

2.6-11

脑电信号混沌态的研究

A Study on Chaotic State of EEG Signal

杨浩
Yang Hao

周守昌
Zhou Shouchang

王桂兰
Wang Guilan

(重庆大学电气工程系, 重庆, 630044)

R741.044
TN911.6

A 摘要 对思维时的脑电信号混沌态进行了研究。在研究中首次引入了阵发性40Hz脑电图检测技术借以确定用于混沌态分析的数据段, 以确保分析结果的可靠性和稳定性。文中对混沌定量计算的参数也进行了一定的研究, 对30多位受试者的脑电信号样本进行了分数维值和最大李亚谱诺夫指数计算。实验结果表明分数维值对临床应用确有价值, 而仅凭一个最大的李亚谱诺夫指数似乎不能有助于诊断疾病。

关键词 混沌场; 脑电图 / 40 Hz 脑电信号
中国图书资料分类法分类号 TN911.6

ABSTRACT In this paper, the chaotic theory is described briefly and the chaotic state of EEG on thinking are studied. In this study, the method of detecting short bursts of 40 Hz EEG activity is firstly used to determine the segments to be computed for analysis of the chaotic state of EEG, therefore, the reliability and stability of the analysis results are assured. In this paper, the chaotic parameters of quantitative analysis are studied and more than 30 subjects EEG are analysed for the value of the fractional dimension and the maximal Lyapunov exponent. The results of experiments indicate that the value of the fractional dimension is valuable for clinical diagnosis and the maximal Lyapunov exponent is not sufficient for diagnosis of disease.

KEYWORDS chaoticfield; electroencephalogram / 40 Hz EEG

0 引 言

混沌是自然界客观存在的一种运动形式, 是非线性动力学系统的一种内部属性^[1]。目前在学术界对混沌的定义还没有一致的论述, 但人们通常都把由确定性的非线性动力学系统中表现出的内在随机性称为混沌。

产生脑电信号的物质基础是大脑的神经细胞, 神经细胞包括神经元和神经胶质细胞等其它神经细胞。在人的大脑中大约有上百亿个神经元, 它们通过轴突和突触相互连接在一起, 形成一个巨大而又复杂的神经网络, 这个网络是信息处理的中枢。单个神经元的结构并

不复杂,其生理特性已为人们所掌握,但由简单的神经元组成的神经网络,其功能并非单个神经元功能的简单叠加。大脑神经网络的信息处理过程是复杂的,在神经细胞间既有化学反应又有机械作用,更主要的是在神经网络中还有电活动。人们之所以对神经网络的电活动感兴趣,是因为人们可以从大脑皮层描记到神经细胞的电活动信号,这就是脑电图(Electroencephalogram,以下简称 EEG)。现代的科学实验结果表明,神经网络中的电活动是大脑信息处理过程中的一种极为重要的形式,通过对脑电信号的研究可以了解神经网络的信息处理过程和作用机理。

1 思维与脑电混沌态

近年来随着人们对混沌现象的深入认识,混沌理论得到了迅速发展。运用混沌理论对脑电信号的研究表明,脑电信号确实具有混沌特性。表面上看来是随机的、无规则的脑电信号实际上是受少数独立的动力学变量控制着^[2]。

大脑神经网络最独特之处在于它的自学习功能。现代科学研究的成果已经证明,人脑所获得的知识是以结构信息的方式储存在大脑中的。这就是说,当人在外界信息刺激下,神经网络对新的信息进行分析、解释和组织,并将其纳入已有的结构信息之中,形成新的结构信息。在这个过程中,神经网络在自学习、自组织、自适应等作用机理之下,从一种有序结构向另一种有序结构转换。神经网络的有序结构对应着神经网络的稳定状态,然而因为大脑每时每刻都在处理着各种信息,每一种信息都可能引起神经网络的结构变化,所以这种有序结构是极不稳定的。当神经网络不断地从一种有序结构向另一种有序结构转换时,脑电信号就表现出混沌现象(以下称为脑电混沌态)。现代科学理论认为,神经网络中的电活动是思维活动的基础,因此我们可以通过对神经细胞电活动的研究来了解思维活动的规律。

