



轨道交通工程建设风险 管理及其应用

黄宏伟 谢雄耀 著
胡群芳 薛亚东



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS



上海市科技专著出版基金资助

轨道交通工程建设风险管理及其应用

黄宏伟 谢雄耀 著
胡群芳 薛亚东



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书作为国内较早关于轨道交通建设风险管理的著作之一,采用理论分析与案例讨论相结合的方法,深入浅出地对轨道交通建设中可能涉及到的各方面风险进行辨识、分析,并提出相应的可能控制措施。

本书重点介绍了轨道交通施工准备期、地下线隧道及车站施工、高架段结构及车站施工、各种跨线及交叉穿越的关键点工程、机电设备施工等的工程风险,并结合上海市轨道交通 11 号线的北段建设工程的总体风险评估,简要介绍了风险评估的主要内容。本书可作为高等学校土木工程和交通工程专业本科生、研究生的专业课辅助教材,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

轨道交通工程建设风险管理及其应用/黄宏伟等著.

—上海:同济大学出版社,2009.12

ISBN 978-7-5608-4210-3

I. ①轨… II. ①黄… III. ① 城市铁路—铁路工程—
工程施工—风险管理—研究 IV. ①U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 225049 号

轨道交通工程建设风险管理及其应用

(本书出版由上海科技专著出版资金资助)

黄宏伟 谢雄耀 胡群芳 薛亚东 著

责任编辑 杨宁霞 季 慧 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

(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 12.75

印 数 1—2100

字 数 255 000

版 次 2009 年 12 月第 1 版 2009 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-4210-3

定 价 34.00 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

目前,全国已开通城市轨道交通的城市有:北京、上海、天津、广州、深圳、南京、长春、大连、重庆、武汉,共10个城市21条线路,已经通车的里程达到585.63km。北京、上海、广州三个城市近几年每年新增的线路长度都达到了30~50km,而国外同类城市仅为10km左右。在上海,为配合世界博览会的召开,到2010年,城市轨道交通规模将与伦敦、纽约这样的世界级大城市基本相当,成为世界上为数不多的拥有长度超过400km的轨道交通网络的城市之一。随着我国城市化建设步伐的加快,可以说我国城市轨道交通已进入高速建设发展期。

轨道交通工程建设复杂多变,涉及到施工准备期、区间盾构隧道施工(在硬土地区可能采用矿山钻爆法隧道施工)、高架道路施工、各种跨线及交叉穿越工程、机电设备施工、施工的环境影响以及人员职业安全等方面。在这些方面,技术原因和人为非技术的原因都有可能诱发导致各类风险事故,同时地下及隧道工程属隐蔽性工程,自身潜在风险事故较多;另外,国内在短时间内轨道交通庞大的建设规模和惊人速度,也极可能会引发难以预见的重大风险,而且,一旦发生事故,不但会导致重大经济损失和人员伤亡,还会引起恶劣的社会影响。近年来,新加坡、法国和我国台湾高雄、北京、上海、广州、杭州等在轨道交通建设中发生的几起重大恶性风险事故,已充分说明了轨道交通建设中的风险因素及后果不可轻视。因此,十分有必要对轨道交通建设进行风险识别与评估分析,提出轨道交通风险控制措施,减少并控制轨道交通体系的风险事故,有效实现轨道交通工程建设中的风险管理。

相对于发达国家的工程风险管理研究及进展来说,国内的工程风险管理起步较晚。本书是国内较早关于轨道交通建设风险管理的著作之一,最大的特点是实用性强,并采用理论分析与案例讨论相结合的方法,深入浅出地对轨道交通建设中可能涉及到的各方面风险进行辨识、分析,并提出相应的可能控制措施。

本书的内容较全面地涵盖了轨道交通施工准备期、地下线隧道及车站施工、高架段结构及车站施工、各种跨线及交叉穿越的关键点工程、机电设备施工、施工的环境影响、人员安全及职业健康等方面。最后,本书结合上海市轨道交通11号线的北段建设工程的总体风险评估简要介绍了风险评估的主要内容。本书的主要材料来源于我们课题组已完成的上海、苏州等地轨道交通建设风险管理的多项科研课题及咨询项目,具有较好的实用价值。

本书主要读者对象是轨道交通的规划、建设、设计、施工、监理等单位的管理与工程技术人员,可作为高等学校土木工程和交通工程专业本科生、研究生的专业课辅助教材,也可供相关专业的科研和技术人员参考使用。

本书是同济大学多位从事工程风险管理研究与应用的教师合写的著作,其中黄宏伟教授负责全书的策划和统稿,并编写了本书的第1、2、3、11章,谢雄耀副教授编写了本书的第5、7章,胡群芳博士编写了本书的第4、6、9章,薛亚东副教授编写了本书的第8、10章。

