

基于多通道线性描述参数的生理性精神疲劳分析

张崇¹, 郑崇勋¹, 于晓琳¹, 李小平², 沈开泉²

(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. 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 24 h 睡眠剥夺实验以及不同精神疲劳状态下的脑电信号进行分析, 提取了脑电信号的多通道线性描述参数场强变化率, 研究了脑电信号场强变化率的平均值与生理性精神疲劳程度之间的关系, 以及它在不同生理性精神疲劳状态下的变化规律及其相关性. 实验结果表明, 场强变化率的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, 其脑电信号场强变化率的平均值逐渐降低. 脑电信号场强变化率的平均值有望成为衡量生理性精神疲劳程度的指标.

关键词: 精神疲劳; 脑电; 场强变化率; 多通道; 线性描述参数

中图分类号: R318.04 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)06-0737-04

Physiological Mental Fatigue Analysis Based on Multichannel Linear Descriptor

Zhang Chong¹, Zheng Chongxun¹, Yu Xiaolin¹, Li Xiaoping², Shen Kaiquan²

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

2. Department of Mechanical Engineering and Division of Bioengineering, National University of Singapore, Singapore 119290, Singapore)

Abstract: Evaluating the multichannel linear descriptor frequency of field variety of electroencephalogram (EEG), the relationship between frequency of field variety of EEG and physiological mental fatigue is investigated by analyzing EEG of different physiological mental fatigue in the experiments of 24 hours sleep deprivation and three mental fatigue states, and the variations of frequency of field variety of EEG under different physiological mental fatigue levels are sought out. The experimental results show that the average frequency of field variety of EEG decreases with the increasing physiological mental fatigue level. The average frequency of field variety of EEG is strongly correlated with physiological mental fatigue. The average frequency of field variety is expected to serve as the index for detecting physiological mental fatigue level.

Keywords: physiological mental fatigue; electroencephalogram; frequency of field variety; multi-channel; linear descriptor

生理性精神疲劳已成为社会中一些阶层人士的普遍现象, 严重影响了人们的健康和生命. 在现代工业中, 尤其是实时监控、车辆驾驶、航空航天、高风险作业等行业, 许多事故的发生都与生理性精神疲劳有关. 因此, 认识生理性精神疲劳的本质以及对疲

劳程度进行分析和评价, 对于预防由精神疲劳引发的事故是十分重要的.

传统的生理性精神疲劳测定方法主要有主观评定法和客观评定法两种^[1]. 主观评定法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,

主要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, 无法对疲劳时心理、生理状态进行客观的评定. 客观评定法就是借助仪器、设备等辅助工具对人体的生理、生化方面指标所进行的观察, 对这些指标进行综合评价来估计疲劳程度. 然而, 这些生理生化指标与疲劳程度的关系是不确定的, 个体差异大, 很难做到客观和定量化, 而且无法实时动态检测.

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检测技术有了很大进步. 但是, 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^[2], 更多的情况下表现为典型的非平稳随机过程. 因此, 本文尝试采用 Wackermann 提出的多通道线性描述参数场强变化率 Φ 来分析生理性精神疲劳状态的脑电信号, 将多个导联的脑电信号同时考虑, 使多个导联的脑电信息相互联系, 获取丰富的大脑信息, 从宏观的角度刻画不同的疲劳状态, 从而更加全面地反映大脑总体状态的变化^[3-4]. 多通道线性描述参数方法的运用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 多通道线性描述参数 Φ

研究多个电极 EEG 间相关特征信息可以从宏观角度有效揭示大脑状态的总体变化. 1996 年, Wackermann 引入多通道线性描述参数, 提出由多个电极 EEG 信号计算参数 Φ 用于量化相应脑区的大脑总体状态的方法^[3-4]. 具体定义如下, 考虑 K 个电极同时采集的 EEG 信号共 N 个采样点构成的向量 $\{u_1, \dots, u_N\}$, 其中 $u_i (i=1, \dots, N)$ 是在第 i 个时间点由 K 个电极同时记录的 EEG 组成的 K 维向量. 这里假设各通道 EEG 已经进行零均值 ($\sum_i u_i = 0$) 和平均参考转换处理 (对每一个 i , $\sum_k u_i^k = 0, k=1, \dots, K$)^[3-4]

$$m_0 = \frac{1}{N} \sum_i \|u_i\|^2 \quad (1)$$

$$m_1 = \frac{1}{N} \sum_i \left\| \frac{\Delta u_i}{\Delta t} \right\|^2 \quad (2)$$

式中: $\Delta u_i = u_i - u_{i-1}$; $\Delta t = 1/f_s$, f_s 是采样频率. 那么

$$\Phi = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{m_1}{m_0} \right)^{1/2} \quad (3)$$

Φ 反映了特定脑区的场强变化率, 即大脑特定脑区总体能量随时间变化的快慢程度. Φ 越大, 反映该脑区的脑电激活程度越大; Φ 越小, 反映了该脑区的脑电激活程度越小^[3-4]. 因此, 多通道线性描述参数 Φ 能够全面地反映了大脑状态, 较好地描述了大脑不同脑区之间的相互关系.

