

重大工程安全风险管理体系丛书 | 李启明 主编

城市地铁工程安全风险 实时预警方法及应用

周志鹏 李启明 · 著



Methodology for Safety Risk Real-Time Early Warning
in Urban Subway Project and its Applications



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

重大工程安全风险管理体系丛书 李启明 主编

城市地铁工程安全风险 实时预警方法及应用

周志鹏 李启明 著



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

• 南京 •

内 容 提 要

城市地铁工程如火如荼建设的同时,各种类型的地铁施工事故却频繁发生,其为城市地铁发展带来无形的阴影,给国家、企业和人民造成巨大损失。因此,研究如何保证地铁工程建设安全,杜绝地铁施工事故发生,极具现实意义。通过分析大量的地铁工程施工事故案例,发现大部分事故并非毫无征兆偶然发生,其发生之前均会出现相应的前馈信号。识别事故之前的前馈信号具有提高安全绩效的巨大潜力,许多组织已经开始研究如何有效地管理事故前馈信号,并且从中获益。本研究的主要目标就是基于前馈信号角度研究地铁工程施工安全管理,将传统的“问题出发型”的安全管理模式,发展为“问题发现型”的安全管理模式。基于复杂网络理论和扎根理论分析事故前馈信号的发生机理,运用新兴信息技术(传感器、射频识别、ZigBee 技术等)对事故前馈信号进行实时监控,采用灰色系统理论构建地铁施工安全风险实时预警模型,以 ArcGIS 和 Microsoft Visual Studio 为软件平台开发地铁施工安全风险实时预警系统。

图书在版编目(CIP)数据

城市地铁工程安全风险实时预警方法及应用/周志鹏,
李启明著. —南京:东南大学出版社, 2017. 1

(重大工程安全风险管理体系丛书/李启明主编)

ISBN 978-7-5641-6862-9

I. ①城… II. ①周…②李… III. ①地下铁道—工
程施工—安全管理—风险管理 IV. ①U231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 285311 号

城市地铁工程安全风险实时预警方法及应用

著 者 周志鹏 李启明

责任编辑 丁 丁

编辑邮箱 d. d. 00@163. com

出版发行 东南大学出版社

社 址 南京市四牌楼 2 号 邮编:210096

出 版 人 江建中

网 址 <http://www.seupress.com>

电子邮箱 press@seupress.com

经 销 全国各地新华书店

印 刷 江苏凤凰数码印务有限公司

版 次 2017 年 1 月第 1 版

印 次 2017 年 1 月第 1 次印刷

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 11.25

字 数 274 千

书 号 ISBN 978-7-5641-6862-9

定 价 48.00 元

本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话(传真):025-83791830

总 序

建筑业是我国国民经济的重要支柱产业和富民安民的基础产业。与其他安全风险较高的行业(例如航空业、石化工业、医疗行业等)相比,建筑工程事故的规模相对较小,但其发生频率相对较高,危险源类型具有多样性。工程安全一直是项目管理人员和相关研究人员关注的重点。虽然建筑工程事故率的不断下降表明工程安全管理水平正在逐步提升,然而频繁发生的工程伤亡事故还是说明工程安全问题尚未从根本上得到解决,与“零事故”(Zero Accident)或者“零伤害”(Zero Harm)的终极目标相去甚远。相关研究表明,建筑工程现场的工作人员受伤或者死亡的概率要远远大于其他行业。从事建筑工程的劳动力约占总数的7%,但是其伤亡事故却占了总数的30%~40%。高事故率是全球建筑工程面临的普遍问题,建筑工程人员工作的危险系数相对较高,其生存工作环境相对恶劣。研究发现,如今愿意从事建筑工程生产的年轻人越来越少,重要原因可以归结为建筑行业糟糕的工作环境和相对较高的事故率,使得年轻人对此行业望而却步。目前,建筑行业的老齡化现象愈发严重,作为劳动密集型的建筑行业如果老齡化趋势继续延续,整个建筑产业的萎缩将是必然的。因此,为了能够使建筑业持续稳定发展,改善其工作环境,提高工程安全管理绩效显得十分重要,这样才能吸引年轻人返回这个古老的行业,给建筑行业不断注入新的活力。

与传统建筑工程相比,重大工程(Megaproject)往往具有投资额度大、技术复杂度高、利益相关者多、全生命周期长等特征。随着重大工程的建设规模越来越大、建设内容越来越多,技术(前期策划、设计、施工、运行)难度越来越高、影响面也越来越广,既包括了质量、成本、进度、组织、安全、信息、环境、风险、沟通等内容,也涉及政治、经济、社会、历史、文化、军事等多个层面。近三十年,各种类型的重大工程如雨后春笋般,在世界各地持续开展,例如中国的三峡大坝工程、日本的福岛核电站灾害处理项目、阿联酋的马斯达尔城项目、尼加拉瓜的大运河工程、美国的肯珀电站项目等。保守估计,目前全球重大工程市场的年均生产总值大约为6万亿~9万亿美元,约占全球GDP的8%。重大工程的持续发展,不断突破工程极限、技术极限和人类操控极限,增加了其安全管理与安全实施的难度,重大工程的安全问题显得尤为突出。1986年4月乌克兰切尔诺贝利核电厂第四号反应堆发生的大爆炸、2008年11月中国杭州地铁1号线土石方坍塌事故、2011年7月中国甬温线高铁列车追尾事故等一系列重大安全事故,给国家、企业和人民造成了巨大损失,给重大工程发展抹上了无形的阴影。因此,研究如何保证重大工程安全,杜绝重大工程安全事故发生,具有非常重要的理论价值和现实意义。

