

利用功能性近红外光谱成像方法评估脑力负荷

潘津津 焦学军 姜 劲 徐凤刚 杨涵钧

(中国航天员科研训练中心人因工程重点实验室, 北京 100094)

摘要 为了研究利用功能性近红外光谱(FNIRS)评估脑力负荷的可行性,综合生理参数法、绩效法及主观量表法,对 12 名在校大学生被试进行了图片 *N*-back 及多元归因任务(MATB)实验,分析了 FNIRS 参数对不同难度的敏感性及其差异。*N*-back 任务中背外侧前额叶皮层(DLPFC)1、5、9、10 号通道及 MATB 任务中 1、9 号通道的 FNIRS 数据对脑力负荷更敏感;在 0~2 级难度的 *N*-back 及 MATB 任务中,含氧血红蛋白(HbO)和总血红蛋白(tHb)的含量随任务难度提升而增加,但在 3 级难度时出现降低。结果表明大脑前额叶皮层(PFC)的 FNIRS 信号对脑力负荷相对更敏感区域为 DLPFC;在一定难度范围内,HbO 和 tHb 的含量随任务难度的提升而增高,而当难度超过一定范围会出现下降。

关键词 光谱学;功能性近红外光谱成像;脑力负荷;大脑皮层;血氧变化

中图分类号 O433.4; TP274.52 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1130002

Mental Workload Assessment Based on Functional Near-Infrared Spectroscopy

Pan Jinjin Jiao Xuejun Jiang Jing Xu Fenggang Yang Hanjun

(National Key Laboratory of Human Factors Engineering, China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094, China)

Abstract To investigate the feasibility of mental workload assessment by using functional near-infrared spectroscopy (FNIRS), 12 college students are organized to complete *N*-back and multi-attribute task battery (MATB) tasks with physiological parameter, behavioral performance and subjective scale. The sensitivity and difference of FNIRS parameters of different difficulties are analyzed. FNIRS data of the first, fifth, ninth and tenth channels in dorsolateral prefrontal cortex (DLPFC) area in *N*-back task and the first, ninth channels in DLPFC area during MATB task are more sensitive to mental workload. In the tasks of 0~2 level difficulty, the oxygenated hemoglobin (HbO) and total hemoglobin (tHb) show greater change as the difficulty increases and lower value change in 3 level difficulty. The results show that the FNIRS signal in DLPFC is the most sensitive area of mental workload in prefrontal cortex (PFC) area. Within a certain range of difficulty, HbO and tHb show larger change as task difficulty level increases, but the change will be opposite when task difficulty beyond a certain level.

Key words spectroscopy; functional near-infrared spectroscopy imaging; mental workload; cortex; blood oxygen change

OCIS codes 300.6340; 170.1420; 170.3880

1 引言

脑力负荷是完成一项或多项任务时所产生的生理和心理需求^[1]。Hart 等^[2]认为脑力负荷不是一

个固有的特性,当任务需求、工作环境、操纵者的技能、行为和感知交互作用的时候,脑力负荷就会产生。脑力负荷结构具有多维特点,影响因素可以归

收稿日期: 2014-06-10; 收到修改稿日期: 2014-07-14

基金项目: 国家 973 计划(2011CB711000, HF 2011Z-Z-B-02)

作者简介: 潘津津(1990—),男,硕士研究生,主要从事功能性近红外光谱成像用于脑功能检测方面的研究。

E-mail: winston331@126.com

导师简介: 焦学军(1969—),男,副研究员,主要从事近红外光谱设备的软硬件开发方面的研究。

E-mail: jxjisme@sina.com (通信联系人)

纳为人、任务、环境三个方面。特定的个人的能力、动机、策略、情绪和操作状态都会影响它的大小^[3-4]。

随着科学技术的飞速发展,尤其是计算机和自动化技术的广泛应用,现代人-机-环系统的系统化和自动化程度大大提高,人-机分工已与以往大不相同,工作者的作用和地位也发生了明显变化,体力工作负荷已大为减轻,但脑力工作负荷却日益增高。一方面由于人机交互的信息量剧增,而人的信息接收能力和信息加工处理能力是有限的,这就增大了操作者信息接收与处理的脑力负荷^[5];另一方面,现代人-机-环系统日益复杂化,其各部分之间关系错综复杂,也是导致操作者高脑力负荷的原因。如果工作量过大,脑力负荷过高会出现“超负荷”现象,遇到复杂情况,操作者的负荷非常高,认知能力、工作效率下降,严重时会导致操作员不能继续工作。如果工作时负荷过低则会出现人不在回路(OOTL)现象,长时间过低负荷工作,任务激励的敏感性、警惕性会降低,从而使得操作员区分、识别和诊断紧急事件的能力大打折扣^[6]。进行脑力负荷研究,分析操作者脑力负荷变化规律,对保证操作者认知能力、工作效率是非常有必要的。

