文章编号:1005-0523(2026)05-0044-11

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,韩南松

(东北林业大学土木与交通学院,黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:为精准刻画无信号路段过街横道处的行人轨迹特征,并深入解析其过街行为机制,研究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,针对行人在过街横道内外的过街行为差异,采用二元Logistic回归模型分别建立过街横道内与过街横道外的过街决策模型,识别影响行人过街的关键因素。在执行层面,鉴于传统社会力模型在描述行人过街时的局限性,引入行人主动超越力与过街横道作用力,对传统社会力模型进行改进。通过MATLAB平台验证模型有效性,并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模型,看手机行为及非机动车过街场景对过街横道外决策模型影响显著,而改进后的社会力模型能更准确地模拟行人过街的轨迹变化。

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

本文引用格式:裴玉龙,韩南松. 基于决策-执行模型的无信号路段过街横道行人轨迹研究[J]. 华东交通大学学报,2026,43(5):44-54.

Study on Pedestrian Trajectory at Crosswalks of Unsignalized Road Sections Based on Decision-Execution Model

Pei Yulong, Han Nansong

(School of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: To accurately depict the trajectory characteristics of pedestrians at crosswalks of unsignalized road sections and deeply analyze their crossing behavior mechanisms, a pedestrian crossing model based on a decision-execution framework is constructed in this study. 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 crossing decision models for scenarios inside and outside the crosswalk respectively, to identify the key factors influencing pedestrian crossing. At the execution level, in view of the limitations of the traditional social force model in describing pedestrian crossing behaviors, pedestrian active overtaking force and crosswalk acting force are introduced to improve the traditional social force model. The validity of the model is verified on the MATLAB platform, and the distribution of pedestrian crossing trajectories is analyzed in combination with field measured data. The results show that compared with the decision-making results inside the crosswalk, mobile phone use and the presence of non-motorized vehicles crossing the street have significant impacts on the deci-

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项目(2572023CT21-02);黑龙江省重点研发计划项目(JD22A014)

sion-making results outside the crosswalk, and the improved social force model can more accurately simulate the trajectory changes during pedestrian crossing.

Key words: pedestrian crossing decision model; improved social force model; pedestrian crossing trajectory

Citation format: Pei Yulong, Han Nansong. Study on pedestrian trajectory at crosswalks of unsignalized road sections based on decision-execution model[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2026, 43(5): 44-54.

在无信号路段的过街横道处，受交通信号缺失及交通流的动态特性影响，行人过街安全难以得到充分保障。目前，多数研究倾向于探讨影响行人过街决策的个人因素（如年龄、性别和风险感知等[1]）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（过街决策）和操作层（行人微观运动）[9]。例如，孔德璇[10]利用Tracker软件分析离港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，在微观层面探讨行人如何依据社会力进行绕行，在更高层次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，可较好地刻画行人的出行特性。

针对行人过街行为，现有研究主要关注信号控制交叉口处的行人过街决策[12]，多聚焦于紧急场景的疏散行为模拟[13]，重点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，需详细分析此类交通环境下的行人微观行为特征。

基于上述分析，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回归模型分别构建过街横道内与过街横道外的过街决策模型[17]，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，引入主动超越力和过街横道作用力，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仿真平台验证模型有效性，基于实测数据探究行人在过街横道上的轨迹变化规律[19]。

1　行人过街双层结构模型框架

行人会根据不同的交通环境和自身通行需求，依次在三个层次上进行决策：战略层、战术层和操作层。战略层是行人出行的起点，涉及出发时间、出行方式及路径选择，在本研究中，该层面决策已被设定为已知内容，因此不作深入分析。战术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，如速度调整、方向变更及避让行为等。因此，本文提出一种双层（决策-执行）结构模型（框架如图1所示），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）。

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，行人过街行为通常分为过街横道内过街和过街横道外过街两类。其中，过街横道是指车行道上用斑马线等标线或其他标准化方式标示的、专供行人横穿车道的步行区域，其核心功能是通过明确的通行界定，提示车辆减速避让，降低行人过街时的安全风险。而过街横道外过街则指行人未使用上述指定步行范围，在规定步行范围之外横穿道路的行为。行人的决策侧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行人往往表现出更急迫的过街需求。

