

一种先心病快速筛选仪的设计与实现

成谢锋,张友迅

(南京邮电大学 电子与光学工程学院、微电子学院,江苏 南京 210046)

摘要:先天性心脏病(congenital heart disease, CHD)是常见的先天性畸形,发病率约占0.8%,尽早筛查与诊疗可有效降低出生缺陷率与婴儿病死率。随着国内二胎政策的实施,新生儿数量已呈快速上升趋势,为了支持先心病全面筛查工作,本团队自主研发了一种先心病筛选辅助设备,以辅助医生实现先心病的快速、准确筛查。该仪器由多通道心音传感器、血氧饱和度传感器和Exynos4412嵌入式系统等组成,通过Qt-C++编程实现四通道心音信号同步采集、预处理、血氧饱和度计算、前端交互界面动态显示、数据存储与传输、特征提取和分类识别。该设备一方面使用并行听诊简化筛查过程,另一方面利用智能算法提高筛查速率。筛选仪具有设计简洁、使用方便、筛查时间短、诊断准确率较高等优点,在家庭、社区和基层医院都能提供一定的帮助。

关键词:心音;先天性心脏病;多通道同步采集;筛查设备

中图分类号:TP302

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2020)02-0148-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2020.02.029

Design and Implementation of a Rapid Screening Instrument for Congenital Heart Disease

CHENG Xie-feng, ZHANG You-xun

(School of Electronic and Optical Engineering & School of Microelectronics,
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210046, China)

Abstract: Congenital heart disease (CHD) is a common congenital malformation with an incidence of up to 0.8%. Early diagnosis and treatment can effectively reduce the rate of birth defects and infant mortality. With the implementation of the two-child policy in China, the number of newborns has shown a rapid upward trend. In order to support the comprehensive screening of congenital heart disease, we independently develop an auxiliary screening device for congenital heart disease to assist doctors to realize rapid and accurate screening of congenital heart disease. The device consists of multi-channel heart sound sensor, blood oxygen saturation sensor and Exynos4412 embedded system. It realizes four-channel heart-sound signal synchronization acquisition, pre-processing, SpO₂ calculation, front-end interactive interface dynamic display, data storage and transmission, feature extraction and classification identification through Qt-C++ programming. On the one hand, the device uses parallel auscultation to simplify the screening process, on the other hand, it uses intelligent algorithm to improve the screening rate. With the advantages of simple design, convenient use, short screening time and high diagnostic accuracy, the screening instrument can provide certain help in families, communities and basic hospitals.

Key words: heart sound; congenital heart disease; multi-channel synchronous acquisition; screening instrument

0 引言

先天性心脏病是一种最常见的先天性畸形,其发病率约占0.8%,每年中国大陆约有30万先心病新生儿^[1]。随着二胎放开以及高龄孕妇增加、环境污染加重,先心病发病率呈逐年上升趋势。新生儿应尽早开展先心病筛查与诊疗工作,可有效降低出生缺陷率与婴儿病死率。

为贯彻落实《母婴保健法》,进一步提高出生人口素质与生命质量,降低5岁以下儿童死亡率,从2016年开始,将全面开展新生儿先天性心脏病筛查工作,如上海市硬性规定新生儿进行先心病筛查,其主要方法是:心脏听诊+脉搏血氧饱和度^[2]。该方法虽然简单、省时、准确度较高,但过度依赖于医生的主观经验,且部分先心病患儿可无杂音或杂音较轻,容易造成漏诊。

收稿日期:2019-01-22

修回日期:2019-05-24

网络出版时间:2019-09-25

基金项目:国家自然科学基金(61271334)

作者简介:成谢锋(1956-),男,教授,研究方向为生物信号智能处理;张友迅(1993-),男,硕士研究生,研究方向为生物信号智能处理。

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20190925.1521.024.html>

在相对贫困地区,尚未形成完备的诊断体系,通常借助于医生人工听诊,然而这对经验尚浅的医生而言,存在较高的误诊率,不但加重了患者家属的负担,同时漏诊的患儿也不能得到及时的治疗。鉴于此,迫切需要相关辅助诊断设备。

