

工学硕士学位论文

基于超声波相位差法的氢气检测仪设计

丁欣

哈尔滨理工大学

2017 年 3 月

国内图书分类号：TP721.5

工学硕士学位论文

基于超声波相位差法的氢气检测仪设计

硕士研究生：丁欣

导 师：王丽杰

申请学位级别：工学硕士

学 科、专 业：安全科学与工程

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: TP721.5

Dissertation for the Master Degree in Engineering

Design of Hydrogen Detector Based on Ultrasonic Phase Difference Method

Candidate:	Ding Xin
Supervisor:	Wang LiJie
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Speciality:	Security Of Science and Engineering
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氢气检测仪设计》，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: 日期: 年 月 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氢气检测仪设计》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 3 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: _____ 日期: _____ 年 _____ 月 _____ 日

导师签名: _____ 日期: _____ 年 ____ 月 ____ 日

基于超声波相位差法的氢气检测仪设计

摘 要

氢气作为一种无污染的高效清洁能源和重要的化工原料，广泛应用于航空航天、核电站、核潜艇、汽车和化工领域等。然而氢气也是一种易燃易爆的气体，在常温常压下，当所占空气体积比例达到 4% 以上时极易发生爆炸。目前国内外的氢气检测仪普遍采用的是催化式传感器，而这类传感器普遍存在长期稳定性差、功耗高、寿命短等问题，无法在恶劣环境中使用。为保障氢气在工业生产过程中安全使用，本文研制出一套高性能的氢气检测系统，对于国民经济领域甚至国防领域具有重要意义。

针对现有氢气检测技术普遍存在的问题，本文提出了一种新型检测方法——超声波相位差法。由于氢气的声速与其他气体的声速具有显著差别，利用此特性便可准确地检测出气体中的氢气浓度，并排除其他气体的干扰。本文采用测量通道和参考通道的双通道设计，巧妙地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，提高了测量精度，同时也消除了环境温度对零点的影响；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，减少了外界环境对测量精度的干扰。本文进行了氢气检测仪的测量模块和主模块的硬件电路设计，完成了检测仪的软件设计。

采用完成的检测仪样机进行了氢气浓度实测并进行了误差分析，实验结果表明本设计克服了其它氢气检测仪的主要缺点，实现了氢气快速、高精度、低功耗、低成本检测。由于敏感元件工作于常温状态，具有连续工作的长期稳定性，具有极高的经济价值和实用价值。

关键词 氢气；超声波；相位差；声速；双通道

Design of Hydrogen Detector Based on Ultrasonic Phase Difference Method

Abstract

Hydrogen as a pollution-free and efficient clean energy and an important chemical raw material, is widely used in aerospace, nuclear power plants, nuclear submarines, automotive and chemical fields, etc. However, hydrogen is also a kind of inflammable and explosive gas, under normal temperature and pressure, when the proportion of air volume is more than 4%, it is prone to explode. Therefore, in order to ensure the safety of hydrogen in the process of industrial production, a set of high performance hydrogen detecting system is developed in this paper, this detection system is very important for the national economy and even the cause of national defense. To refer to the relevant literature, at present, the hydrogen detector at home and abroad is widely used in the catalytic sensor, but this kind of sensor has many problems such as poor long-term stability, high power consumption and short life, it is not up to now the use of hydrogen gas environment in fact.

In view of the existing problems of the existing hydrogen detection technology, A new detection method is proposed in this paper--ultrasonic phase difference method. Because the sound speed of hydrogen has a significant difference with other gases, by using this characteristic, the hydrogen concentration in the gas can be accurately detected, and eliminate the interference of other gases. In this paper, we design a dual channel design using measurement channel and reference channel to transform the speed difference of the ultrasonic wave into the phase difference skillfully, using the variation of the measured phase difference to reflect the change of the gas concentration, improve the measurement accuracy, it also eliminates the influence of environmental temperature on the zero point at the same time; At the same time, the digital temperature sensor is used to compensate the sensitivity, expand the working

temperature range of the sensor, reducing the interference of the external environment to the measuring precision. In this paper, the hardware circuit of the measurement module and the main module of the hydrogen detector is described in detail, and the software design part is introduced, completed the test of the prototype and error analysis.

The experiment was carried out with the standard concentration of hydrogen, the experimental results show that this design overcomes the main shortcomings of other hydrogen detector, realized the fast, high accuracy, low power consumption and low cost detection. Because of the sensitive element is in normal temperature condition, it has long term stability with up to 1 years of continuous work, and has a high economic value and practical value.

Keywords Hydrogen, ultrasonic, phase difference, sound speed, dual channel

目 录

摘 要.....	I
Abstract	II
第 1 章 绪 论	1
1.1 课题背景及意义	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 超声波氢气检测仪总体方案设计	5
2.1 技术指标要求	5
2.2 整体设计方案设计	5
2.3 测量模块方案设计	6
2.3.1 超声波检测原理及传感器结构.....	6
2.3.2 超声波传感器功能分析.....	7
2.4 主模块方案设计	9
2.5 单片机选型	9
2.6 本章小结	10
第 3 章 超声波检测理论分析.....	11
3.1 声速的影响因素	11
3.2 超声波相位差法氢气检测原理分析	11
3.3 本章小结	14
第 4 章 氢气检测仪的硬件电路设计	15
4.1 测量模块电路设计	15
4.1.1 测量模块单片机电路.....	15
4.1.2 超声波传感器驱动电路.....	16
4.1.3 超声波信号放大电路.....	16
4.1.4 检相电路	17
4.1.5 DS18B20 测温电路.....	17
4.2 主模块电路设计	18
4.2.1 主模块单片机电路.....	18
4.2.2 系统电源电路设计.....	19
4.2.3 红外接收电路	21

4.2.4 显示电路	21
4.2.5 报警电路	22
4.2.6 标准频率输出及连接故障报警电路	23
4.3 本章小结	24
第 5 章 系统软件设计	25
5.1 系统软件设计概述	25
5.2 主程序设计	25
5.3 红外解码程序设计	26
5.3.1 NEC 协议	27
5.3.2 红外遥控流程图	28
5.4 标定程序设计	29
5.5 数据处理程序设计	30
5.6 测温程序设计	30
5.6.1 DS18B20 传感器时序简介	30
5.6.2 测温模块设计	32
5.7 数据存储程序设计	32
5.8 本章小结	33
第 6 章 系统测试与误差分析	34
6.1 系统调试	34
6.2 系统测试	34
6.3 误差分析	36
6.4 本章小结	38
结 论	39
参考文献	40
攻读硕士学位期间发表的学术论文	44
致 谢	45

第1章 绪 论

1.1 课题背景及意义

氢气主要用于工业用途及医疗用途。近年来，随着氢气的制取工艺日趋成熟，氢气的应用领域日趋广泛，氢气得以大批量生产。氢气的行业应用主要用于核研究、氘核加速器的轰击粒子、示踪剂、可以做气相色谱氢焰化验原料、密度小充探空气球、新型的高能燃料(驱动火箭)、冶炼金属钨、钼等，还有石油精炼、浮法玻璃、电子、食品、饮水、化工生产、航天、汽车业等行业。

氢气的工业用途主要分为以下两个部分。首先，氢气是主要的工业原料，也是最重要的工业气体和特种气体，在石油化工、电子工业、冶金工业、食品加工、浮法玻璃、精细有机合成、航空航天等方面有着广泛的应用。同时，氢也是一种理想的二次能源（二次能源是指必须由一种初级能源如太阳能、煤炭等来制取的能源）。在一般情况下，氢极易与氧结合。这种特性使其成为天然的还原剂使用于防止出现氧化的生产中。在玻璃制造的高温加工过程及电子微芯片的制造中，在氮气保护气中加入氢以去除残余的氧。在石化工业中，需加氢通过去硫和氢化裂解来提炼原油。氢的另一个重要的用途是对人造黄油、食用油、洗发精、润滑剂、家庭清洁剂及其它产品中的脂肪氢化。由于氢的高燃料性，航天工业使用液氢作为燃料。其次，氢气可用作用作合成氨、合成甲醇、合成盐酸的原料，冶金用还原剂，石油炼制中加氢脱硫剂等。

在氢气为人类提供便利的同时也带来了许多的安全隐患。氢气具有易燃易爆的特性，与空气结合会形成爆炸性气体，在标准大气压及室温的条件下，其爆炸极限为 4.1%~74.2%。近年来，因氢气泄漏而导致的爆炸事故层出不穷。2001 年 2 月 27 日，江苏省盐城市某化肥合成车间因氢气泄漏导致的爆炸事件致 5 人死亡；1984 年 6 月 28 日，荆门热电厂发生氢气爆炸致 2 人死亡 1 人受伤事故；2015 年 6 月 28 日上午 10 时 04，内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗准格尔经济开发区伊东九鼎化工有限责任公司发生一起氢气泄露爆炸事故，造成正在附近施工的 3 名工人死亡，6 人受伤。

氢气爆炸事故的发生原因是多方面造成的，因此要强化氢气的综合治理

工作，防范氢气的爆炸工作除了制定规章制度及加强管理外，加强厂房氢气浓度的实时监测，也是预防氢气爆炸事故的重要方法之一，因此，为保证减少事故的发生，减少人员及财产损失，高效、高质量生产，研制氢气检测仪具有重要的意义。

1.2 课题相关领域发展状况

传感器检测技术是一项与现代化技术密切相关的技术，就国内外研究现状来看传感检测技术的主要趋向有以下几点^[1-2]：(1)利用物理现象、化学反应和生物效应是各种传感器的工作基础也是研制新型传感器的主要途径。(2)开发新材料。新型传感器材料是研制传感器的重要物质基础，近年来，传感器领域应用的新型材料主要有：半导体硅材料，它具有优良的电学特性和机械特性，可用来研制各类硅微结构传感器；石英晶体材料，具有极高的机械品质因数和较好的温度稳定性，天然石英具有良好的压电特性，可用于各种微小型化的高精密传感器；功能陶瓷材料具有半导体的特性，且工作温度上限很高，大大地拓展了其应用领域。(3)传感器的微型化，随着控制仪器设备功能的增多，要求部件体积越小越好，因此传感器本身体积也是越小越好。(4)传感器的集成化与多功能化。传感器的集成化是指将传感器与其后级的多种功能电路制成一个组件，实现一体化，与一般传感器相比，它有体积小、反应快、抗干扰、稳定性好的优点；或是将同一类传感器集成于同一芯片上构成一维、二维阵列式传感器和三维传感器。传感器的功能化是指传感器能感知与转换两种以上不同的物理量，实现多参量检测以及温度补偿等。(5)提高传感器的性能。现在世面上的半导体或陶瓷材料传感器大都采用电阻式或电容式，输出信号为模拟信号，必须经过数字转换才能被单片机进行处理，声学传感器具有很大的优势，它在抗干扰、分辨率等方面有很大的优势，采用气体声学特性制成的传感器输出信号为频率形式，可直接与计算机进行连接，具有一定的优越性。

