

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20230730001

文章编号: 1672-9331(2024)01-0150-14

引用格式: 陈思雨, 吴伟. 基于冲突相位组的自动驾驶交叉口行人过街控制方法[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2024, 21(1): 150-163, 173.

Citation: CHEN Siyu, WU Wei. Pedestrian crossing control method at autonomous intersection based on the conflict phase groups[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(1): 150-163, 173.

基于冲突相位组的自动驾驶交叉口行人过街控制方法

陈思雨, 吴伟

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:【目的】在无信号控制的自动驾驶环境下, 自动驾驶车辆的通行轨迹将与过街行人产生大量冲突, 如何利用交通控制手段使行人安全通过交叉口, 并避免对自动驾驶车辆的通行造成较大的干扰, 是亟待解决的关键问题。【方法】本文提出一种基于冲突相位组的自动驾驶交叉口行人过街控制方法, 将到达交叉口的车辆流向分为4个冲突相位组, 在各相位组内单独分配通行时间, 基于冲突相位组对自动驾驶车辆和行人过街的通行时间进行建模; 在穿插式通行模式的基础上, 使用行人信号灯保障行人过街需求, 建立考虑行人二次过街的自动驾驶交叉口交通控制模型。模型以交叉口各流向需求量与实际交通量乘积之和最大为目标, 以各流向允许车辆通行的时间比例和行人信号灯状态为决策变量, 综合考虑交通流量、行人和车辆通行权等约束, 建立混合整数线性规划模型(mixed-integer linear program, MILP), 该控制模型可为各流向的车辆和行人分配通行权。【结果】本文模型的车均延误较定时控制方案的降低26.74%, 较单次过街模型的降低11.53%, 人均延误较定时控制方案的降低51.66%, 较单次过街模型的降低36.20%。这表明本文模型能有效提升交叉口的通行效率。【结论】本文模型能根据自动驾驶车辆和行人的通行需求, 对交叉口时空通行权进行分配, 有效保障行人过街安全。

关键词: 交通控制; 自动驾驶; 行人过街; 交叉口; 冲突相位组

中图分类号: U491

文献标志码: A

Pedestrian crossing control method at autonomous intersection based on the conflict phase groups

CHEN Siyu, WU Wei

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: [Purposes] In the automatic driving environment without signal control, there will be a large number of conflicts between autonomous vehicles and pedestrians. It's a critical issue to be addressed in how to ensure the safety of pedestrians' crossing at autonomous intersections and avoid causing greater interference to autonomous vehicles. [Methods] This paper proposes a unique traffic control method for pedestrians' crossing based on the conflict phase groups. The

收稿日期: 2023-07-30; 修回日期: 2023-09-04; 接受日期: 2023-09-20

基金项目: 长沙市科技计划项目(kq2107009); 教育部人文社会科学研究项目(22YJCZH189); 国家自然科学基金资助项目(61773077); 长沙理工大学研究生科研创新项目(CXCLY2022005)

通信作者: 吴伟(1987—)(ORCID: 0009-0007-0245-2747), 男, 教授, 主要从事智能交通、自动驾驶、公共交通等方面的研究。E-mail: jiaotongweiwu@csust.edu.cn

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxzbzk/home>

vehicles approaching the intersection are divided into four conflict phase groups according to their movements, and the passage time is allocated separately within each phase group. The passage time of vehicles traversing the intersection are then modeled based on the phase groups. Based on interspersed traffic mode, traffic lights are utilized to ensure the safety of pedestrians' crossing, the two-stage crossing for pedestrians is also employed to improve the overall efficiency of the intersection. A mixed-integer linear programming (MILP) model is formulated, aiming to maximize the sum of the product of demand and actual traffic volume for each direction at intersections. The decision variables of the model include the time proportions for vehicle movement in each direction and the pedestrian signal states. Constraints are incorporated to comprehensively consider factors such as traffic flow, pedestrian rights of way, and vehicle passage rights. The allocation of right-of-way for both vehicles and pedestrians in each direction can be determined by this model. [Findings] The average delay of vehicles in this model is reduced by 26.74% compared with the fixed plan scheme, 11.53% compared with the one-stage crossing model, and the average delay of pedestrian is reduced by 51.66% compared with the fixed plan scheme and 36.20% compared with the one-stage crossing model. The result clearly shows that the proposed model can effectively improve the traffic efficiency of intersection. [Conclusions] The proposed model can allocate the space-time right of way of intersection according to the traffic demand of autonomous vehicles and pedestrians, and effectively guarantee the safety of pedestrians.

Key words: traffic control; automatic driving; pedestrian crossing; intersection; conflict phase group

Foundation item: Project (kq2107009) supported by Science and Technology Plan Program of Changsha; Project (22YJCZH189) supported by the Ministry of Education Humanities and Social Sciences Research Program; Project (61773077) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (CXCLY2022005) supported by Changsha University of Science & Technology Postgraduate Research Innovation Program

Corresponding author: WU Wei (1987—) (ORCID: 0009-0007-0245-2747), male, professor, research interest: intelligent transportation, automatic driving and public transport. E-mail: jiaotongweiwu@csust.edu.cn

0 引言

交叉口是城市道路的交通瓶颈。基于自动驾驶技术^[1-2],自动驾驶车辆能相互协作、相互配合地通过交叉口,突破了已有基于周期、绿信比的传统交通流管控方式,可实现穿插式通行而无需信号灯控制^[3-5]。这一基于自动驾驶的新型交通控制使得道路通行能力得到更充分的利用,同时也对车辆和行人的协调控制提出新的要求。在穿插式通行场景下,车辆通行轨迹与过街行人存在大量冲突,行人如何在穿插式通行的自动驾驶交叉口实现安全高效过街,如何实现自动驾驶车辆和行人时空通行权的有效分配,是交叉口交通控制领域亟待解决的理论问题。

已有文献针对自动驾驶交叉口交通控制方法 (autonomous intersection control, AIC) 展开了深入研究,主要可分为两类:① 基于预留技术的 AIC 模型;② 基于轨迹优化的 AIC 模型。

DRESNER 等^[6]提出了基于预留技术的早期 AIC 模型,把交叉口离散成网格,基于先到先服务 (first come first served, FCFS) 的原则,自动驾驶车辆向控制中心请求交叉口的通行权。但是,该研究发现在车流量过饱和的情况下,FCFS 策略的延误比信号控制的更严重^[7]。随后,研究学者提出了基于预留技术的改进型交通控制模型,例如 LEVIN 等^[8]提出基于动态交通分配的自动驾驶车辆在交叉口空间竞价通行模型,吴伟等^[4]通过外边界投影降维法建立轨迹方程和交叉口空间的映射关系,同时优化车辆的最佳路径和驶入时刻。上述基于预

留技术的AIC模型大多将交叉口内部空间离散成若干网格或冲突点,通过提前预约网格或冲突点的通行权,实现自动驾驶车辆间的冲突分离。

此外,基于车辆轨迹优化的AIC模型也受到研究学者的关注,已有研究主要基于车辆的行驶数据,预测车辆到达时间、车辆轨迹等参数,提出集中式或分布式的控制算法,以交叉口通过车辆数最多^[9]、燃料消耗最少^[10]、总冲突轨迹最短^[11]等为目标,优化车辆进入时间、通行次序及路径选择。例如,LEE等^[11]提出一种车辆通过交叉口的协同控制(cooperative vehicle intersection control, CVIC)系统,以车辆总冲突轨迹最小为目标构建非线性优化模型,制定车辆最优行驶策略,但该模型在车流量较大的情况下收敛速度较慢,且仅考虑了东西直行与南北直行之间的冲突。MIRHELI等^[9]同时考虑直行和左转车辆的冲突,在自动驾驶车辆到达交叉口前优化运行轨迹,使交叉口通行车辆数最大化。MAKAREM等^[12]提出分布式控制算法,考虑车辆油耗及轨迹平顺性,由车辆单独规划行驶轨迹,避免车辆冲突。

以上研究分别基于预留技术和轨迹优化方法,为自动驾驶车辆在交叉口通行提供保障。然而,除服务车辆通行外,交叉口也是解决行人过街需求的重要节点,已有研究大多只针对自动驾驶车辆进行时空轨迹规划,而较少考虑行人过街需求的研究。尤其在自动驾驶交叉口通行场景中,自动驾驶车辆能实现穿插式通行而无需信号灯,其通行轨迹与行人过街产生大量冲突,如何利用交通控制手段使行人安全通过交叉口,并避免对自动驾驶车辆通行造成较大的干扰,是亟待解决的关键问题。已有研究者针对路段行人过街开展了相关研究,例如MILLARD-BALL^[13]利用博弈论分析自动驾驶车辆和行人的冲突,并针对行人过街提出建议;RODRÍGUEZ PALMEIRO等^[14]研究了行人遇到自动驾驶车辆和传统车辆时的过街决策。上述研究针对行人过街的感知与决策进行了探究,但较少考虑自动驾驶车辆的避撞行为。基于上述不足,GUPTA等^[15]在2019年将车-人协商过程概念化,提出了行人和自动驾驶车辆之间的协商模型。

