

基于蒙特卡罗模拟法的快速公交行程时间可靠性研究

王鹏, 周骞

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410004)

摘要: 快速公交行程时间可靠性是体现快速公交吸引力的重要指标。文中分析了快速公交网络的特性, 以一种理想快速公交网络为研究对象, 以快速公交运行中具有专用道和交通信号灯优先通行权等为前提, 只考虑在中途停靠站点的延误作为行车延误, 建立了快速公交网络行程时间可靠性计算模型, 采用基于蒙特卡罗仿真的定量计算方法, 并用实例进行仿真, 结果显示行程时间可靠性可较好地评估快速公交网络性能。

关键词: 城市交通; 快速公交; 行程时间可靠性; 蒙特卡罗模拟法

中图分类号: U491.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)03-0015-04

快速公交集成了城市公共交通中轨道交通的快速性与常规公交的灵活性, 是解决目前大城市交通拥堵的有效方式。合理有序运行的快速公交网络有助于其充分发挥优势。行程时间可靠性是体现快速公交吸引力的重要指标, 能直观地反映快速公交网络的性能, 不仅能为乘客出行提供建议, 也可为交通设计者提供参考。

目前关于行程时间可靠性的研究主要集中于常规公交。何娇娇等依据概率型和方差型行程时间可靠性计算方法, 建立了出行者在考虑最佳出发时间情形下的效用最大化函数; 孙兆祖从无事故状态和随机事故影响两个角度对路径行程时间进行建模计算, 建立了路径行程时间可靠性评价指标体系; 张雄飞等从分析行程时间可靠性角度提出了常规公交线路、路径及系统行程时间可靠性的定量计算方法, 并建立了蒙特卡罗仿真计算方法; Beaud Mickael 等给出了乘客交通方式选择的微观经济模型, 从出行者角度讨论了节省出行时间和提高路网可靠性的关系。由于快速公交线网密度小或建设里程短, 目前对于快速公交可靠性的研究较缺乏。随着大城市快速公交网的建设, 快速公交线路增多, 开展快速公交线网可靠性研究十分必要。常规公交行程时间可靠性研究中假设路段行程时间服从相互独立的正态分布, 公交路径的行程时间也服从正态分布, 但实际中快速公交在网络中行驶的路径经过的各条路段间会有一定相关性, 其分布特性会随之改变, 行程时间的改变将影响乘客出行路径选择, 路段流量变动会影

响行程时间可靠性。因此, 该文以连续随机变量的路段通行能力为基础定义快速公交网络行程时间可靠性, 采用蒙特卡罗模拟法进行仿真分析。

1 问题描述

1.1 问题提出

行程时间可靠性可定义为在一定服务水平下, 在规定时间内出行者完成出行的概率。根据快速公交网络的特性, 可将快速公交行程时间可靠性定义为在一定交通需求下, 快速公交车辆在快速公交专用道上运营的过程中, 从起点到终点或从中间节点 i 到节点 j 的运行时间满足公交时刻表或设定阈值的概率, 是衡量快速公交线网服务水平的重要指标。对乘客而言, 他们更关心自己的实际出行时间和出行目的是否能顺利达成, 故从乘客角度对行程时间可靠性进行分析能直观体现整个快速公交网络的实际性能。

1.2 快速公交网络特性分析

快速公交网络系统是改进的公交车在专用道上运行而形成的城市公共交通网络, 其以快速准时、安全舒适等优点吸引更多乘客选择公共交通出行, 从而缓解城市交通压力, 并促进沿线经济发展。有别于常规公交, 城市快速公交网络具有以下特性:

(1) 快速公交在城市道路网络中拥有专用车道, 包括道路中央专用道、高架专用道、全封闭公交专用地道等形式。

(2) 快速公交在专用车道上行驶, 不受道路上

其他车流影响,上下行车辆独立运行无影响。

(3) 快速公交在行驶过程中拥有信号灯优先通过权,因交通信号等产生的延误对于快速公交可忽略,其行程时间延误主要由中途停靠站加减速及上下乘客所产生。

(4) 在同一网络内,快速公交运营车辆通常采用相同或相似的车型。为方便研究,假定每条快速公交线路运营车辆的车型、额定载客量一致,发车间隔也相同。

1.3 快速公交网络构建

快速公交网络是研究快速公交行程时间可靠性的基础。在公交网络研究中,需考虑实际的公交线路和停靠站点等因素,可用图论的方法定义快速公交网络。按照数学理论,图是有限非空节点集合与节点无序偶集合,分别可称为“节点”和“边”,即图可定义为“节点”和“节点对”所组成的“边”的集合。

基于以下假设建立快速公交网络理想模型:1) 不同路段相互之间的交通流互不影响,仅受本条路段上同向公交车的影响;2) 为使快速公交专用道提供的绿灯信号能被充分利用,忽略交通信号延误,同时保证车辆在专用道上通过交叉口前消除排队情况;3) 单位时间内同一快速公交线路发车频率固定,且同一线路上所有车辆的车型、运载能力等运营特征相同;4) 网络中路径总上下行交通流量守恒。

根据上述假设建立的快速公交网络理想模型见图1。节点表示模拟网络中的道路网络节点,路段表示实际道路网络中的路段,分别对应图论中的“节点”和“边”。快速公交网络中的停靠站点是供乘客上、下车和换乘的地方,在每条路段中根据需要设置。网络中共包含 $d_1, d_2, d_3, \dots, d_{11}$ 11个节点,

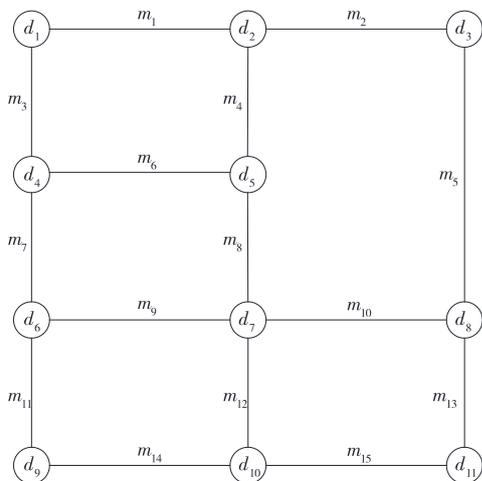


图1 快速公交网络理想模型

$m_1, m_2, m_3, \dots, m_{15}$ 15条路段,快速公交线路在网络中经过某些路段布设。计算过程中可先得到网络中各条路段的行程时间可靠性,再根据模型及路网中某条路段是否在快速公交行驶路径中得到快速公交行驶路径的可靠性,即快速公交行程时间可靠性。

2 快速公交行程时间可靠性分析模型

根据定义,某条路段 m 上行程时间可靠性可用下式表示:

$$P(T \leq t_{\Delta}) \geq \delta \quad (1)$$

$$T = t_m + t_{\text{delay}}^m \quad (2)$$

式中: T 为从起点到终点的实际行程时间; t_{Δ} 为基于可靠性的规定行程时间; δ 为行程时间的概率测度阈值,可在实际中测得或规定,体现了对于现状的期望指标; t_m 为快速公交在路段 m 上的行驶时间; t_{delay}^m 为快速公交在路段 m 上的总延误时间。

影响路段中实际行程时间的因素主要为交通需求和通行能力。实际中,路段通行能力会受到多方面因素的影响,包括多车流混合、交通事故、天气条件等。可将路段行程时间 t_m 作为以流量为变量的阻抗函数,用BPR函数计算,公式如下:

$$t_m = t_m^0 \left[1 + \alpha \left(\frac{x_m}{C_m} \right)^{\beta} \right] \quad (3)$$

