

文章编号:1674-8190(2020)06-759-08

民机应急撤离实验与仿真研究进展

彭浩轩,刘小川,白春玉,惠旭龙,牟让科

(中国飞机强度研究所 结构冲击动力学航空科技重点实验室,西安 710065)

摘要: 民机乘员的应急撤离是人-机-环境多系统耦合作用过程,涉及人员行为、客舱环境、灾害情况等复杂因素,客舱布局、人员属性、应急措施等均对应急撤离过程及结果有显著影响。由于应急撤离与民机安全性直接相关,运输类飞机适航标准规定 44 座以上的民用飞机需进行全尺寸应急撤离适航符合性演示试验,要求在指定环境条件下于 90 s 内完成撤离过程。本文梳理了适航标准对民机应急撤离的要求,对应急撤离实验研究方法和数值仿真方法进行了总结归纳,并结合未来民机安全设计需求和相关技术的发展对应急撤离问题研究的发展趋势进行了展望。

关键词: 应急撤离;民机安全;适航标准;模拟撤离实验;数值仿真

中图分类号: V328

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2020.06.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Advances in Experiment and Simulation of Civil Aircraft Emergency Evacuation

PENG Haoxuan, LIU Xiaochuan, BAI Chunyu, HUI Xulong, MU Rangke

(Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Structures Impact Dynamics, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

Abstract: The emergency evacuation of passengers and crew on a civil aircraft is a man-machine-environment multi-system coupling process, which involves complex factors such as human behavior, cabin environment, disaster situation, etc. Cabin layout, personnel attributes, emergency measures all are of significant influence on the process and results of emergency evacuation. As emergency evacuation is directly related to the safety of civil aircraft, the airworthiness standard of transport aircraft requires that civil aircraft with more than 44 seats must perform a full-scale emergency evacuation test for airworthiness demonstration, demanding the evacuation process to be completed within 90 seconds under specified environmental conditions. This paper outlines the airworthiness requirements of civil aircraft for emergency evacuation, summarizes the experimental research methods and numerical simulation methods of emergency evacuation, and prospects the research trend about emergency evacuation combined with the future requirements of civil aircraft safety design and the development of related technologies.

Key words: emergency evacuation; civil aircraft safety; airworthiness standard; simulated evacuation experiment; numerical simulation

收稿日期:2019-12-03; 修回日期:2020-02-18

通信作者:刘小川,48950166@qq.com

引用格式: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)

0 引言

随着全球民航业的快速发展,航班数量和空域流量迅速增长,尽管民机运营中的安全事故发生概率总体呈现下降趋势,但事故数量却逐年上升。

出现紧急状况时,军机乘员有机会通过座椅弹射、跳伞、迫降撤离等方式脱离危险,但民航飞机只能通过迫降后进行应急撤离的方式疏散乘员。因此,应急撤离是民机发生事故时保障乘员安全的必经环节,在伴随有火灾等灾害的事故中,客舱人员安全且高效的撤离疏散尤为重要。

应急撤离是指飞机发生可生存事故后,在稳定停泊的状态下,乘客和机组人员按照规定程序快速撤离至地面安全位置的过程,具有历时短、人员密集、环境复杂、影响因素众多等特点。在这一过程中有多个不确定因素,如乘客的生理与心理特征、乘客对紧急情况的应对处理方式及能力、飞机撤离设备的可用性、撤离环境因素等,这些因素都会影响乘员的撤离活动及其效率。

1962年,A. H. Hasbrook等^[1]最早开始对飞机应急撤离问题进行研究,通过整理49起飞机事故及66次全尺寸民机应急撤离适航演示试验的资料,详细分析了人员的撤离运动特征并提炼了应急撤离问题的一些重点研究因素,包括:座椅密度,主过道尺寸,出口数量、位置及尺寸,出口标识,打开出口需要的力量,以及可生存坠撞事故中的人为因素等。

在可生存飞机事故中,高效的应急撤离能够使乘客和机组人员在事态失控前尽可能快速地远离危险,是紧急情况下保护飞机乘员安全的重要途径。根据国际民航组织(ICAO)1998—2007年间的飞机事故统计数据,这些事故中约有90%的乘客通过应急撤离实现脱险^[2];通过对20世纪末十余年内有人员伤亡的航空事故统计发现,在事故发生后罹难的乘员中有近94.5%是因为未及时撤离而死于吸入过量有害烟尘或严重烧伤^[3]。由上述统计数据可见,若在飞机事故发生后尽可能快速、安全地完成人员疏散,可减少事故次生灾害导致的伤亡人数,提高乘员生存率。由于飞机可生存事故中的应急撤离对乘员安全影响重大,因此,应急撤离成为民机安全性研究与适航审定的重点关注内容之一。