目前国内外的氢气传感器主要包括半导体式传感器、催化燃烧式传感器、电化学式传感器和光纤传感器等。

1. 催化燃烧式传感器对高浓度区的检测比较有效，在低浓度区由于存在输出信号微弱、灵敏度低等缺点，实际上根本无法检测。由于是暗火工作，还存在引燃爆炸的危险；催化燃烧式传感器检测原理是利用敏感元件在催化物作用下，使气体在元件表面发生无焰燃烧。目前使用的催化燃烧式传感器

是经过改进的，在元件内部加入大量催化载体，载体不仅为反应提供了更大的接触反应表面，使气体能在较低温度下发生催化燃烧反应，并且铂丝线圈不再直接暴露于燃烧区，很大程度降低了铂丝的蒸发。其优点：输出信号大，线性好，检测的精度较高，受环境温度和湿度影响小。缺点：敏感元件容易受硫化氢等有毒物质影响，导致活性降低出现中毒现象，严重影响元件使用寿命；由于载体催化燃烧式甲烷检测存在二值性，测量高浓度甲烷时，会发出错误信息^[3-5]。

2. 热导传感器是最早用于气体检测的气体传感器，最高检测浓度可以达到 100%，具有检测范围大，工作稳定性好、使用寿命长、不存在触媒老化的问题，且具有较高的稳定性和可靠性，热导式传感器具有“广谱”性，可以检测几乎所有的气体，既可以检测所有可燃性气体，也可以检测惰性气体，而且在被测环境中氧或无氧的情况下都可以实现气体浓度的检测，热导式传感器装置简单、价格便宜、使用维护方便，这些优良特性是很多气体传感器不具备的，但是热导传感器存在检测精度差、灵敏度低、温度漂移大等缺陷，限制了热导气体的传感器的广泛应用^[6-8]。

3. 电化学式传感器用于测量微量的氢气浓度，可以检测到 ppm 级氢气，具有体积小、功耗低、选择性好、灵敏度高优点。由于电化学型和催化燃烧型测量头相对较低的成本，它们通常被用于泄漏有可能发生的地方测量。因而对泄漏的反应迅速并可连续探测。另外，由于没有可移动部件，所以不会造成机械故障。但输出信号微弱，且敏感材料易被氧化致使其使用寿命较短，制约了它的发展^[9-11]。

4. 光纤传感器具有灵敏度较高、响应快、无需加热、安全性高以及稳定性好等特点，但经多次循环后易出现脱层、起泡现象，使用寿命较短。同时需要考虑光纤埋入结构的工艺问题，虽然可以通过安装方式得到改善，但同时也导致了应变要先经过金属传递，然后再由光纤间接感应到应变，因此需要通过实验修正才能够进行准确测量。同时光纤传感器的输出信号会受到光源波动、光纤传输损耗变化、探测器老化等因素的影响，这些因素都会降低光纤传感器测量的准确性，再者光纤材料制作成本相当昂贵^[12-15]。

目前，氢气检测中使用较为普遍的是半导体型氢气传感器^[16-17]，该传感器的检测原理在于为传感器表面涂抹一层对氢气敏感的薄膜材料，传感器的表面氧化物吸附氢气后，会影响传感器导电率的改变，通过导电率的变化来检测出氢气的浓度，但受环境温度影响大，选择性差，灵敏度低，稳定性不高使得检测性能总是不尽人意。

综上，目前市场上出售的氢气传感器主要存在以下问题：线性度差，灵敏度低、响应时间长、检测成本高、氢敏材料易受温度、湿度、压强等因素的影响^[18]。因此需要采用数学建模方法建立一种反映氢气浓度与影响因素对应关系的通用算法模型，通过对影响因素的分析及测量等方面展开研究，从而提高氢气传感器的性能。

1.3 课题来源及主要研究内容

本文来源于企业合作项目，主要研究内容包括以下几个方面：

1. 氢气检测仪原理分析

本文根据超声波传感器测量受温度影响条件下进行研究，并建立数学模型，通过该数学模型排除温度的影响，得到氢气浓度值。

2. 氢气检测仪传感器配置方案

本文采用测量通道和参考通道的双通道设计，巧妙地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，提高了测量精度。通过比较两个通道超声波传播时间的差异，即两路通道接收端得到的正弦波信号的相位差就可以获取待测环境中氢气的浓度值。

3. 氢气检测仪硬件电路设计

检测仪以单片机为核心，通过红外遥控进行控制及数据接收，通过数码管进行显示，以及设有声光报警等电路。由于传感器输出信号微弱，本文设有信号放大电路，通过滤波及放大电路进行信号处理，并设有温度检测电路，对环境温度进行测量，排除温度的干扰。

4. 氢气检测仪软件程序设计

本文通过 C 语言完成该检测仪的信号处理，ADC 转换，数据显示、红外遥控等程序设计。

5. 检测仪测试及误差分析

借鉴一些国内实验室的气体浓度配制方法，设计了一种成本低廉，易于操作，精度满足实验要求的标准气体配制系统，达到了浓度可调，气体精度达标。通过理论分析和测量实验，进行了各种可能引起误差的因素影响分析。

第2章 超声波氢气检测仪总体方案设计

2.1 技术指标要求

依据航空航天、军事和化工领域等的不同需求，参考国家标准 GB16808-2008《可燃气体报警控制器》的要求，完成了高性能氢气检测仪的设计。本设计功能要求有：通过数码管实时显示待测环境中氢气浓度值；当被测浓度超过预设值时，触发声光报警且报警值可调；通过输出模块实时输出标准频率信号给上位机；具有温度补偿功能；可达1年连续工作的长期稳定性。具体技术指标见下表2-1所示。

表 2-1 主要技术指标
Table 2-1 Main technical index

指标名称	指标范围	单位
测量范围	0.00~4.00	%
分辨率	0.01	%
测量误差	±0.1	%
工作温度	-30~60	℃

2.2 整体设计方案设计

本设计选用 PIC 单片机作微处理单元，进行信号的采集、浓度计算、信号输出等工作，使整个检测系统达到了低功耗、系统稳定抗干扰能力强等优点。氢气检测仪由超声波传感器、单片机系统、显示电路、系统电源电路、传感器信号调理电路、标准频率输出电路等组成。氢气检测仪的原理框图如图 2-1 所示。

催化燃烧式传感器是国内外普遍应用的传感器，此类传感器具有响应速度快、成本低廉、灵敏度高等优点，但在检测高浓度气体时，由于催化反应而产生的热量过大可能会损坏传感器，并且检测高浓度气体时存在二值性问题。同时，使用催化燃烧式气体传感器测量可燃气体浓度时，氧气浓度是一个必须注意的问题。催化燃烧式传感器要求至少在8-10%的氧气浓度下才能进

行准确测量。而在100%可燃气浓度下，这种仪器的读数将是0%。因此在使用过程中，要求测量可燃气体的浓度之前必须首先测量氧气浓度。而红外吸收传感器拥有相对最低的功耗，但价格过于昂贵，市场价格一般在1000到3000元之间，这会导致成本过高，而且一线采煤面的振动和粉尘也是红外传感器无法忍受的。

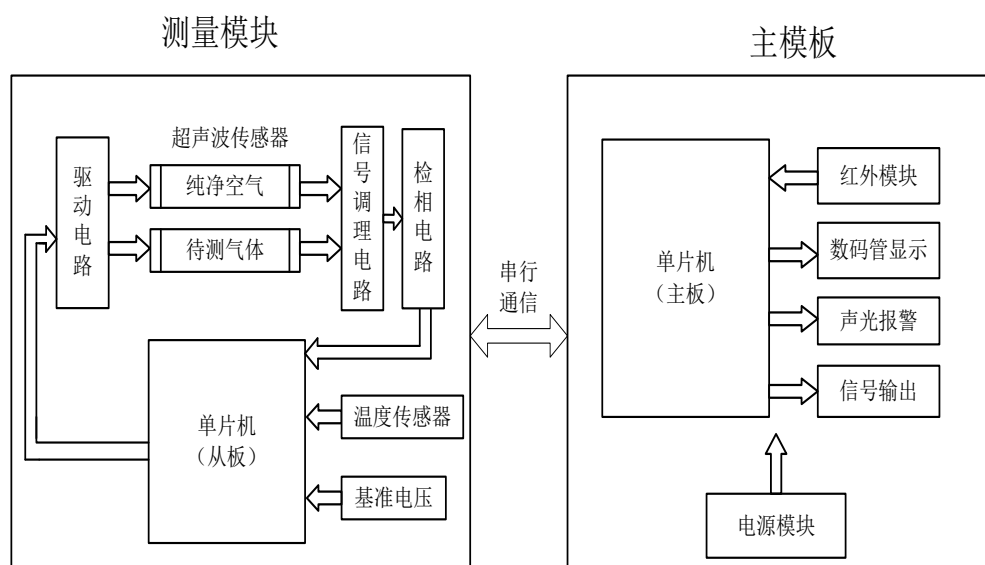


图 2-1 氢气检测仪原理框图

Fig. 2-1 Principle block diagram of hydrogen detector

通过对现有氢气检测技术优缺点分析，本文提出了超声波相位差法，利用氢气的声速与其他气体的声速具有显著差别的特性可准确地检测出气体中的氢气浓度，并排除其他气体的干扰。本方法具有安全性高、功耗低、稳定性高、寿命长等特点。从根本上解决了半导体式传感器稳定性差，催化燃烧式传感器低浓度区灵敏度低、暗火工作有引燃爆炸的危险以及电化学传感器和光学型传感器使用寿命较短的问题。

