

# 可穿戴心电信号采集与分析系统的设计与实现

孟 妍 郑 刚 戴 敏 赵 瑞

(天津理工大学天津市智能计算与软件新技术重点实验室 天津 300384)

(天津理工大学计算机视觉与系统教育部重点实验室 天津 300384)

**摘 要** 针对传统心电采集设备的移动限制性以及佩戴的不舒适性,根据可穿戴计算特点,设计并实现了穿戴式心电采集与分析系统。系统采用自主研发的 12/单导联心电采集模块进行心电信号采集,数据可存于采集设备或经 3G 网络传输到服务器端,同时所开发的软件可对心电图进行辅助病情分析,实现对佩戴人的心电监护。还研究并制作了插入式电极和织物电极,并通过二者的结合提高了采集心电信号的质量。实际佩戴和使用结果表明,使用插入式织物电极的可穿戴式心电采集设备具有良好的舒适性,心电信号波形的质量能够达到临床监控的要求。

**关键词** 心电信号采集,可穿戴计算,3G 网络,织物电极,插入式电极

中图分类号 TP391 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.10.009

## Design and Implementation of Wearable ECG Signal Acquisition and Analysis System

MENG Yan ZHENG Gang DAI Min ZHAO Rui

(Key Laboratory of Intelligent Computing and Novel Software Technology, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

(Key Laboratory of Computer Vision and System, Ministry of Education, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

**Abstract** In traditional electrocardiogram (ECG) measurement, patient with limited activity and uncomfortable wearing is still a practical problem. The paper proposed a wearable ECG acquisition and analysis system based on the features of wearable computing. The system samples ECG signals by own designed Synchrony 12/single lead ECG acquisition device. ECG data can be saved on the device or be transmitted to server by 3G network. And ECG data can be analyzed by own designed software which can provide auxiliary information on clinical heart diagnosis, and perform ECG monitoring. Furthermore, after carefully studying interposer electrode and fabric electrode, the paper proposed a strategy to combine interposer and fabric electrode together. This was done to improve the quality of ECG signal. The experiment data of wearing the ECG acquisition device with interposer fabric electrode show that the ECG measurement procedure is comfortable, and the ECG signal quality can reach the requirement of clinical ECG monitoring.

**Keywords** ECG signal acquisition, Wearable computing, 3G network, Fabric electrode, Interposer electrode

## 1 引言

随着科技的不断发展,现如今可以由患者在家庭环境中使用的穿戴式心电监测系统(Wearable ECG Monitoring Systems)已经成为国内外研究人员关注的热点。穿戴式心电监测设备可以方便地穿在用户身上,而不影响其正常的生活,能够对用户的心脏进行长时间的连续监测,有效地在用户的疾病危险期中提供重要的心电信号依据,为医务人员快速、准确地诊断心脏病带来诸多便利之处。近几年,国内外在穿戴式心电监测方法及应用仪器的研究方面取得了很大进展,其中国外具有代表性的研究成果有:AMON<sup>[1]</sup>腕式健康与预警网络监护仪器、MyHeart 心血管疾病监测智能穿戴系统<sup>[2]</sup>,以及 LifeShirt 生命衫<sup>[3]</sup>等。

AMON 的创新性主要体现在对多传感器的腕式集成化设计和对生理参数的实时处理上。但是,由于对于老弱病人

士来说,该设备过于笨重,且它的费用也比较昂贵,因此对于大多数用户来说,它的设计和本身并不是物有所值。LifeShirt 在心电测量中使用的是传统的 Ag/AgCl 电极,Ag/AgCl 电极属于一次性使用的产品,不可重复使用,并且电极内置电解液对皮肤有刺激作用,长时间使用会造成皮肤过敏等症,用户的佩戴时间有很大限制,一般在 24 小时以内,即使更换新的电极,用户的皮肤也很难忍受更长时间的过敏性刺激,因此 LifeShirt 并不适合患者长期穿戴使用。

目前,国内生产便携式心电监护设备的厂家有很多,但是大多数是以 OEM(Original Equipment Manufacturer)方式进行组装的。这些设备采集的心电数据存储完整性不够,而且纸质记录的心电信息极其有限,医生从中难以得到患者全面的心电信息,得不到数字化的数据也不利于科学研究。大多数的便携式心电监护设备没有设计成一整套的监护系统,并且目前的心电监护设备费用较为昂贵,动辄几千乃至上万元,

