

文章编号:1674-8190(2022)02-107-07

# 面向机组工作量审定的民用飞机人机交互 适航验证场景设计

陈农田<sup>1</sup>, 满永政<sup>2</sup>, 李俊辉<sup>2</sup>

(1. 中国民用航空飞行学院 航空工程学院, 广汉 618307)

(2. 中国民用航空飞行学院 民航安全工程学院, 广汉 618307)

**摘要:** 设计有效的民用飞机人机交互适航验证场景是实施机组工作量审定的基础。依据中国民航规章CCAR25部1523条款和附录D适航验证性要求,通过对运输类飞机机组工作量适航验证条款的解读,建立工作量审定人机交互适航内容及验证流程;确立机组工作量审定民用飞机人机交互适航场景设计原则,分别从测试机组、运行过程、运行环境以及运行状态四个维度设计验证场景,并实施典型机组工作量适航验证场景捕获;结合机组工作量评估策略和测量方法比较,提出机组工作量适航验证方法。结果表明:构建的民用飞机人机交互适航验证场景和适航验证方法适用有效,可为民用飞机机组工作量适航验证提供参考。

**关键词:** 民用飞机设计;机组工作量审定;场景设计;适航验证;人机交互

中图分类号: V328.3

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.02.16

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Civil Aircraft Man-machine Interaction Scenario Design for Crew Workload Airworthiness Verification

CHEN Nongtian<sup>1</sup>, MAN Yongzheng<sup>2</sup>, LI Junhui<sup>2</sup>

(1. College of Aviation Engineering, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

(2. College of Civil Aviation Safety Engineering, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

**Abstract:** The design of effective civil aircraft man-machine interactive airworthiness verification scenarios is the basis for the implementation of crew workload verification. In accordance with the 1523 clauses of CCAR25 of the Civil Aviation Regulations of China and the airworthiness verification requirements in Appendix D, through the interpretation of the airworthiness verification regulations of the transport aircraft crew workload, the workload verification man-machine interactive airworthiness content and verification process is established. Then, the design principles for the crew workload airworthiness verification scenarios of civil aircraft man-machine interaction is established, and the verification scenarios is designed from the four dimensions of test crew, operating process, operating environment and operating status, and then the typical crew workload airworthiness verification scenarios is captured. Finally, the airworthiness verification method of crew workload is proposed combined with crew workload evaluation strategies compared with the measurement methods. The results show that the constructed civil aircraft man-machine interactive airworthiness verification scenarios and airworthiness verification methods are applicable and effective, and can provide a reference for airworthiness verification of civil aircraft crew workload.

**Key words:** civil aircraft design; crew workload certification; scenario design; airworthiness verification; man-machine interaction

收稿日期: 2021-07-05; 修回日期: 2021-11-16

基金项目: 四川省科技厅重点研发计划项目(2022YFG0213); 中国民航局安全能力基金(2022J026)

民航飞行技术与飞行安全重点实验室开放项目资助(F2019KF08); 中国民航飞行学院面上科研项目(J2018-20)

通信作者: 陈农田, chennongtian@hotmail.com

引用格式: 陈农田, 满永政, 李俊辉. 面向机组工作量审定的民用飞机人机交互适航验证场景设计[J]. 航空工程进展, 2022, 13(2): 107-113.  
CHEN Nongtian, MAN Yongzheng, LI Junhui. Civil aircraft man-machine interaction scenario design for crew workload airworthiness verification[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(2): 107-113. (in Chinese)

## 0 引言

运输类飞机机组人员的工作量适航审定问题是民航适航安全领域关注的重要内容和研究热点<sup>[1-2]</sup>。根据有关航空事故统计,有70%的飞机事故是由人为因素导致的。飞行机组的飞行质量直接关系到能否安全顺利地完成任务,而飞行机组的工作量是衡量机组飞行操纵绩效的重要指标,过大或过小的机组工作量对于飞行绩效表现都会产生不利影响。开展运输类飞机机组工作量测量审定研究,对于满足良好人机交互要求的民用飞机设计和保障运输类飞机安全运行具有重要的现实意义。

