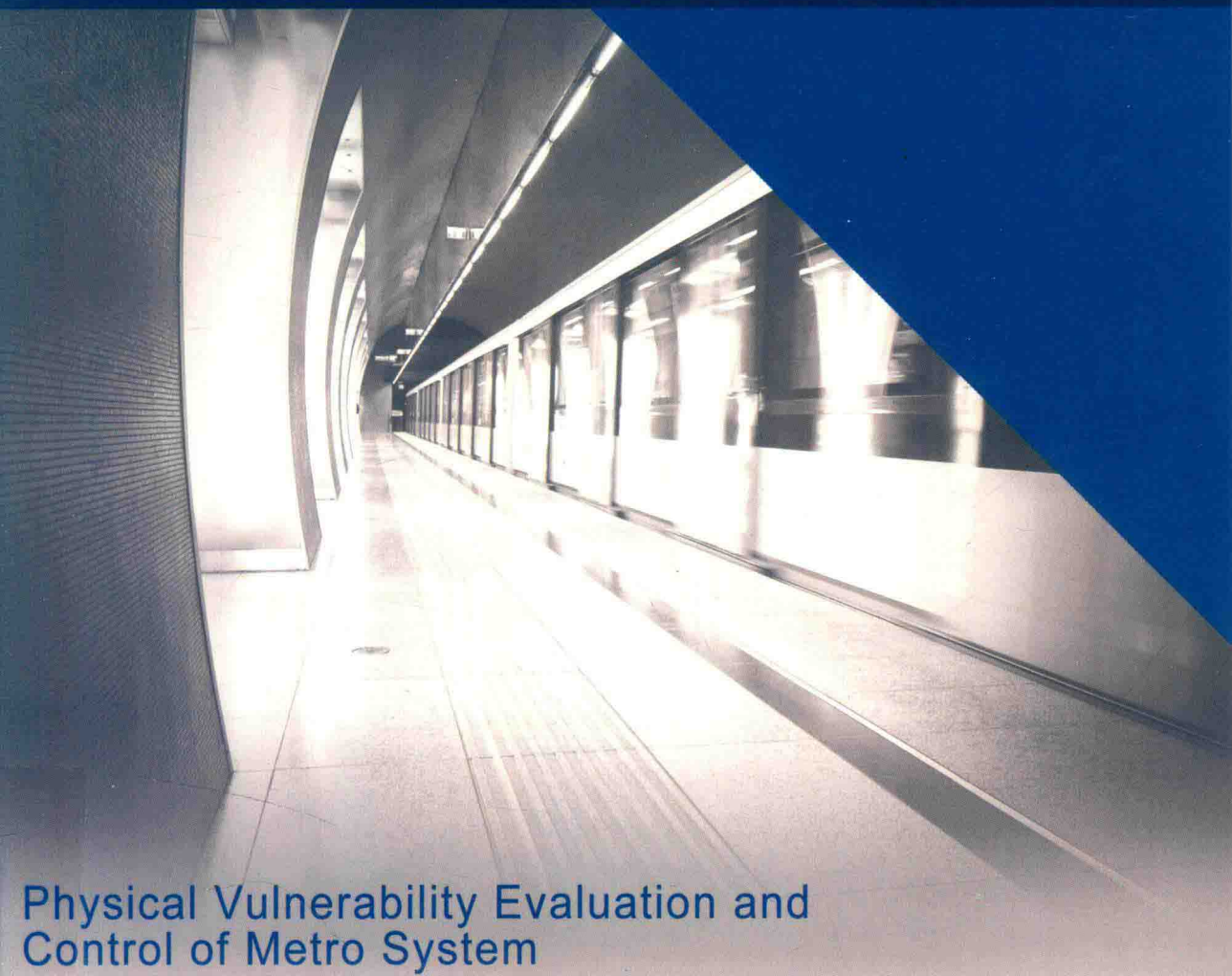


重大工程安全风险管理体系丛书 | 李启明 主编

地铁系统物理脆弱性的 评价及控制

邓勇亮 李启明 · 著



Physical Vulnerability Evaluation and
Control of Metro System

管理丛书 李启明 主编

地铁系统物理脆弱性的 评价及控制

邓勇亮 李启明 著



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

• 南京 •

内 容 提 要

地铁系统是一个复杂的城市公共交通系统。随着投入运营的地铁线路越来越多,网络化运营条件下的地铁运营安全问题引起了众多科研人员和从业者的广泛关注。地铁系统运营事故的统计分析表明:设备设施易受干扰而产生的性能退化、运行故障及其传播是导致运营事故发生的主要原因。因此,本书从脆弱性的研究视角出发,把关注点集中到地铁系统物理脆弱性评价及控制上,分析了地铁系统物理脆弱性的形成机理,采用科学合理的方法识别和评价了地铁系统的物理脆弱源,并提出了物理脆弱性的控制方法和措施。地铁系统物理脆弱性的研究为地铁运营安全管理提供了新的思路,相关的研究成果对提高地铁运行安全管理水平具有重大的理论意义和实践价值。

