

文章编号:1674-8190(2020)06-781-08

# 民用飞机客舱应急撤离仿真算法研究

王霁飞, 刘龙权

(上海交通大学 航空航天学院, 上海 200240)

**摘要:** 在飞机应急撤离的仿真模拟中, 国内多采用元胞自动机模型模拟疏散的人群, 该模型计算较快, 但把疏散者视为同样的粒子, 忽略了个体差异, 因此与实际撤离情况存在差异。采用智能体模型, 建立个人的行为规则; 采用适合飞机应急撤离的 A\* 算法选择估值函数, 建立人物模型, 针对波音 737-700 飞机客舱进行应急撤离过程的仿真模拟, 并与前人实验结果和权威软件 airEXODUS 仿真结果进行验证对比。结果表明: 本文算法的仿真结果与实验结果接近, 更接近真实疏散情况。

**关键词:** 客舱安全; 应急撤离; 智能体模型; A\* 算法; 仿真模拟

中图分类号: V328

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2020.06.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Research on Simulation Algorithm of Civil Aircraft Emergency Evacuation

WANG Jifei, LIU Longquan

(School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** In the simulation of emergency evacuation of aircraft, the cellular automaton model is mostly used to simulate evacuated people. This model is faster in calculation but regards the evacuees as the same particles, ignoring individual differences, so there is a difference from the actual evacuation situation. In this paper, the agent model is used to establish personal behavior rules, combined with the A\* path-finding algorithm, a valuation function in the A\* algorithm suitable for aircraft emergency evacuation is proposed, and a character model is established. The simulation of the emergency evacuation process of the cabin of a certain type of Boeing 737-700 aircraft is carried out, and compared with the previous experimental results and the authoritative simulation software airEXODUS. The results show that the simulation results of the proposed algorithm are close to the real experimental results, and closer to the real evacuation situation.

**Key words:** cabin safety; emergency evacuation; agent model; A\* algorithm; simulation

## 0 引言

飞行安全是飞机研究中最重视的部分, 运输类民航客机适航标准 CCAR 第 25 部 803 条款要求: 对于客座量大于 44 座的飞行器, 必须表明在应急情况下其最大乘坐量的乘员能在 90 s 内从飞机撤

离至地面<sup>[1]</sup>。因此, 民航客机在通过适航认证并正式运营之前, 必须表明其客舱安全性满足适航规章的要求。然而, 一次真机试验需要涉及许多人员、设备和仪器, 费用较高, 且具有较高的危险性。以波音公司为例, 一次客舱逃生试验, 总计耗资金额达到 100 万美元以上<sup>[2]</sup>。1972—1980 年间, FAA

收稿日期: 2019-12-25; 修回日期: 2020-05-19

通信作者: 刘龙权, liulongquan76@sjtu.edu.cn

引用格式: 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)

的 7 次全机逃生试验共涉及人员 2 571 人,造成其中 166 人受伤。1981—1991 年间,FAA 全机逃生试验共涉及 3 761 人,受伤人数达到 212 人<sup>[3]</sup>。1991 年,在对 MD-11 宽体机进行应急撤离疏散实验时,一位女性测试者因受伤而永久性的瘫痪<sup>[4]</sup>。2006 年 A380 完成逃生测试时一人脚部骨折,多人受伤<sup>[5]</sup>。与之相比,数值仿真模拟既安全且可重复性高,又可以模拟各种极限情况,因此飞机客舱逃生数值模拟可作为试验的有益补充。

目前国外已长期开展飞机客舱安全逃生相关仿真研究。据文献调研,FAA 早在 1962 年就已开展乘客应急撤离模型相关研究<sup>[6]</sup>;1970 年,FAA 开发了 GPSS 软件,这是第一个能用来模拟飞机客舱应急撤离仿真的软件;此后国外陆续开发 GA、AIREVAC、MACEY、airEXODUS 等多个用于民航客机 90 s 应急撤离的仿真算法和软件<sup>[7]</sup>,其中英国格林威治大学开发出商用软件 airEXODUS 能较好地模拟仿真各种应急撤离的场景,但关于飞机部分其软件对外保密<sup>[8-10]</sup>。