近年来,国内外对运输类飞机机组工作量开展了系列研究。徐敏敏等<sup>[3]</sup>在分析飞机场景的基础上,对机组工作量场景捕获进行分析;刘树强等<sup>[4]</sup>运用BP神经网络对机组工作量进行评价;毛志威等<sup>[5]</sup>在民用飞机审定过程中,运用MBSE方法进行试飞场景设计研究;黄二利<sup>[6]</sup>从运输类飞机机组的适航符合性验证方面分析和考虑飞机机组工作量审定;G. Roth等<sup>[7]</sup>通过开发有人/无人协作应用程序对工作量进行了分析和比较;D. M. Benitez等<sup>[8]</sup>介绍了一种适用于民航驾驶舱的新型概念来分析和减轻飞行员工作量。综上,国内外的相关研究虽取得了丰硕成果,但在基于机组工作量适航条款解读的人机交互场景维度设计及适航验证方法交叉融合方面的研究较少,有待进一步探讨。

本文针对机组工作量符合性验证场景设计与验证方法问题,通过对运输类飞机机组工作量适航条款的解读与分析,针对性地确立机组工作量场景设计原则;分别从适航验证测试机组、飞行运行过程、飞行运行环境以及飞机运行状态四个维度设计机组工作量适航验证场景,并通过机组工作量评估策略和测量方法比较,提出机组工作量验证方法,通过典型案例加以分析验证,以期开展运输类飞机机组工作量适航验证场景设计和验证提供参考。

## 1 机组工作量适航条款解析与验证

### 1.1 工作量内涵

工作量常用来描述一个人执行任务的能力(生理或者心理)和与其执行任务相关的系统和环境要求匹配之间的关系。工作量是否饱和并非仅依靠工作数量多少而定,而是依据计时定额法确

定而成,与人为操纵者的资源数和完成任务所需的资源数之间的差异密切相关,工作量和工作效率存在关联关系,工作量太高或者太低都会影响工作效率<sup>[9]</sup>。在民用飞机适航安全领域,飞行机组工作量直接影响飞行操纵绩效,进而影响飞行运行安全。而飞机机型、运行环境、飞机工况以及机组自身状态等因素都会对运输类飞机机组工作量产生影响,科学有效地测度机组工作量是民用飞机适航安全审定的基本需求。

### 1.2 机组工作量适航条款解析

我国民航局针对运输飞机机组工作量审定方面,在中国民航规章CCAR25和附录D中,为防止飞行中飞行员工作量过高以及由于驾驶舱自动控制系统可能引发机组工作量异常而诱发不安全问题设立有专门适航条款。CCAR25.1523条最小飞行机组中明确要求,考虑每个机组成员的工作量,使其足以保证安全运行,CCAR25附录D阐述了按要求确定最小飞行机组时采用的准则。飞行过程中机组工作量水平过高或过低,都会引起飞行员精神疲劳或者疏忽,诱发飞行员遗漏重要信息、不能完成执行相关任务而产生人为差错。

CCAR25.1523条是要确保最小飞行机组的安全,必须考虑如下因素:①机组成员必须了解飞行器件的简易性和可操作性;②机组成员工作量;③按该条所审核的运行类型。

CCAR25附录D也明确最小飞行机组的基本工作职能和工作因素。基本工作职能包括:①指挥决策;②导航;③防撞;④飞行航迹控制;⑤监控飞机系统和发动机;⑥通讯。工作因素包括:①飞行过程中所必须的动力装置和操纵器件,并对其进行操作的简易性和可操作性;②所有必需的仪表和故障警告装置(例如火警、电气系统故障和其他故障的指示器或告戒指示器)的可达性和醒目程度,并考虑这些仪表或装置引导进行适当纠正的程度;③操作程序复杂程度。特别要考虑由于飞机重心、飞机结构或飞机上其他适航性的原因而强制采用燃油管理程序,以及发动机使用油箱情况及供油而运转的能力;④在正常操作以及在遇到突发情况下消耗的体力和精力的大小和时间;⑤在飞行过程中,需对飞机所需的燃油进行监控;⑥需要机组成员离开自己原来的岗位,包括应急情况和查看飞机系统;⑦在飞机系统失灵后,处理引起故障的能力;⑧导航所需的工作量;⑨突发情况导致的额外工作量;⑩根据要求至少由两名

