



交通运行管理丛书 | 过秀成 主编

地面公共交通运输运行 可靠性分析与调度控制

Operation Reliability Analysis and
Scheduling Control of Bus Transit

过秀成 严亚丹 著



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

交通运行管理丛书

地面公共交通运输运行 |可靠性分析与调度控制|

**Operation reliability analysis and
scheduling control of bus transit**

过秀成 严亚丹 著

东南大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

地面公共交通运行可靠性分析与调度控制 / 过秀成,
严亚丹著. —南京:东南大学出版社, 2013. 6

(交通运行管理丛书 / 过秀成主编)

ISBN 978-7-5641-4276-6

I. ①地… II. ①过… ②严… III. ①公共交通系统—
运输调度—研究 IV. ①U491.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 109710 号

地面公共交通运行可靠性分析与调度控制

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: 江苏兴化印刷有限公司

开 本: 700 mm×1 000 mm 1/16

印 张: 15.5

字 数: 280 千字

版 次: 2013 年 6 月第 1 版

印 次: 2013 年 6 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5641-4276-6

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

前 言

落实公交优先发展战略,构建以人为本、公交优先和慢行友好的交通系统,是保障和改善民生、实现公共交通与城市的协调发展以及缓解交通拥堵的重要举措。改善居民的公交出行,提高公交服务质量和吸引力,涉及公共交通发展政策和制度设计、公共交通系统可持续发展规划、公交一体化运营与组织等。本书围绕“地面公共交通运行可靠性分析与调度控制”主题,面向公交企业,以公交车辆运行系统为研究对象,界定了公交运行可靠性的内涵及分析方法,总结了改善公交运行环境的设施设置方法,提出了基于运行可靠性分析的各种调度控制策略的模型和算法。

全书共包括 10 章。第 1 章绪论;第 2 章公交运行可靠性与调度控制研究进展;第 3 章基于运行可靠性的公交调度控制机理;第 4 章公交运行信息采集与分析;第 5 章基于 AVL 系统数据的公交运行可靠性评价分析;第 6 章公交线网协调与枢纽衔接;第 7 章考虑随机运行时间的公交线网设计模型及其算法;第 8 章公交线路计划时刻表设计;第 9 章多条公交线路协同调度;第 10 章实时运行过程中调度控制策略。

本书对于进一步增强城市公交企业的运营和管理能力,提高公交系统的服务和管理水平,具有较强的参考借鉴价值。本书可作为高等院校交通工程、交通运输和城市规划等专业高年级本科生、硕/博士研究生的学习用书,也可作为城市规划部门、交通运输管理和设计部门以及公交企业技术人员和管理人员的参考读物。

在本书撰写过程中,参阅了大量国内外文献资料,由于条件所限,未能与原著者一一取得联系,引用及理解不当之处,敬请谅解,并向这些文献资料的原作者表示崇高的敬意和衷心的感谢。

限于作者的学识和水平,书中错误不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

电子邮箱:seuguo@163.com。

著 者

于东南大学

2013年4月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 背景及意义	1
1.2 目标及内容	2
1.3 本书总体架构	6
第 2 章 公交运行可靠性与调度控制研究进展	8
2.1 公交运行可靠性分析	8
2.2 改善运行可靠性的公交调度控制策略研究	12
2.3 既有研究综述	18
第 3 章 基于运行可靠性的公交调度控制机理	21
3.1 公交运行可靠性概念界定	21
3.2 基于运行可靠性的公交调度控制系统框架	30
3.3 基于运行可靠性的公交调度控制策略	34
3.4 不可靠成因与调度控制间关系	47
第 4 章 公交运行信息采集与分析	49
4.1 地面公交信息管理系统	49
4.2 自动车辆定位系统	55
4.3 自动乘客计数系统	59
4.4 自动收费系统	64
第 5 章 基于 AVL 系统数据的公交运行可靠性评价分析	68
5.1 公交线网运行可靠性评价	68
5.2 公交线路运行可靠性评价	70

