

东南交通青年教师

科研论丛

常规公交车辆 行车计划智能化编制 及优化方法

张 健 李文权 冉 斌 ▶ 著

TRANSPORT

RESEARCH ON INTELLIGENT
VEHICLE SCHEDULING AND
OPTIMIZING METHODS FOR
CONVENTIONAL PUBLIC TRANSIT

东 南 大 学 出 版 社

东南交通·青年教师·科研论丛

常规公交车辆行车计划 智能化编制及优化方法

张 健 李文权 冉 斌 著

国家自然科学基金资助项目(51308115)

东南大学出版社
·南京·

内 容 提 要

公交车辆行车计划是公交车辆运营调度的重要依据,是整个公交企业工作的纲领性文件之一。常规公交车辆行车计划智能化编制及优化方法研究是优先发展城市公交的重要体现,同时也是提高运输效率、增强公交吸引力、缓解城市交通拥堵的有效途径。本书共包含 8 章内容。第 1~4 章介绍了该研究的背景、意义、行车计划编制分析、信息采集与处理、时刻表编制。第 5~7 章阐述了行车计划的编制方法、优化方法和基于 VANET 的车辆动态调度技术。第 8 章是根据现有研究的不足提出需要进一步深入探索的问题,并结合车联网技术的发展提出研究的新趋势。

本书可用作交通运输规划与管理、智能交通系统、工业工程等相关专业本科生、研究生教学科研用书,也可供从事交通规划、公交管理等工作的技术和管理人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

常规公交车辆行车计划智能化编制及优化方法/张健,
李文权,冉斌著. —南京:东南大学出版社, 2014. 7

(东南交通青年教师科研论丛)

ISBN 978-7-5641-4995-6

I. ①常… II. ①张…②李…③冉… III. ①公交
车辆—车辆调度—智能运输系统 IV. ①U492.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 111608 号

常规公交车辆行车计划智能化编制及优化方法

著 者 张 健 李文权 冉 斌

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 南京玉河印刷厂

版 次 2014 年 7 月第 1 版

印 次 2014 年 7 月第 1 次印刷

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 11.75

字 数 287 千

书 号 ISBN 978-7-5641-4995-6

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

在东南大学交通学院的教师队伍中,40岁以下的青年教师约占40%。他们中的绝大多数拥有博士学位和海外留学经历,具有较强的创新能力和开拓精神,是承担学院教学和科研工作的主力军。

青年教师代表着学科的未来,他们的成长是保持学院可持续发展的关键。按照一般规律,人的最佳创造年龄是25岁至45岁,37岁为峰值年。青年教师正处于科研创新的黄金年龄,理应积极进取,以所学回馈社会。然而,青年人又处于事业的起步阶段,面临着工作和生活的双重压力。如何以实际行动关心青年教师的成长,让他们能够放下包袱全身心地投入到教学和科研工作中?这是值得高校管理者重视的问题。

近年来,我院陆续通过了一系列培养措施帮助加快青年人才成长。2013年成立了“东南大学交通学院青年教师发展委员会”,为青年教师搭建了专业发展、思想交流和科研合作的平台。从学院经费中拨专款设立了交通学院青年教师出版基金,以资助青年教师出版学术专著。《东南交通青年教师科研论丛》的出版正是我院人才培养措施的一个缩影。该丛书不仅凝结了我院青年教师在各自领域内的优秀成果,相信也记载着青年教师们的奋斗历程。

东南大学交通学院的发展一贯和青年教师的成长息息相关。回顾过去十五年,我院一直秉承“以学科建设为龙头,以教学科研为两翼,以队伍建设为主体”的发展思路,走出了一条“从无到有、从小到大、从弱到强”的创业之路,实现了教育部交通运输工程一级学科评估排名第一轮全国第五,第二轮全国第二,第三轮全国第一的“三级跳”。这一成绩的取得包含了几代交通人的不懈努力,更离不开青年教师的贡献。

我国社会经济的快速发展为青年人的进步提供了广阔的空间。一批又一批青年人才正在脱颖而出,成为推动社会进步的重要力量。世间万物有盛衰,人生安得常少年?希望本丛书的出版可以激励我院青年教师更乐观、自信、勤奋、执着的拼搏下去,搭上时代发展的快车,更好地实现人生的自我价值和社会价值。展望未来,随着大批优秀青年人才的不断涌现,东南大学交通学院的明天一定更加辉煌!