已有研究针对自动驾驶车辆和过街行人的冲突,提出了相应的缓解冲突的方法,增强了行人过街的安全性,但仍存在以下不足:已有文献大多针

对“路段行人过街”,且主要在行人决策方面探索解决方案,缺少针对自动驾驶环境下“交叉口行人过街”的研究。交叉口是交通冲突的集中区域,其通行环境比路段的更加复杂,而且在自动驾驶交叉口的穿插式通行环境下,有效处理行人过街问题尤为重要。CHEN等^[16]基于自动驾驶交叉口通行场景,提出同时考虑行人和车辆通行的AIMped模型,在网络水平上基于最大压力控制策略进行车辆和行人的通行控制。然而该研究在交通控制时,对交叉口空间进行区域划分,分别对不同区域的交通流进行控制,限制了其研究的可实施性。WU等^[17]提出将行人集中在一个封闭单元即自动驾驶摆渡车内,建立自动驾驶交叉口摆渡车的轨迹模型,优化和协调自动驾驶车辆和行人摆渡车进入交叉口的时刻,以缓解自动驾驶车辆和行人的冲突。但是,使用自动驾驶摆渡车运送行人,需要设计和制造专门的摆渡车及导轨,存在建设成本和运营成本较大等问题。

本文提出基于冲突相位组的自动驾驶交叉口行人过街控制方法,主要研究如下:①在自动驾驶交叉口的穿插式通行场景下,根据通行方向将到达交叉口的车流分为4个冲突相位组,基于冲突相位组对自动驾驶车辆和过街行人的通行时间和通行次序进行建模;②考虑行人二次过街对自动驾驶交叉口的时空通行权进行优化。相关研究表明,在普通信号控制交叉口,二次过街方案能有效提高行人过街效率^[18]。

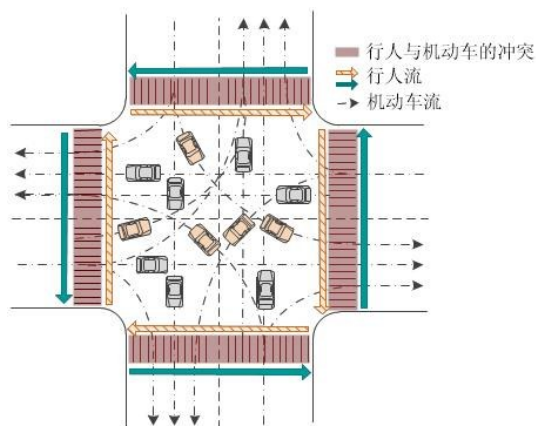
本研究主要包括如下内容:第1部分为问题描述,对本文研究的重点进行直观阐述;第2部分对模型使用的参数进行说明;第3部分建立交叉口控制模型,主要包括需求确定模型、通行时间分配模型和冲突点约束模型;第4部分为模型求解;第5部分为模型验证与效益分析,将本文模型优化方案与定时控制方案、行人单次过街方案进行对比分析,并对关键参数进行敏感性分析。

1 问题描述

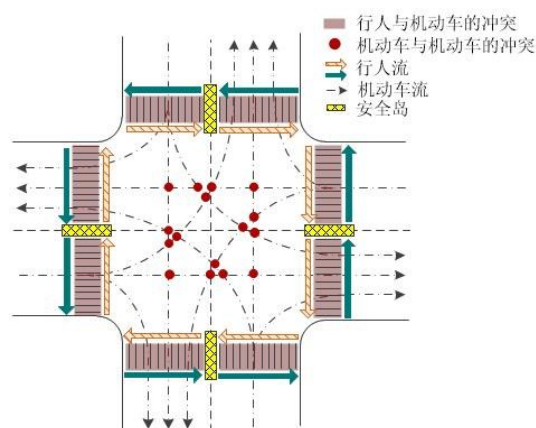
在自动驾驶环境下,车辆相互配合、相互穿插地通过交叉口而无需信号灯控制,其通行路径如图1(a)所示。在穿插式通行模式下,机动车与机动车、机动车与行人的轨迹存在多个冲突点。由于自动驾驶车辆和行人之间很难通过信息交互实

现穿插通行,因此,如何在穿插式通行的交叉口解决行人安全高效通行的问题,是本文的主要研究内容。本文考虑利用行人过街信号灯保障行人过街需求,为减少对车辆通行的干扰,考虑行人二次过街的通行方式,当行人信号灯为绿灯时,该相位的行人允许通行,与该人行横道存在冲突的自动驾驶车辆禁止通行,如图1(b)所示。此外,考虑将到达交叉口的车流根据其通行方向分为4个冲突相位组,相位组内各流向间相互冲突,不允许同时通行,而不在同一冲突相位组内的流向,轨迹无重叠,可同时放行。

本文根据车辆到达和驶离迭代计算各时间窗的车辆通行需求量;根据行人到达率估算行人的过街需求量,以各流向需求量与实际交通量的乘



(a) 穿插式通行模式



(b) 行人二次过街模式

图1 问题描述示意图

Fig. 1 Problem description diagram

积之和最大为目标函数;以各流向允许通行的时间,以及各阶段人行横道的行人信号灯状态作为决策变量;基于冲突相位组对自动驾驶车辆和行人过街的通行时间进行建模,避免车辆与行人的冲突,综合考虑实际流量约束、行人通行权分配和车辆通行权分配,建立考虑行人过街的自动驾驶交叉口交通控制模型。

2 参数说明

本研究使用的主要参数见表1。

表1 主要参数说明

Table 1 Main parameter definition

参数类别	参数符号	参数说明
集合	O	进口方向集合, $O = \{E, W, S, N\}$, 其中E、W、S、N分别表示东、西、南、北方向
	D	出口方向集合, $D = \{E, W, S, N\}$, 其中E、W、S、N分别表示东、西、南、北方向
	Z	交叉口角落集合, $Z = \{A, B, C, D\}$, 其中A、B、C、D分别表示交叉口的西北角、东北角、东南角、西南角
	s_1, s_2, s_3, s_4	4个冲突相位组, 其中 $s_1 = \{N \rightarrow E, S \rightarrow N, E \rightarrow S, W \rightarrow E\}$, $s_2 = \{N \rightarrow E, S \rightarrow N, W \rightarrow N, E \rightarrow W\}$, $s_3 = \{E \rightarrow S, W \rightarrow E, S \rightarrow W, N \rightarrow S\}$, $s_4 = \{S \rightarrow W, N \rightarrow S, W \rightarrow N, E \rightarrow W\}$, 其中 $N \rightarrow E$ 表示车辆由北进口驶向东出口, 其他以此类推
变量	$i \rightarrow j$	车辆由进口方向 i 驶向出口方向 j , $i \in O, j \in D$
	a	行人到达交叉口的的位置, $a \in Z$
	b	行人过街的目标位置, $b \in Z$
	k	人行横道编号
	C_k	人行横道 k 的通行能力, 单位: 人/h
	$c_{i \rightarrow j}$	车辆的通行能力, 单位: pcu/h
	$q_{i \rightarrow j}(t)$	第 t 个时间窗, 流向 $i \rightarrow j$ 的车辆到达数, 单位: 辆
	$\bar{\mu}_{a \rightarrow b}$	由位置点 $a \rightarrow b$ 的行人平均到达率, 单位: 人/h

表 1 (续)
Table 1 (Continued)

