

# 房间出口位置及内部布局对疏散效率的影响研究\*

朱孔金 杨立中<sup>†</sup>

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230027)

(2009 年 12 月 18 日收到; 2010 年 1 月 11 日收到修改稿)

利用先前建立的元胞自动机人员疏散模型, 考虑教室类房间内过道区域的影响因素, 调整行人转移概率的计算规则, 分析了教室不同出口位置、教室内不同布局情况下的疏散效率. 结果表明, 正对教室过道的出口对疏散是很有利的, 教室正面边缘开口和侧面开口相比, 宜在侧面开口, 以减少行人运动过程中方向的变化, 而教室正面中央开口虽然疏散效率最高, 但这样的开口不现实; 另外, 当教室侧面开口时, 紧靠出口墙壁侧的过道是必要的, 当教室总容量不变时, 应优先考虑过道分布的设计, 过道的数目和单个过道宽度相比, 过道数目对疏散效率的影响更显著, 过道数量较多时, 疏散效率较高. 本文有望为教室内部布局和出口设置, 以及影剧院、体育馆看台等类似建筑内座椅和过道的分布设计提供建议.

**关键词:** 教室, 元胞自动机, 疏散效率

**PACC:** 0550, 0520

## 1. 引 言

对类似于教室、影剧院、体育馆看台等建筑结构, 其内部有许多规则排列的座椅, 大量人员需离开, 或紧急情况下行人需立即疏散时, 会严重受到建筑物内部布局的影响. 合理地设置出口位置、科学地布置座椅分布, 以及良好地安排出口和过道的相对位置可以有效地提高疏散效率, 缩短人群离开建筑物所需的时间.

人员疏散行为的研究已经有一百多年的历史, 随着计算机水平的提高, 已经从最初的灾后调查发展到了计算机模拟阶段<sup>[1]</sup>. 对类似于教室的多障碍物房间内的疏散问题, 先前的研究大多是集中于小规模疏散演习的实验研究和建立模型的数值模拟对比研究<sup>[2-6]</sup>, 而评价不同布局下疏散效率问题的研究相对较少. Helbing 等人<sup>[7]</sup> 研究指出, 考虑人员的朝向行为将教室的对称结构调整到过道偏向出口侧, 以及设计漏斗型过道(距出口越近, 过道宽度越大), 可以减轻堵塞时的等待时间, 从而有利于提高疏散效率; Burstedde 等人<sup>[8]</sup> 利用元胞自动机模型模拟结果表明, 礼堂开有两个出口时, 左右侧开口明显优于前后面开口. 本文较详细地研究了不同出

口位置以及出口和过道相对位置不同时对疏散效率的影响, 对相同容量(7 列 × 8 排)的教室设计了 9 种不同的布局结构, 分别从桌椅分布不同和过道分布不同的角度, 分析了疏散效率的差异问题. 本文有望为今后的教室内桌椅布置提供建议, 还可以为大型的类似建筑内座椅的分布设计提供依据.

## 2. 模型介绍

元胞自动机是一种空间和时间均离散的、具有有限状态的、可扩散的多维系统, 广泛应用于交通和行人运动研究等复杂的非线性科学领域<sup>[8-18]</sup>. 我们先前的研究曾建立了一种可应用于模拟紧急情况 and 正常情况下的人员疏散模型. 模型的详细介绍可参见文献[19-21]. 为了更好的模拟教室类建筑物的疏散过程, 本文对先前模型中行人转移概率的计算规则做了调整<sup>[22]</sup>, 具体计算过程公式为

$$N_{ij} = \exp[k_s \times (S_1 + S_2) + k_r \times R + k_d \times D], \quad (1)$$

$$P_{ij} = \frac{N_{ij}}{\sum N_{ij}} \cdot (1 - n_{ij}) \cdot w_{ij}, \quad (2)$$

