

基于 EEG 的驾驶舱告警信息设计研究

吴 薇, 孙有朝, 张 夏

(南京航空航天大学民航学院, 南京 211106)

[摘 要] 针对直升机驾驶舱人机交互中认知负荷问题, 设计飞行模拟试验, 探究视觉和听觉告警对飞行员认知负荷的影响。基于多元线性回归方法, 通过主观评价结果、反应时间、准确率和脑电信号等指标, 构建了直升机驾驶舱人机交互认知负荷评估模型。结果表明文字颜色、语音提示两种告警特征对飞行员信息加工均会产生影响, 使用多元线性回归模型可对不同告警方式下受试对象的认知负荷水平进行评估, 构建的评估模型能够较准确地评估直升机驾驶舱中飞行员的认知负荷, 可为优化驾驶舱交互设计、降低飞行员认知负荷、减少人为差错提供依据。

[关键词] 驾驶舱告警; EEG; 信息编码; 认知负荷

[中图分类号] V223.1

[文献标识码] A

[文章编号] 1006-141X(2022)04-0017-07

Design of Cockpit Warning Information Based on EEG

WU Wei, SUN You-chao, ZHANG Xia

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: Aiming at the cognitive load of civil aircraft cockpit interaction, a flight simulation test has been designed to explore the effects of visual and auditory warnings on the cognitive load of pilots. Based on multiple linear regression method, the cognitive load assessment model of aircraft cockpit interaction is constructed by subjective evaluation results, reaction time, accuracy and EEG signals. The results show that the two warning features, text color and voice prompt, have an impact on pilot information processing. The results show that the multiple linear regression model can evaluate the cognitive load of subjects under different warnings. The evaluation model can accurately evaluate the cognitive load of pilots in civil aircraft cockpit. The results can provide a basis for optimizing cockpit interaction design, reducing pilot's cognitive load and reducing human error.

Key words: cockpit warning; electroencephalogram (EEG); information coding; cognitive load

现代驾驶舱中, 提供给飞行员的大部分信息都是以视觉方式提供的, 伴随着机载设备的飞速发展, 信息量也越来越大, 尤其在紧急情况下, 飞行员的工作量会显著增加, 而在这一压力增加的时期, 经

常会发生人为错误, 从而降低飞行的安全性^[1-3]。听觉系统作为人类获取信息的一种重要通道, 它可以使使用语言进行交流, 而无需飞行员改变视野^[4]。因此, 为了使飞行员更有效地获取告警信息, 可以对驾驶

收稿日期: 2022-08-05

基金项目: 国家自然科学基金委员会 - 中国民用航空局民航联合研究基金项目 (U2033202, U1333119), 国家自然科学基金项目 (52172387), 中央高校基本科研业务费 (1007-XBC22006)

引用格式: 吴薇, 孙有朝, 张夏. 基于 EEG 的驾驶舱告警信息设计研究 [J]. 航空电子技术, 2022, 53(4): 17-23.

舱告警方式进行合理的设计,在不增加视觉负荷的前提下,通过引入听觉来分担信息获取任务,降低飞行员认知负荷,帮助飞行员快速识别危险,缩短反应时间,从而提高飞行安全。

驾驶舱告警信息表现多种多样,不同的告警信息编码方式对驾驶舱人机工效有着不同的作用与影响。在视觉告警方面,尺寸、颜色、形状、闪光频率、大小和数量等不同报警形式在数字界面上的用户性能评价^[5-6]。在听觉告警方面,驾驶舱语音警告的性别(男声/女声)以及不同的声音风格(单调的/紧急的/耳语)会影响飞行员的表现^[7],音量、频率、脉冲数、脉冲-脉冲时间、频率等声学参数对听觉信号的感知确认也会产生影响^[8-9]。

本文从字体颜色、语音提示两个方面对驾驶舱告警信息编码进行研究,通过脑电实验研究飞行员在不同告警方式下的脑电节律分布规律,评估不同设计方案的认知负荷,基于多元线性回归方法构建了直升机驾驶舱人机交互认知负荷评估模型,为改进驾驶舱告警设计提供支持。

1 基于脑电信号的认知负荷评价

现有的关于告警信息编码的研究中,大多通过被试人员的行为数据以及主观测评结果对编码方式进行评价^[10-11],缺少直接测量告警信息引起的认知负荷的方法和手段。通过脑电图(EEG: ElectroEncephaloGram)可以探究飞行员在不同告警方式下的脑电节律分布规律,为驾驶舱告警信息编码提供研究思路。

