

汪磊, 高茗倩, 洪瑞媛. 基于 fNIRS 技术的飞行员焦虑情绪测评方法研究[J]. 安全与环境学报, 2026, 26(6): 2389–2397.
WANG L, GAO M Q, HONG R Y. Study of fNIRS-based anxiety measures for pilots[J]. Journal of Safety and Environment, 2026, 26(6): 2389–2397.

基于 fNIRS 技术的飞行员焦虑情绪测评方法研究*

汪磊, 高茗倩, 洪瑞媛

(中国民航大学安全科学与工程学院, 天津 300300)

摘要: 为了客观、有效地测量飞行员焦虑情绪状态, 克服传统焦虑情绪量表评估方法的滞后性, 研究引入功能性近红外光谱成像 (Functional Near-Infrared Spectroscopic Imaging, fNIRS) 技术, 提出一种融合飞行任务的飞行员焦虑情绪测评方法。首先, 选取 24 名飞行员作为被试, 通过在全动模拟机内设计实施飞行任务情境试验, 以诱发被试的焦虑情绪状态, 同时采集被试 fNIRS 数据并记录反应时间; 之后, 运用最小绝对收缩和选择算子 (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator, LASSO) 回归和支持向量回归等方法进行数据分析, 重点分析前额叶皮层下含氧血红蛋白浓度 (HbO) 对不同焦虑水平的敏感性。研究结果显示: 状态焦虑会在一定程度上影响被试的行为绩效, 且左、右内侧额上回 (Frontal_Sup_Medial_L, Frontal_Sup_Medial_R)、右侧中扣带回 (Cingulum_Mid_R) 的 HbO 指标对焦虑情绪具有较高的敏感性; 基于径向基核函数优化的状态焦虑测量算法模型取得了中等拟合表现, 其均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 为 6.86, 决定系数 (R^2) 为 0.55。研究结果表明了基于 fNIRS 技术在模拟飞行情境中测量飞行员焦虑情绪的可行性, 为下一步开发可应用的飞行员焦虑情绪测评工具提供了依据和参考。

关键词: 安全卫生工程技术; 功能性近红外光谱成像; 状态焦虑; 飞行安全; 机器学习

中图分类号: X949 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6094(2026)06-2389-09

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2025.1233

0 引言

在诸如航空、驾驶等动态系统中, 操作员的情绪状态与其绩效表现密切相关。在飞行过程中, 飞行员通常会由于突发事件或不可预见的情境而产生多种情绪反应, 这些情绪可能削弱其认知功能、情境判断能力以及决策的合理性, 从而对飞行安全产生不利影响^[1]。在某些飞行任务中, 情绪波动可能干扰认知功能和决策过程, 在需要较高认知负荷的复杂任务中尤其明显^[2]。因此, 情绪状态的不稳定性可能对飞行操作的安全性构成潜在威胁。

焦虑作为一种负性情绪状态, 通常源于个体对潜在危险或未来不确定事件的预期, 伴随紧张和忧虑等情绪反应^[3]。状态焦虑属于焦虑的一种形式, 指个体在特定情境下某一时刻所表现出的焦虑水平。这种情绪状态具有短暂性, 会随着所处压力环境的变化而波动。焦虑情绪常伴随生理和行为的双重反应。其中, 生理反应通常表现为心率加快、呼吸频率变化以及皮肤电活动增加等, 这些变化可能会影响飞行员的认知功能, 进而削弱其注意力的集中

能力和工作效率^[4]。此外, 焦虑还可能干扰飞行员的决策能力、反应时间以及适应复杂环境的能力, 从而增加飞行风险^[5]。因此, 焦虑情绪通过引发生理应激反应与损害飞行员认知功能 (如注意力、决策力和应变能力), 增加飞行操作风险。本文探究飞行员焦虑情绪的影响机制及准确识别对航空安全的影响具有重要意义。

在心理学领域, 前人已经开发了广泛的焦虑情绪采集方法, 包括主观量表、生理学指标分析等方法。心理量表如汉密尔顿焦虑量表 (Hamilton Anxiety Rating Scale, HAMA)^[6]、贝克焦虑自评量表 (Beck Anxiety Inventory, BAI)^[7] 以及状态特质焦虑问卷 (State-Trait Anxiety Inventory, STAI)^[8] 等, 作为常用的测量工具, 已广泛应用于焦虑情绪的评估。通过被试的自我评定, 这些问卷能够高效评估个体的焦虑水平, 并为后续的心理干预与治疗提供科学依据。借助生理学指标, 如心率、呼吸频率及皮肤电反应等多种生理信号, 可以对个体的焦虑水平进行客观评估。近年来, 功能性近红外光谱成像技术 (Functional Near-Infrared Spectroscopic Imaging, fNIRS) 由于独特的技

* 收稿日期: 2025-07-14

作者简介: 汪磊, 研究员, 博士, 从事航空安全与人因研究, wanglei0564@hotmail.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32071063)

