

工学硕士学位论文

基于超声波相位差法的无线甲烷报警器设计

邹一风

哈尔滨理工大学

2017 年 3 月



国内图书分类号: TP277

工学硕士学位论文

基于超声波相位差法的无线甲烷报警器设计

硕士研究生: 邹一风

导师: 丁喜波

申请学位级别: 工学硕士

学科、专业: 检测技术及自动化装置

所在单位: 测控技术与通信工程学院

答辩日期: 2017年3月

授予学位单位: 哈尔滨理工大学

Classified Index: TP277

Dissertation for the Master Degree in Engineering

Design of The Wireless Methane Alarm Device Based on Ultrasonic Phase Difference Method

Candidate:	Zou Yifeng
Supervisor:	Ding Xibo
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Specialty:	Detection technique and automatic device
Date of Oral Examination:	March, 2017
University:	Harbin University of Science and Technology

哈尔滨理工大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《基于超声波相位差法的无线甲烷报警器设计》，是本人在导师指导下，在哈尔滨理工大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文研究工作做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签名： 邵-风 日期： 2017年 3月29日

哈尔滨理工大学硕士学位论文使用授权书

《基于超声波相位差法的无线甲烷报警器设计》系本人在哈尔滨理工大学攻读硕士学位期间在导师指导下完成的硕士学位论文。本论文的研究成果归哈尔滨理工大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解哈尔滨理工大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门提交论文和电子版本，允许论文被查阅和借阅。本人授权哈尔滨理工大学可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。

本学位论文属于

保密 ☐，在 年解密后适用授权书。

不保密 ☒

(请在以上相应方框内打√)

作者签名： 邵-风

日期： 2017年 3月29日

导师签名： 丁-平

日期： 2017年 3月29日

基于超声波相位差法的无线甲烷报警器设计

摘 要

近几年来，民用天然气在国家的大力扶持下，以及自身绿色环保经济实惠的优势，在城市中基本取代了液化气等传统能源。天然气泄漏是燃气日常使用中最大的安全隐患。目前国内外的家用天然气报警检测仪普遍采用的是半导体和催化式传感器，这类传感器普遍存在稳定性差、功耗高、寿命短等问题，给家用燃气安全带来了二次隐患。为保障家用天然气的安全使用，研制出一套高性能的甲烷报警器对于人们的生命安全至关重要。

利用超声波在不同介质气体中传输速度的差异性，提出了一种新型检测方法——超声波相位差气体浓度测量法。采用相位差法设计的甲烷报警器分为两部分：甲烷浓度检测模块以及无线通信模块。检测模块设计中传感器采用测量通道和参考通道的双通道设计，将超声波速度差转化为相位差，用测得的相位差变化来反映气体浓度的变化。同时采用数字温度传感器进行灵敏度补偿，拓展了传感器的工作温度范围和检测精度。检测数据通过 WiFi 无线通信模块连接无线路由并连入互联网，数据保存在云服务器上，通过电脑或者智能手机端 APP 实时查看数据。

报警器设计将超声波相差法甲烷浓度测量与 WiFi 无线通信紧密结合，并结合手机智能设备端报警 APP 对报警信息及时监测。对超声波无线甲烷报警器进行实验测试，结果表明本报警器能够实时、准确的做出预警，满足民用燃气报警器标准要求，具有广阔的市场前景。

关键词 甲烷；超声波；相位差；WiFi

Design of The Wireless Methane Alarm Device

Based on Ultrasonic Phase Difference Method

Abstract

In recent years, considering natural gas's advantages of environmental safety and economic benefits, the domestic use of natural gas in the city basically replaced the traditional energy such as liquefied petroleum gas in the country's strong support. The leakage is the biggest security risk in daily use of gas. At present, domestic natural gas alarmers at home and abroad are widely based on semiconductor and catalytic sensor and the sensor generally has the problems of poor stability, high power consumption as well as short service life, which has brought hidden risks to domestic gas safety further. In order to ensure the safe use of natural gas, it is very important to develop a set of high performance natural gas detection system for people's life safety.

Based on the difference of the velocity of the ultrasonic wave in different medium, a new ultrasonic phase difference method is proposed. The alarm is mainly divided into two parts: methane concentration detection module and wireless communication module. The design of dual channel measurement channel and reference channel is used in this work, which transforms the speed difference of the ultrasonic wave into the phase difference, and the change of the gas concentration is reflected by the measured phase difference. Meanwhile, the digital temperature sensor is used to compensate the sensitivity, which extends the working temperature range and the precision of the sensor. Detection data is connected to the Internet through the WiFi wireless communication module, and the data is stored on the cloud server. The data of gas information can be viewed in real time through the computer or smart phone application.

The ultrasonic phase difference method is closely combined with the WiFi wireless communication according to the design. Combined with the application of mobile intelligent device, the alarm information can be monitored timely.

After the experimental test of ultrasonic wireless methane alarm, the results show that the alarm can timely and accurately alarm. The standard meets the requirements of the civil gas alarm and the gas alarm has a broad market prospects.

Keywords methane, ultrasonic, phase difference, WiFi

目 录

摘 要	I
Abstract	II
第 1 章 绪 论	1
1.1 课题研究背景及意义	1
1.2 课题相关领域发展状况	2
1.3 课题来源及主要研究内容	4
第 2 章 无线甲烷报警器设计方案及原理	6
2.1 设计要求	6
2.2 总体设计方案	6
2.3 超声波传感器浓度检测原理	7
2.3.1 超声波传感器原理	7
2.3.2 超声波传感器的性能指标	9
2.3.3 超声波相位差法甲烷浓度测量原理	9
2.4 无线通信方案研究与选择	12
2.4.1 ZigBee 组网技术	13
2.4.2 蓝牙通信技术	14
2.4.3 GPRS 无线数据传输技术	14
2.4.4 WiFi 通信技术	15
2.5 本章小结	15
第 3 章 无线甲烷报警器硬件电路设计	17
3.1 检测模块设计	17
3.1.1 单片机最小系统及其外围电路	17
3.1.2 电源模块电路	20
3.1.3 传感器驱动电路	22
3.1.4 信号接收处理电路	23
3.2 无线通信模块设计	27
3.2.1 WiFi 模块 CPU	27
3.2.2 WiFi 模块接口电路	28
3.2.3 WiFi 模块程序下载接口电路	28

3.3 本章小结	29
第 4 章 无线甲烷报警器软件设计	30
4.1 软件设计概述	30
4.2 主程序设计	30
4.3 数据处理程序设计	32
4.4 标定程序设计	32
4.5 红外遥控解码程序设计	34
4.6 温度测量程序设计	35
4.7 WiFi 模块与检测模块数据传输程序设计	36
4.8 远程监控服务程序设计	37
4.8.1 PC 端监测服务器选择	37
4.8.2 安卓端监测 APP 设计	39
4.9 本章小结	40
第 5 章 系统调试与测试	41
5.1 系统调试	41
5.2 测试实验及结果分析	43
5.3 本章小结	44
结 论	45
参考文献	47
攻读硕士学位期间发表的学术论文	51
致 谢	52

第1章 绪 论

1.1 课题研究背景及意义

近 10 几年来, 清洁安全高效的能源经国家重点推广扶持, 在国家西气东输工程投资大量人力物力财力的基础上^[1], 天然气管道输送技术日趋成熟, 城市民用以及工商业用户使用天然气的成本大幅降低。传统的煤、瓦斯、液化气等等能源逐渐被天然气这种清洁能源所取代^[2]。天然气中甲烷含量高达 94%以上^[3], 它是一种高效、洁净的能源。同样前提下, 燃烧天然气所产生的硫氧化物、氮氧化物等严重有害气体量比燃烧油或煤都少得多, 环保无污染。

我国是原煤生产大国, 但国内发现的天然气资源相对贫乏。追溯中国的天然气使用发展历史, 可概括为以下三点: 发现早, 起步晚, 利用率低。直到 10 多年前国家开始围绕西部大开发、新丝绸之路、一带一路建设^[4], 加强了与西部接壤国家的合作, 从邻国大量进口液化天然气, 并且加强了国内西部的基础资源建设, 燃气输送站、燃气管道横穿了整个中国。于 2014 年, 天然气的国内消费量已经占到国内总资源使用的 5.6%^[5]。根据国家发改委的预测, 至 2020 年天然气的能源消费比重将达到 10%, 为 10 年前的 4 倍^[6]。天然气相比于传统的煤矿瓦斯等能源, 其优点突出, 既能减少空气污染, 降低温室气体的排放。且在目前天然气液化、传输等难题一一被解决的前提下, 天然气的成本大幅降低。以上海市 2016 年为例, 上海市居民使用每立方天然气的价格已经降至 2.5 元^[7]。伴随着天然气的使用成本下降, 天然气在全国范围内的需求大幅提高, 民用天然气愈加普及。天然气的安全传输使用在这样的背景下提出。民用天然气泄漏问题更是天然气相关行业三令五申要重点解决的问题。对天然气泄漏的检测主要是对占天然气 94%浓度以上的甲烷气体的检测。本课题提出的民用无线甲烷报警器对于天然气的安全使用具有重大意义。

天然气的主要成分为甲烷, 甲烷具有无气味、无毒的物理化学性质。天然气中另含少量的丙烷、丁烷气体, 一般也存在硫化氢, 二氧化碳, 水等成分^[8]。甲烷的爆炸极限为 4.9-16%^[9]。当空气中甲烷的含量进入爆炸限, 在一定范围内接触明火, 会造成剧烈爆炸。天然气无色无味, 无法被人体嗅觉识别。目前国内外天然气公司会在天然气分输站加入乙硫醇或是四氢噻吩作为燃气添加剂^[10]。低浓度的燃气添加剂不会影响天然气热值, 且同时赋予燃气特别的警示性臭味, 方便在燃气泄漏时给予人们警告。但是乙硫醇和四氢噻吩的副作用均

较大,吸入低浓度乙硫醇时即可引起头痛、恶心,较高浓度出现呕吐腹泻麻痹等情况^[11]。因此,在民用燃气安全使用过程中,仅仅靠嗅觉来判断泄漏状况危险度较高,需要能够及时预警的设备来检测甲烷浓度信息,保证天然气的安全使用。

民用天然气使用中存在较大的问题。民用、工商业用户天然气使用中爆炸事故频发,造成巨大的人员财产损失。据不完全统计,2015 年我国共发生燃气爆炸事故 658 次,造成 1000 余人受伤,116 人死亡^[12]! 2015 年 8 月,江苏省南京市秦淮区朝天宫某小区一楼一户人家深夜发生爆炸事故。事故造成了多人员的重伤,近 150 户人家的门窗被震碎,屋内家居等财产同样受到波及。事后经查明,爆炸起因来源于天然气深夜泄漏,该户居民熟睡中,等察觉时准备关闭阀门为时已晚^[13]。同年 10 月,芜湖市镜湖区杨家巷一私人小餐馆发生天然气泄漏爆炸,瞬间引发大火,造成 17 人死亡^[14]。安全防护措施不到位,群众用气安全意识差,由此引发的惨剧不会停止。这急需我们提高用气安全意识,还需要采取更加行之有效的监测防泄漏措施,做到主动安全用气与泄漏预警的双保险。

根据《天然气安全使用管理规定》,为了实现民用天然气的安全使用,需要人们严格遵守规定的条例。规定是针对人定制,但是在居民遵守条例的基础上,针对燃气设施,其难免也会存在因质量问题、施工因素等等导致燃气泄漏的情况,需要人们第一时间对泄漏情况作出响应。以上的因素带来了市场上对燃气报警器的需求。本文研究的基于超声波相位差法的无线甲烷报警器,采用超声波相位差法气体浓度检测原理,并运用物联网技术,通过 WiFi 实时向用户传递报警信息,及时准确地发现泄漏情况以便第一时间让户主作出火灾应急处理。报警器使用简单便捷,结合目前智能设备机不离手的日常使用频率,更容易被城市居民所接受,易于市场推广。

1.2 课题相关领域发展状况

在日常天然气使用过程中,为预防燃气泄漏以及做到及时预警,要求甲烷浓度测量有实时,准确的特点,能够第一时间通知户主报警信息。目前国内外市场上甲烷传感器主要基于以下几种原理:占据半壁江山的催化燃烧法;走高端精密路线的红外吸收检测法以及超声波检测法^[15-16]。

催化燃烧式方法是依据可燃气体在高温催化敏感元件上“燃烧”所产生的热量来反映气体浓度。高温条件下,甲烷会与敏感元件发生反应,进行无焰燃

烧, 敏感元件的温度会伴随着燃烧产生的热量进一步上升。温度的变化进一步带来原件电阻的改变^[17-18]。将敏感元件置于惠斯通电桥中, 并设置参考元件, 初始状态为平衡状态。检测到甲烷气体时, 惠斯通电桥失衡, 电压差值的变化反应了气体浓度值的变化^[19]。我国煤矿行业是催化燃烧式传感器的最大用户, 掌握着传感器最先进生产技术和制作工艺。国内炜盛科技研发的催化燃烧式传感器指标精度已经超越日本 Figaro 公司^[20]。但即使我国的催化燃烧式传感器水平已处世界前列, 但其自身弱点并没有被很好地解决。其气体识别性不佳, 对所有可燃性气体都有信号输出, 而且测量精度较低, 难以检测低浓度泄漏。催化式气体检测器已不能胜任当前的行业要求。

红外吸收式检测法的原理为不同种类不同浓度的气体对红外光的选择吸收性不一致。在欧美等发达国家, 应用非色散红外吸收法研制的气体检测仪表已广泛应用于工业安全领域, 在测量甲烷、二氧化碳方面, 德国 Drager、英国 Trolex、Crowcon 研制的红外检测仪表具有精度高、稳定性高、测量范围宽等优点, 在国外基本已经取代了相对落后的催化燃烧式传感器^[21-22]。而我国的红外吸收型传感器研究起步时间较晚, 在上世纪 80 年代才开始兴起。应用红外式传感器研制的气体检测仪, 其可靠性以及稳定性距离国际水平还有很大的差距^[23-24]。且由于红外吸收式传感器价格昂贵, 维护代价极高。在国内经济水平还与发达国家存在一定差距的情况下, 红外吸收式传感器在工用、民用领域的推广举步维艰。

超声波气体检测法作为气体检测领域新兴的检测法, 其在国内起步较晚。早期国内外是将超声波应用到流体的测量中, 并且多针对液体设计。而气体也是流体的一种, 它的浓度测量原理与液体流速测量异曲同工。在气体浓度测量领域, 超声波测量法近五年来才被重视^[25]。在 2013 年的国际流体测量会议上, K Karlsson 提出将超声波技术应用到气体测量中, 开创了国外超声波在气体领域运用的先河^[26]。超声波在不同类别不同浓度气体中传输速度会得到衰减或是增强, 通过对超声波传输速度或是速度相关量的测量, 能够反映出气体的浓度^[27-28]。超声波传感器结构简单, 应用在气体检测领域, 其高检测精度、低成本、高可靠性等优点, 给超声波气体检测方法的推广带来了极大的便利。

