

DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20211025

· 综述 ·

## 高过载失能生理预警指标和告警技术研究进展

常巍, 彭智勇, 李川涛, 姚永杰\*

海军军医大学(第二军医大学)海军特色医学中心航空医学研究室, 上海 200433

**[摘要]** 高过载失能即持续性正加速度引起的意识丧失(G-LOC),是指飞行员在正加速度暴露下,血液受惯性力作用迅速向下半身转移,脑组织发生急性缺血缺氧,导致意识丧失。G-LOC极易引发灾难性的后果,但目前尚无有效避免G-LOC的方法。通过实时生理监测对潜在危险发出警告,提醒飞行员及时采取措施,是解决该问题的根本策略。无线传感技术与人工智能科技的进步使动态精确测量成为可能。本文通过回顾高过载暴露下敏感生理指标的变化,分析头眼水平血流动力学、脑电、脑氧代谢、心电和肌电等指标在G-LOC发生前后的变化特征和意义,梳理国内外现有的告警技术并分析其不足之处,提出通过多指标生理监测结合飞行员体征表现及飞机机动状态进行综合判断是未来解决G-LOC预警问题的发展方向。

**[关键词]** 飞行员; 正加速度; 意识丧失; 生理学; 预警

**[中图分类号]** R 852.21 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-1338(2022)02-0194-07

### Physiological warning indexes and alerting techniques for G-induced loss of consciousness: research progress

CHANG Wei, PENG Zhi-yong, LI Chuan-tao, YAO Yong-jie\*

Department of Aviation Medicine, Naval Medical Center, Naval Medical University (Second Military Medical University), Shanghai 200433, China

**[Abstract]** G-induced loss of consciousness (G-LOC) means that when the pilot is exposed to positive acceleration (+Gz), the blood is rapidly transferred to the lower body due to inertial forces, results in acute cerebral ischemic and hypoxia and loss of consciousness. G-LOC is highly likely to cause catastrophic consequences. Currently, there is no effective method to avoid G-LOC. The fundamental strategy to solve this problem is to warn pilots of the potential danger of G-LOC by real-time physiological monitoring and to alert them to take timely measures. Advances in technologies of wireless sensing and artificial intelligence have made dynamic and accurate measurement possible. By reviewing the progress of sensitive physiological indexes during high +GZ exposure, this paper analyzes the characteristics and significance of head level hemodynamics, electroencephalogram, cerebral oxygen metabolism, electrocardiogram and electromyogram before and after the occurrence of G-LOC, summarizing the existing alerting technologies and their deficiencies. It is concluded that multi-index physiological monitoring combined with pilot physical signs and aircraft maneuvering status for a comprehensive judgment is a future way for solving G-LOC early warning issues.

**[Key words]** pilots; positive acceleration; unconsciousness; physiology; warning

[Acad J Naval Med Univ, 2022, 43(2): 194-200]

当飞行员做机动飞行时,身体会承受 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 各个轴向的加速度作用,其中 $z$ 轴正加速度(+G $z$ )对人体的生理影响最大。当高性能战斗机进行战术飞行时,其产生的+G $z$ 值高达9~10 G,增长率可达6 G/s,持续时间15~45 s,并可反复出现<sup>[1]</sup>。在高+G $z$ 作用下,飞行员的纵向

大血管血液流体静压差梯度增大,体液分布迅速变化,血液从上半身向下半身转移,大脑灌注减少,脑组织发生急性缺血缺氧,飞行员进入晕厥状态,称为高过载失能,即持续性正加速度引起的意识丧失(G-induced loss of consciousness, G-LOC)<sup>[2]</sup>。

根据美国空军安全中心的数据分析,1982—

**[收稿日期]** 2021-10-12 **[接受日期]** 2022-01-24

**[基金项目]** 海军军医大学(第二军医大学)舰载机飞行人才航空医学保障专项课题(2020-JY01),载人航天领域第四批预先研究项目(020101)。Supported by Ship-Based Aviation Medical Support Project of Naval Medical University (Second Military Medical University) (2020-JY01) and the Fourth Batch of Manned Space Pre-Research Project (020101)。

**[作者简介]** 常巍,硕士生。E-mail: changwei0118@163.com

\*通信作者( Corresponding author )。Tel: 021-81883151, E-mail: 648319648@qq.com

2002年,美军共发生559起G-LOC事故,其发生率为25.9起每百万架次<sup>[3]</sup>。英国皇家空军于1987年和2005年分别做过2次调查,G-LOC的发生率分别为19.3%和20.1%<sup>[4]</sup>。近年来,也不乏飞行员因G-LOC丧生的报道<sup>[5-6]</sup>。我军G-LOC的发生率达8.2%,多发生在+4~+6.9 Gz之间<sup>[7]</sup>。随着第4代高性能战斗机的面世,超过+7 Gz的机动飞行增多,多样化的飞行任务和高强度的生理负荷使G-LOC的发生率有上升的趋势<sup>[8-9]</sup>。

