

# 脑电事件相关去同步化和同步化的神经元群模型

郝冬梅, 阮晓钢

(北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100022)

**摘要:** 利用基于丘脑-皮层网络的神经元群模型, 研究被试者在某种认知状态下脑功能区的连接状态。模型包括三个模块, 分别对应脑电头皮电极 C3、Cz、C4 记录的三个皮质区。模型外部输入包括用高斯白噪声表示的上行传入感受器信号、用直流偏移表示的皮质对丘脑的兴奋性输入、用指数衰减表示的来自脑干和前脑基底神经元的调制信号。模型输出的兴奋性神经元群的平均膜电位反映脑电记录的局部电位。改变模型输入, 进行多次仿真试验并进行线性和非线性分析。研究结果显示: 仿真输出信号的 alpha 频带功率谱有与实际脑机接口实验一致的事件相关去同步化和同步化现象; 模型中功能相近的区域间有更强的耦合, 随着耦合强度的增加, 输出信号间的相关性和同步性均增加。

**关键词:** 脑电; 事件相关去同步化和同步化; 神经元群; 耦合; 丘脑-皮层网络  
**中图分类号:** Q692

## 1 引言

脑电 (electroencephalography, EEG) 事件相关电位去同步化和同步化技术是目前探讨正常和病理状态下脑的感觉、运动和认知功能非常有用的方法。与其他功能影像技术相比, EEG 显示了很好的时间分辨率, 而且它的多通道记录方法还能够获得较好的空间分辨率。当大脑皮质某区域开始激活, 该区域的代谢和血流增加, 同时进行性的信息加工可以导致脑电波的 alpha 和 beta 频谱振荡的幅度减低或者阻滞, 这一生理现象称为事件相关去同步化 (event-related desynchronization, ERD); 而 alpha 和 beta 频谱在大脑静息或惰性状态下表现出明显波幅增高的电活动, 称为事件相关同步化 (event-related synchronization, ERS)。最近的研究证实, 运动、感知和认知的信息加工均能引起进行性 EEG 的变化, 形成 ERD 和 ERS<sup>[1,2]</sup>。

对神经系统的建模仿真有助于理解大量神经元协同作用进行信息处理的方式。Lopes da Silva 等<sup>[3]</sup>早期建立了仿真脑电节律的模型, 模型包括两个通过负反馈相互连接的神经元群。仿真结果表明, 当输入一定的噪声信号时, 丘脑神经网络可以产生近似于 alpha 节律的随机信号, 不同大脑区域的相干强度取决于区域间的神经元映射与输入噪声均值之比。Zetterberg 等<sup>[4]</sup>研究了包括三个神经元子集的局部神经元群模型, 每个子集由线性动态元素

和非线性静态元素组成, 子集间通过正反馈和负反馈环相连。研究表明, 当输入白噪声时, 网络处于稳态, 产生类似脑电的节律信号, 当输入信号均值达到某个值时, 网络变得不稳定, 出现极限环。Jansen 等<sup>[5]</sup>用两个模型耦合方式仿真了 EEG 和诱发电位 (EPs)。David 等<sup>[6]</sup>在 Jansen 所建模型基础上将神经元群内部扩展为多个相互作用的子集, 并研究了其耦合和动力学特性。Suffczynski<sup>[7]</sup>研究了与注意力相关的 alpha 节律计算模型, 揭示了“焦点 ERD/周围 ERS“(focal ERD/surround ERS)现象。以上这些模型较少涉及运动尤其是想象运动对输出的作用效果, 即运动对脑电节律和幅度等的影响。

Pfurtscheller 等<sup>[8,9]</sup>在大量的与运动相关作业的研究中发现: 不仅是单侧肢体运动而且想象运动也可以激活初级感觉运动区, 在对侧大脑半球产生 ERD 现象, 在同侧大脑半球产生 ERS 现象。

本文在前人研究的基础上结合神经元和突触相互作用的特性, 对丘脑皮层网络建模仿真, 根据丘脑皮质中继核 (thalamo-cortical relay nucleus,

收稿日期: 2004-08-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60375017)

