

飞机驾驶舱人机协作设计 理论与方法

汤志荔 张 安 毕文豪 著



西北工业大学出版社

FEIJI JIASHICANG RENJI XIEZUO SHEJI LILUN YU FANGFA

飞机驾驶舱人机协作 设计理论与方法

汤志荔 张 安 毕文豪 著



西北工业大学出版社

【内容简介】 飞机驾驶舱是一个由飞行组和各种仪表设备组成的复杂人机系统,其设计不仅包含了基于人类工效学的直观的界面设计,还有系统中人和机器的角色定位,以及内涵的人机协作设计。本书总结了作者近年来在飞机驾驶舱设计理论方法上的最新研究成果,主要包括飞机驾驶舱的发展特点及趋势、人机协作设计理念和模型、人机功能分配理论与方法、人机界面综合评估理论、系统负荷能力模型及实验以及驾驶舱人机界面仿真等内容。

本书可供从事飞机驾驶舱设计的工程技术人员阅读,也可供高等院校航空相关专业的教师和学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

飞机驾驶舱人机协作设计理论与方法/汤志荔,张安,毕文豪著. —西安:西北工业大学出版社,2015.7

ISBN 978-7-5612-4490-6

I. ①飞… II. ①汤…②张…③毕… III. ①飞机—驾驶术—人-机系统—研究
IV. ①V323.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 182174 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电话:(029)88493844 88491757

网址:www.nwpup.com

印刷者:陕西向阳印务有限公司

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:15.625

字数:376 千字

版次:2015 年 8 月第 1 版 2015 年 8 月第 1 次印刷

定价:50.00 元



前言

驾驶舱作为飞行机组的工作场所,既是人为因素对飞行安全影响的直接作用域,又是对人为因素影响的最后一道防线。驾驶舱对于飞行安全的作用日益凸显。围绕驾驶舱与飞行安全和驾驶舱中人机关系已开展了大量的研究,这些研究方法侧重各不相同,但都指向同一个要点:必须在设计阶段将出现不利人为因素的可能性降到最低。美国交通部和欧洲航空安全局在最新修订的适航标准中,已经对驾驶舱设计的适航验证进行了明确的规定。

随着我国大型民用客机项目的上马,国内民航相关的研究,从之前针对飞行机组资源管理、空中交通管制、事故事件分析以及飞机维修这几个重点,发展成为从民用客机的设计研发、适航验证,到运营使用、维修升级、机组培训与管理等全方位的研究。这其中,驾驶舱的设计是不可回避的一环。开展飞机驾驶舱设计理论和方法的研究,既能满足驾驶舱设计的客观工程需要,同时又能为适航验证提供可靠的理论依据和有效的实施工具。相对于普通的人机界面,飞机驾驶舱是一个由飞行机组和各种仪表设备组成的系统。人的存在使得该系统变得异常复杂,也为其设计带来了相当的难度。驾驶舱的设计不仅包含了基于人类工效学的直观的界面设计,还有系统中人和机器的角色定位,以及内涵的人机协作设计。

本书介绍了飞机驾驶舱的发展历史和各阶段的特点以及未来飞机驾驶舱的发展趋势;提出了飞机驾驶舱系统的人机协作设计理念、内涵及模型;重点介绍了人机功能分配的理论方法及其在驾驶舱人机协作设计中的应用,飞机驾驶舱人机界面综合评估理论,人机协作的核心概念——系统负荷能力;最后介绍了飞机驾驶舱系统的仿真及实验。

本书由汤志荔、张安、毕文豪著,其中,汤志荔撰写第4,7~11章,张安撰写第1~3,5,6章,并对全书进行了统筹规划和审定,毕文豪编撰第12~14章。在本书撰写过程中,参阅了许多国内外专家学者的研究成果,也得到了许多同行专家的悉心指导。博士生孙海洋,博士后曹璐,硕士生陈斌、武俊兆、张超、徐海玉提供了大量仿真模型和结果,硕士生张凯翔、王行行、谷晓星等人做了大量的文字、图表编辑和校对工作。在此一并表示诚挚的感谢。

与本书有关的研究工作得到了国家重点基础研究发展规划(973)项目“民机驾驶舱人机工效综合仿真理论与方法研究”(2010734100)与航空科学基金项目“基于人机协作的民机驾驶舱人机界面设计方法研究”(2013805314)的资助,在此也一并表示感谢。

