

深海潜航员脑力负荷评估

石路^{1, 2}, 杨海飞³, 张宁⁴, 李洋洋¹, 王菁¹, 张延猛^{1*}

1. 上海交通大学海洋水下工程科学研究院
2. 上海交通大学-千叶大学国际合作研究中心
3. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院
4. 中国大洋矿产资源研究开发协会

上海 200231

摘要: 潜航员在载人舱内操作潜器设备, 在复杂的深海环境中作业, 承受的工作负荷主要为脑力负荷。

我们对潜航员驾驶潜水器在水池作业训练中的脑电图 (EEG) 和主观评价量表进行了分析, 探究了潜航员脑功能和主观感觉的变化及其关系。结果表明, 潜航员在作业中会出现脑觉醒水平等生理功能的改变和紧张感增加等心理变化。

为了提高潜航员的训练效率, 增加其在各种特殊深海作业环境中的生理及心理承受能力; 通过充分收集人体在作业中的生理、心理变化, 结合作业绩效, 对潜航员在不同深海操作环境中的工作能力予以评估, 我们基于 3dsMax 和 Unity3D 设计建立了人机交互的载人潜水器模拟操作系统, 为潜航员提供了逼真的潜水器模拟操控环境。同时, 参考实际深海环境和作业任务, 设计了不同类型和难度的作业任务。

我们应用潜水器模拟操作系统进行了模拟作业实验, 并在实验期间对被试者进行了认知训练。探究了认知训练、任务类型和难度对模拟作业中的生理指标、任务绩效、负荷量表得分的影响, 结果显示认知训练可使模拟作业中的生理指标趋于稳定, 脑力负荷主观感觉减轻, 多项作业绩效提高; 之后, 通过生理指标与支持向量机 (SVM) 的结合建立模型, 识别了每个被试者在不同难度模拟作业任务中的脑力负荷, 其两两分类的平均准确率为 79.2%。

关键词: 深海载人潜水器; 潜航员; 模拟作业; 脑力负荷评估

载人深潜技术是深海技术的前沿与制高点, 也是深海科考最先进的技术手段之一。由于其在现场观察、水下作业等方面的技术优势, 得到了世界发达国家的高度重视, 美国、法国、俄罗斯、日本先后研发了大深度载人潜水器, 广泛应用于深海地球科学、生命科学、水下工程施工等诸多领域^[1]。2012年7月16日, 我国自主集成研发的“蛟龙”号载人潜水器圆满完成了7000 m级海试, 最大下潜深度达到7062 m, 创造了作业类载人潜水器的下潜世界纪录^[2]。习近平总书记等中央领导同志亲切接见了载人深潜单位和个人代表, 潜航员们也获得了党中央、国务院授予的“载人深潜英雄”称号。最近, “蛟龙”号在南海、东北及西北太平洋、西南印度洋等海域持续开展了试验性应用航次, 取得了丰硕的原创性科研成果, 极大地推动了我国的深海科学与技术的发展。随着我国对深海资源的勘探与开发的迅速发展, “蛟龙号”深海作业次数不断增加, 迄今已顺利完成了150多个潜次的下潜作业任务。深海潜航人员队伍也不断成长, 形成了一支由职业化的潜航员和技术保障人员组成的专业化团队。“蛟龙”号是我国载人深潜发展历程中的一个重要里程碑。它不仅是一个深海装备, 更代表了一种不畏艰险、赶超世界的精神, 它是中华民族进军深海的号角。

潜航员是载人潜水器的操作主体。潜航员在狭小的密闭空间内驾驶载人潜水器进行深海潜航和水下作业工作, 具有受到异常温度、噪声、振动、加速度等因素的影响; 人机系统复杂程度高; 以及作业时间长等特点。这些都让潜航员在作业时的生理功能, 尤其是神经系统功能发生很大变化。潜航员在复杂的深海环境中作业, 承受的工作负荷主要为脑力负荷。

大量的既往研究表明, 生理指标与工作负荷存在着密切的关联。Hankins 通过研究飞行中不同阶段的脑电图 (electroencephalograph, EEG), 发现 θ 波功率在需要脑力计算的飞行阶段显著上升^[3]。Serman 研究了模拟飞行中视觉任务和操纵任务里的 EEG 变化, 发现操纵任务中前额区和中央区的 α 波功率相比于对照组下降^[4]。Wilson 通过研究实际飞行 (22

