

基于改进后社会力模型的信号交叉口行人二次过街行为特征研究

马思远

济宁市鸿翔公路勘察设计研究院有限公司, 山东 济宁

收稿日期: 2024年10月25日; 录用日期: 2024年11月18日; 发布日期: 2024年11月25日

摘要

在信号交叉口行人二次过街的复杂交通状态下,深入分析行人过街的交通特性,如何构建行人动力模型,提高行人过街时的安全与效率成为人们探讨的重要议题。本文提出了一种基于博弈论改进后的社会力模型用于探究信号交叉口行人流饱和状态下的二次过街的影响因素;根据行人二次过街的需求及行为特性对社会力模型进行了改进,增加了信号灯对行人过街产生的影响力并通过纳什均衡确定了公式中行人对时间与速度需求的系数,并且量化了社会力的各个分力;然后运用能量定理对数据进行处理,用实际数据量化了改进后的社会力的各个分力并且将行人过街过程详细地进行了描述。最后将原始社会力模型和改进后的社会力模型以及实际情况进行对比之后,表明改进后的社会力模型能更好地反映实际情况,为提升信号交叉口交通系统高效和安全的运行以及改善行人过街设施提供理论依据提出参考建议。

关键词

行人二次过街, 社会力模型, 博弈论, 动能定理

Study on the Behavior Characteristics of Pedestrians Crossing the Street Twice at Signalized Intersections Based on Improved Post-Social Force Model

Siyuan Ma

Jining Hongxiang Highway Survey and Design Research Institute Co. Ltd., Jining Shandong

Received: Oct. 25th, 2024; accepted: Nov. 18th, 2024; published: Nov. 25th, 2024

Abstract

Under the complex traffic state of pedestrian crossing at signalized intersections, in-depth analysis

文章引用: 马思远. 基于改进后社会力模型的信号交叉口行人二次过街行为特征研究[J]. 建模与仿真, 2024, 13(6): 6246-6258. DOI: 10.12677/mos.2024.136572

of the traffic characteristics of pedestrian crossing, how to construct a pedestrian dynamic model, and improve the safety and efficiency of pedestrian crossing have become an important issue. In this paper, an improved social force model based on game theory is proposed to explore the influencing factors of secondary crossing at signalized intersections under saturated pedestrian flow. According to the needs and behavior characteristics of pedestrians crossing the street twice, this paper improved the social force model, increased the influence of traffic lights on pedestrians crossing the street, determined the coefficients of pedestrians' demand for time and speed through Nash equilibrium, and quantified each component of social force. Then, the energy theorem is used to process the data, and the actual data are used to quantify the various components of the improved social force and the pedestrian crossing process is described in detail. Finally, by comparing the original social force model with the improved social force model and the actual situation, it is shown that the improved social force model can better reflect the actual situation, and provide theoretical basis for improving the efficient and safe operation of the signalized intersection traffic system and improving the pedestrian crossing facilities.

Keywords

Pedestrian Crossing the Street Twice, Social Force Model, Game Theory, Kinetic Energy Theorem

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

行人过街是城市交通体系中重要的组成部分,在城市交通出行中占有很大比例。在大型信号交叉口行人二次过街路段,以步行交通量大,过街设施复杂,成为影响城市交通系统运行的一个重要因素。在城市平面交叉口的研究中,规模较大的混合交通下的交叉口内行人在一个有效绿灯时间内无法到达对面,容易产生安全隐患并且降低机动车流的运行效率[1]。通过信号控制行人二次过街,减少行人与机动车流的冲突,降低了事故隐患,但增加了行人过街时间。信号交叉口行人二次过街是城市复杂交通系统中的重要组成部分,为了探究行人二次过街的影响因素,提高行人二次过街时过街效率保障行人过街安全,在过去的研究中不同学者运用不同的模型与方法来探索研究影响行人过街的因素,分析行人的过街特征。

通过行人行为力学分析,构建行人动力模型,能够深入解析行人过街的交通特性,促进信号交叉口交通系统高效和安全的运行。许多学者在研究行人特征时提出了一系列行人流模型,包括气体动力学模型、元胞自动机模型和社会力模型等。其中,社会力模型受到了越来越多的关注,在微观行人流领域得到了广泛的应用。Helbing 等人提出了社会力模型的概念[2],将人内部动机进行量化,使内心驱动转化为力,从力学方面考虑心理学问题,将力划分为三种力,自身驱动力、人与人之间的相互作用力以及障碍物对人产生的作用力。此后许多学者从压力的生理反应[3]、复杂环境中的应用[4]、心理学的原理解释[5]等多方面对社会力的理论进行了研究。

除此之外,许多学者还对社会力模型进行了改进,Sticco 等运用真实视频数据对社会力模型的两个参数摩擦系数和身体力系数进行了优化[6]。Jiang 等使用环境驱动的社会力模型来探索主体执行复杂的个体运动[7]。李娟等人根据实际行人过街情况,对行人的相对速度、期望速度和行人与障碍物之间的作用力进行了改进[8]。

在 20 多年的发展中,社会力模型不仅在疏散人群、消防救援等方面得到广泛应用,在交通领域也得到了部分应用,例如考虑行人过街时周边行人的干扰对模型进行了改进及仿真[9]。运用社会力模型对平

衡车与行人混合交通的情况下搜集的数据进行校准[10]、对期望速度进行了分析和验证[11]等。但在行人过街方面，目前许多的研究主要是利用调查问卷进行对行人的调查与定性分析，例如运用调查问卷搜集在十字路口影响行人闯红灯过街的行为[12]。Avinash 等人在印度混合交通的情况下通过现场调查及数据搜集分析得出年轻人的过街的步行速度最快并且表明城市特征也影响行人步行速度[13]。行人作为人行横道处的主要交通群体，且在过路过程时与其他群体有着交互行为[14]。因此，为了研究人行横道处多群体行为的演化规律，可以运用博弈论建立模型来分析行为的演化趋势以及影响因素。

综上所述，关于行人过街的行为特性分析，目前研究多集中在心理领域的定性描述，量化计算较少。为此，本研究聚焦信号交叉口行人二次过街行为，基于博弈论改进的社会力模型，解析二次过街的影响因素，为行人过街安全及提高过街效率提供更多的参考建议。

