

# 学区交叉口行人流元胞自动机模型

付连宁, 邹 难\*

(山东大学 控制科学与工程学院, 济南 250061)

**摘 要:** 基于学区交叉口上下学时间段家长和儿童混合行人流过街特性, 利用元胞自动机建立了学区交叉口行人过街模型. 在模型中引入空格参数、方向参数和同向吸引参数, 并综合考虑家长和儿童成对组合过街时的行为规则. 通过仿真研究在双向行人流不平衡, 以及家长和儿童组合比例不同的条件下, 行人流速度—时间、速度—密度、流量—密度的关系, 分析家长和儿童组合对过街行人流的影响. 结果显示, 当行人流中家长和儿童的组合超过一定比例时, 会降低行人流过街的平均速度, 加速行人流的拥堵, 使得系统的临界密度值有所下降, 并对行人流平均速度和流量在临界密度点的变化趋势有一定的影响.

**关键词:** 系统工程; 学区交叉口; 元胞自动机; 家长和儿童; 行人过街

## Cellular Automata Model of Pedestrian Flow at School Intersection

FU Lian-ning, ZOU Nan

(School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** Based on the characteristics of mixed pedestrian flow composed of parents and children crossing street during school time at school intersections, a cellular automaton model for pedestrian's crossing is established. The empty parameter, direction parameter and same direction attracting parameter are introduced in the model, and the crossing behavior rules between parents and children in pairs are also considered. To analyze the effects of parent-child group on crossing pedestrian flow, velocity-time, velocity-density, and flow-density relationships are tested via the simulation, under the condition of unbalanced bidirectional pedestrian flow and different proportion of parent-child group. The results show that the proportion of parent-child group exceed a certain value, the average velocity declines, the pedestrian flow becomes more congested and the critical density value of the system decreases. Besides, the proportion of parent-child group has certain impacts on the change trend of average velocity and flow at critical density point.

**Keywords:** systems engineering; school intersection; cellular automata; parents and children; pedestrian crossing

收稿日期: 2016-10-24

修回日期: 2017-02-25

录用日期: 2017-03-09

**基金项目:** 国家科技支撑计划项目/National Science and Technology Support Plan Project (2014BAG03B04); 山东大学基本科研业务费专项资金项目/The Fundamental Research Funds of Shandong University (2014JC036).

**作者简介:** 付连宁(1986-), 女, 山东青岛人, 博士生.

**\*通信作者:** nanzou@sdu.edu.cn

## 0 引言

近年来,行人交通流的研究引起了越来越多的关注,国内外学者也提出了不同的行人交通流模型,如社会力模型,磁力模型,元胞自动机模型,以及格子气模型等<sup>[1]</sup>.其中元胞自动机模型由于运算规则简单且计算效率高,能够模拟复杂的行人流特征和现象,使其在行人交通流研究领域得到了广泛的应用.Blue等<sup>[2]</sup>先后对单向行人流和双向行人流建立了元胞自动机模型;Burstedde等<sup>[3]</sup>定义了分为动态域和静态域的场域模型;Fang Weifeng等<sup>[4]</sup>在模型中引入了行人的等待行为;Yue Hao等<sup>[5-7]</sup>提出了移动收益和动态参数,并基于行人的右倾习惯引入右倾参数;Feng Shumin等<sup>[8]</sup>基于效益参数、吸引参数和占据参数建立了行人过街模型;任刚等<sup>[9]</sup>在建立行人过街模型时,考虑了行人的结伴行为,分析了结伴行为对过街行人流的影响;陈艳艳等<sup>[10]</sup>提出了异常事件下的行人元胞自动机模型.这些研究虽然考虑了行人在不同方面的特点,但儿童行人作为一个特殊群体,其行为与成人有所不同,对他们在过街行人流中的影响作用关注较少.尤其是在我国特殊的上下学接送模式下,学区交叉口在上下学时间段集中了包括家长和儿童的大量人流,往往引发拥挤和混乱,影响行人过街安全及效率.本文在综合分析家长和儿童组合过街特点的基础上,提出了学区交叉口的行人元胞自动机模型,并通过仿真研究家长和儿童组合对过街行人流的影响.