为确保民航飞机具备较为可靠的应急撤离能力,美国、中国、英国等国的航空管理机构均通过适航条款对影响撤离效率的一些设计因素作了约束,如限制过道宽度、座椅排距等关键尺寸参数的取值,此外还规定新设计民机需要进行全尺寸应急撤离适航符合性演示试验^[4],即“黄金90s”撤离试验。若在指定的撤离环境条件下于90s内完成撤离过程,新机型才有资格通过此项验证。

基于上述背景,国内外针对民机应急撤离开展了实验与仿真研究。本文梳理了适航标准中有关民机应急撤离的要求,重点对应急撤离实验、仿真相关研究方法及其研究进展进行总结归纳,并对该问题的一些研究趋势进行了展望。

1 适航标准对民机应急撤离的相关要求

中国民用航空局运输类飞机适航标准CCAR-25-R4中明确规定,44座以上飞机须通过符合标准要求的应急撤离演示试验表明其满载乘员能在试验开始后的90s内从原位置撤离至地面^[5]。空客A380和ARJ21-700飞机全尺寸地面应急撤离适航演示试验现场分别如图1~图2所示。



图1 A380 应急撤离适航演示试验

Fig. 1 Emergency evacuation airworthiness demonstration test of A380

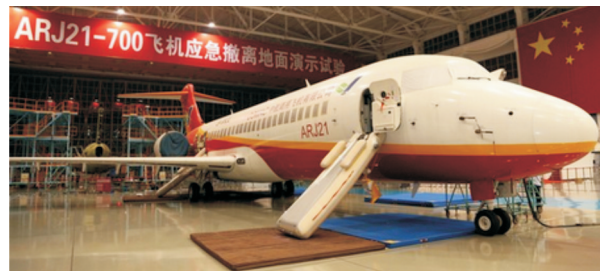


图2 ARJ21 应急撤离适航演示试验

Fig. 2 Emergency evacuation airworthiness demonstration test of ARJ21

为使应急撤离演示试验具有典型代表性,适航

标准从飞机应急照明、应急撤离设备、撤离出口、参试人员组成、机组指挥引导等方面对试验作了系统规范^[6],其中对参试人员组成的要求如下:

- ①均为身心状态健康正常的人员;
- ②女性占比不低于 40%;
- ③50 岁以上人员占比不低于 35%;
- ④50 岁以上女性占比不低于 15%;
- ⑤旅客携带 3 个真人大小的玩偶,以模拟不超过两岁的婴儿;

⑥担任维护或操作飞机职务的正规机组人员、机械员和训练人员不能充当旅客。

上述要求也常被用作建立民机应急撤离仿真模型的参考及输入条件^[7]。

除演示试验外,标准还对飞机应急出口尺寸及位置、应急出口通道尺寸、应急撤离辅助设施(如充气滑梯)、过道宽度、应急照明、民航应急预案等影响应急撤离效率的因素作出了限制与规定^[8],以保障应急撤离的实施。

由于每起民航可生存事故中的飞机状态及灾害情况各不相同,许多事故状况难以在撤离试验中统一进行安全且有效地模拟,因此现行的适航标准规定应急撤离演示试验须在飞机机体完好、无危险灾情的状态下进行,未体现事故中可能出现的机身姿态倾斜、机体变形破坏、客舱内部火灾及有毒烟雾等复杂情况。

2 应急撤离的模拟实验研究

民航事故现场情况具有复杂性与独特性,这导致事故中的撤离过程难以被完整、准确地复现,为了解典型情况下各种设计参数对应急撤离结果的影响,研究中多采用替代实验方法,即基于真实飞机客舱或模拟客舱环境,在弱化不可控事故因素的情况下使参试人员按照一定的要求进行“紧急撤离”实验,采集并分析人员的撤离运动数据,从而研究人员应急撤离过程。

