

分类号 TV512

密级 公开

U D C 626

三峡大学

全日制工程硕士学位论文

**梯级水电开发条件下土石围堰度汛
漫顶风险研究**

学位申请人： 郭志杰

专业领域： 水利工程

指导教师： 卢晓春 副教授

田 斌 教授

企业导师： 龚建华 教授级高工

二〇一八年六月

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Master's Degree of Hydraulic Engineering

**Research on Overhead Risks of Earth-rock Cofferdams
under Cascade Hydropower Development Conditions**

Graduate Student: Guo Zhijie
Professional field: Hydraulic Engineering
Supervisors: Associate Prof. Lu Xiaochun
Prof. Tian Bin
Corporate Mentor: Prof. Gong Jianhua

China Three Gorges University
Yichang, 443002, P.R.China
June, 2018

三峡大学学位论文独立完成与诚信声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果，除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体均已在文中以明确方式标明，本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：_____
日 期：_____

内 容 摘 要

随着近些年我国水电事业的迅速发展,东、中部地区的水电开发已基本完成,随着西部大开发战略的实施,西南部地区已进入全面开发阶段,然而部分在建和拟建的工程坝址处存在深厚覆盖层现象,在此地质条件下施工,导流建筑物首选为土石围堰及隧洞导流,然而围堰属于临时性的建筑物。对于临时性建筑物围堰的安全性分析具有举足轻重的重要,对于不过水土石围堰,如果围堰漫顶并且造成危害,其损失我们是无法估量的,作为工程技术人员对土石围堰的安全性不可忽视,加强对土石围堰安全性的重视与研究具有重大的意义。

本文主要研究土石围堰漫顶风险计算,也就是围堰的堰前水位超过堰顶的概率,它关系到如何较客观地估计围堰的漫顶风险,在整个调洪过程中,存在许多人们难以预测和控制的不确定因素,主要有如下:

(1)洪水入库的随机性,如施工洪水的洪峰流量及洪量的不确定性。

(2)导流建筑物泄流能力,导流系统泄流建筑物水力参数,如导流隧洞糙率、过流面积等因素的不确定性。

首先本文将导流系统中的洪水过程不确定性、泄流能力的不确定性耦合起来研究土石围堰挡水时漫顶风险,采用结构可靠度中的蒙特卡洛法,合理的处理不确定性因素的概率分布函数,使用 C#语言编写相应的程序,计算出风险率。对土石围堰漫顶风险的研究,为土石围堰的安全性评价提供科学的决策依据,具有理论意义和实际价值。

梯级建设环境下土石围堰漫顶风险是来自于整个梯级工程建设环境,针对梯级建设环境下的土石围堰漫顶风险进行研究,全面考虑梯级建设环境下的主要风险影响因素,对工程的初期导流系统进行风险分析和计算,将该工程的水文与水力学资料代入到所建立的漫顶风险分析模型中,计算得到风险率。通过实例计算分析证明,对梯级建设条件下的施工期土石围堰度汛漫顶风险研究是具有意义的。

关键词:梯级水电站 土石围堰 漫顶 风险分析 不确定性 蒙特卡洛法

Abstract

With the rapid development of Chinese hydropower industry in recent years, the development of hydropower in the eastern and central regions has basically been completed. With the implementation of the Western Development Strategy, the southwestern region has entered a phase of comprehensive development. However, part of the dams which are under construction or proposed construction exist overburden phenomenon. Under this geological condition, the preferred diversion structures are earth-rock cofferdams and diversion tunnels, and the cofferdams are temporary buildings. It is important to do the analysis of the safety for temporary buildings cofferdams. If the cofferdams are overcrowded and cause damages, the loss is incalculable. The safety for earth-rock cofferdams can't be ignored by engineers and technicians. It is of great significance to strengthen the emphasis and research on the safety of earth and stone cofferdams.

This paper mainly studies the risk calculation of overlying earth-rock cofferdams, that is, the probability that the water level of the cofferdam exceeds the top of the cofferdam. It is related to how to estimate the overcrowding risk of the cofferdam objectively. There are many factors that are difficult to predict and control which are as follows:

- (1) The randomness of flood storage, such as the uncertainty of flood peak flow and flood volume, and the uncertainty of the duration of flooding process.
- (2) The diversion capacity of the diversion building, the uncertainty of the discharge capacity of the diversion system and the hydraulic parameters of the discharge building.

Coupling the uncertainties of flood process and discharge flow capacity in the diversion system to study the risk of overcrowding in the retaining of earth-rock cofferdams, using the Monte Carlo method in structural reliability, and rationally handling uncertainties the probability distribution function, using C# language to write the corresponding program, finally the risk rate can be calculated. The research on the overlying risk of earth-rock cofferdams provides a scientific decision-making basis for the safety evaluation of earth-rock cofferdams and has theoretical and practical value.

Aiming at the risk of overcrowding of earth-rock cofferdams in a cascade construction environment, and taking full account of the main risk factors under the cascade construction environment, analyzing and calculating the risk of the initial

diversion system of the project, and substituting the hydrological and hydraulic data into the analysis model, the risk rate will be calculated. Examples have showed that the risk analysis model and the calculation process are meaningful.

Key words: cascade hydropower stations earth-rock cofferdam Overtopping
risk analysis Uncertainty Monte Carlo method

目 录

选题的依据与意义	1
国内外文献资料综述	2
1 绪论	3
1.1 引言	3
1.2 国内外研究现状	3
1.3 研究内容及技术路线	8
2 土石围堰度汛漫顶风险模型的建立	10
2.1 风险分析的相关理论	10
2.2 土石围堰度汛不确定性变量	11
2.3 土石围堰漫顶风险模型	17
2.4 小结	18
3 基于蒙特卡洛法的土石围堰度汛漫顶风险分析	19
3.1 蒙特卡洛法的基本理论	19
3.2 施工围堰挡水的调洪演算	20
3.3 工程案例概述	22
3.4 基于蒙特卡洛法的土石围堰度汛漫顶风险程序构建	27
3.5 本章小结	29
4 不考虑梯级环境影响的土石围堰漫顶风险分析	31
4.0 引言	31
4.1 土石围堰漫顶风险计算	31
4.2 敏感性分析	39
4.3 本章小结	40
5 梯级水电开发下土石围堰度汛漫顶风险研究	42
5.1 引言	42
5.2 梯级建设环境下漫顶风险分析	42
5.3 梯级条件下土石围堰漫顶风险分析的约束条件	44
5.4 梯级开发条件下度汛漫顶风险分析	45
5.5 本章小结	47
6 结论与展望	48
6.1 结论	48
6.2 存在的问题及展望	49

三峡大学全日制专业学位硕士学位论文

参考文献	50
致谢	54
附录一：程序代码	55
附录二：攻读硕士学位期间发表的部分学术论著	61

选题的依据与意义

中国是水能资源非常丰富的国家，开发利用的水能资源大约为 4.93 亿 kW，随着近些年我国水电事业的迅速发展，东、中部地区的水电项目开发已基本完成，西部大开发战略的实施，西部地区已进入全面开发阶段，然而部分在建和拟建的工程坝址处存在深厚覆盖层现象。不过水土石围堰是水利水电工程中应用最广泛的一种围堰形式，能够充分利用当地材料或废弃的土石方，构造简单，施工方便，可以在动水中、深水中、岩基上或有覆盖层的河床上修建，如两河口、双江口水电站等广泛采用。对于坝址处存在有深厚覆盖层的地质条件，导流方式通常选择在基坑的上下游填筑土石围堰作为临时性挡水建筑物，主要作用是通过围堰一次性拦断河床形成基坑，保护主体工程能够在干地条件下进行施工，施工洪水经由导流隧洞下泄到下游。

水利水电施工导流系统中，对土石围堰的漫顶风险计算模型的确定，其影响着如何客观的计算分析土石围堰的漫顶风险概率，直接影响着施工期的整体过程的建设安全以及影响工程的建设工期。在整个调洪过程中，存在非常多的人们不确定因素是人类难以预测和控制的，将导流系统中的洪水过程不确定性、泄流能力的不确定性耦合起来研究土石围堰挡水时施工导流系统的综合风险，即土石围堰漫顶风险，对土石围堰漫顶风险的研究有非常重要的意义。

现阶段，水利工程的梯级开发已经成为国内的主要模式，比如在金沙江下游上的乌东德、白鹤滩、溪洛渡及向家坝水电站，然而梯级开发的条件下，水电站工程建设模式主要有为上游电站及下游水电站同步在建、上游电站已建成下游水电站在建、上游电站已建成下游水电站在建或者上下游水电站都已建成，在此梯级建设模式下，分析上游电站建设情况对下游河道的水文的影响及下游电站建设情况对在建电站的影响，综合在建电站导流系统的不确定性全面考虑梯级建设环境下的主要风险影响因素，研究内容不仅扩展梯级建设条件下土石围堰漫顶风险的理论方法，同时也可工程实际提供理论支撑依据，目前对梯级环境施工期土石围堰漫顶风险研究较少，具有理论意义和实际价值。

国内外文献资料综述

风险分析是近几十年来逐步发展起来的一门综合性边缘学科,经过几十年的发展,其应用已经相当广泛。20 世纪 70 年代美国原子能委员会成功将风险理论和风险评价方法用于核电项目的风险评估后,风险分析和评价理论得到了工程界的广泛关注^[1],水利工程方面的风险研究起步较晚。因为在 20 世纪中期,发生几起比较严重且损失巨大的大坝安全事故,从而使世界上许多国家比如美国、前苏联等对水利工程开展洪水灾害风险研究工作,然而当时的风险分析仅局限于泄洪能力的不确定性问题,其主要的原因是在防洪减灾过程中涉及到非常多且非常复杂的自然因素,想要通过人工实验测验其随机性是非常困难的,并且在当时因为技术水平的原因得到的历时资料也不是非常的齐全,因此很难通过数学模型来对研究问题精确描述,近些年,经过国内外许多研究学者对研究问题的不断深入,在水利工程防洪风险等相关研究领域的研究取得了明显的成果,并且在相关领域也得到了广泛的应用。

在水利工程防洪风险研究项目中做出杰出贡献的国外研究学者主要有:

A.H.S.Ang, Wood, Otto pfafstetter, Yen Ben Chie, R. Rachwitz 等学者专家,在 1991 年所举办的国际水利协会大会中特意召开了关于风险分析与可靠性问题方面内容的研讨会,1996 年的第七届随机水力学研究会中促进了风险分析领域的进一步发展,并且在之后的国际水利协会都会将风险分析列入讨论。

在 20 世纪 80 年代,国内也开展了风险分析在水利工程及防洪领域的研究,并且开展了大量的研究工作,取得了丰富的研究成果,比如郭子信、徐祖新等研究学者,但是在水利工程领域的风险研究还远远落后于建筑行业等领域,成果比较零散,缺乏系统的研究总结,有些方面的研究概念也不是很明确,近些年对水利工程施工导流方面的研究越来越重视,王卓甫、胡志根等专家学者展开研究,并且取得了很多的成果,施工导流系统是非常复杂的,存在着及其复杂的不确定性,李其军,陈肇和出版土石坝漫坝风险理论与应用,详细解释了土石坝漫坝风险的相关内容并对 10 余座水库的漫坝风险分析展开研究并归纳总结。随着梯级水电条件下水利工程建设,针对梯级水电开发条件下的风险分析也有一部分的研究产生,国内优秀学者张超、刘全等展开梯级建设条件下施工导流风险分析展开研究,但是通过对国内外水利工程风险研究现状总结分析可以发现,目前对梯级建设环境下土石围堰漫顶风险研究内容是比较少的,在专家学者的研究基础上,综合考虑梯级建设环境下水文的不确定性及泄水建筑物水力参数的不确定性,对梯级土石围堰漫顶风险展开研究是具有重大的意义。

1 绪论

1.1 引言

围堰是在河道流水中修筑的挡水建筑物,虽然属于临时性工程,但是其结构的安全性直接关系到所保护的正在施工的永久建筑物所面临的安全、施工工期等关键问题,其重要性不言而喻。如果所形成的水库拦蓄的洪水总量较大,还关系到下游人民生命财产的安全。如湖北省浠水白莲河水电站土石围堰因导流标准偏低,1959年2月11日到15日浠水上游降雨达120mm,2月15日土石围堰上游水位超过堰顶,堰顶漫水而溃决,填筑的土石围堰全部被冲走,由于围堰失事,使大坝施工延期,电站机组发电日期推迟3个季度,围堰溃决后,下游临时交通浮桥及护桥人员被冲走,基坑内50余台水泵及施工机械被冲走或水淹,140艘土木船及建筑材料物资被冲走,损失巨大。在湖北省清江流域上曾发生围堰失事的安全性事故,围堰溃决造成十八人失去生命其中包括十二名幼童,同时对正在进行施工的基坑及基坑内人员机械设备等造成毁灭的损坏,也影响了主体建筑物施工工期^[2]。因此,围堰工程的安全性具有举足轻重的重要,作为工程技术人员对土石围堰的安全性不可忽视,加强对土石围堰安全性的重视与研究具有重大的意义。

梯级水电开发条件下,施工期土石围堰的正常挡水安全直接影响着整个梯级水利工程的投资及部署,因此在风险分析中必须对土石围堰漫顶安全性展开研究分析,在梯级围堰漫顶风险分析中,存在中非常多并且很复杂的不确定性风险因素,许多研究学者在近几年对施工导流风险分析展开了大量的研究内容,但是在对施工导流系统风险分析中主要是围绕针对的单一水库进行。近些年,随着流域梯级水电开发的发展要求,在中国的大江大河上进行水电开发多数是有同一个公司为主体进行,而且存在着多级水电工程同步建设的情形,对相邻两座水电站同步进行施工的条件下组成的梯级水电下土石围堰漫顶风险分析是一个非常重要的研究内容。

本文针对梯级同步建设环境下土石围堰漫顶风险展开研究,拟采用蒙特卡罗法原理对土石围堰漫顶进行风险分析计算。首先确定水文、水力原始数据及蒙特卡洛法模拟总次数,全面考虑梯级建设开发施工期水文、水力随机因素的不确定性,对入库洪水进行调洪演算,然后统计分析施工导流的上游围堰堰前水位超过堰顶设计高程的次数,从而计算导流系统的综合风险率,此研究对梯级建设下土石围堰的安全性研究具有重要的意义,成为风险不可缺少的一部分。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国内外土石围堰发展概述

在河道中修筑水电工程,施工时首先的工作就是进行施工导流,将上游洪水通过导流建筑物下泄到下游河道,修建土石围堰保证主体建筑物可在干地条件下施工

然而近些年水利工程的发展非常迅猛，随着大中型水利工程的修建，在西南地区的地基基础存在极其复杂的深厚覆盖层条件，围堰的规模越大越大，其堰高也越来越高，对土石围堰的要求也越来越多严格，其施工难度也不亚于主体建筑物的要求。在此条件下对围堰的失效风险研究也越发重要，本文即对土石围堰漫顶失事风险展开研究。

20 世纪七十年代末，巴西与巴拉圭在巴拉那河上修建伊泰普水电站，大坝全长 7760m，该工程施工采用明渠导流，修建上、下游土石围堰。我国水利建设迅猛发展的这些年中，已建许多土石围堰超过 40m 高度的工程，比如有：丹江口、龙羊峡、葛洲坝、小浪底、二滩、三峡工程、向家坝工程、溪洛渡工程、乌东德工程和白鹤滩工程等。

国内外已建大型的土石围堰及主要技术指标参数如表 1.1 所示^[3-4]。

表 1.1 国内外已建的若干大型土石围堰技术指标

工程名称	河流	国家	围堰高度 (m)	施工水深 (m)	填筑量 (万 m ³)	防渗设施	施工年份	备注
白鹤滩上游围堰	金沙江	中国	78			复合土工膜斜墙	2016	
乌东德上游围堰	金沙江	中国	69.5			土工膜斜墙	2015	
向家坝上游围堰	金沙江	中国	59.0	24.0	130.0	土工膜斜心墙	2009	
溪洛渡上游围堰	金沙江	中国	78.0	48.6	204.08	塑性混凝土防渗墙上接斜心墙	2008	
三峡二期上游围堰	长江	中国	80.5	60	590	双排塑性混凝土防渗墙	1998	
小浪底上游围堰	黄河	中国	59		249	黏土斜墙混凝土防渗墙	1998	围堰成 大坝一部分
二滩上游围堰	雅砻江	中国	57		94	高压旋喷灌浆	1993	

漫湾 上游围堰	澜沧江	中国	56			混凝土防渗墙	1988	
葛洲坝二 期上游围 堰	长江	中国	50	20	274	双排混凝土防 渗墙	1981	
伊泰普 上游围堰	巴拉那河	巴西、 乌拉圭	90	40	574.6	黏土心墙	1978	
科雷马二 期上游围 堰	科雷马河	俄罗斯	62.2		270	亚黏土斜墙	1970	围堰成 大坝一 部分
恰尔瓦克 上游围堰	奇尔奇克 河	塔吉克斯 坦	80		162	壤土斜墙铺盖	1967	
奥罗维尔 上游围堰	费琴河	美国	135.4		764	黏土斜心墙	1964	围堰成 大坝一 部分
达勒斯上 游围堰	哥伦比亚 河	美国	90	54	268	黏土斜墙	1957	围堰成 大坝一 部分

1.2.2 施工导流风险分析

20 世纪 60 年代末, Otto pfafstetter (奥特波法弗斯特) 首次将风险分析的理论引入水库泄洪安全设计中, 主要内容是论述了溢洪道设计洪水的经济问题^[5]。

Chauncey Starr(1969)发表了《社会效益与技术风险 (Social Benefit versus Technological Risk)》,最早提出了“多安全才够安全?”这一问题^[6], 开始了对风险标准的探讨。

1970 年, B.C.Yen 提出为了确定泄流建筑物洪水标准, 同时应考虑工程失效与使用年限之间的关系, 但是其提出的风险计算模型单纯的只考虑了洪水的不确定性^[7]。

1971 年, B.C.Yen 和 A.H.S.Ang 两位专家将风险计算中存在的 uncertainty 因素分为主观不确定性和客观不确定性, 并提出了失事风险 $R_N = P(X > Q) = 1 - (1 - 1/T_r)^N$ 其中 T_r 为设计标准, N 为使用年限, 并且列入了美国水文实践指南中^[8]。

1976 年 Rachwitz 将结构可靠度的一次二阶矩法首次应用于防洪风险的计算中。美国总统卡特 1978 年在对全美水利资源委员会的工作中强调了对水利工程进行系统风险分析的必要性和重要性。

