

doi: 10.7690/bgzdh.2021.07.012

全息波导平视显示器 HMI 设计和评估

樊谕涵, 毛研勋, 曾 锐

(中国商用飞机有限责任公司北京民用飞机技术研究中心, 北京 102211)

摘要: 为解决民用飞机减重增效的实际问题, 对全息波导平视显示器(head up display, HUD)进行 HMI 设计和评估。依据全息波导平视显示器 HMI 设计及仿真实验验证, 介绍未来民机全息波导平视显示器 HMI 设计的思路, 结合应用场景及设计目标对现有设计进行了分析; 通过未来民机驾驶舱智能化的设计需求对平视显示器的设计进行改进, 并搭建仿真实验平台进行验证, 证明了新一代全息波导平视显示器 HMI 设计的优势。

关键词: 平视显示器; 人机工效评估; HMI 设计

中图分类号: TJ811 **文献标志码:** A

HMI Design and Evaluation of Holographic Waveguide Head-up Display

Fan Yuhan, Mao Yanxun, Zeng Rui

(COMAC Beijing Aircraft Technology Research Center, Beijing 102211, China)

Abstract: To achieve the weight reduction and efficiency of civil aircraft, the HMI design and evaluation of holographic waveguide head up display (HVD) is carried out. Based on the HMI design of holographic waveguide flat-view display and simulation experiment verification, the idea of HMI design of future civil aircraft holographic waveguide flat-view display is introduced, and the existing design is analyzed with application scenarios and design objectives; the design of flat-view display is improved by the intelligent design requirements of future civil aircraft cockpit, and the simulation experiment platform is built for verification, which proves the advantages of the new generation of holographic waveguide flat-view display, the advantages of HMI design are demonstrated.

Keywords: HUD; human ergonomic evaluation; HMI design

0 引言

平视显示器(HUD)是一种辅助显示仪器, 现已广泛应用于民机驾驶舱内, 通过飞行参数的集中透视显示, 为飞行员安全飞行提供保障, 同时保证了更优越的飞行驾驶体验。

相比普通的平视显示器, 基于全息波导显示的平视显示器最大特点是质量减轻 50%以上, 但缺点是亮度降低, 可视区域减小。为了在减重的同时达到原 HUD 显示效果, 笔者对基于新一代全息波导平视显示器 HMI 进行重构设计(主要包括软件架构和布局设计), 并将设计的成果在工程模拟器上进行了试验验证。

笔者从场景分析出发, 提出使用全息波导 HUD 的需求, 基于场景分析得出的需求对全息波导 HUD 的界面设计提出设计目标, 同时考虑基于飞机级的设计要求。对全息波导 HUD 的界面总体设计进行详细阐释, 基于工程驾驶舱对显示界面进行试验验证, 并基于主客观的量表评价模式对试验数据进行分析, 得出基于全息波导 HUD 的界面设计是否满

足要求。

1 场景分析

场景(scenario)是指有一定关系的事件的组合。场景分析是一种常用的需求捕获技术, 是指把要开发的产品, 置于其运营的场景中, 通过分析其在场景中的预期行为, 从而获得需求的方法。笔者主要针对全息波导 HUD 的应用场景进行简要分析。

基于飞行的功能场景分析进行飞机需求捕获, 尽量保证需求的完整性、覆盖各种可能出现的场景, 通过建立多维场景矩阵, 以飞机级地面减速功能为例, 建立场景矩阵, 固定于系人维度和任务维度, 主要考虑航线运营时的飞行员操作, 建立时间维度、环境维度和状态维度 3 维矩阵。结合飞行场景定义, HUD 的应用场景主要从环境维度、状态维度和时间阶段维度进行描述。笔者主要针对天气因素引出的场景需求进行阐释。

