

文章编号:1005-0523(2019)02-0047-07

城市道路路段人行横道通行能力分析

王天童¹, 郑长江¹, 马庚华², 沈金星¹

(淮海大学 1.土木与交通学院;2.港口海岸与近海工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:人行横道通行能力是影响人行横道设置的重要因素。通过对行人及非机动车过街速度和过街特征的研究,分别建立了以密闭容器为基础的有信号控制人行横道通行能力模型,和以可接受间隙为理论依据的无信号控制人行横道通行能力模型,并通过实例进行了验证,以期对人行横道通行能力研究提供一定价值的参考。

关键词:城市交通;行人交通;人行横道;通行能力

中图分类号:U491.5

文献标志码:A

随着行人与非机动车在城市交通系统中所占比例越来越高,就需要在保证行人及非机动车出行安全的基础上,实现道路设施利用的最大化。在影响人行横道设置的诸多因素中,人行横道通行能力无疑是极其重要也是最基本的参数。

徐良杰,王炜等人以行人、非机动车的运行特征为基础,针对典型的四相位信号控制交叉口给出了计算行人通行能力的公式^[1];Virginia P S 依据行人过街特征及人行横道基本信息,给出了有信号控制人行横道上最大行人过街流率^[2];邱杨等人依据行人过街特征,以推导出行人等待安全间隙及错过安全间隙概率的方法,给出了无信号控制人行横道通行能力计算方法^[3];Kadali 和 Perumal 通过采集路段人行横道处的行人特性、机动车特征及交通流特征数据,确定了影响行人过街决策的主要因素^[4]。

纵观国内外对于人行横道通行能力的研究,发现部分研究成果由于各种各样的原因有失准确。譬如,片面关注行人过街,而忽略了非机动车过街需求;单独考虑行人及非机动车的过街特性,忽略了两者混合带来的影响;未考虑信号灯由绿转黄时,尚未通过的行人及非机动车情况。因此本文从行人及非机动车过街速度和占用面积着手,综合考虑了路段人行横道上行人及非机动车过街特征,分别建立了有信号控制和无信号控制人行横道通行能力模型,并结合实例进行验证。

1 行人及非机动车交通特性分析

1.1 行人及非机动车过街特性

行人及非机动车在有信号控制和无信号控制人行横道上的过街特征^[5],主要表现为以下几个方面:

1) 在有信号控制人行横道上,行人及非机动车在绿灯时间内通过,未通过的行人会在信号灯转黄时加快步速通过人行横道;

2) 在无信号控制人行横道上,行人及非机动车能否通过人行横道取决于机动车的安全间隙,随着机动车数量的增加,行人及非机动车过街难度增加;

收稿日期:2018-08-31

基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK20170879)

作者简介:王天童(1994—),男,硕士研究生,研究方向为交通运输规划与管理。

通讯作者:郑长江(1966—),男,教授,研究方向为交通运输规划与管理。

3) 无论是有信号控制还是无信号控制人行横道,行人和非机动车之间会由于过街速度和占用面积的差异产生相互影响,进而影响人行横道的通行能力。

1.2 过街特性分析

1.2.1 过街速度特征

本文对于行人及非机动车过街速度特征的研究采用实地观测的方法,对于交通量较小,行人违章过街现象少的路段采用人工秒表测算;部分交通量过大,且存在少数行人违章过街的路段,采用现场摄像,调查结束后根据录像整理行人及非机动车过街速度。依据此方法,按照商业区,居民区,学校,医院,公园5种不同用地性质的路段,分别选择了5个具有一定代表性的人行横道收集了200个行人过街速度样本,100个自行车过街速度样本和100个电瓶车过街速度样本,并对行人及非机动车过街速度的频率进行了分析,整理的的数据如图1~图3所示。

