

胡江, 叶伟, 马福恒. 长距离调水工程安全风险综合评估[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(3): 417-426. HU J, YE W, MA F H. Comprehensive risks assessment of engineering safety for long-distance water transfer projects[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(3): 417-426. (in Chinese)

# 长距离调水工程安全风险综合评估

胡江<sup>1,2</sup>, 叶伟<sup>2</sup>, 马福恒<sup>1,2</sup>

(1. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室, 南京 210029; 2. 水利部大坝安全管理中心, 南京 210029)

**摘要:**以某跨流域、跨多省市的长距离调水工程为例, 分析工程安全面临的各类风险事件, 确定两座节制闸之间的运行调度渠段为风险评估单元, 发展基于层次分析法的风险综合评估模型; 以一梁式输水渡槽为例, 阐释建筑物风险因子识别、风险事件分析和风险等级标准划分的方法, 描述风险评估过程; 以该渡槽所在的运行调度渠段为评估单元, 采用层次分析法进行风险综合评估; 在此基础上, 对其余运行调度渠段进行风险综合评估, 讨论造成较大风险的主要原因。结果表明: 提出的方法辨识出了较大风险的运行调度渠段, 造成运行调度渠段工程安全风险综合评估结果为较大风险的因素可归结为左岸水库溃坝或超调水工程防洪标准泄洪导致的风险、交叉河道过流能力不足风险以及左排下游通道排水不畅风险等, 进而有针对性地提出了风险管控措施。研究结果可为类似长距离调水工程安全风险综合评估和管控提供参考。

**关键词:** 调水工程; 风险评估; 工程安全; 层次分析法; 风险管控

**中图分类号:** TV91 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2024.0043

加快构建国家水网, 建设现代化高质量水利基础设施网络是国家的重大战略<sup>[1-3]</sup>。随着南水北调东、中线一期等重大调水工程相继建成, 跨流域、跨区域水网格局逐步形成<sup>[4]</sup>。长距离调水工程是复杂的系统工程, 是水网工程的重要组成部分, 运行中存在多种内外不确定性因素带来的工程安全风险<sup>[5-6]</sup>。推动国家水网高质量发展, 需加强长距离调水工程安全风险识别和评估, 构建风险全链条管控机制, 确保水网工程长期安全运行。

国内外在调水工程风险评估方面已开展了一定的研究<sup>[7-9]</sup>。陈进等<sup>[10]</sup>、汤洪洁<sup>[11]</sup>梳理了长距离调水工程系统的水文、建筑物方面的风险因子, 提出了风险评估分类, 确定了风险分级原则。贡力等<sup>[12]</sup>总结了明渠的失事模式, 构建了风险层次分析模型, 可为明渠风险评估提供基础。聂相田等<sup>[13]</sup>提出了调水工程安全风险评价指标体系, 建立了五等评价标准的评语集模型, 采用 Delphi 法对各指标赋权, 基于云模型理论构建了安全风险评价模型。韩迅等<sup>[14]</sup>考虑内外因素影响, 通过神经网络对南水北调中线工程大型跨(穿)河建筑物运行风险进行了分类

分级。刘恒等<sup>[15]</sup>建立了调水工程综合风险识别体系。杜霞等<sup>[16]</sup>将南水北调中线工程分解为总干渠、交叉建筑物等, 根据破坏机理建立了各类建筑物的风险评价模型, 评价结果表明高风险建筑物主要集中在沿线暴雨中心, 京津段暗渠(涵)运行风险低。李慧敏等<sup>[17]</sup>确定边坡失稳和异常渗漏等为输水渠道主要失事模式, 运用改进的模糊熵计算了风险因子权重, 构建了基于多属性决策方法的失事模式排序模型, 结果表明异常渗漏风险最大。可以看出, 当前从系统角度进行调水工程风险评估的研究不多, 综合考虑工程内部性态变化、外部环境和边界条件演变的研究更少。

长距离调水工程线路长, 建筑物众多, 沿线所经地区的地理环境和水文气象条件差异较大且复杂多变。随着沿线经济社会的发展, 部分原来偏离城镇的建筑物已成为城中建筑物; 同时, 人类活动影响以及交叉河道冲淤变化, 使得工程沿线外部边界条件也有所变化<sup>[18-21]</sup>。加之近年来极端气象事件呈趋频趋强态势, 极端暴雨和超标准洪水时有发生。可见, 长距离调水工程存在外部环境变化冲击和内

收稿日期: 2023-11-30 修回日期: 2024-02-02 网络出版时间: 2024-04-23

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240419.1524.002>

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179138; U2243244); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y724004)

作者简介: 胡江(1983—), 男, 湖南衡阳人, 正高级工程师, 博士, 主要从事水工结构安全研究。E-mail: [huj@nhri.cn](mailto:huj@nhri.cn)

部性态演化联合作用引起的工程安全风险<sup>[22-24]</sup>。本文以某跨流域、跨多省市的长距离调水工程为例开展研究。该工程全长 1 400 多 km, 建筑物种类齐全, 分析工程运行面临的自身风险和外部环境冲击的风险, 确定工程安全风险评估单元划分原则, 以运行调度渠段(以下简称“渠段”)为评估单元, 提出风险综合评估方法; 以一梁式输水渡槽为例, 阐释建筑物的风险因子、风险事件识别和风险等级划分标准, 根据现状调查和复核计算确定风险事件的可能性和危害性, 评估风险等级; 以该渡槽所在的运行调度渠段为评估单元, 阐述评估单元风险综合评估过程; 在此基础上, 对其余渠段进行风险综合评估, 分析导致较大风险的主要原因, 为风险管控提供技术支撑。