G-LOC是一段持续约24 s的无意识状态,包括一段绝对失能期和一段相对失能期;此后,飞行员还需要约3 min甚至更长的时间才能完全恢复认知和操作能力<sup>[10]</sup>。空中失能极易导致机毁人亡的灾难性后果,是飞行安全最为严重的威胁。目前,我军飞行员基础+Gz耐力约为+4 Gz,在实施抗荷收紧动作和综合使用抗荷救生装备条件下,最高耐受范围为+7.25~+8 Gz<sup>[5]</sup>。为实现更高+Gz暴露下的有效防护,需通过生理监测和预警手段加以弥补,在失能发生前通过一些敏感指标检测出来,并发出预警信息提醒飞行员及时采取措施,避免严重飞行事故的发生。

一直以来,世界各国航空医学界对G-LOC的预警问题都高度重视并进行了持续探讨。本文通过回顾高过载暴露下敏感生理指标的变化,分析头眼水平血流动力学、脑电、脑氧代谢、心电及肌电等指标在G-LOC发生前后的变化特征和意义,梳理国内外现有的告警技术,研究其问题和不足,探讨我国飞行员G-LOC预警系统的发展方向。

## 1 预警生理指标

### 1.1 头眼水平血流动力学指标

人的意识状态与头部供血状况有着密切联系。例如,当眼水平动脉血压低于20 mmHg (1 mmHg=0.133 kPa)时,便无法克服眼内压,从而造成视网膜缺血,引起黑视。高过载使飞行员头部血液向下半身转移,导致脑组织缺血缺氧,引发意识丧失。因此,监测头眼水平的血供有助于掌握飞行员在高载荷机动时的意识状态。

#### 1.1.1 离心机+Gz作用下的头部血流变化

20世纪,研究人员以未麻醉的小型猪作为研究对象,采集了不同+Gz暴露下的局部脑血流量数据。结果发现,在+5 Gz暴露期间,实验猪的视网膜血流量显

著减少,在+7 Gz时降至零,脑部血液在此时发生再分配,大脑血流量减少,而脑干和小脑的血供得到维持<sup>[11]</sup>。Burns等<sup>[12]</sup>发现,过载达+7 Gz时,实验猪的眼水平动脉血压可降至-17 mmHg。国内有研究报道,麻醉状态下的家兔受到+Gz作用时,眼部血流量明显降低,大脑各部位的血供也有不同程度的减少,以大脑皮质最为显著<sup>[13]</sup>。然而,早期研究没有同时监测实验对象意识状态,无法将区域血流量与意识状态联系起来。法国学者Florence等<sup>[14]</sup>运用激光多普勒技术和脑皮质电图同时监测恒河猴大脑皮质的血流量和脑电活动,以皮质脑电活动消失作为G-LOC的判断标准;发现在G-LOC发生前,实验猴额顶叶皮质血流量已显著下降并持续2~5 s;当G-LOC发生时,皮质血流量下降至对照值的72%~80%。这一研究首次从血流变化的时间进程进行分析,实验结果进一步证实了意识丧失是由脑缺血引起。日本有研究发现,即使+Gz水平不高(+1.5 Gz),人体大脑中动脉平均流速在暴露开始时便有下降的趋势,5 min后开始显著降低,出现晕厥前兆者,平均流速下降了24.3%<sup>[15]</sup>。可见,头部血流指标对于+Gz作用非常敏感,对G-LOC的预警具有重要价值。

#### 1.1.2 下体负压(lower body negative pressure, LBNP)作用下的头部血流变化

LBNP技术可模拟+Gz生物学效应,解决了离心机人体实验的伦理学问题。陈勇胜等<sup>[16]</sup>用LBNP诱发人体晕厥前症状(presyncopal symptom, PSS),观察头部血压和颞动脉血流的变化特征。在PSS出现前1 min,受试者头部血压由(10.0±0.6) kPa突降至(3.6±0.5) kPa,颞动脉血流在PSS发生时降至最低点。数据结果表明,此时机体心脑血管调节功能已失去代偿作用,出现头眼部供血障碍。头部血压直接反映大脑灌注,颞动脉血流可代表眼部血供状况,两者的变化特征均对G-LOC预警有重要参考价值。还有研究报道,在-6.67 kPa的负压作用下,人体大脑中动脉平均流速可降至对照值的60%,动脉血氧饱和度(arterial oxygen saturation, SaO<sub>2</sub>)也随之显著下降<sup>[17]</sup>。大脑中动脉是大脑供血的重要血管,对意识丧失敏感性较高,其血流动力学变化在G-LOC预警研究中具有重要意义。

