



轨道交通 突发事件分析 与动态应急管理方法

秦 勇 王子洋 郭建媛 著
贾利民 王 莉 曾 璐

 科学出版社

轨道交通突发事件分析 与动态应急管理方法

秦 勇 王子洋 郭建媛 著
贾利民 王 莉 曾 璐

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书旨在为轨道交通现代化的应急处置与管控提供科学化、体系化和模型化的理论、方法及其技术支撑手段。全书遵循基于突发事件影响分析的动态应急处置研究思路,在对轨道交通动态应急管理体系系统化阐述的基础上,针对典型突发事件分别详细介绍了铁路和城市轨道交通路网的动态应急管理方法体系,主要内容包括轨道交通动态应急管理概念、内涵及体系框架;铁路列车大面积晚点突发事件分析、突发事件下列车群行车调整优化、铁路动态应急管理决策支持系统;城轨路网突发事件客流分布影响分析、城轨路网客流疏散及诱导、城轨路网应急处置决策支持系统等。

本书可供轨道交通应急管理与安全保障行业人员及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

轨道交通突发事件分析与动态应急管理方法/秦勇等著. —北京:科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-043026-7

I. ①轨… II. ①秦… III. ①城市铁路-轨道交通-突发事件-应急对策 IV. ①U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 313657 号

责任编辑: 童安齐 / 责任校对: 王万红

责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 2 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2016 年 2 月第一次印刷 印张: 18 1/4

字数: 356 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈中科〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62135235 (VP04)

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

随着轨道交通系统在我国城镇一体化社会经济发展、人民生活及出行水平提高方面起到愈来愈重要的支撑与保障作用,轨道交通突发事件的影响愈来愈广泛和深远。传统的轨道交通应急管理侧重于定性的经验、静态的应急预案和粗糙的应急处置方案,已远远无法满足现代化应急处置的要求。因此,迫切需要加强研究突发事件动态演变规律的定量分析、科学化和精细化的应急处置方案以及在此基础上的动态应急管理体系,从而提高轨道交通应急处置的科学性、高效性、实时性和预测性。

本著作以此为背景,遵循基于突发事件影响分析的动态应急处置研究思路,在对轨道交通动态应急管理体系系统化阐述的基础上,针对典型突发事件分别详细介绍了铁路和城市轨道交通路网的动态应急管理方法体系,主要内容包括:轨道交通动态应急管理概念、内涵及体系框架;铁路列车大面积晚点突发事件分析、突发事件下列车群行车调整优化、铁路动态应急管理决策支持系统;城轨路网突发事件客流分布影响分析、城轨路网客流疏散及诱导、城轨路网应急处置决策支持系统等。

自 2005 年起,本书作者及其科研团队就轨道交通应急管理与处置指挥方法及技术展开了持续深入的研究工作,并得到了国家自然科学基金项目“高速铁路列车运行调整的模糊随机混合智能优化理论与方法的研究”、“突发事件下城市轨道交通路网客流动态估计与网络非均衡演化理论方法的研究”,国家科技支撑计划项目“城轨交通路网运营安全保障关键技术与系统研制”、“高速列车运行组织方案优化设计关键技术与系统-突发事件下列车开行方案设计优化技术”,轨道交通控制与安全国家重点实验室自主课题“高速列车开行方案优化设计与列车群运行建模仿真理论与方法研究”,铁道部科技发展项目“青藏铁路应急救援体系及应急救援指挥信息系统的研发”的持续支持,取得了大量科研成果,指导了该方向大批博硕士研究生,并初步形成了一套系统化、科学化、适应我国轨道交通系统现场实践的动态应急管理理论与方法体系。本书就是对这个理论方法体系及其实践的总结和凝练,尝试为我国轨道交通行业现代化应急管理研究及实践工作提供有益的借鉴和支撑作用。

本书注重基础理论方法与技术及实践的结合,全书内容共分为三篇

八章, 安排如下:

第一篇主要对提出的轨道交通动态应急管理方法进行了详细描述, 包括在第 1 章对轨道交通应急管理研究的现状及问题进行了阐述; 第 2 章对轨道交通动态应急管理的定义、模型、特征及体系框架进行了体系化的描述。

第二篇对铁路动态应急管理方法的核心内容进行了描述, 包括第 3 章对在铁路系统中影响较大的列车群晚点事件进行了建模、判定、分析及预测研究; 第 4 章对突发事件下列车群运行调整模型及算法进行了深入研究; 第 5 章对研制的铁路动态应急管理决策支持系统平台及现场应用效果进行了介绍。

