

Dakuajing Yuyingli  
Hunningtu Liangshiqiao Shigong Qijian  
Fengxian Fenxi

# 大跨径预应力混凝土梁式 桥施工期间风险分析

于玲 包龙生 牛宏 / 著



合肥工业大学出版社  
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

# 大跨径预应力混凝土 梁式桥施工期间风险分析

于玲 包龙生 牛宏 著



 合肥工业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大跨径预应力混凝土梁式桥施工期间风险分析/于玲,包龙生,牛宏著. —合肥:合肥工业大学出版社,2019.1

ISBN 978-7-5650-4065-8

I. ①大… II. ①于…②包…③牛… III. ①长跨桥—预应力混凝土桥—桥梁施工—风险分析 IV. ①U448.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 146112 号

大跨径预应力混凝土梁式桥施工期间风险分析

于玲 包龙生 牛宏 著

责任编辑 马成勋

出版	合肥工业大学出版社	版次	2019年1月第1版
地址	合肥市屯溪路193号	印次	2019年1月第1次印刷
邮编	230009	开本	787毫米×1092毫米 1/16
电话	理工编辑部:0551-62903200 市场营销部:0551-62903198	印张	12.75
网址	www.hfutpress.com.cn	字数	287千字
E-mail	hfutpress@163.com	印刷	安徽昶颀包装印务有限责任公司
		发行	全国新华书店

ISBN 978-7-5650-4065-8

定价: 30.00 元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社市场营销部联系调换。

# 前 言

随着经济的快速发展,我国桥梁建设事业突飞猛进。公路交通“五纵七横”大通道建设及五大跨海工程中,大跨径预应力混凝土梁式桥建设数量非常庞大,在大批桥梁工程相继建设的同时,风险事故也屡屡发生。从风险事故发生的态势来看,一方面桥梁工程事故发生的可能性比过去大大增加,另一方面风险事故的严重程度大大增加。桥梁建设过程中,为顺利实现建设目标,往往过分强调规范化和标准化,但在实际操作过程中却存在着大量不确定性、不可预见的潜在因素,使得桥梁的设计、施工、运营过程都不可避免面临着各种风险,事故频发。因此,近年来桥梁工程的风险分析越来越引起人们的重视。

工程风险评估旨在以科学系统分析方法,辨识并分析工程风险因素,量化风险发生的概率,估算风险损失,并寻求各种可行的风险应对策略。由于风险分析是一门新兴的边缘学科,而桥梁工程方面的研究又处于起步阶段,因此,本书旨在梳理了风险评估的基本理论问题。并在此基础上建立了大跨径预应力混凝土梁式桥梁施工风险评估的基本评价体系。对该类桥梁建设过程中的风致风险、船撞风险、施工精度风险等指标进行了系统、全面地研究。

本书包括风险识别研究、风险概率估计模型研究、风险后果估计研究、风险评估体系研究、关键工况的可靠度研究、关键工况的仿真分析以及风险应对与决策策略研究。通过风险评估的实施,除了可以整体检查并消除设计中的盲点、重复或遗漏,还可以在工程实施的过程中,应用各种风险应对措施,最大限度地降低意外事故的发生概率、减少意外事故所造成的损失和冲击,以提高项目实施的安全水平。对实际工程具有较强的针对性和指导性。

本书在进行风致风险分析时,对桥梁空间脉动风场进行有效模拟,模拟脉动风场的谐波合成(WAWS)法并对其算法进行了改进。本书利用BP神经网络插值来拟合分解谱密度函数曲线,同时引入快速FFT技术,既减少了内存花费又提高了计算效率,得到一种高效又不失精度的脉动风场模拟方法。这种方法在其他文献中未见报道,具有一定的先进性。

本书所依托的课题得到了中交第一公路勘察设计研究院的资助,也得到了课题组同仁的大力支持和协助。刘克同在理论研究方面做了大量的工作,沈阳建筑大学曹悦老师、研究生樊乾玉、白中华负责后期的图表整理及排版、校对工作,在此一并致以衷心的感谢。

感谢!

