

基于决策—执行模型的无信号路段过街横道行人轨迹研究

裴玉龙¹, 韩南松²

(东北林业大学土木与交通学院, 黑龙江 哈尔滨 150000)

摘要: 为刻画无信号路段过街横道处行人的轨迹特征, 并深入解析其过街行为机制, 构建了一种基于决策-执行框架的行人过街模型。在决策层面, 针对行人在横道内外的过街行为差异, 采用二元 Logistic 回归模型建立横道内与横道外的过街决策模型, 以识别关键影响因素。在执行层面, 考虑传统社会力模型描述行人过街的局限性, 引入行人主动超越力与横道作用力, 优化行人过街运动模型。研究通过 MATLAB 平台验证模型的有效性, 结合实测数据分析行人过街轨迹分布。结果表明, 相较于过街横道内决策结果, 看手机、存在非机动车过街对过街横道外决策结果影响显著, 而改进的社会力模型能更好地模拟行人过街的轨迹变化。提出的行人过街决策-执行模型可有效识别影响行人安全的关键因素, 为无信号路段交通安全优化及行人过街设施规划提供理论支持。

关键词: 行人过街决策模型; 改进社会力模型; 行人过街轨迹

中图分类号: U491.2

文献标志码: A

Study on pedestrian trajectory of crossing street in unsignaled section based on decision-executive model

Pei Yulong¹, Han Nansong²

(School of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150000, Heilongjiang, China)

Abstract: To depict the trajectory characteristics of pedestrians at crosswalks in signal-free sections and deeply analyze their crossing behavior mechanisms, constructs a pedestrian crossing model based on a decision-execution framework. At the decision-making level, considering the differences in pedestrian crossing behaviors inside and outside the crosswalk, a binary Logistic regression model is adopted to establish the crossing decision models for both inside and outside the crosswalk to identify key influencing factors. At the execution level, given the limitations of traditional social force models in describing pedestrian crossing behaviors, pedestrian active overtaking force and crosswalk force are introduced to optimize the microscopic movement model of pedestrians. The validity of the model is verified through the MATLAB platform, and the trajectory distribution of pedestrians crossing is analyzed in combination with field measurement data. show that Compared with the decision-making results within the crosswalk, looking at mobile phones and the presence of non-motorized vehicles crossing have a significant impact on the decision-making results outside the crosswalk, while the improved social force model can better simulate the trajectory changes of pedestrians crossing. The pedestrian crossing decision-execution model proposed can effectively identify key factors affecting pedestrian safety, providing theoretical support for traffic safety optimization and pedestrian facility planning in signal-free sections.

Key words: pedestrian crossing decision model; Improving the social force model; Pedestrian tracks across the street

在无信号路段过街横道处, 由于交通信号的缺失以及交通流动态特性的影响, 难以充分保障行人过街的安全。目前大多数研究倾向于探讨行人过街决策的个人因素, 如年龄、性别和风险感知(手机^[1])等和环境因素(如路段类型^[2]、交通流量^[3]、可穿越间隙^[4]等), 通过分析速度变化^[5]、行人间隙接受行为^[6]、驾驶人特性^[7]、等待时间^[8]等特征来评估其过街决策。然而, 仅依靠微观层面的行为分析难以全面刻画行人过街过程的复杂性, 因为行人过街行为受多层次决策机制影响, 包括战略层(出行目的与路径选择)、战术层(过

收稿日期: 2025-05-14

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2572023CT21-02); 黑龙江省重点研发计划项目(JD22A014)

街决策)、操作层(行人微观运动)^[9]。例如,孔德璇^[10]利用 Tracker 软件分析进出站旅客在决策层面和战术层面的行为特点,并以社会力模型为基础建立双层次模型,LI 等^[11]构建了两个互补的模型:在微观层面上,探讨行人如何依据社会力进行绕行;在更高层次上,分析行人如何根据策略作出绕行决策,结果显示,通过层次化分析行人行为,可以较好地刻画行人的出行特性。

针对行人过街行为,现有研究^[12]主要关注信号控制交叉口处行人的过街决策,而对于无信号交叉口或路段,行人的过街行为往往受到更复杂交通环境的影响,例如,部分行人选择在过街横道外穿行。因此,需要结合不同类型的场景,对行人过街决策过程进行更深入的研究。在行人微观运动建模方面,已有研究多聚焦于紧急场景的疏散行为模拟^[13],主要描述行人在高密度人群中的相互作用,如避让机制^[14]、跟随行为^[15]和路径选择^[16]等。然而,对于无信号控制路段,行人过街行为受车辆流量、横道设置及周边环境等因素影响较大,因此,需要详细分析此类交通环境下行人微观行为特征。

基于此,本文提出行人过街决策-执行模型,在行人决策方面,采用二元 Logistic 回归模型^[17]分别构建横道内与横道外的过街决策模型,分析不同场景下影响行人过街行为的关键因素^[18];在行人执行方面,针对传统社会力模型在描述行人过街方面的不足,引入主动超越力和横道作用力,优化行人过街执行模型,使其更符合无信号路段行人的过街行为特征。最后,在上述两个层面模型的基础上,通过 MATLAB 仿真平台^[19]验证模型的有效性,基于实测数据探究行人在过街横道上的轨迹变化。

1 行人过街双层模型框架

行人会根据不同的交通环境和自身的通行需求,依次在三个层次上进行决策:战略层、决策层和操作层。战略层是行人出行的起点,涉及出发时间、出行方式以及路径的选择。然而,在本研究中,该层面的决策已被设定为已知内容,因此不作深入分析。决策层的核心在于行人是否在特定交通状况下选择过街,而操作层则主要描述行人在执行过街过程中的运动特征,如速度的调整、方向的变更以及避让行为等。因此,本文提出一种双层结构的模型,分别关注行人在决策阶段的行为选择和实际过街时的动作执行。前者处理行人的决策过程(战术层面),后者则模拟其执行过程(操作层面)。

