

# 考虑下游交叉口的路段行人过街优化控制模型

赵 靖, 马万经, 杨晓光

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:** 为了处理好城市干道路段上行人过街安全与机动车交通效率之间的矛盾, 提出了一种利用下游交叉口红灯信号时间来为路段行人提供专用过街信号相位的行人过街横道信号控制方法. 它可由混合整数线性规划模型来描述, 其优化目标是在保障行人过街安全和维持机动车现状运行水平的基础上, 使路段过街横道行人绿灯时长最大化. 通过 VISSIM 仿真和实例分析, 对该信号控制设计方法的效果和可操作性进行了验证. 研究表明, 对于有行人中央驻足区的情况, 过街横道可设置于路段任何需要的位置, 且总能计算得到合适的信号配时方案; 对于无中央驻足区的情况, 应将人行横道设置位置与信号配时同时考虑才能实现良好的设计效果.

**关键词:** 城市干道; 路段行人过街; 信号控制; 混合整数线性规划

**中图分类号:** U491.23

**文献标志码:** A

## Signal Control Model for Mid-block Pedestrian Crossing with Consideration of Downstream Intersection

ZHAO Jing, MA Wanjing, YANG Xiaoguang

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** In order to deal with the confliction between the safety of the pedestrian crossing and the efficiency of the vehicle traffic on urban arterial, this paper proposes a method for signal designing of mid-block pedestrian crossing, which provides an appropriate signal phase for the pedestrian by using the red time of the vehicle at downstream intersection. The method is formulated as a mixed integer linear programming. The control objective is to maximize the duration of green for pedestrian on the basis of ensuring the safety of the pedestrian crossing and maintaining the efficiency of the vehicle traffic in status quo. The effect and the maneuverability of the control method are tested by

VISSIM simulation and case study. Results show that in the case of successive crossings, the pedestrian crossing can be located at anywhere of the road section and the suitable signal timing can always be made. And in the case of non-stop crossing, the designing of the location of pedestrian crossing and signal control should be considered synchronously.

**Key words:** urban arterials; pedestrian crossing; signal control; mixed integer linear programming

步行是人类最基本的出行方式, 为满足城市交通行人过街需求, 在路段增设人行过街横道是目前普遍采用的措施. 由于人行横道在空间上未将人流和车流分离, 若不采用信号控制, 在我国目前的管理水平下, 行人的通行权难以保障<sup>[1-2]</sup>, 为提高行人过街的安全性, 采用信号控制将其在时间上分离是一种有效的方法<sup>[2-3]</sup>. 本研究针对交通资源紧张的城市干道, 提出了利用下游交叉口红灯时间满足路段行人过街需求的行人过街横道信号控制方法, 在保障机动车通行效率的基础上, 提供行人专用过街信号相位.

## 1 研究综述

以往针对路段行人过街信号控制方法的研究按不同控制方法主要可分为单点定时控制、单点感应控制以及交叉口协调控制三个方面.

在单点定时控制方面, 研究主要集中于交叉口的行人相位优化<sup>[4-5]</sup>. 对于路段行人过街, 一般沿用交叉口的控制方法, 以总体交通效益最大为目标, 考虑在行人过街横道处的行人和机动车延误<sup>[6-7]</sup>.

定时控制虽然是最为简单易操作的控制方式, 但 Lockwood<sup>[8]</sup>通过对比定时信号与按钮信号控制

收稿日期: 2013-11-12

基金项目: 国家自然科学基金重点资助(51238008); 国家“八六三”高技术研究发展计划(2011AA110305)

第一作者: 赵 靖(1983—), 男, 工程师, 博士生, 主要研究方向为交通管理与控制、交通系统设计. E-mail: jing\_zhao\_traffic@163.com

通讯作者: 马万经(1980—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为交通系统控制与优化理论.

E-mail: mawanjing@tongji.edu.cn

人行横道条件下机动车停车次数和车均延误,得出了按钮信号控制方式优于定时信号控制的结论.之后许多学者对路段行人感应信号的设置方法及相应的控制参数进行了研究<sup>[9-11]</sup>.它主要根据车辆检测实施信号控制,可减少车辆在路段人行横道处的延误,但主要适用于路段机动车流量较小的情况<sup>[12]</sup>.

