分类号：TD529　　密　　级：公 开
U D C ：_____　　单位代码：10424

工 程 硕 士 学 位 论 文

# 高炉高精度水温差无线实时检测系统

马　金　玉

申请学位级别：硕士学位　　领域名称：仪器仪表工程
指导教师姓名：徐 克 宝　　职　　称：教　　授

山 东 科 技 大 学
二〇一二年六月

论文题目：

# 高炉高精度水温差无线实时检测系统


作者姓名：马金玉　　入学时间：**2010 年 9 月**

领域名称：仪器仪表工程　研究方向：微机检测及智能仪器

指导教师：徐克宝　　职　　称：教　　授

张卫东　　教授级高级工程师



论文提交日期：**2012 年 5 月**

论文答辩日期：**2012 年 6 月 9 日**

授予学位日期：_____

# THE BLAST FURNACE HIGH PRECISION WATER TEMPERATURE DIFFERENCE WIRELESS REAL-TIME MONITORING SYSTEM

**A Dissertation submitted in fulfillment of the requirements of the degree of**

## MASTER OF ENGINEERING

**from**

## Shandong University of Science and Technology

**by**


## Ma Jinyu

## Supervisor: Professor Xu Ke Bao

## College of Mechanical and Electronic Engineering


## May 2012

# 声　　明

本人呈交给山东科技大学的这篇硕士学位论文，除了所列参考文献和世所公认的文献外，全部是本人在导师指导下的研究成果。该论文资料尚没有呈交于其它任何学术机关作鉴定。

硕士生签名：

日　　期：

# AFFIRMATION

**I declare that this dissertation, submitted in fulfillment of the requirements for the award of Master of Philosophy in Shandong University of Science and Technology, is wholly my own work unless referenced of acknowledge. The document has not been submitted for qualification at any other academic institute.**

**Signature:**

**Date:**

# 摘 要

随着中国炼铁工业的快速发展，高炉日益向大型化，工艺装备先进化方向发展。水温差检测系统是实时检测冷却壁上冷却管进水口、出水口的温度差的系统。该系统对高炉长寿，指导高炉操作等方面具有重大意义。本系统是为首钢京唐高炉的软水密闭循环冷却系统配套设计的。

本文开发了高精度，低功耗，无线传输的水温差检测系统。本系统主要有四大部分：温度终端采集模块，中继器模块，采集器模块，上位机组态王显示模块。开发了高精度，微功耗的温度终端采集电路。测温分辨率 0.01%，精度度高达 0.1%。设计了线性测温电桥，采用 1/6B 精度的 PT1000 铂电阻传感器，放大器的失调电压仅为 1Uv,失调电流仅为 100PA。14 位高精度 AD 转换器，非线性误差仅为 0.4LBS。为实现 3.3V 电池支持温度采集终端电路连续工作 8 年的要求，设计了工作/休眠两种状态。PCF8563 定时电路周期性的将系统从休眠状态激活，每分钟系统工作时间仅为几个毫秒，在休眠状态下，整个终端仅消耗 1.5uW 左右，工作状态仅耗能几十毫瓦。在中继器模块中，设计了电源电路，保证中继器实时供电。采集器模块中，设计了串口转网口电路，这样 PC 机可以方便快捷的利用因特网接受传输数据。上位机用组态王显示现场温度界面。整个系统采用无线传输方式，开发了 CC2500 无线收发模块，设计了无线通讯协议，用地址和信道定位无线网络节点，保证了传输的准确性和高效性。

**关键词：**水温差，CC2500，高精度，低功耗，无线传输

# ABSTRACT

With the rapid development of China ironmaking industry, the blast furnace equipment are increasingly developed to the direction.of large-scale, advanced technology .The water temperature detection system is the real-time detection cooling wall cooling pipe, water inlet of the difference between the outlet of the system. The system has great significance in the blast furnace longevity, guidance of blast furnace operation and so on . This system is designed for the Soft water closed loop cooling system of shougang blast furnace.

This paper developed a high precision, low power consumption, wireless transmission of the water temperature detection system. This system mainly have four parts: temperature terminal acquisition module, Repeaters module, terminal module, upper unit state display module.In the thesis we developed a high precision, low power consumption of the temperature terminal acquisition circuit. Temperature sensor resolution 0.01 %, the accuracy is as high as 0.1%.In the design of linear temperature measuring electric bridge the 1/6 B precision of the PT1000 platinum resistance sensor was used. So that the disorders of voltage amplifier is only 1 Uv, disorders current only 100 PA .A high precision 14 bit AD converter, nonlinear error was only 0.4 LBS. To achieve 3.3 V battery support temperature acquisition terminal for eight years of circuit requirements, the two states job/dormancy was designed. PCF8563 timing circuit periodic will activation system from dormancy state, work time only lasts several milliseconds every minute system. In dormancy state, the terminal only consume 1.5 uW or so, while working state only few mw. In Repeaters modules, the power circuit is designed to ensure real-time power supply. Terminal module, the turn WangKou circuit serial port is designed, so that the PC is easy to use the Internet to accept data transmission. Configuration king is used to display the live interface temperature. The system used the wireless transmission, the development CC2500 wireless transceiver module, the wireless communication agreement, with the address and channel positioning wireless network node, all the designs above is lead to the result that the transmission is both accuracy and efficiency

**Keywords:** water temperature difference, CC2500, high precision, low power consumption , wireless transmission

# 目 录

1 绪论 ..... 1
1.1 研究背景及意义 ..... 1
1.2 国内外研究现状 ..... 3
1.3 课题研究的主要内容 ..... 4
2 水温差高精度检测原理及总体结构设计 ..... 5
2.1 温度测量原理 ..... 5
2.2 系统总体设计 ..... 6
2.3 本章小结 ..... 9
3 温度采集终端电路硬件设计 ..... 10
3.1 温度采集终端电路概述 ..... 10
3.2 PT1000 仪用放大器电桥线性电路设计 ..... 11
3.3 AD转换电路及型号选择 ..... 20
3.4 微处理器模块电路 ..... 22
3.5 本章小结 ..... 25
4 无线传输 ..... 26
4.1 短距离无线通信技术简介 ..... 26
4.2 CC2500 无线收发模块 ..... 27
4.3 本章小结 ..... 31
5 中继器和采集器硬件电路 ..... 32
5.1 中继器硬件电路 ..... 32
5.2 采集器硬件电路 ..... 35
5.3 本章小结 ..... 38
6 系统软件设计 ..... 39
6.1 系统的整体软件设计 ..... 39

6.2 温度采集终端软件设计 ..... 40
6.3 串口通讯 ..... 40
6.4 定时休眠 ..... 57
6.5 终端模块无线发送 ..... 60
6.6 中继器接收发送程序 ..... 66
6.7 采集器程序及上位机组态王显示 ..... 68
6.8 本章小结 ..... 68
7 实验调试及仿真 ..... 69
8 结论与展望 ..... 73
致谢 ..... 74
参考文献 ..... 75
附录 ..... 78

# Contents

1 Introduction .....1

1.1 Research background and significance ..... 1

1.2 Research status from domestic and abroad ..... 3

1.3 The main content of the subject research ..... 4

2 The Water Temperature High Precision Testing Principle and General Structure Design...5

2.1 Temperature measuring principle ..... 5

2.2 System overall design ..... 6

2.3 Summary of this chapter ..... 9

3 Temperature Gathering Terminal Circuit Hardware Design .....10

3.1 Summary of the temperature gathering terminal circuit..... 10

3.2 PT1000 instrument Bridge linear amplifier circuit design ..... 11

3.3 AD transform circuit and model selection ..... 20

3.4 Microprocessor module circuit..... 22

3.5 Summary of this chapter ..... 25

4 Wireless Transmission .....26

4.1 Introduction short of wireless communication technology ..... 26

4.2 CC2500 wireless transceiver module ..... 27

4.3 Summary of this chapter ..... 31

5 Repeaters and Terminal Hardware Circuit .....32

5.1 Repeaters hardware circuit ..... 32

5.2 Terminal hardware circuit ..... 35

5.3 Summary of this chapter ..... 38

6 System Software Design .....39

6.1 Software design of the overall system..... 39

6.2 Temperature gathering terminal software design ..... 40
6.3 Serial interface communication ..... 40
6.4 Timing dormancy ..... 57
6.5 Terminal module of the wireless delivery ..... 60
6.6 Repeaters receive send program ..... 66
6.7 Terminal program, and upper unit state that show ..... 68
6.8 Summary of this chapter ..... 68
7 The Experiment and Simulation Test ..... 69
8 Conclusion and Prospect ..... 73
Acknowledgement ..... 74
Reference ..... 75
Appendix ..... 78

# 1 绪论

## 1.1 研究背景及意义

### 1.1.1 快速发展的中国炼铁工业

由于中国钢铁工业的固定资产投资大幅上涨和国内市场对钢铁产品的大量需求，从20 世纪的最后 10 年开始，中国钢铁工业保持突飞猛进的发展[1]。1995 年中国生铁产量超过了 1 亿吨[1]，2006 年创造了 4.0416 亿的生铁记录[1]，2011 年粗钢产量在 6.8 亿吨左右。

很明显，铁产量增长的主要原因是高炉数量的增长。2006 年 5 月，发改委出台了新的《钢铁产业发展政策》，政策将高炉的准入技术标准定为 1000 立方米以上，对新建大厂则要求达到 3000 立方米以上。表 1.1 为 2002 年~2007 年钢铁企业高炉座数。

表 1.1 钢铁企业高炉座数

Table1.1 The number of steel blast furnaces

| 年份 | 高炉座数/座 | | | | | | 合计 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | >3000m$^3$ | 2000 ~ 2999m$^3$ | 1000 ~ 1999 m$^3$ | 300 ~ 999m$^3$ | 100 ~ 299m$^3$ | <100 m$^3$ | |
| 2002 | 4 | 17 | 29 | 153 | 72 | 15 | 290 |
| 2004 | 6 | 18 | 39 | 231 | 82 | 9 | 395 |
| 2007 | 12 | 37 | 52 | 30 | 209 | 114 | 454 |

我国钢铁工业长期存在不同层次并存的面貌，即先进技术与落后技术并存；新进设备与落后设备并存；不同生产规模（大于 4000m3 高炉和小于 200m3 高炉）并存；不同环保水平企业（清洁生产型企业和污染严重的小型企业）并存[1]。

钢铁工业结构正在一步一步的向前进行着卓有成效的的调整。近年来我国大型高炉发展很快，并积极向现代化装备方向发展。现有高炉 1200 座左右，其中大于 1000 立方米的以上容积的高炉有 120 座。2012 年，全国 5500 立方米以上高炉一共有 3 座。大型高炉也有利于新技术的引进，这对高炉长寿、节约能耗、清洁生产等具有重要意义。

例如，首钢京唐 1、2 号高炉，有效容积为 5500 立方米，是目前国内容积最大、工艺最先进的大型高炉。高炉共应用了 68 项先进技术：自主研发、拥有自主知识产权的无料钟炉顶技术、全干法除尘技术，以及顶燃式热风炉技术；首次采用首钢自主集成的“一罐到底”技术，缩短工艺流程、降低能耗、清洁生产[2]。

### 1.1.2 高炉冷却壁水温差检测意义

高炉冷却壁水温差直接反映了炉缸冷却壁承受的热负荷状况，是衡量高炉炉缸状况是否良好的指标之一，是调整高炉冷却参数和高炉炉内操作的重要依据[3]。高炉冷却壁水温差的高精度检测系统，在**“**保证高炉生产安全、延长高炉寿命**”**方面具有许多理论和实际应用价值。

#### 1.1.2.1 在“延长高炉寿命”方面具有重大意义

冷却壁的维护对高炉的长寿起着至关重要的作用。一座大型高炉的新建或大型维修需要多达几十亿元的投资，这使得国内外对炉龄非常重视。在高炉寿命方面，我国与日本相比，我国炉龄 10 年左右，而日本高达 20 年。国内大部分高炉由于没有获得冷却壁的热负荷数据，导致冷却壁遭到破坏（例如，宝钢 3 号高炉在九十年代的 4 年内烧坏 109 根冷却壁管子），这必然会增加了维修成本，减少炉龄。

#### 1.1.2.2 在“保证高炉生产安全”方面的应用价值

炉役末期，由于设备老化存在各种安全隐患，极易发生重大生产事故。水温差在线检测系统在“保证高炉生产安全”方面有以下具体应用价值：

- 应用于冷却水管中结垢检测。冷却水往往属于硬水，容易结垢堵塞管道，使冷却壁局部受热严重，使冷却系统不能很好地工作，局部达不到理想的冷却作用。甚至破坏冷却壁减少炉龄寿命。冷却管结垢使水温差升高，即可以通过水温差系统检测冷却水管中结垢情况。
- 应用于冷却壁检漏。高炉炉龄末期, 冷却壁大量漏水, 会导致产量下降、焦比升高、高炉技术经济指标变差。此外, 它还是导致炉冷、炉缸冻结的一个主要根源。多年来, 冷却壁漏水一直困扰着每一个高炉操作者。炉况必须要长期稳定顺行。尽管高炉采用洗炉剂洗炉会损坏高炉内衬, 但对炉龄末期, 尤其是漏水严重的高炉,如果不定期地采用洗炉剂洗炉, 炉墙势必结厚, 操作指标和技术经济指标就要下降。
- 应用于炉壁结垢和渣皮脱落分析。 冷却壁越冷，渣皮越厚，冷却壁过热，形不成渣皮。水温差能反应渣皮厚度，调节冷却系统。可以通过水温差变化来确定其结垢部位。
- 判断煤气流的分布等。 煤气流增大会导致相应的冷却壁温度升高。

1.1.2.3 解决“高炉使用的重要长寿技术与监测技术不相匹配”问题

引入高炉软水密闭循环系统有利于高炉的长寿，与常规冷去系统相比，它具有节水、节能、稳定、可靠的特点。之前，仅高炉炉身采用软水系统，现在炉缸、炉底和风口也有采用软水密闭循环系统的趋势。但是， 国内安装了先进的冷却工艺的高炉大多没有先进的水温差( 热流强度) 在线检测系统, 而且，密闭循环冷却系统由于系统不是开路，水温检测有一定的难度，无法用人工检测方法。如湘钢 4 号，首钢京唐高炉本体炉底、冷却壁、风口全部采用纯水密闭循环冷却系统，却没有水温检测系统。这样高炉关键冷却壁会检测不到, 存在安全隐患。因此, 高炉极其有必要同时配置先进冷却工艺和配套先进的水温检测系统, 只有配套使用才能取得最好的冷却效果。

## 1.2 国内外研究现状

水温差检测一般采用人工方法测量，一是测量误差大，二是人工巡检不及时，往往滞后，为高炉生产带来很大隐患。

3BF 冷却壁是纯水密闭循环的，不能采用人工方法，而且环境干扰大，温度采集点多，不易测量。国外采用铂热电阻，红外线，数字温度计测温度，用超声波/电磁流量计测流量(误差 3%以内)。

2006 年，柳钢新 1 号高炉和唐钢炼钢厂 2560$m^3$ 高炉，均采用铂热电阻和精密电阻组成桥式电路传感器的原理测量温度。

2008 年初在柳钢新 1 号高炉推广使用由嘉逸科工贸有限公司开发的“ 高炉冷却壁热负荷与温度数字化在线连续监测系统”。柳钢新 1 号高炉进水温度 30 ~ 40 ℃ ， 回水温度 40 ~ 50 ℃ ， 共设计有 154 台温度传感器, 全部采用 JY-9003 数字化温度传感器。JY-9003 温度传感器采用进口的 pt100 铂电阻, 高精度, 高稳定性, 直接数字转换电路。测量精度 0.05℃, 400℃ 极限漂移量 0.01℃, 克服了 PN 结测温有一定漂移的问题, 是炉缸高精度测温的最佳选择, 并采用特种封装技术, 隔绝环境温度干扰。

目前市场上也有一些相关的研发产品。如，中科创新园自主研制、开发的“高炉冷却水温度数字化智能系统”。系统采用美国 Echelon 公司的 LONWORKS 现场总线技术，系统中的测温传感器采用美国进口的数字温度传感器。系统整体性能：

温度精度： 0.05℃（0℃～+60℃）

测量分辨率： 0.0325℃

测量范围： -55℃～+125℃

通讯总线：Lonworks 现场总线

通讯距离：1800 米

采样速度：80 点/秒

数据开放：支持标准 OPC 数据交换技术

## 1.3 课题研究的主要内容

为采用“纯水密闭循环冷却系统”的首钢京唐 1，2 号高炉设计“高炉冷却壁水温差高精度在线检测系统”。本系统对于高炉炉墙实时维护和分析高炉冶炼过程的炉况具有重要作用。通过历史数据能够准确反映炉墙温度、温差和热流的变化情况，摈弃传统的手工测量，减少工人工作量和手工测量带来的误差和不准确性。还能通过测量结果，根据炉墙状况实时调整冷却水量，从而减少冷却水消耗，降低生产成本。更重要的是通过高炉冷却壁的水温检测及热流量计算，对高炉生产操作能起指导作用。

主要技术指标：

（1）实时性：对近一百个进水口温度和出水口温度进行实时性在线测量；

（2）高精度（0.1%）：水温测温范围为 10℃ ~ 85℃，分辨率为 0.01℃，精确到 0.1℃；

（3）无线传输：应用无线传感器网络检测技术，将采集到的温度数据传输到上位机；

（4）低功耗：整个系统 3.3V 单电源供电，超低功耗。

（5）利用组态软件显示：入水温度、出水温度、水温差的实时数据和温度场曲线图的实时采集、显示、存储；历史记录查询；各种报警值人工设定；温度、高低实时报警等。

创新点：高精度，低功耗，无线传输

# 2 水温差高精度检测原理及总体结构设计

## 2.1 温度测量原理

目前国内外通用的温度传感器及测温仪如下[4]：

(1)膨胀式温度传感器：人们很早就发现物体存在热胀冷缩现象。根据这一原理制成了玻璃液体温度计和双金属温度计。

(2)热电式温度传感器：包含热电偶测温和热电阻测温。热电偶适用于大范围精度不高的测量，热电阻适用于小范围，精度要求高的场合。

热电偶测温是基于热电效应。同一金属，当两端温度不同时，同一金属的两端会有电动势；同一温度，不同金属相互接触，接触点处也会产生电动势。此方法通常应用于-200 ~ 1300℃的测量，甚至 2800 ~ 4K℃的测量。

热电阻测温是基于应变效应或压阻效应。导体或半导体随温度发生阻值变化。此方法通常应用于-200 ~ 850℃的测量，甚至高达 1000℃的测量。标准铂电阻温度计的精确度足够高，作为国际温标中 961.78℃以下内插用标准温度计。

(3)热辐射式温度传感器：物体内带电粒子阶跃产生向外辐射能量的电磁波。物体的辐射亮度正比于物体的温度 $T^4$。此方法测温上限可达 3000℃。

(4)光纤温度传感器：19 世纪七十年代年开始兴起，各方面具有很好的特性，有着广泛的应用前景。此方法的测量原理是光纤内光的强度、相位、频率等随着光纤所测的物理量(如温度、压力等)变化而变化。

(5)石英测温：石英晶体震荡频率随温度变化而变化。这种方法测得数据稳定，灵敏度高达 0.001℃以上。但温度变化时，石英需要反应约 1s 的时间来发生频率的变化，所以只适应于对速度要求不高的场合。

根据测量对象的特点，水温差测量范围为 10℃-85℃，测量精度 0.1%。分析可知:

红外测温法精度较低，通常分辨率达到 0.1 摄氏度，精度为 1 摄氏度；曾试图采用石英晶体温度传感器，试图提高其分辨率和测量精度。虽然理论上石英晶体温度传感器稳定灵敏度高达 0.001℃以上，但它的理论值和实际值相差太远，一致性差，还要配专用的变送器，成本很高，使用维护极不方便，这项技术离实际工业应用还有一定距离。对

于接触式光纤高温计，虽然耐腐蚀，测温范围广，精度高。但目前国内很难生产出一致性好的 50cm 长的蓝宝石光纤探头，还需大量依赖国外进口，所以光纤测量系统价格太高，影响了它的市场推广发展。

国际温标中 961.78℃以下内插用标准温度计就是以高精度，线性好的标准铂电阻温度计为标准的。所以可以选用 PT1000 温度传感器。由表 2.1 可知，选用 1/3 等级的 PT1000 即可满足设计要求。

表 2.1 PT1000 等级和精度

Table2.1 The Level and precision of PT1000

| PT1000 等级 | 精度（℃） |
|---|---|
| A | +/-(0.15+0.002t) |
| B | +/-(0.3+0.005t) |
| 1/3B | +/-(0.1+0.0017t) |
| 1/6B | +/-(0.05+0.00085t) |
| 1/10B | +/-(0.03+0.0017t) |

## 2.2 系统总体设计

### 2.2.1 水温差检测系统简介

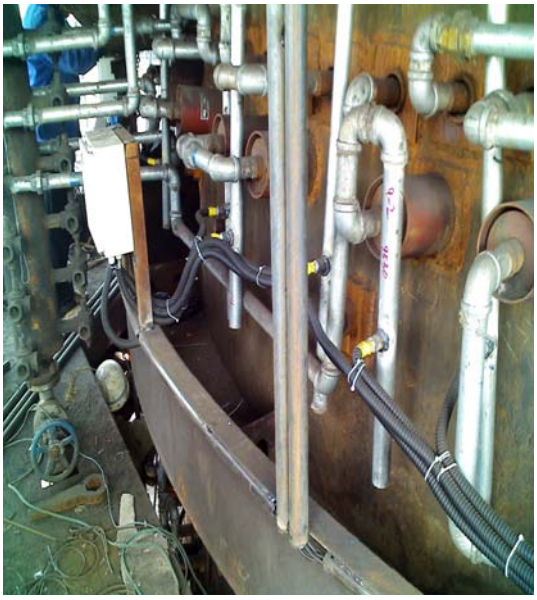


图 2.1 高炉冷却壁

Fig. 2.1 The cooling wall of blast furnace

图 2.2 冷却壁剖面

Fig. 2.2 The section of cooling wall

高炉水温检测系统，是国内外最新检测系统，应用前景广泛。目前国内高炉上还未推广水温检测系统，市场上的水温检测系统极少而且价格昂贵。首钢京唐高炉炉体冷却系统采用铸铁—铜冷却壁及砖壁合一的镶砖冷却壁结合的炉体全冷却结构。在炉缸“象脚状”侵蚀区和铁口区采用铜冷却壁。高炉炉体采用全冷却壁结构，炉腹、炉腰、炉身下部采用 4 段高效铜冷却壁，炉身中上部采用 7 段镶砖铸铁冷却壁。炉喉缸砖下不设 1 段 C 型水冷壁。炉腹至炉身为冷却壁与砖衬一体化薄壁结构，冷却壁镶砖热面直接喷涂耐火材料。高炉本体炉底、冷却壁、风口全部采用软水密闭循环系统。首钢京唐高炉需要引进与冷却系统同步配套的水温检测系统。从而使先进的冷却系统充分发挥延长高炉寿命的作用，并且有利于实时掌握炉况便于指导高炉生产操作。

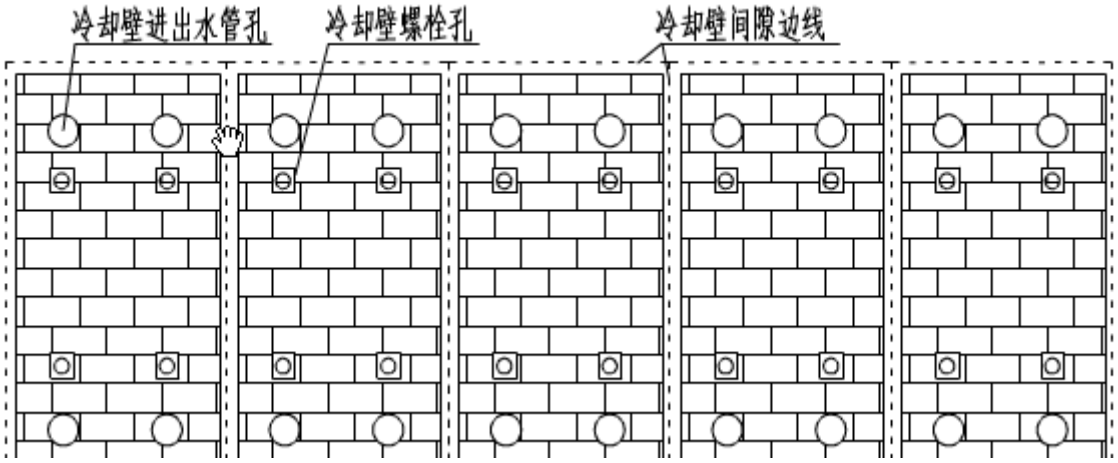



图 2.3 冷却壁冷安装示意图

Fig. 2.3 The installation drawing of blast furnace cooling wall

由图2.1，图2.2，图2.3可知，冷却壁进出水管口多达80多个，对应进出口水温差仅为0.4℃左右。如果测量精确不高，就可能造成进出水温度示值的逆转，令温度示值毫无价值。高炉环境潮湿恶劣，电磁干扰严重，还必须采取各种抗干扰措施，保证众多测量温度终端的精度。

### 2.2.2 水温差检测系统总体设计方案

本系统是以冷却壁冷却管进出口水温为测量对象。系统有休眠和工作两种基本状态。系统每分钟被唤醒一次，采集一次温度值，即系统大部分时间处于休眠节能状态。整个系统采用合理的测量方法，选用精密芯片器件，合理设计硬件和软件，达到高精度，低功耗，无线传输的要求。整个检测系统的结构示意图如图 2.4 所示。

整个系统温度传感器数据采集终端，中继器，采集器，工业计算机，工控中心五部

分组成。开始时，控制温度传感器数据采集终端（数量多达七八十个）进入工作状态，进行数据采集，采集终端将采集到的数据进行数据包微处理后，通过无线传输的方式将处理后的数据传给中继器，采集终端在接收到中继器的接受响应后，或在规定的时间内仍未收到中继器的接受响应信号，即进入休眠状态，这样采集终端便实现节能低功耗的要求。中继器（数量为四个）需要不断地感应是否有终端发送数据，一旦接收到的终端数据后给终端发送接收响应信号，同时将数据通过无线方式传送给采集器，与终端与中继器传输方式类似，采集器和中继器之间的传输方式的也有一定的应答机制。采集器成功接收数据后，通过串口转网口模块将数据数据传输给工业计算机，在工业计算机上进行显示相关数据，图像，曲线。并以 OPC 协议方式实现组态王处理后的信息与工控中心数据共享。

系统中电源供电情况：终端采用 3.3v 电池供电；中继器，采集器采用充电电源供电。系统采用无线传输方式，省去有线布线的麻烦和不便，更有利于系统的拓展升级。系统硬件上均采用高精密的元器件，保证系统的精确性。整个系统是低功耗，高精度，无线传出三大特点。

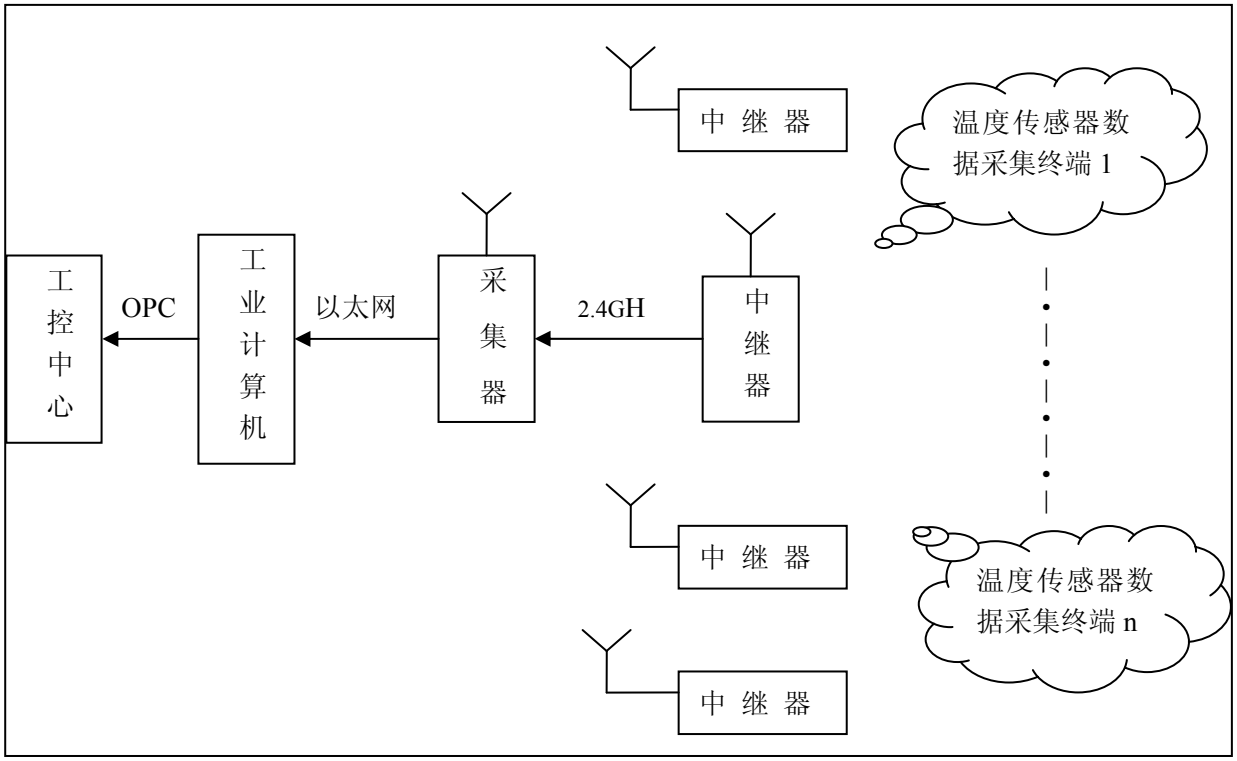



图 2.4 系统结构示意图

Fig. 2.4 System structure schematic drawing

## 2.3 本章小结

1） 本章介绍了当今各种温度测量的原理方法，通过对众多测温方法的分析比较，最后选择用 PT1000 的测温原理来实现本系统中水温差的温度测量。

2） 本章介绍了测量对象冷却壁的特点和结构。

3） 本章设计了测量系统的总体结构：主要由采集终端，中继器，采集器组成，提出了无线传输方式进行数据传输。

# 3 温度采集终端电路硬件设计

## 3.1 温度采集终端电路概述

温度采集终端电路主要由 PT1000 温度传感器组成的惠更斯电桥电路，放大电路，AD 转换电路，微处理器，无线收发模块五大部分组成。为实现系统高精度，低功耗的要求，所选用的器件必须符合高精度，低漂移，强抗干扰，单电源（3.3V）等要求。温度采集终端电路框图如图 3.1 所示：