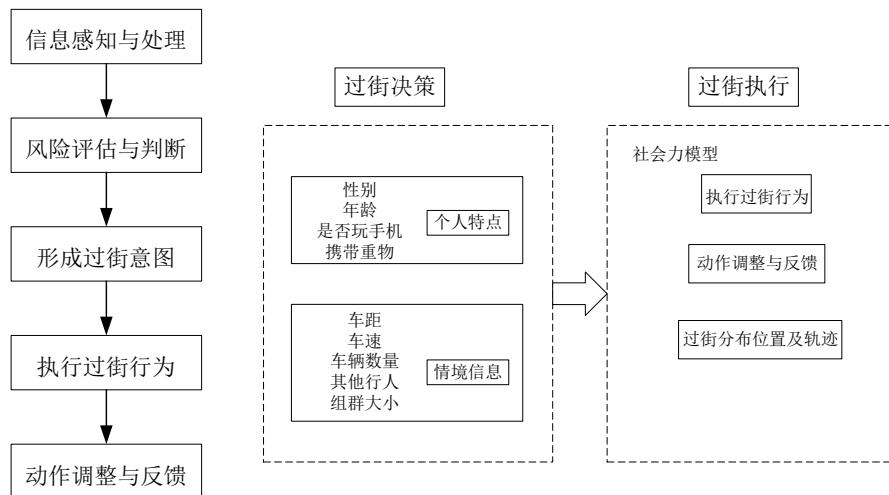


图 1 行人过街双层模型框架

Fig.1 Framework of the Two-layer Model for Pedestrian Crossing the Street

2 行人过街决策模型构建

2.1 行人过街行为分析

在无信号路段，行人的过街行为通常发生在过街横道内侧或外侧，过街横道内指的是在车行道上用斑马线等标线或其他方法标示的规定行人横穿车道的步行范围。是防止车辆快速行驶时伤及行人而在车行道上标线指定需减速让行人过街的地方。过街横道外指的是行人不使用规定行人横穿车道的步行范围，在规定步行范围之外进行过街。行人决策的重点会受到不同环境的影响^[20]。与选择在过街横道内过街的行人相比，在过街横道外穿越道路的人往往表现出更加急迫的态度。基于此观察，本研究旨在构建两种情境下的行人过街决策模型：一种是针对使用横道过街的情况；另一种则是针对直接从人行道边缘步入车道的行为模式。通过对比分析这两种不同环境下个体做出决定时所侧重考虑的因素差异，可以更深入地理解影响人们安全通行的关键要素。具体来说，在有专门设置的人行通道（即过街横道）中行走时，由于存在明确的界限划分以及较高的社会规范认可度，使得该区域内活动的个体倾向于采取较为保守、耐心的态度等待合适时机再进行移动。相反地，当不得不离开正式划定区域而进入车流密集区时，参与者则面临着更大的不确定性和潜在危险，因此他们在做出行动前会对周围环境如车辆间距、速度等变量给予更多关注，并据此调整自身策略以确保个人安全。

当前研究主要关注行人在过街横道内的过街行为决策^[21]，而对行人是否选择在横道外过街的因素未予充分考虑。因此，有必要进一步探讨行人在不同场景下的过街选择，比较横道范围内外的决策差异，以全面理解行人过街行为的规律。无信号路段过街横道处行人过街决策流程如图 2 所示。

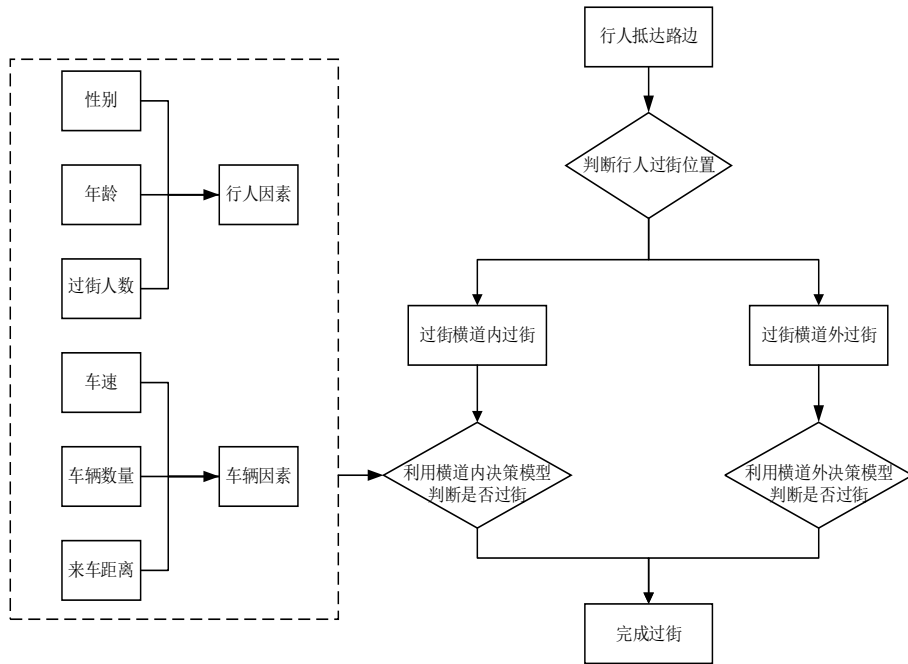


图 2 行人过街决策过程

Figure.2 Pedestrian Crossing Decision Process

2.2 行人过街决策影响因素

2.2.1 影响因素初步选取

本研究聚焦于无信号路段过街横道处的行人过街行为及机动车运行特性，选取两处无信号控制过街横

道作为观测地点。选取晚高峰时段（17:00—18:00），通过无人机与摄像机在天气晴朗时段采集行人过街视频，利用 tracker 处理行人过街数据，标记行人过街轨迹；分两次进行，单次数据采集时长为 1 h。详情如表 1 所示。

表 1 调查地点
Table 1 Survey Locations

调查地点	路段类型	过街横道宽度	道路宽度	过街行人流量	机动车流量
哈尔滨市黄河路	双向四车道	8	16	365	1 562
哈尔滨市长江路	双向六车道	12	24	563	1 725

经过整理，共获得 776 条有效观测样本，其中，过街横道内样本数据 452 条，过街横道外样本数据 324 条，样本采集信息描述如表 2 所示。

表 2 样本采集信息描述
Table 2 Description of Sample Collection Information

因素类别	序号	因素名称	因素描述
行人相关因素	1	性别	虚拟变量，男=1，女=2
	2	年龄	虚拟变量，少年（0-15），青壮年（16-60），老年（60 以上）
	3	同一时刻过街人数	实变量，单位：人
	4	携带大件行李	虚拟变量，是=1，否=2
	5	玩手机	虚拟变量，是=1，否=2
车辆相关因素	6	车辆瞬时速度	实变量，单位：km/h
	7	停车视距内的车辆数	实变量，单位：辆
	8	人车距离	实变量，单位：m
	9	是否有非机动车过街	虚拟变量，是=1，否=2
因变量	10	行人过街	虚拟变量，是=1，否=2

2.2.2 影响因素检验

为确保研究变量的有效性，需对变量进行相关性检验。由于变量数据类型的多样性，所以，采用非参数统计方法——Spearman 秩相关分析，以探究不同变量与行人过街决策的关联程度。公式如下所示

