

城市轨道交通 优化管理与控制

高自友 杨立兴 吴建军 著



科学出版社

城市轨道交通优化管理与控制

高自友 杨立兴 吴建军 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以作者及其团队多年来研究的城市轨道交通管理及优化控制理论为基础,深入细致地阐述了城市轨道交通运营过程中面临的一系列管理与控制优化问题,提出了相关的优化、建模与控制方法,是作者及团队近年来一系列研究成果的集成体现。主要内容包括客流管理与控制优化、列车运行组织优化、列车运行控制以及列车运行管理与控制一体化四大部分。

本书可以作为城市轨道交通运营管理部门科研人员的参考用书,也可作为各高等学校交通运输规划与管理、交通运输工程等专业的研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

城市轨道交通优化管理与控制/高自友,杨立兴,吴建军著. —北京:科学出版社,2018.12

ISBN 978-7-03-060254-1

I. ①城… II. ①高… ②杨… ③吴… III. ①城市铁路-轨道交通-运营管理-研究 IV. ①U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018) 第 290254 号

责任编辑:王丽平 孙翠勤/责任校对:彭珍珍

责任印制:肖 兴/封面设计:黄华斌

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年12月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018年12月第一次印刷 印张:23 1/4 插页:8

字数:460 000

定价:188.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

改革开放四十年来,我国经济得到了快速发展,综合国力有了显著提升。然而,随着我国经济的持续增长和城市化进程的加快,交通问题已成为制约各大城市可持续发展的“瓶颈”。城市轨道交通以其运量大、速度快、时间准、污染少、安全性好、节约用地等特点,成为缓解地面交通压力的一种有效交通方式,并逐步被越来越多大中型城市所采用。近年来,我国城市轨道交通发展迅猛,线路数量、运营里程和客流量均快速增长。《中国交通运输发展》白皮书中指出“十三五”期间,我国将加快人口在 300 万以上城市的轨道交通线网建设,新增城市轨道交通运营里程约 3000 公里。截至 2017 年底,我国已有 30 多座城市开通了轨道交通线路,运营总里程已突破 5000 公里。预计到 2020 年,城市轨道交通运营里程将达到 6000 公里左右,居世界首位。

城市轨道交通是由基础设施、车辆及管理与其控制系统组成的高度组织化的运输系统,在其规划、建设、运营等方面蕴含着大量的管理科学与决策问题,是一个高度复杂的巨系统。城市轨道交通从规划到运营通常划分为三个层次,即战略层、战术层和操作层。作为城市轨道交通系统的长远规划,战略层决策处于整个系统建设的最高层面,包括网络规划、线路规划等。一旦轨道交通系统建成并投入使用,需要在战术和操作层面上,确定最优列车运营方案和控制策略,从而实现全系统的快速、安全、高效运行。因此,①从运营管理角度,需要深入分析轨道交通系统运行的内在机理,结合客流需求、列车流和能耗分布特性,研究人员-车辆-信息多重耦合机理表征,优化列车开行方案、行车计划、调度计划等,深入挖掘运输潜能,进一步提高轨道交通系统的运营效率;②从微观控制角度,需要结合轨道交通实际行车特点和线路特征,合理优化列车运行工况,制定最优行车速度曲线和列车控制策略,以达到安全、低耗运营的目的。

随着我国城市轨道交通的飞速发展,其运营过程中出现了很多复杂特征,具体表现如下。①运营网络化:在一些大城市中,如北京、上海、广州、深圳等,城市轨道交通系统已逐步成网。目前,虽然网络中各线路均为相对独立的子系统,但其运行计划的编制通常需要考虑线路间乘客换乘行为对各线列车运行的影响,因而线间列车运行关系密切。②行车密集化:为提供充足运力,特别是早晚高峰时段,城市轨道交通列车的发车间隔通常限定在两三分钟。更有甚者,北京地铁 4 号线的最小发车间隔已压缩至 1 分 43 秒,几乎达到了信号系统的极限,行车异常密集。③客流巨量化:在我国大城市轨道交通系统中,客流需求总量巨大,特别是早晚高峰时段,实

际出行需求远超运输供给能力,给轨道交通系统带来了巨大压力;再加之客流具有显著的动态随机性,致使列车运行充满了极强的不确定性.城市轨道交通系统的上述特征为运营管理优化和控制带来了巨大挑战.因此,需要深入挖掘城市轨道交通客流和车流的复杂特征,为相关管理优化和控制问题提出高效的解决方案,缓解当前运行压力,提升城市轨道交通系统的运行效率和服务质量.