术优势,逐渐被引入以进行情绪测量。2011年,Liu等^[9]首次将fNIRS应用于情绪识别。2016年,姜劲等^[10]通过采集15名受试者在6种情绪种类图片刺激下的fNIRS信号以及唤醒度、愉悦度评价数据,利用fNIRS技术实现了对不同情绪状态的识别。Tseng等^[11]的研究进一步揭示了fNIRS信号在评估认知表现和情绪状态方面的潜力,并发现前额叶皮层的右偏侧与状态焦虑水平呈负相关,而在便携性和灵活性方面,fNIRS具有区别于其他脑成像技术的独特优势。

fNIRS作为一种新兴的无创、安全、便携的脑成像手段,可以在自然情境中持续、实时地监测个体的脑部血流动力学变化,进而反映其认知状态与情绪反应^[12]。该技术通过探测氧合血红蛋白(HbO)与脱氧血红蛋白(HbR)在近红外光照射下的吸收与散射特性,实现对大脑皮层神经活动的间接表征^[13]。与传统神经成像技术相比,fNIRS在多方面展现出显著优势:相比于功能性磁共振成像(Functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI),其具备更强的便携性与运动耐受性,适用于高动态或自然状态下的试验环境;相较于脑电图(Electroencephalography, EEG),其空间分辨率更高,且不易受头部运动干扰^[14]。此外,fNIRS的时间分辨率(0.1~10 Hz)足以捕捉情绪诱发下的瞬时神经血流响应,特别适用于如飞行驾驶舱等狭小空间中的人因研究。因此,fNIRS为复杂操作环境下个体认知与情绪状态的客观评估提供了重要的技术支撑。

目前,许多专家针对焦虑情绪的评估展开了研究:尧丽等^[15]使用状态特质焦虑量表(STAI)和控制感问卷(Sense of Control Questionnaire, SCQ)对被试进行评估,并探讨了特质焦虑、状态焦虑以及控制感的关系。杨佩佩等^[16]基于径向基函数(Radial Basis Function, RBF)神经网络构建了多因素预测模型,用于评估驾驶人的焦虑状态,结果显示驾驶行为特征可较为有效地预测其焦虑水平。周子木^[17]则利用结构方程模型,对驾驶焦虑与驾驶行为之间的关联性进行了系统分析,并发现焦虑程度对驾驶行为具有显著的正向影响。与传统回归方法相比,机器学习更擅长应对高维特征和多种混杂因素的数据。特别是在自变量包含大量分类与连续变量的情况下,机器学习在预测准确性方面通常表现更优^[18]。此外,该方法具备挑选关键变量的能力,且在模型拟合方面优于常规回归方法^[19]。然而,目前将机器学习方法应用于飞行任务情境下情绪测量的实证研究仍

较为有限。为此,本文基于fNIRS数据,识别影响状态焦虑的关键脑区通道,并借助机器学习算法构建测量飞行员状态焦虑的算法模型。

综上所述,在模拟飞行情境下,准确识别和测量飞行员的焦虑情绪对于保障飞行安全具有重要意义。然而,现有研究在方法层面仍存在一定局限性:传统问卷依赖被试自我报告,主观性强且难以实时捕捉情绪波动;心率等常用生理指标虽然具备一定客观性,但情绪特异性不足;而fMRI、EEG等神经成像技术或因设备庞大、生态效度低,或因运动伪差影响较大,难以适应复杂的飞行情境。相比之下,fNIRS具有便携、抗运动干扰能力较强、适合动态任务等优势,近年来在认知神经科学和临床诊断等领域已得到广泛应用,但在民航情境下的相关研究仍然有限。基于此,本文尝试结合fNIRS与机器学习算法,不仅在方法上提升焦虑测量的客观性与特异性,而且在高负荷、动态的模拟飞行任务中实现更高的生态效度。通过识别与状态焦虑相关的关键脑区通道并构建预测模型,探索其在模拟飞行情境中对飞行员焦虑情绪进行客观测量的可行性,旨在为复杂操作任务中的情绪评估提供一种新型技术路径。

1 试验设计及实施

1.1 被试

研究共招募了来自同一家航空公司的24名B-737机型副驾驶飞行员被试(均为男性),其平均飞行时长为272 h(标准差SD为49)。所有飞行员均持有商用飞行执照,年龄在23~28岁(平均值 M 为24.2,标准差SD为1.14),且在详细了解试验内容后签署了知情同意书。

1.2 试验材料

研究基于全动B-737飞行模拟器开展模拟试验,试验过程中使用了英国Gowerlabs公司的近红外脑成像系统,该系统采用连续波(Continuous Wave, CW)测量技术,由多个独立模块组成,并形成密集的光源-探测器网络。本文使用6块贴片,每块模块含3个LED光源(735 nm、850 nm)和4个光电探测器,左右共216个通道,见表1。fNIRS的采样频率为10 Hz。

状态-特质焦虑量表(STAI)由美国心理学家Spielberger C D团队编制,包括状态焦虑(State Anxiety Inventory, S-AI)和特质焦虑(Trait Anxiety Inventory, T-AI)两个分量表。状态焦虑描述一种通常为短暂性的不愉快的情绪体验,如紧张、恐

