

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108374

心电与心音信号同步智能检测方法与识别技术研究^{*}

臧俊斌^{1,2} 周宸正¹ 向梦辉¹ 张志东¹ 薛晨阳¹

(1. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室 太原 030051; 2. 山西工学院 朔州 036000)

摘要: 心血管疾病的早期准确检测对降低心血管疾病的死亡率具有至关重要的意义。因此,针对心血管疾病早期检测中常用听诊与心电检测方式所存在的数字化与同步联合检测技术瓶颈,研制了基于 MEMS 矢量水听器芯片的高灵敏心音探头,并对其集成化设计出 5 路心音和标准 12 导联心电同步采集仪器系统。测试结果表明:所研制的心音传感探头的信噪比达 40 dB,优于 3M 听诊器;同时该系统所采集获取的 QRS 波心电信号与 S_1 、 S_2 心音信号特征峰点同步,波形特征准确清晰,实验测试实现了心音的数字化检测与病症异常特征的直观辨识。此外,优化系统以期具备智能化检测诊断能力,还搭建了云服务器与数据库,并设计开发了心音智能诊断算法。通过对采集的临床病例数据测试集进行测试,结果表明,5 分类心音智能识别的准确率达 90% 以上。因此,该检测系统对辅助医师进行心血管疾病的早期数字化检测与联合诊断具有重要的技术价值和临床指导意义。

关键词: 心电心音;同步采集;智能诊断;传感器;信号处理

中图分类号: TH776 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 310.6140

The research on synchronous detection methods and intelligent recognition technology of ECG and heart sounds

Zang Junbin^{1,2} Zhou Chenzheng¹ Xiang Menghui¹ Zhang Zhidong¹ Xue Chenyang¹

(1. Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Shanxi College of Technology, Shuozhou 036000, China)

Abstract: Early and accurate detection of cardiovascular disease is of significant importance to reduce the mortality caused by it. In view of the digital and synchronous combined detection technology bottlenecks in the common auscultation and ECG detection methods used in the early detection of cardiovascular diseases, a highly sensitive heart sound probe based on the MEMS vector hydrophone chip was developed and integrated a 5-road heart sounds and standard 12-lead ECG simultaneous acquisition instrument system. The test results show that the developed heart sound sensor probe has a signal-to-noise ratio of 40 dB, which is better than the 3M stethoscope; and the QRS wave ECG signal collected by the system is synchronized with the characteristic peaks of the S_1 and S_2 heart sound signals, and the waveform characteristics are accurate and clear. The test has realized the digital detection of heart sounds and the intuitive identification of abnormal characteristics of the disease. In addition, the system is optimized to have intelligent diagnosis capabilities. Therefore, a cloud server and database have also been built, and an intelligent diagnosis algorithm for heart sounds has been designed and developed. Through testing on the collected clinical case, the results show that the accuracy of the five-category heart sound intelligent recognition is over 90%. Therefore, the detection system has important technical value and clinical guiding significance for assisting physicians in the early digital detection and joint diagnosis of cardiovascular diseases.

Keywords: ECG and PCG; synchronous acquisition; intelligent diagnosis; sensor; signal processing

0 引 言

近年来,随着人们生活水平的不断提高,心脏疾病已成

为影响我国居民健康的主要因素之一,控制其发病率与增长速度显得尤为重要^[1]。心音和心电信号作为人体心脏器官活动产生的生物信号,能有效用于评估身体的健康状态,

收稿日期:2021-11-17

^{*} 基金项目:国家自然科学基金青年基金(62001430)、2020年度山西省研究生教育创新项目(2020BY101)资助

且根据相关研究报告,冠状动脉堵塞 25%,心音有明显杂音,心电无异常,冠脉阻塞 70%以上引起心电异常^[2-3]。因此,同步精准采集心电与心音信号,并深入挖掘二者在时域、频域以及时频域上的关联关系对于预防心血管疾病具有很强的现实意义。