1987 年, Leach M.R 等学者对各单个目标风险的灵敏性进行了研究分析, 提出分割风险的办法和界限^[9]。

21 世纪初, Lee Jong-Seok 对大坝风险评估方法进行了全面的回顾总结, 详细的对大坝破坏后洪水行进路线以及大坝失事后果评价进行了分析, 在此基础上对不确定性因素影响的分析方法展开研究与开发, 其目的是为了大坝风险评估的后果进行量化^[10]。

1997 年 USBR (美国肯务局) 出台了临时性的《实现在大坝安全决策中保护公众指南》, 并于 2003 年正式出台^[11]。

国内对水利工程防洪可靠性的研究是从八十年代开始的, 而且经过不断地研究探索取得了非常丰富的研究成果。

1988 年, 国内研究学者郭子中与徐祖信首次将结构可靠度中的 JC 法用于泄洪风险的计算, 基于此对开敞式溢洪道水力设计中的各种不确定性因素进行了客观的分析总结并且提出了风险的计算模型, 但是在计算中未考虑水库调洪作用^[12]。

1991 年, 金明对泄洪系统中的水力不确定性分析其影响, 通过分析计算得出水力不确定模型的影响主要受其变差系数的影响^[13]。

1992 年王卓甫为了确定水利工程施工导流风险大小, 对施工导流系统中存在的不确定因素进行较为全面的分析, 讨论了如何确定不确定因素的概率分布函数以及所需要的计算参数, 运用结构可靠度中的蒙特卡洛法进行计算, 其结果比较客观, 但是在其所确定的不确定性因素的概率分布函数的确定上, 依然缺乏足够多的历史资料^[14]。

周宜红、肖焕雄等通过对三峡工程大江截流施工过程中水文及水力等不确定性因素的分析, 计算其动态风险率, 并提出了风险控制措施^[15]。

2002 年胡志根等利用蒙特卡洛方法模拟施工洪水过程和导流建筑物泄流过程, 通过系统仿真的方法对施工洪水进行调洪演算, 从而统计分析围堰前水位的分布情况, 并且结合不同标准下的导流标准条件对围堰施工导流风险进行分析^[16]。

近些年胡志根^[17]、钟登华^[18]以及国外学者 Rasekh^[19]、Afshar^[20]等对施工导流风险展开研究, 但是在对施工导流系统风险分析中主要是围绕针对的单一水库进行。晋良海, 梁巧秀等, 综合文献中已有的研究内容, 分别对施工度汛按照一定的标准进行分类、度汛标准、度汛风险量化计算模型研究进程和施工度汛经验这四大方面对其进行综述分析, 并指出施工度汛中有待进一步研究的方向和内容^[21]。通过分析可以得出, 施工导流风险分析已经取得了非常丰富的成果, 主要考虑了水文水力的因素, 结合结构可靠度理论进行计算分析, 其分析模型非常成熟。

1.2.3 漫顶风险研究现状

1991 年, 陈肇和、李其军对水文系列的土坝漫坝风险展开了一系列研究^[22]。

2000 年, 陈肇和、李其军根据随机水文学以及随机水力学等相关的学科内容, 全面客观的分析洪水不确定性、风浪不确定性、库容不确定性和泄水能力不确定性, 综合土坝在洪水和风险联合的作用, 建立了土坝的漫坝风险理论计算模型, 并提出了风险如何取值, 确立取值标准^[26]。

梅亚东考虑一阶季节性自回归模型对入库洪水的影响, 并进行模拟分析, 对影响泄流能力中的水力不确定性分布函数采用三角形分布和正态分布进行描述, 从而计算得到洪水漫坝风险率, 条件是在初始起调水位和调洪规则不变的情况下^[24]。

姜树海通过采用事故树法逐层分析讨论了漫坝失事的形成, 并且防洪设计标准的含义展开分析总结, 讨论了防洪标准对大坝防洪安全的影响, 最后通过计算定量的求解防洪风险率, 并在此基础上讨论了如何合理的选择大坝防洪设计标准^[25]。

2002 年, 胡志根, 刘全等基于蒙特卡洛法, 综合考虑洪水入库过程的不确定性以及导流建筑物的泄流能力的不确定性, 采用系统仿真对施工洪水进行调洪演算, 并通过统计分析模型围堰的堰前水位超过堰顶, 即求解得到漫顶风险率^[26]。

2007 年范锡峨, 胡志根, 靳鹏等, 考虑施工期水文及水力不确定性的影响, 并且综合考虑了工进度的不确定性, 在此基础上, 耦合所有不确定因素对施工导流系统的综合风险展开研究, 提出考虑施工进度计划的综合风险分析模型^[27]。

综上文献所述现如今的研究中, 对于漫顶风险分析主要针对的土石坝工程的漫顶风险分析, 对于临时性工程土石围堰风险分析的研究是比较少的, 并且在对施工期导流风险系统分析仅局限于单一水库的影响。

1.2.4 梯级水库漫顶风险研究

目前国内对梯级水库群漫顶风险的研究比较少, 近几年有专家学者提出理论与方法。

2012 年张超、胡志根、刘全等对梯级建设条件下的施工导流系统的水文、水力等特性, 建立对梯级导流整体风险施工导流系统整体风险数学模型, 从施工洪水过程角度, 考虑不同洪水组合情况分别构建风险计算模型, 并且应用蒙特卡洛方法耦合主要风险因素对模型进行求解^[28]。

薛进平, 胡志根, 刘全等在梯级水电建设的条件下, 通过上游电站对来水的蓄泄作用, 削减下游待建电站的施工洪水, 改变施工导流系统的洪水控制条件和系统特性。针对上游电站预泄条件下待建电站导流风险估计和方案决策研究, 系统分析导流风险成因及其耦合关系, 基于模拟仿真技术建立导流风险测度模型^[29-30]。

2014 年刘全, 胡志根, 任金明等, 主要对梯级建设环境下的水利工程导流风险

展开研究,综合考虑了已建梯级对来水泄流的调蓄影响及河道对洪水的综合影响,建立了梯级建设环境下的导流风险计算模型,更准确地描述目前梯级水电开发条件下的施工导流风险^[31]。

2015年周兴波,陈祖煜,等为系列论文提出的建立在梯级水库群连续溃决风险分析基础上的特级土石坝分级标准,本文阐述了溃坝计算、洪水演进和连溃分析模型的基本原理,通过对冲刷模型、泄流渠水深计算方法等方面的改进^[32]。

通过对国内外水利工程风险研究现状总结分析可以发现,目前对梯级建设环境下土石围堰漫顶风险研究内容是比较少的,近些年随着土石围堰要求的提升,堰顶越来越高,级别要求也越来越高。在专家学者的研究基础上,综合考虑梯级建设环境下水文的不确定性及泄水建筑物水力参数的不确定性,对梯级土石围堰漫顶风险展开研究是具有重大的意义。

1.3 研究内容及技术路线

1.3.1 本文主要研究内容:

(1)第一章:绪论。本章的主要内容是客观的描述了所选课题的研究意义,对本文所研究的内容的国内外研究文献详细的总结分析,对现有风险计算分析方法进行总结,根据各种方法的适用情况及优缺点,从而确定本文的主要研究方法,再根据本文的研究背景及研究内容,绘制研究路线图。

(2)第二章:对于漫顶风险分析进行比较系统全面的阐述,包括风险的定义、风险识别、风险评估、风险处理和风险决策的概念;风险分析的程序和主要内容。探究影响土石围堰漫顶的风险因子,包括水文、泄流能力等其他方面的不确定性因素,总结分析各不确定因子的概率分布,确定土石围堰漫顶风险模型

(3)第三章:基于蒙特卡洛法,通过计算机C#语言编写程序软件并进行风险分析,建立方便使用的软件模型,针对金沙江下游的水利工程建设,通过此模型评估风险因子与洪水联合作用下土石围堰漫顶风险,并提出敏感性分析过程。

(4)第四章:不考虑梯级水电开发对土石围堰漫顶风险的影响,对单一电站条件下的漫顶风险展开理论分析,合理假定各个不确定因素的概率分布函数,并进行敏感性分析,将该水电站水文不确定性及泄水水力不确定性等因素通过数学方法结合起来,基于蒙特卡洛法计算分析土石围堰度汛漫顶风险。

(5)第五章:对梯级建设环境下土石围堰漫顶风险展开理论分析,应用实际水电站施工导流工程,合理假定各个不确定因素的概率分布函数基于蒙特卡洛法计算分析梯级水电开发条件下的土石围堰度汛漫顶风险。

(6)第六章:结论与展望。本章主要是对全文的研究内容进行详细总结,并得出本

文研究结论，同时也详细分析描述了本论文的不足之处，为之后更深层次的研究提出所要注意的问题

1.3.2 研究技术路线

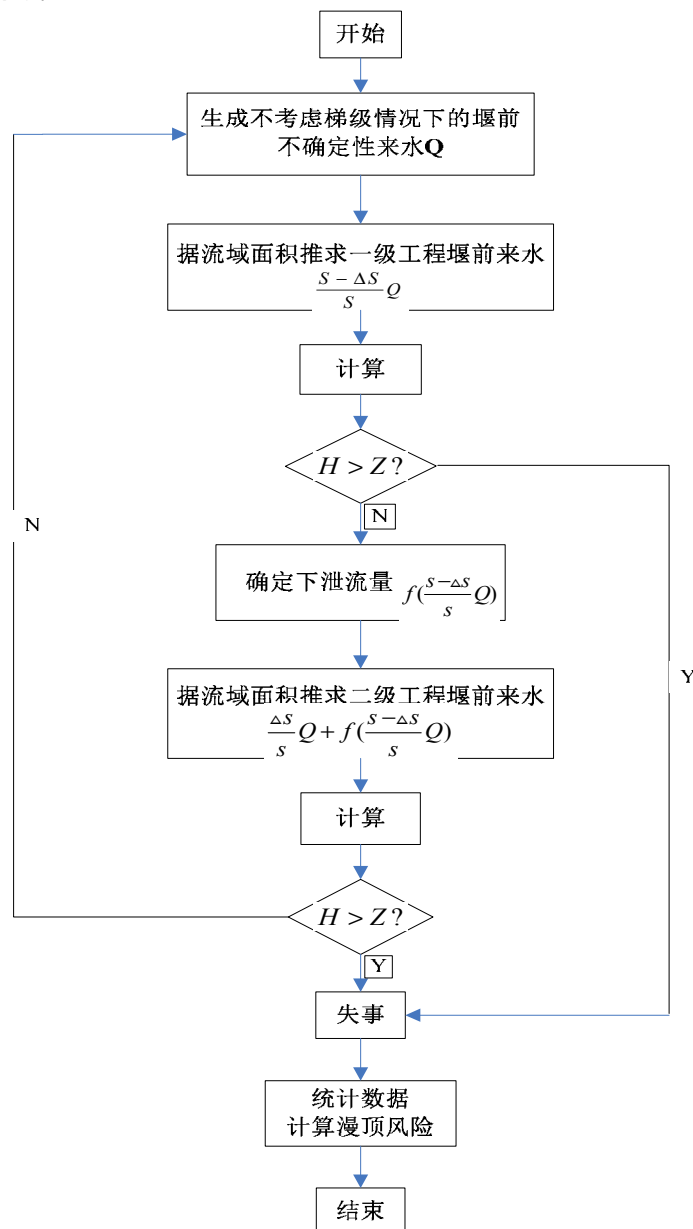


图 1.1 梯级建设条件下漫顶风险分析技术路线图

2 土石围堰度汛漫顶风险模型的建立

2.1 风险分析的相关理论

2.1.1 风险分析概述与极限状态

风险的概念源自 19 世纪的经济学，风险是指在某项事件中，由于某个或者某些特殊的原因，对从事该项事件的主体带来破坏的概率，在不同的研究领域，风险的概念也是不同的，因此一直都没有统一的解释来描述风险定义。一般的，风险应包含以下三个方面：不利事件、不利事件发生的概率即风险率以及不利事件可能造成的不良后果。对于随机事件的风险，往往是由于不确定因素的存在，两者具有紧密的关系，各不确定性因素的存在，可能会造成不利事件的发生。产生不确定性的主要因素有主观上人因为对事件存在认识上的不足和客观上对事件的信息有一定落后。从专业领域来描述，风险主要是指特定的主体在完成任务期间对未来发生各种不利事故的可能性^[33]。风险 R 通常可定义为风险事件发生的可能性 p 和事件发生后产生所的后果 C 的乘积，用数学公式可表达成式 2.1：

$$R = \sum_{i=1}^n p_i \times C_i \quad (2.1)$$

式中： R —风险事件的风险值

p_i —该风险事件可能出现各类风险事故的概率

C_i —该风险时间可能出现各类风险事故的后果指数

极限状态含义：当研究主体整体或部分达到某个临界值时，就不能满足研究对象设计时要求所规定的某一功能的要求，此时所达到临界值时的状态即极限状态。

极限状态可用数学公式来表示：

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2.2)$$

其中， $X_i (i=1, 2, \dots, n)$ 表示研究主体所存在的各项不确定性因素。当函数 $Z > 0$ 时则研究主体为可靠状态；当 $Z = 0$ 时，则表示研究主体处于即将破坏但还没破坏的极限状态；当 $Z < 0$ 时则表示研究主体已经失效。

当研究主体处于极限状态时，可表示为：

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0 \quad (2.3)$$

因此，研究主体失事的风险率 P_f 可表示为：

$$P_f = P(Z < 0) = \int_0^{\infty} f(z) dz \quad (2.4)$$

不确定性是风险存在的原因，工程系统运行过程中正是因为多种因素不确定性的存在而使系统存在运行风险。不确定性是指研究对象中某一事件发生或发生的结果是不确定的，或者可以理解为某一事件出现或事件发生前不能提前得到其结果，必须通过不确定性分析的相关理论和方法进行计算和讨论。

不确定性可分为随机性、模糊性和知识不完备性（未确定性）几种情况^[34]，因为事件在发生时由于其条件不完整，从而导致条件和所发生的事件之间没有因果关系，最后使得事件的出现与否表现为不确定性，也就是随机性。而模糊不确定性表现了对事物本身描述存在模糊、难确定这事实情况；知识不完备性（未确定性）则因为对事件存在知识的不完善性而发生的，由于知识的不完善性，从而使人们无法了解事物的所有内容。

2.1.2 风险分析的主要内容

对于工程风险的管理及分析，研究学者们提出过多种风险管理框架形式，但一般都包括一下几个内容：风险分析（也称为风险识别）、风险评价、风险管理及决策^[35-36]。

水利工程风险要素主要包括工程风险要素、环境风险要素、人为风险要素^[37]

工程风险要素。工程风险要素识别主要是查找可能导致围堰漫顶的工程自身缺陷。工程自身缺陷包括：工程地质缺陷，如地基存在断层、构造、软弱夹层等；坝顶高程不足，上游运行多年，导致泥沙淤积和坍塌；上游库区地形复杂等原因。

环境风险要素。环境风险要素主要是查找可能导致漫顶的外力因素。外力因素包括洪水、地震、上游库区溃坝、人为破坏（战争、恐怖活动）等。

人为风险因素。认为风险因素识别主要是查找安全管理的薄弱环节。包括管理不当，其他设施操作不规范或者操作不正确等因素。

2.2 土石围堰度汛不确定性变量

围堰漫坝风险是许多风险因素和不确定因素综合作用的结果^[38]。在土石围堰挡水的时候，所依据的基本资料就是设计洪水过程线，然而在洪水来临时受到了许多自然条件的影响，使得洪水过程呈现不确定性的状态，使其具有随机性，在推求洪水过程线时主要依据的是水文资料，在水文资料收集过程中因为许多客观原因的存在使其与实际的洪水过程发生偏差，总之在这些不确定性的因素下使得洪水过程表现出随机不确定性。

在导流系统中，泄流建筑物的工程规模已经确定，但是泄流能力受上游水位和泄流建筑物糙率、过流面积及流量系数等水力参数影响，体现出导流泄水建筑物泄流能力是一个随机的过程。不仅于此，由于在工程测量中仪器的不确定性及人为测量的不确定性，上游库区的坍塌等不可避免的因素产生影响，使得上游库容与水位之间的关系不再是固定的，也具有随机性。本章的主要内容是解释土石围堰漫顶主要的风险因素以及各风险因子的概率分布及部分参数的确定理论依据。

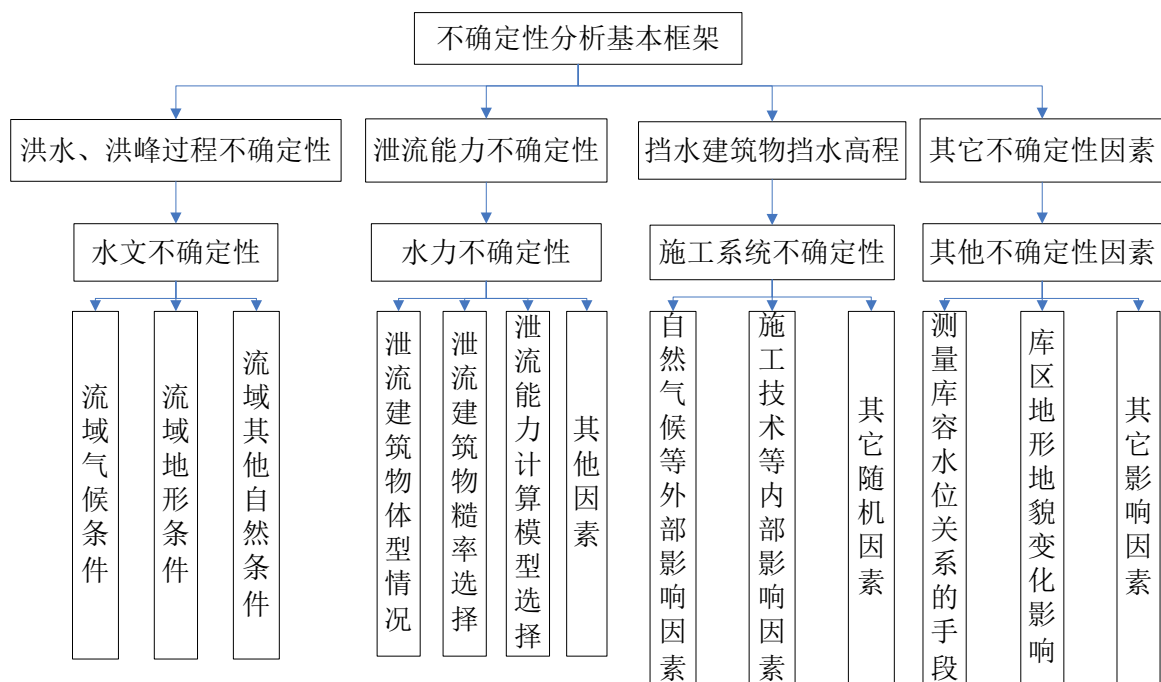


图 2.1 土石围堰漫顶风险不确定性分析基本框架图

2.2.1 施工洪水的确定性

施工洪水作为自然不确定性因素，是土石围堰漫顶风险的主要原因之一^[39-41]。施工洪水受到流域内的地形与气象等自然因素的共同作用，使得洪水过程非常复杂，想要实际获得洪水的随机分布是分成困难的，在施工导流设计中，确定设计洪水过程线时，主要方式是从多年实测的洪水资料中选择最具有代表性的典型洪水过程线，然后根据分析推求洪水的洪峰流量，从而得到在某一频率下的洪水过程线，现实选取过程中，考虑工程的安全性，一般都是从中选的都具有峰高量大、主峰靠后，不利于泄洪安全等特点的典型洪水过程线。长期研究中，洪水过程的不确定性对施工导流及泄洪风险的影响一直被认为很小而忽略不计或者被认为是确定的。