脑力负荷是一个多维度的概念,应从多个角度对其进行测量。目前还做不到直接对人的脑力负荷进行评价,国内外的研究均是通过间接的方式对脑力负荷进行测量。目前常用到的测量方法主要包括主观等级量表评价法、任务绩效法和生理参数法,其中生理参数法具有客观性和实时性的优势^[7-8]。

测量脑力负荷的生理参数方法包括测量外周神经系统电生理信号、测量中枢神经系统电生理信号以及测量血液动力学指标等多种方法。外周神经系统的测量方法主要包括心电图(ECG)、眼电图(EOG)、皮肤电(GSR)等电生理信号,以及测量血液动力学指标的方法,血液动力学指标方法包括功能性磁共振成像(fMRI)、功能性近红外光谱成像(FNIRS)^[9-10]等技术。中枢神经系统电生理信号的测量方法则是测量大脑皮层,如脑电图(EEG)和事件相关电位法(ERP)^[11-12]。其中FNIRS是一项新兴技术,它是利用700~900 nm段波长的光来监测生物组织血氧含量的变化^[13]。脑组织在近红外光谱范围内相对透明,其中的某些载色体的氧化状态会直接影响脑对近红外的吸收率^[14-15]。人体组织中对于近红外光谱主要的吸光成分有水、氧血红蛋白(HbO)和脱氧血红蛋白(Hb)。FNIRS得到的

血液动力学数据(HbO、Hb)和组织的氧化作用以及新陈代谢紧密相关,因此利用FNIRS进行大脑皮层功能和活动研究具有一定的生理学基础^[16-17]。利用修正的Beer-Lambert定律,同时测量不同时间内近红外光谱范围内两种不同的波长,就可以测得HbO以及Hb的浓度变化。这项技术可以便携、安全、廉价、无创地实现对大脑皮层状态的监测^[18-19]。

国际上近年来大量地利用FNIRS进行相关的脑功能研究,如Ayaz等^[20]证明了在自然条件下, FNIRS可以用于评价操作者进行标准N-back实验和复杂认知空中交通管理任务(ATC)的脑力负荷,还证明了FNIRS可以评价操作者在—项复杂认知任务中专业技能的进步,认为在操作中准确的测量脑力负荷,可以提高在人机系统中的操作的效率与安全。Menda等^[21]进行了一项关于无人机(UAV)操作员训练评价以及操作界面发展的研究,对飞行员评估研究的初步结果表明,UAV操作员在视觉搜索/警觉性任务中, FNIRS指标对高低脑力负荷状态敏感。Durantin等^[1]研究了FNIRS和心率变异性(HRV)评估模拟飞行驾驶任务脑力负荷的可行性,针对12名被试进行了模拟飞机驾驶任务,要求被试驾驶模拟飞机跟踪一个动态的目标,为了诱发不同难度的脑力负荷,操作的周期以及控制的难度都可以调节。该研究同样采集了前额叶血样数据,但没有进行通道敏感性的分析,只是对所有通道整体的幅值与难度对应情况进行了分析,得出脑力负荷水平越高, FNIRS的含氧血红蛋白数据有更高水平的激活,同时心率变异性指标低频/高频(LF/HF)比值也更低。因此基本上证明了FNIRS和HRV可以用于评估在模拟驾驶任务中的脑力负荷。

之前的研究证明FNIR具有许多优点,如安全、无创、轻便、无损耗、抗干扰性强、可无线测量等,尤其适用于现场应用^[22-23]。这些研究主要利用FNIRS血氧数据的幅值对不同难度任务进行统计平均比较,没有进行细致的敏感脑区筛选,也没有从脑力负荷分类准确率的角度进行通道筛选,同时这些研究大都是针对国外的被试,没有针对中国的被试进行系统的研究。