参数类别	参数符号	参数说明
变量	$d_{i \rightarrow j}(t)$	第 t 个时间窗, 流向 $i \rightarrow j$ 的车辆需求量, 单位: 辆
	$b_{i \rightarrow j}(t)$	第 t 个时间窗, 流向 $i \rightarrow j$ 允许通行的车辆数, 单位: 辆
	$y_{i \rightarrow j}(t)$	第 t 个时间窗, 流向 $i \rightarrow j$ 的实际交通量, 单位: 辆
	$r_{i \rightarrow j}(t)$	第 t 个时间窗, 流向 $i \rightarrow j$ 的车辆允许通行时间比例
	$Q_{a \rightarrow b}(t)$	第 t 个时间窗, 交叉口位置点 $a \rightarrow b$ 的行人到达量, 单位: 人
	$D_{a \rightarrow b,1}(t)$ 、 $D_{a \rightarrow b,2}(t)$	第 t 个时间窗, 交叉口位置点 $a \rightarrow b$ 第一阶段、第二阶段行人过街的需求量, 单位: 人
	$B_{a \rightarrow b,1}(t)$ 、 $B_{a \rightarrow b,2}(t)$	第 t 个时间窗, 交叉口位置点 $a \rightarrow b$ 第一阶段、第二阶段允许通行的行人数量, 单位: 人
	$Y_{a \rightarrow b,1}(t)$ 、 $Y_{a \rightarrow b,2}(t)$	第 t 个时间窗, 交叉口位置点 $a \rightarrow b$ 第一阶段、第二阶段的实际过街行人数量, 单位: 人
	$R_{a \rightarrow b,1}(t)$ 、 $R_{a \rightarrow b,2}(t)$	二元变量, 第 t 个时间窗, 交叉口位置点 $a \rightarrow b$ 第一阶段、第二阶段的行人信号灯状态, $R_{a \rightarrow b,1}(t) = 1$ 表示第一阶段信号灯为绿灯, $R_{a \rightarrow b,1}(t) = 0$ 表示第一阶段信号灯为红灯; $R_{a \rightarrow b,2}(t) = 1$ 表示第二阶段信号灯为绿灯, $R_{a \rightarrow b,2}(t) = 0$ 表示第二阶段信号灯为红灯
	$\mu_1(t), \mu_2(t)$	二元变量, $\mu_1(t) + \mu_2(t) = 1$, $\mu_1(t)$ 表示第 t 个时间窗, 流向 $i \rightarrow j$ 的实际车辆交通量等于该流向允许通行车辆数量, $\mu_2(t)$ 表示流向 $i \rightarrow j$ 的实际交通量等于其需求量
	$\alpha_1(t), \alpha_2(t)$	二元变量, $\alpha_1(t) + \alpha_2(t) = 1$, $\alpha_1(t)$ 表示 $a \rightarrow b$ 第一阶段的行人实际过街数量等于其允许通行人数, $\alpha_2(t)$ 表示行人实际过街数量等于其行人过街需求量
	$\beta_1(t), \beta_2(t)$	二元变量, $\beta_1(t) + \beta_2(t) = 1$, $\beta_1(t)$ 表示 $a \rightarrow b$ 第二阶段的行人实际过街数量等于其允许通行人数, $\beta_2(t)$ 表示行人实际过街数量等于其行人过街需求量
	δ_{ij}^k	二元变量, $\delta_{ij}^k = 1$ 表示车辆流向 $i \rightarrow j$ 与人行横道 k 相互交叉, $\delta_{ij}^k = 0$ 则表示车辆流向 $i \rightarrow j$ 与人行横道 k 不存在冲突点
	V	表示各流向车辆需求量 $d_{i \rightarrow j}(t)$ 与其实际交通量 $y_{i \rightarrow j}(t)$ 的乘积
	U	表示各流向行人需求量 $(D_{a \rightarrow b,1}(t) + D_{b \rightarrow a,2}(t))$ 与其通行能力 C_k 及信号灯状态值 $R_k(t)$ 的乘积

3 模型建立

3.1 目标函数

本文模型以交叉口各流向需求量和实际交通量的乘积之和最大为目标函数。对于自动驾驶车辆, 需求量根据各进口车道到达和驶离的车辆数量计算, 实际交通量是该流向实际通行的车辆数量; 对于过街行人, 需求量是人行横道双向等待过街行人数量之和, 实际交通量是人行横道通行能力与其信号灯状态值的乘积。本文以自动驾驶车辆和行人通行效率的加权和最大为目标, 如式(1)所示。

使用式(1)的目标函数, 当交叉口某个流向的交通需求量较大时, 为使得目标函数变大, 模型将

为该流向分配更多的通行时间, 从而增大其实际交通量, 实现目标函数的正反馈。当某流向的交通需求量较小时, 目标函数的设置将使得模型为该流向分配较少的通行时间, 使得其实际交通量也会很小, 直至随着时间的推进, 该流向累积的交通需求量越来越大, 并最终成为交通需求量较大的流向。通过最大化需求量和实际交通量的乘积之和, 促使交叉口的实际交通量与需求量相匹配, 有利于优化时空资源分配, 使得道路通行能力得到最大限度的充分利用。因此, 式(1)的目标函数本质是基于交叉口效率最大的目标函数, 有助于实现交叉口通行能力最大化。

$$\max \sum_{i \rightarrow j} \lambda \sum_k (1 - \lambda) \cdot U \quad (1)$$

$$V = d_{i \rightarrow j}(t) \cdot y_{i \rightarrow j}(t) \quad (2)$$

$$U = (D_{a \rightarrow b,1}(t) + D_{b \rightarrow a,2}(t)) \cdot R_k(t) \cdot C_k \quad (3)$$

式(1)中: λ 为权重系数。

3.2 约束条件

3.2.1 流量约束

1) 车辆需求量和通行量。

确定研究时段内,每个时间窗各车道的交通需求量,如图2所示,根据每个时间窗到达及驶离的车辆数量计算该车道的交通需求量。第 $t+1$ 时间窗,交叉口由进口方向 i 驶向出口方向 j 的交通需求量 $d_{i \rightarrow j}(t+1)$,如式(4)所示。

$$d_{i \rightarrow j}(t+1) = d_{i \rightarrow j}(t) + q_{i \rightarrow j}(t) - y_{i \rightarrow j}(t) \quad (4)$$

流向 $i \rightarrow j$ 允许通行的车辆数等于该流向通行能力乘以该流向允许通行的时间比例,如式(5)所示。若该流向允许通行车辆数小于需求量,则该流向的实际交通量等于允许通行车辆数,否则实际交通量等于需求量,如式(6)~(10)所示。

$$b_{i \rightarrow j}(t) = c_{i \rightarrow j} \cdot r_{i \rightarrow j}(t) \quad (5)$$

$$y_{i \rightarrow j}(t) \leq b_{i \rightarrow j}(t) \quad (6)$$

$$y_{i \rightarrow j}(t) \leq d_{i \rightarrow j}(t) \quad (7)$$

$$b_{i \rightarrow j}(t) \leq y_{i \rightarrow j}(t) + M(1 - \mu_1(t)) \quad (8)$$

$$d_{i \rightarrow j}(t) \leq y_{i \rightarrow j}(t) + M(1 - \mu_2(t)) \quad (9)$$

$$\mu_1(t) + \mu_2(t) = 1 \quad (10)$$

其中,式(6)表示流向 $i \rightarrow j$ 的实际交通量不大于该流向允许通行车辆数量;式(7)表示流向 $i \rightarrow j$ 的实际交通量不大于该流向的交通需求量;式(8)~(10)中 M 为大正数; $\mu_1(t)$ 、 $\mu_2(t)$ 是为了公式线性化引入的二元变量。其中,当 $\mu_1(t) = 1$ 时, $\mu_2(t) = 0$,式(8)等同于 $b_{i \rightarrow j}(t) \leq y_{i \rightarrow j}(t)$,结合式(6)即为 $y_{i \rightarrow j}(t) = b_{i \rightarrow j}(t)$,式(9)自动成立;当 $\mu_1(t) = 0$ 时, $\mu_2(t) = 1$,式(8)自动成立,式(9)等同于 $d_{i \rightarrow j}(t) \leq y_{i \rightarrow j}(t)$,结合式(7)即为 $y_{i \rightarrow j}(t) = d_{i \rightarrow j}(t)$ 。

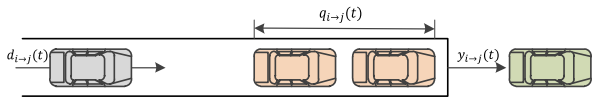


图2 车辆通行需求量示意图

Fig. 2 Diagram of vehicle traffic demand

2) 行人过街需求量。

交叉口四个角落分别定义为A、B、C、D位置点, $a \in Z, b \in Z$,如图3所示。第 t 个时间窗,角落 $a \rightarrow b$ 的行人到达量 $Q_{a \rightarrow b}(t)$ 等于行人到达率

