

图书在版编目 (CIP) 数据

工程风险分析技术/戴树和等编著. —北京: 化学工业出版社, 2006. 7
ISBN 7-5025-9162-1

I. 工... II. 戴... III. 项目管理-风险分析
IV. F224. 5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 087213 号

工程风险分析技术

戴树和 等编著

责任编辑: 周国庆 李玉 辛 田

责任校对: 王素芹

封面设计: 尹琳琳

*

化学工业出版社 出版发行
机械·电气出版分社

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市振南印刷有限责任公司印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 20 1/4 彩插 1 字数 510 千字

2007 年 1 月第 1 版 2007 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-9162-1

定 价: 46.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

序

由于人的认知、综合、分析、判断能力的局限，由于科学理论、技术手段的局限，准确把握事物发展的客观规律总是存在着许多困难。事物的发展往往存在着许多不确定因素，而不确定因素中又往往蕴含着风险，风险在人类认识世界、改造世界、创造新世界的各种活动中普遍存在。现实生活中，如果没有任何风险，我们或许永远不会有来自意外的收获和惊喜。高风险的经济活动往往带来高收益，高风险的科学研究往往实现科学理论的新突破。风险锻炼人的意志，风险培养人的智慧，风险提高人们应对各种复杂局面的能力，风险使我们的生活充满挑战和乐趣，人类在与风险进行的博弈中成长进步。于是对各类高风险的活动，诸如珠峰攀登、峡谷漂流、太空飞行、科学探险、股票买卖、期货交易、风险投资等，许多自然人和经济人都表现出极高的热情，积极参与其中。但是从事有风险的活动就可能失败、出事故、遇灾害、受损失，风险往往带给人们许多失望、焦虑、痛苦和恐惧。如何认识风险、评估风险、管理风险、规避风险，处理风险损失，在参与充满风险的活动中得到意外的成功，获取丰厚的回报，成为人们十分关心的问题，于是“风险研究”受到了高度重视。“降低风险技术”已为世人瞩目，并被列入国际公认的二十一世纪的先进技术之中，正在迅速发展。

风险存在于人类从事的各类社会经济活动中，风险的内容呈现多元化的特征，有工程类风险、经济类风险、政治类风险、自然灾害类风险等，各类风险还可细分。各种风险之间可能互相关联、互为诱因。各类不同性质的风险控制与管理，规避风险的技术策略和方法也不尽相同。

工程风险分析技术专注研究工程类风险，是近年新兴的技术，它的内容涉及许多新学科与新技术，如失效物理学、断裂力学、有限元应力分析技术、结构完整性评定技术、腐蚀与防护、模糊集理论、可靠性工程学、环境科学、安全工程学、管理科学以及近代经济学、社会学等有关理论。

实施工程风险分析技术的要求是：利用工程风险分析技术的原理和技术路线，对不同性质的风险，统筹规划，分类处理，制订适合国情的风险评价相关标准与规范，建立基于风险控制与管理机制，研究制定规避风险策略，努力实现杜绝特大事故、遏制重大事故、减少一般事故的安全管理目标，为经济和社会协调发展做出贡献，为安全生产和保护资源环境、保障可持续发展战略的实施发挥作用。

根据这些要求，在我国工程风险分析技术的发展正值方兴未艾之际，由从事工程风险分析技术研究并享誉国内外的知名学者——南京工业大学戴树和教授主编的《工程风险分析技术》一书由化学工业出版社正式出版发行。本书的问世，可谓正当其时。

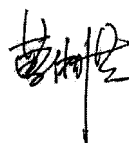
本书内容丰富，有许多新颖之处，如不仅将模糊综合评价法、模糊极值函数法、可拓工程方法、可信性方法和马尔可夫随机过程等作为理论方法引入风险分析中，而且介

绍了有效地用于工程实际的实例，这在同类书籍中尚未见诸报道。

本书除了系统阐明风险分析技术的理论之外，更重要的是将作者们多年积累的学识和工程实践的成功经验，包括获国家级和省、部级重要奖项的研究成果作为应用案例列入书中。本书具有较高的学术价值和工程应用价值。

深信这本书的出版将有助于我国工程风险分析技术的发展，特向读者郑重推荐。

中国工程院院士
中国石化股份有限公司高级副总裁
中国化工学会理事长



2005年8月

前 言

根据记载，人类早在欧洲文艺复兴时代，就将“风险”一词赋予威胁人类安全的含义，并且提出了控制风险、管理风险作为降低风险威胁和保障人类安全的手段。然而，就管理目标和对风险解释而言，却形成了两种哲学思维的观点。一种是实证论（Positivism），对于风险的控制，预先设定明确的目标，利用所有可能的资源和手段使这个既定目标实现，从而缓解风险的威胁。另一种是后实证论（Post Positivism），对风险的控制，不预先设定明确的目标，而是强化主体能力，以抵御风险可能造成的损失。

