

文章编号: 2095-2163(2023)08-0192-05

中图分类号: U491.5+4

文献标志码: A

考虑公平性的交叉口行人专用相位设置条件

张雨迪¹, 王嘉文¹, 吴健章¹, 陆依宁²

(1 上海理工大学 管理学院, 上海 200093; 2 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: 本文提出了一种考虑行人和机动车效用的行人专用相位设置方法, 解决了传统方法中公平性考虑不足的问题。首先, 基于4种因素建立了行人与驾驶员的多元线性效用模型, 并标定参数。其次, 构建人车效用和延误模型, 提出了考虑公平性的行人专用相位优化方法, 得出设置条件。最后, 选取两相位信号交叉口进行分析, 验证了设置条件的有效性。研究结果表明, 考虑公平性的行人专用相位设置条件需根据机动车流量和行人流量确定: 机动车流量不超过1 800辆/h, 行人流量超过800人/h时设置行人专用相位; 机动车流量在1 800~2 500辆/h, 行人专用相位设置要求随车流量增加而提升。

关键词: 交通工程; 行人专用相位; 公平性; 两相位交叉口; 效用模型

Criterion of setting exclusive pedestrian phase intersections considering fairness

ZHANG Yudi¹, WANG Jiawen¹, WU Jianzhang¹, LU Yining²

(1 Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2 School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

[Abstract] This paper proposes the exclusive pedestrian phase setting method that takes into account the utilities of both pedestrians and vehicles, addressing the insufficient consideration of fairness in traditional methods. Firstly, a multivariate linear utility model for pedestrians and drivers is established based on four factors, and parameters are calibrated using field survey data. Secondly, by constructing utility and delay models for pedestrians and vehicles, a 0-1 integer optimization method considering fairness is proposed, and conditions for setting exclusive pedestrian phases are derived. Finally, a two-phase signal intersection is selected for analysis to verify the effectiveness of the setting conditions. The research results indicate that the conditions for setting exclusive pedestrian phases considering fairness should be determined based on vehicle and pedestrian flow: set exclusive pedestrian phases when vehicle flow does not exceed 1 800 veh/h and pedestrian flow exceeds 800 ped/h; when vehicle flow is between 1 800 veh/h and 2 500 veh/h, the requirements for setting exclusive pedestrian phases increase with the growth of vehicle flow.

[Key words] traffic engineering; exclusive pedestrian phases (EPP); fairness; two-phase signalized intersection; utility model

0 引言

行人专用相位设置可提高行人安全和交通通行效率, 但会影响行人和驾驶员的心理感受。因此, 在EPP设置中考虑交通公平性至关重要。针对设置EPP的交叉口, 国内外主要以安全、通行效率等为目标进行分析和评价^[1-3]。Kumaravel等学者^[4]通过图论的方法设计的信号交叉口相位方案, 提高了过街行人的安全性和交通处理能力。Gärder等学者^[5]发现EPP在行人违章率较低的交叉口设置时表现更明显; 需合理设置EPP时间, 时间过长会导致违章过街人数、交通事故发生率也随之增加^[6-7]。TIAN等学者^[8]研究发现当交叉口过街行人和转弯

车辆较多时, 行人专用相位更具优势。同时, 国内的杨晓光等学者^[9]提出了行人专用相位与传统的行人相位的差异评估模型。Ma等学者^[10]通过建立行人专用相位模式定量标准, 发现转弯率高、行人流量较大的情况下, EPP的设置更为合适。Wang等学者^[11]通过建立行人过街不同模式的延误模型, 发现传统的行人通行模式适用于车辆和行人需求较低的情况。王嘉文等学者^[12]基于人车交互理论, 构建有无行人专用相位的交叉口车辆乘客延误以及行人过街延误模型, 讨论行人专用相位适用条件。本研究将公平性纳入行人专用相位的优化目标, 建立了交叉口等待效用模型和公平性量化模型, 并将其应用于0-1优化模型中。通过数值分析和案例验证, 比较了传统

作者简介: 张雨迪(2000-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 交通运输工程。

通讯作者: 张雨迪 Email: zydshgcjdx@163.com

收稿日期: 2023-03-16

设置和考虑公平性设置的适用范围和效果。

平性, 以实现更合理的交叉口内时空资源的分配。本研究考虑行人与机动车二者的公平性和交叉口通行效率两方面, 提出的优化目标为公平性指标函数 $f_1(U_p, U_v)$ 与通行效率指标函数 $f_2(D_p, D_v)$ 之和最小。相关变量符号见表 1。

