

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230296

# 考虑极端降雨的抽水蓄能电站施工导流系统风险分析

胡 鑫<sup>1</sup>, 刘 激<sup>1</sup>, 徐 珊<sup>2</sup>, 黄建文<sup>1</sup>

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司水电水利工程院, 贵州 贵阳 550081)

**摘要:** 为研究极端降雨条件下抽水蓄能电站施工导流的风险, 基于系统风险分析思想, 考虑上下库来水之间的相关性, 提出 Copula-Monte Carlo 导流风险预测方法, 构建上库极端降雨量与下库洪量的联合分布, 模拟极端降雨引发的施工洪水过程; 根据上下库导流工程特点, 构建了抽水蓄能电站导流系统风险模型, 并考虑水文、水力不确定性随机模拟风险率; 最后, 以西南某在建抽水蓄能电站为例进行计算, 结果表明极端降雨条件下 Gumbel-Copula 联合分布拟合施工洪水效果良好, 考虑相关性的导流系统风险率更高, 且更符合实际, 为极端降雨下的抽水蓄能电站施工导流方案决策和度汛标准设计提供了参考。

**关键词:** 抽水蓄能电站; 施工导流风险分析; 极端降雨; Copula 函数

**中图分类号:** TV551.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)08-0143-04

## 1 引言

抽水蓄能电站的工作特点决定了其选址多位于山区<sup>[1]</sup>, 极端降雨引发的山洪会給在建抽水蓄能电站的施工度汛带来威胁, 尤其是电站上下水库同时施工、并行导流时, 一旦发生超标洪水, 后果将极其严重。因此, 对极端降雨可能产生的抽水蓄能电站施工导流系统风险进行分析和预测具有重要的工程意义。目前, 有关水电工程施工导流风险已开展了较多研究。考虑水文、水力不确定性, 胡志根等<sup>[2]</sup>建立了大坝初期导流风险分析模型。在此基础上, MARENGO H H 等<sup>[3-5]</sup>考虑施工历时、大坝上升速度、有效施工天数、蓄水时机等不确定性因素, 对大坝中后期导流风险进行了预测; 常运超等<sup>[6]</sup>针对各区域各时段的洪水流量、洪量等多因素间的相关性模拟施工洪水, 使模拟结果更贴近真实洪水过程。目前对常规水电站施工导流风险已有较全面的研究, 但对抽水蓄能电站上下库施工洪水及导流系统整体风险规律认识较少, 有必要开展抽水蓄能电站导流系统风险分析研究。鉴此, 本文考虑抽水蓄能电站上库遭遇极端降雨事件, 依据极端降雨日的实测降雨和

径流数据构建上库极端降雨量与下库洪量联合分布函数, 并应用 Copula-Monte Carlo 方法模拟极端降雨条件下的抽水蓄能电站施工洪水过程; 基于库区不同部位导流建筑物特点, 建立抽水蓄能电站导流系统风险模型; 通过计算极端降雨条件下的导流系统风险率, 验证了上下库来水相关性分析的必要性, 增强导流方案决策的可靠性。

## 2 基于 Copula 函数的极端降雨洪水模拟

针对上下库来水之间的相关性, 运用 Copula 函数建立上库极端降雨值与下库 24 h 洪量的联合分布, 并进行洪水的随机模拟。

### 2.1 上下库洪量确定

根据上库附近气象站降雨实测资料, 将多年的日降雨量样本按升序排列, 日降雨量大于 0.1 mm 的第 95% 分位数设定为极端降雨阈值  $P_0$ 。将日降雨量大于  $P_0$  定义为极端降雨值  $x_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ), 其中  $n$  为超阈值极端降雨的天数, 构成极端降雨值序列  $X = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ 。通过极端降雨值, 可得到上库 24 h 内降雨过程形成的洪水总量, 即洪量  $w_i$  为:

**收稿日期:** 2023-03-02, **修回日期:** 2023-03-27

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51879147); 水电工程施工与管理湖北省重点实验室开放基金项目(2020KSD12)

**作者简介:** 胡鑫(1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水电工程施工与管理, E-mail: 842734907@qq.com

**通讯作者:** 刘激(1986-), 女, 博士、副教授、硕导, 研究方向为水电工程施工与管理, E-mail: 313293608@qq.com

$$w_i = x_i(M_1 + M_2\alpha) \quad (1)$$

式中,  $M_1$  为上库库底面积;  $M_2$  为库底至顶部坡面总面积;  $\alpha$  为径流系数。

上库洪量序列为  $W = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 。依据下库附近水文站实测资料, 可得到与极端降雨值序列对应日的下库河道洪量序列  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 。