式中: t_m^0 为路段 m 上的自由流行程时间; α, β 为BPR函数的参数; x_m 为路段 m 上的交通流量; C_m 为路段 m 的通行能力。

根据上述假设,快速公交在行驶时拥有专用道及优先路权,在通过道路上的信号灯控制交叉口时拥有优先通行权,其行车延误主要在进出停靠站点时发生。路段 m 上的延误时间可采用徐志等提出的公交车辆延误时间模型,公式如下:

$$t_{\text{delay}}^m = \sum_{m=1}^j [t_{i0} - t_{i1} - t_{i2} - t_{i3} \max(N_{\text{up}}, N_{\text{down}})] \quad (4)$$

式中: j 为路段 m 上的停靠站点数量; t_{i0} 为公交车辆进出停靠站点的实际时间; t_{i1} 为无延误情况下公交车辆减速时间; t_{i2} 为无延误情况下公交车辆加速时间; t_{i3} 为乘客平均乘降时间; N_{up} 为 j 站点的上车人数; N_{down} 为 j 站点的下车人数。

整个快速公交行程时间可靠性约束模型如下:

$$P \left[\sum_{m=1}^n t_m + \sum_{m=1}^n t_{\text{delay}}^m \leq t_{\Delta} \right] \geq \delta \quad (5)$$

式(5)中的 $\sum_{m=1}^n t_{\text{delay}}^m$ 可通过调查与计算得到, t_{Δ}

可由路径上每条路段的规定行程时间表示,即 $t_{\Delta} =$

$$\sum_{m=1}^n t_{\Delta m}, \text{式(5)可简化为:} \quad (6)$$

$$P(t_m \leq t_{\Delta m} - t_{\text{delay}}^m) \geq \delta$$

在以往研究中,路段通行能力 C_m 通常用正态分布表示。该将路段通行能力 C_m 作为一个连续随机变量,并设其分布函数为 $F_{C_m}(\cdot)$,则式(6)可转化为:

$$P = F \left[\frac{\alpha t_m^0 x_m^{\beta}}{t_{\Delta m} - t_{\text{delay}}^m - t_m^0} \right]^{1/\beta} \quad (7)$$

路径行程时间可靠性是指特定路径上实际行程时间在接受范围内的概率。由于快速公交在网络内通过的路段不止一条,而是一条路径,根据路网中某条路段是否在快速公交行驶路径中可建立如下快速公交路径行程时间可靠性模型:

$$E(t_i^{pq}) = \sum_{m=1}^n E(t_m) \gamma_m^{pq} \quad (8)$$

$$\text{Var}(t_i^{pq}) = \sum_{m=1}^n \text{Var}(t_m) \gamma_m^{pq} \quad (9)$$

式中: $E(t_i^{pq})$ 、 $\text{Var}(t_i^{pq})$ 分别为快速公交起讫点 pq 之间行程时间的期望值和方差; $E(t_m)$ 、 $\text{Var}(t_m)$ 为路段 m 上行程时间的期望值和方差; γ_m^{pq} 为 $0 \sim 1$ 变量,当路段 m 在快速公交路径上时, $\gamma_m^{pq} = 1$,否则 $\gamma_m^{pq} = 0$ 。

3 蒙特卡罗仿真方法设计

快速公交行驶路径行程时间可靠性不能直接由组成路径的各条路段行程时间可靠性相加得出,路网中影响通行能力等的条件是多变的,快速公交路径行程时间可靠性的计算有其自身的复杂性。为此,采用蒙特卡罗模拟法进行计算。

