

放松状态下 α 波的溯源分析

王海霞¹ 尤文斌¹ 于在水² 邓慧芳¹

(1. 中北大学电子测试技术国家重点实验室, 太原, 030051; 2. 上海复旦微电子集团股份有限公司, 上海, 200433)

摘要: 鉴于在大多数 α 波研究中, 只分析不同脑区的 α 波差异对研究其神经活动所提供的信息不足问题, 本文提出了 α 波独立分量能量分析法, 并结合源定位算法对产生 α 波的主要脑区进行了溯源分析。首先, 计算预处理后各脑区的 α 波功率以分析其主要活动区域, 将FastICA算法分解的独立分量进行源定位, 再采用 α 波独立分量能量分析法分析主要活动脑区的 α 波与各独立分量的关系。以6名26岁的右利手男性为被试对象, 结果表明在放松状态下 α 波的主要活动脑区为左枕区和右枕区, 其次为右后颞, 左后颞; 左枕区和右枕区的 α 波功率虽无显著性差异, 但其主要 α 波能量却来自不同的神经源, 这两个神经源分别位于靠近左枕区的左脑和靠近右枕区的右脑部位。经过两因素重复方差分析, 发现这两个不同的神经源影响了左枕区与右枕区的 α 波。

关键词: 脑电信号; α 波; FastICA算法; 溯源分析

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

Traceability Analysis of α Waves in Relaxation State

Wang Haixia¹, You Wenbin¹, Yu Zaishui², Deng Huifang¹

(1. National Key Laboratory of Electronic Testing Technology, North University of China, Taiyuan, 030051, China; 2. Shanghai Fudan Microelectronics Group Company Limited, Shanghai, 200433, China)

Abstract: Most α wave studies only analyze α wave differences in different brain regions, which provides insufficient information to study their neural mechanisms. Aiming at this problem, a α wave independent component energy analysis method is proposed, and the main area of α wave generation is traced combining with the source localization algorithm. Firstly, the main active zone of α wave is analyzed by calculating α wave power in each brain area after pre-treatment. Then the independent components of decomposition from FastICA algorithm are source localized. Finally, the relationship between α wave in main brain area of action and every independent component is analyzed by α wave independent component energy analysis method. Testing results on six 26-year-old right-handed male subjects show that the main action areas of α wave in relaxed state are the left and the right occipital regions, followed by the right and the left posterior iliac regions. Although there is no distinct differences in α wave power of the left and the right occipital regions, the main α wave energy comes from different neural sources, which is located at the left brain near the left occipital area and the right brain near the right occipital area, respectively. Results of two-way repeated analysis of variance show that these two different neural sources have effect on α wave of the left and the right occipital regions.

Key words: electroencephalogram (EEG); α wave; FastICA algorithm; traceability analysis

引言

α 波影响着大脑的很多高级功能,有研究表明,人的社会创造性与 α 波息息相关^[1],而在放松状态下产生的 α 波可以增强人的记忆、加快收集资料的速度,促进人更有效地完成任务^[2]。因此,为了更好地了解有关认知、创造等大脑活动机制, α 波的研究受到了广泛关注^[3-4]。马小萌等分别计算抑郁症组与对照组中26个脑区域的静息态脑电 α 波在频域的幅值平均值,并统计其与左右不对称性的相关性,指出 α 波的左右不对称性可能与抑制负性自我加工偏向的神经活动有关^[5]。而在脑电信号(Electroencephalogram, EEG)研究中,EEG信号是神经元细胞集群放电活动在头皮的综合反映,并不是脑内神经元集群产生信号的直接对应^[6],而了解神经元集的活动才能更好地了解大脑活动。仅研究不同脑区的 α 波差异,缺乏对 α 波的溯源分析,所提供的信息对分析大脑神经活动不够全面。文献[7]用独立成分分析(Independent component analysis, ICA)算法分解被试者的自发脑电信号,并指出分解得到的脑电信号表现出了一种自然基础。鉴于此,本文提出了 α 波独立分量能量分析法,探讨不同脑区的 α 波和各独立分量的关系,将FastICA分解的独立分量看作源信号,以同一脑区在不同独立分量中的 α 波功率分布比值作为衡量两者关系的尺度;并结合源定位算法对独立分量进行源定位,获取大脑中源信号的位置信息,以此进行 α 波的溯源分析,弥补了只分析 α 波脑区差异而造成的信息不足的缺陷。本文以放松状态下产生的EEG信号为研究对象进行分析,其分析结果可为放松状态下 α 波产生的神经活动提供参考。