## 1 模型及演化规则

### 1.1 模型

将学区交叉口行人过街通道离散化为 $W \times L$ 个元胞,每个元胞的尺寸为 $w \cdot w$ .系统中每个元胞都有自己的编号,第 $i$ 个元胞的坐标位置为 $(x_i, y_i)$ , $x_i$ 和 $y_i$ 分别为横坐标和纵坐标.系统中每个元胞可以为空或者被行人占据,但只能由一个行人占据.过街行人流根据移动方向分为上行行人流和下行行人流,上行行人在系统中由下而上移动,下行行人反之.系统中行人可以从上下边界移出后从对向边界再次进入系统,但不能越出左右边界.系统中每个

元胞周围有8个相邻的元胞,从理论上这8个邻居都是中心元胞中的行人下一个可能的目标位置,但根据对上下学时间段学区交叉口行人流的观测,成人和儿童行人基本都不会出现后退行为,因此本文模型中只考虑行人向左、右、正前、左前和右前5个相邻元胞移动,此外行人可以停留在自己所在元胞等待,如图1所示.

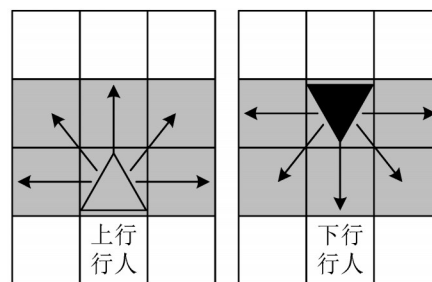


图1 上行及下行行人移动方向

Fig.1 Schematic illustration of pedestrian moving direction

系统中每个元胞只能由一个行人占据,所以行人在移动过程中,只能选择未被其他行人占据的元胞作为下一步的目标位置,或者选择原地等待.因此设置空格参数 $E(x, y)$ 体现空元胞对行人的吸引.如果行人的某相邻元胞为空,那么该元胞对行人具有吸引力, $E(x, y)$ 取值为1;若某相邻元胞已被其他行人占据,则该元胞对行人具有排斥作用, $E(x, y)$ 取值为-1;行人自身所在元胞对行人既不吸引也不排斥, $E(x, y)$ 取值为0.

$$E(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{与行人相邻的空元胞} \\ 0, & \text{行人自身所在元胞} \\ -1, & \text{与行人相邻的非空元胞} \end{cases} \quad (1)$$

如前所述,每个行人在移动过程中有5个潜在移动方向,通过设置方向参数 $D(x, y)$ 来反映每个方向对行人的吸引力的差异.行人在过街时会首先选择沿着目标方向的直线行走,因此行人正前方元胞对其吸引力最大,方向效益值 $D(x, y)$ 取1.行人选择左右平移或原地不动对其向前过街的效率相同,方向效益值 $D(x, y)$ 均为0.行人左前及右前方向的元胞对其吸引力介于正前及平行元胞之间,与正前方元胞相比,到达左前及右前方向元胞的效益值与距离成反比, $D(x, y) = 1/\sqrt{2}$ .

$$D(x,y)=\begin{cases} 1, & \text{正前方的相邻元胞} \\ 0, & \text{平行相邻的元胞或自身元胞} \\ 1/\sqrt{2}, & \text{左前方或右前方的相邻元胞} \end{cases} \quad (2)$$

行人在过街时会根据自己前方行人流情况调整自己的过街行为,通常会跟随与自己同方向的行人流前进,通过设置同向吸引参数 $A(x,y)$ 来反映同向行人的吸引作用.其中 $S_1$ 为视野范围内和中心元胞行人方向相同的行人数量与空元胞数量之和, $S_2$ 为视野范围内和中心元胞行人方向相反的行人数量.

