



注意网络定向状态下多通道脑电能量空间分布的实验设计

刘爱丽¹, 刘迢迢², 白文文^{2*}

(1. 天津医科大学 基础医学院, 天津 300070; 2. 天津医科大学 生物医学工程与技术学院, 天津 300070)

摘要: 在学科融合、多学科交叉等“新工科”背景下, 该文将科研项目研究与本科实验教学相结合, 设计了“注意网络定向状态下多通道脑电能量空间分布”综合实验, 以健康受试者在注意网络定向状态下的多通道脑电信号作为研究对象, 分析脑电特征频段能量的空间分布, 为注意功能机制研究提供支持。该实验设计使学生将理论知识运用于实践, 掌握脑电信号预处理、时频分析、频段提取及能量分布等分析方法, 提高其分析和解决问题的实践能力, 开拓了学生的科学视野, 提高科研兴趣, 锻炼科研思维, 有助于培养未来新兴产业需要的高素质复合型“新工科”人才。

关键词: 实验设计; 注意网络; 脑电; 定向状态; 特征频段

中图分类号: R318; R741.044

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230471

Experimental Design on Power Distribution of Multi-Channel EEGs under Orienting in the Attention Network Test

LIU Aili¹, LIU Tiaotiao², BAI Wenwen^{2*}

(1. School of Basic Medicine, Tianjin Medical University, Tianjin 300070, China;

2. School of Biomedical Engineering and Technology, Tianjin Medical University, Tianjin 300070, China)

Abstract: Under the background of “new engineering” with discipline integration, a practical training course on electroencephalogram (EEG) processing and analysis for the senior undergraduates majoring in biomedical engineering is set up. In this experiment, the multi-channel EEGs of healthy subjects under orienting in attention network are taken as the research objective, and the spatial distribution of EEG characteristic band power is analyzed, to provide support for the study of the mechanism of attention. Through this experiment, students are required to apply theoretical knowledge to practice to master the skills in data preprocessing, time-frequency analysis, frequency band extraction and power distribution of EEG signals, which improve their ability to analyze and solve problems independently. Furthermore, the application of scientific research to undergraduate experimental teaching can broaden students’ scientific horizons, improve their interest in scientific research, and exercise their scientific research thinking. It is definitely helpful to cultivate high-quality compound “new engineering” talents needed by emerging industries in the future.

Key words: experimental design; attention network; EEG; orienting; characteristic frequency band

脑电信号(EEG)是人类大脑活动的电生理信号, 它能够提供有关大脑功能和认知状态的重要信息。在生物医学工程领域, 脑电信号处理与分析应用广泛, 主要包括脑机接口系统、脑电诊断等。在学科融合、多学科交叉等“新工科”背景下, 各一流高校生物医学工程专业逐步在实验教学中增加综合性实验来提高学生创新意识 and 创新能力。针对本科生的课程基础和学习能力,

本文设计了“注意网络定向状态下多通道脑电能量空间分布”综合实验, 为学生提供理论联系实际的实践体验。

注意是一系列影响获取信息处理优先权意识的大脑网络的活动, 它可以概念化为一个具有特定功能和解剖学区域的系统, 即注意网络^[1]。在注意网络理论中, 又分为警觉(alerting)、定向(orienting)和执行控制(executive control)3个子网

收稿日期: 2023-10-09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61971311); 天津市教委科研计划项目(2021KJ260)。

作者简介: 刘爱丽, 硕士, 实验师, 主要从事神经工程和神经生物学方面的研究。E-mail: liuaili6201@tmu.edu.cn

*通信作者: 白文文, 博士, 副教授, 主要从事神经工程方面的研究。E-mail: baiwenwen@tmu.edu.cn

络^[2]。这 3 个子网络体现了个体获得并维持对某一类型信息或目标的警觉状态、对外部有用信息的选择性注意以及处理冲突信息等方面的能力^[3-4]。对注意网络的研究促进了认知科学和脑科学的发展，加深了对神经和精神系统疾病机制的理解^[5-6]。如阿尔茨海默症、注意缺陷多动障碍、帕金森症和抑郁症等疾病患者在学习与注意等方面存在的认知功能障碍，研究表明患者存在注意网络及其子网络受损^[7-10]。

定向网络主要负责在不同的感知信息中，将注意的焦点转移至特定的输入，是注意网络的重要组成部分^[11]。本实验以健康受试者在注意网络定向状态下多通道脑电作为研究对象，应用时频分析计算频段能量，通过统计比较，确定注意网络定向状态下脑电信号的特征频段，分析健康受试者在注意网络定向状态下脑电特征频段能量的空间分布，为注意网络定向状态的机制研究提供支持。

本实验目的是激发本科生对脑科学研究的兴趣，开拓科学视野。通过实际脑电数据的处理与分析，加深对相关理论概念的理解，提高学生实践能力和创新能力，培养未来新兴产业和新经济需要的高素质复合型“新工科”人才^[12-14]。