其中,  $P_{ij}$  为行人选择元胞  $(i, j)$  为转移目标的概率;  $N_{ij}$  为元胞  $(i, j)$  对行人的总吸引度值;  $n_{ij}$  为元胞

\* 国家自然科学基金(批准号: 90924014), 教育部博士点基金(批准号: 200803580007)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: yanglz@ustc.edu.cn

$(i, j)$  空闲系数, 若元胞  $(i, j)$  已经被其他行人占据, 则  $n_{ij} = 1$ , 若未被占据, 则  $n_{ij} = 0$ ; 另外, 若元胞  $(i, j)$  为障碍物, 则  $w_{ij} = 0$ , 否则  $w_{ij} = 1$ .

行人下一时刻的运动由概率转移矩阵确定, 而转移概率主要由行人当前所处元胞的邻域元胞的  $N_{ij}$  值决定, 行人总是以较大的概率选择  $N_{ij}$  值较大的元胞.  $N_{ij}$  受很多因素影响, 这里主要考虑了距出口相对位置的吸引 ( $S_1$ ), 过道区域的吸引 ( $S_2$ ), 行人之间或行人与障碍物之间的排斥 ( $R$ ), 以及人群运动方向的吸引 ( $D$ ) 四个因素. 考虑  $S_1$  和  $S_2$  不随时间变化, 为位置静态因素, 将二者合并为一项.  $k_s, k_r, k_d$  为各参数对应的灵敏性系数, 反应了各因素对总吸引度的贡献程度. 整个数值模拟疏散过程共分为四个步骤, 如图 1 所示.

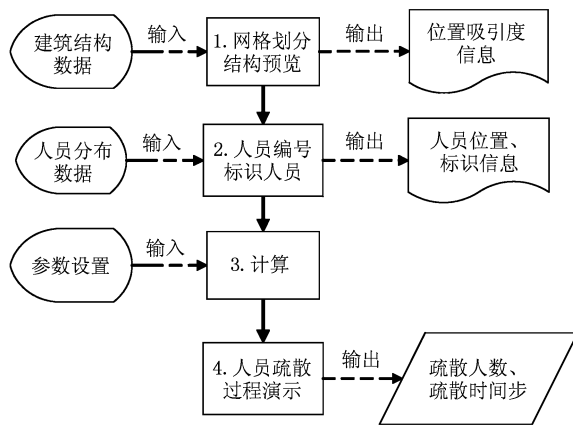


图1 疏散过程示意图

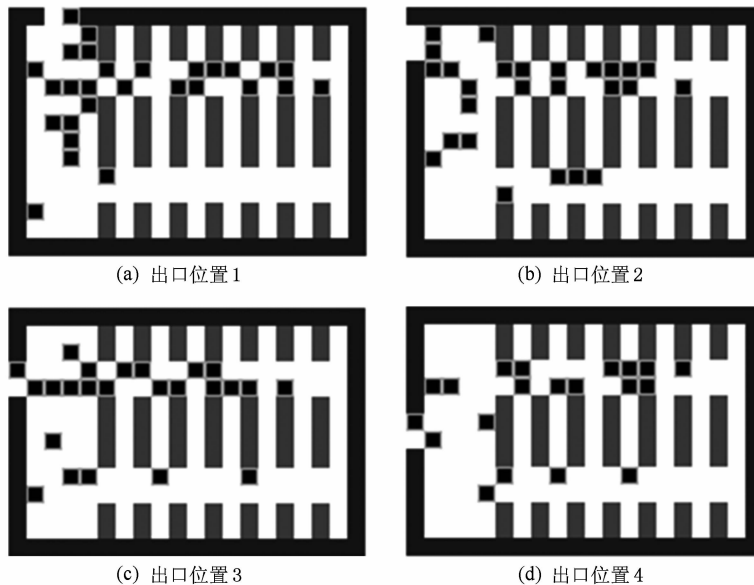


图2 不同出口位置 (a) 教室侧面开口; (b) 教室正面边缘开口; (c) 教室正面正对过道开口; (d) 教室正面中央开口) 下, 教室内布局相同时第  $70ts$  时疏散场景示意图

### 3. 结果分析

#### 3.1. 出口位置影响

相同布局的教室, 出口位置不同时, 模型中计算出的  $S_1$  值会不同, 从而导致个体对疏散路径选择的差异. 因此, 合理地设计出口位置, 优化出口与教室内过道的相对位置可以有效地提高疏散效率.