图书在版编目(CIP)数据

地铁系统物理脆弱性的评价及控制/邓勇亮,李启明
著. —南京:东南大学出版社,2018. 2
(重大工程安全风险管理体系丛书 / 李启明主编)
ISBN 978 - 7 - 5641 - 7622 - 8

I. ①地… II. ①邓… ②李… III. ①地下铁道-工程施工-安全管理-研究 IV. ①U231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 006159 号

地铁系统物理脆弱性的评价及控制

著 者 邓勇亮 李启明

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
责任编辑 丁 丁
编辑邮箱 d. d. 00@163. com
网 址 [http://www. seupress. com](http://www.seupress.com)
电子邮箱 [press@seupress. com](mailto: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 2018 年 2 月第 1 版
印 次 2018 年 2 月第 1 次印刷
开 本 787 mm×1 092 mm 1/16
印 张 8. 5
字 数 207 千
书 号 ISBN 978-7-5641-7622-8
定 价 40. 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,建筑行业的老龄化现象愈发严重,作为劳动密集型的建筑行业如果老龄化趋势延续,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就显得十分重要了,也只有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月中国甬温线动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

国家政策正确引导和相关城市对地铁规划与建设的积极努力,中国的城市地铁建设正处于快速有序的发展阶段,取得了举世瞩目的成就。地铁作为城市公共交通的重要组成部分,具有速度快、运量大、能耗低、污染少、可靠性高、舒适性佳、占地面积小等诸多优点,是解决城市交通问题最有效的方式之一。实践表明,形成以地铁系统为骨干的综合交通体系,是解决大城市交通问题的必由之路。

北京、上海、广州等城市的地铁系统已经进入了网络化运营时代,其他城市的网络化规划与建设也在不断深化和完善。地铁系统的运行空间相对封闭,在突发事故和灾害情况下应急处置难度较高,人员的疏散非常困难。地铁运营事故的统计分析表明:设备设施易受干扰而产生的性能退化、运行故障及其传播是导致运营事故发生的主要原因。因此,研究地铁系统的物理脆弱性对提高地铁运行安全具有重大的理论意义和应用价值。本书主要由以下5部分内容组成:

(1) 通过对现有文献的分析和梳理,总结了安全风险及脆弱性研究的基本理论与方法,阐述了脆弱性的研究现状和研究方向,指出了地铁系统脆弱性的研究不足。在此基础上,介绍了地铁系统的概念、物理构成及运营特征,分析了地铁系统物理脆弱性的内涵、特性及形成机理。进而,确定了物理脆弱性的研究层次,包括网络拓扑层、设备设施层和故障模式层,其中,故障模式是物理脆弱性激发的直观后果。

(2) 基于复杂网络理论,提出了网络脆弱性的测度方法,阐述了地铁系统的网络模型构建方法,并以信号系统为例进行了实证分析。本研究将地铁系统分解为31个功能模块,分析各功能模块之间的物理关系和功能关系,运用网络分析工具Pajek软件构建了地铁系统物理网络模型。在基本拓扑特征分析的基础上,提出了仿真策略,运用网络脆弱性的测度方法研究了地铁系统的物理脆弱性,识别了关键的脆弱域。

(3) 在分析地铁系统设备设施运营特征的基础上,构建了地铁系统物理脆弱点的脆弱性评价指标体系,包括千公里故障率、抗干扰能力、功能影响度、运营影响度、安全危害度、故障难检度六大指标,建立了基于灰色关联分析法和逼近理想解法(TOPSIS)的地铁系统物理脆弱点评价模型。本研究以车辆系统为例,通过实地调研和专家问卷获取研究资料,运用模糊集理论进行量化处理,所得数据为车辆系统的物理脆弱点评价提供了有力的支撑。

(4) 基于复杂网络免疫理论和熵增原理,结合地铁系统的物理脆弱性的层次化特征,提出了地铁系统物理脆弱性的控制策略,即控制关键脆弱域中设备设施的运行状态。基于该控制策略,本书分析了地铁系统设备设施运行状态的演化过程,阐述了劣化