相比之下,国内对于飞机客舱逃生仿真的研究相对较少。李杰等<sup>[11]</sup>研究了飞机应急撤离的元胞自动机模型,并在 DELMIA 平台实现建模和三维演示;徐进津<sup>[12]</sup>研究了飞机客舱疏散仿真的人为因素,总结了客舱和乘客的属性以及一些人为因素数据。上述文献中均采用元胞自动机模型模拟疏散人群的属性,把疏散人群视为相同粒子,忽视了个体的差异化,与真实撤离实验存在一定差别。陈晨、杜红兵等<sup>[13-15]</sup>运用元胞自动机模型,并借鉴了智能体模型,开发仿真软件 CabinEvac,并研究乘客的应急心理状态,但其对心理状态的考虑并不全面,且未与相同状态下的逃生试验结果进行对比验证。

智能体模型把关注点放在疏散体身上,认为模型对象能在一定的环境下,具有一定的行为规则和学习能力,通过感知外界因素调整自身的状态,最终完成目标<sup>[16]</sup>。这种模型的优点在于其能体现个体的差异性,使模拟仿真更接近于真实。

本文采用智能体模型,建立逃生智能体的行为准则,以最优路径算法 A\* 算法为主要行为依据,根据拥挤情况选择在 A\* 算法中适合飞机的估值

函数;结合个体与个体之间的协助与阻碍影响,个体与环境的影响,建立客舱应急撤离的仿真模型;将算法结果与前人实验结果和权威软件 airEXODUS 仿真结果进行对比。

## 1 疏散人群的智能体模型设计

### 1.1 智能体模型

智能体模型来源于人工智能,指的是模型对象在一定的环境下,具有一定的行为规则和学习能力,最终完成目标任务<sup>[16]</sup>,这是一种自下而上构建的社会模型<sup>[17]</sup>。

基于智能体模型理论,结合运输类飞机适航标准,本文中的智能体模型遵循的行为规则分为三大子规则,分别为路径抉择规则、移动规则和交互规则,如图 1 所示。在路径抉择时,智能体通过 A\* 算法求取各逃生出口对应的最优路径,然后比较不同出口的最优路径,最终做出选择;在移动规则下,疏散体的移动速度受到初始移动速度与其他系数的影响;在交互规则下,拥挤、恐慌和互助分别对路径抉择中的 A\* 算法估值函数和影响速度的系数产生影响。

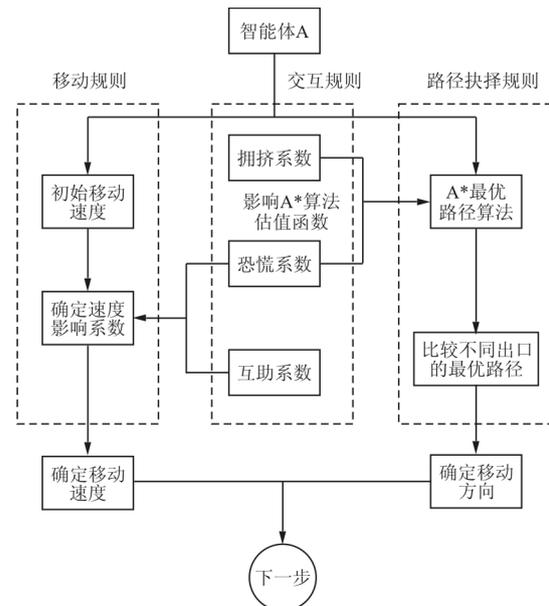


图 1 智能体模型的移动规则

Fig. 1 Agent model movement rules

### 1.2 路径抉择规则

在路径抉择上,每个疏散智能体均选择最优路

径的方法前进,本文采用在最优路径研究领域被广泛采用的 A\* 算法。

1.2.1 A\* 算法原理

A\* 算法是一种人工智能中典型的路径启发式搜索优化算法,通过选用合适的估值函数  $F(n)$ ,朝着最可能的值进行求取,最终得到从起点  $S$  到终点  $E$  的最短且最合适的路线,其原理图如图 2 所示。

