

# 基于围堰施工导流系统风险率不确定性分析

张亚龙

(江苏昆山市花桥水利(水务)站, 江苏 苏州 215332)

**摘要:** 围堰施工导流工程设计应综合考虑水力、水文以及其他不确定性因素的影响, 施工导流系统风险概率作为工程设计的重要依据, 在围堰施工过程中发挥着中重要作用。针对传统导流风险计算方法忽略了参数及分布的不确定性问题, 而仅仅考虑单一不确定因素的概率分布及其参数值的实际状况, 对围堰导流系统风险率的不确定性利用 Monte-Carlo 仿真法进行分析, 并综合考虑水文、水力及其他分布参数的不确定性影响作用。结果显示: 导流系统风险率受水文、水力因素的不确定性影响较为显著, 综合考虑各不确定性水力与水文因素的导流风险率服从正态分布。

**关键词:** 围堰施工; 导流系统; 风险率; 不确定性

中图分类号: TV551

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2019)03-0047-05

## Uncertainty analysis of risk rate of diversion system based on cofferdam construction

ZHANG Yalong

(Kunshan Huaqiao Water Conservancy Station, Suzhou 215332, Jiangsu)

**Abstract:** The influence of hydraulic, hydrological and other uncertainties should be considered comprehensively in the design of cofferdam construction diversion project. As an important basis for engineering design, the risk probability of construction diversion system plays an important role in the process of cofferdam construction. In view of the fact that the traditional risk calculation method neglected the uncertainties of parameters and distribution, and only considered the probability distribution of a single uncertain factor and the actual situation of its parameter value, the uncertainty of risk rate of cofferdam diversion system was analyzed by Monte-Carlo simulation method, and the uncertainty effects of hydrological, hydraulic and other distribution parameters were considered comprehensively. The results showed that the risk rate of diversion system was significantly affected by the uncertainties of hydrological and hydraulic factors. The risk rate of diversion system considering the uncertainties of hydraulic and hydrological factors obeyed the normal distribution.

**Key words:** cofferdam construction; diversion system; risk rate; uncertainty

## 0 引言

风险率为选择施工导流风险工程标准的重要前提和主要依据, 所以对综合风险率的计算分析

将直接影响到导流工程的施工状况和进程<sup>[1-4]</sup>。影响施工导流系统的因素较多, 且各因素具有明显的不确定性特征, 如影响施工导流能力、河道来水量水文、水力以及结构的不确定性等, 并且用于

收稿日期: 2018-10-31

作者简介: 张亚龙(1989—), 男, 工程师, 本科, 研究方向为水利工程。

计算分析风险率的方法也多种多样。如王卓甫等<sup>[5]</sup>对施工导流存在的各种不确定量进行了全面、系统的分析,并研究了各参数的确定方法与分布特征,对施工导流风险利用 Monte-Carlo 法进行了客观评判;肖焕雄等<sup>[6]</sup>对水电工程建设各阶段存在的风险率利用概率论与随机过程理论进行了预测和分析,并提出了相应的计算公式。目前,因所积累的数据资料有限,涉及导流风险的相关研究主要集中在水力与水文不确定性方面,通过假定不确定性因素服从某一概率分布,然后利用数值模拟法或解析法确定相应的分布参数,并完成导流系统风险率的计算。该方法对不确定性因素的分布参数及概率分布特征通常是按照经验进行选取,并将其作为定值判断。但是,风险因子的参数分布往往具有明显的不确定性特征,其计算结果受不同的参数抽样方式的影响较为明显,从而导致导流风险率也表现出不确定性特征。因此,对其不确定性分析具有重要意义。据此,本文在综合考虑了水力与水文不确定性因素的基础上建立了导流风险率仿真模型,并对导流风险与不同的概率分布参数取值、参数抽样方式之间的影响作用进行了探讨,以期揭示不确定性因素对导流风险率的影响规律,并为施工导流工程设计提供可靠、全面的决策依据。

## 1 围堰施工导流不确定性因素

### 1.1 水文因素

在确定洪水过程设计线时,现行的导流设计通常是利用适线法和实测水文资料计算指定频率的设计洪量和洪峰流量,然后对某一频率下的洪水过程采用放大法进行设计。在该过程中主要有以下不确定性因素:典型洪水过程线不能代表施工洪水的总体特征,在设计过程中只能作为一个样本考虑;水文资料的获取方法及其数值通常与实际状况存在一定偏差;对理论频率曲线利用适线法进行推求时,具有一定的主观性影响作用。因此,受上述各不确定性因素的影响作用,从而造成水文、洪水过程、洪量以及洪峰流量的不确定性。假定洪峰流量服从型分布为施工导流风险率模拟的常用方法,相应的概率密度表达式如下:

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (X - a_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-a_0)} \quad (1)$$

$$\alpha = 4/C_S^2; \beta = 2/(\mu_Q C_V C_S); a_0 = \mu_Q [1 - (2C_V/C_S)] \quad (2)$$

式中:

$\alpha$ 、 $\beta$ 、 $a_0$ —分别为 P—Ⅲ型分布的形状、尺度、位置参数;

$\Gamma(\alpha)$ — $\alpha$  为的伽马函数;

$C_S$ 、 $C_V$ —分别为 P—Ⅲ型分布的变差系数和偏态系数;

$\mu_Q$ —为 P—Ⅲ型分布的均值。

### 1.2 水力因素

施工导流计算流量与实际流量之间的差异通常为水力不确定性因素,将泄流量通常作为导流系统的随机变量,并满足三角形分布,其函数表达式为:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)}; & a \leq x \leq b \\ \frac{2(c-x)}{(c-a)(c-b)}; & b \leq x \leq c \\ 0; & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中:

$a$ 、 $b$ 、 $c$ —分别为围堰泄流能力下限、平均以及上限值,可根据主要影响因素假设的糙率系数确定。

### 1.3 其他因素

考虑到导流系统的复杂性、不确定性特征,在水电工程建筑物泄流过程中同样存在其他的不确定因素,如水位与面积、库容之间的曲线误差、上游河道坍塌、以及库区现场绘制测量误差等。由于水电工程数据资料的有限性,并受到现阶段研究深度的限制,本文暂不考虑此类不确定性因素对导流风险的影响作用。

## 2 施工导流风险率不确定性分析方法

### 2.1 导流风险率

广义风险只是在特定的时空与相关环境下某一对象发生的不利事件概率,并因此而造成一定程度的损失,主要有三大基本要素,如发生概率、不利事件以及造成的损失。本文仅对导流风险发生的概率进行考虑,即仅分析围堰的风险率。水电工程导流风险率是指天然来水量在规定的导流期内超过建筑物泄流能力和水库调蓄能力的概率,其表达式为:

$$P_f = P[\int_0^T (Q_1 - Q_2) dt > \Delta V_d] \quad (4)$$

式中:

$T$ —水库由滞洪到最高库水位的延续时间;

$Q_1$ 、 $Q_2$ —分别为洪水流量和泄水流量;

$\Delta V_d$ —水库设计滞洪库容, 可根据坝顶或围堰高程确定。

结合导流建筑物泄流能力和施工洪水过程的不确定性因素, 利用相关设计资料对施工导流风险进行分析, 并模拟了建筑物泄流能力和上游洪水过程, 通过调洪演算统计分析了超过上游围堰设计挡水位的围堰前水位概率  $P_f$ , 其表达式为:

$$P_f = P(Z_{max} > Z_D) \quad (5)$$

式中:

$Z_{max}$ 、 $Z_D$ : 分别为上游围堰前最高水位和设计挡水位。

## 2.2 MC 法理论分析

按照一定的概率分布对不确定性参数利用 MC 法进行大量随机取样, 然后对水力、水文以及出水量等参数进行模拟, 并统计堰前最高水位进行调洪和导流风险率的计算。因此, 模拟次数在一定程度上可对 MC 法的计算精度产生直接影响, 本文结合相关文献选定合适的模拟次数为 1000 次。对影响导流风险率的水文、水力不确定性因子的分布参数抽样方式及其概率分布参数取值进行探讨分析, 是本文研究的重点, 为便于计算和分析首先假定洪峰流量服从  $P$ —Ⅲ型分布。糙率是影响泄流能力较为显著的水力风险因子, 本文对导流风险率分析仅考虑糙率因子并假定服从三角形分布, 分别采用正态分布抽样与均匀抽样两种状况作为各风险因子的概率抽样方式。风险率不确定性分析主要流程为: 对洪峰分布参数  $C_V$ 、 $C_S$  利用水文风险因子概率分布随机生成组洪峰序列, 然后利用峰量之间的作用关系和同频率放大法分别生成洪量序列、洪水过程; 对泄流能力曲线利用随机生成的糙率数进行拟合, 然后对  $n$  组洪水利用拟合好的泄流能力曲线进行调洪计算, 分别得到相应的堰前最高水位; 利用文中所述导流风险率计算公式, 对水力、水文不确定性参数进行多次模拟, 并深入统计分析其概率分布。

