航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
May. 25 2019 Vol. 30 No.05 9-13

人因工程在无人机中的应用及展望

蒋浩*，高鑫
中国民航飞行学院 航空人因与工效学研究所，四川 广汉 618307

摘　要：近年来，无人机得到了越来越广泛的应用。将人因工程应用到无人机的设计中，能提升无人机操作的安全与效率。本文总结了无人机的界面评估方法和工具，对比了无人机驾驶员工作负荷的主观测量及生理测量方法，并提出自动化、多感觉通道等未来研究切入点，为无人机适航规章及标准的出台和完善提供参考，进一步提升无人机的安全性。

关键词：无人机；人因工程；人机界面；工作负荷；人的因素

中图分类号：V279　　**文献标识码**：A　　DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2019.05.002

自从1916年世界上第一架无人机诞生以后，无人机首先在军事领域得以运用。20世纪90年代后，无人机开始了飞速发展，其使用范围不仅局限于军事领域，在民用领域也得到了越来越多的应用。随着无人机技术的发展和行业需求的增长，近年来，无人机在侦察、气象、电力、城市管理、抢险救灾、航拍、勘测等方面都发挥了巨大的作用[1]。

无人机的操纵控制由驾驶员通过地面控制台来进行，人与机是分离的。地面控制台提供了人机交互界面，驾驶员从人机交互界面获取无人机的各类信息，并发出控制指令。与有人驾驶飞机相比，无人机的操纵方式具有以下特点：(1)无人机驾驶员的信息获取是基于二维平面显示画面，其真实度不及有人驾驶获取的三维空间信息；(2)无人机驾驶员主要获取视觉信息，丧失了有人驾驶飞机中其他类型的信息，如前庭本体觉信息。在设计无人机的交互界面时，应当从人因工程的角度考虑上述操作特点。目前已有很多种飞机驾驶舱的界面设计原则，但无人机的界面设计不能完全照搬这些原则，事实上，无人机界面设计中的人因工程学问题是近年来的研究热点之一[2]。

不良的人机界面设计会引发无人机驾驶员缺失情境意识，增加工作负荷，产生疲劳，造成空间定向障碍等，从而诱发事故或不安全事件。无人机的事故率远高于有人驾驶飞机。统计表明，上述由界面设计不良诱发的人为事故占所有无人机事故的60%以上[3]。因此，深入研究无人机驾驶中的人的因素，设计符合人因工程学原则的人机交互界面，是降低无人机事故率的重要手段。本文首先阐述无人机界面评估的工具，然后介绍驾驶员工作负荷的评估方法，最后提出未来的研究切入点。

1 无人机界面工效评估方法和工具

1.1 MCH-UVD

库珀-哈珀量表(Cooper-Harper scale)是一种常用的人机界面评估工具，多年来一直被美国联邦航空局(FAA)用于各类航空器的人机界面和飞行员负荷评估。早期的库珀-哈珀量表并非专用于无人机显示界面的评估，鉴于无人机操作的特点，研究者开发了改进后的库珀-哈珀量表(MCH-UVD)，专用于无人机界面的评估[4]。

MCH-UVD将界面信息显示质量与无人机驾驶员的信息加工过程联系起来，良好的信息显示必须有效地支持驾驶员对信息的知觉、分析与决策。知觉、分析与决策是信息加工的三个有序过程，即知觉是分析的前提，分析是决策的前提。图1展示了MCH-UVD的知觉、分析与决策三阶段过程。根据驾驶员在这三阶段的信息获取质量，来评估人机界面的优劣。

MCH-UVD的评分在1~10分之间，分数越大，说明界面的问题越多。一般而言，低于2分的评分表明无人机的界面设计是良好的，而高于9分则需要重新设计界面[5]。

收稿日期：2019-03-18；退修日期：2019-04-20；录用日期：2019-04-30
基金项目：中国民航飞行学院航空人因与工效学研究所项目(JG2019-13)；中国民航飞行学院面上项目(BJ2016-05，J2014-06)
*通信作者. Tel.：0838-5183477　　E-mail：huban@zju.edu.cn
引用格式：Jiang Hao，Gao Xin.Application and prospect of human factor engineering in unmanned aerial vehicle[J].Aeronautical Science & Technology，2019，30(05)：9-13.蒋浩，高鑫.人因工程在无人机中的应用及展望[J].航空科学技术，2019，30(05)：9-13.