## 1 风险事件

该调水工程主要建筑物包括输水、排水、退水及穿跨邻接建筑物, 输水建筑物分为渠道和各类交叉建筑物, 排水建筑物分为上排和下排建筑物, 退水建筑物为退水闸, 穿跨邻接建筑物包括跨渠桥梁、油气管道、给排水管道及地铁隧洞。

以渠道为风险受体, 识别出的主要风险事件有防洪堤漫流与冲刷、渠道塌陷与渗漏; 以渠道倒虹吸/暗渠/隧洞为风险受体, 主要风险事件有洪水漫堤、管身冲刷、裹头岸坡冲刷; 以梁式渡槽为风险受体, 主要风险事件有槽身挡水、槽墩冲刷、裹头边坡失稳; 以涵洞式渡槽为风险受体, 主要风险事件为槽身挡水超高不足; 以暗涵/箱涵/预应力钢筒混凝土管为风险受体, 主要风险事件为结构破坏; 以左岸排水(左排)倒虹吸/涵河道倒虹吸/排洪涵洞为风险受体, 主要风险事件有左岸洪水漫堤、洪水浸泡渠堤; 以左排渡槽/排洪渡槽为风险受体, 主要风险事件为渡槽洪水漫槽; 以退水闸为风险受体, 主要风险事件有退水渠冲刷破坏、退水漫渠(退水渠)冲刷、无法退水; 以所在渠道为风险受体, 穿跨邻接建筑物主要风险事件包括爆管、垮塌等, 进而造成渠道渗漏或渠水漫堤。

## 2 工程安全风险综合评估方法

### 2.1 风险评估单元划分

两座节制闸之间的渠段是该调水工程输水运行调度的基本单元, 该调水工程共有 60 个渠段。当自然、工程、管理和人为因子等形成风险源后, 以总干

渠为传导载体, 向上、下游传导扩散, 总干渠上的控制建筑物及闸站作为控制节点, 可以放大或减小风险事件后果的严重性。因此, 依据该调水工程输水运行调度方式, 将明渠段划分为 60 个风险评估单元。

### 2.2 风险传导过程分析

针对该调水工程明渠段特点, 主要考虑暴雨洪水、穿跨邻接工程形成风险的传导。

暴雨洪水作用到左岸水库、交叉河道上以及左岸汇水区域, 形成冲击调水工程的洪水, 影响交叉、左排建筑物以及渠道的工程安全。

标准内洪水风险传导路径包括: 河势变化、河道碍洪等问题, 左岸洪水演进至调水工程时的流速、水位等超过原设计, 造成交叉建筑物冲刷破坏以及洪水漫堤等风险; 距调水工程较近的部分小(2)型和小(1)型左岸水库的校核洪水标准低于调水工程交叉或左排建筑物的校核洪水标准, 这些水库遭遇暴雨洪水一旦溃坝, 洪水演进至南水北调中线工程时, 对调水工程造成冲击, 导致交叉建筑物冲刷破坏或洪水漫堤等风险; 经济建设活动导致渠道沿线汇水区地形变化较大, 引起排水量增大或者水面线提高; 出口下垫面条件发生变化, 引起左排建筑物或交叉河道进出口水面线抬高, 导致渠道防洪(护)堤顶不满足防洪要求。标准内洪水风险传导线路见图 1(a), 图中工程结构和防洪安全问题包括堤顶高程不足、管身/槽墩埋深不足、防护措施不足、过流能力不足, 风险事件包括结构冲刷、滑坡与外水入渠。

超标准暴雨洪水为超过调水工程设计标准的暴雨洪水, 风险传导路径包括: 超标准暴雨洪水导致河道洪水超过调水工程原防洪标准, 加上部分河道行洪不畅、流态紊乱, 部分渠道防洪堤、渠堤和裹头防护高度和范围不足, 造成漫堤或冲刷风险; 左岸水库超调水工程标准泄洪或溃坝, 对调水工程造成洪水漫堤(溢)、输排水建筑物冲刷破坏、渡槽超设计工况挡水等风险。

穿跨邻接工程发生失效事故后, 传导给所处的渠道, 导致渠道塌陷、滑坡以及渗漏。穿跨邻接工程风险传导路径见图 2。

在传导过程中风险存在叠加和放大效应。如原本标准内洪水是可承受的风险, 但经过多个环节的叠加和放大, 标准内洪水可能造成严重的风险。比如 2021 年“7·20”特大暴雨, 由于河道河势改变使得洪水流速增大, 导致太行山前区域的多个渠道倒虹吸管身上部覆盖层冲刷就属于这类情况<sup>[20]</sup>。超