表 1 fNIRS 采集部分通道
Table 1 Partial channels of fNIRS acquisition

通道	脑区	坐标/mm		
		X	Y	Z
3	Frontal _ Sup _ Medial _ L(左侧内侧额上回)	2	42	56
9	Frontal _ Sup _ Medial _ R(右侧内侧额上回)	13	54	42
10	Cingulum _ Ant _ L(左侧前扣带和旁扣带脑回)	4	41	29
38	Cingulum _ Ant _ R(右侧前扣带和旁扣带脑回)	17	46	26
42	Cingulum _ Mid _ R(右侧中扣带回)	4	45	32
49	Supp _ Motor _ Area _ L(补充运动区)	-1	29	58
72	Frontal _ Mid _ L(左侧额中回)	-18	53	35
159	Frontal _ Mid _ R(右侧额中回)	21	66	30
167	Frontal _ Sup _ L(左侧背外侧额上回)	-9	61	28
181	Frontal _ Sup _ R(右侧背外侧额上回)	17	52	20

惧、忧虑和神经质,伴有植物神经系统的功能亢进;特质焦虑描述相对稳定的,作为一种人格特质且具有个体差异的焦虑倾向。本文选用汪向东团队翻译的中文版 STAI 的状态焦虑分量表进行研究,总分用于评估被试焦虑水平。状态-特质焦虑量表信度良好,S-AI 的 Cronbach α 系数为 0.906 2,T-AI 为 0.882 5^[20]。

1.3 试验设计

本文试验采用组内设计,旨在利用功能性近红外光谱成像技术(fNIRS)测量飞行员在特定任务情境下的焦虑水平,并进一步探索焦虑对飞行行为的潜在影响。试验自变量为飞行任务过程中记录的生理与行为指标,包括前额叶皮层的 fNIRS 信号及飞行操作中的反应时间;因变量为被试在试验后完成的状态焦虑量表得分。通过这一设计,研究能够在同一批被试的不同试验阶段直接对比焦虑状态的变化,减少个体差异对结果的干扰,从而更准确地揭示任务情境对焦虑情绪的诱发效应。

在试验开始前,主试向被试介绍试验目的与流程。随后,被试签署知情同意书,确认理解并同意参与试验。在正式试验中,首先通过常规巡航任务使飞行员进入稳定操作状态,之后引入单发失效情境,以在高认知负荷和时间压力下有效诱发状态焦虑。当任务结束后,在主试的指导下,被试填写状态焦虑量表,量表得分越高,反映焦虑体验越强。

试验场景设置在全动模拟机内,飞行高度固定于约 8 100 m。每名飞行员在进入驾驶舱后独立执

行飞行任务,首先进行 1 min 的正常巡航操作,随后系统自动触发单发失效故障,见图 1。为了增强焦虑反应,试验任务采用单人飞行(Single Pilot Operation,SPO)模式,要求飞行员在无协作支持的情况下独立完成标准操作程序的处置。该情境兼具操作复杂性和时间压力性,能最大程度地模拟真实飞行中的突发紧急事件,从而有效诱发飞行员的焦虑情绪反应。



图 1 试验场景

Fig.1 Experimental scenario

1.4 数据处理

1.4.1 fNIRS 数据预处理

对于 fNIRS 数据分析,使用 MATLAB 2022a 及 Homer2 工具包^[21]进行预处理。首先,将所有原始光强度信号转换为光密度信号;其次,采用主成分分析法对运动伪影进行校正,保留累计方差解释率达到 97% 的主成分,并设最大迭代次数为 5;同时结合基于滑动窗口的检测方法,设定时间窗长度为 0.5

s,在伪影段前后各延伸 1 s,将信号标准差超过 50 或振幅突变超过 5 的片段视为异常并予以剔除;再次,通过将信号与其标准差进行对比,进一步去除信号幅度过大的运动伪迹;在此基础上,使用有限脉冲响应(Finite Impulse Response,FIR)数字滤波器对信号进行 0.01~0.5 Hz 频率范围的带通滤波处理,以消除慢漂移和低频/心率噪声、脉搏、血压等信号的影响;最后,根据修正的比尔-朗伯定律将光密度转换为氧合血红蛋白(HbO)和脱氧血红蛋白浓度(HbR)的变化。鉴于 HbO 的信噪比高于 HbR,试验计划选择 HbO 信号为研究对象^[22]。

1.4.2 统计学方法

本文使用 SPSS 27.0 进行数据分析。首先,采用 Shapiro-Wilk 检验评估数据正态性。根据检验结果,分别采用 Pearson 或 Spearman 相关分析,探讨状态焦虑评分与 fNIRS 通道数据的相关性。同时,为分析试验任务对额叶皮层神经活动的影响,依据正态性选择配对样本 *t* 检验或 Wilcoxon 符号秩检验,比较静息态与任务态下 fNIRS 数据的差异。

LASSO 回归通过收缩估计精简冗余参数、提高模型泛化能力,常用于从高维特征中筛选关键变量^[23]。本文先将数据进行标准化,借助 LASSO 筛选出与状态焦虑量表相关性最高的 fNIRS 通道特征,再以这些通道的均值、标准差和极值为输入,构建支持向量回归(Support Vector Regression,SVR)模型以预测焦虑得分。由于样本量有限($n=24$),采用结合五折交叉验证和网格搜索协同优化策略^[24],评估 SVR 性能,以避免训练集/测试集划分的随机性影响。在预设参数空间内(线性核:正则化系数 $C \in [10^{-3}, 10^3]$;径向基核: $C \in [500, 2\ 000]$ 、核宽度 $\gamma \in [50, 500]$;多项式核: $C \in [0.1, 100]$ 、阶数 $d \in \{2, 3\}$ 、核尺度 $\gamma \in [0.1, 10]$)穷举所有可能的参数组合。采用以最小化 RMSE 为主、最大化 R^2 为辅的双目标策略,结合核函数筛选与参数优化(C 与 γ),提升模型准确性与泛化能力。