$\bar{\mu}_{a \rightarrow b}$ 与单位时间窗长度 T 的乘积,如式(11)所示。

$$Q_{a \rightarrow b}(t) = \bar{\mu}_{a \rightarrow b} \cdot T \quad (11)$$

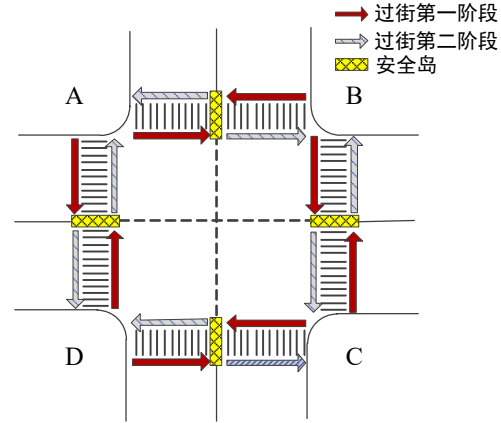


图3 行人过街需求示意图

Fig. 3 Diagram of pedestrian crossing demand

本研究考虑采用行人二次过街的方式提高行人过街效率和交叉口的通行能力。将行人过街分成两个阶段,在人行横道中间设置安全岛,第一阶段行人信号灯为绿灯时,行人可穿过第一阶段的人行横道到达安全岛,并在安全岛上等待第二阶段行人信号灯变为绿灯时通行。位置点 $a \rightarrow b$ 第一阶段允许过街人数 $B_{a \rightarrow b,1}(t)$ 与信号灯状态相关,若为绿灯,则允许过街人数等于人行横道通行能力,若为红灯,则不允许行人过街,如式(12)所示。在第 t 时间窗, $a \rightarrow b$ 第一阶段的行人实际过街数量等于第一阶段允许通行人数 $B_{a \rightarrow b,1}(t)$ 和行人过街需求量 $D_{a \rightarrow b,1}(t)$ 二者中的最小值,如式(13)~(17)所示。

$$B_{a \rightarrow b,1}(t) = C_k \cdot R_{a \rightarrow b,1}(t) \quad (12)$$

$$Y_{a \rightarrow b,1}(t) \leq C_k \cdot R_{a \rightarrow b,1}(t) \quad (13)$$

$$Y_{a \rightarrow b,1}(t) \leq D_{a \rightarrow b,1}(t) \quad (14)$$

$$C_k \cdot R_{a \rightarrow b,1}(t) \leq Y_{a \rightarrow b,1}(t) + M(1 - \alpha_1(t)) \quad (15)$$

$$D_{a \rightarrow b,1}(t) \leq Y_{a \rightarrow b,1}(t) + M(1 - \alpha_2(t)) \quad (16)$$

$$\alpha_1(t) + \alpha_2(t) = 1 \quad (17)$$

其中,式(13)表示位置点 $a \rightarrow b$ 第一阶段的行人实际过街数量不大于该人行横道通行能力与行人信号灯状态值的乘积;式(14)表示位置点 $a \rightarrow b$ 第一阶段的行人实际过街数量不大于该流向的行人过街需求量;式(15)~(17)中, $\alpha_1(t)$ 、 $\alpha_2(t) \in \{0, 1\}$,当 $\alpha_1(t) = 1$ 时, $\alpha_2(t) = 0$,式(15)等同于 $C_k \cdot R_{a \rightarrow b,1}(t) \leq Y_{a \rightarrow b,1}(t)$,结合式(13)即为 $Y_{a \rightarrow b,1}(t) = C_k \cdot R_{a \rightarrow b,1}(t)$,式(16)自动成立;当

$\alpha_2(t) = 1$ 时, $\alpha_1(t) = 0$, 式(15)自动成立, 式(16)等同于 $D_{a \rightarrow b,1}(t) \leq Y_{a \rightarrow b,1}(t)$, 结合式(14)即为 $Y_{a \rightarrow b,1}(t) = D_{a \rightarrow b,1}(t)$ 。

第一阶段行人过街需求量 $D_{a \rightarrow b,1}(t+1)$ 等于上一时间窗的行人过街需求量 $D_{a \rightarrow b,1}(t)$ 加上行人到达量 $Q_{a \rightarrow b}(t)$, 并减去实际过街行人人数 $Y_{a \rightarrow b,1}(t)$, 如式(18)所示。

$$D_{a \rightarrow b,1}(t+1) = D_{a \rightarrow b,1}(t) + Q_{a \rightarrow b}(t) - Y_{a \rightarrow b,1}(t) \quad (18)$$

第二阶段行人过街允许通行人数 $B_{a \rightarrow b,2}(t)$ 和行人实际过街数量 $Y_{a \rightarrow b,2}(t)$ 满足式(19)~(24)。

$$B_{a \rightarrow b,2}(t) = C_k \cdot R_{a \rightarrow b,2}(t) \quad (19)$$

$$Y_{a \rightarrow b,2}(t) \leq B_{a \rightarrow b,2}(t) \quad (20)$$

$$Y_{a \rightarrow b,2}(t) \leq D_{a \rightarrow b,2}(t) \quad (21)$$

$$Y_{a \rightarrow b,2}(t) \geq B_{a \rightarrow b,2}(t) - M(1 - \beta_1(t)) \quad (22)$$

$$Y_{a \rightarrow b,2}(t) \geq D_{a \rightarrow b,2}(t) - M(1 - \beta_2(t)) \quad (23)$$

$$\beta_1(t) + \beta_2(t) = 1 \quad (24)$$

其中, 式(20)表示位置点 $a \rightarrow b$ 第二阶段的行人实际过街数量不大于该人行横道允许通行人数; 式(21)表示位置点 $a \rightarrow b$ 第二阶段的行人实际过街数量不大于该流向的行人过街需求量; 式(22)~(24)中, $\beta_1(t), \beta_2(t) \in \{0, 1\}$, 当 $\beta_1(t) = 1$ 时, $\beta_2(t) = 0$, 式(22)等同于 $Y_{a \rightarrow b,2}(t) \geq B_{a \rightarrow b,2}(t)$, 结合式(20)即为 $Y_{a \rightarrow b,2}(t) = B_{a \rightarrow b,2}(t)$, 式(23)自动成立; 当 $\beta_2(t) = 1$ 时, $\beta_1(t) = 0$, 式(22)自动成立, 式(23)等同于 $Y_{a \rightarrow b,2}(t) \geq D_{a \rightarrow b,2}(t)$, 结合式(21)表即为 $Y_{a \rightarrow b,2}(t) = D_{a \rightarrow b,2}(t)$ 。

与第一阶段行人过街需求量计算不同, 第二阶段行人过街需求量中的到达人数是第一阶段行人实际过街人数, 如式(25)所示。

$$D_{a \rightarrow b,2}(t+1) = D_{a \rightarrow b,2}(t) + Y_{a \rightarrow b,1}(t) - Y_{a \rightarrow b,2}(t) \quad (25)$$

3.2.2 基于行人信号灯的行人通行权分配

在自动驾驶车辆穿插式通行的基础上, 为确保行人过街安全, 本文利用行人信号灯保障行人过街需求。当行人信号灯为绿灯, 且车辆运行轨迹与人行横道相互交叉时, 该流向的车辆不允许通行; 当行人信号灯为红灯, 或车辆运行轨迹与人行横道无冲突时, 该流向实际交通量应受限于其通行能力, 满足式(26)。

$$y_{i \rightarrow j}(t) \leq c_{i \rightarrow j}(1 - R_k(t)\delta_{ij}^k) \quad (26)$$

式中: $R_k(t)$ 为二元变量, $R_k(t) = 1$ 表示人行横道 k 的信号灯为绿灯, $R_k(t) = 0$ 表示信号灯为红灯; 式(26)中的 $R_k(t)\delta_{ij}^k$ 为二元变量乘以二元变量, 可引入 $z_{ij}^k = R_k(t)\delta_{ij}^k$ 将式(26)线性化, 如式(27)~(31)所示。

$$z_{ij}^k \leq R_k(t) \quad (27)$$

$$z_{ij}^k \leq \delta_{ij}^k \quad (28)$$

$$z_{ij}^k \geq R_k(t) + \delta_{ij}^k - 1 \quad (29)$$

$$z_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad (30)$$

$$y_{i \rightarrow j}(t) \leq c_{i \rightarrow j}(1 - z_{ij}^k) \quad (31)$$

当 $R_k(t) = 0$ 或 $\delta_{ij}^k = 0$ 时, 由式(27)~(30)可得 $z_{ij}^k = 0$, 式(31)等同于 $y_{i \rightarrow j}(t) \leq c_{i \rightarrow j}$, 表示车辆流向 $i \rightarrow j$ 的实际交通量不超过其通行能力; 当 $R_k(t) = 1$, 且 $\delta_{ij}^k = 1$ 时, 由式(27)~(30)可得 $z_{ij}^k = 1$, 式(31)等同于 $y_{i \rightarrow j}(t) \leq 0$, 表示流向 $i \rightarrow j$ 不允许车辆通行。