驾驶员组成的最小飞行机组时,其中一名成员不能完成工作时的工作量<sup>[10]</sup>。

### 1.3 工作量审定人机交互适航验证流程

机组工作量审定主要取决于测定不同场景下的机组工作量适航规章符合性,需考虑基于民用飞机全生命周期,建立测试场景并对机组工作量实施测量分析,主要包括:①在飞机设计早期对工作量进行分析。对于特定驾驶舱布局,选取分析方法并对方法进行选择和优化处理。②在分析工作量并且条件允许下,应包含机型与其他相近机型驾驶舱之间的对比。③对驾驶舱有重大改造时,如更改驾驶舱构造、更改飞行员操纵界面、更改飞行员运行程序和职责等,都需要进行综合详细的评估。④若发现设计问题时,应对这些问题深入研究、评估,把相关信息及时提交有关验证部门,并及早发现潜在问题。在机组工作量审定过程中,需要根据CCAR25.1523条以及附录D规章审定要求,结合飞行设计与运行,建立对应测试场景和验证方法,实施机组工作量审定人机交互适航验证(如图1所示)。



图1 机组工作量审定人机交互适航验证流程  
Fig.1 Crew workload man-machine interaction airworthiness verification process

## 2 机组工作量审定人机交互适航验证场景设计

### 2.1 机组工作量适航验证场景设计原则

根据CCAR25.1523条和附录D,对机组工作量进行评估遵循基本设计原则:若要评估的机型与已经取得适航认可的机型相似,则选取类似的方法。对于明显改变驾驶舱、人机交互界面、操纵习惯和流程时,针对改变的新特征来设计新的任务场景进行工作量的评估<sup>[11]</sup>。场景设计时通常要

考虑机组试验人员、天气、航线、机组工作计划、最低设备清单(Minimum Equipment List,简称MEL)和系统失效。设计机组工作量场景设计包括:正常场景、非正常场景和应急操作场景。

### 2.2 机组工作量适航验证场景维度

机组工作量适航场景设计的目的是确保工作量准确性。在场景捕获维度设计上,建立整个飞行过程中的机组工作量多维矩阵,实现场景捕获设计的完整性。参考相关研究和飞机飞行手册,最终得出机组工作量操纵任务场景的4个维度(如图2所示),分别是:飞行阶段、试验人员、环境因素、飞机状态,其中飞行阶段划分六个子任务场景维度:飞机静立、滑行、起飞、巡航、进近以及着陆;试验人员指参与试验的成员,包括学生驾驶员、航线运输驾驶员和试飞员;环境因素维度就是飞机运行阶段所处运行环境;飞机状态维度指飞机适航状态直接影响到飞行员的操纵,严重情况会导致整个系统发生故障,直接诱发飞行事故发生。

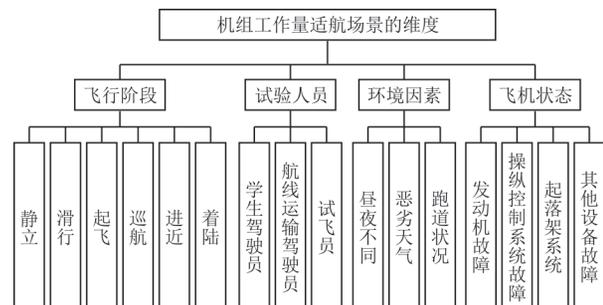


图2 机组工作量审定人机交互适航验证场景维度  
Fig.2 Dimensional of man-machine interaction scenario for crew workload airworthiness verification

### 2.3 机组工作量适航验证要素

#### 2.3.1 工作量适航验证机组维度要素

通过对参与实验人员的反应和状态来分析和制定工作量的大小,当遇到紧急情况时飞行员的工作量突然增加,工作负荷压力突然增多,情景意识就会下降,诊断故障能力和判断力也会下降。根据任务要求考察其相关特征选择实验人员。根据试验要求可以把飞行员分为以下三类:①学员驾驶员,其特征是机型驾驶经验和应急处理能力一般也较弱。②航线运输驾驶员,在飞行时间、航空领域知识和驾驶经验方面,航线运输驾驶员要比学员驾驶员高得多。一般情况下,航线驾驶员应对气象、规章、空气动力学、导航、航空器运行与

空域、重量和平衡的计算、对飞行特征的影响、飞行性能、机动飞行操作程序和应急操作、人为因素和机组管理等,拥有至少 1 500 h 的飞行时间。③试飞员,试飞员必须有丰富的飞行经验、应急处理能力和熟练的驾驶技术。