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (1)$$

式中 S 表示均方根误差(RMSE); n 为数据总个数; y_i 和 $\hat{y}_i$ 分别为主观量表分数和输出参数值。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

式中 $\bar{y}$ 为主观量表分数的平均值。

2 试验结果

2.1 描述性统计

研究中各变量及描述性统计见表 2。

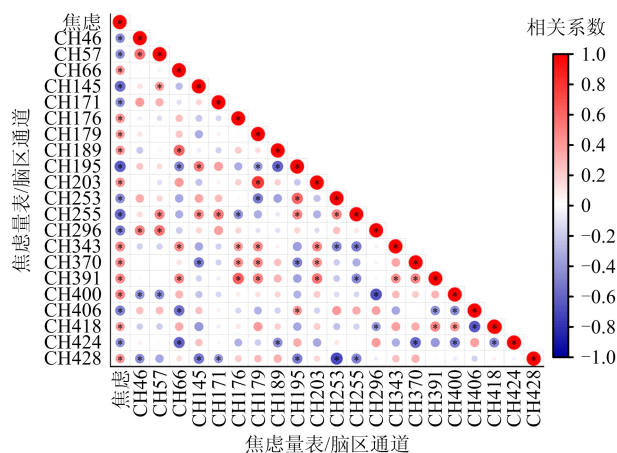
2.2 焦虑水平对飞行行为影响分析

将状态焦虑量表分数与反应时间指标进行斯皮尔曼相关性分析,发现两组变量之间存在显著的正相关关系($r=0.564, p<0.01$)。

2.3 状态焦虑水平对大脑 PFC 的激活影响分析

将状态焦虑量表分数与 HbO 通道数据进行斯皮尔曼相关性分析,即在不同状态焦虑水平下均显著激活的通道见图 2。

如图 3 所示,采用 Wilcoxon 符号秩检验对静息



*表示在 0.05 水平显著相关。

图 2 HbO 下脑区通道与焦虑量表相关性分析热图

Fig. 2 Heatmap of correlations between HbO channel activity in brain regions and anxiety scale scores

表 2 描述性统计结果

Table 2 Descriptive statistical results

统计量	焦虑水平(量表)	反应时间/s	静息态 HbO/($10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	任务态 HbO/($10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)
平均值	34.25	159.54	-4.72×10^{-8}	6.42×10^{-8}
标准差	10.42	177.82	7.42×10^{-8}	9.18×10^{-8}
最大值	67	969	8.44×10^{-8}	2.65×10^{-8}
最小值	20	33	-2.28×10^{-8}	-8.41×10^{-8}

态与任务态条件下的 HbO 信号进行差异性分析,结果显示,中扣带回,内侧额上回等关键脑区的 HbO 浓度变化存在显著性差异($p < 0.05$)。

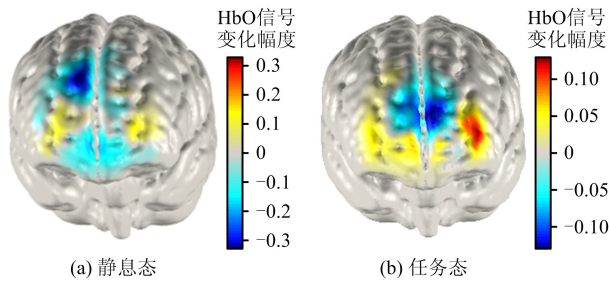


图3 HbO 脑区激活图

Fig. 3 Activation map of HbO responses across brain regions

利用 LASSO 方法进行特征选择,最终确定 21 个与焦虑评分显著相关的脑区通道作为模型学习的特征,具体结果见图 4。筛选的变量有 145、171、176、195 共 4 条脑区通道^[25],对应的回归系数见表 3。

2.4 SVR 状态焦虑算法模型的建立

2.4.1 SVR 核函数的选择

根据 3 种核函数的结果可得,径向基(RBF)核函数的状态焦虑 SVR 模型的均方根误差(RMSE)为 6.86,决定系数 R^2 为 0.55,这表明该状态焦虑模型输出参数值与主观量表分数的吻合程度为 55%,属于中等效应。其他两种均较径向基核函数效果差,

