

基于功率谱分析的头皮电位和心率 变异性关系研究

于晓琳, 张建保, 王珏

(西安交通大学生物医学信息工程教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 通过对数学运算任务中头皮脑电信号和心率变异性的功率谱分析,研究了头皮脑电活动和心脏自主神经活动的关系. 实验显示:数学运算过程中心率明显增加($P < 0.01$),心率变异性功率谱总能量减少($P < 0.05$),归一化高频功率明显降低($P < 0.01$),归一化低频功率明显升高($P < 0.01$);数算时脑电信号的 α 节律相对功率显著降低($P < 0.05$), θ 节律谱能量值显著增加($P < 0.05$),相关分析显示F8、FT8、C4、P4和T8导脑电信号的 θ 节律功率谱能量值与心率变异性谱成分具有显著相关性($P < 0.05$). 结果表明,数算任务中大脑有意识的精神活动增多,大脑中枢神经活动减少与心脏自主神经活动有关,脑中央前回、顶区和颞叶通过增加交感神经活动和减少迷走神经的作用来影响心率,它们在调节心脏自主神经活动中起重要作用.

关键词: 自主神经;心率变异性;脑电;头皮;数学运算

中图分类号: R318.04 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)08-0991-04

Relation Between Scalp Potential and Heart Rate Variability Based on Power Spectral Analysis

Yu Xiaolin, Zhang Jianbao, Wang Jue

(Key Laboratory of Biomedical Information Engineering of Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The relation between scalp activity and cardiac automatic nervous system during a mental arithmetic (MA) task is explored with the power spectrum of electroencephalogram (EEG) and heart rate variability. The results show that heart rate increases ($P < 0.05$), total power reduces ($P < 0.05$), the normalized high frequency power component decreases ($P < 0.01$) and the normalized low frequency power component increases ($P < 0.01$) during MA task, so MA task weakens the cardiac sympathetic activity and enhances parasympathetic activity. And the average relative power in α rhythm of EEG decreases and the θ rhythm of EEG increases significantly ($P < 0.05$). There are obvious correlations between θ rhythm of EEG for F8, FT8, C4, P4 and T8 channels and heart rate variability ($P < 0.05$). It is noted that cerebral conscious activity increases and central decreases with parasympathetic activity decreasing and sympathetic activity increasing, and the pre-central, parietal lobe and temporal scalp influence heart rate by virtue of increasing sympathetic effects and decreasing parasympathetic effects, which plays an important role in cardiac autonomic regulation.

Keywords: autonomic nerve; heart rate variability; electroencephalogram; scalp; mental arithmetic task

脑在调节心脏自主神经活动中起着非常重要的作用,许多心脏疾病可由心理及精神原因引起^[1],所以研究头皮相关部位与心脏自主神经活动的关系具有重要的理论和实际意义。

Westerhaus 等人通过药物刺激交感神经,研究了肾上腺和星形神经节对心脏的调节,结果表明,中间前额皮层、海岛区和腹正中颞叶与交感神经活动有关^[2],不过动物实验与人的实验结果是否具有相似性还有待证明。Gianaros 等人采用正电子发射断层扫描(PET)方法通过脑血氧饱和度随记忆任务中心率的变化,研究了扁桃体、小脑和脑干在调节心脏自主神经活动中的作用^[3]。但是,该方法研究的是皮下层神经组织,关于头皮脑电活动与心脏自主神经活动的关系并未做具体研究。数学运算可以通过交感神经激活加快心率,目前已成为研究交感活动的常用方法。Tanida 等人采用近红外光谱分析方法,发现数算任务中右前额皮层区域比左前额皮层区域更能通过降低副交感神经的影响来调节加快心率^[4]。虽然电生理学的研究已经表明了脑皮层对交感神经活动具有一定的影响^[5],但系统地研究头皮脑电活动与自主神经功能之间的关系还未见报道。本文采用功率谱能量分析方法,研究了头皮 23 导脑电信号和心率变异性的关系,对头皮不同区域的谱能量变化和 HRV 的谱能量进行了分析,试图找出可能在调节心脏自主神经活动中起重要作用的头皮脑电活动区域。

1 实验设计与方法

实验对象是在校男性研究生自愿者 11 名,年龄为 22~25 岁,右利手,身体健康。实验前要求受试者避免酒、茶和咖啡等任何中枢兴奋或抑制性的食物和药物,避免剧烈运动。实验时间为晚 7 点至 10 点,整个实验过程在室内正常照明、安静、尽量舒适的环境(室温 25℃)下进行。

要求受试者连续进行 3 位数的加法运算(如 456+345),以尽可能快的速度计算 10 min,取后 5 min 数据进行统计分析。休息 5 min 后,要求受试者尽可能什么也不想,放松注视电脑黑色屏幕 5 min,作为数学运算的参考状态。

