

文章编号: 1674-8190(XXXX)XX-001-09

# 飞机倾斜对乘员应急撤离行为的影响研究

游乾乾<sup>1,2</sup>, 陈琨<sup>1</sup>, 寇志远<sup>1</sup>, 冯振宇<sup>1</sup>, 陈向明<sup>3</sup>

(1. 中国民航大学 安全科学与工程学院, 天津 300300)

(2. 中国民航大学 中欧航空工程师学院, 天津 300300)

(3. 中国飞机强度研究所 复合材料结构强度研究室, 西安 710065)

**摘要:** 应急撤离是飞机上乘客在发生可生存坠撞事故后迅速逃离危险的重要方法。目前, 国内外已广泛开展有关水平姿态下飞机应急撤离的研究, 但发生可生存事故时, 飞机姿态容易发生倾斜, 而关于倾斜姿态下飞机乘员疏散的研究不足。为了分析倾斜机舱对飞机事故后乘客疏散的影响, 依据试验统计数据, 建立飞机倾斜姿态下个体减速比和不同应急滑梯角度的下滑速度模型; 在传统社会力模型中引入倾斜状态人员运动模型, 构建倾斜姿态下飞机乘客疏散仿真模型, 通过试验数据验证模型的有效性; 考虑事故引发的不同倾斜姿态, 研究飞机乘客疏散时间和瓶颈空间分布。结果表明: 迅速疏散位于机舱上坡部分的乘客避免拥堵十分重要。

**关键词:** 飞机倾斜; 事故逃生; 疏散模型; 人群行为; 瓶颈时空分布

中图分类号: V328

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.XXXX.XX.01

## Research on the impact of airplane inclination on passengers' emergency evacuation behavior

YOU Qianqian<sup>1,2</sup>, CHEN Kun<sup>1</sup>, KOU Zhiyuan<sup>1</sup>, FENG Zhenyu<sup>1</sup>, CHEN Xiangming<sup>3</sup>

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

(2. Sino-European Institute of Aviation Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

(3. Composite Structure Strength Research Laboratory, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** After a preventable catastrophe on the ground, emergency evacuation is a crucial means for airplane occupants to immediately flee danger. Although there has been a lot of research on emergency evacuation of aircraft in a horizontal attitude, the aircraft attitude is susceptible to tilt in the event of a reversible accident, and there hasn't been enough research on the evacuation of aircraft occupants in an inclined attitude. A model of individual deceleration ratios and the sliding speed of various emergency slide angles under the tilted attitude of the aircraft was established based on experimental statistics in order to analyze the impact of the tilted cabin on the evacuation of passengers after an aircraft accident. A model of personnel movement in the tilted state was then added to the conventional social force model to create a simulation model of the evacuation of aircrew. To analyze the spatial distribution of bottlenecks and time for passenger evacuation for various inclination attitudes brought on by accidents. The findings indicate that in order to avoid overcrowding, it is crucial to promptly evacuate passengers who are in the upward-facing area of the cabin. To reduce the risks associated with overcrowding of occupants, special attention should be made to the evacuation of bottleneck exits in the cabin's downward segment.

**Key words:** aircraft inclination; accident escape; evacuation modelling; crowd behaviour; spatial and temporal distribution of bottlenecks

收稿日期: 2023-11-13; 修回日期: 2024-02-11

基金项目: 国家重点研发资助(2022YFB4301000)

通信作者: 冯振宇(1966-), 男, 博士, 教授。E-mail: mhzy@163.com

引用格式: 游乾乾, 陈琨, 寇志远, 等. 飞机倾斜对乘员应急撤离行为的影响研究[J]. 航空工程进展, XXXX, XX(XX): 1-9.

YOU Qianqian, CHEN Kun, KOU Zhiyuan, et al. Research on the impact of airplane inclination on passengers' emergency evacuation behavior[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, XXXX, XX(XX): 1-9. (in Chinese)

## 0 引言

随着我国经济快速发展,飞机成为人们出行的重要交通工具。然而受各种不可控因素影响,飞机发生各种事故又难以避免。飞机应急撤离指发生可生存坠撞事故后,乘客快速疏散到安全地点、脱离危险的重要方法。2011年中国民用航空局发布适航规章 CCAR-25-R4,其中 25.803 条款中规定:“对于客座量大于 44 座的飞机,在满足最大乘坐量的前提下,需通过演示试验或者分析的方法,在 90 s 内机上人员可从飞机成功疏散到安全地点。”<sup>[1-2]</sup>

目前,国内外研究人员对飞机处于水平姿态时人员应急撤离开展了大量研究。美国国家安全运输委员会调查了 46 次涉及 18 种机型的紧急疏散事件,向美国联邦航空管理局提出了关键安全建议<sup>[3]</sup>;王霁飞等<sup>[4]</sup>运用智能体模型和 A\*算法,成功模拟了波音 737-700 的疏散情况,证明了其算法的高效性;宋娜等<sup>[5]</sup>深入分析了运输飞机的应急撤离要求,提出了实用的试验方案;彭浩轩等<sup>[6]</sup>则对应急撤离的研究方法和数值仿真方法进行了总结归纳,为未来研究指明了方向;中国商用飞机有限责任公司为了验证 C919 的适航性,开展全机地面演示实验<sup>[7]</sup>;SONG Chengcheng 等<sup>[8]</sup>基于元胞自动机构建考虑旅客行李取回和超车行为的客舱疏散模型;Melis 等<sup>[9]</sup>探索中型和大型飞机上超重乘客数量增加对撤离时间的影响;Xu Chenchen 等<sup>[10]</sup>利用陈述偏好实验来评估人们在飞机紧急疏散中的出口选择;Choochart 等<sup>[11]</sup>研究在自由疏散、区域疏散等多种方式下,有效评估乘客疏散并找到最有效的疏散形式。

