

文章编号:1674-8190(2020)03-430-07

飞机座舱显示控制界面设计

熊李娜

(中国航空无线电电子研究所 通信导航系统部, 上海 201100)

摘要: 飞机座舱显示控制系统作为人机接口,一直是航空工效学关注的对象,提高飞机座舱显示控制系统的可视性和方便操作性,是其设计时所追求的目标。综合近年来飞机座舱显示控制界面的相关研究现状,创建一种飞机座舱显示控制界面设计方法,并探讨软件设计中涉及到的一些关键技术。该方法集成在 C++ 系统中,在飞机座舱设计的各个阶段分别引入飞行员三维人体几何模型和运动学模型;结合视景仿真建模理论和相关软件,实现飞行视景及座舱显示控制界面的开发;提出飞机座舱显示控制界面设计的综合评价方法,以及各种评价指标的筛选与评价体系的确立。该显示控制界面设计方法能够通过模拟飞行员的操作动作与计算视角、可达性、操纵力等参数,较好地反映出飞行员的运动学和动力学特性,提高了界面友好性、操作直观性、简便性。

关键词: 飞机座舱;显控系统;界面设计; Microsoft Visual C++; MFC; OPENGL

中图分类号: V249.1

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2020.03.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Interface Design of Aircraft Cockpit Display and Control System

XIONG Lina

(Communication and Navigation System Department, China National Aeronautical Radio
Electronics Research Institute, Shanghai 201100, China)

Abstract: As a human-machine interface, cockpit display and control system has always been the focus of aviation ergonomics. To improve the visibility and convenience of the cockpit display and control system is the goal of its design. Based on the research progress of cockpit display control interface in recent years, a design method of cockpit display control interface is established, and some key technologies involved in software design are discussed. The method is integrated into C++ system, and the pilot 3D human body geometric model and kinematic model are introduced in each stage of cockpit design. Combined with the theory of visual simulation modeling and related software, the development of flight visual and cockpit display control interface is realized. A comprehensive evaluation method for the design of cockpit display and control interface is proposed, as well as the selection of various evaluation indexes and the establishment of evaluation system. This design method can better reflect the kinematic and dynamic characteristics of the pilot by simulating the pilot's operation action and calculating the parameters such as the angle of view, accessibility and control force, and improve the friendly interface, intuitive operation and simplicity.

Key words: aircraft cockpit; display and control system; interface design; Microsoft Visual C++; MFC; OPENGL

收稿日期:2019-10-28; 修回日期:2020-05-27

通信作者:熊李娜, xionglina2006@126.com

引用格式:熊李娜. 飞机座舱显示控制界面设计[J]. 航空工程进展, 2020, 11(3): 430-436.

XIONG Lina. Interface design of aircraft cockpit display and control system[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(3): 430-436. (in Chinese)

0 引言

飞机座舱显示控制系统作为人机接口,其设计的好坏,直接关系到飞行员能否做出正确的判断和决策,以及能否合理的控制,从而保障飞行员能够安全、顺利地完成任务。

航空电子系统结构经历了从分立式航空电子系统、集中式航空电子系统、联合式航空电子系统到综合共享式航空电子系统的发展过程^[1-3]。座舱显示技术经历了由机电到电子、由专用到多功能、由分立到系统的漫长发展过程。显示器历经简单机电仪表、机电伺服仪表、综合指引仪表、阴极射线管电子显示器、平板显示器系统,以及正在研制、探索、验证的触敏显示控制器、头盔显示器和清晰大屏幕显示控制器等发展阶段^[1,4]。座舱显示系统也随着技术的发展不断发展前进。

飞机座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,飞行员通常只是把直观知觉到的显示信息作为认知判断和操作的基础^[5]。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,而且情景意识明显增强^[6]。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。用平视仪、下视仪、头盔显示器、三维听觉显示器和触觉显示器构筑一个虚拟增强型座舱,让飞行员在其中执行一项模拟空中截击任务,歼灭有两架战斗机支援的四辆地面坦克。结果发现,使用增强型座舱的飞行员在战场停留时间、对地攻击次数、任务获胜次数、敌我损毁对比方面比常规座舱占有明显优势,而且增强型座舱能够提高飞行员的情景意识、降低飞行员工作负荷,更受飞行员的欢迎^[7]。

