

# 有行人专用相位交叉口行人过街时间模型

赵韩涛<sup>1</sup>, 郭 栋<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学(威海) 汽车工程学院, 264209 山东 威海; 2. 山东理工大学 交通与车辆工程学院, 255000 山东 淄博)

**摘要:** 为确定有行人专用相位交叉口行人绿灯时间,研究了行人穿越交叉口的过街时间. 利用交通波理论推导了行人跨越安全岛的时间函数,考虑同向、对向和交叉行人流的影响,借鉴 HCM 的行人过街时间模型构建了行人穿越交叉口对角的时间公式. 采用录像法和人工测量法对威海市 4 个交叉口进行调查,统计分析得到:行人穿越交叉口对角和非实体安全岛的 15% 位速度为 1.43 m/s,穿越实体安全岛的 15% 位速度为 1.35 m/s;行人在对角通行的有效宽度为 9 m 和 12 m;利用 SPSS 标定了模型参数. 案例研究结果表明,所建模型能较为准确地预测行人过街时间,误差在 5% 以内.

**关键词:** 交通控制;行人专用相位;行人;过街时间;模型

中图分类号: U491

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)08-0057-05

## Model of pedestrians crossing time at signalized intersection with exclusive pedestrian phase

ZHAO Han-tao<sup>1</sup>, GUO Dong<sup>2</sup>

(1. Automotive Engineering Institute, Harbin Institute of Technology at Weihai, 264209 Weihai, Shandong, China;

2. School of Transportation and Vehicle, Shandong University of Technology, 255000 Zibo, Shandong, China)

**Abstract:** To determine the time of green light for pedestrians at signalized intersection with exclusive pedestrian phase, a model for estimating crossing times is proposed. The model consists of two parts. The time function for pedestrian crossing refuges is derived using wave theory, and the time function for pedestrian crossing intersection diagonally is an adaptation of existing HCM model. The model attempts to describe the influence of dominant platoon, opposite platoon and rectangular cross pedestrian flow. According to the data extracted from video survey and artificial measurement of four intersections at Weihai, the statistical analysis comes to conclusions. The 15th percentile speed of pedestrians crossing intersection diagonally and non-physical refuges is 1.43 m/s, and that of pedestrians crossing physical refuges is 1.35 m/s. The effective widths of pedestrians crossing intersection diagonally are 9 meters and 12 meters. Finally, the model parameters were calibrated by using SPSS. Results of a case study show that the model can more accurately predict pedestrian crossing time, and the error is within 5%.

**Key words:** traffic control; exclusive pedestrian phase; pedestrian; crossing time; model

交叉口行人交通问题日益受到国内外交通工程研究人员的重视,如行人流预测<sup>[1]</sup>、行人计数方法<sup>[2]</sup>、行人过街时间等. 其中,行人穿越交叉口时间的研究有助于制定信号周期和行人绿灯时间,对于保障行人安全和减少机动车延误至关重

要. 美国的 HCM2000<sup>[3]</sup>、MUTCD2009<sup>[4]</sup> 以及日本的交通信号控制手册<sup>[5]</sup> 均提供了类似的行人过街时间公式. 上述公式均依据同向行人流的平均步速和人行横道宽度,而未考虑其他方向行人流的需求和作用. Golani<sup>[6]</sup> 引入双向行人流的影响,建立了人行横道高占有率条件下的行人过街时间模型. Alhajyaseen<sup>[7]</sup> 以交通波理论和空气阻力理论分析了行人加速和减速的过程,进而推导了过街时间公式,其过程复杂,难点在于行人流阻力系

收稿日期: 2011-05-19.

作者简介: 赵韩涛(1978—),男,讲师.

通信作者: 赵韩涛, zhthitwh@163.com.

数的确定. 国内在行人交通方面主要侧重于行人过街交通特性、通行能力<sup>[8]</sup>等, 部分学者研究了混合交通流下的行人过街时间. 如刘金广<sup>[9]</sup>研究了信号控制交叉口行人和自行车的聚集特性; 裴玉龙、冯树民等<sup>[10]</sup>采用数理统计的方法分析了人行横道长度、过街行人数量、绿灯时间等对行人过街速度的影响; 徐良杰、王伟<sup>[11]</sup>研究了左转和右转机动车影响下的行人过街时间模型.

