

港湾式公交中途站停靠承载能力建模分析

潘雷¹, 李思童², 苏跃江¹, 胡郁葱²

(1.广州市交通运输研究所, 广东 广州 510627; 2.华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640)

摘要: 港湾式公交中途站的合理配置是公交线路优化的基础约束条件和重要技术支撑。文中通过对公交车进出港湾式中途站全过程总耗时的分析, 借助排队论和插队间隙理论, 在 HCM 分析模型的基础上, 研究通行能力、饱和度、不同线路到站概率等因素对中途站对应最优经停线路数量的影响, 构建影响中途站停靠承载能力修正模型; 经模型分析, 港湾式中途站停靠线路的车辆到站情况不同, 则到达概率不同, 在降低对道路交通影响的情况下可经停的线路存在差异; 不同道路的运行速度、饱和度和线路车辆到达概率直接影响车站对公交线路的承载能力。

关键词: 城市交通; 公共交通; 港湾式公交中途站; 停靠承载能力

中图分类号: U491.8

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)02-0032-04

城市常规公交由公交线路和公交站点构成, 前者是出行的主要载体, 后者是出行的主要受体。载受的不平衡体现在部分公交线路通行能力大于公交中途站停靠承载能力及站点停靠承载能力富余, 无法满足城市人口对公交出行的需求, 也导致环境污染、交通拥堵和资源浪费等。目前, 港湾式公交中途站设置较广泛, 其通行能力很大程度上影响交通系统, 研究港湾式公交站的停靠承载能力对于提升城市公交出行质量具有重要意义。美国《公共交通通行能力和服务质量手册》和《道路通行能力手册》在公交停靠站通行能力计算方面取得了丰硕成果。中国也有大量学者对公交站点的停靠能力进行了不同层面的研究, 如李凯胜等提出了利用停靠站通行能力计算泊位数的方法; 何宁等根据调查所得车辆平均停靠数量、公交车流量和停滞时间等数据建立非线性与线性 2 种回归模型, 研究公交车站停靠能力的估算方法; 吕林考虑乘客需求与车辆供给的匹配情况, 分析了公交停靠站的最大承载能力; 徐辉等通过分析公交站点停靠承载能力影响因素, 建立了公交停靠泊位通行能力模型及多个泊位公交停靠站的泊位利用率值、车辆停靠站通行能力模型。但对港湾式公交中途站停靠能力的研究还不够完善。该文在美国 HCM 模型的基础上进行改进, 对港湾式公交中途站停靠承载能力进行研究。

1 模型构建

1.1 公交中途站停靠承载能力影响因素分析

公交中途站停靠承载能力是指在某种特定道路

条件下, 一个公交车中途站在同一时段内可以满足停靠的最大车辆数, 是公交中途站能为公交车停靠提供的最大供应量。公交车在中途站点停靠的特性如下:

(1) 车辆的到达具有不均匀性。公交车车辆的到达服从泊松分布, 但受交通信号控制的影响, 均匀发车的公交车车辆经过一段时间运行后逐渐形成潮汐公交车流, 在站点排队停靠。

(2) 乘客上下车时间具有随机性。乘客需求量大影响车辆的服务时间, 公交车候车和承载乘客数量较多时, 公交车车辆在站点的停靠服务时间增大, 后续车辆在站点形成排队等候。

(3) 公交站点设置位置影响其停靠承载能力。公交站点位于道路交叉口附近时, 在站点集中排队停靠, 占用站台长度, 车辆在站点的服务时间增大, 停靠能力下降。公交中途站远离交叉口, 设置在路段时, 社会车流对站点停靠承载能力的影响较小, 不易形成排队停靠现象。

(4) 不同设计形式对公交车过站通行时间的影响不同。公交中途站一般有直线式和港湾式 2 种设计形式。对于直线式停靠站, 由于车辆依次排队按顺序进站, 后车难以超越前车提前进站, 车流进出站点时无法加速, 乘客需求量及上下站的时间成为主要影响因素; 对于港湾式停靠站, 公交车出站时加速汇入其他车道, 易与社会车辆产生摩擦, 驾驶人会降低车速来避免危险发生, 整体进出站时间明显大于直线式停靠站。当港湾式泊位数 > 3 个时, 站点停靠通行能力明显降低。