ITE<sup>[13]</sup>指出行人过街信号灯需要与交叉口信号灯协调控制来获得稳定而畅通的交通流.信号协调控制主要以车流在路段行驶过程中的离散性为基础,考虑将路段行人信号配时与上下游交叉口的信号配时进行协调,建立协调系统周期、相位差等优化模型<sup>[14-16]</sup>.其中,路段行人与上游交叉口的联动控制(俗称“父子灯”)是目前常用的方法<sup>[17-18]</sup>.

在我国城市中心区,诸多城市交通主干道在机动车通行拥挤的同时,行人过街需求也较大.在这种情况下,协调机动车与行人的通行权,充分利用有限的时空资源是一个亟待解决的问题.目前已有的模型,尚难很好地解决这一问题,主要有两点原因:

(1) 一般仅考虑路段行人过街对机动车的协调控制流向(一般为直行)的影响,未考虑对其他流向(左转、右转)交通流的不利影响.此外,若没有中央驻足区,难以实现两个流向同时取得良好的协调效果.

(2) 仅考虑信号控制的优化,而未将行人过街位置与信号控制优化统筹考虑.而实际上,行人过街横道的具体位置可以在过街需求点附近一段空间范围内布置.而具体的布置位置反过来会显著影响人行横道与下游交叉口信号协调的效果.

本研究提出一种在满足行人过街需求的基础上,对现状机动车交通及交叉口配时影响最小化的行人过街横道信号设计方法,并同时考虑有、无行人中央驻足区两种情况.

## 2 模型建立

### 2.1 基本思想

模型的核心思想是将路段行人过街与下游交叉口信号统筹考虑,将原本就需要在下游交叉口停车等待的那部分车流提前在路段行人过街处截断,利用下游交叉口红灯信号满足路段行人的过街需求.

具体情形如图 1 所示.考虑了下游交叉口进口道的有效绿灯时长(包括直行和左转)、最小车速

$v_{\min}$ 、最大车速  $v_{\max}$ ,在保障行人过街安全的前提下(满足行人过街最小绿灯时长), $G_a$  时间段内在行人过街处为机动车通行信号,如此便保证所有理论上可在绿灯时间到达下游交叉口的机动车均可通过路段人行过街信号,只有原本就应在红灯时间到达下游交叉口的车辆才可能受到路段行人过街信号的阻滞.即只是将部分受阻车辆的受阻地点由原来的下游交叉口转移到路段人行过街处,使得机动车运行状况维持原状,而为行人提供了安全的通行时间.

与以往路段行人过街信号配时算法相比,本模型具有以下特点:① 维持机动车运行水平;② 道路主线本身无需线协调控制;③ 不对交叉口已有信号配时做大的调整.

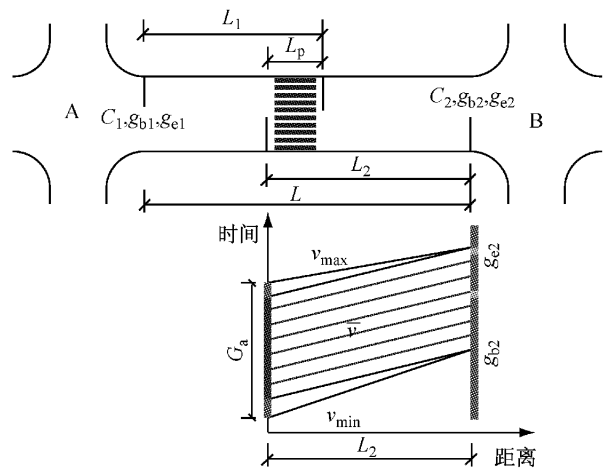


图 1 基本控制概念

Fig.1 Basic control concept

### 2.2 模型算法

#### 2.2.1 总体框架

模型总体框架如图 2 所示.

#### 2.2.2 目标函数

本文所研究的路段行人过街信号控制方法主要针对城市干道,在保障行人过街安全和维持机动车运行水平的基础上,以行人过街绿灯时长最大化为优化目标,对于有或无行人中央驻足区两种情况,分别如式(1)和式(2)所示:

$$\max(G_{p1} + G_{p2}) \quad (1)$$

式中: $G_{p1}$ ,  $G_{p2}$  分别表示有中央驻足区情况下过街横道在 B-A 和 A-B 流向一侧行人相位绿灯时长.后文中,下标为 1 的参数均表示与交叉口 A 或 B-A 流向有关,下标为 2 的参数均表示与交叉口 B 或 A-B 流向有关.

