

民机驾驶舱触控显示系统人机工效评估指标体系搭建研究

徐玮瞳¹, 张 颖¹, 董 磊²

(1. 中国航空无线电电子研究所, 上海 200241;

2. 中国民航大学民用航空器适航审定技术与管理研究中心, 天津 300300)

[摘 要] 从人机工效基本原理出发, 在对国内外适航规章和行业标准解读的基础上, 结合触控技术自身特征, 对触控显示系统人机工效设计的影响因素进行分析, 并综合运用了改进德尔菲法和改进层次法, 初步构建了民机触控显示系统人机工效评估指标体系, 可为系统的设计与评估提供借鉴。

[关键词] 触控显示系统; 指标体系; 改进德尔菲法; 改进层次法

[中图分类号] V223.1

[文献标识码] A

[文章编号] 1006-141X(2021)02-0001-05

Research on the Establishment of the Ergonomic Evaluation Index System for the Touch Display System of the Civil Aircraft Cockpit

XUWei-tong¹, ZHANG Yin¹, DONG Lei²

(1. China National Aeronautical Radio Electronics Research Institute, Shanghai 200241, China;

2. Civil aircraft airworthiness certification technology and management research center, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Starting from the basic principles of ergonomics, and based on the interpretation of domestic and foreign airworthiness regulations and industry standards, the influencing factors of the ergonomic design of the display system are analyzed, combined with the characteristics of touch technology, and the improved Delphi method and the improved hierarchy method are comprehensively used to establish an evaluation index system for the civil aircraft touch display system, which can provide a reference for the design and evaluation of the system.

Keywords: touch display system; index system; modified Delphi method; modified G1 method

随着触控人机交互技术在越来越多的公务机(如湾流 G550)、民用客机(如波音 777X, 空客 A350)的驾驶舱中应用, 并获得适航取证, 触控技术因其有助于节省驾驶舱空间资源、减轻飞机重量、降低运营商成本和提升飞行员体验^[1]成为下一代民机驾驶舱人机接口发展的必然趋势。但目前适航

规章要求、指南方面尚未有可供遵守的触控显示系统的设计和评估指标, 国内未形成比较完善的人机工效评估指标体系, 这给系统的研制带来一定的困难。而指标体系是开展触控显示系统设计和评估工作的基础。

收稿日期: 2021-04-21

引用格式: 徐玮瞳, 张颖, 董磊. 民机驾驶舱触控显示系统人机工效评估指标体系构建研究[J]. 航空电子技术, 2021, 52(2): 01-05.

本文从人机工效基本原理出发,参考国内外适航规章和行业标准,对触控显示系统人机工效设计的影响因素进行分析,筛选评估指标,建立初步的人机工效评估指标体系。基于改进德尔菲法,开展专家调研,并对结果进行统计分析,进一步筛选评估指标;再基于改进层次法(亦称为 G1 法)和专家赋权法相结合,确定各指标的基础权重。从而建立较为完善的民机驾驶舱触控显示系统人机工效评估指标体系。

1 评估指标体系构建过程和方法

1.1 构建初步评估指标体系

构建过程从人机工效学的基本原理出发,结合触控技术自身特征将影响触控显示系统的因素分解成若干个一级指标。与传统驾驶舱显控设备相比,触摸屏可能带来的问题有:(1)容易误操作;(2)显示/控制的界面耦合影响;(3)反馈缺失;(4)响应时间无明确规定;(5)可达性位置优化^[2]。这些特征均可抽象到评估指标当中去。再解读适航规章、咨询通告以及国内外人机工效标准和规范,如 FAR 25 部与驾驶舱人因直接相关的 17 项条款(包括 25.1302)^[3]、AC 25-11B、AC 20-175、SAE ARP 60494 等,并借鉴我国大型客机的设计要求、国际主流客机的机组操作手册等技术资料,提炼评估指标,将每个一级指标进一步分解成若干较低级别和层次的指标,直到触控显示系统每个方面都可以用明确的指标来反映^[3]。评估指标的建立流程如图 1 所示。

