

## 基于心电信号和机械信号同步传感的穿戴式心功能监测

魏良<sup>1</sup>, 黄海韵<sup>2</sup>, 鄢苏鹏<sup>1</sup>, 李韵池<sup>1</sup>, 李永勤<sup>1</sup>, 龚渝顺<sup>1</sup>

1. 陆军军医大学生物医学工程与影像医学系医学仪器与计量学教研室, 重庆 400038; 2. 陆军军医大学第一附属医院超声科, 重庆 400038

**【摘要】**心脏电活动和机械活动的同步监测是全面评估心功能的关键。本研究设计一种可同步采集心电信号和胸部机械振动信号的穿戴式监测设备,以单片机为核心,利用心电采集芯片检测心电信号,利用加速度传感器同步采集心脏在体表的机械搏动信号。信号采集后,通过上位机分析软件识别心电和机械信号特征点,估算心功能指标。实验结果发现所估算的心功能指标与超声心动图获得参数具有较强的相关性,表明基于心电信号和机械信号同步传感的穿戴式监测方法可用于高风险心血管疾病患者的日常心功能监测。

**【关键词】**心血管疾病;心功能;可穿戴;心电图;心震图

**【中图分类号】**R318;G642

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2023)11-1390-05

## Wearable cardiac function monitoring based on synchronous sensing of electrocardiogram and mechanical signals

WEI Liang<sup>1</sup>, HUANG Haiyun<sup>2</sup>, YAN Supeng<sup>1</sup>, LI Yunchi<sup>1</sup>, LI Yongqin<sup>1</sup>, GONG Yushun<sup>1</sup>

1. Teaching and Research Section of Medical Instruments and Metrology, Department of Biomedical Engineering and Imaging Medicine, Army Medical University, Chongqing 400038, China; 2. Department of Ultrasound, the First Affiliated Hospital of Army Medical University, Chongqing 400038, China

**Abstract:** The simultaneous monitoring of the electrical and mechanical activities of the heart is critical to the comprehensive assessment of cardiac function. A wearable monitor that can synchronously collect electrocardiogram (ECG) signals and chest mechanical vibration signals is designed, with a single-chip microcomputer as the core, using ECG acquisition chip to detect ECG signals, and accelerometers to synchronously collect seismocardiogram (SCG) signals. After signal acquisition, the ECG and SCG signal characteristic points are recognized using the host computer analysis software for cardiac function estimation. The experimental results show that the estimated cardiac function indicators have strong correlations with the echocardiogram parameters, indicating that the wearable monitor based on synchronous sensing of ECG and SCG signals can be used for daily cardiac function monitoring in patients with high-risk cardiovascular diseases.

**Keywords:** cardiovascular disease; cardiac function; wearable; electrocardiogram; seismocardiogram

### 前言

心血管疾病(Cardiovascular Diseases, CVD)是导致人类死亡的第一大疾病<sup>[1]</sup>,我国CVD患者高达2.9亿,患病率处于持续上升阶段,患病人群年轻化趋势

明显<sup>[2-3]</sup>。对CVD进行预防性动态监测,可早期发现异常心血管信息,进而及时采取干预措施,尤其是对于CVD高风险人群,如心律失常、心力衰竭患者,动态监测心功能可有效避免心肌梗死、心脏骤停等恶性心脏病的关键措施<sup>[4-7]</sup>。对于心律失常患者,通过动态监测心电(Electrocardiogram, ECG)信号可及时发现异常<sup>[8-9]</sup>;而对于心脏机械收缩功能的评估主要通过心脏彩超获取超声心动图相关指标<sup>[10-11]</sup>。然而,超声心动图必须在医院内进行,需训练有素的超声技师,并不适合动态监测。有研究表明心机械图可用于评估心脏收缩功能相关参数,如利用心震图(Seismocardiogram, SCG)计算心输出量、动脉血压、

