

可穿戴式体温监测预警系统设计

姜艳茹 孟令军

(中北大学 仪器与电子学院 太原 030051)

摘要: 设计了一种可穿戴在腕部的体温监测预警系统,可用于新冠肺炎集中隔离人群的体温监测,也适用于需要连续监测体温的场景和常见情况下使用。以单片机为核心进行设计,温度采集模块采集腕部体表温度和外界环境温度,通过最小二乘法拟合的方式补偿环境温度对腕部温度的影响,然后通过蓝牙模块以无线方式传输到手机端。手机端可以实时显示体温值,温度异常时会显示异常提醒,同时可查看历史体温数据。经测试该系统测量误差小于 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,且稳定性好,实时性高,视觉效果良好,易于功能扩展。

关键词: 体温监测预警;腕部测温;最小二乘法;单片机;蓝牙传输;手机端APP

中图分类号: TP274 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Design of wearable body temperature monitoring and early warning system

Jiang Yanru Meng Lingjun

(School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: A novel coronavirus pneumonia monitoring system was designed for monitoring the temperature of the COVID-19 with a centralized isolation population. It also applies to scenes requiring continuous monitoring of body temperature and common use. The design was based on MCU, the temperature acquisition module collected the wrist surface temperature and the external environment temperature respectively, compensated the influence of the environment temperature on the wrist temperature by the least square fitting method, and then transmitted to the mobile phone through the Bluetooth module. The mobile terminal could display the body temperature value in real time. When the temperature was abnormal, it could display the abnormal reminder and view the historical temperature data. After testing, the measurement error of the system is less than $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, and it has good stability, high real-time performance, good visual effect and easy function expansion.

Keywords: temperature monitoring and early warning; wrist temperature measurement; least square method; MCU; Bluetooth transmission; mobile APP

0 引言

体温参数是生命体征监测的重要生理指标之一,不但是病人接受治疗时的重要观察指标,也被作为众多疾病感染的诊断标准^[1],准确的体温检测能为诊断、治疗、护理提供重要依据。近年来,可穿戴式医疗设备发展迅猛,可实现对人体非介入式、无创的生理特征数据监测,具有长时间持续工作、异常生理参数警报、智能显示等特点,可以更加及时、有效的对疾病进行预防,并且可以直接和移动设备通信,极大地满足了用户的交互需求^[2]。

“新冠肺炎”自爆发以来,持续对人类健康造成重大危害。体温检测是实施症状监测,将疫情控制在萌芽阶段的重要方法和手段,对于提早发现疫情苗头和隐患具有重要

意义。现行的体温筛查方法需要人工测量、人工记录,无法及时发现体温异常的人员并报告,且医护人员劳动强度过大。因此设计一种体温监测系统是非常有必要的。文献[3]设计了一种红外体温测量方法,利用偏最小二乘法和人工神经网络对红外测温进行优化补偿,可以提高测温拟合精度和系统的稳定性,但该方法测量人体的臀部体表温度,不适合长时间对体温进行监测。文献[4]提出一种双测温探头的无线体温检测方法,采用基于热传导方程的算法对测得的温度数据进行补偿,该方法测温精度高、成本低、效果良好,但在无线通信中需要通过电缆连接监护仪,使用不灵活。

本文设计一种可穿戴式的体温监测预警系统,将温度传感器固定在被测对象腕部实时监测体表温度,通过

蓝牙上传至手机获得连续的体温变化数据,通过数据分析,对体温进行预警和管理,可大大降低接触感染的风险,也适用于监测常见疾病引起的体温变化。该系统精度高、使用灵活、可连续监测、功耗低,经实验测试,效果良好。

1 总体方案设计

1.1 测温方案设计

人体温度有体表温度和核心温度之分,体表温度具有易于观察和测量等优点。体表温度的测量包括接触式测量和非接触式测量两种方法^[5],由于非接触红外测温的热电堆传感器体积过大,不宜用于可穿戴设备^[6],所以选用接触式测温方式。接触式测量法可以采用水银体温计和电子体温计。水银体温计易碎危险,易造成环境污染,测量时间长^[7]。电子体温计读数方便、安全性高,使用效果与水银体温计没有明显差异,是可穿戴体温测量仪器的较优选择^[8]。本系统选用 NTC 热敏电阻测量体温,NTC 热敏电阻具有灵敏度高、响应速度快等优点。