适航演示试验能模拟新机型条件下的人员撤离过程,并提供具有研究价值的试验数据,但是适航演示试验成本高、周期长、参试人员多、协调难度大且有人受伤风险。受上述因素限制,适航规章规定新机型只需要进行一次应急撤离演示试验,但由于人员行为具有随机性,一次试验的结果并不能完全代表飞机应急撤离的性能,所获取的信息也不

足以满足人员应急撤离研究的需要,因此国内外研究人员还参考民机客舱环境,按需搭建了多个不同规模的应急撤离实验设施,通过进行控制变量实验,深入研究了多种因素对人员撤离运动的影响。

1974 年起,美国联邦航空局(FAA)和国家运输安全委员会(NTSB)基于自行搭建的民机客舱模拟设施开展了多项人员应急撤离实验,主要目的是研究客舱布局、撤离设施等要素对人员撤离的影响,主要结果为:出口宽度对人员总撤离时间影响比较显著^[9];通过撤离滑梯从出口撤离到地面时,出口离地高度过低会大幅减少出口处的单位时间人员通过数量^[10]。

1980 年,英国克兰菲尔德大学受英国航空管理局(CAA)和欧洲航空安全局(EASA)委托,开始研究客舱布局及内外环境对人员撤离效率的影响规律。研究人员发现直线型过道设计和良好的客舱内、外照明情况利于实现高效的人员撤离,并指出机组人员的合理指挥对提高撤离效率有较大帮助^[11-12]。

2001 年起,美国 FAA 的 CAMI 实验室基于所搭建的单通道客舱模拟设施组织了 192 场人员应急撤离模拟实验,结果表明撤离过程中的人为因素具有关键影响力,甚至能在一定程度上掩盖其他因素的影响,故提出在研究其他因素的影响时应对人因素加以控制^[13-14],如人员运动能力与积极性、出口选择偏好等。此后,CAMI 实验室又在 2015 年对一架从美国空军退役的 C-124 运输机机身进行了改装,使之成为可以模拟从窄体支线飞机到大型单通道窄体飞机尺寸范围内的多种运输类飞机客舱的试验验证平台“FlexSim”,如图 3 所示。该平台最多可容纳 120 名乘客,设有头等舱、盥洗室、厨房和乘客服务设施,并从外观、尺寸及布置上高度还原了真实民机客舱环境^[15]。



图 3 美国 CAMI 实验室“FlexSim”平台^[15]

Fig. 3 “Flexsim” platform of CAMI laboratory^[15]

国内关于民航乘务员应急撤离问题的研究开始的相对较晚,相关实验研究积累也不够系统,研究主要面向 44 座以上运输类飞机研制及适航取证的需求。此外,国内部分高校基于相关课题研究需要,通过搭建人员应急撤离简易实验环境开展人员撤离实验研究。

2012 年,西北工业大学李占科等^[16]基于模拟民航客舱座位布局的实验环境开展了实验研究,重点关注大型客机过道宽度对人员应急撤离时间的影响,获得了当过道宽度在一定范围内(19、20.5、24 和 27 ft)变化时对撤离时间影响不显著的实验结果,其中 1 ft=0.304 8 m。

2017 年,中国民航大学研究团队通过搭建如图 4 所示的简易客舱环境模拟设施,进行了“合作”与“竞争”两种行为模式下的多场人员撤离实验,基于高空摄像视频采集并分析了撤离过程中的人员运动数据,得到两种行为模式下平均总撤离时间接近,但人员密度—速度分布及最拥挤位置差异明显的结论,为人员应急撤离仿真模型的参数标定与模型验证提供了数据支持^[17]。

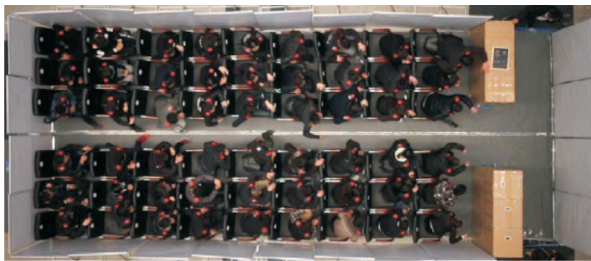


图 4 简易客舱环境模拟设施^[17]

Fig. 4 Simply constructed cabin environment simulation facility^[17]

从全机应急撤离适航演示试验,到基于客舱舱段平台的撤离实验,再到简易模拟客舱环境撤离实验,构成了规模由大到小、真实度由高到低、实施难度由难到易三个层级的应急撤离实验方法体系,为多种因素影响下的民航乘务员应急撤离问题研究、数值仿真建模及验证提供了实验数据和参考资料。