以上提到的几种气体传感器各有所长, 目前常见的家用燃气报警器原理以催化燃烧方法和半导体传感器方法为主流^[29]。前者随使用时间增加会出现催化剂中毒现象, 而后者稳定性较差, 易受环境温湿度影响, 会对检测精度产生较大的干扰。基于超声波传感器的超声波相位差法气体浓度检测与上述方法对比存在明显的优点。

此外,伴随着物联网的进步以及智能化设备的普及,燃气行业也在向智慧燃气事业转型。早在 12 年的国际燃气、供热技术与设备展览会上,国内顶尖的物联网公司 Lierda 就开始主推无线燃气表^[30]。而到目前为止,在工商业用户中,除运营商之一的联通物联网方向起步较慢以外,另外的移动通信都已对 2G 通信频段开放,并专门打造了物联网燃气行业专属频段^[31]。该技术允许通过数据流量手机卡实现燃气表实时联网,数据直接传送到后台服务器,能够实现用气状态监控、远程阀门控制、阶梯气价调整、数据分析以及异常报警等功能。结合智能手机的应用软件,还可以完成远程充值、实时预警等功能。

1.3 课题来源及主要研究内容

本课题来源于国家自然科学基金项目。所设计的超声波无线甲烷报警器运用于智能家居安防领域。设计通过超声波传感器进行了双通道甲烷气体相位差法的测量,根据建立的数学模型实现相位差到甲烷浓度值的转变。报警器结合远程 WiFi 无线通信,通过无线方式将甲烷浓度信息传输至互联网云服务器,并在智能手机端 APP 上推送报警信息。本文主要的研究内容如下:

1. 课题背景研究及其相关发展趋势 分析该课题对于民用天然气安全的重要意义,归纳市场上关于民用甲烷报警技术的优缺点,总结其未来发展趋势。

2. 无线甲烷报警器设计方案及原理 提出了本报警器的设计方案,报警器由检测模块与无线通信模块构成。检测模块传感器选型中对传感器原理、性能作出分析,验证了超声波传感器用于气体检测的可行性。并提出了超声波甲烷浓度测量原理,建立了相位差浓度温度的数学模型。在对比几种无线通信方式后,选择 WiFi 作为本报警器的通信方式,实现检测模块数据联网。

3. 无线甲烷报警器硬件电路设计 对报警器进行了检测模块与无线通信模块细分,细分后的电路模块化设计包括:单片机最小系统、传感器驱动电路、信号接收处理电路、其他单片机外围电路、WiFi 无线通信模块选型、WiFi 模块接口电路、WiFi 模块程序下载接口电路等。

4. 无线甲烷报警器软件程序设计 主要完成本设计的软件编程部分,编写了主程序、相位差浓度数据转换程序、甲烷浓度标定程序、红外遥控解码程序、温度补偿测量程序、检测模块与 WiFi 模块通信程序、WiFi 通信透传协议程序、简单的安卓端燃气报警器应用程序编写等。

5. 无线甲烷报警器实验测试 报警器设计完成后对仪器进行调试,来验证无线甲烷报警器的准确性以及无线传输功能。将本报警器置于密闭实验装置

中，充斥标准浓度的甲烷气体进行测试，测试其报警阈值，并对智能设备上报警信息作出分析等。

第2章 无线甲烷报警器设计方案及原理

2.1 设计要求

民用天然气安全中甲烷泄漏预警是防患于未然的关键。区别于传统的家用燃气报警器，本设计依据超声波在不同气体成分和浓度中传播速度不同，两路在不同介质中传输相同距离的超声波所产生的时间差信号，通过相位差转换后，甲烷气体的浓度值会体现在被测信号与参考信号的相位差中。相位差经数学算法处理，最后表现为能够反馈出浓度值的电信号。电信号数值在温度补偿作用下数据进一步优化，实现了浓度数据的可靠检测。为保证实时预警，第一时间户主能收到泄漏信息，设计另采用 WiFi 无线通信技术，预警信息通过网络传输至服务器，智能手机上打开设计的燃气报警 APP 后每间隔一段时间就会推送浓度信息。技术指标如表 2-1 所示^[32]。

表 2-1 主要技术指标
Table 2-1 The indicators of main technical

指标名称	指标范围	单位
工作温度	-10~55	℃
贮存温度	-25~55	℃
响应时间	≤10	s
测量范围	0.1-10	%
工作电压	AC: 220	V
	DC: 3.6-4.2	

2.2 总体设计方案

本报警器由超声波传感器构成的检测模块及无线通信模块组成。检测模块是报警器的核心，包括有电源电路、传感器驱动电路、信号接收处理电路以及其他外围电路等，以单片机 PIC16F1783 为微型控制单元，实现对超声波传感器信号处理的功能并对传感器输出信号进行了温度补偿，减少了温度对检测结果的影响。无线通信模块选择了 WiFi 技术进行无线传输，并通过无线 AP 连接网络，实现检测模块数据的实时联网。检测模块向无线通信模块发送甲烷浓

度信息，是通过 UART 通信进行数据交流。WIFI 模块启用透传模式直接将检测模块发送的浓度值传送至服务器显示；智能设备端的安防应用 APP 会在甲烷浓度值处于非正常情形下发出预警消息。总体设计框图如图 2-1 所示。

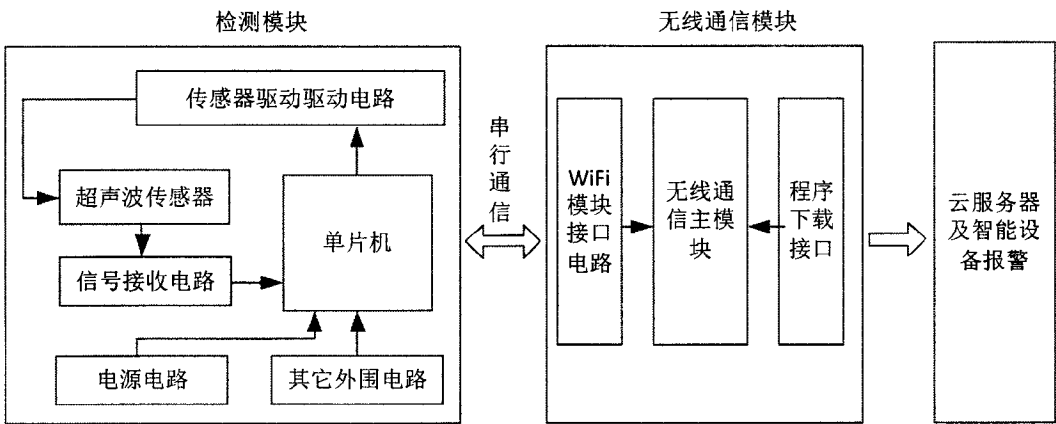


图 2-1 总体设计框图

Fig. 2-1 Overall design block diagram

2.3 超声波传感器浓度检测原理

超声波传感器基于超声波特性，它能将电信号转换成机械振动而向介质中发射超声波，或将超声场中的机械振动转换成相应的电信号，亦可称作超声波换能器、超声波探头等^[33]。人耳能够听到的机械波，基本都处在 16Hz-20 kHz 的频率范围内。声波的定义依据就是能否被人耳识别，而频率高于 20 kHz 的声波称为超声波^[34]。声波的频率越高，其具备的方向性和穿透性愈佳。运用到实际的短距离传播中，超声波的损耗越少，其声特性越接近光的特征。基于超声波良好的声特性，超声波传感器被科研人员深度研发并在测控技术领域得到了广泛应用。

2.3.1 超声波传感器原理

超声波传感器按工作原理可分为压电式、磁致伸缩式、电磁式等。压电式超声波传感器是目前几种超声波传感器中最为成熟的。其工作原理是基于压电材料的压电效应。超声波的产生是通过高频电信号转换成的高频机械振动；超声波的接收刚好相反，当高频超声波作用到压电材料上，引起材料的机械振动会转化成电信号^[35]。图 2-2 为最常用的超声波直探头。该探头被用于发射和接

收纵波，主要由压电晶片、阻尼块、保护膜等组成。压电晶片一般为圆板形，圆板上下厚度与超声波频率成反比。圆板形晶片顶层和底层通过刷一薄银层，作为导电极板，在镀银之后导电性更强；阻尼块紧贴压电晶片，给予压电晶片振动缓冲，吸收声能量。阻尼块可以吸收电脉冲信号消失后产生的余振，避免余振对正常发射的超声波频率的干扰^[36]。

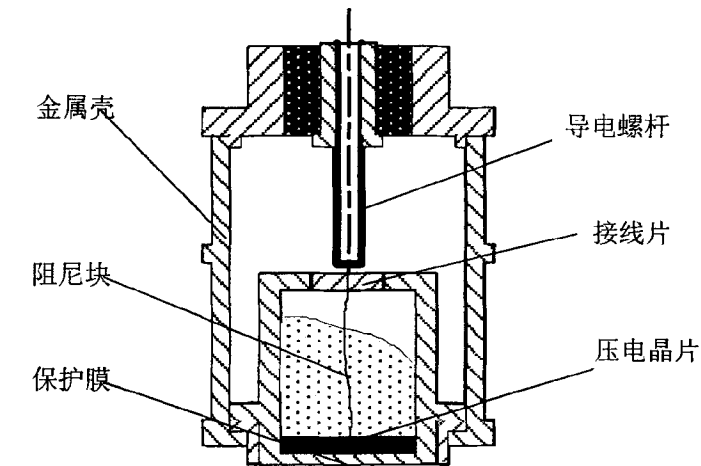


图 2-2 压电式超声波直探头结构图

Fig. 2-2 The structure of piezoelectric ultrasonic sensor

超声波传感器的工作原理如图 2-3。其正常工作需要驱动信号，图中的方波振荡器就扮演了产生驱动信号的角色。设计通过方波发生器产生高频振荡，通过超声波驱动电路使信号保持稳定，并加到超声波发射探头上。超声波在被测介质中传播，穿过重重的介质层，或被介质层反射后，超声波接收传感器将接收到的声波信号转化成电信号^[37]，经过信号接收处理电路后，输出到单片机经过软件算法处理，实现被测介质浓度或其他性质的测量。

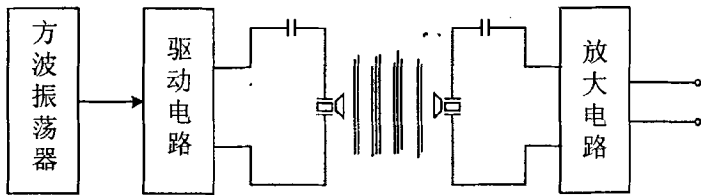


图 2-3 超声波传感器工作原理示意图

Fig. 2-3 Schematic diagram of the ultrasonic sensor working

超声波属于能量波，在介质中传播会被吸收或进行能量转换。按照超声波

衰减特性，其频率越高，声波传递过程中能量被传播介质接收或转化成热能的部分越多，能量耗损程度越严重。如果选择较低频率的超声波，容易向四周扩散，无法保证直线传播上的方向性。因此需要合理选择超声波中心频率。通常超声波传感器设计中共振频率选择为 40-400Khz^[38]，以解决声波能量耗损和方向性的矛盾。

2.3.2 超声波传感器的性能指标

压电式超声波传感器的核心是置于传感器内层的压电晶片。构成晶片的材料可以有许多种。其材质以及其他物理性质诸如厚度之类，决定了传感器的指标规格。超声波传感器的主要性能指标包括：：

- 1.灵敏度 取决于压电晶片的材质和其他物理性质。灵敏度大小与压电晶片的机电耦合系数正相关。
- 2.温度 由于压电材料的磁性转变点温度一般比较高，而超声波传感器由低电压低电流即可驱动，具有低功耗特征。功耗越低，产生的热能越少。归因于此，超声波传感器在室温下有良好的可靠性。
- 3.工作频率 工作频率指压电晶片的共振频率。当驱动传感器的电信号频率和共振频率一致时，输出的超声波能量处于极大值点，传感器性能愈佳。

2.3.3 超声波相位差法甲烷浓度测量原理

超声波相位差法检测甲烷浓度依据的是在不同介质不同浓度气体中，超声波穿透气体介质层的速率存在差异性。图 2-4 是超声波相位差测量原理示意图。

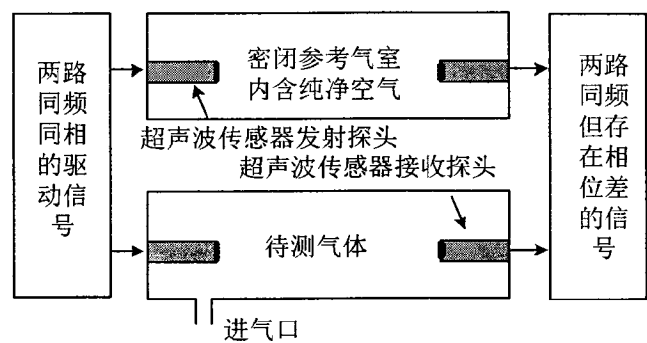


图 2-4 超声波相位差测量原理示意图

Fig. 2-4 Principle of ultrasonic phase difference measurement

其基本原理是配置好两个几何规格完全一样的气室，气室长度不超过 20cm。正常情况下，气室一作为后续算法中的参考基准，里面充斥着室温环境下的纯净空气。而泄漏的待检测气体会被通入气室二。每一组气室的左右两侧都安装了超声波传感器，一端为超声波信号的发射装置，另一端为接收装置。同一个超声波驱动信号在同一时刻分别加在两个超声波发射探头上，确保超声波发射探头中发出的信号在初始条件下同频同相。由于气室长度的限制性，如果直接检测超声波在纯净空气和待测气体中传播所经历的时间差来反映超声波传输速度，时间数量级将会是毫秒级别甚至更小，测量精度要求较高，原因在于低时间测量精度会带来严重的浓度值测量偏差。更高的时间精度要求会带来硬件成本的骤增。而将时间差转化为相位差，并通过后续电路处理，能够将相位差精确地检测出来，根据后续软件算法中建立的数学模型，最终计算得到气体浓度值。

超声波相位差法浓度测量数学模型本质上是由声速公式推导而来。对于同一种理想气体，不论在什么状态下，气体常数的数值都为常数。表 2-2 为几种常用气体的气体常数表^[39]。

表 2-2 几种常见气体的气体常数表
Table 2-2 Gas constant of several common gas

气体种类	气体常数 R	单位
甲烷	518.300	J/(kg·K)
空气	287.041	J/(kg·K)
氧气	259.778	J/(kg·K)
氮气	296.749	J/(kg·K)
二氧化碳	188.901	J/(kg·K)
一氧化碳	296.945	J/(kg·K)

从上表可以得出，甲烷拥有远远高于其他气体的气体常数值。由声速公式 $v = \sqrt{kRT}$ 可看出，在近似相等绝热系数 k 和同一开氏温度 T 下，气体常数 R 与声速呈正相关。计算可得，在常压、15℃下，空气中声速是 340 m/s，甲烷中声速为空气中的 1.2 倍。可以看出，甲烷中声速与其他气体的声速具有较大差异。利用这一特性可准确地检测出混合气体中的甲烷的浓度值，并排除其他气体的干扰。甲烷浓度推导公式如下：