个任务阶段)中多项生理参数的变化,发现不同脑区的 α 波和 δ 波在不同的飞行阶段出现明显变化^[5]。此外, Fallahi 等研究了地面交通控制中心操作员在不同工作负荷下的生理指标变化,结果表明当交通流量增加时,操作员脑力负荷上升^[6]。Brookings 等发现在模拟空中交通控制作业中,任务难度升高时 θ 波(中央区、枕区、右前额区、右颞区)和 δ 波(前额区和中央区)的相对功率上升^[7]。Gevins 等人研究了不同难度记忆任务下的脑电变化情况,结果显示随着难度增加,前额区的 θ 波活动上升, α 波活动下降^[8]。

潜航员作为载人潜水器中人-机-环境系统的核心,担任着潜器驾驶和作业的重要任务。对潜航员在作业中的生理、心理,特别是中枢神经系统的状态进行研究,对其工作负荷进行有效评估,对于预防潜航职业疾病及驾驶疲劳、保护其身心健康以及减少人为失误、提高潜航安全均有重要意义。

1 潜航作业对潜航员脑电指标的影响

1.1 方法

1.1.1 对象与环境

潜航员 6 名,全为男性,平均年龄 27.6 ± 1.97 岁,平均身高 170.8 ± 5.61 cm,平均体重 73.8 ± 7.64 kg。6 名潜航员均通过了深海载人潜水器潜航员学员选拔要求。为减少对生理指标的干扰,潜航员被要求在实验前两小时内不能饮茶和吸烟。

“蛟龙号”潜航作业实验在中船重工七〇二所的试验水池中进行。试验期间“蛟龙”号深海载人潜水器的舱内温度维持在 $15 \sim 18^\circ\text{C}$,湿度为 65-70%, O_2 浓度为 21%, CO_2 浓度 $< 0.03\%$ 。

1.1.2 生理数据采集

采用 α 波衰减系数(alpha attenuation coefficient, AAC)来定量评价潜航员大脑的觉醒水平^[9],该指标对疲劳感具有较好的敏感性。实验流程基于 α 波衰减试验(alpha attenuation test, AAT)法,通过监测 EEG 期间潜航员通过交替睁眼和闭眼期间的 EEG,用闭眼时的 α 波功率值除以睁眼时的 α 波功率得到的指标作为 AAC,可量化中枢神经的活性,用以评价人脑的觉醒水平。

EEG 信号记录运用美国 Biopac 公司的 MP150 系统,采用 Ag-AgCl 盘状电极置于国际标准 10-20 系统电极放置法的 Cz 点记录 EEG。所有记录数据通过接口记录在计算机中便于线下分析。每次记录 4 min 的 EEG,采样频率为 500 Hz。

1.1.3 主观评价方法

记录 EEG 后,采用视觉模拟评分法(visual analogue scale, VAS)^[10]对受试潜航员主观感受进行评分,评分项目包括舒适感、紧张感、眩晕感、醉酒感、嗜睡、愉悦感和工作效率。

1.1.4 实验流程

潜航前,受测者至少休息 10 min,在清醒和安静状态下,身体完全放松,平稳自主呼吸,消除紧张因素后开始进行 EEG 的测量,并进行主观评价。水下潜航期间的测试点为 3 h 潜航任务中的潜航 1.5 h 和 2.5 h 后,每次测试完毕后潜航员均继续进行潜航作业任务。当潜航员完成潜航任务上浮到水面后,潜航员出舱,在安静条件下休息 10 min 后进行潜航后的测试。

1.1.5 数据处理与统计

使用 0.5-35 Hz 带通数字滤波器进行滤波,并将 EEG 数据分成每段 4.096s (2048 个点),50%重叠的分段。对各个分段采用眼电伪迹自动剔除算法进行处理^[71],对含有伪迹的分段