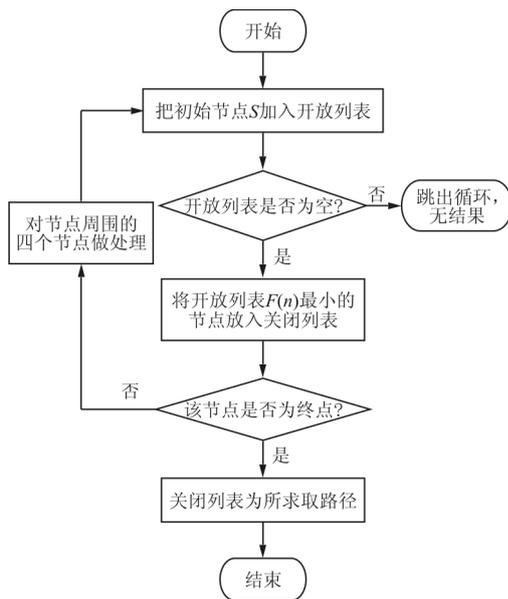


图 2 A\* 算法原理图

Fig.2 A\* algorithm schematic

A\* 算法的步骤:

(1) 设置开放(open)和关闭(close)两个列表,起点定为  $S$ ,终点定为  $E$ 。

(2) 从  $S$  开始,把  $S$  放入 open 列表中。

(3) 判断 open 列表是否为空,若为空,则宣告路径寻找失败,退出循环。

(4) open 列表为非空集合,选取 open 列表中  $F(n)$  最小的节点  $T$ ,将节点  $T$  从 open 列表中删除,放入 close 列表。

(5) 检查节点  $T$  是否为终点  $E$ ,若是终点  $E$ ,则找到路径并退出循环。

(6) 若节点  $T$  不是终点  $E$ ,则把节点  $T$  周围的可扩展节点  $T_i$ (上下左右且不出界和非墙节点)做预处理,计算  $T_i$  节点的  $F(T_i)$ ,并判断  $T_i$ 。若  $T_i$  不在 open 和 close 列表中,则加入 open 列表,并定义其父节点为  $T$ 。若  $T_i$  已经在 open 列表中,

则比较当前  $F(T_i)$ 与原先的  $F'(T_i)$ ;  $F(T_i)$ 较小,则说明当前路径更优,并更改父节点为当前  $T$ ,用  $F(T_i)$ 代替  $F'(T_i)$ ;  $F'(T_i)$ 较小则说明原路径更优,因此跳过。若  $T_i$  已经在 close 列表中,则跳过,处理下一个节点。

(7) 返回步骤(3),直到在步骤(3)或步骤(5)时跳出循环。

1.2.2 A\* 算法的估值函数

估值函数  $F(n)$ 是 A\* 算法中的一个核心,选择合适的估值函数能正确地得到目标至终点的最优路径,A\* 算法选择  $F(n) = G(n) + H(n)$ 作为估值函数,其中  $G(n)$ 为从起点  $S$  到达一个节点  $n$  所已经付出的代价, $H(n)$ 为从节点  $n$  到终点  $E$  所估计需要付出的代价。

在路径搜索中曼哈顿距离常被用于估值函数。曼哈顿距离指的是两点之间的  $x$  轴距离和  $y$  轴距离之和<sup>[18]</sup>,即若存在两点  $S(x_1, y_1)$ 和  $E(x_2, y_2)$ ,则曼哈顿距离  $L$  为

$$L(S, E) = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2| \quad (1)$$

飞机的情况较为复杂,人与人的交互也对估值判断有较大的影响,因此估值  $H(n) = L(S, E) + H_{inter}(n)$ ,其中  $H_{inter}(n)$ 为人群交互所产生的估值函数影响变化。

1.3 交互规则

人与人之间的交互主要对模型体有两方面的影响,拥挤和恐慌会对路径抉择产生影响,同时恐慌与互相帮助也对人的移动速度产生了影响。

1.3.1 拥挤系数

拥挤对路径抉择具有较大的影响,拥挤的人数会被折算成对应的等价距离。

定义拥挤距离  $H_{inter}(S, E) = \mu \times people(S, E)$ ,其中  $people(S, E)$ 指的是从起点到终点两个顶点所组成的矩形中所包含的人数, $\mu$ 为拥挤系数。

因此,A\* 算法中估值函数  $H(n) = L(S, E) + H_{inter}(S, E)$

1.3.2 恐慌系数

恐慌主要产生两方面的影响,一方面适当的恐慌会使人紧张,促使疏散体移动速度变快<sup>[19]</sup>;另一方面过度的紧张会使得疏散人群变得不理智,产生移动停滞或反向移动等现象<sup>[20]</sup>。

