

极端气候条件下水利水电工程施工组织优化研究

王 飞

新疆兵团勘测设计院集团股份有限公司 新疆 石河子 832000

摘要: 全球气候变化背景下, 极端气候事件(如特大暴雨、持续高温、异常低温、强风等)的频率与强度显著增加, 对水利水电工程这一国家关键基础设施的建设构成了严峻挑战。传统的施工组织模式在应对突发性、高强度、长周期的极端气候干扰时, 往往表现出适应性不足、响应滞后、损失巨大等问题。本文聚焦于极端气候条件对水利水电工程施工全链条的影响机制, 系统分析了其在人员安全、设备运行、材料性能、施工工艺及进度控制等方面的具体表现。在此基础上, 构建了一个以“风险预控-动态响应-韧性提升”为核心的施工组织优化框架, 并深入探讨了气象大数据驱动的智能预警、基于数字孪生的施工仿真推演、模块化与装配式施工技术应用、弹性资源调度策略以及韧性供应链构建等关键技术路径。研究表明, 将气候韧性理念深度融入施工组织全过程, 是保障极端气候下水利水电工程安全、优质、高效建设的关键所在, 对推动行业高质量发展具有重要的理论价值与实践意义。

关键词: 极端气候; 水利水电工程; 施工组织; 优化; 气候韧性; 数字孪生

引言

水利水电工程关乎国家水、能源与生态安全, 作用不可替代。但其规模大、技术复杂、建设周期长, 多位于地形地质复杂的偏远或高海拔地区, 面临严苛自然环境考验。近年来, 全球气候变暖, 极端天气气候事件频发, 使施工环境不确定性大增。传统施工组织设计基于历史数据和常规经验, 对极端气候考虑缺乏系统性与前瞻性, 遇极端气候易引发连锁反应, 造成经济损失与安全风险, 2020年长江流域特大洪水、2022年川渝极端高温干旱等事件便是例证, 凸显现有模式脆弱性。因此, 科学应对极端气候挑战, 优化施工组织管理模式, 提升工程项目气候韧性, 是水利水电工程建设领域亟待解决的核心课题。本研究旨在打破传统思维, 探索极端气候下施工组织优化理论与方法, 为重大基础设施安全建设提供技术支撑。

1 极端气候对水利水电工程施工的影响机理分析

极端气候并非单一事件, 而是一个包含多种气象要素异常组合的复杂系统。不同类型的极端气候对施工活动的影响路径各异, 需进行精细化剖析。

1.1 极端降水(暴雨、暴雪)

持续强降雨可导致施工现场大面积积水, 形成内涝, 淹没基坑、厂房等低洼作业区, 迫使土方开挖、混凝土浇筑等湿作业全面停工。暴雪则会覆盖施工道路和作业面, 增加清理成本, 并带来严重的交通阻断。极端降水是诱发山洪、滑坡、泥石流等地质灾害的主要诱因^[1]。对于依山傍水的水利水电工程, 边坡失稳、导流洞堵塞、围堰漫顶乃至溃决的风险陡增, 直接威胁工程主体和人

员生命安全。高湿度环境会延缓混凝土的凝结硬化过程, 影响其早期强度发展; 同时, 雨水冲刷未凝固的混凝土表面, 易造成麻面、露筋等质量缺陷。

1.2 极端温度(高温、低温)

持续高温($>35^{\circ}\text{C}$)环境下, 混凝土水化反应加速, 水分蒸发过快, 极易产生塑性收缩裂缝, 严重影响结构耐久性。同时, 高温作业环境对施工人员构成中暑、热射病等健康威胁, 降低劳动效率, 甚至引发安全事故。沥青等材料在高温下易软化, 影响其使用性能。在寒冷地区或冬季, 低温($<5^{\circ}\text{C}$, 特别是 $<-5^{\circ}\text{C}$)会显著减缓甚至停止水泥水化反应, 导致混凝土强度无法正常增长。若新拌混凝土中的自由水结冰, 体积膨胀9%, 会产生巨大的冻胀应力, 破坏混凝土内部结构, 造成不可逆的损伤。此外, 低温还会使钢材脆性增大, 焊接难度增加, 液压设备油液粘度升高, 机械效率下降。

1.3 强风与沙尘暴

大风(>6 级)天气对高空作业(如大坝浇筑、压力管道安装、塔吊作业)构成致命威胁, 极易引发物体打击、高处坠落等事故。强风还会吹散未凝固的混凝土, 影响浇筑质量, 并可能导致临时设施(如脚手架、工棚)倾覆。在西北干旱半干旱地区, 沙尘暴频发。高浓度的粉尘会侵入精密施工设备(如数控机床、测量仪器)内部, 加速磨损, 导致故障。同时, 能见度急剧降低, 严重影响交通安全和户外作业的精准度。