3.2.3 基于冲突相位组的车辆通行权分配

在自动驾驶环境下, 车辆与车辆、车辆与路边设施之间能实现双向信息交互, 可突破已有经典的基于周期、绿信比、相位差的交通流管控方式, 车辆之间可协调地通过交叉口, 而无需信号灯控制。已有研究表明, 基于穿插式通行自动驾驶交叉口运行模式能进一步提高交叉口通行效率^[19], 因此, 本研究在交叉口未使用信号灯控制, 自动驾驶车辆将在无信号控制的交叉口穿插式通行, 为使车辆快速且有序地通过交叉口, 并减少自动驾驶车辆在交叉口的冲突风险, 考虑设置冲突相位组。根据通行方向将到达交叉口的车流分为4个冲突相位组, 如图4所示, 冲突相位组内的流向之间相互冲突, 同一冲突相位组的流向在每个时间窗内允许通行的时间比例之和不超过1, 而不在同一冲突相位组内的流向可同时放行。4个冲突相位组的设置能覆盖交叉口所有相互冲突流向, 为自动驾驶交叉口各流向通行时间的优化提供了支撑。 s_1, s_2, s_3, s_4 为4个冲突相位组, 分别表示如下:

$$s_1 = \{N \rightarrow E, S \rightarrow N, E \rightarrow S, W \rightarrow E\}$$

$$s_2 = \{N \rightarrow E, S \rightarrow N, W \rightarrow N, E \rightarrow W\}$$

$$s_3 = \{E \rightarrow S, W \rightarrow E, S \rightarrow W, N \rightarrow S\}$$

$$s_4 = \{S \rightarrow W, N \rightarrow S, W \rightarrow N, E \rightarrow W\}$$

其中,E、W、S、N表示东、西、南、北4个方向, $N \rightarrow E$ 表示车辆由北进口驶向东出口,其他以此类推。

在同一冲突相位组内的流向在每个时间窗内允许通行的时间比例之和不应超过1,且满足式(32)~(35):

$$\sum_{i \rightarrow j \in s_1} r_{i \rightarrow j}(t) \leq 1 \quad (32)$$

$$\sum_{i \rightarrow j \in s_2} r_{i \rightarrow j}(t) \leq 1 \quad (33)$$

$$\sum_{i \rightarrow j \in s_3} r_{i \rightarrow j}(t) \leq 1 \quad (34)$$

$$\sum_{i \rightarrow j \in s_4} r_{i \rightarrow j}(t) \leq 1 \quad (35)$$

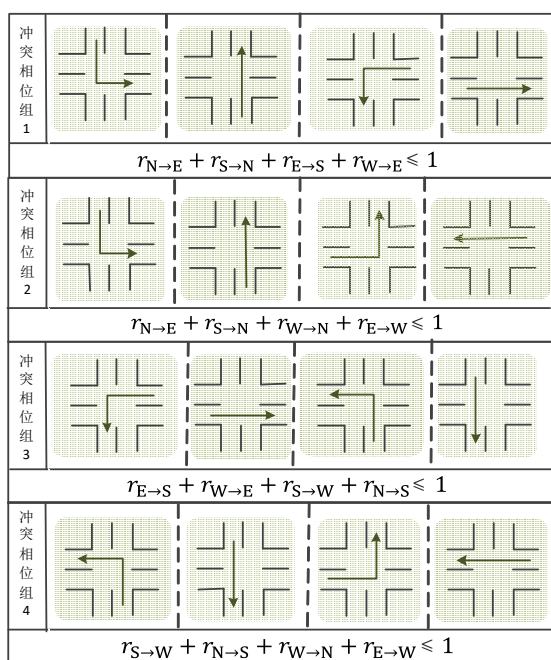


图4 冲突相位组示意图

Fig. 4 Diagram of conflicting phase groups

4 模型求解

本研究建立的模型为混合整数线性规划(mixed-integer linear programming, MILP)模型,该模型的描述如下:

决策变量:第 t 个时间窗,流向 $i \rightarrow j$ 的车辆允许通行的时间比例 $r_{i \rightarrow j}(t)$,位置点 $a \rightarrow b$ 第一阶段、第二阶段的行人信号灯状态 $R_{a \rightarrow b,1}(t)$ 、 $R_{a \rightarrow b,2}(t)$;

目标函数:交叉口各流向需求量及实际交通量的乘积之和最大,即式(1);

约束条件:式(2)~(35)。

本模型使用 AMPL (a mathematical programming language) 进行编程并调用 Gurobi 数学规划优化器进行求解,AMPL为通用的优化问题建模软件,Gurobi为美国Gurobi公司开发的大规模数学规划求解器,可对线性规划问题高效求解^[20]。

5 模型验证与效益分析

为验证本文模型的有效性,对比分析以下三种方案的控制效果:

方案1:定时控制方案;

方案2:行人单次过街方案;

方案3:本文模型优化方案。

对长沙市高升路-汇金路交叉口进行案例研究,5.1节对案例基本信息进行说明;5.2节为模型求解并将各方案结果进行对比分析;5.3节对关键参数进行敏感性分析。

5.1 参数说明

案例分析中的参数说明如表2所示。长沙市高升路-汇金路交叉口为十字路口,高升路为双向六车道,汇金路为双向八车道,车道宽为3.5 m。该交叉口东进口、西进口的人行横道长度为21.0 m,南进口、北进口的人行横道长度为28.0 m,各方向人行横道宽度均为4.0 m。实地中的定时控制方案采用等饱和度方法分配相位绿灯时间,信号周期为92 s(包括12 s的红灯时间和80 s的绿灯时间),各相位绿灯信号配时如图5所示。

表2 参数取值

Table 2 Parameter inputs

参数	取值
南、北进出口车道数	4条进口道,4条出口道
东、西进出口车道数	3条进口道,3条出口道
车道宽度	3.5 m
进口车道的通行能力	1 800 pcu/h
南、北进口人行横道总长度	28.0 m
东、西进口人行横道总长度	21.0 m
人行横道宽度	4.0 m
人行横道的通行能力	2 160 人/h
时间窗长度	20 s

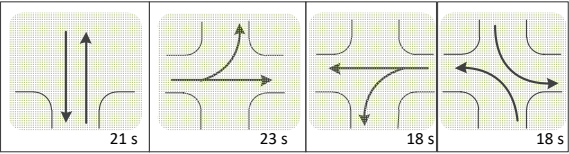


图5 交叉口现状信号配时

Fig. 5 The current signal timing of the intersection

交叉口西北角、东北角、东南角、西南角分别用A、B、C、D表示,人行横道分别用①~⑧表示,如图6所示。其中,东、西进口的每段人行横道长度为10.5 m,南、北进口的每段人行横道长度为14.0 m,以20 s为一个时间窗,在研究时段共计算9个时间窗的数据。对交叉口的车辆和行人数据进行调查,各流向平均小时车辆通行需求量见表3,每一对起讫点的行人平均到达率见表4。

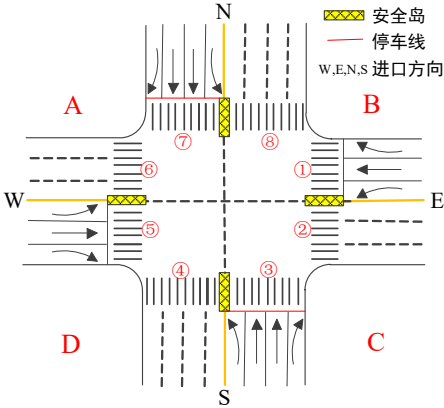


图6 交叉口布局

Fig. 6 Layout of the intersection

表3 平均小时车辆需求量

Table 3 Average hourly vehicle demand					
进口方向	转向	需求量/辆	进口方向	转向	需求量/辆
E	s	342	S	s	648
	l	162		l	342
	r	468		r	468
W	s	450	N	s	828
	l	414		l	360
	r	360		r	378

注:表内转向s,l,r分别表示直行、左转、右转。

表4 行人平均到达率

Table 4 The average arrival rates of pedestrian			
起讫点	行人平均到达率/(人·min ⁻¹)	起讫点	行人平均到达率/(人·min ⁻¹)
A→B	6	D→A	3
A→D	6	D→C	9
B→A	6	C→B	6
B→C	9	C→D	3