**【收稿日期】**2023-06-01

**【基金项目】**国家自然科学基金青年科学基金(31900977)

**【作者简介】**魏良,硕士,讲师,研究方向:生物医学信号检测与处理, E-mail: weiliangsyd@163.com

**【通信作者】**龚渝顺,博士,讲师,研究方向:生物医学信号检测与处理, E-mail: johnsongong@163.com

心肌收缩力等指标<sup>[12-13]</sup>。因此通过实时采集分析SCG等心脏机械振动信号有望实现对心脏机械收缩功能的动态监测。

目前,穿戴式心功能监测设备主要以监测ECG为主,很少涉及心脏机械活动的监测,从而导致在心肌收缩能力方面的动态评估缺失。本研究提出一种可穿戴的心脏ECG信号和机械信号同步传感方案,同步采集ECG信号和SCG信号,进而同时分析心脏节律和心脏机械收缩功能,达到全面分析心功能的目的。

1 监测设备设计与实现

系统硬件框图见图1,包括主控模块、ECG信号采集模块、SCG信号测量模块、电源模块、存储模块、蓝牙模块和数据读取等,各模块协调工作,完成ECG信号和SCG信号的同步采集、存储和传输。设备主控MCU采用STM32F411CEU6(意法半导体,意大利)单片机,该芯片具有丰富的接口以满足多种芯片的数据读写。ECG采集模块采用ADS1291(德州仪器,美国)集成式单导联ECG采集芯片,通过SPI接口与MCU通信;SCG信号采集模块使用三轴加速度传感器LIS2DW12(意法半导体,意大利),最大采集加速度采集范围为±16 g。体表心脏机械振动信号微弱,因此配置加速度传感器测量范围为±2 g以提高灵敏度,灵敏度值为0.244 mg/LSB。SCG信号采集传感器通过I2C接口与MCU通信,INT1和INT2引脚连接到MCU的GPIO口。存储模块使用SD NAND FLASH存储器(米客方德,中国),体积小,易于集成,适用于穿戴式设备的大数据量存储。设备也可将采集的数据通过蓝牙模块实时传输至终端,通过上位机或手机APP查看信号。电源模块包括充电管理和稳压电路两部分,采用3.7 V锂电池供电,通过稳压芯片稳压到3.3 V给系统供电。USB接口提供充电和数据读出功能,采用通用的Type-C接口,读数据时设备进入U盘模式,可直接拷出数据。

监测设备实物见图2,使用3片Ag/AgCl凝胶电极粘贴于胸部适当位置,心脏ECG信号和SCG信号均通过电极传感。设备横放于受试者胸骨上,卧姿,采集的信号示例见图3,设备可正常采集ECG和三轴加速度信号。卧姿时,相对于X轴和Y轴,Z轴获得的加速度信号峰值幅值更大,与卧姿时心脏搏动方向一致。

2 基于ECG和SCG的心功能评估

设备采集数据后,在上位机通过MATLAB分析获取心功能评价指标,主要包括ECG信号与SCG信号的特征点识别以及心功能参数的计算。

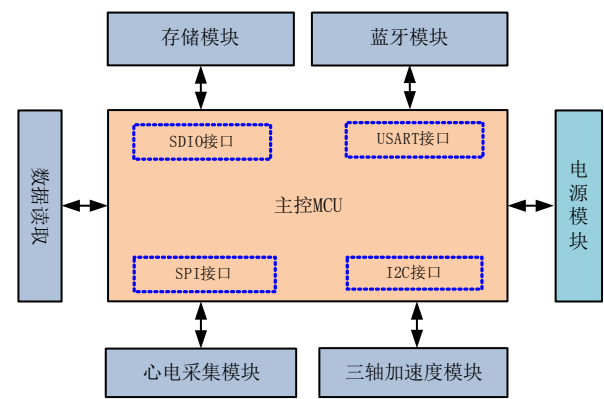


图1 穿戴式心功能监测硬件原理图  
Figure 1 Schematic diagram of the hardware of the wearable cardiac function monitor

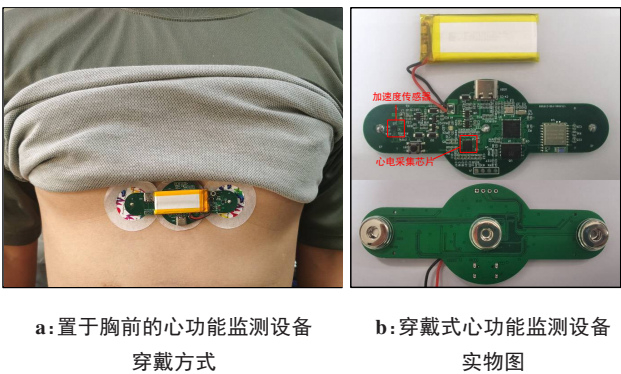


图2 穿戴式心功能监测设备的穿戴方式和设备实物图  
Figure 2 Wearing and physical picture of the wearable cardiac function monitor

