

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1804397

脑电反馈放松训练系统研究及有效性验证^{*}

张力新¹, 郝鑫宇¹, 刘爽², 安兴伟², 明东^{1,2}

(1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院 天津 300072; 2. 天津大学医学工程与转化医学研究院 天津 300072)

摘要:近年来,快节奏的生活导致人们的情绪障碍的发病率逐年增加。为缓解人们紧张、焦虑的情绪,本文搭建了以脑电在线实时反馈为形式的放松训练系统,通过提取脑 α 波指数相对总功率作为反馈值并以视觉动画的形式反馈给用户。最后对20名健康被试者进行脑电反馈放松训练以验证该系统的有效性。结果表明:实验组放松训练后被试者焦虑自评量表SAS得分明显降低,具有显著差异性($t=2.411, P<0.05$)。通过对训练前后静息脑电 α 波指数相对总功率分析得到,在实验组中,训练后测的 α 波指数相对总功率较前测有明显提高,具有显著性差异($t=-4.256, P<0.05$);但对照组无此现象。以上结果说明该训练系统能够达到使被试者放松、情绪反应趋于平和的效果。

关键词:神经反馈;脑电;alpha波;视觉反馈;放松训练;脑-机接口

中图分类号: R318 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 310.61

Research and Validation of EEG feedback relaxation training system

Zhang Lixin¹, Hao Xinyu¹, Liu Shuang², An Xingwei², Ming Dong^{1,2}

(1. College of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Academy of Medical Engineering and Translational Medicine, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In recent years, fast-paced life has led to a gradual increase in the incidence of emotional disorders. In order to alleviate people's tension and anxiety, this paper builds a relaxation training system in the form of online real-time feedback of EEG. The system extracts the relative power of the brain α -wave index as feedback value and feeds it back to the user in the form of visual animation. Finally, 20 healthy subjects were subjected to EEG feedback relaxation training to verify the effectiveness of the system. The results showed that the SAS score of the self-rating anxiety scale of the subjects in the experimental group was reduced obviously, and there was significant difference ($t=2.411, P<0.05$). Through the analysis of the relative total power of the resting EEG α -wave index before and after training, in the experimental group, the relative total power of the α -wave index measured after training is significantly higher than that of the previous measurement, and has significant difference ($t=-4.256, P<0.05$); but this phenomenon is not observed in the control group. The above results show that the training system can achieve the effect of making the subject feel relaxed and the emotional reaction tends to be calm.

Keywords: Neurofeedback; EEG; alpha wave; visual feedback; relaxation training; brain-computer interface

0 引言

现如今,快节奏的生活导致人们的压力变大,消极情绪的累积导致情绪障碍的发病率逐年增加。在一些特殊场合,如:在太空中,航天活动的成功与否很大程度上取决于航天员^[1],在航天员进入空间站工作后,由于长期在

封闭、狭小的太空舱中处于失重状态,航天员极易出现焦虑、抑郁、烦躁等情绪状态,影响航天员的身心健康和作业质量^[2]。故在必要的时间进行适当的情绪调节十分必要。

目前情绪调节方法主要包含心理疗法和药物治疗等,其中心理疗法只适用于日常生活状态,对于航天员的特殊生存环境或危急情况,心理疗法很难实现且奏效;药

物疗法会产生一定的副作用。放松训练作为一种非侵入的自然交互方式,由于其无痛、无创伤且没有副作用、也不会出现心理问题的尴尬等优点,受到越来越多的研究者的关注,是调节焦虑及抑郁情绪的有效方法,在载人航天的特殊环境中有望缓解航天员的负性情绪。

古老中国的气功、日本的坐禅、印度的瑜伽与冥想、近代才有的美国渐进性放松训练、德国的自生训练都是通过放松训练从而治疗一些疾病^[3]。经长时间的实践证明,这些形式花样的放松训练使人进入放松状态,当人进入放松状态时,心率、血压、皮肤电流、呼吸频率、系统性骨骼肌张力降低,肌电活动更加稳定,头脑清晰,全身舒适。以上状态的改变在很大程度上是由于神经调节,进而影响身体的各个机能指标,所以放松训练确实可以对人们的疾病进行预防或调节^[4]。

