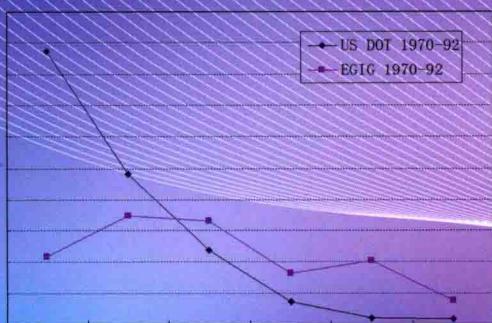


压力管道风险管理 及完整性评价

刘展 俞树荣 胡斌 编著

TALI GUANDAO
FENGXIAN GUANLI JI
WANZHENGXING PINGJIA



化学工业出版社

压力管道风险管理 及完整性评价

刘展 俞树荣 胡斌 编著

YALI GUANDAO
FENGXIAN GUANLI JI
WANZHENGXING PINGJIA



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书是一部关于在用压力管道风险管理和安全评定的著作。

本书以理论和案例的形式介绍在用压力管道风险管理和安全评定解决工程实践中具体方法和过程。书中内容涉及我国在用压力管道的现状及发展趋势,在用压力管道的解析分层风险分析技术、故障树风险分析技术、模糊风险分析技术、灰色风险分析技术、可靠性分析技术、风险因素敏感性模糊分析技术,基于GIS的在用压力管道风险管理地理信息系统和基于RBI的在用压力管道风险检验技术等前沿研究成果。

本书适合于石油、化工、能源等领域特种设备安全科技工作者、安全管理人员学习使用,也可供高校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

压力管道风险管理及完整性评价/刘展,俞树荣,胡斌
编著. —北京:化学工业出版社,2015.4
ISBN 978-7-122-23196-3

I. ①压… II. ①刘…②俞…③胡… III. ①压力管道-
风险管理②压力管道-完整性-完全评价 IV. ①U173.9

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第043666号

责任编辑:杜进祥

文字编辑:刘砚哲

责任校对:宋 玮

装帧设计:韩 飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张7 $\frac{3}{4}$ 字数146千字 2015年6月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:49.00元

版权所有 违者必究

安全生产与管理是保护和发展社会生产力、促进社会和经济全面协调可持续发展的基本保障，是社会、政治文明与进步的重要标志和全面建设社会主义和谐社会、小康社会的本质内涵。

安全发展的理念和指导原则，要融入国家、地方、部门和行业、企业的发展战略和中长期规划，必须坚持标本兼治，重在治本。在当代科技发展和大工业化时期，为遏制特重大安全事故，探寻治本之策成为关键。为此，一方面要综合运用经济手段、法律手段和必要的行政手段，建立安全生产长效机制；另一方面要从发展规划、行业管理、安全投入、科技进步、教育培训、安全立法、激励约束、企业管理、监管体制、社会监督以及追究事故责任、查处违法违纪等方面着手，解决影响制约安全生产的深层次、历史性问题，筑牢人民群众生命财产安全的保障工程。

随着我国经济建设的快速发展，管道运输已成为继铁路、公路、水运、航空之后的第五大运输产业。压力管道广泛应用于石油、化工、冶金、制药、电力、能源等行业，对其进行风险管理与完整性评价，是保证压力管道安全运行的重要手段。

本书以在用压力管道风险管理与安全评价涉及的理论为基础，充分结合工程实践，围绕压力管道风险管理与完整性评价技术，提出引入了压力管道解析分层风险分析技术、故障树风险分析技术、模糊风险分析技术、灰色风险分析技术、可靠性分析及风险因素敏感性模糊性分析技术等分析方法，并对在用压力管道风险管理地理信息系统和基于风险的在用压力管道风险检验技术进行了详尽阐述。

他山之石，可以攻玉。总之，本书内容丰富、翔实，是业内人士不可多得的参考资料，相信本书的出版，对我国从事压力管道及相关领域的研究者会有所启发和帮助，同时对于政府实施安全监察，确保压力管道的安全运行，都有着重要的参考价值。