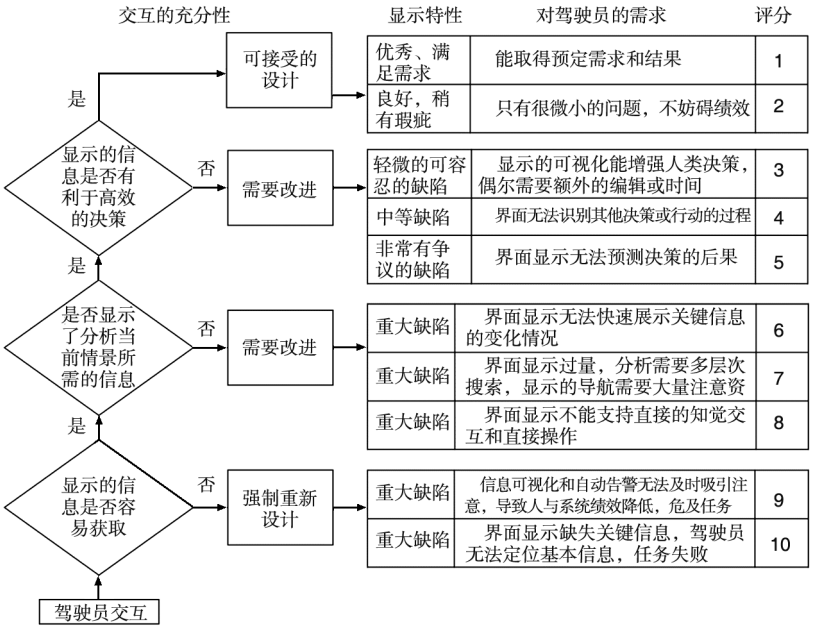

图1 用于无人机界面评估的MCH-UVD量表

Fig.1 MCH-UVD for UAV interface evaluation

1.2 可用性测试

可用性是指特定的用户在特定的使用情景下，有效、高效、满意地使用产品达到特定的目标。可用性测试则是对产品是否具备可用性进行评估，目前可用性测试已经成为各领域产品设计开发和改进维护各个阶段必不可少的重要环节。在无人机界面的评估中，也可以运用可用性测试的原理和方法[6]。

衡量无人机界面是否具备可用性，最重要的三个指标是有效性、效率和满意度。有效性是指无人机界面是否能够实现特定的目标；效率是指完成特定任务所耗费的资源，资源包括智力、体力、时间、材料或经济资源；满意度是驾驶员使用无人机界面的主观感受和情绪体验，描述了使用无人机的舒适度和对它的认可程度。

为获取这三个指标，常用的可用性测试方法包括启发式评估法、认知走查法、用户测试法等。其中，启发式评估法和认知走查法不是以最终用户为测试对象，而是可用性测试专家进行的快速测评方法。前者是根据通用启发式条目确定界面存在的缺陷，后者是评估特定任务流程中可能出现的界面问题。用户测试法则是以无人机的最终使用者为测试对象，根据其在试验任务中的表现（如反应时间、错误率等）获取指标参数，用以对无人机界面进行评估。

1.3 界面设计的工效学指南

Ponsa等研究者在归纳现有的通用人机界面设计指南的基础上，开发出适用于监控界面的工效学指南（GEDIS），并验证了其应用效果[7]。GEDIS类似于一份检查单，包括架构、分布、导航、颜色等10个一级评估指标，每个一级评估指标下包含有数量不等的二级评估指标。采用这些评估指标可以对人机界面进行评分，每个评估指标得分在1~5分之间。最后，将各二级评估指标加权得到一级指标得分，再将各一级指标加权得到人机界面的总分。一般而言，人机界面总分在3分以上为合格，得分低的二级指标则是后续界面改进的出发点。

在GEDIS的基础上，Lorite等研究者进一步开发出适用于无人机界面的GEDIS-UAV评估工具[8]。GEDIS-UAV采用了与GEDIS相同的一级评估指标和分数合成算法，但依据无人机的特点修改了部分二级评估指标。

2 无人机驾驶员工作负荷的测量

虽然无人机引入了不同程度的自动化控制，但无人机驾驶员仍然面临多任务操作，有时一名驾驶员需要同时操作多个无人机，因而其工作负荷往往是偏大的，容易导致事故或不安全事件。无人机界面设计应当避免驾驶员产生高工作负荷。为衡量驾驶员的工作负荷，可以采用主观测量、生理测量等方法。