1 脑电数据采集

试验中选取6名被试者,均为男性,无疾病史,26周岁,右利手,脑电采集系统使用OPENBCI测试系统,其测试电极为Ag/Cl干电极,采样频率为250 Hz。图1给出了国际标准导联10-20系统导联位置,放置的测试区域分别为: $Fp1$ (左额极), $Fp2$ (右额极), C_3 (左中央), C_4 (右中央), T_3 (左后颞), T_6 (右后颞), O_1 (左枕区)和 O_2 (右枕区), A_1 , A_2 作为测试的参考电极分别放置于左耳、右耳部位。

整个采集过程持续约7 min,测试过程中测试者应尽量保持不动,以免带来不必要的干扰。被试者在1~2 min使用手机进行网页的浏览,属自由活动;3~7 min放下手机,进入思绪漫游的放松状态。选取每个被试者进入思绪漫游状态后的较好的EEG信号进行分析,时间段为10 s。

2 分析模型的建立及其原理

试验共获得放松状态下的6组脑电数据,为了使研究具有针对性,对 α 波的主要分布脑区进行溯源分析,分为以下几个步骤:

- (1)通过计算预处理后的EEG信号的 α 波功率,分析 α 波的主要活动区域;
- (2)将FastICA分解获得的独立分量看作源信号,进行源定位分析,获取源信号的脑内分布模型;
- (3) α 波主要分布脑区的 α 波独立分量能量分析,其核心是计算脑区从各独立分量中映射 α 波的功率情况,以功率分布比值大小作为评估测试区域与独立分量关系,并对结果进行统计分析。

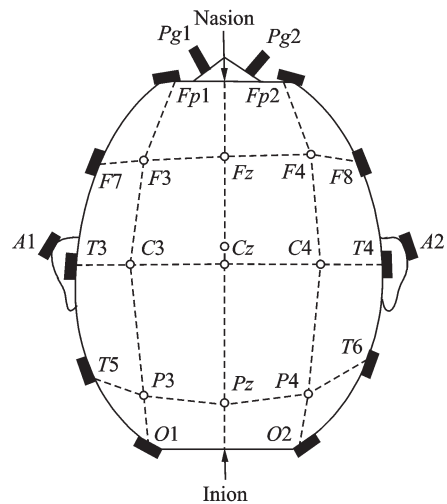


图1 国际标准导联10-20系统电极安放法
Fig.1 International standard lead 10-20 system electrode placement method

2.1 FastICA 算法原理

对于观测信号矢量,存在一个线性变换,使观测信号在线性变换下的每个分量统计独立最大化,其称之为ICA过程^[8],其简化的模型为:若有 M 个源信号 $s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t)$ 在统计上相互独立,则其线性组合产生 $N(M \leq N)$ 个随机变量 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)$,第 i 个混合信号输出为 $x_i(t) = a_{i1}s_1(t) + a_{i2}s_2(t) + \dots + a_{iN}s_N(t) = As(t)$ 其中, $i = 1, 2, \dots, N, a_{ij}$ 为混合系数^[6]。从 M 维观测信号中找到隐含的源信号,可将其简化为线性问题过程: $Y(t) = W^T X(t)$, W^T 为待确定的分离矩阵,这些变换后的向量 y 即所求独立成分。