电子体温计通常测量部位为腋下和口腔,但考虑到对被测对象体温进行连续测量和监测的便利性,选择对腕部温度进行测量,采用腕带式的佩戴方法,可避免对被测对象造成心理压力。但腕部一般情况下裸露在空气中,受外部环境温度影响较大,因此测量时同时检测腕部体表温度和外界环境温度,利用最小二乘法实现腕部体表温度与真实体温值的补偿,提高数据监测的准确性。

由于该系统穿戴方式为腕戴式,采用电池供电,为了可以长时间监测被测对象体温变化,延长设备使用时间,需要保证功耗尽可能低,因此微控制器大部分时间应处于休眠状态,当测量时间到时,唤醒温度传感器和蓝牙传输模块,进行体温测量和数据传输。同时该系统具有体温异常预警功能,当体温值超过 $37.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时或者在 5 min 之内体温升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,蜂鸣器立即发出警告,提醒被测对象体温异常,及时关注自身体征变化,同时向手机端发送异常数据,异常数据可作为医护人员进行诊断的依据。

1.2 总体框架结构

如图 1 所示,本系统由数据采集与处理模块和手机端两部分组成。数据采集与处理部分包括测温传感器、中央处理器、电源模块、蓝牙传输模块和蜂鸣器报警模块。热敏电阻和 DS18B20 传感器分别采集被测对象的腕部温度和外界环境温度,然后传输给 Atmega328P,Atmega328P 收到数据后根据采集到的体温数据和环境温度计算得到补偿后的温度值,通过蓝牙将数据传输至 Android 设备。若体温超过触发报警的阈值或者在短时间内上升过快,则蜂鸣器发出报警信号,提醒保持镇定状态并密切关注自身体温变化,等待下一步的筛查或诊断。手机端通过蓝牙与数据采集与处理模块通信,具有实时数据显示、体温异常提醒、历史数据查看等功能。

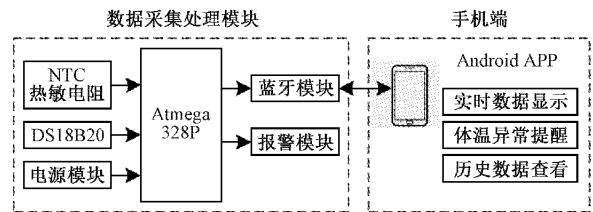


图 1 系统结构

2 系统硬件设计

系统硬件部分主要包括处理器 Atmega328P、温度采集模块、无线传输模块和手机端。Atmega328P 是一款高性能、低功耗的微型处理器^[9],内置高速存储器,工作电压 5 V ,可靠性高,符合测温系统对功耗和数据传输的要求。

2.1 温度采集模块

采用体积小、灵敏度高的热敏电阻测量腕部温度值,型号为 MF52A103F3950A1,测量精度误差为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,具有响应速度快、可长时间稳定工作等优点^[10]。电路原理如图 2 所示,恒流电路主要由三端可调电流源组成,为提高恒流电路精度,增加了一个负温度系数的二极管,用于抑制外界环境温度的变化对电路的影响^[11],恒流电路产生的电流通过热敏电阻后经过运算放大器进行放大,最后电压模拟量送入 ADC 进行模数转换。

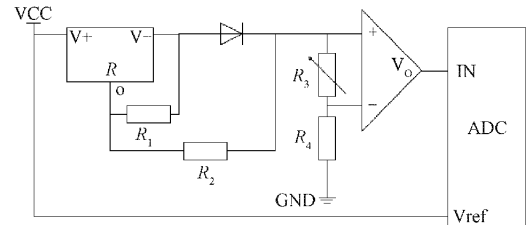


图 2 NTC 热敏电阻电路

采用单总线数字温度传感器 DS18B20 监测环境温度。DS18B20 体积小,精度高,具有 $9\sim 12$ 位的 A/D 转换精度,分辨率可精确到 $0.0625\text{ }^{\circ}\text{C}$,接线简单^[12],占用 IO 口少,连接电路如图 3 所示,外部 5 V 电源供电,DQ 引脚外接 $4.7\text{ k}\Omega$ 上拉电阻^[13],同时与 Atmega328P 的引脚相连接。

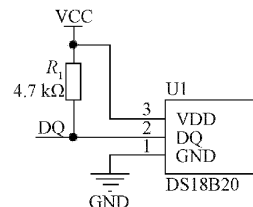


图 3 DS18B20 传感器连接电路

2.2 蓝牙传输模块

本设计采用 nRF24L01 作为无线传输模块,将温度数据发送到手机端。nRF24L01 是由 NORDIC 生产的 2.4 GHz 收发器,可以应用于工业和医疗应用。该模块功耗低、体积