基于这一现象，本研究旨在构建两种情境下的

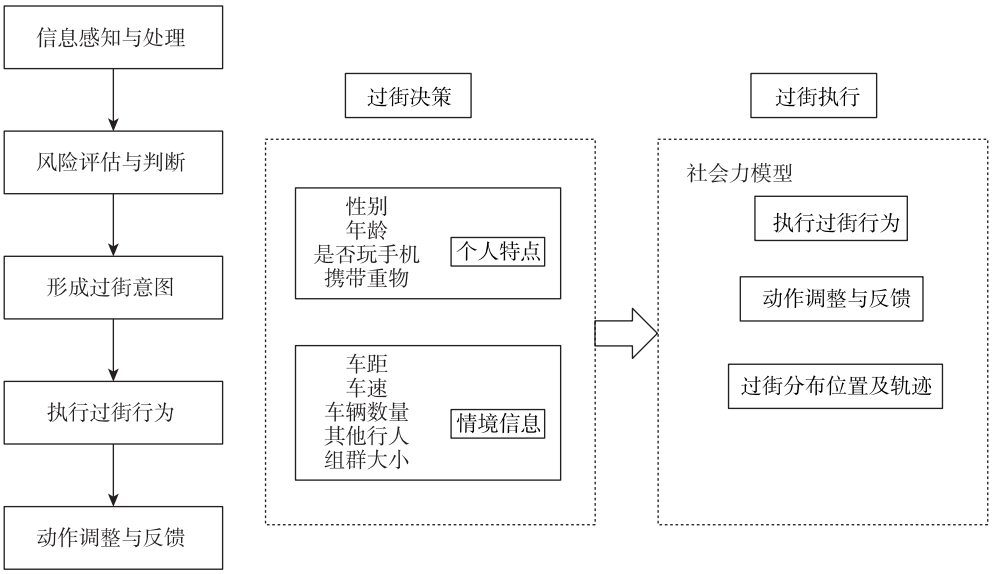


图1 行人过街双层结构模型框架

Fig. 1 Framework of the two-layer structure model for pedestrian street crossing

行人过街决策模型:一种针对使用横道过街的情况,另一种针对行人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决策侧重考虑的因素差异,可更深入揭示影响行人安全通行的关键要素。具体而言,在过街横道内行走时,由于存在明确的区域划分以及较高的社会规范认可度,该区域内的行人倾向于采取较为保守、耐心的态度,等待合适时机再过街。反之,当行人离开正式划定的过街横道区域进入车流密集区时,将面临更大的不确定性和潜在危险,因此其在行动前会对车辆间距、行驶速度等环境变量给予更多关注,并据此调整自身策略以确保安全。

当前研究主要关注行人在过街横道内的过街行为决策,而对影响行人选择在过街横道外过街的因素尚未充分考虑[21]。因此,有必要进一步探讨行人在不同场景下的过街选择,对比过街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。

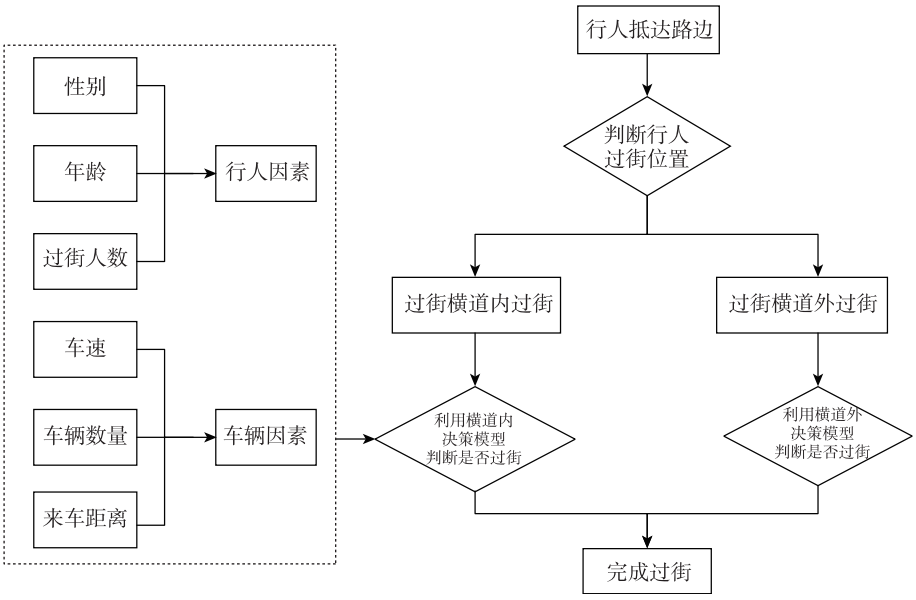


图2 行 人过街决策过程

Fig. 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，采用实地观测法开展数据采集工作，具体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），在天气晴朗条件下通过无人机与摄像机采集行人过街视频，利用Tracker软件处理行人过街数据，标记行人过街轨迹；数据采集分两次进行，单次采集时长为1 h。调查地点详情如表1所示。

