

从驾驶舱设计和适航来减少由设计引发的飞行员人为差错的挑战和途径

Approaches to Reducing Design-Induced Pilot Error Based on Flight Deck Design and Certification

许 为 陈 勇 / Xu Wei Chen Yong

(上海飞机设计研究院,上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

摘 要:

人为差错成为导致民用飞机重大事故的主要原因已经是不争的事实。对人为差错发生的原因及其预防措施已有许多研究和推荐。侧重从民机驾驶舱设计和适航角度,并结合增补的 FAA 和 EASA FAR/CS 25.1302 适航条款,分析和探讨为减少由设计引发的飞行员人为差错所面临的挑战和途径,并对开展这方面的工作提出一系列框架性建议。

关键词:人为差错;人为因素;人机工效学;飞机驾驶舱;适航认证;民用飞机

中图分类号:V221+.91

文献标识码:A

[Abstract] It is an indisputable fact that human error is the main cause induced by major civil aircraft accidents. There have been much studies and recommendations for the causes and prevention induced by human error. Combined with the airworthiness regulations of the FAA and EASA FAR/CS 25.1302, this paper analyzed and discussed the challenges and approaches to reducing design-induced pilot human error, focused on the flight deck design and certification perspectives. Finally, a series of recommendations is provided to develop the work.

[Key words] Human Error; Human Factors; Ergonomics; Flight Deck; Airworthiness Certification; Civil Aircraft

0 引言

在过去二十多年中,全球重大民航事故发生率在稳定地下降。但是,随着民航需求和运输量绝对数的提高,只有进一步降低事故率,才能将民航安全保持在现有公众和舆论可接受的水平^[1]。目前,人为差错是导致约 70% 民航重大事故的主要原因或原因之一^[2-3]。从发生的主体来讲,人为差错可由飞行机组(飞行员)、空管员、设计人员、地面维修人员等引发。从事故源来讲,人为差错可由单一或多种因素交互引发,包括驾驶舱设计、飞行员操作、空中交通管制、地面维修、飞行机组间或与空管间的交流、管理决策以及企业或国家文化等因素。

由此可见,从整个机载人机系统来讲,相对于发展成熟和系统可靠性很高的机载设备系统,人的因素部分可靠性的提高既是很大的挑战,也有更大

的提升空间。安全事故数据表明,由驾驶舱设计引发的飞行员人为差错占有相当大的比例^[1]。针对居高不下的与人为差错相关的民航事故率,FAA 和 EASA 增补了 FAR/CS 25.1302 条款^[4-6]。该条款首次从适航角度就如何减少此类人为差错对设计提出了系统性的适航要求。

本文首先分析了人为差错的分类和各种分析模型,以及它们对减少由设计引发的飞行员人为差错的启发。讨论了民机驾驶舱设计和适航认证中为减少此类人为差错所面临的挑战以及国际航空界的努力。侧重分析了 FAR/CS 25.1302 适航条款的特点,取证、测评技术以及取证中可能面临的一些问题。最后,从驾驶舱设计和适航角度对如何减少此类人为差错提出了一系列框架性建议,包括融合的设计和适航工作流程,人为差错管理设计策略和研究,适航纳入设计的方法,人为差错预测辅助

设计工具,适航取证测评技术以及适航取证的策略。

1 人为差错

1.1 人为差错的分类

人为差错一般分为两种类型,如图 1 所示^[7-9]。第一类是操作者偏离某种规范和标准的无意行为,其中包括执行了错误操作的过失(slip),忽略了某些操作步骤的遗漏(lapse)和由于操作者错误地判断或理解当前操作情景而采取不合适操作的失误(mistake)。第二类是操作者偏离某种规范和标准的故意行为,其中包括在某种情景下操作者故意违反某种规范或标准的违规(violation)。某些失误也属于第二类人为差错。