心音能反映心血管系统的病理特征,在临床上具有重要的价值,因此常用于部分疾病的诊断^[3-6]。随着电子听诊器与数字信号处理的发展,衍生出多种智能诊断器械,如丹麦 Acarix 公司基于心音的体外冠心病诊断仪。近年来,在国内外研究人员的共同努力下,心音采集设备越来越多样、预处理部分也越来越精细、特征参数提取方法越来越成熟、分析技术也越来越高效。并且心音智能诊断技术已经逐步走向了实际应用。在此基础上,该团队研发了一种先心病筛选辅助设备。该仪器由多通道心音传感器、血氧饱和度传感器和 Exynos4412 嵌入式系统等组成,通过 Qt-C++编程实现四通道心音信号同步采集、预处理、血氧饱和度计算,前端交互界面动态显示,数据存储与传输、特征

提取和分类识别。前期应用结果表明,该设备设计简洁、使用方便,诊断结果比较准确,对家庭、社区和基层医院都有推广应用价值。

1 系统结构框架

心音是由心脏瓣膜的开闭、肌肉的舒张收缩及心血管壁振动而产生的一种复合音。长期临床实践经验发现,心脏杂音与心血管疾病有着紧密的相关性。快速先心病筛选仪作为一种医疗辅助设备,针对新生儿进行初步先心病诊断,其阳性结果需进行心超检查确认。其创新之处在于一方面使用并行听诊简化筛查过程,另一方面利用智能算法提高筛查速率,具有设计简洁、使用方便、筛查时间短、诊断准确率较高等优点。系统结构框架如图 1 所示。筛选仪硬件系统主要包括四通道心音传感器、血氧饱和度传感器、Exynos4412 嵌入式系统与电源管理器等。该硬件系统具有采集精度高、稳定性强、制作成本较低、安全便捷等特点,有助于筛选仪后续的推广工作。

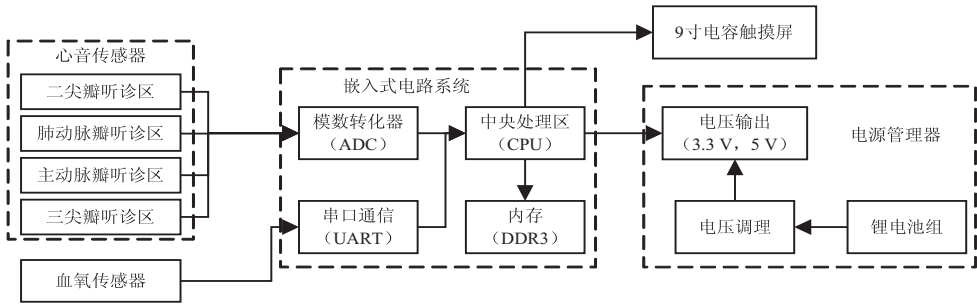


图 1 系统结构框图

2 硬件设计

2.1 四通道心音传感器

1999 年,美国 3M Littmann 公司将电子技术应用于听诊中,研制了一款电子听诊器,推动了智能听诊的研究与发展^[7]。电子听诊器将自然心音信号转化为计算机可识别的数字信号,是进行心音分析的前提^[8]。

目前,国内外多数心音研究尚基于单通道心音信号^[9-12]。结合先心病心音信号的特点,利用四通道同步心音信号分析,能有效提高先心病的筛查效率与诊断准确率^[13]。四通道心音传感器如图 2 所示,前端听诊头是由高分子振动瓣膜、谐振腔体与驻极体麦克风等部分组成,其作用是将心音声学信号转换为电信号。由于新生儿各心脏听诊区分布相近,因此要求相对缩小谐振腔体的面积,这将影响传感器的灵敏度,使得采集信号的信噪比降低,造成部分心音信号被淹没在噪声中。为解决此难题,在听诊头面积不变的情况下,相对扩展震动腔体积,从物理音腔的层面提高灵敏度。四通道心音传感器将多个前端听诊头用支架固定成一体,谐振腔底部与驻极体麦克风紧密连接。在支架的