针对认知负荷相关的脑电节律,专家们开展了一系列研究。Carolina等^[12]发现驾驶员认知负荷与 θ 脑电功率谱正相关;Kumar等^[13]提出了一种利用脑电功率谱测量认知负荷的方法,并通过实验讨论了额叶、顶叶、枕叶和颞叶上 α 、 β 和 δ 带功率谱的特征,对提出的方法进行了验证;Feltman等^[14]发现在听觉任务中额叶 α 和 β 活动与感知工作量相关,在视觉任务中额叶 θ 波与感知工作量有关;Borghini等^[15]对与飞行员驾驶任务的神经生理学测量相关的文献进行了综述,发现在高认知负荷时, θ 波段的脑电功率增加, α 波段的脑电功率减少。

综合评估方法建模方面,较常用的建模技术主要有回归分析和神经网络建模等。曲洪权等^[16]针对

视觉和操作类任务,提出一种基于脑电独立分量特征的认知负荷分类方法;郭孜政等^[17]以脑电信号熵值作为测评指标,基于BP神经网络模型构建驾驶认知负荷识别模型;张宁宁等^[18]通过主观量表、飞行绩效、脑电指标和眼动指标综合评估认知负荷,评价座舱显示界面的性能;卫宗敏^[19]通过设计综合性实验,采用ERP、ECG和EOG三类生理测量法,开展多显示界面多飞行任务状态下的认知负荷评价指标和评价模型研究。

多元线性回归方法能够有效用于研究不同影响因素对于多分类变量的效应,并且能够有效保留所选评价指标,防止信息丢失,预测结果稳定性较好。因此,本文基于多元线性回归方法评估不同告警信息编码方式给飞行员带来的认知负荷,针对 α 、 β 、 θ 波段的脑电信号进行分析,结合NASA-TLX量表、反应时间、正确率等评价指标,对视觉通道与听觉通道两种不同形式的告警进行研究。

2 飞行模拟实验

2.1 受试对象

受试对象平均年龄38.2岁($SD = 4.1$),平均飞行时间3160小时($SD = 1126.4$)。飞行模拟器是在Kamov Ka-52的基础上建立的。通过12次飞行实验模拟预警信息处理过程,每次实验出现4次随机预警。所有受试对象都是右利手,听力正常,视力正常或矫正,所有人的健康状况良好。在参加实验之前,受试对象有足够的睡眠和良好的饮食。

2.2 实验设备

实验设备包括座舱仿真平台和脑电采集设备。座舱模拟平台包括飞行控制装置和显示装置。脑电采集设备包括脑电放大器、脑电帽及相关软件。脑电设备的相关技术指标如表1所示。

表1 脑电设备的相关技术指标

脑电设备	技术指标	
脑电放大器	分辨率	24bit
	采样率	500Hz
	通道数	64
脑电帽	电极类型	osculum
	参考电极	M1 M2
相关软件	数据采集	eego
	数据处理	eeglab

2.3 处理因素

军用直升机的告警系统通常按照国军标 (GJB) 1006-90《飞机座舱告警基本要求》^[20] 进行设计, 其中, 3.2 规定视觉告警一般采用灯光、电 / 光显示器或机械式等显示形式, 3.2.2 电 / 光显示器告警信息为在平视显示器、下视显示器 (多功能) 或专用的告警显示器上用字符显示的告警信息。3.3 规定听觉告警, 一般采用话音、音调两种形式。本试验的视觉告警使用下视显示器进行显示, 听觉告警为话音告警。

本试验的处理因素为驾驶舱告警信息编码方式, 采用了 2 (文字颜色类型) × 2 (是否有语音提示) 的实验设计, 给出四种不同的告警信息编码设计方案。告警内容为“导弹逼近”, 听觉告警语音源为女中音, 视觉告警位于显示屏左中, 字体颜色包括红色和白色文字两种, 告警方式编号及实验中出现的次数如表 2 所示。

表 2 告警方式编号及实验次数

序号	告警方式	出现次数
W1	红色文字、有语音提示	12
W2	白色文字、有语音提示	12
W3	红色文字、无语音提示	12
W4	白色文字、无语音提示	12

2.4 评价指标

通过观察以下信息加工指标研究告警信息编码对受试对象信息加工过程的影响:

(1) NASA-TLX 量表: 每次实验结束后令受试对象填写 NASA-TLX 量表, 评估处理告警信息过程中的认知负荷;

(2) 反应时间: 告警出现后, 受试对象应做大幅度机动模拟躲避导弹的过程, 将告警出现到受试对象注意到告警信息并作出反应这一段时间视为反应时间;

(3) 操作的准确率: 告警出现后, 受试对象应

做大幅度机动模拟躲避导弹的过程, 当被试对象未作出反应或者反应时间过长时都可能导致无法躲避导弹, 因此, 将被试人员无反应或反应时间超过 5s 时视为不正确的操作;

(4) EEG 指标: 被试人员的生理数据直接与其认知负荷相关, 通过测量被试的脑电特征参数, 包括 θ 、 α 、 β 波的功率谱密度, 可以评估告警信息加工过程给被试人员带来的认知负荷。

2.5 实验流程

在驾驶舱平台上进行了仿真实验, 飞行示意图如图 1 所示。飞行过程包括飞行前、起飞、爬升、巡航、下降、进近和降落 7 个飞行阶段。直升机从出发地起飞, 爬升到巡航高度, 在巡航阶段, 受试对象控制直升机保持高度和速度直到到达目的地, 在目的地, 受试对象控制直升机悬停 10 秒钟, 最后直升机返回并降落在出发地。飞行过程中随机出现告警, 受试对象在收到警告信息后, 控制直升机沿飞行路线飞行, 并进行大角度机动, 模拟躲避导弹的过程。实验过程中实时采集受试者的脑电图数据, 每次实验结束后令受试对象填写 NASA-TLX 量表。

具体的任务场景操作程序包括:

(1) 在地面进行状态检查, 加载数据链数据、航路点、航线、地图等信息, 设置预定航线、导航等参数;

(2) 执行飞行前准备;

(3) 起飞: 对准完成后, 接收到指令起飞出航;

(4) 飞行: 按照预定航线飞行, 综合显示机载状态信息、飞行信息、态势指控信息等, 观测并规避地形障碍物;

(5) 告警信息处理: 任务过程中随机时间出现告警, 告警内容为“导弹逼近”, 告警方式为“红色

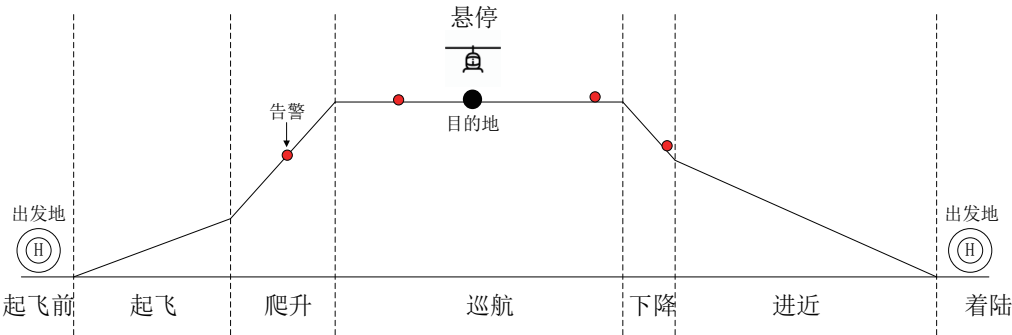


图 1 飞行示意图

文字、有语音提示”、“白色文字、有语音提示”、“红色文字、无语音提示”、“白色文字、无语音提示”四类,受试对象接收到告警信息后进行大角度机动飞行;

(6) 按照预定航线飞行,在到达最后航路点后悬停,然后按原路线返回并着陆。

3 实验结果分析

3.1 主观评估结果

统计受试对象填写的 NASA-TLX 量表评分,对主观评估结果进行单因素方差分析, $F(3,33)=3.698$, $p=0.019<0.05$,不同告警方式的主观评价结果之间存在显著性差异,结果如图 2 所示。

