

双出口房间人群疏散的实验研究和数学建模*

禹尔东 吴正 郭明旻†

(复旦大学力学与工程科学系, 上海 200433)

(2013年11月2日收到; 2013年12月19日收到修改稿)

本文设计了一个双出口房间内人群疏散的实验方案, 通过不同条件下疏散过程的实况录像及视频检测, 得到不同人数疏散时间的许多定量结果. 提出了双出口房间吸引区间的概念, 证明了较小出口吸引区间的边界总是一段圆弧, 可以解释行人流出口处的圆形拱现象. 通过类比地铁候车厅内人群疏散过程, 建立了双出口房间内疏散时间的二次函数模型, 成功拟合不同条件下的实测数据. 疏散人数较少时, 疏散时间随着人数增加而线性增长; 人数较多, 在出口附近出现待行区域时, 疏散时间则呈二次函数增长. 与一些已知疏散时间数学模型相比, 本文模型对出口宽度变化的反应更敏感.

关键词: 行人流, 行人疏散, 吸引区间, 疏散实验

PACS: 45.70.Vn, 05.65.+b

DOI: 10.7498/aps.63.094501

1 引言

行人流是交通流的一个重要方面. 在有限空间内聚集的较大数量人群如何安全疏散, 是行人流研究中普遍受关注的问题. 最近几十年里, 不同国家曾发生过多起由于极度拥挤而导致的人群踩踏惨剧: 1989年4月15日, 在英国谢菲尔德举行的足总杯半决赛中, 超量球迷拥进球场, 造成96人死亡, 1000多人受伤; 1990年7月2日, 沙特阿拉伯麦加附近的一处地下通道发生严重踩踏事件, 1426名朝觐者被踩死或窒息而死; 1994年12月8日, 克拉玛依市教育局组织全市中小学生举办专场文艺演出时发生特大火灾, 造成323人死亡; 2005年1月25日, 印度马哈拉施特拉邦一个宗教集会场所发生踩踏事件, 超过300人死亡, 1000多人受伤; 2010年7月24日, 德国杜伊斯堡约140万人参加的露天音乐节发生踩踏事件, 造成19人死亡, 342人受伤; 2010年11月22日, 正值柬埔寨传统的送水节, 金边钻石岛的一座吊桥上由于吊桥晃动引发恐慌, 发生了456人死亡, 700多人受伤的严重踩踏事故; 2010

年11月29日, 新疆阿克苏第五小学由于学生在楼梯上绊倒发生踩踏事故, 数百名受伤学生被送进医院. 以上这些事件给人们提供了大量血的教训, 促使诸多行人流研究工作的开展. 为此, 科学合理地分析、预测、调度人群聚集场所公众的群体行为, 以及可能发生的最大危险状态, 理解和掌握行人流所遵循的基本规律, 进一步探索行人流的复杂现象, 如成行、成拱等^[1], 具有重要的理论意义和实际应用价值.

对于行人流问题, 目前的研究工作可以分为宏观模型和微观模型两大类型. 宏观模型主要基于传统流体力学的观点, 将行人运动比拟为液体或气体分子的运动, 例如, Hughs^[2]通过模拟流体力学中绕流运动建立行人流方程, 从而揭示麦加朝觐行人流动的形态; Xiong等^[3]利用连续性方程再现了双向行人流的成行现象; 徐尉南等^[4]提出了地铁候车厅内上车人群流动的准一维模型并验证其与实测数据能很好符合; 吴正等^[5]把准一维模型进一步应用于地铁候车厅内人群疏散时间的计算. 微观模型对每个行人个体的行为进行更为详细的描述, 典型的模型有: Helbing等提出的基于行人间相互作

* 国家自然科学基金(批准号: 11002035)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: mmguo@fudan.edu.cn

用力的社会力模型^[6], 离心力模型^[7,8], 基于并行规则的元胞自动机模型^[9-11]和格子气模型^[12-14]等, 基于这些模型进行数值模拟得到的结果能较好地模拟双向行人流的成行现象^[15,16]、过窄口时行人等待的成拱现象^[17-20]以及相变^[21]等行人流自组织特征.

作为有限空间内人群疏散问题的简单模型, 房间内的人群疏散问题研究已有一定的研究, 其中大多数工作集中于元胞自动机的数值模拟, 如施正威等^[22]利用元胞自动机模型计算了多出口房间内的人群疏散问题, 分析了理性程度和敏感性系数对疏散过程的影响; 谭慧丽等^[23]得到了出口宽度和疏散时间之间的一种函数关系; 陈涛等^[24]对十字形通道内人流疏散的临界堵塞密度做了比较详细的研究. 另外, 有一些关于房间内人群疏散的实验研究, 如Kretz等^[25]对瓶颈处行人通过特性开展了一系列实验, 得到了出口密度与瓶颈宽度的关系; Zhang等^[26]通过对教室内学生疏散的实验模拟并结合元胞自动机模型, 得到了疏散时间的统计分布特征以及疏散人员到达时间的个体信息; 朱孔金等^[27]则研究了房间出口位置及内部布局对疏散效率所造成的影响; Zarita等^[28]等通过比较元胞自动机模拟结果和实测条件分析了疏散过程中行人的出口选择行为; 岳昊^[29]等使用元胞自动机对安全出口的设置情况展开了一定的研究.