根据《水利水电工程设计洪水计算规范》以及现有资料的对洪水的适配情况的描述情况来看，皮尔逊-III型分布是比较适合我国现有的洪水频率的分布曲线，根据概率论中对皮尔逊-III型分布的描述，其概率密度函数为：

$$f(x) = \frac{\beta^a}{\Gamma(a)} (x - a_0)^{a-1} e^{-\beta(x-a_0)} \quad (2.5)$$

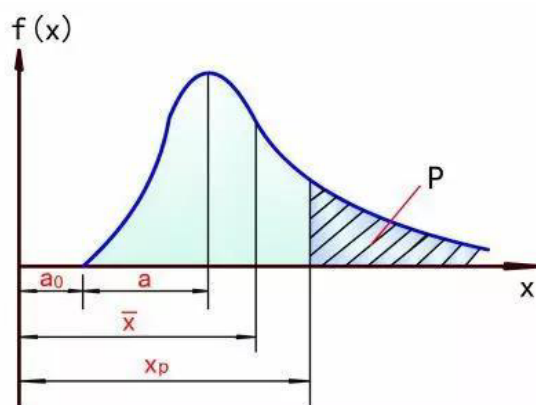


图 2.2 P-III 概率密度曲线

式中， $\alpha, \beta > 0$ ； $\Gamma(\alpha)$ 是 α 的伽玛函数。

上式中有三个未知的参数，分别为 a, β, a_0 ，当确定三个参数之后，该分布函数也可以确定。三个参数的确定用下面的基本参数 \bar{x}, c_v, c_s 表示如下：

$$\alpha = \frac{4}{c_s^2} \quad (2.6)$$

$$\beta = \frac{2}{\bar{x}c_v c_s} \quad (2.7)$$

$$a_0 = \bar{x} \left(1 - \frac{2c_v}{c_s} \right) \quad (2.8)$$

$$X_p = \bar{x} (1 + c_v \Phi_p) \quad (2.9)$$

其中， c_s 是偏态系数； c_v 是离势系数

式 2.9 中 X_p 的求解需要根据已知的 c_s 然后查找皮尔逊 III 型曲线的离均系数 Φ 值表求得 Φ_p ，最后确定解。

表 2.1 部分皮尔逊 III 型曲线的离均系数 Φ 值表

频率 P(%) 偏差系数 Cs	0.2	0.5	1	2	5
0.0	3.72	2.58	2.33	2.05	1.64
0.1	3.94	2.67	2.40	2.11	1.67
0.2	4.16	2.76	2.47	2.16	1.70
0.3	4.38	2.86	2.54	2.21	1.73
0.4	4.61	2.95	2.62	2.26	1.75
0.5	4.83	3.04	2.68	2.31	1.77
0.6	5.05	3.13	2.75	2.35	1.80
0.7	5.28	3.22	2.82	2.40	1.82
0.8	5.50	3.31	2.89	2.45	1.84

0.9	5.73	3.40	2.96	2.50	1.86
1.0	5.96	3.49	3.02	2.54	1.88
1.1	6.18	3.58	3.09	2.58	1.89

对典型洪水放大主要有两种方法：同倍比放大法和同频率放大法。由时段洪量控制防洪后果的水工建筑物一般的使用同倍比放大法，经放大后，设计洪水过程线的形状与典型洪水过程线的形状是一致的。计算风险率的需要考虑到不用典型洪水过程线的影响，需要保持各典型洪水过程线的形状保持不变，同倍比放大法是比较适用的。将所选取得到典型洪水，经同倍比放大后，从而可求得入库洪水的设计洪水线^[42]。

同倍比放大法：首先就是要确定 k 值，用放大倍比 k 放大典型洪水过程线，使放大后的洪峰流量等于设计洪峰流量，或按照控制时段 t_k 的洪量放大使得放大后的洪量等于设计洪量 W_{kp} 。

$$k = \frac{Q_{mp}}{Q_{md}} \quad \text{或} \quad k = \frac{W_{kp}}{W_{kd}} \quad (2.10)$$

式中， k 为放大倍比， Q_{mp} 、 W_{kp} 为设计频率为 p 的设计洪峰流量和 t_k 时段的设计洪量； Q_{md} 、 W_{kd} 为典型洪水过程的洪峰流量和 t_k 时段的洪量。

2.2.2 导流隧洞泄流能力的不确定性

在水利水电工程建设过程中，导流建筑物的选择与建设是重要组成部分，其设计、施工及运行情况都关系到工程的安全问题，在洪水来临的时候，堰前水位的高度受到导流隧洞的泄流能力的直接的影响，从而影响到围堰是否漫堰，所以导流隧洞的泄流能力也是土石围堰漫堰风险分析中的主要风险因子，在泄流能力方面，由于采用的水力模型参数存在不确定性，使其不是非常精确，比如导流隧洞的糙率、隧洞过水断面尺寸、湿周以及底坡等因素，从而使得导流隧洞的泄流能力受多种因素的制约。

在研究围堰挡水时，导流隧洞的泄流流态并不是一层不变的，呈现的状态有有压、半有压、无压或者交替变化的情况，当土石围堰挡水时，求解导流隧洞充分发挥其泄水能力时的情况，也就是当出口为有压流，本文选择有压流流态作为最不利流态^[43-44]，近似认为属于淹没出流，此时泄流能力计算公式为：

$$Q = \mu A \sqrt{2gZ_0} \quad (2.11)$$

其中： μ —导流隧洞淹没出流时流量系数；

A —导流隧洞的断面面积， m^2 ；

Z_0 —上下游计算水位差。

本文选择城门洞形断面，流量系数 μ 使用下式计算：

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\frac{2gL}{C_d^2 R_d} + \sum \zeta + 1}} \quad (2.12)$$

式中： C_d 、 R_d —分别为谢才系数和水力半径，

查找水力学，曼宁公式为下式：

$$C_d = \sqrt{\frac{1}{n} R_d^{1/6}} \quad (2.13)$$

谢齐公式为下式：

$$v = C \sqrt{RJ} \quad (2.14)$$

式中： C 为谢齐系数； R 为断面水力半径，即 $R_d = \frac{A}{\chi}$ ； J 为水力坡度，将上式代

入可得：

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\frac{2gLn^2}{(A/\chi)^{4/3}} + \sum \zeta + 1}} \quad (2.15)$$

式中： $\sum \zeta$ —局部水头损失的和

L —隧洞洞长， m ；

χ —湿周， m ；

n —糙率

g —重力加速度，一般取 $9.81m/s^2$

上式中的水力参数 n 、 A 、 χ 、 s 等参数都具有不确定性，过水断面面积主要是施工的测量误差和材料的不确定，糙率 n 的随机不确定性主要产生于施工过程和测定时的不确定性以及导流隧洞材料的不规则性引起的不确定性，所以，想要确定 n 的分布概率是存在非常大的困难，因此通过近似处理来简化，许多研究学者对糙率所服从的概率分布函数研究分析讨论，参考学者的研究内容假设糙率的概率密度函数服从三角形分布，导流隧洞过水断面面积随机分布服从正态分布，其误差主要来自施工测量误差。由此可见，泄流建筑物其不确定性主要是人为的不确定性因素包括泄流建筑物的设计过程及施工质量控制中不可避免的误差，这些都将导致泄流建筑物泄流能力的不确定性。

参考文献中所提出的糙率服从三角分布^[45]

$$f(x)=\begin{cases} \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)}, a \leq x \leq b \\ \frac{2(c-x)}{(c-a)(c-b)}, b < x \leq c \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (2.16)$$

其中 a, b, c 的取值可以按照参考水利水电工程施工手册第五卷施工导截流与度汛工程中描述, 对于钢筋混凝土衬砌, 按一般施工水平, 糙率常选用取0.014~0.018; 对于采用钢模台车整体建筑, 施工质量好时, 糙率可采用0.012甚至更低, 对于水泥喷浆或喷射混凝土, 可采用0.024~0.030。

过水断面面积 A 服从正态分布, 其分布函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \times e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.17)$$

其中一般取设计值为均值, 其范围根据工程案例中的取值假定 ± 0.08 , 其误差主要来自于施工测量误差。

2.2.3 库容

在传统的施工导流风险分析过程中, 将库容水位视为确定量。但是在现实过程中, 库容是存在非常大的不确定性, 为随机变量。库容的不确定性来自于测量误差、计算简化误差、库容的冲淤变化等因素。水库中泥沙的输出和淤积, 库岸坍塌等都会改变库容。由于库容的动态变化, 数据的获得和分析难度很大, 通常视某一水位下的库容服从正态分布, 设计上采用的库容曲线作为正态分布均值。

2.2.4 风浪

对于土石围堰风险分析中, 是没有风壅水高度的, 但是要考虑波浪爬高, 由于风浪会导致波浪爬高, 经过研究表明^[46], 其影响非常重要, 是不确定性分析中非常重要的一个因素。因此, 在进行漫顶风险分析时, 必须得将风浪作为重要因素考虑进去。来自不同方向 and 不同风速的风是一随机事件, 因此由于风浪因素引起的水面风壅高度和波浪爬高也就是随机过程^[47-49]。但是在实际研究过程中只考虑吹向坝体的风能, 其作为有效风对堰体产生漫堰威胁, 因此一般仅统计分析水库汛期年最大有效风。其他时期和其他方向的风不予考虑。

对一定时段内最大风速的分布函数有多非常多的研究, 一般地服从极值 I 型分布, 其分布函数和概率密度函数为:

$$F(x) = \exp\left\{-\exp\left[-\frac{x-\mu}{a}\right]\right\} \quad (2.18)$$

$$f(x) = \frac{1}{a} \exp\left[-\frac{x-\mu}{a}\right] \exp\left\{-\exp\left[-\frac{x-\mu}{a}\right]\right\} \quad (2.19)$$

式中, α 和 μ 为分布参数, 与均值 $E(x)$ 、均方差 $\sigma(x)$ 的关系为 $\alpha = \frac{\pi}{\sqrt{6}\sigma_x}$, $\mu = E(x) - 0.5772\alpha$ 。

水面壅高也服从极值 I 型分布, 其计算式为

$$\bar{e} = \frac{KW2D}{2gH_m} \cos \beta \quad (2.20)$$

式中, W 为风速均值; D 为风区长度; H_m 为水域平均水深; K 为综合摩阻系数; β 为计算风向与坝轴线法线的夹角。

在一定风速的条件下, 波浪爬高服从瑞利分布, 其分布函数和概率密度函数为:

$$F(x) = 1 - e^{-x^2/(2\mu^2)} (x \geq 0) \quad (2.21)$$

$$f(x) = \left(\frac{x}{\mu^2}\right) e^{-x^2/(2\mu^2)} (x \geq 0) \quad (2.22)$$

分布系数 μ 与均值 $E(x)$ 和标准差 $\sigma(x)$ 有如下关系:

$$E(x) = \sqrt{0.5\pi}\mu, \quad \sigma(x) = \sqrt{0.5(4-\pi)}\mu \quad (2.23)$$

水利水电工程中的不确定因素非常复杂, 其他随机因素, 比如由于上游调洪起调水位的不同导致调洪计算结果的敏感性差异; 下游水位壅高对导流洞泄流能力的影响; 由于施工的影响导流洞出口处下游河道的形态较天然情况发生改变, 由于工程测量、地形图绘制计算和上游库区的坍塌等自然因素的影响, 上游库容与水位之间的关系具有不确定性, 由于涉及资料比较复杂以及研究不够深入, 本文暂不考虑。

水利水电工程中的不确定因素非常复杂, 其他随机因素, 比如由于上游调洪起调水位的不同导致调洪计算结果的敏感性差异; 下游水位壅高对导流洞泄流能力的影响; 由于施工的影响导流洞出口处下游河道的形态较天然情况发生改变, 在实际中工程测量及上游流域自然沉降等自然因素的不确定性影响, 造成上游库容与水位之间的关系同时也不在是不变的, 具有一定的不确定性, 由于涉及资料比较复杂以及研究不够深入, 本文暂不考虑。

2.3 土石围堰漫顶风险模型

在导流初期, 主体建筑物施工一般采用临时性建筑物土石围堰进行挡水, 因为不确定性因素的存在, 影响围堰前水位超过围堰堰顶的高程的造成漫溢的情况, 此时导流系统不能再保护基坑主体建筑物的正常施工, 同时也可能会造成一定程度上人力、财力和物力的损失, 甚至对施工人员及周边居民生命安全有威胁。因此导流系统失效的直接原因是上游来水及导流建筑物两者不确定性因素的共同影响, 所以, 根据前期水文站收集到的坝址处水文气象等实测资料, 以及对泄流建筑物的各

项实测参数,综合考虑土石围堰的水文、水力参数的不确定性因素,最终通过分析上游堰前实际水位与围堰高程的关系来确定失事风险。

从而,土石围堰漫顶风险可以由此定义:在施工导流初期,土石围堰承担挡水任务,泄流建筑物泄水,当此模式下的导流系统无法保证在预期时间和费用内顺利完成主体水电站建筑物施工的可能性。风险率也就是指土石围堰堰前水文超过堰顶高程的概率^[50-54]。围堰堰前水位高于其设计挡水位的风险率如式(3.1)所示:

$$P = P(Z_{up}(t) > H_{upcoffer}) \quad (2.24)$$

式中: $Z_{up}(t)$ —上游围堰堰前水位, m;

$H_{upcoffer}$ —上游围堰堰顶高程, m。

因此在确定土石围堰漫顶风险分析时,不能单纯的只考虑天然洪水过程,必须同时考虑到上游洪水及导流建筑物的影响,也必须考虑水利工程的特性,建立综合考虑各不确定性因素的漫顶风险计算程序。

2.4 小结

本章主要是对不过水土石围堰进行的漫坝风险影响因素分析,

(1) 介绍了土石围堰漫顶风险分析的基本概念,极限状态方程的具体含义与应用,也简单描述了风险分析的主要内容。

(2) 围堰漫坝风险是许多风险因素和不确定因素综合作用的结果,识别影响土石围堰漫顶的主要风险因素,并对其进行概率分布分析,根据专家研究及工程实践应用,拟定各不确定参数的概率分布函数,建立综合考虑了施工洪水、风浪、泄洪、库容等方面的不确定性影响的土石围堰漫顶风险模型。

3 基于蒙特卡洛法的土石围堰度汛漫顶风险分析

3.1 蒙特卡洛法的基本理论

蒙特卡洛法于上个世纪四十年代被首次提出，其处理方式是通过计算机语言进行模拟与仿真^[55-60]。该方法的原理是比较简单的，其实质就是首先要确定各风险因素的随机变量及各变量的概率分布函数，然后按照其分布在计算机中进行随机抽样，得到一组符合概率分布的随机数，再将得到的随机数代入功能函数中，判断结构是否安全，一般蒙特卡洛法的模拟次数不低于十万次，在经过一定数量的模拟之后，统计使得结构失效的次数，求解得到失效次数和总的模拟次数的比值，从而求解得到所求的风险值。

如果在结构中存在不确定性变量 X_1, X_2, \dots, X_n ，共 n 个不确定性因素，然后分析得到各因素的概率密度函数并用 $f_{X_1}, f_{X_2}, \dots, f_{X_n}$ 来描述，结构的功能函数可以表示为：

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3.1)$$

在采用蒙特卡洛法计算时，首先假定总的抽样次数为 N ，抽到的随机数代入到功能函数中，统计失效的次数为 M 次，经过 N 次抽样后的失效概率通过数学公式可表达为：

$$p_f = \frac{M}{N} \quad (3.2)$$

采用蒙特卡洛法计算风险的关键问题是产生随机数，随机数如何选取是必须要考虑的问题，然而随机数的选取在各种文献中都有提及，方法也比较多，但是对于不同的方案，都会产生不同的随机数，但是基本思路都是统一的，首先第一步就是要确定简单的随机数，简单随机数就是在区间 $[0, 1]$ 之间产生的随机数，然后依次为基础在通过公式变换求解得到所需要的随机数^[61]。

随机数的获取在实际应用中有非常多的技术方法，可以通过随机随机数或者数学表达方法获取。但是常用的是方法是通过数学方法来获取随机数。数学方法中，最常用的有乘同余法、取中法等多种方法。下文中简单的介绍一下常用的乘同余法的公式：

$$x_{i+1} = (\alpha x_i + c)_{\text{mod}} m \quad (3.3)$$

上式中的 x_{i+1} 表示 $(\alpha x_i + c)$ 除以 m 所得到的余数。假如引入一个参数 k_i 的话， k_i 的表达式如下：

$$k_i = \text{int}\left(\frac{\alpha x_i + c}{m}\right) \quad (3.4)$$

int 的含义是取整数。则

$$x_{i+1} = \alpha x_i + c - m k_i \quad (3.5)$$

如果用 m 除以 x_{i+1} 之后，则可以获得标准的随机数 u_{i+1} 。

通过数学方法得到 0 到 1 的简单随机数后，我们需要将简单随机数转化为我们常用的正态分布或者极值分布等其他复杂分布的随机数。以正态分布为例，简要介绍下其转换过程。

如果有两个简单随机数 u_n 与 u_{n+1} ，我们可以通过下面的式子将简单随机数变化成标准正态随机数 x_n^* 与 x_{n+1}^* ：

$$\begin{cases} x_n^* = (-2 \ln u_n)^{\frac{1}{2}} \cos(2\pi u_{n+1}) \\ x_{n+1}^* = (-2 \ln u_n)^{\frac{1}{2}} \sin(2\pi u_{n+1}) \end{cases} \quad (3.6)$$

一般的正态分布的随机数可在标准正态分布的随机数上变换而来，它的随机数 x_n^* 与 x_{n+1}^* 可以用下式表示：

$$\begin{cases} x_n = x_n^* \sigma_X + m_X \\ x_{n+1} = x_{n+1}^* \sigma_X + m_X \end{cases} \quad (3.7)$$

