问题。施工现场布设的加长传输线缆长期贴合基坑土体、钢筋结构铺设,土体挤压、金属构件吸附会持续损耗传输信号能量。同时,现场施工振动、线缆弯折磨损、户外环境老化等常态化问题,会持续累积传输干扰,弱化信号强度。长距离传输过程中,灌浆实时参数信号易出现波形畸变、数值偏移、数据延迟等问题,无法精准反映实时灌浆作业状态。

2.3 坝基灌浆多类施工数据并行传输时序错位

坝基灌浆施工运行过程会同步产生压力流量流速等多种类型的监测数据,不同数据对应差异化的采集频率与传输链路。各类数据的传输链路信道容量与响应速度存在客观差异,数据抵达接收终端的时间节点出现偏移。信道资源占用状态会随施工进度产生动态变化,进一步拉大不同类型数据的传输时间差。时序对应关系出现偏差会打乱数据的匹配关联,影响施工工况分析的精准度,不利于施工状态的精准判别。

2.4 坝基密闭施工空间传输信道覆盖与兼容局限

坝基灌浆施工多处于基坑、沟槽、坝前封闭作业区域,周边土体、混凝土结构、密集钢筋网会大幅阻隔无线信号传播,造成施工现场局部区域信号遮挡、散射严重,存在信号弱、覆盖不均的问题。现场施工为多设备协同作业模式,不同批次、不同型号的灌浆监测设备、传感仪器通信协议、传输制式不统一,设备之间信道兼容性差。同时,施工现场临时布线多、信号信道杂乱,易出现信道抢占、信号串扰等问题,导致部分工况数据上传卡顿、中断、丢失,无法实现全域施工数据的稳定、完整传输,制约整体数据监控体系的运行效果。

3 大坝基础复杂地质灌浆施工过程控制核心难点

3.1 坝基非均质地层灌浆施工参数采集精准度缺陷

水库坝基地质条件复杂,岩土密实度、裂隙发育程度、孔隙分布极不均匀,软硬夹层交错分布,浆液渗透、扩散、填充规律无固定可循规律,工况变化随机性强。目前水库灌浆施工均采用地面常规监测、孔口定点采集的通用模式,无深层预埋监测条件,监测点位固定、覆盖范围有限,仅能采集孔口表层施工参数。对于坝基内部零散分布的微裂隙、空洞、软弱夹层的浆液填充变化,无法实现全面捕捉^[1]。复杂地质条件下灌浆参数瞬时波动、局部突变频发,常规地面采集设备响应速

度、监测精度有限,难以精准捕捉地层细微工况变化,导致监测数据存在偏差、局部缺失,无法完整、真实还原坝基整体灌浆施工状态。

3.2 坝基灌浆连续施工过程动态管控衔接难题

坝基灌浆施工属于不间断持续性作业,施工进度会持续改变地层内部结构形态。前期注浆作业会压实松散岩土体、闭合浅层裂隙,改变地层原有渗透条件,对后续施工的浆液运移规律产生持续影响。现有管控体系依托固化运行逻辑开展作业管控,适配性偏向静态施工场景,无法适配施工全程的动态工况转变。不同施工段落的管控阈值与调控标准独立运行,段落交替位置难以实现参数标准的平稳过渡,容易在施工衔接阶段产生管控空白,引发施工状态的不稳定波动。

3.3 坝基地质工况动态变化下施工控制适配性不足

灌浆作业持续推进的过程中,浆液填充、岩土挤压与地层应力重分布等行为会持续改造坝基原始地质结构。地层物理性状与渗透性能处于持续演变状态,施工初始设定的控制参数难以适配改造后的地层工况。现有施工控制体系的参数更新节奏较慢,工况调整动作存在明显滞后。固定化的调控机制无法匹配地质工况的动态演变节奏,调控力度与现场实际施工需求难以精准匹配。工况适配能力的缺失会让灌浆施工长期处于被动调控状态,大幅降低施工过程的精细化管控水平。

3.4 坝基灌浆多工序参数联动控制协同性短板

坝基完整灌浆作业包含浆液制备、孔内注浆、压力调节、流量调控等多个关键工序,各工序均设置独立的运行参数体系。各工序管控单元运行相对独立,系统之间的数据交互通道较为有限,信息流转效率偏低。单一工序运行参数出现变动后,其他关联工序无法主动完成参数自适应调整,工序运行状态难以相互适配。多工序调控体系缺乏统一的联动调度机制,各环节参数调控处于分散运行状态。工序间的协同适配缺陷会打乱灌浆施工的整体运行节奏,引发局部施工参数失衡,制约整体施工质量的稳定把控。

