

文章编号:1674-2869(2015)01-0030-05

# 一种无线温度监控系统的设计与实现

尤 洋<sup>1,2</sup>,文小玲<sup>1</sup>,邹艳华<sup>1</sup>

1. 武汉工程大学电气信息学院,湖北 武汉 430205;

2. 武汉工程大学邮电与信息工程学院,湖北 武汉 430074

**摘 要:**针对传统的温度监控系统依靠有线通信存在布线量大、扩展性差、检修复杂等缺点,设计了基于紫蜂(ZigBee)技术的无线温度监控系统.系统以 STM32F103ZE 微处理器和 CC2530 无线射频芯片为核心,在 ZigBee 协议栈(Z-STACK)基础上建立协调器、终端无线收发模块,构建星型局域网.终端节点以 CC2530 为核心,采用 K 型热电偶温度传感器和脉冲宽度调制交流斩波调压电路,通过与 ZigBee 协调器进行无线通信发送实时温度数据、接收温度指令信号,并用模糊比例积分微分控制算法实现温度的实时控制.通过串口通信方式实现协调器与 STM32F103ZE 之间的数据通信,并在 STM32F103ZE 上建立友好的人机界面实现温度的实时监控.实验结果表明系统实现了温度的无线监控,其控制精度达到了预期的要求,具有无线传输数据可靠、组网简单、扩展性强、成本低等特点.

**关键词:**紫蜂技术;STM32F103ZE;ZigBee 协议栈;模糊比例积分微分;温度监控

中图分类号:TB35

文献标识码:A

doi: 10.3969/j.issn.1674-2869.2015.01.007

## 0 引 言

温度监控系统广泛应用于现代工业、农业及日常生活中,现有大部分依靠有线进行监控,存在需要大量布线、安装位置固定、可扩展性较差、检修复杂等缺陷.随着无线通信技术的日趋成熟,物联网和无线传输技术在工业控制中成为业界研究的热点,采用无线传输技术可以克服有线温度监控系统的上述缺点. ZigBee 采用带时隙或不带时隙的载波检测多路访问与冲突避免的数据传输方法,并通过确认和数据检测等措施,保证数据的可靠传输,且具有组网灵活、成本低、功耗低、抗干扰能力强等优势<sup>[1]</sup>,因而在众多无线传输方式中脱颖而出.本文以 STM32F103ZE、CC2530 无线射频芯片为核心,在 Z-STACK 协议栈基础上建立协调器、终端无线收发模块来构建星型局域网,设计了基于 ZigBee 的无线温度监控系统.

## 1 系统总体设计

系统总体结构框架如图 1 所示,由上位机 STM32F103ZE、ZigBee 协调器、ZigBee 终端节点三大模块构成.由于系统节点数量较少,ZigBee 协调器与 ZigBee 终端节点构建星型网络拓扑结构.

ZigBee 终端节点通过热电偶采集温度信息,通过无线局域网传输到 ZigBee 协调器,接收来自协调器的温度指令信息、并利用模糊比例积分微分(proportional-integral-derivative,以下简称 PID)算法控制温度. ZigBee 协调器接收到终端节点温度信息后上传到上位机 STM32F103ZE. STM32F103ZE 的主要功能是接收来自 ZigBee 协调器的温度信息、并显示在液晶屏幕上,通过键盘设置各个节点温度控制指令值并发送给协调器,同时通过串口实现与监控终端个人计算机(personal computer, PC)的通信.

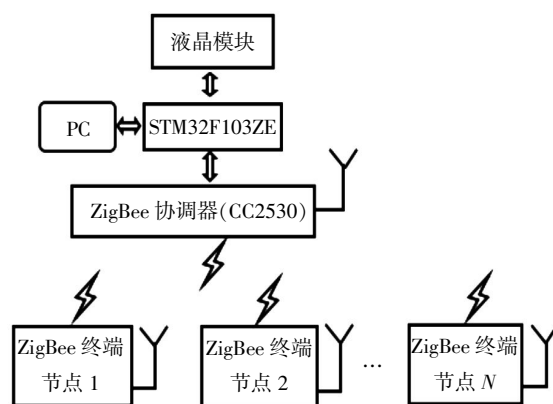


图 1 系统结构框架图

Fig.1 Diagram of system structure

收稿日期:2014-12-22

基金项目:武汉工程大学研究生教育创新基金(CX2013038)

作者简介:尤 洋(1984-),男,湖北荆州人,硕士研究生.研究方向:嵌入式系统.

