

◎ 贾超 著

结构风险分析 及风险决策的 概率方法

Structure Risk Analysis And
Risk Decision Based on
Probability Method



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

◎ 贾超 著

结构风险分析 及风险决策的 概率方法



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

近年来,随着人们对各种建设工程引发的环境 and 安全等问题的关注,工程中因各种不确定因素引起的风险正日益受到重视,相关的工程风险分析和风险管理也正在成为一项新兴的技术 and 行业,并逐渐应用于工程实际当中。本书以概率论及可靠度理论为基础,以南水北调中线工程为背景,从工程角度针对当前工程风险分析及风险决策领域的热点 and 难点进行了研究,提出了基于可靠度的工程结构的概率风险分析方法,分析了结构在多因素作用下的风险问题,进行了结构风险及力学意义下维护时间的决策研究,并从工程及非工程角度提出了降低工程风险损失的措施,特别提出了在水电工程中应用功能设计理念的研究方法,以上研究均结合工程实践进行。

本书可供土木、水利工程等专业的科学研究人员、工程技术人员、研究生以及高等院校的教师 and 本科生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

结构风险分析及风险决策的概率方法 / 贾超著. —北京:

中国水利水电出版社, 2007

ISBN 978-7-5084-4881-7

I. 结… II. 贾… III. 建筑工程—风险管理—研究

IV. TU712

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 114031 号

书 名	结构风险分析及风险决策的概率方法
作 者	贾超 著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心) 北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	880mm×1230mm 32 开本 5.5 印张 148 千字
版 次	2007 年 10 月第 1 版 2007 年 10 月第 1 次印刷
印 数	0001—2500 册
定 价	18.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

序

贾超博士撰写的《结构风险分析及风险决策的概率方法》一书即将由中国水利水电出版社出版，事先阅读原稿，作者嘱我写篇序言，我欣然同意了。

工程风险概率分析方法是当代土木水利工程领域中的一个前沿课题和研究热点。如1999年底，在澳大利亚召开的“第八届统计概率应用国际会议”上，基于可靠度的工程风险分析被作为大会主题之一。2000年召开的“第二十届国际大坝会议”Q76专集中的众多论文对大坝概率风险问题进行了较为集中的探讨。从此可以看出，工程概率风险分析具有广泛的应用前景。工程实践表明，在不确定性因素的影响下，应用安全系数并不能完全确切地表征工程的安全程度。为此，在洪华生（Alfredo H. S. Ang）等国际著名专家的推动下，美国和日本等国家已基于全概率思想，考虑投资风险和效益，进行结构的概率风险分析研究，研究成果已成功应用于若干结构工程的设计。在水利工程中，洪水风险分析早已在国内

外水工建筑物的规划和设计中加以应用。从 20 世纪 50 年代开始,就有学者对大坝简单的可靠度和风险分析进行研究,但采用系统理论将建筑物可靠度、风险、地质灾害、技术、经济和系统整体一起分析的迄今并不多见。

贾超博士自攻读博士学位以来,一直从事工程可靠度和工程风险分析的研究工作。先后做了大量的研究课题和工程项目,取得了一系列卓有成效的研究成果,主要有以下几个方面:①提出了基于可靠度的工程结构的概率风险分析的方法;②进行了结构风险及力学意义下维护时间的决策研究;③提出了在水电工程中应用功能设计理念的研究方法。贾超博士注重理论联系实际,将研究成果应用于南水北调中线渡槽、边坡、混凝土高坝等工程中,并发表了大量的相关科技论文。

在以上研究成果的基础上,贾超博士撰写了《结构风险分析及风险决策的概率方法》一书,总结了他在河海大学攻读博士期间及在清华大学博士后流动站进行研究期间的研究成果,在工程结构风险分析中推进概率思想方法的应用,可以说是进行概率风险分析的探索性研究。相信该书的出版对我国全面推进工程结构风险概率分析研究具有一定的借鉴作用,并一定能起到相应的推动作用。