### 2.2 Copula 函数选择与检验

对上下库来水序列进行频率计算, 选择分布函数描述上库极端降雨量  $X$  和下库洪量  $Y$  概率分布。基于 Sklar 定理, 一个二维联合分布函数可分解为两个独立的边缘分布函数和一个 Copula 连接函数。分别计算 Frank、Gumbel、Clayton 三种 Copula 函数的理论频率和经验频率, 分析 45° 线附近频率点位分布, 选择 Gumbel-Copula 函数为联合分布, 其表达式为:

$$C(u, v) = \exp\{-[(-\ln u)^\theta + (-\ln v)^\theta]^{-1/\theta}\} \quad \theta \geq 1 \quad (2)$$

式中,  $u, v$  均为随机变量的边缘分布函数;  $\theta$  为 Copula 函数参数, 与 Kendall 相关系数  $\tau$  的关系为  $\theta = 1/(1 - \tau)$ 。

对选定的 Copula 函数进行 K-S 假设检验。满足相应置信度要求, 则  $X, Y$  两变量相关性可通过该 Copula 函数描述。

### 2.3 洪水随机模拟

随机变量  $X, Y$  间存在相关性, 利用 Monte-Carlo 方法一次模拟产生的二维随机数需要满足一定的关系才能保持两变量间的相关结构。根据二维 Copula 函数性质可知, 边缘分布  $u, v$  服从  $[0, 1]$  的均匀分布, 则条件分布  $C(u | v)$  也服从  $[0, 1]$  的均匀分布, 其表达式为:

$$C(u | v) = C(u, v)(-\ln u)^{\theta-1} [(-\ln u)^\theta + (-\ln v)^\theta]^{1/(\theta-1)} / u \quad (3)$$

极端降雨引发的洪水模拟思路为先从  $(0, 1)$  中产生两个随机数  $m_1, m_2$ , 令  $u = m_1$  且  $m_2 = C(v | u)$ , 依据式(3)求得  $v$ 。再通过各边缘分布函数模拟得到上库降雨量与下库洪量随机数, 并根据式(1)获得上库洪量随机数。最后, 放大典型洪水过程得到施工洪水过程。

## 3 抽水蓄能电站导流系统风险计算

### 3.1 风险模型

导流系统风险率来自各导流建筑物失效概率的叠加。根据抽水蓄能电站施工度汛特点, 会产生两种导流系统失效情况: ①排水设施尚未运行情况下, 库盆水位超过设计标高, 淹没进出水口、

引水隧洞等施工部位导致地下厂房进水; ②下库大坝堰前水位超过围堰挡水高程造成基坑进水。

若上下库施工导流时段存在交叠且处于汛期, 则各部位需分别满足挡水条件, 才能完成导流任务。本文定义抽水蓄能电站导流系统风险率为基于全概率公式的上下库各临时挡水建筑物漫顶失效概率的组合概率。模型为:

$$R = 1 - \prod_1^k [1 - P(\max(Z_k) \geq H_k)] \quad (4)$$

式中,  $R$  为导流系统风险率;  $Z_k$  为各挡水建筑物前的水位;  $H_k$  为各挡水建筑物的挡水高程;  $k$  为需要计算失效概率的挡水建筑物数量。

风险模型中, 上库保护库盆的挡水建筑物最高水位通过日降雨量、泄流能力及水位-库容关系确定; 下库堰前水位则由上游河道来水、导流洞泄流能力和水位-库容关系确定。假设泄流能力服从三角分布, 洪水来流服从 Gumbel-Copula 分布, 通过 Monte-Carlo 法随机抽样来流和泄流。根据多次调洪演算, 得到挡水建筑物前最高水位, 统计超过挡水位次数, 最终计算得到风险概率。