系统的状态变量分析法是系统分析的一种重要方法。系统的状态变量是指能描述系统任一瞬时状态的为最少(即线性独立)的系统变量集合中的各个变量。在任一瞬时 t ,系统的各状态变量的函数值可以用多维空间中的一个点来表示,这样的空间称为状态空间。当时间变量 t 由 0 向 ∞ 增大时,表示系统瞬时状态的点在状态空间中描绘的曲线称为状态轨迹。状态轨迹经过长时间后所采取的终极形态称为吸引子。吸引子可能是稳定的平衡点,或周期性的轨道;也可能是继续不断变化的,没有明显规则或秩序的回转曲线,这样的吸引子就称为奇异吸引子。奇异吸引子是混沌系统的几何描述。混沌系统的不稳定因素驱使系统的状态轨迹无限地延伸,而系统的稳定因素又将状态轨迹的运动限制在一定的空间内,于是状态轨迹在延伸过程中必然要折回,而且状态轨迹永远也不会回到它所经过的轨道上去,即状态轨迹之间总留有一些未被填充的空隙,这就是混沌系统所特有的运动规律。因为奇异吸引子所占据的空间存在着空隙,所以奇异吸引子的体积只能用分数维描述,它反应了混沌系统的动力学变量数。

2 混沌态数据段的确定

要将脑电信号混沌分析的理论用于临床诊断中,首先必须解决的问题是如何定量描述脑电信号的混沌特性。从作者现已搜集到的资料来看,国内外对脑电信号混沌特性的定量数

据相差很大,至今没有得出统一的结论。影响混沌分析定量数据的因素除了脑电信号的测量时间(数据长度)、采样频率、嵌入空间、时间延迟等这些参数外,更为重要的是用于混沌态分析的数据段是否合适,即用于分析的数据段是否处于混沌态的脑电信号数据段。

我们对思维时的脑电信号做了实验分析,实验表明脑电混沌态特性的个体差异很大。这差异反映在两个方面,一是脑电混沌态的延时(相对于刺激时刻)差异,即在相同的外界刺激下,不同的人的脑电混沌态的起始时刻(相对于刺激时刻)并不相同;二是脑电混沌态持续时间的差异,即不同的人在相同的外界刺激下脑电混沌态的持续时间不同。一般来讲,文化水平越高,大脑生理功能良好的人,在外界刺激下脑电混沌态的延时和持续时间也越小;反之,文化水平低或大脑有功能性疾病的人,在同样的外界刺激下脑电混沌态的延时和持续时间也越大。正是因为脑电混沌态特性的个体差异的存在给脑电信号的混沌态实验分析带来了困难。当采样时间过长(大于脑电混沌态可能的最大延时与最大持续时间之和)时,对于脑电混沌态持续时间短的脑电信号样本来说,因脑电混沌态时间与整个采样时间的比值太小,以致脑电混沌过程引起的变化无法被检测出来;当采样时间太短时,对于脑电混沌态延时或持续时间长的脑电信号样本来说,有可能丢失部分或全部脑电混沌态信号。

为了解决上述问题,我们以阵发性 40 Hz EEG 信号作为脑电混沌态的标志。在采集到的数据中取出一段与脑电混沌态有关的数据作混沌分析,即采集足够长(确保样本中包含有脑电混沌态数据)的脑电信号(EEG 信号),然后通过检测阵发性 40 Hz EEG 信号来确定用于脑电混沌态分析的数据段。

3 脑电混沌态分析^[4]

