

飞行座舱人因设计中的眼动追踪技术应用

姬鸣^{1,2}, 解旭东^{1,2}, 邱燕^{1,2}

(1.陕西师范大学 心理学院, 西安 710062;

2.陕西省行为与认知神经科学重点实验室, 西安 710062)

摘要: **目的** 结合飞行人机交互设计和视觉认知特征, 提出了基于眼动追踪技术的人因设计与评估方法, 使驾驶舱仪表显示设计更符合人的认知需求, 提高人机工效。**方法** 通过对国内外相关文献的研究和分析, 总结归纳了飞行仪表布局的认知交互机制、界面设计评估机理及人因设计构思的生成机制, 分析了眼动追踪技术在航空仪表设计认知和创新技术上的变化及未来发展趋势。**结论** 系统探讨了眼动追踪技术在飞行座舱仪表设计认知与创新过程中存在的问题和解决思路, 分析了适应飞行员视觉认知特征的座舱仪表显示方式, 以及采用眼动追踪技术评估触控交互仪表设计的方法体系。同时, 在眼动技术运用过程中融合多感觉通道信息参数, 提升了设计师的主观认知和不确定性的定量建模方法, 为驾驶舱仪表的人因设计提供了科学依据。

关键词: 飞行座舱仪表; 人因设计; 眼动追踪技术; 视觉认知特征

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)18-0084-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.18.010

Application of Eye Tracking Technology in Human Factor Design of Flight Instruments

Ji Ming^{1,2}, XIE Xu-dong^{1,2}, QIU Yan^{1,2}

(1.School of Psychology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China;

2.Shaanxi Key Laboratory of Behavioral and Cognitive Neuroscience, Xi'an 710062, China)

ABSTRACT: Combining flight human-computer interaction design and visual cognitive characteristics, an eye movement tracking technology based on human factor design and assessment method were proposed to make the design of cockpit instrument display more urgently meet human cognitive needs and promote man-machine ergonomics. Based on the research and analysis of relevant literature at home and abroad, the cognitive interaction mechanism of flight instrument layout, the evaluation mechanism of interface design and the generation mechanism of human factor design idea were summarized, and the changes and future development trend of eye movement tracking technology in aviation instrument design cognition and innovation technology were analyzed. Systematically the eye tracking technology in flight cockpit instrumentation design problems and solution in the process of cognition and innovation were discussed, the display methods of cockpit instrument panel that complying with pilots visual perception characteristics were analyzed, as well as the method system using eye tracking technology assessment touch interaction instrument design. At the same time, in the eye movement technology multi-sensory information channel parameters were used in the process of fusion, To improve the quantitative modeling method of designers' subjective cognitive uncertainty and provide scientific basis for human factor design of cockpit instruments.

KEY WORDS: flight cockpit instrumentation; human factor design; eye tracking technology; visual cognitive feature

收稿日期: 2021-07-10

基金项目: 国家社会科学基金项目 (19BSH038)

作者简介: 姬鸣 (1978—), 男, 甘肃人, 博士, 陕西师范大学心理学院教授, 主要研究方向为复杂社会技术系统中的人因失误、风险感知、情境意识及安全文化, 针对特殊职业的心理选拔、认知和行为训练, 人机交互中的用户体验、人因设计及可用性测试。

安全是航空领域永恒的主题。从技术角度而言,良好的航空工业设计是保障飞行安全,提高操作绩效的重要环节。早期的设计方案大多是由技术的可行性决定,忽视了人机工效问题^[1]。随着航空工业技术水平的不断进步,人的操作能力被弱化,信息加工及决策的能力愈发突出。目前,人的因素是制约飞行安全的主要因素,“人—机—环”的交互性问题不断凸显。因此,就需要基于“以人为中心”的设计理念,在航空工业中不断优化能够适应人的仪器设备、设计有效的人机交互技术,并根据人机工效学的角度进行评估,以满足人的需求。

视觉是操作者接收信息时最重要的感觉通道。研究表明,人机交互过程中,大约 80% 的信息由视觉通道提供给操作者并进一步加工^[2-6]。在操作者与飞行座舱系统的交互过程中,视觉信息的感知与加工更为重要。以飞行员为例,飞行任务中绝大多数的系统状态与参数通过仪表传递给飞行员,飞行员则必须依靠有效的视觉感知与视觉注意分配来处理座舱内的各种信息^[7-10],维持良好的情境意识,从而做出正确的决策与操作。因此,基于人的视觉特征进行有效的界面设计评估及人机交互系统开发,可以帮助操作者提升视觉信息获取效率,切实提高人机工效,保障操作者安全高效的工作。

眼动追踪是研究视觉过程的一项可靠技术,在人机工效学的研究中由来已久。眼动追踪数据作为一种生理指标,在界面设计有效性评估中常与其他指标,如绩效指标、自我评价指标等结合使用^[2]。利用眼动追踪进行评估的优势在于其具有较高的时间和空间分辨率,对视觉过程的变化十分敏感,能够客观反映视觉注意分配与视觉模式。例如平均注视时长(Average Fixation Duration)和注视率(Fixation Rate)能够表征个体的视觉注意的程度与注意分配;注视顺序与眼动热图(Heatmap)能够反映界面布局的有效性 with 合理性;瞳孔直径可以用来评估个体认知负荷^[11]。此外,在航空人机交互系统的开发中,融合了眼动追踪的新兴交互技术例如眼控交互技术及融入眼动数据的特征识别技术,也是目前人机交互研究的热点,并在航空设计中逐渐得到应用^[12-13]。

本文回顾了近年来航空工业设计中,眼动追踪技术如何应用于界面设计评估及人机交互技术系统的开发,期望读者能够从中得到借鉴与启发。最后对眼动追踪技术未来在航空领域内的应用提出了展望。

