

国家自然科学基金面上项目成果专著

陆上油气管线 风险评估技术研究

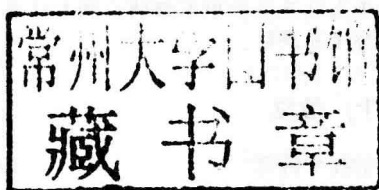
骆正山 等著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

陆上油气管线风险 评估技术研究

骆正山 王小完 张新生 蒋丽云 著



机械工业出版社

本书为国家自然科学基金面上项目“陆上油气管线风险评估技术研究(61271278)”成果。全书共十章,内容基于国外陆上油气管线风险评估研究,结合我国陆上油气管线实际发展、输送介质泄漏特点,综合考虑管线载荷、管材力学性能、缺陷类型与扩展速率、管线损伤等随机特性。主要内容有:首先,反映相关评估参数客观存在的不确定性,准确得到失效概率,为定量描述管线概率风险提供理论依据,对与时间相关的六类失效因素分别建立了失效概率模型、失效概率评估模型、管线失效后果计算模型。其次,运用数值分析方法和新建概率模型,推导出了计算管线失效概率的方法,并采用管线全线的失效概率分析方法对管线失效概率进行评估;利用数值分析理论分析选择适合陆上油气输送管线求解非线性方程的方法,建立了相应的算法模型;将求缺陷失效时间问题和对随机参量进行抽样问题分析并建立相应的数学模型,完成缺陷失效时间和随机参量抽样问题的算法设计;利用流体力学理论,建立了长输油气管线输送介质不同泄漏方式泄漏率的计算模型。最后,采用当量分析法和严重性指数法分析管线介质泄漏造成的综合影响,运用该方法对某输气管线泄漏事故后果进行定量分析和计算,分析结果与实际吻合较好;结合我国实际情况,初步建立了适合我国国情的失效后果分析方法并开发了陆上管线失效概率评估系统。

本书可作为在该领域进行专业研究的技术人员进行深层次研究的辅助教材,也可作为油田、油气管线运营企业技术人员,管线完整性管理、站场管理专业技术人员及其他相关领域工作人员的参考资料,或高等院校相关专业研究生的教材、参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

陆上油气管线风险评估技术研究/骆正山等著. —北京:机械工业出版社, 2016. 5

ISBN 978-7-111-53992-6

I. ①陆… II. ①骆… III. ①石油管道-管道施工-风险评价-研究 IV. ①TE973. 8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 128112 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:易敏 责任编辑:易敏 臧程程 任正一

责任校对:刘怡丹 封面设计:马精明

责任印制:常天培

北京中兴印刷有限公司印刷

2016 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·19.75 印张·400 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-53992-6

定价:43.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

前 言

石油和天然气是地球赋予人类的宝贵能源财富，在近百年中为人类的物质文明发展和技术进步发挥了巨大的作用。然而随着油气管线服役年限的增加和服役条件的恶化，油气输送管线失效事故不可避免，给国民经济造成了巨大的损失，严重影响油气生产企业的社会形象。陆上油气输送管线发生液体介质泄漏时，液体流到地面后，必将沿地面流向低洼处形成一个液池，液池遇火源，必然形成池火。若该液体在地上四处流淌，遇见火源必将引发大面积火灾，其危害将更为严重。另外，池火火灾必然会产生大量的有毒、有害气体和烟尘，在疏散通道有限、室内能见度低时，人员很难顺利逃离火灾现场。陆上天然气管线发生泄漏时，高压气体立即会从破裂处高速喷出，遇火源必然形成射流火。天然气射流火灾的危害是强大的热辐射引起周围建筑物坍塌和大量的人员死亡。1999年奥林匹克公司所属的16in (1in = 0.0254m) 陆上油气管线发生断裂，油气泄漏量达237000USgal (1USgal = 3.78541L)，引发了大的池火火灾，造成两名10岁儿童和多名成年人死亡，造成直接经济损失超过4.5亿美元。

我国目前已建成油气长输管线超过4万km，正在建设中的陕京二线、中哈管线、西部管线等长约1万km。另外，在役油田集输管线超过10万km，城市管网10万km。在役管线中约有60%已运行20年左右，进入事故多发期，一旦发生失效将会发生重大灾难性后果。因此，为了保证油气输送管线的安全运行，对在役管线进行失效风险评估具有非常重要的工程应用价值和科学意义。