2.1 ECG和SCG信号特征点识别

ECG和SCG信号特征点是判断心动周期内各个间期的重要参考点,如电活动中的PR间期、QRS波群、QT间期等,机械活动过程中的射血前期、等容收缩期、快速射血期等。因此ECG和SCG信号特征点的识别格外重要。在识别特征点之前,对SCG信号重采样至ECG信号采样率,这样可以方便地将ECG信号特征点位置对应到SCG信号,进而识别SCG信号特征点。本研究首先采用Pan-Tompkins算法自动识别ECG信号的Q、R、S、T波,然后通过可视化校正,修正识别错误的点位;进而根据文献[14-16]中ECG和SCG特征点的对应关系,寻找SCG波形上的极大值点或极小值点,识别SCG信号的二尖瓣闭合(Mitral Valve Closure, MC)、等容运动(Isovolumic Movement, IM)、主动脉打开(Aortic Valve Opening, AO)、主动脉瓣关闭(Aortic Valve Closure, AC)、二尖瓣打开(Mitral Valve Opening, MO)等特征点。信号特征点识别流程见图4,N1和N2可根据每个人波形的不同进行调整。识别后的各特征点示例见图5。

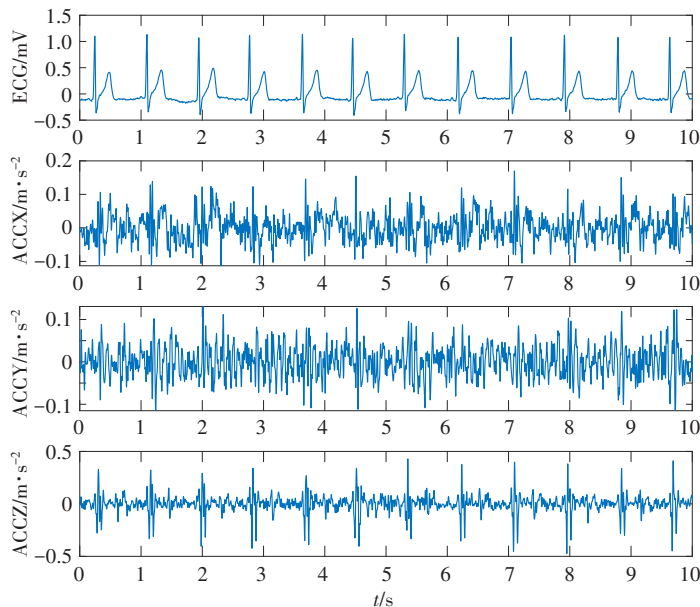


图3 设备采集信号示例

Figure 3 Examples of collected ECG and SCG signals

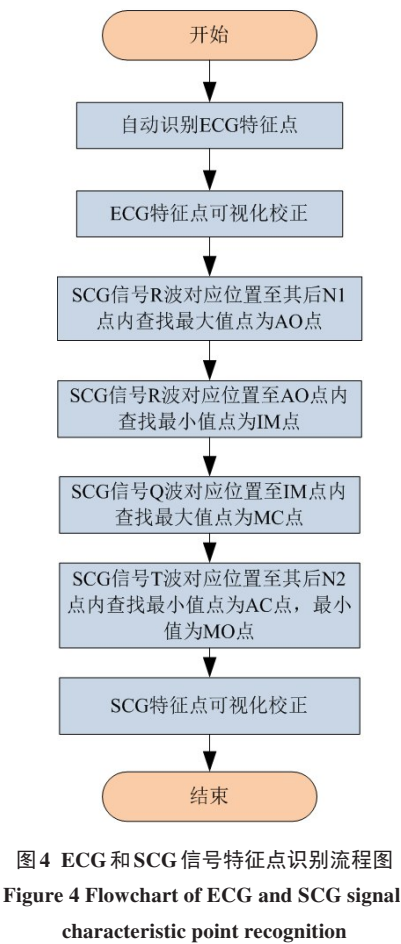


图4 ECG和SCG信号特征点识别流程图

Figure 4 Flowchart of ECG and SCG signal characteristic point recognition

2.2 心功能指标估算

心功能指标用于衡量心肌收缩、舒张功能,本研究主要采用射血前期(Pre-Ejection Period, PEP)、左心室射血时间(Left Ventricular Ejection Time, LVET)、等容