声速公式：

$$v = \sqrt{kRT} \quad (2-1)$$

k 为绝热系数, $k_{CH_4} = 1.31$, $k_{空} = 1.40$ 。

R 为气体常数, $R_{CH_4} = 518.3 (J/kg \cdot K)$, $R_{空} = 287 (J/kg \cdot K)$ 。

$T(T_k)$ 为开氏温度。

将上述值代入公式(2-1)得:

$$V_a = V_{空} = 20.1\sqrt{T_k} \quad (2-2)$$

$$V_b = V_{CH_4} = 26.1\sqrt{T_k} \quad (2-3)$$

可以推出,

$$V_x = V_{混} = (1-c) V_a + c \cdot V_b = V_a + (V_b - V_a) \cdot c \quad (2-4)$$

由于 $\sqrt{T_k}$ 在计算时占据内存大, 故化简, 并转化为 T_c (摄氏温度)。并且 $y = \sqrt{x}$ 曲线在窄范围内近似一条直线, 所以我们采用直线拟合, 令

$$\sqrt{\frac{273.15}{T_k}} = 1 - kT_k = 1 - k'T_c \quad (2-5)$$

取温度在 $0 \sim 30^\circ C$ 内这个范围, 代入 $T_c = 30^\circ C$, $T_k = 303.15 K$ 可以计算出

$$k' = \frac{1}{591} \quad (2-6)$$

将上述值代入公式(2-5)可知

$$\sqrt{\frac{273.15}{T_k}} = 1 - \frac{T_c}{591} \quad (2-7)$$

在等距离的气体腔中, 气体传播时间差为

$$\Delta t = t_a - t_x$$

即

$$\Delta t = \frac{L}{v_a} - \frac{L}{v_x} \quad (2-8)$$

将公式(2-2)、(2-3)、(2-4) 代入公式(2-8)得, 甲烷浓度 c :

$$c = \frac{20.1\Delta t}{6\left(\frac{L}{20.1\sqrt{T_k}} - \Delta t\right)} \quad (2-9)$$

取 $\Delta n = \frac{\Delta t}{A}$ ， A -声波周期 $25\mu s$ ， Δn 为对应的周期差即占空比。

将 Δn 和公式(2-6)代入可得

$$c = \frac{\frac{20.1}{6} \Delta n}{\frac{L}{20.1\sqrt{273.15} \cdot A} (1 - \frac{T_c}{591}) - \Delta n} = \frac{K_1 \Delta n}{K_2 (1 - \frac{T_c}{591}) - \Delta n} \quad (2-10)$$

K_1 、 K_2 为常数，取管长 $L = 80mm$ ，则常数 $K_2 = 9.63$ ，得

$$c = \frac{K \Delta n}{9.63(1 - \frac{T_c}{591}) - \Delta n} = \frac{K(\Delta n - \Delta n_0)}{9.63(1 - \frac{T_c}{591}) - (\Delta n - \Delta n_0)} \quad (2-11)$$

其中 Δn_0 为 0 点标定时测得周期差即相位差，存储 Δn_0 到 E^2PROM 中；在温度为 T_2 、标准气体浓度为 c_2 时进行灵敏度标定，测得周期差为 Δn_2 ，求出常数 K ：

$$K = \frac{c_2 \left[\frac{9.63}{591} (591 - T_2) - (\Delta n_2 - \Delta n_0) \right]}{(\Delta n_2 - \Delta n_0)} \quad (2-12)$$

将常数 K 代入公式(2-10)，最终可得：

$$c = \frac{c_2 \left[\frac{9.63}{591} (591 - T_2) - (\Delta n_2 - \Delta n_0) \right] (\Delta n - \Delta n_0)}{(\Delta n_2 - \Delta n_0) \left[9.63(1 - \frac{T_c}{591}) - (\Delta n - \Delta n_0) \right]} \quad (2-13)$$

由上式可以看出，气体的浓度 c 与 Δn 和 T_c 呈一定关系，在已知环境温度 T_c 数值大小的基础上，只需要再对两路超声波信号的相位差进行测量，即可代入上式计算出当前待测气体浓度值。最终的数学模型充分考虑了标定环境与实际测量环境的温度差异，提高了测量的准确度。

2.4 无线通信方案选择

无线通信技术影响着后期的浓度相关数据联网。要求保证信号的完整以及联网实时性，浓度数据不失真，此外还需要有较快的传输速率。在设计中考虑了目前使用最普及的四种无线通信技术，综合考虑了传输速度、信号强度以及成本种种因素，最后选择了 WiFi 作为民用甲烷无线报警器的无线传输技术。

2.4.1 ZigBee 组网技术

ZigBee 是为低数据速率、短距离无线网络通信定义的一系列通信协议标准，该标准由 ZigBee 联盟开发。ZigBee 的数据传输是通过节点与节点之间的通信，每一个标准节点间的有效通信距离是 10~75m，最大可扩展至 255 个通信节点。其通信频段主要为 2.4GHz^[40]。Zigbee 网络数据传输过程使用了多种控制能耗的方法，其节点通信拓补结构主要有星形结构、树型结构以及网状结构。

支持 ZigBee 的设备遵循 IEEE 802.15.4 标准，这给 Zigbee 技术的推广带来了较大的便利性，相关产品在市场上也占据了一席之地。ZigBee 目前在市场上被广泛应用于智能家居环境中。例如某品牌的家庭智能安防系统，包括门窗传感器、火灾报警器、红外人体感应器等等，所有的这些传感器形成一个网络来收集信息，同时将信息发送至无线网关。所有收集来的信息都是家庭安防的一份保障。

在本设计中，也充分考虑到了利用 ZigBee 技术来进行无线传输的优缺点。ZigBee 功耗相对较低，相关设备通过更换电池具有多年的使用年限。但是在民用小区的短距离传输中，ZigBee 网络拓补结构不甚完美，以树形结构图 2-5 为例：

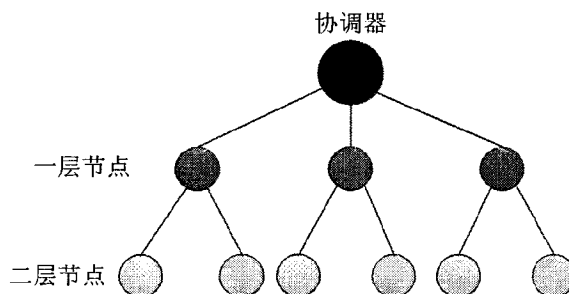


图 2-5 ZigBee 树形拓补网络结构图

Fig. 2-5 Tree topology network structure of ZigBee

在该图中，最底层的 6 个节点要想将信息传输至协调器，则必须经过中间的 3 个节点。同理，第三层节点向协调器发送信息，必须经过中间的两层节点。树形拓补的分枝越长，当底层节点向协调器传输信息时，其经过的层数和上层节点数越多，底层节点传输的信息量越大，底层节点的功耗将远大于顶层节点。实际生活中，在居民小区燃气报警装置采用 ZigBee 无线传输过程中，协调器建在小区基站，则从一楼至顶楼呈树状结构分布。顶楼的节点耗电量较

小，而底层节点不光承担着自己传输信息的任务，底层以上节点全部经由它向协调器传递信息，功耗将是顶层的几十甚至几百倍。如若对底层节点进行多电源设计，成本将大幅上升，后期维护也不甚方便。可见，在民用燃气信息传输上 ZigBee 缺点较为突出。

2.4.2 蓝牙通信技术

蓝牙通信技术是一种无线数据与语音通信的世界开放性规范。通过短间隔长度的无线传输，为移动设备通信环境建立高性价比的短程无线电技术。蓝牙的标准与时俱进。蓝牙技术在传输速率、传输信号质量、有效传输距离、功耗、辐射等方面都日益完善，其最终目的是要建立更完善的无线电空中接口 (radio air interface) 及更通用的控制软件公开标准^[41]，使无线设备端的通信做到更快更强更安全。

蓝牙技术经历了 4 年多的完善后已经于 2016 年 6 月正式发布 5.0 最新版本。最新标准中蓝牙传输距离呈几何倍数增加。而实际运用中，考虑到信号受室内墙壁或者金属材质干扰，蓝牙的实际传输距离限制了其在无线燃气报警器上的发展。当甲烷浓度监测装置要通过蓝牙模块向智能设备端发送预警信息时，如果便携式智能设备，比如手机离监测装置太远，将会导致蓝牙信号中断，传输信息失真等情况。因此，在较大的居室内，蓝牙信号不容易穿墙，不推荐使用。

2.4.3 GPRS 无线数据传输技术

GPRS (General Packet Radio Service) 是通用分组无线服务技术的简称，它是 GSM 移动电话用户可用的一种移动数据业务，属于第二代移动通信中的数据传输技术。GPRS 以数据打包方式来传输，占用的传输资源由传输数据大小来决定。GPRS 通信不会彻底占用某一个频段，一个频段可供多组通信使用，提高了资源利用率。但 GPRS 的传输速率较慢，低于 114Kbps，适用于字节、文本等的数据传输^[42]。

在目前运营商推广 4G 通信业务的形势下，5G 通信也将呼之欲出。通信技术不断地推陈出新，旧的技术正陆续被摒弃。GPRS 数据传输，也就是我们熟知的 2G，将不再为个人通讯业务所服务。由于 2G 通信传输速度慢，覆盖频段窄，以及 4G 通信、5G 通信的向下兼容性，2G 个人通信基站将逐渐被淘汰。为了不浪费资源以及考虑到少量 2G 用户，国家保留了 2G 通信的频段，并将其运用于电力行业、燃气行业、水务行业的信息通讯上。市场上目前大多数的远

程传输燃气表都采用 GPRS 技术来传输，与数据管理中心实现通讯，构成物联网燃气表抄表系统。该系统可实现网络抄表、网络缴费、余额不足报警、远程阀控等功能。每块燃气表需要额外安装一张手机 SIM 卡。但是此技术仅仅是用于城市以及信号良好的地段。GPRS 物联网燃气表在实际使用中，经常会遇到某小区运营商信号覆盖差，小区某一房间内信号丢失等现象，使用及维护成本较高。

2.4.4 WiFi 通信技术

WiFi(Wireless Fidelity)，无线保真技术，又称 802.11b 标准，与蓝牙技术一样，同属于在办公室和家庭中使用的短距离无线技术。相比于蓝牙通信技术，WiFi 的功耗更高一些，但带来的优势明显，WiFi 的传输速度大幅领先于蓝牙，传输范围也几倍于蓝牙。随着时代的发展，智能手机、平板电脑之类，已成为人们生活中不离手的物品^[43]。而 WiFi 成为了智能设备连接上网的最常用方式。一般 WiFi 采用 2.4G 频段，来实现基站与终端的点对点无线通讯，链路层采用以太网协议为核心^[44]，以实现信息传输的寻址和校验。它可以实现通讯距离从几十米到两、三百米的多设备无线组网。

通常情况下，建立一个可以连接互联网的 WiFi 热点，需要一台可以联网的智能设备，以及一台 WiFi 无线路由器。如此便能以无线的模式，结合已有的互联网有线通信，做到空旷房间中网络的大面积覆盖。相比同一环境中多台设备通过有线连接，网线电缆在固定之后可移动性差，即当设备移动时，网线如果没有预留出更长的长度，则需要重新布线，便利性极差。而无线网络的构建成本以及后期的维护，均远远优于传统的有线网络。目前在城市中，许多一线城市都做到了 WiFi 100%全覆盖，更是降低了无线网络的成本。公共无线热点可能会存在网络不稳定以及其他安全问题。考虑到这一点，目前在城市小区中，每一户人家基本上也都安置了自用的无线网络。燃气报警器与 WiFi 结合，燃气浓度信息能够及时通过无线网络传输至后台数据库，数据库直接向用户推送信息。相比于 ZigBee 而言，WiFi 的推送均为广域网传输，更为简单。且 WiFi 传输速率快速，覆盖范围较大，能够有效穿墙，解决了传统 GPRS 无线报警器信号差的缺点，进一步保证了安全性。

2.5 本章小结

本章首先提出了超声波相位差法无线甲烷报警器的设计要求，构思了报警

器的整体设计，然后阐述了超声波传感器的原理及其性能指标，并提出了采用基于声速特性的超声波甲烷检测技术的测量原理。在对比分析几种无线通信方案的优缺点后，选择了 WiFi 技术作为无线通信方式，实现了物联网时代报警器检测模块的数据联网，初步完成了无线甲烷报警器的方案设计。

第3章 无线甲烷报警器硬件电路设计

依据提出的超声波相位差法浓度检测数学模型算法，进行了浓度检测与无线通信模块的硬件设计。

检测模块以 PIC16F1783 为核心控制器，围绕它进行了各个子模块的设计及选型，包含了单片机最小系统、电源模块电路、传感器驱动电路、信号接收处理电路等，并通过相关外围电路实现了甲烷气体浓度信息的实时采集和监控。其中，单片机外围电路包括了温度测量、红外遥控、声光报警等功能。无线通信模块主要负责连接网络，检测模块上预留了 WiFi 模块接口。通过选择合适的 WiFi 模块进行联网，并通过 WiFi 模块程序下载接口更新 SDK，甲烷浓度信息向网络服务器传输，浓度相关信息最后会在智能设备上得以显示。

3.1 检测模块设计

本部分的设计围绕甲烷浓度检测展开，以单片机最小系统为核心，以电源模块为基础，以传感器驱动电路为出发点，被测信号经滤波、放大、整形、检相信号处理四步流程之后，落实到浓度电信号的处理，并辅以温度补偿测量、通过红外识别电路标定、声光报警电路，最后过渡到向 WiFi 无线通信模块传输浓度数据。

3.1.1 单片机最小系统及其外围电路

衡量了设计成本等相关因素，设计选用了微芯公司的 PIC16F1783 单片机作为超声波无线甲烷报警器的核心处理器。选择该单片机原因主要是其针对低功耗设计，具有较强的数据运算能力，能够在很短的时间内实现从超声波传感器电信号到甲烷浓度值数字信号的处理，及时给出预警信息。

PIC16F1783 是具备 16 位高性能精简指令集的处理器。区别传统复杂指令集处理器，1783 单片机处理速度有质的飞跃，为传统单片机 4 倍。其最小系统如图 3-1 所示。选取该单片机的最重要的原因是它拥有高性能的脉宽调制控制器，自带两个可编程开关模式控制器（PSMC）模块，具有 16 位的周期以及 16 纳秒的时钟分辨率，支持单脉宽调制及互补^[45-46]。在信号处理之后的检相部分，既可以通过外接数字式鉴相器来实现，也可通过 PSMC 的软件编程实现。