图 2 为相同教室布局下不同出口位置时第  $70ts$  时的疏散场景. 出口位置不同时, 疏散过程中人群拥挤区域发生在不同位置处, 且拥挤的程度也不一样. 其中, 出口位置 1 下教室的讲台区域聚集了较多的人员, 对空闲区域利用率较大; 出口位置 4 下人员密集程度最低, 未疏散人数最少; 而出口位置 2 与出口位置 3 相比, 过道上的拥挤程度要大, 这说明出口和过道的相对位置对疏散过程中人群密集区域有影响, 二者在同一运动方向没有错位时, 更有利于疏散.

随着疏散时间步的增加, 已经疏散完毕的个体数的变化情况如表 1 和图 3 所示. 其中, 表 1 分别列出了不同出口位置下, 有 0, 50%, 95% 和 100% 个体疏散完毕所用的疏散时间步. 图 3 显示的是随着疏散时间步的增加, 已经疏散完毕的个体数目的变化情况.

可以看出, 出口位置 3 和 4 的疏散效率较高, 其次是出口位置 1, 出口位置 2 的疏散效率最差. 对出

表 1 不同出口位置疏散效率比较

出口位置	最小疏散 时间步/ $t_s$	疏散 50% 人员时所用 时间步/ $t_s$	疏散 95% 人 员所用时间 步/ $t_s$	最大疏散 时间步/ $t_s$
出口位置 1	13	70	123	138
出口位置 2	13	64	119	159
出口位置 3	11	61	114	122
出口位置 4	11	56	113	136

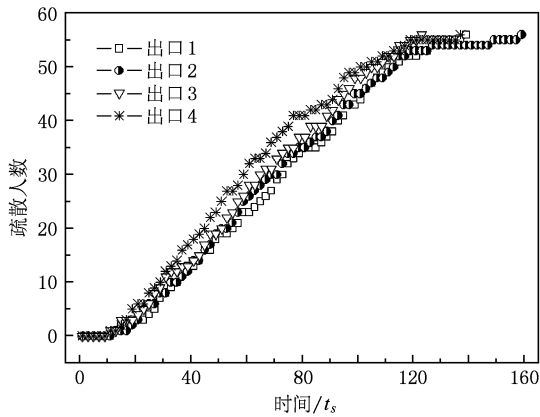


图 3 不同出口位置下疏散时间步与已经疏散人数的关系

口位置 3,出口与过道在同一方向上,人员运动时径直疏散出去,无需改变运动方向,使得疏散所需时

间降低,从而疏散效率提高;在前 95% 的人员疏散时,出口位置 4 的疏散效率是最高的,这主要是因为这时开口在教室中央的对称位置上,两个过道距出口疏散距离相同,人员的分布相对于这时的出口也是对称的,因此对过道的利用率也是相等的,使得疏散效率达到了最大化,但是考虑实际情况,教室正面往往会设置黑板等设备,因此教室正面中央开口是不现实的;出口位置 1 和 2 相比,疏散过程早期二者差别不大,而疏散后期出现显著差别,教室侧面开口的出口位置 1 优于教室正面边缘开口的出口位置 2,这可能是因为侧面开口时,减轻了疏散过程中的拥挤程度,这从图 1(a) 和 (b) 也可看出,而正面边缘开口时,个体在出口附近需要再次改变运动方向,势必会增加疏散时间,使得疏散效率有所降低.