2. 改进后的社会力模型

行人二次过街主要运用于车流量较大车道过宽的十字路口，在道路中心位置设置安全岛，在运用原始社会力模拟行人二次过街后，认为在原模型基础上还要考虑行人二次过街的特性以及绿灯倒计时对行人的影响，所以本文对模型进行了改进，在利用视频数据分析研究行人二次过街的特性之后，发现绿灯倒计时对行人的步速以及运动轨迹都有较大的影响，所以在原始社会力模型的基础上增加了信号灯对行人的影响力。

改进后的社会力模型主要分为四部分：行人自驱力 F_i ；周边行人对被观察者产生的作用力 F_{ij} ；斑马线边界线对行人产生排斥力 F_{iw} ；绿灯时间对人产生的作用力 F_s 。如公式(1)所示。图 1 表明了各个分力的方向以及合力的方向。

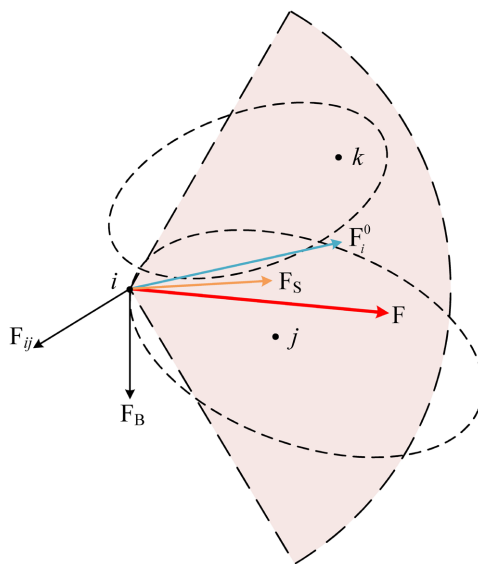


Figure 1. Components of pedestrian social forces
图 1. 行人社会力的各个分力

$$\mathbf{F} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F}_i + \sum \mathbf{F}_{ij} + \mathbf{F}_{iw} + \mathbf{F}_s \quad (1)$$

式中， $\mathbf{F}$ 为行人 i 的社会力； $\mathbf{F}_i$ 为表示行人 i 的自驱力； $\mathbf{F}_{ij}$ 为前方的行人 j 对行人 i 的吸引力和排斥力； $\mathbf{F}_{iw}$ 为边界线对行人 i 的排斥力； $\mathbf{F}_s$ 为绿灯倒计时对行人 i 的吸引力； M 为行人的质量； $\frac{d\mathbf{v}}{dt}$ 为加速度矢量。

2.1. 自驱力

自身驱动力是由行人运动中受到目标吸引所产生的。在进行计算时, 为了更符合行人过街特性增加了方向系数将不同方向的速度进行折算, 如公式(2)以及(3)。

$$e_i(t) = \frac{r_i^k - r_i(t)}{r_i^k - r_i(t)} \quad (2)$$

$$F_i = \frac{1}{\tau_i} \left\{ \left[v_i^0 e_i(t) \right] - a v_i \right\} \quad (3)$$

式中, $e_i(t)$ 为 t 时刻时期望速度的方向向量; v_i 为实际速度; v_i^0 为期望速度; τ 为松弛时间; a 为方向系数。

2.2. 行人的相互作用力

行人之间的相互作用力如公式(4)所示。其中 sign 函数用来表示行人的相互作用力是同向行人的吸引力还是对向行人的排斥力, 如公式(5)所示。此外, 由于行人之间的作用力受对方的速度和过街时间影响较大, 为更符合行人二次过街 A、B 侧对时间认知不同(即 A 侧行人对时间的关注程度更高)的特征增加了时间系数。

$$F_{ij} = \sum_{j(i \neq i)} f_{ij} = \text{sign}(x) \sum_{j(i \neq i)} A_i C \exp \left[\left(r_{ij} - d_j \right) / B_i \right] n_{ij} \quad (4)$$

式中, A_i 为相用力强度系数; B_i 为吸引力作用范围; r_{ij} 为行人视野的扇形半径; C 为时间系数。

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases} \quad (5)$$

在行人行走过程中, 过街时行人会形成椭圆力场与目标行人 i 有关, 如公式(6)。

$$2b_j = \sqrt{\left(\|r_i - r_j\| + \|r_i - r_j - v_j \Delta t\| \right)^2 - \left(\|v_j \Delta t\| \right)^2} \quad (6)$$

式中, b_j 为椭圆的短半轴; r_i 为目标行人 i 的实际行走方向; r_j 为行人 j 的实际行走方向; v_j 为行人 j 的当前实际速度; $v_j \Delta t$ 为行人 j 的步幅宽度。

2.3. 边界线排斥力

在过街时当行人密度到达一定程度时, 行人会超过斑马线边界向两边外扩, 此时斑马线边界线对行人产生一股拉力且力场呈梯度 U_w 下降与边界线的力半径 r_w 及行人的作用力半径 R 有关, 边界线形成的排斥力呈高斯分布, 如公式(7)所示。

$$F_w = -\nabla U_w \exp(-\|r_w\|/R) \quad (7)$$

式中, r_w 为边界线力的半径; R 为行人受力范围半径。

2.4. 绿灯倒计时影响力

1) 绿灯倒计时影响力公式

在考虑行人二次过街的特性之后, 增加了绿灯倒计时对行人过街的影响力, A 侧行人受绿灯时长的影响大且倒计时越短对行人的影响越大, 而绿灯倒计时 t_s 对于 B 侧行人的影响较, 因此对于 A、B 侧行人进

行了绿灯倒计时影响分级。并且绿灯倒计时对行人的影响主要以加速度的形式呈现。除此之外，增加了关于行人速度差的线性函数 $g(\Delta v_{ij})$ 以及关于时间的函数 $h(\Delta t_{ij})$ ，以及对于两侧过街行人的需求侧重不同，在关于时间和速度的函数运用完全信息动态博弈得出各自的权重系数 a 和 b ，且根据行人的特性及行走方向以及距离还设置了力的有效系数，进行区分不同类型的行人如公式(8)所示。

$$F_s = c[1 + ah(\Delta t_{ij}) + bg(\Delta v_{ij})] \times t_s / [\exp(r_i - d_s)] n_s \quad (8)$$