读完书稿,写了一些个人感受,谨此为序。

山东大学 朱维申 教授

2007 年 4 月

前言

客观存在的诸多不确定性因素，使得工程系统的规划和设计不可避免地存在着风险。重大建设项目，如三峡工程、南水北调工程等，往往不可避免地面临着自然灾害风险和社会风险，如台风、洪水、地震、海潮、地质不良、战争、原材料、新技术、判断错误等。从全国重大工程建设实践来看，由于事前没有充分进行风险评估，工程灾害和因工程建设而引发出来的工程性灾害时有发生，使国民经济蒙受了巨大损失。在经济高速发展，重大工程项目不断涌现的今天，为减少风险事故特别是恶性事故的发生，确保工程建设健康、有序地进行，重大工程风险评估及风险决策很自然地提到了议事日程。

本书就工程中的不确定性因素的风险分析进行了以下的研究工作。

(1) 基于可靠度的结构风险决策方法。提出了将工程结构的危险率计算转化为对结构可靠指标的定量计算，以期望损失最小为决策准则，给出了基于可靠性理论的决策分析方法，

可以在一定程度上消除人为因素的影响,使决策更具科学性。同时,在方法中引进了决策树模型等系统工程的方法。

(2) 多因素作用下结构风险分析研究。研究了结构在随机水位及随机地震力等多风险因素作用下的风险问题,以南水北调的一边坡为例,对其在洪水风险及地震力风险共同作用下的滑动风险进行了研究计算,以条件概率和全概率公式为工具,导出了其风险的数学表达式。将地震力效应以水平地震加速度的形式引入土坡的可靠度分析中,推导出了动力作用下土坡的动力安全系数与相应条件下的静力安全系数的关系,以及以安全系数来表征的土坡的可靠度的数学表达式,导出了土坡在地震效应下的失效概率的数学表达形式,探求以数值拟合的方法对边坡的失效概率进行计算的途径,使边坡分析的静力学、动力学、可靠度理论等研究手段在本书中得到充分体现。

(3) 工程结构维护决策研究。在结构的可用性及维护方面,本书考虑了结构在外力作用下的损伤,建立了包括损伤项在内的工程结构的损失模型。关于工程结构使用期内的维护时间的决策问题,本书从使用安全角度出发,提出采用正常使用极限状态的目标可靠指标(β_T)作为决策依据,以南水北调工程丹江口水利枢纽的右联混凝土坝为例进行了维护时间的决策分析,进行了线弹性随机有限元分析,指出了该坝需要维护的关键部位。

(4) 降低工程风险的措施研究。从工程角度及非工程角度出发,探讨了降低工程结构风险的一些对策。在工程措施中,本书从可靠指标对结构参数的敏感性及其可

靠指标对破坏模式相关系数的敏感性出发,提出了降低风险的策略,并对可靠指标对相关系数敏感性的大小进行了量化研究。

(5) 水利水电领域的功能设计理念研究。对高坝结构功能设计前沿进行了相应的研究工作。

本书为笔者在河海大学工程力学系、水利部长江科学院师从刘宁教授、陈进教授级高级工程师攻读博士学位期间进行工程可靠度风险分析研究,以及在清华大学水利工程博士后流动站师从张楚汉院士、金峰教授进行结构功能设计研究期间所做工作的总结,书稿的完成得到了河海大学工程力学系、水利部长江科学院及清华大学水电系众多师长的有益点拨和支持帮助,在此对他们表示深切的感谢!另外,本书的研究工作还得到以下基金的资助:教育部科学技术研究重点项目(01099):南水北调工程的风险决策研究项目;水利部科技创新项目(SCX2002—09):跨流域长距离调水工程的系统风险分析和安全保障关键技术研究项目;中国博士后基金(2005037363):基于功能的高坝设计及风险决策研究项目;山东大学科研启动基金。在此也一并表示感谢!