事故数据分析表明, 航空器在实施进近时飞行员的负荷会大幅增加, 导致的事故率也会成倍的上漲。为了实现航空器在各种气象条件下都能精确地

收稿日期: 2021-04-21; 修回日期: 2021-06-12

作者简介: 樊谕涵(1986—), 男, 湖北人, 硕士, 从事导航制导与控制研究。E-mail: blisskey@163.com。

控制飞机状态参数并准确地预测接地点，同时为了解决飞行员在飞行中频繁俯视看仪表的动作，使其可以始终保持平视飞行。在满足适航规定的最低起飞标准和最低着陆标准的前提下，通过 HUD 的使用，提供飞行员滑行、起飞、进近以及着陆指引，增加飞行员的情景意识，降低着陆标准，提高恶劣天气环境下飞机的派遣率^[1]。

考量 CAT I/II/III 着陆状态，尤其是大雨、大雾和夜间等低能见度环境下的安全着陆。引入 HUD 可降低着陆最低运行标准，例如：对于 I 类运行，着陆最低运行标准由原来的决断高度(DH)60 m/跑道视距(RVR)50 m 降低到 DH45 m/RVR450 m^[2]。

HUD 与可靠的 ILS 和低能见度运行程序相结合，通过优化进近着陆机动飞行，提供驾驶员和机组足够的时间来评估目视参考，从而决定是着陆还是复飞^[3]。

全息波导 HUD 的引入为飞行员提供一个优良的人机接口(HMI)体验，通过优化重构的友好交互界面设计进一步保证飞行的安全和舒适。

2 设计目标

结合场景分析，为保证民用飞机在非正常场景尤其是低能见度下运行的要求，在充分考虑全息波导显示器优势的情况下，通过优化和重构 HUD 的界面显示软件，提供飞行员更简洁和快速的操作模式；同时，保证维护维修的便捷性，从而降低航空公司运营的成本。

3 设计要求

HUD 的界面交互显示系统作为驾驶舱内部重要的辅助飞行设备，其设计原则不能违背民用飞机设计的基本要求，同时也需要基于全息波导 HUD 的设备差异重构页面，提供新型的界面显示模式。

1) 安全性。

民用飞机设计中，最重要的要素之一是保证飞行的安全性。重构设计的 HUD 界面显示系统要求对驾驶员的各种飞行任务不造成任何影响，不会因为新设计的采用引入新的操作失误。此外，应同时保留民用飞机机载系统设计中的多余度设计^[4]。

2) 简约性。

基于场景分析中飞行负荷较重的起飞、进近以及着落等飞行场景，为驾驶员分时提供显示信息，让驾驶员第一时间获取易于判读的清晰直观的图像信息，同时基于飞机的综合告警系统，为驾驶员提

供故障解算，力求基于飞机的各种飞行状态，提供驾驶员更易于获取，更简洁的飞行参数和告警信息显示。

3) 继承性。

HUD 作为民机飞行的辅助飞行机载设备，会应用于民用飞机的各种型号。基于飞行员改飞其他型号或者飞机升级换代，设计中还要保证一定的继承性，降低航司成本的同时缩短飞行员改型训练的时间，使飞行员能快速适应熟练掌握新机型的使用^[5]。

4) 友善性。

飞行员飞行全程中时刻保持和 HUD 的交互，考虑飞行员经过长时间飞行以后的状态，显示界面的设计应以不引入新的疲劳因素为基本要求，使飞行员正常完成飞行任务。

4 总体设计

4.1 架构设计

平视显示器主要的显示模块是飞行指引部分，飞行指引模块由数据接收与处理线程、实时渲染线程 2 部分组成。具体的排布方式如图 1 所示。

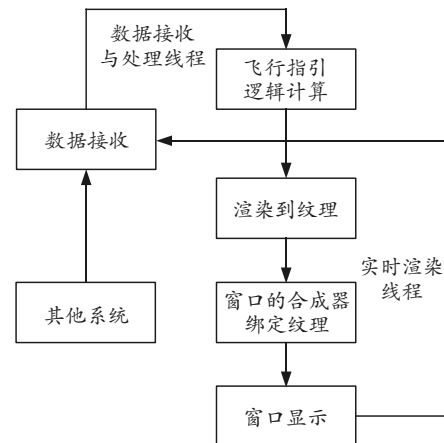


图 1 飞行指引模块内部架构

数据接收线程接收其他系统的数据，并存储在数据链表中，根据绘制画面的当前渲染时刻在链表中选出临近的数据，插值得到当前渲染时刻的数据，再进行必要的飞行指引逻辑计算，等待实时渲染线程获取数据。