度的分析方法,构建了设备设施状态评价模型,以轮对设备为例进行了实证分析。设备设施状态评价可以为设备状态预警阈值提供重要的参考依据,对提高设备设施的维护效果具有重大的理论意义和实践价值。在总结维护方式发展历程的基础上,提出了面向物理脆弱性控制的设备设施维护方式的逻辑决策图。

(5) 物理脆弱性激发的直接后果就是各种各样的故障模式及其传播,从而造成不确定范围内设备设施的功能失效或崩溃。因此,从故障预控的角度进行物理脆弱性的控制研究显得十分必要。通过实地调研和专家问卷获取研究资料,利用模糊集理论进行量化处理获取了所需数据。基于故障模式、影响与危害性分析方法分析设备设施的故障模式,运用影响图理论识别出故障模式的关键影响因素,进而针对关键影响因素提出了可行有效的具体控制措施。

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)、教育部人文社会科学研究青年基金项目(17YJCZH035)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(2017QNB13)和江苏省高校哲学社会科学研究项目(2016SJD630001),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。

邓勇亮、李启明

2016 年 10 月分别于中国矿业大学和东南大学

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	4
1.2 研究现状和启示	6
1.2.1 安全风险的理论研究与评价方法	6
1.2.2 脆弱性的理论模型及评价方法	7
1.2.3 UMNS 的研究现状	10
1.2.4 不同领域的脆弱性研究现状	11
1.2.5 现有研究的评论及不足	13
1.3 研究目标和内容	14
1.3.1 研究目标	14
1.3.2 研究内容	14
1.3.3 研究内容框架结构	15
1.4 研究方法和技术路线	17
1.4.1 研究方法	17
1.4.2 技术路线	17
1.5 本章小结	18
2 城市地铁网络系统物理脆弱性分析	19
2.1 城市地铁网络系统介绍	19
2.1.1 城市地铁网络系统	19
2.1.2 城市地铁网络系统的物理构成	19
2.1.3 地铁运营特点	21
2.1.4 网络化运营特征	21
2.2 UMNS 物理脆弱性的内涵及特性	24
2.2.1 脆弱性内涵及相关概念研究	24
2.2.2 物理脆弱性的定义和内涵	27
2.2.3 物理脆弱性的特性	27
2.3 UMNS 物理脆弱性的影响因素	28
2.3.1 物理脆弱性的内部影响因素	29
2.3.2 物理脆弱性的外部影响因素	29
2.4 UMNS 物理脆弱性的形成机理	30
2.5 UMNS 物理脆弱性的研究层次	33
2.6 本章小结	34

3 基于复杂网络理论的 UMNS 物理脆弱域评价	35
3.1 复杂网络理论概述	35
3.1.1 复杂系统的含义和特征	35
3.1.2 复杂网络——复杂系统的研究方法	36
3.1.3 复杂网络常用的拓扑特征量	36
3.1.4 复杂网络脆弱性测度方法	38
3.2 UMNS 物理网络模型构建方法	39
3.2.1 Pajek 软件简介	39
3.2.2 网络模型构建方法	39
3.3 物理脆弱域评价的实证分析	40
3.3.1 建立网络模型	41
3.3.2 拓扑性质分析	45
3.3.3 仿真策略分析	48
3.3.4 评价结果及讨论	49
3.4 本章小结	51
4 基于灰色关联 TOPSIS 方法的 UMNS 物理脆弱点评价	52
4.1 理论基础及研究方法	52
4.1.1 灰色系统理论	52
4.1.2 TOPSIS 方法	52
4.1.3 模糊集理论	53
4.1.4 权重赋值方法	55
4.2 基于灰色关联 TOPSIS 方法的物理脆弱点评价模型	56
4.2.1 指标体系的构建方法	56
4.2.2 脆弱点的脆弱性评价模型	57
4.2.3 权重赋值	60
4.3 UMNS 物理脆弱点评价的实证分析	62
4.3.1 指标体系构建	63
4.3.2 数据收集及处理	64
4.3.3 权重赋值	68
4.3.4 评价结果及讨论	69
4.4 本章小结	72
5 基于状态维护的 UMNS 物理脆弱性控制研究	73
5.1 物理脆弱性控制分析	73
5.1.1 物理脆弱性控制的含义	73
5.1.2 物理脆弱性的控制机制	74
5.2 基于免疫理论和熵增原理的物理脆弱性控制策略	74
5.2.1 免疫理论	74
5.2.2 熵增原理	75
5.2.3 UMNS 物理脆弱性控制策略	76