本书开拓性地研究了大跨径梁式桥施工期间的风险分析,为桥梁建设工程风险评估的进一步研究奠定了基础。本书对我国大跨径梁式桥建设的安全实施具有很强的指导意义。本书可以作为高等院校相关专业桥梁设计方面的参考资料,也可供从事桥梁工程专业的设计、施工、科研及教学人员参考和使用。

由于作者水平有限,书中难免有不足之处,敬请广大读者批评指正。

作 者

2019年1月

## 目 录

第一章 绪 论 .....	(1)
1.1 引 言 .....	(1)
1.2 桥梁工程风险分析的研究现状和研究的必要性 .....	(2)
1.3 存在的问题 .....	(6)
1.4 本书背景与研究内容 .....	(8)
第二章 大跨径预应力混凝土梁式桥施工期风险评估理论研究 .....	(10)
2.1 风险的基本概念 .....	(10)
2.2 风险分析的理论框架 .....	(11)
2.3 桥梁施工期风险识别 .....	(12)
2.4 施工期风险概率估计 .....	(12)
2.5 桥梁施工期风险损失模型 .....	(14)
2.6 施工期风险评价 .....	(15)
2.7 桥梁施工期风险应对策略及决策准则 .....	(21)
2.8 本章小结 .....	(24)
第三章 大跨径预应力混凝土梁式桥施工期风致风险分析 .....	(26)
3.1 近地自然风特性 .....	(26)
3.2 风与结构的相互作用 .....	(32)
3.3 阵风荷载 .....	(36)
3.4 大跨径预应力混凝土梁式桥施工风致风险识别及风险评价指标体系 .....	(37)
3.5 桥梁抗风性能基本参数不确定性研究 .....	(41)
3.6 施工风致风险概率估计 .....	(46)
3.7 北山桥施工抗风风险评价 .....	(59)
3.8 本章小结 .....	(71)
第四章 大跨径预应力混凝土梁式桥施工期船撞风险分析 .....	(72)
4.1 船撞事故调查 .....	(72)
4.2 基于 BP 神经网络的船撞桥概率估算方法 .....	(77)
4.3 基于概率风险的大跨径预应力混凝土梁式桥船撞风险评估 .....	(85)

4.4	基于 ANSYS/LS-DYNA 船撞碰撞仿真分析基本理论及关键技术 .....	(87)
4.5	船撞桥风险接受准则及等级评价 .....	(89)
4.6	北山大桥施工期船撞风险分析 .....	(90)
4.7	本章小结 .....	(102)
<b>第五章</b>	<b>大跨径预应力混凝土梁式桥施工期洪水风险分析 .....</b>	<b>(103)</b>
5.1	洪水灾害 .....	(103)
5.2	大跨径预应力混凝土梁式桥施工期洪水引起风险事件识别 .....	(105)
5.3	大跨径预应力混凝土梁式桥施工期发生洪水概率分析 .....	(109)
5.4	大跨径预应力混凝土梁式桥洪水风险损失估计 .....	(112)
5.5	洪水风险评价准则 .....	(114)
5.6	北山特大桥施工期洪水风险分析 .....	(115)
5.7	本章小结 .....	(119)
<b>第六章</b>	<b>施工期桥梁临时结构与施工精度风险分析 .....</b>	<b>(120)</b>
6.1	桥梁施工临时结构与施工精度导致的工程事故 .....	(120)
6.2	荷载和材料不确定性对结构安全的影响分析 .....	(123)
6.3	临时结构损坏对结构安全的影响分析 .....	(125)
6.4	桥梁施工精度影响风险分析 .....	(130)
6.5	北山大桥临时结构与施工精度风险分析 .....	(135)
6.6	本章小结 .....	(153)
<b>第七章</b>	<b>结 论 .....</b>	<b>(154)</b>
7.1	主要结论 .....	(154)
7.2	主要创新点 .....	(155)
<b>附件</b>	<b>本书开发的程序 .....</b>	<b>(157)</b>
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>(192)</b>

# 第一章 绪 论

## 1.1 引 言

客观世界的不确定性和人的主观有限性造就了风险。风险是客观存在的,它无处不在。生活中常说的风险,就其不确定性的性质,既可以表现为利益和机遇,又可以表现为损失和灾难。对应于不确定性的两个不同方面,人们的取舍总是取决于对利益的追求和对损失的厌恶。

若风险事件趋向于利益,虽然风险事件发生的可能性较小,但一旦风险事件发生了,就会给涉险者带来丰厚的回报。因此,为了获得风险事件带来的利益,会驱使风险追求者敢于“冒风险”。在这种情况下,风险追求者愿意以增加代价的方法来增加不确定性的发生,比如通过追加赌资和增加赌博的次数来寻求财富的增加,那么他就属于风险追求者,亦如所谓的“不入虎穴,焉得虎子”,同样也属于风险追求者。