进行手动剔除。之后对数据进行快速傅里叶变换 (fast fourier transform, FFT), 得到频谱。对睁眼时段的频谱计算 θ 波 (4~8 Hz), α 波 (8~13Hz), β 波 (13~30Hz) 段的功率值, 并分别除以 4~30Hz 频段的总功率得到相对功率。对各个分段得到的各频段相对功率取平均值。对闭眼时段计算 α 波段功率, 用闭眼段的 α 波平均功率比上睁眼段 α 平均功率得到 AAC。

统计学分析使用 SPSS 20.0 中的重复测量方差分析 (repeated measures ANOVA) 对潜航前对照、潜航 1.5 h、潜航 2.5 h 和潜航后四个时间点的数据进行分析。若有统计学差异, 则采用 Bonferroni 法实施多重比较。P<0.05 认为具有统计学差异。

1.2 结果

1.2.1 脑电指标

与对照组相比, 在 2.5 h 时 Cz 的 θ 波相对功率显著均上升 (P<0.01), 并于潜航后回到对照水平。Cz 的 α 波在 2.5 h 时显著低于对照组 (P<0.01), 潜航后也与对照组水平无显著差异。AAC 则在 1.5 h 时显著高于对照组水平 (P<0.05), 在 2.5 h 和潜航后下降到显著低于对照组水平。Cz 的 β 波在潜航作业中未发生显著性改变。结果如图 1 所示。

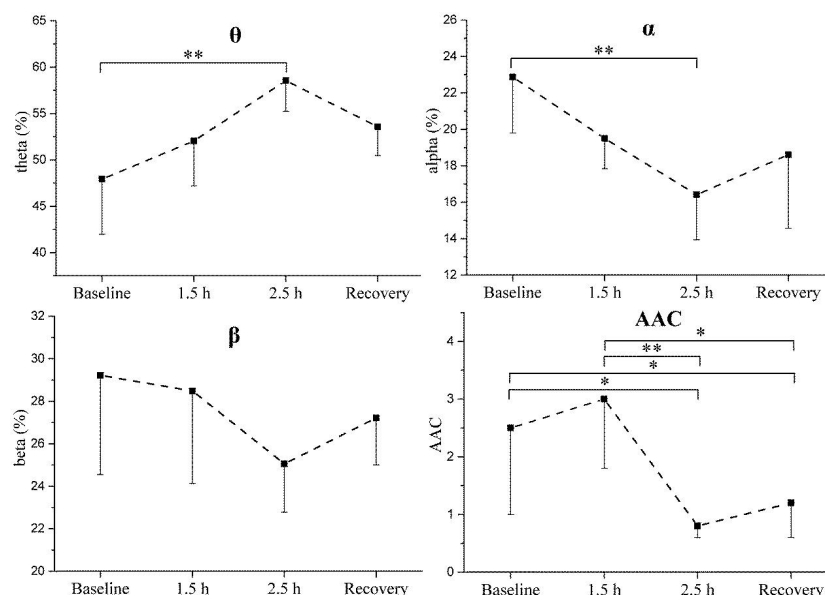


图 1 EEG 各频段相对功率和 AAC 在潜航作业中的变化

1.2.2 主观评价

表 3-1 是主观评价的结果。结果显示, 紧张感在 1.5 h 和 2.5 h 相对于有显著增加, 差异有统计学意义 (P<0.05)。其余指标的差异均无统计学意义。

表 1 主观评价指标在潜航作业中的变化

指标名称	潜航前	1.5 h	2.5 h	潜航后
舒适感	6.8 (1.8)	6.4 (2.6)	6.9 (2.5)	6.6 (2.2)
紧张感	0.5 (0.7)	1.3 (1.0)*	1.4 (1.1)*	0.7 (1.1)
眩晕感	0.3 (0.3)	0.7 (0.8)	0.8 (1.1)	0.7 (1.1)
醉酒感	0.2 (0.3)	0.7 (0.9)	0.6 (1.0)	0.7 (1.0)
嗜睡	0.3 (0.5)	0.9 (0.8)	0.6 (1.0)	0.5 (0.9)
愉悦感	0.4 (0.5)	0.9 (0.8)	0.7 (1.0)	0.7 (0.8)
工作效率	8.0 (1.5)	7.6 (1.3)	7.5 (1.5)	7.6 (1.2)

