

文章编号:1672-3961(2011)02-0102-05

重采样对脉搏间期序列谱分析的影响

李丽萍¹, 杨静², 刘常春¹, 刘澄玉¹, 张庆广¹, 李可¹

(1. 山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061; 2. 山东大学计算机科学与工程学院, 山东 济南 250101)

摘要:研究了重采样对脉搏间期序列谱分析的影响,提出以平均脉率为重采样率对脉搏间期序列进行重采样,为脉率变异性分析提供理论支持。采用最近邻点插值、分段线性插值、分段三次 Hermite 插值和三次样条插值4种方法对仿真脉搏间期序列重采样,并对比相应的 Welch 周期图法和 AR(Auto-regressive)自回归模型法的谱分析结果。提出以平均脉率作为重采样率,并与其他多个重采样率进行比较。结果表明,以平均脉率为重采样率,采用三次样条插值方法及 Welch 周期图法进行谱分析时,所得误差最小,适用于脉搏间期序列的谱分析。采用该方法对30例健康者和30例冠心病患者的脉搏间期序列进行了谱分析,结果显示冠心病患者的谱分析结果显著低于健康者,验证了本方法的有效性。

关键词:非均匀采样;脉搏信号;重采样;谱分析;脉率变异性

中图分类号:TP391 **文献标志码:**A

The effect of re-sampling on spectral analysis of pulse interval series

LI Li-ping¹, YANG Jing², LIU Chang-chun¹, LIU Cheng-yu¹, ZHANG Qing-guang¹, LI Ke¹

(1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. School of Computer Science and Technology, Shandong University, Jinan 250101, China)

Abstract: The effect of re-sampling on spectral analysis of pulse interval series was systematically analyzed. The method of the mean pulse rate as the re-sampling rate was proposed, which could provide theoretical support for pulse rate variability. Four methods, the nearest neighbor interpolation, piecewise linear interpolation, piecewise cubic Hermite interpolation and cubic spline interpolation, were applied to re-sample the simulated pulse interval series. The Welch periodogram and the Auto-regressive model were used for spectral analysis with several re-sampling rates compared. Results showed that the combination of cubic spline interpolation and the Welch periodogram to be an optimal choice for least errors and spectral analysis of pulse interval series. And the mean pulse rate was the optimal resampling rate. Thirty healthy subjects and thirty subjects with coronary heart disease (CHD) were tested to verify the effectiveness of the proposed methods. Results showed that spectral analysis of the subjects with CHD was significantly lower than that of the healthy subjects.

Key words: unevenly sampling; pulse signal; re-sampling; spectral analysis; pulse rate variability

0 引言

生理信号变异性分析作为无创检测人体自主神经系统功能的定量指标已被广泛研究和应用^[1-3],其中以心率变异性(heart rate variability, HRV)最为常见^[4-7]。HRV是指连续窦性心率之间的微小波

动,通过对R-R间期序列计算得到。与HRV类似,采用脉搏间期序列计算得到的变异性信号被称作脉率变异性(pulse rate variability, PRV)。近年来部分学者探讨了PRV在临床上的价值并取得了一些成果,证实了PRV的谱分析结果有别于HRV^[8-11]。

在HRV分析中,由于心电间期序列是非均匀采样序列,因此谱分析前需要对其进行重采样^[12-14]。如

收稿日期:2010-11-22

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2006AA02Z4D9, 2009AA02Z408)

作者简介:李丽萍(1982-),女,山东青岛人,博士研究生,主要研究方向为生物医学信号处理。E-mail: liliping@mail.sdu.edu.cn

图1所示,与心电图序列类似,脉搏间期序列也是非均匀采样的信号,图1(a)中是实际采集的一个正常人的脉搏波形,图1(b)为相应的提取脉搏波的峰值所得到的脉搏间期序列。可以看出,脉搏间期序列在时间轴上是非均匀采样的。那么,在PRV分析中,应该如何选取重采样方法、谱分析方法及重采样率呢?本文作者系统研究了重采样对PRV谱分析的影响。首先采用最近邻点插值、分段线性插值、分段三次 Hermite 插值和三次样条插值4种方法对仿真脉搏间期序列进行重采样,通过对比相应的 Welch 周期图和 AR 自回归模型的谱分析结果,挑选出最优的重采样方法和谱分析方法的组合;接着提出以平均脉率为重采样率对脉搏间期序列进行重采样,并分析了不同重采样率对仿真脉搏间期序列谱分析的影响;最后通过分析30例健康者和30例冠心病患者的脉率变异性来验证本方法的有效性。

