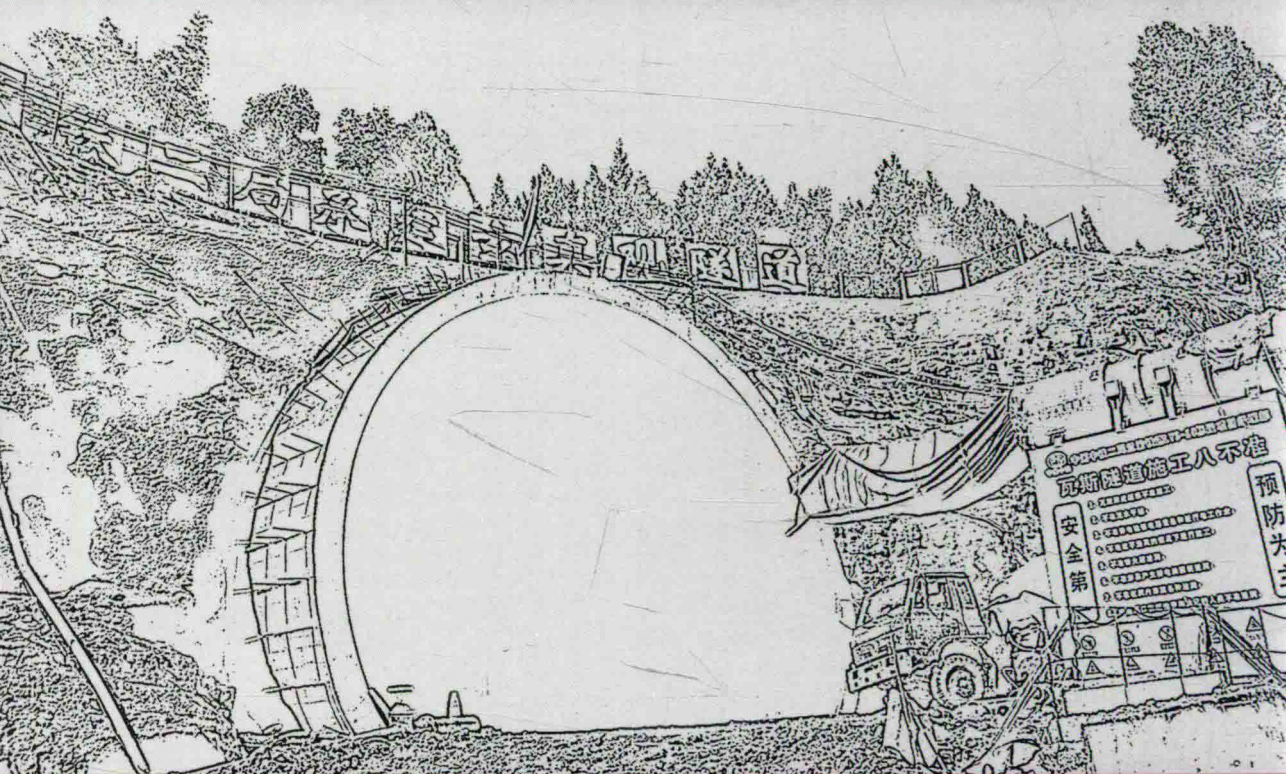


WASI SUIDAO SHIGONG  
FENGXIAN GUANLI YU KONGZHI JISHU  
YANJIU YU SHIJIAN

# 瓦斯隧道施工 风险管理与控制技术 研究与实践

陈寿根 谭信荣 编著



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.

WASI SUIDAO SHIGONG

FENGXIAN GUANLI YU KONGZHI JISHU

YANJIU YU SHIJIAN

# 瓦斯隧道施工

## 风险管理与控制技术 研究与实践

陈寿根 谭信荣 编著



人民交通出版社股份有限公司

China Communications Press Co., Ltd.

## 内 容 提 要

本书紧密结合瓦斯隧道工程施工安全风险管理和工程实践,全书共分9章,第1章主要介绍隧道施工风险管理发展情况,第2章主要介绍瓦斯隧道施工的工程特性,第3章主要介绍隧道施工安全风险管理体系,第4章介绍瓦斯隧道施工的风险源,第5章介绍瓦斯隧道施工风险评估技术,第6章介绍瓦斯隧道施工风险控制技术,第7章介绍瓦斯隧道施工安全风险管理的信息化技术,第8章结合兰渝铁路瓦斯隧道施工介绍瓦斯隧道施工安全风险管理和实践情况,第9章总结瓦斯隧道施工安全风险管理和现阶段取得的主要成果,并根据作者从事瓦斯隧道工程的自身经验对瓦斯隧道施工安全风险评估存在的不足进行了总结。

本书内容全面、丰富、层次清晰,理论阐述清楚,方法叙述明确,既有利于读者系统掌握理论知识体系,又便于在工作中进行实际应用,可供从事隧道工程技术工作的科研、设计、施工人员使用,可作为高等院校隧道工程及相关专业师生的参考书,也可供政府部门或企业的有关安全管理人员参考查阅。

### 图书在版编目(CIP)数据

瓦斯隧道施工风险管理与控制技术研究与实践 / 陈寿根, 谭信荣编著. —北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015. 4

ISBN 978-7-114-12179-1

I. ①瓦… II. ①陈… ②谭… III. ①瓦斯隧道—隧道施工—风险管理—研究 IV. ①U459.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 072941 号

书 名: 瓦斯隧道施工风险管理与控制技术研究与实践

著 作 者: 陈寿根 谭信荣

责任编辑: 温鹏飞

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010) 59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 12.25