2.3 测量模块方案设计

2.3.1 超声波检测原理及传感器结构

本文采用超声波双探头传感器进行气体检测，双探头分为超声波发射头

及超声波接收头两部分。本设计采用双通道法，将其中一对探头作为参考信号封闭在一密闭充满空气的管道中，通过给超声波发射头一定频率驱动信号，使接收探头接收信号传递给信号调理电路，另一对超声波探头则处于与外界相通的管道中，采集外界气体浓度信号，由于两个通道内传播介质不同引起超声波传播速度不同，因此通过比较两个通道超声波传播时间的差异，即两路通道接收端得到的正弦波信号的相位差就可以获取待测环境中氢气的浓度值^[19]。传感器原理图如图2-2所示。

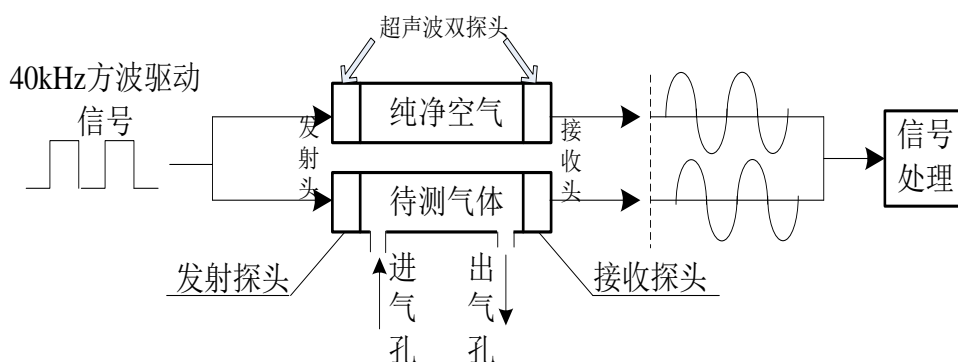


图 2-2 传感器原理示意图

Fig. 2-2 Schematic diagram of sensor principle

2.3.2 超声波传感器功能分析

超声波传感器是利用超声波的特性制成的传感器。超声波是一种机械振荡，人们能够听到的声音是由于物体振动产生的，振动频率在 20Hz 到 20KHz 的范围内，通常把高于 20KHz 的机械振动称为超声波。依据超声波本身固有的性质，其具有较好的方向性和较高的频率，因而可以定向传播，并且超声波能够在气体、固体和液体中传播，但相比较后在液体和固体中的穿透力较强，另外超声波具有反射性，遇到物质会形成反射回波，能够应用测距方面。因为超声波具有上述的性质，则在工业、国防等方面的超声波检测技术得到了较多的应用，那么能够发射和接收超声波的超声波传感器则必不可少。为能够得到应用所需的超声波则要详细地对超声波传感器的工作原理、等效电路和性能指标等进行全面了解^[20-23]。

运用超声波本身所具有的特性和效应研制成了超声波传感器，同时在有些特定的场所也被叫做超声波换能器或超声波探测器。常用的超声波传感器

的种类有压电式、磁致伸缩式、电磁式等，在这之中应用最多的是压电式超声波传感器^[24-28]。

制成此类传感器普遍用到的材料为压电陶瓷和压电晶体，工作原理是由于压电材料所有的压电效应。压电效应分为逆压电效应和正压电效应，其中用来发出超声波的超声波发射传感器运用了逆压电效应，即将输入的高频振动电信号变为高频的机械振动输出；接收超声波信号的超声波接收传感器运用了正压电效应，是将超声波的振动信号变为能够便于处理的电信号。压电式超声波传感器的结构如图 2-3 所示，组成此类传感器的主要部分有：压电晶片、吸收块、保护膜、导电螺杆和接线片。其中压电晶片为重要结构，形状通常为圆形，并在正反两面镀银，成为导电极板，厚度为 δ 并且超声波频率与厚度 δ 成反比。吸收块能够降低晶片的机械品质，如果没有吸收块，当输入的电信号停止的时候，晶片的振动会持续，从而使超声波的脉宽增加，分辨率降低。

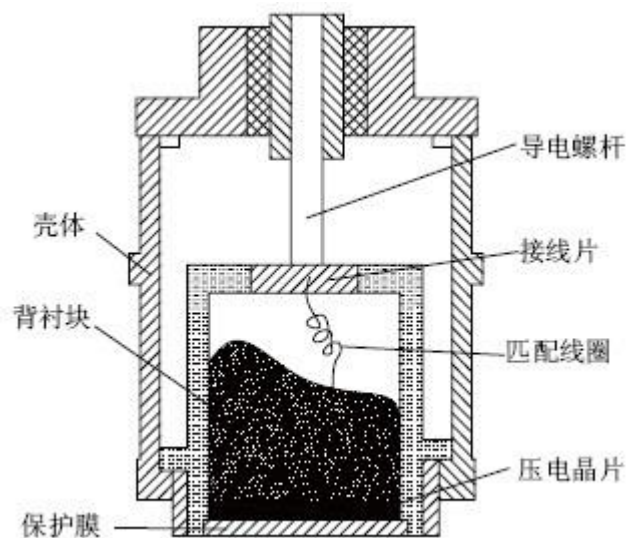


图 2-3 压电式超声波传感器结构图

Fig. 2-3 The structure of piezoelectric ultrasonic sensor

把电信号输入到超声波发射传感器上，经过压电材料和谐振片变为机械振动超声信号，再由辐射器把信号往外发射出去，超声波就依照所需在介质中传播。当传播到超声波接收传感器时，超声波信号被接收，通过其内部结构转换为所需的电信号，然后将此信号滤波放大后，用于进行后续其他电路

[29-32]。

通常用来驱动超声波传感器的信号的中心频率为40KHz、200KHz、400KHz等，当采用超声波检测，传播距离短，频率高时，检测的分辨力较高。

2.4 主模块方案设计

主模块设计选用了PIC16F883单片机作为微处理单元，主模块包括电源模块和功能模块。电源模块作用是为各个功能模块供电及提供电压基准，实现了将12V直流电压转换为5V电压，再将5V电压转换为3.3V电压以及5V转换为2.5V电压。

功能模块主要包括红外接收电路、数码管显示电路、声光报警电路以及信号输出电路。红外接收电路实现了检测仪的外部控制，通过红外遥控器对该检测仪进行标定、清零等功能；数码管显示电路能够实时显示当前环境下的氢气浓度值；声光报警电路实现了检测仪的安全检测功能，当浓度值超过设定值时检测仪会发出报警声及报警灯闪烁；信号输出电路是将信号通过导线传递给远程设备，使远程设备实时接收当前氢气浓度信号。

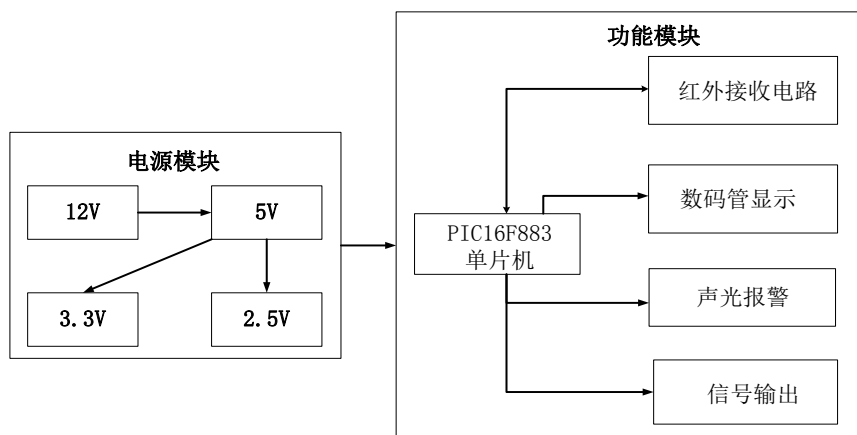


图 2-4 主模块原理框图

Fig. 2-4 Main module principle block diagram

2.5 单片机选型

PIC 单片机是美国 Microchip 公司推出的。PIC 单片机具有以下几点特性：

PIC 系列 8 位 CMOS 单片机具有独特的 RISC 结构，这与传统的采用 CISC 结构的 8 位单片机相比，可以达到 2:1 的代码压缩，速度提高 4 倍；PIC 单片机的所有型号都有价格低廉的用户一次性可编程性；低功耗特性，PIC 单片机工作时的静态电流仅为 2mA，睡眠状态下静态电流可小于 1uA；其引脚具有防瞬态干扰的能力，可以通过一个限流电阻接到 220V 交流电源，也可以直接连接继电器控制电路，无需光电耦合元件进行隔离，给设计及应用带来极大便利；正常工作电压范围宽，可达到 2-6V；速度快，工作频率最高可在 20MHz，每一个指令周期仅为 200ns；保密性彻底，PIC 使用保密熔丝来保护代码，当烧入代码后，通过熔断保密熔丝，使他人无法读取，并且 PIC 采用熔丝深埋工艺，恢复熔丝的可能性极小^[33-38]。

综上所述，本文采用 PIC 系列单片机，因为它相对实用，价格低廉，片内功能丰富，PIC 单片机不仅具有同步串口和异步串口外，还具有 ADC 转换，片内比较器，极适用于本设计。

2.6 本章小结

本章针对超声波相位差法的氢气检测，提出了检测仪的设计要求，主要包括技术指标要求和传感器选型方案等。之后给出了氢气检测仪整体设计方案，并简单介绍传感器配置方案及单片机选型等主要功能介绍。

第3章 超声波检测理论分析

3.1 声速的影响因素

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 3-1 为几种常用气体的气体常数表。

表 3-1 几种常见气体的气体常数表
Table 3-1 Table of gas constants for several common gases

气体种类	气体常数 R	单位
氢气	4121.735	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，氢气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 和同一开氏温度下 T 下，气体常数 R 与声速呈正相关。计算可得，在常温常压的情况下，空气中声速是 340 m/s，氢气中声速是 1295m/s。因此，利用氢气的声速与其他气体的声速具有显著差别这一特性便可准确地检测出混合气体中的氢气的浓度值，并排除其他气体的干扰。

3.2 超声波相位差法氢气检测原理分析

声速公式：

$$v = \sqrt{kRT_k} \quad (3-1)$$

式中： k 为绝热系数， $k_{H_2} = 1.41$ ， $k_{\text{空}} = 1.40$ ；

R 为气体常数， $R_{H_2} = 4121.735 \text{ J/(kg ·K)}$ ， $R_{\text{空}} = 287 \text{ J/(kg ·K)}$ ；

