

# 工程风险分析理论与实践

——上海崇明越江通道工程风险分析

陶履彬 李永盛 冯紫良 编著  
汪炳镒 贾 坚

 同济大学出版社  
TONGJI UNIVERSITY PRESS

## 内容提要

风险分析是项目风险管理系统的主要组成部分,是一门针对特定客观情况、特定期间内某一事件的实际发生结果与预期产生差异甚至相反结果的可能性进行研究的学科。对大型工程进行风险分析在国内尚属起步阶段。本书在介绍有关工程分析相关理论的基础上,详细介绍了上海崇明越江通道工程前期工程风险分析的研究方法。

本书可作为高等学校土木工程专业本科生、研究生的专业课教材,也可供相关专业的科研和技术人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

工程风险分析理论与实践:上海崇明越江通道工程  
风险分析/陶履彬,李永盛,冯紫良等编著. —上海:同  
济大学出版社,2006.12  
ISBN 7-5608-3244-X

I. 工... II. ①陶...②李...③冯... III. 水下隧  
道—隧道工程—风险分析—上海市 IV. U459.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 146752 号

---

---

## 工程风险分析理论与实践——上海崇明越江通道工程风险分析

陶履彬 李永盛 冯紫良 汪炳镒 贾 坚 编著

责任编辑 宋 磊 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

---

出版发行 同济大学出版社 [www.tongjipress.com.cn](http://www.tongjipress.com.cn)  
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话 021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 17.25

印 数 1—2100

字 数 430000

版 次 2006 年 12 月第 1 版 2006 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-5608-3244-X/U·63

---

定 价 35.00 元

---

---

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

# 前 言

2002 年春夏之交,同济大学、奥雅纳工程顾问(香港)有限公司、中交第四航务工程勘察设计院(简称:中交四航院)共同承担了上海崇明越江通道工程风险分析研究项目,组成了以同济大学常务副校长李永盛教授为首,由同济大学地下建筑与工程系朱合华、黄宏伟教授,桥梁工程系肖汝诚教授,交通工程学院陈小鸿教授,同济大学建筑设计研究院轨道交通与地下工程分院贾坚院长,奥雅纳工程顾问(香港)有限公司李国梁、罗明纯先生,中交四航院朱利翔院长、熊翱、张宏铨经理等 100 多名学者、教师、工程技术人员和研究生参加的项目组,针对越江通道可行性研究方案之线位和越江方式的方案,主要就技术的可行性和工程的可造性方面进行风险分析研究,并就以下专题展开工作:

- (1) 河势演变风险评估(中交四航院熊翱、黎维祥等);
- (2) 地震对越江工程的风险评估(同济大学胡世德、周健等);
- (3) 越江工程对长江口生态环境影响风险评估(奥雅纳赵祖强、罗明纯等);
- (4) 工程地质勘察的准确度和可靠度风险评估(同济大学唐益群、叶为民、白航等);
- (5) 越江工程结构耐久性风险分析(同济大学杨林德等);
- (6) 桥梁抗风振风险评估(同济大学葛耀君等);
- (7) 特大跨度桥梁施工期工程风险评估(同济大学肖汝诚、黄宏伟等);
- (8) 桥梁营运管理维护风险评估(包括抗腐蚀、超载等)(同济大学张雄、肖敏瑞、吴冲、石雪飞等);
- (9) 通航船只相撞及通航船只撞击大桥的风险分析(同济大学王君杰等);
- (10) 隧道结构纵横向稳定性及防水可靠性的风险评估(同济大学冯紫良、袁勇、陆浩亮、张玉生等);
- (11) 盾构设计的适应性和可靠性的风险评估(同济大学朱合华、马剑峰等);
- (12) 盾构隧道施工期工程风险评估(同济大学廖少明等);
- (13) 长距离隧道通风风险评估(奥雅纳 Vincent、华淑敏等);
- (14) 隧道火灾风险评估(奥雅纳赵德龙、陈姿吟等);
- (15) 恐怖袭击对越江通道的风险评估(奥雅纳 John Haddon、David Hadden 等);
- (16) 交通量预测及交通事故、恶劣天气下运行的风险评估(同济大学陈小鸿、吴娇蓉等);
- (17) 越江通道工程财务风险评估(中交四航院王志民、何文钦等)。

作者作为本项目的技术总负责人,参与并策划了本项研究的立项申请、技术路线的制定、中期研讨、各专项分报告的审定,并在此基础上进行研究项目总报告的撰写工作。本书是在项目研究总报告的基础上,适当补充有关工程风险分析的基本理论而成。

作者衷心地感谢上海市公路处张奎鸿等领导在研究工作中给予的支持和帮助,感谢上海市政设计研究总院、上海轨道交通与隧道设计研究院、上海市城市建设设计研究院在研究中提出宝贵意见的工程师们,感谢为本项目研究工作付出辛勤劳动的工作人员。

