

文章编号:1674-8190(2016)04-484-05

民用飞机试飞阶段人为因素适航审定技术研究

宋海靖, 焦毅, 胡毅

(中国飞行试验研究院 可靠性研究中心, 西安 710089)

摘要: 随着飞机各系统可靠性的不断提高,人为失误逐渐成为系统失效或造成飞行事故的主要因素,已成为设计及适航审定部门关注的重难点问题。当前国内外对于如何验证人为因素是否满足相关适航条款的要求仍处于理论探索阶段。针对上述问题,基于CCAR-25部条款分析试飞阶段民用飞机人为因素适航审定过程,包括基于SHELL模型及T. E. S. T矩阵的人为因素审定条款筛选,基于MOC5 & MOC6的试验机符合性验证方法,并基于模糊评判方法给出数据分析实例。本文提出的人为因素适航审定思路及验证方法具有一定创新性,已在试飞阶段ARJ21-700飞机上初步应用,可为后续C919等民用飞机人为因素设计和适航审定提供技术支持和方法保证。

关键词: 试飞阶段;人为因素;适航审定;符合性验证;模糊评判

中图分类号: V217+.1

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2016.04.014

Study on Airworthiness Certification of Human Factor in Flight Test for Civil Aircraft

Song Haijing, Jiao Yi, Hu Yi

(Reliability Research Center, Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: With the development of system reliability for aircraft, human error is becoming one of the main factors leading to flight accidents, as well as the key difficulty and challenge for the design and airworthiness authorized departments. Currently, how to certify the compliance of the human factor is still in the theoretical exploration stage for both at home and abroad. Aiming at above problems, the airworthiness certification process based on CCAR-25 is analyzed, including the selection of 40 regulations relevant with human factor based on SHELL model and T. E. S. T matrix, also the means of compliance(MOC5 & MOC6) for flight test, and finally the data analysis example based on fuzzy evaluation is presented. The proposed thoughts and methods have been applied preliminarily in ARJ21-700 and can provide the technical support for design and airworthiness certification of human factor and ergonomics for other civil aircrafts such as C919.

Key words: flight test step; human factor; airworthiness certification; means of compliance; fuzzy evaluation

0 引言

波音公司调查表明,航空事故中10%的事故涉及飞机系统故障,而70%~80%的飞行事故与人为失误有关^[1]。美国海军研究表明,1977年由于环境和机械因素导致的事故数较多,但是随着可

靠性技术的提高,1992年的统计结果显示,仅由环境和机械因素引起的事故数量几乎可忽略,而人为因素导致的飞行事故数所占比重却越来越大^[2]。航空事故率不断降低,而人为失误却始终维持在一定比例。人为因素逐渐成为影响航空安全的关键因素^[3-4],愈来愈为设计及适航审定部门所重视。当前国外已将人为因素列为一个单独系统进行审定,相关条款正在不断修订完善中^[5-6];而国内针对人为因素适航审定的研究仍处于理论探索阶段。随着飞机设计技术的不断提高,市场对民用飞机人

收稿日期:2016-07-22; 修回日期:2016-10-12

通信作者:宋海靖,shjaj@163.com

机界面良好性的需求不断增强,飞行员的工作负荷日益增大。尤其在试飞阶段,飞机处于设计更改的关键时期,因人为误判和误操作引起的飞行事故时有发生。因此,人为因素越来越成为航空工效评价和适航审定关注的重难点问题。

本文基于 SHELL 模型重点分析 CCAR-25 部有关条款对人为因素评估的具体要求,并基于条款适应性分析确定人为因素审定依据(25.1302 & 25.1523),提出基于 T. E. S. T 矩阵的评审思路;分析当前普遍应用的驾驶舱可操作性与设计评价步骤(Cockpit Operability and Design Evaluation Procedure,简称 CODEP)审定方法,提出适用于试飞阶段工程应用性强的符合性验证方法(MOC5 & MOC6);结合 ARJ21-700 试验机的试飞实际给出数据分析实例,为后续 C919、MA700 等民用飞机人为因素设计和适航审定提供技术支持。

