

水利工程施工安全风险识别与动态预警机制研究

梁光成

广东才睿建筑工程有限公司 广东湛江 524300

摘要:在我国基础设施建设持续推进的背景下,水利工程因规模大、施工环境复杂、工序交叉密集及外部环境不确定性强等特点,成为安全生产事故的高发领域。随着项目建设全面迈向高标准、高质量发展阶段,传统基于经验判断的安全管理模式已难以适应多源风险叠加、工序耦合增强以及极端气候事件增多等新形势。施工风险的动态演化特征要求构建一套贯穿施工全过程、具备实时感知能力、预测预警能力和主动干预能力的动态风险管理体系。研究表明,基于动态预控的安全管理模式能够有效提升风险识别的准确性、预测的实时性及管控的前瞻性,为大型水利工程施工安全治理提供理论参考与技术支撑。

关键词:水利工程; 施工安全; 风险识别; 动态预控

引言

水利工程是保障国家水安全、防洪安全、生态安全与能源安全的重要基础设施,其建设周期长、作业空间分散、结构形式复杂,施工阶段往往处于极端气候、水文条件叠加、地质扰动显著的高风险环境中。近年来,随着工程规模不断扩大、施工装备高功率化、地下与深基坑施工增多,以及信息化程度相对滞后等因素的叠加,施工现场面临的风险呈现出系统性、链式化和突发性强等特征。特别是在导流洞开挖、高边坡防护、深基坑支护、闸墩混凝土浇筑、大型设备吊装等关键工序中,任何一个环节出现失误都可能触发连锁性事故。因此,研究施工阶段风险识别、量化评估与动态预控,对降低事故发生概率、提升工程本质安全水平具有关键意义。

一、水利工程施工安全风险的形成机理与演化特征

(一)水利工程施工安全风险的形成机理

水利工程施工安全风险具有显著的系统工程特征,其形成机理由自然条件、工程结构特征、施工组织方式、设备状态与人员行为等多重因素耦合决定。首先,自然条件是风险形成的基础性驱动因素,包括水文条件突变、暴雨洪水、地质不均匀性、软弱结构面发育以及高温、高湿等环境因素,这些因素常导致边坡稳定性降低、

渗流压力异常增大、基坑结构失稳等危险情形^[1]。其次,水利工程结构规模巨大,涉及坝体、溢洪道、压力管道、引水隧洞、船闸及附属建筑等多种结构形式,其结构体系复杂、施工工序多样,导致不同结构间的风险相互影响、相互叠加。再次,与机械化、智能化程度较高的土木工程相比,水利施工仍存在大量依赖人工布设、现场判断与手工操作的环节,使得人员行为成为重要的风险触发因素。最后,施工组织方式的复杂性也影响风险形成,尤其在多承包商并行施工条件下,信息不对称、调度不协调和管理断点容易诱发安全隐患。

从系统动力学角度看,水利工程施工风险呈现出由外部环境驱动、内部结构放大和行为因素触发的综合演化机制。在施工过程中,这些因素通过非线性耦合影响工程安全状态,使风险表现为阶段性波动、链式传播与放大效应。因此,准确分析风险形成机理是构建动态预控模型的前提。

(二)施工安全风险的演化规律与链式传播特征

水利工程施工风险具有显著的时序性与动态性,其演化过程包括风险孕育、风险积累、风险暴露与事故触发四个阶段^[2]。风险孕育阶段主要表现为隐蔽性强,如微小位移、渗压异常、设备轻微振动等,此时风险尚未显现但已具备潜在危害;风险积累阶段则表现为监测指标逐渐偏离正常范围,工程结构状态劣化加速;风险暴露阶段意味着危险源已具备失稳条件,稍有干扰即可导致事故;事故触发阶段则表现为结构破坏、基坑失稳、坍塌、大体积混凝土温控失效等。由于水利工程结构庞

作者简介:梁光成(1991.12-),男,汉族,广东省湛江市人,大专学历,研究方向:水利水电。

大、介质复杂、环境多变，其风险演化具有突发性强、扩散速度快、链式传递性明显等特征。当前实践表明，链式风险传播是水利工程施工事故发生的重要形式。其形成路径通常包括地质构造链、结构稳定链、施工交叉链和设备故障链，任何链条中某一节点的失效都可能引发连续性事故。基于这种链式传播特征，构建可实时监测各链条状态并预测其传递趋势的动态预控体系，对于提高工程安全治理能力至关重要。

