

基于马尔科夫方程的快速公交瓶颈车站识别

汪晖¹, 田晟¹, 马美娜¹, 潘雷²

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640;

2. 广州市交通运输研究所 交通运输发展部, 广东 广州 510635)

摘要: 通过对城市快速公交 (BRT) 系统中可能的瓶颈设施进行分类, 明确以车站设施作为研究对象, 基于马尔科夫方程建立车站排队服务模型, 并利用 VISSIM 软件对广州中山大道 BRT 系统 24 个车站进行仿真, 得到了车站模型的各项指标参数; 以车站发生排队概率、车辆平均停站时间、站台乘客平均候车时间、车站泊位饱和度和车站平均排队长度 5 个主要性能指标为基础建立 BRT 车站瓶颈识别体系, 对广州中山大道 BRT 各车站进行综合评价打分, 确定岗顶站、师大暨大站、棠东站为潜在瓶颈车站。

关键词: 城市交通; 快速公交 (BRT); 马尔科夫方程; 车站瓶颈; VISSIM 仿真

中图分类号: U491.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)02-0039-05

随着城市的不断发展, 大力发展公共交通已成为大家的共识, 在此背景下, 大运量、低造价、灵活、高效的城市快速公交系统 (BRT) 得到了广泛应用。BRT 系统由于线路较为集中, 一般配备有较长的独立车站。目前关于 BRT 系统的研究多从路权问题、交叉口信号协调、线路优化、发车频率、车型优化等角度出发, 较少考虑车站处运行效率。而随着线路和客流量的增加, 车站成为了系统中潜在瓶颈点, 影响系统整体效率。为进一步提升 BRT 运行效率, 该文基于马尔科夫方程构建 BRT 瓶颈车站识别模型, 通过模型计算识别 BRT 系统中的瓶颈站点。

1 BRT 系统瓶颈概述

BRT 系统瓶颈的定义可参照城市交通瓶颈。城市交通瓶颈是指城市道路网络的薄弱连接环节, 交通拥堵往往发生在交通瓶颈处。BRT 系统在物理空间上一般由路段、交叉口、站台等静态设施组成, 动态输入为 BRT 车辆。路段一般为全封闭或半封闭专用道, 部分城市 BRT 系统采取全封闭路段设计, BRT 车辆在路段上有较高的优先权, 因此一般不构成瓶颈。交叉口处一般配合交通信号进行协调控制, 赋予 BRT 车辆专门的相位时间确保其顺畅通过交叉口或进行相应交叉口优化协调设计, 交叉口瓶颈问题不在该文研究范围内, 在此不作详细介绍。站台处是大量 BRT 线路产生减速、停止、起动行为的聚集点, 大量交通流线在此交织, 同时承担乘客候车、上下车、进出站等行为活动。现代 BRT 车辆以

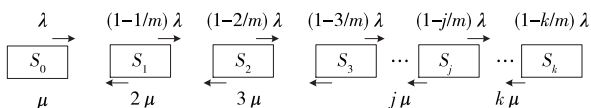
12~18 m 大型客车为主, 站台长度为 180~285 m。以往研究表明, 受站台处物理空间、服务能力、上下车乘客人数等因素的限制, 公交站台往往构成了 BRT 系统的主要瓶颈点, 车辆在公交站台处需花费大量时间排队等待服务。因此, 该文以 BRT 系统中的独立站台为研究对象, 基于马尔科夫方程构建车站服务模型和仿真模型测算系统中各站台的性能指标, 进而确定 BRT 系统潜在瓶颈站点。

2 马尔科夫方程的求解与应用

排队论在交通运输系统中运用较广泛, 排队模型可用 $A | B | c | n | m$ 表示, 其中: A 表示顾客到达间隔时间的分布率; B 表示服务时间的概率分布; c 表示服务台数量; n 表示系统容量; m 表示顾客数量。马尔可夫排队过程即顾客到达流是简单流或者说顾客到达的时间间隔服从简单泊松分布, 各服务台服务时间相互服从负指数分布。

马尔科夫排队模型基于以下假设: 1) 顾客到达流为简单流或服从泊松分布, 到达率 $\lambda_n = (1 - n/m)\lambda$ (λ 为乘客到达率); 2) 共有 c 个服务台且输出率 μ 相同, 均服从负指数分布, 总体服从 c 阶爱尔朗分布; 3) 系统共有 n 个服务台, 如果服务台全忙则顾客自行离去。