但飞机在发生事故迫降后,并不能确保处于适航验证试验时的水平姿态,可能由于起落架折断等因素使得人员应急撤离时飞机处于倾斜状态,这会严重影响人员疏散效率<sup>[12]</sup>。封文春等<sup>[13]</sup>证明了人员撤离速度会因为飞机迫降后的不利姿态而降低。

关于倾斜环境下的疏散问题,多项研究探讨了地面倾斜对人员疏散的影响。Storm 等<sup>[14]</sup>研究了地下设施中逃生路线疏散时的步行速度与体力消耗的关系。在船舶领域,澳大利亚海事工程研究中心<sup>[15]</sup>、日本海上工程研究中心<sup>[16]</sup>、荷兰研究中

心<sup>[17]</sup>和中国科学技术大学<sup>[18]</sup>开展了倾斜面上人员疏散的试验,显示疏散速度受倾斜方式和角度影响,且俯仰角影响更显著。此外,船舶横摇运动也会影响疏散能力<sup>[19]</sup>。研究者通过建立疏散仿真模型,探讨了倾斜对人员疏散时间和效率的影响,发现船舶倾斜会影响行人移动和期望速度<sup>[20-21]</sup>。不同横滚角下人员疏散时间也有所变化<sup>[22]</sup>。实际船舶步行实验数据显示,船的滚动运动会降低个人步行速度,特别是在楼梯上<sup>[23]</sup>。

综上,尽管在船舶等大型运输工具的环境内已经进行了大量关于倾斜平面上人员疏散的研究,但在飞机客舱处于倾斜状态时的人员疏散问题的研究相对较少。由于飞机起落架折断导致客舱倾斜的事故时有发生,机舱内倾斜角度通常比船舶倾斜角度小,但由于飞机乘员需要通过滑梯逃生,飞机的倾斜姿态不同会对出口疏散产生影响。为此,本文研究飞机倾斜状态下人员的应急撤离问题,构建倾斜姿态下飞机乘客疏散仿真模型,通过试验数据验证模型的有效性,并研究飞机乘客疏散时间和瓶颈空间分布,以期对飞机客舱和逃生设施的设计、飞机客舱的布局和优化、制定飞机倾斜状态下人员紧急疏散方案以及加强机组的应急处置能力等方面提供有益参考。

## 1 飞机倾斜对人员疏散影响

### 1.1 客舱倾斜角度分析

由于民用飞机容易发生重着陆、冲出跑道等事故,导致起落架失效或折断,使得飞机客舱发生倾斜。不同飞机由于设计上的差异,其倾斜角度也会有所不同。近年来部分起落架折断事故如表 1 所示,以空客 A330-200 型号飞机为例<sup>[24]</sup>,考虑不同姿态下的倾斜角度,得出不同事故工况下的飞机俯仰角和横滚角,如表 2 所示。

表 1 飞机起落架折断事故

Table 1 Aircraft landing gear breakage accident

年份	机型	折断部位
2014	A320	前起落架
2018	A320	前起落架
2019	B737	右侧主起落架
2019	SSJ-100	主起落架

表2 飞机事故下不同姿态倾斜角度表  
Table 2 Different attitude tilt angles in aircraft accidents

各种姿态	俯仰角/(°)	横滚角/(°)
1、所有起落架放下	-1.25	0
2、主起折断,前起放下	+3.25	0
3、前起折断,主起放下	-8.65	0
4、前起落架和左侧主起落架折断	+4.31	+10.25
5、前起落架和右侧主起落架折断	+4.31	-10.25

### 1.2 倾斜客舱下的速度衰减比公式

个体行走速度是评估疏散结果的重要参数。全尺寸演示试验周期长且费用高,并且存在较大的人员受伤风险,因此在飞机倾斜状态下对人员的速度研究较少。通过对船舶环境下的相关数据<sup>[16-17,25]</sup>进行统计分析,可分别得到人员俯仰和横滚状态下的行走速度衰减比,表示人员在倾斜状态下与正常姿态下速度的比值。

船舶领域的研究表明,船舶倾覆角度一般为30°<sup>[26]</sup>,而飞机客舱由于起落架折断导致的倾斜角度通常不会超过15°。因此,统计出倾斜角度在20°内的行走速度衰减比,并绘制了行走速度衰减比与倾斜角度关系曲线,如图1~图2所示。