2014年3月16日

前言

在我当学生的 20 年里,最后 3 年的博士研究生学习生涯对本书的出版起到了至关重要的作用,因为我的研究对象就是城市公交车辆的行车计划编制及优化调整。

借用经济学家钟爱的“需求”、“供给”两个词,不难理解在国民经济快速发展和城镇化进程加快的进程中,人民群众日益增长的交通出行需求与现有道路交通设施所能提供的交通供给之间的矛盾日益突出。城市交通拥挤堵塞已成为制约城市可持续发展的主要瓶颈之一,并在很大程度上影响了城市经济进一步发展及人民生活水平的提高。为缓解日益严峻的交通供需突出矛盾,促进整个城市可持续发展,必须引导城市交通向“以公共交通为主体”方向发展。在城市人口密度大、道路资源相对十分有限的中国国情下,优先发展城市公共交通已成为缓解我国城市交通压力的有效措施和必然选择。

公交车辆行车计划是公交车辆运营调度的重要依据,是整个公交企业工作的纲领性文件之一。公交车辆的行车计划智能化编制是优先发展城市公共交通的重要体现,同时也是提高运输效率、增强公交吸引力、缓解城市交通拥堵的有效途径。本书围绕常规公交车辆的行车计划智能化编制及优化调整这条主线,按照“规划—管理”的思路,将公交车辆行车计划研究分成“静态—动态”两部分(以静态调度规划编制车辆行车计划,用动态调度技术来优化调整车辆行车计划)。本书的主要内容如下:

第 1 章介绍研究背景、意义、国内外研究现状、研究目标和主要研究内容,提出了研究思路和技术路线,梳理了本书的组织结构。第 2 章对常规公交车辆行车计划的传统编制方法进行分析,从常规公交车辆调度流程、调度组织形式和现场调度等三个方面分析了传统编制方法的不足,并在其基础上提出改进的车辆行车计划智能编制方法,着重给出常规公交车辆行车计划的智能化编制及优化流程图,明确智能化的具体体现。第 3 章从交通工程学科角度出发,分别从人、车、路、环、管五个方面,对常规公交车辆行车计划编制及优化所需信息的获取与处理进行了分析;综合利用乘客出行行为特征、公交站点附近土地用地性质和公交站点换乘功能影响等多元信息来改进公交线路客流 OD 推算,并对与后续章节联系较为密切的部分进行了比较详细的介绍。第 4 章是对常规公交车辆行车时刻表的编制研究,是本书的重点之一,该章通过公交站点基本信息的获取与处理,首先研究公交线路车辆发车间隔优化问题,按照“由点到线”的逻辑顺序编制出公交线路的车辆行车时刻表;然后通过区域范围内不同线路间乘客的换乘,利用公交

换乘站点“由线到面”地研究了区域公交线路时刻表的调整问题。第5章是对常规公交车辆行车计划的编制研究,既是本书的重点,也是难点。其核心是利用排序理论中的固定工件排序知识来解决行车计划智能编制过程中车辆排班问题,从而最终解决车辆行车计划编制问题,到此章结束才算真正解决了车辆行车计划的编制问题。第6章是对常规公交车辆行车计划的优化调整研究。第5章是静态编制,该章是动态优化,主要是从动态优化调整策略、现有方法分析两个方面开展研究,然后重点讨论了公交车辆晚点到站异常情况下的车辆行车计划优化调整。第7章是公交车辆行车计划动态优化技术研究。伴随新技术发展,从公交车辆传统常用调度技术出发,提出了基于新通讯环境下的常规公交车辆行车计划动态优化技术。主要介绍了VANET的相关内容,分析了无线通讯的连通性并对集中优化调度技术进行了比对。第8章是结论与展望,对全书的主要研究成果与结论进行总结,概括主要创新点,分析研究的不足,并对今后研究的方向提出展望。

本书在写作过程中得到了许多同行学者、朋友和研究生的帮助,在此特别感谢授业导师李文权教授、冉斌教授,感谢王伟教授、秦霞书记等领导及同事,感谢美国威斯康星大学麦迪逊分校的金璟博士、程阳博士和方捷博士等同门,感谢王卫博士、张鹏博士、许项东博士、李锐博士、万霞博士、曲栩博士,感谢硕士赵锦焕、研究生邱丰、华璟怡、何赏璐、聂建强、钟罡、孟越、丁婉婷等人,有了他们的支持最终才能完成本书。最后还要特别感谢我的家人,感谢父母的养育,感谢妻子的支持,感谢岳父母的理解,感谢孩子小鑫带给我的动力和欢乐,有了家庭的温暖和关怀才使得笔者有时间和精力投入到本书的写作中。

本书有幸出版,得到了江苏省优势学科建设资助,还要感谢现代城市交通技术江苏高校协同创新中心、江苏省城市智能交通重点实验室、东南大学交通学院青年教师发展委员会、东南大学物联网交通应用研究中心、物联网技术与应用协同创新中心智慧交通物流分中心给予本人在青年教师出版方面的支持与帮助。