5.3 实例分析	78
第 6 章 公交线网协调与枢纽衔接	87
6.1 多层公交线网协调	87
6.2 轨道交通接运公交线网协调	90
6.3 公交枢纽衔接模式及合理规模分析	107
第 7 章 考虑随机运行时间的公交线网设计模型及其算法	127
7.1 公交线网设计问题描述	128
7.2 公交线网设计数学建模	129
7.3 基于模拟退火的求解算法	133
7.4 实例分析	143
第 8 章 公交线路计划时刻表设计	149
8.1 公交线路计划时刻表设计相关问题	149
8.2 发车间隔确定方法	152
8.3 基于时间控制点的公交线路计划时刻表设计	162
第 9 章 多条公交线路协同调度	178
9.1 换乘与协同发车要求	178
9.2 多线路公交协同调度设计	182
9.3 轨道交通接驳公交协同调度	188
9.4 城乡公交线路协同发车设计	199
第 10 章 实时运行过程中调度控制策略	202
10.1 调度控制策略分类	202
10.2 中途越站调度控制	207
10.3 首站放车调度控制	221
后记	223
参考文献	225

第1章

绪论

1.1 背景及意义

随着我国城镇化进程加快,城市人口急剧膨胀,社会经济迅速发展,机动化的进程也同时明显加快。公交优先作为城市交通政策的核心,为了实现其持续实施,在不同的发展阶段应制订相应的发展目标,依据目标采取合适的策略和措施。现阶段我国城市公交处于从扩张公交线网、增加公交车辆为特征的发展阶段步入服务质量引导型的精细化公交优先发展阶段的转型期。同时,城乡一体化进程的推进对城乡综合交通体系与城乡公共交通的一体化发展提出了新的要求^[1,2]。公交运行可靠性是公交用户出行方式选择时考虑的关键服务质量因素,亦对公交运营效率具有重要意义,是实现服务引导型常规公交系统建设的重要方面^[3]。

然而,尽管优先发展公共交通已成为我国大多数城市的共识,硬件投入不断增加,车辆和场站规模增加,但收效甚微。公共交通在与小汽车的竞争中处境艰难,许多城市的小汽车出行比例加速增长,而公交出行比例增长缓慢甚至下降,公交服务质量和吸引力低是主要原因。在三个城市(泰州、滁州、宣城)的公交服务质量满意度调查中^[4~6],乘客普遍对公交运行可靠性最为关注,他们对公交不满意的原因主要集中在等车时间长、车内拥挤、不准点三个方面。对于公交企业而言,不可靠的公交运行导致运营成本增加以及车辆利用效率低,且对乘客造成的焦虑情绪以及额外的时间成本,使得乘客流失,公交竞争力和满意度下降。

在许多公交优先措施实施后,如公交专用道、信号优先等,改进的公交运行可靠性对于提高乘客满意度和增加客流量有显著效果^[7]。除了运行环境的改善外,公交运行可靠性与企业的调度控制密切相关^[8]。公交运行可靠性既是调度控制的目标,亦是调度控制的基础。尽管公交投入不断加大,公交供给与需求总量之间的矛盾得到缓解,但是在时空上仍有大量的不匹配,线路和线网的许多特性都对运行可靠性有重要影响^[9]。此外,由于公交运行系统的复杂性和随机性,实际运行会与

计划时刻表产生偏差,如何控制这种偏差亦是企业在调度控制时需要考虑的重要内容。考虑到交通需求的持续增长以及道路资源的有限性,如何在不增加额外基础设施投资的同时,对公交车辆运行系统进行调度控制,提高公交运行可靠性,是交通系统可持续发展的重要手段。

科学技术的进步及公交优先政策下政府对公交投入力度加大^[10,11],智能公共交通系统发展迅速,我国部分城市公交线路上已建成公交车辆跟踪调度系统,并安装了电子站牌、车载定位设备,实现了对车辆的实时跟踪和定位、公交车与调度中心的双向通信以及电子站牌上实时显示下班车位置信息等功能。自动车辆定位(Automatic Vehicle Location,简称 AVL)系统广泛应用于公交车辆的实时监控,数据主要用于通知乘客公交车辆的到达信息,以及相关管理部门了解公交车辆在首末站的准点率情况。而公交运行可靠性是公交车辆运行系统性能的综合反映^[12],如何分析基于运行可靠性的公交调度控制机理,利用获取的 AVL 系统数据进行公交运行可靠性分析,将其引入调度控制中的每一个环节,并进行有效整合,使得调度人员在监控到运行不可靠的负面现象(如串车、大间隔问题)发生时,可以及时采取相应的调度控制策略,在运行不可靠发生后尽快恢复可靠运行;并为政府管理部门提供监控和考核的指标体系,以及为公交线网、信号优先、专用道等的设计实施提供决策支持依据,具有重要的理论价值和实践意义。