字 数: 283 千

版 次: 2015 年 4 月 第 1 版

印 次: 2015 年 4 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-12179-1

定 价: 39.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

# 前言

截至 2012 年年底,我国大陆地区运营的铁路隧道已达 10100 座,总长度约 7600km;在建铁路隧道约 3800 座,总长度约 7300km;规划铁路隧道 5100 座,总长度约 10800km。随着我国隧道建设的快速发展,隧道建设及运营规模已经处于世界第一位。隧道建设区域、建设环境也已发生较大变化,建设区域已涵盖我国各个省(区、市),建设环境日益复杂。由于我国煤炭和天然气分布广泛且富集程度不一,隧道建设不可避免地穿越大量含瓦斯地层,施工过程中经常会遭遇瓦斯灾害,对隧道工程的建设 and 施工人员的安全构成极大威胁。

尽管我国在隧道建设方面已积累了丰富经验,在隧道的修建技术上取得长足发展和巨大进步,形成了大量的成果,但由于瓦斯赋存地质条件的复杂性,瓦斯事故危险性大,瓦斯隧道施工风险评估缺乏系统的分析理论体系和计算方法,使得瓦斯隧道施工风险管理与控制的难度较大。

瓦斯频繁地出现在隧道施工中,如达成线炮台山隧道,株六复线新岩脚寨隧道,南昆线家竹箐隧道,内昆线朱嘎隧道、青山隧道,水柏线发耳隧道,贵广线李家院隧道、小范坪隧道、尖山营隧道、太阳庄隧道、高田头隧道、上寨隧道、都匀 2 号隧道,六沾线乌蒙山、三联隧道等,成渝高速中梁山隧道,广邻高速华蓥山隧道、都汶高速紫坪铺、龙溪隧道,垫邻高速明月山、铜锣山隧道,镇胜高速槽箐头、孙家寨隧道等,均在施工中出现不同程度的瓦斯灾害。随着瓦斯频繁地出现在隧道施工中,瓦斯造成的重、特大灾害安全事故也在急剧上升。在施工中,瓦斯事故一旦发生,不仅延误工期、大幅度地提高隧道施工费用,而且严重威胁施工人员生命,造成巨大的经济损失和恶劣的社会影响。如贵昆线岩脚寨隧道发生了 5 次瓦斯燃烧和 2 次严重的瓦斯爆炸,被迫停工 76 天,伤亡人数逾百人;达成线炮台山隧道瓦斯爆炸死亡 13 人,被迫停工 7 个月;紫坪铺枢纽工程的友谊隧道,先后发生瓦斯燃烧、爆炸 40 余次,并于 2004 年 12 月 7 日发生恶性瓦斯爆炸事故,造成 60 多人伤亡;董家山隧道进口于 2005 年 12 月 22 日发生特大瓦斯爆炸事故,造成 44 人死亡,11 人受伤,直接经济损失 2035 万元。

本书以兰渝铁路 LYS-10 标段四座高瓦斯隧道(仲家山隧道、玄真观隧道、四方山隧道、肖家梁隧道)为工程背景,并结合贵广铁路小范坪隧道、都汶高速公路紫坪铺隧道、沪蓉高速公路明月山隧道等煤系瓦斯隧道的相关成果,综合采用技术调研、理论分析、现场

试验与测试、计算机编程、归纳和总结等手段,对瓦斯隧道施工风险管理与控制技术展开研究,构建了“瓦斯隧道施工安全风险评价指标体系”,开发出“瓦斯隧道施工安全评估与管理系统”,取得了“瓦斯隧道施工风险评估技术”、“瓦斯隧道超前地质预报技术”、“瓦斯隧道监测技术”、“瓦斯隧道施工设备防爆改造技术”、“瓦斯隧道塌方处理技术”等一系列技术成果。这些成果的研究成功及在施工中的应用,为实现瓦斯隧道施工的安全、快速、优质完成起到了非常重要的作用,并为今后类似工程的风险管理和控制提供范例,为我国瓦斯隧道施工规程和规范的制定和完善提供依据。

在本书的编写和研究中得到了中铁二局集团有限公司的大力支持,特别是马辉教授级高级工程师、李应华高级工程师、刘杰高级工程师、杜文高级工程师的全力帮助。在现场测试和试验中得到了中铁二局集团公司等单位同仁的大力支持和帮助,在此对他们表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免有错误和不足之处,恳请专家同行批评指正,也热诚欢迎读者提出宝贵的意见。

编 者

2014年8月于成都



# 目 录

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 第 1 章 隧道施工风险管理发展概述      | 1  |
| 1.1 隧道施工风险源研究现状         | 1  |
| 1.2 隧道施工风险评价方法研究现状      | 2  |
| 1.3 隧道施工风险管理标准研究现状      | 6  |
| 1.4 隧道施工风险评估与管理系统开发现状   | 7  |
| 第 2 章 瓦斯隧道施工特性          | 10 |
| 2.1 瓦斯灾害分析              | 10 |
| 2.2 瓦斯赋存与流动规律           | 13 |
| 2.3 瓦斯隧道施工技术            | 20 |
| 第 3 章 隧道施工安全风险管理体系      | 28 |
| 3.1 风险管理                | 28 |
| 3.2 隧道工程风险管理的特点         | 30 |
| 3.3 隧道施工安全风险管理基本流程及主要内容 | 30 |
| 第 4 章 瓦斯隧道施工风险源         | 35 |
| 4.1 隧道施工风险源分析和分类        | 35 |
| 4.2 隧道施工风险识别            | 38 |
| 4.3 瓦斯隧道施工风险指标体系的建立     | 58 |
| 第 5 章 瓦斯隧道施工风险评估技术      | 67 |
| 5.1 安全风险评估模型的提出         | 67 |
| 5.2 风险发生概率和等级标准         | 68 |
| 5.3 风险发生后果等级标准          | 72 |
| 5.4 瓦斯隧道施工风险分级标准        | 73 |
| 5.5 瓦斯隧道施工风险接受准则        | 73 |
| 5.6 安全风险评价方法及选择         | 74 |
| 5.7 瓦斯隧道风险评价            | 80 |
| 5.8 瓦斯隧道安全风险评估报告        | 83 |
| 第 6 章 瓦斯隧道施工风险控制技术      | 87 |
| 6.1 瓦斯预测技术              | 87 |