实时渲染线程获取数据接收与处理线程的数据，进行绘制逻辑的计算并基于 RTT 技术将各指引符号渲染到纹理上，随后将纹理绑定到窗口的合成器上进行最后的输出显示。

RTT 技术就是把渲染目标从帧缓存变成一张纹理，即可在画面渲染后再进行后处理。而合成器是 OGRE 渲染引擎 API 的一部分，使用它可以轻松定

义全屏的后加工处理效果^[6]。

4.2 接口设计

接口设计中只包含数据接口，无电子和机械接口设计要求，与其他系统的数据交联接口如图 2。

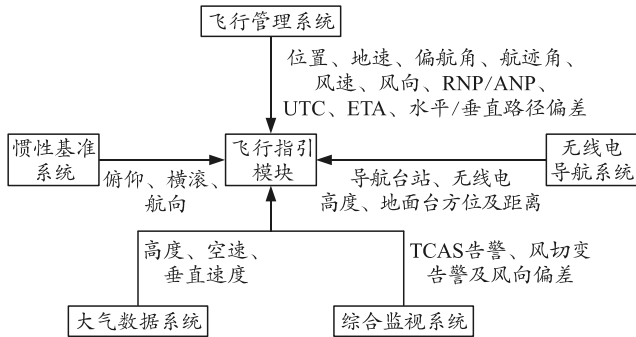


图 2 接口交联关系设计

4.3 界面设计

4.3.1 速度指引

图 3 为飞行指引画面中速度带区域中的速度指示信息，图 4 为地速和升降率的显示位置示意图。

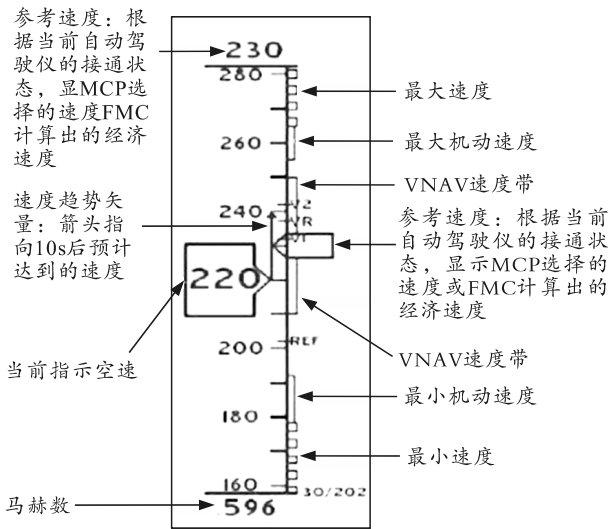


图 3 速度指引信息

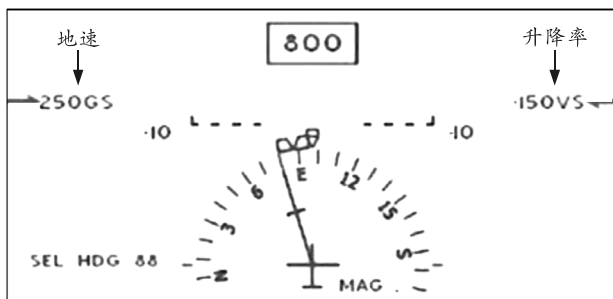


图 4 地速及升降率指示

4.3.2 高度指示

图 5 为飞行指引画面高度带区域中的高度指示信息，图 6 为无线电高度示意图。

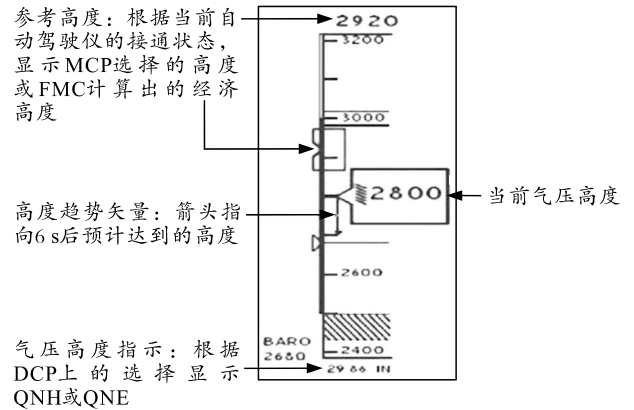