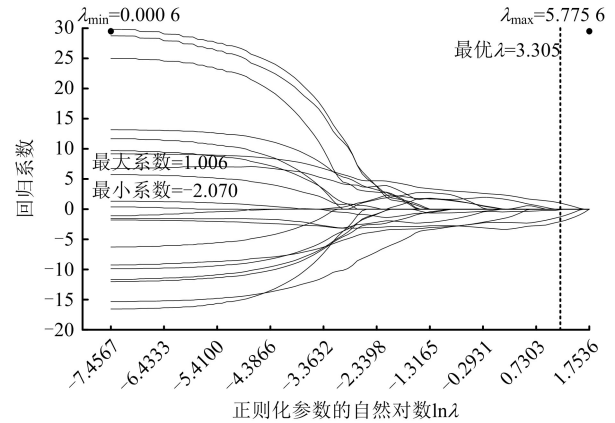


图4 正则化系数 λ 与回归系数关系图

Fig. 4 Plot of regularization parameter λ versus regression coefficients

因此径向基核函数可作为状态焦虑算法模型的函数,见表 4。

2.4.2 优化超参数

本文采用网格搜索结合交叉验证的方法,在预设参数范围内优化支持向量回归模型的超参数,旨在通过该优化过程最小化均方根误差(RMSE),提升模型的预测性能。图 5(a)展示了支持向量回归(SVR)模型在不同惩罚参数 C 与核函数尺度参数 γ 下的均方根误差(RMSE)变化趋势的三维响应曲面,颜色深浅反映模型预测误差大小,表面呈明显凹陷,其最低点对应模型在交叉验证中性能最优的参数组合。图 5(b)展示了上述参数的搜索结果,以等

表3 特征选择后的影响因素回归系数

Table 3 Regression coefficients of influencing factors after feature selection

变量通道	回归系数	对应脑区
145	-2.07	Frontal _ Sup _ Medial _ L(左侧内侧额上回)
171	-1.27	Frontal _ Sup _ Medial _ L(左侧内侧额上回)
176	1.01	Frontal _ Sup _ Medial _ R(右侧内侧额上回)
195	-0.09	Cingulum _ Mid _ R(右侧中扣带回)

表4 不同核函数对状态焦虑的测量结果

Table 4 Measurement results of state anxiety using different kernel functions

项目	核函数	训练集		交叉验证	
		均方根误差	决定系数	均方根误差	决定系数
状态焦虑	线性	6.62	0.58	7.00	0.53
	径向基	6.53	0.59	6.86	0.55
	多项式	6.59	0.58	7.13	0.51

高线代表不同 RMSE 水平,标记点精确定位了最小 RMSE 对应的最优参数组合。从图 5 可见,模型在高 C 和中等 γ 区域表现最佳,且最小 RMSE 对应的最优参数为 $\log_2 C = 8.9658$, $\log_2 \gamma = 5.6439$ 。该参数优化过程不仅确定了最优参数组合,更直观地揭示了参数变化对模型性能的影响规律。

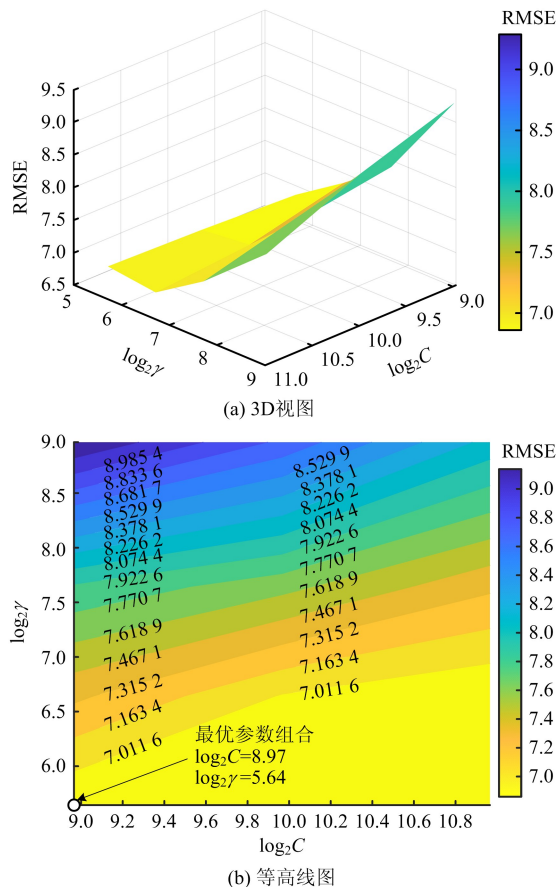


图5 SVR 参数优化

Fig. 5 SVR parameter optimization

3 讨论

研究采用功能性近红外光谱成像技术(fNIRS)监测飞行员前额叶皮层血氧动力学变化,通过模拟飞行突发情境诱发状态焦虑,探究焦虑情绪对行为的影响并结合 S-AI 焦虑评分及 fNIRS 生理数据,建立了测量状态焦虑算法模型。

前额叶皮层在情绪和情绪调节中起重要作用^[26]。相关性结果显示,随着状态焦虑水平的升高,飞行员行为绩效越差。研究表明,情绪是压力调节系统的核心组成,不同个体对相同压力源会产生不同的身心反应^[27]。同时,焦虑与认知表现密切相关,状态焦虑较高者在需高效认知处理的任务中表现较差^[11]。飞行员的焦虑敏感性与心理健康水平

显著相关,诸如对能力丧失的恐惧等焦虑因素会削弱决策与注意力,增加操作失误风险^[28]。

差异结果显示,中扣带回、内侧额上回等脑区在任务中神经活动显著增强,可能参与相关认知加工。本文基于筛选后的 fNIRS 血氧特征,构建了 LASSO-SVR 模型以评估飞行员状态焦虑水平。