飞机驾驶舱更新换代越来越快,与其相关的新理论、新技术和新方法层出不穷,希望本书的出版能起到抛砖引玉的作用。

由于水平有限,书中难免有疏漏和不足之处,敬请同行专家和读者批评指正。

著者

2015年3月

目 录

第 1 章 飞机驾驶舱发展阶段及特点	1
1.1 第一代:机电仪表驾驶舱	1
1.2 第二代:电子显示仪表驾驶舱	1
1.3 第三代:玻璃驾驶舱	3
1.4 第四代:彩色液晶显示器驾驶舱	3
1.5 飞机驾驶舱的发展趋势	4
第 2 章 飞机驾驶舱系统设计理念	7
2.1 以技术为中心的研究	7
2.2 以人机关系为中心的研究	8
2.3 存在的问题	10
2.4 NASA 的 IIFDT 项目	10
第 3 章 驾驶舱系统的人机协作模型	12
3.1 人机协作设计理念	12
3.2 波音和空客设计理念的差异	17
3.3 驾驶舱系统的人机协作模型	19
第 4 章 人机功能分配理论体系	27
4.1 人与机器关系的发展	27
4.2 自动化等级	27
4.3 人机功能静态分配理论	28
4.4 驾驶舱动态功能分配理论	34
第 5 章 基于区间二元语义的驾驶舱人机功能静态分配方法	46
5.1 驾驶舱系统功能分类	46
5.2 飞机驾驶舱人机功能分配流程	49
5.3 基于区间二元语义的多属性群决策人机功能分配算法	51
5.4 算例及分析	55

第 6 章 基于 ULMADM 的驾驶舱人机功能静态分配方法	60
6.1 ULMADM 基本定义	60
6.2 功能分配自动化等级范围确定	62
6.3 功能分配自动化等级确定	62
6.4 算例及分析	63
第 7 章 基于操作员功能状态的人机功能动态分配方法	67
7.1 操作员功能状态概述	67
7.2 模糊控制器	68
7.3 基于操作者状态的动态功能分配方法	71
7.4 基于 CTL 模型的动态功能分配方法	76
7.5 动态功能分配策略	81
第 8 章 基于遗传神经网络的驾驶舱人机功能动态分配方法	83
8.1 遗传算法	83
8.2 BP 神经网络	84
8.3 基于遗传 BP 神经网络的驾驶舱人机功能分配方法	87
第 9 章 飞机驾驶舱人机界面综合评估理论	91
9.1 飞机驾驶舱人机界面综合评估研究现状	91
9.2 飞机驾驶舱人机界面静态评价指标体系	95
9.3 飞机驾驶舱人机界面的静态综合评估方法	106
第 10 章 人机协作的核心概念——系统负荷能力	129
10.1 任务需求负荷	129
10.2 系统当前工作负荷	131
10.3 系统负荷能力	132
10.4 系统负荷能力的数学模型	136
10.5 ASWC 和 CSWC	138
10.6 人机协作决定驾驶舱系统 SWC	143
第 11 章 视觉 CTDL 与 CSWC 的量化	147
11.1 人的视场	147
11.2 视觉 CTDL 和 CSWC 的计算	148
11.3 剩余可用视觉资源的空间分布	162

11.4 剩余可用视觉资源的激活机制	164
第 12 章 飞机驾驶舱仿真系统和仿真实验	166
12.1 仿真系统的构成	166
12.2 CSWC 参数测量	169
12.3 CSWC 参数测量系统	177
12.4 仿真实验	179
第 13 章 驾驶舱动态功能分配实验验证	191
13.1 实验平台总体设计	191
13.2 任务模块	191
13.3 自动化等级控制模块	197
13.4 想定生成模块	198
13.5 记录和评估模块	201
13.6 系统触发的 DFA 方案的实现	201
13.7 实验设计	206
13.8 实验结果和分析	209
第 14 章 驾驶舱智能显控系统的界面设计	213
14.1 驾驶舱智能显控系统的需求分析	213
14.2 案例分析	214
14.3 智能显控系统的概念	219
14.4 智能显控系统的组成	221
14.5 基于 SOM ² 的飞行状态感知	222
14.6 机组智能体状态感知	228
14.7 决策与显控界面	230
14.8 任务需求信息显控界面(TDICD)	232
14.9 协作需求信息显控界面(CDICD)	234
参考文献	237