(1) 国外研究现状

早在20世纪80年代中期,美国空军就与麦道公司签订合同,利用模拟器研究21世纪战斗机的座舱技术。为此,麦道公司的座舱设计专家首次提出了“大图像”(Big Picture)的概念,其主导思想是利用大屏幕显示器实现超视距全局态势感知,以头盔显示器作为实现视距内战术态势感知的主显示器,并采用握杆操纵控制(HOTAS)、触摸控制、头

位跟踪与控制等技术,实现综合显示控制^[8-9]。X-32验证机的座舱达到了“座舱2000”标准,而X-35验证机则直接采用了“全景座舱”的设计理念。

国外第三代战斗机的座舱布局多采用“一平三下”的布局方式,即平显在仪表板顶部,之下是正前方控制板,三个多功能显示器位于仪表板左、中、右^[10]。采用该布局形式的战机有欧洲的EF2000、JAS-39“鹰狮”等。

美国空军研究实验室于1990年提出了“全景座舱控制和显示系统(PCCADS)”方案^[9,11],向飞行员提供较大面积的显示器和离轴目标截获武器瞄准头盔,以满足超视距的态势感知和大离轴角瞄准的需要。

相比第三代战斗机或三代半战斗机,F/A-22“猛禽”战斗机是波音公司与洛马公司联合为美国空军研制的空中优势战斗机^[12-13]。F/A-22的座舱有1个平视显示器和6个多功能显示器^[14-15]。

美国新研制的F-35战斗机,其座舱配有大屏幕显示器,支持触敏控制、语音识别,采用双目式瞄准头盔显示器,充分体现了战斗机座舱显示的发展方向。

(2) 国内研究现状

目前,我国军用飞机正处在更新换代时期,引入计算机控制显示技术,用平视仪、下视仪、多功能显示器等时分制综合信息显示系统取代常规机电显示仪表,采用话音告警技术改进听觉显示界面,是我国新机研制和现役飞机改型中更新信息显示界面的主要举措。

①座舱控制界面研究

国产新机在普遍采用平视仪、下视仪、多功能显示器等综合电子显示系统的同时,还大量采用握杆操纵控制器、显示器周边控制软键、正前方控制板等新型控制设计将座舱重要控制器小型化、集中化、多功能化,以方便飞行员同时兼顾显示观察和操作控制。采用握杆操纵技术,将至关重要的转换控制器集中布置在飞机油门杆和驾驶杆上,以保证飞行员在平视飞行操纵飞机的同时仍能完成诸如武器投放等控制动作,是现代高性能战斗机控制器设计的共同特点。

②座舱自动化与人工控制

座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,座舱自动化必须关注三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^[16],尽可能实现人与自动化系统之间的协调配合。目前,正致力于探讨飞行员内在操作模型和自动化系统运行模式之间的匹配和兼容,呼唤以人为本的自动化设计^[17]。

尽管飞机座舱自动化在某种程度上减轻了飞行员的体力负荷,但却增加了非常规操作的负荷,带来很多与飞行安全相关的问题。例如,飞行员情境意识丧失、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等^[18]。目前,我国飞机座舱自动化控制技术尚处于初级阶段,对飞机的整体自动控制能力有限,可靠性不高,这对座舱显示控制界面的设计提出了新的要求。而我国军用飞机座舱已采用大屏幕液晶显示器取代 CRT 显示器,液晶显示工效学和座舱合理自动化可能成为国内飞机座舱显示控制界面工效学研究的重点领域。

随着航电显示技术、传感器技术、图形处理技术等不断发展,以及航电显示复杂度的不断增加,以往的开发方法逐渐暴露出诸多缺点^[19]:需要进行复杂的编程和图形设计,手写代码(Hand code)的工作量非常大;以手写代码描述仪表的复杂运动越来越困难,还容易忽略仪表的某些重要特性;编程、调试过程中消耗了大量的人力、物力和时间;开发的显示形式单一,不能满足日益丰富的需求;对于界面繁多且显示格式复杂、数据交互要求高的航电显示系统,所需要的开发投入更大、周期更长。这些都是国内研究中面临的关键问题。

为此,本文设计一种集成在 C++ 系统中的飞机座舱显示控制界面设计方法,探讨软件设计中采用的关键技术,并提出飞机座舱显示控制界面设计的综合评价方法。

1 软件设计中采用的关键技术与方法

飞机座舱提供一个重要的人机交互环境。载机的飞行数据、控制系统的工作参数以及作为联邦成员订购的一些信息最后都要输送到座舱内的显示系统^[20]。操作者根据显示的信息,操纵载机或者根据战场态势做出相应响应。通过舱内外视景的叠加以及对中央控制面板的操作获得驾驶飞行