限于作者水平,书中如有错误和不妥之处,恳请读者批评、指正。

此为试读,需要完整PDF请访问: [www.ertongbook.com](http://www.ertongbook.com)

---

编者  
2006年11月

# 目 次

## 前 言

1 风险分析的基本原理与方法 .....	(1)
1.1 工程风险的基本概念 .....	(1)
1.2 风险的分类 .....	(2)
1.2.1 按损失标的物分类 .....	(2)
1.2.2 按风险来源分类 .....	(2)
1.2.3 按损失的承受者来分类 .....	(3)
1.2.4 按风险的可控制性来分类 .....	(3)
1.3 危险的辨识 .....	(3)
1.3.1 危险辨识的方法 .....	(4)
1.3.2 主要工作内容 .....	(4)
1.4 风险的评估 .....	(4)
1.4.1 事故发生可能性的度量——风险概率 .....	(4)
1.4.2 风险评估工作的分类 .....	(5)
1.4.3 风险的评估方法 .....	(5)
1.4.4 风险分级的方法 .....	(7)
1.5 风险决策 .....	(8)
1.5.1 风险按处理优先级别的排序 .....	(9)
1.5.2 风险的接受准则 .....	(9)
1.5.3 风险控制 .....	(10)
1.5.4 风险决策的程序 .....	(10)
1.6 风险管理 .....	(11)
1.6.1 引言 .....	(11)
1.6.2 范畴 .....	(12)
1.6.3 风险注册 .....	(12)
1.7 风险分析与评估的方法 .....	(17)
1.7.1 调查和专家打分法 .....	(17)
1.7.2 层次分析法(AHP) .....	(18)
1.7.3 蒙特卡罗模拟技术(Monte Carlo simulation) .....	(18)
1.7.4 其他风险分析方法 .....	(19)

---

2	上海崇明越江通道工程风险分析概述	(21)
2.1	上海崇明越江通道工作组对风险分析的要求	(21)
2.2	风险分析专题	(22)
2.3	风险分析研究的目标	(22)
2.3.1	越江工程东线方案的线路走向	(22)
2.3.2	越江工程的越江方式	(23)
2.3.3	本项研究的目标方案	(29)
2.3.4	上海崇明越江通道工程风险分析研究的主要技术路线和方法	(29)
3	建设期风险分析	(37)
3.1	工程地质勘察的准确度和可靠度风险分析	(37)
3.1.1	风险源分析	(37)
3.1.2	风险分析综合评价	(41)
3.1.3	风险对策	(41)
3.2	桥梁方案建设期风险分析	(43)
3.2.1	概述	(43)
3.2.2	桥梁上部结构施工期工程风险分析	(43)
3.2.3	桥梁方案基础施工期工程风险分析	(47)
3.2.4	降低桥梁方案施工期风险的措施	(51)
3.3	隧道方案建设期风险分析	(54)
3.3.1	盾构机设计的适应性和可靠性风险分析	(54)
3.3.2	盾构隧道施工期施工风险分析	(61)
4	营运期风险分析	(69)
4.1	桥梁方案	(69)
4.1.1	地震对越江桥梁工程的风险分析	(69)
4.1.2	通航船只相撞及通航船只撞击大桥的风险分析	(81)
4.1.3	越江大桥桥梁结构受海水侵蚀损坏的风险分析	(87)
4.1.4	越江大桥桥梁结构受酸雨侵蚀的风险评估	(89)
4.1.5	超载对桥梁结构的损伤和破坏风险分析	(91)
4.1.6	桥梁抗风振风险分析	(95)
4.1.7	恶劣天气对大桥通行的影响	(102)
4.1.8	交通事故对越江通道正常运营的影响	(105)
4.1.9	桥梁结构耐久性风险分析	(107)
4.2	隧道方案	(111)
4.2.1	隧道火灾风险分析	(111)