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (1)$$

式中：第 i 组数据对应的秩次差值由 d_i 表示，而 n 代表观测样本的总数量。

借助 SPSS 数据分析工具进行了相关性方面的研究分析，详细的数据展示参见表 3。

表 3 不同因素分析结果
Table 3 Results of Different Factor Analysis

横道内决策模型		横道外决策模型	
因素名称	相关系数	因素名称	相关系数
性别	-0.190**	性别	0.012
年龄	0.033	年龄	-0.066
同一时刻过街人数	0.161**	同一时刻过街人数	0.166**
携带大件行李	0.090	携带大件行李	0.030
过街途中存在非机动车	0.023	过街途中存在非机动车	-0.163**

看手机	-0.052	看手机	-0.532**
停车视距内的车辆数	0.618**	停车视距内的车辆数	0.733**
来车瞬时速度	0.031	来车瞬时速度	0.319**
人车距离	-0.631**	人车距离	-0.785**

注：**表明存在显著相关性。

2.3 决策模型建立

行人过街决策属于二分类问题，因此可以利用二元 Logistic 回归模型来进行分析，具体公式如下

$$p = \{y_i = 1 | x_1, x_2, \dots, x_n\} = \frac{1}{1 + \exp[-f(x)]} \quad (2)$$

式中： p 代表行人过街的可能性； y_i 表示第 i 位行人的选择，若过街则 $y_i = 1$ ，若等待则 $y_i = 2$ ； x_n 表示影响决策的某一特定因素； n 是有可能影响因素的全集；

采用分层随机抽样方法将观测样本划分为训练集（60%样本量）与测试集（40%样本量），基于 SPSS 软件拟合模型。根据不同变量的检验结果进行筛选，挑选与行人过街相关性较强的变量并进行组合，最后选择拟合效果最优的模型作为决策模型。

表 4 预测准确性分析

Table 4 Analysis of Prediction Accuracy

实测结果	横道内决策模型		正确百分比%	实测结果	横道外决策模型		正确百分比%
	预测结果				预测结果		
	是	否			是	否	
是	97	18	84.3	是	134	11	92.4
否	10	326	91.0	否	10	94	90.4
总体百分比			93.8	总体百分比			91.6

表 5 修正参数结果汇总

Table 5 Summary of Parameter Correction Results

影响因素	横道内决策模型			影响因素	横道外决策模型		
	B	Sig	$exp(B)$		B	Sig	$exp(B)$
性别	-0.856	0.056	0.425	同一时刻过街人数	1.092	0.023	2.979
停车视距车辆数	0.885	0.001	2.424	停车视距车辆数	2.138	0.001	1.20
来车瞬时速度	0.001	0.001	1.791	看手机	-4.25	0.022	1.837
人车距离	-0.001	0.001	0.878	存在非机动车过街	-2.249	0.023	3.35
常量	-1.720	0.131	0.179	来车瞬时速度	-0.65	0.001	2.228
				人车距离	-0.03	0.001	1.03
				常量	-6.918	0.023	0.001

注：在回归分析中，“ B ” 作为回归系数用于量化变量的影响程度；“ Sig ” 反映统计上的显著性水平；而 “ $exp(B)$ ” 则用于计算变量对应的优势比（ OR 值），以评估其相对影响力。

横道内决策模型考虑性别，停车视距车辆数，来车瞬时速度及人车距离等因素；横道外决策模型考虑同一时刻过街人数，停车视距内的车辆数，看手机，是否存在非机动车过街，来车瞬时速度以及人车距离等因素。

3 行人过街执行模型构建

在行人过街中，由于受到自身及外界环境的影响，行人的微观运动具有高度复杂性和变化性。为了保证

过街行为的连续性，本文采用社会力模型^[22]来构建行人过街执行机制。

3.1 行人自驱力改进

3.1.1 行人主动超越特性

主动超越是超越者为了维持较高的步行速度，并防止与前方缓行者发生碰撞，通常会选择变更行走路径，并适当提升步伐节奏以完成超越动作。

当超越者进行前向超越时，其与目标对象的横向距离会逐渐增大，直至达到峰值 D_{h1} 后，超越者重新回归至最初的行走路径。以该峰值所在位置作为参考点，整个过程可归纳为两个关键阶段，即路径调整阶段和超越完成阶段。这两个阶段的轨迹形态呈现出先远离后靠近被超越者的趋势，并具体表现为曲线状分布，如图 3 所示。当超越者与前方行人之间的横向距离为 D_h 、纵向距离 D_n 时，开始超越。 D_{h1} 为横向距离达到的最大值； D_{n1} 为横向距离最大时的纵向距离。

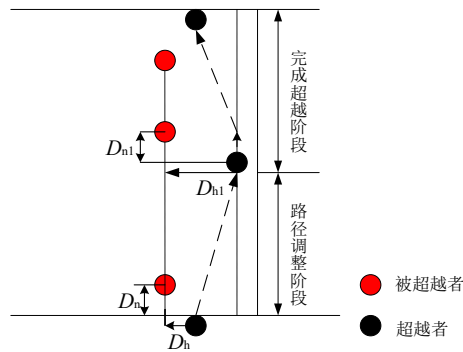


图 3 行人绕行超越全过程

Figure.3 The entire process of pedestrians detouring and overtaking

通过分析实地调查所收集的数据，本研究选取了发生主动超越的行人群体，并基于其运动轨迹特征，统计了超越过程中行人间的距离变化。重点研究了在超越行为启动阶段，行人间的距离变化，以及在超越完成时两者之间的横向距离。不同密度下 D_{h1} 、 D_{n1} 平均值如表 6 所示。

表 6 行人主动超越距离特征

Table 6 Characteristics of Pedestrian Active Overtaking Pedestrian Distance

交通参数	密度/($m^2 \cdot 人^{-1}$)	平均值/cm
D_{h1}	3.0	68
	3.5	71
	4.0	75
	4.5	77
	5.0	80
D_{n1}	3.0	27
	3.5	30
	4.0	29
	4.5	31
	5.0	33

3.1.2 主动超越力

行人在行走过程中受到内在因素和外部环境的综合作用，社会力模型通过模拟行人所受的力的变化，将行人的心理活动转化为力的形式。在行人运动建模中，为量化心理作用力对行人的驱动作用，引入前进驱动力表示行人实现期望速度的行为倾向，根据行人的主动换道行为引入变道驱动力，以模拟其偏离原行走方

