

基于元胞自动机和复杂网络理论的双向行人流建模*

任刚 陆丽丽[†] 王炜

(东南大学交通学院, 江苏省交通规划与管理重点实验室, 南京 210096)

(2011年9月9日收到; 2011年12月12日收到修改稿)

通过设计行人行走倾向性调查实验, 分析了行人的行走倾向性特征. 引入前进系数、右倾系数、超越系数以及影响修正系数等对元胞自动机 (CA) 基本模型中的转移概率进行修正, 建立了考虑行人行走倾向性特征的 CA 行人仿真模型. 针对该模型中的行人群体, 依据 k -近邻作用原理, 构建行人复杂网络. 通过计算机仿真, 揭示了行人流密度、速度和流量的关系以及仿真过程中出现的自组织现象. 进一步分析仿真输出的行人流基本参数和行人复杂网络主要特征参数, 发现对同一行人流, 其平均速度和网络平均路径长度均随着行人流状态的改变而变化. 最后, 通过平均路径长度和平均速度的数据拟合, 得出两者之间存在着线性负相关关系的结论, 即具有较小网络平均路径长度的行人流具有较高的平均速度.

关键词: 行走倾向性, 元胞自动机, 复杂网络, 双向行人流

PACS: 45.70.Vn, 89.40.-a

1 引言

行人行为的复杂性、随机性使得行人交通流的研究较机动车流复杂, 这也促使越来越多的研究者借助于物理、计算机手段来研究行人交通流^[1-3]. 元胞自动机 (CA) 是近年来涌现出的一个描述复杂行为包括行人行为的仿真工具, 它通过演化规则模仿行人个体的行为, 并通过微观行为之间的相互作用产生宏观的集计行为.

许多研究者通过考虑行人的不同行为特性, 建立了各种 CA 模型对行人流进行仿真^[4-14]. 如文献 [5] 提出了考虑行人向前运动倾向的模型; 文献 [7, 8] 建立了考虑行人倾向于向右行走特性的 CA 模型; 文献 [12] 讨论了行人下一步行走可能会遇到的所有情况, 并计算出各种情况下的选择概率; 文献 [13] 提出了基于 k -近邻相互作用的 CA 模型, 考虑 k -近邻作用下的行人行走方向选择.

上述很多模型其本质是在探讨行人下一步向邻域中的单元格移动的概率, 即转移概率. 行人的

转移概率既体现了行人运动特征, 又对行人流自组织现象的出现起着重要作用 (如分层现象是行人在运动过程中选择向左和向右选择概率的不同造成的^[15]). 因此, 转移概率是应用 CA 进行行人仿真的关键参数. 但上述文献中转移概率的确定往往是基于一定的假设或理论, 如 Blue 等^[6]认为行人在变道时选择相邻两条道的概率各为 0.5. 岳昊等^[7]则考虑中国行人右倾性的特点, 引入了右倾系数, 并讨论了系数取不同值时的仿真情况. 复杂网络是近年来研究复杂系统的重要工具之一, 已广泛应用于交通^[16-19]、医学、社会学等领域. 其核心思想在于通过探讨微观个体的活动以及微观个体的相互作用来把握丰富的整体行为并进一步揭示整个系统宏观现象的形成机理, 也就是说复杂网络是架构在微观个体作用与宏观整体现象关系研究的一座桥梁. 现有的一些行人仿真模型往往侧重于探讨行人流宏观参数的关系以及行人流演化过程中出现的自组织现象, 如分层、成带以及拥堵等, 但缺少对现象形成机理的阐释. 当然, 也有定性的研究指出行人流的自组织现象是由行人间的非线性相互

* 国家科技支撑计划 (批准号: 2009BAG13A05) 和国家自然科学基金 (批准号: 51078086) 资助的课题.

[†] E-mail: lulili_seu@sohu.com

作用引起的^[20]. 而要定量研究行人个体间通过相互作用演化到整体特性的机制需要借助于复杂网络理论这一有力的研究工具. 总之, 应用复杂网络理论研究行人流可以考虑行人个体这一复杂系统中微观个体的复杂作用关系以及宏观复杂现象并最终揭示系统的演化机制、演化规律和整体行为.

本文针对以上行人模型研究的不足, 提出了一种通过调查方法确定模型参数以量化行人行走倾向性特征的 CA 模型, 得到了该模型下的行人流密度、速度以及流量间的关系以及模型仿真过程中出现的自组织现象; 针对模型中的行人个体, 依据 k -近邻原理进行行人复杂网络建模, 探究网络结构特征参数与行人流宏观参数间的关系, 以揭示行人流复杂系统中的内在规律.

2 行走倾向性特征

行人在行走过程中会表现出一定的倾向性, 如中国行人倾向于向右行走, 日本行人习惯于向左行走^[8]. 正是由于行走倾向性的存在, 行人在选择向各个方向行走时的概率并非如基本模型中假定是

均等的. 考虑到这一点, 本文基于控制实验和对比实验的思想, 设计了行人行走倾向性调查实验, 量化人群在行走时的倾向性分布情况, 确定模型中转移概率分布, 从而使模型能更准确地模拟行人群体的行走特性. 同时, 为了反映行人在行走时除了有前行、变换邻道、原地等待等行为, 还有超越其他行人的行为 (不考虑后退行为), 将 CA 模型的邻域从基本模型的 3 个扩展为 5 个, 如图 1 所示.

