

# 基于汛情风险分级的水闸泵站安全风险预控管理体系构建研究

刘冬侠 卢荻 鹿梅

徐州市水利工程运行管理中心，江苏徐州，221000；

**摘要：**本研究针对水闸泵站安全管理，提出基于汛情风险分级的预控管理体系。精准风险分级对防控风险、减少灾害损失及提升区域防灾能力至关重要。梳理国内外管理体系后，分析汛情风险要素（如暴雨强度、洪水频率）及其相互作用，并对比风险矩阵法、层次分析法（AHP）等方法优劣。同时，剖析水闸泵站核心风险因素（如结构安全、设备故障）及LEC法、故障树分析法（FTA）等安全评价方法。研究强调汛情风险等级与安全风险的动态关联。构建风险管理框架，涵盖风险辨识、评估、控制、监测预警及应急响应，融合物联网实现多维度实时监测。该体系遵循科学性、系统性、动态适应性和实用性原则，通过工程、管理及应急措施提升汛期安全运行能力，保障区域防洪安全。

**关键词：**汛情风险分级；水闸泵站；安全风险预控；风险管理体系

**DOI：**10.69979/3060-8767.25.08.032

## 引言

全球气候变化加剧暴雨洪涝灾害，水闸泵站作为关键防洪基础设施，其安全运行至关重要。构建基于汛情风险分级的安全风险预控管理体系，对精准防控风险、减少灾害损失及提升区域防灾能力意义重大。发达国家已形成较完善的标准与管理模式（如美国严格标准、欧洲全生命周期管理），我国在设施改造与自动化监控方面进展显著。在汛情风险分级方面，国外多采用数学模型量化评估，我国则建立了本土化指标体系。国内外管理体系虽成果丰硕，但风险耦合机制研究不足且部分成果操作性待提升。未来需向精细化、智能化发展，加强多学科与新技术融合。本研究综合文献分析、典型案例剖析及定量定性方法，通过理论分析、框架构建与案例验证，旨在建立科学实用的水闸泵站安全风险预控体系。

## 1 研究区概况

奎河闸站管理所位于徐州市奎河与云龙湖水库溢洪道交汇处，承担着市区南半部的防汛排涝任务，由袁桥东站、袁桥西站、袁桥节制闸等水利工程组成。

袁桥东站于1999年建成，位于袁桥节制闸上游50米处，奎河东岸，担负着徐州市主城区防汛任务。总设计流量20立方米/秒，总装机容量2400千瓦。配套6台1000HD-9的混流泵，设计流量3.33立方米/秒，扬程7.5米；配套10KV电机YLB560-12，功率400千瓦。其功能：当市区下雨，奎河自排不足或袁桥西站开机强排仍不够时，开机运行，将奎河水排至故黄河中。

袁桥西站于1984年建成，位于奎河袁桥节制闸上游西岸，担负着徐州市主城区防汛任务。2016年改造重建，2017年建成，设计流量20立方米/秒，配套电机Y L500-12-215KW，总装机容量860千瓦；共配套4台套1200ZLB-125轴流泵。其功能：当奎河水位超过30.05米，且奎河自排不足时，落下袁桥节制闸开机强排，将奎河水由节制闸上游排至下游。

袁桥节制闸1982年建成，2002年进行了改造，位于奎河与云龙湖水库溢洪道交汇处。采用3扇平面钢闸门，10吨卷扬式启闭机，3.5千瓦电动机。设计流量58立方米/秒。

为了使奎河闸站管理所能够保持高效稳定的运行状态，需要对基于汛情风险分级的预控管理体系进行构建研究。



图1 袁桥节制闸



图2 袁桥西站机房

## 2 汛情风险分级与水闸泵站安全风险相关理论

### 2.1 汛情风险分级理论基础

#### 2.1.1 汛情风险要素分析

汛情风险是多种要素相互作用的复杂系统。暴雨强度是关键致灾因子，能引发内涝灾害。洪水频率是重要指标，反映洪水发生的可能性。淹没范围是直观体现，受水量、流速、地形影响。这些要素相互关联：暴雨强度影响洪水频率和淹没范围；洪水频率影响淹没范围；淹没范围影响灾害损失。剖析要素是评估风险的基础。

#### 2.1.2 汛情风险分级方法

风险矩阵法基于可能性和后果严重程度构建矩阵进行汛情风险分级。评估时，确定风险因子（如暴雨强度）的发生可能性和后果等级（均分为低、中、高），在矩阵中定位以确定风险等级（如低、中、高风险）。该方法直观简便，适用于快速初步分级和决策参考，但评估主观性强，难以精确量化风险。

层次分析法（AHP）将决策分解为层次结构（目标、准则、方案），结合定性与定量分析。应用于风险分级时，建立模型：最高层为风险分级目标，中间层为风险要素（如暴雨强度），最低层为情景；通过专家打分确定权重，计算综合权重实现分级。该方法考虑层次关系和重要性，使分级科学合理，但依赖专家判断，一致性检验复杂，且指标多时计算量大。