外围使用屏蔽密封圈,有效防止心音信号受到外界干扰。四个谐振器腔体之间使用软体弹性材料相互接触,提高心音谐振的效果,并使得四路心音信号互不干扰。

在听诊过程中,四通道心音传感器解决了需要不断移动听诊器的难题,缩短了现场诊断时间,提高了先心病筛查效率,并具有检测精度高、装置体积小、生产成本低等优点。目前四通道心音传感器已获得中国发明专利(专利号 201510179382.3)。



图 2 四通道心音采集器

2.2 血氧饱和度传感器

血氧饱和度 (pulse oxygen saturation, SpO_2) 是氧合血红蛋白 (oxyhemoglobin, HbO_2) 与血红蛋白 (hemoglobin, Hb) 的比重系数,是衡量血液输送氧气的能力的一项指标。人体的血液中,存在血红蛋白 HbO_2 、氧血红蛋白 Hb 、碳氧血红蛋白 COHb 、镁铁血红蛋白 MetHb 。对于大多数健康的人群而言,相对于 Hb 与 HbO_2 ,血液中的 COHb 与 MetHb 含量较低,所以在实际临床中,往往将 COHb 与 MetHb 忽略不计, SpO_2 的公式简化为:

$$\text{SpO}_2 = \frac{C_{\text{HbO}_2}}{C_{\text{HbO}_2} + C_{\text{Hb}}} \quad (1)$$

2014 年,赵趣鸣在研究中发现血氧饱和度对先心病的灵敏度可达 83%^[14]。江苏省昆山市妇幼保健所的韩霞医生结合心肺听诊与血氧饱和度,在 2011 年至 2014 年间,共筛查 62 000 名新生儿,检测出先心患儿共 539 例,灵敏度与特性均超过了 90%^[15]。通过上述文献可知,血氧饱和度对新生儿先心病评估具有一定的参考价值。

光电式血氧传感器原理:由 HbO_2 和 Hb 对不同波长光线的吸收系数不同,因此设置红光 ($\lambda_1 = 660 \text{ nm}$) 与红外光 ($\lambda_2 = 880 \text{ nm}$) 透射手指,根据二者的透射光强度,通过采样与转换获取血氧饱和度。血氧饱和度传感器主要包括光电模块与控制模块。光电模块由发射管与接收管组成,发射管分别采用 660 nm 与 880 nm 波长的发光二极管,当波长为 660 nm 时, Hb 的吸收系数相对 HbO_2 较大,当波长为 880 nm 则相反;计算模块经过模数转换器读取两种光束透射强度,通过计算比例系数得 SpO_2 值。控制模块由数模转换器、处理器与串口通信等部分组成。首先,数模转换器将接收管的输出转换为数字信号并送给处理器;其次,处理器根据上述公式计算血氧饱和度;最后,由串口通信输出血氧饱和度。

2.3 Exynos4412 核心板

嵌入式系统是执行特定应用程序的计算机系统,该系统以计算机为基础,是工业与医疗器械领域一种极为重要的技术^[16]。筛选仪选用 Samsung 公司研发的 Exynos4412 核心板。Exynos4412 常被用于手持式设备、仪表与医疗等产品^[17],其 CPU 主频可达 1.6 G,运算能力 16K DMIPS,能大幅度缩短算法的运行时间。核心板如图 3 所示。

嵌入式系统包括中央处理器、电源管理模块、显示驱动模块、数模转换器、I/O 接口等。中央处理器采用 Cortex-A9 架构,运行 Linux 操作系统;电源管理模块选用线性稳压器实现完备的功耗管理,电源芯片型号为 S5M8767;显示驱动模块保证 9 寸电容屏的正常运