第 1 章 飞机驾驶舱发展阶段及特点

飞机驾驶舱是飞行员执行飞行任务时的主要活动场所,飞行员必须依靠舱外目视搜索、舱内信息显示和自身本体感觉等获取各类飞行信息,通过驾驶舱内的各类控制器操纵飞机完成各种飞行任务。因此飞机驾驶舱显示/控制人机界面一直都是航空工效学关注的重点。本章介绍飞机驾驶舱的主要发展阶段和特点,并分析其未来的发展趋势。

1.1 第一代:机电仪表驾驶舱

20 世纪初,一些原始的飞行仪表开始陆续地装备于单座飞机上,主要包括磁罗盘、气压高度计、油量表、油压表、时钟、转弯和侧滑指示器。图 1-1 所示为奥维特·莱特徒手驾驶的“飞行者”一号的驾驶舱。

20 世纪 50 年代,第二次世界大战为飞机的飞行提供了丰富的经验,飞行仪表已达到一定的标准化。主要飞行仪表按照“基本 6 件”型排列:陀螺航空地平仪、空速表、升降速度表、航向指示器、高度表、转弯和倾斜指示器。

20 世纪 70 年代,波音 747(B747)的驾驶舱拥有一整套传统机电式仪表,由 3 名机组人员驾驶,即机长、副驾驶员和飞行工程师。仪表组的布局已由“基本 6 件”型向现在的“基本 T”型转变,并趋向发展成熟,如图 1-2 所示。



图 1-1 “飞行者”一号的驾驶舱



图 1-2 B747 的驾驶舱

1.2 第二代:电子显示仪表驾驶舱

随着运输飞机的大型化、远程化,飞机上的仪表数量激增。例如,B747-300 安装了 132 个仪表,驾驶员的工作量很大,安全性较差。由于显示技术、计算机技术、人机工程学等科学技术的迅速发展,电子显示仪表的问世为实现航空仪表现代化提供了解决方法。

1981 年,装有 6 个彩色阴极射线管(Cathode Ray Tube,CRT)电子仪表系统的 B767 首飞

成功,这标志着民航飞机显示仪表从此进入了电子仪表的新时代。由于电子仪表具有显著的优点,B757/767,B737-300/400/500,A310 干线飞机和“挑战者”“湾流”“贝尔”通用飞机等许多飞机也很快安装了电子仪表系统。图 1-3 所示为 B757/767 的驾驶舱。



图 1-3 B757/767 的驾驶舱

波音系列飞机电子仪表由电子飞行仪表系统(Electronic Flight Instrument System, EFIS)、发动机指示及机组告警系统(Engine Indication and Crew Alerting System, EICAS)组成。前者包括两个电子姿态指引仪和两个电子水平状态指示器,后者包括主、辅显示器各两个。空客系列飞机电子仪表由包括主飞行显示器(Primary Flight Display, PFD)和导航显示器(Navigation Display, ND)的 EFIS 和包括发动机指示/警告显示器(Engine/Warning Display, E/WD)、系统显示器(Systems Display, SD)的电子中央飞机监视系统(Electronic Centralized Aircraft Monitoring, ECAM)组成。

电子显示仪表具有下述主要优点。

(1)信息量大,能够显示绝大部分飞机和发动机信息,大大减少了仪表数量。

(2)信息显示由常规仪表的空分制(按空间分配)改为时分制(按时间分配),显示方式、内容可以根据需要自由选择,较灵活。

(3)许多信息采用图形化显示,使飞行员对飞行状态的感知由原来先判读参数然后再想象感知,转变为从观察图形直接感知,这就缩短了反应时间,提高了可靠性,有利于飞行安全。

(4)自动化程度高,减轻了驾驶员负担,机组成员减少到两人。电子仪表系统具有完善的自检、自监视能力。

上述显示仪表在技术上具有下述不足。

(1)元器件技术较落后,大多是分立器件,集成度不高,外场可更换组件(Line Replaceable Unit, LRU)较多,采用模拟式和数字式混合器件,显示器尺寸比较小。