T_k 为开氏温度。

将上述值代入式(3-1)得：

$$V_a = V_{\text{空}} = 20.1\sqrt{T_k} \quad (3-2)$$

$$V_b = V_{H_2} = 75.5\sqrt{T_k} \quad (3-3)$$

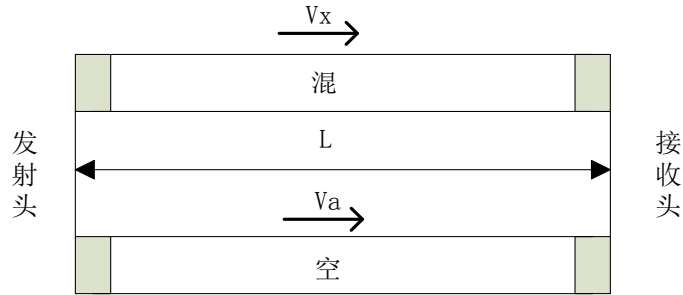


图3-1 双通道气体测量腔

Fig. 3-1 Dual channel gas measurement chamber

可以推出：

$$V_x = V_{\text{混}} = (1-c) V_a + c \cdot V_b = V_a + (V_b - V_a) \cdot c \quad (3-4)$$

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：

$$\sqrt{\frac{273.15}{T_k}} = 1 - kT_k = 1 - k'T_c \quad (3-5)$$

取温度在 $0 \sim 30^\circ\text{C}$ 内这个范围，代入 $T_c = 30^\circ\text{C}$ ， $T_k = 303.15\text{K}$

可以计算出：

$$k' = 591$$

将上述值代入式(3-5)可知：

$$\sqrt{\frac{273.15}{T_k}} = 1 - 591T_c \quad (3-6)$$

在等距离的气体腔中，气体传播时间差为：

$$\Delta t = t_a - t_x$$

即：

$$\Delta t = \frac{L}{v_a} - \frac{L}{v_x} \quad (3-7)$$

将式(3-2)、(3-3)、(3-4)代入式(3-7)得，氢气浓度 c ：

$$c = \frac{20.1\Delta t}{55.4(\frac{L}{20.1\sqrt{T_k}} - \Delta t)} \quad (3-8)$$

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 和式(3-6)代入可得：

$$c = \frac{\frac{20.1}{55.4}\Delta n}{\frac{L}{20.1\sqrt{273.15 \cdot A}}(1 - \frac{T_c}{591}) - \Delta n} = \frac{K_1\Delta n}{K_2(1 - \frac{T_c}{591}) - \Delta n} \quad (3-9)$$

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

$$c = \frac{K\Delta n}{9.63(1 - \frac{T_c}{591}) - \Delta n} = \frac{K(\Delta n - \Delta n_0)}{9.63(1 - \frac{T_c}{591}) - (\Delta n - \Delta n_0)} \quad (3-10)$$

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 ，温度为 T_2 ，求出常数 K ：

$$K = \frac{c_2[\frac{9.63}{591}(591 - T_2) - (\Delta n_2 - \Delta n_0)]}{(\Delta n_2 - \Delta n_0)} \quad (3-11)$$

将常数 K 代入式(3-9)，最终可得：

$$c = \frac{c_2[\frac{9.63}{591}(591 - T_2) - (\Delta n_2 - \Delta n_0)](\Delta n - \Delta n_0)}{(\Delta n_2 - \Delta n_0)[9.63(1 - \frac{T_c}{591}) - (\Delta n - \Delta n_0)]} \quad (3-12)$$

由上式可以看出，气体的浓度 c 与 Δn 和 T_c 有关，即只要知道当前环境温度 T_c ，再通过设计的检相电路获得相位差 Δn ，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。

3.3 本章小结

本章对超声波氢气检测仪的相位差法检测原理做出了详细介绍，对检测原理进行了详细的推导，阐释了如何将超声波的时间差转换为相位差的推导过程，而温度作为超声波检测的一个影响因素，在推导公式中明确表述了温度对超声波检测的影响，提出了超声波相位差的检测方法。

第4章 氢气检测仪的硬件电路设计

氢气检测仪是由测量板模块和主板模块两部分组成。其中主板模块主要实现显示、报警等功能，以单片机 PIC16F883 为微型控制单元，包括有电源电路、数码管显示电路、声光报警电路、红外接收电路、信号输出电路等；测量板模块是本检测仪的核心，包括信号处理电路、温度测量电路等，以单片机 PIC16F883 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；主模块和测量模块间采用 UART 通信进行数据交流。

4.1 测量模块电路设计

测量模块主要包括超声波传感器探头的驱动电路、超声波信号的接收电路、信号放大电路、温度补偿电路以及测量模块的单片机电路的设计。

4.1.1 测量模块单片机电路

测量模块单片机选用了 PIC16F883 系列，主要实现了数据处理的功能，将接收的信号转换为气体的浓度值，通过串口将数据传送给主板模块。图 4-1 为测量模块的单片机电路。

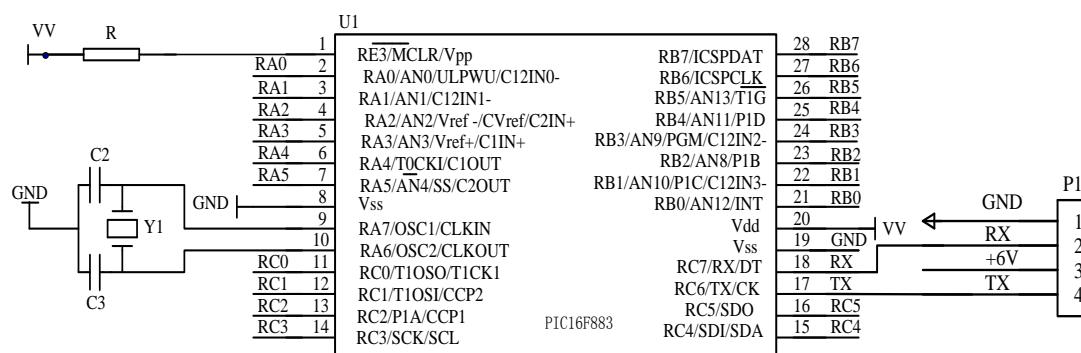


图 4-1 测量模块单片机电路

Fig. 4-1 Measuring module single chip microcomputer circuit

4.1.2 超声波传感器驱动电路

对于超声波发射探头可以采取方波信号或正弦波信号方式驱动，经调试发现用 MCP1415 驱动时，接收端信号更稳定。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）。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^[39]。

本设计采用方波驱动。由单片机定时器 A 的 PWM 方式输出 40KHz、0-3.3V 的方波信号，经 MCP1415 芯片后，获得峰值为+6V、频率为 40KHz 的方波驱动信号。超声波传感器驱动电路如图 4-2 所示。

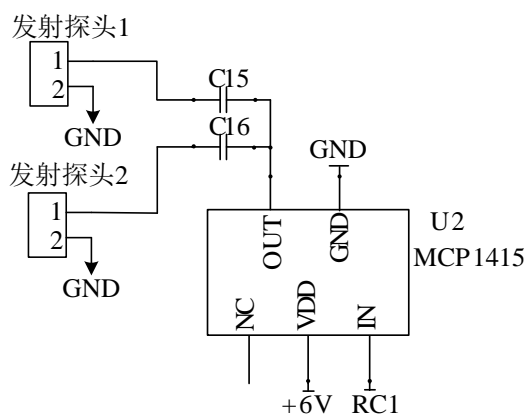


图 4-2 超声波传感器驱动电路

Fig. 4-2 Ultrasonic sensor driving circuit

4.1.3 超声波信号放大电路

信号处理电路完成对接收探头接收到的 40KHz 正弦波信号进行滤波、放大，并转换成方波信号，主要包括三个部分：滤波电路、差分放大电路、比较器电路。接收探头接收到 40KHz 的正弦波信号先经过低通滤波电路滤掉高频干扰，再经过高通滤波电路滤除低频信号，得到较为完善的波形。图中电阻 R15、R16 共同确定了放大倍数，电容 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，接收探头 1 的信号处理电路如图 4-3 所示。

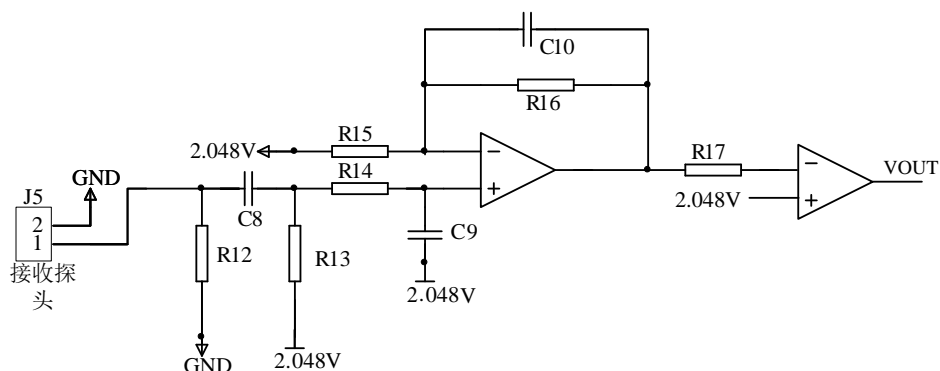


图 4-3 信号处理电路

Fig. 4-3 Signal processing circuit

4.1.4 检相电路

本氢气检测仪设计使用高速数字检相芯片 AD9901 对两路经过整形的信号进行检相，两路信号分别接入 AD9901 的信号输入端，output 端输出即为与氢气浓度大小成线性关系的相位差信号 $\Delta\phi$ 。将 output 接 CD4052 实现信号稳幅，再经滤波输出 Δu 为 0-2.5V 直流信号送单片机处理，进而实现甲烷浓度值测量^[40-41]，检相电路如图 4-4 所示。