城市轨道交通的优化管理与控制是管理科学中的重要组成部分.它以既有轨道交通系统为研究对象,从中观和微观层面,针对列车日常运营中涉及的一系列科学问题开展研究.通过对客流和车流运营规律的深入挖掘、整合及优化,寻找提高运输效率、降低运营成本的高效决策方法和方案.具体而言,就是采用科学的定量方法理解、分析和优化城市轨道交通系统中客流、车流及其之间的耦合关系,探求列车与运行环境之间、不同列车之间、列车和客流之间以及客流与交通设施之间的相互作用机理,进而从车站、线路和网络层面调控客流和车流在系统中的运行状态,以期最大限度地利用现有轨道交通资源,提升轨道交通系统的整体效率.显然,城市轨道交通的管理优化与控制属于一门综合性学科,其研究过程涉及多学科的交叉与融合,如交通科学、运筹学与控制论、信息科学、管理科学、应用数学等.

本书的主要内容是基于系统科学的思想分析和刻画城市轨道交通中客流和车流的内在特征,运用运筹学和控制论的方法对列车运营中涉及的一系列问题进行数学建模并设计有效的求解方法,进一步通过大量的数值算例对所建模型和算法进行有效验证.本书的知识体系主要分为四部分内容,分别为客流管理与控制优化、列车运行组织优化、列车运行控制和列车运行管理与控制一体化.第一部分主要介绍了常态下轨道交通客流管控优化,以及突发事件对客流影响估计的建模,具体内容呈现于本书第2章.第二部分主要集成了作者近年来的部分研究成果,针对列车运行图及调整问题进行了详细介绍,对相关问题进行了理论建模和算法设计工作,为城市轨道交通的高效运营提供了基于中观层面的方法和策略,该部分内容见于本书第3、4、5、6章,内容涵盖了面向客流-车流协同的城市轨道交通列车运行图优化、面向首末班及过渡阶段的城市轨道交通列车时刻表优化、城市轨道交通与地面公共交通的接驳优化以及城市轨道交通列车运行图调整策略.第三部分主要从微观控制的角度,介绍了列车运行控制中的一些建模方法和算法,内容包括:列车运行速度曲线优化、列车节能优化、单列车运行控制方法、多列车协同运行控制方法等,对应本书第7、8章内容.此外,列车运行管理与控制的一体化目前已成为城市轨道交通领域的研究热点.为此,本书的第四部分详细介绍了列车运行图与速度曲线的一体化优化问题,通过考虑不同的运营决策环境,介绍了该类问题的数学模型及相应的求解算法,对应本书第9章内容.

特别指出,本书作者长期从事城市轨道交通客流分析、运输管理和控制优化方面的理论和实践研究,本书内容反映了作者及其团队近年来在该领域的主要研究成

果. 在编写过程中, 作者针对不同的研究问题, 详细查阅了大量的参考文献, 分析总结了近年来该领域的国内外研究现状, 力图采用言简意赅的语言, 系统地阐述城市轨道交通列车管理与控制模型、算法和算例等研究成果. 然而, 由于本书所介绍的内容均为城市轨道交通目前面临的复杂基础问题, 同时也是本领域的国际热点, 再加之作者的研究水平有限, 书中难免存在疏漏和不妥之处, 在此恳请广大读者批评指正.

本书的研究工作得到国家自然科学基金创新研究群体项目 (编号: 71621001)、国家自然科学基金杰出青年科学基金项目 (编号: 71525002, 71825004)、教育部“双一流”学科建设经费、以及国家自然科学基金重大项目 (编号: 71890972, 71890970) 的资助. 同时, 本书也得到北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室以及北京交通大学交通系统科学与工程研究院的大力支持. 此外, 在本书内容的组织过程中, 北京交通大学李树凯副教授、高原副研究员、杨欣副教授、阴佳腾副教授、康柳江博士、郭欣博士、戚建国博士、孟凡婷博士、莫鹏里博士、张春田博士、王蕊同学等均参加了本书的撰写, 在此表示感谢!