作为一种ICA算法,FastICA算法基于非高斯最大化原理,以最大化负熵作为其目标函数,采用牛顿迭代算法对观测变量的大量采样点进行批处理,收敛速度快,使用方便^[8]。

2.2 脑电信号预处理

脑电信号是一种微弱复杂的生理信号,而工频、眼电以及心电等干扰信号幅值大,极易将有用的脑电信号淹没^[9-10]。为了分析放松状态下产生 α 波的主要脑区,需要对脑电信号进行预处理后再对 α 波功率进行统计。工频干扰以及电磁干扰往往发生在较高的频段,可以采用经典滤波方法去除,而眼电伪迹采用传统滤波的方法很难去除,因此,可使用FastICA算法去除。预处理模型如图2所示。

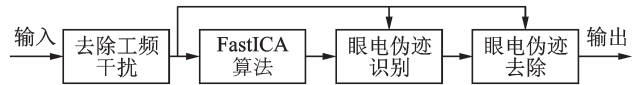


图2 脑电信号预处理模型

Fig.2 EEG signal preprocessing model

预处理的具体步骤如下:

- (1)输入为实测八通道脑电信号,利用50 Hz的陷波器进去除工频干扰信号;
- (2)利用FastICA算法对步骤(1)得到的信号进行分解,以获得多个独立成分,以及对应的分解矩阵 W^T 和混合矩阵 A ;
- (3)根据眼电伪迹的特点,进行辨识;
- (4)将 W^T 对应的眼电伪迹分量置0,并与混合矩阵 A 相乘,重构后得到去除工频干扰以及眼电伪迹的信号。

2.3 α 波主要分布区域分析

EEG信号经过预处理后,对 α 波主要分布区域分析,具体步骤为:

- (1)对脑电信号进行功率谱密度(Power spectral density, PSD)分析,计算经过预处理后每个通道的EEG信号功率;
- (2)利用梯形积分法计算每组各通道的 α 波(8~12 Hz)功率,对6组数据的不同通道利用两因素方差分析(Two-way analysis of variance, tow-way ANOVA)进行检验统计,确定 α 波的主要分布脑区。

2.4 独立分量的源定位

由FastICA分解所得的分量,其统计独立性最大,将这些独立分量看作独立生物电信号,为了直观地分析大脑源信号活动情况,对独立分量进行等价偶极子定位,得到脑内源信号的分布模式。

使用MATLAB环境下的EEGLAB14.1工具包中的DIPFIT插件进行源定位,采用电流偶极子模型描述脑内激励源,头模型使用Spherical Four-Shell(BESA)模型。DIPFIT插件可以对每个独立分量进行定位分析,采用相对误差(Relative variance, RV)值来衡量拟合程度,RV越小表示头皮电势分布与偶极子源在头皮上产生点位分布差别越小,拟合程度越好^[11]。

2.5 α 波独立分量能量分析法

此方法的核心思想是分析 α 波的分布脑区对不同源信号中 α 波功率的映射情况,以其映射功率比值的大小评估测试区域与不同独立分量的关系。此方法结合独立分量的源定位结果,可以更好地了解放松状态下不同脑区的 α 波主要来自何源信号。具体步骤如下:

(1)假设 A_{nm} 为分解得到的独立矩阵, n 表示通道数, m 表示独立分量数,将矩阵 A 中第 i 行的 j 列保留原值,其余元素全部置0,记作 $Y'(i=1, \dots, n; j=1, \dots, m)$;

(2)计算 $X'=AY'$ 的值,其中 A 为混合矩阵;

(3)计算 X' 中第 i 行的 α 波功率,即为第 j 个独立分量在第 i 个通道中映射的 α 波功率;

(4)将目标通道在每个独立分量中获取的 α 波功率值(步骤(3)所得)相加作为总值,并计算不同独立分量在总值中所占的比值;

