

【院士专栏：国防装备设计与制造】

航空装配作业疲劳监测机理研究及其装备设计应用

张岚云, 何彦, 杨静怡, 周海海, 陈炳发

(南京航空航天大学 工业设计系, 南京 210000)

摘要: **目的** 对航空制造业装配操作者的疲劳检测方法进行研究, 并对疲劳监测设备提出设计策略。**方法** 以人为中心的设计概念为基础, 运用实证法, 通过对新手操作者和熟练操作者的肌电信号和主观疲劳程度进行采集, 整体地分析生理和主观评价的数据, 对操作者的疲劳进行评估。**结果** 得出肌电信号的特征值随着人员的疲劳而规律性地变化, 其中 RMS 值(均方根值)和 FI_{nsm5} 值(由 Dimitrov 提出的新频域参数)与主观评价表现出显著的相关性; 新手操作者与熟练操作者的肌电信号也出现差异。**结论** 结合 RMS 值和 FI_{nsm5} 值的联合频谱分析, 提出一个评估肌肉疲劳的模型, 包括 3 种肌肉状态: 肌肉激活、过渡到疲劳、疲劳到精疲力竭; 提出将主观评价标准融入疲劳检测系统的方法; 分析航空制造业装配操作者疲劳监测设备的设计策略, 包括: 可穿戴设备、肌肉疲劳模型的应用策略、反馈数据形式。最后根据设计策略对一款可穿戴设备的人机交互进行了设计应用探索。

关键词: 疲劳监测; 可穿戴设备; 交互设计; 工业设计

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)16-0001-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.16.001

Investigating Fatigue Assessment Mechanism for Aviation Manufacturing and Application of the Device Design

ZHANG Lan-yun, HE Yan, YANG Jing-yi, ZHOU Hai-hai, CHEN Bing-fa

(Department of Industrial Design, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210000, China)

ABSTRACT: In aviation manufacturing industry, fatigue is a common problem among operators. In order to monitor operators's muscle fatigue, sEMG signal and self-perceived fatigue level are collected between novice and skilled operators. The collected data are further analyzed. It is found that a few sEMG features indicated directional changes with the increase of dynamic muscle fatigue. Spearman correlation analysis indicates that Borg ratings have strong correlations with RMS and FI_{nsm5} slopes. Significant differences in the sEMG signals between novice and skilled operators are found. Combined with experimental results, a model is proposed for muscle fatigue assessment. Furthermore, design implications to guide fatigue monitoring devices are discussed for aviation manufacturing workers: design of wearable device, how to apply the proposed model to assess muscle fatigue, and the design of the feedback signal. At last, the design and application of a wearable device for human-computer interaction in this context is explored.

KEY WORDS: fatigue detection; wearable device; interaction design; industrial design

我国航空制造业发展至今, 智能制造水平有了很大的提高, 这极大地提升了飞机生产效率和质量可靠性。不过, 由于航空产品生产专用装备多、工装复杂、

工艺流程多变、制造环境要求高, 且具有多品种、小批量、设计制造并行等特点^[1], 整个生产活动还是离不开人的参与。例如, 对于结构复杂、布局紧凑的飞

收稿日期: 2022-07-15

基金项目: 江苏省双创博士基金(JSSCBS20210190); 南京航空航天大学科研基金(56YAH20099); 南京航空航天大学前瞻布局科研专项(ILA22060)

作者简介: 张岚云(1988—), 女, 博士, 讲师, 主要从事人机交互设计与研究。

通信作者: 陈炳发(1963—), 男, 硕士, 教授, 主要从事人机工程与交互、CAD&CG 等研究。

机零部件,狭窄的空间内进行的装配、检测和清理工作依然有赖于人力。航空领域的许多工序难度高,工艺复杂,在需要人工操作的情况下,对操作者的能力及效率有着极高的要求。操作者的身心状态对航空产品的质量有着不容忽视的影响。基于此,本研究将以航空制造业装配操作者的疲劳问题作为主题,探索疲劳监测设备的设计研究,以期操作者对自身状态有实时的感知,以更舒适高效的方式完成作业。

1 制造业疲劳监测的发展现状

1982年第五届国际运动生化学术讨论将疲劳定义为“机体生理过程不能持续其机能在特定水平或不能维持预定的运动强度”;心理学家认为疲劳是指“感知到个体效能降低后对完成既有工作的主观厌恶感”;总的来说,疲劳是指持久或过度劳动后引起的机体的不适,并会导致工作效率的降低^[2],在生产和职业环境中是一个不容忽视问题。国内外学者探讨了疲劳产生的原因和机理,目前研究还停留在假说阶段,主要有3种比较经典的假说:力源消耗论、疲劳物质积累论和中枢系统变化论^[3]。目前,与疲劳监测相关的研究大部分都集中在交通运输领域,其他领域的疲劳研究相对较少,不过近年来随着人因工程学的逐渐成熟,对疲劳问题的研究范围有所拓展;同时,人体疲劳的测量对象是人,测量方法在不同行业具有通用性,仍可在文献中发现许多对制造业疲劳监测问题研究来说有价值的研究成果。