本文将在以上工作的基础上, 进一步设计一个双出口房间内人群疏散的实验方案, 包括两个出口开启方式的多种条件, 能够得到不同条件下不同人数疏散时间的定量结果, 从而进行疏散时间的数学模型研究.

2 实验设计与数据结果

不失一般性, 双出口房间的出口布局可分为三种类型: 1) 两个出口中心位于两条对边任何位置, 出口大小可以相同也可以不同; 2) 两个出口中心位于两条邻边任何位置; 3) 两个出口中心位于同一边上. 图1给出了这三种类型的示意图, 其中 x_1 , x_2 , y_1 和 y_2 表示出口中心处坐标.

本文实验地点是复旦大学光华楼东主楼2601室, 房间形状为边长11 m的正方形, 东西两侧各有一个两扇门组成的出口, 两个出口靠近北侧墙壁, 属于图1(a)的类型. 由于房内有桌椅和黑板等, 实验时将其靠南侧放置, 因此等候疏散人群实际所占

区域为长11 m、宽8 m的长方形, 如图2所示. 每扇门宽均为0.8 m, 可以组成1.6 m(两门都开)、0.8 m(只开一扇门)和0 m(某一侧出口关闭)这样三种不同出口大小. 因此, 整个实验一共分成五种条件进行: 两侧出口都开一扇门: 仅西侧出口开一扇门: 西侧出口两门全开东侧出口关闭: 西侧出口全开东侧出口开一扇门: 两侧出口全开.

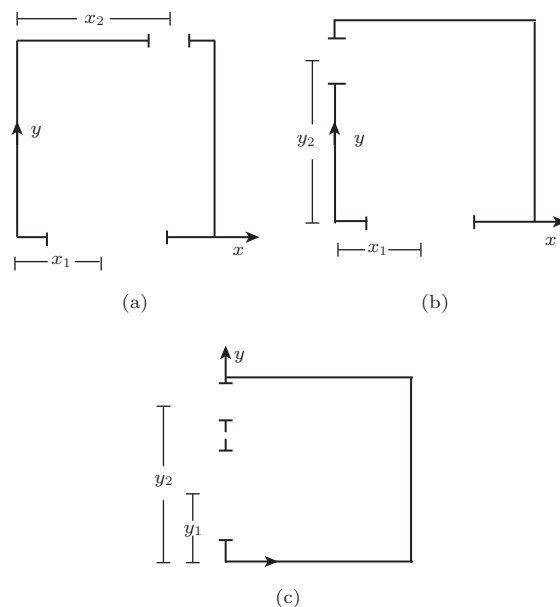


图1 双出口房间三种出口布局类型示意图

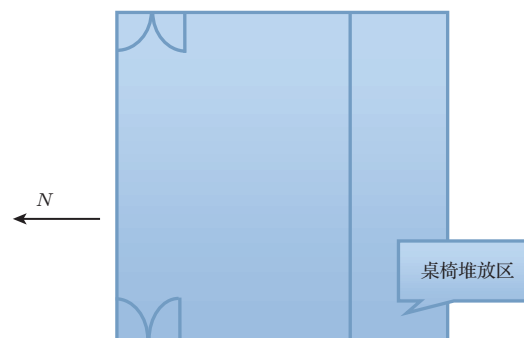


图2 实验房间示意图

实验开始, 参加实验人员随机站立(或走动, 或就坐)于长方形区域内, 一段时间后突然听到疏散指令, 于是迅速选择合适的出口并以尽可能快的速度离开房间, 放置在桌椅堆放区两侧高处的摄像机记录下整个疏散过程. 每次实验前, 向参加人员告知了开门情况, 以利于他们选择疏散路径. 参加人员在疏散前被要求尽量均匀分布在整个区域内, 不能集中在门口或其他位置, 且发出指令的时间是完

全未知的. 两侧出口外都安排工作人员记录最后一个人疏散完毕的时间, 并疏导已走出房间的人员, 避免阻挡后面的人流.

实验于 2013 年 3 月 19 日下午进行, 参加人员为复旦大学力学与工程科学系师生, 共计 24 人, 年龄大多为 21 至 22 岁. 从录像中可以看到, 实验人员均具有较快的反应(从疏散指令发出到实施疏散动作一般不超过半秒钟)和明确的出口选择行为(几乎没有重新选择出口), 在疏散过程中始终保持了较快的行走速度和平稳有序的秩序, 即使在出口附近拥堵的情况下也没有推搡或跌倒的现象, 这反映了本文实验的参与者在实验过程中保持了很高的理性程度. 由于几种条件下 24 人已经形成了明确的待行特征, 而待行部分的增大一般不会对疏散

时间的变化规律产生影响, 所以没有考虑有更多人参加的实验方案.

