

离心机G载荷作用下肌电变化对G-LOC预警的有效性研究

李毅峰,杨景慧,李宝辉,金朝,张立辉,卫晓阳,杨明浩*

(空军军医大学空军特色医学中心,北京 100142)

[摘要] 目的:研究离心机G载荷作用下肌电变化对于持续加速度引起的意识丧失(G-induced loss of consciousness, G-LOC)预警的有效性和可行性。方法:首先,参照2条件分析法,选取7名受试者进行高G训练和推拉训练。其次,对高G训练模式下和推拉效应下受试者发生G-LOC前后不同部位的肌电变化特征进行分析。最后,对同一名受试者临近2次载荷作用下的肌电特征参数综合绝对值(integrated absolute value, IAV)和波形长度(waveform length, WL)的变化进行研究。结果:所有受试者G-LOC前后的肌电波形呈现出不对称,且肌电波形不规则。在高G训练模式下,腓肠肌处的肌电特征参数变化比胫骨前肌处的肌电特征参数变化对于G-LOC预警更具有价值;在推拉效应下,肌电特征参数变化不明显,对于G-LOC预警效果不佳。同一名受试者在临近2次载荷作用下的肌电特征参数IAV和WL也呈现出特征性变化。结论:对于G-LOC预警,腓肠肌处的肌电变化比胫骨前肌处的肌电变化更有效;2条件分析法对高G训练模式下的G-LOC预警有效,但对推拉效应作用下的G-LOC预警效果不明显;对比同一名受试者在临近2次载荷作用下的肌电特征参数变化也能实现G-LOC预警。

[关键词] 离心机;G载荷作用;G-LOC;G-LOC预警;2条件分析法

[中国图书资料分类号] R318 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8868(2024)12-0025-07

DOI: 10.19745/j.1003-8868.2024231

Investigation on effectiveness of EMG for G-induced loss of consciousness forewarning under centrifuge G load

LI Yi-feng, YANG Jing-hui, LI Bao-hui, JIN Zhao, ZHANG Li-hui, WEI Xiao-yang, YANG Ming-hao*

(Air Force Medical Center, Air Force Medical University, Beijing 100142, China)

Abstract Objective To explore the efficiency and feasibility of EMG changes for forewarning of G-induced loss of consciousness (G-LOC) under G load of human centrifuge. **Methods** Firstly, seven subjects were selected for high G training and push-pull training with reference to the 2-condition analysis method. Secondly, the characteristics of EMG changes in different parts of the body were analyzed before and after the occurrence of G-LOC in the subjects under the high-G training mode and the push-pull effect. Finally, the changes of two EMG characteristic parameters, including integrated absolute value (IAV) and waveform length (WL), were investigated under two sequential loads to one subject. **Results** The EMG waveforms of all the subjects were asymmetric and irregular before and after G-LOC. Under the high-G training mode, the changes of EMG characteristic parameters at the gastrocnemius muscle were more valuable than those at the tibialis anterior muscle for G-LOC forewarning; under the push-pull effect, the changes of EMG characteristic parameters were not obvious, and not effective for G-LOC forewarning. The IAV and WL showed characteristic changes under two sequential loads to one subject. **Conclusion** The changes of EMG characteristic parameters at the gastrocnemius muscle behaved better than those at the tibialis anterior muscle for G-LOC forewarning; the 2-condition analysis method was effective for G-LOC forewarning under the high-G training mode, while not in the presence of a push-pull effect; comparing the changes of EMG characteristic parameters of some subject under two sequential loads can also be used for G-LOC forewarning. [Chinese Medical Equipment Journal, 2024, 45(12):25-31]

Key words centrifuge; G-load effect; G-induced loss of consciousness; forewarning of G-induced loss of consciousness; 2-condition analysis method

0 引言

作者简介:李毅峰(1977—),女,硕士研究生,高级工程师,主要从事人体生理信号监测与分析、离心机工程方面的研究工作,E-mail:liyf8886@sina.com。

通信作者:杨明浩,E-mail:minghaoyang@qq.com

持续性 $+G_z$ 作用下人体空中失能的监测、预警等防护措施的研究一直是航空医学领域的一个重要研究方向。持续正加速度引起的意识丧失(G-induced loss of consciousness, G-LOC)主要是由飞行员在z轴上的突然加速引起的。 $+G_z$ 加速度引起的意识丧失对