与一般工程相比,重大工程安全管理对安全管理的理论与方法提出了新的挑战,原

有的理论与方法已经难以满足环境和系统复杂性带来的新问题对重大工程安全管理新理论与新方法的渴求,对传统的工程安全管理理论和方法进行反思和创新势在必行。本丛书总结了东南大学研究团队多年的研究成果,基于重大工程全生命周期的维度,从计划、设计、施工、运营、维护等方面对重大工程安全管理进行全面的阐释。研究重点从传统的施工阶段拓展到包括设计、运营的全生命周期阶段的安全风险管理;从传统安全风险内容深化到安全风险的预测和预警;从一般风险事件聚焦到国际重大工程的政治风险、重大工程的社会风险、PPP项目残值风险等特定风险。本丛书作者来自东南大学、南京航空航天大学、中国矿业大学、河海大学、北京科技大学等单位。作者李启明教授、吴伟巍副教授、陆莹副教授、周志鹏博士、王志如博士、邓勇亮博士、万欣博士,以及季闯博士、贾若愚博士、宋亮亮博士等长期从事重大工程安全管理的研究工作。由于本丛书涉及重大工程安全管理的多个方面,限于作者们的水平和经验,书中不妥之处在所难免,欢迎读者批评指正。

李启明

2016年10月9日

前 言

城市地铁工程发展至今,已有 150 多年的历史。由于人口急剧增加和经济快速发展,世界各大都会区都在积极推动地铁工程建设,以解决城市交通拥堵问题。伴随着中国经济不断发展和城镇化规模不断扩大,诸多城市的公共交通荷载日益加剧,地铁发展已经成为缓解城市公共交通压力的主要手段。截至 2012 年 12 月 31 日,中国大陆地区总共有 17 个城市开通地铁运营线路 64 条,总里程为 2 008 公里,运营线路的平均里程为 31.38 公里。从 2009 年到 2015 年,中国政府在全国 25 个城市投资 9 886 亿元人民币,修建总里程约 2 495 公里的 87 条地铁线路。截至 2012 年底,中国以平均每年新建 270 公里的速度进行城市地铁工程建设。上述一系列数据表明,目前中国正处于城市地铁建设的高速发展时期,其已成为全球最大的地铁建设市场,建设规模之大、速度之快和范围之广堪称史无前例。

城市地铁工程如火如荼建设的同时,各种类型的地铁工程事故却频繁发生,其为城市地铁发展带来无形的阴影,给国家、企业和人民造成巨大损失。因此,研究如何保证地铁工程建设安全,杜绝地铁安全事故发生,极具现实意义。通过分析大量的地铁工程施工事故案例,发现大部分事故并非毫无征兆偶然发生,其发生之前均会出现相应的前馈信号。识别事故之前的前馈信号具有提高安全绩效的巨大潜力,许多组织已经开始研究如何有效地管理事故前馈信号,并且从中获益。本书的主要目标就是基于前馈信号角度研究地铁工程安全管理,将传统的“问题出发型”的安全管理模式,发展为“问题发现型”的安全管理模式。基于复杂网络理论和扎根理论分析事故前馈信号的发生机理,运用新兴信息技术(传感器、射频识别、ZigBee 技术等)对事故前馈信号进行实时监控,采用灰色系统理论构建地铁施工安全风险实时预警模型,以 ArcGIS 和 Microsoft Visual Studio 为软件平台开发地铁施工安全风险实时预警系统。本书主要由以下 6 部分内容组成:

(1) 基于技术角度和管理角度对地铁工程安全管理的国内外研究现状进行分析,指出地铁工程施工安全管理现有研究的不足:忽视地铁施工事故前馈信号的管理。然后,通过前馈信号在安全管理领域研究现状的分析,获悉前馈信号管理已广泛应用于核电工业、石化工业、医疗行业、交通行业等,并且相关实践结果表明,事故前馈信号管理是促进安全管理绩效提高的有效手段。同时,针对新兴信息技术在施工安全管理应用现状的分析,指出传感器、射频识别、ZigBee、GIS、BIM 等技术的不断涌现和发展,为实时监控地铁施工事故前馈信号提供了可能路径,进而对地铁施工安全风险实时预警提供了可靠保障。

(2) 为填补地铁工程领域安全事故数据库的空白,构建地铁施工事件数据库(Subway Construction Incident Database, SCID)。考虑到地铁施工事故数量的缺乏,将险兆事件和不安全行为/状态作为地铁施工事故的有效补充。基于数学集合论,分析事件、事故、险兆事件、不安全行为/状态和前馈信号之间的逻辑关系,应用韦恩图进行阐述。同时,从发生机理、发生数量和管理力度三方面针对事故与险兆事件进行比较分析。基于关系数据库 Microsoft Access 2010,进行 SCID 的表设计、查询设计、报表设计、窗体设计、宏设计和模块设计等。

(3) 地铁施工事故之间具有“原生—次生—衍生”的关系,大量的事故链或者事故网络存在于客观的地铁施工实践之中。为更好地认识单例事故发生的本质,研究中运用复杂网络理论构建地铁施工安全事故网络模型(Subway Construction Accident Network,SCAN),计算SCAN的网络拓扑特性[包括度分布(Degree Distribution)、平均路径长度(Average Path Length)、网络直径(Diameter)、聚类系数(Clustering Coefficient)和介数(Betweenness)],以获取地铁工程相关的安全预警信息。