目前,国内外有关心电检测的设备和新技术已日趋成熟,如 Fouassier 等^[4]提出的 T 恤心电采集系统、Omar 等^[5]研制的手臂式可穿戴心电远场心电检测系统以及天津大学研制的基于光电效应的可穿戴心电监测系统^[6]等,其心电信号的采集质量与成熟的 Holter 记录器效果基本一致,但其便携、可视化以及互联网远程传输诊断优势突出。相比之下,心音信号的采集与应用还处于发展阶段,以 3M 电子听诊器主导领跑的一系列心音采集装备正在日新月异的快速更替发展中,但其心音库的缺乏和对心音图的认识水平和技术的欠缺导致其发展较为缓慢。而有关心电和心音信号同步采集的仪器装备更是寥寥无几^[7]。尽管 Huang 等^[8]和 Sun 等^[9]通过不同的设计方法和技术实现了心电心音的检测采集,但其未实现多通道并行同步采集和远程传输、存储以及智能识别,无法开展应用与研究。因此,亟需将二者进行深度结合,研发多导心电、心音同步检测技术装备以心电辅助心音进行图库建立,助力多模态信号的融合与特征深度分析,挖掘信号关联关系中蕴含的疾病量化参数。

本文研制了一种基于 MEMS 矢量水听器芯片技术的高灵敏心音采集探头与多通道心电、心音同步智能检测系统,优点在于便携、信噪比高、波形可视化与实时同步采集,且能够通过预搭建的云服务器平台实现数据云端传输、存储与智能诊断,为心脏疾病的早期初筛与辅助诊断提供更多的参数,对 AI 数字化医疗诊测发展提供了一种新的技术手段。

1 系统设计

心电、心音同步采集智能检测系统,主要由硬件系统与软件系统组成,硬件系统集成标准 12 导联心电和 5 路 MEMS 矢量高灵敏心音探头。其中心音采集探头的核心敏感单元为课题组自主设计的 MEMS 矢量水听器芯片,集成封装方法主要采用声信号介质传导高效耦合阻抗匹配的封装方案实现微弱心音信号的高效拾取。多导同步信号的采集与数字化处理采取 FPGA 并行同步采样技术,而 12 导心电采集运用了 DSP 前处理的全新方案解决了高信噪比心电信号的精准提取问题。软件系统主要由上位机软件、MySQL 数据库与搭载了深度学习算法的云服务器平台组成,其核心智能识别算法为自主构建的基于 CNN 网络的同态信号处理算法完成,实时数据传输采取 FTP 压缩传输方式达到实时、快速通信与云交互。整体系统的设计实现了多路同步采集、实时传输与智能云交互的技术优势,其一体化集成系统的整体结构框图如图 1 所示。

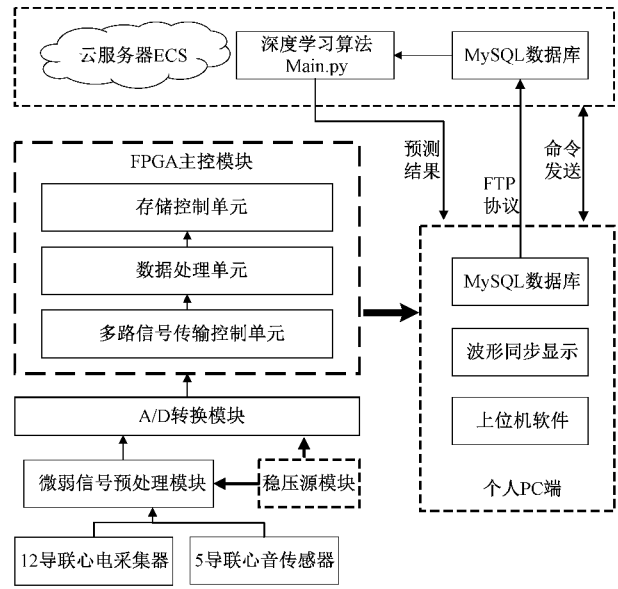


图 1 系统方案框图

其中心电与心音信号采集点位置选择如图 2 所示,12 导联心电采集点分别连接在 RA、LA、RL、LL、V1~V6 位置处,5 路心音传感器探头放置于心脏标准听诊区内,同步采集人体心音和心电信号^[9]。由于二者皆是微弱小信号,幅值在几毫伏左右,且频率在 600 Hz 以下。因此,该系统需要对信号进行滤波、放大等后处理,然后由交互软件系统经 FTP 协议传输至云服务器完成智能诊断。

