

不同脑力负荷水平下的情境意识研究

冯传宴, 完颜笑如, 刘双, 陈浩, 庄达民

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘要:为探索不同脑力负荷水平的情境意识(SA)变化规律,并寻找该任务条件下SA的敏感生理指标。选取24名被试完成基于多任务属性平台(MATB)II的3种脑力负荷水平(低、中和高)任务。记录绩效测量、情境意识全面测量技术(SAGAT)、三维度情境意识测评技术(3D-SART)、眼动和脑电数据。结果表明,随着脑力负荷的增加,SAGAT得分和3D-SART得分均显著减小。并且,这两者均与美国国家航空航天局任务负荷指数量表(NASA-TLX)得分中等负相关。SAGAT得分与顶叶区(C_4) α_2 相对功率中等正相关。此外,仅在高脑力负荷下,SAGAT得分与最近邻指数(NNI)中等负相关。研究表明,在不同脑力负荷水平下,①随着脑力负荷增加,SA逐渐减少。②NNI和 α_2 相对功率可能是SA的敏感指标。该研究可为驾驶舱显控界面的设计及人机功能分配的优化提供一定参考。

关键词:情境意识;脑力负荷;SAGAT;NNI; α_2 相对功率

中图分类号:R857.1

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2020)03-0610-09

情境意识(situation awareness, SA)是目前航空安全和工效学科的研究热点之一^[1-4]。根据美国国家运输安全委员会事故报告,由人因失误导致的航空事故中有88%都与SA差错相关^[5-6]。SA最广泛的定义由Endsley提出,即“感知特定时间和空间情境下的相关情境元素,理解其意义并进一步预测随后可能发生的状态”^[1]。情境意识的测量方法主要包括主观的情境意识测评技术(situation awareness rating technology, SART)^[7]、客观的情境意识全面测量技术(situational awareness global assessment technology, SAGAT)^[2]、绩效测量^[8]和生理测量^[9-10]等。

脑力负荷与SA之间关系的探索一直是研究人员的兴趣点,该研究对于开展驾驶舱显控界面的设计以及人机功能分配的优化具有十分重要的现实意义^[11-13]。相关研究表明,脑力负荷与SA既相互支持又相互竞争^[14],高脑力负荷既可能与低SA相关,也可能与高SA相关^[11,15]。高信息量会导致认知的高脑力负荷,从而导致SA的减少^[6,14]。同样,在高度自动化的系统中,由于无聊和警惕性降低也可能

导致SA降低^[6,14]。Vidulich在对18组相关的研究进行了分析,指出这两者之间缺乏一致的关系^[16]。在一些研究中,研究人员通过在显示界面添加新信息的方式提高了SA,但同时也增加了脑力负荷^[16]。另外,也有研究人员发现这两者之间存在相反的关系^[12,14,17]。截至目前,不同脑力负荷水平与SA的定量关系仍不明确。

此外,SA的实时监测是工程应用的一个重要研究方向。生理测量方法实时且客观,因此探索SA的敏感生理指标一直是研究人员的目标。其中,以眼动和脑电指标关注度最高^[10,18-19]。视觉元素仅在眼动的注视期间被处理,对某一视觉元素的注视和回视行为提供了对该元素进行注意力分配、对该视觉信息的获取以及在记忆中对该信息进行存储的视角^[10,20]。van de Merwe在一项模拟飞行的任务中指出注视频率和注视停留时间是信息获取指标以及最近邻指数(nearest neighbor index, NNI)是新信息获取活动指标的观点^[10]。大脑警觉性的降低和疲劳状态的出现可能诱发低SA的出现,而EEG指标与

收稿日期:2019-07-03

基金项目:国家自然科学基金和中国民用航空局联合项目(U1733118)以及国家自然科学基金(71301005)资助

作者简介:冯传宴(1992—),北京航空航天大学博士研究生,主要从事飞行员情境意识研究。

通信作者:完颜笑如(1981—),北京航空航天大学讲师,主要从事驾驶舱人机工效研究。E-mail: wanyanxiaoru@buaa.edu.cn

这些变化联系紧密^[21-23]。EEG 目前多用于测评飞行员脑力负荷^[24-25],而直接用于测量 SA 的研究较为有限。一项采用 EEG 测量 SA 的研究指出,在空对地作战任务中 θ 波活动的增加和 α 波活动的减少与低 SA 存在联系^[9]。综上所述,眼动和脑电指标对 SA 的敏感性有待进一步研究。

为了探索不同脑力负荷水平的 SA 变化规律,并寻找该任务条件下 SA 的敏感生理指标。本研究招募了 24 名被试完成 3 种脑力负荷的实验任务,并记录了绩效测量、SAGAT 方法、主观测量、眼动和脑电数据以分析 SA 变化。进一步进行了多个测量指标之间的 Pearson 相关分析,以定量描述这种变化并找寻可能的对 SA 敏感的眼动和脑电指标。