作 者

2018 年 12 月于北京交通大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 城市轨道交通发展现状	1
1.2 相关概念	2
1.3 面临的问题	5
1.4 本书研究内容	6
第 2 章 城市轨道交通网络客流管理和控制优化	8
2.1 概述	8
2.2 常态情况下的轨道交通客流优化控制	12
2.3 突发事件影响估计和限流优化	20
2.4 小结	51
参考文献	52
第 3 章 面向客流-车流协同的城市轨道交通列车运行图优化	54
3.1 概述	54
3.2 城市轨道交通列车运行图和客流控制协同优化	55
3.3 城市轨道交通基于客流需求的运行图与车底运用协同优化	76
3.4 考虑女性乘客需求的城市轨道交通列车运行图优化	91
3.5 小结	103
参考文献	104
第 4 章 面向首末班车及过渡阶段的城市轨道交通列车时刻表优化	106
4.1 概述	106
4.2 城市轨道交通首班列车换乘衔接优化	110
4.3 城市轨道交通末班列车换乘衔接优化	124
4.4 城市轨道交通过渡阶段时刻表协同优化	142
4.5 小结	156
参考文献	157
第 5 章 城市轨道交通与地面公共交通的接驳优化	160
5.1 概述	160
5.2 城市轨道交通首班列车与地面公交接驳优化	162
5.3 城市轨道交通末班列车与地面公交接驳优化	174

5.4	故障条件下城市轨道交通与地面公交网络接驳优化	181
5.5	小结	202
	参考文献	202
第 6 章	城市轨道交通列车运行图调整策略	205
6.1	概述	205
6.2	故障处理过程中的列车运行图应急调整策略	206
6.3	故障排除后列车运行图恢复调整策略	228
6.4	小结	246
	参考文献	246
第 7 章	城市轨道交通列车节能优化方法	248
7.1	概述	248
7.2	列车运行速度曲线优化模型与算法	250
7.3	考虑再生制动的列车节能优化	260
7.4	供电区间内列车协同运行节能优化	274
7.5	小结	288
	参考文献	289
第 8 章	城市轨道交通列车运行控制建模与方法	291
8.1	概述	291
8.2	城市轨道交通单列车运行控制建模与方法	293
8.3	城市轨道交通多列车协同运行控制建模与方法	305
8.4	小结	321
	参考文献	321
第 9 章	城市轨道交通列车运行图与速度曲线一体化优化方法	325
9.1	概述	325
9.2	基于时空网络的列车运行图与速度曲线一体化优化方法	327
9.3	考虑不确定列车质量的运行图与速度曲线一体化优化方法	340
9.4	小结	358
	参考文献	358
	索引	360
	彩图	

第1章 绪 论

1.1 城市轨道交通发展现状

截至 2017 年末,我国大陆地区(未统计港澳台数据)共计 34 个城市开通并投入运营城市轨道交通,运营线路共计 165 条,线路长度达 5033 公里。2016 年当年线路增长首次超过 500 公里,达到 535 公里;2017 年线路增长突破 800 公里,又迈上了新台阶,全年累计完成客运量 185 亿人次,同比增长 14.9%。拥有 2 条及以上运营线路的城市增至 26 个,占已开通城市轨道交通城市总数的 76.5%。以上现状表明,中国内地城市轨道交通已进入快速发展的新时期,运营规模、客运量、在建线路长度、规划线路长度均创历史新高。城市轨道交通发展日渐网络化、差异化和制式结构多元化,逐步实现网络化运营。

从运营线网规模看,上海 732.2 公里、北京 685.1 公里的城市轨道交通线路里程大幅领先全国其他城市;广州、南京运营线路长度超过 300 公里,线网规模增长迅速;深圳、成都、重庆、武汉运营线路长度超过 200 公里,骨干网络加速形成。目前,共计 14 个城市形成了 100 公里以上线网规模,已逐步实现城市轨道交通的网络化运营。从客运量来看,截至 2017 年末,北京累计完成客运量 37.8 亿人次,日均客运量 1035 万人次,居全国首位;上海累计完成客运量 35.4 亿人次,日均客运量 969.2 万人次;广州累计完成客运量 28.1 亿人次,日均客运量 768.7 万人次;深圳累计完成客运量 14.5 亿人次,日均客运量 396.2 万人次,上述四城市的客运量均创历史新高。伴随着南京、武汉、成都等城市大量新建线路投入网络化运营,后发城市骨干网络组建完毕,北京、上海、广州、深圳四城市客运量占全国总客运量比重从上年 67.3%降至 62.6%。