对不同角度下的行走速度衰减比进行分析可知,当人员在横滚斜面上运动时,国内外研究机构所得到的结果基本一致,随着横滚角度的增加,行走速度衰减比呈现缓慢减小趋势。当人员处于俯仰向上的运动状态时,随着俯仰角度的增加,行走速度衰减比呈现迅速减小的趋势,但减小的程度

$$r_1 = 1 - 0.00243 \times \alpha - 1.13432 \times 10^{-4} \times \alpha^2$$

$$r_2 = \begin{cases} 1 - 0.01082 \times \lambda, & 0^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ \\ 1 - 0.00237 \times \lambda - 2.768 \times 10^{-4} \times \lambda^2 & (-20^\circ \leq \lambda \leq 0^\circ) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\alpha$ 为飞机横滚状态下的倾斜角度; $\lambda$ 为飞机俯仰状态下的倾斜角度; $r_1$ 为飞机横滚状态下个体行走速度衰减比; $r_2$ 为飞机俯仰状态下个体行走速度衰减比。

通过以上研究,得到了在飞机客舱倾斜状态下人员的速度衰减比,为疏散模型的建立提供了基础。

略有差异。

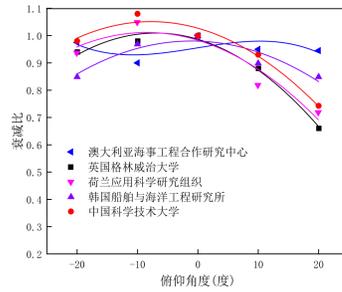


图1 俯仰状态下人员行走速度衰减比与角度对应关系图  
Fig. 1 Relationship between walking speed decay ratio and angle under trim condition

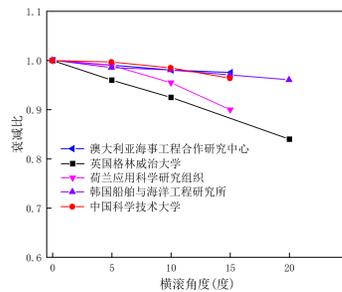


图2 横滚状态下人员行走速度衰减比与角度对应关系图  
Fig. 2 Relationship between walking speed attenuation ratio and angle under heeling condition

通过对以上国内外倾斜地面人员速度衰减比数据进行拟合<sup>[16-17,25]</sup>,根据飞机姿态角度,建立疏散人员在飞机客舱倾斜状态下速度衰减比公式(1)。

### 1.3 滑梯角度对人员速度的影响

船舶倾斜客舱的试验数据可以用于飞机倾斜客舱内人员疏散分析,但由于飞机的应急出口和滑梯与船舶有较大的差异,人员在滑梯上的速度对整个疏散过程有影响。通过研究国内外民航应急撤离演示试验和真实事故情况下人员疏散视频,统计滑梯角度与人员出口下滑速度的数据,如表3所示。得出滑梯状态与人员下滑速度的关系并绘制出两者关系曲线,如图3所示。

表3 滑梯角度与人员下滑速度表  
Table 3 Slide angle and personnel slide speed

机型	滑梯长度/m	离地高度/m	角度/(°)	速度/(m·s <sup>-1</sup> )
ARJ21	3.4	1.5	26.2	2.1
A320	6.8	2.3	19.7	2.04
A380	9.41	5.2	33.5	3.29
A380	14.7	8.42	34.8	4.15

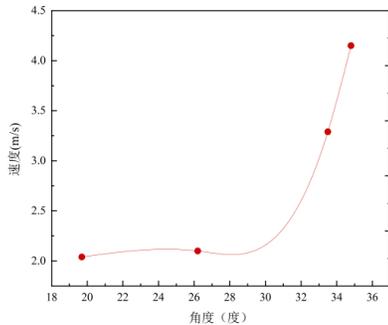


图3 真实疏散下滑梯角度与人员速度图  
Fig. 3 Real evacuation under the slide angle and personnel speed

基于表3数据,建立不同滑梯角度下人员出口下滑速度的公式(2):

$$v = 2.11224 - 0.10499 \times \gamma + 0.00572 \times \gamma^2 \quad (2)$$

其中 $\gamma$ 为滑梯角度, $v$ 为滑梯疏散人员出口下滑速度。这些公式提供了疏散人员在不同滑梯角度下速度的计算,为后续模型参数提供输入。

## 2 考虑事故飞机倾斜的乘员疏散建模

该模型由九个主要模块组成,包括场景建模、疏散路径、人员属性、人与障碍物之间的作用力、人与人之间的交互作用力、飞机客舱的倾斜作用力、疏散人员的连续位移场运动、个体轨迹的误差验证以及数据输出模块。具体建模过程和参数设置,请详尽参照本研究领域论文<sup>[27]</sup>中的专业阐述。该论文对建模流程与参数设定进行了详尽而深入的分析,是本研究得以顺利进行的重要理论依据。

在飞机处于正常姿态时,客舱内的疏散人员会受到多种力的影响。这与Helbing<sup>[28]</sup>在其社会力模型中提出的规则相一致,即人员会按照预期的疏散方向在多种力的作用下进行移动。与水平客舱环境下人员疏散时相比,飞机倾斜状态时疏散