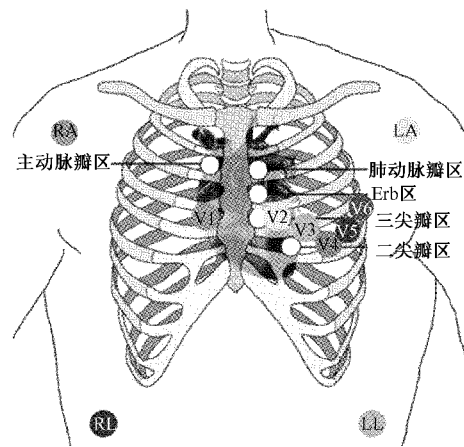


图 2 心电心音信号采集位置

2 硬件系统设计

本系统采用自主设计研发的 MEMS 矢量水听器传感芯片对微弱心音信号进行拾取采集,并利用差分方式提升信号的前端捕获能力^[10]。心电信号的采集采用广泛应用于心电图医疗仪器中的 ADS1298 芯片实现。主控 FPGA 芯片选用 XC3S400,后端信号处理电路由 AD8226、AD823A 和 AD7091R 完成信号的滤波、放大与 A/D 处理。其详细的硬件系统结构如图 3 所示。

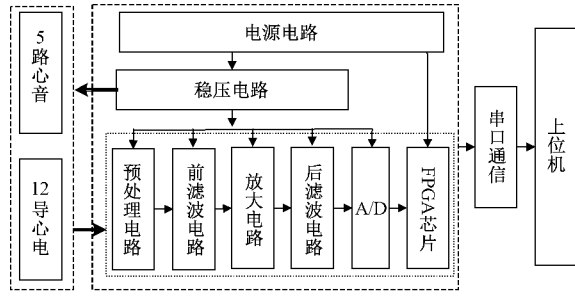


图3 硬件电路系统框图

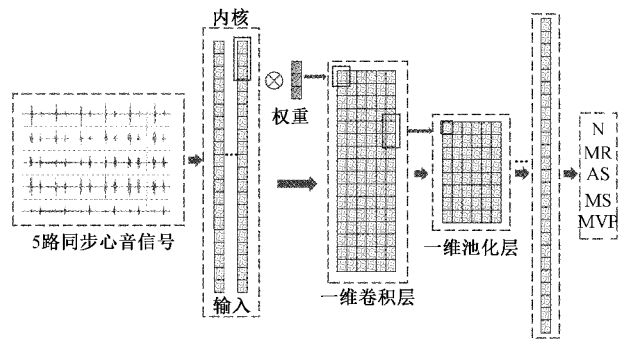


图5 算法网络结构

3 软件系统设计

3.1 上位机交互软件系统

上位机系统软件采用Qt开发,主要功能为:采集下位机实时传送的心电、心音数据;下发操作控制参数指令给下位机;实时保存数据并建立心电、心音病例数据库;界面显示心电、心音实时波形;与云服务平台实时交互完成智能AI诊断等。其详细的软件系统流程如图4所示。