本文计划对中国21~24岁之间的健康被试,利用FNIRS进行单一任务及综合任务的脑力负荷研究,探究不同任务下前额敏感通道和脑区,及血氧数据的变化规律。

2 实验设计

实验中对 12 名 21~24 岁在校大学生被试进行了 2 组任务脑力负荷诱发实验,平均年龄为 23 岁,为避免性别差异对结果的影响,全部为男性被试,其中右利手 9 名。第一组诱发任务为图片 N -back 任务(26 min),第二组实验为 NASA 的多元化归因任务(MATB)(25 min),表 1、2 为实验范式介绍。实验过程中利用 Artinis Oxymon 近红外光谱仪测量操作者前额部分血氧数据(4 光源,4 探测器,10 通道),同时纪录行为学绩效指标,并在任务结束后辅助被试填写 NASA 任务负荷指标(NASA-TLX)主观量表(图 1 为光学检测示意图)。

表 1 N -back 实验范式介绍

Table 1 Experimental paradigm introduction of N -back

Task	Task operation
0-back	Press left key when current picture is same with target
1-back	Same with the last picture
2-back	Same with the second to last picture
3-back	Same with the third to last picture

表 2 MATB 实验范式介绍

Table 2 Experimental paradigm introduction of MATB

Task	Operation			
	Track	Monitor	Communicate	Manage
0-MATB	low	low	low	none
1-MATB	low	low	low	low
2-MATB	medium	medium	medium	medium
3-MATB	high	high	high	high

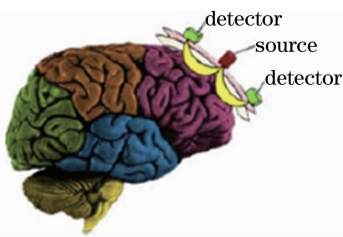


图 1 FNIRS 光学检测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of FNIRS optical detection

N -back 范式是一种关于记忆加工的任务类型,是认知神经科学研究中常用的范式,实验所使用的图片 N -back 任务是基于 E-prime2.0 编写的,为避免情绪对被试造成干扰,任务中图片均为中性情绪图片。 N -back 范式是指主试要求被试者将刚刚出现过的刺激与前面第 N 个刺激进行比较,通过控制当前刺激与目标刺激间隔的刺激个数来操纵负荷。例如当 $N=0$ 时,要求被试者比较当前刺激图片和已知的对照图片,相同按左键,否则按右键;当 $N=$

2 时,则比较当前刺激和与它前面隔一个位置上的刺激;依此类推,获得不同程度的任务难度。该范式的优点在于将任务设计成在工作记忆上施加一连续的、参数可变的负荷,而其他任务需要保持恒定。实验过程中按随机次序对 0~3-back 任务分别采集 5 min 实验数据,每个 back 任务之间休息 2 min。

NASA 的 MATB 任务是一种复杂的操作任务,它是一种基于计算机设计的任务,可以用来评价操作者的绩效和负荷。同时进行多任务评价绩效是 MATB 的主要特点,这个特点也正是和许多实际的操作系统相一致的。MATB 任务操作涉及系统监控任务、跟踪任务、语音交流、资源管理等子任务。

3 信号噪声去除

FNIRS 生理参数法进行脑力负荷检测,虽然具有实时性和客观性等优势,但是实验误差、仪器误差、生理干扰等会对客观信号的准确性造成一定影响,因此对得到的 FNIRS 实验数据要进行噪声的去除。

仪器噪声和运动伪影等是与被测脑区的功能无关的噪声。生理噪声来源于被测生物组织内部由于心跳、呼吸、血压搏动、自发低频振荡等引起的 HbO 震荡,这些生理噪声源引起的测量误差对多个波长探测光的影响在一定程度上是一致的,在将原始光强信号通过 Beer-Lambert 定律转换为血液动力学参数变化后进行去除。

