

基于 ARM11 的无创心血管健康评估系统设计

陈真诚¹, 陈志高², 刘善剑², 徐北平², 朱健铭¹

(1. 桂林电子科技大学 生命与环境科学学院, 广西 桂林 541004;

2. 桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 为了使用低成本、无创伤且易操作的方法评估人体心血管的健康状况, 设计一个基于 ARM11 (S3C6410) 的无创心血管健康评估系统, 该系统由无创心血管参数检测探头、嵌入式人机交互平台和内嵌的健康评估模型 3 个部分组成; 基于能量代谢守恒法、指端容积脉搏波检测等研制出无创检测探头, 用于测量血压、血流速度和血糖等人体参数, 采用蓝牙 4.0 设备将数据传输至嵌入式人机交互平台, 数据经改进后的国人缺血性心血管病 (ICVD) 10 年发病危险评估模型得出健康评估结果; 实验结果表明该方法所得评估结果和微创真值经原始 ICVD 评估模型所得评估结果的 Pearson 相关系数为 0.91 (Spearman 相关系数为 0.891), 说明该方法是可行的。

关键词: 心血管健康评估; 人机交互平台; 无创检测

Design of Non-invasive Cardiovascular Health Assessment System Based on ARM11

Chen Zhencheng¹, Chen Zhigao², Liu Shanjian², Xu Beiping², Zhu Jianming¹

(1. School of Life and Environmental Sciences, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to assess cardiovascular health by low-cost, non-invasive and easy-to-handle method, the non-invasive cardiovascular health assessment system based on ARM11 (S3C6410) which is composed of non-invasive cardiovascular parameters measurement sensor, embedded GUI platform and embedded health assessment model was designed. According to the method of conservation of energy metabolism and the detection of fingertip volume pulse waves, the sensor for blood pressure, blood flow velocities and non-invasive blood glucose measurement was designed. The embedded GUI platform will display the health assessment results when the body parameters which were measured by the sensor and were transferred to the embedded GUI platform by Bluetooth 4.0 device were operated on the improved evaluation model of the ten years risk of ischemic cardiovascular diseases (ICVD) in Chinese. The experimental results indicated the Pearson correlation coefficient was 0.91 (Spearman correlation coefficient was 0.891) between the test values and the true values of the health assessment, which indicated this method is feasible.

Keywords: non-invasive measurement; GUI platform; cardiovascular health assessment

0 引言

心血管病是当今世界致死率极高的病症之一, 进行心血管健康评估是预防该病的重要手段^[1-3]。国家“十五”攻关“冠心病、脑卒中综合危险度评估及干预方案的研究”^[4]采用英国统计学家 D. R. Cox^[5]提出的 Cox 比例风险模型, 同时考虑到我国心血管病“冠心病相对低发、脑卒中相对高发”^[6]的特点, 以年龄、收缩压、体重指数 (BMI)、血清总胆固醇 (TC)、是否糖尿病和是否吸烟等危险因素为自变量, 以缺血性心血管病事件为因变量, 拟合出了较好的适用于中国人的心血管病综合危险评估工具^[5]。目前, 获取上述生理信息的方法主要是问卷调查结合有创抽血化验^[2]。如果基于该心血管病综合危险评估工具开发一个便携式的无创心血管健康评估系统,

可以方便国民获取自身的心血管健康状况, 一方面可以避免抽血带来的创伤痛苦与感染风险, 另一方面无需医疗化验, 可以降低检测成本, 具有很高的市场应用价值。

Cho ok kyung 等人提出了代谢热整合法, 在此基础上桂林电子科技大学陈真诚等人提出了能量代谢守恒法^[7], 指出血糖值和指端热交换代谢率 M , 血氧饱和度 SPO_2 , 血流速度 BF 和心率 HR 之间存在如下函数关系 (式 (1) 中的 c 为常数):

$$GLU = F1(M, SPO_2, BF, HR, c) \quad (1)$$

Hiroshi 等人通过对容积脉搏波进行二次、三次微分^[8]后得到的加速脉搏波波形进行研究, 该研究结果显示加速脉搏波能比较有效的反映和预测血液循环系统功能, 梁永波等在此基础上给出了一种无创无袖套连续血压测量方法。