研究结果显示,左内侧额上回(通道 145/171)的 HbO 浓度变化对焦虑相关神经活动具有显著抑制作用($\beta = -2.07/-1.27$),符合 Bishop^[29]提出的前额叶执行控制模型,即左侧前额叶功能越强,个体越能够有效抑制焦虑和恐惧情绪。该区与杏仁核(Amygdala)的交互被视为情绪抑制的关键环节^[30]。同时,其强抑制效应可能与该脑区情绪自我调节的能力有关。此外,研究显示左内侧额上回功能异常可能是焦虑障碍患者的核心神经特征,焦虑个体通常表现为左内侧额上回活动减少,杏仁核活动增强,导致情绪调控能力下降^[31]。

与左侧相反,右内侧额上回(通道 176)表现出正向权重($\beta = 1.01$),表明该区域可能在焦虑个体中过度激活。特别是在个体对威胁刺激的敏感性上,右前额叶的过度反应可能增强焦虑体验^[32]。Davidson 不对称性理论^[30]提出,右前额叶主要加工负性情绪,左侧则偏向积极情绪调控。本文研究发现,焦虑个体右侧前额叶过度激活、左侧抑制不足,支持情绪超监测理论,即其倾向放大并持续关注负性信息,从而加剧焦虑体验^[33]。

中扣带回是边缘系统的关键区域,参与情绪冲突监测、认知控制与应激调节。研究表明,在焦虑个体中该区功能减弱,易导致对负性情绪的过度关注从而加重焦虑体验^[34]。Etkin 等^[35]发现,中扣带回在情绪冲突任务中发挥关键作用,焦虑个体通常表现出中扣带回活动减少,导致其难以有效抑制负性情绪。

本文针对 SVR 模型,比较了线性核函数、径向基核函数(RBF)及多项式核函数 3 种核函数的性能,并发现 RBF 在捕捉 fNIRS 非线性特征与焦虑评分间关系时最优, $R^2 = 0.55$, 达到中等拟合水平^[36]。尽管 GPower 事后检验力分析($\alpha = 0.05$, $f^2 = 0.3$)显示,所需最小样本量为 45 例,在当前样本量($n = 24$)下的统计检验力仅约为 44.5%,提示结果的稳健性需谨慎解读,但这仍表明即使在特征维度有限、样本量较少的条件下,飞行员前额叶 fNIRS 信号仍能有效反映焦虑状态。径向基核函数的非线性映射优势优于线性模型,更能刻画脑功能

信号与心理变量的复杂关系,与情绪识别领域强调非线性算法优势的结论一致^[37],进一步佐证了 fNIRS 在情绪监测中的可行性与适用性。此外,模型的中等拟合表现也反映出情绪状态的复杂性和个体差异。尽管模型的 R^2 仅达到中等水平,但在一定程度上反映了焦虑的多因素特性:除任务情境外,个体特质、压力耐受和睡眠状况等因素亦会影响情绪,而短时 fNIRS 采集难以完全捕捉这些差异。即便如此,结果仍表明基于 fNIRS 与机器学习的方案可为飞行员焦虑提供客观、实时的评估路径,克服传统量表易受自报偏差与环境干扰的弊端,适用于飞行等高动态、高认知负荷场景,并为后续焦虑监测工具的开发提供了实践依据。 R^2 的中等水平也提示未来研究可在以下方向进一步优化:(1)受限于样本量($n = 24$)较少,焦虑相关神经机制可能具有较大个体差异,未来研究需扩大样本规模($n \geq 45$)以提高统计效能;(2)扩展研究对象至普通人群,通过跨群体比较分析,系统探讨焦虑情绪影响机制的共性与差异性特征。此外,该模型也可在其他任务情境中开展推广性验证,以增强其测量与泛化能力。

4 结 论

(1)状态焦虑情绪水平的升高会显著干扰飞行员的行为操作表现,具体表现为焦虑水平越高,其被试在故障处置时操作反应时间越长。

(2)额叶皮层中特定区域的 HbO 浓度变化对焦虑状态高度敏感:焦虑情绪水平随左内侧额上回和右中扣带回的激活而降低,随右内侧额上回的激活而升高。

(3)本文构建的 LASSO - SVR 模型在评估飞行员状态焦虑中取得中等拟合表现。未来将扩展至普通人群,比较焦虑机制的共性与差异,并在其他任务情境中进行验证,以提升模型的测量效能与泛化能力。

参考文献 (References):