一般求解马尔科夫方程的方法为建立哥尔莫可夫方程和状态转移图 (见图 1), 这里利用 $M/M/c/n/m$ 模型求解马尔科夫排队模型, 将其他情况视为 $M/M/c/n/m$ 模型的衍生。



S_0, S_1, \dots, S_k 表示排队系统不同时刻的状态。

图1 状态转移图

构建哥尔莫可夫方程如下:

$$[(1-i/m)\lambda + i\mu]P_i = [1 - (i-1)/m]\lambda P_{i-1} + (i+1)\mu P_{i+1} \quad (1)$$

$$\lambda P_0 = \mu P_1 \quad (2)$$

$$[1 - (n+c-1)/m]\lambda P_{n+c-1} = c\mu P_{n+c} \quad (3)$$

哥尔莫可夫方程的解为:

$$P_i = \frac{\rho(m-1)(m-2)\cdots(m-i+1)}{m^{i-1}i!} P_0 \quad (4)$$

$$P_{c+i} = \frac{\rho(m-1)(m-2)\cdots(m-i-c+1)}{m^{c+i-1}ic^i c!} P_0 \quad (5)$$

$$P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + \cdots + P_i + \cdots + P_{n+c} = 1 \quad (6)$$

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad (7)$$

式中: P_0 为排队系统中没有车辆排队的概率; P_i 为排队系统中有 i 辆车排队的概率。

3 基于马尔科夫方程的车站排队服务模型

3.1 广州中山大道 BRT 车站概况

广州中山大道 BRT 系统西起天河体育中心,东至黄埔夏园,全长 22.9 km,设站 26 处。路段为双向两车道,车站为双向四车道港湾式,多采用三子站形式布置,依次以数字 1、2、3 表示。进站停靠线路车辆站内不允许超车,即如果有车停靠在子站 3 上下客,则子站 1 和 2 处的车辆要等子站 3 处车辆离开后方可离开,该站不停靠线路车辆可由内侧车道直接驶过。鉴于首末站客流组织的特殊性,暂不考虑其排队性能,研究对象为中间 24 处车站。

以棠东站(见图 2)为例,该站上下行方向各有 3 个子站,由于车道中央采取物理隔离措施,可认为上下行方向互不影响,相互独立。以北侧 N1、N2、N3 子站为研究对象,停靠在子站处的线路及发车频率见表 1。

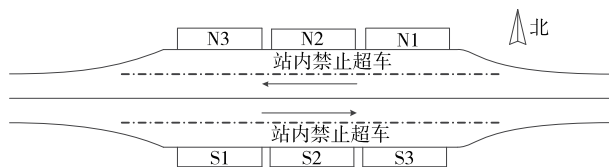


图2 棠东站平面示意图

表1 棠东站北侧站台停靠线路统计

子站	停靠线路名称	发车频率/(辆·h ⁻¹)
N1	b13 高峰快线; b4 路; b5 路; b5 路快线; b6 快线; b6 路; b7 快线; b7 路	97
N2	b12 路; b16 路; b20 路; b21 路; b22 路; b2a 路; b2 路; b3c 路	89
N3	b17 路; b1 路; b1 路快线; b27 路; b8 路; b4b 路; b3 路; b4a 路	85

对棠东站北侧站台视频资料进行统计,以 5 min 为时间间隔连续采集 5 个工作日高峰小时(早 8:00—9:00)进站车辆数,得到 60 组数据(见表 2)。

表2 棠东站北侧站台进站车辆统计

车辆数/辆	频数/次	车辆数/辆	频数/次
14	8	22	2
15	7	23	3
16	3	24	1
17	4	25	2
18	3	26	4
19	9	27	1
20	8	28	3
21	2		

3.2 模型构建及求解

由表 2 可得出 5 min 内进站车辆数均值 $m = 19.37$, 方差 $s^2 = 16.48$, $s^2/m = 0.851$, 车辆到达可能服从泊松分布。对其进行卡方检验,证实站台处车辆到达服从参数为 19.37 的泊松分布。根据文献[5]提出的方法计算得到广州中山大道 BRT 各子站台服务时间服从参数 $\mu = 63.1$ 、 $l = 3$ 的爱尔朗分布。由此根据棠东站的子站情况和站内停靠规则得到排队模型如下:

(1) 各子站处车辆到达均服从简单泊松分布,到达率分别为 $\lambda_{N1} = 97$ 辆/h、 $\lambda_{N2} = 89$ 辆/h、 $\lambda_{N3} = 85$ 辆/h。

(2) 各子站服务时间服从参数 $\mu = 63.14$ 的爱

尔朗分布,总服务时间服从三阶爱尔朗分布。

(3) 车辆进站前如泊位被占则必须等待,即该排队模型为多服务台顾客源无限等待模型($M/M/c/\infty/\infty$)。

在该排队模型中,顾客为到站 BRT 车辆,到达率为 $\lambda_{N1} + \lambda_{N2} + \lambda_{N3} = 271$ 辆/h;服务台为 BRT 车站中的各子站,服务能力为 $\mu = \mu_1 + \mu_2 + \mu_3 = 189$ 辆/h; $c=3$ 。令 $M/M/c/n/m$ 模型中 n 取 ∞ 、 m 取 ∞ ,则由式(4)~(7)可推导出:

$$P_0 = [1 + \rho + \frac{\rho^2}{2!} + \dots + \frac{\rho^c}{c!} + \frac{\rho^c}{c! (1 - \rho)}]^{-1} \quad (8)$$

$$P_i = \frac{\rho^i}{i!} P_0; 0 < i < c \quad (9)$$

$$P_{c+k} = \frac{\rho^{c+k}}{c^k c!} P_0; k = 1, 2, 3, \dots \quad (10)$$

计算得到棠东 BRT 车站中某一时刻没有车辆的概率 $P_0 = 0.356$,则车站中有大于等于 1 辆车的概率 $P_{\neq 0} = 0.644$,即 $P_{\text{排队}} = 0.644$ 。

车站发生排队的概率越高,则进站车辆停车等候的次数越多,参考《美国道路通行能力手册》服务水平推荐值(见表 3),将公交车辆进入车站发生排队的概率分为 6 级,对应不同的服务水平,将发生排队的概率作为重要指标纳入瓶颈识别体系。

表 3 《美国道路通行能力手册》服务水平推荐值

车站服务水平	被占用时间/s	排队概率/%
A	1 200	1.0
B	1 800	2.5
C	2 400	10.0
D	2 700	20.0
E	3 000	35.0
F	3 600	50.0

4 基于 VISSIM 的车站排队仿真

4.1 相关参数输入

利用 VISSIM 软件,结合相关公交线路班次、BRT 车辆尺寸、站台尺寸等参数建立 BRT 车站仿真模型,对 24 个车站进行仿真,得到相关性能参数。模型建立步骤:1) 设置公交专用道、线路及港湾式站台;2) 设定车站冲突区及让行规则;3) 公交线路输入及属性设定;4) 设置检测点及检测项目;5) 模型运行及仿真数据导出。

4.2 仿真结果输出

将仿真总时长设定为 10 800 s,采集 6 000~9 600 s 共 1 h 的数据作为棠东站性能指标数据,统计得到车辆平均停站时间、站台乘客平均候车时间、泊位饱和度、平均排队长度等指标数据(见表 4)。

表 4 车站仿真模型输出数据

站点	车辆平均停站时间/s	站台乘客平均候车时间/s	车站平均排队长度/m
石牌桥	34.6	157	18.4
岗顶	36.7	134	21.7
师大暨大	33.7	107	37.2
华景新城	35.1	114	15.3
上社	34.4	148	12.8
学院	33.3	164	14.5
棠下	32.7	173	9.7
棠东	35.8	184	10.4
天朗明居	34.7	176	11.7
车陂	34.9	208	13.1
东圃镇	34.2	195	8.3
黄村	34.3	183	9.6
珠村	32.5	177	6.4
莲溪	31.4	176	8.7
茅岗	31.5	153	6.8
珠江村	31.3	114	7.3
下沙	28.3	169	6.5
乌冲	28.1	137	7.5
黄圃客运站	29.9	147	7.3
双岗	26.5	138	3.4
沙埔	27.2	157	1.2
南海神庙	27.7	145	4.1
庙头	27.3	149	2.8
南湾	27.1	163	3.9