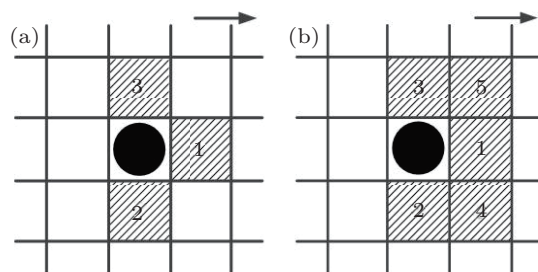


图 1 CA 模型邻域 (a) 基本模型的元胞邻域; (b) 改进模型的元胞邻域

在调查实验中, 考虑行人下一步可到达的位置选择, 共设定了如图 2 所示的 6 种情景, 图中黑色圆圈代表行人本身, 灰色圆圈代表其他行人, 行人只能选择到达有数字标示的位置.

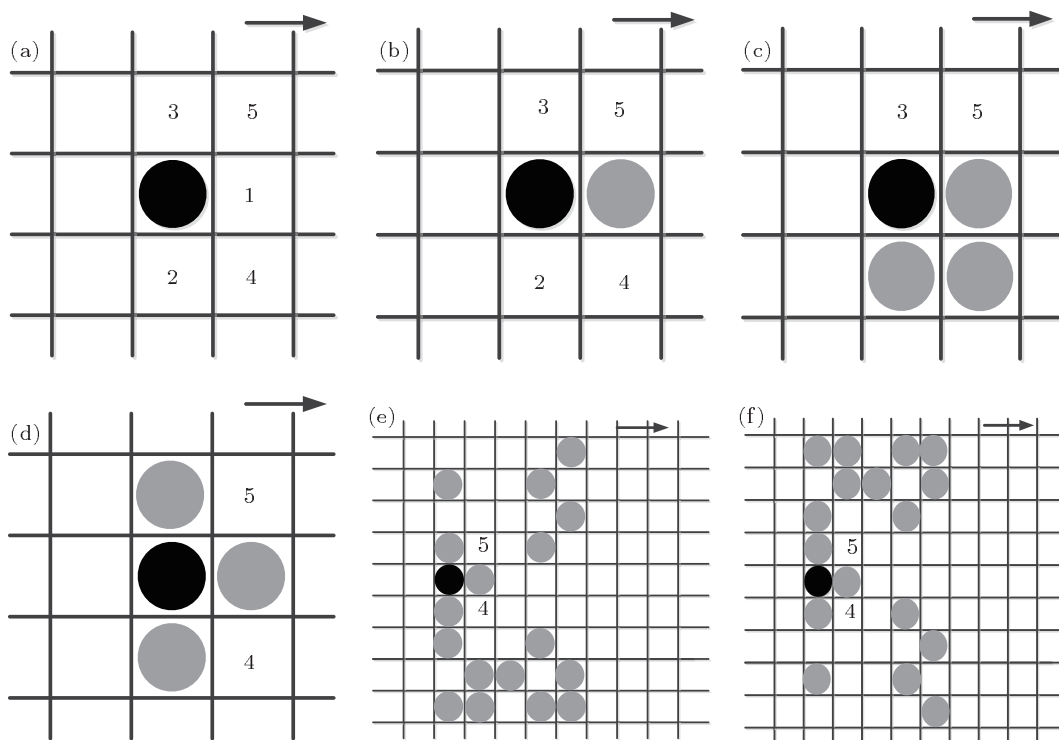


图 2 调查所设的 6 个情景 (a) 判断行人最倾向于往哪行走; (b) 比较行人倾向于靠右还是靠左行走; (c) 比较行人是否有超越其他行人的倾向性; (d) 比较行人倾向于靠右还是靠左行走; (e), (f) 与情景 (d) 形成对比实验, 判断行人左行和右行倾向性是否受左右两侧其他行人数量多少的影响

将 6 个情景设计成问卷形式,对南京市各主要道路交叉口、火车站及汽车站的行人展开问卷调查,共回收有效问卷 792 份,问卷初步统计结果如表 1 所示.

表 1 问卷调查统计结果(单位:%)

	1- 前面	2- 右侧	3- 左侧	4- 右前侧	5- 左前侧
(a)	67.4	12.1	9.8	5.3	5.3
(b)	-	37.6	26.9	23.9	11.7
(c)	-	-	56.8	-	43.2
(d)	-	-	-	61.5	38.5
(e)	-	-	-	22.9	77.1
(f)	-	-	-	86.3	13.7

调查结果表明:行人在行走时具有强烈的朝目的地方向行走的倾向性,在 (a) 情景下 1—5 均未被其他行人占有时,67.4%的行人仍然选择了向前行走;在 (b) 与 (d) 两种情况时,选择靠右行走的人数均约为选择靠左行走的 1.6 倍.这一结果表明,在中国行人人群中并不是所有的行人都有右倾性,但右倾性的人数所占比例较大.同时,行人的行走倾向性易受其左右两侧行人数量分布的影响,也就是说行人固有的倾向性容易因周围其他行人分布情况而改变,这可以在 (d) 与 (e), (f) 的结果对比中看出:当行人右侧的其他行人数量较左侧的多时,倾向于靠右行走的行人百分比从 61.5%减少到 22.9%;相反地,右侧人数少于左侧时,86.3%的行人表现为右行倾向性.

3 模型建立

3.1 考虑行走倾向性特征的 CA 模型

行走倾向性特征的综合作用决定了行人向不同方向运动的转移概率分布.本文通过引入前进系数、右倾系数、超越系数和影响修正系数对 CA 基本模型中的转移概率进行修正.

首先,模型被定义在一个包含 $W \times L$ 个正方形元胞的通道中. W 表示通道宽度上的元胞数目, L 表示通道长度上的元胞数目.每个元胞在每个时间步至多只能被一个行人占有.同时,针对典型中国人,每个元胞取 $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ 来表示单个行人的占地面积.通道的上、下、左、右四个边界中,上下边界封闭,即行人不能穿越;左右边界循环连通,即右行行人到右边界后可以从左边界重新进入通道

中;同理,左行行人到左边界后可以从右边界再次进入通道.假定所有行人均无后退行为.

