

哲学社会科学学术专著文库
中南大学

公共交通运营可靠性分析 理论及其应用

黎茂盛 著

中国社会科学出版社

公共交通运营可靠性分析 理论及其应用

曹建刚 著

中国铁道出版社

中南大学
哲学社会科学学术专著文库

公共交通运营可靠性分析 理论及其应用

黎茂盛 著

中国社会科学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

公共交通运营可靠性分析理论及其应用/黎茂盛著.

—北京: 中国社会科学出版社, 2018. 5

(中南大学哲学社会科学学术专著文库)

ISBN 978-7-5203-2527-1

I. ①公… II. ①黎… III. ①公共交通系统—
可靠性估计—研究 IV. ①U491.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 088566 号

出版人 赵剑英
责任编辑 郭晓鸿
特约编辑 席建海
责任校对 韩海超
责任印制 戴 宽

出 版 中国社会科学出版社
社 址 北京鼓楼西大街甲 158 号
邮 编 100720
网 址 <http://www.csspw.cn>
发 行 部 010-84083685
门 市 部 010-84029450
经 销 新华书店及其他书店

印 刷 北京明恒达印务有限公司
装 订 廊坊市广阳区广增装订厂
版 次 2018 年 5 月第 1 版
印 次 2018 年 5 月第 1 次印刷

开 本 710 × 1000 1/16
印 张 17.5
插 页 2
字 数 206 千字
定 价 76.00 元

凡购买中国社会科学出版社图书, 如有质量问题请与本社营销中心联系调换

电话: 010-84083683

版权所有 侵权必究

中南大学“双一流”建设文科战略先导专项经费资助

国家社科基金一般项目“公共交通工具路径旅行时间理论分布
及运营可靠性研究（14BJT017）”

《中南大学哲学社会科学学术成果文库》和《中南大学 哲学社会科学博士论文精品丛书》出版说明

在新世纪，中南大学哲学社会科学坚持“基础为本，应用为先，重视交叉，突出特色”的精优发展理念，涌现了一批又一批优秀学术成果和优秀人才。为进一步促进学校哲学社会科学一流学科的建设，充分发挥哲学社会科学优秀学术成果和优秀人才的示范带动作用，校哲学社会科学繁荣发展领导小组决定自2017年开始，设立《中南大学哲学社会科学学术成果文库》和《中南大学哲学社会科学博士论文精品丛书》，每年评审一次。入选成果经个人申报、二级学院推荐、校学术委员会同行专家严格评审，一定程度上体现了当前学校哲学社会科学学者的学术能力和学术水平。“散是满天星，聚是一团火”，统一组织出版的目的在于进一步提升中南大学哲学社会科学的学术影响及学术声誉。

中南大学科学研究部

2017年9月

前 言

当今“互联网+交通”时代，各种类型的交通数据层出不穷，如何充分挖掘这些数据所隐含的交通行为或车辆运行规律，并充分利用这些规律提高交通运营安全和效率成为这个时代的一个科学问题。

无论是城市道路交通网络，还是城市轨道交通网络，都是由道路路段或是区间线路连接而成，因此，充分理解和把握多因素影响下的车辆区间旅行时间理论分布规律，是助推数据驱动下的交通运营管理的基础。

通常，列车区间旅行时间分布被认为服从某种数学概率分布，这样同一轨道交通线路、不同区间上的列车旅行时间分布就需要使用参数不同或类型不同的数学概率分布进行拟合。也有部分学者进一步提出，考虑到列车区间最大旅行速度限制，还应该截去小于列车区间最小旅行时间区段；这样，列车区间旅行时间分布服从经济学上受限因变量模型中的截取模型。这些做法将导致两方面的问题：一方面，尽管同一线路上城市轨道交通外部环境、牵引动力、控制方式基本一致，但是却无法正确解释导致以下现象的原因，即同一轨道交通线路、不同区间上的城市轨道交通列车旅行时间分布不具有共性。另一