本书中的研究成果得到国家质检公益性行业科研专项、中国石油天然气股份有限公司科研项目、甘肃省自然科学基金项目等资金资助，兰州理工大学的梁瑞教授、李淑欣教授和部分研究生给予了大力支持，在此表示深深的感谢。对文中引用的参考文献作者表示感谢。另外由于笔者水平所限，书中错误、纰漏之处，恳请同行专家和读者指正。

编著者

2014年12月

目录

CONTENTS

第 1 章 压力管道概述

1

1.1	压力管道概念	1
1.2	现役油气长输管道运行现状	2
1.3	压力管道安全形势	3
1.3.1	典型压力管道的失效事故	3
1.3.2	燃气压力管道安全形势	3
1.3.3	压力管道事故多发的原因	4
1.3.4	我国压力管道安全监察体制及对策	5
1.4	国内外研究现状	5
1.4.1	压力管道风险评价相关技术研究现状	5
1.4.2	压力管道风险评价技术的应用	8
1.4.3	压力管道风险评价技术的发展趋势	9
1.5	压力管道风险评价技术的意义	10

第 2 章 压力管道风险管理理论

12

2.1	压力管道风险管理理论的系统提出	12
2.1.1	风险概述	12
2.1.2	风险管理概述	14
2.1.3	国外压力管道风险管理研究现状	15
2.1.4	国内压力管道风险管理研究现状	16
2.1.5	压力管道风险管理理论体系的系统提出	17
2.2	压力管道风险识别	18
2.2.1	压力管道风险识别的特点和原则	18
2.2.2	压力管道风险识别的方法和过程	19
2.2.3	压力管道失效分析	20
2.3	压力管道风险分析	22
2.3.1	失效概率的计算	22
2.3.2	失效后果的计算	23
2.4	压力管道风险估算	23
2.5	压力管道风险评价	23

2.6	压力管道风险决策	24
2.7	压力管道风险控制	24
2.8	压力管道风险管理地理信息系统	25

第3章 长输管道风险因素统计分析

26

3.1	长输管道风险	26
3.1.1	长输管道系统功能	26
3.1.2	长输管道事故原因	27
3.1.3	从重要事故中得到的经验和教训	28
3.2	事故数据来源	28
3.2.1	数据收集	28
3.2.2	事故数据来源	29
3.2.3	事故数据来源报告标准	29
3.2.4	管网的发展和特点	30
3.3	事故频率数据	34
3.3.1	性能指标	34
3.3.2	全失效频率	36
3.3.3	因素的失效频率	38
3.4	事件后果	40
3.4.1	伤亡比率	41
3.4.2	世界范围内的伤亡事件	42
3.4.3	西欧石油工业的泄漏	44
3.5	事故数据总结和讨论	45

第4章 压力管道解析分层风险分析技术

49

4.1	影响压力管道风险水平的基本因素	49
4.1.1	影响压力管道性能的因素	49
4.1.2	风险因素的界定和分类	50
4.2	风险分析的基本原理	51
4.2.1	风险分析的含义	51
4.2.2	风险分析准则和目标	52
4.2.3	压力管道风险分析	53
4.2.4	风险评价指标的量化	54
4.3	基于解析分层法确定管道风险因素的权重	54

4.3.1	解析分层法介绍	55
4.3.2	合成权数向量的计算和分层整体一致性检验	57
4.3.3	长输管道事故因素的分类及解析分层法权数 计算	58

第5章 压力管道风险的故障树分析技术

61

5.1	故障树分析法	61
5.1.1	故障树分析法简介	61
5.1.2	故障树分析法的应用及其研究现状	62
5.2	长输管道故障树的建立	63
5.3	长输管道故障树定性分析	67
5.3.1	基本认识	67
5.3.2	最小割集	67
5.3.3	管线失效的主要影响因素	69

第6章 压力管道模糊理论风险分析技术

71

6.1	模糊理论	71
6.2	压力管道模糊理论风险分析方法	71
6.3	模糊性风险事件的概率及风险指标计算	72
6.3.1	风险率计算模型	73
6.3.2	风险度计算模型	73
6.3.3	模糊风险计算模型	73
6.3.4	模糊综合评判流程	74
6.3.5	模糊风险分析法的关键问题及应用	76

