

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.201700079

大坝原址重建施工导流风险特性研究

刘全¹,胡志根¹,齐志坚²,闵瑞³

(1.武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室,湖北武汉430072;2.中水东北勘测设计研究有限责任公司,吉林长春130021;
3.广东粤港供水有限公司,广东深圳518021)

摘要:随着中国后水电开发时代的到来,大坝重建工程逐渐增多。大坝重建工程导流系统一般由原工程建筑物和新建导流建筑物联合组成,导流系统的组成和功能的丰富化使导流系统约束和导流风险因素更加复杂,导流风险呈现显著的特异性。本文旨在探索大坝重建工程施工导流风险计算方法及其变化规律。在大坝重建工程导流系统分析的基础上,归纳主要致险因素和致险模式,研究建立上游水位、下泄流量、下游水位等致险模式的数学表达,综合建立大坝重建工程导流多维风险判别式。针对系统中的洪水不确定性,利用Gumbel-Hougaard Copula函数描述洪水峰量联合分布,同时考虑原工程控泄规则和导流泄水建筑物的运用规则,利用Monte-Carlo方法模拟导流度汛过程并计算水力要素,结合风险判别式建立大坝重建工程施工导流多维风险计算模型。定性风险分析说明,建筑物的功能和设计标准差异决定了大坝重建工程导流系统的多种致险模式并不完全相关,导流系统风险呈显著多维分布特征。由于风险特性与导流系统配置有关,针对将原大坝作为上游围堰,占用原工程泄流建筑物出口的典型重建工程导流系统,进行了导流风险计算。定量风险特性分析说明:导流风险存在从下游漫顶致险模式向原坝泄水致险模式的转移点,主导致险模式转移的驱动因素是导流系统的泄流量,转移点对应下游围堰可防范的风险上限。研究成果为大坝重建工程导流风险评价和方案优化提供了重要支撑。

关键词:大坝重建;施工导流;风险特性;多维风险

中图分类号:TV551

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2017)05-0035-07

Risk Feature Analysis of River Diversion for Dam Reconstruction on the Original Site

LIU Quan¹, HU Zhigen¹, QI Zhijian², MIN Rui³

(1.State Key Lab. of Water Resources and Hydropower Eng. Sci.,Wuhan Univ.,Wuhan 430072;China;

2.China Water Northeastern Investigation,Design &Research Co. Ltd.,Changchun 130021;China;

3.Guangdong Yue Gang Water Supply Co. Ltd., Shenzhen 518021,China)

Abstract: As the era of the post-hydropower in China comes, the dam reconstruction works are increasing. In general, the river diversion for dam reconstruction consist of some original dam structures and some newly built diversion structures. Hence, compared to the diversion system for a newly built dam, the constraints and risk sources are more complicated in the diversion system for dam reconstruction. In this study, we will explored the risk evaluation of river diversion and the risk characteristics evolution rules. Based on the comprehensive analysis of diversion system for dam reconstruction, the main risk factors and risk modes were summarized, and the expressions of risk patterns were built. Those patterns included the upstream water level risk pattern, the downstream water level risk pattern and the discharge risk pattern. Then the multi-dimension risk discriminant was built on the ground of above expressions. Aiming at the flood uncertainty in the system, using the Copula function to describe the joint distribution of the flood peak and volume as well as taking account of the flow discharge rules and the operating regulation of discharge structures, the multi-dimension risk analysis model was built by sampling the flood routing, calculating hydraulic elements and integrating them into risk discriminant with Monte-Carlo method. The qualitative analysis showed that the above risk patterns were not fully correlated because of the differences in function and design standards of diversion structures, and the risk ruled by multi-dimensional distribution. Since the risk feature was decided by specified configuration, a typical case was provided, which used the original dam as upstream cofferdam and blocks the discharge way as construction pit. The quantitative risk analysis showed that there was a dominant risk pattern shifting point, beside which the discharging risk

收稿日期:2017-02-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51379164)

作者简介:刘全(1976—),男,副教授。研究方向:水利水电工程施工系统分析研究。E-mail: hapland@163.com

pattern took over downstream water level risk pattern as dominant risk pattern. The driving factor was the discharge rate of diversion system, and the shifting point corresponds to the upper risk limit that downstream cofferdam could defend. The research can serve as references for diversion risk evaluation and diversion scheme optimization for a dam reconstruction.