1 人为因素适航审定研究

1.1 人为因素适航审定思路

本文研究思路框架如图 1 所示。

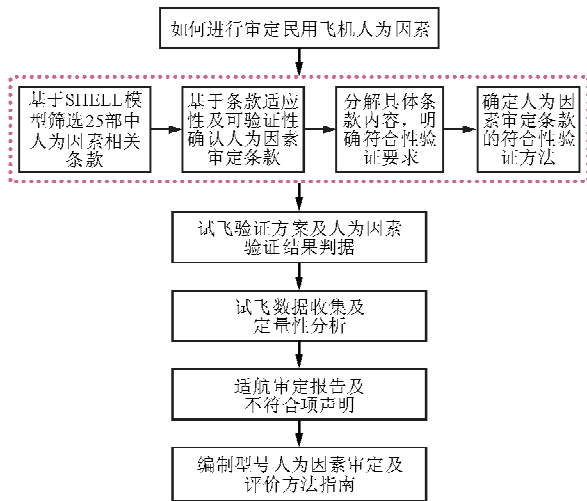


图 1 民用飞机人为因素适航审定框架

Fig. 1 The framework of human factor airworthiness certification for civil aircraft

1.2 人为因素适航审定条款分析

(1) 基于 SHELL 模型的人为因素相关条款筛选及适应性分析

国际民航组织安全管理手册中的 SHELL 模

型^[7-9]如图 2 所示,主要包括软件(Software)、环境(Environment)、硬件(Hardware)、人(Liveware)四个模块,及其各自功能接口和相互关系,即:人—软件、人—环境、人—硬件和人—人的接口关系。

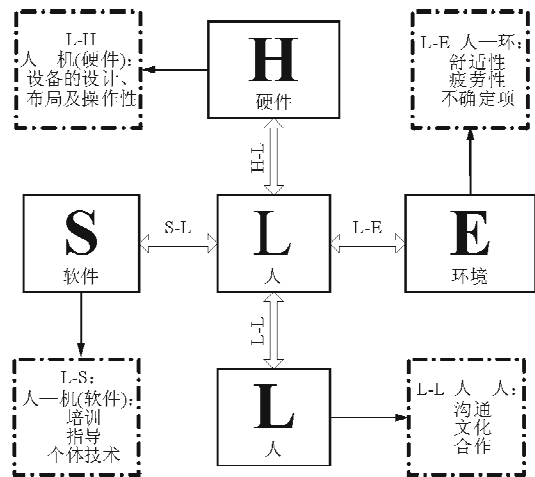


图 2 SHELL 模型

Fig. 2 The thought of SHELL model

基于 SHELL 模型具体要素筛选出 CCAR-25 部中人为因素相关条款如表 1 所示,可以看出条款内容或是基于具体系统审定,或是从具体部件设计方面提出跟人相关的要求,并非专门针对人为因素相关内容的审定,大都宽泛且难以验证。

(2) 基于 T. E. S. T 矩阵的人为因素审定条款识别

依据人为因素条款筛选及适应性分析,专门针对人为因素审定且需专项试飞验证的条款有两项:考虑工作负荷的最小飞行机组条款(25.1523)和为降低人为差错的系统安全性条款(25.1302)。本文将这两项条款作为人为因素适航评审的依据。结合试飞阶段工作实际,基于任务分析,提出 T. E. S. T 矩阵模型,作为民用飞机人为因素适航评审的指导思想,如图 3 所示。

在 T. E. S. T 矩阵模型中,行、列坐标均可表示为 T. E. S. T,但含义不同。列坐标中 T. E. S. T 含义为

T(Tasks):飞行任务;E(Errors):人为失误;S(System impact):系统冲突;T(Threat & Treatment):飞行安全的威胁。

表 1 CCAR-25 部中人为因素相关条款
Tabel 1 The relevant regulations for human factor in CCAR-25