本书在编写过程中,上海申通集团和苏州轨道交通建设公司都提供了科研咨询项目资料,同济大学出版社的编辑对本书进行了编辑与反复校对,同济大学覃辉和江帆两位研究生对本

书的文字进行了编排,尤其是上海市科技出版基金给予了资助,没有以上这些单位和人员的大力支持和帮助,本书是难以与读者见面的,在此,作者对上述各单位及有关人员表示衷心的感谢。

由于我国城市轨道交通工程发展迅速,本书仍有待进一步完善。另外,由于时间有限,书中不当或者错误之处难免,敬请不吝指教。

著 者

2009年12月

目 录

前言

1 概述	(1)
1.1 中国国内轨道交通现状及施工管理水平	(1)
1.2 国内外风险管理现状	(2)
1.3 本书研究的主要目的及内容	(4)
2 城市轨道交通工程建设期风险评估方法与标准	(5)
2.1 风险评估基本方法	(5)
2.1.1 基于信心指数的专家调查法	(5)
2.1.2 模糊综合评判方法	(6)
2.1.3 层次分析法	(6)
2.1.4 故障树法	(7)
2.2 风险评估标准	(8)
2.2.1 风险评价依据的技术规范	(8)
2.2.2 风险评价依据的政策法规	(9)
2.2.3 风险评价等级	(9)
2.2.4 风险等级色别	(10)
3 工程风险评估软件系统及应用	(11)
3.1 概述	(11)
3.2 软件设计方法与系统	(11)
3.2.1 软件开发的思路及其实现的功能	(11)
3.2.2 软件开发的工具	(12)
3.2.3 软件菜单说明和操作	(13)
3.3 软件应用实例	(25)
3.3.1 工程定义	(25)
3.3.2 风险辨识	(26)
3.3.3 风险调研和数据导入	(29)
3.3.4 风险评估	(30)
3.3.5 风险决策	(36)
3.3.6 风险结果查询	(36)
3.3.7 小结	(37)

4 工程施工准备期风险评估	(38)
4.1 概述	(38)
4.2 工程地质勘察风险	(38)
4.2.1 不良地质失察风险	(38)
4.2.2 承压水勘测失察风险	(39)
4.2.3 管线位置勘测不准风险	(39)
4.2.4 大型障碍物勘测不准风险	(40)
4.3 动拆迁风险	(41)
4.3.1 建筑拆除风险	(41)
4.3.2 人员安置及社会影响风险	(41)
4.3.3 动拆迁影响总体工期风险	(42)
4.4 管线综合风险	(42)
4.4.1 管线拆迁方案选择不当的风险	(42)
4.4.2 管线拆迁造成管线损坏风险	(43)
4.4.3 管线拆迁对周围环境影响风险	(43)
4.5 工程设计风险	(43)
4.5.1 线路设计风险	(43)
4.5.2 结构设计不当风险	(45)
4.6 工程招投标风险	(46)
4.6.1 工程管理模式以及设计和承包商选择不当风险	(46)
4.6.2 设备、材料采购风险	(47)
4.6.3 合同风险	(48)
4.7 风险规避措施	(49)
4.7.1 工程地质勘察风险	(49)
4.7.2 工程设计风险	(49)
4.7.3 动拆迁风险	(49)
4.7.4 管线综合风险	(49)
5 地下段结构工程风险评估	(50)
5.1 地下区间隧道工程风险	(50)
5.1.1 盾构区间隧道工程风险	(50)
5.1.2 明挖暗埋区间隧道工程风险	(68)
5.1.3 联络通道施工风险	(70)
5.2 地下车站工程风险	(73)
5.3 地下车站附属工程风险	(82)
6 轨道高架段结构工程风险评估	(84)
6.1 高架区间工程风险评估	(84)

