

# 基于社会属性的民机复杂群体应急撤离仿真与试验研究

封文春<sup>1</sup>, 李伟<sup>1</sup>, 张桐<sup>2</sup>, 姚向茹<sup>1</sup>

(1.航空工业第一飞机设计研究院 机电系统研究所, 陕西 西安 710089;  
2.北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

**摘要:**基于基本社会力模型,提出社会属性影响指数,从性别、年龄、受教育程度、乘坐频率和安全知识与经验等方面修正了个体期望速度;通过恐慌参数、跟随力、倾斜力、速度衰减比系数对个体行为、群体行为及不利姿态的影响进行了修正。基于动态客舱应急撤离试验环境,开展了单人、多人和群体应急撤离试验,分析了个体运动速度分布、不利姿态对个体运动速度以及群体疏散速度的影响。试验表明:个体期望速度约 1.5 m/s,最大期望速度 2.86 m/s;在撤离过程中,男性平均速度高于女性,而在跳下滑梯时,女性恐慌比例高于男性。基于试验数据拟合所得的速度衰减比系数与劳氏船级社模型的速度衰减比系数基本一致。仿真与试验对比表明,修正后仿真模型能够比较准确地模拟应急撤离过程,与试验环境群体试验最大误差 6.25%,与 ARJ21-700 应急撤离演示试验相对误差 3.7%,误差满足工程需要。

**关键词:**社会属性;应急撤离;试验;仿真;客舱;动态撤离试验环境

中图分类号:V245.3<sup>+1</sup>

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2022)04-0853-12

为保证飞机迫降后乘员快速撤离,FAA、EASA和CAAC均在适航规章中明确要求,对于客座量大于44座的飞机,必须表明其最大乘坐量的乘员能在90s内在模拟的应急情况下从飞机撤离至地面。对于这一点的符合性,必须按规定的试验准则所进行的实际演示来表明<sup>[1]</sup>。据统计,在1998年至2007年间,飞机发生可控坠地事故造成8759人死亡,3176人受伤,77249人未受到损伤,约90%的乘客通过应急撤离避免了可能受到的伤害<sup>[2]</sup>。应急撤离演示是验证应急撤离的重要手段,但是存在周期长、费用高、有一定风险等缺点。自1969年起,制造商已进行了超过20次的全尺寸撤离验证试验,牵涉到7000多名自愿者和航空公司机组人员,平均6%的全尺寸演示参试者受伤,主要是刮伤、擦伤和骨折<sup>[3]</sup>。在1991年10月26日MD-11应急撤离演示取证期间发生一起严重的受伤事件,导致一名参试

者瘫痪。利用计算机模拟应急撤离是一种重要的手段,早在20世纪70年代FAA就开发了用于航空领域飞机应急撤离的通用仿真系统(general purpose simulation system,GPSS),至2009年共发表有8种飞机应急撤离仿真模型<sup>[4]</sup>。

与应急撤离演示试验相比,仿真具有模拟着火、烟雾等相对真实的撤离场景的优势,但不能准确表达危险环境条件下人员的行为,这也是应急撤离仿真尚不能完全替代试验的关键。虽然已建立了多种疏散模型,如网络流模型、流体动力学模型、元胞自动机模型和社会力模型等,但在模拟人的行为方面仍然存在不足。因为,人的基本属性是社会性,而且具有思考和应急应变能力,不同社会背景的人员在应急情况下的行为不同。而且民机乘客组成复杂,不同的人具有不同的知识背景、社会关系、心理素质和身体条件,都会影响应急情况下的反应和行为。

收稿日期:2021-09-25

作者简介:封文春(1972—),航空工业第一飞机设计研究院研究员,主要从事飞行器安全救生、氧气系统等设计研究。

e-mail:chunfeng@buaa.edu.cn

本文根据民航飞机乘员特征和客舱特点,基于基本社会力模型,考虑乘员的社会背景、教育背景等社会属性以及迫降后的不利姿态,重点关注乘员的竞争行为和恐惧心理,对基本社会力模型进行修正,建立了具有一定社会属性的民用飞机乘员应急撤离仿真模型,并基于客舱应急撤离半物理仿真试验环境,进行了某大型客机应急撤离试验,与仿真结果进行了对比分析,验证了仿真模型的准确度。

## 1 应急撤离仿真模型

### 1.1 民用飞机应急撤离特征

与人员聚集场所或建筑内的疏散不同,民用飞机迫降后撤离具有5个显著特征:①撤离时所有人员均承受了迫降过程中的紧张气氛,具有一定的心理恐慌和较大的心理压力,部分人员可能受伤;②客舱通道狭窄,人员密度大;③民航乘员组成复杂,家庭背景、教育程度、社会关系、心理素质等都会影响应急情况下人员的行为;④迫降场景及可用应急出口不可预知,客舱内部和外部环境对撤离均有一定影响;⑤民航客舱是一个典型的“鱼骨型”通道,在撤离过程中极易发生拥堵。

在应急撤离过程中,个体的物理属性决定乘客的反应速度和运动速度。社会属性影响乘客的决策和对其他乘客决策的影响,进而影响个体行为。过去航空安全研究中忽略了社会职业与社会关系对乘客撤离行为的影响。标准90 s的应急撤离适航准则是在乘客互相之间社会无关、社会职业无限制的假设基础上提出的,其大部分的试验审查过程是基于个人独立行为来进行的。在实际的应急撤离过程中乘客行为会被现场其他乘客以及各自旅行伙伴之间的社会关系和习惯所影响。同伴关系类型包括家庭成员关系、朋友关系、工作同事关系和其他社会性关系。在应急撤离试验和仿真中,准确描述这些关系具有很大的难度。

### 1.2 基本社会力模型

Helbing等基于牛顿第二定律建立了社会力模型<sup>[5]</sup>。基本社会力模型包括3个基本力:自驱力 $f_i^0$ 、个体之间相互作用力 $f_{ij}$ 和与障碍物的作用力 $f_{iw}$ 。在这些力的合力作用下,个体产生加速度,并时刻调整自己速度大小和方向,以此向目的地移动。模型方程如(1)式所示

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = f_i^0 + \sum_{j \neq i} f_{ij} + \sum_w f_{iw} \quad (1)$$

式中: $m_i$ 表示个体*i*的质量; $v_i$ 表示个体*i*的移动速度。

自驱力是个体在自身主观意识作用下朝着期望位置移动而对自己施加的力。在运动过程,个体根据周围环境调整速度大小和方向,以保证最短路径。自驱力可用(2)式表示

$$f_i^0 = m_i \frac{v_i^0(t) e_i^0 - v_i(t)}{\tau_i} \quad (2)$$

式中: $v_i(t)$ 表示*t*时刻个体速度; $v_i^0(t)$ 表示*t*时刻的期望速度; $e_i^0$ 表示*t*时刻的期望方向; $\tau_i$ 表示反应时长。