### 3.2 计算流程

**步骤 1** 确定模拟次数  $N$ 、各分布参数及各部位挡水建筑物高程。

**步骤 2** 基于 Copula 分布产生上下库来水随机数, 同倍比法放大洪水过程, 基于三角分布产生泄流能力随机数。

**步骤 3** 根据上库洪水过程、水位-库容关系及库盆排水能力, 基于调洪演算, 模拟水位超过上库挡水建筑物的次数为  $\{M_1, M_2, \dots, M_i\}$  次, 其中  $i$  为上库导流挡水建筑物个数。

**步骤 4** 同理, 根据下库洪水过程、水位-库容关系及导流隧洞泄流能力, 模拟水位超过下库挡水建筑物的次数为  $\{S_1, S_2, \dots, S_j\}$  次, 其中  $j$  为下库导流挡水建筑物个数, 且  $k = i + j$ 。

**步骤 5** 依据式(3)可得导流系统风险为:

$$R = 1 - \prod_1^i (1 - M_i/N) \prod_1^j (1 - S_j/N) \quad (5)$$

## 4 工程案例

### 4.1 导流工程特点

贵州省南部某抽水蓄能电站上库由库盆、进出水口等建筑物组成, 其中库盆西北口填筑面板堆石坝挡水, 最大坝高 44 m。上库径流由降雨形成。下库距上库 3.2 km, 位于某江支流小寨河, 为在建水库。拦河坝为面板堆石坝, 最大坝高 85

m。下库引水系统进、出水口和拦渣坝均采用上下游围堰挡水施工。导流系统布置见图 1,导流方式与导流标准见表 1。其中,鉴于保护对象的重要性,上库进、出水口的度汛标准明显高于库盆。根据相关规范<sup>[7]</sup>选用其度汛标准为 100 年一遇。虽然进、出水口的度汛标准较高,相应风险率极低,但考虑到失事后果较严重,其风险评估仍有较强的参考意义。

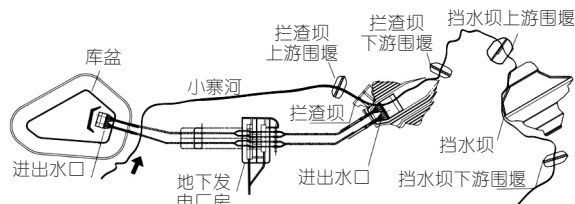


图 1 抽水蓄能电站施工导流系统布置

Fig. 1 The layout of the construction diversion system of the pumped storage power station

表 1 抽水蓄能电站施工导流方式和导流标准

Tab. 1 Diversion modes and standards for the pumped storage power station

水库	保护对象/挡水建筑物	对应水位/m	导流方式	度汛标准
上库	库盆/挡水坝	1 566.5	水坑集水、排水洞泄水	20 年一遇
	进、出水口/预留岩坎	1 567.5	预留岩坎挡水、排水廊道排水	100 年一遇
下库	进、出水口、拦渣坝/不过水围堰	1 052.0	围堰一次拦断河床、隧洞导流	100 年一遇
	面板堆石坝/不过水围堰	1 005.2	围堰一次拦断河床、隧洞导流	20 年一遇

该工程导流系统特点:①工程位于省内极端降雨高值地区。小寨河属典型山区雨源型河流,洪水主要由降雨形成;②上下库同时在建,施工导流时段有交叠。由于上下库导流失效概率共同决定了导流系统的整体风险,因此风险有叠加放大的可能性;③上下库相距仅 3.2 km,一旦遭遇极端降雨,施工洪水极可能受同一降雨事件影响。

#### 4.2 上下库来水联合分布及模拟

统计分析 2001~2021 年上库汛期降雨量和下库河道洪量,选定极端降雨序列  $X$  和对应洪量序列  $Y$ ,确定其边缘分布函数参数见表 2。Kendall 秩相关系数  $\tau = 0.5867$ ,表明上下库来水间具有较强相关性。

表 2 上下库极端降雨量与洪量边缘分布参数

Tab. 2 Marginal distribution parameters of extreme rainfall and flood volume for two reservoirs

变量	$C_V$	$C_S$	均值/ $10^4 \text{ m}^3$	$\mu/\text{mm}$	$\sigma^2$
$X$				62.72	22.96
$Y$	0.55	1.59	16.71		

绘制二元频率直方图选定 Copula 函数。如图 2 所示, $u, v$  分别为极端降雨量与洪量边缘分布,二者频率直方图与 Gumbel-Copula 密度函数形态相似,具有尾部相关性,且上尾高、下尾低。