## 3 实例应用

某水电站初期采用隧洞和全年段流围堰的施工导流方式, 主要采取 5 条导流隧洞作为初期泄流建筑物。按照 30 年一遇洪水作为初期导流标准设计, 相应的洪峰流量为  $26500 \text{ m}^3/\text{s}$ 。洪峰分布参数分别  $C_V$ 、 $C_S/C_V$  为 0.28 和 4.00, 参数值  $\mu_Q$  为  $162000 \text{ m}^3/\text{s}$ , 糙率为 0.012 ~ 0.016 范围。调洪演算原设计洪水标准, 得到堰前最高水位为 651.62 m, 然后结合水电站实际状况和洪水过程特征, 分别选取 652.00 m、653.00 m、654.00 m 围堰堰顶高程进行风险率的分析, 均采用正态与均匀抽样方式进行参数抽样。为满足计算精度和效率要求, 参考已有文献选取抽样次数  $n$  为 4000 次, 选取  $N=2000$  作为洪峰分布  $C_V$ 、 $C_S/C_V$  的抽样次数<sup>[7]</sup>。

### 3.1 水文不确定性

对理论频率曲线利用适线法进行选取时, 一般保持历史洪峰样本均值  $\mu_Q$  不变, 仅仅考虑导流风险率受抽样参数  $C_V$ 、 $C_S$  变化的影响作用, 各参数抽样取值范围如表 1 所示。

对调洪演算定性时可通过参数抽样拟合洪水过程线, 并且选取设计值作为泄流能力曲线, 糙率选取为 0.015, 风险率系列变幅、均值等指标的统计分析结果如表 2。

其中 90% 的置信区间与风险率均值之比即为  $C_{ID}$  值, 由表 2 可以看出同一堰顶高程风险率变幅在考虑水文不确定性时较大, 相当于由 50 年一遇的导流设计标准转变为 20 年一遇的风险率, 因此对导流风险率影响较为显著的因素有水文参数的不确定性, 所以必须给予高度重视。采取均匀抽样方式时, 导流风险率均值、极值随着堰顶高程的增加而呈现出下降趋势, 风险率  $C_V$  在不同堰顶高程的情况下存在一定的差异, 并且该差异幅度随着高程的增加而增大, 由此表明相对于系列均值风险率的离散程度更加明显, 并且其敏感性相对较低; 对于  $C_S$  值, 在不同的堰顶高程条件下具有较大的变幅, 最大为 0.192, 由此说明风险率的偏态性受堰顶高程的影响较大, 并且未呈现出明显的规律性。

表 1 参数抽样取值区间

参数	$C_V$	$C_S/C_V$	$a$	$b$	$c$
上限	0.280	4.200	0.985	1.005	0.996
下限	0.260	3.200	0.975	1.055	4.046



表 2 导流风险率水文不确定性分析结果

堰顶高程 /m			651.62 m	652.00 m	653.00 m	654.00 m
风险率	均值	均匀抽样	3.15	3.08	2.85	2.54
		正态抽样	3.12	3.11	2.82	2.55
	变幅	均匀抽样	2.11 ~ 4.36	1.96 ~ 4.28	1.76 ~ 3.76	1.65 ~ 3.72
		正态抽样	2.06 ~ 4.22	1.90 ~ 4.20	1.86 ~ 3.82	1.56 ~ 3.62
	$C_v$	均匀抽样	0.112	0.125	0.128	1.135
		正态抽样	0.108	0.106	0.112	0.125
	$C_s$	均匀抽样	0.118	0.260	0.061	0.108
		正态抽样	0.122	-0.018	0.088	0.251
	90% 置信区间	均匀抽样	[2.56, 3.71]	[2.52, 3.74]	[2.26, 3.40]	[2.05, 3.18]
		正态抽样	[2.61, 3.70]	[2.62, 3.70]	[2.35, 3.36]	[2.10, 3.18]
	置信区间离散度 $C_{ID}$	均匀抽样	0.36	0.40	0.42	0.45
		正态抽样	0.35	0.32	0.33	0.41

采取正态分布抽样方式时,导流风险率均值、极值随着堰顶高程的增加而逐渐降低,风险率  $C_v$  和  $C_s$  值均为表现出显著的变化特征,堰顶高程与置信区间为 90% 的  $C_{ID}$  不存在对应关系。正态分布抽样风险率在同一堰顶高程情况下高于均匀抽样,而  $C_v$  值表现出相反的特征,由此说明风险率可受到抽样方式的影响作用。