表 1 给出了五种不同条件下 24 人完成疏散的实测时间, 每种条件重复三次. 从表 1 可以看出, 在只有西侧出口开一扇门的情况下疏散时间最长, 平均达到 14.6 s; 而在一侧半开一侧全开和两侧全开的情况下疏散时间最短, 平均 5.7 s 多一点, 仅为最长疏散时间的 40% 左右; 一侧全开的平均疏散时间 (7.87 s) 则为一侧半开疏散时间的 50% 左右. 另外, 在编号 1 的前两次实验时, 有部分参加人员在等待阶段是坐着的, 同一条件第三次实验时要求全部站立(或走动)等待指令, 结果发现两者的疏散时间有较大差异. 在编号 2—5 的实验中, 全部人员都是站立(或走动)等待指令.

表 1 不同条件下的实测疏散时间

编号	实验条件	第一次/s	第二次/s	第三次/s	平均值/s
1	两侧出口都开一扇门	10.90	12.90	9.60	11.13
2	仅西侧出口开一扇门	15.00	13.90	14.90	14.60
3	西侧出口两门全开东侧出口关闭	7.30	8.30	8.00	7.87
4	西侧出口全开东侧出口开一扇门	5.50	6.00	5.80	5.77
5	两侧出口全开	5.20	6.10	5.90	5.73

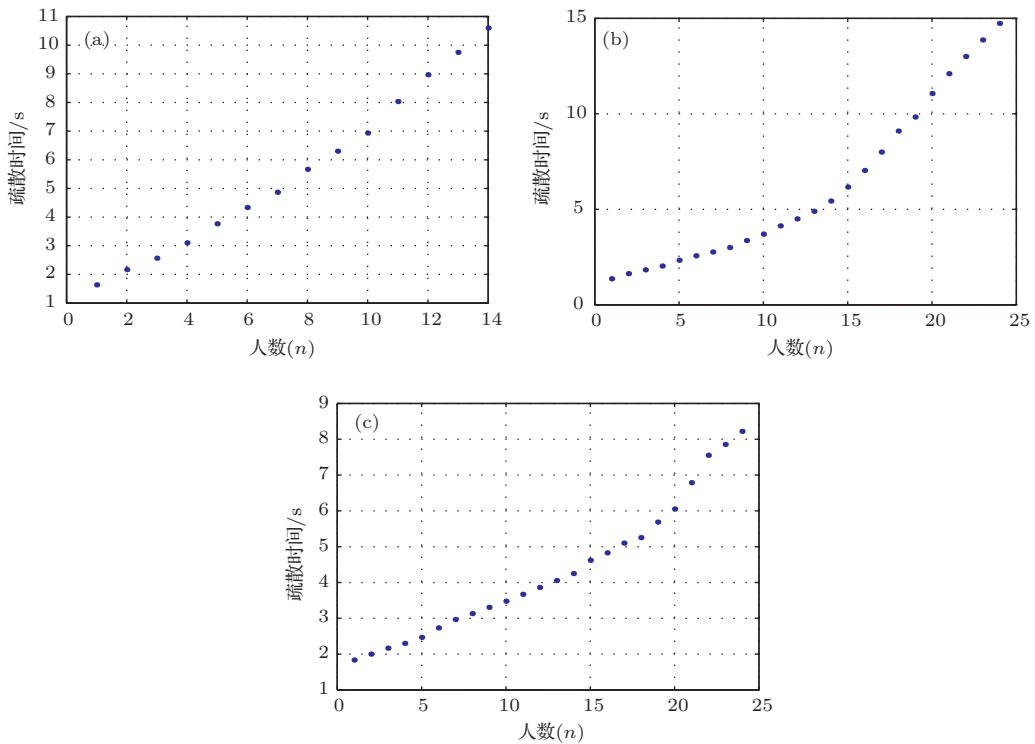


图 3 三种条件下疏散人数与疏散时间关系曲线 (a) 条件 1; (b) 条件 2; (c) 条件 3

图3进一步给出了从视频录像中得到的离开房间的人数与时间之间的函数关系. 其中条件1是两侧开门并且大小相同, 所以每侧只有12人, 基本是一条直线; 条件2和3都是单侧开门, 所以有24人, 曲线呈现明显的分段特征, 也就是形成了待行人群, 而出口宽度大一倍的条件3出现待行比条件2明显要晚.

3 双出口房间吸引区间模型

在地铁候车厅客流疏散模型中^[5], 提出了吸引区间概念: 将整个行人流所在区域划分为几个区间, 每个区间内的人群理论上都从同一个出口疏散, 则这个区间就称为这个出口的吸引区间. 将此概念推广到双出口房间, 则整个房间一定可以划分成两个吸引区间. 若又以房间内各点到达出口的距离作为划分吸引区间的依据, 则可以证明两个区间之间的边界一定是一段圆弧或直线.