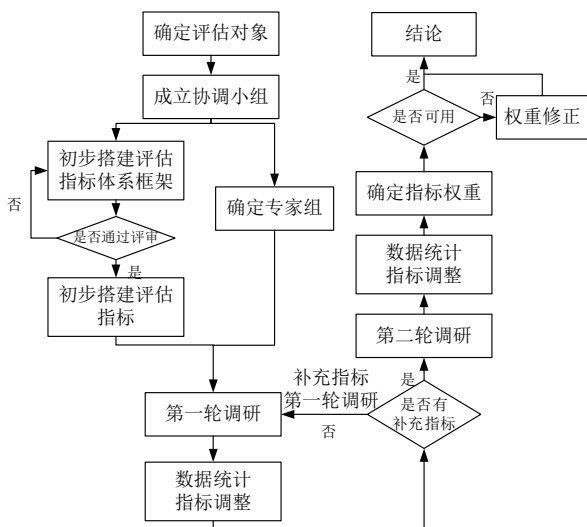


图 1 指标体系建立流程

按照以上步骤,初步确定一个三层级评估指标体系,该体系的框架如表 1 所示。

表 1 民机触控显示系统评估指标体系框架^[4-7]

一级指标 O_{i0}	二级指标 O_{ij}	三级指标集 O_k
可视性	触摸显示器位置	U_1
	视差	.....
可读性	标识样式	.....
	文字	.....
	颜色	.....
	布局	.....
可达性	菜单	.....
	触控显示器位置	.....
	触控区域位置	.....
	戴手套的影响	.....
操作性	照明条件	.....
	触摸目标尺寸	.....
	触摸区域位置	.....
	过载及振动影响	.....
交互性	继承性	.....
	多通道交互	.....
功能性	手势	.....
	特定功能	.....
防差错性	触摸反馈	.....
	显示逻辑	.....
可靠性	告警	.....
	防误触设计	.....
	差错管理	.....
	屏维护性	.....
	屏性能	U_{25}
	测试性	U_{26}

其中, U_k 代表第三等级指标集,例如:

$U_1=\{u_{11},u_{12}\}=\{ \text{针对身高 158 厘米至 190 厘米的最小飞行机组成员,触控屏的安装位置易于观察;在不同光环境和振动环境下触控显示屏易于观察} \}$ 。

1.2 专家调研

有研究表明,改进德尔菲法是建立驾驶舱显示系统工效学评估指标体系的有效方法,它的基本思想是:初步确定出的一系列评估指标,以调查表的形式分别征询专家对所设计的评估指标的意见,然后进行统计处理,并反馈咨询结果,经几轮咨询后,如果专家意见趋于集中,则由最后一轮咨询确定出具体的评估指标体系^[8]。改进德尔菲法一般只需两到三轮即可使专家意见趋于一致^[9],实施步骤为:

(1) 成立协调小组

协调小组负责确定评估对象、构建初步评估指标体系、拟定专家咨询人员名单、编制专家咨询表、组织和协调咨询工作、对数据进行统计分析等。

本次研究的协调小组由 3 人组成,其中高级工程师 1 名、工程师 2 名,专业方向均为显示系统工效研究专业。

(2) 成立专家咨询组

进行指标研究时, 最关键的是咨询专家的选择, 专家人数在 10 到 30 人之间较为合理^[9]。然后, 并要求每位专家根据已有的知识和经验判断出每个指标对飞行员操作工效的影响程度。1-5 分分别表示对触控显示系统的人机工效“没什么影响”、“有较小影响”、“影响大”、“影响很大”和“影响非常大”。

本次研究在建立指标体系时邀请到了 19 名民机航空领域的驾驶舱工效学专家、机载系统设计师和工效设计师, 以及软件设计师等作为咨询专家组成员, 其中有 3 位具备触控显示系统研发经验。

为保证调研问卷的可靠性和有效性, 在正式调研前, 首先对问卷进行了试测, 并对试测结果进行了分析, 根据分析结果进一步调整了问卷结构。

1.3 调研结果统计分析

对回收的 19 份调查问卷进行统计处理和分析, 本研究采用了以下几个统计参数进行数据处理和分析^[10]:

(1) 集中程度 $\bar{E}_i$, 其表达式为:

$$\bar{E}_i = \sum_{j=1}^5 E_j m_{ij} / d, i=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

其中, 为指标影响飞行员操作工效程度的量值 (1, 2, 3, 4, 5), m_{ij} 为将第 i 个评估指标打分为第 j 个等级的专家数, n 为指标个数, d 为专家个数。

(2) 离散程度 (σ_i), 其表达式为:

$$\sigma_i = \left[\sum_{j=1}^5 m_{ij} (E_j - \bar{E}_i)^2 / (d-1) \right]^{1/2} \quad (2)$$

离散程度反映专家对第 i 个指标影响飞行员操作工效程度评估的分散程度, 该值越小, 表明专家评估结果的分散程度越小。

(3) 协调程度 (使用变异系数 V_i 、协调系数 W 进行描述), 表达式如下:

$$V_i = \sigma_i / \bar{E}_i \quad (3)$$

$$W = \frac{12}{d^2(n^3 - n) - d \sum_{k=1}^n T_k^2} \sum_{i=1}^n s_i^2 \quad (4)$$

s_i 为第 i 个指标的指标等级与全部指标等级和的算术平均值之差, T_k 为修正系数。变异系数、协调系数分别从专家对单个指标评估, 以及整个指标体

系评估的角度反映协调程度。对协调系数进行显著性检验, P 值小于 0.05 则专家评估结果协调性好, 反之则结果不可取。

(4) 专家一致性意见, 有不少于 2/3 (约 67%, 记为 P33) 的专家评估结果认为指标等级应大于该等级时的取值^[11]。

将第一轮打分中专家组对每个指标判断结果的分布情况及一致意见, 在第 2 轮中反馈给每位专家, 专家再对每个指标重新进行评估。同时, 要求专家给出在判断各指标对工效影响程度等级时的自信度。自信度等级的划分采用 5 级标度, 分别表示自信度等级“低”、“较低”、“较高”、“高”、“很高”。当专家组的自信度等级 (即所有专家给出的自信度等级的均值) 不小于 3 时, 认为咨询结果比较接近于主观判断的“真实”情况。

1.4 确定指标权重系数

每个指标对触控显示系统的影响程度是不相同的, 因此在指标体系初步建立好之后, 应确定各项指标的权重系数。权重系数不同时, 评估结果往往存在较大差异, 它是影响评估结果的关键因素。

并且由于单一专家给出的权重打分具有主观性, 因此需要多位专家参加调查, 使结果更客观。鉴于参加调查的专家知识结构、经验水平及对评估对象和指标的了解程度差异, 需对专家本身可靠度进行评估, 以确定各专家在评估指标调查结果中的占比。结合上述考虑, 本研究在确定一级和二级指标权重时邀请到了 14 名民机航空领域的驾驶舱工效学专家、机载系统设计师、工效设计师, 以及软件设计师等组成咨询专家组。基于 G1 法和专家赋权法相结合的方法确定各指标的基础权重^[9], 步骤如下:

(1) 比较判断指标之间相对重要程度

记一级指标集 $\{O_{10}, O_{20}, \dots, O_{m0}\}$, 二级指标集 $\{O_{i1}, O_{i2}, \dots, O_{in}\} (i=1, 2, \dots, m; n \text{ 为不同一级指标对应的二级指标数量})$, 请各个专家分别对一级指标集、二级指标集中指标的相对重要程度 r_{ik} 进行比较:

$$\begin{cases} r_{ij}^d = w_{j-1}^d / w_j^d & d=2; i=1, 2, \dots, m \\ & j=2, 3, \dots, n \\ r_{ij}^d = w_{i-1j}^d / w_{ij}^d & d=1; i=2, 3, \dots, m \\ & j=0 \end{cases} \quad (5)$$

w_{ij}^d 为 d 级指标 O_{ij} 所对应权重, r_{ij}^d 取值如表 2 所示

表 2 r_{ij}^d 赋值表

r_{ij}^d	解释
5/9	被比较指标比比较指标极端不重要
5/8	被比较指标比比较指标强烈不重要
5/7	被比较指标比比较指标明显不重要
5/6	被比较指标比比较指标稍微不重要
1	被比较指标与比较指标重要性相等
6/5	被比较指标比比较指标稍微重要
7/5	被比较指标比比较指标明显重要
8/5	被比较指标比比较指标强烈重要
9/5	被比较指标比比较指标极端重要