3.2 施工围堰挡水的调洪演算

土石围堰挡水时，堰前水库对洪水洪峰具有消减作用，对堰前水位进行调洪演算，根据工程设计要求的设计洪水过程线、泄流建筑物的泄流参数及库容水位关系曲线等基本设计资料，从而能够计算出在设定的施工洪水和库容等其他参数下的上游水位^[62-65]，流程图如下：

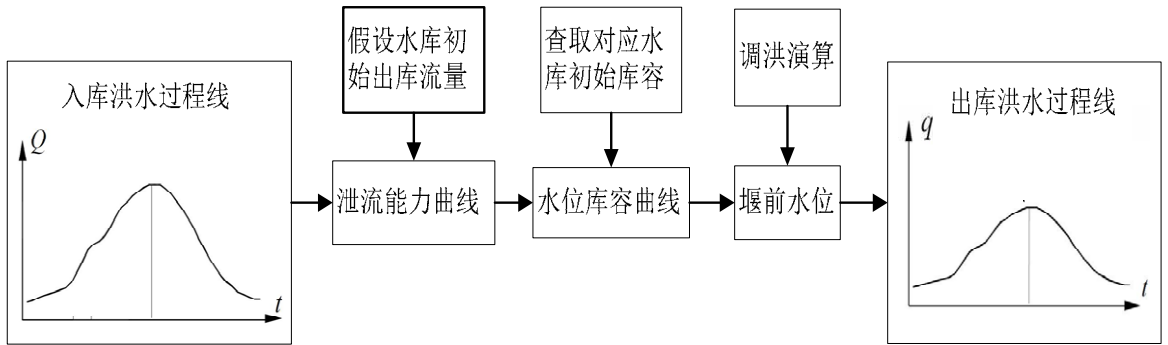


图 3.1 围堰度汛的堰前水库调洪模拟模型

根据水量平衡方程：

$$\frac{Q_1 + Q_2}{2} \Delta t - \frac{q_1 + q_2}{2} \Delta t = V_2 - V_1 \quad (3.8)$$

式中：

Q_1, Q_2 —分别为计算时段内始、末入库流量

q_1, q_2 —分别为计算时段内始、末出库流量

V_1, V_2 —分别为计算时段内始、末的水库蓄水量

一般情况下，根据实测水文数据可以得到入库洪水过程线时，从而可以得到 Q_1 、 Q_2 ， V_1 、 q_1 为计算的初始假定条件， V_2 、 q_2 是未知数。

取 Δt 时间内发生的变化为研究主体，一般情况下假定在 Δt 时间里下泄流量 q_1 是不

随时间变化的量，洪水过程 $F_{in}(t)$ 在该时间里进入水库的洪量 ΔQ_{in} :

$$\Delta Q_{in} = \int_{\Delta t} F_{in}(t) dt \quad (3.9)$$

流出水库的水量 ΔQ_{out} :

$$\Delta Q_{out} = q_1 \Delta t \quad (3.10)$$

所以，水库中水量的增量 ΔV 为:

$$\Delta V = \Delta Q_{in} - \Delta Q_{out} = \int_{\Delta t} F_{in}(t) dt - q_1 \Delta t \quad (3.11)$$

ΔV 注入水库使水库中原有的水量从 V_1 变化到 $V_2 = V_1 + \Delta V$ ，而 V_2 又会引起挡水建筑物前的水位从 H_1 变化到 $H_2 = v^{-1}(V_1)$ ，泄流建筑物的下泄流量从 q_1 变化到 $q_2 = q(H_2)$ 。一般， q_1 不等于 q_2 ，亦即下泄流量 q 也是时间的函数 $q = q(H_1, t)$ ，更一般的可表达为 $q(H, t)$ ， H 为上游水位。所以，在 Δt 时间里 ΔV 的计算方法也要使用积分表达即:

$$\Delta V = \int [F_{in}(t) - q(H, t)] dt \quad (3.12)$$

将 Δt 微分化，即可得到调洪演算的关于时间的微分方程。

$$\frac{dV(t)}{dt} = [F_{in}(t) - q(H, t)] \quad (3.13)$$

其初始条件为式:

$$\begin{cases} q(t_1) = F_{in}(t_1) \\ H(t_1) = h(q(t_1)) \\ V(t_1) = V(H(t_1)) \\ F_{in}(t_i) = C_i (i=1, \dots, n) \end{cases} \quad (3.14)$$

其中 C_i 为已知值，边界条件为式:

$$\begin{cases} q = q(H) \\ V = v(H) \end{cases} \quad (3.15)$$

根据调洪演算的物理模型可知函数 $q(H)$ 和 $v(H)$ 都是单调函数。

$$\begin{cases} H = q^{-1}(q) \\ H = v^{-1}(V) \end{cases} \quad (3.16)$$

可见根据导流建筑物的泄流能力曲线 $H \sim q$ 和水库的水位库容曲线 $H \sim V$ ，可确定 q 与 V 的函数关系，即 $q = f(V)$ 。可以采用常微分方程数值解法中的单步法求解上述微分方程。设洪水过程历时为 $t \in [0, T]$ ，将其离散到 n 个时段(只要 n 取得足够大就可以保证算法稳定性)，即:

$$t_i = \frac{i}{n} T \quad i=1, 2, L, n \quad (3.17)$$

可采用二分法求解水量平衡方程中的未知参数，推求水库下泄过程线，得到水库的最大下泄流量、防洪所需库容以及相应的最高堰前水位，调洪演算流程图如图所示。

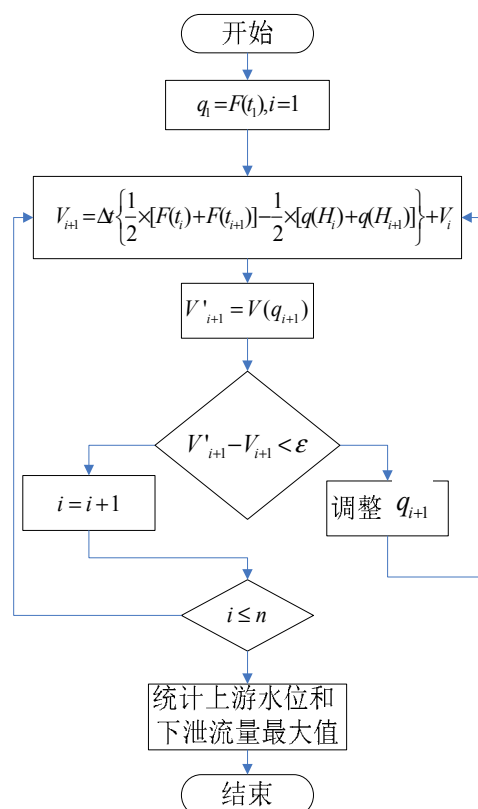


图 3.2 调洪演算流程图

3.3 工程案例概述

金沙江干流下段规划建设4个梯级枢纽为：乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝。其中，乌东德、白鹤滩已截流，溪洛渡、向家坝已建成投产。

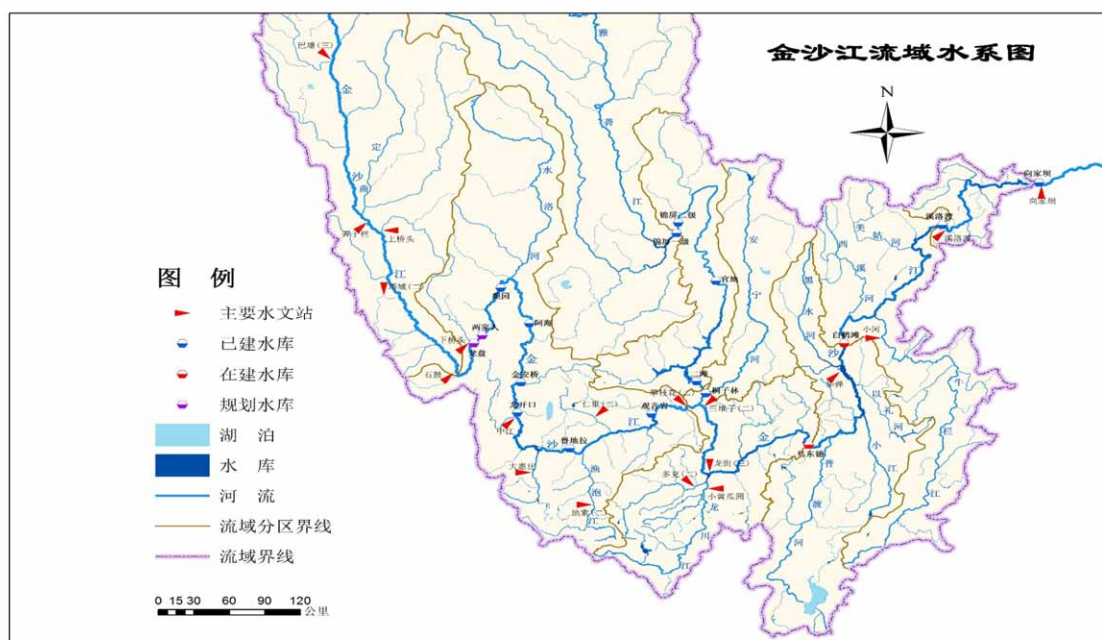


图 3.1 金沙江中下游水系及梯级电站分布图

3.3.1 乌东德水电站工程概况

乌东德工程为金沙江干流下段首级枢纽，位于四川省会东县和云南省禄劝县交界处的金沙江峡谷内，距白鹤滩大坝180km，控制集水面积406142km²，是一座以发电为主，兼顾防洪的特大型电站。水库正常蓄水位975m，相应库容58.63亿m³，死水位950m，死库容32.48亿m³，调节库容26.15亿m³，具有季调节性能，汛期限制水位为952m，相应的防洪库容为24.4亿m³。

乌东德水电站河床具有深厚52.4~65.5m的覆盖层，填筑土石围堰的高度69.5m，乌东德坝址适合采用在土石围堰的结构型式并覆盖层上填筑，堰体须采取可靠的防渗措施。左、右岸1#~4#导流隧洞联合泄流条件下，围堰混凝土防渗墙施工平台挡水标准为20年一遇设计洪水，洪峰流量7100m³/s，对应上、下游设计水位分别为830.97m和827.38m；大坝围堰挡水期，左、右岸1#~5#导流隧洞联合泄流条件下，大坝围堰度汛标准选择的是全年50年一遇设计洪水，根据资料显示洪峰流量26600m³/s，对应上游水位为871.1，下游水位为845.12m。汛前完成大坝上、下游围堰填筑（上、下游围堰堰顶高程分别为873.00m和847.00m）

（1）水位库容关系

水位~库容曲线见下表。

表3.1 乌东德坝址水位~库容曲线

高程(m)	水上库容(亿m ³)	高 程(m)	水上库容(亿m ³)	高 程(m)	水上库容(亿m ³)
810	0	880	3.028	950	32.476
820	0.028	890	4.517	960	41.68
830	0.173	900	6.691	970	52.511
840	0.423	910	9.577	980	65.208
850	0.79	920	13.357	990	80.012
860	1.303	930	18.359	1000	97.011
870	2.026	940	24.744		

（2）坝址设计洪水

经计算，万年一遇设计洪水42400m³/s，五千年一遇设计洪水40500m³/s，百年一遇设计洪水28800m³/s，坝址洪水设计成果见表3.2。

表3.2 坝址洪水设计成果表

单位: Qm(m³/s); 洪量W (亿m³)

项目	各频率设计值 (%)										
	0.02	0.10	0.20	0.50	1	2	3.33	5	10	20	50
Qm	40500	35800	33700	30900	28800	26600	24900	23600	21100	18500	14500
W24h	34.0	30.1	28.3	26.0	24.2	22.4	21.0	19.8	17.8	15.6	12.2
W72h	98.8	87.4	82.4	75.6	70.3	65.0	60.9	57.6	51.7	45.3	35.5
W7d	204	181	170	156	146	134	126	119	107	93.8	73.5
W15d	415	366	345	316	293	270	253	239	214	187	145

(3) 施工导流规划

本工程不宜采用围堰过水方案, 采用河床一次断流、土石围堰全年挡水、左右岸导流隧洞泄流的导流方案; 后期导流采用导流底孔和永久泄水建筑物泄水。本工程布置有4低1高共5条导流洞, 左岸3条, 右岸2条。截流时由两岸共4条低导流洞泄流, 进口底高程814m, 尺寸16.5×24m (宽×高), 汛前完成大坝上游围堰填筑 (上围堰堰顶高程分别为873.00m)

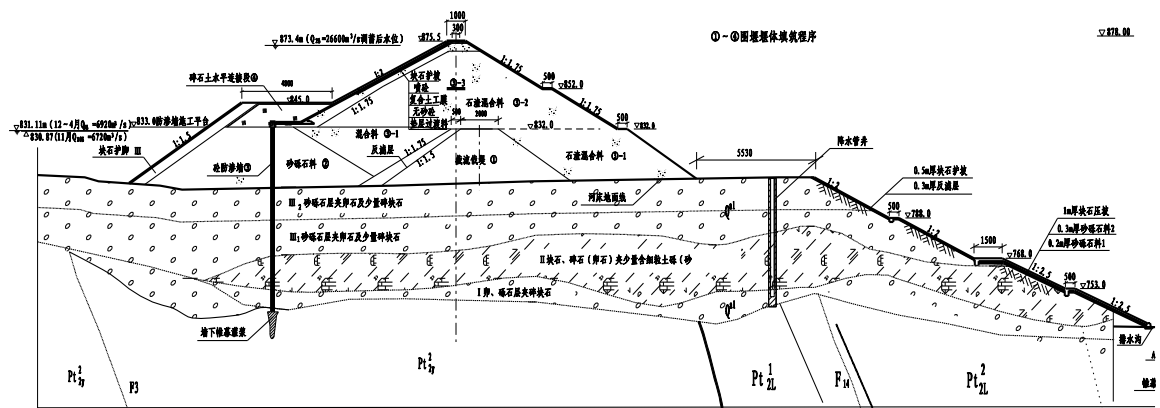


图 3.4 乌东德上游围堰典型横剖面图

表 3.3 乌东德导流隧洞特性表

导流隧洞编号	进口高程 (m)	出口高程 (m)	洞长 (m)	断面尺寸 (m)
1 [#]	814.00	800.00	1712.8	16.5×24.0
2 [#]	814.00	800.00	1620.1	16.5×24.0
3 [#]	812.00	800.00	1472.4	16.5×24.0
4 [#]	812.00	800.00	1613.6	16.5×24.0
5 [#]	830.00	824.00	1699.6	12.0×16.0

3.3.2 白鹤滩水电站导流工程

白鹤滩工程为金沙江干流下段第2级枢纽，位于四川省宁南县和云南省巧家县交界处的金沙江峡谷内，坝址下至宜宾河道长382km，至溪洛渡大坝199km，控制集水面积430308km²，是一座以发电为主，兼顾防洪的继三峡和溪洛渡之后的第三座千万kW级巨型电站。白鹤滩水电站，正常蓄水位825m，相应库容190.06亿m³，死水位765m，死库容85.70亿m³，调节库容104.36亿m³，具有年调节性能。水库汛期限制水位为785m，防洪库容为75.0亿m³。电站总装机容量为16000MW，保证出力为4200/4950MW，多年平均发电量为640.95亿kW·h。

(1) 水库库容曲线成果表

表 3.4 白鹤滩水库库容曲线表

高程(m)	库容(10 ⁸ m ³)
585	0.64
595	0.78
607	1.01
610	1.08
620	1.28
630	1.72
640	2.45
650	3.58
660	5.5

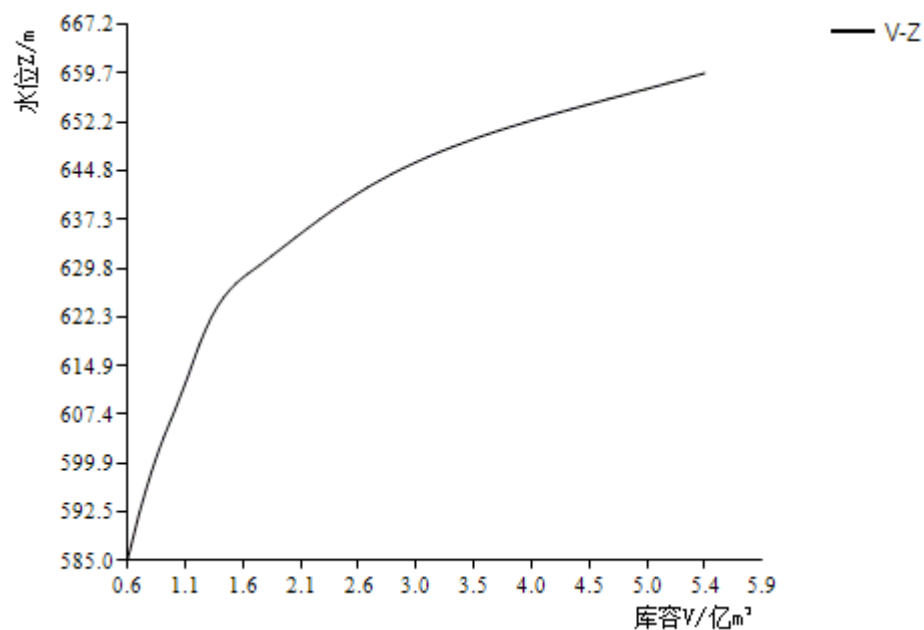


图 3.5 水位-库容曲线

(2) 坝址洪水

该坝址以上流域面积 43.03 万 km^2 ，多年平均降水量为 715.9mm，多年平均流量 4190 m^3/s 。金沙江洪水主要由暴雨形成，年最大洪峰的发生时间主要集中在 7、8、9 三个月，约占总数的 95%以上，其余 5%可发生在 6 月下旬和 10 月上、中旬。根据 1939~2014 年 75 年实测水文资料分析，实测最大洪峰流量为 25800 m^3/s （1966 年 9 月 1 日），实测第二大洪峰流量为 23800 m^3/s （1954 年 8 月 26 日）。坝址处全年洪水设计成见表 4.1，天然情况分期设计洪水成果见表 4.2。

表 3.5 坝址设计洪水成果表（全年洪水）

单位： m^3/s .