工程中不确定性因素的复杂性,其理论和实践均需要深入和广泛的研究,本书仅是初步探索性研究。由于时间和作者的认识水平有限,可能存在一些错误和不足之处,敬请读者批评指正!

贾超

2007年7月

目 录

序

前言

1 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 本书研究的工程实例背景概述	6
1.2.1 南水北调工程中风险因素分析及解决对策	7
1.2.2 南水北调工程风险分析研究展望	11
1.3 工程结构不确定性的描述	12
1.3.1 荷载的不确定性	12
1.3.2 材料参数的不确定性	13
1.3.3 几何尺寸的不确定性	13
1.3.4 初始条件和边界条件的不确定性	14
1.3.5 计算模型的不确定性	14
1.4 工程风险分析及风险决策研究状况及进展	14
1.5 可靠度理论的回顾	20
2 风险分析决策的基本理论及研究	25
2.1 风险决策的基本特征	26
2.1.1 简单风险决策问题	26
2.1.2 一般决策问题的特征	29
2.2 决策模型及决策分析	30
2.2.1 决策树	30
2.2.2 决策准则	32
2.2.3 决策分析	32
2.2.4 信息的价值	34

2.3	效益理论的基本概念	34
2.3.1	效益理论的原理	35
2.3.2	效益函数	36
2.3.3	确定效益值	37
2.3.4	最大期望效益准则	37
2.3.5	效益函数的常用形式	38
2.3.6	期望效益对效益函数形式的敏感性	38
2.4	工程算例分析	39
3	结构风险及力学意义下维护时间的决策研究	48
3.1	结构风险损失模型的建立	48
3.1.1	模型的框架	49
3.1.2	模型总结	53
3.2	结构的监测和维护决策	53
3.2.1	两种极限状态的描述	54
3.2.2	抗力与荷载效应随时间变化的分析	55
3.3	维护时间决策算例分析	56
3.3.1	荷载分析	56
3.3.2	功能函数的建立	57
3.3.3	相关性的处理	58
3.3.4	计算结果分析	64
3.3.5	重点维护部位的确定	65
4	基于可靠度的工程风险决策的研究	68
4.1	目前工程风险决策的研究现状及存在的问题	68
4.2	基于可靠度的工程风险决策分析方法	69
4.2.1	以可靠指标表征风险率	69
4.2.2	风险损失和决策树	70
4.3	以可靠度理论进行失效概率计算的方法	71
4.3.1	单元失效概率计算方法	71
4.3.2	模式失效概率计算方法	72

4.3.3	系统综合失效概率或失效概率界限的计算方法	73
4.4	用方向加速法求可靠度指标	75
4.4.1	方向加速法原理	76
4.4.2	用方向加速法求可靠指标的过程	79
4.5	算例分析	80
5	多因素作用下渠坡结构的风险分析	84
5.1	两个概念	85
5.1.1	工程中的风险概念	85
5.1.2	多因素作用下风险分析	85
5.2	堤坝边坡风险模型的建立	86
5.2.1	堤坝边坡在水位为随机情况下风险模型的建立	86
5.2.2	边坡在随机水平地震力作用下的滑动风险	88
5.3	总风险的计算	91
5.4	工程算例	91
5.4.1	边坡在随机水位下的滑动破坏概率的计算	92
5.4.2	边坡在随机水平地震作用下滑动破坏概率的计算	94
5.4.3	土坡的综合风险率的计算	96
6	南水北调中线工程渡槽结构的力学风险分析	97
6.1	梁式渡槽各部位风险的可靠度分析	98
6.1.1	破坏模式分析	98
6.1.2	渡槽结构可靠度计算	103
6.2	渡槽结构风险的随机有限元分析	105
6.2.1	Newton-Raphson (牛顿-拉普逊) 变刚度迭代法 的全量法弹塑性随机有限元	105
6.2.2	渡槽的随机有限元分析	109
7	降低结构风险的措施研究	119
7.1	工程措施研究	119
7.1.1	点可靠度对随机变量的敏感性分析	119
7.1.2	可靠度对相关系数的敏感性分析	120