在城市轨道交通迅猛发展的同时,能源消耗总量过大的问题也日渐突出。例如,北京市城市轨道交通系统在 2008—2015 年期间,年耗电量由 6.5 亿度增长到 13.9 亿度,年均增速高达 12%。其中,整个城市轨道交通系统中大约 50%的耗电量为列车牵引能耗。按照目前我国城市轨道交通发展规划推算,未来几十年城市轨道交通的能源消耗将达到相当大的规模。国家“十二五”发展规划就明确提出:未来交通要以节能减排为重点,建立以低碳为特征的交通发展模式,提高资源利用效率。国家“十三五”发展规划更是将节能环保写入了国家战略层面,且在节能环保方面的投入将是“十二五”期间的两倍以上。因此,研究降低城市轨道交通系统能耗的有效方法,对保持我国城市轨道交通可持续发展具有非常重要的意义。

1.2 相关概念

为了更好地理解此书,下面首先介绍一些常用的概念.

(1) 车站进站量

定义: 统计期内, 由自动售检票系统直接记录的进入车站的乘客数量.

单位: 人次.

(2) 线路进站量

定义: 统计期内, 清分系统计算后得到的进入该线的乘客数量.

单位: 人次.

计算方法: 线路进站量 = 本线进出人次 + 本线进其他线出人次.

注: 本线进出人次指进站与出站均属于本线路的乘客在统计期内的数量; 本线进其他线出人次指进站属于本线而出站不属于本线路的乘客在统计期内的数量.

(3) 车站出站量

定义: 统计期内, 由自动售检票系统直接记录的离开车站的乘客数量.

单位: 人次.

(4) 线路出站量

定义: 统计期内, 清分系统计算后得到的离开该线的乘客数量.

单位: 人次.

计算方法: 线路出站量 = 本线进出人次 + 其他线进本线出人次.

注: 本线进出人次指进站与出站均属于本线路的乘客在统计期内的数量; 其他线进本线出人次指进站不属本线路而出站属于本线路的乘客在统计期内的数量.

(5) 换乘站换乘量

定义: 统计期内, 换乘站线路间各方向换乘乘客的总量.

单位: 人次.

计算方法: 换乘站换乘量 = \sum 线路间各方向换乘乘客人次.

(6) 线路换乘量

定义: 统计期内, 换入该线的乘客数量.

单位: 人次.

计算方法: 线路换乘量 = 其他线进本线出人次 + 途经本线人次.

注：其他线进本线出人次指进站不属本线路而出站属于本线路的乘客在统计期内的数量；途经本线人次指进站与出站均不属于本线路，但按照乘客出行路径会经过本线路的乘客在统计期内的数量。

(7) 断面客流量

定义：单位时间内，单向通过运营线路某一断面的乘客数量。

单位：人次。

注：断面客流量通过清分系统计算得到。

(8) 断面满载率

定义：单位时间内，运营线路单向断面客流量与相应断面运力的比值，反映列车单位时间内该断面的列车满载情况。

计算方法：断面满载率 = 断面客流量 / 相应断面运力 × 100%。

(9) 线路客运周转量

定义：统计期内，运营线路乘客乘坐里程的总和。

单位：人次公里。

计算方法：线路客运周转量 = \sum 线路中乘客乘坐里程。

(10) 路网客运周转量

定义：统计期内，路网内乘客乘坐里程的总和。

单位：人次公里。

计算方法：路网客运周转量 = \sum 路网中乘客乘坐里程。

(11) 列车运行图

定义：表示列车在线路各区间运行时间及在各车站停车和通过时间的线条图，是列车运行的基础。运用坐标原理描述列车运行时间、空间关系，以横轴表示时间、纵轴表示距离、水平线表示各车站的中心线、垂直线表示时间、斜直线表示列车运行线。

(12) 到发时刻

定义：列车在每个车站的到达和出发（或通过）的时刻。

单位：分钟。

(13) 发车间隔

定义：一条运营线路上两个连续的车辆沿同一个方向经过某个固定位置的时间间隔。

单位: 分钟.

(14) 最小发车间隔

定义: 车站为保证列车运行安全, 办理列车到发和通过作业所需要的最小间隔时间.

单位: 分钟.

(15) 发车频率

定义: 一小时内 (或其他时间间隔) 一条线路上沿同一个方向经过某一个固定点行驶的列车数.