第7章 压力管道灰色系统理论风险分析技术

77

7.1	灰色系统理论	77
7.1.1	灰色预测	77
7.1.2	GM(1,1) 模型的建立	78
7.2	灰色预测在受到腐蚀压力管道可靠性设计中的应用	80
7.2.1	压力管道的可靠度设计	80
7.2.2	压力管道抗腐蚀可靠性设计	81

7.3 灰色理论与模糊理论的对比研究	81
7.3.1 灰色理论与模糊理论的研究宗旨	81
7.3.2 灰色理论与模糊理论的对比	81

第8章 压力管道可靠性分析技术

83

8.1 可靠性概述	83
8.1.1 指数分布	84
8.1.2 极值分布	84
8.2 埋地压力管道的可靠性分析	85
8.2.1 钢质埋地压力管道的腐蚀因素	85
8.2.2 埋地压力管道所处的环境	85
8.2.3 埋地压力管道受到腐蚀的可靠度分析	86
8.2.4 埋地压力管道受到腐蚀的可靠度计算	87
8.2.5 实例计算	88
8.2.6 计算结果分析及故障控制对策	89
8.3 在役长输管道的可靠性分析	89
8.3.1 在役长输管道事故的主要可能因素	89
8.3.2 长输管道系统可靠性的定义及可靠性指标的 计算	90
8.3.3 长输管道可靠性指标的处理	92
8.3.4 实例计算	92
8.3.5 计算结果分析及故障控制对策	93
8.3.6 长输管道事故率	93

第9章 压力管道风险因素敏感性模糊分析技术

95

9.1 敏感性分析概述	95
9.2 经济领域敏感性分析的一般方法	95
9.3 压力管道风险因素的敏感性分析	96
9.4 压力管道风险因素敏感性模糊分析	96
9.4.1 普通敏感性综合决策	97
9.4.2 模糊敏感性综合决策	97
9.4.3 实例计算	98
9.4.4 计算结果分析	100

10.1	风险控制的基本原理	101
10.2	压力管道风险宏观监控管理系统	101
10.2.1	宏观监控管理系统的重要思路	101
10.2.2	宏观监控管理系统的设计思想	102
10.2.3	宏观监控管理系统网络设计方案	102
10.2.4	压力管道风险管理信息系统	102
10.3	基于 GIS 的压力管道风险管理地理信息系统的初步设计	102
10.3.1	GIS 概述	102
10.3.2	GISPPRM 系统的开发平台	103
10.3.3	GISPPRM 系统的数据结构	103
10.3.4	GISPPRM 系统的基本功能	104
10.4	基于 RBI 的压力管道风险检验技术	105
10.4.1	RBI 概述	105
10.4.2	RBI 的实施步骤	106
10.4.3	RBI 的分析方法	108
10.4.4	RBI 项目的成本效益分析	109
10.5	RBI 在压力管道风险检验中的应用实例	110
10.5.1	压力管道 RBI 的半定量分析应用	110
10.5.2	压力管道 RBI 的成本效益分析应用	110

压力管道概述

1.1 压力管道概念

压力管道，是指利用一定的压力，用于输送气体或者液体的管状设备，其范围规定为最高工作压力大于或者等于 0.1MPa（表压）的气体、液化气体、蒸汽介质或者可燃、易爆、有毒、有腐蚀性、最高工作温度高于或者等于标准沸点的液体介质，且公称直径大于 25mm 的管道。压力管道按其用途划分为长输管道、公用管道、工业管道和动力管道。

作为现代五大运输系统（公路、铁路、水运、航空、管道）之一的管道运输系统在现代工业生产和城市建设中的应用已经遍及各个领域，几乎一切流体在其生产、加工、运输及使用过程中都使用压力管道。压力管道工程日益复杂，正朝着大型化、整体化和自动化方向发展。随着石油、化工、冶金、电力、机械等行业的迅速发展，压力管道在这些行业中占据着越来越重要的地位。

我国的管道运输起步晚，管道运行管理目前情况亦是如此，甚至还相对落后。到目前为止，世界上长输管道的总长度已经超过 2×10^6 km。我国的原油产量在世界上排第 5 位，天然气产量在世界上也排第 5 位，因此管道的建设与我国经济发展相比，并不能适应经济发展的要求，还有很大的发展空间。因此，在以后的发展阶段，管道系统的可靠性分析应该引起足够的重视。我们要在修建新管道的同时，切实保证在役压力管道的安全可靠经济运行。这就对我国输送危险介质的油气管道运输的技术可靠性、安全性、风险性、经济性提出了更大的挑战。