在每个时间步内,行人可以以一定的概率移动到邻近的 5 个元胞中的其中 1 个(如图 3 所示).若 5 个邻近元胞都被其他行人占据,则行人只能选择在原地等待.

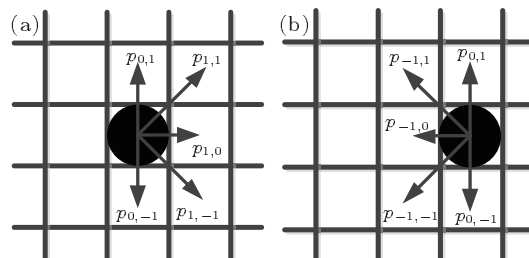


图 3 行人的转移概率示意图 (a) 右行行人; (b) 左行行人; 图中选择概率 p 下标表示邻近元胞与行人所在元胞的相对位置关系

不考虑行走倾向性特征时,首先设定行人下一步到达邻域中每个单元格的初始概率为 p_0 , 则

$$p_0 = \begin{cases} 0 & \text{如果该元胞被占据} \\ \frac{1}{n} & \text{如果该元胞为空} \end{cases}, \quad (1)$$

式中, n 表示邻域中空的元胞数.

在考虑倾向性特征的基础上,各个单元格的转移概率分别为(以右行行人为例,左行行人计算方法类同)

$$\begin{cases} p_{1,0} = f * p_0, \\ p_{0,-1} = r * p_0, \\ p_{1,-1} = s * r * p_0, \\ p_{1,1} = s * p_0, \\ p_{0,1} = p_0, \end{cases} \quad (2)$$

式中,前进系数 $f = \frac{N_{a1}}{N_{a3}}$, 右倾系数 $r = \left(\frac{N_{b2} + N_{b4}}{N_{b3} + N_{b5}} + \frac{N_{d4}}{N_{d5}} \right) / 2$, 超越系数 $s = \frac{N_{c5}}{N_{c3}}$. N_{a1} 表示在 (a) 情景下选择到达位置 1 的行人百分比, N_{a3}, N_{b2}, N_{b3} 等的意义与 N_{a1} 类同.

考虑行人左右两侧其他行人数量分布对行人倾向性的影响,也就是行人固有的倾向于靠右行走或靠左行走的习惯被弱化时,采用影响修正系数对转移概率进行修正.左右两侧其他行人数量分别是指在给定的行人左视野域和右视野域内的行人数量.视野范围定义如图 4 所示 (M 表示视野长度上的

元胞个数)^[13].

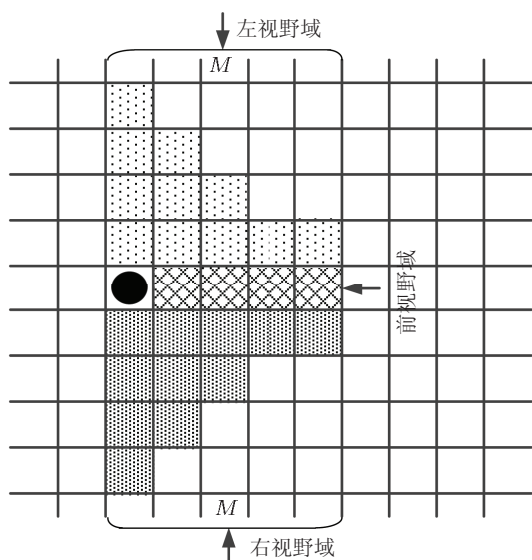


图4 行人视野范围示意图 $M = 5$

当右侧行人数量多于左侧行人数量时,修正系数为 c_r, c_l , 则

$$\begin{cases} p_{0,-1} = c_r * r * p_0, \\ p_{1,-1} = c_r * s * r * p_0, \\ p_{1,1} = c_l * s * p_0, \\ p_{0,1} = c_l * p, \end{cases} \quad (3)$$

$c_r = \frac{N_{e_4}}{N_{d_4}}, c_l = \frac{N_{e_5}}{N_{d_5}}$. 式中, $N_{e_4}, N_{d_4}, N_{e_5}, N_{d_5}$ 的意义与 N_{a_1} 类同.

当左侧行人数量多于右侧行人数量时,修正系数为 c'_r, c'_l , 则

$$\begin{cases} p_{0,-1} = c'_r * r * p_0, \\ p_{1,-1} = c'_r * s * r * p_0, \\ p_{1,1} = c'_l * s * p_0, \\ p_{0,1} = c'_l * p_0, \end{cases} \quad (4)$$

$c'_r = \frac{N_{f_4}}{N_{d_4}}, c'_l = \frac{N_{f_5}}{N_{d_5}}$. 式中, N_{f_4}, N_{f_5} 的意义与 N_{a_1} 类同.

将选择概率进行归一化处理:

$$\begin{cases} p'_{1,0} = \frac{p_{1,0}}{\sum_{i \geq 0, |j| \leq 1} p_{i,j}}, \\ p'_{0,-1} = \frac{p_{0,-1}}{\sum_{i \geq 0, |j| \leq 1} p_{i,j}}, \\ p'_{1,-1} = \frac{p_{1,-1}}{\sum_{i \geq 0, |j| \leq 1} p_{i,j}}, \\ p'_{1,1} = \frac{p_{1,1}}{\sum_{i \geq 0, |j| \leq 1} p_{i,j}}, \\ p'_{0,1} = \frac{p_{0,1}}{\sum_{i \geq 0, |j| \leq 1} p_{i,j}}. \end{cases} \quad (5)$$

模型中的系数根据调查数据和公式计算如表 2.