1 实验设计

1.1 受试者

实验数据来源：天津医科大学神经工程实验室。受试者为 6 名健康在校大学生，年龄 20~25 岁，视力或者矫正视力正常，右利手，均无神经及精神方面疾病。实验过程严格遵守相关医学伦理和知情同意等问题的有关规定、要求，所有受试者均以书面形式被告知本实验内容，本实验中的所有受试者均签署知情同意书。

1.2 注意网络测试

注意网络的 3 个子网络可以通过文献 [1] 设计的注意网络测试(attention network test, ANT)来测量。注意网络测试的实验范式由线索提示目标任务和冲突任务组成，实验逻辑是通过不同的视觉提示任务来测量警觉和定向网络的效率，通过冲突任务来测量执行控制网络的效率，从而量化了 3 个网络的加工效率^[15]。

ANT 的经典实验范式^[15]如图 1 所示。首先，一个固定的十字形符号“+”会始终出现在屏幕的中心点上。符号“+”即为注视点，受试者在实验

过程中，在没有提示和目标出现时要一直注视着它。在每次实验中，会随机出现 3 种提示类型中的其中一种。星号“*”为提示符号，3 种提示类型分别为无提示、中心提示和空间提示，提示出现的持续时间为 200 ms。在提示出现后的 300~1450 ms 可变时间段内，目标会出现。目标是一排箭头(由 5 个箭头构成)中的中间箭头，在目标的左翼和右翼各有两个箭头。当目标的指向和两翼相同时，称为一致的情况；当目标的指向和两翼相反时，称为不一致的情况。

1) 无提示类型为在没有任何提示情况下，目标会直接随机出现在注视点上方或下方。

2) 中心提示类型出现后，目标也会随机出现在注视点上方或下方。

3) 空间提示是在注视点上方或下方出现提示，目标会出现在对应的地方。

受试者要在 2000 ms 的时间内判断目标的方向，在受试者做出判断后，目标和侧翼都会消失。目标和下次目标出现的时间间隔为 3000~4200 ms。实验时，受试者保持静坐、双脚平放，使用左手食指和右手食指做出判断。

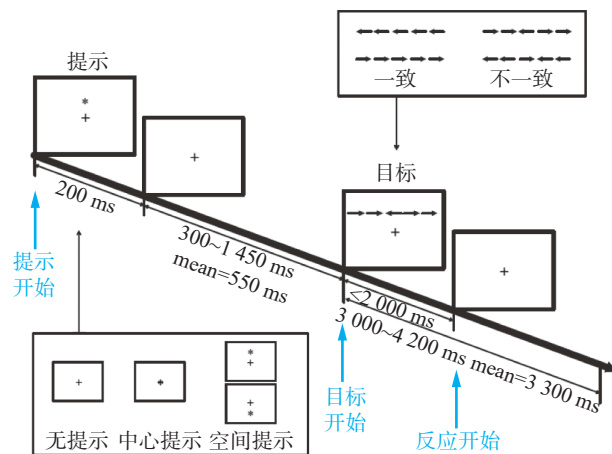


图 1 ANT 范式示意图

本实验目的是注意网络定向状态下多通道脑电特征频段能量的空间分布，与定向网络相关的提示类型是中心提示和空间提示，因而接下来做脑电信号数据处理时均截取提示出现前 50 ms 和提示出现后 450 ms 的脑电数据。

1.3 多通道脑电信号采集

该实验使用美国 Neuroscan 公司的 SynAmps 放大器记录注意网络测试中 32 通道脑电信号，Ag/AgCl 电极位置按照国际 10-20 系统放置。电极

阻抗保持在 5 kΩ 以下。1-32 通道分别对应电极 Fp1、Fp2、AF3、AF4、F7、F3、Fz、F4、F8、FC5、FC1、FC2、FC6、C5、C3、Cz、C4、C6、CP5、CP1、CP2、CP6、P7、P3、Pz、P4、P8、PO3、PO4、O1、Oz 和 O2。参考电极位于 Cz 和 Cpz 连线中点上,接地电极位于 Fpz 和 Az 连线中点上,同时记录水平眼电和垂直眼电。本实验中,脑电信号的采样频率为 1000 Hz。

1.4 脑电信号预处理

由于脑电采集过程中会混入噪声、干扰等内外界因素,而且脑电信号具有随机性强、非线性特征显著等特点^[16],故在分析脑电数据之前应对其进行预处理。预处理的过程主要包括去除工频干扰、去基线漂移和去眼电。

工频干扰是 50 Hz 市电以电磁波辐射形式对电子设备和电器设备产生的干扰,对脑电进行频谱分析时,表现为在 50 Hz 处出现一个尖峰。在本实验中,首先通过快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)得到信号的功率谱,观察是否存在 50 Hz 工频干扰。若存在工频干扰,则设计巴特沃斯陷波器将其去除。