1 基于眼动追踪的飞行仪表布局与设计评估

飞行座舱是飞行员与飞机进行交互的重要场所,仪表显示界面是飞行员获取信息的重要媒介。通过眼动追踪技术的评估可以为飞行仪表的整体布局和显示界面的设计效果提供证据。本节分别介绍眼动追踪是如何运用于仪表总体布局和各种常见仪表显示界

面的设计与评估。

1.1 驾驶舱仪表系统布局评估

飞行员在任务中需要通过大量的仪表获取与当前任务相关的有效信息,合理的驾驶舱仪表布局可以提高人机交互的水平。

飞行仪表布局的设计与视觉注意有着密切的联系。在 20 世纪中期,国外研究者就依据飞行员监视仪表时的注视转移对仪表布局进行了评估,基于此提出了驾驶舱仪表 T 型布局的原则。这种布局完全满足了飞行员快速准确扫描仪表并优先考虑飞机姿态的要求。随着技术的进步,仪表显示系统从最初的机电仪表系统改进到集成数字化电子仪表系统,进而过渡到了如今的整体大屏幕综合模块仪表系统。这个过程中,技术的进步推动了仪表之间的整合显示,各个仪表的形状、排布及距离等要素在不断优化和改进,但飞行仪表布局设计始终遵循 T 型布局及邻近兼容性(Proximity Compatibility Principle)的原则,见图 1。眼动追踪技术对仪表布局优化与改进的效果评估起到了积极作用。杨坤等人(2016 年)研究了传统机电仪表分离式布局、显像管显示集中布局、数字化电子仪表集成布局在飞行任务中对飞行员眼动的影响,证实了仪表布局的集成化演变对于人机交互的优化^[14]。具体而言,仪表布局的优化明显缩短了对各仪表的扫视轨迹长度。从不同的飞行阶段来看,在直线爬升阶段飞行员的注意力在速度表、姿态表和高度表之间分配,注视转移主要发生在速度表和姿态表之间。基于此视觉特征与邻近兼容性原则,波音飞机的集成化设计的飞行仪表能够满足常用仪表相邻水平排布,这比传统排布的机电仪表更适合在直线爬升使用。在平直飞行和水平转弯阶段,注意力分配和转移主要发生在姿态表和垂直速度表上。基于波音飞机的集成化设计允许基本飞行仪表在一块液晶显示屏上呈现,因此这种布局更符合飞行员视觉加工,并且缩短了该过程中的视觉扫描长度。

针对通用航空中传统仪表系统与集成化电子仪表显示系统的可用性,Wright S 和 O'Hare D(2015 年)从工作绩效与主观评价的角度研究了两者的优劣^[15]。基于此,凡明坤等人(2018 年)从工作负荷的角度出发,进一步采集生理指标,发现同一飞行任务中被试对集成化电子仪表系统的注视时间更短、工作负荷更小,证实了集成化电子仪表系统的有效性^[16]。

此外,邻近兼容性原则也被运用在客舱加压系统(Cabin Pressurization System)的设计布局评估当中。客舱加压系统界面设计与安全事故关系密切,Li W C 等人(2019 年)从提高操作者在人机交互中的情境意识角度,评估了不同显示方式的加压系统对交互过程中情境意识的影响^[17]。发现以某波音飞机为例加压系统的数字化显示符合邻近兼容性原则,其在中央仪表上的显示无需被试重新定位视线即可获得。因此,

将加压系统分散的指针显示重新设计为集成化数字显示能够满足以人为中心的设计。

1.2 驾驶舱显示界面设计评估

迄今为止，大量的飞行座舱采用集成化电子仪表系统，通过数字化液晶显示屏，将众多的飞行参数与信息集中整合、分类显示。集成化电子仪表系统界面通常由 6 块液晶屏幕构成，2 名飞行员前方各放置 1

套主飞行显示器与导航显示器。中间有 2 块上下排布的屏幕，分别为显示发动机参数与告警信息的飞机电子集中监视系统（Electronic Centralized Aircraft Monitor, ECAM）或发动机指示和机组警告系统（Engine Indication and Crew Alerting System, EICAS）。以某空客飞机为例，1 区域为主飞行显示器，2 区域为导航显示器，3 区域为 ECAM，见图 2^[18]。



a 机电式仪表系统



b 集成数字化电子仪表系统



c 大屏幕综合模块仪表系统

图 1 不同的仪表系统

Fig.1 Different instrument systems



图 2 集成化电子仪表系统布局

Fig.2 Layout of integrated electronic instrument system

集成化的方式在各显示界面中融合了大量的信息。因此,除了具有良备的仪表布局以外,符合操作者需求的界面设计同样重要。通过眼动技术对各个显示器内部界面设计进行评估与优化,以满足人的视觉特征,同样是提高人机工效,保证飞行员拥有良好情境意识的重要一环。以下通过眼动追踪技术对不同类型显示界面设计的评估进行了总结。

1.2.1 主飞行显示器设计评估

在现代集成化电子仪表设计中,主飞行显示器(Primary Flight Display, PFD)包含飞机状态和自动驾驶模式的基本飞行信息,同样遵循T型布局原则,以某波音飞机为例,包括空速、高度、姿态、航向和飞行模式指示器(Flight Mode Annunciation, FMA),见图3。相关研究表明,PFD是商业飞行员分配注意资源最多(大约31%)的区域^[19-20]。

从早期的航空业开始,飞机设计工程师就一直在使用自动化来减少飞行员的工作负荷。现代飞行的自动化系统通常有 20 多种不同的操作模式,然而 FMA 的基本原理几乎没有改变。FMA 在 PFD 的最上方呈现,分为 3 栏,以文本的方式向飞行员提供基本飞行参数控制的信息。一定程度上,自动化的引入不是降低了飞行员的工作负荷,而是改变了工作负荷,飞行员从操纵者的角色向监控者转变。随着更复杂的自动化概念的出现和自动油门的引入,一个基本的飞行参数现在可以由多个系统控制,飞行员识别某个参数是否由自动化系统控制,需要将 FMA 文本联系起来理解。此外, FMA 较多依赖于中央视觉反馈的设计,不能支持飞行员在执行与飞行相关的并行任务时追踪系统变化。这使得利用 FMA 理解自动化的情况及探测自动驾驶模式变得更加复杂和困难。因此,需要开发一种更简单、更容易理解的飞行模式提示方式。