目前，风险多元化的内容已逐渐形成，如工程风险、人文风险、政治风险、经济风险、环境风险、灾害风险、个人风险、公共风险等。针对各类不同性质的风险，控制与管理风险的不同策略和方法也应运而生。特别在当今高新技术发展过程中，高新技术创新使用了新方法，甚至采用欠成熟的技术；高新技术产品试图“动摇”现有市场并获取超常回报；高新技术产业在经济上要求高的期望值以及按照一般规律，创新成功率总是偏低，凡此种种，都存在着大量未可预计和难以确定的因素。而不确定性是风险的根源。风险威胁体现在诸多领域，人们对有效地规避风险和降低风险水平的渴求甚为强烈，工程风险分析技术的研发已是众所期盼，迫不及待。

1979年美国三哩岛核电站事故，1984年美国联合碳化物公司印度 Bhopal 农药厂异氰酸甲酯毒气泄漏事故，1986年美国挑战者航天飞机失事和1986年前苏联切尔诺贝利核电站事故等特重大事故，给人们带来了灾难性的后果，影响至深，震撼了全球。除此以外，由于投资风险、市场风险和其他一些原因导致跨国大公司（如美国的 Enron 能源公司和 MCI-WORLDCM 通信公司等）宣告破产的事件也屡见不鲜。这些重大事件发生后，风险社会化、国际化的趋势备受瞩目。1995年在美国旧金山举行的国际制造业大会上，将“降低风险技术”列为21世纪将要重点发展的新兴技术之中，该项新兴技术被列为21世纪的闪光技术（Emerging Technologies, ET）之一。另外，2002年在美国纽约举行的国际技术峰会上，预测21世纪前20年技术发展有3大热点，它们是：能源工程、信息技术和纳米材料产品，每种技术都将带动一批学科发展。风险工程与管理被列入能源工程将要带动发展的学科之中。

至此，风险分析技术作为一项国际公认的新兴技术，得到了蓬勃发展，受到工程界、经济界和学术界人士的高度重视。

本书作者们所在科研组在国家自然科学基金4次立项资助 [批准号：842085 (85213), 5680190, 59175193, 59575028] 和江苏省自然科学基金（批准号：BK93122411）以及有关部委、企业支持下，于20世纪80年代初率先在我国化工设备领域开展可靠性分析的研究。20余年来，运用概率风险分析（Probabilistic Risk Assessment, PRA）技术开展了秦山核电厂国产核容器重要部件焊接质量疲劳评定的试验研究

和可靠性评估；在我国第八、第九、第十个五年计划期间分别开展了含缺陷压力容器与压力管道安全评价工程方法的研究，无论理论上或者工程应用上都取得了一定成绩。近年，连续获得国家及省部委的重要奖励：国家科技进步二、三等奖各一项，原国家石油和化学工业局科技进步一等奖、江苏省科技进步一等奖各一项和其他奖项。其中一项被国家科技奖励办公室作为 2000 年国家最新实用科技成果推广项目向全国推广。

近几年来，随着研究工作的深入，本书作者们对可靠性工程学学科相关的“工程风险分析技术”的研究，也取得了一定进展。本书一部分内容即选自作者为研究生开设的风险工程学课程教材，除此以外，还介绍了当今广为应用的基于风险检测（Risk-Based Inspection, RBI）技术，上述获国家级和省部级重要奖项的研究成果作为应用案例亦列入书中。

本书第一章绪论主要论述工程风险分析技术的内容、国内外发展概况以及在安全工程和项目投资风险评价等领域中的应用。

第二章风险辨识从物质危险性、设备危险性、工艺过程（系统）危险性和人的危险性等 4 个方面进行分析，其中对设备完整性评价、美国道（DOW）化学危险指数法、状态转移中马尔可夫（Markov）随机过程等作了较为详尽的阐述。

第三章失效可能性预测包括失效物理模型、失效可能性分析、失效概率计算，含缺陷结构失效概率计算、失效可能性模糊预测方法等 5 个部分。工程风险分析技术的基础理论，如失效物理模型、故障树分析、一次二阶矩法、蒙特卡罗（Monte Carlo）随机模拟法、模糊综合评价法等内容尽在本章中。

第四章失效后果严重性预测按照安全学科体系进行编撰，涉及失效与灾害的类别，爆炸、火灾、泄漏、中毒等灾害造成损失的计算等。在此基础上论述了失效后果严重性模糊评价方法和可拓工程方法在失效后果严重性预测中的应用。可拓工程方法的研究对象是客观世界的矛盾问题，它的理论基础是物元理论和可拓集合理论。本章对此有较详细的阐述。