6.1.1 一般高架桥梁路段风险	(84)
6.1.2 低置高架路段风险	(94)
6.2 高架车站工程风险评估	(96)
6.2.1 房屋框架结构施工风险	(97)
6.2.2 钢屋架屋顶施工风险	(98)
6.2.3 高架车站桩基础施工风险	(98)
6.3 风险规避措施	(98)
6.3.1 桥墩施工风险规避措施	(98)
6.3.2 PHC 打入桩施工风险控制措施	(99)
6.3.3 钻孔灌注桩施工风险控制措施	(99)
7 关键节点工程风险评估	(101)
7.1 既有车站改造工程风险评估	(101)
7.1.1 工程概况	(101)
7.1.2 风险辨识	(102)
7.1.3 风险分析	(102)
7.1.4 风险控制措施	(109)
7.2 盾构相邻交叠穿越施工风险评估	(112)
7.2.1 工程概况	(112)
7.2.2 风险辨识	(114)
7.2.3 风险分析	(114)
7.2.4 风险控制措施	(115)
7.3 盾构穿越重要河流施工风险评估	(115)
7.3.1 工程概况	(115)
7.3.2 风险辨识	(118)
7.3.3 风险分析	(118)
7.3.4 风险控制措施	(119)
7.4 盾构穿越干线铁路施工风险评估	(119)
7.4.1 工程概况	(119)
7.4.2 风险辨识	(122)
7.4.3 风险分析	(122)
7.4.4 风险控制措施	(125)
7.5 盾构穿越桩基风险评估	(125)
7.5.1 工程概况	(125)
7.5.2 风险辨识	(126)
7.5.3 风险分析	(126)
7.5.4 风险控制措施	(127)
7.6 盾构穿越重要管线风险评估	(127)
7.6.1 工程概况	(127)

7.6.2	风险辨识	(130)
7.6.3	风险分析	(130)
7.6.4	风险控制措施	(131)
8	机电设备风险评估	(133)
8.1	概述	(133)
8.1.1	供电系统	(133)
8.1.2	通信系统	(133)
8.1.3	信号系统	(133)
8.1.4	通风与空调系统	(133)
8.1.5	给排水、消防系统	(134)
8.1.6	防灾、报警与环境控制系统	(134)
8.1.7	自动售检票等其他车站设备	(134)
8.2	风险辨识	(134)
8.3	风险分析	(135)
8.4	风险规避措施	(136)
9	环境影响风险评估	(137)
9.1	概述	(137)
9.2	施工对周边建筑物影响风险评估	(137)
9.2.1	风险辨识	(137)
9.2.2	风险分析	(139)
9.3	施工对周边道路影响风险评估	(140)
9.3.1	风险辨识	(140)
9.3.2	风险分析	(143)
9.4	施工对周边管线影响风险评估	(145)
9.4.1	风险辨识	(145)
9.4.2	风险分析	(148)
9.5	噪声、水及固体废弃物污染风险分析	(149)
9.5.1	噪声污染风险分析	(149)
9.5.2	水污染风险分析	(150)
9.5.3	空气污染风险分析	(150)
9.5.4	固体废弃物污染风险分析	(151)
9.6	生态环境影响风险分析	(151)
9.7	风险规避措施	(152)
9.7.1	轨道交通工程周边建筑物的规避措施	(152)
9.7.2	轨道交通工程周边道路交通的规避措施	(152)
9.7.3	轨道交通工程周边管线的风险规避措施	(153)
9.7.4	其他环境影响的规避措施	(154)

10 人员安全及职业健康风险评估	(155)
10.1 概述.....	(155)
10.2 人员施工安全风险.....	(156)
10.2.1 风险辨识.....	(156)
10.2.2 风险分析.....	(157)
10.3 人员职业健康风险.....	(167)
10.3.1 风险辨识.....	(167)
10.3.2 风险分析.....	(168)
10.4 人员安全及职业健康风险规避措施.....	(170)
11 城市轨道交通工程建设总体风险评估实例	(171)
11.1 工程概述.....	(171)
11.2 轨道交通 11 号线特点分析	(171)
11.3 风险评估的内容.....	(173)
11.4 风险评估.....	(180)
11.5 风险评估的主要结论.....	(187)
参考文献	(189)

1 概述

1.1 中国国内轨道交通现状及施工管理水平

随着城市人口的急剧增涨和城市化进程步伐的加快,大中型城市普遍出现交通阻塞、交通秩序混乱、耗能多、污染严重等问题。城市轨道交通因其运量大、速度快、延误少、低能耗、少污染、乘坐舒适方便等优点被世界许多大型城市广泛采用,作为解决大中城市公共交通运输问题的根本途径。

目前全球运营线路长度排名前十名的城市依次为:纽约、伦敦、巴黎、莫斯科、东京、芝加哥、墨西哥城、柏林、波士顿、圣彼得堡,全长约 2 300km,约占全球运营线路总长度的 43%。纽约是当今世界运行线路最长的城市,其线路有 37 条之多,全长达 432.4km;巴黎地铁是世界层次最多的地铁,最大的地下大厅共有 6 层(一般为 2~3 层);莫斯科市区有 9 条地铁线路纵横交错。这些城市庞大的轨道交通网络的修建一般都经历了 50~100 年的发展历史,其中修建速度较快的是墨西哥城,整个城市修建 400km 的地铁网络也用了 30 多年时间。