## 2 系统硬件设计

### 2.1 无线局域网

系统采用星型拓扑网络结构,网络结构中主要包括 ZigBee 协调器、ZigBee 终端节点。

**2.1.1 ZigBee 协调器** ZigBee 协调器由德州仪器 (Texas Instruments,以下简称简称 TI) 公司 CC2530 和射频专用功率放大器 CC2591 组成的全功能模块 (full-functional device, 以下简称 FFD) 构成。CC2530 是一个结合了 2.4 GHz IEEE 802.15.4、ZigBee 和 RF4CE 的高性能片上系统,集成了领先的 RF 收发器、业界标准的增强型 8051CPU、系统内可编程闪存、8 kB RAM 等资源。CC2591 是 TI 公司生产的高性价比和高性能射频专用功率放大器,非常适合低电压、低功耗的 2.4 GHz 无线应用<sup>[2]</sup>。另外,在全功能模块上安装天线装置使得无线传输距离更远。

**2.1.2 ZigBee 终端节点** ZigBee 终端节点由 ZigBee 无线射频全功能模块 FFD、测温电路和调压加热电路构成。其中,测温电路采用 K 型热电偶作为温度传感器,可以直接测量 0℃~1 300℃范围的液体蒸汽和气体介质以及固体的表面温度。加热装置采用脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation, 以下简称 PWM) 交流斩波调压电路加热电阻丝。

K 型热电偶测温产生的热电动势不仅与热端温度有关,还与冷端温度相关。本系统采用灵敏度较高、线性较好的 IN4148 作为热敏元件进行冷端补偿、以减少 CPU 开销。热电偶测温电路原理图如图 2 所示,热电偶测量温度信号经过冷端补偿及信号调理后输入到 CC2530 的 12 位 A/D 模拟量输入通道。

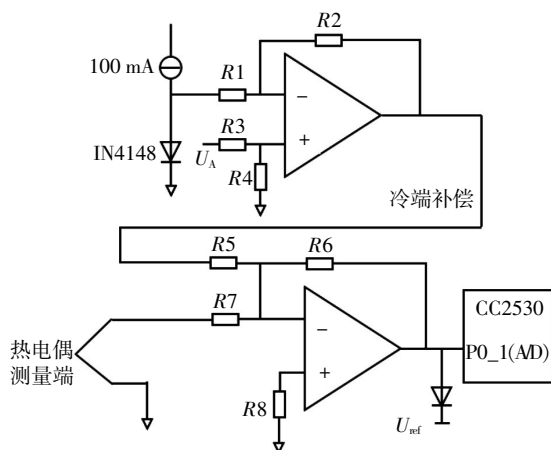


图 2 热电偶电路

Fig.2 Thermocouple circuit

加热电路采用 PWM 控制 N 沟道 P-MOSFET 交流斩波调压方式,以改变加热电阻丝两端的电压来进行温度控制。其原理图如图 3 所示,CC2530 产生 PWM (Pulse Width Modulation) 波形,通过驱动电路驱动 P-MOSFET 进行交流斩波调压。该电路控制简单,产生的高频高次谐波很容易利用很小的电感电容滤掉,可以提高加热电路中的电能质量、给温度控制精度提供基本保障<sup>[3-5]</sup>。