基线是频率在 0.05~1 Hz 左右的低频信号。产生基线的原因很多,主要有环境温度变化的影响,以及某些电子学元器件的不稳定性和波谱仪在电路设计方面的不完善性等。实验中首先使用截止频率 0.5 Hz 的高通滤波器去除漂移对应的低频成分,随后利用 MATLAB 中的 polyfit 和 polyval 函数产生最高阶数为 5 阶的多项式拟合基线趋势予以去除。

眼电分为水平眼电和垂直眼电。垂直眼电的幅值在 200 μV 以上,眼动时间在 500 ms 以内,因此可通过设置去除幅值 200 μV 前后 200~300 ms 的部分来去除垂直眼电。而水平眼电对脑电的影响因人而异,根据需要去除。实验采用 MATLAB 中的 EEGLAB 工具箱处理眼电,利用 ICA 协方差方法加以去除。

1.5 脑电信号的时频分析

对脑电信号进行短时傅里叶变换(short time Fourier transform, STFT)来实现时频分析,以观察脑电信号随时间和频率变化所发生的变化。STFT 的主要原理是将一个可移动的平滑时间窗加到脑电信号上,对窗内的脑电信号进行 FFT,得到该时间内信号的功率,移动时间窗从而求出整

个时间范围内脑电信号的功率谱,通过这种方法即可得到脑电信号在整个时间段各频段分量的分布情况。

短时傅里叶变换的公式如下:

$$S_{\text{STFT}}(f, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} [X(t)g(t-\tau)e^{-j2\pi ft} dt]$$

式中: $X(t)$ 是脑电信号, $g(t)$ 是时域局部化的窗函数, τ 是移动步长。假定信号在某个时间窗内是平稳的、移动窗函数,从而计算整个时间范围内的功率谱。经过 STFT 之后,得到各个通道内信号能量的分布情况。在该实验中,进行时频分析时所选的窗函数为 hamming 窗,窗宽设置为 256。

2 实验结果

2.1 脑电信号的预处理结果

1) 去除工频干扰

对脑电信号进行 FFT,观察 50 Hz 处是否有工频出现。若存在,则利用 MATLAB 设计巴特沃斯陷波器对信号进行处理。以某名受试者的单个导联脑电数据为例,展示去除工频干扰前后的功率谱图,结果显示 50 Hz 的频率成分已被去除,如图 2 所示。

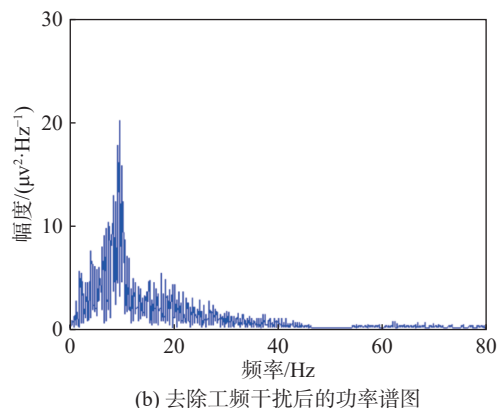
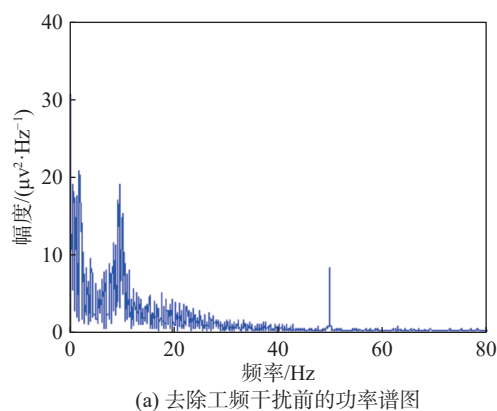


图 2 去除工频干扰前后脑电信号功率谱图

2) 去除基线漂移

在采集脑电信号的过程中，由于信道传感器物理特征的环境因素，可能会引起脑电信号基线漂移，可以通过多项式拟合方法对其进行去基线处理，并通过验证均值是否为 0 以保证去基线漂移的效果。本实验中离线分析时以所有电极的平均电位为参考，以某名受试者的 4 个导联脑电数据为例，去除基线漂移的结果如图 3 所示。

2.2 时频分析结果

本数据集包含了无提示、中心提示和空间提示 3 种情况下的被试反应数据。根据实验范式划分为提示时段(选取提示开始前 50 ms 至线索开始后 450 ms)、目标时段(选取目标开始前 100 ms 至目标开始后 700 ms)和反应锁定时段(选取反应前 300 ms 至反应后 300 ms)3 部分。定向效应定义为空间提示与中心提示的差值。因此，需要截取两种空间提示(up/down)及中心提示(center)所对应的线索时段数据。

根据文献报道选取 14 个导联(FP1、FP2、F7、F3、F4、F8、C3、C4、P7、P3、P4、P8、O1、O2)进行时频分析。分别对受试者的脑电数据进行短时傅里叶变换，获得时频分布。中心提示下和空间提示下的多通道时频分析结果如