自 20 世纪 20 年代以来,检测到肌电活动开始,人们就是将反馈信息(例如肌电、血压、心率、脑电等)作为调整机体功能的方式从而实现预防疾病和治疗疾病的目的。近年来,通过功能磁共振成像反馈技术可以实时观看到自己的大脑活动进而完成情绪训练,但功能磁共振成像反馈技术时间分辨率低,具有一定的局限性,而且设备价格昂贵、体积巨大,在实际生活中不方便使用,特别是在某些特殊场合或环境,很难进行相应的训练。2002 年,Monderer 把脑电生物反馈称为神经反馈,他指出通过选择性的抑制或增强特定脑电波段可以达到调节脑功能的效果。在神经反馈期间,大脑状态向预定设计的目标值偏移时,获得正向鼓励,从而促进被试者大脑状态正方向的偏移;但是在大脑状态向预定反方向偏移的情况下,反馈信号会出现警示或惩罚的作用,以此提醒被试者,达到逆转或阻断被试者的大脑偏移倾向状态的效果。因此,通过脑电信号以反馈形式进行情绪调节的训练方式受到越来越多的医学和科研工作者的青睐^[5]。脑电信号(electroencephalogram, EEG)是由大脑神经元活动产生的一种非线性、非平稳、随机微弱信号^[6-7],其产生的机理比较复杂冗复杂,但蕴含着极为丰富的信息量。已有的神经心理学研究发现,脑电波中 α 波段是成人在安静放松状态下的主要活动节律,在整个脑电能量中占有很大的比重。因此,可以通过对 α 波段的训练,帮助患者放松,脑电成分有序化增加。

神经反馈领域自 20 世纪 50 年代末产生,但发展不稳定且缓慢,直到近几年才得到迅速发展^[8],但目前人们对神经反馈效果的有效性尚存在疑问,且缺乏客观的评价指标。目前常用的评价指标为临床疗效与主观反馈。

综上所述,本文搭建了一套基于脑电 α 波的神经反馈放松训练系统,并采集分析了 20 名被试(实验组:10 名;对照组:10 名)放松训练前后的脑电数据,通过对比训练前后的 α 波指数相对总功率值从而判断该放松训

练系统的有效性。

1 放松训练系统理论分析

放松训练系统主要由 3 个部分组成:脑电采集模块、特征提取模块、反馈模块。系统如图 1 所示。

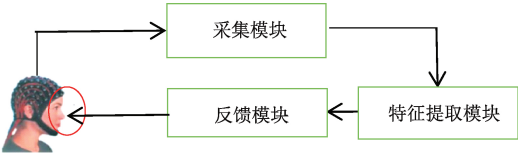


图 1 放松训练流程

Fig.1 The flow chart of relaxation training

1) 脑电采集模块

本实验脑电信号采集采用的设备为美国的 Neuro Scan 公司生产的 Neuroscan SynAmps² EEG 放大器与 64 导 EEG/ERP 脑电信号实验采集和处理系统;电极成分为 Ag/AgCl;电极帽电极的放置标准 10~20 系统^[7,9-10]。采样率 1 000 Hz,1~100 Hz 带通滤波,右耳乳突(M2)作为参考电极,接地电极位于脑部前额顶侧中央处。预处理模块包括变参考到双耳平均,降采样到 500 Hz。

2) 特征提取模块

在频域分析方法中,功率谱估计是一种经常使用的能量分析方法,该分析方法的原理是用已观测到数量固定的样本数据来估计一个平稳随机信号的功率谱。本实验的功率谱估计采用的方法为 Welch 算法谱估计^[11]。

Welch 算法谱估计的原理是先将数据分段并加窗处理,然后计算每段功率谱的值,最后进行平均得到平均功率谱^[12]。其算法如式(1)

$$G_M^L(\omega) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L G_{M,l}(\omega) \tag{1}$$

显而易见的是, L 与 M 成反比。为了削弱段数增加同时造成分辨率的下降,本实验在数据分段时将每段数据都重叠一部分^[12]。本实验中共包含 $60 \times 6 = 360$ 维特征维数,60 代表 60 导脑电,6 代表每一导分解的 6 个频段,如下:

- (1) δ 频段:0.5~4 Hz
- (2) θ 频段:4~8 Hz
- (3) α 频段:8~13 Hz
- (4) β_1 频段:13~30 Hz
- (5) β_2 频段:30~44 Hz
- (6) γ_1 频段:44~100 Hz

分别将以上频段功率谱密度按照各频率点对应的幅值相加,求功率谱和(功率谱能量值)^[12]。

3) 反馈模块

(1) 反馈参数

放松状态下,枕区的 α 节律明显,由此在脑电反馈系统的研究中, α 波的同步特性是作为反应放松程度的一个指标^[13]。健康成人 α 波的频率范围为 8~13 Hz,平均振幅在 30~50 μV ,主要分布于顶枕区,一般呈正弦波样。大多数健康成人的脑电以 α 波为主要成分,在觉醒安静闭目状态时出现的数量最多且振幅也最高。 α 节律分为 3 类:①受视觉影响较大主要分布在枕区的 α 节律,此节律也是本实验主要分析、提取、反馈的节律;②受运动和体表感觉刺激的主要分布中央运动区域的 Rolandic μ 节律;③受听觉与心理感知影响较多,但因个人分布差异较大的,主要分布于颞中区域 (midtemporal region) 的 α 节律^[14]。

本实验利用脑 α 波指数相对总功率,即 α 波功率在全部脑波所产生的功率中所占的比重为反馈值进行反馈。由于 δ 波是在非快速眼动睡眠第 3 时期时出现的脑波; γ 幅值较低不易识别,故参与反馈的脑电波为 4~30 Hz,即 β 、 θ 、 α 频段。计算方法如式(2)。

$$P = \alpha / \beta + \theta + \alpha \tag{2}$$

(2) 反馈界面

实验中反馈界面如图 2 所示。

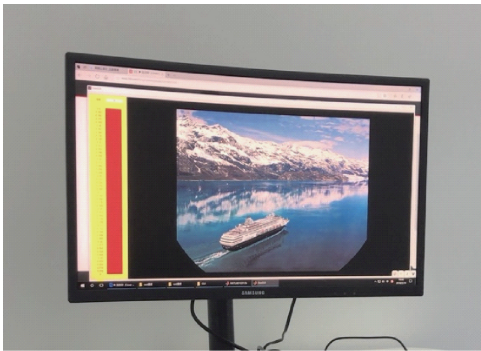


图 2 放松训练反馈界面

Fig.2 Relaxation training feedback interface

本实验的视觉反馈因其特殊的应用场合和用途,故对反馈界面进行了针对性设计^[15]。反馈界面左边的小窗口为 α 波指数相对总功率的实时显示,即红色液柱部分,在红色液柱左侧标有刻度值,范围分布为 0~0.4,分度值为 0.008,共 51 个数值。且此数值在在线反馈系统中实时改变,每当系统计算出一个 α 波指数相对总功率值时,红色液柱即上升至该刻度值的位置。反馈界面的右窗口为一个渐变的动画设计,在训练开始,窗口为一黑色幕布,随着训练的展开,该动画将以渐变效果展开即黑色部分以圆形方式展开。黑色幕布部分展开大小这一变量因素与被试者放松程度成

正比。

本实验设定 3 s 的脑电数据作为一个样本,根据式(2)计算并输出一个值,反馈界面根据该数值同步显示相应画面。当 α 波指数相对总功率值越大时,黑色幕布遮挡部分就越小;反之,遮挡部分就越大。被试根据界面中图片相对大小自主进行放松调节,当黑色幕布遮挡部分变小时,被试应尽量继续保持当下状态,反之,被试应调整自己的呼吸,观看反馈界面中的图片进行放松调节,进而使黑色幕布遮挡部分尽可能的小。

实验前,经分析多个非本次实验人员的静息数据,如表 1 所示,可发现同一个人在连续两天内的 α 频段功率谱值相差不大,故本实验为了科学的严谨性,被试者至少间隔一天再进行下一次的 α 放松反馈训练,以判断该训练是否有效果;在选取参考点时,为避免脑电偏侧化的出现,将取值点范围缩小至 CPZ(37)、PZ(46)、POZ(54)、OZ(59)这四处。经分析表 2 的 6 个样本在 4 处导联位置的 α 频段功率谱值,最终将 CPZ 定为取值点。由表格可知正常人的 α 波指数相对总功率在 0.220 0 左右,由此确定反馈界面数值显示区间。