### 3.2. 教室布局影响

考虑一个 7 m × 10 m 的教室结构,内部布置了 8 列 × 7 排桌椅,教室前部讲台区域尺寸为 2 m × 7 m,出口位于教室侧面,宽为 1 m,教室内过道总宽度为 2 m,考虑最危险情况(人员载荷最大),分布有 56 名学生.通过改变过道的数目以及相应的单个过道的宽度,以及改变桌椅分布,来研究疏散效率的差异.9 种不同布局的教室如图 4 所示.

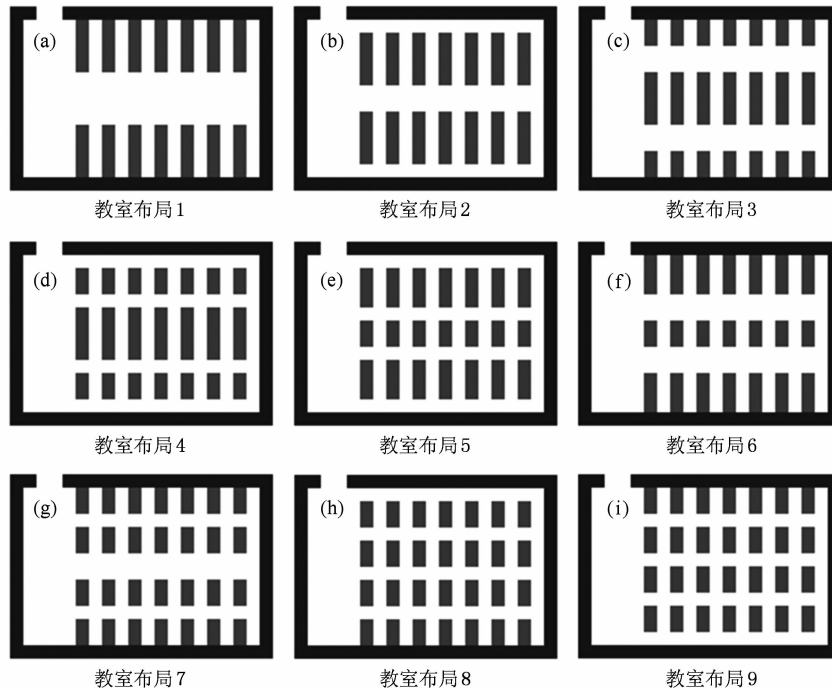


图 4 9 种不同的教室内桌椅布局图((a)一(i)分别为教室布局 1—9) (a)和(b),(c)和(d),(e)和(f),(g)一(i)教室的桌椅分布相同;(b)和(g),(c)和(f),(d,e,h,i)教室的过道分布相同

表2分别列出了不同的教室布局下,疏散人数占总人数的0,25%,50%,75%,95%,以及100%时所用的时间步对比情况.可以看出:教室2,4,5和8布局下,最小疏散时间步(即第一个完成疏散的个体所用时间步)小许多,这4个教室的共同布局是都有一个紧靠出口墙壁的过道,这说明紧靠墙壁的过道是很有利于人员疏散的,特别是紧急情况下,人们需要在最短的时间内疏散完毕时,紧靠出口侧墙壁的过道有利于个体尽快疏散,因此对教室布局的设计,若在侧面开口时,宜优先设置紧靠墙壁的过道.而教室1布局下的最小疏散时间步是最大的( $18t_s$ ),这主要是因为出口和过道的相对位置最大,疏散距离较大,并且这时的桌椅分布是最集中的,不利于个体的疏散.

教室4,5,7,8和9的总疏散时间步(即最大疏

散时间步)较小,它们的教室布局内,过道数目达到最大.在疏散过程中,每一列过道都得到充分地利用,并且将疏散人员引导到不同的区域,减轻了过道上的排队等候现象,从而提高了疏散效率.教室1和6布局下的总疏散时间步较大,从教室布局设计可以看出,这时的个体到过道的距离较大,且过道距出口较远,个体疏散在移动至过道之前的桌椅之间的运动时,排队等候现象较严重,疏散效率不高,从而增大了疏散所需时间.