标准暴雨洪水存在较大危害,经过上游水库溃坝、汇水区下垫面变化以及河道河势变化与碍洪等因

素的放大效应后,超标准暴雨洪水风险的危害将进一步增大。

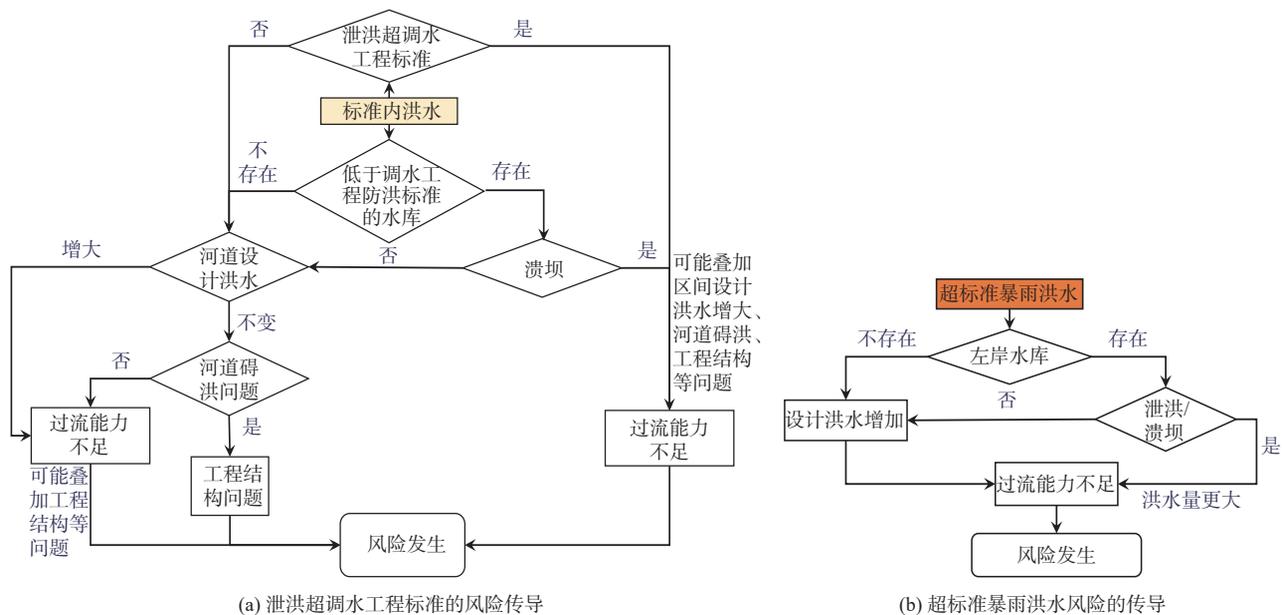


图1 暴雨洪水风险的传导路径

Fig. 1 Transmission path of rainstorm flood risk

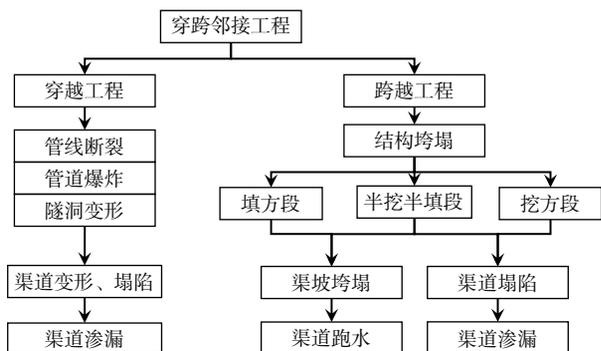


图2 穿跨邻接建筑物风险的传导路径

Fig. 2 Transmission path of risks through passing, crossing, and adjacent buildings

### 2.3 建筑物风险等级划分标准

风险等级划分方法主要有风险矩阵法、人因可靠性分析法以及失效模式和效应分析方法等。风险矩阵法考虑了风险影响(严重性)和风险概率(可能性)两方面的因素,可直接对风险进行评估。风险矩阵法通过对风险可能性高低和后果严重程度进行定性或定量评估后,确定风险严重性和可能性等级,依据评估结果绘制风险图谱<sup>[25]</sup>。采用风险矩阵法确定评估单元中各类建筑物风险等级。

如表1,将事件后果的严重性与事件发生的可能性分为5档,由此组成的风险R分为4个等级,即低、一般、较大和重大风险。I级风险为低风险( $R=(0\sim4)$ ),属可接受风险。II级风险为一般风险

( $R=(4\sim9)$ ),属可容忍风险,措施为监控。III级风险为较大风险( $R=(9\sim15)$ ),属不可接受风险,需采取必要措施,使风险等级降至可容忍或可接受的水平。IV级风险为重大风险( $R=(15\sim25)$ ),属不可容忍风险,应采取紧急措施,做好应急预案,减免风险,一旦发生险情,及时开展修复、补救等。IV级风险为重大风险( $R=(15\sim25)$ ),属不可容忍风险,应采取紧急措施,做好应急预案,减免风险,一旦发生险情,及时开展修复、补救等。

表1 风险矩阵

Tab. 1 Risk matrix

可能性	严重性				
	1	2	3	4	5
1	1	2	3	4	5
2	2	4	6	8	10
3	3	6	9	12	15
4	4	8	12	16	20
5	5	10	15	20	25

### 2.4 评估单元的工程安全风险综合评估方法

层次分析法把复杂的多因素决策问题分解为多个层次上的子因素的相互比较和权重计算问题。对于一个由相互关联、相互制约的众多因素构成的复杂的、缺少定量数据的系统,层次分析法可提供简单实用的建模方法。它包括建立层次结构模型、

构造各层次判断矩阵、层次单排序及一致性检验、层次总排序及一致性检验等步骤。采用层次分析法对评估单元工程安全风险进行综合分析。

工程安全风险受体为各类建筑物,构建得到渠段的工程安全风险综合评估层次结构见图 3。同一类建筑物风险由风险量值最大建筑物确定,即采用最大值法获取上层指标的风险量值。专家打分法

可对大量难以采用技术方法进行定量分析的因素做出合理分析。上层指标向准则层集成时,为确定不同类型建筑物对渠段工程安全的影响,根据专家打分法确定权重。同样地,根据专家打分计算准则层中输水、排水(洪)、退水、穿跨邻接建筑物的权重,进而加权集成至目标层(渠段)。