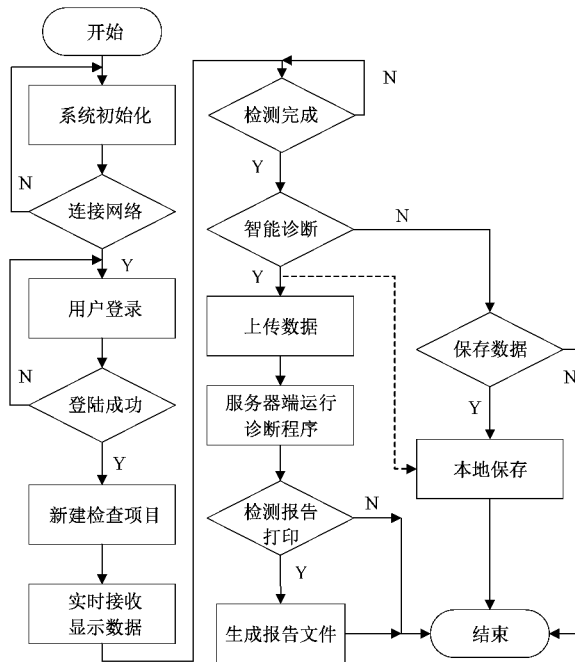


图4 上位机软件流程

3.2 智能检测识别算法实现

自主搭建的深度学习智能识别算法由Python语言编程后预先部署在云服务器上;实时采集的心电、心音数据信息经上位机交互软件系统由FTP协议上传并保存到MySQL数据库中;云服务器上预先部署的深度学习心音分类算法主函数对数据库中实时存储的病例数据进行实时读取,并按照算法流程进行数据处理,最终实现对心脏健康状态的智能识别诊断与反馈显示。图5为构建的深度学习算法网络结构图^[11-14]。其主要思想为基于CNN的多维数据信号同步卷积。

考虑到系统需要的泛化性能,系统使用的是直接将原始的5路同步心音信号输入到卷积神经网络中,这样可以保证心音信号中的特征不会丢失,由一层层的卷积自主提取心音信号中蕴含的更深层次的生理以及病理数据特征信息,最终完成数据的分类识别。

4 实验结果与分析

4.1 仪器系统测试

在系统软硬件开发完成后对其进行系统整机联合测试,图6为仪器系统实际测试图。为了验证系统设计目标的实现程度,主要对系统进行功能性测试,其中心电信号采集测试导联线为市面上常规的标准12导联线。

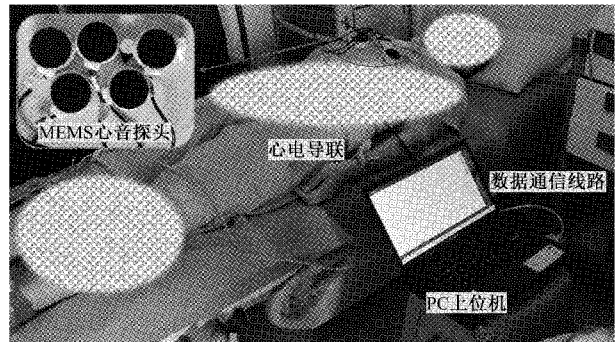


图6 仪器临床测试

为验证MEMS心音探头集成到该系统后所采集到的心音信号的质量和准确性,通过采用MEMS听诊探头和3M听诊探头对同一实验对象心音信号的采集,如图7所示,取其中一路心音信号进行分析,3M听诊器采集的心音信号电压幅值小于MEMS心音探头采集心音信号电压幅值。MEMS听诊器采集到的心音信号电压幅值绝对值 U_1 为0.86V, U_2 为0.0097V;3M听诊器采集到的心音信号幅值 U_1 为0.308V, U_2 为0.0038V。由式(1)计算得到^[15-18],本系统采集到的心音信号信噪比为40dB,优于3M电子听诊器的38dB。