构建快捷、可靠、方便、舒适的一体化都市公交体系,提升公共交通的吸引力,使之与城市发展相互协调,实现交通与城市、经济、生活和谐共生,是公交都市希望达到的最终目标^[13]。本书以我国现阶段公交信息化发展情况为背景,界定公交线网运行可靠性和公交线路运行可靠性的内涵,剖析基于运行可靠性分析的公交调度控制机理;利用 AVL 系统收集的公交车辆运行数据,评价分析公交运行可靠性;探索改善运行可靠性的公交优先设施设置,以及公交枢纽衔接换乘与线网协调方法;并着重构建考虑随机运行时间的公交线网设计模型、基于时间控制点的公交线路计划时刻表设计模型、多条公交线路协同调度模型、首站放车和中途越站调度控制模型,分别提出相应的求解算法。以期为公共交通的规划设计和运营管理提供理论基础和决策支持,从而为出行者提供更加可靠的高品质常规公交服务,提高公交竞争力,吸引居民公交出行。

1.2 目标及内容

本书的研究目标是结合当前 AVL 系统的前沿研究和应用现状,总结、归纳、丰富和补充基于智能公交技术的公交运行可靠性研究理论与方法,以及为公交企业通过对车辆运行系统的调度控制改善可靠性提供分析工具和关键技术。基于此,

提出以下几个研究问题:

(1) 如何从线网和线路两个层次上分别定义公交运行可靠性,使其能够更加客观地充分反映公交运行系统的特性?

(2) 如何拓展传统调度控制的范畴,引入公交运行可靠性,分析基于运行可靠性的公交调度控制机理?

(3) 如何充分利用现阶段广泛应用的 AVL 系统所获取的数据,构建公交运行可靠性评价指标体系?

(4) 如何优化基于运行可靠性的公交调度控制的关键技术模型,实现改善公交运行可靠性的目标?

围绕以上的研究问题,确定本书的主要内容如下:

(1) 基于运行可靠性的公交调度控制机理

以公交线网系统和单条线路上常规公交车辆运行系统为研究对象,界定公交线网运行可靠性和公交线路运行可靠性的内涵;根据系统学中的可靠性定义,揭示公交线路运行系统的属性,研究公交线路运行不可靠机理及其原因;分析基于运行可靠性的公交调度控制的内涵与要素、内容及各要素作用规则;探讨不可靠成因与调度控制内容间的对应关系。

① 公交运行可靠性概念界定

采用系统论的观点界定公交线网系统的内部要素及要素之间的相互关系,考虑公交线网系统的运输功能,界定公交线网运行可靠性的内涵;探讨公交线路运行系统的属性,提出公交线路运行可靠性的定义,并与服务可靠性的概念作对比分析。

② 公交线路运行不可靠原因

系统学上的稳定性或可靠性,是指在各种有意的或无意的干扰或冲击之下,系统维持其自身工作状态的能力。以各公交站点处车辆的到站时间,作为公交线路运行系统的状态变量,简要分析公交线路运行系统的不可靠原因。

③ 基于运行可靠性的公交调度控制机理

基于运行可靠性的公交调度控制为宏观调度控制的范畴,包括网络设计和线路控制两个层面,线路控制又进一步细分为计划时刻表设计时对运行不可靠的处理和运行过程中对运行不可靠的纠正两个阶段;并具体分析基于运行可靠性的公交调度控制的特征、内容及各要素作用规则。

(2) 公交运行信息采集与处理

分析各类公交运行信息,重点介绍公交运行可靠性分析所需的数据,以及自动车辆定位系统、自动乘客计数系统、自动收费系统三种公交运行信息采集技术。与传统人工调查数据相比较,总结智能公交采集数据的特性,建立各类智能技术采集