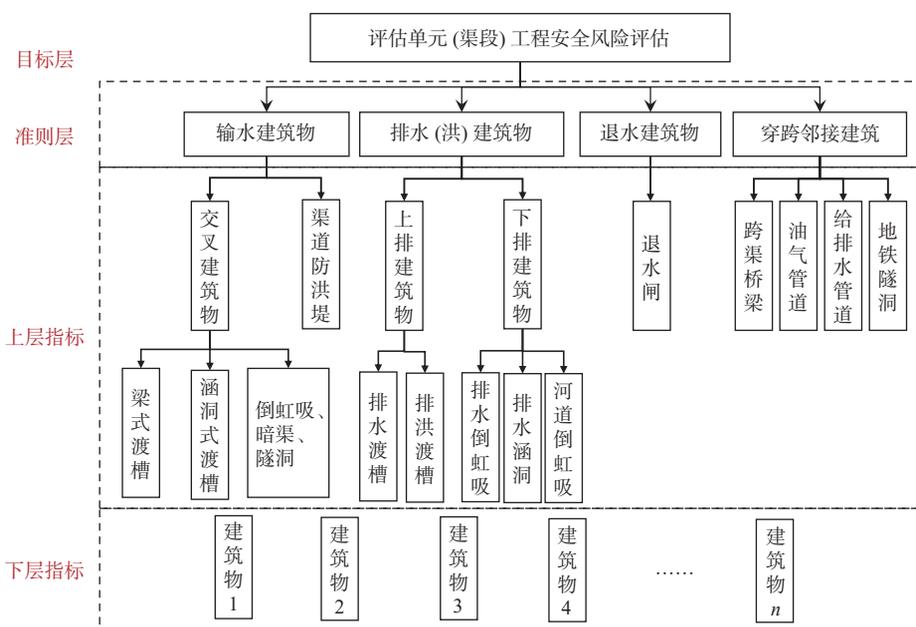


图 3 渠段工程安全的风险综合评估层次结构

Fig. 3 Hierarchy of risk assessment for engineering safety of canal segments

### 3 建筑物风险评估方法及实例

建筑物风险评估是渠段风险综合评估的基础。其中,交叉建筑物易受到洪水冲击失效,是该调水工程运行期的主要风险之一。以交叉建筑物梁式渡槽为例,提出风险评估方法,在此基础上,以 MH 梁式渡槽举例说明建筑物的风险评估过程。

#### 3.1 建筑物风险评估方法

风险事件和风险因子识别过程包括:(1)现场调研;(2)确定主要风险事件,从自然、人为、工程以及运行管理因素等方面识别风险因子;(3)分析风险因子导致风险事件发生的可能性,以及发生风险事件后产生后果的严重性,提出风险等级划分标准;(4)根据现状调研和复核计算,分析风险因子导致风险事件可能性以及相应后果严重性,确定风险等级标准。

风险因子识别可采用头脑风暴法、因果分析法(鱼刺图)、故障树分析法、事故树分析法、检查表法。调水工程建筑物数量众多、河(沟)道条件复杂,影响因素多样,环境变化较大,且可获得的定量信息较少。因果分析法归纳分析导致风险发生的各

种原因,用简明的文字和线条罗列风险因子,将因子分类、分层分析,具有直观性强、因果关系明确等特点,采用因果分析法识别风险因子。因果分析结果以树枝图或鱼刺图等展示,过程如下:(1)分析导致风险发生的因子,并将有直接或间接关系的因子归类;(2)对风险因子进行分层;(3)用简明的文字和线条将各类风险因子链接起来,形成鱼刺图。

以梁式渡槽为例,利用因果分析法识别风险事件和风险因子,提出风险事件可能性和后果严重性等级划分标准,其中的风险因子权重采用专家打分法确定;采用风险矩阵方法确定建筑物风险等级。

梁式渡槽风险事件有槽墩冲刷破坏、裹头边坡失稳以及槽身挡水等 3 类。采用因果分析法识别自然、工程、人为、管理等方面的风险因子。将识别得到的 10 类风险因子绘制于图 4,包括设计洪水增加、交叉断面过流能力不足、槽墩埋深不足、河床防护措施破坏、裹头岸坡防护措施破坏、管身埋深不足、河床下切、河道碍洪问题、上游(邻近)存在风险隐患工程、交叉建筑物防汛管理与应急处置问题、交叉河道防汛管理与应急处置问题等。

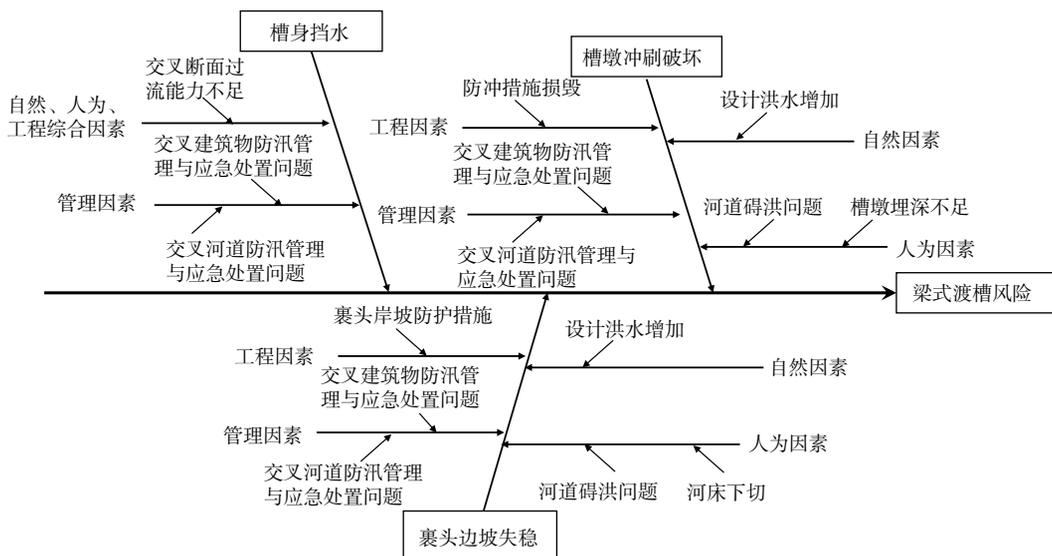


图4 梁式渡槽风险因子识别的鱼刺图

Fig. 4 Causal relationship diagram for risk factor identification of beam-type aqueducts