表1　调查地点

Tab.1　Survey locations

调查地点	路段类型	过街横道宽度/m	道路宽度/m	过街行人流量/（人/h）	机动车流量/（辆/h）
哈尔滨市黄河路	双向4车道	8	16	365	1 562
哈尔滨市长江路	双向6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。

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。采用非参数统计方法Spearman秩相关分析，探究不同变量与行人过街决策的关联程度，表达式为

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

表2　样本采集信息描述

Tab.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=0
	2	年龄	虚拟变量，少年（0~15岁）、青壮年（16~60岁）、老年（>60岁）
	3	同一时刻过街人数	实变量，人
	4	携带大件行李	虚拟变量，是=1，否=0
	5	看手机	虚拟变量，是=1，否=0
车辆相关因素	6	来车瞬时速度	实变量，km/h
	7	停车视距内车辆数	实变量，辆
	8	人车距离	实变量，m
	9	是否存在非机动车	虚拟变量，是=1，否=0
因变量	10	行人过街行为	虚拟变量，是=1，否=0

式中：ρ为秩相关系数；d_i为第i组数据对应的秩次差值；n为观测样本的总数量。

借助SPSS数据分析工具对因素变量进行相关性分析，分析结果如表3所示，其中*表明该因素存在显著相关性。

2.3　决策模型建立

行人过街决策属于二分类问题，因此可采用二元Logistic回归模型进行分析，表达式为

$$p = \{y_i = 1 | x_1, x_2, \cdots, x_m\} = \frac{1}{1+\exp[-f(x)]} \tag{2}$$

式中：p为行人过街的可能性；y_i为第i位行人的选择，若过街则$y_i=1$，若等待则$y_i=0$；x_m为影响决策的某一特定因素；m为所有可能影响因素的集合；$f(x)$为影响因素对行人过街决策的综合影响效应；exp(·)用于计算变量对应的优势比，以评估其相对影响力。采用分层随机抽样方法将观测样本划分为训练集（占总样本量的60%）与测试集（占总样本量的40%），并基于SPSS软件进行模型拟合。根据不同变量的检验结果进行筛选，挑选与行人过街决策相关性较强的变量并进行组合，最终选择拟合效果最优的模型为决策模型。剔除缺失值及异常值，模型预测准确性如表4所示。

通过对行人过街决策模型进行修正，发现过街横道内决策模型考虑性别、停车视距内车辆数、来车瞬时速度及人车距离等因素；过街横道外决策模型的影响因素包括同一时刻过街人数、停车视距内

表3 不同因素分析结果

Tab.3 Results of different factor analysis

因素名称	过街横道内决策模型相关系数	过街横道外决策模型相关系数
性别	−0.190*	0.012
年龄	0.033	−0.066
同一时刻过街人数	0.161*	0.166*
携带大件行李	0.090	0.030
是否存在非机动车	0.023	−0.163*
看手机	−0.052	−0.532*
停车视距内车辆数	0.618*	0.733*
来车瞬时速度	0.031	0.319*
人车距离	−0.631*	−0.785*

表4 预测准确性分析

Tab.4 Analysis of prediction accuracy

决策模型	实测结果	预测结果		准确率/%
		是	否	
过街横道内	是	97	18	84.4
	否	10	326	97.0
	总体百分比			93.8
过街横道外	是	134	11	92.4
	否	10	94	90.4
	总体百分比			91.6

车辆数、是否看手机、是否存在非机动车过街、来车瞬时速度以及人车距离等。修正参数结果如表5所示。在回归分析中，β作为回归系数用于量化变量的影响程度；Sig值反映统计显著性水平。

3 行人过街执行模型构建

在行人过街过程中，受自身属性及外界环境的共同影响，行人的微观运动具有高度复杂性和时变性。为保证过街行为模拟的连续性，采用社会力模型[22]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

当超越者实施超越行为时，其与被超越对象的横向距离会逐渐增大，达到峰值后，超越者重新回归原行走路径。以该峰值所在位置为参考点，整个超越过程可划分为两个关键阶段，即路径调整阶段和超越完成阶段。两个阶段的运动轨迹呈现先远离、后靠近被超越者的趋势，整体为曲线形态，如图3所示。当超越者与前方行人的横向距离为 D_h、纵向距离为 D_n 时，启动超越行为。当超越进行至横向距离的最大值 D_{h1} 时，所对应的纵向距离记为 D_{n1}。