山东省威海市所有信号控制交叉口均设置行人专用相位, 行人可利用交叉口对角穿行. 此种信号控制方式下, 行人过街时间是确定最优信号配时方案的关键. 现有行人过街时间的研究成果均立足于常规的人行横道, 且主要考虑人车冲突. 鉴于此, 本文针对行人对角过街时不同方向的行人通行需求, 尝试建立适用于有行人专用相位信号交叉口的行人过街时间模型.

### 1 行人过街时间分析

#### 1.1 HCM 行人过街时间模型

文献[3]研究了人行横道时空值的确定, 给出了清空交叉口人行过街所需时间(或有效绿灯时间)的计算公式为

$$\begin{cases} t = 3.2 + \frac{L}{S_p} + \left(0.81 \frac{N_{ped}}{W}\right), & W > 3.0 \text{ m}; \\ t = 3.2 + \frac{L}{S_p} + (0.27N_{ped}), & W \leq 3.0 \text{ m}. \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $t$  为总的过街时间,  $L$  为人行横道长度,  $S_p$  为行人平均速度,  $N_{ped}$  为一个信号周期内过街的行人数量,  $W$  为人行横道宽度, 行人起动时间为 3.2 s.

HCM 的计算方法假定行人以某一特定步速前行, 行人的起动延误为常值, 同时考虑了同向行人队列消散的影响. 借鉴其计算公式, 本文进一步分析对向行人流、交叉行人流的影响, 建立基于交叉口几何条件、各个方向行人通行需求的行人过街时间模型.

#### 1.2 有行人专用相位交叉口行人过街时间分析

行人专用相位在信号控制交叉口的应用有 3 种方式, 如图 1 所示. 图 1(a)和图 1(b)完全隔离了行人和车辆的冲突, 差别在于是否允许行人沿交叉口对角方向通行. 图 1(c)为行人提供专用通行时间之外, 允许行人和同向车辆共用相位. 3 种方式的适用场合需要根据行人等待空间、过街时间及信号周期等时空因素决定.

图 1(a)中行人过街时间受同向行人流和对向行人流的影响, 图 1(b)中行人在对角通行时增加了垂直交叉行人流的影响, 图 1(c)则保留了机

动车流的影响. 对于图 1(b)和图 1(c)中行人专用相位而言, 行人绿灯时间由对角通行的行人过街时间决定.

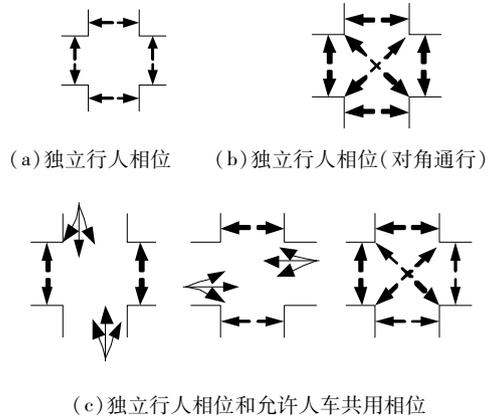


图 1 行人专用相位应用形式

行人对角过街时间由两部分组成: 越过安全岛时间  $T_d$ 、穿越交叉口内部时间  $T_c$ , 如图 2 所示. 行人红灯期间, 随机到达的行人以相互之间保留一定间隙的方式排队聚集在安全岛上(A 区)等候通行.  $T_d$  即为行人绿灯伊始到所有排队行人越过安全岛所用时间, 其值由安全岛几何尺寸、行人步速及行人数量决定. 行人在交叉口内部通行时, 在 B、C、D 区分别受到同向、垂直交叉、对向行人流的阻碍, 走行空间被限制, 造成不同程度的延误.  $T_c$  即为穿越交叉口内部所需的时间, 其值由交叉口对角线长度、行人步速和不同方向的行人数量决定.