序号	25 部条款	主题内容
1	25.101	性能总则
2	25.143	总则(操纵性和机动性)
3	25.601	总则(D分部,设计和构造)
4	25.611	可达性措施
5	25.671	总则(操纵系统)
6	25.771	飞行员疲劳及设备操作性
7	25.773	飞行员视野
8	25.777	驾驶舱操纵器件
9	25.779	驾驶舱操纵器件的工作和效果
10	25.781	驾驶舱操纵手柄形状
11	25.1141	动力装置的操纵器件:总则
12	25.1143	发动机的操纵器件
13	25.1145	点火开关
14	25.1147	混合比操纵器件
15	25.1149	螺旋桨转速和桨距的操纵器件
16	25.1153	螺旋桨顺桨操纵器件
17	25.1155	反推力和低于飞状的桨距调定
18	25.1159	增压器操纵器件
19	25.1161	应急放油系统的操纵器件
20	25.1301	功能和安装
21	25.1302	* 系统及设备的人为差错 *
22	25.1303	飞行和导航仪表
23	25.1309	设备安装及告警
24	25.1321	布局 and 能见度(仪表;安装)
25	25.1322	警告等、戒备灯和提示灯
26	25.1326	空速管加温指示系统
27	25.1329	飞行指示系统的设计
28	25.1381	仪表灯
29	25.1383	着陆灯
30	25.1401	防撞灯
31	25.1411	总则(安全设备)
32	25.1523	* 最小飞行机组 *
33	25.1541	总则(标记和标牌)
34	25.1543	仪表标记:总则
35	25.1545	空速限制信息
36	25.1549	动力装置和辅助动力装置仪表
37	25.1555	操纵器件标记
38	25.1557	其他标记和标牌
39	25.1561	安全设备
40	25.1563	空速标牌

注:“*”表示经适应性分析后可作为人为因素审定依据的条款。

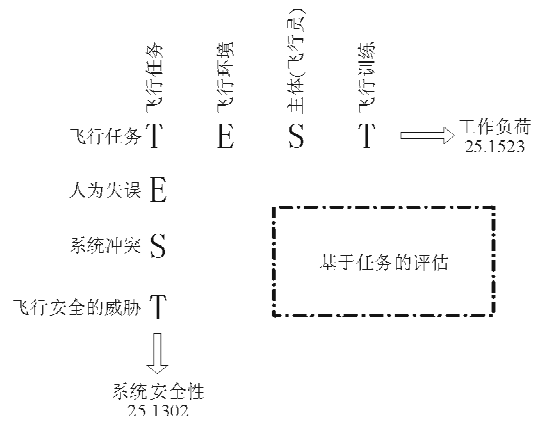


图 3 T. E. S. T 矩阵模型

Fig. 3 The thought of T, E, S, T matrix

行坐标中 T. E. S. T 含义为

T(Tasks): 飞行任务; E(Environment): 飞行环境; S(Subject): 主体即为飞行员; T(Training): 飞行训练。

其中,列坐标表示人为因素适航审定过程中必须考虑在特定的飞行任务下飞行员是会犯错的,同时也要考虑人与机的交互。行坐标表示在人为因素适航审定时,必须综合考虑四个要素:飞行任务、飞行环境、飞行员以及飞行训练。

因此,列坐标定位于飞行员失误(Flight Crew Error),与之相对应的是 25.1302 条款;行坐标考虑的是飞行员工作负荷(Workload),与之相对应的是 25.1523 条款。

1.3 人为因素适航审定方法研究

(1) 传统的适航审定方法

民用飞机驾驶舱人为因素评估以往是以功能为导向,难以细致描述和评价飞行员操作的细节。传统的评价体系通常基于某些孤立节点开展分析,缺乏对飞行员任务行为的全面、综合考虑^[10-11]。例如,当前广泛应用的 CODEP 评价方法。该方法指出在人为因素适航审定过程中,必须考虑飞行员信息加工模型,包括对外界信息的感知(S)、处理(P)、反应(R)和反馈(C)^[12-14]。然而,CCAR-25 部条款是以任务为导向制定的,普遍应用的 CODEP 评价方法过于概念及理论化,工程应用性不强。在工程阶段,例如飞行试验过程中,对于如何实现人为因素适航审定难以给出符合性验证结果。

(2) 试飞阶段人为因素审定方法

本文针对 25.1523 及 25.1302 条款具体内容进行分析,给出评价模块、具体工程验证方法及所使用的技术手段,试飞阶段人为因素审定方法具体框架如图 4 所示。