|      |                           |     |
|------|---------------------------|-----|
| 6.2  | 瓦斯隧道施工通风技术 .....          | 96  |
| 6.3  | 瓦斯隧道施工设备改造与配置 .....       | 103 |
| 6.4  | 隧道瓦斯抽排技术 .....            | 109 |
| 6.5  | 瓦斯隧道塌方处理技术 .....          | 117 |
| 6.6  | 瓦斯事故应急预案 .....            | 118 |
| 6.7  | 瓦斯隧道施工管理制度 .....          | 124 |
| 第7章  | 瓦斯隧道施工风险动态管理与控制系统开发 ..... | 133 |
| 7.1  | 系统开发基础工具 .....            | 133 |
| 7.2  | 系统总体设计 .....              | 136 |
| 7.3  | 瓦斯隧道施工安全风险评估与管理系统 .....   | 143 |
| 第8章  | 瓦斯隧道施工安全风险管理的实践 .....     | 163 |
| 8.1  | 玄真观隧道工程概况 .....           | 163 |
| 8.2  | 瓦斯隧道空气质量现场测试 .....        | 164 |
| 8.3  | 玄真观隧道施工安全风险评估 .....       | 173 |
| 8.4  | 玄真观隧道风险处理 .....           | 179 |
| 第9章  | 结论与展望 .....               | 181 |
| 参考文献 | .....                     | 184 |



# 第1章 隧道施工风险管理发展概述

瓦斯越来越频繁地出现在隧道施工中。为尽可能降低瓦斯隧道施工的风险,本书将根据瓦斯隧道施工的特点,介绍瓦斯隧道施工风险管理与控制技术。

由于我国在 20 世纪 80 年代引进项目管理理论、方法及体系时,没有将风险管理的理论方法及体系同时引入<sup>[1]</sup>,致使我国在风险管理理论研究方面起步较晚,过去那些分散的、孤立的风险评估与管理理念与方法不适合于瓦斯隧道工程建设,无法满足生产实践的需要。由于目前对瓦斯隧道施工过程中的风险认识不够,缺乏科学的风险评估工具,缺乏科学的风险管理体系,加上地下工程具有项目投资大、技术复杂、建设工期长、地质条件复杂、施工环境差等特点,是一个复杂的系统<sup>[2-3]</sup>,建设中的风险具有多样性和多层次性,时间跨度大,动态变化大,管理难度大<sup>[4-5]</sup>。在当前的情况下,研究适合于瓦斯隧道施工的风险分析、评估和管理的理论和方法已迫在眉睫。

## 1.1 隧道施工风险源研究现状

杜立新等<sup>[6]</sup>研究了兰渝铁路隧道施工存在富水砂岩、高地应力软岩大变形、瓦斯(天然气)、岩溶(煤矿采空区)突泥突水四大高风险源的特点及危害,较详细地分析了应对大变形的措施和施工方案,通过现场调研、专家会诊、施工试验,以及不断地优化设计和施工方法,初步探明了主要影响因素,制定了继续试验性施工的针对措施,使得兰渝铁路隧道施工总体处于受控状态。

管飞<sup>[7]</sup>采用专家调查法对复杂地质条件下某高速公路长大隧道工程施工图设计阶段安全风险事件和风险源进行辨识,对风险事件概率等级和损失后果进行评价,通过对专家调查数据进行统计,得到相关风险事件的概率等级和损失后果等级,进而得到相关风险事件的风险等级,采用层次分析法对风险事件及其风险源的重要性进行排序,为风险控制措施的实施提供依据,并在施工图设计的基础上给出风险控制措施建议,以满足降低风险等级的需要。

周少东<sup>[8]</sup>介绍了武汉轨道交通 2 号线一期工程汉口站至范湖站区间盾构隧道成功穿越低瓦斯地层的地质及施工情况。就目前的技术水平和存在的不足,提出了瓦斯地层勘察的基本要求。分析了瓦斯地层修建隧道的风险因素和风险源。针对性地提出了瓦斯地层隧道的电气设备防爆改造、监控监测系统、隧道通风系统、盾构掘进参数、施工工艺、人员培训等方面的技术措施、方案和技术参数。

余祖佳<sup>[9]</sup>依托赤水至望谟高速公路仁怀至赤水段莫洛隧道煤系地层隧道工程,阐述了莫

洛隧道煤系地层瓦斯揭煤施工的基本原则,揭煤防突出施工的流程、步骤,揭煤防突措施与效果,探讨了公路隧道瓦斯防治技术措施,确保了高风险瓦斯隧道施工安全。

朱颖<sup>[10]</sup>简述了高风险隧道设计、评估的重点,并根据线路实例,介绍了抓好地质选线、线路设计的原则,提出规避、减轻、避免工程风险设计的理念和措施与建议,对建设世界一流客运专线设计,具有重要指导意义。

由广明<sup>[11]</sup>从风险识别、风险评估、风险应对、风险监控等方面介绍了隧道施工风险管理,分析了公路隧道施工风险的特征,提出了公路隧道施工风险应对技术措施,以完善公路隧道风险管理,从而更好地预防不良地质灾害的发生,保证隧道施工的安全。

沈殿臣<sup>[12]</sup>分析了瓦斯隧道对土体的影响,以梅岭关高瓦斯隧道工程实例,从瓦斯爆炸基本原理分析得到,瓦斯的提前释放到安全压力范围内,火源和通风的管理是瓦斯控制的关键点。

叶飞<sup>[13]</sup>首先对施工过程中面临的各种风险进行了综合分析,包括揭煤施工风险、瓦斯突出风险、采空区施工风险、围岩大变形风险、塌方风险,以及边仰坡失稳风险等。进而有针对性地提出了风险规避措施,包括安全教育、揭煤防突措施、瓦斯防治措施、边坡卸载、现场监控,及地质超前预报等。依据与隧道结构之间的空间关系,将采空区分为了上位式、侧位式、交叉式、重叠式,以及下位式等类别,并在对现有采空区处治措施全面分析的基础上,将采空区处治措施归纳为“探”、“钻”、“喷”、“填”、“撑”、“注”、“灌”等方面。