$$\max G_{p3} \quad (2)$$

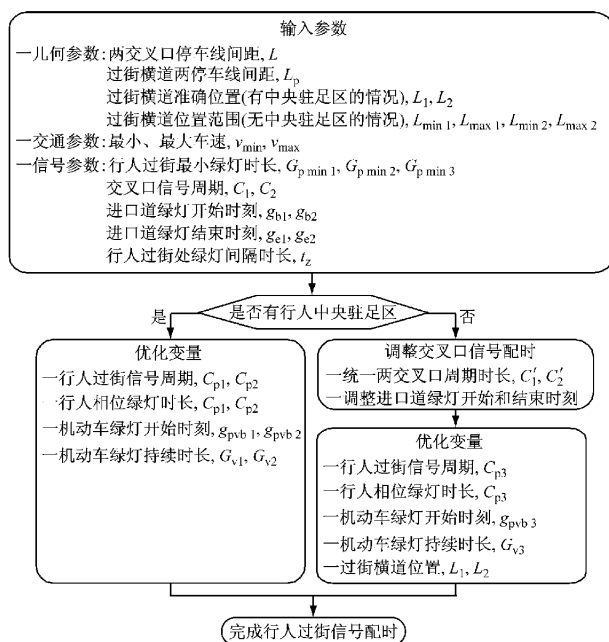


图2 模型框架

Fig.2 Framework of the model

式中:  $G_{p3}$  表示无中央驻足区情况下过街横道行人相位绿灯时长。

### 2.2.3 约束条件

(1) 过街横道行人相位绿灯时长由下式计算:

$$G_{pi} = C_{pi} - G_{vi} - 2t_z, \forall i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

式中:  $C_{p1}, C_{p2}, C_{p3}$  分别表示有中央驻足区情况下 B-A 流向一侧、A-B 流向一侧以及无中央驻足区情况下过街横道周期时长;  $G_{v1}, G_{v2}, G_{v3}$  分别表示有中央驻足区情况下 B-A 流向一侧、A-B 流向一侧以及无中央驻足区情况下机动车相位绿灯时长;  $t_z$  表示绿灯间隔时长。

(2) 过街横道行人相位绿灯时长应满足最小绿灯时长要求:

$$G_{pi} \geq G_{p \min i}, \forall i = 1, 2, 3 \quad (4)$$

式中:  $G_{p \min 1}, G_{p \min 2}, G_{p \min 3}$  分别表示有中央驻足区情况下 B-A 流向一侧、A-B 流向一侧以及无中央驻足区情况下过街横道行人相位最小绿灯时长。

(3) 信号周期约束

对于有中央驻足区的情况,为了取得良好的协调控制效果,驻足区两侧行人过街的信号周期可以不同,但均应与下游交叉口信号周期相同,如下式:

$$C_{pi} = C_i, \forall i = 1, 2 \quad (5)$$

式中:  $C_1, C_2$  分别表示交叉口 A 和 B 的信号周期。

对于无中央驻足区的情况,过街横道需要与交叉口 A 和 B 同时进行协调控制。为了取得良好的控制效果,应首先调整交叉口 A 和 B 的信号配时,统

一其周期时长(可取其较大值),并对各流向绿灯时长进行相应调整。在此基础上,过街横道信号周期应与统一后的交叉口信号周期相等,如下式(6)~(8),其中式(7)和式(8)可保障式(6)右侧取为  $C_1$  和  $C_2$  中的较大值。

$$C_{p3} = C'_i = u_1 C_1 + u_2 C_2, \forall i = 1, 2 \quad (6)$$

$$u_1 + u_2 = 1 \quad (7)$$

$$(C_1 - C_2)(u_1 - u_2) \geq 0 \quad (8)$$

式中:  $C'_1, C'_2$  分别表示交叉口 A 和 B 调整后的信号周期;  $u_1, u_2$  为 0-1 变量。

(4) 为了保障增设过街横道后机动车交通能基本维持现状运行水平,应使得所有理论上可在绿灯时间到达下游交叉口的机动车均可在路段行人过街处获得绿灯信号,只有原本就应在红灯时间到达下游交叉口的车辆才可能受到路段行人过街信号的阻滞。

对于有中央驻足区的情况,如下式:

$$g_{pvi} \leq g_{bi} - \frac{L_i}{v_{\min}} + u_{3i} C_{pi}, \forall i = 1, 2 \quad (9)$$

$$g_{pvi} + G_{vi} \geq g_{ei} - \frac{L_i}{v_{\max}} + u_{4i} C_{pi}, \forall i = 1, 2 \quad (10)$$