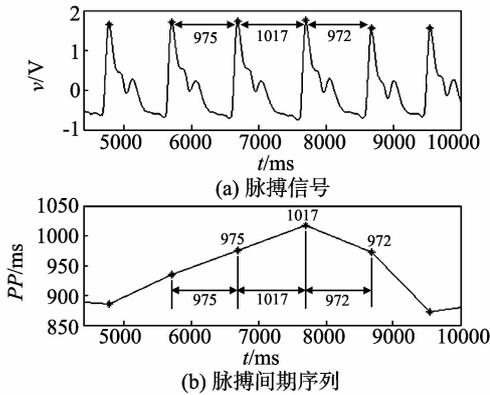


图1 一例健康者的脉搏信号及相应的脉搏间期序列
Fig.1 An example of pulse wave signal from a healthy subject and the corresponding pulse interval series

1 方法

1.1 仿真脉搏间期序列

在PRV分析中,与HRV类似,谱分析的结果不仅受重采样的影响,也受坏点和非平稳趋势的影响^[12-16]。为避免这些因素的影响,且由于脉搏间期序列的非均匀采样特性和其谱分析结果的双峰特性,本研究采用一种动态模型来构造仿真脉搏间期序列进行分析^[17],包括以下2个步骤:

(1) 利用2个高斯分布函数产生类似PRV谱分析结果的双峰功率谱函数 $S(f)$,

$$S(f) = \frac{P_{LF}}{\sqrt{2\pi}c_{LF}^2} \exp\left(-\frac{(f-f_{LF})^2}{2c_{LF}^2}\right) + \frac{P_{HF}}{\sqrt{2\pi}c_{HF}^2} \exp\left(-\frac{(f-f_{HF})^2}{2c_{HF}^2}\right) \quad (1)$$

其中, P_{LF} 和 P_{HF} 分别表示低频和低频分量的能

量, f_{LF} 和 f_{HF} 为低频和低频分量的中心频率, c_{LF} 和 c_{HF} 则是各分量的标准差。如图2所示,即为通过该模型得到的仿真功率谱 $S(f)$, 所取变量值为:

$$f_{LF} = 0.1, f_{HF} = 0.25, c_{LF} = c_{HF} = 0.01, \frac{P_{LF}}{P_{HF}} = 0.5。$$

(2) 通过对幅值为 $\sqrt{S(f)}$ 、相位随机分布的序列进行傅立叶反变换,即可得到功率谱为 $S(f)$ 的非均匀采样的脉搏间期序列。如图3(b)中即为一例仿真脉搏间期序列,其功率谱如图2所示。

在仿真序列中, f_{LF} 的变化范围是 0.08 ~ 0.12 Hz, f_{HF} 的变化范围是 0.22 ~ 0.33Hz, P_{LF}/P_{HF} 的变化范围是 0.5 ~ 2.0。

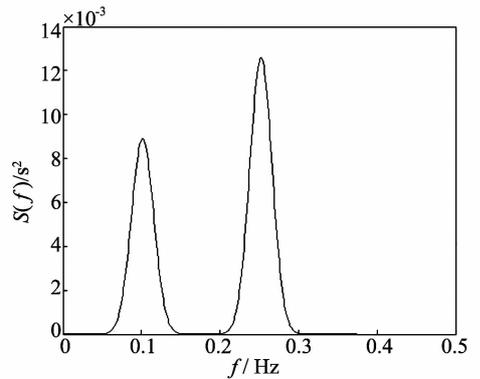
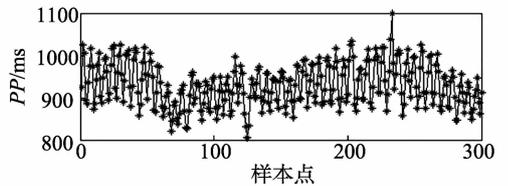
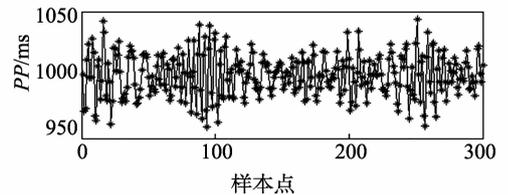