为了研究脑电混沌特性,首先必须建立脑电系统(神经网络)的状态空间。建立状态空间的传统方法是根据系统结构确定系统的状态变量,建立数学模型,然后按照数学模型求出系统的状态轨迹。然而神经网络是一个复杂的系统,要建立一个能全面反映其功能的数学模型是极其困难的,至少目前还无法做到。为此我们可以根据 Takens 定理*,从复杂系统输出的时间序列来重构系统在状态空间中的吸引子,通过对重构状态空间吸引子的分析来了解复杂系统真实状态空间吸引子的行为特性。我们采用延迟方法重构状态空间,设 m' 为观察空间的嵌入维数(重构空间的维数),即观察时间序列的窗口长度, τ 为延迟时间。将任一时刻在 (m', τ) 窗中看到的 m' 个时间序列值作为嵌入空间 $R^{m'}$ 中一个状态矢量的 m' 个分量之值,当复杂系统输出时间序列一步步通过 (m', τ) 窗时就得到嵌入空间的一个状态矢量序列,由状态矢量列就可以重构状态空间。由 Takens 的定理知道,当 $m' \geq 2m + 1$ 时,重构状态空间可以反映真实系统状态空间的特性,这里 m 是真实系统状态空间的维数。然而真实系统状态空间的 m 未知,加上脑的混沌态是不稳定的,随时有新的信息进来和退出,故 m' 应适当地取大一点。但 m' 究竟可取多大?只能通过实验来确定。图 1、图 2 给出了两例脑电信号在 m' 取 15, 20, 25, 30, 80, 100 等值时的吸引子分析,从图中可以看出嵌入维数 m' 对吸引子的影响。在 $m' = 15, 20, 25$ 时,吸引子形状差不多,说明吸引子在这些嵌入维数时比较稳定,而当 m' 为 30, 80, 100 时,吸引子形状已有了较大变化。因此,作者认为嵌入维数 m' 取为 15 ~ 25 比

* Takens F, Rand D A, Yong L S. Lecture in Math, (Springer Verlag, 1981)

较合适。

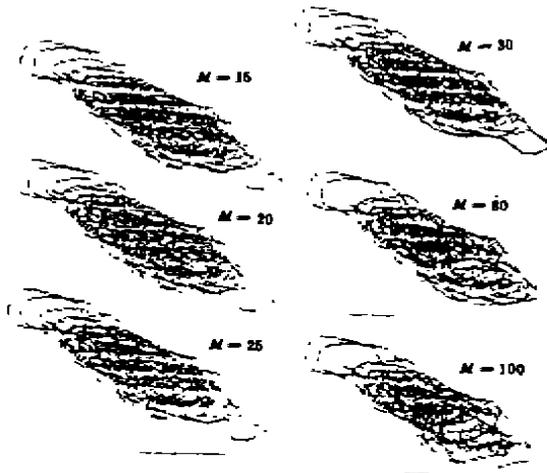


图 1 嵌入维数对吸引子的影响例 1

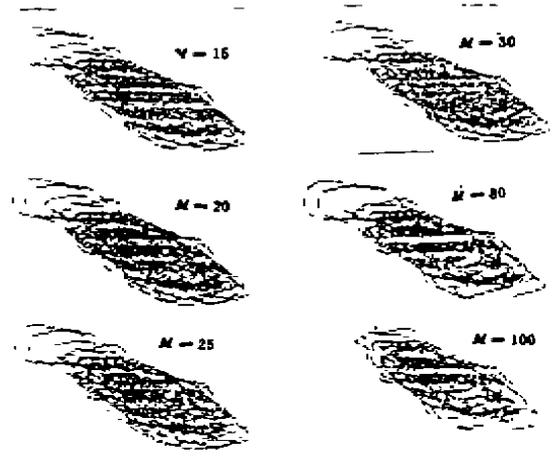


图 2 嵌入维数对吸引子的影响例 2

时间延迟 τ 的大小将会对吸引子产生影响。我们决定 τ 的大小，主要是考虑矢量与矢量之间的相关要尽量少。因此 τ 的间隔取得长一点是有好处的。但脑是一个有记忆的器官，我们必须考虑神经元的动作电位变化的时间。 τ 取得太大，则不能准确反映脑的特定功能变化。在本文中， τ 取为 6 毫秒。

