

路侧公交专用车道模式下右转交织长度建模

陈永恒¹, 谌 垚¹, 徐 扬², 白乔文¹, 汪昆维¹, 刘鑫山¹

(1. 吉林大学 交通学院 长春 130022; 2. 吉林省高速公路管理局 长春 130022)

摘要: 在设置路侧公交专用道的交叉口处,可通过划定交织区的方式允许右转车辆借用一定长度的公交专用道通行.合理规划公交车与右转车的交织区长度有利于提高借道右转的通行效率,减少在交织区前的排队车辆数从而降低道路混乱程度,保障公交车的专用路权.本文分析了公交站点影响下的公交车车头时距分布,建立了右转车穿越交织区长度计算模型,并结合实际调查数据进行了算例分析和模型验证.研究成果可为公交优先条件下的交叉口空间优化设计提供理论参考.

关键词: 交通工程;公交专用车道;右转机动车;交织区长度;公交车车头时距

Modeling the Weaving Area Length of the Road-side Bus Lane at the Intersection

CHEN Yong-heng¹, SHEN Yao¹, XU Yang², BAI Qiao-wen¹, WANG Kun-wei¹, LIU Xin-shan¹

(1. College of Traffic and Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. Highway Administration of Jilin Province, Changchun 130022, China)

Abstract: Right-turning vehicles are allowed to use the road-side transit-lane when they are at the entering approach. It is necessary to optimize the weaving length to improve the efficiency of right-turning flow and lower the impact on buses turning along the transit lane. Distribution of bus turn headway is firstly analyzed concerning about stop time. Then a working model is developed to determine the weaving length for right-turning vehicles. At last, a case study is conducted using actual data. The results provide reference for channelization of entering approach under bus priority policy.

Keywords: traffic engineering; bus lane; right-turning vehicle; weaving length; time headway of bus

0 引言

当前,在公交优先的背景下,公交专用道在城市中得到了广泛的应用.一般情况下,公交专用车道大部分都设置在道路最外侧.因此在交叉口处,右转车辆必须穿过公交专用道实现右转,这势必会与公交车产生冲突.为明确通行规则、保障公交

车的路权,通常采用设置虚实线的方式表示可供右转车辆借用公交专用车道转弯的交织区,即公交专用车道一侧设置实线,普通车道一侧设置虚线.交织区的长度是公交专用道设置时必须考虑的因素,因为右转车辆在交织区内必须完成强制换道,交织区长度过短且右转车辆流量增大时,由于

收稿日期:2016-10-25

修回日期:2017-01-04

录用日期:2017-01-11

基金项目:国家自然科学基金/National Natural Science Foundation of China(51278220, 51278520).

作者简介:陈永恒(1978-),男,吉林公主岭人,副教授,博士.

*通信作者:cyh@jlu.edu.cn

标线对路权的限制,等待穿越的右转车会在交织区前出现排队现象,不仅阻碍公交车的通行效率,甚至造成整个交叉口或者路段的交通量降低;而交织区设置得过长,右转车辆过早进入公交专用车道混行,这势必会影响公交车的运行效率,使公交专用道的设置失去其专用的意义.因此,在设置路侧公交专用道的情况下需要根据公交车与右转车的实际交通状况来确定交织区的长度.

当前右转车与公交车交织形式主要有两种,其中回授线形式是指右转车与公交共用进口道的形式,虚实线的终止表示公交专用道的结束,如图1(a)所示.另一种是提前右转形式,主要是指在交织区内右转车穿越公交车通行,虚实线结束后公交专用道仍然延续,如图1(b)所示.另外,由于小支路路口及单位交叉口的形式与提前右转形式类似,可以并入提前右转形式,如图1(c)所示.对于虚实线形式的交织区,国标《城市交通标志和标线设置规范》(GB51038-2015)中指出在视距受限等危险路段、仅允许单向超车路段或允许单侧车辆左转、掉头的交叉口处,可采用虚实线的设置方式.并根据设计车速规定了虚实线的线宽、线长及虚线段间隔等基本参数.但对于公交专用道交织区的设置情况没有明确规定.在道路渠化实践中对于图1(a)形式交织长度一般根据经验确定,对于图1(b)和图1(c)形式通常根据支路的宽度设置.