5.2 模型求解及延误对比

求解模型使用的电脑是装有 win7 64 位系统的台式机,处理器为 Intel(R) Core i5-9400F, 2.90 GHz, 8 G 内存,在 AMPL 中编译模型并使用 Gurobi 优化器求解,模型共包含 228 个变量,580 个约束,求解平均耗时 0.016 s。每一时间窗交叉口各车辆流向的通行时间比例及各人行横道的行人信号灯状态见表5,人行横道平均通行能力及进口方向车辆平均通行能力见表6。

表5 本文模型计算结果

Table 5 Results of the proposed model

时间窗	进口方向E		进口方向S		进口方向W		进口方向N		显示绿灯的行人信号灯
	转向	车辆通行时间比例	转向	车辆通行时间比例	转向	车辆通行时间比例	转向	车辆通行时间比例	
T1	s	0.00	s	0.30	s	0.00	s	0.25	① ②
	l	0.00	l	0.10	l	0.50	l	0.00	
	r	0.00	r	0.00	r	0.30	r	0.40	
T2	s	0.00	s	0.25	s	0.60	s	0.00	① ④ ⑥ ⑦
	l	0.00	l	0.00	l	0.40	l	0.00	
	r	0.00	r	0.30	r	0.00	r	0.00	
T3	s	0.40	s	0.00	s	0.00	s	0.60	② ③ ⑤ ⑧
	l	0.30	l	0.00	l	0.00	l	0.00	
	r	0.00	r	0.00	r	0.00	r	0.30	
T4	s	0.00	s	0.45	s	0.50	s	0.00	④ ⑥ ⑦
	l	0.00	l	0.00	l	0.50	l	0.00	
	r	0.80	r	0.70	r	0.00	r	0.00	

表5 (续)
Table 5 (Continued)

时间窗	进口方向E		进口方向S		进口方向W		进口方向N		显示绿灯的行人信号灯
	转向	车辆通行时间比例	转向	车辆通行时间比例	转向	车辆通行时间比例	转向	车辆通行时间比例	
T5	s	0.00	s	0.00	s	0.00	s	0.50	① ⑤ ⑧
	l	0.00	l	0.50	l	0.00	l	0.90	
	r	0.00	r	0.40	r	0.00	r	0.50	
T6	s	0.70	s	0.00	s	0.00	s	0.00	② ③ ⑦
	l	0.40	l	0.00	l	0.30	l	0.00	
	r	0.70	r	0.00	r	0.80	r	0.00	
T7	s	0.00	s	0.00	s	0.50	s	0.35	① ⑥ ⑧
	l	0.00	l	0.00	l	0.00	l	0.40	
	r	0.00	r	0.50	r	0.50	r	0.00	
T8	s	0.30	s	0.40	s	0.00	s	0.00	② ④ ⑤ ⑦
	l	0.00	l	0.70	l	0.00	l	0.00	
	r	0.60	r	0.00	r	0.00	r	0.00	
T9	s	0.00	s	0.00	s	0.60	s	0.40	① ③ ⑧
	l	0.00	l	0.00	l	0.00	l	0.40	
	r	0.00	r	0.00	r	0.20	r	0.70	

表6 各方案通行能力

Table 6 Traffic capacity of each scheme

通行能力	定时控制	行人单次过街	本文模型
人行横道平均通行能力/(人·h ⁻¹)	469	780	930
进口方向车辆平均通行能力/(pcu·h ⁻¹)	494	370	400

由表6可知,定时控制方案进口方向车辆平均通行能力最大,这是因为基于等饱和度方法分配的绿灯时间存在浪费现象,通行能力未能充分利用,而另一方面,定时控制方案中的人行横道通行能力不能满足行人过街需求。本文模型根据各流向的需求量优化分配车辆和行人的通行时间,使得交叉口行人和车辆的整体通行能力大于定时控制方案和行人单次过街方案的通行能力。这表明本文模型能显著提高交叉口整体通行能力,有效提升交叉口通行效率。

对于车辆延误的计算,参考文献[21]推导的延误公式,分析各进口方向的饱和状态,利用相应的进口车道延误公式进行计算。为采用统一延误计算方法,将本文模型和行人单次过街方案中的三个时间窗视为一个信号周期,允许通行时间为有效绿灯时间,不允许通行时间则为红灯时间。

定时控制方案、行人单次过街方案和本文模型优化方案的各流向车均延误和车均延误对比图分别如表7和图7所示。

从图7(a)可以看出:①定时控制方案的各个方向所有车辆的车均延误为39.90 s,行人单次过街方案的为33.04 s,本文模型的为29.23 s,相比定时控制方案和行人单次过街方案,本文模型的车均延误分别降低了26.74%和11.53%;②定时控制方案、行人单次过街方案和本文模型的车均延误的中位数分别为37.58、33.08和27.8 s,且本文模型的车均延误较为集中,车均延误为26.4~31.0 s占25%~75%,可见本文模型相比定时控制方案和行人单次过街方案,能在降低整体车均延误的同时,使各流向的车均延误更加均衡。

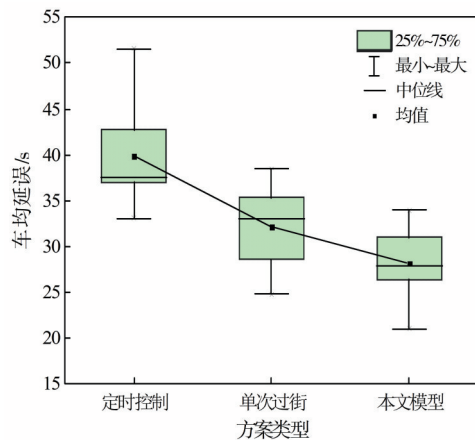
从图7(b)可以看出:①定时控制方案除东→南流向外,其他流向的车均延误在三个方案中最大,行人单次过街方案的车均延误整体上次之,本文模型的车均延误整体最小;②在行人单次过街方案中流向南→北和南→西的车均延误分别为24.83和31.00 s,本文模型中,流向南→北和南→西的车均延误分别为33.40和33.99 s,这两个流向的延误显著增加,这是因为南进口人行横道过街需求量较少,行人单次过街方案若允许行人过街,

会使车辆损失更多的通行权,导致目标函数变小,因此行人单次过街方案使得该相位行人累积至需

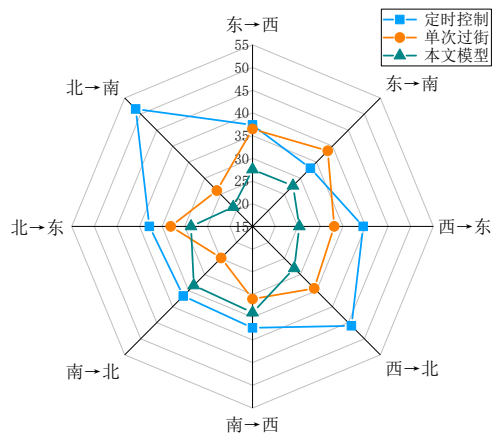
表7 各方向车均延误

Table 7 The average vehicle delays of each direction

进口方向	转向	车均延误/s		
		定时控制	行人单次过街	本文模型
E	s	37.33	36.45	27.53
E	l	33.11	38.52	27.67
W	s	39.48	33.07	25.35
W	l	45.94	34.31	28.04
S	l	37.33	31.00	33.99
S	s	36.68	24.83	33.40
N	l	37.82	33.09	28.61
N	s	51.55	26.14	21.03
全部车辆的车均延误/s		39.90	33.04	29.23



(a) 车均延误箱线图



(b) 各流向车均延误对比

图7 各方案车均延误对比图

Fig. 7 The comparison of average vehicle delays of each scheme

求量较大时才可行,而本文模型的行人过街不会对车辆造成过大干扰,目标函数会适当分配通行权给行人,从而造成行人单次过街方案南进口的车均延误比二次过街优化方案的车均延误小。

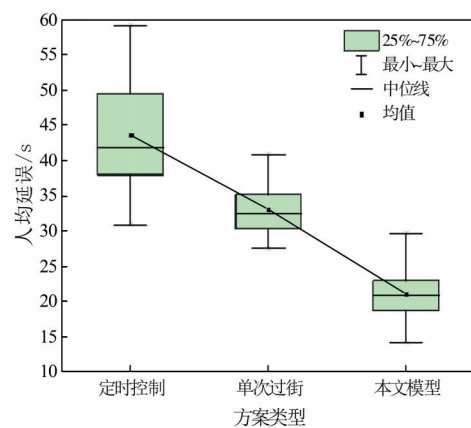
对于行人延误的计算,参考文献[22]推导的信号交叉口行人过街延误公式,根据绿灯损失时间、红灯时间及行人疏散时间进行计算,三种方案的人均延误和人均延误对比图分别如表8和图8所示。