1 方法

1.1 被试

招募了 24 名年龄在 21 到 24 岁 ($M=23.29$ 岁, $SD=0.81$ 岁) 的被试。所有被试均为北京航空航天大学航空学院在校研究生,专业为航空工程,均具有良好的航空知识背景。在实验之前,所有参与者都被告知实验的说明和流程并签署书面知情同意书。所有被试身体健康状况良好,右利手,视力或矫正视力正常,实验前 24 h 要求保证足够睡眠(至少 8 h)。

1.2 实验设备与材料

基于多属性任务管理软件(multi attribute task battery, MATB) II 搭建了模拟平台,并在一块 22 英寸 Lenovo L2240pwD 液晶显示屏(1 680×1 050 像素分辨率)上显示。该平台经过几个版本的更新,其有效性已经得到了广泛验证^[26]。本研究对该平台进行了重新定义,共包括 4 个元素,呈现在独立的兴趣区域(area of interest, AOI),如图 1 所示。



图 1 MATB II 显示界面及各子任务划分

显示界面左上方的系统监控任务(图 1 AOI 1),上方中央区的追踪任务(图 1 AOI 2),右上方的通信监测任务(图 1 AOI 3)和下方中央区(图 1 AOI 4)的资源监控任务。各子任务的呈现顺序和呈现时间通过可扩展标记语言 eXtensible Markup Language (XML) 编程实现。在任务显示界面中, MATB II 显示界面的尺寸为 1 014×758 像素,呈现在电脑显示屏的正中央。

1.3 实验设计

实验采用被试内设计,自变量为脑力负荷水平,包括 3 个水平:低脑力负荷水平(低负荷)、适中脑力负荷水平(中负荷)和高脑力负荷水平(高负荷)。这 3 种脑力负荷采用拉丁方顺序平衡疲劳效应和练习效应。在整个任务阶段,低负荷的呈现频率为 0.25 次/min,中负荷的呈现频率为 3 次/min,高负荷的呈现频率为 6 次/min。另外,每次脑力负荷任务中各子任务呈现的次数是相同的。

因变量包括主观和客观的测量指标。采用美国国家航空航天局任务负荷指数(national aeronautics and space administration task load Index, NASA-TLX) 量表和 3D-SART 量表分别对被试的脑力负荷(分值范围:1~100)^[27]与 SA(分值范围:0~14)^[7]进行主观评估。

任务绩效测量指标包括 4 个子任务的反应时间(response time, RT)和正确率(accuracy, AC)、手动追踪任务的飞行偏差(flight deviation, FD)。任务绩效数据由 MATB II 平台后台自动记录。RT 为该子任务中被试作出正确反应的平均响应时间。AC 为该子任务中被试正确响应次数占呈现总数的百分比。FD 通过计算以像素为单元的中心点的均方根偏差实现。使用 SAGAT 方法客观测量被试的 SA 水平^[2],记录其 SAGAT 得分,即对 SA 冻结问题进行正确响应的百分比。

采用 Tobbi Pro X3-120 系统采集被试的眼动数据,并采用 5 点校准法完成校准,采样率为 120 Hz。眼动数据分析采用 tobbi studio 3.4.5 软件进行,记录并计算得到眼动的 3 个指标:注视频率、注视停留时间和 NNI。注视频率为单位时间内的注视次数^[10]。注视停留时间指的是同一 AOI 的注视总时间以及在同一 AOI 上不同注视之间的时间^[10]。注视频率和注视停留时间反映了视觉区域对作业人员的重要程度。使用空间统计算法分析眼动注视数据,结果是距离指示器,称为 NNI。该指标反映了注视点离

散程度^[28],采用 ASTEF 工具进行计算。

采用 Neuroscan Neuamps 系统 32 通道放大器记录 EEG 数据: $F_7, FT_7, T_3, TP_7, T_5; FP_1, F_3, FC_3, C_3, CP_3, P_3, O_1; F_Z, FC_Z, C_Z, CP_Z, P_Z, O_Z; FP_2, F_4, FC_4, C_4, CP_4, P_4, O_2; F_8, FT_8, T_4, TP_8, T_6$ 。所有电极采用 Ag/AgCl,记录带宽为 0~200 Hz,采样率为 1 000 Hz。电极的阻抗保持在 5 k Ω 以下。GND 设置为接地,左乳突 A1 作为在线参考。同时记录垂直和水平眼电。然后,EEG 信号重新参考离线的双侧乳突电极的平均值。使用 MATLAB R2014a eeglab14_1_1b 工具箱进行离线分析,采用双侧乳突电极进行重参考、1~30 Hz 带通滤波。进一步进行独立成分分析,并采用 ADJUST1.1.1 工具包进行伪迹去除。全部 EEG 数据被分段并进行快速傅里叶变换,平均后进行 6 个不同频率划分: δ (1~4 Hz), θ (4~8 Hz), α_1 (8~10 Hz), α_2 (10~13 Hz), β_1 (13~18 Hz)以及 β_2 (18~30 Hz)。使用通过整个指定频谱的功率积分确定的整体频带功率,功率分析为微伏的平方(μV^2)每倍频。脑电指标包括不同波段的绝对功率和相对功率,以及慢快波比值(slow wave/fast wave, SW/FW)。相对功率为该波段脑电指标绝对功率占总功率的比例,其中总功率为 6 个不同频率绝对功率之和。以 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1$ 和 β_2 波作为快波, θ 波作为慢波,可计算多个 SW/FW。本文记录分析 4 个 SW/FW: $\theta/\alpha_1, \theta/\alpha_2, \theta/\beta_1$ 和 θ/β_2 。

