

# 复杂水文条件下围堰施工安全风险动态防控体系构建

伍德

身份证号: 440921198508040476

DOI:10.61369/WCEST.2025020011

**摘要:** 阐述复杂水文条件下围堰施工安全风险, 包括水文参数动态变化, 多源风险因子耦合放大。介绍三维风险监测矩阵构建、FTA - BN组合模型等防控手段, 还涉及多种技术方法如蒙特卡罗模拟、DBN模型等, 构建了全过程防控体系及提出闭环管理机制

**关键词:** 围堰施工; 水文条件; 安全风险防控

## Construction of Dynamic Prevention and Control System for Safety Risks of Cofferdam Construction under Complex Hydrological Conditions

Wu De

ID: 440921198508040476

**Abstract:** This paper discusses the safety risks associated with cofferdam construction under complex hydrological conditions, including the dynamic changes in hydrological parameters and the amplification of multi-source risk factors. It introduces methods for risk prevention and control, such as the construction of a three-dimensional risk monitoring matrix and the FTA-BN combined model. Additionally, it covers various technical approaches, including Monte Carlo simulation and DBN models, to establish a comprehensive prevention and control system and propose a closed-loop management mechanism

**Keywords:** cofferdam construction; hydrological conditions; safety risk prevention and control

### 引言

随着基础设施建设的推进, 围堰施工在复杂水文条件下的安全风险防控至关重要。2021年发布的《关于加强水利工程建设质量和安全管理的通知》强调了对工程质量和安全的严格要求。复杂水文条件下, 潮汐、径流、降水等水文要素动态变化, 多源风险因子相互耦合, 对围堰稳定性构成威胁。三维风险监测矩阵构建、基于FTA - BN组合模型的预警阈值确定等技术应运而生。本研究构建了全过程防控体系, 提出数字孪生管理机制, 符合政策导向, 为相关工程提供借鉴。

## 一、复杂水文条件下围堰工程特性分析

### (一) 水文参数动态变化特征

复杂水文条件下, 水文参数呈现出显著的动态变化特征。潮汐具有周期性涨落规律, 其水位变化、潮流速度及流向等在不同时间和地点存在差异, 这种变化会对围堰产生周期性的水平荷载和水位差影响<sup>[1]</sup>。径流受流域降水、地形地貌等多种因素制约, 其流量、流速和含沙量等参数处于动态变化中, 可能导致围堰基础受到冲刷或淤积。降水的时空分布不均匀, 不仅会引起水位的快速上升, 增加围堰的静水压力, 还可能改变土壤的含水量和渗透性, 影响围堰的稳定性。这些水文要素相互作用, 其动态变化共同构成了复杂的水文条件, 对围堰结构产生复杂的脉动荷载作用。

### (二) 多因素耦合风险作用机理

复杂水文条件下, 水动力作用、地质构造、施工荷载等多源

风险因子相互影响, 产生非线性耦合放大效应。水动力作用受水流速度、水位变化等影响, 可能导致围堰结构承受过大的侧向压力和冲刷力<sup>[2]</sup>。地质构造的不均匀性和不稳定性, 会改变围堰基础的受力状态, 增加地基失稳的风险。施工荷载包括机械设备、材料堆放等, 其分布和大小的变化在与水动力和地质因素相互作用时, 进一步加剧了围堰结构的受力复杂性。这些多源风险因子并非孤立存在, 而是相互耦合, 使得围堰所面临的风险远大于单个因素作用之和, 对围堰的稳定性和安全性构成严重威胁。

## 二、安全风险动态防控体系架构设计

### (一) 三维风险监测矩阵构建

在复杂水文条件下围堰施工安全风险动态防控体系中, 三维风险监测矩阵构建至关重要。需建立包含水力环境、结构响应、

施工行为的三维监测指标体系。对于水力环境，可监测水位、流速、流量等指标，以了解水流对围堰的冲击力<sup>[9]</sup>。结构响应方面，关注围堰的变形、应力、位移等，及时掌握结构的安全状态。施工行为监测包括施工设备的运行参数、施工人员的操作规范等。同时，要设计合理的传感器布设方案，确保能准确获取各项监测数据。传感器应根据监测指标的特点和围堰的实际情况进行布置，如在关键部位设置水位传感器、在结构受力点设置应力传感器等，从而实现对围堰施工安全风险的全面、实时监测。

## （二）风险分级预警机制构建

基于 FTA - BN 组合模型构建五级预警阈值确定方法与应急响应规程。FTA - BN 组合模型综合了故障树分析 (FTA) 和贝叶斯网络 (BN) 的优势<sup>[4]</sup>。通过 FTA 对围堰施工安全风险进行定性分析，确定导致风险发生的基本事件及其逻辑关系。然后将 FTA 转化为 BN，利用 BN 的概率推理能力，结合历史数据和专家经验，对基本事件的发生概率进行量化。在此基础上，依据风险可接受水平和相关标准，确定五级预警阈值。当监测数据表明风险指标接近或超过相应阈值时，启动对应的应急响应规程，以实现动态对安全风险的动态防控。