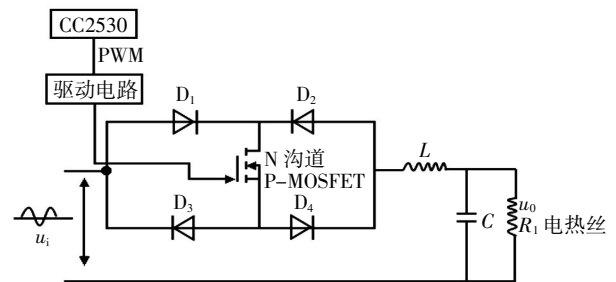


图 3 加热电路

Fig.3 Heating circuit

### 2.2 STM32F103ZE 上位机模块

上位机模块由 STM32F103ZE 最小系统和 TFTLCD 液晶显示模块及输入按键构成。STM32F103ZE 是意法半导体公司生产的基于 Cortex-M3 的 32 位微处理器,最高工作频率 72 MHz,片内 Flash 容量 512 kByte,片内 SRAM 容量 64 kByte;具有高性能、低功耗、丰富的片内资源等特点。STM32 提供了睡眠、待机、停机三种低功耗省电模式和灵活的时钟控制模式,用户可合理优化系统。STM32F103ZE 采用自带可变静态存储控制器 (Flexible Static Memory Controller, FSMC) 接口与 TFT3.2 寸 (320\*240) 液晶模块相连,更加方便地控制液晶模块<sup>[6]</sup>。键盘部分采用 4 个按键完成,用 KEY1 设置温度、KEY 2 加温度值、KEY 3 减温度值、KEY 4 移动设置数据位。

## 3 系统软件设计

系统软件包括 ZigBee 协调器、ZigBee 终端节点程序,STM32F103ZE 上位机程序三部分。其中 ZigBee 协调器节点程序的功能是组建局域网、管理终端节点,实现与 STM32F103ZE 的通信;ZigBee 终端节点程序的功能是采集温度传感器信号及无线收发温度信息,利用模糊 PID 算法控制加热装置;STM32F103ZE 上位机程序实现与 ZigBee 协调器的通信,发送终端节点温度控制参数,收集、处理及显示各个节点温度信息,提供友好的人机界面。

### 3.1 ZigBee 协调器节点程序

ZigBee 协调器是本系统的信息中枢,软件总

体设计建立在 Z-STACK 工作流程基础上. ZigBee 节点程序的核心 Z-STACK 协议栈在 IEEE 802.15.4 的物理 (Physical, PHY) 层和媒体访问控制 (Media Access Control, MAC) 层基础上, 设计了网络 (Network, NWK) 层和应用 (Application, 以下简称 APL) 层. 在 APL 层内提供应用支持子 (Application support sub-layer, APS) 层和设备对象 (ZigBee Device Object, ZDO) 以及应用框架 (Application Framework, AF), 用户可以在应用框架中加入自定义应用对象<sup>[7]</sup>. Z-STACK 内部各层之间采用“原语”进行通讯. Chipcon 公司设计的 Z-Stack 协议栈中提供了一个名为操作系统抽象层 (Operating System Abstraction Layer, 以下简称 OSAL) 的协议栈调度程序. 在协议栈中发生了任何事件, OSAL 都可以通过调用相应层的任务, 即事件处理函数来处理.

协调器节点程序在应用层定义两个事件来完成事件: 事件 1, 协调器无线接收终端节点测量温度, 并将温度发送给 STM32F103ZE 系统; 事件 2 是通过串口接收上位机 STM32103ZE 的设置温度信息, 并将设置温度无线发射到各个终端节点. 其流程图如图 4 所示, 系统初始化包括初始化各层任务, 在 APL 层建立用户自定义任务和事件处理函数, 然后进入 OSAL 操作系统运行, 不断查询任务优先级, 当有事件发生时, 比较事件对应的任务优先级, 进入高优先级任务层的事件处理函数, 事件属于应用层任务时, 进入应用层任务查询事件号 1、2, 进入对应事件的处理函数.