BRT 线路(上下行)车辆在 24 个站台的平均停站时间为 31.8 s,其中平均停站时间最长的站点为岗顶站,达 36.7 s;最短的为沙埔站,为 26.2 s。站点平均候车时间为 157 s,车陂站平均候车时间最长,为 208 s;师大暨大站平均候车时间最短,为 107 s。仿真期间各车站均发生车辆排队,其中师大暨大站的排队长度最大,平均 37.2 m;沙埔站的排队长度最小,平均 1.2 m。车站泊位饱和度平均为 0.42,其中平均饱和度最大的站点为岗顶站,达 0.53;各子站中,棠下站的 N1 子站饱和度最大(达 0.64),莲溪站的 N2 子站饱和度最小(为 0.31)。饱和度较高的 5 个站点数据见表 5。

表 5 饱和度前 5 名车站的详细数据

站点	北侧子站的饱和度/%				南侧子站的饱和度/%			
	1	2	3	4	1	2	3	4
岗顶	53	45	57	—	53	49	61	—
师大暨大	48	47	53	58	54	43	49	51
华景新城	54	42	47	—	48	56	53	—
棠下	64	56	46	—	57	45	42	—
车陂	44	53	49	—	54	57	47	—

5 BRT 车站瓶颈识别体系

BRT 系统服务能力是指在一定条件下,一段时间内系统中的某个断面所能输送的乘客数量,其往往受限于瓶颈车站处的服务能力。因此,有必要选取 BRT 车站的相关指标构建性能指标体系进行评估分析。

这里选取发生排队概率 P_1 、车辆平均停站时间 P_2 、站台乘客平均候车时间 P_3 、泊位饱和度 P_4 、平均排队长度 P_5 5 个指标作为 BRT 车站性能评价指标。采用层次分析法(AHP)确定各指标的权重,其关键在于两两指标之间重要程度的量化,一般采取 1~9 标度方法,标度定义及说明见表 6。邀请业内专家根据表 6 对各指标之间的重要程度进行打分,得到判断矩阵(见表 7),利用 AHP 法计算各指标的权重并进行矩阵一致性判别。

表 6 专家打分 1~9 标度

标度	定义与说明
1	两指标相比较重要程度相当
3	一个指标比另一个指标稍微重要
5	一个指标比另一个指标明显重要
7	一个指标比另一个指标重要很多
9	一个指标比另一个指标极端重要
2,4,6,8	表示上述需要在两指标之间折衷

表 7 各指标的判断矩阵

指标	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
P_1	1	3	3	1	3
P_2	1/3	1	1	1	1
P_3	1/3	1	1	1	1
P_4	1	1	1	1	1
P_5	1/3	1	1	1	1
合计	3	7	7	5	7

计算得到 5 个指标的权重分别为 $P_1=0.363$ 、 $P_2=0.148$ 、 $P_3=0.148$ 、 $P_4=0.192$ 、 $P_5=0.148$,判断矩阵一致性指标 $CI=0.005<0.100$,满足要求。为方便计算,对各指标权重取整(见表 8 中权重 γ)。

表 8 指标参数及其权重

指标 Φ	权重 γ	等级 θ	分值 f
车站发生排队概率	0.35	I (0%~10%)	1
		II (10%~35%)	2
		III (35%~65%)	3
		IV (65%~100%)	4
车辆平均停站时间	0.15	I (26~29 s)	1
		II (29~32 s)	2
		III (32~35 s)	3
		IV (35~38 s)	4
站台乘客平均候车时间	0.15	I (107~132 s)	1
		II (132~157 s)	2
		III (157~182 s)	3
		IV (182~208 s)	4
车站泊位饱和度	0.20	I (35%~40%)	1
		II (40%~45%)	2
		III (45%~50%)	3
		IV (50%~55%)	4
车站平均排队长度	0.15	I (1~10 m)	1
		II (10~20 m)	2
		III (20~30 m)	3
		IV (30~40 m)	4

BRT 车站瓶颈综合得分 F 计算公式如下:

$$F = \sum_{i=1}^5 \gamma_i f_i \quad (11)$$

式中: γ_i 为各指标的权重; f_i 为各等级对应分值。

按式(11)计算,得到 24 个车站的瓶颈综合得分(见表 9)。

瓶颈综合得分超过 3 分的车站有岗顶站、师大暨大站和棠东站,与实际情况较相符。岗顶站为广

表 9 各车站的瓶颈得分情况

站点	分值	站点	分值
石牌桥	1.75	珠村	2.30
岗顶	3.20	莲溪	2.15
师大暨大	3.05	茅岗	1.65
华景新城	2.70	珠江村	1.85
上社	2.30	下沙	1.65
学院	2.65	乌冲	1.50
棠下村	2.90	黄圃客运站	1.65
棠东	3.15	双岗	1.50
天朗明居	2.45	沙埔	1.50
车陂	2.85	南海神庙	1.85
东圃镇	2.10	庙头	1.50
黄村	2.65	南湾	1.50