郝俊锁<sup>[14]</sup>为消除隧道穿越含浅层天然气地层瓦斯给施工带来的安全隐患,对新建兰渝铁路梅岭关隧道所处区域构造位置、地层岩性与浅层天然气构造和储层关系以及天然气储集层的类型、发育特征对隧道的影响等方面进行系统详尽的研究,并通过施工揭示天然气涌出情况和监测分析其涌出规律等提出针对性预防措施,指出浅层气对梅岭关隧道的危害程度。

邓加亮<sup>[15]</sup>以娄(娄底)新(新化)高速公路刘家排隧道为工程背景,针对公路瓦斯隧道施工风险分析开展研究。主要的研究工作与内容如下:论述了风险评估是确保高瓦斯隧道安全施工的重要手段,是今后岩土与隧道工程发展的重点;采用专家调查法识别出刘家排瓦斯隧道施工的主要风险因素,并利用层次分析法(AHP)建立该瓦斯隧道施工风险层次结构,结合1~9标度法计算出了各基本风险事件的综合权重;根据瓦斯隧道施工风险度量具有模糊性的特点,运用模糊理论对公路瓦斯隧道施工风险估计中的定性问题进行量化处理,得到了刘家排隧道施工基本风险因素的概率估计及损失估计结果。

郭明香<sup>[16]</sup>总结了风险管理的一般程序,针对静态风险分析存在的缺陷,提出了实现动态分析的方法,并以瓦斯地质条件下的隧道为例阐述了风险动态分析的一般过程。

## 1.2 隧道施工风险评价方法研究现状

风险评估一般分为风险辨识和风险评价两个部分:风险辨识的方法一般包括专家调查法、德尔菲法、头脑风暴法、核对表法以及事故统计法等;风险评价的方法又可根据方法的数理原理、数据要求及作用效果分为定性评价方法、定量评价方法和定性定量相结合的方法。

对于风险辨识和评价方法的选择既要考虑方法的适用性、可行性和可操作性,还要考虑被评价对象的类型与特点。风险辨识方法的选择较为简单,根据项目风险特点即可选择,风险评

价方法的选择则较为复杂。首先,定性评价的方法目前使用得越来越少,因为使用该类方法时受评价人员主观因素影响较大,易导致评价结果的不准确;其次,现阶段对定量评价方法的使用也不太多,主要是定量分析所需参数、分布及统计特征等信息难以准确获得,定量计算函数的建立难以准确地契合实际情况,导致该类方法的推广使用受到限制;目前使用最多的就是定性与定量相结合的方法,该类方法既能满足风险评价难以量化的要求,还能通过一定的技术手段有效降低评价人员的主观影响,故该类方法是目前管理学及其他学科风险评价中常常选择的一种方法。

风险辨识与评价的方法多种多样,同一方法在不同领域的应用也不尽相同,国内外许多专家学者在该领域都做出了不同程度的贡献。H. H. Einstein<sup>[17-20]</sup>指出了隧道及地下工程中风险分析的特点和理念,并基于可靠度的方法对岩石隧道的风险分析方法进行了深入研究。美国 T. L. Saaty 教授于 70 年代初提出了著名的层次分析法<sup>[21]</sup> (The Analysis Hierarchy Process, AHP),一种可以对多方案、多目标进行决策的方法,其实质是一种策略思维的数学体现。Saaty 教授利用该方法为美国国防部的“应急计划”、美国国家科学基金会电力分配问题、苏丹政府运输问题的决策提供了理论依据,该方法于 1982 年由 Saaty 教授的学生 H. Gholajnezhad 首次介绍给中国学者。之后,Saaty 教授又在 AHP 的基础上进一步提出了 ANP 的理论与方法。美国学者 L. A. Zadeh<sup>[22]</sup>提出了表达事物模糊性的重要概念——隶属函数,考虑了风险指标评价中的不确定性因素,利用定性的模糊评价简化并规范评价过程,结合模糊数学等手段实现了定性与定量相结合,使评价结果能客观、准确地反映被评对象的风险状态。

国内关于风险评估方法的应用更是数不胜数,特别是近年来国家对工程安全重视程度提高之后,国内诸多专家学者均致力于该领域的研究,取得了不少成果。

同济大学的黄宏伟<sup>[23-24]</sup>教授等在《可信性方法在深基坑施工期风险分析中的应用》中综合利用可信性风险分析方法和基于权重的专家调查法,对深基坑工程施工期的风险概率、后果进行评价,最终评价出深基坑工程施工期的总体风险度。在《深基坑工程施工中的风险管理》中综合运用专家调查法、层次分析法对深基坑工程施工阶段的风险进行评价,并提出了风险管理措施。陈龙<sup>[25]</sup>在其论文中提出了一种新的方法用于处理专家数据及意见——“信心指数法”,以保证分析结果可以准确有效地反映出专家评审意见。文中还提出“风险概率增强系数”的概念,建立起具体工程参数与风险一般性规律之间的接口,提高了该方法的普适性和实用性。边亦海<sup>[26-27]</sup>以上海港国际客运中心基坑近接中远老楼为依托,在广泛调研的基础上,在控制变形的前提下对深基坑支护结构稳定性进行了可靠性分析,分析了基坑支护的破坏形式,并建立了相应的可靠性分析的功能函数和蒙特卡罗分析模型,统计了模型中涉及到的一系列参数的分布形式及特征变量,如土层的黏聚力、内摩擦角、重度,再如基坑周边的附加荷载、基坑支护结构尺寸等。李罡<sup>[28]</sup>等在《超大直径盾构水中进洞风险分析》中结合上海长江隧道水中进洞工程,建立了盾构进洞风险指标体系,运用层次分析法计算出该体系各层指标的权重系数,并结合模糊综合评判的方法评价出总风险。闫玉茹<sup>[29]</sup>等在《大连湾海底隧道钻爆法施工风险评估研究》中以大连湾海底隧道工程为背景,采用基于信心指数的专家调查法对预工可阶段的施工风险进行了辨识、分析。孟卫东<sup>[30]</sup>等在《基于灰色评价方法的企业人力资本投资风险研究》中建立了适用于人力资本投资风险评价的指标体系,并利用灰色系统理论中的灰色评估方法评价了企业人力资本投资的风险,取得了较好的成效。顾雷雨<sup>[31]</sup>等在《对某拟