在密集的人群,个体之间会产生相互影响,包括心理排斥和物理力,个体之间的作用力用(3)式表示

$$f_{ij} = \left\{ A_i \exp \left[ \frac{(r_{ij} - d_{ij})}{B_i} \right] n_{ij} + \kappa \mu (r_{ij} - d_{ij}) \right\} n_{ij} + \kappa \mu (r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ij}^t t_{ij} \quad (3)$$

式中: $A_i$ 为作用力强度; $r_{ij}$ 为2个个体半径之和; $d_{ij}$ 为2个个体之间的距离; $B_i$ 为作用力的范围; $n_{ij}$ 是指由个体*i*指向个体*j*的向量; $\Delta v_{ij}^t$ 为切线方向速率差; $t_{ij}$ 为 $n_{ij}$ 的切向方向; $\kappa$ 为挤压系数; $\mu$ 为摩擦因数。

在撤离过程中,个体通常会与障碍物保持一定的距离,个体与环境间的作用力用(4)式表示

$$f_{iw} = \left\{ A_w \exp \left[ \frac{r_i - d_{iw}}{B_w} \right] n_{iw} + \kappa \mu (r_i - d_{iw}) \right\} n_{iw} + \kappa \mu (r_i - d_{iw}) (v_i \cdot t_{iw}) t_{iw} \quad (4)$$

式中: $A_w$ 为环境对个体*i*的作用力强度; $d_{iw}$ 为个体到环境的距离; $r_i$ 为个体半径; $B_w$ 为环境作用力的范围; $n_{iw}$ 为由边界指向个体*i*的法向方向; $t_{iw}$ 为个体与环境之间的切向方向。

### 1.3 基于社会属性的改进

社会力模型被提出后,有许多学者对其进行了改进,应用于不同的疏散场景,如分析狭窄过道处的“欲速而不达”效应、高密度行人中不耐烦行为与急躁行为等。

社会力模型使得群体疏散研究取得了很大的进步。Ramos等<sup>[6]</sup>指出,社会力模型能够成功地仿真大多数在步行动力学中可以观察到的典型现象。社会力模型能够非常准确地重现恐慌时人群行为,能够很好地考虑恐慌情形群体间产生高压力的特

性<sup>[7-8]</sup>。虽然社会力模型能够很好地描述总的群体效应,但人不是粒子,其基本属性是社会性,个体行为和决策对撤离过程有至关重要的影响。

### 1.3.1 个体行为修正

个体行为主要取决于个体的焦躁和紧张程度,可使用(5)式来表示<sup>[9]</sup>

$$n_i(t) = 1 - \frac{v_{id}(t)}{v_i^0(0)} \quad (5)$$

式中:  $v_{id}(t)$  是行人速度在期望方向上的投影;  $v_i^0(0)$  是初始期望速度。

因此,个体的期望速度  $v_i^0(t)$  可用(6)式表示

$$v_i^0(t) = (1 - n_i(t))v_i^0(0) + n_i(t)v_i^{\max} \quad (6)$$

式中,  $v_i^{\max}$  为行人可实现的最大期望速度。

### 1.3.2 个体社会属性修正

上述对个体期望速度的修正仅反映了焦虑情绪,实际上,个体的性别、年龄、受教育程度、事故经历等社会人口统计学变量与个体的思维方式和行为方式存在着一定的关系,在遭遇突发事件时,会因个体社会属性的差异,存在生理和心理方面的差异,进而影响个体在疏散过程中的决策。本文通过引入社会属性影响指数  $S$  修正期望速度,进而修正自驱力。

在突发事件中,男性一般有着更快的反应能力,女性往往更容易产生恐慌和焦虑情绪。男性相对于女性,在突发事件中能理智地选择正确的方式<sup>[10]</sup>。文献[11]通过问卷调查将个体的恐慌程度划分为一级(低)、二级(中)、三级(高),男性在这3个级别的分布分别为80.7%、13.8%和5.5%,而女性则为58.5%、32.6%和8.9%,表明女性总体上较男性恐慌水平更高这一趋势。但也有研究表明,女性的安全意识要强于男性,且女性比男性更愿意主动帮助他人,男性的竞争意识更为明显,会更加关注自身的安全<sup>[12]</sup>。在大型商场疏散行为分析中,听到警报后,“不知所措”的女性几乎是男性的2倍。基于文献研究结果和民航旅客男女组成比例(约13:10),在本文中性别影响指数  $S_1$  以女性为基准,即女性取1.0,男性取1.05。

随着年龄的增长,经验和知识的积累越多,在面对突发状况时能更好地保持镇定。研究表明,在各个年龄段中,50岁以上的乘客具有更好的特质焦虑评价,41~50岁的乘客有着最高的积极应对评价<sup>[13]</sup>。但是随着年龄的增长,步行的频率、速度和步长都会下降,在撤离过程中,年轻人的知觉、反应速度与动作灵活性会优于年长者。年龄在乘客疏散

过程中造成影响的综合应对得分随年龄提升变化在2%左右<sup>[13]</sup>。本文年龄影响指数  $S_2$  侧重于经验知识,因此以年轻人为基准,各年龄段的取值如表1所示。

表1 年龄影响指数  $S_2$  的取值

年龄段	$S_2$ 取值
15岁以下	0.90
15~20岁	1.00
21~30岁	1.02
31~40岁	1.04
41~50岁	1.06
51~60岁	1.08
60岁以上	1.10

大量研究表明,不同受教育程度的乘客在安全意识程度和疏散行为等方面存在差异,受教育程度越高,往往也有着更丰富的安全知识,在遇到突发情况下能保持头脑冷静,沉着思考,寻找最佳的疏散路线<sup>[14]</sup>。文献[15]对漳州古雷“4·6”事故居民疏散行为调查研究发现,在预疏散阶段,接到疏散通知后学历较高的人群在该阶段表现更为冷静和理性,并且会传递更多的疏散信息;在返程阶段,学历越高的居民按要求返程的占比越高。文献[16]通过Logistic回归模型分析了受教育程度对人群疏散行为的影响:学历的参照类别是研究生以上,回归系数为正,说明表示学历正向影响人们选择“看周围人反应”的概率。初中及以下文化程度的乘客“看周围人反应”的发生比是研究生及以上文化程度的1.602倍,高中或中专文化程度的这一比例为5.506,大学(本科、专科)文化程度的这一比例为1.743倍。当然,个体受教育程度并不是应急情况下决定行为的唯一因素,还与社会经历、从事职业、社会背景等有关。本文以受过高中教育为基准,基于文献[16]的模型分析结果,受教育程度影响指数  $S_3$  取值如表2所示。