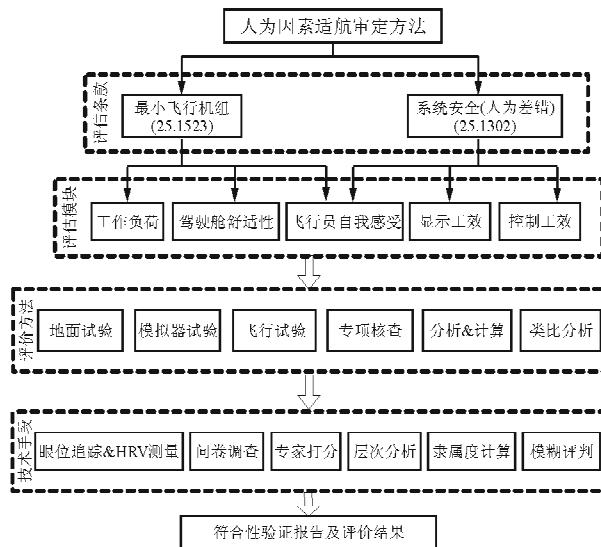


图 4 试飞阶段人为因素审定方法框架

Fig. 4 The framework of means of compliance for human factor during flight test

从图 4 可以看出:人为因素适航审定时先将条款验证分为五个模块(包括工作负荷、驾驶舱舒适性、飞行员自我感受、显示工效及控制工效),给出工程应用阶段的验证方法(包括地面试验、模拟器试验、飞行试验、专项核查、分析 & 计算、类比分析等),并确定实现结果所使用的技术手段及数据处理方法(包括眼位追踪 & HRV 测量、问卷调查、专家打分、层次分析、隶属度计算及模糊评判),最后得到符合性验证结果。其中,基于眼位追踪的试飞方案确定及基于模糊评判的试飞数据处理方法是本文的创新点及难点。

2 试飞数据分析实例

以 ARJ21-700 飞机的驾驶舱人机界面定性评价定量化为例,其评估体系构成形式如下:

评语等级: $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\} = \{优, 良, 中, 次, 劣\}$, 驾驶舱人机界面具体评判等级及含义如表 2 所示。

表 2 驾驶舱界面具体评判等级及含义

Tabel 2 The levels and meaning of the indexes for the cabin interface

等级	V	分值	评语含义
优	v_1	90~100	非常满意,获得满意的性能不需要额外补偿
良	v_2	70~90	有可忽略的缺陷,获得满意性能不需要飞行员或维护人员补偿
中	v_3	50~70	有不满意度适中的缺陷,获得足够的性能需要飞行员及维护人员适度的补偿
次	v_4	30~50	有不满意度高的缺陷,获得足够的性能需要飞行员及维护人员强烈的补偿
劣	v_5	0~30	有较大缺陷,不能完成部分需要的操作

评价指标集: $\{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\} = \{工作负荷, 舒适性, 飞行员自我感受, 显示工效, 控制工效\}$;

模糊权重向量集: $A = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\} = \{0.27, 0.30, 0.20, 0.10, 0.13\}$;

评价矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} & r_{45} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} & r_{54} & r_{55} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.450 & 0.300 & 0.150 & 0.050 & 0.050 \\ 0.200 & 0.450 & 0.125 & 0.125 & 0.100 \\ 0 & 0.350 & 0.350 & 0.200 & 0.100 \\ 0.100 & 0.450 & 0.300 & 0.100 & 0.050 \\ 0 & 0.050 & 0.400 & 0.400 & 0.150 \end{bmatrix}$$

评估结果: $B = A \cdot R = (0.1915, 0.3375, 0.2300, 0.1530, 0.0880)$;

定性分析: $\max(0.1915, 0.3375, 0.2300, 0.1530, 0.0880) = 0.3375$ 。

隶属度 0.3375 对应的评判级为良, ARJ21-700 飞机驾驶舱人机界面级别可以定为良好。定量分析,评估值 $W = B \cdot V^T = 3.3915$, 即,该驾驶舱人机界面总体评估值为 3.3915。

上述驾驶舱界面评估实例作为人为因素审定过程中数据处理的一部分,在实际操作中先对各评估指标的下属指标进行评估,再给出权重。例如,具体显示工效的显示装置布局、色彩、舒适度等,并分别赋予权重及数据处理^[14-16],从最低层指标向上一级评估进行综合,逐级向上评估并反馈评分低指标项,发现存在的问题。

结果表明:该型机工作负荷及空间布局得分较高,即飞行员及维护人员较为满意;而显示界面存在炫光、操纵姿势等方面得分较低,表现较差,表明有适度缺陷,需要试飞员及机务人员额外的关注补偿。评价结果已与 ARJ21-700 飞机试飞机组、设计部门进行确认,验证了评价结果的客观真实性,同时可为后续设计更改提供依据,改善人机界面问题项,为提高最终定型飞机的界面工效水平奠定基础。