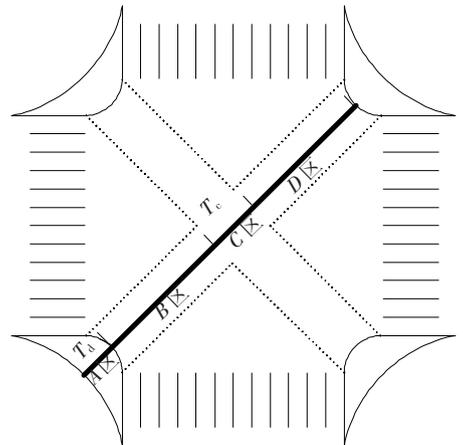


图 2 行人对角过街时间组成

## 2 模型建立

### 2.1 行人穿越安全岛时间 $T_d$

实际的交通观测表明, 当安全岛等待行人形成排队时, 行人流的行为非常类似于车流交通波的行为. 行人绿灯亮起时, 排队等待的行人从安全岛边缘位置产生起动波, 该波以接近行人在安全

岛上的自由流速度(定义为 $u_1$ )向后传播.不考虑行人起动期间后续到达的行人,起动波的波阵面将在处于最末尾的排队行人起动时消散,其消耗时间为 $L_1/u_1$ ,其中 $L_1$ 为红灯期间行人排队长度.最末尾行人以 $u_1$ 的速度越过安全岛,其消耗时间亦为 $L_1/u_1$ .则 $T_d$ 可描述为

$$T_d = \frac{2L_1}{u_1}. \quad (2)$$

式中: $u_1$ 需要依据本地数据进行标定, $L_1$ 由不同时间段内行人到达数量以及安全岛所能提供的空间所决定.

预期对角通行的行人在红灯期间逐渐聚拢,如图3(a)阴影部分所示.为便于理论推导,将行人等待区域简化为图3(b)所示形状(不考虑畸形交叉口).

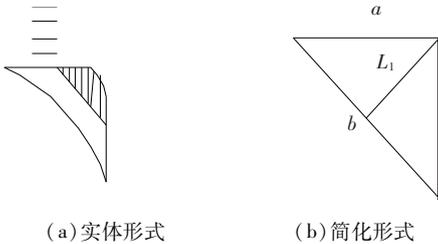


图3 安全岛上行人等待区域示意图

假定单个行人站立时需要的空间面积为 $A_0$ ,红灯期间行人聚集人数为 $N_{ped0}$ .根据几何形状的面积进行换算,即 $N_{ped0} \cdot A_0 = a^2/2 = b \cdot L_1/2$ ,推导可得 $L_1 = \sqrt{N_{ped0} \cdot A_0}$ ,代入式(2),得

$$T_d = \frac{2L_1}{u_1} = \frac{2\sqrt{N_{ped0} \cdot A_0}}{u_1}. \quad (3)$$

需要注意的是,式(3)中并未特别标明行人起动损失时间 $I$ .不同类型人群的 $I$ 值不尽相同,聚集人群和单个行人的 $I$ 值也有差异,本文将起动损失时间融入 $T_d$ .

## 2.2 行人穿越交叉口内部时间 $T_c$

行人在流量较少时以自由流速度通行.设交叉口对角线长度为 $L$ ,自由流速度为 $u_2$ ,则穿越时间为 $L/u_2$ .同向行人流增大到一定程度时,行人成群依次过街,队列呈逐渐拉伸之势,个体行人产生延误 $d_s$ .行人继续前行,在交叉口中央位置遭遇对向行人流和左右垂直方向的交叉行人流.对向行人流对行人产生阻力,迫使行人减速,造成延误 $d_0$ .行人流交叉类似于机动车流交叉的情形,行人将利用可插间隙通行,产生延误 $d_c$ .行人穿越交叉口内部的过街时间可表示为

$$T_c = \frac{L}{u_2} + d_s + d_0 + d_c. \quad (4)$$

根据HCM的研究结果,行人过街时间由人

行设施的时空特性决定,即 $N_{ped}/w, N_{ped}$ 为一定时间内需要通行的行人数量, $w$ 为人行设施的有效宽度.同理,在行人受对向、交叉行人流干扰时,均为通行时空受到不同程度的影响.因此,借鉴式(1),有行人专用相位交叉口行人穿越时间可表述为

$$T_c = \frac{L}{u_2} + m \frac{N_{ped1}}{w} + n \frac{N_{ped2}}{w} + p \frac{N_{ped3} + N_{ped4}}{w}. \quad (5)$$

式中: $N_{ped1}$ 为同向行人数量; $N_{ped2}$ 为对向行人数量; $N_{ped3}$ 和 $N_{ped4}$ 为交叉行人数量; $m, n, p$ 分别为同向、对向、交叉行人流的影响系数.