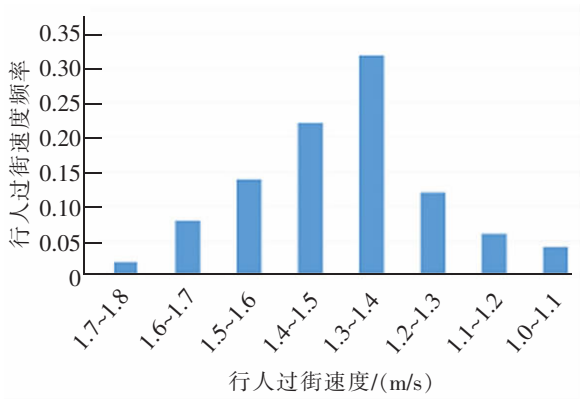


图1 行人过街速度频率分布图

Fig.1 Frequency distribution diagram of pedestrian crossing speed

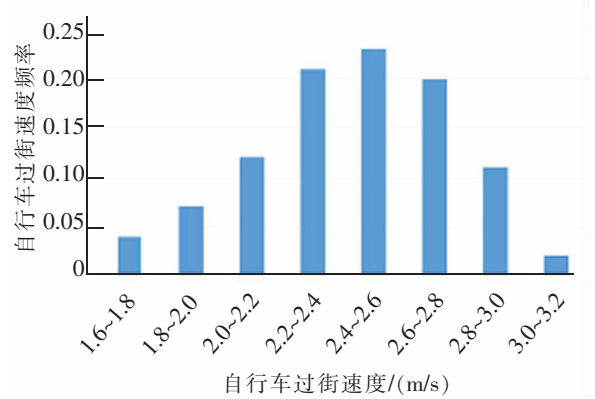


图2 自行车过街速度频率分布图

Fig.2 Frequency distribution diagram of bicycle crossing speed

采用加权平均的方法计算得平均速度,以平均速度为设计速度,即行人、自行车、电瓶车的横向过街设计速度为:1.40,2.43,2.60 m/s。

1.2.2 过街占用面积特征

1) 行人过街占用面积。根据我国学者实测^[5],行人的平均肩宽为0.75 m,行人在行走过程另需0.25 m的随意摆动宽度,则行人过街时宽度要求为1 m。行人的平均步幅^[6]为0.66 m,在行走过程中前后两步应具有连续性及自由性,则前后两步还需一定的安全距离0.2 m^[5],所以行人在过街过程中所需的前后间距要求 $0.66 \text{ m} \times 2 + 0.2 \text{ m} = 1.52 \text{ m}$ 。即行人在横向过街过程中,占用的安全面积为 $1.52 \text{ m} \times 1 \text{ m} = 1.52 \text{ m}^2$ 。

2) 非机动车过街占用面积。非机动车过街占用面积包括前后安全距离和左右安全宽度,前后安全距离包括4个主要部分^[6],分别是反应时间内行驶的距离,采取制动时间内行驶的距离,非机动车自身长度和采取制动后与前方物体保持的距离。由此可得非机动车在横向过街时的前后距离要求为

$$L = v_0 t + \frac{v_0^2}{2(f+i)g} l_0 + l_{\text{车}} \quad (1)$$

式中: L 为非机动车横向过街前后长度要求,m; v_0 为非机动车正常行驶速度,m/s; t 为反应时间,s; l_0 为非机

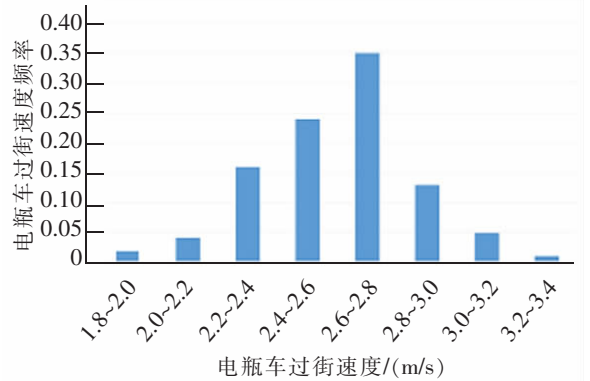


图3 电瓶车过街速度频率分布图

Fig.3 Frequency distribution diagram of battery bicycle crossing speed

动车采取制动后与前方物体的安全距离, m ; $l_{\text{车}}$ 为非机动车的车身长度, m ; f 为轮胎与路面的附着系数; i 为道路纵坡度(%), 上坡为正, 下坡为负; g 为重力加速度。