3 应急撤离的数值仿真研究

客舱或模拟客舱环境下的应急撤离实验在反映人员撤离运动及行为特征,提供研究需要的实验数据等方面发挥着重要作用,但参试人员的受伤风

险却不容忽视。通过对 1972—1991 年间 19 次适航演示试验的调查发现,参试人员中的受伤人数约占总人数的 4.5%,甚至出现过参试者严重受伤导致瘫痪的事故^[18]。此外,出于对参试人员安全的考虑,一些在真实事故中具有重要影响的因素难以在撤离实验中体现,如火灾、机体变形等。鉴于应急撤离实验存在上述不足之处,随着计算机技术的快速发展,有研究人员开始寻求通过数值仿真手段进行人员应急撤离问题研究。

飞机客舱乘务员应急撤离可被抽象为人—机—环境多因素耦合作用下的系统模型^[19],其主要组成部分有:

(1) 人员属性模型:描述乘员个体的性别、年龄、腰围等生理属性,镇静、紧张、惶恐等心理属性,以及国籍、文化背景、受教育程度等社会属性;

(2) 人员行为模型:描述疏散过程中群体和个体的行为模式与规则,如群体跟随移动模式、个体最短路径移动规则等;

(3) 人员运动模型:描述个体运动的数学模型,包含人员的反应时间、移动速度等运动参数;

(4) 疏散环境模型:描述客舱座位、通道、出口(舱门)、人员等要素的信息,如状态、位置和尺寸;

(5) 灾害模型:描述火灾、坠撞冲击等事故灾害特征及影响,如火灾烟雾浓度分布、坠撞机体变形情况等。

上述各部分之间的典型作用关系如图 5 所示。



图 5 人员应急疏散系统模型

Fig. 5 System model of personnel emergency evacuation

构建人员应急疏散仿真系统模型的核心问题,是建立能够合理描述人员动态移动过程且可以与人员属性、环境等因素交互的人员运动模型。截至目前,研究人员已提出多个能在一定程度上反映人员疏散运动特征的计算机仿真模型,按各自运行机制的连续性或离散性分为连续型模型和离散型模型。连续型模型的代表有磁场力模型^[20]和社会力

模型^[21],是基于连续的物理方程而建立;离散型模型的代表有排队网格模型^[22]和元胞自动机模型^[23],是通过在离散的计算时空中设置一系列演化规则而构建的。

以上两类人员运动模型均可用于实现民机乘员的应急撤离仿真,但各有优、劣势。连续型模型的优势是可以较为真实地模拟人员个体位置、速度以及人群密度等状态参数,劣势是计算效率较低、对仿真场景变换比较敏感;离散型模型的优势是计算效率高、对不同撤离仿真场景通用性较好,劣势是对撤离中的人员个体运动及人群间相互作用描述得不够真实准确。在进行民机乘员应急撤离仿真研究时,应按照具体研究需求选用合适的人员运动模型。

20 世纪 70 年代起,随着计算机技术的快速发展,民机应急撤离仿真研究得以广泛开展,国外多家研究机构基于不同人员运动模型开发了共十余种人员应急撤离仿真程序及软件^[17],例如英国格林威治大学基于排队网格模型开发的 Air-Exodus 软件(仿真界面如图 6 所示),可用于预测民机应急撤离适航验证试验总撤离时间,也能在一定程度上模拟火灾等事故环境的影响。

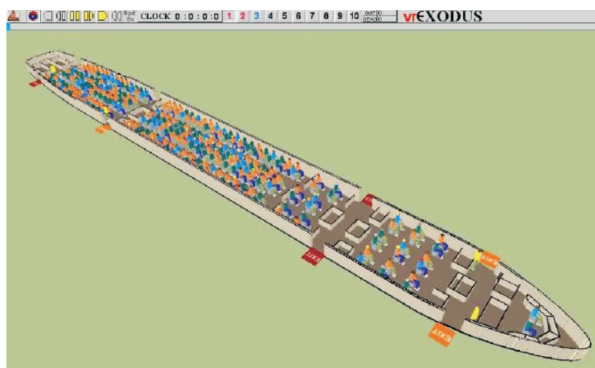


图 6 飞机应急撤离仿真软件“Air-Exodus”界面^[17]