表 1 3 位被试连续两天的 α 波指数相对总功率
Table 1 The relative total power of the α -wave index of three subjects for two consecutive days

天数	导联位置	样本 1	样本 2	样本 3
第 1 天	(cpz) 37	0.244 4	0.232 2	0.252 6
	(pz) 46	0.245 7	0.232 4	0.252 3
	(poz) 54	0.228 7	0.228 7	0.244 3
	(oz) 59	0.252 4	0.236 8	0.246 5
第 2 天	37	0.253 4	0.253 4	0.253 7
	46	0.252 4	0.252 4	0.252 0
	54	0.253 3	0.253 3	0.247 7
	59	0.254 9	0.254 9	0.245 7

表 2 6 位被试不同导联的 α 波指数相对总功率
Table 2 The relative total power of the α -wave index of different leads in the 6 subjects

样本	37	46	54	59
1	0.223 2	0.225 4	0.223 2	0.225 9
2	0.226 4	0.226 9	0.231 9	0.228 4
3	0.222 6	0.224 9	0.223 0	0.224 2
4	0.232 6	0.232 9	0.229 3	0.229 5
5	0.222 8	0.223 4	0.223 5	0.222 6
6	0.226 8	0.229 6	0.220 2	0.223 7

2 实 验

2.1 被试及实验环境

本次实验共招募 20 名被试,男生 10 名,女生 10 名,年龄分布在 21~27 岁,均为受过高等教育的大学生,所有被试者无论男女均为右利手,随机分成实验组 10 人(男性 5 人,女性 5 人)和对照组 10 人(男性 5 人,女性 5 人),无精神病史;智力正常;实验前 24 h 内禁烟禁酒,避免食用含咖啡因的食物,避免服用对神经敏感性有影响的药物;女性被试者应避免经期;无脑电生物反馈训练治疗史、自我感觉压力较大者为佳(从参与积极性角度考虑);实验前签署了知情同意书。在应征者了解试验内容并自愿签署知情同意书后,该应征者正式成为本次试验的被试者^[16]。

在每次做实验之前,要求被试者清洗并吹干头发,清洗时不能使用护发素,以免过多的头皮阻抗对脑电采集造成干扰。在戴电极帽时用去角质的啫喱膏对耳后安放电极的皮肤表面进行清洁,增加耳后皮肤表面的导电性,再用医用胶带粘贴涂有导电膏的电极^[17]。被试者实验中出现走神、发呆、疲劳过度打哈欠等,在实验之前若自己知情,可提前告知,若遇突发事件发生(以上任意情况之一)则停止实验,适当休息再重新开始测试(若被试者实验中出现走神情况,该被试者的脑电信号将不作为选用数据)。正式实验时,室内温度 27℃ 左右,环境保持安静,被试手机静音或关机,避免电磁信号影响实验结果。

2.2 实验方法

1)8 min 睁闭眼范式

睁眼状态时脑电的信号由于受到眨眼的影响较大,但在闭眼静息的状态下脑电的信号较为稳定。因此,本实验采取的静息脑电采集方式为睁闭眼静息方式,且两者高度相关,Spearman Brown 曾验证了睁闭眼条件下的可靠性为 0.91^[18]。

本实验采用 OCCOCOOC 模式,O 代表睁眼,C 代表闭眼,即这个模式为:睁眼 1 min,闭眼 2 min,睁眼 1 min,闭眼 1 min,睁眼 2 min,闭眼 1 min,共计 8 min 的正闭眼交替循环的静息脑电采集。在测试过程中,被试者头戴耳机,当提示音提示“请睁眼”时,被试者应保持睁眼状态,直至提示音提示“请闭眼”,被试者转换为闭眼状态,直至再次听到“请睁眼”,以此依次交替转换睁、闭眼状态,具体设置可见图 3。