向的行为；主动超越力是行人为了维持较高的步行速度，并防止与前方缓行者发生碰撞而产生的作用力，为便于理解，将行人行进的方向设为 x 轴，则图 4 所示即为行人主动超越力。

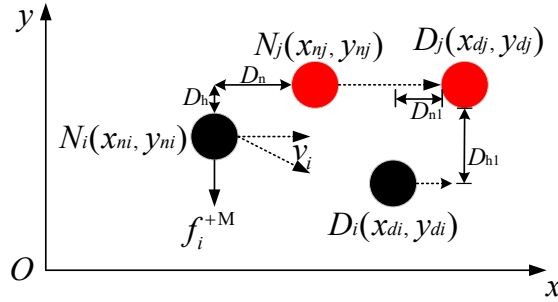


图 4 行人主动超越力示意

Figure.4 Illustration of Pedestrian's Active Overtaking Force

前进驱动力、变道驱动力组合形成了修正的行人自驱力，表示为

$$f_i^0 = f_i^{\text{dr}}(t) + f_i^{+M}(t) \quad (3)$$

1) 前进驱动力。为了描述行人在纵向行进中的主动超越行为，结合其运动心理特征，提出相应的动力机制模型，其中个体在步行过程中保持稳定的前向速度。该动力机制的表达式如下

$$f_i^{\text{dr}}(t) = m_i \frac{v_i^0(t) - v_{ih}(t)}{\tau_i} \mathbf{n}_h \quad (4)$$

式中：个体 i 的质量由 m_i 表示；其在 t 时刻期望达到的速度为 $v_i^0(t)$ ；在 t 时刻的纵向速度则为 $v_{ih}(t)$ ， m/s ； τ_i 为反应时间； \mathbf{n}_h 为纵向单位向量； N_i, N_j 为行人 i, j 初始位置坐标， D_i, D_j 为行人更新后的位置坐标。

2) 变道驱动力。在行人调整行走轨迹以超越前方个体时，其行为受到横向间距限制及周围人群流动的影响。变道驱动力的表达式如下：

$$f_i^{+M}(t) = C_i \theta_{id_v} \theta_\rho \mathbf{n}_v \quad (5)$$

式中： C_i 代表行人在水平方向上的位移能力； θ_{id_v} 用于表征行人的预期横向间距强度，其计算方式为个体的最大预期横向间距与整体平均最大横向间距的比值； θ_ρ 用于衡量密度强度，随着行人流密度的增加，该强度会相应降低； \mathbf{n}_v 为行人在避开前方行人时所遵循的方向向量。

3.2 行人之间作用力改进

在无信号路段，由于行人过街密度较低，相较于信号控制路段，行人之间的排斥力并不显著。因此，本文不考虑行人之间的排斥力。在无信号控制的路段，行人过街时常表现出组队效应，为描述这一现象，引入行人之间相互吸引力。行人之间作用力表达式为

$$\vec{f}_{ij}^{\text{soc}} = A_{ij} \exp\left[\frac{(r_{ij} - d_{ij})}{B_{ij}}\right] \mathbf{n}_{ij} \quad (6)$$

式中： A_{ij} 表示行人 i 和 j 之间的吸引力强度； B_{ij} 表示该吸引力的作用范围； r_{ij} 是 i 和 j 所对应的半径之和， m ； r_{ij} 是 i 和 j 之间的距离， m ； \mathbf{n}_{ij} 是 i 朝向 j 的标准向量。

3.3 行人与边界作用力改进

在无信号路段，过街横道没有墙壁或栅栏等边界，因此不存在作用力。但在行人过街过程中，过街轨迹受到过街横道影响，调查发现过街横道对行人产生一种虚拟边界的作用力，即心理作用力。过街横道边界的作用力可以分为吸引力和排斥力，如图 5 所示。当行人过街走出横道内时，过街横道会产生一种吸引力，引导行人在横道内行走；当行人将要到达目的地时，受到的作用力会逐渐减小，行人因此远离横道，过街横道对行人施加的作用力表达式为

$$f_i^{(c)}(t) = \begin{cases} A_c \exp\left[\frac{(r_i - d_{ic})}{B_c}\right] n_{ci} d_{ic}, & \text{行人在过街横道内} \\ A_c \exp\left[-\frac{(r_i - d_{ic})}{B_c}\right] n_{ic} d_{ir}, & \text{行人在过街横道外} \end{cases} \quad (7)$$

式中： d_{ic} 表示行人与边界之间的垂直距离； A_c 和 B_c 分别代表边界施加的力量强度及其影响范围；当行人在过街横道内时， n_{ci} 为单位向量，指向边界；当行人越过边界后， n_{ic} 为单位向量，指向行人； d_{ic} 为行人与道路侧缘之间的最短垂直距离。

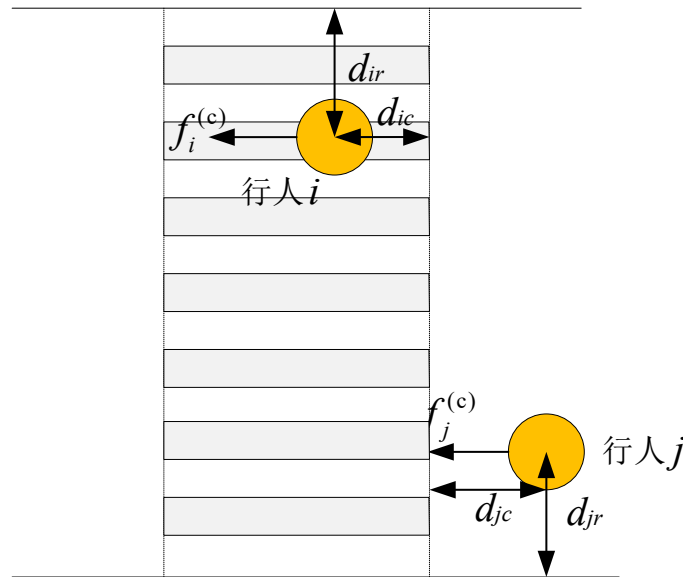


图 5 横道作用力

Figure.5 The force acting on the crosswalk

3.4 执行模型建立

本文在原始社会力的基础上，构建了行人过街执行模型。针对现有的社会力模型不能有效刻画行人过街的主动超越情况，以及未能考虑过街横道对行人过街的影响。为此，本文以原始社会力模型为基础，引入了过街横道对行人的心理作用力，进一步完善了行人与其他障碍物之间的相互作用，同时对行人的自驱力和行人之间的相互作用力进行了更加详细的描述。