(5)对拟研究的不同脑区域的不同独立分量映射的 α 波能量进行两因素重复方差分析,研究不同独立分量和不同脑区,以及两者的交互作用对 α 波功率是否具有显著影响。

3 结果分析

3.1 α 波主要活动区域分析结果

以第1组 EEG 信号为例进行分析,得到的独立分量时域图如图3所示,可以看出分量1在约3.2 s处、分量6在约0.1 s和0.7 s处出现较大的幅值变化。根据眼电伪迹的特征,可判定为眼动伪迹。

通过预处理脑电信号,计算每个通道的 EEG 信号的 α 波功率。6组预处理后被测脑区的 α 波功率如表1所示,可以看出, α 波功率因脑区的不同而差异较大,但是一般的规律是左枕区及右枕区的 α 波功率较大,其次为右后颞和左后颞。

对不同被试者的不同脑区进行两因素检验统计,结果发现因被试者不同, α 波功率有显著差异($F=2.79, df=5, p=0.0318 < 0.05$);脑区不同,对 α 波功率的影响差异显著($F=58.66, df=7, p=0$)。此外,左枕区与右枕区的 α 功率显著大于右后颞、左后颞的 α 功率($p < 0.05$),右后颞的 α 波功率显著大于左后颞,但左枕区与右枕区的 α 波功率无显著差异($p=0.3156 > 0.05$),分析结果与 α 波的主要分布区域在枕区的论述一致。

不同脑区的 α 波功率差异较大,这与大脑不同区域负责不同的功能有关。当人体处于放松状态时,与运动相关的额叶区处于不活跃状态,而枕区的 α 波功率大,这可能与视觉信息的处理以及思维活动等活跃有关,而主要负责处理听觉信息的颞区较额叶来说也比较活跃。

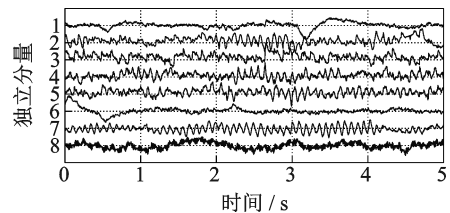


图3 第1组脑电独立分量时域图

Fig. 3 Time domain diagram of EEG independent components in the first group

表1 各脑区 α 波功率统计表

Tab. 1 Channel average power statistics of the first group

脑区	α 波功率/ $10^4(\mu V)^2$					
	第1组	第2组	第3组	第4组	第5组	第6组
$Fp1$	0.525	0.491	0.354	0.464	0.632	0.467
$Fp2$	0.384	0.345	0.334	0.3016	0.365	0.740
C_3	1.515	1.558	1.209	0.784	0.591	1.734
C_4	1.125	9.490	1.169	1.133	0.926	1.599
T_5	5.330	5.779	5.558	3.766	2.593	3.783
T_6	8.853	8.181	8.515	8.243	6.597	7.703
O_1	19.503	25.426	19.690	12.027	9.005	25.837
O_2	23.643	23.056	25.270	18.756	18.765	18.980

3.2 源定位分析结果

对图3中各独立分量的源定位结果如图4所示,其中括号中的百分比表示RV值。由图4可知,分量1,6在前额眼睛附近,符合眼电伪迹的位置特点。分量7的波形具有 α 波的典型特点,呈现梭形,并且具有明显的调幅现象,进行频谱分析后,发现其频段集中主要于11~12.5 Hz,源定位后其偶极子在右枕区附近($X=15, Y=-91, Z=6$)。分量2的源定位在靠近纵裂的左枕区附近($X=-11, Y=-111, Z=22$),其能量也集中于11~12.5 Hz频段。

