

【航空科学与工程研究】

结伴行为对航站楼出发厅旅客疏散的影响

杜红兵, 赵德超, 邢梦柯

(中国民航大学 安全科学与工程学院, 天津 300300)

摘要:为探究结伴行为对旅客疏散的影响,提出了一种基于 AnyLogic 的系统仿真框架,分别建立了航站楼出发厅物理环境模型、旅客初始分布仿真模型、旅客应急疏散仿真模型。以某机场为例,模拟了航站楼旅客正常离港与应急疏散流程;根据客流高峰时期航站楼旅客在各出口的疏散状况与疏散时间,分析了不同结伴比例对旅客疏散效率的影响。结果表明:疏散出口无拥挤现象时,旅客结伴比例为 20% 与 40% 时,相较于无结伴行为,旅客疏散时间并无显著增加,旅客结伴比例为 60% 时,疏散时间显著增加;疏散出口发生拥挤现象时,结伴比例为 60% 时相较于无结伴行为的旅客疏散时间更短;模型优化后的疏散时间显著降低。研究结果对组织航站楼内结伴旅客疏散具有一定的指导意义。

关键词:航站楼;出发厅;结伴行为;疏散时间;拥挤现象

中图分类号: X 947 **文献标识码:** A **DOI:**10.13486/j.cnki.1673-2618.2023.04.004

机场扩建与增加为当地带来巨大经济效益的同时,也产生了巨大的安全隐患,尤其是消防问题。机场航站楼作为旅客密集的大型公共建筑,内部人员密集且结构复杂,一旦发生火灾等突发事件极易造成大量人员伤亡和财产损失,因此研究航站楼内人员疏散有重大现实意义。

根据《2021 年暑假出游结伴人群类型》统计:结伴人员占比 77%,独行出游仅占比 23%^[1]。结伴出行成为主流模式。结伴行为是指存在特定关联的 2 个或者 2 个以上的行人一起行走,结伴行为主要出现在人群大规模集散的公共场所内,如车站、航站楼等大型公共运输类建筑。结伴旅客在疏散过程中响应时间更长,逃离过程中会有停留、折返等动作,从而影响疏散进程。

近年来,国内外学者对航站楼内人员疏散进行了研究,取得了一系列成果。周杰松等对绵阳机场航站楼进行实地调研,构建了基于 AnyLogic 的应急疏散仿真模型,得出该航站楼火灾发生 1~3 min 为最佳疏散时间^[2];张龙财等以安全风险为管理背景,在风险因素分析的基础上结合 Free FTA,以兰州中川机场为实例,使用应急疏散仿真软件 AnyLogic 构建模拟环境,对可能影响疏散效率的各类风险因素进行优化^[3];GU 等设计了一个火灾疏散仿真系统,提出了一种混合人群疏散建模与仿真方法^[4];ARDI 等提出了一种利用贝叶斯网络进行寻路的复杂系统建模方法,获得影响苏加诺-哈塔机场寻路活动的因素,为系统改进提供建议^[5]。以上研究重点考虑建筑的结构、人员密度、行人速度等固有属性对疏散的影响,而人员的各种行为对疏散进程有着巨大的影响。宋英华等建立了一种考虑避让行为的元胞自动机模型,分析不同人员比例和初始分布对疏散的影响^[6];高国平等研究了青年人对老年人的帮助行为对疏散的影响,得出年轻人的帮助行为有助于疏散,但其效率受老年人比例和位置的影响^[7];XIE 等研究了群组效应对疏散的

收稿日期:2023-02-20

第一作者简介:杜红兵(1967—),男,山西河津人,教授,博士,主要从事民航安全管理研究。

E-mail:hongbin_du@163.com

影响,当疏散出口较宽时,总疏散时间变短,群组效应促进了疏散^[8];胥旋等研究了人员的绕行行为对疏散的影响,引入感知参数,改变了以往只考虑临近 4 个网格的行人状态^[9];GUAN 等研究了包含两种不同行为的人员即合作者与非合作者共同疏散的问题^[10];CHENG 等研究疏散中人群的合作行为,行人间的合作行为受逃生意愿水平、紧急程度和异质学习率 3 个因素影响^[11]。以上研究分析了人员的行为对疏散进程的影响,对于人员的结伴行为及比例尚未进行充分研究。本文将航站楼出发厅旅客按性别、年龄进行分类,结伴比例分别设置为 0、20%、40%与 60%,探究不同结伴比例对疏散效率的影响。