(2)结构设计较落后,EFIS 和 EICAS(或 ECAM)互相独立,相互没有交联、没有互换性,因此系统余度不够高,程序设计语言主要采用汇编语言。

(3)信息综合程度不够高。例如,B757/B767 的电子姿态显示器(Electronic Attitude Director Indicator, EADI)不能显示速度、高度和升降速度。A310 的 ECAM 不能显示发动机参数。

(4)人机工效较差。例如,B757/767 的 EADI 没有大气数据和航向信息,不便于驾驶员观察、比较纵横向飞行状态的变化;主发动机指示器的发动机参数在右边,告警信息在左边,不便

于机长观察发动机工作情况。A310 的 ECAM 两个显示器分列在中央仪表板两边,不利于两位驾驶员交叉观察。

1.3 第三代:玻璃驾驶舱

1987 年 2 月,装有第二代电子显示仪表系统的 A320 飞机首飞,这标志着民航飞机电子显示仪表进入了成熟期,实现了“玻璃驾驶舱”。图 1-4 所示为 A320 的驾驶舱。

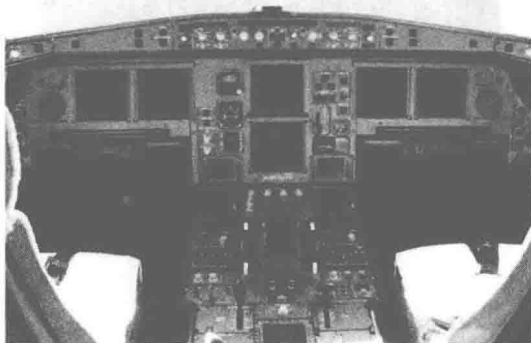


图 1-4 A320 的驾驶舱

玻璃驾驶舱的代表是安装在 A320, A330, A340, B737-600/700/800, B747-400, MD-11 等干线飞机和“比奇”“利尔”“多尼尔”等支线飞机上的电子仪表系统。该显示仪表在元器件、结构设计先进性、综合程度、人机工效等方面有了很大进步,具有以下主要优点。

(1)采用尺寸更大、更先进的显示器。A320 采用显示尺寸为 $184\text{ mm} \times 184\text{ mm}$ 的显示器, B747-400 采用显示尺寸为 $203\text{ mm} \times 203\text{ mm}$ 的显示器。

(2)采用更先进的集成化电子器件。广泛采用表面贴装器件、大规模集成电路、门阵列、全数字电路、高密度包装技术等。这样,减少了元器件数量,提高了可靠性和维护性。

(3)提高了综合化程度,增大了信息量,取代了全部飞行仪表和发动机仪表。

(4)采用新的系统结构,具有更大余度和可靠性。显示系统和飞机其他电子系统形成了一个有机整体,显示仪表仅是综合航空电子系统的显示终端,飞机电子系统从此进入了综合化时代。系统的可靠性、安全性大大提高。系统软件采用高级语言设计。

(5)更注重人机功效学原理,仪表显示更安全、有效,避免人为差错。

1.4 第四代:彩色液晶显示器驾驶舱

1995 年 6 月交付的 B777 用液晶显示器(Liquid Crystal Display, LCD)取代阴极射线管显示器,标志着电子显示仪表系统进入了一个崭新时代,它是当前最先进的电子显示仪表。图 1-5 所示为 B777 的驾驶舱。

继 B777 以后, B737-600/700/800, B767-400ER 及一批支线客机等相继安装了 LCD。B777 的 LCD 系统采用 6 个 $203\text{ mm} \times 203\text{ mm}$ 的大型 LCD,它是飞机综合模块化信息管理系统的一个组成部分。它的显示器采用非晶硅薄膜晶体管有源矩阵寻址行扫描工作方式、扭曲

向列/宾主液晶、黑条加红绿蓝对角配置微型彩色滤色层和背光照明技术,分辨率为 6.7 点/mm。该代飞机电子仪表系统还首次采用了电子检查单,继 EICAS 的“电子空中机械师”和 ECAM 的“电子飞行手册”后,又向“无纸驾驶舱”前进了一步。所有主要的飞行、导航及发动机信息数据都显示在 6 块大型屏幕上,大大减轻了驾驶员的工作负荷。