第三篇对城市轨道交通动态应急管理方法的核心内容进行了描述, 包括第 6 章对突发事件下路网客流分布及其特征进行了建模、参数选择及客流指标计算研究; 第 7 章对客流组织疏散过程的行为建模、可达路径分析及乘客诱导进行了定量研究; 第 8 章对研制的城轨路网应急处置决策支持系统及其现场应用进行了介绍。

秦勇担任本书总策划, 确定了主要思想和各章内容架构, 并审定了全书内容; 贾利民参与了全书的内容策划和梳理总结。参与本书撰写及整理的人员有: 曾璐(第 1 章、第 2 章), 马慧(第 3 章), 王莉(第 4 章), 赵忠信(第 5 章、第 8 章), 王子洋、于鸿飞(第 6 章), 郭建媛、明玮、高江华、赵忠信(第 7 章)。

本书相关的研究工作得到了国家自然科学基金委、科技部、原铁道部以及轨道交通控制与安全国家重点实验室的立项资助, 以及中国铁路总公司、北京轨道交通路网管理有限公司、广州市地下铁道总公司、北京交通大学交通运输学院等单位的大力支持与协助。在研究过程中, 还得到了北京交通大学轨道交通主动安全保障与应急研究团队的徐杰、程晓卿、王艳辉等教师, 研究生孟学雷、杜渺、韩国兴、张雅琴、谢正媛、陈彩霞、刘小霞、朱婕、杜婷婷的参与和帮助, 同时参考了大量国内外本研究领域众多学者的研究成果, 在此一并表示诚挚的感谢!

限于作者水平, 书中存在的疏漏和不足之处在所难免, 恳请读者和同行批评指正。

秦 勇

2014 年 11 月

于红果园

目 录

前言

第一篇 动态应急管理方法

第 1 章 轨道交通应急管理现状	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 现状与发展趋势	3
1.2.1 铁路方面	6
1.2.2 城市轨道交通方面	8
第 2 章 轨道交通动态应急管理方法	12
2.1 动态应急管理方法	12
2.1.1 动态应急管理模型	12
2.1.2 动态应急管理特征	14
2.1.3 动态应急管理体系框架	18
2.2 轨道交通动态应急管理研究范畴	24

第二篇 铁路动态应急管理方法

第 3 章 铁路列车大面积晚点突发事件分析	26
3.1 突发事件下列车群大面积晚点分析方法	26
3.1.1 列车晚点状况分析	26
3.1.2 列车大面积晚点分析方法	34
3.1.3 列车大面积晚点判定算法	41
3.1.4 案例计算分析	44
3.2 列车群晚点传播预测分析方法	58
3.2.1 晚点传播规律分析	59
3.2.2 传播预测模型	66
3.2.3 案例计算分析	80
3.3 列车大面积晚点与应急处置	90

第4章 列车群行车调整优化方法	94
4.1 列车群行车调整理论分析	94
4.1.1 列车群运行调整原因与特点	94
4.1.2 列车运行调整影响因素与原则措施	96
4.1.3 列车运行图分析	98
4.2 基于模糊理论的列车运行调整模型	100
4.2.1 经典列车运行调整模型构建	100
4.2.2 模糊参数辨识及表达	106
4.2.3 综合目标函数的描述	109
4.3 基于模糊优化的模型求解	110
4.3.1 模糊线性规划求解方法	110
4.3.2 基于容差法的模型求解方法	112
4.4 实例分析	115
4.4.1 运行调整场景构建	115
4.4.2 限速情境下列车运行计划调整	117
4.4.3 晚点情境下列车运行计划调整	124
第5章 铁路动态应急管理决策支持系统	135
5.1 系统体系结构	135
5.1.1 系统总体架构	135
5.1.2 子系统设计	136
5.1.3 系统网络架构	138
5.2 系统功能及应用	139
5.2.1 高速铁路特殊运营条件获取与生成子系统	139
5.2.2 高速铁路运输组织应急预案编制与决策支持子系统	144
5.2.3 特殊运营条件下高速列车开行方案设计优化子系统	148
5.2.4 特殊列车群应急处置决策支持子系统	152

第三篇 城市轨道交通动态应急管理方法

第6章 城轨路网突发事件客流分布影响分析	163
6.1 城市轨道交通路网日常运营特点	163
6.1.1 路网客流分布及变化特点	163
6.1.2 路网客流管控状况	168