$$A(x,y)=\frac{S_1-S_2}{\Delta x \cdot \Delta y} \quad (3)$$

$$\Delta x=\begin{cases} 3, & x_{\max}-x \geq 3 \text{ 且 } x > 3 \\ 2, & x_{\max}-x < 3 \text{ 或 } x < 3 \end{cases} \quad (4)$$

$$\Delta y=\begin{cases} 5, & y_{\max}-y \geq 5 \text{ 且 } y > 5 \\ y_{\max}-y, & y_{\max}-y < 5 \\ y, & y < 5 \end{cases} \quad (5)$$

仿真过程中行人的速度和时间被离散,每个时间步内,行人都会计算每个潜在的目标位置的效益值,即空格参数、方向参数和同向吸引参数之和,并且选择效益值最大的元胞作为下一步的移动目标.因此,每个行人在 $t+1$ 时刻的位置取决于 $t$ 时刻该行人所处元胞的位置及邻域内其他元胞的状态.

## 1.2 演化规则

通过对学区交叉口行人过街的观察发现,在学区交叉口的行人流中,家长和儿童主要是以组合的形式成对出现.家长带领儿童过街时,通常会让孩子在自己的左侧或右侧,与自己保持平行,当行人流较大时,家长和儿童可能会与其他行人发生交织,导致两人的位置发生变化,但彼此仍然会保持在一定的距离内.儿童在过街过程中主要是跟随家长而移动,因此组合中家长和儿童在移动中的位置选择除了比较相邻元胞的情况,还要考虑彼此的相互制约.

本文采用同步并行更新算法,其中个体行人,以及组合中家长遵循如下更新规则:

(1) 行人每个时间步只能移动一个元胞的位置,且选择效益值最大的邻域元胞作为目标位置.

若通过计算获得多个具有最大效益值的元胞,则等概率随机选择其中一个元胞作为目标位置.

(2) 若某一个元胞同时被多个行人选中作为下一步的目标位置,则等概率随机选取其中一个行人占据,其他行人保持位置不变.

(3) 若两个方向相反的个体行人发生正面冲突,且两个人同时将对方位置作为下一步的目标位置,则两个人彼此交换位置.由于家长在移动过程中要保证与儿童相邻,所以家长在与其他行人发生正面冲突时,不与其交换位置.

过街行人流中家长和儿童组合的更新规则如下:

(1) 模型初始化时,家长和儿童组合的位置是两个相邻平行的元胞.

(2) 在移动过程中儿童和家长不能分离,两者之间的距离不能超过 $\sqrt{2}w$ .

(3) 儿童和家长在移动过程中尽可能维持在平行相邻的位置,儿童行进方向优先与家长行进方向相同.

(4) 如果在 $t$ 时刻没有处于平行相邻位置的儿童和家长,通过计算下一步也不能达成,则两者均保持原有位置不变.

(5) 若不能满足规则(3)和(4),当家长与儿童之间距离 $\leq \sqrt{2}w$ 时,儿童优先与家长水平同方向移动;无法移动,则儿童保持不动;当家长与儿童之间距离 $> \sqrt{2}w$ 时,儿童移至组合中家长所在元胞.

儿童从 $t$ 到 $t+1$ 时刻的位置更新根据家长 $t$ 到 $t+1$ 时刻移动和没有移动两种情况分别进行考虑.