式(1)各元素取值如下: 自行车和电瓶车设计行驶度为 2.43 m/s 和 2.60 m/s; 自行车或电瓶车驾驶员反应时间取为 0.7 s^[5]; 路面与轮胎的附着系数, 取干燥状态下混凝土或沥青路面与轮胎的附着系数 0.75^[7]; 本次选取的路段道路纵坡度均为 0; 重力加速度按照惯例取 9.8 m/s²; 根据实地观察和调查测量, 自行车或电瓶车采取制动后与前方物体的安全距离取 0.5 m, 且目前自行车多为 26 型共享单车, 取自行车平均车长为 1.7 m; 电瓶车种类较多, 经过多个品牌电瓶车车长实际测量, 取平均车长为 1.9 m。则自行车、电瓶车横向过街前后所需的前后安全距离为: 4.3, 4.68 m。另外, 根据自行车和电瓶车过街行为特征, 自行车和电瓶车在横向过街时所需的宽度为 1 m 和 1.1 m^[6]。综上所述自行车和电瓶车在横向过街时所占用面积分别为 4.3 m² 和 5.14 m²。

1.2.3 非机动车过街换算系数计算

由于自行车和电瓶车在横向过街过程中, 过街速度和占用面积均大于行人, 因此, 有必要将自行车和电瓶车换算成标准行人, 其换算公式^[6]如下

$$K = \frac{S}{S_{\text{人}}} \times \frac{v_{\text{人}}}{v} \quad (2)$$

式中: K 为非机动车过街换算系数, S 表示非机动车过街点用面积, m²; $S_{\text{人}}$ 表示行人过街点用面积, m²; V 表示非机动车过街设计速度, m/s; $V_{\text{人}}$ 表示行人过街设计速度, m/s。由上文所得的自行车和电瓶车过街速度及过街占用面积可得自行车和电瓶车对行人的换算系数为 1.63, 1.82。

2 平面人行横道通行能力分析

2.1 有信号控制人行横道通行能力分析

本次建立的有信号控制人行横道通行能力模型在相关文献[5-7]的基础上, 假设人行横道为一个封闭的容器“R”, 绿灯启亮时, 行人以横向一排为单位, 逐次通过人行横道。则在行人通过时间内, 路段人行横道实际通行能力计算模型为

$$q = \frac{3600}{C} \times \frac{B}{b} \times \left(\frac{G - \frac{L}{v_p} - t_{\text{损}} - t_{\text{黄}}}{\frac{b_{\text{间}}}{v_p}} + \frac{t_{\text{黄}}}{\frac{b_{\text{间}}}{v_p'}} + 1 \right) \times r_1 \times r_2 \times r_3 \quad (3)$$

式中: q 为路段人行横道实际通行能力; C 为信号灯周期, s; B 为行人横道宽度, m; b 为行人横向过街宽度要求; p 为一次行人通过时间内通过的行人排数; r_1 为行人不均匀通过的折减系数, 推荐取值为 0.93~0.95^[7]; r_2 为对向行人干扰的折减系数, 具体数值见参考文献^[7]; r_3 为行人, 自行车和电瓶车相互影响的折减系数, 推荐取值为 0.92~1.0^[6]; G 为行人过街时间, 为行人信号灯绿灯与黄灯时间之和; L 为行人横道长度, m; v_p 为行人横向过街设计速度, m/s; $t_{\text{损}}$ 为行人横向过街过程中损失时间, 即启动延误时间, 通常取 0.3 s^[6]; $t_{\text{黄}}$ 为行人信号灯黄灯时间; $b_{\text{间}}$ 为前后排行人间距, m; v_p' 为行人信号灯由绿变黄后行人横向过街速度, 由图 1 数据分析取 1.5 m/s。

2.2 无信号控制人行横道通行能力分析

在无信号控制的人行横道上, 行人在穿过人行横道前根据道路实际情况, 判断是否可以安全通过。当行人穿越人行横道时, 由于车辆的到达和车辆的车头时距不同, 行人会有不同的可利用时间, 当行人可利用的时间大于行人安全通过所需时间时, 行人便会择机通过^[3]。