表 2 模型各系数列表

前倾系数 f	6.87
右倾系数 r	1.60
超越系数 s	0.76
影响修正系数 c	右侧人数大于左侧人数 $c_r = 0.37$ $c_l = 2.00$ 左侧人数大于右侧人数 $c'_r = 1.40$ $c'_l = 0.36$

3.2 行人复杂网络构建

行人在行走过程中会与周围的行人发生相互作用,这一点从调查中行人选择下一步到达的位置受周围其他行人分布的影响可以看出来.行人个体间的相互作用综合表现为行人流的整体状态,也是行人流发生自组织现象的根本原因.但行人间的相互作用关系难以捕捉,同时这种相互作用关系随着行人的行走过程时刻发生变化.因此,对于真实的行人流,要确定行人复杂网络难度很大.本文应用 k -近邻作用原理,认为每个行人个体在决定其自身的运动行为时受距其最近的 6 个其他个体影响,而不是与其一定距离范围内的所有个体发生相互作用^[21],简化确定行人个体之间的相互作用关系.当行人视野范围内的行人数量多于或等于 6 个时,认为行人与距其物理距离最小的其中 6 个行人存在相互作用关系,如图 5(a) 所示;当视野范围的行人数量不足 6 个时,则认为其与所有行人有相互作用,如图 5(b) 所示.

以考虑倾向性特征的改进 CA 仿真模型为基础,将上述模型中的行人作为网络节点,在行人与按 k -近邻原理确定的有相互作用关系的其他行人间建立边,根据行人与其对向行人间作用的相互性

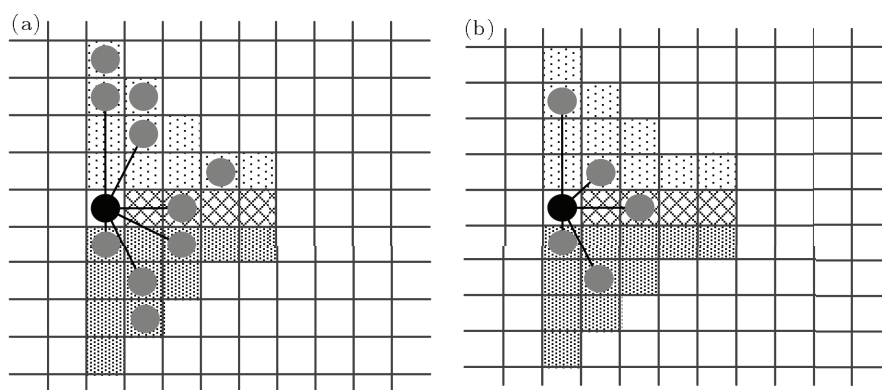


图5 行人近邻确定方法示意图 (a) 视野内的行人多于6人; (b) 视野内的行人少于6人

以及 k -近邻原理的要求, 假定边的性质为双向边. 节点和边共同构成了行人复杂网络, 如图6所示.

通过改变模型仿真参数和控制仿真进程可以获取各种行人流下的行人复杂网络相关的数据, 包括网络结构特征参数等. 表现网络结构特征的3个主要参数为网络平均路径长度、度分布和聚集系数.

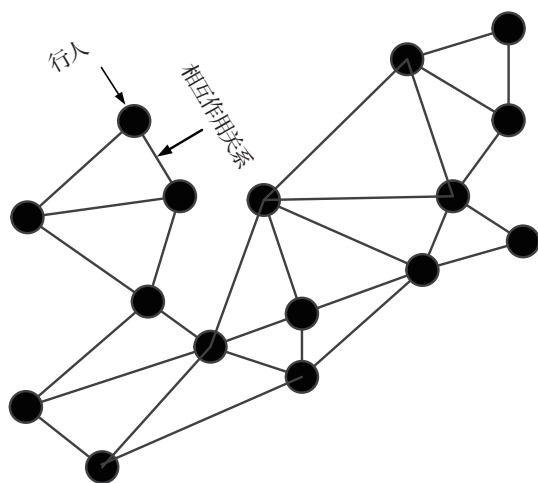


图6 行人复杂网络局部示意图

4 仿真分析

4.1 仿真场景和参数

利用考虑行人倾向性特征的改进 CA 模型进行双向行人流仿真, 模拟行人在一个宽为 $W = 30$, 长为 $L = 50$ 的通道中的运动. 通道中的行人密度为通道中总人数与元胞总数的比值; 将行人向前方

和右前方、左前方 (虽然在单位时间步上运动的空间距离为 $\sqrt{2}$, 但在目的地方向的行进距离仍为 1) 的元胞运动时的速度设为 1, 向左、右侧元胞运动时速度设定为 0 (虽然在单位时间步上运动的空间距离为 1, 但在目的地方向的行进距离为 0), 则通道中行人流的平均速度是速度为 1 的行人数量占总行人数量的百分比; 流量可以通过通道内行人流平均速度和密度的乘积计算得到.

4.2 自组织现象和基本图

仿真初始时刻, 行人以给定的密度随机分散在通道中; 随着仿真的进行, 观测行人流状态的变化. 图7显示了密度在 0.2, 0.4, 0.6 时仿真过程中出现的行人流状态. 图中红色的边表示通道边界, 蓝色圆点代表右行行人, 绿色圆点代表左行行人.

