

基于多导脑电特征的生理性精神疲劳分析

张崇¹, 郑崇勋¹, 张连毅², 李小平³, 沈开泉³

(1. 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; 2. 上海电机学院电气工程系, 200240, 上海;
3. 新加坡国立大学机械工程与生物分离工程系, 119290, 新加坡)

摘要: 通过对4种生理性精神疲劳状态下4导脑电信号进行功率谱和小波熵特征分析, 研究了脑电信号各节律相对功率以及小波熵与生理性精神疲劳程度之间的关系, 并分析了它们在不同生理性精神疲劳状态下的变化规律及其相关性. 实验分析结果表明, 脑电信号各节律的相对功率以及小波熵平均值与生理性精神疲劳程度之间存在很强的关联性, 对于不同的生理性精神疲劳状态, 随着生理性精神疲劳程度的增加, 其脑电信号的小波熵平均值逐渐降低, θ 、 α 和 β 节律高频快波相对功率的平均值逐渐降低, 而 δ 节律高幅度慢波相对功率平均值逐渐增加. 脑电信号各节律的相对功率以及小波熵平均值有望成为衡量生理性精神疲劳程度的指标.

关键词: 生理性精神疲劳; 脑电; 小波熵; 功率谱

中图分类号: R318.04 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)02-0250-05

Physiological Mental Fatigue Analysis Based on Multichannel Electroencephalogram Features

Zhang Chong¹, Zheng Chongxun¹, Zhang Lianyi², Li Xiaoping³, Shen Kaiquan³

(1. MOE Key Laboratory of Biomedical Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 200240, China; 3. Department of Mechanical Engineering and Division of Bioengineering, National University of Singapore, Singapore 119290, Singapore)

Abstract: Investigating the effects on physiological mental fatigue with continuous studying and short rest, the relationships between relative power in different rhythms of electroencephalogram (EEG) and physiological mental fatigue, and between wavelet entropy of EEG and physiological mental fatigue are explored by analyzing power spectrum and wavelet entropy features of four channels' EEG in four mental fatigue states, and the variations of relative power and wavelet entropy of EEG at different physiological mental fatigue levels are sought out. The experimental results show that physiological mental fatigue level increases with the increase of the studying time and intensity, and short rest can relieve the physiological mental fatigue level. The relative power and wavelet entropy of EEG are strongly correlated with the physiological mental fatigue level. The average relative power in θ , α and β rhythms and the wavelet entropy of EEG decrease, while the average relative power in δ rhythm of EEG increases with the increasing physiological mental fatigue level. The average relative power in different rhythms and the wavelet entropy of EEG are expected to serve as the index for detecting physiological mental fatigue level.

Keywords: physiological mental fatigue; electroencephalogram; wavelet entropy; power spectrum

生理性精神疲劳现已成为城市中的重要问题, 严重威胁着人们的健康和生命. 在交通驾驶、航空航天

活动、人-机系统监控等工作中, 操控人员精神疲劳引起的瞬间的注意力分散、反应迟缓或协调性不够, 都

可能导致极为严重的事故.因此,对于生理性精神疲劳状况的分析以及疲劳程度的评价就显得非常必要.

目前,主要采用主观方法检测精神疲劳,根据作业者的身体感受症状、神经感受症状来判断疲劳的程度,通过问卷调查的形式来进行.主观评定法的评分标准不易统一,且易受主观因素的影响,无法对疲劳时的心理、生理状态进行客观的评定.

近年来,脑电信号的检测与分析技术的发展使生理性精神疲劳的测定技术有了很大进步,但目前的分析技术主要集中在时域和频域,多采用经典的统计信号处理方法和谱分析技术,将脑电信号视作平稳信号,因而难以确定敏感的特征量.近期的研究表明,脑电信号呈现出确定系统的混沌规律^[1],更多的情况下表现为典型的非平稳随机过程.小波变换具有多分辨率特性,已成为分析非平稳信号的有效工具^[2].基于小波变换的小波熵作为一种新的时变熵的分析方法,相对于传统的谱熵,将更适合于具有明显非平稳性的脑电信号.因此,本文采用适合于非平稳信号分析的小波熵以及平稳信号分析的功率谱来共同对不同生理性精神疲劳状态下的脑电信号进行分析,将有助于更好地解释精神疲劳现象及其机理,为精神疲劳研究开辟一条新途径.