利用蒙特卡罗模拟法计算行程时间可靠性的步骤(见图2):1)确定平衡流量 x_m 、各条路段的通行能力 C_m 的分布及各条路段和快速公交路径行程时间的概率测度阈值,令 $n=1, i=0$,其中 i 表示满足行程时间可靠性要求的路径计数。2)对每条经过的路段产生通行能力样本值 $C_m^{(n)}$ 。3)用BPR函数计算路段行程时间 t_m ,得到式(10)。4)若满足可靠性条件 δ ,则 $i=i+1$ 。5)若 $n < N$,则 $n=n+1$,返回步骤2;若 $n=N$,则得到快速公交行程时间可靠性 $G \approx i/N$ (N 为预先设定的模拟次数)。

$$t_i^{pq(n)} = \sum_{m=1}^n t_m^{(n)} \gamma_m^{pq} \quad (10)$$

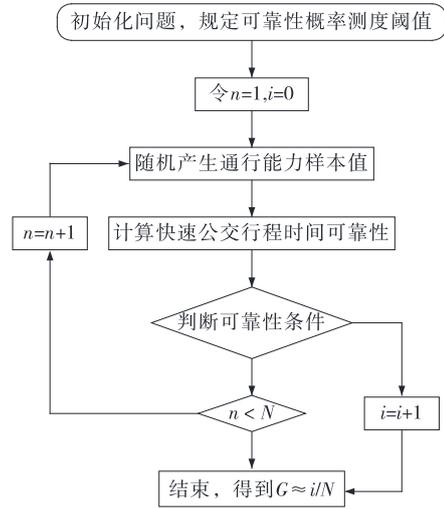


图2 蒙特卡罗仿真方法流程

4 算例分析

测试网络共有11个节点、15条路段(见图3),设其中共有4条快速公交线路,分别为 d_1-d_{11} ($d_1-d_4-d_5-d_7-d_8-d_{11}$)、 d_3-d_{11} ($d_3-d_1-d_9-d_{11}$)、 d_3-d_9 ($d_3-d_2-d_5-d_7-d_{10}-d_9$)、 d_3-d_9 ($d_3-d_8-d_7-d_6-d_9$)。为便于计算,规定每条路段都有双向快速公交专用道,上下行车辆不受影响。根据美国联邦公路局的建议,BPR函数中参数 $\alpha=0.15, \beta=4$ 。各路段的自由流行程时间和公交车最大通行能力见表1。

路段 m 上的自由流行程时间和公交车最大通行能力根据假设确定。假设路段通行能力在最大通行能力和最大通行能力一半之间服从均匀分布,采用蒙特卡罗模拟加载算法得出各路段的平衡流量,结果见表1。

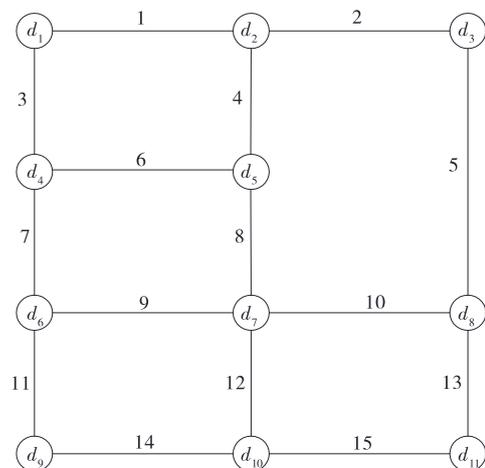


图3 快速公交网络模型示例

表1 路段性能指标计算结果

路段编号	自由走行时间/min	最大通行能力/(veh·min ⁻¹)	平衡流量/(veh·min ⁻¹)
1	4	40	25.4
2	3	40	32.7
3	3	45	35.1
4	4	50	48.2
5	6	60	58.3
6	3	45	32.1
7	4	40	32.1
8	3	50	41.2
9	5	40	26.7
10	6	50	30.3
11	4	30	22.5
12	3	40	35.2
13	3	30	24.3
14	4	50	64.1
15	4	40	35.2

确定模拟次数为100次,采用蒙特卡罗仿真方法可计算出快速公交网络模型中各条路段的行程时间可靠性(见表2)。

表2 路段行程时间可靠性计算结果

路段编号	可靠性	路段编号	可靠性
1	0.81	9	0.91
2	0.71	10	0.67
3	0.46	11	0.44
4	0.39	12	0.33
5	0.35	13	0.27
6	0.65	14	0.00
7	0.38	15	0.31
8	0.00		