飞行人员的安全造成了严重的威胁。近年来,第四代高性能战斗机逐渐成为未来空战的主要机种^[1],对飞行员的抗荷能力提升及预警技术提出了更高的要求^[2]。因此,为实现更高 G_z 暴露下的有效防护,除了提高飞行员自身的 G 耐力外,还必须通过生理信号的监测和预警技术加以弥补,以避免飞行事故的发生。航空医学界对高过载失能的预警技术研究进行了持续探讨。由于载人离心机能很好地模拟飞行中的 G 载荷作用,因此,越来越多的学者开始利用载人离心机开展人体试验进行研究。由于生理信号直接反映了人的警醒状态,因此对飞行人员在载人离心机训练中的相关生理信号进行监测、观察和评估具有重要意义^[3]。目前,国外用来监测飞行人员 G-LOC 的信息源主要有头部血流、耳脉搏、脑电、脑氧饱和度、心电、肌电,眨眼次数、脑功能状态、合成音反应等的研究较少。由于从头水平处的脑血压值降为 0 到大脑意识丧失还有 2~3 s 的氧储备时间,所以通常将耳脉搏波幅值降低 75%,或耳脉搏波拉平 2 s 左右,作为黑视或意识丧失的预警^[4]。在国外,有学者认为耳脉搏仅能够和其他参数一起作为预警灰视发生的指标^[5]。在国内,耳脉搏也是目前在离心机训练中来判断飞行员耐力终点的一项主要的生理指标,其也为其他可能用作预警的生理指标的研究提供了判断依据。虽然头水平处的脑血压值能够准确地反映大脑的意识状态,但其在 G 载荷下的实时监测等实现起来相当困难,经常和脑电、脑血氧等其他信号混杂在一起,需要对获取到的多个信号进行离线分析。有学者设计了载人离心机无创连续血压监测系统,能够实时获取飞行员在整个高过载训练过程中伴随抗荷动作的连续血压变化,但在实际应用中仍存在设备体积大、安装困难、不具备监测载荷值的能力等问题^[6]。脑电图能够直接且敏感地反映出大脑的功能状态,是目前研究较热的一个领域,许多学者认为脑电可作为一项预警 G-LOC 的监测指标^[7-8]。还有学者通过周期图参数的分析方法提取有价值的特征参数^[9]。围绕飞行中的脑电变化,学者进行了不少相关研究^[10-12]。但是现实中脑电采集通常需要多导联,且高 G 载荷时飞行员佩戴头盔面罩也会影响采集到的脑电信号质量,所以高载荷下如何获取到高质量的脑电信号,还需要进一步研究。

肌电图数据最早用于生理评估。Oksa 等^[13]发现飞行员颈肩部的肌肉力量和耐力要明显高于普通人群。之后 Chen 等^[14]提出了肌电图分析方法,认为与主观评价相比,通过肌电图监测飞行员做抗荷动作(anti-G straining maneuver, AGSM)时肌肉收缩力和

耐力的定量变化是一种更加客观且精确的 AGSM 有效性评估方法。之前多位学者对肌电特征变化进行了研究^[15-22]。有研究^[23]记录并分析了 3 个信号采集部位(颈部、腹部、小腿)和失能发生前后综合绝对值(integrated absolute value, IAV)、波形长度(waveform length, WL)、均方根(root mean square, RMS)、平均绝对值(mean absolute value, MAV)、斜率信号变化(slope sign changes, SSC)、过零(zero crossing, ZC)和中值频率(median frequency, MF)7 种肌电特征参数的数据,发现飞行员在执行 AGSM 过程中下肢肌肉的肌电信号振幅的下降比上肢肌肉明显,这与 Cornwall 等^[16]的研究结果一致。同时该研究结合飞行员执行的任务特点,证实了在振幅下降更为明显的下肢中,在小腿腓肠肌和比目鱼肌处放置肌电传感器测量 IAV 和 WL 可能是预测 G-LOC 的最佳方法。Choi 等^[24-25]认为肌电信号可用于 G-LOC 预警。肌电信号中提取出的可用于 G-LOC 预警的 2 个特征参数——反映肌肉收缩的 IAV 及反映肌肉收缩和疲劳的 WL,在进入 G-LOC 前 3 s 出现了急剧的衰减。该研究认为这 2 个指标是创建 G-LOC 预警算法的关键变量,认为开发 G-LOC 预警算法,建立 G-LOC 预警系统是可行的。而多指标多信号比单指标单信号的预警效果和预警的准确率要更好。吴斌等^[26]提出了“9 选 3”的 G-LOC 的预警和评判方法。肌电预警 G-LOC 装备的发展离不开算法的研究,需首先开发 G-LOC 预警算法。因此基于肌电的预警算法和预警技术的研究尤为重要。基于肌电进行预警技术研究还具有其优越性,肌电信号的采集比脑电信号的采集相对简单,比脑血压的监测更加易于实现。肌电和脑电、耳脉搏等多信号的联合预警,将大大提高 G-LOC 预警的可靠性和准确性。

本文首先参照 2 条件分析法,研究高 G 载荷下腓肠肌处和胫骨前肌处的肌电特征参数的变化特点及它们预警 G-LOC 的可行性,并观察 2 条件分析法对于推拉效应(push-pull effect, PPE)下 G-LOC 预警的有效性。本研究还首次提出载荷对比法,观察该方法在高 G 训练模式下是否同样具有 G-LOC 预警的潜力。本研究可为将来基于肌电的预警装备的研制及深入研究和解决高 G 防护这一航空医学领域的重大问题提供有利的依据。