1 小波熵计算

Shannon 熵理论指出:对于一个不确定性系统,若用一个取有限个值的随机变量 X 表示其状态特征,取值为 x_i 的概率为 $p_i = P\{X=x_i\}$, $i=1,2,\dots,n$, 且 $\sum_{i=1}^n p_i = 1$, 则 X 的信息熵定义为

$$H(X) = -\sum_{i=1}^n p_i \ln \left(\frac{1}{p_i} \right) \quad (1)$$

信息熵可用来定量估计随机信号的复杂性.基于 Shannon 熵概念的谱熵是一种信息熵,可用于分析信号的复杂度.信号功率谱中存在的谱峰越狭窄,谱熵越小,表示信号中存在明显的振荡节律,复杂度小;反之,功率谱越平坦,谱熵就越大.但是,基于傅里叶变换的功率谱估计仅适用于平稳信号,并且谱估计的频率分辨率与所采用的信号长度成正比,短时间窗会引起较严重的旁瓣泄漏效应,使功率谱失真.小波变换可以在时域和频域同时定位分析非平稳时变信号.用小波变换取代傅里叶变换,求得的谱熵称为小波熵,将更适合于分析脑电信号.

将信号进行二进离散小波变换,可分解成不同尺度下的各个分量,得到小波系数 $C_j(k)$. 利用这些小波

系数就能够直接估计出不同尺度下的能量.二进离散小波变换的实现过程相当于重复使用一组高通和低通滤波器,对时间序列信号进行逐步分解,每次分解后,将信号的采样频率降低到原来的 $1/2$,再对低频分量重复以上的分解过程,从而得到下一层次的 2 个分解分量.设信号经上述变换后,在第 j 分解尺度下 k 时刻的高频分量系数为 $cD_{j,k}$,低频分量系数为 $cA_{j,k}$,进行单支重构后,得到信号分量 D_j 和 A_j .

不同分辨率 j 的细节信号能量为 $E_j = \sum_k |C_j(k)|^2$, 其中小波系数 $C_j(k) = \langle x(t), \varphi_{j,k}(t) \rangle$, 信号总能量即为

$$E_{\text{tot}} = \|x(t)\|^2 = \sum_j \sum_k |C_j(k)|^2 = \sum_j E_j \quad (2)$$

因此,归一化后的相对小波熵 $P_j = \frac{E_j}{E_{\text{tot}}}$. 显然 $\sum_j P_j = 1$.

1. 类似 Shannon 熵,小波熵定义为^[3-4]

$$H_w = -\sum_j P_j \ln(P_j) \quad (3)$$

小波熵 H_w 可以反映出多频率成分信号的混乱程度,并提供信号的动力学特征,刻画了时间序列信号的谱的结构情况,信号的能量在整个频率成分上分布越均匀,则信号越复杂^[5],因此文中将其作为评定脑电信号复杂性的指标.

2 精神疲劳实验设计及脑电数据采集

我们选用 PL-EEG Wavepoint 系统对 4 种精神疲劳状态下的脑电数据进行了记录.实验对象为在校大学生自愿者 3 名.实验过程中受试者一直坐在比较舒适的椅子中,要求受试者尽可能什么也不想,尽可能放松.采用 10-20 导联头皮电极系统,共记录了 Fp1、Fp2、Pz 和 Fz 4 导脑电数据.各导联阻抗均小于 $5 \text{ k}\Omega$,参考电极粘贴在喉结右下方的锁骨管处,采样间隔为 6 ms .实验具体细节描述如下.

实验是在室内灯光关闭、受试者闭眼状态下进行的,各种实验状态均持续大约 5 min .

状态 1:受试者一上午都在集中精力阅读,有一定的阅读量要求,并要求做阅读摘要笔记.阅读结束后,受试者感觉有一些疲倦,数据采集实验持续时间为上午 $11:58 \sim$ 下午 $12:03$.