行;数模转换器支持四通道转换,转换精度与频率分别为 12 bit 和 2 000 Hz。

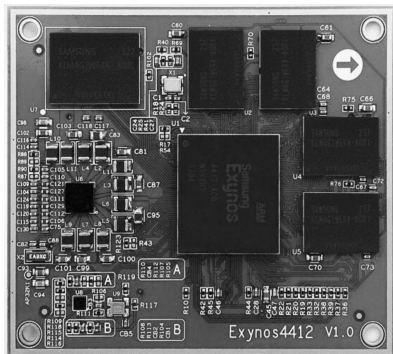


图 3 Exynos4412 核心板

综上所述,Exynos4412 核心板的性能与功能均较为强大,具有体积小、功耗低、性能强等优点,较为符合筛选仪的设计理念。

3 软件设计

3.1 Qt 介绍

Qt 是由挪威 TrollTech 公司出品的跨平台界面框架,其中包括了 Qt 的面向设备、涵盖的编程语言、集成编译环境、界面设计 Designer、编译组件 qmake 与 Cmake、常用开发工具等。Qt 拥有成熟、开源、丰富且稳定的引擎库,因此受到众多开发者的青睐^[18]。随着用户数量的不断增长,其功能不断扩展,性能逐渐优化,达到了工业级标准。

Qt/Embedded 是嵌入式环境下所使用的,具有以下优势:

工作效率高:根据特定的软硬件应用场景,做出相应的调整,可有效节省系统资源,提高应用程序的工作效率。Qt 具有良好的封装机制,其模块化程度高、灵活性好,有助于用户的程序开发。另外,其特有的 Signals/Slots 机制能有效降低多任务事件协同的复杂程度。

跨平台特性:由于硬软件新版本的迭代,有可能造成部分应用程序无法正常运行。如果进行整个代码重构,必将耗费大量的资源。跨平台特性可良好规避此风险,通过重新交叉编译后即可完成环境适配。Qt 支持下列主流操作系统:Windows、Linux、MacOs 等。

API 与控件库:包括 280 多个 Class,如 Collection, I/O device, File 等。用户在设计交互界面的时候,往往能在控件库中找到相应的一些控件,如图形展现、虚拟按钮与界面容器等。

综上所述,Qt/Embedded 在嵌入式领域有着广泛应用,其跨平台特征能够较好支持系统平台升级,较符合筛选仪的功能需求与设计理念,所以采用 Qt/Embedded 作为界面应用程序开发框架。

3.2 筛选仪工作流程

经过前期与医护人员进行反复的讨论与交流,结合病患的特点以及现有采集设备的意见与建议,确定

了筛选仪的工作流程,如图4所示,主要包括了主界面、数据采集、算法分析、历史查询等界面。

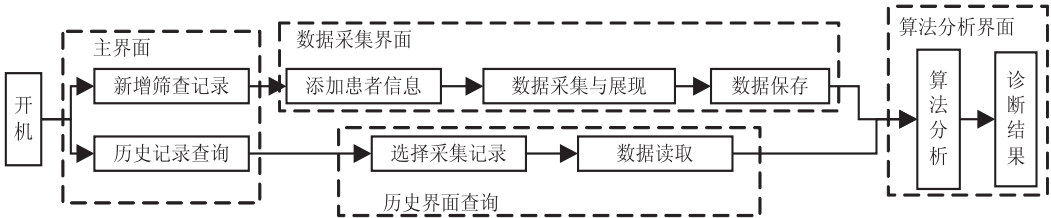


图4 筛选仪工作流程

主界面主要包括图片和三个操作按钮,分别用于“新增筛查记录”、“历史记录查询”与“设备待机”。轻触“新增筛查记录”,进入数据采集界面,如图5所示,上方是由医生录入的患者住院编号、姓名、出生日期与性别等信息;左侧分别是四个心脏听诊区的具体位置,有助于医生进行心音信号采集;中部为四通道同

步心音信号波形;右侧的操作按钮包括“添用户”、“同步采集”、“存储”、“分析”与“返回”。通过“分析”按钮进入算法分析界面,如图6所示,上方是患者信息与诊断时间;下方从左至右依次是心脏听诊区、心音波形、能量分布图与诊断结果,从上至下分别对应二尖瓣、主动脉瓣、肺动脉瓣与三尖瓣。