## 3 数据采集

### 3.1 模型参数分析

式(3)、(5)中的交叉口几何特征值参数 $L$ 以及不同方向行人数量 $N_{ped0}, N_{ped1}, N_{ped2}, N_{ped3}, N_{ped4}$ 可直接测量或计数; $A_0$ 为行人设施设置的1个重要参数,HCM取值为 $0.3 \text{ m}^2/\text{人}$ ,欧洲一些国家的取值为 $0.28 \text{ m}^2/\text{人}$ <sup>[12]</sup>,我国行人静态站立占用的面积取值 $0.25 \text{ m}^2/\text{人}$ <sup>[13]</sup>;其余参数 $u_1, u_2$ 以及 $m, n, p$ 需要利用统计数据进行分析.

### 3.2 数据采集方法

数据采集采用录像法与人工测量相结合的方式. $u_1, u_2$ 的取值方法:分析行人绿灯期间的录像,提取流量较少时行人以近似自由流速度前行的影像,分别记录行人到达及越过安全岛和交叉口内部的时刻,通过距离-时间的基本公式求解 $u_1, u_2$ .

$N_{ped0}, N_{ped1}, N_{ped2}, N_{ped3}$ 和 $N_{ped4}$ 的取值方法: $N_{ped0}$ 为安全岛上所有等待的行人,其余4个数值为对角通行的行人,提取时需辨别行人通行方向.排除非机动车较多的录像数据,较少的非机动车以折合的方式计入行人数量,折合系数根据行人占用面积和非机动车占用面积的比值求取.我国自行车静态停车面积为 $1.2 \sim 1.8 \text{ m}^2/\text{辆}$ ,考虑到电动自行车的应用,本文取上限值 $1.8 \text{ m}^2/\text{辆}$ .

$w$ 的取值方法:以 $1 \text{ m}^2$ 为单位均等地划分交叉口内部区域,根据分帧影像记录不同行人数量时的通行宽度.

### 3.3 数据统计结果分析

选择4个人流密集的位于威海市商业中心区的交叉口作为调查对象,调查时间定在连续3周的星期六、星期日,每个交叉口分别录像,合计48 h.排除掉行人流特别少及非机动车占比较大比例的数据,共获取有效数据326组,可利用统计分析各参数值的选取结果.

图4为行人穿越安全岛和交叉口对角的平均自由流速度和15%位速度,其中交叉口1、交叉口2和交叉口3为非实体安全岛,交叉口4为实体安全岛。

图4表明,对于交叉口对角和采用标线施划的安全岛而言,行人自由流速度变化不大,在1.55~1.61 m/s之间波动,平均为1.58 m/s;15%位速度在1.41~1.45 m/s之间波动,平均为1.43 m/s。对于采用实体方式的安全岛而言,行人自由流速度略有下降,平均为1.50 m/s,15%位速度为1.35 m/s。文献[10]统计了哈尔滨市不同条件下行人过街速度的变化,给出1.2 m/s为通用的过街设计速度。显然,对于有行人专用相位的信号控制交叉口而言,行人自由流速度高于该值。原因在于两点:一是杜绝人车冲突的方式使得行人放心前行;二是当前的行人绿灯时间设置较短,且未设倒计时,行人习惯快速通行。综合考虑,本文取行人在交叉口对角的 $u_2$ 值及非实体安全岛的 $u_1$ 值为1.43 m/s,在实体安全岛的 $u_1$ 值为1.35 m/s。