1.4 实验任务与流程

在每个脑力负荷任务中,被试需要监控 MATB II 界面上显示的子任务的状态,并尽可能准确且迅速地通过鼠标、键盘和摇杆响应每个子任务的操作。每个子任务的具体操作要求如下。系统监测(AOI 1)中,所有被试被要求监控 4 个刻度栏的指针位置。当指针超出正常显示范围,鼠标点击相应刻度栏以恢复正常。追踪任务(AOI 2)呈现二维随机的输入补偿追踪任务。被试被要求监控当前飞行状态,当飞行状态由手动变成自动时,要求按键盘左方向键进行响应,然后操纵飞行摇杆操纵飞行器保持在最佳的飞行区域内(中央矩形区域内)。通信监控任务(AOI3)中,被试被要求监控计划刻度中即将到来的通信任务,当新的通信任务发生时(在计划栏中左侧的绿色滑块触碰到 0 时刻线时),按压键盘的右方向键进行响应。在资源监控(AOI 4)中,被试需要监控 4 个主要油箱的油量(A, B, C 和 D)。

当供油的油泵出现故障时,使用鼠标左键点击对应的油泵进行响应。

实验包括 2 个阶段:练习阶段和正式实验阶段,被试在练习阶段接受充分培训并签署知情同意书。正式实验中,每个被试需完成 3 次不同水平脑力负荷实验,一次脑力负荷实验约持续 20 min。实验过程中实时采集被试的眼动和脑电数据,同时采用 SAGAT 方法测量被试的 SA 水平,即在任务进行随机时刻冻结任务并且要求被试回答关于当前任务情境的一组 SA 问题。实验冻结呈现间隔约为 5 min,被试每次需回答 6 个 SA 问题(每个问题呈现时间为 10 s)。各水平脑力负荷实验之间要求被试填写 NASA-TLX 量表和 3D-SART 量表,并安排适当休息。

1.5 数据分析

统计分析均由 SPSS Statistics 23.0(IBM, united states)进行。所有统计检验水平均使用 $\alpha = 0.05$ 。采用重复测量的方差分析(ANOVA)用于确定脑力负荷对因变量的主效应。对于被试内部变量,采用 Mauchly's test 测试球形假设。如果违反了球形假设,则使用 Greenhouse-Geisser 对球形估计来校正自由度。事后检验采用 LSD 方法。采用 Pearson 相关方法计算各测量指标之间的相关性水平。

2 实验结果

2.1 脑力负荷的控制

随着脑力负荷的增加,在 NASA-TLX 得分中发现了增加的趋势($M_1 = 39.75, SD_1 = 15.21; M_2 = 53.23, SD_2 = 10.75; M_3 = 65.30, SD_3 = 9.37$)。这里 M 为均值, SD 为标准差,下标 1, 2 和 3 分别表示低负荷、中负荷和高负荷。重复测量的 ANOVA 分析表明脑力负荷的主效应显著,事后比较表明低负荷的 NASA-TLX 得分显著低于中负荷和高负荷,中负荷的 NASA-TLX 得分显著低于高负荷,如表 1 所示。进一步,分别对 NASA-TLX 量表的 6 个维度(脑力需求、体力需求、时间压力、工作绩效、努力和挫败感)进行重复测量的 ANOVA,结果发现脑力负荷的主效应均显著($p < 0.05$)。事后比较中发现除工作绩效和挫败感的低负荷和高负荷之间的不显著,其余组别之间均显著($p < 0.05$)。该结果很好地支持了本实验对 3 种脑力负荷水平的实验控制。