状态 2:受试者午饭后进行数据采集,实验持续时间为下午 $2:37 \sim$ 下午 $2:42$.

状态 3:受试者下午进行与上午同样要求的阅读.阅读结束后,受试者感到非常疲劳.数据采集实验

持续时间为下午4:38~下午4:44.

状态4:受试者晚饭后进行数据采集,实验持续时间为下午5:36~下午5:41.

3 脑电信号功率谱和小波熵特征提取及分析

由于大脑皮层的前额叶皮层参与了解决问题和计划行为的工作记忆^[6-7],因此本文选用Fp1、Fp2、Pz和Fz 4导脑电信号进行分析,研究4种精神疲劳状态下的脑电信号功率谱以及小波熵的变化规律.

3.1 数据预处理

对脑电信号进行功率谱以及小波熵分析前,为了滤除脑电信号中的噪声干扰,采用了0.5~30 Hz的54阶有限冲击响应(FIR)带通滤波器,同时采用三次样条插值函数对脑电数据进行重采样,将采样频率由原来的167 Hz降为128 Hz.

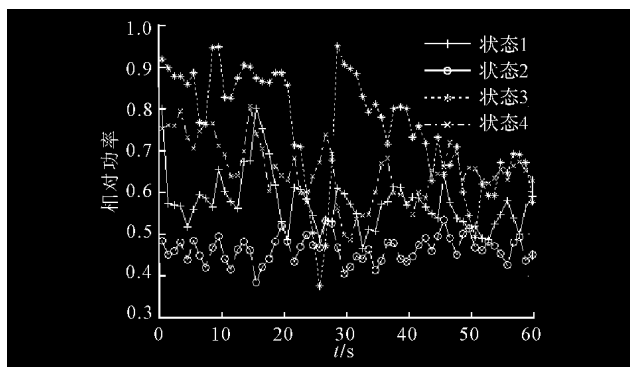
3.2 脑电信号功率谱分析

选取前256个采样数据为基本数据,计算数据段长度的累加步长为13个采样点.将从第257个数据采样点开始连续1 min的脑电数据作为研究对象.在4种疲劳状态下,对4导脑电数据进行功率谱分析,求得各数据段内的功率谱特征,分别为脑电节

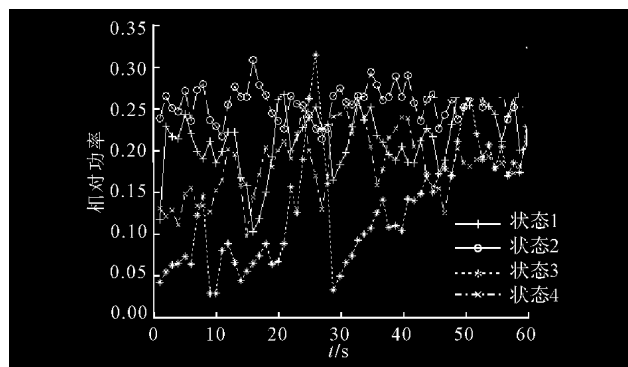
律 δ (0.5~4 Hz)、 θ (4~8 Hz)、 α (8~14 Hz)和 β (14~30 Hz)内的功率占0.5~30 Hz内总功率的比例,即相对功率.为减少各节律相对功率波动的影响,计算1 s内所有数据段各节律相对功率的平均值,代表脑电信号在1 s内的各节律成分的相对功率.4种生理性精神疲劳状态下各节律相对功率平均值随时间变化的曲线如图1所示,Fp1、Fp2、Pz和Fz 4导各节律相对功率平均值如表1所示.

采用SPSS 13.0对数据进行统计,组间比较采用单因素方差分析,两两比较应用最小显著差法(LSD).统计分析表明,Pz导联的状态1和状态4之间的 δ 、 θ 和 α 节律的相对功率的平均值差异未达到显著性水平,Fp1和Fp2导联在 β 节律状态3和状态4、Pz导联在 β 节律状态1和状态4显著性差异不是非常明显($P < 0.05$),但也达到了统计学意义的程度,其他4种疲劳状态下各导联各节律之间相对功率的平均值存在非常明显的显著性差异($P < 0.001$).