Key words: dam reconstruction; construction diversion; risk feature; multi-dimensional risk

进入后水电工程开发时代, 改建和重建大坝工程比例逐渐增加, 如丹江口大坝加高工程、丰满水电站大坝重建工程等。为了保证原枢纽功能并节省投资, 大坝重建多利用原大坝作为上游围堰, 新建部分导流建筑物共同组成重建工程施工导流系统^[1]。施工期, 导流系统和新建大坝需要“无缝”接替原工程的功能, 共同保证基坑干地施工和原工程的供水、发电、防洪、航运等功能。相对于新建大坝工程, 重建大坝工程施工导流系统的致险模式更为多样, 运行约束更为广泛, 施工导流风险特性更为复杂。因此, 开展大坝原址重建工程施工导流风险研究对于大坝重建工程施工导流度汛安全具有重要意义。

风险是涉及工程建设和运行管理的重要问题^[2]。水电工程施工导流风险是施工导流标准的重要参考, 国内外众多学者和工程设计人员从水电工程施工导流系统分析、致险因素及风险评价方法等方面开展了大量研究。施工洪水是导流系统的主要致险因素。宋晓猛等^[3]提出基于代理模型的水文模型参数分析方法。Favre等^[4]将Copula函数引入多维极值分布领域, 分析洪水峰量的联合分布; Zhang等^[5]进一步考虑洪峰、洪量、历时等多变量的相关性, 并利用Gumbel-Hougaard Copula构造联合分布函数; 李天元等^[6]采用基于Copula函数的改进离散求和方法研究梯级水库下游设计洪水, 得到考虑水库断面洪峰和区间洪量相关关系的水库下游洪水概率分布; 冯平等^[7]针对变化环境下洪峰、洪量序列, 建立了基于Copula函数的非一致性洪水序列多变量联合分布模型。

在致险因素分析的基础上, 水电工程施工导流风险评价模型, 从考虑单一水文因素逐步向考虑复合多因素发展。近年来, Nasir^[8]、钟登华^[9]等考虑施工洪水的峰量、历时和施工进度等的不确定性, 建立了施工导流风险模型; 针对梯级施工导流环境, 刘招等^[10]考虑上游已建水库控泄因素, 提出施工导流风险模型; 薛进平等^[11]考虑洪水入库过程和导流建筑泄流的随机性, 评估了土石挡水围堰导流风险。

为融合导流风险因素, 常用的风险评价方法有Monte-Carlo方法^[11]、1次2阶矩法、最大熵方法^[12]、分割多目标法^[13]等。其中Monte-Carlo方法因对复杂系统具有良好适应性, 应用较多。

以上研究在致险因素、风险模型和风险评价方法等方面, 为大坝原址重建工程的施工导流风险评

价奠定了良好的基础。然而这些研究多针对新建水电工程, 对大坝原址重建工程施工导流系统特征分析及其风险计算讨论甚少。鉴于此, 本文通过分析大坝原址重建工程施工导流系统主要致险因素和致险模式, 综合建立风险判别式, 通过融合多种不确定性和致险模式的描述建立重建工程导流风险评价模型, 并利用Monte-Carlo方法求解, 分析重建工程的导流风险特征。

1 重建工程施工导流系统风险分析

1.1 系统风险分析

大坝重建工程导流系统需要在保证原工程功能目标的前提下保证基坑安全。导流泄水建筑物的运用受到水库坝前水位、入库流量、洪量等多因素制约。除去一般认为的上游围堰漫顶风险之外, 具备泄流能力的原大坝会带来泄水风险; 新建的导流挡水建筑物则仍可能存在漫顶风险。其风险组成如图1所示。

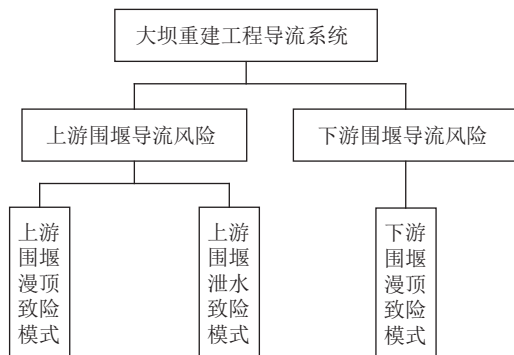


图1 重建工程施工导流系统风险组成

Fig.1 Risk composition of river diversion for dam reconstruction

一般全新导流系统各导流建筑物的设计标准基本一致, 泄水建筑物单一且基本不进行泄量控制, 因此可选取上游围堰漫顶作为导流系统的风险判据。与之不同, 大坝重建工程导流系统具备以下特征: 1) 上游围堰为原大坝, 下游围堰为新建导流建筑物, 各导流建筑物挡水标准不协调; 2) 导流泄水建筑物可能包括原大坝的泄水通道和新建的专用导流泄水通道, 组合运用方式复杂, 致险因素多, 致险模式丰富, 风险主导因素需要专门分析。