2)实验流程

本实验共有 20 名被试者参加,随机分成实验组和对照组。每名被试者至少间隔一天的时间再进行下一次的

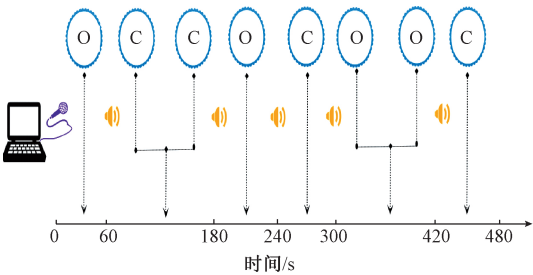


图 3 8 min 睁闭眼范式

Fig.3 Eight-minute open and close eye paradigm

测试,每人参加 3 次测试,共有 18 人(实验组 9 人;对照组 9 人)完成了 3 次完整的放松训练。单次放松训练流程设计如图 4 所示。

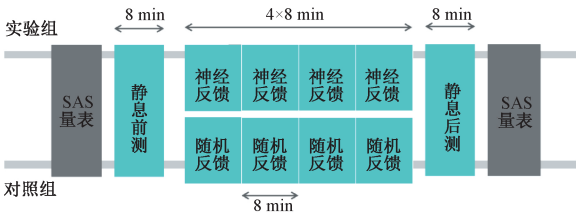


图 4 单次实验流程设计

Fig.4 Flow chart of single experiment

实验组:

- (1)填写焦虑自评量表(SAS)。
- (2)8 min 的前测睁闭眼静息脑电前测采集。
- (3)4 次 8 min 的 α 神经反馈训练。训练时被试者需持续注视反馈界面,每次训练记录 8 min 的脑电数据,适当休息接着做下一组 α 神经反馈训练,持续 4 次。
- (4)8 min 的睁闭眼静息脑电后测采集,记录脑电数据。
- (5)再次填写焦虑自评量表(SAS)。

对照组:

将实验组训练流程步骤(3)取消,替换为 4 次 8 min 的随机反馈训练,即图片根据一组与正常人 α 波指数相对总功率接近的随机数组数值进行展开。

2.3 结果分析

1)焦虑自评量表(SAS)结果分析

如图 5 所示,实验组被试者 SAS 得分由 (30.00 ± 6.44) 分在放松训练后降低至 (28.42 ± 6.14) 分,差异有显著性($t=2.411, P<0.05$);对照组被试者 SAS 得分 (27.58 ± 7.00) 分在放松训练后升高至 (27.75 ± 7.81) 分,差异不具有显著性($t=-0.114, P=0.911$)。

2)脑电数据结果分析

如图 6 所示,横轴为实验组与对照组前测 α 波指数相对总功率,纵轴为实验组与对照组后测 α 波指数相对

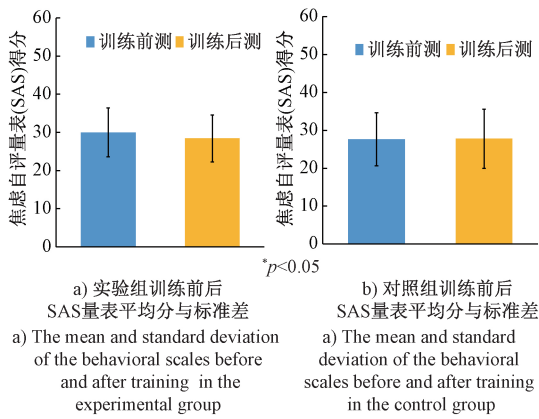


图5 实验组与对照组 SAS 量表训练前后平均分与标准差
Fig.5 Mean and standard deviation of SAS scales before and after the training in the experimental group and the control group

总功率。在实验组中,9 名被试的数据均在斜率为 1 的线以上,说明训练后测的 α 波指数相对总功率较前测有明显提高,且具有显著性差异($t=-4.256, P<0.05$);在对照组中,9 名被试的数据大部分在斜率为 1 的线左右,说明训练后测的 α 波指数相对总功率较前测几乎没有提高,且不具有显著性差异($t=-0.402, P=0.698$)。以上结果可知基于脑电 α 波的神经反馈放松训练系统取得了较好的效果。