从整个疏散过程分析,教室5布局下的疏散效率是最高的,这从图5(c)中也可看出,出口处的人员流量较大,疏散所用时间步较低,这是因为这种布局下既有紧靠出口墙壁的过道,又设计了最大数目的过道.相比之下,教室1所用疏散时间步最大,也即教室1的布局设计是最差的.

表2 不同教室布局下,疏散出不同比例人数所用时间步

	最小疏散 时间步/ $t_s$	25% 人员疏散 所用时间步/ $t_s$	50% 人员疏散 所用时间步/ $t_s$	75% 人员疏散 所用时间步/ $t_s$	95% 人员疏散 所用时间步/ $t_s$	最大疏散 时间步/ $t_s$
教室1	18	58	96	126	153	159
教室2	6	34	60	88	116	153
教室3	13	42	70	96	123	138
教室4	8	34	62	87	117	127
教室5	6	36	60	81	102	113
教室6	13	44	74	101	130	150
教室7	13	36	58	83	107	124
教室8	7	33	57	84	104	124
教室9	11	35	63	87	114	132

另外,教室8与教室9相比,二者的桌椅分布和过道分布是相同的,仅是整个布局同出口侧相对位置的差别,教室8出口侧墙壁紧靠过道,而教室9是出口侧墙壁紧靠桌椅,但教室8布局下疏散效率明显优于教室9的布局,教室8的总疏散时间步比教室9低6%.这也论证了在紧靠出口侧墙壁设置过道是有利的这一观点.

图5给出的是桌椅分布相同时不同时间步下已经疏散人数的变化情况.图5(a)教室布局1为单过道,教室布局2为多过道.在疏散前期,教室布局2明显优于教室布局1,随着疏散时间的增加,教室布局2疏散完毕的人数大于教室布局1,且差别越来越大,而疏散后期,教室布局2的出口流量(即曲线斜率)明显下降,单个个体延误了总体疏散时间步,使得二者的差距缩小,总体而言,教室布局2的疏散

效率优于教室布局1;图5(b)教室布局3与教室布局4相比,二者的出口流量相差不多,而教室布局4有紧靠出口侧墙壁的过道,个体到达出口的疏散距离较小,个体所用的最小疏散时间步较小,也进一步使得总体疏散时间较小,教室布局4布局优于教室布局3;图5(c),随着时间步的增加,教室布局5与教室布局6的差别越来越大,教室布局5的过道较多,减少了个体进入过道所需的时间,教室布局5的疏散效率优于教室布局6;(d)图中教室布局7,8和9的过道数目都较多,桌椅的布局较分散,教室布局9的疏散效率是最差的,而教室布局7与8的疏散效率差别不大.