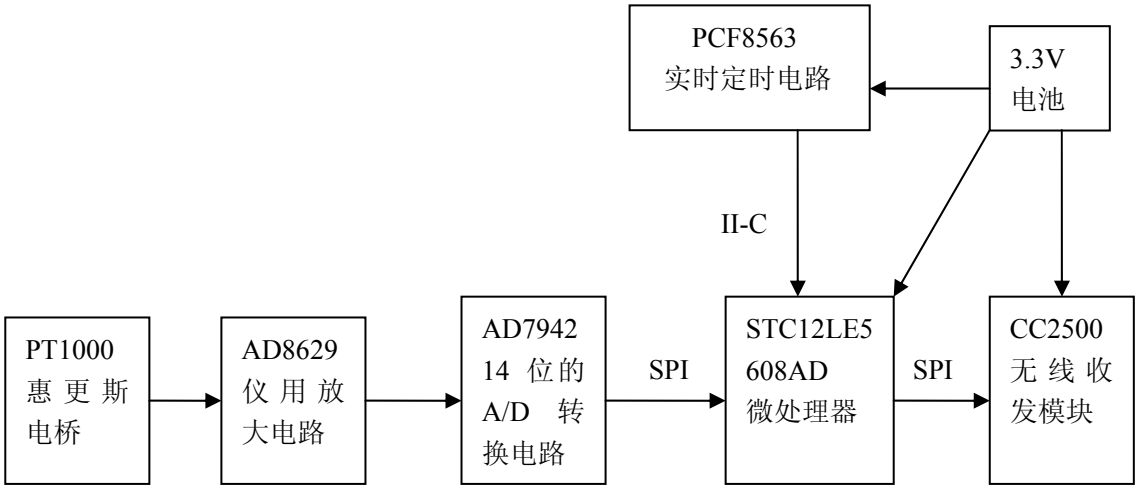



图 3.1 温度采集终端电路框图

Fig. 3.1 The temperature gathering terminal circuit diagram

温度采集终端电路具体工作流程：温度采集终端电路有两种状态，工作状态和休眠状态。定时电路每分钟产生一次中断，将系统从休眠状态唤醒到工作状态。微处理器唤醒后，立刻控制电源给惠更斯电桥、仪用放大电路、A/D 转换电路供电；电桥采集温度经放大电路放大和转换电路变成数字电路后，将数值通过 SPI 接口传给微处理器。微处理器将数据做初步处理后，将无线收发模块从休眠状态唤醒，并将初步处理的数据通过 SPI 口传给无线收发模块。无线收发模块数据发送出去。最后，惠更斯电桥、仪用放大电路、A/D 转换电路断电，微处理器，无线收发模块进入休眠状态。每分钟系统工作约几毫秒左右。

## 3.2 PT1000 仪用放大器电桥线性电路设计

PT1000 传感器采用仪用放大器电桥原理测量。为了提高系统测量的精确性，就不能忽视两个重要影响因素：电桥的非线性误差和放大器失调电压及漂移。

在电桥电路中，电桥电压的变化值与桥臂上测温电阻的变化值并不成线性，根据相关公式可得，测温电阻变化越大，非线性越严重。另一方面，仪用放大器自身的失调电压和漂移也会混合到最终的电桥电压输出上，成为信息的干扰成分，影响系统的精度。

PT1000 仪用放大器电桥线性电路，以电桥非线性和放大器失调电压及温漂为主要误差对象，设计了放大器反馈型有源线性电桥，并选用了低失调电压，低温漂，高精度的仪用放大器。

### 3.2.1 惠更斯电桥检测原理及非线性分析

以四个桥臂的电阻都为 R 的全等情况讨论，当测温电阻阻值由 R 随温度上升增加 ΔR 时,若直接测量电桥电压，则电路如图 3.2 所示。

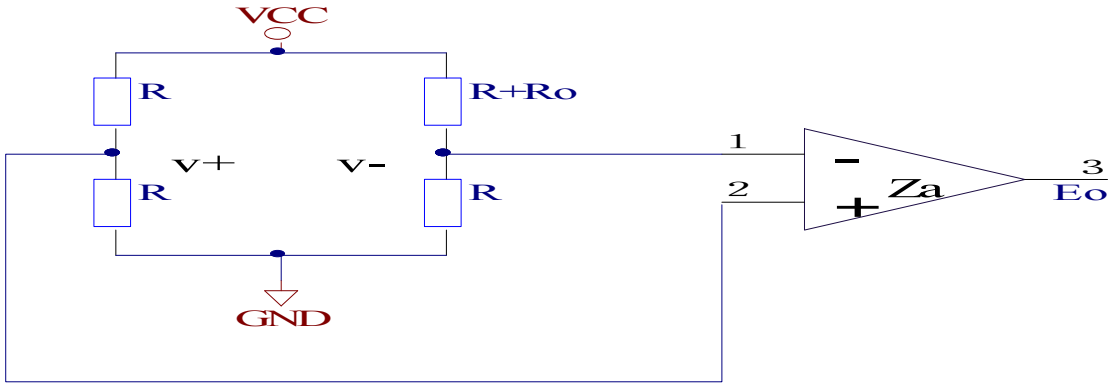



图 3.2 直接电桥检测图

Fig. 3.2 Direct bridge detection drawing

其中，仪用放大器的放大倍数为 A，放大器的失调电压为 V，电桥激励电压为 $V_{OS}$，忽略放大器的输入电流，则得：

$$E_o = \frac{A\,V\,(\Delta R/R)}{4(1+\Delta R/2R)} - A\,V_{os}, \tag{3.1}$$

由式(3.1)可见,分母中的 ΔR 导致电桥电压与测温电阻值变化不成线性关系。当测温阻值变换较小时,也就是说当 ΔR 远远的小于 2R 时,式(3.1)可以近似化简为：

$$E_o = \frac{A \cdot V \cdot \Delta R}{4R}\left(1 - \frac{\Delta R}{2R}\right) - A V_{os}, \tag{3.2}$$

从式(3.2)可以看出, ΔR/2R 的存在使 E0 与 Δ R 存在非线性关系，而且可以看出 ΔR/2R 越小造成的线性误差越小。另一方面 A 越大，失调电压对结果不准确性的的影响越大。因此，必须减少或消除电桥的非线性误差和选择低失调低温漂的仪用放大器。

### 3.2.2 线性电桥电路设计方案比较

改进电桥电路非线性方法有以下几种：

方法一：增加 R 的初始电阻值

这种方法虽然能降低非线性，但同时会降低桥路的灵敏度。

方法二：恒流源法

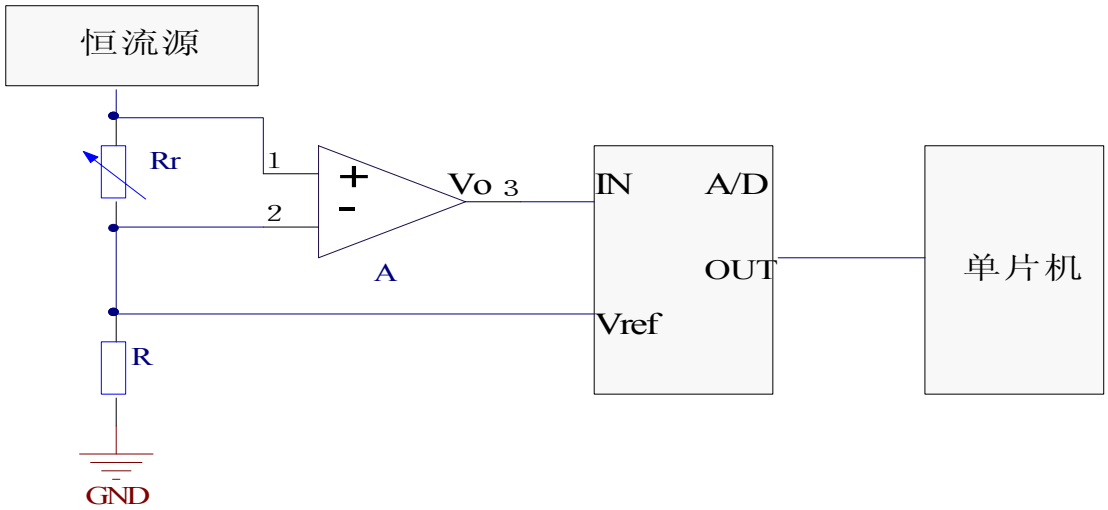



图 3.3 恒流式测温电路图

Fig. 3.3 Constant current source temperature measuring circuit

$$\Delta V = IR_T \tag{3.3}$$

$$V_{REF} = IR \tag{3.4}$$

由于采用了恒流源和取样电阻 R 为 A/D 转换器提供参考电压 VREF，此系统中，所测热敏电阻电压值变化构与热敏电阻值变化成线性关系，这样就消除了由于恒流源漂移给系统带来的误差。虽然恒流源方法消除了电桥非线性，但恒流源价格较贵，而且与本系统使用的是 3.3V 电池供电的理念不符。

方法三：精密稳压器法

ALC431 电路符号如图 3.4 所示，它是一种类似稳压二极管的器件, 只不过稳定电压

（A，K 之间电压）可变。其中 R 为控制端，当控制端的电压确定之后，K 和 A 端之间就像一支普通的稳压管一样，不同的是性能十分优良，且该稳压值（A，K 之间电压）随 R 端的电压变动。

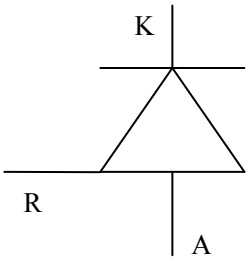



图 3.4 ALC431 符号

Fig. 3.4 ALC431 symbol

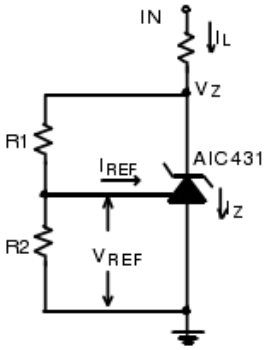



图 3.5 ALC431 典型应用电路

Fig. 3.5 Typical application circuit of ALC431

ALC431 的典型应用电路如图 3.5 所示。它内部基准电压 VREF 为 2.495V（±0.5%）不变， $V_Z$ 电压值由不变的 VREF 基准电压值和与 ALC431 连接的外部电阻 R1, R2 阻值决定。它们的大小关系为：

$$V_Z=(1+R1/R2)V_{REF} \tag{3.5}$$

ALC431 输出的电流大，自耗电极少，动态电阻小，输出噪声少，接两只电阻的分压就可以调整稳定电压，十分方便，特别适宜装置高的稳压电源。ALC431 在无非线性误差的电路中的应用如图 3.6 所示。一旦传感器的阻值随水温发生变化时，ALC431 的 A、K 端的稳定电压 U 也会依据传感器阻值变化的规律而变动。此时若将这个变动的电压 U 作为供电电压加到不平衡电桥上，从而就能使电桥的非线性特性得到极大改善。

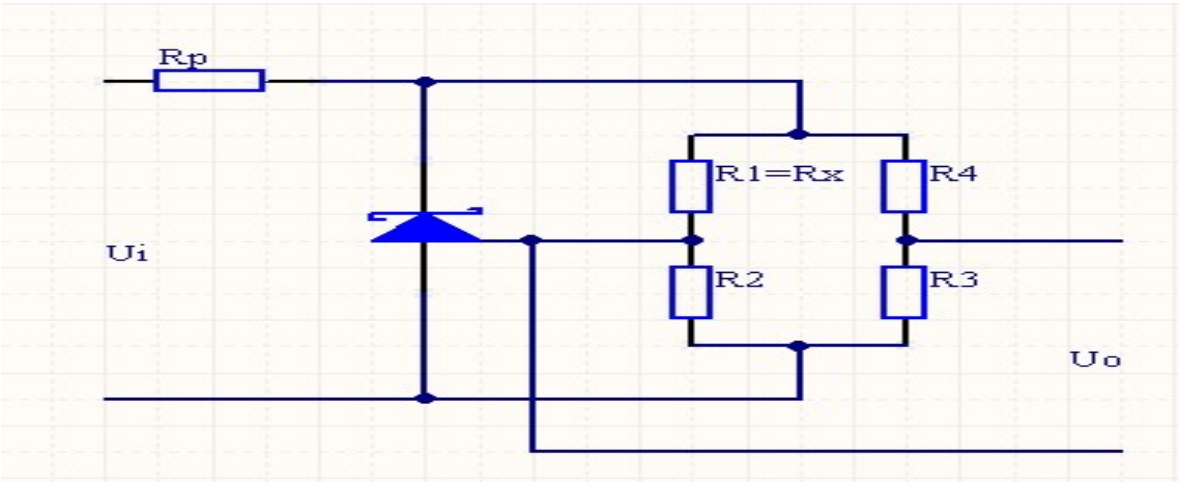



图 3.6 无非线性误差的电路

Fig. 3.6 Nonlinear error circuit

令 R1=RX=R+△R, R2=nR, 则

$$U_O = U \frac{R1R3 - R2R4}{(R1 + R2)(R3 + R4)} \tag{3.6}$$

将式（3.5）代入式（3.1），整理可得

$$U_O = \frac{U_{REF}}{n+1} \bullet \frac{\Delta R}{R} \tag{3.7}$$

可以看出引起电桥输出非线性误差的出现在式（3.1）上的分母中含有△R 的一项已消失，不平衡电桥的输出电压 $U_O$ 仅与△R 成线性关系。从理论上讲只要 ALC431 内部放大器的增益足够大时这种方法就能完全消除电桥的非线性误差。电桥的不平衡输出电压 $U_O$ 将严格的与传感器阻值变化量△R 成线性关系。

这种精密稳压器法，可行性很强。但 ALC431 基准电压精确度为 0.5%，与系统要求的 0.1%精确度相比还有一定的差距。而且 ALC431 内部放大器的增益为有限制，还存在极小的非线性误差。

方法四：放大器反馈控制消除非线性方法

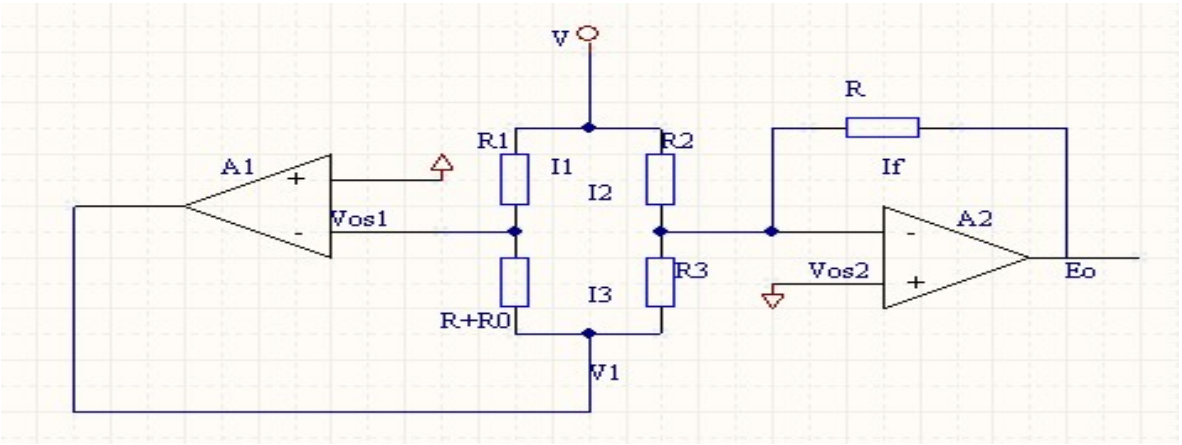



图 3.7 放大器反馈控制线性化电路

Fig.3.7 Amplifier feedback control linear circuit

当电桥臂上的测量电阻值增大或减小时，放大器 A1 的输出也放生相应变化，如传感电阻变大，A1 负输入端变大，输出变小，产生一个下拉 V1 电压的作用。从而导致 I3 电流变大，IF 值相应增大补偿反馈 I3 的变化。最终导致 E0 电压值随着发生变化。最终测量电阻的变化现行的反映在了输出电压 E0 上。

$$E_O = \frac{A}{2}\left[\frac{V\Delta R}{R}\right] + A(V_{OS2} - V_{OS1}) + V_{OS2} \tag{3.8}$$

式中 $A = 2R_F / R$

由上述分析可知，该电路简单易行。注意到两放大器的温漂和失调电压是相互抵消

的，所以选用双通道的放大器会产生很好的消除温漂和失调电压的效果。

### 3.2.3 PT1000 仪用放大器电桥线性硬件电路

方法四采用的是双极性电源，而温度采集终端电路是单电源 3.3V，所以参考方法四改进了反馈性桥式电路如图 3.8 所示。

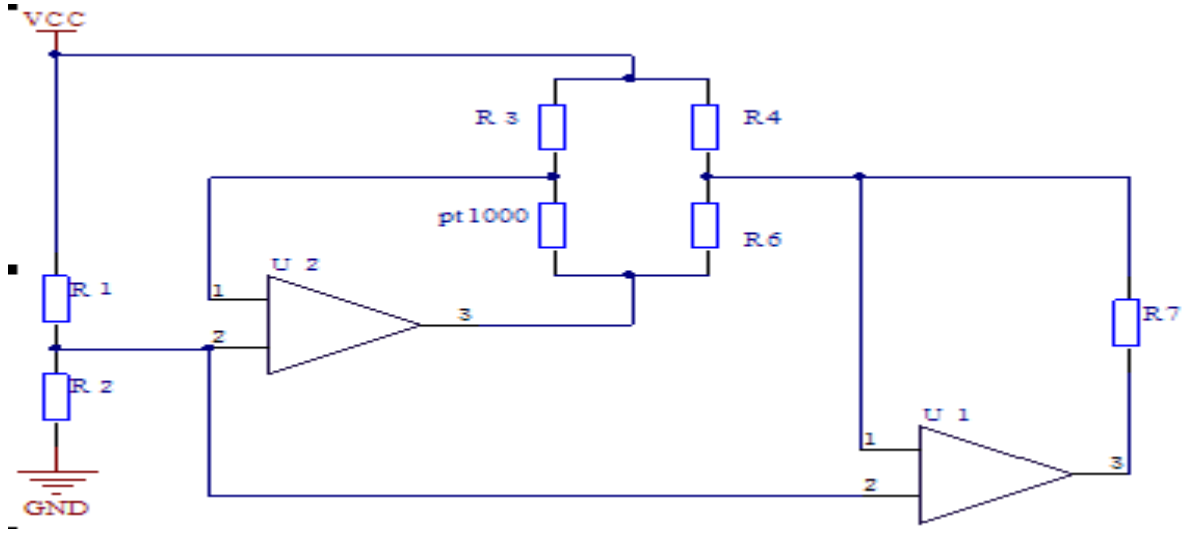



图 3.8 **P**T1000 仪用放大器电桥线性电路原理图

Fig.3.8 PT1000 instrument amplifier bridge with linear circuit principle diagram

如图 3.8 所示，线性电路的工作原理如下。两放大器的正输入端电压值被钳位在恒定电压值 $U_{REF}$，$U_{REF}$=R2/(R1+R2)；又因为放大器的虚短、虚断特性，VA=VB=$V_{REF}$，所以电桥 R3，R4，PT1000 上电流 I 不变。当 PT1000 由于温度升高而阻值升高△R 时，PT1000 上压降增大，VC 值相应降低，△VC=I×△R。VC 值的降低使 R6 上的压降增大△VC，R6 上电流增大$\triangle I_6$=△VC/R6。 R4 上电流不变，所以 R6 上增大的$\triangle I_6$ 电流完全由 R7 支路补给。可知，△U=$\triangle I_6$×R7。可知，△U 的表达式为

$$\Delta U = \frac{I \bullet \Delta R}{R6} \bullet R7 \tag{3.9}$$

#### 3.2.3.1 电桥电阻阻值计算及选型

PT1000 在 10 摄氏度时电阻值为 1039.025 欧姆，在 90℃时阻值为 1347.069 欧姆。即在水温测量范围（10℃到 90℃）内，PT1000 电阻值变化了△R=308.044 欧姆。为保证 PT1000 测温的准确性，通过 PT1000 温度传感器的电流不宜大于 I=0.5mA，所以在水温测量范围内，惠更斯电桥输出电压变化范围为：

$$U_{01} = I \times \Delta R \tag{3.10}$$

计算可得，$U_{O1}$ 为 154.022mV。已知电源电压为 3.3V，所以放大电路放大系数为 20，即可将惠更斯电桥输出的电压 $U_{O1}$ 放大到 U=A×$U_{O1}$=20×154.022mV=3080.44。

$$A = R7/R6 \tag{3.11}$$

由 I=0.5mA，电源 3.3V，PT1000，可知 R3=3.3V/0.5 mA-1000Ω= 5.6KΩ。所以可选择 R3=5KΩ，$V_{REF}$=0.8V; R1/R2=3，可选 R1=3KΩ，R2=1 KΩ；由式(3. 11)得，可选 R7=20K。

由于测温系统要求达到 0. 1%的测量精度，所以，电桥中的电阻精度要至少要达到 0. 1%的精度。本系统选用 AR 系列的高精密电阻，完全可以满足系统测量精度。精密电阻的相关参数如表 3. 1。

表 3.1 AR 系列的高精密电阻说明

Table 3.1 AR series of high precise resistance instructions

| Item / Type | Power Rating at 70°C | Operating Temp. Range | Max. Operating Voltage | Max. Overload Voltage | Resistance Range ±0.01% | Resistance Range ±0.05% | Resistance Range ±0.1% | TCR (PPM/°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| AR02 (0402) | 1/16W | -55 ~ +155°C | 25V | 50V | 49.9Ω - 5KΩ | | | ±5 |
| | | | | | 49.9Ω - 12KΩ | | | ±10 |
| | | | | | 49.9Ω - 12KΩ | | 49.9Ω - 70KΩ | ±15 |
| AR03 (0603) | 1/16W | -55 ~ +155°C | 50V | 100V | 24.9Ω - 15KΩ | | | ±5 |
| | | | | | 24.9Ω - 100KΩ | 4.7Ω - 332KΩ | | ±10<br>±15 |
| AR05 (0805) | 1/10W | -55 ~ +155°C | 100V | 200V | 24.9Ω - 30KΩ | | | ±5 |
| | | | | | 24.9Ω - 200KΩ | 4.7Ω - 511KΩ | | ±10<br>±15 |
| AR06 (1206) | 1/8W | -55 ~ +155°C | 150V | 300V | 24.9Ω - 50KΩ | | | ±5 |
| | | | | | 24.9Ω - 500KΩ | 4.7Ω - 1MΩ | | ±10<br>±15 |
| AR13 (1210) | 1/5W | -55 ~ +155°C | 150V | 300V | 24.9Ω - 50KΩ | | | ±5 |
| | | | | | 24.9Ω - 500KΩ | 4.7Ω - 1MΩ | | ±10<br>±15 |
| AR10 (2010) | 1/4W | -55 ~ +155°C | 150V | 300V | 24.9Ω - 100KΩ | | | ±5 |
| | | | | | 24.9Ω - 500KΩ | 4.7Ω - 1MΩ | | ±10<br>±15 |
| AR12 (2512) | 1/2W | -55 ~ +155°C | 150V | 300V | 24.9Ω - 100KΩ | | | ±5 |
| | | | | | 24.9Ω - 500KΩ | 4.7Ω - 1MΩ | | ±10<br>±15 |

### 3.2.3.2 仪用放大器选型及放大器电桥线性硬件电路

仪用放大器选型标准：电桥直接输出的不平衡电压信号很小，此系统中放大系数要大三四十，放大器的失调电压和漂移会影响输出电桥电压的准确性。选用的放大器必须

为低失调电压，低温漂。供电电源为 3.3V, 为了将电桥输出的小信号尽量放大，以提高系统精确度，选用的放大器必须为 rail-to-rail 型，这种类型的放大器额输出电压几乎能达到供电电压的值。选用的放大器能在 0 ~ 100 摄氏度，3.3V 单电源下正常工作。查资料可得，低失调，低温漂的高精度仪用放大器如表 3.2 所示：

表 3.2 低失调，低温漂仪用放大器

Table 3.2 Low disorders, low temperature drift with instrument amplifier

| 型号 | 最大<br>失调电压<br>(uV) | 最大<br>温漂<br>（uV/℃） | 电源电压<br>(V) | 最大<br>输出电压<br>（V） |
|---|---|---|---|---|
| TLC2652AL | 1 | 0.03 | +5 (-5)；$V_+$-$V_-$:5～16 | +4.8（-4.8） |
| ICL7652/ ICL7650 | 5 | 0.05 | +5 (-5)；$V_+$-$V_-$:5～16 | +4.95（-4.95） |
| AD8551/AD8571 | 5 | 0.04 | 3 ～ 5 | 2.9 ～ 4.9 |
| OPA333 | 10 | 0.05 | 1.8～5.5 | — — |

上述精密仪用放大器由于工作电源等原因应用线性电桥放大电路的设计并不理想。根据查找大量资料可知，符合单电源，rail-to-rail 型，低失调，低温漂的高精度仪用放大器不超过四种。能在市场上能买到的只有 AD8628 和 AD8629。AD8628 是单通道放大器，而且 AD8629 是双通道放大器, 非常适合应用于电桥放大电路的设计方案。AD8629 是零漂移，低失调电压，低噪声，单电源，低功耗 rail-to-rail 型仪用放大器。AD8629 管脚图如图 3.9 所示。

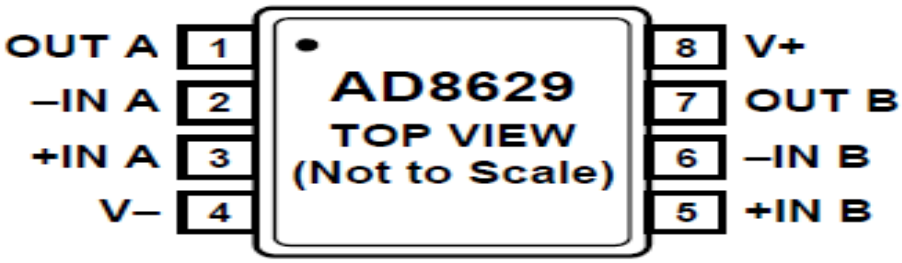



图 3.9 AD8629 管脚图 MSOP

Fig. 3.9 AD8629 tube feet MSOP figure

AD8629 优良性能如下：

- 自动调零放大器，低噪声；
- 低偏置电压：1uV；
- 输入偏置电压：0.002 μV/°C；
- 轨到轨的输入和输出；
- 2.7V 到 5V 单电源；
- 高增益 CMRR and PSRR：120 dB；
- 低输入偏置电流：最大 100pA；
- 低工作电流：1.0 mA ；
- 过载恢复时间：10 μs ；
- 双通道放大器；
- 无外部器件的要求；

AD8629 具体参数如表 3.3 所示。

表 3.3 AD8629 参数表

Table 3.3 AD8629 parameter table

$V_S$ = 2.7 V, $V_{CM}$ = 1.35 V, $V_O$ = 1.4 V, $T_A$ = 25°C, unless otherwise noted.