本文采用 SIS 模型和情绪衰减管理模型<sup>[21]</sup>模拟疏散人群的恐慌现象。

恐慌情绪会对路径决策产生影响,人群分为两类:易感者(Susceptibles)与感染者(Infectives)。易感者为情绪接收者,不向外传递情绪;感染者为情绪传递者,同时也能接收情绪。易感者与感染者可互相转变,其转变零界点为情绪阈值 $\eta$ 。当情绪值达到 $\eta_c$ 时,其行为呈现非理智状态,将出现停滞或随机移动的行为现象。

初始时刻的恐慌系数 $k$ 通过正态分布确定<sup>[21]</sup>,如式(2)所示。

$$k_{t=0} \sim N(\mu_k, \sigma_k) \quad (2)$$

式中: $k$ 为恐慌系数; $\mu_k$ 为正态分布的均值; $\sigma_k$ 为正态分布的标准差。

由于恐慌程度与年龄性别有关,建立不同年龄段和性别的初始恐慌因子,如表 1 所示。

表 1 不同年龄、性别人群的初始恐慌因子

Table 1 Initial panic factors for people of different ages and genders

人群分类	$\mu_k$	$\sigma_k$
青年男性	0.05	0.01
青年女性	0.06	0.01
老年男性	0.09	0.02
老年女性	0.10	0.02

某一时刻某一人物恐慌系数 $k$ 的计算公式,如式(3)所示。

$$k_p^{t+1} = k_p^t - k_{pdecay} + \sum_{r_s < R} k_s' \times \Delta k_{r_s} \quad (3)$$

式中: $k_p^{t+1}$ 和 $k_p^t$ 分别为 $t+1$ 时刻和 $t$ 时刻疏散人员 $p$ 的恐慌值; $k_{pdecay}$ 为情绪衰减速率; $r_s$ 为感染者与疏散者 $p$ 之间的距离; $R$ 为传染半径; $k_s'$ 为感染者的恐慌值; $\Delta k_{r_s}$ 为情绪传染比例。

一般情绪传递半径为一格到两格<sup>[21]</sup>,本文选用两格作为情绪传递半径。

$$\Delta k_{r_s} = \begin{cases} 0.01 & (r_s = 2) \\ 0.03 & (r_s = 1) \end{cases} \quad (4)$$

疏散人群的恐慌会随时间衰减,并且会离出口相接近时大幅度衰减。因此情绪衰减速率 $k_{pdecay}$ 的计算公式,如式(5)所示。

$$k_{pdecay} = \begin{cases} k_p e^{-\frac{\alpha}{d}} & (d \leq R_{door}) \\ k_p \beta & (d > R_{door}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\alpha$ 为疏散体在靠近出口处的情绪衰减速率,取值 0.8; $\beta$ 为疏散体正常情况下的情绪衰减速率,取值 0.1; $t_p$ 为疏散体收到情绪传递的时间; $d$ 为疏散体离最近出口的曼哈顿距离; $R_{door}$ 为出口相近处的临界曼哈顿距离。

当恐慌系数 $k_p < \eta_c$ 时,疏散体呈现较为理智状态,此时 $k_{move} = \lambda k_p$ ,其中 $\lambda$ 为激励调节因子;当恐慌系数 $k_p \geq \eta_c$ ,疏散体呈现不理智状态,呈现停滞。

### 1.3.3 乘客之间的互相协助因子

互相帮助可以使得疏散者的移动速度变快。根据 AASK 的飞机事故数据库调查显示,49.5%的乘客会在飞行过程中与同伴一起同行,其中 65%为家庭关系,16%为朋友关系,8%为同事关系,11%为其他关系,不同的关系决定了帮助的程度<sup>[22-23]</sup>。在同伴关系中,9%的乘客在真实飞行过程中,提供了他人帮助,其中男性占据 68%,女性占据 36%。

因此协助系数 $s$ :

$$s = \begin{cases} 1 & (\text{无同伴关系}) \\ s_1 \times s_2 & (\text{有同伴关系}) \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{式中: } s_1 = \begin{cases} 1.20 & (\text{家庭关系}) \\ 1.15 & (\text{朋友关系}) \\ 1.10 & (\text{同事关系}) \\ 1.05 & (\text{其他关系}) \end{cases}; s_2 = \begin{cases} 1.05 & (\text{男性}) \\ 1.00 & (\text{女性}) \end{cases}。$$

## 1.4 移动规则

### 1.4.1 乘客的速度

人员最大的移动速度取决于年龄、性别,是否携带婴儿等其他因素影响,因此采用公式 $V_k = \text{random}(V_{kmax}, V_{kmin}) \times \lambda$ ,其中 $V_{kmax}$ 为人员移动速度最大值, $V_{kmin}$ 为人员移动速度最小值, $\lambda$ 为速度影响系数。