## 三、动态风险评估方法研究

### （一）概率风险评估模型

#### 1. 蒙特卡罗随机模拟

在概率风险评估模型中，蒙特卡罗随机模拟是重要方法。对于复杂水文条件下围堰施工安全风险评估，开发基于改进拉丁超立方抽样的参数概率分布建模方法至关重要。这种改进的抽样方法能够更有效地处理参数的不确定性，提高模拟结果的准确性和可靠性。通过对相关参数进行合理的概率分布建模，利用蒙特卡罗随机模拟技术，可以大量重复地模拟围堰施工过程中各种风险因素的组合格况。从而得到不同风险场景下的结果分布，为后续风险分析和决策提供有力的数据支持，以更好地构建围堰施工安全风险动态防控体系<sup>[9]</sup>。

#### 2. 动态贝叶斯网络建模

动态贝叶斯网络 (DBN) 是一种用于处理动态系统中不确定性的强大工具。在复杂水文条件下围堰施工安全风险评估中，构建考虑时间序列特征的 DBN 风险演化预测模型具有重要意义。该模型能够捕捉风险因素随时间的变化规律，从而更准确地预测风险的发展趋势。通过对历史数据的分析和学习，确定网络节点及其之间的条件概率关系，以反映不同风险因素之间的相互影响。同时，结合实时监测数据不断更新网络参数，使模型能够适应复杂多变的水文环境。利用 DBN 的推理能力，可以对未来不同时刻的风险状态进行预测，为围堰施工安全风险的动态防控提供科学依据<sup>[6]</sup>。

### （二）实时风险评估算法

#### 1. 流式计算框架设计

基于 Spark Streaming 的实时风险计算架构设计是复杂水文条件下围堰施工安全风险动态防控的关键。该架构利用 Spark

Streaming 的实时流处理能力，能够快速处理海量的水文数据以及围堰施工相关数据。通过分布式计算，有效提高计算效率，降低计算延迟。它可以实时监测水文条件的变化以及施工过程中的各种风险因素，并根据预设的风险评估模型进行实时风险评估。同时，该架构具备良好的扩展性，能够适应不同规模的围堰施工项目。这种实时风险计算架构为围堰施工安全风险动态防控提供了有力的技术支持，确保施工过程中的安全性和可靠性<sup>[7]</sup>。

#### 2. 风险预测模型优化

为优化风险预测模型，开发融合 LSTM 与卡尔曼滤波的混合预测算法<sup>[8]</sup>。LSTM 神经网络在处理时间序列数据时具有优势，能有效捕捉数据的长期依赖关系。卡尔曼滤波则在处理动态系统的状态估计问题上表现出色，可对系统状态进行实时更新。将两者融合，既能充分利用 LSTM 对复杂水文数据的特征提取能力，又能借助卡尔曼滤波的实时更新机制，提高预测的准确性和时效性。该混合算法可更好地适应复杂水文条件下围堰施工安全风险的动态变化，为实时风险评估提供更为可靠的依据。

## 四、防控体系关键技术实施

### （一）智能感知技术应用

#### 1. 多源异构数据融合

在复杂水文条件下围堰施工安全风险动态防控体系中，多源异构数据融合至关重要。基于联邦学习的分布式监测数据融合方法是一种有效的手段。联邦学习允许在不共享原始数据的情况下，对来自不同数据源的数据进行联合建模和分析。通过这种方式，可以整合多源异构数据，如不同传感器采集的水位、流速、压力等数据，以及不同监测设备获取的图像、声音等信息。这些数据可能具有不同的格式、分辨率和采样频率。利用联邦学习算法，能够挖掘数据之间的潜在关联，提高对围堰施工安全风险的感知和预测能力，为防控体系提供更准确、全面的数据支持<sup>[9]</sup>。

#### 2. 边缘计算节点部署

在复杂水文条件下围堰施工安全风险动态防控体系中，边缘计算节点部署至关重要。需考虑施工现场的实际环境和需求，合理确定节点的位置和数量。对于具有自适应降噪功能的边缘计算模块技术方案，要确保其能有效处理各类感知数据。通过优化节点布局，提高数据采集的准确性和及时性，以更好地应对复杂水文环境带来的挑战。同时，结合智能感知技术应用，使边缘计算节点能够快速适应环境变化，为整个防控体系提供可靠的数据支持和决策依据，保障围堰施工安全风险的动态防控有效实施<sup>[10]</sup>。