可以看到, 随着仿真的进行, 行人流状态会逐渐发生改变. 在 $D = 0.2$ 和 $D = 0.4$ 时, 行人流从初始随机分布状态逐渐出现分层. 在 $D = 0.6$ 时, 行人流从随机分布状态逐渐转变为拥堵状态. 行人流状态的变化是由于微观上每个行人个体在行走过程中, 会根据自己的行走倾向性和周围行人的情况不断调整 and 选择自己的行走方向, 宏观上则表现为行人流的自组织现象. 作为对照, 基本模型中由于行人向各个方向行走的概率是相同的, 始终不出现分层现象.

进一步分析行人流在各个密度下的平均速度和流量. 同样在 $W = 30, L = 50$, 分别取 $M = 5, 10, 20$ 时, 利用模型仿真输出的数据, 绘制得到密度 - 速度、密度 - 流量曲线, 分别如图8所示. 可以

看出, 平均速度先随着密度的增加而缓慢下降; 然后, 当密度达到一个临界值, 约为 0.50 时, 速度突然下降. 这意味着超过这个密度值, 相向行人在运动过程中可能会从自由流状态转变为拥堵流. 密度

大约超过 0.53 时, 平均速度随密度的增大而逐渐降低为 0. 流量值的变化经历了先增加、后突然下降、最后逐渐下降的过程. 这与行人流基本图的变化趋势是一致的 [22].

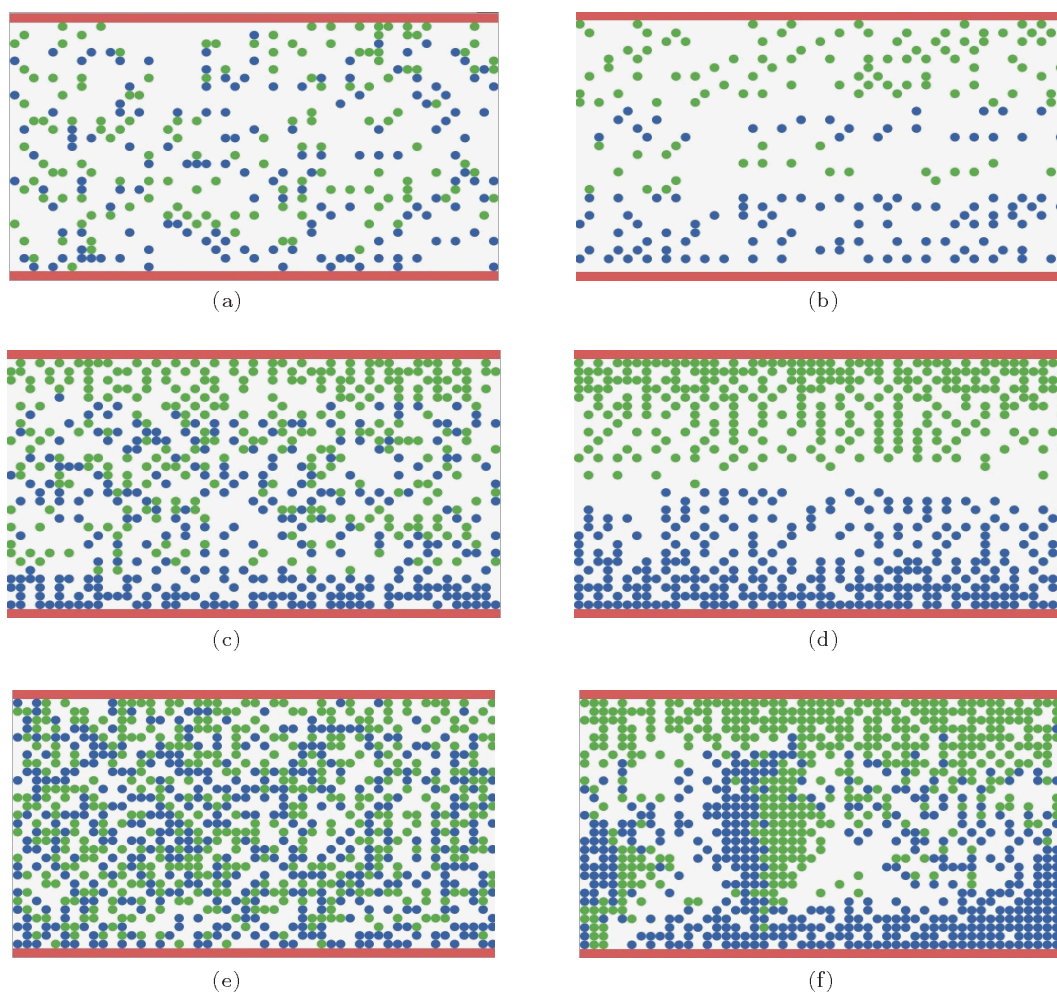


图 7 不同密度下仿真过程中的行人流状态 (a) 初始状态 ($D = 0.20$); (b) 分层状态 ($D = 0.20$); (c) 初始状态 ($D = 0.40$); (d) 分层状态 ($D = 0.40$); (e) 初始状态 ($D = 0.60$); (f) 拥堵状态 ($D = 0.60$)