设 e_1 和 e_2 分别为两出口宽度, d_1 和 d_2 分别为吸引区间边界上的点到两出口中心的距离, 假定吸引区间的边界是到两出口中心的距离与出口宽度成反比例函数的点所形成的轨迹, 即吸引区间边界总是靠近宽度较小的出口, 则有

$$\frac{d_1}{d_2} = \left(\frac{e_2}{e_1}\right)^n. \quad (1)$$

对于图1(a)类型, 设出口1的宽度大于出口2(相当于表1中的条件4), 出口所在两边之间距离为 b , 则根据(1)式有(取 n 为1, 下同)

$$\frac{(x-x_1)^2 + y^2}{e_1^2} = \frac{(x-x_2)^2 + (y-b)^2}{e_2^2}$$

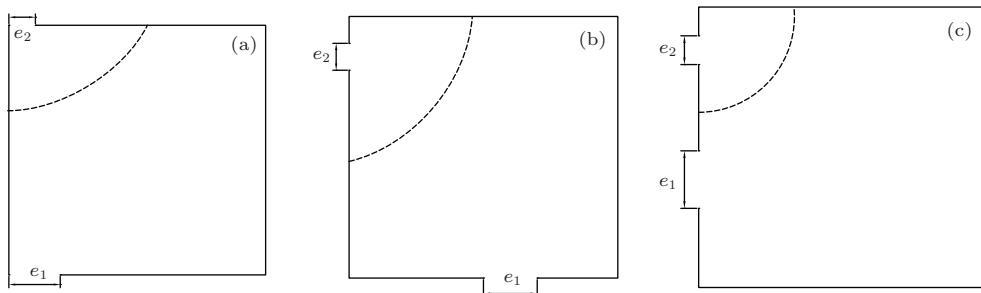


图4 吸引区间边界曲线($e_1/e_2 = 2$) (a)类型a; (b)类型b; (c)类型c

从实际经验和数值模拟中都已经发现, 在房间内人群疏散的过程中, 人群聚集在出口, 大部分行人无法运动, 从而导致人群在出口处形成一个拱形分布, 对应着堵塞现象的加剧^[16]. 成拱是一种房

$$\Rightarrow \left(x + \frac{e_2^2 x_1 - e_1^2 x_2}{e_1^2 - e_2^2}\right)^2 + \left(y - \frac{e_1^2 b}{e_1^2 - e_2^2}\right)^2 = \left(\frac{\sqrt{e_1^2 e_2^2 [b^2 + (x_1 - x_2)^2]}}{e_1^2 - e_2^2}\right)^2. \quad (2)$$

由此可知吸引区间边界是一段圆弧, 如图4(a)所示. 特别, 当两出口宽度相同时, 吸引区间边界则为两出口中心连线的垂直平分线的一段.

对于图1(b)类型, 同样设出口1的宽度大于出口2, 则有

$$\frac{(x-x_1)^2 + y^2}{e_1^2} = \frac{x^2 + (y-y_2)^2}{e_2^2} \Rightarrow \left(x + \frac{e_2^2 x_1}{e_1^2 - e_2^2}\right)^2 + \left(y - \frac{e_1^2 y_2}{e_1^2 - e_2^2}\right)^2 = \left(\frac{\sqrt{e_1^2 e_2^2 [x_1^2 + y_2^2]}}{e_1^2 - e_2^2}\right)^2. \quad (3)$$

吸引区间边界也是一段圆弧, 如图4(b)所示. 当两出口宽度相同时, 吸引区间边界则为两出口中心连线的垂直平分线的一段.

对于图1(c)类型, 仍然设出口1的宽度大于出口2, 又有

$$\frac{x^2 + (y-y_1)^2}{e_1^2} = \frac{x^2 + (y-y_2)^2}{e_2^2} \Rightarrow x^2 + \left(y + \frac{e_2^2 y_1 - e_1^2 y_2}{e_1^2 - e_2^2}\right)^2 = \left(\frac{e_1 e_2 (y_1 - y_2)}{e_1^2 - e_2^2}\right)^2. \quad (4)$$

吸引区间边界还是一段圆弧, 如图4(c)所示. 当两出口宽度相同时, 吸引区间边界则为两出口中心连线的垂直平分线的一段.

间内人群疏散中普遍存在的现象, 孙立等^[18]曾经提出, 当拥挤的人群从宽敞的场地涌向狭窄的通道时, 除了正常的纵向人流之外, 还存在从两侧进入通道的人流, 而这种从两侧进入的人流会妨碍正常

流向人群的通行, 从而在通道口处形成滞留人群, 人群密度逐渐增大到一定程度时, 通道口处形成拱形的人流结构, 瞬时所有人都无法通过. Helbing 等 [17] 则利用微观动力学模型成功模拟了疏散过程中行人在出口附近形成拱形滞留状态. 从本节结果看, 无论出口布局 and 宽度怎样变化, 其中较小出口的吸引区间总是呈现圆弧形, 这与行人流出口处的成拱现象本质上是完全一致的, 说明成拱现象也可以用出口对行人流的吸引范围与其自身宽度大小成反比的规律来解释.