(4) 运用扎根理论识别地铁施工事故前馈信号,形成相关前馈信号理论。研究中选取Qualitative Nvivo(Nonnumerical Unstructured Data: Indexing, Searching and Theorizing)作为扎根分析的辅助软件,基于SCID数据库中的事故案例进行开放式编码(Open Coding)、主轴式编码(Axial Coding)和选择式编码(Selective Coding),以获取地铁施工事故前馈信号的发展路径,并对编码过程进行信度检验。针对所获取的坍塌事故前馈信号开展问卷调查,以验证相关前馈信号的有效性和可用性。同时对坍塌事故中的前馈信号进行比较分析,结果再次验证前馈信号可以有效避免事故的发生,提高地铁施工安全管理绩效。

(5) 基于新兴信息技术构建地铁施工安全风险实时监控系統,并应用灰色系统理论建立地铁施工安全风险实时预警模型。首先针对地铁施工事故前馈信号需求信息的多样性,分别选取合适的技术或方式,设计融合RFID和ZigBee技术的WSID无线传感网络,进行事故前馈信号需求信息的采集与传输,实现对地铁施工事故前馈信号的实时监控。然后运用灰色模糊聚类对前馈信号进行危险等级的划分,通过灰色关联分析计算 t 时刻前馈信号新样本与代表不同危险等级的样本之间的关联度。关联度越高,表明前馈信号新样本越接近于这个等级,可以近似地认为 t 时刻的前馈信号样本处于此状态。

(6) 地铁施工安全风险实时预警系统(GIS-SCSRTEW)的开发以ArcGIS 9.3(包括ArcCatalog、ArcMap、ArcGIS Engine Developer Kit和ArcGIS Engine Runtime)作为软件应用平台,以Microsoft Access 2010和GeoDatabase作为数据库管理系统,以Microsoft Visual Studio 2008作为开发工具。首先,基于ArcCatalog的个人数据库(Personal Database)实现空间数据库和属性数据库的构建,以及空间数据库和属性数据库的连接。然后,采用数据与系统相分离,数据与程序相分离的原则,基于Microsoft Visual Studio 2008开发平台实现GIS-SCSRTEW系统的主界面、主菜单栏、快捷菜单栏和工具栏。最后,以明挖法地铁车站工程A为例,对GIS-SCSRTEW系统的实践应用进行具体阐述。

本书在资料收集和著作过程中得到了众多业界有关人员的大力支持和帮助,研究得到相关科研基金的资助,包括国家自然科学基金项目(51508273和51578144)、江苏省高校哲学社会科学研究项目(2016SJD630001)、江苏省自然科学基金项目(BK20130616)和江苏省高校青年科技创新基金项目(NR2016013),特此致谢。限于作者水平和经验,书中不妥和谬误之处在所难免,欢迎读者不吝指出。

周志鹏 李启明

2016年10月分别于南京航空航天大学 and 东南大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状及不足	2
1.2.1 工程安全管理现状	2
1.2.2 地铁工程施工安全管理研究现状	2
1.2.3 前馈信号在安全管理领域的研究现状	7
1.2.4 新兴信息技术在工程安全管理中的应用现状	8
1.2.5 现有研究现状评述	11
1.3 研究内容与方法	12
1.3.1 研究目标	12
1.3.2 主要研究内容	12
1.3.3 研究内容的框架结构	14
1.3.4 拟解决的关键问题	16
1.3.5 研究方法	17
1.4 本章小结	17
第 2 章 地铁施工事件数据库(SCID)构建	18
2.1 基本概念及理论基础	18
2.1.1 相关基本概念	18
2.1.2 事件/事故/险兆事件和不安全行为/状态四者之间的逻辑关系	19
2.1.3 比较分析险兆事件与事故	20
2.2 地铁工程施工事件案例搜集	22
2.2.1 事故案例搜集	22
2.2.2 险兆事件案例搜集	25
2.2.3 不安全行为/状态案例搜集	30
2.3 运用 Microsoft Access 构建地铁施工事件数据库(SCID)	30
2.3.1 SCID 中的表设计	30
2.3.2 SCID 中的查询和报表设计	35
2.3.3 SCID 中的窗体设计	35
2.4 本章小结	35
第 3 章 运用复杂网络理论构建地铁施工事故网络模型	37
3.1 基于 SCID 数据库分析事故链	37
3.1.1 拓展地铁工程施工事故分类	37
3.1.2 分析案例事故链	38
3.2 构建地铁施工事故网络(SCAN)模型	41

3.3 解析地铁施工事故网络的拓扑性质	43
3.3.1 SCAN 网络的度分布	43
3.3.2 SCAN 网络直径和平均路径长度	45
3.3.3 SCAN 网络的聚类系数	45
3.3.4 SCAN 网络中的介数	47
3.4 本章小结	48
第4章 基于扎根理论识别地铁施工事故前馈信号	49
4.1 扎根理论起源与基本概念	49
4.1.1 扎根理论起源	49
4.1.2 扎根理论基本概念	49
4.2 运用扎根理论分析 SCID 事故案例	50
4.2.1 开放式编码(Open Coding)	51
4.2.2 主轴式编码(Axial Coding)	52
4.2.3 选择式编码(Selective Coding)	52
4.2.4 信度检验	63
4.3 地铁施工安全管理中的前馈信号分析	63
4.3.1 关于前馈信号的问卷调查分析	63
4.3.2 前馈信号比较分析	67
4.4 本章小结	70
第5章 基于新兴信息技术构建地铁施工安全风险实时预警的监控系统	71
5.1 地铁施工事故前馈信号的需求信息	71
5.1.1 需求信息分析	71
5.1.2 需求信息分类	75
5.2 地铁施工事故前馈信号需求信息的采集设备/方式	76
5.2.1 相关采集设备	76
5.2.2 运用基于 ZigBee 协议的 WSN 进行需求信息采集	78
5.2.3 运用融合 RFID 和 WSN 的 WSID 进行需求信息采集	79
5.2.4 借助第三方监测获取需求信息	81
5.2.5 需求信息其他采集设备/方式	82
5.3 地铁施工安全风险实时预警的监控系统功能需求	82
5.4 地铁施工安全风险实时预警的监控系统体系结构设计	82
5.4.1 系统体系结构	82
5.4.2 系统工作机制	83
5.4.3 地铁施工事故前馈信号需求信息数据库构建	84
5.5 本章小结	84
第6章 基于前馈信号构建地铁施工安全风险实时预警模型	85
6.1 预警原理	85
6.2 单指标预警方法	85
6.3 多指标综合预警模型	88