1 方法

1.1 试验设备

本试验在 AMST-HC-4E 型载人离心机上进行。离心机主臂长 8 m,具有 3 个自由度,而且具备动态飞行模拟功能。该离心机座舱内受试者正前方设置

有 1 个红色的中央灯和 2 个白色的周边灯, 用来判断受试者的视觉变化。

1.2 试验对象

选取 7 名试验对象, 均为参加选拔或训练的飞行员, 无心脑血管、神经精神病史及其他的载人离心机试验禁忌证。试验对象均已有过离心机体验, 清楚试验内容, 均自愿参加试验。

1.3 试验方法

首先设置离心机运行的加速度曲线, 包括高 G 训练加速度曲线和 PPE 加速度曲线。高 G 训练的加速度曲线设置如下: 从 1G 开始离心机启动, 以 1G/s 的增长率达到 1.4G 基线持续数秒后, 以 3G/s 的加速度增至设定的最大 G 值, 持续 10 s 后, 再以 3G/s 的加速度降为 1G, 离心机停止。其中训练时的 G 值第一天为 3G、5G、6G, 第二天为 3G、5G、8G, 根据飞行员飞的机种不同, 最大 G 载荷也可能是 3G、5G、9G。PPE 的加速度曲线设置如下: 第一次暴露为 PPE2.5 10 s, 为离心机从 1G 的载荷开始启动, 以 1G/s 增长率达到 1.4G 基线持续数秒, 由基线载荷下降至 $-1G_z$ (下降率为 1G/s), 持续 5 s, 然后立刻暴露于 $+2.5G_z$ (增长率为 2G/s), 持续 10 s; 第 2 次暴露为 PPE3.5 10 s, 离心机从 1G 的载荷开始启动, 以 1G/s 的增长率达到 1.4G 基线持续数秒, 由基线载荷下降至 $-1G_z$ (下降率为 1G/s), 持续 5 s, 然后立刻暴露于 $+3.5G_z$ (增长率为 2G/s), 持续 10 s; 第 3 次暴露为侧向 4.5G 10 s, 从 1G 开始离心机启动, 以 1G/s 的增长率达到 1.4G 基线持续数秒, 由基线载荷下降至 $-1G_z$ (下降率为 1G/s), 持续 5 s, 然后立刻暴露于 $+4.5G_z$ (增长率为 2G/s), 持续 10 s。

每 2 次 G 暴露间歇 5 min, 每次加速度暴露后询问受试者对中央灯和周边灯的视觉状况。试验过程中记录和监测的指标包括心电图、耳脉搏、三轴向的加速度值、双向通话和舱内视频。试验耐力终点判断标准为耳脉搏波拉平, 主诉 100% 周边灯光消失或 50% 中心灯光模糊, 结合其表情判断受试者是否到达了耐力终点。其他停机指标包括面色苍白、恶心、呕吐等及严重心律失常、心率大于 200 次/min、出现意识丧失或技术故障等。

1.4 数据采集

本研究中采用肌电测量设备获得左右胫骨前肌、左右腓肠肌的肌电信号, 其中, 同时获得三轴向的加速度信号, 其中腓肠肌选内侧肌肉。肌电测量设备为 ME6000-T8 表面肌电测试系统 (MEGA 公司, 芬兰), 电极片使用一次性蓝点电极。粘贴电极前用 75% 乙醇擦拭皮肤, 去除油脂, 用来降低电阻。电极方向为沿着肌纤维走向, 电极间距离为 2~3 cm, 每

块肌肉的参考电极贴于肌纤维外侧。接地电极放置于肌电测量设备内。对原始肌电信号进行滤波处理后, 使用肌电测量设备配套的软件将信号导出成 MATLAB 软件可以处理的数据形式进行波形和参数的进一步深入分析。本研究参考之前的研究结果, 重点对腓肠肌的肌电参数进行研究。

1.5 数据分析

数据分析包括对 $+G_z$ 作用前后的肌电波形的时域分析和对原始滤波后的肌电信号的特征参数的提取和分析 2 个部分。表示肌电特征的主要参数共有 RMS、MAV、SSC、ZC、MF、IAV 和 WL 7 个。其中 RMS、IAV、MAV 主要反映肌肉收缩, SSC、WL、ZC、MF 主要反映肌肉收缩和疲劳。多个文献表明, 小腿腓肠肌处的 IAV 和 WL 可能是提取 $+G_z$ 下肌电变化的最有效的特征参数^[24-25]。基于此, 本研究对腓肠肌和胫骨前肌等处的 IAV 和 WL 进行观察, 重点对腓肠肌处的 IAV 和 WL 进行特征研究。