3 结 论

本文提出的试飞阶段人为因素适航审定过程引入了 SHELL 模型及 T. E. S. T 矩阵确定人为因素适航审定依据;考虑了人机界面评价指标定义和概念的模糊性及专家认识上的主观性,提出了基于 MOC5 & MOC6 结合的符合性验证方法,工程可操作性强;提出了基于专家打分、层次分析、模糊评判集成的试飞数据处理方法,实现了人机界面的定量评价,能更有说服力的分级说明座舱界面存在的问题。综上所述,民用飞机试飞阶段人为因素适航审定技术的研究为民用飞机人为因素适航审定及座舱人机界面综合评价提供了方法保证,可为 C919、MA700 等民用飞机人为因素审定提供技术支持,填补了试飞阶段人为因素适航审定及界面工效评价工程应用方面研究的空白,同时为各型飞机界面工效指标的设计更改提供依据。

参考文献

- [1] Human Factors-Harmonization Working Group. Flight crew error/flight crew performance considerations in the flight deck certification process[R]. Human Factors-IIWG Final Report, 2004.
- [2] McClumpha A J, Rudisill M. Certification for civil flight decks and the human-computer interface[R]. N95-34784, 2000.
- [3] Keota R, Toivonen R, Luukkonen R, et al. Expert assessment of physical ergonomics at video-display unit workstations: repeatability, validity and responsiveness to changes [J]. International Archives of Occupational and Environmental Health, 2004, 77(6): 437-442.
- [4] Federal Aviation Administration. The interfaces between flight crews and modern flight deck systems[R]. FAA Report, 1996.
- [5] 项勇. 通用飞机人为因素适航审定要求研究[J]. 航空标准化与质量, 2011(2): 31-35.
- [6] Harris D. Human performance on the flight deck[M]. USA: CRC Press, 2011.
- [7] ICAO DOC9859 Safety management manual[S]. 2009.
- [8] MIL-STD-1472F Human engineering[S]. 1999.
- [9] MIL-HIDBK-759C Human engineering design guidelines[S]. 1995.
- [10] Xiao J, Douglas D, Lee A H, et al. A delphi evaluation of the factors influencing length of stay in Australian hospital [J]. International Journal of Health Planning and Management, 1997, 12(3): 207-218.
- [11] Osborne J, Collins S, Ratcliffe M, et al. What ideas-about-science school be taught in school science? A delphi study of the expert community[J]. Journal of Research in Science Teaching, 2003, 40(7): 692-720.
- [12] Jayson R. Analysis of installed systems and equipment for use by flight crews[R]. Australian Civil Aviation Authority, 2012.
- [13] AC25.1302 installed systems and equipment for use by flight crews[S]. Federal Aviation Administration, 2013.
- [14] 宋海靖, 焦毅, 黄丙寅. 民航驾驶舱显示界面工效模糊评价研究及应用[C]. 西安: 2013 年国际航空维修与管理学术会议, 2014.
Song Haijing, Jiao Yi, Huang Bingyin. Study on fuzzy evaluation research and application of cockpit display ergonomics for civil aircraft[C]. Xi'an: The 2013 International Aviation maintenance and Management Conference, 2014. (in Chinese)
- [15] 郭亚军. 综合评价理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 41-46.
Guo Yajun. Comprehensive evaluation theory and method [M]. Beijing: Science Press, 2002: 41-46. (in Chinese)
- [16] 陈伟. 正确认识层次分析法(AHP法)[J]. 人类工效学, 2000, 6(2): 32-35.
Chen Wei. Correct understanding of the analytic hierarchy process(AHP)[J]. Chinese Journal of Ergonomics, 2000, 6(2): 32-35. (in Chinese)

作者简介:

宋海靖(1988-),女,硕士,工程师。主要研究方向:飞机适航及安全性评估。

焦毅(1986-),男,硕士,工程师。主要研究方向:试飞阶段飞机维修性及保障性评估。

胡毅(1985-),男,硕士,工程师。主要研究方向:试飞阶段飞机安全性评估。

(编辑:赵毓梅)