通讯作者: 阮晓钢, 电话: (010)67396157

E-mail: adrxg@bjut.edu.cn

TCR) 细胞群和网状核细胞 (reticular nucleus cells, RE) 群间功能性相互作用, 建立了想象左右手移动实验中对三个检测电极 (C3, Cz, C4) 的三个神经元群模块, 并输入感受器信号、皮质作用信号和调制信号, 由各个区域的仿真输出, 揭示 ERD 和 ERS 产生的生理机制, 并采用线性和非线性分析方法对模型特性进行分析。

## 2 模型建立

### 2.1 生理学依据

从丘脑皮层网络方面分析, 运动命令通过脑干经脊髓运动神经元传给肌肉组织。皮肤、肌肉和关节的感受器输入上行传至丘脑并中继至躯体感觉运动区, 由此将躯体感觉运动信息传递给运动皮质以调节运动。丘脑核不仅包括中继核 (如 TCR), 还包括具有传播和映射功能的神经核 (如 RE), 可调节丘脑皮层网络的活动节律。如图 1 所示, 两种丘脑核接收上行的特定输入并映射至某一皮质区, 皮质又反向连接至 TCR 和 RE。TCR 传递兴奋给 RE, RE 通过树突互连并反过来抑制 TCR。TCR 还从脑干接收类胆碱物质的输入, RE 从脑干和基底前脑处接收类胆碱物质的输入。

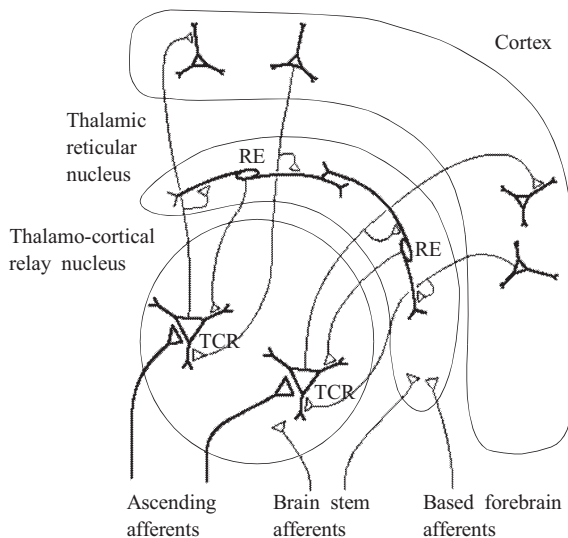


Fig.1 The schematic diagram of connections between TCR, RE and cortex

从细胞机理方面分析, 当一个神经元通过突触接收上位神经元传来的信号后, 在细胞内整合, 在轴丘处形成触发信号, 继而产生沿轴突的传递信号, 并转化为突触输出部位的输出信号。突触可以

在输入信号的作用下产生兴奋性突触后电位 (excitatory post synaptic potential, EPSP) 或抑制性突触后电位 (inhibitory post synaptic potential, IPSP)。轴丘处动作电位的发放取决于 EPSP 和 IPSP 总和的相对强度, 只有此处达到阈值才可产生动作电位, 并沿轴突传播。

### 2.2 模型描述

本文建立模型时做了以下假设: 由于解剖和生理学实验数据所限, 只考虑丘脑皮层网络对脑电 ERD/ERS 现象的作用; 模型仿真的是神经元群而非单个神经元的总体特性; 为了简化, 模型未考虑 TCR 间可能存在的正反馈及噪声信号源对 RE 的直接作用。模型如图 2 所示。

此模型由三个结构相同的模块组成, 分别表示标准脑电电极 C3、Cz、C4 检测的三个区域, 其中 C3、C4 为左、右手对应的感觉运动区, Cz 位于 C3、C4 中间位置。每个模块内由以负反馈方式连接的兴奋性 TCR 群和抑制性 RE 群组成。TCR 群和 RE 群分别用两部分模拟。一部分用传递函数  $h_c(t)$  和  $h_i(t)$  模拟神经元群的输入信号与 EPSP、IPSP 的关系, 另一部分用 sigmoid 函数  $\lambda_g(v)$  或  $\lambda_g(v)$  模拟突触后电位的代数和与发放的动作电位密度  $E(t)$  间的关系。耦合系数  $w_1$  和  $w_2$ 、 $w_6$  和  $w_7$ 、 $w_{10}$  和  $w_{11}$  分别表示三个模块内部 TCR 细胞到 RE 细胞、RE 细胞到 TCR 细胞的平均连接数目。模块间通过抑制性 RE 细胞互连, 耦合系数  $w_4$  和  $w_5$ 、 $w_8$  和  $w_9$ 、 $w_{12}$  和  $w_{13}$  分别表示三个模块间 RE 细胞的互连数目。