$$SNR = 20\lg\left(\frac{U_1}{U_2}\right) \quad (1)$$

式中： U_1 为实验采集时心音信号电压幅值的绝对值， U_2 为仪器空采时的噪声信号电压幅值的绝对值。

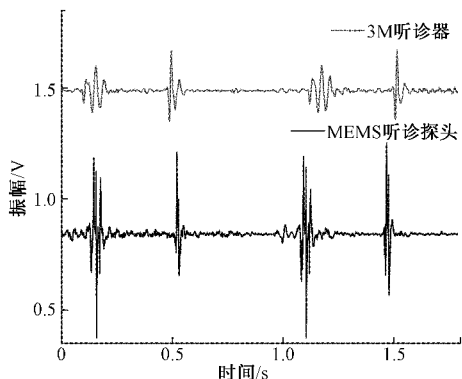


图 7 MEMS 听诊器与 3M 听诊器对比

4.2 心电心音同步性分析

如图 8 所示，为采用 MEMS 心音探头和标准心电电极同步采集的患有冠心病和陈旧性心梗的丁女士心电与心音同步信号。从图 8 中可以看出，心电信号的 QRS 波群和心音信号的 S_1 和 S_2 明显可见。研究表明，心电信号 R 波波峰与心音 S_1 同步出现，心电 T 波于心音 S_2 同时消失。因此，该本文设计的心电、心音同步采集系统采集的心电、心音信号具有很好的同时性。此外，从图中还可以清晰看到该患者第 1 心音振幅小于第 2 心音，并且在收缩期存在明显杂音。

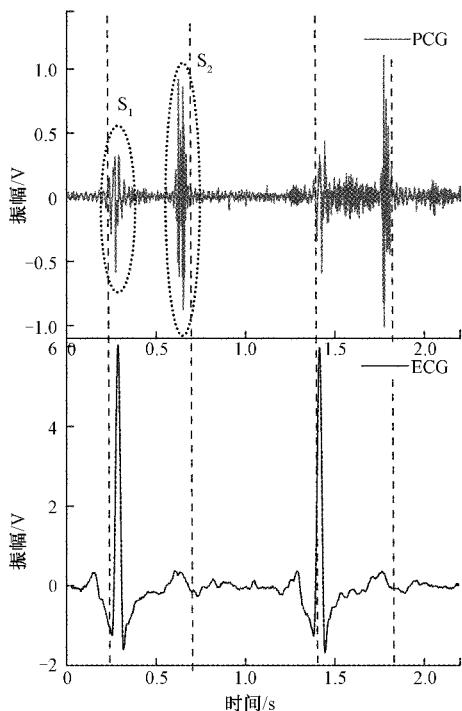


图 8 心电心音同步性分析

进一步为了研究该系统采集的 5 路心音信号用于疾病辅助诊断的可行性和确定 5 路心音同步采集信号的准确

性，本文采集了标准 3B Scientific 心肺音听诊训练模型中具有第 2 心音反常分裂和二尖瓣狭窄的示例信号。结果如图 9 所示，从图 9(a)可以看出 5 路同步信号波形在时域波形上存在差异，其中主动脉瓣区(A)表现为第 2 心音 S_2 比 S_1 振幅大，在 Erb 区(E)、肺动脉瓣区(P)与三尖瓣区(T)有明显第 2 心音 S_2 分裂现象，尤其在三尖瓣区(T)表现最为明显，分析病理原因可能为三尖瓣关闭不全导致肺动脉瓣提前关闭所致；从图 9(b)可以看出二尖瓣狭窄病例心音对应 5 路心音信号同样存在差异，其中主动脉瓣区(A)第 2 心音 S_2 比第 1 心音 S_1 振幅大很多；二尖瓣区(M)、肺动脉区(P)、主动脉第二听诊区 Erb(E)、三尖瓣区(T)对应的 S_2 振幅与 S_1 接近，而且明显看到 S_2 附近含有高频隆隆样杂音，且在二尖瓣区(M)最为明显，分析病例原因为重度二尖瓣狭窄病变所致。可见，该系统采集的 5 路同步心音信号的时域波形可以对疾病诊断做出更为准确的判断。

另外，对心音信号进行小波频域分解，将其在 4 个主要频段进行展开，计算各频段信号的能量谱密度，如图 9(b)和(d)所示，可以看出对于同一种病，不同听诊区同步采集的心音信号的频域能量谱差异性更大，对疾病的分类更加有效。所以，通过对采集的心电、心音信号进行同时性和时频域特性研究分析，表明本系统采集到的心电、心音同步信号可有效用于临床心脏疾病的辅助诊断，为心脏疾病诊断提供更多有用参数。