研究中利用小波分解与重构方法去除了常规的白噪声和毛刺噪声,利用带通滤波器滤除生理干扰,利用基于相关性的信号改进算法(CBSI)滤除运动

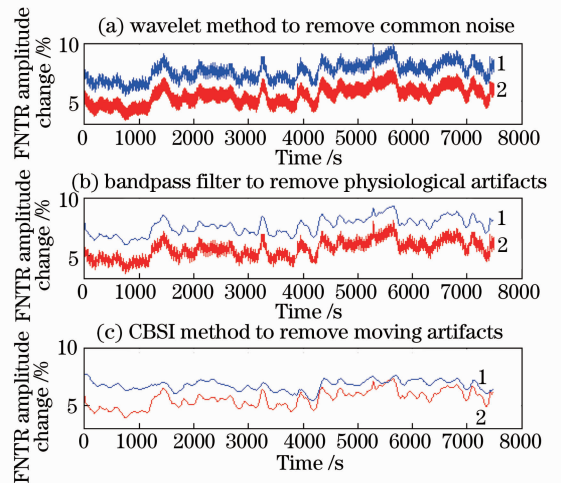


图 2 FNIRS 信号三步去噪波形比较

Fig. 2 FNIRS signal comparison of three step de-noising

干扰。图 2 为 HbO 信号经过三种去噪方法去噪前后的波形比较,曲线 1 是去噪之后的信号,曲线 2 是去噪之前的信号。可以看出经过三次去噪,HbO 信号中的白噪声、工频干扰、毛刺噪声、心动等生理干扰、运动伪迹等都被较好地去除,得到满足统计分析需求的较为纯净的 FNIRS 信号^[24]。

4 实验结果

4.1 行为学结果

图 3 为图片 N -back 任务的任务绩效(准确率以及反应时间)。利用重复测量方差分析 ANOVA 发现,随着图片 N -back 任务难度升高,被试按键操作的准确率显著下降,0~3-back 的准确率(ACC)分别为 0.978、0.937、0.918、0.868,且方差分析显著性值 $F(1,11)=8.32$,显著性水平 $p<0.05$;同时反应时

间(RT)显著提高,0~3-back 的 RT 分别为 520.189、581.909、635.126、684.259 s,且 $F(1,11)=26.35$, $p<0.05$ 。操作者按键操作的 RT 与 ACC 与图片 N -back 任务的任务难度相关性显著。

4.2 主观问卷结果

本文利用 NASA-TLX 量表,在实验后对每名被试进行了主观问卷调查,为了尽可能提高主观问卷的可信度,本研究使用主试问被试回答的形式填写 NASA-TLX 量表。并且利用 ANOVA 分析了所有被试 NASA-TLX 量表的总得分与任务难度之间的关系。0~3-back 难度的平均量表得分为 13.73、17.55、29.36、40.73,结果如图 4 所示,NASA-TLX 量表得分与任务难度相关性显著, $F(1,11)=54.3$, $p<0.05$ 。

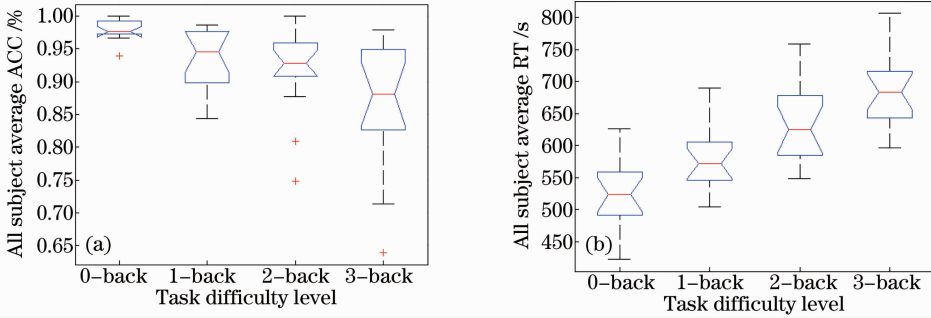


图 3 N -back 任务绩效与任务难度关系

Fig. 3 Relationship between task performance and difficulty of the task of N -back

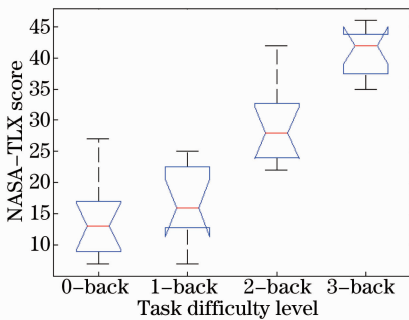


图 4 NASA-TLX 量表得分与任务难度关系

Fig. 4 Relationship between NASA-TLX score and difficulty of the task

4.3 FNIRS 结果

4.3.1 FNIRS 信号敏感脑区

实验中采集了 12 名被试大脑前额叶皮层(PFC)区 10 通道 FNIRS 信号的 HbO、还原血红蛋白(Hb)、tHb 变化值。支持向量机(SVM)利用每一通道每个特征对 4 种难度的 back 任务进行分类,