### 2.3.2 飞行运行过程维度要素

飞机飞行过程中分六个子任务运行过程场景维度:飞机静立、滑行、起飞、巡航、进近以及着陆。①飞机静立场景设置为航空器推出或滑行之前,或者在到达之后,在廊桥、机坪或者停机位处于静止状态。②飞机滑行场景设置为航空器起飞前或者着陆后,依靠自身动力在机场道面上移动。③飞机起飞场景设置为航空器为实际起飞而使用动力起飞时起,经滑跑直到达到标高之上 35 ft(1 ft=0.304 8 m)的高度。④飞机巡航场景设置为飞机经起飞爬升之后到飞机进入进近阶段之间的运行阶段。⑤飞机进近场景设置为飞机开始下降进下滑道到着陆之间的飞行运行阶段。⑥飞机着陆场景设置为从开始着陆拉平,直至航空器脱离着陆跑道或者停止在跑道上。

### 2.3.3 飞行运行环境维度要素

飞行运行环境因素维度就是飞机在不同运行

过程所处的环境。昼夜不同是飞机在不同运行阶段所处的时间不同;恶劣天气是指气象条件,如低能见度、风切变、飞机积冰、颠簸等;跑道状况是指机场的环境,干跑道、湿跑道、污染跑道等。

### 2.3.4 飞机运行状态维度要素

飞机运行状态是在不同飞行运行过程中遇到系列飞机状态。飞机运行状态除了正常情况下,典型故障模式包括:①发动机故障:发动机失效包括单发失效和双发失效;②操纵控制系统故障:包括主操纵系统、辅助系统故障,导航失效包括无线电高度表失效、惯性基准失效、大气数据基准失效等;③起落架系统故障:包括起落架收放故障、起落架警告系统故障等;④其他设备故障等,包括仪表板、飞机结构受损等。

## 2.4 机组工作量适航验证典型场景捕获

根据适航验证场景设计原则,以及适航验证场景维度,确定着陆典型应用场景的飞行员操纵行为任务,根据具体的操纵任务来分析机组工作量适航审定要求,运行环境维度为良好运行环境(如表 1 所示)。

表 1 机组工作量适航验证着陆场景捕获  
Table 1 Crew workload airworthiness verification landing scene capture

序号	机组维度 (PM/PF)	飞机维度	机组操作要求	机组工作量审定要求
01	PF	进近剖面(A)垂直性能和显示功能	按计划下降所需高度,调速,按计划放襟翼,宣布“放襟翼”	当不满足计算性能时有告警划分提升功能
02	PM	具备显示速度、姿态的仪表;具备液压/电动手襟翼的系统;具备 FMS 计算和速度指示	按指令调定襟翼手柄	仪表准确可靠;具备操纵和指示能力;具备失速保护和告警;机组有效获取信息
03	PF	具备方式控制面板和相应的指示系统	按需使用水平方式,切入最后进近航道	指示系统能否有效显示,机组有效获取信息
04	PF	具备 LOC/GS 指示和 LOC/GS 自动捕获功能	核实航向道截获	仪表显示准确可靠以及相应警告功能,机组有效获取信息
05	PM	具备 LOC/GS 指示和 LOC/GS 自动捕获功能	核实下滑道移动	仪表显示准确可靠以及相应警告功能
06	PF	具备显示速度、姿态的仪表;具备液压/电动手襟翼的系统;具备 FMS 计算和速度指示	下滑道移动时(按需)宣布:1.“起落架放下”,2.“襟翼*度”	仪表显示准确可靠以及相应警告功能;具备相应收放襟翼高度限制
07	PM	具备显示速度、姿态的仪表;具备液压/电动手襟翼的系统;具备 FMS 计算和速度指示	调定起落架手柄至 DN,调定襟翼手柄至*位	起落架和襟翼手柄具有挡位;标识仪表显示可靠
08	PF	具备减速板手柄及相应指示	减速板手柄预定	联动扰流板自动放出
09	PF	具备显示下滑道状态的仪表	截获下滑道时,按着陆需要宣布“襟翼*度”	显示准确可靠性,机组识别便捷有效
10	PM	具备襟翼调定手柄	按指令调定襟翼手柄	襟翼调定具有挡位显示
11	PM	E-checklist 和闭合回路	完成着陆检查单	能够有效识别减少机组工作量

