

文章编号: 1002-0268 (2005) 01-0127-05

两相位信号控制交叉口行人 专用相位设置条件研究

杨晓光, 马万经, 林 瑜

(同济大学交通工程系 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 行人专用相位是国内近年来用于解决交叉口行人与机动车冲突的一种控制方法。本文运用穿越理论推导在行人通行时, 穿越行人的转弯车辆通行能力模型和行人延误模型; 在这两个模型的基础上, 通过设置专用相位前后交叉口通行能力和行人人均延误的对比分析, 论证了设置整个交叉口行人专用相位的条件。本研究成果可以用来指导交叉口行人专用相位的设置。

关键词: 两相位信号; 行人专用相位; 通行能力; 行人延误

中图分类号: U491.5⁺4

文献标识码: A

Criterion of Setting Exclusive Pedestrian Phases at Two-phase Signalized Intersections

YANG Xiao-guang, MA Wan-jing, Lin Yu

(Department of traffic Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Exclusive pedestrian phases used in recent years, are effective measures to eliminate conflicts between pedestrians and motor vehicles at signalized intersections. We study the capacity of crosswalk for turning vehicles when pedestrians are passing and the pedestrian average delay under the influence of turning motor vehicles. Furthermore, the paper compares the capacity of the intersection and average pedestrian delay before and after the setting of exclusive pedestrian phases. In the end, we deduce the criterion of setting exclusive pedestrian phases. The results have significant importance to guide the setting of exclusive pedestrian phases.

Key words: Two-phases signal; Exclusive pedestrian phase; Capacity; Pedestrian delay

0 引言

交叉口行人过街交通与机动车交通相互干扰一直是困扰交通控制与管理的难题。据相关资料, 在 2001 年上海市交通事故中, 由于行人与机动车的冲突而导致的事故占总事故数 3.4%, 因此死亡的人数占总事故死亡人数的 18%。在美国 2001 年的交通事故中, 有 4 882 行人死亡, 78 000 行人受伤, 在这些事故中, 有 32.2% 发生在交叉口, 有 30% 的事故与转弯车辆有关。由此可见, 行人与机动车的冲突, 不

但导致事故多发, 而且后果严重。同时, 过街行人与机动车的冲突, 还导致了交叉口机动车通行能力的降低和行人延误的增加。对上述问题的分析, 是本文研究的重要内容。

正因为行人与机动车冲突带来的影响十分严重, 国内外交通学者对此进行了一系列的相关研究, Virginia, P. and AKIN, Darcin 研究表明不合理的信号控制设计, 容易导致行人遵章率下降^[1]。笔者曾对行人交通信号设置和相位切换问题进行了研究^[2], 并提出了行人专用信号的设计方法。然而, 这种方法中, 行

收稿日期: 2003-11-25

基金项目: 国家自然科学基金——通用“中国科学研究基金”资助项目 (70122201/G0114)

作者简介: 杨晓光 (1959-), 男, 江苏宿迁人, 教授, 主要研究方向为智能交通运输系统、交通系统控制、设计与管理等。

(yangj379cumt@sina.com)

人仍然嵌在机动车相位中通行,并没有消除转弯车辆对行人通行的影响。

本文首先对信号控制交叉口行人与机动车干扰特征进行了分析,并针对转弯车流与行人相互干扰的这一现象,提出了行人专用相位的概念。然后,推导了穿越行人流的转弯车辆通行能力模型和转弯车流影响下行人过街人均延误模型,在此基础上,通过设置行人专用相位前后通行能力和人均过街延误的对比分析,得出两相位交叉口行人专用相位的设置条件。

1 现行信号控制交叉口行人与机动车的干扰特征

1.1 相位切换期间行人与机动车相互干扰

我国城市现行信号控制交叉口,一般采用机动车灯兼控行人,绿灯间隔时间按机动车安全交叉来确定。这种控制方法不适应行人安全过街的要求,在相位切换期间会产生行人与机动车的相互干扰。这种干扰可以通过设置行人信号灯进行迟起早断控制来解决,且已有成熟的研究成果^[3],本文对此不做讨论。