有以下表达式<sup>[34]</sup>:

$$h_c(t) = A [\exp(-a_1 t) - \exp(-a_2 t)] \quad (1)$$

$$h_i(t) = B [\exp(-b_1 t) - \exp(-b_2 t)] \quad (2)$$

$$g(V) = \begin{cases} g_0 \exp[q(V - V_d)] & \text{if } V \leq V_d \\ g_0 \{2 - \exp[q(V_d - V)]\} & \text{if } V > V_d \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $A=1.65$  mV,  $B=32$  mV,  $a_1=55$  s<sup>-1</sup>,  $a_2=605$  s<sup>-1</sup>,  $b_1=27.5$  s<sup>-1</sup>,  $b_2=55$  s<sup>-1</sup>, A、B 反映每种突触连接的有效性。  $q=1.5$  mV,  $V_d=7$  mV,  $\lambda_{g_0}=25$  s<sup>-1</sup>。  $V_d$  为动作电位的平均发放阈值。  $\lambda_{g_0}$  为动作电位的平均发放率。

已有的研究表明<sup>[10]</sup>: 在想象运动过程中, 脊髓兴奋, 出现神经肌梭活动, 想象运动的一侧肢体的肌电信号增加, 且增强程度与想象努力的程度成比例。

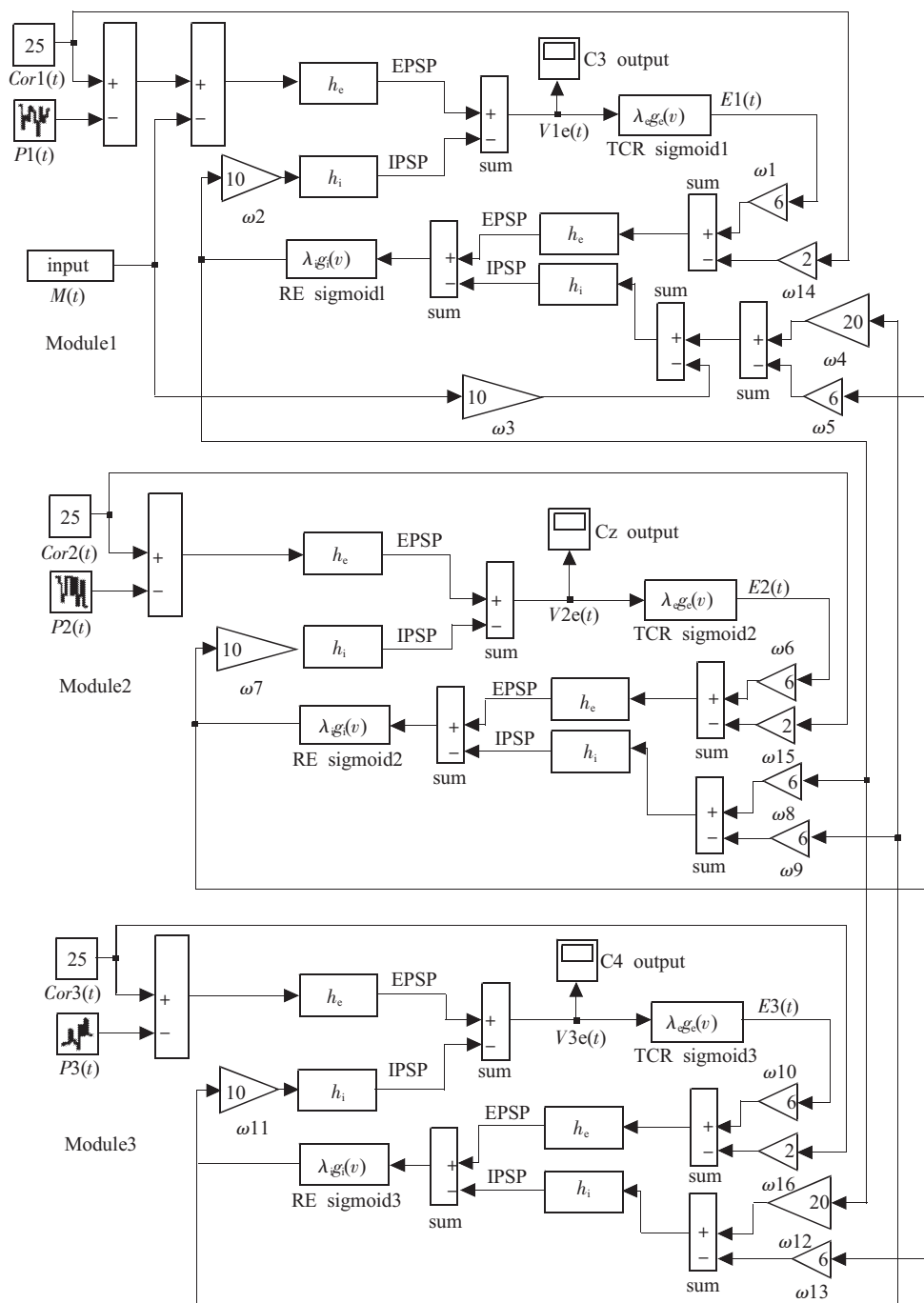


Fig.2 Neuron population model for ERD/ERS

用高斯白噪声信号  $P1(t)$ 、 $P2(t)$ 和  $P3(t)$ 模拟由肢体感受器上行传至 TCR 的输入；用直流偏移信号  $Cor1(t)$ 、 $Cor2(t)$ 和  $Cor3(t)$ （取值均为 25 pps）模拟皮质第六层锥体细胞对 TCR 和 RE 的兴奋性输入，三个模块中增益  $w14$ 、 $w15$  和  $w16$  分别表示