油气泛指原油、成品油、液化烃、可燃液体化工品及可燃气体等，它们普遍具有易燃、易爆及有毒等特性。但它们却是人类社会不可缺少的能源和原材料。为了将这些重要的能源和原材料运送到最需要的地方去，管道输送是最重要的手段。所谓油（气）长输管道是指长距离输送原油（成品油或油产品）或天然气的管道，一般其长度在 25km 以上。

输送危险介质的油气管道失效可能造成严重的危害，可燃或有毒物质泄漏是引起许多悲惨意外事故的开始事件。公众和社会对环境污染和意外事件的宽容度

现在正在减弱,同时,意外事件发生之后,管理者所要承担的责任则越来越大。尽管危险事件在全世界屡屡发生,但跟铁路、公路运输相比,管道运输仍然被认为是输送大量危险物质的最安全模式之一。

一方面,压力管道输送的介质具有易燃、易爆、有毒、强腐蚀性及高温高压的性质,压力管道中存在的缺陷极易发生泄漏、爆炸、燃烧及中毒事故,造成国民经济和人民生活财产的重大损失,因此,要尽量排除压力管道缺陷;另一方面,由于制造、运输和安装等原因,压力管道中存在缺陷是不可避免的,如果一有超标缺陷就予返修或更换,不但会带来很大的经济损失,而且还可能引入新的缺陷,甚至可能造成更大的危害。基于以上两点,如何依据我国的国情,借鉴国内外的先进技术,根据“合于使用”原则从技术角度、根据失效后所造成的危害程度从管理角度,对在役压力管道进行风险识别、风险评价和风险管理,是急需解决的重大问题。

1.2 现役油气长输管道运行现状

近几年,美国、俄罗斯、加拿大、英国、阿根廷、委内瑞拉等欧美国家发生过多起油气管道爆裂、泄漏事故,损失惨重,给社会造成极大影响。当今,在全球范围内,有超过一半的管道已经进入老龄阶段(我国长输管道有82%的管龄已经超过24年,66%的超过25年),更存在不少事故隐患。在20世纪80年代前后,国外(欧美及原苏联)油气管道的事故率约在 $(4\sim6)\times 10^{-4}\text{km}^{-1}\cdot\text{年}^{-1}$ 。据美国管道安全办公室统计,从1986年1月到2001年12月的16年间,全美输气干线共发生事故1286起,死亡达58人,受伤217人,财产损失2.84亿美元。

我国石油天然气管道的生产和使用是随着石油工业的兴起而逐步发展起来的。我国第一条长输管道是1958年建于克拉玛依-独山子炼油厂的双线输油管道。随着石油天然气的开发,我国迎来一个长输管道快速发展的时期,从20世纪90年代中期逐渐进入高潮,目前我国正处在长距离输送油(气)管道建设的高峰期,在今后的几年里将形成东西南北相互贯通的管道网络。近几年来随着国家西部大开发战略的实施,我国已经建成的或正在兴建中的管道有西气东输(新疆-上海)天然气管道、涩北-西宁-兰州天然气管道、兰州-成都-重庆成品油管道、茂名-昆明成品油管道、忠县-武汉天然气管道、宁波-上海-南京进口原油管道、环珠江三角洲液化天然气管道、镇海-萧山成品油管道,以及平湖-上海的海底天然气管道等。正准备兴建的管道还有中俄天然气管道、中俄原油管道,远景规划可能还有土库曼斯坦至中国的天然气管道、西西伯利亚至中国天然气管道,以及苏里格气田的外输管道等。2002年我国国内共有输油(气)管道2.6万千米,这些油气管道分布在全国24个省、市、自治区,形成了东北、华北、华东、中原和西北的地下大动脉。但是长期以来,由于管理分散、法规不健全、技术水平落后等原因,管道普遍缺陷严重,带“病”运行,每年因第三方破坏、腐蚀、误操作等原因造成泄漏与爆炸事故也时有发生。据不完全统计,仅输油管道在近