7.2	降低系统风险的非工程措施	126
7.3	工程算例研究	127
8	基于功能的结构设计理论概况	131
8.1	研究背景	131
8.2	结构工程中功能设计的研究现状及进展	133
8.3	在水利水电工程中引入功能设计理念的必要性	136
8.4	水电工程中功能设计需要解决的问题	137
9	基于功能理念的高坝设计	139
9.1	高坝抗震设防水准的两种方法的探讨	140
9.1.1	以相同重要性结构在不同设计使用年限内具有 相同的可靠指标进行设防标准决策	140
9.1.2	基于主要经济功能的高坝抗震设防烈度 的决策研究	142
9.2	高坝建设方案的风险决策研究	143
9.3	高坝震害损失计算方法研究	144
9.4	算例	146
9.4.1	抗震设防	146
9.4.2	高坝建设方案风险决策	148
9.5	目前存在的问题	150
9.6	即将展开的前沿研究	151
9.6.1	地震危险性分析	152
9.6.2	高拱坝—地基非线性反应与破损模型	152
9.6.3	高拱坝地震破损指数与抗震对策	154
9.6.4	高拱坝抗震风险评价	155
	参考文献	158

1 绪论

1.1 研究背景及意义

重大工程项目的建设历来受到各级政府主管部门的重视。每一个重大建设项目投资前都应经过可行性研究；进入投资期，对设计、施工还应进行严格审查，并建立监理制度；竣工也有严格的验收制度。这是政府部门保证重大项目实现预期目标的有力监控措施。但这些措施仍缺少风险评估这一环节。重大建设项目如三峡工程、核电站、南水北调工程等，往往不可避免地面临着自然灾害风险和社会风险，如台风、洪水、地震、海潮、地质不良、战争、原材料、新技术、判断错误等。从全国重大工程建设实践来看，由于事前没有充分进行风险评估，工程祸害和因工程建设而引发出来的工程性灾祸时有发生，使国民经济蒙受巨大损失，对以后的发展产生深远的影响。在经济高速发展、重大工程建设项目不断涌现的今天，为减少风险事故特别是恶性事故的发生，确保工程建设健康、有序地进行，重大工程风险评估及风险决策很自然地提到了议事日程。本书则侧重于从工程力学角度探讨工程结构可能存在的风险。

近年来，随着人们对水利水电工程引发的环境 and 安全等问题的关注，水利水电工程因各种不确定因素引起的风险正日益受到重视，相关的工程风险分析和风险管理也正在成为一项新兴的技术和行业，并逐渐应用于工程实际当中。在今后的几年，国际大坝委员会将大坝安全作为一项工作重点，为确保大坝安全着手进行各种安全评价和改建，对包括大坝安全在内的各种不确定因素

进行风险分析和风险管理。世界银行近年来也对技术上可靠、环境可持续发展和经济上可行的水电工程给予投资优先。美国从 20 世纪 90 年代起采用的综合资源规划将工程的环境、技术、公共卫生、财务、价格以及社会经济等多项不确定因素及其产生的风险加以考虑，同时开展了包括风险管理在内的全面综合管理。