#### 1.1.3 高过载期间的耳脉搏变化

耳脉搏也是有效反映头眼部血供的指标之一<sup>[18]</sup>。高过载期间,耳

脉搏波呈现周期性的上升和下降,与主观的中心/周边视野消失相比,耳脉搏能够更加客观地评估头部血供情况。1940年,爱尔兰航空所首次在离心机上对飞行员的耳脉搏进行了无创监测,发现耳脉搏幅值随着载荷的增大而降低<sup>[19]</sup>。此后的研究进一步证实了这一结论,在持续高过载暴露下,受试者在耳脉搏消失约5s后发生意识丧失<sup>[20]</sup>。国内关于高过载暴露时耳脉搏的研究表明,耳脉搏幅值随着载荷的增大而降低,+9 Gz时,幅值可降至对照值的25%;另外,耳脉搏波形的变化与受试者主诉的视野变化及是否到达耐力终点有较高的符合度,总符合率达91.5%<sup>[21-22]</sup>。耳脉搏是客观评估飞行员G耐力和意识状态的有效指标。国内外多项研究都证实了通过耳脉搏信号监测头眼部血供的可行性。值得注意的是,耳脉搏幅值也受到抗荷动作和抗荷正压呼吸的影响,在呼气相波幅升高,在吸气相波幅明显降低<sup>[21]</sup>。但其影响机制目前尚无定论,推测可能与特殊呼吸方式影响胸内压,进而影响动脉血压有关。

1.2 脑生物电指标 脑电图(electroencephalogram, EEG)能够直接敏感地反映大脑功能,也是特殊环境下监测大脑皮质电活动最适用的方法。

1.2.1 波幅变化 已有研究证实,当飞行员发生意识丧失时,EEG会出现“高幅慢波”的特征变化<sup>[23-25]</sup>,但多种类型的无意识状态(如睡眠、昏迷、缺氧、麻醉状态等)下的EEG均可表现出“高幅慢波”,该特征缺乏特异性、易受干扰,并且当肉眼观察到这一特征时,飞行员可能已经发生晕厥,因此波形观察对G-LOC的预警意义不大。

1.2.2 各频带功率谱变化 金璋瑞等<sup>[26]</sup>将研究重点放在频带功率谱上,他们记录了飞行活动时脑电各频带功率谱的百分数,发现在特技飞行中各频带平均频率明显加快, $\alpha_2$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 这3个频带的功率百分数有显著增加的趋势,并与载荷的增加呈正相关。国外对脑电频谱的研究也得出相似的结论<sup>[27-28]</sup>。Lewis等<sup>[29]</sup>提出,在G-LOC发生时, $\beta$ 频带已出现持续降低的趋势,当G-LOC发生时, $\beta$ 频带向较慢的 $\theta$ 和 $\delta$ 频带转移,低频带功率也显著增强。这一发现将人们的关注点集中到失能前 $\beta$ 频带的变化上。陈勇胜等<sup>[16,30]</sup>对 $\beta_2$ 频带能级图和 $\beta_2$ 功率指数(P $\beta_2$ )做了定量分析,认为二者都能如实地反映大脑功能状态,对预测PSS的发生有应

用价值;值得一提的是,他们发现P $\beta_2$ 在PSS出现前1min“突降”,认为这一特征性的变化比肉眼观察到“高幅慢波”对G-LOC预警的应用价值更大。但是,在真实+Gz暴露下,P $\beta_2$ 在PSS前“突降”的时间进程需要进一步实验观察。

1.2.3 事件相关电位(event-related potential, ERP)变化 ERP是一项可以将生理和心理统一起来评定大脑功能状态的有效指标<sup>[31]</sup>。在LBNP实验中,P3潜时(P3L)在PSS发生即刻显著延长,这一现象提示此时中枢神经系统(central nervous system, CNS)的神经传递功能可能存在障碍<sup>[32]</sup>。事件相关电位P300受缺氧影响,当大脑灌注减少,P300振幅明显降低,潜伏期显著延长,反应时间和跟踪误差均显著增加,出现大脑认知功能障碍<sup>[17,33]</sup>。ERP能够反映CNS的功能状态,评价大脑认知负荷,理论上可以为飞行晕厥的医学鉴定提供参考;然而,ERP不易在离心机环境或实际飞行中准确测得<sup>[34]</sup>,该指标的应用可行性不足。