脑电数据采集使用 Neuroscan 32 导脑电仪(美国 Neuroscan 公司),采用 10~20 导联头皮电极系统记录 FP1、FP2、F3、F4、Fz、F7、F8、FT7、FT8、FC3、FC4、FCz、C3、C4、Cz、P3、P4、Pz、O1、O2、Oz、T7 和 T8 共 23 通道脑电信号,同时记录水平眼电

和垂直眼电。参考电极置于双侧乳突连线,放大器的通带频带为 0.1~70 Hz,采样频率 500 Hz,各导联阻抗均小于 5 k Ω 。

心电数据的记录采用一次性银/氯化银电极,正、负电极分别放置在右侧锁骨下与左前腋下第 10 肋骨间,参考电极为右下低于负电极位置,放大器的通带频带为 0~100 Hz,采样频率为 500 Hz。

采用 SPSS 13.0 软件进行配对 t 检验分析和相关性分析,实验数据分别用平均值 $\pm$ 标准差和相关系数 r 表示。

2 实验结果与分析

2.1 心率变异性功率谱分析

为消除高频干扰,对心电信号采用 40 阶截止频率为 100 Hz 的 FIR 低通滤波器进行滤波。利用 R 点位置序列,获得逐次 RR 间期和 RR 间期均值,若 RR 间期小于 0.6 倍均值或大于 1.4 倍均值,均认为是异常的 RR 间期并予以剔除,构成新的 RR 间期序列^[6],采用 Kobayashi 的线性插值法对间隔不均匀的 RR 间期进行等间隔重采样^[7]。功率谱分析 AR 模型阶数为 16,短时程心率变异性谱的高频成分(0.15~0.4 Hz)与低频成分(0.04~0.15 Hz)常被视作监测心迷走与交感传出活动及其均衡性的定量指标,低频段和高频段功率的归一化值更能直接反映交感和迷走神经调节的变化^[8]。

对 5 min 数学运算和参考状态的心电信号进行功率谱分析,求得两种状态下的心率,计算心率变异性谱成分的归一化高频功率、归一化低频功率、总功率及反映自主神经系统平衡状态的低频成分与高频成分的比值,分别进行统计分析,结果如表 1 所示。

低频功率由血压的 0.1 Hz 节律波动经心脏迷走与交感神经作用于窦房结引起,主要反映交感神经的定量调节,高频功率主要反映由呼吸活动通过心脏迷走神经作用而引起的心率波动^[9]。从表 1 可以看出,数学运算过程中心率明显增加($P<0.01$),HRV 谱总能量减少($P<0.05$)。与参考状态相比,归一化高频功率明显降低($P<0.01$),归一化低频功率明显升高($P<0.01$),低频成分与高频成分的比值明显增加($P<0.01$),说明数学运算任务能激活交感神经,同时减少心脏迷走神经活动。

2.2 脑电信号功率谱分析

使用 0.5~30 Hz 的 54 阶 FIR 带通滤波器滤除脑电信号中的噪声干扰,用三次样条插值函数对

表 1 数学运算和参考状态下心率变异性功率谱分析

	心率/次·min ⁻¹	总功率/10 ³ ×s ²	归一化低频功率	归一化高频功率	低频功率与高频功率比值
数学运算	88.31±10.95**	0.92±0.71*	46.45±20.64**	53.55±20.64**	1.16±0.89**
参考状态	79.49±6.80	4.60±5.43	26.78±17.13	73.22±17.13	0.45±0.40

注:带*的数据表示与参考状态相比 $P<0.05$,带**的数据表示与参考状态相比 $P<0.01$.

脑电数据进行重采样,将采样频率由原来的 500 Hz 降为 256 Hz,并对各导联脑电信号去除趋势分量.根据 Walter 分类法,脑电可以划分为 4 种节律: δ (0.5~3.5 Hz)、 θ (4~7 Hz)、 α (8~13 Hz)和 β (14~30 Hz).4 种节律的功率(0.5~30 Hz)及其占总功率的比例(相对功率)可通过对 23 导脑电数据进行功率谱分析获得.数算和参考状态下 FP2、C3、C4 和 P4 导脑电信号的 α 节律的相对功率如图 1 所示,F7、FT7、C3、P3 和 T7 导左侧脑电信号的 θ 节律谱能量值如图 2 所示,F8、FT8、C4、P4 和 T8 导右侧脑电信号的 θ 节律功率谱能量值如图 3 所示.