本书的研究针对陆上油气管线输送介质泄漏特点，综合考虑管线承受载荷、管材力学性能、缺陷类型与扩展速率、管线损伤等随机特性，主要包括以下内容：首先，反映相关评估参数客观存在的不确定性，准确得到失效概率，为定量描述管线概率风险提供理论依据，对与时间相关的六类失效因素分别建立了失效概率模型、失效概率评估模型、管线失效后果计算模型。其次，运用数值分析方法和新建概率模型，推导出了计算管线失效概率的方法，并采用管线全线的失效概率分析方法对管线失效概率进行评估；利用数值分析理论分析选择适合陆上油气输送管线求解非线性方程的方法，建立了相应的算法模型；将求缺陷失效时间问题和对随机参量进行抽样问题分析并建立相应的数学模型，完成缺陷失效时间和随机参量抽样问题的算法设计；利用流体力学理论，建立了长输油气管线输送介质不同泄漏方式泄漏率的计算模型。最后，采用当量分析法和严重性指数法分析管线介质泄漏造成的综合影响，运用该方法对某输气管线泄漏事故后果进行定量分析和计算，分析结果与实际吻合较好；结合我国实际情况，初步建立了适合我国国情的失效后果分析方法并

开发了陆上管线失效概率评估系统。

综上所述,本书较系统地研究了陆上油气输送管线的失效概率评估问题,建立了基于可靠性的失效概率模型、失效概率评估模型、管线失效后果计算模型,并开发了相应的评估系统。本书对实现油气管线失效评估由定性向定量评估转化,以及我国陆上管线可靠性评估技术的理论研究和应用进行了深层次的探索,为在该领域开展深层次的理论研究和应用奠定了基础。

本书由国家自然科学基金委员会自然科学基金面上项目“陆上油气管线风险评估技术研究”(基金号:61271278)支持,由西安建筑科技大学系统工程研究所、风险评估与数据处理研究所(中心)等科研团队的研究成果形成。在此,作为团队和项目负责人,对长期以来为项目顺利开展提供支持的研究人员和单位表示衷心的感谢,也对为本研究提供试验、数据以及技术支持的中国石油天然气集团公司相关单位表示诚挚的感谢!

由于水平有限,书中有不当之处敬请读者批评指正,若有改进建议请反馈至:luozhengshan@163.com,我将不胜感激!

骆正山

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 概述	1
第二节 研究水平及现状	4
第三节 基于可靠性设计与评估综述	5
第四节 研究范围和主要内容	7
第二章 陆上油气管线失效概率模型研究	11
第一节 概述	11
第二节 失效概率模型综述	13
第三节 腐蚀模型	17
第四节 制造裂纹模型	20
第五节 应力腐蚀开裂模型	24
第六节 坑-沟槽缺陷模型	27
第七节 横向地层移动模型	31
第八节 轴向地层移动模型	34
本章小结	38
第三章 陆上油气管线失效概率评估模型研究	39
第一节 概述	39
第二节 管线失效概率评估	40
第三节 数值分析理论	42
第四节 数值分析的应用	45
第五节 管线输送介质泄漏率计算方法	49
本章小结	59
第四章 陆上油气管线失效后果评价及方法研究	61
第一节 概述	61
第二节 后果分析影响图	62
第三节 后果分析影响图的计算	75
第四节 效用理论	81
第五节 灰色系统	83
第六节 后果分析模型的其他信息	86
本章小结	92
第五章 陆上油气介质泄漏的危害模型研究	93
第一节 概述	93

第二节 介质泄漏的急剧危害模型	94
第三节 介质泄漏的急剧危害后果及计算	105
第四节 介质泄漏的长期危害模型	110
本章小结	120
第六章 陆上油气介质泄漏后果模型中的数学理论及数值计算方法研究	121
第一节 数学概念	121
第二节 后果分析中常用的概率密度函数	122
第三节 数值计算	125
本章小结	141
第七章 陆上油气管线的风险评价与风险管理	142
第一节 管线风险评价	143
第二节 管线风险评价方法	146
第三节 几种常用的风险评价方法	152
第四节 油气管线的风险管理	177
本章小结	182
第八章 陆上油气管线的完整性管理	184
第一节 陆上油气管线的完整性管理发展概况	184
第二节 陆上油气管线的完整性管理	194
第三节 陆上油气管线的完整性评价	205
第四节 陆上输气管线完整性管理案例	212
第五节 陆上输油管线完整性管理案例	225
本章小结	233
第九章 陆上油气管线失效概率评估软件系统	234
第一节 概述	234
第二节 系统需求分析	235
第三节 系统设计与实现	237
第四节 实例分析	244
本章小结	265
第十章 结论与展望	266
致谢	268
附录 A 符号对照表	269
附录 B 管线失效事件的条件概率	275
附录 C 清理效率平均特征	276
附录 D 财产损伤费用	277
附录 E 模块中重要功能的计算过程	278
参考文献	300