表2 受教育程度影响指数  $S_3$  取值

受教育程度	$S_3$ 取值
初中及以下	0.90
高中	1.00
专科	1.02
本科	1.04
硕士及以上	1.06

乘坐频率往往与乘客对乘坐的交通工具环境熟悉情况呈正相关关系。乘坐频率越高的乘客,在突发事件发生时,越容易避免疏散过程中的恐慌心理和盲目从众行为<sup>[16]</sup>。根据文献[17]中地铁乘坐频率与火灾爆炸事故应急反应的交叉表人数和占比设置等级,乘坐频率影响指数  $S_4$  取值如表3所示。

表3 乘坐频率指数  $S_4$  的取值

乘坐频率	$S_4$ 取值
很少	0.98
偶尔	1.00
有时	1.02
经常	1.04

在地铁人员疏散心理行为调查及相关性研究中发现,接受过专门安全教育的往往会按照疏散指示标志选择安全出口,这表明接受过专门安全教育的乘客更能够选择正确的出口,在疏散过程中做出正确的疏散决策<sup>[18]</sup>。基于地铁乘客个体特征的非适应性行为研究表明,乘客安全知识及疏散安全态度对地铁乘客的非适应性行为有显著的负向作用,乘客的安全知识和疏散安全态度每提高1%,非适应性行为发生的可能性将分别降低0.48%和0.53%<sup>[19]</sup>。对于航空旅行来说,在每次飞行前均有安全知识演示和安全卡片,阅读和观看安全须知对个体的安全知识有一定的影响。基于航空旅行特点,以无安全知识但阅读安全卡片和观看安全演示为基准,安全知识影响指数  $S_5$  的取值如表4所示。

表4 安全经验知识影响指数  $S_5$  的取值

安全知识情况	$S_5$ 取值
无安全知识且没有阅读和观看安全演示	0.90
无安全知识但阅读和观看安全演示	1.00
有安全知识经验但没有阅读和观看安全演示	1.10
有安全知识经验并阅读和观看安全演示	1.20

由于各因素的影响指数最终作用在乘客的疏散速度上,在影响指数设定时,已经归一化,作为与疏散速度相乘的调整系数。因此多个影响指数可以通过加权算数平均或者加权几何平均进行计算。对上述各指数取平均,得到个体的社会属性影响指数  $S$ :

$$S = \sum_{i=1}^5 S_i \quad (7)$$

影响指数是作为调整系数对乘员的初始期望疏散速度进行调整,而初始期望速度的变化导致自驱力的变化。引入社会属性影响指数后,自驱力的表达式为

$$f_i^0 = m_i \frac{Sv_i^0(t)e_i^0 - v_i(t)}{\tau_i} \quad (8)$$

### 1.3.3 群体行为修正

在撤离过程中,由于人群密集,在群体的影响和压力下,个体会放弃自我想法而采取与大多数人一致的行为,即从众效应,也即跟随行为,可通过在基本社会力模型中增加一项新的作用力模型来表示<sup>[20]</sup>,即人员之间的跟随力  $f_{i,fol}$ 。跟随力可通过作用范围影响因子  $\alpha_1$ 、自身速度影响因子  $\alpha_3$ 、个体间距影响因子  $\alpha_4$  和同向行人影响因子  $\alpha_5$  来表示

$$f_{i,fol} = \sum_{i \neq j} \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 \varphi m_i \frac{v_i^0}{\tau_i} n_{ij} \quad (9)$$

式中,  $\varphi$  为强度系数,可取0.2。

作用范围影响因子  $\alpha_1$  表示个体间距离小于某一固定值  $L$  时才会产生相互影响,  $\alpha_2$  为角度影响

$$\alpha_1 = \begin{cases} 1, d_{ij} < L \\ 0, d_{ij} \geq L \end{cases} \quad (10)$$

$$\alpha_2 = \begin{cases} 1, \langle d_{ij}, e_i^0 \rangle < \frac{\pi}{2} \\ 0, \langle d_{ij}, e_i^0 \rangle \geq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $\langle d_{ij}, e_i^0 \rangle$  表示个体  $i, j$  的质心连续方向与个体  $i$  的期望速度方向的夹角度数。

自身速度影响因子  $\alpha_3$  是反映行人自由运动是否受限的参数,是根据个体当前运动速度能否达到期望速度来判断运动是否受限,也即个体达到期望速度时不会跟随他人运动。

$$\alpha_3 = \begin{cases} 1, |v_i| < v_i^0 \\ 0, |v_i| \geq v_i^0 \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $|v_i|$  为个体  $i$  当前速度标量。

个体间距影响因子  $\alpha_4$  用来表示个体之间的距离对个体  $i$  跟随行为的影响,当个体间距较近时,跟随倾向越大,跟随力越大;当个体间距逐渐增大时,个体  $i$  的跟随欲望不再强烈。

$$\alpha_4 = \begin{cases} 1, d_{ij} < r_i + r_j \\ \exp\left(\frac{r_i + r_j - d_{ij}}{C_i}\right), d_{ij} \geq r_i + r_j \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $C_i$  为常数,可取1 m;  $r_i + r_j$  为行人  $i$  与行人  $j$  模

型半径之和。

同向行人影响因子  $\alpha_5$  用来表示个体跟随行为是有选择性的,而不是盲目从众,是反映行人  $j$  的当前速度  $v_j$  与行人  $i$  的期望速度方向  $e_i^0$  相似程度的参数。个体更倾向于跟随那些当前速度与自身期望速度方向更为接近的个体运动,并且不会跟随那些当前速度与自身期望速度方向相反的个体。当被跟随对象的速度超出跟随对象的期望速度时,个体的跟随意愿不继续增大。

$$\alpha_5 = \begin{cases} 0, & e_i^0 \cdot v_j < 0 \\ \cos \langle e_i^0 \cdot v_j \rangle, & e_i^0 \cdot v_j \geq 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中,  $\langle e_i^0 \cdot v_j \rangle$  为个体  $i$  在  $t$  时刻期望速度方向与个体  $j$  速度方向的夹角;  $e_i^0 \cdot v_j$  为个体  $i$  在  $t$  时刻期望速度方向与个体  $j$  速度方向的点积。

#### 1.4 迫降不利姿态的影响修正

虽然适航规章要求的全机地面应急撤离演示要求飞机必须处于起落架放下的正常姿态下进行试验,而且多数仿真模型也没有考虑迫降后不利姿态的影响。但是,在大多数情况下,由于起落架故障、坠撞冲击力或冲出跑道等原因,飞机迫降后并不一定处于正常姿态。迫降后的不利姿态会对个体的运动产生影响<sup>[21]</sup>,主要给个体带来重力分量以及运动的不适感。