风险 (risk) 的概念最早于 19 世纪末在西方经济学领域中被提出，现已广泛应用于环境科学、自然灾害、经济学、社会学、建筑工程学等领域。加拿大标准协会 [Canadian Standard (CSA), 1997] 给出“风险”的直接定义：以概率为衡量标准进行的对由于工程失效造成的人员伤亡、财产损失、环境影响、健康损伤及其他损害等后果的评价。风险研究的内容有时很复杂，特别是在精神损伤及社会政治等方面。风险的定义方式及其在决策过程中所起的作用是因学科的不同而相异的 [美国 Wisconsin 大学希克曼 (James C. Hickman) 教授]。风险是由不确定性因素产生某种程度损失的机会；或为“失事”的概率，是系统在规定的的时间和规定的条件下，未能完成规定功能的概率；或在客观条件下、特定期间内，实际结果与预期结果之变动程度，变动程度越大，风险就越大。不确定性是风险存在的主要原因，包括客观存在的不确定性和人们认识水平的局限所引起的不确定性。例如，在大坝安全方面，风险通常被定义为：风险 = 坝失事年概率 × 坝失事造成的损失。作为分析手段的风险分析最先应用于复杂工程系统（如核电站、航天器等）中，后来逐渐应用于其他的工程系统和社会经济领域，并得到迅速发展，形成一种系统化分析方法。近年来，风险分析也逐步在水资源工程中得到应用。大坝安全评价就是风险分析应用的众多领域之一，尤其在澳大利亚、加拿大、荷兰和美国，大坝风险分析已经成为众所关注的焦点。在 2000 年举行的“第二十届国际大坝会议” Q76 专题（风险分析在大坝安全决策和管理中的应用）中，不少专家就大坝风险分析的基本要素进行了讨论。另一个重要的防洪工程——堤防工程的风险分析也开始引起人们的注意。在荷兰，堤防的可靠性设计

和风险分析已经取得明显成效。目前国内一些学者也开始对堤防工程进行风险分析研究,参考文献[1]~参考文献[3]就堤防工程风险决策和可靠性基本问题进行了探索研究,是国内较早开展这方面研究的成果;参考文献[4]则对堤防工程安全评价的理论和方法进行了较系统的研究。

风险可以是多种致险因素造成的总风险(total risk),也可以是某个特定因素造成的特定的风险(specific risks),如洪水、地震、管涌、滑坡、溢洪道损毁等。人为失误充斥于风险的各个方面,无形中增加了工程的失效概率。

风险的后果可以表达为人身生命安全、社会经济损失、社会环境损伤等。风险管理是管理科学的方法、过程、实践具体系统地应用于风险领域进行风险分析、风险控制、风险监测等(CSA, 1997),可用如图1.1表示。

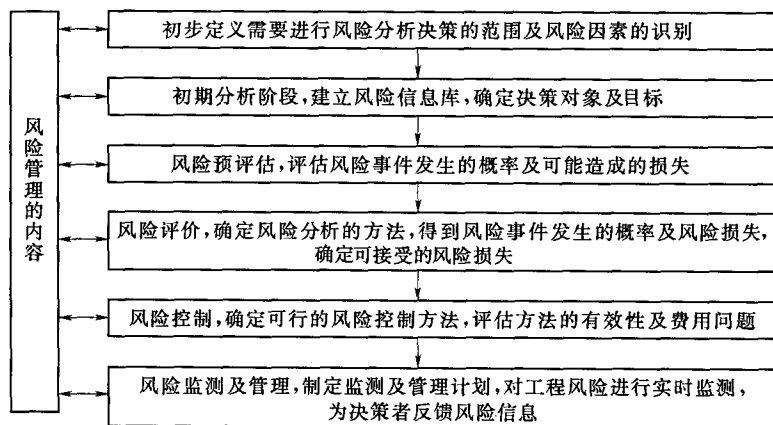


图 1.1 风险管理决策的步骤

水利水电工程的风险分析同其他行业和类型的风险分析类似,从内容上讲必须包括三个主要方面,即预测人员损失,评估经济损失,计算失事概率。其他内容还有诸如评价社会及政治影响、商业可靠程度及可接受的安全指标等。风险分析从程序上

主要分为以下几个步骤：详细分析各备选方案，建立事件树，描述所有可能导致失事风险的内在关系，得出事件树中各要素的出现概率。实践证明，在工程决策过程中引进风险分析是必要和有益的。