综合上述修改，在无信号控制路段的过街横道处，过街行人的社会力模型表达式为

$$F_i = f_i^0 + \tilde{f}_{ij}^{soc} + f_i^{(c)}(t) \quad (8)$$

4 轨迹分析与验证

为了实现行人与车辆的混合仿真，并考虑行人运动受改进社会力模型影响的因素，本文选择 MATLAB 作为仿真工具平台，相比其他仿真软件，MATLAB 能够提供更加灵活的仿真环境，使得用户能够根据具体需求构建和调整行人运动模型，从而精确控制模型参数。这使得 MATLAB 成为验证本文构建模型的理想工具。行人过街决策-执行模型的仿真流程如图所示。为验证引入主动超越力后的模型仿真效果，在 MATLAB 中建立行人过街仿真通道，行人每隔 30s 进入通道，其模拟效果如图 7 所示。

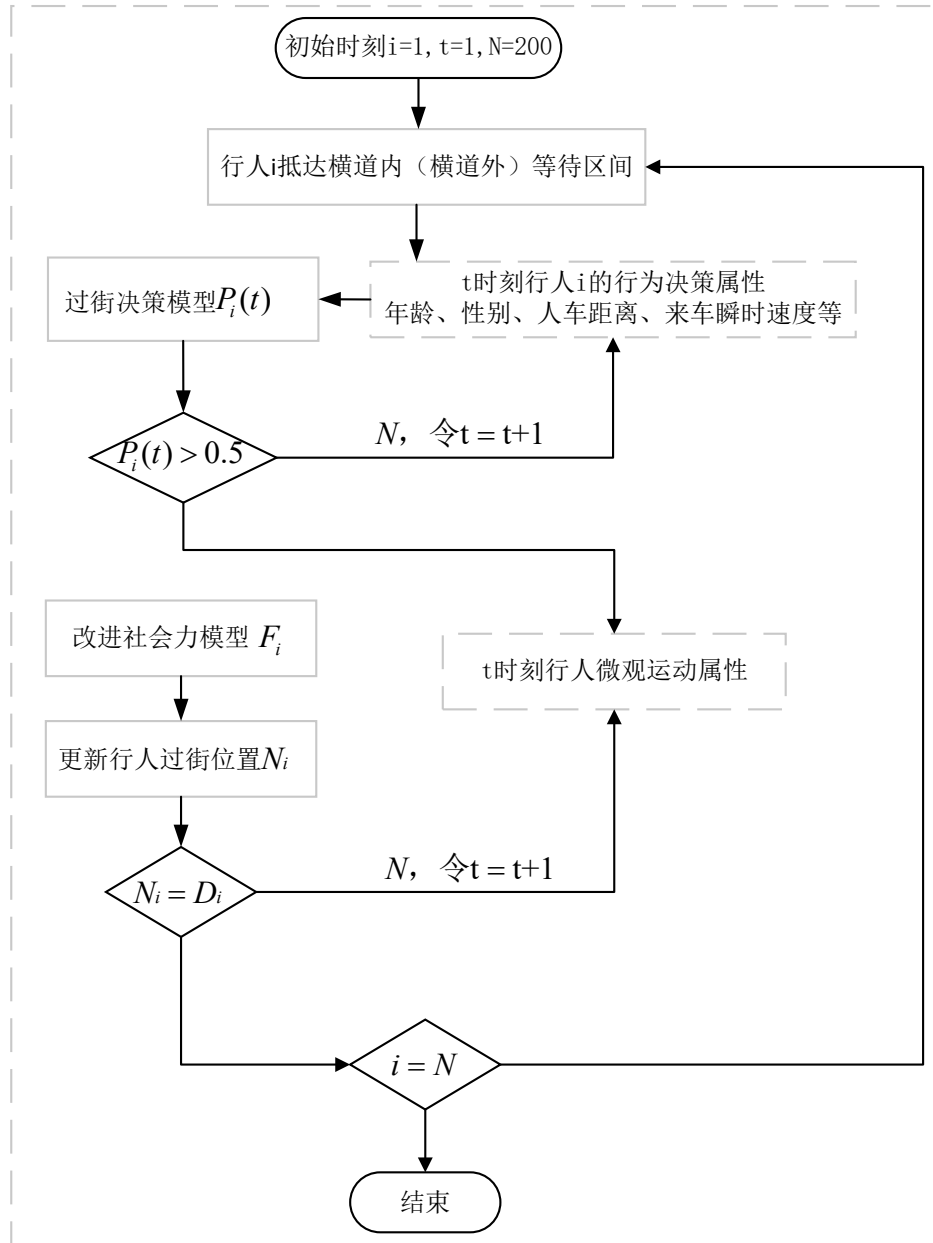


图 6 行人过街仿真流程

Figure.6 Pedestrian Crossing Simulation Process

在使用 MATLAB 软件进行仿真时，需要对建立的模型进行参数标定，本文通过参考已有文献^[23]中的方法，并结合对行人过街行为的实际观察，来对模型的各项参数进行优化调整，相关参数取值如表 7 所示。

表 7 不同参数校准结果整理

Table 7 Compilation of Calibration Results for Different Parameters

参数	参数含义	取值
m_i	行人质量	50~80 kg
v_i	行人初始速度	0.6~1.8 m/s
τ_i	行人反应时间	2 s
C_i	行人横向移动能力	120 N
θ_{D_x}	行人期望横向间距强度	0.8~1.2 m
θ_ρ	密度强度	0~1
B_i	边际力作用范围	5 m
r_i	行人半径	0.2~0.4 m
A_{ij}	行人间的吸引力作用强度	0.75×10^3 N
B_{ij}	行人间的吸引力作用范围	1.75 m
A_c	横道边界作用力强度因子	5 N
B_c	横道边界作用力作用范围	0.6 m