6.2	城轨路网客流分配模型	172
6.2.1	城市轨道交通网络拓扑模型	172
6.2.2	城市轨道交通出行路径阻抗建模	173
6.2.3	城市轨道交通路网出行有效路径	180
6.2.4	城轨路网多路径客流随机动态分配模型	187
6.2.5	基于模型的城轨客流指标计算方法	191
6.3	突发事件下城轨路网客流分配模型	196
6.3.1	突发事件下行车组织方案	196
6.3.2	区间运营中断下客流分类分析	197
6.3.3	站内聚集人数计算方法	199
6.3.4	突发事件下多路径非均衡客流分配模型	204
6.4	实例分析	210
6.4.1	现场数据	210
6.4.2	客流分配算法验证	213
6.4.3	中断情况下客流影响分析	215
第 7 章	城轨路网客流疏散及诱导方法	222
7.1	客流疏散组织分析	222
7.1.1	城市轨道交通客流行为特点分析研究	222
7.1.2	基于元胞自动机的城市轨道交通客流疏散模型研究	226
7.1.3	城市轨道交通客流疏散模型验证	231
7.2	基于可达性分析的乘客诱导	233
7.2.1	乘客出行可达性分析	234
7.2.2	乘客出行可达性计算方法	240
7.2.3	案例计算分析	259
第 8 章	城轨路网应急处置决策支持系统	271
8.1	系统体系结构	271
8.2	系统功能及应用	272
8.2.1	系统功能架构及功能分析	272
8.2.2	系统界面展示	273
8.2.3	示范工程及现场应用	277
参考文献		278

第一篇 动态应急管理方法

第 1 章 轨道交通应急管理现状

1.1 研究背景及意义

近年来,包括铁路及城市轨道交通在内的我国轨道交通发展呈蓬勃之势。截至 2013 年年底,全国铁路营运里程达到 10.3 万 km,其中高铁 1.1 万 km,高速动车组拥有量 1308 组,已形成了“四纵四横”的高速路网基本架构,并覆盖了我国不同气候类型及地形地貌区域,高铁运营规模居世界第一;预计到 2020 年,我国拥有时速 250km 以上的高铁线路里程将达到 1.8 万 km。从运输量统计,我国铁路运输量仍处于各类交通方式之首,据统计 2013 年全国铁路旅客发送量达 21.06 亿人次,周转量完成 10595.62 亿人 km;铁路货物发送量达 39.61 亿 t,周转量完成 29173.89 亿 tkm,2014 年国庆期间更是实现了 9100.7 万人次的发送量。

城市轨道交通同样得到了快速发展,截至目前,我国北京、上海、广州、天津、杭州、重庆、武汉、南京等总共有 22 个城市开通轨道交通,运营里程约 2700km,其中上海、北京从 2002~2012 年 10 年间各建成近 400km 线路,平均每年建成 40km,其路网规模分列世界第一、二位;城市轨道交通网络化运营已成为发展趋势。城市轨道交通的成熟发展吸引了大量出行客流,其中北京地铁尤为突出,日客运量将近千万人次已成常态。未来几年城市轨道交通仍将处于供小于求的局面,预计到 2020 年,全国城市轨道交通客运量将超过 200 亿人次。

轨道交通在公共交通方式中的骨干作用以及其高速、高密度、网络化、技术构成复杂、系统耦合性强、自然环境影响大等特征势必给轨道交通的安全运营提出了严峻的挑战。近年来,在世界范围内由于自然环境、设备、人为管理甚至恐怖行为造成的轨道交通突发事件频有发生。例如,由于人为驾驶原因,2011 年 7 月 12 日美国加利福尼亚州一列客车与货车相撞,事故造成至少 26 人丧生,130 多人受伤,是美国 10 多年来最严重的火车事故。由于设备原因,1998 年 6 月 3 日德国城际特快列车(ICE)在艾雪德小镇附近脱轨,造成 101 人死亡,88 人受伤

的世界高速铁路史上最大的伤亡事故；2011年7月23日北京南站开往福州站的D301次动车组列车运行至甬温线上海铁路局管内与前行的D3115次动车组列车发生追尾事故，造成40死亡，约200人受伤；2011年9月27日上海地铁10号线新天地站设备发生故障，致使一列列车行至豫园至老西门下行区间不慎与前车发生追尾，造成271人受伤。由于自然灾害原因，2008年1月下旬受南方雨雪冰冻灾害影响，我国京广线、沪昆线等主要干线牵引供电网和通信信号系统中断，导致铁路运输瘫痪，造成大量列车滞留晚点和停运，南方部分地区站车旅客滞留积压严重，铁路运输严重受阻；2011年6月23日特大暴雨造成北京地铁1号线、亦庄线及众多车站停止运营，给公众出行带来巨大困难。由于恐怖行为，2010年3月29日莫斯科市“卢比扬卡”地铁站内一节车厢发生恐怖爆炸，造成至少25人死亡，另有10多人受伤；2004年3月11日，西班牙首都马德里3个火车站以及附近地区连续发生爆炸，共有4列近郊区旅客列车连环爆炸，造成192人死亡、1500多人受伤。