第五章风险评价的内容是在前两章关于失效可能性预测与失效后果严重度预测基础上进行综合，以求得风险的级别，并论述风险可接受准则判定的原则。

第六章基于风险检测技术是当今石化、炼油等领域广为应用的一种技术，对于它的基本概念、技术路线、技术内容、检验策略、数据库结构等内容，本章均作了较详细的论述。

第七章工程建设项目风险评价与管理着重论述工程项目风险识别、风险分析、风险评价与管理的内容和方法，包括 6 种风险识别方法和 5 种风险评价方法。对于盈亏平衡分析和敏感性分析做了较详尽的论述。对工程项目风险管理、风险控制理论、风险应对策略，以及风险监控方法等亦做了扼要介绍，并附 9 个算例，供读者参考。

第八章工程风险分析技术的应用案例包含了本书作者们近年在工程风险分析技术和可靠性工程领域的 9 个工程应用项目的主要内容，作为实践案例列入书中，请读者批评指正。这些项目绝大多数都取得了良好的效果，并获重要经济效益和社会效益，其中一些获国家级和省、部级重要奖励。

本书的编著和出版得益于本书作者们所在科研组全体同仁多年来教学和科研工作的实践，以及国家自然科学基金会、江苏省自然科学基金会和有关部、委与企业的大力支持。

感谢南京工业大学长期对作者们在学科建设和教学、科研工作的支持与指导。

感谢中国石油化工股份有限公司高级副总裁曹湘洪院士对作者们科研工作的支持与指导；并为本书作序。

感谢中国石油化工股份有限公司安全环保部和科技开发部对作者们科研工作的支持、指导与帮助。

感谢化学工业出版社对本书出版给予的支持、指导与帮助，前总编辑郭长生和前副总编辑张红兵对本书提出了宝贵意见和建议。

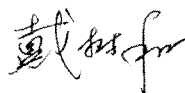
感谢中国信达资产管理公司资产管理部经理、河海大学在读博士、高级经济师何永玲审阅了本书第七章的内容，提出了宝贵意见和建议，并为本书撰写了第八章第四节的案例。

感谢金陵石化工程有限责任公司原副总经理程松林对本书第七章撰写过程中的支持与帮助，并审阅了该章的内容。

本书在编写过程中，参阅了国内外学者的有关著作和科学论文，对他们给予的启示，在此表示由衷的感谢。

本书第一章，第二章第二、四节，第七章，第八章第一节、第二节中一、第三节中一由南京工业大学戴树和教授撰写；第二章第一、三节和第四章由南京工程学院副教授张艳丽博士撰写；第三章第一、二、三、五节和第四节中一、二、三由南京工业大学黄文龙教授撰写；第三章第四节中四和第六节，第五章，第六章，第八章第二节中四和第三节中三、四由南京工业大学教授赵建平博士撰写；第八章第二节中二、三，第三节中二由南京工业大学教授周昌玉博士撰写；第八章第四节由中国信达资产管理公司资产管理部经理、河海大学在读博士、高级经济师何永玲撰写。全书由戴树和统稿。

工程风险分析技术涉及多学科领域，内容宽广。作者们尽管在科研和教学实践中对本书的体系、结构和内容作了思考，但限于水平和涉猎的知识面狭窄，加之编著时间短促，虽然某些章节多次易稿，进行修改，但不妥之处，可能仍不在少，敬请读者批评指正。



2006年7月

目 录

第一章 概述	1
第一节 工程风险分析技术	1
一、“安全”的学科体系	1
二、“风险”的含义	1
三、工程风险分析技术的内容和方法	3
四、国内外发展概况	4
第二节 工程项目决策筛选	6
一、概述	6
二、投资风险	7
三、项目评价与筛选	8
参考文献	9
第二章 风险辨识——危险性分析	11
第一节 概述	11
第二节 物质危险性	11
一、危险物质及其分类	11
二、物质危险性的辨识	16
第三节 设备危险性	21
一、概述	21
二、设备危险性辨识	21
三、设备危险性辨识调研提纲（实例）	23
四、基于危险性分级的设备重要度	28
五、设备完整性评定	30
第四节 工艺过程危险性	31
一、概述	31
二、道（DOW）化学公司火灾、爆炸危险指数法	32
三、蒙德（Mond）火灾、爆炸与毒性危险指数法	38
四、日本六阶段法	45
五、危险度分级	47
第五节 人因失误	47
一、概述	47
二、人因失误产生的原因	50

三、人因失误的预测	51
四、状态转移过程中计及人因失误的装置可靠性预测	55
五、人因失误的预防	58
附录	60
拉普拉斯变换 (Laplace Transforms)	60
参考文献	60
第三章 失效可能性预测	62
第一节 基本概念	62
一、概述	62
二、失效概率与可靠度	63
第二节 失效物理模型	65
一、应力-强度干涉模型	65
二、最弱环模型	71
三、纤维束模型	73
四、反应速率模型	73
第三节 失效分析方法	75
一、失效模式和后果分析 (FMEA) 法	75
二、故障树分析 (FTA) 法	76
三、事件树分析 (ETA) 法	83
第四节 可靠度指数和失效概率	83
一、可靠度指数	83
二、一次二阶矩法 (FOSM)	83
三、非正态变量转变为当量正态变量的方法	89
四、蒙特卡罗方法 (Monte Carlo Method)	95
第五节 含缺陷结构失效概率的计算	103
一、概述	103
二、含缺陷结构的安全评定	104
三、含缺陷结构失效概率的计算	105
第六节 模糊集理论及失效可能性模糊预测方法	109
一、模糊集合及其运算	109
二、隶属函数的确定	111
三、模糊关系与模糊矩阵	111
四、模糊语言变量	113
五、模糊极值函数	114
六、模糊综合评价	115
七、模糊故障树分析	118
八、失效可能性模糊预测	119
参考文献	121
第四章 失效后果严重性分析	124
第一节 失效与灾害	124