从图8(a)可以看出,定时控制方案的所有行人过街的人均延误为43.61 s,行人单次过街的为33.03 s,而本文模型的为21.08 s。由此可知,若不设置行人二次过街,该模型的行人过街人均延误相比定时控制方案的仅降低24.24%;若设置行人二次过街即本文优化模型,其人均延误比定时控制方案的降低51.66%,比行人单次过街的降低36.18%,这表明本文模型能有效提高交叉口行人

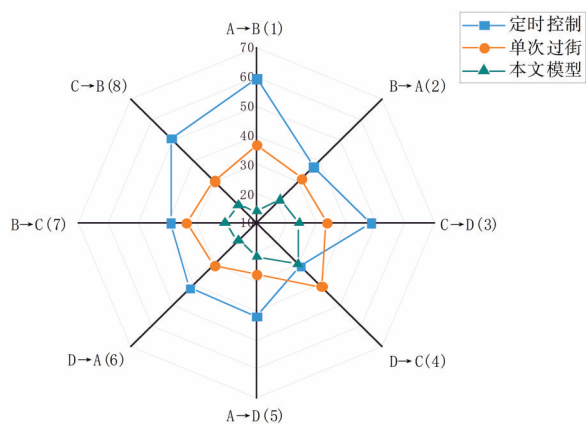
表8 行人平均延误

Table 8 The average pedestrian delays

行人起讫点	人均延误/s		
	定时控制	行人单次过街	本文模型
A→B	59.27	36.67	14.10
B→A	37.05	31.44	21.14
C→D	48.36	33.43	24.27
D→C	30.87	40.85	29.66
A→D	41.98	27.55	21.61
D→A	41.72	30.31	18.60
B→C	38.87	33.67	20.67
C→B	50.79	30.31	18.60
所有行人的 人均延误/s	43.61	33.03	21.08



(a) 人均延误箱线图



(b) 各流向人均延误对比

图8 人均延误对比图

Fig. 8 The comparison of average pedestrian delays

过街效率。从图8(b)可以看出,本文模型各人行横道的人均延误最小,定时控制方案的人均延误整体最大,行人单次过街方案的次之,但行人单次过街方案中人行横道D→C的人均延误相比本文模型和定时控制方案的都大,这是因为D→C的行人过街需求量最大,而单次过街方案对双向车辆通行造成较大干扰,模型分配给人行横道D→C的通行权有限,造成人均延误较大。

5.3 敏感度分析

由于车辆和行人在通过交叉口时所需的时空资源存在冲突,所以本文模型在目标函数中对车辆和行人通行各赋权重。本节对目标函数中的权重系数 λ 进行敏感性分析,改变权重系数 λ 的取值,其他参数取值均和5.1节的相同。图9为在不同权重系数 λ 下交叉口实际通行量及延误对比图,图10为在不同权重系数 λ 下的车均延误和人均延误对比图。

从图9可以看出,随着目标函数权重系数 λ 的增大,代表车辆的通行权重增大,控制模型为达到更大的目标函数值,偏向于为车辆分配更多的通行权,车均延误逐渐降低,车道通行能力显著提升,而行人通行量呈减少趋势,人均延误则持续上升。特别的,当权重系数 $\lambda = 0$ 和 $\lambda = 0.1$ 时,交叉口没有分配通行权给车辆,各车辆流向允许通行时间为0,且所有时间窗的行人信号灯皆为绿灯。当权重系数 $\lambda = 0.4$ 时,人均延误大幅增加,车均延误大幅降低,车辆实际通行量迅速增加,这是因为在目标函数中行人通行的权重开始不占优势,模型允许车辆占用更多的时空通行资源。当权重

系数 $\lambda = 1.0$ 时,交叉口不再为行人分配通行权,将所有通行权根据各进口道车辆需要进行分配。

从图10可以看出:①当权重系数为 $0.3 < \lambda \leq 0.6$ 时,交叉口各流向的车均延误较为分散,尤其是 $\lambda = 0.6$ 时,车均延误为26.34~37.74 s的占25%~75%,数据跨度较大,同时人均延误则相对集中,

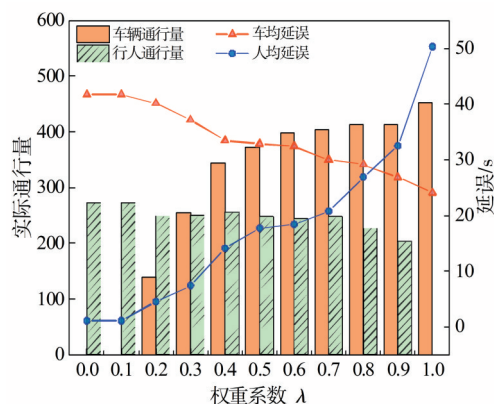
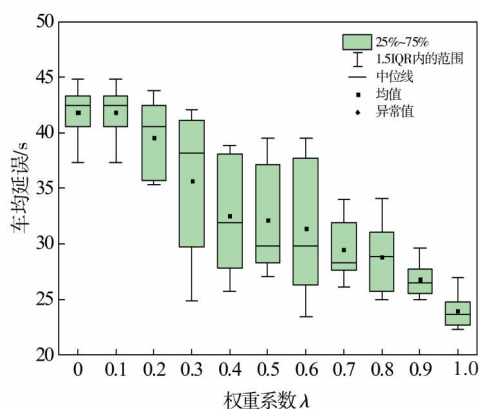
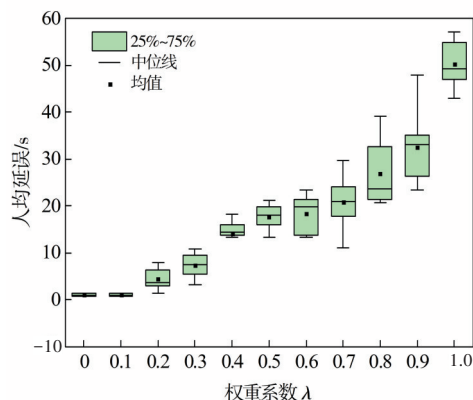
图9 不同权重系数 λ 下交叉口实际通行量及延误对比图

Fig. 9 The comparison of traffic throughput and delays under different weight coefficient



(a) 车均延误



(b) 人均延误

图10 不同权重系数 λ 下的车均延误和人均延误对比图

Fig. 10 The comparison of average delay of vehicles and pedestrians under different weight coefficient

这是因为此时车辆和行人的权重相当,模型在各流向车辆和行人中权衡,对于需求量较多的车辆流向,模型分配的通行权较大,而对于需求量较少的车辆流向,通行权较小或者没有通行权,该流向的车辆须等待多个时间窗才能通行,其延误会大幅增加;②当权重系数为 $0.7 < \lambda \leq 1$ 时,车辆权重大于行人权重,控制模型分配给行人的通行权较小,人均延误大幅增加,且各人行横道的人均延误较为分散,这是因为模型为达到更大的目标函数值,偏向于为过街需求量较多的人行横道分配绿灯,而过街需求量较小的人行横道须等待多个时间窗累积至一定需求量才可通行,造成需求量大的人行横道人均延误较小,需求量小的人行横道人均延误较大。

6 讨论

传统定时信号控制下的交叉口通行能力利用空间有限,无法发挥自动驾驶技术的优势,导致交叉口时空资源损失;而无信号控制下的自动驾驶交叉口车辆和行人之间存在大量冲突,难以保障行人过街的安全和效率。基于此,本文利用行人信号灯分离车辆与行人的冲突,确保行人过街安全;另外,为充分利用交叉口时空资源,已有研究常用延误最小化作为目标函数,但由于难以确定行人延误,本文设置目标函数为车辆和行人各流向需求量与实际交通量的乘积之和最大,即交叉口通行效率最大。为使得目标函数更大,本文模型为需求量大的流向分配更多的通行时间,从而使得该流向的实际交通量更大,以实现目标函数的正反馈。结果表明,本文模型能根据各流向的需求量分配通行权,但由于车辆和行人所占用的时空资源存在差异,需在目标函数中为两者各赋权重,在后续可根据车辆和行人通过交叉口时所需的时空资源对该权重值的选取进行深入探究。

此外,本研究为行人分配通行权时,考虑到在实际中无法获取行人过街需求,因此采用行人到达率估算过街需求,且将行人信号灯的绿灯时长设置为固定长度,但这将导致当某一流向的行人需求量很小时,该流向行人需等待较长时间才能

过街。下一步研究可考虑行人信号灯时长动态变化以适应各流向过街需求量的差异。

7 结论

1) 本研究提出一种基于冲突相位组的自动驾驶交叉口行人过街控制方法,以自动驾驶车辆和行人通行效率的加权和最大为目标,在各冲突相位组内对自动驾驶车辆和行人过街的通行时间进行建模。