飞机处于倾斜姿态,乘客会额外受到重力在倾斜方向上的分量,对个体运动的影响可通过倾斜力来表示

$$f_g^0 = m_i g \sin(\theta) e_\theta \quad (15)$$

式中:  $g$  为重力加速度;  $\theta$  为客舱地板平面与水平面的夹角大小;  $e_\theta$  为重力在飞机地板平面上的分量方向。

在飞机处于倾斜状态下,因摩擦力减小及重力分量的作用,导致人行走步长明显降低,步频显著减慢,步宽明显增大,从而使人的行走速度与期望速度均大幅降低。德国劳氏船级社提出了船体横倾或纵倾浮态下平均个体行走速度衰减比模型<sup>[22]</sup>,广泛应用于船舶疏散。由于船舶的横倾和纵倾角度较大,而飞机迫降后的俯仰和滚转角基本上都在  $\pm 15^\circ$ ,所以本文仅参考该角度范围内的衰减比系数。

$$\gamma_1 = -0.0067\psi, 0^\circ \leq \psi < 15^\circ \quad (16)$$

$$\gamma_2 = \begin{cases} 0.005\theta + 1, & -20^\circ \leq \theta < 0^\circ \\ -0.015\theta + 1, & 0^\circ \leq \theta < 20^\circ \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $\psi$  为滚转角;  $\theta$  为俯仰角。

在倾斜姿态下,个体的期望速度为

$$v_{ry}^0(t) = \gamma_1 \gamma_2 v_i^0(t) \quad (18)$$

经过上述修正后可得到基于社会属性的社会力模型

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = f_i^0 + \sum_{i \neq j} f_{ij} + \sum_w f_{iw} + f_{i,fol} + f_g^0 \quad (19)$$

修正后的社会力模型是个常微分方程,较难求出初值问题的解析解,在本文中利用改进的欧拉法进行数值求解。

## 2 应急撤离试验环境

客舱应急撤离半物理试验环境由客舱物理环境和测试系统组成。客舱物理环境是基于某大型客机建设的典型单通道“3-3”布局客舱,共 19 排座椅,2 个翼上 III 型出口和 1 个 C 型登机门,其余舱门和应急出口仅模拟外形,不具备开启功能。舱门和应急出口进行了简化,但模拟真实的打开方式和开启力。为了便于试验,滑梯为常打开方式,没有与舱门开启联动。客舱地板以上按照飞机外形加工,地板以下通过六自由度平台支撑,模拟飞机的运动姿态。舱内内饰按某大型客机设计,座椅为真实的航空座椅,行李舱、个人服务单元、应急照明、标牌标记等与真实飞机一致。

为了营造应急迫降场景和撤离的紧张气氛,采用了舷窗视景系统,模拟飞机外部着火、机场跑道等。同时在客舱内部设置舞台发烟装置,模拟客舱出现烟雾情况。

测试系统由乘员轨迹跟踪系统和生理参数测试系统组成。乘员轨迹跟踪系统采用超宽带脉冲定位技术(UWB),通过设置在舱内、舱外的基站和乘员佩戴的标签实现参试人员在试验中运动轨迹的记录。生理参数测试系统采用无线腕带式多通道生理传感器,记录参试人员的心率、脉搏、皮电等生理信号,通过试验过程中生理参数的变化,分析参试人员的行为。

## 3 应急撤离仿真模型参数选取

社会力模型中的一些参数可通过实际数据给出,包括个体的质量  $m_i$ 、个体半径  $r_i$ 、个体的期望速度  $v_i^0$ 、个体的反应时长  $\tau_i$ 、个体间作用力强度  $A_i$ 、作

用范围  $B_i$ , 环境作用力强度  $A_w$  及作用范围  $B_w$ 、挤压系数  $\kappa$ 、摩擦因数  $\mu$ 。一些学者依据对实际应急撤离轨迹的观察, 利用极大似然估计等统计学方法对社会力模型中的参数进行了标定。个体半径  $r_i$  的取值主要参考人体的肩宽, 文献[23] 根据我国国标《中国成年人人体尺寸》对男性 18 ~ 60 岁, 女性 18 ~ 55 岁数据总结分析得出

$$2r_i = \begin{cases} -147.9949 + 0.3107H, & \text{男性} \\ -167.8938 + 0.3284H, & \text{女性} \end{cases} \quad (20)$$

式中,  $H$  为身高; 个体体重  $m_i$  和身高  $H$  可按国标《中国成年人人体尺寸》及仿真中男女性别比例进行选取。

不同性别、年龄人员的反应时间不同, AASK<sup>[24]</sup> 统计得出的男性平均反应时间为 1.49 s, 女性为 1.7 s, 不同性别比例、年龄段的平均反应时间如表 5 所示。文献中采用的反应时间为“犹豫时间”, 结合应急撤离模型的参数选取经验和 AASK 数据库统计数据的规律, 在本文的仿真中, 个体反应时长按表 6 选取。

表 5 AASK 统计年龄、性别与平均反应时间

年龄	男性比例/%	女性比例/%	平均反应时间/s
13~18	2.35	2.65	1.40
19~35	20.39	19.51	1.42
36~50	10.87	20.63	1.64
51~65	10.17	13.43	2.01

表 6 应急撤离仿真模型中的反应时间

年龄	男性反应时长/s	女性反应时长/s
13~18	0.2	0.3
19~35	0.3	0.4
36~50	0.5	0.6
51~65	0.8	1.0

虽然在仿真中性别比例和年龄组成可以随意设置, 但为了与试验对比, 仿真中性别比例和年龄组成按照适航要求进行设置, 即: ①至少 40% 是女性; ②至少 35% 是 50 岁以上的人; ③至少 15% 是女性, 且 50 岁以上。

关于受教育程度、乘坐频率等社会属性, 通过问卷调查获得的统计结果如表 7 所示, 问卷调查共回收有效数据 673 份, 其中包括来自某机场航站楼登

机口旅客的 123 份问卷。

表 7 问卷调查人口统计学特征分布

变量	类目	频数	百分比/%
性别	男	330	49.03
	女	343	50.97
学历	初中及以下	37	5.50
	高中或中专	73	10.85
	大专或本科	383	56.91
	研究生及以上	180	26.75
乘坐频率	很少(3次以下/年)	392	58.25
	偶尔(3~6次/年)	215	31.95
	有时(1~3次/月)	44	6.54
	经常(3次以上/月)	22	3.27