1.2 重建工程导流的致险因素模型

如前所述, 重建工程的导流系统为“新旧”建筑

物及其功能组合,每个环节均可能成为主导致险因素,需要逐因素分析致险模式,建立致险模型。

1) 上游围堰漫顶致险模式

上游围堰漫顶风险定义为:一次洪水过程,水库水位高于上游围堰堰顶高程发生的风险。上游围堰漫顶风险 R_1 如式(1)所示。

$$R_1 = P, Z(t) > H_u \quad (1)$$

式中, $Z(t)$ 为上游围堰堰前水位变化过程, H_u 为上游围堰堰顶高程。

2) 原坝泄水基坑过流致险模式

基坑如果占用了泄流建筑物的出口,开启基坑上方泄流建筑物泄流必然导致基坑淹没。则原坝泄水导致基坑过流的风险定义为需要利用基坑上方泄水建筑物泄流的风险,故原坝泄水风险 R_2 如式(2)所示。

$$R_2 = P, q_{out} > f_0 \quad (2)$$

式中, q_{out} 为原坝下泄流量, f_0 为必须开启基坑上方泄流建筑物的泄量阈值。

3) 下游围堰漫顶致险模式

如前所述,重建工程的导流建筑物功能多、挡水标准不协调,上游水位和下游水位的变化过程不同步,有必要专门考虑下游围堰漫顶风险。下游围堰漫顶风险定义为下游水位高于下游围堰堰顶高程的风险。下游围堰漫顶风险 R_3 如式(3)所示。

$$R_3 = P, D(t) > H_d \quad (3)$$

式中, $D(t)$ 为下游围堰堰前水位变化过程, H_d 为下游围堰堰顶高程。

一般地,如果洪水从上游灌入基坑,也会引发下游围堰漫顶溃决。但是此类情况,导流系统失效在先,因此此类下游围堰漫顶不应计入致险模式。另外,下游河道的行洪条件对导流系统风险也有影响,本文为突出导流系统本身的风险特性,不做深入讨论。

1.3 大坝重建工程导流风险

基于各致险因素的致险模型,根据上游水位、下游水位、下泄流量等过程,统计导流系统失效事件。基坑淹没综合风险 R 为多种致险模式的综合。式(4)为大坝重建工程导流综合风险判别式。

$$\begin{cases} R_1 = P(Z(t) > H_u), \\ R_2 = P(q_{out}(t) > f_0), \\ R_3 = P(D(t) > H_d), \\ R = P[(Z(t) > H_u) \cup (q_{out}(t) > f_0) \cup (D(t) > H_d)] \end{cases} \quad (4)$$

依式(4)可见,施工导流系统风险 R 的随机分布受多元变量影响。对于一般新建导流系统,上游围堰、泄流建筑物、下游围堰常采用统一的设防标准,则 R_1 、 R_2 、 R_3 完全相关即 $R=R_1$,式(4)退化为一般导流系统致险模型。对于大坝重建工程,导流建筑物的功

能和设计标准差异决定了各致险模式对导流水力要素脆弱性的差异;控泄规则和泄流通道运用规则分离了 R_1 、 R_2 、 R_3 的相关性,因此需要综合 R_1 、 R_2 、 R_3 评价导流系统风险,并且特定的参数组合可能存在特定的主导致险模式。主导致险模式的转移特性结合典型工程在案例分析中讨论。

2 大坝重建工程施工导流风险建模和解算

导流系统致险因素模型和风险判据均涉及施工导流系统的水力指标。由此,借助度汛水力计算模型,模拟洪水经导流系统下泄的过程,建立度汛水力指标的计算模型,结合风险判别式,建立大坝重建工程施工导流风险模型,进而建立模型的求解方法。

2.1 施工洪水不确定性

假设洪峰、洪量均为服从PⅢ分布的连续型随机变量,根据Sklar定理,设洪峰 Q 和时段洪量 W 的边缘分布分别为 $F_Q(q')$ (洪峰用 q' 表示)和 $F_W(w)$,那么存在唯一的Copula函数 $C(F_Q(q'), F_W(w))$,使

$$F(q', w) = C(F_Q(q'), F_W(w)), \forall q', w \quad (5)$$

考虑洪水峰量的相关性,采用Gumbel-Hougaard Copula作为连接函数,描述施工洪水的不确定性:

$$C(F_Q(q'), F_W(w)) = \exp\left\{-\left[(-\ln F_Q(q'))^\theta + (-\ln F_W(w))^\theta\right]^{1/\theta}\right\}, \theta > 1 \quad (6)$$

式中, θ 为Copula函数的参数,可根据与Kendall秩相关系数 τ 的关系用 $\theta = 1/(1-\tau)$ 求得。

根据式(5)、(6),通过联合分布随机抽样方法,模拟得到洪峰洪量相关的施工洪水不确定性参数。步骤如下:

步骤1:产生服从 $[0, 1]$ 分布的2个独立随机数 r_1 和 r_2 ;