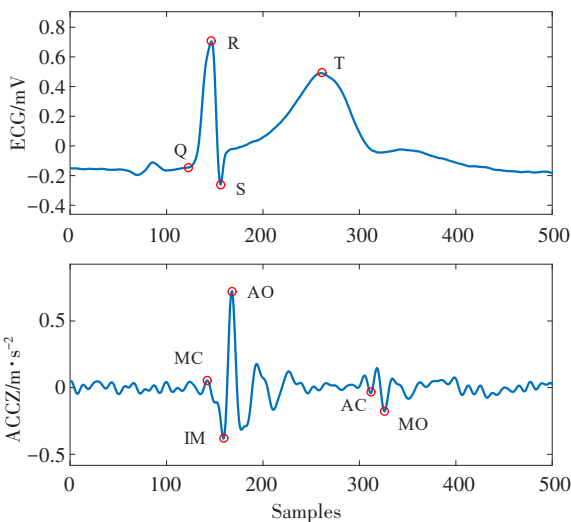


图5 ECG和SCG特征点识别示例

Figure 5 Examples of ECG and SCG signal characteristic point recognition

收缩时间(Isovolumic Contraction Time, IVCT)、等容舒张时间(Isovolumic Relaxation Time, IVRT)、左心室射血分数(Left Ventricular Ejection Fraction, LVEF)等指标对系统心功能监测能力进行评估。

2.2.1 心动周期参数估算 心动周期参数是特定心脏事件之间的持续时间,与心脏生理和功能密切相关。ECG的Q波与SCG的AO峰之间的时间间隔被认为是PEP的替代值,PEP是心脏等容收缩周期的量度,是心脏收缩力的指标<sup>[15-16]</sup>。LVET常用于估算心脏收缩时间间期,可作为动态监测心脏功能和预测心衰的指标,动态监测心功能变化和判断左室收缩功能



不全。心动周期参数估算主要根据 ECG 和 SCG 信号特征点的时间位置进行计算<sup>[17-18]</sup>：

$$PEP=t_{AO}-t_Q \tag{1}$$

$$LVET=t_{AC}-t_{AO} \tag{2}$$

$$IVCT=t_{AO}-t_{MC} \tag{3}$$

$$IVRT=t_{MO}-t_{AC} \tag{4}$$

其中,  $t_Q$ 、 $t_{AO}$ 、 $t_{AC}$ 、 $t_{MC}$ 、 $t_{MO}$  分别表示 Q 波、AO 点、AC 点、MC 点及 MO 点在一个心动周期中的时间点。

**2.2.2 心肌收缩指标估算** 心肌收缩指标是评价心肌收缩能力的重要参数,本研究主要采用 LVEF 和 Tei 指数估算心肌收缩指标。PEP 与 LVET 的比值称为收缩指数(Contractility Coefficient, CCt),是衡量左心室功能障碍的重要指标,左心室功能下降会导致 CCt 升高<sup>[19-20]</sup>。CCt 计算公式如下：

$$CCt=PEP/LVET \tag{5}$$

Tei 指数又称心肌做功指数,用于评价心脏的整体功能<sup>[21-22]</sup>,其计算公式如下：

$$Tei=(IVCT+IVRT)/LVET \tag{6}$$

LVEF 指每搏输出量占心室舒张末期容积量的百分比,其与心肌收缩功能密切相关,是判断心力衰竭类型的重要指征之一<sup>[23]</sup>。LVEF 的大小与心肌收缩功能密切相关,但不能通过心动周期参数直接获得,而同样作为评价心肌功能的重要参数,CCt 和 Tei 指数可能与 LVEF 之间存在着相关关系,本研究对 LVEF 与 CCt 和 Tei 指数及二者的组合之间的关系进行分析。

3 结果与分析

为验证基于 ECG 和 SCG 评估心功能参数的可行性,本研究招募 5 名健康受试者开展测试。首先对受试者行超声心动图检查,记录心功能参数数据。因设备粘贴位置为超声心动图检查的相关区域,因此在超声检查后粘贴本设备进行 ECG 和 SCG 信号采集,从而使得两次测试受试者心率不会出现大的波动。采集过程中,受试者卧姿平躺在测试床上,数据记录在设备存储器中,数据采集时长为 5 min。

