

①6
88-91

脑电信号非线性动力学处理方法的研究

Study on Nonlinear Dynamical Method for EEG Signal Processing

潘 军^①
Pan Jun

周守昌^②
Zhou Shouchang

黄尚廉^②
Huang Shanglian

R741.044

(^① 重庆大学光电精密仪器系, 重庆, 630044; ^② 重庆大学电气工程系; 第一作者 28 岁, 男, 博士生)

摘 要 首先从系统方法的角度对脑电信号的研究作了定义, 在此基础上具体分析了脑电信号系统分析的基本困难或特点, 说明难于用建模的方法对脑电信号系统进行研究。然后引出重构状态空间吸引子方法并阐述其在脑电信号系统分析中的意义。笔者最后对几例病例作了初步的分析计算以探讨该方法在脑电信号分析中的意义。

关键词 状态空间; 辨识; 生物医学工程
中国图书资料分类法分类号 Q811.4

脑电信号 非线性动力学

ABSTRACT After studying the meaning of EEG signal processing using systems theory, the basic difficulties of the research on the EEG system and signal analysis are given, showing that it is hard to build model of the EEG system and signal. Hence, we introduce the method of reconstructing the attractor in state spaces. Through the analysis of some experiments, the meaning of the presented method has been discussed.

KEYWORDS state spaces; identification; biomedical engineering

0 引 言

人们很早就在大脑皮层测得脑电波信号(它可以看成是由大量神经元电活动引发的综合效应),通过对脑电信号的分析,可以帮助医生对脑部疾病的诊治。在这种分析过程中,并不注重神经元网的微观特性,而是将整脑的电活动特性与人的思维状态联系起来,通过少量的定量指标,结合医生本人的经验,采用定量分析与定性分析相结合的办法说明问题。其实,在这种对大脑神经元网异常状态(病变状态)的诊断过程中,包含有许多医生本人对大脑神经元网电活动规律的朴素认识。根据这些认识对大脑病变的诊疗往往是有成效的,说明这些认识中含有正确的成分。如果能用一个适当的方法把这些零星的认识统一起来,形成对脑电活动的一个总体认识,一定会大大促进我们对大脑活动规律的理解,当然也会大大促进对脑部疾病的诊治。

笔者认为非线性动力学吸引子的行为也许可以说明脑神经元网的一些特性。作非线性联接的神经元网,往往可以表现出单个神经元所没有的特性,而用吸引子来说明神经元网的整体性质也许比以往的随机过程方法更有效^[1]。

• 收文日期 1995-01-16

1 用系统方法研究脑电信号的数学表达^[2]

临床实践中,将 8 个电极放置在大脑皮层 8 个有生理学意义的区域,对 8 道信号分别处理。从系统的观点来看,实质上是从一个网络的 8 个输出端口上的观测波形来推测该网络端口所属子网络的状态。联系每个输出端口的输出变量 $y_i (i = 1, 2, \dots, 8)$ 与决定该端口输出的状态矢量 $S (i = 1, 2, \dots, 8)$ 的方程用矢量表示为:

$$Y = G(S) \quad (1)$$

其中, Y 为输出矢量, S 为状态矢量。这是该网络的输出方程,要完整描述该网络尚需联系输入矢量及状态矢量的状态方程

$$S = F(X) \quad (2)$$

其中, X 为输入矢量, S 为状态矢量。方程(1)、(2)的等效方程为

$$Y = GF(X) = T(X) \quad (3)$$

用系统方法研究脑电信号首先就要建立方程(1)、(2)或等价地建立方程(3)。

2 脑电信号系统分析的基本困难或特点

对一个系统建立模型,须考虑该系统及信号的特点。脑电信号貌似无规律的信号,因而,在相当长的一个时期内,总是将脑电信号用随机过程的模型来模拟它。随着现代时间序列分析技术的发展,人们提出一种基于最小均方误差准则的随机信号分析方法。它的基本思想是把随机信号 $y(n)$ 视为由白噪声 $\omega(n)$ 激励线性系统 $h(n)$ 产生的。这样, $h(n)$ 的特性就表征了 $y(n)$ 。