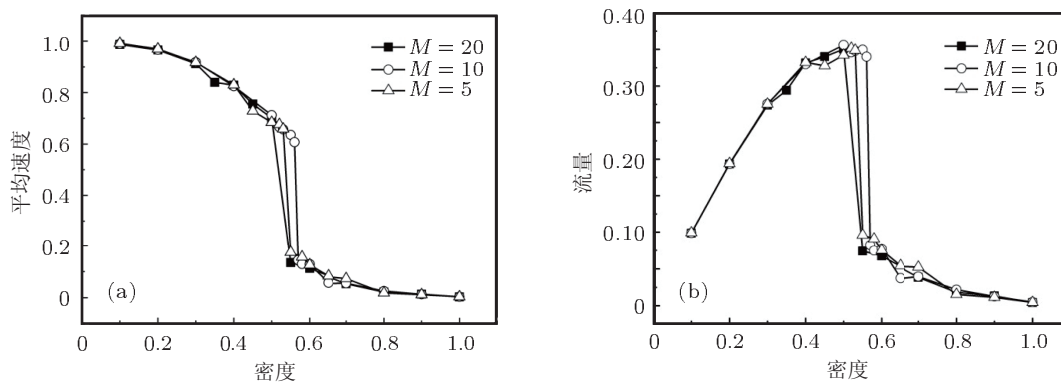


图 8 基本图 (a) 密度 - 平均速度曲线; (b) 密度 - 流量曲线

由于在仿真模型中, 行人流的密度一般定义为通道中行人数量与总元胞数的比值, 这与真实行人流的密度定义不同, 在将模型得到的行人流特性与真实行人流的比较前需要对密度进行换算. 在模型中, 当行人密度约为 $D = 0.50$, 根据每个元胞大小为 $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$, 可换算成为 3.12 ped/m^2 时, 行人流的速度开始迅速下降; 当行人流密度约为 $D = 0.80$ 或 0.90 时, 也就是 5.00 或 5.62 ped/m^2 时, 行人流的速度基本为 0. 在这一点上与文献 [23] 对真实行人流观察研究得到的结论很符合, 即当行人流密度大于 3 ped/m^2 时, 行人在行走过程中开始出现拖曳行为, 即只能慢慢地跟随前面的行人行走, 行人流速度迅速下降; 而当行人流密度大于 5 ped/m^2 时, 行人流的速度基本接近于 0. 由此也验证了模型的合理性.

4.3 网络特性参数分析

由于在行人复杂网络中, 认为行人与视野内的至多 6 个近邻有相互作用关系, 因此在通道中的行人密度小于 0.3 时, 网络中节点度的平均值在 3 附近波动; 而当行人密度大于 0.3 时, 网络中节点的度逐步接近 6. 网络的群集系数只有微小的变化, 基本围绕在 0.48 附近. 下面主要围绕另一参数——平均路径长度展开详细讨论.

平均速度是表现行人流的重要宏观指标, 首先分析平均速度与行人流状态的关系. 仿真过程中, 在密度为 $D = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.54$ 时, 行人流

从随机分布状态转变为分层状态, 分别输出行人流处于这两个状态时刻的瞬时平均速度, 相应地, 行人复杂网络数据也同时输出; 在 $D = 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$ 时, 行人流从随机分布状态向拥堵状态转化, 则分别输出这两个状态出现时的瞬时平均速度以及该时刻的行人复杂网络数据. 图 9 为每个密度仿真 10 次得到每个状态对应的瞬时平均速度的平均值. 可以看到, 在同一个密度下, 行人流处于分层状态时的平均速度要高于随机分布状态时的平均速度; 拥堵状态时的平均速度小于随机分布状态时的平均速度, 即同一行人流的平均速度会随着行人流的状态而改变.

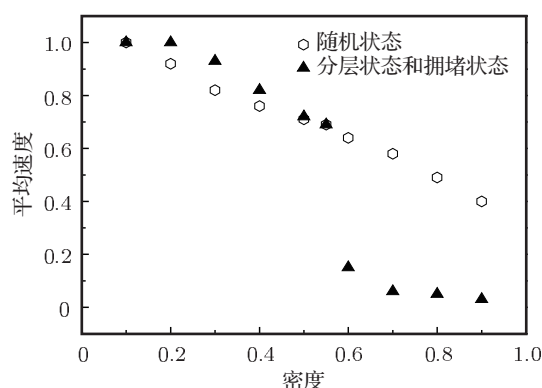


图 9 不同行人流状态下的平均速度分布图

然后计算对应的行人流状态下网络的平均路径长度, 发现即使在同一密度下, 对应于不同行人流状态的网络的平均路径长度不同, 如图 10 所示.

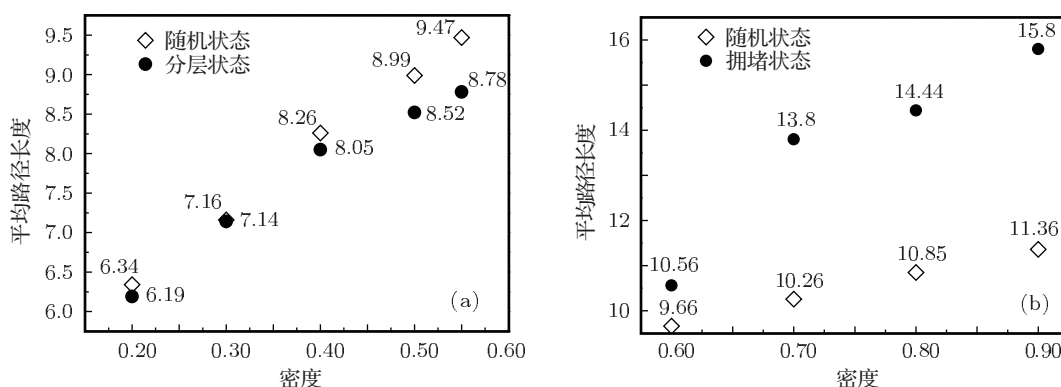


图 10 行人流不同状态下平均路径长度分布图 (a) 随机状态和分层状态; (b) 随机状态和拥堵状态

在同一密度下, 处于随机分布状态的行人流的网络平均路径长度要略大于处于分层状态的网络平均路径长度; 处于随机分布状态的行人流的网络

平均路径长度要小于处于拥堵状态的网络平均路径长度. 又由于行人流处于随机分布状态时的平均速度略小于分层状态时的平均速度, 因而处于拥堵

状态时行人流的平均速度要小于处于随机分布状态的行人流. 考虑到对应行人流状态变化而产生的平均速度和平均路径长度变化的趋势的一致性, 分析平均速度和网络平均路径长度间是否存在某种关系.