为了解决这一问题，一些针对 FMA 的设计被不断开发和评估。

一种改进方式为依靠外周视觉线索以自下而上的方式捕获和引导注意,可以有效运用增强 FMA (Enhance FMA) 和外周条带 (Ambient Strip) 2 种依靠外周视觉反馈设计的 FMA 优化设计^[21]。另一种改进方式是将 FMA 与 PFD 上的飞行参数相关联。这种设计模式保留了原有的 FMA 文本栏,在 PFD 面板中被自动化控制的参数周围添加绿色边框,以突出显示被当前飞行模式控制的参数,增强 PFD 上的视觉线索。因此,只要查找绿色边框是否存在,就可以立即确定某个参数是否由自动化控制。研究者在不同的模拟飞行阶段中比较了依据这种方式改进后的 FMA 与传统 FMA 的可用性,发现调整后的 FMA 可以减少飞行员的注视时长,降低了工作负荷,提高了飞行员对飞行模式转换的情境意识,同时研究者通过眼动热图分析发现,改进后的 FMA 使飞行员的注意更多分布在原始数据中,这对于飞行安全至关重要^[22-23]。可见,在 PFD 中应用增强视觉指示,通过将 FMA 集成到原始数据中,突出适当视觉元素,能够促进飞行员注意的合理分配,帮助飞行员更快、更准确地识别飞行模式。

考虑到飞行员对使用模式控制面板 (Mode Control Panel, MCP) 跟踪自动化较为熟悉, Li W C 等人 (2016 年) 设计了一种遮光板嵌入式的 FMA (Glareshield Mounted FMAs, GM-FMA) 设计模式, 具体是将 FMA 移动到遮光板上, 固定在 MCP 的左侧。并且在某波音飞机模拟机上通过模式变化检测任务对这种设计方式进行了评估, 发现 GM-FMA 能够缩短飞行员的平均注视时间, 促进飞行员注意的合理分配, 提高情境意识^[24]。

1.2.2 告警系统设计评估

告警系统主要用于唤起飞行员注意、说明事件性质和指导飞行员采取正确行动。告警系统最普遍的作用是注意力获取,即试图将飞行员的注意力引导到需要他们识别、分析和解决的信号偏差上。

目前告警系统同样采用了集成化设计。以波音系列飞机为例,EICAS 是飞行员最常关注的视觉告警系统,其功能是显示发动机相关信息,并在需要时显示警报信息。有研究者提出,通过驾驶舱界面处理特情的任务可以简化通过识别外部环境的线索来寻找特定的解决方案的过程。如果一种新的设计可以减少搜索空间和时间,工作人员将有更多的时间解决外部环境的问题。Li W C 等人(2019 年)设计了一种集成化 EICAS,其特点是能够整合机组警告信息和快速参考手册中的紧急事件指令,因此飞行员可以直接获得所需的信息而不需要进一步的视觉搜索,见图 4^[25]。并且利用模拟飞行软件模拟了双发飞机起飞后单引擎火警的特情情境,对传统 EICAS 和集成化 EICAS



图 3 主飞行显示器
Fig.3 Main flight display



图 4 2 种 EICAS 设计
Fig.4 Two EICAS designs

进行了评估。结果发现集成化设计增加了 EICAS 所显示的信息，需要更深层次的认知处理，增加了对 EICAS 的注视频率和注视时间。这反映了飞行员与集成化 EICAS 交互时，能够将更多的注意力集中到关键任务，情境意识水平得到了提升。

1.2.3 平视显示器设计评估

平视显示器（Head-Up Display，HUD）是指将仪表指示器和主要飞行参数投影到驾驶员的头盔前或风挡玻璃上的一种显示设备，使得驾驶员向前平视前方视景的同时，能看到主要驾驶仪表及相关重要的飞行参数，以某波音飞机为例，见图 5。HUD 首先被应用于军事航空领域，近年来在民航设计中也得到了广泛的使用。对军事航空的研究发现，HUD 和驾驶舱外部提供的信息是成功完成任务的主要支持。研究者通过平均注视时间和注视率等指标证实，在执行空对空和空对地任务中，HUD 是分配注意资源最多的区域^[26-27]。在 HUD 及其中各仪表的可用性方面，刘志方等人于 2018 年通过眼动追踪技术，对下视显示器（Head-Down Display，HDD）与 HUD 的可用性在不同经验的群体中进行了评估^[28]。其中，地平仪（Altitude Indicator）信息对飞行任务最为重要，其注视时间与注视率相较于其他区域更高。相较于

HDD，被试对 HUD 的平均注视时间更短，具体分析交互作用后发现，飞行员对 HUD 系统上的地平仪平均注视时间减少，对 HUD 系统上的非地平仪眼跳次数更多。这说明 HUD 系统主要降低了对地平仪知觉编码的困难程度，并更有利于整合地平仪与其他仪表的信息。

值得注意的是，相关研究发现 HUD 对人机工效的影响并不总是有效的，某些情况下也存在缺陷。刘志方等人（2018 年）的研究中，还考察了被试的经验因素，发现经验丰富的被试使用 HDD 反而可以维持更好的飞行精确性，HUD 的使用导致有经验的被试在操作中的高度偏差增加，而 HUD 更适合新手进行训练^[28]。白杰等人（2017 年）基于进近过程中的跑道入侵探测过程进行研究，发现 HUD 与 HDD 不会显著改变被试对不同飞行仪表与参数的注视时间和注视次数，并且相较于 HUD 系统，HDD 系统的使用使得飞行员在注视轨迹更加合理，更容易探测跑道入侵；此外，HUD 的使用还使得飞行员更加容易疲劳，这是由更小的瞳孔直径所反映的^[29]。