图 1-5 B777 的驾驶舱

液晶显示器主要具有以下优点。

(1)体积小、重量轻。LCD 和 CRT 相比,厚度减少 80%,重量减少 70%。

(2)节省功耗。B777 的 LCD 总功耗为 60~70W,而同等尺寸的 CRT 为 150W,减少 60%,因而不需强制通风,可以自然冷却。

(3)可靠性高。LCD 所需电子器件少,平均无故障间隔时间长,系统可靠性比 CRT 高 10~20 倍,从而大大提高了系统维护性和经济性。

(4)安全性好。CRT 有爆炸危险,高压电源和 X 射线也具有不安全因素,而 LCD 完全没有这些问题。

(5)在高环境光作用下,亮度、对比度和色度分辨力明显优于 CRT,可观察性好。

(6)环境条件承受力强。LCD 不受外磁场干扰,具有较好的耐震动、耐冲击性能。

1.5 飞机驾驶舱的发展趋势

目前,最新一代飞机驾驶舱以 B787、空客 A350XWB 和空客 A380 为代表,图 1-6 所示为 B787 的驾驶舱。



图 1-6 B787 的驾驶舱

新一代的飞机驾驶舱采用更大尺寸的双屏液晶平板显示器,并采用垂直状态显示模式以显示飞机航迹的相关数据,还可以加入增强视景系统和三维合成视景系统,进一步减轻了驾驶员的工作负荷。

随着飞机的功能和性能要求不断增加和提高,飞机上的电子设备在不断增加,飞行员需要了解和控制的信息越来越多,电子与显示技术出现了初步的综合。随着超大规模电路、高速数据总线、软件等的发展,航空电子系统出现高度综合化的趋势,新一代的驾驶舱显示技术应运而生。未来飞机驾驶舱的发展趋势主要体现在以下几个方面。

1. 高清晰大屏幕全景显示/控制系统

为了大范围、全方位了解飞机周围情况,提高安全性和营运效率,需要大面积显示器。美国全景驾驶舱控制显示系统(PCCADS)计划设想整个仪表板是一个高分辨率大屏幕,采用触敏与语音控制,采用标准菜单式结构和交互式界面。大屏幕不仅可以显示平面视图,也可以显示三维视图;不仅可以显示全屏图像,也可以分屏或镶嵌插图。它运用数据融合、透视、重构、分屏、插入、立体声等先进技术,显示整个飞行过程所需的数字地图、全景图像或系统状态。

2. 三维和四维显示模式

飞机驾驶舱设计应同时考虑飞行员的认知特点和感知运动操作特性。在高度紧张的情况下,飞行员往往只是把直观感觉到的显示信息作为认知判断和操作的基础。为了改善飞行员在复杂情景中对自身状态、飞机状况及周边事态的了解和把握程度,增强飞行员的态势感知能力,国外目前正在寻求新的信息显示方式或途径,研制开发新型信息显示界面。研究发现,与常规显示/控制类飞行管理系统人机界面相比,飞行员使用三维图形数据格式信息显示界面时,不仅认知反应时间短、操作错误少、心理负荷低,而且态势感知能力明显增强。因此,三维立体显示器的研制和开发成为一种新的显示选择。

当代的驾驶舱信息显示格式仍然受数字、字母和符号的困扰。这些参数描述符由数学分析中的真实原理抽象而来,但用于描绘实时空间感知的显示器介质却使用不当。使用现代的信息格式,驾驶员仍需动用大脑将 PFD 和 ND 显示器上以直角坐标系显示的二维信息构想成一幅现实世界中的三维/四维画面。尽管引进了“玻璃驾驶舱”,但可控飞行撞地(Controlled Flight Into Terrain, CFIT)事故发生率仍没有明显的减少。CFIT 事故的历史表明,字母-数字符号体系不具有足以防止驾驶员无意识地撞向地面的能力。

1981 年,兰利空军基地进行 BAC11 携带彩色 PFD/ND 显示器首飞实验,期间提出了“空中高速公路”的概念,即直觉化三维和四维图像信息显示。1983 年“空中高速公路”系统于卡尔斯潘实验室的 C-130 飞机上首飞。这是一种对现实地形的简单、直觉化的显示的方法,可以对任何偏离预想航迹线的飞行预警,并在手动进近时对驾驶员提供支持,便于精确、合理和直觉化地驾驶飞行。

3. 采用平视显示器

平视显示器(Head-up Display, HUD)已经在战斗机上使用了约 40 年,取得了良好效果。民航机平显也早已取得 FAA 在 IIIa 级气象条件下进行人工操纵进场的适航证。对民用运输机而言,使用平视显示器主要有下述优势。