由于轨道交通系统的特点带来了其存在着必然的脆弱性，突发事件一旦发生，轻则带来运行晚点影响人们的正常出行，重则导致人员伤亡、线路中断、财产损失和环境破坏，甚至造成社会危害和影响社会稳定等严重后果。因此，如何更好地预防轨道交通突发事件的发生以及将突发事件的损失降低到最小已成为世界各国政府和相关部门迫切需要解决的问题。国外长期以来非常重视突发事件的应急管理研究，包括政府应急管理和交通系统应急管理，而且已经逐步形成了一套非常成熟的应对突发事件的应急管理体制和专门的应急管理机构，

美国是目前世界上应急管理体系最完备的国家之一，1979年美国成立了联邦紧急事务管理局（FEMA），专门负责突发事件应急管理过程中的机构协调工作，这标志着世界现代应急管理的一个重要里程碑。经历了“9·11”事件，2003年美国成立了国土安全部，FEMA成为了紧急事态准备与应对司下属的第三级机构，目前形成了以国土安全部为中心，下分联邦、州、县、市、社区五级的应急管理机构，分级响应^[1]。

澳大利亚四周环海其突发事件主要是自然灾害，比如洪水、暴雨、热带风暴等。澳大利亚设立了具有不同职责的三个层面的政府应急管理体系，包括联邦政府、州、地区和社区。同时成立了应急管理署，负责各种类型的灾害，包括人为的和自然灾害。在灾害管理中，澳大利亚有较为先进的管理理念、法律依据充分、技术指导力度大、管理规范，具有以志愿者为特色的社会广泛参与、以风险管理为基本管理方式等特征^[2]。

日本由于地理位置原因是世界易遭自然灾害的国家之一，经过长期的积累，日本也形成了一套具有特色的突发事件应急处置机制。首先，日本有完善的应急管理法律体系，除基本法外关于抗震减灾法的就有50多部；其次，日本有巨灾风

险管理体系,为灾后人民的生活提供了保障;同时日本还有严密的灾害救援体系,此体系是由消防、警察、自卫队和医疗机构组织组成的。日本政府设立了风险管理总监和内阁风险管理中心,并成立了“防灾省”,建立了从中央到地方的防灾减灾信息系统及应急处置管理系统。

俄罗斯颁布了《俄罗斯联邦战时状态法》,建立了联邦安全会议和紧急事务部,形成了以联邦安全会议中心为决策的中枢系统,政府各部门之间分工协作,化解和处理国家发生的各种公共安全事件^[3]。

加拿大主要的自然灾害是暴风雪,政府形成了一套高效系统化的抗雪灾应急措施体系。1988年,加拿大成立了应急准备局,建立了三级应急体制,包括联邦、省和市镇,各行其责,分级管理。

英国也形成了一套自己的应急组织体系。英国成立了内阁办公室国内紧急状态秘书处,英国首相为应急管理的最高执行长官,统一领导指挥各部分的应急活动,内阁办公厅负责向民众发布预警信息及公众教育,同时英国政府各部门分别负责自己范围内的防灾救灾工作。

我国同样建立了从国家到省、市县、社区或村的多级应急管理体系,在国务院专门设立了应急管理办公室,各部委及省市都有专门的应急管理机构;同时完善了相应的法规及应急预案体系,形成了以政府为主导全社会参与的应急救援响应机制。近年来,我国对灾害管理的重视程度在不断加大,灾害管理水平也在不断提高。

从各国的应急管理发展历程看,应急管理经历了从单一灾害管理—多灾害管理—综合应急管理的过程。国外建立突发事件应急管理的总体发展趋势,倾向于强调涵盖所有灾害危险、整合所有资源、动员所有机构参与、实行全过程的综合管理。在实践中,一种以一体化、全过程和动态性为特征的突发事件应急管理模式,开始逐步在许多国家形成,并在应急管理中取得重大成功。一体化是指应急管理组织机构体系的一体化,是指各级政府部门、社会组织、工商企业、社区组织和公众在政府的统一领导下,分工协作、相互配合,共同进行防灾救灾工作。全过程是指对应急管理的预防、准备、反应和恢复四个阶段,采取不同的应对措施,实施全过程的管理。动态性是指针对突发事件在不同阶段的发展演化规律和存在特征,采取有针对性的控制或预防措施,从而最大限度地提高应急管理的科学性、可操作性和实效性。