针对 HUD 系统的不足，人们尝试从不同的角度对其进行优化与评估。第 1 种方式是视景系统的应用。增强视觉系统（Enhanced Vision Systems，EVS）与综合视觉系统（Synthetic Vision Systems，SVS）是驾驶舱显示新式视景技术，将成为未来飞行显示系统的一个组成部分。Ellis K K E 等人（2011 年）在仪表进近转向目视着陆的模拟环境中分别将 SVS 应用于 HUD 与 PFD，研究 SVS 的不同布置对飞行员情境意识的支持能力^[30]。发现将 SVS 应用于 HUD 可以有效保持飞行员的注意力，使飞行员在 PFD 和驾驶舱外进行注意切换所花费的时间最小化。而将 SVS 应用到 PFD 中能够使飞行员快速扫视 PFD 获得必要信息，随后再次过渡到驾驶舱外，获得目视跑道条件，以增加飞行员情境意识。

第 2 种方式是优化 HUD 显示特性，减轻视觉疲劳。杨坤和杜晶（2018 年）基于行为指标与眼动注视轨迹、平均注视时间与瞳孔直径数据，评估了 HUD 字符颜色对 HUD 和 HDD 相容性的影响^[31]。发现绿



图 5 HUD 功能与位置示意
Fig.5 HUD function and location

色与青色的字符编码能够使飞行员在仪表切换后保持较好的搜索效率,情绪更加稳定。此外,在 HUD 中添加合理的告警显示也是一种有效手段。当告警位置位于 HUD 中间偏右的高度指示区附近时,被试对此区域视觉注视点分配较多,工作绩效更好,能够保持良好的情境意识^[32]。

1.3 无人机仪表界面设计评估

无人机(Unmanned Aerial Vehicle)已成为当前航空情报、监视和侦察行动的关键元素。与有人机相比,无人机的主要特点是操作员在地面基站上控制无人机,缺少躯体感觉输入,操作员更加依赖多种类型的传感器(如数字视频传感器、红外摄像机、超光谱传感器等)的视觉信息。无人机的人机界面也与有人机不同。以捕食者(Predator)无人机为例,其将传统仪表改变为一种叠加在外部视景上的数字文本显示。攻角、空速、高度和垂直速度等信息以上下移动的文本形式在屏幕中展示,而航向和引擎转速只给出固定的数字显示,见图 6^[33]。

然而,这种显示方式并不是无人机界面的最优设计,对无人机事故的分析也支持了这一考虑。因此,研究无人机飞行员的视觉扫描模式,对无人机显示界面的有效性进行评估至关重要。Tvaryanas A P (2004 年)通过记录飞行员的眼动轨迹,研究了飞行员使用捕食者无人机显示器时的视觉扫描模式^[33]。研究发现,和飞行员与有人机交互时的视觉特征相似,姿态指示器是无人机操纵员最常扫描的仪器,但他们对无人机界面上垂直速度指示器(VSI)的注视比例比有人机的 VSI 注视比例更高,与对无人机界面空速、航向、攻角仪表的注视比例相比也是如此。这不仅是由于无人机操作延迟,更是由于数字文本纵向移动并不能提供更多的信息,所以需要更多的注视,进而造成了认知效率的低下。此外,操纵员没有调整他们对发动机仪表的扫描行为,以补偿听觉或触觉信息的损失。这些结论对优化无人机界面布局有重要参考价值。

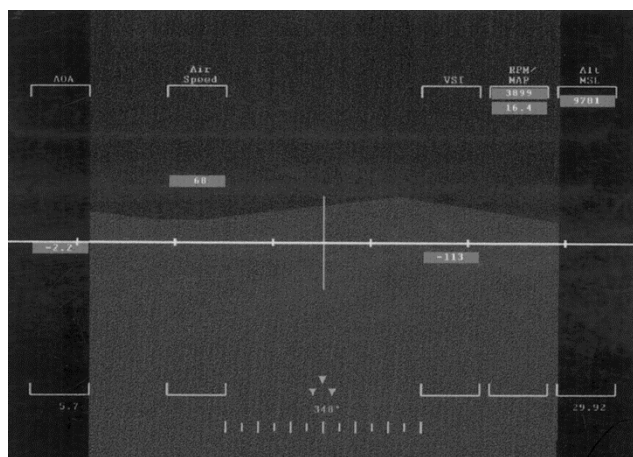


图 6 捕食者无人机显示界面
Fig.6 Predator UAV display interface

自动化信任是人机交互的重要问题,自动化信任的程度直接影响人们对自动化系统的使用效果。无人机作为侦察和情报收集的重要辅助决策工具,操作员与无人机交互时的自动化信任影响重大。Lu Yi-du 和 Sarter N (2019 年)模拟了无人机操纵任务,要求被试在自动化的协助下监控无人机视频,并进行目标识别。实验操纵了自动化可靠性,结合眼动数据、主观评价和行为绩效数据,以实现对操作员信任水平变化的推断和追踪^[34]。眼动追踪数据显示,除平均眼跳幅度外,大多数指标均受系统可靠性的显著影响。自动化较低的可靠性与更长的总注视时间、更高的转移率、总注视和转移计数、每秒扫视路径长度的增加相关。提供可靠性信息的能力也会影响被试对系统的信任水平,这在平均扫视幅度中得到了反映。因此,眼动跟踪可以有效且实时推断操作员信任水平的变化,并作为其他指标的有利补充。