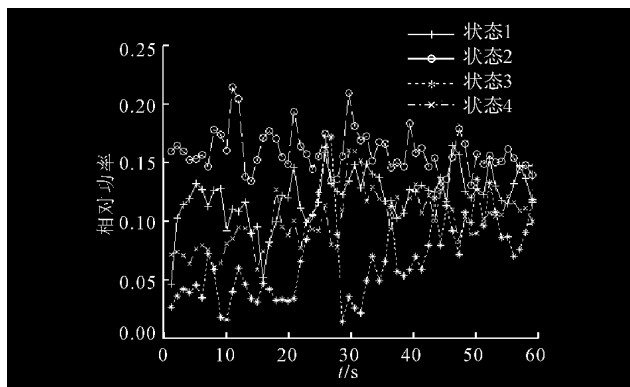
从多重比较结果以及图1和表1可以看出:在 θ 、 α 和 β 节律,状态2相对功率的平均值比状态1显著升高,状态4相对功率的平均值比状态3显著升高,状态4和状态3比状态2和状态1相对功率的平均值显著降低;对于 δ 节律,其相对功率平均值的变化



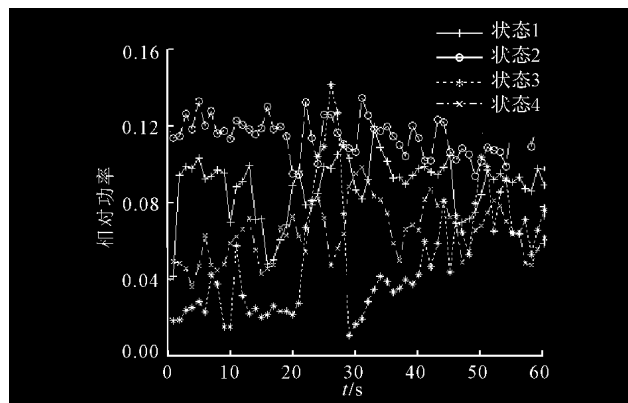
(a) δ 频段



(b) θ 频段



(c) α 频段



(d) β 频段

图1 4种生理性精神疲劳状态下各节律相对功率平均值随时间变化曲线

表 1 4 种生理性精神状态下 4 导脑电功率谱分析

状态	相对功率平均值															
	Fp1				Fp2				Pz				Fz			
	δ	θ	α	β	δ	θ	α	β	δ	θ	α	β	δ	θ	α	β
1	0.585	0.209	0.117	0.089	0.597	0.203	0.114	0.085	0.554	0.216	0.135	0.095	0.560	0.220	0.127	0.093
2	0.470	0.253	0.158	0.119	0.483	0.248	0.155	0.114	0.446	0.263	0.171	0.120	0.454	0.261	0.165	0.120
3	0.762	0.122	0.066	0.050	0.776	0.115	0.062	0.047	0.740	0.133	0.077	0.051	0.720	0.144	0.078	0.059
4	0.677	0.170	0.092	0.061	0.694	0.161	0.087	0.058	0.566	0.220	0.133	0.081	0.664	0.174	0.098	0.064

规律与 θ 、 α 和 β 节律正好相反。

由于一般认为 α 和 β 高频快波是大脑皮层兴奋时的主要波形, δ 高幅度慢波是大脑皮层处于抑制状态时电活动的主要表现^[8],所以上面的实验结果说明了状态 2 比状态 1、状态 4 比状态 3 大脑兴奋程度高,受抑制程度低,大脑疲劳程度降低.状态 2 和状态 4 的脑电信号分别采集于午饭后和晚饭后,即在经历一上午和一下午的学习,经过了短暂的休息之后,说明短暂的休息对生理性精神疲劳有较大的缓解作用,使得疲劳的脑神经细胞得以恢复.同时从实验结果也可以看出,状态 4 和状态 3 相对于状态 2 和状态 1 大脑兴奋程度明显降低,受抑制程度升高,大脑疲劳程度增加,这也与受试者的主观感觉相一致.这表明生理性精神疲劳程度随着学习时间的延长、紧张程度的增加而加深.另外,从实验结果中我们也发现, θ 节律各疲劳状态的相对功率的变化规律与 α 和 β 节律一致,同样可以作为大脑皮层兴奋的标志.