在右转车与公交车的交织特性方面,娄康^[2]利用vissim仿真的方法模拟公交车流量变化对回授线长度的影响.张曼等^[3]建立了右转车汇入概率模型,在公交车流率与右转车汇入率一定的情况下,得出了交织区距离计算公式.另外,在研究交织问题时,公交车到站停靠规律也是关键因素,这方面的代表研究有:孙磊磊^[4]提出了公交停靠时间的新的非线性模型,进而给出公交车在港湾式公交停靠站停留时间的数学模型;吕双等^[5]以公交车到达率为折减系数,考虑公交停靠延误时间,提出公交车在港湾式车站停靠有无溢出情况下对路段通行能力的折减模型;刘路等^[6]引入排队论模型,得出公交车进站排队时间,从时间占用的角度计算了公交车的路段通行能力.上述研究主要关注设置公交车停靠站情况下公交车道的通行能力和延误问

题,而本文为分析公交车与右转车交织的复杂过程,需要对公交车出站时的车头时距分布进行深入研究.

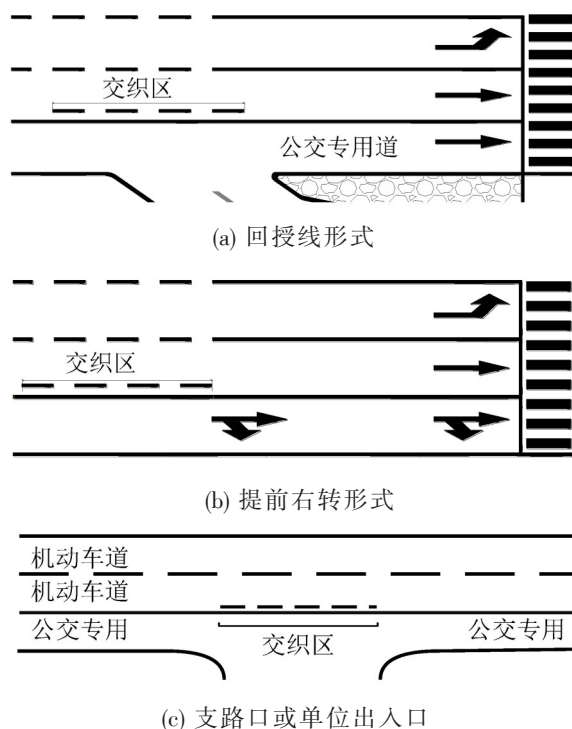


图1 交织区设置形式

Fig. 1 Three kinds of weaving section

考虑到交通问题的复杂性,本文主要针对提前右转形式的交织区,研究公交车在公交专用道内有绝对优先权的情况下,公交车与右转车的交通量对交织区长度设置的影响,结合公交车停靠时间影响下的车头时距分布,建立右转车穿越交织区长度计算模型,并结合实际调查数据进行了模型验证.

1 公交车车头时距分布模型

1.1 交织区的冲突特性描述

在提前右转形式的路口、支路或者单位出入口处的交织区,交通秩序混乱的一个重要原因是右转车辆在公交专用道中的强制换道行为.当右转车交通量较少不足以形成车队时,右转车辆需要寻找前后公交车之间的可穿越间隙并穿过公交专用车道实现右转.由于公交车的优先路权,右转车辆不会对公交车造成延误;当右转车数增加到需要排队通过交织区时,会在交织区前等待穿越从而形成车队,此时的公交车仍然具有优先路权,但

由于右转车的成队通过会在交织区内与公交车争抢路权,甚至发生拥堵蔓延.公交车之间出现可穿越间隙的车头时距分布决定了右转车辆的小时通过率,因而研究公交车在到达交织区前的车头时距分布具有重要意义.

1.2 公交车出站时的车头时距分布模型

车辆到达情况通常呈现一定的分布规律,如泊松分布、二项分布、高斯分布等.由于公交专用道的设置,公交车的到达情况不会受到社会车辆的影响.因而公交车在车站处的停靠时间会对车头时距分布造成影响.本文将公交车到站前的车头时距 t_a 与公交车停车时间 t_b 结合起来,计算出最终车辆驶出公交站时的车头时距分布.假设前后连续公交车以相同的行车速度通行,则出站时的车头时距分布即可视为公交车到达交织区时的车头时距分布.