表 1 NASA-TLX 和 3D-SART 量表的 ANOVA 结果

测量指标	F 值	P 值	η^2	事后比较		
				低-中	低-高	中-高
NASA-TLX 得分	$F(2,46) = 57.037$	<0.001 *	0.713	<0.001 *	<0.001 *	<0.001 *
脑力需求	$F(2,46) = 78.015$	<0.001 *	0.772	<0.001 *	<0.001 *	<0.001 *
体力需求	$F(2,46) = 12.705$	<0.001 *	0.356	0.004 *	0.001 *	0.012 *
时间压力	$F(2,46) = 23.687$	<0.001 *	0.507	<0.001 *	<0.001 *	<0.001 *
工作绩效	$F(2,46) = 6.144$	0.010 *	0.211	0.090	0.011 *	0.023 *
努力	$F(2,46) = 44.128$	<0.001 *	0.657	<0.001 *	<0.001 *	<0.001 *
挫败感	$F(2,46) = 5.449$	0.008 *	0.192	0.155	0.010 *	0.033 *
3D-SART 得分	$F(2,46) = 13.422$	<0.001 *	0.369	0.002 *	0.001 *	0.010 *
注意资源的需求量	$F(2,46) = 72.311$	<0.001 *	0.792	<0.001 *	<0.001 *	<0.001 *
注意资源的供应量	$F(2,46) = 4.764$	0.024 *	0.200	0.049 *	0.023 *	0.217
实验情境的理解程度	$F(2,46) = 0.128$	0.750	0.007	1.000	0.725	0.716

注: * 表示 $p < 0.05$; 其中“低-高”表示低负荷和中负荷的组间比较, 其余类似。

2.2 任务绩效测量

随着脑力负荷水平的增加, MATB II 界面中央区的手动追踪和资源监测任务的 AC (%) 呈现逐渐

减少的趋势, RT (ms) 呈现逐渐增加的趋势, 如表 2 所示。

表 2 任务绩效指标的描述性结果 (均值±标准差)

子任务	指标	描述性结果		
		低负荷	中负荷	高负荷
系统监控任务	AC/%	100.00±0.00	88.40±16.62	90.45±8.10
	RT/ms	4 585.0±2 000.9	4 112.6±917.9	3 954.7±615.6
手动追踪任务	AC/%	100.00±0.00	99.65±1.70	97.57±4.06
	RT/ms	1 725.0±641.5	1 850.7±426.7	2 229.9±448.0
	FD	22.88±6.94	23.04 ± 5.72	21.50 ± 4.78
通信监控任务	AC/%	100.00±0.00	90.94±10.69	92.03±6.25
	RT/ms	2 773.7±1 797.8	2 659.0±1 291.2	3 439.5±1 531.5
资源监控任务	AC/%	100.00±0.00	95.83±5.49	92.71±6.87
	RT/ms	2 669.6±879.9	2 407.4±533.2	2 531.1±466.1

对 3 种脑力负荷水平下的不同绩效指标进行重复测量的 ANOVA, 结果表明对于 4 种子任务的 AC, 脑力负荷的主效应均显著 ($p < 0.05$), 如表 3 所示。

另外, 仅对于追踪任务的 RT, 脑力负荷的主效应是显著的 ($p < 0.05$)。事后比较的结果见表 3。

表 3 任务绩效指标的 ANOVA 结果

子任务	指标	F 值	P 值	η^2	事后比较		
					低-中	低-高	中-高
系统监控任务	AC/%	$F(2,46) = 10.977$	0.001	0.323	0.002 *	<0.001 *	0.417
	RT/ms	$F(2,46) = 1.908$	0.176	0.077	0.239	0.126	0.354
手动追踪任务	AC/%	$F(2,46) = 6.638$	0.011	0.224	0.328	0.007	0.025 *
	RT/ms	$F(2,46) = 8.794$	0.001	0.277	0.319	0.001 *	0.002 *
	FD	$F(2,46) = 0.536$	0.588	0.023	0.936	0.461	0.057
通信监控任务	AC/%	$F(2,46) = 10.665$	0.001	0.317	<0.001 *	<0.001 *	0.693
	RT/ms	$F(2,46) = 2.858$	0.068	0.111	0.769	0.143	<0.001 *
资源监控任务	AC/%	$F(2,46) = 17.607$	<0.001	0.434	0.001 *	<0.001 *	0.013 *
	RT/ms	$F(2,46) = 1.660$	0.201	0.067	0.132	0.407	0.159

2.3 SAGAT 和 3D-SART 测量

随着脑力负荷的增加, SAGAT 得分呈现逐渐递减的变化趋势 ($M_1 = 85.88, SD_1 = 8.67; M_2 = 79.86, SD_2 = 8.48; M_3 = 65.97, SD_3 = 9.60$)。脑力负荷对 SAGAT 得分有显著的影响, $F(2, 46) = 29.618, p < 0.001, \eta^2 = 0.563$ 。事后分析表明, 低负荷的 SAGAT 得分显著低于中负荷 ($p = 0.036$), 中负荷显著低于高负荷 ($p < 0.001$)。