3.3 脑电信号小波熵特征计算及分析

选用与脑电波形较相似的 Daubechies10 正交小波函数对信号进行 4 尺度分解,所得分解信号对应的频率段即为 A_1 (0~4 Hz)、 D_4 (4~8 Hz)、 D_3 (8~16 Hz)和 D_2 (16~32 Hz),然后计算移动间隔为 13 个采样点、宽为 256 个采样点的重叠时间窗内 EEG 的小波熵特征.为减少小波熵波动的影响,计算 1 s 内所有数据段小波熵的平均值,代表脑电信号在 1 s 内的小波熵.4 种疲劳状态下小波熵平均值随时间的变化曲线如图 2 所示,Fp1、Fp2、Pz 和 Fz 4 导小波熵平均值如表 2 所示.

采用 SPSS 13.0 对数据进行统计,组间比较采用单因素方差分析,两两比较应用 LSD.统计分析表明,4 种疲劳状态下各导小波熵平均值均存在非常明显的显著性差异($P<0.001$),达到了统计学意义的程度.

从多重比较结果以及图 2 和表 2 可以看出,状态

表 2 4 种状态下 4 导脑电小波熵分析

状态	小波熵平均值			
	Fp1	Fp2	Pz	Fz
1	0.845 67	0.803 07	0.954 81	0.926 01
2	0.995 47	0.961 01	1.068 40	1.035 80
3	0.372 20	0.348 87	0.419 57	0.434 50
4	0.533 54	0.506 15	0.778 35	0.550 94

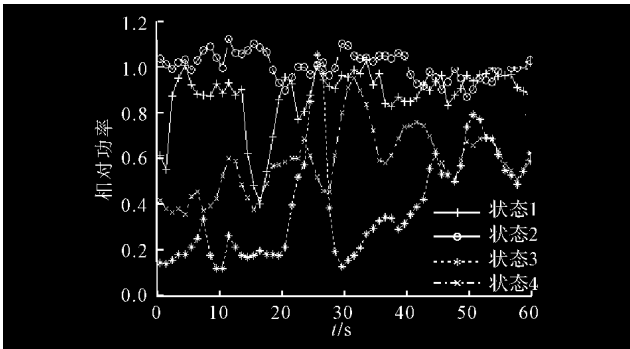


图 2 4 种疲劳状态下 4 导小波熵平均值随时间变化曲线

态 2 比状态 1、状态 4 比状态 3 的小波熵平均值显著升高,状态 4、状态 3 比状态 2、状态 1 的小波熵平均值显著降低.小波熵作为一种复杂性的量度,刻画了脑电信号的无序程度,进而标志了大脑受抑制的程度.因而,小波熵的实验结果说明状态 2 比状态 1、状态 4 比状态 3 大脑思维的无序程度增加,复杂性升高,大脑兴奋程度增加,受抑制程度降低,大脑疲劳程度降低.状态 4 和状态 3 相对于状态 2 和状态 1 大脑思维的无序程度降低,复杂性下降,大脑兴奋程度降低,受抑制程度增加,大脑疲劳程度加深.小波熵分析所得到的结论与功率谱分析完全一致,表明脑电信号平均小波熵与生理性精神疲劳程度之间存在很强的关联性,随着学习时间的延长、紧张程度的增加,生理性精神疲劳程度逐渐加深,同时短暂的休息对生理性疲劳程度有一定的缓解作用.

