

· 生物电子学 ·

心律波动信号的 $1/f$ 噪声特性分析

曹坤勇, 于盛林

(南京航空航天大学自动化学院 南京 210016)

【摘要】 心律波动信号具有 $1/f$ 噪声特性,是非平稳的。该文采用平均功率谱密度方法,分析了基于平均功率谱密度和最小二乘拟合法求正常人和心脏充血患者的心律波动信号的谱参数,发现根据谱参数可以定量地区分正常人与心脏充血患者:大部分正常人的心律波动信号的谱参数大于1,而大部分心脏充血患者的心律波动信号的谱参数小于1,该结论可为心脏病的诊断与预诊断提供一种辅助手段。

关键词 心律波动信号; $1/f$ 噪声; 谱参数; 平均功率谱密度; 最小二乘准则
中图分类号 O211 文献标识码 A

Analysis of Heart Rate Variability Via Averaged Power Spectrum

CAO Kun-yong, YU Sheng-lin

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics Nanjing 210016)

Abstract Heart rate variability is nonstationary and shows $1/f$ fluctuation. Based on averaged power spectrum and least square algorithm, the deduced spectral parameter is further used to analyze the heart rate variability of congestive heart failure patients and normal people. The most spectral parameters corresponding to congestive heart failure patients are smaller than 1, and the most spectral parameters corresponding to normal people are larger than 1. This fact could provide an assistant method for the diagnosis and prediagnosis of cardiopathy.

Key words heart rate variability; $1/f$ noise; spectral parameter; averaged power spectrum; least square algorithm

人体的心脏跳动是在心室系统的控制下以非线性、非平稳的复杂形式进行的。这些非平稳、非线性的波动主要源于神经系统输入的相互作用:副交感神经减缓心律波动,而交感神经加速心律波动。不过,心脏病变也可能导致心脏迟钝以至于不能有效地响应心脏外部的激励。心动电流图,简称心电图(Electrocardiograph, ECG),是记录心律波动的最好方法。但是,通常必须是心脏医学专家才能更准确地看出心电图中隐含的心脏诊断信息,因此设计一种不需要专家随时参与,能够及时反映心脏状态,定量地区分心脏病人与正常人的方法是非常必要的。心律波动的医学重要性的研究最早可以追溯到1965年,研究者对心律波动的统计特性进行了研究,主要方法有:均值法、昼夜区别法、长序列方差法(通常用24 h数据)、短时间序列方差法(通常用几小时甚至是几分钟的数据)等。然而,心律波动是瞬态的,样本之间具有很强的长程相关性,而且功率谱密度近似与 $1/f^\gamma$ 成正比,谱参数 γ 一般接近于1^[1-4],即心律波动信号具有 $1/f$ 噪声特性。尽管这样的幂指数形式的功率谱提供了重要的医学信息,但是如何更有效地将这两者关联起来目前尚不十分明了。国外对 $1/f$ 噪声的研究比较成熟^[5],但国内很少,尤其在心律波动信号的 $1/f$ 噪声特性研究方面。本文在心律波动信号的 $1/f$ 噪声特性的基础上,以美国国家健康研究中心提供的心电图数据库为对象,提取了心律波动信号,求其平均功率谱密度,并采用最小二乘拟合法以求取谱参数,尝试区分正常人与心脏充血患者,并希望分析结果为心脏病的临床诊断与预诊断提供一种辅助手段。

1 心律波动信号——心电图与RR序列

很多医疗与科研机构用标准的仪器采集心律波动数据,并建立了不同状态心脏的心电图数据库。国家

收稿日期:2004-07-01

作者简介:曹坤勇(1976-),男,博士生,主要从事 $1/f$ 信号处理、分形理论及应用方面的研究。

健康研究中心对这些数据库进行了整理,按照心脏的不同状态分成了不同的心电图数据库,以供研究者们进行分析研究。本文分析的心律波动数据来源于以下两个数据库:心脏充血患者心电图数据库、正常人心电图数据库。心脏充血患者心电图数据库包含15个严重充血性心脏失调患者(11个男性,年龄22~71岁;4个女性,年龄54~63岁)的24 h的心电图数据;正常人心电图数据库包含18个研究对象(5个男性,年龄26~45岁;13女性,年龄20~50岁)的24 h的心电图数据。