2) 本文模型能在自动驾驶交叉口内根据车辆和行人的通行需求量分配时空通行权,并有效提升交叉口的通行效率。

3) 对目标函数中的权重系数 λ 进行敏感性分析,随着目标函数权重系数 λ 的增大,车均延误逐渐降低,车道通行能力显著提升,行人通行量呈减少趋势。权重系数 $\lambda = 0.4$ 时,行人通行的权重开始不占优势,模型允许车辆占用更多的时空通行资源,结果进一步证明了基于冲突相位组的自动驾驶交叉口行人过街控制方法的有效性。

4) 本文模型在建模过程中,仅考虑了自动驾驶车辆和行人两类交通流,下一步研究中可面向自动驾驶和人工驾驶混合流的交通通行场景,设计自动驾驶专用相位,进一步拓展本文模型的使用范围。

[参考文献]

- [1] 武和全,刘瑾,龚创业,等.自动驾驶汽车的碰撞安全性研究综述[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2023,20(2):35-44. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20230115001.
WU Hequan, LIU Jin, GONG Chuangye, et al. A review of crash safety research on self-driving cars[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2023, 20(2): 35-44. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20230115001.
- [2] 黄中祥,覃定明,况爱武.考虑无人驾驶车辆影响的道路网络容量模型[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2018,15(4):45-51. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2018.04.007.
HUANG Zhongxiang, QIN Dingming, KUANG Aiwu. Capacity model of road network considering the impact of the autonomous vehicles [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2018, 15(4): 45-51. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.

- 2018.04.007.
- [3] ULAK M B, OZGUVEN E E, MOSES R, et al. Assessment of traffic performance measures and safety based on driver age and experience: a microsimulation based analysis for an unsignalized T-intersection [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2019, 6 (5): 455-469. DOI: 10.1016/j.jtte.2018.05.004.
- [4] 吴伟, 刘洋, 刘威, 等. 自动驾驶环境下交叉口车辆路径规划与最优控制模型[J]. *自动化学报*, 2020, 46(9): 1971-1985. DOI: 10.16383/j.aas.c190002.
- WU Wei, LIU Yang, LIU Wei, et al. A novel autonomous vehicle trajectory planning and control model for connected-and-autonomous intersections[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46 (9): 1971-1985. DOI: 10.16383/j.aas.c190002.
- [5] LU G Y, SHEN Z L, LIU X B, et al. Are autonomous vehicles better off without signals at intersections? A comparative computational study [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2022, 155: 26-46. DOI: 10.1016/j.trb.2021.10.012.
- [6] DRESNER K, STONE P. Multiagent traffic management: a reservation-based intersection control mechanism[C]//*Proceedings of the Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*. New York: IEEE, 2005: 530-537.
- [7] LEVIN M W, BOYLES S D, PATEL R. Paradoxes of reservation-based intersection controls in traffic networks [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2016, 90: 14-25. DOI: 10.1016/j.tra.2016.05.013.
- [8] LEVIN M W, FRITZ H, BOYLES S D. On optimizing reservation-based intersection controls [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 18 (3): 505-515. DOI: 10.1109/TITS.2016.2574948.
- [9] MIRHELI A, HAJIBABAI L, HAJBABAIE A. Development of a signal-head-free intersection control logic in a fully connected and autonomous vehicle environment [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 92: 412-425. DOI: 10.1016/j.trc.2018.04.026.
- [10] MALIKOPOULOS A A, CASSANDRAS C G, ZHANG Y J. A decentralized energy-optimal control framework for connected automated vehicles at signal-free intersections [J]. *Automatica*, 2018, 93: 244-256. DOI: 10.1016/j.automatica.2018.03.056.
- [11] LEE J, PARK B B, YUN I. Cumulative travel-time responsive real-time intersection control algorithm in the connected vehicle environment [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2013, 139 (10): 1020-1029. DOI: 10.1061/(asce)te.1943-5436.0000587.
- [12] MAKAREM L, GILLET D. Model predictive coordination of autonomous vehicles crossing intersections [C]//*16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013)*. The Hague: IEEE, 2014: 1799-1804. DOI: 10.1109/ITSC.2013.6728489.
- [13] MILLARD-BALL A. Pedestrians, autonomous vehicles, and cities [J]. *Journal of Planning Education and Research*, 2018, 38 (1): 6-12. DOI: 10.1177/0739456x16675674.
- [14] RODRÍGUEZ PALMEIRO A, VAN DER KINT S, VISSERS L, et al. Interaction between pedestrians and automated vehicles: a wizard of Oz experiment [J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2018, 58: 1005-1020. DOI: 10.1016/j.trf.2018.07.020.
- [15] GUPTA S, VASARDANI M, WINTER S. Negotiation between vehicles and pedestrians for the right of way at intersections [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 20 (3): 888-899. DOI: 10.1109/TITS.2018.2836957.
- [16] CHEN R S, HU J, LEVIN M W, et al. Stability-based analysis of autonomous intersection management with pedestrians [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 114: 463-483. DOI: 10.1016/j.trc.2020.01.016.
- [17] WU W, LIU Y, HAO W, et al. Autonomous intersection management with pedestrians crossing [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2022, 135: 103521. DOI: 10.1016/j.trc.2021.103521.
- [18] 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): 103-106. DOI: 10.3321/j.issn: 1671-1637.2004.02.024.
- 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): 103-106. DOI: 10.3321/j.issn: 1671-1637.2004.02.024.
- [19] MICULESCU D, KARAMAN S. Polling-systems-based autonomous vehicle coordination in traffic intersections with No traffic signals [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2020, 65 (2): 680-694. DOI: 10.1109/TAC.2019.2921659.
- [20] JABLONSKÝ J. Benchmarks for current linear and mixed integer optimization solvers [J]. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 2016, 63(6): 1923-1928. DOI: 10.11118/actaun201563061923.
- [21] 刘广萍, 翟润平. 信号交叉口进口道延误模型[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2007, 39(4): 609-612. DOI: (下转第173页)

- conflict analysis[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2012, 45: 120–130. DOI: 10.1016/j.aap.2011.11.015.
- [17] 郭延永, 刘攀, 吴瑶, 等. 基于交通冲突模型的信号交叉口渠化岛设置方法[J]. *交通运输工程学报*, 2017, 17(4): 140–148. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1637.2017.04.015.
- GUO Yanyong, LIU Pan, WU Yao, et al. Design approach of channelized island based on traffic conflict models at signalized intersection[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2017, 17(4): 140–148. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1637.2017.04.015.
- [18] SACCHI E, SAYED T, DELEUR P. A comparison of collision-based and conflict-based safety evaluations: the case of right-turn smart channels [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2013, 59: 260–266. DOI: 10.1016/j.aap.2013.06.002.
- [19] SOHEL MAHMUD S M, FERREIRA L, HOQUE M S, et al. Application of proximal surrogate indicators for safety evaluation: a review of recent developments and research needs [J]. *IATSS Research*, 2017, 41(4): 153–163. DOI: 10.1016/j.iatssr.2017.02.001.
- [20] WARD J R, AGAMENNONI G, WORRALL S, et al. Extending time to collision for probabilistic reasoning in general traffic scenarios [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015, 51: 66–82. DOI: 10.1016/j.trc.2014.11.002.
- [21] XING L, HE J, ABDEL-ATY M, et al. Examining traffic conflicts of up stream toll plaza area using vehicles' trajectory data [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2019, 125: 174–187. DOI: 10.1016/j.aap.2019.01.034.
- [22] ZHANG Y Q, WU C X. The effects of sunshields on red light running behavior of cyclists and electric bike riders[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2013, 52: 210–218. DOI: 10.1016/j.aap.2012.12.032.

(责任编辑:周鹏展;校对:刘平;英文编辑:刘至真)

(上接第163页)

- 10.3321/j.issn:0367-6234.2007.04.023.
- LIU Guangping, ZHAI Runping. Approach delay model of signalized intersection[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2007, 39(4): 609–612. DOI: 10.3321/j.issn:0367-6234.2007.04.023.
- [22] 冯树民, 裴玉龙. 行人过街延误研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2007, 39(4): 613–616. DOI: 10.3321/j.issn:0367-6234.2007.04.024.
- FENG Shumin, PEI Yulong. Research on delay of pedestrian crossing [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2007, 39(4): 613–616. DOI: 10.3321/j.issn:0367-6234.2007.04.024.

(责任编辑:刘平;校对:石月珍;英文编辑:刘至真)