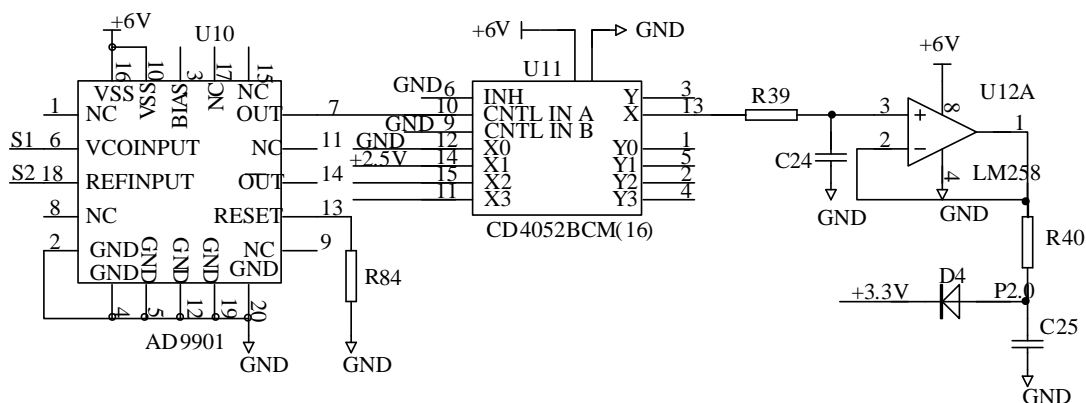


图 4-4 检相电路

Fig. 4-4 Testing phase difference circuit

4.1.5 DS18B20 测温电路

DS18B20 是 DALLAS 公司的产品，温度信号直接以 1-Wire 数字方式传播，提高了系统的抗干扰能力，可用于危险环境的温度测量。本文所使用的

DS18B20 为三脚 TO-92 直插式，其引脚功能分别为接地、信号输入输出及电源正极，因其体积小，用该传感器所组成的电路非常简单，仅需一个接口就可以实现测量。DS18B20 的温度测量范围为 $-55\sim+125^{\circ}\text{C}$ ，其分辨率可以从 9-12 位选择（默认 12 位）^[42-44]。

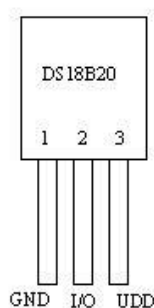


图 4-5 DS18B20 传感器

Fig. 4-5 DS18B20 sensor

由于超声波在气体中传播速度随温度的变化而变化，本电路实现对环境温度的实时检测，完成对超声波传播速度的温度补偿功能。DS18B20 是一款数字温度传感器，连接简单，单总线操作，只需一个信号线与单片机 I/O 连接，便可实现温度测量，精度为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。测温电路如图 4-6 所示。

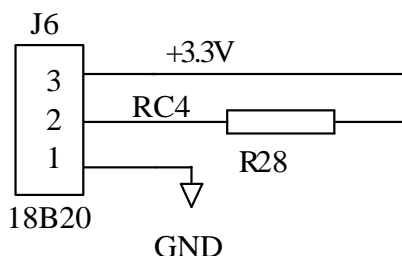


图 4-6 18B20 测温电路

Fig. 4-6 18B20 temperature measurement circuit

4.2 主模块电路设计

4.2.1 主模块单片机电路

主模块电路设计在最大程度应用了单片机的片上功能和资源。例如主模

块设计所选用的 PIC16F883 单片机有可靠内部复位电路,无需附加复位芯片。同时 PIC 单片机的片内 10 位 AD 也能很好的满足本文的精度需求。在增加系统可靠性的同时,进一步降低了设计成本,为产品将来的生产和市场推广打下了坚实的基础。本检测仪主模块采用 PIC16F883 型号单片机作为处理芯片。PIC 单片机的外围核心电路相对简单只要将下载端口引线和外部电源和晶振电路设计好就可以。这部分单片机设计电路是最基本也是保障单片机运行的最基本电路。包括单片机供电电路、单片机起振电路、上电复位的电路、程序调试下载电路。主模块单片机系统电路如图 4-7 所示。

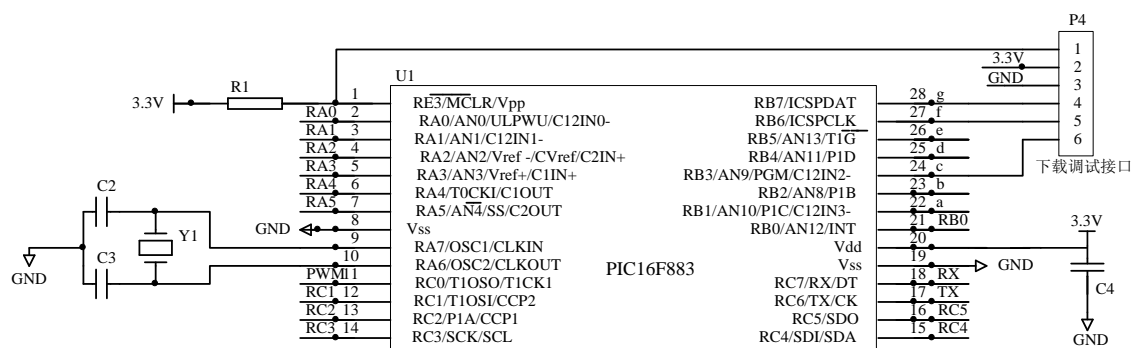


图4-7 主模块单片机系统电路图

Fig. 4-7 The circuit diagram of the main module single chip microcomputer system

PIC16F883 单片机具有 24 个带有方向性可单独控制的 I/O 引脚, I/O 引脚具有高灌电流可直接驱动 LED, 且带有增强型 USART 模块^[45]。

4.2.2 系统电源电路设计

系统电源电路主要由三个部分组成分别为: 系统供电部分, 单片机供电部分和 AD 电压基准部分。工业现场采取 12V-24V 供电, 而氢气检测仪的主要供电部分为 5V, 需要一个降压电路将现场供电降到氢气检测仪所需要的 5V。常用的电压转换芯片的工作原理主要有: 开关式原理电压转换芯片, 线性原理电压转换芯片, 和电荷泵式原理的电压转换芯片。氢气检测仪的系统供电部分采用 LM2576 开关原理的电压芯片对现场电压进行降压。单片机供电电路部分由于考虑到供电的稳定要求则采用线性原理的 AMS1117 进行降压转换, 将 5V 转换为 3.3V。此外, 采用精密电压芯片 TL431 进行设计, 产生+2.5V 电压为 PIC 单片机内部 AD 模块和其他电路提供基准。系统供电电

路、单片机供电电路及基准电压电路如图 4-8、图 4-9、图 4-10 所示。

LM2576 系列是美国国家半导体公司生产的 3A 电流输出降压开关型集成稳压电路，它内含固定频率振荡器（52KHz）和基准稳压器（1.23V），并具有完善的保护电路。由于+12V 由外部电路直接接入，为了避免误操作使接入电压反向，这部分特别设计两个二极管起到了防止电压反向的作用。L1 和 C5 则对现场电压进行了滤波，以保证 LM2576 的输入电压稳定^[46-48]。

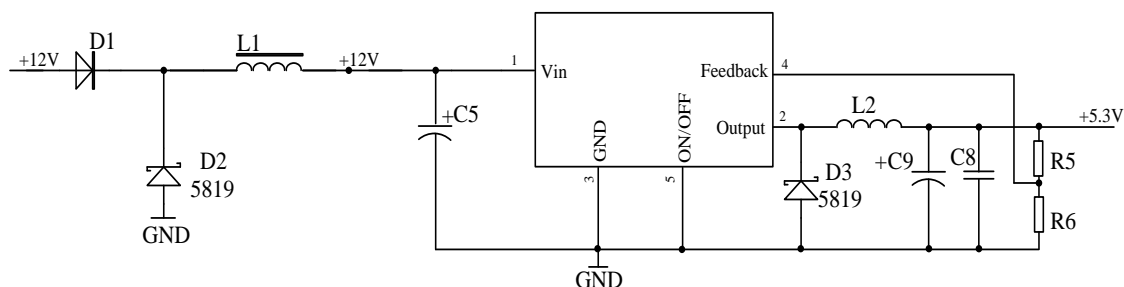


图4-8 DC-DC转换电路

Fig. 4-8 System power supply circuit

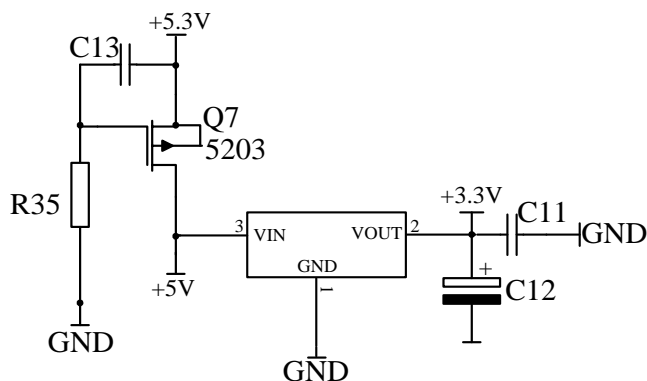


图 4-9 稳压电路

Fig. 4-9 Single chip power circuit

图4-9中AMS1117同样作为电压转换芯片但是与LM2576不同，AMS1117 采用线性稳压原理，但只能用作降压使用，而且有一定的输入输出电压限制，输入电压必须在输出电压的1.2V以上。此款芯片的输出最大电流可以到达 1A。线性电压芯片虽然转换效率不高，但是转换精度和电路噪声很低，这些

特点使得AMS1117特别适合作为PIC单片机的系统供电电路。

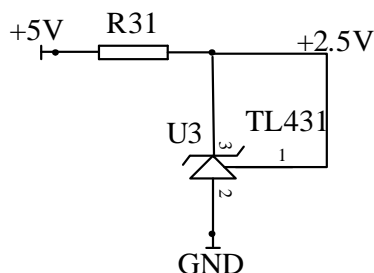


图 4-10 基准电压源电路

Fig. 4-10 Power reference circuit

图4-10所示是电压基准电路。电压基准在电路中起到参考电压点的作用，并不需要实际的电路输出能力，电流输出过大将影响基准的准确程度。TL431的精度可以通过提供灌电流来实现精准控制。TL431内部基准电压为+2.5V，将参考极与阴极短接，当输入电压稳定时输出精度为0.2%、幅值为+2.5V的稳定基准电压。电路设计时需要注意R31的选择，根据TL431的芯片手册说明必须要保证阴极有1-10mA的灌电流才能使TL431稳定工作。

4.2.3 红外接收电路

本检测仪采用红外遥控的方式进行零点、灵敏度及报警限设置，操作简单，以软件实现节省了硬件成本。红外遥控器接收部分主要是识别外部的控制信号，以这种红外连接方式既省去了有线连接控制的繁琐，同时也解决了由于安装位置等原因造成的无法直接手动控制的缺陷。只要在一定的距离及角度内硬件电路即可接收外部的控制信号，根据设置的程序完成相应的操作^[49-52]。本作品最终采用 VISHAY 公司生产的一款内部集成调理电路的一体化红外接收头 HS0038B 进行设计，它体积小、操作方便、可靠，具体红外解码电路如图 4-11 所示。