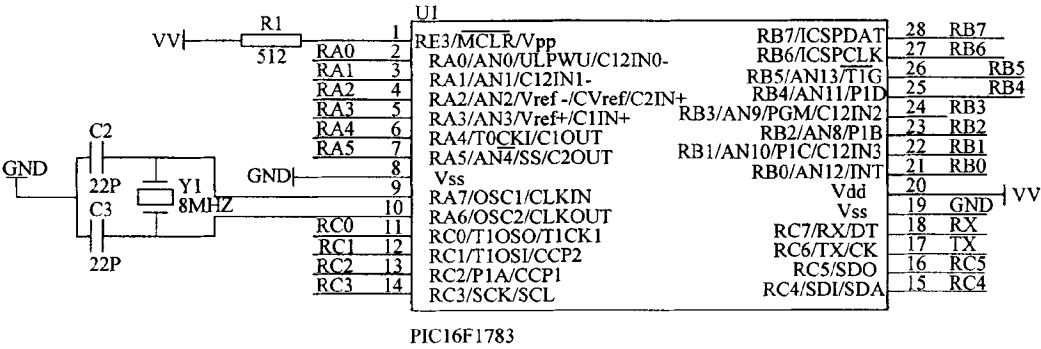


图 3-1 PIC16F1783 单片机最小系统

Fig. 3-1 Minimum system of the MCU PIC16F1783

根据声速公式 $v = \sqrt{kRT}$ 可以看出：超声波穿透气体进行传播，其速率大小与温度的二次方根呈线性关系。要保证超声波相位差法甲烷浓度测量的准确性，必须将温度的影响考虑在内。依据上一章节中提出的甲烷浓度、超声波速度与气体温度的关系式，对测量结果加以温度补偿。测量电路如图 3-2。设计选用了数字温度传感器 DS18B20 实现温度测量，其连接简单，为单总线操作^[47]，只需一个信号线与单片机 I/O 连接，便可实现 $-55^{\circ}\text{C} \sim +125^{\circ}\text{C}$ 温度测量，精度为 0.5°C 。

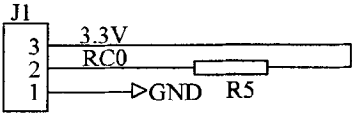


图 3-2 温度测量电路

Fig. 3-2 Circuit of temperature measurement

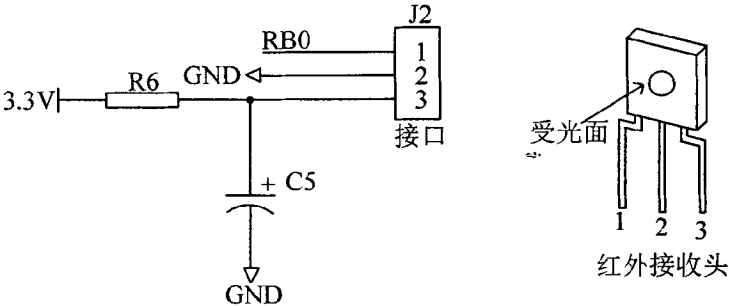


图 3-3 红外遥控电路

Fig. 3-3 Circuit of IR remote controller

在进行完温度补偿后，甲烷浓度数据理论上会与实际相符。但根据上文提出的温度、浓度、速度三者的关系，仍需要若干组准确无误的定点数据进行参考。因此需要对报警装置进行标定。设计选择利用红外遥控器来代替传统的按钮功能，能够在出厂之前大规模大批量的对报警器进行标定，提供工作效益。红外电路如图 3-3 所示。批量标定时，只需按下红外遥控器上对应的不同功能的按钮，报警器接收到的不一样的编码代表不一样的按键，按钮功能已在红外遥控标定程序中设定。报警器进而执行不同程序，例如出厂时报警器置于纯净空气中，当按下 0 点标定按钮，则完成了报警器的 0 点设置。

红外遥控标定程序亦可对报警阈值进行设定调节。本报警器检测到的甲烷浓度超标时，程序中设定单片机的特定引脚会发生电平的跳变。设计的报警电路图如图 3-4 所示，其同时兼具声光报警功能。当单片机特定引脚由低电平向高电平跳变后，晶体管基极电流增大，导通了 Q5 晶体管，报警指示灯悬空的一端将被置高，产生红色预警指示灯；蜂鸣器悬空的一端会被接地，发出刺耳的火灾警报，以警示户主存在燃气泄漏的可能性。

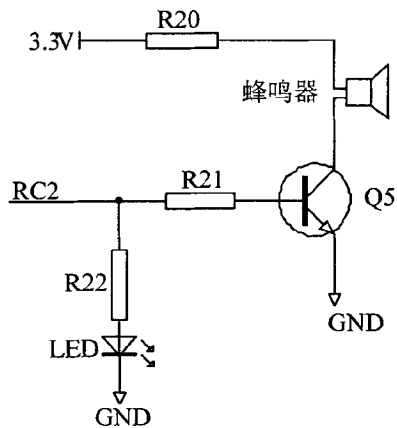


图 3-4 报警电路
Fig. 3-4 Alarm circuit

红色预警指示灯指示以及火灾警报提醒仅仅在户主未出户时有效。当户主家中无人值守，而恰逢突发燃气泄漏的情况，此时的声光报警作用大幅受限。本设计在超声波相差法甲烷报警器上后续加上了无线通信功能，即便出现户主不在家中亦或户主未能对声光报警作出及时反应，报警信息将会在户主随身携带的智能设备端被推送。无线通信模块设计将在下文提及。

3.1.2 电源模块电路

报警器的电源要进行多电源基准的设计。在国内民用环境下，仅存在 220V 交流电以及使用电池的可能性，需要进行电源电压的转换来获得不同大小的电压。考虑到燃气报警器通常安装在距离房顶 0.3m 的位置，一般居民家庭装修设计时很少会考虑到在天花板附件安装插线口。采用 220V 交流电供电便利性差，因此设计中采用锂电池供电，其输出电压为 4.2V。而 PIC 系列单片机工作电压一般为 3.3V。采用 TPS72733 线性稳压器将锂电池输出的 4.2V 稳压至 3.3V，后接 PIC 单片机 3.3V 电源输入端，电路原理图如图 3-5 所示。图中，运放 A 起放大误差的作用，经过 R57 与 R58 分压的同相端电压输入与反向端参考端信号输入进行比对后，输出信号能够决定 MOS 管 Q10 是否处于正常工作状态^[48]，使输出电压始终保持 3.3V，该稳压器起着良好的纹波抑制作用。

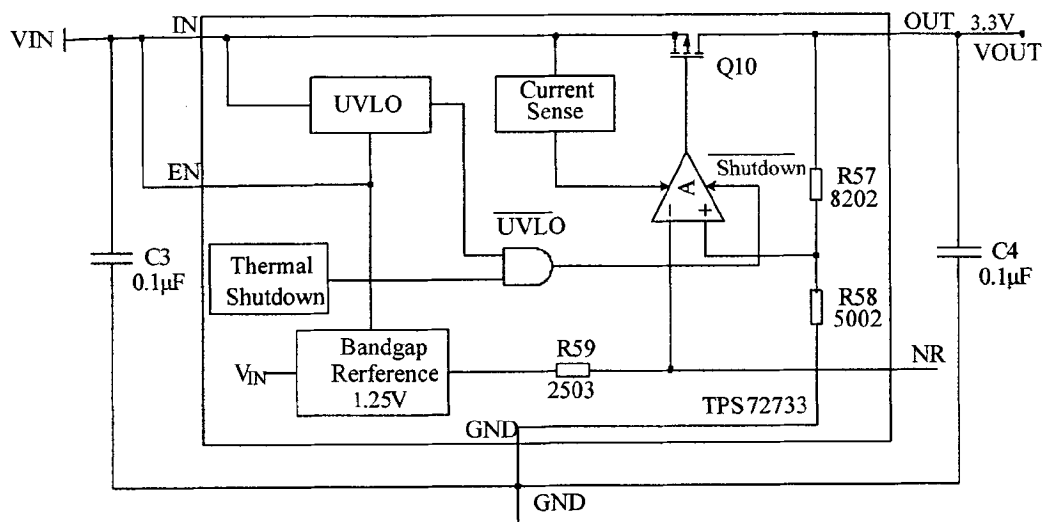


图3-5 TPS72733稳压电路图

Fig. 3-5 TPS72733 voltage source

报警器的锂电池供电组在工作较长时间后，电池剩余电量减小，会造成整个电源电路的电压降低，影响整个报警器的正常工作。且锂电池安放在报警器内部，锂电池型号不一，无法像干电池那样用户可以频繁更换。因此需要对锂电池进行充电，以满足其长时间使用。

本设计采用 PIC 单片机模数转换模块监测电池组供电。一般监测到电池

组电量低于 3.6V 时,意味着报警器电池电源不足,电池电量指示灯将变红,以提醒户主报警器电量不足该进行充电。设计的充电管理电路采用了 BQ24040,电路原理图如图 3-6 所示。通过预留的 usb 充电接口,利用手机适配器以及充电数据线即可进行快速充电。报警器锂电池组充电步骤如下:首先,在低电量状态下,选择恒流充电方式对锂电池进行快速充电;当电量达到 70%,恒定电流减小,过渡到恒压充电;电池接近充满时,进入涓流充电,充电指示灯 L2 熄灭。

图 3-6 BQ24040 充电保护电路

Fig. 3-6 BQ24040 Charging protection circuit

考虑到在后续电路的设计中，运算放大器、整形电路、以及检相电路对电压幅值有一定的要求，锂电池产生的 4.2V 电压无法使元器件工作在正常状态，需要对锂电池提供的 4.2V 进行升压设计。采用 LT1308DC-DC 升压芯片将外部电压转换为 5V 直流电压，LT1308 具有 $100\mu\text{A}$ 的低静态电流， $3\mu\text{A}$ 的低关闭电流^[49]。当负载功率较小时，芯片会自动进入突发工作模式，功耗会大幅降低。同样其具有良好的纹波抑制效果。输出端电压大小通常由 R62 以及 R63 的电阻配比决定。升压至 5V 通常选择 100K 与 309K 大小的电阻配比。其升压电路如图 3-7 所示。

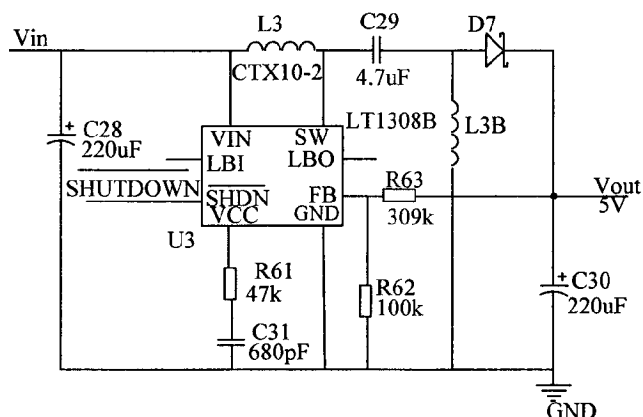


图 3-7 锂电池升压电路

Fig. 3-7 Booster circuit for lithium battery

此外，需要额外对单片机 AD 转换进行电压基准设计。设计采用了 TL431 这一款三端可调的分流基准源。TL431 热稳定性优越，典型的动态阻值仅为 0.2 欧姆。通过调节 TL431 外接电阻配比，可以实现 2.5V-36V 的稳压^[50]。本文通过多电阻分配，输入电压经 TL431 稳压以及所接的三个电阻分压后，输出 3.0V 的 AD 基准电压。再由 R33 和 R34 两个阻值相等的电阻进行分压，经 LMP2014 高精度轨对轨跟随，可以得到信号接收处理电路的参考电压基准。电压基准原理图如图 3-8。

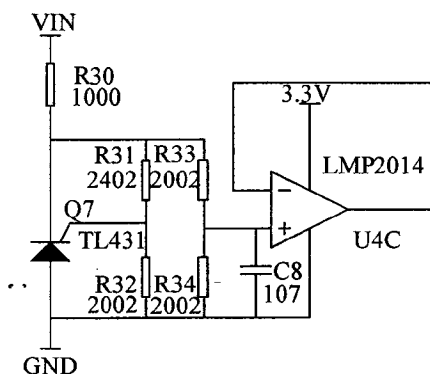


图3-8 基准电压电路图

Fig. 3-8 Circuit of reference voltage

3.1.3 传感器驱动电路

超声波传感器发射超声波是通过高频电信号转换成高频机械振动得到的。

超声波信号的强度、稳定性、频率特征等取决几个因素：一是超声波传感器本身的性能指标，二是取决于驱动超声波传感器的前置电路和信号，三是取决于超声波传感器工作频率与驱动电信号的匹配性。在超声波传感器选型确定之后，其驱动电路产生的电信号决定了后续电路的精度。传感器驱动电路出现问题，其作为后续信号接收处理信号的基础，即使存在微弱误差的发射信号，在经过后续电路多级放大之后，误差会成倍增大，造成报警器检测结果出错。

超声波传感器驱动电路一般采用脉冲谐振电路，驱动原理是通过一个振荡电路产生高频振荡，高频振荡的频率与超声波传感器的工作频率大小匹配时，输出的能量最大，灵敏度也最高。驱动电路选择方波驱动。通过配置单片机定时器，使其输出占空比可调的方波信号。传感器驱动电路如图 3-9 所示。基于超声波传感器的额定工作频率，定时器输出的方波信号频率为 40Khz，幅值为 3.3V。并选择 MCP1415 进行驱动电路设计，对方波信号幅值和频率进行选择，以得到稳定的超声波发射信号。MCP1415 器件是能够提供 1.5A 峰值电流的高速 MOSFET 驱动器，反相或同相单通道输出能直接被 TTL 或 CMOS 逻辑所控制（3V 到 18V）^[51]。低贯通电流、匹配的上升和下降时间以及短传播延迟也是这些器件的特色，非常适合高开关频率的应用。在开和关的状态下，它提供了足够低的阻抗，从而确保即使在发生大的瞬态事件时，MOSFET 的预期状态也不会有影响。

