



算术心算过程 40Hz 脑电事件相关电位的分维特性研究¹⁾

张作生 公佩祥 彭 虎 李江明

(中国科学技术大学生物医学工程研究所 合肥 230026)

关键词 认知, 40Hz 脑电事件相关电位(ERP), 分维.

1 引言

用非线性动力学的原理方法,特别是分形与混沌学说,来研究大脑、分析脑电,已经成为当前非常热门的一个领域.现代研究表明,EEG(electroencephalogram)信号不仅仅是准周期信号或是随机信号,它在多数情况下呈现出混沌特征.在睡眠、低级警醒、认知等状态,EEG是一种混沌时间信号,即人的脑电信号中存在的混沌吸引子.脑电信号作为混沌吸引子的研究,主要就是通过刻画吸引子的动力学特性,如分形维数、李雅普诺夫特征指数等来研究脑电的一些特性,其中最常用的就是分形维数的测量.

EEG的维数代表了EEG信号自相似特性和尺度无关特性的不变测度,反映了EEG信号的复杂程度.EEG的关联维数分析,其意义主要在于不同实验条件、不同生理状态下的对比研究.因而,不同情况下的EEG维数的相对不同以及同一情况下维数的差异要比其绝对的数值更有价值^[1].

目前EEG的分维数测量,主要集中在不同生理状态下自发EEG信号和普通诱发电位的分维特性研究方面,而与认知活动密切相关的事件相关电位,尤其是40Hz ERPs的分维特性分析还未见国内外文献报导.这里,我们采用自制的脑电40Hz ERPs研究系统提取了短时文字记忆-辨识过程中40Hz ERPs信号,同时开发了一套基于奇异谱分析的分维数分析软件系统,对于40Hz ERPs信号进行了相应的分析研究.

2 算术心算测试实验设计

算术心算测试所采用的心理实验系统,主要包括40Hz ERPs采集系统、认知事件刺激发生系统、记录分析处理系统等三个部分构成.图1是实验系统的结构框图.

被试对象为16名在校大学生和研究生,其中12名男性、4名女性,年龄分布在22—

1) 国家自然科学基金资助项目.