RE 较 TCR（增益为 1，省略）对皮质输入更加敏感；调制信号  $M(t)$ 模拟想象运动时脑干神经元和前脑基底神经核的输入，对 TCR 表现为兴奋性输入，对 RE 表现为抑制性输入，这是因为在类胆碱通道上释放的乙酰胆碱降低了 TCR 中  $K^+$  的传导性，从

而引起 TCR 神经元群的去极化<sup>[1]</sup>，却可以提高 RE 中 K<sup>+</sup> 的传导性，从而引起 RE 神经元群的超极化<sup>[2]</sup>。增益  $w_3$  表示乙酰胆碱的输入对 TCR、RE 细胞的不同影响。将  $M(t)$  加在模块 1 或模块 3 上分别仿真想象左或右手移动的情况。用兴奋性神经元群的平均膜电位  $V1e(t)$ 、 $V2e(t)$  和  $V3e(t)$  分别表示由标准头皮电极 C3、Cz 和 C4 记录的 EEG 信号。

### 3 结果

#### 3.1 仿真结果

用神经元群模型进行多次仿真试验（文中为 100 次），调制信号从第 3 秒加至第 9 秒，考虑到注意力的逐渐降低，采用一个以指数形式衰减的信号，如图 3 所示。对每一次试验结果，用 8~12 Hz (alpha 频带) 的线性相位 Remez FIR 等纹波带通滤波器进行滤波，对每个采样点的幅值平方后求多次试验的均值，对 200 ms 滑动窗内采样点的前述均值取平均，得到准瞬时功率 ( $A$ ) 后，向前移动一个采样点，计算前 3 s 的平均功率作为参考功率

( $R$ )，据下式计算每一采样点的相对功率。

$$per=100\times(A-R)/R \quad (\%) \tag{4}$$

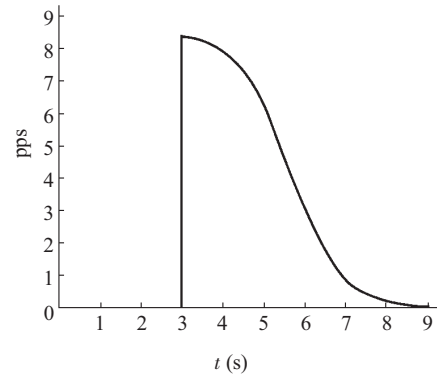


Fig.3 Modulating input

图 4 中粗实线仿真想象左手移动时三个模块的输出，图 5 中粗实线仿真想象右手移动时三个模块的输出。信号的正值表示 ERS，负值表示 ERD。由图中可以看出，想象左手移动时在左侧大脑半球的感觉运动区出现了 ERS 现象，而右侧大脑半球的感觉运动区出现了 ERD 现象；想象右手移动时，结果正好相反。