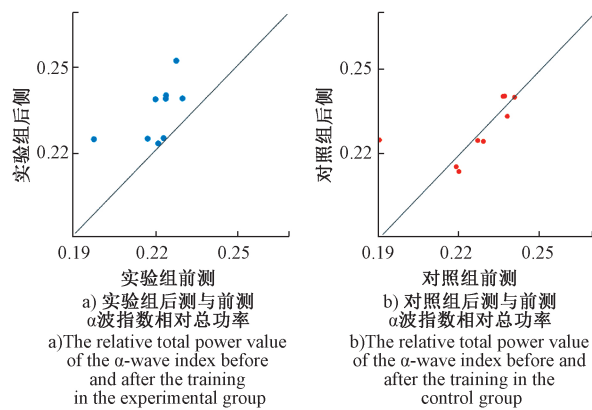


图6 实验组与对照组后测与前测 α 波指数相对总功率值
Fig.6 The relative total power value of the α -wave index before and after the training in the experimental group and the control group

3 实际应用展望

随着脑神经科学的快速发展,脑电反馈放松训练系统有望在特种医学和临床康复治疗中成为新的治疗焦虑等负面情绪的手段。在特殊环境下,如在密闭太空舱中,当航天员产生焦虑等负面情绪时,可运用脑电反馈放松训练系统这种自适应神经调控疗法,达到缓解宇航员负

性情绪的作用。由于不需外接仪器施加刺激,更容易被宇航员接受。在临床环境下,传统的焦虑治疗方法主要分为药物治疗、放松训练、系统脱敏训练等。药物疗法见效比较快,但有一定的副作用及风险;放松训练见效快但不持久;系统脱敏训练见效慢。许多心理学家与临床主治医生都在积极探索更加安全、有效的缓解焦虑的治疗方法^[19]。崔燕、元小冬、张菁等^[20-21]利用神经反馈对卒中后焦虑患者进行调控,效果显著。2015 年,首都医科大学康复医学院采用神经反馈治疗广泛性焦虑障碍患者情绪的研究为神经反馈在情绪调控上的应用提供了有力依据^[22]。由于脑电反馈放松训练系统具有安全、方便的特点及无创、无刺激、无副作用等优点,有望在特殊环境及临床上实现应用和推广^[23-26]。

4 结论

本文研究的神经反馈技术是建立在脑电信号理论基础上的,与 fMRI、MEG 等神经成像技术相比,EEG 不仅具有较高的时间分辨率,既能用于研究外来刺激下的功能反应,也能用来研究自发的功能状态,而且是一种完全无创、无危险、费用相对低廉、简便易用的方法,并且较好地实现了人体信息检测与智能人机交互,巧妙的连接了大脑与外部环境,更适于神经反馈技术的实际应用与推广发展。本文的研究工作初步完成了基于脑电的神经反馈放松训练系统,实现了在线反馈系统的搭建,实验的数据分析显示该系统实现了放松训练的效果,具有可行性。

参考文献

[1] MOURIAUX P, VARNOTEAUX P. Alexandre Ananoff (1910-1992): 30 years to promote astronautics before Sputnik[J]. Acta Astronautica, 2014, 93(1): 266-278.

[2] 秦海波,白延强,吴斌,等. 载人航天飞行中的情绪研究进展[J]. 航天医学与医学工程, 2012, 25(4): 302-306.

QIN H B, BAI Y Q, WU B, et al. Progress of study on emotion in manned spaceflight[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2012, 25(4): 302-306.

[3] 任俊,黄璐,张振新. 冥想使人变得平和人们对正、负性情绪图片的情绪反应可因冥想训练而降低[J]. 心理学报, 2012, 44(10): 1339-1348.

REN J, HAUNG L, ZHANG ZH X. Meditation makes a peaceful state of mind: peoples positive and negative emotional response can be reduced by meditation training[J]. Acta Psychologica Sinica, 2012, 44(10): 1339-1348.