方面,如果受限因变量模型中的截取模型是合理的,那就意味着某些车辆在路段运行过程中消失了,显然这违背物理学最基本的运动规律:进入路段的车辆总会以某种速度驶出该路段,无论车辆是主动驶离还是被动拖离,不然就会阻塞该路段。

项目研究从车辆区间旅行时间等于区间长度除以列车的区间平均旅行速度这一基本概念出发,展现了车辆区间旅行时间与受限因变量模型具有相同表达形式的现象,结合“进入路段的车辆总会以某种速度驶出该路段,不然就会阻塞该路段”的物理运动规律,定义了一类更具一般性的受限因变量模型——具有迁移性质的受限因变量模型。该模型认为:小于某一定值的旅行时间观测值均迁移到了其他区间,迁入可能性大小与该区间中已有旅行时间观测值出现的可能大小成正比。项目基于城市轨道交通车辆的压轨电路所记录的计划偏离报告数据,验证发现:具有迁移性质的受限因变量模型优于一般的数学分布模型、受限因变量模型中的截取模型和审查模型,且能解释以下规律,即因同一线路上城市轨道交通外部环境、牵引动力、控制方式基本一致,同一轨道交通线路、不同区间上的城市轨道交通列车旅行时间分布具有一致性的基本规律。

相比于城市轨道交通列车区间旅行时间分布只需要考虑列车驾驶行为的差异性、区间限速因素外,城市道路车辆路段旅行时间分布规律研究还需考虑交叉口信号灯、路段入流率、交通流量、行人和非机动车等因素的影响。考虑到可以通过工程措施隔离行人和非机动车的影响,本项目着重研究驾驶员驾驶行为差异性、路段限速、交叉口信号灯、路段入流率、交通流量因素对城市道路车辆路段旅行时间理论分布规律的影响。

驾驶行为的差异性被认为是影响车辆路段旅行时间的内部因素,

它对应着同一个人在没有其他因素影响下,同一路段重复驾驶多次所呈现的旅行时间分布情况,或者是多个人驾驶同种型号的车辆驶过这一路段后所呈现的旅行时间分布。这种分布展示了没有其他因素影响下,车辆路段旅行时间固有的波动性,研究发现这种波动性用对数正态分布或正态分布展现最为合适。

路段限速、交叉口信号灯、路段入流率、交通流量被认为是车辆行驶的外部环境因素,它们对车辆路段旅行时间分布的影响方式各不相同。路段限速会使得绝大多数理性驾驶者的路段旅行速度小于路段限速,只有极个别驾驶者的路段速度会超过限速速度,这其中就会出现一个最大的路段旅行速度,对应着路段最小旅行时间,小于最小旅行时间的路段旅行时间值将不会被观测到。没有限速路段上的车辆旅行时间分布呈现正态分布特征,加上限速因素之后,车辆路段旅行时间分布呈现对数正态分布特征且小于最小旅行时间的路段旅行时间值将不会被观测到,这正是具有迁移特征受限因变量模型的基本特征。项目提出的具有迁移特征受限因变量模型分析方法,能够从这一统一的视角来研究城市轨道交通列车区间旅行时间分布和城市道路路段车辆旅行时间分布规律。

在此基础上,再引入交叉口信号灯和交通流量对车辆路段旅行时间分布的影响分析。当路段交通流量很少时,比如只有一辆车在路段上行驶。若车辆在绿灯期到达交叉口前停车线时,车辆越过交叉口前停车线的可能性不受任何影响,车辆可以直接通过交叉口。若车辆在红灯期到达交叉口前停车线时,车辆通过交叉口的可能性就被延迟到下一绿灯期的前部。通过这种迁移规则,可以得到交叉口信号灯因素对车辆路段旅行时间分布的影响。当路段交通流量增加时,这时车辆到达交叉口前停车线,车辆通过交叉口的可能性就可能被延迟若干个