人员还会受到重力的影响,即共受到四种力的影响。故对于倾斜客舱环境,将社会力模型的数学表达式进行改进,考虑倾斜角度即重力分量对疏散人员的影响以及人员在倾斜状态下的自我能动性。这些力的合力作用于疏散人员,其数学表达式如式(3)所示,俯仰状态和横滚状态下倾斜力的公式如式(4)~式(5)所示。

$$m_i \frac{dv_i(t)}{dt} = f_i^0(t) + \sum_{j(\neq i)} f_{ji}(t) + \sum_w f_{wi}(t) + f_b \quad (3)$$

$$f_b = mg \sin \theta \quad (4)$$

$$f_b = mg \sin \beta \quad (5)$$

式中: $f_i^0(t)$ 、 $f_{ji}(t)$ 和 $f_{wi}(t)$ 分别为自我能动性、与其他乘客的排斥力和与障碍物的排斥力; $m$ 为疏散人员质量; $g$ 为重力系数; $\theta$ 为俯仰角度; $\beta$ 为横滚角度。

倾斜状态下疏散人员受到的倾斜力如图6所示。

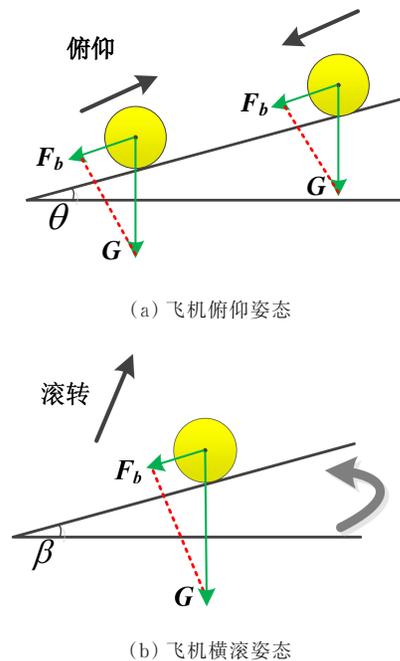


图6 疏散人员的倾斜力  
Fig. 6 Tilt force of evacuees

利用倾斜地面下人员速度衰减比模型,即公式(1),设计倾斜客舱下的人员撤离模型。根据水平客舱疏散模拟试验得到疏散人员的期望速度为 $(0.65 \pm 0.2)$  m/s,根据式(1)计算飞机倾斜和横滚状态下的个体平均行走速度衰减比,即飞机倾斜

状态下疏散人员期望速度与水平状态下疏散人员期望速度的比值,从而得到疏散人员在飞机倾斜

状态下的期望速度。飞机客舱倾斜作用力模块的参数设置如表 5 所示。

表 5 飞机客舱倾斜作用力模块主要参数  
Table 5 Main parameters of aircraft cabin tilt force module

各种姿态	俯仰角/(°)	横滚角/(°)	倾斜力/N	速度衰减比	期望速度/(m/s)
所有起落架放下	-1.25	0	0	1	0.65±0.2
主起折断,前起放下	+3.25	0	13.1	1.027	0.67±0.2
前起折断,主起放下	-8.65	0	34.1	0.965	0.63±0.2
前起落架和左侧主起落架折断	+4.31	+10.25	90.2	1.184	0.77±0.2
前起落架和右侧主起落架折断	+4.31	-10.25	45.1、106.8	0.882	0.57±0.2
前起落架和右侧主起落架折断	+4.31	-10.25	45.1、106.8	0.882	0.57±0.2

为了验证社会力模型在时间和人员疏散行为方面的准确性,我们将该模型的结果、商业仿真软件 Pathfinder 模拟的人员疏散结果以及基准试验结果<sup>[29]</sup>进行了比较。在通过基准试验验证后,模型计算在不同飞机机舱俯仰和横滚姿态以及考虑飞机起落架不同断裂点的情况下,人员的紧急疏散时间和瓶颈时空分布。我们比较了飞机在无倾斜条件下的人员疏散过程,并分析了疏散时间和瓶颈时空分布的差异,以揭示飞机起落架断裂后的倾斜角度对乘客紧急疏散的影响。

## 2.1 飞机所有起落架放下状态时乘员疏散仿真分析

### 2.1.1 疏散时间及疏散效率对比

使用连续位移场疏散仿真商用软件 Pathfinder 建立相同疏散环境模型,主要参数对比如表 6 所示。

表 6 社会力仿真模型和 Pathfinder 模型主要参数对比  
Table 6 Comparison of the main parameters of the social force simulation model and Pathfinder model

参数对比	社会力疏散仿真模型	Pathfinder 模型
期望速度/(m·s <sup>-1</sup> )	0.65±0.2	0.65±0.2
人员直径/cm	28~38	28~38
松弛时间/s	0.5	0.5

运行连续位移场应急撤离仿真模型以及 Pathfinder 所建立的模型,得到 100 次仿真撤离的平均时间,疏散时间对比如表 7 所示。

表 7 疏散时间对比  
Table 7 Evacuation time comparison

场景	疏散时间均值
3 次竞争性试验 <sup>[29]</sup>	29.7 s
社会力模型 100 次计算	30.5 s
Pathfinder 模型	34.8 s

如表 7 所示,试验的平均疏散时间为 29.7 s,而模型的 100 次迭代的平均模拟时间为 30.5 s,与试验相比误差为 2.6%。Pathfinder 模型的平均疏散时间为 34.8 s,与试验相比误差为 17.1%。社会力模型预测的总疏散时间与试验一致,并且相比 Pathfinder 模型,其预测准确性更高。因此,该模拟模型基本上能够预测试验的总疏散时间。