项目	频率（%）						
	0.2	0.5	1	2	3.33	5	10
Qm (m^3/s)	36500	33400	31100	28700	26800	25300	22700
W3 (亿 m^3)	89.6	82.0	76.4	70.0	65.8	62.0	55.6
W7 (亿 m^3)	190	174	162	149	140	132	118
W15 (亿 m^3)	470	340	317	292	273	257	231
W30 (亿 m^3)	641	591	550	509	476	450	406

（3）施工导流规划

2016 年由围堰挡水度汛，来水由 5 条导流隧洞联合下泄。上游围堰堰顶高程 651.00m，度汛标准为全年 50 年一遇洪水， $Q=28700\text{m}^3/\text{s}$ 。

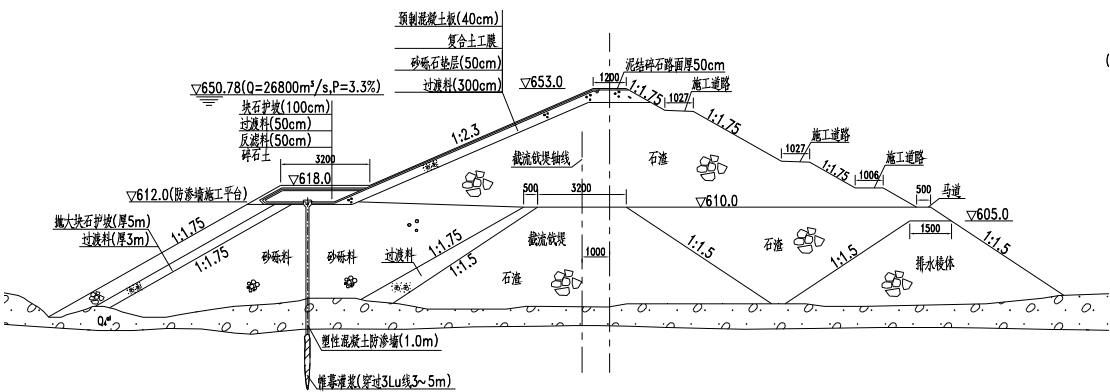


图 3.6 上游土工膜斜墙围堰典型剖面图

上游围堰采用复合土工膜斜墙土石围堰，堰顶高程为 651.00m，最大堰高为 83.0m，堰顶宽 12.0m，堰顶轴线长 208.9m。

（4）施工导流布置

本工程导流建筑物包括 5 条导流隧洞和上、下游围堰。5 条导流隧洞方案，采用城门洞型，从左岸至右岸依次为 1#~5#导流隧洞，导流隧洞下游段均与尾水洞相结合，结合洞线长度为 2009.07m，各条导流隧洞特性见表

表 3.6 导流隧洞特性表

导流隧洞编号	进口高程 (m)	出口高程 (m)	洞长 (m)	与尾水洞结合段长(m)	有坡段底坡 <i>i</i> (%)	断面尺寸 (m)
1 [#]	585.00	574.00	2007.63	453.59	0.762	17.5×22.0
2 [#]	585.00	574.00	1791.31	400.32	0.851	17.5×22.0
3 [#]	585.00	574.00	1584.82	360.30	0.947	17.5×22.0
4 [#]	585.00	574.00	1650.87	351.12	0.903	17.5×22.0
5 [#]	605.00	574.00	1945.63	443.74	2.192	17.5×22.0

为满足导流隧洞下闸封堵要求，进出口均需设置闸门井，进口均采用岸塔式闸门井，其中 2[#]~4[#]导流隧洞进口闸门受金属结构挡水水头水平控制，需设置中墩，出口均采用地下式闸门井（与尾水洞检修闸门井相结合）。

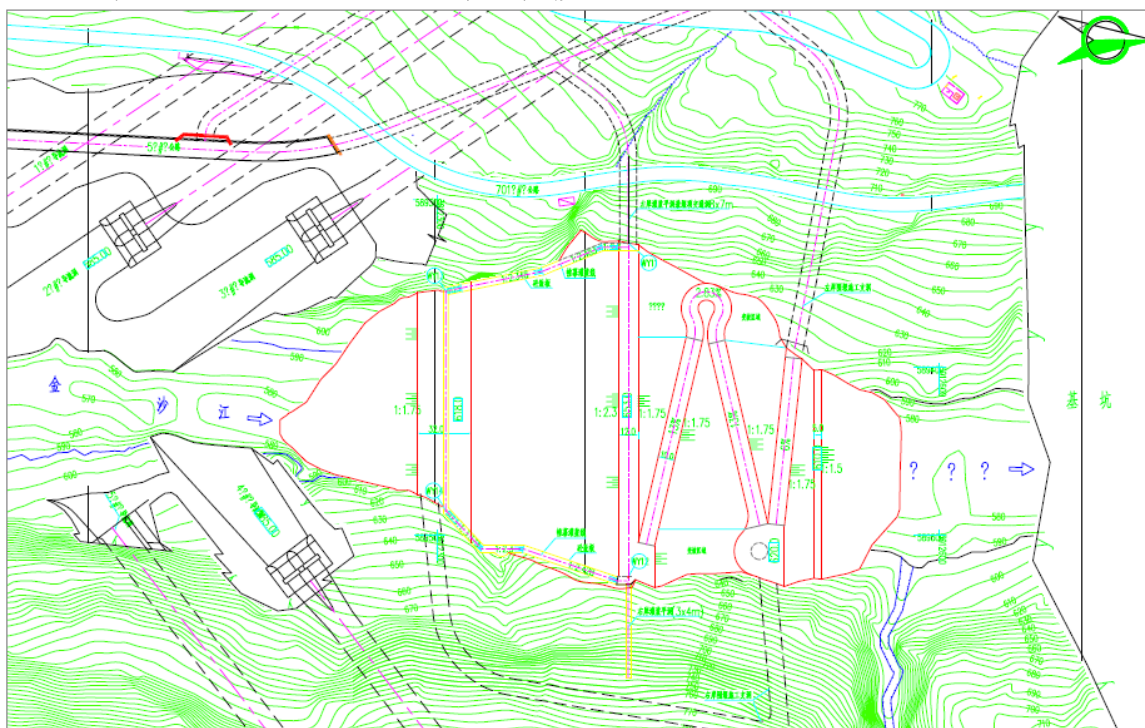


图 3.7 上游围堰平面布置图

3.4 基于蒙特卡洛法的土石围堰度汛漫顶风险程序构建

3.4.1 基于 Monte-Carlo 法的土石围堰度汛漫顶风险分析模型计算流程

- (1) 首先要确定计算机模拟的次数；
- (2) 输入导流系统水文、水力、库容的概率密度函数以及与计算相关的参数，根据这些参数计算出入库洪水过程中与泄流过程中有关的随机数；
- (3) 根据确定的随机参数的概率密度函数进行抽样计算，拟合待建电站设计断面洪水过程线；

(4) 通过拟合的施工洪水过程线, 导流建筑物泄流参数的随机数进行调洪演算, 拟计算相应情况下对应的堰前水位

(5) 通过统计模拟分析堰前水位, 统计堰前水位超过堰顶高程的次数以确定导流风险。

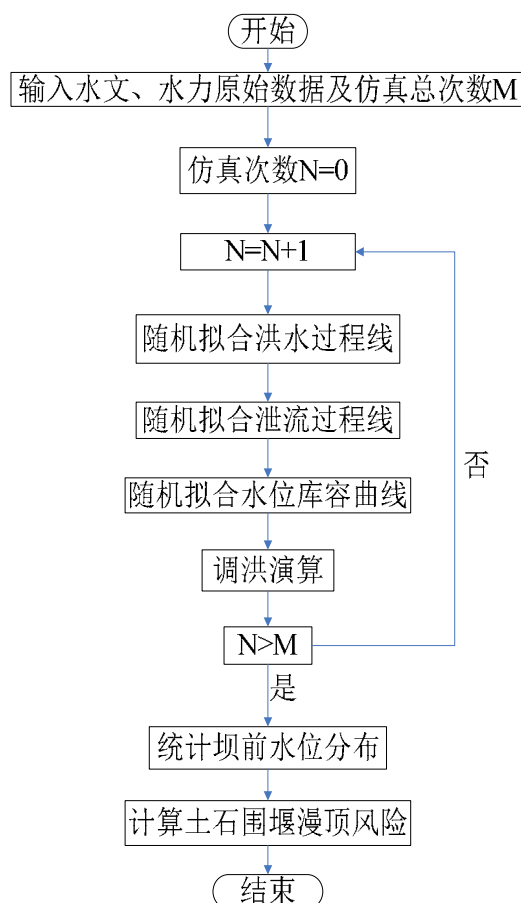


图 3.8 漫顶风险模型计算流程图

通过计算流程图, 基于 C#语言编写程序^[66], 建立程序软件便于模型计算与分析, 部分程序代码见附录。

3.4.2 基于 MC 法的土石围堰漫顶风险计算

基于以上章节中的内容, 在软件针对水文、水力不确定性因素进行随机模拟, 先确定模拟次数, 然后对全部或部分水文序列进行调洪演算, 后将结果导入数据库, 计算施工导流的风险率, 计算风险概率模型软件截图如下:



图 3.4 基于蒙特卡洛法的土石围堰漫顶分析软件界面



图 3.4 基于蒙特卡洛法的土石围堰漫顶分析软件参数设定界面

3.5 本章小结

本章主要是确定施工度汛初期土石围堰进行的漫顶风险分析方法及程序编写：

- (1) 首先确定计算方法采用蒙特卡洛法进行模拟计算，详细阐述蒙特卡洛法。

根据第二章分析影响围堰漫顶的主要风险因素，假定各不确定性因素的概率分布函数，根据所确定的土石围堰漫顶风险计算公式，考虑了洪水洪峰流量、导流隧洞泄流能力等各方面的不确定性因素的影响，然后建立土石围堰漫顶风险的计算模型，

（2）建立基于蒙特卡洛法的施工导流风险分析计算模型软件，结合本文所采用的金沙江下游流域的工程背景，通过计算机语言编制程序，实现对土石围堰漫顶风险的求解

4 不考虑梯级环境影响的土石围堰漫顶风险分析

4.0 引言

针对土石围堰漫顶风险的特点，影响其风险的因素主要包括水利不确定性和水力不确定性，本文第三章中，重点分析了来水洪峰流量的不确定性，以及泄流能力中导流隧洞的糙率、断面面积以及流量系数的不确定性，根据专家学者的研究分析结果，合理的假定各不确定性因素的概率分布，运用蒙特卡洛理论，基于计算机语言，编制计算软件模型，使得风险计算更加快捷。文章第三章中提供的计算程序模型可用于类似工程的风险值计算。

4.1 土石围堰漫顶风险计算

根据前面章节中提到的所谓土石围堰漫顶风险，即在建电站上游土石围堰挡水期间，堰前洪水水位超过堰顶高程时的风险率，当洪水漫顶后，在建电站的导流建筑物受到不同程度的破坏，从而失去保护基坑主体建筑物的施工的能力，围堰堰前水位高于其设计挡水位的风险率如式所示：

$$P = P(Z_{up}(t) > H_{upcoffer}) \quad (4.1)$$

(1) 水文的随机性表现在天然来水(洪峰)流量和来水(洪水)过程的随机性。为了简化研究，在施工导流风险计算中，假设洪水过程随机性很小，并忽略它的影响，而只考虑(洪峰)流量的随机性。选择一典型设计单位洪水过程线，用洪峰流量 Q ，按同倍比放大的方法来推求洪水过程，本文采用专家学者对洪峰流量所提出的皮尔逊-III型的分布曲线。

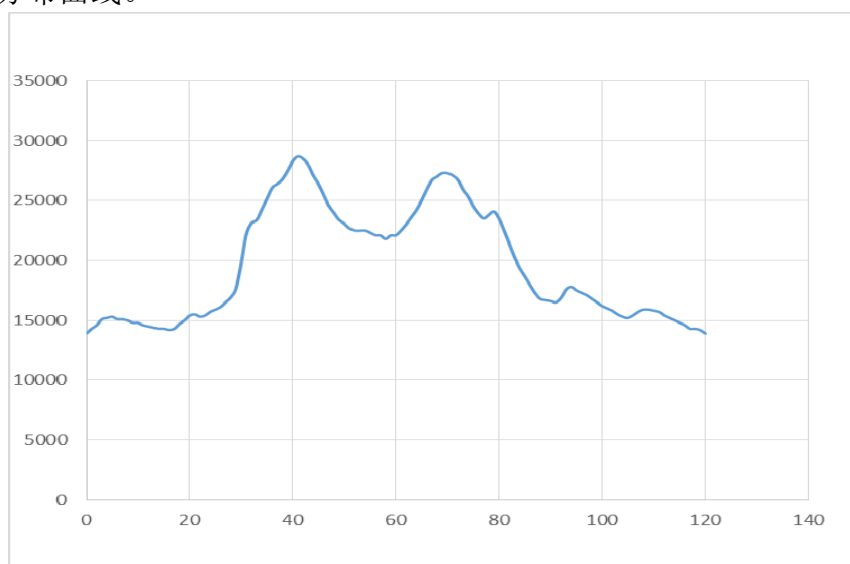


图4.1 白鹤滩坝址1962年型设计洪水过程线（2%）

其概率密度函数为：

$$f(x) = \frac{\beta^a}{\Gamma(a)} (x - a_0)^{a-1} e^{-\beta(x-a_0)} \quad (4.2)$$

式中, $\alpha, \beta > 0$; $\Gamma(\alpha)$ 是 α 的伽玛函数, 三个参数 a, β, a_0 根据以下参数计算得结果。 c_s 是偏态系数; c_v 是离势系数。

表 4.1 设计洪水成果

项目	均值	C_v	C_s/C_v	频率 (%)						
				0.2	0.5	1	2	3.33	5	10
$Q (m^3/s)$	16300	0.29	4	36500	33400	33100	28700	26800	25300	22700

由上表已有的资料, 通过计算可以确定来水洪峰流量的概率密度函数:

$$m_Q = 16300 m^3/s, C_v = 0.29, C_s = 4 \times 0.29 = 1.16 \quad (4.3)$$

$$\alpha = \frac{4}{\frac{C_s^2}{C_v^2}} = \frac{4}{1.16^2} = 2.973 \quad (4.4)$$

$$\beta = \frac{2}{\overline{Q_f} C_v C_s} = \frac{2}{16300 \times 0.29 \times 1.16} = 3.647 \times 10^{-4} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} a_0 &= \overline{Q_f} \left(1 - \frac{2C_v}{C_s}\right) \\ &= 16300 \times \left(1 - \frac{2}{4}\right) = 8150 m^3/s \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\Gamma(x) = \Gamma(2.973) = 1.9457 \quad (4.7)$$

将经过计算以后的数据结果代入到概率密度函数中, 可以得到该水电站电站导流天然来水洪水洪峰流量的概率密度函数公式

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{\beta^a}{\Gamma(a)} (x - a_0)^{a-1} e^{-\beta(x-a_0)} \\ &= 3.088 \times 10^{-11} (x - 8150)^{1.973} e^{-3.647 \times 10^{-4} (x - 8150)} \end{aligned} \quad (4.8)$$

(2) 该水电站初期导流过程复杂, 并且相应的资料也不是特别齐全, 在导流初期, 土石围堰挡水以及五条导流隧洞泄水时, 在导流隧洞泄流过程中呈现的状态有: 有压、半有压以及无压或者几种交替变化的状态, 本文分析围堰挡水时, 要得到隧洞的泄流能力的风险问题时, 选择最不利的有压流态, 近似认为属于淹没出流, 此时泄流能力计算公式为:

$$Q = \mu A \sqrt{2gZ_0} \quad (4.9)$$

其中: μ —导流隧洞淹没出流时流量系数;

A —导流隧洞的断面面积, m^2 ;

Z_0 —上下游计算水位差。

此工程选择的是城门洞形断面, 并为有压淹没出流, 流量系数 μ 使用下式计算:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\frac{2gLn^2}{(A/\chi)^{4/3}} + \sum \zeta + 1}} \quad (4.10)$$

城门洞型的断面面积计算公式如下：

$$A = \frac{1}{2} \times B \times (H_1 + H - r) + \frac{\theta \times \pi \times r^2}{360} \quad (4.11)$$

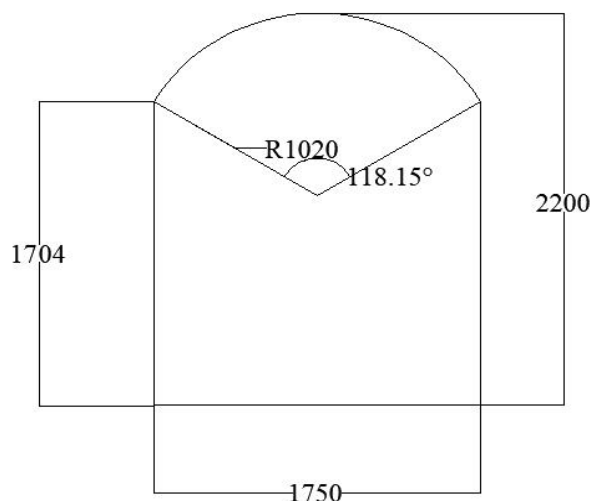


图4.2 导流隧洞城门洞型示意图

式中 B 为宽, H 为高, r 为半径, 根据已有资料

$$B=17.5m,$$

$$H=22m,$$

$$H_1=17.05m,$$

$$\theta=118.15^\circ,$$

$$r=10.2m$$

计算得结果：

$$A = 0.5 \times 17.5 \times (17.05 + 22 - 10.2) + \frac{118.15 \times 3.1415 \times 10.2^2}{360} = 359.64m \quad (4.12)$$

根据一些工程经验和研究学者的分析, 假定导流隧洞断面面积 A 服从正态分布, 其均值取设计值 $A=359.64m$;

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \times e^{-\frac{(x-359.64)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.13)$$

参考类似工程均方差取值为 0.1, 误差主要是来自施工测量误差, 根据文献中的取误差范围为 ± 0.5 。

流量系数 μ 的取值，根据前文中所假设的泄流系数服从三角形分布，

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)}, & a \leq x \leq b \\ \frac{2(c-x)}{(c-a)(c-b)}, & b < x \leq c \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4.14)$$

其中 a , b , c 分别为流量系数的最小值，众值，最大值，计算中使用的参数取值可取为 $a=0.97\mu$, $b=1.0\mu$, $c=1.05\mu$ 。

μ 的取值可以根据前面各参数的取值，按照公式计算

对于糙率，根据一些工程经验前文已经描述，服从三角形分布

根据规范以及已有的工程研究取值， $a=0.014$, $b=0.0155$, $c=0.017$ ，可以得到该工程的导流隧洞糙率 n 的三角形分布函数为：

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2(x-0.014)}{(0.0155-0.014)(0.017-0.014)}, & 0.014 \leq x \leq 0.0155 \\ \frac{2(0.017-x)}{(0.017-0.014)(0.017-0.0155)}, & 0.0155 < x \leq 0.017 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4.15)$$

表 4.2 各不确定性变量取值表

变量	来水洪峰流量 Q (m^3/s)	隧洞断面面积 $A(m^2)$	糙率 n	湿周 χ (m)	$\sum \zeta$	隧洞长 L (m)
均值	16300	359.64	0.0155	72.55	0.4	1796.05
分布函数	(P-III) 型分布	正态分布	三角形分布			