以槽墩冲刷破坏事件为例,采用设计洪水增加、槽墩埋深不足、河道碍洪、河床防护措施、交叉建筑物防汛管理与应急处置、交叉河道防汛管理与应急处置6个风险因子评估风险事件发生的可能性等级。根据专家打分法,评价指标及权重见表2。

以设计洪水增加为例说明风险因子可能性判别方法。该调水工程设计至今近10年,河道及流域气候条件、下垫面情况、水土保持措施、产汇流方式、河道上的工程等方面都发生了一定变化,这些都可能影响设计洪水成果。在对交叉建筑物断面现状行洪能力复核计算基础上,分析设计洪水水面线增加可能性。通过槽下水位 $h$ 与槽底高程 $h_{槽底}$ 、校核

洪水位 $h_{校核}$ 及二者间高差(校核水位以上超高) $\Delta H_{梁}$ 进行设计洪水增加因子可能性的判别(图5)。

表2 槽墩冲刷破坏事件发生可能性风险因子及权重  
Tab. 2 Risk factors and weights for the possibility of risk events of scouring destruction of piers

因子分类	风险因子	权重
致灾因素	设计洪水增加	0.10
	槽墩埋深不足	0.30
	河道碍洪问题	0.10
抗灾因素	河床防护措施破坏	0.40
管理因素	交叉建筑物防汛管理与应急处置问题	0.05
	交叉河道防汛管理与应急处置问题	0.05

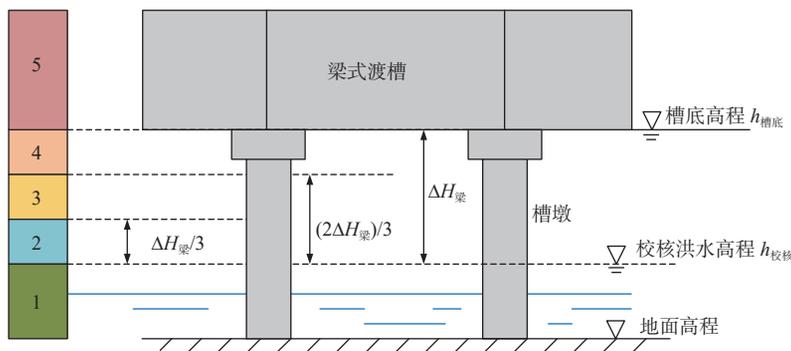


图5 梁式渡槽槽身挡水风险事件可能性

Fig. 5 The possibility of water retaining risk events in the aqueduct body of a beam-type aqueduct

交叉河道风险事件严重性等级判断标准见表3。仍以槽墩冲刷破坏为例,槽墩冲刷破坏导致结构破坏,对调水工程正常运行产生较大影响,但尚未影响调水工程正常输水,槽墩冲刷破坏事件的后果严重性等级(S)取3。

### 3.2 建筑物风险评估实例

MH渡槽(图6)共16跨,全长930m,单跨长度40m。

2022年7月对交叉断面上游3.5km~下游3km进行勘察。裹头高程与设计值基本一致。2016年

“7·19”洪水河道主槽冲刷约 1.3 m, 修复了冲刷的河槽及槽墩。2021 年“7·20”洪水导致主河槽由渡槽 11~12 跨南移至 10~11 跨, 河床下切 1~2 m, 10 号、11 号槽墩承台顶最小埋深为 4.2 m、3.3 m, 不满足设计指标要求的承台顶埋深 4.7~7.6 m。河道已经过防护并与裹头平顺连接; 交叉断面导流堤坡脚河底有防护, 防护无损毁<sup>[20]</sup>。

表 3 交叉建筑物风险事件的严重性等级标准  
Tab. 3 Severity criteria for risk events of cross buildings

等级	风险事件后果	风险事件严重性等级
1	工程完好, 不影响正常使用	无
2	发生较小险情, 工程局部破坏, 未影响输水	无
3	发生较大险情, 工程结构破坏但尚未影响正常输水	槽墩冲刷破坏, 裹头边坡失稳
4	发生重大险情, 影响正常输水	槽身挡水
5	发生十分严重险情, 供水中断	槽身挡水倾覆



图 6 渡槽及上、下游河道状况

Fig. 6 The aqueduct and conditions of its upstream and downstream river courses

将水文系列延长至 2021 年, 复核校核水位高于原校核水位 1.28 m, 低于梁底高程 1.06 m, 大于  $(\Delta H_{梁})/3$ , 且小于  $(2\Delta H_{梁})/3$ , 风险事件可能性为 3 (图 5)。复核计算结果增大的主要原因是交叉断面上游存在多处砂石堆, 下游存在碍洪建筑物, 壅高

水位。经与实测洪水对比分析, 计算结果合理。该渡槽存在槽身挡水风险(槽下净空不足)、槽墩冲刷破坏、裹头边坡失稳风险。基于现场调研、复核计算成果, 结合风险事件等级划分标准判断渡槽风险等级, 结果列于表 4。风险量值为 11.4, 为较大风险。海河“23·7”流域性特大洪水期间, 渡槽槽墩处冲刷加剧并且冲刷范围有扩大趋势。

#### 4 评估单元工程安全风险综合评估实例

以 MH 渡槽所在的 MH 渡槽进口闸—NSHBD 渠道倒虹吸出口闸这一渠段为例, 说明运行调度单元工程安全风险综合评估过程。

##### 4.1 评估单元概况

该评估渠段全长 21.248 km, 内有 MH 渡槽、NSHND 及 NSHBD 渠道倒虹吸等 3 座交叉建筑物, 其他左排、穿跨邻接建筑物见图 7。

##### 4.2 风险综合评估结果

(1) 排水(洪)建筑物风险。共有 9 座左排倒虹吸和渡槽。上、下排建筑物风险量值均采用最大值法确定。上、下排建筑物中, HZNG 排水渡槽、GCG 排水倒虹吸风险量值最大, 分别为 2.30、13.36。上、下排建筑物赋权重分别为 0.3、0.7, 计算得到渠段内排水(洪)建筑物风险量值结果 10.04。