由于笔者专业视野和学术水平有限,本书难免有错漏和不足之处,敬请读者批评指正。

张 健

2014年4月

于东南大学

目 录

总序

前言

1 研究概述	1
1.1 研究背景及意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究问题	2
1.1.3 研究意义	3
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 国外研究概况	3
1.2.2 国内研究概况	8
1.3 研究目标与主要内容	12
1.3.1 研究目标	12
1.3.2 主要研究内容	13
1.4 研究思路和技术路线	13
1.5 本书组织结构	14
2 常规公交车辆行车计划编制分析	16
2.1 常规公交车辆行车计划概述	16
2.1.1 常规公交车辆行车计划	16
2.1.2 常规公交车辆调度的形式	17
2.1.3 常规公交车辆调度的分类	17
2.2 行车计划传统编制方法介绍与分析	18
2.2.1 车辆行车计划传统编制	18
2.2.2 公交车辆传统调度流程	19
2.2.3 公交车辆传统调度组织形式	19
2.2.4 公交车辆传统现场调度	20
2.2.5 车辆行车计划传统编制方法的不足	21
2.3 改进的车辆行车计划智能编制方法	21
2.3.1 公交车辆行车计划智能编制及优化流程	22
2.3.2 公交车辆智能调度组织形式	23

2.3.3 公交车辆智能现场调度·····	23
2.3.4 车辆行车计划编制的智能化体现·····	26
2.4 本章小结·····	27
3 车辆行车计划编制及优化的基本信息获取与处理·····	28
3.1 引言·····	28
3.2 公交客流特征信息的获取与处理·····	29
3.2.1 调查内容·····	29
3.2.2 获取手段·····	29
3.2.3 信息处理·····	33
3.3 公交车辆运营信息的获取与处理·····	34
3.3.1 调查内容·····	34
3.3.2 获取手段·····	35
3.3.3 信息处理·····	39
3.4 公交线路特征信息的获取与处理·····	41
3.4.1 调查内容·····	41
3.4.2 获取手段·····	42
3.4.3 信息处理·····	42
3.5 道路环境特征信息的获取与处理·····	46
3.5.1 调查内容·····	46
3.5.2 获取手段·····	46
3.6 公交管理政策信息的获取与处理·····	48
3.6.1 调查内容·····	48
3.6.2 获取手段·····	49
3.7 本章小结·····	49
4 常规公交车辆行车时刻表编制研究·····	50
4.1 行车时刻表编制技术·····	50
4.1.1 车辆运行参数的确定·····	50
4.1.2 行车次序排列的确定·····	53
4.1.3 确定发车类型·····	53
4.1.4 完成车辆行车时刻表·····	54
4.1.5 行车时刻表编制总结·····	55
4.2 公交车辆线路发车间隔优化研究·····	56
4.2.1 引言·····	56
4.2.2 线路发车间隔优化模型建立·····	56
4.2.3 模型求解算法·····	60

4.2.4 算例分析	70
4.3 公交车辆区域行车时刻表优化研究	77
4.3.1 引言	77
4.3.2 车辆区域行车时刻表优化模型建立	78
4.3.3 模型求解	80
4.3.4 算例分析	81
4.4 本章小结	83
5 常规公交车辆行车计划编制研究	84
5.1 引言	84
5.2 公交车辆线路行车计划编制	84
5.3 公交车辆区域行车计划编制	86
5.3.1 排序理论的引入——固定工件排序模型	86
5.3.2 排序理论下的区域车辆排班模型	87
5.3.3 模型求解	94
5.4 算例分析	102
5.4.1 算例设计	102
5.4.2 离线情况下的公交车辆区域行车计划	103
5.4.3 在线情况下的公交车辆区域行车计划	106
5.5 本章小结	108
6 常规公交车辆行车计划优化调整研究	109
6.1 引言	109
6.2 常规公交车辆行车计划优化调整方法	109
6.2.1 动态优化调整策略	110
6.2.2 现有站点调度问题分析	110
6.2.3 晚点到站异常情况下的车辆行车计划优化调整	111
6.3 本章小结	114
7 基于 VANET 的公交车辆行车计划动态优化技术	115
7.1 公交车辆动态调度常用技术	115
7.1.1 传统的现场调度技术	115
7.1.2 基于 GPS—GSM/GPRS/CDMA 的调度技术	115
7.2 基于 VANET 的公交车辆动态优化调度	117
7.2.1 VANET 相关概念	117
7.2.2 国内外研究现状	118
7.2.3 车载自组网技术	120

7.2.4 基于 VANET 的公交车辆动态调度	123
7.3 公交车辆动态调度无线通信的连通性分析	126
7.4 常规公交车辆动态优化调度技术对比	129
7.5 本章小结	129
8 结论与展望	130
8.1 主要研究成果与结论	130
8.2 主要创新点	131
8.3 研究不足与展望	132
参考文献.....	135
附录 1 GPS 数据处理程序	150
附录 2 LINGO 软件编程代码	154
附录 3 排序理论介绍	156
附录 4 University of Wisconsin-Madison 校园公交线路图	166
附录 5 Access 数据库中数据处理的 Java 软件编程.....	167
附录 6 主要变量及符号释义	174