### 3 机组工作量适航验证方法及应用

#### 3.1 机组工作量适航验证策略

根据机组工作量不同测试场景,采用不同的工作量设计和评估工作,评估工作量考虑采用直接比较法、间接比较法和独立评估法。①直接比较法。通过建立有组织的试验体系,试验评估人员把新设计与之前已经通过验证特定任务做比较,记录比较数据来完成评估,通过设计全新试验场景来完成特定评估。②间接比较法。由于条件限制,两系统进行并联评估直接比较是非常困难的,通过飞行员的“心理感受”,将旧系统和新系统进行比较。③独立评估法。通过评估系统本身的质量(尤其是用户满意度)来确定相应的工作量评估策略。

#### 3.2 机组工作量适航验证方法

测量工作量的前提是确定工作量的评估方法。在测量方法或者选择测量方法时,注重考虑有效性、可靠性以及适用性需求,测量方法尽可能不增加机组的额外工作量,尽可能不影响机组正常工作。

##### 3.2.1 主观测量法

主观测量法是一种事后经验性的方法,通常可以表征机组工作量<sup>[12]</sup>。主观测量法可用工作量评定表来划分亮度等级。常用方法包括:NASA工作负荷指数法、Bedford法、主观工作负荷评估法等。应用较成熟的NASA工作负荷指数法是用NASA-TLX量表来测量工作量,由6个因素及相关描述组成(如表2所示),检验者可以根据自身情况进行打分,实现量化评估。

表2 NASA-TLX量表的6个因素  
Table 2 6 factors of NASA-TLX scale

因素名称	端点	描述
脑力需求	弱/强	脑力与知觉活动(如思考、决策、记忆、注视、搜寻等)有什么要求?任务是容易的还是困难的?简单的还是复杂的?苛刻的还是宽松的?
体力需求	弱/强	体力和知觉活动(如推、拉、旋转、控制、启动等)有什么要求?任务是容易的还是困难的?缓慢的还是迅速的?松弛的还是紧张的?悠闲的还是吃力的?
时间需求	弱/强	你感到任务或者任务成分的速度或者节律所造成的时间压力有多大?速度是缓慢和悠闲的还是迅速和紧张的?
业绩水平	弱/强	你认为你在达到实验者(或者自己)设定的任务目标方面做得如何?你对自己在完成这些目标中获得的成绩有多满意?
努力程度	弱/强	为了达到你的成绩水平,你必须工作(脑力和体力)得多努力?
受挫水平	弱/强	在作业期间,你感到有多危险、多气馁、多恼怒、多紧张和多烦恼?或者多安全、多高兴、多满足、多轻松和多得意?

##### 3.2.2 绩效测量法

绩效测量法是一种用以判断其方案、绩效、收益等是否达到预期目标的评估程序,该评估程序需要使用统计证据以确定特定的绩效目标。主要测量方法为主任务测量法和辅助任务测量法。

##### 3.2.3 生理机能测量法

生理机能测量法是通过中枢神经系统、自主神经系统及内分泌系统等生理指标测量分析所得。生理测试分为两个层次:情绪和生理活跃的测量(心率、瞳孔变化和眼动特征),感觉和精神过程测量(相关的电位和凝视方向)。生理机能测试结果可以表示机组工作量测量的表面特征,通过结果确定工作量程度的变化<sup>[13]</sup>。

##### 3.2.4 机组工作量适航验证方法比较

单一工作量评价方法存在适用范围和优缺点(如表3所示)。主观测量法重在评估操纵员功能及因素,相对于其他方法应用广泛,但在精准度方面有待提升。绩效测量法主要考虑主任务和辅助任务完成情况,评价结果较为准确。生理机能测量法需要采用生理学相关内容,测试方法不容易实现,部分测试技术还有灵敏度要求<sup>[14]</sup>。面向机组工作量审定的民用飞机人机交互适航验证,综合运用主观和绩效测量的方法,并结合生理机能测量方法,实施机组工作量适航验证条款有效验证。