6.3.1 确定聚类论域的原始矩阵	90
6.3.2 数据标准化	91
6.3.3 危险性关联分析	92
6.3.4 计算灰色相似关系矩阵	93
6.3.5 前馈信号聚类分析	97
6.3.6 地铁施工安全风险实时预警分析	99
6.4 本章小结	99
第7章 基于GIS设计地铁施工安全风险实时预警系统(GIS-SCSRTEW)	100
7.1 GIS-SCSRTEW 系统需求分析与设计原则	100
7.1.1 GIS-SCSRTEW 系统需求分析	100
7.1.2 GIS-SCSRTEW 系统设计原则	100
7.2 GIS-SCSRTEW 系统目标与功能	101
7.2.1 GIS-SCSRTEW 系统目标	101
7.2.2 GIS-SCSRTEW 系统功能	101
7.3 GIS-SCSRTEW 系统结构设计	102
7.4 GIS-SCSRTEW 系统模块设计	102
7.4.1 基本图形控制模块	102
7.4.2 数据查询模块	103
7.4.3 图层控制模块	103
7.4.4 监控设备管理模块	103
7.4.5 数据管理模块	103
7.4.6 统计分析模块	103
7.4.7 预警分析模块	103
7.4.8 系统配置管理模块	104
7.5 GIS-SCSRTEW 系统数据库设计	104
7.5.1 GIS-SCSRTEW 系统数据库管理内容	104
7.5.2 GIS-SCSRTEW 系统数据库设计原则	104
7.5.3 GIS-SCSRTEW 系统数据库结构设计	104
7.5.4 GIS-SCSRTEW 系统数据库标准化设计	106
7.6 GIS-SCSRTEW 系统开发环境	106
7.6.1 GIS 系统的开发方式	106
7.6.2 ArcGIS 9.3 概述	107
7.6.3 ArcObjects 和 ArcGIS Engine	108
7.6.4 系统开发运行环境	109
7.7 本章小结	109
第8章 地铁施工安全风险实时预警系统(GIS-SCSRTEW)实现与应用	110
8.1 GIS-SCSRTEW 数据库建立	110
8.1.1 GIS-SCSRTEW 空间数据库建立	110
8.1.2 GIS-SCSRTEW 属性数据库建立	114

8.1.3 GIS-SCSRTEW 中空间数据库与属性数据库的连接	120
8.2 GIS-SCSRTEW 系统实现	120
8.2.1 GIS-SCSRTEW 主界面实现	120
8.2.2 GIS-SCSRTEW 主菜单栏实现	123
8.2.3 GIS-SCSRTEW 快捷菜单栏实现	125
8.2.4 GIS-SCSRTEW 工具栏实现	127
8.3 GIS-SCSRTEW 在地铁车站工程施工安全管理中的应用	128
8.3.1 空间数据获取	129
8.3.2 属性数据编辑	130
8.3.3 监控设备布设方案	132
8.3.4 采集信息	134
8.3.5 预警分析	139
8.4 本章小结	146
第9章 结论与展望	147
9.1 研究结论	147
9.2 创新点	149
9.3 研究不足及展望	150
参考文献	152
附录	167
附录1 地铁工程施工事故类型中英文对照翻译	167
附录2 关于地铁施工坍塌事故前馈信号的调查问卷	168

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景及意义

地铁工程项目发展至今,已有 150 多年历史。由于人口急剧增加和经济快速发展,世界各大都会区都在积极推动地铁工程建设,以期解决城市交通拥堵顽疾^[1]。伴随着中国经济不断发展和城镇化规模不断扩大,诸多城市的公共交通荷载日益加剧,地铁发展已成为缓解城市公共交通压力的主要手段。表 1.1 简要介绍了中国城市地铁工程的发展概况,截至 2012 年 12 月 31 日,中国大陆地区总共有 17 个城市开通地铁运营线路 64 条,总里程为 2 008 公里,运营线路的平均里程为 31.38 公里^[2]。从 2009 年到 2015 年,中国政府准备在全国 25 个城市投资 9 886 亿元人民币,修建总里程约 2 495 公里的 87 条地铁线路。截至 2012 年底,中国以平均每年新建 270 公里的速度进行城市地铁工程建设^[3,4]。上述一系列数据表明,目前中国正处于城市地铁建设的高速发展时期,已成为全球最大的地铁建设市场,其建设规模之大、速度之快和范围之广堪称史无前例。