1 航站楼旅客疏散模型的建立

1.1 社会力模型

本文使用 Anylogic 软件对航站楼出发厅火灾人员疏散进行仿真研究。该软件基于社会力模型,能够较好地模拟火灾发生时航站楼内旅客真实的运动状态。社会力模型由 HELBING^[12]提出,已成为当今主流的人员疏散模型。社会力模型基于牛顿第二定律,乘客所受的力由乘客自身驱动力、乘客间相互作用力、乘客与障碍物间作用力和随机力 4 部分组成,数学表达式为 $m_i \frac{dv_i}{dt} = f_{wall} + \sum_{j(\neq i)} f_{ij} + \sum_w f_{iw} + \xi$ 。式中: m_i 为乘客的质量(kg); v_i 为乘客 i 当前速度(m/s); t 为时间(s); f_{wall} 为乘客 i 的自身驱动力(N),反映了乘客受运动目标的影响; f_{ij} 为乘客 i 与乘客 j 之间的相互作用力(N),反映了乘客受周围其他人的影响; f_{iw} 为乘客 i 与障碍物 W 间的作用力(N),反映了乘客受周边墙壁等障碍物的影响; ξ 为乘客 i 受到的随机力(N),反映了乘客运动行为的不确定性。

乘客的自身驱动力表示其个体期望在一定时间内将当前实际速度改变至期望速度,数学表达式为 $f_{wall} = m_i \frac{v_i^0(t)e_i^0(t) - v_i(t)}{\tau_i}$ 。式中: v_i^0 为乘客 i 期望速度的标量; e_i^0 为乘客 i 期望速度的单位方向向量; $v_i(t)$ 为乘客 i 在 t 时刻的速度(m/s); τ_i 为乘客 i 从当前时刻速度达到期望速度的时间(s)。

1.2 行人速度

对于无结伴行为旅客的行走速度,目前主要通过现场调研和视频取证两种方式进行统计。董书衡在地铁旅客行为特征的疏散仿真研究中,对不同地区乘客行走速度修正,得到不同年龄、性别的旅客行走速度^[13],青年男性、青年女性、中年男性、中年女性、老年男性、老年女性行走平均速度分别为 1.35 m/s、1.25 m/s、1.27 m/s、1.18 m/s、1.19 m/s、1.07 m/s。对于结伴行为旅客的行走速度与疏散速度,刘子凡在考虑行人特征的大型公共建筑的研究中,对结伴行为的行走速度进行了统计分析:2 人结伴旅客行走平均速度为 1.12 m/s,3 人结伴旅客行走平均速度为 1.08 m/s;对于乘客的疏散速度,由于乘客在紧急疏散时会加速移动,设定修正因子为 1.2,即疏散速度为正常行走速度的 1.2 倍^[14]。

1.3 结伴行为

相较于地铁、高铁等运动受限空间,航站楼内有多通道、结构复杂、乘客携带行李多等特点,结伴人员的比例也会大大增加。实际航站楼出发厅旅客疏散时发生的结伴行为较复杂,本文对结伴行为、结伴区域做了适当简化。假定乘客均在进入航站楼时完成结伴行为并进入航站楼出发区办理值机、安检等手续,最后进入航站楼候机区等待乘机。为方便研究问题和符合实际情况,本文选取旅客结伴比例分别为 0、20%、40%、60%,分析不同结伴比例对航站楼旅客疏散的影响。

1.4 疏散效率评价

疏散效率评价一直是研究疏散行为和设计建筑的重要内容。本文以疏散运动时间、必要安全疏散时间、不同结伴比例下各出口疏散情况为评价指标研究航站楼内旅客疏散。根据消防安全疏散第九部分的人员疏散评估指南^[15],必要安全疏散时间 REST 是指从火灾等突发事件发生起,一直到人员疏散到安全区域所用的时间,主要包括感知时间(t_1)、响应时间(t_2)、疏散运动时间(t_3)。其中,感知时间是指从突发