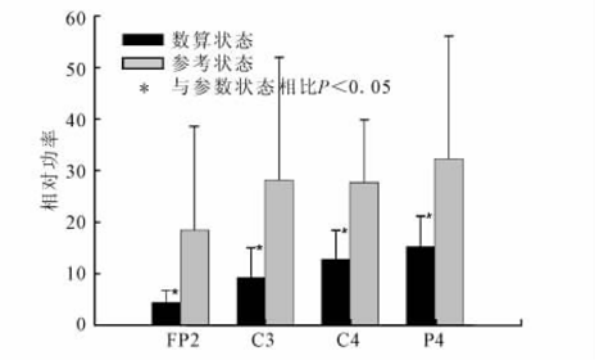


图 1 数学运算和参考状态下 α 节律的相对功率

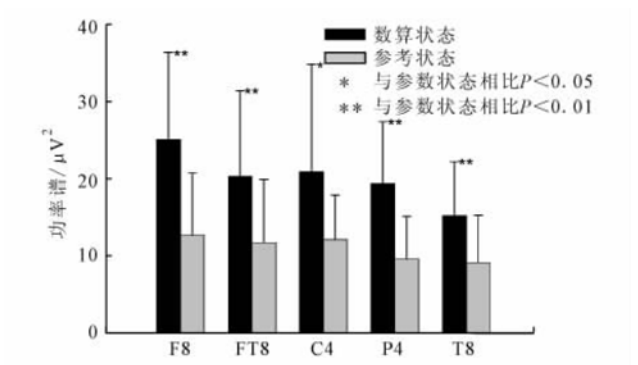


图 2 数学运算和参考状态下右侧皮层 θ 节律谱能量值

图 1 显示,数学运算状态下 FP2、C3、C4 和 P4 导脑电信号 α 节律相对功率的平均值比参考状态显著降低($P<0.05$).图 2 和图 3 显示,数学运算状态下 F7、F8、FT7、FT8、C3、C4、P3、P4、T7 和 T8 导脑电信号的 θ 节律谱能量值比参考状态显著增加(P

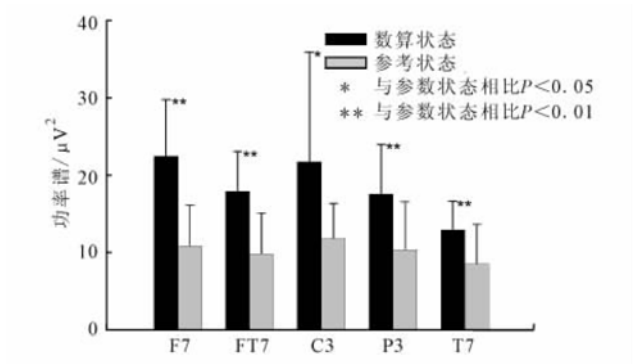


图 3 数学运算和参考状态下左侧皮层 θ 节律谱能量值

<0.05).

一般认为 α 波是正常成人脑电波的基本节律,当有意识地进行精神活动(智力活动)时, α 波很快消失, θ 波谱能量增加是大脑中枢神经系统活动减少的表现^[10].从以上分析可以看出,数学运算状态有意识的精神活动增多,中枢神经系统活动减少.FP2 主要代表右前额头皮脑电活动,C3 和 C4 是反映中央区的脑电活动,P3 和 P4 是反映顶区的脑电活动,F7、F8、FT7、FT8、T7 和 T8 为颞叶和颞叶前部头皮脑电活动的表现.实验结果表明,数学运算任务中右前额、顶区、中央区和颞叶的头皮脑电节律谱能量均发生显著变化.

2.3 头皮脑电位与心率变异性的相关性分析

采用 SPSS 13.0 软件,对数学运算状态下的脑电信号 θ 节律功率谱能量值与心率变异性谱成分的归一化高频功率和归一化低频功率分别进行相关性分析,结果如表 2 所示.

表 2 θ 节律谱能量值与心率变异性相关性分析

	F8	FT8	C4	P4	T8
归一化高频功率	0.83**	0.65*	0.67*	0.76**	0.82**
归一化低频功率	-0.83**	-0.65*	-0.67*	-0.76**	-0.82**

注:带*的数据表示 $P<0.05$,带**的数据表示 $P<0.01$.

从表 2 可以看出,F8、FT8、C4、P4 和 T8 导脑电信号的 θ 节律功率谱能量值与心率变异性谱成分具有显著相关性($P<0.05$),与归一化高频功率正

相关,与归一化低频功率负相关,说明右侧脑中央前回、顶区和颞叶与心脏自主神经活动有关.实验结果还表明,数算过程中大脑中枢神经活动减少与心脏迷走神经活动减少和交感活动增强有关.