参照 Choi 等^[25]的研究中的 2 条件分析法, 预警条件设置如下: (1) IAV 和 WL 负斜率变化持续 3 个窗口, 且第 3 个窗口的数值同时小于初始值的 70%; (2) IAV 和 WL 同时小于初始值的 70% 且持续 3 个窗口。其中 IAV 和 WL 的定义如下: 参加高 G 训练的飞行员进入到 5G 以上的 G 平台, 对平台期间的肌电数据, 以 1 s 时间长度的窗口为基本窗口, 以每次 0.5 s 时间长度的速率, 沿时间轴不断向右移动, 直至移动到 10 s 的 G 平台的末端。对每一个窗口内的肌电数据进行处理, 计算其特征参数值 IAV 和 WL。将前 3 个窗口的数据取均值, 作为基数值, 后面每个窗口所取得的数值和基数值相比, 得到一系列的百分比数值 RIAV 和 RWL, 观察百分比数值的变化特征, 尤其是对于平台期出现 G -LOC 的受试者, 准确定位 G -LOC, 对照 G -LOC 出现的时刻研究 G -LOC 前后参数的变化特征, 提取出对 G -LOC 预警有意义的特征。

2 结果

2.1 G -LOC 前后的肌电波形的变化特征

所有受试者 G -LOC 前后的肌电波形不对称且不规则。不同受试者肌电波形的幅值呈现出大小不同。 G -LOC 平台期的肌电的幅值都有不同程度增加, 不同受试者增加幅度不同, 幅值一般不超过 2 000 μ V。总体来讲, 大多右侧的幅值比左侧大, 耐力好的飞行员的肌电波形更规则和密集, 耐力不好的飞行员的肌电波形更不规则, 波动更大一些。图 1 为受试者 1 在经历 8G 10 s 时的左右侧的肌电波形, 该受试者在平台期接近 10 s 时发生了 G -LOC。图 2 为受试者 2 在经历 8G 10 s 时的左右侧的肌电波形, 该名受试者

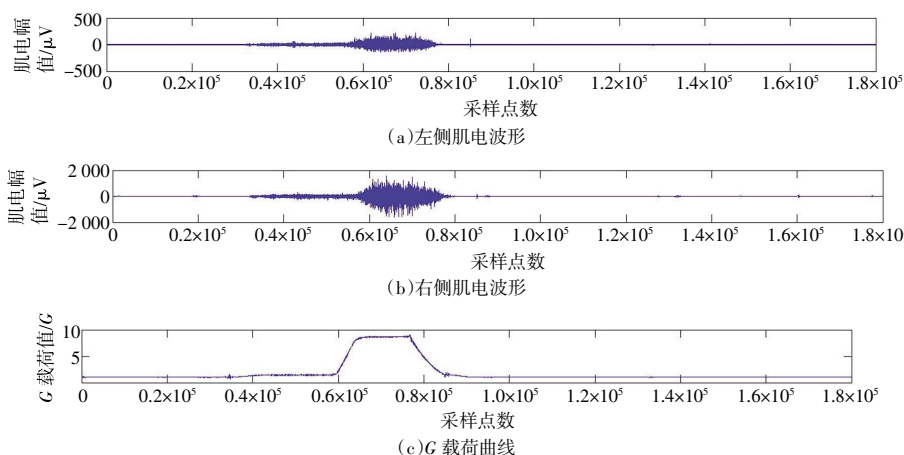


图1 受试者1(出现G-LOC)在8G时的肌电波形

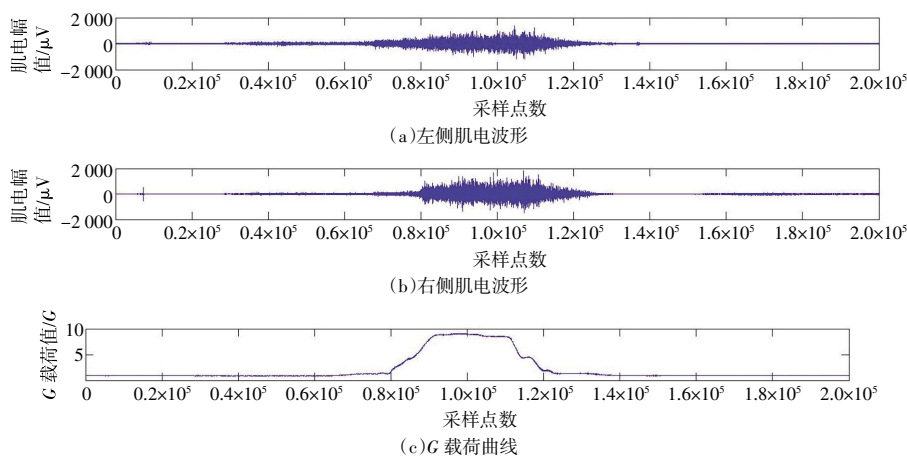


图2 受试者2(G耐力良好)在8G时的肌电波形

在8G的平台期主诉良好,表现出较好的耐力。

2.2 G-LOC 前后肌电的特征参数分析

肌电的特征参数来自于7名不同的飞行员,这7名飞行员分别经历了高G训练或者推拉训练。本研究重点对高G训练或者推拉训练中G平台期的IAV和WL这2个参数进行特征分析,其中G平台期包括G耐受和G-LOC这2个状态。将1人经过1次G暴露,比如1人经过8G 10s,或1人经过1次PPE称为1人次。选取数据完整的18人次的数据,其中13人次是经历了高G载荷训练,5人次经历了PPE;经历高G训练的13人次中有3人次是G-LOC,其余G耐受良好,即主诉为良好或周边灯略变暗。5人次的PPE中,有2人次是G-LOC,另3人次是G耐受。10s的G平台期,以1s时间长度的窗口为基本窗口,以每次0.5s时间长度的速率,共可以得到19个窗口,其中每一个窗口有对应的参数IAV和WL,共得到16个参数RIAV和RWL。绘制平台期的参数变化曲线,分析不同状态下的变化特征。