| Parameter | Symbol | Conditions | Min | Typ | Max | Unit |
|---|---|---|---|---|---|---|
| INPUT CHARACTERISTICS | | | | | | |
| Offset Voltage | $V_{OS}$ | | | 1 | 5 | μV |
| | | –40°C ≤ $T_A$ ≤ +125°C | | | 10 | μV |
| Input Bias Current | $I_B$ | | | 30 | 100 | pA |
| | | –40°C ≤ $T_A$ ≤ +125°C | | 1.0 | 1.5 | nA |
| Input Offset Current | $I_{OS}$ | | | 50 | 200 | pA |
| | | –40°C ≤ $T_A$ ≤ +125°C | | | 250 | pA |
| Input Voltage Range | | | 0 | | 5 | V |
| Common-Mode Rejection Ratio | CMRR | $V_{CM}$ = 0 V to 2.7 V | 115 | 130 | | dB |
| | | –40°C ≤ $T_A$ ≤ +125°C | 110 | 120 | | dB |
| Large Signal Voltage Gain | $A_{VO}$ | $R_L$ = 10 kΩ, $V_O$ = 0.3 V to 2.4 V | 110 | 140 | | dB |
| | | –40°C ≤ $T_A$ ≤ +125°C | 105 | 130 | | dB |
| Offset Voltage Drift | $\Delta V_{OS}/\Delta T$ | –40°C ≤ $T_A$ ≤ +125°C | | 0.002 | 0.02 | μV/°C |
| OUTPUT CHARACTERISTICS | | | | | | |
| Output Voltage High | $V_{OH}$ | $R_L$ = 100 kΩ to ground | 2.68 | 2.695 | | V |
| | | –40°C ≤ $T_A$ ≤ +125°C | 2.68 | 2.695 | | V |
| | | $R_L$ = 10 kΩ to ground | 2.67 | 2.68 | | V |
| | | –40°C ≤ $T_A$ ≤ +125°C | 2.67 | 2.675 | | V |
| Output Voltage Low | $V_{OL}$ | $R_L$ = 100 kΩ to V+ | | 1 | 5 | mV |
| | | –40°C ≤ $T_A$ ≤ +125°C | | 2 | 5 | mV |
| | | $R_L$ = 10 kΩ to V+ | | 10 | 20 | mV |
| | | –40°C ≤ $T_A$ ≤ +125°C | | 15 | 20 | mV |
| Short-Circuit Limit | $I_{SC}$ | | ±10 | ±15 | | mA |
| | | –40°C ≤ $T_A$ ≤ +125°C | | ±10 | | mA |
| Output Current | $I_O$ | | | ±10 | | mA |
| | | –40°C ≤ $T_A$ ≤ +125°C | | ±5 | | mA |
| POWER SUPPLY | | | | | | |
| Power Supply Rejection Ratio | PSRR | $V_S$ = 2.7 V to 5.5 V | | | | |
| | | –40°C ≤ $T_A$ ≤ +125°C | 115 | 130 | | dB |
| Supply Current/Amplifier | $I_{SY}$ | $V_O$ = 0 V | | 0.75 | 1.0 | mA |
| | | –40°C ≤ $T_A$ ≤ +125°C | | 0.9 | 1.2 | mA |
| INPUT CAPACITANCE | | | | | | |
| Differential | $C_{IN}$ | | | 1.5 | | pF |
| Common-Mode | | | | 10 | | pF |
| DYNAMIC PERFORMANCE | | | | | | |
| Slew Rate | SR | $R_L$ = 10 kΩ | | 1 | | V/μs |
| Overload Recovery Time | | | | 0.05 | | ms |
| Gain Bandwidth Product | GBP | | | 2 | | MHz |
| NOISE PERFORMANCE | | | | | | |
| Voltage Noise | $e_n$ p-p | 0.1 Hz to 10 Hz | | 0.5 | | μV p-p |
| Voltage Noise Density | $e_n$ | f = 1 kHz | | 22 | | nV/√Hz |
| Current Noise Density | $i_n$ | f = 10 Hz | | 5 | | fA/√Hz |

有上述可见，水温检测电路中选用仪用放大器 AD8629 是非常理想的。图 3.10 为由 AD8629 构成的电桥放大线性电路。

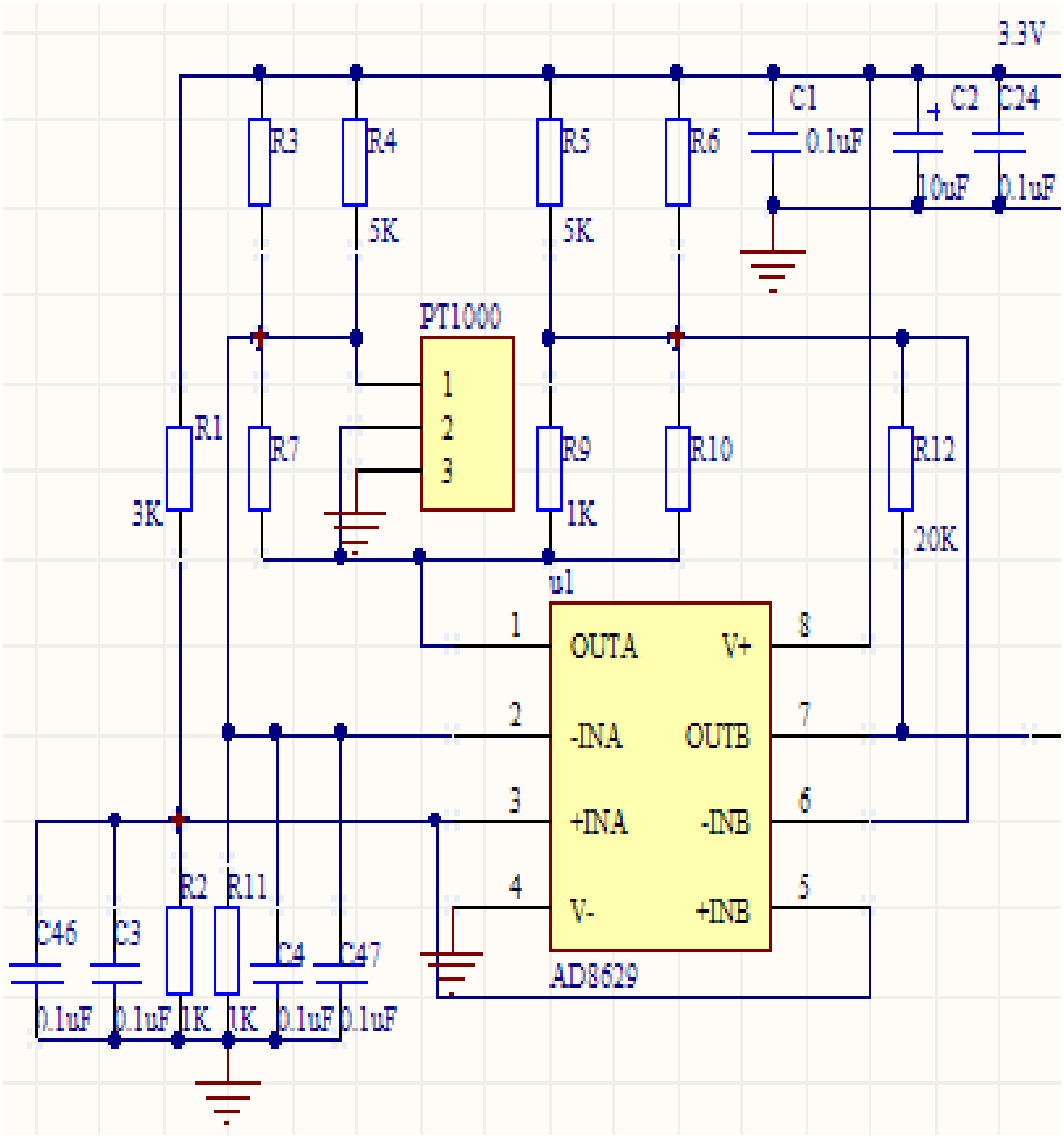



图 3.10 PT1000 仪用放大器电桥线性硬件电路

Fig. 3.10 PT1000 instrument amplifier bridge with linear hardware circuit

其中，R4，R5，PT1000，R9 构成惠更斯电桥，双通道 AD8629 通过输出反馈方式控制线性有源电桥，将放大的不平衡电压信号送到下面的 AD 转换电路中。PT1000 采用三线制连接方案消除引线电阻影响, 提高测温系统精度。电阻均采用 AD 系列 0.1%精密电阻，R3，R3，R6，R10 为桥臂上的微调电阻，电路中 10Uf, 0.1uF 电容起滤波稳压作用。实验证明，该放大桥式电路有良好的线性和很高的精确度。实验数据如图 3.11 所示。

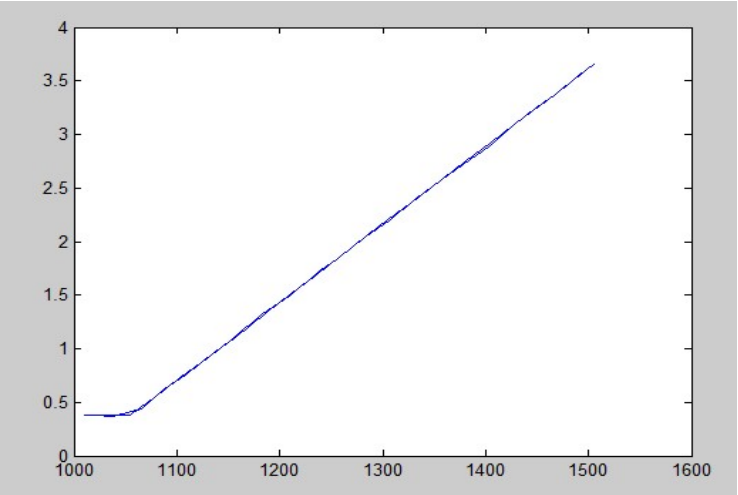



图 3.11 放大器电桥线性硬件电路 电阻-电压曲线图

Fig. 3.11 Bridge amplifier linear hardware circuit resistance-voltage curve

## 3.3 AD转换电路及型号选择

由水温测量范围 10℃～85℃和 0.01℃的分辨率可知，显示数字量为 10.00～85.00 摄氏度，通过计算可得需要选用 14 位 AD 转换器。常用的 A/D 转换器有两种：串行模数转换器和并行模转换器。并行模数转换器虽然传输速率高，但它的引脚多、体积大、占用单片机的口线多，常需要对单片机的 I/O 口进行扩展；而串行模数转换器随着科技的发展其传输速率也可很高，加上它体积小、占用单片机的口线少，因此串行模数转换器的应用越来越广泛。本系统被测水温变化慢，对数据快速性没有特别要求，所以选用串口转换器，连线方便简单。为满足系统高精度要求，所选 AD 转换器还需满足高精度，低噪声，抗干扰等要求。查资料可得，14 位串口，单电源，高精度 AD 转换器种类非常少，有 TLC3541，MAX194, MAX1062, MAX1069，MAX1156， AD7940/ AD7942/ AD7946。前五种型号均需 5v 供电，不满足设计要求。后三种型号可以在 2.3～5.5V 电源下工作。所以可选用 AD7942，其管脚图如图 3.12。

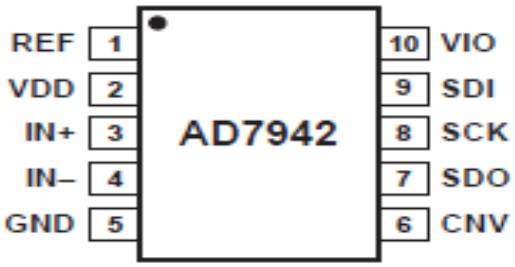



图 3.12 AD7942 管脚图

Fig. 3.12 AD7942 tube feet figure

其优良特性如下：

- 14 高精度分辨率；
- 单电源 2.3～5.5V 供电；
- 吞吐量：250KSPS；
- SPI / QSPI / u Wire/ DSP compatile 接口；
- 积分非线性：±0.4 LSB typ，±1 LSB max (±0.0061 % of FSR)；
- 功耗：1.15 mW @ 2.5 V/100 kSPS，3.3 mW @ 5 V/100 kSPS，1.15 µW @ 2.5 V/100 SPS
- 模拟量输入范围：0-～VDD；
- 标准电流：1nA；
- 没有延迟；

表 3.4 AD7942 参数表

Table 3.4 AD7942 parameter table

VDD = 2.3 V to 5.5 V, VIO = 2.3 V to VDD, $V_{REF}$ = VDD, $T_A$ = −40°C to +85°C, unless otherwise noted.

**Table 2.**

| Parameter | Conditions | Min | Typ | Max | Unit |
|---|---|---|---|---|---|
| RESOLUTION | | 14 | | | Bits |
| ANALOG INPUT | | | | | |
| Voltage Range | IN+ – IN– | 0 | | $V_{REF}$ | V |
| Absolute Input Voltage | IN+ | –0.1 | | VDD + 0.1 | V |
| | IN– | –0.1 | | 0.1 | V |
| Analog Input CMRR | $f_{IN}$ = 250 kHz | | 65 | | dB |
| Leakage Current at 25°C | Acquisition Phase | | 1 | | nA |
| Input Impedance | | See the Analog Input section. | | | |
| ACCURACY | | | | | |
| No Missing Codes | | 14 | | | Bits |
| Differential Linearity Error | | –0.7 | ±0.25 | +0.7 | LSB[1] |
| Integral Linearity Error | | –1 | ±0.4 | +1 | LSB |
| Transition Noise | REF = VDD = 5 V | | 0.33 | | LSB |
| Gain Error[2], $T_{MIN}$ to $T_{MAX}$ | | | ±TBD | ±TBD | LSB |
| Gain Error Temperature Drift | | | ±TBD | | ppm/°C |
| Offset Error[2], $T_{MIN}$ to $T_{MAX}$ | | | ±TBD | ±TBD | mV |
| Offset Temperature Drift | | | ±TBD | | ppm/°C |
| Power Supply Sensitivity | VDD = 5V ± 5% | | ±TBD | | LSB |
| THROUGHPUT | | | | | |
| Conversion Rate | VDD = 4.5 V to 5.5 V | 0 | | 250 | kSPS |
| | VDD = 2.3 V to 4.5 V | 0 | | 200 | kSPS |
| Transient Response | Full-Scale Step | | | 1.8 | µs |
| AC ACCURACY | | | | | |
| Signal-to-Noise | $f_{IN}$ = 20 kHz, $V_{REF}$ = 5 V | 83 | 85 | | dB[3] |
| | $f_{IN}$ = 20 kHz, $V_{REF}$ = 2.5 V | | 84 | | dB |
| Spurious-Free Dynamic Range | $f_{IN}$ = 20 kHz | | –100 | | dB |
| Total Harmonic Distortion | $f_{IN}$ = 20 kHz | | –100 | | dB |
| Signal-to-(Noise + Distortion) | $f_{IN}$ = 20 kHz, $V_{REF}$ = 5 V | 83 | 85 | | dB |
| | $f_{IN}$ = 20 kHz, $V_{REF}$ = 5 V, –60 dB Input | | 25 | | dB |
| | $f_{IN}$ = 20 kHz, $V_{REF}$ = 2.5 V | | 84 | | dB |
| Intermodulation Distortion[4] | | | TBD | | dB |

有上述可见，水温检测电路中选用 AD7942 转换器是满足系统要求的。图 3.13 为由 AD7942 构成的 AD 转化电路。电路将 AD8629 输出的放大不平衡模拟电压值转换成 14 位的数字量，通过 SDO 口传给后面的微处理器。

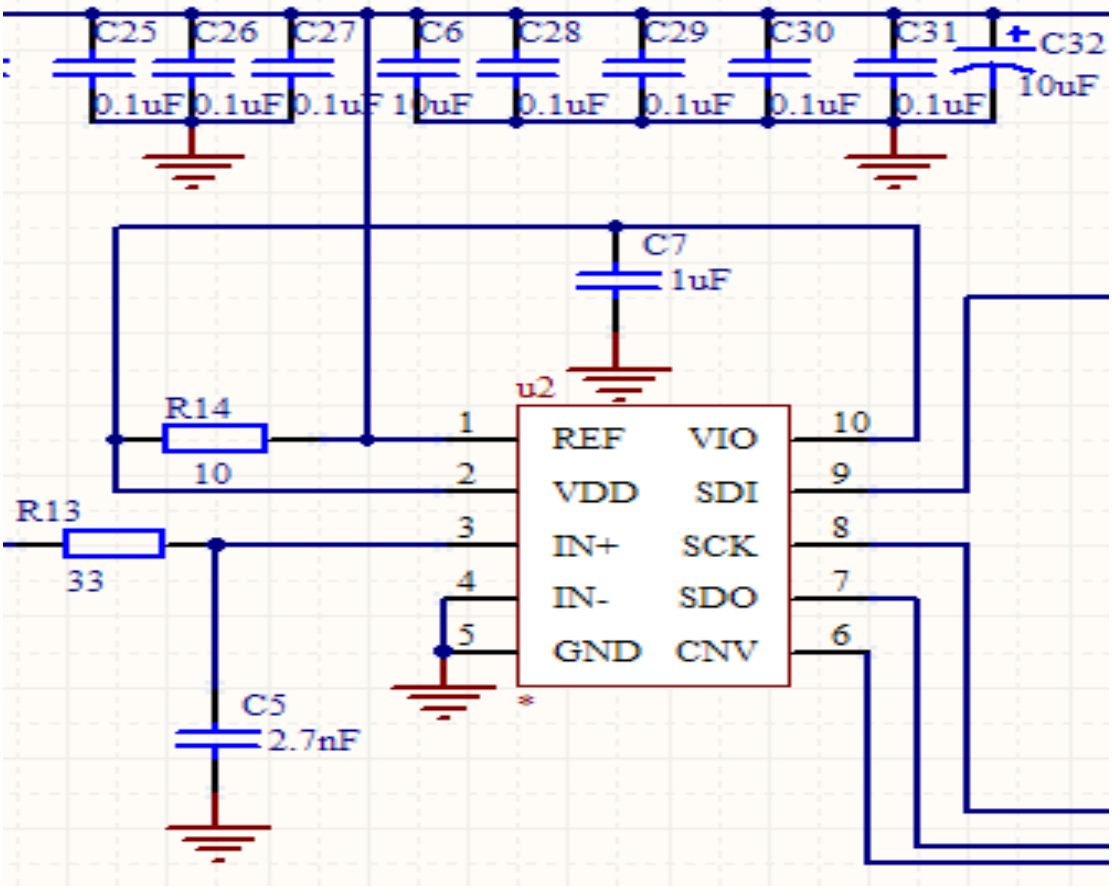



图 3.13 AD 转换电路

Fig. 3.13 AD transform circuit

## 3.4 微处理器模块电路

### 3.4.1 STC12LE5608AD 简介

选用宏晶新一代增强型 51 单片机 STC12LE5608AD，主要性能：

- 高速：1 个时钟/机器周期，RISC 型 8051 内核，速度比普通 8051 快 12 倍；
- 宽电压：5.5V～3.4V, 2.0～3.8V；
- 低功耗设计：空闲模式，掉电模式；
- 工作频率：0～35MHZ(相当于普通 8051：0～420MHZ), 实际可到 48MHZ；
- 时钟：外部晶体或内部 RC；
- 片内 Flash 程序存储器，擦洗次数 10 万次以上；512 字节片内 RAM 数据寄存器；
- 芯片内 $E^2$PROM 功能；
- ISP/IAP，在系统编程/在应用编程；
- 10 位 ADC, 8 通道；

- 4 通道捕获/比较单元（PWM/PCA/CCU）；
- 2 个硬件 16 位定时器，四路 PCA 还可以实现四个定时器；
- 硬件看门狗；
- 高速 SPI 通信端；
- 全双工异步串行口（URAT）；
- 先进的指令集结构；
- 通用 I/O 口，复位后为：准双向口/弱上拉，可设置四种模式：准双向口/弱上拉，推挽/强上拉，仅为输入/高阻，开漏，，每个 I/O 口驱动能力均可达 20mA, 但整个芯片最大不超过 55mA。

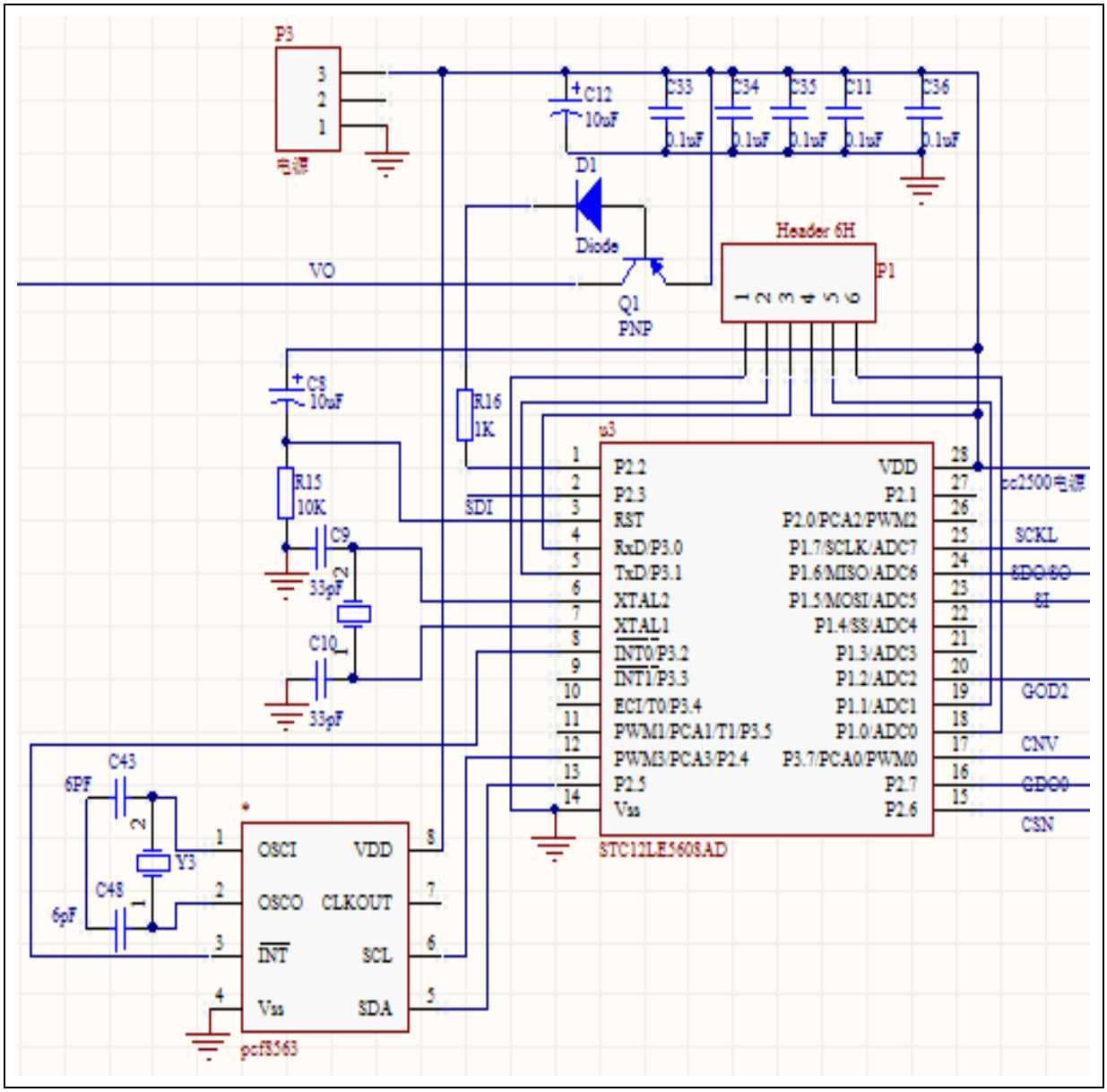



图 3.14　STC12LE5608AD 电路图

Fig. 3.14　STC12LE5608AD circuit

STC12LE5608AD 电路中， 数据传输通过高速 SPI 端口。AD7942 通过 SPI 口将数字量传给单片机，单片机应用 SPI 口将数据传给 CC2500 模块，所以 AD7942 和 CC2500 共用单片机的一个 SPI 口中的 SCLK 端和 MISO 端。

为达到低功耗的目的，P2.2 口控制桥式电路，放大电路，AD 转换电路的电源通断。由图 3.14 可知，当 P2.2 为高电平时 PNP 三极管不导通，使得 V0=0，桥式电路，放大电路，AD 转换电路不工作。当 P2.2 为低电平时 PNP 三极管导通，V0=3.3V, 桥式电路，放大电路，AD 转换电路工作。

插槽 Header6H 为单片机与电脑的串口接口，用于下载用户程序或在线编程。插槽 Header6H ，从 1 到 6 依次与单片机的 GND, P3.1，P3.0，VCC, P1.1，P1.0 管脚相连。

STC12LE5608AD 单片机有休眠功能，工作在不采集温度值时处于休眠状态，达到低功耗目的。在休眠状态只有外部中断 0。实时时钟日历芯片 PCF8563 通过外部中断 0 将单片机唤醒。

### 3.4.2 实时时钟日历芯片 PCF8563 简介

PCF8563是低功耗的CMOS实时时钟日历芯片。它提供一个可编程时钟输出，中断输出和低电压标志。所有的地址和数据，通过I2C总线接口串行传递，最大速度400Kbits/s，每次读写数据后内嵌的字节地址寄存器会自动产生增量。

芯片特性：

- 低工作电流典型值：0.25uA，当VDD=3.0V，T=25℃ 时；
- 世纪标志；
- 大工作电压范围：1.0V--5.5V；
- 低休眠电流典型值为：0.25 A(VDD=3.0V,Tamb=25 )；
- 400KHz 的I2C 总线接口：VDD=1.8～5.5V 时；
- 可编程时钟输出频率为：32.768KHz、1024Hz、32Hz、1Hz；
- 报警和定时器功能；
- 低电压指示功能；
- 内部集成的振荡器电容；
- 片内电源复位功能；
- I2C 总线地址:读0A3H 写0A2H；
- 开漏中断引脚。

PCF8563相关工作数据如表3.5所示：

表3.5 PCF8563简明参考数据

Table 3.5 PCF8563 concise reference data

| Symbol | Parameter | Conditions | Min | Max | Unit |
|---|---|---|---|---|---|
| $V_{DD}$ | supply voltage operating mode | $I^2C$-bus inactive; $T_{amb}$ = 25 °C | 1.0 | 5.5 | V |
| | | $I^2C$-bus active; $f_{SCL}$ = 400 kHz; $T_{amb}$ = −40 to +85 °C | 1.8 | 5.5 | V |
| $I_{DD}$ | supply current; timer and CLKOUT disabled | $f_{SCL}$ = 400 kHz | - | 800 | µA |
| | | $f_{SCL}$ = 100 kHz | - | 200 | µA |
| | | $f_{SCL}$ = 0 Hz; $T_{amb}$ = 25 °C | | | |
| | | $V_{DD}$ = 5 V | - | 550 | nA |
| | | $V_{DD}$ = 2 V | - | 450 | nA |
| $T_{amb}$ | operating ambient temperature | | −40 | +85 | °C |
| $T_{stg}$ | storage temperature | | −65 | +150 | °C |

本设计便是利用 PCF8563 的定时功能，产生外部中断 0，将单片机从休眠中唤醒。虽然 PCF8563 一直处于工作状态，但由表 3.5 可得，它的工作电流最大仅为 0.8mA，是超低功耗芯片。

## 3.5 本章小结

本章主要解决以下问题：

1）创新性的设计了“单电源放大器输出反馈电路”，很好的解决了惠更斯电桥的非线性问题。

2）通过选择满足高精度，低功耗，单电源要求器件，保证测量电路的高精度低功耗。如选用了低失调电压，低温漂，低功耗，单电源，rail to rail 型的双通道放大器芯片 AD8629；选用了高精度，单电源，14 位分辨率的串口 A/D 转换器 AD7942；选用了 1/3B 型 PT1000，误差+/-(0.05+0.00085t)；电路电阻选用 AX 系列的高精密电阻，误差为 0.1%或者更高。

3）合理巧妙设计硬件电路，达到测量电路低功耗的要求。如，选用高速、低功耗的宏晶新一代增强型 51 单片机 STC12LE5608AD。利用超低功耗定时芯片 PCF8563 产生定时中断，单片机控制测量电路循环进入工作状态和休眠状态，从而保证电路的低功耗。

# 4 无线传输

## 4.1 短距离无线通信技术简介

短距离无线通信系统一般使用高度集成化的单片数字信号射频收发芯片，加上简单的外围电路和微控制器，根据命令字节就可以方便的实现数据的收发。它具有开发简单，成本低，低功耗，抗干扰等优点。

短距离无线通信方案目前有蓝牙技术(Bluetooth)、IEEE802.nb(Wi-Fi)、Zigbee、红外通信技术 IrDA(Infra red Data Association)和一种无线单片技术。表 4.1 为各种短距离无线通信方案的优缺点比较。

表 4.1 短距离无线通信方案的优缺点比较

Table 4.1 The advantages and disadvantages of short-range wireless communication scheme comparison

| 方案 | 优点 | 缺点 |
|---|---|---|
| 蓝牙技术 | 支持语音和数据传输；使用跳频扩频技术；可靠性高；多个设备可以相互定位； | 价格昂贵；功耗大；通信协议复杂；传输距离短（当功率为 1mv 时，仅 10 米）； |
| 红外通信技术 | 成本低廉；功耗低；连接方便；干扰少；速度快；保密性强； | 传输距离短（2 米），发射角度小（小于 20 度）；限于两台设备通信，无法灵活构成网络； |
| IEEE802.nb 技术 | 最大优点兼容性；穿透能力，全方位传送，建网速度快，可用来组建大型无线网络； | 价格比较昂贵 |
| Zigbee 技术 | 省电、可靠、成本低、容量大、安全； | 技术要求高 |
| 无线单片技术 | 外设少、成本低、干扰少、功耗低， | — — |