4.2.2	隧道结构纵、横向稳定性风险分析 .....	(119)
4.2.3	高水压下隧道防水可靠性风险分析 .....	(125)
4.2.4	长距离隧道通风风险分析 .....	(132)
4.2.5	地震对隧道工程影响的风险分析 .....	(137)
4.2.6	盾构隧道结构耐久性风险分析 .....	(145)
5	河势演变风险分析 .....	(152)
5.1	长江口河段的河床演变 .....	(152)
5.1.1	长江口河势的演变 .....	(152)
5.1.2	南港河道演变 .....	(153)
5.1.3	北港河道演变 .....	(154)
5.1.4	小结 .....	(154)
5.2	南、北港河道稳定性概率分析 .....	(154)
5.2.1	南、北港河势变化风险因素层次分析 .....	(154)
5.2.2	咨询专家成果分析 .....	(154)
5.2.3	河床稳定性判断 .....	(156)
5.2.4	小结 .....	(156)
5.3	越江通道轴线河道横断面尺度变化概率分析 .....	(157)
5.4	河床演变对越江工程的风险评估 .....	(161)
5.4.1	桥梁方案 .....	(161)
5.4.2	隧道方案 .....	(166)
5.4.3	小结 .....	(167)
5.5	越江工程对河床演变的影响 .....	(167)
5.5.1	通风井对河床演变的影响 .....	(167)
5.5.2	桥墩对河床演变的影响 .....	(167)
5.5.3	小结 .....	(167)
5.6	风险防范措施 .....	(167)
6	越江工程对长江口生态环境影响风险分析 .....	(169)
6.1	分析目的 .....	(169)
6.2	风险源分析 .....	(169)
6.3	风险发生后对环境造成的危害 .....	(172)
6.4	水质预测计算模型和水质敏感区域 .....	(172)
6.5	风险分析计算 .....	(175)
6.6	预防及应急措施大纲 .....	(214)

7	恐怖袭击风险评估 .....	(216)
7.1	恐怖袭击定义及其趋势 .....	(216)
7.2	对于隧道与桥梁的恐怖袭击 .....	(216)
7.3	越江通道遭袭的危害分析 .....	(218)
7.4	风险评估 .....	(223)
7.5	研究结论和措施 .....	(225)
8	越江通道工程交通量预测风险分析 .....	(227)
8.1	交通量预测的风险因素识别 .....	(227)
8.2	交通量预测风险因素的安全指标确定 .....	(228)
8.3	交通量预测风险因素衡量 .....	(230)
8.4	交通量预测风险综合评定 .....	(234)
8.5	交通量预测风险对策 .....	(236)
9	财务风险评估 .....	(237)
9.1	财务风险分析的目标和方法 .....	(238)
9.2	财务风险分析的内容框图 .....	(238)
9.3	工程建设费用风险分析 .....	(241)
9.4	项目财务营运费用风险分析 .....	(246)
9.5	项目财务效益的风险分析 .....	(249)
9.6	财务风险评价及风险防范措施 .....	(252)
10	崇明越江通道各方案风险分析综合评价 .....	(257)
10.1	评价内容 .....	(257)
10.2	讨论及意见 .....	(258)
10.3	结论意见 .....	(261)
	参考文献 .....	(262)

# 1 风险分析的基本原理与方法

## 1.1 工程风险的基本概念

随着人类科学技术的进步,工程建设的规模越来越大,工程技术也越来越复杂。例如:隧道的直径越来越大,埋深越来越深,与此同时所使用的材料却越来越细薄,而且这种趋势今后还将继续向前发展。为保证工程建设的成功,工程师必须认识和避免工程在它的生命周期中潜在的可能失败。

然而工程有其自身的规律,它的表现也只按照它自身的规律来进行。工程师要完全理解并掌握这些规律是十分困难的。世界工程建设史上的许多工程事故和灾难就是因这个原因发生的。

风险分析就是研究处理复杂工程系统,辨识其中存在的各种风险,分析这些风险出现的可能性和造成损失的严重程度,提出控制风险的相关措施,以尽可能地防止或降低可能引发的各种灾害的技术手段。

有关风险工程的研究,最早可追溯至 20 世纪 40 年代。为解决飞机失事事故,使用可靠性定量化的方法,制定了飞机性能的可靠性准则和安全规范。然后在宇航和核领域中应用与发展。到了 20 世纪 70 年代,由美国原子能委员会主持并完成了一项具有重要意义的风险性评估“WASH-1400 反应堆安全性研究”。该研究分析了大量的各种各样的核事故,按其发生概率的大小为序,定量地分等级排列,从而评估其对公众可能产生的后果。该研究所运用的方法及其所起的作用对其他行业产生了重要的影响,致使世界各行业纷纷效仿,而得以迅速推广。

进入 21 世纪以来,风险分析也已融入了交通工程建设的领域。世界上一些技术先进的国家,甚至已把有关风险分析的内容作为设计要求写入了国家的设计规范或指南类的重要文件之中。

为进一步理解风险的概念,我们先来观察工程事故发生的过程。首先,在工程中发生事故之前,工程已处在一种不安全的状态,我们称之为危险(hazard)。在这种状态下,工程内部和外部的条件便构成完备的事故链,最终发生了事故。而事故的结果总是引起各种损失(loss),这种损失主要包括人身健康与安全损失、财产损失、工期延误和环境的破坏等若干方面。