- [1] CAUSSE M, DEHAIS F, PÉRAN P, et al. The effects of emotion on pilot decision-making: a neuroergonomic approach to aviation safety [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2013, 33: 272 - 281.
- [2] SCHOOF D, WOLF O T, SMEETS T. Cold pressor stress impairs performance on working memory tasks requiring executive functions in healthy young men [J]. *Behavioral Neuroscience*, 2009, 123(5): 1066.
- [3] 董心洁. 焦虑心理学 [M]. 苏州: 古吴轩出版社, 2019: 2.
- [4] DONG X J. Anxiety psychology [M]. Suzhou: Guwuxuan Press, 2019: 2.
- [5] 张晨. 状态焦虑与认知负荷对视觉观点采择的影响 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2020.
- [6] ZHANG C. The influence of state anxiety and cognitive load on visual perspective-taking [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2020.
- [7] ALLSOP J, GRAY R. Flying under pressure: effects of anxiety on attention and gaze behavior in aviation [J]. *Journal of Applied Research in Memory and Cognition*, 2014, 3(2): 63 - 71.
- [8] RABINOWITZ J, WILLIAMS J B W, HEFTING N, et al. Consistency checks to improve measurement with the Hamilton Rating Scale for Anxiety (HAM - A) [J]. *Journal of Affective Disorders*, 2023, 325: 429 - 436.
- [9] BARDHOSHI G, DUNCAN K, ERFORD B T. Psychometric meta-analysis of the english version of the beck anxiety inventory [J]. *Journal of Counseling & Development*, 2016, 94(3): 356 - 373.
- [10] SPIELBERGER C D, GORSUCH R L, LUSHENE R E. Manual for the state-trait anxiety inventory [M]. Palo Alto, CA: Consulting Psychologists Press, 1970.
- [11] LIU Y, SOURINA O, NGUYEN M K. Real-time EEG-based emotion recognition and its applications: transactions on Computational Science XIII (Lecture Notes in Computer Science 6670) [C]. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011: 256 - 277.
- [12] 姜劲, 焦学军, 潘津津, 等. 基于功能性近红外光谱技术识别情绪状态 [J]. *光学学报*, 2016 (3): 164 - 174.
- [13] JIANG J, JIAO X J, PAN J J, et al. Emotional state recognition based on functional near-infrared spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016 (3): 164 - 174.
- [14] TSENG Y L, LU C F, WU S M, et al. A functional near-infrared spectroscopy study of state anxiety and auditory working memory load [J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2018, 12: 313.
- [15] WANG D, LIN B, HUANG Y, et al. Exploring neural correlates between anxiety and inhibitory ability: evidence from task-based fNIRS [J]. *Depression and Anxiety*, 2024, 2024(1): 8680134.
- [16] PINTI P, AICHELBURG C, GILBERT S, et al. A review on the use of wearable functional near-infrared spectroscopy in naturalistic environments [J]. *Japanese Psychological Research*, 2018, 60(4): 347 - 373.
- [17] SCARAPICCHIA V, BROWN C, MAYO C, et al. Functional magnetic resonance imaging and functional near-infrared spectroscopy: insights from combined

- recording studies[J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2017, 11: 419.
- [15] 尧丽, 郭阳, 周诗雨, 等. 大学生控制感对状态焦虑的影响[J]. *中国心理卫生杂志*, 2022, 36(11): 970-974.
- YAO L, GUO Y, ZHOU S Y, et al. Effect of perceived control on state anxiety in college students[J]. *Chinese Mental Health Journal*, 2022, 36(11): 970-974.
- [16] 杨佩佩, 熊坚, 何扬帆. 公路小半径曲线路段驾驶人焦虑水平模型[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(1): 227-232.
- YANG P P, XIONG J, HE Y F. Anxiety level model of drivers on sharp circular curve road[J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(1): 227-232.
- [17] 周子木. COVID-19 疫情防控期间的驾驶员驾驶行为及焦虑心理分析[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2023.
- ZHOU Z M. Analysis of drivers' driving behavior and anxiety during COVID-19 epidemic prevention and control [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2023.
- [18] 李超, 求文星. 基于机器学习的因果推断方法研究进展[J]. *统计与决策*, 2021(11): 10-15.
- LI C, QIU W X. Research progress of causal inference method based on machine learning [J]. *Statistics & Decision*, 2021(11): 10-15.
- [19] GILLAIN S, BOUTAAYAMOU M, SCHWARTZ C, et al. Using supervised learning machine algorithm to identify future fallers based on gait patterns: a two-year longitudinal study[J]. *Experimental Gerontology*, 2019, 127: 110730.
- [20] 李文利, 钱铭怡. 状态特质焦虑量表中国大学生常模修订[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 1995, 31(1): 108-112.
- LI W L, QIAN M Y. Revision of the Chinese college student norm of the state-trait anxiety inventory [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1995, 31(1): 108-112.
- [21] HUPPERT T J, DIAMOND S G, FRANCESCHINI M A, et al. HomER: a review of time-series analysis methods for near-infrared spectroscopy of the brain[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(10): D280-D298.
- [22] MAHMOUDZADEH M, DEHAENE-LAMBERTZ G, FOURNIER M, et al. Syllabic discrimination in premature human infants prior to complete formation of cortical layers [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(12): 4846-4851.
- [23] KANG J, CHOI Y J, KIM I, et al. LASSO-based machine learning algorithm for prediction of lymph node metastasis in T1 colorectal cancer[J]. *Cancer Research and Treatment: Official Journal of Korean Cancer Association*, 2021, 53(3): 773-783.
- [24] 刘小生, 章治邦. 基于改进网格搜索法的 SVM 参数优化[J]. *江西理工大学学报*, 2019, 40(1): 5-9.
- LIU X S, ZHANG Z B. Parameter optimization of support vector machine based on improved grid search method[J]. *Journal of Jiangxi University of Science and Technology*, 2019, 40(1): 5-9.
- [25] TZOURIO-MAZOYER N, LANDEAU B, PAPATHANASSIOU D, et al. Automated anatomical labeling of activations in SPM using a macroscopic anatomical parcellation of the MNI MRI single-subject brain[J]. *Neuroimage*, 2002, 15(1): 273-289.
- [26] DAVIDSON R J. Affective style and affective disorders: perspectives from affective neuroscience[J]. *Cognition & Emotion*, 1998, 12(3): 307-330.
- [27] ISHIKAWA W, SATO M, FUKUDA Y, et al. Correlation between asymmetry of spontaneous oscillation of hemodynamic changes in the prefrontal cortex and anxiety levels: a near-infrared spectroscopy study[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2014, 19(2): 027005.
- [28] 刘玉华, 冯正直, 汪涛, 等. 飞行员焦虑敏感与心理健康的关系[J]. *中国行为医学科学*, 2006(12): 1097-1099.
- LIU Y H, FENG Z Z, WANG T, et al. The study of the relationship between the anxiety sensitivity and mental health of the pilots[J]. *Chinese Journal of Behavioral Medicine and Brain Science*, 2006(12): 1097-1099.
- [29] BISHOP S J. Trait anxiety and impoverished prefrontal control of attention[J]. *Nature Neuroscience*, 2009, 12(1): 92-98.
- [30] DAVIDSON R J. Anxiety and affective style: role of prefrontal cortex and amygdala [J]. *Biological Psychiatry*, 2002, 51(1): 68-80.
- [31] GOLDIN P R, MCRAE K, RAMEL W, et al. The neural bases of emotion regulation: reappraisal and suppression of negative emotion [J]. *Biological Psychiatry*, 2008, 63(6): 577-586.
- [32] SHACKMAN A J, MCMENAMIN B W, MAXWELL J S, et al. Right dorsolateral prefrontal cortical activity and behavioral inhibition [J]. *Psychological Science*, 2009, 20(12): 1500-1506.
- [33] MATHEWS A, MACKINTOSH B. A cognitive model of selective processing in anxiety[J]. *Cognitive Therapy and Research*, 1998, 22(6): 539-560.
- [34] DAVIDSON R J. What does the prefrontal cortex "do" in affect: perspectives on frontal EEG asymmetry research[J]. *Biological Psychology*, 2004, 67(1/2):