图2 含低频和低频分量的功率谱 $S(f)$
Fig.2 The power spectrum $S(f)$ with the LF and HF components



(a) 真实脉搏间期序列



(b) 仿真脉搏间期序列

图3 脉搏间期序列示例

Fig.3 Examples of pulse interval series

1.2 谱分析方法

在PRV分析中,谱分析的方法可分为经典功率谱估计和参数模型功率谱估计两类^[18-19]。其中最常用的是 Welch 周期图法和自回归模型法。

在经典功率谱估计中,傅里叶变换法(fast Fourier transform, FFT)估计出的谱性能常常不好,谱的起伏和方差都比较大,而 Welch 周期图法可以改

善 FFT 估计出的谱的方差特性。Welch 周期图的基本思想是采用分段加窗的方法把一长度为 N 的数据分成 L 段,并允许每段数据有部分重叠,分别求出每一段的功率谱 $P_i(\omega)$ 后,加以平均即得到功率谱 $\bar{P}(\omega)$ 。

自回归模型法是参数模型功率谱估计的一种,即 AR 模型法。本研究采用 Burg 法计算 AR 模型的参数 a_k 以及预测误差功率 σ^2 ,将得到的模型参数及预测误差功率带入式(2)即得到该数据的功率谱, p 为模型的阶数,在本研究的 PRV 分析中选阶数为 10。

$$P_x(e^{j\omega}) = \frac{\sigma^2}{|A(e^{j\omega})|^2} = \frac{\sigma^2}{|1 + \sum_{k=1}^p a_k e^{-j\omega k}|^2} \quad (2)$$

上述 Welch 周期图法和 AR 模型法都是基于均匀采样时间序列的谱分析方法,因此在 PRV 分析中,首先要对脉搏间期序列进行重采样。

2 试验结果和分析

2.1 不同重采样方法对谱分析的影响

图 3(a) 中所示是一例健康人的脉搏间期序列,图 3(b) 中是采用仿真模型得到的仿真脉搏间期序列。可见,脉搏间期序列中含有非平稳趋势,而仿真脉搏间期序列中则没有,因此采用仿真序列可以避免非平稳趋势对谱分析造成的干扰。

对仿真脉搏间期序列采用 4 种插值方法进行重采样,即最近邻点插值(the nearest neighbor interpolation, NNR)、分段线性插值(the piecewise linear interpolation, Line)、分段三次 Hermite 插值(the piecewise cubic Hermite interpolation, Pchip)和三次样条插值(the cubic spline interpolation, Spline)^[20]。重采样率选用文献[14]中的推荐值 4 Hz。图 4(a)~(d) 依次为最近邻点插值、分段线性插值、分段三次 Hermite 插值和三次样条插值。从图 4 可以看出,最近邻点插值的结果是不连续的,可以看到明显的阶梯状;线性插值的结果虽然是连续的,但仍是由一段段的折线组成,不平滑;而分段三次 Hermite 插值和三次样条插值的结果则既是连续的,而且曲线也比较平滑。本研究采用以上 4 种插值方法对 10 000 组采用随机参数仿真出的脉搏间期序列以 4 Hz 频率进行重采样,用 Welch 周期图法和 AR 自回归模型法进行谱分析,并选用以下指标定量分析 4 种重采样方法对谱分析结果的影响:

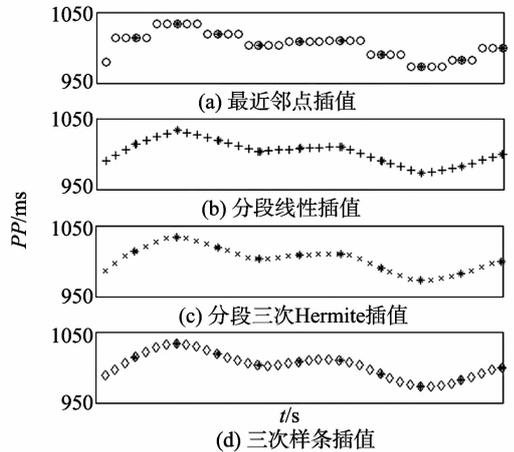


图 4 4 种插值方法对仿真脉搏间期序列的重采样结果
Fig. 4 The results of re-sampling the simulated pulse interval series with four interpolation methods

f_{LF} : 低频分量的中心频率;

f_{HF} : 高频分量的中心频率;