步骤2:令 $F_Q(q') = r_1$,求出 q' ,设 r_2 为洪峰为 q' 时的洪量 w 的条件概率分布值,即 $r_2 = S_Q(w|q') = \frac{\partial F(q', w)}{\partial q'}$,求得洪量 w ;

步骤3:根据求得的峰量比值,在资料中选择峰量比值相近的洪水过程;

步骤4:采用同频率法放大洪水过程线得到施工洪水过程线,即 $Q_m = F_s(q', w)$ 。其中, $F_s(\bullet)$ 为洪水过程线处理函数。

2.2 原工程多目标运行约束

水库防洪、供水、发电、航运、生态等功能目标与导流风险相关联,导流风险受水库运行多目标性制约。原水库的发电、取水、生态、航运等功能运行受到取水建筑物取水水位、生态流量、河道航运最低水位等的限制。上述限制和约束对导流系统的影响较为复杂,在运行管理中,多利用如式(7)的控泄规则综合反映上述约束。

$$q_{\text{out}} = f(Z(t_i), \bar{Q}_{\text{in}}(t_i), W_{\text{in}}(t_i), q_s) \quad (7)$$

式中, f 为控泄规则函数, $Z(t_i)$ 为 t_i 时刻库水位, $\bar{Q}_{\text{in}}(t_i)$ 为 t_i 时刻调度规则规定的时段平均入库流量, $W_{\text{in}}(t_i)$ 为 t_i 时刻调度规则规定的时段入库洪量, q_s 为导流系统的泄流能力。

2.3 大坝重建工程导流度汛风险模型

在系统考虑河道来流、调度规则、导流建筑物泄流及水库的多目标特征的基础上建立度汛过程模拟模型。采用 Copula 函数模拟洪峰洪量的联合分布, 模拟入库施工洪水不确定性; 根据控泄规则、上游水位泄量关系和水位库容关系及下游水位流量关系, 基于水量平衡方程演算度汛过程, 得到各致险因素相关的下泄流量过程、上游水位过程和下游水位过程等关键指标, 如式 (8) 所示。

$$\begin{cases} F(q', w) = C(F_Q(q'), F_W(w)), \\ Q_{\text{in}} = F_s(q', w), \\ \bar{Q}_{\text{in}}(t_i) = \frac{Q_{\text{in}}(t_{i-1}) + Q_{\text{in}}(t_i)}{2}, \\ W_{\text{in}}(t_i) = \int_{t_{i-1}}^{t_i} Q_{\text{in}}(t) dt, \\ q_{\text{out}}(t_i) = f(Z(t_i), \bar{Q}_{\text{in}}(t_i), W_{\text{in}}(t_i), q_s), \\ V(t_i) = (Q_{\text{in}}(t_i) - q_{\text{out}}(t_i))(t_i - t_{i-1}) + V(t_{i-1}), \\ Z(t_i) = Z_V(V(t_i)), \\ D(t_i) = D_q(q_{\text{out}}(t_i)) \end{cases} \quad (8)$$

式中, Q_{in} 为入库洪水过程, W_{in} 为洪量 W_{in} 的统计历时, V 为库容变化过程, D 为下游水位变化过程, Z_V 为库容与水位关系, D_q 为下游河道水位流量关系。

2.4 导流风险的解算

1) 边界条件:

$$\begin{cases} Z = Z_V(V), \\ D = D_q(q), \\ q_s = q(Z, S_1, S_2, \dots) \end{cases} \quad (9)$$

式中, S_1, S_2, \dots 为导流泄水建筑物参数。

2) 初始条件:

$$V(t_0) = Z_V^{-1}(Z(t_0)) \quad (10)$$

式中, $Z(t_0)$ 为汛前水位。

3) 风险解算

基于 Monte-Carlo 方法, 大坝重建工程导流风险解算步骤如下:

步骤 1: 生成随机洪水过程;

步骤 2: 将式 (9) 的边界条件和式 (10) 的初始条件, 代入式 (8);

步骤 3: 利用式 (8) 计算上游水位、下泄流量和下游水位的变化过程;

步骤 4: 依据式 (4) 判断重建工程施工导流风险。

多次以随机样本代入上述步骤 1~4, 模拟导流

度汛过程, 统计得到大坝重建工程的导流多维风险值及各致险模式的边缘风险值。

由于大坝重建工程的导流系统配置各异, 其风险特征也不尽相同。下面以利用原坝作上游围堰、占用坝后溢洪道作为基坑的大坝重建工程典型案例进一步说明重建工程导流风险特性。