随着脑力负荷的增加, 在 3D-SART 得分中发现了减少的趋势 ($M_1 = 7.92, SD_1 = 2.45; M_2 = 6.79, SD_2 = 1.47; M_3 = 6.08, SD_3 = 1.06$)。重复测量的 ANOVA 分析表明, 脑力负荷对于 3D-SART 得分的主效应显著 ($p < 0.05$), 如表 1 所示。低负荷的 3D-SART 得分显著高于中负荷和高负荷, 中负荷显著高于高负荷。进一步, 分别对 3D-SART 的 3 个维度 (注意资源的需求量、注意资源的供应量和实验情境的理解程度) 进行重复测量的 ANOVA, 结果发现注意资源的需求量和注意资源的供应量的主效应均显著。对这 2 个维度进行事后比较发现除注意资源的供应量的低负荷和中负荷组别不显著外, 其余组别均显著

($p < 0.05$)。

2.4 眼动测量

如图 2 所示, 随着脑力负荷的增加, 眼动的注视频率 ($M_1 = 139.84, SD_1 = 33.51; M_2 = 147.83, SD_2 = 21.96; M_3 = 142.18, SD_3 = 23.11$) 和注视停留时间 ($M_1 = 675.14, SD_1 = 164.65; M_2 = 715.27, SD_2 = 116.27; M_3 = 714.12, SD_3 = 133.59$) 均呈现先增后减的趋势, NNI 呈现逐渐减少变化趋势 ($M_1 = 0.5983, SD_1 = 0.0825; M_2 = 0.5789, SD_2 = 0.0578, M_3 = 0.5719, SD_3 = 0.0539$)。重复测量的 ANOVA 表明脑力负荷对注视停留时间和 NNI 的主效应均显著 ($F(2, 46) = 4.109, p = 0.041, \eta^2 = 0.152; F(2, 46) = 5.004, p = 0.016, \eta^2 = 0.179$), 对注视频率主效应不显著 ($F(2, 46) = 1.995, p = 0.148, \eta^2 = 0.080$)。进一步的事后比较表明, 对于注视停留时间, 高负荷显著高于低负荷 ($p = 0.023$), 中负荷临界显著高于低负荷 ($p = 0.059$), 高负荷和中负荷之间不显著 ($p > 0.05$)。对于 NNI 指标, 低负荷的 NNI 显著低于中负荷 ($p = 0.030$) 和高负荷 ($p = 0.016$), 中负荷和高负荷之间差异不显著 ($p > 0.05$)。

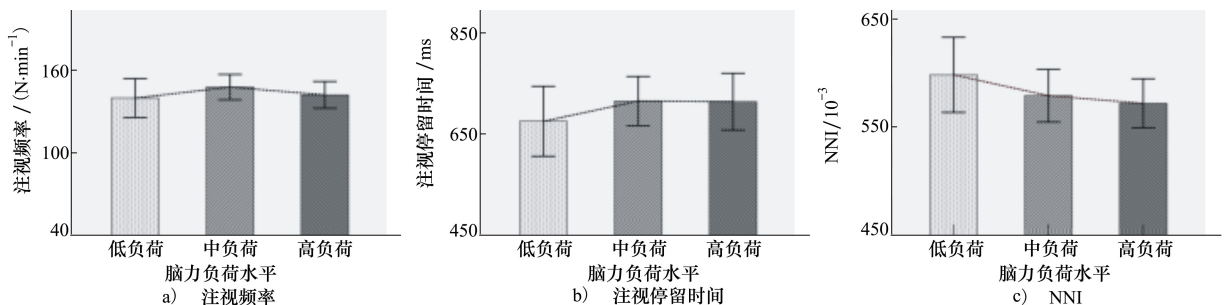


图 2 眼动指标

2.5 脑电测量

考虑到中线头皮的3个电极部位(F_z , C_z 和 P_z)在全头电极点分布中具有代表性,选择其用于脑电图特征的分析^[23-24]。选取脑电不同波段的脑电指标(δ , θ , α_1 , α_2 , β_1 和 β_2 频段)的绝对功率和相对功率,4个SW/FW,分别进行3脑力负荷水平(低负荷、中负荷和高负荷) \times 3中线电极点(F_z , C_z 和 P_z)双因素重复测量的ANOVA,采用Greenhouse-Geisser方法进行校正。

如图3a)至3c)所示,频谱地形图显示了6个频段绝对功率及其相对功率、4个SW/FW的描述性结果。图中对3种脑力负荷组别的各波段数据进行了归一化处理,并如图下方显示色条在0~1的区间内