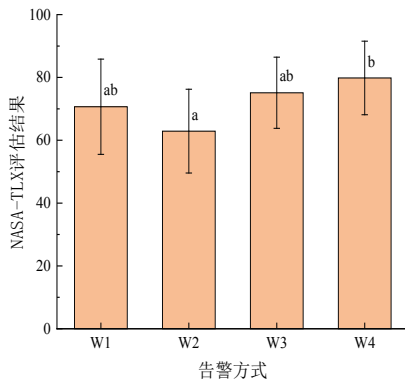


图 2 主观评价结果

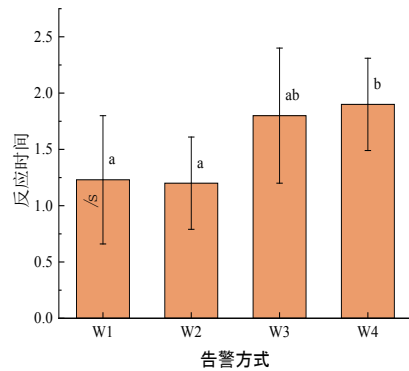
结合图 2 与显著性分析结果可以看出,告警方式为 W4 (白色文字、无语音提示) 时,受试对象的认知负荷显著高于告警方式为 W2 (红色文字、有语音提示) 的结果,四种告警方式下,认知负荷的排序是 $W4>W3>W1>W2$ 。

3.2 反应时间与正确率

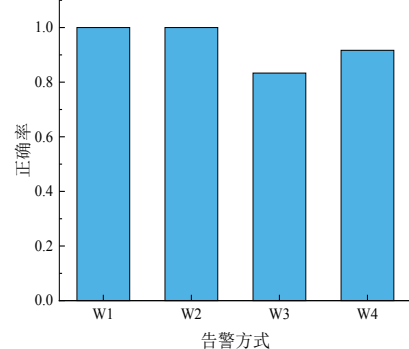
根据实验记录的视频统计受试对象的反应时间及正确率,对反应时间进行单因素方差分析, $F(3,33)=4.921$, $p=0.007<0.05$,不同告警方式的反应时间之间存在显著性差异;对正确率进行单因素方差分析, $F(3,33)=2.067$, $p=0.124>0.05$,不同告警方式的正确率之间无显著性差异;结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出,有语音提示时,受试对象的反应时间和正确率明显优于无语音提示的情况,有语音提示时字体颜色对反应时间和正确率的影响不

大,但是无语音提示时可以看出白色文字的视觉告警下,受试对象的正确率更高,反应时间与红色文字接近。



(a) 反应时间



(b) 正确率

图 3 受试对象的反应时间及正确率

3.3 脑电数据分析

以 1s 为时间窗截取出数据,提取事件开始后 1s 的时间窗口,对原始脑电信号数据进行快速傅里叶变换,计算各个波段 (θ : 3.5~7.5Hz, α : 7.5~12.5Hz, β : 12.5~30.0Hz) 功率谱密度的平均值。

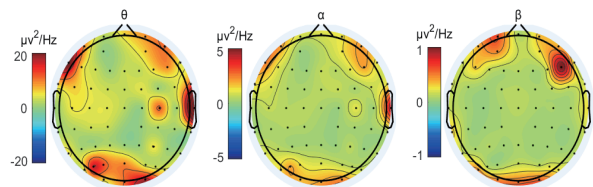
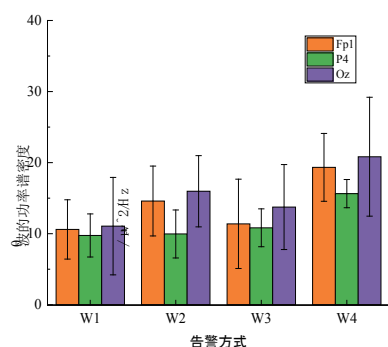


图 4 各频段的脑电地形图

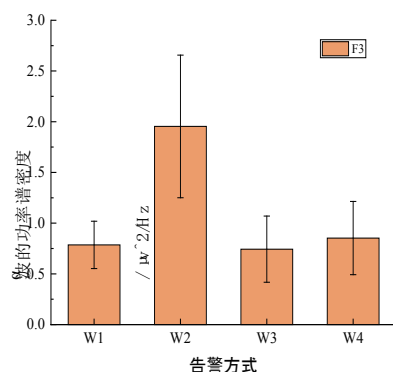
由图 4 可以看出,三个频段的脑电地形图在额叶和枕区表现出典型的特征。根据文献 [12-15],与认知负荷相关的脑区主要为额叶、顶区和枕区,因此选取这几个区域的电极进行分析。使用 SPSS 对