通过以上几种无线技术的介绍，从系统的经济性、传输速率，确定该系统部分电路

设计使用无线收发芯片。无线单片芯片的可靠性高、稳定性好、抗干扰能力强，通讯防议简单透明，技术成熟。使用该种方案无线通信接口与数据采集系统接口电路设计简单。无线收发芯片的种类和数量比较多，有 CC1000，nRF401 单芯片 RF 收发机，11RF903 单片射频收发器芯片，TH72On 单片射频发射芯片，nRF24EI 高性能单片机内核的高速单片无线收发芯片，TRF6901 单片低成本射频收发器芯片，nRf9E5 系统级 RF 芯片。

在设计中选择合适芯片可以提高产品开发周期、节约成本。从功耗，功率，体积，成本等各个方面对上述无线收发芯片比较。由于系统中外部已有 STC12XX 单片机，我们选用的芯片无需内置单片机。我们选用了 ChiPcon 公司生产的 CC 系列的单片低成本低能耗 RF 收发芯片。CC 系列新一代产品有 CC1100，CC1101，CC2500 等。CC1100，CC1101 工作频带在 315、868 及 915MHZ，传输距离为 300 米左右；CC1101 适用于 zigbee 技术的开发；CC2500 工频为 2.4GHZ，传输距离为 100 米左右。本系统要求传输的距离不远（节点距离不超过 100 米）。所以可以选用 CC2500，而且 CC2500 的工频为 2.4G，可以方便以后无线传输网络升级为 ZIGBEE 网络。

## 4.2 CC2500 无线收发模块

CC2500 是无线收发芯片，它的收发频率为2.4G，数据传输率高达500kbps，传输距离为100米以内，功耗小。CC2500 为数据包处理、数据缓冲、突发数据传输、清晰信道评估、连接质量指示和电磁波激发提供广泛的硬件支持[6]。CC2500 的主要操作参数和 64 位传输/接收FIFO（先进先出堆栈）可通过 SPI 接口控制[6]。RF输出功率由两个寄存器设定：PATABLE寄存器，它提供8个设定功率； FREND0.PA_POWER 寄存器，低三位选择八种功率中的一种。初始化CC2500配置寄存器，就可以进行数据的无线收发了。为检验数据的传输质量，可以查看两个寄存器：寄存器LQI值，此值表示数据的传输质量，可表示数据是否传输正确；RSSI反应接收信号的功率强度。CC2500 基 于 0.18 微 米 CMOS 晶 体 的Chipcon 的 SmartRF 04 系列。

CC2500 主要特性

●体积小（QLP 4×4mm 封装，20 脚）

●真正的单片 2.4GHz RF（射频）收发器

●频率范围：2400 ~ 2483.5MHz

●无线接收准确性高

●传输速度快

●低功耗

●可编程控制的输出功率，可达+1dBm

●各种配置形式，满足用户各种收发要求

●外部电路简单，内含频率合成器

●自动滤波检错

●多频带，多信道

CC2500 工作电压 1.8V～3.6V, 工作温度为-40℃～+85℃，超低功耗。CC2500 管脚图如图 4.1 所示。

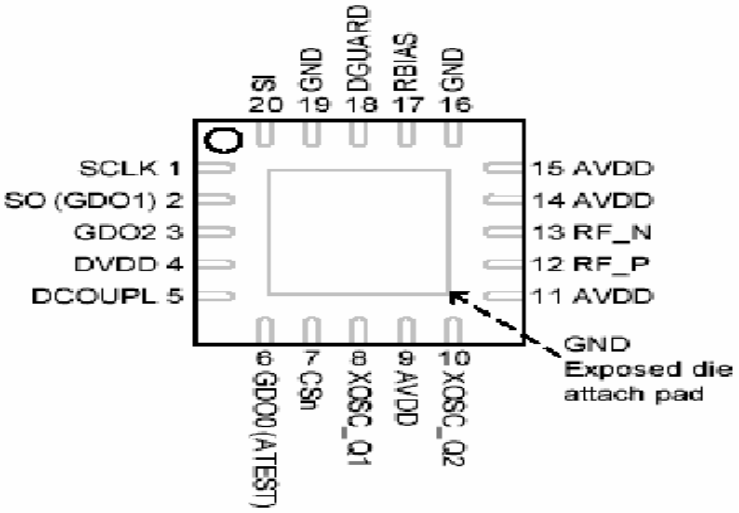



图 4.1 CC2500 引脚顶视图

Fig.4.1 CC2500 Pin top view

引脚介绍说明如表 4.2 所示：

表 4.2 CC2500 引脚介绍

Table 4.2 CC2500 Pin introduction

| 引脚编号 | 引脚名 | 引脚类型 | 描述 |
|---|---|---|---|
| 1 | SCLK | 数字输入 | 连续配置接口，时钟输入 |
| 2 | SO(GD01) | 数字输出 | 连续配置接口，时钟输出<br>当 CSN 为高时，为可选的一般输出脚 |
| 3 | GDO2 | 数字输出 | 一般用途的数字输出脚：<br>测试信号；<br>FIFO 状态信号； |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | | 时钟输出，从 XOSC 向下分割；<br>连续输入 TX 数据； |
| 4 | DVDD | 功率（数字） | 数字 I/O 和数字中心电压调节器的<br>1.8V-3.6V 数字功率供给输出 |
| 5 | DCOUPL | 功率（数字） | 对退耦的 1.6V-2.0V 数字功率供给输出<br>注意：这个引脚只对 CC2500 使用。不能用来对其他设备提供<br>供给电压 |
| 6 | GDO0<br>(ATEST) | 数字 I/O | 一般用途的数字输出脚：<br>测试信号<br>FIFO 状态信号<br>时钟输出，从 XOSC 向下分割<br>连续输入 TX 数据<br>也用作原型/产品测试的模拟测试 I/O |
| 7 | CSN | 数字输入 | 连续配置接口，芯片选择 |
| 8 | XOSC_Q1 | 模拟 I/O | 晶体振荡器脚 1，或外部时钟输入 |
| 9 | AVDD | 功率（模拟） | 1.8V-3.6V 模拟功率供给连接 |
| 10 | XOSC_Q2 | 模拟 I/O | 晶体振荡器脚 |
| 11 | AVDD | 功率（模拟） | 1.8V-3.6V 模拟功率供给连接 |
| 12 | RE_P | RF I/O | 接收模式下对 LNA 的正 RF 输入信号<br>发送模式下对 LNA 的正 RF 输出信号 |
| 13 | AVDD | RF I/O | 接收模式下对 LNA 的负 RF 输入信号 |
| 14 | AVDD | 功率（模拟） | 1.8V-3.6V 模拟功率供给连接 |
| 15 | AVDD | 功率（模拟） | 1.8V-3.6V 模拟功率供给连接 |
| 16 | GND | 地（模拟） | 模拟接地 |
| 17 | RBIAS | 模拟 I/O | 参考电流的外部偏阻器 |
| 18 | DGUART | 功率（数字） | 对数字噪声隔离的功率供给连接 |
| 19 | GND | 地（数字） | 数字噪声隔离的接地 |
| 20 | SI | 数字输入 | 连续配置接口，数据输入 |

CC2500 无线收发应用电路，如图 4.2，CC2500 外部元件个数少，设计方便。

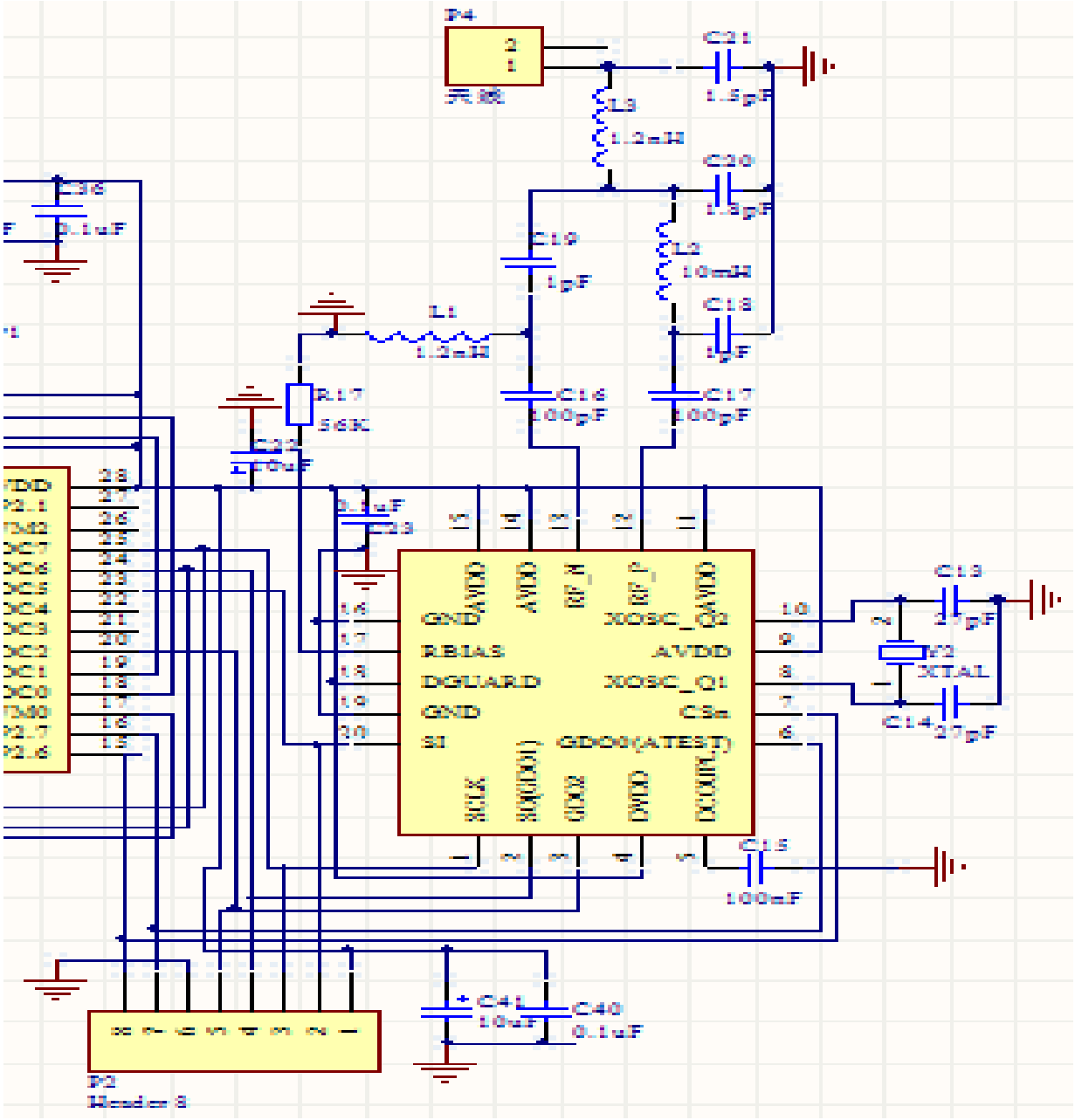



图 4.2 CC2500 无线收发模块典型外围电路

Fig. 4.2 CC2500 wireless transceiver module typical peripheral circuit

由图 4.2 可见，CC2500 无线收发模块，直接与电池相连接。但 CC2500 芯片有休眠状态，因此只有在工作状态才会消耗电量。CC2500 芯片与单片机的接口有 SPI 接口（SI,SO,SCLK 和 CSn），通过 SPI 接口，单片机完成对 CC2500 的配置，写/读 FIFO, 发送命令，读 CC2500 状态等数据传输操作。GDO0 和 GDO2 分别与单片机的 P1.2 和 P2.7 相连，GDO0 和 GDO2 作为测试输出控制引脚，通过软件设置，GDO0 和 GDO2 能把 CC2500 相应的状态反馈给单片机，使单片机更好的控制 CC2500 无线收发模块。

插槽 Header 8，从 1 到 8 依次为管脚：VDD,SI,SCKL, SO,GOD2,GND,GOD0，CSN。

插槽的安装便于插针式 CC2500 无线收发模块直接与单片机线路连接。

工作流程：CC2500 无线收发模块被单片机从休眠状态中激活，通过 SPI 串口收到单片机的数据后，将数据通过无线传输方式发送给中继器。CC2500 无线收发模块向采集器发送完数据后，重新进入休眠状态。

外部元件说明如表 4.3 所示。

表 4.3 CC2500 外部元件说明

Table 4.3 CC2500 external components introduction

| 元件 | 描述 |
|---|---|
| C15 | 数字部分的片内电压调节器的 100nF 退耦电容 |
| C13/C14 | 晶体负载电容 |
| C16/C17 | RF 平衡转换器 DC 模块电容 |
| C18/C19 | RF 平衡转换器/匹配电容 |
| C20/C21 | RF LC 滤波/匹配电容 |
| L1/L2 | RF 平衡转换器/匹配电感（便宜的多层类型） |
| L3 | RF LC 滤波电感（便宜的多层类型） |
| R17 | 内部偏电流参考的 56 千欧电阻 |
| Y2 | 26MHz-28MHz 晶体 |

## 4.3 本章小结

1）本章介绍了无线通讯技术，对各种短距离无线通讯技术进行比较。通过讨论选用无线单片技术方式进行无线传输，最终选用 CC2500 无线收发模块。

2）设计了 CC2500 无线收发模块的应用电路，并完成了 CC2500 无线收发模块与单片机的外围接口连接。至此，高精度，低功耗的温度采集终端硬件电路设计完毕。

# 5 中继器和采集器硬件电路

## 5.1 中继器硬件电路

由于温度采集终端电路距离上位机距离比较远，为了保证信息准确有效的传给采集器，系统中必须设计中继器。

中继器是局域网环境下用来延长网络距离的最简单最廉价的互联设备，操作在 OSI 的物理层，中继器对在线路上的信号具有放大再生的功能。中继器硬件电路的核心是 CC2500 无线收发模块。中继器电路中的 CC2500 无线收发模块与温度采集终端电路中的 CC2500 无线收发模块完全相同。

不同的是，由于温度采集终端电路中的 CC2500 无线收发模块只有在发射信息时才处于工作状态，大部分时间处于休眠状态，所以超低功耗，用 3.3V 普通干电池供电即可。而中继器始终要处于工作状态，需要不断的搜索接收温度采集终端无线传来的数据，然后将收到的信息发送给采集器。所以中继器耗电较多，仅用 3.3V 普通干电池供电不能满足要求，需要设计电源电路。中继器硬件电路框图如图 5.1 所示。

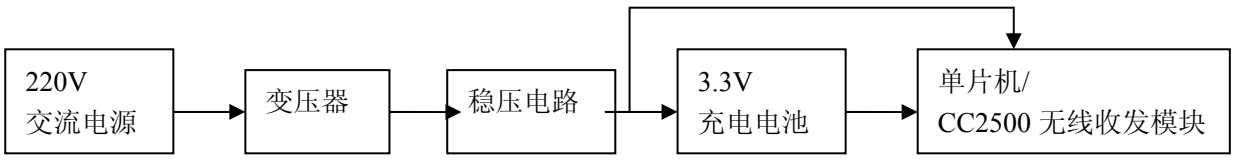



图 5.1 中继器硬件电路框图

Fig. 5.1 Repeaters hardware circuit diagram

本系统选用安全隔离变压器 PE2812S。如图 5.2 所示，它有一组高电压输入端，两组低电压输出端。安全隔离变压器 PE2812S 将 220V 交流电转换成 6V～7V 低电压，输出电流为 125mA。将变压器变压后的电压再通过稳压电路生成稳定的 3.3V 直流电源。3.3V 直流电源即可以对充电电池充电，又可以直接为单片机/CC2500 无线收发模块供电。由于厂房只有晚上供电，这样便实现了白天由充电电池供电，晚上由交流电转换的 3.3V 直接供电。电源电路设计如图 5.2 所示。

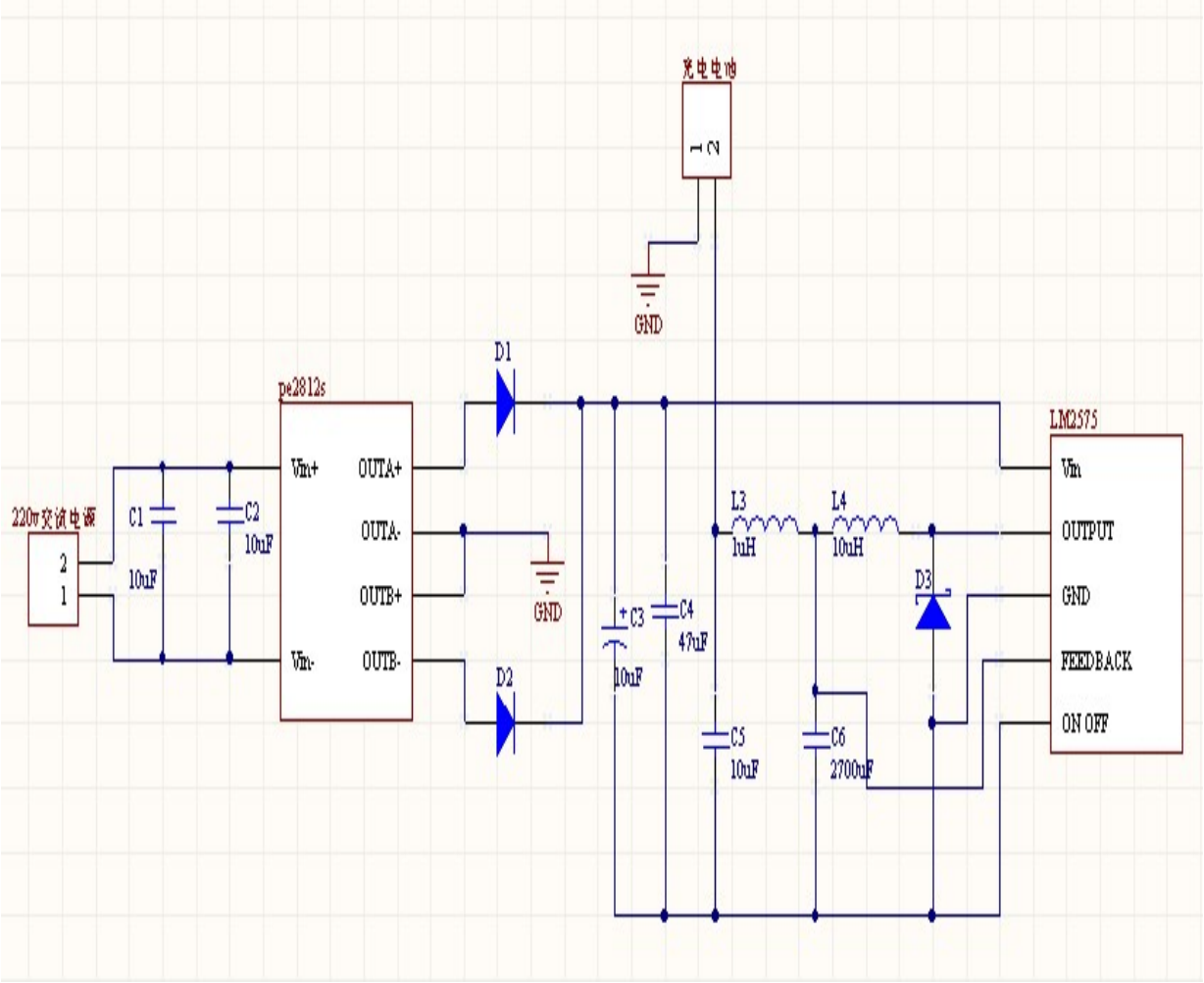



图 5.2 中继器电源电路

Fig.5.2 Repeaters power supply circuit

### 5.1.2 LM2575-3.3 开关稳压电路

LM2575T 系列开关稳压集成电路芯片的主要参数如下：

最大输出电流：1A；

最大输入电压：LM1575/LM2575 为 45V；LM2575HV 为 63V；

输出电压：3.3V,5V,12V,ADJ(可调)；

振荡频率：54KHZ；

最大稳压误差：4%；

转换效率：75%～88%（不同的电压输出的效率不同)；

工作温度范围：LM1575 为-55℃～+150℃； LM2575-40℃～+120℃

图 5.3 为 LM2575-3.3 芯片管脚图。表 5.1 为 LM2575-3.3 芯片管脚说明。

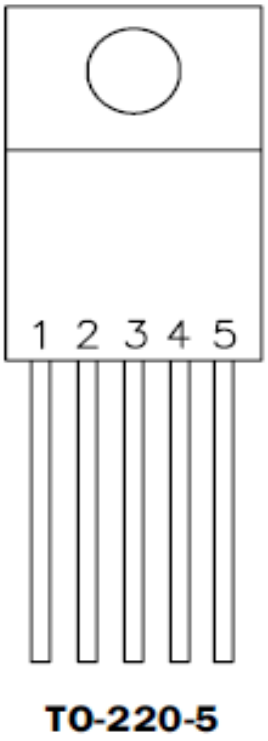



图 5.3 LM2575-3.3 芯片管脚图
Fig. 5.3 LM2575-3.3 chip tube feet figure

表 5.1 LM2575-3.3 芯片管脚说明
Table 5.1 LM2575-3.3 chip tube feet introduction

| 序号 | 管脚 | 描述 |
|---|---|---|
| 1 | VIN | 未稳压电压输入端 |
| 2 | OUTPUT | 开关电压输出，接二极管及快恢复二极管 |
| 3 | GND | 公共端 |
| 4 | FEEDBACK | 反馈输入端 |
| 5 | ON/OFF | 控制输入端，接公共端时，稳压电路工作；接高电平时，稳压电路停止 |

开关稳压器的工作原理如图 5.4 LM2575 的内部结构方框图。由比较器、基准电压源、振荡器输出三极管、电流限制电路、热保护电路等组成。振荡器的频率范围 1Hz-100kHz，输出三极管的开关电流可达 3A。电流限制电路包括两个比较器，一个比较器的同相输入端以低于 115mV的电压为基准；另一个比较器的反相输入端以高于地电位以上 115mV为基准。比较器输人级的独特之处在于用户可以采用反相或同相辅入，且两者皆含有1.0V基准电压。只要限流端的电压与电位偏离 115mV时，电流限制电路即起作用，因此，LM2579 的电流限制电路既可以地为基准，也可以为V基准而工作。

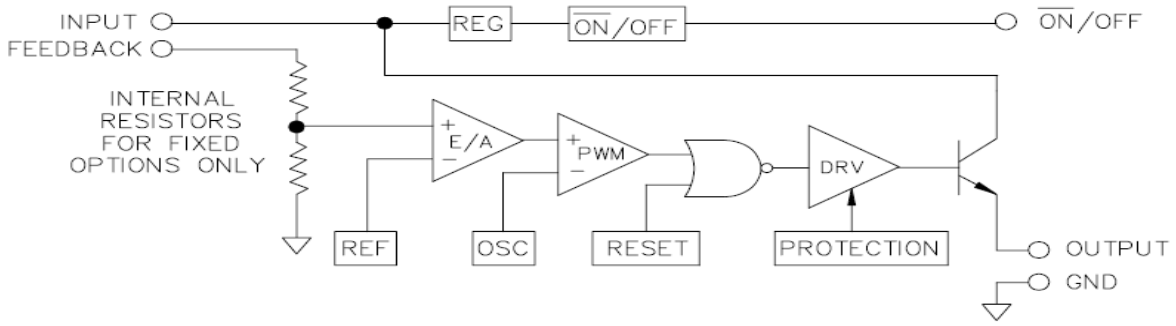



图 5.4 LM2575 内部结构方框图
Fig.5.4 The internal structure chart

在利用 LM2575 设计稳压电路时，应注意以下几点：

1) 电感的选择：根据输出的电压档次、最大输入电压、最大负载电流等参数选择电感时可根据相应的电感曲线图来查找所需采用的电感值。

2) 输入输出电容的选择：输入电容大于 47uF，并尽量靠近电路。而输出电容推荐使用的电容量为 2700uF, 其耐压值应大于额定输出的 1.5～2 倍。

3) 二极管的选择：二极管的额定电流应大于最大负载电流的 1. 2 倍，但考虑到负载短路的情况，二极管的额定电流应大于 LM2575 的最大电流限制；另外二极管的反向电压应大于最大输出电压的 1.25 倍。

LM2575-3.3 开关稳压电路如图 5.5 所示：

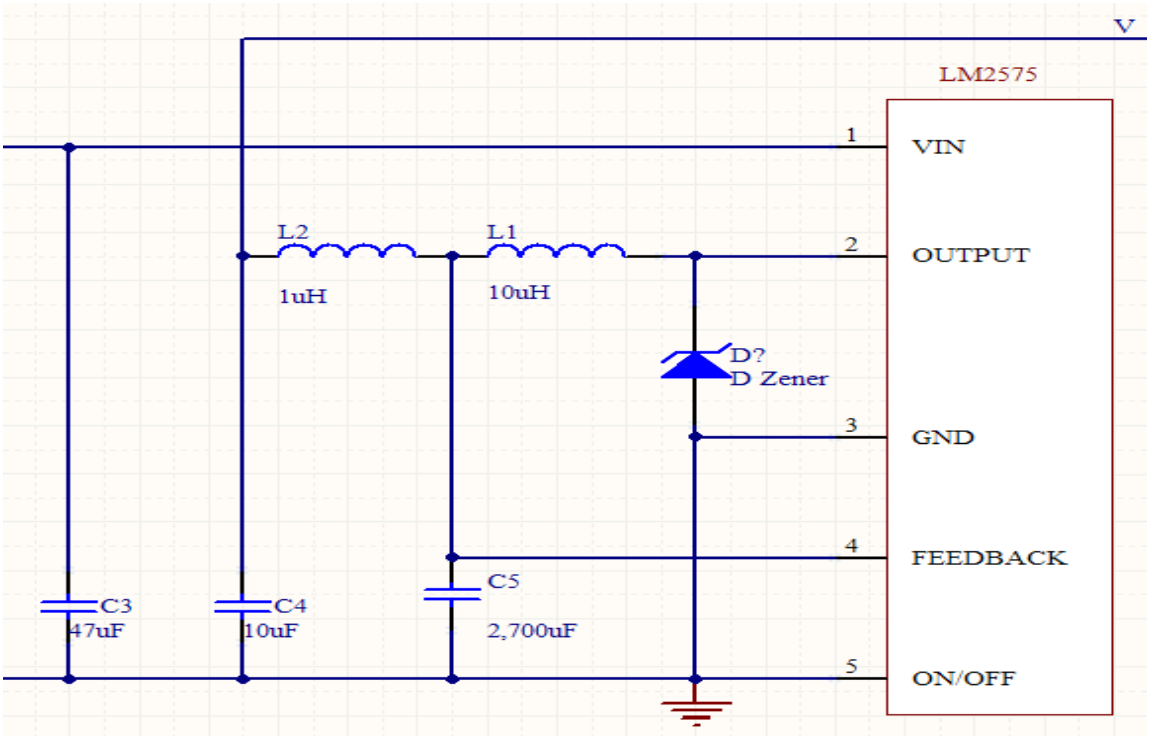



图 5.5 LM2575-3.3 开关稳压电路

Fig.5.5 Switching circuit

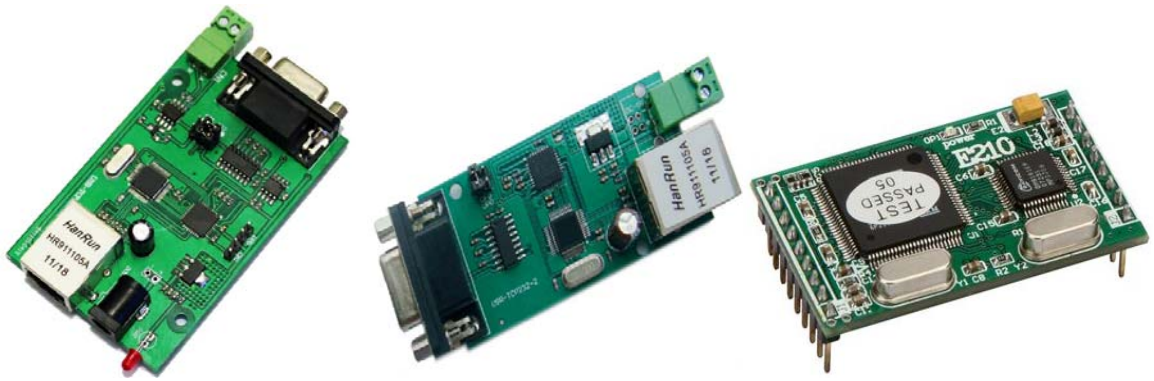
## 5.2 采集器硬件电路

采集器硬件电路的核心仍然是单片机/CC2500 无线模块，这与终端和中继器的单片机/CC2500 无线模块完全形同。采集器硬件电路也由电源供电，电路设计同中继器的电路设计完全相同。所以，采集器的电路设计电路和单片机/CC2500 无线模块电路在此不再赘言。采集器硬件电路框图如图 5.6 所示。

图 5.6 采集器硬件电路框图

Fig.5.6 Terminal hardware circuit diagram

串口转网络模块 RS232 /RS485 转以太网即网络转串口模块是将串口数据和网络 TCPIP 数据实现透明传输的设备，通过它轻松实现普通串口设备向联网设备的升级。目前市场上有很多串口转网口电路模块。如图 5.7 所示。