式中:  $g_{pvi}, g_{pvi}$  分别表示有中央驻足区情况下 B-A 流向和 A-B 流向一侧过街横道机动车相位绿灯开始时刻;  $g_{b1}, g_{b2}$  分别表示交叉口 A 和 B 进口道绿灯(包括直行和左转)开始时刻;  $g_{e1}, g_{e2}$  分别表示交叉口 A 和 B 进口道绿灯(包括直行和左转)结束时刻;  $L_1, L_2$  分别表示过街横道机动车停车线分别与交叉口 A 和 B 停车线的间距;  $v_{\min}, v_{\max}$  分别表示最小和最大行驶车速;  $u_{3i}, u_{4i}$  为整数变量,其作用是保障  $g_{pvi}, g_{pvi}$  优化结果在相应的周期时长范围内。

对于无中央驻足区的情况,行人过街信号配时要同时满足双向机动车流的通行需求,如下式:

$$g_{pvi} \leq g'_{bi} - \frac{L_i}{v_{\min}} + u_{5i} C_{p3}, \forall i = 1, 2 \quad (11)$$

$$g_{pvi} + G_{v3} \geq g'_{ei} - \frac{L_i}{v_{\max}} + u_{6i} C_{p3}, \forall i = 1, 2 \quad (12)$$

式中:  $g_{pvi}$  表示无中央驻足区情况下过街横道机动车相位绿灯开始时刻;  $g'_{b1}, g'_{b2}$  分别表示交叉口 A 和 B 进口道调整后的绿灯(包括直行和左转)开始时刻;  $g'_{e1}, g'_{e2}$  分别表示交叉口 A 和 B 进口道调整后的绿灯(包括直行和左转)结束时刻;  $u_{5i}, u_{6i}$  为整数变量。

上述约束均应在周期时长范围内讨论:

$$0 \leq g_{pvi} \leq C_{pi}, \forall i = 1, 2, 3 \quad (13)$$

$$0 \leq g_{bi} - \frac{L_i}{v_{\min}} + u_1 C_{pi} \leq C_{pi}, \forall i = 1, 2 \quad (14)$$

$$0 \leq g_{ei} - \frac{L_i}{v_{\max}} - G_{vi} + u_2 C_{pi} \leq C_{pi}, \forall i = 1, 2 \quad (15)$$

$$0 \leq g_{pvb3} \leq C_{p3} \quad (16)$$

$$0 \leq g'_{bi} - \frac{L_i}{v_{\min}} + u_{3i} C_{p3} \leq C_{p3}, \forall i = 1, 2 \quad (17)$$

$$0 \leq g'_{ei} - \frac{L_i}{v_{\max}} - G_{v3} + u_{4i} C_{p3} \leq C_{p3}, \forall i = 1, 2 \quad (18)$$

### (5) 过街横道位置约束

对于有中央驻足区的情况,由于两侧过街横道可分别进行配时设计,仅需要考虑与下游交叉口进行协调控制,因此,对过街横道在路段中的位置无具体要求,可在优化前确定。但对于无中央驻足区的情况,由于过街横道需要与交叉口 A 和 B 同时进行协调控制,控制效果与过街横道位置密切相关,应与信号配时同时优化,并满足下述约束:

$$L = L_1 + L_2 - L_p \quad (19)$$

$$L_{\min i} \leq L_i \leq L_{\max i}, \forall i = 1, 2 \quad (20)$$

式中: $L$  表示 A、B 两交叉口停车线间距; $L_p$  表示过街横道两停车线间距; $L_{\min 1}, L_{\max 1}, L_{\min 2}, L_{\max 2}$  表示过街横道预期位置范围。

### 2.2.4 模型求解

路段行人过街横道优化控制模型可由上述混合整数线性规划模型描述。对于有中央驻足区的情况,目标函数为式(1),约束条件为式(3)~(5),(9),(10),(13)~(15);对于无中央驻足区的情况,其目标函数为式(2),约束条件为式(3),(4),(6)~(8),(11),(12),(16)~(20)。可由分支定界法求解。