5.3	UMNS 物理系统的运行状态分析	77
5.3.1	设备设施状态演化	77
5.3.2	劣化度分析方法	80
5.3.3	状态评价模型及其实证分析	81
5.4	面向物理脆弱性控制的维护方式决策	85
5.4.1	维护方式的发展历程	85
5.4.2	维护方式的逻辑决策模型	86
5.5	本章小结	88
6	基于故障预控的 UMNS 物理脆弱性控制研究	89
6.1	面向物理脆弱性控制的故障及其影响因素分析模型	89
6.2	脆弱点的故障模式分析	89
6.2.1	FMECA 方法	89
6.2.2	FMECA 的分析流程	90
6.2.3	实证分析	91
6.3	基于影响图理论的故障影响因素分析	96
6.3.1	影响图理论介绍	96
6.3.2	实证分析	98
6.4	面向物理脆弱性控制的故障影响因素调控措施	106
6.4.1	不断完善维护体系	106
6.4.2	提高工作人员的作业能力	106
6.4.3	加强安全文化建设	106
6.4.4	提高应对环境变化的能力	107
6.5	本章小结	107
7	结论与展望	108
7.1	主要的研究工作及其结论	108
7.2	研究的创新点	109
7.3	研究不足及展望	110
	参考文献	111

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

随着世界经济的快速发展和科学技术的进步,越来越多的人口涌向城市,城市化进程导致的人口高度集中在促进城市发展的同时也给城市交通和环境保护带来了巨大的压力和挑战,地面交通已经逐渐无法解决交通拥堵、环境污染等一系列城市公共问题。1863年,英国首都伦敦建造完成了世界上第一条地铁线路,对伦敦的快速发展起到了巨大的推动作用。随后,芝加哥、布达佩斯、巴黎、柏林、纽约、东京、莫斯科等大城市相继开始修建城市地铁。以此为序幕,地铁逐渐成为世界各大城市交通体系的重要组成部分,为改善城市交通结构、缓解城市交通压力、促进城市快速发展发挥着越来越重要的作用。

地铁作为一种城市公共交通工具,具有速度快、运量大、能耗低、污染少、可靠性高、舒适性佳、占地面积小等诸多优点,是解决城市交通问题最有效的方式之一。作为城市公共交通系统的重要组成部分,地铁不仅满足了人民群众的基本出行需求,也大大降低了环境污染,提高了人类可持续发展的能力,这些都与人民群众的生产生活息息相关。在已经开通地铁运营的大中城市中,地铁逐渐成为城市居民出行的“主干道”。以北京为例,2014年北京地铁的日均客流量约为800万人次,约占公共交通出行的40%,极大地缓解了交通压力,有力地促进了城市的经济发展与社会进步。实践表明,形成以城市地铁网络系统(Urban Metro Network System, UMNS)为骨干的综合交通体系,是解决大城市交通问题的必由之路。

我国的城市地铁建设起步较晚,但近年来发展十分迅速。1969年,中国大陆的第一条地铁线路在首都北京开通运营。1976年,天津的城市地铁也通车运营。改革开放以后,诸多城市先后逐步开始规划建设城市地铁。进入21世纪,我国的城市地铁呈现出快速发展的态势,速度超出了世界上任何其他国家的高峰期。根据统计,2005—2016年我国的地铁年新增运营里程状态如图1-1所示^[1]。

随着投入运营的线路不断增多,城市地铁的线网规模也随之扩大,网络化运营进程不断加快,网络效应越发凸显。截止到2016年12月31日,中国大陆有28座城市已经开通运营城市地铁,运营线路总长度约为3560 km,具体情况如表1-1所示^[1]。此外,还有一些城市处于建设或规划阶段。目前,中国已经成为全球规模最大、发展最快的城市地铁建设及运营市场。