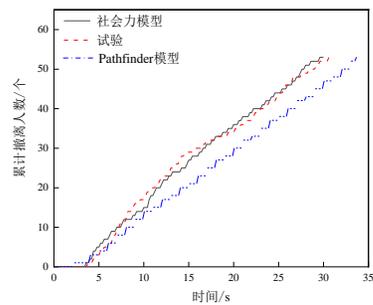


图 7 疏散人员疏散效率对比  
Fig. 7 Comparison of evacuation efficiency of evacuees

对疏散时间和累计撤离人数的关系进行分析,得到 100 次仿真的平均结果,与试验进行对比,如图 7 所示。仿真模型、试验中首位乘员撤离的时间分别为 3.4 s、3.8 s,时间仅相差 0.4 s,误差为 1.3%。以累积撤离人数和时间比值表示撤离效

率,计算得出社会力仿真模型、Pathfinder 仿真模型、试验的撤离效率分别为 1.93、1.6、1.88,社会力仿真模型与试验误差为 2.5%,Pathfinder 仿真模型与试验误差为 14.9%,社会力模型预测出得到的撤离效率与试验吻合性较好,与 Pathfinder 模型相比,预测更准确。因此,连续位移场疏散仿真模型基本可以模拟出试验中撤离人数的情况。

### 2.1.2 瓶颈区域时空分布规律对比分析

从宏观时间-人数方面检验之后,为了进一步检验模型在撤离过程中的匹配度,我们在本节中从主过道人群密度的时空分布规律出发,来验证仿真模型的有效性。将区域 4、区域 6 的社会力模型和 Pathfinder 模型仿真结果与试验结果进行对比,如图 8~图 9 所示,其中横坐标代表疏散时间,纵坐标代表密度。

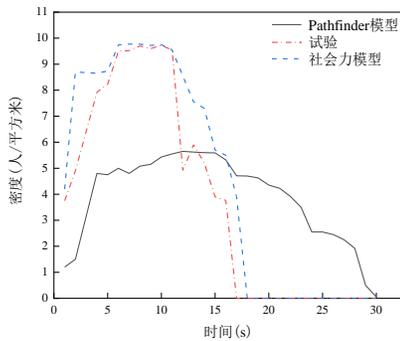


图 8 区域 4 仿真和试验主过道密度对比图  
Fig. 8 Comparison of simulated and experimental main aisle density in area 4

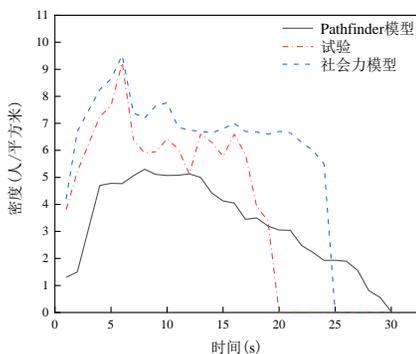


图 9 区域 6 仿真和试验主过道密度对比图  
Fig. 9 Comparison of simulated and experimental main aisle density in area 6

从图 8 可以看出:区域 4 中的试验的密度峰值为 9.72,社会力仿真模型的密度峰值为 9.75,误差为 0.3%,Pathfinder 模型中密度峰值为 5.65,相差

41.9%。

从图 9 可以看出:区域 6 中,试验密度峰值为 9.24,社会力仿真模型的密度峰值为 9.52,误差为 3%,Pathfinder 模型中密度峰值为 5.3,误差为 44.3%。社会力仿真模型中,在座椅和过道交叉口处的人员行为比较复杂,导致人员难以快速融入过道,这与试验结果产生了差异。另外,离散网格的疏散模型限制了区域密度的表示,每个网格最多只能容纳 2 人,因此无法准确体现真实区域的高密度峰值。

## 2.2 单列试验对比分析

基于中国科学技术大学孙锦路<sup>[17]</sup>单列试验对疏散仿真模型有效性进行验证,其试验平台尺寸为 10.0m(L)×08(m)L×2.2m(H),横滚角取值为 0,±5,±10,±15°,俯仰角取值为 0,±5,±10,±15,±20°。

当飞机前起折断、主起放下时,其俯仰角-8.65°、翻滚角 0°,对应于单列试验的俯仰角-10°,横滚角 0°。将单个人员的期望速度输入社会力模型,进行 100 次仿真得到的平均值为 1.233 m/s,试验中群体的平均速度为 1.25 m/s,结果显示相差 5.7%,验证了倾斜状态下疏散仿真模型的有效性。

## 3 不同客舱倾斜角的乘员疏散仿真及影响分析

第 2 节通过与试验和真实事故的对比,从人员疏散效率和主过道密度两个方面验证了社会力疏散仿真模型的有效性。接下来,我们将利用该模型计算不同飞机姿态下的撤离时间和密度分布情况。

### 3.1 疏散事件分析

疏散时间是评估疏散能力的传统指标,是反映人员疏散效率的重要参数。分别运行飞机倾斜状态下社会力疏散仿真模型,计算出其平均疏散时间,进行统计如表 8 所示。疏散时间是评估疏散能力的传统指标,也是反映人员疏散效率的关键参数。我们分别运行飞机倾斜状态下的社会力疏散仿真模型,并计算其平均疏散时间,统计结果如表 8 所示。下面对飞机不同倾斜状态下的疏散时间进行分析。