在国内,北京轨道交通一期工程于 1965 年 7 月 1 日开工,1969 年 10 月 1 日建成通车试运行,全长 23.6km,修建历时 4 年多。二期工程于 1984 年 9 月 20 日建成通车运营,全程 16.1km,修建历时 13 年之久;复兴门至八王坟路段修建时间约 7 年。上海轨道交通 1 号线一期长 16.4km,于 1995 年建成通车,修建历时约 5 年;已运行的轨道交通 1 号、2 号、3 号、4 号和 5 号线总长约 145km,大约建设了十多年的时间。进入 21 世纪,中国经济的迅猛发展为轨道交通的建设带来了重大机遇,各大城市轨道交通项目竞相立项开工,并对未来轨道交通网络都进行了规划。在国家“十一五”期间,全国特大城市的地铁和轻轨通车里程将超过 1 500km,投资总额约 6 000 亿元。目前,全国已开通城市轨道交通的城市有北京、上海、天津、广州、深圳、南京、长春、大连、重庆、武汉 10 个城市,共 21 条线路,已经通车的里程达到 585.63km,其中北京、上海、广州三个城市近几年每年新增的线路长度都达到了 30~50km,而国外同类城市仅为 10km 左右。

在上海,为配合世界博览会的召开,到 2010 年,地铁规模将与伦敦、纽约这样的世界级大城市基本相当,成为世界上为数不多的拥有长度超过 400km 的轨道交通网络的城市之一。而上海目前地铁运营里程约 240km,这意味着在以后的短短的三年中要新建约 200km 的地铁。现阶段上海同时开工的地铁建设线路有 5~6 条,整个地区轨道交通建设任务十分繁重,这样的建设速度世界罕见。上海市城市轨道交通已进入高速建设发展期,同时上海轨道交通建设的风险管理问题也成为上海城市轨道交通及城市交通建设发展所面临的新课题。

目前,上海轨道交通建设出现了如下几个特点。

(1) 网络规模大,工程规模大,投资规模大。2007 年上海轨道交通在建项目 12 个,共 8 条线路,230km,共 163 座车站投入使用;按建设计划,2010 年将有 11 条线路,超过 400km,共 280 座车站投入使用;2007 年同期建设的二线换乘车站达 47 个,三线及以上换乘车站达 11 个,30%以上的车站底板埋深超过 20m;近期建设的区间隧道推进长度达 240km,其中与既有区间隧道相交点达 15 处,穿越铁路节点达 8 处,需要盾构设备达 88 台;建设投资方面,2004

年第一次突破百亿元,2005 年达到 180 亿元,2007 年投资规模突破 260 亿元。

(2) 促进城市发展,社会责任重大。为满足 2010 年上海世博会期间高运量要求,上海地铁将承担 50% 以上的客运总量,届时与世博展区直接相关的 13 号线的“世博段”,以及 8 号、4 号、7 号线等都将面临严峻的考验。总之,随着社会的发展以及居民对生活质量的要求的提高和维权意识的加强,对轨道交通建设质量及其建设者依法施工、文明施工等提出了更高的要求。

(3) 网络建设管理体系呈现政府管理与企业管理并重的局面。面对城市轨道交通技术复杂、技术含量高和工程建设风险大的特点,上海市政府直接将上海地铁指挥部设立在上海申通地铁集团有限公司(企业),并成立了以融资、建设、运营、管理为一体的“轨道交通建设推进办公室”,负责上海市 14 个行政区及设计、施工单位,共同推进轨道交通网络建设。

轨道交通工程复杂,涉及到施工准备期、区间盾构隧道施工、高架道路施工、各种跨越及交叉穿越工程、机电设备施工、施工的环境影响以及人员职业安全等方面,各类风险大量存在,同时地下隧道工程属隐蔽性工程,自身潜在风险事故较多,因而,国内在短时间内轨道交通庞大的建设规模,极可能会遇到大量的难以预见的重大风险。一旦发生事故,不但会导致重大经济损失和人员伤亡,而且还造成其他间接的影响甚至恶劣的社会影响。例如:① 人民广场换乘枢纽。当时人民广场换乘枢纽 1 号、2 号线先期建成,8 号线即将建成,同时该地区还建造了 $7000\sim 8000\text{m}^2$ 的下沉式广场。另外,为了实现空间和机电设备的共享,还要对 1 号线和 2 号线车站进行大面积的改造。在进行这样大面积改造,盾构穿越施工、下沉式广场等建设的同时,还要保证既有线路的正常运营,保护周边环境,这给地铁施工建设提出了非常高的要求。② 世纪大道换乘枢纽。世纪大道站被作为一个四线的换乘枢纽,按照设计,6 号线要横穿 2 号、4 号、9 号线的站厅,四线车站呈“卅”形布置。整个地区的管线和周边交通非常复杂,给枢纽的规划、设计、施工等都带来了巨大的挑战。③ 徐家汇换乘枢纽。该换乘枢纽为 1 号、9 号、11 号线的换乘枢纽,由于设计上大胆地将 9 号线和 11 号线的车站设在已有的商业广场,因此,要对商业广场的地下室 2 层和 3 层空间进行改造,这对该工程提出了巨大的挑战。因此,目前十分有必要对轨道交通的建设进行风险识别与分析,提出轨道交通风险控制体系,减少并控制轨道交通体系的风险事故。