到稿日期:2014-09-11 返修日期:2015-01-09 本文受天津市科委科技支撑重点项目(10ZCKFSF00800)资助。

孟 妍(1989—),女,硕士生,主要研究领域为生物信号处理, E-mail:m\_dream1989@126.com;郑 刚(1970—),男,博士,教授,CCF 会员,主要研究领域为生物信号、智能信息处理;戴 敏(1972—),博士,教授,CCF 会员,主要研究领域为智能信息处理;赵 瑞(1987—),男,硕士生,CCF 会员,主要研究领域为嵌入式系统。

一般的患者难以承受。

可穿戴心电采集需要满足可穿戴计算的一些基本要求：非限制性(可移动)、非独占性和可观性<sup>[4]</sup>。因此,实现心电信号采集的可穿戴性旨在能够让用户以舒适的方式进行信号采集,而且不影响用户的各种日常运动状态;同时还能实现心电信号的连续监测,时长可达到24小时至1周左右;并且可以实现无线传输,随时随地传输数据,更方便用户活动。另外,更重要的是要能够采集到高质量的心电信号,达到临床医疗的要求,并且能够做出实时的诊断。

本文通过对可穿戴心电采集的深入研究,使用自主制作的心电采集电路、改进的心电电极进行心电采集,使用3G无线传输数据,并对心脏病情用软件判断,整体实现了基于物联网的可穿戴式心电采集与分析系统。本文解决了可穿戴心电采集系统的可移动性以及舒适性。通过改进电极、制作插入式电极来提高可穿戴式心电采集信号的质量,能够达到临床监控的要求。

## 2 基于物联网的可穿戴式心电采集与分析系统设计方案

根据现今可穿戴心电采集的种种不足,本文设计制作了基于物联网的一套穿戴式心电采集与分析系统,如图1所示,它使用我们自主开发的12/单导联采集设备以穿戴式背心的方式进行数据采集,用3G网络等方式将数据传输到监控终端,在监控终端使用诊断软件进行病情诊断,解决了心电信号的采集、传输、诊断的问题。其中穿戴式心电采集、无线数据传输是最主要的环节,接下来将详细说明心电采集电路的设计、3G无线传输的实现、可穿戴心电采集的实现中的主要问题和解决方案。

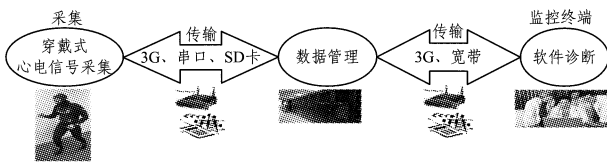


图1 穿戴式心电采集系统设计

## 3 心电采集电路设计

基于现今可穿戴心电监护设备的不足,我们自主开发了12/单导联心电采集终端来采集心电信号,它既可以采集12导联的心电信号,又可以采集单导联心电信号。

我们设计的采集终端的硬件架构模型如图2所示,MCU嵌入式平台(包含电源模块)、AD采集模块和传输单元是重要构成部分,显示器和存储单元是辅助组成部分。

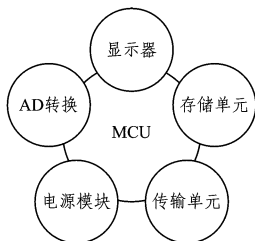


图2 嵌入式平台模块关系示意图

本文采用STM32单片机作为处理器、ADS1298芯片作为采集芯片实现采集信号以及AD转换功能。STM32系列

基于专为要求高性能、低成本、低功耗的嵌入式应用设计的ARM Cortex-M3内核,ADS1298是美国著名半导体厂商TI公司新近推出的一款专用12导联心电信号采集芯片,它具有8个采集通道,信号放大倍数可编程,它不仅提供了基本的放大和AD转换功能,还为RLD提供右腿驱动,为胸前6导联提供威尔逊中心电压、实时监测电极脱落功能、可编程的AD采样基准电压等。

图3是嵌入式平台硬件结构图,原始信号先经过硬件低通滤波滤除137Hz以上的高频噪声,再经过ADS1298芯片对信号进行放大以及各通道差分计算,可得到12导联的心电数据,在对信号进行A/D转换后通过SPI总线传输到单片机;单片机可以把得到的数据通过串口或通过3G网络传给上位机,也可以将数据存入SD卡中。