事件发生到航站楼的内部监测设备感知并报警的时间,响应时间是指从旅客意识到突发事件并开始疏散的反应时间,疏散运动时间是指所有旅客从开始疏散至安全区域所用的时间。对于旅客的感知与响应时间,韩燕喆^[16]在考虑结伴行为的地铁车站的行人疏散研究中,将行人的感知时间设置为 5 s,无结伴行为响应时间为 10 s,结伴行为响应时间为 20 s,航站楼作为大型公共客运建筑同样适用。疏散运动时间通过建立的疏散仿真模型得到。

2 航站楼旅客疏散模型应用

为验证航站楼旅客出发厅疏散模型的实用性,本文以某机场航站楼出发厅为例,分别建立该航站楼出发厅物理环境模型、旅客初始分布仿真模型、旅客应急疏散仿真模型,分析不同结伴比例对旅客疏散效率的影响。

2.1 航站楼布局信息

该机场为 4C 级支线机场,机场航站楼面积 3499.1 m²,可满足年旅游吞吐量 28 万人次、货邮吞吐量 1200 t、飞机起降 3333 架次的使用需求。根据《建筑防火设计规范》^[17]对民用公共建筑的设计要求,该航站楼为单层建筑,耐火等级不低于二级。设计阶段峰值人流量为 350 人,每 111 人设计疏散宽度 1.65 m,设计疏散宽度 12.4 m,计算疏散宽度 2.275 m。计算疏散宽度大于设计疏散宽度,满足疏散要求。根据《民用机场航站楼设计防火规范》^[18],机场航站楼内供旅客使用的区域主要有出发区、候机区与到达区。本文的研究范围为旅客离港区域,主要包括该航站楼的出发区与候机区。

2.2 航站楼物理环境模型构建

根据该机场航站楼建筑 CAD 图纸,利用 Anylogic 软件的空间标记模块建立航站楼物理环境模型。图 1 为航站楼的平面布局,对于航站楼的办公区域,默认为旅客不可进入,用矩形实体代替。

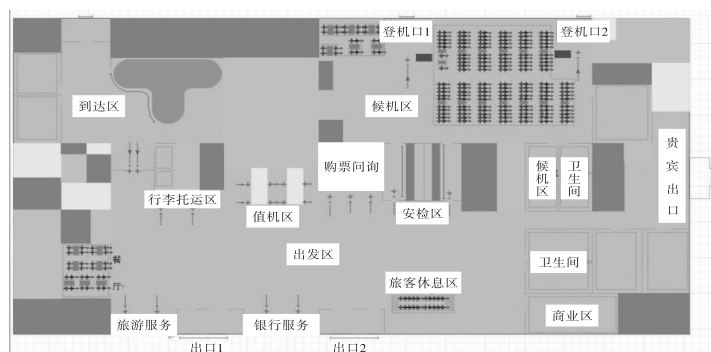


图 1 航站楼的平面布局

2.3 高峰小时人数

关于高峰小时人数的计算方法,我国民用航空根据航班满载旅客数与国内正点航班平均客座率的乘积计算。中国民航局公布的数据显示,国内航空公司平均客座率为 80%。对于航班满载旅客数,通过对该机场 2022 年 3 月 37 日至 2022 年 10 月 2 日的离港航班时刻表进行统计,得出该机场航班机型主要有 B737-800、空客 A320、空客 A319,各机型满载人数分别为 162 人、150 人、126 人。经计算得到该机场实际高峰小时人数为 350 人。航站楼内工作人员共 10 人,疏散时默认为普通旅客,本文疏散人数共 360 人。

2.4 旅客结伴行为场景设定

在 Anylogic 结伴行为模型中,拖入 Select Output 与 Ped Group Assemble 元素,按照概率设置结伴行为比例,结伴比例分别为 0、20%、40%、60%。旅客从出口 1 和 2 到达出发大厅,在出口处完成结伴行为并进入航站楼接受服务,组的大小为 2~3 人,接受服务类型为单独服务所有组成员。

2.5 旅客初始分布

旅客到达航站楼后,需经历购票、值机、安检等流程。结合该机场航站楼旅客实际离港状况,利用

AnyLogic 行人库模块建立旅客离港流程与应急疏散流程。

旅客到达速率设置为 180 人/h,即在該速率下运行仿真一小时,可得到客流高峰时期不同结伴比例下的旅客初始分布。表 1 统计了各结伴比例下旅客初始分布情况。

表 1 旅客初始分布情况

结伴比例/%	值机区/人	安检区/人	候机区/人	各服务区/人
0	88	28	228	16
20	105	25	208	22
40	95	16	227	22
60	67	18	257	18