心跳在心电图上的表现是一个个连续的QRS波,连续的两个QRS波之间的时间间隔就是两次心跳时间间隔。但是,一般不选用QRS波作为测量对象,这是因为在噪声背景下幅值较低的QRS波不好定位,容易导致测量错误。心电图采集仪器的频率要高于心脏跳动频率,而每次心跳在心电图上就体现为一个又窄又高的波峰,这个波峰叫做R波峰。为了较精确地测量心跳间隔,选用较易测量的R波为对象。连续两个R波峰之间的时间间隔,简称为RR间隔。将测量到的所有RR时间间隔组合起来就组成了RR序列。RR序列对应于心跳次数的曲线,简称为RR曲线。一般地,分析RR序列需要24 h的观测以便进行有效的分析。当然,也可以对较短的心律波动序列进行分析,但是这样将无法观测到较大时间尺度的波动,无法获得清醒和睡眠两种状态对心律波动的影响。

2 RR序列的 $1/f$ 噪声特性分析

2.1 RR序列的预处理

为了有效地分析RR序列,首先要对RR序列进行一定的预处理以消除心脏的额外收缩,或者采集仪器漏采的影响。本文采用预处理方法^[6]:对任意5个连续RR间隔,忽略中间点 $R_{RR}[i]$,取均值

$$R_{RR,mean}[i] = \frac{1}{4}(R_{RR}[i-2] + R_{RR}[i-1] + R_{RR}[i+1] + R_{RR}[i+2]) \quad (1)$$

如中间点 $R_{RR}[i]$ 的值落在区间 $[0.8R_{RR,mean}[i], 1.2R_{RR,mean}[i]]$ 外,将中间点 $R_{RR}[i]$ 从原序列中去除。

2.2 RR序列的功率谱密度直线拟合谱参数分析

从心电图和RR曲线图无法分析心跳的状态。最初,采用传统的信号处理方法,从“线性”的角度进行研究。心律波动的“线性”统计特性主要有:均值法、昼夜区别法、长序列方差法(通常用24 h数据)、短序列方差法(通常用几小时甚至是几分钟的数据)等。但是,心脏血管的控制系统是非线性的,而且这个控制系统本身也是非平稳的,必然导致心律波动是非线性、非平稳的,而且样本之间具有很强的长程相关性。这使得传统的分析方法不能有效地反映心跳状态。心律波动最突出的“非线性”特性主要是其特殊形状的功率谱密度。RR序列是非平稳的,采用一般的功率谱方法无法有效地进行分析^[7-8]。为此本文采用平均功率谱对其进行分析^[9]。由于RR序列具有 $1/f$ 噪声特性,即其平均功率谱密度满足:

$$S(f) = \frac{C}{|f|^{\gamma_p}} \quad (2)$$

式中 C 为常数; γ_p 为谱参数。对式(2)两端取对数,得:

$$\lg S(f) = \lg C - \gamma_p \lg f \quad (3)$$

$\lg S(f)$ 相对于序列 $\lg f$ 有线性关系,斜率为 $-\gamma_p$ 。但实际离散数字信号处理中,序列 $\{\lg S(f)\}$ 相对于序列 $\{\lg f\}$ 不完全满足线性关系,必须进行最小二乘直线拟合。假设拟合所得直线斜率为 k_p ,则谱参数 γ_p 就是斜率 k_p 的相反数,即 $\gamma_p = -k_p$ 。

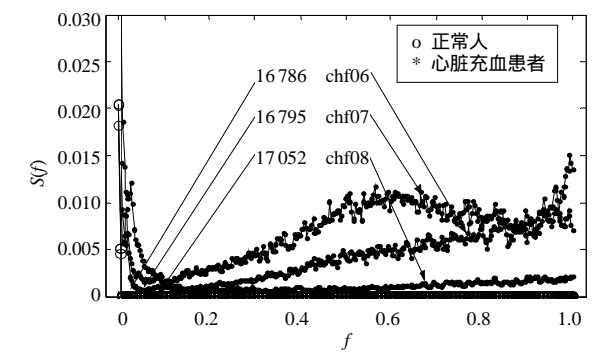
3 仿真结果与分析

从心脏充血患者心电图数据库中选取连续3例序号为chf06、chf07、chf08的心电图数据;从正常人心电图数据库中选取连续3例序号为16 786、16 795、17 052的心电图数据,并进一步提取相应的RR序列,采用本文介绍的方法进行预处理。图1表示谱参数 γ_p 的求解过程。图1a表示RR序列的功率谱密度曲线;图1b表示相应的对数功率谱密度曲线;图1c为最小二乘规则下,图1b中各曲线对应的拟合直线,图中标出了拟合所得直线的斜率 k_p ,即RR序列的谱参数估计值 γ_p 。