信号周期, 延迟时间长短, 取决于交叉口停车线前排队车辆的长度, 只有当这些排队车辆都被清空之后, 该车辆才能驶过该交叉口。通过递推关系, 能得到车辆被延迟了多少个信号周期, 并把交叉口信号灯和交通流量因素影响下的车辆路段旅行时间分布公式表达出来。项目最后通过离散化研究时段的方法, 处理了路段入流率对车辆路段旅行时间分布的影响。研究发现: 在驾驶行为差异性、路段限速、交叉口信号灯、路段入流率、交通流量因素综合作用下, 车辆路段旅行时间分布服从混合分布, 其是理想条件下经平移转换后的数学概率分布的权重和。项目通过城市道路卡口过往车辆数据, 使用 Kolmogorov—Smirnov 检验发现: 项目研究所得的混合分布能很好拟合实际数据分布, 并能适应路段交通流量高峰、平峰和低峰期的不同情况, 混合分布还揭示了车辆路段旅行时间分布在不同的交叉口信号参数下, 将呈现不同的数学概率分布类型。这一研究成果成功地解释了国内外不同学者对车辆路段旅行时间分布有不同观测和研究结论的现象, 统一了大家的认识。

项目朝着解析车辆区间旅行时间分布、助推数据驱动下的交通运营管理方向, 进一步得到了城市地铁列车易晚点区间识别方法、城市常规公交车辆站点集束可能性大小计算方法, 这些方法能很好地揭示城市公共交通运营的可靠性。同时通过这些可靠性指标, 我们能够诊断城市公共交通运营管理中存在的问题, 进而从城市交通规划、交通建设、交通运营、交通信息和交通管理等多个方面采取综合措施, 提高城市公共交通运营的安全性、舒适性和效率。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究内容	6
1.2 基本观点	6
1.3 研究思路	10
1.4 研究方法	14
1.5 创新之处	14
1.6 全书结构	15
第2章 列车区间旅行时间理论分布	17
2.1 受限因变量模型	23
2.2 TIJT 分布的迁移特征	27
2.3 数据说明	33
2.4 参数标定	37
2.5 结论	46



第3章 城市地铁列车易晚点区间识别方法	47
3.1 追踪列车组(束)的可靠度	49
3.2 晚点高发区间的辨识	54
3.3 结论	58
第4章 高铁列车图定区间旅行时间适宜性分析	60
4.1 衡量标准	64
4.2 数据说明	66
4.3 旅行时间分布拟合函数	68
4.4 图定区间旅行时间适宜性	74
4.5 结论	82
第5章 车辆路段旅行时间理论分布	83
5.1 基本定义和符号说明	89
5.2 旅行时间波动成因分析	93
5.3 路段旅行时间理论分布的受限因变量模型	95
5.4 路段旅行时间分布规律分析	98
5.5 实例分析	123
5.6 结论	141
第6章 交叉口信号参数优化方法	143
6.1 路段旅行时间理论分布	147
6.2 几个旅行时间测度	151
6.3 交叉口信号参数优化方法	152
6.4 结论	169

第 7 章 信号交叉口控制时段划分	170
7.1 多因素间关系	175
7.2 控制时段划分	178
7.3 旅行时间计算	180
7.4 划分实例分析	181
7.5 结论	191
第 8 章 公交车到站时间分布规律理论分析	193
8.1 基本概念	195
8.2 公交车到站时间分布规律	196
8.3 几点说明	214
8.4 结论	214
第 9 章 公交站点附近道路实际通行能力分析	216
9.1 多辆公交车站相遇事件的概率计算	219
9.2 公交车到站时间期望概率密度计算	231
9.3 公交车停站对道路通行能力的影响分析	234
9.4 实例分析	235
9.5 结论	243
第 10 章 结论	244
参考文献	247