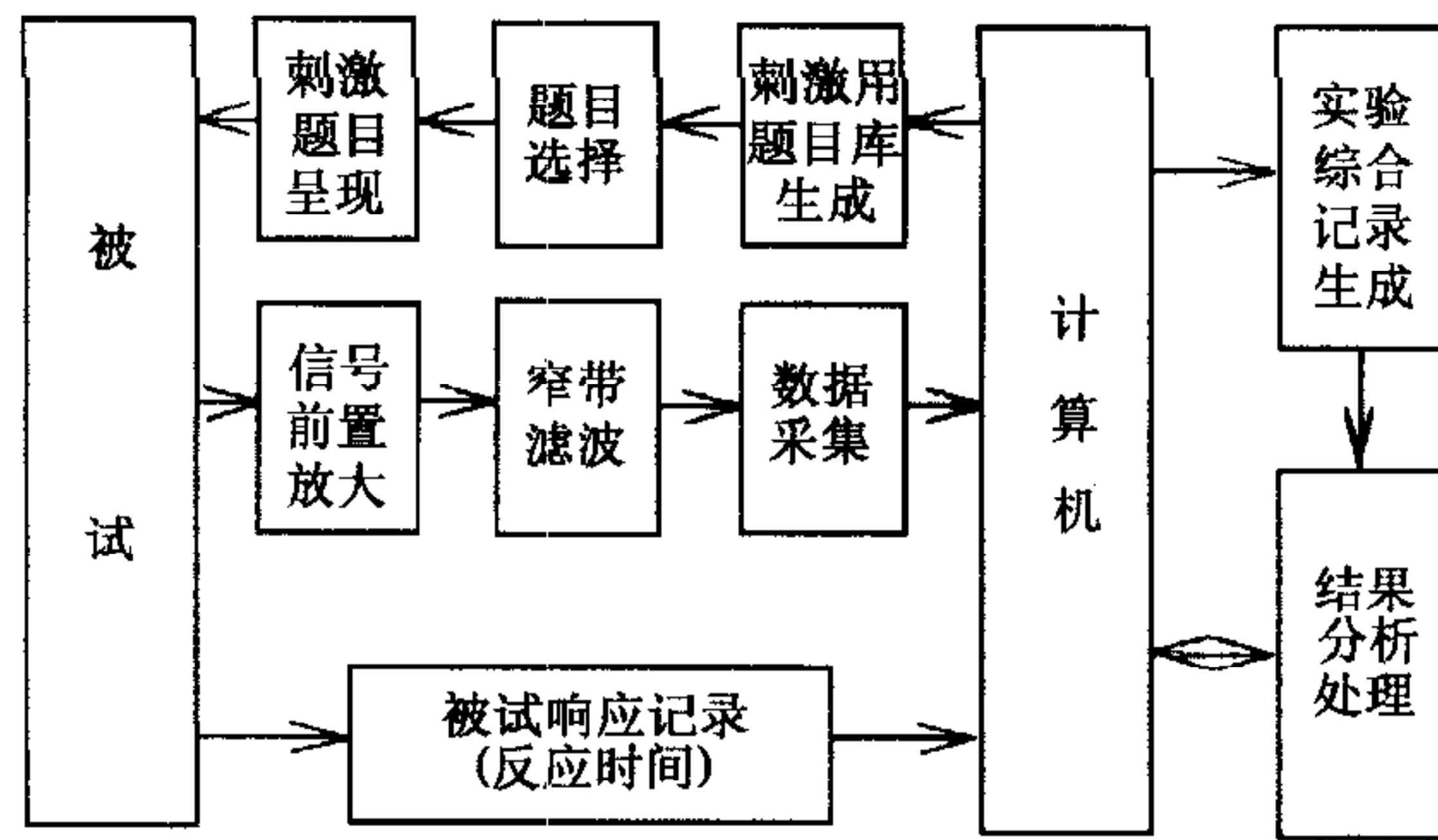


图1 实验系统结构框图

27 岁之间. 同时记录左右半球两路脑电信号, 电极安放位置在 01-P3-T5 和 02-P4-T6 各自的三角区中心.

由计算机随机产生 20 道两位整数的乘除法运算题目, 每个题目的屏幕呈现时间为 20 秒, 要求被试得到的乘除结果后立即按下鼠标键; 通过被试完成心算所用时间, 可以将测试题目分成几个难度等级. 在实验处理中取 1—10 共十个难度等级.

3 分维数提取算法

由于实验的 EEG 信号都存在较大的噪声, 因而运用传统的 $G-P$ 算法^[2] 求解相关维数时, 算法的可靠性和精度都不理想, 因此必须设法减小噪声对于算法可靠性和精度的影响. 在研究了多种噪声处理方法之后, 采纳了 Fraedrich 的建议^[3] 将 Albano^[1] 提出的奇异谱分析与 $G-P$ 算法相结合, 首先通过对相空间进行奇异谱分析, 进而对原始相空间进行旋转, 从而提高了信号的信噪比, 然后再采用 $G-P$ 算法计算关联维数. 算法的结构框架如图 2 所示.