危险的出现概率有多大?究竟会发生何种事故?可能导致何种损失?在事故发生之前都是不确定的。风险是指特定危害事件发生的概率和后果严重程度的总和,是描述工程系统危险程度的度量。风险  $R$  一般地可用损失量  $c$  和发生概率  $p$  的函数来表示为:

$$R = f(p, c) \quad (1-1)$$

在一些工程的实际应用中,常把上述公式中的风险  $R$  简单地处理为发生概率  $p$  与损失量  $c$  的乘积:

$$R = pc \quad (1-2)$$

由概率理论可知,上述风险的定义是以经典的长期相对频率概念为基础的。然而在目前

情况下,建设工程的风险分析主要是用于一些特大型的重点工程。风险分析所获得的预测概率值并不以长时期相对频率的数据为基础,因而这种“罕见事件”在本质上已不是原来经典统计推论而得的概率,而是一种专家的意见及相信程度的度量。

风险分析工作的主要内容包括:

(1) 风险辨识。寻找风险的来源(风险来自哪一种技术?风险发生在哪一个工程生命阶段?风险发生在哪一个工程部位?……)。

(2) 风险估计。用定性或定量的分析方法研究风险发生的可能性及其后果的严重程度。

(3) 风险评价。给风险评分评级,研究如何处理和对待风险。

在风险分析的基础上,采取措施和对策以排除和降低风险的过程,称为风险控制(risk control)。风险管理(risk management)是指风险分析和风险控制的全过程,它是一个以最低成本来最大限度地降低系统风险的动态过程。

工程师的责任是必须考虑和消去在工程建设与运营中可以预见到的各种风险。并做到以下几点:

(1) 避免风险。在风险分级中,第一步是尽可能地避免风险。这就要求有一个结构化的风险辨识过程,此时,首选的目标应是通过方案选择排除危险。如果有留下的风险,这些风险必须是可控制的,或者可减小的,并提供相应的控制措施。

(2) 提供信息。工程师必须提供有关风险的适当信息,使工程的建设者和使用者有足够的时间做好防止灾害的各种精神上 and 物质上的必要准备。

(3) 保持记录。工程师应该把有关风险的考虑、活动记录在案。虽然没有一条法规明确工程师必须这样做,但是,这对日后进行调查时的工作是非常有效的文档文件。

## 1.2 风险的分类

风险可以按照损失标的物(也称风险形态)、风险的来源、风险产生的工程生命阶段、风险损失的承受者等的不同而进行各种分类。

### 1.2.1 按损失标的物分类

按损失标的物可以将工程风险分为以下几点:

(1) 建设成本风险。各类事故灾害的发生往往都将引起工程建设的成本增加,以致超过预算。

(2) 建设工程风险。因事故的发生而延误了预定的建设工程的完成日期。

(3) 社会声誉风险。指对公司今后的业务关系的影响。

(4) 人员伤害风险。指人员伤亡、身体或精神的损害。

(5) 环境风险。是指对环境的破坏,如对大地、空气、水、生物生存环境的污染和危害等。

### 1.2.2 按风险来源分类

按风险来源可以将工程风险分为以下几点:

(1) 自然风险。是指自然界引起的不以人类意志为转移的各种灾害,如地震、台风、海啸、

地貌与河势的变迁等。

(2) 技术风险。是指在工程地质勘察、设计、施工、运营、管理和维护等工程生命阶段中,因技术考虑不足而引起各种事故的风险。

(3) 社会风险。是指国内外因政治、经济和文化等方面的原因引起的工程环境不稳定因素带来的风险,如对工程的恐怖袭击风险。

### 1.2.3 按损失的承受者来分类

按损失的承受者可以将工程风险分为以下几点:

(1) 社会风险。是指整个社会将承受的风险,如生态环境的污染、破坏,民众对社会的不满和抱怨。

(2) 企业风险。是指公司企业将承受的风险,如经济上、声誉上的损失等影响到企业的日后发展与生存。

(3) 个人风险。是指个人将承担的风险,包括人身的伤亡、精神追求、财产损失等。

### 1.2.4 按风险的可控制性来分类

可控制风险往往是由决策者自愿承担的风险,其后果也在工程的直接控制范围之内,例如新技术的采用可能导致风险,但因新技术可以带来声望和收益而使决策者自愿承担这种风险。在工程建设中区分风险的可控制性是十分重要的。按风险可控制性程度的不同可分为以下几点:

(1) 完全可控。指风险因素与后果完全处于可控制范围内的。

(2) 他方控制。指风险处于工程管理者不得不打交道的那些人的控制范围内,如来自银行的、消防的、质监部门的要求。

(3) 政府控制。是指如建筑规范、税率的调整、有关新政策文件的发布等。

(4) 大自然控制。来自诸如地震、恶劣天气等自然界。

显然,上述分类仅是相对的。实际上风险产生的原因往往是相互联系的,即所谓“天灾人祸一起来”。事故灾害造成的损失也常常是多方面的,其后果往往也是由社会各方面来共同承担的。