第一章

绪论

第一节 概 述

石油和天然气是地球赋予人类的宝贵能源财富，在近百年中为人类的物质文明发展和技术进步发挥了巨大的作用。然而随着服役年限的增加和服役条件的恶化，油气输送管线失效事故不可避免，给国民经济造成巨大的损失，严重影响油气生产企业的社会形象。陆上油气输送管线发生液体介质泄漏时，液体流到地面后，必将沿地面流向低洼处形成一个液池，液池遇火源，必然形成池火。若该液体在地上四处流淌，遇见火源必将引发大面积火灾，其危害将更为严重。另外，池火火灾必然会产生大量的有毒、有害气体和烟尘，在疏散通道有限、室内能见度低时，人员很难顺利地逃离火灾现场。陆上天然气管线发生泄漏时，高压气体立即会从破裂处高速喷出，遇火源必然形成射流火。天然气射流火灾的危害是强大的热辐射引起周围建筑物坍塌和大量的人员死亡。1999年奥林匹克公司所属的16in陆上油气管线发生断裂，油气泄漏量达237000USgal，引发大的池火火灾，造成两名10岁儿童和多名成年人员死亡，造成直接经济损失超过450000000美元。因此，对在役管线进行失效风险评估具有十分重要的意义。

我国是一个能源生产和消费大国，能源生产仅次于美国和俄罗斯，位居全球第三，而能源消费已超过美国和俄罗斯，位居世界第一。石油和天然气作为最重要的能源，在我国的分布极为不平衡，主要分布在我国西部地区，如我国的四大油气主产区：塔里木油气区（西气东输的主要气源）、川渝油气区（中武线油气源）、陕北油气区（京津主要油气源）和柴达木盆地油气区（兰州一线油气源）均分布在西部。从全球石油天然气资源分布看，油气资源主要分布在中东和俄罗斯地区。俄罗斯是世界石油资源最丰富、产量最高的国家之一。1982年探明储量86亿t，占世界的9%以上，仅次于沙特阿拉伯、墨西哥和科威特，居第四位；1982年产原油6.12亿t，约占世界的1/5，居第一位。石油主要埋藏在东部地区，仅西西伯利亚和伏尔加—乌拉尔地区，就占全国石油储量的72%，北高加索为8.1%，中亚、哈萨克、库页岛共为7.8%。俄罗斯的石油生产主要集中在西西伯利亚、伏尔加—乌

拉尔、外高加索、曼格什拉克、提曼—伯朝拉、北高加索、土库曼和乌克兰等 8 个采油区，其中以前 4 个采油区最为重要，也是我国石油天然气主要进口国家和地区之一。按照我国目前对石油天然气的消费，国家发改委预测到 2020 年仅天然气进口将超过 350 亿 m^3 ，相当于 2500t/年。

从目前情况看，我国人均拥有石油天然气资源远远低于发达国家，从国内石油天然气资源分布看，东南沿海和中部地区石油天然气资源分布较少，另一方面，这些地区又是我国经济发展迅速地区，需要更多的石油天然气资源，如何解决这一矛盾，事关我国经济发展整体战略，也直接关系到西部发展战略能否顺利实现。

解决石油天然气资源地区分布不平衡问题，目前世界各国主要采取以下几种措施：一是寻找和开发新的石油天然气资源，即在油气资源相对缺乏地区探寻是否有新的可开采的石油天然气资源来满足需求；二是石油天然气资源的合理调配，即在不增加现有油气资源总量的前提下合理调配各地区石油天然气资源的比例，抓住主要矛盾，用有限的石油天然气资源保证最大限度的经济发展；三是从国外进口石油天然气资源来满足国内经济发展的需求；四是寻找和开发替代能源，如 2009 年 9 月 25 日在北京召开的新闻发布会上，中国地质部门公布的在青藏高原发现的可燃冰（天然气水合物）是环保新能源，但预计在十年以后才可能投入使用。按照“在可持续发展的前提下合理开发石油天然气资源”的原则，目前我国主要采取第二、三项举措，即主要依靠石油天然气资源的合理调配和从国外进口来满足国家经济发展的需要。无论采取上述哪项举措，都无一例外地涉及石油天然气的运输问题，从运输成本角度考虑，世界各国对石油天然气的运输大都采用管线运输，尤其是石油天然气的长距离输送，管线运输在技术上、经济上都更为合理可行。