[4] 杨媛媛,蔡洁,潘柳萍,等. 合理情绪疗法、心理干预及

- 放松训练等方法联合对发生不良事件护士焦虑症状的影响[J]. 中国保健营养, 2016, 26(3): 8-9.
- YANG Y Y, CAI J, PAN L P, et al. The effect on anxiety of nurses undergoing nursing adverse events by the associated methods of rational emotive therapy, psychological intervention and relaxation training and so on[J]. China Health Care & Nutrition, 2016, 26(3): 8-9.
- [5] 蒲贤洁. 基于脑电的神经反馈技术及应用研究[D]. 西安: 电子科技大学, 2011.
- PU X J. Research on neurofeedback technology and application based on EEG[D]. Xi'an: University of Electronic Science and Technology of China, 2011.
- [6] 罗志增, 李亚飞, 孟明, 等. 一种基于二代小波变换与盲信号分离的脑电信号处理方法[J]. 航天医学与医学工程, 2010, 23(2): 137-140.
- LUO Z Z, LI Y F, MENG M, et al. A processing method of EEG signals based on second generation wavelet transform and blind signal separation[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2010, 23(2): 137-140.
- [7] 周福超, 徐进, 廖文. 脑-机接口系统关键技术研究[J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(5): 68-72.
- ZHOU F CH, XU J, LIAO W. Research on key technologies of brain computer interface system[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2018, 37(5): 68-72.
- [8] JACEK R, KATERZYNA J, KATARZYNA P, et al. The do's and don'ts of neurofeedback training: A review of the controlled studies using healthy adults[J]. Frontiers in Human Neuroscience, 2016, 10.
- [9] 张文渊. 由脑电图检查中的“10-20 国际标准导联”想到的[J]. 癫痫与神经电生理学杂志, 2011, 20(1): 51-51, 55.
- ZHANGWEN W Y. Thought of “10-20 international standard leads” in EEG examination[J]. Journal of Epileptology and Electroneurophysiology, 2011, 20(1): 51-51, 55.
- [10] 万柏坤, 朱欣, 杨春梅, 等. ICA 去除 EEG 中眼动伪差和工频干扰方法研究[J]. 电子学报, 2003, 31(10): 1571-1574.
- WAN B K, ZHU X, YANG CH M, et al. Study on applying independent component analysis of remove blink artifacts and power noise in EEG[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(10): 1571-1574.
- [11] 伊鑫, 曲爱华. 基于 Welch 算法的经典功率谱估计的 Matlab 分析[J]. 现代电子技术, 2010, 33(3): 7-9.
- YI X, QU AI H. MATLAB simulation analysis of power spectrum estimation based on welch method[J]. Modern Electronics Technique, 2010, 33(3): 7-9.
- [12] 金连文, 韦岗. 现代数字信号处理简明教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- JIN L W, WEI G. Concise course of modern digital signal processing[M]. Beijing: Tsing Hua University Press, 2004.
- [13] 吴泽为. 情绪事件的脑电图非线性动态分析的研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2012.
- WU Z W. Nonlinear dynamic analysis of EEG in emotional events[D]. DaLian: DaLian JiaoTong University, 2012.
- [14] 熊红川. 脑电 Alpha 节律研究[D]. 西安: 电子科技大学, 2010.
- XIONG H CH. Study on electroencephalic alpha rhythm[D]. Xi'an: University of electronic science and technology, 2010.
- [15] 安兴伟, 曹勇, 焦学军, 等. 基于视听交互刺激的认知机理与脑机接口范式研究进展[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(7): 983-993.
- AN X W, CAO Y, JIAO X J, et al. Research on cognitive mechanism and brain-computer interface application in visual-auditory crossmodal stimuli[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2017, 31(7): 983-993.
- [16] 郭晋敏, 张莉, 舒鹤, 等. 我院药物临床试验知情同意书设计及签署情况分析[J]. 中国医药导报, 2014, 11(12): 151-154.
- GUO J M, ZHANG L, SHU H, et al. Design and signature of informed consent form from clinical trial drugs of our hospital[J]. China Medical Herald, 2014, 11(12): 151-154.
- [17] 胡万宝. 人脸识别中的特征分析[J]. 北京化工大学学报, 2012, 19(5): 122-127.
- HU W B. Feature analysis of face recognition[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2012, 19(5): 122-127.
- [18] DIRK ADOLPH, JÜRGEN MARGRAF. The differential relationship between trait anxiety, depression, and resting frontal a-asymmetry[J]. Neural Transm, 2017, 124(3): 379-386.
- [19] 曹佳佳, 衣峰. 基于神经反馈的焦虑缓解平台研究与设计[J]. 软件导刊, 2014, (2): 89-90, 91.
- CAO J J, YI F. Research and design of anxiety relief platform based on neurofeedback[J]. Software Guide,