(2) 计算权重系数

根据 r_{ij}^d 可计算指标 u_{ij} 权重值 w_{ij}^d :

$$\begin{cases} w_{in}^d = (1 + \sum_{k=2}^n \prod_{j=k}^n r_{ij}^d)^{-1} & i=1, 2, \dots \\ w_{ik-1}^d = r_{ik}^d w_{ik}^d, k=2, 3, \dots, n & m, d=1 \\ w_{mj}^d = (1 + \sum_{k=2}^m \prod_{i=k}^m r_{ij}^d)^{-1} & d=2, \\ w_{k-1-j}^d = r_{kj}^d w_{kj}^d, k=2, 3, \dots, m & j=0 \end{cases} \quad (6)$$

(3) 评估专家可靠度

根据各个专家在所属领域的权威程度、工作经验和相关问题熟悉程度, 对 r 个专家可靠度 p_i 进行评估, 对各个专家可靠度评估的结果需满足:

表 3 两轮评估分析指标统计

三级指标名称	第一轮统计指标				第二轮统计指标				
	$\bar{E}_i$	σ_i	P33	V_i	$\bar{E}_i$	σ_i	P33	V_i	GCR
针对身高 158 厘米 (5 英尺 2 英寸) 至 190 厘米 (6 英尺 3 英寸) 的 (按第 25.1523 条规定的) 最小飞行机组成员, 触控屏的安装位置易于观察	4.26	0.99	4.00	0.23	4.16	0.69	4.00	0.17	4.42
手指残留物影响屏的触控精度	3.89	0.81	4.00	0.21	3.89	0.46	4.00	0.12	4.37
触控显示屏支持可用性测试	3.47	0.70	3.00	0.20	3.32	0.48	3.00	0.14	3.74
提供用于自检的人机交互接口	3.37	0.68	3.00	0.20	3.26	0.45	3.00	0.14	3.95

中, 所有指标的标准差和变异系数都比第 1 轮的小, 表明第 2 轮咨询中专家判断结果的分散程度较小, 协调程度较高。另外, 第 2 轮咨询结果中各指标的专家组判断自信度 GCR 都大于 3, 表明咨询结果比较接近于专家主观判断的真实情况。

第二轮调研中, 根据专家意见对缺失指标进行了补充, 对补充指标建议单独继续进行小范围的调研, 以达到指标优化的目标。

通过 G1 法、专家赋权法相结合分析得到的一二级指标基础权重如表 4 所示。G1 法的基本思想是,

$$\sum_{i=1}^r \rho_i = 1 \quad (7)$$

(4) 综合处理

使用步骤 (2) 计算出的第 i 位专家对应的权重向量 $\{W_{i1}^d, W_{i2}^d, \dots, W_{iq}^d\}$ (d 为指标等级, q 为评估指标数量), 结合步骤 (3) 中各个专家可靠度, 得到各指标基础权重 $(W_1^d, W_2^d, \dots, W_q^d)$ 。

$$W_p^d = \sum_{i=1}^r \rho_i w_{ip}^d, p=1, 2, \dots, q \quad (8)$$

2 结果

本研究共经过两轮专家调研, 第一轮调研后, 根据专家意见, 对初步建立的 89 个三级指标中不合理的进行了筛除, 形成新的指标集并进行了第二轮调研, 对调研结果进行统计处理, 得出各指标的统计参数结果, 如表 3 所示。

GCR 表示专家组在判断指标对飞行员操作工效影响程度等级时的自信度。最终通过分析专家组自信度筛选得到了 84 个三级指标。筛选标准为: 专家一致性意见 P33、专家组自信度均大于 3。

分析表 3 结果可知, 第 2 轮调研得出的统计结果

先对各评价指标按某种评估准则依次比较判断, 进行定量赋值, 经处理后得出各个指标的权重系数^[12]。

经过两轮咨询之后, 计算出的专家意见协调系数, 如表 5 所示。经过对比可以发现, 协调系数由第一轮的 0.158 提高到第二轮的 0.395, 表明专家对指标重要程度的认识趋于一致, 协调系数的专家意见协调性显著, 结果可取。