根据国民体质与健康数据库^[9]2006 年到 2011 年的数据 (样本 1 万例以上) 得出, 男性 BMI 和总胆固醇的 spearman 相关系数为 0.443, 女性 BMI 和总胆固醇的 spearman 相关系数为 0.389, 人体的 BMI 和总胆固醇具有中等相关性。在不需知道总胆固醇具体数值的情况下, 可以通过 BMI 推断总胆固醇的大致范围, 这样可能带来一定误差, 但是能换来便捷性。

收稿日期: 2015-08-08; 修回日期: 2015-09-17。

基金项目: 广西自动检测技术与仪器重点实验室主任基金项目 (YQ14116); 国家自然科学基金 (61271119); 国家科技支撑计划 (2013BAI03B01); 广西高等学校科学研究项目 (KY2015YB096); 桂林电子科技大学研究生教育创新计划资助项目 (GDYCSZ201479)。

作者简介: 陈真诚 (1965-), 男, 湖南永州人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事生物传感与智能仪器方向的研究。

1 系统总体设计

无创心血管健康评估系统融合了嵌入式技术、无创血糖检测技术以及容积脉搏波检测技术, 前端用无创检测探头采集人体的血糖、血氧饱和度、血压及血流速度等心血管参数, 通过蓝牙 4.0 模块将数据传输至基于 S3C6410 的嵌入式人机交互终端, 可供输入性别、年龄、身高、体重、是否吸烟等信息, 经内嵌的评估模型运算后给出人体心血管健康评估结果。系统结构图如图 1 所示。

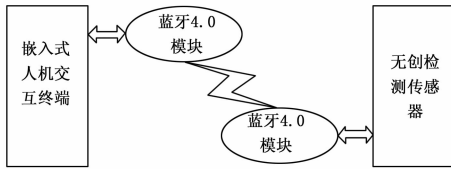


图 1 无创心血管健康评估系统结构图

2 系统硬件平台设计

1) 嵌入式平台硬件设计:

该系统的控制核心采用三星公司的 S3C6410 处理器。外置 2 G 的 SD 卡用于存储大量心血管生理参数数据。外接 4.3 寸 TFT 带触摸屏液晶, 可通过手写笔进行各项操作。本系统的嵌入式平台硬件构成如图 2 所示。

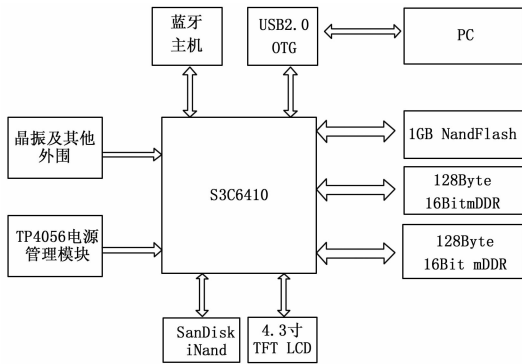


图 2 嵌入式平台硬件构成

2) 无创检测探头硬件设计:

在现有光电容积脉搏波检测电路^[8]的基础上做出改进, 引入自适应光强调节功能, 克服了以往因人体运动、手指抖动和自然光照变化所带来的环境影响, 并引入多级放大滤波电路, 能得到更纯净的前端信号。此外集成了用于无创血糖检测的传感器^[7], 在其基础上改用更高精度、更灵敏的温湿度传感器 SI7005, 避免了之前的信号滞后性问题, 并引入智能电源管理芯片 AXP173, 可独立控制四路电源输出, 解决了因电源热散失从而影响指端代谢率提取不够准确的问题。无创检测探头硬件构成如图 3 所示。

因心脏射血, 从而引起血液和血管壁之间振荡, 这一生理现象体现在人体指端处, 当手指放入探头腔体内, 单片机通过内部 12 位 DA 模块和外置 H 桥驱动电路驱动位于手指下表面的光电发射 LED 交替发出 660 纳米红光和 920 纳米红外光, 因为手指皮肉及血液成分会吸收一部分发射光, 发射光透过手指后的那部分光被位于手指上表面的光电接收 LED 捕获, 而所捕获的信号中 0.6~18 Hz 的交流信号为有用信号, 如脉搏

