



城市轨道交通路网运营 安全保障理论与应用

Theory and Application of Operation
Safety Assurance of Urban Rail Transit Network

秦勇 梁平 战明辉 刘靖/编著



科学出版社

城市轨道交通路网运营 安全保障理论与应用

Theory and Application of Operation Safety
Assurance of Urban Rail Transit Network

秦 勇 梁 平 战明辉 刘 靖 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书旨在为城市轨道交通路网运营安全保障和应急处置提供科学化、体系化、精细化的理论、方法及技术支撑手段。全书从城市轨道交通路网数据中心构建关键技术、城市轨道交通运营安全评估与预警关键技术、城市轨道交通路网突发事件应急处置关键技术三方面详细研究城市轨道交通路网运营安全保障理论与应用, 主要内容包括城市轨道交通信息集成与融合方法、数据标准与架构方法、客流检测视频分析方法、路网运营安全评价方法、关键设备服役状态分析与维修决策支持技术、事故致因分析和风险预测方法、应急预案管理方法、路网突发大客流传播及诱导方法、路网运营安全保障系统等。

本书可供城市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

城市轨道交通路网运营安全保障理论与应用 = Theory and Application of Operation Safety Assurance of Urban Rail Transit Network / 秦勇等编著. —北京: 科学出版社, 2019.3

ISBN 978-7-03-060660-0

I. ①城… II. ①秦… III. ① 城市铁路-铁路运输管理-安全管理-研究 IV. ①U239.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第037556号

责任编辑: 耿建业 王楠楠 / 责任校对: 王萌萌

责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 无极书装

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>

天津文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年3月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2019年3月第一次印刷 印张: 15 3/4

字数: 317 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

“城轨交通路网运营安全保障关键技术与系统研制”

课题技术组

课题/技术负责人:

梁 平	北京轨道交通路网管理有限公司
秦 勇	北京交通大学
战明辉	北京市轨道交通指挥中心
刘 靖	广州地铁集团有限公司

课题责任专家:

贾利民	北京交通大学
-----	--------

主要成员:

王艳辉	北京交通大学
郭建媛	北京交通大学
王子洋	北京交通大学
谢征宇	北京交通大学
孙 方	北京轨道交通路网管理有限公司
汪 波	北京轨道交通路网管理有限公司
丁建隆	广州地铁集团有限公司
蔡昌俊	广州地铁集团有限公司
程晓卿	北京交通大学
徐 杰	北京交通大学
赵 鹏	北京交通大学
刘 瑜	北京轨道交通路网管理有限公司
张月坤	北京轨道交通路网管理有限公司
冯昕辉	北京轨道交通路网管理有限公司
李 健	北京轨道交通路网管理有限公司
李 军	广州地铁集团有限公司
袁敏正	广州地铁集团有限公司
李 曼	北京交通大学
祝凌曦	北京交通大学
刘利忠	北京轨道交通路网管理有限公司
唐 堃	北京宏德信智源信息技术有限公司
彭怀军	北京宏德信智源信息技术有限公司
贾献博	北京宏德信智源信息技术有限公司

前 言

城市轨道交通作为缓解城市交通拥堵、引导城镇群空间合理布局拓展、支撑城市可持续发展的核心基础设施近年来得到了快速发展,特别是以北京、上海、广州为代表的特大城市,其城市轨道交通已进入网络化运营阶段。目前我国城市轨道交通路网存在着地铁里程快速增加、客流量迅速攀升、线路之间高度关联、设备设施复杂性显著增加、不确定性风险因素影响显著等特点,特别是在高强度的运营负荷、多变的外界自然环境以及复杂的公共安全环境影响下,路网的安全运营面临着严峻的挑战,因此在网络化运营条件下保障城市轨道交通路网的安全可靠运行已成为城市轨道交通发展的迫切需求和需要解决的关键问题。

针对该关键问题,北京交通大学、北京轨道交通路网管理有限公司与广州地铁集团有限公司等单位共同成立了课题联合技术组,并承担实施了国家科技支撑计划课题“城轨交通路网运营安全保障关键技术与系统研制(2011BAG01B02)”。研究目标是突破复杂路网运营条件下城市轨道交通运行安全风险的获取、辨识、分析、预测以及应急处置等关键技术,研制相关的核心装备和系统,提高成网条件下的运营安全信息共享、主动安全预防与科学应急处置的水平,同时对打破国外技术垄断、形成我国自主知识产权的城市轨道交通安全保障技术与系统起到技术支撑作用。