仿真的沉浸感、交互感。

1.1 座舱显示系统加入视景仿真

本文中,飞行员通过人机交互界面,仿真座舱的同时观察舱外视景和舱内显示系统。由 Microsoft Visual C++ 中 MFC 开发的多功能显示器、中央控制板和用 OpenGL 开发的平视显示器最终需要嵌入到视景仿真平台上并显示出来^[21]。

1.1.1 视景融合

界面的底层是由 OpenGL 实现的,而 Microsoft Visual C++ 6.0 开发出的仿真仪表等可以生成 C++ 和 OpenGL 源代码,因此它们之间是可以通过 OpenGL 连接起来的。

视景仿真界面和 OpenGL 采用的三维观察方法基本一样,而二者的视点坐标系不同。虽然都采用右手坐标系,但是视景仿真界面视点看向 y 轴正方向,OpenGL 看向 z 轴负方向,如图 1 所示。

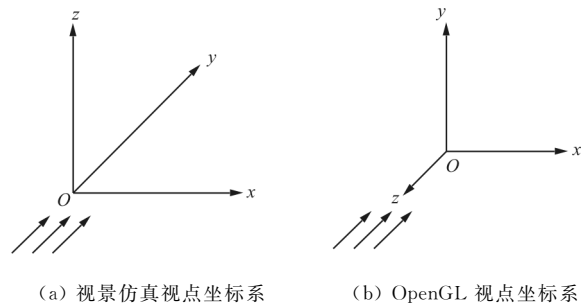


图 1 两种视点坐标系

Fig. 1 Coordinate systems of two viewpoint

这样就把视景、平视显示器、多功能显示器和中央控制面板整合在一个窗口中显示出来,如图 2 所示。

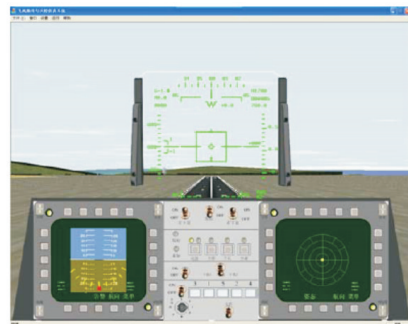


图 2 座舱显控系统 with 视景叠加效果

Fig. 2 Overlay effect of cockpit display control system and visual

1.1.2 鼠标消息映射

在多功能显示器和中央控制面板上,有许多可以进行人机交互的开关、按键,它们能对鼠标的点击等动作做出相应的响应。但是视景仿真界面和 Microsoft Visual C++ 6.0 两种开发软件平台的鼠标消息处理机制不同,导致仿真时座舱中多功能显示器和中央控制面板上的开关按键不能响应鼠标消息。解决方法是:首先将视景仿真界面中的鼠标消息映射为多功能显示器能够识别的鼠标事件格式,然后重载视景仿真界面中的鼠标消息处理虚函数 onMouseEvent。对于每一个需要根据鼠标动作做出响应的按键或开关,需要获取它们的位置和尺寸大小,当鼠标点击位置位于这个范围之内时,这些开关和按键将会做出反应。流程图如图 3 所示。