(2) 输水建筑物风险。确定评估单元内各段渠道和输水建筑物风险, 采用最大值法得到渠道的风险量值为 5.75。根据标准内、超标准暴雨洪水分析成果, 采用最大值法确定渠段交叉建筑物风险量值, 左岸水库超标准洪水导致的 MH 渡槽的风险量值最大, 为 12, 确定渠段交叉建筑物风险量值为 12。共发放专家打分表 30 份, 专家样本来自工程设计、管理和验收等不同领域, 对各专家打分成果构造判断矩阵, 对 30 位专家的打分结果进行加权平均, 计算交叉建筑物与渠道风险的权重, 分别为 0.732、0.268, 计算评估单元输水建筑物风险量值, 为 10.28。

表 4 梁式渡槽建筑物风险等级划分结果

Tab. 4 Risk classification result of the aqueduct

槽墩冲刷破坏			裹头边坡失稳			槽身挡水			风险值	风险等级
可能性	严重性	风险值	可能性	严重性	风险值	可能性	严重性	风险值		
3.05	3	9.15	1.45	3	4.35	2.85	4	11.4	11.4	较大风险

(3) 穿跨邻接建筑物风险。通过最大值法确定量值为 4.52。

(4) 计算评估单元工程安全风险。输水、排水

(洪)、穿跨邻接建筑物权重为 0.702、0.168、0.130, 计算得到工程安全风险量值结果, 列于表 5。评估单元工程安全风险为 9.50, 属于较大风险(Ⅲ级), 各

类建筑物中输水建筑物风险量值较大,为 10.28,主要风险为左岸上游水库存在病险且防洪标准不足,对 MH 梁式渡槽造成风险。

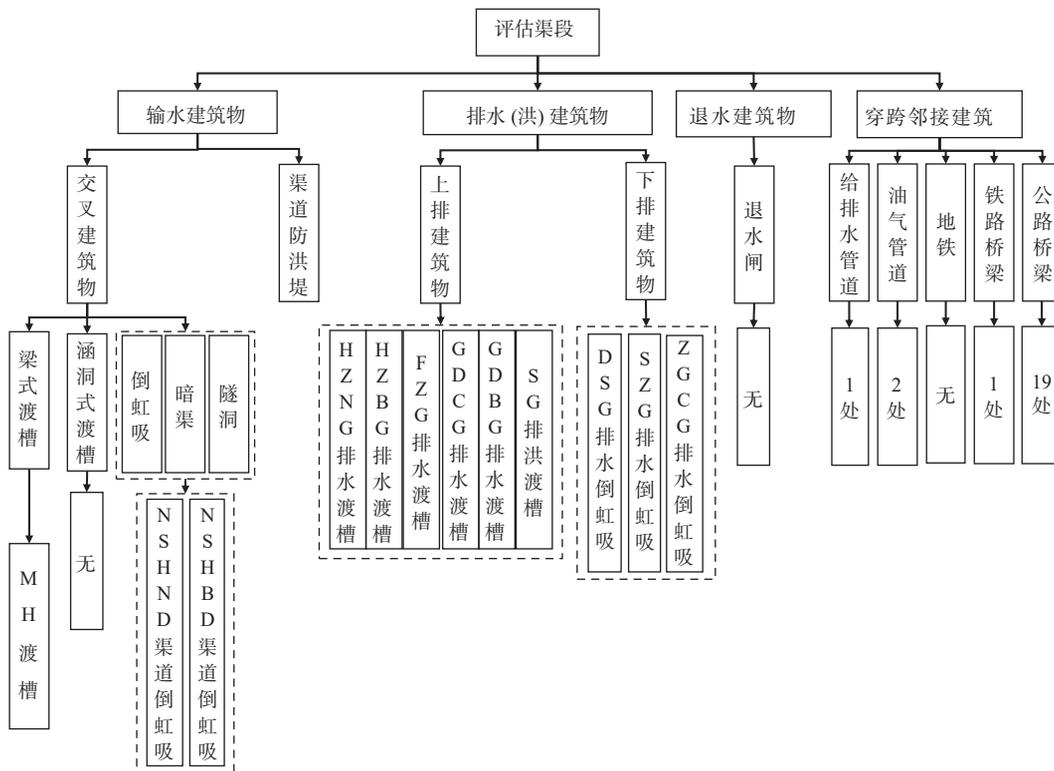


图 7 评估渠段建筑物层次结构

Fig. 7 Hierarchical structure of buildings in the evaluated canal unit

表 5 评估单元的工程安全风险量值

Tab. 5 Risk results of the assessed unit

建筑物类型	风险量值	权重	工程安全风险量值
输水建筑物	10.28	0.702	7.22
排水(洪)建筑物	10.04	0.168	1.69
穿跨邻接建筑物	4.52	0.130	0.59

左岸上游水库为浆砌石重力坝,库容 51.22 万 m<sup>3</sup>,坝高 13.5 m,距离 MH 渡槽 3.7 km,为二类坝,存在防洪标准不足问题。所在河道曾因侵占等问题造成未及设计工况时的洪峰水位异常升高。水库无管理用房和监测设施,存在运行管理隐患。应对 MH 渡槽跨越的河道存在的采砂坑、淤积、树木、阻水建筑物等问题开展河道整治提升水库洪水标准与保坝能力,并及时对水库安全隐患进行加固处理。