4 疏散时间模型研究

4.1 地铁候车厅疏散时间模型的比拟

在地铁候车厅客流上车时间模型中 [4], 提出了以下形式的行人流速密关系:

$$v(\rho) = K\rho^{-2}, \quad (5)$$

并认为其倒数的积分就是整个人群的上车时间

$$T = \int_0^w \frac{1}{v(y)} dy, \quad (6)$$

其中 w 是排队人群中最后一个人与车门的初始距离, y 是任何一个人与车门距离, 随着 y 不同, 密度、速度也都在变化, K 是一个经验常数.

与实测数据比较 [4], 这一模型在中等密度区域符合很好, 但在高密度和低密度区域则差异较大. 因此, 本文提出改进的行人流速密关系如下:

$$v = \begin{cases} \bar{v}_c, & 0 < \rho \leq \rho_f, \\ \bar{v}_c \left(\frac{\rho}{\rho_f}\right)^{-2}, & \rho_f < \rho \leq \rho_c, \\ \bar{v}_c \left(\frac{\rho_c}{\rho_f}\right)^{-2} \frac{\rho_j - \rho}{\rho_j - \rho_c}, & \rho_c < \rho \leq \rho_j. \end{cases} \quad (7)$$

当房间内人群密度介于 ρ_f 与 ρ_c 之间时, 可以认为行人流速密关系 (5) 及相应的计算地铁候车厅上车时间的公式是有效的, 能够用于计算房间内人群的疏散时间.

在地铁候车厅上车模型中 [4], 吸引区间边界是一条抛物线 (图 5), 车门半宽为 b , 所以吸引区间面积为

$$\begin{aligned} S &= 2 \int_b^B y(x) dx + 2wb \\ &= 2w \frac{B^2}{B+b} - \frac{2}{3} w \frac{B^3 - b^3}{B^2 - b^2} + 2wb. \end{aligned} \quad (8)$$

吸引区间边界到车门最大距离为

$$d_{\max} = \sqrt{(B-b)^2 + w^2}. \quad (9)$$

两式联立消去 w , 可以得到一个在已知 S , d_{\max} 和 b 条件下求解 B 的非线性方程

$$\begin{aligned} B + b - \frac{4}{3S} \sqrt{d_{\max}^2 - (B-b)^2} (B^2 + bB + b^2) \\ = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

解得 B 之后又可按下式计算 w :

$$w = \frac{3S}{4} \frac{B+b}{B^2 + bB + b^2}. \quad (11)$$

因此对于一般的双出口房间人群疏散问题, 在按上一节方法确定各出口吸引区间之后, 就可以计算出相应的 S 和 d_{\max} , 代入方程 (10) 和 (11) 得到 B 和 w , 最后通过下式计算疏散时间 T [5]:

$$T = \frac{s^2 n^2}{2Kw} \frac{B+b/2}{B-b/2} \ln \frac{2B}{b} + A \triangleq A + Cn^2, \quad (12)$$

式中 n 是某一出口疏散的总人数, s 是每个人的平均占地面积, 本文取为 0.2 m^2 .

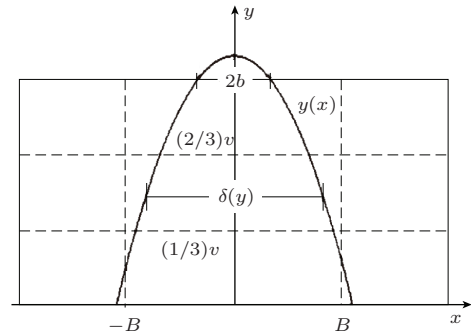


图 5 地铁候车厅模型的吸引区间

4.2 考虑待行的分段函数模型

从图 3 可知, 如果疏散总人数很少, 出口附近没有形成待行人群, 那么疏散时间与人数之间为线性函数关系. 随着人数增多, 待行人群出现并且逐渐扩大, 疏散时间与人数之间变为抛物线函数关系, 此时可以用 (12) 式计算. 综合起来, 可以得到如下分段函数模型:

$$T = \begin{cases} A^* + C^*n, & n < n^*, \\ A + Cn^2, & n \geq n^*. \end{cases} \quad (13)$$

表 2 给出了前三种条件下拟合参数的结果, 其中 r^* 和 r 分别为线性部分和抛物线部分拟合的相关系数, 可以看出拟合的相关度很高. 图 6 则给出了两种具有分段函数特征条件下的实测曲线与拟合曲线比较及拟合误差, 可以看到线性部分拟合得非常好, 抛物线部分则稍有一些误差, 但最大误差不超过 0.5 s .