关于是否阅读安全卡片及观看安全演示, 文献[25]给出了如图 1 所示的调查统计结果。其他社会力模型参数的选取如表 8 所示。

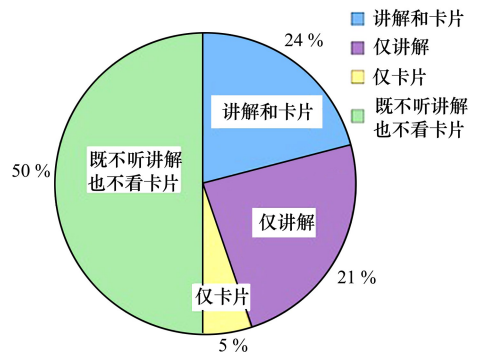


图 1 出口同排乘客阅读安全卡片和听讲解百分比

表 8 其他社会力模型参数的选取

WK 名称	符号	取值
正常期望速度	$v_i^0 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	1.5
最大期望速度	$v_i^{\text{max}} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	2.5
个体间力作用强度	$A_i / \text{N}$	440
个体间作用范围	$B_i / \text{m}$	0.08
环境作用力强度	$A_w / \text{N}$	180
环境作用范围	$B_w / \text{m}$	0.08
摩擦因数	$\mu / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2})$	6 000
挤压系数	$\kappa / (\text{kg} \cdot \text{s}^{-2})$	4 000

## 4 仿真与试验

### 4.1 试验工况

在应急撤离试验环境共进行了 3 类试验, 即单人试验、多人试验和群体试验。单人试验用于验证

个体行走速度,多人试验用于验证个体间相互作用及速度衰减比,群体试验用于验证仿真模型的准确度。

单人试验共招募人员 24 名,男 10 人、女 14 人,年龄 25~50 岁,身高 150~180 cm,体重 55~85 kg。每个试验对象以模拟舱内的第 40 排座椅 A 为起点,达到客舱右前舱门并触碰舱门上的标记为结束。试验按自由行走模式和快速撤离模式进行撤离,以便研究快速撤离模式与自由行走模式的差异。

多人试验每次试验人员 18 名,随机就座于模拟舱内第 38 排至第 40 排的座位。试验人员需从座位处进入过道并撤离至客舱前部的黄色标记处,如图 2 所示。群体撤离试验共招募人员 90 名,年龄分布在 25~55 岁,分为 5 组进行重复试验。

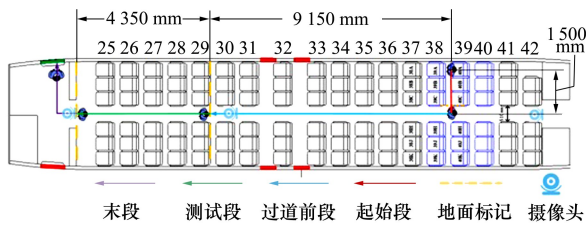


图2 多人试验场景

群体试验共进行了 6 次,人员分别为 80 名和 96 名,各进行 3 次,按照适航要求的男女性别及年龄比例招募参试人员。图 3 是全尺寸撤离试验过程中舱内录像截图。



图3 撤离过程中舱内录像截图

### 4.2 应急撤离试验

通过单人试验得到了不同运动模式及不同区域的运动速度如图 4 所示,在直线段的期望速度约 1.49 m/s,在快速撤离模式下,直线段的速度约 2.86 m/s。试验结果表明,仿真中选取的期望速度 1.5 m/s 是合适的,而最大期望速度 2.5 m/s 偏低。

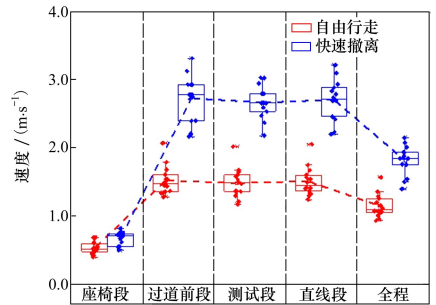


图4 行走速度试验结果

试验中所得男女行走速度如图 5 所示。从图中可以看出,在自由步行情况下,男女行走速度比较一致,但在快速撤离模式下,男性在各段速度均高于女性。同时通过试验录像,在跳下滑梯时,表现出害怕恐慌情绪的女性要多于男性。试验表明,在仿真模型中加入性别修正是合适的。

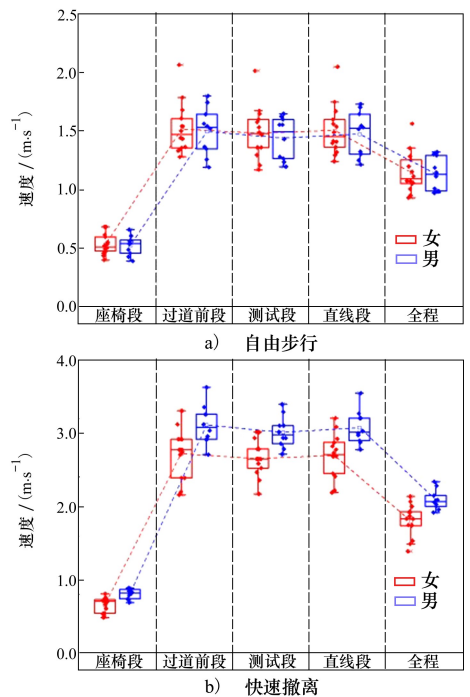


图5 撤离速度性别差异

不利姿态条件下撤离试验结果如图 6 所示,从图中可以看出,滚转角对自由行走撤离速度的影响较少,而对快速撤离速度影响较大,在-10°滚转角下,最大期望速度降低至约 2.25 m/s。俯仰角对自由行走速度和快速撤离速度均有影响,俯仰角为 10°时,自由行走速度降低至约 1.25 m/s,快速撤离速度降低至约 2.20 m/s。试验表明,在仿真模型中有必要加入迫降后不利姿态的影响。

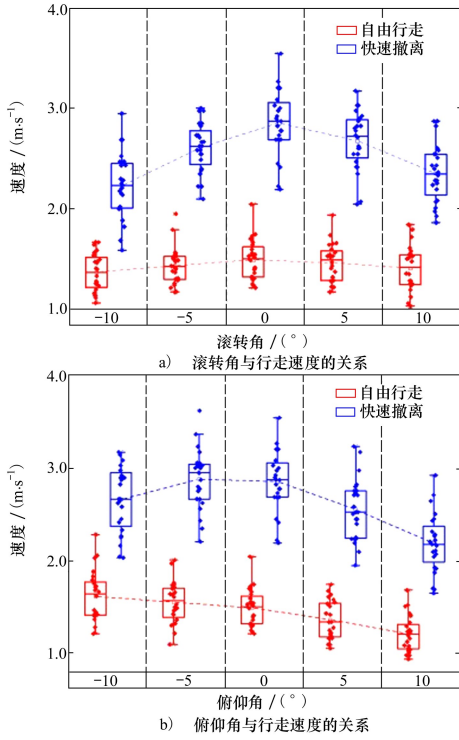


图 6 不利姿态与行走速度的关系

基于多人试验,得到不同滚转角及俯仰角下平均速度及其衰减比如图 7~8 所示。从图中可以看出,滚转角为 5°时,整体速度的衰减比为 0.948,滚转角为 10°时,整体速度衰减比为 0.859。倾角对疏