(5) 公交车进出站时间受公交站点附近社会车辆车流的影响。当社会车辆在道路上形成密集连续流时,公交车变换车道的的时间会受到影响,车辆停靠的延误时间增加。

该文的研究对象为港湾式公交站。根据以上分析,影响港湾式公交中途站停靠能力的因素可从公交车到达、候车及承载乘客数量、道路交通状态三方面进行分析。在模型计算中,公交车到达的影响体现在公交车到达率;候车及乘客数量用乘客上下车时间来体现;道路交通状态根据不同情况下社会车辆的影响,用延误等待时间来量化。

1.2 模型假设

(1) 天气因素对模型的影响忽略不计。

(2) 乘客上下公交车的时间均相同。

(3) 车辆的到达满足泊松分布,车辆在站点的服务时间满足爱尔朗分布。

(4) 公交中途站设置在路段上,不考虑交叉口信号灯绿信比及转弯车流的影响。

(5) 乘客只能在站台候车上下车,不允许在公交车未进入泊位时上下车。

(6) 乘客下车后,不在港湾式停靠站故意逗留。

(7) 社会车辆不在港湾式站点处停车下客及接客。

(8) 中途站所处路段不考虑设置公交专用道,车辆进站、离站时需变道。

(9) 公交车辆减速进站、加速离站的速度和加速度都相等。

(10) 公交车辆汇入相邻机动车道时,遵循机动车道社会车辆优先通行的准则。

1.3 模型的建立

以 HCM 公交通行能力模型为基础,充分考虑港湾式站点的特殊性 & 公交车进站和出站的影响。通过排队论分析计算车辆不同状态下总消耗时间出现的概率,计算公交停靠消耗的时间。对 HCM 公交车停靠能力计算方法进行改进,更精确地计算港湾式公交中途站的停靠承载力。

1.3.1 排队论模型分析

一般认为所有公交车的到达服从泊松分布,公交车在站点的服务时间服从爱尔朗分布,依照排队论,公交车辆和中途站形成“单路排队多通道服务的 $M/E_k/N$ ”系统:公交站点没有停靠车辆时,到站的公交车依照到达的前后顺序进站停靠,在高峰时段,只要站点有空闲位置,后续形成排队等待的车辆就

进站停靠,遵循“先到先服务”的原则。中途站无车辆停靠的概率为:

$$P(0) = \left[\sum_{k=0}^{N-1} \frac{\rho^k}{k!} + \frac{\rho^N}{(1-\rho/N)N!} \right]^{-1} \quad (1)$$

式中: k 为排队车辆数; N 为公交车泊位数; ρ 为服务强度, $\rho = \lambda/\mu$; λ 为公交车辆总到达率,即单位时间内到达的公交车数量; μ 为中途站服务率,即单位时间内一个泊位服务的公交车数量。

中途站有 k 辆公交车的概率为:

$$\begin{cases} P(k) = \frac{\rho^k}{k!} P(0), k \leq N \\ P(k) = \frac{\rho^k}{N! N^{k-N}} P(0), k > N \end{cases} \quad (2)$$

站点的平均停靠车辆数为:

$$\bar{n} = \rho + \frac{P(0)\rho^{N+1}}{N! N(1-\rho/N)^2} \quad (3)$$

车辆在站点的平均排队长度为:

$$\bar{q} = \bar{n} - \rho \quad (4)$$

车辆排队的平均等待时间为:

$$\bar{w} = \frac{\bar{q}}{\lambda} = \frac{\bar{n} - \rho}{\lambda} = \frac{P(0)\rho^{N+1}}{\lambda N! N(1-\rho/N)^2} \quad (5)$$