1.2 行人与左、右转车辆相互干扰

我国城市现行信号控制交叉口,一般右转弯车辆不受控制,对于两相位控制的交叉口,行人通行时,左转车辆同时放行。这种情况下,行人在通行的时间里始终存在着与转弯车辆的冲突,如图1所示。当机动车流量较大时,人行横道常常被转弯车辆强行阻断,行人被迫聚集在道路中央等待可穿越空当;而当行人流量大时,找不到可穿越空当的转弯车辆在人行横道前集结排队等候或慢慢向过街人群中渗透。这种干扰导致行人过街延误的增加和转弯车辆通行能力的下降,而且这种情况下行人、机动车的遵章率和交叉口安全性都较低。

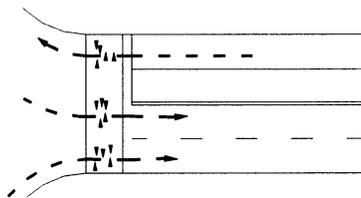


图1 两相位交叉口横道上行人与机动车冲突

2 行人专用相位

正是为了解决行人与左、右转车辆相互干扰问题,提出了行人专用相位的对策。根据行人通行方式的不同,行人专用相位分为两种,其一为单进口的行人专用相位,即在这个进口行人通行时,与其相冲突的车流禁行;反之,相冲突的机动车通行时,行人禁行。如图2(a),A进口行人专用相位里,A进口行

人通行,而A进口的直左右、B进口的右转、C进口的直行和D进口的左转禁行;其二为整个交叉口的行人专用相位,即交叉口4个进口的行人在一个独立的相位里同时通行,机动车全部禁行,反之,机动车通行时,所有流向的行人禁行。如图2(b),在交叉口行人专用相位里,4个方向行人都允许通行,如设有对角线方向横道,对角线方向行人也允许通行,而A、B、C、D4个进口的机动车全部禁行。显然,设置专用相位之后,行人与转弯车辆的冲突因通行时间的错开而消失。

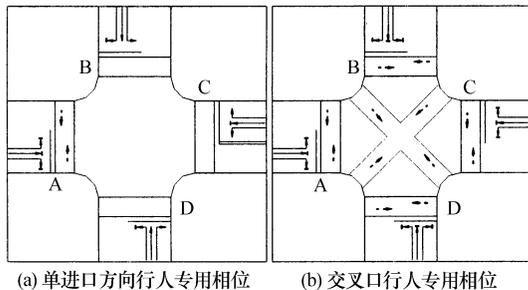


图2 行人专用相位

对于两相位交叉口,任意一个进口设置行人专用相位,需要交叉口两相位的机动车都禁行才能实现。如图2(a)的A进口,当该进口设置行人专用相位时,需要东西相位禁行(包括A进口右转);同时,由于D进口的左转和B进口右转与A进口横道行人也有冲突,需禁行,即南北相位禁行(包括B进口右转)。在这种情况下,显然设置交叉口行人专用相位,同时放行4个进口的行人较为合理。因此,对于两相位交叉口,只存在设置整个交叉口行人专用相位一种情况。本文试图通过对穿越行人流的转弯车辆通行能力和转弯车流影响下行人过街延误的分析,研究两相位交叉口设置行人专用相位的条件。

3 穿越行人流的转弯车辆通行能力模型

根据道路交通管理条例规定,在行人绿灯时,行人通行权优先于与其冲突的转弯车辆。因此在行人通行时,与其相冲突的转弯车辆(包括本向驶出的右转弯、横向驶入的右转弯和左转弯车辆)通过交叉口停车线后,需要选择可穿越的行人空当通过人行横道。本文利用穿越理论,对人行横道上与行人冲突的转弯车辆通行能力计算模型推导如下。