表中数值为均值 (标准差), *与潜航前相比 P<0.05

2 模拟潜航作业中的脑力负荷评估

2.1 方法

2.1.1 对象

8 名男性，平均年龄 24.8 ± 1.8 岁，平均身高 171.8 ± 6.7 cm，平均体重 65 ± 10.4 kg，右利手，实力或矫正视力正常，均在潜水器模拟操作系统上受过培训，实验前对实验内容知情同意。

2.1.2 仪器

认知测试与认知训练均在维也纳心理测试系统 (Vienna Test System, VTS) 上进行。

2.1.3 实验设计

实验采用完全被试内设计。实验开始前 (第 0 天)，被试者进行静息状态的生理指标记录 (3 min)，之后进行 1 次认知测试。被试者每天进行一次认知训练，包含双手协调训练、选择性注意能力训练和视觉空间记忆能力训练 3 个项目。认知测试中，被试者在潜水器模拟操作系统上进行模拟作业任务。模拟作业结束后，保持静息状态休息 3 分钟后，被试者进行认知测试。潜水器模拟作业任务可分为驾驶任务和机械手操作任务两种类型，每个类型下有 3 个子任务，每个子任务 3 min，顺序在被试者中交叉平衡。每个子任务后，让被试者根据主观感觉使用 NASA-TLX 量表对脑力负荷进行评价。

每个被试者共接受测试 3 次，训练 10 次，共持续 13 天。第 1 天、第 7 天、第 13 天进行各进行一次相同的测试，第 2-6 天和第 8-12 天每天进行一次相同的认知训练。

连续记录被试者在模拟作业 6 个不同任务中的 EEG 和 fNIRS 信号。

fNIRS 信号采用 NIRX 公司的 fNIRS 记录仪，采样频率 7.81 Hz，采集前额叶区 20 个点的 HbO 浓度变化。人工去除伪迹后，采用 0.02~0.06 Hz 的带通滤波器进行滤波，对不同子任务下的 HbO 浓度取时间平均值，再对 8 个被试者取平均值，作脑地形图。

统计学分析使用重复测量方差分析 (repeated measures ANOVA) 对被试者在模拟作业中的生理数据、负荷量表得分和任务绩效进行分析，如果有统计学差异，则采用 Bonferroni 法实施多重比较。P<0.05 认为有统计学差异。

2.2 结果

2.2.1 生理指标

2.2.1.1 EEG 指标

认知训练对 Fz、Cz、Pz 点的脑电波功率变化主效应不显著，但两两比较结果显示，在训练 10 天后，Fz、Cz、Pz 点的 θ 波相对功率要与训练前以及训练 5 天后相比明显下降，而 Fz、Cz 点 β 波相对功率则与训练前以及训练 5 天后相比明显上升。Pz 点的 β 波相对功率则是在训练 5 天后显著高于训练前。任务类型对 Fz、Cz 点的 θ 波相对功率主效应显著，且与其他两因素交互作用不显著。具体表现为在 Fz、Pz 点上，机械手操作任务中的 θ 波相对功率均高于驾驶任务中的 θ 波相对功率。训练前，在作业中 Fz 的 θ 波相对功率都显著高于作业前和作业后 (P<0.05)，Cz 和 Pz 的 θ 波相对功率都显著高于作业前 (P<0.05)，Fz 和 Pz 的 β 波功率显著低于作业前 (P<0.05)。训练 5 天后，在作业中 Fz 和 Cz 的 θ 波显著高于作业前，Cz 的 β 波功率显著低于作业前 (P<0.05)；在作业后 Pz 点的 θ 波相对功率显著高于作业前和作业中， β 波相对功率显著高于作业前。训练 10 天后，上述变化则均未出现。