1.2 国内外风险管理现状

风险管理及控制分析在工程项目上的应用研究相对于风险管理理论研究显得较为缓慢。虽然自 20 世纪 70 年代以后,隧道工程风险分析研究也取得了一定的成果,但也多以理念的建立和定性研究为主,其中对定量的研究主要采用可靠度理论来分析。国外地铁及隧道工程的风险管理与控制研究部分基本进入了实质性的工程应用阶段,但是对于轨道交通网络施工及运营风险评价的研究目前还刚起步。

隧道及地下工程风险分析的代表性人物有美国 MIT(麻省理工学院)的教授 H. H. Einstein(1974,1994,1996,1997,2000,2004)、美国岩石力学学会理事长 John Reilly(1999)和英国 IC(帝国理工大学)的教授 J. B. Burland(2000),其中 H. H. Einstein 影响最大,他撰写了多篇关于研究隧道工程的风险分析和评估问题的论文,并进行了隧道工程风险应用研究。1983 年剑桥大学的 G. F. Salazar 撰写了博士论文,研究隧道设计和建设中的不确定性以及经济评估的实用性,将不确定性的影响和工程造价联系起来。B. Nilsen 等(1992,2003)对复杂底层条件地区水下隧道的风险进行了比较深入的研究。J. B. Burland(1974,1995,2000)对隧道及地下工程施工沿线建筑物造

成的环境风险,给出了计算沉降的方法,对建筑物造成的损伤程度进行了分类,并将该研究成果应用于英国的 Jubilee 线路延伸工程中,在线路规划阶段计算出了沿线建筑物可能造成的损伤情况,建议了相应的加固措施。J. J. Reilly(2000, 2001, 2003)对隧道及地下工程风险研究工作做出了比较突出的贡献,其研究主要从工程风险管理的角度重点研究了大型隧道工程的风险分析问题,并在美国多项大型地铁工程风险分析中得到应用(如: Washington Metro, Los Angeles Metro)。M. T. Isaksson(1998, 1999, 2002)基于可靠度理论分析了隧道及地下工程施工风险问题,如盾构方案的选择、隧道施工进度和投资管理等,研究得到了实用性的理论。C. B. Chapman(1987, 1999, 2000)重点研究隧道及地下工程施工风险管理,分析了工程投标、承包和施工中的风险责任,并采用专家知识系统进行了软件设计工作。C. Yoo 和 J. H. Kim(2003)通过对隧道工程建设过程中的地面沉降预测的方法进行了归纳总结,开发了一个基于网络的建筑(设施)损坏评估系统 TURISK(2003, 2006)。国际隧道协会(ITA, 2004)在 2004 年 5 月由 Søren Degn Eskesen 和 Per Tengborg 等人在国际隧道期刊上发表了隧道风险管理指南(guidelines for tunneling risk management),并以此作为隧道工程风险管理的一整套参照标准和方法,该指南的编写和出版标志着隧道及地下工程风险分析研究进入了一个崭新的阶段。英国 Mellors 等人(2004)提出了英国隧道风险管理规范,并期望能在欧洲隧道建设工程中得到推广与应用。2006 年 ITA(2006)在韩国首尔召开了年会,重点讨论隧道及地下工程的风险与安全。

国内风险分析与评估方面的研究工作开始比较晚(1984, 1993, 1996),风险分析与评估理论在地下工程领域的研究最早是由同济大学的丁士昭教授(1992)提出。天津大学的白峰青(1996)完成了隧道工程的风险设计及决策,将可靠性因子分析方法应用于隧道稳定性的风险决策模型中。上海市隧道工程轨道交通设计研究院的范益群博士(2000)以可靠度理论为基础,提出了地下结构的抗风险设计概念,计算出基坑、隧道等地下结构风险发生的概率以及定性评价风险造成的损失。沈景炎(2000)对地铁规划中的客流量预测风险进行了研究,并提出了针对客流量风险的“抗风险设计”。香港的 L. McFeat-Smith(2000)提出了亚洲复杂地质条件下隧道工程的风险评估模式,根据发生频率的高低将风险分为 5 级(1~5),根据风险发生后影响后果也将风险分为 5 级(A~E)。郭斯杰等人(2003)研究得出暗挖隧道工程所适用的保险费率在 2.0‰~2.5‰等研究成果。