1.2 现状与发展趋势

突发事件一旦出现,往往会对其周边范围产生极大的影响,使得日常生活秩序产生极大的变动,而且突发事件发生后,在较短的时间内很难恢复到均衡状态。

按照《中华人民共和国突发事件应对法》中对突发事件的定义,认为突发事件(emergency event),即紧急事件,是指突然发生,造成或者可能造成严重社会危害,需要采取应急处置措施予以应对的自然灾害、事故灾难、公共卫生事件和社会安全事件。

结合轨道交通系统的特点,我们可以归纳在轨道交通环境下的突发事件为:在轨道交通系统运营过程中,突然发生的、造成或者可能造成线路运营中断、人员滞留和伤亡、设备财产损失和环境破坏等消极后果,甚至造成社会危害和影响社会稳定,需要紧急采取应急处置措施予以应对的自然灾害、事故灾难、公共卫生和社会安全等事件。

轨道交通系统突发事件具有一般突发事件的基本特点^[4],同时具有自身的特殊性。轨道交通系统突发事件特点可总结为以下几个方面:第一,突发性。轨道交通系统的突发事件的发生往往没有征兆或征兆很少,很难被发觉或预测。第二,不确定性。不确定性包括突发事件发生时间地点的不确定性、发展的不确定性以及造成的伤害无法估计性。第三,易发性。轨道交通由于其所处环境的特殊性,如受自然环境影响大、运营过程中客流密集性、运输设备及设施的复杂性、运输工具及场所的封闭性、客流出行高低峰的不均衡性,使得其安全问题具有易发性。第四,变异性。轨道交通系统本身是个复杂巨系统而且呈现网络化特征,突发事件易于传播,而且在传播过程中受很多因素的影响会产生变异,产生次生事件,如火灾事件中发生踩踏事故,单线晚点造成相邻线乘客滞留等。第五,严重性。轨道交通突发事件一旦发生,往往由于其空间狭小半封闭、客流密集等原因,使客流疏散和应急救援有很大难度,进而造成较严重的后果。第六,公共性。轨道交通具有公共性和广泛性,在处理突发事件时,政府和轨道交通部门是主导力量,它必须联合其他各个公共部门共同配合协作,同时需要广大群众的公众力量。

轨道交通系统处在一个开放的大环境中,环境状态是时刻变化的,内因和外因共同作用导致了突发事件的发生。轨道交通突发事件的诱因主要表现在人为因素、环境因素、设备因素和管理因素四个方面。第一,人为因素。人为因素方面又可以分为工作人员因素和乘客因素,如人工队伍老化、连续工作时间长、旅客不遵守秩序携带危险品等。第二,环境因素。诱发轨道交通突发事件的环境因素包括内部环境和外部环境两部分。内部环境因素主要指作业环境,包括生产设施所构成的操作环境、企业文化和班组氛围等。外部环境因素包括地震、山体滑坡、暴雨等自然环境和爆炸、恐怖袭击、毒气、传染病等社会环境两部分。第三,设备因素。轨道交通运输设备因素包括隧道坍塌、轨道断裂、地铁车辆故障、列车脱轨、追尾及冲撞、牵引供电系统故障、照明停电、失火、电梯故障、车站内部坍塌等事件。第四,管理因素。管理因素包括事前预防控制和事后应急处置的管理体系、机制、法规及办法等,正确、科学的管理有利于将突发事件的损失降低

到最小。

应急管理随着突发事件应运而生。突发事件应急管理是一门新兴学科,是一门综合了运筹学、战略管理、信息技术以及各种专门知识的交叉学科,是针对突发事件进行的决策、指挥、预案优化、资源配置和调度优化等的技术、工具和方法。应急管理^[5]是在应对突发事件的过程中,为降低突发事件所产生的危害而达到优化决策的目的,在对突发事件的成因、过程及后果进行分析的基础上,有效集成社会各方面的相关资源,对突发事件进行有效预警、控制和处理的过程。

可以说,突发事件和应急管理是一个事物的两个方面,事件作为客体,而应急管理作为主体。应急管理就是围绕着对客体规律性的认识,对主体涉及的技术、工具、方法与系统的综合研究与应用。总之,应急管理是对重大事故的全过程管理,贯穿于事故发生前、中、后的各个过程,充分体现了“预防为主,常备不懈”的应急思想。

目前的应急管理大多侧重于静态管理,即在仅考虑突发事件基本性质和单个事件影响的基础上,构建相应的准备、计划、预案、协调和指挥控制架构。实际情况是突发事件是一个复杂动态过程,其性质与状态随时间在不断变化而且往往在传播过程中造成更大的次生事件与灾害,因此应建立在对突发事件动态特性的了解和掌握基础上,采取相应的预防、监督和控制措施。