### 1.3 脑氧代谢指标

1.3.1 局部脑氧饱和度(regional oxygenation saturation, rSO<sub>2</sub>)变化 高过载导致脑组织氧合水平降低<sup>[35-37]</sup>。在LBNP作用下,人体左前额rSO<sub>2</sub>显著降低,并与眶上动脉血流的变化显著相关:当rSO<sub>2</sub>降低7%以上、眶上动脉血流减少50%以上时,PSS出现;当rSO<sub>2</sub>降低20%以上、眶上动脉血流接近0时,则可能发生G-LOC<sup>[38]</sup>。在离心机实验中,rSO<sub>2</sub>随着载荷的上升而降低<sup>[35]</sup>,当rSO<sub>2</sub>下降6%~7%时,受试者发生失能;rSO<sub>2</sub>低于阈值的时间越长,失能时间就越长<sup>[36,39]</sup>。由此推论,rSO<sub>2</sub>的改变提示脑血流量的下降,对于G-LOC的预警有一定参考价值。

1.3.2 脑组织氧合血红蛋白(oxyhemoglobin, HbO<sub>2</sub>)浓度变化 +Gz暴露导致脑组织去氧血红蛋白浓度升高,HbO<sub>2</sub>浓度降低<sup>[39]</sup>。Smith等<sup>[40]</sup>和Eiken等<sup>[41]</sup>发现,前额叶皮质氧合水平的降低最为显著,认为前额叶皮质HbO<sub>2</sub>是预测G-LOC的有效指标。但在不同研究中,HbO<sub>2</sub>的下降幅度存在较大差异<sup>[41-43]</sup>,推测可能是由于测量方法上的差异导致。

除此之外,Kurihara等<sup>[43]</sup>认为,额叶皮质组织氧合指数(tissue oxygenation index, TOI)也是评价G耐力的有效指标,他们的研究结果显示,G-LOC发生时飞行员前额叶皮质TOI降低了

15%。不足之处是,该指标对+Gz反应的个体差异较大,用来预测G-LOC的准确度不高。

**1.4 心电指标** +Gz可导致心律失常<sup>[44-45]</sup>,其中以室上性心动过速、室性期前收缩和室性心动过速居多。陆霞等<sup>[46]</sup>发现+Gz暴露时心电图(electrocardiogram, ECG)可发生QRS波形改变,  $R/S < 1$ 。吴斌等<sup>[47]</sup>比较了出现/未出现G-LOC前驱症状受试者在离心机+Gz暴露下的ECG,出现G-LOC前驱症状的受试者最大心率较低,QT间期较长,QT/RR比值较高。用以上指标判断G-LOC前驱症状是否出现,最大心率预测符合率达62.16%,QT/RR比值符合率达83.78%,提示心输出量下降导致ECG的改变,最大心率和QT/RR比值有可能成为G-LOC的预警指标。Zawadzka-Bartczak等<sup>[48]</sup>则认为,心脏节律的变化不仅与心脏本身的代偿机制有关,也受心理因素的影响,在离心机实验和实际飞行中,飞行员的心理应激水平不同,心血管反应也有一定差异。高过载暴露下,心血管应激反应受多种因素影响,使用单一指标预测G-LOC是不可靠的,可能还需结合脑力负荷、心理应激等多项指标综合考虑才能提高阳性率,降低误报率。

**1.5 肌电指标** 高过载可导致肌肉阵挛性抽搐。有研究通过肌电图(electromyogram, EMG)评价飞行中的肌肉劳损,发现飞行员在实施抗荷收紧动作时,下肢肌肉EMG振幅的下降比上肢肌肉明显。结合飞行员任务特点,证实小腿腓肠肌和比目鱼肌是测量EMG的最佳位置<sup>[49-51]</sup>。Chen等<sup>[52]</sup>认为,与主观评价相比,EMG能更加客观、准确地评价抗荷收紧动作的有效性。

Choi等<sup>[53-54]</sup>认为EMG可用于G-LOC预警。他们通过分析飞行员小腿腓肠肌的EMG发现,在正常承受+Gz阶段,EMG表现为较为规则的肌电波动;在G-LOC发生时,肌电波动不规则,波幅减弱。其中,反映肌肉收缩的综合绝对值(integrated absolute value, IAV)和反映肌肉收缩和疲劳的波形长度(waveform length, WL)在进入G-LOC前3s出现急剧衰减,因此认为IAV和WL是创建G-LOC报警算法的关键变量,有望建立基于EMG的G-LOC预警方法。在今后的研究中,可考虑对颈后肌群、腹直肌、小腿及前臂等部位做全面的EMG监测,研究失能时各部位EMG的变化特征,

为建立G-LOC预警模型提供更多的数据支持。

## 2 告警技术

**2.1 基于单项指标的告警技术** 脉搏血氧饱和度(blood oxygen saturation, SpO<sub>2</sub>)和脉率是临床上常用的生理监测指标<sup>[18,55]</sup>,通常采用光电容积脉搏波描记(photoplethysmography, PPG)技术测量。常规PPG传感器常置于手指、手腕、耳垂、前额等部位,用夹子固定在皮肤上,需要施加一定的压力来获得可靠的信号。安静状态下,手指和前额测得的数据最为准确,但在飞行环境下,读数受到严重干扰,测量的准确性较低<sup>[56-57]</sup>。