为实现以上研究目标,项目组研究了城市轨道交通路网数据中心构建、城市轨道交通运营安全评估与预警、城市轨道交通路网突发事件应急处置等关键技术;研制了具有自主知识产权的多元运营安全信息互操作网关设备、客流状态实时检测分析设备,实现了客流状态实时监控与预警;开发了城市轨道交通路网运营安全综合监控与预警系统和突发事件应急处置系统,为网络化运营应急处置和客流调控提供技术支持;搭建了城市轨道交通路网数据中心测试模拟平台,形成了一批技术系统、技术装备及知识产权;并分别依托北京轨道交通路网运营指挥中心、广州地铁5号线及路网安监应急中心完成工程化应用部署,建立了北京、广州两个运营安全保障系统示范工程,实现客流、列车、基础设施设备等多元运营安全信息的安全接入和共享,通过示范工程的运行系统地验证了课题各项研究成果。

本书主要依托课题研究成果和课题研究报告及主编者团队近期相关研究成果编写完成,全书共5章,内容依次为绪论、城市轨道交通路网数据中心构建关键技术研究、城市轨道交通运营安全评估与预警关键技术研究、城市轨道交通路网突发事件应急处置关键技术研究、城市轨道交通路网运营安全保障系统。

本书得到了北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室、北京轨道交通路网管理有限公司、广州地铁集团有限公司、北京京港地铁有限公司、北京地铁运营有限公司、北京宏德信智源信息技术有限公司等单位部门与企业专家的大力支持和帮助,在此表示诚挚的感谢。在此也对曾经参与本课题研究的所有单位的课题组成员,以及参与本书编写工作的研究生刘源、王雅观、郑云霄等表示衷心的感谢。

由于时间、现场等客观条件的限制,本书取得的科研成果还有很大的进步和改进空间,诚恳希望读者提出宝贵的意见和建议;同时限于作者水平,书中难免存在不足之处,恳请读者和同行批评指正。

作者

2018年8月20日于北京

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 研究背景与意义	1
第二节 研究现状	2
一、城市轨道交通路网数据中心构建关键技术研究现状	2
二、城市轨道交通运营安全评估与预警关键技术研究现状	3
三、城市轨道交通路网突发事件应急处置关键技术研究现状	6
第三节 研究目标与内容	9
一、研究目标	9
二、研究内容	10
第四节 技术路线	15
第二章 城市轨道交通路网数据中心构建关键技术研究	17
第一节 城市轨道交通路网运营状态实时获取方法	17
一、城市轨道交通路网数据采集方法	17
二、城市轨道交通路网数据传输方法	18
第二节 城市轨道交通安全互操作方法	20
一、城市轨道交通信息安全保障方法	20
二、系统间互操作运行和协同机制	23
三、面向分布式信息系统的集成应用和互操作应用构建	23
第三节 城市轨道交通信息集成与融合方法	25
一、多元信息集成与融合技术算法	25
二、多元信息集成与融合技术原型建模和接口规范	26
三、多元信息集成与融合技术体系	28
第四节 城市轨道交通数据标准与架构方法	29
一、城市轨道交通核心元数据标准	29
二、城市轨道交通核心元数据架构	30
第五节 城市轨道交通运营安全信息互操作设备	32
第六节 城市轨道交通路网数据中心	34
第三章 城市轨道交通运营安全评估与预警关键技术研究	38
第一节 城市轨道交通高密度客流检测视频分析方法	38

一、客流检测技术概述	38
二、基于 HOG 特征和 SVM 分类器的目标检测方法	40
第二节 城市轨道交通路网运营安全评价方法	56
一、车站运营安全评价指标	56
二、线路运营安全评价指标	69
三、路网运营安全评价指标	87
四、综合安全评估与预警模型	89
五、运营安全等级划分方法	93
第三节 城市轨道交通关键设备服役状态分析与维修决策支持技术	96
一、基于检修数据的可靠性分析方法	96
二、基于比例风险模型的可靠性分析方法	99
三、关键设备的服役状态评价方法	99
四、基于风险评估的维修方案	104
五、空调系统服役状态与维修决策分析	107
六、自动扶梯系统服役状态与维修决策分析	110
第四节 城市轨道交通事故致因分析和风险预测方法	112
一、事故致因网络模型的构建	112
二、事故致因网络关联属性分析	114
三、事故致因模型算法	115
四、交通事故风险预测模型	119
五、交通事故风险预测模型实例	120
第五节 城市轨道交通客流状态实时检测分析设备	122
第六节 城市轨道交通路网运营安全综合监控与预警系统	129
第四章 城市轨道交通路网突发事件应急处置关键技术研究	133
第一节 城市轨道交通应急预案管理方法	133
一、轨道交通应急预案概述	133
二、轨道交通多级应急预案的数字化模型	136
三、案例分析	144
第二节 城市轨道交通突发大客流传播机理	147
一、突发大客流特征分析	148
二、多因素影响的路径阻抗计算方法	149
三、基于 K 短路算法的有效路径筛选方法	152
四、基于时间阻抗的多路径分配和客流推演方法	154
五、受影响客流的筛选和重分布计算方法	157
六、案例分析	162