二、水利工程施工安全风险识别方法体系构建

（一）基于工程特征的系统性风险识别框架

在水利工程施工期间，风险识别需要立足工程结构特征、地质水文条件以及施工组织方式，通过多维度信息融合实现风险源的精准定位。首先，应基于施工设计文件、地质勘察报告、结构计算书等资料，建立施工阶段风险源清单，涵盖深基坑稳定、爆破震动、围堰安全、坝基处理、模板体系、吊装作业、临时用电、灌浆施工等典型风险点。其次，应通过现场踏勘、地质超前预报、物探成像等技术补充识别潜在风险，如软弱夹层、断层破碎带、水文突变区域等^[1]。再者，应综合分析施工工艺与进度安排，识别因施工交叉、高强度连续作业和季节性施工引发的风险。构建系统化识别框架的关键在于形成“工程结构—环境条件—施工活动—设备状态—人员行为”的五维风险关联模型，通过对风险源之间的耦合关系进行定量描述，实现从单一因素识别向整体关联性识别转变。

（二）智能化风险识别方法及其工程应用

随着智能感知技术的发展，基于物联网、智能传感器、无人机遥测、激光扫描与机器视觉的自动化风险识别方法逐渐应用于大型水利工程。通过布设振动、位移、渗压、温度、压力和应变等多类型传感器，可构建高频监测网络，实现结构变化的实时感知。无人机航测能够快速识别高边坡松动、块体位移及堆渣场稳定性隐患；激光点云技术可用于坝体变形、隧洞围岩收敛及基坑边坡变化的精细化分析；机器视觉技术可智能识别人员违规行为、设备运行状态及现场危险动作。通过建立数据融合算法与特征提取模型，可实现多源数据的深度融合，从而提高风险识别准确性。如，基于时序分析的异常检测模型适用于渗压与变形数据；基于卷积神经网络（CNN）的视觉识别模型适用于施工现场行为识别；基于聚类分析的无监督学习模型可自动标识异常状态分布模式。实践表明，智能化识别技术的应用能显著提升风险

识别效率，为动态预控提供可靠数据支撑^[4-5]。

三、水利工程施工安全风险的动态评估与预测模型

（一）动态风险评估体系的构建逻辑与方法框架

水利工程施工安全风险的演化本质上是一种受多因素驱动的动态过程，其变化路径往往不呈现线性或单一方向，而是在地质扰动、结构应力重新分布、外界水文气候波动以及施工强度变化的共同作用下，不断呈现阶段性积累与突发性释放并存的复杂状态。正因如此，动态风险评估体系的构建必须打破传统依赖人工检查或阶段性监测的静态方法，而转向基于连续数据更新、实时状态感知与持续风险量化的动态判断机制。在实际工程中，只有当结构变形速率、渗流压力、温度梯度、施工扰动强度以及设备运行参数等关键指标能够被持续监测并纳入整体风险表达体系时，风险状态的真实变化才能被准确捕捉，评估体系也才能具有预测性和指导性，而非事后确认性质。

在这样的背景下，动态评估体系的核心任务并非简单收集数据，而是构建一种能够反映系统稳定性变化趋势的“风险时序表达框架”。在这个框架中，工程结构的响应指标被视为主导要素，它们直接体现地基或结构的安全储备是否被消耗；环境指标则作为外部驱动力影响整体边界条件，如降雨强度或水位变化对地下水动力的改变；施工行为指标体现人为扰动是否使系统趋于临界；设备运行指标反映风险触发因素是否正在累积；人员状态和管理执行信息则揭示了风险是否在操作层面获得充分抑制。所有这些信息通过时间维度不断叠加，使风险不再是静态量，而成为随时间波动的动态变量。

为了使这种动态变量具有可量化、可比较和可追踪的属性，风险评估体系需要引入数学表达，如通过构建基于权重的风险指数，使多类指标在同一尺度上进行融合。与传统单一加权方法不同，动态评估强调指标之间具有相互强化或削弱的耦合效应，因此更倾向引入模糊推理、贝叶斯概率更新或云模型等方法，使风险状态能够在数据不断更新的同时自动调整其结果。当监测数据出现异常连锁变化时，如变形速率突然升高并伴随渗压快速增加，风险指数将随之产生非线性响应，从而在数值上提前反映系统趋于失稳的趋势。通过这种方式，动态评估体系能够在施工过程中形成一套持续运行的“安全温度计”，用以刻画风险的整体体征，实现对潜在失稳的早期识别。