4.2.4 显示电路

显示部分采用四位一体红色数码管 LG5641AH，红色数码管在应用现场有很好的醒目指示效果，用于实时显示待测环境中的氢气浓度，显示范围

0.00~4.00%，分辨率为 0.01%。LG5641AH 具有 4 个位选引脚（com1~com4）和 8 个段选引脚（a~f, dp），由于每个数码管上要现实的数字不同，在同一时刻是不能同时显示的，因此需要通过位选信号来选择当前所要选择的是哪一个数码管，并把当前的段选信号显示在该数码管上，通过单片机利用动态显示的原理来显示氢气的实时浓度值。显示电路如图 4-12 所示。

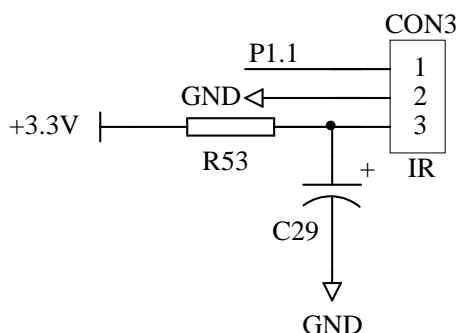


图 4-11 红外接收电路

Fig. 4-11 Infrared receiving circuit

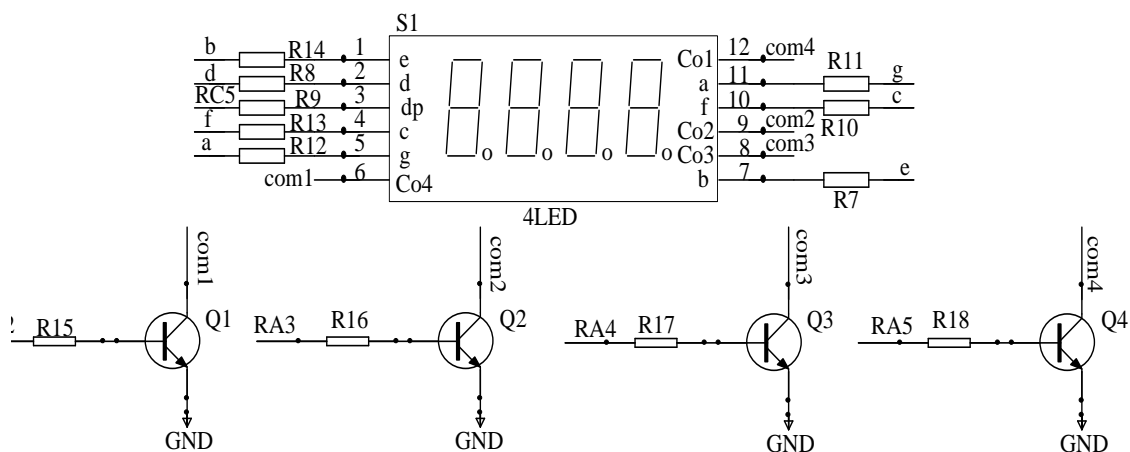


图4-12 显示电路

Fig. 4-12 Display circuit

4.2.5 报警电路

该部分设计了报警电路，当气体浓度超过设定的报警点时，蜂鸣器和报警指示灯在单片机的控制下以一定的频率鸣响和闪烁。报警电路如图 4-13 所

示。

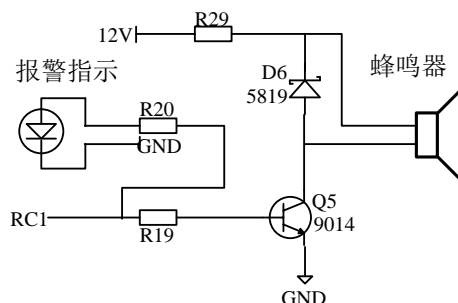


图 4-13 报警电路

Fig. 4-13 Alarm circuit

4.2.6 标准频率输出及连接故障报警电路

标准输出信号制式可以为电流型、频率型和数字信号型，本设计采用频率型。输出 200-1000Hz 频率信号与 0-4%氢气浓度值对应成线性关系。频率信号传输到分站上位机，在上位机上分析出频率值对应的当前氢气浓度值，当氢气浓度超出标准限范围，分站将信息传给总站，以采取相应的措施。频率输出电路如图 4-14 所示。

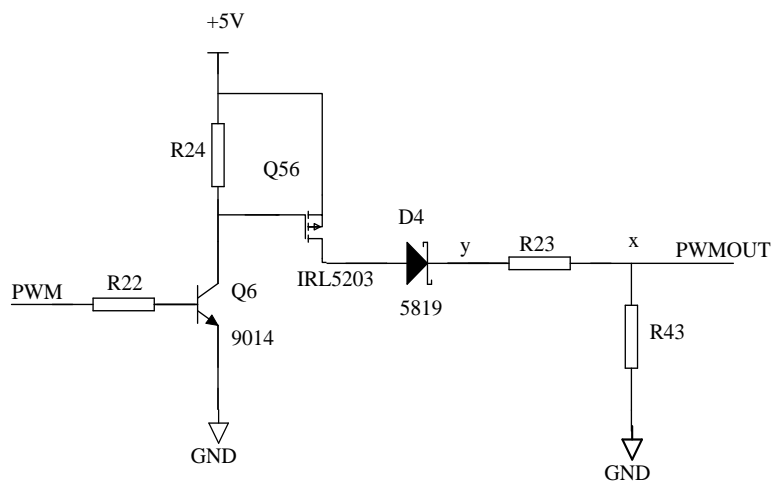


图4-14 频率信号输出电路

Fig. 4-14 Frequency signal output circuit

由于检测器要通过长达2km模拟线缆与分站连接，线缆距离较长且传输环境较差，有可能会出现线缆断路问题。为了解决该问题，本检测仪设计了输出信号故障报警电路，该电路有效地指示线缆故障。具体的故障报警电路如图4-15所示。

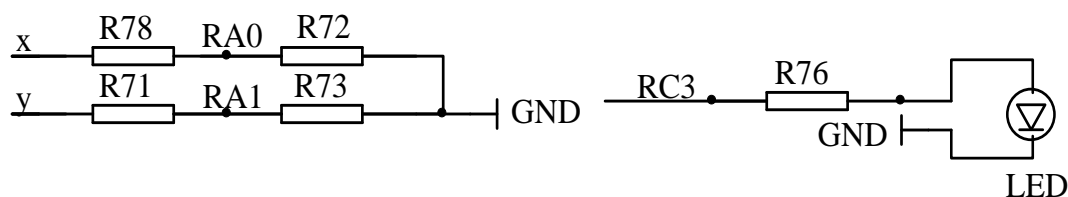


图4-15 频率输出连接故障报警电路

Fig. 4-15 Frequency output connection fault alarm circuit

当频率信号 x 通过线缆正常连接时，报警灯 LED 不亮；反之，若线缆出现断路情况，报警灯 LED 亮，工作人员可采取相应的检修措施。

4.3 本章小结

本章主要阐述超声波氢气检测仪的整体结构设计，并设计了各部分模块电路，具体对单片机系统的设计以及各个模块的工作原理进行了说明主要包括了测温电路、信号放大电路、显示电路、电源模块电路、红外遥控解码电路、声光报警电路等，实现了氢气检测仪从整体到模块的硬件设计。

第5章 系统软件设计

5.1 系统软件设计概述

氢气检测仪的整个软件设计、开发、调试过程都是在 MPLAB 集成开发平台上完成的。MPLAB 是适用于使用 Microchip 的 PIC micro & reg 系列单片机进行嵌入式设计的应用开发，是综合编辑器也是设计平台。MPLAB 通过使用内置模拟器观察程序流程调试可执行逻辑；或者使用 MPLAB ICE 4000 仿真器或 MPLAB ICD 2 在线调试器实时调试可执行逻辑^[53]。本检测仪主程序主要包括传感器信号经放大后送入单片机进行的数据处理程序、红外解码程序、18B20 环境温度测量程序、标定程序以及经数据处理后得出的标准氢气浓度值的显示电路。

5.2 主程序设计

主程序的设计是一个程序的核心，关系到变送器工作效果的好坏。本文采用 C 语言编程方式对程序进行编写，C 语言编程在单片机软件编程中的优点是编写代码效率高、调试直观、维护升级方便、代码的重复利用率高、便于跨平台的代码移植等。应用 MPLAB 的开发环境，采用模块化编程理念，对检测仪进行编程^[54-56]。

首先对单片机进行系统的初始化工作，初始化主要包括对系统工作时钟的设置，单片机 I/O 口的设置以及看门狗的设置等；其中单片机的 I/O 口主要根据设计需要对 I/O 口进行方向及输入输出的设置。

其次对红外遥控、数据处理、标定、补偿、数据存储以及数据输出等模块进行程序的编写。其中红外遥控主要工作是判断是否接收到信号，如果收到红外信号则对信号进行识别及跳转到信号相应函数进行处理；标定程序指接收到标定指令后将标定值存储到 EEPROM 中；补偿程序是控制温度传感器 18B20 进行温度测量；数据输出包括数码管显示程序频率输出及报警电路的程序设计模块。主程序组成框图如图 5-1

所示。

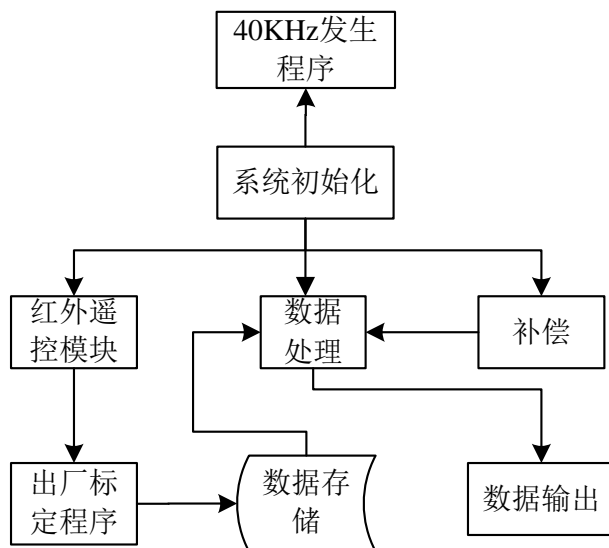


图 5-1 主程序组成框图

Fig. 5-1 Principle block diagram of the main program

5.3 红外解码程序设计

目前，红外遥控是在危险环境下最常用的遥控手段，特别是存在易燃易爆气体、强辐射、有毒气体和高压的危险工业场合。红外遥控装置优点：功能强大、可靠性好、操作方便、抗干扰能力强等优点。