建海底隧道运营期的风险评估》中建立了适用于海底隧道运营期风险评估的指标体系,利用层次分析法计算出体系各指标的权重系数,再运用基于信心指数的专家调查法得到底层指标的评价信息,从而评价出海底隧道运营期的安全风险。黄宏伟<sup>[32]</sup>等在《复合式土压平衡盾构刀盘失效风险分析》中综合运用专家调查法和故障树分析方法(FTA),评价了复合式土压平衡盾构的刀盘失效风险,为施工措施的制定提供了理论依据。胡群芳<sup>[33]</sup>在其博士论文中以上海长江隧道工程为依托,利用专家调查法结合事故分析识别出施工阶段的主要风险指标,统计了工程所处区域地质参数的分布特征及各类相关系数,运用 ANSYS 中的 PDS 模块,基于可靠度理论对施工重点区域的支护结构风险进行了失效率计算。王燕<sup>[34]</sup>等在《基于风险的隧道结构全寿命设计方法研究》中将风险理念引入到隧道结构全寿命设计当中,综合利用专家调查法、层次分析法等方法对隧道结构的危险进行评价,为全寿命设计提供了理论依据。朱琳<sup>[35]</sup>等在《上海地铁 11 号线关键节点工可阶段工程风险评估》中以上海地铁 11 号线关键节点工程为背景,综合利用专家调查法和层次分析法对其工可阶段的施工环境、工艺、质量和安全等方面的危险进行识别和评估,并依据评价结果提出了工程施工的建议。

山东大学的李术才、李景龙<sup>[36]</sup>等在《地下工程的风险分析研究》中以抽水蓄能水电站主厂房为工程背景,建立了危险评价指标体系,综合运用层次分析法、模糊评判法分析了其设计施工期间的危险,为实际施工提供了有效的理论依据。许振浩<sup>[37]</sup>等在《基于层次分析法的岩溶隧道突水突泥风险评估》中建立了适用于岩溶隧道突水突泥危险评价的指标体系,综合运用层次分析法、基于信心指数的百分制评分法对岩溶隧道突水突泥危险进行了评价。葛颜慧<sup>[38]</sup>等在《基于危险评价的岩溶隧道综合超前地质预报技术研究》中建立了岩溶隧道突水危险评价指标体系,基于地质学、岩溶学,综合运用专家调查、层次分析、模糊综合评判等方法对岩溶危险进行了评价。在沪蓉西高速公路乌池坝隧道的实践证明,评价结果为优化综合超前地质预报的方案和流程提供了理论依据。李利平<sup>[39]</sup>等在《基于岩溶突涌水危险评价的隧道施工许可机制及其应用研究》中也利用层次分析法计算出指标体系的相对权重,结合基于信心指数法的专家调查法计算出岩溶突涌水危险度,并将该套理论与体系应用于季家坡、鸡公岭、天鹅岭 3 条特长岩溶隧道。李媛<sup>[40]</sup>等在《盐岩地下油气储库运营期危险的故障树分析》中以江苏金坛盐岩地下油气储库工程为依托,基于故障树基础理论建立了储库运营期危险分析模型,结合最小割集和结构重要度等理念分析了盐岩地下油气储库运营期的危险,为其施工阶段制定合理对策提供了指导意见。贾超<sup>[41]</sup>等在《盐岩储气库运营期时变可靠度计算及风险分析》中也有类似分析。

北京交通大学的张顶立<sup>[42]</sup>教授等在《基于风险系数的海底隧道纵断面确定方法》中,以厦门翔安海底隧道选线为工程背景,建立了海底隧道纵断面线路方案评价指标体系,运用层次分析法计算各指标的相对权重,通过专家打分得出各线路方案总体评价分数,为最优线位的选取提供了参考意见。李兵<sup>[43]</sup>等在《风险系数法在海底隧道平面线位确定中的应用》中也有类似介绍。贾嘉陵<sup>[44]</sup>等在《北京西单立体交通工程施工安全危险模糊分析》中以北京西单立体交通工程为依托,综合利用层次分析、模糊综合评价、专家调查等理论,对该工程的安全危险进行了评价,为后期明确适合西单地区的施工方法提供了指导意见。

西南交通大学的仇文革<sup>[45]</sup>教授提出将近接危险区域划分理念应用于近接工况下的危险评估,李冬梅<sup>[46]</sup>建立了适用于铁路隧道危险评价的指标体系,并将层次分析法、模糊综合评价

法、专家调查法和熵度法应用于风险评价中。王志远<sup>[47]</sup>、冯小豪<sup>[48]</sup>也在各自的研究领域进行了相关研究。李俊松<sup>[49]</sup>基于岩土力学与可靠度原理,以京石客运专线石家庄隧道工程为依托,在大量调研的基础上建立了用于基坑失稳风险评价的蒙特卡罗功能函数,统计出各参数的分布形式,对工程中各近接段落的失稳风险进行了定量评价,为制定合理有效的风险控制措施提供了理论依据。

综上可知,定性与定量相结合的风险评价方法最为常用,具有易操作、适用性广和准确性较高等特点。

通过对国内外相关文献的广泛调研可知被国内外学者广泛采用的定性与定量相结合的风险评价方法主要包括以下几种:

(1) 主观评分法<sup>[50-51]</sup>

主观评分法是利用专家经验对风险因素进行评分的一种方法,主要借鉴专家以往类似工程的经验进行评价。以 0~10 之间的整数作为评价标准,其中 0 表示风险最低,10 表示风险最高,专家按照此标准对每一风险因素的风险度和重要性进行评价,之后再将各风险指标的权重相加,再与风险评价的标准比较分析即可。主观评分法操作流程见图 1-1。



图 1-1 主观评分法步骤

(2) 决策树法<sup>[52]</sup>

决策树法可以为风险决策提供一种手段与工具,其特点是利用直线将方框、圆点连接形成类似于树状结构的模型,可以形象地描述决策路线及方法,其中直线、方框和圆点各自代表其特定的含义。

(3) 外推法<sup>[51]</sup>

外推法也是一种被广泛用于风险评价的方法,可以按照推理方式的不同将其分为前推法、后推法和旁推法,其基本原理均是设法将历史的经验和数据与想要推测的未知事件建立联系,以推测其发生的概率和后果。这三种类型的外推法详细介绍见表 1-1。由于其简便性、可操作性使得这三种类型的外推法在工程项目中均得到了广泛应用。

外 推 法 介 绍 表 表 1-1

| 方法   | 前 推                                                                              | 后 推                                                        | 旁 推                                                    |
|------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 方法介绍 | 根据以往类似工程的经验总结推测未来工程风险概率及后果。可以通过对历史数据的周期性进行统计,或者通过对历史数据进行曲线拟合得到曲线的公式,从而实现对未来风险的预测 | 将未知事件的概率及后果与已发生的一些类似事件作联系、对比,将未来未知事件归结到有据可查的事件,最终实现未知事件的评价 | 根据已有项目的数据及经验对类似项目的风险进行评价,在充分考虑新环境变化影响的前提下,可实现类似项目的风险预测 |

(4) 影响图法<sup>[53-56]</sup>

该方法最早由美国 Howard 教授等人提出,它是一种利用网络图形来表示决策分析模式的方法。该方法可以利用图形来表征概率估计和决策分析,将贝叶斯条件概率定理应用在图形分析上,可用有效的图形语言来表征复杂的具有不确定性的决策问题。由于该方法的新颖性、可视性及可操作性,使其在风险评价领域的应用较为广泛。

### (5) 蒙特卡罗模拟法<sup>[57-67]</sup>

蒙特卡罗模拟法起源于赌徒的博弈,于第二次世界大战期间得以应用,主要应用在当时原子能研究领域,该方法为其提供了一种数学模拟的途径。蒙特卡罗模拟法又称随机抽样或统计试验方法,是一种依据统计理论,结合计算机技术来研究风险发生概率、损失的数学方法。

### (6) 故障树分析法<sup>[68-75]</sup>

故障树分析法最早是由美国贝尔(Bell)电话实验室的 Watson 和 Meams 等人提出和使用,起初该方法被用于预测民兵式导弹发射控制系统的安全性,之后随着研究的进一步深入和研究领域的拓宽,该方法被广泛应用于各个行业和领域的研究。

### (7) 层次分析法<sup>[76-84]</sup>

层次分析法由美国学者 T. L. Saaty 教授于 70 年代初提出,它是一种可以对多方案、多目标进行决策的方法,其实质是一种策略思维的数学体现。Saaty 教授利用该方法为美国国防部的“应急计划”、美国国家科学基金会电力分配问题、苏丹政府运输问题的决策提供了理论依据,该方法于 1982 年由 Saaty 教授的学生 H. Gholajnezhad 首次介绍给中国学者。

### (8) 模糊综合评价法<sup>[85-93]</sup>

模糊综合评价法是由美国控制论专家艾登(Eden)于 1965 年提出的,同年美国控制论专家、加利福尼亚大学查德(Zadeh)教授也提出了表达事物模糊性的重要概念——隶属函数,充分考虑了风险指标评价中的不确定性因素,利用定性的模糊评价简化并规范评价过程,结合模糊数学等手段实现了定性与定量相结合,使评价结果能客观、准确地反映被评对象的风险状态。

## 1.3 隧道施工风险管理标准研究现状

国外相关专家及学者在各自研究领域提出了相关的风险评价标准,其中隧道工程领域风险分析的代表人物是加拿大的 H. H. Einstein<sup>[94-97]</sup>,他撰写了许多具有指导意义的文献,为隧道工程风险分析的理念建立、标准制定和方法研究做出了巨大贡献。他在该领域发表的主要文献有 *Geological Model for Tunnel Cost Model, Risk and Risk Analysis in Rock Engineering, Decision Aids in Tunneling, On The Development of a Risk Management Plan for Tunneling*。英国 Southampton 大学 Chapman C B<sup>[98]</sup>教授在 *Risk Analysis for Large Projects: Models, Methods and Cases* 中提出了大型工程风险评估的方法及标准,以“风险工程”理念为基础阐述了大型工程风险分析的模型、方法和标准,并通过实际工程案例进行说明,如 1976 年北海油田输油管道工程和 1979 年伊拉克火力发电厂工程。

隧道工程建设风险评估研究最具代表性的是英国著名学者 J. B. Burland<sup>[99-101]</sup>,他依托于具体工程项目,从项目实际风险评估工作中探寻规律,总结出工程对环境影响的评价方法及标准,他在该领域发表的主要文献有 *Settlement of Buildings and Associated Damage, Assessment of Risk Damage to Buildings due to Tunneling and Excavation, Modeling Tunneling Induced Settlement of Masonry Buildings*。

除此之外,在隧道及地下工程风险评估标准研究方面, T. Isaksson<sup>[102]</sup>, R. Stunk<sup>[103]</sup>, J. J. Reilly<sup>[104]</sup>, J. Brown<sup>[105]</sup>, Vallejo<sup>[106]</sup> 和 B. Nilsen<sup>[107]</sup> 也在各自研究领域提出了风险评价