图 5 高度指示信息

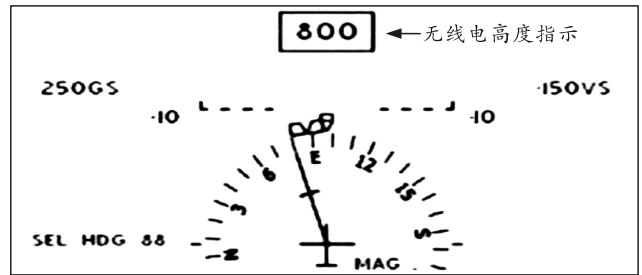


图 6 无线电高度指示

上图无线电高度指示显示逻辑为：低于 2 500 英尺时才显示；下降穿过 2 500 英尺时有 10 s 的方框显示；下降低于无线电高度最低下降高度时有方框显示，并且方框闪烁 2s 后稳定显示。

4.3.3 姿态指示

姿态指示如图 7 所示。

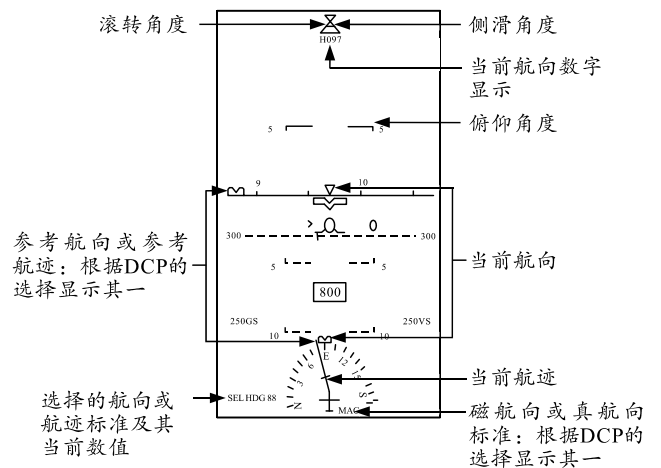


图 7 姿态指示

当飞机俯仰角度过大时，俯仰刻度压缩显示。当俯仰姿态向上超过 30° 时，刻度压缩显示且有向下三角显示，表示飞行员应采取向下俯仰动作；当俯仰姿态向下超过 20° 时，刻度压缩显示且有向上三角显示，表示飞行员应采取向上俯仰动作。以上姿态显示情况如图 8 所示。

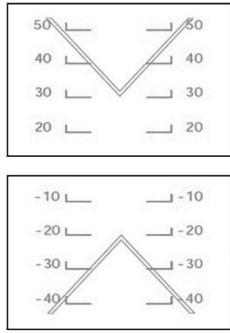


图 8 俯仰限制指示

5 应用示例

未来民机座舱显示控制系统的主要创新应用在于触摸式显示控制系统的应用，展示的是服务于未来的应用体系。将该设计思路应用到研究中，最终形成了如图 9 所示的初步应用示例，后期将进一步完善基于触摸的显示控制交互方式对人机工效的影响并进行相关的实验测试。