美国开发了一种名为SPYDR的新型PPG传感器设备,专为特殊环境(高压、低氧、高机动和高重力)设计,设备为一体式耳罩,传感器置于耳后,整个设备可替代飞行员头盔中的耳罩。此外,SPYDR的机载处理系统同时具有失能报警功能,通过骨传导技术在人体出现症状之前发出警报<sup>[58]</sup>。经离心机测试,测量结果快速可靠,SPYDR对SpO<sub>2</sub>变化的反应比常规PPG传感器快50s<sup>[57]</sup>。SPYDR作为一种用于特殊环境的生理监测设备,能够同时满足准确性、适用性和舒适性的要求。

ECG信号受运动干扰大、测量设备复杂,在高机动飞行环境中很难实现准确测量。我国研制了飞行员飞行生理参数记录检测仪<sup>[59]</sup>,该设备为胸带式设计,记录飞行过程中飞行员的ECG、呼吸、体温和过载参数,信号较为清晰稳定,并可通过配套软件进行数据分析,回顾飞行员飞行过程中的生理状态。

**2.2 多指标综合告警系统** 几十年来,世界各国围绕G-LOC预警做了大量研究,提出了G-LOC预警和恢复系统的构想。20世纪90年代,美国开始致力于意识丧失监测系统的研究<sup>[60]</sup>。最初的设想是同时监测飞行员血压、呼吸、ECG和EEG等多种生理指标的变化,但在实际飞行中,在座舱里和飞行员身上安装复杂的监测设备会影响飞行员的操作。研发人员设计将10个生理指标与6个飞机机动指标相结合,通过计算机算法对生理数据进行判断。采集的指标包括眨眼率、头部位移、头水平动脉搏动、眼水平动脉压、SpO<sub>2</sub>、驾驶杆握力、EEG频谱、抗荷动作完成度、抗荷服功能状态、对语音询问的反应及飞机过载值等。他们认为多参数集成

可降低误报率,提高预警系统的可靠性。G-LOC 预警与恢复系统结合了意识监测系统与飞机自动恢复系统,实时监测飞行员生理指标和飞机机动状态,综合评估飞行员瞬时状态,并做出反应。当系统监测到飞行员状态异常,便发出警告,提醒其采取防护措施;若判断已发生 G-LOC,则立即启动飞机自动驾驶系统,同时给予飞行员物理刺激,促使其尽快恢复意识<sup>[61]</sup>。

针对高性能战斗机,美国海军研发了战术飞行员综合生命保障系统(tactical aircrew integrated life support system, TAILSS),将多种监测模块集成到一起。TAILSS 是一个实时生理参数自适应调节的闭环电子控制系统,通过微型传感器监测飞行员各项生理指标:通风背心上的干电极可监测 ECG、腹部 EMG、体温和湿度,飞行头盔中的传感器可监测头水平动脉搏动、SpO<sub>2</sub> 和 EEG,氧气面罩上的压力传感器可监测呼吸。系统的风险预测模型将以上参数实测值与“正常值”(通过文献研究与离心机实验得出)进行对比,根据结果自动调整抗荷服与抗荷正压呼吸的压力。2004 年,该系统又加入了近红外光谱装置,并经过离心机和飞行测试,可有效监测飞行员的生理指标<sup>[62]</sup>。多指标综合告警系统的研究虽已取得一定进展,但仍不成熟,预警效果仍不理想,核心问题主要在于没有一套可靠可行的生理预警指标,判断缺乏金标准。

与外军相比,我军尚未系统地开展 G-LOC 综合告警系统的研究。目前,仅有空军研发的飞行头盔生理参数检测装置原理样机,其利用现有飞行装备,实现了部分生理指标的监测<sup>[63]</sup>。该样机将传感器和电极置于飞行头盔内,耳罩处有心电电极、惯性传感器和检测控制电路,头带处除心电电极外,还有光电脉搏传感器和红外温度传感器,可实现在不影响头盔功能的前提下,检测到飞行员的 ECG、血流脉搏波、SpO<sub>2</sub>、体温及过载值,其中血流脉搏波是判断失能的主要指标。在多指标、多模块集成的告警系统研发上,我军与外军还存在一定差距,这也是我们今后需要努力的重点方向。

### 3 小结

虽然关于 G-LOC 生理监测和告警技术已有诸多研究,但仍缺乏一套可靠可行的指标、方法和模型。这是由于在战术飞行中,低气压、高重力及高

机动状态限制了许多生理监测设备的使用。更重要的是,在实际空战中,飞行员的生理心理应激水平高,意识状态受多重因素影响,即使某一生理指标接近临界值,也不能完全代表意识的丧失。G-LOC 告警系统若要实现实装应用,须尽可能降低误报率和漏报率,未来应开展多指标、多模态研究,综合多项敏感生理指标,结合飞行员体征表现及飞机机动状态,根据计算机系统算法和飞行员对警告信号的反馈进行最终的判断。随着未来生物力学、脑认知科学、监测技术和人工智能的高速发展,G-LOC 生理监测和告警问题将会得到逐步解决。