1 研究概述

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

随着国民经济的高速发展和城镇化进程的加快,人民的生活水平不断提高,城市规模不断扩大,我国机动车拥有量及道路交通量急剧增加。尤其在大城市,交通拥挤堵塞已经成为制约城市可持续发展的主要瓶颈之一,并在很大程度上影响了城市经济进一步发展及人民生活水平的提高。以北京市为例^[1],2009年末全市民用汽车拥有量达到368.11万余辆,相比2000年末的104.12万辆,增长了2.54倍;私人汽车拥有量达到296.56万余辆,相比2000年末的49.41万辆,增长了5.00倍。据调查^[2],2005年,北京市市区高峰小时机动车流量超过10000辆以上的路口有55个,5000~10000辆的路口有51个,严重拥挤堵塞的路口和路段有99处。市中心区道路网高峰期的平均负荷度已超过90%,11条主要干道的平均车速已降至12 km/h,个别路段的车辆行驶速度仅为7~8 km/h,有近1/5的路口与路段呈瘫痪状态。进入“十一五”后,市区道路交通拥堵范围更加扩大,拥堵范围逐步由市中心区向外围和放射线道路蔓延。尤其是在早晚高峰时段,全市拥堵道路经常超过百条,节假日前夕有时竟高达140条。特别是遇到雨雪恶劣天气,全市脆弱的道路交通系统几乎濒临瘫痪。据《2009福田指数——中国居民生活机动性指数研究报告》显示,道路畅通时,北京居民每天平均上下班在路上消耗的时间为40.1 min,若遇到拥堵,则该时间会增长一半以上(62.3 min)。此外,每天早高峰时间比以往提前约1个小时,晚高峰多从下午4点左右开始,持续到晚8、9点才结束。据统计,北京每台机动车每月支付的道路拥堵成本在300~400元之间,若全市机动车保有量以450万辆计算,则年损失就高达216亿元。

众所周知,公共交通具有运量大、运送效率高、能源消耗低、相对污染少、运输成本低等优点。优先发展城市公共交通是提高交通资源利用效率,缓解交通拥堵的重要手段;在城市交通结构中,公共交通在人均占用道路资源、道路环境污染和能源消耗等三方面颇具优势。一方面,优先发展城市公共交通是国外城市交通发展的经验总结。在欧洲,瑞士的苏黎世、德国的弗莱堡、法国的巴黎等城市都是成功的范例;在亚洲,一些国家和地区拥有完善的城市公共交通系统,如日本东京、新加坡和香港;在美洲,巴西的库里蒂巴是快速公交(Bus Rapid Transit, BRT)的发源地,即使是在汽车王国美国,也有像波特兰这样的公共交通示范城市。另一方面,我国政府也高度重视城市公共交通的优先发展。2004年6月,温家宝总理做出重要批示:“优先发展城市公共交通是符合中国实际的城市发展和交通发展的正确战略思想。”2005年9月23日,国务院办公厅转发了建设部等六部门《关于优先发展城市公

公共交通的意见》(国办发〔2005〕46号),要求各地要认真贯彻落实“公交优先”战略。2005年11月17日,全国公交企业代表共同签署公交优先的《郑州宣言》。2006年,建设部会同国家发展和改革委员会、财政部、劳动保障部等四部门印发了《关于优先发展城市公共交通若干经济政策的意见》(建城〔2006〕288号文件)。2009年10月7日,胡锦涛总书记在考察北京交通工作时指出:“要解决城市交通问题,必须充分发挥公共交通的重要作用,为人民群众提供快捷、安全、方便、舒适的公共交通服务,使广大群众愿意乘公交、更多乘公交。”

因此,为缓解日益严峻的交通供需突出矛盾,促进整个城市的可持续发展,必须在加大城市交通建设、规划和管理步伐的同时,采取多手段调控城市交通结构,引导城市交通向以公共交通为主体的方向发展,特别是在城市人口密度大、道路资源相对十分有限的现实国情下,优先发展城市公共交通已经成为缓解我国城市交通压力的有效措施和必然选择。

虽然提出“优先发展城市公共交通”的交通政策已有许多年,但是我国城市公共交通却发展缓慢。以南京市为例^[3],主城区1999年居民公交出行方式比例为21%,2005年为22.6%,2006年为18.61%(其中轨道交通分流0.68%),2007年(含轨道交通)为21.46%^[4],2008年(含轨道交通)为21.56%^[5],2009年为21.86%(其中路面公交出行比例为19.11%^[6],轨道交通出行比例为2.75%)。造成城市公交发展缓慢的表面原因有两个方面,一是居民出行对公交方式失去了吸引力,主要原因有:①公交车辆到站准时性不能保证;②车内环境差、服务质量低;二是公交企业效率低下,亏损严重,影响服务质量。这两个方面互相影响,使公交发展陷入了恶性循环。造成公交失去吸引力和公交公司亏损的重要原因是:公交运营调度不合理、欠优化。调度是依据“行车计划”,并执行“行车计划”,车辆行车计划的编制及优化是本书要研究的内容。