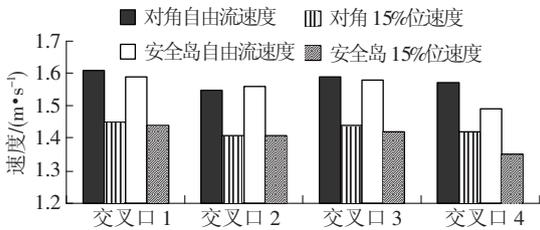


图4 不同交叉口行人自由流速度及15%位速度

图5所示为不同同向行人数量下的行人穿越交叉口的有效宽度观测值。

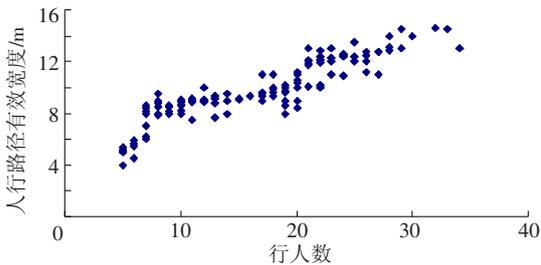


图5 行人穿越交叉口有效宽度观测值

由图5可见,行人数量不同时, $w$ 在4~15 m波动。所调研的4个交叉口内部均未标划人行横道,行人通行自由,因此有效宽度值变化较大。当行人数量少于15人时,宽度在8~10 m之间浮动(人数特别少时在6 m上下浮动),取 $w = 9$  m;当行人数量大于15人时,宽度在10~14 m之间浮动,取 $w = 12$  m。

图6所示为行人穿越交叉口内部的时间观测值。可见,随着冲突行人数的变化,行人穿越交叉口内部的时间观测值在15~24 s波动。同向行人

数少于15人时,时间观测值随着人数的增加呈明显递增趋势;同向行人数量多于15人时,时间观测值递增缓慢,基本维持在一定的范围内。因此,为精确描述行人过街时间模型,以15人为界分为两种情况进行考虑。利用SPSS进行标定,参数预测结果见表1。

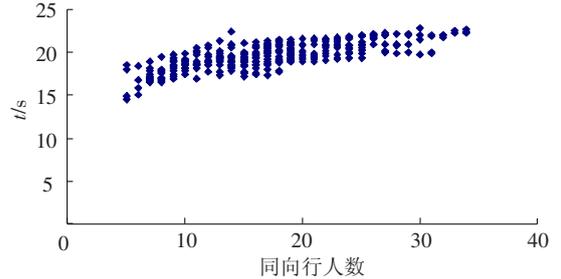


图6 行人穿越交叉口内部时间观测值

表1 模型参数标定值

| 参数  | 估计值     |          | 标准方差    |          |
|-----|---------|----------|---------|----------|
|     | $w = 9$ | $w = 12$ | $w = 9$ | $w = 12$ |
| $m$ | 1.699   | 1.397    | 0.414   | 0.193    |
| $n$ | 0.673   | 0.546    | 0.288   | 0.220    |
| $p$ | 0.395   | 0.650    | 0.201   | 0.229    |

由表1可见,对行人穿越时间影响最大的是同向的行人数量,在 $w$ 取值不同时,其影响系数 $m$ 分别为1.699和1.397;同向行人数量少于15人时,对向行人流的影响要大于交叉行人流的影响,其影响系数 $n$ 、 $p$ 分别为0.673、0.395;同向行人数量多于15人时,对向行人流的影响要小于交叉行人流的影响,其影响系数 $n$ 、 $p$ 分别为0.546、0.650。

结合式(3)、(5)以及上述调查数据的统计结果,行人过街时间模型可描述为

$$\left\{ \begin{array}{l} T = \frac{2\sqrt{N_{ped0} \cdot A_0}}{u_1} + \frac{L}{u_2} + 1.7 \frac{N_{ped1}}{w} + 0.67 \frac{N_{ped2}}{w} + \\ 0.4 \frac{N_{ped3} + N_{ped4}}{w}, N_{ped1} \leq 15, w = 9.0 \text{ m}; \\ T = \frac{2\sqrt{N_{ped0} \cdot A_0}}{u_1} + \frac{L}{u_2} + 1.4 \frac{N_{ped1}}{w} + 0.55 \frac{N_{ped2}}{w} + \\ 0.65 \frac{N_{ped3} + N_{ped4}}{w}, N_{ped1} > 15, w = 12.0 \text{ m}. \end{array} \right. \quad (6)$$

式中: $T$ 为行人过街时间。

## 4 案例分析

为验证模型有效性,以实际调查数据进行对比分析。案例交叉口选择昆明路-统一路交叉口,对角线长度为21.5 m,安全岛为标线形式,连续录像2 h,提取20组有效数据。分别采用HCM模型及本文模型计算行人过街时间,本文对HCM

模型中的人行横道宽度采用有效宽度,即9 m和12 m,结果见图7.