表8 飞机事故下不同姿态疏散时间分析表  
Table 8 Evacuation time analysis table of different attitude under aircraft accident

各种姿态	平均时间/s
1、所有起落架放下	30.5
2、主起折断,前起放下	35.94
3、前起折断,主起放下	19.2
4、前起落架和非出口侧主起落架折断	37.92
5、前起落架和出口侧主起落架折断	29.7

当主起落架折断且前起落架放下时,由于机头上仰,疏散时间比所有起落架都放下时增加了 5.44 s。此时,疏散人员受到倾斜力的阻碍,加速度减小,并且期望速度比所有起落架放下时的速度要慢,因此疏散时间增加。当前起落架折断、主起落架放下时,机头下沉,与所有起落架放下时相比,疏散时间减少。因为此时疏散人员的期望速度增加,且受到倾斜力的推力作用,加速度增加,减少了疏散时间。当前起落架和非出口侧主起落架折断时,机头上仰,飞机机身向非出口侧倾斜导致人员的疏散时间最长。因为在这种状态下,人员的期望速度减少,疏散人员受到重力分力的阻碍,并且由于机身向非出口侧倾斜,与人员的疏散方向相反,同样也阻碍人员疏散,因此疏散时间最长,比无倾斜状态时增长了 7.42 s。当前起落架和出口侧主起落架折断时,机头上仰,飞机向出口侧倾斜,人员疏散时受到重力分力的阻碍,但由于机身向出口侧倾斜,与人员的疏散方向相同,有利于人员的快速疏散,因此疏散时间和所有起落架放下时的疏散时间几乎相同,仅相差 0.8 s。

### 3.2 主过道瓶颈演化规律分析

通过总体疏散时间不足以识别人员疏散过程中的差异。下面基于瓶颈时间和瓶颈位置对飞机倾斜状态下主过道瓶颈时空分布规律进行分析,探究对乘员疏散影响。为确定瓶颈出现的时间和位置,首先将区域人员密度值作为确认瓶颈依据,并采用 Voronoi 图的测量法对狭窄座椅过道这种复杂环境下人员密度进行计算,可以获得相对稳定的测量结果<sup>[30]</sup>。以  $i$  人员  $t$  时刻的坐标  $(x_i, y_i)$  来表示人员疏散过程中某一时刻的坐标,基于 Voronoi 方法可计算得到人员某一时刻的元胞面积  $a_i(t)$ ,人员密度  $\rho_i(t)$  如式(6)所示。

$$\rho = \frac{1}{a_i} \quad (6)$$

区域平均密度可以作为瓶颈量化指标之一,以反映特定区域内人员拥挤程度,平均密度  $\bar{\rho}_j$  由下式计算得出,其中  $n_j$  表示人员数量。

$$\bar{\rho}_j = \left( \sum_{i=1}^{n_j} \rho_i \right) / n_j \quad (7)$$

对于一般疏散场景,区域平均密度超过 6 人/ $m^2$  即可认为人群在该区域处于拥挤状态<sup>[31]</sup>,而在主过道中人员拥挤度更大,通过观察试验疏散过程,主过道的区域内平均密度  $\bar{\rho}_j (j=1\sim 8)$  大于 6.5 人/ $m^2$  时,该区域人群整体移动受阻显著,堵塞现象明显。因此,将平均密度数值  $\bar{\rho}_j > 6.5$  人/ $m^2$  的区域识别为瓶颈出现区。根据试验场景中主过道区域的划分,按照上述瓶颈判定原则,即可定量识别主过道各区域在某一时刻是否出现瓶颈,并能够计算得出瓶颈起始位置、终止位置以及中心位置,如图 10 所示,红色区域为识别出瓶颈的区域,  $X_I$  为瓶颈的起始位置,  $X_{II}$  为瓶颈的终止位置,由  $X_I$  和  $X_{II}$  可计算得到瓶颈中心位置:

$$X = (X_I + X_{II}) / 2 \quad (8)$$

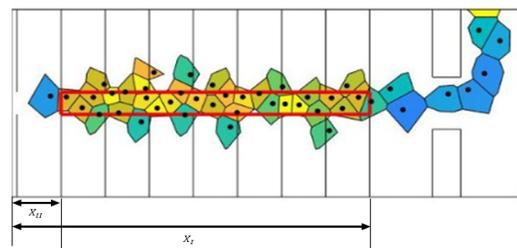


图 10 试验过程主过道瓶颈区域图

Fig. 10 Test process main aisle bottleneck area

运行飞机倾斜状态下应急撤离疏散仿真模型,基于 Voronoi 图绘制撤离过程中的主过道瓶颈时空分布图(如图 11 所示)。

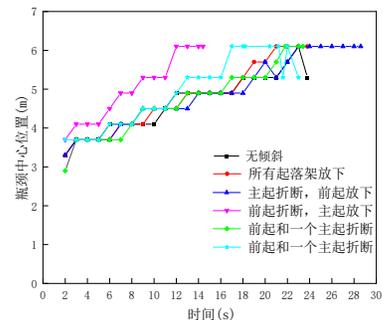


图 11 瓶颈中心演化图

Fig. 11 Evolution of bottleneck centre position

从图 11 可以看出:对上述不同工况的瓶颈中心位置进行分析。瓶颈的中心位置会随着人员的移动不断向出口移动,这是因为瓶颈的起始位置都在后排位置区域 8,而瓶颈终止位置的人群平均密度会逐渐减小。后排区域的人员会以整体高密度向前疏散,导致瓶颈终止位置不断向前排区域移动。在距离出口较近的区域,瓶颈中心位置的持续时间较长,这表明应该及时疏散这些区域的人员。

