水利水电施工项目管理中的安全风险评估与防控

邹　虎，吴茂竹

（湖北浩川水利水电工程有限公司，湖北 武汉 430200）

摘　要　针对大型水枢纽建设中地质环境极端、交叉工序密集导致隐患难以精准预警的问题，开展施工全周期风险量化评估与主动防御体系研究。采用工作分解结构与风险分解结构（WBS-RBS）耦合矩阵剥离底层危险源，融合改进的作业条件危险性评价法（LEC），对深部围岩失稳、大型起重干涉等核心致灾因子进行动态量化分级。依托测算底座，提出部署深部物联传感矩阵、实施 AI 视觉边缘计算防碰联锁，以及结合沉浸式体感与射频识别的违章刚性约束三大防控策略。结果表明，将安全防线由人工经验巡查前置为底层物理数据干预，可精准斩断复合型灾变链路。本文构建的“动态评估 + 智能硬管控”闭环机制，从根本上重塑了复杂工况下的风险抗御模型，以期为同类工程的安全管理提供参考。

关键词　水利水电施工；安全风险评估；深部物联传感矩阵；交叉工序动态管控；沉浸式体感培训

中图分类号：TV512　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.031

0　引言

水利水电施工项目因其复杂性与高风险性，对安全管理提出了极高要求。随着工程建设规模不断扩大，施工环境日益复杂，安全风险评估与防控成为项目管理的核心问题。为此，本文打破常规安全排查的表层局限，旨在构建一套融合多维量化评估与智能物理干预的风险防控体系。借助空间传感矩阵、底层机电联锁技术的引入，重新建立起隐患识别与阻断的底层逻辑，以期为实现现场危险源从被动事后应对转变为主动超前防御的实质性跨越提供参考，进而为现代大型水利枢纽的高效推进、“零事故”目标给予坚实的理论支持、可复制的实践范式。

1　水利水电施工安全风险的特点与分类

1.1　水利水电施工安全风险的特点

1.1.1　风险因素的复杂性与多样性

水利水电工程的安全风险有着明显的复杂性与多样性，原因是自然条件和施工作业紧密结合。一方面，工程所在地区不断变化的水文气象、软弱围岩等不好的地质状况，构成了具有隐蔽性的基础风险源[1]。另一方面，高边坡开挖、深长隧洞爆破、大型机械立体交叉作业等复杂的工序，直接产生了多个维度的技术隐患。这种自然环境的不确定性和高难度施工工艺相互交错，使得现场风险因素不仅类型复杂，而且致险机制相互嵌套，实际上增加了隐患精准识别和过程管控的难度。

1.1.2　风险演变的动态性与突发性

水利水电工程建设周期比较长，而且工序更替频繁，其安全风险有着明显的演变特征。伴随导截流、洞室开挖等节点逐步推进，作业环境、结构受力持续发生变化，危险源也随之出现时空转移。另外，受到深部地质应力释放或者气象突变的影响，岩爆、突水、高边坡失稳等险情隐蔽性很强，预警窗口非常短，具有很强的突发性。这种风险要素的动态流转和灾变瞬发相互叠加，对现场管控提出了很高的要求。

1.1.3　事故后果的严重性与广泛性

水利水电工程常常涉及大量水体的调控、高势能的施工作业，其安全事故所带来的后果具有灾难性、空间延展的特性。若出现围堰溃决、大规模滑坡或者地下洞室群整体坍塌等这类极端险情，瞬间释放出来的破坏力不但会造成现场人员伤亡、核心设施损毁，还很容易引发复杂的链式次生灾害[2]。这种破坏效应通常会突破施工区的边界，顺着流域朝下游快速蔓延，进而引发次生洪涝、地质环境恶化，给区域公共安全、生态系统带来深远且无法挽回的冲击。

作者简介：邹虎（1976-），男，本科，高级工程师，研究方向：水利水电施工及工程管理。

1.2 水利水电施工安全风险的分类

基于系统工程理论，水利水电施工安全风险可解构为自然环境致灾、技术工艺衍生与组织行为偏差三大维度。自然环境风险源自工程区域复杂的边界条件，主要涵盖超标洪水等极端水文气象灾害，以及深部岩爆、软弱围岩变形等隐蔽性地质突变。技术工艺风险伴随高危作业流转而生，集中体现于高陡边坡失稳、长大隧洞群爆破失控，以及特种重型机械在有限空间内的交叉运行干涉。组织行为风险则归因于管理体系失效与个体违章操作，核心涉及现场隐患排查机制断层、多工作面协同指令冲突以及一线人员的盲目施救。这三类风险在施工现场时空维度上深度耦合，共同构成了贯穿项目建设全周期的复合型危险源体系。