3.1 心动周期参数

ECG 和 SCG 信号特征点识别后,按照式(1)~(4)计算心动周期参数,对所有心动周期的参数取均值作为本次测试的心动周期参数(表 1)。

3.2 心肌收缩指标

根据式(5)计算 CCt,根据式(6)计算 Tei 指数,CCt、Tei 指数及 LVEF 如表 2 所示。

对 LVEF 和 CCt、Tei 及二者的组合做线性拟合,拟合曲线见图 6,拟合公式分别为：

$$LVEF=-46.9\times CCt+82.8 \tag{7}$$

$$LVEF=-40.8\times Tei+82.9 \tag{8}$$

表 1 心动周期参数表(ms)  
Table 1 Cardiac cycle parameters (ms)

受试者	PEP	LVET	IVCT	IVRT
1	74±4	255±8	46±4	55±7
2	100±6	259±10	56±6	58±8
3	87±5	316±6	42±4	42±7
4	96±6	282±8	54±3	31±8
5	78±7	259±18	47±8	65±16

表 2 心肌收缩指标  
Table 2 Myocardial contraction indicators

受试者	CCt	Tei	LVEF
1	0.290	0.396	67.7
2	0.386	0.440	63.7
3	0.275	0.266	72.1
4	0.340	0.301	70.1
5	0.300	0.431	65.8

$$LVEF=-31.1\times (CCt+Tei)+89.2 \tag{9}$$

从拟合结果可以看出,LVEF 与 CCt、Tei 和二者之和均为负相关,与 Tei 指数( $R^2=0.932$ )和二者之和( $R^2=0.973$ )具有较强的相关性,这与 Chien-Hung 等<sup>[17]</sup>的研究结果一致,表明通过 ECG 和 SCG 信号特征点获取心肌收缩功能指标,进而计算 LVEF 是可行的。

4 讨论

本研究研发了一种基于心脏电活动和机械活动同步传感的穿戴式心功能监测设备,实现 ECG 和 SCG 信号的同步采集,并通过 ECG 和 SCG 信号的特征点识别实现对常用的心动周期参数和心肌收缩指标的估算。考虑到采集受试者的 ECG 和 SCG 信号是在做完超声心动图后马上进行的,受试者心率并未发生大的波动,因此可通过超声心动图测量的 LVEF 与估算的 CCt 和 Tei 指数之间的线性关系验证设备在评估心功能上的可行性。拟合结果表明 LVEF 与 CCT 和 Tei 指数之和具有较强的相关性( $R^2=0.973$ ),且呈负相关。研究还发现加速度传感器采集到的 SCG 波形具有较大的个体差异,同时加速度传感器所处的位置对 SCG 波形形态也有较大影响,这对于自动提取 SCG 信号特征点是不利的。另外,尽管研究发现 LVEF 与 CCt 和 Tei 指数之和具有较强的相关性,但仅有 5 例数据,样本量较小,且招募的受试者均为健康大学生,其波形与 CVD 患者也有较大差异,后续还需要对其他年龄阶段和 CVD 患者的波形做进一步分析。