同济大学(李永盛、陶履彬、黄宏伟, 2002)完成了《崇明越江通道工程风险分析研究》课题,将风险管理理论应用于隧道和地铁项目中,提出了系统评价一个大型项目风险的方法。黄宏伟(2003)主持完成了武汉越江隧道(含地铁)的风险评估和苏州轨道交通试验段的初步风险评估等项目,并于 2004 年依托上海长江隧道重大工程,承担了上海市科委重大攻关项目(04dz12021)——隧道工程的施工控制与预警、报警系统及风险管理系统研究。黄宏伟指导的研究生陈贵香(2004)在其撰写的硕士论文《地铁工程项目的风险管理研究》中,对地铁的规划、设计、施工以及运营四个阶段的主要风险因素进行了研究;黄宏伟指导的研究生陈龙(2004)在其撰写的博士论文《软土地区盾构隧道施工期风险分析与评估研究》中,以工程应用为目标,系统分析了盾构隧道工程施工期中可能存在的各种风险,将风险分为直接费用损失、工期损失、耐久性损失以及环境影响等四大部分进行系统的分析与研究。黄宏伟 2005 年承担了《城市地下空间建设风险控制机制》课题,并于 2007 年与中国土木工程学会合作主持编写了我国第一部《地铁与地下工程建设技术风险管理指南》。

另外,由于近年来国内重大工程设施项目的建设风险越来越受到各级政府和管理部门的

重视,每个项目在工程规划、设计、施工和运营中都需要进行工程风险分析与风险评估,其中包括投资效益风险、设计风险、施工技术风险和环境风险等(E. A. Vik, 2000)。可以看到,隧道及地下工程建设及运营安全风险分析的研究目前已经引起世界各国的高度重视,并已经开展了大量的研究工作。然而,对轨道交通网络建设及运营风险控制体系的研究还处于起步阶段。因此,结合国内各大城市轨道交通网络的发展状况,我国急需结合轨道交通网络建设及运营安全问题展开深入研究,建立轨道交通网络建设及运营的风险控制体系,为上海市及国内其他大中城市的轨道交通网络的建设提供科学的可操作性的依据。

1.3 本书研究的主要目的及内容

本书的目的是为建设单位在工程筹划时建立风险的基本概念,对全线土建施工、机电安装中存在的风险点进行梳理,以便在工程设计管理及施工招标时能够提前对相关风险进行消除或控制,也可作为工程保险谈判的参考材料。具体可达到使建设方充分了解工程的风险状况,为建设方进行有效的决策提供量化的依据。

本书主要包括以下几个方面的内容:

(1) 施工准备期风险评估

全面阐述地质勘察风险、动拆迁风险、管线综合风险、工程招投标风险。

(2) 地下段结构工程风险评估

其分为地下区间隧道工程风险与地下车站工程风险部分。在地下区间隧道风险中,阐述超前预报地质风险、盾构区间隧道推进风险、明挖暗埋区间隧道施工风险、联络通道施工风险;在地下车站工程风险中,阐述一般地下车站施工风险、换乘枢纽车站施工风险与附属风井及出入通道施工风险。

(3) 高架段结构工程风险评估

其分为高架区间工程风险与高架车站工程风险部分。在高架区间中,阐述高架桥梁跨越重要道路、干线铁路、河流施工风险;在高架车站工程中,阐述房屋框架结构施工风险,钢结构屋架屋顶施工风险,高架车站桩基础施工风险,并提出高架段结构风险规避措施。

(4) 关键节点工程风险评估

在结构土建部分,挑选既有车站改造工程施工风险,盾构上、下行线交叠穿越施工风险,盾构穿越重要河流施工风险,盾构穿越干线铁路施工风险,盾构穿越桩基风险,盾构穿越重要管线风险,与磁悬浮近距离并行区段施工风险进行关键节点工程风险评估。

(5) 机电设备风险评估

在机电设备方面,分为:供电系统,通信系统,信号系统,通风与空调系统,给排水、消防系统,防灾、报警与环境控制系统,自动售、检票等其他车站设备安装施工风险辨识与风险分析。

(6) 环境影响风险评估

重点讨论施工对周边建筑物影响风险评估,施工对周边道路影响风险评估,施工对周边管线影响风险评估,噪声、水及固体废弃物污染风险分析,生态环境影响风险分析,并提出环境影响规避措施。