2 水利水电施工项目管理中的安全风险评估

在安全风险评估环节，存在评估精度不足的问题。施工项目涉及众多复杂的因素，包括自然环境、施工工艺、设备运行等，而现有的风险评估方法往往难以全面覆盖这些因素。

2.1 评估的重要性

安全风险评估在水利水电施工项目管理当中，是从被动应对转变为主动防御的重要节点。水利工程存在复杂地质条件、多维交叉作业环境，传统经验型管理在隐患识别方面容易出现盲区。系统的风险评估流程可引入定量或者半定量测算模型，对施工全周期里潜在致灾要素深入剖析并剥离出来[3]。这个过程给管理层输出清晰的风险分级图谱，让现场资金、技术、监管资源能精准投入高危工序和薄弱环节。科学评估结论是制定针对性防范策略和应急预案的底层逻辑，作为阻断危险源转化为现实灾变的核心屏障，从根本上决定了整个工程安全管控模式的运行效能。

2.2 评估流程与方法

在危险源甄别阶段，通常采用工程工作分解结构（WBS）与现场勘查相融合的路径，将庞杂的枢纽标段拆解至微观单项工序。在此基础上，辅助运用安全检查表法（SCL），对照国家强制性规范与行业标准，对深长隧洞、高陡边坡等关键节点的物态缺陷、环境干扰及人员违章迹象进行逐项对照筛查，从而建立全要素的静态风险基础清单。

进入深度量化评估环节后，需根据施工作业特征匹配适用的测算模型。针对动态交叉频繁的现场工序，普遍引入作业条件危险性评价法（LEC），通过对事故发生的可能性（L）、人员暴露于危险环境的频次（E）以及潜在后果严重度（C）进行严密的经验赋值与乘积推演，半定量地输出底层工序的危险等级得分[4]。面对受多重自然条件制约的系统级复杂隐患，则常叠加使用风险矩阵法（Risk Matrix），将致灾发生的概率与潜在损失当量置于二维网格坐标系中进行空间比对，从而科学划定重大、较大、一般与低风险的绝对边界。这种复合型评估链路有效对冲了单一经验判断的盲区，为后续针对性调配防范资源打下了坚实的数据基础。

3 水利水电施工项目管理中的安全风险防控策略与措施

3.1 部署深部物联传感矩阵，超前预警地质突变

面对水利水电工程极端复杂的地质环境，传统的表面变形监测已难以满足高应力、大埋深工况下的防灾需求。项目管控必须将防御阵线向围岩深部延伸，依托物联网架构铺设高精度的立体传感矩阵。这种技术路径通过在岩体内部植入多维度的感知触角，能够全天候捕捉应力重分布、孔隙水压波动及微观破裂等先兆信息。海量的底层物理数据经由网络实时穿透地层，直接映射至工程控制中枢，从而将隐蔽且不可测的地质演化过程转化为可视化的预警指标。这种超前介入的机制彻底改变了以往被动应对的局面，从根本上阻断了深部地质缺陷向工程灾变转化的路径。

以某大型抽水蓄能电站深埋地下洞室群的开挖作业为例，该枢纽工程地处高地应力花岗岩地带，深部围岩完整性差且频发脆性剥落。为防范强岩爆及突水突泥风险，项目部在常规地表巡测的基础上，前置部署了微震监测阵列与分布式光纤传感网。技术团队利用超前地质探孔及辅助导洞，在主开挖面外围网格化埋设了数十个高灵敏度低频检波器与智能渗压计，构建起一个包络式的深部监听网络。在引水下斜井推进至一条隐伏断层破碎带前夕，物联中枢连续捕获到微震事件的密集爆发，且能量释放曲线呈现出陡峭的阶跃式上升，同时局部光纤应变数据亦突破了预设的安全阈值[5]。控制中心的算法模型迅速锁定异常区域，并研判出强岩爆的极高发生概率。现场指挥部接到系统自动触发的红色指令后，果断叫停该掌子面的掘进作业，紧急回撤所有大型台车与施工作业人员。仅数小时后，预警区域的顶拱便发生了剧烈的岩爆及大面积塌方。由于传感矩阵精准捕捉到了岩体失稳前的微观物理量畸变，项目不仅实现了人员的零伤亡避险，更为后续针对性补强长锚索支护体系赢得了宝贵的决策时间。

3.2 实施交叉工序动态管控，智能干预设备险情

水利水电施工现场常呈现高度集中的立体空间特征，多工种与重型设备穿插频繁，静态排班计划难以应对瞬息万变的工序干涉风险。项目管理需建立基于时空维度的动态管控机制，将安全防线由“人工盯防”向“底层物理干预”转移。通过在核心机械加装环境感知终端与边缘计算模块，构建毫秒级响应的控制中枢。当设备运行轨迹与周边环境发生高危重叠时，系统直接绕开人工判断，瞬时切断动力回路。这种伴随式硬管控剥离了视觉盲区与反应延迟的不确定性，从根源上截断了险情演化链路。