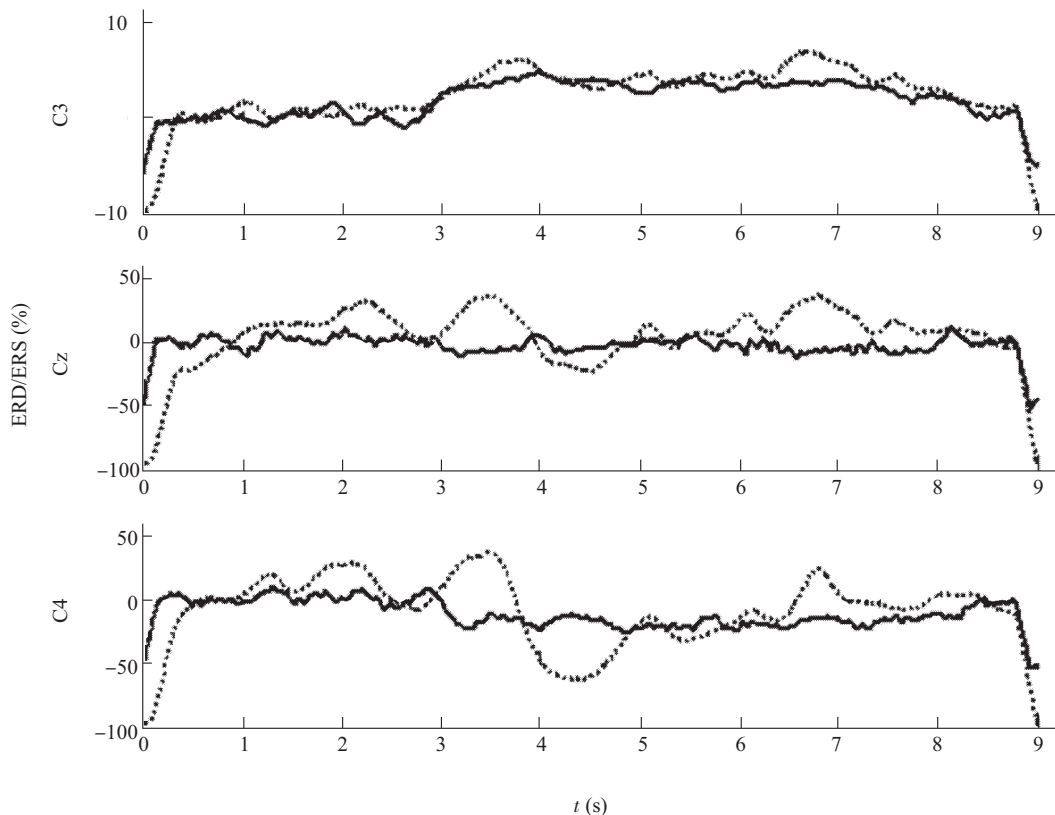


Fig.4 Imagination of left hand movement

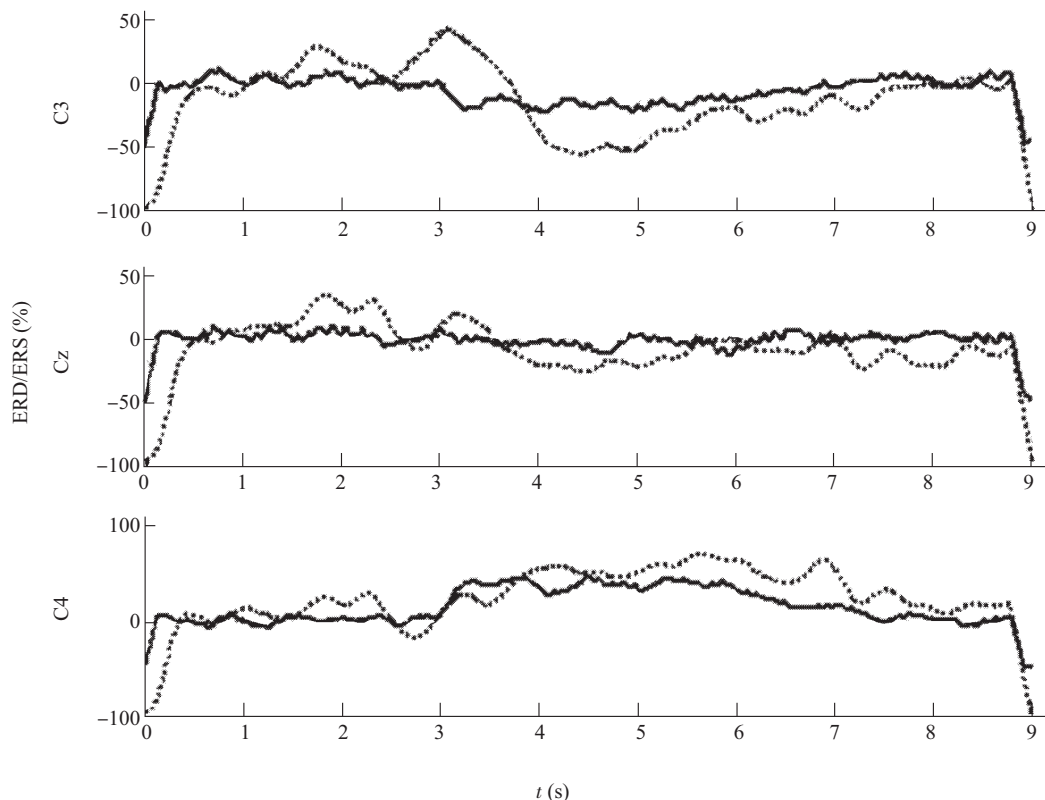


Fig.5 Imagination of right hand movement

### 3.2 实际实验结果

实际实验采用 2003 年国际脑机接口 (brain computer interface, BCI) 竞赛中由奥地利 Graz 科技大学生物医学工程学院提供的实验方法及数据。被试者放松坐在椅子上, 面对显示器。前 2 s 处于安静状态,  $t=2$  s 时有声音提示实验开始, 屏幕上显示 “+” 1 s,  $t=3$  s 时显示向左或向右的箭头, 提示被试者想象左手或右手移动, 根据电极 C3、Cz、C4 记录的 EEG 信号控制进度条的移动。信号采样频率为 128 Hz, 被试者共进行了 280 次时程为 9 s 的实验。图 4 中细虚线为实际实验中想象左手移动时电极 C3、Cz、C4 的输出, 图 5 中细虚线为实际实验中想象右手移动时电极 C3、Cz、C4 的输出。

可以看出仿真结果与实际实验有相似的 ERD/ERS 规律。

## 4 模型分析

大脑连接的复杂性决定了其功能的多样性, 大

