

心音时域分析的新方法研究^{*}

胡玉良¹ 王海滨¹ 陈 健¹ 江钟伟² 乔军选³

1(西华大学 电气信息学院 四川省信号与信息处理重点实验室,成都 610039)

2(山口大学 机械工学科,日本山口市宇部市 755 - 8611)

3(解放军第 452 医院,成都 610072)

摘 要:为快速、准确地判断心音的正常与否,本文提出一种新的心音时域分析方法——心音特征波形法。通过数字听诊器将采集到的心音数据由 USB 接口传输到计算机,建立单自由度分析模型提取心音特征波形,计算出心音特征参数来判别正常与异常的心音。文中通过对正常/异常心音案例分析,验证了心音特征波形法的有效性。另外,为检验已提出的心音时域分析方法对正常与异常的心音判别准确率,选用已采集的 40 组正常与 20 组异常的心音数据进行实验及统计分析,准确率分别达到 92.5% 和 95.0%。

关键词:心音;听诊器;信号分析;单自由度模型;心音特征波形

中图分类号 TN911.6 **文献标识码** A **文章编号** 1001-5515(2010)02-0425-04

A New Method for Heart Sound Analysis in Time Domain

Hu Yuliang¹ Wang Haibin¹ Chen Jian¹ Jiang Zhongwei² Qiao Junxuan³

1 (Sichuan Provincial Key Laboratory of Signal and Information Processing, School of Electrical and Information Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

2 (Department of Mechanical Engineering, Yamaguchi University, Yamaguchi, 755-8611, Japan)

3 (The 452nd Hospital of PLA, Chengdu 610072, China)

Abstract: In order to discriminate normal and abnormal heart sounds accurately and effectively, a new method is proposed to analyze heart sounds, namely heart sound characteristic waveform (HSCW) method. Digital stethoscope is used to collect heart sound signals. The recorded data are transmitted to a computer by USB interface for analysis based on HSCW, which is extracted from an analytical model of single degree-of-freedom (SDOF). Furthermore, a case study on the normal and abnormal cardiac sounds is demonstrated to validate the usefulness and efficiency of the proposed HSCW method. Besides, in order to test the accuracy of discriminating normal and abnormal heart sounds, 40 normal and 20 abnormal heart sounds are collected and analyzed, the accuracy performances are achieved by 92.5% and 95.0%, respectively.

Key words: Heart sound; Stethoscope; Signal analysis; Single degree-of-freedom (SDOF); Heart sound characteristic waveform (HSCW)

引言

心音信号含有关于心脏各个部分如心房、心室、心血管及各个瓣膜功能状态的生理病理信息。心脏听诊包含了大量对诊断心脏疾病有价值的信息。传统的心脏听诊方式通过“听”心音来识别心脏疾病,人耳听力敏感局限和听诊者的临床经验在很大程度上影响了听诊的准确度,难以定量分析。

近年来,随着计算机、数字信号处理、模式识别等技术的迅猛发展,心音更易于记录和分析。心音的自动分析研究^[1-5]显示了新的趋势,大多数研究者侧重于心音频率分析法的特征提取和功率谱分析,其中文献[2]使用自适应滤波方法提高所采心音信号的信噪比,文献[3,4]从多个角度提取心音的特征参数,区分不同的心音,有助于器质性心脏病的辅助诊断,这些研究旨在帮助心脏病专家更准确地诊断心脏疾病。文献[5]中讨论的功率谱在心音信号的分析 and 处理中广泛应用,在计算方法上有一定的优

^{*}四川省教育厅自然科学基金重点项目资助(09209025);西华大学人才引进项目资助(R0620907)

通讯作者。E-mail: hu99ai@tom.com

势,但它是以信号服从高斯分布假设为前提,同时丢失了信号的相位信息。

本文的目的是在时域中研究一种正常与异常心音判别的新方法,即建立单自由度分析模型,仿真人耳鼓膜听音的特性以提取作用于鼓膜上的声音持续时间,进而从单自由度模型中提取心音特征波形(heart sound characteristic waveform, HSCW),选取有效的特征参数 [T1, T2, T11, T12], 它们是 HSCW 与阈值(threshold value, THV)之间形成的交叉点所确定的时间间隔,与第一心音和第二心音有关,可用来有效地判别正常和异常心音,同时,特征参数配以可视化的易于理解的图形表示。

1 心音时域分析原理

心音的时域分析原理主要包括建立单自由度模型、提取心音特征波形及定义特征参数、图形化表示及判别方法三个方面,心音时域分析的总体框图如图 1 所示。

心音的采集是基于文献[6]已建立的听诊采集系统,将 IC 录音机记录的心音数据由 USB 接口传输到计算机,借助基于 MATLAB 7.1 的分析程序来判别心音的正常与异常。