2 精神疲劳实验设计及脑电数据采集

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 3 名在校大学生自愿者. 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 和 Fz 3 个导联的脑电数据. 各导联阻抗均小于 5 k Ω , 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.

(1) 实验 1 为 24 h 睡眠剥夺的精神疲劳实验. 本实验是由受试者 1 和 2 完成, 主要考察在睡眠剥夺状态前后各生理性精神疲劳状态与场强变化率 Φ 之间的关系, 关注睡眠剥夺对生理性精神疲劳的影响. 睡眠剥夺状态起止时间, 从早上 11:00 开始持续到第 2 天上午 11:00. 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 1-1: 受试者感觉非常清醒, 数据采集实验持续时间为第 1 天上午 11:00~11:05.

状态 1-2: 受试者感觉有一些疲倦, 数据采集实验持续时间为第 2 天上午 11:00~11:05.

(2) 实验 2 为 3 状态疲劳实验. 本实验是由受试者 3 完成, 主要为了考察受试者在下午工作刚开始、下午工作刚结束, 以及晚饭后的生理性精神疲劳状态与场强变化率 Φ 之间的关系. 实验是在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 2-1: 下午工作刚开始, 受试者自我感觉非常清醒, 数据采集实验持续时间为下午 3:50~3:55.

状态 2-2: 下午工作刚结束, 受试者感觉有些疲劳, 并偶尔打哈欠, 数据采集实验持续时间为 5:15~5:20.

状态 2-3: 晚饭后, 经过短暂的休息, 受试者感觉疲劳有所恢复, 数据采集实验持续时间为 6:52~6:57.

3 脑电信号 Φ 的分析

由于大脑皮层的前额叶参与了解决问题和计划

行为的工作记忆^[5-6],因此本文选用 Fp1、Fp2 和 Fz 3 个导联的脑电信号进行分析,研究在不同的精神疲劳状态下的脑电信号场强变化率 Φ 的变化规律.

3.1 数据预处理

在计算场强变化率 Φ 之前,首先需要对脑电信号进行预处理.为了滤除脑电信号中的噪声干扰,采用了 0.5~30 Hz 的 54 阶 FIR 带通滤波器,然后对脑电信号进行零均值处理.另外,为了减小不同通道脑电信号幅值对场强变化率 Φ 计算的影响,还需要对各通道脑电信号的幅度作归一化处理.

3.2 24 h 睡眠剥夺脑电信号 Φ 的分析

选取滑动时间窗为 1 000 个采样数据,每次移动 17 个采样点,直到最后 1 s,连续 1 min 的脑电数据作为研究对象,得到不同精神疲劳状态下场强变化率 Φ 随时间变化的时程.为减少 Φ 值波动的影响,计算 1 s 内所有数据段 Φ 值的平均值,代表脑电信号在 1 s 内的 Φ 值.分别对 Fp1、Fz 以及 Fp2、Fz 电极间的脑电信号进行计算,得到 Φ 的时程变化.受试者 1 睡眠剥夺前后 Fp1、Fz 以及 Fp2、Fz 电极间 Φ 的时程变化如图 1 所示,计算得到的受试者 2 的 Φ 的时程变化曲线类似受试者 1.

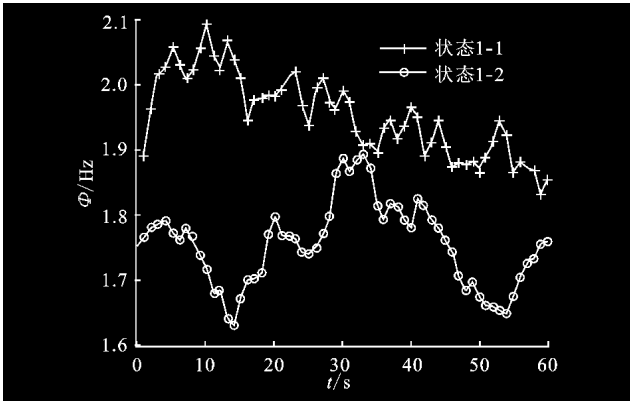
采用 SPSS 13.0 对睡眠剥夺前后 Fp1、Fz 以及 Fp2、Fz 电极间的 Φ 进行统计,组间比较采用单因素方差分析,两两比较应用最小显著性差别检验(LSD).统计分析表明,状态 1-1 和状态 1-2 之间的 Fp1、Fz 以及 Fp2、Fz 电极间的 Φ 平均值存在着显著性差异($P<0.01$),达到了统计学意义的程度.两个受试者在睡眠剥夺前后 Fp1、Fz 以及 Fp2、Fz 电极间的 Φ 平均值比较如表 1 所示.