本文所采用的红外接收电路设计十分简单，只用由一个红外接收管和一个上拉电阻组成。复杂的解码工作由单片机完成，单片机有丰富的中断资源和定时器功能，能够很好的检测电平变化时间。这样就能精确地解出红外编码^[57]。

红外接收头对遥控器发射的信号接收，接收到的信号是由特定的芯片对遥控器上的按键进行编码调制后由红外的发射头发射的，红外接收头接收到的信号经集成在内部的调理电路进行放大、滤波、解调等处理，得到的有效信号经过分压送单片机进行解码。单片机识别完红外信号后，通过对比EEPROM 中存储数据识别出具体接收到的信号完成解码，根据解码后数据的信息响应相应的功能。

5.3.1 NEC 协议

本文采用 NEC 红外协议。红外 NEC 协议编码格式为：

$$\text{Address} + \overline{\text{Address}} + \text{Command} + \overline{\text{Command}}$$

地址码 地址反码 命令码 命令反码

NEC 典型脉冲链如图 5-2 所示。NEC 红外协议由起始码、地址码、地址反码、命令码和命令反码五部分组成，为 32 位编码，其中，起始码为脉冲链开始信号，地址码与地址反码用于区别遥控器类型，命令码与命令反码为按键的编码。反码的作用是校验相应的码值。

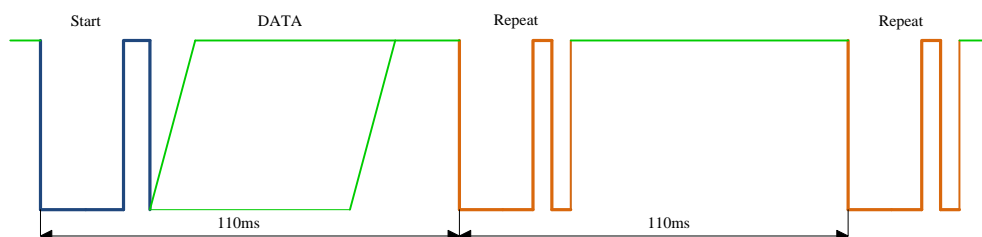


图5-2 NEC典型脉冲链

Fig. 5-2 Typical pulse chain of NEC Protocol

该协议采用脉时调制方式，即通过脉冲串之间的时间间隔进行信号调制的方式。载波频率为 38KHz，逻辑“0”时间为 1.12ms，逻辑“1”时间为 2.25ms。NEC 协议起始位，逻辑位的信号码如图 5-3 所示。

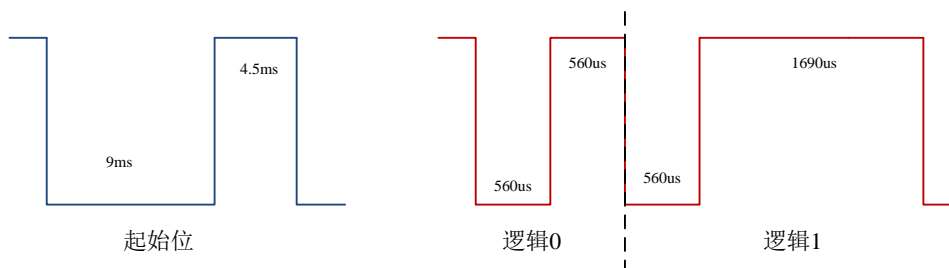


图 5-3 信号码定义

Fig. 5-3 The definition of signal code

5.3.2 红外遥控流程图

单片机采用中断方式识别红外脉冲，在中断程序中计算脉冲宽度，识别脉冲信号。由于引导码及逻辑“0”、逻辑“1”信号占空比不同，则根据中断间隔时长来判断信号种类。编码接收完毕后，进行信号校验和键值判断等。红外遥控解码程序流程图如图 5-4 所示。

本设计的红外遥控模块同时设计以下按键功能：“零点标定键”、“2%灵敏度标定键”、“50%灵敏度标定键”、“+设置键”、“-设置键”、“输出模式显示键”、“输出模式设定键”、“复位键”和“确认键”。

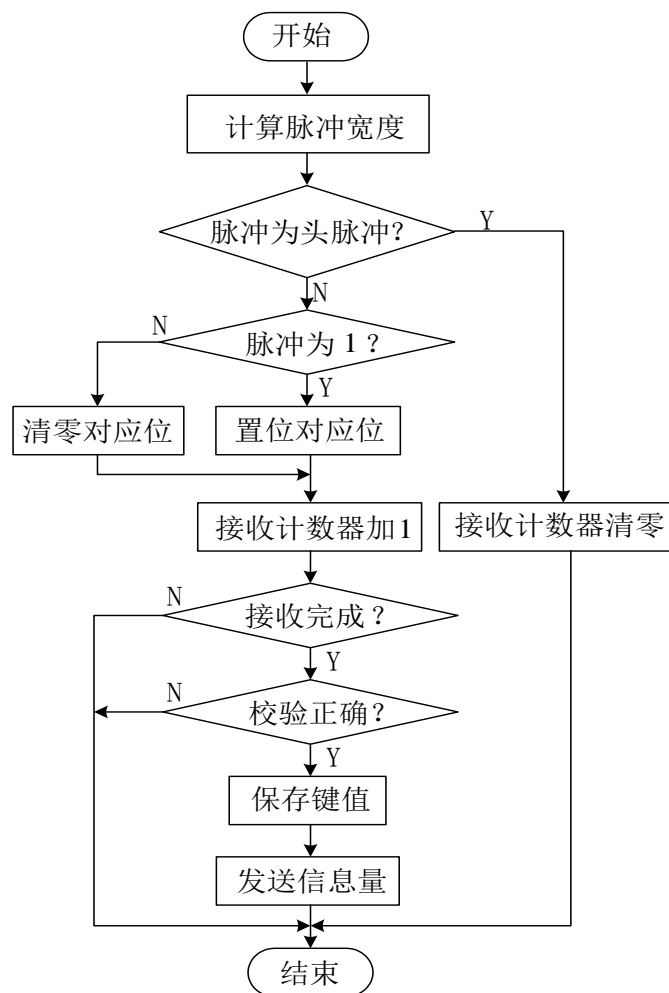


图 5-4 红外接收流程图

Fig. 5-4 Infrared receiving flow chart

5.4 标定程序设计

仪器出厂前需对其进行标定，该检测仪通过红外遥控器完成标定过程。当单片机检测到红外遥控信号时，首先确定其是否为有效信号，若是则进行对应的标定工作，该检测仪需进行零点标定和灵敏度标定，标定流程如图 5-5 所示。

标定程序流程如图 5-5 所示。

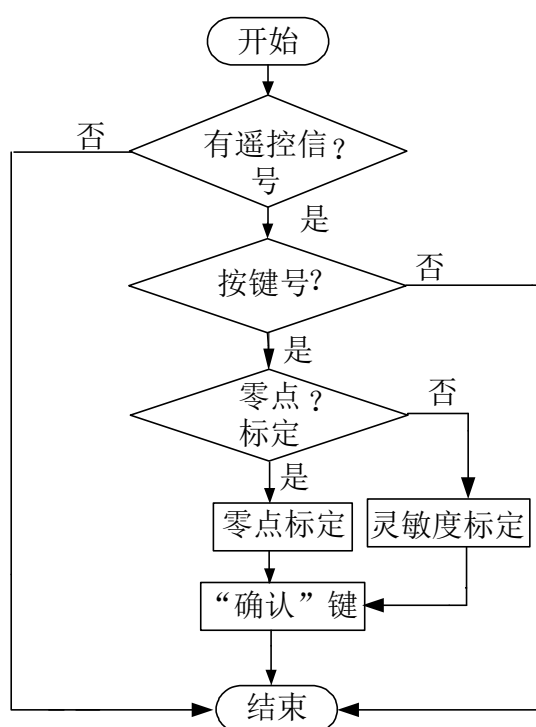


图 5-5 标定流程图

Fig. 5-5 Calibration flow chart

标定过程如下：

1. 零点标定。检测器置于纯净空气中，稳定后按零点标定键进行零点标定，按确认键把当前状态记忆为零点标定值，设置内容可永久断电保持，直至下次更改生效为止。

2. 灵敏度标定。将检测器置于氢气浓度为 2% 的标准气体中，信号稳定

不变后按灵敏度标定键进行标定，此时数码管的显示值为设定的 2.00%。按下“确认键”，把当前状态记忆为灵敏度标定点即真正的 2% 浓度值，然后返回到正常工作状态。设置内容可永久断电保持，直到下次更改生效为止。

理想状态下，在氢气气体浓度值为零时，超声波传感器相位差为零。但由于相同电阻的阻值，电容的容值以及运放的参数不能够完全相同，传感器的敏感元件与超声波双路的元器件不完全一致等原因，使得输出的信号的相位差不为零，且有时偏差会很大。所以零点标定主要是使单片机记录当前内部 PSMC 模块信号的占空比的值所对应的浓度值设定为零。

5.5 数据处理程序设计

根据所建立的数学模型和对温度影响因素的分析，通过数据处理程序实现了将两路接收探头的相位差信号转化为相应的氢气浓度信号。具体算法的实现提高了测量精度，同时也消除了环境温度对零点和灵敏度的影响。具体的数据处理程序流程图如图 5-6 所示，此外还实现了实时显示和标准频率输出的功能。

5.6 测温程序设计

5.6.1 DS18B20 传感器时序简介

本设计测温模块使用了 DS18B20 数字温度传感器，使用简单便捷，仅需与单片机连接一根数据线就能实现数据的双向传输，并且其核心功能是直接读取数字，测得的温度可直接数据处理。

控制 DS18B20 的指令分为读命令、选择定位命令、跳过 ROM 序列号检测命令、查询命令以及报警查询命令，而如果主机仅对一个 DS18B20 传感器进行操作的话，就可以进行如下操作了。