随着技术的普及,民用无人机的需求也日益增长。在民用无人机视频观察过程中,对视觉模式的研究可以为不同应用类型的无人机飞行设计提供帮助。Krassanakis V 等人(2018 年)对无人机视频观测过程中的视觉行为进行了研究。通过眼动热图分析了无人机视频监测时不同外部环境元素对视觉的影响^[35]。这对于无人机界面设计和评估有很大的借鉴意义。

2 融合眼动追踪的航空人机交互技术

在航空人因设计与评估中,眼动追踪技术已经成为了研究者广泛采用的可靠评价方法。随着智能化的发展与眼动追踪技术的逐渐成熟,眼动设备在保留一定精度的同时体积得以不断缩小。一些研究者在现有的基础上进行突破,不再局限于眼动追踪技术的可用性评估功能,创造性地将其作为人机交互的媒介。目前,越来越多的人因设计研究开始尝试将眼动追踪技术融入飞行座舱人机交互系统的开发当中,成为智能化人机系统的一部分。

2.1 状态识别技术

自适应人机交互系统是人机交互研究的热点。其中,改进飞机人机交互系统,提高对飞行员的状态识别的能力,是实现飞机人机交互智能化的主要目标之一,能够适应系统提供理论与技术支持。脑机接口的研究中,传统的脑电信号已经广泛运用于特征识别过程。随着眼动追踪技术的发展,眼动设备所获取的数据越来越准确,眼动数据也逐渐成为状态识别的重要指标之一。

梁永强等人(2018 年)从人与飞机仪表界面交互的角度出发,提出了一种基于眼动特征的操作者交互行为意图预测模型。运用支持向量机(SVM)算法成功预测了被试与界面的 5 种交互意图。然而有研究者认为,由单一的眼动或脑电指标得到的特征识别效

果有待提升^[36]。随后,研究者进一步将眼动指标与脑电指标结合,发现融合了眼动指标后,基于 SVM-DS 的数据融合分析平均准确率(92.34%)比仅靠脑电数据的识别准确率(76.29%)得到了显著提升^[13]。Wang Xiao-shuang 等人(2020年)在模拟机训练任务中,将眼动数据的直观性与脑电、心电数据的真实性结合,基于多模态指标,通过支持向量机算法对被试在高保真模拟飞行任务中行为与决策能力进行了区分,整体识别准确率高达76%。其中,眼动指标提取出的平均注视时间是特征分类的重要指标之一^[37]。

2.2 眼控交互技术

眼动追踪技术除了用于收集、分析眼动数据外,还可以作为交互系统的一种输入方式。有学者提出了一种视觉增强用户界面设计理念(Gaze-enhanced User Interface Design),将眼动作为人机交互的主要方式,而键盘和鼠标则作为其补充^[38]。目前,航空工业设计已经开始尝试将眼动作为输入工具,实现基于用户界面的人机交互。

在军用航空领域,眼动追踪可以帮助飞行员实现多任务控制,提高操作效率。在一些新式战机的设计当中,已经开始尝试将眼动技术与战斗机飞行员的头盔显示器进行整合,飞行员可以通过视线,达到跟踪、瞄准、锁定目标,以及控制火控系统进行发射的目的。这种基于眼动的瞄准技术在速度和准确性上具有优势,能够缓解飞行员手部操作压力,从而降低任务负荷,对于战斗力的提升有着重要意义^[39-40]。在军用无人机方面,随着无人机技术的发展,操控员操作需求不断增加。传统键鼠交互模式难以胜任无人机技术迅速发展的需求,无人机的控制正在向多模式操作发展。在这种背景下,眼动追踪技术不仅是无人机多模态交互系统的重要组成部分,也是该系统人因评估子系统的重要模块^[41]。

在民用航空领域,Alonso R 等人(2013年)对眼动设备作为空中交通管制与监视器交互的输入设备可行性进行了分析与验证。被试通过眼动注视时长实现了与显示器中元素的交互。发现眼动输入的精度与速度都具有较好的可靠性与可接受性,缓解了空管手部操作的压力^[42]。此外,在民用无人机方面,Wang Jie 等人(2021年)设计了一种可穿戴式人机界面,通过加工人眼不同的运动输出的电信号精确控制民用无人机的运动方向^[43]。Pavan K 等人(2020年)则开发了眼动仪与头戴显示器集成的交互技术,允许操作者通过眼动注视控制无人机摄像头,使其使用性能比遥控操作更好^[44]。

3 以往研究局限及将来研究展望

眼动追踪技术已经被广泛应用于航空人因设计领域,在界面可用性评估与人机交互技术开发方面发

挥了重要作用。然而,近年来航空工业设计理念不断进步,一些新技术正在被应用于座舱系统当中。研究者提出,未来飞行座舱需要满足显示智能化、信息集中化、操作简洁化、布局人性化的特征。在交互设计方面,需要满足座舱大图像全景智能显示与触控操作的要求,最终实现多感觉输入与输出的沉浸式虚拟座舱设计^[45-47]。因此,未来座舱人机交互系统的发展趋势对眼动追踪技术的应用提出了更高的要求,而在当前航空人因设计领域内通过眼动追踪技术开展的相关研究还存在一些不足与问题。

1) 当前研究进度相对滞后于驾驶舱显示系统技术与理念的更新。近年来,智能化系统的需求与未来空战环境的复杂性日益增加,促使了驾驶舱人机系统的加速变革。大屏幕视觉界面与综合模块显示系统是驾驶舱人机界面发展趋势,目前已经在新一代民用、军用飞机中得到应用^[48]。大屏座舱显示设备使得界面中信息集成化程度更高、容纳的信息量显著增加,同时也导致飞行员视觉搜索范围扩大。因此,对传统显示设备评估与优化所得到的结论,在大屏座舱显示方式中是否仍然适用是目前值得探究的问题。然而,目前大多数人机界面设计与评估依然基于经典6小块液晶屏组成的数字化集成电子显示系统开展,对新一代显示界面关注较少,研究的时效性与前瞻性尚有欠缺。飞行员在更大的显示范围下的视觉模式会发生什么样的变化?如何基于新环境下飞行员的视觉需求完善界面设计?这些亟待解决的问题对提升大屏幕座舱界面布局和设计的合理性至关重要。因此,在座舱界面设计变革的潮流下,未来的研究有必要将关注点逐渐转移到对大屏界面显示方式的开发与评估上。