USR-TCP232-24 USR-TCP232-2 C2000 E210

图 5.7 各种串口转网口模块

Fig.5.7 Kinds of serial turn WangKou module

本系统选用了 TTL 串口转网口模块，网口转串口模块 C2000 E210。 C2000 E210 是具有高性价比且稳定可靠的串口设备嵌入式联网模块，它提供 TTL 串口到 TCP/IP 网络和 TCP/IP 网络到 TTL 串口的数据透明传输，它可以使设备立即具备联入 TCP/IP 网络的功能。C2000 E210 向上提供 10/100M 以太网接口，向下提供 1 个标准 TTL 串行口，通讯参数可通过多种方式设置。C2000 E210 模块有两排插针引脚 J1 和 J2，用于与用户板联接，该两排引脚分别有 9 个和 8 个插针，其插针管脚定义如表 5.2，表 5.3 所示。

表 5.2 J1 插针管脚定义

Table 5.2 J1 Put needle tube feet definition

| J1(引脚序列) | 功能说明 | 备注 |
|---|---|---|
| 1 | TXD(串口信号发送端) | 模块内弱上拉，建议接 4.7K 上拉电阻。 |
| 2 | RXD（串口信号接收端） | 模块内弱上拉，建议接 4.7K 上拉电阻。 |
| 3 | CTS（串口） | 模块内弱上拉，建议接 4.7K 上拉电阻。 |
| 4 | RTS（串口） | 模块内弱上拉，建议接 4.7K 上拉电阻。 |
| 5 | RESET(手动复位输入端) | 低电平模块复位，不使用时可悬空或接电源；使用时可与用户系统复位端相连（注意有效复位电平为“0”还是“1”） |
| 6 | SETUP(恢复出厂设置) | 模块内部上拉，将此引脚接地，模块按出厂设置工作，不使用是可悬空。 |
| 7 | PROTECT(设置信息保护) | 模块内部上拉，将该引脚悬空或接 VCC 时，设置参数将不会被改变；接地时方可改变参数。 |
| 8 | VCC(电源正极) | 接+5V 电源，建议靠近该引脚加 0.1uF 电容和 100uF 的电解电容（电源范围 4.5v～5.5V） |
| 9 | GND(电源负极) | 接地 |

表 5.3 J2 插针管脚定义

Table 5.3 J2 Put needle tube feet definition

| J2(引脚序列) | 功能说明 | 备注 |
|---|---|---|
| 1 | MODE | 以太网全双工、半双工指示灯，全双工点亮，高电平驱动 LED |
| 2 | SPEED | 以太 10M/100M 指示灯，100M 点亮，高电平驱动 LED. |
| 3 | TPIN+(ERX+) | 网络数据差分接收正确。使用方法见图 5.8 所示。 |
| 4 | TPIN-(ERX-) | 网络数据查分接收负端。使用方法见图 5.8 所示。 |
| 5 | LD(ETX-) | 网络数据差分发送副端。使用方法见图 5.8 所示。 |
| 6 | HD(ETX-) | 网络数据差分发送副端。使用方法见图 5.8 所示。 |
| 7 | E_COM | 网络发送端的参考信号。 |
| 8 | LINK | 以太网连接指示灯，连接状态点亮，高电平驱动 LED。 |

C2000 E210 模块外围电路如图 5.8 所示。

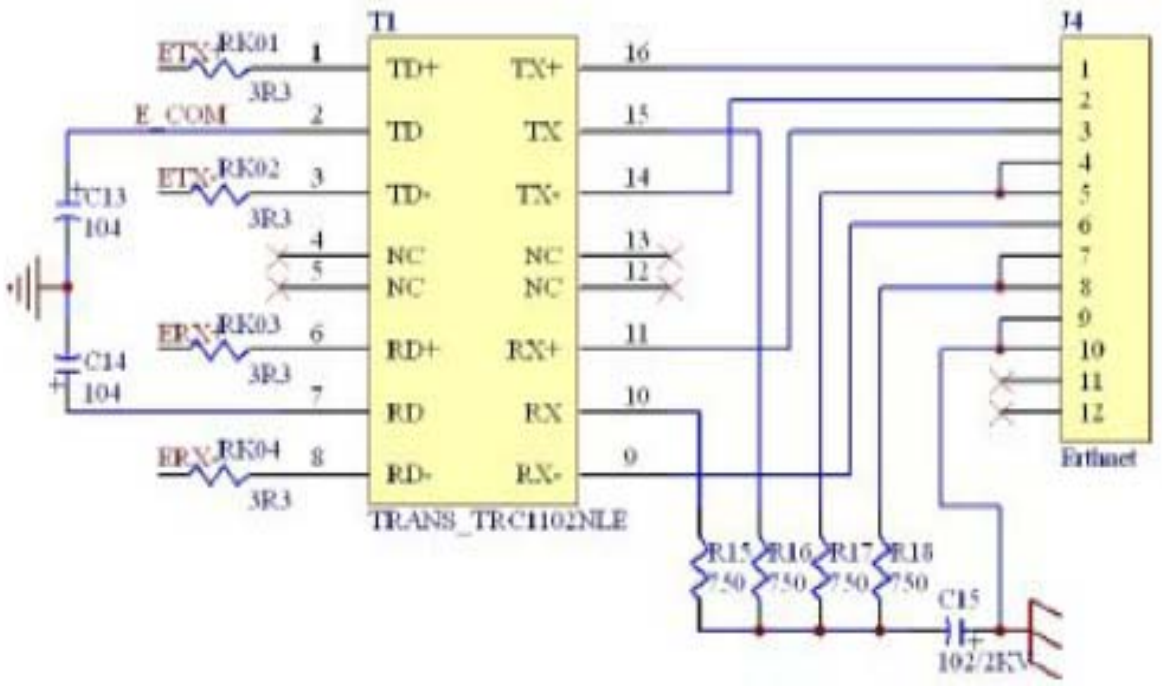



图 5.8 C2000 E210 模块外围电路

Fig. 5.8 C2000 E210 peripheral circuit

## 5.3 本章小结

1）本章设计了中继器的硬件电路。介绍了安全隔离变压器 PE2812S 和开关稳压器 LM2575-3.3 芯片的功能特点，并应用 PE2812S 和 LM2575-3.3 设计了中继器的电源电路。

2）本章设计了采集器的硬件电路。重点介绍了串口转网络模块 C2000 E210 的特点，并应用 C2000 E210 设计了串口转网口电路。

# 6 系统软件设计

软件程序框架清晰，语言要简洁，软件执行速度要快。终端，中继器，采集器之间的收发时序要设计好，保证无线传输的正确性。每块电路板上的有线通讯要正确快速节能。软件还要设计数据包处理程序和设计抗干扰程序。本系统的软件用 C 语言编程，在 Keil 环境下运行。

## 6.1 系统的整体软件设计

从整体上来说，该系统软件包含由一个初始化的主函数和一个中断函数两大部分。进入中断，系统工作；中断函数完成则进入休眠状态。系统软件基于软件模块思想。每一部分又由各个功能软件模块组成。

主函数初始化包含：UART 串口初始化,I2C 子程序，pc8563 初始化，SPI 初始化，定时器/外部中断初始化。中断函数包含：数据采集软件模块，数据包处理模块，终端无线发送模块，中继器接收/发送模块，采集器无线接收发送模块，PC 机接收数据包组态王显示模块。

系统的软件框图如图 6.1 所示。

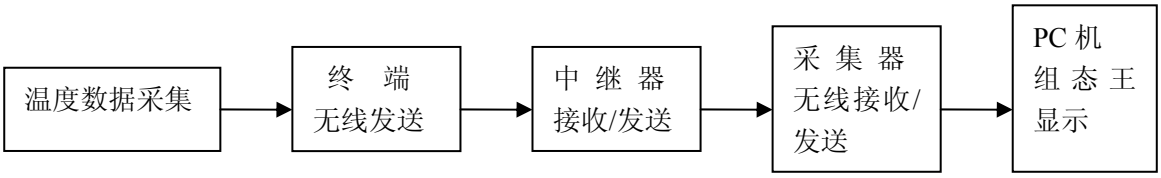



图 6.1 系统软件框图

Fig. 6.1 System software diagram

系统软件工作流程。软件控制温度采集终端模块在工作/休眠两种状态中切换。即温度数据采集完毕后断电和无线收发模块发送完数据后进入休眠状态。中继器始终处于工作状态，随时搜索接收数据并将数据无线发送给采集器。采集器始终处于工作状态，随时接收采集器的数据，并将数据通过以太网网口传给 PC 机。PC 机将接收到的数据通过组态王软件显示。至此，便完成了实时采集温度的目的。

## 6.2 温度采集终端软件设计

温度采集终端软件设计主要包括,温度数据采集和终端无线发送两大部分。其中，温度数据采集部分又包括：系统休眠/工作中断程序初始化。PCF8563 的配置，PCF8563 与单片机的 II-C 串口通信程序,通过 II-C 串口中的 SDA,SCL 两根串口线，单片机向 PCF8563 写入数据完成定时初始化，PCF8563 通过-INT 端口每隔一定时间产生一次负电平，给单片机产生外部中断，使单片机从休眠进入工作状态。AD7942 与单片机的 SPI 串口通信程序，通过此程序单片机采集 AD 转换器发送的 14 位温度数据；终端无线发送部分包括：单片机与 CC2500 的 SPI 串口通讯，CC2500 配置程序，CC2500 读/写 FIFO 程序，CC2500 命令滤波程序，CC2500 发送/接收程序。温度采集终端软件流程框图如图 6.2 所示。

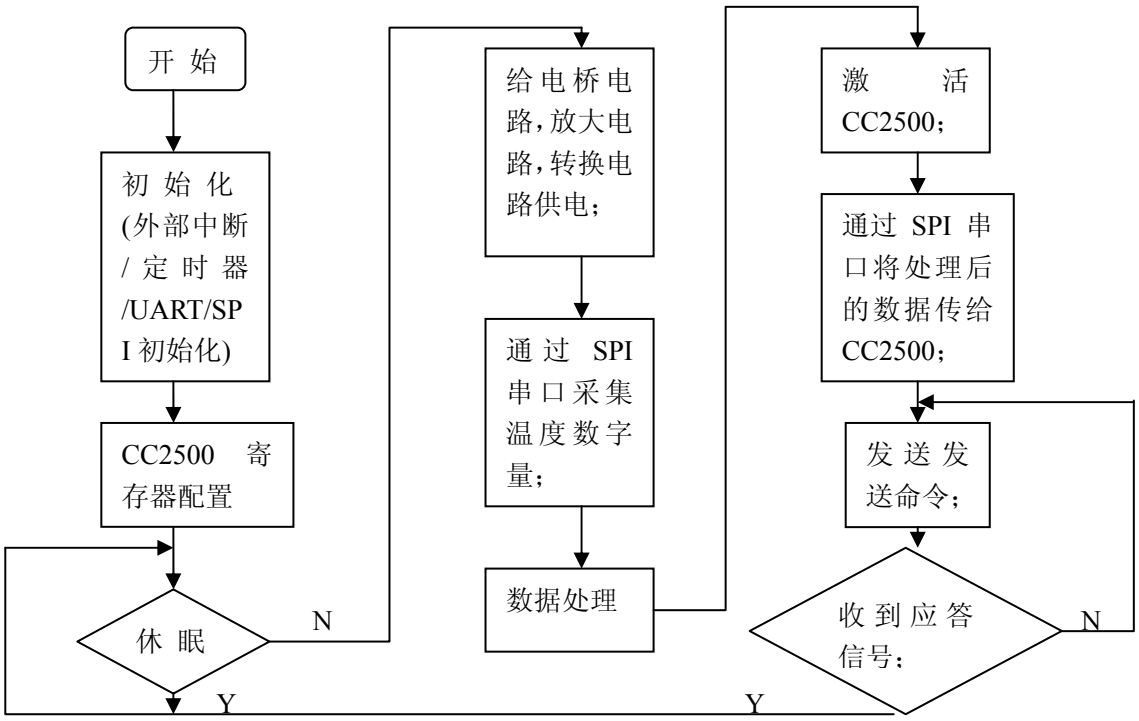



图 6.2 温度采集终端软件流程框图

Fig.6.2 Temperature gathering terminal software flow diagram

## 6.3 串口通讯

### 6.3.1 UART 串口通讯

为调试方便，本系统在调试时，使用了 UART 串口全双工通讯，用 RS232 总线标准

将温度采集终端单片机和 PC 机进行数据传递。采用的是串口方式 1，即可变波特率，由 T1 的溢出率决定；T1 计数器方式 2，即八位自动重装模式，波特率 2400bit/s。

#### 6.3.1.1 串行通讯概念

串口通讯只占用两个端口，传输距离比并行远。串行通信的数据传送方式可分成三种基本的传送形式:单工、全双工和半双工。虽然半双工形式比单工形式灵活，但它的效率依然较低，从发送方式切换到接收方式所需要的时间大约为数个毫秒，这个时间延迟在对时间较为敏感的系统中是无法容忍的。全双工形式下，采用了信道划分技术，避免了半双工形式的缺点，数据传送是双向的，且可以同时发送和接收数据。此系统采用全双工模式。八位数据，无校验位，有一个低的起始位，一个高的终止位的帧模式。空闲情况下，RXD、TXD 均是高电平。每次写入 SBUF=0Xxx,便由单片机向电脑开始发送数据，每次发送开始位 TXD 会变低，开始传八位数据，最后 TXD 变高停止。每次写入 A＝SBUF，单片机开始接收数据，一旦单片机的 RXD 端接收到变低的电平，就开始接收数据。

#### 6.3.1.2 RS 232 总线标准

RS-232 只能用于 PC 串口和设备之间一对一的数据传输，传输距离可达 15 米。目前已广泛应用于计算机与外围设备的串行异步通信接口中。

实际应用中，一般不采用 25 插头，普遍采用 DB9 插头，对于一般的双工通信，仅需几条信号线就可实现，包括一条发送线、一条接收线和一条地线。表 6.1 给出了 DB9 连接器的信号引脚功能。

表 6.1 DB9 连接器的信号引脚功能

Table 6.1 DB9 connector signal pin function

| 引脚 | 信号名称 | 方向 | 信号功能 |
|---|---|---|---|
| 1 | DCD | PC←对方 | PC 机收到远程信号(载波检测))) |
| 2 | RXD | PC←对方 | PC 机接收数据据 |
| 3 | TXD | PC→对方 | PC 机发送数据据 |
| 4 | DTR | PC→对方 | PC 机准备就绪绪 |
| 5 | GND | ---- | 信号地地 |
| 6 | DSR | PC←对方 | 对方准备就绪绪 |
| 7 | RTS | PC→对方 | PC 机请求发送数据据 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 8 | CTS | PC←对方 | 对方已切换到接收状态(清除发送) |
| 9 | RI | PC←对方 | 通知 PC 机，线路正常(振铃指示) |

RS-232C 标准的电气特性如表 6.2 所示。由表 6.2 可以看出 RS-232C 电平采用负逻辑，逻辑“0”：+5～+15V，逻辑“l”：-5～-15V。在计算机和智能仪器内，通用的信号是正逻辑的 TTL 电平。而 RS-232C 电平是负逻辑的，与 TTL 电平不兼容，必须进行电平转换。电平转换可以使用 MC1488、MC1489、MAX232 等芯片实现。系统采用 MAX232 芯片实现电平转换。

表 6.2 RS232C 电气特性

Table 6.2 RS232C Electrical characteristics

| | |
|---|---|
| 不带负载时驱动器输出电平 | -25V～25V |
| 负载电阻 | 3～7k |
| 驱动器输出电阻 | <300 |
| 负载电容(包括线间电容) | <2500 |
| 逻辑“O”时驱动器输出电平 | 5～15V |
| 逻辑“0”时负载端接收电平 | +3V |
| 逻辑“1”时驱动器输出电 | -15～5V |
| 逻辑“l”时负载端接收电平 | <-3 |
| 输出短路电流 | 500mA |
| 驱动器转换速率 | <30V/us |

RS-232C 标准规定的波特率为:50、75、100、150、300、600、1200、4800、9600 和 19200bps。本系统波特率采用 2400bps。驱动器允许有 250opF 的电容负载，通信距离受此电容限制。

#### 6.3.1.3 UART 串行通讯程序

调试时，编写的 UART 串行通讯初始化

```
SCON = 0x50;            //8 位数据,可变波特率
PCON &= 0x7F;           //波特率不倍速
AUXR &= 0xBF;           //定时器 1 时钟为 Fosc/12,即 12T
AUXR &= 0xFE;           //串口 1 选择定时器 1 为波特率发生器
TMOD &= 0x0F;           //清除定时器 1 模式位
```

```
TMOD |= 0x20;              //设定定时器 1 为 8 位自动重装方式
TH1=0xF4;
TL1=0xF4;                  //波特率 2400bit/s
TR1=1;                     //启动计数器 T1
```

单片机向 PC 机发送数据软件程序为：

```
SBUF=0X30                  //写入 0X30
while(!TI);
TI=0;
Delay();
```

PC 机向单片机发送数据软件程序为：

```
a=SBUF                     //单片机接收 PC 机的值，并赋值给变量 a
delay();
```

注意，在使用串口调试窗口时，若连续接收或发送数据，要有一定的延时，约零点几个毫秒。否则，使用外部 11.05924 的晶振时，CPU 完成一条发送或接收语句只需 1us，而外部串口速度相对缓慢，会导致数据传输错误，从而无法正常显示接收。单片机中相关寄存器说明如表 6.3, 6.4, 6.5, 6.6 所示：

表 6.3 串行口控制器 SCON(地址：98H) 可位选

Table 6.3 A serial port SCON controller (address: 98 H) can bite choice

| | | |
|---|---|---|
| 7 | SM0 | 0 0 ：串口方式 0<br>0 1 ：串口方式 1<br>1 0 ：串口方式 2<br>1 1 ：串口方式 3 |
| 6 | SM1 | |
| 5 | SM2 | RI=0 ，SM2=0 时，单片机接收到停止位：则将数据装入 SBUF 并 RI 置 1。 |
| 4 | REN | 串行口允许接收位。 |
| 3 | TB8 | 发送数据的位 8。 |
| 2 | RB8 | 接收数据的位 8。 |
| 1 | TI | 串行口发送中断标志位。软件清零。 |
| 0 | RI | 串行口接收中断标志位。软件清零。 |

表 6.4 波特率控制寄存器 PCON

Table 6.4 Baud rate control register PCON

| | | |
|---|---|---|
| 7 | SMOD | 为 1，通讯波特率提高一倍。为 0, 波特率不变 |
| 6 | SMOD0 | ----- |
| 5 | LVDF | 低电压标志 |
| 4 | POF | 上电复位标志，可由软件清零 |
| 3 | GF1 | 用户自由定义 |

| | | |
|---|---|---|
| 2 | GF0 | 用户自由定义 |
| 1 | PD | 掉电模式，只有外部中断继续工作。 |
| 0 | IDL | 空闲模式，只有 CPU 不工作。可由任何一中断唤醒 |

表 6.5 定时器的方式寄存器 TMOD（地址：89H）

Table 6.5 The timer way TMOD registers (address: 89 H)

| | |
|---|---|
| GATE | GATE=1：TR1=1，–INT1=1。启动定时器。<br>GATE=0：TR1=1。启动定时器。 |
| C/-T | 为 1：计数方式，计数脉冲从 T1 引脚输入。<br>为 0：定时方式，连接至内部工作时钟源，计数脉冲的周期为机器周期。 |
| M1 | 0 0 ：定时器工作方式 0<br>0 1 ：定时器工作方式 0<br>1 0 ：定时器工作方式 0<br>1 1 ：定时器工作方式 0 |
| M0 | |
| GATE | 略 |
| C/-T | 略 |
| M1 | 略 |
| M0 | |

表 6.6 定时器的控制寄存器 TCON(地址：88H）可位选

Table 6.6 The timer control register TCON (address: 88 H) can be a choice

| | |
|---|---|
| TF1 | 定时器 T1 的溢出中断标志位。响应中断服务程序，或软件清零。 |
| TR1 | 定时器 T1 运行控制位。TR1=0，定时器停止运行；TR1=1，配合其他位启动 |
| TF0 | |
| TR0 | |
| IE1 | 外部中断 1 的中断请求标志位。若外部中断触发方式为边沿触发，由硬件清零；若为电平触发，由软件清零。 |
| IT1 | 为 1：外部中断边沿触发；为 0：外部中断低电平触发。 |
| IE0 | 外部中断 0 的中断请求标志位。若外部中断触发方式为边沿触发，由硬件清零；若为电平触发，由软件清零。 |
| IT0 | 为 1：外部中断边沿触发；为 0：外部中断低电平触发。 |

### 6.3.2 II-C 串行总线

PCF8563 的通过 SDL 和 SCLK 端口与 51 单片机相连，遵循 II-C 串口通讯协议。

II-C 总线是 PHLIPS 公司推出的一种串行总线，是具备多主机系统所需要的包括中线裁决和高低速器件同步功能的高性能串行总线。II-C 总线只有两根双向信号线，一根是数据线 SDA,另一根是时钟线 SDI。传输速率可设定为 100K 或 400K。同一时间一个主机可以有很多从机，传输数据时，要先选择从机的地址。

基本工作原理如图 6.3 所示： SCLK 时钟线为高时，主机控制 SDA 线变低，产生一个下降沿，表示开始位。然后传输数据，每次在时钟线为低时改变 SDA 数据，SCL 为高时保持/采集数据。先发送一个读（1）/写（0）字节，再发送七位地址，根据地址相应的从机在第九个脉冲高电平时为高，表示应答。以上成功完成主机从机选择联络。然后主机就与相应的从机进行数据传输，时钟低时改变数据，时钟高时保持数据。数据传输完毕，最后当 SCLK 为高时，SDAC 出现下降沿，则证明传输结束。

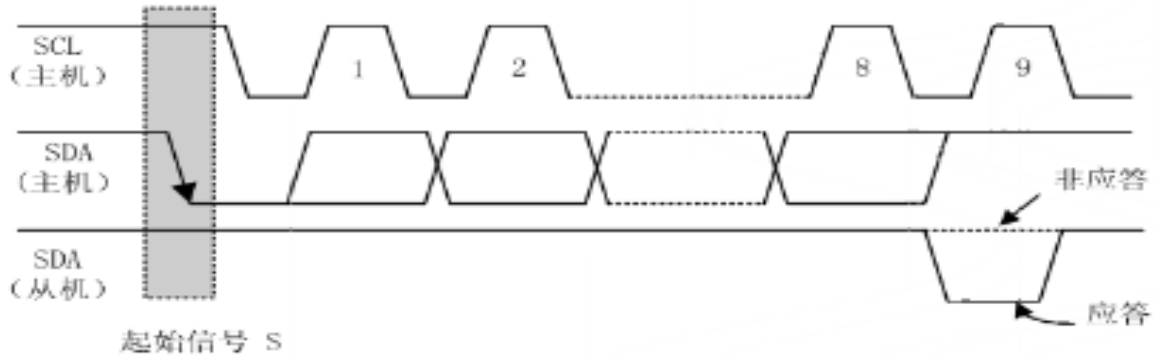



图 6.3 II-C 串行总线数据传输格式

Fig. 6.3 II-C Serial bus data transmission format

6.3.2.1 具体总线信号时序如图 6.4，具体分析如下

1）空闲状态

总线 SDA 和 SCL 都为高电平

2）启动信号 START

当前一个状态为空闲状态时，SCL 仍旧保持高电平，而 SDA 出现一个由高变低的负脉冲，意味着产生一个启动信号，开始处于忙状态开始传输数据。

3）停止信号 STOP

当时钟线处于高电平时，从机掌握数据线 SDA,从机使 SDA 总线产生一个由低到高的正脉冲，意味着停止数据传输，即通讯结束。总线处于空闲状态。

4）数据传送

当时钟总线为低时，发送数据的一方将要传输的数据发送到数据总线 SDA 上，等待时钟总线变高，SDA 上的数据保持不变。直到时钟总线再次变低的时候，发送数据的一方将下一个位数据传到数据线上。

5）应答信号 ACK

当发送器发送完一个字节后，接收数据的一方掌握 SDA 数据线，当下一个脉冲为高电平是，接收数据的一方在 SDA 上发送低电平，表示接收器成功接收发送器发来的字节

数据。

6）非应答信号 NACK

当发送器发送完一个字节后，接收数据的一方掌握 SDA 数据线，当下一个脉冲为高电平是，接收数据的一方在 SDA 上发送高电平，代表一个非应答信号。

NACK 有两种用途:

a.若接收器是从机，意味着接收器接收字节数据失败；

b. 若主机接收数据时，发送数据的从机接收到非应答，将不再掌控数据线，而由主机来掌控数据线。表示发送数据的从机已经全部发送完数据。

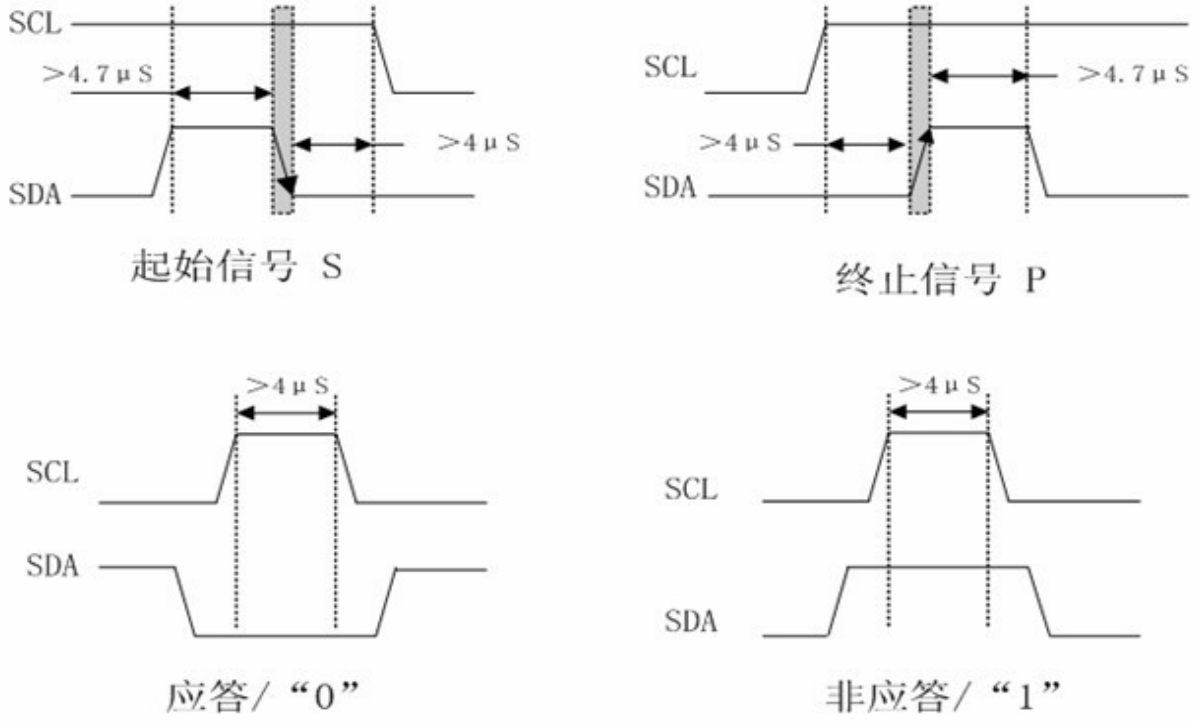



图 6.4 起始，终止，应答，非应答信号时序图

Fig. 6.4 Beginning and end, response, the response signal timing diagram

6.3.2.2 I2C 串口数据读写传输程序

```
void init()          //不忙
 {
  sda=1;
  scl=1;
  }
  void delay(void)   //延时约 7us
                                    {
                                     _nop_();
                                     _nop_();
                                     _nop_();
                                     _nop_();
                                     _nop_();
```

```
    _nop_();
    _nop_();
  }
  void start(void)   //起始信号
  {
    sda=1;
    delay();
    scl=1;
    delay();
    sda=0;
    delay();
    }
void stop(void)     //终止信号
{
  sda=0;
    delay();
    scl=1;
    delay();
    sda=1;
    delay();
    }
  void ask()        //应答信号
  {
    unsigned char i;
    i=0;
    scl=1;
    delay();
    while((sda=1)&&(i<200))
        i++;
    scl=0;
    delay();
    }
    void noask(void)   //非应答信号
    {
    sda=1;
    delay();
    scl=1;
    delay();
    scl=0;
    delay();
    }
void iicwr_byte( unsigned char dat)   //写字节
  {
    unsigned char i;
    scl=0;
    for(i=0;i<8;i++)
    {
     if(dat&0x80)
      {
       sda=1;
       }
      else
       {
       sda=0;
        }
      dat=dat<<1;
      delay();
      scl=1;
      delay();
      scl=0;
```

```
        delay();
       }
       sda=1;
       delay();
     }
   unsigned char iicre_byte(void)     //读字节
   {
      unsigned char i,dat;
     scl=0;
     delay();
     sda=1;
     delay();
     for(i=0;i<8;i++)
     {
       scl=1;
       delay();
       dat=dat<<1;
       if(sda)
       {
         dat++;
        }
       scl=0;
       delay();
       }
     return dat;
     }
//以下为写时序
void write_byte( unsigned char add, unsigned char
dat)
     {
       init();
       start();
       iicwr_byte(0xA2);
       ask();
       iicwr_byte(add);
       ask();
       iicwr_byte(dat);
       ask();
       stop();
       delay();
       }
     //以下为读时序
unsigned char read_byte(unsigned char add)
       {
         unsigned char a;
         init();
         start();
         iicwr_byte(0xA2);
         ask();
         iicwr_byte(add);
         ask();
         start();
         iicwr_byte(0xA3);
         ask();
         a=iicre_byte();
         noask();
         stop();
         return a;
       }
```