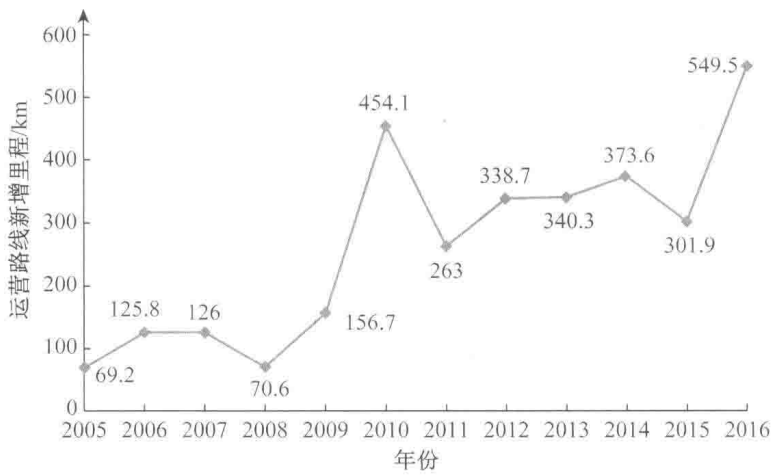


图 1-1 2005—2016 年新增运营里程统计

表 1-1 2016 年中国城市地铁运营线路统计表

序号	城市	通车线路数	运营车站(座)	运营线路长度(km)
1	上海	14	365	579.2
2	北京	19	345	567.1
3	广州	10	175	287.4
4	深圳	8	198	283.6
5	南京	6	121	224.4
6	重庆	4	126	209.8
7	武汉	5	136	181.8
8	天津	5	113	166
9	成都	4	87	108.7
10	大连	3	50	101.8
11	西安	3	66	91.2
12	杭州	3	57	80.2
13	宁波	2	51	74.8
14	苏州	2	59	66.9
15	昆明	3	37	65.5
16	无锡	2	46	56
17	沈阳	2	44	55
18	长沙	3	43	50
19	长春	2	48	48.3
20	郑州	2	36	46.8
21	东莞	1	15	37.8
22	南宁	1	25	32.1

续 表

序号	城市	通车线路数	运营车站(座)	运营线路长度(km)
23	南昌	1	21	28.8
24	青岛	1	22	24.8
25	合肥	1	23	24.6
26	佛山	1	15	21.5
27	哈尔滨	1	18	17.5
28	福州	1	9	9.8

从我国城市地铁的地域分布来看,投入运营的城市地铁主要集中在环渤海、长三角、珠三角等经济发达地区。其中,北京、上海、广州的地铁运营总里程约占全国总运营里程的 50%。上述三个城市分别以奥运会、世博会、亚运会为发展契机,率先进入了地铁网络化运营时代。但是,伦敦、东京、纽约等国际大都市,其高峰时段地铁出行占公共交通出行的比重高达 60%以上,而我国北京、上海等地铁最发达的城市,该项比例仅为 30%左右;国外的地铁承运率已经达到 70%~80%,而目前我国只有 40%左右,未来应该还有非常大的提升空间^[2]。

目前,地铁在城市综合公共交通系统中的骨干地位已经基本得到认同。但随着地铁的持续迅猛发展,一些新的安全问题也逐渐引起人们的关注。地铁运营安全不仅具备安全问题的共性特征,还有其自身的特殊性。首先,由于地铁的运营空间以地下为主、高架空间为辅,环境相对而言较为封闭,但是客流量大,人员密集程度高,紧急情况下的快速疏散非常困难。因此,一旦发生安全事故,容易在较小的封闭空间内造成极大的人员伤亡和财产损失,对所在地区的社会和经济造成严重的负面影响。其次,随着地铁进入网络化运营阶段,线路交叉、设备系统共享等情况愈发普遍,致使路网之间、设备设施之间的关联性不断加强,如果地铁网络中某个点发生突发事件,可能引发蝴蝶效应而影响整个路网的运营安全与品质。此外,地铁是一个庞大而复杂的交通运输系统,设备设施种类繁多,功能复杂,相互之间需要协同工作来完成整个地铁系统的运输功能。而在日常运营过程中,地铁的设备系统不可避免地会受到复杂多变的环境因素和各种人为干扰因素的影响,从而加剧了地铁运营的安全风险,导致各种运营事故频繁发生。

UMNS 在运营过程中故障频发,表现出明显的脆弱性特征。以上海地铁为例,仅 2004 年 1~10 月,上海地铁 1 号线、2 号线、3 号线发生的各类设备设施运行故障就达 8 000 余次^[3]。上海地铁和广州地铁 2005 年、2006 年部分运营故障统计分类如表 1-2 所示,从表中的故障统计结果可以看出,在城市地铁系统的诸多子系统中,车辆系统的故障最多,约占故障总数的 30%~40%,信号系统的故障略低于车辆系统,约占 30%,供电、通信、线路的故障依次递减^[4]。

表 1-2 2005 年、2006 年上海、广州地铁运营故障统计

地铁线路	车辆故障	信号故障	供电故障	通信故障	线路故障
上海地铁 1、2、3 号线	37.8%	24.3%	8.9%	4.9%	1%
广州地铁 1、2 号线	32%	37%	10%	1%	3%