以大坝风险管理为例，包括风险分析、风险监测、风险控制。具体内容如图 1.2 所示。

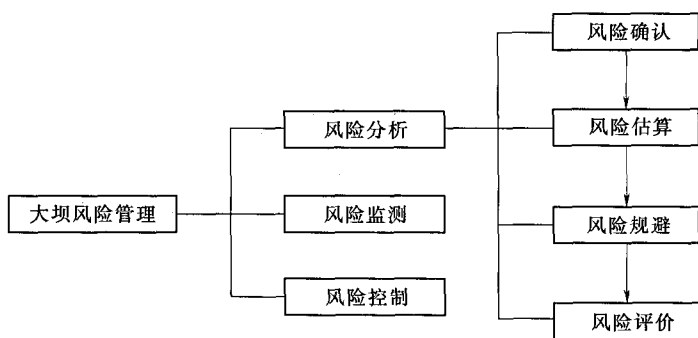


图 1.2 大坝风险管理内容图示

风险分析主要有四个步骤：风险确认，风险估算，风险规避，风险评价。在风险确认阶段，首先要找出可能导致大坝破坏的主要风险源或事件（可能是外部原因，如洪水、地震等；也可能是内部原因，如管涌等），然后建立事件树框图，详细描述可能引起大坝破坏的各种事件的模式及逻辑关系。在风险估算阶段，要给出事件树每一分支的条件几率以及各分支所代表的破坏形式之间相互的因果关系，其中还包括估算与每个破坏形式有关的人员与经济损失。在风险规避阶段，找出能够降低大坝破坏风险的工程与非工程措施。风险评价是一个决策过程，通过这一过程判定什么是可以接受的风险水平，哪种方案对降低风险和减少投资效果最好；如果每个方案中的破坏几率都很低，为提高大坝安全标准而采取的措施耗资巨大而其他方面的效益又很少，并且人员损失难以避免，在这些情况下，选择最适宜方案的决策往往

很难作出。

根据国外垮坝资料统计,因漫坝、溢洪道损毁、管涌和渗透,以及滑坡造成的安全失事和垮坝事故占垮坝总数的90%以上,其失事风险可划分为两大类:第一类为可修性失事风险,也可称低公害(高风险)或中等公害(中等风险)失事;第二类为垮坝失事风险,也可称高公害(低风险)失事。对可修性失事风险,由于其危害性较小,失事后易修复,影响不大,对其失事后的影响可采取工程措施或通过经济指标加以衡量。而对垮坝失事风险,其风险标准应由社会、经济、文化等因素综合确定。另外,从引起垮坝的原因来划分,坝失事风险包括漫坝风险、管涌风险、流土风险、失稳风险、超量开裂风险、地震风险及其他类型的工程技术风险。

在针对垮坝风险而采取的风险管理措施中,美国已制定并开始采用一些新的标准用于制作垮坝和泄洪可能影响到的下游地区的淹没图。这些标准要求针对每一个高危险和非常危险的坝制作相应的淹没图,并将淹没图分发至下游相关地区,供他们在洪水预警和疏散计划中使用。负责紧急事务的地方官员可利用那些可能遭受淹没的地区的基本情况、洪水演进预测时间表、淹没图及其他有关信息来制定洪水预警和公众疏散计划。美国垦务局计划在必要的地方采用地理信息系统(GIS)技术绘制淹没图,这些图将以数字形式制作。垦务局认为,数字化淹没图将最大限度地满足所辖地区和紧急事务管理机构对技术信息的需求,因为只有将淹没图数字化才能在GIS和应急信息系统软件中使用它,同时还将使有关水坝安全的研究数据处理起来更加容易。

不仅对已建成的水电工程存在对其安全性等方面的风险分析和风险管理问题,在工程建设过程中进行有关风险的分析并采取相应对策也同样重要和必要。例如,作为工程规划与设计中心一项必不可少的技术决策,施工导流设计以信息和预测为依据,其中必然包含不确定性,如超标准洪水的发生等。正是由于存在这些不确定因素,加之一些工程技术因素的作用,使导流风险不可避