(二) 基于预测模型的风险演化趋势分析与前瞻性预警机制

在风险评估体系提供实时状态刻画之后,预测模型的任务在于利用这些状态变化的时间序列特征,推断工程体系未来可能出现的风险走向。预测的意义不仅在于判断某一指标是否将超限,而在于揭示风险是否进入快速积累阶段、是否存在临界失稳点,以及系统是否即将发生不可逆的结构破坏。在施工环境复杂、多源扰动频繁的水利工程中,仅依赖经验判断难以洞察风险的前兆,因此构建科学的预测模型成为动态预控体系不可或缺的一环。预测模型要实现有效运行,必须充分利用监测数据的时间序列结构特点。如边坡位移在失稳前往往经历“缓慢变形—加速变形—突变失稳”三个阶段,孔隙水压力在基坑涌砂前会产生连续的小幅上升,混凝土温度裂缝在形成前会出现热应力累积的明显加快,而隧洞围岩在松动前往往表现为不规则的间断收敛行为。这些变化若用传统静态方法难以识别,但在机器学习模型中却可以通过变量时间滞后、行为模式识别或趋势外推等方法实现高精度捕捉。

在具体实现上,长短期记忆网络(LSTM)凭借对长时间依赖关系的敏感性,能够通过历史监测曲线识别潜在的加速趋势,从而在边坡或基坑接近失稳前提前给出预测;支持向量回归模型则适用于非线性程度较高但数据噪声较大的场景,如复杂地层中的渗压变化预测;集成学习模型(如随机森林或XGBoost)在多源数据融合方面表现突出,能够同时吸收结构、设备和施工数据,判断风险等级是否可能上升。若将这些模型与工程机理相结合,预测效果可进一步增强。如,在混凝土温控预测中加入热传导方程约束,可避免模型产生与物理规律冲突的结果;在隧洞围岩预测中嵌入围岩力学模型,可使算法对异常变形的判断更加可靠。在预测结果基础上构建的预警机制,是整个动态预控体系的前瞻性核心。预警机制需要将预测曲线与“临界变形速率”“允许渗压上升幅度”“温差临界阈值”等临界条件建立关联,使系统

在预测结果触及这些边界条件前发出提示。预警并非单一数值触发,而是结合趋势斜率、加速强度和指标耦合程度形成综合判断。如:渗压轻微升高若伴随施工扰动减少,则预警强度应相对较低;若渗压上升与变形加速同时出现,则应提高预警等级;若伴随降雨或水位变化,则风险可能呈指数式增长,应提前采取干预措施。通过这一机制,预测模型不仅能提供未来风险趋势,还能管理者提供干预时间窗口,使施工组织得以优化调整,确保风险在可控范围内被消解。

结论

水利工程施工安全风险具有形成机理复杂、演化规律多变、链式传播显著等特征,仅依赖传统静态管理模式已经无法适应现代大型工程的安全需求。本文通过构建系统性的风险识别方法、数据驱动的动态风险评估模型及智能化的主动预控体系,实现了从风险识别到预测预警再到主动干预的全过程管理。研究表明,基于动态预控的风险管理模式能够有效提升风险识别精度、预测准确性及预控及时性,为保障大型水利工程施工安全提供了可靠技术路径。未来,应进一步加强数字孪生模型的精细化构建、智能算法的自适应提升以及多方协同机制的完善,以推进水利工程施工安全管理向更高水平迈进。

参考文献

- [1] 纪雪梅.水利工程施工安全管理[J].南北桥,2022(19):52-54.
- [2] 郑超,姜景科.水利工程施工安全管理研究[J].河南水利与南水北调,2025,54(8):43-44.
- [3] 顾明.浅谈水利工程施工安全管理[J].现代职业安全,2024(1):52-53.
- [4] 田陌.水利工程施工安全浅析[J].模型世界,2023(20):117-120.
- [5] 郑彤,王栋.水利工程施工安全管理分析[J].模型世界,2023(35):177-179.