### 3.2 水文与水力不确定性

主要考虑泄流能力作为水力不确定性因素,并假定其服从三角形分布,按照随机抽样的方式对其参数进行泄流曲线计算,然后在考虑水文与水力不确定性因素的基础上对导流风险率进行求解,结果如表 3 所示。

由表 3 计算结果可以看出,围堰导流风险率均值、极值在水文与水力不确定条件下可随着堰顶高程的增加而逐渐降低,并且参数  $C_v$  值整体呈显著增加趋势,而  $C_s$  未表现出规律性变化特征; $C_{ID}$  表现出了略微的增加趋势,而置信区间无明显的规律性。单独考虑水文不确定性的模拟峰值  $C_v$ 、 $C_s$  与上述不确定性条件下基本保持一直,并且采用正态分布抽样方式时,其规律性更加明显。

进一步分析泄流能力  $u$  风险率之间的参数关系可知,二者未表现出明显的规律性特征。对比分析风险率与参数抽样值可以发现,在多组不同的抽样参数组合时可出现异参同效现象,由此表明在抽样参数之间具有相互补偿的关系。

总而言之,对风险率均值考虑水力与水文、水文不确定性两种条件进行分析,前者的风险率略高于后者,由此说明在施工导流风险率分析时应重点考虑水文不确定性因素,并且还要考虑水力风险的影响作用,否则可降低计算所得的风险率。风险离散度均值  $C_{ID}$  在设计标准提高时呈现出增大的趋势,由此可进一步增大了风险率分析的不确定性。

## 4 结论

(1) 综合考虑了水文、水文与水力不确定性两种条件下的导流风险率,并建立了仿真计算模型,对导流危险风险率受不同概率分布参数和抽样方式的影响作用进行了深入的探讨和分析。

(2) 水力与水文不确定性对导流风险率的影

表 3 导流风险率水文与水力不确定性分析结果

堰顶高程 /m			651.62 m	652.00 m	653.00 m	654.00 m
风险率	均值	均匀抽样	3.18	3.12	2.85	2.56
		正态抽样	3.20	3.20	2.88	2.64
	变幅	均匀抽样	2.21 ~ 4.42	2.11 ~ 4.38	1.80 ~ 3.86	1.68 ~ 3.85
		正态抽样	2.05 ~ 4.32	2.24 ~ 4.50	1.82 ~ 3.96	1.65 ~ 3.82
	$C_v$	均匀抽样	0.111	0.122	0.120	0.128
		正态抽样	0.108	0.108	0.115	0.120
	$C_s$	均匀抽样	0.162	0.175	0.061	0.182
		正态抽样	0.112	0.195	0.226	0.270
	90% 置信区间	均匀抽样	[2.60, 3.81]	[2.55, 3.75]	[2.30, 3.45]	[2.11, 3.16]
		正态抽样	[2.75, 3.80]	[2.70, 3.80]	[2.45, 3.48]	[2.16, 3.17]
	置信区间离散度 $C_{ID}$	均匀抽样	0.37	0.40	0.40	0.39
		正态抽样	0.35	0.35	0.36	0.37

响作用略高于水文参数, 在施工导流风险率分析时应重点考虑水文不确定性因素, 并且还要考虑水力风险的影响作用, 否则可降低计算所得的风险率。风险离散度均值在设计标准提高时呈现出增大的趋势, 由此可进一步增大了风险率分析的不确定性。

## 参考文献:

- [1] 杜震宇, 王永平, 邹伟, 等. 二期围堰泄流槽体型及开挖施工技术[J]. 南水北调与水利科技, 2015(2):366-369.
- [2] 赵鹏飞. 深水抛石围堰岩坎及防渗体爆破设计[J]. 水

利技术监督, 2015, 06:85-87+90.

- [3] 徐辉, 梁治国. 海上软土地基中大型钢板桩围堰加固技术[J]. 施工技术, 2015, 17:120-123.
- [4] 张红武. 跨流域多水源引调水工程系统设计方案研究[J]. 水利规划与设计, 2015, 08:61-65.
- [5] 王卓甫. 施工导流风险分析[J]. 水利学报, 1992, (2): 65-71.
- [6] 肖焕雄, 孙志禹. 不过水围堰超标洪水风险率计算[J]. 水利学报, 1996, (2): 37-42+36.
- [7] 纪中庭. 关于现代水利工程中的生态问题探讨[J]. 水土保持应用技术, 2016, (01): 22-23.