州中山大道 BRT 线路上较大的换乘站,BRT 线路与地铁 3 号线在此交汇,有大量乘客需通过该站点完成地铁—BRT 换乘,周边有百脑汇、天娱广场、石牌村等高强度交通吸引源;师大暨大站位于华南师范大学和暨南大学之间,学生出行需求量较大,站台长度、子站数量、停靠线路均为广州中山大道 BRT 系统之最,繁忙程度较高;棠东站北侧为棠东村,南部为骏景花园、东御苑等高密度住宅小区,交通吸引力较大,且有明显潮汐现象。综合实际情况和打分结果,确定岗顶站、师大暨大站、棠东站为广州中山大道 BRT 系统中的 3 个主要瓶颈车站。

针对这 3 个瓶颈车站易发生拥堵的问题,可在既有线路停靠方案的基础上,调整线路停靠各子站的组合方案降低进站排队概率或调整线路车型和发车频率等提高线路服务能力,降低站点拥堵概率。在消除瓶颈站点的同时,还需注意防止瓶颈的移动转移,这也是今后的一个研究方向。

6 结语

BRT 系统作为一种高效、廉价、环保的公共交通工具,在国内外很多城市得到应用。该文基于马尔科夫方程计算了广州中山大道 BRT 车站发生排队现象的概率,并利用微观仿真软件 VISSIM 结合相关参数建立了车站仿真模型,得到了车站发生排队概率、车辆平均停站时间、站台乘客平均候车时间、车站泊位饱和度、车站平均排队长度等 5 个主要性能指标;通过专家打分赋予其不同权重,得到了 24 个车站的瓶颈综合得分,据此得到广州中山大道

BRT 系统中潜在的 3 处瓶颈车站分别为岗顶站、师大暨大站和棠东站,与实际踏勘情况较相符。文中研究为 BRT 系统瓶颈车站识别提供了一套可行的理论方法。

参考文献:

[1] 杨敏,陈学武,王伟.城市快速公交(BRT)应用的可行性分析[J].现代城市研究,2006(4).

[2] 金凡.快速公交(BRT)在中国的发展[J].国外城市规划,2006(3)

[3] 顾尚华.国内外快速公共交通系统的发展概况[J].交通与运输,2009(3).

[4] 边经卫,丁明.厦门市公共交通发展与 BRT 规划建设实证研究[J].城市交通,2009(3).

[5] 罗建勋.广州中山大道快速公交(BRT)运营管理可行性研究[D].广州:华南理工大学,2009.

[6] 陈爱萍.快速公交规划的基本问题研究[D].西安:长安大学,2004.

[7] 卢厚清,周先华.马尔可夫排队过程的数学模型研究[J].运筹与管理,1998(1).

[8] 潘瑞.公交网络瓶颈识别方法研究[D].北京:北京交通大学,2012.

[9] 冯浚.快速公交通行能力研究[D].西安:长安大学,2007.

[10] 盖春英.VISSIM 微观仿真系统及在道路交通中的应用[J].公路,2005(8).

[11] 罗小东,徐昕远.信息环境下城市快速路交通瓶颈识别技术[J].公路与汽运,2016(2).

[12] 代小瑞,任俊学,聂世刚.客运枢纽集散网络瓶颈识别及缓解方法研究[J].公路与汽运,2011(5).

[13] 陈元朵.广州市 BRT 运营调度方案评价及交通流特性研究[D].广州:华南理工大学,2011.

[14] 陈元朵,徐建闽.基于排队论的 BRT 线路停靠方案优化研究[J].交通信息与安全,2012,30(5).

[15] 肖海燕.基于马尔科夫的动态交通流演化模型及应用[J].武汉大学学报:工学版,2012,45(2).

[16] 戢晓峰.基于粗糙集的路网瓶颈路段识别方法[J].公路交通科技,2009,26(9).

[17] 王建玲.城市交通网络拥挤识别[D].成都:西南交通大学,2008.

[18] 解慧.城市轨道交通车站疏散能力瓶颈识别及仿真研究[D].北京:北京交通大学,2013.

[19] 黄令海,李海鹰,许心越.城市轨道交通车站动态瓶颈识别方法研究[J].铁道学报,2015,37(7).