各个频段的脑电数据单因素方差分析,研究不同告警方式对受试对象 θ 、 α 、 β 波的功率谱密度值产生的影响以及在不同电极上结果的差异。

以 θ 波的功率谱密度作为指标,对脑电数据进行单因素方差分析,发现在 Fp1 电极上, $F(3,33)=5.480$, $p=0.004<0.05$; 在 P4 电极上, $F(3,33)=7.917$, $p<0.001$; 在 Oz 电极上, $F(3,33)=3.525$, $p=0.026<0.05$, 四种告警方式之间存在显著差异,四种告警方式在各个电极上的 θ 波如图 5 (a) 所示。以 α 波的功率谱密度作为指标,对脑电数据进行单因素方差分析,发现在 F3 电极上, $F(3,33)=15.876$, $p<0.001$, 四种告警方式之间存在显著差异,四种告警方式在各个电极上的 α 波如图 5 (b) 所示。以 β 波的功率谱密度作为指标,对脑电数据进行重复测量方差分析,四种告警方式之间无显著差异。



(a) θ 波的功率谱密度



(b) α 波的功率谱密度

图5 四种告警方式的脑电数据分析

研究发现,四种告警方式下,受试对象脑电波的区别主要集中在额叶区域 Fp1、F3 和顶区 P4、枕区 Oz 共 4 个电极上。在额叶 (F3),告警方式 W2 (白

色文字、有语音提示)的 α 波显著高于其他告警方式;在额叶 (Fp1) 和顶区 (P4),告警方式 W4 (白色文字、无语音提示)的 θ 波显著高于其他告警方式。根据文献 [14-15],在高认知负荷时, θ 波段的脑电功率增加, α 波段的脑电功率减少。因此可以看出,告警方式为 W4 (白色文字、无语音提示)时,飞行员认知负荷最大,告警方式为 W2 (白色文字、有语音提示)时,受试对象认知负荷最小,说明听觉通道的告警设计能够帮助受试对象感知到告警信息,降低受试对象的认知负荷。

3.4 认知负荷评估模型

基于实验测量的分析结果,选取 θ 波和 α 波的功率谱密度、反应时间作为指标,使用多元线性回归方法,构建直升机驾驶舱人机交互认知负荷评估模型,构建的模型如下:

$$y = 59.918 + 0.938 * x_{11} - 0.175 * x_{12} + 0.678 * x_{13} - 14.771 * x_2 + 3.911 * x_3$$

其中, y 为认知负荷的评估值, x_{11} , x_{12} , x_{13} 分别为 Fp1、P4、Oz 三个电极上的 θ 波的功率谱密度, x_2 为 F3 电极上的 α 波的功率谱密度, x_3 为反应时间测量值。

模型的 R^2 为 0.834,拟合效果较好,结果表明利用多元线性回归模型对认知负荷水平进行评估具有较高的准确度。

3.5 分析与讨论

实验结果表明:字体颜色和语音提示对飞行员信息加工均会产生影响。

字体颜色对飞行员信息加工的反应时间和正确率有影响。色彩具有捕获和凸显注意的作用,可以降低无关信息的凸显程度、避免界面信息冗余,从而减少外在认知负荷。白色字体时飞行员的反应时间和正确率均高于红色字体;从脑电指标来看,红色文字相对于白色文字时飞行员的认知负荷更小。这表明两种字体颜色的视觉告警相比,红色文字的告警方式更容易引起被试人员的注意。

相比于无语音提示的情况,有语音提示时被试人员处理告警信息的反应时间更短,正确率更高,并且有语音提示时,不同字体颜色的告警下受试对象的信息加工速率和正确率很相近。这说明语音提示可以帮助飞行员理解视觉告警信息的内容,从而提高飞行员信息处理速度和准确率。脑电结果显示,在有语音提示时,被试人员的认知负荷降低,受试