2.2.1 基于2条件分析法的高G训练中的肌电特征参数分析

将G平台开始的前3个窗口的IAV的平均值作为初始值 $IAV_{INITIAL}$,令 $RIAV=IAV/IAV_{INITIAL}$,计算出后面每个窗口的RIAV。同理,将G平台开始的前3个窗口的WL的平均值作为初始值 $WL_{INITIAL}$,令 $RWL=WL/WL_{INITIAL}$,计算出后面每个窗口的RIAV和RWL,绘制G平台期的变化曲线。不同个体的RIAV和RWL数值差别较大,但一般右侧的数值偏大一点,这可能与在离心机旋转时飞行员处于左侧朝下、右侧朝上的特殊体位及右侧肌电变化更明显有关。

根据之前相关文献^[24-25]的研究方法进行分析,13人次中3人次的G-LOC符合预警条件,能够报出,其中1人次须将阈值适当提高到72%左右,提前1~2s报出;另1人次数值偏低,提前5~6s报出;1人次G-LOC漏报。这3人次G-LOC发生在不同的飞行员身上,这

些飞行员年龄、体型接近。G耐力好的大部分都不符合预警条件,但也有个别误报。图3为1名受试者右侧肌电参数的变化曲线,受试者在接近10s时经历了G-LOC,RIAV和RWL 2个参数同时在提前1s左右给出了预警信号。图4为另1名受试者右侧肌电参数的变化曲线,受试者耐力良好,不符合2个预警条件。对共13人次的误报、正确报警及漏报的情况进行统计,绘制G-LOC预警有效性概率统计图,如图5所示。

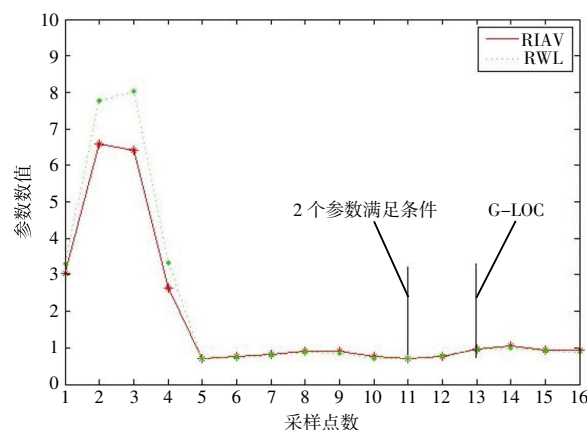


图3 出现G-LOC受试者以0.5s为1个时间窗口的右侧肌电参数变化曲线

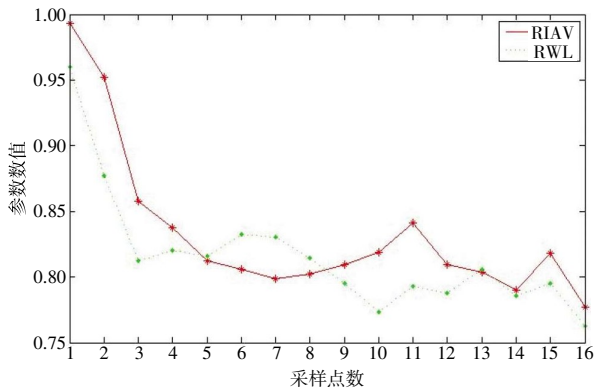


图4 G耐力良好受试者以0.5s为1个时间窗口的右侧肌电参数变化曲线

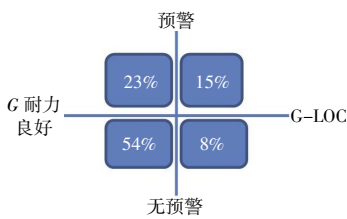


图5 G-LOC预警的有效性概率统计分布

2.2.2 PPE中的肌电参数分析

与之前研究不同的是,本研究对PPE中的G-LOC和非G-LOC肌电数据也进行了调研。对2名飞行员的5人次的PPE进行简单的肌电分析,发现对于3人次非G-LOC状态的数据,肌电参数无误报,但对于2人次典型的G-LOC状态的数据,这2人次G-LOC发生在同一名飞行员2次经历不同的G载荷时,左侧和右侧的肌电参数在平台期均检测不出。本试验中PPE下G-LOC的人次较少,并不能完全说明2条件预警方法对于PPE下G-LOC的检测无效,但可以初步推断,2条件预警方法对于PPE下G-LOC的检测效果并不是很好。所以应该重点研究该方法在高G训练中的应用效果。