式中， t_s 为绿灯倒计时； r_i 为行人 i 的力场半径； d_s 为绿灯作用距离； a 、 b 为对时间和速度关注度概率； n_s 为绿灯倒计时力场方向； Δv_{ij} 为行人 i 和 j 的相对速度。

2) 运用完全信息动态博弈设置的权重系数

在设置信号灯力的时，根据行人二次过街的特性，运用完全信息动态博弈，对时间和速度关注度概率设置权重，根据视频数据将 A、B 侧行人对时间和速度的关注度的不同设定速度矩阵中 5 个单位为零收益，时间矩阵中 6 个单位为零收益，根据两侧的零收益来计算出 A、B 侧行人各个博弈情况下的收益，如表 1 所示。

Table 1. Velocity matrix gains of pedestrians on both sides of A and B

表 1. A、B 两侧行人的速度矩阵收益

	改变	不改变
改变	(-1, 0)	(-2, 0.5)
不改变	(0.5, -0.5)	(1, 1)

当 A、B 两侧行人行走方向都改变时，A 侧行人追求尽快通过人行横道，设定 A 侧行人的距离值为 6；B 侧行人追求最短的通行距离，更快的通行速度，轨迹线进行小范围的改变，则 B 侧的距离值为 5；所以该博弈的收益值为(-1, 0)。当 A 侧行人行走方向改变、B 侧行人不变时，因 B 侧行人不改变行走轨迹，A 侧行人要在原有轨迹上做出改变来避免与 B 侧行人发生冲突，因此取 A 侧的距离值为 7，B 侧不改变方向轨迹线对比都改变时的距离值要小，取 B 侧的距离值为 4.5；所以该博弈的收益值为(-2, 0.5)。A 侧行人不改变方向时，取距离值为 4.5，B 侧行人改变且相比于两侧都改变时 B 侧行人要改变的幅度要大，因此 B 侧的距离值为 5.5；所以该博弈的收益值为(0.5, -0.5)。A、B 两侧行人的行走方向都不改变时，两侧都是寻求最短轨迹因此两者的距离值都最小取为 4，所以该博弈的收益值为(1, 1)。

由于 A、B 侧行人对时间的追求与对时间的认知都有所差异，并且在信号配时上，A 侧绿灯时间短、过街距离长；B 侧过街距离短、所以相比于 A 侧更追求过街舒适性，在对视频资料的行人过街的时间数据分析之后确定 A、B 侧行人时间收益矩阵，如表 2 所示。

Table 2. Velocity matrix gains of pedestrians on both sides of A and B

表 2. A、B 两侧行人的速度矩阵收益

	改变	不改变
改变	(2, 1)	(1.5, 0)
不改变	(0, -1.5)	(-1, -2.5)

A、B 两侧行人行走方向都改变时，A 侧行人更追求过街速度，过街时间少，B 侧行人追求舒适，轨迹改变较小且花费时间要比 A 侧多，所以将 A 侧时间值设为 4，B 侧时间值为 5；A、B 侧以支付 6 个单位的时间为零收益，所以该博弈的收益值为(2, 1)。A 侧行人行走方向改变、B 侧不变时，A 侧行人为了避

让 B 侧行人在时间上会比两侧都改变要长, B 侧通行时间长, 但对时间的追求小于 A 侧, 且 B 侧不改变方向时间花费更长, 所以该博弈的收益值为(1.5, 0)。A 侧行人行走方向不变、B 侧改变时, A 侧过街时间会更长, B 侧因为时间充足但追求过街舒适度, 过街时间花费更长, 所以该博弈的收益值为(0, -1.5)。A、B 两侧行人行走方向都不改变时, 由于对时间认知的差异且双方都不让步, 过街花费的时间会更久, 所以该博弈的收益值为(-1, -2.5)。

计算出所有可能性的博弈收益之后, 在时间和距离综合考虑下的收益找到纳什均衡, 分别有 8 个不同的 P 值如表 3 所示, 用来进行计算。

Table 3. Explanation of the variable P

表 3. 变量 P 的解释说明

变量名称	变量解释
P_1	当 A 侧行人和 B 侧行人都选择变方向时 A 侧行人的收益
P_2	当 A 侧行人选择变方向, B 侧行人不改变方向时 A 侧行人的收益
P_3	当 A 侧行人选择不变方向而 B 选择变方向时 A 侧行人的收益
P_4	当 A、B 侧行人都选择不变方向时 A 侧行人的收益
P_5	当 A 和 B 都选择变方向时 B 的收益
P_6	当 A 选择变方向而 B 选择不变方向时 B 的收益
P_7	当 A 选择不变方向而 B 选择变方向时 B 的收益
P_8	当 A 和 B 都选择不变方向时 B 的收益

同时, 本文也引入权重系数 b 来当作 B 侧行人在考虑过街距离上的占比, 这样就可以得到 B 侧行人在距离和时间同时考虑下的综合收益, 用公式描述如(9)和(10)所示。

$$P \begin{cases} P_1 = a \times (-1) + (1-a) \times 2 \\ P_2 = a \times (-2) + (1-a) \times 1.5 \\ P_3 = a \times 0.5 \\ P_4 = a + (1-a) \times (-1) \end{cases} \quad (9)$$

$$P \begin{cases} P_5 = (1-b) \\ P_6 = b \times 0.5 \\ P_7 = b \times (-0.5) + (1-b) \times (-0.5) \\ P_8 = b + (1-b) \times (-2.5) \end{cases} \quad (10)$$