人员最大移动速度采用 GALEA 整理的民机人员应急撤离速度分布统计数据,结合 Fruin 实验统计<sup>[20]</sup>,数据是对于目前应急撤离实验录像影音中人群的速度统计得到,如表 2 所示。

表 2 不同年龄性别人群应急撤离速度统计<sup>[24]</sup>  
Table 2 Statistics of emergency evacuation speed of different ages and gender groups<sup>[24]</sup>

分 组	速度最小值/(m·s <sup>-1</sup> )	速度最大值/(m·s <sup>-1</sup> )
男性 18~50 岁	1.0	1.2
男性 50~60 岁	0.7	1.1
女性 18~50 岁	0.9	1.2
女性 50~60 岁	0.5	0.9

小于 2 岁的婴儿被视为无行为能力者,且依赖于其他人员且弱化该人员逃生速度,本文采用减少被依附人员 30%的移动速度。

### 1.4.2 速度影响系数

速度影响系数  $\lambda$  主要受到恐慌系数  $k$ 、互助系数  $s$  和障碍物的影响。

在客舱中障碍物分为两种,可翻越式与不可翻越式。其中可翻越式主要为乘客的行李、座位处的把手,不可翻越式主要为座位、机上厨房与洗手间。根据《运输类飞机适航标准》附录 J<sup>[1]</sup>,在适航逃生时,会有乘客人数一半的行李、毯子、枕头等其他类

似物品放在过道或出口造成轻微障碍。不同障碍物的速度影响系数如表 3 所示,得到速度影响系数  $\lambda = k_{move} \times s \times \lambda_{else}$ 。

表 3 不同障碍物的速度影响系数  
Table 3 Speed influence factor of different obstacles

其他障碍物	$\lambda_{else}$
座位扶手	0.7
行李	0.90~0.95
毯子/枕头	0.95~0.98

## 2 飞机客舱模型

### 2.1 机型选择 B737-700 机型

本文选用 B737-700 座级机型进行数值仿真。该机型客舱分布图如图 3 所示,左右两侧呈现对称状态,每侧各有三个应急出口,共 120 个座位,为 B737-700 全普舱型机型。

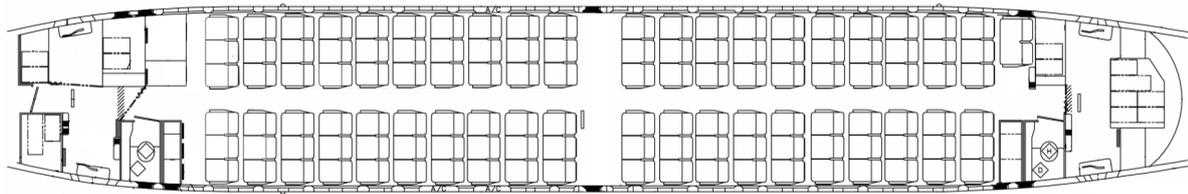


图 3 B737-700 客舱模型图

Fig. 3 B737-700 cabin model diagram

### 2.2 应急设备使用情况

#### 2.2.1 安全门使用情况

按照《运输类飞机适航标准》25.807 条<sup>[1]</sup>,许可的最大乘客数取决于机身上每一侧的应急出口类型和数量,可容纳最大乘客数规定如表 4 所示。

表 4 应急出口类型与最大乘客数对应表

Table 4 Correspondence table of emergency exit types and maximum number of passengers

出口类型	最大乘客数	出口类型	最大乘客数
A 型	110	I 型	45
B 型	75	II 型	40
C 型	55	III 型	35

C 型出口需在 10 s 内完全展开,其他型出口需要在 6 s 内完全展开<sup>[1]</sup>。结合文献[25]可得 C 型、I 型与 II 型门大致开门时间如表 5 所示。

表 5 各类型门开门时间

Table 5 Opening time of various types of doors

类型	开门时间/s	类型	开门时间/s
C 型门	6~8	II 型门	4~5
I 型门	4~5		

在适航审定过程中,局方要求使用的安全门是开启一半的门,根据中轴线对称的每两扇门使用其中一扇作为可用出口,用来测试能否通过 90 s 的应急撤离试验。由于在仿真计算过程中,左门开启与右门开启影响甚微,因此全部使用一侧作为开口。