Fig. 6 Interface of aircraft emergency evacuation simulation software “Air-Exodus”^[17]

受民机新型号研制及适航取证需求的牵引,国内研究人员先后开展了多项民机应急撤离仿真建模与研究。马智^[24]通过元胞自动机模型进行了民机应急撤离仿真研究,但仿真结果未经实验验证;李杰、张炜等^[25-26]在行人流问题研究基础上,基于民机环境约束下的元胞自动机模型实现了民机应急撤离仿真,并结合 Delmia 软件进行了三维

可视化撤离演示;张玉刚等^[27-28]使用 Visual C++ 面向对象编程方法发展了基于元胞自动机模型的民机应急撤离仿真系统(CAEES),通过典型客舱布局进行了计算验证,应用于多型民机和不同客舱布置条件下的应急撤离仿真分析;徐进津^[29]基于含智能体的元胞自动机模型,开发了飞机乘客紧急疏散仿真软件 Evacu-Simulation;张青松等^[30-31]将基于计算流体动力学(CFD)的火灾动力学仿真与民机应急撤离仿真相结合,模拟了双层民机可生存事故发生后发生火灾情况下的人员撤离,通过分析不同出口选择方案下的仿真结果,对适航验证试验方案及航空公司运营策略给出了建议,体现出仿真方法在研究危险灾害对民机乘员撤离影响方面的优势;杜月娟^[17]、吴义兵^[32]基于社会力模型开发了人员应急撤离仿真程序,使用简易客舱环境人员撤离实验数据对仿真模型参数进行了标定,并验证了所得仿真程序的合理性;潘立军等^[33]基于适航符合性进行了翼身融合布局客机的客舱设计,并进行了应急撤离仿真分析,形成了符合适航标准的 382 座客舱布置方案。

综合来看,民机应急撤离的一个显著特点是人群密集参与,因此仿真的难点在于如何考虑撤离环境中人员的个体、群体行为特点以及心理特性。早期的人员疏散仿真主要通过将人群的运动抽象为宏观流动^[34](流体模型),或是把人员看作按拟定的规则运动、无需反应时间的机械个体(如元胞自动机)以实现运动模拟^[23]。为了较真实地反映实际撤离中人员的状态,体现个体对周围环境的判断、撤离路线的选择、心理情绪变化等行为,智能体技术逐渐被应用于民机应急撤离等人员疏散模拟^[4]。通过将智能体技术与元胞自动机等模型相结合,目前已在一定程度上实现了应急撤离仿真中个体行为的智能化,如基于环境信息的实时目标出口选择与撤离路线规划,考虑乘客恐慌情绪影响等^[7,27,29,35-43]。

发展飞机乘员应急撤离仿真模型及软件可以辅助运输类飞机客舱布局设计与优化、适航验证等工作,避开应急撤离实验中的人员受伤风险。由于仿真研究手段具有低成本、低安全风险、便于改进等优势,在目前已开展的应急撤离相关研究中,数值仿真研究数量显著多于实验研究,但仿真方法在真实性、通用性、智能性等方面还有进一步提高的

空间。

4 总结与展望

随着国家大型民机研制的推进以及民航市场的不断发展,业界对相关民机技术和运营安全的要求也越来越高。其中,应急撤离作为保障民机乘员安全的重要方式,围绕其开展的研究已经产生了较为显著的成果及应用价值,同时也有许多发展提升的空间。

适航验证方面,当前适航标准以“全尺寸飞机地面应急撤离 90 s 演示试验”为民机应急撤离能力的验证手段,演示试验考虑了人员生理属性、环境照明条件、机组指挥引导、人员携带婴孩等影响因素,并对其作了相应规定。出于参试人员安全、试验可重复性等方面的考虑,该试验在状态完好的真实飞机上进行,未模拟火灾、有毒烟雾等事故场景。未来可基于具有大带宽、低延时特性的 5G 通信网络,应用虚拟现实(VR)、增强现实(AR)、混合现实(MR)等技术^[44]提高撤离演示试验真实感,如基于 AR 技术^[45]的事故情景实时 3D 显示等。