### [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] ERCAN E, GUNDUZ S H. The effects of acceleration forces on cognitive functions[J]. *Microgravity Sci Technol*, 2020, 32: 681-686.
- [3] LYONS T J, KRAFT N O, COPLEY G B, DAVENPORT C, GRAYSON K, BINDER H. Analysis of mission and aircraft factors in G-induced loss of consciousness in the USAF: 1982-2002[J]. *Aviat Space Environ Med*, 2004, 75: 479-482.
- [4] GREEN N D C, FORD S A. G-induced loss of consciousness: retrospective survey results from 2 259 military aircrew[J]. *Aviat Space Environ Med*, 2006, 77: 619-623.
- [5] 徐艳,张立辉,马月欣,耿喜臣. 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: 62-68.
- [6] METZLER M M. G-LOC due to the push-pull effect in a fatal F-16 mishap[J]. *Aerosp Med Hum Perform*, 2020, 91: 51-55.
- [7] CAO X S, WANG Y C, XU L, YANG C B, WANG B, GENG J, et al. Visual symptoms and G-induced loss of consciousness in 594 Chinese Air Force aircrew: a questionnaire survey[J]. *Mil Med*, 2012, 177: 163-168.
- [8] 刘保钢,赵显亮,张莉莉,苏芳,张晓丽. 第四代战斗机超机动性带来的航空医学问题[J]. *中华航空航天医学杂志*, 2017, 28: 218-222, 封4.
- [9] KELLY D, EFTHYMIU M. An analysis of human factors in fifty controlled flight into terrain aviation accidents from 2007 to 2017[J]. *J Safety Res*, 2019, 69: 155-165.
- [10] TRIPP L D, WARM J S, MATTHEWS G, CHIU P, WERCHAN P, DEATON J E. +Gz acceleration loss of consciousness: time course of performance deficits with repeated experience[J]. *Hum Factors*, 2006, 48: 109-120.
- [11] LAUGHLIN M H, WITT W M, WHITTAKER R N.