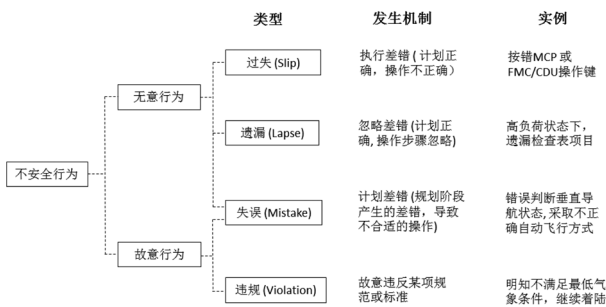


图 1 人为差错的分类、发生机制和实例

1.2 各种人为差错成因和预防分析模型

针对人为差错的成因和预防,航空和学术界根据不同研究取向提出了以下几种主要的模型^[10-11]。首先,Wickens 的认知模型从人类信息加工的一系列心理操作差错角度来分析人为差错,其中包括飞行员对各种飞行相关信息和操作的知觉、监控、情景意识、心理负荷和决策等^[12]。该模型有助于分析飞行员信息加工、操作和决策过程的差错,并指导机载人机界面的设计。

以 SHEL 为代表的人机工效模型强调的是人-机器-操作环境匹配的系统设计方法^[13],认为人为差错的产生是由于三者间的不匹配。该模型强调了飞行员作业,人机界面设计和操作环境之间的交互作用对人为差错的影响。

社会心理模型视飞行操作为一项飞行机组、空管员和地勤维修人员等之间的团队协调工作^[14]。认为团队协调中沟通交流间的断链导致了人为差错的产生。机组资源管理(CRM)培训为减少人为差错所发挥的作用体现了该模型的贡献。

组织模型强调管理、组织决策、培训和飞行操作程序规范等因素对人为差错的影响^[15]。主张事

故的发生是由一系列子事件组成的事故链的累积而致,包括组织因素的失效。这种从宏观组织环境和事故链的角度来分析人为差错的产生具有积极的作用。

Rasmussen 的“技能-规则-知识”认知工程模型则从三种作业绩效层面上将人为差错分为基于技能的差错,基于规则的差错,以及基于知识的差错^[16]。该模型有助于分析人为差错发生的成因和改进人机界面的人机工效设计。

最后,Reason 提出的“瑞士奶酪”(Swiss Cheese)式系统组织模型被广泛地应用在航空界^[17]。该模型系统地整合了以往的各种模型,主张将整个航空领域视为一个复杂的生产系统,而飞行安全就是其产品。系统中各部分必须有效地整合,否则系统事故链中某部分的断链会导致事故的发生。这种系统的失效体现在形似整个系统中不同层面的“瑞士奶酪”的空洞中。

1.3 对减少由设计引发的飞行员人为差错的启发

首先,各种人为差错类型具有不同的发生机制,特定的发生机制给设计干预提供了可能性和途径,人机工效学以及本文侧重关心的是过失、遗漏和失误类人为差错。有效的驾驶舱人机界面设计有利于预防或减少此类人为差错的发生。

其次,充分了解各类人为差错的特征有助于采用合适的设计手段(例如防错和容错设计)来降低发生概率。例如,根据人机工效和认知模型,可通过有效的控制装置或显示机器人机界面的控制方位、形态、触觉等编码方式来减少过失(执行差错)。而对于失误(计划差错),可根据人机工效和 Rasmussen 模型通过提供有效整合的信息来提高飞行员的情景意识和知识型能力,从而采取符合当前飞行任务和环境的操作。

再者,各种人为差错模型根据不同的研究取向为揭示人为差错的成因和预防提供了互补和系统化的对策。航空安全数据分析表明,事故往往是由包括人为差错在内的多种因素的交互而引起,而人为差错的产生也是多因的。正因为事故是由一系列子事件(事故征候)累积而形成的事故链所导致,因此,关键在于如何采用对策(包括设计手段)来切断事故链,从而阻止这些子事件最终发展成为事故。