实验研究方面,不论是研究各种因素影响下的人员应急撤离,还是建立并验证民机乘员应急撤离仿真模型,都离不开充足实验数据的支持。根据应急撤离实验数据等资料分析并提取不同因素影响下的人员行为模式及关键运动参数,用于构建较为真实的民机乘员应急撤离模型。从国内民机发展需求角度考虑,未来远程宽体客机乃至翼身融合布局客机等新机型的发展都需要满足适航标准对应急撤离能力的要求,但目前国内缺乏针对这些客舱布局的模拟撤离实验研究。

仿真研究方面,目前已有的人员疏散仿真模型可以体现人员的动态移动过程和一些智能行为,已被应用于人员疏散动态模拟、疏散时间预测和环境因素影响分析,但还有改进提升的空间。拥有不同国籍、文化背景、受教育水平等社会属性的人员在紧急情况下的心理及行为特点具有差异性,以欧美人群为样本的研究结果可能不适用于国内乘员的撤离仿真建模。现有仿真模型中的人员运动规则是根据实验结果或调研报告人为设置的,智能程度低,而随着人工智能技术的发展,可以使用基于人工智能的智能体建模等方法,通过基于实验数

据的深度学习^[46]等手段发展更加真实、通用、智能的民机乘员应急撤离仿真模型。

5 结束语

研究民机乘员的应急撤离问题有助于深入了解应急撤离过程中的人员行为特征和多种因素对人员撤离的影响方式及规律,为民机安全设计、客舱布局设计与优化、适航验证等工作提供支持,有利于提高民机应急撤离的效率,降低可生存事故的伤亡率,更好地保护乘员的安全。

本文从民机应急撤离问题的背景出发,由相关适航要求、实验研究和仿真研究三个方面展开,对该问题研究的主要发展脉络、现状及进展进行了分析总结,并结合未来民用航空发展需求和 5G 等新技术应用展望了民机应急撤离研究的部分发展趋势,以供参考。

参考文献

- [1] HASBROOK A H, GARNER J D, SNOW C C. Evacuation pattern analysis of a survivable commercial aircraft crash: AD 282 893[R]. U. S. : Civil Aeromedical Research Institute, 1962.
- [2] Safety Regulation Group. CAP 780: aviation safety review 2008[M]. England: Civil Aviation Authority, 2008.
- [3] CAAPS. Surviving the crash: the need to improve lifesaving measures at our nation's airports[R]. U. S. : International Association of Fire Fighters, 1999.
- [4] 张玉刚, 宋笔锋, 薛红军. 民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] 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-transport category airplanes: CCAR-25-R4[S]. Beijing: CAAC, 2011. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 邹田春, 潘庭, 杜月娟, 等. 基于多智能体和元胞自动机民机应急撤离仿真[J]. 计算机仿真, 2015, 32(9): 56-60.
ZOU Tianchun, PAN Ting, DU Yuejuan, et al. Simulation