2.1 主观测量

主观测量是操作者本人对感受到的工作负荷进行自我

评估的方法，通常在任务完成后进行。目前比较成熟的主观测量表有以下几种。

主观工作负荷评估量表（SWAT）从三个维度评估工作负荷：时间负荷、努力负荷、心理紧张负荷。三个维度分别有轻度、中度、重度三个等级，因此共形成3×3×3=27种组合。测试时，受试者首先对三个维度的重要性进行排序，然后根据自身感受选出相应的负荷等级，并换算成0~100分的工作负荷值。分值越大，表明工作负荷越大。

任务负荷指数（NASA–TLX）是另一个常用的主观评估量表，它评估了工作负荷的6个维度：努力、绩效、挫折程度、时间需求、脑力需求、体力需求。测试时，受试者对每个维度进行自我评分，每个项目得分在0~20分之间，也有以10分为最大得分的量表设置。然后，再通过加权求和得到总分，各维度的权重是由受试者进行各个维度的对偶比较而确定的。

此外，前文提到的库珀–哈珀量表也可用于主观工作负荷的评估。

理论研究及实践表明，上述工作负荷的主观测量工具具备良好的信度和效度，施测也较为简便。然而个体差异较大，每个人对工作负荷的理解与感受也不同，测量结果不够客观准确，因此这种方法具有很大局限性。

2.2 生理测量

对工作负荷进行基于生理参数的测量与评估，是一种更为客观准确的方法。目前有很多生理参数指标可用于工作负荷的评估，包括脑电、大脑血液动力、心率、眼动指标等，以下分别进行简述。

事件相关电位（ERP）是一种特殊的脑诱发电位，反映了认知过程中大脑的神经电生理变化，常用于考察复杂的心理活动。衡量工作负荷的常用ERP指标是P300，其峰值大约出现在相关事件发生后的300ms。研究表明，当驾驶员的工作负荷较大时，P300的波幅会减小，其潜伏期会延长[9]。

将脑电及ERP技术用于工作负荷测量具有时间分辨率高的优点，但其空间分辨率较低，诊断力受到一定程度的限制。为克服这些局限，可采用功能性近红外光学成像技术（fNIRS）。fNIRS技术利用了血红蛋白对近红外波段的光（680~1000nm）具有良好的散射性特性，通过测定某一脑区的光学信号变化，来说明氧合血红蛋白和脱氧血红蛋白的变化，从而研究人的复杂认知活动。Ayaz等利用fNIRS技术研究了执行空中交通管理任务的工作负荷，发现当工作负荷增加后，操作者左侧额下回的血液氧合血红蛋白浓度增加[10]。

功能磁共振成像技术（fMRI）是另一种具有高空间分辨率的技术，在工作负荷的评估中也有应用。当工作负荷提高时，前额皮层（PFC）及扣带前回（ACC）等脑区的血流增加，因而可以用这些脑区的变化来反映工作负荷的大小。

心率和心率变异性也是工作负荷的常用衡量指标。心率（HR）是指每分钟心跳的次数，心率变异性（HRV）是指逐次心跳周期差异的变化情况。HRV的分析方法有时域分析法、频域分析法及非线性分析法，用于工作负荷评估时常用频域分析法，将频率分为超低频、甚低频、低频、高频。高频部分代表着副交感神经的活动，因此，高频部分的减少意味着工作负荷的增大。也有研究者将低频部分与高频部分的比值作为衡量工作负荷的指标，比值越大，工作负荷越大[11]。

鉴于人机界面主要通过视觉系统获取信息，眼动技术成为考察操作者视觉追踪及工作负荷的天然手段。眼动技术可以分析操作者的瞳孔直径、眨眼频率、眨眼持续时间等指标。当工作负荷增加时，瞳孔直径会变大[12]。但利用瞳孔直径来说明工作负荷变化时，需要注意的是，瞳孔直径易受光照变化的影响，须排除光照对瞳孔的影响才能考察工作负荷带来的影响。眨眼频率是指每分钟眨眼的次数。目前，工作负荷如何影响眨眼频率尚无定论，工作负荷增加可能使眨眼频率降低，也可能使其提高。眨眼持续时间是指每次眨眼的时间长度，通常在0.1~0.4s，当工作负荷增加时，眨眼持续时间降低。

在以上各种工作负荷的生理测量技术中，最常用的是心率变异性和眼动技术。此外，大量的工作负荷研究都不是采用单一指标，而是结合多种主观测量、生理测量等方法，得到工作负荷的综合评估，使结果更具说服力[11]。