最后,Dismukes 等人详细分析了在 1991-2000 年期间发生的以人为差错为主要原因的民机事故^[18]。结果表明,即使有经验的飞行员有时也不可

避免会犯差错,尤其在高工作负荷状态下。因此,优化的机载人机界面设计要能帮助飞行员进行有效的人为差错管理,包括探测差错、预防差错、减少差错、容错(系统容错设计)和从差错中恢复,从而阻断人为差错发展成为事故。

2 驾驶舱设计中为减少人为差错所面临的挑战

2.1 现有设计过程和方法的缺陷

针对居高不下的与人为差错相关的民航事故率,早在1996年FAA就牵头启动了一项颇具影响力的民航驾驶舱人机界面的人机工效学研究^[19]。该研究发现,由于没有充分考虑飞行员的能力(生理、体力、心理/信息加工等)和设计对飞行员操作绩效的影响,导致机载人机界面设计过分复杂和缺乏足够的人机工效,从而可能导致人为差错的产生。主要是因为设计过程缺乏对有效地人为差错管理设计的支持,对贯彻“以人为中心”的设计理念缺乏具体有效的方法、工具和标准,设计过程和决策缺少足够的人机工效学考虑或专业人员的参与,以及设计员和试飞员缺乏足够的人机工效学知识和技能等。

2.2 从传统的防错设计过渡到有效的人为差错管理设计

传统机电式机载设备人机界面设计中所采用的一些防错设计为预防和减少人为差错的发生发挥了作用。例如,操纵装置的形状编码、互锁设计、位移限定装置等。“玻璃驾驶舱”所带来的数字综合化交互式人机界面将这些传统的防错设计提高到有效的人为差错管理设计的新高度,然而现役机载人机界面的设计还没有完全体现这样的新要求^[19]。例如,FMC/CDU中复杂多层次的菜单结构,非规范化设计的按键排列,难记且不一致的英文缩写指令符号,对某些重要飞行参数的输入缺乏执行前核准或复原功能等,这些设计有可能增加飞行员的认知工作负荷,并导致人为差错的发生。

2.3 自动化驾驶舱的代价

虽然民航驾驶舱自动化提高了飞行操作的准确性和可靠性、航运经济性和整体飞行的安全性等,但它的发展从一开始就是以技术为导向,而非遵循以飞行员为中心的人机工效学理念。由此带来自动驾驶系统的人机界面设计了过分复杂的自动化模式和控制方式,带来产生人为差错的隐

患^[19-21]。受设计兼容性、培训成本和适航风险等因素影响,后续新机型的设计并没有根本性的改进。例如,在垂直导航(VNAV)飞行操作时,垂直速度(V/S)、飞行高度改变(FLCH)、VNAV航路、VNAV速度以及飞行路径角(FPA)等众多的控制方式增加了飞行员的认知工作负荷,并可能导致人为差错(方式选择错误)的产生。

2.4 新增机载设备与人机界面的复杂性

新增的机载设备虽然为飞行安全提供了进一步的保障,但如果没有与原有机载设备实现有效的系统化整合则可能增加人机界面的复杂性^[18]。例如,原有机载设备通过各种信息加工通道(听觉、视觉、触觉等)给飞行员提供了众多的告警信号,然而,由于逐步增加的新机载设备(例如TCAS、EGPWS)的告警信号并没有与原有各类告警信号实现有效的系统化整合,有时会给高负荷应急状态下的飞行员造成信息过载,从而导致产生人为差错的隐患。

2.5 新发展可能带来的新隐患

航空业的新发展如果没有有效设计的支持也有可能带来产生人为差错的新隐患。为满足空中交通运输量和密度增加的要求,新一代空管系统(例如NextGen)必然将部分空管自主权下放给飞行机组^[18]。一方面,飞行员需要更多的驾驶舱自动化来协助完成新增的作业,例如,驾驶舱交通信息显示器(CDTI)^[22]。另一方面,新增的工作量有可能增加了飞行员的认知工作负荷,可能引进产生人为差错的新隐患。另外,全球航空业的快速发展给飞行操作环境(驾驶舱,空管等)引进了更加多元化的文化元素,这也可能带来产生人为差错的新隐患^[1]。