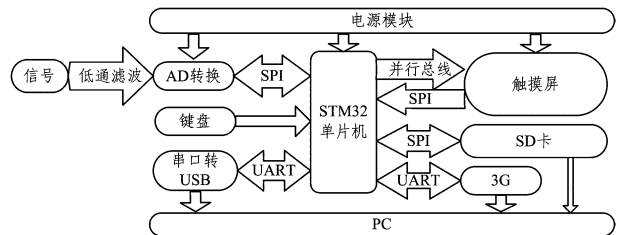


图3 嵌入式平台硬件结构框图

## 4 3G无线传输设计

一套基于物联网的可穿戴心电信号采集设备需要具有一定的可移动性,这就需要有稳定、可靠、覆盖广的无线数据传输网络,能够将在用户身上采集的数据无线传输到上位机上进行分析,构成一个动态心电图采集与分析网络。由于现在无线网络覆盖比较广的是3G网络,因此我们选择基于3G的数据传输方案,利用市场上现有的3G调制解调模块,把它嵌入到采集设备中,实现心电信号的远程传输。

本文选用华为CDMA2000模块,如图4所示,3G模块与单片机之间通过串口建立链接,单片机通过AT指令初始化3G模块,命令模块与远程服务器建立TCP/UDP链接,以便发送和接收数据包。

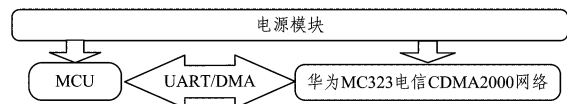
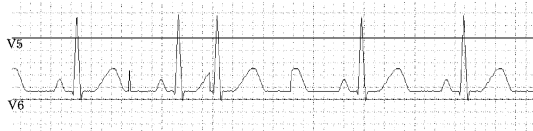


图4 MC323与MCU接口示意图

TCP能够提供可靠的传输,但是它是以足量带宽为前提、牺牲速度为代价的,在3G带宽有限的情况下,TCP传输不仅不会提供可靠传输,反而会因为它的控制机制而大量浪费带宽资源,从而造成严重的拥塞。在本设计中经过大量的实验也证明了这一点。UDP正是因为没有TCP那样复杂的控制机制,所以才高效高速。虽然UDP传输速度快,基本能满足心电信号的实时传输,但是它所带来的丢包现象严重,由于3G带宽是无法改变的瓶颈,而UDP的丢包可以在应用层加以控制,因此我们采用UDP作为心电信号实时传输的方案。

最简单的丢包处理就是每个数据包发送多次,通过增加冗余来降低数据丢失的概率,每个数据包都有ID号,在服务器端,把重复的数据包滤掉。服务器端接收到的波形如图5所示。



(a)未使用冗余算法情况下服务器端波形



(b)使用冗余算法情况下服务器端波形

图5 服务器端波形

## 5 可穿戴心电背心设计

### 5.1 心电电极材料

目前临床应用的动态心电监护仪大部分使用粘性电极。粘性电极由 Ag/AgCl 制成,电极表面的粘性导电胶会引起皮肤刺激症状,并且在长时间使用过程中,导电胶遇到汗水稀释或脱水干化等现象均会影响心电信号的测量质量。所以需要选择合适的电极材料制作成心电电极来提高心电采集过程中的舒适性,而且能够保证采集信号的质量。

织物电极使用镀银涤纶材料作为导电媒介,该材料的性能如表 1 所列。

表 1 镀银涤纶的主要性能指标

项目	规格值	单位
表面阻抗(50mm×50mm)	≤0.05	Ω
耐热温度	115~125	℃
熔点指数	8~12g/10Min	g/Min
抗磨损测试	10000	次

从表 1 中可以看到,镀银织物材料有较好的传导能力、自身阻抗较低、对皮肤刺激小、皮肤湿度对电极与皮肤之间的阻抗影响较小、感觉舒适。因此,本文采用镀银织物电极来做采集心电信号的心电电极。

通常边长越长的织物电极与皮肤之间的接触面积越大因而接触阻抗越小。然而,经过对实际穿戴者的大量调查发现,作为穿戴式心电采集的电极越小越方便,越小舒适度越高。因此本文选取 5cm×5cm 规格的织物电极效果较好,既不会太影响电位差,又能使皮肤与电极充分接触。

### 5.2 电极放置位置

可穿戴式的心电采集信号需要能够满足临床的监控要求,然而使用单导联的心电采集即可满足简单的临床监控作用,并且采集过程舒适便捷。V5 导联信号比较强,波形特征清晰、R 波突出便于识别。所以本文选择了传统的 V5 导联位置作为可穿戴式心电采集的电极放置位置。V5 导联电位点如图 6 所示。黄色电极位置为胸骨柄右缘,红色电极位置为左侧腋前线与第 6 肋的交点,黑色电极位置为胸廓右侧下缘,约在第 9 肋与第 10 肋软骨的交点。