- of emergency evacuation in civil aircraft based on multi-agent and cellular automata technology[J]. *Computer Simulation*, 2015, 32(9): 56-60. (in Chinese)
- [8] 刘明. 民用飞机应急撤离适航要求研究[J]. *机械设计与制造工程*, 2017, 46(5): 79-81.
LIU Ming. Analysis on the airworthiness requirements of civil aircraft emergency evacuation[J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2017, 46(5): 79-81. (in Chinese)
- [9] FENNELL P J, MUIR H. The influence of hatch weight and seating configuration on the operation of a type III hatch; CAA-93015[R]. London: Civil Aviation Authority, 1993.
- [10] Transportation Safety Board of Canada. A safety study of evacuation of large, passenger-carrying aircraft; SA9501[R]. Ontario: TSB, 1995.
- [11] MUIR H, BOTTOMLEY, DAVID M. Effect of motivation and cabin configuration on emergency evacuation behavior and rates of egress[J]. *The International Journal of Aviation Psychology*, 1996, 6(1): 57-77.
- [12] MUIR H, COBBETT A. Aircraft evacuation tests, an initial assessment of the influence of various aisle configurations and lighting conditions under different evacuation scenarios[R]. Montreal: Transportation Development Center, 1996.
- [13] McLEAN G A. Access-to-egress: a meta-analysis of the factors that control emergency evacuation through the transport airplane type-III over-wing exit; DOT/FAA/AM-01/2[R]. Washington DC: Office of Aviation Medicine Report, 2001.
- [14] McLEAN G A. Access-to-egress III: repeated measurement of factors that control the emergency evacuation of passengers through the transport airplane type-III over-wing exit; DOT/FAA/AM-04/2[R]. Washington DC: Office of Aviation Medicine Report, 2004.
- [15] CAMI. CAMI research facilities get major upgrades[EB/OL]. [2019-12-03]. https://www.esc.gov/MONRONeYnews/archive/2015/CB/01_3.asp.
- [16] 李占科, 刘超. 大型客机过道宽度对应急撤离时间影响的实验研究[J]. *机械科学与技术*, 2012, 31(7): 1033-1036.
LI Zhanke, LIU Chao. Experimental research on the aisle width's effect on emergency evacuation time of a civil aircraft[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2012, 31(7): 1033-1036. (in Chinese)
- [17] 杜月娟. 大型客机应急撤离仿真及参数影响性分析[D]. 天津: 中国民航大学, 2017.
DU Yuejuan. Civil aircraft emergency evacuation simulation and analysis of parameter influence[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2017. (in Chinese)
- [18] 王敏, 吴洋, 周琳. 提高应急撤离地面演示参试者安全性的研究[J]. *民用飞机设计与研究*, 2017(2): 20-24.
WANG Min, WU Yang, ZHOU Lin. Research on participant safety improvement in emergency evacuation demonstration[J]. *Civil Aircraft Design and Research*, 2017(2): 20-24. (in Chinese)
- [19] 杜红兵. 航空器内人员应急疏散仿真模型研究[J]. *中国安全科学学报*, 2010, 20(7): 14-20.
DU Hongbing. Study on the simulation model for occupant emergency evacuation in aircraft[J]. *China Safety Science Journal*, 2010, 20(7): 14-20. (in Chinese)
- [20] OKAZAKI S. A study of pedestrian movement in architectural space-part 2: concentrated pedestrian movement[J]. *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, 1979, 9: 101-110.
- [21] HELBING D, MOLNAR P. Social force model for pedestrian dynamics[J]. *Physical Review E*, 1995, 51(5): 4282-4286.
- [22] GUNNAR G L. Modeling and simulation of pedestrian traffic flow[J]. *Transportation Research, Part B (Methodological)*, 1994, 28(6): 429-443.
- [23] SCHADSCHNEIDER A. Cellular automaton approach to pedestrian dynamics-theory[C]// *Pedestrian and Evacuation Dynamics Conference*. New York: Springer, 2002: 75-85.
- [24] 马智. 大型飞机人员应急撤离建模及仿真[D]. 西安: 西北工业大学, 2008.
MA Zhi. Modeling and simulation of crowd emergency evacuation in large aircraft[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2008. (in Chinese)
- [25] 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(3): 40-43.
LI Jie, ZHANG Wei. Simulation of passenger evacuation under emergency in large civil aircraft[J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2010, 40(3): 40-43. (in Chinese)
- [26] 张炜, 刘泽奇, 马智. 飞机乘员应急撤离可视化仿真方法研究[J]. *航空工程进展*, 2010, 1(4): 347-351.
ZHANG Wei, LIU Zeqi, MA Zhi. Study on visualization simulation of aircraft emergency evacuation[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2010, 1(4): 347-351. (in Chinese)
- [27] 张玉刚, 宋笔锋, 薛红军. 基于元胞自动机的民机应急撤离仿真系统设计[J]. *飞机设计*, 2011, 31(1): 45-50, 60.
