

文章编号:1000-582X(2004)07-0050-03

# 心率变异信号的相关维数分析\*

朱家富<sup>1,2</sup>, 杨浩<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 电气工程学院, 重庆 400030; 2. 渝西学院 物理与电子信息工程系, 重庆 402168)

**摘要:**心率变异性(HRV)是反应交感-副交感神经张力及其平衡的重要指标,在临床中可以用来参考实现对心血管疾病辅助诊断及其康复过程中的无创性监测。通过对心率变异信号的非线性特征得到证实后认为,可以利用如相关维数等非线性动力学参数来刻画与分析心率变异信号。传统的计算时间序列相关维数的方法是基于相空间重构理论的G-P算法,通过对该算法的改进,可以大大降低其计算工作量。计算了30例临床病例HRV信号的相关维数,并对计算结果进行了统计分析,其结果可以在临床上提供参考。

**关键词:**心率变异信号;非线性动力学;相关维数;相空间重构

**中图分类号:**R318.04

**文献标识码:**A

传统的观念认为正常心脏的跳动应该高度规则,但现代医学研究证实,即使在安静状态下,正常人的心率也是在一定的范围内波动,完全规则的心率反而是一种异常现象。这种连续心搏间瞬时心率的微小涨落,也即窦性心率在一定时间内周期性改变的现象被称为心率变异性。

产生心率波动的因素包括脑的高级神经活动、中枢神经系统的自发性节律活动、呼吸活动以及由压力、化学感受器传入的心血管反向活动等。影响心率波动的最后通道在于上述各种因素对心脏的交感神经和迷走神经的综合调节作用,HRV可以反映自主神经系统活性,是反映交感-副交感神经张力及其平衡的重要指标,而且可以定量评估心脏交感神经与迷走神经张力及其平衡性。HRV信号蕴含了有关心血管调节的大量信息,对这些信息的提取和分析可以定量评估心脏交感神经和迷走神经活动的紧张性、均衡性及其对心血管系统活动的影响,从而可以帮助判断心血管疾病的病情及预后,它是预测心脏性猝死和心律失常性事件的一个有价值的指标。

传统的心率变异性测定方法有两种,即时域测定法和频域分析法,其测定参数作为评估某些心血管疾病,如心肌梗死危险度分层的主要指标<sup>[1]</sup>。由于心率变异生理指标具有信息量大及无创伤检测的特性,并且通过心率变异生理指标能够了解神经和体液的相互

调节规律,因此心率变异性的检测在国内外已广泛应用于临床。近几年,随着非线性科学的发展,人们已经初步证实HRV信号的非线性特性,并尝试用非线性动力学的方法来分析HRV信号,且在一些方面取得了初步进展,一些结论也开始应用与临床实际中<sup>[2]</sup>。

## 1 HRV信号的非线性特性

心率变异性是连续心搏间瞬时心率的微小涨落,体现了心率或心动周期的波动性,通常用心动周期内的信号采样点数或者心动周期时间来表示。如图1为HRV信号波形图,它是以128 Hz频率采样的15 min心电信号为原始信号,通过检测RR间期获得,并以RR间隔时间 $t$ 来表示,数据长度为1000次心动周期。

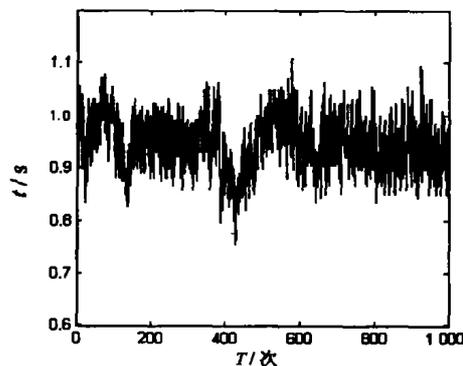


图1 HRV信号的时域波形图

\* 收稿日期:2004-03-20

基金项目:重庆大学高电压与电工新技术教育部重点实验室资助项目(200240)

作者简介:朱家富(1969-),男,重庆万州人,渝西学院讲师,重庆大学硕士研究生,从事生物医学信号处理方法的研究。

心率变异信号的分析方法有时域分析法、频域分析法和非线性分析法等多种,而由于 HRV 的非线性分析可以反映心率的瞬间变化,因而正在成为生物医学信号处理领域的一个热点。从 HRV 信号的产生机理来看,由于心率、血压、呼吸运动是由几个中枢神经系统调节、控制的,这些系统间的相互作用会产生非周期时间过程,但这些呈现随机性的时间过程却有着良好的确定性动力系统特性<sup>[3]</sup>,因此,HRV 信号应该具有非线性动力学特征。