1.1 疲劳测量方法

结合前述对疲劳的定义,人体疲劳由多个维度组成,包括生理上的疲劳和心理上的疲劳,并可将其进一步细分为肌肉性疲劳、心理性疲劳、脑力性疲劳、病理性疲劳及混合性疲劳。

疲劳测量的方法大致可以分为主观测量和客观测量两种^[4],主观测量的研究方法一般基于问卷或访谈的形式,采用自我报告来评估疲劳程度。主观测量的方法简单易行且费用低廉,但客观性较差,为保证科学研究的可靠性,常见的自评量表有博格量表^[5]等。研究中也常使用基于生理、行为等间接指标测量被试者的疲劳程度,常用的疲劳测量方法有心率值测定法、反应时间测定法、脑电波测定法等^[6]。其中心率值测定法基于劳动强度越大,心率恢复至正常水平所需时间越长这一现象,使用劳动停止后恢复到静息心率时间内的总心跳数来表示人的疲劳程度;反应时间测定法则基于人越疲劳,对刺激的反应就越慢这一现象,使用反应时间来测量疲劳程度;脑电波测定法则通过脑活动的直接反映,分析前后的信号变化来测定人体的疲劳程度^[7]。

1.2 疲劳监测方法

疲劳监测和疲劳测量是2个不同的概念,尽管二

者的测量原理可能相同,但前者对测量有着更高的要求,即对疲劳程度实时动态的感知。

在疲劳监测发展最成熟的交通运输领域,研究者们针对疲劳驾驶问题已提出了许多方法,其中基于身体反应的监测方法是最常用也最受认可的,此方法通过监测驾驶员头部倾斜度、身体姿势的下垂度、眼睛闭合的频率、驾驶员掌控方向盘的力度等的变化实时感知驾驶员的疲劳程度^[8]。而在制造业的背景下,肌肉性疲劳的问题是最关键的。人体肌肉发生疲劳时,肌电信号的幅度和频谱特征会发生变化,通过对电信号的分析,可以实现对肌肉疲劳的连续监测^[9]。2022年,González-Zamora等^[10]提出了一种基于肌电信号测量肌肉疲劳程度的实时系统,该系统使用平均频率和功率谱密度作为肌肉疲劳测定的特征,使用线性回归模型确定肌肉疲劳的程度,并采用了EMG(肌电图)无线传感器使工人的操作不受影响。

1.3 新手与熟练操作人员的比较

疲劳测量时必须考虑人口统计学变量。对于相同的任务,每个人的感觉和生理反应都是不同的^[11]。在制造业疲劳测量中不能忽视的一个人口统计学变量——操作人员的熟练程度。研究人员已经确定,对于给定的任务,有经验的操作者相比新手通常采用较低的生物力学脊柱负荷,较少的背部肌肉激活,更窄的腰椎运动范围,更高的主观不适阈值和心理上可接受的承重,以及在地面任务期间更大的膝关节屈曲^[12]。

1.4 疲劳监测设备的反馈信号类型

疲劳监测设备在用户达到临界疲劳值时需要用户对用户进行提醒,以避免生产或安全事故。这一过程需要设备主动发出反馈信号传递信息,刺激人的感觉器官。若采用合适的方式刺激人体的感觉通道就能获得好的信息处理效果。常用的感觉通道有视觉通道和听觉通道。在特定条件下,触觉和嗅觉通道也有特殊用处^[13]。在疲劳检测设备中,常见的反馈信号类型包括提示消息(视觉)、提示铃声(听觉)、闪烁灯光(视觉)、刺激气味(嗅觉)、设备振动(触觉)等。

目前制造业领域内肌肉监测相关产品较少,大多还停留在概念阶段,对反馈信号的设计还不成熟。此处以驾驶疲劳监测设备为例介绍反馈信号的类型。尼桑驾驶员注意力提醒系统(Driver Attention Alert)利用转向传感器实时监控驾驶状态,当系统发现驾驶员疲劳时,会发出铃声,同时仪表板上会出现咖啡杯图标和提醒驾驶员休息的提示信息^[14]。福特驾驶员警报系统利用前视摄像头来监控车辆在车道中的位置并监测驾驶员的注意力集中程度。若系统察觉驾驶员疲劳,系统将发出提示音,仪表盘屏幕会弹出警告弹窗。如果警告被忽视或者驾驶员疲劳程度加深,警告弹窗将由黄变红,提示音会变得更急促刺耳^[15]。

2 肌肉疲劳实验研究

2.1 实验设计和过程

本研究拟通过表面肌电信号和主观量表来预测操作者在工作过程中的肌肉疲劳。由于航空装配作业以人的上肢肌肉负荷为主,尤其是飞机蒙皮装配中的铆接,主要为肘关节和肩关节之间的肱二头肌承载作业负荷^[16]。上肢的重复作业中,肱二头肌也是主要累

及的肌肉^[17]。因此为了模拟装配作业中的主要肌肉负荷,本研究设计了上肢哑铃卷举实验。被试者被要求完成至少五组坐姿孤立哑铃卷举,每组重复 12 次。实验开始前需要重复 5 次动作作为热身。对不同熟练程度的操作者,有 3 种哑铃的重量可供选择(5 kg、8.5 kg 和 10 kg)。被试者按照不同的实验模式进行实验(一半的被试者被要求选择模式 a,另一半为模式 b),见图 1。