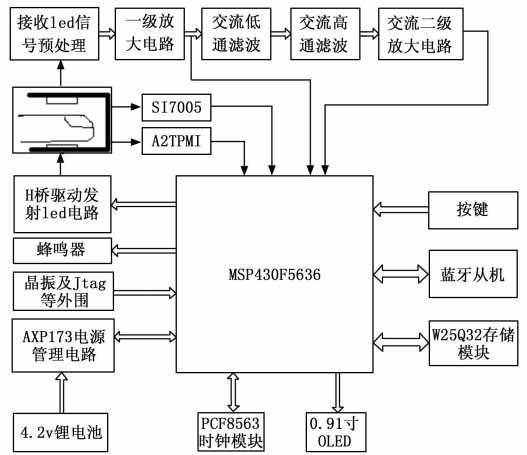


图 3 无创检测探头硬件构成

波等, 能反应人体的血氧、脉搏和血糖等生理情况, 这些信号以电流的方式表现出来。经第一级放大电路后, 信号被放大的同时也被转换成毫伏级电压信号, 反馈给单片机, 单片机通过内部的 12 位 AD 模块采集到其中的直流信号, 判断信号的可用性, 用于调整发射 LED 的光照强度。随后信号通过截止频率为 0.6 HZ 的交流高通滤波, 同时隔断直流信号, 再经过 18 HZ 的低通滤波, 得到最终的有效信号, 再经放大, 有用信号在 1~3 V 之间, 单片机通过另一路 AD 采集到该有用信号用于数据处理。

基于以上思路每 2 ms 采集 1 个数据点, 一共采集 1 000 个数据点, 从而得到高分辨率脉搏波形, 根据“脉搏波传导时间 (PWTT) 和动脉血压之间呈线性相关”^[8]这一原理可以得到收缩压 PS, 如式 (2) 所示, 其中 PWTT 可由波形分析提取可得, C1 和 C2 为常数。

$$PS = C1 - C2 * PWTT \quad (2)$$

根据无创血糖检测原理及其传感器设计^[7], 将所采集到的信号综合处理后还可获得心率、血氧饱和度、及血流速度等参数。另外通过温湿度传感器 (SI7005)、辐射传感器 (A2TPMD) 等检测人体手指与环境之间热交换的数据, 进而得到指端代谢率, 最终得到血糖值。

3) 蓝牙 4.0 通信模块硬件设计:

为了使终端和探头之间进行实时通信, 根据 CC2540 数据手册自行设计蓝牙模块电路, 电路如图 4 所示。该模块对 CC2540 的模拟电源输入端和数字电源输入端进行分离滤波, 能有效抑制 1 M 以下噪声信号, 且实测功耗仅 1.2 μA。S3C6410 和 MSP430 单片机可以分别通过 UART 接口与其连接, 实现无线通信, 在特定波特率下的通信准确率达 99%。

3 健康评估模型改进与软件设计

1) 健康评估模型改进:

国家“十五”攻关“冠心病、脑卒中综合危险度评估及干预方案的研究”课题组^[4]开发的“ICVD 事件 10 年发病危险预测模型和简易评估工具”使用评估表方式呈现, 结合现有的指端无创技术, 并考虑便捷性, 对该工具模型进行如下几点改进: (1) 改进后将“性别”这一危险因素提升至主要因素, 将男女两种评估方式整合成一种; (2) 对于“年龄”这一危险因素, 该工具特别适用于年龄段 35~59 岁人群, 参照中国心