6.3.2.3 寻址约定

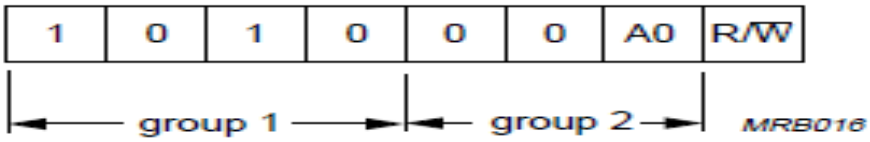



图 6.5 PCF8663 的片地址

Fig.6.5 PCF8663 Piece of address

PCF8563 的片地址，包括 7 位地址码和一位 R/W 如图 6.5 所示，高四位地址由厂家决定，不能改变，PCF8563 中，高四位不可用默认为 A。含有 IIC 总线的芯片，有的含有地址引脚，可以根据硬件编写软件设定低三位地址。而有的不能，如使用 PCF8563 时，用户不能改写芯片地址，统一为 2。最后一位标志着是读还是写，读 PCF8563 数据时为 1，向 PCF8563 写数据时为 0。向 PCF8563 写数据时，读时片地址为 A3H；向 PCF8563 写数据时，片地址为 A2H。

6.2.3.4 PCF8663 的读写通讯过程

PCF8663 的写通讯过程如图 6.6 所示，CPU 向 PCF8563 写数据时，先检查是否是空闲状态，若是则先发一个开始信号，紧接着发送芯片地址数据，此时读写为是写，然后相应 PCF8563 控制数据线产生一个应答信号。CPU 接收到应答位后发送 PCF8563 片内地址，同样为写，然后 PCF8563 在控制数据线产生一个应答信号。CPU 接收到应答位后发送开始发送数据，每发送完一个数据，接收到应答后，继续发送下一字节。直到 CPU 产生一个停止信号。

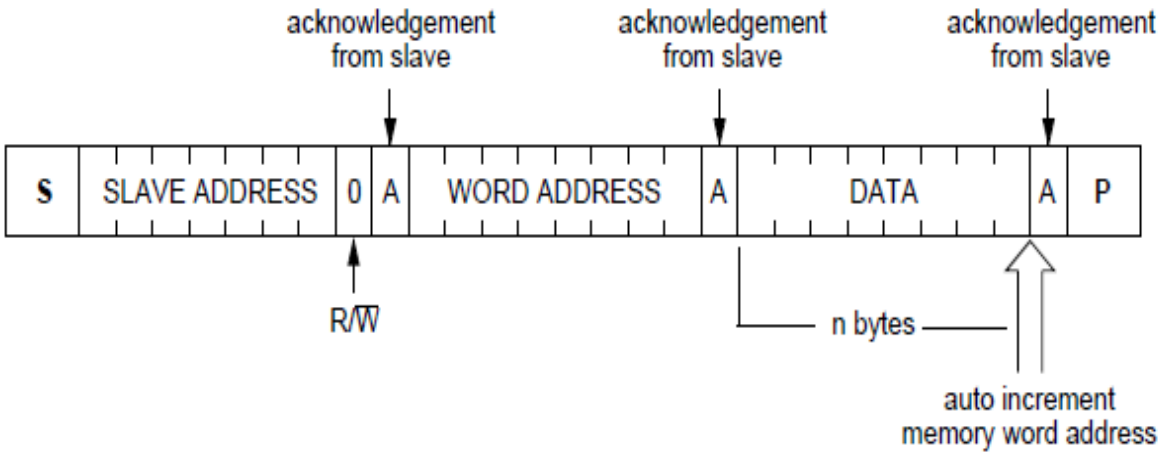



图 6.6 单片机向 PCF8663 的写通讯过程

Fig.6.6 Single chip microcomputer to PCF8663 write communication process

PCF8663 的读通讯过程如图 6.7 所示。CPU 向 PCF8563 写数据时，先检查是否是空

闲状态，若是则先发一个开始信号，紧接着发送芯片地址数据，此时读写为是写，然后相应 PCF8563 控制数据线产生一个应答信号。CPU 接收到应答位后发送 PCF8563 片内地址，同样为写，然后 PCF8563 在控制数据线产生一个应答信号。CPU 接收到应答位后再次发送一个开始信号，并再一次发送片选地址，此次为读 1，收到应答后，开始接受从机发来的数据，每收到一个字节，主机发送一个应答，最后一个字节接收完毕后，主机发送非应答，然后主机发送停止信号。

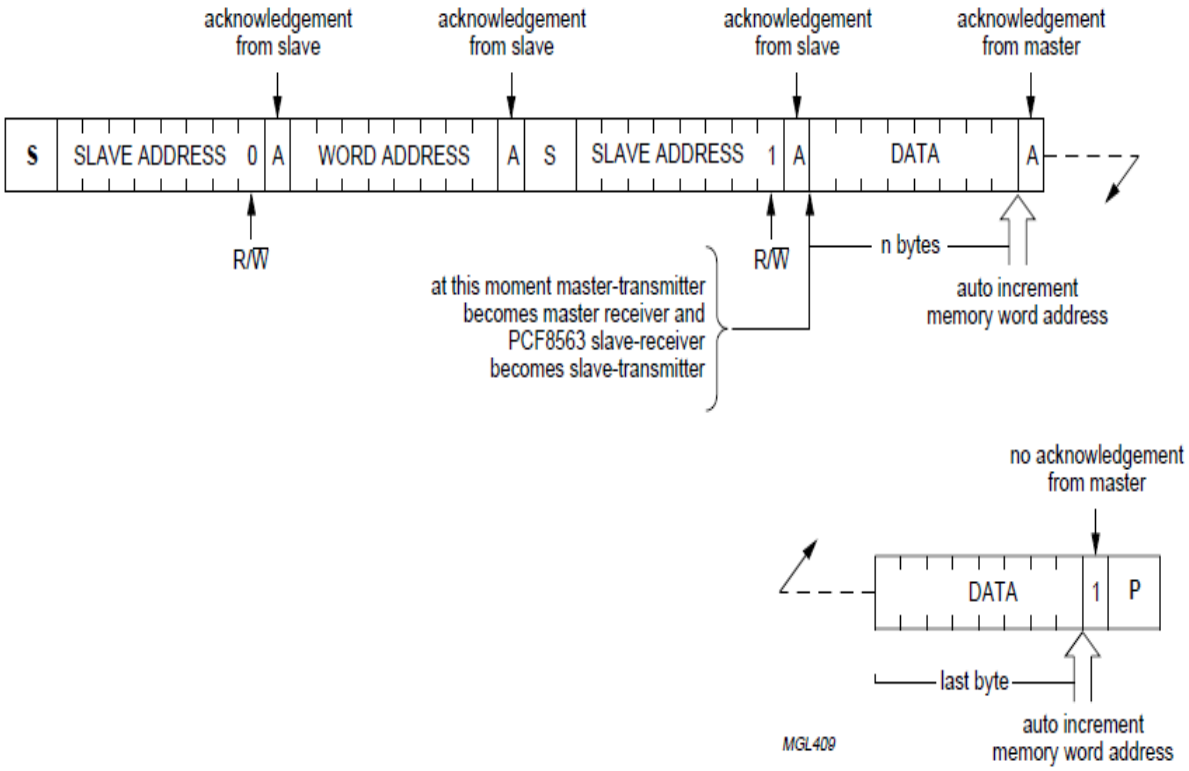



图 6.7 单片机从 PCF8663 的读通讯过程

Fig. 6.7 From the single chip microcomputer PCF8663 read communication process

由图 6.6，6.7 可见，接收数据是总是接收一方发送应答信号，发送地址时，总是从机发送应答信号。当主机为接收器是最后要发送非应答。

由于单片机没有 II-C 接口，所以用 51 单片机的 I/O 口 P2.4（接 SCLK）P2.5 口（接 SDA）模拟 II-C 总线时序，完成单片机与 PCF8563 之间的读写操作。

对 PCF8563 的初始化配置软件程序：

```
write_byte(0x0E,0x82);      // 定时控制寄存器，选择定时 TE 使能，选择计数频率 1HZ
write_byte(0x0F,0x10);      // 倒计时寄存器赋值，每半分钟分钟中断一次
write_byte(0x01,0x01);      // 控制状态寄存器 2，TIE=1 产生定时中断有效
write_byte(0x00,0x00);      // 控制状态寄存器 1 写入 00
```

上述四句语句的功能为初始化 PCF8563，使 PCF8563 每半分钟通过-INT 端口，置 INT 为低，从而完成向单片机发一次中断定时作用。

### 6.3.3 SPI 总线

A/D 转换器 AD7942 通过 SPI 口(SDO,SCK)与单片机的 SPI 口(MISO,SCLK)相连，遵循 SPI 总线协议。AD7942 的 P3.7 和 P2.5 分别和 AD7942 的 CNV 和 SDI 相连，起到控制作用。CC2500 也有外围 SPI 口（SI,SO,SCLK 和 CSN），分别和单片机接口（MISO,MISO,SCLK 和 P2.6）相连。所以，此系统属于 SPI 单主机，多从机配置。

SPI（Serial Peripheral Interface）是一种串行同步通讯协议，由一个主设备和一个或多个从设备组成，主设备启动一个与从设备的同步通讯，从而完成数据的交换。SPI 接口由 SDI（串行数据输入），SDO（串行数据输出），SCK（串行移位时钟），CS（从使能信号）四种信号构成，CS 决定了唯一的与主设备通信的从设备，如没有 CS 信号，则只能存在一个从设备，主设备通过产生移位时钟来发起通讯。通讯时，数据由 SDO 输出，SDI 输入，数据在时钟的上升或下降沿由 SDO 输出，在紧接着的下降或上升沿由 SDI 读入，这样经过 8/16 次时钟的改变，完成 8/16 位数据的传输。

SPI 是一个环形总线结构，其时序其实很简单，主要是在 sck 的控制下，两个双向移位寄存器进行数据交换。在 8 个时钟脉冲以后，主机，从机的寄存器的内容互相交换一次。这样就完成里一个 spi 时序。此系统中的单主机，多从机配置原理如图 6.8 所示。

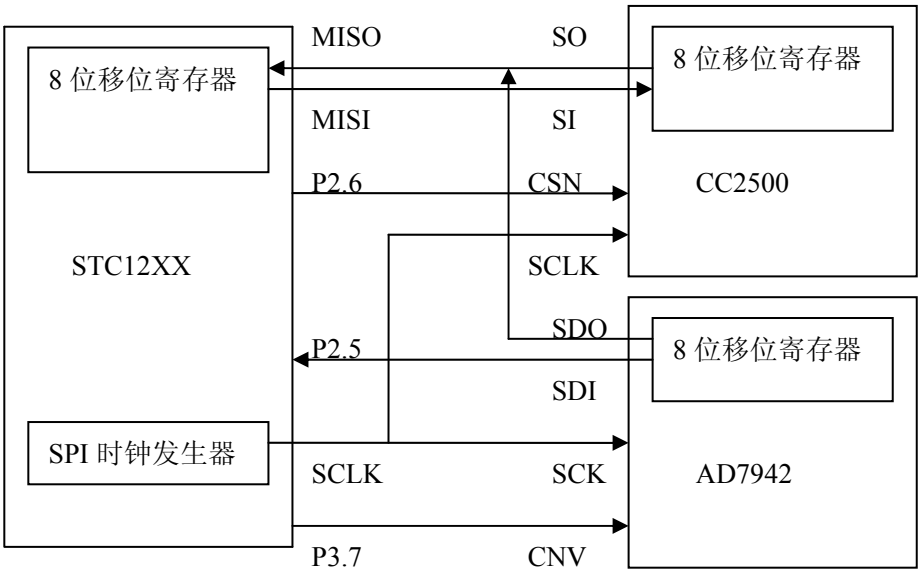



图 6.8 SPI 单片机-CC2500 /AD7942 配置

Fig.6.8 SPI microcontroller-CC2500 / AD7942 configuration

在进行主机单片机的 SPI 初始化时，要根据从机 CC2500 /AD7942 的 SPI 时序配置。

AD7942 的数据转换时序如图 6.9 所示。由图可知，本系统中，AD7942 采用 CS 模式。SDI 始终为高电平 1，仅由 CNV 控制 AD7942 的传输和转换。当 CNV 上升沿时，AD7942 开始模数转换，本系统令 CNV 持续为高直到模数转换结束，有数据手册可知，转换时间 tconv 最大为 2.2us。当转换完成，AD7942 进入传输阶段。当 CNV 变低，最高字节输出到 SDO 上。其余的数据位由随后的 SCK 下降沿进行时钟控制。即从第一个上升沿开始接收数据，下降沿改变数据。由手册可知 VIO=3.0V 时，AD7942 时钟脉冲最小周期为 29ns，即 SCK 最大频率为 34.48MHZ。直到 14 个脉冲或 SDI 变高，传输完毕，SDO 恢复高阻抗。

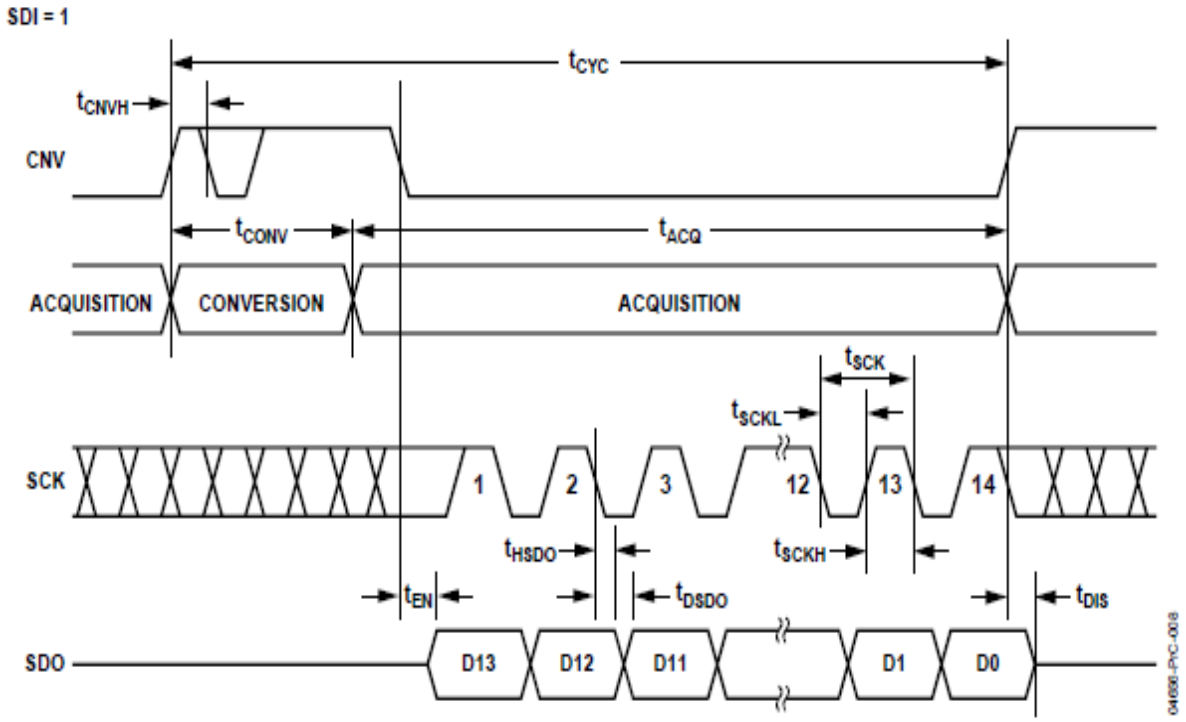



图 6.9 AD7942 的数据转换时序

Fig.6.9 AD7942 data conversion timing

根据 AD7942 的数据转换时序初始化单片机。首先介绍单片机内与 SPI 串口相关的寄存器：控制寄存器 SPCTL，状态寄存器 SPSTAT，数据寄存器 SPDAT，并结合系统进行分析。

表 6.7 SPI 控制寄存器的位描述（SPCTL-地址：85H）

Table 6.7 SPI control register a description (SPCTL-address: 85 H)

| 位 | 符号 | 描述 |
|---|---|---|
| 0 | SPR0 | SPR0/SPR1 是 SPI 时钟速率选择控制位。 |
| 1 | SPR1 | SPR1 , SPR0：<br>0 0 CPU-CLK/4 |

| | | |
|---|---|---|
| | | 0 1 CPU-CLK/16<br>1 0 CPU-CLK/64<br>1 1 CPU-CLK/128 |
| 2 | CPHA | SPI 时钟相位选择<br>1：数据在 SPICLK 的前时钟沿驱动，并在后时钟沿采样；<br>0：数据在/SS 为低（SSIG=0）时被驱动，在 SPICLK 的后时钟沿被改变，并在前时钟沿被采样。（注：SSIG=1 时的操作未定义） |
| 3 | CPOL | SPI 时钟极性<br>1：SPICLK 空闲时为高电平。SPICLK 前时钟沿为下降沿而后沿为上升沿。<br>0：SPICLK 空闲时为低电平。SPICLK 前时钟沿为上升沿而后沿为下降沿。 |
| *4* | MSTR | 主/从模式选择 |
| 5 | DORD | SPI 数据顺序：<br>1：数据字的 LSB(最低位)最先发送。0：数据字的 MSB(最高位)最先发送。 |
| 6 | SPEN | SPI 使能。<br>1：SPI 使能。0：SPI 被禁止，所有管脚都作为 I/O 口使用。 |
| *7* | SSIG | /SS 忽略<br>1：MSTR 确定器件为主机还是从机。0：/SS 脚用于确定器件为主机还是从机。 |

表 6.8 AD7942 时间说明

Table 6.8 TIMING SPECIFICATIONS

| | Symbol | Min | Typ | Max | Unit |
|---|---|---|---|---|---|
| Conversion Time: CNV Rising Edge to Data Available | $t_{CONV}$ | 0.7 | | 3.2 | µs |
| Acquisition Time | $t_{ACQ}$ | 1.8 | | | µs |
| Time between Conversions | $t_{CYC}$ | 5 | | | µs |
| CNV Pulse Width ( $\overline{CS}$ Mode ) | $t_{CNVH}$ | 10 | | | ns |
| SCK Period ( $\overline{CS}$ Mode ) | $t_{SCK}$ | 25 | | | ns |
| SCK Period ( Chain Mode ) | $t_{SCK}$ | | | | |
| VIO above 3 V | | 29 | | | ns |
| VIO above 2.7 V | | 35 | | | ns |
| VIO above 2.3 V | | 40 | | | ns |
| SCK Low Time | $t_{SCKL}$ | 12 | | | ns |
| SCK High Time | $t_{SCKH}$ | 12 | | | ns |
| SCK Falling Edge to Data Remains Valid | $t_{HSDO}$ | 5 | | | ns |
| SCK Falling Edge to Data Valid Delay | $t_{DSDO}$ | | | | |
| VIO above 3 V | | | | 24 | ns |
| VIO above 2.7 V | | | | 30 | ns |
| VIO above 2.3 V | | | | 35 | ns |
| CNV or SDI Low to SDO D15 MSB Valid ($\overline{CS}$ Mode) | $t_{EN}$ | | | | |
| VIO above 2.7 V | | | | 18 | ns |
| VIO above 2.3 V | | | | 22 | ns |
| CNV or SDI High or Last SCK Falling Edge to SDO High Impedance ($\overline{CS}$ Mode) | $t_{DIS}$ | | | 25 | ns |
| SDI Valid Setup Time from CNV Rising Edge ($\overline{CS}$ Mode) | $t_{SSDICNV}$ | 30 | | | ns |
| SDI Valid Hold Time from CNV Rising Edge ($\overline{CS}$ Mode) | $t_{HSDICNV}$ | 0 | | | ns |
| SCK Valid Setup Time from CNV Rising Edge (Chain Mode) | $t_{SSCKCNV}$ | 5 | | | ns |
| SCK Valid Hold Time from CNV Rising Edge (Chain Mode) | $t_{HSCKCNV}$ | 8 | | | ns |
| SDI Valid Setup Time from SCK Falling Edge (Chain Mode) | $t_{SSDISCK}$ | 5 | | | ns |
| SDI Valid Hold Time from SCK Falling Edge (Chain Mode) | $t_{HSDISCK}$ | 4 | | | ns |
| SDI High to SDO High (Chain Mode with BUSY indicator) | $t_{DSDOSDI}$ | | | 26 | ns |

由表 6.7，表 6.8 对 CPU 寄存器 SPCTL 和 AD7942 时序说明可知：

1）因为当 VIO=3.0V 时，AD7942 时钟脉冲最小周期为 29ns, 即最大频率为 34.48MHZ。又因为单片机用的是 12MHZ 的晶振，所以选 CPU-CLK/4 模式即可。

2）选 CPHA 为 0，在 SPICLK 的后时钟沿被改变，并在前时钟沿被采样。

3) 根据 AD7942 时序图，选 CPOL 为 1。SPICLK 空闲时为高电平，SPICLK 前时钟沿为下降沿而后沿为上升沿。

4）选 MSTR=1；

5）选 DORD=0，最高位先发送。

6）选 SPEN=1，SPI 使能。

7）选 SSIG=1；选单片机为主机模式，主从模式选择如表 6.9 所示。

所以，可以令 SPCTL=11011000（0xD8），即时钟频率 3MHZ，空闲时低电平，前时钟沿取样；高位先发送；主机模式，SPI 使能。

表 6.9 SPI 主从模式选择

Table 6.9 SPI master-slave mode choice

| SPEN | SSIG | /SS 脚 | MSTR | 主或从模式 | MISO | MOSI | SPICLK | 备注 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | X | P1.4 | x | SPI 功能禁用 | P1.6 | P1.5 | P1.7 | SPI 功能禁用。P1.6，P1.5，P1.7 作为普通 I/O 口使用。 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 从机模式 | 输出 | 输入 | 输入 | 选择为从机 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 从机模式 未被选中 | 高阻 | 输入 | 输入 | 未被选中。MISO 为高阻形态，以避免总线冲突。 |
| 1 | 0 | 0 | 1->0 | 从机模式 | 输出 | 输入 | 输入 | 如果/SS 被驱动为低电平，则 MSTR 自动清零。 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 主（空闲） | 输入 | 高阻 | 高阻 | 当主机空闲时 MOSI 和 SPICLK 以避免总线冲突。 |
| | | | | 主（激活） | | 输出 | 输出 | 作为主机激活时， |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | MOSI 和 SPICLK 为推挽输出。 |
| 1 | 1 | P1.4 | 0 | 从机 | 输出 | 输入 | 输入 | |
| 1 | 1 | P1.4 | 1 | 主机 | 输入 | 输出 | 输出 | |

表 6.10 SPI 状态寄存器的位描述（SPSTAT-地址：84h）

Table 6.10 SPI status register a description of the (SPSTAT-address: 84 h)

| | 符号 | 描述 |
|---|---|---|
| | SPIF | SPI 传输完成标志。当一次串行传输完成时，SPIF 置位。并当 ESPI 和 EA 都置位时产生中断。通过软件向其写入“1”清零。 |
| | WCOL | SPI 写冲突标志。在数据传输的过程中如果对 SPI 数据寄存器 SPDAT 执行写操作，WCOL 将置位。WCOL 标志通过软件向其写入“1”清零。 |
| -5 | - | 保留 |

本系统中，用 SPIF 查询方式，如表 6.10 所示，查询 SPI 是否传输完毕。也可以用 SPI 中断使能功能：AUXR 特殊功能寄存器的 bit3 是 SPI 中断允许控制位 ESPI，如表 6.11 所示；IE 特殊功能寄存器的 bit5 是 ADC 和 SPI 两个中断共享的总中断允许控制位 EADC_SPI； 总中断 EA。三者都为 1 时，才允许 SPI 中断使能。AUXR 不可位寻址，IE 可以位寻址。SPI 中断查询次序为“5”。

表 6.11 AUXR 特殊功能寄存器

Table 6.11 AUXR special function registers

| | | |
|---|---|---|
| 7 | T0x12 | 0：定时器 0 是 12 分频；<br>1：定时器 0 不分频； |
| 6 | T1x12 | 0：定时器 1 是 12 分频；<br>1：定时器 1 不分频； |
| 5 | UART_MOx6 | 0：串口模式 0 是 12 分频；<br>1：串口模式 0 是 2 分频； |
| 4 | EADCI | 0：禁止 AD 中断；<br>1：允许 AD 中断； |
| 3 | ESPI | 0：禁止 SPI 中断；<br>1：允许 SPI 中断； |
| 2 | ELVDI | 0：禁止低压中断；<br>1：允许低压中断； |

| | | |
|---|---|---|
| 1 | - | |
| 0 | - | |

由图 6.10 CC2500 的数据转换时序可知，数据在 SCKL 脉冲第一个上升沿开始取样，下降沿改变数据，最高位先发送。由表 6.12 SPI 接口时间要求知，CC2500 时钟频率最大为 10NHZ, 单片机用的是 11.05924MHZ 的晶振，所以选 CPU-CLK/4 模式即可。即 CC2500 的 SPI 初始化配置 SPCTL=11011000，与 AD7942 的 SPI 初始化配置相同。

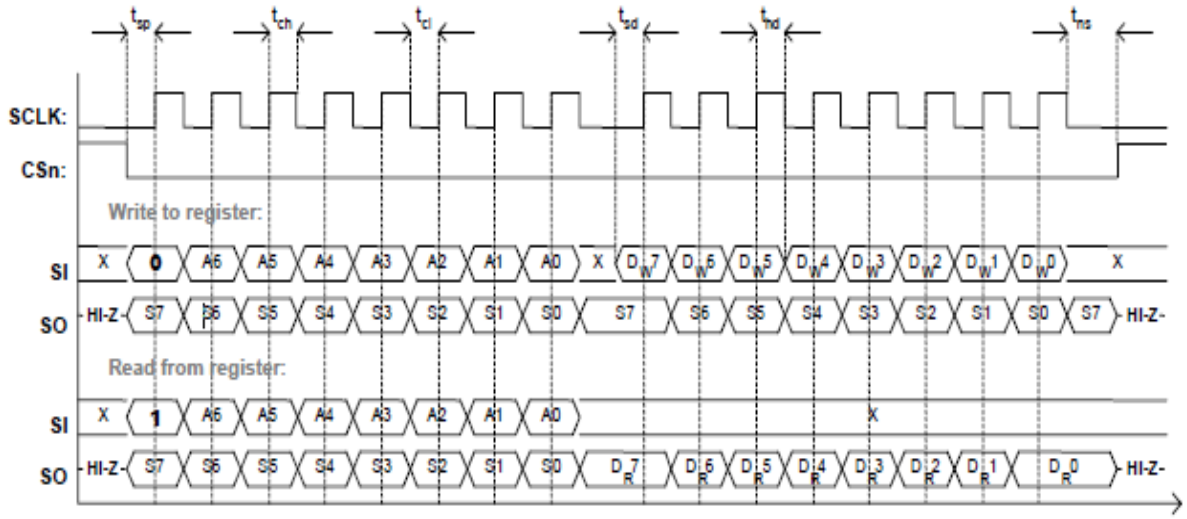



图 6.10 CC2500 的数据转换时序

Fig.6.10 CC2500 data conversion timing

表 6.12 SPI 接口时间要求

Table 6.12 Table 6.13 SPI interface time requirements

| Parameter | Description | Min | Max | Units |
|---|---|---|---|---|
| $F_{SCLK}$ | SCLK frequency | 0 | 10 | MHz |
| $t_{sp,pd}$ | CSn low to positive edge on SCLK, in power-down mode | TBD | - | µs |
| $t_{sp}$ | CSn low to positive edge on SCLK, in active mode | TBD | - | ns |
| $t_{ch}$ | Clock high | 50 | - | ns |
| $t_{cl}$ | Clock low | 50 | - | ns |
| $t_{rise}$ | Clock rise time | - | TBD | ns |
| $t_{fall}$ | Clock rise time | - | TBD | ns |
| $t_{sd}$ | Setup data to positive edge on SCLK | TBD | - | ns |
| $t_{hd}$ | Hold data after positive edge on SCLK | TBD | - | ns |
| $t_{ns}$ | Negative edge on SCLK to CSn high. | TBD | - | ns |

SPI 串口初始化软件程序：

```
SPCTL=0xD8;          // 时钟频率 3MHZ，时钟空闲时低电平，前时钟沿取样；高位先发送；
                        主机模式，SPI 使能。
SPDAT=0x00;          //启动传输阶段
```

```
while(!SPSTAT&0x80)        //用查询方式查看 SPI 是否传输完毕。SPFI 不是 1，即没传完就等。
                                                          是 1，就执行存储。
_nop_();
read [i]=SPDAT;            //将返回值赋给 read[i]
```

## 6.4 定时休眠

PCF8563 每半分钟向单片机外部中断 0 产生一次低电平触发中断，将单片机从休眠状态唤醒，单片机进入工作状态后采集发送温度数据，工作完毕后单片机控制系统再次进入休眠状态。