### 2.2 水闸泵站安全风险理论

#### 2.2.1 水闸泵站安全风险因素

水闸泵站的结构安全是其正常运行的基础保障。水闸的闸室、闸墩、底板等关键部位，以及泵站的泵房、进出水建筑物等结构，在长期运行过程中可能遭受水流冲刷、地基不均匀沉降、地震作用等影响，导致裂缝、

破损、变形等病害。例如，某水闸闸墩因长期受高速水流冲刷，致使混凝土保护层剥落、内部钢筋锈蚀，严重削弱了结构承载能力，甚至存在引发垮塌事故的风险。

设备故障是水闸泵站安全运行的另一重要风险因素。水闸的闸门、启闭机，泵站的水泵机组、电机等核心设备，因频繁启闭操作和长时间连续运行，易出现机械磨损、材料老化、电气控制系统故障等问题。诸如闸门止水密封件老化导致漏水、启闭机制动装置失灵、水泵叶轮气蚀或损坏等故障，均可能导致水闸泵站无法发挥其设计功能，在汛情发生时无法有效调节水位和控制流量。

操作失误风险与运行人员的专业素养及责任心密切相关。操作人员若违反安全操作规程，例如误开误关闸门、错误设置运行参数等行为，均可能引发安全事故。如某泵站曾发生因操作人员启动水泵时未按规程先行开启出水阀门，导致设备损坏，影响正常排水作业。

管理缺陷风险涵盖运行管理的诸多方面，包括管理制度不健全、日常检查不到位、维护保养不及时等。缺乏完善的管理制度易导致运行管理混乱、职责边界不清；检查不到位则无法及时发现结构隐患和设备故障；维护保养不及时会加速设备性能劣化与损坏进程。这些管理层面的不足均会显著增加水闸泵站的安全风险，削弱其应对汛情的能力。

#### 2.2.2 水闸泵站安全风险评价方法

作业条件危险性评价法（LEC法）通过评估事故发生可能性（Likelihood, L）、人员暴露于危险环境的频繁程度（Exposure, E）和事故可能造成的后果严重性（Consequence, C）三个因素，综合确定作业条件的危险性等级。该方法适用于水闸泵站日常运行中的安全风险评价，如设备检修、闸门操作等作业活动。评价时，首先确定事故发生可能性等级（通常分为极低、低、中等、高、极高五级）；评估人员在危险环境中的暴露频繁程度（如很少暴露、偶尔暴露、频繁暴露等）；确定事故后果严重性（从轻微伤害到重大人员伤亡或财产损失进行分级）。将三个因素的分值相乘得到风险值  $D(D=L \times E \times C)$ ，依据  $D$  值大小判断作业条件的风险等级。LEC法操作简便，能快速评价作业安全风险，但其评价结果主观性较强，高度依赖评价人员的专业经验与判断能力。

故障树分析法（Fault Tree Analysis, FTA）是一种

从顶事件（不希望发生的系统故障或事故）出发，自上而下逐层分析导致该事件发生的直接原因和间接原因（基本事件），并建立其逻辑关系的方法。在水闸泵站安全风险评价中，通常以“水闸泵站无法正常运行”或特定事故（如“闸门无法正常启闭”）作为顶上事件，逐步分析其发生的直接原因（如“启闭机故障”、“控制信号中断”）和更深层次的原因（如“设备老化”、“维护不足”、“电源故障”等），将这些原因作为中间事件和基本事件，运用“与门（ANDgate）”、“或门（ORgate）”等逻辑门符号连接，构建完整的故障树模型。通过定性和定量分析（如计算最小割集、最小径集及顶上事件发生概率），可确定系统安全风险的大小及其关键致因路径。该方法能够全面、系统地分析风险成因及其传播途径，为制定针对性的风险控制措施提供理论依据，但对分析人员的专业素养要求较高，模型构建过程相对复杂。

### 2.3 汛情风险分级与水闸泵站安全风险关联

不同汛情风险等级下，水闸泵站面临的安全风险特征存在显著差异。在低汛情风险等级下，外部水环境压力较小，安全风险主要集中于设备日常维护保养与操作规范执行方面，结构安全风险相对较低。随着汛情风险等级升高（如中等风险），洪水流量增大、水位上升，结构物承受的水压力和水流冲击力显著增加，结构安全风险随之增大；同时，设备运行负荷加重，发生故障的概率提高。在高汛情风险等级下（如遭遇特大洪水），即使结构状态良好、设备功能正常，亦可能因洪水的巨大破坏力（如超高水位、高速水流、漂浮物撞击等）而引发严重安全问题，例如闸门被冲毁、泵房进水等。