基于此出发点,现代化的应急管理应是动态应急管理。动态应急管理的定义如下:动态应急管理是在对突发事件发生机理及演化规律研究的基础上,运用先进的监测、信息、建模、优化决策等现代方法技术,针对事件的动态特征对应急管理相关资源进行优化集成,从而实现高效、实时和精细化的预防、准备、响应和恢复等应急管理全过程,最终达到显著防止其发生或降低其可能造成后果和影响的目的。

相比静态式的应急管理,动态应急管理具有如下特点和优势:第一,注重突发事件动态性和综合性。在突发事件发生机理及演化规律研究基础上,对突发事件产生、发展、传播和后果等过程精细分析,在突发事件生命周期的各个环节,准确把握其不同阶段的特点和影响规模。第二,现代先进技术的广泛采用。为支撑实现对突发事件的定量分析、监测和预测等功能,现代应急管理过程中广泛采用了监测、信息、建模、优化等多种技术手段,使应急过程更加科学化和预测性。第三,应急处置的精细化管理,针对突发事件动态特征而采取针对性的处置措施并不断优化,可实现对突发事件管理的高效性、准确性和实时性。

轨道交通应急管理应以动态应急管理为基本出发点,一方面要注重对轨道交通系统中各类典型突发事件动态变化的分析与预测,增强对突发事件的预防和准备工作能力;另一方面应重视轨道交通应急处置中最关键的客流、车流处置措施,可显著增强轨道应急处置的水平 and 效率。因此,国内外对轨道交通典型突发事件

的发展规律展开了不少研究,如列车晚点分析、突发客流传播影响分析、设备故障失效链等;针对各类轨道交通应急处置措施也开展了不少研究,如列车群运行调整、客流诱导与疏散、设备故障诊断与处置办法等。以下将分别按照铁路及城市轨道交通对其主要的研究进展总结如下。

1.2.1 铁路方面

1. 铁路突发事件影响分析

(1) 列车晚点突发事件影响分析

列车正点率是反映铁路运输的重要指标,如何在愈加复杂的环境下,尤其发生突发情况时,解决列车晚点问题是铁路运输研究中一直探索的问题。许多文献对中国列车晚点原因进行了阐述,从自然因素到管理因素等角度分析了晚点的产生原因,并讨论了晚点产生的影响。但解决晚点问题,就必须对列车晚点现象的外在因素和内在规律开展深入探究,主要一个研究内容就是对列车的晚点传播效应。在 20 世纪 90 年代我国铁路专家胡思继等就研究了区段内不同类型列车组合间的不同层次列车晚点传播过程及其传播规律,利用排队论方法对晚点传播进行了分析^[6]。近年的研究中,文献[7]从铁路网络拓扑结构出发,利用复杂网络的传播动力学分析路网性能并建立了基于 SIR 的晚点传播模型,推演列车晚点传播对路网的影响。文献[8]通过利用基于轨道区段锁闭时间理论,提出了两趟列车间晚点传播的构建方法,并以此为基础构建了多趟列车晚点传播链的方法。文献[9]讨论了模拟移动空间闭塞、移动时间闭塞、完全移动闭塞 3 种移动闭塞模式下的列车晚点传播现象及其规律,得出相同初始晚点时间下,移动空间闭塞模式总的列车晚点时间最大且晚点列车总数最多,而完全移动闭塞则恰恰相反的重要结论。

国外近几年主要研究对列车晚点传播更加有效的表示方法和其传播规律以及列车晚点后运行图的及时调整,通过使列车晚点传播最小化使路网上列车准点率整体提高,petri 网络是其主要应用方法之一,荷兰 Delft 理工大学交通运输系的研究较为突出。文献[10]通过对荷兰铁路列车到发晚点、停站时间、换乘时间等实际数据的分析,利用统计概率方法,结合了不同的信号制式、车站类型,建立了基于随机模型的列车晚点传播模型,主要为时刻表的编制和实际列车准点运行提供依据。Rob Goverde 在文献[11]中应用赋时事件网的基础理论对列车运行建立数学模型,通过 max-plus 代数对其进行求解,分析了列车晚点的传播规律。

(2) 自然灾害突发事件影响分析

自然灾害事件属于铁路突发事件的一种,区别与事故灾难、公共卫生事件和群体性事件等,自然灾害是由天文、地理等不可抗力因素引发的,在历年的铁路突发事件统计中占较大比例^[12]。自然灾害的发生通常会导致铁路运输基础设施遭到破坏,或者铁路客流异常波动,从而影响铁路行车秩序混乱,无法按计划行