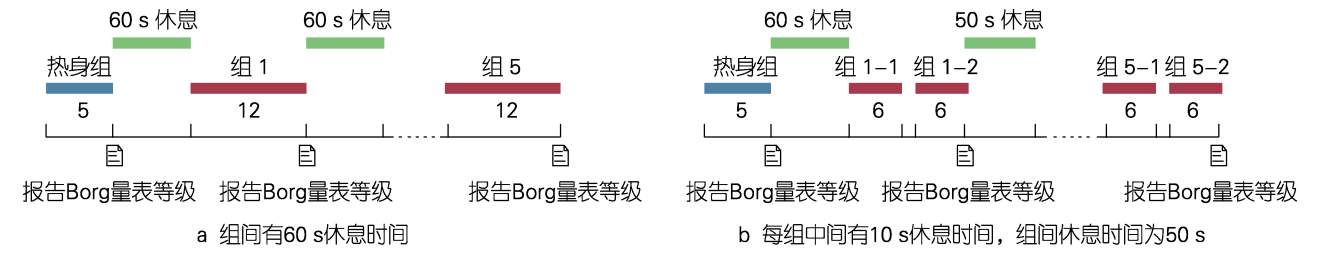


图 1 肌电实验休息模式
Fig.1 sEMG exercise pattern

具体的实验的流程如下。
第 1 步,在阅读完实验信息表并签署同意后,被试者被要求选择最适合自己的哑铃重量,并被告知给定的工作模式。在肱二头肌热身(使用 2 kg 哑铃)完后,被试者被要求坐下来并佩戴无线表面肌电信号设备直到整个过程结束(在放置表面肌电电极前,用酒精垫清洁皮肤表面)。

第 2 步,被试者需要完成 5 次重复的热身动作和至少 5 组坐姿孤立哑铃卷举,每组重复 12 次,组间和组内的休息时间由他们选择的实验模式决定,肌电信号的采集在整个过程中一直都是持续的。每组测试结束后,被试者需要立即报告他们的主观疲劳程度(博格量表),见表 1。基于 Borg CR10 量表的主观性,被试者可能会根据自己的疲劳感受对自己的疲劳程度进行不同的评估,这可能会导致他们在整个实验过程中不准确地报告自己的努力程度。为了应对这一

挑战,我们对博格量表的各个等级进行了解释。例如,“3”表示肌肉开始疼痛,“10”表示无法举起哑铃。
第 3 步:在完成练习后,被试者被要求回答关于日常工作疲劳的半结构化问题,包括间隔的休息时间和他们日常工作的模式。

2.2 实验被试信息

本实验招募了 20 名健康男性被试者,表 2 显示

表 2 被试者信息
Tab.2 Participant information

编号	BMI	哑铃重量/kg	实验模式	类型
1	30.86	5	模式 1	新手
2	20.76	5	模式 1	新手
3	20.76	5	模式 2	新手
4	23.66	5	模式 1	新手
5	25.95	5	模式 2	新手
6	23.39	5	模式 1	新手
7	22.2	5	模式 2	新手
8	21.97	5	模式 1	新手
9	23.14	5	模式 2	新手
10	22.4	5	模式 1	新手
11	22.49	10	模式 2	熟练
12	23.06	8.5	模式 1	熟练
13	22.86	8.5	模式 2	熟练
14	22.20	8.5	模式 2	熟练
15	23.05	8.5	模式 2	熟练
16	21.60	8.5	模式 1	熟练
17	23.12	10	模式 2	熟练
18	21.38	8.5	模式 1	熟练
19	23.14	10	模式 1	熟练
20	25.95	10	模式 2	熟练

数值	疲劳等级	程度
0	完全没有	
0.5	刚刚感觉到	
1	非常轻微	
2	轻微	
3	中等	肌肉开始疼痛
4		
5	强烈	
6		
7	非常强烈	
8		举起哑铃十分困难
9		
10	最大值	无法举起哑铃

了被试者的信息,以及他们在给定的实验模式下对哑铃重量的选择。原始表面肌电信号通过无线 8 通道生物信号 Plux HUB 采集,采样速率为 1 000 Hz。被试者测量身体质量指数 (BMI) 也在表 2 中给出。其中,新手操作者的招募标准是经过初步训练或有兴趣现场进行操作培训的人员,熟练操作者的招募标准是在过去至少有 1 年进行过大量重量练习的人员。

2.3 数据收集和分析方法

表面肌电信号采样频率为 1 000 Hz,利用带通滤波器将 20~500 Hz 的频率截断。在哑铃弯曲时,肌肉呈现间歇性的激活状态。Teager-Kaiser 能量算子 (TKEO) 用于检测肌肉激活的活动段。提取了肌电信号的活动段之后,通过 Python 提取计算 6 个肌电特征。6 个肌电特征的计算原理如下。

对于振幅特征,提取了 2 个指标:平均绝对值 (MAV 值) 和均方根值 (RMS 值)。它们由式 (1) — (2) 表达。

(1) 平均绝对值 (M_{MAV})

$$M_{\text{MAV}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i| \quad (1)$$

其中 x_i 是信号的第 i 个样本, N 是窗口内的样本数。

(2) 均方根值 (M_{RMS})

$$M_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i|^2} \quad (2)$$

其中 x_i 是信号的第 i 个样本, N 是窗口内的样本数。

(3) 过零率 (M_{ZCR})

$$M_{\text{ZCR}} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (\text{sig}(x_i) - \text{sig}(x_{i-1})) \quad (3)$$

$$\text{其中 } \text{sig}(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{if } x = 0 \\ -1 & \text{if } x < 0 \end{cases}, N \text{ 是该窗口内的样本数。}$$