水闸泵站自身的安全状况对区域汛情应对能力具有决定性影响。安全状况良好的水闸泵站能有效发挥其调节水位、控制流量、排除内涝的核心功能，显著降低区域汛情风险等级。例如，正常运行的水闸可通过精确调节闸门开度控制下泄洪水流量；高效的泵站系统可及时排除积水，有效减轻内涝灾害。反之，若水闸泵站存在安全隐患，则可能无法正常运行，导致洪水失控、内涝加剧，从而抬升区域汛情风险等级，造成更为严重的灾害损失。

## 3 基于汛情风险分级的水闸泵站安全风险预控管理体系框架

### 3.1 体系构建目标与原则

本体系构建的目标在于：科学分级区域汛情风险，精准识别水闸泵站存在的安全风险隐患，据此采取有效的预控措施，降低风险发生概率及灾害损失程度，确保水闸泵站在汛期安全、稳定、高效运行，为区域防洪安全与经济社会发展提供坚实保障。

体系构建遵循以下核心原则：科学性原则强调基于科学理论与先进方法技术（如水文模型、风险评估模型、实时监测技术），全面收集基础数据，量化评估风险水平，实时监测设施运行状态。系统性原则要求整体考虑风险预控管理的各个环节（风险辨识、评估、控制、监测预警、应急响应），形成覆盖全面、逻辑清晰、闭环运行的完整管理体系。动态适应性原则要求体系具备根据气象水文条件、工程状态及管理需求变化进行动态调整与持续优化的能力。实用性原则注重体系的可操作性与实际应用效果，确保制定的风险控制措施能有效应对实际风险。

### 3.2 体系主要构成要素

依据相关技术标准规范，综合运用多种方法全面辨识水闸泵站潜在风险源。采用直接判定法快速确定重大风险源（如存在结构性缺陷的水闸闸墩）；运用安全检查表法（SafetyCheckList, SCL）系统检查设施结构、设备、管理、环境等各方面，详细记录存在的隐患。从结构安全、设备故障、操作失误、管理缺陷、外部环境因素（如地质、气象）等多角度对风险源进行分类整理，为后续风险评估与控制提供基础信息支撑。

综合运用风险矩阵法、层次分析法（AHP）、作业条件危险性评价法（LEC法）等方法，结合实时汛情风险分级结果，科学确定水闸泵站各项安全风险的风险等级。风险矩阵法通过将风险发生可能性与后果严重程度分级构建矩阵进行风险定位；AHP法通过构建层次模型确定各风险因素权重进而实现风险分级；LEC法则更适用于日常运行作业活动的风险评价。多种方法的综合运用旨在实现风险等级评估的准确性与客观性。

从工程技术、管理措施、应急处置等多个维度制定风险控制策略。工程技术措施包括结构加固改造、设备更新换代、安装实时在线监测系统；管理措施包括完善运行管理制度与操作规程、加强人员专业技能培训与安全意识教育、强化设施日常检查与预防性维护保养；应急处置措施包括制定专项应急预案、定期组织应急演练

练等。通过综合运用多种手段，形成全方位、多层次的风险控制体系。

建立涵盖水文气象、结构状态、设备运行参数、管理状况等多维度的监测指标体系。利用物联网（IoT）、传感器网络等信息技术手段，实时采集、传输与分析监测数据，发现异常状态及时触发预警机制。预警信息通过多种可靠渠道（如管理平台、短信、广播等）及时发布，并根据风险严重程度分级（如蓝色、黄色、橙色、红色预警），明确不同级别预警下应采取的响应措施，为风险控制决策提供实时支持。

#### 4 结论与展望

理论体系完善：深入分析汛情风险要素（暴雨强度、洪水频率、淹没范围）的相互作用，明确不同风险等级下水闸泵站安全风险（结构安全、设备故障、操作失误、管理缺陷）的动态演变，揭示其与区域汛情应对效能的紧密关联。方法融合创新：综合运用风险矩阵法、层次

分析法、作业条件危险性评价法及故障树分析法，构建多维度、定量定性结合的风险评估体系，提升科学性与适用性。探索全生命周期风险管理模式：将风险预控贯穿规划、设计、施工、运维及退役全过程，建立成本优化与绩效模型。完善标准规范与协同机制：制定适应精细化、智能化需求的标准规范；推动跨区域、跨部门信息共享与应急联动，提升综合防灾能力。通过创新实践，水闸泵站风险管理将迈向精细化、智能化与协同化，支撑韧性城市和流域建设。

#### 参考文献

- [1] 刘强. 基于异构并行计算的流域洪水模拟理论与方法研究[D]. 西安理工大学[2025-07-02].
- [2] 丁志雄, 李纪人. 流域洪水汛情的遥感监测分析方法及其应用[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(3): 4.
- [3] 黄藏青, 吴礼福, 辛立勤. 实时汛情自动监视系统的设计与实现[J]. 水文, 1998(S1): 4.