30年内共发生大小事故上千次；天然气管道也发生事故几百起。

1.3 压力管道安全形势

根据国家质量监督检验检疫总局特种设备安全监察局发布的统计报告，截至2004年底全国压力管道总长度为75万千米。其中工业管道20万千米；公用管道22万千米；长输管道3万千米；集输压力管道30万千米。

1.3.1 典型压力管道的失效事故

随着管道的大量铺设和长期运行，管道事故不断发生。例如，1989年6月在苏联乌拉尔山脉隧道附近由于对天然气输送管线维护不当，造成天然气泄漏，随后引起大爆炸，烧毁了两列铁路列车，死亡800多人，成为1989年震撼世界的灾难性事故。美国1985~1992年，共发生天然气管道失效事故1906起，其中包括146起灾害事故和721起伤害事故。在此期间，发生液体管道失效事故1591起，其中包括24起灾害事故和18起伤害事故。直接经济损失超过3500万美元。加拿大每年发生压力管道事故30~40起。欧洲输油管线在1971~1994年间，平均每年发生管道事故13.8起，到1995年底，清理泄漏石油费用超过970万美元。1981~1996年，苏联发生压力管道失效事故752起。

我国油气输送管道事故也曾多次发生。1974年，大铁复线漱江穿越段用气体试压时发生爆炸，爆炸长度达2km。四川石油管理局南干线在1971~1990年，共发生108起失效事故。每次事故停输时间超过24h，经济损失约达1亿元人民币。塔里木轮南-库尔勒输油管线在建成后的试压过程中发生爆炸和泄漏事故。

1.3.2 燃气压力管道安全形势

城市燃气是城市建设的重要基础设施之一，是城市能源供应的重要组成部分，为城市工业、商业和居民生活提供气体燃料。城市燃气系统由气源、输配和应用三部分组成，城市埋地燃气管道属于其中的输配部分。随着我国经济的高速发展，我国的城市燃气已经得到普遍应用，2000年全国城市煤气供应总量已经达到152亿立方米，天然气供应总量82亿立方米，液化石油气供应总量1054万吨。655个城市的用气人口1.76亿，用气普及率84.15%，各类城市燃气管道总长度已经超过89473km，其中，煤气管道总长度48384km，天然气管道33655km，液化石油气管道7434km。

随着城市燃气事业的发展，燃气管网的不断扩大和延伸，输送易燃易爆介质的燃气管道随时都有发生泄漏、爆炸等事故的可能。由于我国城市燃气管道的管理技术现状已无法缓解日益扩大的城市燃气管网对城市居民生命财产安全所形成的巨大潜在威胁，部分大中城市已先后发生过多起埋地燃气管道爆管伤人事故。

例如, 1995 年 1 月 3 日, 济南市和平路中压煤气管道破裂, 泄漏煤气进入电缆沟内并起火爆炸, 造成 13 人死亡, 40 多人受伤, 2.2km 长路段的人行道和部分路面遭到不同程度的破坏, 直接财产损失 429.1 万元; 1999 年 12 月 8 日, 西安市莲湖路古都大酒店门前非机动车道埋地天然气管道发生爆炸, 200m 的路面被强大的冲力炸开, 造成 15 人受伤, 并且导致大面积停电, 直接经济损失 300 余万元; 1999 年 12 月, 沈阳市沈河区热闹路顺通市场发生埋地煤气管道爆炸; 2000 年 1 月 5 日, 乌鲁木齐市河南路南二路下的天然气管道突然发生了大爆炸, 约 60m 长的混凝土路面开裂、错位, 水管被炸断, 电缆沟被炸毁, 事故造成铁路局 9000 多户居民停气, 部分地区停水停电, 近 30 万平方米的暖气停供; 2000 年 1 月 28 日, 广西贵港市城区富士花园至港北区公安分局南梧公路段发生埋地油气管道爆炸事故, 造成 8 人当场死亡、16 人受伤, 公路严重损坏; 2003 年 8 月 21 日上午, 深圳市福华三路发生煤气管道连环爆炸, 造成 9 人受伤, 直接经济损失约 90 万元。此外, 还有一些事故虽然由于处理及时未造成人员伤亡, 但造成了很大的社会影响。例如, 2003 年 2 月 18 日, 在青岛市福州路与宁夏路交叉口处, 一挖掘机不小心挖开了深埋在地下的燃气管道, 裂缝长达 50cm, 为了抢修关闭了相关的 6 个阀门, 停了附近的 32 个调压站, 直接影响周边地区的供气; 2003 年 11 月 17 日, 杭州市凤起路与环城东路交汇处燃气管道发生爆炸事故, 200 多米路段的数十个窨井盖被炸飞, 大量建筑物和汽车受损, 1652 户居民家被停止供气; 2004 年 1 月 3 日, 泉州市江头台湾街与仙岳路交汇处, 一中压燃气管道因地基不均匀沉降而发生断裂, 引起燃气严重泄漏事故, 抢修人员关闭了气源总阀, 被迫中断附近 3000 余用户的管道燃气供应; 2004 年 1 月 16 日上海塘桥地区发生了上海首次大面积天然气泄漏事件, 当晚有 2000 余户居民被疏散。