公交车进入中途站停靠的模式分为无需排队直接进站和按顺序排队进站 2 种。当载体承载能力小于等于受体承载能力,即公交线路到达的车辆数小于等于公交站点实际停靠泊位数($k \leq N$)时,公交车不经过排队等待,按照顺序直接进入公交中途站停靠进行上下客服务;当载体承载能力大于受体承载能力,即公交线路到达的车辆数大于公交站点实际设置的泊位数($k > N$)时, k 辆车进入车站完成停靠, $N-k$ 辆车在站点外排队等候,直至前面有车辆完成乘客上下车服务,有空闲车位产生时,排队车辆依次进入站点停靠。

1.3.2 公交车停靠能力计算方法

HCM 通过考虑绿信比、站点滞留时间、消散时间等因素,提出公交车基本停靠能力计算模型,得到单个公交中途站单位小时内能停靠的车辆数。计算公式如下:

$$C_b = \frac{3\,600(g/c)R}{[(g/c)D + t_c]} \quad (6)$$

式中: C_b 为公交站的基本停靠能力; g 为有效绿灯时间; c 为一个周期内绿灯的时长; g/c 为有效绿信比,无信号控制时取 1; R 为折减因子,表征延误时间变化造成的影响,一般取 0.833; D 为公交车在站点的滞留时间; t_c 为公交车在站点的消散时间。

根据式(6),存在多个泊位的公交中途站的停靠能力为:

$$C_B = N_{eb} \cdot C_b = N_{eb} \frac{3600(g/c)R}{[(g/c)D + t_c]} \quad (7)$$

式中: C_B 为多个泊位的公交站点每小时容纳的公交车数量; N_{eb} 为多个泊位的有效泊位数。

1.3.3 公交车进出站时间过程

公交车在港湾式中途站停靠的过程可用6段时间进行描述,分别为排队进入站点时间 t_w 、减速进入站点时间 t_j 、公交车开关车门的时间 t_m 、乘客上下车时间 t_d 、加速离开站点的时间 t_c 、汇入机动车道的等待时间 t_h 。公交车在港湾式公交站点的总消耗时间 T 为上述6段时间之和,即:

$$T = t_w + t_j + t_m + t_d + t_c + t_h \quad (8)$$

乘客上下车的时间和车门开关时间之和即为中途站对车辆的服务时间 T_f :

$$T_f = t_m + t_d \quad (9)$$

公交车的服务率为:

$$\mu = \frac{1}{T_f} + \frac{1}{t_m + t_d} \quad (10)$$

1.3.4 基本停靠能力计算模型修正

(1) 在公交站基本停靠能力计算公式中,候车及承载乘客数量已用乘客上下车占用的时间 t_d 量化,即公式中的公交车在站点的滞留时间 D 。但滞留时间仅包括乘客上下车时间,未考虑公交车减速进站停车的时间和车辆开关门所需时间,需在公式中增加减速进站时间和车辆开关车门时间。设公交车减速进站的速度为 v_1 ,减速进站的加速度为 a_j ,则公交车减速进站的时间 t_j 可按式(11)计算。设公交车加速出站的速度为 v_2 ,加速出站的加速度为 a_c ,则车辆加速离站的时间 t_c 可按式(12)计算。

$$t_j = \frac{v_1}{a_j} \quad (11)$$

$$t_c = \frac{v_2}{a_c} \quad (12)$$

(2) 根据前文对站点停靠承载能力影响因素的分析,计算模型应体现道路交通流状态,即应考虑车辆出站汇入机动车道时排队等待的时间 t_h 。依照无信号交叉口穿越间隙理论,将中途站所在港湾看作次干道,相邻机动车道看作主干道。设港湾式站点相邻机动车道的交通流量为 Q ,公交车离开港湾式车站汇入机动车道的临界间隙时间为 $\tau(s)$ 。车辆到达满足泊松分布,车头时距满足负指数分布,公