(7) 人员安全及职业健康风险评估

主要讨论人员施工安全风险,人员职业健康风险,人员安全及职业健康风险,并提出规避措施。

2 城市轨道交通工程建设期风险评估方法与标准

2.1 风险评估基本方法

2.1.1 基于信心指数的专家调查法

1. 专家调查法的基本理论

这是一种最常用、最简单易用的方法。它的应用由两部分组成:首先辨识出某一特定项目可能遇到的所有风险,列出风险调查表(checklist);然后利用专家经验对可能的风险因素的重要性进行评价,综合成整个项目风险。具体步骤如下:

(1) 确定每个风险因素的权重,以表征其对项目风险的影响程度。

(2) 确定每个风险因素的等级值,按可能性很大、比较大、中等、不大、较小这五个等级,分别打分。

(3) 将每项风险因素的权数与等级值相乘,求出该项风险因素的得分。再求出该项目风险因素的总分。显然,总分越高说明风险越大。

信心指数法是一种改进的专家调查法,该方法的前提是要在调查中引入“信心指数”这个参数。所谓信心指数就是专家在作出相应判断时的信心程度,也可以理解为该数据的客观可靠程度。这意味着将由专家自己进行数据的可靠性或客观性评价,这就会大大提高数据的可用性,也可以扩大数据采集对象的范围。通过这种方法,可以挖掘出专家调研数据的深层信息。即使数据采集对象并非该领域的专家,只要他对所作出的判断能够有一个正确的评价,那么,这个数据就应该视为有效信息。

2. 基于信心指数的专家调查法的操作流程

第一步:设定专家权重

信心指数是一种主观度量,它直接受被调查者的经验、知识、判断能力以及心态、倾向、情绪等因素的影响。因此,在应用信心指数时,需要对该专家的具体情况作全面了解。假设评估项目将专家大致分为四类,专家权重分别取 0.7,0.8,0.9,1.0,其中一类专家所作出的判断及信心指数认为是最可靠的,数据所反映的信息是最真实的。

第二步:确定单个专家的区间概率分布曲线

在对数据进行处理之前,首先要做的就是对该数据进行区间归类。

数据处理时,先将专家的判断值归入上述分好的区间中。该数据发生概率或可能性,可由专家权重与该数据的信心指数相乘获得,然后将其他的可能性按照从该数据区间到两边依次递减的原则分摊到各个可能数据区间上去,即可得到单个专家概率函数曲线。

第三步:初步确定目标参数的区间概率函数曲线

在获得每一位专家的区间概率函数曲线后,将其按区间叠加,然后进行归一,即可初步得到各风险事故的发生概率可能性函数曲线和事故发生后的直接经济损失、工期损失、耐久性损失和环境影响损失的区间概率函数曲线。

第四步:数据筛选及验证

在获得各目标参数的区间概率分布曲线后,就可以对原始数据进行筛选和验证,剔除一些干扰信息,即异常值。本书采用半极差型检验方法。

第五步:获得事故发生后各类损失的概率密度函数分布曲线

经过前四步的数据处理后,各风险事故的损失区间概率函数曲线应该比较趋向于集中,下一步就要将离散性的概率函数转化为连续的密度函数。

第六步:获得各事故发生前损失的概率函数和分布函数曲线

以上的损失分布函数曲线讨论的都是事故发生以后的情况,但决策总是要事前进行的,也就是说要将事故未发生的情况考虑进去。

第七步:获得不同工况总体损失的概率函数和分布函数曲线

将各分布进行叠加合成,最常用的方法是蒙特卡洛法,但由于本书采用的是经验分布,在获取随机数时非常困难,而且计算量比较大,因此本书采用 CIM 模型计算。

2.1.2 模糊综合评判方法

所谓模糊综合评判,说得通俗一点,就是权衡各种因素项目,给出一个总概括式的优劣评价或取舍,属于多目标决策方法。

设给定两个有限论域:

$$U=(u_1, u_2, \dots, u_n), \quad V=(v_1, v_2, \dots, v_m)$$

其中, U 代表模糊综合评判的因素所组成的集合, V 代表评语所组成的集合。给定模糊矩阵 $K=(K_{ij})_{m \times n}$, $0 \leq K_{ij} \leq 1$ 进行模糊变换,即利用 U 的子集 X 得到评判的结果 Y , Y 是 V 上的模糊子集,模糊变换参照下式进行:

$$X \circ K = Y$$

$$y_i = \bigvee_{j=1}^m (x_j \wedge k_{ij}), \quad i=1, 2, \dots, n$$

式中的“ $\circ$ ”是合成运算符,进行模糊合成运算时,可以采用“小中取大”进行运算,也可进行简单矩阵乘运算,应视具体情况而定。 X 可视为 U 中各因素的相对权重, K 可利用专家调查法和统计资料获得。