### 6.4.1 PCF8563 定时报警功能

实时时钟日历芯片 PCF8563，具有定时和报警功能。片内有 16 个 8 位寄存器：

1）00H-01H 控制状态寄存器，位描述如表 6.13，表 6.14 所示。

表 6.13 控制状态寄存器 1 位描述（00H）

Table 6.13 Control status register a description (00 H)

| 位 | 符号 | 描述 |
|---|---|---|
| 7 | TEST1 | TEST1=0:正常模式；<br>TEST1=1:EXT_CLKc 测试模式； |
| 5 | STOP | STOP=0:RTC 时钟源运行；<br>STOP=1：RTC 时钟源停止(CLKOUT at 32.768 kHz is still available)； |
| 3 | TESTC | TESTC=0：上电复位 override 能力被禁用（正常运行时置 0）<br>TESTC=1：上电复位 override 能力使能。 |
| 0 1 2 4 6 | 0 | 默认值为 0 |

表 6.14 控制状态寄存器 2 位描述（00H）

Table 6.14 Control status register two description (00 H)

| 位 | 符号 | 描述 |
|---|---|---|
| 5 6 7 | 0 | 默认值为 0 |
| 4 | TI/TP | TI/TP=0：当 TF 有效（TIE 有效），INT 有效；<br>TI/TP=1：当 TF 有效（TIE 有效），INT 脉冲有效;<br>（脉冲频率取决于定时计数器“所填的数值”和<br>“所选的频率”） |
| 3 | AF | 报警标志位，软件清零； |
| 2 | TF | 定时标志位，软件清零； |
| 1 | AIE | 报警中断使能； |
| 0 | TIE | 定时中断使能； |

2）如表 6.15 所示，02H-08H 为时钟日历计数器。依次为秒，分，时，天，礼拜，

月，年计数器，而且除礼拜外都是 BCD 码，如 101 1001=59； 其中，VL=0 表示时钟/日历信息的可靠性有保证；VL=1：表示时钟/日历信息的可靠性不再有保证。C=0，表示 20XX 年，C=1，表示 19XX 年。

09-0C 报警寄存器，定义报警条件，有分，时，天，周四个寄存器。每个寄存器第七位为 AE ，AE=0 报警使能端。0-6 位设定分（或者时、天、周）值。当某个报警寄存器（如，分）的 AE=0，则当每当相应的时钟日历计数器（如，分）中的计数值增加到和报警寄存器中的计数值相同时，报警标志位 AF=1 时形成中断(-INT)。报警标志位 AF 靠软件清零。

表 6.15 02H-0CH 寄存器

Table 6.15 02 H-0 CH registers

| Address | Register name | BCD format tens nibble | | | | BCD format units nibble | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Bit 7 $2^3$ | Bit 6 $2^2$ | Bit 5 $2^1$ | Bit 4 $2^0$ | Bit 3 $2^3$ | Bit 2 $2^2$ | Bit 1 $2^1$ | Bit 0 $2^0$ |
| 02H | Seconds | VL | <seconds 00 to 59 coded in BCD> | | | | | | |
| 03H | Minutes | – | <minutes 00 to 59 coded in BCD> | | | | | | |
| 04H | Hours | – | – | <hours 00 to 23 coded in BCD> | | | | | |
| 05H | Days | – | – | <days 01 to 31 coded in BCD> | | | | | |
| 06H | Weekdays | – | – | – | – | – | <weekdays 0 to 6 >[1] | | |
| 07H | Months/Century | C | – | – | <months 01 to 12 coded in BCD> | | | | |
| 08H | Years | <years 00 to 99 coded in BCD> | | | | | | | |
| 09H | Minute alarm | AE | <minute alarm 00 to 59 coded in BCD> | | | | | | |
| 0AH | Hour alarm | AE | – | <hour alarm 00 to 23 coded in BCD> | | | | | |
| 0BH | Day alarm | AE | – | <day alarm 01 to 31 coded in BCD> | | | | | |
| 0CH | Weekday alarm | AE | – | – | – | – | <weekday alarm 0 to 6 >[1] | | |

3）0D 寄存器控制时钟输出频率，本系统未用时钟输出功能。0D 寄存器第 7 位 FE=1，输出时钟使能；FD1，FD0 选择输出频率。

4）0E-0F 定时控制和倒计时寄存器，位描述如表 6.16 所示。倒计时寄存器 0F 中装入的初值，当定时使能 TE=1 时，倒计时寄存器开始按照设定的时钟频率倒计时，当倒计时寄存器中的数减到零时，定时标志位 TF=1 时形成中断(-INT)。定时标志位 TF 靠软件清零。

表 6.16 定时控制寄存器（0EH）

Table 6.16 Timing control register (0 EH)

| | | |
|---|---|---|
| 7 | TE | TE=0：定时关闭；<br>TE=1：定时使能； |
| 6-2 | - | 无效 |

| | | |
|---|---|---|
| 1 | TD1 | 为倒计时寄存器选择时钟频率；<br>(00 ，01， 10，11//4096，64， 1， 1/60 HZ） |

为达到定时向单片机产生中断的要求，可采用定时计数器定时功能，也可采用报警功能。由于报警功能最短报警间隔时间为一分钟，而定时器定时功能定时时间，最小可达可达 1/4096，最大可达 4 到 5 分钟。短时间定时，利用定时器定时更加灵活方便。所以，本系统利用定时器定时产生中断。定时时间为半分钟 1 次。只需用 II-C 串口完成相关寄存器的配置即，配置 PCF8563 定时中断相关程序如下：

```
write_byte(0x0E,0x82);      // 定时控制寄存器，选择定时 TE 使能，选择计数频率 1HZ
write_byte(0x0F,0x10);      // 倒计时寄存器赋值，每半分钟分钟中断一次
write_byte(0x01,0x01);      // 控制状态寄存器 2，TIE=1 产生定时中断有效
write_byte(0x00,0x00);      // 控制状态寄存器 1 写入 00
```

上述四句语句的功能为初始化 PCF8563，使 PCF8563 每半分钟通过-INT 端口，置 INT 为低，从而完成向单片机发一次中断定时作用。

### 6.4.2 单片机休眠

单片机有掉电休眠功能，采集完温度数据后，要求系统进入休眠状态。由表 6.6 PCON 寄存器可知，只要置 PD 位 1 即可让单片机处于休眠状态。休眠时，外部时钟停振，定时器，串行口全部停止工作，只有外部中断继续工作。可由外部中断低电平触发或下降沿触发模式唤醒。本系统中由于 PCF8563 产生的是低电平中断，所以单片机采用外部中断 0 低电平触发模式。与单片机休眠中断有关的寄存器除了表 6.6 PCON 寄存器：置 PD 位 1；表 6.8 定时器的控制寄存器 TCON：IE0 外部中断标志位，IT0=0 外部中断低电平触发；还要开启外部使能中断 EX0=1，和总中断 EA=1。IE 中断寄存器如表 6.17 所示。

表 6.17 IE 中断允许控制寄存器

Table 6.17 IE interrupt allow control registers

| | |
|---|---|
| EA | 总中断 |
| EADC_SPI | 总中断 ADC_SPI 中断 |
| ES | 串口中断允许位 |
| ET1 | T1 溢出中断允许位 |
| EX1 | 外部中断 1 中断允许位 |
| ET0 | T0 溢出中断允许位 |

| | |
|---|---|
| EX0 | 外部中断 0 中断允许位 |

开启外部中断 0，单片机进入休眠相关程序：

```
IT0=0;                    // 设外部中断 0 为低电平触发
EX0=1;                    // 允许响应外部中断 0  (初始化单片机外部中断 0 )
EA=1;                     // 总中断开关;
PCON=PCON|0x02;           // 单片机进入休眠状态
```

注意，单片机从休眠状态被唤醒时，先响应中断，再顺序执行休眠语句 PCON=PCON|0x02,下面的相应语句。而与之相反，单片机从空闲状态被唤醒时，先执行 PCON=PCON|0x01 后面的语句，再执行中断语句。

单片机从掉电模式被唤醒后进入工作状态的中断函数程序：

```
void work () interrupt 0
{
  ……
 }
```

## 6.5 终端模块无线发送

### 6.5.1 CC2500 重启

当能量供应开启时，系统必须重启。CC2550 上的其他重启可能性为 SRES 命令滤波。通过发布这个滤波，所有内部寄存器和状态被设置为空闲状态。功率增加序列如图 6.11 所示。

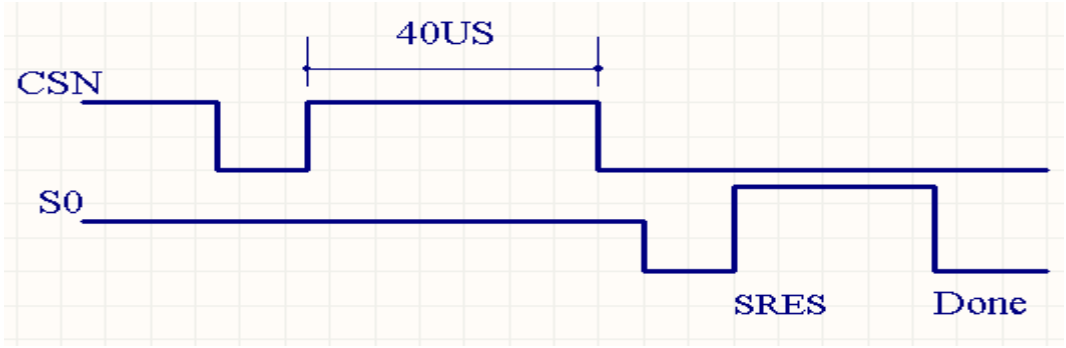



图 6. 11 功率增加序列

Fig. 6.11 power increase sequence

由图可知功率增加序列为：置 SCLK=1 and SI=0，为避免引脚控制模式下潜在的

问题；滤波 CSn 低/高；保持 CSn 为高至少 40μs；将 CSn 拉为低，等待 SO 变低；发布 SRES 滤波；当 SO 再次变低时，重启完成，芯片处于空闲状态。重启完毕。CC500 重启相关软件程序为：

```
CSN=1;
SCLK=1;
SI=0; //sclk=1,si=0.为避免引脚控制模式
        下的潜在问题
SO=1;
CSN=0;  //csn 为低
_nop_();
CSN=1;  //csn 为高至少 40us
for( i=0;i<100;i++)
nop_();
CSN=0;  //拉低 CSN, sdo 立刻变低
while(SO==1)
{
SBUF=0X31;
delay();
 }
SBUF=0X32;
while(!TI);
TI=0;
delay();
for(i=0;i<8;i++)//发送返回值
{
SCLK=0;   //在第一个上升沿采集数据
SO_1=SO_1<<1;
if(j&0x80)
SI=1;
SI=0;
 _nop_(); //最短时间 50ns
_nop_();
_nop_();
SCLK=1;
_nop_();
if(SO==1 )
{
SO_1=SO_1+1;
 }
_nop_();
_nop_();
 j=j<<1;
}
SCLK=0;
```

此程序中，通过 SPI 口向 CC2500 写入 0X30 的值，即完成了重启命令的发送。此演示程序是通过

### 6.5.2 CC2500 配置

CC2500 有从 0x00H 到 0x2EH 共 47 个配置寄存器。所有的配置寄存器均能读和写。当对寄存器写时，每当一个待写入的数据字节传输到 SI 脚时，状态字节将被送至 SO

脚。通过在地址头设置突发位，连续地址的寄存器能高效地被访问。这个地址在内部计数器内设置起始地址。每增加一个新的字节（每 8 个时钟脉冲），计数器值增加 1。突发访问，不管是读访问还是写访问，必须通过设置 CSn 为高来终止。SPI 接口上所有的处理都同一个包含一个读/写位，一个突发访问位和一个 6 位地址的头字节一起作用。

配置寄存器的具体数据有专门的配置寄存器软件 SmartRF studio 实现最优配置，用户可以根据需要做个别寄存器的修改，界面如图 6.12 所示。

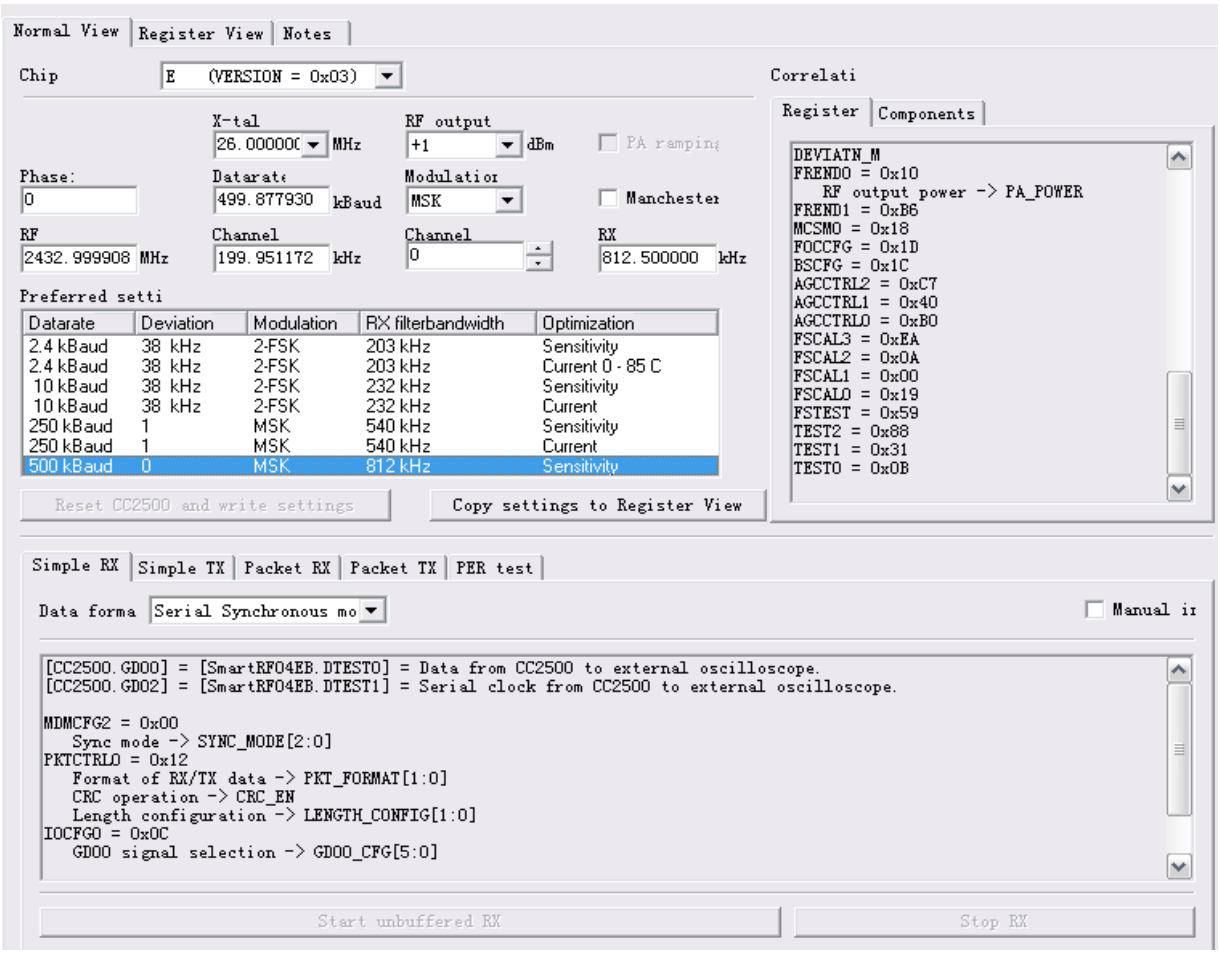



图 6.12 SmartRF studio 用户接口

Fig. 6.12 SmartRF studio user interface

CC2500配置关键参数设计有：功率降低/提升模式；晶体振荡器功率降低/提升；接收/传输模式；RF 信道选择；数据率调制格式化；RX 信道滤波器带宽；RF 输出功率；64 位传输 FIFO 数据缓冲；数据包通信硬件支持；交错前向误差校正；数据白化；电磁波激活（WOR）。相关配置程序如下：

```
unsigned char code pizhi2500[47]={0x06,0x29,0x07,0x07,0xD3,0x91,0x04,0x05,0x44,0x00,0x00,0x08,
0x00,0x5D,0x93,0xB1, 0X86,0x83,0x13,0x22,0xFB,0x44,0x07,0x30,0x18,0x16,0x6c,0x03,0x40,0x91,
0x87,0x6B,0xF8,0x56,0x10,0xA9,0x0A,0x00,0x11,0x41,0x00,0x59,0x7F,0x3F,0x88,0x31,0x0B};
```

```
wr(0x40);              // 将头字节写入SPI的MOSI口，头字节表示突发写访问以00H为首的地址：
for(i=0;i<46;i++)      //依次将配置数据写入47配置寄存器
wr(pizhi2500[i]);      //连续向MOSI口写入要配置的数据
```

### 6.5.3 CC2500向中继器发送数据

CC2500重启，配置完毕之后。就可以发送数据了。发送数据完整操作软件流程框图如图6.13所示。

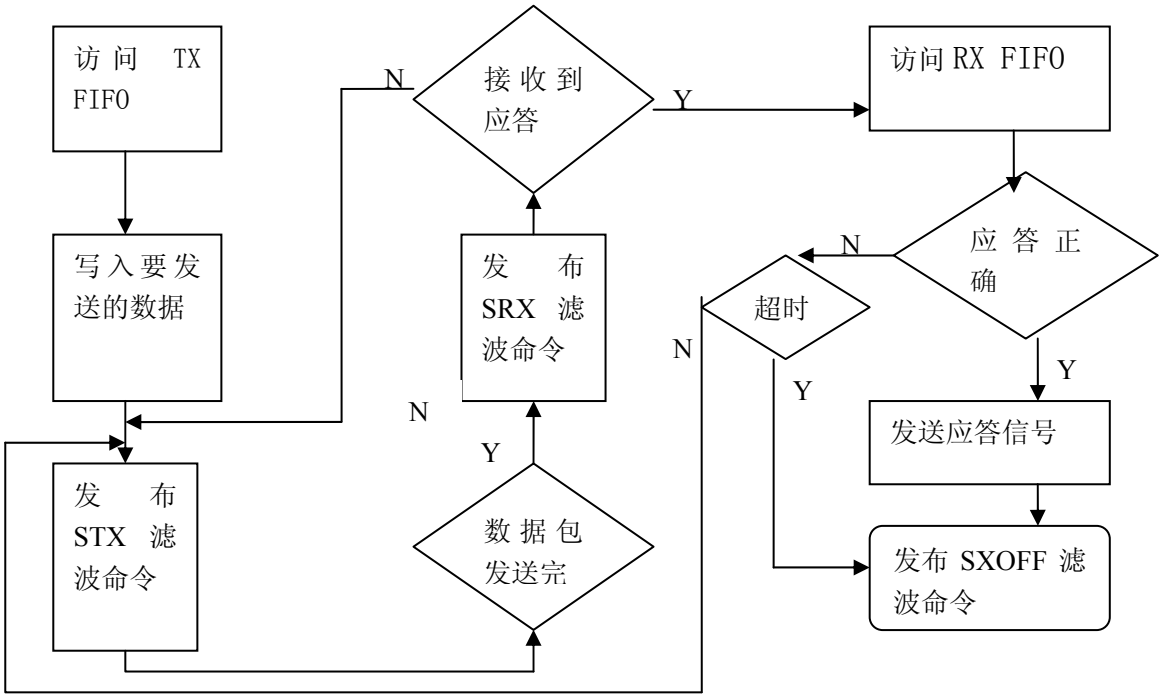



图6.13 终端CC2500发送数据软件流程框图

Fig.6.13 CC2500 terminal to send data flow diagram of the software

1）访问FIFO 。CC2500中，含有64k个FIFO堆栈区。可以通过配置寄存器分配读写空间的大小。访问FIFO时，先通过SPI发送一个头字节,头字节格式如表6.18所示。FIFO的访问地址为0F，读为1，写为0。突发访问为1，表示连续访问堆栈，直到CSN变高结束，突发访问为0，只能访问一个字节，便结束访问。

表6.18 头字节

Table 6.18 Head bytes

| 7 | 6 | 5～0 |
|---|---|---|
| 读写位 | 突发访问位 | 访问地址 |

每当从SI口写入一个头字节，同时从SO口输出一个状态字节，表示此时芯片的状态，

如提供芯片转台模式，TX FIFO 是否溢出等信息。状态字节如表6.19所示。

表6.19 状态字节概述

Table 6.19 State bytes in the paper

<table>
<tr><th>比特</th><th>名称</th><th>描述</th></tr>
<tr><td>7</td><td>CHIP_RDYn</td><td>保持高，直到功率和晶体已稳定。当使用 SPI 接口时应始终为低。</td></tr>
<tr><td>6:4</td><td>STATE[2:0]</td><td>表明当前主状态机模式
<table>
<tr><th>值</th><th>状态</th><th>描述</th></tr>
<tr><td>000</td><td>空闲</td><td>空闲状态</td></tr>
<tr><td>001</td><td>RX</td><td>接收模式</td></tr>
<tr><td>010</td><td>TX</td><td>发送模式</td></tr>
<tr><td>011</td><td>FSTXON</td><td>快速 TX 准备</td></tr>
<tr><td>100</td><td>校准</td><td>频率合成器校准正运行</td></tr>
<tr><td>101</td><td>迁移</td><td>PLL 正迁移</td></tr>
<tr><td>110</td><td>RXFIFO_OVERFLOW</td><td>RX FIFO 已经溢出。读出任何有用数据，然后用 SFRX 冲洗 FIFO。</td></tr>
<tr><td>111</td><td>TXFIFO_OVERFLOW</td><td>TX FIFO 已经下溢。同 SFTX 应答</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>3:0</td><td>FIFO_BYTES_AVAILABLE[3:0]</td><td>TX FIFO 中的自由比特数。若 FIFO_BYTES_AVAILABLE=15，它表明有 15 或更多个比特是可用/自由的。</td></tr>
</table>

相关访问程序语句：

```
SPCTL=0xD8;              // 时钟频率 3MHZ，时钟空闲时低电平，前时钟沿取样；高位先发送；
                            主机模式，SPI 使能。
SPDAT=0x7F;              //启动传输阶段 ,发送 7F,表示连续向堆栈写数据
SPDAT=a;
SPDAT=b;
……                       // 通过 SPI 连续传输数据，数据被连续写入 FIFO 堆栈区
CSN=1;                   //直到 CSN 变高，访问 FIFO 停止。
SPDAT=0xFF;              //启动传输阶段 ,发送 FF,表示连续从堆栈读数据
while(!SPSTAT&0x80)      //用查询方式查看 SPI 是否传输完毕。SPFI 不是 1，即没传完就等。
                                                          是 1，就执行存储。
_nop_();
SPDAT=0x00;              //启动 SPI
read [i]=SPDAT;          //将访问 FIFO 读取的值赋给 read[i]
```

2)测试输出控制引脚。3个数字输出引脚 GDO0 和 GDO1和 GDO2为常规控制脚。

它 们 的 功 能 分 别 由 IOCFG0.GDO2.GDO0_CFG ， IOCFG1.GDO1_CFG 和 IOCFG2.GDO3_CFG 控制。这些信号能用作 MCU 的中断。GDO1 和在 SPI 接口上的 SO 脚是同一脚，因此这个脚上控制的输出在 CSn 高时才有效。GDO1 的默认值为 3 状态，当 SPI 接口和其它设备一起使用时这是有效的。

本系统中，设置GDO0为：当同步词汇被送出/收到时声明，在数据包末端时反声明；对 RX，当可选地址检测失败或 RX FIFO 溢出时，引脚被反声明。若 TX FIFO 下溢，这个引脚将同样被反声明。当一个数据包被 OK CRC 收到时声明。当第一个字节从 RX FIFO 中读取时反声明。设置GDO0为：当一个数据包被 OK CRC 收到时声明。当第一个字节从 RX FIFO 中读取时反声明。本系统正式通过单片机循环查询GDO0，GDO0的状态，来判断CC2500是否接受或发送完数据的。

3）发布滤波命令。状态寄存器和命令滤波的地址均含在0x30-0x3D中，用突发位来区别是访问状态寄存器还是命令滤波器。当发送命令滤波时（共14 个命令滤波，如表6.20所示），直接通过SPI串口发送命令滤波所在的地址即可。所以命令滤波对应头字节读写位只能为写，突发访问表示是命令滤波寄存器还是状态寄存器，只能为0。访问状态寄存器时，头字节的突发访问为自然是1，读写为必须为1，因为只能读状态寄存器，不能写状态寄存器。

表6.20 滤波命令

Table 6.20 Filter command

| 地址 | 滤波名 | 描述 |
|---|---|---|
| 0x30 | SRES | 重启芯片 |
| 0x31 | SFSTXON | 开启和校准频率合成器（若 MCSM0.FS_AUTOCAL=1） |
| 0x32 | SXOFF | 关闭晶体振荡器 |
| 0x33 | SCAL | 校准频率合成器并关断（开启快速启动） |
| 0x34 | SRX | 启用 RX。若上一状态为空闲且 MCSM0.FS_AUTOCAL=1 则首先运行校准。 |
| 0x35 | STX | 空闲状态：启用 TX。若 MCSM0.FS_AUTOCAL=1 首先运行校准。若在 RX 状态且 CCA 启用：若信道为空则进入 TX |
| 0x36 | SIDLE | 离开 RX/TX,关断频率合成器并离开电磁波激活模式若可用 |
| 0x37 | SAFC | 运行 23.1 节列出的频率合成器的 AFC 调节 |
| 0x38 | SWOR | 运行 28.5 节描述的自动 RX 选举序列（电磁波激活） |
| 0x39 | SPWD | 当 CSn 为高时进入功率降低模式。 |
| 0x3A | SFRX | 冲洗 RX FIFO 缓冲 |
| 0x3B | SFTX | 冲洗 TX FIFO 缓冲 |
| 0x3C | SWORRST | 重新设置真实时间时钟 |
| 0x3D | SNOP | 无操作。可能用来为更简单的软件将滤波命令变为 2 字节。 |

发送命令滤波，直接发送相关的头字节即可。读状态寄存器时先发送相应头字节，在下一个SPI时序在读取状态寄存器中的数值。访问滤波寄存器和状态寄存器的相关软件程序如下 ：

```
SPCTL=0xD8;              // 时钟频率 3MHZ，时钟空闲时低电平，前时钟沿取样；高位先发送；
                            主机模式，SPI 使能。
SPDAT=0x34;              //发布接收命令
SPDAT=0XF4;              //发送访问状态寄存器 0x34
while(!SPSTAT&0x80)      //用查询方式查看 SPI 是否传输完毕。SPFI 不是 1，即没传完就等。
                                                    是 1，就执行存储。
_nop_();
SPDAT=0x00;              //启动 SPI
read [i]=SPDAT;          //将访问状态寄存器的状态值赋给 read[i]
```

## 6.6 中继器接收发送程序

中继器要与很多终端进行通讯交换数据，还要向上端采集器发送数据，因此，中继器的工作繁忙，地位重要。为正确有序的工作，本系统采用分时的方法。即采集终端按照软件设定程序依次向中继器发送数据，这样每个终端都单独分配一定的时间段与中继器发生数据传输，避免了多点对一点的通信冲突。数据包括中继器地址，终端采集器自

己的节点地址，要发送的温度数据。中继器按顺序接收数据，并检查数据是否正确，若数据正确，则给相应的终端发送应答信号，本系统中发送的应答信号为相应的终端地址。若中继器收到终端的应答信号，则立即将温度数据传给采集器。中继器接收发送程序框图如图6. 14。