为了寻找两者间的关系, 将行人流不同状态下的平均速度和平均路径长度数据进行拟合, 如图 11 所示.

由此可见, 行人流的平均速度与行人复杂网络的平均路径长度线性负相关, 即随着行人流平均速度的下降, 行人复杂网络的平均路径长度变大. 网络平均路径长度是网络中任意节点间连接的平均

最小边数, 具有较小平均路径长度的网络往往较为理想^[24]. 从这一点上可以看到, 具有较小网络平均路径长度的行人流具有较高运行效率的结论是合理的. 在行人复杂网络中, 平均路径的长度意义为两个有相互作用关系的行人之间所经历的其他行人个数. 当平均路径长度较小时, 行人个体联系更为紧密, 行人可获得较充分的信息以做出较优的行进决策, 从而使行人流的运行效率较高, 宏观上则表现为平均速度的提高. 因此提高行人之间信息交互的畅通性对于改善行人流的运行有较大的意义, 利用这一点可以提出有效地改善行人设施和引导行人流的策略.

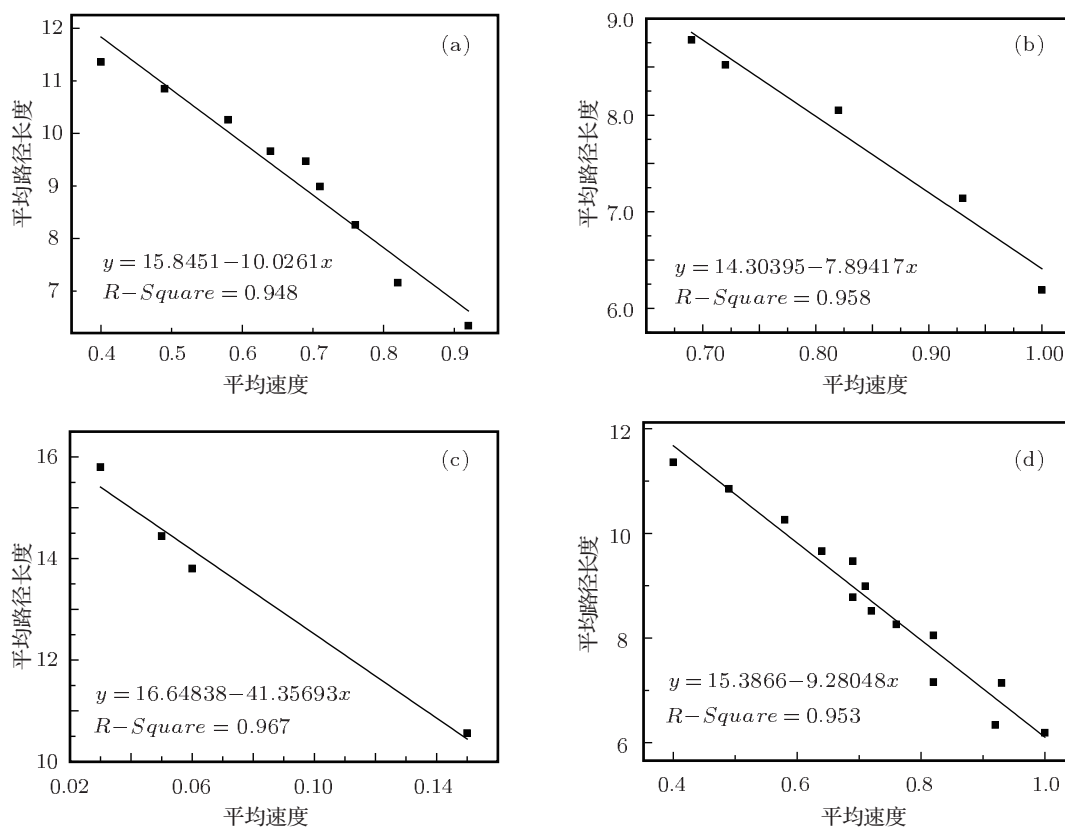


图 11 平均路径长度和平均速度线性拟合 (a) 行人流随机状态下的速度与平均路径长度的关系; (b) 行人流分层状态下的平均速度与平均路径长度的关系; (c) 行人流拥堵状态下速度与平均路径长度的关系; (d) 行人流非拥堵状态下速度与平均路径长度的关系

5 结论

本文采用考虑行人行走倾向性特征的元胞自动机模型和复杂网络理论对双向行人流进行研究. 通过设计行走倾向性调查实验, 分析行人行走倾向性的特征, 并引入了前进系数、右倾系数、超越系

数以及影响修正系数对基本 CA 行人仿真模型的选择概率进行修正, 以定量化反映这些特征. 通过模型仿真得到了行人流的密度 - 速度曲线和密度 - 流量曲线以及观测到行人流的自组织现象.

同时, 由于该模型嵌置了基于 k -近邻原理的行人复杂网络模型, 组合模型的仿真数据可用于

综合分析行人流状态、行人流基本参数和行人复杂网络特征参数之间的关系,探究行人流的内在规律.研究发现,对同一行人流,处于不同状态时平均速度和网络平均路径长度均会发生变化;进一步数据拟合分析表明行人网络平均路径长度和平均速度之间存在着线性负相关的关系.在对行人复杂网络路径平均长度的意义进行分析后,认为通过信息提示等工程提高行人间信息交互的畅通性,以引导行人做出最优的行进策略,提高行人流的整体运

行效率.