ZCR 体现了在特定帧的持续时间内信号符号变化的速率。

(4) 平均功率频率 (M_{MPF})

$$M_{\text{MPF}} = \frac{\int_{f_1}^{f_2} f \cdot P(f) df}{\int_{f_1}^{f_2} P(f) df} \quad (4)$$

其中 f 为频率, $P(f)$ 为信号的功率谱密度。用 $f_1=20$ Hz 和 $f_2=500$ Hz 由滤波器的带宽决定。

(5) 中值频率 (M_{MDF})

$$\int_{f_1}^{f_{\text{med}}} P(f) df = \int_{f_{\text{med}}}^{f_2} P(f) df \quad (5)$$

其中 f_{med} 为中值频率, f_s 为采样频率, $P(f)$ 为信号的功率谱密度, $f_1=20$ Hz, $f_2=500$ Hz。

(6) 由 Dimitrov 提出的新频率参数 MFI_{nsms}

$$MFI_{\text{nsms}} = \frac{\int_{f_1}^{f_2} f^{-1} \cdot P(f) df}{\int_{f_1}^{f_2} f^5 \cdot P(f) df} \quad (6)$$

其中 $P(f)$ 是信号的功率谱密度, $f_1=20$ Hz, $f_2=500$ Hz。

本文采用 SPSS 统计软件对实验中采集的数据进行描述性分析和统计学分析,探讨肌电图特征和主观指标随肌肉疲劳程度增加的变化规律。首先对所有表面肌电信号特征进行归一化处理。其次,通过单因素方差分析对表面肌电信号特征进行独立比较,当获得显著的 F 值时,执行 Sheffe 事后检验来检验平均值之间的两两差异。最后进行相关性分析,分析表面肌电信号特征之间的相关性,以及表面肌电信号特征与主观测量指标之间的相关性。本文未展示半结构化访谈数据的结果。

3 肌肉疲劳实验结果分析

3.1 总体数据实验结果

如图 2 所示,表面肌电信号的时域特征 (RMS 值, ZCR 值, MAV 值) 和频域特征 (MDF 值, FI_{nsms} 值, MPF 值) 的表面肌电信号特征表明,肌肉的疲劳程度增加时,表面肌电信号的时域特征和频域特征值都表现出规律性的上升或下降。RMS 值的方差分析和事后检验结果分别表明:在前 3 组中,前 4 次重复记录的 RMS 值显著低于 ($P<0.05$) 高于后 4 次重复,如图 2a。 FI_{nsms} 的方差分析和事后检验结果表明:在最后 3 组中,前 3 次重复记录的 FI_{nsms} 显著低于后 3 次重复 ($P<0.05$),如图 2d。

采用线性回归法计算各个表面肌电信号特征每组的斜率。Spearman 相关分析表明 Borg 量表评分与 RMS 值的斜率具有较强的相关性 ($r=-0.638$, $P<0.01$),其次是 Borg 量表评分和 FI_{nsms} 值的斜率 ($r=0.531$, $P<0.01$),见表 3。

3.2 新手组和熟练组的对比结果

根据实验被试者肌肉力量水平的不同,可将被试者分为新手组 (所选哑铃重量为 5 kg) 和熟练组 (所选哑铃重量为 8.5 kg 和 10 kg)。新手组和熟练组的实验结果也存在显著差异。

如表 4 所示, Mann-Whitney 的检验结果显示,新手组和熟练组在表面肌电信号特征的数值上存在显著差异。从表中可以看出,新手组的幅值特征比熟练组小,原因在于幅值是与肌肉的力量水平呈正相关的。而造成新手组的频域特征与熟练组也有显著差异的原因,基于实验中的观察,猜测新手组在实验过程中发力不正确、姿势不标准,从而造成了与熟练组之间的显著差异。

为了研究随着重复次数的增加,新手组和熟练组肌肉疲劳变化程度的不同,对新手组和熟练组按每组 12 次重复的平均值进行了回归分析,分析的特征为时域特征 RMS 值和频域特征 FI_{nsms} 值。