脑可以看作是动力学系统, 由于大量状态变量导致许多特异性的亚稳态, 这种亚稳态使大脑具有易变性, 可以通过调节内部结构产生自组织功能。大脑的整合性或功能连接可以由耦合神经系统信号间的统计相关性反映, 下面对模型输出的对应感觉运动区的脑电信号 (电极 C3、C4 记录的  $V1e(t)$ 、 $V3e(t)$ ) 的瞬时功率的统计相关性, 与图 2 中 C3、C4 区域间耦合系数  $w4$  (或  $w12$ ) 的关系进行线性和非线性分析, 以反映大脑的功能连接特性<sup>[3]</sup>。

### 4.1 线性分析

两个时间序列  $x$ 、 $y$  的相关性, 常用线性互相关函数表示。

$$c_{xy}(l) = \left\langle \left( \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma_x} \right) \left( \frac{y_{i+l} - \bar{y}}{\sigma_y} \right) \right\rangle_i \quad (5)$$

其中,  $\bar{x}$  和  $\sigma_x$ 、 $\bar{y}$  和  $\sigma_y$ , 分别表示序列  $x$ 、 $y$  的均值和方差,  $l$  为时间延迟。  $\langle \rangle$  表示取均值。

如图 6 所示, 随着 C3、C4 区域耦合强度增加, 信号间的相关性沿负向增加。这也说明了 C3、C4 区域间是相互抑制的, 从而出现了 ERD/ERS 现象。