个别风险事件的发生是偶然的,而对大量风险事件的观察会发现,风险事件的发生往往呈现明显的规律性,也就是说在随机现象的大量重复中会呈现出几乎必然的规律。由于风险与损失密切相关,所以人们希望这种带来巨大损失的风险事件最好不经常出现,甚至是越罕见越好,为此我们开展风险研究,运用统计学方法去处理大量相互独立的偶发风险事故,深入讨论风险发生机理,并利用概率论和数理统计的方法测算出风险事故发生的概率及其损失程度,希望能够通过采取一定的措施,将风险发生的概率降低到我们能够接受的水平后再执行该事件,对于采取措施后风险水平仍旧不能为我们所接受,那么我们就抛弃该事件的执行,转而别寻它径。

桥梁在人类文明的发展过程中占据着重要的一页。自 20 世纪 60 年代中期在德国莱茵河上采用悬臂浇筑法建成 Bendorf 桥以来,悬臂浇筑施工法和悬臂拼装施工法得到不断改进、完善和推广应用,从而使得预应力混凝土连续梁桥成为许多国家广泛采用的桥型之一。

我国自 20 世纪 50 年代中期开始修建预应力混凝土梁式桥,比欧洲起步晚,但近年来发展迅速,在预应力混凝土桥梁的设计、结构分析、试验研究、预应力材料及工艺设备、施工工艺等方面日新月异,预应力混凝土梁式桥的设计技术与施工技术都已达到相当高的水平。

预应力混凝土梁式桥是预应力桥梁中最常见的一种形式,它具有整体性能好、结构刚度大、变形小、抗震性能好等特点,特别是主梁变形挠曲线平缓、桥面伸缩缝少、行车舒适等优点。加上这种桥型的设计施工均较成熟,施工质量和施工工期能得到控制,成桥后养护工作量小。上述种种因素使得这种桥型在公路、城市和铁路桥梁工程中得到广泛采用。

## 1.2 桥梁工程风险分析的研究现状和研究的必要性

桥梁工程事故的多样性和潜在风险的日益严重性,一方面表现为桥梁工程事故发生的可能性比过去大大增加,除受到自然因素、人为因素所带来的风险外,还会受到由于结构形式创新、社会发展引起的特殊效应等带来的一些新的风险事态。从已收集到的桥梁事故的资料来看,自1710年起至2005年4月桥梁事故共计500起余,其中1900年以后的411起,占已知事故总数的90%以上,1990年以后257起,占到了一半以上;另一方面表现为风险事故的后果严重程度大大增加,从目前国内已建和在建的桥梁来看,投资规模动辄上亿、几十亿,甚至数百亿元人民币。近年来,桥梁工程事故频繁发生,例如:2007年6月15日,广东九江大桥非通航孔桥墩被一艘运沙船撞塌,引起200多米引桥(连续梁)倒塌,9人死亡;2007年8月13日,湖南省凤凰县正在施工中的沱江大桥(多跨石拱桥)发生坍塌特重大事故,死亡64人,给社会带来了非常恶劣的影响。

工程事故的发生给从事桥梁工程的管理、设计、施工和研究的人员的内心深处留下了无法磨灭的烙印,也使我们深刻认识到在桥梁工程建设中所面临的巨大挑战,一系列的问题需要我们去深思、去研究:为什么会发生这些工程事故?这些工程事故是如何发生的?事故的发生具有哪些规律性?能否预先了解事故发生的可能性?如何在事故发生前预测事故发生后可能造成的损失?采取哪些措施才能减小事故发生的可能性以及减轻事故发生后的损失程度?

所有这些问题归根到底都是工程风险评估的研究内容,需要通过对工程项目的风险评估进行研究才能科学地回答这些问题。

### 1.2.1 风险分析在其他工程领域的发展和研究现状

第二次世界大战后,随着工业过程日趋大型化和复杂化,生产中的火灾、爆炸和毒气泄漏等重大事故不断发生,事故预防和安全风险分析日益受到重视,人们开始了对安全评价方法的探索。

20世纪50~60年代,风险分析方法最先开始被应用于欧美核电厂的安全性评估之中。此后,概率论方法分析也开始被人们应用于核电厂的安全性评价。

60年代后期,以概率风险评估为代表的系统安全评价技术得到了迅速的发展。英国在60年代中期就建立了故障数据库和可靠性服务所来开展概率风险研究工作。

1973年3月,美国的三里岛核电厂2号发电机组发生事故,核电厂的概率安全评价

(PSA)开始为人们所关注。1975年,NRC首次发表了商用核电站轻水反应的风险分析报告。1979年,英国和德国的一些机构对荷兰的一些工业设施进行了风险评价。随后,关于此类风险分析评价技术在西方许多发达国家的诸多工业项目中得到了广泛的应用,并且先后研究推出了一系列风险评价方法,至此,风险分析方法已进入实际应用的新阶段。