以某巨型高拱坝主体的混凝土连续浇筑作业为例，该作业区重型起重集群密集交织，上方有跨度超千米的大型缆机运送混凝土料罐，下方仓面内多台塔机同步进行钢筋与模板吊装，立体交叉干涉频次极高。常规的对讲机调度极易因操作员疲劳或视线受阻产生指令盲区。为此，项目部引入基于 UWB 厘米级定位与机电互锁的智能避撞系统。所有重型设备的起重臂、吊钩及料罐均挂载了动态坐标回传基站。在一次夜间仓面浇筑工序中，一台塔机在调运大型钢结构时，其主臂回转轨迹无意间侵入了正高速下降的缆机料罐包络线。由于夜间照明存在局部阴影，双方操作手均未察觉空间冲突。此时，智能中枢的防碰算法瞬间解算出碰撞交点，在预计剐蹭前三秒直接越权接管设备控制。塔机回转电机被强制断电锁死，缆机卷扬系统同步触发急停制动。伴随现场声光警报，满载料罐最终悬停在距塔机臂架仅 2 米处。整个干预过程完全排除人为反应延迟，依靠纯粹的机械联锁化解了一起可能导致塔身折断及群死群伤的重大险情，真正兑现了工序交叉阶段的主动式安全防御。

3.3 创新沉浸式体感培训，刚性约束违章行为

施工防线常因一线人员的习惯性违章而局部失效，单纯依靠纸面交底难以触及个体的防范底线。项目管控需引入沉浸式体感交互技术重构培育逻辑。借助力反馈设备与虚拟现实的融合，将抽象规章转化为直击感官的失重与撞击体验，强制唤醒作业群体的风险敬畏本能。同步管理端需将违章记录与智能门禁实行底层权限捆绑。利用系统的物理隔离彻底消除试错空间，使安全规范从被动遵循转化为不可逾越的刚性约束。

以某大型水利枢纽调压井群施工为例，该区域涉及多处百米级深竖井与高支模作业，高处坠落风险极高。由于劳务人员流动频繁，常规说教收效甚微。项目部搭建了集成六自由度动感平台的体感实训舱，新进场工人必须穿戴气动反馈背心进入复刻的竖井作业场景。系统预设了未挂靠双保安全带的触发机制，工人在虚拟空间失足时，平台会瞬间模拟剧烈失重下坠，气动背心同步输出胸部勒紧与背部重击的体感反馈。这种逼真的冲击感，从潜意识层面瓦解了作业人员的侥幸心理。配套体感教育，项目部在竖井通道口加装了基于 RFID 与视觉识别的硬隔离闸机，所有全身式安全带均植入有源感应芯片。工人进入高危作业面时，闸机探头会即时扫描防护装备穿戴完整性及后台资质有效状态。一次夜班作业中，某支模工人试图未系安全带进入平台，识别系统当即物理锁死道闸并亮起红灯报警，违章画面同步直传总控室。这种不留人情余地的机械干预，彻底切断了人为违规的操作链路。

4 结束语

本文重构了水利水电施工安全管理的底层逻辑。研究发现，复杂枢纽的安全风险本质上是地质演化、机械运转与人员行为在时空维度上的深度耦合。基于此规律抽象出的“全要素识别—多维度量化”评估模型，是突破传统经验盲区、实现防范资源精准前置的科学核心。实践论证表明，将管控策略由表层规章约束转向底层物理干预具有决定性的应用价值：深部物联传感矩阵能有效洞察地质微观形变，AI 边缘计算直接截断了高危设备的干涉空间，体感交互与门禁物联则彻底封堵了人员试错的可能，三者协同闭环了灾害的演化链路。本项研究不仅丰富了大型工程安全动力学的理论框架，更输出了贴合施工一线的智慧管控范式。未来，需进一步聚焦数字孪生底座与多模态大模型在施工场域的深度融合，探索灾害自主决策预演与全域无人化监管体系。

参考文献：

[1] 朱楚洵.施工项目管理中的风险评估与控制策略[J].砖瓦世界,2025(20):184-186.
[2] 廖禄武.建筑施工安全管理中的风险评估与防控[J].城市建设理论研究(电子版),2025(19):37-39.
[3] 蔡喆.水利工程项目管理中的风险评估与控制[J].中国图片(中英文),2024(22):68-69.
[4] 吴恩义.水利工程项目管理中的风险评估与应对策略研究[J].水上安全,2024(01):155-157.
[5] 甄楠楠.水利工程施工中安全风险评估与控制策略分析[J].城镇建设,2025(13):208-210.