4.3 智能诊断深度学习模型训练测试

通过使用 5 分类心音开源数据库^[19-25]（正常(N)、二尖瓣回流(MR)、主动脉狭窄(AS)、收缩期存在杂音(MVP)、二尖瓣狭窄(MS))对图 5 构建的深度学习模型进行训练，从准确度曲线可以看出其准确率高于 95%。通过利用开源心音库训练的深度学习模型对该系统采集的 1 028 临床病例数据进一步的训练，将 1 028 例数据分 628 例为训练集、400 例为测试集。通过训练调参优化，以使其训练准确率维持在 95% 以上。然后，用测试集对优化后的模型进行测试验证，其 5 分类智能诊断结果如表 1 所示，测试集 5 分类识别准确率均高于 90%。

表 1 心音智能诊断准确率

类型	AS	MR	MS	MVP	N
准确度/%	90.2	97.3	90.5	95.1	100

将上述深度学习智能识别算法编译为可执行程序部署到云服务器平台，对测试数据进行实时智能识别。最后将开发完整的仪器与系统用于临床实际测试，图 10 为实际测试结果，由图 10 可以看出，该系统出色的达到了设计研发目标，可以完整的实时显示检测波形并能快速返回智能诊断结果，对辅助临床心脏疾病诊断有着较高的医疗使用价值。