2.2.3 高G训练中不同载荷下肌电特征参数IAV、WL的对比研究

国外相关研究^[25]和2.2.1中的研究是针对参数RIAV和RWL,即同一载荷下参数相对于初始值的变化情况。本研究对同一受试者在不同G值即3G、5G、8G或3G、5G、9G下的IAV和WL参数进行对比并提取特征,发现不同受试者在低G值时的参数数值受个体影响差别较大,数值从几千到几万不等。随着G值增大,IAV和WL均不同程度增大,增大的幅值因个体差异也较大。IAV和WL数值接近,但一般IAV比WL数值大。个体耐力好的参数数值大些,个体耐力相对差点的参数数值小些。随着G值增大,IAV数值增大,增大幅度多为1~2倍,增加幅度大的为2~10倍,个别人次会很大。

本研究将高G载荷运行的前面一次的运行称为临近一圈,将临近一圈的参数值作为基值,重点研究8G相对于基值的变化。选取的7名飞行员中,2

名进行PPE训练,其余5名进行高G训练,对这5名受试者,利用载荷对比法研究8G时参数相对于基值的变化。训练时,大部分载荷值为3G、5G、8G或3G、5G、9G,一般取5G时的数值作为基值。设5G和8G时对应的参数IAV和WL分别表示为 IAV_{5G} 、 IAV_{8G} 、 WL_{5G} 、 WL_{8G} ,将它们的比值定义为 IAV_G 或 WL_G ,即 $IAV_G = IAV_{8G}/IAV_{5G}$ 或 $IAV_G = IAV_{9G}/IAV_{5G}$, $WL_G = WL_{8G}/WL_{5G}$,或 $WL_G = WL_{9G}/WL_{5G}$,并绘制 IAV_G 和 WL_G 的曲线。结果发现,耐力较好的受试者IAV和WL参数数值都较大,耐力较差的受试者IAV和WL参数数值都较小。同样,同一受试者在高G平台期总体参数数值呈下降趋势,表现为耐受时刻对应参数值较大,不耐受时刻对应参数值较小。对比G-LOC发生时刻,在G-LOC发生前的2~5s,IAV和WL数值同时降到1.01以下且持续2个窗口,即1s。由此初步判断,类似于之前的G-LOC预警2条件分析法,如果将临近一次载荷作用下的参数数据作为基值, IAV_G 和 WL_G 与基值的比值同时持续减小,该指标具有G-LOC预警的潜力,有望成为G载荷下基于肌电变化预警G-LOC的新指标。

2.2.4 高G训练中胫骨前肌处的肌电特征参数分析

以上分析都是针对腓肠肌处的肌电信号,因为根据之前的相关文献^[24-25],从小腿腓肠肌处获取到肌电信号,经过分析而得出的参数IAV和WL可能是预测G-LOC的最佳方法。由于飞行任务特点不同、人员体质不同以及接地电极放置位置的不同,考虑到“下肢肌肉的肌电信号振幅下降比上肢肌肉明显”^[25],胫骨前肌是距离腓肠肌最近的小腿上的肌肉,所以本研究参照腓肠肌处的分析方法,同时对高G训练时的胫骨前肌处的参数进行了分析。结果表明,在同样人次的情况下,胫骨前肌处的误报率比腓肠肌处的高;在同样发生误报的情况下,从RIAV、RWL的数值本身来看,胫骨前肌处的误报情况比腓肠肌处的严重;在同时对左右侧的肌肉进行分析时,对于左侧肌肉参数,腓肠肌参数在无误报的情况下胫骨前肌参数依然会产生误报,而且发生多次;对于G-LOC预警,腓肠肌处能报警的,胫骨前肌也符合2条件分析法预警,同样也能给出报警信号,但是相对于腓肠肌,胫骨前肌给出报警信号所提前的时间比腓肠肌要长。对于训练时只有10s的高G平台期,希望预警能提前的时间尽量控制在一定的范围之内,能尽早给出报警,但提前的时间不要过长,而胫骨前肌给出报警信号所提前的时间相对较长,比腓肠肌长,即对于高G作用的平台期来说,预警的有效性降低。从这个角度讲,相对于腓肠肌,胫骨前肌处参数的变化特

征在一定程度上降低了提前预警的意义和有效性。因此,从各个角度讲,胫骨前肌处参数预警的效果不如腓肠肌的效果好,和Choi等^[24-25]证实的“在小腿腓肠肌和比目鱼肌处放置肌电传感器测量IAV和WL可能是预测G-LOC的最佳方法”的结论一致。本研究在不同的试验方式下验证了对于G-LOC预警,腓肠肌处的肌电变化比胫骨前肌处更有效这一说法。