表 4 一、二级指标基础权重

一级指标	一级指标权重	二级指标	二级指标权重	一级指标	一级指标权重	二级指标	二级指标权重
可视性	0.152	触摸显示器	0.366			过载及振动影响	0.142
		位置				继承性	0.143
		视差	0.323				
可读性	0.142	标识样式	0.229	交互性	0.115	多通道交互	0.238
		文字	0.197			手势	0.246
		颜色	0.189			特定功能	0.237
		布局	0.200			触摸反馈	0.280
		菜单	0.186				
可达性	0.119	触控显示器	0.465	功能性	0.121	显示逻辑	0.485
		位置				告警	0.515
		触控区域位置	0.535	防差错性	0.111	防误触设计	0.526
操作性	0.118	戴手套的影响	0.178			差错管理	0.474
		照明条件	0.191	可靠性	0.122	屏维护性	0.326
		触摸目标尺寸	0.177			屏性能	0.340
		触摸区域位置	0.168			测试性	0.334

表 5 两轮专家意见协调系数比较表

系数	第一轮咨询	第二轮咨询
协调系数	0.158	0.395
χ^2	249.716	306.616
P 值	2.0906E-17	1.3824E-23

3 结束语

对比现有的驾驶舱显示系统人机工效评价指标体系，主要以传统机载显示系统为研究对象。有专家采用改进德尔菲法，聘请了 23 名现役有经验的飞行员作为专家进行了两轮咨询，从一致性、可读性、布局、明确性、功能性、防差错性几个方面，形成了一个由 6 个一级指标和 38 个二级指标的递阶结构指标体系^[10]。

本研究综合运用改进德尔菲法和改进层次分析法构建了民机触控显示系统人机工效评估指标体系，由 8 个一级指标，26 个二级指标和 84 个三级指标组成。该指标体系覆盖了原有机载显示系统的评价指标，增加了针对触控系统特性、操作特性以及飞行员认知和工作负荷的指标，并进行了指标权重系数的确定，从多方面更新了原指标体系，完整性和有效性较高，可以民机触控显示系统研发工作提供依据，也可为其它领域的相关研究提供借鉴。

参 考 文 献

[1] 程金陵,叶军晖,严林芳. 触控技术在民用飞机驾驶舱的应用研究[J]. 电光与控制,2017,24(7):105-107.

[2] 舒秀丽,王黎静,何雪丽,董文俊. 民机驾驶舱中触摸屏设备应用的工效学探讨[J]. 航空工程进展,2016,7(1):112-119.

[3] 揭裕文,朱亮,郑戈源,刘勋. 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,2017,33.

[4] CCAR-25-R4. 中国民用航空规章第 25 部运输类飞机适航标准[S].2011.

[5] AC 25-11B. Electronic flight displays[S].2014.

[6] AC 20-175. Controls for flight Ddeck Systems[S]. 2011.

[7] SAE ARP 60494.Touch interactive display systems: human factors considerations system design and performance guidelines[S]. 2019.

[8]XIAO J G, DOUGLAS D. A delphi evaluation of the factors influencing length of stay in Australian hospitals[J]. International Journal of Health Planning and Management,1997, 12: 207-218.

[9] 刘启越. 民用飞机驾驶舱人机工效评估方法研究 [D]. 南京:南京航空航天大学,2013,14,15,26.

[10] 李银霞,袁修干. 改进德尔菲法在驾驶舱显示系统工效学评估指标筛选中的应用研究 [J], 航天医学与医学工程,2006,19(5):369-371.

[11]OSBOME J, COILLNS S, RATCLIFFE M, et al. What“ideas about-science” school be taught in schools? A Delphi study of the e pert community[J].Journal of Research in Science Teaching, 2003, 40(7): 692—720.

[12] 周琳,李银霞,王黎静. 民机驾驶舱显示系统工效学评价指标权重系数研究 [J]. 民用飞机设计与研究 2010, (1):54-57.