对应每个通道的每个特征可以得出一个正确率。将 12 名被试的三种特征(HbO, Hb, tHb)分类准确率进行加和,将差异累加放大,得出了与 10 个通道对应的描述通道敏感性强弱的得分值,这些值代表对应通道能够正确反映相应大脑皮层活动的敏感性程度,即以此得分来筛选敏感脑区。

N -back 任务和 MATB 任务 10 个 FNIRS 通道的敏感性得分值情况如表 3、4 所示,其对应 FNIRS 通道分布在大脑皮层 PFC 区域的具体位置如图 5 所示。在本研究中,图片 N -back 任务诱发的脑力负荷程度敏感的脑区位置在 1、5、9、10 号位置,属于背外侧前额叶皮层(DLPFC)。同样方法可以得出在 MATB 复杂任务中的 FNIRS 通道敏感分值及位置分布,敏感脑区位置如图 5(b)所示在 1、9 号位置比较敏感,也属于 DLPFC 区。通过 N -back 及 MATB 任务的 FNIRS 数据得出 PFC 区脑力负荷相对更敏感脑区位置为 DLPFC。

表 3 10 个 N-back 任务通道敏感性得分统计

Table 3 10 channel sensitivity score statistics of N-back task

Channel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Score	17.711	16.648	16.043	16.753	19.586	16.386	15.462	15.927	17.124	17.923

表 4 10 个 MATB 任务通道敏感性得分统计

Table 4 10 channel sensitivity score statistics of MATB task

Channel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Score	20.040	16.056	15.919	15.983	17.201	17.693	17.491	18.362	20.233	12.016

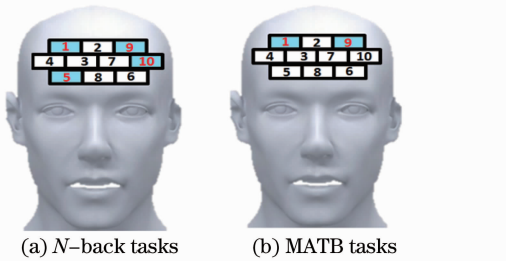


图 5 不同任务下 FNIRS 敏感脑区分布
Fig. 5 FNIRS sensitive brain distribution under different tasks

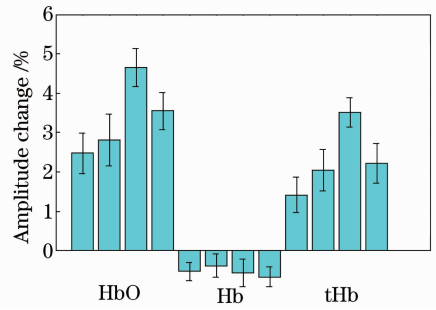


图 6 N-back 任务 FNIRS 特征幅值变化
Fig. 6 FNIRS amplitude change in N-back tasks

4.3.2 FNIRS 信号与任务难度关系

利用统计学方法对本研究中采集的 12 名被试敏感通道的 FNIRS 数据进行统计平均处理,图 6、7 为统计结果。可以发现,图片 N-back 和 MATB 任务难度不同, FNIRS 的 HbO、Hb、tHb 均有明显不同,且在一定范围内 HbO、tHb 含量变化随任务难度增加而增加。在 0~2-back 任务及 0~2-MATB 中,任务难度越大, Hb 和 tHb 含量变化越大。但是对应图片 2-back 与 3-back 任务,以及 2-MATB 和 3-MATB 任务,统计结果显示 3-back 中 HbO、tHb 数据变化量小于 2-back 任务, 3-MATB 任务中的 HbO、tHb 数据变化量也小于 2-MATB 任务。对比行为学绩效和主观量表数据,可能是由于图片 3-back 和 3-MATB 任务难度过大,对于某些被试人员在完成本部分任务的某些操作时采取了相对较多的放弃或猜测行为,计划在后续进行过高负荷下 FNIRS 变化规律及机理方面的深入研究。

综上所述,在图片 N-back 和 MATB 任务中,在一定难度范围内, HbO、tHb 的含量随任务难度提升而增高,与 Ayaz 等^[20,23]的研究结论大体一致。当难度超过一定范围时,随难度提升, HbO、tHb 含量变化减小。