在行人二次过街时行人间的速度差和时间差都有较大关系, 所以按照所测量的数据进行分析, 得出了单调递增的速度差函数和单调递减的时间差函数。公式如(11)和(12)所示。

$$g(\Delta v_{ij}) = \Delta v_{ij} \times u \quad (11)$$

$$h(\Delta t_{ij}) = \Delta t_{ij} / d \quad (12)$$

式中, Δv_{ij} 为行人 i 和 j 的速度差; Δt_{ij} 为行人 i 和 j 时间差; u 为速度系数; d 为时间系数。

行人所受的社会力会随着绿灯倒计时越来越短而逐渐增大, 且绿灯倒计时只影响力的大小而不会改变力的方向。

3. 结果与讨论

3.1. 数据收集与处理

在模型改进前选取淄博市南京路与共青团西路交叉口的北进口东西向的行人二次过街区域为研究目标，且过街以年轻人为主，斑马线全长 32 m、宽 9 m，中间设有安全岛 4 m，如图 2 所示，将二次过街分为两个阶段，这次主要研究 AB 段行人过街特性。

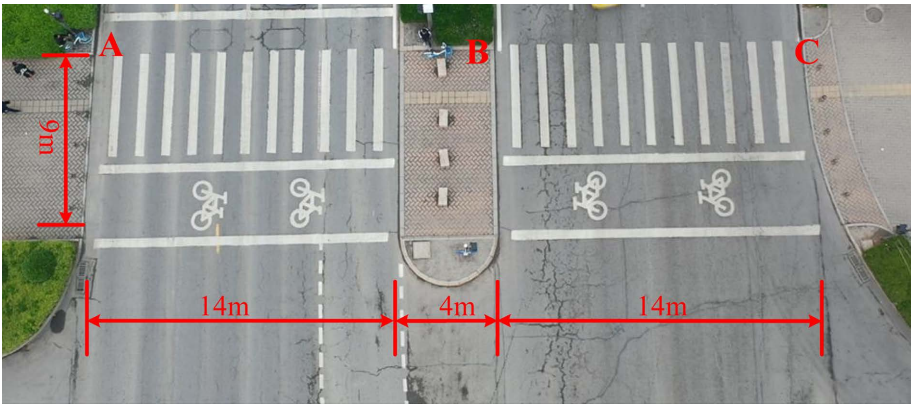


Figure 2. Schematic diagram of pedestrians crossing the street twice
图 2. 行人二次过街示意图

在所研究的交叉口行人二次过街中，利用无人机收集了 10 个工作日晚高峰时段的视频数据，共提取到 276 个信号周期的有效数据。运用 Kinovea 软件对目标行人进行了追踪，得到行人的速度、轨迹等。本文设置了 4 个横截面分别是 1、2、3、4 将路分成了五个路段，分别是路段 S0、S1、S2、S3、S4，如图 3 所示。

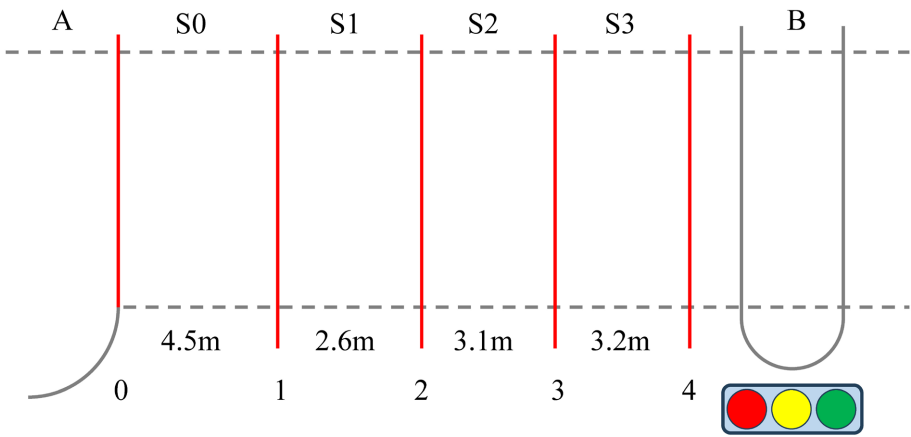


Figure 3. The location of the cross section for data collection
图 3. 数据收集横截面位置

其中在 1 横截面(大约 4.5m 处)时，A 侧后部分行人处于启动加速状态，B 侧行人开始启动状态，如图 4(a)所示。此时行人前方视野开阔且空间较为空旷，行人此时主要受自驱动力和同向行人的吸引力。在 S1 至 S2 的路段，A 侧行人慢慢加速，B 侧行人开始启动并向 A 侧前进。

在 2 横截面(大约 7.1 m 处)在 A 侧与 B 侧“首位行人”交汇时的区段，如图 4(b)所示，此时 A 侧行

人速度开始下降,增加了对向行人对A侧行人的阻力。

在3横截面(大约10.2 m处)时,两侧行人完全进入了拥挤状态如图4(c)所示,A侧行人速度开始放缓,且增加了改变路线的次数。S3至S4的路段,拥挤的人群开始消散,行人的速度开始提升,随着绿灯倒计时的时间越来越小,行人的速度也越来越快。