2.2.1.2 fNIRS 信号

图 2 为 8 位被试者在不同子任务下的氧合血红蛋白 (HbO) 浓度变化平均脑地形图。从

与作业前后的比较中可以看出，模拟作业对 Fp2 和 AF3 附近区域的激活作用较明显。

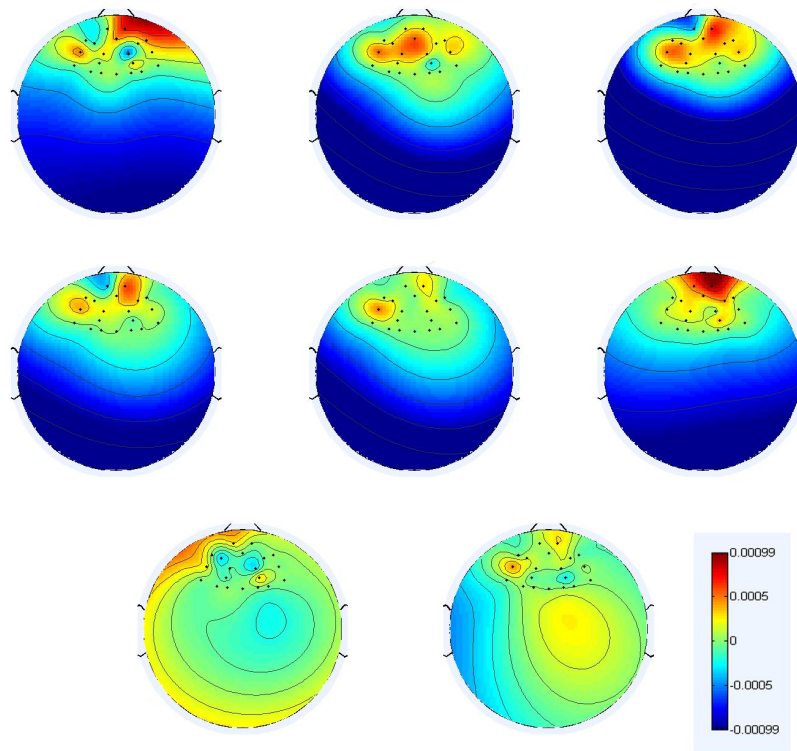


图 2 模拟作业前中后前额叶区 HbO 浓度变化

Fig 2 HbO concentration changes in prefrontal area before, during and after simulated operation

2.3 基于 SVM 的脑力负荷评估

2.3.1 模型构建与计算结果

支持向量机 (SVM, Support Vector Machine) 常用于模式分类和变量之间非线性关系的预测。本研究运用 SVM 和生理数据建立脑力负荷识别模型对被试者在不同难度作业任务下的脑力负荷进行分类识别。

2.3.1.1 EEG 信号特征提取提取

先使用 0.5-45 Hz 带通数字滤波器对原始信号进行滤波，并将数据分成每段长度为 T (s)，50%重叠的分段。对每个分段采用眼电伪迹自动剔除算法进行处理[71]，再对幅值过大 (大于 10 个总体标准差) 和标准差过大 (>3 个总体标准差) 分段进行自动剔除。之后，对每个分段进行快速傅里叶变换 (fast fourier transform, FFT)，得到频谱。

对每个分段的频谱计算功率谱，并对 4~44 Hz 的功率谱以步长为 2 Hz 分成 20 个频段，计算每个频段的功率并除以总功率得到相对功率。

这样，对一个子任务可得到了 N 个分别具有 60 个 EEG 特征 (20 个频段 × 3 个部位 (Fz、Pz、Cz)) 的样本。

2.3.1.2 SVM 识别过程

考虑到个体差异性，且潜航员人数较少，我们针对 8 个被试者分别进行 SVM 分类器训练与识别。采用 k 重交叉检验 (k-fold cross validation)，对驾驶任务和机械手操作任务分别进行子任务 1、子任务 2、子任务 3 的两两分类，得到分类准确率。

经试验，核函数采用多项式核函数、高斯核函数的分类准确率都要显著高于使用线性核函数的分类准确率 (调参后)。我们在 SVM 分类器中使用了高斯核函数，见式 1，参数 γ

=0.0009。

$$K(x_i, x_j) = \exp(-\gamma \|x_i - x_j\|^2), \gamma > 0 \quad (1)$$

由于相邻分段有 50 % 的重叠，若采用随机取测试集的方法，可能造成训练集和测试集有相关性，从而导致准确率偏高。因此，我们将样本集按时间长度平均分为 k 段，每次选取其中的一段作为测试集，剩余样本作为训练集。