P_{LF} : 低频分量能量,频段为 0.04 ~ 0.15 Hz;

P_{HF} : 高频分量能量,频段为 0.15 ~ 0.4 Hz;

$\alpha = P_{LF}/P_{HF}$: 低频和高频分量能量的比值。

设上述某指标的真值为 x_0 , 测量值为 x , 则其相对误差为

$$\delta = \left| \frac{x - x_0}{x_0} \right| \times 100\% \quad (3)$$

这样每个指标都可以计算出其平均相对误差 $\bar{\delta}$:

$$\bar{\delta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_i, N = 10\ 000 \quad (4)$$

上述指标的真值由仿真模型的 $S(f)$ 计算得到,测量值是对仿真脉搏间期序列重采样后进行谱分析计算得到。采用各重采样方法及谱分析方法得到的 $\bar{\delta}$ 如表 1 中所示。可以看出,不论是采用 Welch 法还是 AR 法进行谱分析,重采样对谱分析的各指标均产生了较大影响。

(1) 低频分量和高频分量的中心频率都发生了不同程度的偏移,且大都是高频分量的偏移大于低频分量,其中偏移程度最大的是采用最近邻点插值重采样后的 AR 法。而且不管采用哪种重采样方法,AR 法的中心频率偏移程度都大于 Welch 法。

(2) 重采样对低频和高频分量能量的结果都产生较大误差,除采用最近邻点插值重采样后的 AR 法外,均是高频分量的误差大于低频分量。

(3) 在 Welch 法中,线性插值产生的误差最大,最近邻点插值次之。在 AR 法中,最近邻点插值产生的误差最大,线性插值次之。在两种谱分析方法中均是三次 Hermite 插值和三次样条插值的重采样效果更好,且三次样条插值要优于三次 Hermite 插值。

综上所述,不论采用哪种谱分析方法,重采样对

谱分析的结果均产生了较大影响,且三次样条插值和 Welch 周期图法的组合得到的平均相对误差

表1 不同重采样方法和谱分析方法结果的平均相对误差

Table 1 The mean relative errors of the results using different re-sampling and spectral analysis methods

	Welch					AR				
	f_{LF}	f_{HF}	P_{LF}	P_{HF}	α	f_{LF}	f_{HF}	P_{LF}	P_{HF}	α
NNR	1.94	2.14	18.92	26.61	27.15	45.55	12.69	62.76	12.83	64.64
Line	1.88	2.24	19.27	41.31	57.45	3.46	6.12	21.45	35.62	27.25
Pchip	1.95	2.17	18.55	26.45	26.63	4.81	6.42	20.85	22.66	10.03
Spline	1.99	2.10	18.46	19.03	12.35	3.46	5.20	17.22	21.68	13.66

2.2 不同重采样率对谱分析的影响

由2.1可知,三次样条插值和 Welch 周期图法的组合得到的 δ 最小,因此选用三次样条插值和 Welch 周期图的组合来分析不同重采样率对谱分析的影响。设重采样率的符号为 f_r ,对于 f_r 的设置,文献[12,14]曾推荐的有 2 Hz、4 Hz、6 Hz、7 Hz、8 Hz 和 10 Hz。本研究提出选用平均脉率(\overline{PF})作为重采样率,并与上述推荐值进行对比。平均脉率 \overline{PF} 是平均脉搏间期 \overline{PP} 的倒数,计算方法如下:

$$\overline{PP} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N PP_i, \overline{PF} = 1/\overline{PP}, \quad (5)$$

其中, PP_i 为脉搏间期, N 为序列长度。

对 10 000 组仿真脉搏间期序列进行分析,结果如表 2 所示。可以看出,不同重采样率对 Welch 周期图产生的影响有一定差别,其中,以 7 Hz 为重采样率时,高、低频中心频率的偏移和各分量能量及其比值的误差均最大;而以 \overline{PF} 为重采样率时,低频和高频分量的中心频率偏移程度最小,低频和高频分量能量及其比值的误差也最小;且各重采样率下,高频分量能量的误差均大于低频分量,这同样说明重采样对高频分量的影响大于低频分量。