● 超越行人 ● 被超越行人

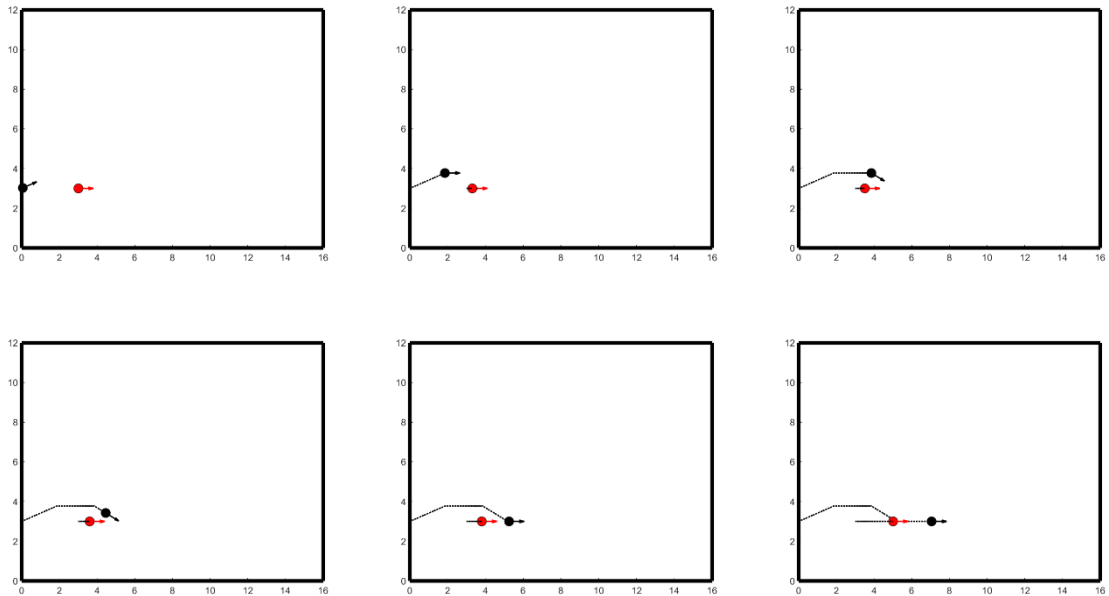
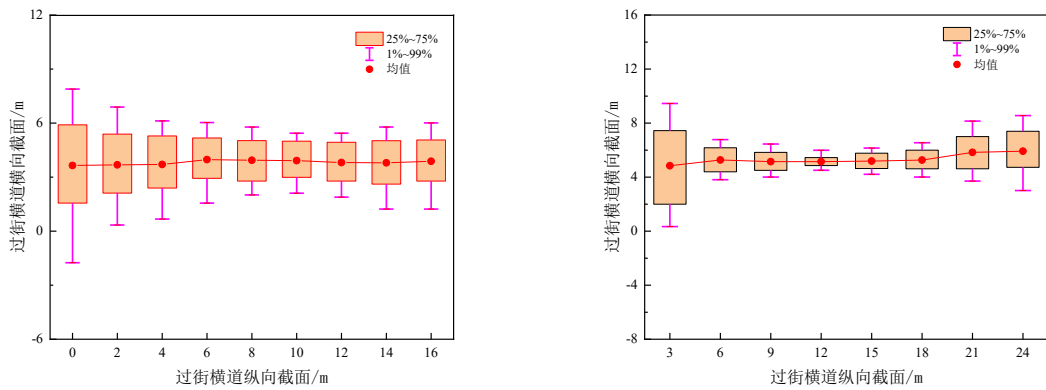


图 7 行人主动超越仿真示意

Figure.7 Simulation Illustration of Pedestrian Active Overtaking

4.1 行人过街轨迹分布特性

行人在过街过程中，由于受道路环境、行人特征、交通流状态等多因素的影响，其运动轨迹会不断变化，呈现一定的随机性和规律性。为了更直观地分析行人过街轨迹的空间分布特征，本研究在黄河路和长江路的过街横道上，沿行车道的平行方向设置多个纵向截面，选取黄河路相邻的截面间隔为 2 m，长江路相邻的截面间隔为 3 m，并针对行人轨迹的横向分布情况进行数据统计与分析，具体如图 8 所示。图中，采用红色实心点代表平均值，上下延伸的短线代表行人 1%~99%的波动范围。



(a)黄河路行人轨迹点横纵分布

(b)长江路行人轨迹点横纵分布

图 8 行人轨迹点横纵分布

Figure.8 Distribution of Pedestrian Trajectory Points in Horizontal and Vertical Directions

由图所示，在过街横道的起始阶段，行人的轨迹点在横向分布上存在较大的波动幅度。然而，随着行人逐步向前移动，这种波动范围逐渐缩小，轨迹趋于稳定，行人呈现出向过街横道内集中的行走趋势。据此可以推断，过街横道的边界线影响了行人的运动轨迹，促使原本在横道外的行人逐渐朝向横道内部移动。此外，这种影响力的强度在道路中央区域表现得更突出。

4.2 行人过街轨迹分布仿真分析

检验仿真模型准确性的一种理想方式是直接比对模拟轨迹与真实行人轨迹的差异。然而，由于行人行走路径的随机性较强，使得这一方法难以量化分析，并且无法精准对应模拟与实测数据。因此，研究的重点转向轨迹分布的整体特征，以更全面地评估模型效果。本研究以黄河路上一段未设置信号灯的过街横道为仿真分析的场景，研究过程中，将行人出发前的过街位置、行人在道路中心的过街位置、行人到达后的过街位置设置成近端、中端、远端，分别在道路左右两侧以及中心位置选取三个截面，将每个截面划分为 $(-\infty, 0)$ ， $(0, 2)$ ， $(2, 4)$ ， $(4, 6)$ ， $(6, +\infty)$ 5 个区域，如图 9 所示。