3 仿真实验与结果分析

3.1 应急疏散路径的选择

航站楼出发厅达到客流高峰后,对航站楼出发区的旅客进行紧急疏散,即突发事件发生时,所有旅客停止当前接受的服务,由所在位置向最近出口进行紧急疏散。

疏散路径选择最短路径,在软件中对智能体找寻疏散出口进行定义,编译代码如下:double dis = 999999.0 * 999999.0;for(TargetLine m:get_Main 出口){if(this.distance To(m.get X(),m.get Y())<= dis){出口 = m;dis = this.distance To(m.get X(),m.get Y());}}。

3.2 疏散时间

基于航站楼旅客疏散模型,使用 AnyLogic 仿真软件计算旅客在不同结伴比例下疏散运动时间。为减小误差,仿真 20 次,取平均数作为旅客疏散运动时间。实验结果见表 2。

表 2 不同结伴比例下的实验结果

结伴比例/%	感知时间/s	响应时间/s	疏散运动时间/s	REST/s
0	5	10	126.8	141.8
20	5	20	117.9	142.9
40	5	20	122.1	147.1
60	5	20	153.9	178.9

由表 2 可知,当结伴比例分别为 20%、40%时,旅客的疏散运动时间相较于无结伴行为降低。由于结伴行为的旅客响应时间变长,使总疏散时间增加,结伴比例为 60%时,疏散运动时间显著增加。

3.3 旅客疏散分布

为进一步分析不同结伴比例下各出口的疏散情况,表 3 统计了不同结伴比例下各出口的疏散人数。

表 3 各出口疏散人数

结伴比例/%	出口 1	出口 2	贵宾出口	登机口 1	登机口 2
0	24	97	10	151	78
20	27	108	6	129	90
40	21	93	11	149	86
60	19	91	2	162	86

根据旅客初始分布与各出口疏散人数,相同客流量下旅客疏散运动时间不同的主要原因是突发事件发生时旅客的初始分布不同。旅客结伴比例为 60%时,候机厅位于登机口 1 与登机口 2 附近的人员较多,作为应急疏散出口的登机口 1 与登机口 2 疏散时出现人员拥挤现象,造成了疏散运动时间的增加。当

结伴比例为 20%与 40%时,旅客位于值机区、购票区、安检区的旅客较多,当突发事件发生后,处于该区域的旅客立即向出口 1 与出口 2 疏散,减缓了登机口 1 与登机口 2 的疏散压力,使疏散时间降低。

3.4 旅客疏散效率曲线分析

为分析各出口在不同结伴比例下的疏散效率,绘制各出口疏散时间曲线,横坐标表示疏散人数,纵坐标表示疏散运动时间。

图 2 与图 3 分别表示出口 1 与出口 2 在不同结伴比例下的疏散情况。从图中可知,出口 1 无结伴行为疏散效率高于结伴行为。出口 2 无结伴行为的疏散效率在 20%与 40%之间,当结伴行为比例小于 40%时,一定程度的结伴行为有利于提高疏散效率。当结伴比例为 60%时,两个出口的疏散效率较低。

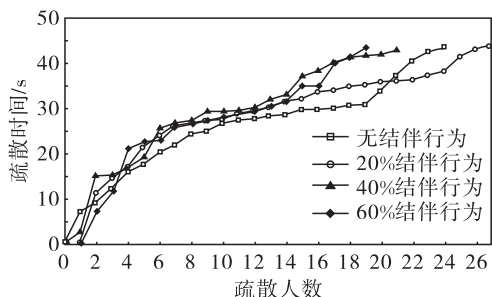


图 2 出口 1 疏散情况

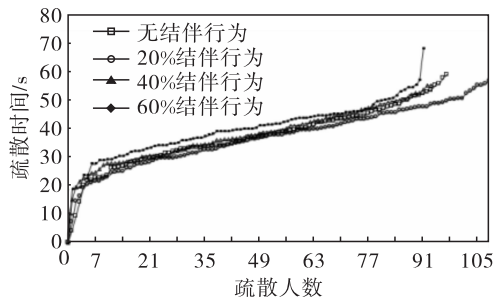


图 3 出口 2 疏散情况

图 4 表示贵宾区出口在不同结伴比例下人员的疏散情况。从图中可知,由于贵宾出口距离较远,位于候机厅附近的旅客一部分选择拥挤的登机口 1 进行疏散,一部分选择通过安检通道选择出口 2 和贵宾出口进行疏散逃生。