1986年,苏联切尔诺贝利核电站发生了爆炸事故,美国“挑战者”号航天飞机发生爆炸,这两起震惊世界的重大事故,使得人们对风险问题有了更加深入的认识,风险分析与评价技术得到了重视和进一步发展。

20世纪80年代,随着发展中国家经济的起飞,风险管理愈加被这些国家所重视,风险管理研究也从发达国家逐步向发展中国家扩散。联合国为了在发展中国家推广和普及风险管理科学,1987年其专门机构出版了有关风险管理的研究专题报告《The Promotion of Management in Developing countries》。

国内风险分析理论研究的起步比较晚。但改革开放以来,随着我国经济的发展和工程建设的需要,风险管理的重要性逐渐被人们认识。20世纪80年代初,相继出现风险分析方面的文章,如1983年,李存斌发表了《建设项目经济效果风险分析的函数偏导法》;1984年,李正发表了《投资的经济效果及其风险分析》。进入20世纪90年代后,国家对诸多关系国计民生的大型项目开展了较为深入的风险研究,取得了可喜的成果,工程项目风险评价理论也逐渐与国际接轨,为我国的风险分析理论的深入研究奠定了基础。

“七五”“八五”期间,天津大学参加了国家科技攻关课题——“三峡工程重大科学技术研究”中的关于三峡工程风险分析的研究,这是国内首次对大型工程项目进行的风险分析和评价,相关学者结合该工程项目的实例,全面、系统地研究了风险的理论和方法,在总结研究成果的基础上,编写了《投资项目风险分析》。

针对大型工程项目实施阶段的风险分析与风险管理,同济大学多位学者进行了深入研究。武汉水利电力大学结合专长对大型水利工程中许多风险问题进行了大量专题研究。

目前,风险分析方法的应用已涉及航天工程、水利工程、土木工程、经济管理等诸多领域,并得到了广泛推广和发展。

### 1.2.2 风险分析在桥梁工程领域的发展和研究现状

随着经济的快速健康发展,我国桥梁建设突飞猛进。但在大批桥梁工程相继建成的同时,工程风险事故也屡屡发生。从风险事故发生的态势来看,一方面桥梁工程事故发生的可能性比过去大大增加,另一方面风险事故的后果严重程度大大增加,所以桥梁工程的风险也就越来越引起人们的重视。

工程风险评估旨在以科学系统分析方法,辨识并分析工程风险因素,量化风险发生的概率,估算风险损失,并寻求各种可行的风险应对策略。通过风险评估的实施,除了可以整体检查并消除设计中的盲点、重复或遗漏,还可以在工程实施的过程中,应用各种风险应对措施,最大限度地降低意外事故的发生概率、减少意外事故所造成的损失和冲击,以提高项目实施的安全水平。

桥梁建设过程中,为顺利实现建设目标,往往过分强调规范化和标准化,但在实际操

作过程中却存在着大量不确定性、不可预见的潜在因素,如来自于环境、材料、人为及结构自身等各种原因,使得桥梁的规划、设计、施工、运营过程都不可避免面临着各种风险。

风险评估在桥梁工程领域的研究相对较少。目前桥梁工程领域风险评估研究主要涉及的方面有抗灾减灾、碰撞、项目管理、施工、政策与环境、投资等。

### 1.2.3 桥梁施工风险分析的必要性

施工阶段的工程风险评估成为桥梁施工风险评估研究的重点之一,这主要是由以下几个方面所决定的。

#### 1. 桥梁工程施工期风险评估是减少工程事故发生的客观需要

桥梁工程结构复杂庞大,很多高新技术应用其中,同时由于工程项目涉及面广,生命周期长,使得工程项目面临诸多来自自然界的、社会的、人为的、技术的、材料的不确定性因素影响。一旦事故发生,生命及财产就会遭受巨大损失,同时工程事故所衍生的社会成本损失更是难以估计,所以决策过程中必须对各种极端事件进行充分的考虑。通过工程风险评估,了解和掌握桥梁施工阶段各种潜在的风险因素,并形成积极有效的风险应对策略,从而控制和降低风险水平,减少工程事故的发生和降低事故的损失。

近年来的调查分析表明,工程结构在施工期的风险远远高于使用期。其根源在于固有的不确定性和复杂性决定了结构性能的不稳定,同时工程施工过程中结构的不完整性、结构力学性能研究的不充分性、所受荷载的复杂性及施工管理的不完善,导致结构的平均风险率最高,失效概率最大,如图 1-1 所示。有学者对我国 1958—1987 年各种工程结构发生倒塌事故进行了统计,在国内的 285 起工程事故中,有 237 起发生在施工期间,达到了占事故总数的 83.2%。从美国 1977—1981 年桥梁发生倒塌事故的统计表格(见表 1-1)可以看出,美国桥梁在施工期间发生倒塌事故 3 起,占事故总数的 21%。虽然从结构类型及国内外施工技术或管理水平的差异方面考虑,我国国内的情况会有所差异,但不管如何,施工期结构的安全问题是一个需要引起注意的问题。