### （二）数字孪生平台构建

#### 1. BIM-GIS 集成建模

BIM - GIS 集成建模是数字孪生平台构建的关键环节。通过将 BIM 的精确几何信息和丰富的语义数据与 GIS 的强大空间分析能力相结合，能够更全面地呈现复杂水文条件下围堰施工的环境和工程信息。利用 BIM 技术创建围堰及相关工程结构的三维精细模型，包括其内部结构和施工细节。同时，GIS 技术整合地形、水文等地理空间数据，提供宏观的地理环境背景。二者集成后，可实

现数据的无缝交互和共享，为后续的施工安全风险动态防控提供准确、直观的可视化基础，有助于施工人员更好地理解工程与环境的关系，及时发现潜在风险。

## 2. 虚实映射机制设计

建立基于 OPC UA 的物理实体与数字模型双向映射体系是虚实映射机制设计的关键。OPC UA 作为一种先进的工业通信标准，能够实现不同设备和系统之间的数据交互与整合。在围堰施工安全风险动态防控体系中，通过 OPC UA 技术，物理实体（如围堰结构、施工设备等）的实时状态数据（如位移、应力、水位变化等）可以准确地传输到数字模型中。同时，数字模型根据分析结果和预设规则对物理实体发出控制指令，实现双向的映射和交互。这种映射体系确保了数字孪生平台能够实时反映物理实体的真实状态，为施工安全风险动态防控提供了精准的数据支持和决策依据。

### （三）智能决策系统开发

#### 1. 案例推理知识库构建

构建案例推理知识库需从多方面着手。一方面，要广泛收集复杂水文条件下围堰施工的典型安全风险案例，涵盖不同施工阶段、不同水文环境以及不同围堰类型等情况。这些案例应详细记录风险发生的背景、过程、造成的影响以及采取的应对措施等关键信息。另一方面，运用知识图谱技术对收集的案例进行整合与分析。通过构建实体与关系模型，将案例中的各种要素进行关联，如施工工艺与风险类型的关联、水文条件与风险发生概率的关联等。同时，要不断更新和完善知识库，随着新案例的出现以及对已有案例认识的深入，及时调整知识图谱的结构和内容，确

保知识库能为智能决策系统提供准确、有效的案例支持。

## 2. 多目标优化算法设计

开发考虑安全 - 成本 - 工期的 NSGA - III 优化决策模块。NSGA - III 是一种先进的多目标优化算法，适用于处理复杂的多目标决策问题。在围堰施工安全风险动态防控体系中，安全、成本和工期是三个关键目标。该模块通过对施工过程中的各种因素进行量化分析，建立多目标优化模型。利用 NSGA - III 算法的优势，能够在庞大的解空间中快速搜索到一组满足不同目标要求的非劣解。这些解代表了不同的施工方案选择，每个方案在安全、成本和工期方面都有不同的表现。决策者可以根据实际情况和偏好，从这些非劣解中选择最适合的施工方案，从而实现围堰施工安全风险的动态防控，同时兼顾成本和工期的合理控制。

## 五、总结

本研究在复杂水文条件下围堰施工安全风险防控方面取得了重要成果。构建了包含实时监测、动态评估和智能决策的全过程防控体系，并经工程实践验证其在极端水文条件下的响应能力。同时提出基于数字孪生的风险防控闭环管理机制，为同类工程树立了可借鉴的技术范例。这些成果不仅有助于提高围堰施工在复杂水文环境中的安全性和可靠性，还为相关工程领域的风险管理提供了新的思路和方法。未来研究将朝着多项目数据共享以及新型传感器网络集成方向发展，有望进一步提升该防控体系的性能和应用范围。

## 参考文献

- [1] 郭晓丹. 民航空管安全风险防控研究 -- 以 A 管制空域为例 [D]. 山东大学, 2023.
- [2] 赵巍. 水文与气象条件下的船舶多目标航路规划研究 [D]. 吉林大学, 2021.
- [3] 宋强. 复杂环境下地下洞室群施工风险评估及防控措施研究 [D]. 重庆交通大学, 2022.
- [4] 陈天津. A 生产车间的安全风险防控研究 [D]. 西南交通大学, 2021.
- [5] 张雪韬. 甘肃省出口蔬菜及其制品安全风险防控体系优化研究 [D]. 兰州大学, 2022.
- [6] 李力波, 郑照龙, 王彦钧. 三网融合提升安全风险防控能力 [J]. 石油化工管理干部学院学报, 2021, 23(4): 28-32.
- [7] 杨健, 张华, 翟新军, 等. 储能安全风险防控关键技术研究 [J]. 中国高新科技, 2022(20): 24-27.
- [8] 魏静萍. 高层房屋建筑工程施工安全风险隐患与防控措施 [J]. 砖瓦世界, 2024(12): 157-159.
- [9] 党国峰, 刘井义, 李黎, 等. 海城环境承台围堰施工安全风险评估 [J]. 价值工程, 2022, 41(3): 49-51.
- [10] 王伟, 王曜. 基于大数据的港口集团安全风险防控平台 [J]. 集装箱化, 2024, 35(1): 22-26.