表 1.1 中国城市地铁工程发展概况

阶段	城 市	数量
运营中	北京、长春、成都、重庆、大连、佛山、广州、杭州、昆明、南京、上海、沈阳、深圳、苏州、天津、武汉、西安、香港	18
建设中	长沙、东莞、鄂尔多斯、福州、贵阳、哈尔滨、合肥、兰州、南昌、宁波、南宁、青岛、石家庄、无锡、温州、乌鲁木齐、郑州、澳门	18
已批准	常州、太原、徐州	3
规划中	海口、呼和浩特、济南、嘉兴、九江、金华、昆山、洛阳、厦门、银川、中山	11

然而,在城市地铁工程如火如荼发展的同时,各种类型的地铁工程安全事故却频繁发生。2008 年 11 月 15 日,杭州地铁 1 号线湘湖站北 2 基坑施工现场发生土石方坍塌,导致 21 人死亡和 24 人受伤,这起坍塌事故成为中国城市地铁工程建设历史上迄今为止最为惨重的一次事故;2009 年 5 月 15 日,广州地铁 3 号线北延段施工 9 标工地,发生中毒事故,导致 3 名施工人员死亡;2010 年 7 月 14 日,北京地铁 15 号线顺义站明挖车站施工过程中,车站深基坑钢支撑脱落,导致 8 名工人被砸受伤,2 名工人被埋死亡,直接经济损失为 145.94 万元;2011 年 8 月 18 日,上海地铁 11 号线南段一在建桥墩发生脚手架坍塌事故,致使当时正在现场作业的 6 名施工人员跌落,其中 4 名工人幸运逃生,另外两人遇难;2012 年 5 月 22 日,北京地铁 9 号线 03 标七里庄站,发生高处坠落事故,导致 1 人受伤 1 人死亡;等等。上

述一次次的地铁工程安全事故,是一次次惨痛的血的教训,给城市地铁工程发展抹上了无形的阴影,给国家、企业和人民造成了巨大损失。因此,研究如何保证城市地铁工程建设安全,杜绝地铁工程安全事故发生,具有非常重要的实践意义。

1.2 国内外研究现状及不足

1.2.1 工程安全管理现状

与其他安全风险较高的行业相比,建筑业事故的规模相对较小,但其发生频率较高,危险源类型具有多样性^[5]。建筑安全一直是项目管理人员和相关研究人员关注的重点,建筑业事故率的不断下降表明建筑工程安全管理水平正在逐步提升^[6,7]。然而,频繁发生的工程伤亡事故再次印证建筑工程安全问题并没有从根本上得到解决,与“零事故”或者“零伤害”的终极目标相去甚远。相关研究结果指出,建筑工程施工现场的工作人员受伤或者死亡的概率要远远大于其他行业^[8]。从事建筑业的劳动力约占总数的7%,但是建筑业的伤亡事故却占了总数的30%~40%^[9]。表1.2阐述了世界上主要国家建筑业工程安全管理现状,相关研究数据表明,高事故率是全球建筑业面临的普遍问题,建筑工程人员工作的危险系数相对较高,其生存工作环境相对恶劣。

表 1.2 全球主要国家建筑业工程安全管理现状

国家	描述各主要国家建筑业工程安全管理现状
美国	美国劳工统计局(Bureau of Labor Statistics,BLS)的相关数据表明,2011年总共有774名工人死于建筑工程事故,其占工作事故总数的16.5%。建筑业死亡率(每10万名全职工作人员中9.8人死亡)在所有行业中排名第四 ^[10] 。
英国	建筑业致命事故是所有行业致命事故平均数的四倍,是致命事故发生最多的行业 ^[11] 。
中国	2007年死于建筑工程事故的人数为2538人 ^[12] 。
新加坡	2006年的建筑业致命事故总数为24例,约占整个62例致命事故的39% ^[13,14] 。
韩国	建筑业的致命事故率是所有行业中最高的 ^[15] 。
澳大利亚	2009年的建筑业致命事故总数为41例,是所有行业中致命事故最多的。建筑业死亡率(每10万名全职工作人员中5.9人死亡)超过所有行业平均死亡率(每10万名全职工作人员中1.9人死亡)的三倍 ^[16] 。

相关研究发现,如今愿意从事建筑业的年轻人越来越少^[17,18]。这种现象产生的原因可以归结为建筑业糟糕的工作环境和相对较高的事故率,使得年轻人对于建筑业望而却步。目前,建筑业的老齡化现象愈发严重。众所周知,充裕的人力资源是一个行业得以不断蓬勃发展的关键,作为劳动密集型的建筑业更是如此。如果建筑业老齡化的趋势延续下去,整个建筑产业的萎缩将是必然的。因此,为了能够使建筑业持续稳定发展,改善建筑业的工作环境,以及提高建筑工程安全管理绩效显得十分重要,这样才能吸引年轻人返回到这个古老的行业,给建筑业不断注入新的活力。

1.2.2 地铁工程施工安全管理研究现状

与一般建筑工程相比,地铁工程建设具有技术交叉性、复杂性、风险隐蔽性、环境特殊性

等特征,其大规模高速度的建设必然导致地铁工程建设的高风险性^[19]。目前,在地铁工程安全管理研究领域,国内外学者的研究主要聚焦于两个方面:一是从技术角度进行研究,监测建(构)筑物和土体受力状态及其位移情况,选取关键性参数进行控制,以实施地铁工程安全管理;二是从管理角度进行研究,分析事故致因机理及影响因素,针对地铁工程建设过程中的危险源进行评价、监控和预警。