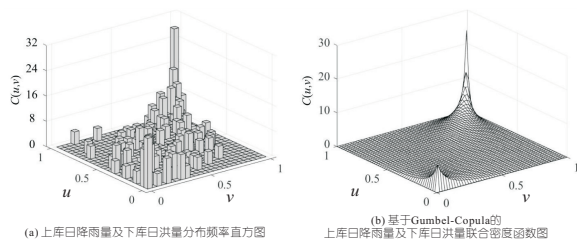


图 2 上库极端降雨量与下库洪量的二元频率直方图与 Gumbel-Copula 概率密度函数图

Fig. 2 Binary frequency histogram and Gumbel-Copula PDF of extreme rainfall and flood volume

表明上库降雨量越大,二者相关性越大。因此,在极端洪水影响下,选用 Gumbel-Copula 函数描述变量相关性不易低估风险概率。函数参数  $\theta = 2.419$ ,并通过 K-S 检验。

分别考虑与忽略随机变量的相关性,随机模拟 10 000 次情况下,得到上库日降雨量和下库日洪量的频率值。根据模拟结果结合式(1)得到上下库区 24 h 洪量抽样值散点图见图 3,采用同倍比方法放大典型年的洪水过程。

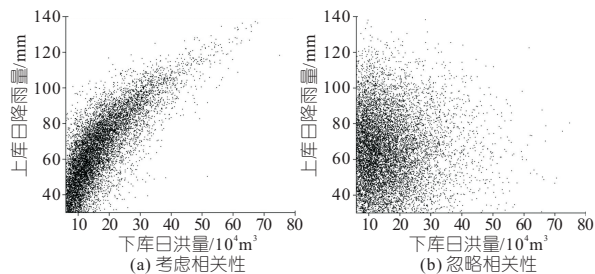


图 3 考虑和忽略相关性的上库极端降雨量与下库洪量模拟散点图

Fig. 3 Random number scatter diagram of extreme rainfall of upper reservoir and flood volume of lower reservoir considering their relevance and non-relevance

#### 4.3 导流系统风险计算

由上下库导流时段和施工进度可知,该工程施工跨越两个汛期,见图 4。考虑导流部位并行施工的数量及工期占汛期时长比,选择汛期 2 的导流建筑物为本文风险计算对象。

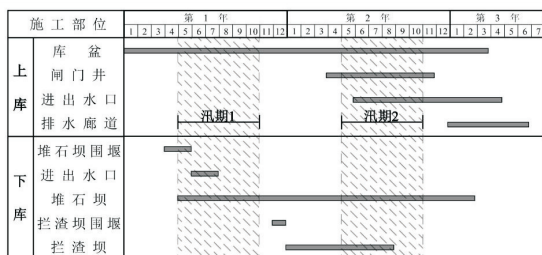


图 4 上下库导流系统施工进度

Fig. 4 Diversion system progress of upper and lower reservoirs

假定泄水建筑物泄流能力服从三角分布,其中  $a = 0.98, b = 1, c = 1.02$ 。计算库盆、堆石坝围堰和拦渣坝围堰最高水位,并统计其超过库盆最高挡水位、进、出水口预留岩坎和围堰的次数。最

终得到各挡水建筑物失效率、导流系统风险率及对应的当量重现期。表 3 为考虑上下库来水相关性和不考虑相关性的计算结果。

表 3 抽水蓄能电站导流系统风险计算结果及当量重现期

Tab. 3 Diversion risk rates and equivalent return periods of the pumped storage power station

指效	相关性	保护对象					导流系统
		上库库盆	上库进 出水口	下库 拦渣坝	下库 堆石坝	下库进 出水口	
失效率/	忽略相关性	1.03	$<10^{-5}$	0.39	0.58	$<10^{-5}$	1.99
风险率/%	考虑相关性	1.03	$<10^{-5}$	0.55	0.79	$<10^{-5}$	2.35
当量重	忽略相关性	97.00		256.00	172.00		50.00
现期/a	考虑相关性	97.00		181.00	126.00		42.00