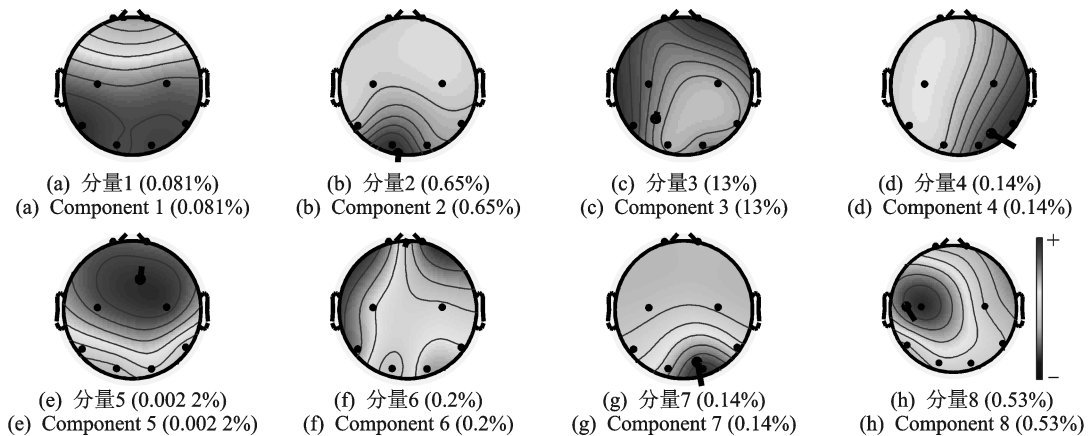


图4 第1组 EEG 各独立分量的源定位结果

Fig.4 Source positioning results for EEG independent components in the first group

对其余5组的 EEG 信号分析时,发现每组源定位结果均不相同,这可能说明不同的被试者在放松状态时的活动神经源有差别,但是在枕区附近均有以 α 波频段为主的源信号出现,其 α 波信号特征明显。这说明在放松状态下,枕区附近区域分布有产生以 α 波为主要频段的神神经源。

3.3 α 波独立分量能量分析结果

对左枕区、右枕区的 EEG 信号进行 α 波的溯源分析。以第1组为例,分析结果表明,右枕区的 α 波功率的91.13%取决于独立分量7;左枕区的 α 波功率的95.84%取决于独立分量2。结合源定位分析结果,可以看出,右枕区与左枕区中的 α 波主要来自各自附近位置的独立神经源。

对其余组进行分析,均发现右枕区与左枕区的 α 波主要来自其附近位置的独立神经源,这两个神经源所产生的信号频段大约集中在11~13 Hz,并且波形呈梭形,而其他神经源信号的主要频段集中于0.5~6 Hz,在10~13 Hz也占有小部分。

为了分析左枕区与右枕区的 α 波与其附近位置神经源的关系,采用两因素重复方差分析法对这两个源信号和两个枕区的 α 波功率进行统计分析。结果显示,在显著水平为0.05时,左枕区和右枕区的不同、独立分量的不同对 α 波功率并没有显著性影响($F=1.01, df=1, p=0.326; F=2.45, df=1, p=0.1266$),而两者的交互作用具有显著性差异($F=14.37, df=1, p=0.0011$),这表明左枕区和右枕区的 α 波功率受不同的神经源影响。

4 结束语

通过6个26岁右利手的被试者在放松状态下 α 波的主要分布区域进行分析,结果发现其 α 波的主要分布区域位于左枕区和右枕区,两者之间无显著差异,其次是右后颞和左后颞,右后颞的 α 波功率显著大于左后颞。

放松状态下,对左枕区和右枕区的 α 波的溯源分析结果显示,虽然6名被试者的左枕区与右枕区的 α 波功率无没有显著性差异,但是其 α 波主要来自于不同的神经源,分别位于靠近左枕区的左脑和靠近

右枕区的右脑位置,其具有明显的 α 波信号特征,频段主要集中在11~13 Hz。经过两因素重复方差检验,发现这两个不同的神经源影响了左枕区与右枕区的 α 波功率。