2) 研究过程忽视多感觉通道信息的相互影响。尽管视觉信息是人机交互中的主要信息来源,但飞行员仍然需要综合其他感觉通道的信息,才能对当前情境形成全面、准确的判断。然而,不同感觉通道的信息加工会相互影响。相关研究已经证明,加工视觉信息时听觉信息的同时输入会改变人机交互时的视觉模式^[49-51]。相较于实验室环境,实际操纵过程中飞行座舱环境更为复杂,听觉、触觉和躯体感觉等通道输入的信息量更大。然而,如何根据不同飞行情境下多感觉通道信息的相互作用优化界面设计,是目前研究尚未解决的问题。随着未来座舱人因设计越来越强调多感觉信息的整合,将视觉通道抽离出来进行人机界面研究也显得较为片面。因此,在未来的相关研究中,有必要将各个通道作为整体看待,综合考虑多种情境下不同通道感觉信息的整合加工对飞行员视觉的影响,实现更加可靠的人机交互系统开发与评估。

3) 在眼控交互技术的应用方面,眼动设备自身的技术性问题仍需解决。利用眼动辅助操作者控制的眼控交互技术在人机交互系统中有很大的应用价值,

由于设备本身的技术性问题, 复杂情况下使用眼控技术输入的稳定性与精确度存在不足。实验室桌面式眼动仪的采样率可以达到 1 000 Hz, 目前成熟的便携式眼动设备所具备的采样率无法超过 200 Hz。此外, 在操作过程中的头动因素也是影响眼动设备识别精度的因素之一。由于眼控交互技术需要将眼动设备与座舱系统结合, 如何在满足便携性的同时保障精确性, 是眼控技术应用过程中需要攻克的问题。因此, 未来可以从提高眼动设备本身性能与调整界面显示元素特征 2 个角度出发, 在各种环境下验证眼控技术交互功能的可靠性, 将它在人机交互中的价值发挥到最大。

4 结语

眼动追踪技术在航空工业中有着巨大的应用潜力, 虽然我国对于结合眼动指标的人机工效研究起步较晚, 但是目前也取得了许多重大突破。随着科技的进步和理念的提升, 航空工业设计正在朝着开放式控制、智能化、网络化方向发展, 以人为中心的设计理念始终是设计的核心。因此, 在当今的时代背景下, 应紧跟技术发展潮流, 革新观念, 深入探讨眼动追踪技术在人机交互评估与应用中如何发挥最大化作用。进而从人机工效学角度, 为保障飞行安全与航空工业设计和制造提供先进的理论与技术支撑, 推动《中国制造 2025》计划目标的实现。

参考文献:

- [1] 刘伟, 袁修干, 庄达民, 等. 驾驶工效综合评定座舱实验台的研制[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(11): 9-12.
LIU Wei, YUAN Xiu-gan, ZHUANG Da-min, et al. Development of a Simulated Cockpit for Synthetic Ergonomic Evaluation of Pilot[J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(11): 9-12.
- [2] GERATHEWOHL S. Leitfaden der Militärischen Flugpsychologie[M]. München: Verlag Für Wehrwiss, 1987.
- [3] 范晓丽, 周前祥, 柳忠起, 等. 基于视觉搜索的飞机显示界面设计原则[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(2): 216-221.
FAN Xiao-li, ZHOU Qian-xiang, LIU Zhong-qi, et al. Principle of Plane Display Interface Design Based on Visual Search[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(2): 216-221.
- [4] 孙瑞山, 汪莹. 飞行模拟器环境下飞行员视觉特征[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(7): 897-901.
SUN Rui-shan, WANG Ning. Visual Features of Pilot Based on Markov Chain under Flight Simulator[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(7): 897-901.
- [5] 王宁, 余隋怀, 肖琳臻, 等. 考虑用户视觉注意机制的人机交互界面设计[J]. 西安工业大学学报, 2016, 36(4): 334-339.
WANG Ning, YU Sui-huai, XIAO Lin-zhen, et al. Human-Computer Interface Design Considering Visual Attention[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2016, 36(4): 334-339.
- [6] 葛列众, 许为. 用户体验: 理论与实践[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2020.
GE Lie-zhong, XU Wei. User Experience-Theory and Practice[M]. Beijing: China Renmin University Press, 2020.
- [7] 柳忠起, 袁修干, 刘伟, 等. 飞行员注意力分配的定量测量方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(5): 518-520.
LIU Zhong-qi, YUAN Xiu-gan, LIU Wei, et al. Quantitative Measuring Method of pilots' Attention Allocation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(5): 518-520.
- [8] 刘志方, 苏衡, 吕飒飒, 等. 歼击机模拟作战飞行任务中的情境意识测量与比较: 基于眼动的证据[J]. 人类工效学, 2015, 21(6): 17-21.
LIU Zhi-fang, SU Heng, LYU Sa-sa, et al. Measurement and Comparison of Situation Awareness in Air Combat Environment-Evidence from Eye Movement[J]. Chinese Journal of Ergonomics, 2015, 21(6): 17-21.
- [9] LI W C, YU C S, BRAITHWAITE G, et al. Pilots' Attention Distributions between Chasing a Moving Target and a Stationary Target[J]. Aerospace Medicine and Human Performance, 2016, 87(12): 989-995.
- [10] WEI Heng-yang, ZHUANG Da-min, WANYAN Xiao-ru, et al. An Experimental Analysis of Situation Awareness for Cockpit Display Interface Evaluation Based on Flight Simulation[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26(4): 884-889.
- [11] 陈晓皎, 薛澄岐, 陈默, 等. 基于眼动追踪实验的数字界面质量评估模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(1): 38-42.
CHEN Xiao-jiao, XUE Cheng-qi, CHEN Mo, et al. Quality Assessment Model of Digital Interface Based on Eye-Tracking Experiments[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2017, 47(1): 38-42.
- [12] 朱富丽, 杨磊, 姬波. 显示界面空间属性对眼控交互的影响[J]. 航天医学与医学工程, 2020, 33(6): 491-496.
ZHU Fu-li, YANG Lei, JI Bo. Effect of Spatial Attributes of Display Interface on Eye Control Interaction Space[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2020, 33(6): 491-496.
- [13] 王崴, 赵敏睿, 高虹霓, 等. 基于脑电和眼动信号的人机交互意图识别[J]. 航空学报, 2021, 42(2): 324290.
WANG Wei, ZHAO Min-rui, GAO Hong-ni, et al. Human-Computer Interaction-Intention Recognition Based on EEG and Eye Tracking[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(2): 324290.
- [14] 杨坤, 高温成, 白杰. 基于眼动指标的飞行仪表布局