对我国而言，管线运输是国民经济综合运输的重要组成部分之一，也是衡量一个国家的能源与运输业是否发达的特征之一。我国的长距离油气输送管线始于 1958 年建成的新疆克拉玛依至独山子原油输送管线和 1963 年建成的四川巴县到重庆的巴渝输气管线。目前我国在役油气管线总长超过 18000km，在建和拟建十余条管线，共数千公里。加上 2011 年 1 月 1 日开通输油的俄罗斯斯科沃罗季诺地区至中国黑龙江漠河地区的国际石油输送管线，以及西起俄罗斯的伊尔库茨克，从东北入境直到北京的天然气管线，直接给我国输送天然气的管线已超过 20000km。20 世纪 80 年代以来，世界各国长距离油气输送管线泄漏事故频发，造成了巨大的经济损失和人员伤亡。近年来，随着石油天然气输送距离的增大，我国油气输送管线的失效、断管、爆管事故发生频率呈上升趋势，在 1993 年前的 20 年间共发生 8 起，但仅 1994 ~ 1997 年三年间就发生了 11 起。2004 年 10 月至 2005 年 6 月不到一年时间我国发生陆上油气管线泄漏事件 22 起，其中仅陕西就有四起重大泄漏事故。当前面临的更为严重的问题是，我国陆上长输油气管线大多是 20 世纪 60 ~ 70 年代建设的，已进入中老龄期，若不进行有效管理，将会严重影响管线的安全运行，甚至导致灾难性事故。

从国外石油天然气输送管线运营情况看,运营风险事故也居高不下。据美国国家会计总局 2000 年 5 月的一份管线安全报告,1989~1998 年管线事故数量每年增加 4%,造成 226 人死亡。仅 2000 年管线泄漏量就达到 180 万 USgal,造成德克萨斯州、肯塔基州莱克星顿以及弗吉尼亚州里士满饮用水源的污染以及密歇根州底特律西部 500 户居民被强制疏散。2000 年 8 月 19 日,新墨西哥州卡尔斯巴德一条 50 年的老管线发生爆炸,夺去了 11 个人的生命。又据《俄罗斯石油》杂志报道,俄罗斯新西伯利亚、北高加索、鞑靼以及伏尔加河沿岸地区是该国生态环境最为恶劣的地区,原油和成品油的泄漏严重污染了当地的自然环境,尽管采取了很多措施,但每年仍有大量的管线发生断裂。1999 年管线断裂事故为 27408 起(1998 年为 28523 起)。发生事故的主要原因除管线设计施工遗留的缺陷、损伤等因素外,还有管线的维护不当以及误操作等。因此,陆上长距离石油天然气输送管线的风险评估问题日益突出,对管线系统进行失效概率及后果的评估技术研究具有十分重要的意义。

陆上油气输送管线是我国现代化建设的大动脉,肩负着油气输送的重要使命。要保证管线安全运行,首先要知道管线的安全运行状况、管线的薄弱区域和事故隐患所在,结合输送介质的特点、力学性质,管线经过区域的地质结构、条件,建立可能发生的各种风险的失效概率模型,从而对管线风险进行合理的评价,以便对管线运行期间采取既经济又合理的维护提供依据,也为在突发事件发生后,决策机构采取合理的应对措施,有效降低灾害造成的损失提供重要的依据。从长远看,我国在未来是全球石油天然气消费大国,在今后较长时期内,我国还将建立大量的长输油气管线,满足国防和经济发展的需求,因此,针对与时间相关的各类失效因素分别建立失效评估模型、管线失效后果计算模型对我国未来国防建设和经济发展具有重要的战略意义,在油气管线运营企业具有广阔的应用前景。

对我国而言,目前最大限度地降低管线的运营风险,提高管线的运营管理水平,也是一项十分紧迫的工作。管线风险管理是关系到管线的生存与发展的重要环节。近十几年来,西方发达国家的长距离输送油气管线都已逐步开展了风险管理,美国法律明确规定对新建管线要进行风险评估,在役管线要定期进行风险评估。我国油气输送管线还没有正式开展这方面的工作,基本处于探索性研究阶段。

油气输送工程是我国社会经济发展中的一项重点工程,管线线路长,不同管段通过的地质条件复杂,并且环境温度、湿度不同,管线失效的机理也不同。因此,有必要结合我国管线,特别是“地下”管线的特点,利用国外先进的管线风险管理技术,建立适合我国油气管线实际的风险评价模型,开展油气管线维护检修风险评估和风险管理,提出风险控制方法、原则以及减少系统风险的有效措施,为油气管线维护检修提供决策依据。

本课题研究的问题及其涉及的内容均属国家重点支持的信息应用技术,研究主要针对陆上油气输送管线维护检修的特殊需要,为我国油气输送以及西部大开发提

供新的技术措施。因此该课题的研究符合国家产业政策和《中共中央国务院关于加强技术创新,发展高科技,实现产业化的决定》的精神。研究成果可推广用于我国其他领域及地区的管线风险评估,因而具有广阔的应用前景及市场需求。