一、概述	124
二、灾害类别	125
三、灾害后果严重度的表征	125
第二节 灾害损失计算	127
一、爆炸	127
二、火灾	134
三、泄漏	136
四、中毒	139
第三节 失效后果严重性模糊综合评价方法	142
一、概述	142
二、模糊综合评价法的应用	143
第四节 可拓工程方法及其在失效后果严重性分析与预测中的应用	148
一、概述	148
二、基本概念——物元理论和可拓集合理论	148
三、关联函数及相关函数的运算	149
四、可拓工程方法的运算	150
参考文献	157
第五章 风险评价	158
第一节 风险的表征方法	158
第二节 风险可接受准则制定方法	160
一、确定风险可接受准则的基本原则	160
二、风险可接受准则的影响因素	160
三、ALARP 准则	160
四、风险可接受准则	161
五、基于模糊集理论的压力容器风险可接受准则	162
第三节 企业职业伤害风险指标	163
一、社会风险	163
二、一些国家推荐的职业伤害风险指标	164
三、我国的职业卫生评价指标	164
参考文献	167
第六章 基于风险检测 (RBI) 技术	168
第一节 RBI 的基本概念	168
一、概述	168
二、RBI 特点	168
三、RBI 在国内、外的发展概况	168
第二节 工作范围	170
一、定性风险分析	170
二、定量风险分析	170
第三节 技术路线	171

一、RBI 的总体思路	171
二、RBI 的执行过程	172
第四节 技术内容	172
一、失效可能性分析	172
二、失效后果分析	181
三、风险表征	188
第五节 检测策略	188
一、检测方法及其检测有效性	188
二、RBI 检测策略与常规检测方法的对比	191
三、检测策略	191
第六节 数据库结构	193
一、RBI 的数据需求	193
二、RBI 的评价结果	196
参考文献	199
第七章 工程建设项目风险评价与管理	201
第一节 工程建设项目风险识别与风险分析	201
一、概述	201
二、检查表法 (Checklist Method)	201
三、工作分解结构 (Work Breakdown Structure)	203
四、态势分析 (SWOT) 法	203
五、德尔菲 (Delphi) 法	205
六、集思广益法	207
七、基于可信性的风险识别、分析方法	207
第二节 工程建设项目的风险评价	209
一、概述	209
二、工程建设项目风险评价方法	209
第三节 工程建设项目风险管理	220
一、概述	220
二、项目风险管理内容	221
三、风险的应对	224
四、风险监控	226
参考文献	228
第八章 工程风险分析技术的应用案例	229
第一节 概述	229
第二节 失效分析与寿命预测	230
一、超高压换热器的失效分析与寿命预测	230
二、热壁加氢反应器寿命预测的研究	235
三、基于分形论定量金相技术加氢反应器寿命预测研究	243
四、在役含缺陷冷凝器的失效分析与寿命预测	247

第三节 风险分析与控制.....	254
一、巨型液氨球罐应力腐蚀开裂的风险控制.....	254
二、某市使用 20 年以上地下燃气管网安全评价	264
三、高压加氢裂化装置风险控制与管理.....	268
四、在役安全阀的风险分析.....	275
第四节 工程项目的风险分析与评价.....	283
一、工程项目概况.....	284
二、工程项目风险识别.....	284
三、风险分析与预测.....	285
四、投资风险的敏感性分析.....	286
五、风险对策.....	292
六、结论.....	292
参考文献.....	292
附录	294
附录 A 常用危险化学品法律法规和标准	294
附录 B 中华人民共和国国家标准重大危险源辨识	299
附录 C 工程风险分析常用标准和主要文件目录	304
附录 D 美国风险与保险学会制订的危险性风险管理 101 准则.....	306
附录 E 正态分布表	309

第一章 概 述

第一节 工程风险分析技术

一、“安全”的学科体系

安全问题是人们生产和生活所必须面对的重要问题。它包括治安或保安 (Security) 和安全 (Safety) 两个领域。本书内容仅涉及后者。

“安全”作为一门学科,于 1992 年在我国国家标准《学科分类代码》(GB/T 13745—1992) 中被列为一级学科,命名为“安全科学技术”,其下设置安全科学技术基础、安全学、安全工程、职业卫生工程 and 安全管理工程 5 个二级学科和 24 个三级应用学科。