3 从适航来减少人为差错所面临的挑战和国际适航当局的努力

3.1 25部适航条款中存在的问题和FAR/CS 25.1302的增补

国际适航当局就如何从适航来应对由设计引发的飞行员人为差错的问题一直在进行着不懈的努力。受FAA人机工效学研究小组报告的影响,FAA(1999)启动了一个人为因素协调工作组(HWG),成员包括FAA、JAA(EASA前身)、波音和空客等单位^[1]。HWG的研究发现,现有各种适航条款(不仅仅是25部)和咨询通报(AC)存在约250项与人机界面设计和人为因素有关的问题。其

中,35项重要问题主要集中在现有适航条款和AC没有就驾驶舱设计如何充分地考虑飞行员能力、如何有效地支持飞行员作业绩效和人为差错管理提出全面系统的适航要求以及指导。

进一步地,25部以往对人为因素的适航要求是按照“以系统设备和功能为导向”的方式在相关条款中做出一般性和定性的要求,例如,25.1301、25.671(a)、25.771(a)、25.777、25.1523等。HWG认为局部修改25部的部分条款无法系统地解决所存在的问题,因而有必要按照“以飞行员为中心”的人机工效学方法来增补一项新条款。

HWG(2004)最后建议25部新增由HWG所拟定的25.1302新条款以及相应的AC^[1]。EASA已于2007年采纳该条款(CS25.1302,AMC25.1302)^[5]。FAA在向航空业界广泛征求意见后于2013年5月正式发布了内容一致的FAR 25.1302以及AC25.1302-1^[4,6,23]。中国商飞C919型号项目也已将25.1302条款纳入适航认证^[24]。

3.2 25.1302条款的特点

25.1302条款不同于以往的“以系统设备和功能为导向”的各种条款(25.1523除外),25.1302将整个驾驶舱中与飞行员飞行任务相关的设备和功能视为一个整合交互的人机系统,以飞行员任务为导向,以能否支持飞行员有效和安全地完成规定的飞行任务(作业绩效)为目标,规定了这些和设备功能的设计必须与飞行员的能力相匹配,并能有效地支持飞行员作业绩效和人为差错管理,从而最大限度地减少由设计引发的飞行员人为差错^[25-26]。

25.1302条款对相关设备和功能的设计提出了一系列人机工效学要求,包括提供合适的显示器和控制器以及有效的设计(信息呈现,可用性等)来支持各种飞行员任务、情景意识设计、设备和功能的可预测性和可控性、机载人机系统和界面整合设计以及人为差错管理设计等^[4-6]。

3.3 25.1302条款适航取证面临的一些挑战

3.3.1 适航取证经验

作为一项新的适航条款,即使国际适航当局(例如FAA)也缺乏对实际取证工作指导的丰富经验。FAA在25.1302的发布公告中也明确表示要与航空界共同累积经验和细化所建议的符合性方法(MOC)^[6]。考虑到人为因素取证工作的特点,申请人和局方对条款要求的理解,MOC的选择等都需要一定的实践和经验的积累^[25]。

3.3.2 取证范围

25.1302将机载设备和功能的取证范围与以飞行安全为目标的飞行任务相结合,这种以飞行员任务为导向并且跨设备和功能的方法为取证范围的确定带来新的考虑。从一定意义上讲,几乎包括了绝大多数驾驶舱设备。不同于传统驾驶舱机电式人机界面,数字综合化交互式人机界面(例如显示器界面菜单、触屏交互控制模式等)对人为差错管理提出了新的要求。在人机工效学界,对25.1302的取证范围也有不同的意见^[27]。另外,如何处理25部中原有与人为因素相关的条款的取证与25.1302取证的关系,都对如何确保必要的取证,但又避免重复取证从而提高取证效率,提出了新的要求。