图 4 和图 5 所示。

进一步选取能量最大的 7 个导联(FP1、FP2、F3、F4、P7、P3、O1)作为特征通道进行分析。图 6 所示为空间提示减去中心提示得到的脑电的定向效应。结果发现，定向效应的特征频段为 θ 频段，且在刺激后 200 ms 左右出现能量的集中增加。

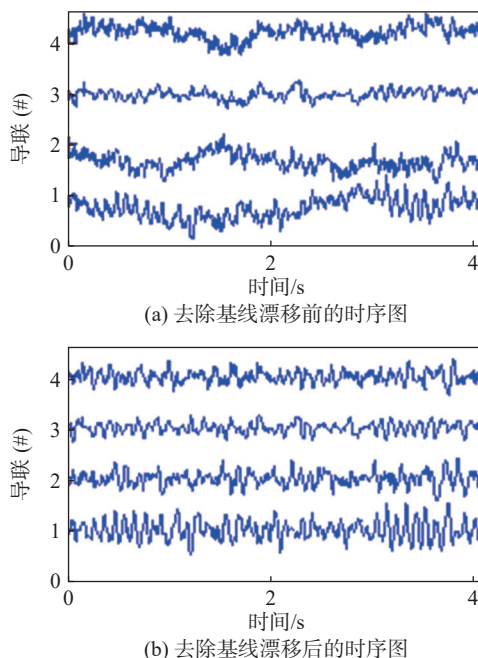


图 3 去除基线漂移前后的脑电信号时序图

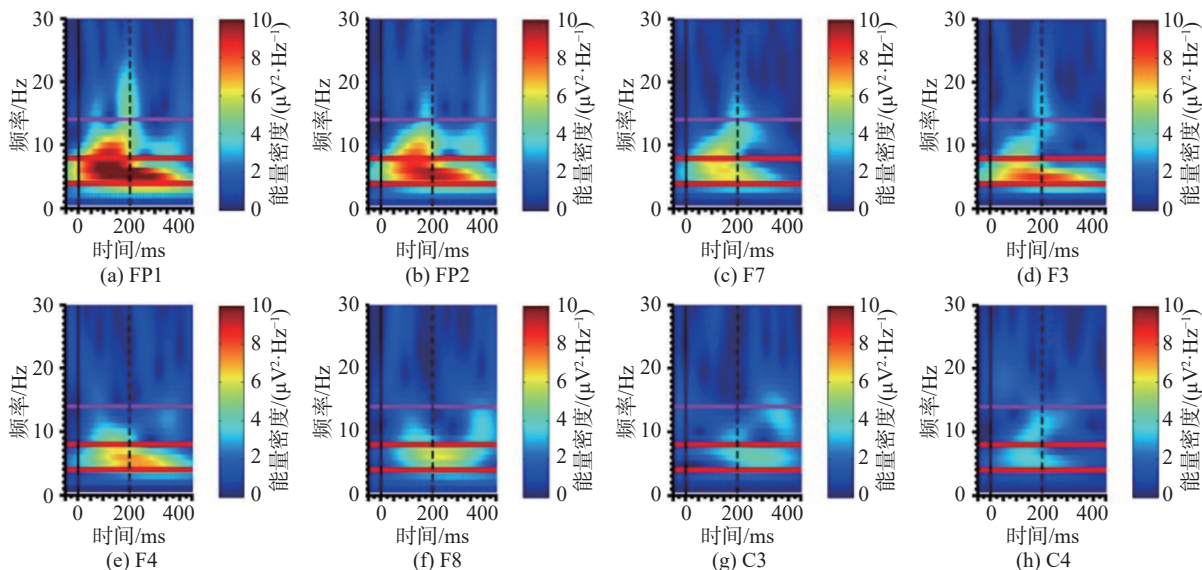


图 4 中心提示下多通道时频分析结果

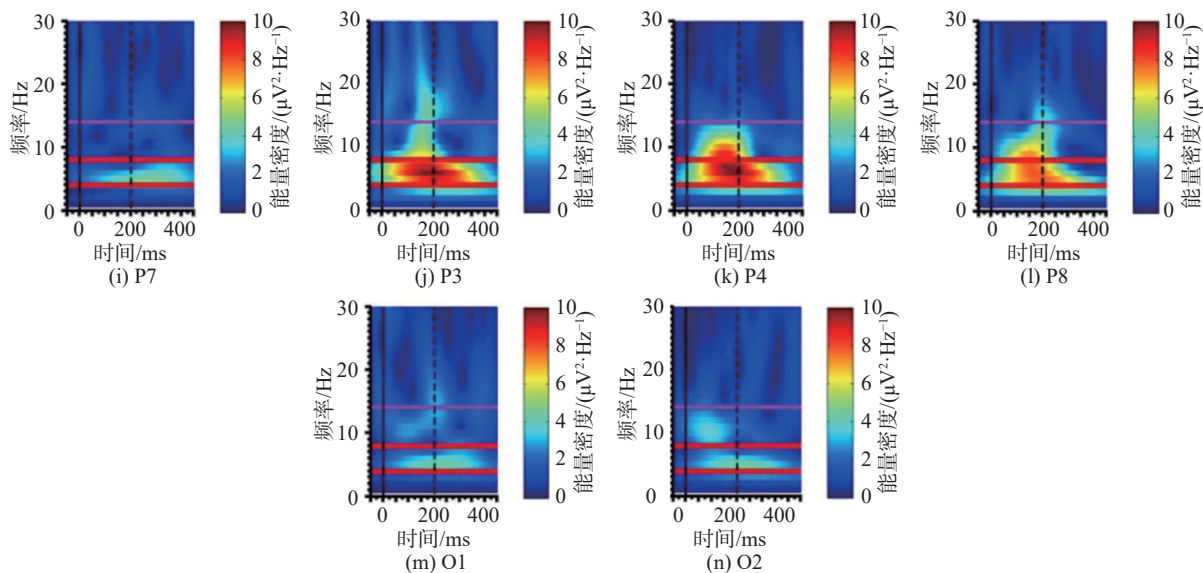


图 4 (续)