3.1 基本假设

(1) 行人通行相位里,与行人冲突的车流严格按照让行规则,车辆穿越可接受空当通过人行横道。

(2) 横道上单向行人流量小于1000人/h,且过

街行人的到达冲突点的间隔服从负指数分布^[3]。

3.2 模型推导

设 t_{p1} 为距离较近一侧行人到达其与转弯车辆冲突点的时间; t_{p2} 为距离较远一侧行人到达其与转弯车辆冲突点的时间, g_p 为行人可通行的绿灯时间。

(1) 第 1 种情形

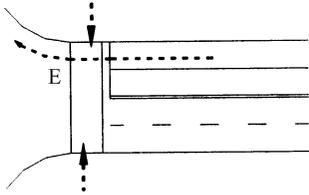


图 3 人行横道上转弯车辆通行情形 1

在 t_{p1} 内, 横道上双向的行人都未到达其与转弯车辆的冲突点, 车辆可以不受行人干扰自由通过冲突点, 其通行能力可用下式计算

$$N_1 = \frac{t_{p1} v_v}{L} \quad (1)$$

式中, v_v 为交叉口内转弯车辆的运行速度; L 为安全车头时距, $L = l_v + S_{停}$, l_v 为车身长度, $S_{停}$ 为停车距离。

(2) 第 2 种情形

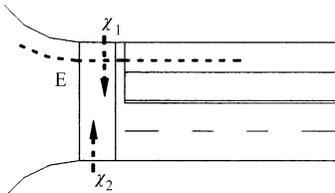


图 4 人行横道上转弯车辆通行情形 2

在 t_{p1} 到 t_{p2} 的一段时间内, 只有距离冲突点较近的一个方向的行人到达冲突点而较远一端的人流尚未到达, 冲突的转弯车辆只需要穿越一股人流。

设过街行人间距为 $H(s)$, α 为转弯车可穿越的最小行人间隔, α_0 为转弯车连续通过冲突点的最小车头时距。当 $\alpha \leq H < \alpha + \alpha_0$ 时, 允许一辆转弯车通过冲突点, 当 $\alpha + (n-1)\alpha_0 \leq H < \alpha + n\alpha_0$ 时, 允许 n 辆转弯车通过冲突点。记双向行人过街流率分别为 χ_1 人/s (距离冲突点较近一侧) 和 χ_2 人/s (距离冲突点较远一侧), 如图 4 所示。由假设 (2), 行人到达间隔服从负指数分布, 其概率密度函数为

$$P(h > t) = e^{-\chi t} \quad (2)$$

在情形 2 下, 可以通过的 n 辆转弯车的概率为

$$P_n = P[\alpha + (n-1)\alpha_0 \leq H < \alpha + n\alpha_0]$$

由前面分析, 情况 2 持续的时间为 $t_{p2} - t_{p1}$, 则情

形 2 可以穿越的转弯车数为

$$N_2 = \chi_1 (t_{p2} - t_{p1}) \sum_{n=1}^{\infty} p_n n =$$

$$\chi_1 (t_{p2} - t_{p1}) \sum_{n=1}^{\infty} np [\alpha + (n-1)\alpha_0 \leq H < \alpha + n\alpha_0] =$$

$$(t_{p2} - t_{p1}) \frac{\chi_1 e^{-\chi_1 \alpha}}{1 - e^{-\chi_1 \alpha_0}}$$

(3) 第 3 种情形

在 $g_p - t_{p2}$ 时间内, 两个方向的人流都已到达冲突点, 冲突车转弯需要等待出现双向的可穿越空当才可以通过。

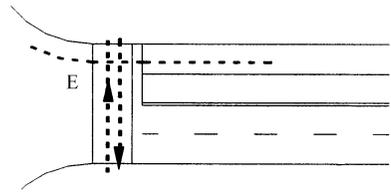


图 5 人行横道上转弯车辆通行情形 3

设双向的行人空当分别为 $H_1(s)$ 、 $H_2(s)$, 当 $\alpha \leq H_1 < \alpha + \alpha_0$ 且 $\alpha \leq H_2$ 和当 $\alpha \leq H_2 < \alpha + \alpha_0$ 且 $\alpha \leq H_1$ 时, 允许一辆转弯车通过冲突点, 当 $\alpha + (n-1)\alpha_0 \leq H_1 < \alpha + n\alpha_0$ 且 $\alpha + (n-1)\alpha_0 \leq H_2$ 和当 $\alpha + (n-1)\alpha_0 \leq H_2 < \alpha + n\alpha_0$ 且 $\alpha + (n-1)\alpha_0 \leq H_1$ 时, 允许 n 辆转弯车通过冲突点。