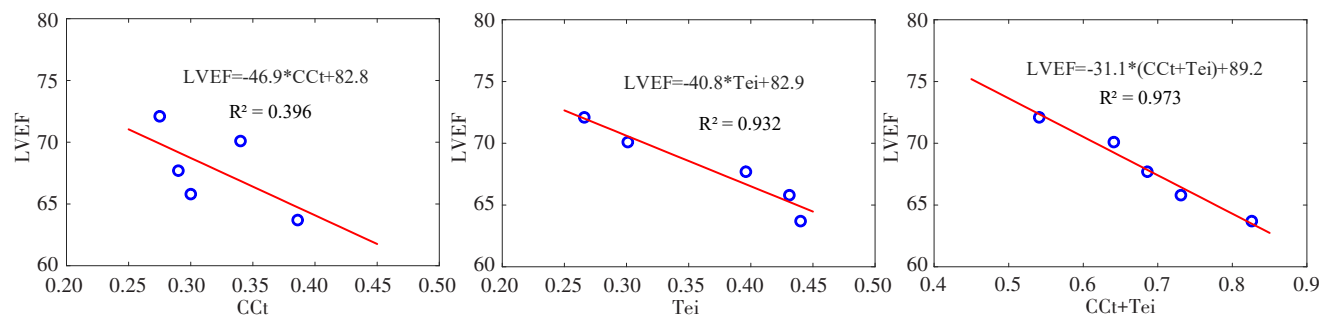


图6 CCt、Tei指数及二者之和与LVEF的拟合曲线

Figure 6 Fitting curves of LVEF with CCt, Tei index and sum of the two

## 5 结语

穿戴式心功能监测设备已逐渐进入家庭,包括手表、贴片式ECG监测仪等,这些系统可以提供心率、ECG节律和心率变异性的估计值,但不能直接提供有关心脏和脉管系统的机械健康信息<sup>[24-25]</sup>。加速度传感器在检测微小振动方面具有较强的优势,但用于健康监测设备上时大多作为计步和运动状态监测,几乎不涉及心脏机械活动的评估。本研究探索了基于ECG和SCG同步采集的心功能监测方法,通过同步采集ECG和SCG信号,分析心脏电活动和机械活动,以期实现对心功能的全面评估。作为可穿戴设备,研究成果可为患有心衰等心脏结构和/或功能异常改变患者的日常自我评估和运动康复指导提供借鉴。