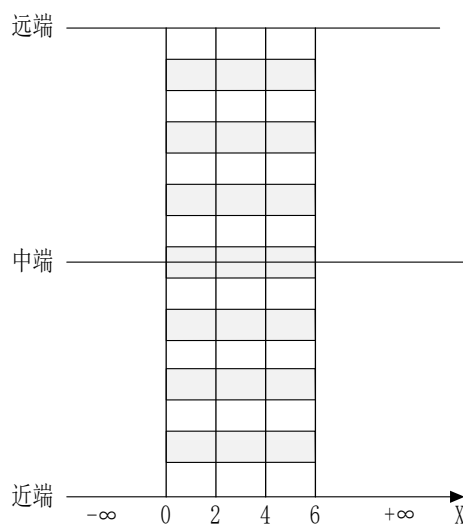


图 9 行人过街截面

Figure 9: Cross-section of pedestrian crossing

接着对行人通过这些位置的分布特征进行系统整理，相关数据展示图 10 所示。

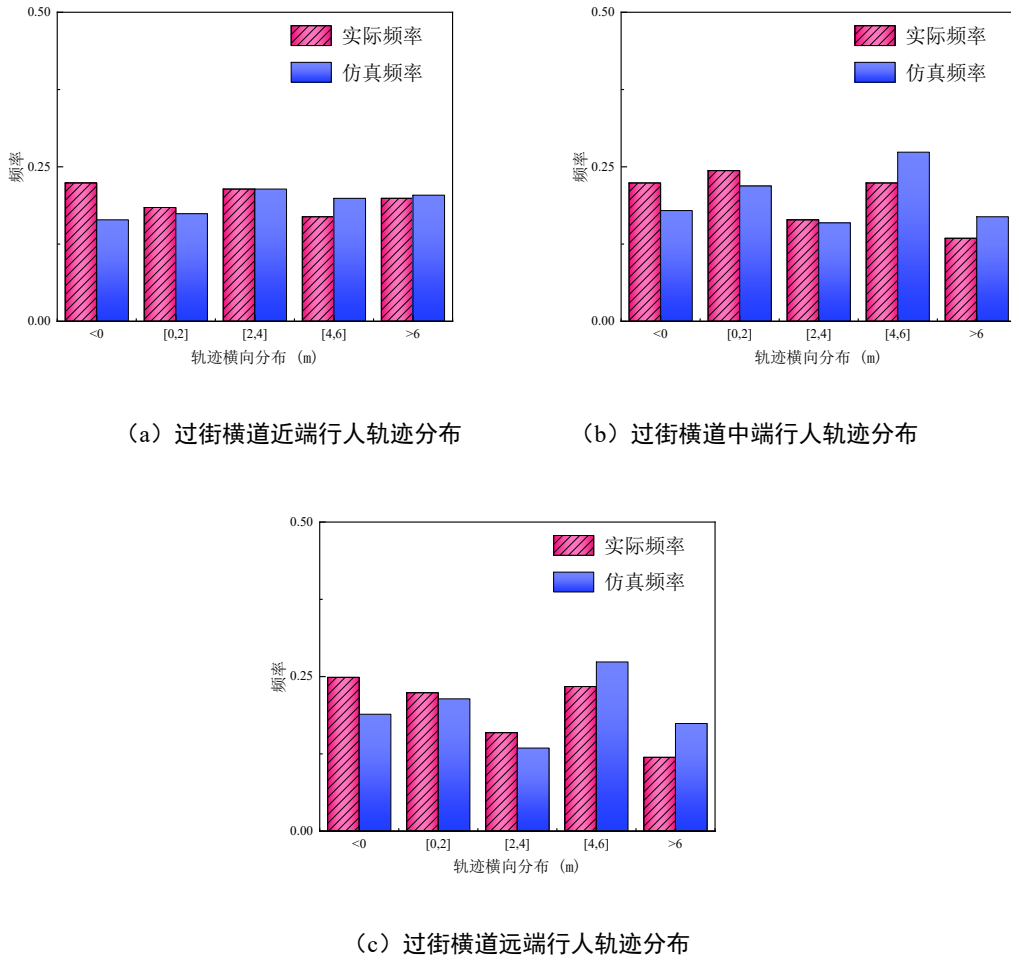


图 10 不同截面行人轨迹分布

Figure.10 Distribution of Pedestrian Trajectories at Different Cross-sections

本研究采用双样本 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验方法，对仿真行人穿越位置分布与实际观测数据进行差异性分析。该方法的计算公式如下 [19]

$$D_{n,m} = \sup_x |F_{1,n}(x) - F_{2,m}(x)| \quad (9)$$

该公式涉及两组样本的分布特征，其中 $F_{1,n}(x)$ 和 $F_{2,m}(x)$ 作为对应的分布函数。假设检验的基本前提 H_0

为两组数据来源于同一分布，当满足 $D_{n,m} > c(\alpha)\sqrt{\frac{n+m}{nm}}$ 时，则推翻此假设，否则维持不变。参数 n 与 m 代表样本规模，显著性水平记作 α 。在本研究的计算过程中，选择 $\alpha = 0.05$ 作为判定标准，并结合具体样本数据进行分析，以评估假设的合理性。

通过带入样本数据计算可得， $c(\alpha)\sqrt{\frac{n+m}{nm}}$ 为 0.0626，借助 SPSS 软件分析得出的数值显示，近、中、远三个截面的位置分布函数值 D 分别测得为 0.049、0.059 和 0.059，均未超过 0.0626 这一临界值。因此原假设得以验证，行人穿越位置的分布特征在调查数据和仿真模拟结果之间具有高度一致性，符合相同的统计规律。为确保仿真结果的可靠性，选取另一组数据进行计算，借助 SPSS 软件分析得出的数值显示，近、中、

远 3 个截面的位置分布函数值 D 分别测得为 0.054、0.044 和 0.049，不超过 0.062 6。

在过街横道的起始区域，行人通常更倾向于从两侧进入横道。随着行进至横道的中央区域，行人时刻暴露于与机动车的接触之中，穿越位置逐渐集中在了横道的中间位置。而到达过街横道的远端时，由于目的地位置的不同，行人开始逐渐向两端扩散分布。这一变化主要是由于过街横道两端对行人的约束作用相对较弱，同时，行人在靠近道路边缘时，出于便捷性的心理，有时会选择超出过街横道的范围行走，与实际观测到的情况相一致。为了减少行人溢出过街横道的现象，可调整横道末端宽度或出口引导方向，规范行人过街行为。结果显示，改进后的社会力模型可以较好地反映过街横道上行人的实际状况。

5 结论

本文根据哈尔滨市无信号路段的实测数据，构建了无信号路段决策-执行双层模型，得到如下结论：

1) 在行人过街决策方面，采用过街横道内外分别建立决策模型的方法更符合实际情境。结果表明，过街横道外决策模型相较过街横道内决策模型所考虑的因素要多，包括是否有非机动车过街以及看手机两个因素，这些因素对过街横道外行人的决策行为具有显著影响，而过街横道内决策模型则可能未充分考虑这些因素。

2) 在行人过街执行方面，为了改进传统的社会力模型，即考虑行人主动调整路径的影响，引入行人主动超越力，以更清晰地描述其穿越横道时的轨迹动态变化。结合过街横道对行人运动的影响，使得模型能够更精确地模拟行人在横道内的路径分布情况。通过深入研究行人过街的决策与执行行为，建立了行人行为的数学模型，该模型能够预测不同交通情境下行人通过过街横道的决策规律，为过街横道的设计提供科学依据。

3) 行人出行是一种复杂多变的出行方式，在不同的场景、不同的密度下，其流动呈现出不同的特点。由于过街行人对行人的心理排斥等影响，本研究并未考虑行人对行人的心理排斥作用，无法应用于行人密集场所，如商场、医院等。今后，还需对行人的运动、轨迹及心理等进行更深入的分析与研究，并据此改进社会力模型。