第三节 城市轨道交通路网客流诱导方法	171
一、乘客出行可达性分析	171
二、乘客出行可达性计算方法	176
三、面向路网的多终端信息发布方法	185
四、案例分析	187
第四节 城市轨道交通路网突发事件应急处置系统	195
第五章 城市轨道交通路网运营安全保障系统	200
第一节 面向路网运营协调管理的运营安全保障系统	200
一、调研准备	200
二、方案设计	201
三、实施及部署	204
第二节 面向运营集中管理的过程级运营安全保障系统	224
一、调研准备	224
二、方案设计	225
三、实施及部署	229
参考文献	238

第一章 绪 论

第一节 研究背景与意义

交通是城市发展的基础。城市轨道交通是缓解城市交通拥堵、引导城镇群空间布局合理拓展、促进城市人口合理迁移的大运量骨干交通工具。过去十几年里，我国城市轨道交通事业取得了巨大成就，实现了跨越式发展，基本形成了涵盖城市轨道交通规划设计、工程建设、运营管理、技术装备等各领域的产业链，已经成为世界瞩目的城市轨道交通大国。截至 2017 年年底，34 个城市开通城市轨道交通运营线路 5033km，其中 31 个地铁城市运营总里程为 3883km，客运量达 180 多亿人次，地铁城市之多、线路之长和客运量之大高居世界前列，上海、北京已是全球最大的两个地铁城市；62 个城市获批城市轨道交通线网规划，规划线路 7424km；56 个城市在建，在建规模为 6246km。随着我国城市轨道交通建设的快速发展和成网运营，乘客乘坐城市轨道交通出行的便捷性增加，轨道交通所承担的客流比例不断提升，路网客运量持续攀升。目前广州、上海轨道交通路网日客流量已达 900 万人次，北京轨道交通路网已进入日客流量 1000 万人次的新时代，预计到 2020 年，北京市路网规模将会达到 1000km，届时，路网日客运量将达到 2000 多万人次。

城市轨道交通列车是城市轨道运输的载体，随着城市轨道交通运营里程的迅速增加、运送客流规模的急剧增大，如何在快速运行条件下保障城市轨道交通列车的运营安全已经成为各城市共同面临的越来越严峻的考验。随着城市轨道交通运营里程的延长、线路的增多、路网结构的复杂化，地铁运营必然会遇到一系列管理和技术难题，迫切需要提前展开研究。

以北京、上海、广州为代表的特大城市，地铁里程快速增加，客流量迅速攀升，各种新情况、新任务、新问题层出不穷。轨道交通线路纵横交错、规模庞大，客流与车流交互影响，线路之间高度关联，这个复杂巨系统的安全、可靠、高效运行成为地铁运营面临的重大考验，对此类特大城市轨道交通网络化运营难题进行研究具有十分重要的意义和现实价值。

1) 网络化调度指挥需要以强有力的检测、状态评估系统为基础依托

网络化运营环境下的安全保障最突出的要求是主动预防，需要对列车、车站设备设施和客流状态进行准确、快速的实时检测，但目前高密度客流分布、不同

层级关键设备设施和环境联合作用下安全状态评判的相关研究仍存在空白点。

2) 网络化条件下应急预案管理需要更加智能化的决策系统支持

网络化条件下突发事件的形式千变万化, 单项文本应急预案体系与内容已难以适应, 根据突发事件的特征对预案进行智能化匹配, 生成各层级处置要点, 并进行数字化管理是网络化应急预案管理的趋势和要求。