5 讨论与分析

本研究的目的是研究在 N-back 及 MATB 任务中脑力负荷对 PFC 血液动力学指标的影响机制。

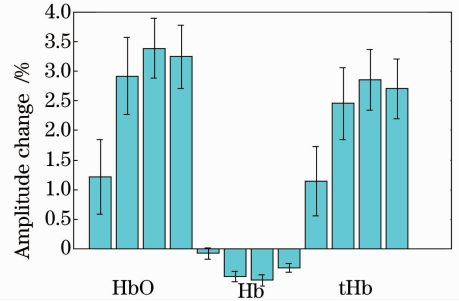


图 7 MATB 任务 FNIRS 特征幅值变化情况
Fig. 7 FNIRS amplitude change in MATB tasks

从方法论的角度来看,本研究综合利用了 FNIRS 信号生理参数、行为学绩效及 NASA-TLX 主观问卷相结合的方法,研究了中国 12 名大学生被试的 N-back 及 MATB 任务。

本研究要解决的第一个是问题确保实验任务能够有效地诱发不同级别的脑力负荷。主观问卷得分证明了主观的脑力负荷级别随任务类型从 0-back 到 3-back 有明显的增加。同时结果也证明了不同的任务确实激发了 DLPFC 区域不同程度的血氧变化水平,在一定难度范围内, HbO、tHb 含量随任务难度提高而增加,与 Durantin 等^[1,20,23]的结论相似。虽然没有发现脑力负荷影响 PFC 区域激活程度的主要影响因素,但是证实了对脑力负荷相关性比较敏感的是 DLPFC 区域。

此外,还发现 DLPFC 区域敏感通道的血氧数据的变化呈现 U 形的变化模式: HbO 和 tHb 含量

随着任务难度的提高而增加,但当难度增加到一定范围,HbO 和 tHb 含量出现下降。根据这个结果,可以猜测 DLPFC 区域是和中央执行相关联的一个主要区域,该区域主要负责任务监控和认知控制功能。DLPFC 区域的幅值在高难度时呈降低变化,与较差的绩效相对应,同时对应的主观问卷脑力负荷得分值也比较高。综合这些结果,可以猜测测试无法调动脑力资源以适应该高难度任务需求,即在高难度时可能出现了脑力超负荷现象。Durantin 等^[1,25]也研究了这种涉及脑力超负荷的生理反应模型,研究了如瞳孔直径等外周神经系统指标的生理反应,也倾向于认为脑力负荷过重时会导致外周神经系统以及大脑活动性的降低。

6 结 论

1) 大脑 PFC 区的 FNIRS 信号对脑力负荷相对敏感区域为 DLPFC; 2) 在一定难度范围内, HbO、tHb 含量随任务难度提高而变大, 难度超过一定范围随难度提升, HbO、tHb 含量减小。基本上证明了 FNIRS 针对中国人被试开展 *N*-back 任务脑力负荷研究的可行性。在后续研究中可以利用 FNIRS 方法开展脑力负荷评估、分类研究, 高难度下关于放弃及猜测等认知行为的研究, 还可以综合使用多种生理参数(如 FNIRS、EEG、ECG、GSR 等)进行脑力负荷跨人、跨任务研究。

参 考 文 献

- 1 G Durantin, J F Gagnon, S Tremblay, *et al.*. Using near infrared spectroscopy and heart rate variability to detect mental overload [J]. *Behavioural Brain Research*, 2014, 259(2): 16–23.
- 2 S G Hart, L E Staveland. Development of NASA-TLX (task load index): Results of empirical and theoretical research [J]. *Advances in Psychology*, 1988, 52(1): 139–183.
- 3 W B Rouse, S L Edwards, J M Hammer. Modeling the dynamics of mental workload and human performance in complex systems [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, & Cybernetics*, 1993, 23(6): 1662–1671.
- 4 D Elmes, B Kantowitz, III H Roediger. *Research Methods in Psychology* [M]. Belmont: Cengage Learning, 2011. 221–230.
- 5 Ge Liezhong, Li Hongting, Wang Duming. *Engineering Psychology* [M]. Beijing: Renmin University of China Press, 2012. 185–190.
葛列众, 李宏汀, 王笃明. *工程心理学* [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2012. 185–190.
- 6 K Mandrick, G Derosiere, G Dray, *et al.*. Prefrontal cortex activity during motor tasks with additional mental load requiring attentional demand: a near-infrared spectroscopy study [J]. *Neuroscience Research*, 2013, 76(3): 156–162.
- 7 Liu Zhongqi, Yuan Xiugan, Liu Tao, *et al.*. Mental workload measurement technology in aviation ergonomics [J]. *Ergonomics*, 2003, 9(2): 19–22.