(1)显示的图形信息重叠于现实世界图像上,在一个相对较小的视场内显示飞行参数,改善了数据之间的交叉查询。

(2)改善了在风切变和地形/交通防撞飞行情况下的驾驶员态势感知能力。

(3) HUD 安装于驾驶员头部上方,合成仪连至驾驶舱顶,在不需要的时候,合成仪能够折叠起来。

(4)在进近和着陆期间,驾驶员能够简单地沿预定的下滑道倾斜角(俯角)驾驶飞机飞行,并把航迹线矢量设置到希望的着地点。HUD 中的航迹线矢量能使驾驶员驾驶飞机实现“点”着陆,如果在着地点之前发生偏航或侧滑,则给出重要的提示信息。

(5)在低能见度进近时,驾驶员则可利用 HUD、目视仪表着陆系统(Instrument Landing System, ILS)提供的航向提示信息驾驶飞机。驾驶员的注意力被明确地引导至目视空间适当的点,从而尽早获得进近跑道位置。如果不能满足最低限度标准需要,则可迅速、肯定地中断进近并复飞。

4. 驾驶舱自动化

驾驶舱自动化正在成为一种设计时尚。为了切实降低飞行员的工作负荷,驾驶舱自动化必须关注 3 个关键的工效学问题:功能分配、刺激-反应兼容、飞行员内在操作模型,尽可能实现人与自动化系统的协调配合。驾驶舱自动化在一定程度上减轻了飞行员的体力工作负荷,但是也带来了很多与飞行安全有关的问题,如飞行员情景意识丧失、监控无能、心理负荷加重、自动化系统故障或失效时难以有效恢复人工控制等。问题出自人-机信息交换及协调的中断,主要表现为飞行员无法跟踪、了解、预见自动化系统的运行状态和当前行为,对自动化系统的运行模式产生认知错误,出现模式混淆(mode confusion)现象。问题的根源在于自动化设计与飞行员能力及需求不相匹配,在于忽视人的特性而导致的“过度自动化(over-automation)”或“不当自动化(inappropriate automation)”。

第2章 飞机驾驶舱系统设计理念

当前,民航事业在世界范围内迅速发展。统计资料表明,在过去的10年里,民航飞行架次数翻了一番。随着我国经济的不断发展,人民生活水平普遍提高,民航以其高速性和舒适性成为越来越多人的出行选择。民航是一个高技术集中的行业。民航运输的安全性、高效性和经济性,是多专业共同的研究目标,其中安全性是最基本也是最重要的要求。

波音公司2011年的统计资料表明,世界范围内的民航事故率已经低至每百万架次不足一次。但是在近20年里,民航事故率的下降速度极其缓慢。与此形成鲜明对比的是民航运输规模的迅速发展。在事故率下降停滞的情况下,民航运营架次的迅速增加带来的是民航事故绝对数量的增加。2005年8月至9月间,全球在40天内接连发生了8起重大民航事故,除了法航客机由于机组处置得力使全部人员脱险外,另外7起事故造成了495人死亡,其中425人为机上乘客和机组成员。如果民航事故率的下降继续停滞,按照现在的民航运营架次发展速度计算,到2015年几乎每一周就会发生一起重大事故发生。这对社会公众的心理和民航业本身都是难以承受的。而实际上,对市场而言,民航运输的发展速度仍然不够。美国NASA提出了下一代民航运输计划“NextGen”。该计划旨在提高民航的运营效率。通过改进导航和空中交通管制(Air Traffic Control, ATC)技术,提高民航运输的空域密度,扩大民航运营区域,降低航班延误率,等等。在通用航空领域,出现了“自由飞”的概念。在“自由飞”概念下,除了机场附近空域,飞机需要依靠自身完成航路规划和空中间隔保持。这些以提高运营效率为目标的计划和概念,将为民航安全性带来更大的挑战。在这些客观需求下,民航安全技术必须得到革命性的改进。