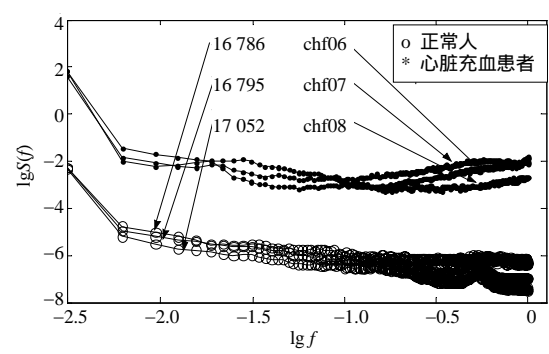
从图1可以看出,图1a所示的正常人、心脏充血患者的RR序列的功率谱密度曲线有一定的差别,但是经

求对数后,图1b所示的正常人、心脏充血患者的RR序列的对数功率谱密度曲线有更大的区别,而图1c求得的谱参数估计值,对正常人、心脏充血患者有很好的区分效果。另外,从图1c还可以看出,心脏充血患者chf06、chf07、chf08的RR序列的谱参数 γ_p 均小于1;而正常人16 786、16 795、17 052的RR序列的谱参数 γ_p 均大于1。

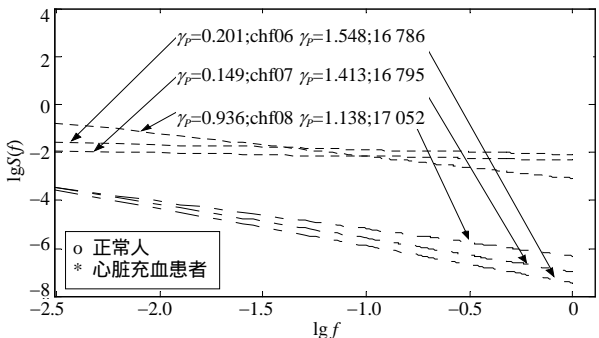
进一步对BIDMC心脏充血患者心电图数据库、正常人心电图数据库中提取的所有RR序列进行谱参数估计得谱参数 γ_p 。图2表示RR序列的谱参数 γ_p 分布情况,其中对于‘o’表示的谱参数,横坐标1~15对应于心脏充血患者的序号;对于‘*’表示的谱参数,横坐标1~18对应于正常人的序号16 265、16 272、16 273、16 420、16 483、16 539、16 773、16 786、16 795、17 052、17 453、18 177、18 184、19 088、19 090、19 093、19 140、19 830。



a. RR序列功率谱密度曲线



b. RR序列对数功率谱密度曲线



c. RR序列功率谱密度对数-对数曲线的最小二乘直线拟合

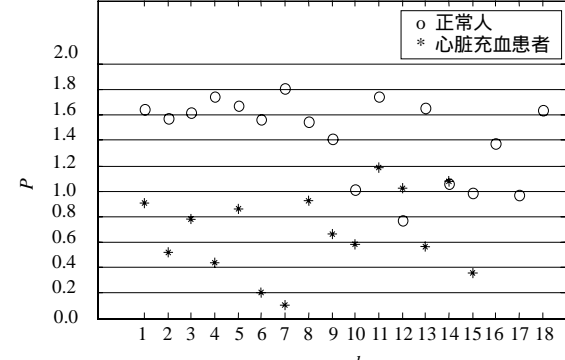


图2 心脏充血患者与正常人的RR序列的谱参数 γ_p 分布

图1 RR序列功率谱密度直线拟合谱参数求解过程

从图2可以看出,正常人大部分的RR序列的谱参数大于1,而心脏充血患者大部分RR序列的谱参数小于1,说明谱参数估计方法对心脏充血患者、正常人有很好的区分效果。另外,年龄对谱参数也有一定的影响^[10],心脏病的程度也对谱参数有很大的影响。但是本文取得的心电图数据库没有包含具体的年龄信息和心脏病程度信息,无法对年龄及心脏病程度的影响进行进一步的分析。

4 结论

从心电图中提取的RR序列具有1/f噪声特性,反映该特性的参数就是谱参数。从美国国家健康研究中心的心律波动数据库中提取RR序列,并通过本文的平均功率谱密度直线拟合谱参数分析,发现大部分正常人RR序列的谱参数大于1,大部分心脏充血患者RR序列的谱参数小于1。这个结论可以为心脏病的临床诊断与预诊断提供一个参考。另外,年龄及心脏病的程度对谱参数的估计也有一定的影响,本文将在后续工作中进一步探讨。

参 考 文 献

[1] Kaplan D T, Pilgram B. Nonstationarity and 1/f noise characteristics in heart rate[J]. Computers in Cardiology, 1996, 11(8): 169-172.
 [2] Nakao M, Takizawa T. An optimal control model of 1/f fluctuations in heart rate variability[J]. IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, 2001, 20(2): 77-87.