安全学科的研究对象是人类活动中的负效应(即事故),研究它们发生的机理和发展的规律。傅贵认为^[1], 事故发生的规律基于三条原则:

- ① 任何事故的发生都有其因果关系;
- ② 任何事故都是由人和物两方面原因引起;
- ③ 事故发生符合“事故三角形”规律。

这里的“事故三角形”规律指的是一次重大伤亡事故之前可能已经发生了原因类似的 30 次轻的伤亡事故和 300 次无伤亡的事故^[2,3]。在人们的日常生活中,这是一条普遍的规律,“30”、“300”是将人生哲理在安全学科中进行比喻的量化数值。

安全学科的研究方法有多种,下列两种是普遍采用的方法:

① 统计监测法。它是将过去发生的事故,按照专业类别、失效机理、伤害模型、损失严重程度等进行统计分析,并随时更新数据库,进行动态监测,寻求事故发生的原因,发现事故发生的规律,进而为建立控制事故发生的管理机制提供科学依据。

② 抽样分析法。一般是通过问卷进行调研,根据答卷进行分析,或用文字表述或用评分求得统计结论。

安全学科是一门综合性学科,各种交叉学科形成了它的应用学科体系(如上述的三级学科)。表 1-1 示出其中一些学科的例子。

这里需要提及的是,在表 1-1 所列各学科中,“风险分析”已成为当代安全工程学科中迅猛发展的领域。

二、“风险”的含义

引发人们安全问题的主要根源是危险。危险的定义是可能产生潜在损失的征兆。危险对人们生命、健康、财产、生产活动、生存环境和生活质量等会产生负面效应的威胁。至于危险发生的可能性有多少,什么条件下才会发生,有没有办法使危险发生的概率降到最低,或者有无控制危险发生的策略;以及危险一旦发生,它对人们生产、生活造成的负面效应严重程度有多大,有无防范措施使损失降到最小,能否建立基于控制危险发生的生产管理机制

等，显然都是人们关注和急于寻求解决的课题，也正是促使当代工程风险分析技术应运而生和蓬勃发展的主要因素。

表 1-1 安全工程学科中的应用学科^[1]

学科名称	安全应用学科	学科名称	安全应用学科
物理学	灾害物理学	经济学	安全经济学
化学	灾害化学	管理学	安全管理学
生物学	灾害毒理学	工程学	各门安全工程学
系统科学	安全系统工程	信息科学	安全信息科学
心理学	安全心理学	医学	医学安全工程
人机工程学	安全人机工程学	风险分析	安全评价
法学	安全法学	⋮	⋮

“风险”英文名“Risk”，源于法文“Risque”，意为在危险悬崖间航行。而法文又引自意大利文“Risicare”和希腊文“Risk”，意思是冒险才有获利的机会。

危险是风险的前提，没有危险就无所谓风险。风险的定义由两部分组成：一是危险事件发生的可能性（或失效概率），二是危险一旦发生，其后果严重程度和损失的大小。如果将这两部分的量化值综合，就是风险的表征，或称风险指标。

危险是客观存在、无法改变的，而风险却在很大程度上随着人们的意志而改变，亦即按照人们的意志可以改变危险或事故发生的概率和一旦出现危险，由于采取防范措施或实施规避危险策略，从而可以改变损失的程度。

工程风险分析技术是新兴学科“风险工程与管理”的重要组成部分，具有跨学科的特点，已列入国际公认的 21 世纪闪光技术（Emerging Technologies, ET）^[4]之中，近年发展迅猛，为工程界、企业界、经济界和学术界人士所关注。

在工业领域，工程风险分析技术是将危险转化成安全的技术，是将危险带来的挑战作为提高安全性机遇的技术。它的最终目标是力争化险为夷，使工程达到尽可能的成功。

工程风险分析技术内容广泛，失效分析、失效预测与预防、可靠性工程、结构完整性评价、装置寿命预测、环境安全评价、人因失误分析、应急预案编制和工业经济预测、投资风险决策等尽在其中。不仅如此，由于工业领域危险源各式各样，危险造成事故的机理千差万别，防范措施因不同对象而异，经济投资和决策方式不尽一致，风险分析技术的研究内容和方法也随不同工业类别或工艺过程、装置的不同而迥异。但是，作为一项专门技术，除了有针对性地研究各个工业领域风险的个性问题外，对共性问题或方法论的研究，正在为人们所关注。