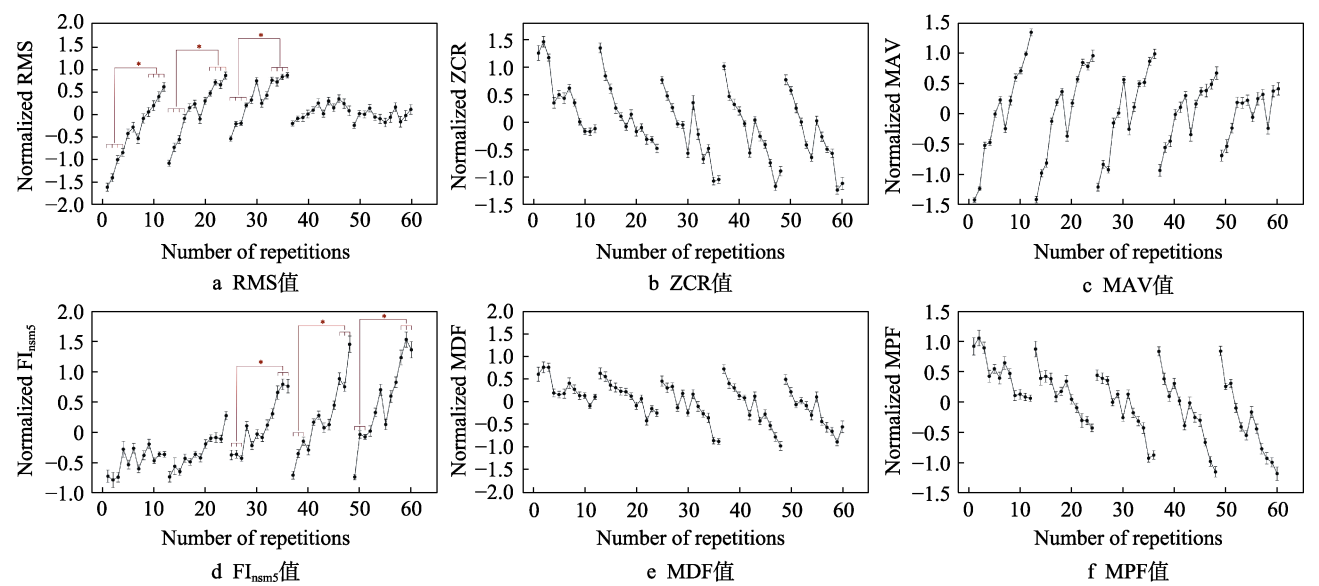


图 2 表面肌电信号的变化 (均值±标准差)
Fig.2 Changes of sEMG features (mean±SD)

表 3 表面肌电特征与 Borg 量表评分之间的相关性分析

Tab.3 Correlation coefficients between Borg scale ratings and the slope of six sEMG features						
特征	RMS 值	FI _{nsm5} 值	MDF 值	MPF 值	ZCR 值	MAV 值
Borg Scale Ratings	-0.638**	0.531**	-0.360**	-0.415**	-0.193	-0.504**

注: * $P<0.05$, ** $P<0.01$ 。

表 4 新手组与熟练组各肌电特征的数值比较

Tab.4 Numerical comparison of sEMG features between novice group and skilled group					
特征	RMS 值	MAV 值	MDF 值	MPF 值	FI _{nsm5} 值
新手组平均值±标准差	0.463±0.13	0.356±0.097	66.64±11.6	78.35±14.2	1.686±0.96
熟练组平均值±标准差	0.674±0.11	0.516±0.098	60.67±8.2	73.62±9.5	1.845±1.03
P 值	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.006**

注: * $P<0.05$, ** $P<0.01$ 。

如表 5 所示,随着组数的增加,熟练组和新手组的 RMS 值的回归系数和相关系数都在减小。但是与新手组相比,熟练组在后期 RMS 值的变化并不显著,并且除第 1 组外,熟练组的相关性都比新手组小。由此可以看出,熟练组到达 RMS 值的阈值的时间比新手组短。

表 5 新手组与熟练组 RMS 值变化趋势比较分析

Tab.5 Comparison of changing trend of RMS between novice group and skilled group						
组数	新手组回归系数	新手组相关系数	P 值	熟练组回归系数	熟练组相关系数	P 值
1	0.159	0.945	0.000**	0.219	0.979	0.000**
2	0.168	0.947	0.000**	0.150	0.874	0.000**
3	0.158	0.904	0.000**	0.078	0.798	0.002**
4	0.060	0.712	0.009**	0.010	0.284	0.370
5	0.027	0.634	0.027*	-0.011	0.178	0.579

注: * $P<0.05$, ** $P<0.01$ 。

如表 6 所示,除了新手组的第 1 组之外,其他组的数据都呈显著线性增加的趋势。对比于新手组,熟练组的上升趋势更为明显。新手组 4-5 组的变化显著,熟练组最后 3 组的变化显著。可以看出,FI_{nsm5} 值反映疲劳对于熟练组更加敏感,新手组在 4-5 组的趋势相比 1-3 组更加明显。

表6 新手组与熟练组 FI_{nsm5} 值的变化趋势比较分析
Tab.6 Comparison of changing trend of FI_{nsm5} between novice group and skilled group

组数	新手组回归系数	新手组相关系数	P 值	熟练组回归系数	熟练组相关系数	P 值
1	0.023	0.255	0.423	0.049	0.818	0.001**
2	0.064	0.789	0.002**	0.087	0.911	0.000**
3	0.084	0.809	0.001**	0.078	0.910	0.000**
4	0.187	0.923	0.000**	0.010	0.922	0.000**
5	0.151	0.858	0.000**	-0.011	0.972	0.000**

注: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ 。

4 肌肉疲劳模型构建

4.1 疲劳模型的构建原理

现有研究表明,表面肌电信号幅值的增加与肌肉力量^[13]高度相关,频谱的偏移是肌肉疲劳^[17]的典型标志。发现在前3组中,RMS值随着肌肉力量的增加而显著增加,后2组没有明显变化。另一方面,最后3组的 FI_{nsm5} 值明显增加,这被认为与疲劳的增加高度相关。同时与其他表面肌电信号特征相比,每组的 RMS 值和 FI_{nsm5} 值的斜率与 Borg 量表评分的相关性更高。因此,结合 RMS 值和 FI_{nsm5} 值的联合频谱分析,提出了3种疲劳状态:肌肉激活,过渡到疲劳,疲劳到精疲力竭。模型来评估肌肉疲劳水平,见图3。