3 典型案例分析

3.1 工程概况

某混凝土重力坝正常蓄水位 261 m, 设计洪水位 266 m, 坝顶高程 266.5 m, 库容约 $10.78 \times 10^9 \text{ m}^3$, 设溢流坝段和坝后式发电厂房。承担发电、防洪、灌溉、城市及工业供水、养殖和旅游等综合功能, 已服役 70 余年。现需重建大坝, 重建工程利用原大坝作为上游围堰, 在左岸新建导流隧洞导流; 为防止洪水从下游倒灌入基坑, 在基坑下游新建断流土石围堰围护基坑。导流平面示意图如图 2 所示。

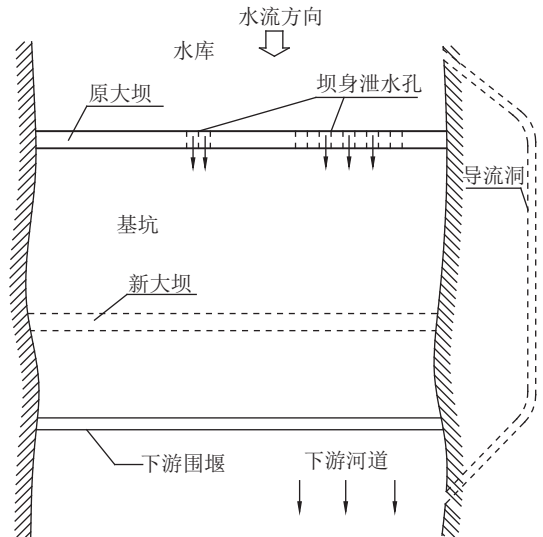


图 2 典型大坝重建工程导流平面示意图

Fig.2 Sketch layout of river diversion for a case of dam reconstruction

1) 洪水不确定性参数

洪峰和洪量均服从 P III 分布。洪峰均值为 $4860 \text{ m}^3/\text{s}$, C_V 为 0.78, C_S/C_V 为 2.5; 3 d 最大洪量均值为 $9.711 \times 10^8 \text{ m}^3$, C_V 为 0.68, C_S/C_V 为 2.5; 洪水峰量相关系数 τ 为 0.61, θ 为 2.56。

2) 汛前水位参数

综合考虑导流系统功能目标, 取汛前水位 $Z(t_0)$ 为 257.9 m。

3) 导流系统泄量控制规则

利用水库控泄规则反映原工程的多目标运行约束, 考虑上游水位 Z , 日均入库流量 Q_d , 3 d 入库流量 W_{3d} 作为控制条件, 决定导流系统下泄流量 (以下简称“泄量”) q_{out} 的取值范围。具体参数见表 1。

表1 导流系统泄量控制规则

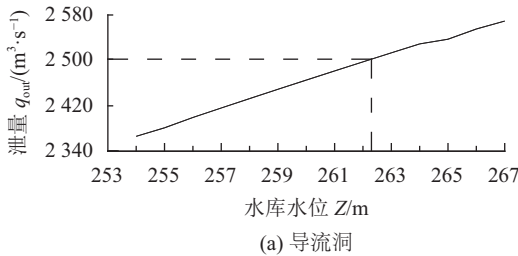
Tab.1 Discharge regulation of river diversion system

水位条件/m	流量和洪量条件	导流系统泄量限制/(m ³ ·s ⁻¹)
255.42≤Z≤257.90	无	≤2 500
257.90<Z≤262.30	$Q_d \leq 10\,700\text{ m}^3/\text{s}$ 且 $W_{3d} \leq 19.4 \times 10^8\text{ m}^3$	≤2 500
	$Q_d > 10\,700\text{ m}^3/\text{s}$ 或 $W_{3d} > 19.4 \times 10^8\text{ m}^3$	≤4 000
262.30<Z≤264.1	$Q_d \leq 10\,700\text{ m}^3/\text{s}$ 且 $W_{3d} \leq 29.3 \times 10^8\text{ m}^3$	≤4 000
	$Q_d > 10\,700\text{ m}^3/\text{s}$ 或 $W_{3d} > 29.3 \times 10^8\text{ m}^3$	≤5 500
Z>264.1	无	可开启全部泄流设施

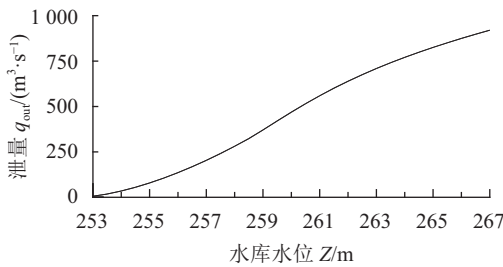
注: Z为水库上时段末水位, Q_d 为水库上时段平均入库流量, W_{3d} 为前72 h入库水量。