假设公交车进站的到达情况服从泊松分布,公交车的平均到达率 $\lambda^{[7]}$ 为

$$\lambda = \frac{Q_b}{3600} \quad (1)$$

式中: Q_b 表示公交车小时交通量.

此时,公交车进站时的车头时距 t_a 服从负指数分布,即

$$P\{t_a < t_c\} = 1 - P\{t_a \leq t_c\} = 1 - e^{-\lambda t_c} \quad (2)$$

式中: t_c 表示临界间隙.

当目标交叉口前没有设置公交车停靠站时,公交车车头时距分布通过式(2)确定即可.当交叉口前存在公交车站时,结合排队理论,考虑公交车站长度能容纳 k 辆公交车同时停靠的情况,建立停

靠时间的爱尔朗分布^[8]模型为

$$f_{t_{bi}} = \frac{w(w t_{bi})^{k-1} e^{-w t_{bi}}}{(k-1)!} \quad (3)$$

式中: t_{bi} 为公交车到站停靠时间; w 为参数,取值为 $w = E(X)/D(X)$, $E(X)$ 表示停靠时间的样本均值, $D(X)$ 表示停靠时间的样本方差; k 为公交车站能同时停靠的最大车辆数,通常取值为2.

前后两辆公交车以车头时距 t_a 驶入公交停靠站,前车的到站停靠时间为 t_{b1} ,后车的到站停靠时间 t_{b2} ,且前后车的停靠时间满足 $t_{b2} \geq t_{b1} - (t_a - t_1)$ 时,如图2所示.由于公交车的停靠时间 t_{b1} 、 t_{b2} 均服从爱尔朗分布,因此前车与后车出站时的车头时距 t 大于 t_1 的概率为:

当 $t_a > t_1$ 时,满足 $t_{b2} > t_{b1} - (t_a - t_1)$,所以 $t_{b1} \geq t_a - t_1 \geq 0$,否则不可能出现前后车出站车头时距大于 t_1 ($t_1 = t_c + h t_f, h = 0, 1, 2, \dots, n$)的情况.

$$P(t > t_1) = \int_{t_1}^{+\infty} \lambda e^{-\lambda t_a} \cdot P_1(t_b) dt_a = \int_{t_1}^{+\infty} \lambda e^{-\lambda t_a} dt_a \int_{t_a - t_1}^{+\infty} w^2 t_{b1} e^{-w t_{b1}} dt_{b1} \int_{t_{b1} - (t_a - t_1)}^{+\infty} w^2 t_{b2} e^{-w t_{b2}} dt_{b2} \quad (4)$$

当 $t_a < t_1$ 时, t_{b2} 的取值必须要满足 $t_{b2} > t_{b1} - (t_a - t_1)$,此时 $t_a - t_1 < 0$ 且 $t_{b1} \geq 0$,因而只需要 $t_{b1} \geq 0$.

$$P(t > t_1) = \int_0^{t_1} \lambda e^{-\lambda t_a} \cdot P_2(t_b) dt_a = \int_0^{t_1} \lambda e^{-\lambda t_a} dt_a \int_0^{+\infty} w^2 t_{b1} e^{-w t_{b1}} dt_{b1} \int_{t_{b1} - (t_a - t_1)}^{+\infty} w^2 t_{b2} e^{-w t_{b2}} dt_{b2} \quad (5)$$

经过对式(4)和式(5)的整理可得

$$P(t > t_1) = \frac{\lambda e^{-w t_1}}{4} \left(\frac{5w + 2\lambda}{(w + \lambda)^2} \cdot e^{-(w + \lambda)t_1} - \frac{w t_1}{(w - \lambda)} + \frac{3w - 2\lambda}{(w - \lambda)^2} \cdot (e^{-(w - \lambda)t_1} - 1) \right) \quad (6)$$

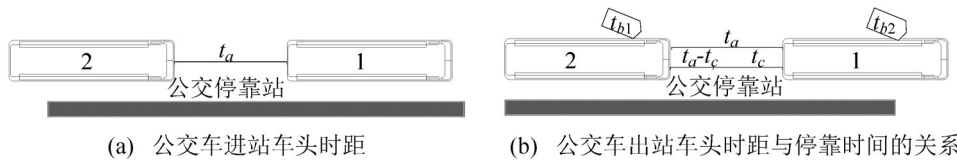


图2 公交车停靠时间示意图

Fig. 2 Bus stop time diagram

2 交织区长度计算模型

本文将右转车辆在交织区内穿越公交车道的过程看作次路车流穿越主路车流的过程,即右转车辆需要寻找主路公交车的可穿越间隙右转,因而可建立主次路相交的间隙理论模型.