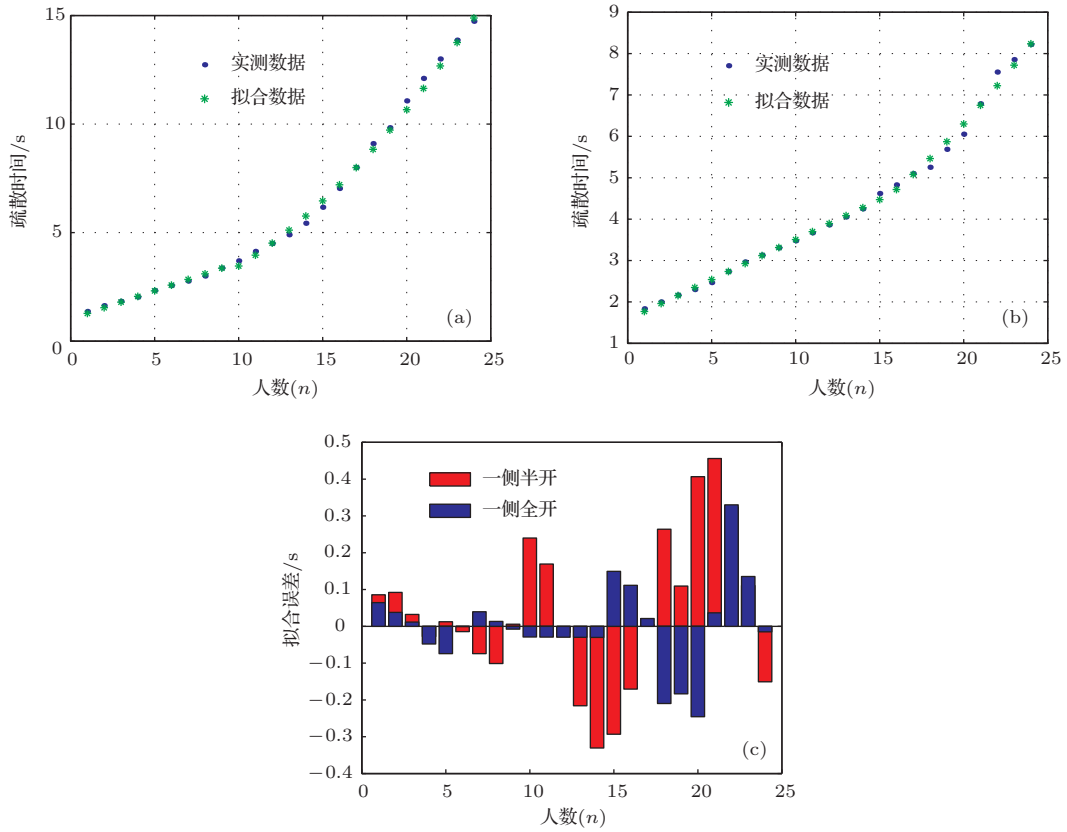


图6 (网刊彩色) 参数拟合结果与误差 (a) 条件2; (b) 条件3; (c) 拟合误差

表2 三种条件下的拟合参数

编号	A^*	C^*	r^*	A	C	n^*	r
1	0.434	0.692	0.9860				
2	1.021	0.260	0.9961	1.060	0.024	9	0.9959
3	1.576	0.193	0.9960	1.899	0.011	15	0.9776

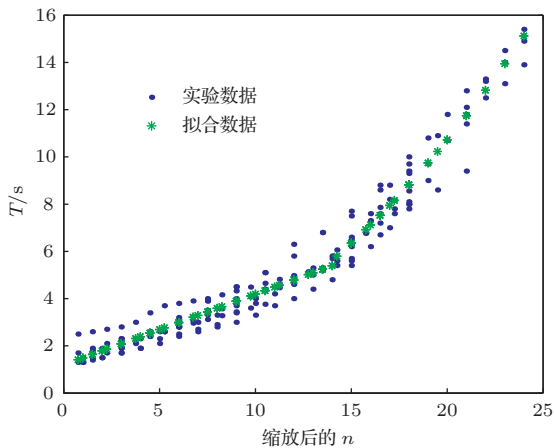


图7 (网刊彩色) 归一化的参数拟合结果

虽然上面分不同条件的函数拟合取得成功, 但很明显, 这几个函数表达式系数是不同的, 也就是没有统一的形式, 这在应用中是不方便的. 因此,

我们下面尝试将图3所示的三次实验数据进行归一化处理, 定义归一化人数

$$\tilde{n} = h(b, f)n, \quad (14)$$

其中 $h(b, f)$ 是一个与出口宽度 b 、出口设置方式 f 有关的比例因子. 如果在条件1, 2, 3下分别取比例因子值为1.5, 1和0.75, 则三次不同条件下得到的实验数据基本上可以合并成一条曲线(图7). 然后, 仍按照分段函数(13)式进行拟合, 结果得到一个统一的表达式如下:

$$T = \begin{cases} 1.19 + 0.30\tilde{n}, & \tilde{n} < 13.4, \\ 0.721 + 0.025\tilde{n}^2, & \tilde{n} \geq 13.4. \end{cases} \quad (15)$$

从图7可以看出这个函数的拟合效果也是很不错的.