3.3.3 取证测评方法

25.1302条款强调通过飞行员任务作业来测评设计对飞行员作业绩效和人为差错管理的影响,这就要求取证测评应该考虑到飞行操作情景和任务特征。人机工效学对于操作情景(工作领域环境)的测评方法正在不断地完善中^[28]。再则,受研究样本的限制,人机工效学预测和测评人为差错的一些方法和工具的可信度和效度有待进一步提高^[29-30]。过分地依赖现有的试飞员主观评价法会影响取证结果的客观性,即使AC25.1302-1(包括AMC25.1302)也没有对具体的测评方法和工具提供详细的建议^[23]。

3.3.4 评价人

作为适航认证评价人的试飞员,通常采用主观评价法来测评相关的人为因素条款,航空界已质疑这种方法的客观性和有效性^[27]。试飞员的培训、知识结构和现有的测评方法并不能保证他们(包括试飞工程师)能全面客观和有效地评价人机界面设计的人机工效设计。目前,试飞学院的培训也仅仅提供了主观评价的方法。另外,从“以飞行员为中心”的人机工效学方法角度出发,由于试飞员通常并不参与日常的航线飞行服务,所以他们并非是所测产品(驾驶舱)真正意义上的最终用户,他们的测评有时并非能完全真实地反映航线飞行员的经验和需求。

4 对通过设计和适航来减少由设计引发的飞行员人为差错的建议

4.1 加强申请人和局方的合作

考虑到申请人和局方对新条款的适航经验,以

及人为因素条款取证本身的特点,申请人和局方应尽早就 25.1302 条款要求、取证范围、MOC 和可接受的设计要求等达成共识^[25]。这样有利于尽早将适航要求纳入具体的设计中。另外,如同 FAA 所建议,局方的早期参与和申请人主动向局方分享设计、分析和模拟器试验等数据可为后期的正式取证工作建立“信用分”,并提高取证效率^[23]。

4.2 将适航条款要求纳入设计

4.2.1 将条款要求嵌入设计全过程

25.1302 条款对现有设计过程和方法提出了新的要求。现有的设计过程和方法应体现“以人中心”的人机工效学设计理念,而不是传统的“以技术为中心”的设计理念。这种整合过程包括人机工效学专业人员的早期参与,人机界面的设计满足用户需求,快速原型和早期模拟验证等^[31-32]。这种设计过程符合 25.1302“以飞行员任务为导向”的适航理念和取证方法,有助于充分考虑设计与飞行员能力相匹配,并且有效地支持飞行员作业绩效和人为差错管理。

4.2.2 将条款要求落实在具体的设计和企业标准中

参照 AC25.1302-1(第 5 章)所建议的有关显示器、控制器、系统行为和功能分配以及人为差错管理等具体设计要求,将 25.1302 条款要求具体地“分解”为各设备和功能的设计要求以及可接受的设计指标^[23]。在不同设计节点,将适航要求落实在具体的设计、分析和测试中。这样有利于在设计阶段(而不是在适航取证阶段)对不符合条款的设计做到早发现早更正,以避免后期重大设计问题的出现^[25-26]。另外,应该将 25.1302 条款要求纳入驾驶舱人机界面设计的人机工效学企业标准,有利于长期指导设计和跨机型的一致性设计。

4.2.3 将条款要求纳入机载设备供应商的设计

作为驾驶舱机载设备的系统整合集成者,民机制造商应在供应商选择流程中,充分评估设备人机界面的人机工效设计,并确保其设计符合 25.1302 条款要求。这样也为各种机载设备功能交互使用和系统整合设计符合 25.1302 条款提供了前提保障,分担和降低适航风险。

4.3 将人为差错管理融入设计

制定企业人为差错管理(探测差错,预防差错,容错和差错恢复)的设计策略和指导原则,并落实在具体的驾驶舱人机界面设计要求和企业标准中。

例如,空客就人为差错管理制定了指导性文件,从组织管理和设计层面上制定了一系列的设计原则^[33]。另外,在具体的设计中应该充分体现有效的人为差错管理理念。例如,通过系统逻辑设计、余度设计、系统自检等方法来达到防错和容错设计,通过优化的人机界面设计帮助飞行员迅速探测差错并能从差错中恢复。