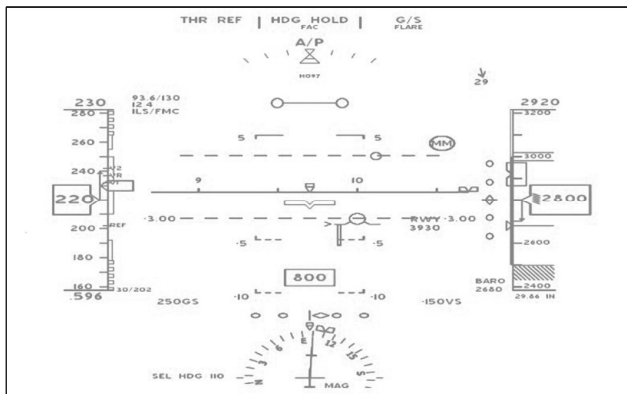


图 9 飞行指引画面综合应用示例

6 测试过程

试验内容分为正常状态与低能见度状态 2 部分。按场景控制项分解，仿真包括夜晚、雾天和雷电等。如图 10 所示，试验试飞人员针对以上不同场景进行了试验测试。



图 10 试验飞行人员进行试验

试验中除进行被测人员心跳、血氧信息的采集

外，主要通过开展主观评估作为试验结果的评估手段。主观评估分作 2 方面来进行：1) 工作负荷的评估，常用的是 NASA-TLX 量表；2) 被试本身基于常用的 7 点评价标准^[7]。

基于 NASA-TLX 量表是多维度主观工作负荷评价方法，包含了 6 个维度的工作负荷贡献：脑力需求 (mental demand)、体力需求 (physical demand)、时间需求 (temporal demand)、绩效 (performance)、努力程度 (effort) 和受挫程度 (frustration Level)。被试者基于以上 6 个维度进行打分，后续数据处理中进行两两对比，确定各维度不同的权重值，最后得出总的工作负荷值。通过分值 1~10 表明各个维度工作负荷的大小变化^[8]。

试验结束后需对今日试验过程填写意见反馈单，包括试验设备、飞行情况、试验过程等与试验有关的意见反馈。意见反馈可得到有飞行经验的人员对于此次试验的相关改进建议，使试验人员主观表达试验感受，对试验评估有一些参考价值。

主观数据收集方法采用 NASA-TLX 量表的主观评价法来研究上述操作中的工作负荷。问卷包含 3 类：问卷 1 为 6 个影响工作负荷的因素，作为 6 个维度来对飞行的工作负荷进行分类评估；问卷 2 为不同因素的相对重要性；问卷 3 为操作舒适程度评估^[9-10]。

以主驾驶的评分标准举例如表 1 所示。

表 1 主驾驶评分

因素	低能见度起飞	低能见度着陆	正常着陆	正常起飞
心理需求	3	3	2	1
体力需要	4	4	3	2
时间需要	4	4	3	2
绩效	4	4	3	2
努力程度	4	4	3	2
挫败感	4	4	3	2

表 2 为整体试验不同场景 (通透、夜晚、雾、3 级能见度) 的主观评价结果。

表 2 不同颠簸列表

因素	通透	夜晚	雾	3 级能见度
心理需求	1	3	3	3
体力需要	1	2	4	5
时间需要	1	2	4	4
绩效	1	2	3	6
努力程度	1	2	3	4
挫败感	1	2	3	6

选用 Mio Alpha2 心率手表测得生理数据如图 11 所示，可视化处理后的数据如图 12 所示。

	A	B	C
4	File created by Mio Go v2.7.4.4 Android App.		
5	sensor	present	smrec
6	workout	starttime	runningtime
7		2020-9-29 8:56:52	6:58:57
8	interval	starttime	runningtime
9	0	2020-9-29 8:56:52	6:58:57
10	time(secor	hr_heartate(1s)	
11	0		94
12	1		96
13	2		96
14	3		96
15	4		96
16	5		96
17	6		96
18	7		100
19	8		101
20	9		102
21	10		103
22	11		103
23	12		103

图 11 生理数据

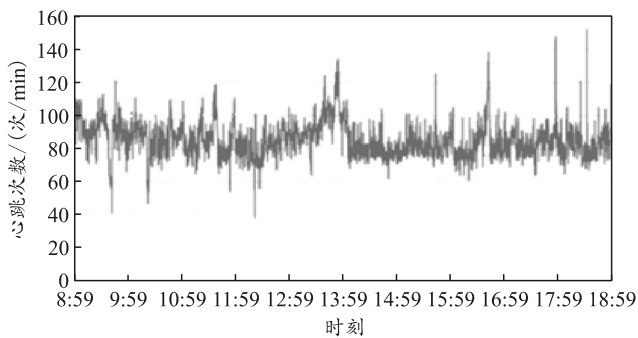


图 12 可视化处理后的生理数据

以非正常能见度下执行的起飞任务为例说明试验结果,根据图 13 可发现在非正常能见度下执行起飞任务时,HUD 显示和 HDD 显示在作业绩效上存在显著差异;在心理需求、时间需求和努力程度方面具有非典型的数据分布;在体力需求方面、挫折水平方面,两者的主观评测相似^[11]。