数据的清洗及处理方法,确定缺失数据补齐、错误数据判别以及冗余数据约简的方法,为公交运行可靠性分析奠定基础。

(3) 基于 AVL 系统数据的公交运行可靠性分析

介绍 AVL 系统及可获取的数据,构建公交线网运行可靠性及公交线路运行可靠性评价指标体系。AVL 系统是目前智能公交系统中公交信息采集层的核心技术,指标体系的构建既要符合评价边界分析和指标选取原则,亦要能够采用 AVL 数据进行计算,保证其可操作性。从关键站点处换乘可靠性、O-D 点对间运行时间可靠性两个方面分析公交线网运行可靠性,从运行时间、车头时距、准时分析三个方面分析公交线路运行可靠性,构建相应的评价指标体系。

(4) 公交枢纽衔接换乘与线网协调

阐述多层公交网络之间的换乘分类;提出轨道交通接运公交线网协调设计方法,包括现有地面公交线路调整、新增接运公交线路生成、接运公交线网优化等内容;分析公交枢纽衔接模式,基于公交枢纽乘客聚集原理,确定各类型公交枢纽的合理规模。

(5) 考虑随机运行时间的公交线网设计模型与算法

公交线网设计是在满足一系列约束条件的情况下,寻求一个理想的目标,以期得到一个最优的公共交通线路的网络配置和一个与之相关联的最优的发车频率方案。将公交运行可靠性理论纳入到公交线网设计过程中,引入 O-D 点对间运行时间可靠性为约束条件之一,构建考虑随机运行时间的公交线网设计的鲁棒优化模型,并基于模拟退火算法,对其进行求解。

① 考虑随机运行时间的公交线网设计的鲁棒优化模型

公交企业期望在最大限度地降低其成本的同时,提供令乘客满意且满足政府管理部门标准的公交服务。公交线网设计被构建为一个优化问题,目标是在各种约束条件(包括 O-D 点对间运行时间可靠性)的制约下,确定一组公交线路及相应的发车频率,最大限度地减少公交企业的运营成本。考虑到运行时间的随机性,目标函数借用鲁棒性模型的结构,反映公交企业对运营成本波动的风险规避。

② 基于模拟退火的求解算法

公交线网设计问题是一个 NP-hard 问题,采用启发式算法——模拟退火进行求解。构建含候选线路集、备选公交线网方案、需求分配过程、目标函数计算、候选线路集优化、最终决策等六要素的求解算法流程。其中,候选线路集的生成主要基于带有约束的 k -最短路径法,备选公交线网方案生成时引入三个乘客路径集的概念,需求分配过程则基于 Probit 的出行路径选择概率计算。

(6) 公交线路计划时刻表设计

根据客流信息,分析时段划分技术,研究公交线路发车间隔的计算方法。基于

时间控制点的公交线路计划时刻表包含公交车辆到达每一个时间控制点处的规划到达时间以及班次结束时的驾驶员休整时间。利用公交运行的实时数据,考虑随机运行时间和驾驶员恢复行为,在没有滞站策略的条件下,对公交线路计划时刻表设计的鲁棒优化模型进行研究。

① 公交线路计划时刻表设计的鲁棒优化模型

在基于时间控制点的公交线路计划时刻表指导下,驾驶员能够频繁地在两个时间控制点之间调整公交车辆运行速度,尽可能地“追赶”公交线路上选取的部分时间控制点处的规划到达时间,即公交运行过程中存在恢复行为。考虑这种恢复行为和随机运行时间,以所有时间控制点处的时刻表偏差的总惩罚成本(包括均值项和平均绝对偏差项)最小为目标函数,以各区段上的松弛时间的总和不大干由配备的公交车辆数、规划车头时距和规划半循环时间所决定的总松弛时间的最大值为约束条件,构建公交线路计划时刻表设计的鲁棒优化模型。

② 基于蒙特卡罗的优化模型求解算法

采用蒙特卡罗法生成模型中的各随机变量的一组样本,并将含平均绝对偏差的公交线路计划时刻表设计的鲁棒优化模型转化为混合整数线性规划问题,这样就可以通过任一优化问题求解软件,如 Lingo、CPLEX 进行编程求解。