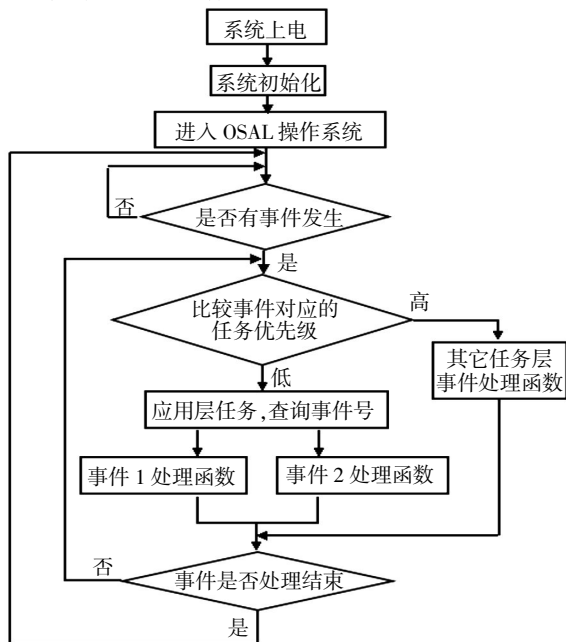


图 4 协调器节点程序流程

Fig.4 Coordinator node program flow

### 3.2 ZigBee 终端节点程序

ZigBee 终端节点是系统中温度采集和控制的末梢. 软件总体设计建立在 Z-STACK 工作流程基础上, 本程序定义两个事件来完成任务: 事件 1 是终端节点读取 K 型热电偶测量数据, 将温度数据无线发射到协调器; 事件 2 是终端节点无线接收控制温度数据并采用模糊 PID 算法控制加热装置.

因温度的纯滞后性, 采用常规 PID 控制效果不够理想. 所以采用模糊 PID 算法控制温度, 其原理框图如图 5 所示. 图 5 中,  $R$  为温度指令信号,  $Y$  为温度反馈信号. 控制算法思路是利用偏差  $e$  和偏差变化率  $e_c$  与 PID 三个参数 ( $k_p, k_i, k_d$ ) 之间的模糊关系, 在控制温度过程中不断计算  $e$  和  $e_c$ , 根据建立的模糊控制规则进行模糊推理, 自整定 PID 参数值, 再进行 PID 控制<sup>[8-9]</sup>.

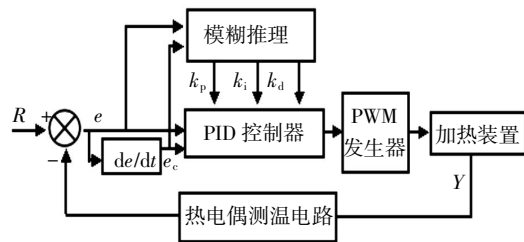


图 5 模糊 PID 控制系统原理框图

Fig.5 Diagram of Fuzzy PID control system

PID 调节的差分方程为

$$y_k = y_{k-1} + \Delta y = y_{k-1} + k_p(e_k - e_{k-1}) - k_i e_k \Delta T + k_d \frac{e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2}}{\Delta T}$$

其中,  $\Delta T$  为 A/D 采样温度周期. 模糊 PID 控制既实现在线自整定  $k_p, k_i, k_d$  参数, 也延续了常规 PID 控制原理简单、使用方便、鲁棒性较强的特点. 模糊 PID 算法的程序流程如图 6 所示.

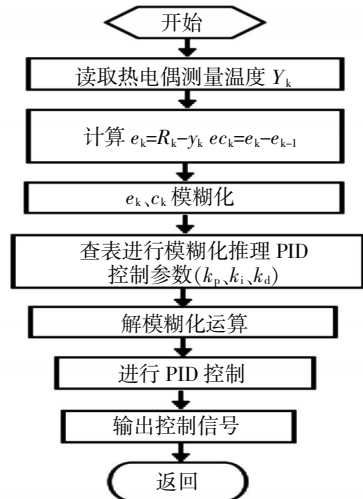


图 6 模糊 PID 算法程序流程

Fig.6 Fuzzy PID algorithm flowchart

### 3.3 STM32F103ZE 上位机程序

STM32F103ZE 上位机程序由串口通讯模块, TFTLCD 液晶屏驱动、显示模块, 按键设置模块三部分组成. 串口通讯模块负责收发温度信息, LCD 液晶程序负责显示温度信息, 按键程序负责设置终端温度<sup>[10]</sup>, 程序流程图如图 7 所示.