3) 突发事件条件下客流疏导和组织需要更加科学化与准确化

路网突发事件频发, 从路网协调调度管理者角度看, 以客流安全疏导为目标, 为了合理调配运能、实施有效的客运组织措施, 需要更加快速和准确地掌握突发事件的波及范围、影响程度等量化数据。

4) 网络化客运要求下的实时乘客出行服务和诱导信息需要更加有针对性

乘客出行路径受列车开行、车站组织、突发事件等各种条件影响, 从乘客出行角度看, 需要接收更加有针对性的路径可达信息。实时路径可达性的计算和相应的乘客信息发布是网络化服务的优势, 更是挑战。

综上所述, 城市轨道交通路网运营安全保障系统与设备的研制具有迫切的现实需求和重要意义, 城市轨道交通安全监控和突发事件应急处置是急需解决的重大科学技术问题。

第二节 研究现状

一、城市轨道交通路网数据中心构建关键技术研究现状

北京市轨道交通信息化经过多年的发展, 建立了许多业务应用系统, 这些系统为行业信息化建设奠定了基础。但轨道交通各部门在以往信息系统建设中主要以满足项目业务需求为出发点, 缺乏统一的规范和数据标准, 使信息沟通有障碍, 数据资源通常只能在单个业务平台中发挥局部作用, 呈现孤岛状态, 难以发挥其整体的效应; 各个系统的数据、接口等标准也大相径庭, 没有形成规范的元数据标准, 给数据的采集、存储、转换、加工处理、发布等都造成了很大的困难, 难以构建统一、规范的城市轨道交通路网数据中心。

城市轨道交通路网在每天运营过程中产生的数据包括全网运营监管、突发事件处置、票务清分清算、运营数据等, 也包括轨道交通指挥中心(traffic control center, TCC)系统、自动售检票(automatic fare collection, AFC)系统清算管理中心(AFC clearing center, ACC)系统两大核心业务数据。然而目前 ACC 和 TCC 两大系统作为应用平台, 存储容量和存储时间均有限, 各类专业信息不能有效整合;

此外, ACC、TCC 系统主要功能为收集线路各类专业信息, 并进行简单的统计分析, 但对信息深度挖掘、仿真、综合分析的能力不足, 不能满足政府主管部门、运营企业等相关单位, 以及路网网络化运营管理的需要。因此, 依托对海量数据的存储、管理和挖掘, 为全网提供一个集中、规范的网络化城市轨道交通路网数据中心迫在眉睫。

本书通过对国内外城市轨道交通网络化运营的技术支撑条件和手段的研究, 初步针对城市轨道交通路网产生的各类源系统数据、基础数据、应用数据进行分析整理, 并在此基础上运用现代信息技术、数量经济学和管理科学, 对城市轨道交通线网数据进行采集、加工、存储、分析和传递, 为最终构建城市轨道交通路网数据中心提供规范及技术支撑。

二、城市轨道交通运营安全评估与预警关键技术研究现状

1. 城市轨道交通高密度客流检测视频分析方法

在城市轨道交通客流检测的需求中, 需要准确地知道有多少人上车和下车, 因此在检测到乘客之后, 需要对其进行跟踪, 以确定其是否已经离开了目标区域, 从而进行计数。因此, 目标跟踪算法的开发是本技术的一个重点研究内容, 目前, 目标跟踪算法有核跟踪算法和粒子滤波跟踪算法。

(1) 核跟踪算法^[1]。核跟踪的目标通常用原始的目标区域来表达, 跟踪由计算目标运动来实现, 目标运动用参数形式的运动(如平移、仿射等)或计算得到的连续帧的密度流区域描述。这些算法在外观表达的运动、跟踪的目标数目、运动估计使用的方法等方面有所差异。核跟踪算法的优点是简单、速度较快, 缺点是要求目标的运动比较平滑, 难以应付目标突然变化的情形。

(2) 粒子滤波跟踪算法^[2]。它的思想基于蒙特卡罗方法, 利用粒子集来表示概率, 可以用在任何形式的状态空间模型上, 核心思想是通过从后验概率中抽取的随机粒子来表达其分布。它的优点是可以应付目标的多模态情形和非平滑运动, 主要缺点是计算量比较大。

鉴于实际的监控或者客流统计的环境中往往在同一个场景中有多个目标同时进行运动, 所以, 对于多目标的检测, 本书将分类器的输出结合时间上的信息进行整合; 而对于多目标的跟踪, 本书采用数据关联(data association)^[3]与核跟踪的结合方法。该方法有效地解决了多目标的同时检测与跟踪问题, 对目标间的交互遮挡具有一定的鲁棒性。