4.3 与一些已知模型的比较

有限空间内人群疏散时间模型的核心, 是同样人数条件下疏散时间与出口宽度之间的函数关系, 已有一些文献对此展开研究. 谭惠丽等^[23]给出的结论是

$$T \propto b^{-0.616 \pm 0.02}, \quad (16)$$

其中 b , T 分别为出口宽度、疏散时间. (16) 式显示疏散时间是出口宽度的减函数, 与出口宽度的负次幂成比例, 并且其中幂值有一定变化范围. Yu 等 [7] 利用离心力模型得到的结论是

$$T \propto b^{-0.83 \pm 0.05}. \quad (17)$$

(17) 式显示疏散时间仍与出口宽度的负次幂成比例, 但幂的绝对值和变化范围都比 (16) 式要大. Kretz 等 [25] 通过实验数据给出了另外一种形式的结果:

$$b \propto \begin{cases} 116.73 - T, & n = 80, \\ 146.66 - T, & n = 100, \end{cases} \quad (18)$$

其中 n 为疏散人数. (18) 式显示疏散时间仍是出口宽度的减函数, 但与出口宽度成线性函数关系.

在本文建立的数学模型 (13) 或 (15) 中, T 是 n 的函数, 其系数则与 b 以及出口设置方式有关. 对于同一种出口设置方式并且疏散人数不变, 又可得到 T 与 b 的函数关系. 在表 1 所列五种条件中, 出口设置方式有两种: 1) 单侧出口; 2) 双侧出口. 每种出口设置方式下又可分为只开一扇门(条件 2 和条件 1) 和两门全开(条件 3 和条件 5) 两种情况, 分别对应出口宽度 0.8 m 和 1.6 m. 因此, 通过视频中记录的不同人数对应的疏散时间数据, 就可以拟合得到如下公式:

$$T \propto b^{-0.92 \pm 0.03}. \quad (19)$$

(19) 式显示疏散时间仍与出口宽度的负次幂成比例, 但幂的绝对值比 (17) 式更大, 幂值变化范围则介于 (16) 式和 (17) 式之间.

如果假定其他条件相同, 只是出口宽度增加一倍, 那么按 (16) 式可知疏散时间为原来的 64.35%—66.16%, 按 (17) 式为原来的 54.34%—58.24%, 按 (19) 式为原来的 51.76%—53.96%. 说明本文实测数据及其相应的数学模型对出口宽度变化的反应, 比数值模拟方法得到的 (16) 和 (17) 式更敏感, 这是值得注意的, 当然可能与本文参与实验人员年龄较轻、行为比较理智也有关系.

5 结论与展望

本文设计了一个双出口房间内人群疏散的实验方案, 包括两个出口开启方式的多种条件. 通过不同条件下疏散过程的实况录像及视频检测, 得到

不同人数疏散时间的许多定量结果, 为研究疏散时间数学模型奠定了基础.

本文提出了双出口房间吸引区间的概念, 以及吸引区间的边界是到两出口中心距离与出口宽度成反比的点所形成轨迹的假定, 证明了较小出口吸引区间边界总是一段圆弧(当两出口宽度相同时, 退化为两出口中心连线的垂直平分线的一段), 可以从另外一个角度解释行人流出口处的圆形成拱现象.

通过类比地铁候车厅内人群疏散过程, 利用本文给出的吸引区间, 建立了双出口房间内疏散时间关于疏散人数的二次函数模型. 进一步与实测结果比较, 提出了适用于有无待行区域的统一的分段函数模型, 能够成功拟合不同条件下的实测数据. 这一模型与一些已知的数学模型相似, 疏散时间与出口宽度的负次幂成比例, 但它对出口宽度变化的反应比其他模型更敏感.

在本文的实验过程中发现, 采用志愿者参加人群疏散实验的方式, 虽有真实性的优点, 但随着实验重复次数的增加, 难免会出现心理的疲劳, 这对于实验结果的一致性会带来不利影响. 如果用蚂蚁(或其他动物)作为实验对象, 可以克服这一缺点, 便于采集更具有可重复性和可靠性的数据, 这是今后一种发展方向.

参考文献

- [1] Li X 2012 *M. S. Thesis* (Shanghai: Shanghai University) (in Chinese) [李翔 2012 硕士学位论文 (上海: 上海大学)]
- [2] Hughs R L 2002 *Transpn. Res. B* **36** 507
- [3] Xiong T, Zhang P, Wong S C, Shu C W, Zhang M P 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 108901
- [4] Xu W N, Wu Z 2005 *J. Railway Sci. & Eng.* **2** 70 (in Chinese)[徐尉南, 吴正 2005 铁道科学与工程学报 **2** 70]
- [5] Wu Z, Wang Y, Shen J Y 2006 *J. Fudan Univ. (Natural Sci.)* **45** 594 (in Chinese) [吴正, 王昀, 沈俊彦 2006 复旦学报(自然科学版) **45** 594]
- [6] Helbing D, Molnár P 1995 *Phys. Rev. E* **51** 4282
- [7] Yu W J, Chen R, Dong L Y, Dai S Q 2005 *Phys. Rev. E* **72** 026112
- [8] Yu W J 2006 *M. S. Thesis* (Shanghai: Shanghai University) (in Chinese) [郁文剑 2006 硕士学位论文 (上海: 上海大学)]
- [9] Burstedde C, Klauck K, Schadschneider A, Zittartz J 2001 *Physica A* **295** 507
- [10] Zhou J W, Chen X L, Kong L J, Liu M R, Tan H L, Zhou J H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2281 (in Chinese)[周金旺, 陈秀丽, 孔令江, 刘慕仁, 谭惠丽, 周建槐 2009 物理学报 **58** 2281]