1.1.2 研究问题

公交车辆行车计划是公交运营调度的重要依据。整个公交企业的工作都围绕公交车辆行车计划进行安排。车辆行车计划编制及优化的是否合理,不仅直接影响企业生产效率、经济效益和服务质量,还进一步影响着居民公交方式出行比例和城市运输效率。编制车辆行车计划的目的是:通过科学组织车辆运行最大限度地方便公交乘客出行,满足居民公交出行需求,提高公交出行方式的吸引力。公交车辆行车计划编制不合理或者调整不及时,会直接导致车辆过分拥挤或者接近空车运行,既影响公交公司效益,又失去公交对市民吸引力。所以,研究公交车辆行车计划的编制及优化是提高运输效率、增强公交吸引力、缓解城市交通拥堵的有效途径。

按照各种交通工具的技术特征,可将公共交通系统分为常规公共交通系统、大运量快速公共交通系统、辅助公共交通系统和特殊公共交通系统。常规公共交通系统主要包括公共汽车、公共电车(有轨、无轨)、小型公共汽车(中巴)等。它是城市公共交通系统的主体,是使用最广泛的公共交通系统,其特点是灵活机动、成本较低。大运量快速公共交通系统又称轨道交通系统,包括地铁、轻轨、高铁,其特点是运量大、速度快、可靠性高,并可促进城市土地开发,但造价很高。辅助公共交通系统包括出租车、三轮车、摩托车,在城市公交系统中起着辅助和补充作用。特殊公共交通系统包括轮渡、缆车等,在特殊条件下采用^[7]。显而易见,对常规公交系统的研究更具有广泛性和现实性。

公共交通事业的快速发展,“优先发展城市公共交通”政策的切实落实,居民公交出行方

式比例的提高,离不开现代化的公交技术和管理手段。如何充分利用现有的城市常规公共交通基础设施,提高公交车辆的运营效率?如何智能化地编制公交车辆行车时刻表和排班计划?这正是本书所要思考和探索的问题,即常规公交车辆行车计划的智能化编制及优化方法研究。

1.1.3 研究意义

目前,我国大部分城市的公交车辆调度仍在沿用 20 世纪 40 年代的“定点发车,沿线失控、两头卡点”传统手工作业编制方式。行车计划的编制多凭调度人员的经验,缺少必要的理论指导,具有不稳定的缺点;调度员与驾驶员之间缺乏必要联系,公交车辆调度处于“看不见、听不着”状态,对运营过程中出现的临时性变化反应滞后;车辆运营中的“串车”、“大间隔”现象普遍,乘客候车时间过长、前车提前离站、后车拥挤不堪的现象常有发生,导致公交公司的经济和社会效益受到很大损失。由于缺乏实时的数据反馈和高效的分析预测,公交车辆的现场调度只能依赖于调度员的经验,车辆调度的科学性、实时性和有效性得不到保障。

近些年来,随着国家大力优先发展公共交通政策的实施,以及计算机网络、无线通讯、车辆定位、大屏幕显示、公交电子站牌等技术的不断完善,我国部分城市利用全球定位系统(Global Positioning System, GPS)、通用分组无线业务(General Packet Radio Service, GPRS)、地理信息系统(Geographic Information System, GIS)等先进技术产品先后建立了智能化公交调度系统。例如,北京、上海、杭州、大连等城市对建设先进公共交通系统给予了高度重视,在硬件建设方面取得了初步成果,先后在部分公交线路建立了公交智能化调度系统。然而,由于它们依据的公交车辆行车计划未能摆脱传统的经验编制模式,与之配套的调度形式在很大程度上仍然由调度人员的经验决定,而不是根据实时公交车辆运行状况由系统自动给出,使得现有调度系统难以发挥其应有作用。因此,为改善我国公交车辆调度落后状况,国家高技术研究发展计划设立了探索导向类专题课题,研究我国城市公交车辆行车计划的智能化编制及优化方法具有重要的理论意义和实用价值。

1.2 国内外研究现状

公交车辆行车计划编制及优化研究大致可归纳为两个方面:①优化理论研究;②系统设计与集成。可将这两个方面分别视为车辆运营调度系统的“软件”和“硬件”部分。前者是在系统提供的信息基础上,辅助调度员或系统自身做出科学决策;后者是利用大量定位、通讯、控制等硬件技术装备,获得充分的实时信息,保证信息中心与公交车辆之间的信息交通畅通。

1.2.1 国外研究概况

国外发达国家对公交车辆行车计划编制及优化的理论研究非常重视,开始研究的时间也早,主要运用运筹学等应用数学的理论和方法,针对行车计划编制及优化进行研究。已取得了大量的研究成果,并出版了相关指南和手册。以美国为例,早在 1947 年 8 月就已经出

版《公共交通运营计划编制指导手册》^[8]。1998年,美国公共交通合作研究项目(Transit Cooperative Research Program, TCRP)出版行车计划编制培训手册《报告30》^[9],2009年又出版了该手册升级版《报告135》^[10]。丰富的公交车辆行车计划编制及优化技术与先进的车辆定位、无线通信、计算机网络技术相结合,使得国外很早就建立了很多公交调度系统的实例。如20世纪80年代以来,美国、日本、新加坡和欧盟部分发达国家对公交系统的智能化研究给予了高度重视和巨大投入,大量研究成果和先进技术被应用于城市公交调度系统,传统公交行车计划编制及优化中存在的诸多问题得到了很大改善,这些国家已经进入了智能化公交运营调度时代。