图6给出的是过道分布相同时不同疏散时间步下已经疏散人数的变化情况.图6(a)教室布局2与7为三过道,疏散前期教室布局2由于有紧靠出口

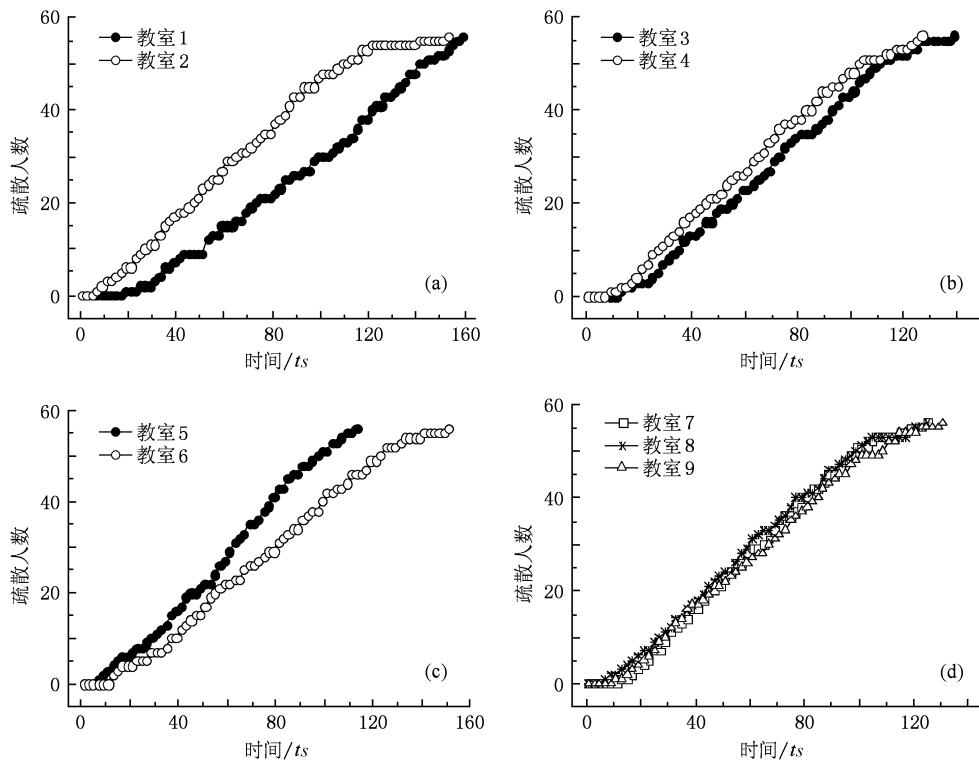


图5 桌椅分布相同时疏散时间步与已经疏散人数的关系 (a)教室布局1与2; (b)教室布局3与4; (c)教室布局5与6; (d)教室布局7,8和9

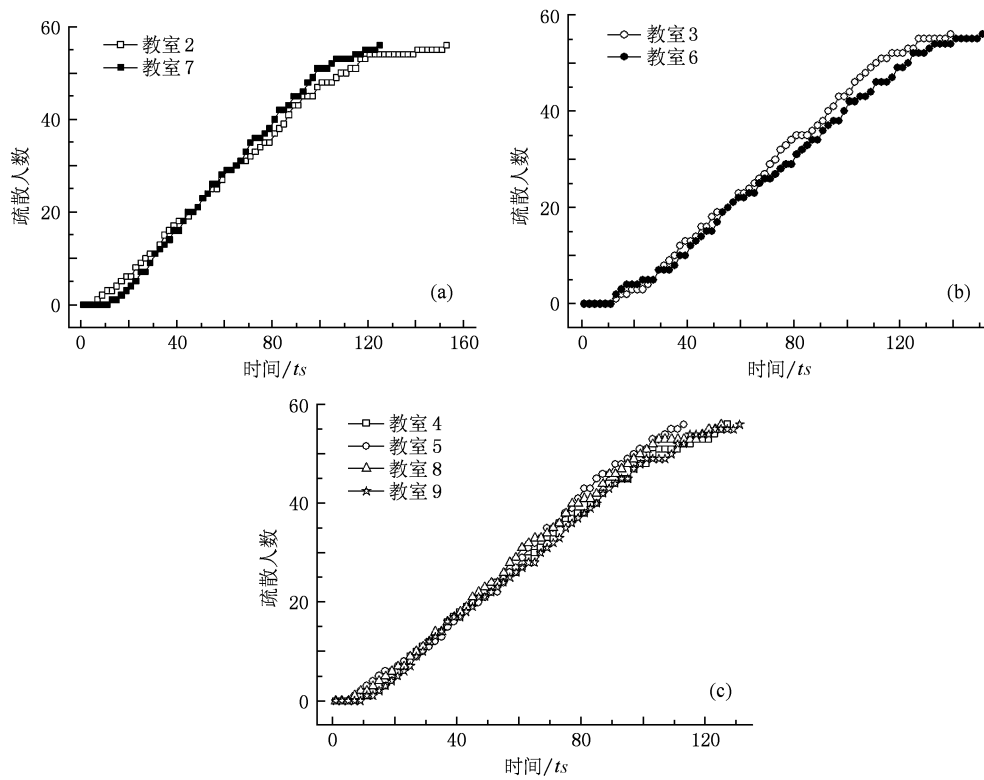


图6 过道相同分布时疏散时间步与已经疏散人数的关系 (a)教室布局2与7; (b)教室布局3与6; (c)教室布局4,5,8和9

侧墙壁的过道,疏散效率大于教室布局 7 的,而疏散后期,由于教室布局 7 的桌椅分布较分散,个体所需排队等候时间缩短,疏散效率反而优于教室布局 2 的,最终单个个体延长了教室布局 2 下的疏散时间步;图 6(b)教室布局 3 与 6 相比,疏散初期二者差别不大,而疏散后期教室布局 3 稍微优于教室布局 6,这可能是因为教室布局 3 中个体更容易进入过道,避免了行人在桌椅之间行走和等待所消耗的时间,从而减少了总体疏散时间步;图 6(c)教室布局 4,5,8 与 9 的疏散效率差别不大,教室布局 5 的总体疏散时间步稍微低一些,这时的教室布局内都有较多的过道数目。