- [3] Yamamoto M, Nakao N M. $1/f$ fluctuations of cat's inter-heartbeat intervals in extremely low frequency range[C]// Proceedings of 15th International Conference on Noise in Physical Systems and $1/f$ Fluctuations, Bentham, 2000: 191-194.
- [4] Hausdorff J M, Peng C K. Multiscaled randomness: A possible source of $1/f$ noise in biology[J]. Physical Review E, 1996, 54(2): 2154-2155.
- [5] Milottie E. $1/f$ noise: A pedagogical review[EB/OL]. <http://arxiv.org/pdf/physics/0204033>, 2003-12-10.
- [6] Ho K K L, Moody G B, Peng C K. Predicting survival in heart failure case and control subjects by use of fully automated methods for deriving nonlinear and conventional indices of heart rate dynamics[J]. Circulation, 1997, 96(10): 842-848.
- [7] Meyer M, Rahmel A, Marconi C. Stability of heartbeat interval distributions in chronic high altitude hypoxia[J]. Integrative Physiological and Behavioral Science, 1999, 33(4): 344-362.
- [8] Peng C K, Hausdorff J M, Havlin S. Multiple-time scales analysis of physiological time series under neural control[J]. Physica A, 1998, 249(1-4): 491-500.
- [9] Stoica, P, Moses R L. Introduction to spectral analysis[J]. Englewood Cliffs, NJ, 1997, 1: 52-54.
- [10] Iyengar N, Peng C K, Morin R. Age-related alterations in the fractal scaling of cardiac interbeat interval dynamics[J]. American Journal of Physiology (Regulatory Integrative and Comparative Physiology), 1996, 40(4): R1078- R1084.

编辑 漆 蓉

(上接第800页)

5 结果分析与结论

用本文算法综合后的神经网络作为神经网络控制器对水位控制系统进行在线控制, 控制规则阈值 $T_{\text{Thresh}} = 0.5$ 。经 Matlab 建模仿真分析, 得到如图3所示的系统实际水位对期望水位之间的跟随曲线。图4是PID控制器控制下的跟随情况, 各控制参数如图4所示。比较图3和图4可以发现, PID控制的效果不理想, 系统的跟随情况较差, 有明显振荡。而神经网络控制下, 系统的实际水位很好地跟随了系统的期望水位, 无明显振荡。

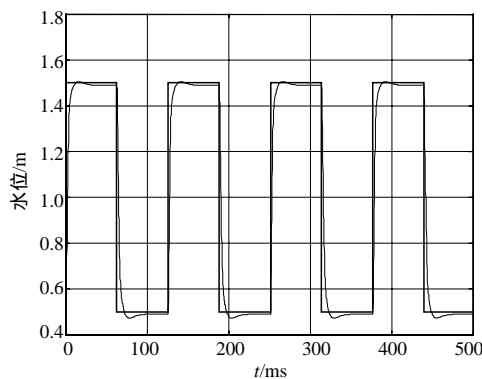


图3 神经网络控制下系统实际水位对期望水位的跟随曲线 ($T_{\text{Thresh}} = 0.5$)

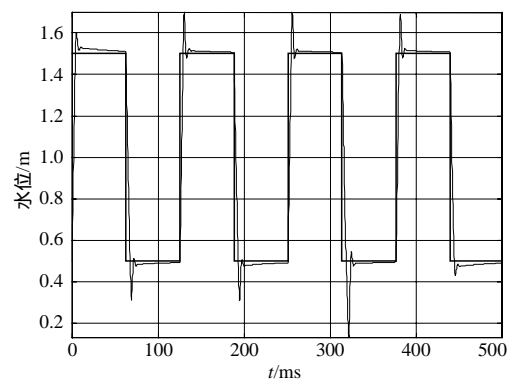


图4 PID控制下系统实际水位对期望水位的跟随曲线 ($k_p = 3, k_i = 0.05, k_d = 2$)

本文在把粗糙集、遗传算法及神经网络的有效结合方面进行了一些探索, 并通过实际的控制实例说明了其有效性和可行性。基于粗糙集规则的神经网络编码方法为大规模神经网络分解提供了理论依据^[4]。同时, 标准遗传算法与具有自适应变异因子的改进遗传算法的有机结合, 确保了神经网络进化过程的合理性。经过对控制结果的比较可以发现, 在对具有很强的非线性被控对象进行线控制时具有很好的效果。

参 考 文 献

- [1] 韩帧祥, 张 琦, 文福松. 粗糙集理论及其应用综述[J]. 信息与控制, 1998, 27(1): 37-45.
- [2] 韩力群. 人工神经网络理论设计及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [3] 王国胤. Rough集理论与知识获取[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000.
- [4] Sankar K P, Sushmita M, Pabitra M. Rough-fuzzy mlp: modular evolution, rule generation, and evaluation[J]. 14IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2003, 15(1): 14-25.

编辑 漆 蓉