小,功能强大^[14],具有片上的天线模块,工作电压 1.9~3.6 V,在正常工作期间的功耗仅 12 mA。与 Atmega328P 连接电路如图 4 所示,通信时使用 SPI 协议,可以很方便地建立连接。

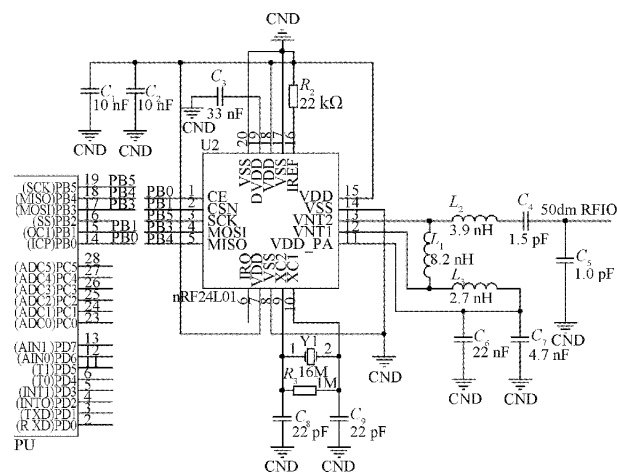


图 4 蓝牙模块电路

3 系统软件设计

3.1 最小二乘法温度补偿

腕部温度值受外界环境温度影响较大,为了提高测温系统的准确性,需要对测量的腕部温度数据进行补偿。令 x 为腕部温度, y 为环境温度, z 为补偿后的体温值,通过 MATLAB 软件拟合工具箱进行数据分析,得其数学模型为:

$$Z = Ax^2 + Bx + Cy + Dxy + E \quad (1)$$

式中:计量单位均为 $^{\circ}\text{C}$, A 、 B 、 C 、 D 、 E 为补偿系数。

数据拟合时以腋下体温作为基准,采集在不同环境温度下的腕部温度数据和腋下温度数据。选取 10 名被测者,被测者在测量前半小时内无剧烈运动,分别在 3 种不同温度环境下对被测者腕部和腋下温度进行测量,腕部温度数据由 NTC 热敏电阻测量,腋下温度用医用电子体温计测量,然后通过最小二乘法对数据进行拟合,以确定各项补偿系数。经拟合后得到 $A = -0.019 0$, $B = 0.732 3$, $C = -0.855 2$, $D = 0.029 8$, $E = 29.723 9$ 。

3.2 温度数据采集处理程序

系统主程序流程如图 5 所示,系统上电后,首先进行温度传感器和蓝牙模块的初始化配置,然后等待蓝牙的连接。蓝牙连接成功后,手机端发送采集指令,开始采集腕部体温数据和外界环境温度数据。为进一步降低测量误差,采用平均值滤波方法计算温度,公式如下:

$$T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (2)$$

式中: t_i 为第 i 次测量的温度; n 为测量次数。利用式(2)计算得平均值温度数据,然后把平均值数据代入式(1)数学模型中计算得到补偿后的体温值^[15],提高温度测量精度。若

体温值超过 37.3°C 或者在 5 min 内温度值升高 1°C ,蜂鸣器立即发出报警信号,并向手机端发送异常温度值和报警指令,若体温值在正常范围内,则向手机端发送正常体温数据。然后进入休眠状态,等待下次的采集指令。

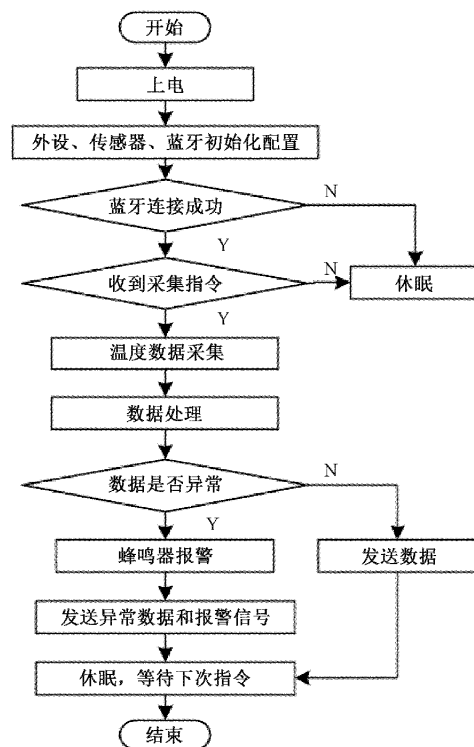


图 5 主程序流程

3.3 手机端软件设计

手机端 APP 实现对体温数据的实时更新和同步显示,采用 APP Inventor 开发环境进行代码编写。APP Inventor 是一种可视化编程的 Web 服务端开发平台,开发过程比较简单^[16]。手机客户端的主要功能包括蓝牙连接、体温数据显示、查看历史数据 3 个功能模块,结构如图 6 所示。