这一革命性的改进,将从对人为因素的研究上取得突破。统计资料表明,75%的空难与人为因素有关。在航空机械、电子等技术日趋成熟的今天,人为因素已经取代系统失效成为了民航安全的头号威胁。这其中,飞行机组的人为因素占据了显著的地位。驾驶舱作为飞行机组的工作场所,既是人为因素对飞行安全影响的直接作用域,又是对人为因素影响的最后一道防线。驾驶舱对于飞行安全的作用日益凸显。近年来,围绕驾驶舱与飞行安全和驾驶舱中人机关系开展了大量的研究。这些研究方法侧重各不相同,但都指向同一个要点:必须在设计阶段将出现不利人为因素的可能性降到最低。

对民机驾驶舱的研究可以分为两个大的类别:以技术为中心的研究和以人机关系为中心的研究。以技术为中心的研究侧重于通过发明或改进机载设备,改进驾驶舱的显控技术来提高飞行的安全性和效率。以人机关系为中心的研究重点为驾驶舱中的飞行机组,从人为因素的角度研究飞行机组对于飞行安全的影响,从而得到相应的驾驶舱设计需求。

2.1 以技术为中心的研究

科技进步对提高民航安全性的贡献是巨大的。驾驶舱中系统和功能的不断完善,有效地

改善了民航飞行的安全性。经过几次重要的技术革命,现代大型民机驾驶舱基本实现了“玻璃化”。LED取代了CRT显示器,各类飞行和系统参数通过数据总线实现了综合显示。自动化系统得到了广泛使用。除了自动驾驶仪和自动推力等基本自动控制系统的功能更加完善之外,飞行管理系统(Flight Management System, FMS)的航路规划功能大大提高了飞行的效率和经济性。Fly-by-Wire系统已经成为现代大型民机的标准配备,能够有效防止飞行员的错误操作。近地告警系统(Ground Proximity Warning System, GPWS)以及增强型近地告警系统(Enhanced Ground Proximity Warning System, EGPWS)有效降低了可控飞行撞地事故的发生概率。空中防撞系统(Traffic Collision Avoidance System, TCAS)能够有效预防空中撞击事故的发生。随着传感器技术、计算机技术、通信导航技术的不断进步,驾驶舱中各类系统设备的功能将越来越强大。随着民航运输的发展,更多更复杂的任务将由驾驶舱中的飞行员和自动化系统来完成,由此产生了对新的系统和功能的需求。目前,多种新型驾驶舱显控技术,包括4D显示技术、增强视景显示、光标控制、机载TCAS等等,正在进行实验验证或者已经被最新的机型所采用。

2.2 以人机关系为中心的研究

以技术为中心的研究能够直接产生驾驶舱内的系统设备,但其对飞行安全的影响并不能保证与技术的设计初衷一致。驾驶舱是一个由飞行机组和机器设备组成的复杂系统,决定飞行安全的是整个系统的性能。对这个系统中某一环节的修改,尽管有着提高系统性能的初衷,但实际上却可能给系统埋下安全隐患。人机关系是这个系统的重要特征,只有对驾驶舱中的人机关系有着明确的认识,能够对其进行有效的控制,驾驶舱的设计才能按照预定的目标进行。

以人机关系为中心的研究中,取得成果较为显著的首先是对设计诱发的飞行员人为差错的研究。设计诱发的飞行员人为差错,是指由于驾驶舱人机界面设计的缺陷,导致飞行员在进行操作时易于犯错。在工业生产领域,人为差错很早就得到了重视,产生了很多人为差错辨识方法。驾驶舱的人为差错辨识引入了这些方法,其中定性类的方法如SHERPA(Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach), HAZOP(Hazard and Operability Analysis),等等。定量的方法中最具代表性的是人为差错概率(Human Error Probability, HEP)量化方法,如THERP(Techniques for Human Error Rate Prediction), CREAM(Cognitive Reliability and Error Analysis Method)等。与定性方法相比,定量方法在民航领域使用得较少。美国联邦航空总署(Federal Aviation Administration, FAA)的资讯通告(AC25.1309-1A14)就指出,对于飞行员的差错进行定量计算是不可能的。在综合了多种人为差错辨识方法的基础上,Stanton等人提出了HET(Human Error Template)。HET按照民航的行业特点和工程经验进行设计,是一种专业的民机驾驶舱人为差错辨识方法。人为差错辨识不仅是未来民机设计的重要环节,也是适航验证的必需步骤。

除了人为差错辨识,对人机界面研究的另外一个重点内容是人机界面的评估。在这方面出现了很多方法。其中,基于信息熵理论的人机界面信息的复杂度的计算方法具有较好的应用价值。这类方法获得的是对人机界面的客观的定量的评估结果。同时,信息熵理论采用了概率的形式作为计算基础,在数学理论上能够较好地体现人的特性。