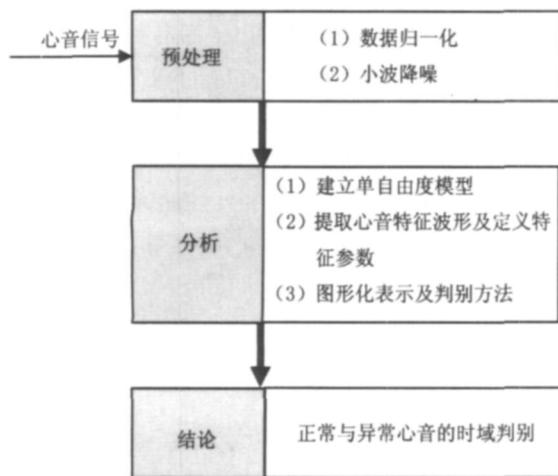


图 1 心音时域分析的总体框图

Fig. 1 General block diagram for heart sound analysis in time domain

1.1 建立单自由度模型

由于人耳鼓膜对低频声音或声音持续时间非常敏感而且易于捕获这些信息,任何未经训练的人都可以用听诊器听出正常心脏有韵律的“嗒嗒嗒”声音和二尖瓣返流“呼呼呼”的声音,因此建立一种单自由度的振动模型,仿真人耳鼓膜听音的特性以提

取作用于鼓膜上的声音持续时间^[7]。

图 2 是该单自由度分析模型的示意图。假定模型中质量、弹簧系数、阻尼系数分别用 m 、 k 和 c 表示,将心音设为输入 $x(t)$, 则输出响应 $y(t)$ 满足式 (1):

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = x \quad (1)$$

令 $\bar{S} = |x/m|$, $p = \sqrt{k/m}$ 及 $\gamma = c/2\sqrt{mk}$, 则式 (1) 可以转化为式 (2):

$$\ddot{y} + 2\gamma\dot{y} + p^2y = \bar{S} \quad (2)$$

其中 p 和 γ 分别为与共振频率及阻尼率相关的参数,可以设置参数 $p/2$ 为 5 ~ 10 Hz 及 γ 为 0.7 ~ 1.2, 以便提取正常与异常心音的特征。

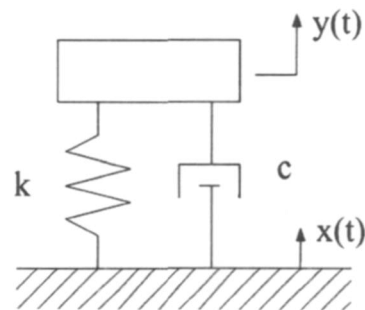


图 2 单自由度分析模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of SDOF analytical model

1.2 提取心音特征波形及定义特征参数

如图 3 所示,提取原始心音信号的包络曲线比原始心音简洁,也易于数据分析与处理。包络曲线表示的是心音应用到单自由度分析模型的结果,它是通过将记录的心音数据归一化及小波降噪后输入到单自由度分析模型中获得的。因此,将这种包络曲线所表示的波形称为心音特征波形^[8]。

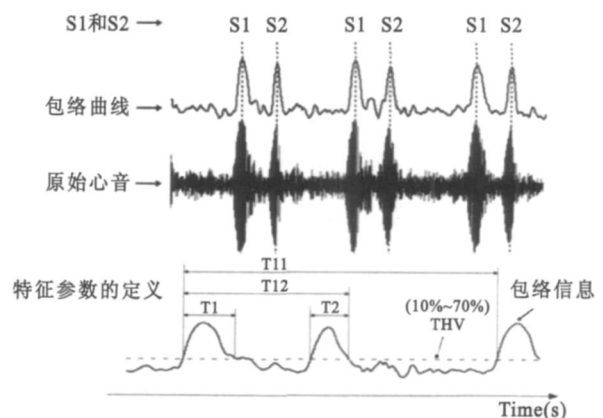


图 3 心音特征波形的提取及特征参数的定义

Fig. 3 HSCW extraction and definition of the characteristic parameters

首先,选择一条经由 HSCW 的适当的线作为 THV,它是随个体或心脏疾病类型不同而改变的;其次,将图 3 中的 T_1 、 T_2 、 T_{11} 及 T_{12} 定义为特征参数,它们是 HSCW 与 THV 之间形成的交叉点所确定的时间间隔,其中 T_1 和 T_2 分别表示第一心音 S_1 和第二心音 S_2 的时宽,而 T_{11} 表示的是两个相邻 S_1 的间隔时间,即显示的是心跳节律状态, T_{12} 是 S_1 和 S_2 之间的时间间隔。