表5 修正参数结果汇总

Tab.5 Summary of parameter correction results

决策模型	影响因素	β	Sig值	exp(β)
过街横道内	性别	−0.856	0.056	0.425
	停车视距内车辆数	0.885	0.001	2.424
	来车瞬时速度	0.001	0.001	1.001
	人车距离	−0.001	0.001	0.999
	常量	−1.720	0.131	0.179
过街横道外	同一时刻过街人数	1.092	0.023	2.979
	停车视距内车辆数	2.138	0.001	8.480
	看手机	−4.250	0.022	0.014
	是否存在非机动车	−2.249	0.023	0.106
	来车瞬时速度	−0.065	0.001	0.937
	人车距离	−0.030	0.001	0.970
	常量	−6.918	0.023	0.001

通过分析实地调查采集的数据，本研究筛选出存在主动超越行为的行人群体，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规律，重

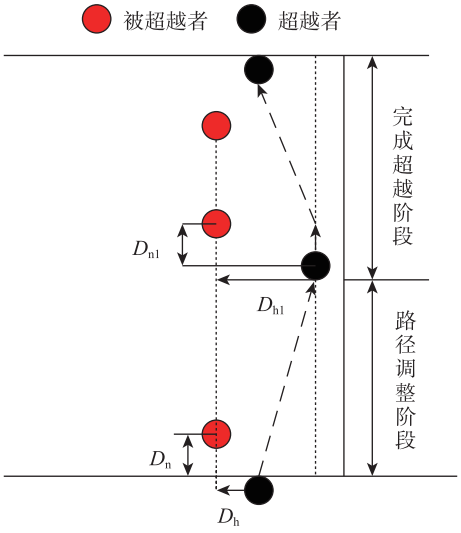


图3 行人绕行超越全过程

Fig. 3 The entire process of pedestrian detouring and overtaking

点分析了超越行为启动阶段的行人间距特征，以及超越完成时二者的横向距离特征。不同密度下 D_{hl}、D_{nl} 平均值如表6所示。

表6　行人主动超越距离特征

Tab.6　Characteristics of pedestrian active overtaking distance

交通参数	密度/（m^2/人）	平均值/cm
D_{hl}	3.0	68
	3.5	71
	4.0	75
	4.5	77
	5.0	80
D_{nl}	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，引入前进驱动力以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，图4为行人主动超越力示意图。N_i，N_j 为行人 i，行人 j 初始位置坐标；D_i，D_j 为行人更新后的位置坐标；(x_{N_j},y_{N_j})、(x_{D_j},y_{D_j})、(x_{N_i},y_{N_i})、(x_{D_i},y_{D_i}) 分别代表行人 i，行人 j 在不同时刻的横纵坐标。

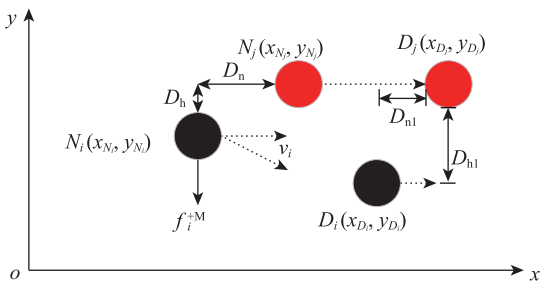


图4　行人主动超越力示意

Fig. 4　Illustration of pedestrian's active overtaking force

前进驱动力与变道驱动力组合形成了修正的行人自驱力，表达式为

$$f_i^0(t)=f_i^{\mathrm{dr}}(t)+f_i^{+\mathrm{M}}(t) \tag{3}$$

式中：$f_i^0(t)$ 为修正的行人 i 在 t 时刻的自驱力；$f_i^{\mathrm{dr}}(t)$ 为行人 i 在 t 时刻的前进驱动力；$f_i^{+\mathrm{M}}(t)$ 为行人 i 在 t 时刻的变道驱动力。

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，其中行人在步行过程中倾向于保持稳定的前向速度。该动力机制的表达式为

$$f_i^{\mathrm{dr}}(t)=m_i\frac{v_i^0(t)-v_{i\mathrm{h}}(t)}{\tau_i}\boldsymbol{n}_{\mathrm{h}} \tag{4}$$

式中：m_i 为行人 i 的质量，kg；行人 i 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 $v_{i\mathrm{h}}(t)$，m/s；τ_i 为行人 i 的反应时间，s；$\boldsymbol{n}_{\mathrm{h}}$ 为纵向单位向量。

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为

$$f_i^{+\mathrm{M}}(t)=C_i(t)\theta_i\theta_\rho\boldsymbol{n}_{\mathrm{v}} \tag{5}$$