第二节 研究水平及现状

管线失效概率分析是管线风险分析的一部分。关于管线的风险分析,国外已进行了 30 多年的研究,并取得了一定的成绩,基本实现了由安全管理向风险管理的过渡,由定性风险分析向定量风险分析的转化,风险分析已逐步规范化。如 1985 年美国 Battelle. Columbus 研究院发表的《风险调查指南》,在油气输送管线风险分析方面运用了评分法。1992 年, W. Kent. Muhlbaueer 撰写的《管线风险管理手册》,详细叙述了管线风险评估模型和各种评估方法,它是美国在前 20 年开展油气管线风险评估技术研究工作的标志性成果,成为世界各国普遍接受的开发风险评估软件的唯一依据。该书在 1996 年再版时作者增加了约 1/3 篇幅详细介绍不同条件下的管线风险评估修正模型,并在风险管理部分补充了成本与风险关系的具体内容,使该书更具实际指导意义。目前,该书已成为各国开展油气管线风险评价研究工作的指导性文献。

我国有关油气输送管线风险评价的研究工作起步较晚。管线风险评价技术由油气储运专家潘家华教授 1995 年在《油气储运》杂志上介绍后,近年已逐渐引起该领域科技人员的注意。西安工业大学刘长虹等利用分层取样法求解球罐失效概率,该算法大幅度减少了计算的次数,提高了计算精度,对管线风险评价中的概率计算有较好的指导意义。南京大学周剑秋在《降低压力管线潜在失效概率的定性探讨》中,从提高焊接质量和无损检测可靠性两个方面论述了降低压力管线潜在隐患的途径。并在《含缺陷压力管线模糊失效概率的分析计算方法》中运用模糊随机概率理论,在考虑压力管线评估参数的随机性和失效模式模糊性的基础上,指出含缺陷压力管线的失效概率本质上是一个模糊随机概率问题,进而提出计算含缺陷压力管线模糊失效概率的一些方法。这种方法与仅考虑参数的随机性相比,更科学合理且符合工程实际。天津大学建工学院余建星、祁世芳提出一种新的油气输送管线可靠性分析方法,即构建综合可靠度的理论设想。充分考虑了管线设计各个特征参数的影响以及它们在管线设计、运行和维护中的变化规律,概念内涵较以前更为丰富、实用,同时还运用神经网络的基本原理和模型进行了分析建模,提供了相关的分析思路和步骤。天津大学郭章林以陕—京管线为研究对象,把油气输送管线作为一个可修复系统,应用结构可靠性方法计算了陕—京管线各部分的可靠性系数和失效概率。根据等风险法默 (Farmer) 曲线法计算了该管线部分管段的风险值。西南石油大学颜冬青也利用结构可靠性方法和灰色理论计算了管线在各种外加载荷下的失效概率。中国石油集团公司管材研究所参加了加拿大 C—FER 公司组织的国际合作项

目, 并采用该项目研究成果对西气东输管线进行了相应的风险预评估, 但定量评价的结果仅能用于对风险值的相对评价和高风险段的确定。在以上的研究中, 通常只是采用单一的分析和计算方法, 对失效因素的分析也不够全面。因而目前在国内还没有一个较系统的关于管线定量风险评价方法的研究结果。

第三节 基于可靠性设计与评估综述

基于可靠性设计与评估 (Reliability Based Design and Assessment, RBDA) 的结构设计和操作的基本目标是: ①在设计寿命内, 结构可以承受所有预期的载荷和变形, 并有适当的抵抗失效的安全裕度; ②结构的变形不影响它的功能和操作需求。对于压力容器和管线而言, 设计中多采用允许应力设计方法, 结构中的应力受最小材料强度的比例限制。在这种方法中, 抵抗失效的安全水平基于安全因子, 即材料的强度除以操作应力 (或设计因子, 安全因子的倒数)。最小安全因子通常根据以过去已有的经验与专业判断为基础的标准进行设计。

基于可靠性设计与评估方法的本质是量化设计的不确定性, 用它们计算概率安全尺度, 这是评估具体设计的基础。这个尺度就是可靠度, 定义为一段时间内结构不发生失效的概率。

一、历史观点

结构可靠度的经典理论是所有概率设计方法的基础, 在第二次世界大战后, 作为一个工具来描述和模拟与结构行为相关的不确定性。

在最初的实际设计中很少应用这个理论, 因为确定性设计方法已经被很好地建立, 概率设计被看作一个复杂且运算量很大的方法。然而, 当看到可靠度可以与确定性设计因子联系起来, 应用到载荷效应与抗力时, 情况开始发生变化。这个发展使得定义确定性设计检验成为可能, 这个检验可以通过校准去满足确定的可靠度目标, 这就意味着, 通过基于载荷与抗力因子设计方法的实际设计, 人们认识到了这个方法的优点。