工程风险分析技术近年发展很快，究其原因大体上涉及 4 个方面。

一是风险分析技术不仅包括安全工程中失效分析、事故预测、缺陷安全评定、可靠性预测等内容，而且涉及失效后果严重程度和损失大小的预测、人身体健康预测、环境污染的预测等，所反映的问题较为全面。二是风险不是越低越好，降低风险要付出代价，无论减少危险发生的概率，还是采取防范措施使危险发生造成的损失降到最小，都要投入资金、技术和劳务。风险与利益间要取得平衡，可以由人们根据具体条件寻求最佳的选择，接受合理的风险。三是利用风险分析技术可以建立基于控制风险的管理体制，这是一种全新理念、新颖的安全管理策略，与传统的安全管理方法截然不同，对于确保安全，优化资金配置的效果明显。四是经实践证明，风险分析技术的实施，不仅可以获取明显的经济效益和社会效益，而且其重要意义还在于能够减少事故所引发的灾害，指导安全生产和资源与环境保护、可持续发展战略实施，符合科学发展观的方针。随着地球资源日益紧缺，风险分析技术的重要意义

将更为突出。

除此以外，风险分析技术在发展高新技术产业风险投资决策中的应用，已经成为当代人们关注的热点。

三、工程风险分析技术的内容和方法

危险源、暴露和后果是风险的 3 个要素：①危险一般由于能量或毒物释放失去控制而引起。在进行风险分析时，首先要确定危险源的种类，如毒物释放、爆炸、火灾等，其次要确定系统中哪一部分是危险的来源，如压力容器、压力管道、储罐、动力装置等。②环境、人员或其他生态系统、建筑物或构筑物暴露于危险区域的程度。③危险一旦发生，对暴露目标的有害作用或可能造成的损失。这 3 个要素称为风险链，在进行风险分析时，要对链中的每个环节作具体分析和评价。

实施风险分析的技术路线，总的要求是对所选定的工艺系统，统筹策划，分类处理，分别采取有效的风险控制对策，使工艺系统中各单元协调运作，延长各单元的工作周期，保证各单元安全、可靠、高效率运行，最大限度地获取经济效益和社会效益。

具体路线是对所选定工艺系统中各生产过程设备进行风险辨识、风险分析与评价；根据评定的风险级别排序，按照风险级别的大小，采取控制风险的不同策略；制订维护、检修、管理计划。对高风险设备实施严格的风险控制对策，降低其风险级别，达到安全生产和保护环境的作用。

工程风险分析技术一般包括 5 项主要内容，它们是：风险辨识，风险分析，风险评价，风险控制和风险管理。

1. 风险辨识 风险辨识的目的是确定危险的种类和危险的来源，主要涉及 3 个方面。一是对所考察生产系统的历史资料，如设计、施工资料，有无发生过事故、如何处理和技术鉴定资料的调查；以及对现在生产情况、技术经济指标和控制系统与相关软件等的调查。二是对系统中生产装置制造工艺过程、遵循的标准或规范，制造厂商技术水平、质保体系，竣工、施工资料以及装置运行情况、维修、检验等资料的调查。三是人因素资料（包括误操作）和管理体制、管理模式的调查。

风险辨识方法有许多种，较重要的有：①流程图分析法^[5]；②制式表格法^[5,6]；③危险鉴别法^[7]；④重要度分类法^[8]等。在这些方法中，危险鉴别法和重要度分类法分别是美国石油学会和日本高压气体保安协会推荐的方法，是较重要的方法，应用广泛。

2. 风险分析及风险评价 辨识风险主要是认识风险的来源。风险分析与风险评价则要求在“辨识”的基础上对每一风险项目的性质进行分析，然后做出评价。

“风险数据库”和“风险管理资讯系统”是进行风险分析的基础，一些国家大型企业已经建立。它有助于失效事件资料的保存和风险管理经验的积累。数据库的信息越多，越有利于风险分析工作的开展。在运用数据库的信息时，管理人员经验的判定也是非常重要的。

根据风险的定义，风险包括的主要内容是：危险发生的可能性或失效概率和危险一旦发生后果严重程度与损失的大小。

失效概率的计算方法很多。故障树分析（Fault Tree Analysis, FTA）和事件树分析（Event Tree Analysis, ETA）是常用的方法。除了用于寻求失效主要影响因素外，也可以用来求取失效概率。它们已被一些资料或规范、标准作为求解失效概率近似方法推荐使用。

对于化工、石化企业承压设备而言，特别是含缺陷承压设备的失效概率，需要求解复杂的多维积分。这种多维积分对于失效判据不复杂的情况，可以用数值积分法求解。如果变量

较多，一般用改进一次二阶矩法（Advanced First Order Second Moment, AFOSM）或蒙特卡罗（Monte Carlo）方法求解。

至于失效后果严重程度的预测，要根据事故发生可能的具体情况考虑事故后果对多种因素的影响，如经济损失、人员伤亡、环境污染等。由于评价这些因素的影响程度，往往涉及人们的经验、判断与决策，故在实际工作中，常采用模糊综合评价方法进行预测。

失效后果严重程度，也可以采用可拓学的方法进行预测。可拓学的研究对象是客观世界中的矛盾问题，研究内容是探讨处理矛盾问题的规律和方法。它的理论基础是物元理论和可拓集合理论。