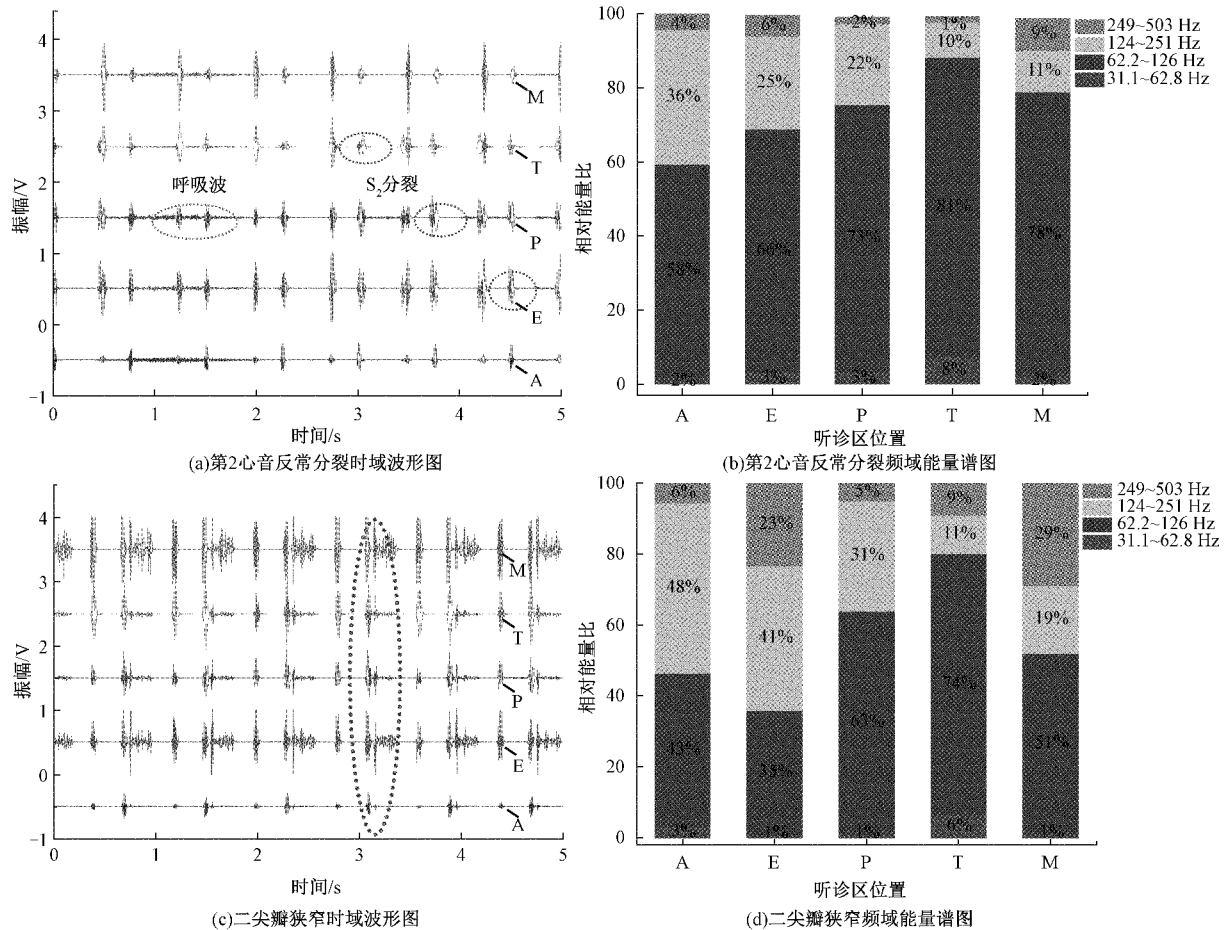


图9 5路心音信号分析结果

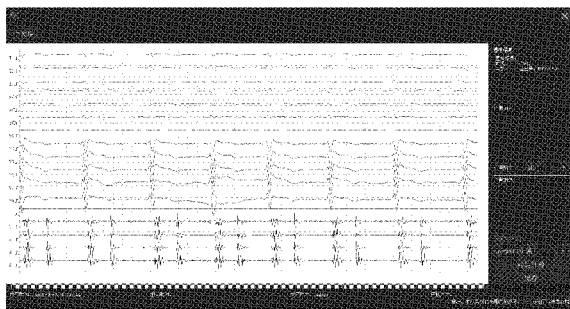


图10 智能诊断结果

5 结 论

本文研究设计的心电、心音同步采集智能检测系统,将标准12导心电信号与5路心音信号进行多路同步采集,解决了临床检测中心电与心音分项、分立采集存在的操作繁琐性和特征独立性问题,具备应用心电辅助标记构建心音图库的技术可行性。同时,通过实际测试表明本系统中的心音采集探头信噪比较3M听诊器提升2 dB,并且能实现异常心音信号的准确采集。另外,该系统中所构建的智能识别算法模型,能有效用于系统闭环智能诊断测试

证,且其测试集准确度达90%。进一步将本文研究设计的系统进行简化,移植于便携穿戴检测设备中将有助于全时段、全方位的日常心脏健康评估与筛查预防。但是本系统的多模态特征融合诊断算法还未完成,后期可进一步完善以期提升系统临床应用的可靠性和准确性。

参考文献

- [1] 吴超群,李希,路甲鹏,等.中国居民心血管疾病危险因素分布报告[J].中国循环杂志,2021,36(1):4-13.
- [2] DOCK W, ZONERAICH S. A diastolic murmur arising in a stenosed coronary artery[J]. American Journal of Medicine, 1967, 42(4):617-619.
- [3] SANGSTER J F, OAKLEY C M. Diastolic murmur of coronary artery stenosis[J]. Heart, 1973, 35(8):840-844.
- [4] FOUASSIER D, ROY X, BLANCHARD A, et al. Assessment of signal quality measured with a smart 12-lead ECG acquisition T-shirt [J]. Annals of Noninvasive Electrocardiology, 2020, 25(1):c12682.
- [5] OMAR J E, WILLIAM D L, GILBERTO P, et al. Data-driven ECG denoising techniques for characterising bipolar lead sets along the left arm in wearable long-term heart rhythm monitoring [J].