(1) 家长 $t$ 到 $t+1$ 时刻没有移动,即 $(x_p', y_p') = (x_p, y_p)$

若 $d=w$ ,且 $y_c=y_p$ ,则 $(x_c', y_c') = (x_c, y_c)$ ;

若 $d=w$ ,且 $x_c=x_p$ ,则

$$(x_c', y_c') = \begin{cases} (x_p+1, y_p), & \text{若 } E(x_p+1, y_p)=0, E(x_p-1, y_p)=1 \\ (x_p-1, y_p), & \text{若 } E(x_p-1, y_p)=0, E(x_p+1, y_p)=1 \\ (x_p+\delta, y_p), & \text{若 } E(x_p+\delta, y_p)=0 \\ (x_c, y_c), & \text{若 } E(x_p+\delta, y_p)=1 \end{cases} \quad (6)$$

若 $d=\sqrt{2}w$ ,则

$$(x'_c, y'_c) = \begin{cases} (x_c, y_p), & E(x_c, y_p) = 0 \\ (x_c, y_c), & E(x_c, y_p) = 1 \end{cases} \quad (7)$$

(2) 家长  $t$  到  $t+1$  时刻位置移动了, 即  $(x'_p, y'_p) \neq (x_p, y_p)$

若  $d = w$ , 则

$$(x'_c, y'_c) = \begin{cases} (2x_c - x_p, y_c + 1), & E(2x_c - x_p, y_c + 1) = 0 \\ (x_p, y_p), & E(2x_c - x_p, y_c + 1) = 1, \\ & y_p = y_c + 1 \\ (x_p, y_p + 1), & E(x_p, y_p + 1) = 0, y_p = y_c \\ (2x_c - x_p, y_c), & E(2x_c - x_p, y_c) = 0 \\ (x_c, y_c), & E(2x_c - x_p, y_c) = 1 \end{cases} \quad (8)$$

若  $d = \sqrt{2}w$ , 则

$$(x'_c, y'_c) = \begin{cases} (x_c, y_c + 1), & E(x_c, y_c + 1) = 0 \\ (x_p, y_p), & E(x_c, y_c + 1) = 1, \\ & x_p = x_c, y_p = y_c + 1 \\ (x_c, y_c), & E(x_c, y_c + 1) = 1, \\ & x_p = x_c \pm 1, y_p = y_c \end{cases} \quad (9)$$

若  $d > \sqrt{2}w$ , 则  $(x'_c, y'_c) = (x_p, y_p)$

其中  $(x_p, y_p)$  和  $(x'_p, y'_p)$  分别是家长在  $t$  时刻和  $t+1$  时刻的位置坐标;  $(x_c, y_c)$  和  $(x'_c, y'_c)$  分别是儿童在  $t$  时刻和  $t+1$  时刻的位置坐标;  $d = \sqrt{(x_p - x_c)^2 + (y_p - y_c)^2}$  表示家长与儿童之间的距离;  $\delta = 2 \cdot \text{round}(r) - 1$ ,  $r$  是  $0 \sim 1$  之间的一个随机数,  $\text{round}(r)$  表示四舍五入取整。

## 2 仿真及结果分析

本研究在模拟学区交叉口行人流过街情况时, 首先设系统宽度  $W=30$ , 长度  $L=40$ , 系统总人数为 480 人。在上下学时间段, 由于家长接送孩子上下学的情况比较普遍(主要针对小学生), 使得学区交叉口在较短时间内聚集大量的家长和儿童的行人流, 且这部分行人流具有单方向性, 导致上行和下行两个方向的行人流不均衡, 因此在仿真时设上行和下行行人数量  $N_1/N_2 = 7/3$ 。此外, 考虑到家长和儿童的组合主要在单方向的行人流中出现, 仿真过程中只在上行行人流中加入家长和儿童的组合形式。行人流中组合的比例  $n_g$  是指占行人总数量  $N_1 + N_2$  的比例。行人流的流量  $Q$  为单位时间步内上

行行人通过上边界和下行行人通过下边界的行人数量之和; 行人流密度为行人总量与系统元胞数量之比,  $K = \frac{N_1 + N_2}{W \cdot L}$ ; 平均速度为单位时间内移动