由式 (2), 可以通过的 n 辆转弯车的概率为

$$P_n = P[\alpha + (n-1)\alpha_0 \leq H_1 < \alpha + n\alpha_0] P[\alpha + (n-1)\alpha_0 \leq H_2] + P[\alpha + (n-1)\alpha_0 \leq H_2 < \alpha + n\alpha_0] P[\alpha + (n-1)\alpha_0 \leq H_1]$$

则情形 3 可以通过的转弯车辆数为

$$N_3 = (g_p - t_{p2}) \{ \chi_1 \sum_{n=1}^{\infty} np [\alpha + (n-1)\alpha_0 \leq \alpha + n\alpha_0] \times$$

$$p [\alpha + (n-1)\alpha_0 \leq H_2] + \chi_2 \sum_{n=1}^{\infty} np [\alpha + (n-1)\alpha_0 \leq H_0 < \alpha + n\alpha_0] P[\alpha + (n-1)\alpha_0 \leq H_1] \}$$

求解得:

$$N_3 = (g_p - t_{p2}) e^{-(\chi_1 + \chi_2)\alpha} [\chi_1 (1 - e^{-\chi_1 \alpha_0}) + \chi_2 (1 - e^{-\chi_2 \alpha_0})] [1 - e^{-(\chi_1 + \chi_2)\alpha_0}]$$

由此, 一个方向转弯车辆在人行横道上的通行能力为: $N_{转弯1} = 3600 [N_1 t_{p1} + N_2 (t_{p2} - t_{p1}) + N_3 (g_p - t_{p2})] / g_p$ 式中, $N_{转弯1}$ 为设置行人专用相位之前, 转弯车辆通行能力。

此时交叉口机动车总通行能力为

$$C_{q1} = \sum N_{转弯1} + \sum N_{其它1}$$

式中, C_{q1} 为设置专用相位前交叉口机动车总通行能

力; $\sum N_{其他1}$ 为设置专用相位前交叉口除转弯车流外其他车流通行能力之和; $N_{转弯1}$ 为转弯车流通行能力之和, 可以应用 Webster 公式求得^[5]。

而设置行人专用相位之后, 转弯车辆通行能力为

$$N_{转弯2} = S_{转弯} \left[\frac{C - g_{专} - \sum I}{C} \right]$$

式中, $N_{转弯2}$ 为设置行人专用相位后转弯车辆通行能力; $S_{转弯}$ 为转弯车道饱和流量; C 为交叉口信号周期; $g_{专}$ 为专用相位有效绿灯时间; $\sum I$ 为交叉口总损失时间。

则设置行人专用相位交叉口机动车总通行能力为

$$C_{q2} = \sum N_{转弯2} + \sum N_{其他2}$$

式中, $\sum N_{其他2}$ 为设置专用相位后除转弯车辆外其余车流的通行能力之和。

从交叉口通行能力的角度分析, 设置行人专用相位的条件一为

$$C_{q2} > C_{q1} \quad (3)$$

3.3 计算结果分析

假设如图 6(a)所示正交叉交叉口, 相交道路均为双向 4 车道, 且车道功能划分相同, 右转车不受控制。设 $\chi_1 = \chi_2 = \chi$, 取 $\alpha_0 = 4s$, $\alpha = 2.5s$, 信号周期为 $T = 60s$, 机动车绿灯间隔时间为 $5s$, 行人专用相位的长度取行人过街最短绿灯时间^[5]。假设行人——机动车绿灯间隔时间与机动车绿灯间隔的差异可以通过对行人进行迟起早断控制消除。取右转车道受控时饱和流量为 $1\ 550pcu/h$, 直左车道饱和流量为 $1\ 300pcu/h$ 。由于两相位条件下, 受阻于人行横道前的左转车可以在下一相位初驶离交叉口, 而右转车则无法避免与行人的冲突, 故在不设置行人专用相位时, 只考虑冲突对不受控的右转车通行能力的影响, 则设置行人专用相位前后交叉口通行能力与人行横道宽度及单向行人流量的变化关系如图 7。