(1) 基于技术角度研究地铁工程安全管理

基坑工程是地铁工程建设中的关键,师健等^[20]针对地铁车站基坑工程建设中发生的事故案例,分别进行工程地质、事故原因和处理措施分析,并提出相应的技术对策、基坑维护渗漏检验方法和安全性验算方法。刘润等^[21]基于大量的工程实测数据,模拟基坑建设过程的有限元分析模型和计算参数,通过数值模拟方法,实现对基坑破坏过程的研究,以确定适合天津地区地铁深基坑建设安全的控制标准。Shi^[22]对冲击土层上的地铁车站基坑工程进行数值模拟分析和现场监控,以保障工程安全。

由于地质条件的差异性和工程自身的不可复制性,需要针对具体的地铁工程进行案例分析。Vogel 和 Rast^[23]对瑞士阿尔卑斯枢纽计划工程(Alp Transit Project)的哥达和新勒奇基线隧道(Gotthard and Lotschberg Base Tunnels)进行结构健康安全分析,包括岩石压力、渗水、通风、防火等。Costopoulos^[24]研究雅典地铁工程安全管理,对 TBM 隧道掘进法的超挖安全风险进行评估,其评估方法基于直觉、理论方法和实践经验。通过钻孔评价地质条件,以及确定基本危险因素。运用监控系统收集工程现场数据,然后运用数值分析技术对这些数据进行处理。黄张裕等^[25]结合南京地铁 1 号线(南京站)过站区隧道,探讨地下隧道穿越既有轨道的施工监测技术,分析影响工程安全的各种因素,提出切实可行的监测方案。Berkelaar 等^[26]对鹿特丹中央地铁站扩容和升级进行研究,在该站扩容和升级过程中,由于与现存地铁站距离很近,必然会引起其变形,并产生危险。因此,在建设过程中需要应用一个变形监测系统,不间断工作,并通过网络发布危险警报信息。由于北京地铁 5 号线崇文门车站工程为首次在既有地铁隧道下方采用暗挖法施工的地铁车站,张成平等^[27]在该工程施工前对既有地铁结构进行安全评价,基于评价结果结合相关规范制定既有有线结构变形的安全控制标准。在施工安全分析的基础上,结合数值模拟计算确定柱洞法施工方案,并辅以降水、超前大管幕和注浆等辅助技术措施,同时采用远程自动监控系统实时监控既有线的动态变化,对施工中既有有线结构出现的异常变形进行及时处理,以确保既有地铁结构的安全可靠。Fang 等^[28]针对北京地铁 4 号线和 10 号线的换乘车站黄庄车站(施工方法为浅埋暗挖法),进行安全风险分析。Ding 等^[29]运用有限元分析软件 FLAC3D,对武汉地铁 2 号线的循礼门车站进行仿真模拟,以保证工程施工安全。Zhang 等^[30]研究应用于北京地铁 10 号线工程安全管理的技术系统。彭智^[31]结合深圳地铁 2222 标项目工程建设过程中的实际情况,分析风险控制与安全保障措施,提出针对地铁建设过程中风险源的防范措施和建议。Wang 和 Shen^[32]运用 Sadaovsk 公式对大连地铁 2 号线的钻爆法施工安全进行分析。刘爱华和刘欣宇^[33]基于岩石地下工程安全分级体系,对广州地铁 2 号线区间隧道盾构工程的安全评价进行分级。

地铁工程建设会对其周边环境产生一定程度的影响,诸多学者针对地铁工程周边的建筑、桥梁、地下管道、高速公路等进行安全可靠分析。Nishibayashi 和 Nagashima^[34]分析东京地铁 7 号线的 Higashi Roppongi 车站工程施工对附近高速公路安全性的影响。He 等^[35]分析地铁施工对周边桥梁的安全影响。Hou 等^[36]对地铁隧道穿过桥梁的 U 形桥台情

况的安全风险进行分析,并针对城市中心地带地铁隧道施工对周边建筑物影响进行分析,构建安全风险管理系统(Safety Risk Management, SRM),包括风险识别、风险分析、风险评估、风险处理和风险监控五个方面。Guo 和 Liu^[37]对北京地铁 10 号线下穿新兴桥梁情况下的可靠性进行分析。Sun^[38]提出对地铁施工周边建筑物安全评价的程序化方法。为确保地铁施工期间邻近建筑物的安全使用,在综合考虑邻近建筑使用现状和受力特点的基础上,秦东平等^[39]运用位移反分析和有限元方法对其进行结构安全分析,以确定邻近建筑物变形控制指标。Qian 等^[40]对地铁隧道穿越已建地铁车站进行仿真分析,以确保施工安全可靠。Wang 和 Peng^[41]运用有限元计算软件 FLAC3D,对已建地铁站上新建地铁站的情况进行结构安全可靠分析。Wang 等^[42]对地铁施工周边的地下管道进行安全评估与控制分析。