## 1.3 危险的辨识

危险的辨识(hazard identification)是发现、识别系统中存在的危险源的工作,是风险分析的基础,也是全部风险管理工作中最为重要的一项工作内容。

由于现代工程建设的规模庞大、技术复杂、综合性强,危险源又是“潜在的”不安全因素,有一定的隐蔽性,故危险的辨识工作是一项既重要又困难的任务。因而对于辨识人员的素质要求很高,必须具备相当的专门知识和工程实践经验。辨识人员的队伍也应该由各种专业人才组成。

### 1.3.1 危险辨识的方法

目前还没有一种固定的、能普遍适用的方法。但目前人们所使用的辨识方法大致可分为下面两种类型：

(1) 基于工程师直觉的判断。辨识人员根据以往相关工程，特别是以往类似系统已发生的事故，通过查找其中的事故隐患，再运用专门知识对现实工程中的危险因素作出判断。

这类方法具体实施时，可按照规范、规程或工程建设进程与生命周期等制作详细的风险检查表，然后进行“头脑风暴”式的调查，并汇总风险源。

(2) 基于系统安全的理论分析方法。系统安全分析可以揭示系统中可能导致事故的多种因素及其相互作用，从而用来辨识系统中的危险。现在已经有多种方法可以进行此项工作。

前一种方法的优点是简单易行，缺点是可能遗漏某些风险，特别是对于没有先例的新建系统，效果不佳；后一方法更适合复杂而没有事故经验系统的危险源识别。

### 1.3.2 主要工作内容

危险的辨别是风险研究的第一阶段，主要应做的工作是：

(1) 确定危险的种类（结构失效、火灾、施工中止等）；

(2) 确定该系统哪一部分是上述危险的来源（衬砌管片、接缝止水带、盾构掘进机等）；

(3) 规定研究的范围（如研究的内容是否包括人为破坏、地震、河势变迁、施工机械等造成的风险）。

总之，这一阶段的主要目标是广义上确定可能的潜在危险和规定所研究的系统。

## 1.4 风险的评估

风险评估也称安全评估。它是以实现工程安全为目的，综合运用有关的风险评估原理和方法、专业理论知识和工程经验，在对工程系统中存在的危险源进行辨识的基础上，研究工程发生事故的可能性及其产生后果的严重程度，并进行分类排序，从而为进一步的风险控制措施与策略提供依据。

### 1.4.1 事故发生可能性的度量——风险概率

工程事故的发生受许多不确定的因素控制，它的发生时间、地点、形式、规模也是不确定的。数学中是用概率来描述和度量这类不确定事件的，并已建立起较完备的理论体系——概率论。在决策时，概率可以用来表示事件的确定性程度。概率在风险评估与决策中起着举足轻重的作用。为更好地运用概率来进行风险评估，应该对风险分析中所使用的概率作更进一步的理解。

根据概率理论，概率本身的含义有两种不同的说法。一种是所谓的“客观概率”。客观概率论者认为概率是对事物的长期的重复出现进行统计分析而获得的结果。因而，概率只能用于可重复出现的事件，并进行多次重复观察的事件。

另一种是所谓“主观概率”。主观概率是反映决策者基于可获得的信息，对事件认识的确

信程度。当然,这些信息应该是准确可信的,数据形式是标准化的、前后一致的。

这两种不同含义的概率都会自觉或不自觉地同时被应用在工程建设的实践中。譬如,在工程师进行钢筋混凝土截面的配筋设计时,就使用了基于客观概率的方法。但是对于建设工程来说,这些工程往往具有的是唯一性,而并不具有如流水线上生产出来的产品那样的重复性。因此,对于建设工程领域中的风险分析与决策研究中概率的提法更多地属于主观概率范畴。

基于同样的经验与信息,不同的决策者对主观概率的判断是不同的。这与决策者的工程经验、学识修养,乃至价值观、个性及偏向等诸多因素都有关系。通过运用主观概率,可以将不确定的情况转化为风险情况。要使主观概率可以被接受,甚至优于客观概率,关键在于如何正确地来确定主观概率。为此,在采取决定前应尽可能地具备相应的知识,并用分析、综合、模拟、试验等方式尽可能地消除无知。然后在此基础上,可用一些风险理论中的标准方式来确定主观概率值。例如塞维奇博彩法就是其中的一种方法。这种博彩法是用放在盒内的具有不同颜色的色球模拟不同的随机事件,以色球的数量模拟不同的概率,并组成各种不同打赌的组合。如果决策者愿意选择作为现实情况的某种组合打赌,我们就可以根据盒内色球的颜色和数量计算出相应的概率。运用塞维奇博彩法的理论基础是现实情况与色球组合间概率的相似性。因而,必需的前提是决策者给予现实情况与色球组合的概率是一致的、连贯的,至少是定性的。

上述建设工程项目的风险分析中使用的概率具有较多的主观概率因素。这一本质特征对整个风险评估,乃至决策带来了很大的影响。事实上,整个风险分析理论中处处都渗透着这一主观概率特征的细胞。