近三十年来, 许多结构设计标准把概率设计方法作为基础。在一大批关键研究的基础上, 建筑标准倡导使用这个设计方法。在 20 世纪 70 年代早期, 主要标准采用了这个方法, 如 ACI、CSA 与 CEB。现在, 在设计钢铁与钢筋混凝土建筑中, 北美几乎专门使用 LRFD 标准。

过去二十年来, 可靠度理论、软件技术与计算机硬件技术的巨大发展, 使得可靠度计算更加快捷方便。20 世纪 70 ~ 80 年代, 一阶与二阶可靠度概念得到了巨大发展, 导致了对计算机需求的大大降低。这些方法都基于具体的假设, 并不需要针对所有情况。近年来, 随着计算机运行速度的加快, 解决了这个问题, 不能用一阶与二阶可靠度方法解决的问题, 允许使用模拟方法。由于这些技术的进步, 运用概

率设计所需的计算变得更加有效,导致了众多结构概率设计方法的迅速革命。这样的实例有输油管线 (API RP2A-LRFD1993, DNV1989, FIP1985 与 CSA1992)、桥梁 (CSA S6 1988) 与核设备等。

尽管基于可靠性方法还没有在管线工业中得到广泛使用,但是,对于采用这种方法的兴趣越来越强烈,以更低的费用获得稳定的安全水平得到大家的共识。DNV1996 和 ISO16708 (2004) 已经开始采用这些方法作为管线设计的基础。而且,在管线的检测和维护决策中,基于可靠性方法也被逐渐采用。作为一种设计理念,加拿大标准协会的管线设计标准 Z662 (CSA2003) 与 ISO 管线设计标准的草案 (ISO DIS 13623 2004) 都提及了概率方法。除了这些设计应用,工业中已经把基于可靠性方法应用到增加管线运行压力、指定检测与维护决策中。

二、油气管线的极限状态

极限状态指的是这样一种状态,超过这个状态,结构不再满足特殊的设计要求。依据设计要求,陆上油气输送管线极限状态分为以下三种:①最终极限状态 (Ultimate Limit States, ULS), 如大泄漏和破裂,影响到管线失去承压能力的事故,这将导致巨大的安全问题;②泄漏极限状态,即小泄漏状态,该状态不会造成严重的安全后果;③管线服役极限状态 (Serviceability Limit States, SLS), 如椭圆度和沟槽,该状态影响管线的功能性,但不会危及承压能力。

极限状态概念的本质是辨认管线真正的失效模式,考虑到失效后果的严重程度,最终做出决策,以保证管线适当的保守度。在设计管线时,现在的弹性极限设计原则首先应该考虑抵抗环向屈服,而极限状态方法建议管线的设计应该服从上述极限状态分类方法。与最终极限状态相比,服役极限状态的后果相对要小得多,因此两种状态需要更多的保守度。进而保证对真正的失效机理有更为正确的认识,如腐蚀和设备冲击,这比应力极限设计方法有更为一致的安全水平。

考虑到与结构有关的不确定性,基于可靠性设计与评估方法用可靠度来衡量结构的安全性。某一极限状态的可靠度定义为给定长度管线在一定时间段内不达到任何极限状态的概率。即等于 1 减去达到极限状态的概率 (每公里每年的失效概率)。

某一规定极限状态的失效概率通过载荷效应超过相应抗力的概率来计算 (例如过载与抗力不足的混合概率)。载荷效应与抗力分布情况经常通过其他变量,采用分析模型来评估。例如地震载荷效应根据地层加速度的峰值来估计,而管线压力抗力的计算要根据其屈服强度、直径和管壁厚度来进行,最终采用公式表达极限状态函数,该定义导致失效的基本参数的混合。根据极限状态函数计算失效概率和基本参数的概率分布有很多标准方法可供选择。

RBDA 方法是一种设计与评估方法,通过该方法设计管线,要满足预先设定的目标可靠度水平。在管线的整个寿命过程中,这个目标必须得到满足。考虑到失效

后果,对于更严重的后果,需要更严格的目标可靠度水平。

在设定适当的保守度时考虑失效后果严重程度。如管线设计中常用的考虑抵抗环向应力(弹性极限设计)的方法,在这里可能就不大适用,因为小量的屈服并不会对管线产生严重的失效后果。实际中,真正关心的是造成失效后发生爆炸的概率。假设爆破压力与屈服压力的比值随着钢的后屈服刚度变化很大,抵抗屈服设计将导致抵抗爆破的安全水平变化。因此,极限状态方法把爆炸考虑为最终极限状态,以保证对于相应的失效后果有着恰当的保守程度。

在本研究中,给定极限状态的失效概率用载荷超过抗力的概率来计算。载荷效应和抗力分布采用其他变量用统计模型来评估。比如,地震载荷效应用地面加速度峰值来评估,或者管线压力抗力用屈服强度、管线直径和管壁厚度计算。最终,形成一个极限状态函数,把引起失效的基本参数进行综合定义。计算极限状态失效概率和基本参数的概率分布有标准方法可以采用。