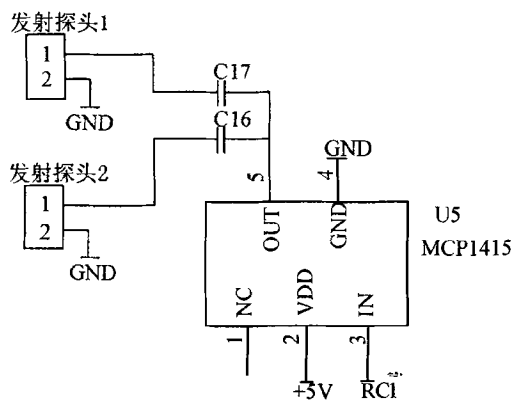


图 3-9 超声波传感器驱动电路

Fig. 3-9 Driving circuit of ultrasonic sensor

3.1.4 信号接收处理电路

信号接收处理电路是对超声波传感器接收探头接收到的信号做后续处理，

主要包括滤波放大电路的设计，信号整形电路设计以及检相电路设计。超声波信号接收处理电路的结构图如图 3-10 所示。

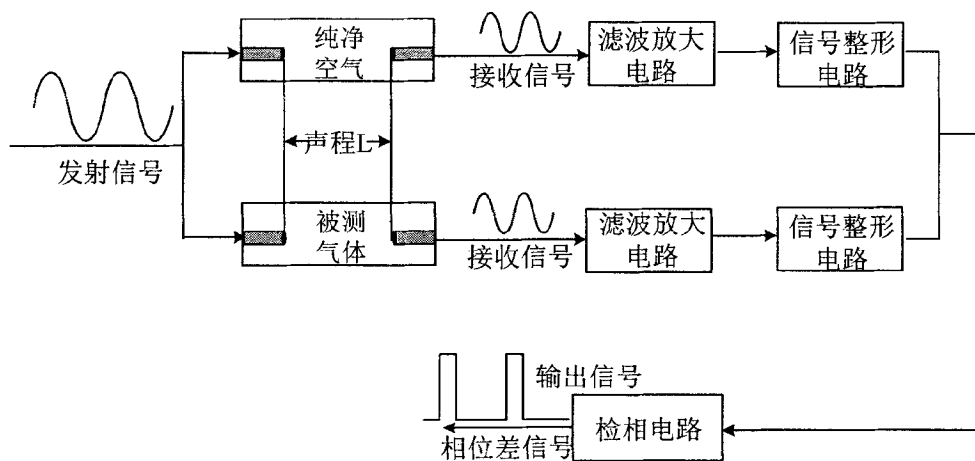


Fig. 3-10 Signal processing structure

首先，由于 40Khz 的超声波发射信号在气室中传播了 L 的长度， L 的长短影响着超声波的衰减强度。气室的材质也会对超声波信号产生反射或者是吸收作用。考虑到外界种种的干扰因素，即使发射信号与超声波传感器工作频率一致，由共振产生的能量最大，得到的超声波信号质量最好，但是在超声波传感器接收探头处，总会出现偏离 40Khz 的电信号，小频率信号混杂在其中会严重影响后续的甲烷检测精度。此外，超声波信号在气体中传播，接收到的电信号还会出现幅值衰减的现象。所以，信号接收处理必须先进行滤波放大电路的设计。对传感器接收到的电信号进行滤波，保留 40Khz 大小的信号，滤除偏差太大的杂波。且由于幅值的衰减，幅值衰减程度太大时，接收到的微弱电信号难以处理，需要进行放大。方波驱动的超声波发射信号衰减之后成为近似正弦波信号，需要信号整形电路将正弦波信号重新整形为方波，以方便后续检相电路的设计。两路经过整形的信号进行检相，相位差转换为特定占空比的方波，占空比大小由相位差直接决定。特定占空比的方波经低通滤波后输出至单片机内部的 AD 转换模块，模拟信号转换为数字信号，并通过提出的算法计算得到甲烷浓度值。

信号滤波放大电路是信号接收处理电路的第一步，对传感器接收到的电信号做滤波放大处理。根据传感器接收到的电信号幅值频率以及所需求的放大倍数对运算放大器进行选型。经实验测量在用 3V 的方波驱动下，超声波传感器

接收探头转换得到的电信号不到 0.3V。需要进行放大以满足后续整形检相电路。信号滤波放大电路如图 3-11 所示。设计中选用了微芯公司的运算放大器 MCP6004，它具有 1MHz 的增益带宽积，支持轨对轨输入输出。但轨对轨运放也无法真正达到满摆幅，MCP6004 的输入输出电压范围需大于 0.3V 或小于 -0.3V^[52]。因此需要对参考地进行调整，将输入电压电位提高以实现运放的最佳特性。设计在单片机 AD 转换 3.0V 的电压基准上进行分压，选择了 1.5V 作为运放的虚拟地。且由于超声波探头为容性，超声波信号太大时，电荷会累加在电容上面，产生额外的电压，使测量结果虚高，需要 R12 电阻将多余电荷接地释放。接收探头接收到 40KHz 的正弦波信号先经过高通滤波电路滤掉低频干扰，再经过低通滤波电路滤除高频信号，得到较为完善的波形。图中 R15、R16 共同确定了放大倍数，C10 对运放做了超前补偿。经滤波和放大处理后的正弦波信号送给比较器转换成相应的方波信号。

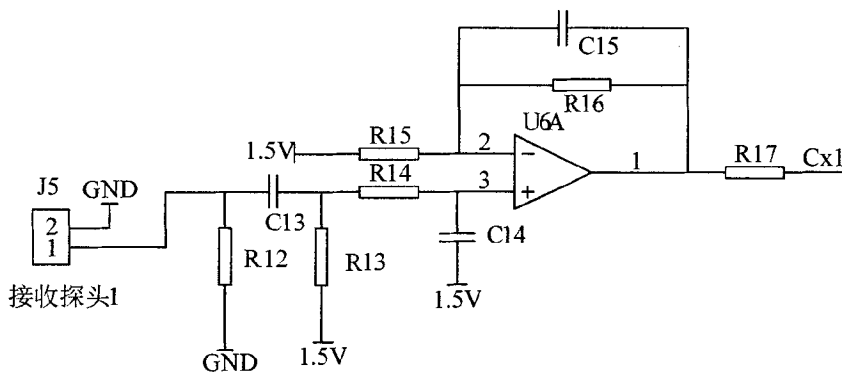


图 3-11 信号滤波放大电路

Fig. 3-11 Circuit of signal amplification and filter

超声波信号经滤波后在放大器同相端的输入电压为：

$$V_+ = \frac{X_{13} R_{13} V_m}{(X_{13} R_{13} + X_{13} R_{14} + X_{14} R_{13}) + (X_{13} X_{14} + R_{13} R_{14})} \quad (3-1)$$

其中 X_{13} ， X_{14} 为电容 C13 与 C14 容抗。通过选取合适的滤波电阻电容，使得 $(X_{13} X_{14} + R_{13} R_{14})$ 接近于 0，消除超声波信号在滤波后产生相移所造成的误差。此外，应选取温度系数小的电阻电容，最大程度消除温度对超声波信号的影响。

整形电路将接收电路处理的正弦波信号整形为对应频率的方波信号，以供

单片机 PSMC 检相以及作为数字式检相电路输入。图 3-12 为信号整形电路。

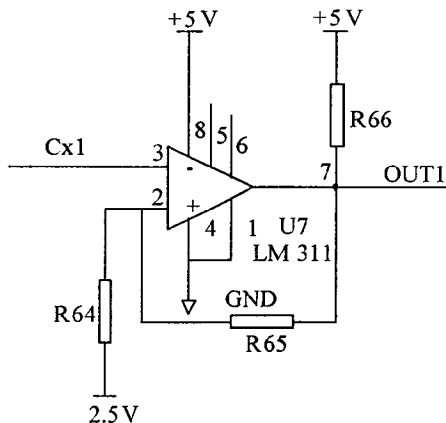


图 3-12 信号整形电路
Fig. 3-12 Signal shaping circuit

经过整形后的两路信号图如 3-13 所示，两路信号 OUT1 和 OUT2 同频不同相，超声波传输相同声程所经历的时间不同，时间差反映在图中的相位差 $\Delta\phi$ 中。

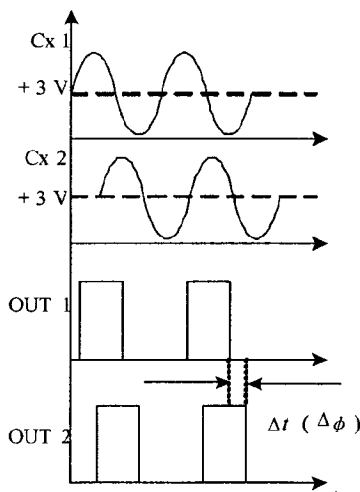


图 3-13 信号整形波形图
Fig. 3-13 The signal shaping oscillograph

检相电路设计选择了 AD9901 高速数字式检相与单片机内部的 PSMC 相结合。双检相设计保证了相位差的检测精度。检相过程如下：经过信号接收处理电路处理的被测信号和参考信号分别接入检相芯片的 S1 和 S2，同时也接入单片机的 PSMC 引脚。PSMC 检相是将经过处理后的两路信号分别接入

PIC16F1783 单片机中，作为触发 PWM 的上升沿事件和下降沿事件，通过软件编程，可以方便快捷的检测出占空比获知相位差。两路信号在通过单片机外部检相芯片后输出相位差，输出的相位差信号与甲烷浓度呈一定函数关系。CD4052 对检相器输出的信号进行信号稳幅，再经滤波输出 Δu 为 0-3V 直流信号送单片机处理，进而实现甲烷浓度值测量，外接检相电路如图 3-14 所示。

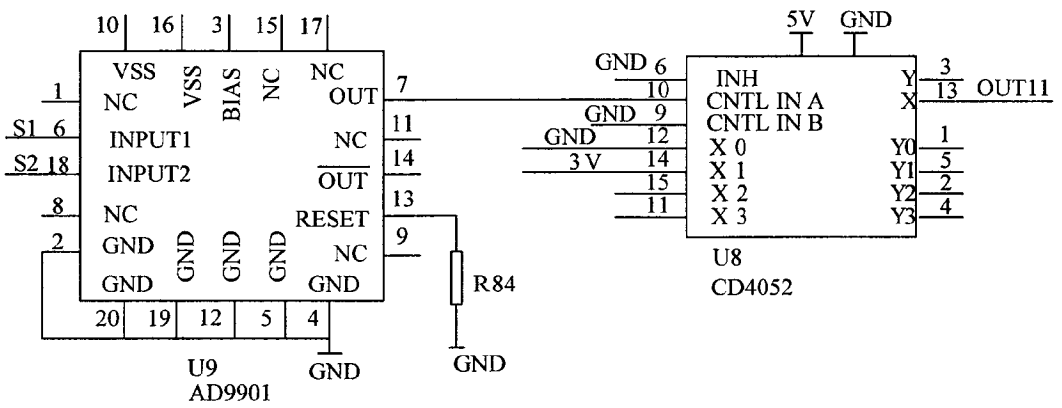


图 3-14 检相电路
Fig. 3-14 Phase detecting circuit

3.2 无线通信模块设计

为方便用户能够第一时间获取报警信息，在报警器进行声光报警的同时，选择了WiFi技术作为无线通信方式，以此实现数据联网推送。利用无线通信模块，可以实现甲烷浓度数据的无线传输，节省了有线网传输的架设成本。通过WiFi模块实现了检测模块的联网，报警信息可以更迅速的向户主反馈。无线通信模块主要由WiFi模块内核ESP8266-12E、模块接口电路及程序下载电路等外围电路组成。

3.2.1 WiFi 模块 CPU

模块内核选用安信可公司的ESP8266-12E。WiFi模块最小系统图如图3-15所示。该模块核心处理器ESP8266在较小尺寸封装中集成了业界领先的Tensilica L106超低功耗32位微型MCU，带有16位精简模式，主频支持80MHz和160MHz，支持RTOS，集成Wi-Fi MAC/ BB/RF/PA/LNA，板载天线^[53]。该模块支持标准的IEEE802.11 b/g/n协议，遵循完整的TCP/IP协议栈。

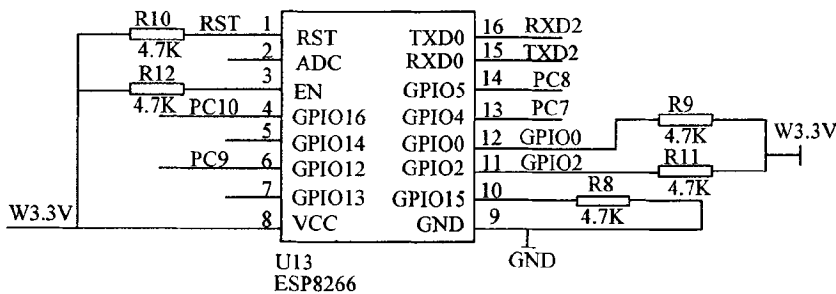


图 3-15 WiFi 模块最小系统

Fig. 3-15 Minimum system of WiFi module

3.2.2 WiFi 模块接口电路

检测模块检测到的浓度信息通过串口与 WiFi 模块进行数据交互，实现甲烷浓度报警信息联网。ESP8266 支持 UART/GPIO 数据通信接口，且支持 SPI 串行外设接口。主串行接口 SI 能在二、三、四线制总线配置下运行，被用来控制 EEPROM 或其他 I2C/SPI 设备。SPI 可以被用来控制外接设备，如串行闪存、音频 CODEC 或其他从机设备。在本设计中，仅需实现报警信息的透明传输，设计时选择了检测模块单片机与 ESP8266 均支持的 UART 串口通信。设计的接口电路图如图 3-16 所示。WiFi 模块通过 TXD0 与 RXD0 与检测模块进行通信。

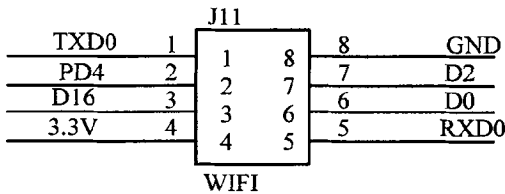


图 3-16 WiFi 模块接口电路

Fig. 3-16 Interface circuit of WiFi module

3.2.3 WiFi 模块程序下载接口电路

在调试过程中，需要进行 WiFi 模块与无线路由 AP 的连接。路由账号密码可以通过后期智能设备端配置实现。设计过程中出于可调式性考虑，需要更改 WiFi 模块内部程序；以及透传协议的编辑均需在 PC 端完成，需要通过下载接口对 WiFi 模块进行内部程序的更新。本设计选用了 USB 转 UART 的单芯片桥接器 CP2102 进行了下载接口电路设计，其具有集成的 USB 收发器和时钟，

无需外部电路和外接振荡器。接口电路如图 3-17 所示。

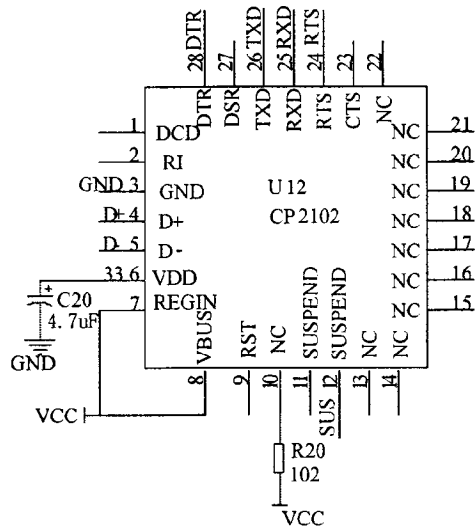


图 3-17 USB 转串口程序下载电路

Fig. 3-17 Program download circuit of USB to serial port

3.3 本章小结

本章进行了超声波无线报警器的硬件设计，包括了检测模块硬件设计以及无线通信模块硬件设计。首先进行检测模块中 CPU、电源、传感器相关电路的选型以及设计，旨在进行甲烷浓度的精确测量。继而进行无线通信模块选型以及相关接口电路设计，旨在实现浓度数据的无线传输、联网。