2.2.1 行人可穿越安全间隙数计算

对于服从泊松分布的车流, 可以假设在一定时间内到达量车的概率为

$$P(K) = \frac{\lambda^K}{K!} \times e^{-\lambda} \quad (4)$$

式中: $P(K)$ 为一定时间内到达辆车的概率; K 为一定时间内到达的车辆数; λ 为单位时间到达指定车辆数的平均发生率。

当知道路段的机动车交通量时,就可以根据该概率求出路段人行横道可供行人安全通过的间隙数。该间隙数为

$$Z=Q_{\text{车}} \times P(t_k \geq t) = Q_{\text{车}} \times e^{-\lambda} \quad (5)$$

式中: Z 为可供行人安全通过的间隙数; $Q_{\text{车}}$ 为路段机动车交通量。式中的 λ ,指的是行人安全通过所需时间 t 内到达的平均车辆数,其计算方法为

$$\lambda = \frac{Q_{\text{车}}}{3600} \times t \quad (6)$$

即无信号控制人行横道上行人可安全穿越的孔隙数 Z 的计算方法如下

$$Z = Q_{\text{车}} \times e^{-\frac{Q_{\text{车}}}{3600} \times t} \quad (7)$$

2.2.2 安全间隙内穿越人流量计算

行人安全通过所需的时间包括3个部分:①第1排行人通过人行横道的时间,②后续排的行人逐次通过行人间安全间距的时间,③由于对向行人的干扰所延误的时间。我国学者通过实测^[7]发现:行人在横向过街过程中,由于对向行人的干扰,绕过对向行人需要额外增加时间 Δt ,取值为0.2 s,则每过1排行人,就需额外增加1个 Δt 。综上所述,行人安全通过的时间 t 的计算方法为

$$t = \frac{L}{v_p} + \frac{b_{\text{间}}}{v_p} \times (n-1) + \Delta t \times n \quad (8)$$

式中: t 为行人安全通过人行横道的时间,s; L 为人行横道长度,m; v_p 为行人横向过街设计速度,m/s; $b_{\text{间}}$ 为行人横向过街前后安全距离,m; Δt 为由于对向行人产生的时间延误,s; n 为安全间隙内通过的行人的排数。

则本次建立的无信号控制路段人行横道通行能力模型是在参考文献[8]的基础上,并结合以上分析得出

$$q = Z \times n \times \frac{B}{b} \times r_1 = Q_{\text{车}} \times e^{-\frac{Q_{\text{车}}}{3600} \times t} \times n \times \frac{B}{b} \times r_1 \times r_2 \quad (9)$$

式中: q 为路段人行横道实际通行能力; B 为行人横道宽度,m; b 为行人横向过街宽度要求; r_1 为行人不均匀通过的折减系数; r_2 为对向行人干扰的折减系数; t 为行人安全通过人行横道的时间,m; v_p 为行人横向过街设计速度,m/s; $b_{\text{间}}$ 为行人横向过街前后安全距离,m; n 为安全间隙内通过的行人的排数。

2.3 两种控制方式比较

有信号控制和无信号控制人行横道在实际应用中均较为常见,且适用于不同类型的路段,对于有信号控制和无信号控制人行横道通行能力的对比,主要集中在以下几个方面:

1) 有信号控制人行横道在行人绿灯时间内,行人拥有优先通行权,无信号控制人行横道上行人始终拥有优先通行权,但由于实际路况情况下部分机动车驾驶员未做到礼让行人,导致了无信号控制人行横道的通行能力有所下降;

2) 目前而言,有信号控制人行横道通行能力大于无信号控制人行横道通行能力,所以行人过街需求量大,且机动车较为密集的路段更适合于设置为有信号控制人行横道;

3) 影响有信号控制人行横道通行能力的主要因素是行人过街绿灯时间;影响无信号控制人行横道通行能力的主要是路段车流量大小,车流量大,行人过街难度增加,通行能力随之降低。

3 应用实例

3.1 有信号控制人行横道通行能力计算

选取汉中门大街劲顺花园小区门口处人行横道,劲顺花园位于莫愁湖北岸,东边不远处为汉中门大街和虎踞路交叉口,车流量较大,行人横向过街存在一定需求,其具体调查的晚高峰17:00-18:00的行人,自行车和电瓶车交通量如表1所示。

表 1 汉中门大街劲顺花园小区处人行横道晚高峰交通量调查表

Tab.1 Evening peak traffic volume survey of crosswalk in Jinshun garden community, Hanzhongmen street