1) 肌肉激活 (RMS 值的斜率 > 0.1 , FI_{nsm5} 值的斜率 < 0.15), 此阶段肌肉力量增加,无肌肉疲劳。

2) 过渡到疲劳 (RMS 值的斜率 > 0.1 , FI_{nsm5} 值的斜率 > 0.15), 此时肌肉力量增加,肌肉疲劳增加。

3) 疲劳至力竭 (RMS 值的斜率 < 0.1 , FI_{nsm5} 值的斜率 > 0.15), 此阶段肌肉力量下降,肌肉疲劳增加。

如图3所示, x 轴和 y 轴分别表示每组的 RMS 值的斜率和 FI_{nsm5} 值的斜率。例如,如果某组的 RMS 值得斜率大于 0.1, FI_{nsm5} 值的斜率小于 0.15, 框架就会判定该组的肌肉状态为肌肉激活。

疲劳模型中的阈值可以根据用户的使用数据进行调整。基于收集的数据,发现博格尺度评分在 0-3 的组,其 RMS 值的斜率大多大于 0.1; 博格评分大于 7 的组,其 RMS 值的斜率大多小于 0.1。所以决定将 0.1 设置为 x 轴 (RMS 轴) 的阈值。 FI_{nsm5} 值的斜率阈值的确定方法与 RMS 值类似。总的来说,阈值应该可以根据不同的用户和同一用户的不同肌肉表现自动调整。在实际的场景中,随着实验疲劳监测设备用户的增加,会收集该用户的大量数据。因此,疲劳模型中的阈值理论上可以自动调整。

为了测试该疲劳模型,将使用 Borg 量表的评分作为标签。根据博格量表的评分,将 0-3 定义为肌肉激活,4-6 定义为过渡到疲劳,7-10 定义为疲劳至力竭。在图4中,3种不同颜色的点代表博格等级的不同范围。我们将实验数据放到这个框架中,轴上的每



图3 基于 RMS 值的斜率和 FI_{nsm5} 值的斜率的疲劳模型
Fig.3 Model of fatigue assessment with RMS and FI_{nsm5} slopes

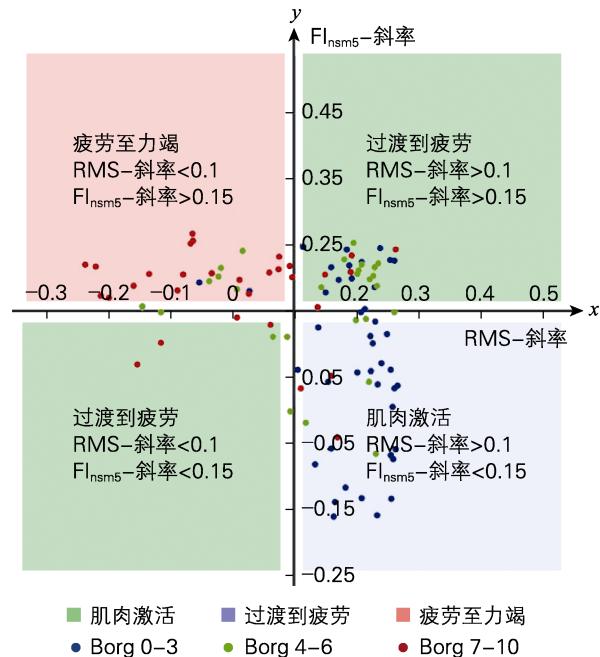


图4 模型中代表每组的点
Fig.4 Points of each set in the model

个点代表了 1 个组的 Borg 量表评分。

准确率的计算方法是落在相应颜色区域的点的数量除以点的总数。64.29% 的 0–3 的 Borg 评分被判断为肌肉激活; 55.56% 的 4–6 的 Borg 评分被判断为过渡到疲劳; 而在 7–10 的 Borg 评分中, 有 61.29% 被认定为疲劳至力竭, 见表 7 所示。准确率可以通过不同的方法进一步测试, 如机器学习算法。另一方面, 主观感受 (即 Borg 量表的评分) 也可以对疲劳模型中的阈值产生影响, 而不是仅作为检验准确率的参考标准。

表 7 3 种状态的识别率 (%)
Tab.7 Accuracy of identifying three states

Borg	识别为肌肉 激活	识别为过渡到 疲劳	识别为疲劳至 力竭
0–3	64.29	30.95	4.8
4–6	22.22	55.56	22.22
7–10	9.7	29.03	61.29

4.2 新手和熟练操作者的疲劳模型

由于新手操作者组和熟练操作者组的 RMS、 FI_{nsm5} 在数值和斜率上存在一些差异。对于 RMS 值, 与新手组相比, 熟练组的整体斜率更偏低一些, 在中度疲劳 (Borg 为 3–6) 时熟练操作者更低, 因此预计将新手肌肉疲劳模型中的 RMS 值的斜率的阈值调高为 0.15, 熟练组模型中的 RMS 值的阈值适当调低为 0.05。对于 FI_{nsm5} 值, 与新手组相比, 熟练组的整体斜率更偏高一些, 因此预计将新手组肌肉疲劳模型中的 FI_{nsm5} 值的阈值适当调低为 0.1, 熟练组适当调高为 0.2。

调整完肌肉疲劳模型框架中的阈值之后, 将新手组和熟练组对应的组带入各自不同阈值的疲劳模型中计算准确率, 结果 (见表 8) 显示识别准确率与原先相比有所下降, 由于新手组和熟练组的疲劳模型中只有 25 个数据, 可能是由于样本量减小造成了准确率的下降, 需要进一步研究不同肌肉力量水平对应的模型阈值。