ZHANG Yugang, SONG Bifeng, XUE Hongjun. Design of civil airplane emergency evacuation simulation system based on improved cellular automata[J]. *Aircraft Design*, 2011, 31(1): 45-50, 60. (in Chinese)
- [28] 张玉刚, 宋笔锋, 薛红军, 等. 民用客机客舱布置应急撤离影响因素仿真分析[J]. *计算机仿真*, 2011, 28(6): 62-65.
ZHANG Yugang, SONG Bifeng, XUE Hongjun, et al. Simulation analysis of civil aircraft emergency evacuation impact factor[J]. *Computer Simulation*, 2011, 28(6): 62-65. (in Chinese)
- [29] 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)
- [30] ZHANG Qingsong, QI Hanpeng, ZHAO Guomin, et al. Performance simulation of evacuation procedures in post-crash aircraft fires[J]. *Journal of Aircraft*, 2014, 51(3): 945-955.
- [31] 张青松, 杨彩红. 飞机客舱应急撤离演示模拟方案设计研究[J]. *安全与环境学报*, 2016, 16(3): 154-157.
ZHANG Qingsong, YANG Caihong. Simulation design for the aircraft cabin emergency evacuation[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2016, 16(3): 154-157. (in Chinese)
- [32] 吴义兵. 基于社会力模型的飞机应急撤离仿真研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2018.
WU Yibing. Simulation of aircraft emergency evacuation based on social force model[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2018. (in Chinese)
- [33] 潘立军, 吴大卫, 谭兆光, 等. 基于适航符合性的翼身融合布局客机客舱布置设计[J]. *航空学报*, 2019, 40(9): 66-74.
PAN Lijun, WU Dawei, TAN Zhaoguang, et al. Cabin layout design for BWB civil aircraft based on airworthiness compliance[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2019, 40(9): 66-74. (in Chinese)
- [34] HENDERSON L. On the fluid mechanics of human crowd motion[J]. *Transportation Research*, 1974, 8(6): 509-515.
- [35] HELBING D, FARKAS I, VICSEK T. Simulating dynamical features of escape panic[J]. *Nature*, 2000(28): 487-490.
- [36] 徐高. 基于智能体技术的人员疏散仿真模型[J]. *西南交通大学学报*, 2003(3): 301-303.
XU Gao. Simulation model for crowd evacuation based on agent technology[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2003(3): 301-303. (in Chinese)
- [37] POUDEL M, COSENZA C A N, CAMINO F M. Aircraft emergency evacuation: a multi agent optimization approach[C]// 2009 INCOSE International Symposiu. [S.l.: s.n.], 2009: 1652-1662.
- [38] 董文永, 毛文韬, 钟安原, 等. 基于智能体技术的火场人员疏散元胞自动机模型与仿真[C]// 国际教育技术与培训会议. [S.l.: s.n.], 2010: 236-239.
DONG Wenyong, MAO Wentao, ZHONG Anyuan, et al. Cellular automation model and simulation of fire evacuation based on agent technology[C]// International Conference on Education Technology & Training. [S.l.: s.n.], 2010: 236-239. (in Chinese)
- [39] MIYOSHI T, NAKAYASU H, UENO Y, et al. An emergency aircraft evacuation simulation considering passenger emotions[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2012, 62(3): 746-754.
- [40] GIITSIDIS T, SIRAKOULIS G C. Simulation of aircraft disembarking and emergency evacuation[C]// Proceedings of the 2014 22nd Euromicro International Conference on Parallel, Distributed, and Network-Based Processing. Washington DC: IEEE, 2014: 372-379.
- [41] GIITSIDIS T, DOURVAS N I, SIRAKOULIS G C. Parallel implementation of aircraft disembarking and emergency evacuation based on cellular automata[J]. *The International Journal of High Performance Computing Applications*, 2016, 31(2): 134-151.
- [42] 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)
- [43] POUDEL M, CHAUDHURY B, SHARMA K, et al. GPU based computational simulation of aircraft evacuation: temporal and spatial analysis[J]. *Transportation Research Procedia*, 2018, 29: 356-365.
- [44] 陶东. VR/AR/MR 技术在应急疏散中的应用与分析[J]. *中国应急救援*, 2018(5): 13-16.
TAO Dong. Application and analysis of VR/AR/MR technology in emergency evacuation[J]. *China Emergency Rescue*, 2018(5): 13-16. (in Chinese)
- [45] 侯颖, 许威威. 增强现实技术综述[J]. *计算机测量与控制*, 2017, 25(2): 1-7.
HOU Ying, XU Weiwei. A survey of augmented reality technology[J]. *Computer Measurement and Control*, 2017, 25(2): 1-7. (in Chinese)
- [46] 纪乾. 基于深度学习的飞机乘员应急撤离行为特征分类研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2019.
JI Qian. Classification of behavioral characteristics in aircraft emergency evacuation process based on deep-learning [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2019. (in Chinese)

作者简介:

- 彭浩轩(1995—),男,硕士研究生。主要研究方向:工程力学。
- 刘小川(1983—),男,博士,研究员。主要研究方向:材料/结构冲击动力学。
- 白春玉(1984—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:材料/结构冲击动力学。
- 惠旭龙(1989—),男,硕士,工程师。主要研究方向:材料/结构冲击动力学。
- 牟让科(1966—),男,博士,研究员。主要研究方向:结构动力学。

(编辑:丛艳娟)