表 1 睡眠剥夺前后电极间 Φ 平均值比较

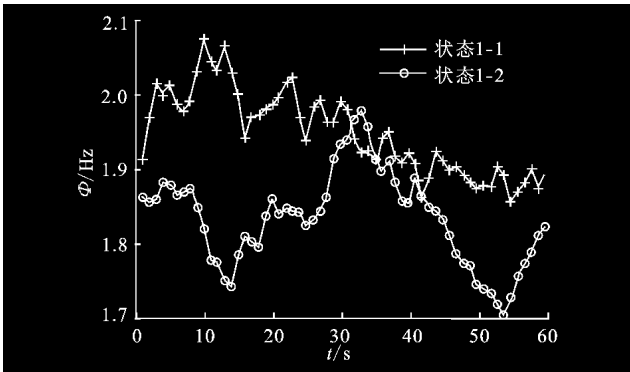
受试者	Φ/Hz			
	Fp1、Fz 电极间		Fp2、Fz 电极间	
	状态 1-1	状态 1-2	状态 1-1	状态 1-2
1	1.95±0.063	1.76±0.065*	1.95±0.058	1.83±0.065*
2	1.75±0.077	1.47±0.201*	1.72±0.093	1.42±0.204*

注:加*数据表示与状态 1-1 相比 $P<0.01$.

从多重比较结果以及图 1 和表 1 可以看出,睡眠剥夺后状态 1-2 的 Fp1、Fz 以及 Fp2、Fz 电极间 Φ 平均值比睡眠剥夺前状态 1-1 相应的 Φ 平均值显著降低. Φ 描述了特定脑区的场强变化率. Φ 越大,反映该脑区脑电的激活程度越大; Φ 越小,反映该脑区脑电的激活程度越小.根据电生理知识,当精神疲劳



(a)Fp1 与 Fz



(b)Fp2 与 Fz

图 1 睡眠剥夺前后电极间 Φ 的时程变化曲线

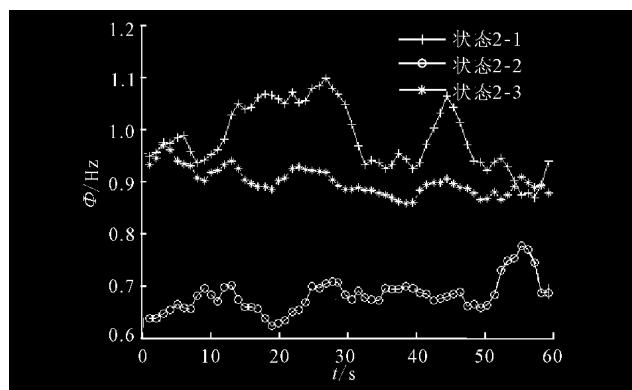
程度增加时,大脑激活程度降低,受抑制程度增加.因此,实验结果说明,睡眠剥夺后状态 1-2 的精神疲劳程度相对于睡眠剥夺前状态 1-1 显著增加,这也与两名受试者的主观疲劳感觉一致.

3.3 3 状态疲劳脑电信号 Φ 的分析

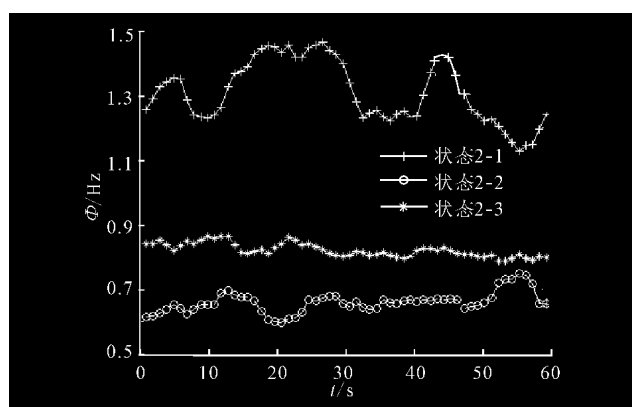
按照睡眠剥夺脑电信号相同的分析方法,对 3 状态疲劳实验中的脑电信号进行分析,得到不同疲劳状态下 Fp1、Fz 以及 Fp2、Fz 电极间 Φ 随时间变化的时程.3 状态疲劳实验中 Fp1、Fz 以及 Fp2、Fz 电极间 Φ 的时程变化如图 2 所示.

采用 SPSS13.0 对 3 种疲劳状态下 Fp1、Fz 以及 Fp2、Fz 电极间计算得到的 Φ 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,3 种疲劳状态下 Fp1、Fz 以及 Fp2、Fz 电极间 Φ 平均值存在非常明显的显著性差异($P<0.01$),达到了统计学意义的程度.3 种疲劳状态下 Fp1、Fz 以及 Fp2、Fz 电极间 Φ 平均值的比较如表 2 所示.