在4横截面(13.5 m处)时,两侧行人拥挤状态即将消散。A侧行人马上到达安全岛,由于信号控制不均衡,导致A侧行人行走速度越来越大。

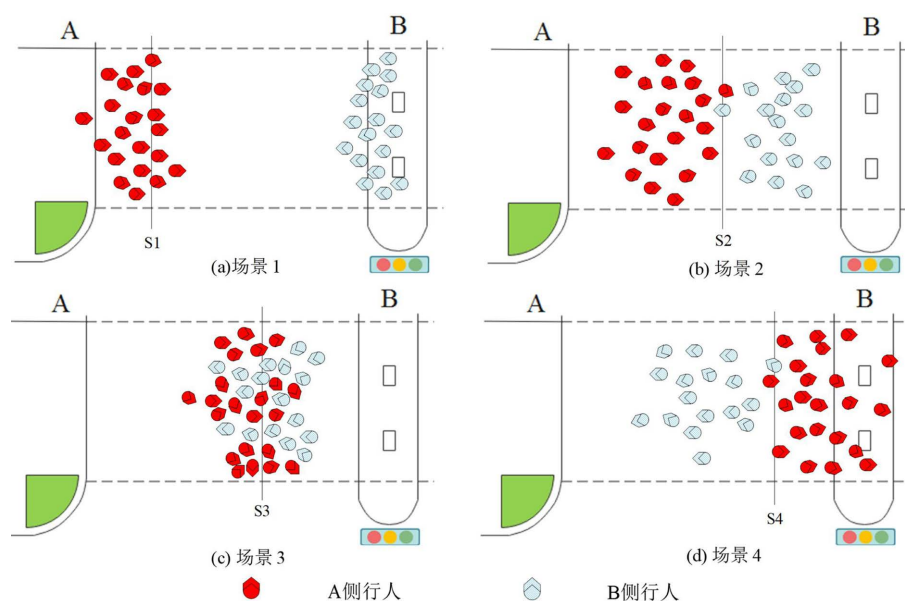


Figure 4. Pedestrian status on the sides of cross section A and B

图4. 横截面A、B侧行人状态

图5说明了信号交叉口A、B侧行人过街信号,从图中可以看出所调查的信号交叉口行人过街信号为两相位。在行人二次过街的第一阶段A侧为全红,B侧有效绿灯时间为51s,在行人二次过街的第二阶段A、B侧行人有效绿灯时间均为33s。

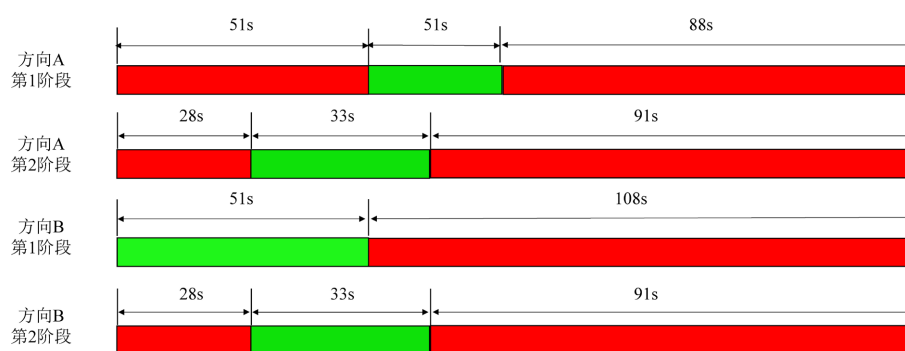


Figure 5. Effective green time for pedestrians crossing the street

图5. 行人过街的有效绿灯时间

在四个横截面我们用视频比对以及参考其他资料之后,结合路口特点,在每个横截面上分别搜集了行人的年龄、性别、步速、运动轨迹等多种数据。首先将收集到的数据按照横截面进行分类,在S1路段,主要受内心驱动的行人的实际速度大多在0.9~1.2 m/s。在S2路段由于感受到绿灯倒计时的压力及对向行

人的阻力行人的实际速度大多在 1.4 m/s~1.7 m/s 之间，如图 6 所示。

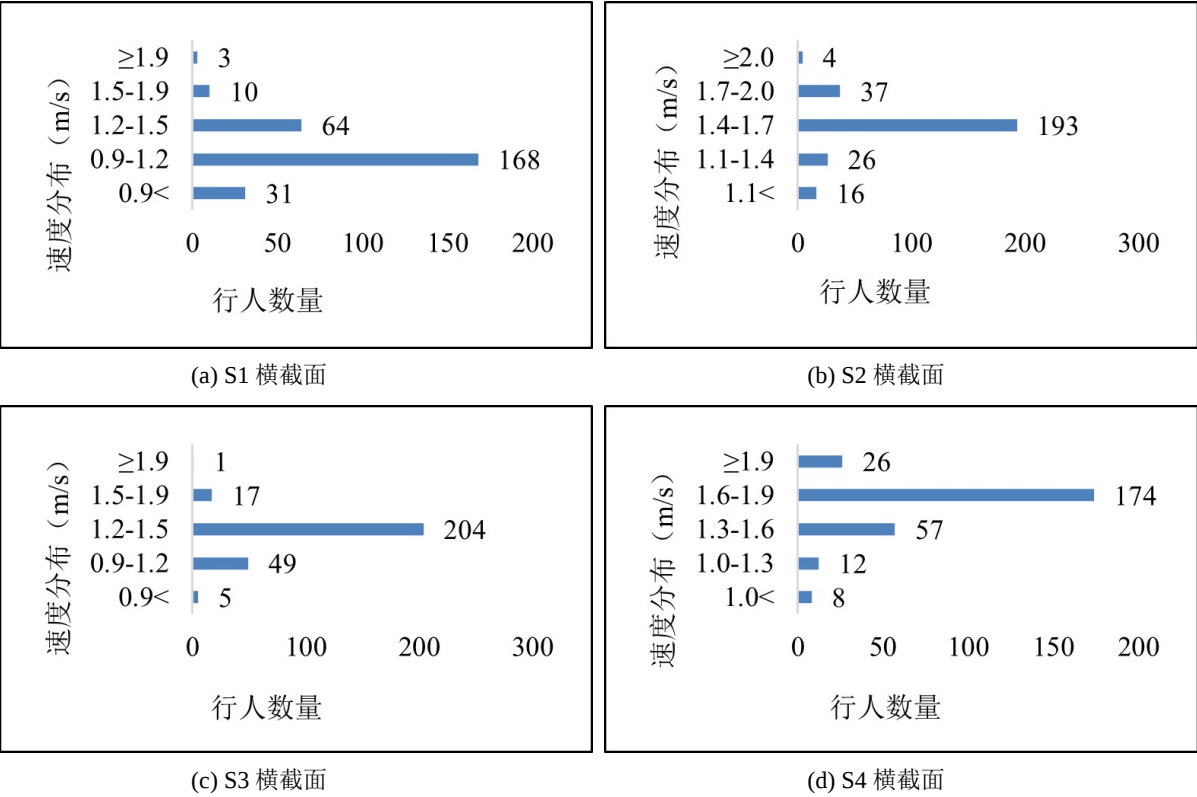


Figure 6. Four cross-sectional pedestrian speed profiles
图 6. 四个横截面行人速度分布图

拥挤状态下行人的横截面处的瞬时速度方向各异，处理计算时较为复杂，所以设置了 6 个速度方向以及 8 个区间 $a, b, \dots, h$ 来进行数据的计算，如图 7 所示。由于 y 轴在实际场景中为南北方向所以不设置速度方向，当行人的行走方向在 b 区间时，都按 2 方向进行处理，有便于计算速度在 x 轴与 y 轴的分量。以此类推 c 区间速度方向都按照方向 3 进行计算， f 区间的行人速度的方向都以速度方向 5 进行计算， g 区间的速度方向都以速度方向 6 进行计算，以上每个区间的所占圆的 $1/8$ ，且每个扇形的弧度均为 45° 。 d, e 两区间的行人速度方向都归为速度方向 4 进行计算， a, h 两区间接速度方向 1 计算。