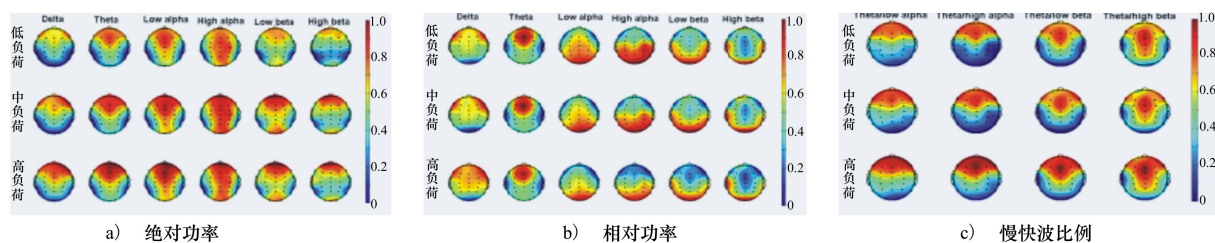


图3 EEG指标描述性结果

2.6 相关性分析

针对各测量指标进行Pearson相关性分析,以进行相应的探索。首先进行SA与脑力负荷关系探索。不同脑力负荷下,SAGAT得分与NASA-TLX得分呈现中等负相关($r = -0.446, p < 0.001$)。相似的负相关关系也在3D-SART得分与NASA-TLX得分上发现($r = -0.458, p < 0.001$)。

然后,进行SA的敏感生理指标探索。考虑到SAGAT得分和3D-SART得分在SA评估中的广泛应用^[29]。在不同脑力负荷下,选取这两者与生理指标之间分别进行相关性分析。结果发现SAGAT得分和3D-SART得分与眼动指标(注视频率、注视停留时间和NNI)均不相关($|r| < 0.2$)。此外,仅在高负荷水平下的SAGAT得分与NNI之间发现中等负相关($r = -0.481, p = 0.017$)。SAGAT得分与脑电顶叶(C_4)的 α_2 相对功率中等相关($r = 0.415, p < 0.001$)。3D-SART得分与枕叶区3个电极点(O_1 , O_z 和 O_2)的 α_2 相对功率也中等相关($0.4 < r < 0.6, p < 0.001$)。

最后,对眼动和脑电指标也进行了相关性分析。结果发现,在不同脑力负荷下,对眼动指标与EEG

进行标准化,其中红色表示更高的激活。双因素重复测量的ANOVA发现对于脑电指标,脑力负荷 \times 电极点的交互效应均不显著($p > 0.05$)。脑力负荷对于 α_2 相对功率($F(2,46) = 7.452, p = 0.002, \eta^2 = 0.245$)和 θ/α_2 ($F(2,46) = 8.171, p = 0.011, \eta^2 = 0.177$)的主效应显著,其余指标主效应均不显著($p > 0.05$)。对于 α_2 相对功率,事后比较表发现高负荷显著低于低负荷($p = 0.012$)和中负荷($p = 0.033$),低负荷和中负荷之间不显著($p > 0.05$)。对于 θ/α_2 指标,事后比较发现高负荷显著高于低负荷($p = 0.016$),其余脑力负荷水平之间不显著($p > 0.05$)。

指标进行相关性分析。结果发现NNI和 C_z 点的 θ/β_1 强相关($r = 0.601, p < 0.001$)。另外,在低负荷下发现,NNI与前额区(F_3, F_z)和顶叶区(FC_3, FC_z, C_z)的 β_1 相对功率强负相关($|r| > 0.600, p < 0.05$)。在低负荷和中负荷水平下,NNI与顶叶区(C_3, C_z, C_4, CP_z 和 P_z)的 θ/β_1 均强正相关($r > 0.600, p < 0.05$)。

3 讨论

本实验设置了3种不同的脑力负荷水平,并采用NASA-TLX得分验证了脑力负荷实验设置的有效性。统计学结果表明随着脑力负荷的增加(由低负荷、中负荷到高负荷),SAGAT得分和3D-SART得分均逐渐减少。研究表明,3D-SART量表是SA测量中广泛使用的主观量表^[7]。另外,SAGAT方法能够有效和客观地测量SA^[2]。因此在不同脑力负荷水平下,SA与脑力负荷呈现一定的负相关关系。这一发现也得到2.6节中NASA-TLX得分与这两者的中等负相关关系的支持。上述结果与Lin、Heikoop等人的研究结论一致^[12,14,17],为脑力负荷与SA之

间关系的阐释增加了新的定量数据支撑。当任务需求较少而资源供应充足时,个体拥有较好的 SA,随着任务需求接近人脑的资源供应,绩效将变差并带来 SA 的降低。因此,在不同脑力负荷水平下,随着脑力负荷的增加,SA 会逐渐降低。