行人数量与行人总量之比,  $V = \frac{N_{1m} + N_{2m}}{N_1 + N_2}$ , 其中,  $N_{1m}$

和  $N_{2m}$  分别指单位时间步内上行和下行行人流中移动行人的数量。

仿真结果显示, 系统中组合比例  $n_g$  不同, 行人流在不同时间的分布情况有所差异。当行人流中没有家长和儿童的组合时, 不同方向的行人流在较短时间内就会各自形成清晰的自组织通道, 而不会发生拥堵, 见图 2(a), 图 2(b); 当行人流中出现少量的家长和儿童组合时 ( $n_g = 0.1, 0.2$ ), 行人依然可以形成一定的通道, 但随着家长和儿童组合比例的增加, 通道的条数相对变少, 如图 2(c)~图 2(f) 所示; 随着行人流中家长和儿童组合的继续增加 ( $n_g = 0.3, 0.4$ ), 行人流会逐渐出现拥堵区域, 且发生拥堵的时间随着组合比例的增加而减少, 如图 2(g)~图 2(j) 所示; 当行人流中家长和儿童组合的比例  $n_g$  达到 0.5 时, 行人流在短时间就会发生局部拥堵, 并会逐步出现多个拥堵区域, 如图 2(k), 图 2(l) 所示。

不同家长和儿童组合比例, 行人流平均速度随时间的变化情况如图 3 所示。可以看出, 当行人流中家长和儿童组合比例较低时 ( $n_g \leq 0.2$ ), 行人流平均速度随时间的变化并不大, 这是因为行人在行进过程中会逐渐自发的形成一定的通道, 每个通道内只有同方向的行人, 不会发生拥堵, 且平均速度会逐渐趋于 1。当  $n_g = 0.25$  时, 行人流平均速度在  $t=200$  时开始逐渐下降,  $t > 600$  后趋于稳定。当  $n_g > 0.25$  时, 平均速度在  $t=200$  时急剧下降, 且下降幅度随  $n_g$  的增大而增大, 说明行人流中家长和儿童组合的增加会降低平均速度。由于家长带领儿童过街时, 家长会尽量牵着儿童, 儿童也会尽可能的跟随大人, 在空间上两者要维持在一定的距离内, 相互依赖和牵制, 因此移动速度相对个体行人要慢, 从而使得整体的平均速度有所下降。