图 5、图 6 分别表示登机口 1 与登机口 2 在不同结伴比例下人员的疏散情况。从图中可知,当结伴比例为 60%时,作为应急疏散出口的登机口 1 和 2,疏散效率最高,而无结伴行为和结伴比例为 20%、40%的疏散场景疏散效率相对较低。

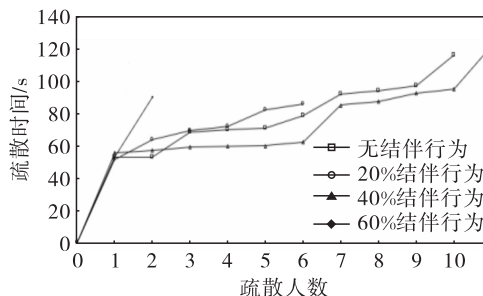


图 4 贵宾出口疏散情况

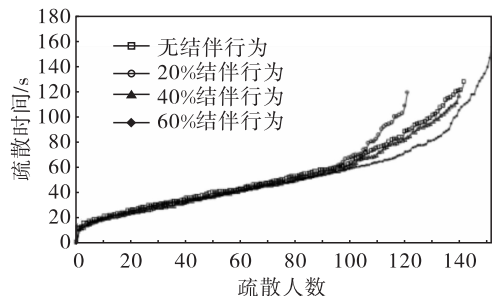


图 5 登机口 1 疏散情况

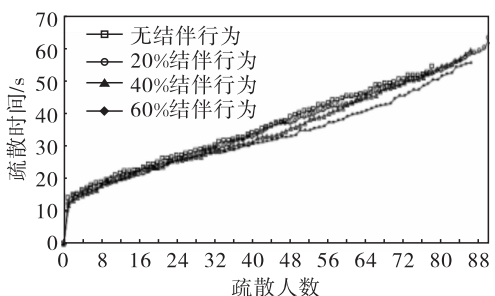


图 6 登机口 2 疏散情况

3.5 模型优化分析

综合以上分析结果可知,登机口 1 与 2 出现拥挤现象,导致疏散时间增加。因此,设置人员干预措施,引导候机厅部分旅客通过安检通道前往出发厅进行疏散。使用 Anylogic 软件生成优化后登机口 1 与登机口 2 人员疏散结果。结果如下:优化前登机口 1 与登机口 2 疏散时间分别为 153.9 s 与 55.5 s,优化后为 118.6 s 与 50.6 s,降幅为 22.93%与 8.83%;优化前登机口 1 与登机口 2 疏散人数分别为 162 人与 86 人,优化后为 109 人与 76 人,降幅为 32.72%与 11.63%。从数据可以看出,设置人员引导后,减缓了

两个疏散出口的压力。

4 结论

本文基于仿真软件 AnyLogic 建立了航站楼旅客疏散模型,研究了不同结伴比例对航站楼旅客疏散的影响,并以某机场为例验证了此模型的实用性。结论如下:

(1)建立航站楼出发厅物理环境模型与旅客初始分布模型,验证了旅客疏散时初始人员分布、疏散出口的拥挤程度、疏散出口的选择等因素会对疏散结果产生较大影响。

(2)建立旅客应急疏散仿真模型,验证了当应急疏散出口不存在拥挤现象时,一定程度的结伴行为有助于旅客疏散,结伴行为比例较大会使疏散时间增加。当应急疏散出口存在拥挤时,出现“快即是慢”现象,即结伴比例较大时,旅客疏散时间较短。

(3)针对航站楼登机口 1 与 2 人员疏散时出现的拥挤与秩序混乱现象,建立优化后的疏散模型,验证了设置人员干预措施后,旅客疏散时间显著降低。

参考文献:

- [1] 2021 年中国暑期出游人群的结伴对象的分布情况[EB/OL]. (2021-08-27)[2023-01-20]. [https://dydata.io/datastore.detail/2221958132064718848/](https://dydata.io/datastore/detail/2221958132064718848/).
- [2] 周杰松,邓永恒.基于 AnyLogic 的机场航站楼应急疏散仿真研究[J].现代计算机(专业版),2017(14):82-84.
- [3] 张龙财,余美君.航站楼到港旅客应急疏散仿真优化[J].综合运输,2021,43(10):83-89.
- [4] GU T, WABG C, HE G. A VR-based, hybrid modeling approach to fire evacuation simulation [C]//The 16th ACM SIGGRAPH International Conference. ACM, 2018. DOI:10.1145/3284398.3284409.
- [5] ARDI R, FIKRI S, RAHAYU P D. Investigating Effectiveness Wayfinding on Terminal Navigation in Terminal 2 Soekarno-Hatta Airport: Bayesian Network Approach [C]//The 2019 5th International Conference, 2019. DOI:10.1145/3364335.3364340.
- [6] 宋英华,张宇,霍非舟,等.考虑避让行为的人员疏散元胞自动机模型研究[J].系统仿真学报,2020,32(6):975-981.
- [7] 高国平,管昌生.考虑帮助行为的人员疏散元胞自动机模型[J].中国安全科学学报,2018,28(1):56-61.
- [8] XIE W, LEE E W M, LI T, et al. A study of group effects in pedestrian crowd evacuation: experiments, modelling and simulation[J]. Safety science, 2021, 133(1): 105029.
- [9] 胥旋,史聪灵,李建,等.考虑绕行效应的人员疏散元胞自动机模型研究[J].中国安全生产科学技术,2018,14(2):20-25.
- [10] GUAN J, WANG K, CHEN F, et al. Evolution of pedestrian evacuation considering different human behaviors[J]. International journal of modern physics C, 2017, 28(6): 1750081.
- [11] CHENG Y, ZHENG X. Emergence of cooperation during an emergency evacuation[J]. Applied mathematics and computation, 2018, 320(5): 485-494.
- [12] HELBING D, MOLNAR P. Social force model for pedestrian dynamics[J]. Physical review E, 1995, 51(5): 4282-4286.
- [13] 董书衡.地铁疏散人员行为特征及应急疏散仿真[D].郑州:郑州大学,2017.
- [14] 刘子凡.考虑人群特征的大型公共建筑应急疏散仿真研究[D].天津:天津工业大学,2020.

- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.消防安全工程 第九部分:人员疏散评估指南:GB/T 31593.9-2015[S].北京:中国标准出版社,2015.
- [16] 韩雁喆.考虑结伴行为的地铁车站站台行人疏散建模与仿真研究[D].北京:北京交通大学,2020.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.建筑设计防火规范:GB 50016-2014[S].北京:中国计划出版社,2018.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.民用航站楼设计规范:GB 51236-2017[S].北京:中国计划出版社,2018.

The Influence of Companion Behavior on Passenger Evacuation in Departure Hall of Terminal

DU Hongbing, ZHAO Dechao, XING Mengke

(School of Safety Science and Engineering,
Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In order to explore the influence of companion behavior on passenger evacuation, a system simulation framework is proposed based on AnyLogic. The physical environment model of the departure hall of the terminal, the simulation model of passenger initial distribution and the simulation model of passenger emergency evacuation are established respectively. An airport is taken as an example to simulate the normal departure and emergency evacuation process of passengers in the terminal. According to the evacuation status and evacuation time of the terminal passengers at each exit during the peak of passenger flow period, the impact of different companion ratios on passenger evacuation efficiency is analyzed. The results show that when there is no crowding at the evacuation exit, the proportion of passengers' companion is 20% and 40%. Compared with the non-companion behavior, the evacuation time of passengers is not significantly increased. When the proportion of passengers' companion is 60%, the evacuation time is significantly increased. When the evacuation exit is congested, the evacuation time is shorter when the proportion of passengers with companions is 60% than that of passengers without companions. The evacuation time after model optimization is significantly reduced. The results show certain guiding significance for organizing the evacuation of passengers in the terminal.

Keywords: terminal; departure hall; companion behavior; evacuation time; crowding phenomenon

(责任编辑:唐立平)