需要指出的是,本文的结论只是针对仿真案例的数据分析得到的,尽管该仿真模型充分考虑了行人的行走特征.未来的研究工作将通过实验方法观察更真实的行人间相互作用行为,获取更丰富的相关数据,应用这些数据进行更深入的行人复杂网络建模.并期待能将研究成果应用于指导改善行人设施、公共建筑物、人群活动场所的安全性、舒适性等.

- [1] Helbing D, Molnár P 1995 *Phys. Rev. E* **51** 4282
- [2] Dijkstra J, Timmermans H 2002 *Automat. Constr.* **11** 135
- [3] Burstedde C, Klauck K, Schadschneider A, Zittartz J 2001 *Physica A* **295** 507
- [4] Blue V J, Adler J L 2001 *Trans. Res. Part B* **35** 293
- [5] Tajima Y, Takimoto K, Nagatani T 2002 *Physica A* **313** 709
- [6] Blue V, Embrechts M, Adler J 1997 *IEEE* **3** 2320
- [7] Yue H, Shao C F, Chen X M, Hao H R 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6901 (in Chinese) [岳昊, 邵春福, 陈晓明, 郝合瑞 2008 物理学报 **57** 6901]
- [8] Yue H, Guan H, Zhang J, Shao C F 2010 *Physica A* **389** 527
- [9] Yang L Z, Zhao D L, Li J, Fang T Y 2005 *Build. Environ.* **40** 411
- [10] Sarmady S, Haron F, Talib A Z 2011 *Simul. Model. Pract. Theory* **19** 969
- [11] Weng W G, Shen S F, Yuan H Y, Fan W C 2007 *Physica A* **375** 668
- [12] Fang W F, Yang L Z, Fan W C 2003 *Physica A* **321** 633
- [13] Ma J, Song W G, Zhang J, Lo S M, Liao G X 2010 *Physica A* **389** 2101
- [14] Yue H, Hao H, Chen X M, Shao C F 2007 *Physica A* **384** 567
- [15] Helbing D 1996 *Theory and Decision* **40** 149
- [16] Jia B, Gao Z Y, Li K P 2007 *Models and Simulations of Traffic System Based on the Theory of Cellular Automaton* (1st Ed.) (Beijing: Science Press) p270 (in Chinese) [贾斌, 高自友, 李克平 2007 基于元胞自动机的交通系统建模与模拟 (第一版)(北京: 科学出版社) 第 270 页]
- [17] Li S B, Wu J J, Gao Z Y, Li Y, Fu B B 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 050701 (in Chinese) [李树彬, 吴建军, 高自友, 林勇, 傅白白 2011 物理学报 **60** 050701]
- [18] Gao Z Y, Zhao X M, Huang H J, Mao B H 2006 *J. Trans. Syst. Eng. Inform. Technol.* **6** 41 (in Chinese) [高自友, 赵小梅, 黄海军, 毛保华 2006 交通运输系统工程与信息 **6** 41]
- [19] Wu J J, Gao Z Y, Sun H J 2008 *J. Trans. Syst. Eng. Inform. Technol.* **7** 69 (in Chinese) [吴建军, 高自友, 孙海军 2008 交通运输系统工程与信息 **7** 69]
- [20] Helbing D, Molnár P, Farkas I J, Bolay K 2001 *Environ. Plan. B* **28** 361
- [21] Ballerini M, Cabibbo N, Candelier R, Cavagna A, Cisbani E, Giardina I, Lecomte V, Orlandi A, Parisi G, Procaccini A, Viale M, Zdravkovic V 2008 *Proc. Nat. Acad. Sci.* **105** 1232
- [22] Helbing D, Johansson A, Al-Abideen H Z 2007 *Phys. Rev. E* **75** 046109
- [23] Tregenza P R 1976 *The Design of Interior Circulation* (1st Ed.) (New York: Van Nostrand Reinhold Company) p135
- [24] Albert R, Barabási A L 2002 *Rev. Modern Phys.* **74** 47

Modeling bi-direction pedestrian flow by cellular automata and complex network theories*

Ren Gang Lu Li-Li[†] Wang Wei

(Key Laboratory of Transportation Planning and Management of Jiangsu Province, School of Transportation,
Southeast University, Nanjing 210096, China)

(Received 9 September 2011; revised manuscript received 12 December 2011)

Abstract

In this paper the experiment to study the features of pedestrians' walking preference is designed. Then the cellular automata model which considering pedestrians' walking preference features is built, in which the forward-parameter, right-parameter, surpass-parameter and the correction-parameters are included to mend the probability of the pedestrian getting to each neighboring cell. Based on this model and k -nearest-neighbor interaction pattern, the complex network of pedestrians is modeled. The simulation results obtained from the model well illustrate the density-speed curve and density-volume curve. Meanwhile the self-organization phenomena of the bi-direction pedestrian flow can be observed from the model simulation. In the further analysis of the pedestrian flow's basic parameter and the main feature parameters of pedestrians' complex network, it is found out that the average speed and the average path length are changed with the state of the flow. Finally it can be concluded that there is a linear negative correlation between these two parameters by fitting the data; in other words, pedestrian flow with shorter average-path length has a higher average speed.

Keywords: walking preference, cellular automata, complex network, bi-direction pedestrian flow

PACS: 45.70.Vn, 89.40.-a

* Project supported by the National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2009BAG13A05), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51078086).

[†] E-mail: lulili_seu@sohu.com