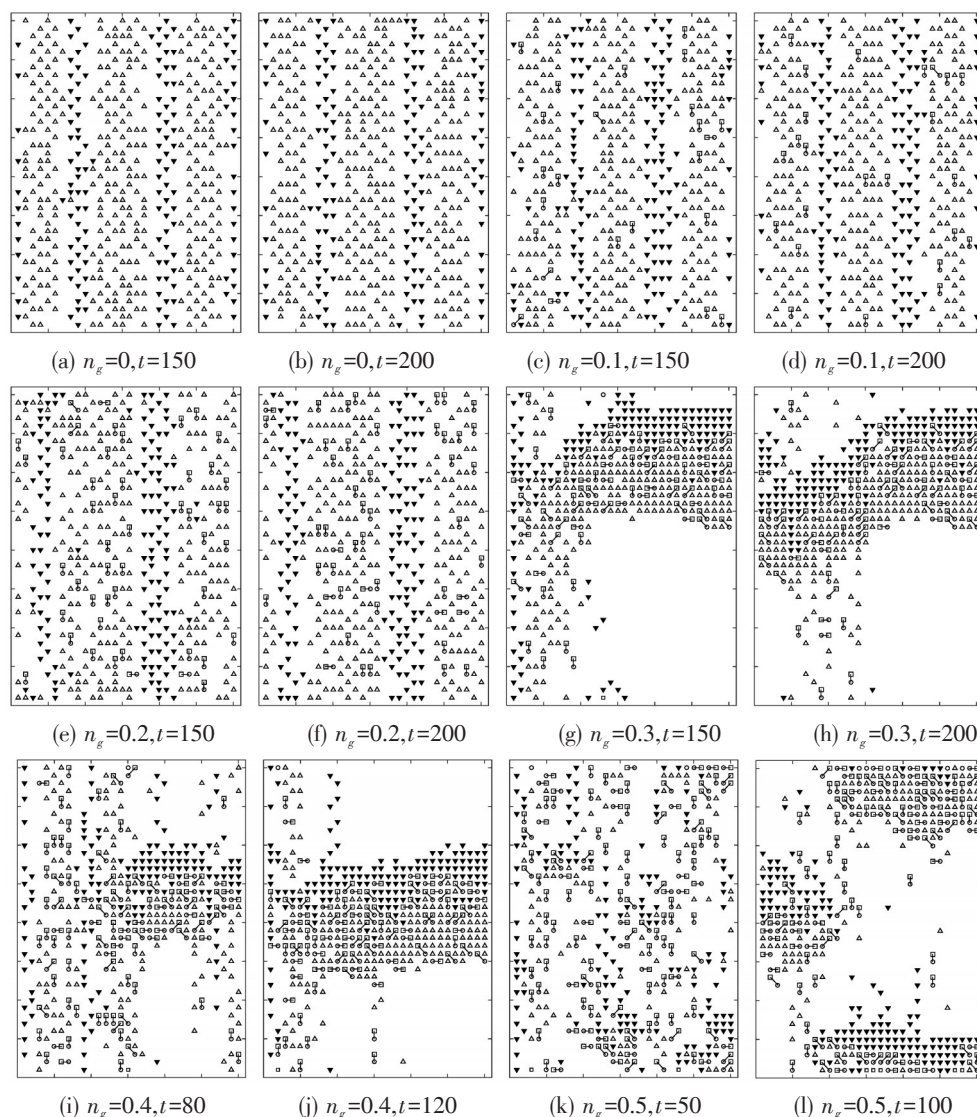


图2 家长—儿童组合比例不同,系统在不同时刻的行人流空间分布

Fig. 2 The spatial distribution of pedestrian flow at different time steps with different proportion of parent-child group

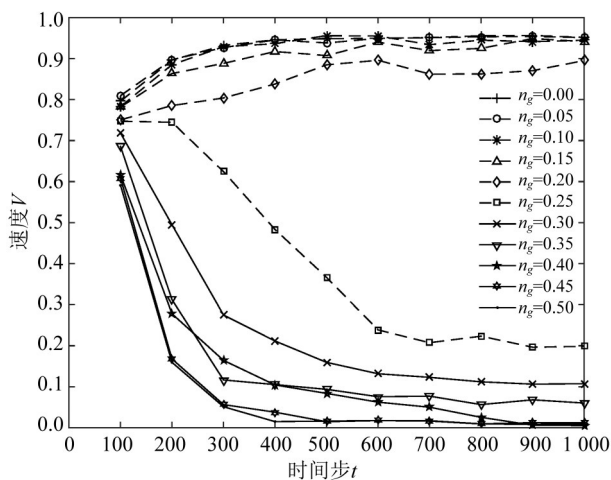


图3 不同家长和儿童组合比例下行人速度随时间的变化曲线

Fig. 3 Variation of average velocity at time steps with different proportion of parent-child group

从图4所示的行人流速度—密度曲线,以及流量—密度曲线可以看出,无论行人流中是否有家长和儿童组合存在,系统都存在临界密度.当行人流密度小于临界密度时,行人流处于自由流状态,平均速度保持不变,行人流量随密度的增加而逐渐增加.在临界密度点,行人流量达到最大值,行人平均速度开始下降,但行人流中家长和儿童组合比例不同,平均速度下降幅度有所差异.当 $n_g=0$ , 0.05时,平均速度和流量从临界密度处开始缓慢下降;当 $n_g=0.1\sim 0.2$ 时,平均速度和流量下降幅度变大;当 $n_g\geq 0.25$ 时,不仅系统的临界密度值有所下降,而且平均速度和流量都在临界密度点急剧下降.进一步说明行人流中家长和儿童组合的加入会