单位: 车次.

(16) 再生制动

定义: 是一种使用在电力驱动车辆上的制动技术. 再生制动在制动工况下将电动机切换成发电机运转, 利用车的惯性带动电动机转子旋转而产生反转力矩, 将一部分的动能或势能转化为电能并加以储存或利用, 因此是一个能量回收的过程.

(17) 再生能量

定义: 由列车再生制动产生的电能称为再生能量.

单位: 千瓦时.

(18) 牵引能耗

定义: 在列车运行的过程中, 用于驱动列车牵引加速所消耗的电能.

单位: 千瓦时.

(19) 控制力

定义: 在列车运行过程中的牵引力或制动力.

单位: 牛.

(20) 速度

定义: 列车运行中的速度.

单位: 公里/小时.

(21) 位移

定义: 列车运行中的位移.

单位: 公里.

1.3 面临的问题

城市轨道交通系统是一个复杂巨系统,其运营过程中蕴含大量的优化管理和控制问题。下面,我们将从不同层面对城市轨道交通系统中面临的一系列问题进行简要分析。

在城市轨道交通网络客流管理和控制方面,目前很多城市在客流高峰时段采取限流措施对客流需求进行科学有效的管理。即,通过对进站客流采取一定的人为限制措施,减缓乘客进站速率,减小站台客流密度,通过调节各站点客流流入的速率来影响客流在网络上的时空分布状态。此外,随着城市轨道交通网络的不断扩张和线网密度增加,网络化运营过程中的突发事件频现,严重情况下可导致轨道交通系统运营中断。突发事件会导致列车运行图的重新调整,对城市轨道交通列车运行和车站客流管理带来了极大挑战,进而影响了城市轨道交通的安全运营。因此,在正常运营和突发状况下,针对城市轨道交通管理方法和客流管控方法开展深入研究,可为保障列车运营安全和乘客高效出行提供有效的理论支撑。

此外,鉴于城市轨道交通的客流具有较强的动态性,当前主要采用高峰运行图和平峰运行图来满足不同时段的客流需求。然而,随着客流量的逐年激增,当前运营模式也将不再满足城市轨道交通的运输需求。为提高城市轨道交通系统的服务水平,需要结合客流控制方法,研究准确反映客流动态特征、面向需求的列车运行图优化方法。以期在提高运行效率的同时,缓解站台拥堵,减少事故发生风险。另外,由于城市轨道交通的运营非常复杂,在列车运行图的设计过程中,线路上可用车底数量也是制约系统运营的重要指标。因此,从系统优化的角度,需将列车运行图、车底运用计划和动态客流需求协同优化,从而增加列车运行图的可操作性。

在城市轨道交通列车线间衔接方面,随着轨道交通路网规模快速扩张,换乘节点日益增多,换乘客流量也将大幅增加,乘客出行的路径选择更具多样性。在此背景下,分阶段优化运行图可有效提升路网输送效率,实现运力运量匹配,合理化资源配置,减少列车运营成本。为增加路网当前列车运行图的协同状态,实现乘客无缝换乘,城市轨道交通系统仍需解决如下问题:呈网络化运营,协同难度增大;中心放射型网络结构,换乘量剧增;列车间断运营,起止运营时间难以确定;通道预留不充分,运力和速度受限;多家运营商共同承担运营任务等。因此,需要针对上述问题开展一系列深入系统的研究。

在城市轨道交通列车流调整方面,由于列车具有发车频率高、客流量大、乘客上下车频繁等特点,一旦遇到故障导致运行中断,大量乘客将滞留在车站,不仅延长乘客出行时间、降低出行效率,而且增加拥挤、踩踏风险。列车运行图调整的目标是尽快恢复计划运行图和减少乘客滞留时间。通常,地铁列车在计划运行图中的

运行速度已经接近最大允许速度. 因此, 为快速恢复计划运行图, 往往需要采取跨站停车、取消部分车次、改变折返点等特殊运行方式. 一方面, 这些特殊运行方式的引入, 势必导致地铁列车调整策略的复杂化; 另一方面, 故障的突发性和不确定性, 要求调度部门能够迅速找到合适的调整策略. 换言之, 地铁列车的调整策略同时具有较强的复杂性和实时性. 这也是运行图调整和运行图编制的最大差别, 需要进行深入详细的研究.