2.3.1.3 模型计算结果

对于分段时间长度 T 分别取 2s, 3s, 4s; k 取值 3, 5, 10。平均分类准确率分别为如表 2 所示。

表 2 分段时间长度 T 和检验重数 k 对平均分类准确率的影响

Table 2 the effect of T and k on average accuracy of classifications

-	T=2s	T=3s	T=4s
k=3	71.8%	72.8%	73.6 %
k=5	73.4%	74.5%	75.5 %
k=10	74.7%	76.1%	77.4%

3. 讨论

潜航员在在潜航过程中，交感迷走神经平衡性发生了显著改变，EEG 中的 θ 波相对功率增加， α 波相对功率下降，均在一定程度上反映出脑力负荷的上升。此外，作业后期潜航员的大脑觉醒水平有所下降，提示可能出现了大脑疲劳。

此外，通过运用建立的潜水器模拟操作系统开展了不同任务类型和任务难度的模拟作业，记录了作业中的生理数据，作业绩效和负荷量表得分，并在 3 次模拟作业间期对被试者进行了认知训练。结果显示，认知训练对被试者在模拟作业中的生理指标、作业绩效和负荷量表得分的影响均较大，主要表现为随着认知训练的进行，模拟作业中的生理指标趋于稳定，脑力负荷主观感觉减轻，多项作业绩效提高明显；在机械手操作任务中的 Fz 和 Pz 的 θ 波活动要高于驾驶任务中的 θ 波活动，可能是由于机械手作业需要更多的手眼协调和视觉注意引起的。

最后，基于 SVM 分类算法，我们建立了脑力负荷识别模型，对不同难度的作业任务进行了识别。模型两两分类的平均准确率达到 79.2%，证明了基于生理数据的 SVM 算法在脑力负荷评估中的的有效性。

参考文献

- [1] 刘保华, 丁忠军, 史先鹏, 于凯本, 李德威, 李宝钢. 载人潜水器在深海科学考察中的应用研究进展. *Acta Oceanologica Sinica*. 2015, 37(10):1-10.
- [2] 郭剑. “蛟龙”潜水, 再创纪录. *中国科技术语*. 2012, 14(4):40-40.
- [3] Hankins T C, Wilson G F. A comparison of heart rate, eye activity, EEG and subjective measures of pilot mental workload during flight. [J]. *Aviation Space & Environmental Medicine*, 1998, 69(4):360-7.
- [4] Stermann M B, Mann C A, Kaiser D A, et al. Multiband topographic EEG analysis of a simulated visuomotor aviation task[J]. *International Journal of Psychophysiology Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, 1994, 16(1):49-56.
- [5] Glenn F. Wilson. An Analysis of Mental Workload in Pilots During Flight Using Multiple Psychophysiological Measures[J]. *International Journal of Aviation Psychology*, 2002, 12(1):3-18.
- [6] Fallahi M, Motamedzade M, Heidarimoghadam R, et al. Effects of mental workload on physiological and subjective responses during traffic density monitoring: A field study. [J]. *Applied Ergonomics*, 2015, 52:95-103.
- [7] Brookings J B, Wilson G F, Swain C R. Psychophysiological responses to changes in workload during simulated air traffic control. [J]. *Biological Psychology*, 1996, 42(3):361-77.
- [8] Gevins, A., Smith, M. E., McEvoy, L., & Yu, D. (1997). High resolution EEG mapping of cortical activation related to working memory: Effects of task difficulty, type of processing, and practice. *Cerebral Cortex*, 7, 374 - 385.
- [9] Stampi C, Stone P, Michimori A. A new quantitative method for assessing sleepiness: The alpha attenuation test. *Work & Stress* 1995; 9(2-3): 368-376.
- [10] Hjerstad MJ, Fayers PM, Haugen DF, Caraceni A, Hanks GW, Loge JH, et al. Studies Comparing Numerical Rating Scales, Verbal Rating Scales, and Visual Analogue Scales for Assessment of Pain Intensity in Adults: A Systematic Literature Review. *J Pain Symptom Manag* 2011; 41(6): 1073-1093.