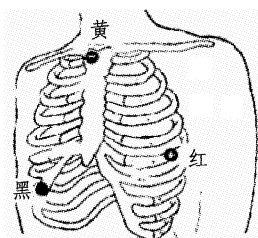


图 6 V5 单导联电极位置

### 5.3 采集电极的改进

为了加强信号强度、提高信号采集质量,本文尝试使用插入式电极<sup>[5]</sup>来提高采集的心电信号的质量。

本文使用镀银织物电极并且在织物电极上连接一个小的运算放大电路,构成一个简单的插入式织物电极。图 7 是插入式电极上的运算放大电路图。其中运算放大器采用 OPA333 芯片,它具有零漂移的特性,且可在 1.8V~5.5V 的电压下正常工作,特别适合作为电极上的运算放大器使用。

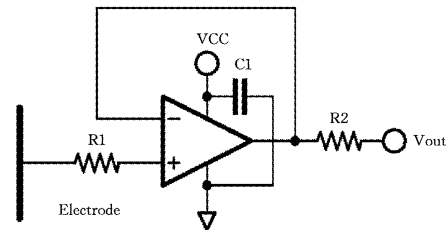


图 7 插入式电极上运算放大电路

### 5.4 穿戴形式

实现可穿戴心电信号采集关键是要解决可穿戴性,目前实现可穿戴心电采集的形式有布带式、背心式等,背心式较舒适而且穿脱方便、外形得体,所以本文选择紧身背心作为穿戴介质。

穿戴衣的材质会影响穿戴者的舒适度,应该选择紧身、弹性大、不容易变形的材质来制作。含有 66% 聚酯、29% 聚酰胺、5% 氨纶成分的运动紧身衣在腰部胸部都加强了紧身弹性,弹性大、不易变形并且易清洗,适合用来制作穿戴衣。使用化纤材料的运动紧身衣制作的穿戴衣以及心电采集设备如图 8 所示。

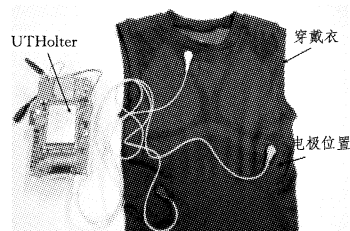
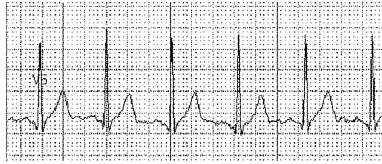


图 8 采集设备和穿戴衣

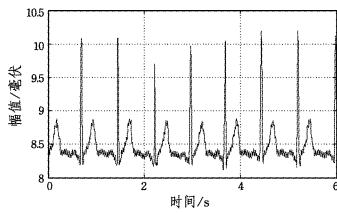
## 6 采集实验

使用上述制作的穿戴式心电采集设备进行实际的采集实验,对 20 个年龄在 23~25 之间的男性志愿者进行心电采集实验,分别使用成品心电图仪、粘性电极、织物电极、插入式织物电极各采集一次,每次采集 5 分钟的实验数据。采集到的一位志愿者的心电波形图如图 9 所示。

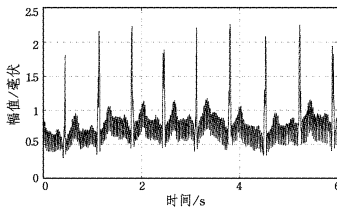
从图 9 中可以看出,使用插入式电极采集到的心电信号与原始织物电极相比明显加强,R 波幅值增大,QRS 波群更加突出,这说明插入式织物电极有放大微弱的心电信号的作用,并且与粘性电极采集到的信号的波形形态相似,能够起到提高采集质量的作用。图 9(e)中的黑色波形是利用传统心电图机获得的纸质心电波形,红色波形为使用自制同步 12 导联心电采集设备和插入式织物电极获得的心电波形,从吻合度来看,2 个波形基本重合,误差在一个小格(纸质心电图背景中的标准格)以内,但符合临床诊断要求。同时,也可以看出心电信号中基线漂移较重,信号里有高频噪声、肌电干扰、电极接触噪声等<sup>[6]</sup>。