- 2014,(2):89-90,91.
- [20] 崔燕,元小冬,申健,等. 脑电生物反馈对脑卒中后心理障碍及日常生活能力的影响[J]. 中国健康心理学杂志,2014(9):1326-1328.
- CUI Y, YUAN X D, SHEN J, et al. Impact of EEG biofeedback on psychological disorder efficacy and ability of daily living of post-stroke[J]. China Journal of Health Psychology, 2014(9):1326-1328.
- [21] 张菁,罗瑜,杨国平. 脑电生物反馈治疗脑卒中后焦虑障碍的临床疗效研究[J]. 中国健康心理学杂志, 2011,19(11):1318-1320.
- ZHANG J, LUO Y, YANG G P. Study on the effect of EEG biofeedback in the treatment of post-stroke anxiety disorder[J]. China Journal of Health Psychology, 2011, 19(11):1318-1320.
- [22] 徐莹,宋鲁平. 神经反馈对广泛性焦虑障碍患者的情绪及负性注意偏向的影响[C]. 北京国际康复论坛, 2014.
- XU Y, SONG L P. Effect of neurofeedback on emotional and negative attention bias in patients with generalized anxiety disorder[C]. Beijing International Rehabilitation Forum, 2014.
- [23] 陆红宇,宋鲁平. 神经反馈在卒中后抑郁和焦虑中应用的研究进展[J]. 中国卒中杂志, 2016, 11(9): 786-790.
- LU H Y, SONG L P. The research progress of applications of neurofeedback in post-stroke depression and anxiety [J]. Chinese Journal of Stroke, 2016, 11(9):786-790.
- [24] 徐国政,宋爱国,高翔,等. 基于焦虑情绪与混杂控制的机器人辅助临床康复实验[J]. 仪器仪表学报, 2017,38(10):2364-2372.
- XU G ZH, SONG A G, GAO X, et al. Robot-assisted clinical rehabilitation experiment based on anxiety emotion and hybrid control [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017,38(10):2364-2372.
- [25] 徐宝国,何小杭,魏智唯,等. 基于运动想象脑电的机器人连续控制系统研究[J]. 仪器仪表学报,2018, 39(9):10-19.

XU B G, HE X H, WEI ZH W, et al. Research on continuous control system for robot based on motor imagery EEG [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018,39(9):10-19.

- [26] 明东. 人体信息检测与智能人机交互[J]. 仪器仪表学报,2017,38(6):1305-1306.

MING D. Human information detection and intelligent human-Computer interaction [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017,38(6):1305-1306.

作者简介



张力新,1993 年于天津大学获得硕士学位,现为天津大学教授,主要研究方向为生物医学电子学,心电、超声等。

E-mail: lxzhang@tju.edu.cn

Zhang Lixin received his Ph. D. degree in 1993 from Tianjin University. Now, he is a professor in Tianjin University. His main research interest includes biomedical electronics, electrocardiography, and ultrasound.



郝鑫宇,2018 年于河北工业大学获得学士学位,现为天津大学生物医学工程专业在读研究生,主要研究方向为神经康复与脑—机接口。

E-mail: xyhao@tju.edu.cn

Hao Xinyu received her B. Sc. degree in 2018 from Hebei University of Technology. Now, she is a graduate student in biomedical engineering in Tianjin University. Her main research interest is neural rehabilitation and brain-computer interface.



刘爽(通信作者),2018 年于天津大学获得博士学位,现为天津大学讲师,主要研究方向为情绪脑电的响应机制,识别方法和调控技术,以及抑郁的脑机制研究。

E-mail: shuangliu@tju.edu.cn

Liu Shuang (Corresponding author) received her Ph. D. degree in 2018 from Tianjin University. Now, she is a lecturer in Tianjin University. Her main research interest includes emotional EEG response mechanisms, recognition methods and control techniques, and brain mechanisms of depression.