第4章 无线甲烷报警器软件设计

4.1 软件设计概述

无线甲烷报警器在硬件设计的基础上,为使无线报警器按照流程工作,针对每一个硬件电路设计,都有一块软件程序与之相辅相成。

报警器的软件设计部分,主要分为三部分:检测模块的软件程序设计,无线通信模块的软件程序设计以及智能设备端 APP 的设计编写。检测模块程序负责对甲烷浓度进行检测,包括对接收信号产生的相位差信号的数据处理程序,标定程序设计,标定程序设计,红外遥控解码程序设计,温度补偿程序设计;无线通信模块的程序设计主要包括了单片机中存储的甲烷浓度数值与 WiFi 模块之间的通信程序, WiFi 模块连接 AP 路由、WiFi 模块数据向服务器传输;智能设备端 APP 的设计主要是进行安卓端报警检测 APP 的界面设计以及实现报警信息的推送功能。

检测模块的 MCU 选用了微芯公司的 PIC 系列单片机。PIC 系列单片机的开发环境为 MPLAB X,其开发工具链实现了模块化。区别 MPLAB IDE V8.XX 的老版本, MPLAB X IDE 是基于 Oracle 的开源 NetBeans IDE,能够非常快速和容易地添加许多经常要求的功能^[54]。同时,模块化的设计提供了一个扩展性更高的架构。无线通信模块的程序设计主要在 ESP8266 IDE2.0 上实现。该 IDE 是基于 Eclipse 的插件版,去除了 Eclipse 原版的冗余功能,能够方便得对 ESP8266 的 SDK 进行编辑,另增加了针对 WiFi 模块的串口调试功能。智能设备端 APP 的设计是基于 E4A 的安卓编程,其图形化 UI 设计使得编程更具便利性,模块化设计简单易懂,适合简单安卓 APP 的编写设计。

4.2 主程序设计

主程序设计是无线甲烷报警器软件程序的核心,实现的是报警器程序的主干功能:浓度检测——WiFi 数据传输——报警信息显示推送。图 4-1 为超声波无线甲烷报警器软件主程序流程图。

其具体工作流程如下:在单片机上电后,首先要进行检测模块单片机的系统初始化;检测模块与 WiFi 模块通过 UART 串口进行数据传输,需要对串口进行对应的初始化和中断设置。在系统初始化之后,开始执行与硬件电路相对应的软件程序。考虑到温度补偿是影响超声波相差法浓度检测最重要的因素,

需要编写温度测量代码，根据数字式温度传感器 18B20 测量得到当前环境的具体温度数值；传感器驱动电路的方波是通过单片机定时器 A 产生，对单片机定时器进行分频和占空比的程序编写，可以得到所需要的频率 40Khz、占空比 50%的方波；信号经过接收处理电路后经过单片机的模数转换，相位差信号被转换为数字信号并存储；存储的浓度值需要进行量程零点的标定来确定其灵敏度，通过红外遥控解码程序来进行遥控器每一个按钮功能的设定。标定结束之后根据相位差、温度、浓度值三者的关系进行量程范围内的甲烷浓度检测算法程序编写。最后将计算得到的浓度值通过 WiFi 模块输出至服务器显示，并在智能设备端推送。

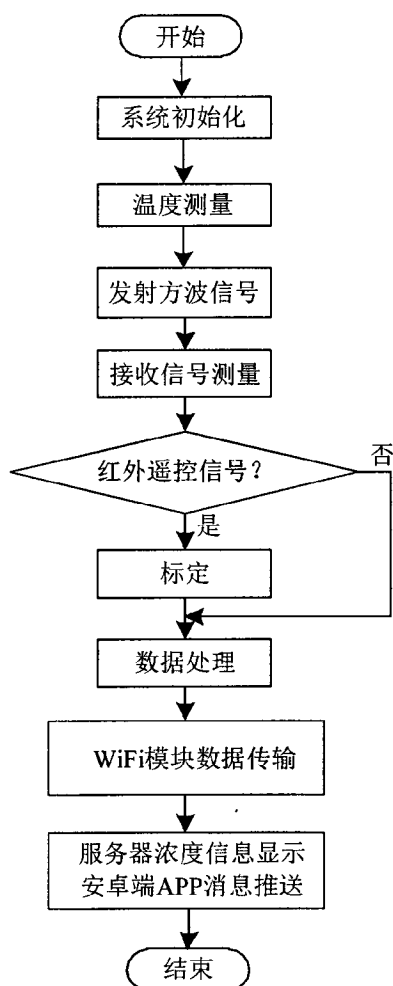


图 4-1 软件主程序流程图

Fig. 4-1 Software main program flow chart

4.3 数据处理程序设计

数据处理程序是根据提出的浓度算法中温度浓度与相位差的关系式，通过软件程序的计算得到甲烷浓度值。超声波传感器转换得到的电信号经过信号滤波放大处理，并进行检相。之后判断数据是否在有效范围之内，如果数值在量程范围之内则进行浓度数据存储，并与无线通信模块进行数据传输。其流程图如图 4-2。

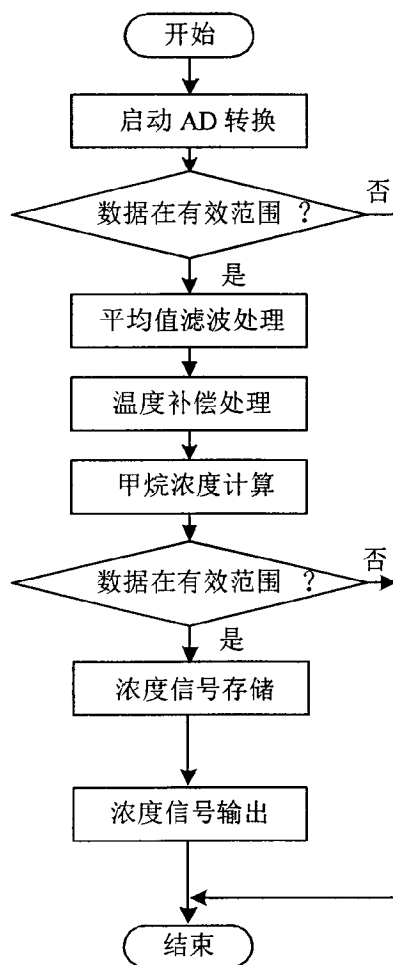


图 4-2 浓度数据转换流程图

Fig. 4-2 Flow chart of concentration data conversion

4.4 标定程序设计

超声波相位差无线甲烷报警器在出厂之前，需要进行 0 点以及量程的标定工作。报警器的标定主要是针对检测模块的标定。图 4-3 为标定程序流程图。其中，标定 0 点是为了抑制 0 点漂移，以及确保量程的准确性。标定灵敏度时需要标定多个点，根据建立的浓度与温度相位差的关系式，浓度输出成一定的函数关系，对报警器进行多点浓度值标定，可以将输出曲线分段线性化，提高检测精度。

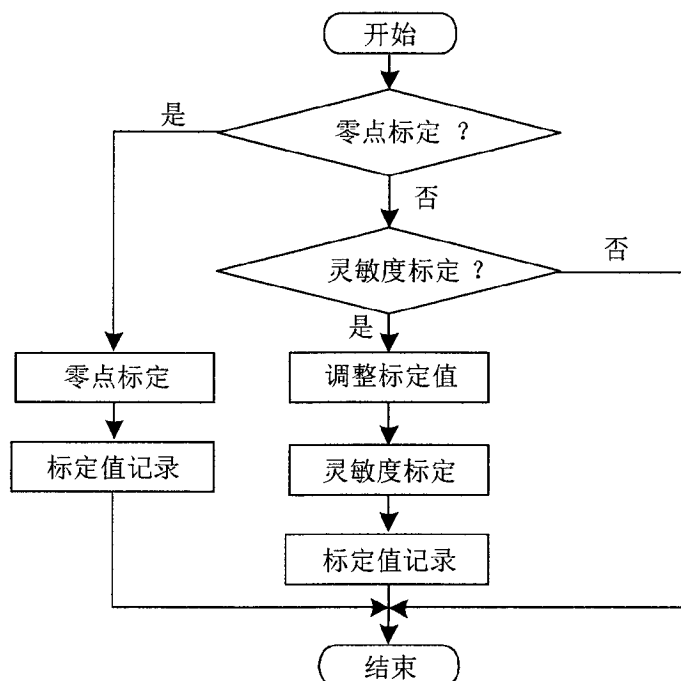


图 4-3 标定程序流程图

Fig. 4-3 Flow chart of calibration

报警器的标定对检测结果至关重要，标定的环境必须为精确无误的浓度环境，容不得任何偏差。报警器的标定过程如下：于出厂之前，将报警器放置在纯净的空气之中，此时甲烷浓度值为 0。给报警器通电使其进行工作，待稳定后按下红外遥控器上数字按钮 0，其代表了对报警器 0%浓度点的确认，即在出厂后的测量中，其参考的 0 点都以此时标定的 0 点为标准。同理，对量程及灵敏度标定也是如此。首先配置好满量程 2%的标准浓度甲烷气体，将报警器放置在标准 2%甲烷气体中，再按下数字按钮 2，代表了对报警器的满量程 2%浓度点确认，及在出厂后的测量中，满量程确定为 2%浓度。量程内其他各点的浓度值标定同

理。浓度值点标定越多，输出曲线分段越接近线性。

4.5 红外遥控解码程序设计

采用红外遥控取代实体按键，能够完成报警器出厂之前的批量标定。报警器通过红外遥控器自定义按键功能进行标定，其原理是基于脉宽调制的 NEC 协议。遥控器各个按键每一次被按下，不同的红外信号响应按键被连续发射。HS3008B 接收红外信号并将其转换成一帧脉冲编码信号。每一组红外信号转换成的脉冲编码信号不同，但是其基本构成是一致的，每一组红外信号均由“0”脉冲、“1”脉冲以及“Header”脉冲构成，通过这 3 种脉冲任意组合，不同的搭配，完成标定按键对应的不同红外光的信号转换。

而单片机识别经 HS3008B 转换后的信号，是通过对每一个基本脉冲持续时间的测量。其中，脉冲 0 具有 1.125ms 的持续时间，这 1.125ms 的脉冲 0 代表着逻辑 0；脉冲 1 持续时间为脉冲 0 的 2 倍，2.25ms 持续脉冲代表了逻辑 1；“Header”脉冲持续时间最长，持续 13.5ms。“Header”脉冲在整帧中起引导码的作用。每一组脉冲信号的波形如图 4-4。PIC 单片机可通过定时器计时器功能来计算脉冲的持续时间，通过时间来判断三种基本脉冲，并确定多个脉冲组成的帧信号。

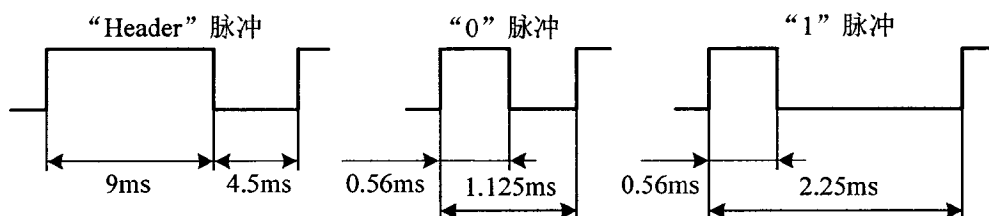


图 4-4 脉冲信号波形图

Fig.4-4 The definition of impulse codes

NEC 协议每一帧的编码顺序固定不变，分别是：引导码、低 8 位用户码、高 8 位用户码、8 位键数据码及其反码、重复码和结束码。解码程序需要对每一帧数据的编码顺序进行分析解码，来确认执行标定 0 点还是报警限设置等功能。程序流程图如图 4-5 所示。每次解码开始，程序检测引导码到来与否。若为引导码，则进入接收状态，计数器清零，后续每接收一个脉冲，计数器加 1；若不为引导码，继续判断是否处于接收状态，处于接收状态的脉冲才会被正确接收。整个解码程序利用状态机转换思想，判断每个脉冲都与当前所处的

状态有关。

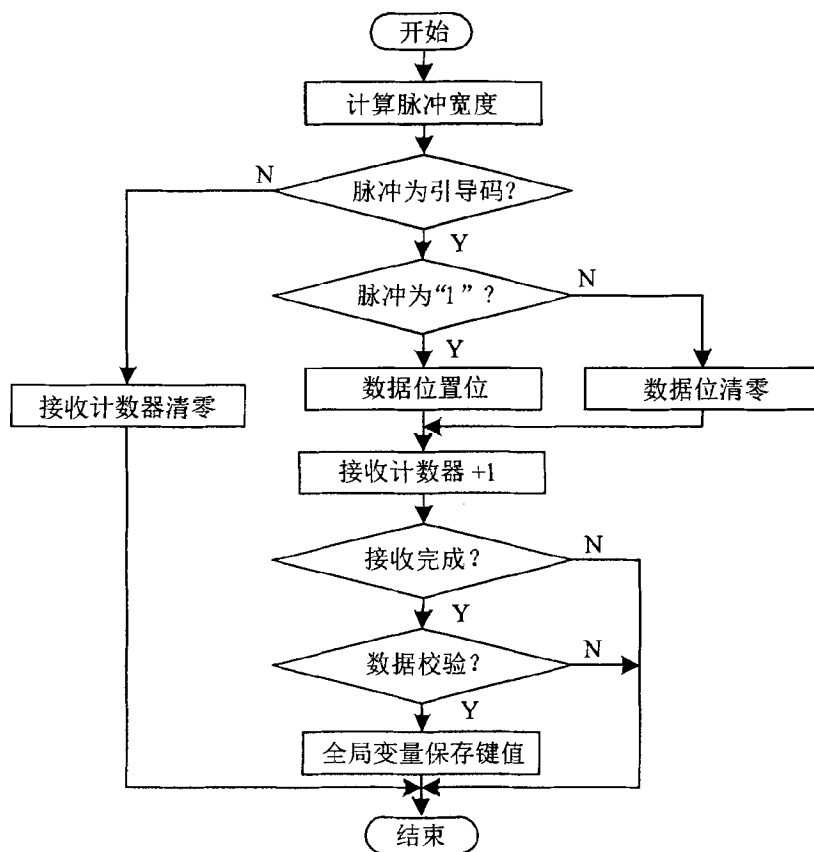


图 4-5 中断解码程序流程图

Fig. 4-5 Flow chart of infrared remote controller decoding

4.6 温度测量程序设计

由于甲烷浓度的检测需要进行温度补偿，温度值经 DS18B20 转换成相应的数字量，送入单片机进行处理。后续数学模型中将处理后的温度信号代入，重新计算到的浓度值有着更高的准确性。DS18B20 温度传感器通过一个单线接口发送接收信息，给单片机留下了更多的 IO 口资源。它通过 Dallas 公司的单总线协议，依靠一个单线端口，通过单片机控制其初始化，并进行读写时序的程序编写，先写再读：先将温度数据根据总线 1 位 1 位写入，写到 DS18B20 传感器自带的高速暂存器中；接着从高速暂存器中读取并转换成温度值输出至