图 4.3 软件参数设定

根据第二章对所提出的不确定性因素分析并且得到各不确定性因素的概率分布情况，通过第三章中所编译的基于蒙特卡洛法的土石围堰漫顶风险分析软件，统计当堰前水位超过堰顶高程的次数，从而求解风险值，本次求解为了分析模拟次数对结果的影响，分别求解一万次、十万次以及一百万次的计算结果并且对计算结果分析讨论。

计算 10000，通过计算机程序统计计算结果得概率 $P=[0.04949\%, 0.05566\%]$



图 4.8 抽样 10000 次概率区间计算结果

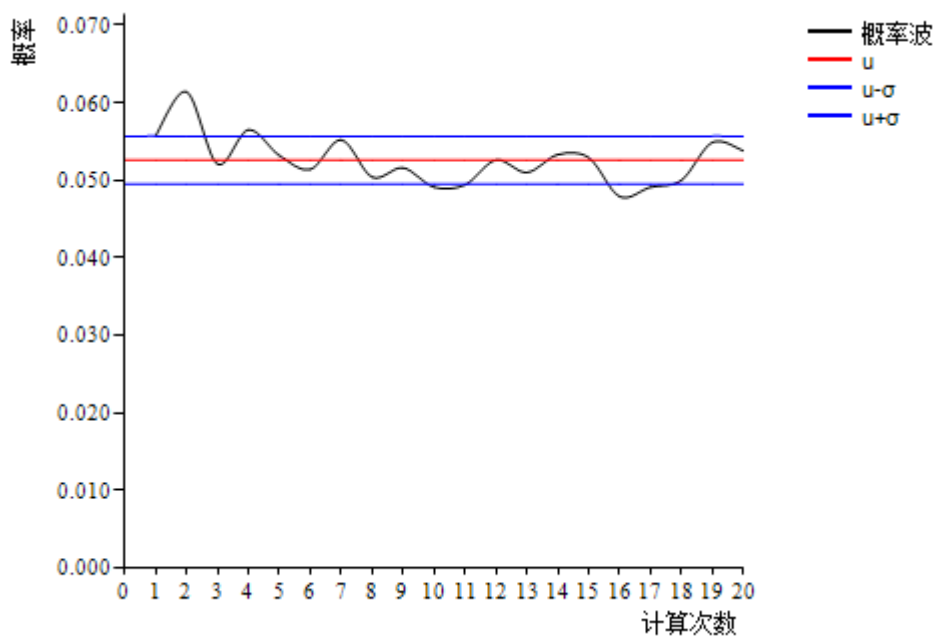


图 4.9 随机抽样 10000 次概率分布图

计算 100000 次, 通过计算机程序统计计算结果得概率 $P=[0.03024\%, 0.04306\%]$

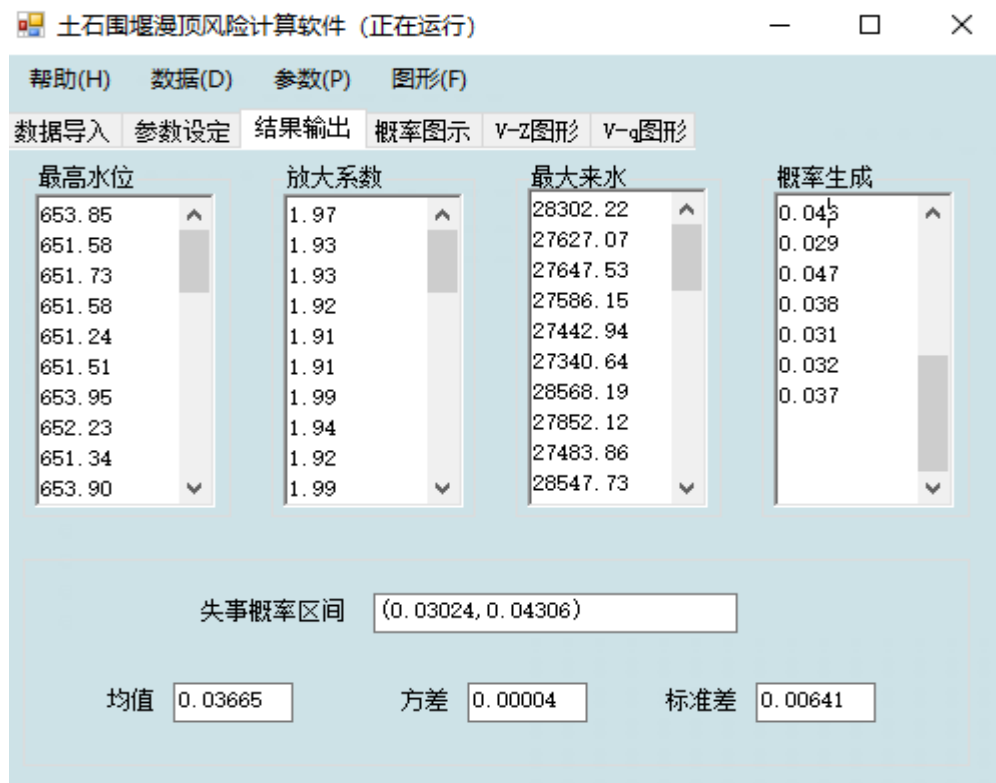


图 4.6 抽样 100000 次概率区间计算结果

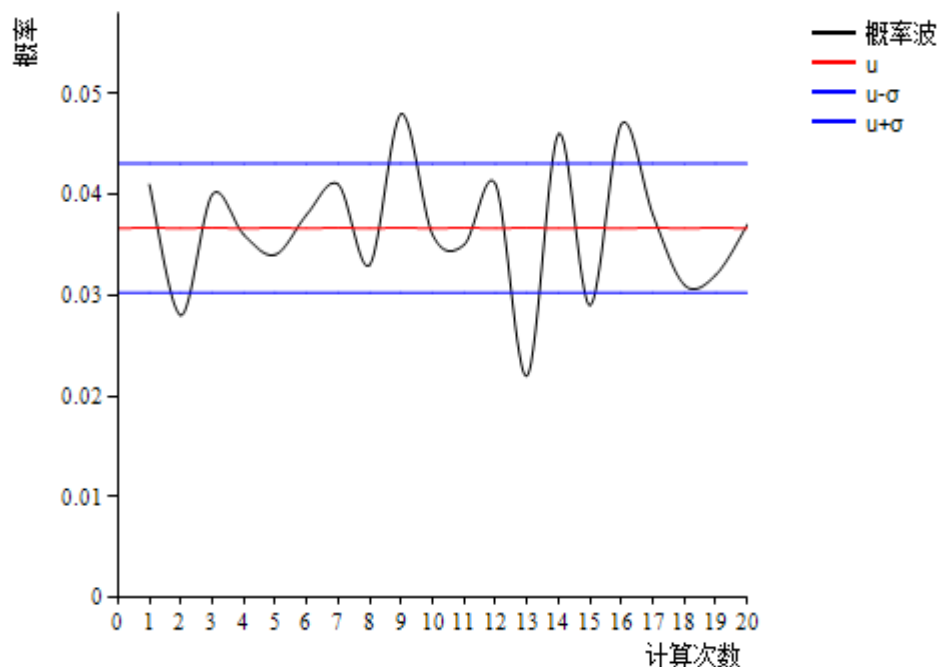


图 4.7 随机抽样 100000 次概率分布图

计算 1000000 次，通过计算机程序统计计算结果得概率 $P=[0.00513\%, 0.04587\%]$,



图 4.4 随机抽样 1000000 次概率区间计算结果

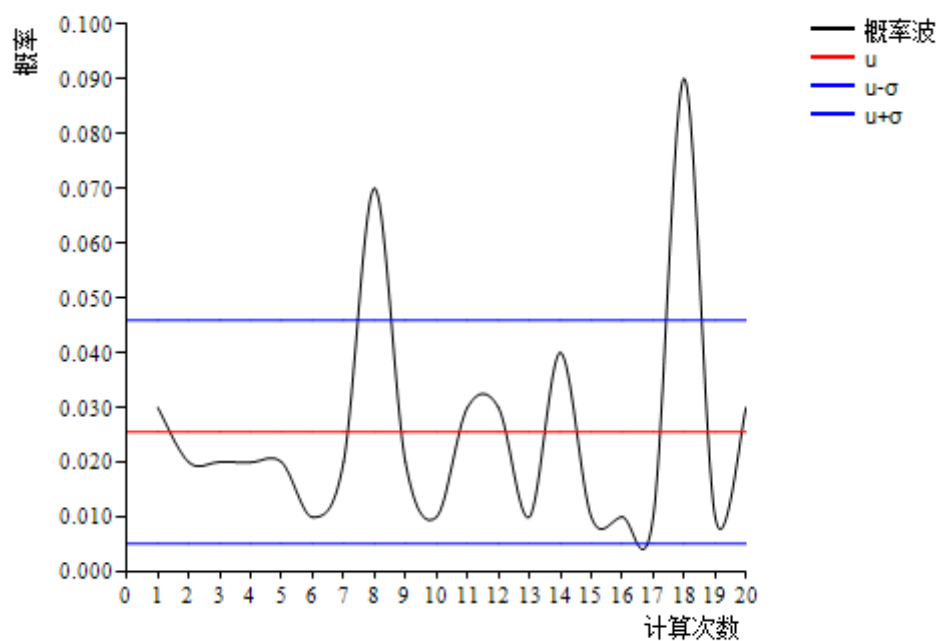


图 4.5 随机抽样 1000000 次概率分布图

表 4.3 风险计算成果

模拟次数	风险率 (%)	风险率均值 (%)
10000	0.04949, 0.05566	0.05258
100000	0.03024, 0.04306	0.03665
1000000	0.00513, 0.04587	0.02550

不考虑梯级建设环境条件，计算该工程上游土石围堰漫顶风险，分别计算一万次，十万次，一百万次三种情况下的漫顶风险值，通过结果可以看出，计算结果相对稳定，可见随着计算次数的增加，风险值的求解越准确，求值对工程具有指导意义，所建立的漫顶风险率是合理可信的。

4.2 敏感性分析

在对不确定因素分析时，敏感性分析是指从定量的角度分析某个特定的指标受不确定性因素的变动所产生的数值上的变化规律。其实质是通过对某一不确定性因素逐一改变其数值大小，按照一定的要求对该因素放大或者缩小，从而分析得到某一不确定性因素对特定指标的影响，对于漫顶风险分析敏感性分析，以漫顶风险率为指标，通过对不确定性因素的分析，选取具有代表性的洪峰流量的偏态系数 C_s ，变差系数 C_v ，过流面积的均值和方差，糙率的均值和方差等主要风险因素为分析因子。根据已有的工程资料及计算结果，确定敏感性分析的基准方案，在按照第三章所确定的计算方法，从而求解在基准方案情况下的漫顶风险，接下来，根据工程实际设计资料及要求，假设需要考虑分析因子的一定的变动幅度，再采用每组不同的比较方案，依旧采用第三章所确定的计算方法及程序软件，得到相应标准的漫顶风险率，并通过计算得到漫顶风险率的变动百分比，即目标指标的变动百分比。最后求解敏感系数，敏感系数等于目标指标的变动百分比与不确定性因素参数的变动百分比。敏感系数其实就是表示不确定性因素参数在升降 1% 后目标指标的变化百分比，通过计算过程可以看出敏感系数的数值变化幅度越大，该分析参数对目标指标的影响趋势越高，在实际设计中，必须予以考虑规避。

本章节对文中所提及的主要风险因素进行敏感性分析，首先将上文对不考虑梯级建设环境下的土石围堰漫顶计算方案作为敏感性分析的基准方案。

(1) 确定不确定性变量参数和根据要求确定的基准方案：本文中取设计值洪峰流量均值 $x = 16300 \text{ m}^3/\text{s}$ ，变差系数 $C_v = 0.29$ ，偏态系数 $C_s = 1.16$ ；

(2) 基准方案选择为模拟次数十万次的漫顶风险 $P = 0.03665\%$

(3) 假定洪水等分析因子的在一定范围内的变幅，从而求解得到对应情况下的土石围堰漫顶风险率和敏感系数，并将最后的计算结果汇总至下表。

表 4.4 敏感性分析

不确定性因素	分析参数	改变值	土石围堰漫顶风险率%	敏感系数	敏感系数平均值
洪峰流量	均值 16900	17500	0.184	40.20	47.16
		17278	0.1308	42.81	
		16952	0.112	51.39	
		16626	0.0764	54.22	
	变差系数 Cv 0.29	0.348	0.130	12.73	15.06
		0.033	0.119	14.97	
		0.319	0.0944	15.75	
		0.304	0.0674	16.78	
隧洞过流面积	误差 0.5	0.600	0.052	8.37	3.10
		0.575	0.0454	2.38	
		0.55	0.0384	0.31	
		0.525	0.0464	1.33	
	均方差 σ_A 0.1	0.120	0.050	1.87	3.19
		0.115	0.055	3.37	
		0.110	0.051	4.07	
		0.105	0.043	3.46	
糙率 n	均值 0.0145	0.014	0.057	-11.10	-5.25
		0.013	0.070	-4.55	
		0.012	0.052	-4.19	
		0.011	0.045	-1.14	

计算结果分析可以得到，洪峰流量均值对土石围堰漫顶风险率影响是最大的，根据计算结果，其敏感系数均值为 47.16，也就是说洪峰流量均值增加或者减小 1%，土石围堰漫顶风险率随之增加 47.16%；从结果中也可以看出洪峰流量的变差系数 Cv 对土石围堰漫顶风险影响也是比较大的；根据文献所提出的对泄流建筑物隧洞过流面积误差取值时对土石坝漫顶风险率的影响相对较小，相应的敏感系数为约为 3.10；过流面积服从正态分布，其均方差的取值对风险计算影响很小。对于糙率对土石坝漫顶风险率的影响也较显著，糙率均值影响较大，相应的敏感系数为约为 5.25。在计算时对糙率的取值及分布函数确定需要谨慎分析。

4.3 本章小结

(1) 首先根据文中对不考虑梯级建设环境下的白鹤滩水电站围堰进行漫顶风险

分析，为了避免求解次数对漫顶风险率的求解影响，分别求解一万、十万及一百万模拟次数下的围堰漫顶风险率，使得求解结果更加可靠。

(2) 综上所述，通过对土石围堰漫顶影响因素进行敏感性分析，对大坝漫顶风险率影响最大的是洪峰流量均值，洪峰流量的变差系数 C_v 的敏感系数较大；隧洞过流面积对土石坝漫顶风险率的影响也较显著，其中过流面积均值影响较大，而均方差影响很小，几乎可以忽略；对于糙率对土石坝漫顶风险率的影响也较显著，其中糙率均值影响较大。

5 梯级水电开发下土石围堰度汛漫顶风险研究

5.1 引言

随着水利工程的发展，梯级开发成为了西南地区水利工程开发的基本形式，在我国各大流域上如澜沧江、雅砻江、金沙江、大渡河等都逐步开展流域的梯级开发建设，梯级环境主要包括上游在建或者已建梯级电站、上游支流、区间汇流、主体在建工程、下游在建或者已建梯级电站等多个影响主体，梯级建设环境下土石围堰漫顶风险应该客观的考虑梯级建设下的主要影响因素，梯级建设环境下，上游电站对下游河道的水文情况改变，在已有的单库风险研究的理论基础下，以下针对实际工程分析上游在建梯级、区间洪水及下游已建梯级条件下的土石围堰展开漫顶风险研究。

5.2 梯级建设环境下漫顶风险分析

与单一电站相比，梯级建设下土石围堰漫顶风险主要分析的是上游水电站的导流系统对在建电站水文情况的影响，上游导流系统改变了下游施工洪水原来的分布情况，使得其不再服从从前的统计规律，需要对洪水过程资料重新确定，梯级开发的条件下，水电站工程建设模式主要有为上游电站及下游水电站同步在建、上游电站已建成下游水电站在建、上游电站已建成下游水电站在建或者上下游水电站均已建成，对于本文所采用的工程资料，主要研究上游电站处于在建状态，下游电站已经建成，在此情况下，上游电站的挡水建筑物土石围堰对施工洪水具有一定的调蓄作用，从而降低了在建电站的漫顶风险概率，然后如果上游土石围堰出现漫顶的现象，其溃决后的洪水与区间洪水叠加后，在一定程度上增加了漫顶失事概率。

梯级水电建设条件下的施工洪水，按照其来水情况分为以下三种方式：第一，当仅有区间来水，此时区间来水即为该情况下的施工洪水情况；第二，当仅有上游水电站泄水作为施工洪水情况；第三，两部分洪水过程叠加作为施工洪水。在导流风险分析中，一般采取上游水电站的下泄洪水与区间洪水洪水叠加组合后的施工洪水作为最不利洪水组合方式作为下游土石围堰设计断面的施工洪水^[67]。

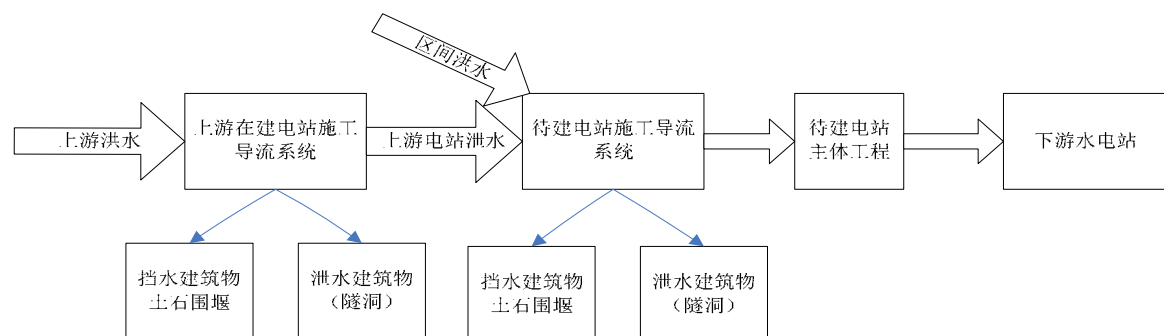


图 5.1 梯级施工导流系统概括图

(1)上游在建导流系统的影响因素分析

上游在建梯级电站临时导流建筑物围堰对水库有一定的调蓄作用，围堰对水库的调蓄作用改变了原河道的水文特性，上游水利工程施工导流系统改变了原河床的水力特性，上游同步建设的电站对施工洪水具有很大的影响，必须考虑上游在建电站对下游在建电站的影响，可以通过上游电站围堰对洪水的蓄泄参数来体现其影响，一般的可以用下式描述上游在建梯级电站对施工洪水的影响：

$$Q_t = f(Q_{ut}, q_{ut}, V(H)) \quad (5.1)$$

其中： Q_t 为经过上游在建工程导流建筑物蓄泄后的洪水过程影响表达式； $f(Q_{ut}, q_{ut}, V(H))$ 为上游在建的梯级电站导流蓄泄所采取的控泄措施对下泄洪水的影响； Q_{ut} 为上游在建梯级电站坝址洪水过程表达式； q_{ut} 为上游在建梯级电站所采用的施工导流系统对泄流能力的影响表达式； $V(H)$ 为上游在建梯级围堰的水位库容关系。