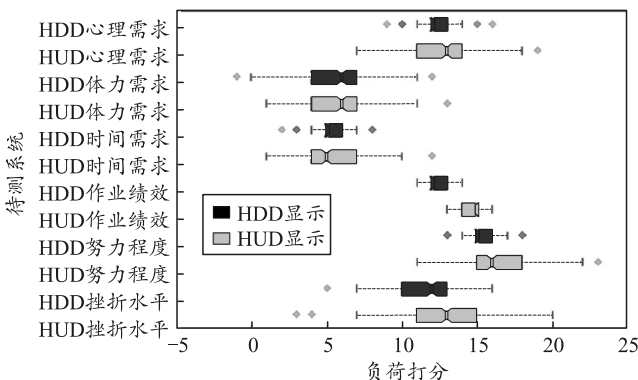


图 13 非正常能见度起飞任务 NASA-TLX 主观认知负荷

经过上述数据整理和讨论,总结出以下 3 个重要结论。

1) HUD 在非正常能见度下执行起飞任务,作业绩效明显提高。

2) 在非正常能见度下的 HUD 显示更不容易受到机外环境因素的影响,因此驾驶员付出的努力程

度相较于正常能见度场景的差异会缩小。

3) 相较于正常能见度显示,HUD 与 HDD 显示的挫折水平差异减小,即在低能见度的环境下 HDD 显示与 HUD 显示的挫折差异将会减小。

7 结束语

笔者提出采用新型小尺寸显示器替代传统平视显示器的设计思路,基于新型的全息波导显示器进行了显示界面的重构设计并进行了试验验证。验证结果表明:非正常能见度下的测评取得了较好的评估效果,为后续民机的设计工作奠定了一定基础。

参考文献:

- [1] 潘文林. 漫谈广角全息平视显示器[J]. 航空世界, 2013(1): 68-71.
- [2] 彭海潮. 离轴大视场全息平视显示光学系统的设计与研制[D]. 北京: 北京理工大学, 2015: 13-24.
- [3] 刘启越. 民用飞机驾驶舱人机工效评价方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013: 18-20.
- [4] 樊谕涵. 未来民机座舱显示控制系统初探[J]. 电子测试, 2018, 399: 16-18.
- [5] THOMSON M E, NKAL D, AVCIOLU A, et al. Aviation risk perception: A comparison between experts and novices[J]. Risk Analysis, 2004, 24(6): 1585-1595.
- [6] KASARSKIS P, STEHWIEN J, HICKOX, et al. Comparison of expert and novice scan behaviors during VFR flight: Proceedings of the 11th International Symposium on Aviation Psychology[C]. Columbus, OH: Citeseer, 2001.
- [7] WILSON G F, RUSSELL C A. Real-time assessment of mental workload using psychophysiological measures and artificial neural networks[J]. Human Factors, 2003, 45(4): 635-643.
- [8] CHUEH T H, CHEN T B, TAO T H. Statistical prediction of emotional states by physiological signals with manova and machine learning[J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2012, 26(4): 1250008.1-1250008.18.
- [9] WANG Z, FU S. An Analysis of Pilot's Physiological Reactions in Different Flight Phases, in Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics, Lecture Notes in Computer Science, D Harris, Editor[C]. Springer: Berlin, 2014: 94-103.
- [10] HJORTSKOV N, RISSÉN, D, BLANGSTED A K, et al. The effect of mental stress on heart rate variability and blood pressure during computer work[J]. European journal of applied physiology, 2004, 92(1-2): 84-89.
- [11] URRY H L, REEKUM C M V, JOHNSTONE T, et al. Individual differences in some (but not all) medial prefrontal regions reflect cognitive demand while regulating unpleasant emotion[J]. NeuroImage, 2009, 47(3): 852-863.