1.3 图形化表示及判别方法

为使特征参数可视化,在图 4(a)中将 $[T_1, T_2]$

和 $[T_{11}, T_{12}]$ 对应关系以二维散点图形式表示。假设用两个圆表示正常心跳节律的区域,半径大小的确定目前是依据国际标准提供的^[9-11],圆心为 $[0.1, 0.1]$ 和 $[0.8, 0.4]$ 。如果计算的特征参数 $[T_1, T_2]$ 和 $[T_{11}, T_{12}]$ 值属于这两个圆范围,就可以判定为正常心音,因此,散点图可以帮助使用者很清楚地了解自己的心脏状况。另外,为了方便使用者和医生量化评估心跳节律,这些特征参数也用柱状图来表示,如图 4(b) 所示。

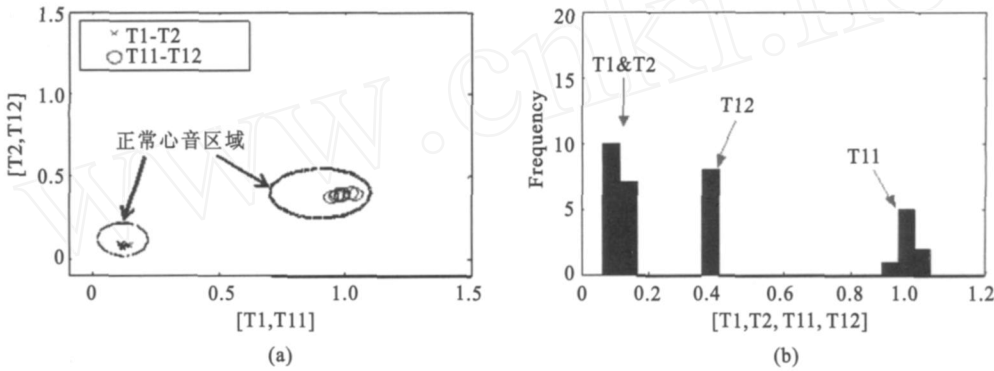


图 4 特征参数 $[T_1, T_2, T_{11}, T_{12}]$ 的图形表示
(a) 散点图; (b) 柱状图

Fig. 4 Graphic representations of the characteristic parameters $[T_1, T_2, T_{11}, T_{12}]$
(a) the scattergram of the parameters; (b) the histogram of the parameters

2 临床验证与结果讨论

2.1 心音的获取

采集的心音数据来源于解放军 452 医院心血管疾病中心以及西华大学国防生,其中正常的心音数据来自于西华大学 10 名男性国防生,听诊头置于心前区四个临床听诊解剖位置,分别是主动脉、肺动脉、三尖瓣、二尖瓣,共记录 40 组心音数据;20 组异常的心音数据来自于解放军 452 医院的 2 名女性及 3 名男性(测量条件同前,两名女性经临床诊断分别为先天性心脏病伴室间隔缺损、风湿性心脏病伴二尖瓣关闭不全;三名男性分别为风湿性心脏病、先天性心脏病伴巨大室间隔缺损、风湿性心脏病伴二尖瓣狭窄)。

录取心音前,提供安静舒适的环境,设置好系统参数,即采样频率 44.1 kHz,灵敏度为高档,频带为 20 Hz ~ 20 kHz,记录时间为 10 ~ 12 s;录取心音时,要求身体平躺,吸气后屏住开始测量记录。

2.2 临床验证

临床验证部分包括对正常心音和异常心音两个方面。选择心音预处理的滤波频带为:229.68 ~ 918.75 Hz,单自由度分析模型中的参数设定为 $\alpha = 0.707, p = 10 \text{ Hz}, \text{THV} = 0.25$ 。对文中所阐述的心音时域分析方法的有效性验证结果如表 1 所示,正常与异常心音判别准确率分别为 92.5 % 和 95.0 %。

表 1 正常与异常心音判别结果

Tab. 1 Analytical result of normal and abnormal heart sounds				
类型	实验数据(组)	正确数据(组)	误诊数据(组)	准确率(%)
正常心音	40	37	3	92.5
异常心音	20	19	1	95.0

因篇幅所限,各选一例正常与异常的心音数据作为研究对象进行详细分析。正常心音数据源于一名年龄 20 岁、身高 175 cm、体重 60 kg 男性,体检合格,身体健康。从图 5 分析结果来看,其特征参数 $[T_1, T_2]$ 、 $[T_{11}, T_{12}]$ 全部分布在圆内,可以判别为正常心音,与实际情况相吻合。

异常心音数据源于一位年龄 45 岁、身高 156 cm、体重为 40 kg 的女性,临床诊断为风湿性心脏病

伴二尖瓣关闭不全。分析结果如图 6 所示,即使选取不同的滤波频带,原始心音波形中的第一、第二心音成分也很难识别出来。从散点图中可知特征参数 $[T1, T2]$ 和 $[T11, T12]$ 的值都各自散落在两个圆心为 $[0.1, 0.1]$ 和 $[0.8, 0.4]$ 的圆形区域外,表明为异常心音,与实际临床诊断的结果一致。