(2)区间洪水的影响分析

区间洪水指的是待建电站所控制的区域所产生的洪水过程，也是水利工程设计洪水的重要组成部分，我国汛期洪水一般包括冰雪融化及极端降雨，考虑到区间洪水和上游洪水过程属于同一个流域的部分，假定其具有一定的相关性。对于区间洪水和上游电站泄水所发生的汇流，一般可采用洪峰叠加原理，主要有上游导流建筑的泄水与区间洪水通过洪水过程的推演及按照规律进行叠加，从而求的待建电站土石围堰堰前的施工洪水过程^[75]。

梯级水电开发条件中的区间洪水资料是很难有实测的洪水过程资料，一般可以通过以下几种间接的方式假定：

如果上游电站围堰计算断面和待建电站围堰设计断面均有实测洪水过程资料，可以通过洪水演进方式演进到下游围堰设计断面，然后相减，即可得到区间洪水过程资料，一般只适用于区间洪水很重大的条件。

如果某一流域上存在水文观察站时，可以参考水文站所控制的流域总面积与区间面积的比值，再根据已有的洪水过程线，从而转换成区间洪水的过程线。

如果区间有比较丰富的暴雨资料时，可以通过暴雨资料来求解得到区间洪水过程线，具体分析过程国内外已有许多学者对极端暴雨的情况展开研究^[68-71]。

如果以上方式均不可行，则可通过区间所在地的暴雨情况等值线图和暴雨径流查算图表进行计算，也可以由类似流域情况的经验公式，推求得到区间设计洪水过程线。

(3)河槽调蓄作用分析

梯级电站之间的连接是通过河段完成的，在上游电站的下泄洪水通过河段的调

蓄作用向下游演进。在水利工程中一般采用的方法是马斯京根法来考虑河槽调蓄作用^[72-73]。

(4) 下游梯级水库的影响分析

在本工程案例中，下游梯级水库已经处于建设完成状态，下游导流系统的回水影响到待建电站的导流建筑物如导流隧洞的泄流能力，对梯级水电开发条件的导流系统造成一定的影响^[74]。

根据对前文对单一电站上游土石围堰漫顶风险的分析，以及对梯级建设条件下的多个影响主体进行讨论分析，梯级水电建设条件下的土石围堰漫顶风险分析主要是对施工洪水进行分析，一般采取上游水电站的下泄洪水与区间洪水洪水叠加组合后的施工洪水作为最不利洪水组合方式即为下游土石围堰设计断面的施工洪水。

本文针对金沙江下游梯级水电开发背景下，上游乌东德水电站处于在建过程中，白鹤滩水电站的施工洪水来自于上游乌东德水电站施工洪水经过水库调节之后的下泄洪水及区间洪水的叠加组合，从而得到下游水电站土石围堰堰前洪水情况，下游已建的溪洛渡电站的回水对待建白鹤滩水电站上游围堰漫顶风险也有一定的影响。因此，本章综合考虑梯级建设下的主要风险因素，求解风险率。

5.3 梯级条件下土石围堰漫顶风险分析的约束条件

在水利工程建设过程中，水利工程在控泄时必须满足防洪，发电，生活，工业，航运等多方面对用水的基本要求，在梯级建设条件下的水利工程，上下游水利工程存在互相影响，比如上游水电站通过挡水和泄水建筑物可起到拦洪蓄洪的作用，其作用是非常明显的，既可以满足该工程的要求，同时也提高了下游水电站工程的安全性，也就是说可以有效的分担下游工程所存在的安全风险，当然，从反面来讲，如果上游水电站工程出现漫顶或者其他失事问题，同时也极大的提高了下游在建工程的安全性，对于梯级水库而言，其控制的流域面积相对于单一水库更大，换言之，流域面积越大，其区间所存在的不确定因素也会越多，比如流域域的地质因素和区间降雨问题也会有很大的区别，也大大的增加了下游在建工程的漫顶风险率，下游在建工程的计算断面的施工洪水主要来自于上游的泄水建筑物的泄流以及区间洪水通过叠加的作用汇在一起，因此上游水电站对上游来水的调节作用，是有效提高下游待建电站安全性的一项重要举措，然而传统的土石围堰漫顶风险分析忽略了梯级条件的影响，所以在建立梯级水电开发条件下的土石围堰漫顶风险分析毕竟综合考虑上下游水利工程彼此的相互影响，同时也得考虑到各水利工程在航运，防洪，生活等领域的要求，根据文献中所提到的要求，必须满足一下以下约束条件^[75]：

(1) 各梯级水电站之间必须满足水量平衡条件，具体可用公式表示：

$$V_{n,t+1} = V_{n,t} + (q_{n,t} - Q_{n,t} - S_{n,t})\Delta t \quad \forall t \in T \quad (5.2)$$

式中, $V_{n,t+1}$ ——第 n 个电站在 t 时段末水库的蓄水量 (m^3);

$V_{n,t}$ ——第 n 个电站在 t 时段初水库的蓄水量 (m^3);

$q_{n,t}$ ——第 n 个电站在 t 时段的入库流量 (m^3/s);

$Q_{n,t}$ ——第 n 个电站在 t 时段的发电流量 (m^3/s);

$S_{n,t}$ ——第 n 个电站在 t 时段排出的水流量 (m^3/s);

Δt ——计算时段长度 (s)。

(2) 水库蓄水量约束:

$$V_{nt,\min} \leq V_{n,t} \leq V_{nt,\max} \quad \forall t \in T \quad (5.3)$$

式中, $V_{nt,\min}$ ——第 n 个电站在 t 时段的水库最小保证蓄水量 (m^3);

$V_{n,t}$ ——第 n 个电站在 t 时段水库的实际蓄水量 (m^3);

$V_{nt,\max}$ ——第 n 个电站在 t 时段的水库最大允许蓄水量 (m^3 , 一般是基于水库的防洪安全考虑的)。

(3) 水库下泄流量约束:

$$Q_{nt,\min} \leq Q_{n,t} \leq Q_{nt,\max} \quad \forall t \in T \quad (5.4)$$

式中, $Q_{nt,\min}$ ——第 n 个电站在 t 时段的最小下泄流量 (m^3/s , 一般是为保证下游生产生活及工业用水的需求);

$Q_{nt,\max}$ ——第 n 个电站在 t 时段最大允许下泄流量 (m^3/s , 一般是基于水库的防洪安全考虑的^[42])。

(4) 电站出力约束:

$$N_{t,\min} \leq A_n \cdot Q_{n,t} \cdot H_{n,t} \leq N_{t,\max} \quad \forall t \in T \quad (5.5)$$

式中, $N_{t,\min}$ ——第 n 个电站的允许最小出力 (MW , 由水轮机的种类以及特性所决定); $N_{t,\max}$ ——第 n 个电站的装机容量 (MW)。

(5) 非负条件约束:

上述所有变量均为非负变量 (变量 ≥ 0)。

5.4 梯级开发条件下度汛漫顶风险分析

本节对金沙江下游同时在建的白鹤滩水电站及上游乌东德水电站所构成的梯级建设条件下的围堰漫顶风险进行计算分析, 在计算过程中, 由于资料的不足及对计算方式进行简化处理, 粗略的求解得到了梯级建设环境下的不过水土石围堰漫顶风险值。

(1) 本文所计算的两个水电站同在金沙江下游, 因为缺乏实际工程水文资料, 已知下游天然洪水情况资料, 以及流域面积的大小, 根据前文对洪水情况的设定, 按照流域面积比假定上游水电站堰前的来水、区间洪水曲线过程。

$$Q_{\text{上}} = k \times Q_{\text{天}}$$

式中 $Q_{上}$ 为上游梯级电站的来水过程线， k 为流域面积比， $Q_{天}$ 为下游电站天然来水过程线

(2) 根据上游乌东德水电站的工程资料调洪演算计算得下泄流量得到下泄流量曲线

(3) 梯级建设条件下的下游水利工程来水，在本工程中，白鹤滩电站与乌东德电站之间不存在支流汇流的情况，在此情况下，假定待建电站来水曲线等于上游电站导流隧洞泄流与区间洪水的叠加。

(4) 根据由以上得出的下游电站来水，从而根据第三章确定的基于蒙特卡洛法的土石围堰漫顶风险分析模型求解在梯级建设环境下的土石围堰漫顶风险研究。



图 5.2 抽样 1000000 次概率区间计算结果

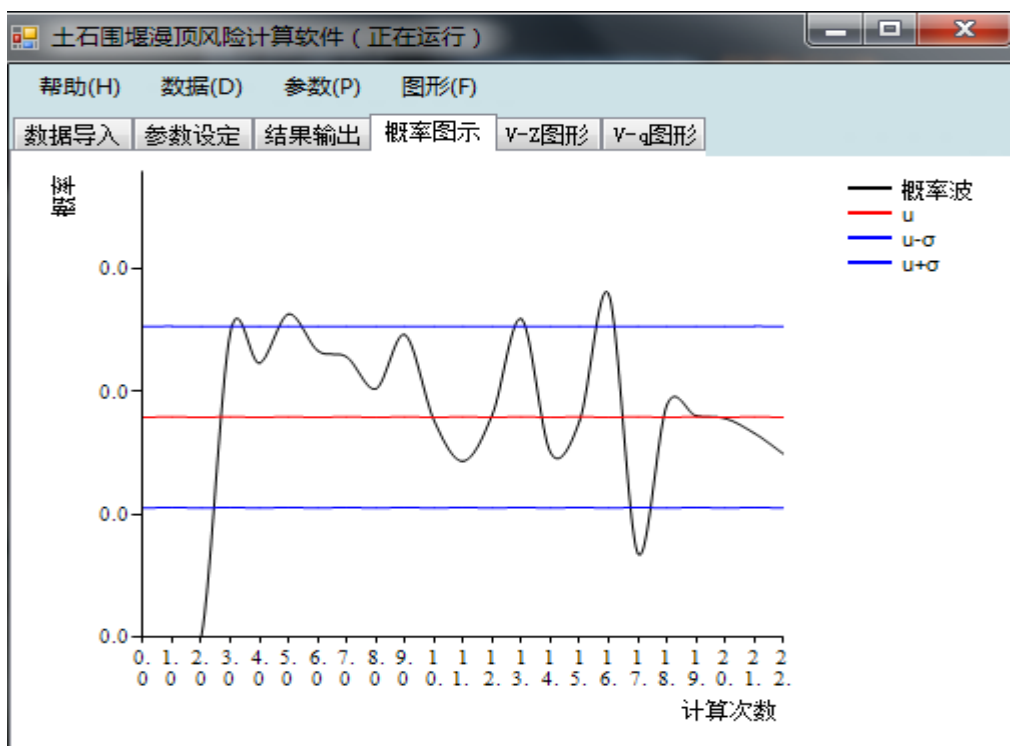


图 5.3 随机抽样 1000000 次概率分布图

表 5.1 梯级建设环境下的风险计算成果

模拟次数	风险率 (%)	风险率均值 (%)
1000000	0.01050,0.02529	0.01790

考虑梯级建设环境条件，计算该工程上游土石围堰漫顶风险，一百万次情况下的漫顶风险值，通过结果可以看出，对梯级水电站漫顶风险分析是非常有必要的，本文章上游梯级电站对上游洪水消减作用，减小了风险，因此求值对梯级建设环境下的土石围堰漫顶分析具有指导作用。

5.5 本章小结

本章针对梯级建设环境下待建电站土石围堰漫顶风险评价分析：

- (1) 分析上游在建梯级电站、区间洪水和下游已建梯级电站等因素对梯级待建电站土石围堰漫顶风险的影响，洪水构成是漫顶风险的重要因素，洪水经上游电站控蓄后改变了原河道洪水过程，考虑施工系统水流控制对洪水过程特征的影响，从而更加准确的描述金沙江下游梯级电站的在建过程中对土石围堰漫顶风险的影响。
- (3) 同时考虑上游在建电站乌东德水电站施工导流建筑物对下游待建电站来水的影响，考虑各不确定性因素下的的梯级土石围堰漫顶风险率。

6 结论与展望

6.1 结论

本文基于蒙特卡洛法，主要考虑水文及水力因素的不确定性，分析其概率分布计算土石围堰漫顶风险值，为土石围堰的漫顶安全性评价提供科学的决策依据。

1.随着风险分析理论深入到水利工程建设中，其作用已经越来越重要，本文详细地分析和讨论了土石围堰漫顶风险的来源以及影响漫顶风险的各种不确定性因素，首先在第一、二章中有条理的总结了国内外专家学者在漫顶风险分析方面的诸多成果的基础上，解释了几种风险计算方法，并详细的解释了各风险计算方法的优劣性。本文主要综合考虑分析来水和泄流能力和其它方面不确定性因素，建立了适用土石围堰漫顶风险计算程序模型。

2.针对土石围堰漫顶风险系的特点，影响其风险的因素主要包括水利不确定性和水力不确定性，在本文第三章中，重点分析了来水洪峰流量的不确定性，以及泄流能力中导流隧洞的糙率、断面面积以及流量系数的不确定性，根据专家学者的研究分析结果，合理的假定各不确定性因素的概率分布，运用蒙特卡洛理论，基于计算机语言，编制计算软件模型，使得风险计算更加快捷。文章第三章中提供的计算程序模型可用于类似工程的风险值计算，虽然蒙特卡洛模拟法带来的复杂和耗时，但是计算精度相对较高。

3.随着水电开发向西南方向转移，西南地区已经进入了梯级开发建设阶段，然而对于深厚覆盖层的狭窄河谷，导流建筑物土石围堰与导流隧洞依旧非常适用，目前关于梯级建设环境下土石围堰漫顶风险还是比较少的，与单一电站相比，梯级建设下土石围堰漫顶风险主要分析的是上游水电站的导流系统对在建电站水文情况的影响，上游导流系统改变了下游施工洪水原来的分布情况，使得其不再服从从前的统计规律，需要对洪水过程资料重新确定，梯级开发的条件下，对于本文所采用的工程资料，主要研究上游电站处于在建状态，下游电站已经建成，在此情况下，上游电站的挡水建筑物土石围堰对施工洪水具有一定的调蓄作用，从而降低了在建电站的漫顶风险概率，然后如果上游土石围堰出现漫顶的现象，其溃决后的洪水与区间洪水叠加后，在一定程度上增加了漫顶失事概率，通过分析计算分析可得，上游在建工程降低了下游待建工程土石围堰的漫顶风险率。

通过结合金沙江下游水电工程土石围堰，将本文建立的土石围堰漫顶风险分析模型及软件应用到漫顶风险研究中，在全面分析来水不确定性和泄流能力的不确定性后，确定各个不确定因素的具体概率分布。同时，采用基于C#软语言编写的蒙特卡罗方法程序进行风险计算。最终得到土石围堰漫顶风险率，更加贴近工程实际地体现了风险率。

6.2 存在的问题及展望

虽然本文围堰漫顶风险的定义进行了总结，也通过风险计算方法求解了基于蒙特卡洛法的白鹤滩水电站土石围堰漫顶风险分析，但是限于风险理论体系的不成熟以及在研究过程中资料的缺失，还有本人在计算方法上的认识不足，仍有很多的内容可以深入研究：

(1) 首先在风险计算过程中，不确定性因素的分析，对不确定性因素的概率密度函数及特征值的选取都是感觉在以往工程中的经验选取，对于本工程而言不一定非常适用，在假定其服从分布概率后的结果求解可能需要客观的分析讨论。

(2) 水电工程施工导流系统及其复杂，存在很多复杂难以描述的不确定性因素，如：在深厚覆盖层上建筑土石围堰可能会出现沉降问题；由于各方面的原因从而导致现场测量及绘制存在不同程度的误差等。本文中暂时未考虑到这些问题，但是想要综合考虑各方面的不确定性因素，必须对各项不确定性因素进行分析，在以后的研究分析中可深入分析。

(3) 在对梯级建设条件下土石围堰漫顶风险分析过程中，仍有许多方面的不确定性因素未考虑到本文中，比如极端暴雨对梯级建设环境的影响，本文只单纯的针对两个电站所组成的梯级环境，梯级建设环境是非常复杂的背景条件，假设 n 级开发条件下的围堰漫顶是非常有意义的内容，对于待建工程土石围堰漫顶风险分析需更细致。

(4) 在软件编制中可以通过更多的学习，对软件进行优化，或者有更好的编译方式，使得漫顶风险程序对各种条件都适用。

参考文献

- [1]Rowe W D.Energy Risk Management[M].U.S:Academic Press Inc.1979
- [2]卢晓春,田斌.土石围堰边坡安全性研究[J].地下空间与工程学报,2007(7):1284-1290
- [3]郑守仁,王世华,夏仲平,刘少林.导截流及围堰工程[M].北京:中国水利电力出版社, 2004
- [4]卢晓春.深厚覆盖层上深水高土石围堰结构性态研究[D].武汉,武汉大学,2011
- [5]王锐琛,王维第等.中国水力发电工程-工程水文卷[M].北京.中国电力出版社.2006: 347-354
- [6]吕保和.可接受风险标准研究[D].镇江:江苏大学, 2010
- [7]B.C.Yen, Risk in hydrologic design of engineering projects[J].Journal of the Hydraulics Division Proceeding of the American Society of Civil Engineers, 1970:959-966.
- [8]B.C.Yen, A.H.S.Ang,Risk analysis in design of hydraulic projects[J].Stochastic Hydraulics, 1st International symposium on stochastic Hydraulics, 1971 : 694-709.
- [9]Leach M R , Harmes Y Y.Multiobjective Risk-impact Analysis Method.Risk Analysis,1987
- [10]Lee Jong-Seok,Uncertainty Analysis in Dam Safety Risk Assessment, Ph,Dthesis,Utah State University, 2001
- [11]USBR(United States Bureau of Reclamation).Guidelines for Achieving Public Protection in Dam Safety Decision Making, Denver,Colorado,2003.6
- [12]徐祖信.郭子中.开敞式溢洪道泄洪风险计算[J].水利学报,1989 (4): 50-54
- [13]金明,水力不确定性及其在防洪泄洪系统风险分析中的影响[J],河海大学学报, 1991,19 (1): 40-44.
- [14]王卓甫.施工导流风险分析[J].水利学报, 1992 (5): 65~71
- [15]周宜红,肖焕雄.三峡工程大江截流风险决策研究[J].武汉水利电力大学学报,1999, 32(1): 4~6
- [16]胡志根,刘全等.基于Monte-Carlo方法的土石围堰挡水导流风险分析[J].水科学进2002.135(5):634-638
- [17]胡志根,范锡峨,刘全等.施工导流系统综合风险分配机制的设计研究[J].水利学报, 2006,37(10):1270-1277.
- [18]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.