在列车运行节能方面, 目前站间速度曲线优化和运行图优化是两种降低城市轨道交通列车牵引能耗的有效方法. 前者通过优化单列车在各站间的速度曲线来直接降低列车牵引能耗; 后者则通过协调多列车的牵引制动时间来提高再生能量的直接利用量, 从而降低列车牵引能耗. 这两种方法虽研究对象不同, 但彼此并不是完全孤立的. 列车速度曲线的优化过程是在列车运行图提供各站间运行时间的约束下完成的, 而优化运行图时也受列车速度曲线提供的各站间牵引时间和制动时间的约束. 因此, 为实现城市轨道交通的系统节能, 需探讨各种列车运行节能方法及其内在关系, 以实现轨道交通系统的能效最优化.

在列车运行控制方面, 考虑到目前城轨列车均采用多控制单元进行牵引和制动, 因而有必要研究基于多质点模型的列车运行控制模型及方法, 以提高列车运行追踪精度和运行舒适度. 而已有的单质点模型难以精确地描述不同控制单元之间的相互作用力, 很难保证列车运行中的舒适性. 基于通信的列车运行控制系统的广泛应用, 使得多列车的协同运行控制成为现实. 为进一步提升城市轨道交通的运行可靠性和运营效率, 开展基于邻车信息的多列车协同运行控制的研究, 将为城市轨道交通多列车安全、高效、协同运行提供理论支撑.

此外, 当前我国轨道交通运营管理体系均是按专业进行分割式管理, 导致管理方法和控制策略之间联动性差、全局性不协同, 缺乏有效的协同优化机制. 决策者在制定运输管理计划 (如运行图、调度方案等) 时, 无需考虑对列车运行控制的影响; 同时, 列车的控制过程只要求遵循运输计划, 但不会对上层的运输计划形成有效反馈, 导致从管理到控制过程的开环, 未能达到全局优化的效果. 为进一步提升能效和时效, 实现城市轨道交通的精细化运营, 需要面向全系统, 实现管理到控制过程的闭环, 通过形成有效的信息反馈, 达到轨道交通全局层面的优化效果.

1.4 本书研究内容

本书的具体章节内容安排如下: 第 1 章为绪论. 第 2 章为城市轨道交通网络客流管理和控制优化; 第 3 章为面向客流-车流协同的城市轨道交通列车运行图优化; 第 4 章为面向首末班车及过渡阶段的城市轨道交通列车时刻表优化; 第 5 章为城

市轨道交通与地面公共交通的接驳优化;第6章为城市轨道交通列车运行图调整策略;第7章为城市轨道交通列车节能优化方法;第8章为城市轨道交通列车运行控制建模与方法;第9章为城市轨道交通列车运行图与速度曲线一体化优化方法。

第2章 城市轨道交通网络客流管理和控制优化

2.1 概 述

随着我国经济的快速发展,城市人口规模不断增长,城市地面交通的拥堵程度越来越严重.为缓解地面交通拥堵,优化城市功能划分,各大城市逐步加强城市轨道交通的规划、建设及运营.近年来,我国城市轨道交通制式种类正在逐步扩展,由以地铁为主,逐步转变为地铁、轻轨、单轨、有轨电车、自动导向系统和低速磁悬浮等多种制式共同发展.多种制式共同发展的原因在于:首先,北京、上海等城市经过多年的快速发展,核心城区的城市轨道交通网络已逐步趋于完善;其次,我国中小城市以及特大城市卫星城正在进入城市轨道交通需求发展期,而其城市规模、交通需求等并不适合发展高运量的地铁交通,反而轻轨、单轨、有轨电车、磁浮交通等中、低运量制式交通方式是其构建骨干线网的主要选择;最后,轻轨等中低运量制式相较于地铁具有投资少、工期短等特点,更容易快速发展.

随着城市轨道交通的发展,各城市将由单一线路过渡到网络化的运营模式.网络化运营借助快速有效的城市轨道交通运营管理体系,对现有的设备、人力资源进行统一协调指挥管理,实行路网集中控制和车站控制两层级别控制,保证城市轨道交通的安全高效运营,从而实现效益的最大化.此外,由于乘客出行多样化需求日益明显,成网运营条件下乘客一次出行有多条路径可供选择,如何识别乘客的出行路径已经成为网络化运营客流分析中的一个重要课题.而且,轨道交通网络化使得突发事件发生的概率增大,突发事件波及的范围也随之增大,如何快速有效地识别车站客流异常以及突发事件的影响范围,也是车站运营安全管理中的一个重要问题.在此背景下进行城市轨道交通网络乘客路径匹配,能够比较准确反映出城市轨道交通网络中的客流分布特点,对于城市轨道交通网络规划与运营管理具有重要意义.