散中个体速度的影响全部呈现出减速效果,且速度衰减比随次序的变化规律并不明显。基于试验数据,拟合得到的速度衰减比系数为

$$\gamma_1 = 1 - 0.00675 |\psi|, |\psi| \leq 10^\circ \quad (21)$$

$$\gamma_2 = \begin{cases} 1 + 0.0082\theta, & -10^\circ \leq \theta \leq 0^\circ \\ 1 - 0.019\theta, & 0^\circ < \theta \leq 10^\circ \end{cases} \quad (22)$$

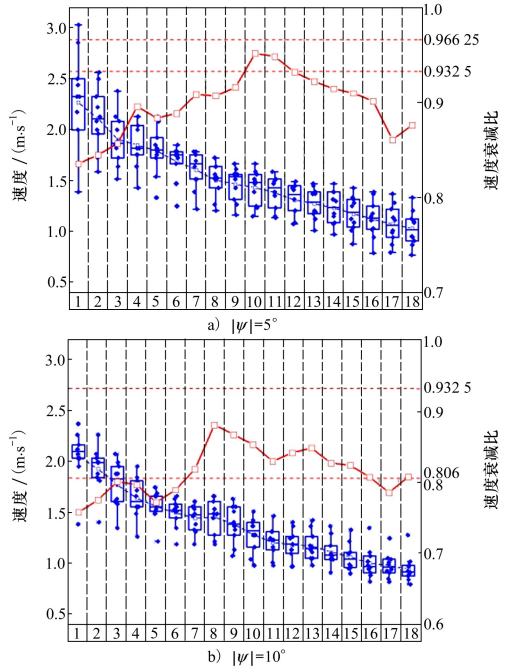


图 7 滚转姿态各次序个体速度统计及其衰减比

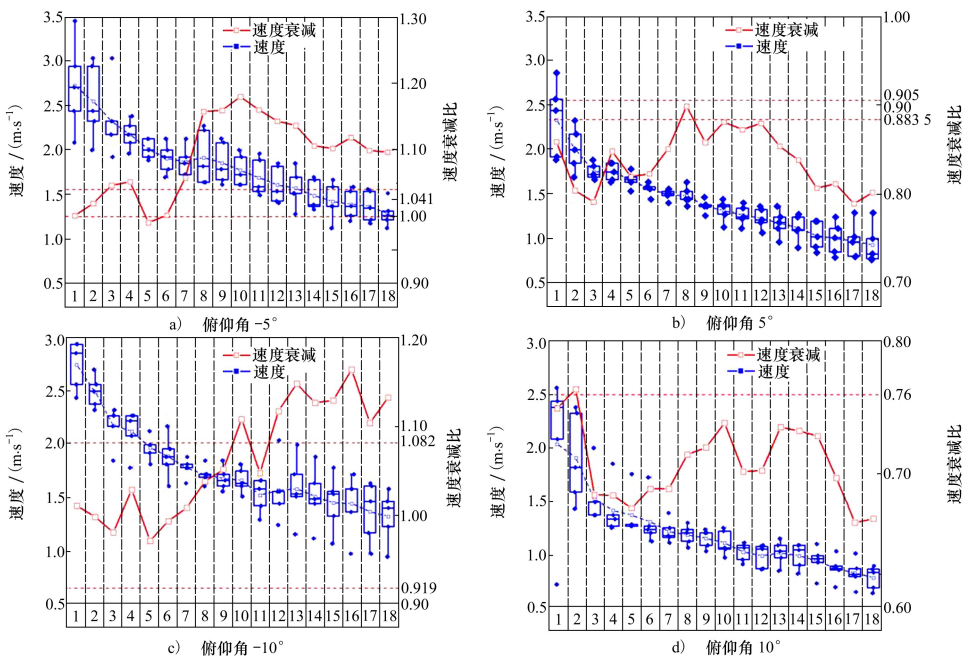


图 8 俯仰姿态下各次序个体速度统计及其衰减比

与劳氏船级社的衰减系数相比,滚转姿态和仰角姿态下基本一致,而俯角姿态下所得衰减比系数略微较大。

### 4.3 试验与仿真对比

#### 4.3.1 单人仿真与试验

撤离时间的对比如图 9 所示,最大误差出现在 10°俯仰角,为 5.2%。从图中可以看出,与试验数据相比,仿真更加稳定,数据点更集中。

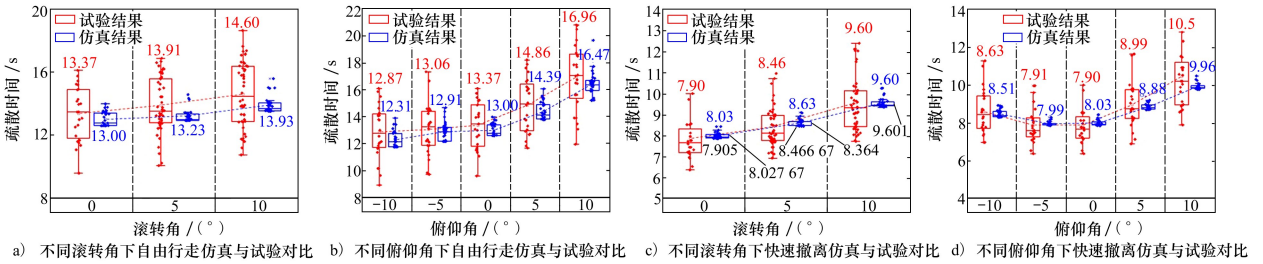


图 9 单人撤离仿真与试验对比

#### 4.3.2 多人仿真与试验

多人试验撤离时间的对比如图 10 所示,各工况的最大误差为 5.0%。在大倾斜角度下对不同个体的影响不同,10°倾斜角时试验获得的撤离时间分布较大,而仿真结果则较为稳定。

所示。从表中数据可以看出,仿真与试验结果比较接近,最大误差 6.25%。

表 9 群体撤离仿真与试验对比

试验 编号	人数	前登 机门	翼上应 急出口	撤离时间/s	
				试验	仿真
S1	80	✓	✓	65	
S3	80	✓	✓	61	57.7
S3	80	✓	✓	58	
S4	96	✓	✓	63	
S5	96	✓	✓	54	64.1
S6	96	✓	✓	64	