由此可见, 燃气压力管道安全形势不容乐观, 我们要下决心寻找对策解决这些问题。

1.3.3 压力管道事故多发的原因

对在役压力管道构成威胁的因素越来越多, 但归纳总结一下, 在役压力管道事故多发的原因主要表现为以下几个方面。

① 压力管道周边安全生态环境遭到破坏, 如道路改造、河流箱涵改造、管线改造等, 使得原来符合安全要求的管道出现安全隐患, 特别是违章建筑屡禁不止。

② 建筑施工等人为因素造成管道断裂。

③ 压力管道腐蚀严重, 未及时更新和修补。

④ 缺乏科学合理有效的压力管道管理规章和制度。

⑤ 缺乏科学严密的风险辨识预测方法和能力。

- ⑥ 压力管道检验手段和方法老化，国家有关压力管道的强制性标准落后。
- ⑦ 监控、决策、调度、信息共享等监控管理水平和层次不高。
- ⑧ 压力管道风险预警响应能力差。

1.3.4 我国压力管道安全监察体制及对策

我国于1995年在劳动部职业安全卫生及锅炉压力容器安全监察局设立了压力管道安全监察处，负责全国的压力管道安全监察工作，并于1996年由劳动部颁布了我国的第一个压力管道法规《压力管道安全管理与监察规定》（1996年4月23日劳动部劳部发[1996]140号），从而使我国的压力管道的安全管理步入了法制化的轨道。1998年国务院政府机构改革将劳动部的特种设备安全监察职能成建制划转到国家质量技术监督局，成立特种设备安全监察局，专门负责全国的特种设备安全监察工作，压力管道是其监察的重点对象。2003年国务院正式颁布了《特种设备安全监察条例》（2003年3月11日中华人民共和国国务院令 第373号），2013年6月29日第十二届全国人民代表大会常务委员会第三次会议通过了《中华人民共和国特种设备安全法》，进一步统一和强化了全国各地区各行业的压力管道安全管理与安全监察工作。由此可见，我国实行的是国家强制性的压力管道安全监察与管理体制，依法对压力管道进行设计、制造、安装、使用、检验、维修、改造和事故处理等全过程、全系统、全方位的监察和管理。

但是，由于我国正处在全面建设小康社会的关键时期，以压力管道作为基础设施的建设项目呈大量增长态势，压力管道事故频发，而新时期构建和谐社会的客观需要要求我们要努力杜绝特大事故，降低重大事故，减少一般事故，为人民群众创造一个人与自然（包括压力管道）安全协调相处的和谐社会。事故上升趋势与构建和谐社会的要求就构成了一对尖锐的矛盾，而我们就是要努力寻求对策，预防和减少事故，尽量改善压力管道安全形势。近年来，我国除加大对压力管道的安全监察力度外，国家相关部门如国家质量监督检验检疫总局、国家科委以及其他相关部门也加大了对压力管道安全科学技术的科研经费投入和人才培养力度。国家已经并将继续重点依靠压力管道安全科学技术的进步，来保障压力管道的安全运行。