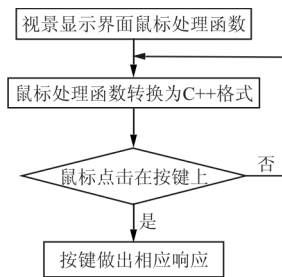


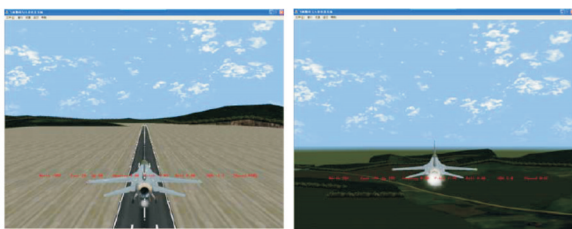
图 3 鼠标消息映射流程图

Fig. 3 Flowchart of mouse message mapping

1.2 飞机运动模型的实现

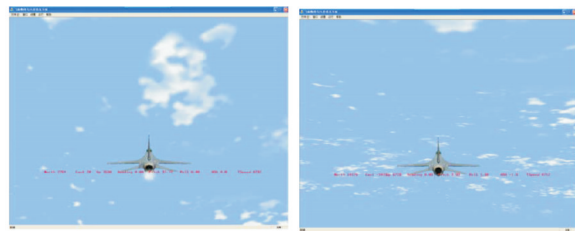
本文需要用实时获得的飞行参数来驱动飞机模型和视点的移动,因此需要利用位置策略创建一种新的运动方式。可以由 vpObject 类的成员函数 SetStrategy()将物体和运动模型进行绑定。对于有多种运动模型的仿真对象,函数 SetNextStrategy()可以将多种运动模型顺序与物体绑定。

在一次空战仿真中,从机场跑道滑行开始到目标截获过程中的部分画面如图 4 所示。



(a) 跑道滑行阶段

(b) 起飞阶段



(c) 飞行航姿 1

(d) 飞行航姿 2

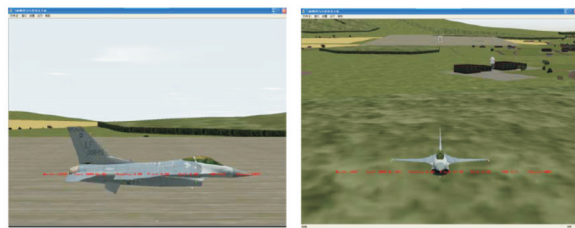
图 4 飞行仿真截图

Fig. 4 Screenshot of flight simulation

1.3 视点管理

在飞行视景仿真应用中,操作者可以根据需要调整视点,只有进入到视点覆盖范围内的场景、物体及环境特效才能被显示出来,其他部分将被裁剪掉。因此视点管理在视景仿真中发挥着非常重要的作用。

当视点位于飞机座舱外时,可以选择相对于飞机模型不同的位置设定视点,看到飞机不同的侧面,如图 5 所示;当视点处于座舱内部时,使用设定一个相对于飞机模型固定偏移的视点,以达到总处于座舱内部的感觉。



(a) 侧视图

(b) 前视图

图 5 飞机座舱外不同视点效果图

Fig. 5 Different viewpoints outside the aircraft cockpit

1.4 视景仿真中的坐标系及转换

飞机飞行及座舱显示视景仿真系统作为飞机数传及控制系统仿真的一部分,需要将载机的飞行参数实时传递给监控方显示。仿真中整个大地形是以经纬度为单位开发实现的,而飞行仿真中飞机位置数据是以米为单位计算的,为了统一数据单位,需要将飞机位置参数转换为经纬度在监控系统上显示出来。

通常,飞行视景仿真中涉及到四种坐标系^[22]:

投影坐标系、大地坐标系、地心坐标系和局部笛卡尔坐标系,如图 6 所示,图中,LLE 是 Locally Linear Embedding(局部线性嵌入算法)的缩写。该算法是针对非线性信号特征矢量维数的优化方法,这种维数优化并不仅是在数量上简单的约简,而是在保持原始数据性质不变的情况下,将高维空间的信号映射到低维空间上,即特征值的二次提取。