## 1.4.2 风险评估工作的分类

风险评估按工程的生命周期及评估目的可分为风险预评估、风险验收评估、现状风险评估等多种类型。

风险预评估。是以工程建设的可行性研究报告为依据,在初步设计之前进行的风险评估研究,用以预测建设项目中可能存在的风险及其应对风险的对策、措施及建议,为建设项目的初步设计提供依据,以保障工程建设的成本效益。

进行风险验收评估需要提供详细的设计与竣工文件和现场实际情况作为评估依据,对设计与施工中的缺陷或不足之处提出整改措施。

进行风险现状评估除需要提供与上述风险验收评估的相同材料外,还应提供维护、修缮和运营的相关材料。必要时,还须做许多工程材料性质和结构、使用等方面的检测工作。风险现状评估可以对工程的继续使用提供依据,甚至可以预测继续使用的工程寿命。

## 1.4.3 风险的评估方法

### (1) 量化的风险评估过程

美国原子能规章委员会 1975 年公布的研究报告 WASH-1400,是商业核工业概率风险评估的奠基之作。它的评估技术已广泛地应用于其他的工业领域,如汽车、食品安全、环境、石油化工和航天工业。了解与掌握这些经典的风险评估方法,一定会对自己的评估项目带来益处。

图 1-1 是经典的风险评估过程。其中第一步是定义评估的对象。这一步常有被忽视的可能,但许多工程师却因此而浪费了宝贵的时间和资源。在定义评估对象时,应清晰地说明评估的对象、范围、目的和所关心的破坏状态。这是一个界定问题的步骤。如果对象和目标不清楚,评估的结果也不会是清楚的。一份连对象与目标都不甚清楚的报告,很难让人相信它的价值。这一步也包含了风险感知的过程。

第二步是确定所考虑的风险系统。大部分的风险仅涉及全系统的一部分,从而构成所要研究的(子)系统。

第三步是研制事件列表,列出所关心的各种事件。这可能用多种方法来进行识别与研究,例如用危险分类法识别体现最关心的那种危险的事件,故障树法可以细化事件是如何可能发生的,破坏模式与效用分析(FMEA)可以绘出特定的元件引发事件时的具体破坏信息。

由此制定出描述危险事件列表的功能事件树(第四步)。事件树显示了危险事件的发生与危险控制间的关系,对列表中的每一事件计算其破坏概率(第五步),先前量化的系统故障树此时将会十分有用。

第六步是确定风险的后果。评定的方式可以是定性的。类似的破坏状态也可以用多种方式进行定量的分析。具体的方法取决于分析后想要获得的结果。如用成本利润分析得到一个偶发事故等于多少金额的货币。也可以找到因事故而引发的人员伤亡数、环境损失值等。

在风险评估中,要对各种风险进行计算其风险值,并绘成风险断面图,风险断面图可方便于比较各种风险,并能更好地理解各风险的危害程度。这对于风险管理是非常重要的。

风险管理是决定如何配置风险分析中已被识别风险的决策过程。在第一步中已经感知的每一个风险,都应列入风险管理的内容,不应有所忽视。

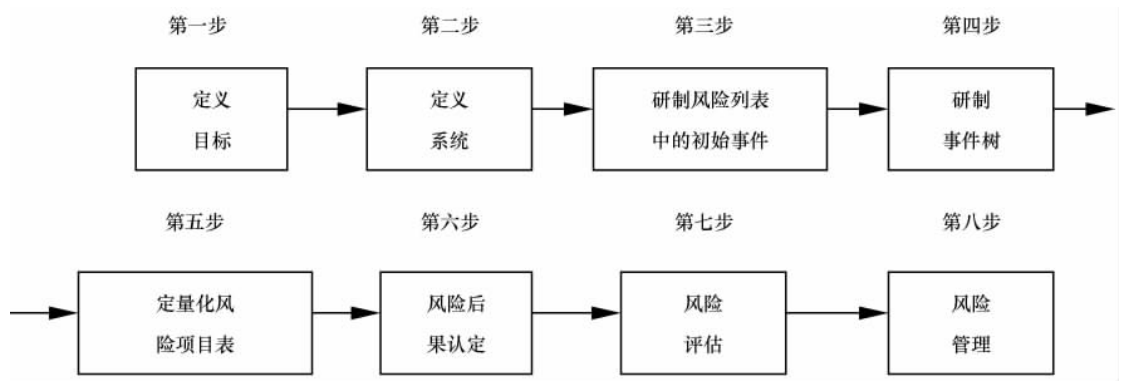


图 1-1 风险评估的过程

## (2) 定性和半量化的风险评估过程

工程建设中的风险评估往往采取半量化或定性的风险分析与评估,所采用的工作过程也不一定完全按上述流程全盘照搬。实际工作大致可分为下述 4 个工作阶段:

① 准备阶段。明确评估的对象、要求和范围,熟悉有关的文件资料,进行现场调查。

② 初步危险分析阶段。确定危险的种类及其来源。初步分析引起事故的事件链以及有关的措施和事故后果,在这基础上根据实际评估工作的需要将工程建设项目分成若干个评估单元。划分评价单元的原则可按专业领域、危险因素的类别、事故的性质与评估组成员情况灵

活地划分,使评价单元相对的独立,且具有明显的特征区别。

③ 风险研究阶段。首先要确定评估的方法,以确定事故发生的可能性和后果的严重性。传统的风险分析方法是事件树法和故障树法。前者是归纳式的风险评估方法,后者是演绎式的风评估方法。两者都是定量化的分析方法。但大型交通工程规模庞大,学科综合性强,技术复杂,完全的量化分析极为困难,而且过分投入定量数字的研究,反而可能忽略评估工作的最主要目标。

因而,正如英国“隧道衬砌设计指南”(tunnel lining design guide)所建议的:对于一般的工程,使用定性的评估方式已可以了。对于重大工程则建议使用半定量半定性的评估方法。

然后根据选定的评估方法,对危险因素导致事故发生的可能性和严重程度给出破坏概率值和损失值,或者给出评分值。并最终给出风险的等级,为制定风险对策与措施提供依据。

④ 提出安全措施及对策建议阶段。根据上述风险研究阶段得到的评估结果,提出摆脱、消除、减弱、转移或接受风险的策略和相应的技术与管理措施建议。

#### 1.4.4 风险分级的方法

理想的风险分级应该根据风险的基本定义  $R = pc$  进行。显然只要能够定量地算得风险值  $R$ ,风险的分级便有了毫无争论的基础了。但因上述理由,实际工作中运用的是半定量的分析法,甚至是完全的定性方法。因此也需要有一个适合的风险分级方法。

目前广为采用的方法是美国国防部 1993 年的“系统安全计划要求”M 1-STD-882C。使用该法分级风险是非常容易的。一般可分成 3 个步骤实现:①对工程的风险损失评分;②对工程的风险概率评分;③根据损失评分值与概率分值,把风险放入风险评估矩阵进行分级。

表 1-1 和表 1-2 是风险分析中应用得最多的危险严重度和发生概率的定性分类。

表 1-1 风险严重度分类

描述语	分类	定义
灾难性的	I	死亡,系统失效,严重的环境破坏
严重的	II	严重伤害,严重职业病,主系统或环境的重大损坏
边际的	III	少量伤害,轻度职业病,次系统或环境的受损
可忽略的	IV	更少的伤害,更轻度的职业病,更轻的次系统或环境影响

资料来源:美国国防 1993“系统安全计划要求”M 1-STD-882C。

表 1-2 定性的危险概率水平

描述语	水平	项目说明	发生情况
频繁的	A	可能频繁地发生	连续发生
可能的	B	在项目的生命周期中将多次发生	常常发生
偶尔的	C	在项目的生命周期中可能发生几次	有时发生
很少的	D	在项目生命周期内仍有可能发生	不太会的,但仍有理由发生
几乎不可能的	E	可以认为不可能	仍有可能性

注 1. 描述语的定义可在定量分析后作修正;

2. 发生情况的具体数据应进一步定义;

3. 资料来源:美国国防部,1993,“系统安全计划要求”M 1-STD-882C。

危险概率水平反映了在项目的给定周期内,危险将要发生的可能性。在一个项目的初期,

或对于一个缺乏足够的定量信息的项目,要确定一个定量的值是十分困难的。但是这里并不排除定量地确定危险的数值概率。事实上,如果项目有足够的的数据,数值概率的水平一般要好于仅仅根据定性分析而得的值。具体操作可参见传统的概率与统计参考书籍。当然还有许多方法可以进行定量的概率分析。本书后叙各章将有较详细的阐述。

在进行了上述危险的严重度和概率水平评分后,即可以应用表 1-3,进行危险水平的评级。这是一种相当简便的风险评估矩阵,在风险分析中也是用得较多的一种。

表 1-3 风险评估矩阵

风险的频率	(1)	(2)	(3)	(4)
	灾难的	重大的	边际的	可忽略的
(A) 频繁( $x > 10^{-1}$ )	1A	2A	3A	4A
(B) 可能( $10^{-1} > x > 10^{-2}$ )	1B	2B	3B	4B
(C) 偶尔( $10^{-2} > x > 10^{-3}$ )	1C	2C	3C	4C
(D) 很少( $10^{-3} > x > 10^{-6}$ )	1D	2D	3D	4D
(E) 几乎不能( $10^{-6} > x$ )	1E	2E	3E	4E
危险性指标	风险决策准则			
1A, 1B, 1C, 2A, 2B, 3A	不可接受的,停止运作,立即改正			
1D, 2C, 2D, 3B, 3C	不希望的,由上层管理决策,是否接收或拒绝风险			
1E, 2E, 3D, 3E, 4A, 4B	可接受的,但须经管理部门复审			
4C, 4D, 4E	可接受的,不需经管理部门复审			