图 5 与图 6 相比,对相同的桌椅分布,由于过道的数目和宽度的不同,疏散效率差别较大,尤其是出口流量的差别,其中设置较多的过道,以及设置紧靠出口侧墙壁的过道,有利于个体尽快的疏散到安全区域,以及会使得总体疏散效率较高。而当过道的分布相同,仅是桌椅的分布不同时,疏散效率差别不大。这提示我们在今后的教室类建筑(影剧院、体育馆看台)设计内部构造时,应该优先考虑过道分布的设计,这主要包括过道的数量和单个过道的宽度的设计。

#### 4. 结 论

为了更好的模拟教室类多障碍物房间(影剧

院、体育馆看台)内的人员疏散过程,在先前建立的元胞自动机人员疏散模型的基础上,考虑教室内过道区域的影响,调整了行人运动转移概率的计算规则。分析了不同出口位置、不同教室布局对疏散效率的影响问题。主要结论有:

1. 设置教室出口时,正对过道的出口对疏散是很有利的,正面边缘开口和侧面开口相比,宜在侧面开口,以减少行人运动方向的改变,提高疏散效率,另外,虽然教室正面中央出口的疏散效率较高,但不现实;

2. 当教室侧面开口时,紧靠出口墙壁侧的过道是必要的,可以使个体尽快地疏散至安全区域,设置较多的过道数目对疏散也是很有利的,也即,过道的数目和单个过道宽度相比,过道数目对疏散效率的影响更显著,过道数量较多时,疏散效率也较高;

3. 当教室总容量不变时,应优先考虑过道分布的设计,相同桌椅分布下的不同布局的教室疏散效率差别较大,而相同过道分布下不同布局的教室疏散效率差别不大。

本文研究的教室规模较小,今后会研究大型类似建筑(影剧院、体育馆看台)内不同布局时的疏散效率问题。另外,今后会考虑出口因素(数量、宽度)以及过道宽度对疏散效率的影响。本文有望为教室内桌椅的布局,以及影剧院、体育馆看台内座椅的设计提供建议。