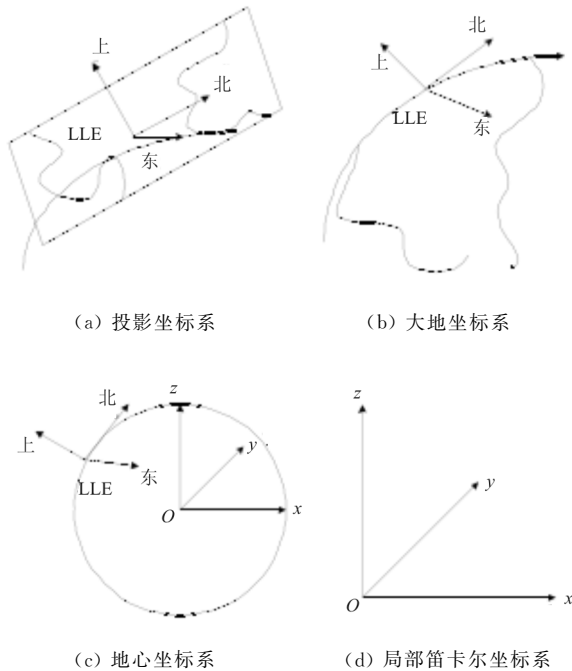


图 6 飞行视景仿真中的四种坐标系

Fig. 6 Four coordinate systems in flight visual simulation

多种坐标系在飞机、导弹、火箭、人造卫星等各种飞行视景仿真中都有广泛的应用。

基于同一个椭球模型的不同坐标系之间可以相互转换,通过转换,将一个坐标系下的位置信息和姿态信息转换为另一坐标系下的数据信息。大地坐标系和投影坐标系或者地心坐标系之间的转换可以通过调用函数一步实现,而投影坐标系和地心坐标系之间的转换则需要以大地坐标系为中间媒介。

2 显控界面设计综合评价方法

2.1 评价指标体系的建立

2.1.1 评价指标的筛选与确定

作为座舱显示控制系统的综合评价,必然要综合考虑显示系统与控制系统的各个方面,包括显示

信息内容,显示方式,显示背景、光照,显示、控制布局以及控制器的可靠性、可控性等。任何一个方面都不是独立的,而是与其他方面密切相关。飞行员只有通过显示仪认知并正确地理解后,才能进行有效的控制。因而,评价座舱显示控制系统的有效方法是将其纳入综合性的任务环境之中,通过评估和分析执行任务的效果,来评价显示控制系统在实际任务环境中的效能。

2.1.2 评价体系的建立

由于显示、控制器的布局影响显示控制系统的性能,显示、控制器的布局合理性也应有两个评价指标。考虑到设计、制造费用的制约,经济性自然也为一个评价指标。

完成任务的程度用系统的“显示水平”“控制水平”描述,在开始执行任务和执行任务过程中的状态情况用“显示可靠性”“控制可靠性”来评估。

随着飞机性能的提高,飞行员的工作负荷及操作难度也日益增大。一个显示控制系统,其工作强度当然是越低越好。在评估该系统时,负荷强度也应为一个评估指标。

整个评价体系如图 7 所示,其中包括 11 项:显示可读性、显示可飞性、可控性、显示可靠性、控制水平(能控性)、控制可靠性、总体布局合理性、经济性、可靠性、维修性及安全性。

2.2 评价方法的确立

(1) 在完成各飞行任务的基础上用主、客观综合考虑法来评估单项指标;

(2) 采用定性目标的定量处理法来进行主观评估;

(3) 采用专家判断层次分析法^[23]计算加权系数;

(4) 采用多级工程模糊综合评判对座舱显示控制系统进行综合评判;

(5) 采用最小、最大距离法(重心排序法^[24])进行排序、决策;

(6) 具体评估步骤:①根据具体评估对象及考虑因素、对象的实际使用情境确定测试课目、评估指标;②填写加权判断矩阵,计算各级指标的加权系数;③进行各项测试,完成各单因素指标评估;④综合考虑主、客观值,进行综合评估;⑤利用④得到的综合评估分值进行多方案的优先排序。