- 219 – 234.
- [35] ETKIN A, EGNER T, KALISCH R. Emotional processing in anterior cingulate and medial prefrontal cortex[J]. Trends in Cognitive Sciences, 2011, 15 (2): 85 – 93.
- [36] FERGUSON C J. An effect size primer: a guide for clinicians and researchers[J]. Professional Psychology: Research and Practice, 2009, 40(5): 532 – 538.
- [37] LI Y, ZHENG W, CUI Z, et al. EEG emotion recognition based on graph regularized sparse linear regression[J]. Neural Processing Letters, 2019, 49: 555 – 571.

Study of fNIRS-based anxiety measures for pilots

WANG Lei, GAO Mingqian, HONG Ruiyuan

(School of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: This study developed a pilot anxiety assessment method that integrates flight tasks with Functional Near-Infrared Spectroscopic Imaging (fNIRS), a non-invasive neuroimaging technique well-suited for dynamic flight scenarios. Twenty-four B – 737 pilots with valid commercial licenses participated in the research. Typical flight operations were simulated using a high-fidelity full-motion simulator, which accurately replicated flight dynamics and cockpit conditions to elicit authentic state anxiety. During the experiment, fNIRS brain signals and reaction time data were collected simultaneously, with an fNIRS sampling rate of 10 Hz. Reaction times were measured during critical operations, such as emergency handling and altitude adjustment, to capture neural activity patterns closely associated with fluctuations in anxiety. During the analysis stage, the Least Absolute Shrinkage and Selection Operator (LASSO) regression was initially employed to screen 31 anxiety-related channels. This process eliminated redundant or weakly correlated features, retaining only those neural signals that were strongly associated with fluctuations in anxiety. Subsequently, the most anxiety-sensitive brain regions were identified. Next, a Support Vector Regression (SVR) model was constructed using a Radial Basis Function (RBF) kernel. The model optimized the penalty parameter (C) and kernel width (γ) to minimize prediction errors and enhance overall accuracy. The findings indicate that state anxiety significantly impacts pilots' behavioral performance, leading to slower reaction times and reduced decision-making accuracy during high-stress operations. Notably, HbO signals in the left and right medial superior frontal gyri (Frontal _ Sup _ Medial _ L and Frontal _ Sup _ Medial _ R) and the right middle cingulate gyrus (Cingulum _ Mid _ R) demonstrated the highest sensitivity to fluctuations in anxiety. These regions are linked to emotional regulation and stress processing. The RBF-based SVR model achieved a RMSE of 6.86 and an R^2 value of 0.55, indicating a moderate level of predictive accuracy that is suitable for preliminary real-time monitoring. These findings confirm the feasibility and effectiveness of fNIRS in identifying pilots' anxiety in complex flight scenarios, addressing a significant gap in objective anxiety assessment during realistic flight tasks. Moreover, this research provides a scientific foundation for developing real-time emotional monitoring and early warning systems. Such systems could enhance flight safety management by facilitating the early detection of anxiety-related risks.

Key words: safety and hygiene engineering technology; functional near-infrared spectroscopic imaging; state anxiety; flight safety; machine learning