方向	行人/人	自行车/辆	电瓶车/辆	换算汇总/人
由南向北	117	9	27	181
由北向南	144	23	56	284

该路段行人实际横向通过的路段为 18 m 左右,人行横道宽度为 5 m。该人行横道信号灯的信号周期为 140 s,1 个信号周期内包括 2 次循环,其中行人通行的绿灯时间均为 20 s,黄灯时间均为 3 s。具体路段如图 4 所示。

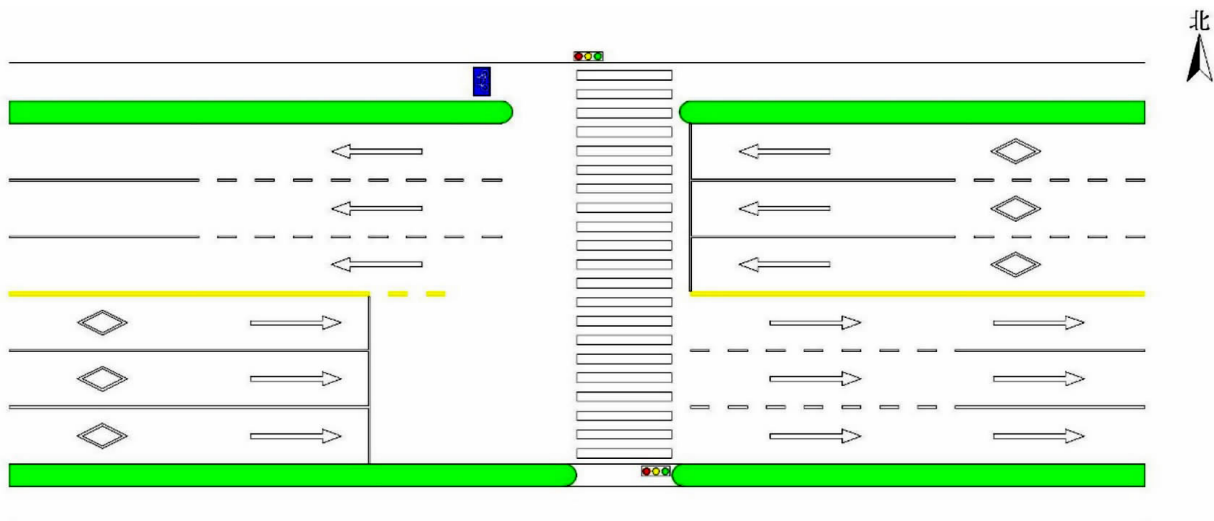


图 4 劲顺花园小区处人行横道路段图

Fig.4 Section map of pedestrian crossing in Jinshun garden community

行人不均匀到达的折减系数的选取,依据实际调查所得交通量可知,该路段单向行人交通量均 ≤ 500 人/h,因此 r_1 取为 0.95;对向行人干扰的折减系数与行人通行红灯时间和人行横道长度有关,依据文献[7],对于信号周期内的 2 次循环, r_2 分别取为 0.75 和 0.78;由于该路段行人流中,行人比例较高,所以 r_3 取为 0.95。综上所述,利用以上数据带入模型,可计算的该路段人行横道的通行能力为

$$q = \frac{3600}{140} \times \frac{5}{1} \times \left[\left(\frac{23 - \frac{18}{1.4} - 0.3 - 3}{\frac{1.52}{1.4}} + \frac{3}{1.52} + 1 \right) \times 0.75 + \left(\frac{23 - \frac{18}{1.4} - 0.3 - 3}{\frac{1.52}{1.4}} + \frac{3}{1.52} + 1 \right) \times 0.78 \right] \times 0.95 \times 0.95 = 1818 \text{ 人/h} \quad (10)$$

根据道路通行能力手册^[9],该处人行横道在高峰时段处于 C 级服务水平,行人过街表现为个体较随意,部分行人活动受影响,且该路段行人及非机动车实际交通量远小于人行横道通行能力,故此设置信号控制的人行横道很有必要,且通过验算可以满足需求。