4)导流泄水建筑物的运用规则

导流系统泄水量受调度规则控制,为宣泄特定流量,需根据导流系统配置和泄流能力选定泄流建筑物。本例泄流建筑物由导流洞和原大坝坝身11个溢流孔组成,导流洞和单溢流孔泄流能力曲线如图3所示。泄流方式组合规则:为了尽量保护基坑干地施工,首选采用导流洞单独泄流;当导流洞的泄流能力无法满足泄量要求时,溢流孔开启凑泄。



(a) 导流洞



(b) 单个溢流孔

图3 导流建筑物泄流能力曲线

Fig.3 Discharge capacity of diversion structures

3.2 重建工程施工导流风险特征分析

3.2.1 典型度汛过程分析

为说明度汛过程与导流风险之间的关系,选取典型洪水,利用前述方法计算库水位、泄量和下游水位等过程(图4)。其泄量过程线分段说明如下: a点至b点之间,库水位为257.9 m,由于泄量需求低于2 500 m³/s,导流洞单独运用保持库水位; b点至c点之间,入库流量低于10 700 m³/s且水库水位低于262.30 m,泄量取2 500 m³/s,仍可单独运用导流洞泄流; c点至d点之

间,入库流量超过10 700 m³/s,导流系统泄量须达4 000 m³/s,坝身泄水建筑物必须开启; d点至e点之间,流量回落,最大泄量回到2 500 m³/s; e点至f点之间,上游水位已超过262.30 m,泄量提升到4 000 m³/s。各阶段的主导致险因素分析如表2所示。

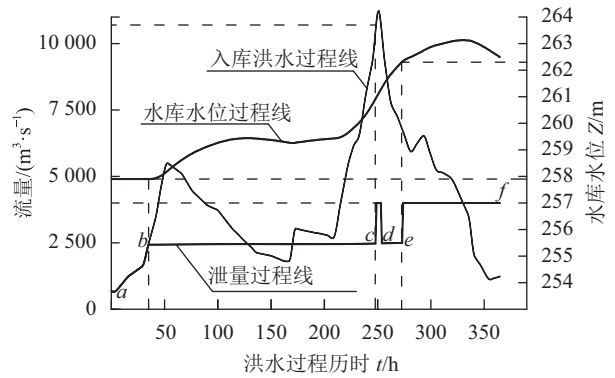


图4 典型洪水的库水位和导流系统泄量过程线

Fig.4 Water level and discharge hydrograph for typical flood passing

3.2.2 施工导流系统风险特性分析

利用Monte-Carlo方法,对度汛过程进行多次随机抽样,利用式(4)可统计洪峰、洪量、导流系统上、下游水位和泄量等主要致险因素与重现期之间的关系。假定下游围堰高程可求得导流风险及各致险模式的边缘风险。下游围堰高程关键点对应的导流风险见表3。

可见,下游围堰高程与导流系统风险之间并不完全相关。过度提高下游围堰高程,也许可以保证下游堰顶高于下游水位,但是基坑将被上游原坝泄流的洪水淹没。即随着下游围堰升高,原坝泄水致险模式 R_2 将会取代下游漫顶致险模式 R_3 ,成为导流系统的主导致险模式。从式(2)可知 R_2 的致险机理与下游围堰不相关,即大坝重建工程的导流风险呈现出多维风险特征。图5中的下游围堰高程与导流系统风险关系曲线上的拐点即为主导致险模式切换点。

表 2 导流系统的泄量阶段的主导致险模式分析

Tab.2 Dominant risk pattern by discharge stage of river diversion

区段	泄量控制条件	泄量 $q_{out}/(m^3 \cdot s^{-1})$	泄流建筑物	说明	主导致险模式
a~b	$Z=257.90\text{ m}$	$\leq 2\,500$	导流洞	保持库水位不变	下游围堰漫顶
b~c	$257.90\text{ m} \leq Z \leq 262.30\text{ m}$ 且 $Q_d \leq 10\,700\text{ m}^3/\text{s}$	2 500	导流洞	库水位上涨	下游围堰漫顶
c~d	$17\,000\text{ m}^3/\text{s} < Q_d \leq 19\,700\text{ m}^3/\text{s}$	4 000	导流洞+溢流孔	溢流孔参与泄流	原坝泄水
d~e	$Q_d \leq 10\,700\text{ m}^3/\text{s}$	2 500	导流洞	库水位上涨	下游围堰漫顶
e~f	$262.30\text{ m} \leq Z \leq 264.10\text{ m}$	4 000	导流洞+溢流孔	库水位回落	原坝泄水

注：洪量条件在本例中未触发，因此未出现。

表 3 下游围堰顶部高程与导流风险关系

Tab.3 Relationship between diversion risk and crest level of downstream cofferdam

下游围堰顶高/m	导流风险/%	重现期/a	主导致险模式
194.90	100.00	1.00	
195.14	56.80	1.76	下游漫顶致险模式
195.18	9.75	10.26	
>195.18	9.75	10.26	原坝泄水致险模式