1) 优化理论研究方面^[11-13]

20世纪50年代后期,英国利兹大学探讨了计算机在交通调度中的应用问题,并在60年代将理论研究成果应用于铁路和公交车辆的行车计划编制中,为进一步研究的可行性提供了理论和技术基础。1966年,Elias提出公交行车计划中车辆和人员的分配优化模型。1968年,Kirman发表了最早的基于网络的调度优化方法。

进入20世纪70年代,各种行车计划编制软件的研发促进了理论的进一步发展。如Hoffstadt提出的基于网络调度优化的Hungarian算法,Ario等于1979年提出的分时段优化调度方法。1975年在芝加哥举行的“公交车辆功能自动调度技术”研讨会上,第一次将应用软件分为基于线路和基于网络两类,表明基于网络的优化理论已较为成熟,而且得到了广泛应用。在整个70年代,许多优化理论应用到公交调度优化理论中,如匹配算法(Matching Methods)、集划分算法(Set Partitioning)、集覆盖法(Set Covering Approaches)和交互式优化法(Interactive Approaches)等寻优方法。

20世纪80年代公交行车计划编制研究的侧重点是实用理论的建立、区域行车计划编制优化理论的研究和计算机模拟执行行车计划。1981年,Stern和Ceder^[14]将Deficit函数引入到车辆行车计划编制中,应用该方法研究了运营车辆数的最小化问题。1983年,Bodin等^[15]提到一种考虑线路时间约束的车辆调度问题,约束由车辆离开车场的时间或英里数代替。1985年,Furth^[16]针对线路两方向客流不均匀问题,探讨了如何优化放车调度(空车发出,中途载客)过程,并提出了相应模型。1985年,Koutsopoulos等^[17]提出了一个用来求解具有不同需求的公交网络中每日不同时段的发车频率问题模型,模型中维修费用和出行时间也假设随时间的变化而变化。区域行车计划编制的理论研究主要集中在单车场车辆行车计划编制问题(SDVSP)和多车场车辆行车计划编制问题(MDVSP)的模型和求解方法上。1984年,Carraresi和Gallo^[12]提出了基于先分组后安排线路策略的车辆行车计划编制模型,为多车场车辆行车计划编制问题的求解打下基础。1987年,Bertossi等^[18]考虑到多车场车辆行车计划编制问题的复杂性,提出了一种启发式求解算法。计算机模拟方面也有很多研究成果,如公交线路发车频率模拟模型、运营情况模拟模型等,拓展了公交车辆行车计划编制模型的建模和求解方法。如1988年,Marlin等^[19]开发了一种仿真模型来编制公交车辆行车计划,检验结果的可行性,并在交互的计算机支持系统中使用了数学规划方法对车辆进行分配。

随着先进公共交通系统(APTS)的发展,20世纪90年代开始对实时调整和各种调度控制模式下的行车计划编制进行了研究。1992年,Li和Rousseau^[20]建立了实时放车调度的优化模型并运用启发式算法进行求解。1993年,Carey^[21]研究了车辆的非准点到站分布,以

及不同发车间隔下乘客的到达分布,基于个体对费用、出行时间等因素考虑研究了时刻表的编制问题。1995年, Van Oudheusden 和 Zhu^[22]提出用于优化公交线路发车频率的模拟模型。1995年, Eberlein^[23]系统地研究了实时控制策略下的公交运营模型和分析。1998年, Adamski 和 Turnau^[24]运用 SIMULINK 仿真工具对处于准点控制、发车间隔控制、协同控制和随机控制四种调度控制模式下公交线路运营状况进行了模拟仿真研究。1999年, Des-souky 等^[25]运用车辆跟踪技术研究了大间隔发车的公交车辆到站的延误分布,发现车辆的晚点与起始时间无关,为实时控制提供一定依据。2001年, Ceder 等^[26]研究以协同最大化为目标的公交时刻表制定,建立了多条公交线路协同发车的行车计划编制模型。