- 柳忠起, 袁修干, 刘涛, 等. 航空工效中的脑力负荷测量技术 [J]. *人类工效学*, 2003, 9(2): 19–22.
- 8 Dong Mingqing, Ma Ruishan, Cheng Hongwei. Multivariate dual task mental workload assessment discriminant analysis [J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 1997, 10(5): 358–362.
- 董明清, 马瑞山, 程宏伟. 双任务脑力负荷评定的多变量判别分析 [J]. *航天医学与医学工程*, 1997, 10(5): 358–362.
- 9 E M Peck, D Afergan, B F Yuksel, *et al.*. Using fNIRS to Measure Mental Workload in the Real World [M]. London: Springer London, 2014. 117–139.
- 10 M Strait, M Scheutz. What we can and cannot (yet) do with functional near infrared spectroscopy [J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2014, 8(5): 117–125.
- 11 E Kirilina, A Jelzow, A Heine, *et al.*. The physiological origin of task-evoked systemic artefacts in functional near infrared spectroscopy [J]. *Neuroimage*, 2012, 61(1): 70–81.
- 12 A Villringer, B Chance. Non-invasive optical spectroscopy and imaging of human brain function [J]. *Trends in Neurosciences*, 1997, 20(10): 435–442.
- 13 Pan Jinjin, Jiao Xuejun. New application, development and aerospace prospect of FNIRS [J]. *Engineering*, 2013, 5(5): 47–52.
- 14 Zhou Zhenyu, Yang Hongyu, Gong Hui, *et al.*. Brain signal analysis of functional near-infrared imaging based on Hilbert-Huang transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(2): 307–312.
- 周振宇, 杨宏宇, 龚辉, 等. 基于希尔伯特-黄变换的近红外脑功能成像信号分析 [J]. *光学学报*, 2007, 27(2): 307–312.
- 15 Zhu Dan, Wu Guiling, Luo Qingming, *et al.*. Photonics diffusion for small source-detector separations of tissue [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 25(5): 638–642.
- 朱丹, 吴龟灵, 骆清铭, 等. 生物组织中光子微区扩散理论研究 [J]. *光学学报*, 2006, 25(5): 638–642.
- 16 Y Gu, Y Song, A Constantinescu. Comparison of tumor vascular blood volume measured by near infrared spectroscopy and ¹⁹F NMR spectroscopy [J]. *Chin Opt Lett*, 2005, 3(05): S179–S181.
- 17 Xia Hui, Liu Wenqing, Zhang Yujun, *et al.*. An approach of open-path gas sensor based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Chin Opt Lett*, 2008, 6(6): 437–440.
- 18 A Villringer, B Chance. Non-invasive optical spectroscopy and imaging of human brain function [J]. *Trends in Neurosciences*, 1997, 20(10): 435–442.
- 19 B Chance, J S Leigh, H Miyake, *et al.*. Comparison of time-resolved and-unresolved measurements of deoxyhemoglobin in brain [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1988, 85(14): 4971–4975.
- 20 H Ayaz, P A Shewokis, S Bunce, *et al.*. Optical brain monitoring for operator training and mental workload assessment [J]. *Neuroimage*, 2012, 59(1): 36–47.
- 21 J Menda, J T Hing, H Ayaz, *et al.*. Optical brain imaging to enhance UAV operator training, evaluation, and interface development [J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2011, 61(1): 423–443.
- 22 Jiao Xuejun, Bai Jing, Chen Shanguang, *et al.*. Monitoring mental fatigue in analog space environment using optical brain imaging [J]. *Engineering*, 2013, 5(5): 53–57.
- 23 C Herff, D Heger, O Fortmann, *et al.*. Mental workload during *N*-back task—quantified in the prefrontal cortex using fNIRS [J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2013, 7(1): 935–940.
- 24 D A Boas, C E Elwell, M Ferrari, *et al.*. Twenty years of functional near-infrared spectroscopy: introduction for the special issue [J]. *NeuroImage*, 2014, 85(1): 1–5.
- 25 R Cabestrero, A Crespo, P Quirós. Pupillary dilation as an index of task demands [J]. *Perceptual and Motor Skills*, 2009, 109(3): 664–78.