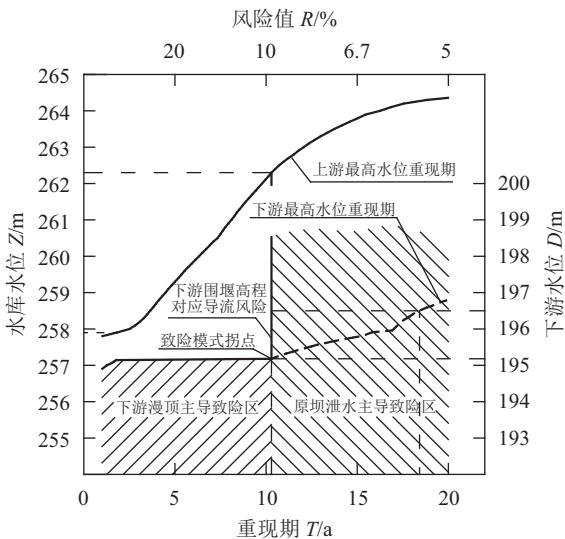


图 5 水位与主导致险模式关系

Fig.5 Relationship between water level and dominant risk pattern

下文利用洪峰流量和导流系统最大泄量的重现期关系，从泄量的角度分析导流系统的致险模式迁移驱动因素。

洪峰流量低于 $8\,190\text{ m}^3/\text{s}$ 时，利用水库调蓄，最大泄量可控制在 $2\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 以下，可仅用导流洞泄流，此时导流风险的主导因素为下游漫顶致险模式 R_3 ；洪峰流量高于 $8\,190\text{ m}^3/\text{s}$ 时，导流系统最大泄量达 $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ ，需原坝泄水建筑物开启湊泄，导流系统风险主导因素转移为原坝泄水致险模式 R_2 （图6）。从导流系统的

水位重现期关系可见主导致险模式转移的驱动因素是导流系统的泄流量。

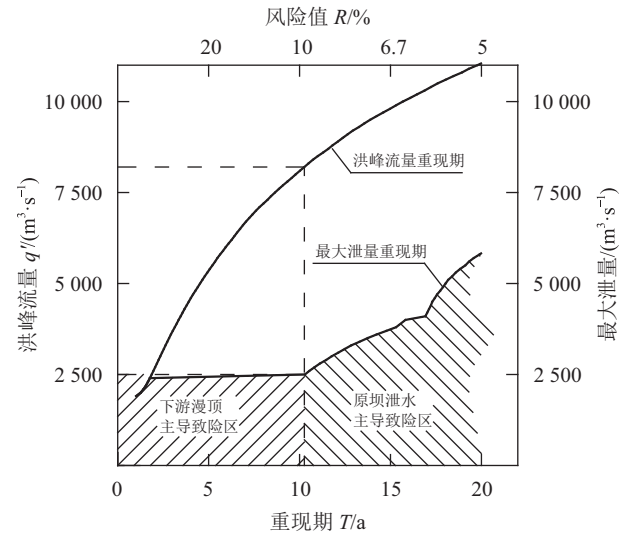


图 6 流量和主导致险模式关系

Fig.6 Relationship between discharge and dominant risk pattern

3.2.3 下游围堰高程的有效上限

如前所述，由于主导致险因素的转移特性，下游围堰可防范的风险上限即为致险因素转移点，亦对应下游围堰的有效高程上限。由此，取下游围堰的设计水位为 195.18 m ，堰顶高程 196.5 m 。本例导流系统风险为 $1/10.26$ 约 9.75% ，如式（11）所示。

$$R = P[(Z(t) > H_u) \cup (q_{out}(t) > f_0) \cup (D(t) > H_d)] = 1/10.26 \quad (11)$$

各致险源的边缘风险值，如式（12）所示。

$$\begin{cases} R_1 = P(Z(t) > 266.5) = 1/185.87, \\ R_2 = P(q_{out} > 2\,500) = 1/10.26, \\ R_3 = P(D(t) > 196.5) = 1/18.42 \end{cases} \quad (12)$$