此外,范益群以可靠度理论为基础,提出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,并提出改进的层次分析方法^[43]。Tang 等^[44]针对上海隧道工程泥土中的沼气提出处理措施,以避免中毒事故发生。陈龙^[45]研究软土地区盾构隧道施工阶段的风险分析与评估问题,提出软土地区盾构隧道施工阶段的风险与评价模型,归纳总结软土地区盾构隧道施工阶段的风险概率的可能性分布规律,进而为定量分析软土地区盾构隧道施工阶段的风险提供科学的理论依据。霍玉华等^[46]探讨地铁车站工程安全监测中的围护桩变形、土体变形、支撑结构的受力状况、地下水水位、地下管线沉降和位移监测的实施细则,并研究工程安全保障技术方法体系。Prochazka 和 Dolezel^[47]基于有限元计算软件 PLAXI,对布拉格城郊地铁的深边坡开挖进行结构可靠性和安全性分析。周刘刚等^[48]结合地铁及地下工程建设环境安全风险现状,介绍地铁施工安全风险源分布现状及其与结构的相互影响,阐述地铁建设领域安全风险分级和评估体系,以及安全风险的控制标准和监测方案的实施。Fung 等^[49]对地铁工程现场的土层压力与变形进行三维仿真分析,以确保地铁工程建设安全。李兴高和王霆^[50]在分析管线渗漏诱发地铁工程事故原因的基础上,构建相关技术措施体系,包括给排水管线现状调查、给排水管线安全评估、管线渗漏地层饱和范围分析、监控测量、管线保护综合技术措施和工程应急预案建设。宫培松和琚倩茜^[51]通过分析地铁工程安全风险事件机理,探究工程参数与安全风险事件之间的关联,进而开发地铁工程安全识别规则,为实现地铁工程安全自动系统打下基础。

(2) 基于管理角度研究地铁工程安全管理

地铁工程安全事故分析是提高安全管理绩效的重要手段,因此,诸多研究人员基于地铁工程安全事故案例,探究事故发生机理,剖析事故致因因素,以促进地铁工程建设安全管理水平的提高。莫若揖等^[52]参考国际隧道协会所建议的分级系统,将 2001—2006 年间在亚太地区地铁工程建设所发生的 43 个事故,依其后果的严重性分级,作为开展地下工程安全风险分级管理的基础。朱胜利等^[53]列举国内近年来的地铁工程事故,分析事故原因,指出地铁工程安全管理的重要性,对未来发展提出建议。危险源主要有地铁本身结构及所处位置的工程及水文地质条件,工程建设周边环境,施工工艺和管理操作水平,监理人员的素质、技术能力、管理水平及工作态度。Sun 等^[54]通过分析地铁工程中的 126 个事故案例,指出坍塌事故发生的频率最高,根据事故致因因素和复杂的地质环境,提出地铁工程安全管理应急预案。Zhang 等^[55]对北京地铁施工中事故案例进行分类,包括管道漏水或断裂导致的安全事故、不良地质条件导致的安全事故、过多的地层变形导致的安全事故、管理不完善导致的安全事故和不可抗力引起的事故。同时,指出管理不完善是最大的事故致因因素,但大部分的

严重性事故是由管道漏水或断裂和不良地质条件引起。侯艳娟等^[56]以北京地铁近年来新建线路施工中出现的具体工程事故为例,结合新建地铁工程特点及施工难点,分析地铁施工安全事故发生的主要原因。叶大梅和梁国斌^[57]结合地铁安全事故频发的情况,深入分析地铁施工安全管理现状,提出健全安全监管机构,强化地铁施工企业内部管理,加强施工现场安全管理和劳务分包队伍管理。周志鹏等^[58]基于事故机理和管理因素对地铁坍塌事故进行分析,并以杭州地铁1号线湘湖站坍塌事故为例进行实证分析。邓小鹏等^[59]通过对地铁施工安全事故进行统计分析,从不同的角度和视角揭示地铁工程安全事故发生的规律,以指导地铁施工安全管理。邓小鹏等^[60]通过分析地铁安全事故案例,识别地铁工程安全绩效的48个关键因素,包括参与各方对安全的影响程度、人的不安全行为及不安全状态、材料的不安全状态、机械设备的不安全状态和现场环境的不安全状态,基于结构方程模型得出各个指标的重要度及各指标之间的相互影响。Zhou等^[61]构建地铁施工事件数据库(Subway Construction Incident Database, SCID),包括事故、险兆事件和不安全行为/状态。余宏亮等^[62]提出地铁工程施工安全事故案例表示的结构化模型,设计以案例推理(Case-Based Reasoning, CBR)为主规则推理(Rule-Based Reasoning, RBR)为辅的混合模式应用框架,集成 VC++和 CLIPS 专家系统工具开发地铁施工安全事故案例库管理系统。

地铁工程自身的复杂性导致其工程安全事故涉及致因因素较多,诸多学者基于复杂繁多的致因因素探究地铁工程安全评价模型与方法。Ghosh 和 Jintanapakanont^[63]对基础设施项目的风险进行综述,基于这些风险变量,对泰国地铁工程中的风险关键因素进行分离和评估,利用关键因素分析方法获得关键因素,因素变量通过测试来确定其信任度和稳定性,最后得到9项关键因素和35项子关键因素。Seo 和 Choi^[64]提出需要从设计阶段开始考虑施工安全,构建安全评估模型,并将其应用于韩国明挖法施工的地铁工程中。周红波等^[65]运用模糊综合评价法对上海地铁8号线的安全风险进行评估。Zhou 和 Fang^[66]基于模糊影像图法对隧道工程安全风险进行评估。Zou 和 Li^[67]综合运用风险调查表和模糊层次分析法对地铁工程施工中的安全风险进行识别和评估,并以南京地铁2号线为例进行实证分析。李启明等^[68]认为施工人员的不安全行为是地铁施工安全事故发生的直接因素,不安全行为是施工人员安全能力匮乏的外在表现,施工人员安全能力的强弱直接影响到是否发生施工事故。在构建施工人员安全能力模型的基础上,分析地铁施工人员安全能力的形成机理。同时,运用项目反应理论(IRT)对地铁施工人员安全感知能力进行测定^[69]。邓小鹏等^[70]基于模糊信号检测理论(FSDT),针对辨别力指标和反应倾向性指标对地铁施工人员安全能力进行定量评价。游鹏飞和牟瑞芳^[71]针对地铁土压平衡式盾构隧道施工的特点,运用系统工程学理论识别盾构隧道施工中的风险因子,基于泛函理论构建安全评价指标体系,最后运用模糊综合评价法进行安全风险评估。蔡园等^[72]运用决策实验室分析法(DEMATEL)对地铁工程建设中的安全气候进行测定。丁烈云等^[73]阐述地铁工程施工安全评价标准的定位、适用范畴、编制依据及编制原则,构建针对施工安全组织管理评价、施工安全技术管理评价、施工环境安全管理评价和施工安全监控预警管理评价的安全评价指标体系。刘仁辉等^[74]基于层次分析区间估计方法构建地铁施工安全风险评价指标筛选理论模型,并以哈尔滨地铁1号线1期6标段工程为例进行实证分析。游鹏飞和牟瑞芳^[75]考虑地铁坍塌中的不确定因素和指标之间的关联性问题,基于集对分析理论进行地铁施工安全评价。王春苗等^[76]通过对地铁工程建设安全生产管理调查对象、内容、调查方式和评估方法的系统研究,