## 3 模型检验

本节将通过两个算例,分别对上述有、无行人中央驻足区两种情况下的路段行人过街横道优化控制模型的优化效益进行检验。

### 3.1 有行人中央驻足区的情况

对于有行人中央驻足区的情况,算例输入参数设置如下:两交叉口停车线间距  $L=600$  m;过街横道两停车线间距  $L_p=6$  m;过街横道位置为  $L_1=256$  m,  $L_2=350$  m;最小和最大行驶车速分别为  $v_{\min}=10$  m·s<sup>-1</sup>,  $v_{\max}=18$  m·s<sup>-1</sup>;行人过街两侧最小绿灯时长分别为  $G_{p \min 1}=15$  s,  $G_{p \min 2}=15$  s;行人过街处绿灯间隔时长  $t_z=3$  s;中央驻足区面积满足需求;两交叉口间路段流量、进口道各流向流量以及信号配时如表 1 所示。

表 1 有行人中央驻足区算例流量及交叉口配时

Tab.1 Volumes and signal timing used in the numerical example in the case of successive crossing

流向	位置	流量/(pcu·h <sup>-1</sup> )	周期时长/s	绿灯开始时刻/s	绿灯结束时刻/s	绿灯持续时长/s
B-A	路段	1 000				
	进口左转	200	90	23	43	20
	进口直行	600	90	0	20	20
	进口右转	200	90	0	90	90
A-B	路段	1 000				
	进口左转	200	120	43	73	30
	进口直行	600	120	10	40	30
	进口右转	200	120	0	120	120

根据上文提出的优化模型,路段行人过街横道的信号配时如表 2 所示。

表 2 信号配时优化结果

Tab.2 Optimization results of signal timing s

流向	信号相位	信号周期	绿灯开始时刻	绿灯结束时刻	绿灯持续时长
B-A	机动车相位	90	64	29	55
	行人过街相位	90	32	61	29
A-B	机动车相位	120	95	54	79
	行人过街相位	120	57	92	35

采用 VISSIM 仿真软件,对机动车从驶入该路段至通过下游交叉口整个过程的总延误进行评价。

仿真中采用默认的驾驶员行为参数,车辆类型均为小汽车。并取 20 次仿真结果的均值作为评价结果以消除仿真的随机性。结果如图 3 所示。

由图 3 可得,采用本文建议模型增设路段行人过街信号后车均延误与人行过街设施设置前基本相同。其中左转、直行车延误基本保持一致,平均延误增加 0.65 s。右转车延误略有上升,分别增加 5.0 s 和 5.4 s,这主要是由于右转在交叉口不受信号灯控制,增设路段行人过街信号后,会在路段上受一定阻滞。

此外,在保持路段行人过街绿灯时长不变的基础上,对其绿灯开始时刻按步长 5 s 进行枚举,如图

4. 可得, 本文建议模型计算结果可使得车均延误最小, 且车均延误随信号配时与本文建议模型计算结果偏差的增大而增加。

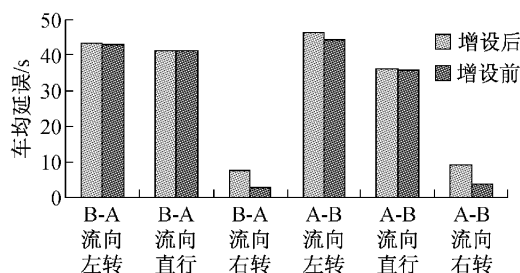


图 3 有行人中央驻足区增设路段行人过街信号前后机动车延误对比

Fig. 3 Comparison of vehicular delay with the setting of signalized successive mid-block crossing or not

### 3.2 无行人中央驻足区的情况

对于无行人中央驻足区的情况, 算例输入参数设置如下: 过街横道预期位置范围为与两端交叉口至少间隔 80 m 的路段范围, 即  $L_{\min 1}=80 \text{ m}$ ,  $L_{\max 1}=526 \text{ m}$ ,  $L_{\min 2}=80 \text{ m}$ ,  $L_{\max 2}=526 \text{ m}$ ; 行人过街最小绿灯时长为  $G_{p \min 3}=35 \text{ s}$ ; 两交叉口间路段流量、进口道各流向流量以及信号配时如表 3 所示; 其余参数同 3.1 节。

表 3 无行人中央驻足区算例流量及交叉口配时

Tab. 3 Volumes and signal timing used in the numerical example in the case of non-stop crossings

流向	位置	流量/(pcu · h <sup>-1</sup> )	周期时长/s	绿灯开始时刻/s	绿灯结束时刻/s	绿灯持续时长/s
B-A	路段	1 000				
	进口左转	200	120	28	53	25
	进口直行	600	120	0	25	25
	进口右转	200	120	0	120	120
A-B	路段	1 000				
	进口左转	200	120	18	48	30
	进口直行	600	120	105	15	30
	进口右转	200	120	0	120	120