## 4 结 论

1) 飞机倾斜姿态下连续位移场疏散仿真模型与基准试验指标相关性较强。与商业仿真软件 Pathfinder 建立的模型相比,在疏散时间、疏散效率、密度峰值等方面的模拟精度全面占优,尤其是过道区域的密度峰值方面,精度高于其 40% 以上。

2) 舱内(不考虑滑梯)疏散仿真表明,疏散人群整体疏散速度和疏散瓶颈受倾斜力影响,在前起落架和非出口侧起落架折断事故场景下,人员的疏散时间最长,与飞机正常姿态相比最高增加了 26%。当疏散人员在机舱内上坡移动时,过道区的瓶颈消失时间增加,出现瓶颈堆积。

3) 反之,过道区的瓶颈消失得更快,这有助于机舱后部人员的疏散,但机舱门处的疏散压力会提前到达。在靠近出口的区域,人群形成的瓶颈持续时间较长,因此靠近出口的人员应快速疏散,避免拥挤。

4) 在发生起落架折断这类事故时,在客舱上坡段指挥人员疏散时,应快速疏散舱内过道人员,可在出口位置处提前聚集人员,充分利用出口和滑梯进行快速疏散,避免人群在舱内形成瓶颈堆积。在客舱下坡段指挥人员疏散时,舱内过道人员疏散速度会加快,应重点关注出口疏散瓶颈,避免出口出过于拥挤。经过仿真模型计算,人员在客舱前部的疏散速度较快,疏散时间较短,因此在实际的撤离过程中,向客舱后部疏散的人员可以适当增加一两排人员向客舱前部的出口进行疏散,以提高疏散效率。

基于以上研究结果,在未来的研究中可以引入人员特征,如人员的年龄、性别、体能、行动能力等,这些因素对疏散过程可能有重要影响。我们希望这项研究能够为提高飞机倾斜状态下的应急

撤离效率和人员安全性提供支持,提高飞机事故后人员的生存力。

## 参 考 文 献

- [1] XUE Z, BLOEBAUM C. A particle swarm optimization based aircraft evacuation simulation model-vacate air[C]// 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. US: AIAA, 2008: 1-10.
- [2] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准:CCAR-25-R4[S]. 北京:中国民用航空局, 2011. Civil Aviation Administration of China. Airworthiness standards of transport category aircraft: CCAR-25-R4[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2011. (in Chinese)
- [3] National Transportation Safety Board. Emergency evacuation of commercial airplanes: NTSB/SS-00/01[R]. Washington, DC: NTSB, 2000.
- [4] 王霁飞, 刘龙权. 民用飞机客舱应急撤离仿真算法研究[J]. 航空工程进展, 2020, 11(6): 781-788. WANG Jifei, LIU Longquan. Research on simulation algorithm of civil aircraft emergency evacuation[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(6): 781-788. (in Chinese)
- [5] 宋娜, 陈琨, 冯振宇, 等. 运输类飞机应急撤离演示试验适航要求解析[J]. 航空工程进展, 2019, 10(5): 650-654. SONG Na, CHEN Kun, FENG Zhenyu, et al. Analysis of airworthiness requirements for emergency evacuation demonstration test of transport aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(5): 650-654. (in Chinese)
- [6] 彭浩轩, 刘小川, 白春玉, 等. 民机应急撤离实验与仿真研究进展[J]. 航空工程进展, 2020, 11(6): 759-766. PENG Haoxuan, LIU Xiaochuan, BAI Chunyu, et al. Advances in Experiment and Simulation of Civil Aircraft Emergency Evacuation[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(6): 759-766. (in Chinese)
- [7] 韩丽, 张柱国. 基于虚拟最大客座量构型的民机应急撤离适航技术要求研究[J]. 机械设计与制造工程, 2023, 52(4): 60-62. HAN Li, ZHANG Zhuguo. Research on airworthiness requirements for emergency evacuation of civil aircraft based on virtual maximum passenger capacity configuration [J]. Mechanical Design and Manufacturing Engineering, 2023, 52(4): 60-62. (in Chinese)
- [8] SONG Chengcheng, SHAO Quan, ZHU Pei, et al. An emergency aircraft evacuation simulation considering passenger overtaking and luggage retrieval[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 229: 108851.
- [9] MELIS D J, SILVA J M, YEUN R, et al. The effect of airline passenger anthropometry on aircraft emergency evacuations[J]. Safety Science, 2020: 128: 112-121.
- [10] XU Chenchen, LUO Yiyang, FUELLHART K, et al. Modeling exit choice behavior in airplane emergency evacuations [J]. Journal of Air Transport Management, 2023,