Takens 定理对时间序列的长度 N 没有约束，对某一个简单系统来说，其稳态所形成的吸引子在没有外加扰动时，将会保持不变。但由于脑功能在发生不断的变化，应集中在一段短时间内对脑电信号进行测量，故 N 不宜取得太大。根据已发表的一些资料来看，序列长度取 2000 点左右可满足要求。

4 脑电信号的数据采集

按国际 10 - 20 标准电极分布法，在受试者的额区 ($Fm1, Fm2$)、中颞区 ($T3, T4$)、顶区 ($P3, P4$) 及枕区 ($O1, O2$) 安置 8 个电极，采集受试者在四个状态下的 EEG 信号，即思维前静态，减法运算，空间试验和思维后静态。思维前静态是指思维前受试者闭目，尽量不思考任何问题，但保持清醒时的状态。减法运算是让受试者从 100 连续减 7 时的状态，考察受试者的逻辑思维能力。空间试验是指受试者睁眼做空间测试题时的状态，用以诱发受试者的形象思维。空间试验的办法采用了国际韦氏智商试验与 SCEF 法。思维后静态指思维后受试者闭目，尽量不思考任何问题，但保持清醒时的状态。

脑电信号通过脑电图机进行放大，再经过信号调整放大器对信号进行滤波和电平调整后送至 A/D 转换器，A/D 转换器将模拟脑电信号转换成数字信号后送入计算机进行处理。因为脑电信号是一个混合的纪录，其中包括有在神经纤维上传导着的动作电位的变化，突触的、神经细胞的、以及神经胶质细胞的电位变化等。神经的动作电位全过程只有 1.5 毫秒，通

过突触的时间大约需要 5 到 250 毫秒。因此采样频率不能太小,否则就不能反映动作电位在其中的影响。在本文中,采样频率取为 1000 Hz。

为了保证采集到大脑思维时的脑电信号,采样时间(数据长度)应适当地取大些,在本文实验中,采样时间取为 10 秒,即在每个思维状态下,每道脑电信号采集 10000 个样本点。在实际计算中采用阵发性 40 Hz EEG 检测技术从这 10000 个样本点中选出反映思维状态的 2000 个样本点作为混沌分析数据段。

5 脑电混沌态的临床分析与讨论

本文共对 30 多位受试者的 EEG 样本进行了分析,将受试者分为 4 组,第一组为 20 位大脑功能正常者;第二组 4 位左脑梗塞或异常者;第三组为 6 位右脑梗塞或出血者;第四组共有两位受试者,一位是散发性脑炎患者,另一位是椎——基底动脉供血不足患者。

5.1 分数维计算结果的分析与讨论

先介绍下面要用到的几个概念。左脑分数维是指左脑 4 个电极上的分数维值之和;右脑分数维是指右脑 4 个电极上的分数维值之和;左右脑分数维是指左右脑电极(即所有电极)上的分数维值之和。

对第一组正常人的脑电信号分数维的分析表明:正常人在思维时的左右脑分数维比思维前静态时高,也比思维后静态时高。在做减法运算时,左脑分数维大于右脑分数维。在做空间试验时,右脑分数维大于左脑分数维。

由医学知识可知,大脑分为左半球和右半球,左半球专管语言、分析、逻辑思维,右半球则负责视觉和空间的感受。作者认为,思维时分数维值的增高说明了在思维状态下神经网络的生理活动相对于静态时更积极;当做减法运算时,左脑分数维大于右脑分数维,这说明左脑的神经网络的生理活动比右脑更活跃,即左脑是优势半球,这与神经心理学的理论是一致的;当做空间试验时,右脑分数维大于左脑分数维,这说明右脑的神经网络比左脑的神经网络更活跃,即右脑是优势半球,这个结果与神经心理学的理论也是一致的。

对第二组受试者的脑电信号分数维的分析表明:在做减法运算时,左脑分数维小于右脑分数维(其中 1 例左右脑分数维小于思维前静态的分数维);做空间试验时,右脑分数维大于左脑分数维。由此可见,左脑梗塞或异常者的左脑神经网络的活动受到了抑制,而右脑神经网络的功能则是正常的。