表 8 新手组和熟练组不同阈值下 3 种状态的识别率 (%)
Tab.8 Recognition rate of three states in novice group and skilled group under different thresholds

Borg	识别为肌肉 激活	识别为过渡到 疲劳	识别为疲劳至 力竭
0–3	54.76	51.85	48.39
4–6	40.48	29.63	12.90
7–10	2.40	18.51	38.70

5 肌肉疲劳监测设备设计策略及其应用

随着航空制造业复杂程度的提高, 脑力作业及心

理紧张性作业的负荷加重。在这种情况下, 为达到最佳的人机匹配, 设计者需要了解感觉器官功能的限度和能力, 以及使用时可能出现的疲劳程度^[13]。实时监测操作者的肌肉疲劳情况是必要的。肌肉疲劳的评估和测量既是一项技术也是一项服务, 它需要设计专门的交互形式, 可应用在操作者可穿戴设备上, 具体如下。

5.1 可穿戴设备的思考

技术进步为可穿戴电子设备的产品设计、操作效率和使用体验带来新的机遇。例如在航空装配场景下, 飞机部件铆接装配, 操作者需要长时间保持同一姿势或重复同一过程, 即使拥有外骨骼机器人的辅助, 操作者的肌肉疲劳状况依然需要密切关注、监测。目前市场上已有大量监测类可穿戴设备, 包括监测运动的智能手表、用于分析用户睡眠模式的健身手环, 以及监测温度、心率和水平水合水平的灵活贴片设备^[18]。虽然这些设备并没有应用于肌肉疲劳的领域, 但已经展现了可穿戴设备的巨大潜力。在专为科学研究和运动学研究领域, 现在已经有一些用于测量肌肉活力和被激活状态的可穿戴设备^[19], 但这些设备不能对肌肉的疲劳进行评估和反馈。因此, 本文提出针对专用于航空装配过程中的疲劳监测可穿戴设备是值得研究和开发的。

5.2 肌肉疲劳模型的应用策略

本文提出的疲劳模型旨在评估肌肉重复舒张背景下的疲劳。该模型可以通过分析原始肌电信号来帮助了解人们的肌肉状况。“肌肉激活”状态可以帮助操作者了解是否进入工作状态, “疲劳至力竭”状态可以防止操作者过度疲劳。在实际应用中, 阈值可以通过从操作者前 2 到 3 次重复中收集的数据来确定, 并且随着肌肉激活、肌肉力量和疲劳程度的增加, 模型中的阈值应该能够相应地调整。此外, 主观数据可以通过 2 种不同的方法参与到肌肉疲劳评估中。第 1 种, 主观报告作为标签来调整模型, 并间接影响疲劳评估结果; 第 2 种, 主观报告作为输入, 直接影响疲劳评估结果。

5.3 反馈信号的设计

可穿戴设备能为佩戴者提供实时反馈。实时反馈的目的是让操作者在装配任务期间对其的姿势和运动行为有更好的自我意识, 并促进改变、减轻或管理肌肉的骨骼损伤。视觉反馈是大多数设备的主要选择^[20], 振动触觉或听觉反馈策略不需要视觉刺激, 这对一些需要持续视觉注意的任务, 例如本文的场景, 可能是首选。然而, 视觉反馈可以通过更详细地可视化操作者的运动来增强的学习。工作场所环境中的声音反馈可能不切实际, 并会引起潜在的混淆效应。在对航空装配过程中的肌肉疲劳监测设备设计思考时,

需要整体考虑。

5.4 可穿戴设备的人机交互设计应用

课题组设计了飞机装配操作者可穿戴疲劳监测系统的外观和交互系统,由可穿戴手环和操作者疲劳信息软件2部分组成,见图5。首先,关于可穿戴形式的思考,对产品加绑带的形式进行了选择,不同长度的绑带可以适宜不同的肌肉部位,且穿戴简单、易于使用。其次,关于肌肉疲劳模型的应用策略,根据疲劳模型将操作者的疲劳程度分成了3类,即肌肉激活、过渡到疲劳、疲劳;产品可以根据采集到的肌电

信号来判断操作者的疲劳状态。再次,针对不同肌肉力量、不同熟练程度的操作者,模型的阈值与系统推荐的休息时间也是不同;针对新手和熟练操作者在实验中表现出来的疲劳数据不同,本设计对2类人群进行了模型的相应修改和阈值的调整;在设计的界面中,操作者也可以查看自己在装配作业过程中疲劳程度的变化和系统给出的建议。最后,关于反馈信号的设计,为模型中3种不同疲劳状态设计了不同的指示灯和振动程度,当操作者达到不同的疲劳程度时,系统会即时反馈不同颜色的灯光,并且当达到疲劳状态后会发出振动以提醒休息。



图5 飞机装配操作者可穿戴疲劳监测系统造型和界面设计

Fig.5 Product and interface design of wearable fatigue monitoring system for aircraft assembly operators

6 结语

航空领域的许多工序难度高、操作复杂,对操作者有着极高的要求。操作者的疲劳状态对工作效率有着不容忽视的影响。因此,对航空制造业装配操作者疲劳监测设备的研究是一个很重要的课题。本文通过肌肉疲劳实验,对新手和熟练操作者的肌电信号和主观疲劳程度进行采集,整体地分析了生理和主观评价的数据。基于实验的结果,提出了基于肌电信号时域和频域特征的肌肉疲劳模型,初步检测了其准确率,并分析了如何将主观评价标准融入疲劳检测系统的方法。

在实验的基础上,本文从可穿戴设备、肌肉疲劳模型的应用策略、反馈数据形式等3个方面分析了航空制造业装配操作者疲劳监测设备的设计策略,并根据设计策略对一款可穿戴设备的人机交互进行了设计应用探索。

参考文献:

[1] 王国磊,吴丹,陈恩. 航空制造机器人现状与发展趋

势[J]. 航空制造技术, 2015, 58(10): 26-30.