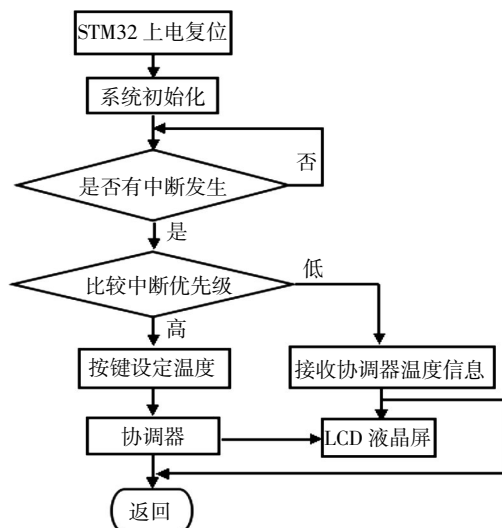


图 7 STM32F103ZE 程序流程

Fig.7 STM32F103ZE program flowchart

温度设置采用按键中断程序完成, 液晶显示程序设计为数值显示和模拟温度计光柱等比例显示, 使得监控显示值更加清晰直观.

## 4 系统测试

系统 ZigBee 节点所用的开发环境是 IAR7.60, 移植了 TI 公司的 Z-STACK (版本 CC2530-2.3.0-1.40) 协议栈. STM32F103ZE 使用 Keil uVision4 开发. 系统接入三个 ZigBee 终端节点, 以水温为实验对象, 实验数据如表 1 所示.

表 1 实验数据

Table 1 Experimental data

	设置温度/℃	系统测量温度/℃	误差/%
终端 1	50.0	49.2	1.6
终端 2	60.0	61.1	1.8
终端 3	75.0	76.3	1.7

运行稳定后 STM32F103ZE 液晶显示如图 8 所示, 实验结果显示该系统实现了无线温度监控. 由于温度是一个难控对象, 系统模糊 PID 控制加热温度时存在一定的偏差, 热电偶测量较低温度时精度相对较低导致实验数据有一定误差. 在实际生产、生活中, 可以根据实际情况选择元器件和控制策略, 多进行现场调试来满足监控精度.

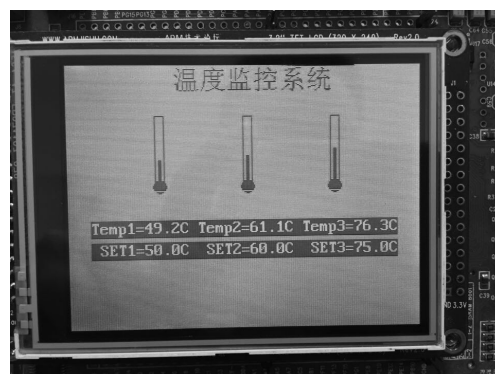


图 8 液晶显示界面

Fig.8 LCD interface

## 5 结 语

上述基于 ZigBee 无线传输技术和 STM32F103ZE 设计的温度监控系统具备系统稳定、无线传输数据可靠、设备组网简单、可扩展性强、成本低等特点. 系统采用的模糊 PID 控制 PWM 交流斩波改变加热电压控制温度, 满足了一般生产、生活的精度要求, 但交流斩波调压效率及温度控制精度仍有较大的改善空间, 这是以后深入研究的方向. 随着无线技术在工业应用领域的发展, 这种基于 ZigBee 无线技术的温度监控技术将会有更多的应用价值和广阔的前景.

## 致 谢

武汉工程大学研究生教育创新基金提供了资金资助, 赵振华教授给予的指导, 在此表示衷心的感谢!