建立针对地铁工程建设领域的安全生产管理调查评估方法。鲍学英等^[77]以住建部颁布的《地铁施工安全评价标准(GB 50715—2011)》为依据,基于模糊层次分析法进行地铁工程施工安全评价。

与地铁工程安全评价相比,地铁工程安全监控或地铁工程安全预警更具针对性和实时性。贺勇等^[78]提出地铁基坑工程安全预警的一些量化指标。姚卫峰^[79]在分析地铁施工事故致因机理的基础上,从人-机-环境-管理系统的视角,对地铁施工安全评价进行研究,提出地铁施工预警管理指标,并对神经网络在地铁施工预警中的应用进行探讨。刘璐^[80]提出从信息化施工及风险管理的角度建立深基坑工程预警系统,对深基坑工程施工预警系统的建立、预警指标的确定、预测方法的选择等进行理论和实践研究。Wang 和 Wang^[81]基于对地铁施工企业的调查,构建针对地铁工程施工的安全监控管理信息系统(SMMIS)。周志鹏等^[82]认为通过监控险兆事件(Near-Miss),可以有效提高地铁工程施工安全管理绩效,因此构建险兆事件管理系统(NMMS),改变“问题出发型”的安全管理方式为“问题发现型”。池秀文等^[83]基于 ArcGIS Engine 平台研究地下工程安全风险管理系统。王乾坤等^[84]利用 PostgreSQL、GeoServer、Tomcat、Flex、MooTools 等开源软件,完成地铁施工安全监控管理信息系统的开发,实现基于 Web 的 MIS 和 GIS 系统的集成。为解决地下工程施工阶段安全风险动态评估和管理问题,仇文革等^[85]开发基于 WebGIS 的风险管理系统,进行实时数据采集和安全风险的动态评估预警。陈帆和谢洪涛^[86]通过因子分析和 BP 神经网络相结合构建耦合模型,识别地铁施工过程中的不安全因素,进而对地铁施工安全进行预警。丁烈云等^[87]针对穿越扬子江的地铁隧道工程构建施工安全风险实时预警系统。Ding 和 Zhou^[88]运用数据融合模型,构建基于网络的地铁施工安全预警模型,并成功应用于武汉地铁、沈阳地铁、郑州地铁和昆明地铁施工过程中。吴贤国等^[89]研究地铁工程安全监控和预警的标准。Zhou 等^[90]将 4D 显示技术应用于地铁工程安全管理之中,可以对地铁工程安全状态进行实时可视化。

地铁工程的单件性和不可复制性特征表明,地铁工程安全管理过程中的知识或者经验积累至关重要。Zhou 等^[91]基于本体论、控制论和信息论,设计地铁工程施工的安全贮藏系统(SRS-MCP),包括安全知识获取、安全知识表示、安全知识组织、安全知识存储和安全知识管理。周诚等^[92]针对传统安全控制过程中存在的控制黑箱、信息孤岛和知识遗失等问题,构建面向知识重用的地铁工程施工安全集成控制过程模型。邓小鹏等^[93]将险兆事件(Near-Miss)作为地铁施工安全管理中的失败知识,对 Near-Miss 知识进行框架表示,构建 Near-Miss 知识库。Ding 等^[94]基于知识管理构建地铁施工安全风险识别系统(SRIS)。通过知识集成,零碎离散的经验知识形成规则库,可以自动地进行安全风险识别^[95]。吴贤国等^[96]采用专家系统技术对地铁施工安全领域的显性知识和隐性知识进行集成管理,通过风险及其致险机理分析辨识致险因子集,结合致险因子的属性状态经过知识结构化构建事实库,基于典型情况下风险结论可信度临界值进行风险潜在性评价。袁竞峰等^[97]运用安全设计(DFS)概念,提出地铁设计中应该考虑施工与运行安全,通过构建 DFS 知识库以提高设计人员的 DFS 能力。

此外, Van Hasselt 等^[98]针对阿姆斯特丹南北地铁线施工,研究适用于地下空间的安全风险管理内容。Snelders^[99]针对地下工程安全事故,提出应该在设计阶段加强对安全因素的控制。Spangenberg 等^[100]将桥梁施工和隧道施工中住院受伤事故进行比较,确定不同工程类型的安全风险等级。路美丽^[101]等认为地铁工程作为一项大型工程项目,存在着大量