交车辆离开站点有2种情况:1) 车头时距大于或等于插车间隙,即 $h \geq \tau$ 时,车辆直接汇入相邻机动车道,无需排队。2) 车头时距小于插车间隙,即 $h < \tau$ 时,车辆需排队出站,汇入相邻机动车道。依照排队论和插车间隙理论,将公交车辆汇入相邻机动车道的排队时间看作 $M/M/1$ 系统的延误时间。直接出站的概率按式(13)计算,排队出站的概率按式(14)计算,机动车道上社会车辆的平均车头时距 \bar{h} 按式(15)计算。根据插车间隙理论,公交车排队出站时汇入机动车道的等待时间 t_h 按式(16)计算。

$$p_3 = P(h \geq \tau) = e^{-Q\tau/3600} \quad (13)$$

$$p_4 = P(h < \tau) = 1 - e^{-Q\tau/3600} \quad (14)$$

$$\bar{h} = \frac{3600}{Q} = \frac{1}{\sigma} \quad (15)$$

$$t_h = \frac{1}{\sigma} (e^{Q\tau/3600} - \sigma\tau - 1) \quad (16)$$

(3) 公交车进站分为直接进站和排队等待进站2种情况,需考虑车辆进站的排队时间。根据排队论,公交车在站点外排队等待的平均时间按式(17)计算。 $k \leq N$ 时,车辆直接进站,根据式(2),直接进站的公交车辆概率按式(18)计算。式(1)、式(2)联合得到式(19)。根据上述对公交车进出站时间的分析,公交车的进出站可划分为直接进站、直接出站,直接进站、排队出站,排队进站、直接出站和排队进站、排队出站4种情况,其总消耗时间分别按式(20)~(23)计算。在不考虑信号灯绿信比的前提下,港湾式多泊位站点实际通行能力按式(24)计算。

$$t_w = \bar{w} = \frac{\bar{q}}{\lambda} = \frac{\bar{n} - \rho}{\lambda} = \frac{P(0)\rho^{N+1}}{\lambda N! N(1 - \rho/N)^2} \quad (17)$$

$$p_1 = P(k < N) = \sum_{k=1}^N \frac{\rho^k}{k!} P(0) \quad (18)$$

$$p_2 = 1 - P(0) - p_1 \quad (19)$$

$$T_1 = t_j + t_m + t_d + t_c \quad (20)$$

$$T_2 = t_j + t_m + t_d + t_c + t_h \quad (21)$$

$$T_3 = t_w + t_j + t_m + t_d + t_c \quad (22)$$

$$T_4 = t_w + t_j + t_m + t_d + t_c + t_h \quad (23)$$

$$C_{\text{总}} = \frac{3600N_{\text{eb}}R[1 - P(0)]}{p_1 p_3 T_1 + p_1 p_4 T_2 + p_2 p_3 T_3 + p_2 p_4 T_4} \quad (24)$$

式中: T_1 为直接进站、直接出站的公交车在站点的总消耗时间; T_2 为直接进站、排队出站的公交车在站点的总消耗时间; T_3 为排队进站、直接出站的公交车在站点的总消耗时间; T_4 为排队进站、排队出

站的公交车在站点的总消耗时间; p_1 为直接进站的公交车出现的概率; p_2 为排队进站的公交车出现的概率; p_3 为直接出站的公交车出现的概率; p_4 为排队出站的公交车出现的概率。

2 实证研究

广州市马场路为双向六车道,设计速度为 60 km/h,高峰期单向交通流量约为 3 000 pcu/h。马场路公交中途站设置在道路最南侧,为港湾式中途站,车站停靠泊位数为 2 个,即 $N_{eb}=2$ 个(见图 1)。道路交通状况见表 1。

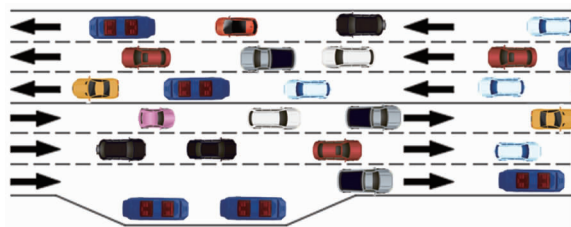


图 1 公交站道路运行情况

表 1 站点交通运行状况

参数	取值
单向车道交通流量 $Q_{\text{单}}/(\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1})$	3 000
车道饱和度 $Q_{\text{饱}}$	0.6
道路期望饱和度 $Q_{\text{限}}$	0.8
道路设计速度 $v_{\text{设}}/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	60
小汽车畅行速度 $v_{\text{汽}}/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	60
公交车畅行速度 $v/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	35
道路宽度 w/m	47