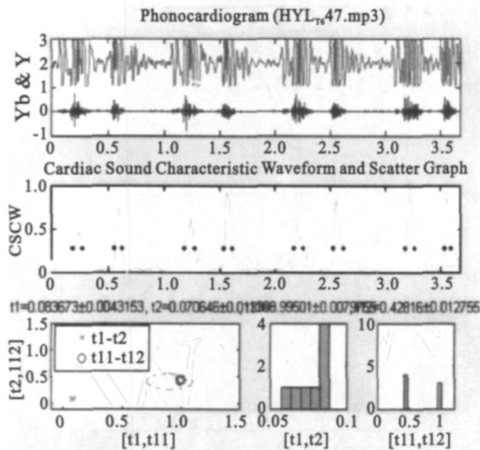


图 5 正常心音分析结果

Fig. 5 Normal heart sound

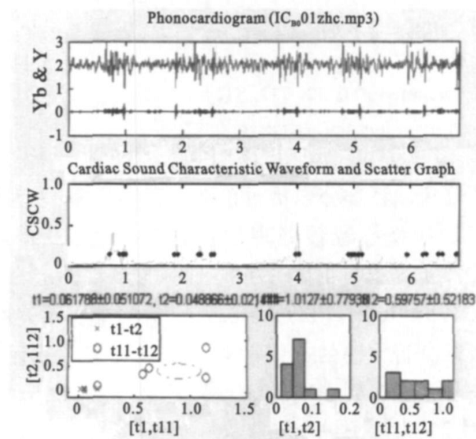


图 6 异常心音分析结果

Fig. 6 Abnormal heart sound

2.3 结果讨论

本文提出了一种新的心音时域分析方法,即心音特征波形法。首先建立单自由度分析模型提取心音特征波形,计算特征参数,采用简单的曲线图示和特征参数来判别正常与异常心音。通过对多组正常与异常的心音数据的实验研究及统计分析,验证了

该方法的有效性,为心音的两类判别提供了一种时域分析方法。

从表 1 的结果看出,单纯从时域角度来分析心音的准确率并不能达到 100%,为了提高判别的准确率,我们将辅以频域研究,结合频谱分析方法。另外,特征参数也受 THV 的取值影响,如何自动地选取 THV 值也是心音时域智能化判别的重要研究内容。

参考文献

- [1] MARTINEZ-ALAJARIN J, RUIZ-MERINO R. Efficient method for events detection in phonocardiographic signals [C]. Japan: In Proceedings of SPIE, 2005, 5839: 389-409.
- [2] ESTER S, FEMMER U, MOST E. Heart sound analysis utilizing adaptive filter technique and neural networks[J]. Tech Mess, 1995, 62(3): 107-112.
- [3] BARSCHDORFF D. Phonocardiogram signal analysis in infants based on wavelet transforms and artificial neural networks[J]. Processing Annual Science Meeting Computer Cardiology, 1995, 24(7): 753-756.
- [4] 周静, 杨永明, 何为, 等. 心音信号的分析及其特征提取方法的研究[J]. 中国生物医学工程学报, 2005, 24(6): 685-689.
- [5] JADRANKA S, JENNIFER B, LARS L, et al. Effect of increased diaphragm activation on diaphragm power spectrum center frequency[J]. Respiratory Physiology & Neurobiology, 2005, 146(1): 67-76.
- [6] 王海滨, 江钟伟, 董秀成, 等. 基于听诊器的心音采集解析系统[J]. 生物医学工程学杂志, 2009, 26(2): 282-287.
- [7] WOOD M V V, LUND R C, STEVENSON K B. Bacterial contamination of stethoscopes with antimicrobial diaphragm covers[J]. Am J Infect Control, 2007, 35(4): 263-266.
- [8] JIANG Z W, CHOI S J. A cardiac sound characteristic waveform method for in-home heart disorder monitoring with electric stethoscope[J]. Expert Systems with Applications, 2006, 31: 286-298.
- [9] CHOI S J, JIANG Z W. Comparison of envelope extraction algorithms for cardiac sound signal segmentation[J]. Expert Systems with Applications, 2008, 34(2): 1056-1069.
- [10] FARABEE M J. The circulatory system [EB/OL] (2007-06-06) [2008-12-31]. <http://www.emc.maricopa.edu/faculty/farabee/BIOBK/BioBookcircSYS.html>.
- [11] KARNATH B, THORNTON W. Auscultation of the heart [M]. America: Hospital Physician, 2002: 39-43.

(收稿: 2008-12-31 修回: 2009-05-18)