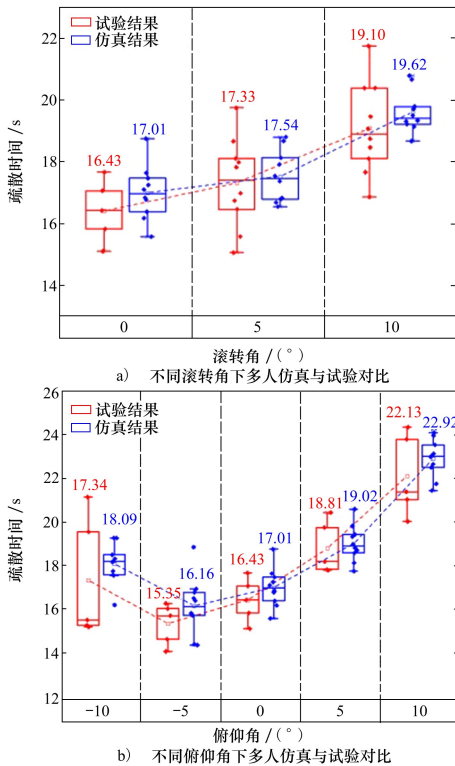


图 10 多人仿真与试验结果对比

#### 4.3.3 群体仿真与试验

群体试验的撤离时间与仿真结果的对比如表 9

各出口的撤离人数试验及仿真对比如表 10 所示。表中 D 表示前登机门,前 E 表示沿航向前翼上应急出口,后 E 表示沿航向后翼上应急出口。从表中数据可以看出,虽然仿真结果更符合客舱人员分布情况,但与试验存在较大的差异。在试验中,参试人员更愿意从前登机门撤离,而不是选择就近出口撤离,这与试验中参试人员的心理状态有关,因为在其内心认为这是地面试验,没有紧迫感,更愿意选择更容易跨出的登机门,而不选择尺寸相对较小的翼上应急出口。在 S4 试验中,由于是第一次试验,参试人员基本上按就坐区域附近出口撤离。在 S5 试验中,由于熟悉了试验环境,试验中有 36,37 和 39 排(参考图 2)的人员从前登机门撤离,在 S6 试验中,几乎翼上应急出口前的所有人员均从前登机门撤离(共 7 排,42 人)。相对来说,仿真更符合应急情况下就近选择应急出口的原则。

表 10 各出口撤离人数仿真与试验对比

试验 编号	试验			仿真		
	D	前 E	后 E	D	前 E	后 E
S1	22	25	33			
S2	22	24	34	24	24	32
S3	24	23	33			
S4	29	35	32			
S5	35	28	32	25	26	45
S6	42	26	27			

4.3.4 与全机应急撤离演示试验的对比

ARJ21-700 型客机是我国已完成适航取证投入运营的国产支线喷气客机。ARJ21-700 飞机进行的全机地面演示试验中,所有人员在 57 s 内撤离完毕。根据 ARJ21-700 飞机应急撤离地面演示试验客舱结构建立仿真场景。

虽然适航规定了参试人员的性别和年龄比例,但无法获得 ARJ21-700 应急撤离演示试验参试人员的具体信息,为避免人员组成及人体尺寸参数对数据的影响,仿真中人员按适航要求的范围随机生成,通过多次仿真进行统计分析,结果如图 11 所示。

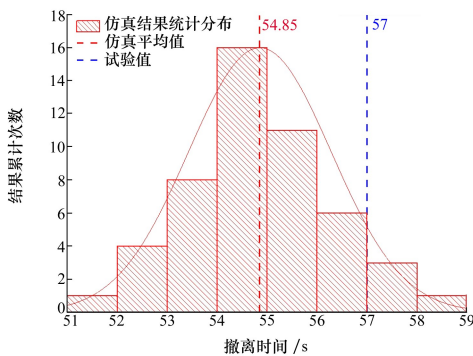


图 11 ARJ21-700 仿真与试验结果对比

从图中可以看出,本文的仿真结果与试验结果吻合较好,误差 2.15 s,相对误差 3.7%。

5 结 论

1) 基于基本社会力模型,从个体行为、个体社会属性、群体行为等方面修正了仿真模型,并通过试验获得了不同性别在撤离时速度的差异;在快速撤离模式下,男性在各阶段速度均高于女性,全程平均速度男性为 2.01 m/s,女性为 1.80 m/s。在步行模式下,男女在各阶段速度比较一致;

2) 针对迫降后的不利姿态,修正了仿真模型,具备不利姿态仿真能力;并通过试验验证了不同姿态对自由行走速度和快速撤离速度的影响,说明在仿真模型中加入不利姿态修正是合适的;

3) 基于动态应急撤离试验环境,开展了单人试验、多人试验和群体试验,基于多人试验数据,获得了飞机不利姿态的速度缩减比系数,为仿真模型的不利姿态修正提供了可靠的数据;

4) 由于缺乏竞争机制和紧张心理,在试验中,参试人员对应急出口的选择具有随意性。相对来说,仿真更符合应急情况下就近选择应急出口的原则;但从另一方面来说,所建仿真模型尚不能真实模拟人员的心理,仿真在某种程度上是群体行为的一种统计;

5) 通过单人试验、多人试验、群体试验以及全尺寸应急撤离演示试验的对比,表明所修正的社会力模型能够比较准确地模拟民航机应急撤离,仿真误差满足工程需要。

参考文献:

[1] XUE Z, BLOEBAUM C. A particle swarm optimization based aircraft evacuation simulation model-vacateair[C]//AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 2013

[2] Safety Regulation Group. CAP 780; aviation safety review-2008[EB/OL]. (2008-11-11)[2021-09-02]. <https://publicapps.caa.co.uk/docs/33/CAP780.pdf>

[3] Office of Technology Assessment. Aircraft Evacuation Testing: Research and Technology Issues[EB/OL]. (1993-09-15)[2021-09-02]. <https://ota.fas.org/reports/9306.pdf>

[4] 张玉刚, 宋笔锋, 薛红军. 民航机应急撤离过程仿真模型研究进展[J]. 航空工程进展, 2010, 1(1): 55-61  
ZHANG Yugang, SONG Bifeng, XUE Hongjun. Advances in simulation for civil aircraft emergency evaluation[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2010, 1(1): 55-61 (in Chinese)

[5] HELBING D, MOLNAR P. Social force model for pedestrian dynamics[J]. Physical Review E, 1998, 51(5): 4282