### 2.2.2 逃生滑梯的使用情况

查阅文献[26],得到在正常离地高度3.5 m,滑梯展开与地面呈 35°时,乘客与滑梯之间的摩擦系数为 0.4,单人下滑时间为 1.91 s。B737-700 舱门离地高度约为 2.7 m。因此  $t_{\text{单人}} \approx 1.91/3.5 \times 2.7$ ,为 1.47 s。按照 CTSO-C69c 标准,一段滑梯上应能同时承载 3 人[27],因此当  $t = 1.47/3 = 0.49$  s时,下一位疏散体即可使用滑梯。

### 2.3 应急撤离时间

应急撤离时长由以下两部分组成:

(1)  $T_1$ ——乘务员抵达相应安全门,若对应大门可用,则打开门,滑梯充气的时间。

(2)  $T_2$ ——乘客开始准备撤离,在开门过程中排队,开完门后依次乘坐应急逃生滑梯离开客舱的时间。

总撤离时长  $T = T_1 + T_2$ 。

## 3 模型有效性验证

为了验证数值仿真模拟的有效性,本文采用模拟 B737-700 机型,将本文数值模拟结果与 airEXODUS 软件仿真结果[24]和前人实验结果[28]进行对比。模拟客舱内含有 60 名志愿者,包含 38 名青年男性和 22 名青年女性。客舱段选用了前十排座椅(总计 60 个座位)和两个前排 I 型门。在真实实验中一共重复四次,airEXODUS 软件仿真模拟 12 次,本文采用相同情况进行模拟 20 次结果,取最大与最小的模拟时间与实验结果进行对比图如图 4~图 5 所示。

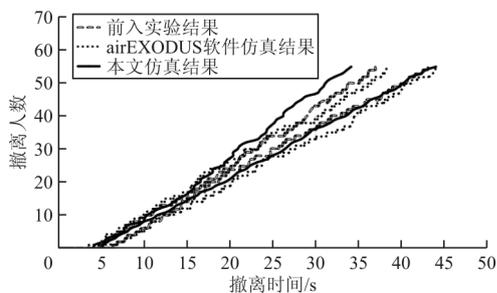


图 4 应急撤离数值模拟结果、前人实验结果与 airEXODUS 软件模拟结果对比图

Fig. 4 Comparison between the numerical simulation results of emergency evacuation, previous experimental results and simulation results of airEXODUS software

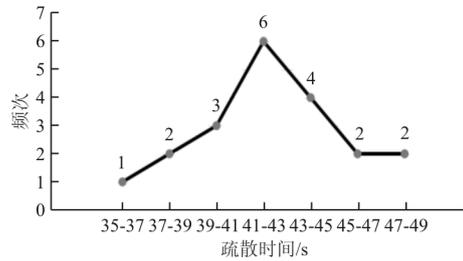


图 5 应急撤离数值模拟 20 次结果频数分布图

Fig. 5 Frequency distribution diagram of 20 results of numerical simulation of emergency evacuation

从图 4~图 5 可以看出:本文的数值模拟结果与真实实验结果和软件 airEXODUS 仿真结果吻合(airEXODUS 仿真软件为航空器撤离权威学者 E. R. Galea 带领团队开发[8-9,22-24]),在 15~30 s,本文仿真结果较真实撤离有更宽的覆盖范围,这是因为真实实验一共由四次组成,因此并没有全面覆盖应急撤离的真实时间范围;同时,平均撤离时间较为接近,在 25~40 s 部分实线(本文模拟结果)包在长条点状线(前人实验结果)以外,较为合理。因此本文的仿真结果有效。

55 名乘客疏散时间的数值模拟结果与前人实验结果和 airEXODUS 仿真结果对比如表 6 所示,可以看出:本文算法模拟的乘客疏散时间与前人实验结果和 airEXODUS 仿真结果接近。

表 6 55 名乘客疏散时间的数值模拟结果和实验结果与 airEXODUS 结果比较

Table 6 Comparison between numerical simulation results and experimental results and airEXODUS results of 55 passengers' evacuation time

方 法	最小疏散时间/s	平均疏散时间/s	最大疏散时间/s
本文	35.7	42.1	48.6
真实实验	37.1	42.7	43.2
airEXODUS	38.4	41.2	44.1