3 未来研究切入点

3.1 人机界面设计优化

有很多研究考察了无人机的界面设计和视觉元素呈现特征对驾驶员操作绩效的影响，包括以下几个方面。第一，无人机拍摄画面的视野大小研究，视野有宽视野和窄视野之分，宽视野更容易引起运动病，主要症状是眩晕感。第二，人机界面的视角呈现方式，视角有机外视角和机内视角，机内视角更易增加驾驶员的工作负荷。第三，画面是否有立体效果会产生不同的影响，带有立体显示效果的界面比单视场界面绩效更好，驾驶员应激也更小。

虽然上述针对无人机界面设计的研究取得了一定成果，但仍有很多问题悬而未决，很多无人机产品的界面设计并未从人机交互的角度考虑其设计是否符合人的认知及操控特性。未来应进一步探索显示画面的空间分辨率、时间

分辨率、视野大小等因素对操作绩效的影响，并在这些因素之间做出权衡。此外，在界面显示中引入增强现实或合成视景技术，可能导致正面或负面的影响，这些新技术带来的不同效果也值得进一步研究。

3.2 自动化

无人机的操作具有不同的自动化水平，从全自动、半自动到全手动。手动操作需要驾驶员借助无人机拍摄的实时画面，全自动操作则需要预先设定好航路点等众多参数。另外，有的无人机可以实现自动和手动操作的切换，驾驶员可按当前任务需求改变无人机的自动化水平。

自动和手动操作具备各自的优势及缺陷。手动操作往往易增加驾驶员的工作负荷，尤其是同时控制多个无人机时，并且手动操作易受其他任务及通信延迟的干扰。自动控制能在很大程度上降低驾驶员的工作负荷，其控制也更精确，然而驾驶员“不在环”的状态容易降低其情境意识，还会产生自动化依赖、自动化惊奇等不良心理反应。

为克服自动控制引起的缺陷，充分发挥其优势，应深入研究不同自动化水平的适用场景和条件，以及驾驶员对自动控制的超控条件。另外，无人机的起飞和降落有不同的方式，包括现场操作、地面控制台操作、自动控制等，各类方式的效果及事故率不同。鉴于起飞和降落阶段事故的高发性，应重点关注起降阶段的自动化水平。

3.3 多感觉通道的信息获取

同其他任务一样，无人机驾驶员的操作从本质上讲也属于信息加工。信息加工过程受到有限的注意资源的限制，根据多重资源理论，注意资源具有多重维度，如图2所示。信息加工过程涉及输入通道、编码方式、加工阶段和输出方式。例如，输入通道包括视觉通道、听觉通道等不同的感觉通道，编码方式有空间编码、语音编码，加工阶段包括知觉、认知和反应阶段，输出方式包括手动输出、语音输出等。

多重资源理论认为，如果多个任务在输入通道、编码方式、加工阶段和输出方式上具有不同的属性，而没有占用同一种属性，则可以同时进行而不会相互干扰；反之，若几个任务占用了相同属性的资源，则会相互干扰而无法同时进行。例如，管制员的语音输出与视觉信息输入不会相互干扰，而视觉常规信息与视觉告警信息之间则会相互干扰。

多重资源理论可以用于分析不同任务所使用的资源属性，并基于此分析来判断两个或多个任务是否可以同时进行。另一方面，多重资源理论也可以指导人机界面的设计。例如，告警信息可以采用视觉或听觉通道进行编码，为避免与其他视觉信息产生冲突，听觉告警信息能在注意资源有限的情况下取得更好效果。另外，除视觉、听觉这两种最常见的感觉通道以外，触觉也是获取信息的重要通道，且不占用视听通道，因此在注意资源紧张的情况下可考虑采用恰当的触觉信号。

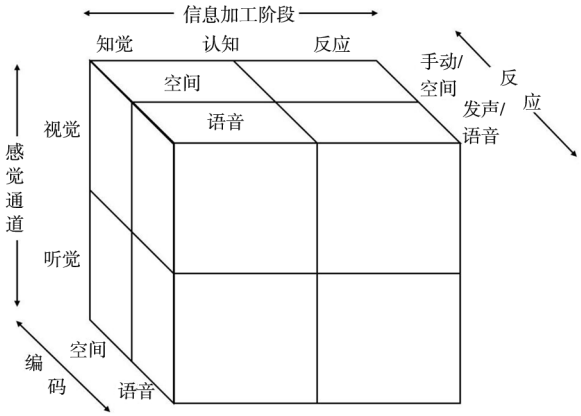

图2 多重资源理论

Fig.2 Multiple resource theory

4 结束语

无人机技术的提升及需求的增长，必将使其在未来有更广泛的应用。无人机应用的增长对无人机的安全性提出了更高的要求，然而，从人的因素角度进行无人机安全性的研究则相对滞后，相关的适航规章和标准也亟待出台和完善。本文总结了无人机界面设计中的人因工程学研究成果，提出了未来研究切入点，以期能为无人机的人机界面设计规范提供参考。