但是,从本质上说,这是一种黑箱的处理方法,不涉及系统的内部结构,因而其分析不能深入下去。因为完全不同的内部结构也可能产生相似的外部表现。实际上,在随机过程分析方法的使用中,经验往往占很大成分。

笔者认为对脑电信号建模的困难还表现在脑电信号系统的下述特点中^[3]:

A) 脑是一个时变系统。脑神经元间的联系时刻都在变化,因而,描述脑电信号系统的结构及运行状态的方程必然是时变方程;

B) 脑电活动是自发的,在未知激励输入的情况下,仍有脑电信号的输出,表明它是一个非因果系统;

C) 脑的自发活动起源于神经元的水平上,而神经元确有提供电活动所需能量的一些组成。因此,脑是一个有源系统;

D) 脑又是一个非线性系统。

在通常的系统学研究中,总是假设系统为线性的、因果的、时不变的和无源的。因而,对脑电信号系统建模就比较困难。

3 重构状态空间吸引子的方法及其特点

前面已经谈到,要描述一个系统的状态,须建立系统的状态方程。系统状态方程解的几何描述是状态空间中的轨道。所以,一般地说,要了解系统的状态轨道,也就必须建立系统的状态方程,而这对脑电信号系统来说是比较困难的。近年来,国外提出一种新的时间序列处

理算法,它可以从复杂系统输出的单一时间序列中重构出系统在状态空间中吸引子的行为。吸引子对应于动态系统的稳态,这种方法避开了由模型描述系统的困难。

混沌系统的吸引子将表现出奇异性,当度量其维数时,将呈分数值。

4 算法描述

4.1 由时间序列描述吸引子^[4,6]

前已述及, $Y = G(S)$ 为系统状态方程所决定的输出方程,其中, S 为状态矢量, Y 为观测矢量。

当整脑模型(G)未知,只知其某些输出端口上的波形时间序列,如何由这些时间序列来重构吸引子?下面介绍一种延迟方法来重构吸引子,Takens从微分几何上研究了这个问题,我们仅给出结果。

对于 (m, J) 窗,其中, m 为状态空间的维数,这里为窗长, J 为延迟间隔。

设 $v_1, v_2, \dots, v_1, \dots$ 为观察数据。

比如 $(4, 6)$ 窗,4代表取数的维数,6代表每隔6个数据取数。

$$v_1, v_2, \dots, \boxed{v_1} \dots \boxed{v_{1+6}} \dots \boxed{v_{1+12}} \dots \boxed{v_{1+18}}$$

则 $P_i = (v_i, v_{i+6}, v_{i+12}, v_{i+18})^T$ 为由 $(4, 6)$ 窗获得的第 i 个矢量,构成4维空间的一点。不断从数据中按这种方法取数,构成一个点的集合,这就是吸引子。Takens证明:它保留了吸引子的某些特征。从而对它的分析,就可获得对原来真实的动态系统的某些认识。

在具体实现过程中,对于维数 m ,延迟 J 及序列长度 N 等,要结合脑电信号系统的具体特点及数值实验取舍。这方面笔者也曾作过一些探讨,限于篇幅,不再赘述。

4.2 维数计算

设用边长为 ϵ ,维数为 m 的立方体去覆盖吸引子, N_ϵ 为覆盖吸引子所需这种立方体的最小数目。则维数定义为

$$D = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \ln N_\epsilon / \ln \left(\frac{1}{\epsilon} \right) \quad (4)$$

直观地,可以这样理解:

设该集合体积为 V

$$V \cong N_\epsilon \cdot \epsilon^D \quad (5)$$

$$N_\epsilon \sim \epsilon^{-D} \quad (6)$$

ϵ^D 可定义为高维立方体的体积,即

$$\ln N_\epsilon = D \ln \left(\frac{1}{\epsilon} \right) + \ln V \quad (7)$$

作 $\ln N_\epsilon - \ln \left(\frac{1}{\epsilon} \right)$ 曲线,不断减少 ϵ 或提高 N_ϵ 之值,得一直线,其斜率为维数为一个估值。