## 4 结 论

(1) 将适用于飞机疏散的 A\* 算法仿真结果与前人实验结果和国外权威软件仿真结果进行对比,对比结果表明本文仿真算法是有效的。

(2) 本算法与传统应急疏散撤离中使用的元胞自动机模型相比,考虑了疏散体之间的差异性,

是一种从疏散体本身出发的算法。利用本算法,可以使仿真模拟更接近真实疏散情况。但本算法的求解效率还有待进一步研究与改善。

### 参考文献

- [1] 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)
- [2] DOPART K. Aircraft evacuation testing: research and technology issues[M]. US: Office of Technology Assessment, 1993: 43-45.
- [3] BRODERICK A J. Evacuation demonstrations for certification[M]. US: Federal Aviation Administration, 1991: 18-25.
- [4] BRANCH A A I. Report on the accident to Boeing 737-236 series 1, G-BGJL at Manchester International Airport on 22 August 1985[R]. Manchester: Aircraft Accident Report, 1988.
- [5] Airbus. A380 successfully completes evacuation test[DB/OL]. [2019-12-25]. <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2006/03/a380-successfully-completes-evacuation-test.html>.
- [6] HASBROOK A H, GAMER J D, SNOW C C. Evacuation pattern analysis of a survivable commercial aircraft crash[R]. US: Civil Aeromedical Research Institute, 1962.
- [7] 战飞飞. 高速列车车辆空间及布局参数对乘客应急撤离的影响[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.  
ZHAN Feifei. The influence of high-speed train space and layout parameters on passengers emergency evacuation[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [8] OWEN M, GALEA E R, LAWRENCE P J, et al. The numerical simulation of aircraft evacuation and its application to aircraft design and certification[J]. Aeronautical Journal, 1998(6): 301-312.
- [9] GALEA E R, OWEN M, LAWRENCE P J. Computer modelling of human behaviour in aircraft fire accidents[J]. Toxicology, 1996, 115(1/3): 63-78.
- [10] MUIR H, COBBETT A. Influence of cabin crew during emergency evacuations at floor level exits[R]. London: Civil Aviation Authority, 1996.
- [11] 李杰, 张炜. 大型民用飞机应急撤离模型与仿真方法研究[J]. 航空计算技术, 2010, 40(2): 40-42, 45.  
LI Jie, ZHANG Wei. Simulation of passenger evacuation under emergency in large civil aircraft[J]. Aeronautical Computing Technique, 2010, 40(2): 40-42, 45. (in Chinese)
- [12] 徐进津. 飞机客舱乘客紧急疏散仿真方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- XU Jinjin. The simulation of multiple agents evacuation in an airplane[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011. (in Chinese)
- [13] 陈晨. 民航旅客应急群体行为研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2014.  
CHEN Chen. Research on crowds behavior of passengers evacuation during civil aircraft emergency[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2014. (in Chinese)
- [14] 杜红兵, 陈晨, 王燕青. 民机客舱乘客应急逃生群体行为特征研究[J]. 消防科学与技术, 2014, 33(7): 818-821.  
DU Hongbing, CHEN Chen, WANG Yanqing. Research on crowds behavior characteristics of civil aircraft cabin passengers during emergency evacuation[J]. Fire Science and Technology, 2014, 33(7): 818-821. (in Chinese)
- [15] 杜红兵, 张庆庆, 陈晨. 民航飞机客舱乘客应急疏散仿真模型[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(1): 161-167.  
DU Hongbing, ZHANG Qingqing, CHEN Chen. Occupant evacuation simulation model during civil aircraft emergency[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(1): 161-167. (in Chinese)
- [16] 薛宏涛, 叶媛媛, 沈林成, 等. 多智能体系统体系结构及协调机制研究综述[J]. 机器人, 2001, 23(1): 85-90.  
XUE Hongtao, YE Yuanyuan, SHEN Lincheng, et al. A roadmap of multi-agent system architecture and coordination research[J]. Robot, 2001, 23(1): 85-90. (in Chinese)
- [17] 郑小平, 钟庭宽, 刘梦婷. 用于群体疏散的数字仿真方法研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(12): 3503-3508.  
ZHENG Xiaoping, ZHONG Tingkuan, LIU Mengting. Study on numeral simulation approaches of crowd evacuation[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(12): 3503-3508. (in Chinese)
- [18] 苏兰明. 基于案例推理的路径规划研究[D]. 石家庄: 河北大学, 2013.  
SU Lanming. Path finding methods based on cased-based reasoning[D]. Shijiazhuang: Hebei University, 2013. (in Chinese)
- [19] 王春雪, 索晓, 吕淑然, 等. 地铁应急疏散恐慌程度模型研究[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(2): 171-176.  
WANG Chunxue, SUO Xiao, LÜ Shuran, et al. Research on panic degree model of emergency evacuation from subway[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(2): 171-176. (in Chinese)
- [20] HEIGAS L, LUCIANI A, THOLLOT J, et al. A physical based particle model of emergent crowd behaviors[R]. Graphicon: [s. n.], 2003.
- [21] 陈长坤, 童蕴贺. 基于元胞自动机恐慌状态下人群疏散模型研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019(6): 12-17.  
CHEN Changkun, TONG Yunhe. Study on crowd evacuation model under panic state based on cellular automata[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019(6): 12-17. (in Chinese)
- [22] GALEA E R, FLNNEY K M, DIXON A J P, et al. An a-