## 参考文献:

- [1] 沈序建, 周焱. 工业无线通信协议综述[J]. 电子科技大学学报, 2010(39): 116-120.  
SHEN Xu-jian, ZHOU Yan. Wireless technology at industrial field Level [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2010 (39): 116-120. (in chinese)
- [2] Ergem S C, Varaiya P T. DMA scheduling algorithms for wireless sensor networks[J]. Wireless Networks, 2010, 16 (4): 985-997.
- [3] 周士华. 单相交流斩波调压技术控制策略的研究[J]. 工业控制计算机, 2013, 26(3): 115-116.  
ZHOU Shi-hua. Research on control strategy in single-phase AC chopper technology [J]. Industrial Control Computer, 2013, 26(3): 115-116. (in chinese)
- [4] 蔡鹏, 汤雨, 李林林. 移相控制 ZVS 高频环节 AC/AC 变换器原理研究[J]. 电力电子技术, 2014, 48(6): 40-

42.  
CAI Peng, TANG Yu, LI Lin-lin. Principle study of AC/AC converter in phase-shift control zero voltage switching high frequency Link[J]. Power Electronics, 2014, 48(6): 40-42. (in chinese)
- [5] 陈坚, 康勇. 电力电子学(第三版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 190-196.  
CHEN Jian, KANG Yong. Power electronics (Third edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011: 190-196. (in chinese)
- [6] 刘易斯, 陈文智, 胡威. 嵌入式软件设计基础. 基于 ARM Cortex-M3 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2014: 25-36.  
LIU Yi-Si, CHEN Wen-zhi, HU Wei. Fundamentals of embedded software with the ARM Cortex-M3 [M]. BEIJING: Machinery Industry Press, 2014: 25-36. (in chinese)
- [7] shahin Farahani. ZigBee 无线网络与收发器[M]. 沈建华, 王维华, 译. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2013: 27-30.  
shahin Farahani. ZigBee wireless networks and transceivers [M]. SHEN Jian-hua, WANG Wei-Hua. Beijing: Beihang University press, 2013: 27-30. (in chinese)
- [8] 戴俊珂, 姜海明, 钟奇润, 等. 基于自整定模糊 PID 算法的 LD 温度控制系统[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10): 3287-3291.  
DAI Jun-Ke, JIANG Hai-ming, ZHONG Qi-run, et al. LD temperature control system based on self-tuning fuzzy PID algorithm [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(10): 3287-3291. (in chinese)
- [9] 左帅, 和婷, 尧思远. 基于模糊 PID 控制的半导体激光器温控系统[J]. 激光与红外, 2014, 1(44): 94-97.  
ZUO Shuai, HE Ting, YAO Si-yuan. Temperature control system for semiconductor laser based on fuzzy PID [J]. Laser & Infrared, 2014, 1(44): 94-97. (in chinese)
- [10] 曹圆圆. 基于 STM32 的温度测量系统[J]. 自动化与仪器仪表, 2010(1): 16-18.  
CAO Yuan-yuan. Temperature measurement system based on the STM32 [J]. Instrumentation Analysis Monitoring, 2010(1): 16-18. (in chinese)

## Design of wireless temperature monitoring system based on ZigBee

YOU Yang<sup>1,2</sup>, WEN Xiao-ling<sup>1</sup>, ZOU Yan-hua<sup>1</sup>

1. School of Electrical and Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

2. The College of Post and Telecommunication of WIT, Wuhan 430074, China

**Abstract:** Aimed at the poor extension and complicated overhaul of traditional temperature monitoring system, a wireless temperature monitoring system based on ZigBee was designed. In the system, the STM32F103ZE and the CC2530 chip were used to construct coordinator and terminal sensor nodes of star network based on the Z-STACK protocol. As the controller of a terminal sensor node, CC2530 sent real-time temperature data from K-Thermocouple into the ZigBee coordinator, received temperature commands from ZigBee coordinator, implemented fuzzy proportional-integral-derivative control algorithm, and output pulse width modulation signals to alternating current chopper circuit. The data transceiver between coordinator and STM32F103ZE was realized by serial port communication, and the real-time monitoring of temperature was accomplished with the friendly human-computer interface established on STM32F103ZE. Experimental results show that the temperature wireless monitoring and control precision can meet the desired requirements. Furthermore, the designed system is characterized by reliable wireless data transmission, simple networking, strong expansibility and low cost.

**Keywords:** ZigBee; STM32F103ZE; Z-STACK; fuzzy PID; temperature monitoring

本文编辑: 陈小平