这些影响相互交织、叠加放大, 使得施工组织管理面临前所未有的复杂局面。因此, 必须从被动救灾转向主动防灾, 建立一套能够有效识别、评估、预警并响应

极端气候风险的施工组织新范式。

2 极端气候下水利水电工程施工组织优化框架构建

针对上述挑战,本文提出一个三层递进式的施工组织优化框架,即“风险预控-动态响应-韧性提升”。

2.1 风险预控层:从源头规避与减轻风险

该层是整个框架的基础,核心在于利用先进的信息技术,实现对极端气候风险的超前感知和科学评估。(1)精细化气候风险评估:摒弃粗放的历史平均值,采用高分辨率区域气候模式(RCM)对未来项目周期内的极端气候情景进行模拟预测,结合工程具体地理位置、微地形特征,绘制详细的“气候风险地图”,明确不同施工阶段、不同作业区域面临的主导风险类型及其概率。(2)智能预警与决策支持:集成气象卫星、地面雷达、物联网传感器等多源数据,构建面向工程现场的短临(0-6小时)和短期(1-7天)极端气候智能预警平台。预警信息应与BIM(建筑信息模型)深度融合,直观展示受影响的构件、工序和资源,为管理者提供可视化、量化的决策依据。

2.2 动态响应层:实现施工过程的柔性调整

当预警发出或极端气候事件发生时,该层确保施工系统能够快速、有序地做出调整,最大限度减少损失。(1)基于数字孪生的施工仿真推演:构建与物理工地完全映射的数字孪生体。在收到预警后,可在虚拟环境中快速模拟多种应急方案(如调整工序、转移设备、加固边坡)的效果,选择最优解指导现场行动,实现“先模拟,后执行”^[2]。(2)弹性资源调度与作业面重组:建立动态的劳动力、机械设备、材料库存数据库。根据气候影响范围和程度,智能算法可实时重新分配资源,将受影响区域的资源调配至安全区域,或将非关键路径上的作业提前,确保整体工期目标的可控性。例如,在预报有暴雨前,优先完成关键部位的混凝土浇筑并做好覆盖保温。

2.3 韧性提升层:增强系统的长期适应能力

该层着眼于长远,通过技术创新和管理变革,从根本上提升工程系统抵抗和从极端气候冲击中恢复的能力。(1)推广气候适应性施工技术:大力研发和应用不受或少受气候制约的施工工艺。例如,在低温环境下,采用综合蓄热法、电热法或添加高效防冻剂来保障混凝土冬季施工质量;在高温地区,推广夜间施工、喷雾降温、使用缓凝型外加剂等措施。(2)构建韧性供应链:与材料供应商、物流服务商建立战略联盟,建立多元化的供应渠道和应急储备机制。对于关键材料(如特种水泥、外加剂),在项目附近设立区域性应急仓库,确保在交通中断等极

端情况下仍能维持基本供应。

3 关键技术路径与实施策略

为有效落实“风险预控-动态响应-韧性提升”三位一体的施工组织优化框架,必须依托一系列先进且可落地的关键技术路径。这些技术不仅是理论构想的支撑,更是连接顶层设计与现场实践的桥梁。

3.1 气象大数据与人工智能驱动的智能预警系统

传统气象服务多聚焦宏观区域,难以契合大型工程对局地、精细且高时效性气象信息的需求,构建面向水利水电工程的智能预警系统迫在眉睫,需实现多层次跃升。数据融合层面,系统要打破信息孤岛,集成国家气象中心数值预报产品、工地及周边地面自动气象站实时数据、S波段天气雷达回波、风云系列气象卫星遥感影像,以及关键施工部位微型气象传感器网络数据,精准刻画工程微气候场时空演变特征。模型算法层面,摒弃单一模型,采用“物理机制+数据驱动”混合建模范式,用CNN处理图像识别强对流云团趋势,用LSTM等时序模型预测极端事件,再耦合工程知识图谱,将结果转化为具体“工程影响语句”。应用服务层面,预警信息通过多渠道精准推送责任人,附带标准化应急处置流程卡,将模糊气象信息转变为精确决策依据,为施工决策提供科学、量化、可执行支撑。