降低行人流平均速度,加剧过街行人流的拥堵。

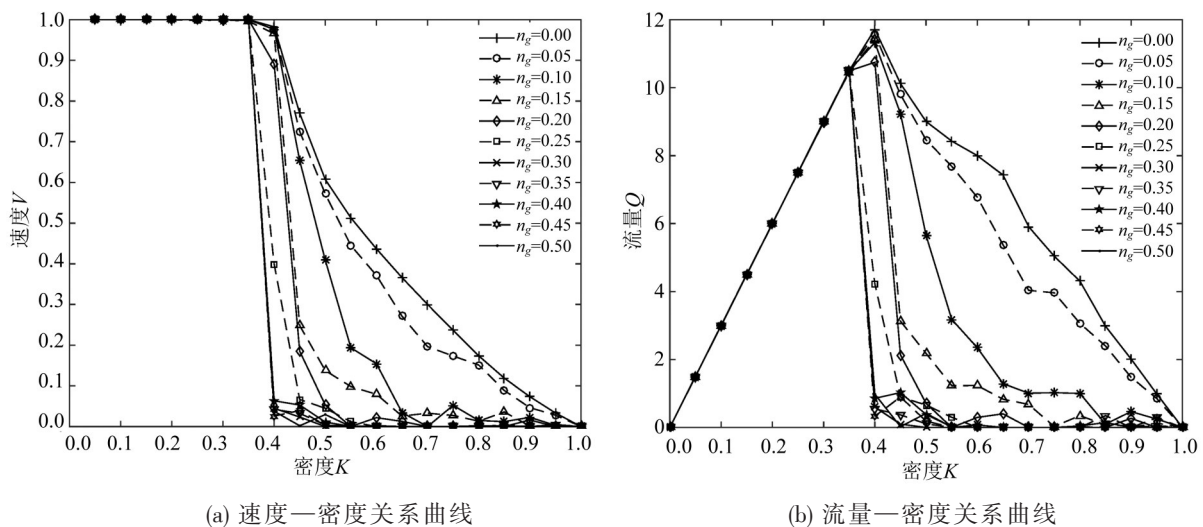


图4 不同家长和孩子组合比例下行人流速度—密度、流量—密度曲线

Fig. 4 Velocity-density curve and flow-density curve with different proportion of parent-child group

### 3 实例分析

本实例是以济南市甸柳第一小学附近的交叉口(和平路—甸新东路)放学时间段行人过街的调查结果为基础,将仿真结果与实际结果进行对比分析.相关研究指出中国行人平均宽度为 $0.426\text{ m}^{[8]}$ ,人在拥挤状态下所占空间一般为 $0.4\text{ m}\times 0.4\text{ m}^{[3]}$ ,本文研究对象以儿童为主,所以模型中设置每个元胞空间尺寸为 $0.4\text{ m}\times 0.4\text{ m}$ .和平路—甸新东路交叉口南北方向人行横道长 $22\text{ m}$ ,宽 $5\text{ m}$ ,因此系统宽度 $W=12$ ,长度 $L=55$ .通过对甸柳第一小学交叉口放学高峰期过街行人流量的统计确定系统行人流密度 $K=0.2$ ,家长—儿童组合的比例 $n_g=0.15$ ,上行和下行行人数量比 $N_1/N_2=4/1$ ,将对应参数输入系统模型进行仿真得出结果与实际调查结果对比如表1所示.仿真行人流平均速度为 $1.2\text{ m/s}$ ,实际统计和平路—甸新东路交叉口行人过街平均速度为 $1.15\text{ m/s}$ ,误差率为 $4.35\%$ ;仿真行人平均流量为 $7.23\text{ 人/s}$ ,实际统计平均值为 $6.80\text{ 人/s}$ ,误差为 $6.32\%$ .可以认为本模型客观反映了行人密度较小时学区交叉口行人过街的规律,但下一步仍需通过实际观测或实验方法对较大行人密度下学区交叉口行人流过街进行分析,并获取更多儿童行人过街行为特征,从而对模型做进一步改进.