在研究复杂的问题时,需要考虑的因素很多,而且这些因素往往不在一个层次上,因此大多数情况下需要进行分级综合评定,此时,就要借助另一种风险评估的方法——层次分析法进行分析。

2.1.3 层次分析法

美国著名数学家 T. L. Saaty 教授在 20 世纪 70 年代提出了层次分析方法。该方法能把定性因素定量化,并能在一定程度上检验和减少主观影响,使评价更趋科学化。该方法通过风险因素间的两两比较,形成判断矩阵,从而计算同层风险因素的相对权重。

1. 确定判断矩阵

首先明确分析问题,划分和选定有关风险因素,然后建立风险因素分层结构,假设同层共有 n 个因素 $A_1, A_2, \dots, A_n$, 对所有因素进行成对比较,如将 A_i 和 A_j 比较,使用 1~9 的比例标度 a_{ij} 来反映相对的重要性,标度的含义参见表 2-1。若 A_i 与 A_j 相比得 a_{ij} , 则 A_j 与 A_i 相比的

判断为 $a_{ji}=1/a_{ij}$, 从而可以得到一个 $n \times n$ 的判断矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$ 。

2. 计算矩阵 A 的最大特征值和对应的特征向量

对于矩阵 A , 先算出其最大特征值 $y_{\max}$, 然后求出其相应的特征向量 W , 即 $AW=y_{\max}W$, 这时的 W 分量即相应 n 个因素的权重。计算矩阵特征值和特征向量的方法很多, 在精度要求不高的情况下, 往往采用简单的近似方法, 本文限于篇幅只介绍一种方法——方根法。

表 2-1 标度的含义

1	表示 A_i 与 A_j 相比, A_i 与 A_j 同等重要
3	表示 A_i 与 A_j 相比, A_i 比 A_j 稍微重要
5	表示 A_i 与 A_j 相比, A_i 比 A_j 明显重要
7	表示 A_i 与 A_j 相比, A_i 比 A_j 强烈重要
9	表示 A_i 与 A_j 相比, A_i 比 A_j 极端重要
2, 4, 6, 8 为上述相邻判断的中值	

先求出 W_i , 即: $w_i = \sqrt[n]{\sum_{j=1}^n a_{ij}}$, $i=1, 2, \dots, n$

然后将 W 规范化, 即: $w = w_i / \sum_{j=1}^n \bar{w}_j$

再计算最大特征值, 即: $y_{\max} = \sum_{i=1}^n (Aw)_i / nw_i$

通过以上的计算可以得到各层次风险因素的相对权重向量 W 。

3. 一致性检验

因为判断矩阵 A 采用两两比较得到, 未必满足等式 $a_{ij}a_{jk}=a_{ik}$ 。因此, 需要采用一个一致性指标 $C.I.$ 来衡量由于 A 矩阵不相容所造成的 $y_{\max}$ 和 W 的误差。

$$C.I. = \frac{y_{\max} - n}{n-1}$$

当判断完全一致时, $C.I.=0$, 一般只要 $C.I.<0.1$, 就认为这个判断可以满意了。把所求出的各子因素相对危害程度统一起来, 就可求出该工作风险处于高、中、低各等级的概率值的大小, 由此可判断该工作包含的风险程度。

工程风险的分析和评价是个主观和客观结论相结合的过程, 对某些过程中潜在风险因素的评价很难用定量数字来描述, 而层次分析法则可以恰当地解决这个问题。它处理问题的程序与管理者的思维程序、分析解决问题的思路相一致。在考虑过程中采用专家评判, 并用定量原则检验这一评判的重要性, 最后综合成整个项目的风险, 既有定性分析, 又有定量结果, 为管理者提供了一个全面了解项目全过程中风险情况的机会, 使其决策更为科学。

2.1.4 故障树法

故障树分析法(FTA)是一种评价复杂系统可靠性与安全性的方法, 20 世纪 60 年代初由美国贝尔研究所首先提出, 曾成功运用于对民兵式导弹发射控制系统的随机失效概率问题的预测上, 并逐步在工业领域得到推广应用。

故障树就是将系统的失效事件(称为顶部事件)分解成许多子事件的串、并联组合。在系统中各个基本事件的失效概率已知时, 沿故障树图的逻辑关系逆向求解系统的失效概率。故障树是一种特殊的树状逻辑因果关系图, 它用规定的逻辑门和事件符号描述系统中各种事物之间的关系。故障树的编制要求分析人员十分熟悉工程系统情况, 包括工作程序、各种参数、作业条件、环境影响因素及过去常发事故情况等。

故障树解决问题的步骤大致如图 2-1 所示。