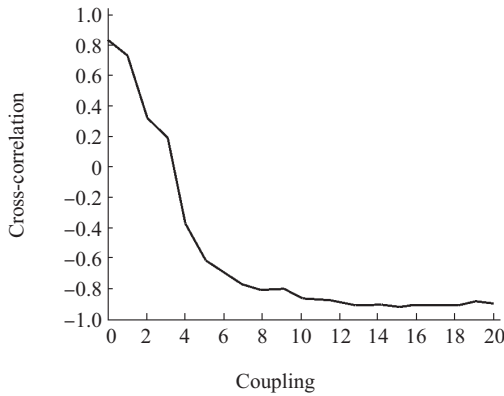


Fig.6 Cross-correlation as a function of coupling

4.2 非线性分析

4.2.1 互信息

从信息论角度分析两个随机信号  $X$ 、 $Y$  间的互信息，可以表示为：

$$MI(X,Y)=H(X)+H(Y)-H(X,Y) \tag{6}$$

其中， $H(X)$ 、 $H(Y)$  分别表示随机信号  $X$ 、 $Y$  的熵， $H(X,Y)$  表示随机信号  $X$ 、 $Y$  的联合熵。结果如图 7 所示。可以看出随着耦合的增加，两随机信号  $X$ 、 $Y$  间有更多的信息相关性。

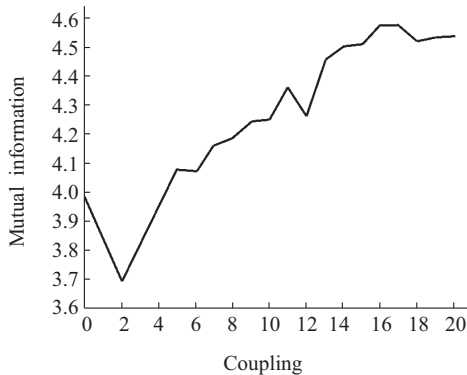


Fig.7 Mutual information as a function of coupling

4.2.2 相位同步分析

设信号  $x(t)$  的解析信号为  $\xi(t)$ ，定义为：

$$\xi(t)=x(t)+ix_h(t)=a_\xi(t)e^{i\phi_\xi(t)} \tag{7}$$

其中， $x_h(t)$  为  $x(t)$  的 Hilbert 变换。定义为

$$x_h(t)=H\{x(t)\}=x(t)\otimes\left(\frac{1}{\pi t}\right) \tag{8}$$

则  $\xi(t)$  的瞬时相位与  $x(t)$  的瞬时相位相等， $\phi_\xi(t)=\phi_x(t)$ 。同样，可求出  $y(t)$  的瞬时相位  $\phi_y(t)$ 。则相对相位：

$$\phi_{xy}(t)=\phi_x(t)-\phi_y(t) \tag{9}$$

平均相位相干性可表示为：

$$\rho=|\langle e^{i\phi_{xy}(t)} \rangle_t| \tag{10}$$

$\langle \rangle$  表示取均值， $0 \leq \rho \leq 1$ 。 $\rho=0$  表示信号不同步， $\rho=1$  示信号完全同步。图 8 中，随着耦合的增加，信号同步性也增加。

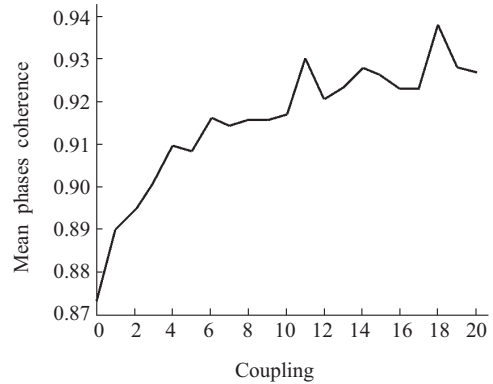


Fig.8 Mean phases coherence as a function of coupling

5 结 论

本文在神经解剖学、生理学实验、实际 BCI 实验及前人工作的基础上提出了仿真 ERD/ERS 的神经元群模型。模型用三个神经元群模块模拟了 Graz 科技大学 BCI 实验中头皮电极 C3、Cz 和 C4 对应的三个大脑皮质区，模块内由以负反馈方式连接的兴奋性 TCR 群和抑制性 RE 群组成，模块间通过抑制性 RE 神经元群互连，用调制信号作用于不同模块模拟被试者想象左右手移动的激励信号，得到与实际实验类似的 ERD/ERS 现象。电极 C3、C4 对应的感觉运动区有相似的功能，电极 Cz 对应的区域与运动无关，虽然 Cz 位于 C3 和 C4 间，但 Cz 与 C3、C4 间的耦合系数 ( $w_5, w_8, w_9, w_{13}$ ) 远小于 C3 与 C4 间的耦合系数 ( $w_4, w_{12}$ )。模型结构提示，被试者想象左右手移动时 C3、Cz 和 C4 对应的三个大脑皮质区是抑制性连接，但是抑制强度不是与距离相关而是与功能区相关，即功能相近的区域之间有更强的耦合连接。