- [19] Rasekh A, Afshar A, Afshar M H. Risk-cost optimization of hydraulic structures: Methodology and case study[J]. Water Resources Management, 2010, 24(11): 2833 -2851 .
- [20] Afshar A, Rasekh A, Afshar M H. Risk-based optimization of large flood-diversion systems using genetic algorithms[J]. Engineering Optimization, 2009, 41(3): 259-273.
- [21] 晋良海, 梁巧秀. 水利水电工程施工度汛综述[J]. 中国农村水利水电, 2016, (2): 157-160
- [22] 陈肇和, 李其军. 土石坝漫坝风险理论与应用[M]. 中国水利水电出版社, 2008.
- [23] 陈肇和, 李其军. 漫坝风险分析在水库防洪中的应用[J]. 中国水利, 2000(9): 73-75
- [24] 梅亚东, 谈广鸣. 大坝防洪安全的风险分析[J]. 武汉大学学报. 2002, 35(6): 11~15
- [25] 姜树海. 防洪设计标准和大坝的防洪安全[J]. 水利学报, 1999. 5(5): 19~25
- [26] 胡志根, 刘全, 贺昌海等. 基于Monte-Carlo方法的土石围堰挡水导流风险分析[J]. 水科学进展, 2002, 13(5): 634-638
- [27] 范锡峨, 胡志根, 靳鹏. 基于Monte-Carlo方法的施工导流系统综合风险分析[J]. 水科学进展, 2007, 18(4): 640-608
- [28] 张超, 胡志根, 刘全. 梯级施工导流系统整体风险分析[J]. 水科学进展, 2012, 23(3): 396~402
- [29] 薛进平, 胡志根, 刘全等. 梯级电站预泄条件下施工导流方案风险决策[J]. 水力发电学报, 2013, 32(5): 64~69
- [30] 薛进平, 胡志根, 刘全等. 梯级水电站建设施工导流风险分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(1): 75-79
- [31] 刘全, 胡志根, 任金明等. 梯级建设环境下水电工程施工导流风险分析[J]. 水力发电学报, 2014, 33(1): 147-152
- [32] 周兴波, 陈祖煜, 黄跃飞, 王琳, 李相南等. 特高坝及梯级水库群设计安全标准研究 III: 梯级土石坝连溃风险分析[J]. 水利学报, 2015, 46(7): 765-772
- [33] 邓铁军, 仇一颖, 黄晓明. 工程风险管理[M]. 人民交通出版社, 2004
- [34] 余建星. 工程项目风险管理[M]. 天津: 天津大学出版社, 2006
- [35] 高延红, 张俊芝. 堤防工程风险评价理论及应用[M]. 中国水利水电出版社, 2011
- [36] 金萍. 地质灾害风险评估方法研究[D]. 河南, 河南工业大学, 2007
- [37] 严祖文, 彭雪辉, 张延亿. 病险水库除险加固风险决策[M]. 北京: 中国水利出版社, 2011
- [38] 谢小平, 黄强, 徐晨光等. 公伯峡水电站施工度汛方案风险分析[J]. 水力发电学报,

2005,24(6):6-9

- [39]王常红.施工导流系统不确定性问题的分析与应用研究[D].武汉,武汉大学,2013
- [40]席秋义.水库群防洪安全风险率模型和防洪标准研究[D].西安,西安理工大学,2006
- [41]沈笛.基于入库设计洪水不确定性的梯级水库防洪极限风险率研究与应用[D].华北电力大学,2014
- [42]詹道江,徐向阳,陈元芳.工程水文学[M].中国水利水电出版社,2010
- [43]全国水利水电施工技术信息网,施工导截流与度汛工程[M].北京:中国电力出版社,2005
- [44]吴持恭.水力学[M].高等教育出版社.2007
- [45]米子明,钟登华,刘东海.导流建筑物泄流能力可靠性分析[J].天津大学学报,2001,34(2):154-157
- [46]莫崇勋.洪水与风浪联合作用下水库土坝漫坝风险评价及效应研究[D].南京:河海大学,2007.
- [47]孙开畅,李权,尹志伟,齐中新.基于Rackwitz-Fiessler方法的土石坝漫顶风险数学模型.武汉大学学报(工学版),2017,50(3):327-331
- [48]王雪妮.土石坝漫坝风险分析计算方法研究[D].大连,大连理工大学,2016
- [49]莫崇勋.洪水与风浪联合作用下水库土坝漫坝风险评价及效应研究[D].南京:河海大学,2007.
- [50]王雪妮.土石坝漫坝风险分析计算方法研究[D].大连,大连理工大学,2016
- [51]胡志根,刘全,陈志鼎,范锡峨.施工导流风险分析[M].科学出版社,2010
- [52]张虎,王长新,李江,王健.基于MATLAB的MC法在施工导流风险率计算中的应用[J].水利与建筑工程学报,2013,11(4):94-97
- [53]李清富,龙少江.大坝洪水漫顶风险评估[J].水利水电技术,2006,32(7):20-22
- [54]张莹莹.大型重建工程施工导流风险分析与极端天气影响[D].天津,天津大学,2011
- [55]李宗坤,葛巍,王娟,等.土石坝建设期漫顶风险分析[J].水力发电学报,2015,(3):145-149.
- [56]孙颖,黄文杰.漫坝风险分析在水库运行管理中的应用[J].水利学报,2005,36(10):1153-1157.
- [57]吕弯弯,顾圣平,何蕾等.基于蒙特卡罗法的土石坝洪水漫顶风险率计算及其敏感性分析[J].长江科学院院报,2015,(5):48-52,56.
- [58]赵国藩,曹居易,张宽权.工程结构可靠度[M].北京:科学出版社,2011
- [59]董艳秋,田敬博.蒙特卡洛法结构可靠度分析[J].黑龙江工程学院学报(自然科学版),2010,24(1):27-29

- [60]张俊芝.服役工程结构可靠性理论与应用[M].北京:北京水利水电出版社,2007
- [61]李侃,巨能攀.基于蒙特卡洛方法的边坡可靠性评价.中国地质灾害与防治学报[J], 2014,25(1):23-27
- [62]何俊仕,林洪孝.水资源规划与利用[M].北京:中国水利水电出版社,2006
- [63]姜树海,范子武,吴时强.洪灾风险评估和防洪安全决策[M].北京:中国水利水电出版社,2005
- [64]赵晓慎,蒋丽,刘宪亮.水库调洪演算的数值解法[J].人民黄河,2006,28(6):30-31
- [65]张莹莹.大型重建工程施工导流风险分析与极端天气影响[D].天津,天津大学,2011
- [66]王欣,黎峰.新型的面向对象的编程语言-C#[J].计算机工程与设计,2004, 25(6):929-931
- [67]刘澍.梯级水电站施工导流风险效益分摊及补偿机制研究[D].武汉,武汉大学,2014
- [68]钱维宏,符娇兰,张玮玮等.近40年中国平均气候与极端气候变化的概述[J].地球科学进展,2007,22(7):673-683.
- [69]翟盘茂,潘晓华.中国北方近50年温度和降水极端事件变化[J].地理学报,2003,58(9): 1-10.
- [70]Bonsal B R,Zhang X B,Vincent L A,etal,Characteristic of daily and extreme temperature over Canada[J].Climate,2001,5(14):1959-1976.
- [71]Frich P,Alexander L V,Della-marta P M,etal,Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century[J].Climate Res,2002, 19:193-212.
- [72]McMillan Hilary K., Brasington James. End-to-end flood risk assessment:A coupled model cascade with uncertainty estimation[J].Water Resources Research,2008, 44(3):W03419.
- [73]Van Overloop Peter-Jules.Drainage control in water management of polders in the Netherlands[J]. Irrigation and Drainage Systems,2006,20(1):99-109.
- [74]任金明,蔡建国,胡志根,任文杰.下游水库对上游梯级电站施工导截流的影响[J].武汉大学学报(工学版),2011,44(3):331-334
- [75]尤渺.大渡河流域下游梯级电站发电优化调度研究[D].重庆,重庆大学,2008.

致 谢

作为一名在三峡大学学习和生活七年的学生，对我来说一直都是一件非常自豪的事情，时间过得真快，就要离开这个令人尊敬的校园，此刻心中充满了太多的眷恋不舍，有太多的感慨，也充满了无限的感激，在硕士论文即将完成之际，特在此表达我对母校所有老师最真挚的感谢和敬意。

当然，首先我要感谢的是我的导师卢晓春副教授，无论是卢老师在国外学习期间，还是在学校都给予我最无私的帮助，论文能够顺利完成，离不开卢老师悉心的指导。在论文选题阶段到论文定稿，卢老师提出了许多宝贵和中肯的建议，细心指导，耐心讲解，使论文思路更加清晰，逻辑更加缜密，行文更加流畅。作为导师，卢老师平时刻苦工作，严谨的治学态度，渊博深厚的学术造诣，仁德谦和的为人品格，深深打动了我，使我受益匪浅，是我努力学习的榜样。在此，谨向卢老师致以最诚挚敬意和衷心的感谢！

同时感谢在研究生学习生涯中给予我帮助的田斌教授，感谢老师热情、无私的指导和教诲，老师在百忙中准备演示文稿给我们研究生讲述研究生阶段如何提升自己的能力，让我豁然开朗，在论文中老师对我们的研究内容提出更高的要求与建议，对我起到了很大的帮助。同时也感谢在论文的开题和修改过程中各位老师提出的宝贵意见和建议，使得我在论文修正上更加明确。

感谢我的各位同门，郭斌、张磊、焦雨起、沈桑桑，无论是在生活中还是学习上，都给予了我很多的帮助，也让三年的时间过的非常充实，同时也感谢陈玉玺师弟在论文程序上的帮助，在与他们的相处，共同学习生活中，我学到了很多他们身上的优点。

最后感谢我的家人对我的鼓励和支持，正是家人无微不至的关心与付出，使得我有勇气面对一切困难，并有信心克服，是我坚强的后盾！感谢所有关心过和帮助过我的人！

附录一：程序代码

1 水文不确定性

洪峰流量 P-III型分布计算程序编写

我国洪水频率的分布曲线一般情况下服从皮尔逊-III型分布，因此本文假定洪水洪峰流量其概率密度函数为：

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (x-b)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-b)} (b \leq x < \infty) \quad (1)$$

式中， $\alpha, \beta > 0$ ； $\Gamma(\alpha)$ 是 α 的伽玛函数。

对应程序代码：

```
double MC()//水文不确定性 P-III分布
{
    double beita;
    double erfa,erfa0,e;
    double gamma;
    double c,Q=0.0;
    double junzhi=Convert.ToDouble(textBox5.Text);
    double CV = Convert.ToDouble(textBox6.Text);
    double CS = 4*CV;
    double x,y,f;
    e = 2.718281828459;
    erfa = 4 / Math.Pow(CS,2);
    beita = 2 / (junzhi* CS * CV);
    erfa0=junzhi*(1-2*CV/CS);
    gamma = Convert.ToDouble(textBox7.Text);//1.9457;//运用 MATLAB 直接调用 gamma
    函数计算得来
    double xx = erfa + erfa0;
    c = (Math.Pow(beita, erfa) / gamma) * Math.Pow((xx- erfa0), erfa - 1)*Math.Pow(e,
    -beita * (xx - erfa0));
    for (int i = 1; i < 2; i++)
    {
        Random rand = new Random();
        int R1 = rand.Next(0, 1000);
        int R2 = rand.Next(0, 1000);
        float r1 = (float)R1 / 1000;
        float r2 = (float)R2 / 1000;// x = junzhi*(1+CV*2.604)*r1;
    }
}
```

```
x = erfa0 + (junzhi * (1 + CV * 2.604) - erfa0) * r1;  
y = c * r2;  
f = (Math.Pow(beta, erfa) / gamma) * (Math.Pow(x - erfa0, erfa - 1))  
* Math.Pow(e, -beta * (x - erfa0));  
if (y > f)  
{ i = i - 1;  
  continue; }  
else  
{ Q += x;  
  break; }  
} return Q;
```

2 泄流能力计算相关程序编写

1、糙率 n ，流量系数均参照文献中所提出的概率分布，服从三角形分布，其概率密度函数为：

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

对应程序代码：

```
double Caolv()//水力参数不确定性糙率 n，三角形分布  
{double nmin,nmax,n,fmax;  
  double x, y,f,N=0.0;  
  nmin = Convert.ToDouble (textBox9.Text );  
  nmax = Convert .ToDouble (textBox10.Text);  
  n = Convert .ToDouble (textBox8.Text);  
  fmax = 2 / (nmax - nmin);  
  for (int i = 1; i < 2; i++)  
{Random rand = new Random();  
  int R1 = rand.Next(0, 1000);  
  int R2 = rand.Next(0, 1000);  
  float r1 = (float)R1 / 1000;
```

```
float r2 = (float)R2 / 1000;
x = nmin + (nmax - nmin) * r1;
y = fmax * r2;
if (nmin < x && x < n || x == nmin || x == n)
{ f=2*(x-nmin)/((n-nmin)*(nmax-nmin));
  if (y > f)
  {i = i - 1;
   continue; }
  else
  {N += x; break; }
}
if (n < x && x < nmax || x == nmax)
{f = 2 * (nmax - x) / ((nmax - nmin) * (nmax - n));
  if (y > f)
  { i = i - 1; continue; }
  Else
  { N += x; break; }
}
return N;
```

2、过水断面面积，假定其服从正态分布，其概率密度函数为：

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

相应的程序代码：

```
double Mianji()//水力参数不确定性隧洞过水面积 A，正态分布
{ double x, y, f;
  double A = 0.0;
  double junzhi = Convert.ToDouble(textBox11.Text);
  double wucha = Convert.ToDouble(textBox13.Text);
  double cgm = Convert.ToDouble(textBox12.Text);
  double fmax = 1 / (cgm * Math.Pow(2 * 3.14, 0.5));
  double nmax = junzhi+wucha;
  double nmin = junzhi-wucha;
```

```
double mi;
for (int i = 1; i < 2; i++)
{
Random rand = new Random();
int R1 = rand.Next(0, 1000);
int R2 = rand.Next(0, 1000);
float r1 = (float)R1 / 1000;
float r2 = (float)R2 / 1000;
x = nmin + (nmax - nmin) * r1;
y = fmax * r2;
mi = -(Math.Pow((x - junzhi), 2)) / (2 * cgm * cgm);
f = fmax * Math.Pow(2.718, mi);
if (y > f)
{ i = i - 1; continue;
}
else
{ A += x; break; }
}
return A;
```

3、流量系数计算公式及代码

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\frac{2gLn^2}{(A/\chi)^{4/3}} + \sum \zeta + 1}} \quad (4)$$

计算代码如下：

```
double Miu()
{ double a, b, c, f, x, y, M=0.0;
double miu, miu1, miu2, miu3, miu4, miu5;
double n;
double A;
double L = Convert.ToDouble(textBox14.Text);
double g = 9.81;
double shizhou = Convert.ToDouble(textBox15.Text);
double kesai = 0.4;
```

```
n = Caolv();
A = Mianji();
miu1 = 2 * g * L * n * n;
miu2 = Math.Pow(A / shizhou, 4 / 3);
miu3 = miu1 / miu2;
miu4 = miu3 + kesai + 1;
miu5 = Math.Pow(miu4, 0.5);
miu = 1 / miu5;
a = 0.97 * miu;
b = 1.0 * miu;
c = 1.05 * miu;
f = 2 / (c - a);
for (int i = 1; i < 2; i++)
{
    Random rand = new Random();
    int R1 = rand.Next(0, 1000);
    int R2 = rand.Next(0, 1000);
    float r1 = (float)R1 / 1000;
    float r2 = (float)R2 / 1000;
    x = a + (c - a) * r1;
    y = f * r2;
    if (a < x && x < b || x == a || x == b)
    {
        f = 2 * (x - a) / ((b - a) * (c - a));
        if (y > f)
        {
            i = i - 1; continue;
        }
        else
        {
            M += x; break;
        }
    }
    if (b < x && x < c || x == c)
    {
        f = 2 * (c - x) / ((c - a) * (c - b));
        if (y > f)
        {
            i = i - 1; continue;
        }
        else
        {
            M += x; break;
        }
    }
}
```

```
    }  
    }  
    return M;  
}
```

4、泄流能力计算公式及代码:

$$Q = \mu A \sqrt{2gZ_0} \quad (5)$$

计算代码如下:

```
private double Xieliunengli(double H)//  
double Q;  
double miu;  
double A,z;  
A = Mianji();  
miu = Miu();  
z = 596;  
Q = n * miu * A * Math.Pow(2 * 9.81 *(H-z), 0.5);
```


附录二：攻读硕士学位期间发表的部分学术论著

- 1.郭志杰,卢晓春,陈玉玺,焦雨起等.基于 ANSYS 的混凝土围堰断面优化.人民珠江, 2017(10):39-41
- 2.张磊,田斌,卢晓春,焦雨起,郭志杰.养护环境及粉煤灰对水工混凝土导电性能影响研究.三峡大学学报(自然科学版),2017,39(6):31-34
- 3.郭斌,卢晓春,郭志杰等.MgO 掺量对混凝土不同浇筑温度下拱坝应力的影响[J].水电能源科学,2018,36(4):86-88,9.
- 4.卢晓春,赵欢,郭志杰.一种用于混凝土快速冻融试验机的试件桶固定装置:中国,CN205280626U[P].2016-06-01
- 5.卢晓春,乔雨,郭志杰.一种大坝坝面附着物采集装置:中国,CN205333343U[P].2016-06-22
- 6.田斌,张磊,卢晓春,郭志杰.一种用于固定混凝土电阻率电极的装置:中国,CN206057441U[P].2017-03-29
- 7.卢晓春,焦雨起,郭志杰.一种湿筛混凝土废料回收处理装置:中国,CN205762668U[P].2016-12-07
- 8.卢晓春,焦雨起,郭志杰.一种骨料筛分清洗装置:中国,CN206316019U[P].2017-07-11
- 9.卢晓春,焦雨起,郭志杰.一种可拆分式混凝土试验模具:中国,CN20665311712U[P].2017-09-29

指 导 教 师 _____

学 科(系) 主 任 _____

院 分 管 领 导 _____