表1 仿真结果与实际调查结果对比

Table 1 Comparison between simulation results and survey results

	仿真平均值	实际统计平均值	误差
行人平均速度	$1.20\text{ m/s}$	$1.15\text{ m/s}$	$4.35\%$
行人平均流量	$7.23\text{ 人/m}$	$6.80\text{ 人/m}$	$6.32\%$

### 4 结论

本文采用元胞自动机模型对学区交叉口过街行人流进行研究,考虑家长和孩子过街的行为规则,分析家长和孩子组合过街对行人流的影响.通过模型仿真得到在双向行人流不均衡、家长和孩子组合比例不同的情况下,行人流速度随时间的变化曲线,以及速度—密度、流量—密度的关系曲线,并详细观测了不同家长和孩子组合比例、不同时间段行人流的状态.研究表明:

- (1) 随着行人流中家长和孩子组合比例的增加,行人流会逐渐出现拥堵现象,且组合的比例越高,出现拥堵的时间就越快,拥堵点越多.
- (2) 行人流平均速度—时间关系曲线显示,当家长和孩子组合超过一定比例会导致行人流平均速度有所下降.
- (3) 行人流中家长和孩子组合的比例影响系统临界密度值,以及平均速度、流量在临界密度点的

变化趋势.当行人流中组合比例超过一定值时,系统临界密度值有所下降,且组合比例越大,平均速度和流量在临界密度点的下降幅度越大.

#### 参考文献:

- [1] 胡明伟, 史其信. 行人交通仿真模型与相关软件的对比分析[J]. 交通信息与安全, 2009, 27(4): 122-127. [HU M W, SHI Q X. Comparative study of pedestrian simulation model and related software[J]. Journal of Transportation Information and Safety, 2009, 27(4): 122-127.]
- [2] BLUE V J, ADLER J L. Cellular automata microsimulation for modeling bi-directional pedestrian walkways[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2001, 35(3): 293-312.
- [3] BURSTEDDE C, KLAUCK K, SCHADSCHNEIDER A, et al. Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2001, 295(3): 507-525.
- [4] FANG W F, YANG L Z, FAN W C. Simulation of bi-direction pedestrian movement using a cellular automata model[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2003, 321(3-4): 633-640.
- [5] YUE H, HAO H, CHEN X, et al. Simulation of pedestrian flow on square lattice based on cellular automata model[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2007, 384(2): 567-588.
- [6] 岳昊, 邵春福, 陈晓明, 等. 基于元胞自动机的对向行人交通流仿真研究[J]. 物理学报, 2007, 57(11): 6901-6908. [YUE H, SHAO C F, CHEN X M, et al. Simulation of bi-directional pedestrian flow based on cellular automata model[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 57(11): 6901-6908.]
- [7] YUE H, GUAN H, ZHANG J, et al. Study on bi-direction pedestrian flow using cellular automata simulation[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2010, 389(3): 527-539.
- [8] FENG S M, DING N, CHEN T, et al. Simulation of pedestrian flow based on cellular automata: A case of pedestrian crossing street at section in China[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2013, 392(13): 2847-2859.
- [9] 任刚, 丁晨滋, 陆丽丽, 等. 基于元胞自动机的结伴过街行人流建模与仿真[J]. 交通运输系统工程与信息, 2014, 14(2): 45-50. [REN G, DING C Z, LU L L, et al. Model and simulation of group pedestrian flow on a crosswalk based on cellular automaton[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2014, 14(2): 45-50.]
- [10] 陈艳艳, 陈宁, 王杨, 等. 一种考虑吸引型异常事件的行人元胞自动机模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(3): 56-63. [CHEN Y Y, CHEN N, WANG Y, et al. A cellular automata model considering attractive incidents[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(3): 56-63.]