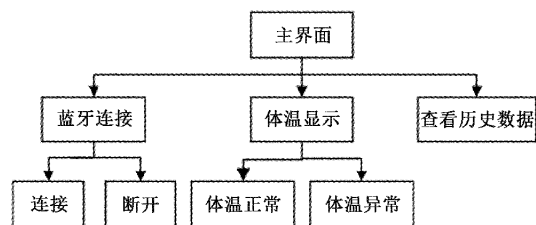


图 6 手机 APP 结构

要实现体温数据的无线传输,首先需要完成蓝牙与手机端的连接。首先搜索并连接蓝牙设备,蓝牙连接成功,开始启用定时器,定时时间到发送采集指令,然后接收蓝牙端发送的数据并显示,把数据存储在文件管理器中,若还接受到体温数据异常的报警指令,则发出预警,提醒被测对象或者医护人员及时关注身体变化。若需要查看历史温度,把文件管理器中的数据读取出来并进行显示。程序流程如图 7 所示。

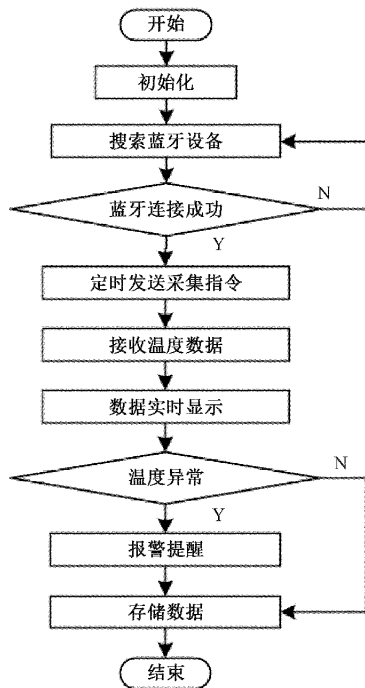


图 7 手机端 APP 程序流程

4 实验与结果

4.1 体温数据检测

为测试系统的测量精度,选用医用电子体温计 OMRON MC-341 作为标准器,测量腋下温度用于测温准确度分析实验,其精确度可以达到 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在室内无风的环境下($22\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 26\text{ }^{\circ}\text{C}$)分别用本系统和 OMRON MC-341 电子体温计对 8 名被测对象进行体温测量,测量时被测对象静坐,前半小时内无剧烈运动,且两设备的测量时间间隔尽可能的短。将本系统佩戴于被测对象腕部,使得 NTC 热敏电阻紧贴腕部皮肤,DS18B20 充分暴露在空气中。测得的数据如表 1 所示,表中数据均为单次测量结果。

表 1 测量结果对比

序号	本样本测量结果/ $^{\circ}\text{C}$	OMRON MC-341 测量结果/ $^{\circ}\text{C}$
1	36.42	36.5
2	36.28	36.2
3	36.47	36.4
4	36.26	36.2
5	36.41	36.5
6	36.38	36.3
7	36.67	36.6
8	35.51	36.6

从表 1 中可以看出经过优化补偿后的温度数据与标准值误差的平均值为 $0.08\text{ }^{\circ}\text{C}$,在合理范围内,符合医疗标准

最大允许误差为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的要求。因此该系统满足要求。

4.2 手机 APP 测试

打开手机 APP,点击蓝牙连接,选择要连接的蓝牙设备后,若显示连接成功即可进行数据通信,界面会显示连接成功,体温数据也会实时显示,如图 8(a)所示。当体温数据高于 $37.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,会发出预警,显示“体温过高,请及时联系医生!”,如图 9(a)所示,若体温在 5 min 内上升 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,也会发出预警,显示“体温上升过快,请及时联系医生!”,如图 9(b)所示。点击查看历史记录,即可看到历史记录显示,如图 8(b)所示。当需要断开蓝牙时,点击断开按钮,然后点击确认,连接就会断开。