4 讨论与结论

上述研究结果表明,脑电信号各节律的相对功率以及小波熵可以客观地反映大脑生理性精神疲劳的程度,具有明确的物理意义。 θ 、 α 和 β 高频快波作为大脑皮层兴奋时的主要波形,其相对功率代表了大脑兴奋的程度。 δ 高幅度慢波是大脑皮层处于抑制状态时脑电活动的主要表现,反映了大脑受抑制的程度。小波熵作为一种复杂性的量度,反映出多频率成分信号的混乱以及无序程度,刻画了时间序列信号的谱的结构情况,因而脑电信号的小波熵标志了大脑受抑制程度。

本文通过对4导脑电信号在4种疲劳状态下进行功率谱和小波熵分析,考察了学习、短暂休息对生理性精神疲劳的影响,结合统计分析结果,可以得出以下结论。

(1)随着学习时间的延长、紧张程度的增加,大脑受抑制的程度增加,大脑思维的无序程度和复杂性降低,生理性精神疲劳程度增加。同时,脑电信号 θ 、 α 和 β 节律相对功率以及小波熵平均值逐渐降低, δ 节律相对功率平均值逐渐增加。脑电信号各节律的相对功率以及小波熵平均值与生理性精神疲劳程度之间存在很强的相关性。

(2)短暂休息对由学习时间延长、紧张程度增加引起的生理性精神疲劳有较大的缓解作用。

(3)利用脑电信号各节律的相对功率以及小波熵平均值对生理性精神疲劳程度进行分析具有一定的可行性。

通过本文分析可以看出,脑电信号各节律相对功率以及小波熵平均值与生理性精神疲劳程度之间有着密切的关系,它能灵敏地反映出生理性精神疲劳程度的变化,将其作为分析生理性精神疲劳程度的指标,是一种非常好的方法,为生理性精神疲劳的

监测与分析提供了新思路和新工具,在交通运输业及其他行业中具有广阔的应用前景,有望成为衡量精神疲劳程度的指标。

参考文献:

- [1] Jansen B H, Brandt M E. Nonlinear dynamical analysis of the EEG [M]. Singapore: World Scientific, 1993.
- [2] Tong S, Bezerianos A, Paul J, et al. Nonextensive entropy measure of EEG following brain injury from cardiac arrest source [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2002, 305(3/4):619-628.
- [3] Rosso O A, Blanco S, Yordanova J, et al. Wavelet entropy: a new tool for analysis of short duration brain electrical signals [J]. J Neurosci Meth, 2001, 105(1): 65-75.
- [4] Al-Nashash H A, Thakor N V. Synthesized quantitative assessment of human mental fatigues with EEG and HRV [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2005, 52(12): 2119-2122.
- [5] 封洲燕. 应用小波熵分析大鼠脑电信号的动态变化特征 [J]. 生物物理学报, 2002, 18(3): 325-330.
Feng Zhouyan. Dynamic analysis of the rat EEG using wavelet entropy [J]. Acta Biophysica Sinica, 2002, 18(3):325-330.
- [6] Newman J, Grace A A. Binding across time: the selective gating of frontal and hippocampal systems modulating working memory and attention status [J]. Consciousness and Cognition, 1999, 8(2): 196-212.
- [7] Belger A, Puce A, Krystal J H, et al. Dissociation of mnemonic and perceptual processes spatial and nonspatial working memory using fMRI [J]. Hum Brain Mapp, 1998, 6(1): 14-32.
- [8] 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.

(编辑 杜秀杰)

我校郭烈锦教授负责的学科创新引智基地获得高等学校学科 创新引智计划 2007 年度建设项目资助

由教育部、国家外国专家局联合实施的“高等学校学科创新引智计划”(以下简称“111”计划)第二批建设项目的评审工作已经结束,经各领域专家组评审和“111 计划”专家委员会综合评议,确定 52 个创新引智基地作为 2007 年度建设项目予以立项。我校继去年有 2 个引智基地进入首批建设项目后,今年由郭烈锦教授负责的“能源高效与再生利用的热物理科学创新引智基地”获得立项资助,引智基地立项总数在全国高校名列前茅。根据教育部及国家外专局文件规定,该建设项目将获得 600 万元国拨经费资助,其中外国专家局资助 300 万元,教育部从“985”建设经费中资助 300 万元。

(蔡丽红)