HRV 信号的非线性特征最先由 Babloyantz 和 Goldberger 等人进行了研究,他们的主要结论有:HRV 的功率谱密度是宽带的,具有 1/f 谱成分;估算 HRV 的关联维数是有限的;HRV 不存在单一的时间尺度,具有统计自相似性。所有结果都表明 HRV 不是随机的而是某些确定性控制的输出,是一种混沌信号。图 2 为图 1 所对应的 HRV 信号的散点图,它是利用相邻的两个 HRV 采样点的前一个点值作为横坐标,后一个点值作为纵坐标绘制而成的图,从图的形状上看,HRV 信号的散点图具有纺锤形状,也表明 HRV 信号具有非线性动力学特征。

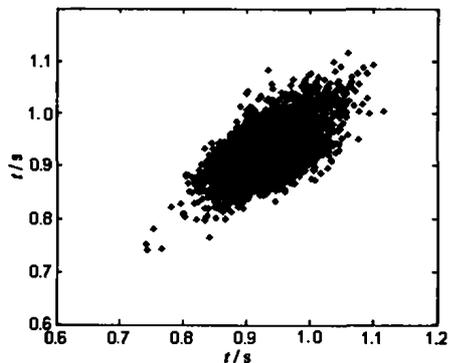


图 2 HRV 信号的散点图

HRV 信号具有非线性动力学特征,可以将 HRV 信号作为混沌信号来研究,而混沌信号的研究主要是通过刻画混沌吸引子的分数维值、Lyapunov 指数、哥氏熵以及复杂度等参数<sup>[4]</sup>来分析其非线性动力学特征,而最常用的就是分数维值,分数维有多种,一般用相关维数( $D_2$ )来表示。相关维数是表示混沌吸引子自相似特性和尺度不变特性的不变测度,是用来描述混沌自由度信息的参数,任何时间序列一旦建立重构吸引子,则包含相关维数在内的所有分数维值都可以得到计算。

## 2 HRV 信号相关维数的计算方法

关联维值的计算方法主要是 G - P 算法,它是由 Grassberger 和 Procaccia 根据嵌入理论和相空间思想于 1983 年提出来的<sup>[5]</sup>,它可以直接从时间序列计算相关维数  $D_2$ 。

设  $\{x_k : k = 1, \dots, N\}$  是观测得到的某一时间序列,将其嵌入到  $m$  维欧氏空间  $R_m$  中,得到一个点(或向量)集  $J(m)$ ,其元素记作

$$X_n(m, L, J) = (x_{1+(n-1)J}, x_{1+(n-1)J+L}, \dots, x_{1+(n-1)J+(m-1)L}) \quad (n = 1, \dots, N_m) \quad (1)$$

式中  $L$  是时间延迟 (time delay),  $m$  是嵌入维数 (embedding dimension),  $J$  是采样间隔数,一般情况下取 1,  $N_m$  是重构点(或相量)的维数,满足

$$N_m = N - ((m - 1) \times L) \quad (2)$$

从状态空间中的这  $N_m$  个点中任意选定一个参考点  $X_i$ , 计算其余  $N_m - 1$  个点到  $X_i$  的距离可以定义为:

$$r_{ij} = d(X_i, X_j) = \left[ \sum_{k=0}^{m-1} (x_{i+k \times L} - x_{j+k \times L})^2 \right]^{1/2} (i \neq j) \quad (3)$$

对所有  $X_i (i = 1, \dots, N_m)$  重复这一过程,得到相关积分函数:

$$C_m(r) = \frac{1}{N_m(N_m - 1)} \sum_{i=1}^{N_m} \sum_{j=1}^{N_m} \theta(r - r_{ij}) (i \neq j) \quad (4)$$