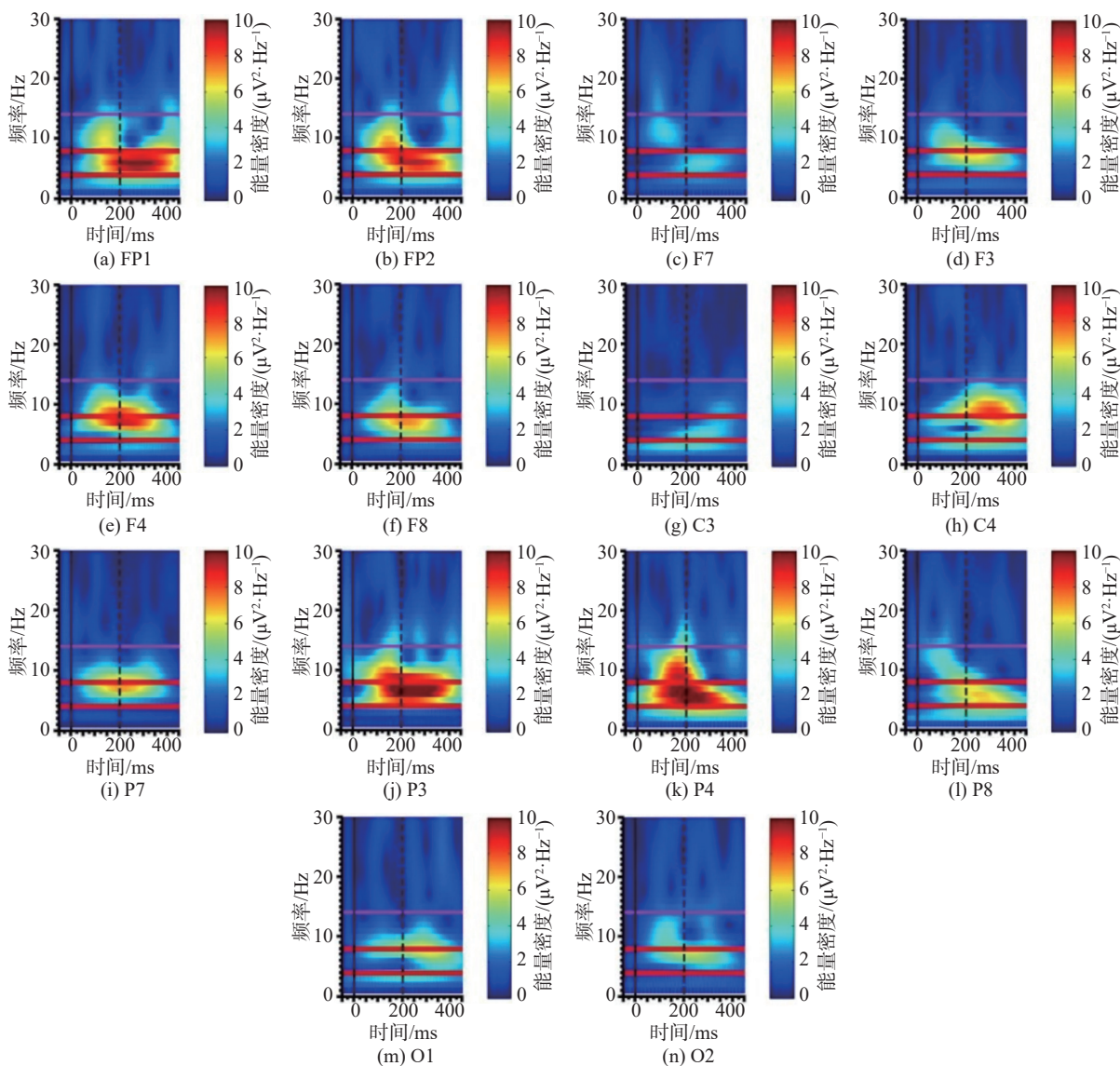


图 5 空间提示下多通道时频分析结果

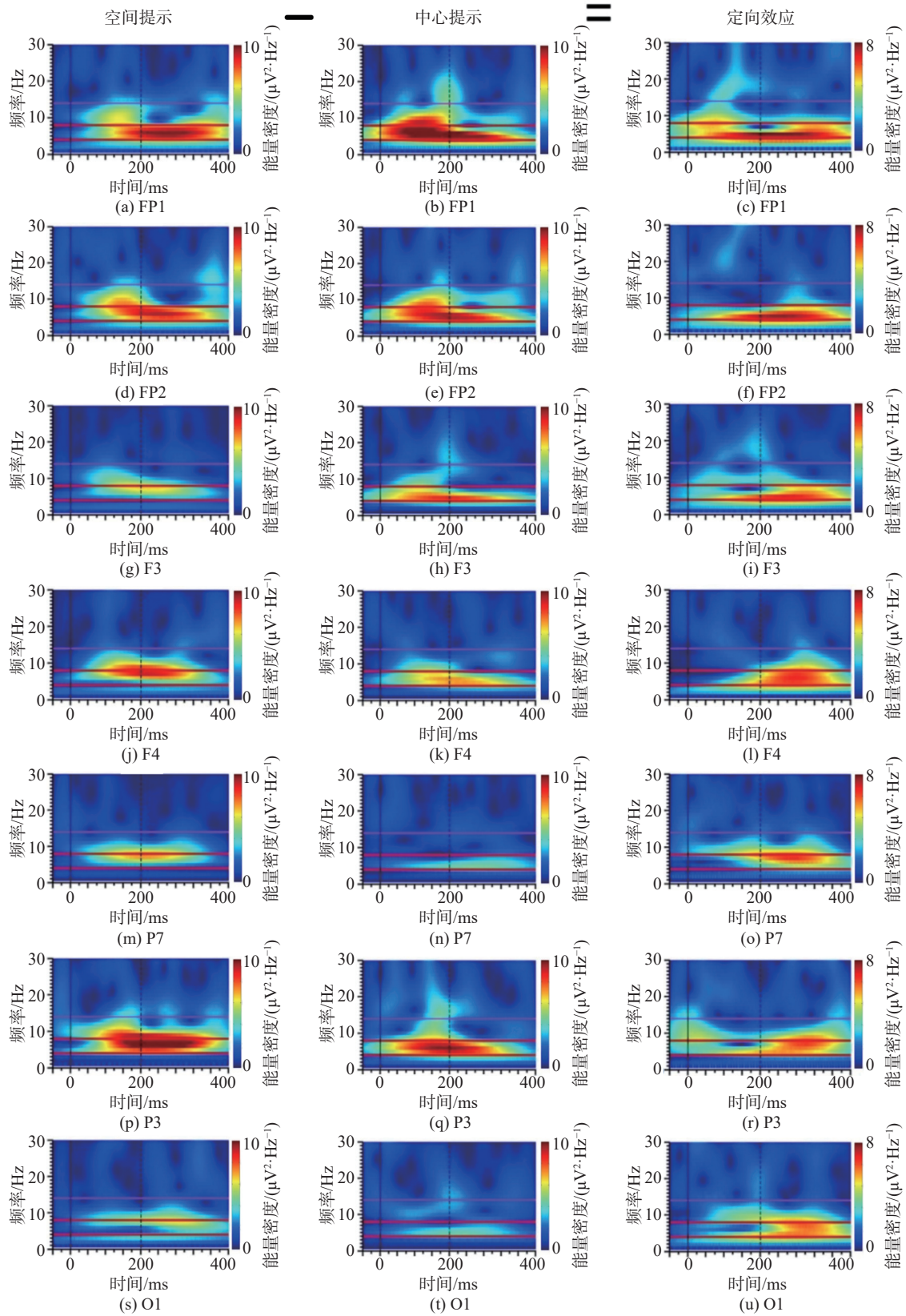


图6 7个特征通道脑电的定向效应

2.3 注意网络定向状态下脑电特征频段能量的空间分布

根据不同频段的频率范围(δ : 0.5~4 Hz, θ :

4~8 Hz, α : 8~13 Hz, β : 13~30 Hz, γ : 30~100 Hz), 设计巴特沃兹或切比雪夫带通滤波器, 提取不同频段分量, 如图 7(a)所示。计算不同频段脑电的

能量密度, 并进行统计比较, 以此确定注意网络定向状态下脑电的特征频段。

首先, 对得到的等长数据集进行正态性和方差齐性检验, 根据结果进行配对 t 检验或秩和检验。实验结果显示, θ 频段与其他 4 个频段均存在

显著性差异 ($*P < 0.05$, $***P < 0.001$), 如图 7(b) 所示, 故确定 θ 频段为注意网络定向状态的特征频段。利用 EEGLAB 中的 topoplot 函数绘制脑电特征频段 (θ 频段) 能量分布图, 结果如图 7(c) 所示, 可见特征频段能量主要分布在额顶区。