从图 7 可以看出, 对相同的信号周期而言, 考虑与

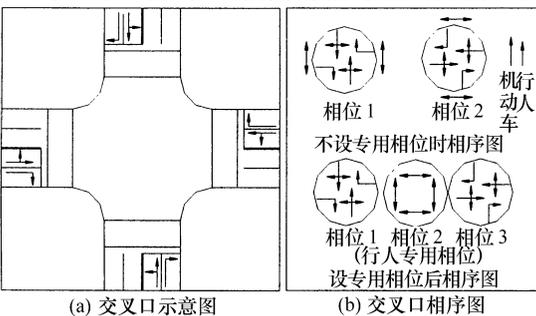


图 6 交叉口及交叉口相序图

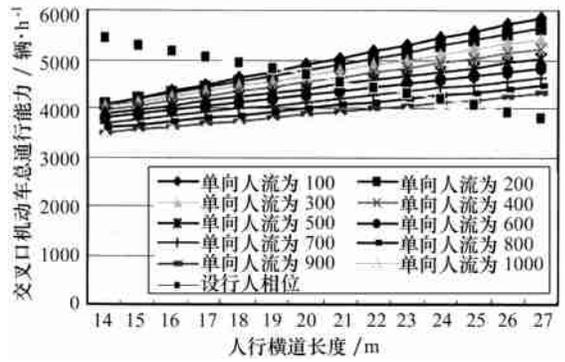


图 7 设置行人专用相位前后通行能力比

行人的冲突之后, 人行横道的长度一定时, 在不设置专用相位的情况下, 单向过街行人流量越大, 交叉口机动车总通行能力越低。在设置专用相位之后, 交叉口的总通行能力随着人行横道的增长而减少。

取图 7 中设置专用相位和不设置专用相位时通行能力相等的点, 以单向行人流量为横坐标, 以人行横道长度为纵坐标, 得图 8。显然, 当符合假设的交叉口落入 Y 区域时, 设置行人专用相位机动车总通行能力要大于不设置行人专用相位的情形, 应设置行人专用相位; 反之, 落入 N 区域的交叉口, 设置行人专用相位的机动车总通行能力要小于不设置的情形, 不设置行人专用相位。

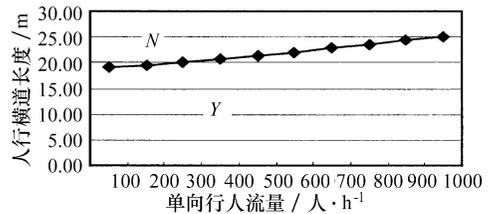


图 8 设置行人专用相位的条件 1

4 转弯车流影响下的行人延误

4.1 延误计算

在国内现行信号控制交叉口, 除因信号控制产生行人延误外, 绿灯起亮行人进入人行横道之后, 由于转弯车辆的影响将产生行人的附加延误。附加延误时间越长, 行人在道路中间逗留的时间越长, 所需要的安全过街时间也就越长, 对整个交叉口的运行效率和安全运转也就越不利。因此, 行人延误也是判断设置行人专用相位的重要条件。

信号控制行人延误计算公式为

$$d_{信} = r^2 b C^{1.4}$$

式中, $d_{信}$ 为信号控制行人延误; C 为信号周期时间; r 为行人禁行时间, $r = C - g$; g 为行人绿灯时间。则设置专用相位后, 行人人均延误为