地铁系统的各类设备设施故障对地铁的运营安全造成严重的威胁,频繁导致各类运营

事故发生。其中,比较典型的重大案例有:2009 年 11 月 22 日,上海地铁 1 号线发生了列车相撞事故,导致全线停运将近 5 个小时,造成了恶劣的社会影响;2011 年 9 月 27 日,上海地铁 10 号线发生列车追尾事故,导致 271 名乘客不同程度的受伤,造成了重大的经济损失。这两起运营事故都是由设备问题引发的,第一起是轨道区段编码电路出错导致供电触网跳闸故障,第二起是电缆封堵作业导致的供电设备故障。在北京地铁运营过程中也发生了各种各样的运营事故,表 1-3 是北京 2008—2011 年的地铁运营事故原因统计^[5]。从北京地铁运营事故原因的统计分析中可以得出,设备故障导致的运营事故约占 70%,是导致地铁运营事故发生的重要、直接原因。

表 1-3 北京 2008—2011 年的地铁运营事故原因统计

序号	原因分类		事故总数	占总事故比例	典型案例	总计
1	设备故障	通信原因	145	28.43%	信号故障	72.15%
2		车辆原因	142	27.84%	车辆故障	
3		供电原因	51	10.00%	供电故障	
4		机电原因	20	3.92%	屏蔽门故障	
5		土建设施	7	1.37%	设施原因	
6		线路影响	3	0.59%	道床隆起	
7	非设备故障	乘客原因	97	19.02%	跳下站台	27.85%
8		环境原因	34	6.67%	异物侵入	
9		工作人员	11	2.16%	操作失误	

从北京地铁运营事故原因的统计结果中可以看出,地铁系统设备的故障率较高,物理脆弱性比较明显,可以说,地铁系统的物理脆弱性是导致运营事故发生的主要、直接原因。设备设施正常工作是地铁运营的物理条件,也是发挥其大容量快捷运输优势,支持社会和经济发展的核心基础,设备设施中的薄弱环节给地铁运营带来了重大安全隐患。虽然新技术、新设备的应用极大提高了地铁设备设施的科技含量,但地铁系统的物理脆弱性可能导致的安全运营风险始终是最引人关注的问题之一。

在网络化运营条件下,地铁线网密度有了很大的提高,站点与站点之间、线路与线路之间的联系更加密切,表现出明显的联动性和依赖性。由于不同的线路所处的城市区域发展状况差异性大,站点周围的社会功能迥异,不同的站点和线路客流量不均衡性十分明显。一个站点的断面流量变化可能会涉及不同线路,甚至整个网络不同站点的断面流量变化。地铁的网络化运营对设备设施系统的高度依赖性以及设备设施系统之间复杂的关联性,使得一个局部的设备故障及其连锁反应导致的运营事故可以在运营网络中迅速传播,事故的影响范围大大增加。因此,网络化运营条件下的事故,轻则造成列车晚点或停运、乘客滞留难以疏散,重则造成全线路网瘫痪、设备毁坏、人员伤亡和经济损失。地铁运营事故的发生,对乘客的生命安全造成了巨大的威胁,也给国家和社会造成了巨大的经济损失。

1.1.2 研究意义

我国地铁处于快速发展时期,地铁线网规模不断扩大,客运量持续攀升,网络效应日益

显现。地铁系统的高负荷运行给运营安全带来了巨大压力和安全隐患,设备设施脆弱性对地铁运营安全和稳定运行产生的严重影响没有得到有效控制和解决。目前在 UMNS 安全管理都是事后型和被动式的管理模式,即对事故发生的原因进行分析,再来回溯探讨防止事故的措施。这样的管理模式对运营安全只能起到亡羊补牢的作用,不能适应地铁网络化运营的要求。安全管理应根据 UMNS 网络化运营特征而不断更新、改进和完善现有的运营安全管理体系,采用事前预防的主动式安全管理模式,即事先对 UMNS 物理脆弱性进行识别、评价和控制研究,并制定针对性的具体控制措施,在未发生故障或发生故障但尚未形成事故之前,即可发出预警信息而提醒工作人员马上采取与之相对应的处理措施,从而将安全事故消灭在萌芽状态。

新的形势对地铁运营的安全管理提出了更高的要求。要想切实提高地铁运行的安全性和可靠性,必须从系统本身入手,通过对地铁系统物理脆弱性的分析评价,可以找出物理系统中易于失效或者退化的薄弱环节,选用科学合理的管理和技术措施对脆弱性进行预防和控制,从而提高地铁系统运营的安全性和可靠性。UMNS 物理脆弱性的研究重点应放在对 UMNS 运行的物理脆弱性识别、评价和控制,制定针对性的有效控制策略。因此,从 UMNS 物理特征和网络结构出发,开展脆弱性评价方法和控制研究,对保障 UMNS 的高品质运行具有重要理论意义和实践价值。具体研究意义如下:

1) 有利于探索地铁系统物理脆弱性的形成机理、规律及针对性控制策略

随着城市地铁飞速发展,全网客流量不断增加,网络化运营情况愈加复杂,安全管理的压力越来越大,对运营安全提出了更高的要求。国内外学者对运营安全风险的发生、发展和演化机理进行了相关的探索研究,但是对地铁网络化运营条件下物理脆弱性的形成、演变、评价及控制的研究相对较少。开展城市地铁网络化运营条件下物理脆弱性评价与控制的理论和方法研究,有利于探索地铁系统物理脆弱性的形成机理、规律及针对性控制策略,具有重要的理论指导意义。

2) 有利于提高网络化运营条件下的设备设施管理水平

地铁系统的物理脆弱性是基于特定的物理特征在网络化运营的条件下所表现出来的整体性行为,是客观存在的,会随着时间、空间的变化而变化。将脆弱性引入地铁系统的研究之中,使网络化运营条件下的安全风险评估向全局性、系统性、创新性方向迈进,有利于提高城市地铁设备设施的安全风险管理水平。UMNS 物理脆弱性评估通过脆弱等级划分和脆弱度的计算,可以找出设备设施系统中存在的相对薄弱环节,这对于合理配置安全资源、保证设备设施的安全运行具有重大的理论意义和应用价值。

3) 有利于提高网络化运营条件下的安全保障能力

地铁物理脆弱性研究是掌握地铁物理结构脆弱性问题内在演变规律,为安全管理和技术改进提供理论基础,从根本上提高地铁运营安全的重要途径。从经济效益角度来看,无限加大安全资金投入,理论层面上可以使地铁运营风险趋向于零。但是在实际操作中,无限的安全资源投入既不可能,也没有必要。最理想的状况是以较小的安全投入获取较大的经济效益和社会效益,这就要求在安全投入时区分主次。通过对网络化运营条件下的地铁系统物理脆弱性评估,发现网络化运营过程存在的问题、安全隐患以及网络的薄弱环节等,并采取相应的控制策略来降低物理脆弱性,这些研究成果都对制定、完善应急预案,加强应对突发大故障的响应能力,设置网络应急救援站,优化救援物资配备具有重要的指导作用,对提

高网络化应急救援能力和快速恢复运营具有重要的现实意义。

因此,对城市地铁网络系统物理脆弱性的评价及控制的理论与方法进行研究,揭示网络化运营条件下地铁系统物理脆弱性的形成、发展、演变机理和客观规律,有助于地铁运营安全管理从事前预防、事中控制和事后救援的角度出发,提高安全风险管理决策水平,更加全面、客观、准确地预防与控制物理脆弱性激发,具有重要的理论意义和应用价值。

1.2 研究现状和启示

1.2.1 安全风险的理论与评价方法

从工业革命开始,工业生产过程中发生的工业事故越来越频繁。经过不断总结经验教训,研究人员不断探索安全事故的形成及发生规律,相继提出了多种理论来阐明事故发生的原因以及针对这些原因如何采取措施预防的问题,这些理论被称为事故致因理论。

早期的事故致因理论研究以法默尔(Farmer)的事故频发理论和海因里希(Heinrich)的事故法则为代表,认为安全事故的发生仅仅与一个原因或几个原因有关。20世纪40年代之后,随着人机工程学和事故判定技术的不断进步,事故致因理论的研究开始考虑人员、设备设施、生产环境等诸多因素,逐步从人的不安全行为、物的不安全状态等直接原因向管理缺陷等深层原因拓展。具体理论则有数十种之多,例如多米诺骨牌理论、乳酪理论、扰动理论、轨迹交叉理论、错误链法则、事故遭遇倾向论、能量释放理论等。

1) 多米诺骨牌理论

多米诺骨牌理论是美国安全工程师海因里希于20世纪20年代发展而成,他认为一种可预防的伤亡事故发生是一系列事件按照一定顺序发生的结果,整个过程就像是一排垂直放置的多米诺骨牌,前面的一个倒下会引起后面的一个倒下,当最后一个骨牌倒下,就意味着伤害结果的发生。海因里希认为事故的发生顺序包括五张骨牌,第一张是先天遗传的个性与社会环境(Ancstry and Social Enviroment),第二张是个人的失误(The Fault of a Person),第三张是不安全的行为或机械上的缺陷(Unsafe Act and/or Mechanical of Physical Hazard),第四张是意外事故(Accident),第五张是伤害(Injury)。该理论构建了导致伤亡事故的各种因素之间、因素与伤害之间的关联关系。其核心思想是:事故的发生并不是一个孤立的事件,而是一系列原因事件相继发生的结果,伤亡与各原因之间存在连锁关系^[6]。