## 【参考文献】

- [1] Luca AC, David SG, David AG, et al. Atherosclerosis from newborn to adult-epidemiology, pathological aspects, and risk factors[J]. Life (Basel), 2023, 13(10): 2056.
- [2] 《中国心血管健康与疾病报告》编写组.《中国心血管健康与疾病报告2020》概述[J]. 中国心血管病研究, 2021, 19(7): 582-590. Compilation Group of Annual Report on Cardiovascular Health and Diseases in China 2020. Overview of annual report on cardiovascular health and diseases in China[J]. Chinese Journal of Cardiovascular Diseases, 2021, 19(7): 582-590.
- [3] 吕煜焱, 丁思霄, 赵逸凡, 等. 人工智能化的远程心电监测在心血管疾病中的应用[J]. 中国心血管杂志, 2020, 25(3): 270-273. Lü YY, Ding SX, Zhao YF, et al. Application of artificial intelligence-based remote ECG monitoring in cardiovascular disease[J]. Chinese Journal of Cardiovascular Disease, 2020, 25(3): 270-273.
- [4] 中国康复医学会心血管病专业委员会, 中国老年学学会心脑血管病专业委员会. 慢性稳定性心力衰竭运动康复中国专家共识[J]. 中华心血管病杂志, 2014, 42(9): 714-720. Cardiovascular Disease Professional Committee of Chinese Rehabilitation Medical Association, Cardiovascular and Cerebrovascular Disease Professional Committee of Chinese Gerontology Society. Chinese expert consensus on sports rehabilitation for chronic stable heart failure[J]. Chinese Journal of Cardiology, 2014, 42(9): 714-720.
- [5] Huang JD, Wang J, Ramsey E, et al. Applying artificial intelligence to wearable sensor data to diagnose and predict cardiovascular disease: a review[J]. Sensors (Basel), 2022, 22(20): 8002.
- [6] Kumar S, Victoria-Castro AM, Melchinger H, et al. Wearables in cardiovascular disease[J]. J Cardiovasc Transl Res, 2023, 16(3): 557-568.
- [7] Donisi L, Cesarelli G, Pisani N, et al. Wearable sensors and artificial intelligence for physical ergonomics: a systematic review of literature[J]. Diagnostics (Basel), 2022, 12(12): 3048.
- [8] 胡萍, 吴志红. 动态心电图在冠心病伴心律失常患者中的诊断价值分析[J]. 中国医学工程, 2023, 31(6): 75-79. Hu P, Wu ZH. Diagnostic value of ambulatory electrocardiogram in patients with coronary heart disease and arrhythmia[J]. China Medical Engineering, 2023, 31(6): 75-79.
- [9] Fairley JL, Ross L, Quinlivan A, et al. Sudden cardiac death, arrhythmias and abnormal electrocardiography in systemic sclerosis: a systematic review and meta-analysis[J]. Semin Arthritis Rheum, 2023, 62: 152229.
- [10] Bonagura JD, Blissitt KJ. Echocardiography[J]. Equine Vet J Suppl, 1995, 19: 5-17.
- [11] 吕真, 黄丽建. 动态心电图联合超声心动图诊断冠心病的临床效果分析[J]. 现代医用影像学, 2022, 31(10): 1930-1932. Lü Z, Huang LJ. Clinical effect analysis of ambulatory electrocardiography combined with echocardiography in the diagnosis of coronary heart disease[J]. Modern Medical Imageology, 2022, 31(10): 1930-1932.
- [12] Etemadi M, Inan OT. Wearable ballistocardiogram and seismocardiogram systems for health and performance[J]. J Appl Physiol, 2018, 124(2): 452-461.
- [13] Beren S, Andrew MC, Jessica CJ, et al. Non-invasive wearable patch utilizing seismocardiography for peri-operative use in surgical patients[J]. IEEE J Biomed Health Inf, 2021, 25(5): 1572-1582.
- [14] Crow RS, Hannan PJ, Jacobs DR, et al. Relationship between seismocardiogram and echocardiogram for events in the cardiac cycle[J]. Am J Noninvasive Cardiol, 1994, 8: 39-46.
- [15] Kouhyar T. Systolic time intervals and new measurement methods[J]. Cardiovasc Eng Technol, 2016, 7(2): 118-125.
- [16] Sieciński S, Kostka PS, Tkacz EJ. Gyrocardiography: a review of the definition, history, waveform description, and applications[J]. Sensors (Basel), 2020, 20(22): 6675.
- [17] Chien-Hung C, Wen-Yen L, Ming-Yih L. Computer-aided detection of fiducial points in seismocardiography through dynamic time warping[J]. Biosensors (Basel), 2022, 12(6): 374.
- [18] Sidikova M, Martinek R, Kawala-Sterniuk A, et al. Vital sign monitoring in car seats based on electrocardiography, ballistocardiography and seismocardiography: a review[J]. Sensors (Basel), 2020, 20(19): 5699.
- [19] Lin WY, Ke HL, Chou WC, et al. Realization and technology acceptance test of a wearable cardiac health monitoring and early warning system with multi-channel MCGs and ECG[J]. Sensors, 2018, 18(10): 3538.
- [20] Balali P, Rabineau J, Hossein A, et al. Investigating cardiorespiratory interaction using ballistocardiography and seismocardiography-a narrative review[J]. Sensors (Basel), 2022, 22(23): 9565.
- [21] Zhang Y, Sun G, Zhu W, et al. Feasibility study on evaluating right ventricular diastolic function by new Tei-index[J]. Heliyon, 2023, 9(10): e20666.
- [22] 胡科丹, 罗铃, 寇艳, 等. Tei指数联合血压评价向心性肥厚原发性高血压患者左心功能的效果分析[J]. 医药前沿, 2022, 12(23): 52-54. Hu KD, Luo L, Kou Y, et al. Effect of TEI index combined with blood pressure in evaluating left ventricular function in patients with central hypertrophic essential hypertension[J]. Journal Frontiers of Medicine, 2022, 12(23): 52-54.
- [23] 中华医学会心血管病学分会心力衰竭学组, 中国医师协会心力衰竭专业委员会, 中华心血管病杂志编辑委员会. 中国心力衰竭诊断和治疗指南2018[J]. 中国心血管病杂志, 2018, 46(10): 760-789. Heart Failure Group of Cardiology Branch of Chinese Medical Association, Heart Failure Professional Committee of Chinese Medical Doctor Association, Editorial Board of Chinese Journal of Cardiovascular Diseases. Chinese heart failure diagnosis and treatment guidelines 2018[J]. Chinese Journal of Cardiovascular Diseases, 2018, 46(10): 760-789.
- [24] Parlato S, Centracchio J, Esposito D, et al. ECG-free heartbeat detection in seismocardiography and gyrocardiography signals provides acceptable heart rate variability indices in healthy and pathological subjects[J]. Sensors (Basel), 2023, 23(19): 8114.
- [25] Parlato S, Centracchio J, Esposito D, et al. Heartbeat detection in gyrocardiography signals without concurrent ECG tracings[J]. Sensors (Basel), 2023, 23(13): 6200.

(编辑:谭斯允)