- 评估研究[J]. 人类工效学, 2016, 22(3): 1-6.
- YANG Kun, GAO Wen-cheng, BAI Jie. Research on the Evaluation of Flight Instruments Layout Based on Eye Movement Indices[J]. Chinese Journal of Ergonomics, 2016, 22(3): 1-6.
- [15] WRIGHT S, O'HARE D. Can a Glass Cockpit Display Help (or Hinder) Performance of Novices in Simulated Flight Training?[J]. Applied Ergonomics, 2015, 47: 292-299.
- [16] 凡明坤, 刘星, 孙有朝, 等. 不同仪表显示界面对飞行员工作负荷的影响[J]. 航空计算技术, 2018, 48(1): 38-40.
- FAN Ming-kun, LIU Xing, SUN You-chao, et al. Effect of Different Instrument Display Interface on Pilots' Workload[J]. Aeronautical Computing Technique, 2018, 48(1): 38-40.
- [17] LI W C, ZAKARIJA M, YU C S, et al. Interface Design on Cabin Pressurization System Affecting Pilot's Situation Awareness-the Comparison between Digital Displays and Pointed Displays[J]. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries, 2020, 30(2): 103-113.
- [18] 房玮. 浅谈民航飞机驾驶舱显示器的演变[J]. 科技资讯, 2016, 14(20): 55-56.
- FANG Wei. Talking about the Evolution of the Cockpit Display of Civil Aviation Aircraft[J]. Science & Technology Information, 2016, 14(20): 55-56.
- [19] HO H F, SU Hui-sheng, LI W C, et al. Pilots' Latency of First Fixation and Dwell among Regions of Interest on the Flight Deck[C]. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [20] SARTER N B, MUMAW R J, WICKENS C D. Pilots' Monitoring Strategies and Performance on Automated Flight Decks-an Empirical Study Combining Behavioral and Eye-Tracking Data[J]. Human Factors, 2007, 49(3): 347-357.
- [21] NIKOLIC M I, SARTER N B. Peripheral Visual Feedback-a Powerful Means of Supporting Effective Attention Allocation in Event-Driven, Data-Rich Environments[J]. Human Factors, 2001, 43(1): 30-38.
- [22] HORN A, LI W C, BRAITHWAITE G. Human-Centered Design of Flight Mode Annunciation for Instantaneous Mode Awareness[C]. Cham: Springer International Publishing, 2018.
- [23] LI W C, HORN A, SUN Zhen, et al. Augmented Visualization Cues on Primary Flight Display Facilitating Pilot's Monitoring Performance[J]. International Journal of Human-Computer Studies, 2020, 135: 102377.
- [24] LI W C, WHITE J, BRAITHWAITE G, et al. The Evaluation of Pilot's Situational awareness during Mode Changes on Flight Mode Annunciators[C]. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [25] LI W C, ZHANG Jing-yi, LE MINH T, et al. Visual Scan Patterns Reflect to Human-Computer Interactions on Processing Different Types of Messages in the Flight Deck[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2019, 72: 54-60.
- [26] YU C S, WANG E M, LI W C, et al. Pilots' Visual Scan Patterns and Situation Awareness in Flight Operations[J]. Aviation, Space, and Environmental Medicine, 2014, 85(7): 708-714.
- [27] YU C S, WANG E M, LI W C, et al. Pilots' Visual Scan Patterns and Attention Distribution during the Pursuit of a Dynamic Target[J]. Aerospace Medicine and Human Performance, 2016, 87(1): 40-47.
- [28] 刘志方, 陈朝阳, 苏永强, 等. 飞机仪表显示系统的可用性评估:眼动和绩效数据证据[J]. 航天医学与医学工程, 2018, 31(3): 341-346.
- LIU Zhi-fang, CHEN Zhao-yang, SU Yong-qiang, et al. Usability Evaluation of Instruments Display Format in Aircraft-Evidences from Eye Movements and Performances[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2018, 31(3): 341-346.
- [29] 白杰, 葛祥雨, 杨坤. 飞行员探测跑道入侵的眼动模式分析[J]. 航天医学与医学工程, 2017, 30(5): 327-332.
- BAI Jie, GE Xiang-yu, YANG Kun. Analysis of Eye Movement Patterns in Pilot's Detection of Runway Incursion[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2017, 30(5): 327-332.
- [30] ELLIS K K E, KRAMER L J, SHELTON K J, et al. Transition of Attention in Terminal Area NextGen Operations Using Synthetic Vision Systems[J]. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 2011, 55(1): 46-50.
- [31] 杨坤, 杜晶. 基于眼动指标的平视显示器字符颜色对平视显示器和下视显示器相容性影响分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(14): 96-101.
- YANG Kun, DU Jing. Analyses on the Influences of Head up Display Character Color on Head Up Display and Head down Display Compatibility Based on Eye Movement Index[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(14): 96-101.
- [32] 白杰, 王曼. 位置编码下平视显示器告警显示工效学问题探究[J]. 航空维修与工程, 2021(3): 68-71.
- BAI Jie, WANG Man. Study on Alarm Display Ergonomics of Head-Up Display Based on Position Coding[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2021(3): 68-71.
- [33] TVARYANAS A P. Visual Scan Patterns during Simulated Control of an Uninhabited Aerial Vehicle (UAV)[J]. Aviation, Space, and Environmental Medicine, 2004, 75(6): 531-538.
- [34] LU Yi-du, SARTER N. Eye Tracking-a Process-Oriented Method for Inferring Trust in Automation as a function of Priming and System Reliability[J]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 2019, 49(6): 560-568.
- [35] KRASSANAKIS V, SILVA M, RICORDEL V. Monitoring Human Visual Behavior during the Observation of

- Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) Videos[J]. Drones, 2018, 2(4): 36.
- [36] 梁永强, 王崴, 瞿珏, 等. 基于眼动特征的人机交互行为意图预测模型[J]. 电子学报, 2018, 46(12): 2993-3001.
- LIANG Yong-qiang, WANG Wei, QU Jue, et al. Human-Computer Interaction Behavior and Intention Prediction Model Based on Eye Movement Characteristics[J]. ACTA ELECTRONICA SINICA, 2018, 46(12): 2993-3001.
- [37] WANG Xiao-shuang, GONG Guang-hong, LI Ni, et al. Decoding Pilot Behavior Consciousness of EEG, ECG, Eye Movements via an SVM Machine Learning Model[J]. International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing, 2020, 11(4): 2050028.
- [38] 张丽川, 李宏汀, 葛列众. Tobii 眼动仪在人机交互中的应用[J]. 人类工效学, 2009, 15(2): 67-69.
- ZHANG Li-chuan, LI Hong-ting, GE Lie-zhong. Application of Tobii Eye Tracker in Human-Computer Interaction[J]. Chinese Journal of Ergonomics, 2009, 15(2): 67-69.
- [39] 史卫民, 王庆敏, 刘秋红, 等. 视觉跟踪技术及其应用的研究进展[J]. 海军医学杂志, 2014, 35(1): 72-74.
- SHI Wei-min, WANG Qing-min, LIU Qiu-hong, et al. Research Progress of Eye Tracking Technology and Its Application[J]. Journal of Navy Medicine, 2014, 35(1): 72-74.
- [40] 卢姗姗, 王庆敏, 姚永杰, 等. 视觉追踪技术在外国军事航空领域中的应用[J]. 飞机设计, 2015, 35(3): 61-64.
- LU Shan-shan, WANG Qing-min, YAO Yong-jie, et al. Application of Eye Tracking Technology in Foreign Military Aviation[J]. AIRCRAFT DESIGN, 2015, 35(3): 61-64.
- [41] 陈必然, 曹建, 梁捷, 等. 多模式无人机人机交互系统设计[J]. 飞机设计, 2018, 38(1): 28-33.
- CHEN Bi-ran, CAO Jian, LIANG Jie, et al. Design of Multi-Mode UAV Human-Computer Interaction System[J]. AIRCRAFT DESIGN, 2018, 38(1): 28-33.
- [42] ALONSO R, CAUSSE M, VACHON F, et al. Evaluation of Head-Free Eye Tracking as an Input Device for Air Traffic Control[J]. Ergonomics, 2013, 56(2): 246-255.
- [43] WANG Jie, XU Jian-ming, CHEN Tao, et al. Wearable Human-Machine Interface Based on the Self-Healing Strain Sensors Array for Control Interface of Unmanned Aerial Vehicle[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 321: 112583.
- [44] PAVAN K, BALASUBRAMANYAM A, PATIL A K, et al. GazeGuide: An Eye-Gaze-Guided Active Immersive UAV Camera[J]. Applied Sciences, 2020, 10(5): 1668.
- [45] 孔渊, 陆虎敏. 未来战斗机座舱显控系统发展动态[J]. 航空电子技术, 2006, 37(3): 33-37.
- KONG Yuan, LU Hu-min. Development Trends of Cockpit Display and Control System of Future Fighters[J]. AVIONICS TECHNOLOGY, 2006, 37(3): 33-37.
- [46] 樊谕涵. 未来民机座舱显示控制系统初探[J]. 电子测试, 2018(18): 16-18.
- FAN Yu-han. Cockpit Display Control System for Civil Aircraft in the Future[J]. ELECTRONIC TEST, 2018(18): 16-18.
- [47] 王庆伟. 新一代军用飞机航空电子系统发展趋势与发展现状[J]. 教练机, 2019(3): 5-11.
- WANG Qing-wei. The Development Trend and Current Situation for Avionics System of New Generation of Military Aircraft[J]. TRAINER, 2019(3): 5-11.
- [48] 符积弘. 面向任务的现代飞机座舱人机界面信息显示机理研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- FU Ji-hong. Research on Task Oriented Information Display Mechanism of Modern Cockpit Human Machine Interface[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [49] KEARNEY P, LI W C, YU C S, et al. The Impact of Alerting Designs on Air Traffic Controller's Eye Movement Patterns and Situation Awareness[J]. Ergonomics, 2019, 62(2): 305-318.
- [50] LU T, LOU Z, SHAO F, et al. Attention and Entropy in Simulated Flight with Varying Cognitive Loads[J]. Aerospace Medicine and Human Performance, 2020, 91(6): 489-495.
- [51] STRAYER D L, FISHER D L. SPIDER: A Framework for Understanding Driver Distraction[J]. Human Factors, 2016, 58(1): 5-12.