上面所提及的故障树分析、事件树分析，一次二阶矩法，蒙特卡罗方法，模糊综合评价法以及可拓学方法等的具体内容，都将在本书随后各相关章节中加以阐述。

3. 风险控制——风险管理的工具 风险控制是指为了降低失效概率，减少损失所采取的各种措施。改变危险源的性质，减少暴露，降低意外事故发生的可能性，发挥对危险防范措施的功效等都是控制风险的手段。

控制风险的理论有许多种^[5]，如骨牌理论、能量释放理论、作业评估技术系统（Technique of Operations Review System）理论（简称 TOR 系统理论）、系统安全理论等。它们对于失效原因、失效机理和应采取控制对策的陈述各有不同，但概括言之，控制风险要对危险源辨识清楚，避免运行中造成损伤和误操作；控制能量释放；建立风险评价体系信息网络，加强风险监控和基于风险的检验。

“风险管理”一词是控制风险、减少损失所采用的各类检验、监控方法与过程的统称。风险管理，一般从降低失效概率和减少损失两个方面考虑。降低失效概率，在设计阶段，生产工艺过程参数的选择，应尽可能规避高风险的流程和规避采用高风险工艺生产系统与装置。对于高温、高压、易燃、易爆、毒物介质的生产过程或其他工况严苛的生产系统，在设计阶段必须进行风险预评价并有规避风险的技术措施。在生产运行阶段，根据对潜在危险的预测，要及时采取检验、维修与控制，或者改变工艺条件，规避失效的发生。

至于损失预防，是以降低失效事件发生的频率和损失幅度为主。紧急隔离，紧急减压，设置蓄水池、喷淋装置、消防设施、截断阀，甚至修改工艺过程，改变人们操作、管理等都是常用的方法。

另外，风险控制措施还包括技术储备，如新技术开发、拥有先进的检验、监控装备和相关计算机软件以及高素质技术管理人才与先进的管理体制等。

四、国内外发展概况

工程风险分析技术的发展涉及 4 个方面。

概率风险评价（Probability Risk Analysis, PRA），它是在事故发生前，预测某设施（或项目）可能发生什么样的事故及其可能造成的损害，如人员伤亡、建筑物或构筑物的破坏以及对环境的污染、对人们健康的影响等。美国核管理委员会（Nuclear Regulatory Commission, NRC）完成的 WASH-1400 报告^[9]就是其中一例。它系统地发展和建立了概率风险评价方法（PRA）。

实时（Real time）后果评价，其主要研究内容是在事故发生期间给出及时的处理，如对有毒物质的迁移和浓度降低，及时做出防护决策，减少事故的危害。国际原子能机构（International Atomic Energy Agency, IAEA）于 1988 年 10 月与美国利物莫国立实验所联合召开的“实时剂量评价国际研讨会”^[10]，就是以实时后果评价作为会议的主要内容。

事故后后果（Over-event 或 Past accident）评价，主要研究事故发生后的影响，重点是

重大突发性事故对环境造成危害的评价问题。它包括易燃、易爆和有毒物质、放射性物质失控状态下的泄漏，大型基本设施（如桥梁、水坝等）的损伤，发生这种灾难性事故的概率虽然很小，但影响往往是巨大的。1988~1994年由国际原子能机构（IAEA）及欧盟共同发起并有20多个国家参加的国际协调研究项目“核素在陆地、水域、城市诸环境中迁移模式有效性研究”（简称VAMP），主要研究前苏联切尔诺贝利核电站事故发生后对中、西欧的影响。

工程风险分析技术的另一发展动向正在引起人们的高度重视和浓厚兴趣，那就是在发展高新技术产业风险投资决策中的应用。

20世纪40年代发展的风险投资，主要是向创新型产业和有巨大潜力的企业提供资本支持的一种投资方式。20世纪80年代，高新技术领域已经成为风险投资的主要对象。硅谷发展成为美国的第一财富中心，就是风险投资成功运作的典范。风险投资在高科技产业发展过程中的重要作用已为国际公认。风险投资运作的基本条件有赖于与其相关的中介环节，其中风险分析与评价，对于保证投资项目筛选和投资决策的科学性、准确性起着重要作用。它的应用将有助于高新技术科研成果向现实生产力转化，而且会产生巨大的经济效益和社会效益。目前，它的应用已不仅限于高新技术产业风险投资范畴。风险评价已成为新建、改建和扩建项目立项决策和项目管理的重要环节。我国建设部已明确将风险的识别与分析、风险的对应、风险的监督和控制等列为工程项目管理的内容。

近年，国内许多单位也对风险分析技术开展了研究，涉及范围宽广，成绩显著。例如：对我国某型号运载火箭安全性进行的概率风险评估（PRA）^[11]；模糊综合评判对风险因子的研究^[12]；在组合投资的风险分析中，从数学上给出了一种新的风险度量定义^[13]；对可接受风险界定方法进行的探讨^[14]；长输管道的风险评价^[15]；边际油田开发方案的风险评估^[16]；对海洋平台结构的风险评估^[17]；航天安全风险管理与决策^[18]；采用故障树分析（FTA）法和Bayes方法计算的化工企业突发事故的概率^[19]；金陵石化公司化工一厂凡士林加氢装置基于API 581规范半定量风险分析方法对安全性做出的评价^[20]；基于风险分析的城市燃气管道安全评价^[21,22]；风险控制与管理^[23]；工程评价方法的研究^[24~26]；风险评价中人因失误分析^[27]；化工、石化承压设备风险分析与评价^[28~30]等。