- Regional cerebral blood flow in conscious miniature swine during high sustained +Gz acceleration stress[J]. *Aviat Space Environ Med*, 1979, 50: 1129-1133.
- [12] BURNS J W, PARNELL M J, BURTON R R. Hemodynamics of miniature swine during +Gz stress with and without anti-G support[J]. *J Appl Physiol* (1985), 1986, 60: 1628-1637.
- [13] 张作明,郭守一. +Gz对兔眼、脑血流量影响的比较研究[J]. *中华航空医学杂志*, 1992, 3: 22-24.
- [14] FLORENCE G, BONNIER R, RIONDET L, PLAGNES D, LAGARDE D, VAN BEERS P, et al. Cerebral cortical blood flow during loss of consciousness induced by gravitational stress in rhesus monkeys[J]. *Neurosci Lett*, 2001, 305: 99-102.
- [15] KONISHI T, KURAZUMI T, KATO T, TAKKO C, OGAWA Y, IWASAKI K I. Changes in cerebral oxygen saturation and cerebral blood flow velocity under mild +Gz hypergravity[J]. *J Appl Physiol* (1985), 2019, 127: 190-197.
- [16] 陈勇胜,焦志刚,颜桂定,金璋瑞. 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: 145-148.
- [17] HAN W Q, HU W D, DONG M Q, FU Z J, WEN Z H, CHENG H W, et al. Cerebral hemodynamics and brain functional activity during lower body negative pressure[J]. *Aviat Space Environ Med*, 2009, 80: 698-702.
- [18] CASTANEDA D, ESPARZA A, GHAMARI M, SOLTANPUR C, NAZERAN H. A review on wearable photoplethysmography sensors and their potential future applications in health care[J]. *Int J Biosens Bioelectron*, 2018, 4: 195-202.
- [19] North Atlantic Treaty Organization. Methods for measuring physiological responses and protection in man exposed to high +Gz: report of NATO Advisory Group for Aerospace Research & Development[R]. France: NATO, 1995.
- [20] BRADKE B S, MILLER T A, EVERMAN B. Photoplethysmography behind the ear outperforms electrocardiogram for cardiovascular monitoring in dynamic environments[J/OL]. *Sensors (Basel)*, 2021, 21: 4543. DOI: 10.3390/s21134543.
- [21] 王红,徐艳,金朝,耿喜臣,颜桂定,李宝辉,等. 离心机模拟空战机动训练时飞行员的心律变化[J]. *中华航空航天医学杂志*, 2003, 14: 132-135.
- [22] 莫隆宸,王海霞,贺斌,金朝,耿喜臣,张立辉,等. 载人离心机训练用耳脉搏传感器的设计与验证[J]. *航天医学与医学工程*, 2018, 31: 618-622.
- [23] 李毅峰,张涛,邓略,陈勇胜. 高重力加速度及其模拟条件下脑电变化研究综述[J]. *北京生物医学工程*, 2013, 32: 647-654.
- [24] WHINNERY J E, BURTON R R, BOLL P A, EDDY D R. Characterization of the resulting incapacitation following unexpected +Gz-induced loss of consciousness[J]. *Aviat Space Environ Med*, 1987, 58: 631-636.
- [25] WILSON G F, REIS G A, TRIPP L D. EEG correlates of G-induced loss of consciousness[J]. *Aviat Space Environ Med*, 2005, 76: 19-27.
- [26] 金璋瑞,赵国忠,王玉红,王力力. 飞行活动脑电图的特点[J]. *应用生理学杂志*, 1986, 3: 228-230.
- [27] LI Y F, YANG J J, ZHANG L H, ZHANG T, DENG L, WANG B. Research of EEG change feature under +Gz acceleration[J]. *Comput Ind*, 2015, 70: 144-152.
- [28] STERMAN M B, DUCHENKO T, HAMEL A S. Measurement and modification of sensorimotor system function during visual-motor performance[R]. Defense Technical Information Center, 1986.
- [29] LEWIS N, MCGOVERN J, MILLER J, EDDY D, FORSTER E. EEG indices of G-induced loss of consciousness (G-LOC). AGARD Conference Proceedings NO.432, Trondheim, May 25-29, 1987 [C/OL]. [2021-10-24]. [https://www.researchgate.net/publication/235110728\\_EEG\\_Indices\\_of\\_G-Induced\\_Loss\\_of\\_Consciousness\\_G-LOC](https://www.researchgate.net/publication/235110728_EEG_Indices_of_G-Induced_Loss_of_Consciousness_G-LOC).
- [30] 陈勇胜,黄攀,金璋瑞,闫洪敏. 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: 173-175.
- [31] GALVEZ-POL A, CALVO-MERINO B, FORSTER B. Revealing the body in the brain: an ERP method to examine sensorimotor activity during visual perception of body-related information[J]. *Cortex*, 2020, 125: 332-344.
- [32] 陈勇胜,王致洁,焦志刚,颜桂定. 下体负压晕厥前症状下事件相关电位变化特征[J]. *中华航空航天医学杂志*, 1998, 9: 220-222.
- [33] 韩文强,胡文东,马瑞山. +Gz作用下人体事件相关电位P300及工效学指标的改变[J]. *中国临床康复*, 2004, 8: 98-100.
- [34] DEHAIS F, DUPRÈS A, BLUM S, DROUGARD N, SCANNELLA S, ROY R N, et al. Monitoring pilot's mental workload using ERPs and spectral power with a six-dry-electrode EEG system in real flight conditions[J/OL]. *Sensors (Basel)*, 2019, 19: 1324. DOI: 10.3390/s19061324.
- [35] RYOO H C, HREBIEN L, SHENDER B S. Noninvasive monitoring of human consciousness by near-infrared spectroscopy (NIRS) during high +Gz stress[J]. *Biomed Sci Instrum*, 2002, 38: 1-7.
- [36] RYOO H C, SUN H H, SHENDER B S, HREBIEN L. Consciousness monitoring using near-infrared spectroscopy (NIRS) during high +Gz exposures[J]. *Med Eng Phys*, 2004, 26: 745-753.
- [37] BENNI P B, LI J K, CHEN B, CAMMAROTA J, AMORY D W. NIRS monitoring of pilots subjected to +Gz acceleration and G-induced loss of consciousness (G-LOC)[J]. *Adv Exp Med Biol*, 2003, 530: 371-379.
- [38] WU B, XIE B, XUE Y, YOU G, LU S, LIU X. Changes of cerebral oxygen saturation under lower body negative