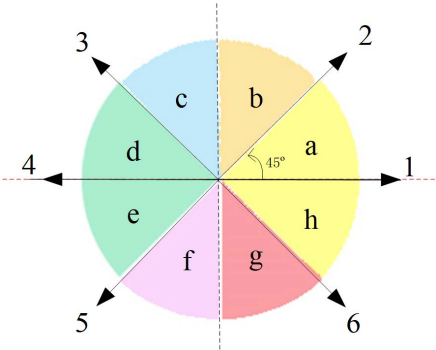


Figure 7. Partition decision diagram for different speed directions
图 7. 不同速度方向分区判定图

3.2. 结果讨论

3.2.1. 自驱力

根据视频中提取的各项数据以及对行人的调查与访谈,从A到B侧行人的平均期望速度 $v_0 = 2 \text{ m/s}$ 。行人的平均速度为 $v_i = 1.45 \text{ m/s}$ 。计算后得到图8的曲线,行人在过街时的期望速度和自驱力与实际速度呈反比,即实际速度越大,自驱力就越小。从图中可以清楚的看到自驱力的变化,在开始过街时慢慢加速,此时内心对于过街目标明确,速度一直增长,从S1到S2时,当看到对向行人移动时,A侧行人的速度加快上升逼近于期望速度,所以自驱力开始减小。在2横截面处,由于与对向行人的距离拉近,斑马线上开始形成拥挤状态,A侧行人的实际速度有所下降,与期望速度的差值开始增大,自驱力也开始增大,并在3横截面的拥挤中心实际速度最小时,自驱力达到一个高峰值。在3横截面之后,拥挤的人群逐渐消散,实际速度增大,自驱力减小。

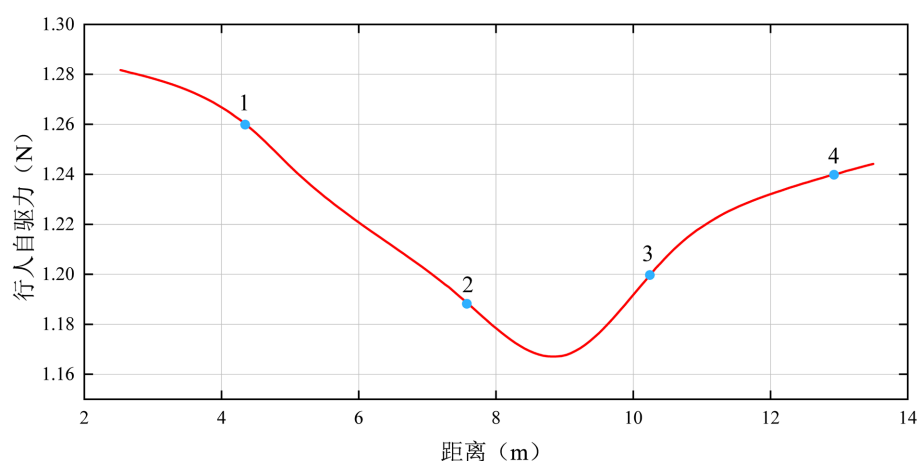


Figure 8. Trend graph of pedestrian self-drive force on side A
图8. A侧行人自驱力趋势图

3.2.2. 行人相互作用力

在开始过街时,行人的实际速度比期望速度要低,经过松弛时间达到期望速度。在S2段由于周围影响力增大,不同侧的行人受到的影响也不同,例如在行人二次过街时,影响行人过街的有同行的同伴,

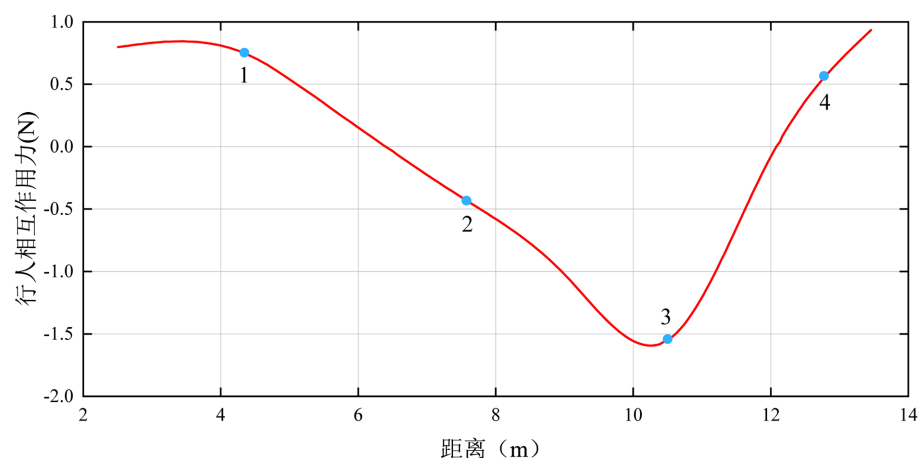


Figure 9. Trend graph of pedestrian interaction force on side A
图9. A侧行人相互作用力趋势图

周围的同向行人以及对向行人对行人的影响力。

本文将行人过街时受到其他行人影响的作用力强度 A 分为三个等级，第一等级为距离特别近的同伴的此时将系数设为 1、第二等级为对向行人的压力按照计算设为 0.85，第三等级为同行的陌生人的压力设为 0.5。以及在二次过街时 AB 侧行人对时间认知度不同，所以统计计算出 A 侧行人过街的平均过街时间为 8~10 s， B 侧为 10~12 s。