单片机。温度传感器同时自带配置寄存器，可以配置温度检测的精度。图 4-6 是温度检测软件流程图。

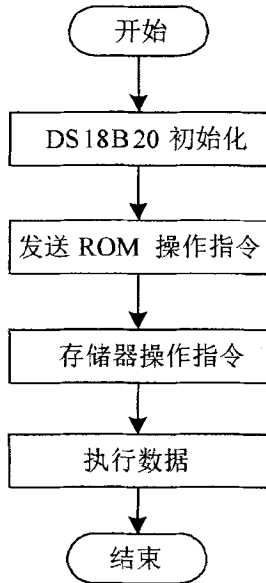


图 4-6 温度检测软件流程图

Fig. 4-6 The flow chart of temperature measurement

4.7 WiFi 模块与检测模块数据传输程序设计

ESP8266 支持两种工作模式，一种是通过 AT 指令来进行配置，另一种为软件开发者（SDK 编程）工作模式。AT 指令主要运用于检测终端与主机服务器之间的通信。编程中通常对 AT 指令进行宏定义，每一条 AT 指令对应的功能具有唯一性。且对于该指令而言，必须逐个逐条发送，才能被正确响应。当指令发送太快，多条指令合并到一起发送，将无法识别。另外如果出现一些非预期的信息，比如说无线信号出现不稳定的情况，AT 指令返回值将返回无用信息诸如乱码之类。AT 指令配置较多使用于手机短信的指令识别。ESP8266 的第二种工作模式为 SDK 编程模式，在这种工作模式下，软件开发者利用厂家提供的常用功能程序，按自己需求修改配置参数，即可较为便捷的实现联网数据传输等功能。本设计选用的 SDK 编程工作模式，其为用户提供了一套数据接收、发送的函数接口，用户不必关心底层网络，只需要专注于物联网上层应用的开发，利用内部提供的接口完成网络数据的收发即可。

ESP8266 支持串口之间的透明传输模式。WiFi 模块 CPU 的串口引脚可直

接与 PIC 系列单片机串口引脚相连。通过串口发送中断和接收中断，WiFi 模块可以主动向检测模块请求浓度信息，亦可被动的接收信息，无需任何解析。在透明传输模式下，可以完全兼容各类软件语言，编程的难度进一步降低。其与检测模块的数据传输流程图如图 4-7 所示。

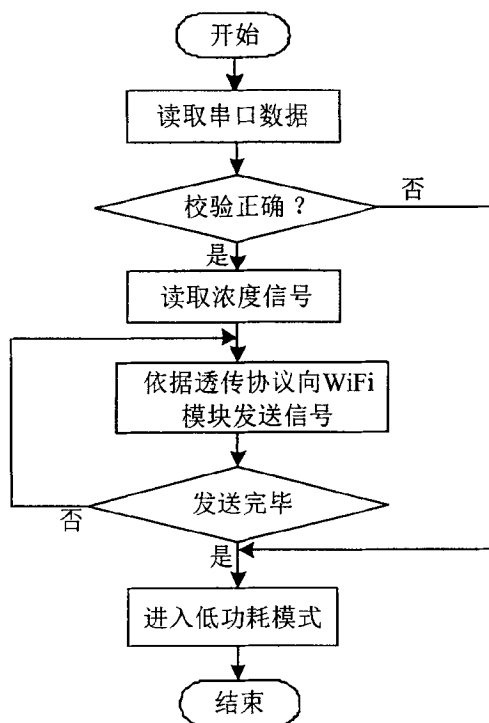


图 4-7 无线数据传输操作流程

Fig. 4-7 Flow chart of wireless data transmission operation

4.8 远程监控服务程序设计

4.8.1 PC 端监测服务器选择

论文中所涉及的 PC 监测平台，我们使用免费对公众开放的传感器接入平台氩氩云。使用氩氩云有以下优势：免费的调试阶段接入平台。报警器在调试阶段，选用昂贵的服务器得不偿失。而氩氩云调试可以实现简单的数据传送，足够满足调试阶段的日常使用。此外，该平台提供后期的多平台服务聚合，可以与国内众多的社交服务平台对接，在日后无线报警器版本升级中可以加入支付、用户用气数据分析等功能，带来更好的用户体验。氩氩云支持企业级数据

加密，无须担心用户私人信息的泄露。

要完成报警器浓度等信息与氩氮云的数据交互，需要在 ESP8266SDK 中对和氩氮云以及相应的传感器接口进行修改操作，每一个传感器接口对应的传感器都需要分配一个身份识别码，确保该传感器与氩氮云注册用户身份相匹配。这就需要进一步获取 API 密匙。API 密匙是申请氩氮云账号时，与账户唯一匹配鉴别码，是该用户下所有绑定设备的识别码，利用这个识别码的授权，可以实现除氩氮云账号之外的多平台账号登录。通过 API 密匙能够获取对连接入氩氮云的传感器的开关、定时、数据读写等相关权限。执行程序之中的数据发送循环，循环主要由浓度数据传递函数 `InfToHekr` 构成，能够将检测模块浓度信息传至氩氮云，并在手机端显示。远程监控流程图如图 4-8。

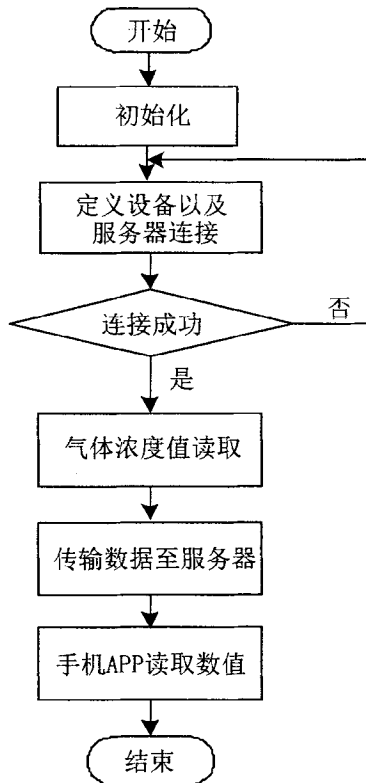


图 4-8 远程监控流程图

Fig. 4-8 Remote monitoring flow chart

依据透传协议，前四帧数据分别为帧起始标识、整帧内容（包括帧头、帧长、校验码等）的字节个数、帧类型、帧序号。第五帧和第六帧包含了检测模块向 WiFi 无线通信模块传递的甲烷浓度信息。第七帧和第八帧分别为有效数据位和校验码。如图 4-9 所示，第五帧数据为 2，第六帧数据为 1，说明氩氮

云服务器监测此时的浓度为 2.1%。

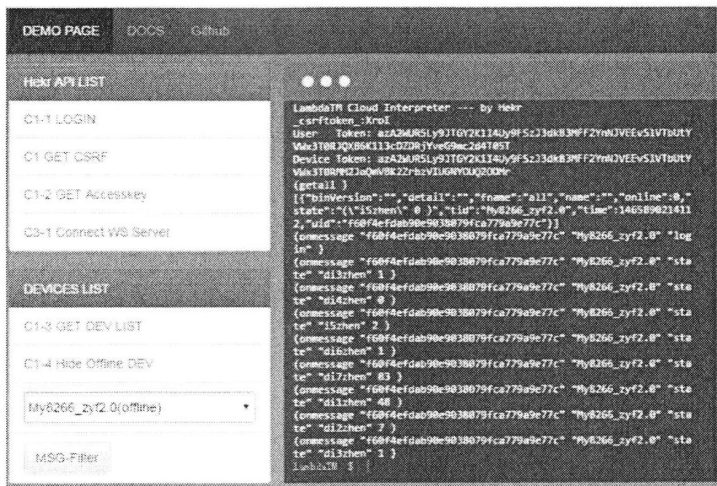


图 4-9 氢氨云监测浓度信息显示

Fig. 4-9 Monitoring concentration information on the Hekr Cloud

4.8.2 安卓端监测 APP 设计

设计中选择 E4A 进行安卓编程，E4A 是以 Google Simple 语言为基础的一款安卓程序开发 IDE。E4A 安卓编程来源于易语言，采用通俗的中文编程，通过 E4A 能够利用中文基础语法，迅速便捷地实现安卓 APP 编写。相比于传统的 Eclipse 以及 Android Studio，E4A 上手简便，模块组件化设计，方便安卓新手使用。设计的安卓端 APP 如图 4-10 所示。

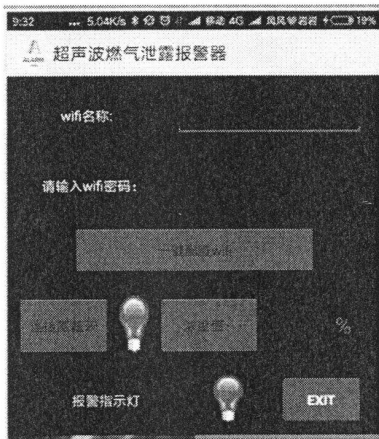


图 4-10 安卓端监测 APP 效果图

Fig. 4-10 Application effect chart on Android

APP 实现功能如下：通过点击配置 WiFi 按钮，能够配置无线甲烷报警器连接入屋内的无线 AP，再点击连接氦氮云按钮后，指示灯将会亮起，甲烷浓度值将每隔 15s 实时在 APP 中显示，其推送频率可调。

4.9 本章小结

依据超声波无线甲烷报警器模块化设计要求，本章提出了检测模块及无线通信模块的软件编写流程，进行了总体的主程序设计，并对主程序的每一块结构进一步细分。在软件编程中进行了甲烷浓度、相位差、温度值三者数学模型的建立，通过红外遥控标定程序确立浓度点，并进行了无线数据传输程序设计、PC 端远程监控程序以及安卓智能设备端监控软件的设计。

第5章 系统调试与测试

5.1 系统调试

报警器在设计完成之后，必须对报警器整机进行系统调试。首先需要对硬件电路做全方位的检查：检查电路设计电源问题，有无短路断路情况，芯片电容电阻等元器件是否存在虚焊、漏焊、引脚位置颠倒焊反、过孔寄生电容电感是否会严重影响信号处理、电路板检测模块与无线通信模块接口电路是否稳定、UART 串口接线同向阻塞等问题。确认无相关错误后进行上电，测量各测试点电压是否正常，晶振是否起振，无误后对检测模块以及无线通信模块下载对应的程序以实现甲烷浓度值的检测。

软件程序的调试是建立在硬件电路设计以及电路板成品无误的情况下。同样，报警器的软件程序调试分为两部分：检测模块软件调试与无线通信模块的调试。检测模块的软件调试在 MAPLAB X IDE 上进行，通过该 IDE 强大的导航工具，可以极其方便的转至各个函数，转至文件、转至类型、转至符号等等，亦可调试串口发送中断，判断检测到的浓度值每一帧节是否发送正确。调试无线通信模块中自行设置无线网络路由信息，进行最简单的字符串发送测试。通过 PC 端的串口助手显示的数据来判断各个工作部分的数据采集情况。

串口助手显示的数据如图 5-1 所示。

窗口中乱码是 ESP8266 初始化时正常现象。首先进行服务器初始化操作，进而测试弱无线信号强度下 WiFi 模块工作情况，能否搜索到无线 AP、能否快速连接上无线路由、连接上无线 AP 后报警器是否联网。若测试正常，会出现“scandone”字符。当连接上无线 AP 后，会显示所连接的 AP 名称以及通道。连接成功后会分配给 WiFi 模块子 IP 地址。进一步对检测模块与无线通信模块之间的通信程序进行测试，判断检测模块与无线通信模块之间的通信程序是否正常，这需要通过观察 PC 端服务器上数据。通过观察氩氮云服务器的调试窗口，判别每一帧数据是否遵循透传协议。

最后要完成安卓端 APP 的报警信息消息显示以及推送调试。选择超出报警限的标准浓度甲烷气体进行调试，智能设备端监控 APP 是否能够读取服务器上的浓度值信息，在显示框内是否显示甲烷浓度值信息以及浓度值超出报警限后是否推送报警信息。安卓端调试实拍图如图 5-2 所示。

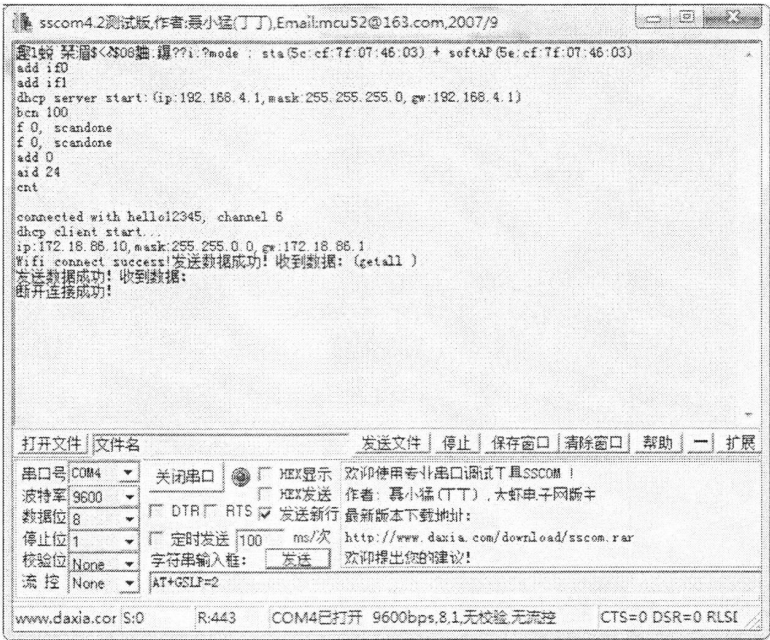


图 5-1 WiFi 串口数据调试

Fig. 5-1 WiFi serial data debugging



图 5-2 系统数据采集情况显示

Fig. 5-2 Display of the alarm data acquisition

5.2 测试实验及结果分析

报警器在调试完之后进行实验测试以验证甲烷浓度测量的准确性。具体操作是在实验室环境下，在报警器接通电源后，稳定 3~5min，放置在纯净的空气中进行浓度测量，相当于出厂前的 0 点校准。同理再将报警器放置在标准 2.5%甲烷气体中，进行量程灵敏度标定，标定重复 2~3 次。检验报警器的准确性选择了 5 组标准浓度的甲烷气体。实验室环境下仅有 100%标准甲烷气体，需要与纯净的空气按照一定的体积比混合，由于 100%浓度甲烷气体属于高危易燃易爆气体，配置低浓度甲烷气体时需要在通风良好的环境下进行体积分配，并且杜绝一切明火火源。配气过程如下：如配置 1%浓度的甲烷气体，则将 10 毫升的甲烷气体混合 90ml 空气注入标准密封性良好的气袋中，等待 3-5 分钟，待气体混合均匀。由于混合气体的装置输气口较小，气体混合过程中经管壁摩擦可能会带来温度的变化，因此需要缓慢注射气体，并经历一段时间的等候，使气体温度重新降至室温。

表 5-1 为在 25 摄氏度室温下进行实验后报警器的测量结果。

表 5-1 25℃报警器实验数据
Table 5-1 Alarm test data at 25℃

序号	实际甲烷浓度 (%)	实测浓度					最大相对误差
		第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	
1	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	/
2	0.50	0.50	0.50	0.48	0.48	0.53	6.0%
3	1.00	1.02	1.01	0.97	1.00	1.07	7.0%
4	2.00	2.02	2.02	1.99	2.01	2.17	8.5%
5	2.50	2.55	2.44	2.46	2.52	2.67	6.8%