1 模型构建

1.1 问题描述

在新政策下, 需要考虑不同出行主体之间的公

表 1 符号及其说明

Tab. 1 Symbols and the corresponding description

	符号	说明
目标函数	F	行人与机动车的公平性指标函数与交叉口通行效率指标函数之和
决策变量	$SEPP$	0 - 1 变量, $SEPP = 1$ 设置行人专用相位, $SEPP = 0$ 不设置行人专用相位
输入参数	K	依据信号控制方式确定的增量延误修正系数, 对固定配时交叉口 K 一般取 0.5
	I	按上游信号等车辆还车道和调节的增量延误修正因子
	T/h	研究持续时间, 一般取 15 min
	l_i/m	i 街角人行横道长度
	m_i	街角 I 顺时针方向相邻角的索引, $m_i = \begin{cases} i + 1 & i + 1 \leq 4 \\ I & i + 1 > 4 \end{cases}$
	n_i	街角 I 逆时针方向相邻角的索引, $n_i = \begin{cases} i - 1 & i - 1 \geq 1 \\ 4 & i - 1 < 1 \end{cases}$
	k_i	街角 I 对角方向相邻角的索引, $k_i = \begin{cases} i + 2 & i + 2 \leq 4 \\ (i + 2) - 4 & i + 2 > 4 \end{cases}$
	$v^p/(m \cdot s^{-1})$	行人平均行走速度, 取 1.2 m/s
	t/s	可接受的过街前后间隙时间, 一般取 5 s
	$\mu_i/(veh \cdot h^{-1})$	转角 i 转向车辆的平均流量
参数	α	公平性调整系数
	β	将机动车延误 D_v 换算成机动车上出行者的平均延误 D_{vp} , $D_{vp} = \beta D_v$
	U_v	机动车驾驶员效用
	U_p	行人效用
	α_k^p	($K = 1, 2, 3, 4$) 为行人效用影响变量的系数, 属于待估计参数
	α_k^v	($K = 1, 2, 3, 4$) 为机动车出行者效用影响变量的系数, 属于待估计参数
	X_K	($K = 1, 2, 3, 4$) 分别为天气、出行区位、出行急迫度、气温等 4 种影响变量
	$D_v/(s \cdot veh^{-1})$	每辆车的平均延误
	$D_p/(s \cdot ped^{-1})$	每个行人的平均延误
	$d_1/(s \cdot veh^{-1})$	均衡延误, 该延误是由车辆均匀到达产生的
	$d_2/(s \cdot veh^{-1})$	随机延误, 该延误是由车辆到达随机所引起的附加延误
	$d_3/(s \cdot veh^{-1})$	初始排队附加延误, 该延误是由于调查初始的排队车辆数引起的
	g/s	车道组的有效绿灯时间
	X	车道组饱和度, 无量纲
	$C_A/(veh \cdot h^{-1})$	车道组通行能力
	λ	$\lambda = g/C$, 绿信比
	Q	信号交叉口对应的平均过饱和和排队车辆长度
	$d_{ij}^c/(s \cdot ped^{-1})$	行人穿越街角 i 到 j 人行道与转弯车辆产生的冲突延误
	$d_{ij}^p/(s \cdot ped^{-1})$	行人对角线二次穿越街角 i 到 j 产生的绕行延误
	$d_{ij}^s/(s \cdot ped^{-1})$	行人穿越街角 i 到 j 产生的信号延误

1.2 人车效用模型

舒适度反映出行者在感知舒适性、安全性和方便性等方面的出行体验^[13];城市交通公平性为出行者提供平等参与社会经济活动的机会^[14]。本文以出行舒适度的效用值衡量公平性指标,函数表达为:

$$f_1(U_p, U_v) = (U_p D_p - U_v D_v)^2 \quad (1)$$

研究舒适度影响时,选取天气、温度、急迫性和区位四因素,用于量化行人和驾驶员效用,建立的线性效用函数分别见如下:

$$U_p = \sum_{k=1}^4 a_k^p X_k^p + a_0^p \quad (2)$$

$$U_v = \sum_{k=1}^4 a_k^v X_k^v + a_0^v \quad (3)$$

1.3 人车延误模型

为提高交叉口通行效率,应最小化交通主体导致的总延误。本文给出的效率指标函数表达式为:

$$f_2(D_p, D_v) = \beta D_v + D_p \quad (4)$$

1.3.1 机动车延误

参照 HCM2010 控制延误模型。本研究中不考虑交叉口饱和或过饱和状态,故 $d_3 = 0$ 。机动车总延误可由式(4)来计算:

$$D_v = d_1 + d_2 + d_3 \quad (5)$$

1.3.2 常规行人过街延误

常规行人过街延误包括信号延误(等待过街)、冲突延误(与转弯车辆冲突)和绕行延误(二次过街)。行人延误计算采用常规过街模式:

$$D_p = d_{ij}^{Sp} + d_{ij}^{Cp} + d_{ij}^{Dp} \quad (6)$$

其中, d_{ij}^{Sp} 表示信号延误; d_{ij}^{Cp} 表示冲突延误; d_{ij}^{Dp} 表示绕行延误。进一步地,推得的各值的数学定义公式分别表示如下:

$$d_{ij}^{Sp} = \frac{(C - g_{ij}^p)^2}{2C} \quad \forall i, j \quad (7)$$

$$d_{ij}^{Cp} = \frac{e^{\mu_i t} - \mu_i t - 1}{\mu_i} \quad \forall i, j = m_i \text{ or } n_i \quad (8)$$

$$d_{ij}^{Dp} = \frac{l_i + l_{i,m_i} - l_{ij}}{v^p} \quad \forall i, j = k_i \quad (9)$$

1.3.3 行人专用相位延误

行人专用相位延误的计算公式具体如下:

$$D_p = d_{ij}^{Sp} + d_{ij}^{Cp} + d_{ij}^{Dp} \quad (10)$$

其中,信号延误为 $d_{ij}^{Sp} = \frac{(C - g_{ij}^p)^2}{2C}$, $\forall i, j$; 冲突延误为 $d_{ij}^{Cp} = 0$, $\forall i, j$; 绕行延误为 $d_{ij}^{Dp} = 0$, $\forall i, j$ 。

1.4 考虑公平性的行人专用相位优化模型

1.4.1 目标函数

本文的优化目标函数表达式如下:

$$\begin{aligned} \min F = & \alpha f_1(U_p, U_v) + f_2(D_p, D_v) = \\ & \alpha (U_v D_v - U_p D_p)^2 + \\ & \beta D_v + D_p \end{aligned} \quad (11)$$

1.4.2 约束条件:

(1) 交叉口信号周期: $C_{\min} \leq C \leq C_{\max}$ 。

(2) 信号总时长: $C = \sum_x (g_x + I_x)$ 。

(3) 每个时段应满足最小绿灯要求:

$$\max_{i \in \Phi_x^p} \{g_{i,\min}^p\} \leq g_x, \forall x, \max_{i \in \Phi_x^v} \{g_{i,\min}^v\} \leq g_x, \forall x。$$

(4) 相位绿灯间隔时间: $I_x = I_i^v, \forall i \in \Phi_x^v; I_x = I_i^p, \forall i \in \Phi_x^p$ 。

(5) 行人绿灯时间: $t_{\min}^p \leq t_{pg} \leq t_{\max}^p$ 。这里, $t_{\min}^p = 7 + \frac{L}{v_p} - I_o$ 。

(6) 车辆绿灯时间: $t_{\min}^v \leq t_{vg} \leq t_{\max}^v$ 。

2 效用模型标定

2.1 行人效用模型标定

本文随机邀请一组行人和驾驶员参与问卷调查,以天气、温度、区位以及出行急迫度四种因素作为自变量进行多元回归。通过逐步回归对变量筛选,最后影响行人效用指标为:天气、出行区位、出行急迫度,再次回归得到标定结果见表2。

表2 回归系数表

Tab. 2 Regression coefficients table

保留因素	未标准化系数		标准化系数 Beta	t	显著性	相关性			共线性统计	
	B	标准错误				零阶	偏	部分	容错	VIF
(常量)	0.608	0.180		3.388	0.001					
天气	0.282	0.047	0.303	5.949	0	0.529	0.324	0.260	0.736	1.359
区位	0.295	0.047	0.299	6.262	0	0.476	0.339	0.274	0.840	1.191
急迫度	0.249	0.045	0.262	5.497	0	0.452	0.302	0.240	0.381	1.203