可见，即使堰顶高程对应的下游围堰致险模式的边缘风险值可达 $1/18.42$ ，在多种致险因素综合作用下，导流系统风险仅为 $1/10.26$ 。

4 结 论

大坝重建工程导流较一般的导流工程的致险因素组合更复杂,上游围堰漫顶、基坑上游坝身泄流、下游围堰漫顶等均可能成为导流系统的主导致险因素。为此,针对重建工程施工导流,采用Copula函数模拟洪峰、洪量的不确定性,分析了导流系统的上游水位、下泄流量、下游水位等致险因素,建立了致险模式表达,综合建立重建工程施工导流多维风险模型,并提出了基于Monte-Carlo随机抽样的求解方法。定性风险分析说明,导流建筑物的功能和设计标准差异决定了导流系统的多种致险模式并不完全相关,其风险特性与特定的导流系统配置有关。典型案例表明:以原大坝为上游围堰、占用原工程泄流建筑物出口的导流系统,主导致险模式存在从下游漫顶致险模式向原坝泄水致险模式的转移点,其转换的驱动因素是导流系统的下泄流量,并且转移点对应下游围堰可防范的风险上限。研究可为大坝重建导流风险评价和方案优化提供理论支撑。

参考文献:

- [1] Kim K, Kang H. Cases of dam rehabilitation projects in Korea[J]. *International Journal on Hydropower and Dams*, 2004, 11(2): 88–90.
- [2] Chen Liang, Li Xingyuan, Fu Chuang. Decision-making of power grid DC De-icing plan based on equal-risk method[J]. *Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition)*, 2015, 47(2): 158–164. [陈亮, 李兴源, 傅闯. 基于等风险度法的电网直流融冰计划决策[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2015, 47(2): 158–164.]
- [3] Song Xiaomeng, Zhang Jianyun, Kong Fanzhe, et al. Multi-objective optimization for hydrological models using surrogate modeling[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2014, 46(2): 36–45. [宋晓猛, 张建云, 孔凡哲, 等. 基于代理模型的水文模型参数多目标优化[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2014, 46(2): 36–45.]
- [4] Favre A C, Aollouni S El. Multivariate hydrological frequency analysis using copulas[J]. *Water Resources Research*, 2004, 40(1): 1–12.
- [5] Zhang L, Singh V P. Gumbel-Hougaard copula for trivariate rainfall frequency analysis[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2007, 12(4): 409–419.
- [6] Li Tianyuan, Guo Shenglian, Liu Zhangjun, et al. Design flood estimation methods for cascade reservoirs[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(6): 641–648. [李天元, 郭生练, 刘章君, 等. 梯级水库下游设计洪水计算方法研究[J]. *水利学报*, 2014, 45(6): 641–648.]
- [7] Feng Ping, Li Xin. Bivariate frequency analysis of non-stationary flood time series based on Copula methods[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(10): 1137–1147. [冯平, 李新. 基于Copula函数的非一致性洪水峰量联合分析[J]. *水利学报*, 2013, 44(10): 1137–1147.]
- [8] Nasir D, McCabe B, Hartono L. Evaluating risk in construction-schedule model (ERIC-S): Construction schedule risk model[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2003, 129(5): 518–527.
- [9] Zhong Denghua, Huang Wei, Zhang Fayu. Uncertainty analysis for construction diversion based on system simulation[J]. *Journal of Tianjin University*, 2006, 39(12): 1441–1445. [钟登华, 黄伟, 张发瑜. 基于系统仿真的施工导流不确定性分析[J]. *天津大学学报*, 2006, 39(12): 1441–1445.]
- [10] Liu Zhao, Huang Qiang, Wang Yimin, et al. Diversion flood risk control of Shuhe hydropower project construction with considering the discharge control of upstream Ankang reservoir[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2008, 27(2): 29–34. [刘招, 黄强, 王义民, 等. 基于安康控泄的蜀河水电站施工导流洪水风险控制[J]. *水力发电学报*, 2008, 27(2): 29–34.]
- [11] Xue Jinping, Hu Zhigen, Liu Quan. Method of multi-attribute group negotiation decision of construction diversion schemes[J]. *Systems Engineering Theory & Practice*, 2014, 34(5): 1324–1329. [薛进平, 胡志根, 刘全. 施工导流方案多属性群协商决策[J]. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(5): 1324–1329.]
- [12] Wang Liping, Zhang Yanke, Ji Changming, et al. Simulate maximum entropy method and its application to reservoir flood risk calculation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(1): 27–32. [王丽萍, 张验科, 纪昌明, 等. 模拟最大熵法及其在水库泄洪风险计算中的应用[J]. *水利学报*, 2011, 42(1): 27–32.]
- [13] Jin Lianghai, Tian Bin, Liang Chuan. Application of PMRM model for anti-flood measure[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2010, 42(1): 87–90. [晋良海, 田斌, 梁川. 施工度汛的分割多目标风险模型及应用[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2010, 42(1): 87–90.]

(编辑 张琼)

引用格式: Liu Quan, Hu Zhigen, Qi Zhijian, et al. Risk feature analysis of river diversion for dam reconstruction on the original site[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2017, 49(5): 35–41. [刘全, 胡志根, 齐志坚, 等. 大坝原址重建施工导流风险特性研究[J]. *工程科学与技术*, 2017, 49(5): 35–41.]