车。铁路运输对不同的自然灾害敏感性不同,如地震、泥石流会导致铁轨损坏;暴雪天气可能造成道岔不能完全闭合;雷电、大风等天气可能会造成接触网断线、信号系统故障;海啸、飓风等可能造成列车倾覆等。而直接扰乱行车秩序的则是自然灾害导致的线路中断和限速运行,对铁路线路区间能力与车站的接发车能力造成严重影响,甚至改变铁路路网拓扑结构^[13]。针对自然灾害的特殊环境,国内外学者就灾害下列车运行调整等方面展开了研究。文献[13]首先将灾害情况下线路区间通过能力的变化作为马尔科夫过程计算得出其通过能力,并以此为基础研究了线路中断后,在路网层面上列车运行径路及跨线运行路径分配模型,最后引入模糊算子和收敛因子的粒子群优化算法对模型进行求解,为突发事件条件下列车运行组织问题提供了一整套解决方案。文献[14]中,分析了自然灾害下列车迂回径路生成的影响因素,设计了基于通过能力的改进最短径路生成算法,再利用遗传算法对所提出的列车运行径路分配模型进行了求解。文献[15]以京沪高速铁路为研究背景,构建了铁路地理网络模型,重点研究事故灾害对路网衔接能力及通过能力的影响,运用了“宽度优先+剪枝”的状态搜索算法对事故条件下高速铁路列车迂回可行径路集生成进行了相关研究,并在此基础上构建了突发事件条件下高速铁路列车开行方案模型。文献[16]提出雪灾情况下客运专线铁路弹性运输能力的概念,并利用模糊综合评判法进行基于马尔科夫过程的雪灾下通过能力变化规律的研究,采用定性分析和定量分析相结合的方法,建立了以最快疏散滞留旅客为目标的开行方案目标规划模型,最后结合实例运用 Excel 进行求解。文献[17]针对山区铁路的特点,归纳总结了灾害条件下列车运行组织的七种方法,建立了灾害条件下基于总运行时间最短的路径选择模型,最后提出了旅客列车开行数量、列车等级以及停站方案的调整方法。文献[18]针对自然灾害或设备故障等突发事件建立了两阶段的模糊优化模型,模型中将总延误时间最小作为优化目标,并运用 GAMS 优化软件求解。该文章的创新点在于采用基于情景的方法将双线路能力恢复时间模糊化。

2. 列车群行车调度国内外研究现状

目前,国内外关于列车群行车调度优化方面做了很多研究工作,多集中在模型的建立和算法求解两方面。具有代表性的调整方法有运筹学方法、人工智能优化算法、基于离散事件动态系统理论的方法、模糊综合优化法和模拟仿真方法。文献[19-22]采用传统数学和运筹学求解,0-1 混合整数规划模型、分支定界法、拉格朗日松弛算法等在文献中得到广泛应用;启发式智能优化算法,自兴起以来广受关注,为列车群运行调度问题的求解提供了很好的思路,文献[23-32]则是应用了这种方法,如遗传算法、粒子群算法、蚁群算法、粗糙集理论、神经网络等,解决了大规模问题不能用运筹学方法求解的难题;模糊综合优化方法^[33-36]是将部

分参数如最小追踪间隔时间、列车运行速度等利用隶属度函数模糊化,在经典模型的基础上建立模糊优化模型,从而使模拟结果更贴近现实且更优。模拟仿真的方法^[37-42]主要利用计算机模拟列车的运行、人工编制和人工调整列车运行图,利用人工经验及相关原则生成计算机能识别的判别准则和执行程序,实现列车运行调整。

1.2.2 城市轨道交通方面

1. 客流分析国内外研究现状

城市轨道交通客流分配领域是伴随着近年来主要城市的轨道交通网络建设的快速发展才逐渐引起研究者注意的,属于一个全新的领域,其理论和应用模型并不完善。目前为数不多的研究主要集中在借助交通分配理论在道路交通中的研究成果,对轨道交通对象进行研究。