的相关标准。

国内关于工程风险评估的研究起步较晚,近几年才逐步提出了风险评估相关的标准,国内相关权威组织机构也发布了一系列指导性文件。如中华人民共和国铁道部<sup>[108]</sup>颁布了《铁路隧道风险评估与管理暂行规定》(铁建设[2007] 200号)。该暂行规定主要由铁路隧道风险评估和铁路隧道风险管理两部分组成:风险评估部分主要介绍了铁路隧道风险评估方法、评价标准和接受准则等内容;风险管理主要介绍了管理构架及管理职责、可行性研究阶段风险管理、初步设计阶段及施工图设计阶段风险管理、招投标阶段风险管理和施工阶段风险管理。该暂行规定对铁路工程的风险概率等级标准、铁路工程风险损失等级标准、第三方经济损失等级标准、人员伤亡等级标准、风险评价矩阵和风险接受准则都做了详细的介绍。该规定是我国第一本关于铁路工程建设风险管理方面的规定,可以称之为风险评估与管理规定的里程碑。

国内许多相关专家学者也在各自的研究领域提出了许多风险评价的相关标准。李兵<sup>[109]</sup>以厦门海底隧道工程为背景,结合监测结果和数值模拟结果制定了安全风险控制标准;房倩<sup>[110]</sup>在保证既有结构安全的前提下,以地层变形为控制标准提出了既有建筑物风险评价标准;边亦海<sup>[111]</sup>基于直观且物理意义明确的裂缝宽度,提出了由于深基坑开挖引起的建筑物潜在破坏风险的评价标准;胡群芳<sup>[112]</sup>针对城市地铁隧道与邻近公路的近接情况,结合公路沥青路面使用性能指标提出了沥青路面破坏风险评价标准;张雁<sup>[113]</sup>对《城市轨道交通地下工程建设风险管理规范》(GB 50652—2011)的编制背景、指导思想、编制过程等进行了详细说明,结合国内外相关标准现状解释了规范的标准制定原则;闫玉茹结合大连湾海底隧道工程,提出了钻爆法施工风险概率、后果的评价标准及风险接受准则。

## 1.4 隧道施工风险评估与管理系统的开发现状

风险管理起源于美国,而且现阶段美国的风险管理水平也确实是世界最成熟最领先的,主要对风险评价的方法和应用模式进行研究,风险管理所涉及的领域也从最开始的保险行业拓展至各行各业。

德国的风险管理发源也比较早,主要起步于一战期间,最开始主要借助于风险管理治理国内混乱的经济情况,当时致力于研究风险执政的理论,也就是研究如何在当时国家政治、经济风险存在的情况下,通过风险管理中的控制、分散、补偿、转嫁、防止、回避、抵消的手段措施,提出合理可行的经营经济行为和处置措施,达到有效防止或缓解通货膨胀等问题的目的。当时关于风险管理的代表作是管理学家莱特纳(1915)撰写的《企业风险论》。

日本的风险管理主要是受到美国的影响才发展起来的,日本发展虽然较晚但进展较快,特别是风险管理方法方面的研究可以说是突飞猛进,取得了丰硕的成果,现阶段已经形成了具有日本特色的风险管理理论体系。日本风险管理方面具有代表性的人物应该是关西大学的龟井利明教授,撰写了《风险管理的理论和实务》、《海上风险管理和保险制度》和《风险管理学》等专著,为风险管理研究做出了巨大贡献。

20世纪80、90年代美英等发达国家的风险管理研究进入飞速发展阶段,其研究工作开展得如火如荼,他们将风险评价及分析技术拓展到海洋石油平台建设及运营、海上石油输送管线铺设和军事工业等这些风险性较大的项目,并取得了不错的成效。如 Prasanta D, Mario T.

T.<sup>[114]</sup>发表了 *Planning for project control through risk analysis: a petroleum pipeline-laying project*, Chapman C. B., Cooper D. F.<sup>[115]</sup>发表了 *Risk Analysis for Large Projects: Models. Methods and Cases* 等。Haimes<sup>[116]</sup>提出了一种全新的风险管理理念——全面风险管理,他认为全面的风险管理应该是一种全新的集风险识别、估计、评价与管理于一身的理念,应该说这是风险管理理念的一次突破。

随着全球经济的发展,各行各业已经打破了国界的束缚,风险管理也是如此。受发达国家的影响,发展中国家和地区也开始了风险管理的研究,于20世纪90年代形成了全球发展的的大好局面。联合国为了促进和推动发展中国家风险管理的研究进程,于1987年出版了风险管理的研究报告——*The Promotion of Risk Management in Developing Countries*。其中非洲的尼日利亚的风险管理水平在发展中国家中名列前茅,其代表人物 Irukwn J. O.<sup>[117]</sup>发表了他的专著 *Risk Management in Developing Country*,并在1994年对尼日利亚的高速公路建设项目开展了系统的、全面的风险评价与分析工作。

我国台湾、香港的风险管理研究较内地起步较早,也均是受美国影响发展而来。台湾主要注重风险管理理论的研究,在此方面有着不菲的成绩,其代表人物主要为段开龄博士与宋明哲先生等,宋明哲先生编撰的《风险管理》可以称之为该时期台湾风险管理方面的代表作。台湾由于受到工程限制,风险管理的实际应用很少,与之相反的是香港地区的风险管理主要体现在岩土工程的实际应用上,主要是因为香港地区特殊的地质情况导致其岩土工程问题极其严重,易发生滑坡等地质灾害,故对岩土工程灾害的防治成为该地区风险研究的热点。