在穿越模型中,主次路为单车道交汇,当交织区出现临界间隙 t_c 时,次路右转车辆可穿越公交车流.当右转车流量或者公交车流量较大时,穿越机会较少,如图1(b)和图1(c)的形式,交织区会发生右转车排队滞留现象,因此需要将交织区适当延

长,以支路或单位出入口形式为例,延长后的交织区如图3所示.与一般的主次路穿越情况不同,当交织区延长时,次路车辆可以在交织区内追赶主路间隙^[9],就相当于延长了主路车的可穿越车头时距.延长后的交织区长度为 L_2 ,原交织区长度为 L_1 ,如图3所示,延长的交织区长度即为 $L_2 - L_1$.



图3 交织区延长示意图

Fig. 3 The extended weaving section

假设公交车道的临界间隙为 t_c ,而转弯车辆的跟随时距为 t_f .当公交车之间出现大于等于临界间隙 t_c 的车头时距时,右转车能通过的车辆数 Q_r 为

$$Q_r = Q_b[(1+x)p\{t \geq t_c\} + \sum_{h=0}^{n-1} p\{t \geq t_c + ht_f\} - (n+x)p\{t \geq t_c + ht_f\}] \quad (7)$$

式中: x 为延长交织区后额外通过的车辆数; Q_r 为右转车交通量.

当 h 达到足够大时, $p\{t \geq t_1 + nt_2\} = 0$,所以式(7)改写为

$$Q_r = Q_b[xp\{t \geq t_c\} + \sum_{h=0}^{n-1} p\{t \geq t_c + ht_f\}] \quad (8)$$

当公交车以速度 v 进入交织区行驶时, x 取值为

$$x = \text{int}[(L_2 - L_1)/(vt_f + l)] \quad (9)$$

式中: l 为右转社会车辆的车身长度,按标准车取值为6 m.

由式(6)、式(8)和式(9)可知,交织区的长度与公交车流量小时交通量 Q_b ,右转车小时交通量 Q_r 存在式(11)所示关系.

$$L_2 = (vt_f + l) \left[\frac{Q_r - Q_b \sum_{h=0}^{n-1} P(t \geq t_c + ht_f)}{Q_b \cdot p(t \geq t_c)} - 1 \right] + L_1 \quad (10)$$

式中: t_c 为临界间隙,一般取值为5~7 s; t_f 为跟车间隙,一般取值为3~5 s; L_1 为一条车道宽度,一般取值为3.5 m; v 为公交车平均车速,取值为35 km/h,等于9.72 m/s.

$p(t_1 \geq t_c)$ 和 $\sum_{h=1}^{n-1} p(t_1 \geq t_c + ht_f)$ 为公交车出现可穿越间隙的概率分布,表示为

$$p(t > t_c) = \frac{\lambda e^{-wt_c}}{4} \left(\frac{5w + 2\lambda}{(w + \lambda)^2} \cdot e^{-(w + \lambda)t_c} - \frac{wt_c}{(w - \lambda)} + \frac{3w - 2\lambda}{(w - \lambda)^2} \cdot (e^{(w - \lambda)t_c} - 1) \right)$$

$$\sum_{h=1}^{n-1} p(t > t_c + ht_f) = \frac{5w\lambda + 2\lambda^2}{4(w + \lambda)^2} \cdot \sum_{h=0}^{n-1} e^{-(2w + \lambda)(t_c + ht_f)} - \frac{w(t_c + ht_f)}{(w - \lambda)} \cdot \sum_{h=0}^{n-1} e^{-w(t_c + ht_f)} + \frac{3w - 2\lambda}{(w - \lambda)^2} \cdot (e^{\lambda(t_c + ht_f)} - e^{-w(t_c + ht_f)})$$

式中: λ 取值为 $\frac{Q_b}{3600}$.