表3 测量方法对比表  
Table 3 Comparison table of measurement methods

测试方法	原理	适用范围	优点	缺点
主观测量法	事后经验性方法表征机组工作量,根据调查情况打分实现量化评估。	实验场景及对象限制小	(1)良好的表面效率,容易得到评估者的认可; (2)广泛适用性。	(1)没有给出诊断信息; (2)精确度有待提升; (3)分量表与工作量关联准确性不高。
绩效测量法	使用统计证据评估程序以确定特定的绩效目标。	测试对象及绩效目标设定有要求	(1)具有客观性,主观因素影响较小; (2)可用辅助任务进行持续工作量测量。	(1)辅助任务可能干扰主要任务,引起主要任务衰减,影响系统运行的安全性; (2)操作员对辅助任务认可和接受程度存在困难。
生理机能测量法	通过测量操作员生理反应来评估工作量。	对测试对象有要求	(1)可进行持续工作量测量; (2)可采用不同检测方法; (3)结果受主观干扰性小。	(1)结果数据可能存在伪差; (2)对测量条件有要求; (3)检测灵敏度有待提升。

### 3.3 运行场景下工作量适航验证案例应用

在开展机组工作量验证工作前需向民航适航当局提供验证行动计划,其内容包括适航验证计划安排以及适航符合性验证方法<sup>[15]</sup>。申请方需向局方递交飞机图纸和技术条件,以及关于试验任务安排和参考飞机的报告,要求参考飞机在结构尺寸、技术水平、驾驶舱布置和机组人数等符合验证飞机要求。试飞员需在验证飞机和参考飞机上根据试飞场景完成同样的试飞任务,并完成机组工作量主客观评价。如果机组工作量相类似或待验证机组工作量略低于参考机组工作量,则验证飞机机组工作量审定通过适航验证。

B767 开展机组工作量适航验证时,采用资深飞行教员及飞行品质评估专家共同评定,通过选取 B737 作为参考比较机型,记录飞行员生理参数,开展机组工作量评估分析<sup>[16]</sup>。在运行场景下工作量适航验证典型案例为:设置模拟三个自动驾驶仪不起作用,座舱高度表不起作用,左发着火,前起落架灯关闭。在飞机运行维度方面,用单台发动机完成应急下降,飞行仪表进场着陆直至停止,此间有意关闭着陆灯,使用单发反推装置来发现方向操纵发生故障。在该场景中自动驾驶仪全部故障改为手动飞行;座舱高度表不起作用,则机组成员无法读取飞机的高度信息;有意关闭着陆灯后,机组成员只能借助周围建筑物或跑道上的近灯光作为参考目视飞行;左发着火需关闭左发并执行灭火操作;飞机单发着陆,机组成员需执行的操作大幅度增加,精神高度紧张,工作量陡增。通

过对高风险、高工作量场景的模拟,采用综合主观和绩效测量的方法,并结合生理机能测量方法评估机组成员能否在有限的时间内完成指定的操作,判断每个机组成员的工作量是否合理。

## 4 结 论

(1) 针对运输类飞机机组工作量适航条款 CCAR25.1523 条和附录 D 的解析为面向机组工作量适航审定提供理论支撑。

(2) 从适航验证测试机组、运行过程、运行环境以及飞机状态四个维度可有效构建面向机组工作量审定的人机交互适航验证场景,并实施典型着陆场景捕获应用。

(3) 面向机组工作量审定的运输类飞机人机交互适航场景设计以及机组工作量适航验证方法,有助于民用飞机人机交互正向设计与适航风险分析。

### 参考文献

- [1] 张夏,孙有朝,张越梅,等. 运输类飞机运行符合性验证规划方法研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(1): 76-82.  
ZHANG Xia, SUN Youchao, ZHANG Yuemei, et al. Study on the planning method of transport aircraft operation compliance verification [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(1): 76-82. (in Chinese)
- [2] 朱海云. 民用飞机最小机组工作量评价方法研究[J]. 内燃机与配件, 2019(8): 185-187.  
ZHU Haiyun. Research on the evaluation method of civil aircraft minimum unit workload [J]. Internal Combustion Engines and Parts, 2019(8): 185-187. (in Chinese)
- [3] 徐敏敏,揭裕文. 面向适航审定的飞行场景研究[J]. 民用