式中：C_i 为 t 时刻行人 i 在水平方向上的位移能力；θ_i 用于表征行人 i 的预期横向间距强度；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；$\boldsymbol{n}_{\mathrm{v}}$ 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

在无信号控制路段，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，引入行人之间的相互吸引力。行人 i 和行人 j 之间在 t 时刻的作用力 $\vec{f}_{ij}^{\mathrm{soc}}(t)$ 表达式为

$$\vec{f}_{ij}^{\mathrm{soc}}(t)=A_{ij}\exp\left[\frac{(r_{ij}-d_{ij}(t))}{B_{ij}}\right]\boldsymbol{n}_{ij} \tag{6}$$

式中：A_{ij} 为行人 i 和行人 j 之间的吸引力强度，N；B_{ij} 为该吸引力的作用范围，m；r_{ij} 为行人 i 和行人 j 所对应的半径之和，m；$d_{ij}(t)$ 为 t 时刻在行人 i 和 j 之间的距离，m；$\boldsymbol{n}_{ij}$ 为行人 i 朝向行人 j 的单位向量。

3.3　行人与边界作用力改进

在无信号控制路段，过街横道本身没有墙壁或栅栏等实体边界，因此不存在实体边界的作用

力。但在行人过街过程中，过街轨迹受到过街横道的约束，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。当行人走出过街横道范围时，过街横道会产生一种吸引力，引导行人回到过街横道内行走；当行人将要到达目的地时，受到的作用力会逐渐减小，行人因此可能偏离过街横道。过街横道对行人施加的作用力表达式为

$$f_i^{(c)}(t)=\begin{cases}A_c\exp\left[\dfrac{(r_i-d_{i,c}(t))}{B_c}\right]\boldsymbol{n}_{c,i}, & d_{i,c}\text{行人在过街横道内}\\ A_c\exp\left[-\dfrac{(r_i-d_{i,c}(t))}{B_c}\right]\boldsymbol{n}_{i,c}, & d_{i,r}\text{行人在过街横道外}\end{cases} \tag{7}$$

式中：$d_{i,c}$为行人i与边界c之间的垂直距离；A_c和B_c分别为边界c施加的力的强度及其影响范围；当行人在过街横道内时，$\boldsymbol{n}_{c,i}$为单位向量，指向边界；当行人越过边界后，$\boldsymbol{n}_{i,c}$指向行人；$d_{i,r}$为行人i距过街出口r之间的距离；r_i为行人i的身体半径；$f_i^{(c)}(t)$为t时刻过街横道对行人i的作用力，分为$d_{i,r}$与$d_{i,c}$两种情况，下标取j时为行人j的相关作用力。

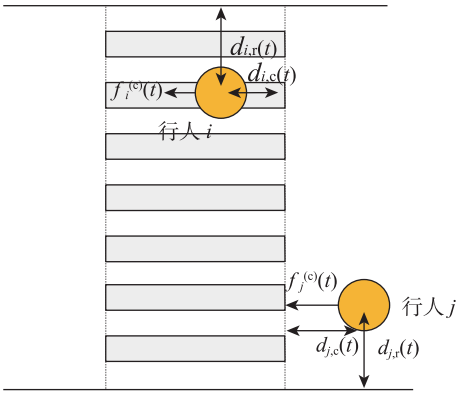


图5 横道作用力

Fig. 5 The force acting on the crosswalk

3.4 执行模型建立

在无信号控制路段的过街横道处，过街行人的社会力$F_i(t)$模型表达式为

$$F_i(t)=f_i^0(t)+\vec{f}_{ij}^{\,soc}(t)+f_i^{(c)}(t) \tag{8}$$

4 轨迹分析与验证

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。仿真中行人每隔30 s进入仿真通道，依据实时交通环境状态计算行人过街概率。当行人做出过街决策后，利用改进社会力模型计算合力，根据受力结果更新行人位置。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。本文通过参考文献[23]中的方法，并结合对行人过街行为的实际观察，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 模型参数校准结果

Tab.7 Calibration results of model 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_i	行人期望横向间距强度	0.8~1.2 m
θ_ρ	密度强度	0~1
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	过街横道作用力强度因子	5 N
B_c	过街横道作用力作用范围	0.6 m