对第三组受试者的脑电信号分数维的分析表明:在做减法运算时,左脑分数维大于右脑分数维;做空间试验时,右脑分数维小于左脑分数维(其中 1 例左右脑分数维小于思维前静态的分数维)。由此可见,右脑梗塞或异常者的右脑神经网络的活动受到了抑制,而左脑神经网络的功能则是正常的。

对第四组受试者的脑电信号分数维的分析表明:在做减法运算时,左脑分数维小于右脑分数维(其中 1 例左右脑分数维小于思维前静态左右脑分数维);在做空间试验时,一例右脑分数维小于左脑分数维,另一例右脑分数维几乎等于左脑分数维。由此可见,左右脑都异常者的整个(或大部)神经网络活动受到了抑制。

综上所述,作者认为可以得出如下结论:正常人在思维时,左右脑分数维要增加;在做减法运算时,左脑分数维大于右脑分数维;做空间试验时,右脑分数维大于左脑分数维;大脑患

有疾病时,病灶部位的神经网络活动将受到抑制。

我们除了对上述 4 组受试者的脑电信号进行分析外,还对 5 位有认识功能障碍患者的脑电信号进行了分析。这 5 位受试者的实验编号为 26, 27, 30, 34, 37, 其中 26 号受试者为智商差者,其余受试者为痴呆病人。在做减法运算时,26、27 号受试者的左脑分数维小于右脑分数维(其中 27 号受试者的左右脑分数维小于思维前静态分数维),37 号受试者的左脑分数维几乎等于右脑分数维,这与正常人不一样;而 34 号受试者的左脑分数维大于右脑分数维,这与正常人一样。在做空间试验时,26、27、37 号受试者的右脑分数维大于左脑分数维,这与正常人一样;而 34 号受试者的右脑分数维小于左脑分数维,这与正常人不一样。

上述实验结果表明:具有认识功能障碍患者的脑电信号分数维与正常人有差别,但其病变疾病的定位意义并不明确,这也许是神经网络功能的互补性所造成的。

5.2 最大李亚谱诺夫指数计算结果的分析与讨论

作者曾对最大李亚谱诺夫指数的值进行过初步统计,但未能得到一致的结论。作者认为:李亚谱诺夫指数是一个谱,最大的李亚谱诺夫指数并不能反映李亚谱诺夫指数谱的全貌,因而仅根据一个李亚谱诺夫指数并不能揭示更多的东西。这一点与分数维不同。分数维仅有一个,而李亚谱诺夫指数则不然,因此仅凭一个李亚谱诺夫指数似乎不能有助于疾病的诊断。

6 结 论

综上所述,可以得出以下结论:

- 1) 在混沌研究中引入阵发性 40 Hz EEG 检测技术来确定用于混沌分析的数据段是很有必要的,它保证了混沌分析结果的可靠性和稳定性。
- 2) 实验分析表明脑电信号确实具有混沌特性。
- 3) 正常人在思维状态下,相对于静态时,分数维会增高;当人在做减法运算时,左脑分数维大于右脑分数维;当人在做空间运算时,右脑分数维大于左脑分数维;当人有认识功能障碍或患有脑部疾病时,其神经网络的功能区或病灶区域的神经细胞活动受到抑制,则不满足上述条件。这一结论表明分数维分析对临床诊断是有意义的。
- 4) 单个的李亚谱诺夫指数似乎不能有助于诊断。

参 考 文 献

- 1 裴留庆. 确定性混沌与信息科学. 自然杂志, 1992, 15(9), 66~673
- 2 徐京华. 人脑功能的混沌动力学. 科学, 1990, 42(4), 265~270
- 3 郝柏林. 世界是必然的还是偶然的. 科学, 1991, 43(4), 263~269
- 4 Greenside H S, Wolf A, Swift J et al. Impracticality of a box-counting algorithm for calculating the dimensionality of strange attractors. *Physical Review A* 1982, 125(6), 3453~3456