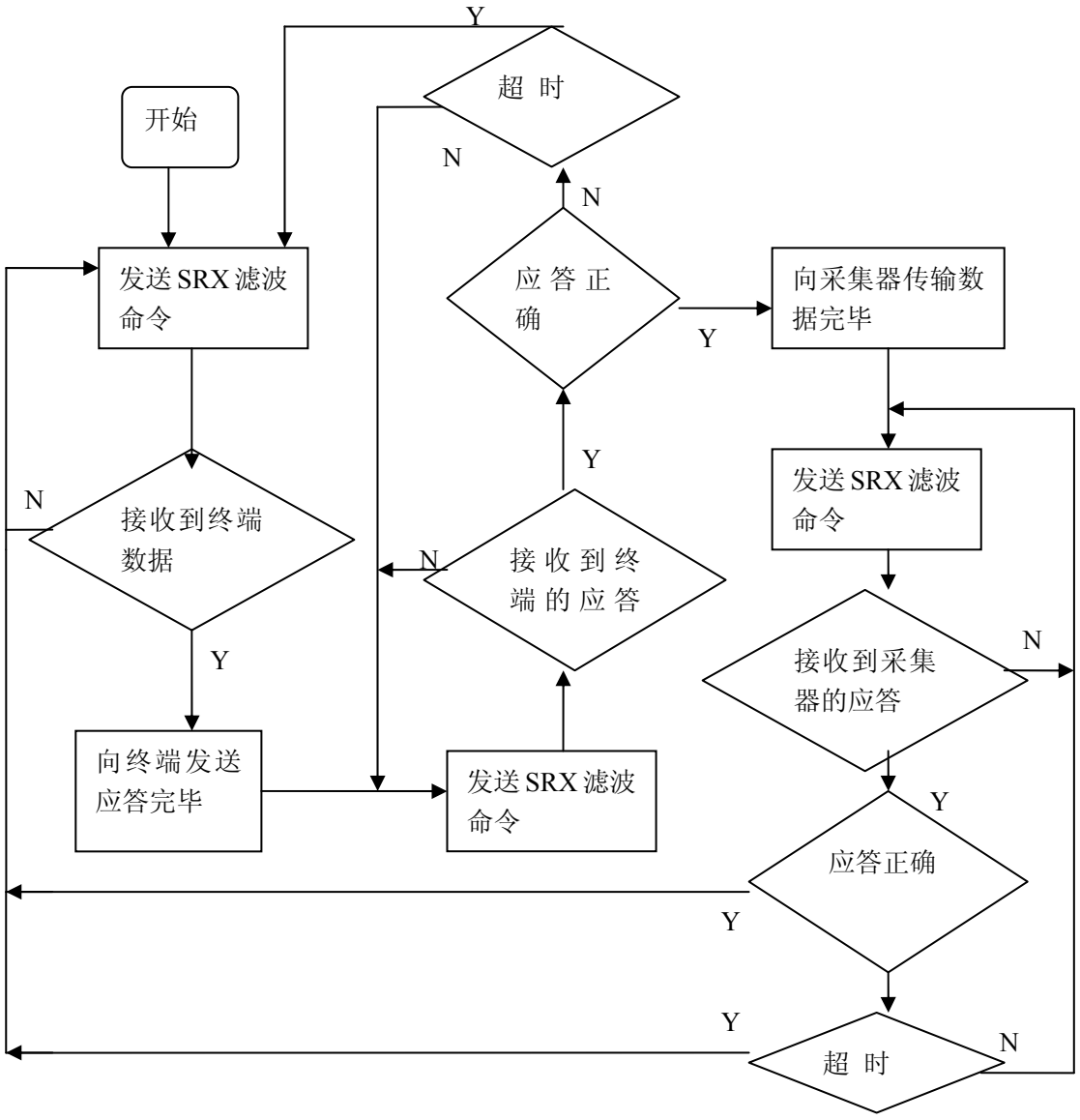



图6.14 中继器接收发送程序框图

Fig. 6.14 Repeater to receive data and to send data flow diagram of the software

由于中继器频繁的进行接收发送，为保证收发有序进行，要注意收发关系。当处于发送状态时，若使用 SRX 命令，则终止发送传输，向 RX 转换。若当 STX 或 SFSTXON 命令滤波被使用时，通信控制装置处于 RX 状态，则“若清理信道，则进行 TX 功能被使用。若信道不清洁，则芯片将仍处于 RX 中 。MCSM1.CCA_MODE 设置控制清理信道估计的条件，清理信道的条件如表 6.21 所示。

表 6.21 清理信道的条件

Table 6.21 The condition of cleaning channel

| 设定 清理信道指示 | 清理信道条件 |
|---|---|
| 0 (00) | 总是 |
| 1 (01) | 若 RSSI 在门限之下 |
| 2 (10) | 除非当前接收一个数据包 |
| 3 (11) | 若 RSSI 在门限之下除非当前<br>接收一个数据包 |

## 6.7 采集器程序及上位机组态王显示

采集器的收发软件流程与中继器的接收发送程序框图完全相同，只是中继器将数据传给采集器，而采集器将数据通过以太网口传给 PC 机而已。所以采集器的软件框图在此不再赘言。

在组态王运行环境—工程浏览器下，用户经过精心设计，利用快速应用设计工具来实现所要达到的功能。通过组态王实现的功能如下:

1）形象的显示实际环境中的画面。

2）设计各种曲线图，表框图，实物图，便于实时观察，一目了然，也便于提取具体数值。

3）数据包格式易于工业向上位机传输，易于设备间的相互传输。

## 6.8 本章小结

1）本章介绍了三种串口通讯：微处理器与 PC 机的 URAT 串口，PCF8563 与单片机的 IIC 总线串口，AD7942、CC2500 与单片机的 SPI 串口。

2）本章设计了 PCF8563 的定时程序，并设计了 CC2500 无线收发程序。

3）本章设计了采集终端、中继器、采集器三者之间的通讯协议。

4）本章介绍了组态王显示界面。

# 7 实验调试及仿真

本章对本系统中温度采集终端，中继器，采集器分别进行了调试实验，并调试了三者之间的通讯协议，最后用组态王显示了界面。

温度终端采集实验电路板如图 7.1 所示。中间为微处理器 STC12E5608AD，左下方为定时日历芯片 PCF8563，右下方为仪用放大芯片 AD8629，中间左边为 AD 转换芯片 AD7942，最上方为 CC2500 无线收发模块。 对于无线收发模块，目前通常有 F 型天线和弹簧式天线，实验证明图 7.1 中的 F 型天线收发信号更好。

图 7.1 温度采集终端实验板

Fig. 7.1 Temperature gathering terminal experiment board

通过用串口调试小助手帮助调试PCF8563的定时程序，控制系统周期性的工作休眠，程序运行良好对。程序每隔半分钟输出一次数据，其余时间处于休眠状态。程序运行结果如图 7.2 所示。

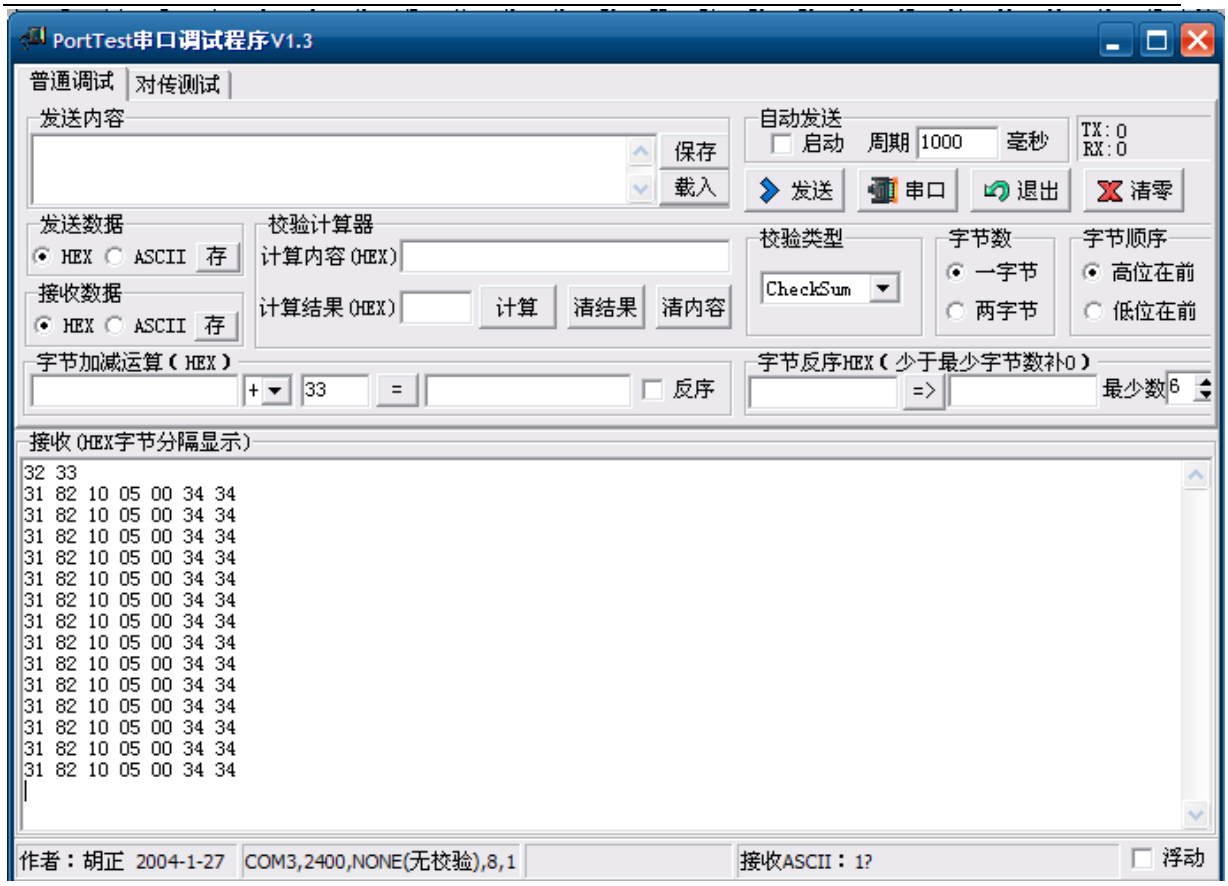



图 7.2 调试 PDF8563 程序时串口助手显示界面

Fig. 7.2 Debugging PDF8563 program assistant display interface serial port

通过对 AD8629 放大器组成的电桥电路进行实验，得到的实验结果证明本系统中设计的电路具有很好的线性度。实验数据如图 7.3 所示，横轴为 PT1000 电阻值，纵坐标为输出电压值。

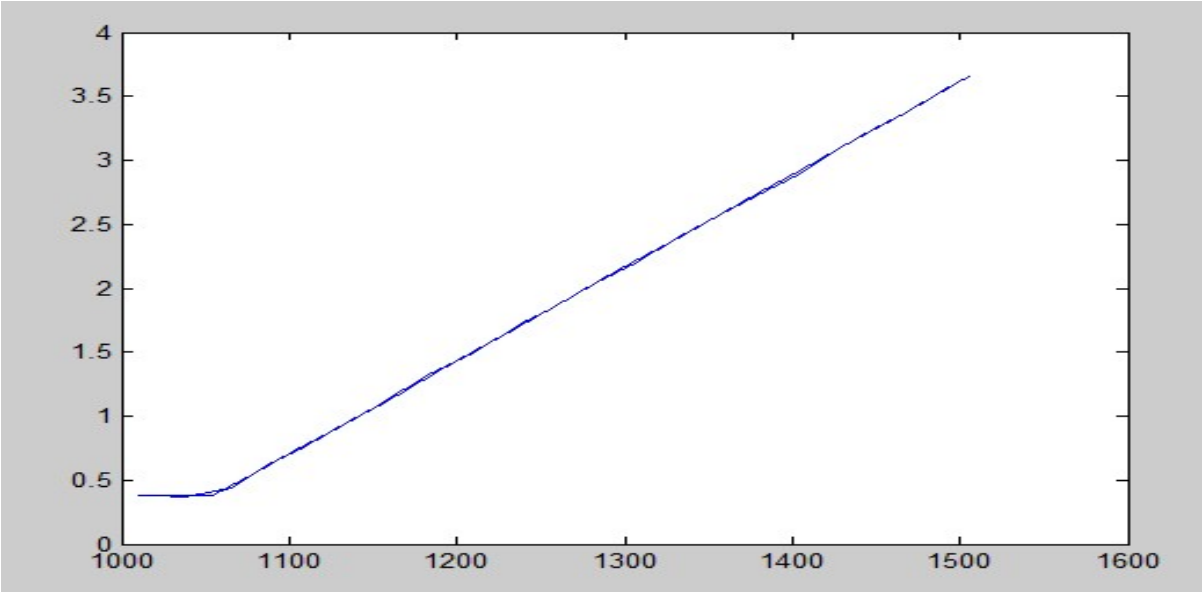



图 7.3 线性电桥实验数据图

Fig. 7.3 Linear bridge experiment data figure

在进行通讯协议调试试验时，通过两块 CC2500 模块（1 号，2 号）进行相互无线收发，两模块收发数据同样用串口助手显示，以便直观的验证传输数据是否正确。收发实验硬件图如图 7.4 所示，两块 CC2500 模块分别通过 RS232 连接到 PC 机上，然后进行两块 CC2500 模块的相互收发实验。

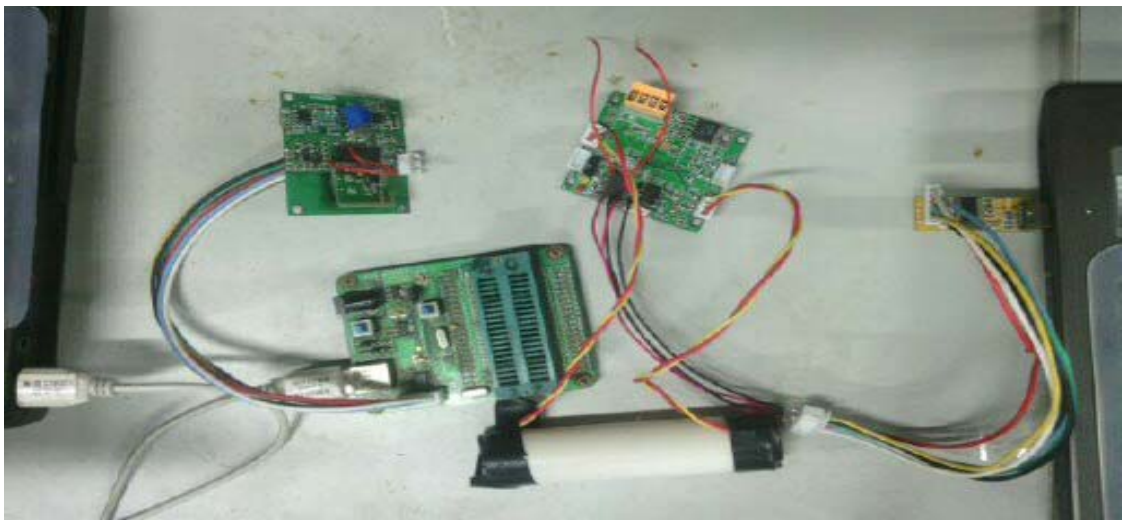


图 7.4　CC2500 无线收发实验

Fig. 7.4　CC2500 wireless transceiver experiment

中继器电路板如图 7.5 所示。此实验板反面焊有 CC2500 模块，能将 220v 交流电转化为稳定的 3.3v 电。左下方安全隔离变压器 PE2812S，中间左边的芯片为开关稳压器 LM2575-3.3 芯片，中间右边的芯片是微处理器 STC12E5608AD。

图 7.5 中继器实验板

Fig. 7.5　Repeaters experiment board

采集器电路板如图 7.6 所示。

图 7.6　采集器实验板

Fig.7.6　Terminal experiment board

串口转网口模块 C2000 E210 电路板如图 7.7 所示。

图 7.7　C2000 E210 电路板

Figure 7.7　C2000 E210 circuit board

采集器将数据传给 PC 机，组态王显示界面如图 7.8 所示。

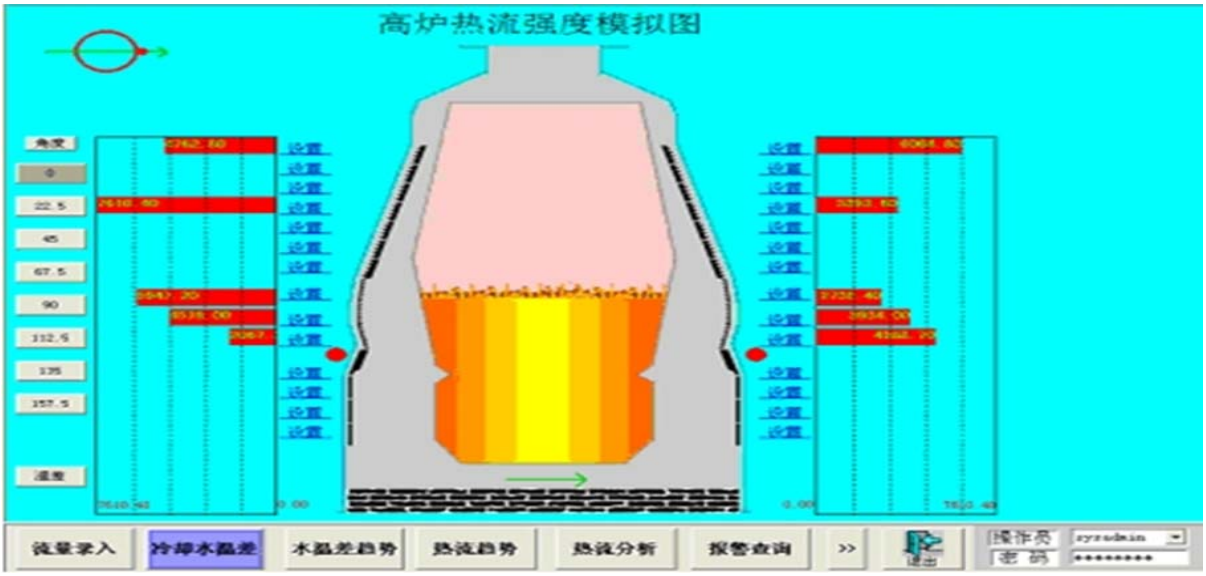



图 7.8　界面显示

Figure 7.8　Interface display

# 8 结论与展望

论文的创新点是本文设计的系统具有高精度，低功耗，无线传输的特点。研究了如何设计线性电桥测温电路，精密的传感器电路是提高了测量精度的关键之一。巧妙地设计电路，使系统具有工作和休眠两种模式，这对实现系统的低功耗具有重要意义。研究开发了无线单片技术，采用无线方式传输数据，更加有利于系统的安装和升级，避免了有线传输带来的布线繁琐等问题。

不足之处，电源电路可以改进为节能环保的电池板充电电路。系统需进行现场调试改进。

该系统应用前景广泛：

1）目前国内高炉正在向着“大型锅炉，先进工艺”的方向发展。所以钢铁工业将对水温差检测系统有很大需求。此系统经进一步完善后可以普及推广到各大炼钢厂进行高炉水温差检测。

2）温度作为一项热工参数，在工业现场和过程控制中具有至关重要的作用。本系统不仅可以应用于冶炼行业，还可以应用于其他行业的高精度测温。如联碱行业，发酵行业等。

3）本系统可移植性强。将温度传感器换成其他高精度传感器，就可以方便的测量所需要的信号。

# 致谢

首先，我要衷心感谢我的导师徐克宝教授，正是在徐老师的悉心指导下我才能顺利地完成这篇论文。徐老师渊博的学识、严谨的治学态度给我留下了深刻的印象，徐老师丰富的实践经验以及在日常生活中的育人哲理，也给了我莫大的启发，并将使我终生受益。在此表示深深的谢意和崇高的敬意。

衷心感谢我的校外副导师张卫东教授级高级工程师对我的帮助和支持，在此表示深深的谢意。

在这几年学习中，测控系的老师们也给于了我很多帮助，在此表示深深的感谢。

同时，衷心感谢和我一同师从徐老师的同学们，在这短短的二年中，我们互相帮助、互相学习，感觉自己受益良多。

衷心感谢在百忙之中抽出时间参加我论文评阅和答辩的各位老师。

最后，感谢我的父母、如果没有他们给予我物质上、精神上的支持和帮助我很难完成学业。

马金玉

2012 年 4/6 月

# 参考文献

1．张寿荣.中国高炉炼铁的现状和存在的问题[J].第二届中德（欧）冶金技术研讨会论文集,2007: 13-21.

2．首钢京唐公司 2 号高炉成功点火烘炉[J].钢铁研究, 2009, (6): 29.

3．崔大福.水温差在线检测技术在高炉上的应用[J].中国冶金, 2007,17(10): 8-13.

4．张雷.高炉冷却系统热负荷测量与在线监测系统的研究[D].陕西西安:西安电子科技大学, 2007.

5．刘瑞.基于 MP3 语言录音格式的智能公交车[D].安徽合肥:合肥工业大学, 2009.

6．王宝刚.鞍钢铜冷却壁高炉的热负荷管理[J].炼铁,2008,27(2):1-4.

7．徐南平.宝钢 3 号高炉冷却壁的热负荷测定研究[J].宝钢技术,1999,(4):15-18.

8．胡狄辛.宝钢 3 号高炉软水密闭循环冷却系统的控制[J].钢铁技术,1999,(2):21-26.

9．张建.本钢新 1#高炉软化水温差系统[J].自动控制 2011,(3):69-70.

10. 冯宏斌.长钢 3 号高炉炉墙结厚处理[J].炼铁,2004,23(3):36-38.

11. 杨小峰.分布式光纤测温系统在核电系统中的应用[D],四川成都:成都理工大学,2010.

12. 姜弘仪.高炉过程检测和控制与高炉操作[J].炼铁,1995,14(6):35-38.

13. 柯兆盛.无线传输高精度测温系统[D],吉林:吉林大学,2004.

14. 赫亮.焦炉炭化室侧壁连续测温系统的研究[D],沈阳:沈阳工业大学,2009.

15. 刘威.基于 DS18B20 和 nRF9E5 的多点无线测温系统[D],吉林:吉林大学,2007.

16. 尚学友.线性输出的不平衡电桥[J].仪器与仪表,1994,37-39.

17. 朱小菲.基于石英晶体传感器的恒温槽温控系统的设计[J].信息技术,2008,(6):65-68.

18. 吴俐俊.高炉冷却壁智能监测方法的研究[J].钢铁,2008,43(1):14-16.

19. 樊德军.消除传感器电桥非线性误差的方法[J].仪表技术与传感器,1998,(4):37-42.

20. 林金秋.新型精密石英晶体温度传感器[J].仪器仪表与检测技术,2003,22(9):60-63.

21. 戴景民.多光谱辐射测温理论与应用[M].北京:高等教育出版社,2002.

22. 郑明东,宁方青.焦炉立火逆温度控制研究[J].人连理工大学学报,2001,41:442-445.

23. 鄂飞.抗干扰技术在高精度测温仪中的应用[J].自动化仪表,2004,25(11):65-68.

24. 王振强.一种双电桥非线性校正方法[J],信息技术,2008,(12):116-118.

25. 肖楠.ARM 及在 Linux 在高精度测温系统中的应用[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2009.
26. 张金波.单片机系统常见干扰及抗干扰措施[J].煤矿自动化,2001,(6):40-42.
27. Habel B,Hufman B.Monitoring of prestressed concrete structure with optical fiber sensors.[J].SPIE,1993,19(1):23-29.
28. 朱阳军.微电子器件热谱分析方法的研究[D].山东济南:山东大学,2007.
29. Zur A,Abraham Katzir.Fibers for low-temperature Radiometric Measurements[J].Applied Optics,1987,(7):1203-1206.
30. 刘金松.多点智能测温系统在 VAV 系统室内环境测量中的应用[D].陕西西安:西安建筑科技大学,2006.
31. Wang Yu-tian,Shi Jin-shan,Wang Li-tian.Research on a new two-color ratio pyrometer withoptical fiberlind[J].Journal of Electronic Measurement and Instrument,1993,7(4):34-39.
32. 夏世勤.光纤比色测温仪原理及设计[J].光纤光缆传输技术,1993，(3)：21.
33. 工魁汉.温度测量技术[M].沈阳:东北工学院出版社,1991.
34. Hilgers K B,Kaufman I.A fiber optic differential temperature probe[J].Fiber Optic and Laser Sensors.San Diego:SPIE,1987,838:223-230.
35. 胡瑞华等.非接触测温的辐射测温法[J].大连轻工业学院学报，1997,16(1)：88-89.
36. 马明建,周长城.数据采集与处理技术[M].西安:西安交通大学出版社,2001.
37. Bedfore R.E.Emissivities of diffuse cavities:isothermal and noniso thermal cones and cylinders[J].Opt Soc Am,1974,63(3):339.
38. 邓恩民.SW-1型光电比色高温计及其应用[J].冶金自动化,1984，(1)：40-44.
39. 邓恩民,郭宏先.光纤式红外比色高温计[J].冶金自动化,1986，(2)：49-53.
40. 吴旭,李萍.智能化红外双色测温仪[J].冶金自动化,1986，(4)：44-48.
41. 白日午,王喜顺,王晓香等.BRW-1H高精度比色红外光纤温度计的研制[J].冶金自动化1995(5):10-14.
42. 朱景伟.单片机光纤比色测温仪的研制[J].辽宁工学院学报,1994,14(3):47-49.
43. 赵芳霞,张振忠,林尤栋.分叉式光纤比色智能化测温仪研制[J].铸造设备研究,1999，(6)：11-15.
44. 张胜全.一种新型的粮库无线测温方案[J].粮油加工与食品机械.2005,(l0):67-70.
45. 王魁汉,李友,王柏忠.温度测量技术的最新动态及特殊与实用测温技术[J].自动化仪表.2001.22(8):l-4.
46. 郑启忠,朱宏辉,耿四军.数字温度传感器Ds18B20及无线测温系统设计[J].微型机与应

用.2004,(11):16-19.

47. 高廓,基于nRr24EI的无线多点温湿度测量系统方案设计[J],吉林大学电子科学与工程学院，2005.5:l-7.

48. 丁晓进,史小军,朱为等.基于Dsl8B20的多点温度检测[J].电子工程师.2006,32(7):1-7.

49. 崔景俊,无线紫外火灾探测系统的设计与实现[J],成都电子科技大学精密仪器及机械，2007.5:13-15.

50. 李春杰,刘瑞霞.基于一种新型嵌入式系统级芯片的无线数据采集系统的设计[J].现代电子技术.2006(3):36-35.

51. 郝铁伟，基于无线传感器的监控网络系统设计[J],武汉理工大学检测与自动化装置,2007.4:l-7

52. 蔡型,张思全.短距离无线通信技术综述[J],现代电子技术,2004.(3):65-67.

53. 川赵刚.分布式远程巡回测温系统的实现[J].凰刁大学机电工程系:测试计量技术及仪器,2001.5:1-14.

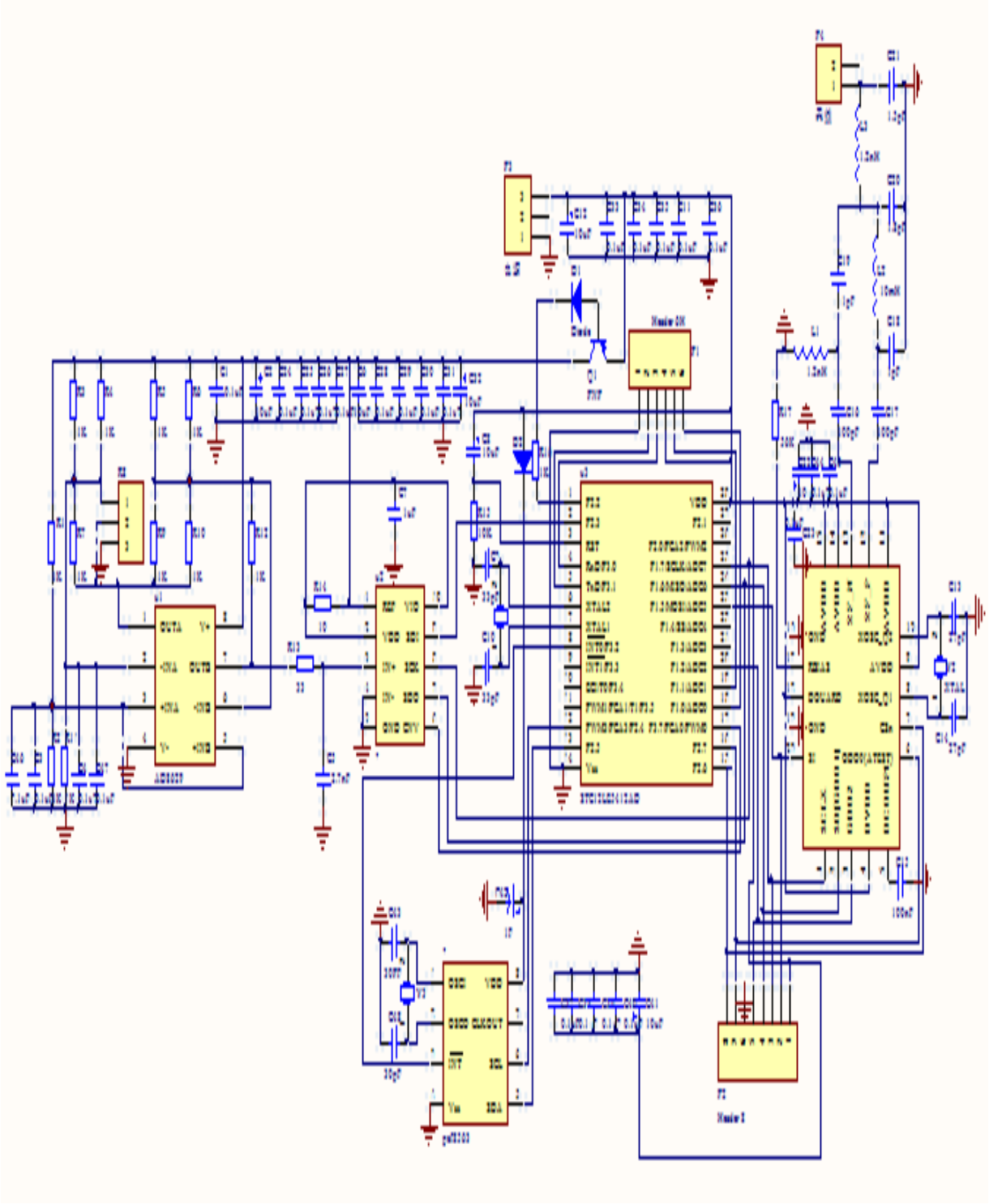
54. 黄智伟,朱荣辉,朱卫华.数字温度传感器AD7418及其应用[J],传感器界,2002.(08):29-31.

55. 方彦军,李京丽.新型数字式温度传感器LM74在现场总线中的应用[J],自动化仪表,2004.25(05):68-7035.

56. 蔡捷伟.接触式光电温度传感器[J].传感器世界,2002，(3)：10-13.

57. Khan M A,Allemand C,Eagar T W.Noncontact temperature measurement I[J].interpolation based techniques Rev.Sci.Instrum,1991,62(2):392-402.

# 附录



温度终端电路原理图

**Temperature terminal of the circuit principle diagram**