2. 城市轨道交通路网运营安全评价方法

我国在城市轨道交通路网运营安全评估与预警方面还处在初级阶段,各地铁运营单位的安全运营评估方法存在差异,而路网运营安全的影响因素众多,运营风险大,所以需要结合城市轨道交通路网运营安全综合评价指标体系的特点来进行综合评价。目前对于城市轨道交通路网运营安全评估的研究主要包括以下几个方面。

(1)评价指标的构建。对于评价指标的构建,目前主要依据一些评价标准和评价原则,未能综合考虑土建、机电、城市轨道交通客流量、车站设施、车站封闭性等多种因素对运营的影响。

(2)评价方法的研究。城市轨道交通运营安全评价方法有变权和相对差异函数法^[4]、模糊层次分析法^[5]、多级可拓评价法^[6]、基于元胞自动机的评价方法^[7]等,这些方法有一定的优点,也得到了一些应用。

以上研究多以单层指标为主,静态性强,表征线路运营安全状态时考虑的因素不够完整,评价时未体现动态实时性。本书通过对国内典型城市轨道交通进行深入的调研分析,总结影响运营安全的主要因素,对运营安全要素进行提取、凝练,构建城市轨道交通路网运营安全“微观—中观—宏观”评估指标体系,采用增益型加权综合法^[8]作为指标的评价算法,实现对“车站—线路—路网”不同空间粒度的运营安全综合评估,在此基础上,研制开发综合安全评估与预警系统,为城市轨道交通路网运营安全状态评估与预警提供理论依据、技术支撑和应用支持。

3. 城市轨道交通关键设备服役状态分析与维修决策支持技术

随着城市轨道交通的快速发展,运营单位对城市轨道交通关键设备服役状态与维修决策分析的需求越来越大,目前,国内的设备服役状态分析^[9]主要集中于对变电设备、汽车设备、锅炉设备、电气设备的分析。然而,城市轨道交通路网关键设备设施状态的获取,多数是基于安全域估计的评估方法^[10]对轨道车辆等服役状态进行分析的,对于其他一些与客流相关的设备的研究较少。

通过对车站中故障率较高的空调系统和自动扶梯系统进行评价,可采用基于统计数据的可靠性模型^[11]和比例风险模型^[12]两种可靠性分析模型研究车站关键设备的服役状态。通过模型拟合建立关键设备服役状态的评价模型,通过模型的参数计算得到关键设备的服役状态和维修决策,可为车站管理和维修部门提供技术支持。

4. 城市轨道交通事故致因分析和风险预测方法

现代城市地铁安全系统是在空间和时间上的动态系统,具有规模巨大、结构复杂、联系广泛的特点,这就决定了地铁安全管理工作的复杂性和多样性^[13]。影响地铁安全的因素众多,要实现对事故长期有效的预防,就必须科学准确地统计和分析各种事故因素,找出故障发生的主要原因及变化规律,对事故风险进行评价。目前关于事故致因分析的方法包括以下几种。

(1) 贝叶斯网络分析法^[14]。该方法以危险因素、事故、事故后果等作为层次分界来构建网络拓扑模型,阐述网络模型各层次的构成以及层次间的因果关系,找出薄弱环节和事故隐患,控制系统的风险。

(2) 事故树分析法^[15]。该方法是一种定性和定量相结合的分析方法,从需要分析的特定事故(顶上事件)开始,层层分析其发生的原因,直到找出事故的基本原因(底事件),并根据所调查的情况和资料,确定所有事件的发生概率,并标在事故树上,根据这些基本数据,求出顶上事件发生的概率。

(3) 两类危险源理论分析法^[16]。该方法认为危险源的存在是事故发生的根本原因,防止事故就是消除、控制系统中的危险源。危险源为可能导致人员伤亡或财物损失的潜在的不安全因素。根据危险源在事故发生、发展中的作用,把危险源划分为两大类,即第一类危险源和第二类危险源,并可通过对危险源的辨识,控制事故的发生。

以上方法均以危险元素和事故的表态特征为研究对象,多数是针对事故发生后的研究,而对于量化研究事故的预防很少涉及。在贝叶斯网络理论的基础上,为了更好地分析事故致因,本书充分考虑影响因素间的关联性,将城市轨道交通路网中影响列车运营的事故抽象为由若干节点、有向边构成的网络模型,并通过模糊概率算法和路径选择机制对事故演化路径进行分析,最后,基于多因素时间序列预测模型对事故风险进行预测,输出预测值。