- 飞机设计与研究, 2014(2): 66-69.
- XU Minmin, JIE Yuwen. Study on flight scenarios for airworthiness certification [J]. Civil Aircraft Design and Research, 2014(2): 66-69. (in Chinese)
- [4] 刘树强, 孙有朝. 基于BP网络的机组工作量评估方法研究[J]. 飞机设计, 2014, 34(2): 63-66.
- LIU Shuqiang, SUN Youchao. Research on crew workload evaluation method based on BP network [J]. Aircraft Design, 2014, 34(2): 63-66. (in Chinese)
- [5] 毛志威, 屈展文, 张彤, 等. 基于MBSE的民机审定试飞场景设计[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(8): 1768-1775.
- MAO Zhiwei, QU Zhanwen, ZHANG Tong, et al. Scenario design of civil aircraft certification flight test based on MBSE [J]. System Engineering and Electronic Technology, 2020, 42(8): 1768-1775. (in Chinese)
- [6] 黄二利. 民用运输类飞机最小飞行机组的适航符合性验证研究[J]. 科技视界, 2014(12): 79-80.
- HUANG Erli. Research on the airworthiness compliance verification of the smallest flight crew of civil transport aircraft [J]. Science and Technology Vision, 2014(12): 79-80. (in Chinese)
- [7] ROTH G, SCHULTE A, SCHMITT F, et al. Transparency for a workload-adaptive cognitive agent in a manned-unmanned teaming application [J]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 2020, 50(3): 225-233.
- [8] BENITEZ D M, VALIENTE A, LANZI P. A novel global operational concept in cockpits under peak workload situations[J]. Safety Science, 2018, 102: 38-50.
- [9] 揭裕文, 朱亮. 民用飞机驾驶舱人为因素适航验证导论[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2017: 129-157.
- JIE Yuwen, ZHU Liang. Introduction to airworthiness verification of civil aircraft cockpit human factors [M]. Beijing: Beihang University Press, 2017: 129-157. (in Chinese)
- [10] 屈展文, 郑弋源. 民用运输类飞机最小机组工作量评估中的评估机组选取研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2016(3): 33-35.
- QU Zhanwen, ZHENG Yiyuan. Research on the selection of evaluation crew in the minimum crew workload evaluation of civil transport aircraft [J]. Civil Aircraft Design and Research, 2016(3): 33-35. (in Chinese)
- [11] 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 standard of transport aircraft: CCAR-25-R4 [S]. Beijing: CAAC, 2011. (in Chinese)
- [12] 王佳珂, 牛亚峰, 薛澄岐. 基于生理评测技术的民用无人机控制界面研究[J]. 设计, 2018(5): 154-155.
- WANG Jiako, NIU Yafeng, XUE Chengqi. Research on civil uav control interface based on physiological evaluation technology [J]. Design, 2018(5): 154-155. (in Chinese)
- [13] 刘树强. 民机驾驶舱最小机组工作量评估方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- LIU Shuqiang. Research on evaluation method of minimum crew workload in civil aircraft cockpit [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [14] 宋海靖, 焦毅, 胡毅. 民用飞机试飞阶段人为因素适航验证技术研究[J]. 航空工程进展, 2016, 7(4): 484-488.
- SONG Haijing, JIAO Yi, HU Yi. Study on the airworthiness evaluation technology of human factors in the flight test stage of civil aircraft [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2016, 7(4): 484-488. (in Chinese)
- [15] 张强, 程伟豪, 刘旭华. 民用飞机机组工作量适航验证程序研究[J]. 科技和产业, 2013, 13(4): 126-129.
- ZHANG Qiang, CHENG Weihao, LIU Xuhua. Research on airworthiness verification procedure of civil aircraft crew workload [J]. Science and Technology and Industry, 2013, 13(4): 126-129. (in Chinese)
- [16] 闫光巍, 孙泽鹏. 民机机组工作量评估及任务场景设计方法研究[J]. 广东科技, 2014, 12(6): 161-162.
- YAN Guangwei, SUN Zepeng. The method of civil aircraft crew workload evaluation and task scenario design [J]. Guangdong Science and Technology, 2014, 12(6): 161-162. (in Chinese)

#### 作者简介:

**陈农田**(1984—),男,博士研究生,副教授。主要研究方向:航空安全与适航技术、人机环境系统工程等。

**满永政**(1995—),男,硕士研究生。主要研究方向:航空安全与适航技术、人机环境系统工程等。

**李俊辉**(1995—),男,硕士研究生。主要研究方向:航空安全与适航技术、人机环境系统工程等。

(编辑:马文静)