通过对模型输出信号的线性和非线性分析可以看出，区域间的耦合强度影响信号间的线性相关性、信息相关性和同步性。

参考文献：

[1] 庄平. 脑电事件相关去同步化和同步化活动与运动相关性作业. 中国临床康复, 2004,8(1):152~154  
 [2] Pfurtscheller G, Lopes da Silva FH. Event-related EEG/MEG

- synchronization and desynchronization: basic principles. *Clinical Neurophysiology*, 1999,110:1842~1857
- [3] Lopes da Silva FH, Hoeks A, Smits H, Zetterberg LH. Model of brain rhythmic activity: the alpha-rhythm of the thalamus. *Kybernetik*, 1974,15:27~37
- [4] Zetterberg LH, Kristiansson L, Mossberg K. Performance of a model for a local neuron population. *Biological Cybernetics*, 1978,31:15~26
- [5] Jansen BH, Vincent GR. Electroencephalogram and visual evoked potential generation in a mathematical model of coupled cortical columns. *Biological Cybernetics*, 1995,73:357~368
- [6] Olivier D, Friston KJ. A neural mass model for MEG/EEG: coupling and neuronal dynamics. *NeuroImage*, 2003,20:1743~1755
- [7] Suffczynski P, Kalitzin S, Pfurtscheller G, Lopes da Silva FH. Computational model of the thalamo-cortical networks: dynamical control of alpha rhythms in relation to focal attention. *International Journal of Psychophysiology*, 2001,43:25~40
- [8] Pfurtscheller G, Neuper CH, Flotzinger D, Pregezer M. EEG-based discrimination between imagination of right and left hand movement. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 1997,103:642~651
- [9] Pfurtscheller G, Neuper C, Guger C, Harkam W, Ramoser H, Schlögl A, Obermaier B, Pregezer M. Current trends in graz brain-computer interface (BCI) research. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 2000,8(2):21~219
- [10] Jeannerod M. Mental imagery in the motor context. *Neuropsychologia*, 1995,33(11):1419~1432
- [11] McCormick DA, Prince DA. Actions of acetylcholine in the guineapig and cat medial and lateral geniculate nuclei in vitro. *J Physiol (Lond)*, 1987,392:147~165
- [12] McCormick DA, Prince DA. Acetylcholine induces burst-ring in thalamic reticular neurons by activating a potassium conductance. *Nature*, 1986,319:402~405
- [13] Olivier D, Diego C, Friston KJ. Evaluation of different measures of functional connectivity using a neural mass model. *NeuroImage*, 2004,21:659~673

## A NEURON POPULATION MODEL FOR EVENT-RELATED DESYNCHRONIZATION AND SYNCHRONIZATION

HAO Dong-mei, RUAN Xiao-gang

(School of Electronic Information and Control Engineering, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, China)

**Abstract:** A neuron population model based on thalamo-cortical network was used to study the brain connectivity with certain mental tasks. It consisted of three modules corresponding to cortex regions under EEG electrodes C3, Cz and C4. Its external inputs included the sensory inputs from the ascending afferents expressed with Gaussian white noise, the corticothalamic excitatory input expressed with a DC offset and the modulating input from brainstem and forebrain basilar neurons expressed with attenuating exponent. Its output average membrane potential in the excitatory population stood for the local field potential recorded in scalp EEG. Many trials had been made with various inputs and the model was analyzed with linear and nonlinear measurements. The results indicate that the alpha frequency band spectrum of output shows event-related desynchronization and synchronization (ERD and ERS), which is consistent with the brain computer interface experiment. The similar functional regions have more inhibitory connection and the dependency between the time series increase with coupling strength.

**Key Words:** Electroencephalography (EEG); Event-related desynchronization and synchronization (ERD and ERS); Neuron population; Coupling; Thalamo-cortical network