由表 2 可知,天气、区位以及急迫度的显著性均小于 0.05,温度对行人出行舒适度的影响较小, VIF 小于 10 说明变量无多重共线性,最终行人效用模型为:

$$U_p = 0.282X_1^p + 0.295X_2^p + 0.294X_3^p + 0.608 \quad (12)$$

其中, X_1^p, X_2^p, X_3^p 分别表示影响行人的天气、出行区位、出行急迫度因素。

2.2 驾驶员效用模型标定

以天气、温度、区位以及出行急迫度四种因素作为影响变量进行分析。通过逐步回归对全部变量进行筛选。最终影响机动车效用指标为:天气、出行区位,对模型再次回归得到最终标定结果见表 3。

表 3 回归分析以及系数表

Tab. 3 Regression analysis and coefficients

模型因素	未标准化系数		标准化系数	t	显著性
	B	标准错误	Beta		
(常量)	0.450	0.418		1.078	0.291
天气	0.515	0.154	0.506	3.353	0.002
区位	0.315	0.135	0.353	2.341	0.027

天气、区位两种影响因素显著性均小于 0.05,对驾驶员效用影响显著,研究得到的驾驶员效用模型

标定结果见如下:

$$U_v = 0.515X_1^v + 0.315X_2^v + 0.45 \quad (13)$$

其中, X_1^v, X_2^v 分别表示影响机动车驾驶员的天气、出行区位因素。

3 考虑公平性的 EPP 适用性分析

为验证模型适用性,选取两相位固定信号控制交叉口为研究对象,改变人车流量,比较考虑与不考虑公平性时设置与不设置行人专用相位 (EPP) 的结果。通过枚举人车流量数值并比较模型结果,得到设置与不设置 EPP 的情况如图 1 所示。由图 1 分析可知,文中对此做探讨论述如下:

(1) 机动车流量在 1 800~2 500 辆/h 范围内,随流量增加,考虑公平性的 EPP 设置对行人流量需求逐渐增加。

(2) 行人流量不变,若机动车流量增加且与行人流量比小于 0.75,应设置 EPP。机动车流量在 2 500 辆/h 以下,随行人流量增加,适合设置 EPP。

(3) 机动车流量不超过 1 800 辆/h 时,考虑公平性设置 EPP 的行人流量与机动车流量比越小,公平性指标对 EPP 设置越显著;此时,行人流量较低时同样具备设置 EPP 条件。

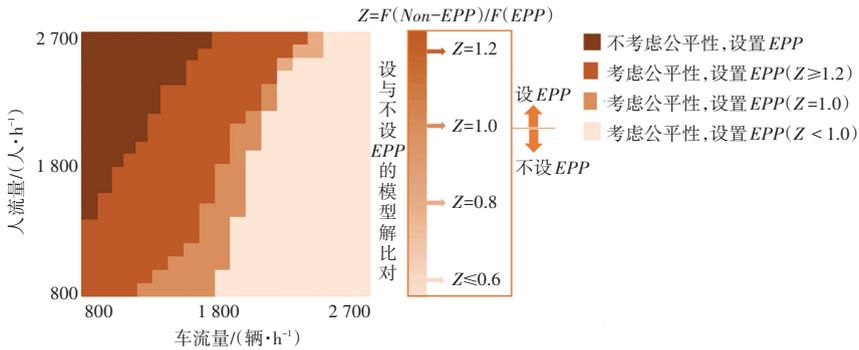


图 1 设置与不设置 EPP 的模型解比对

Fig. 1 Comparison of model solutions with and without EPP

4 案例验证

本研究选取上海市淮海中路-黄陂南路交叉口,统计记录几何参数及工作日高峰人车流量,比较设置和不设置行人专用相位的模型结果,证明模型有效性和可行性。参数输入及结果见表 4、表 5。

表 4、表 5 的模型结果显示,设置 EPP 后,机动车乘客延误增加 31.24%,行人延误减少 47.3%,交叉口总延误降低 11.92%。考虑公平性的行人专用相位优化模型表明,设置行人专用相位更优,与案例

交叉口实际相符。因此,提出的优化模型被证实有效。

表 4 流量数据输入表

Tab. 4 Traffic data input table

项目名称	场景数据
东西直行车流量/(pcu · h ⁻¹)	386
南北直行车流量/(pcu · h ⁻¹)	390
南北左转车流量/(pcu · h ⁻¹)	100
设置 EPP 时行人流量/(人 · h ⁻¹)	445
不设置 EPP 时行人流量/(人 · h ⁻¹)	270