- 112: 102450.
- [11] CHOOCHART P, THIPYOPAS C. Study of Passenger Evacuation from the Airbus A 330-300 Aircraft [J]. Proceedings of MDPI AG, 2020, 39(1): 25.
- [12] VINUEZA V, Maria F, ZHOU K, et al. Cerebellar control of gait and interlimb coordination [J]. Brain Structure and Function, 2015, 220(6): 3513-3536.
- [13] 封文春, 李伟, 张桐, 等. 基于社会属性的民机复杂群体应急撤离仿真与试验研究 [J]. 西北工业大学学报, 2022, 40(4): 853-864.
- FENG Wenchun, LI Wei, ZHANG Tong, et al. Simulation and experimental research on emergency evacuation of complex groups in civil aircraft based on social attributes [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2022, 40(4): 853-864. (in Chinese)
- [14] STORM A, CELANDER E S. Field evacuation experiment in a long inclined tunnel [J]. Fire Safety Journal: An International Journal Devoted To Research On Fire Safety Science And Engineering, 2022.
- [15] KOSS L L, PORTEOUS B. Human mobility data for movement on ships [J]. International Conference on Fire at Sea, 1997: 1-11.
- [16] MURAYAMA, ITAGAKI, YOSHIDA. Study on evaluation of escape route by evacuation simulation [J]. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 2000, 188: 441-448.
- [17] 孙锦路, 卢兆明, 陆守香. 船体浮摇状态下人员疏散运动特征研究现状分析 [J]. 中国水运(下半月), 2016, 16(4): 33-36.
- SUN Jinlu, LU Zhaoming, LU Shouxiang. Analysis of the current situation of research on the characteristics of evacuation movement of personnel under the floating and rocking state of ship hull [J]. China Water Transport (Second Half Moon), 2016, 16(4): 33-36. (in Chinese)
- [18] BLES W, NOOY S, BOER L C. Infuence of ship listing and ship motion on walking speed [C]// Proceedings of Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics. [S. l. : s. n. ], 2001: 437-452.
- [19] 张德珍, 赵敏. 风浪影响下的客轮人员疏散模型及仿真 [J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(6): 1609-1615.
- ZHANG Dezhen, ZHAO Min. Modelling and simulation of passenger ship personnel evacuation under the influence of wind and waves [J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2016, 36(6): 1609-1615. (in Chinese)
- [20] KANG Z X, ZHANG L, LI K. An improved social force model for pedestrian dynamics in shipwrecks [J]. Applied Mathematics and Computation, 2019, 348: 355-362.
- [21] 房斯明, 刘正江, 封室丞, 等. 船舶倾斜对不同行人流疏散效率影响的数值分析 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(1): 201-206.
- FANG Siming, LIU Zhengjiang, FENG Muroseung, et al. Numerical analysis of the effect of ship inclination on the evacuation efficiency of different pedestrian flows [J]. Transportation Systems Engineering and Information, 2021, 21(1): 201-206. (in Chinese)
- [22] 赵靖普. 客船横滚角度与人员疏散时间的仿真研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2021.
- ZHAO Jingpu. Simulation study of passenger ship transverse inclination angle and personnel evacuation time [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2021. (in Chinese)
- [23] WANG Xinjian, LIU Zhengjiang, LOUGHNEY S, et al. An experimental analysis of evacuees' walking speeds under different rolling conditions of a ship [J]. Ocean Engineering, 2021, 233: 108997.
- [24] 王惠玲. 民用飞机应急撤离滑梯设计技术分析 [J]. 航空工程进展, 2011, 2(1): 37-42.
- WANG Huiling. Analysis of the design technology of emergency evacuation slides for civil aircraft [J]. Advances in aeronautical engineering, 2011, 2(1): 37-42. (in Chinese)
- [25] KIM H T, LEE D K, PARK J H, et al. The effect on the mobility of evacuating passengers in ship with regard to list and motion [J]. IE interfaces, 2004, 17(1): 22-32.
- [26] 杜栋. 现代综合评价方法与案例精选 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- DU Dong. Modern integrated evaluation methods and selected cases [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)
- [27] 宋娜. 飞机乘员应急撤离瓶颈分析与仿真研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2020.
- SONG Na. Analysis and simulation of bottlenecks for emergency evacuation of aircraft occupants [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020. (in Chinese)
- [28] HELBING D, FARKAS I, VICSEK T. Simulating dynamical features of escape panic [J]. Nature, 2000, 407: 487-490.
- [29] 陈琨, 冯振宇, 宋娜. 典型民用飞机人员疏散瓶颈规律 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20(31): 13053-13060.
- CHEN Kun, FENG Zhenyu, SONG Na. Bottleneck law for personnel evacuation of typical civil aircraft [J]. Science, Technology and Engineering, 2020, 20(31): 13053-13060. (in Chinese)
- [30] 岳昊, 何栋梁, 张滨雅. 行人步行设施空间疏散特征指标 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(9): 17-24.
- YUE Hao, HE Dongliang, ZHANG Binya. Indicators of spatial evacuation characteristics of pedestrian walking facilities [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(9): 17-24. (in Chinese)
- [31] ZHANG Jun, KLINGSCH W, SCHADSCHNEIDER A, et al. Transitions in pedestrian fundamental diagrams of straight corridors and T-junctions [J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment 2011(6): 1742-5468.

(编辑:马文静)