- [11] Yue H, Shao F C, Guan H Z, Duan L M 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4499 (in Chinese)[岳昊, 邵春福, 关宏志, 段龙梅 2010 物理学报 **59** 4499]
- [12] Jiang R, Wu R S 2007 *Physica A* **373** 683
- [13] Tian H H, Xue Y, Wen J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3817 (in Chinese)[田欢欢, 薛郁, 温坚 2010 物理学报 **59** 3817]
- [14] Kuang H, Li X L, Wei Y F, Song T, Dai S Q 2010 *Chin. Phys. B* **19** 070517
- [15] Muramatsu M, Irie T, Nagatani T 1999 *Physica A* **267** 487
- [16] Chen X M, Hao H R, Shao C F 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6901 (in Chinese)[陈晓明, 郝合瑞, 邵春福 2008 物理学报 **57** 6901]
- [17] Helbing D, Farkas I, Vicsek T 2000 *Nature* **407** 487
- [18] Sun L, Zhao L D 2007 *J. Safe. & Environ.* **2007** 124 (in Chinese)[孙立, 赵林度 2007 安全与环境学报 **7** 124]
- [19] Zhou J W, Kuang H, Liu M R, Kong L J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3001 (in Chinese) [周金旺, 邝华, 刘慕仁, 孔令江 2009 物理学报 **58** 3001]
- [20] Zhou J W, Deng M Y, Liu M R, Kong L J 2009 *GuangXi Sci.* **16** 277 (in Chinese) [周金旺, 邓敏艺, 刘慕仁, 孔令江 2009 广西科学 **16** 277]
- [21] Ge H X, Cheng R J, Lo S M 2013 *Chin. Phys. B* **22** 070507
- [22] Shi Z W, Chen Z Y, Zhou L, Ling J W 2010 *Sys. Eng.* **28** 51 (in Chinese) [施正威, 陈治亚, 周乐, 凌景文 2010 系统工程 **28** 51]
- [23] Tan H L, Qiu B, Liu M R, Kong L J 2004 *J. GuangXi Norm. Univ. (Natural Sci.)* **22** 1 (in Chinese) [谭惠丽, 邱冰, 刘慕仁, 孔令江 2004 广西师范大学学报 **22** 1]
- [24] Chen T, Song W G, Fan W C, Lu S X 2004 *Eng. Sci.* **6** 56 (in Chinese)[陈涛, 宋卫国, 范维澄, 陆守香 2004 中国工程科学 **6** 56]
- [25] Kretz T, Grünebohm A, Schreckenberg M 2006 *J. Statistical Mech.: Theory & Experiment* p10014
- [26] Zhang J, Song W, Xu X 2008 *Physica A* **387** 5901
- [27] Zhu K J, Yang L Z 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7701 (in Chinese) [朱孔金, 杨立中 2010 物理学报 **59** 7701]
- [28] Zarita Z, Lim E A 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 078901
- [29] Yue H, Yao S Z, Shao C F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4523 (in Chinese)[岳昊, 姚智胜, 邵春福 2009 物理学报 **58** 4523]

Experimental features and mathematical model of pedestrian evacuation from a room with two exits*

Yu Er-Dong Wu Zheng Guo Ming-Min[†]

(Department of Mechanics and Engineering Science, Fudan University, Shanghai 200433, China)

(Received 2 November 2013; revised manuscript received 19 December 2013)

Abstract

A set of experimental schemes of pedestrian evacuation from a room having two exits is proposed and applied to experiments. Some quantitative results of evacuation time varying with the number of pedestrians in different circumstances are obtained from the video recordings. The concept of attraction domain of a two-exit room is established. It is proved that the boundary curve of attraction domain of the smaller exit is always a circular arch, by which the mechanism of arch formation near an exit can be illustrated. Compared with the passenger evacuation procedure in a subway waiting hall, we have established a quadratic function model of evacuation time which can fit the measured data well for various cases. The evacuation time increases linearly with the number of people without waiting, and increases as a quadratic function of the number of people after the formation of a waiting region. It is also found that the expression is affected by the width of exit more sensitively than in other well-known models.

Keywords: pedestrian flow, pedestrian evacuation, attraction domain, evacuation experiment

PACS: 45.70.Vn, 05.65.+b

DOI: 10.7498/aps.63.094501

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11002035).

[†] Corresponding author. E-mail: mmguo@fudan.edu.cn