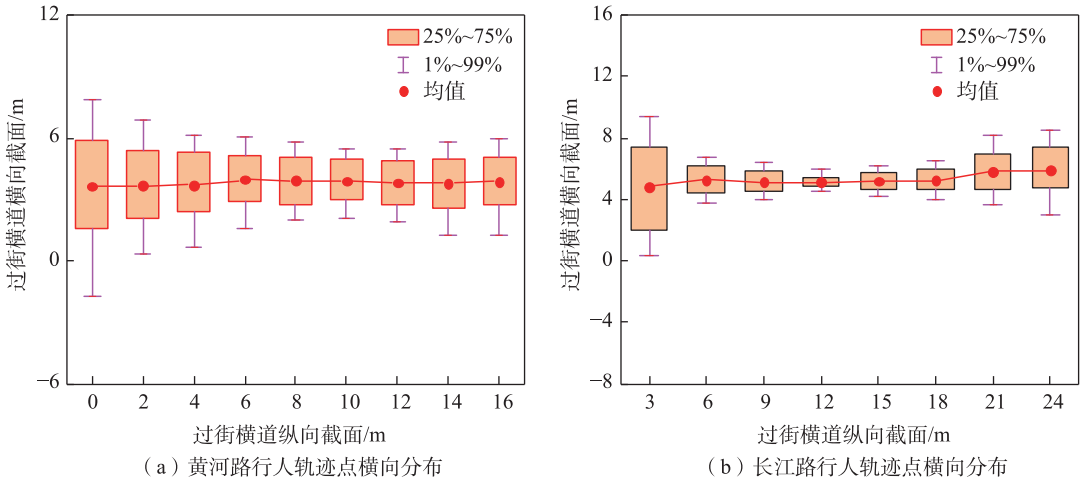
4.1 行人过街轨迹分布特性

为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，沿与行车道的平行方向设置多个纵向截面。其中，黄河路相邻截面的间隔为2 m，长江路相邻截面的间隔为3 m。对行人轨迹的横向分布进行数据统计与分析，结果如图6所示。图中，红色实心点代表样本平均值，上下延伸的短线代表行人1%~99%的分布区间。

由图6可知，在过街横道的起始阶段，行人轨迹点的横向分布存在较大波动幅度。随着行人逐步向前移动，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部集中的行走趋势。据此推断，过街横道的边界线影响了行人的运动轨迹，促使原本在过街横道外的行人逐渐向过街横道内部移动。此外，这种影响在道路中央区域表现得更为显著。

4.2 行人过街轨迹分布仿真分析

检验仿真模型准确性的理想方法是直接比对模拟轨迹与实测行人轨迹的差异。然而，由于行人行走路径具有较强的随机性，该方法难以进行量化



（a）黄河路行人轨迹点横向分布　　（b）长江路行人轨迹点横向分布

图6　行人轨迹点横向分布

Fig. 6　Distribution of pedestrian trajectory points in horizontal direction

分析，也无法实现模拟与实测数据的精确对应。因此，本研究将重点转向轨迹分布的整体特征，以更全面地评估模型效果。本研究选取黄河路上一段未设置信号灯的过街横道作为仿真场景。研究过程中，将行人过街起始端、过街横道中部、过街终止端分别定义为近端、中端、远端，并在道路左右两侧及中心位置选取3个截面。将每个截面划分为$(-\infty,0]$、$(0,2]$、$(2,4]$、$(4,6]$、$(6,+\infty)$共5个区域，如图7所示。

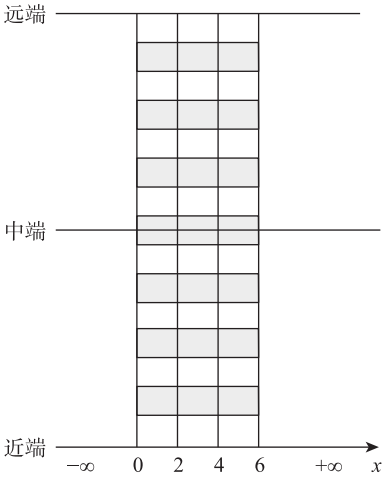


图7　行人过街截面

Fig. 7　Cross-section of pedestrian crossing

随后对行人通过这些截面的分布特征进行系统整理，相关数据如图8所示。

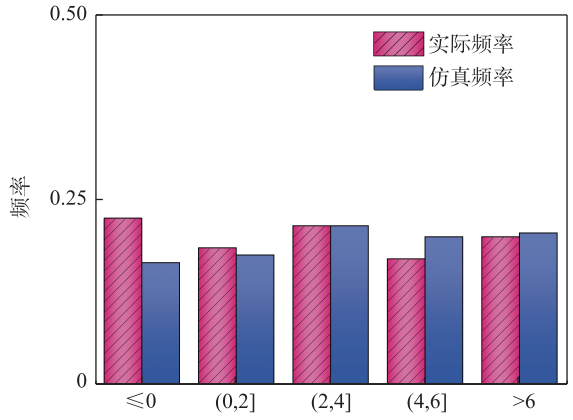
采用双样本Kolmogorov-Smirnov（K-S）检验方法，对仿真行人穿越位置分布与实际观测数据进行分析。该方法的计算式[19]为