此外,现有研究表明,SA 的生理检测指标非常有限且不明确,因此本研究进一步开展了 SA 的敏感性生理指标探索。在本次实验条件下,随着脑力负荷的增加,被试的注视行为更为密集^[28,30],表现为注视停留时间的增加以及 NNI 值的减少。在低负荷情况下,被试的警觉性较低,表现为注视点的分散^[31]。高负荷时,注意力资源的消耗增加,这增加了信息获取和注意力转移的难度,容易出现注视点的集中^[31]。但相关性结果表明,在不同脑力负荷下,SAGAT 得分和 3D-SART 得分指标均未发现与注视类指标(注视频率、注视总时间和 NNI)存在相关性。仅在高负荷下,NNI 与 SAGAT 得分之间呈现中等相关性。这与前人的研究结果存在一定差异^[10,19,28]。分析其原因,前期文献研究多采用绩效指标与生理指标开展相关性分析,考虑到 SA 与作业绩效之间的关系并不明确,而 SAGAT 得分对于

SA 评估的有效性获得了更为广泛的认可^[29],因此,本研究采用 SAGAT 得分与生理指标进行相关性分析,从而在一定程度上产生了研究结果的差异。另外,在 SAGAT 得分和 3D-SART 与 EEG 指标的相关性结果,均发现了 α_2 相对功率指标的中等相关性。 α_2 相对功率的减少一般认为表征了大脑唤醒水平的提高^[21,23-24],该结果表明了 α_2 相对功率在不同脑力负荷下表征 SA 的潜力。上述结果表明,NNI 和 α_2 相对功率对 SA 的变化敏感,可为 SA 的敏感性生理指标研究提供新的探索方向。

此外,本研究结果还表明,在不同脑力负荷水平下,NNI 与 θ/β_1 之间存在强相关关系。NNI 反映了注视行为的集中程度,该值越接近 0 表示注视点越密集^[28]。 θ/β_1 表征了大脑的觉醒水平, θ/β_1 越低,表示越高的大脑觉醒水平^[21-22]。这可能揭示了眼动注视点密集程度和脑电大脑警觉性水平存在一定的联系。本研究仍有一些局限性。首先,实验任务与真实场景之间仍存在一定差异。其次,对极端脑力负荷条件(低唤醒和超负荷)SA 的探索较为有限,需要进一步的探索。

参考文献:

- [1] ENDSLEY M R. Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems[J]. Human Factors, 1995, 37(1): 32-64
- [2] ENDSLEY M R. Measurement of Situation Awareness in Dynamic Systems[J]. Human Factors, 1995, 37(1): 65-84
- [3] WEI H, ZHUANG D, WANYAN X, 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
- [4] STANTON N A, SALMON P M, WALKER G H, et al. State-of-Science: Situation Awareness in Individuals, Teams and Systems[J]. Ergonomics, 2017, 60(4): 449-466
- [5] ENDSLEY M R. A Taxonomy of Situation Awareness Errors[J]. Human Factors in Aviation Operations, 1995, 3(2): 287-292
- [6] ENDSLEY M R. Human Error and System Design and Management[M]. London: Springer, 2000: 15-26
- [7] TAYLOR R M. Situational Awareness Rating Technique(SART): The Development of a Tool for Aircrew Systems Design[C]// Proceedings of the AGARD AMP Symposium on Situational Awareness in Aerospace Operations, 1990: 50-67
- [8] FOYLE D, HOEY B. Pilot Performance Models[M]. Mahwah, NJ: Erlbaum, 2007: 213-240
- [9] VIDULICH M A, STRATTON M, CRABTREE M, et al. Performance-Based and Physiological Measures of Situational Awareness[J]. Aviation, Space, and Environmental Medicine, 1994, 65(suppl 5): A7
- [10] VANDEMERWE K, VANDIJKH, ZON R. Eye Movements as an Indicator of Situation Awareness in a Flight Simulator Experiment[J]. The International Journal of Aviation Psychology, 2012, 22(1): 78-95
- [11] ENDSLEY M R. Situation Awareness and Workload-Flip Sides of the Same Coin[C]// International Symposium on Aviation Psychology, 1993: 906-911
- [12] LIN L W, LU M S. Empirical Research on the Relationship Between Helicopter Pilots' Mental Workloads and Situation Awareness Levels[J]. Journal of the American Helicopter Society, 2016, 61(3): 1-8
- [13] 冯传宴,完颜笑如,陈浩,等. 基于多资源负荷理论的情境意识模型与应用[J]. 北京航空航天大学学报,2018,44(7): 1438-1446