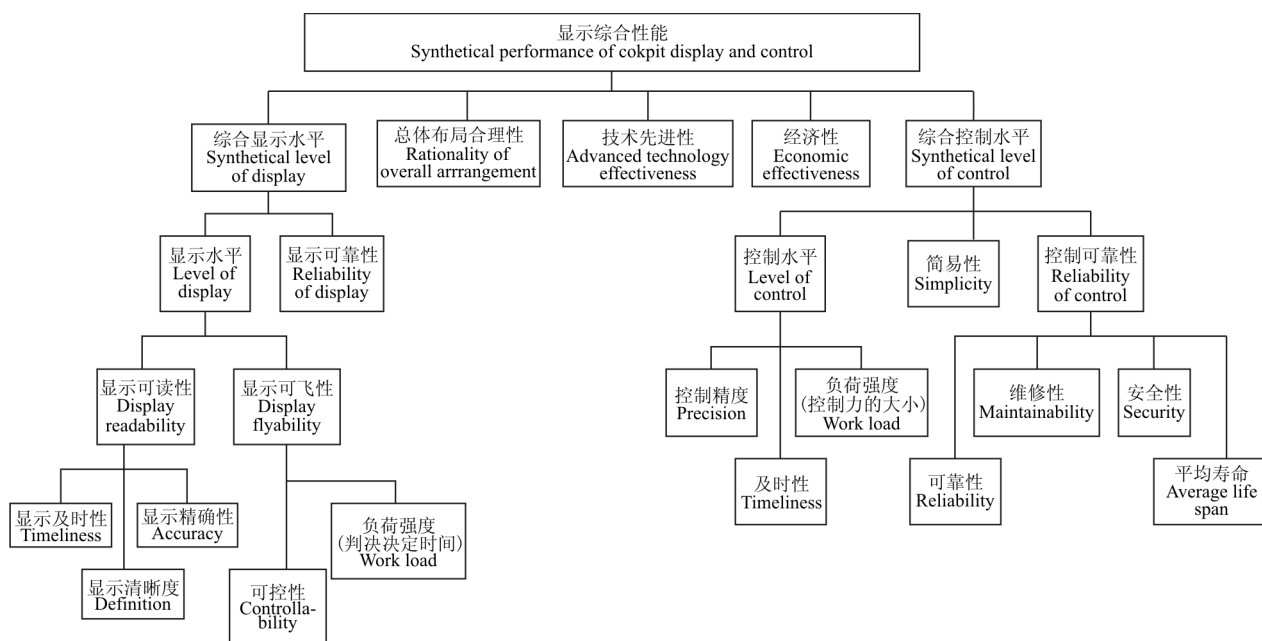


图 7 显控系统综合评价指标体系

Fig. 7 Comprehensive evaluation index system of display and control system

3 结 论

(1) 本文设计了一种集成在 C++ 系统中的飞机座舱显示控制界面设计方法,并开发出了平视显示器、多功能显示器,以及可以自定义的运动模型模块、平视显示器绘制模块、多功能显示器绘制模块等,实现了舱内视景、舱外视景的融合叠加和视点管理、场景管理、环境特效等功能。该设计方法能够较好地反映出飞行员的运动学和动力学特性,提高了界面友好性、操作直观性、简便性。

(2) 飞机座舱显控界面设计综合评价方法与评价体系的建立,为飞机座舱显示控制界面设计方法的评价建立了基础,但目前此套评价体系尚在理论研究中,还需进一步实践验证。

参考文献

- [1] 康卫勇,袁修干,柳忠起. 基于脑力负荷飞机座舱视觉显示界面优化设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(7): 782-785.
KANG Weiyong, YUAN Xiugan, LIU Zhongqi. Optimization design of vision display interface in plane cockpit based on mental workload[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(7): 782-785. (in Chinese)
- [2] 张燕荣,李京华,马阳阳,等. 飞机座舱多功能显示界面的

实现[J]. 航空计算技术, 2012, 42(3): 104-107.

- ZHANG Yanrong, LI Jinghua, MA Yangyang, et al. Realization of aircraft cockpit multi-function display interface[J]. Aeronautical Computing Technique, 2012, 42(3): 104-107. (in Chinese)
- [3] 张慧姝,庄达民,马丁,等. 飞机座舱显示界面目标图符的设计和评价[J]. 包装工程, 2011, 32(10): 89-92.
ZHANG Huishu, ZHUANG Damin, MA Ding, et al. Design and evaluation of target icons of the cockpit display interface[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(10): 89-92. (in Chinese)
- [4] 卫宗敏,完颜笑如,庄达民. 飞机座舱显示界面脑力负荷测量与评价[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(1): 86-91.
WEI Zongmin, WANYAN Xiaoru, ZHUANG Damin. Measurement and evaluation of mental workload for aircraft cockpit display interface[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(1): 86-91. (in Chinese)
- [5] 谈卫,孙有朝. 面向显示界面工效研究的飞机座舱仿真系统[J]. 计算机系统应用, 2016, 25(8): 86-91.
TAN Wei, SUN Youchao. Aircraft cockpit simulation system for display interface ergonomics[J]. Computer Systems & Applications, 2016, 25(8): 86-91. (in Chinese)
- [6] 夏高明. 飞机座舱显示系统 DF 定义文件验证平台设计与实现[D]. 上海: 华东理工大学, 2014.
XIA Gaoming. Design and implementation of DF file verification platform for cockpit display system[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)