因为, N_ϵ 与 D 呈指数关系,实验表明算法收敛速度相当慢,当 ϵ 减小到与噪声可以相比时,维数计算将可能得不到收敛解。为了加快收敛速度,可以采用排序法或者Grassberger-Procaccia方法。

5 在若干思维状态下的初步分析实验

怎样运用上述方法来分析人脑的不同思维状态呢?第一个基本问题是:较之相对平静状态下,人脑在思维时所获得的脑电信号时间序列状态吸引子有没有变化?有哪些变化?

为此，笔者在重庆医科大学神经内科董为伟教授的帮助下进行了若干实验。

其中一个实验是参照国际韦氏智商测试法设计的。主要设计了若干用于诱发受试者抽象思维及形象思维能力的一组心理学试题。结果发现：受试者在思考试题期间，其相应部位的脑电信号时间序列的吸引子维数有某种改变。通过分析具体数据，估计人脑在思维状态下，其相应部位的维数值可能有升高的趋势。这需要更多的实验来支持。

不妨换一个角度来思考这个问题。如果说人脑在正常思维状态下其相应部位维数值要升高的话，那么人脑的病变部位的维数值较之正常情况下会有什么改变呢？如果人脑在病变情况下其相应部位的维数值也要升高的话，则用维数值的升降来识别人脑相应部位的正常思维状态、病变状态可能就不太适宜。为此，又对某些患有脑部疾病受试者的脑电信号时间序列进行了分析。现引述部分病例。

例 1：病人被诊断为右脑出血。发病当天，测其脑电波信号，计算维数值，按部位标在图 1 上，从维数值可以看出，其右半脑的维数值基本上低于左半球。不过在枕区部位，该现象不太明显。

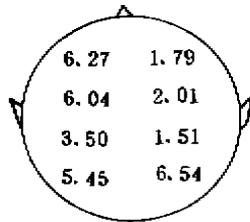


图 1 实验一分数维值计算结果

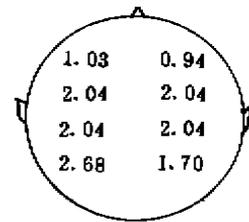


图 2 实验二分数维值计算结果

例 2：病人经 CT 检查，诊断为左额脑出血。发病当天，测得维数值按部位标在图 2 上。从图上可以看到，在病人额区部位的分数维值比其它部位低。至于其左、右侧均较低的原因是左、右额区形成镜灶，在左额功能失常的情况下，影响右额所致。

通过上述结果可以看到：人脑在病变情况下，其相应部位的维数值可能存在降低的趋势。

为了对比发病时的维数值变化情况，待其病情好转以后，重新测试第二例受试者，同样按部位标在图 3 上。由图可见，病情好转以后，其额区部位的维数值增大了。

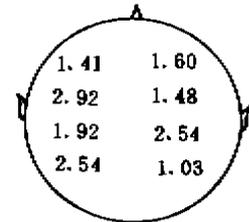


图 3 实验三分数维值计算结果

通过以上的实验，笔者认为在正常思维状态及病变状态下，人脑相应部位脑电信号状态吸引子的维数值可能存在某种升降的趋势。这说明利用重构状态空间吸引子方法分析人脑的思维状态是值得进一步探讨的。

参 考 文 献

- 1 徐京华. 人脑功能的混沌动力学. 科学, 1990, 42(4), 266~270
- 2 潘军. 脑电信号非线性动力学处理方法的研究, [硕士学位论文]. 重庆, 重庆大学电气工程系, 1991
- 3 巴沙 E. 生物物理和生理系统分析. 郁宪章译. 北京: 科学出版社, 1979. 1~300
- 4 Wolf A. Determining lyapunov exponents from a time series. Physica D, 1985, 16, 285~317
- 5 Broomhead D S. Extracting Qualitative dynamics from experimental data. Physica D, 1987, 20, 217~236