根据骨牌理论提出的防止事故的措施是:从骨牌顺序中移走一个或多个中间骨牌。合理配置资源消除人的不安全行为和物的不安全状态,是预防伤害发生的最佳方法。海因里希强调人们应正确地操作机器设备,这比改善机器缺陷更能有效防止伤害的发生^[7]。后来我国有关专家做了一些修改,强调了社会和管理的作用,但是忽略了个人本身的生理素质和心理素质的影响。

2) 乳酪理论(Swiss Cheese Theory)

乳酪理论^[8]也被称作瑞森模型(Reason Model),是瑞士人Reason于1997年提出出来的一种事故原因的连锁关系模型。乳酪理论中每一片乳酪代表某一机械设备、操作功能或操作程序等环节,而每一片乳酪的孔洞即代表这一环节可能发生的失误点。如果多片串联的乳酪的孔洞刚好可以连成一条直线,也就意味着系统事故的发生。乳酪理论给人们的启示

有两点:第一点是减少每个环节的失误点;第二点就是每个环节之间增加屏障措施。

3) 扰动理论

本尼尔(Benner)认为事故的发生过程包含了一组相继发生的事件。生产活动可以看作是一组自觉地指向某种预期或非预期结果而相继发生的一系列事件,它包含了生产系统元素之间的相互作用和不断变化的外界环境的影响。事件的发生一定是由某人或某物引起的,如果把引起事件的人或物称为“行为者”,则可以用行为者和行为者的行为来描述事件的发生。外界影响发生变化将对行为者产生扰动,当这些扰动超过行为者的承受能力时,则原有的动态平衡过程中断而转入事故过程。该事故过程可能使行为者受到伤害或者损坏,这些伤害或损坏可能依次引起其他变化或能量释放而造成下一个行为者发生串联的伤害或损坏。综上所述,事故可以看作是由相继事件过程中的扰动开始,以伤害或损坏为结束的过程。扰动理论的主要启示是,应努力防止扰动的产生,在扰动产生后应尽快消除或降低扰动带来的不良影响。

事故致因理论的研究为事故的预防提供了多种思路。海因里希在 1931 年出版的著作《安全事故预防:一个科学的方法》中提出了著名的安全金字塔法则。他认为在一起严重伤害事故的背后,有 29 起轻微伤害事故,303 起无伤害事件,以及大量的不安全性行为和不安安全状态。从事故的发展过程分析,事故与一切事物一样,有其发生、发展和消亡的规律。金字塔法则阐述了一个重要的事故预防原理:消除人的不安全行为和物的不安全状态可以预防无伤害事件,预防无伤害事件可以预防轻微伤害事故,预防轻微伤害事故可以预防严重伤害事故。所以说,事故预防的关键在于能否消除人的不安全行为和物的不安全状态。现实中应该从细节管理入手,做好日常的的安全管理工作,减少处于金字塔底端的不安全行为和不安安全状态,预防事故发生。

飞机涡轮机的发明者帕布斯·海恩提出了一个航空界飞行安全的海恩法则,该法则指出:每一起严重事故的背后,必然有 29 次轻微事故和 300 起未遂先兆以及 1 000 起事故隐患。这一法则虽然是针对航空业提出的,但是它揭示的规律是适用于各行各业的。该法则强调两点:一是事故的发生是量的积累的结果;二是再好的技术,再完美的规章,在实际操作层面,也无法取代人自身的素质和责任心。

随着安全风险理论研究的不断发展,先后出现了许多风险评价方法。目前常用的风险评价方法主要有德尔菲法(Delphi Method)、层次分析法(A analytical Hierarchic Process, AHP)、蒙特卡洛法(Monte Carlo Method)、灰色系统理论(Grey System Theory)、人工神经网络法(Artificial Neural Network, ANN)、故障树分析法(Fault Tree Analysis, FTA)、影响图法(Influence Diagram)和马尔可夫过程理论(Markov Process Theory)等。

1.2.2 脆弱性的理论模型及评价方法

1) 脆弱性的理论模型

随着脆弱性在社会科学和自然科学中的广泛应用,出现了以下几个有代表性的脆弱性概念模型。

(1) R-H(Risk-Hazards)模型

R-H 理论模型以 Burton 等人为代表,认为区域自然灾害是致灾事件与人类相互作用的产物,把致灾因子造成的破坏理解为暴露度和承灾体敏感性的函数,又称“遭遇—反应”关系,在灾害与气候变化的影响评价中应用广泛^[9]。该模型强调系统对致灾因子或环境冲击