#### 4.4 结果分析

(1)由表 3 可知,导流系统风险率比上下库导流部位风险率高,表明电站风险的叠加效应明显;此外,考虑上库极端洪水与下库河道径流相关性,下库导流部位的风险率显著上升。下库拦渣坝、堆石坝及电站导流系统整体风险上升幅度[(上升幅度值=(考虑相关性时的风险率-忽略相关性时的风险率)/忽略相关性时的风险率) $\times 100\%$ ]分别为 41.02%、36.21%、18.09%,表明相关性对上下库导流部位的风险均有较大影响。正是由于相关性作用,上下库来水变量的变异系数差变小,极端降雨和洪水来流在导流系统整体中的作用功能下降,最终表现为整体风险上升幅度不及导流部位的风险上升幅度。

(2)上下库进出水口挡水建筑物失效概率均小于 0.000 01%,极端降雨引发的失事风险可忽略不计,因此未纳入工程导流系统风险。表明为确保抽水蓄能地下厂房安全度汛,进出水口的施工度汛设计标准显著高于其他部位,符合工程实际。此外,结合原导流设计标准,表 3 中的当量重现期表明各导流部位和导流系统抵御极端降雨下的度汛设计标准大大提高,但鉴于极端降雨事件发生概率较小,决策者可结合风险偏好及成本收益进行参考。

## 5 结论

通过分析上库极端降雨与下库河道洪水的相关性构建联合分布并模拟施工洪水,基于抽水蓄能电站自身特性和导流系统风险的叠加性,建立风险模型。工程案例表明,上库极端降雨事件下,采用二维 Gumbel-Copula 函数构建上下库施工洪水联合分布是可行的。与不考虑相关性的风险计算结果相比,下库导流部位和导流系统风险率显著上升,但导流系统风险率受相关性影响导致系统整体作用功能下降,变化率不及导流各部位变化率大,体现了上下库来水相关性对风险的影响。为极端降雨下的抽水蓄能电站施工导流方案决策和度汛标准设计提供了参考依据。

#### 参考文献:

- [1] 韩冬,赵增海,严秉忠,等. 2021 年中国抽水蓄能发展现状与展望[J]. 水力发电,2022,48(5):1-4,104.
- [2] 胡志根,胡建明,李燕群. 过土石围堰下游护坡的溢流设计风险率模型[J]. 水科学进展,2003,14(5):622-625.
- [3] HUMBERTO MARENGO H, ARREGUIN F I, ALDAMA A A, et al. Case study: risk analysis by overtopping of diversion works during dam construction; the La Yesca hydroelectric project, Mexico[J]. Structural safety, 2013, 42: 26-34.
- [4] 张超,胡志根. 高拱坝施工初一中期导流风险模型及应用[J]. 水科学进展,2019,30(1):102-111.
- [5] 刘激,胡志根. 高堆石坝施工度汛挡水风险动态控制模型研究[J]. 水力发电学报,2016,35(2):82-89.
- [6] 常运超,王文鹏,段锋,等. 基于 Copula 函数的邕宁水利枢纽多时段施工导流风险及方案决策[J]. 水电能源科学,2021,39(10):127-130.
- [7] 国家能源局. 抽水蓄能电站设计规范:NB/T 10072-2018[S]. 北京:国家能源局,2018.

## Construction Diversion System Risk Analysis for Pumped Storage Power Station Considering Extreme Rainfall

HU Xin<sup>1</sup>, LIU Lian<sup>1</sup>, XU Shan<sup>2</sup>, HUANG Jian-wen<sup>1</sup>

(1. College of Hydraulic Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hydropower and Water Conservancy Engineering Institute, Power China Guiyang Engineering Co., Ltd., Guiyang 550081, China)

**Abstract:** To study the diversion risk of pumped storage power station construction under extreme rainfall, based on the idea of system risk analysis, the Copula-Monte Carlo method for diversion risk prediction was proposed by considering the correlation between upper and lower reservoir inflow. Joint distribution of the upper reservoir extreme rainfall and the lower reservoir flood volume was constructed to simulate the construction flood process caused by extreme rainfall. According to the characteristics of the upper and lower reservoirs diversion engineering, the risk model of the diversion system in the pumped storage power station was established to simulate the risk rate by considering hydrological and hydraulic uncertainty. Finally, a pumped storage power station under construction in southwest China was taken as an example, the results show Gumbel-Copula joint distribution fits the construction flood well in extreme rainfall cases, the diversion system risk rate is higher and more realistic when considering the correlation. It provides a reference for pumped storage power station construction diversion scheme selection and flood standard design under extreme rainfall.

**Key words:** pumped storage power station; analysis of construction diversion risk; extreme rainfall; Copula function