第1章 绪论

城市公共交通是广大民众出行的重要方式，随着城市交通拥堵、环境污染日趋严重，优先发展公交、倡导公交出行成为我国城市交通的发展战略。为了贯彻落实党中央、国务院的指示精神，交通运输部制定的《城市公共交通“十二五”发展规划纲要》（2010年7月）和《城市公共交通“十三五”发展纲要》（2016年7月20日印发），强调指出：城市公共交通是满足人民群众基本出行需求的社会公益性事业，与人民群众生产生活息息相关，是政府应当提供的基本公共服务和重大民生工程。

在现代大都市中，城市轨道交通与常规公交有机配合，构成以轨道交通为骨干的多式公交系统。城市轨道交通由于其超强输送能力、节能、环保、低碳等特点，在世界各国大中城市的公交体系中占有越来越重要的地位。常规公交线路由于设置灵活、投资少、覆盖面大，是城市公交的主导方式。

对城市公共交通线路及站场进行好的规划，以及城市公共交通的可靠营运，是保持城市常规公交与城市轨道交通良好协同性的基础。一旦城市公共交通营运方案定下来以后，影响城市公共交通按计划营



运的关键因素就是波动的外部运行环境。波动的外部环境对城市常规公交系统来说,最重要的方面就是道路交通系统中公交车辆的路段旅行时间波动,这种波动性将动摇甚至破坏城市常规公交系统营运的计划性,使得公交汽车偏离计划的运行时刻表,诱发公交车辆运行不准时,引发公交系统运行可靠性下降,从而使城市常规公交系统的服务质量劣化。同样,波动的供电电力、通信、驾驶员驾驶行为和变化的客流需求等因素,也会导致城市轨道交通列车区间旅行时间波动,列车晚点对单线、高频率开行的城市轨道交通线营运影响不太大,但是对于成网共线营运的城市轨道交通网络来说,甚至能瘫痪这些网络的正常营运。若这些不利情况频繁发生,将导致城市公共交通吸引力下降,城市公共交通客源量减少,城市公共交通运营企业盈利能力下降;最终将使得地方政府为城市公共交通系统的建设、运营和维护背负沉重的财政负担。

研究城市公共交通路径旅行时间分布规律,是规划好的城市公共交通线路和站场系统,以及编制可靠城市公共交通运营计划的基础。因而,发展城市公共交通,必须首先研究好城市常规公交车辆、城市轨道交通、城际列车以及高速铁路列车路径旅行时间理论分布这一基础理论问题,然后才能定量研究城市公共交通系统可靠性,检验这一人造系统的运行效率,保证城市公共交通通道安全、顺畅、高效和便捷地为城市(或城市群)社会、经济发展服务。

不同学者对最适合的旅行时间分布规律,有不同的研究结论,如 Talley 和 Becker (1987)^① 认为最适合的分布是负指数分布,Turn-

^① Talley, W. K., Becker, A. J., "On-time performance and the exponential probability distribution", *Transportation Research Record*, 1987, pp. 22-26.

quist^①, Mohammadi^②, Strathman 和 Hopper^③, Hollander 和 Liu^④, Nobuhiro, Fumitaka, Hiroshi 和 Yasunori^⑤ 认为是对数正态分布, May 等^⑥认为是正态分布, Guehthner 和 Hamat^⑦ 认为是伽马分布。其他研究主要集中在行程时间预测方法上,如 Amer^⑧ 利用 AVL 和 APC 等智能设施设备收集动态数据,建立基于动态数据的公交车运行时间模型,并运用 Kalman 滤波方法求解模型。文章将公交车运行时间划分为两个部分,第一部分时间为前 n 个路段的路段运行时间;第二部分时间为前 n 个站停留时间,到达公交车站的时间为两部分时间之和。模型没有考虑交叉口的影响。Daganzo 等^⑨利用实时的交通信息,掌握公交旅行时间,提出了一种公交车运行的自适应控制方案,来减少公交车的汇聚。Lampkin 等^⑩构建了基于舒适度与出行时间两个指标的

① Turnquist, M. A., "A model for investigating the effects of service frequency and reliability on bus passenger waiting times", *Transportation Research Record*, 1978, pp. 70 - 73.