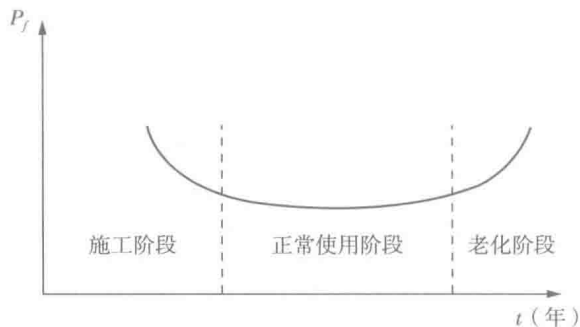


图 1-1 工程失效概率在不同阶段的发展规律

桥梁工程的施工建造是一项复杂庞大的系统工程,在建造时期的任一环节存在错误和疏忽,都将会大大降低结构的安全性,导致在桥梁的建造和使用中付出惨重的经济代价和人员伤亡。近年来发生的大量桥梁工程事故,不但造成了大量的人员伤亡的后果,

而且也导致工程造价超支,工期拖延,有的甚至还使承包商破产,设计师被吊销设计许可证等,如1907年跨径548.6m的加拿大魁北克(Quebec)桥,在架设过程中就两次发生事故;1993年7月日本岩手县盛冈市玉川温泉桥(钢管混凝土拱桥),在施工过程中拱圈倾斜垮塌,造成4人死亡、5人重伤的重大工程事故;1992年7月韩国汉城跨越汉江的一座即将竣工的多跨斜拉桥突然坍塌;北美一座钢桁梁桥在即将合拢时桥毁人亡的重大事故甚至被写进了教科书,作为告诫世人的反面教材;在密什根 Zilwankee 桥施工过程中出现的混凝土箱形梁挠度超限,虽无人伤亡,但使工期拖延5个月,造成的损失也很大。施工期间的桥梁事故发生在我国国内的情况也屡见不鲜,1987年,我国四川达县的一座钢筋混凝土桥梁斜拉桥在即将合拢之际,突然失稳,桥毁人亡;1996年广东韶关白桥坑大桥在施工过程中突然坍塌,造成32人死亡、59人受伤的特大事故,震惊全国;1998年9月跨径258m的宁波招宝山大桥在经过三年建设即将合龙之际,突然发生主梁压溃破坏的严重质量事故,虽未造成人员伤亡,但这起事故使整个工程工期延误近两年,造成的经济损失巨大,并且在社会上产生了极大的负面影响;2007年,湖南省凤凰县正在施工中的沱江大桥(多跨石拱桥)发生特大坍塌事故,给社会带来了非常恶劣的影响。

表 1-1 美国及其他国家 1977—1981 年桥梁事故分布情况

项目类型		美国		其他国家
		坍塌事故	危险事故	坍塌事故
总事故数		14	19	24
施工期	事故数	3	3	4
	所占比例(%)	21	16	17
使用期	事故数	11	16	20
	所占比例(%)	79	84	83

个别风险事故的发生是偶然的,而大量风险事故的发生往往呈现出明显的规律性。为此,我们开展风险研究,运用统计学方法去处理大量相互独立的偶发事件,深入讨论风险发生机理,并利用概率论和数理统计的方法测算风险事故发生的概率及其损失程度,然后采取相应的应对策略,以期将风险发生的概率能够降低到我们可以接受的水平。

2. 桥梁工程施工期风险评估是制定风险预案、控制工程质量和降低风险损失的客观需要

作为生命线工程的重要组成部分,桥梁工程在国家经济的发展中具有非常重要的意义,决策者对各种安全隐患势必要有充分的认识和准备。可以说,桥梁工程施工期风险评估,正是以桥梁安全为主要目标,以定性方法、定量方法或半定量方法为研究手段,综合考虑结构、经济、社会、环境、政治等多方面的因素,以辅助决策者建立保障工程安全的预警机制,达到防患于未然的目的;并通过建立健全突发事件应急机制,使得事故发生后,事故的次生灾害降至最低,达到减小风险损失的目的。