正常运营条件下的客流分配可以分为均衡分配和非均衡分配两大类。其中路网均衡客流分配模型和算法方面:黄一华^[43]将 Fisk 随机用户均衡模型应用在城市轨道交通网络中,并给出了求解算法;孔繁钰^[44]分析了考虑系统最优的弹性需求下的城市轨道交通客流分配算法,证明了客流需求并非总是固定不变的;吴祥云^[45]等提出了城市轨道交通用户均衡模型,并改进了 F-W 求解算法,但是并没有考虑留乘问题;文献[46, 47]利用遗传算法对用户均衡分配模型进行求解,提高了预测的准确性。客流非均衡分配模型和算法方面:Trahan 等^[48]对该模型的算法进行了改进提高了算法的效率;Daganzo^[49]提出了多路径概率分配模型,然而由于计算量太大并不适合于大规模路网,文献[50, 51]改进了该多路径概率分配方法。而非均衡分配模型和算法方面:Dial^[52]最早提出了 Logit 模型对道路网络进行非均衡分配,四兵锋^[53]和刘剑锋^[54]将该模型用于城市轨道交通客流分配建模,并利用数据进行了验证,与之相似的研究还有文献[55-59],区别在于有效路径的定义和搜索算法。

异常情况下针对城市轨道交通客流的研究十分有限,张志青等^[60]利用系统仿真的方法模拟路网的车流和客流运行情况,并通过随机生成故障的方式对路网客流的变化进行模拟,然而并未考虑到故障情况下的决策方式和客流需求变化情况;波涛^[61]利用多智能体理论建立了城轨路网仿真模型,对客流传播和疏散进行了简单的描述;王志强等^[62, 63]用流行病传播理论对城市轨道交通故障状态下的客流演化进行了分析,该方法能够反映出路网连通性等可靠性特征,但是对客流量的变化描述并不准确;朱婕^[64]利用多路径概率模型研究了城市轨道交通中断情况下的客流分配,提出了中断情况下客流变化的静态模型,但是该模型仅仅考虑了故障状态下客流选择和路径分配概率的变化情况,并不能反映出容量限制状态下路网客流的动态变化情况;李建^[65]从北京地铁网络的实际出发,对路网客流的扩散情

况进行了定性分析,但是并未考虑故障带来的运能变化引发的运输效率下降。

通过上述文献综述可以看出,目前的研究对城市轨道路网出行路径的描述及其阻抗建模并不能很好地体现出城市轨道交通出行特性,以及路径拥堵状况不同导致的客流分配的动态变化规律;对异常情况下的客流分配大都通过仿真方法实现,未能描述出突发事件对出行者路径选择倾向的影响,缺乏一种运能下降时的站内聚集人数计算方法。

2. 客流疏散国内外研究现状

客流疏散方面,国内外一些专家学者在微观层面主要从两方面进行研究:乘客微观行为选择及乘客与设备设施之间复杂关系影响。

乘客微观行为研究方面:行人交通流源于大量乘客的个体交通行为,这些行为主要有路径选择行为、碰撞规避行为、追踪和逃逸行为、到达和离去行为、徘徊行为等^[66]。研究表明尽管个体交通行为可以用简单的方法来描述,但是由这些简单的行为组成的群体行为具有混沌、非线性动力学特性。最早建立乘客个体行为模型的是 Gipps 等人,他们假定行人的移动服从最短路定律,并建立了简单的路径选择模型^[67]。随着人工智能和计算机技术的不断进步,许多其他行业的研究者也介入到研究大量行人产生的复杂行为中,其中较典型的有元胞自动机模型^[68-72],这种模型借助道路交通的仿真方法运用“换道”的思路对行人移动的过程进行了描述。然而,许多事实证明这种假设存在着一定的局限性,行人交通远比道路交通流复杂^[73]。著名的物理学家 Helbing 在 *Nature Transportation Science* 上发表文章说明了行人交通流的复杂特性^[74-78],并提出了著名的“社会力”模型(social force model)。还有一些研究者则通过类比的方法对大量行人的疏散问题提出了引力模型^[79]、气体动力学模型^[80]及排队网络模型^[81]等。国内的大部分学者对以上模型尤其是基于元胞自动机的疏散模型和基于社会力的仿真模型进行了一定程度的改善,使之能够用于研究紧急情况下小范围空间的人员逃生问题^[82-85]。由于乘客行为的复杂性,已有研究对于模型的验证问题也还没有得到充分的解决,对乘客自组织的认识还有待于进一步深化。

乘客流与步行设施之间的复杂关系影响方面:枢纽内乘客集散的全过程实际上是行人利用不同的交通设施完成位移的过程。基于将大量行人视作连续可压缩流体介质的假设,通过对不同步行设施上的行人流的流体特性进行调查,研究整个流体的平均行为,对挖掘行人交通和枢纽步行设施的本质关系具有重要的意义。大量实证研究证明行人流的特征不仅与行人的个体特征紧密相关^[86],行人在不同的交通设施上所表现出的特征也是完全不同的^[87-89]。1985 年 Seneviratne 提出对于行人设施的规划及评价应当根据不同国家的具体特征进行分析^[90,91],随后,