三、基于可靠性方法的优点

基于可靠性方法对油气输送管线失效概率及后果评估具有以下几个优点:

1) 该方法为真实结构行为设计。通过确定管线失效的真正模式,进而做出决策以减轻油气输送管线失效的实际后果,避免不切实际的设计准则与过度的保守。

2) 该方法始终保持一致的安全水平。对失效后果较严重的油气输送管线,通过设定更低的失效率(或更高的可靠度水平),可以得到一致的可靠度水平。这是对固定安全因子的一个改进,对于不同的油气管线,固定安全因子导致了不明确的、变化很大的风险水平。

3) 节省费用。把保守度置于最需要的地方(相对于服役极限状态,最终极限状态设定更高的可靠度),对于给定整体安全水平,可以形成最低费用方案。

4) 对新问题的适应性强。可靠度是设计和操作参数的函数,通过对服役管线的维护得到的可靠度可以在设计阶段包含进去,这就对投资支出有着潜在的降低的可能。随着检测技术与维护技术的发展与实践,这将带来相当大的经济收益。

在陆上油气管线失效评估中采用基于可靠性方法,与现有的设计和评估方法有着两个关键性的不同:

1) 设计与评估的检验。既然基于可靠性失效极限状态方法需要考虑实际失效原因,处于支配地位的失效机理,如腐蚀、机械损伤和针对某些管线的地层移动,在设计和评估过程中需要更为详细的考虑。

2) 寿命周期可靠度。对于一些主要失效机理如腐蚀等,其可靠度随着时间变化而变化,设计应该基于寿命周期的可靠度,必须把维护的影响考虑在内。

第四节 研究范围和主要内容

众所周知,引起管线输送介质大量意外流失的原因只有发生管线泄漏和管线破

裂两种情况。从大量管线事故分析报告的统计结果可知,导致管线泄漏的原因主要有内腐蚀、外腐蚀、施工损伤、焊接缺陷、接头缺陷和第三方破坏等;导致油气输送管线破裂的原因主要有第三方破坏、超压、焊接缺陷和腐蚀等。有时,单一因素即可引起油气管线失效的事故,但更多的管线事故是由于多种因素联合作用而引起的。

在引起管线事故的各种因素中,除腐蚀、超压和第三方破坏是变化、发展的之外,其余失效事故因素都是在管线建成后就已经存在了,并且一般没有太大的变化(管材中的可扩展裂纹除外)。随着管线使用寿命的延长,像腐蚀之类的因素必然会导致管线穿孔或破裂事故的发生,所以在概率风险评估中,随时间发展而变化的因素应作为重点来分析考虑。随时间发展而变化的因素,本著作中称为与时间相关的因素,研究与时间相关的因素对管线失效概率影响的模型,称为与时间相关的管线失效模型。本著作研究基于可靠性与时间相关的概率模型、管线失效后果模型及相应的计算方法。

具体讲,本书的内容包括:

1) 基于概率论、数理统计等理论,对陆上油气管线失效概率进行研究,确定不同条件下陆上油气管线失效概率模型,为后续油气管线失效风险评估技术研究奠定基础。

2) 利用成熟的数学、物理理论或经验公式对影响管线失效的与时间相关的各种因素建立失效模型。

3) 利用数值分析法讨论并建立油气管线失效后果模型。

4) 讨论管线失效概率及后果评估。

5) 研究管线失效的主要后果的定量计算方法及模型。

在各国日益重视油气管线安全管理及运营的背景下,油气管线可靠性分析技术从20世纪70年代起在欧美一些发达国家开始了理论研究和应用实践。可靠性分析结果可让管线管理者掌握管线运行状况并了解管线可能发生危险的地段,以便合理分配维护资金,从而变管线的盲目、被动维修为预知、主动性维修。这不仅可做到管线维护费用的最优化使用,而且最大限度地减少了油气管线发生突发性事故所造成的经济损失,最终提高管线的安全水平,增强管线公司的竞争力,达到风险最小、效益最大的目标。同时,在管线风险分析中得到的一些有用的结论和最终结果也可为新建油气管线的安全设计、选择合适的运行路线、进行管线建设规划等提供理论依据。

本书共分十章,各章内容如下:

第一章绪论。简述管线失效概率和可靠性分析技术在国内外的发展现状,以及对油气管线进行概率分析、可靠性分析的目的和必要性,然后介绍本书的基本研究背景和研究内容。

第二章陆上油气管线失效概率模型研究。简述失效模式与失效模型的主要参

量;综合考虑了管线承受载荷、管材力学性能、缺陷扩展速率、管线损伤特征等随机特性,对与时间相关的六类事故因素分别建立失效概率模型,这些模型一方面在一定程度上反映相关评估参数客观存在的不确定性,另一方面能准确得到失效概率,为定量描述管线概率风险提供了理论依据。