5. 城市轨道交通客流状态实时检测分析设备

本书在高密度客流检测视频分析方法^[17]研究的基础上,通过视频采集、视频分析、数据接入处理、信息发布等计算机技术,设计和研制一套视频采集、视频接入与分析检测、数据应用三层结构的客流视频检测分析设备,可实现城市轨道交通站厅、站台等环境下高密度客流的检测,并且三层结构的设备设计有利于系统在实际工程中部署。

6. 城市轨道交通路网运营安全综合监控与预警系统建立

本书从路网运营安全角度出发,通过对系统目标客户、系统项目目标和系统

业务范围进行分析,设计具备对客流数量、密度等实时状态进行显示及对拥挤、入侵、逆行等异常行为信息进行实时报警;对城市轨道交通路网运营列车监察数据、路网客流数据进行可视化综合展现;对路网运营安全状态不同层次(微观、中观、宏观)进行综合评估;对重要事故进行致因分析和风险预测分析;根据路网安全评估结果出具路网运营日报等功能的综合监控与预警系统。

三、城市轨道交通路网突发事件应急处置关键技术研究现状

城市轨道交通路网突发事件应急处置关键技术主要包括路网多级应急预案数字化建模、突发大客流传播机理研究,以及客流诱导与信息发布的三个方面。其相关前期研究基础如下。

1. 城市轨道交通应急预案管理方法研究现状

应急预案的应用较为广泛,几乎涉及各个行业部门,目前我国已经初步建立了“一案三制”的应急管理体系,并进入应急管理的法制阶段,从研究现状来看,针对应急预案管理方法的研究有以下几方面。

1) 应急预案数字化模型方面

(1) 基于本体的应急预案数字化方法^[18]:将基础本体作为上层本体,在此基础上扩展表示应急预案的词汇,形成应急预案本体,并结合本体五元组的相关概念和 OWL(web ontology language)本体的相关定理,挖掘词汇之间的映射关系,从而构建应急预案的本体模型。

(2) 基于语义的应急预案数字化方法^[19]:对现有应急预案的结构与内容进行分析并建模,进而挖掘应急情景与应急预案之间的语义映射关系,最终实现情景应对模式下的数字化预案语义模型的构建。

2) 应急处置流程化建模方法方面

(1) 基于情景的突发事件案例推理应急决策方法^[20, 21]:计算当前接警情景与现有数据库中的实例间的相似度,将相似度最高的案例的处置方案作为目标,在此基础上进行调整并用于当前事件的处置。相似度计算方法一般有最近相邻检索算法^[19]、引入结构相似度计算^[19]和基于云模型的启发式权重获取算法^[22]等。

(2) 模糊多目标应急决策方法^[23]:针对应急环境的不确定性,引进灰色关联度计算被选方案与理想方案和负理想方案的关联距离,考虑方案之间的关联程度,然后采用三角模糊数处理决策信息的模糊性和不确定性,突出各决策方案之间的关联影响。

国外对城市轨道交通的应急能力的评价研究较多,但对地铁突发事件应急预案的评价研究还比较匮乏,目前主要通过演练的方式进行应急预案的评估^[24-26]。通过演练虽然在一定程度上可以检验应急预案的应急能力,但是演练的成本大,可行性不高。国内的学者对地铁突发事件应急预案的评价也进行了一定的研究,但总体来说研究得比较少,研究的内容不够全面,地铁应急预案的针对性不强,建立的指标体系大多是地铁应急能力评价指标体系,还没有相对完善的地铁应急预案的评价指标体系。我国应该按照地铁突发事件应急预案的具体内容及建立地铁突发事件应急预案指标的特点、功能、原则,建立适合我国地铁应急预案评价的指标体系,并运用合适的评价方法对应急预案进行客观、全面、准确的评价。

就当前的研究成果来看,应急预案数字化建模研究较多集中在单个应急预案的数字化方面,没有考虑多层级应急处置工作中存在的交互,不能全面适应网络化运营条件下,多层级应急处置工作相互关联、频繁交互的业务特点。本书将根据路网应急处置工作中车站、线路、路网之间的相互影响关系,建立多层级的应急预案数字化和流程化建模技术。