### 5 全线风险综合评估结果及管控措施

评估其余 59 个单元的工程安全综合风险。如风险值相对较大的评估单元 SH 渡槽进口闸—YDH 倒虹吸出口闸段,风险量值为 15.91,主要风险

源来自 SH 渡槽左岸上游的三类坝,该坝溃坝洪水对调水工程可能造成冲击,且 YDH 倒虹吸交叉断面过流能力不足,有裹头漫溢入渠风险。总体看,造成 60 个渠段工程安全较大风险的因素可归结为左岸水库溃坝或超调水工程防洪标准泄洪导致的风险、交叉河道过流能力不足风险以及左排下游通道排水不畅风险等。以调水工程建筑物为受体,主要表现为渠道倒虹吸/暗渠/隧洞洪水漫堤、管身冲刷破坏、裹头岸坡冲刷;梁式渡槽槽身挡水、槽墩冲刷破坏、裹头边坡失稳;涵洞式渡槽槽身挡水超高;左排倒虹吸/涵河道倒虹吸/排洪涵洞左岸洪水漫堤、洪水浸泡渠堤;左排渡槽/排洪渡槽洪水漫槽等风险。

左岸水库存在问题主要包括早于调水工程建设的水库的防洪标准与调水工程防洪标准不匹配,距调水工程一定距离内的部分左岸大中型水库调度运用方式与调水工程防洪要求不协调,左岸不同组合的梯级水库群存在工程布局和防洪标准不协调,部分左岸水库存在病险和管理隐患等。相应地,应优化左岸水库调度运用,加强梯级水库群联合调度,实施病险水库除险加固、防洪标准提升工程或报废

处理。同时,根据洪水演进成果,对交叉建筑物或所在断面以及裹头部位进行必要的加高加固。

受排水通道不畅以及暴雨洪水影响,少量左排建筑物为重大风险,原因是汇流面积及下垫面变化;部分左排建筑物自身也存在较大风险,主要是因为下游行洪通道束窄或未贯通问题较为严重。相应地,应实施导截流工程,加快完成防洪影响处理工程,疏通下游排水通道。

## 6 结论

提出了长距离调水工程安全风险综合评估方法,以某重大调水工程为例,说明了风险综合评估过程,得到以下主要结论:

两座节制闸之间的渠段是该长距离调水工程运行的基本单元,以此为风险评估单元,便于左岸水库、交叉河道对调水工程造成冲击的外部风险的传导分析。在此基础上,构建了调水工程安全风险综合评估的层次分析模型。

以梁式输水渡槽为例,阐释了建筑物风险事件与风险因子识别方法,提出了风险事件可能性与风险后果严重性划分标准。举例分析的梁式渡槽因所处交叉河道河势改变、交叉断面河床下切、历史洪水冲刷导致槽墩埋深不足等,风险量值为 11.4,为较大风险(Ⅲ级)。

以该梁式渡槽所在渠段为评估单元,构建了该评估单元工程安全风险综合评估的层次分析模型,基于各建筑物风险评估结果,计算得到了综合风险量值,为 9.49,属于较大风险(Ⅲ级),其中输水建筑物风险量值较大,为 10.28,主要风险为左岸上游水库存在病险、防洪标准不足等。

分析计算了其余评估单元综合风险,该调水工程明渠段工程安全风险主要包括左岸水库溃坝或超调水工程防洪标准泄洪导致的风险、交叉河道过流能力不足风险以及左排下游通道排水不畅风险等。

### 参考文献:

- [1] 赵勇,何凡,何国华,等.国家水网基础认知与建构准则[J].*南水北调与水利科技(中英文)*,2023,21(6):1049-1054,1063. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0101.
- [2] 郭旭宁,刘为锋,邢西刚,等.国家水网的理论内涵与战略策略关系[J].*南水北调与水利科技(中英文)*,2023,21(6):1055-1063. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-

dqk.2023.0102.

- [3] 国家水网建设规划纲要[J].*中国水利*,2023,(11):1-7.
- [4] 夏军,陈进,余敦先,等.变化环境下中国现代水网建设的机遇与挑战[J].*地理学报*,2023,78(7):1608-1617. DOI: 10.11821/dlxb202307003.
- [5] 刘耀儒,侯少康,程立,等.水利工程智能建造进展及关键技术[J].*水利水电技术(中英文)*,2022,53(10):1-20. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.10.001.
- [6] 杨启贵,张传健,颜天佑,等.长距离调水工程建设与安全运行集成研究及应用[J].*岩土工程学报*,2022,44(7):1188-1210. DOI: 10.11779/CJGE202207002.
- [7] FAUNDEZ M, ALCAYAGA H, WALTERS J, et al. Sustainability of water transfer projects: A systematic review[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 860: 160500. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.160500.
- [8] TOOSI S L R, SAMANI, J M V. Evaluating water transfer projects using analytic network process (ANP)[J]. *Water Resources Management*, 2012, 26: 1999-2014. DOI: 10.1007/s11269-012-9995-2.
- [9] FU X, WANG G, REN M, et al. Flood control risk identification and quantitative assessment of a large-scale water transfer project[J]. *Water*, 2021, 13(13): 1770. DOI: 10.3390/w13131770.
- [10] 陈进,黄薇.跨流域长距离调水工程的风险及对策[J].*中国水利*,2006(14):11-14. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2006.14.005.
- [11] 汤洪洁.长距离调水工程风险评估工作思考[J].*水利规划与设计*,2020(5):86-91. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2469.2020.05.020.
- [12] 贡力,路瑞琴,靳春玲.基于G1-VPRS-MIE多层次灰色理论的引水明渠运行风险评价[J].*安全与环境学报*,2021,21(1):1-9. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2019.1044.
- [13] 聂相田,范天雨,董浩,等.基于IOWA-云模型的长距离引水工程运行安全风险评价研究[J].*水利水电技术*,2019,50(2):151-160. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2019.02.022.
- [14] 韩迅,安雪晖,柳春娜.南水北调中线大型跨(穿)河建筑物综合风险评价[J].*清华大学学报(自然科学版)*,2018,58(7):639-649. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2018.25.030.
- [15] 刘恒,耿雷华,裴源生,等.南水北调运行风险管理关键技术问题研究[J].*南水北调与水利科技*,2007,32(5):4-7. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1683.2007.05.002.