在图 9 中我可以看出，在 1 横截面与向行人交叉之前， A 侧行人属于起步状态，人与人之间的距离较小，状态较为稳定此时相互之间的作用力也较为平稳，在 $S1$ 到 $S2$ 时，人群逐渐散开人与人之间的距离拉大，行人与行人之间的相互作用力也开始减小，在 $S2$ 至 $S3$ 时，对向行人使 A 侧行人的行走空间缩小，并且对 A 侧行人有阻力所以合力进一步减小，从 $S3$ 至 $S4$ 对向行人减少， A 侧行人聚集至安全岛，相互作用力逐渐上升。

3.2.3. 边界力

在行人过街时，斑马线附近并无较大障碍物，所以边界力对行人影响不大，根据计算行人流位置靠近斑马线边界线的行人流受边界力影响较大，而靠近中间的行人受到的边界力相对较小，所以根据计算采用定值作为行人二次过街中斑马线的边界力，如图 10 所示。

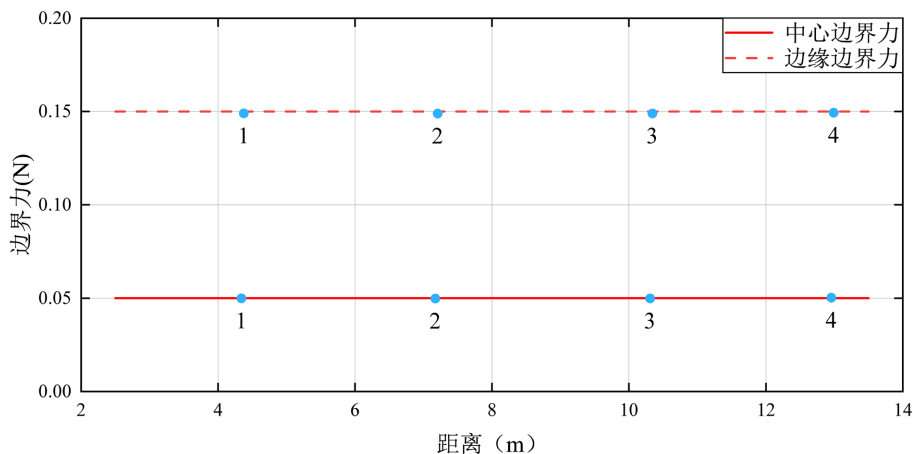


Figure 10. Trend map of boundary force on side A

图 10. A 侧边界力趋势图

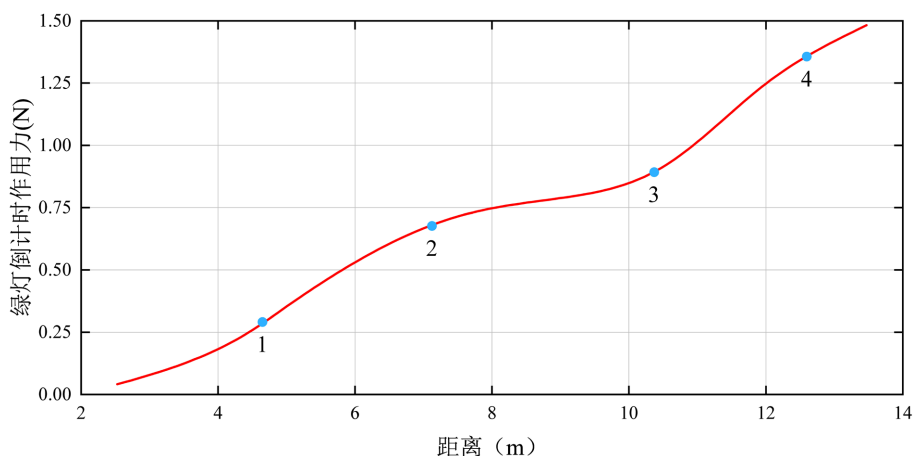


Figure 11. Trend chart of the green countdown force on side A

图 11. A 侧绿灯倒计时作用力趋势图

3.2.4. 信号灯作用力

作为在行人二次过街中，导致行人速度波动变化最大的力是由绿灯倒计时所导致，比如在过街绿灯后期刚开始过街的行人可能会选择跑步前进。而在快要接近安全岛或已经在安全岛内的行人想要一次性通过该路口，尤其是在 A 侧的行人对时间的关注度较大，绿灯倒计时就成了人们后半段加速的主要原因。在 A、B 侧分阶段进行计算并且每个路段的绿灯倒计时力的影响系数的数值不同。A 侧行人对于时间的看重且 A 侧行人在斑马线的前半段对于时间的关注度相比于后半段稍微低一些，在 S3 至 S4 时，绿灯倒计时越来越小且由于信号灯设置的不合理导致行人内心想要过街的心情变得更加焦虑所以力的走向呈上升趋势。如图 11 所示。

3.3. 模型验证

根据实际情况运用动能定理改进后的社会力模型与通过动能定理计算出的实际情况以及原始社会力模型进行量化之后得出如图 12 所示的趋势对比图，可以直观的看出改进后的社会力模型更符合行人二次过街的特性，在前半部分行人处于启动和加速状态，此时主要受自驱力的影响且行人的行走空间较大，所以原模型、改进后的模型与实际情况走向大致相同。随着行人密度的增大导致斑马线开始出现拥挤状况，所以后半部分开始人群到达拥挤状态，行人行走空间减小，到图中最低点时为过街人群最拥挤的状态，然后人群开始消散，并且 A 侧行人受绿灯倒计时的影响步速明显增大。所以图中可以看出，在后半段原模型的趋势与改进后模型、实际情况的走向相差较大，由于改进后的模型考虑了实际绿灯倒计时对行人的影响，所以与实际情况更为接近。但在图中最低点，人群到达最拥挤的状态，此时行人过街处于复杂交通状态，影响行人过街的因素增加，所以此点的原模型数据与改进后的模型数据都与实际情况相差较大。