表 4 人行横道位置及信号配时优化结果

Tab. 4 Optimization results of signal timing and crossing locations

信号相位	信号周期	绿灯开始时刻	绿灯结束时刻	绿灯持续时长/s
机动车相位	120	81	35	74
行人过街相位	120	38	78	40

采用 VISSIM 仿真软件, 对机动车从驶入该路段至通过下游交叉口整个过程的总延误进行评价。仿真中采用默认的驾驶员行为参数, 车辆类型均为小汽车, 并取 20 次仿真结果的均值作为评价结果以消除仿真的随机性。结果如图 5 所示。

由图 5 可得, 采用本文建议模型增设路段行人过街信号后车均延误与人行过街设施设置前基本相

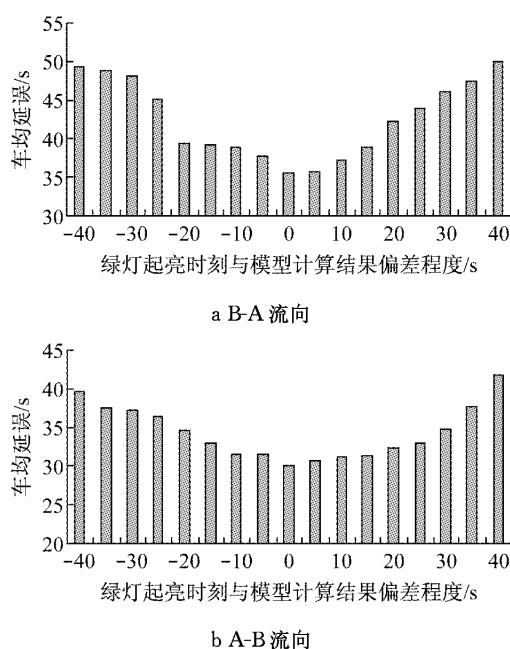


图 4 不同行人过街绿灯开始时刻条件下机动车延误对比

Fig. 4 Comparison of vehicle delay with different starts of green

根据提出的优化模型, 路段行人过街横道位置的优化结果为, 过街横道分别距离交叉口 A 366 m, 距离交叉口 B 240 m ( $L_1=366 \text{ m}$ ,  $L_2=240 \text{ m}$ ); 信号配时优化结果如表 4 所示。

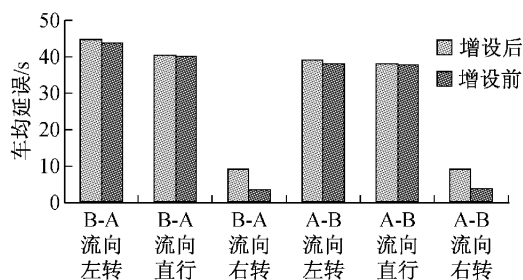


图 5 无行人中央驻足区增设路段行人过街信号前后机动车延误对比

Fig. 5 Comparison of vehicular delay with the setting of signalized non-stop mid-block crossing or not

同。其中左转、直行车延误基本保持一致, 平均延误

增加 0.63 s. 右转车延误略有上升, 分别增加 5.6 s 和 5.4 s, 这同样是由于右转在交叉口不受信号灯控制, 增设路段行人过街信号后会使其受到一定阻滞。

此外, 以 20 m 为步长间隔改变过街横道位置, 并通过仿真获得其车均延误, 如图 6 所示。可知, 本文建议模型计算结果可使得车均延误最小, 且车均延误随路段人行横道设置位置与本文建议模型计算结果偏差的增大而增加。