- [7] HAAS M V, BEYER S L, DENNIS L B, et al. Evaluation of advanced multisensory display concepts for use in future tactical aircraft: AD-A328 767/9/XAB[R]. [S. l. : s. n.], 1997.
- [8] 李文军. 飞机航电综合显控计算机视频显示技术的研究与实现[D]. 西安: 西北工业大学, 2012.
LI Wenjun. Research and implementation of computer video display technology for integrated display and control of aircraft avionics[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2012. (in Chinese)
- [9] 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 Humin. Development of future fighter cockpit display and control system[J]. Avionics Technology, 2006, 37(3): 33-37. (in Chinese)
- [10] HANCOCK W R, JOHNSON M J, ROGERS J C. Meeting the graphical needs of the electronic battlefield[C]// AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference, 13th DASC. Phoenix, AZ, USA, 2002: 465-470.
- [11] OLSON J L, ARBAK C J, JAUER Jr R A. Panoramic cockpit control and display system: AFWAL-TR-88-1038[R]. USA: [s. n.], 1991.
- [12] 谭正平. “猛禽”核心美国 F-22 战斗机座舱[J]. 环球军事, 2007(1): 56-57.
TAN Zhengping. The raptor's core U. S. F-22 cockpit[J]. Universal Military, 2007(1): 56-57. (in Chinese)
- [13] 孙滨生. F-22 战斗机座舱显示系统[J]. 电光与控制, 2007, 14(4): 50-56.
SUN Binsheng. F-22 fighter cockpit display system[J]. Electro-optic and Control, 2007, 14(4): 50-56. (in Chinese)
- [14] 陈德煌, 陈万美. F-22 战斗机的综合航空电子系统[J]. 电光与控制, 2003, 10(1): 50-53.
CHEN Dehuang, CHEN Wanmei. Integrated avionics system for F-22 fighter aircraft[J]. Electro-optic and Control, 2003, 10(1): 50-53. (in Chinese)
- [15] 孙滨生. 现代战斗机座舱人机接口述评[J]. 新世纪展望, 2000(4): 5-14.
SUN Binsheng. A review of the man-machine interface in the cockpit of modern fighter aircraft[J]. New Century Prospect, 2000(4): 5-14. (in Chinese)
- [16] 马训鸣, 林晓焕. 飞机座舱模拟台控制系统的设计及实现[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(5): 269-271.
MA Xunming, LIN Xiaohuan. Design and realization of control system for aircraft cabin simulation table[J]. Microelectronics & Computer, 2009, 26(5): 269-271. (in Chinese)
- [17] 张磊, 庄达民, 颜吟雪. 飞机座舱显示界面编码方式[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(4): 466-469.
ZHANG Lei, ZHUANG Damin, YAN Yinxue. Encoding of aircraft cockpit display interface[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009, 41(4): 466-469. (in Chinese)
- [18] 康卫勇, 袁修干, 柳忠起, 等. 飞机座舱视觉显示界面脑力负荷综合评价方法[J]. 航天医学与医学工程, 2008, 21(2): 103-107.
KANG Weiyong, YUAN Xiugan, LIU Zhongqi, et al. Synthetic evaluation method of mental workload on visual display interface in airplane cockpit[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2008, 21(2): 103-107. (in Chinese)
- [19] PAUL L, MARIA K. Cardiac data increase association between self-report and both expert ratings of task load and task performance in flight simulator tasks: an exploratory study[J]. International Journal of Psychophysiology, 2010, 76(2): 80-87.
- [20] NICKLAS D, STAFFAN N. Mental workload in aircraft and simulator during basic civil aviation training[J]. The International Journal of Aviation Psychology, 2009, 19(4): 309-325.
- [21] LIU J Y, WANG T, QIU J, et al. The electrophysiological effect of working memory load on involuntary attention in an auditory-visual distraction paradigm: an ERP study[J]. Experimental Brain Research, 2010, 205(1): 81-86.
- [22] 完颜笑如, 庄达民, 刘伟. 脑力负荷对前注意加工的影响与分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(4): 497-501.
WANYAN Xiaoru, ZHUANG Damin, LIU Wei. Analysis on effect of mental workload on pre-attentive processing[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(4): 497-501. (in Chinese)
- [23] 王俊. 轻型运动飞机座舱人机界面设计与分析研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
WANG Jun. Research and design on human-machine interface of light sport aircraft's cockpit[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [24] 张毅, 王士星. 仿真系统分析与设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 121-129.
ZHANG Yi, WANG Shixing. Simulation system analysis and design[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 121-129. (in Chinese)

作者简介:

熊李娜(1987—),女,硕士,工程师。主要研究方向:飞机座舱显控设计。

(编辑:马文静)