- analysis of human behaviour during aircraft evacuation situations using the AASK v3.0 database[J]. *Aeronautical Journal*, 2003(3): 219-231.
- [23] GALEA E R, FLNNEY K M, DIXON A J P, et al. The AASK database V4.0: aircraft accident statistics and knowledge, a database to record human experience of evacuation in aviation accidents[C]// *The Fourth Triennial International Fire and Cabin Safety Research Conference*. Lisbon: IEEE, 2004: 1-10.
- [24] GALEA E R. Computer based simulation of aircraft evacuation and its application to aircraft safety[C]// *Proceedings of 1998 International Aircraft Fire and Cabin Research Conference*. London: IEEE, 1998: 8-15.
- [25] MCLEAN G A, CORBETT C L. Access-to-egress III: repeated measurement of factors that control the emergency evacuation of passengers through the transport airplane type-III over-wing exit[R]. Oklahoma City: Civil Aerospace Medical Institute, 2004.
- [26] 李涛, 王晓强, 黄艳平. 应急滑梯撤离速率数值模拟及试验验证[J]. *舰船电子工程*, 2017, 37(10): 75-79.  
LI Tao, WANG Xiaoqiang, HUANG Yanping. Numerical simulation and test verification of the evacuation rate of the emergency evacuation slide[J]. *Journal of Ship Electronic Engineering*, 2017, 37(10): 75-79. (in Chinese)
- [27] 中国民用航空局. 应急撤离滑梯、轻便梯、轻便梯滑梯以及滑梯救生筏: CTSO-C69c[S]. 北京: 中国民用航空局, 2019.  
Civil Aviation Administration of China. Emergency evacuation slides, ramps, ramp/slides, and slide/rafts: CTSO-C69c[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2019. (in Chinese)
- [28] MUIR H, COBBETT A. Influence of cabin crew during emergency evacuations at floor level exits[R]. US: CAA, 1996.

#### 作者简介:

王鹏飞(1994—),男,硕士研究生。主要研究方向:民用飞机客舱疏散仿真。

刘龙权(1976—),男,博士,副教授。主要研究方向:民用飞机客舱安全及智能逃生、纤维增强复合材料结构强度、纳米点阵材料制备技术及力学增强。

(编辑:丛艳娟)

(上接第 780 页)

- hypothesis test-based detection method of CPS control layer attacks[J]. *Journal of Information Security Research*, 2017, 3(7): 633-637. (in Chinese)
- [34] MCMILLIN B. Complexities of information security in cyber-physical power systems [C] // *Proceedings of 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*. Seattle: IEEE, 2009: 1-2.
- [35] United States Department of Commerce. Order activating suspended denial order relating to Zhongxing Telecommunication Equipment Corporation and ZTE Kangxun Telecommunications LTD [EB/OL]. [2019-12-03]. [https://www.commerce.gov/sites/commerce.gov/files/zte\\_denial\\_order.pdf](https://www.commerce.gov/sites/commerce.gov/files/zte_denial_order.pdf).

#### 作者简介:

李飞(1986—),男,博士,讲师。主要研究方向:空天作战与装备体系建设。

王世梅(1988—),女,硕士,助教。主要研究方向:军事装备实战化训练。

胡剑波(1965—),男,博士,教授、博导。主要研究方向:装备维修保障与评估、智能控制理论与应用。

刘炳琪(1995—),男,硕士研究生。主要研究方向:质量竞争力评价、装备维修保障与评估。

(编辑:丛艳娟)