- FENG Chuanyan, WANYAN Xiaoru, CHEN Hao, et al. Situation Awareness Model Based on Multi-Resource Load Theory and Its Application[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(7): 1438-1446 (in Chinese)
- [14] LIN C J, HSIEH T L, LIN S F. Development of Staffing Evaluation Principle for Advanced Main Control Room and the Effect on Situation Awareness and Mental Workload[J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, 265: 137-144
- [15] VIDULICH M A, TSANG P S. The Confluence of Situation Awareness and Mental Workload for Adaptable Human - Machine Systems[J]. Journal of Cognitive Engineering and Decision Making, 2015, 9(1): 95-97
- [16] VIDULICH M A. The Relationship Between Mental Workload and Situation Awareness[C]//Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 2000: 460-463
- [17] HEIKOOP D D, DE WINTER J C F, VAN AREM B, et al. Effects of Mental Demands on Situation Awareness during Platooning: a Driving Simulator Study[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2018, 58: 193-209
- [18] DEWINTER J C F, EISMA Y B, CABRALL C D D, et al. Situation Awareness Based on Eye Movements in Relation to the Task Environment[J]. Cognition, Technology & Work, 2019, 21(1): 99-111
- [19] 靳慧斌, 刘文辉, 陈健. 塔台管制中最邻近指数注视指数与情境意识的相关性研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(26): 135-139
- JIN Huibin, LIU Wenhui, CHEN Jian. Correlation Research between NNI Fixation Index and Situation Awareness in Tower Control[J]. Science Technology & Engineering, 2016, 16(26): 135-139 (in Chinese)
- [20] RAYNER K. Eye Movements and Attention in Reading, Scene Perception, and Visual Search[J]. The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 2009, 62(8): 1457-1506
- [21] EOH H J, CHUNG M K, KIM S H. Electroencephalographic Study of Drowsiness in Simulated Driving with Sleep Deprivation [J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2005, 35(4): 307-320
- [22] JAP B T, LAL S, FISCHER P, et al. Using EEG Spectral Components to Assess Algorithms for Detecting Fatigue[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(2): 2352-2359
- [23] ZHAO C, ZHAO M, LIU J, et al. Electroencephalogram and Electrocardiograph Assessment of Mental Fatigue in a Driving Simulator[J]. Accident Analysis & Prevention, 2012, 45: 83-90
- [24] BORGHINI G, ASTOLFI L, VECCHIATO G, et al. Measuring Neurophysiological Signals in Aircraft Pilots and Car Drivers for the Assessment of Mental Workload, Fatigue and Drowsiness[J]. Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 2014, 44: 58-75
- [25] WANYAN X, ZHUANG D, LIN Y, et al. Influence of Mental Workload on Detecting Information Varieties Revealed by Mismatch Negativity During Flight Simulation[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2018, 64: 1-7
- [26] WICKENS C D, GUTZWILLER R S, VIEANE A, et al. Time Sharing Between Robotics and Process Control: Validating a Model of Attention Switching[J]. Human factors, 2016, 58(2): 322-343
- [27] HART S G, STAVELAND L E. Development of NASA-TLX(Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research [J]. Advances in Psychology, 1988, 52(6): 139-183
- [28] DI NOCERA F, CAMILLI M, TERENCE M. A Random Glance at the Flight Deck: Pilots' Scanning Strategies and the Real-Time Assessment of Mental Workload[J]. Journal of Cognitive Engineering and Decision Making, 2007, 1(3): 271-285
- [29] SALMON P M, STANTON N A, WALKER G H, et al. Measuring Situation Awareness in Complex Systems: Comparison of Measures Study[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2009, 39(3): 490-500
- [30] FENG C, WANYAN X, YANG K, et al. A Comprehensive Prediction and Evaluation Method of Pilot Workload[J]. Technology and Health Care, 2018, 26(suppl 1): S65-S78
- [31] REES A, WIGGINS M W, HELTON W S, et al. The Impact of Breaks on Sustained Attention in a Simulated, Semi-Automated Train Control Task[J]. Applied Cognitive Psychology, 2017, 31(3): 351-359

Study on Situation Awareness under Different Mental Workloads

FENG Chuanyan, WANYAN Xiaoru, LIU Shuang, CHEN Hao, ZHUANG Damin

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The aim of the present study was to examine the situation awareness (SA) changes under various mental workloads and to explore the sensitive physiological indicators to SA under this circumstance. Twenty-four participants were recruited to perform tasks under three kinds of mental workload based on the Multi Attribute Task Battery (MATB) II platform. Performance measures, situational awareness global assessment technology (SAGAT), three dimensions situation awareness rating technology (3D-SART), eye movement and electroencephalograph (EEG) data were recorded. Results indicated that, the SAGAT scores and 3D-SART scores decreased significantly with the increasing of mental workload. In addition, the two scores both have a medium negative relationship with the National Aeronautics and Space Administration Task Load Index (NASA-TLX) scores. The SAGAT scores have a medium positive relationship with the high alpha relative power at C4 electrode site. What's more, The SAGAT scores have a medium negative relationship with the Nearest Neighbor Index (NNI) under high mental workload condition. In conclusion, under different mental workload levels, (1) Mental workload has a medium negative relationship with SA. (2) NNI and high alpha relative power may be possible sensitive indicators to SA. The present study can provide a reference for designing the display and control interface in cockpit and for optimization of man-machine functional allocation.

Keywords: situation awareness; mental workload; SAGAT; NNI; high alpha relative power