1.4 国内外研究现状

压力管道是一个十分复杂的系统，其输送的介质具有易燃、易爆、有毒的性质，容易发生泄漏、燃烧、爆炸及中毒事故，造成国民经济和人民生命财产的重大损失。因此，发达国家对压力管道风险评价及其相关技术进行了大量的研究和应用，我国由于种种历史原因起步较晚，但也开展了一定的研究和应用。

1.4.1 压力管道风险评价相关技术研究现状

1.4.1.1 压力管道风险评价的起源和发展

压力管道风险评价又称危险评估，它根据危险源评价方法确定影响系统发生

事故的各种因素，并对这些因素进行定性和定量分析，评价系统发生危险的可能性和程度，以寻求最小的事故率、最小的损失和最优的安全投资效益。20 世纪 70 年代，欧美等工业发达国家在第二次世界大战后兴建的大量油气长输管道开始进入老龄期，各种事故的频繁发生造成了巨大的经济损失和人员伤亡。因此，美国首先开始了管道风险评估分析技术的研究，即应用风险评估的基本原理对管道的各区段进行评价，以风险值的大小来评定各区段的安全性的技术。

美国的 PRCI（Pipeline Research Committee International）针对美国和欧洲的输气管道事故数据进行了分析，归纳总结出 22 种引起压力管道失效的基本因素。其中，只有 1 种因素的本质原因是“未知的”，即不能确定它的本质特性。其余 21 种失效因素按照与时间的关系分为 3 类，见表 1.1。

从 20 世纪 70 年代到 90 年代，美国一边研究一边实践应用，逐步确定了管道风险评价的基本模型，提出了压力管道风险评估的评分系统。1992 年 W. Kent. Muhlbauer 对美国 20 年来所开展的油气管道风险评价技术研究成果进行了总结，编著了《管道风险管理手册》一书，详细叙述了管道风险评价模型和评估方法，将引起管道失效的因素归结为第三方破坏、腐蚀、设计错误、操作不当四类，1996 年再版时增加了约 1/3 的篇幅介绍不同条件下管道风险评价修正模型，并在风险管理部分补充了成本与风险关系的内容，使该书更具实际指导意义。

最近 10 多年，许多工业发达国家相继开发这一先进技术来管理本国的长输管道和燃气管道，开始了建立适合本国国情的管道风险管理系统的研究工作。

表 1.1 PRCI 针对输气管道总结出的 21 种失效“基本因素”

发生变化且变化规律与时间关系密切的因素	外腐蚀	
	内腐蚀	
	应力腐蚀	
稳定存在的失效因素	与制造有关的缺陷	管道焊缝(纵焊缝或螺旋焊缝)缺陷
		管体缺陷
	与焊接、安装有关部门的缺陷	管道环焊缝缺陷
		管道安装缺陷
		弯头起皱或翘曲
		螺纹损坏或管道破裂或接头失效
	与设备有关的失效	密封圈失效
		控制或安全泄放设施故障
		密封或泵体包装失效
		杂项

续表

发生变化但变化规律与时间无关的失效因素	第三方/机械破坏	由第一方、第二方或第三方引起的破坏(瞬间/直接失效)
		管道先前曾遭受破坏(延时失效模式)
		蓄意破坏
	误操作	错误的操作程序
	与自然和外力有关的失效因素	严寒
		雷电
		暴雨或洪水 地层运动

1.4.1.2 压力管道风险评价方法

风险评价方法可以分为以下三类。

① 定性方法。这类方法主要根据经验对系统的工艺、设备、环境、人员等各方面进行定性的评价。安全检查表法、预先危险分析法、故障类型和影响分析法、危险可操作性研究法等都属于这类方法。这类方法简单易行,评价过程和结果直观,但含有相当高的经验成分,带有一定的局限性,而且不同评价对象的评价结果之间没有可比性。

② 半定量方法。这类方法以系统中的危险物质和工艺为评价对象,将影响事故频率和事故后果的各种因素指标化,用一定的数学模型综合处理这些指标,从而评价系统的危险程度。美国 DOW 公司的火灾爆炸指数法、英国帝国化学公司蒙德工厂的蒙德评价法、日本的六阶段安全评价法、我国工厂的危险程度分级法都是这类方法。这类方法操作简单,应用很广,但各指标的层次关系和综合方法缺乏足够的数学依据,并且使用了主观意识和经验成分较重的评分方法来确定指标的取值。