4 坝基灌浆数据传输与施工过程控制针对性解决方案

4.1 坝基复杂地质适配性数据传输抗干扰优化方案

针对坝基施工现场机电设备杂波干扰、户外基坑环境扰动引发的传输不稳定问题,完全依托现场常规施工条件,通过标准化硬件防护与传输算法优化提升数据稳定性。对现场灌浆泵、控制柜、传输线缆等设备做规范屏蔽处理,采用专用屏蔽线缆、绝缘防护护套包裹线路,有效隔绝设备运行产生的电磁辐射与电流杂波干扰。针对施工现场常态化的扬尘、高湿、施工振动等工

况,升级监测设备外部防护结构,提升设备防水、防尘、抗振动性能,适配水库坝基露天基坑施工环境^[4]。同时优化数字信号调制方式,增强信号自身抗扰动能力,搭建分层分级的信号过滤机制,智能甄别并剔除传输链路中的杂波、乱码等无效干扰数据,精准保留灌浆压力、流量等核心有效工况数据,无需深层设备布设,即可全方位保障现场灌浆数据传输的持续稳定。

4.2 坝基灌浆长线缆传输与信道局限优化方案

针对坝基灌浆作业点位分散导致的长线缆传输损耗、基坑封闭区域信道覆盖差、设备兼容紊乱等常态化问题,采用水利工程通用落地技术优化传输质量。结合坝基施工分区布局,科学规划传输线缆铺设路径,规避钢筋密集区、高阻抗岩土区域,精简超长布线段落,从源头降低信号传输损耗。针对不可规避的长距离布线,加装常规民用工程信号中继补偿设备,有效抵消线缆传输产生的信号衰减,杜绝数据波形畸变、数值偏移与延迟失真问题。同时优化地面信号收发设备布设点位,补齐坝基沟槽、基坑等封闭区域的信号覆盖盲区,统一全场监测设备通信传输协议,破除不同型号设备的信道兼容壁垒,实现全域灌浆工况数据实时互通、稳定上传,大幅提升现场数据传输整体质量。

4.3 坝基灌浆高精度参数采集与动态控制方案

针对水库无深层监测布设条件、非均质地层工况复杂、常规孔口采集精度不足的痛点,基于地面常规监测体系开展精细化升级优化。替换高灵敏度标准化孔口监测设备,有效提升对灌浆压力、瞬时流量、注浆速率等参数细微波动的捕捉能力,适配坝基岩土不均、裂隙杂乱的复杂地质特性。优化地面监测点位布局,采用多点位、分区分布式监测模式,扩大坝基施工全域监测覆盖范围,通过多点位数据交叉校核,弥补单一孔口监测覆盖面窄、数据片面的缺陷。建立适配地质动态变化的参数更新机制,缩短数据采集与系统刷新间隔,依托实时地面监测数据动态调校施工参数,精准匹配注浆过程中地层渗透性能、裂隙状态的动态变化,在不增设深层监测设备的前提下,实现灌浆施工全过程的精细化动态管控。

4.4 坝基灌浆多工序数据联动与协同控制方案

针对坝基灌浆多工序独立运行产生的协同性不足问题,可通过搭建一体化管控架构实现各工序参数的统筹调控。可打通浆液制备孔道注浆压力调节流量管控等各工序的数据交互通道,实现工序运行数据的实时互通流转。可设置统一的参数联动调控规则,依托核心施工参数的变动状态,带动关联工序参数完成自适应调整,消除各工序独立运行产生的调控偏差。可搭建全域工序调度平台,整合各环节运行数据,对灌浆施工全流程的运行状态进行统筹调控,平衡各工序的运行节奏。可优化工序联动响应机制,缩短参数交互与调控指令传递的耗时,提升多工序协同运行的匹配程度。一体化的协同管控模式能够消除工序运行的孤立性,解决多参数调控失衡的问题,持续优化坝基灌浆施工整体运行状态。

结束语

坝基灌浆施工的数据传输与过程监控,是保障复杂地质条件下施工质量的关键环节。通过实施抗干扰优化与信号增益措施,可有效提升传输链路的稳定性与可靠性;采用高灵敏度分布式采集方案,能够弥补非均质地层参数捕捉的精度缺陷;搭建多工序一体化联动控制架构,则能消除工序独立运行产生的协同短板。这些技术路径的落地应用,将推动灌浆施工从被动应对向主动调控转变,实现施工全过程的精细化管控。持续完善数据全链路管理能力,对于筑牢大坝基础安全防线、提升水利工程整体建设质量具有重要的支撑作用。

参考文献

- [1]李雨星.小型水库除险加固中帷幕灌浆对坝基防渗性能的提升作用[J].全面腐蚀控制,2026,40(4):407-409.
- [2]沈林平.帷幕灌浆防渗技术在水库除险加固工程中的应用研究[J].科技资讯,2026,24(1):198-200.
- [3]胡大彪,张涛,杨刚,等.某水库渗漏勘察及补强灌浆处理效果评价[J].水利技术监督,2026(6):315-319.
- [4]李正军.水库灌浆施工技术及其质量控制[J].科技创新,2026(12):177-180.