3. 桥梁工程施工期风险评估研究是行业技术进步的需要

风险评估在很多领域都有了较为广泛的研究,但在桥梁工程方面的研究目前尚处于起步阶段,其研究深度和研究水平也参差不齐,没有充分体现工程风险评估工具的有效

性,难以满足方兴未艾的工程建设需要,本书的研究能为本行业提供进一步开展研究的平台,促进行业技术的全面发展。

4. 桥梁工程施工期风险评估研究是缓解决策压力、保护公众利益和开展工程保险业务的需要

随着社会的不断进步,公众对灾害事故的敏感性以及参政意识的增强,使政府越来越感到决策的压力,重大事故发生后,政府不得不承受来自各方面的压力。风险评估的最终目的是为决策者提供决策依据,帮助投资方、设计方、施工方充分了解工程所面临的各种风险的风险水平及风险损失情况,从而应用经济的手段制定相应的措施,为如何管理风险做出理智的决策,提高决策者对不确定事件的掌控程度。综上所述,桥梁工程施工期风险评估在提高桥梁工程安全性工作中具有重要的地位,通过工程风险评估确定潜在风险,制定风险控制方案,拟定消除风险的预案是非常必要的。

综上所述,桥梁工程施工期风险评估在提高桥梁工程安全性工作中具有很重要的地位,通过工程风险评估确定潜在风险,制定风险控制方案,拟定消除风险的预案是非常必要的。

## 1.3 存在的问题

### 1.3.1 风险识别方面

桥梁工程施工期间,可能引起工程风险的因素很多,其后果的严重程度也各不相同,所以不可能将所有的因素完全考虑到风险分析体系中。风险识别的理论和方法的研究目前还不太成熟,就大跨度桥梁来说,工程的施工建造涉及了很多方面,需要由成百上千的劳动者,经过较长时间的共同工作,才能将设计图纸转变为真实结构。社会环境、自然环境、施工环境、组织因素的不同,结构材料在制作过程中难以控制的各种复杂因素以及设计计算简化的影响等,决定了施工期间存在着较多的不确定性因素,加之现有的施工控制技术还不能很好地考虑各种随机因素对工程的影响,桥梁在施工中出现事故的情况屡屡发生,对于那些发生概率很小且可能造成的后果又很轻微的危险因素,应及时排除在进一步的分析之外。而忽略或遗漏某些重要因素对于决策的科学化却是很不利的,因此动态风险源数据库的建立就显得尤为迫切。通过建立风险源普查表,从施工项目的实际工程情况着手,或从已有的桥梁工程事故中筛选确定,进行风险源普查,并根据工程进展和对风险源的认识深化,对风险源动态数据库进行新的扩充或删减。但就从目前收集的文献看,这方面的工作尚未展开。

目前常用的风险识别方法有定性识别方法和定量识别方法。定性方法虽然不受统计数据的限制,但却因为易受分析人员的主观因素影响而缺乏说服力;定量分析方法虽然由于数据的量化而具有较大的可靠性,但却因为分析过于复杂而在工程中应用得较少;层次分析方法属于一种综合风险识别方法,该方法符合人的思维逻辑,形式简单,但是在实际应用中,由于风险因素的复杂性和人们认识中存在的主观偏差以及数字标度的限制,专家给出的判断矩阵很难得到完全一致的结果。

### 1.3.2 风险概率估计方面

风险概率估计是风险分析整个过程中最为复杂也是最为关键的核心步骤。目前工程风险评估领域里,在缺少相关统计资料的情况下,风险概率估计常常使用专家调查法进行,当然,该方法的前提是专家的判断应尽可能地真实可靠。

对于桥梁结构失效概率的求解,可靠性分析理论为其提供了许多基本解析算法,如一次二阶矩法、高次高阶矩法及其改进算法等。但这些基本算法仅对结构功能函数显式表达的情况适用。当结构的复杂度明显增加,如自由度和随机变量数目的增多、非线性影响的引入等,结构承载后的响应量与输入量之间的函数关系会变得非常复杂,功能函数一般就会无法显式表达,这时解析算法由于难于求解而不再适用。

随机有限元方法和蒙特卡罗方法由于能够回避结构可靠度计算中的数学困难,不需要考虑功能函数的非线性和极限状态的复杂性,所以擅长解决大型复杂结构非显式功能函数的可靠性求解问题。但在实际可靠度计算中,随机有限元方法计算过程既复杂又耗时,工作量很大,蒙特卡罗方法也同样具有计算量大、效率低的缺点,大大限制了这两种方法的应用。

为获得大型结构的功能函数,人们在探索结构可靠性分析的近似分析方法上进行了诸多研究,具有代表性的是响应面法。该方法的思想是构造一个响应面函数,即二次多项式,来拟合实际的功能函数。但以二次多项式拟合响应面函数,无法解决响应面的精度问题,故其应用有一定局限性。