根据各条路段行程时间可靠性,由式(8)、式(9)可得出 d_1-d_{11} ($d_1-d_4-d_5-d_7-d_8-d_{11}$)、 d_3-d_{11} ($d_3-d_1-d_9-d_{11}$)、 d_3-d_9 ($d_3-d_2-d_5-d_7-d_{10}-d_9$)、 d_3-d_9 ($d_3-d_8-d_7-d_6-d_9$) 4条快速公交线路行驶路径的行程时间可靠性(见表3)。

从表3可看出:模拟路网中, d_1-d_{11} 线路的可靠性最差,分析线路走向,发现该线路非直线系数较

表3 快速公交行程时间可靠性计算结果

路径	可靠性
3—6—8—10—13	0.271
2—1—3—7—11—14—15	0.671
2—4—8—12—14	0.517
5—10—9—11	0.798

大,且经过了路段8和路段13等行程时间可靠性较低的路段; d_3-d_9 线路可靠性相对较好,其线路走向路段行程时间可靠性相对较好。说明快速公交的行程时间可靠性与其通过路段本身的可靠性有较大联系。从乘客角度,可根据快速公交行程时间可靠性选择出行路径。从交通规划者角度,影响路段行程时间可靠性的主要因素是路段通行能力和平衡流量,在实际快速公交网络规划设计中,流量较大的路段应考虑增加发车频率或规划多条快速公交线路以满足公共交通需求;还可对路段中的瓶颈路段即行程时间可靠性较低的路段进行改造,提高其通行能力,从而提升整个网络的交通性能。

5 结语

该文分析了快速公交网络的特性,通过构建一种理想的快速公交网络模型,建立了基于蒙特卡罗仿真的快速公交行程时间可靠性计算模型。根据计算结果,可得出各路段及各条快速公交线路的行程时间可靠性,由此评价快速公交网络的性能。但研究中只考虑了快速公交在停靠站点产生的延误,实际运行中在交叉口、路段上还会产生延误,在这些方面有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 刘聪娜,周骞,何风.基于快速公交线路的常规公交线网优化[J].长沙理工大学学报:自然科学版,2016,13(1).
- [2] 代存杰,李引珍,马昌喜,等.时间依赖需求下多车型快速公交发车频率优化[J].交通运输工程学报,2017,17(1).
- [3] 何娇娇,张勇.行程时间可靠性及其价值估计分析[J].系统工程,2016,34(7).
- [4] 孙兆祖.路径行程时间及其可靠性研究[D].成都:西南交通大学,2017.
- [5] 张雄飞,李瑞敏,李宏发,等.基于 Monte Carlo 的行程时间可靠性研究[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2012,36(4).

(下转第25页)

4 结语

该文在阐述城乡公交一体化与社会经济发展适应性内涵的基础上,参照国内外对其适应性评价的研究成果,构建了城乡公交一体化与社会经济发展适应性评价指标体系及等级标准;运用 AHP-Entropy 法确定指标权重,利用模糊集对分析法建立了适应性评价模型。运用该模型对以 H 县城乡公交一体化建设与经济发展适应性进行评价,结果表明该县城乡公交一体化与社会经济发展处于适应状态,与现状相符。该文开拓了城乡公交一体化适应性评价的思路和方法,可为城乡公交一体化发展规划制定提供决策依据,促进城乡公交一体化与社会经济的协调可持续发展。

参考文献:

- [1] 顾皓,黄江锋,高云燕,等.城乡一体化背景下城镇公交适应性评价体系研究[J].交通与运输,2014(2).
- [2] 相伟.城乡一体化进程中城镇公交规划方法研究[D].西安:长安大学,2006.
- [3] 魏亮.基于灰色模糊多层次模型的城乡公交一体化体系评价研究[D].西安:长安大学,2013.
- [4] 易正林.基于自组织理论的城乡公共客运适应性评价[D].武汉:武汉理工大学,2013.
- [5] Milada Št'astná, Antonín Vaishar, Kateřina Stonawská, et al. Integrated transport system of the South-Moravian Region and its impact on rural development[J]. Transportation