3.2 无信号控制人行横道通行能力计算

选取清凉山公园南门处人行横道,清凉山公园西临广州路与虎踞路交叉口,东临江苏省医院,因此清凉山南门处的车流量极大,车流密度较高,其具体调查的晚高峰 17:00-18:00 的行人、非机动车和机动车的交通量如表 2 所示。

表2 清凉山公园南门处人行横道晚高峰交通量调查表
Tab.2 Evening peak traffic volume survey at the south gate of Qingliangshan park

机动车	小型车/辆	大型车/辆	标准车当量/pcu	
由东向西	1 460	84	1 586	
由西向东	1 026	88	1 158	
非机动车	行人/人	自行车/辆	电瓶车/辆	换算汇总/人
由北到南	96	10	22	153
由南到北	52	2	6	67

该路段行人实际横向通过的路段为 24 m 左右,人行横道宽度为 4.5 m。具体路段如图 5 所示。

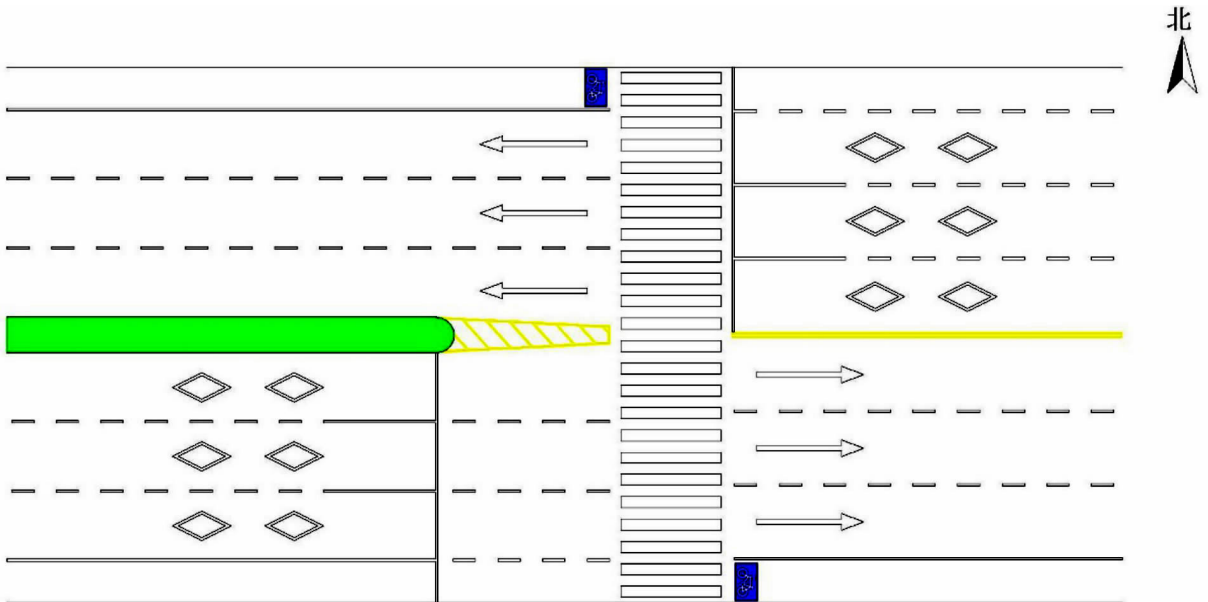


图5 清凉山公园南门处人行横道路段图

Fig.5 Section map of pedestrian crossing at the south gate of Qingliangshan park

由于该路段人行横道为无信号控制人行横道,且实际调查发现只有少数机动车驾驶员会主动避让行人,故行人横向过街需寻找机动车过街间隙,由无信号控制的人行横道通行能力模型可知,仅供 1 排行行人可安全穿越的空隙数为

$$t = \frac{24}{1.4} + 0.2 \times 1 = 17.343 \text{ s} \quad (11)$$

$$Z = Q_{\text{车}} \times e^{-\frac{Q_{\text{车}}}{3600} \times t} = 2744 \times e^{-\frac{2744}{3600} \times 17.343} = 0.005 \quad (12)$$