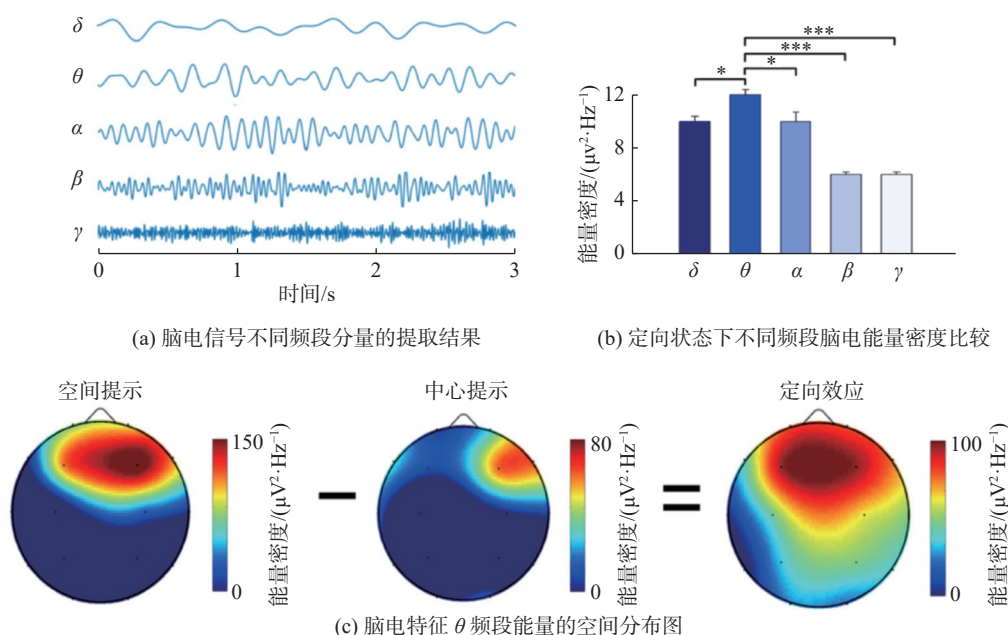


图 7 定向状态下不同频段脑电的特征频段能量

3 实验结论与讨论

该实验分析了健康受试者在注意网络 ANT 测试中定向状态脑电特征频段能量的空间分布。研究发现: 健康受试者在注意网络定向状态下, 表现为 FP1, FP2, F3, F4, P7, P3, O1 这 7 个特征通道能量的增加; 特征通道脑电信号在空间提示下的能量显著高于中心提示下的能量。从时间上看, 特征通道脑电能量的增加主要集中在空间提示出现后 200 ms 左右; 从频段上看, 能量主要集中在 θ 频段 (4~8 Hz), 即定向状态的特征频段是 θ 频段, 且能量主要集中在额顶区。

定向网络负责选择性地集中注意力于特定位置、物体或刺激。它使我们能够将注意力从一个对象转移到另一个对象, 有助于我们在复杂的视觉场景中定位和识别目标。在 ANT 测试中, 线索提示在目标刺激之前呈现, 使参与者凭借随机变换的线索提示对目标刺激做出反应。定向网络需要选择性处理感官输入的信息, 在完成任务时需将一个人的注意力与交替的感官输入源保持一致。定向网络被认为与多个感官输入相关的脑区

的激活水平有关^[17], 主要包括额叶眼区、顶内沟、顶颞联合区和腹侧前额皮层。本实验结果表明了定向效应激活的脑区主要为额顶区, 这与文献报道是一致的。定向功能损害被认为与胆碱能系统失衡有关。研究发现, 帕金森病患者黑质多巴胺能神经元变性丢失、黑质-纹状体多巴胺通路变性、纹状体多巴胺含量显著降低, 使胆碱能系统相对亢进, 可能导致定向功能受损^[18]。

本实验揭示了正常脑功能的定向效应, 而对于神经和精神系统疾病患者, 其定向效应等注意功能可能出现异常。ANT 测试是评估注意功能的有效方法, 目前已被用于临床评估阿尔茨海默症、儿童注意力缺陷等患者的注意功能。因此, 本实验设计为神经和精神系统疾病的注意功能缺陷的机制研究及临床诊断提供了新的思路和技术支持。

4 实验的实施

实验实施过程包括以下 6 个步骤。

1) 由任课教师向学生讲授关于脑电的基础理论知识, 主要包括脑电信号概述、脑电的采集方

法等。

2) 以一个具体的课题“注意网络定向状态下多通道脑电能量空间分布”为实验题目, 让学生熟悉信号处理软件 MATLAB 及其工具包 EEGLAB, 掌握脑电信号的预处理和数据选取, 掌握脑电信号的特征分析方法。基于给定的实验课题, 要求学生通过自行查阅相关文献了解课题背景, 确定实验原理与方法, 按照实验步骤进行脑电信号的处理分析。