参考文献

- [1] 张存保,陈峰,韦媛媛,等.无信号控制路段手机对行人过街行为和ari安全的影响[J].交通运输系统工程与信息,2018,18(2):136-141.
Zhang C B, C F, W Y Y, et al. The Impact of Mobile Phones on Pedestrian Crossing Behavior and Safety at Unsignalized Crossings [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(2): 136-141.
- [2] ZHANG Y C, QIAO Y, FRICKER J D. Investigating pedestrian waiting time at semi-controlled crossing locations: Application of multi-state models for recurrent events analysis[J]. Accident Analysis & Prevention, 2020, 137: 105437.
- [3] 张子乾.基于无人机航拍数据的无信控路段行人过街安全研究[D].东南大学,2021.
Zhang Z Q. Research on Pedestrian Crossing Safety at Unsignalized Crossings Based on UAV Aerial Photography Data [D]. Southeast University, 2021.
- [4] 赵佳,宋柱,张名芳,等.无信号控制路段行人过街决策研究[J].中国安全科学学报,2017,27(05):25-30.
Zhao J, Song Z, Zhang M F, et al. Research on Pedestrian Crossing Decision-making at Unsignalized Road Sections [J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(05): 25-30.
- [5] ALVER Y, ONELCIN P, CICEKLI A, et al. Evaluation of pedestrian critical gap and crossing speed at midblock crossing using

- image processing[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2021, 156: 106127.
- [6] THEOFILATOS A, ZIAKOPOULOS A, OVIEDOTRESPALACIOS O, et al. To cross or not to cross? Review and meta-analysis of pedestrian gap acceptance decisions at midblock street crossings[J]. *Journal of Transport & Health*, 2021, 22: 101108.
- [7] 梁钰,杨艳群,祝站东,等.驾驶特性对驾驶人应激反应的影响研究[J].*华东交通大学学报*,2024,41(01):87-95.
Liang Yu, Yang Y, Zhu Z D, et al. Research on the Impact of Driving Characteristics on Driver Stress Response [J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2024, 41(01): 87-95.
- [8] 冉旭东.基于轨迹数据的无信号交叉口行人过街行为研究[D].天津大学,2018.
Ran X D. Research on Pedestrian Crossing Behaviors at Signalless Intersections Based on Trajectory Data [D]. Tianjin University, 2018.
- [9] HOOGENDOORN S P, BOVY P. Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2004, 38(2):169-190.
- [10] 孔德璇.航站楼离港旅客行为社会力模型研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2020.
Kong D X. Research on Social Force Model of Departure Passenger Behavior at Terminal Buildings [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [11] LI M, SHU P, XIAO Y, et al. Modeling detour decision combined the tactical and operational layer based on perceived density[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2021, 574: 126021.
- [12] 张惠玲,庞鲜鲜,彭丹.信号交叉口老年人过街影响分析与决策建模[J].*深圳大学学报(理工版)*,2023,40(04):452-462.
Zhang H L, Pang X X, Peng D. Analysis and Decision Modeling on the Impact of Elderly Pedestrians Crossing at Signalized Intersections [J]. *Journal of Shenzhen University (Science & Technology Edition)*, 2023, 40(04): 452-462.
- [13] 岳昊,刘秋梅,武鑫森.步行设施内疏散行人拥挤踩踏仿真研究[J].*交通运输系统工程与信息*, 2020, 20(3):190-197.
Yue H, Liu Q M, Wu X S. Simulation Research on Pedestrian Crowding and Trampling in Pedestrian Facilities during Evacuation[J]. *Transportation Systems Engineering and Information*, 2020, 20(3): 190-197.
- [14] 陈鹏,唐鹏,闫伟曦,等.无信控路段人行横道处行人过街建模与仿真[J].*交通运输系统工程与信息*,2022,22(04).
Chen P, Tang P, Yan W X, et al. Pedestrian Crossing Modeling and Simulation at Crosswalks without Traffic Control [J]. *Transportation Systems Engineering and Information*, 2022, 22(04).
- [15] 魏科,朱茵,路峰.基于演化博弈的行人过街机理与管理对策模型研究[J].*中国人民公安大学学报(自然科学版)*,2019,25(02):87-93.
Wei K, Zhu Y, Lu F. Research on Pedestrian Crossing Mechanism and Management Countermeasures Model Based on Evolutionary Game Theory [J]. *Journal of the People's Public Security University of China (Natural Science Edition)*, 2019, 25(02): 87-93.
- [16] 曹宁博.城市道路环境下行人过街微观仿真模型研究[D].吉林大学,2018.
Cao N B. Research on Microscopic Simulation Model of Pedestrian Crossing in Urban Road Environment [D]. Jilin University, 2018.
- [17] 段坚堤,龙科军,李磊.无信号控制路段过街横道处行人过街行为[J].*系统工程*,2013,31(04):116-121.
Duan J D, L K, L L. Pedestrian Crossing Behavior at Unsignalized Crosswalks [J]. *Systems Engineering*, 2013, 31(04): 116-121.
- [18] 马丹,裴玉龙,刘涛,等.城市路段行人不良过街行为决策模型及技术矫正措施[J].*吉林大学学报(工学版)*,2023,53(01):111-123.
Ma D, Pei Y L, Liu T, et al. Decision-making Model and Technical Correction Measures for Poor Pedestrian Crossing Behaviors in Urban Road Sections [J]. *Journal of Jilin University (Engineering Science Edition)*, 2023, 53(01): 111-123.
- [19] 钟欣育.无信号控制人行横道处行人过街仿真模型研究及应用[D].重庆交通大学,2023.
Zhong X Y. Research and Application of Pedestrian Crossing Simulation Model in Signal-free Crosswalks [D]. Chongqing Jiaotong University, 2023.
- [20] SALEH W, GRIGOROVA M, ELATTAR S. Pedestrian road crossing at uncontrolled mid-block locations: Does the refuge island increase risk?[J]. *Sustainability*, 2020, 12(12): 4891.
- [21] 秦昊.车路协同环境下路段行人过街元胞自动机仿真研究[D].哈尔滨工业大学,2022.

Qin H. Research on Cellular Automata Simulation of Pedestrian Crossing at Road Sections in the Context of Vehicle-Road Cooperation [D]. Harbin Institute of Technology, 2022.

[22] Zeng W , Chen P , Nakamura H ,et al.Application of social force model to pedestrian behavior analysis at signalized crosswalk[J].Transportation Research Part C, 2014, 40(mar.):143-159.

[23] 杨蕊.城轨通道行人超越与对向避让模型研究[D].北京交通大学,2014.

Yang Rui. Research on Pedestrian Overtaking and Oncoming Avoidance Models in Urban Rail Transit Passageways [D]. Beijing Jiaotong University, 2014.



通信作者：裴玉龙（1962—），男，教授，博士，研究方向为智能交通与管理。E-mail:peiyulong@nefu.edu.cn。