仅依靠机动车的间隙使得 1 排行行人安全通过的概率为

$$p = e^{-\frac{2744}{3600} \times 17.343} = 2.09 \times 10^{-6} \quad (13)$$

通过以上计算可得,行人横向过街时仅依靠机动车的安全间隙通过人行横道的概率几乎为零,即行人如果在这种状态下横向过街,完全需要依靠机动车驾驶员主动减速或者停车避让。这种情况的出现,使得该路段人行横道的实际通行能力极低,也极大的干扰了该路段行人过街的安全,非常容易引发交通事故^[10],且该路段人行横道处已经有局部拥堵状况的出现。总之,该路段无信号控制的人行横道急需改为有信号控制的人行横道,否则该路段的问题无法得到根本性解决。

4 结论

本文充分考虑了影响人行横道通行能力的诸多因素,分别对有信号控制和无信号控制人行横道通行能力进行分析,并得出其计算方法。

1) 通过对有信号控制人行横道上行人和非机动车过街特性的研究,在充分考虑了诸多影响通行能力的折减系数的基础上,建立了有信号控制人行横道通行能力模型,并依托模型对路段人行横道通行能力和实际交通量做出对比,发现路段人行横道符合C级服务水平,且路段实际交通量仅为人行横道通能力1/4左右,行人过街较为随意,与实际路段情况相符。

2) 通过对无信号控制人行横道上行人及非机动车过街特性的分析,采用概率论的方法,以可接受间隙理论为基础,得出无信号控制人行横道上可穿越的人流量,并依托模型对实际路段进行验证,发现该路段人行横道通行能力极低,行人仅依靠穿越车辆间隙通过人行横道的通行能力几乎为0,极大地干扰了行人过街安全的同时易引发交通事故,且该路段人行横道处已经有局部拥堵状况出现,因此建议将该路段无信号通知人行横道改建为有信号控制人行横道。

3) 依据本文所提出的有信号控制和无信号控制人行横道通行能力的计算方法,通过计算具体路段人行横道通行能力,进而与实际交通量对比,依据对比情况和实际路段情况,可为城市道路路段人行横道设置提供一定的理论参考。

参考文献:

- [1] 徐良杰,王炜,俞斌. 信号交叉口非机动车及行人交通控制研究[J]. 交通运输工程与信息学报,2004,2(2):102-108,114.
- [2] OH H, SISOPIKU V P. Probabilistic models for pedestrian capacity and delay at roundabouts[C]//Maui.Proceedings of the 4th International Symposium on Highway Capacity. Hawaii:Naticnal Research Council,2000:459-470.
- [3] 邱杨. 路段无信号控制人行横道实际通行能力研究[J]. 湖南交通科技,2016,42(4):174-177.
- [4] RAGHURAM K B,RATHI N,PERUMAL V. Evaluation of pedestrian mid-block road crossing behaviour using artificial neural network[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2014,1(2):111-119.
- [5] 冯绍海,李淑庆,谢晓忠. 交叉口人行横道通行能力研究[J]. 交通与计算机,2011,29(1):20-24.
- [6] 李文勇,陈学武,王庆,等. 路段人行横道通行能力及过街绿灯时间计算[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2006,30(5):751-754.
- [7] 郑祖武. 现代城市交通[M]. 北京:人民交通出版社,1998:320-323.
- [8] 韩慧敏,彭宏勤. 行人过街设施的设置依据与措施[J]. 湖南交通科技,2007,33(4):134-136,184.
- [9] 美国交通研究委员会(TRB). 道路通行能力手册[M]. 任福田,译. 北京:中国建筑工业出版社,1991.
- [10] 付文进,郑长江,王晨. 无控制人行横道处城市道路通行能力研究[J]. 大连交通大学学报,2017,38(4):38-40.

Analysis of the Pedestrian Crossing Capacity in Urban Road Section

Wang Tiantong¹,Zheng Changjiang¹,Ma Genghua²,Shen Jinxing¹

(1. College of Civil Engineering and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The capacity of pedestrian crossing is an important factor affecting the setting of pedestrian crossing. Through the investigation of street speed and crossing characteristics of pedestrians and non-motorized vehicles, a signal control capacity model of pedestrian crossings based on closed vessels and a non-signal control capacity model of pedestrian crossings based on gap acceptance were established and verified by an example in this paper so as to provide reference for the research on the capacity of pedestrian crossings.

Key words: urban traffic; pedestrian traffic; pedestrian crossing; traffic capacity