以上各测量数据均为安卓端 APP 上显示，其来源是 WiFi 通信模块读取的检测模块的甲烷浓度值信息。因此，从测量数据的精度满足要求的情况来看，报警器两段式模块化的设计是符合设计要求的。通过对 5 组甲烷浓度数据进行分析，结果表明：报警器浓度检测误差低于实际甲烷浓度值的±10%，表明提出的浓度检测数学模型算法无误，设计的超声波无线相差法甲烷报警器满足测量要求。

5.3 本章小结

在完成超声波无线甲烷报警器软硬件设计的基础上，本章首先对报警器的硬件电路作了全方位的电路检查，无误后进行软件程序的调试，对 WiFi 无线通信模块接收信号进行了串口调试。在实验室环境下进行模拟甲烷泄漏实验，旨在验证超声波相位差法浓度检测原理的可行性以及 WiFi 无线传输的稳定性，实验结果表明报警器能准确实时地测量甲烷浓度。

结 论

本文在分析了当前基于不同原理的甲烷气体传感器后，分析对比其检测精度、可靠性、市场成本等因素，最终完成了基于超声波相位差法的无线甲烷报警器设计。超声波无线甲烷报警器设计时选择了模块化设计，主要分为了检测模块以及无线通信模块。检测模块中围绕建立的超声波相差法甲烷浓度值测量数学算法，进行了报警器的软硬件设计。报警器以 PIC 系列单片机为核心 CPU，超声波传感器接收信号经滤波放大之后进行检相，检相后的信号输入至单片机的模数转换器，经数据处理后，最终完成了浓度信息从模拟量至浓度百分比的转变。无线通信模块实现了与检测模块的信息交互，完成了浓度值信息的联网。浓度值信息通过 WiFi 模块联网后传输至氩氦云服务器，并向手机端实时推送报警信息。主要完成的内容具体如下：

1. 对超声波气体传感器作了深入分析，了解了超声波传感器的性能指标，确保了超声波相位差法气体浓度测量的可行性。参考声速公式，结合温度补偿，提出了甲烷气体浓度关于相位差与温度的数学算法。

2. 通过比较民用燃气报警器的几种无线通信方式，在比较了传输速度、信号强度、局域网亦或互联网连接以及通信成本之后，选择了 WiFi 技术作为本设计的无线通信技术。检测模块与 WiFi 模块通过 UART 进行数据传输，并利用 WiFi 通信技术实现数据联网。

3. 完成了模块化的总体硬件方案设计，包括检测模块和无线通信模块电路设计。并对两大模块进一步细分，检测模块围绕 PIC16F1783 单片机，进行了电源、传感器驱动、信号接收处理电路的设计；无线通信模块以 ESP8266 为 CPU，进行了检测模块与 WiFi 模块通信接口电路和程序下载电路设计。

4. 在 MPLAB X 平台下采用模块化设计方法对相关程序进行了通信、数据处理、补偿、运算、标定等软件开发；在 ESP8266 2.0IDE 平台下利用无线通信模块官方提供的 SDK 软件程序开发包进行了无线通信程序的编写，在物联网的上层应用进行开发，利用 8266 内部提供的 WiFi 接口程序、GPIO 接口程序、中断接口程序完成联网和网络数据的收发。在 E4A IDE 上进行了安卓应用程序的简单设计，主要进行了对经 WiFi 模块联网后传输至氩氦云服务器上的浓度值信息的读取，并设计了超限报警，手机端提示异常信息的设计。

5. 对报警器进行系统调试，并在实验室环境下进行甲烷无线报警测试，对测量结果作了简要的数据分析，验证了报警器的实时性准确性。

由于实验室的条件有限，相关的测量结果还存在一定误差，同时整个系统仍需要进行改进与相关创新设计来进一步提高超声波无线甲烷报警器的各项性能。

参考文献

- [1] 贾承造, 张永峰, 赵霞. 中国天然气工业发展前景与挑战[J]. 天然气工业, 2014, 34(2): 1-10.
- [2] 陆家亮, 赵素平. 中国能源消费结构调整与天然气产业发展前景[J]. 天然气工业, 2013, 33(11): 9-15.
- [3] 付国忠, 陈超. 我国天然气供需现状及煤制天然气工艺技术和经济性分析[J]. 中外能源, 2013, 15(6): 28-33.
- [4] Paragulgov T.K, Paragulgov K.K. Classifying of East Kazakhstan Sedimentary Basins and Their Oil and Gas Potential[C]. 1st International Geosciences Conference for Kazakhstan, November 2010, 17, 406-445.
- [5] 刘勇, 赵忠德, 李广, 等. 我国城市燃气行业天然气利用现状与展望[J]. 国际石油经济, 2014, 22(09): 79-91.
- [6] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 国家应对气候变化规划(2014-2020年)[R]. 北京: 国家发改委, 2014-9-19.
- [7] 刘勇, 单蕾, 孙慧, 等. 中国天然气价格改革适时提速——中国天然气行业2015年回顾与2016年展望[J]. 国际石油经济, 2016, 24(06): 61-68.
- [8] 顾安忠, 曹文胜. 中国液化天然气的发展[J]. 气体分离, 2005, 3(02): 4-12.
- [9] 苏立军. 天然气管道泄漏爆炸实验分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(12): 40-45.
- [10] Volkmar Chowanietz, Christoph Pasel, Michael Luckas, et al. Temperature Dependent Adsorption of Sulfur Components, Water, and Carbon Dioxide on a Silica - Alumina Gel Used in Natural Gas Processing[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2016, 61:3208-3216.
- [11] Solomon Omwomaa, Christopher T. Gorea, Yuanchun Jia, et al. Environmentally benign polyoxometalate materials[J]. Coordination Chemistry Reviews, 2015, 286:17-29.
- [12] 廉辉. 城市管道燃气事故应急救援处理分析[J]. 科技与企业, 2015, 12(24): 101.
- [13] 徐岑. 南京一小区凌晨发生天然气爆燃[N]. 现代快报, 2015, 2015-

08-15(3).

- [14] 孙曙峦. 安徽芜湖餐馆爆炸再敲燃气安全警钟[N]. 芜湖日报, 2015, 2015-10-12(5).
- [15] 张传远, 于同珍, 苏雪莲. 常用气体报警器的工作原理、性能及应用[J]. 化学分析计量, 2011, 20(4): 70-71.
- [16] 褚云. 国内外易燃易爆气体传感器的分类与比较[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(12): 112-117.
- [17] 温度对催化燃烧式气体传感器影响研究[J]. 现代计算机, 2015, 22(27): 3-5.
- [18] 赵东敏. 矿用催化燃烧式甲烷测定器的计量校验[J]. 中国质量技术监督, 2015, 17(12): 66-67.
- [19] 张正勇, 徐定钧, 于震, 等. 热催化气体传感器的特性分析及其设计原则[J]. 传感技术学报, 2008, 21(9): 1503-1506.
- [20] 刘海波, 沈晶. 催化燃烧式瓦斯传感器技术研究进展[J]. 智能计算机与应用, 2011, 01(5): 71-73.
- [21] 吴永忠, 陈丹艳, 郭太峰, 等. 非分光红外甲烷传感器的研制[J]. 煤炭学报, 2007, 32(11): 1224-1227.
- [22] 于庆. 基于光谱吸收的气体检测技术在煤矿中的应用[J]. 矿业安全与环保, 2012, 39(3): 26-28.
- [23] 云玉新, 吕天光, 韩洪, 等. 气体红外吸收特性受压强与温度的影响分析[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(6): 992-996.
- [24] GL Li, Sui Y, Dong M, et al. A carbon monoxide detection device based on mid-infrared absorption spectroscopy at 4.6 μm [J]. Applied Physics B, 2015, 119(2):287-296.
- [25] IN Sudiana, MZ Firihi. Development of a gas detector by using ultrasonic sensor integrated with artificial neural network[J].Contemporary Engineering Sciences, 2016, 9(3):125-133.
- [26] Karlsson K, Delsing J. The gap discharge transducer as a sound pulse emitter in an ultrasonic gas flow meter[C]International Flow Measurement Conference, Curran Associates, 2013: 472-478.
- [27] 杨玉芝, 刘艳萍, 崔朋朋. 超声波气体流量计中传感器参数选择[J]. 仪表技术与传感器, 2009, 39(s1): 416-417.
- [28] 孙凌逸, 高钦和, 蔡伟, 等. 低压电源驱动的超声波发射接收电路设

- 计[J]. 仪表技术与传感器, 2009, 40(10): 77-79.
- [29] 吴媛媛, 陈文柳. 家用燃气报警器比选方法研究[J]. 煤气与热力, 2014, 34(2): 25-28.
- [30] 张恒, 代红亮. 物联网技术在燃气抄收、监控及安全管理的应用与实践[J]. 城市燃气, 2015, 22(5): 40-44.
- [31] 邓金伟, 段吉忠, 曹荀. 基于物联网技术的城市燃气监控系统研究设计[J]. 石油化工自动化, 2015, 51(4): 30-33.
- [32] 国家安全生产监督管理总局. AQ 6206-2006煤矿用高低浓度甲烷传感器[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [33] 马爱霞, 徐音. 超声波传感器原理及应用[J]. 科技风, 2016, 10(1): 109.
- [34] 窦光宇. 次声与超声[J]. 百科知识, 2009, 16(4): 19-20.
- [35] 曹瑞, 包空军. 基于超声波传感器新技术的应用[J]. 科技信息, 2009, 16(3): 491.
- [36] 赵燕. 传感器原理及应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2010, 1: 312-316.
- [37] 张海鹰, 高艳丽. 超声波测距技术研究[J]. 仪表技术, 2011, 18(9): 58-60.
- [38] 李东明, 崔爽, 丛琳皓, 等. 超声波轴承用挤压式压电换能器的共振频率[J]. 光学精密工程, 2014, 22(9): 2423-2430.
- [39] 张家荣. 工程常用物质的热物理性质手册[M]. 北京: 新时代出版社, 1987.
- [40] Terada M. Application of ZigBee sensor network to data acquisition and monitoring[J]. Measurement Science Review, 2016, 9(6):183-186.
- [41] Afonso J A, Maio A J F, Simoes R. Performance Evaluation of Bluetooth Low Energy for High Data Rate Body Area Networks[J]. Wireless Personal Communications, 2016, 90(1):1-21.
- [42] Chang M, Wang Q. Application of Wireless Sensor Network and GPRS Technology in development of Remote Monitoring System[J]. Telkomnika Indonesian Journal of Electrical Engineering, 2015, 13(1):151-158.
- [43] Retscher G, Moser E, Vredeveld D, et al. Performance and accuracy test of a WiFi indoor positioning system[J]. Journal of Applied Geodesy, 2016, 1(2):103-110.

- [44] 范卫萍, 吴叶兰, 陈红军, 等. 智能燃气表缴费系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(1): 328-330.
- [45] 李荣正, 刘启中, 陈学军. PIC单片机原理及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004, 2: 13-16.
- [46] 黄修铜, 王婷旺, 杨文涛, 等. 基于PIC单片机的热膜式空气流量计设计[J]. 传感器世界, 2013, 19(11): 15-19.
- [47] Song Q, Xie S, Wang C, et al. A Temperature Collection and Analysis System Based on the MCU and DS18B20[J]. Electronic Science & Technology, 2015, 28(9):100-103.
- [48] Pflugradt M, Mann S, Tigges T, et al. Multi-modal signal acquisition using a synchronized wireless body sensor network in geriatric patients.[J]. Biomedizinische Technik/biomedical Engineering, 2015, 61(1):192-8.
- [49] Pietkiewicz S. Chapter 133 - Micropower 600kHz step-up DC/DC converter delivers 5V at 1A from a Li-Ion cell[J]. Analog Circuit Design, 2015:277-278.
- [50] Zhang H M, Li H, Peh L S. Research of Li-Ion Battery's Equalizer Circuit Based on TL431[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 33(9):1056-1059.
- [51] 维普网. 美国微芯上市高速MOSFET驱动IC[J]. 机电工程技术, 2008, 8: 5-6.
- [52] 刘敏侠, 田泽, 邵刚. 高增益轨对轨运算放大器的设计实现[J]. 计算机技术与发展, 2013(8): 152-156.
- [53] 范兴隆. ESP8266在智能家居监控系统中的应用[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2016, 16(9): 52-56.
- [54] Ibrahim D. Chapter 3-MPLAB X IDE and MPLAB XC8 C Programming Language[J]. Pic Microcontroller Projects in C, 2014, 1:25-50.

攻读硕士学位期间发表的学术论文

- [1] 邹一风, 丁喜波, 胡逸. 氨气泄漏源定位方法研究与监测系统研制[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(8): 163-168.
- [2] Xi-Bo D, Yi-Feng Z, Chun-Yu L, et al. Study of the Ultrasonic Three-Dimensional Wind Speed Measurement Methods Based on the Phase Difference[C]Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), 2016 Sixth International Conference on. IEEE, 2016: 785-789.
- [3] 李春玉, 丁喜波, 邹一风. 相位差法超声波三维风速测量方法研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2016, 21(4): 45-49.
- [4] 丁喜波, 王珊, 邹一风. 基于超声波声衰减的甲烷测量方法研究[J]. 应用基础与工程科学学报. ISSN 1005-0930; CN 11-3242/TB. (已录用)

致 谢

毕业在即，感慨光阴似箭，两年半的硕士生涯使我受益匪浅。回想这两年半，有初到哈尔滨理工大学的欣喜、有遇到困难的焦躁、也有成功的喜悦和泪水等等，所有的一切都将成为我最宝贵的回忆。在这里我要感谢帮助过、鼓励过我的所有人，因为有了你们我的研究生之路才充满了阳光。

首先，我最想要感谢的是一直以来在学业上对我无私帮助和鼓励的我的导师——丁喜波教授。丁老师平易近人，虚怀若谷的师者风范感染着我，严谨细致、一丝不苟的学者之道影响着我；丁老师不仅授我科研的方法，而且教我人生的道理，更是在我迷茫之际给予开导分析。虽历时三载，从老师身上学到无穷之道却使我终生受益。本课题在研究过程中，丁老师不仅帮助我开拓研究思路，为我查找最前沿的专业资料，更是在百忙之中对于我的疑问，还细心地向我讲解，给我指明方向，使我备受感动。简单的言语无法道尽我对老师的感激之情，还请老师在这里接收我最真诚的祝福，祝老师身体健康，工作顺利，永远幸福。

其次感谢实验室的师兄师姐师弟师妹，是你们创造了安静的实验室环境和良好的科研氛围，两年多来我们朝夕相处，共同进步，感谢你们给予的所有帮助；还要感谢我的室友和远在北方的好朋友们，感谢你们对我的支持鼓励。

感谢赵岩岩默默的支持和鼓励。

最后，感谢含辛茹苦培养我长大的家人，你们一直是我坚强的后盾，面临人生选择的迷茫之际，为我排忧解难，你们对我无私的爱与照顾是我不断前进的动力，我爱你们！