- Electronics, 2017, 6(4):84-84.
- [6] 赵静. 基于光学原理的可穿戴心电信号监测方法及实验研究[D]. 天津:天津大学, 2018.
- [7] XU W Z, YU K, XU J J, et al. Artificial intelligence technology in cardiac auscultation screening for congenital heart disease: Present and future [J]. Zhejiang Da Xue Xue Bao, Yi Xue Ban Journal of Zhejiang University, Medical Sciences, 2020, 49(5): 548-555.
- [8] HUANG B, ZENG Q N, LONG C. A portable ECG and PCG real-time acquisition system based on Android platform[J]. Modern Electronics Technique, 2016, 39(2):85-88.
- [9] SUN K, PAN J H, YAO R P. Real-time acquisition of PCG and ECG based on APSOC heterogeneous system[J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition, 2020, 42(6):1072-1079.
- [10] LI H X, ZHANG G J, REN Y F. Heart sound detection of coronary heart disease based on MEMS electronic stetho-scope [J]. Micronanoelectronic Technology, 2020, 57(8): 657-664.
- [11] ARI S, HEMBRAM K, SAHA G. Detection of cardiac abnormality from PCG signal using LMS based least square SVM classifier[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(12):8019-8026.
- [12] KIRANYAZ S, ZABIHI M, RAD A B, et al. Real-time phonocardiogram anomaly detection by adaptive 1D convolutional neural networks [J]. Neurocomputing, 2020, 411:291-301.
- [13] RUFFO M, CESARELLI M, JIN C, et al. Non-invasive foetal monitoring with combined ECG-PCG system[J]. Biomed. Eng. Trends Electron. Commun. Softw, 2011: 347-366.
- [14] PHANPHAISARN W, ROEKSABUTR A, WARDKEIN P, et al. Heart detection and diagnosis based on ECG and EPCG relationships[J]. Medical devices(Auckland, NZ), 2011, 4: 133.
- [15] LI H, REN Y, ZHANG G, et al. Design of a high SNR electronic heart sound sensor based on a MEMS bionic hydrophone[J]. AIP Advances, 2019, 9(15005): 1-10.
- [16] PEI Y, WANG W, ZHANG G, et al. Design and Implementation of T-type MEMS heart sound sensor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 285:308-318.
- [17] EGLÈ K, HAROLDAS R, DAN J M, et al. A comparison of electronic and traditional stethoscopes in the heart auscultation of obese patients[J]. Medicina, 2019, 55(4):94.
- [18] YASEEN, SON G Y, KWON S. Classification of heart sound signal using multiple features [J]. Applied Sciences, 2018, 8(12),2344.
- [19] LI S, LI F, TANG S, et al. A review of computer-aided heart sound detection techniques [J]. BioMed Research International, 2020:1-10.
- [20] WU M T, TSAI M H, HUANG Y Z, et al. Applying an ensemble convolutional neural network with Savitzky Golay filter to construct a phonocardiogram prediction model[J]. Applied Soft Computing, 2019, 78:29-40.
- [21] ABDUH Z, ALI E, WAHED M A, et al. Classification of heart sounds using fractional Fourier transform based Mel-frequency spectral coefficients and traditional classifiers [J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2020, 57:101788.
- [22] WAHED M A, KADAH Y, ABDUH Z. Classification of heart sounds using fractional fourier transform based mel-frequency spectral coefficients and stacked autoencoder deep neural network [J]. Imaging Health Inform, 2019, 9(1):1-8.
- [23] LANGLEY P, MURRAY A. Heart sound classification from unsegmented phonocardiograms [J]. Physiological Measurement, 2017, 38(8):1658-1670.
- [24] GHAREHBAGHI A, LINDEN M. A deep machine learning method for classifying cyclic time series of biological signals using time-growing neural network [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2017:1-14.
- [25] KAUR A, GARG M. A review on deep learning methods for classifying cycle time series of Biological signals using neural network [J]. International Journal of Trend in Research and Development, 2018, 5(2): 2394-9333.

作者简介

臧俊斌, 博士研究生, 主要研究方向为 MEMS 医疗传感器、深度学习。

E-mail: zangjunbin@163.com

周宸正, 硕士研究生, 主要研究方向为 MEMS 芯片制备。

E-mail: s1906213@st.nuc.edu.cn

向梦辉, 硕士研究生, 主要研究方向为深度学习。

E-mail: xiang.menghui@foxmail.com

张志东, 副教授, 主要研究方向为医疗传感器与深度学习。

E-mail: zdzhang@nuc.edu.cn

薛晨阳(通信作者), 教授, 主要研发方向为 MEMS 声学传感器、医疗传感仪器系统、深度学习。

E-mail: xuechenyang@nuc.edu.cn