资料来源:美国国防部,1993,“系统安全计划要求”MIL-STD-882C。经 N·J·Bahr (1997)修正。

这里的风险概率可以用定性的,或者用定量的方法获取。上述评分表中同时显示了两种方法。如果分析者希望以定量的方式得到概率的范围,则必须清晰地理解这个概率范围是如何得到的。一旦对某一个事件进行定量的分析,该事件的函数将被视为一个离散型的函数,而不是连续函数。美国宇航局在阿波罗计划的早期,曾遭遇这个问题。定量的分析值表明:飞驶月球是太危险了。而把同一使命用定性的方法重新分析,却显示为是可行的。这是一个很好的例子,说明数字可以产生误导。因为美国宇航局所着手做的是人类从未做过的事,要量化这样的风险是十分困难的。

## 1.5 风险决策

经过风险评估,得到风险的分级后,进入了风险决策阶段,这时要对风险进一步按处理优先的级别排序,要决定风险可接受的准则,要对风险进行控制等一系列的决策活动。风险决策应从理解工程系统中最脆弱的联结点出发,按下列选择原则进化优化决策:

- (1) 最优选择应是完全避免或消除风险的潜在因素;
- (2) 第二位的选择应是早早控制住风险,不让它发生;
- (3) 第三位的选择是降低或减轻事故发生后的灾害。

### 1.5.1 风险按处理优先级别的排序

风险项目的评价标准确定后,应对所有风险分列排序,并确定哪些风险项目因其潜在的危害太大而完全地避开,哪些风险项目应纳入一般的管理轨道,哪些项目的风险足够小,以致不必付出太多的管理成本。风险项目按处理优先级别的排序可能因为一系列原因被复杂化,例如可能遇到与下述两例相似的情形。

机会与危险可能以意料之外的方式相互作用。例如,美国巴拿马运河施工中第一年工程的延迟,提供了重新研究一个多重闸门的机会。运河工程的总工期反而因此而缩短了。

单个的风险项目可以引起多种后果。例如,早期巴拿马运河的施工中发生的反复地层滑坡,引起了严重的伤亡、成本超支和计划进度的延迟。

### 1.5.2 风险的接受准则

工程建设中总存在着诸多不确定性。而且工程师不可能把这些不确定的东西全部弄清楚后再建设,因而在工程建设中,工程师必须接受这些风险和不确定性。风险的接受取决于风险评估的准确程度,风险可以被控制在什么范围之内以及承担风险后可以得到多少回报。

风险评价的标准是为管理服务的。风险评价标准的制定必须是科学的、实用的,它的制定应符合国家和地方的环境保护、卫生标准、劳动防护等相应政策规定的要求。标准的条款应反映公众的价值和灾害承受能力,同时又必须考虑社会的经济承受能力。标准过严,社会无法承担过高的经济成本,也会阻碍社会经济的发展。因而风险评价标准的确定本质上是一个寻求最优解的过程。

具体的风险可接受程度对于不同的行业、不同的工程规模和不同的决策者对风险的态度而有着较大的差别。下面是两个较著名的制定可接受风险程度的例子。

一个例子是由加拿大标准协会制定的关于海洋钻井平台的规定:对于能引起大量生命伤亡或环境重大破坏的风险,其概率不得超过  $10 \sim 5 \text{ 人} \cdot \text{a}^{-1}$ 。而对于那些人身安全风险小或对潜在的环境破坏较小的,则规定其风险概率值不超过  $10 \sim 3 \text{ 人} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

另一个例子是美国核能委员会于1986年对核电站规定的两个定性和定量的可接受风险准则。

#### (1) 定性的准则

① 在核电设施附件的公众应得到恰当的防护,以免招致因核电站运营而引起对人身和健康受到实质性的连带风险;

② 由核电站运营引起的集体人身安全风险不得超过比其他可行方式发电所产生的风险,并且不应对其他的集体风险有实质性的增加。

#### (2) 定量的准则

① 因核电站事故引起的电站周围人身直接死亡的概率不得超过美国其他事故引起的人身直接死亡累积总数的  $10^{-5}$ ;

② 核电站邻边地区居民的癌症死亡率不超过包括所有原因引起的癌症死亡率的  $10^{-5}$ ;

③ 当考虑降低某些人员的防辐射措施时,社会因减少辐射死亡而获得的好处应能与为降低辐射而投入的1000美元(每人每雷姆)的金额成本相匹配;