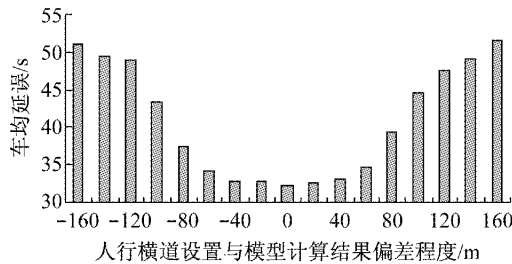


图 6 人行过街横道不同设置位置下的车均延误对比

Fig. 6 Comparison of vehicular delay with different locations of crossings

## 4 案例分析

为了进一步验证上述设计方法的实际可操作性, 现以张家港市长安路(城北路—暨阳路)为例, 对本文所提出的设计方法进行实例分析。该路段为城

市主干路, 道路横断面采用三幅路的断面形式, 道路平面设计如图 7。

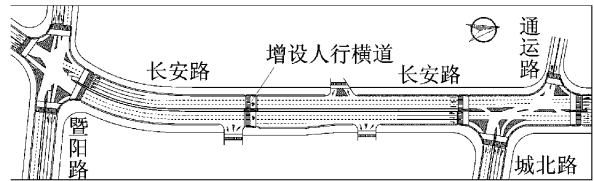


图 7 长安路(城北路—暨阳路)路段道路设计图

Fig. 7 Layout of Changan Rd (Chengbei—Jiyang)

在该路段增设一处人行过街横道, 过街横道两停车线间距  $L_p = 6$  m, 其设置位置为停车线距暨阳路交叉口 147 m, 距城北路交叉口 183 m. 路段最小和最大行驶车速分别设为  $v_{\min} = 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $v_{\max} = 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 行人过街两侧最小绿灯时长均为 20 s; 行人过街处绿灯间隔时长  $t_z = 3$  s; 两交叉口间路段流量、进口道各流向流量以及信号配时如表 5 所示。

根据本文提出的优化模型, 路段行人过街横道的信号配时如表 6 所示。

采用 VISSIM 仿真软件, 对比增设路段行人过街设施前后车均延误(如图 8)。可见机动车延误基本保持原来的服务水平, 且路段行人和自行车过街延误也在可接受范围之内。

表 5 案例流量及交叉口配时

Tab. 5 Volumes and signal timing in the case study

流向	位置	流量/(pcu · h <sup>-1</sup> )	周期时长/s	绿灯开始时刻/s	绿灯结束时刻/s	绿灯持续时长/s
城北路往暨阳路 (北向南)	路段	980				
	进口左转	300	120	45	63	18
	进口直行	515	120	0	41	41
	进口右转	165	120	0	41	41
暨阳路往城北路 (南向北)	路段	780				
	进口左转	130	120	0	55	55
	进口直行	390	120	0	55	55
	进口右转	260	120	18	55	37

表 6 路段人行横道信号配时

Tab. 6 Signal timing of the pedestrian crossing

流向	信号相位	信号周期	绿灯开始时刻	绿灯结束时刻	绿灯持续时长
北向南	机动车相位	120	95	56	81
	行人过街相位	120	59	92	33
南向北	机动车相位	120	89	46	77
	行人过街相位	120	49	86	37

## 5 结论

如何协调路段行人过街与干道机动车交通流的

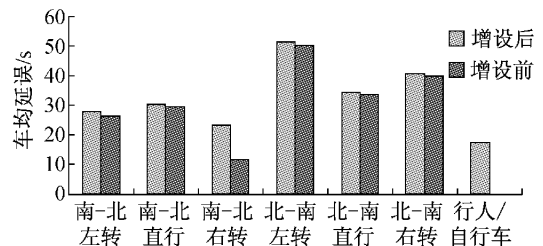


图 8 案例中增设路段行人过街信号前后机动车延误对比

Fig. 8 Comparison of vehicular delay with the setting of the signalized mid-block crossing or not in the case study

路权分配是城市交通运行管理中需要处理的问题。

与前人研究集中研究考虑路段行人信号的影响进行干线协调控制的思路不同,本文提出一种利用下游交叉口红灯信号满足路段行人过街需求的行人过街横道信号设计方法,建立了线性规划优化模型,在保障机动车通行效率维持原状的基础上,提供行人专用过街相位,降低了行人延误并提高了过街安全性。同时,这种方法考虑了行人过街对下游交叉口所有交通流(协调相位和非协调相位)的影响,使得路段行人过街的设置对机动车运行水平造成的负面影响最小化。

研究表明,对于有行人中央驻足区的情况,过街横道可设置于路段任何需要的位置,且总能计算得到合适的信号配时方案。只是对于不同的位置,行人过街相位绿灯时长有所不同。对于无行人中央驻足区的情况,将行人过街横道位置作为变量进行优化后,能够显著改善控制效果。

但当路段行人过街横道需要与公交停靠站组合设计时,为了提高公交运行水平,应当考虑公交车辆到达和停靠情况,有待进一步研究。在实际应用中还应该对机动车车速等输入参数进行标定和校核,考虑非机动车的干扰和车速的随机性等影响,以提高模型计算结果的可靠性。