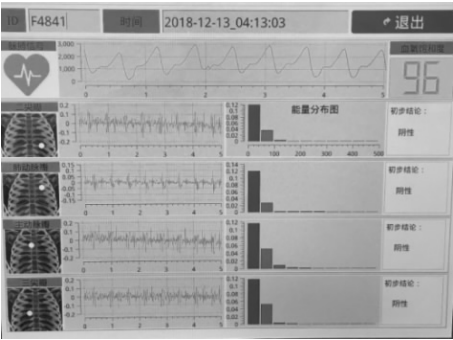


图5 信号采集界面

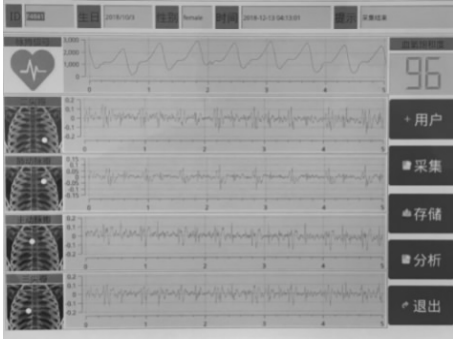


图6 信号分析界面

3.3 筛选仪算法流程

心音信号的特征分析较为成熟,常用包络曲线、声谱图、梅尔倒谱等。筛选仪采用一种高效的频域分析

方法:小波分解+能量商。该算法主要分为三个步骤,其流程如图7所示。

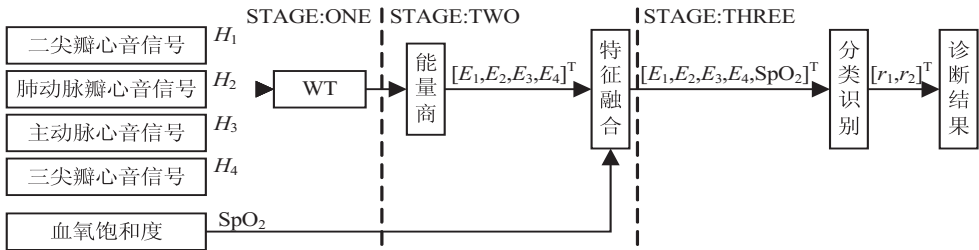


图7 算法流程

步骤1:原始四路心音信号分别进行小波分解^[19]。单路心音信号采用db10小波进行5层分解,重构信号 $[h_1, h_2, h_3]$ 。 h_1 信号(62.5~125 Hz)主要代表 S_1 与 S_2 心音成分; h_2 信号(125~250 Hz)代表生理性杂音; h_3 信号(250~500 Hz)代表病理性杂音。

步骤2:计算分解后信号的能量商 $[E_1, E_2, E_3, E_4]^T$,并融合血氧饱和度 SpO_2 获得特征向量 $[E_1, E_2, E_3, E_4, SpO_2]^T$ 。文献提出能量商作为心音特征,由于心脏杂音分为良性杂音与病理杂音,良性杂音的频率与正常心音相近,而病理杂音频率相对较高,因此分析

心音能量商系数能够有效判断心脏健康状况,其定义为^[20]:

$$R_i = \frac{E(i)}{E} \times 100\% \tag{2}$$

其中, R_i 表示能量商; $E(i) = |g_i(k)|^2$ 表示某个子带的归一化能量值; $E = \sum_{k=1}^n |g_n(k)|^2$ 表示所有子带能量总和, n 为子带序号。

步骤3:采用支持向量机^[21]对特征向量进行分类识别,获得诊断结果 $[r_1, r_2]$ 。

4 结束语

介绍了一种先心病快速筛选仪,并详细阐述了传感器的设计原理、硬件平台的性能、软件系统的搭建、算法的流程分析以及整体实现的效果。该仪器能较好协助医生进行诊断,为先心病筛查提供了一种新的辅助设备,并且弥补了新生儿健康产业链的缺口。筛选仪具有设计简洁、使用方便、筛查时间短、诊断准确率较高等优点,在临床测验过程中也获得了医生的好评,在 2018 年获得全国研究生电子设计竞赛二等奖,全国大学生智能互联创新竞赛三等奖。