- [6] ALTSHULER E, RAMOS O, NUNEZ Y, et al. Symmetry breaking in escaping ants[J]. *The American Naturalist*, 2005, 166: 643-649
- [7] TIAN W, SONG W G, MA J, et al. Experimental study of pedestrian behaviors in a corridor based on digital image processing [J]. *Fire Safety Journal*, 2012, 47: 8-15
- [8] HELBING D, JOHANSSON A, AL-ABIDEEN H Z. Crowd turbulence: the physics of crowd disasters[C]//The Fifth International Conference on Nonlinear Mechanics, Shanghai, 2007: 967-969
- [9] HELBING D, BUZNA L, JOHANSSON A, et al. Self-organized pedestrian crowd dynamics: experiments, simulations, and design solutions[J]. *Transportation Science*, 2005, 39(1): 1-24
- [10] 张培红, 尚融雪, 姜泽民, 等. 大型商场人员疏散行为的调查和分析[J]. *东北大学学报*, 2011, 32(3): 439-442  
ZHANG Peihong, SHANG Rongxue, JIANG Zeming, et al. Investigation and analysis of evacuation behavior in a large shopping mall[J]. *Journal of Northeastern University*, 2011, 32(3): 439-442 (in Chinese)
- [11] 张庆庆. 民机应急群体疏散仿真研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2016  
ZHANG Qingqing. Simulation on emergency evacuation in civil aircraft[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2016 (in Chinese)
- [12] 郭零, 何理, 石杰红, 等. 地铁不同人群疏散行为特征调查问卷研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2012, 8(4): 183-188  
GUO Yu, HE Li, SHI Hongjie, et al. Questionnaire research on the evacuation behavior characteristics of different crowds in subway[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2012, 8(4): 183-188 (in Chinese)
- [13] 李敬强, 李康, 王蓓, 等. 航空旅客焦虑情绪特征分析[J]. *中国公共卫生*, 2019, 35(4): 398-401  
LI Jingqiang, LI Kang, WANG Bei, et al. Anxiety characteristic in air passengers: a cross-sectional analysis[J]. *Chinese Journal of Public Health*, 2019, 35(4): 398-401 (in Chinese)
- [14] 阎卫东, 梁清山, 陈宝智. 火灾情况下疏散心理和行为在不同层次起点学生中的差别研究[J]. *中国安全科学学报*, 2006, 16(3): 8-11  
YAN Weidong, LIANG Qingshan, CHEN Baozhi. Mental and behavioral differences among students of different levels and starting points during evacuation from fire[J]. *China Safety Science Journal*, 2006, 16(3): 8-11 (in Chinese)
- [15] 柯霄, 程五一, 邓云峰, 等. 漳州古雷“4·6”事故居民疏散行为调查及相关性研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2019, 15(6): 48-54  
KE Xiao, CHEN Wuyi, DENG Yunfeng, et al. Investigation and correlation study on evacuation behavior of residents in "4·6" accident of Zhangzhou Gulei[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2019, 15(6): 48-54 (in Chinese)
- [16] 刘严萍, 王世通, 张宇. 基于 logistic 回归的地铁乘客应急行为研究[J]. *安全*, 2018, 39(1): 23-26  
LIU Yanping, WANG Shitong, ZHANG Yu. Emergency behavior research of subway passenger based on the logistic regression [J]. *Safety*, 2018, 39(1): 23-26 (in Chinese)
- [17] 刘严萍, 王世通, 赖迪辉. 天津地铁乘客火灾疏散行为特征调查研究[J]. *灾害学*, 2017, 32(4): 169-172  
LIU Yanping, WANG Shitong, LAI Dihui. Surveys on personnel evacuation in subways in Tianjin[J]. *Journal of Catastrophology*, 2017, 32(4): 169-172 (in Chinese)
- [18] 穆娜娜, 肖国清, 何理, 等. 地铁人员疏散心理行为调查及相关性研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2013, 9(6): 85-90  
MU Nana, XIAO Guoqing, HE Li, et al. Investigation and correlation study on human evacuation psychological behavior in subway[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2013, 9(6): 85-90 (in Chinese)
- [19] 王彦云, 李树刚, 成连华. 基于地铁乘客个体特征的非适应性行为研究[J]. *火灾科学*, 2019, 28(2): 79-84  
WANG Yanyun, LI Shugang, CHEN Lianhua. Study on non-adaptive behavior based on individual characteristics of subway passengers[J]. *Fire Safety Science*, 2019, 28(2): 79-84 (in Chinese)
- [20] YUAN Z, JIA H, LIAO M, et al. Simulation model of self-organizing pedestrian movement considering following behavior[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2017, 18(8): 1142-1150
- [21] VELOZ M V, ZHOU K, BOSMAN L, et al. Cerebellar control of gait and interlimb coordination[J]. *Brain Structure and Function*, 2015, 220(6): 3513-3536
- [22] MEYER-KNIG T, VALANTO P, POVEL D. Implementing ship motion in AENEAS-model development and first results[C]//Conference Proceedings, Pedestrian and Evacuation Dynamics, Vienna, 2005
- [23] 李伟, 张宝光. 应用于工业设计的人体尺寸数据的分析处理[EB/OL]. (2005-08-24)[2021-09-02]. <http://www.paper>

edu.cn/releasepaper/content/200508-157

[24] CIVIL Aviation Authority, Safety Regulation Group. A database to record human experience of evacuation in aviation accidents [EB/OL].(2008-07-15)[2021-09-02]. [https://publicapps.caa.co.uk/docs/33/2006\\_01.pdf](https://publicapps.caa.co.uk/docs/33/2006_01.pdf)

## Emergency evacuation simulation and test research of civil aircraft complex groups based on the social attribute

FENG Wenchun<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, ZHANG Tong<sup>2</sup>, YAO Xiangru<sup>1</sup>

(1. Institute of Mechanical and Electrical System, First Aircraft Institute of AVIC, Xi'an 710089, China; )  
(2. College of Aviation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China )

**Abstract:** Based on the basic social model, the social attribute effect factor is put forward. The desired velocity of individual is modified from sex, age, education, ride frequency, safety knowledge and experience. The influence of the individual behavior, group action and adverse attitude of landing are revised through panic parameter, follow force, leaning force and coefficient of speed damping ratio. Based on the dynamic cabin emergency evacuation test environment, the individual evacuation test, multiplayer evacuation test and group evacuation test are performed. The individual speed distributes and the adverse attitude effects on the individual velocity and group evacuation speed are analyzed. The test result show that the individual desired speed is about 1.5 m/s and the maximum desired speed is about 2.86 m/s. During evacuation, the average speed of male is higher than that of female. However, the proportion of panic of female during jump slide is higher than that of male. The fitting coefficient of speed damping ration based on the test data is consist with that from Lowe's Ship Club. Through comparing the simulation result with the test, the revised social model can be exact simulate evacuation process. The maximum deviation is 6.25 percent with group test performed in the test environment. The relative error is 3.7 percent with ARJ21-700 evacuation demonstrate test. The errors conform to the engineering requirement.

**Keywords:** social attribute; emergency evacuation; test; simulation; cabin; dynamic evacuation test environment

**引用格式:** 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. Emergency evacuation simulation and test research of civil aircraft complex groups based on the social attribute[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2022, 40(4): 853-864 (in Chinese)