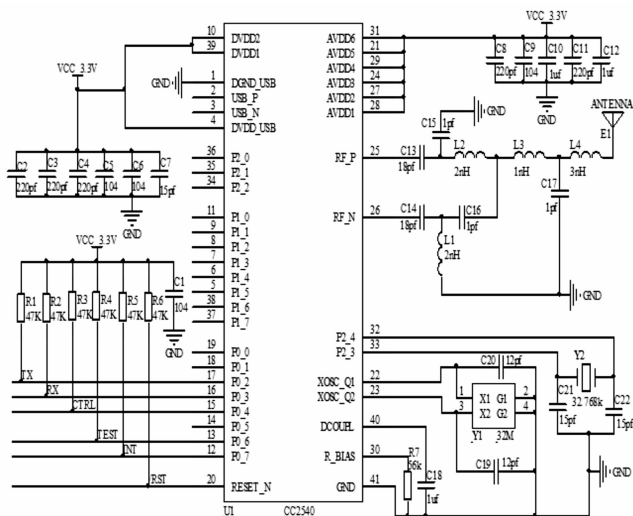


图 4 蓝牙 4.0 模块电路

管病防治信息网^[10]给出的权威做法，对于小于 35 岁受测人群，相应的打分及结果比对与年龄段“35~39”岁标准一致；(3) 将危险因素“体重指数 (BMI)”拆分成“身高”和“体重”两个危险因素，靠系统内部计算出 BMI；(4) 将“是否糖尿病”替换成“餐后 2 小时血糖值”，将餐后 2 小时血糖值 ≤ 7.8 mmol/L 视为正常，反之视为异常；(5) 参照国民体质与健康数据库数据^[9]，当 BMI ≥ 26，判别个体的总胆固醇值 ≥ 5.2 mmol/L，否则 < 5.2 mmol/L。

2) 软件设计：

嵌入式软件设计包含启动程序、Linux 内核、文件系统和应用程序 4 个部分。在 PC 机 ubuntu9.10 系统下编译 uboot1.1.6 版本源代码，生成 u-boot.bin，可供 S3C6410 嵌入式平台启动。内核选用 Linux-3.0.1 版本，在此内核中进行蓝牙设备接口驱动开发。文件系统选用 Yaffs，桌面系统选用 QtE4.7.1。按上述方式搭建好嵌入式平台，在 PC 上开发人机交互软件，而后移植到该嵌入式平台下。



图 5 人机交互软件

S3C6410 与蓝牙模块之间的默认通信设置为 115 200 bps，8 bit 数据位，无校验，1 个停止位，代码如下：

```

cfsetispeed(&.serialAttr, B115200);
cfsetospeed(&.serialAttr, B115200);
serialAttr.c_cflag &= ~CSIZE;
serialAttr.c_cflag |= CS8;
serialAttr.c_iflag = IGNPAR;
serialAttr.c_cc[VMIN] = 1;

```

图 5 中，性别、年龄、身高、体重和是否吸烟等项需要使用者用触摸笔填写或选择，然后点击开始测试项，之后操作无创探头，等采集完毕后，“收缩压”、“餐后 2 小时血糖”及“总胆固醇范围”等项会显示相关的结果，“十年 ICVD 绝对风险”项会显示最终的评估结果，还可以在右下角输入相关指令，点击“发送”项便将指令传送至无创检测探头，实现主从控制。另外使用者可以点击“Help”项，之后会给出该平台的使用方法，对于评估结果的说明以及上位机与下位机进行蓝牙通信的指令说明。所涉及功能函数如下所示：

```

TMainForm::startButtonClicked();
//开始测试
TMainForm::sendButtonClicked();
//发送指令
TMainForm::helpButtonClicked();
//给出帮助文件
蓝牙通信指令见表 1。

```

表 1 蓝牙通信指令

指令	功能说明	指令	功能说明
S	设定默认时间	S150701	设定年月日
Q	回传测试结果	S0801	设定时分
E	使探头关机	SS	保存测试结果

4 实验结果

1) 实验准备：

实验环境为室内，温度 25 ± 0.5 °C，相对湿度 67 ± 3%。实验对象分 AB 两组，每组 10 人，每组中男女各 5 人。要求 A 组被测人群年龄段为 20~34 岁，编号为 1~10，B 组被测人群年龄段为 35~59 岁，编号为 11~20，数据采集及其后期处理都采用此编号。通过调查登记，袖带式血压计（欧姆龙血压计）测血压、微创方式测血糖（罗氏微创血糖仪）及总胆固醇（台湾百捷多功能检测仪）等方式获得人体相关生理参数真值，经“ICVD 事件 10 年发病危险预测模型简易评估工具”得到相应评估结果，再用自制心血管健康评估系统样机进行心血管健康评估。

2) 结果与分析：

使用袖带式血压计所测收缩压与自制样机所测收缩压的结果相关性如表 2 所示。

表 2 两种方式所测收缩压之间相关性

数据来源	Pearson		Spearman	
	R 值	P 值	R 值	P 值
1~20 号	0.676	0.001	0.706	0

使用罗氏微创血糖仪所测血糖值与样机所测血糖值之间的相关性如表 3 所示。

表 3 两种方式所测血糖值之间相关性

数据来源	Pearson		Spearman	
	R 值	P 值	R 值	P 值
1~20 号	0.841	0.005	0.839	0.002

由以上结果表明，自制无创探头可以较准确的采集人的收缩压及血糖情况。