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

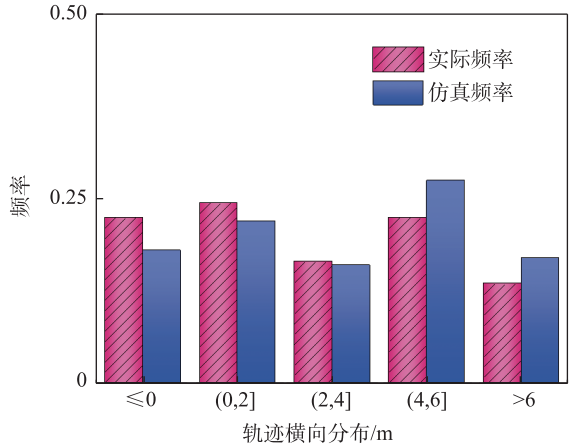
该式涉及两组样本的分布特征。式中：$F_{1,n}(x)$和$F_{2,m}(x)$分别为第1组和第2组所对应的分布函数；$\sup|\cdot|$为取上确界运算函数；$D_{n,m}$为K-S检验统计量。假设检验的两组数据来源于同一分布，当满足$D_{n,m}>c(\alpha)\sqrt{\frac{n+m}{nm}}$时，则推翻该原假设，否则接受原假设。参数$n$与$m$分别为第1组和第2组的样本规模；显著性水平记作$\alpha$；$c(\alpha)$为$\alpha$对应的K-S检验临界系数。在本研究的计算过程中，选择$\alpha=0.05$作为判定标准，并结合具体样本数据进行分析，以评估假设的合理性。

通过代入样本数据计算可得，$c(\alpha)\sqrt{\frac{n+m}{nm}}$为0.062 6，借助SPSS软件分析得出，近、中、远3个截面的位置分布函数差值D分别为0.049、0.059和0.059，均未超过0.062 6。因此接受原假设，表明调查数据与仿真结果的行人穿越位置分布具有高度一致性，符合统计规律。为进一步验证仿真结果的可靠性，另取一组独立数据进行计算。借助SPSS软件分析得出，近、中、远3个截面的位置分布函数差值D分别为0.054、0.044和0.049，同样未超过0.062 6。

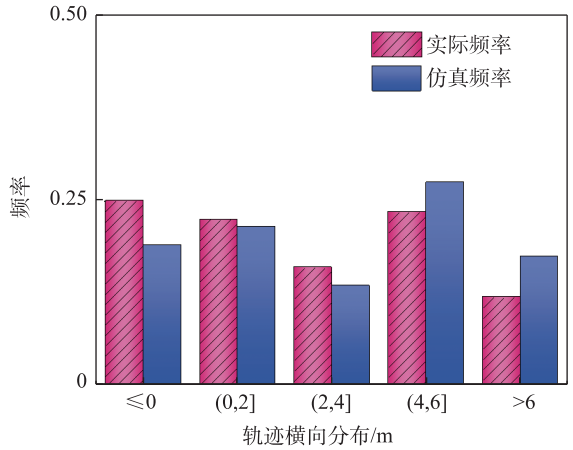
在过街横道的起始区域，行人通常更倾向于从两侧进入过街横道。行进至过街横道中央区域时，行人直接暴露于机动车流中，穿越位置逐渐集中于过街横道中间。到达过街横道远端时，由于目的地



（a）过街横道近端行人轨迹分布



（b）过街横道中端行人轨迹分布



（c）过街横道远端行人轨迹分布

图8 不同截面行人轨迹分布

Fig. 8 Distribution of pedestrian trajectories at different cross-sections

存在差异，行人开始向两端扩散。这一变化规律主要源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，出于通行便捷性考虑，有时会选择超出过街横道范围行走，这与实际观测情况完全一致。为减少行人溢出过街横道的现象，可适当调整过街横道末端宽度或优化出口引导方向，以规范行人过街行为。研究结果表明，改进后的社会力模型能够较好地反映过街横道上行人的实际运动特征。

5 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贴合实际过街情境。研究结果表明，过街横道外决策模型较过街横道内决策模型考虑的影响因素更全面，新增了非机动车过街状态、行人是否使用手机等因素。这些因素对过街横道外行人的决策行为具有显著影响，而过街横道内行人决策不受上述因素干扰。