## 参考文献:

- [1] 杨晓光, 劳云腾, 云美萍. 无信号控制路段行人过街方式适用性研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(11): 1466.  
YANG Xiaoguang, LAO Yunteng, YUN Meiping. Application of different pedestrian cross pattern to no-signal controlled segment [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(11): 1466.
- [2] 王俊骅, 方守恩. 行人机动车冲突模型及其行人过街风险控制应用[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(9): 1191.  
WANG Junhua, FANG Shouen. Pedestrian-vehicle conflict model and its application to pedestrian crossing street risk control [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(9): 1191.
- [3] 陈博. 路段行人过街设施安全性分析[J]. 城市交通, 2013, 11(4): 52.  
CHEN Bo. Safety analysis of pedestrian street crossing facilities [J]. Urban Transport of China, 2013, 11(4): 52.
- [4] 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, 14(1): 73.  
YANG Xiaoguang, CHEN Bailei, PENG Guoxiong. Study of the way of setting pedestrian's traffic control signal [J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(1): 73.
- [5] 马万经, 林瑜, 杨晓光. 多相位信号控制交叉口行人相位设置方法[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(2): 103.  
MA Wanjing, LIN Yu, YANG Xiaoguang. Design method of pedestrian phases at multi-phase signal intersection [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(2): 103.
- [6] MA Wanjing, LIU Yue, XIE Hanzhou, et al. Multi-objective optimization of signal timings for two-stage midblock pedestrian crosswalk [J]. Transportation Research Record, 2011, 2264: 34.
- [7] MA Wanjing, YANG Xiaoguang, PU Wenjing, et al. Signal timing optimization models for two-stage midblock pedestrian crossing [J]. Transportation Research Record, 2011, 2198: 133.
- [8] Lockwood D N, Ribbens H. The use of pelican pedestrian crossings in developing countries; a case-study in Roodepoort, South Africa [J]. Traffic Engineering & Control, 1990, 31(2): 72.
- [9] 杨晓光. 城市道路交通设计指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.  
YANG Xiaoguang. Manual of urban traffic design [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [10] 马万经. 城市道路平面行人过街交通设计与控制理论[D]. 上海: 同济大学, 2004.  
MA Wanjing. The study on the traffic design and control theory of pedestrian crossing [D]. Shanghai: Tongji University, 2004.
- [11] 何赏璐, 郑长江, 过秀成, 等. 路段感应式信号控制行人过街系统设计[J]. 交通信息与安全, 2012, 30(3): 110.  
HE Shanglu, ZHENG Changjiang, GUO Xiucheng, et al. Design of pedestrian road crossing system with actuated signal control [J]. Journal of Transportation Information and Safety, 2012, 30(3): 110.
- [12] 钟章建. 路段行人过街信号控制方法及实现[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2009.  
ZHONG Zhangjian. Signal control of pedestrian in the road sections: method and implementation [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2009.
- [13] Institute of Transportation Engineers. Design and safety of pedestrian facilities; a recommended practice of the institute of transportation engineers [R]. Washington D C: Institute of Transportation Engineers, 1998.
- [14] 李娜. 路段行人过街信号与交叉口信号协调控制研究[D]. 南京: 东南大学, 2004.  
LI Na. Research on the signal coordination of mid-block street crossing and intersection [D]. Nanjing: Southeast University, 2004.
- [15] 郑长江, 王伟, 程淑燕. 行人过街信号与交叉口信号的协调控制[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(4): 106.  
ZHENG Changjiang, WANG Wei, CHENG Shuyan. Coordination control of crossing pedestrian signal and crossroads signal [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(4): 106.
- [16] 郑长江. 行人过街信号与交叉口信号联动控制方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.  
ZHENG Changjiang. Research on the signal coordination control of mid-block street crossing and intersection [D]. Nanjing: Southeast University, 2005.
- [17] 谢佳. 杭州: “父子灯”缓解行人过街难题[N]. 人民公安报·交通安全周刊, 2007-04-21(1).  
XIE Jia. Hangzhou: relieving the pedestrian crossing problem by traffic light control of the parent and child [N]. China Police Daily Traffic Safety Weekly, 2007, 4, 21.
- [18] 谢子青. 基于模糊逻辑的智能交通信号控制方法及仿真研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.  
XIE Ziqing. Research on the intelligent traffic signal control method and simulation based on fuzzy control [D]. Chengdu: University of Electronic and Technology of China, 2011.