(7) 多条公交线路协同调度

多条公交线路换乘衔接的顺畅直接影响乘客出行的便捷性。不同换乘分类有相应的协同发车要求与设计准则。同步换乘系统能实现所有相交线路的车辆同时到达换乘中心,方便各方向乘客换乘的目的。基于换乘与协同发车要求和调度设计准则,构建面向换乘枢纽的轨道交通接驳公交的计划调度协同模型和考虑运行可靠性的接运公交调度优化模型;在片区多线路协同时刻表设计准则的基础上,提出城乡公交片区线路协同时刻表编制方法。

(8) 实时运行过程中调度控制策略

分站点间控制、站点处控制和其他三类,介绍各种调度控制策略。重点研究中途越站和首站放车调度控制模型与算法。中途越站和首站放车调度控制为基于单条公交线路的实时调度控制策略。各种影响因素导致公交运行不可靠,偏离规划的计划时刻表,如大间隔、串车等现象,作为常用的控制策略,中途越站和首站放车调度控制在这种情况下是非常有用的,即均匀车头时距,尽量使得各站点处车头时距与计划车头时距一致。

① 中途越站调度控制

基于每隔一辆车实施一次越站调度的原则,分析问题同时考虑三辆公交车的运行,以乘客等待时间、出行(车内)时间及线路总运行时间的加权和为目标函数,以避免超车、首站/末站处禁止越站、中途越站调度控制下的车辆运行过程为约

束条件,构建越站调度控制策略为非线性 0-1 规划问题。若站点间行驶时间为常量,直接采用遗传算法进行求解;当站点间行驶时间服从随机分布时,设计基于蒙特卡罗的遗传算法进行求解。

② 首站放车调度控制

首站放车调度控制需要确定从首站开始,应当连续越过几站,讨论对一辆车实施放车调度,以乘客等待时间、出行(车内)时间及线路总运行时间的加权和为目标函数,以避免超车、末站处禁止越站、首站放车调度控制下的车辆运行过程为约束条件,构建首站放车调度控制策略为非线性 0-1 规划问题。采用基于蒙特卡罗过程的枚举算法进行求解。

1.3 本书总体架构

本书综合交通运输工程、系统论、控制论、概率统计等多学科的知识,以数学建模、蒙特卡罗随机模拟、启发式算法为主要手段,对公交运行可靠性及公交调度控制进行研究。其中,改善运行可靠性的公交设施设置、公交枢纽衔接换乘与线网协调、考虑随机运行时间的公交线网设计模型及其算法为设施设置与网络设计部分;公交线路计划时刻表设计、多条公交线路协同调度、实时运行过程中调度控制策略为单/多线路控制部分。

本书共分为 10 个章节,各章内容如下:

第 1 章绪论。阐述公交运行可靠性与调度控制研究的目的意义和必要性,以及本书的主要研究内容。

第 2 章公交运行可靠性与调度控制研究进展。综述国内外既有的研究成果。

第 3 章基于运行可靠性的公交调度控制机理。界定公交运行可靠性的概念,提出基于运行可靠性的公交调度控制的内容、要素、特征和作用规则,介绍公交运行不可靠成因与各调度控制策略之间的对应关系。

第 4 章公交运行信息采集与分析。明确公交运行可靠性分析所需数据,以及信息采集技术,总结智能公交采集数据的特性,提出数据的清洗及处理方法。

第 5 章基于 AVL 系统数据的公交运行可靠性评价分析。构建公交线网运行可靠性与公交线路运行可靠性评价指标体系,明确各指标的计算和测度方法。

第 6 章公交线网协调与枢纽衔接。研究轨道交通接运公交线网协调设计方法,在公交枢纽衔接模式分析和乘客聚集原理的基础上,提出各类型公交枢纽合理规模的计算方法。

第 7 章考虑随机运行时间的公交线网设计模型及其算法。以运行时间可靠性为约束条件之一,构建考虑随机运行时间的公交线网设计问题为鲁棒优化模型,提

出基于模拟退火的求解算法。

第8章公交线路计划时刻表设计。分析发车间隔确定方法,提出基于时间控制点的公交线路计划时刻表设计模型与算法。

第9章多条公交线路协同调度。明确多线路协同调度的准则,构建面向换乘枢纽的轨道交通接驳公交的计划调度模型和考虑运行可靠性的接运公交调度优化模型,提出城乡公交片区线路协同时刻表编制方法。