4.4 在各种设计节点上早期诊断和预测人为差错

充分利用有效的人为差错诊断和预测方法以及工具,从而在各设计节点上将潜在的由设计引发的差错在设计阶段降至最低。现有的人为差错诊断和预测工具大多是基于飞行员任务分析的方法,这与 25.1302 条款的“以飞行员任务为导向”的方法是一致的,因此有助于在设计阶段检查适航要求的落实。初步的实验结果表明,基于 25.1302 开发出的差错检查表现出比其他方法更高的预测灵敏度^[34]。

4.5 有效开展适航取证工作

4.5.1 充分理解条款要求和准确确定取证范围

充分理解 25.1302 条款的假设和例外条件以及取证“筛选”考虑因素,这样有利于确定这一跨设备和功能条款的要求和取证范围^[4-5]。这些预设和例外条件包括:飞行员培训和飞行资质,违规或非违规差错,是否是手动控制中产生的技能性差错,飞行操作使用或地面维修使用的机载设备等。取证“筛选”考虑因素包括机载设备设计的新颖性、整合性和复杂性程度,设备是否与飞行员操作任务相关,设备和功能是否影响飞行员作业绩效,飞行安全和人为差错管理等。并且,对这种影响的考虑不仅仅针对单个设备和功能,也包括多个设备和功能之间的交互作用。

4.5.2 开展飞行员作业绩效和任务分析的工作

这项工作是由 25.1302 条款“以飞行任务为导向”的特点所决定。其中包括一般操作体力型作业和认知作业分析。该分析有助于充分理解设备和功能、飞行任务以及操作情景,从而帮助确定与飞行任务相匹配的机载设备和功能的取证范围。

4.5.3 选择合适的 MOC 和取证测评方法

参照 AC25.1302-1,重点考虑各种 MOC 的特点和适用范围,设计特征(新颖程度,复杂性和整合性),飞行安全的影响等因素来选择合适的 MOC^[23,25]。选择合适或者开发有效的测评飞行员作业绩效和人为差错管理的取证方法和工具。结

合现有的主观评价法,从而能更客观地反应实际航线飞行员的体验,并获得具有足够效度和可信度的取证结果。

4.5.4 合理计划和安排取证工作

参照 AC 25.1302-1 以及所建议的工作流程,编写人为因素取证计划书(HFCP)^[35]。申请人和局方应尽早协商取得共识。对于试飞项目,应首先进行模拟舱预备测试,根据结果适当调整方案。人机工效学专业应参与整个取证过程,FAA 目前正在编写人机工效学专业人员在适航认证中的责任和委托人制度的指导文件^[6]。针对 25.1302 条款可能较多的取证工作量,可通过设计过程中的“取证信用分”方法有效地分担取证工作。此外,在 25 部其他相关人为因素条款的取证中也可以分担部分 25.1302 的取证工作。

4.6 开展有关人为差错的研究

研究要为型号设计和适航服务。首先,研究人为差错管理的技术以及在驾驶舱设计中的应用。其次,研究开发出一系列方法和工具,包括在设计阶段能有效诊断人为差错隐患的人为差错预测和分析的设计辅助工具,能有效对人为差错成因进行分析的事故分析模型和工具,能提供足够效度和可信度并且易用的人为差错取证测评方法和工具。

4.7 加强设计员和试飞员的培训

由设计引发的飞行员人为差错从某种程度上是“设计员差错”。增强设计员的人机工效学知识可以帮助设计员将这些知识运用在设计中,在设计阶段将“设计员差错”降至最低。加强试飞员人机工效学的培训,并且提供有效的人机工效学测评工具,这样试飞员能作出更客观有效的测评。FAA 为试飞员提供了专门的人机工效学培训材料^[36]。

5 结论

综上所述,笔者提出了通过设计和适航减少由设计引发的飞行员人为差错的工作指导框架,如图 2 所示。该工作框架强调了设计和适航之间相互依存和支持的工作过程。从宏观上讲,需要一个申请人和局方密切合作,整合人机工效学方法和现有设计过程,创造人机工效学专业与设计员和试飞员分享人机工效学知识的工作环境。同时,企业人为差错管理设计策略和人为差错研究可以对整项工作提供策略性的支持。