2）在行人过街执行方面，针对传统社会力模型的不足，考虑行人主动调整路径的行为特征，引入行人主动超越力，以描述行人在穿越过街横道过程中的轨迹动态变化规律。同时耦合过街横道对行人运动的约束作用，使模型能够更精确地模拟行人在过街横道内的路径分布特征。通过对行人过街行为的系统研究，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，可为过街横道的优化设计提供科学依据。

3）行人出行是一种复杂多变的交通行为，在不同场景、不同密度下，其流动规律呈现差异化特征。由于本研究未考虑高密度条件下行人之间的心理排斥效应，因此该模型不能直接应用于商场、医院等行人密集的公共场所。后续需针对行人的运动特征、轨迹演化规律及心理作用机制开展更深入的分析与研究，并据此进一步优化社会力模型。

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安全的影响[J]. 交通运输系统工程与信息，2018，18(2)：136-141.

Zhang Cunbao，Chen Feng，Wei Yuanyuan，et al. The effects of mobile phone on pedestrian crossing behavior and safety at uncontrolled mid-block crosswalks[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2018，18(2)：136-141.

[2] Zhang Yunchang, Qiao Yu, 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]. 南京：东南大学，2021.
Zhang Ziqian. Evaluation of pedestrian crossing safety at non-signalized road segments based on unmanned aerial vehicle data[D]. Nanjing: 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(5)：25-30.
Zhao Jia, Song Zhu, Zhang Mingfang, et al. Research on pedestrian crossing decision without signal control [J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(5): 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, Oviedo-Trespalacios 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(1)：87-95.
Liang Yu, Yang Yanqun, Zhu Zhandong, et al. Study on the influence of driver characteristics on driver's stress response[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(1): 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：天津大学，2018.
Ran Xudong. Research on pedestrian crossing behavior at unsignalized intersection based on trajectory data [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.

[9] Hoogendoorn S P, Bovy P H L. 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 Dexuan. Research on airport terminal departure passengers behavior social force model[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.

[11] Li Maosheng, Shu Panpan, Xiao Yao, 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(4)：452-462.
Zhang Huiling, Pang Xianxian, Peng Dan. Analysis and decision modeling of the impact of elderly pedestrian crossing street at signalized intersections[J]. Journal of Shenzhen University (Science & Engineering), 2023, 40(4): 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 Hao, Liu Qiumei, Wu Xinsen. Simulation of crowding and stampede on evacuation pedestrians in pedestrian facilities[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 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(4)：79-88.
Chen Peng, Tang Peng, Yan Weixi, et al. Modeling and simulation of pedestrian crossing behavior at uncontrolled mid-block crosswalk [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(4): 79-88.

[15] 韩喜双，翟凤勇，李平，等. 无信号控制路口行人过街行为特征及博弈模型分析[J]. 运筹与管理，2017，26(3)：78-85.
Han Xishuang, Zhai Fengyong, Li Ping, et al. Pedestrians' behavioral characteristics and a game theoretical analysis while crossing an unsigned intersection[J]. Operations Research and Management Science, 2017, 26(3): 78-85.

[16] 曹宁博. 城市道路环境下行人过街微观仿真模型研究[D]. 长春：吉林大学，2018.
Cao Ningbo. Study on microscopic simulation model of pedestrian crossing in the urban road environment[D]. Changchun: 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(4)：116-121.
Duan Jiandi, Long Kejun, Li Lei. Pedestrian behavior on

un-signalized mid-block pedestrian crosswalk[J]. Systems Engineering,2013,31(4):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(1):111-123.
Ma Dan, Pei Yulong, Liu Tao, et al. Decision making model and technical corrective measures of pedestrian's bad crossing behavior in urban road section[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2023,53(1):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:重庆交通大学,2023.
Zhong Xinyu. Research and application of pedestrian crossing simulation model at pedestrian crossings without signal control[D]. Chongqing: 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:哈尔滨工业大学,2022.
Qin Hao. Research on simulation of pedestrian crossing street at road sections by cellular automata in cooperative vehicle infrastructure system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2022.

[22] Zeng Weiliang, Chen Peng, Nakamura H, et al. Application of social force model to pedestrian behavior analysis at signalized crosswalk[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies,2014,40:143-159.

[23] 杨蕊. 城轨通道行人超越与对向避让模型研究[D]. 北京:北京交通大学,2014.
Yang Rui. The research of pedestrian overtaking and avoiding model in urban rail channel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2014.



通信作者:裴玉龙(1962—),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为智能交通系统与交通管理。E-mail: peiyulong@nefu.edu.cn。

(责任编辑:姜红贵)