为了揭示不确定性因素影响下蕴藏在系统内部的风险发生规律,样本点的设计常常采用随机遍历法,在一个可能存在的可行状态的全集中依次遍历所有的元素。当样本向量数据较多,且分布范围又较大时,按照随机遍历方法进行样本设计,必然将招致样本点急剧增加。为获取足够多的样本将不得不消耗较多的时间和精力,同时,过多的样本也必然降低网络的精度,这与样本的致密性、遍历性和相容性是不符合的。

### 1.3.3 风险后果估计方面

定性的后果评价是用定性的指标以严重、一般、轻微等分级来描述损失的严重程度。这种方法对于风险损失难以定量估计情况下,虽然具有一定的适用性,但损失估计结果却不可避免地具有片面性缺陷。

如何对桥梁施工风险后果进行系统、全面地分析与估算,是一个亟待解决的问题。桥梁工程风险事态所建立的后果模型既要考虑模型内部固有的风险,又要考虑模型本身失效的风险。

### 1.3.4 风险评价标准方面

安全与否的判定,需要确定一个风险接受标准。风险可接受的标准实际上是公众愿意承受的经济负担和能够经受得起的风险之间的一种平衡,是经济、技术和安全之间的

一种平衡。相对于我国的国情,桥梁工程领域里风险分析研究才刚刚起步,尚没有确定相应的风险可接受标准。

目前实际工程中的风险评估,人们往往把目光集中在结构本身和施工环境上,注重投资和工程技术,而忽略了伦理、公众意愿等非工程措施对于质量控制的作用,这是一个认识误区。随着社会的不断进步,公众对灾害事故的敏感性以及参政意识不断增强,研究如何让公众参与工程决策过程已经非常必要,需要风险评估研究过程中充分重视和考虑社会公众的意见,使风险标准的制定能够充分反映公众意愿。

## 1.4 本书背景与研究内容

### 1.4.1 本书背景

大跨径预应力混凝土梁式桥是我国桥梁建设中常见的桥型。随着高等级公路的迅速发展,桥梁行车条件的要求不断提高和悬臂施工方法的不断成熟,我国公路交通“五纵七横”大通道建设及五大跨海工程已陆续启动,大跨径预应力混凝土梁式桥建设数量非常庞大,工程事故屡有报道,说明其施工期间存在大量的不确定性和高风险性。因此,本书主要以北山大桥施工过程为背景进行研究。

### 1.4.2 本书的研究内容

本书以指导工程实践和科研创新为目的,以浙江青田北山特大桥施工为研究背景,结合桥梁施工风险分析存在的问题,从风险分析理论、分析方法与分析体系的角度,对大跨径预应力混凝土梁式桥施工期的各种风险展开了研究。通过理论分析和仿真实例计算,为桥梁工程施工期风险评估提出一些新的理论和方法,研究制定大跨径预应力混凝土连续梁施工期结构风险的应对措施。主要研究内容如下。

第一章 简述大跨径预应力混凝土梁式桥的发展概况。阐述开展大跨径预应力混凝土梁式桥施工风险分析研究的必要性和重要意义;指出本书的主要研究内容。

第二章 对大跨径预应力混凝土梁式桥施工期风险评估理论进行研究。阐述风险的基本概念及风险度量的合理表达式,并在此基础上构建桥梁施工期风险分析的总体理论框架;在进行桥梁施工期风险识别研究的基础上进行桥梁施工期风险概率估计与损失模型问题的研究;研究桥梁施工期风险的评价方法和接受准则;开展桥梁施工期风险应对策略和决策准则研究。

第三章 大跨径预应力混凝土梁式桥施工期风致风险分析。针对传统桥梁结构的抗风性能评估中存在的一些问题,从桥梁施工风险的角度对抗风性能评估进行研究。

第四章 大跨径预应力混凝土梁式桥施工期间船撞风险研究。在回顾和总结国内外关于船撞桥问题研究及进展概况的基础上,从风险概率的角度对大跨径桥梁的船撞风

险评估进行研究。同时,对于施工期关键的工况进行可靠度分析和仿真分析。

第五章 大跨径预应力混凝土梁式桥施工期间洪水风险分析。以上部结构施工阶段和基础施工阶段为关键工况进行洪水风险分析,建立大跨径预应力混凝土梁式桥施工期间洪水风险评估流程和评估方法。主要采用层次分析法进行风险识别,根据防洪标准确定施工期间洪水发生概率,结合工程概预算量化洪水风险损失。应用所建立的方法对北山大桥进行施工期间洪水风险的分析 and 评价,验证所建立方法的可行性及合理性。