目前国内外各大城市的城市轨道交通大多采用自动售检票系统(automatic fare collection, AFC).AFC是以现代计算机等技术为基础,通过对各种专业技术的融合运用,实现城市轨道交通售检票等功能的自动化系统.随着计算机技术的发展以及城市轨道交通技术的日渐成熟,国内外各大城市的轨道交通都普遍采用了AFC系统,系统设备和功能得到不断加强,并融入到城市的公交一卡通系统中(蒋祥刚, 2008).一般来讲,城市轨道交通AFC系统包含五个层级,分别是:车票层级、终端设备层级、车站控制系统层级、中央控制系统层级和清分系统层级.AFC层级

结构是以计程、计时票制为基础, 依据行车组织全封闭的运行原则、车票介质的构成原则, 根据各层级设备和各层级系统的功能、分界和接口划分. AFC 系统的五层级结构划分具有较高的科学性、实用性和可扩展性. AFC 系统层级结构如图 2-1 所示.

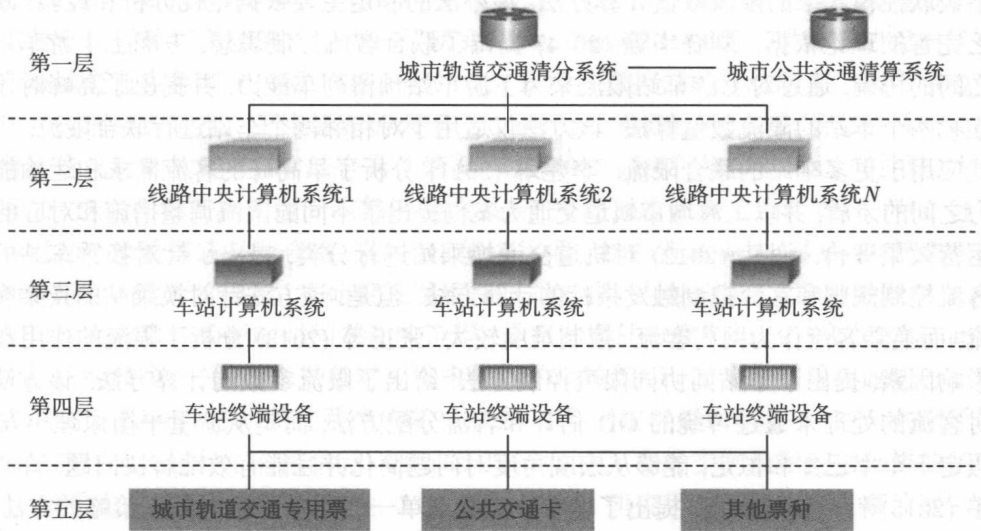


图 2-1 城市轨道交通 AFC 系统 (潘颖芳, 2012)

我国城市轨道交通系统基本采用 AFC 智能刷卡系统来采集乘客的进出站信息, 其主要数据形式见表 2-1.

表 2-1 AFC 主要数据形式

采集信息	含义	形式
DEAL.TIME	交易完成时间	如 2014/2/17 10:00:00
GRANT_CARD_CODE	卡编号	1000 7510 4430 ****
TICKET_TYPE	票种类	0, 1, 7, 18, 177
ENTRY_TIME	进站时间	如 2014/2/17 10:00:00
CURRENT_LOCATION	当前站点	15099****
TRIP_ORIGION_LOCATION	旅程原始进站	15099****
TOTAL_AMOUNT	旅程总金额	联乘累积金额
END_OF_JOURENY	旅程结束	0 或 1(1 表示旅程结束; 0 表示旅程未结束)

面对客流拥挤对安全和高效运营带来的挑战, 亟需有效的客流疏散策略. 目前, 在运能接近饱和的情况下, 对客流进站速率进行控制是最实际可行的方法之一, 也就是我们常说的车站“限流”. 它是交通需求调节的一种手段, 通过调节各站点客流流入的速率影响网络上客流的时空分布状态. 通常情况下, 限流策略的制定需