- [1] Bryan J L 1999 *Fire Mater* **23** 249
- [2] Weckman H, Lehtimäki S, Mannikko S 1999 *Fire Mater* **23** 357
- [3] Zhang J, Song W G, Xu X 2008 *Physica A* **387** 5901
- [4] Liu S B, Yang L Z, Fang T Y, Li J 2009 *Physica A* **388** 1921
- [5] Helbing D, Isoobe M, Nagatani T, Takimoto K 2003 *Phys. Rev. E* **67** 067101
- [6] Varas A, Cornejo M D, Mainemer D, Toledo B, Rogan J, Munoz V, Valdivia J A 2007 *Physica A* **382** 631
- [7] Helbing D, Buzna L, Johansson A, Werner T 2005 *Transport Sci.* **39** 1
- [8] Burstedde C, Kirchner A, Klauack K, Schadschneider A, Zittartz J 2002 *Pedestrian and Evacuation Dynamics* (Berlin: Springer-Verlag) p87
- [9] Yue H, Shao C F, Yao Z S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4523 (in Chinese) [岳 昊、邵春福、姚智胜 2009 物理学报 **58** 4523]
- [10] 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]
- [11] Zhou J W, Chen X L, Zhou J H, Tan H L, Kong L J, Liu M R 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2281 (in Chinese) [周金旺、陈秀丽、周建槐、谭惠丽、孔令江、刘慕仁 2009 物理学报 **58** 2281]
- [12] 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]
- [13] Yuan W F, Tan K H 2008 *4th International Conference on Structural Engineering and Construction* Melbourne, Australia, September 26—28, 2007 p1253
- [14] Yuan W F, Tan K H 2007 *Physica A* **384** 549
- [15] Nishinari K, Kirchner A, Namazi A, Schadschneider A 2004 *Leice T Inf Syst* **E87d** 726
- [16] Guo R Y, Huang H J 2008 *J. Phys. a-Math. Theor.* **41** 385104
- [17] Kirchner A, Schadschneider A 2002 *Physica A* **312** 260
- [18] Burstedde C, Klauack K, Schadschneider A, Zittartz J 2001 *Physica A* **295** 507

- [19] Yang L Z, Fang W F, Fan W C 2003 *J. Fire Sci.* **21** 227 *China Ser. E* **47** 608
- [20] Yang L Z, Fang W F, Huang R, Deng Z H 2002 *Chinese Sci. Bull* **47** 1484
- [21] Yang L Z, Li J, Zhao D L, Fang W F, Fan W C 2004 *Sci. MDUSA*, Mar 8—10, 2010
- [22] Zhu K J, Yang L Z, Liu S B 2010 *The 5th International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics Gaithersbury, MDUSA*, Mar 8—10, 2010

## The effects of exit position and internal layout of classroom on evacuation efficiency\*

Zhu Kong-Jin Yang Li-Zhong<sup>†</sup>

(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of Hefei 230027, China)

(Received 18 December 2009; revised manuscript received 11 January 2010)

### Abstract

On the basis of the previous cellular automaton evacuation model, we modify the method of calculating the pedestrians' transition probability with considering the effect of aisle region in the classroom-like buildings, and analyze the difference among evacuation efficiencies induced by different exit positions and different layout inside classrooms. The results demonstrate that it is very beneficial when the exit faces the aisle, that it is useful to set up exit on the side of the classroom compared with exit which is on the edge of the facing classroom in order to reduce the change in direction of pedestrian movement, that the exit situated at the central position in the front of classroom is the most efficient, however, is unrealistic; in addition, when the classroom is designed to have a side exit, the aisle is necessarily close to the exit side of the wall; when the total capacity of the classroom is fixed, we should give a priority to the design of aisle distribution, rather than the design of the arrangement of chairs and tables; the number of aisles is more significant to affect the evacuation efficiency than the width of a single aisle, the larger the number of aisles is, the higher the evacuation efficiency will be. This paper is expected to be able to make suggestions for the design of internal layout and exit position of the classroom, as well as the design of the distribution of grandstand seats and aisles in similar buildings, such as theaters, stadiums, etc.

**Keywords:** classroom, cellular automata, evacuation efficiency

**PACC:** 0550, 0520

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 90924014), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (Grant No. 200803580007).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: yanglz@ustc.edu.cn