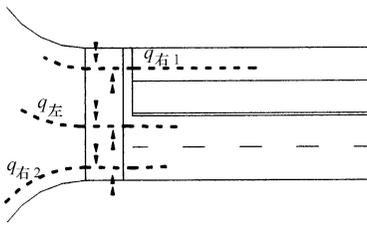


图 9 导致行人附加延误的 3 股车流

$$d_2 = (C - g_{专})^2 / 2C$$

式中, $g_{专}$ 为行人专用相位长度, s 。

车流影响下行人延误计算公式为

$$d_{转} = (e^{q\tau} - q_i\tau - t) / q_i \quad (4)$$

式中, $d_{转}$ 为转弯车流 i 影响下的行人延误时间, 如图 9 中的车流 $q_{右1}$ 、 $q_{右2}$ 和 $q_{左}$; q_i 为转弯车流 i 的流率; τ 为行人通过的最小间隔时间; t 为绿灯间隔时间。则设置行人专用相位前, 行人人均延误为

$$d_1 = d_{信} + \sum d_{转} \quad (5)$$

显然, 从行人延误的角度考虑, 设置行人专用相位的条件 2 为

$$d_2 < d_1 \quad (6)$$

4.2 计算结果分析

取 $\tau = 5s$, 信号控制周期为 $60s$, 两相位有效绿信比均为 0.5 , 行人过街横道长度为 $14m$, 专用相位长度取行人最短过街时间, 设交叉口 4 个进口的转弯流量和入流量都相同, 设置行人专用相位前后的行人人均延误对比如图 10。

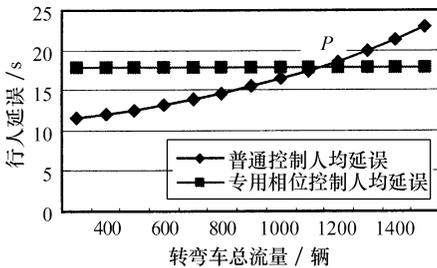


图 10 设置行人专用相位的条件 2

从图中可以看出, 当行人横道宽度一定时, 设专用相位的行人人均延误为定值。

当转弯流量较小时, 不设专用相位时的人均延误明显小于设置专用相位的行人人均延误, 随着转弯车流量的增加, 不设专用相位时的人均延误明显增加,

过 P 点以后, 不设置行人专用相位时的人均延误大于设置行人专用相位时的人均延误。从行人延误的角度分析, 整个交叉口行人专用相位设置条件为: 交叉口通过一条横道的转弯总流量大于 P 点对应横坐标值。

5 行人专用相位设置条件

综合上述研究结果, 行人专用相位设置条件可以概括为表 1。

表 1 行人专用相位设置条件

$C_{ap2} > C_{ap1}$	$d_2 < d_1$	设置行人专用相位
Y	Y	Y
Y	N	综合考虑其他因素
N	Y	
N	N	N

(1) 当两个条件都满足时, 宜设置行人专用相位; 当两个条件都不满足时, 不宜设置行人专用相位。

(2) 当只有一个条件满足时, 则需要综合考虑其他影响因素 (如安全因素) 来判断是否需要设置行人专用相位。

(3) 本文在建立交叉口穿越人流的转弯车辆通行能力模型和转弯车流影响下行人过街延误模型的基础上, 通过对交叉口通行能力和行人过街延误的比较, 论证了两相位信号控制交叉口设置行人专用相位的条件。

需要指出的是, 交叉口行人过街安全也是行人专用相位设置与否的重要影响因素, 从这一方面探讨其设置条件, 需要进一步的研究。

参考文献:

[1] Virginia P. Sisiopiku, Ph D. Assessment of Pedestrian Crossing Options [C]. Washington: TRB. D. C. January 2000 CD-ROM.
 [2] 杨晓光, 陈白磊, 彭国雄. 行人交通控制信号设置方法研究 [J]. 中国公路学报, 2001 (1): 73-76.
 [3] 李淑庆. 信号灯平交路口设置人行过街立交设施的依据 [D]. 上海: 同济大学, 1989.
 [4] 陈白磊. 城市行人交通研究 [D]. 上海: 同济大学, 2001.
 [5] 杨佩昆, 张树升. 交通管理与控制 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1997.