对象在信息处理过程中占用更少的认知资源。

4 总结

本文分析了驾驶舱告警信息编码对飞行员认知负荷的影响,通过脑电实验研究飞行员在不同告警方式下的脑电节律分布规律,基于多元线性回归方法构建直升机驾驶舱人机交互认知负荷评估模型,评估不同设计方案的认知负荷,并分析了字体颜色、语音提示两种特征对驾驶舱告警信息加工的影响。实验发现文字颜色、语音提示两种特征对飞行员信息加工均会产生影响,红色文字的视觉告警信息设计能够获得更短的反应时间与更高的正确率;在有语音提示的情况下,飞行员的反应时间更短且正确率更高,可以更好地引起飞行员的注意,降低飞行员认知负荷。实验结果表明构建的直升机驾驶舱人机交互认知负荷评估模型具有较好的拟合效果,这说明将脑电应用于驾驶舱告警信息加工过程的研究是可行的,可以为改进驾驶舱告警设计提供支持。

参考文献

- [1] 蒋浩. 飞机驾驶舱触摸屏界面的人机交互[J]. 科技创新导报, 2019, 16(05): 21-23.
- [2] 蒋引, 高杉, 谭维, 等. 基于人因工程视角的民机驾驶舱告警系统研究综述[J]. 民用飞机设计与研究, 2021(01): 85-91.
- [3] 舒秀丽, 董大勇, 董文俊. 飞机驾驶舱视觉告警信号设计的基本要求分析[J]. 航空工程进展, 2015, 6(04): 512-518.
- [4] Sabic Edin, Chen Jing, MacDonald Justin A. Toward a better understanding of in-vehicle auditory warnings and background noise[J]. Human factors, 2019.
- [5] Y F Niu, B Li, X Y Zhang, et al. Performance evaluation of alarm forms under different visual coding on the digital interface[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 439(3).
- [6] Jiang Shao, ChengqiXue, Haiyan Wang, et al. Study on event-related potential of information alarm in monitoring interface[J]. Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics, 2015, 54-65.
- [7] G. Robert Arrabito. Effects of talker sex and voice style of verbal cockpit warnings on performance[J]. Human Factors: The Journal of Human Factors and Ergonomics Society, 2009, 51(1).
- [8] BodendorferXaver, KortekaasReinier, Weingarten Markus, et al. The effects of spectral and temporal parameters on perceived confirmation of an auditory non-speech signal[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2015, 138(2).
- [9] Lijing Wang, Wei Guo, Xianchao Ma, et al. Analysis of influencing factors of auditory warning signals' perceived urgency and reaction time[J]. Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics, 2016, 452-463.
- [10] 卫宗敏. 民机驾驶舱人机交互脑力负荷预测模型[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(13): 5270-5274.
- [11] 董磊, 向晨阳, 赵长啸, 等. 民机驾驶舱显示触控系统人机工效综合评价[J]. 航空学报, 2021, 42(06): 75-89.
- [12] Carolina Diaz-Piedra, Maria Victoria Sebastián, Leandro L. Di Stasi. EEG theta power activity reflects workload among army combat drivers: an experimental study[J]. Brain Sciences, 2020, 10(4).
- [13] Naveen Kumar, Jyoti Kumar. Measurement of cognitive load in hci systems using eeg power spectrum: an experimental study[J]. Procedia Computer Science, 2016, 84.
- [14] Feltman Kathryn A, Bernhardt Kyle A, Kelley Amanda M. Measuring the domain specificity of workload using eeg: auditory and visual domains in rotary-wing simulated flight[J]. Human factors, 2020.
- [15] Gianluca Borghini, Laura Astolfi, Giovanni Vecchiato, et al. Measuring neurophysiological signals in aircraft pilots and car drivers for the assessment of mental workload, fatigue and drowsiness[J]. Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 2014, 44: 58-75.
- [16] 曲洪权, 单一平, 刘欲哲, 等. 脑电信号中独立分量特征提取与脑力负荷分类[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(28): 11499-11504.
- [17] 郭孜政, 潘毅润, 潘雨帆, 等. 基于 EEG 熵值的驾驶员脑力负荷水平识别方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2015, 45(05): 980-984.
- [18] 张宁宁, 范思岑, 王丹丹, 等. 基于脑力负荷的通航飞机座舱显示界面测评研究[J]. 工程设计学报, 2019, 26(04): 409-415.
- [19] 卫宗敏. 面向复杂飞行任务的脑力负荷多维综合评估

模型 [J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(07): 1287-1295.

[20] 国防科学技术工业委员会. 飞机座舱告警基本要求

CJB 1006-90[S]. 国防科学技术工业委员会, 1991.