③ 定量方法。这类方法以系统的事故发生概率来评价其危险程度。失效树分析法(FTA)、事件树分析方法(ETA)等都是这类方法。这种方法有充足的理论依据,结果准确可靠,在航空、航天、核能等领域得到广泛的应用。例如,1974 年拉氏姆教授对民用核电站的安全评价、1977 年英国坎威岛石油工业联合企业安全评价、1979 年德国对 19 座大型核电站的安全评价、1979 年荷兰雷杰蒙德六项大型石油化工装置的安全评价等都使用了这种方法。这类方法要求数据准确、充分,能充分描述系统的不确定性,但通常要耗费大量的人力物力。

目前管道风险评价主要采用半定量方法和定量方法。

目前多数国家对于压力管道的半定量风险评价方法均以《管道风险管理手册》为基础,其重点是各风险因素的权重如何确定。确定各风险因素的权重的方法有两类,即基于历史数据的统计法和专家估计法。基于历史数据的统计法虽然有一定的应用,但该方法受客观条件的限制很大。较有应用前景的是专家估计

法。这种方法并不仅仅局限于征求意见,许多研究者就如何提高专家估计的准确性和衡量专家的权威性做了深入的研究,并采用贝叶斯法处理专家的评估意见等。也有一些专家建议将历史数据和专家估计法进行综合应用,使权重的确定更为准确。

压力管道定量风险评价的研究技术进展主要集中于管道的失效可能性的研究,由最初的单一研究腐蚀引起的管道寿命预测,发展到考虑内压、温度、外部载荷、管道弯曲、壁厚减薄、新缺陷的生成等多种因素共同作用下管道的可靠性预测。此外,也有研究者对一些不确定性的风险因素作出评价,例如,对操作者——人的可靠性的研究、自然灾害及第三方破坏等方面的研究,以及对于变化规律和与时间有关的失效因素的研究等等。对失效后果的研究主要有对燃气管道爆炸的伤亡半径和几种燃气的泄漏模式的定量计算,以及对人的生命价值进行准确评估等。

1.4.2 压力管道风险评价技术的应用

如前所述,管道的危险源评价和风险评价技术起源于美国。20世纪90年代初期,美国的许多油气管道都已应用了基于危险源评价和风险评定的风险管理技术来指导管道的设计和维护工作。此外,在加拿大、英国、法国、澳大利亚等国,政府规定对于具有危害性的管道,需要进行风险评估,建立安全管理系统。

目前国外的管道风险评价技术正在向成熟应用阶段过渡。美国许多管道公司都已进行了风险评价或开发出了风险评估软件,取得了良好的经济效益和社会效益。如 Amoco 管道公司、NGPL 公司 (Natural Gas Pipeline Co. of America)、洛尼尔 (Colonial) 管道公司分别采用风险指标评价模型对所属的油气管道或储罐进行风险评估,取得了良好的经济效益。加拿大等国也相继于 20 世纪 90 年代加入了管道风险评估技术的开发和应用行列。加拿大在 1994 年由国家能源管道协会和国家能源委员会以及加拿大标准协会等学术机构和企业协会共同成立了“管道风险评估指导委员会”,负责组织加拿大油气管道风险评估和风险管理技术开发的方案实施。加拿大的努发 (NOVA) 管道公司和 NGPL 天然气管道公司已开发出第一代管道风险评估软件和系统故障树分析软件,软件分析预测具有相当的准确性和适用性。在欧洲,英国煤气公司开发了用于计算输气管道风险的软件包 RANSPIRE,该软件在英国范围内全面使用后较好地协调了在确定在役城市煤气管道是否符合安全技术标准方面所发生的技术冲突。

总之,发达国家在管道风险识别和风险评价研究的基础上,已经实施了对新建压力管道进行开工前风险论证,对在役压力管道进行风险管理,并定期向社会公告风险管理措施的执行情况。通过风险评价,在提高在役管道管理水平、减少管道事故、延长管道使用寿命和提高管道公司的经济效益等方面取得了显著效果。