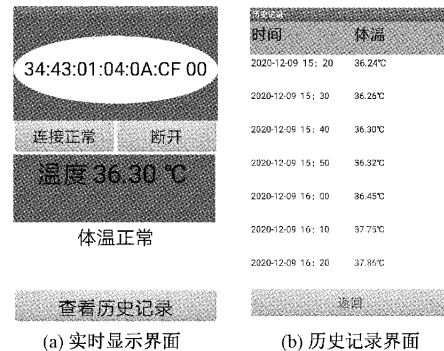


图 8 手机 APP 界面显示

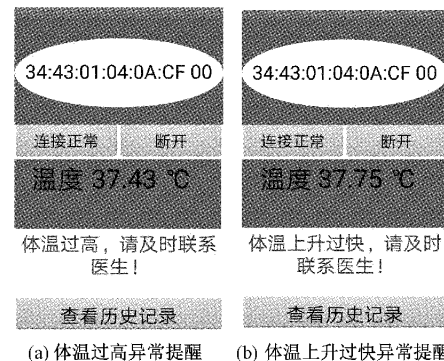


图 9 温度异常提醒界面显示

5 结 论

体温是生命体征监测的重要指标之一,本文设计实现了一款可穿戴式的体温监测预警系统,硬件部分主要包括单片机 Atmega328P、温度采集模块和无线传输模块,软件部分采用平均值滤波方法处理采集到的腕部温度和环境温度,然后代入数学公式得到补偿后的温度,手机端主要实现温度的实时显示和异常提醒。为使测量的数据更加准确和真实,利用最小二乘法优化补偿环境温度对腕部温度的影响。相较于传统的体温检测设备,该系统功耗低、体积小、性能稳定可靠,佩戴方式为腕戴式,不影响被测对象正常活动。经实验测试,该系统测量误差小于 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,符合医疗标准。同时本系统可避免因水银温度计消毒不彻底导

致的交叉感染、红外温度计使用方式有误导导致读数不准确等情况的发生。同时体温发生异常时,系统会及时发出预警,异常数据也可作为医护人员进行下一步筛查和诊断的依据。

参考文献

- [1] 仲悦萍. 危重症病人体温监测方法的研究进展[J]. 护理研究, 2014, 28(20): 2443-2444.
- [2] 陶毅阳. 穿戴式体温监测设备的服务设计研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [3] 陈小惠, 王桌培, 王悠苒, 等. 基于臀部红外测量的神经网络体温算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(9): 1453-1458.
- [4] 霍东风, 谭励夫, 张腾. 双体温探头的无线体温监测系统[J]. 电子测量技术, 2018, 41(12): 64-67.
- [5] 李峥, 夏鲲, 何晟. 基于腕部测温的可穿戴体温检测装置设计[J]. 电子测量技术, 2018, 41(13): 100-106.
- [6] 余春艳, 齐子铭, 苏金池, 等. 可穿戴腕部体温监测装置设计[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(4): 121-123, 127.
- [7] 王纪彬, 王文廉. NFC 无源体温测量系统[J]. 传感技术学报, 2019, 32(8): 1271-1275.
- [8] 苑冬梅, 杨坤, 张妍妍, 等. 基于 NTC 的体温测量系统设计[J]. 中国医疗设备, 2017, 32(11): 98-103.
- [9] 屈宝鹏, 张喜凤, 卜文锐. 基于 ATMEGA328 的视频监控智能车的设计与实现[J]. 现代电子技术, 2015, 38(19): 160-162.
- [10] 许宏为, 秦会斌, 周继军. 基于 WiFi 的耳标式生猪体温监测系统设计[J]. 电子技术应用, 2020, 46(9): 64-68.
- [11] 冯靖杰. 穿戴式核心体温和连续血压测量关键技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [12] 肖新帅, 林晓焕, 胡念祖, 等. 多类型高精度测温系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(3): 75-79.
- [13] 赵莉, 王翔. 反馈调节式体外血液净化加热系统的设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(7): 1080-1085.
- [14] 陈龙翔, 邱飞岳, 傅攀, 等. 基于蓝牙通信的阅读视力检测仪设计[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(7): 280-284.
- [15] 廖盼盼, 张佳民. 红外测温精度的影响因素及补偿方法的研究[J]. 红外技术, 2017, 39(2): 173-177.
- [16] 高明华, 肖佳豪, 许丽金, 等. 基于 App Inventor 设计的蓝牙通信实验的开发[J]. 实验技术与管理, 2018, 35(3): 128-130.

作者简介

姜艳茹, 硕士研究生, 主要研究方向为电子测试存储、嵌入式系统与应用。

E-mail: 15762789709@163.com

孟令军, 博士, 副教授, 主要研究方向为集成测量系统及仪器、微纳仪器与测试及图像处理。