参考文献

[1] Gupta S G, Ghonge M M, Jawandhiya P M. Review of unmanned aircraft system[J]. International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology, 2013, 2(4): 1646-1658.

[2] Demir K A, Cicibas H, Arica N. Unmanned aerial vehicle domain: Areas of research[J]. Defence Science Journal, 2015, 65(4):319-329.

[3] Yesilbas V, Cotter T S. Structural analysis of HFACS in unmanned and manned air vehicles [C]//Proceedings of the International Annual Conference of the American Society for Engineering Management. American Society for Engineering Management, 2014.

[4] Cummings M L, Myers K, Scott S D. Modified Cooper Harper

evaluation tool for unmanned vehicle displays[C]//Proceedings of UVS Canada: Conference on Unmanned Vehicle Systems Canada, 2006.

[5] Donmez B, Cummings M L, Graham H D, et al. Modified cooper harper scales for assessing unmanned vehicle displays [C]//Proceedings of the 10th Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop. ACM, 2010: 235-242.

[6] Irizarry J, Gheisari M, Walker B N. Usability assessment of drone technology as safety inspection tools[J]. Journal of Information Technology in Construction, 2012, 17(12): 194-212.

[7] Ponsa P, Amante B, Díaz M. Ergonomic design applied in a sugar mill interface[J]. Latin American Applied Research, 2010, 40(1): 27-33.

[8] Lorite S, Muñoz A, Tornero J, et al. Supervisory control interface design for unmanned aerial vehicles through GEDIS-UAV[C]//International Conference on Human-Computer Interaction. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013: 231-240.

[9] Song J, Zhuang D, Song G, et al. Pilot mental workload measurement and evaluation under dual task[C]//2011 4th International Conference on Biomedical Engineering and Informatics. IEEE, 2011.

[10] Ayaz H, Shewokis P A, Bunce S, et al. Optical brain monitoring for operator training and mental workload assessment[J]. Neuroimage, 2012, 59(1): 36-47.

[11] Harriott C E, Buford G L, Adams J A, et al. Mental workload and task performance in peer-based human-robot teams[J]. Journal of Human-Robot Interaction, 2015, 4(2): 61-96.

[12] Reiner M, Gelfeld T M. Estimating mental workload through event-related fluctuations of pupil area during a task in a virtual world[J]. International Journal of Psychophysiology, 2014, 93(1): 38-44.

（责任编辑 皮卫东）

作者简介

蒋浩（1985— ）男，博士，讲师。主要研究方向：航空人机工效。

Tel：0838-5183477

E-mail: huban@zju.edu.cn

高鑫（1986— ）男，博士，讲师。主要研究方向：航空生理心理学。

Tel：0838-5183477 E-mail: gaoxin_xinli@163.com

Application and Prospect of Human Factor Engineering in Unmanned Aerial Vehicle

Jiang Hao*, Gao Xin

Institute of Aviation Human Factors and Ergonomics, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China

Abstract: In recent years, Unmanned Aerial Vehicles (UAV) have been applied more and more widely. The application of human factor engineering in UAV design can improve safety and efficiency of UAV operation. The paper summarize the assessment methods and tools for UAV interface, compare the subjective and physiological measurement methods of UAV operator's workload, and put forward future research breakthrough points such as automation and multi-sensory modality. Our research could provide references for the establishment and improvement of regulations and standards of UAV airworthiness, and further improve the safety of UAV.

Key Words: UAV; human factor engineering; man-machine interface; workload; human factors

Received: 2019-03-18； **Revised:** 2019-04-20； **Accepted:** 2019-04-30

Foundation item: Program of Institute of Aviation Human Factors and Ergonomics of CAFUC (JG2019-13); General Program of Civil Aviation Flight University of China (BJ2016-05, J2014-06)

***Corresponding author.Tel. :** 0838-5183477 **E-mail:** huban@zju.edu.cn