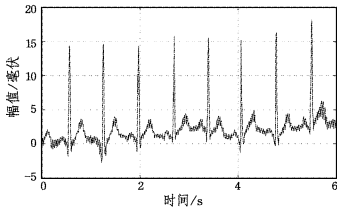
(a)心电图仪采集的波形图



(b)使用粘性电极采集的心电信号



(c)使用原始织物电极采集的心电信号

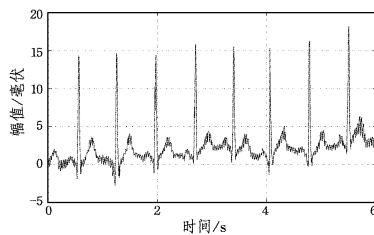


(d)使用插入式织物电极采集的心电信号

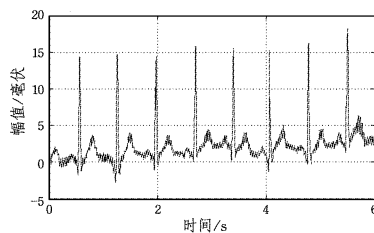


(e)纸质心电图波形与使用插入式织物电极获得的心电波形对比

图9 志愿者(男,26岁,170cm,62kg)



(a)原始波形



(b)去噪处理后的波形

图10 心电信号去噪

本文用低通滤波器滤除高频噪声,用中值滤波法滤除基线漂移,用小波变换法去除肌电干扰<sup>[7,8]</sup>。如图10所示,QRS波群清晰,噪声基本已滤除,满足临床监控的需要。

## 7 病情分析

上位机接收到采集的心电数据之后,使用开发的病情分析软件可以对数据进行简单的病情分析。

软件先对数据进行预处理,再进行特征点识别,识别出Q、R、S、ST、T、P之后进行波形分类,首先按照诊断分析要求和波形参数特征对波形进行分类,分为正常(N)、室上早(S)、室早(V)、伪差(X)4大类,再使用聚类算法对各大类中的小类进行聚类分析。分出波形后对各个波形进行参数计算,之后展现数据并生成分析报告。

**结束语** 为了实现基于物联网的可穿戴式心电采集系统,保证穿戴衣和电极的舒适度、信号采集质量以及采集设备的可移动性,本文提出了基于单片机、3G网络以及插入式织物电极的穿戴式心电信号采集系统设计方案。大量采集实验表明,穿戴式心电采集设备采集到的波形与粘性电极采集到的波形形态相似,而且试用者普遍反映采集过程比使用粘性电极采集过程舒适。对采集到的信号进行了去噪处理,得到的波形可达到临床监控的要求,并且制作出了简单的病情分析软件,真正地做到了一个完整的可穿戴心电信号采集与分析系统。

## 参考文献

- [1] Anliker U, Ward J A, Lukowicz P, et al. AMON: a wearable multiparameter medical monitoring and alert system[J]. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 2004, 8(4): 415-427
- [2] Giorgino T, Tormene P, et al. Wireless support to poststroke rehabilitation: MyHeart's neurological rehabilitation concept[J]. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 2009, 13(6): 1012-1018
- [3] Heilman K J, Porges S W. Accuracy of the Lifeshirt® (Vivometrics) in the detection of cardiac rhythms[J]. Biological psychology, 2007, 75(3): 300-305
- [4] 陈东义, McIntyre B. 可穿戴计算与系统仿真[J]. 系统仿真学报, 2014, 16(2): 210-213
- [5] Chen Dong-yi, McIntyre B. Wearable Computing and System Simulation [J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(2): 210-213
- [6] Merritt C R, Nagle H T, Grant E. Fabric-based active electrode design and fabrication for health monitoring clothing[J]. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 2009, 13(2): 274-280
- [7] 涂岳文. Holter 系统中运动伪差自动识别的关键技术及算法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013
- [8] Tu Yue-wen. Research on key technologies and algorithms of automatic identification of motion artifact in holter system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013
- [9] 孙佳新. 基于信号质量评估的可穿戴运动心电监护系统[D]. 上海: 东华大学, 2011
- [10] Sun Jia-xin. Wearable dynamic ECG monitoring system based on the signal quality evaluation[D]. Shanghai: Donghua University, 2011
- [11] 李肃义. 可穿戴生理参数监测系统的动态心电信号处理方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009
- [12] Li Su-yi. Study on dynamic electrocardiograph signal processing method of a wearable physiological parameters monitoring system[D]. Changchun: Jilin University, 2009