3) 实验结束后学生需要独立完成一份实验报告书, 主要包括: 实验目的、原理与方法、实验步骤、实验结果分析和讨论等。撰写实验报告的同时, 要求学生结合实验过程自主思考以下问题: 注意网络脑电信号的特征频段为哪个频段? 特征频段能量集中增加出现在刺激后多长时间? 特征频段能量主要分布在哪些脑区? 两种空间提示产生的定向效应是否一致? 通过自主思考, 锻炼学生的科研思维, 提高了学生独立解决问题的能力 and 脑电信号处理的实践能力。

5 结束语

本实验设计要求学生掌握脑电信号处理方法, 并能够熟练应用 MATLAB 软件对脑电信号进行数据预处理、时频分析、频段能量提取和能量空间分布等。在实践中引导学生将理论知识运用于实践, 提高发现问题、解决问题的能力, 为后续开展本科毕业论文工作的顺利开展奠定良好的基础。同时, 将科研课题应用于本科生的实验教学, 开拓了学生的科学视野, 提高了科研兴趣, 锻炼了科研思维, 促进了新工科背景下复合型创新人才的培养。

参考文献

- [1] FAN J, MCCANDLISS B D, SOMMER T, et al. Testing the efficiency and independence of attentional networks[J]. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2002, 14(3): 340–347.
- [2] FAN J, POSNER M. Human attentional networks[J]. *Psychiatrische Praxis*, 2004, 31: 210–214.
- [3] WESTLYE L T, GRYDELAND H, WALHOVD K B, et al. Associations between regional cortical thickness and attentional networks as measured by the attention network test[J]. *Cerebral Cortex*, 2011, 21(2): 345–356.
- [4] GORINA E, KULIKOVA A A, MACINNES W J. Comparing saccadic and manual responses in the attention network test[J]. *Cortex*, 2021, 144: 29–42.
- [5] GAZZANIGA M S. *The Cognitive neurosciences*[M]. 4th ed. Cambridge, Mass.: MIT Press, 2009.
- [6] FORTENBAUGH F C, DEGUTIS J, ESTERMAN M. Recent theoretical, neural, and clinical advances in sustained attention research[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2017, 1396(1): 70–91.
- [7] SOMMERFELDT S L, CULLEN K R, HAN G, et al. Executive attention impairment in adolescents with major depressive disorder[J]. *Journal of Clinical Child and Adolescent Psychology*, 2016, 45(1): 69–83.
- [8] MCDONOUGH I M, WOOD M M, JR MILLER W S. A review on the trajectory of attentional mechanisms in aging and the Alzheimer's disease continuum through the attention network test[J]. *Yale Journal of Biology and Medicine*, 2019, 92(1): 37–51.
- [9] VÁZQUEZ-MARRUFO M, GARCÍA-VALDECASAS COLELL M, GALVAO-CARMONA A, et al. The Attention Network Test in the study of cognitive impairment of ADHD patients[J]. *Revista de Neurologia*, 2019, 69(10): 423–432.
- [10] PAULETTI C, MANNARELLI D, LOCURATOLO N, et al. Attention in Parkinson's disease with fatigue: Evidence from the attention network test[J]. *Journal of Neural Transmission*, 2017, 124(3): 335–345.
- [11] RAZ A, BUHLE J. Typologies of attentional networks[J]. *Nature Reviews Neuroscience*, 2006, 7(5): 367–379.
- [12] 刘宇雷, 余明. “新工科”背景下高校实验教学体系建设探索[J]. *实验技术与管理*, 2019, 36(11): 19–21.
- [13] 陆国栋. “新工科”建设的五个突破与初步探索[J]. *中国大学教学*, 2017(5): 38–41.
- [14] 顾佩华. 新工科建设发展与深化的思考[J]. *中国大学教学*, 2019(9): 10–14.
- [15] FAN J, BYRNE J, WORDEN M S, et al. The relation of brain oscillations to attentional networks[J]. *The Journal of Neuroscience*, 2007, 27(23): 6197–6206.
- [16] 韩伟, 卓雁文, 李艳, 等. 脑电信号处理与分析方法研究进展[J]. *中国医疗设备*, 2020, 35(4): 149–154.
- [17] CORBETTA M, KINCADE M, OLLINGER J M, et al. Temporal dynamics of visual attention: Spatial expectancy vs. target detection, as revealed by ANOVA based event-related fMRI[J]. *NeuroImage*, 2000, 11(5): S8.
- [18] RINNE J O, PORTIN R, RUOTTINEN H, et al. Cognitive impairment and the brain dopaminergic system in Parkinson disease: [18F]fluorodopa positron emission tomographic study[J]. *Archives of Neurology*, 2000, 57(4): 470–475.