根据理论计算的最小数据长度, 以及为了减少系统出现不稳定和干扰的影响, 算法中

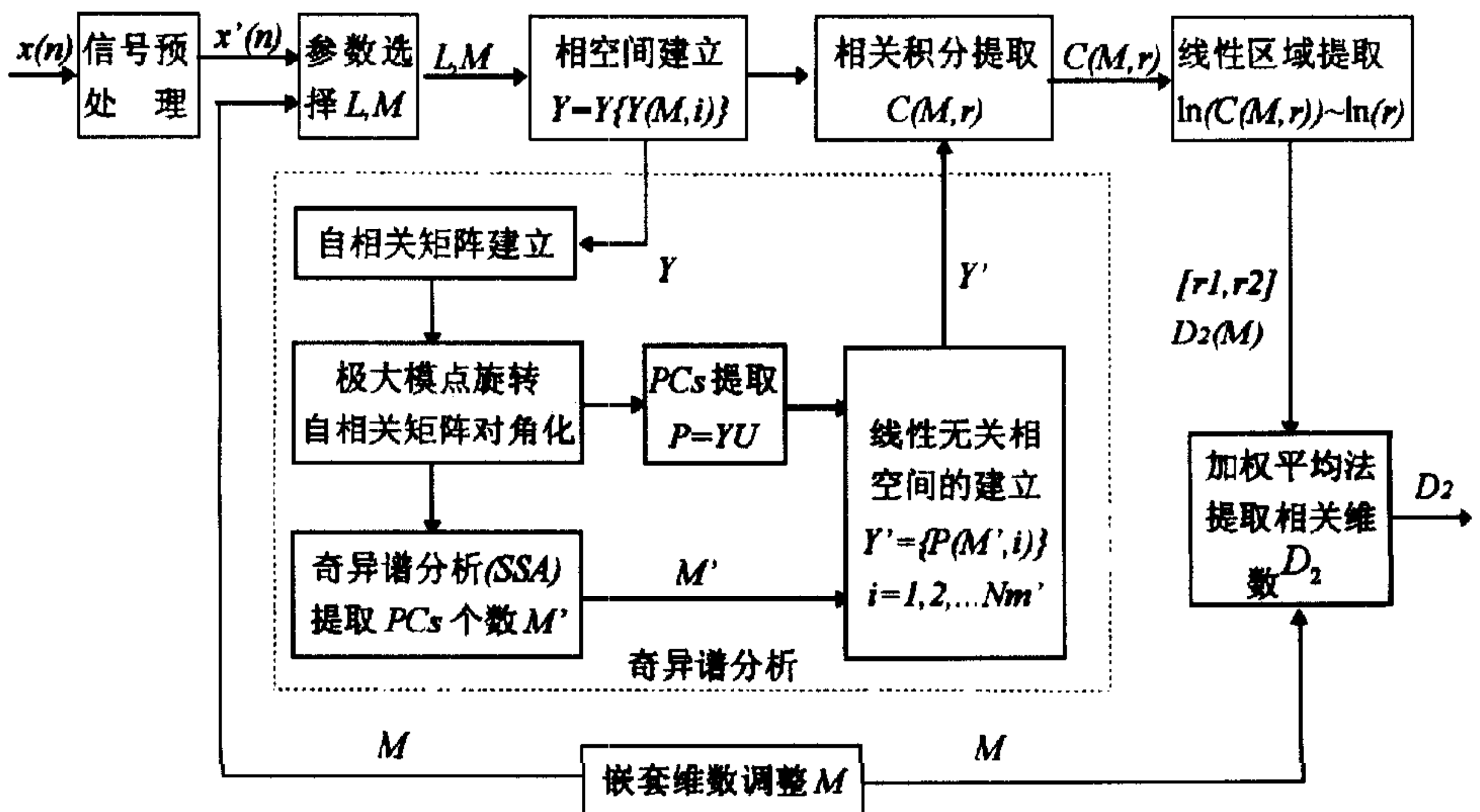


图2 基于奇异谱分析的关联维数提取算法

选择 $N=1\ 000$, 延迟时间 $L=3\tau/(M-1)$, 其中 τ 为信号的自相关函数下降到其初始值的 $1/E$ 时的时间间隔. 线性增益区由一个不断扩大的滑动窗口自动确定. 为了保证结果的可靠性, 计算过程中选择嵌套维数 $M=16, 20, 24, 28, 32$, 分别计算它们各自对应的关联维数, 再通过它们的加权平均得到最后结果, 所用的权值就是每个 M 所对应的线性增益区的宽度.

4 算术心算过程中 40Hz ERPs 分维特性分析

每个题目呈现时间为 20 秒, 每个数据段长度为 1 000 点, 这相当于在每道题目呈现过程要计算 8 次分形维数. 我们把计算得到的 40Hz ERPs 分形维数和完成心算所用的时间进行比较, 得到图 3 所示结果. 图中每条竖线段表示对应题目完成的时间, 相邻两条虚竖线间的时间长度对 20 秒.