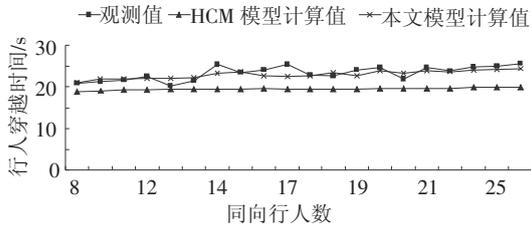


图7 本文所建模型与HCM模型的计算结果对比

图7表明,HCM模型考虑步速、路径长度和固定的行人起动时间,因此不同数量的同向行人穿越时间维持在19~20 s之间.本文所建模型的计算结果和观测值比较接近,基本反映了观测时间的变化趋势,平均误差在5%以内.对比两个模型的计算结果曲线,在行人数量较少时(图中少于14人),HCM模型能够反映穿越时间的变化趋势,误差较小;而随着行人数量的增加,较之HCM模型,本文模型显然更加接近观测结果.

## 5 结论

1)借鉴HCM模型,建立了有行人专用相位交叉口的行人过街时间模型.案例研究结果表明,模型能够较为准确地预测行人穿越时间.

2)将交通波理论应用于行人跨越安全岛时间,较HCM模型计算的固定行人起动时间更为接近现实.

3)行人穿越交叉口同时考虑了同向人流、对向人流和交叉人流对行人穿越时间的影响.

## 参考文献:

[1] SCHNEIDER R J, AMOLD L S, RAGLAND D R. A pilot model for estimating pedestrian intersection crossing volumes [J]. Transportation Research Record, 2009 (2140): 13-26.

[2] SCHNEIDER R J, AMOLD L S, RAGLAND D R. A methodology for counting pedestrians at intersections: using automated counters to extrapolate weekly volumes from short manual counts [C]//TRB 88th Annual Meeting Compendium of Papers CD-ROM. Washington DC: National Research Council, 2009: 3172.

[3] Transportation Research Board. Highway capacity manual [R]. Washington DC: National Research Council, 2000.

[4] United States Federal Highway Administration. Manual on uniform traffic control devices for streets and highways [S]. Washington DC: FHWA, 2009.

[5] MTSC. Manual of traffic signal control [S]. Tokyo: Japan Society of Traffic Engineers, 2006.

[6] GOLANI A, DAMTI H. Model for estimating crossing times at high occupancy crosswalks [C]//TRB 86th Annual Meeting Compendium of Papers CD-ROM. Washington DC: National Research Council, 2007: 2965.

[7] ALHAJYASEEN W K M, NAKAMURA H. A methodology for modeling pedestrian platoon discharge and crossing times at signalized crosswalks [C]//TRB 88th Annual Meeting Compendium of Papers CD-ROM. Washington DC: National Research Council, 2009: 984.

[8] 熊辉,蒋晓蓓.基于时空消耗法的信号交叉口行人通行能力[J].北京理工大学学报,2008,28(3):211-214.

[9] 刘金广,于泉,荣建,等.信号交叉口行人自行车聚集群交通特性[J].北京工业大学学报,2010,36(2):229-234.

[10] 裴玉龙,冯树民.城市行人过街速度研究[J].公路交通科技,2006,23(9):104-107.

[11] 徐良杰,王炜.信号交叉口行人过街时间模型[J].交通运输工程学报,2005,5(1):111-115.

[12] LEE J Y S, LAM W H K. The effects of effective density on walking speeds at signalized crosswalks [C]//TRB 88th Annual Meeting Compendium of Papers CD-ROM. Washington DC: National Research Council, 2009:3497.

[13] 任福田,刘小明,荣建.交通工程学[M].北京:人民交通出版社,2003.

(编辑 魏希柱)