3 讨论与结论

心率变异性是指逐次心跳瞬时心率不断波动的现象,主要反映自主神经系统对心脏节律的调节^[11].HRV功率谱成分的高频谱能量可以反映心脏迷走神经的活动,低频谱能量与交感神经活动有关^[9].数算任务中心率变异性功率谱归一化高频值显著降低,归一化低频值显著增加,即心脏迷走神经活动减少,交感神经活动得到激活.

脑电图是描记头皮上两个电极间脑细胞群电位差的一种记录,实验中选取了23个导联分别覆盖大脑额区、顶区、枕区和颞叶,以及在各周边区之间起联络作用的联合区.脑电仪记录了23导脑电 α 、 β 、 δ 和 θ 4种节律脑电波,前两种是高频快波,后两种是高幅慢波.实验中发现,数学运算过程头皮脑电位的功率谱能量发生显著变化,FP2、C3、C4和P4导脑电 α 节律相对功率明显降低,F7、F8、FT7、FT8、C3、C4、P3、P4、T7和T8导脑电 θ 波谱能量显著增加,说明数算任务中,大脑有意识的精神活动增多,中枢神经系统活动减少.相关分析显示,F8、FT8、C4、P4和T8导脑电信号的 θ 节律功率谱能量值与心率变异性谱成分的归一化高频功率正相关,与归一化低频功率负相关,说明数算过程中大脑中枢神经活动减少与心脏迷走神经活动减少和交感活动增强有关.所以,推测脑中央前回、顶区和颞叶通过增加交感神经活动和减少迷走神经的作用来影响心率,它们在调节心脏自主神经活动中起重要作用.这与Westerhaus等人通过动物实验所得的皮下层解剖部位一致.从以上的分析结果还可以看出,数学运算过程中头皮右侧比左侧对自主神经活动的影响明显,这与Tanida等人采用近红外光谱分析方法所得的结果一致.另外,数学运算任务中FP2、F7、FT7、C3、P3、和T7导脑电节律谱能量均发生显著变化,但这些脑皮层区域与交感神经活动不相关,可能是由于智力和精神因素影响.

本文通过23导脑电信号的谱能量分析和心率变异性的功率谱分析,研究了数算任务中头皮脑电位和心率的变化与自主神经活动的关系.根据Brodmann的大脑功能分区,认为大脑皮层52分区中位于中央前回的4区和之前的6区为皮层运动感

觉区,具有植物神经皮质中枢的部分功能^[12],本实验结果与4区和6区的皮层区域接近.本文实验提示,我们可以通过头皮脑电位研究自主神经的活动,进而监测与评价心血管的功能状态.

参考文献:

- [1] Stoudenmire A, McDaniel J S. Psychological factors affecting medical conditions [C]//Comprehensive Textbook of Psychiatry. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2000: 1765-1775.
- [2] Westerhaus M J, Loewy A D. Central representation of the sympathetic nervous system in the cerebral cortex [J]. Brain Research, 2001, 903 (1/2): 117-127.
- [3] Gianaros P J, van der Veen F M, Richard Jennings J. Regional cerebral blood flow correlates with heart period and high-frequency heart period variability during working-memory tasks: implications for the cortical and subcortical regulation of cardiac autonomic activity [J]. Psychophysiology, 2004, 41(4): 521-530.
- [4] Tanida M, Sakatani K, Takano R, et al. Relation between asymmetry of prefrontal cortex activities and the autonomic nervous system during a mental arithmetic task: near infrared spectroscopy study [J]. Neuroscience Letters, 2004, 369(1): 69-74.
- [5] Verberne A J, Owens N C. Cortical modulation of the cardiovascular system [J]. Prog Neurobiology, 1998, 54(2): 149-168.
- [6] 肖冬萍. 心率变异信号临床分析技术的研究 [D]. 重庆:重庆大学电气工程学院, 2004.
- [7] 王兴元. 复杂非线性系统中的混沌 [M]. 北京:电子工业出版社, 2003: 130-133.
- [8] Mateo J, Laguna P. Improved heart rate variability signal analysis from the beat occurrence times according to the IPFM model [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2000, 47(8): 985-996.
- [9] Malliani A, Pagani M, Lombardi F, et al. Cardiovascular neural regulation explored in the frequency domain [J]. Circulation, 1991, 84(2): 1482-1492.
- [10] 刘曾荣, 文铁桥, 姚晓东. 脑与非线性动力学 [M]. 北京:科学出版社, 2006: 54-57.
- [11] Bailey J R, Fitzgerald D M, Applegate R J. Effects of constant cardiac autonomic nerve stimulation on heart rate variability [J]. Am J Physiology, 1996, 270(Suppl): 2081-2087.
- [12] 乔治·阿德尔曼. 神经科学百科全书 [M]. 翻译编辑委员会, 译. 上海: 伯克豪伊萨尔出版社和上海科学技术出版社联合出版, 1992.

(编辑 杜秀杰)