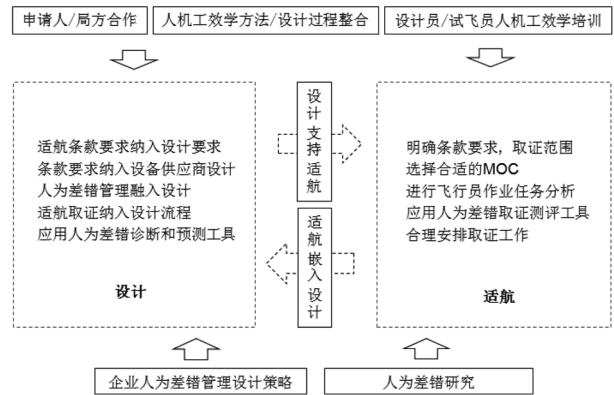


图 2 从设计和适航来减少由设计引发的飞行员人为差错的工作指导框架

在设计方面,将适航纳入设计过程和具体的设计 requirements 中,并采用有效的人为差错诊断和预测辅助设计工具在设计阶段尽可能消除产生人为差错的隐患。在适航方面,明确条款要求,开展飞行员任务分析,准确划定取证范围,选择适合的 MOC,并采纳有效的人为差错取证测评方法,然后,有效合理地计划和安排取证工作。

最后,尽管全面有效地减少人为差错从而降低民航事故发生率需要从人为差错发生的各个主体和事故源出发来考虑综合系统的方法,然而从设计和适航来减少由设计引发的飞行员人为差错必将会从源头上为进一步提高飞行安全作出贡献。

参考文献:

- [1] Human Factors - Harmonization Working Group. Flight Crew Error/Flight Crew Performance Considerations in the Flight Deck Certification Process, Human Factors-HWG Final Report, 2004.
- [2] Boeing Commercial Airplanes Group. Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents: Worldwide Operations 1959-2007. Seattle WA; Boeing, 2008.
- [3] Civil Aviation Authority. Global Fatal Accident Review 1997 - 2006 (CAP 776), London, Civil Aviation Authority, 2008.
- [4] Federal Aviation Regulations. Part 25 - Airworthiness Standards: Transport Category Airplanes, Amendment 138, 2013.
- [5] European Aviation Safety Agency. Certification Specifications for Large Aeroplanes (CS-25), Amendment 3, 2007.
- [6] Federal Aviation Administration. 14 CFR Part 25, Section 25.1302, Installed Systems and Equipment for Use by the Flightcrew (Amendment 25 - 138). Federal Register, 2013,

Vol. 78, No. 86:25840-25846.

[7] Christopher Wickens, Justin Hollands, Raja Parasuraman & Simon Banbury. *Engineering Psychology & Human Performance* (4th Edition), Pearson, 2012.

[8] Don Harris. *Human Performance on the Flight Deck*, Ashgate, 2011.

[9] 张垠博. 人为差错对飞行安全影响的研究[J]. 科技信息, 2011, 22: 805-807.

[10] 杨家忠, 张侃. 民用航空中的人误分类与分析[J]. 人类工效学, 2003, 9(4): 41-44.

[11] Douglas Wiegmann & Scott Shappell. *A Human Error Approach to Aviation Accident Analysis*. Ashgate, 2003.

[12] Christopher Wickens & John Flach. *Information Processing*. In E. L. Wiener and D. C. Nagel (Eds), *Human Factors in Aviation* (pp. 11-55), Academic Press, 1988.

[13] Ernie Edwards. *Introductory overview*. In E. L. Wiener and D. C. Nagel (Eds), *Human Factors in Aviation* (pp. 3-25), Academic Press, 1988.