表5 模型结果表

Tab. 5 Model results table

h

	评价指标			模型解
	机动车内乘客延误	行人延误	总延误	
未设置 <i>EPP</i>	49.3	60.6	109.9	168.0
设置 <i>EPP</i>	64.7	32.1	96.8	162.0

5 结束语

本研究解决了行人专用相位设置中人车公平性问题,提出了公平性优化模型。采用四因素建立人车多元线性效用模型,提出公平性行人专用相位0-1整数优化方法。分析不同人车流量下,行人专用相位设置对延误的影响,通过VISSIM验证设置条件有效性。研究结果显示,考虑公平性时,行人流量较低时同样具备设置*EPP*条件。本文研究具有一定的实际意义和参考价值。

参考文献

- [1] 张卫华,刘冉冉,颜鹏. 考虑舒适度因素的出行价值模型[J]. 公路交通科技,2020,37(05):116-122.
- [2] 袁黎,葛兴,雷智鹞. 信号交叉口行人专用相位安全效益评价方法研究[J]. 中国安全科学学报,2014,24(03):85-90.
- [3] WANG Jiawen, YANG Chengcheng, ZHAO Jing. Conditions for setting exclusive pedestrian phases at two-phase signalized intersections considering pedestrian-vehicle interaction[J]. Journal of Advanced Transportation, 2021, 2021(16):1-14.
- [4] KUMARAVEL S D, AYYAGARI R. Design of optimal phase plan for urban signalized intersections accommodating safe pedestrian

crosswalks [C]// International Conference on Intelligent Transportation Systems. Maui, HI, USA; IEEE, 2018; 3905-3910.

- [5] GÅRDER P J A A. Pedestrian safety at traffic signals: a study carried out with the help of a traffic conflicts technique [J]. Accident Analysis and Prevention, 1989, 21(5): 435-44.
- [6] ABRAMS C M, SMITH S J T RR. Selection of pedestrian signal phasing [J]. Transportation Research Record, 1977, 629: 1-6.
- [7] IVAN J N, MCKERNAN K, HANG Y, et al. A study of pedestrian compliance with traffic signals for exclusive and concurrent phasing [J]. Accident Analysis and Prevention, 2017, 98: 157-66.
- [8] TIAN Zong, URBANIK T, ENGELBRECHT R, et al. Pedestrian timing alternatives and impacts on coordinated signal systems under split-phasing operations [J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2001, 1748(1): 46-54.
- [9] 杨晓光,马万经,林瑜. 两相位信号控制交叉口行人专用相位设置条件研究[J]. 公路交通科技,2005(01):127-131.
- [10] MA Wanjing, LIAO Dabin, LIU Yue, et al. Optimization of pedestrian phase patterns and signal timings for isolated intersection [J]. Transportation Research Part C, 2015, 58(SEP.PT.C):502-514.
- [11] WANG Tao, ZHAO Jing, LI Chaoyang. Pedestrian delay model for continuous flow intersections under three design patterns [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 2019:1-12.
- [12] 王嘉文,陈超,金杨,等. 考虑人车交互的两相位信号控制交叉口行人专用相位设置条件[J]. 公路交通科技,2020,37(01):96-103.
- [13] 马俊来,边扬,王炜. 城市交通方式间相对出行舒适度研究 [C]//第六届交通运输领域国际学术会议. 大连:中国旅美交通学会,2006:111-116.
- [14] 黄谦. 交通公平性的层次划分与量化评价方法 [D]. 北京:清华大学,2008.

(上接第191页)

- [21] 李伟康,李炜,吴云芳. 深度学习中汉语字向量和词向量结合方式探究[J]. 中文信息学报,2017,31(06):140-146.
- [22] 吕佳,李婷婷. 半监督自训练方法综述[J/OL]. 重庆师范大学学报(自然科学版):1-10 [2021-09-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20210630.0850.004.html>.
- [23] WEI J, ZOU Kai. Eda: Easy data augmentation techniques for

boosting performance on text classification tasks [J]. arXiv preprint arXiv:1901.11196, 2019.

- [24] MARTIN K J, SIRKO S, BOYAN B. Comparison and evaluation of ontologies for units of measurement [J]. Semantic Web, 2018, 10(3):1-19.