- pressure[J]. *Space Med Med Eng (Beijing)*, 1997, 10: 245-249.
- [39] 金朝,曹征涛,王海霞,张立辉,李毅峰,周玉斌,等. 慢长率模式+Gz加速度暴露对局部脑血氧饱和度的影响[J]. *中国应用生理学杂志*, 2020, 36: 130-133.
- [40] SMITH C, GOSWAMI N, ROBINSON R, VON DER WIESCHE M, SCHNEIDER S. The relationship between brain cortical activity and brain oxygenation in the prefrontal cortex during hypergravity exposure[J]. *J Appl Physiol* (1985), 2013, 114: 905-910.
- [41] EIKEN O, KERAMIDAS M E, TAYLOR N A S, GRÖNKVIST M. Intraocular pressure and cerebral oxygenation during prolonged headward acceleration[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2017, 117: 61-72.
- [42] TRIPP L D, WARM J S, MATTHEWS G, CHIU P Y, BRACKEN R B. On tracking the course of cerebral oxygen saturation and pilot performance during gravity-induced loss of consciousness[J]. *Hum Factors*, 2009, 51: 775-784.
- [43] KURIHARA K, KIKUKAWA A, KOBAYASHI A, NAKADATE T. Frontal cortical oxygenation changes during gravity-induced loss of consciousness in humans: a near-infrared spatially resolved spectroscopic study[J]. *J Appl Physiol* (1985), 2007, 103: 1326-1331.
- [44] WHINNERY A M, WHINNERY J E, HICKMAN J R. High +Gz centrifuge training: the electrocardiographic response to +Gz-induced loss of consciousness[J]. *Aviat Space Environ Med*, 1990, 61: 609-614.
- [45] WHINNERY A M, WHINNERY J E. The electrocardiographic response of females to centrifuge +Gz stress[J]. *Aviat Space Environ Med*, 1990, 61: 1046-1051.
- [46] 陆霞,初旭,周杰,颜桂定,惠亚玲. 离心机高G训练中的心电图改变[J]. *航天医学与医学工程*, 1997, 10: 62-64.
- [47] 吴斌,薛月英,由广兴,刘兴华,吴萍,黄伟芬,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: 28-32.
- [48] ZAWADZKA-BARTCZAK E K, KOPKA L H. Cardiac arrhythmias during aerobatic flight and its simulation on a centrifuge[J]. *Aviat Space Environ Med*, 2011, 82: 599-603.
- [49] OKSA J, HÄMÄLÄINEN O, RISSANEN S, MYLLYNIEMI J, KURONEN P. Muscle strain during aerial combat maneuvering exercise[J]. *Aviat Space Environ Med*, 1996, 67: 1138-1143.
- [50] 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: 971-975.
- [51] KIM S, KIM D, CHO T, LEE Y, CHOI B. 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: 119-128.
- [52] 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: 162-167.
- [53] CHOI B, KIM D, KIM M. Effectiveness of EMG in development of G-induced loss of consciousness (G-LOC) warning system: proceedings of the International Conference on Biomedical Engineering and Systems, Prague, August 14-15, 2014[C/OL]. [2021-10-24]. [http://www.avestia.com/ICBES2014\\_Proceedings/papers/129.pdf](http://www.avestia.com/ICBES2014_Proceedings/papers/129.pdf).
- [54] CHOI B, LEE Y, CHO T, KOO H, KIM D. Detection of G-induced loss of consciousness (G-LOC) prognosis through EMG monitoring on gastrocnemius muscle in flight: proceedings of 2015<sup>37</sup>th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, August 25-29, 2015[C]. Milan: IEEE, 2015: 7007-7010.
- [55] ALLEN J. Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement[J/OL]. *Physiol Meas*, 2007, 28: R1-R39. DOI: 10.1088/0967-3334/28/3/R01.
- [56] SUN S X, PEETERS W H, BEZEMER R, LONG X, PAULUSSEN I, AARTS R M, et al. Finger and forehead photoplethysmography-derived pulse-pressure variation and the benefits of baseline correction[J]. *J Clin Monit Comput*, 2019, 33: 65-75.
- [57] BRADKE B, EVERMAN B. Investigation of photoplethysmography behind the ear for pulse oximetry in hypoxic conditions with a novel device (SPYDR)[J/OL]. *Biosensors*, 2020, 10: 34. DOI: 10.3390/bios10040034.
- [58] BRADKE B S, WHITE Z, POSTON J. Bone conduction as a viable alternative to current communications systems in fighter cockpits[J]. *Aerosp Med Hum Perform*, 2018, 89: 927-930.
- [59] 葛宏,吕晓东,范军,张永宝,胡晓林,张莉莉. 飞行员飞行生理参数记录检测仪数据分析系统的研制[J]. *医疗卫生装备*, 2009, 30: 15-16.
- [60] ALBERY W B, VAN PATTEN R E. Non-invasive sensing systems for acceleration-induced physiologic changes[J]. *IEEE Eng Med Biol Mag*, 1991, 10: 46-51.
- [61] CAMMAROTA J P. Integrated systems for detecting and managing acceleration-induced loss of consciousness[J]. *IEEE Eng Med Biol Mag*, 1991, 10: 52-55.
- [62] SHENDER B S. Update from NAWCAD Patuxent River[J]. *The +Gzette*, 2004, 4: 7.
- [63] 吕晓东,耿斌,郭云,余文斌,张永宝,阎永华,等. 飞行头盔生理参数检测装置:CN102657523A[P]. 2012-09-12.