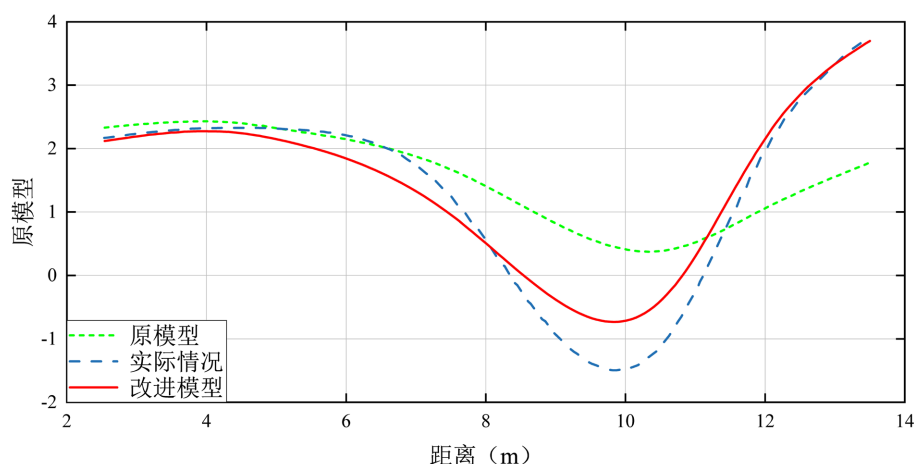


Figure 12. Comparison of the original model, the improved model and the actual data
图 12. 原模型、改进后模型与实际数据的对比图

4. 结论

本研究运用博弈论分析了实际情况下的行人二次过街两侧行人的过街需求，在 A 侧行人过街时对于时间的考虑比重较大且后期绿灯倒计时对其步速和情绪的影响较大，所以根据不同侧行人过街的不同需求，对原始社会力模型进行了改进，在考虑了饱和状态下两侧行人的过街需求以及信号配时不均衡的情况，得出了以下结论：

- 1) 对改进后的社会力的各个分力(自驱力、行人相互作用力以及绿灯倒计时力)进行了量化，将得出

的改进后的模型与原模型和实际情况进行对比验证，结果表明改进后的模型能够更准确地反应行人过街特性。

2) 运用博弈论对流量不均衡的二次过街的行人对时间和速度的关注进行了量化，得出 A 侧行人对时间认知更强烈。

3) 改进后的社会力模型更能准确描述行人二次过街，前半段行走过程中原始社会力、改进后的社会力模型与实际情况下力的走向大致相同，在后半段行走路过程中考虑了绿灯倒计时影响的改进后的社会力模型更符合实际情况。

以上结论在未来为交叉口设置行人二次过街信号和改进行人过街设施设置提供参考。我们通过量化行人二次过街影响因素以及由于实际条件限制，只选取了一个实际路况进行了验证，模型还有很大的空间进行改进，未来我们将研究更多复杂交通状况下的行人过街，为了提高行人通行效率和通行安全，更适用于多种情况下的行人过街。

参考文献

- [1] 陈振起, 陈绍宽, 林琳, 毛保华. 交叉口行人二次过街信号相位设计与仿真研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2007(4): 57-65.
- [2] Helbing, D. and Molnár, P. (1995) Social Force Model for Pedestrian Dynamics. *Physical Review E*, **51**, 4282-4286. <https://doi.org/10.1103/physreve.51.4282>
- [3] Zhao, Y., Lu, T., Su, W., Wu, P., Fu, L. and Li, M. (2019) Quantitative Measurement of Social Repulsive Force in Pedestrian Movements Based on Physiological Responses. *Transportation Research Part B: Methodological*, **130**, 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.10.008>
- [4] 单庆超, 张秀媛, 张朝峰. 社会力模型在行人运动建模中的应用综述[J]. 城市交通, 2011(6): 71-77.
- [5] Wang, P. (2016) Understanding Social-Force Model in Psychological Principles of Collective Behavior. <https://arxiv.org/abs/1605.05146v13>
- [6] Sticco, I.M., Frank, G.A. and Dorso, C.O. (2021) Social Force Model Parameter Testing and Optimization Using a High Stress Real-Life Situation. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **561**, Article ID: 125299. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.125299>
- [7] Jiang, J., Lu, D., Jiang, Y., Lee, Z., Zhang, Y. and Yu, J. (2018) Understanding Environment-Influenced Swarm Behavior from a Social Force Perspective. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **492**, 724-736. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.11.002>
- [8] 李娟, 刘安阳. 基于改进社会力模型的行人过街运动行为研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2017, 15(2): 6-13.
- [9] Zeng, W., Nakamura, H. and Chen, P. (2014) A Modified Social Force Model for Pedestrian Behavior Simulation at Signalized Crosswalks. *Procedia—Social and Behavioral Sciences*, **138**, 521-530. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.07.233>
- [10] Dias, C., Iryo-Asano, M., Nishiuchi, H. and Todoroki, T. (2018) Calibrating a Social Force Based Model for Simulating Personal Mobility Vehicles and Pedestrian Mixed Traffic. *Simulation Modelling Practice and Theory*, **87**, 395-411. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2018.08.002>
- [11] Ma, L., Chen, B., Wang, X., Zhu, Z., Wang, R. and Qiu, X. (2019) The Analysis on the Desired Speed in Social Force Model Using a Data Driven Approach. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **525**, 894-911. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.03.087>
- [12] Zhang, W., Wang, K., Wang, L., Feng, Z. and Du, Y. (2016) Exploring Factors Affecting Pedestrians' Red-Light Running Behaviors at Intersections in China. *Accident Analysis & Prevention*, **96**, 71-78. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.07.038>
- [13] Avinash, C., Jiten, S., Arkatkar, S., Gaurang, J. and Manoranjan, P. (2019) Investigating Effect of Surrounding Factors on Human Behaviour at Un-Controlled Mid-Block Crosswalks in Indian Cities. *Safety Science*, **119**, 174-187. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.11.006>
- [14] Zhang, R., Wei, Z., Gu, H. and Qiu, S. (2021) Behavior Evolution of Multi-Group in the Process of Pedestrian Crossing Based on Evolutionary Game Theory. *Sustainability*, **13**, Article No. 2009. <https://doi.org/10.3390/su13042009>