经调查,共有 5 条公交线路途经马场路公交中途站,分别为 138 路、407 路环线、499 路、545 路、901A 路公交线路,线路发车间隔见表 2。

表 2 站点途经公交线路发车间隔

公交线路名称	高峰期发车 间隔/min	发车频率/ (辆 \cdot s $^{-1}$)
138 路	5	0.003 3
407 路环线	10	0.001 7
499 路	4	0.004 2
545 路	4	0.004 2
901A 路	3	0.005 5
合计		0.018 9

根据实际调查和相关经验,取 $t_m=3.5$ s, $t_d=2.5$ s, $v=35$ km/h, $a_j=1.5$ m/s 2 , $a_c=1$ m/s 2 ,则进站时间 $t_j=v/a_j=6.5$ s,出站时间 $t_c=v/a_c=9.7$ s。

将 t_m 、 t_d 代入式(9)、式(10),得 $T_i=28.5$ s、

$\mu=0.035$ pcu/s。由表 2 得 $\lambda=0.018 9$ 辆/s, $\rho=\lambda/\mu=0.54$ 。

将 N_{eb} 、 ρ 代入式(1)、式(17)~(19)得: $P(0)=57.48\%$ 、 $t_w=2.27$ s、 $p_1=39.42\%$ 、 $p_2=3.10\%$ 。

以高峰期单向交通流量为基础,求得单车道交通流 $Q=1\ 000$ pcu/h。将机动车道上所有车辆视作小汽车(小型车),单车道宽取 7.8 m,参考 HCM 模型,取 $\tau=6$ s。将 Q 、 τ 代入式(13)、式(14)、式(16),得 $p_3=0.189$ 、 $p_4=0.811$ 、 $t_h=9.46$ s。

将 t_w 、 t_j 、 t_m 、 t_d 、 t_c 、 t_h 分别代入式(20)~(23),得 $T_1=44.7$ s、 $T_2=54.16$ s、 $T_3=46.97$ s、 $T_4=56.43$ s。

将上述计算结果代入式(24),得马场路公交站在高峰期的通行能力 $C_{\text{总}}=113$ 辆/h。取 $D=t_m+t_d=28.5$ s,根据高峰期车辆调查结果,取清空时间 $t_c=15$ s,代入式(7),得 $C_B=138$ 辆/h。

调查结果显示,1 h 内马场路公交站所服务的车辆为 142 辆。修正前模型计算所得服务车辆数为 124 辆/h,其偏差为 12.7%,而修正后模型的偏差仅为 2.8%,其计算结果更贴近实际调查情况。

3 结论

(1) 公交中途站的承载力受道路运行情况、路段饱和度及途径公交线路到站概率等因素的影响。

(2) 港湾式公交中途站经停线路的车辆到达存在 4 种类型,公交车辆到站情况不同,则其到达概率不同,直接影响中途站的承载力。

(3) 经案例验算,修正后中途站承载力模型与实际道路运行情况较契合,可为合理布设公交站点泊位和规划公交线路公交车数量提供参考。

参考文献:

- [1] 李凯胜,冯佳,李夏苗.多线路公交停靠站的设置研究[J].交通运输系统工程与信息,2011,11(增刊 1):187-193.
- [2] 何宁,马健霄,李娜.公交车站停靠能力的研究[J].城市轨道交通研究,2004,7(2):78-80.
- [3] 吕林.城市公交站点优化设计方法研究[D].南京:东南大学,2006.
- [4] 徐辉,谭振霞,李晋.城市道路公交中途停靠站通行能力研究与应用[J].中国市政工程,2018(5):87-89.
- [5] 王伟,过秀成.交通工程学[M].南京:东南大学出版社,2011.