上述对人为差错的研究局限于人机界面上。而驾驶舱中的人机关系远比人机界面所体现的要复杂得多。飞行任务由驾驶舱中的飞行员和自动化系统共同完成,人与自动化系统之间的关系,已经成为影响飞行安全的重要因素。20世纪八九十年代,一系列因人与自动化系统协作出错而造成的事故,如著名的 Cali 空难,引起了业内对人与自动化关系的重视。相关研究表明,飞行员丧失自动化意识(Automation Awareness, AA)和情景意识(Situation Awareness, SA)已经成为自动化系统引入驾驶舱后飞行事故的主要诱因之一。1991年, NASA 发布了技术备忘录,系统阐述了以人为中心的驾驶舱设计理念,明确了人在人与自动化关系中的主导地位。“Crew - Centered”设计理念被业内广泛认可。1996年, FAA 发布了对驾驶舱中人机关系的研究报告。该报告指出了驾驶舱的设计应以提高系统整体性能为目标,明确了从初步设计到评估验证的全部设计过程都应在设计理念的指导下进行。Starter 等人对自动化系统带给驾驶舱的变化进行了详细的分析,指出自动化系统不是降低了飞行员的工作负荷,而是改变了工作负荷的分布;自动化系统为飞行员带来了新的工作负荷和知识需求;自动化系统带来了新的协作需求和飞行员训练需求,同时还引入了新的差错形式;飞行员对自动化的过信任成为新的安全威胁。NASA 的 Degani 等人提出了基于有限状态机的人机交互模型,可以对人机交互过程中的自动化意识的变化进行模拟,从而发现设计中存在的缺陷。针对驾驶舱中的人机功能分配问题开展了一些研究,得到了不同功能分配方案对飞行员的工作负荷和飞行任务执行效果的不同影响。自适应自动化的概念也被引入,对其的研究致力于通过自动化功能的自适应调整,克服目前自动化系统所带来的种种问题。但是自适应自动化的实现前提是获得一定的对人的特性的研究成果,这制约了其发展脚步。对人机关系的研究多是在顶层设计的层面进行,其产生的成果大多是抽象的理念和原则。这使得其在工程实际中的应用效果远不如以技术为中心的研究成果。

对驾驶舱的研究中,出现频度最高的关键词之一是“工作负荷”(Workload)。这其中,对飞行员的心理负荷(Mental Workload, MW)的研究最为活跃。围绕工作负荷这一主题,出现了大量的定性和定量的飞行员工作负荷模型和实验测量方法。NASA 开发了一套 TLX 量表,由飞行员对驾驶舱带来的工作负荷进行评估,是一种广泛采用的工作负荷主观评估方法。在客观测量方面,比较常见的思路是通过人的生理参数变化来估计其心理负荷,包括心跳、脉搏、呼吸、眨眼频率等等。现在研究较多的是脑电势测量和眼动追踪的方法。主、客观方法测量的结果存在着差异,需要综合使用。

无论是进行人为差错辨识,还是处理人与自动化的关系,其难度均来自于人的复杂特性。以对人建模为目标的研究也大量开展。这其中,取得成果较为显著的首先是源自传统人类工效学的对人体尺寸、运动特性的建模。通过对人体的 3D 建模,对驾驶舱设计方案的适用性进行验证,这方面已经较为成熟。但是这部分内容对于提升驾驶舱整体性能的作用有限。对人的认知特性的研究是处理好驾驶舱中人机关系以及降低人为差错的关键。通过使用脑电势测量、眼动追踪等实验方法,对人的认知过程和注意力分配进行建模。为了拓宽人机交互的渠道,增强人机交互的鲁棒性,对新的交互形式进行了研究,其中包括对人的行为进行识别。

对人的认知特性研究取得了一定的成果,但远未产生工程实际效果。实验测量方法一方面脱离了真实的飞行环境,结果的真实程度得不到保证,另一方面实验测得的各类参数与人的心理状态之间的关系难以确定。由于没有可靠的实验验证方法,理论模型得到的结果尚无法使用。对认知特性的研究,以及对人机交互形式的研究,为驾驶舱辅助系统和智能驾驶舱系统