第三章陆上油气管线失效概率评估模型研究。应用数值分析理论分析选择适合陆上油气输送管线求解非线性方程的方法,建立相应的算法模型;将求缺陷时间问题和对随机参量进行抽样问题转化为数学问题,建立相应的数学模型,完成缺陷失效时间和随机参量抽样问题的算法设计;利用流体力学理论,综合国内外关于管线输送介质泄漏率计算方法的研究,介绍了管线泄漏的典型模式。针对目前泄漏率计算模型的局限性,利用孔-管模型计算泄漏率的大小,建立了长输油气管线输送介质不同泄漏方式泄漏率的计算模型。

第四章陆上油气管线失效后果评价及方法研究。陆上油气管线泄漏风险要实现定量评估,关键要解决3个问题:首先要搞清楚引起管线事故风险的因素有哪些(确定定量评估的参数)。其次是搞清这些因素诱发管线事故的可能性有多大(失效概率)。第三是管线事故的后果是什么(风险后果的计算模型)。这三个问题是陆上油气管线风险评价的关键技术。本章基于前几章的研究,重点描述的是陆上油气管线发生失效后的后果分析模型,该模型用四个指标来量化管线失效后在生命安全、环境和经济方面造成的后果。

第五章陆上油气介质泄漏的危害模型研究。陆上油气介质泄漏的危害分为急剧危害和长期危害。本章首先较深入地分析了介质泄漏的急剧危害模型,采用事件树方法分析了管线泄漏后的灾害形式,并利用射流火、池火和蒸气云爆炸模型预测火灾的影响区域。建立相关的参数计算模型。给出了介质泄漏所造成的人员死亡、建筑物破坏和经济损失以及失效综合后果的模型。其次,分析了介质泄漏对环境造成的长期危害,并计算了液体介质泄漏后在水面上的扩散区域。针对现有的定性和半定量分析方法,采用当量泄漏体积来表示介质泄漏对环境造成的影响。根据我国的实际情况,初步拟定了人员伤亡和环境损失的风险转化指标。在失效后果综合影响计算模型中,结合对我国国情的分析,在以往案例和法规的基础上,提出适合我国当前实际情况的人员伤亡货币化方法,以2003年为例,初步拟定了有关标准;针对环境破坏经济损失评估尚没有成熟的方法,文中利用资源相应的市场价格来确定生态资源破坏的经济损失。借鉴国外严重性指数转化系数的思想,建立适合我国国情的转化系数。并针对具体的输气管线给出了失效后果分析实例。

第六章陆上油气介质泄漏后果模型中的数学理论及数值计算方法研究。现代数值分析是应用数学研究的一个重要分支,它是研究如何高效地应用计算及进行科学计算的数值方法及理论的一门科学,是程序设计的重要依据,是对数值结果进行理论分析的基础。本章运用数值分析理论和数值计算方法探讨陆上油气管线计算失效概率过程中,运用多项插值法、数值积分方法、割线法、牛顿迭代法以及分段和样

条插值法等方法求解非线性方程最优解的问题。

第七章陆上油气管线的风险评价与风险管理。本章介绍了国内外陆上油气管线风险评价与风险管理的基本理论和发展情况,较深入地研究了陆上油气管线风险评估与风险管理方法,结合我国陆上油气管线的实际情况,以风险理论和管线风险评价模型为基础,讨论了陆上油气管线的风险管理过程,对定性方法、半定量方法和定量方法做了分析和论述。

第八章陆上油气管线的完整性管理。本章介绍了陆上油气管线的完整性管理的发展历程、内容及特点,阐述了陆上油气管线完整性管理的重要性和管线完整性评价方法。结合陆上油气管线运营不断变化的管线系统及环境条件实际案例,对油气管线运营中面临的危害因素的识别和风险评价,制定相应的风险控制对策,改善识别到的不利影响因素,提高油气管线安全性,从而将管线运营的风险水平控制在合理的、可接受的范围内。以此为基础,对可能使油气管线失效的主要威胁因素,采用检测、监控等各种方式,获取与专业管理相结合的管线完整性的信息。对管线的完整性、适用性进行评估,最终达到持续改进安全性、减少和预防管线事故发生、经济合理地保证油气管线安全运行的目的。

第九章陆上油气管线失效概率评估软件系统。简要介绍该评估系统的需求,包括性能需求和功能需求;系统的功能设计、数据库设计,并通过实例分析验证系统计算结果的正确性。

第十章结论与展望,简述本研究的主要成果及不足。