WANG Guo-lei, WU Dan, CHEN Ken. Current Status and Development Trend of Aviation Manufacturing Robot[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(10): 26-30.

[2] 杨奎. 铁路列车调度员疲劳机理与发展规律研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.

YANG Kui. Mechanism and Developing Law of Railway Dispatcher's Fatigue[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.

[3] 谢晓莉. 驾驶疲劳生成机理研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2010.

XIE Xiao-li. Study on Driving Fatigue Formation Mechanism[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010.

[4] SEDIGHI MAMAN Z, ALAMDAR YAZDI M A, CAVUOTO L A, et al. A Data-Driven Approach to Modeling Physical Fatigue in the Workplace Using Wearable Sensors[J]. Applied Ergonomics, 2017, 65: 515-529.

[5] TROIANO A, NADDEO F, SOSSO E, et al. Assessment of Force and Fatigue in Isometric Contractions of the Upper Trapezius Muscle by Surface EMG Signal and Perceived Exertion Scale[J]. Gait & Posture, 2008,

- 28(2): 179-186.
- [6] 徐腾. 制造业线上工人作业疲劳影响因素综合评价研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2017.
- XU Teng. Research on Comprehensive Evaluation of Factors Influencing Fatigue of Workers' Job in Manufacturing Industry[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2017.
- [7] 曾志康. 用于精神疲劳监测的多模态表皮电子传感器研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- ZENG Zhi-kang. Research on Multi-Modal Epidermal Electronic Sensor for Mental Fatigue Monitoring[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [8] 黄瀚敏. 基于汽车驾驶员疲劳状态监测技术的汽车主动安全系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- HUANG Han-min. Based on Detecting Driver's Fatigue Status of Vehicle Active Safety[D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.
- [9] 唐晓. 基于表面肌电的运动单位活动特性分析及应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
- TANG Xiao. Analysis and Application of Motor Unit Activities Derived from Surface Electromyography[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.
- [10] GONZÁLEZ-ZAMORA P, BENITEZ V H, PACHECO J. A Feature-Based Processing Framework for Real-Time Implementation of Muscle Fatigue Measurement[J]. Cluster Computing, 2022: 1-10.
- [11] LAMBAY A, LIU Ying, JI Ze, et al. Effects of Demographic Factors for Fatigue Detection in Manufacturing[J]. IFAC-PapersOnLine, 2022, 55(2): 528-533.
- [12] CHEN Yi-lang. Effects of Work Experience and Exertion Height on Static Lifting Strengths and Lift Strategies of Experienced and Novice Female Participants[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2014, 44(5): 607-614.
- [13] 丁玉兰. 人机工程学[M]. 4 版. 北京: 北京理工大学出版社, 2011.
- DING Yu-lan. Human engineering[M]. 4th ed. Beijing: Beijing Insititute of Technology Press, 2011.
- [14] Nissan. Driver Attention Alert System[EB/OL]. (2015-07-25)[2022-07-13]. <https://www.nissanusa.com/experience-nissan/news-and-events/drowsy-driver-attention-alert-car-feature.html>
- [15] Ford. What Is the Ford Driver Alert System?[EB/OL]. (2021-04-22)[2022-07-13]. <https://www.ford.com/support/how-tos/ford-technology/driver-assist-features/what-is-the-driver-alert-system/>.
- [16] 张永建, 景世才, 唐健钧, 等. 面向飞机总装的人机工程仿真技术[J]. 航空制造技术, 2018, 61(20): 96-101.
- ZHANG Yong-jian, JING Shi-cai, TANG Jian-jun, et al. Ergonomic Simulation Technology for Aircraft Final Assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(20): 96-101.
- [17] 张非若, 丁嘉顺, 戴文涛, 等. 重复作业上肢肌肉疲劳的表面肌电实验研究[J]. 工业卫生与职业病, 2007, 33(1): 5-8.
- ZHANG Fei-ruo, DING Jia-shun, DAI Wen-tao, et al. Experimental Study on Muscle Fatigue of Upper Limbs during Repetitive Performance by Using sEMG[J]. Industrial Health and Occupational Diseases, 2007, 33(1): 5-8.
- [18] BARNES K, KAUFFMAN V, CONNOLLY C. Health Wearables: Early Days[R]. Delaware: Pricewater House Coopers LLP 2014.
- [19] Cometa. PicoEMG[EB/OL]. (2021-06-22) [2022-07-13]. <https://www.cometasystems.com/products/picoemg>.
- [20] LEE R, JAMES C, EDWARDS S, et al. Evidence for the Effectiveness of Feedback from Wearable Inertial Sensors during Work-Related Activities: A Scoping Review[J]. Sensors, 2021, 21(19): 6377.

责任编辑: 陈作