21世纪以来,理论研究进入“百家争鸣,百花齐放”新时期:既有改进传统车辆行车计划编制模型,又有构建智能化新模型;既研究车辆的线路调度,也有探讨区域调度。2000年, Banihashemi 和 Haghani^[27]重点研究了实际的大规模多车场车辆行车计划编制问题的求解算法。2001年, Palma 和 Lindsey^[28]研究了单条线路在给定公交车辆数情况下的公交时刻表的优化编制方法。2002年, Haghani 和 Banihashemi^[29]为解决现实中可能存在的诸如燃料消耗之类的约束,在车辆行车计划编制问题中考虑了额外的运行时间约束,并提出了几种启发式求解方法。该方法在大城市的应用表明,需要减少变量和约束条件的数目。同年, Valouxis 和 Housos^[30]以乘客出行费用最少为目标建立了关于车辆与驾驶员最佳组合问题的模型,并采用一种快速遗传算法对模型进行求解,在希腊的几个运输公司中得到了较好应用。2003年, Haghani 等^[31]比较了三种车辆行车计划编制模型,一种是多车场模型,其他两种是基于特殊多车场问题的单车场模型,分析表明在一定情况下,单车场行车计划编制模型表现更好,并对重要参数进行了敏感性分析,分析结果表明空驶车次的行驶速度参数非常关键。2004年, Zolfaghari 等^[32]提出了一种基于实时信息的公交调度模型。2005年, Gintner 等^[33]研究了多车场多车型的公交车辆行车计划编制问题。2006年, Rodrigues 等^[34]给出了一种解决大都市车辆与驾驶员调度问题的计算工具。2007年, Fattouche^[35]通过更好的行车计划编制来改进高频率发车下公交车辆服务的可靠性。2008年, Guihaire 和 Hao^[36]对城市公交网络的设计与行车计划编制进行了系统全面的文献综述研究。2009年, Laurent 和 Hao^[37]提出了一种列生成法用来求解多车场车辆行车计划编制问题。同年, Michaelis 等^[38]在给定的公交网络上,给出了一种以顾客为导向的启发式算法,来求解公交线路规划、时刻表生成和行车计划编制的一体化问题。2010年, Guihaire 和 Hao^[39]以改进服务质量、降低车辆运营成本为目标,联立考虑了时刻表生成和公交车辆分配,并对时刻表进行了重新定义,给出了一种求解方法。

特别的,在线路发车间隔优化方面:

1980年, Schéele^[40]提出了一个最小乘客出行时间的公交线路发车频率优化模型。该模型是一个非线性规划,其决策变量是每条线路的发车频率,优化频率同时还考虑客流分配问题。1981年, Furth 和 Wilson^[41]介绍了确定公交线路发车间隔的四种常用方法,提出用于确定给定公交网络的发车频率的一种优化(非线性规划)模型和求解算法;模型假设每条线路的需求是具有弹性的,即对发车频率变化敏感,却没有建立不同线路间需求的关联关系。1984年, Ceder^[42]提出了基于站点调查数据(最大客流)和基于跟车调查数据(断面客流)确定发车频率的四种方法。1985年, Koutsopoulos 等人^[43]提出了一个以乘客等待费用、运营者成本和拥挤费用最小为目标,用来求解具有不同需求的公交网络中每日不同时段

的发车频率问题的模型,该模型是一个非线性规划,通过简化初始条件,最后采用线性规划方法进行了求解。1990年,Banks^[44]提出了一种在公交线路系统中确定发车间隔的模型,并对比了线路需求变化与需求固定的情况。1994年,Shih和Mahmassani^[45]在给定的公交网络中,在O-D需求不变情况下,提出了一种迭代的方法:首先优化车型,然后根据载客量确定发车频率,再重新优化车型,直至结果相差不大为止。2003年,Wirasinghe^[46]检验了由Newell提出的发车频率计算公式的有效性,指出在大多数情况下,Newell提出的“平方根法则”通过一些修改是可用的。

在区域车辆时刻表编制研究方面:

2001年,Ceder等^[47]建立了以网络中每两辆公交车辆相遇次数最大为目标的模型,并应用于以色列的公交运营系统。但该模型没有考虑公交站台的停车泊位数,也没有考虑到多辆车相遇要比两辆车分别相遇可以给乘客换乘提供更多的选择。

2006年,Cevallos和Zhao等^[48]建立了比较详尽的车辆同步到达模型,但参数难以获得,不具备实用性。

在车辆行车计划编制研究方面:

美国公共交通合作研究项目(TCRP)的《报告30》^[9]和《报告135》^[10]给出了构建车次链的基本方法。1972年,Salzborn^[49]建立了在已知车次的平均往返时间和停站时间,放射状公交线路下计算最小车队规模的模型。20世纪八九十年代,Vijayaraghavan研究了基于大站快车和区间车调度策略下的车辆分配、组织和行车计划编制问题,并通过引入若干特定线路从而减少某条线路的车辆数^[50-51];Freling等^[52](2001)和Huisman等^[53](2005)提出了用于求解单条线路车辆人员编制问题的集成方法:将车辆行车计划问题定义为一个网络流问题,网络中的每条路径代表一个可行的行车计划编制方案,每个点代表一个车次;在组合过程中网络问题合并为相同的规划问题,问题中还包含了用于描述人员编排问题的集合分割问题。