[14] Robert Helmreich & Clayton Foushee. *Why crew resource management? Empirical and theoretical bases of human factors training in aviation*. In E. L. Wiener, B. G. Kanki and R. L. Helmreich (Eds), *Cockpit resource management* (pp. 3-45). Academic Press, 1993.

[15] Frank Bird. *Management Guide to Loss Control*. Institute Press, 1974.

[16] Jens Rasmussen. *Skills, rules, knowledge: signals, signs and symbols and other distinctions in human performance models*. *IEEE Transactions: System, Man & Cybernetics*, SMC-13, 1983: 257-267

[17] James Reason. *Human error*[M]. New York: Cambridge University Press, 1990.

[18] Key Dismukes, Benjamin Berman & Loukia Loukopoulos. *The Limits of Expertise*. Ashgate, 2007.

[19] Federal Aviation Administration, *Report on the Interfaces between Flightcrews and Modern Flight Deck Systems*. Washington D. C.: Federal Aviation Administration, 1996.

[20] 许卫. 有关自动化飞机驾驶舱的人机工效学问题[J]. 国际航空, 2004, 5: 49-51.

[21] Wei Xu. *Identifying problems and generating recommendations for enhancing complex systems: Applying the abstraction hierarchy framework as an analytical tool*. *Human Factors*, 2007, 49(6): 975-994.

[22] Paul Krois, Dino Piccione & Tom McCloy. *Commentary on NextGen and Aviation Human Factors*. In Eduardo Salas & Dan Maurino (Eds), *Human Factors in Aviation* (2nd edi-

tion), Academic Press, 2010.

[23] Federal Aviation Administration. *Advisory Circular AC25.1302-1: Installed Systems and Equipment for Use by the Flightcrew*. Washington, DC: Department of Transportation, 2013.

[24] 党亚斌. C919 的翱翔之道[J]. 大飞机, 2012, 1: 74-79.

[25] 许为, 陈勇. 民用客机人机工效学适航认证及对策[J]. 民用飞机设计与研究, 2013, 2: 24-30.

[26] 罗青. 运输类飞机人为因素适航评审过程概述[J]. 科技信息, 2013, 21: 83-84.

[27] Don Harris. *Human Factors for Flight Deck Certification: Issues in Compliance with the new European Aviation Safety Agency Certification Specification 25.1302*. *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation, Series A*, 2010, 42(1): 11-20.

[28] Michael Feary, Dorrit Billman, Xiuli Chen. *Linking Context to Evaluation in the Design of Safety Critical Interfaces*. *Human-Computer Interaction. 15th International Conference of HCI (Proceedings, Part I)*, Las Vegas, NV, USA, 2013: 193-202.

[29] Neville Stanton, Paul Salmon, Guy Walker. *Human Factors Methods*, Chapter 5. *Human error identification methods*. Ashgate, 2005.

[30] Valerie Gawron. *Human Performance Workload, and Situational Awareness Measures Handbook* (2nd edition). CRC Press, 2008.

[31] 许为. 人机工效学在大型民机驾驶舱研发中应用现状和挑战[J]. 人类工效学, 2004, 10(4): 53-56.

[32] 许为, 陈勇. 人机工效学在民用客机研发中应用的新进展及建议[J]. 航空科学技术, 2012, 6: 18-21.

[33] Airbus. *Flight Operations Briefing Notes, Human Performance and Error Management*, FOBN Reference: FLT OPS - HUM_PER - SEQ 07 - REV 01, 2005.

[34] Neville A. Stanton, Don Harris?, Paul M. Salmon, et al. *Predicting Design Induced Pilot Error using HET (Human Error Template) - A New Formal Human Error Identification Method for Flight Decks*. *Aeronautical Journal*, 2006, 110(1104): 107-115.

[35] Federal Aviation Administration. *Guidance for Reviewing Certification Plans to Address Human Factors for Certification of Transport Airplane Flight Decks*, FAA Memorandum, ANM-99-2, 2002.

[36] Kim Cardosi & Stephen Huntley. *Human Factors for Flight Deck Certification Personnel. Final Report for FAA*, 1993.