我国内地风险管理起步较晚,但发展势头强劲,逐步形成了百家争鸣之势。目前,国内有关风险管理的理论研究在国外相关学者研究理论的基础上有一定的进步,取得了一定的成果,但是还不够深入,需要进一步加大研究力度拓展研究领域。由于国内近年来工程建设的逐步兴起,国家对施工安全的进一步重视,使得风险理论在实际工程中的应用越来越多,涉及领域也越来越广泛。其中高校学者中的代表人物主要有黄宏伟、张顶立、仇文革等。台湾阿克金斯公司总顾问毛儒<sup>[118-122]</sup>先生在该领域研究较早,有着较高的建树,其代表作主要有《轨道交通安全风险》、《积极开展隧道风险评估,认真加强风险管理》、《论工程项目的风险管理》、《隧道工程风险评估》和《有效的风险管理》。

随着科学技术的进步,各行各业与计算机的联系越来越紧密,随着建设工程风险评价时效性、准确性要求的进一步提高,风险管理技术通过计算机和网络来实现也迫在眉睫,国外相关部门和一些专家学者就对风险管理系统开发这一问题展开了深入研究,形成了一些具有一定可操作性的商业软件。

意大利 GeoDATA 公司联合麻省理工学院基于对欧洲地质资料的统计,针对隧道及地下工程施工阶段安全风险研究开发出 GDMS (Geologic Data Master System) 信息化管理平台,该系统综合运用了 GIS 和 WEB 技术,由建筑物状态管理系统 (Building Condition System)、建筑风险评估系统 (Building Risk Assessment)、盾构数据管理系统 (TBM Data Management)、监测数据管理系统 (Monitoring Data Management) 以及文档管理系统 (Document Management System) 5 个子系统构成,具备完善的风险管理方案,并在俄罗斯圣彼得堡、意大利罗马和圣地亚哥等地铁工程中得到应用。

A. S. Akintove<sup>[123]</sup>结合广泛的资料调研总结出,当时工程风险管理技术方法较多,如核

表法、MC 法、PERT 法、敏感性分析法等,其中大部分分析方法均已实现计算机程序化,使得风险评估技术在工程上易被广泛应用。L. J. Barry<sup>[124]</sup>和 S. Ward<sup>[125]</sup>结合各自研究领域,对风险数据库的构建提出了建议,并初步设计了风险数据库。Williams<sup>[126]</sup>, R. Carter<sup>[127]</sup>和 S. Ward<sup>[125]</sup>分别研究了他们研究领域的风险数据库所应包含的内容及架构模式。

国内关于风险管理软件的开发相对来说比较晚,相关单位和高校均对此有所研究,但目前开发出的风险管理系统主要局限于监测数据的利用与管理。如中铁隧道勘测设计院研发了基于监测数据预测及管理的“中铁隧道集团隧道及地下工程监控量测预警信息管理平台”、“武汉地铁第三方监测管理系统”,北京交通大学也研发出基于监测数据预测及管理的“北京轨道交通工程施工安全风险监控系统”。同济大学开发出了盾构隧道施工风险管理系统 TRM1.0,该系统为单机版,不能提供网络服务。北京基康公司基于美国相关技术也开发出了 BGK-Logger 信息管理系统<sup>[128-129]</sup>。

姚雪梅<sup>[130]</sup>在《地下工程施工安全风险管理系统研究》中对风险评估与管理系统的功能模块架构进行了设计,主要包括系统界面设计、风险识别模块设计、风险评估模块设计、风险指标更新模块设计、施工动态监控模块设计、退出系统界面设计。

综上所述,目前地下工程风险信息管理系统主要侧重于监测数据的采集、分析与管理,较少涉及全面的风险信息管理,功能也较为单一,而且大多风险管理系统都借鉴了目前比较流行的办公系统研发模式,对信息的发布和管理做得比较到位,却缺乏有效的风险管理标准、适用的风险评价方法。因此,现阶段很有必要研发出一套适合于国内地下工程建设特点的,基于 Web、ArcGIS、SQL Server 等技术的,有效集成最新风险评价标准及方法研究成果的,实现全面的风险评估、预警与控制的管理系统。



## 第 2 章 瓦斯隧道施工特性

瓦斯是一种无色、无味、无臭的一种混合气体,主要成分为甲烷( $\text{CH}_4$ )与乙烯( $\text{C}_2\text{H}_2$ ),相对密度为 0.554,具有能燃烧、能爆炸、能使人窒息的多种危害性,但它的最主要的危害是燃烧爆炸。

瓦斯极易燃烧,但不能自燃,当与空气混合到一定浓度时,遇火源能燃烧或爆炸。当坑道中的瓦斯浓度低于 5% 或高于 16% 时,遇到火焰只是在火源附近燃烧而不会爆炸;瓦斯浓度在(5% ~ 6%)到(14% ~ 16%)时,遇到火源便会爆炸,9.5% 左右时爆炸威力最大,但瓦斯浓度高于 43% 时,一般遇火也不能燃烧,瓦斯浓度爆炸界限见表 2-1。可见,瓦斯隧道施工极具危险性。

瓦斯浓度爆炸界限 表 2-1

| 瓦斯浓度 (%) | 爆炸界限          |
|----------|---------------|
| 5 ~ 6    | 瓦斯爆炸下界限       |
| 14 ~ 16  | 瓦斯爆炸上界限       |
| 9.5      | 爆炸最强烈         |
| 8.0      | 最易点燃          |
| 低于 5.0   | 不爆炸,与火焰接触部分燃烧 |
| 高于 16    |               |

### 2.1 瓦斯灾害分析

#### 2.1.1 瓦斯灾害类型

##### 1) 瓦斯窒息

瓦斯是多种气体的混合物,组成成分多达数十种,主要成分为甲烷( $\text{CH}_4$ )。 $\text{CH}_4$ 扩散性比空气高,且不利于呼吸。每立方米  $\text{CH}_4$ 质量仅 0.716kg,比空气轻,因此常常积聚在隧洞顶部,造成局部瓦斯浓度增高,含氧量减少。由于瓦斯无色无味,很难防范,当工作人员吸入一定量的瓦斯、空气混合气体( $\text{CH}_4$ 浓度大于 16%, $\text{O}_2$ 浓度小于 10% ~ 12%)时,就会造成瓦斯窒息事故,发生窒息死亡。