2. 城市轨道交通突发大客流传播机理研究现状

城市轨道交通路网系统作为城市公共交通的主要承担者,一旦发生区间中断等突发事件,将造成客流大面积聚集,对乘客运输安全和服务水平产生较大影响。根据历史同期的客流 *OD* (origin and destination) 对数据,根据突发事件的特征信息在路网上对客流进行分配,可以得到突发大客流在路网的分布范围和影响强度。目前,针对城市轨道交通路网客流分布方法和突发事件影响分析方法有以下研究。

1) 城市轨道交通路网客流分布方法

城市轨道交通路网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^[27]。目前国内外对轨道交通客流分配的研究主要分为客流均衡分配和客流非均衡分配两种方法。大致思想是通过定义各路段的阻抗函数,利用路径搜索算法寻找有效路径,并利用 Logit 模型或者基于 Wardrop 原理的客流均衡分配模型对客流进行推演和分布计算。

在客流均衡分配模型和算法方面,黄一华^[28]将 Fisk 随机用户均衡分配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^[29]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;吴祥云和刘灿齐^[30]提出了城市轨道交通用户均衡分配模型,并改进了 F-W (Floyd-Wolfe) 求解算法,但是并没有考虑留乘问题;文献[31]和文献[32]利用遗传算法对客流均衡分配模型进行求解,提高了预测的准确性。

在客流非均衡分配模型和算法方面, Trahan^[33]对该模型的算法进行了改进, 提高了算法的效率; Daganzo 和 Sheffi^[34]提出了多路径概率分配模型, 然而由于计算量太大, 其并不适用于大规模路网, 文献[35]改进了该多路径概率分配模型; Dial^[36]最早提出了利用 Logit 模型对道路网络进行非均衡分配; 四兵锋等^[35]和刘剑锋等^[37]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[38]~文献[42], 区别在于有效路径的定义和搜索算法。

2) 路网突发事件影响分析方法

国内外对于突发事件影响分析方法的研究主要有两种: 其一是研究地铁车站人群的疏散模式, 利用计算机仿真分析人群行为及突发事件情况下的疏散过程^[43, 44]; 其二是利用复杂网络理论研究路网的连通性和鲁棒性, 从复杂网络传播动力学角度利用 SIR (susceptibles infectives recovered) 流行病传播模型, 从传播阈值、微观传播机制和免疫策略等方面研究突发事件下轨道交通网络的客流量的演变^[45-47]。

3. 城市轨道交通路网客流诱导方法研究现状

随着城市现代化发展进程的加快, 产生了巨大的交通需求以及随之而来持续增长的道路交通发展建设, 很多学者对于交通领域的可达性进行了广泛研究。可达性最根本的含义是反映交通成本的基本指标, 可达性定义为克服空间阻隔的难易程度。可达性是交通系统中的出行问题及服务水平研究的重要基础理论。道路交通中可达性的具体定义为出行者利用给定的交通系统从出发点到达活动地点的便利程度。道路交通的学者从不同的角度建立了定义可达性的模型(空间阻隔模型、累积机会模型、空间相互作用模型、效用模型以及时空约束模型), 这些研究为轨道交通的可达性研究提供了良好的理论基础。然而针对轨道交通可达性的研究比较匮乏, 有少量学者对轨道交通换乘设备设施产生的空间可达性进行了研究^[48], 另有学者对运行计划约束下的末班车开行引起的路网动态可达性进行了研究^[49, 50]。城市轨道交通可达性的研究存在两方面的问题: 一是理论研究比较分散, 没有形成较为完善的理论成果; 二是没有将可达性成果充分应用于实际运营中。因此, 本书对城市轨道交通可达性进行系统的理论研究, 并将其应用于实际的乘客出行诱导系统中, 旨在提高乘客出行质量和路网整体服务水平。

城市轨道交通系统是一种大运量、快速、准时、舒适的客运交通系统。随着城市轨道交通的快速发展, 城市轨道交通的路网结构变得更加复杂, 路网中的客流控制、计划调整、突发事件等会产生更大范围和更加复杂的影响, 对这类信息的及时和恰当的发布会明显降低乘客出行的不便, 提高乘客的出行质量。

城市轨道交通信息发布系统在承担乘客导引、运营状态展现以及各种广告宣传等任务的同时, 还具备无线接收和插播控制中心的报警信息的功能, 这是城市轨道交通人性化服务的重要组成部分, 目前北京、上海、广州、深圳、天津等城