3 讨论

3.1 2条件分析法对于G-LOC预警有效性的进一步探讨

本研究参照文献^[24-25]的2条件分析法对我国飞行员目前训练模式及数据获取方式下的肌电数据进行了分析,发现该方法对G-LOC预警仍具有效果,参数表现出一定的特征。在发生G-LOC的3人次中,虽然1人次RIAV、RWL 2个参数提前给出了预警,但是提前的时间有些长,不是很理想,但不能否认参数变化对预警的有效性;在我国目前训练模式及数据获取方式下,参数阈值可能需要调整,根据目前结果,须将阈值提高到72%左右。

3.2 对腓肠肌可能是预测G-LOC最佳位置的进一步证实

本研究选取下肢且距离腓肠肌最近的胫骨前肌作为研究对象,用2条件分析法进行分析,发现从各个角度胫骨前肌处参数预警的效果不如腓肠肌处的好,进一步证实了腓肠肌可能是预测G-LOC最佳位置这一相关结论。

3.3 IAV、WL双参数的应用

本研究选取IAV和WL作为特征参数对G-LOC前的参数特征进行提取。结果表明,用来预警的2条件分析法中的IAV和WL参数代表了肌电的不同属性,只用其中某一个参数的预警效果不佳,只有这2个参数联合应用对于G-LOC预警才更有效。

3.4 PPE下的肌电特征分析

由于训练中也要对飞行员进行PPE训练,本研究对PPE中的G-LOC和非G-LOC数据也进行了初步调研。虽然研究的人数和人次数都有限,但不难看出,2条件分析法对于PPE下G-LOC的检测效果不佳,主要是对推拉作用下的G-LOC检不出。这可能与推拉作用下的G-LOC更多由G载荷变化引起,和肌肉用力的关系相对小有关。由此推断,2条件预警方法更适用于高G训练中的G-LOC的检测。

3.5 肌电参数的载荷对比法对G-LOC预警的有效性探讨

本研究对同一受试者不同载荷下的IAV和WL数值进行了对比,结果表明因个体差异参数差别

仍较大,但可看出一般变化趋势,即随G值增大数值变大,耐力好的数值较大,数值降低意味耐力降低,对G-LOC预警应引起注意。另外,将临近一次G载荷运行的特征参数作为基值,观察IAV和WL与基值的比值,这2个比值同时持续减小,具有和2条件分析法类似的预警G-LOC的潜力。国外文献^[25]中,2条件分析法中参数特征观察须持续3个窗口,而载荷对比法中的参数特征观察只需持续2个窗口,因此该发现很可能为G-LOC预警提供一种新的思路和方法。但无论是2条件分析法中的以高G平台的前3个窗口为基值,还是载荷对比法中的以临近一次载荷运行中的数据作为基值,都必须有对照值即有基值作为参考。因为肌电信号本身微小且多变,以信号参数数值本身的变化作为G-LOC预警的条件或生理评价,可能意义不大,相对于基值的特征变化,即去除了个体差异的特征参数变化才具有评价意义。

3.6 本研究的不足

本研究对高G训练模式下腓肠肌、胫骨前肌处的肌电信号和PPE中腓肠肌处的肌电信号参照2条件分析法进行了特征分析,同时对不同载荷下的肌电特征参数变化进行了分析,但目前只是初步的调研,还存在许多不足:(1)国内外离心机上训练任务特点不同、国内外人员体质及耐力不同都会影响试验结果;(2)2条件分析法中电极间距5cm,接地电极放在比目鱼肌的一端,本研究中电极间距2~3cm,将接地电极放在肌电测量设备内,这也会对结果产生影响;(3)不同滤波方法对信号的处理等都会对结果产生影响;(4)样本数少,尤其是G-LOC的样本数少。后续须补充一定的G-LOC样本数,才能使研究结果更加准确可信。

4 结语

本研究参考国外最新提出的预警2条件分析法,对我国飞行员在现有训练模式下获取到的腓肠肌、胫骨前肌处的肌电信号进行分析,验证了根据肌电的2条件分析法在我国高G训练模式下对G-LOC预警的有效性;同时对PPE下的肌电信号进行分析,调研了在PPE下2条件分析法对G-LOC预警的有效性;除了参考2条件分析法,本研究还对临近2次不同载荷下的肌电的2个参数IAV、WL自身进行分析,观察参数随载荷的变化趋势,发现新提出的载荷对比法具有和2条件分析法类似的预警G-LOC的潜力。本研究为类似的G载荷作用下肌电变化特征的研究提供了参考依据,为后续进一步通过肌电对G-LOC进行监测及预警技术的研究奠定了基础。

[参考文献]