3.2 基于BIM+GIS+IoT的数字孪生平台

数字孪生是实现施工过程动态响应的核心载体。一个成熟的工程数字孪生平台,是BIM(建筑信息模型)、GIS(地理信息系统)和IoT(物联网)三大技术深度融合的产物。BIM模型作为工程实体的数字化骨架,承载了所有构件的几何、材料、工艺等静态信息;GIS则提供了工程所处宏观地理环境(地形、水文、地质、生态)的背景底图;而遍布工地的IoT传感器(应力计、位移计、温湿度计、视频监控、人员定位卡等)则如同神经末梢,源源不断地将物理世界的实时状态反馈给虚拟模型。在极端气候应对中,该平台展现出强大的仿真推演与辅助决策能力。当智能预警系统发出警报后,管理者可在数字孪生平台上进行“沙盘推演”^[3]。例如,模拟一场特大暴雨对施工现场排水系统的影响:通过在虚拟环境中注入设定的降雨量,平台可以动态计算出积水范围、淹没深度和汇流路径,直观暴露出排水管网的瓶颈所在。基于此,可以快速比选多种预案——是增加临时水泵,还是开挖新的导流沟?哪种方案成本更低、效果更好?推演结果一目了然。事件过后,平台还能自动比对灾前灾后的IoT监测数据,精准评估灾害造成的实际损失(如边坡位移量、设备受损情况),并自动生成修复工程量清单和

资源需求计划,极大地提升了应急管理的科学性和效率。

3.3 模块化与装配式施工技术的应用

从根本上减少现场露天作业,是规避极端气候干扰最有效的长期策略。模块化与装配式施工技术通过“工厂造零件,现场搭积木”的模式,将大量高精度、高质量、高效率的作业环节前置到环境可控的工厂内完成。对于水利水电工程,其应用场景十分广阔。例如,水电站的副厂房、开关站等附属建筑可采用全钢结构或预制混凝土框架体系;压力钢管、闸门及其启闭机等金属结构可在专业制造厂内完成整体或分段预组装;甚至一些复杂的水工构筑物,如鱼道、消能工等,也可探索采用高性能混凝土预制单元进行现场拼装。推广此项技术的关键在于标准化设计与精益化物流。设计阶段需遵循模数协调原则,最大限度地统一构件规格,提高通用性和互换性。同时,必须建立与之匹配的智慧物流体系,利用北斗/GPS定位和RFID技术,对每一个预制构件从出厂、运输到现场吊装的全过程进行追踪管理,确保“构件未到,信息先行”,实现现场装配的无缝衔接。尽管初期投入较高,但其带来的工期缩短、质量提升、安全风险降低以及对恶劣气候的免疫能力,使其综合效益远超传统现浇模式。

3.4 弹性资源调度与“气候窗口期”管理

再先进的技术也需要高效的组织来保障。在动态多变的气候环境下,僵化的资源计划必然失效。因此,必须建立一套高度弹性的资源调度机制。核心是构建一个集成了气候预测引擎、4D/5DBIM进度模型(时间+成本)和实时资源状态数据库(人力、机械、材料库存)的中央智能调度中心。该中心的核心功能是智能捕捉和利用短暂的“气候窗口期”。系统能够自动分析未来数日的精细化天气预报,识别出适合进行特定高敏感度作业(如大体积混凝土浇筑、大型构件吊装)的时间段。一旦识别出窗口期,系统会立即启动优化算法,在满足工艺逻

辑和资源约束的前提下,自动调整后续工序的优先级和资源配置,生成一份详细的“窗口期作战计划”,并推送给各施工班组^[4]。例如,系统可能决定将原定于下周进行的非关键路径上的钢筋绑扎工作提前,而将所有可用的混凝土搅拌车和泵送设备集中用于在接下来48小时的晴好天气里,突击完成大坝关键仓面的浇筑任务。这种基于数据的、主动式的调度,取代了传统依赖项目经理个人经验的被动调整,显著提升了资源利用效率和工期保障能力。

4 结语

全球气候变化下,极端气候成水利水电工程建设“新常态”。本文系统分析其影响机理,创新提出“风险预控-动态响应-韧性提升”三位一体施工组织优化框架,结合关键技术路径,论证其在保障工程安全、质量与进度上的巨大潜力。未来,水利水电工程施工组织管理需从“经验驱动”转向“数据驱动”、“静态计划”转向“动态仿真”、“被动应对”转向“主动韧性”,这既是技术革新,也是管理理念升级。将气候韧性纳入工程全生命周期管理,是行业可持续高质量发展的必由之路。展望未来,随着新一代信息技术深度融合,施工组织优化将更智能自主,如利用强化学习优化调度决策、区块链构建韧性供应链,筑牢国家水网和能源网安全基石,应对未来气候挑战。

参考文献

- [1]赵玮璠.水利水电工程施工组织设计编制探讨[J].工程与建设,2024,38(01):165-167.
- [2]王海勇.水利水电工程施工中的安全管理研究——评《水利水电工程施工组织与管理》[J].人民黄河,2021,43(12):169.
- [3]吴海龙.数字化技术在水利工程施工组织设计可视化与优化中的应用[J].科学技术创新,2026,(03):169-172.
- [4]徐万昌,王峰.施工组织设计在水利工程施工管理中的应用[J].中国房地产业,2025,(29):26-29.