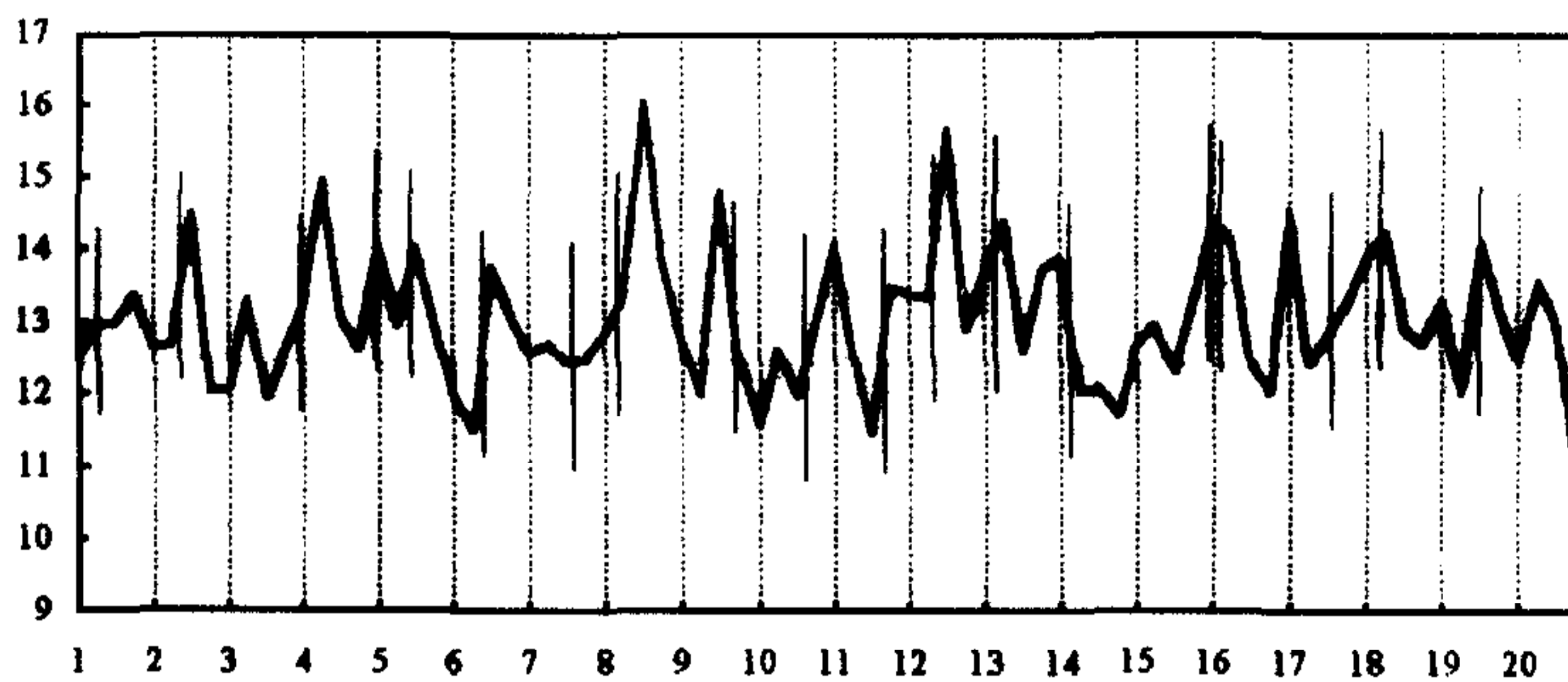


图 3 心算过程中左半球 40Hz ERPs 的分维数变化

从图 3 可以发现几个非常有意义的现象. 首先, 对于每个心算题目刺激, 对应的 40Hz ERPs 分维数都存在一个较明显的峰值, 该峰值基本上与对应的刺激事件保持了一定程度上的同步. 这一点在图中表现的非常明显. 其次, 在每一心算题目测试的时间间隔内, 题目完成的时间基本上处于 40Hz ERPs 分维数变化曲线的上升沿. 对于所有被试的计算结果, 也都存在这些现象. 这说明, 心算事件刺激在 40Hz ERPs 上有较强烈的诱发反应, 导致了大脑的动力学状态出现明显变化. 此时, 大脑的兴奋性, 即其动力学系统的瞬变特性表现得极为强烈. 而心算题目完成的时间基本上处于 40Hz ERPs 分维数变化曲线的上升沿这一事实似乎表明: 在静息态时大脑活动的复杂度较低, 表现为其分维数也较低; 心算事件刺激的到来, 促使大脑兴奋, 对应于分形维数的上升趋势. 随着题目的求解结束, 这种兴奋增大到一定值后逐渐下降, 直到下次刺激的到来为止. 同样, 从实验也可看到, 右半球也存在类似于左半球的那些变化.

5 结束语

根据前面得到的结果, 可以看到在认知活动中, 大脑的动力学运动与认知事件刺激的耦合关系密切. 尤其是在心算测试中, 40Hz ERPs 与认知事件保持了相当程度的同步性, 对于每个心算题目, 基本上都有一 40Hz ERPs 分形维数峰值与其对应, 两者表现出较强

的耦合性. 这验证了 40Hz EEG 的有关学说, 即作为“集中唤醒”标志的 40Hz ERPs 与认知事件刺激之间存在着一种松散耦合关系.

从研究结果可以看到, 脑电的动力学特性表征有极强的科学性和应用价值, 它从物理学的思想出发, 提供了常规分析方法所无法得到的信息, 具有不受特殊点影响和可重复性强的优点, 它使我们得以在系统的水平分析大脑的运动特性, 为脑科学的研究提供了有力的工具. 另外, 也从一个侧面证实了 40Hz ERPs 与认知活动的密切关系, 为认知科学和 40Hz ERPs 的相关性研究提供了新方法.

参 考 文 献

- 1 Albano A M, Muench J *et al.* Singular-value decomposition and the Grassberger-procaccia algorithm. *Physical Review A*, 1988, **38**(2): 3017—3026.
- 2 Grassberger P, Procaccia I. Measuring the strangeness of strange attractor. *Physica D*, 1983, **9**(1): 198—208.
- 3 Fraedrich K, Wang R S. Estimating the correlation of an attractor from noising and small data sets based on re-embedding, *Physica D*, 1993, **65**(1): 373—398.

RESEARCH OF THE FRACTAL DIMENSION PROPERTY OF 40Hz EVENT-RELATED POTENTIALS UNDER ARITHMETIC CALCULATION TASKS

ZHANG ZUOSHENG GONG PEIXIANG PENG HU LI JIANGMING

(BME Institute of University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Key words Cognition, 40Hz event-related potentials, fractal dimension.