- [16] 杜霞, 耿雷华. 南水北调中线工程运行风险分析[J]. *水利水电技术*, 2011, 42(3): 85-88. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0860.2011.03.021.
- [17] 李慧敏, 吉莉, 李锋, 等. 基于FMEA的调水工程输水渠道运行安全风险评估[J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(2): 24-31. DOI: 10.11988/ckyyb.20200138.
- [18] 谢遵党. 水利水电工程数字设计工厂建设构想与实践[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(2): 60-72. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.02.006.
- [19] 聂相田, 赵天明, 庄濮瑞, 等. 长距离引水工程运行安全风险关联分析及风险传递研究[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(2): 45-53. DOI: 10.19760/j.ncwu.zk.2022020.
- [20] 康亚静, 刘宇, 解家毕. 超标准暴雨洪水条件下南水北调中线工程沿线各单元风险评估[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(2): 342-351. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0035.
- [21] 汤洪洁, 赵亚威. 跨流域长距离调水工程风险综合评价研究与应用[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(1): 29-38. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0004.
- [22] 秦雪, 徐海顺. 城市雨洪管理效益评估研究综述[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(4): 10-23. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.04.002.
- [23] HU J, MA F, LI X. Analysis of deformation formation causes and reinforcement disposal effects in deep excavated expansive soil canal slope: Case study[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2023, 23(5): 8265. DOI: 10.1061/IJGNAI.GMENG-8265.
- [24] 雷峥琦, 刘毅, 朱振泱, 等. 高寒区混凝土坝长期运行安全监控预警方法[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(3): 70-77. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.03.007.
- [25] 赵东风, 刘尚志, 王浩水, 等. 基于风险的隐患定义及管控研究[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(2): 1-8. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2023.02.2607.

## Comprehensive risks assessment of engineering safety for long-distance water transfer projects

HU Jiang<sup>1,2</sup>, YE Wei<sup>2</sup>, MA Fuheng<sup>1,2</sup>

(1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. Dam Safety Management Center of Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** The major water transfer projects such as the East and Middle Routes of the South-to-North Water Transfer Projects are the main framework and artery of China's national water network. These long-distance water transfer projects have long routes and numerous buildings. The geographical environment and hydrological and meteorological conditions of the areas along the water transfer routes vary greatly and are complex and variable. In recent years, extreme meteorological events tend to be more frequent, more intense and more extensive. Extreme rainstorms and super standard floods occur occasionally, threatening the safe operation of these transfer projects. At the same time, with the economic and social development along the routes, some water transfer canal sections that deviated from originally urban areas have become urban canal sections. The impact of human activities and natural erosion and siltation of rivers have also led to changes in the external boundary conditions along the routes. In addition, with the increase of operating time, complex engineering geological canals and buildings are also facing their own risks of material aging and increase in hidden dangers and defects in anti-seepage and reinforcement foundations. It can be seen that long-distance water transfer projects face engineering safety risks caused by external environmental changes and internal behavior evolution during operation. To promote the high-quality development of the national water network in China, it is urgent to propose risk identification and assessment methods, and establish a full chain of risk control to ensure the safe operation of water network projects.

A study was conducted based on the comprehensive risk assessment results of a major water transfer project in China. Various risk events faced by engineering safety during the operation period were analyzed, and the scheduling units between two control gates were determined as the risk assessment units. The processes of external risks transmission from left bank reservoirs, crossing rivers, etc. to water transfer projects were also analyzed. On

this basis, a comprehensive risk assessment model for scheduling units based on analytic hierarchy process (AHP) was proposed. A beam type water conveyance aqueduct was selected as a case, and the identification of risk factors, risk event analysis, risk level classification standards, and risk assessment process for water conveyance buildings were explained. The scheduling unit where the aqueduct is located was taken as the assessment unit to conduct a comprehensive risk assessment using the AHP method. Finally, the risk assessment results of other scheduling units were also summarized, and the main reasons for causing high risks were discussed.

The results indicate that the proposed method has good practicality. The risk value of the analyzed beam type aqueduct was 11.4, which is a relatively high risk (Level III) due to changes in the crossing river, downward cutting of the cross-section riverbed, and insufficient burial depth of the canal piers caused by historical flood erosion. Based on the risk assessment results of the conveyance buildings, the risk value of the assessed scheduling unit was calculated. The risk of the evaluated unit project is 9.49, which also belongs to a relatively high risk (Level III). The risk value of the water conveyance buildings is relatively high, at 10.28, with the main risk being the presence of diseases in the upstream reservoir and insufficient flood control standards, which poses a risk to the beam type aqueduct. After analyzing and calculating the risks of other scheduling units, the safety risks of the overall canal of the water transfer project mainly include the risks caused by the dam failures of the left bank reservoirs or flood discharges exceeding the flood control standards of the water transfer project, the risks of insufficient flow capacity of the crossing rivers, and the risks caused by poor discharge capacity of the left downstream buildings. Risk control measures were also proposed, mainly including the reinforcement of the left bank dangerous reservoirs and the improvement of their flood control standards.

**Key words:** water transfer project; risk assessment; engineering safety; analytic hierarchy process; risk control