图1-1为“中国期刊网”1994~2001年间国内核心期刊发表风险领域论文数量统计图。从图可以看出，论文数量呈逐年上升趋势。

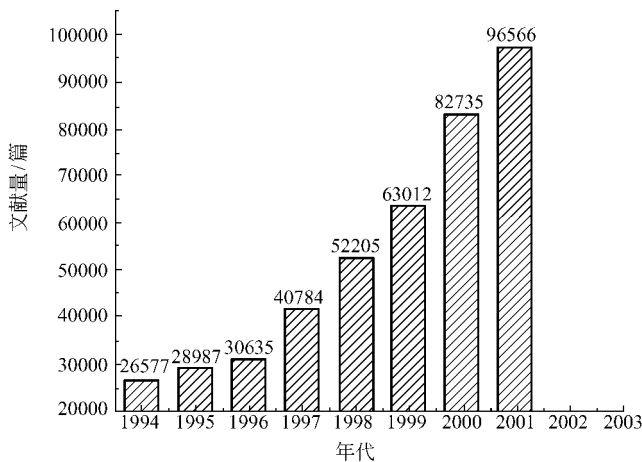


图1-1 1994~2001年“中国期刊网”对风险工程有关问题发表论文数量统计图

需要提及的是近年国内一些石化企业对于美国石油学会（American Petroleum Institute, API）颁布的基于风险检测（Risk Based Inspection, RBI）API 581 正式文件和 API 580 RBI 标准^[30]，进行了工程实践的探索。初步了解，国内引进了 4 套 RBI 的软件，详见表 1-2。

基于风险的检测（RBI）是在对系统潜在危险发生的可能性和后果进行科学分析的基础上，定出系统中各组成单元的风险级别并排序，找出薄弱环节，针对高风险装置采取有效措施，以期达到确保安全和减少费用、优化检验的目标。

表 1-2 近年我国引进的 RBI 软件

软件商品名	软件开发商	软件功能	国内使用单位
ORBIT	挪威 DNV	RBI 分析	天津石化、扬子石化、燕山石化
RB. Eye	法国 BV	RBI 分析	茂名石化、大连西太平洋化工
T-OCA	英国 Tischuk	RBI 分析	青岛安全工程研究院和齐鲁石化
Risk Wise	TWI	RBI 分析	国家锅检中心
SAFETI	挪威 DNV	后果分析	中国石化所属 10 多家单位
LEAK	挪威 DNV	泄漏频率分析	
Neptune	挪威 DNV	海洋石油平台 RBI 分析	青岛安全工程研究院

表 1-2 中 DNV 软件是由美国石油学会（API）和挪威 DNV 石油开采运输公司合作编制而成，它们大都基于 2000 年美国石油学会公布的 API 581 正式文件和 2002 年颁布的 RBI API 580 标准两个版本。

茂名石化公司、天津石化公司、镇海石化公司和扬子石化公司等都先后利用引进软件实施了 RBI 的工作，取得一定成效，认为采用 RBI 方法对于石化企业保证承压设备安全运行，减少维修费用有明显效果，值得大力推广^[31]。

相对于近年来国际上风险研究的态势，目前国内在这个领域的研究还十分薄弱，基于风险控制的安全管理机制尚未形成，新项目和现在企业的改造项目中风险评价，过程工业设备长周期运行的风险管理以及技术经济和市场风险问题都远未解决。自然灾害的风险预测和风险评价体系网络的建立以及风险评价法规与风险可接受准则技术规范的编制更是缺乏。有组织有计划地开展风险工程研究工作尚待加强。确立风险意识，引进国外先进理念，结合国情提高科学决策水平，研发具有自主知识产权的风险控制的管理方法已是当务之急。

第二节 工程项目决策筛选

一、概述

21 世纪是一个以科技创新为主导的世纪。国家的兴衰很大程度上取决于其科技实力和创新能力。一个国家在科学技术和创新能力上无所作为，将不可避免地制约其经济和社会的发展，最终将为时代所淘汰。

当前，我国的发展面临各种机遇和挑战。我国政府在国民经济和社会发展中，坚持以改革开放和科技进步作为主要动力，把加快科技进步和创新置于经济与社会发展的优先地位。中国共产党十六大报告，在经济建设和经济体制改革中，明确提出^[32]：

“形成以高新技术产业为先导，基础产业和制造业为支撑，服务业全面发展的产业格局。”

“积极发展对经济增长有突破性重大带动作用的高新技术，用高新技术和先进适用技术