(下转第 46 页)

参考文献:

- [1] 周庆芬,束昱,路珊.电子商务时代上海地下物流系统发展前景[J].地下空间与工程学报,2011,7(增刊):1269—1273.
- [2] 王都.铁路特种货物物流网络构建及运作研究[D].北京:北京交通大学,2008.
- [3] 许敏.带时间窗的生鲜食品冷链物流配送车辆路径规划研究[D].秦皇岛:燕山大学,2020.
- [4] 闫重绿.基于轻轨车辆智能化结构与造型的设计研究[D].大连:大连理工大学,2020.
- [5] 钱七虎.利用地下空间助力发展绿色建筑与绿色城市[J].隧道建设,2019,39(11):1737—1747.
- [6] 刘亚楠,郑长江,沈金星.基于地铁的城市物流配送路径优化[J].贵州大学学报(自然科学版),2019,36(6):114—118.
- [7] 周芳汀,张锦,周国华.带时间窗的地铁配送网络路径优化问题[J].交通运输系统工程与信息,2018,18(5):88—94.
- [8] 张露.基于改进遗传算法求解带时间窗车辆路径规划问题[J].中国物流与采购,2020(14):66—69.
- [9] WANG Feng, LIAO Fanshu, LI Yixuan, et al. An en-

semble learning based multi-objective evolutionary algorithm for the dynamic vehicle routing problem with time windows [J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 154: 107131.

- [10] TANG Yalian, CAI Yanguang, YANG Qijiang. Improved ant colony optimization for multi-depot heterogeneous vehicle routing problem with soft time windows[J]. Journal of Southeast(English Edition), 2015, 31(1): 94—99.
- [11] VIDAL T, CRAINIC T G, GENDREAU M. A hybrid genetic algorithm with adaptive diversity management for a large class of vehicle routing problems with time-windows[J]. Computers & Operations Research, 2013, 40(1): 475—489.
- [12] ZHANG L P, CHAI Y T. Improved genetic algorithm for vehicle routing problem with time windows[J]. Computer Engineering and Application, 2010, 46(32): 228—231.
- [13] 陈一村,董建军,尚鹏程,等.城市地铁与地下物流系统协同运输方式研究[J].地下空间与工程学报, 2020, 16(3): 637—646.

收稿日期:2021—06—25

(上接第 35 页)

- [6] 宋路娟.基本路段内公交停靠站通行能力模型[D].西安:长安大学,2010.
- [7] 秦思.多线路公交停靠站选型及站点优化技术研究[D].西安:长安大学,2018.
- [8] 李娜,陈学武.公交车中途停靠站停靠能力及设计站长计算初探[J].土木工程学报,2003,36(7):72—77.
- [9] 彭庆艳,杨东援.公共汽车中途站停靠时间模型[J].长安大学学报(自然科学版),2002,22(1):60—62.
- [10] 吴北川.考虑阻塞传播影响的常规公交线路站点能

力和发车间隔的协调优化[D].成都:西南交通大学,2019.

- [11] 刘应东,牛惠民.多站台港湾式公交站交通流模型及仿真分析[J].交通运输系统工程与信息,2012,12(5):97—102.
- [12] 蒋阳升,陈巍,陈粤飞.多线港湾式公交站点高峰期通行能力模型修正[J].西华大学学报(自然科学版), 2014, 33(6): 53—56.

收稿日期:2021—06—30

(上接第 38 页)

- [8] 全国旅游标准化技术委员会.旅游度假区等级划分:GB/T 26358—2010[S].北京:国家旅游局,2010.
- [9] 交通运输部公路司,中交第一公路勘察设计研究院有限公司.公路工程技术标准:JTG B01—2014[S].北京:人民交通出版社,2014.
- [10] 全国交通工程设施(公路)标准化技术委员会.道路交通标志和标线 第 2 部分:道路交通标志:GB 5768.2—2009[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [11] 全国交通工程设施(公路)标准化技术委员会.公路交通标志板:JT/T 279—2004[S].北京:中华人民共和国

国交通部,2004.

- [12] 韩笑.农村公路交通标志设置研究[J].中国高新技术企业(中旬刊),2015(8):20—21.
- [13] 孙义峰,宛岩.旅游度假区旅游指路标志系统设置方法研究[J].宁波工程学院学报,2014,26(1):26—29+42.
- [14] 王瑶文,谢辉.文旅融合下旅游公路安全设施设计要点分析[J].公路交通科技(应用技术版),2019(8):250—251.

收稿日期:2021—08—11