3 模型仿真及验证

3.1 敏感性分析

通过上文建模过程可以看出,当公交车出站时的车头时距分布确定后,公交车与右转车的小时交通量会引起交织区长度的变化.为了反映交织长度随公交车与右转车交通量的变化趋势,取停靠时间服从参数 $w = 0.1$ 的二阶埃尔朗分布,绘制交织区长度 L_2 的变化趋势图,如图4所示,可以看出交织区长度随着右转车和公交车流量的增加而增加.当右转车流量为250 veh/h时,对应交织区长度为150 m左右,如图中截面所示.可见随着右转车辆的继续增加,交织区长度呈现明显快速递增的趋势,由于城市道路交叉口间距的限制,交织区设置太长不符合城市道路几何条件,公交专用车道的设置将失去其专用的意义.因而不宜设置交织区形式,可考虑设置右转车分离相位;当右转车流量为80 veh/h时,对应交织区长度为3.5 m左右,如图中截面所示,因此,当右转车流量小于等于80 veh/h时,表明右转车对公交车的影响较小,此时取最短交织长度3.5 m(为一条出口车道的宽度)即可.

3.2 模型验证

3.2.1 数据获取

以长春市人民大街与自由大路交叉口南进口数据为例,其几何条件如图5所示,该交叉口处设置有路侧公交专用道,且在交织区前设置有公交车停靠站.在数据采集与分析过程中,采用视频检测手段获取数据,并通过Matlab软件及人工统计等手段对数据进行处理,采集的数据主要包括公交站处的车辆停靠时间(精度为1 s);公交车小时交通量及同一时间段经过的右转车小时交通量.

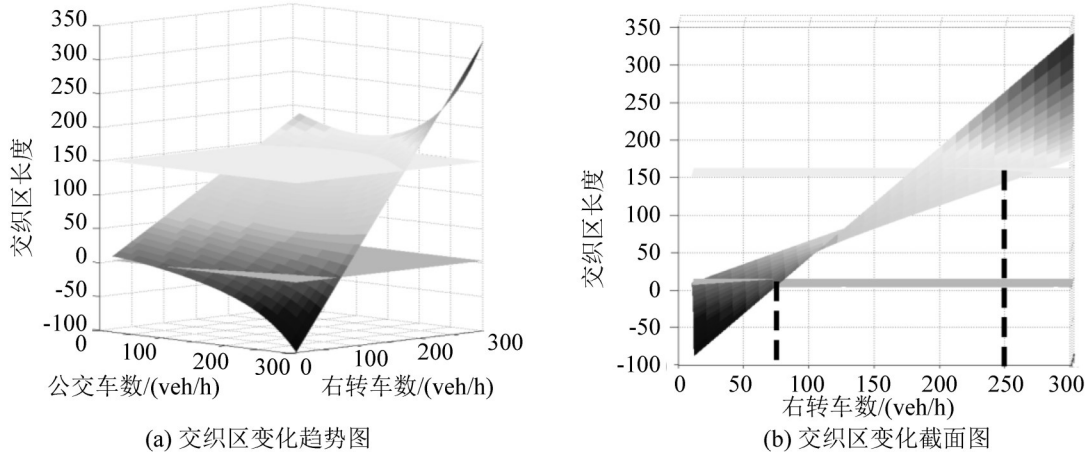


图4 交织区长度与交通量关系图

Fig. 4 Relationship between weaving length and volume

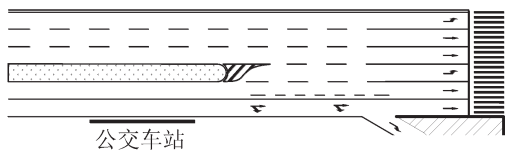


图5 交叉口几何条件图

Fig. 5 Entering approach geometry

通过对高峰期(17:00-19:00)的数据进行处理,得到在公交站处的公交停靠时间分布、相应的交织区长度及交叉口处的右转车流量.

3.2.2 参数标定及模型计算

文中将调查的数据分为两个部分,第一部分选取了17:00-18:00为调查时段,作为模型输入;另一部分选取了18:00-19:00时段,用作对模型的验证.统计参数如表1所示.

表1 参数调查表

Table 1 Parameter calibrated

参数	数值	参数	数值
Q_{b1}	166 veh/h	t_f	4 s
Q_{r1}	245 veh/h	l	6 m
Q_{b2}	168 veh/h	L_{r1}	3.5 m
Q_{r2}	232 veh/h	L_{r2}	115 m
t_c	6 s	w	0.295

对调查得到人民大街与自由大路交叉口公交车站处的公交车停靠时间,进行三阶埃尔朗分布拟合,拟合系数 R-square 为 0.900 6,拟合结果如图6所示.