第10章实时运行过程中调度控制策略。总结各类实时调度控制策略,重点研究中途越站和首站放车调度控制的0-1规划模型,分别提出对应的求解算法。

第 2 章

公交运行可靠性与调度控制研究进展

2.1 公交运行可靠性分析

2.1.1 国外研究进展

关于公交服务可靠性的内涵,相关研究集中于从乘客和公交企业的角度出发的公交服务可靠性,更多地体现乘客是顾客的企业经营理念。研究者通常把它同公交系统的不同方面联系起来,并采用不同的评价指标进行分析。

国外关于公交可靠性的研究始于 20 世纪 70 年代。由于此时人工采集数据的方式成本较高,研究者缺乏充足的数据进行分析,多是采用基本的样本统计值作为可靠性的量化指标进行评价。智能公交系统(AVL、APC 技术)的发展和应用实践为公交服务可靠性的研究提供了大量数据支撑,而相关研究又促使了各项技术的改善和广泛应用。

Sterman 和 Schofer(1976)^[14]分析了可靠性的影响因素,提出以点到点的途中时间的标准差的倒数作为公交服务可靠性指标,并利用墨西哥区域的数据进行了测试。Turnquist(1978)^[15]假设站点处公交车辆到达服从 Lognormal 分布,研究了发车频率和可靠性对于乘客随机到达和非随机到达情况下的期望等待时间的影响。Polus(1978)^[16]将可靠性定义为每天运营性能指标的一致性程度,且它和运行时间的标准差成反比。Silcock(1981)^[17]提出了迟到的公交车辆数、准点发车的公交车辆百分比、平均等待时间、额外等待时间、实际和计算等待时间之差等公交服务可靠性指标。Abkowitz 等^[18~20]撰写了关于公交服务可靠性的综述报告,对其定义、评价指标、不可靠的原因及影响、应对策略做了总结,并建议采用智能公交技术改善公交服务可靠性^[21~28]。

Turner 和 White(1990)^[29]提出了一个含发车间隔方差变量的公式计算额外等待时间,用作可靠性指标:

$$EWT = \frac{T}{2} \left(\frac{1}{N} - \frac{1}{S} \right) + \frac{N \cdot VarH}{2T} \quad (2-1)$$

式中: EWT——额外等待时间;

T——可靠性调查的持续时间;

N——在可靠性调查中观察到的公交车辆数;

S——可靠性调查中计划车辆数;

VarH——观察到的发车间隔方差。

Henderson 等(1991)^[30]采用按时到达车辆数的比除以不按时到达车辆数的比,即特殊准点率作为可靠性指标,以反映乘客对准点率的高度敏感性。Levinson (1991)^[31]认为可靠的服务意味着保持公交车辆准点、维持平稳的车头时距、最小化最大载客量的方差。Strathman 和 Hopper(1993)^[32]基于实测数据对波特兰 TriMet 公司公交车辆的准点率进行了定量分析。Nakanishi(1997)^[33]基于各站点处的时刻表评价准点率和准点可靠性,详细介绍了抽样原则和调研方案,并给出了在实际运营中,出现不同情况(如“串车”、“车辆故障”)的数据处理方法。该方法优于传统的基于首末站的可靠性评价,局限性在于不适用于发车间隔较小或者没有各站发车时刻表的线路。Strathman 等(1999)^[34]提出发车间隔(HR,实际间隔与计划间隔的比值)、运行时间率(RTR,实际运行时间与计划运行时间的比值)、变异系数和平均候车时间作为评价公交服务可靠性的指标,并在 TriMet 公司的 8 条公交线路进行了应用,分析了四个指标之间的相互关系。Tahmasseby(2009)^[35]在研究公交乘客出行行为时发现,频繁使用公交的人一般都对候车时间长短、到达目的地的时间有一定的期望。他们通常基于对行程时间的变动估计和个人风险偏好规划行程,选择出行方式、线路和出发时间。当车辆比乘客的经验时刻提前、推迟到达或者到达时刻波动范围较大时,乘客的出行计划会被打乱,带来不便。因此服务可靠性是服务质量属性中最重要的。而评价可靠性以及改善策略对可靠性影响的一个难题在于乘客和运营商感知的可靠性存在不同,出行者倾向于关注车头时距平稳性、准点到达目的地、等待时间;而运营商更关注时刻表遵守率。