第六章 大跨径预应力混凝土梁式桥施工临时结构和施工精度风险分析。首先论述荷载和材料的不确定性对结构安全造成的影响,考虑桥梁施工期临时结构损坏引起的桥梁结构风险,由于桥梁施工存在着不同程度的误差,因此需要考虑控制误差影响分析,最后对桥梁施工过程结构的稳定性进行了分析。

第七章 总结。

对以上几个方面进行总结,提炼出本书创新点,指出本书进一步研究的方向。

### 1.4.3 技术路线

根据上述研究内容,制定研究步骤及技术路线如图 1-2 所示。

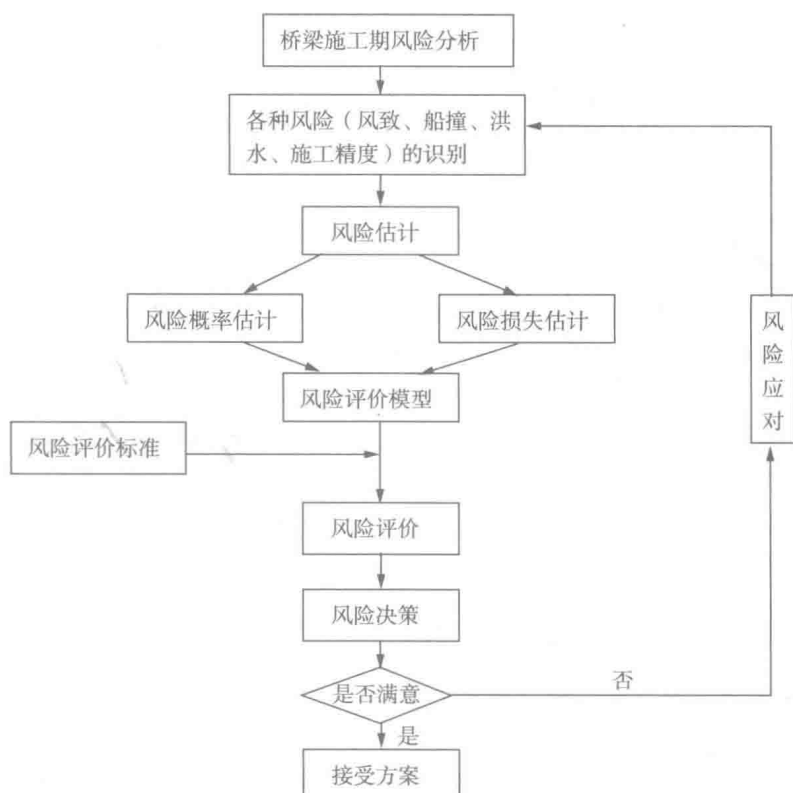


图 1-2 技术研究路线

## 第二章 大跨径预应力混凝土梁式 桥施工期风险评估理论研究

### 2.1 风险的基本概念

为了全面深入了解风险,首先就要给出确切的风险定义和风险度量方式。

#### 1. 风险的定义

“风险”一词最早出现在 19 世纪末,当时由于专业背景、应用背景不同,各国学者对风险的定义未达成一致,因此不同研究领域对风险的定义是不同的。下面给出了比较有影响力的不同的学者对风险的定义。

1901 年,Willlett 在题为《风险及保险的经济理论》的博士论文中,认为风险是关于不愿发生事件的不确定性之客观体现。

1985 年,Williams 将风险定义为:在给定情况特定时间内,那些可能发生结果间的差异。

Saburo Ikeda 将风险定义为两部分:一部分是不利事件发生的概率,另一部分是不利事件而造成的后果。

综合上述观点可以看出,风险主要包括两方面的含义:不利事件的发生概率和可能产生的后果。鉴于此,本书提出风险的一般性定义:风险是指所考察系统在规定的工作条件和预定的时间内,发生故障的概率及由此产生的后果。

#### 2. 风险的度量

风险的度量是指风险的表达方式或风险程度的衡量形式。

根据风险的定义,风险评估应解决下面两个问题:

- ① 意外事件发生的可能性或概率;
- ② 发生意外事件后会产生什么样的后果。

基于以上两点,绝大多数学者认为,就风险的不确定性与不利结果这两个方面来说,综合表达风险是采用不利事件(事故或危险)的发生概率和其造成的后果。

现在,在工程领域普遍认可的风险表达方式为:用事故发生的概率与事故造成的后果的乘积来定义风险,则风险可以定义为:

$$R = P \times C \quad (2-1)$$