将图6拟合的分布函数带入交织区长度模型进行计算,交织区长度随公交车交通量、右转车交通量增加的变化趋势如图7所示.根据实际调查的 Q_{r1} 、 Q_{b1} , 计算得到的交织区长度为 $L_2 = 104$ m, 这与

实际的交织区长度 $L_{21} = 115$ m 相近.同时,根据本文模型计算,如果交织长度增加到 150 m 时,右转车交通量达到 319 veh/h,说明在该路口,如果右转车超过 319 veh/h 时,就不宜再采用设置交织区的右转车组织形式.

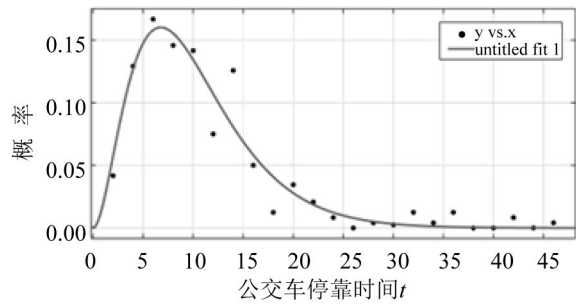


图6 公交停车时间分布拟合图

Fig. 6 Bus parking time distribution fitting

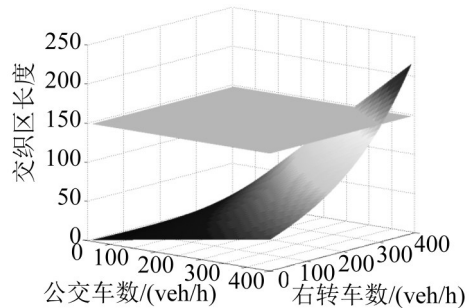


图7 交织区长度变化图

Fig.7 Variation of the weaving area

由于难以将计算所得的各种交通量条件下的交织长度全部实施,以验证模型的计算精度,本文采用了替代调查手段,进一步检验模型是否真实反映了右转车与公交车之间的冲突过程,基本原

理是:采用第二部分数据(18:00-19:00)进行模型的验证,将计算得到的交织区长度 L_2 与实际调查得出的公交车数 Q_{b2} 进行计算,得出右转车辆数 Q_r .

$$Q_r = Q_{b2} \cdot \sum P(t \geq t_c + ht_f) + Q_{b2} P(t \geq t_c) (1 + \frac{L_2 - L_1}{vt_f + l}) \quad (11)$$

将计算得到的右转车辆数 Q_r 与实际右转车辆数 Q_{r2} 进行对比.计算得到的右转车交通量 Q_{r2} 取值为250 veh/h,对比实际右转车交通量232 veh/h,其误

差为7.20%.

为验证模型的适应性,本文对长春市的5个类似的交叉口进行数据统计和交织长度计算,该5个交叉口都为设置公交专用道的提前右转交叉口,各个交叉口参数统计如表2所示.

利用表2对各交叉口的基本调查参数,采用式(11)计算了交织长度 L_2 和右转车交通量 Q_r ,具体结果如表3所示.

表2 交叉口参数调查表

Table 2 Parameters calibrated for studied sites

参数	人民大街—自由大路(西)	南湖大路—亚泰大街(东)	人民大街—南湖大路(南)	人民大街—新发路(东)	人民大街—新发路(北)
$Q_{b1}/(\text{veh/h})$	176	107	128	98	124
$Q_{r1}/(\text{veh/h})$	241	189	237	311	282
$Q_{b2}/(\text{veh/h})$	167	98	112	89	119
$Q_{r2}/(\text{veh/h})$	249	176	243	323	287
t_f/s	4	4	4	4	4
t_c/s	6	6	6	6	6
l/m	6	6	6	6	6
L_{11}/m	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
L_{21}/m	121	141	155	145	128
w	0.289	0.327	0.339	0.386	0.333