Yin 等(2002, 2004)^[36,37]利用蒙特卡罗随机模拟方法,考虑乘客路径选择行为,结合随机用户均衡分配模型,分析了三种可靠性指标:出行时间可靠性、时刻表可靠性、等待时间可靠性。并结合一个小型网络,提出可能提高可靠性的四个措施(增加停站时间、采用大型车辆、降低单位乘客上/下车时间、加快并行线路的周转),分析在可靠性定义参数不同的情况下,分别采用四项措施时可靠性的变化规律。结果表明,各可靠性指标之间并没有必然的联系,提高某一项可靠性指标不一定同时改善其他可靠性指标。美国公共交通通行能力与服务质量手册(TCQSM)(2003)^[38]认为公交服务可靠性主要是关于乘客究竟能否在预定的时间到达目的

地,还是乘客必须预留额外的时间来应对频繁出现的无规律服务,并给出了公共交通可靠性的评价方法及准点率的六个评价等级,该评价方法和评价标准被广泛应用在美国各公交企业的可靠性评价过程当中。Camus 等(2005)^[39]指出,TCQSM 给出的评价方法存在两个问题:①无法反映出公交车辆晚点的具体程度;②没有反映公交车辆提前离站的情况。针对这两个问题,研究提出了“加权延误指标”,综合反映车辆晚到、早离开对乘客的影响。Junsik 等(2006)^[40]以公交车辆的车头时距平稳性作为可靠性评价指标,分析了首尔的公交站点处的乘客舒适性。TCQSM 方法显示首尔公交运行的服务水平较差,而这与乘客期望的等待时间不相一致。为克服这个缺点,提出采用发车间隔(车头时距)的变化率的分布(近似为正态分布),通过计算变化率的平均值和标准差对 TCQSM 方法进行了修正。Liu 和 Sinha(2007)^[41]提出了以乘客出行时间的变动性作为可靠性指标。Sorratini 等(2008)^[42]利用动态的微观仿真模型研究了各种用于评价可靠性的指标,包括车头时距、过多的候车时间以及公交网络的休整时间等。Furth 和 Muller(2006)^[43]、Oort(2010)^[44]等的研究认为,等待时间可靠性更能够直接反映服务可靠性对乘客对于公交服务质量感知的影响。

AVL 以及 APC(自动乘客计数器, Automatic Passenger Counter)等新技术的出现方便了公交系统数据的采集。Lee 等(2001)^[45]研究了 AVL 系统对排班遵守率、运营者行为以及保持遵守时刻表意愿的影响。Bertini 和 El-Geneidy(2003)^[46]认为,大量的 AVL/APC 数据为计算和利用原有的不可行的性能指标帮助运营者改善服务质量和可靠性提供了机遇。Hammerle 等(2005)^[47]利用墨西哥公交管理机构的 AVL/APC 数据,分析了车头时距分布情况,并对串车发生的地点和原因进行了诊断。Mazloumi 等(2008)^[48]基于 AVL 系统的运行时间数据库,应用各种运行时间波动特征和运行时间可靠性指标,探讨了公交企业的偏好指标,发现这些指标没有很显著的区别。Mandelzys 等(2010)^[49]基于 AVL 和 APC 采集数据,设置了公交车辆晚到或者早离开的阈值,将原因归结为三类,应用统计学提出一种用于识别不满足排班遵守率标准的公交站点以及原因的方法。El-Geneidy 等(2011)^[50]采用 AVL 数据,构建了一系列统计分析模型,研究各种线路特性如长度、站点数、上下客情况等对运行时间和时刻表遵守率的影响。Cortés 等(2011)^[51]提出一种采用 GPS 数据监控公交车辆平均运行速度的方法。

关于公交服务不可靠的原因有多种(Sterman 等,1976; Abkowitz, 1978; Bowman 等,1981; Strathman 等,1993; Strathman 等,2003)^[14,18,52,32,53],主要有线路特性(线路长度、信号交叉口数、路上停车的程度、站距等),运行条件(交通量、服务频率、乘客活动),司机(离开延误、驾驶行为)。TCQSM(2003)^[38]系统总结了影响可靠性的因素,包括交通条件、道路建设和施工养护、车辆和维护质量、车辆和驾