- [1] 孙喜庆,姜世忠. 航空航天生物动力学[M]. 西安:第四军医大学出版社,2013:31.
- [2] 徐艳,张立辉,马月欣,等. 抗荷动作研究进展及其在 G-LOC 防护中的必要性[J]. 中华航空航天医学杂志,2012,23(1):62-68.
- [3] 李毅峰,蒋科,李宝辉,等. 高性能载人离心机的基本结构、原理和故障维修[J]. 医疗卫生装备,2021,42(7):97-99,103.
- [4] WOOD E H, LAMBERT E H. Objective documentation and monitoring of human Gz tolerance when unprotected and when protected by anti G suits or M1 type straining maneuvers alone or in combination[J]. SAFE, 1989, 19(1):39-48.
- [5] HOLEWIJN M. 耳脉搏和周边视力丧失之间的关系[J]. 航空军医,1997,25(1):20-21.
- [6] 蒋科,李毅峰,张莉莉,等. 载人离心机无创连续血压监测系统设计与实现[J]. 医疗卫生装备,2022,43(11):40-43,53.
- [7] 陈勇胜,焦志刚,颜桂定,等. 下体负压晕厥前症状时脑功能指标的变化特征[J]. 中华航空航天医学杂志,2000,11(3):145-148.
- [8] 陈勇胜,黄攀,金璋瑞,等. 正常人下体负压试验晕厥前症状时脑电变化特征[J]. 临床神经电生理学杂志,2002,11(3):173-175.
- [9] LI Y F, YANG J J, ZHANG L H, et al. Research of EEG change feature under +Gz acceleration[J]. Comput Ind, 2015, 70:144-152.
- [10] LIU C L, ZHANG C Y, WANG Y B, et al. Identification of pilots' mental workload under different flight phases based on a portable EEG device[C]//2023 7th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS), August 4-6, 2023, Xi'an, China. New York: IEEE, 2023:32-37.
- [11] CUI Z X, CHEN D W, WU D S. EEG-based pilot competency level evaluation in full flight simulator training about abnormal events[C]//2021 IEEE 3rd International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT), October 20-22, 2021, Changsha, China. New York: IEEE, 2021:495-500.
- [12] ZHANG F T, CHEN D W, WU D S. Analysis of pilot's training effect based on EEG signal[C]//2020 IEEE 2nd International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT), October 14-16, 2020, Weihai, China. New York: IEEE, 2020:981-986.
- [13] OKSA J, HÄMÄLÄINEN O, RISSANEN S, et al. Muscle strain during aerial combat maneuvering exercise[J]. Aviat Space Environ Med, 1996, 67(12):1138-1143.
- [14] CHEN H H, WU Y C, KUO M D. An electromyographic assessment of the anti-G straining maneuver[J]. Aviat Space Environ Med, 2004, 75(2):162-167.
- [15] FARAGO E, CHAN A D C. A pilot study on quantifying signal quality in high-density surface electromyography[J]. IEEE Trans Instrum Meas, 2023, 72:1-9.
- [16] CORNWALL M W, KROCK L P. Electromyographic activity while performing the anti-G straining maneuver during high sustained acceleration[J]. Aviat Space Environ Med, 1992, 63(11):971-975.
- [17] JUN J, ZHAO B X, ZHANG P, et al. UAV formation flight control by using the surface electromyography signals[C]//2021 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC), May 22-24, 2021, Kunming, China. New York: IEEE, 2021:3287-3291.
- [18] WINTER D A. Biomechanics and motor control of human movement[M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons. Inc., 1990:191-212.
- [19] FERNANDES L, LINDER J, KROCK L P, et al. Muscle activity in pilots with and without pressure breathing during acceleration[J]. Aviat Space Environ Med, 2003, 74(6 Pt 1):626-632.
- [20] STEVENSON A T, SCOTT J P R. +Gz tolerance, with and without muscle tensing, following loss of anti-G trouser pressure[J]. Aviat Space Environ Med, 2014, 85(4):426-432.
- [21] BAGSHAW R J, WHINNERY J E. Contribution of skeletal muscle activity to the natural history of acceleration-induced loss of consciousness (G-LOC)[J]. Med Hypotheses, 1989, 30(2):123-128.
- [22] FANG Z Y, NEO D, WANG J, et al. An integrated fall prevention system with single-channel EEG and EMG sensor[C]//2021 4th International Conference on Circuits, Systems and Simulation (ICSS), May 26-28, 2021, Kuala Lumpur, Malaysia. New York: IEEE, 2021:183-189.
- [23] KIM S, KIM D, CHO T, et al. Analysis on electromyogram (EMG) signals by body parts for G-induced loss of consciousness (G-LOC) prediction[J]. J Korea Inst Mil Sci Technol, 2017, 20(1):119-128.
- [24] CHOI B, LEE Y, CHO T, et al. Detection of G-Induced Loss of Consciousness (G-LOC) prognosis through EMG monitoring on gastrocnemius muscle in flight[C]//2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), August 25-29, 2015, Milan. New York: IEEE, 2015:7007-7010.
- [25] CHOI B, KIM D, KIM M. Effectiveness of EMG in development of G-induced loss of consciousness (G-LOC) warning system[C]//The International Conference on Biomedical Engineering and Systems, August 14-15, 2014, Prague, Czech Republic. Orleans, Ontario, Canada: Avestia Publishing, 2014:129-1-129-4.
- [26] 吴斌,薛月英,由广兴,等. 加速度致意识丧失前驱反应特征及预警方法研究[J]. 空军医学杂志,2011,27(1):28-32.

(收稿:2024-03-19 修回:2024-07-24)