表3 误差分析

Table 3 Error analysis

参数	实际公交车交通量 $Q_{b2}/(\text{辆/h})$	计算交织长度 L_2/m	预测右转车交通量 $Q_r/(\text{辆/h})$	实际右转车交通量 $Q_{r2}/(\text{辆/h})$	误差/%
人民大街—自由大路(西)	187	102	257	242	6.20
南湖大路—亚泰大街(东)	98	129	173	184	5.72
人民大街—南湖大路(南)	108	157	204	243	16.05
人民大街—新发路(东)	89	143	301	323	6.18
人民大街—新发路(北)	119	121	273	287	5.13

通过以上计算数据与实际数据的对比,得到误差分析如图8所示.按本文方法计算得出的交织长度,右转车交通量预测值与实际调查值之间的误差最大值为16.05%,最小值为6.2%,平均误差为7.85%,在10%以内.表明本文建模过程符合实际情况下右转车和公交车的运行特征.

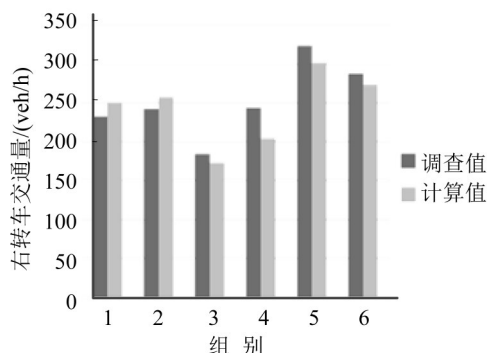


图8 右转车交通量实际值与预测值对比图
Fig. 8 Comparison between actual value and calculated value of right turns

4 结 论

本文针对提前右转方式的公交专用道交织区,建立了公交车站影响下的车头时距分布函数,基于间隙理论,构造了右转车交织区长度计算模型.结合交织区长度变化趋势图,得出了交织区长度实用限值结论.实际算例表明,公交车在停靠站影响下的车头数据分布拟合符合精度要求;计算的交织区长度与实际情况相符;模型预测的右转车穿过交通量与实际通过交通量的平均误差在10%以内.因此,本文所建立的交织区长度计算模型能够根据不同的右转车与公交车交通量计算出合适的交织区长度,为公交优先条件下的交叉口空间优化设计提供理论参考.

参考文献:

- [1] CJJ 37-2012,中华人民共和国行业标准:城市道路工程设计规范[S]. [CJJ 37-2012, Industry Standards in People's Republic of China: Code for Design of Urban Roads[S].]
- [2] 娄康. 基于仿真试验的公交专用道回授线合理长度研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2014. [LOU K. Study on the reasonable length of bus lanes feeder routes based on simulation[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Teidao University, 2014.]
- [3] ZHANG M, LI W Q. Factors affecting headway regularity on bus routes[J]. Journal of Southeast University(English Edition), 2013(1): 99-102.
- [4] 孙磊磊. 基于停靠时间的城市公共交通网络均衡客流分配模型研究[D]. 西安: 长安大学, 2014. [SUN L L. Research on network equilibrium flow of urban public transportation based on bus dwell time[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.]
- [5] 吕双, 袁振洲, 曹志超. 基于公交车到达率的港湾式车站对路段通行能力的影响分析[J]. 公路与汽运, 2015(4): 46-50. [LV S, YUAN Z Z, CAO Z C. Bus bay based on bus arrival rate of road traffic impact analysis[J]. Highways and Automotive Applications, 2015(4): 46-50.]
- [6] 刘路, 毛保华, 梁肖, 等. 定点停靠公交站的路段通行能力计算方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(4): 123-128. [LIU L, MAO B H, LIANG X, et al. Calculation method of road link capacity with fixed-dwelling bus stop[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(4): 123-128.]
- [7] 杨晓光, 周光伟. 公交优先技术方法[J]. 城市交通, 2000(2): 1-12. [YANG X G, ZHOU G W. Bus priority methods[J]. Urban Transport of China, 2000(2): 1-12.]
- [8] 许秀华. 公交车在公交停靠站的停靠时间研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015. [XU X H. Research on bus stopping time at the bus stop[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.]
- [9] 曲昭伟, 金勇, 陈永恒, 等. 提前右转组织方式及其影响分析[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(2): 106-109, 115. [QU Z W, JIN Y, CHEN Y H, et al. Planning methods and effect analysis of advance right-turn[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(2): 106-109, 115.]