(1) SDVSP

SDVSP可以理解为MDVSP的子问题,也可以被描述为最小费用流问题、线性指派问题、运输问题、近似指派问题或匹配问题。

1978年,Gavish和Shifler^[54]定义了大型公交企业的行车计划编制问题,即如何合理的规划车辆配置来执行给定的班次任务,给出了满足相关约束条件下所需车辆数最小和车辆闲置时间最少的问题求解算法。1995年,Desrosiers等^[55]归纳了SDVSP研究中的关键问题,指出SDVSP研究的主要进展,并在此基础上对SDVSP研究前景进行了展望。1999年,Kwan和Rahin^[56]提出一种面向对象的车辆行车计划编制方法,该方法通过修正交换规则改进Smith和Wren在1981年提出的VAMPIRES迭代算法,改进算法引入了辅助活动层次分类概念,这些辅助活动包括:车次、滞留、重新分配、无效的滞留、无效的重新分配、场站返回、场站起始、场站结束。2001年,Fring等^[57]应用准指派问题模型和贪婪算法讨论了单车场单车型的调度问题,提出了四种不同算法并比较了它们的效率:用于求解准指派问题的现有贪婪算法和新贪婪算法,可交换的二阶段准指派模型,用于减小问题规模的基于核心的算法。同年,Hasse等^[58]描述了车辆人员集成编排问题,研究了单车场单车型的行车计划编制问题,对于人员编制问题提出了包含线路行程边缘约束的集合分割问题,基于这样的约束可产生适宜的车辆行车计划。

(2) MDVSP

MDVSP 是 SDVSP 的扩展问题。1987 年, Bertossi 等^[59] 证明了车场数大于等于 2 时的 MDVSP 属于 NP-hard 问题。在实际应用中, 车辆行车计划编制问题通常被描述为整数线性规划(Integer Linear Programming, ILP)问题。其求解方法的基本原理是: 首先构造一个解空间, 然后利用启发式方法缩减这个空间, 再将问题描述为集合覆盖问题, 然后利用分枝定界法对问题进行求解。近几年, 列生成(Column Generation)技术被引入到 ILP 问题求解中, 求解的问题规模有所增大, 但对大型实际问题的求解仍需简化。

因为区域调度下的配车问题, 可行解数量极大, 特别是针对多车场车辆行车计划编制问题, 所以针对该问题的研究多集中在问题求解算法方面。1981 年, Ceder 和 Stern^[14] 提出了逆差函数法(Deficit Function Approach)来解决公交车辆调度问题, 描述了一种基于构建空驶班次的算法来减少车队规模。1993 年, Dell'Amico 等^[60] 基于最短路径问题研究了几种启发式算法, 为多车场行车计划编制问题寻求所需的最小车辆数。算法分阶段进行, 每阶段中新增加车辆的任务都得以确定。通过在网络子集而非整个网络中应用最短路径算法来提高算法效率。算法定义了一个禁用弧集, 之后在网络图中搜索不包括禁用弧的可行回路。通过将整个问题分解为几个部分的方法来减少问题规模, 并对基本算法进行了修正, 如将求解车次的再分配问题替换为单车场行车计划编制问题、重组部分车次以及不同车场每个车次对的内部再分配等, 以节约计算时间。1995 年, Mingozzi 等^[61] 第一次提出了解决有时间窗(Time Windows)的多车场车辆行车计划编制问题(Multiple Depot Vehicle Scheduling Problem with Time Windows, MDVSPTW)的算法, 算法使用分枝定界法解决包含筛选列集的集合分割模型, 列集筛选使用了变量固定法(Variable Fixing)。Löbel^[62-63] (1998, 1999)研究了多车场车辆行车计划编制问题及其松弛问题, 提出一个特殊的多货物流问题模型, 并基于拉格朗日松弛技术提出了列生成算法求解模型, 将问题转变成线性规划问题以应用分枝定界法求解。1999 年, Mesquita 和 Paixao^[64] 基于多货物网络流模型, 使用了搜索树方法对多车场行车计划编制问题进行求解。该算法包含用于描述车次间的连接和描述将车次分配到场站这两种不同类型的决策变量。Banihashemi 和 Haghani^{[27][29]} (2000, 2002)重点研究了实际的大规模多车场车辆行车计划编制问题的求解算法, 提出了几种启发式求解方法, 通过修正方法减少问题求解规模, 将原问题转化为一组单车场问题, 并考虑了续驶时间约束限制。2005 年, Huisman 等^[65] 提出了用于描述多车场调度问题的动态模型, 通过解决一系列短时优化问题对静态调度问题中假设行驶时间是一个仅输入一次的固定参数进行了调整, 研究表明少量增加车辆可满足最小化晚点车次和最小化总延误费用目标。为求解模型, 应用了“聚类再生成”启发式算法: 算法开始于一个分配车次给车场的静态问题, 然后求解多个动态的单车场问题, 最后基于数学规划模型得出优化的结果。

值得注意的是, MDVSP 的模型并不一定比 SDVSP 的模型标线更好。2003 年, Haghani 等^[66] 比较了三种车辆调度模型: 一种是多车场模型, 另两种是基于特殊多车场调度问题的单车场模型。研究表明, 在一定条件下单车场调度问题的模型表现更好, 空驶车次的行驶速度参数非常关键。这也是本书只对 SDVSP 进行研究的原因之一。

综观国外学者的研究成果, 国外公交车辆行车计划优化理论研究还在不断深化、不断完善。主要内容可总结为: 基于不同目标公交行车计划编制优化模型、区域协调编制优化问题、不同运营模式下公交行车计划编制方法以及实时调整技术。国外研究成果注重分析模