表2 不同重采样率下 Welch 周期图法谱分析结果的平均相对误差

Table 2 The mean relative errors of the Welch periodogram with different re-sampling rates

f_r/Hz	f_{LF}	f_{HF}	P_{LF}	P_{HF}	α
\overline{PF}	1.97	1.90	18.42	18.67	10.92
2	2.20	2.01	19.39	20.03	16.02
4	1.99	2.10	18.46	19.03	12.35
6	2.04	2.00	18.40	19.26	12.78
7	2.56	2.51	20.35	20.74	19.37
8	2.36	2.30	19.49	20.10	16.39
10	2.22	2.25	18.35	19.03	12.34

2.3 60 例受试者脉率变异性分析结果

由上述分析可知,对脉搏间期序列进行谱分析时,以平均脉率为重采样率,采用三次样条插值进行重采样,使用 Welch 周期图法进行谱分析产生的误差最小。

使用本方法分析 60 例受试者的脉率变异性和心率变异性。试验数据来自于自主研发的 CV FD-I

型心血管系统状态监测仪临床同步采集的 30 例健康者 (Health, Age: 45 ± 15) 和 30 例冠心病患者 (CHD, Age: 59 ± 9) 的指端光电容积脉搏信号和心电信号。试验地点在山东大学齐鲁医院,试验方案经医学伦理委员会通过,并已获得所有受试者签名的知情同意书。其中健康者的人选标准为超声心动图、血脂、血糖、血液粘度以及心电图检查均正常的受试者。整个采集时间为 5 min,采样率为 1 000 Hz。通过自动识别脉搏信号峰值点和心电信号 R 波得到脉搏间期序列和心电间期序列,并利用本方法计算相应序列的 PRV 和 HRV。采用 SPSS 16.0 软件对结果进行统计分析,结果如表 3 所示。

表3 健康者和冠心病患者的 PRV 和 HRV 结果
Table 3 The PRV and HRV of the health and patients with CHD

	PRV		HRV	
	P_{LF}/ms^2	P_{HF}/ms^2	P_{HF}/ms^2	P_{LF}/ms^2
Health	218 ± 149	317 ± 305	226 ± 156	306 ± 300
CHD	86 ± 76	113 ± 62	99 ± 103	112 ± 119
P 值	0.001	0.001	0.001	0.002

比较健康组或冠心病组的 PRV 和 HRV 均可以发现,PRV 的低频分量能量低于 HRV,而高频分量能量则高于 HRV。这可能是由于脉搏不仅像心率一样受自主神经系统的调制,而且在传播过程中还要受血管弹性、血液粘度等血流动力学因素的影响,从而使得 HRV 与 PRV 的低频和高频分量能量并不完全相同。从表 3 中还可以看出,冠心病组的 PRV 和 HRV 的低频和高频分量能量都比健康组有所减少,从表 3 的 t 检验结果(置信区间为 95%)可以看出,这种差异具有统计学意义($P < 0.05$)。因此,和 HRV 一样,PRV 也可以用于人体自主神经系统功能的评价。

3 结语

通过构造的仿真脉搏间期序列系统分析了重采样对脉搏间期序列谱分析结果的影响,并提出以平均脉率为重采样率对脉搏间期序列进行重采样,结果表明:以平均脉率为重采样率,采用三次样条插值进行重采样,并用 Welch 周期图进行谱分析时的误

差较小,适合用于脉搏间期序列的谱分析。

另外,采用该方法分析了30例健康者和30例冠心病患者的脉率变异性(PRV),试验表明,冠心病患者的脉率变异性显著低于健康者。脉率变异性检测方法简单,操作方便,可作为心率变异性的替代用于无创评价人体自主神经系统功能。

参考文献:

- [1] KIM K H, BANG S W, KIM S R. Emotion recognition system using short-term monitoring of physiological signals [J]. *Medical & Biomedical Engineering & Computing*, 2004, 42(3): 419-427.
- [2] 刘澄玉,杨静,李斌,等. 基于LZ复杂度的脉搏传播时间变异性分析[J]. *山东大学学报:工学版*, 2009, 39(6): 58-62.
LIU Chengyu, YANG Jing, LI Bin, et al. Analysis of pulse transit time variability based on LZ complexity [J]. *Journal of Shandong University: Engineering Science*, 2009, 39(6): 58-62.
- [3] 刘澄玉,刘常春,李丽萍,等. 联合变异性在评价心脏病患者心血管系统功能状态中的应用[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2010, 40(2): 539-544.
LIU Chengyu, LIU Changchun, LI Liping, et al. Application of associated variability for evaluating cardiovascular system function in healthy adults of different ages [J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2010, 40(2): 539-544.
- [4] MALIK M, GANG Y. Heart rate variability: measurements and risk stratification. *Electrical disease of the heart: genetics, mechanisms, treatment, prevention* [M]. London: Springer, 2008: 365-378.
- [5] Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use [J]. *Circulation*, 1996(93): 1043-1065.
- [6] 梁仲刚,严洪. 心率变异性的分析方法及其在航天医学领域的应用 [J]. *航天医学与医学工程*, 2003, 16(z1): 577-581.
LIANG Zhonggang, YAN Hong. Method of heart rate variability analysis and its application in the field of space medicine [J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2003, 16(z1): 577-581.
- [7] 孙京霞,白延强. 心率变异分析方法的研究进展[J]. *航天医学与医学工程*, 2001, 14(3): 230-234.
SUN Jingxia, BAI Yanqiang. Research progress of methods of heart rate variability analysis [J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2001, 14(3): 230-234.
- [8] CONSTANT I, LAUDE D, MURAT I, et al. Pulse rate variability is not a surrogate for heart rate variability [J]. *Clinical Science*, 1999(97): 391-397.
- [9] KAGEYAMA T, KABUTO M, KANEKO T, et al. Accuracy of pulse rate variability parameters obtained from finger plethysmogram: a comparison with heart rate variability parameters obtained from ECG [J]. *Journal of Occupational Health*, 1997(39): 154-155.
- [10] SHI P, ZHU Y, ALLEN J, HU S. Analysis of pulse rate variability derived from photoplethysmography with the combination of lagged poincare plots and spectral characteristics [J]. *Medical Engineering & Physics*, 2009, 31(7): 866-871.
- [11] 赵海勇,邱意弘,胡思钧,等. 冠心病病人脉搏变异性信号的去趋势波动分析[J]. *航天医学与医学工程*, 2007, 20(6): 455-457.
ZHAO Haiyong, QIU Yihong, HU Sijun, et al. Detrended fluctuation analysis of pulse rate variability signals of coronary disease patients [J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2007, 20(6): 455-457.
- [12] CLIFFORD G D, TARASSENKO L. Quantifying errors in spectral estimates of HRV due to beat replacement and resampling [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2005, 52(4): 630-638.
- [13] KIM K K, KIM J S, LIM Y G, et al. The effect of missing RR-interval data on heart rate variability analysis in the frequency domain [J]. *Physiological Measurement*, 2009, 30(10): 1039-1050.
- [14] SINGH D, VINOD K, SAXENA S C. Sampling frequency of the RR interval time series for spectral analysis of heart rate variability [J]. *Journal of Medical Engineering & Technology*, 2004, 28(6): 263-272.
- [15] TARVAINEN M P, RANTA-AHO P O, KARJALAINEN P A. An advanced detrending method with application to HRV analysis [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2002, 49(2): 172-175.
- [16] 李丽萍,杨静,刘澄玉,等. 滑动窗口脉冲抑制滤波器用于心电间期序列坏点去除 [J]. *光电子激光*, 2010, 21(9): 1426-1430.
LI Liping, YANG Jing, LIU Chengyu, et al. An impulse rejection filter based on moving window for artifact removal in R-R interval series [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2010, 21(9): 1426-1430.
- [17] McSHARRY P E, CLIFFORD G D, TARASSENKO L. A dynamical model for generating synthetic electrocardiogram signals [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2003, 50(3): 289-294.
- [18] 胡广书. 数字信号处理——理论、算法与实现 [M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2003: 552-554.
- [19] 杨福生,高上凯. 生物医学信号处理 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.
- [20] PRESS W H, TEUKOLSKY S A, VETTERLING W T, et al. *Numerical recipes: the art of scientific computing* [M]. (third edition). New York: Cambridge University Press, 2007: 110-154.