参考文献:

- [1] 黄际卫. 先天性心脏病危险因素和防治的研究进展[J]. 中国儿童保健杂志,2018,26(3):269-272.
- [2] 莫兆冬,郭小玲,王维琼,等. 脉搏血氧仪筛查先天性心脏病的有效性研究[J]. 中国新生儿科杂志,2015,30(5):343-346.
- [3] BOZKURT B, GERMANAKIS I, STYLIANOU Y. A study of time-frequency features for CNN-based automatic heart sound classification for pathology detection[J]. Computers in Biology and Medicine,2018,100:132-143.
- [4] 房 玉,江钟伟,王海滨,等. 一种先天性心脏病杂音分割及分析方法[J]. 北京生物医学工程,2018,37(2):151-156.
- [5] 张福伟,陈漠水. 现代心音图技术在心血管疾病诊断中的作用[J]. 医学综述,2016,22(21):4265-4269.
- [6] SUN Shuping, WANG Haibin, JIANG Zhongwei, et al. Segmentation-based heart sound feature extraction combined with classifier models for a VSD diagnosis system[J]. Expert Systems with Applications,2014,41(4):1769-1780.
- [7] 黄 梅,刘洪英,皮喜田,等. 计算机辅助诊断的新型电子听诊器系统[J]. 中国医疗器械杂志,2017,41(3):161-165.
- [8] 王续博,张国军,郭 楠,等. MEMS 电子听诊器微结构设计及验证[J]. 微纳电子技术,2016,53(1):31-35.
- [9] 吴云飞,周 煜,陈天浩,等. 基于自相关函数的心音周期提取和识别[J]. 计算机与数字工程,2017,45(10):2068-2073.
- [10] 赵 湛,张旭茹,方 震,等. 基于心动周期估计的心音分割及异常心音筛查算法[J]. 电子与信息学报,2017,39(11):2677-2683.
- [11] 游菡蓓,房 玉,王海滨,等. 基于 PSoC4 的可视化心音采集系统[J]. 电子技术应用,2016,42(4):81-84.
- [12] 魏 敏,孙科学,王晨曦,等. 一种心音检测仪的设计与实现[J]. 计算机技术与发展,2016,26(5):179-182.
- [13] 孙科学,魏 敏,宋江珉,等. 双声道心音能量熵比的提取与识别研究[J]. 计算机技术与发展,2017,27(12):166-169.
- [14] 赵趣鸣,郑建勇,杜嘉会,等. 合并室间隔缺损的主动脉闭锁一例[J]. 中华儿科杂志,2010,48(9):716-717.
- [15] 韩 霞,杨文红,喻 茜,等. 经皮血氧饱和度检测结合临床评估筛查新生儿先天性心脏病的可行性研究[J]. 中国儿童保健杂志,2018,26(3):251-253.
- [16] 谷惠敏. 嵌入式实时软件在计算机软件设计中的运用分析[J]. 电子设计工程,2016,24(9):169-171.
- [17] 韩金宸,夏虞斌,陈海波,等. 基于 TrustZone 技术的安全移动远程控制系统[J]. 计算机工程,2016,42(4):147-154.
- [18] 艾 红,张素凯. 生理参数监测和远程监护系统的研究[J]. 现代电子技术,2016,39(8):150-154.
- [19] VARGHEES V N, RAMACHANDRAN K I. Effective heart sound segmentation and murmur classification using empirical wavelet transform and instantaneous phase for electronic stethoscope[J]. IEEE Sensors Journal,2017,17(12):3861-3872.
- [20] 成谢锋,姜 炜,刘子山. 一种新的人体运动强度检测方法的研究[J]. 仪器仪表学报,2013,34(5):1153-1159.
- [21] MOURA M D C, ZIO E, LINS I D, et al. Failure and reliability prediction by support vector machines regression of time series data[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017,96(11):1527-1534.