② Mohammadi, R., "Journey time variability in the london area - 1 Journey time distribution", *Traffic Engineering and Control*, 1997, 5, pp. 250 - 256.

③ Strathman, J. G., Hopper, J. R., "Empirical analysis of bus transit on - time performance", *Transportation Research part A*, 1993, 27, pp. 93 - 100.

④ Yaron, H., Ronghui, L., "Estimation of the distribution of travel times by repeated simulation", *Transportation research Part C*, 2008, 16, pp. 212 - 231.

⑤ Nobuhiro, U., Fumitaka, K., Hiroshi, T., and Yasunori, I., "Using bus probe data for analysis of travel time variability", *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2009, 1, pp. 2 - 15.

⑥ May, A. D., Bonsall, P. W., Marler, N. W., *Travel Time Variability of a Group of Car Commuters in North London*, University of Leeds, 1989.

⑦ Guehthner, R. P., Hamat, K., "Distribution of bus transit on - time performance", *Transportation Research Record*, 1985, pp. 1 - 8.

⑧ Amer, S., Ali, F., *Bus Travel Time Prediction Model for Dynamic Operations Control and Passenger Information Systems*, TRB 82nd Annual Meeting. Washington D. C., 2003, pp. 1 - 16.

⑨ Daganzo, C. F., Pilachowski, J., "Reducing bunching with bus - to - bus cooperation", *Transportation Research Part B*, 2011, 1, pp. 267 - 277.

⑩ Lampkin, W., Saalmans, P. D., "The design of routes, service frequencies, and schedules for a municipal bus undertaking: A case study", *Journal of the Operational Research Society*, 1967, 4, pp. 375 - 397.



网络设计模型,开发了公交规划网络程序包。Hirsch 等^①设计了固定费用与固定需求的公交线网优化模型,并提出了求解该问题的分支定界分解算法。Christoph^②在已知两点之间的最短距离和最短路径条件下,探讨运用等待时间来考察和评价公交路网的合理性,运用启发式算法求解,优化了基于出行成本最低的公交网络系统。

Fosgerau 和 Fukudap^③利用车牌识别数据,详细研究了城市道路上车辆路段旅行时间的分布,他们认为经过正规化后的车辆路段旅行时间数据符合稳定分布(Stable distribution),且可以粗略地认为分布与数据在一天中所取得的时间段无关。他们的探索属于典型的拟合式经验型研究方法,完全不能揭示道路交通系统中的内在因素,如交叉口信号灯、路段交通流量等因素对车辆路段旅行时间分布的影响,并给出在多因素影响下的车辆路段旅行时间理论分布。

国内,于滨等人^④构建了支持向量机模型预测公交车运行时间,并将其运用到大连 23 号线进行实例验证。结果证明,该模型比自回归移动平均模型、人工神经网络模型预测结果更优。陈已康等^⑤运用 GPS 定位系统数据,发布公交车的到站时间,将公交车到站时间精确到 2 分钟内,准确率达 80% 以上。

① Hirsch, Warren M., Dantzig, G. B., "The fixed charge problem", *Naval Research Logistics Quarterly*, 1970, 2, pp. 217 - 235.

② Christoph, E., Mandl., "Evaluation and optimization of urban public transportation networks", *European Journal of Operational Research*, 1980, 6, pp. 396 - 404.

③ Fosgerau, M., Fukuda, D., "Valuing travel time variability: Characteristics of the travel time distribution on an urban road", *Transportation Research Part C*, 2012, 24, pp. 83 - 101.

④ 于滨、杨忠振、林剑艺:《应用支持向量机预测公交车运行时间》,《系统工程理论与实践》2007 年第 4 期,第 160—164 页。

⑤ 陈已康、詹成初、陈良贵:《基于路段行程时间的公交到站预测方法》,《计算机工程》2007 年第 21 期,第 281—282 页。