在这里,相关积分  $C_m(r)$  定义为“参考点周围半径为  $r$  的  $m$  维空间所能包含矢量的概率”<sup>[6]</sup>。式中  $\theta$  是 Heaviside 函数:

$$\theta(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

对于充分小的  $r$ , 相关积分逼近下式:

$$\ln C_m(r) = \ln C + D(m) \ln r \quad (6)$$

因此序列的相关维数,实际中可以利用  $\ln C_m(r) \sim \ln r$  曲线通过线性回归来求得相关维数  $D_2$ <sup>[7]</sup>。

## 3 算法的改进

传统的 G - P 算法的计算工作量主要是在相关积分函数  $C_m(r)$  的计算上,大约为  $N_m^2$  次。观察式(3)和式(4),知  $r_{ij} = r_{ji}$ ,即计算的参考点与其余吸引子上点的距离是对称的,因此,在计算  $C_m(r)$  只需考虑  $j > i$  的情况,这对于整体来说是一样的。于是,式(4)可以简化为:

$$C_m(r) = \frac{2}{N_m(N_m - 1)} \sum_{i=1}^{N_m} \sum_{j=i+1}^{N_m} \theta(r - r_{ij}) \quad (7)$$

把式(7)与式(4)对比,  $C_m(r)$  的计算工作量少了一半,约为  $N_m^2/2$  次。另一方面,根据相关积分  $C_m(r)$  定义:参考点周围半径为  $r$  的  $m$  维空间所能包含矢量的概率,可知  $C_m(r)$  是一个统计事件,而吸引子的密度是非常高的。因此,可以对参考点进行等间隔选取,没有必要遍历吸引子上的每一点。假设在相空间轨道上以间隔  $\tau$  (一般  $> 1$ ) 等距离地选取参考点,则参考点的总数为:

$$N_{ref} = \left\lfloor \frac{N_m}{\tau} \right\rfloor$$



- 1988, 31(12):3 502 - 3 510.
- [9] YANG H Q, YANG K T. Benard - Marangoni Instability in a Two - Layer System with Uniform Heat Flux[J]. J thermophysics, 1990, 4(1):73 - 78.
- [10] CRESPO E D A, EXTREMENT G P, SANI R L. Thermo-capillary convection in two - layer fluid system with flat interface[J]. Adv Space Res, 1991, 11(7):129 - 132.
- [11] LIU Q S, CHEN G, ROUX B. Thermogravitational and thermocapillary convection in a cavity containing two superposed immiscible liquid layers[J]. Int J Heat Mass Transfer, 1993, 26(1):101 - 117.
- [12] LI MINGWEI, ZENG DANLING. The effect of liquid encapsulation on the Marangoni convection in a liquid column under microgravity condition[J]. Int J Heat Mass Transfer, 1996, 39(17):3 725 - 3 732.

## Effect of Marangoni Number of Liquid on Marangoni Convection in Liquid Bridge

PENG Lan, LI You-rong, ZENG Dan-ling

(College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** The physical and mathematical model of the Marangoni convection in liquid bridge with liquid encapsulation (or two immiscible coaxial liquid columns) are established. A numerical simulation of the Marangoni convection in liquid bridge with liquid encapsulation is performed by employing vorticity - streamfunction method and the Alternative Direction Implicit scheme in finite difference. The distribution of temperature and flow in two liquid columns are then obtained. The influence law of Ma number of liquid encapsulation to the Marangoni convection in liquid bridge with liquid encapsulation is obtained.

**Key words:** microgravity; liquid bridge with liquid encapsulation; Marangoni convection; numerical analysis

(编辑 陈移峰)

(上接第 52 页)

## Correlation Dimension Analysis on Heart Rate Variability Signal

ZHU Jia-fu<sup>1,2</sup>, YANG Hao<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Department of Physics and Electronic Information Engineering,  
Western Chongqing University, Chongqing 402168, China)

**Abstract:** Heart rate variability is an important index to express the tensility and balance of the parasympathetic - sympathetic nerve, and it is valuable to diagnose heart and blood disease in clinical diagnosis. It is approved that HRV signal possess non - linear characteristic, and we can analyse and present HRV signal with non - linear dynamic parameteres, such as fractal dimension. Based on phase - space reconstruction theory, an improved algorithm is introduced to calculate the correlation dimension of HRV signal, and some valuable conclusions are expressed according to the result which is concluded from the correlation dimension of nearly 30 samples.

**Key words:** heart rate variability signal; non - linear dynamics; correlation dimension; phase - space reconstruction

(编辑 李胜春)