- Research Part D: Transport and Environment, 2014, 36.
- [6] Nagendra R Velaga, Mark Beecroft, John D Nelson, et al. Transport poverty meets the digital divide: accessibility and connectivity in rural communities[J]. Journal of Transport Geography, 2012, 21.
- [7] 郭延永.城市轨道交通建设与发展的适应性分析[D].西安:长安大学,2012.
- [8] 王宏伟,张鑫,邱俊楠.模糊集对分析法在水资源安全评价中应用[J].西北农林科技大学学报:自然科学版, 2011, 39(10).
- [9] 郑达.区域综合交通系统经济适应性评价研究[D].北京:北京交通大学,2014.
- [10] 孙玮.基于集对综合评价模型的长江水上搜救能力研究[D].武汉:武汉理工大学,2012.
- [11] 史鸽飞.城乡公交一体化服务水平评价研究[D].长沙:长沙理工大学,2015.
- [12] 许雪大.公路建设与经济发展的适应性评价研究[D].长沙:长沙理工大学,2006.
- [13] 檀菲菲,张萌,李浩然,等.基于集对分析的京津冀区域可持续发展协调能力评价[J].生态学报,2014, 34(11).
- [14] 周雪梅,石云林,刘梅,等.城乡公交服务质量评价方法[J].同济大学学报:自然科学版,2015, 43(7).
- [15] 窦慧丽,边浩毅,付昌辉.城乡客运一体化发展评价指标体系及方法研究[J].公路与汽运,2012(2).
- [16] 华雯婷.城乡客运一体化发展水平评价体系及应用研究[J].青岛理工大学学报,2013, 34(2).

收稿日期:2017-11-29

(上接第 18 页)

- [6] Beaud Mickael, Blayac Thierry, Stephan Maite. The impact of travel time variability and travelers' risk attitudes on the values of time and reliability[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2016, 93.
- [7] R S Thilakarathne, S C Wirasinghe. Implementation of bus rapid transit (BRT) on an optimal segment of a long regular bus route[J]. International Journal of Urban Sciences: Journal on Asian-Pacific Urban Studies and Affairs, 2016, 20(1).
- [8] 柳波,余红红.基于可靠性的快速公交线路评价体系[J].交通科学与工程,2012, 28(3).
- [9] 谢昉珊,杨信丰,徐静.基于随机约束的快速公交车间隔优化研究[J].公路与汽运,2016(6).
- [10] Yu Zhengyao, Wood Jonathan S, Gayah Vikash V. Using survival models to estimate bus travel times and associated uncertainties[J]. Transportation Research

- Part C: Emerging Technologies, 2017, 74.
- [11] 曹洁,李旋,侯亮,等.交叉口 BRT 实时优先通行控制方法研究[J].控制工程,2012, 19(6).
- [12] 徐志, Akpakli Vincent Kwami, 杨孝宽.公交停靠站延误分析及估算方法[J].武汉理工大学学报:交通科学与工版,2010, 34(5).
- [13] 冯树民,张桂娥.基于乘客感知的公交行程时间可靠性研究[J].公路与汽运,2015(6).
- [14] 陈城辉.城市多模式公交行程时间可靠性研究[D].南京:南京理工大学,2011.
- [15] 丁亚民,柳波.考虑行程时间约束的快速公交网络可靠性[J].交通信息与安全,2013, 31(2).
- [16] 杨熙宇,李鹏凯.基于 Vissim 仿真的公交行程时间可靠性研究[A].中国城市交通规划年会暨学术研讨会[C].2012.

收稿日期:2017-09-27