从多重比较结果以及图 2 和表 2 可以看出,状态 2-2 的 Fp1、Fz 以及 Fp2、Fz 电极间 Φ 平均值比状态 2-1 相应 Φ 的平均值显著降低,而状态 2-3 的



(a) Fp1 与 Fz



(b) Fp2 与 Fz

图2 3 状态疲劳实验中电极间 Φ 的时程变化曲线表2 3 种疲劳状态下电极间 Φ 平均值比较

状态	Φ/Hz	
	Fp1、Fz 电极间	Fp2、Fz 电极间
2-1	$1.035\ 8 \pm 0.069\ 70$	$1.311\ 2 \pm 0.096\ 64$
2-2	$0.691\ 3 \pm 0.036\ 23^*$	$0.660\ 4 \pm 0.032\ 81^*$
2-3	$0.939\ 5 \pm 0.153\ 23^{* \#}$	$0.821\ 3 \pm 0.020\ 80^{* \#}$

注:加*数据表示与状态 2-1 相比 $P < 0.01$;加#数据表示与状态 2-2 相比 $P < 0.01$ 。

Fp1、Fz 以及 Fp2、Fz 电极间 Φ 平均值比状态 2-2 相应 Φ 的平均值显著增加。 Φ 作为一种描述大脑特定脑区总体能量随时间变化快慢程度的量度,刻画了该脑区脑电激活的程度,进而标志了大脑的精神疲劳程度。因而,实验结果说明下午工作刚结束时状态 2-2 的精神疲劳程度比下午工作刚开始时状态 2-1 显著增加,晚饭后状态 2-3 的精神疲劳程度比下午工作刚结束时状态 2-2 显著降低。得到这样的结果是由于,随着工作时间的延长、紧张程度的增加,生理性精神疲劳程度逐渐加深,所以下午工作刚结束

时状态 2-2 的精神疲劳程度比下午工作刚开始时状态 2-1 显著增加,短暂的休息对生理性疲劳程度有一定的缓解作用,所以晚饭后状态 2-3 的精神疲劳程度比下午工作刚结束时状态 2-2 显著降低。另外, Φ 参数分析所得到的结论也与受试者自身的疲劳感觉相一致。

4 讨论与结论

上述研究结果表明,多通道线性描述参数 Φ 可以客观地反映大脑生理性精神疲劳程度的变化,具有明确的物理意义。 Φ 作为一种描述大脑特定脑区的场强变化的量度,刻画了该脑区脑电激活的程度,进而标志了大脑的精神疲劳程度。

(1)24 h 睡眠剥夺对精神疲劳有较大的影响,睡眠剥夺后的精神疲劳程度相对于睡眠剥夺前显著增加。同时,睡眠剥夺后脑电信号的场强变化率 Φ 平均值相对与睡眠剥夺前显著降低。

(2)随着工作时间的延长、紧张程度的增加,大脑受抑制的程度增加,大脑脑电的激活程度降低,生理性精神疲劳程度增加,短暂休息对由工作引起的生理性精神疲劳有较大的缓解作用。场强变化率 Φ 平均值随着精神疲劳程度的增加而逐渐降低。

(3)脑电信号的场强变化率 Φ 刻画了大脑特定脑区脑电激活的程度,进而标志了大脑的精神疲劳程度,利用它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,脑电信号的场强变化率 Φ 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,将其用于分析和监测生理性精神疲劳程度是一种非常好的方法,为生理性精神疲劳研究开辟了一条新途径,有望成为衡量精神疲劳程度的指标。

参考文献:

- [1] 张连毅,郑崇勋,李小平,等.基于柯尔莫哥洛夫熵的生理性精神疲劳分级的可行性研究[J].航天医学与医学工程,2005,18(5):375-380.
Zhang Lianyi, Zheng Chongxun, Li Xiaoping, et al. Feasibility study of mental fatigue grade based on Kolmogorov entropy [J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2005, 18(5): 375-380.
- [2] Jansen B H, Brandt M E. Nonlinear dynamical analysis of the EEG [M]. Singapore: World Scientific, 1993.
- [3] Wackermann J. Towards a quantitative characteriza-

- tion of functional states of the brain: from the non-linear methodology to the global linear description [J]. *International Journal of Psychophysiology*, 1999, 34(1): 65-80.
- [4] Pei Xiaomei, Zheng Chongxun, Zhang Aihua, et al. Discussion on “towards a quantitative characterization of functional states of the brain: from the non-linear methodology to the global linear description” by J. Wackermann [J]. *International Journal of Psychophysiology*, 2005, 56(3): 201-207.
- [5] 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.
- [6] 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.

(编辑 杜秀杰)