本文所提出的 α 波独立分量能量分析法,结合源定位算法所进行的 α 波溯源分析,亦可对其他状态下产生的 α 波进行溯源、以及病灶分析定位等,并且建议分析时可适当增加采集电极的个数。

参考文献:

- [1] 谷传华,王亚丽,吴财付,等. 社会创造性的脑机制:状态与特质的EEG α 波活动特点[J]. 心理学报,2015,47(6): 765-773.
Gu Chuanhua, Wang Yali, Wu Caifu, et al. The brain mechanism of social creativity: The characteristics of EEG α wave activity of state and traits [J]. *Journal of Psychology*, 2015, 47(6): 765-773.
- [2] 张旺,张万春. 脑电波及其对学习的意义[J]. 教学与管理,2000,18(3): 70-71.
Zhang Wang, Zhang Wanchun. Brain waves and its significance to learning [J]. *Teaching and Management*, 2000, 18(3): 70-71.
- [3] 王俊,李勇华,陈龙军. 基于部分相位同步的中少年脑电分析[J]. 数据采集与处理,2016,31(5): 1035-1042.
Wang Jun, Li Yonghua, Chen Longjun. Middle-aged EEG analysis based on partial phase synchronization [J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2016, 31(5): 1035-1042.
- [4] 沃建中,曹河圻,潘昱,等. 6~12岁儿童脑电 α 波的发展特点[J]. 心理发展与教育,2000,16(4): 1-7.
Wo Jianzhong, Cao Hezhen, Pan Wei, et al. 6—12-year-old children's brain electricity α wave development characteristics[J]. *Psychological Development and Education*, 2000, 16(4): 1-7.
- [5] Ma Xiaomeng, Zhong Ning, Guo Jialiang, et al. An analysis of correlation between asymmetry of α wave and cognitive behavior in depression[J]. *Science Innovation*, 2017, 5(4): 231-237.
- [6] 徐立超,王仲朋,许敏鹏. 脑电逆问题在运动康复领域中的应用[J]. 中国生物医学工程学报,2017,36(6): 733-740.
Xu Lichao, Wang Zhongpeng, Xu Minpeng. Application of EEG inverse problem in the field of sports rehabilitation [J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2017, 36(6): 733-740.
- [7] Makeig S, Enghoff S, Jung T P, et al. A natural basis for efficient brain-actuated control[J]. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 2000, 8(2): 208-211.
- [8] 余先川. 盲源分离理论与应用 [M]. 北京:科学出版社,2011: 72-103.
Yu Xianchuan. Blind source separation theory and application [M]. Beijing: Science Press, 2011: 72-103.
- [9] Hassanien A E A T. Brain computer interfaces: Current trends and applications[M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2014: 15-16.
- [10] 胡广书,汪梦蝶. 生物医学信号处理研究综述[J]. 数据采集与处理,2015,30(5): 915-932.
Hu Guangshu, Wang Mengdie. Review of biomedical signal processing research[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2015, 30(5): 915-932.
- [11] 文念,黄丽亚,于涵. 基于ICA和聚类的EEG脑源定位研究[J]. 计算机技术与发展,2015(5): 228-232.
Wen Nian, Huang Liya, Yu Han. EEG brain source localization based on ICA and clustering [J]. *Computer Technology and Development*, 2015(5): 228-232.

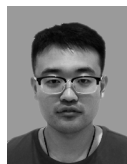
作者简介:



王海霞(1992-),女,硕士研究生,研究方向:生物医学信号处理技术、恶劣环境下的信息采集与处理,E-mail:wanghixaxai@163.com。



尤文斌(1981-),男,副教授,研究方向:恶劣环境下的信息获取及测量数据的重构技术,E-mail:youdenbin@nuc.edu.cn。



于在水(1993-),男,硕士研究生,研究方向:智能卡数据的采集与处理、集成电路设计,E-mail:shuigeili@163.com。



邓慧芳(1994-),女,硕士研究生,研究方向:图像处理,E-mail:wanghixaxai@163.com。