1. 初始化操作：

DS18B20 初始化的目的是加强串口功能，能够在串口调试上观察测量结果，方便调试。

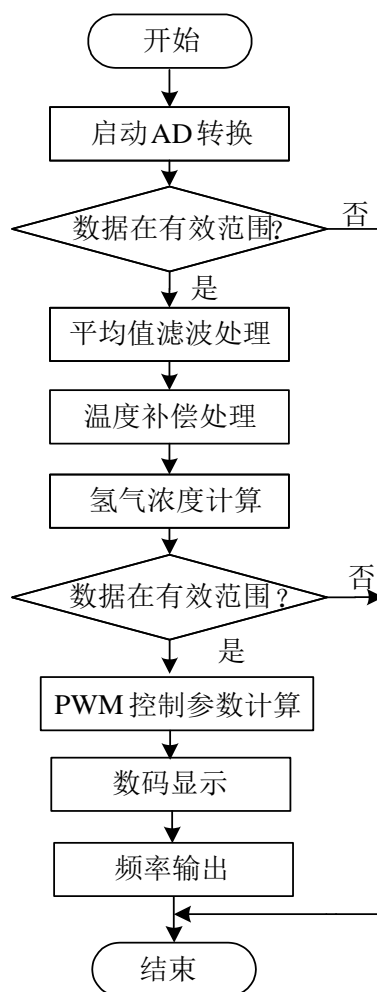


图 5-6 数据处理程序流程图

Fig. 5-6 Data processing program flow chart

2. 写操作时序

首先要将数据线置低电平 0，延时确定的时间为 $15\mu\text{s}$ ，按从地位到高位顺序发送数据（一次只发送一位），延时时间 $45\mu\text{s}$ ，将数据线拉到高电平 1，重复以上的步骤，直到发送完整个字节，最后将数据线拉高到 1。

3. 读操作时序

首先将数据线拉高到 1，延时 $2\mu\text{s}$ ，将数据线拉到 0，延时 $6\mu\text{s}$ ，将数据线拉高到 1，延时 $4\mu\text{s}$ ，读数据线的状态得到一个状态位，并进行数据处理，延时 $30\mu\text{s}$ ，重复以上步骤，直到读取完一个字节。

5.6.2 测温模块设计

DS18B20 的软件编程设计简明，它的转换精度高，用户可根据需要自行设置分辨率，并且分辨率会存储在 DS18B20 的 EEPROM 中，掉电不会丢失。

基于超声波检测甲烷浓度的原理，由于超声波在气体中传播的速度不仅会随着甲烷气体浓度的变化，还会受到温度的影响，因而要得到准确的甲烷浓度值，要进行温度补偿。在计算甲烷浓度值时需要带入实时测量的温度值进行数据处理，获取温度值的方法是用数字温度传感器测量所得的返回值乘上 0.0625 即实时温度值，可用于计算。本设计中是 PIC 单片机和 DS18B20 进行数据通讯，其测量温度时硬件电路连接简单，程序容易编写，所得的温度精度能够满足设计需要。如图 5-7 所示为温度测量程序流程图。

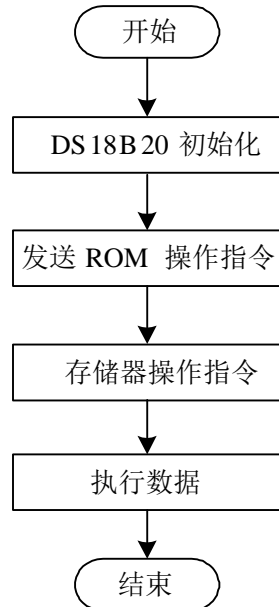


图 5-7 温度测量程序流程图

Fig. 5-7 Temperature measurement program flow chart

5.7 数据存储程序设计

EEPROM（上电可擦可写只读存储器）是仪器用来存储重要运算数据和记录数据的存储器（ROM）。EEPROM 在使用时是很方便的，它不需要先读出数据再修改数据，然后重新写入。EEPROM 的数据擦除也是同样，直接通过电信号就可以修改其内容，不干扰其它程序的执行也不受其它程序干扰。

PIC 单片机的 EEPROM 分成了两个部分 A 和 B 部分。程序将标定的数据存贮在 B 段。A 段则是用来备份 B 段所存贮的数据。当系统出现问题或者 B 段存贮数据损坏时进行数据修复。这样就提高了系统的可靠性，也使设计更加合理，充分的利用了 EEPROM 的特性。图 5-8 是数据存储程序流程图。

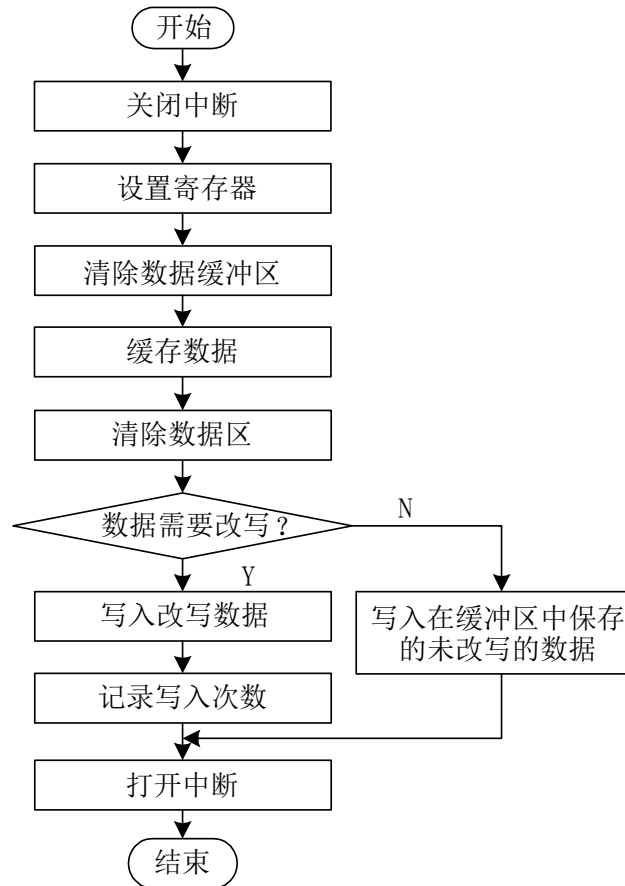


图 5-8 EEPROM 存储器操作流程图

Fig. 5-8 EEPROM memory operation flow chart

5.8 本章小结

本文依据超声波氢气检测仪的工作原理及设计思路，给出了超声波氢气检测仪的软件设计的总体方案，介绍了各模块程序的设计思路以及对几个主要的模块的功能及流程进行了详细的介绍，主要包括系统主程序、红外解码程序、测温程序、标定程序、数据处理程序、数据存储程序。

第6章 系统测试与误差分析

6.1 系统调试

任何仪器仪表在设计完成后，都需经过系统的调试阶段，验证仪器的功能特点和性能指标是否满足行业标准，通过调试验证阶段后，才能够在厂家生产和投入使用，由此可见系统调试是从设计迈向产品必不可少的阶段。系统调试首先要进行模块调试，后对仪器整体调试。模块调试时，依据设计原理图来调试模块功能，模块必须达到设计指标，若经多次调试仍不能正常工作或达到指标要求，则需调整，直到满足设计要求。模块调试完成后，对仪器整体调试，测试准确性、可靠性等指标测试。在调试的过程中，要做好详细的系统调试记录，这些记录对于仪器的检修，改进具有重要意义。

本设计的超声波氢气检测仪的调试分为硬件电路和软件程序调试。硬件电路调试：首先要检测电路板，查看是否存在虚焊和漏焊的问题，电源线、信号线等是否有短路并着重检查芯片焊接是否正确。上述检查无问题后，给硬件电路板上电，此时要检测电路板状况，若无异常，则使用万用表检测所有电压点，供电和基准电压都正常，即可对电源电路、显示信号输出电路、驱动电路、接收信号电路进行调试。软件程序调试：首先软件程序编写时要先确定主程序，然后进行各个模块程序的编写，编写完成后都要通过软件的编译环节，程序全部通过编译后，可结合硬件对程序调试。开始先测试单片机是否正常工作，晶振是否起振，这是程序运行的基本条件。若测试正常，则可对标定程序、方波发生程序、红外遥控程序等进行调试，输出无误后可在实验室环境下进行氢气浓度测量^[58]。

6.2 系统测试

在本文的超声波检测仪的标定以及测试等过程中，需要将检测仪放入指定浓度的氢气环境当中，从经济方面考虑来说，单独购买指定浓度的氢气价格不菲，况且因测试需要多种浓度的氢气，一些特定的浓度需向厂家申请配置，所以需要配置多种浓度的氢气来满足标定、测试等需求。因此，为节省成本及缩短时间，本文借鉴一些国内实验室的气体浓度配制方法，设计了一

种成本低廉，易于操作，精度满足实验要求的标准气体配制系统，达到了浓度可调，气体精度达标的要求^[59,60]。配气系统的结构连接框图如图 6-1 所示，高压储气钢瓶减压阀控制连接结构如图 6-2 所示。

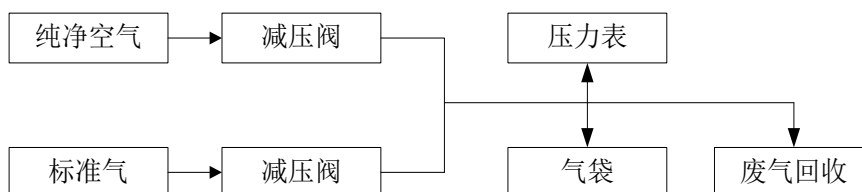


图 6-1 配气系统结构连接框图

Fig. 6-1 Structure connection diagram of gas distribution system

启动和零点标定：检测仪接通电源后，稳定 3~5min，用纯净的空气进行零点校准。灵敏度标定：将用配气装置配制好的 2%氢气标准气连接到检测仪的进气口，进行灵敏度标定，标定重复 2~3 次。



图 6-2 高压钢瓶减压阀控制连接结构图

Fig. 6-2 Control connection structure of high-pressure cylinder pressure reducing valve

表 6-1 是三个样机在完全相同的环境下的氢气检测实验数据表。由表 6-1 的实验数据可以看出，检测仪多次测量同一浓度的氢气气体时的误差不超过 1%，在允许范围内，说明检测仪的重复性良好，检测氢气浓度的可靠性高，

实时性好可实际应用，测量精度符合国家标准 GB16808-2008《可燃气体报警控制器》的要求。

表 6-1 氢气气体浓度测量结果

Table 6-1 Hydrogen gas concentration measurement results

序号	标准气体 浓度 (%)	实测浓度 (%)		
		第 1 组	第 2 组	第 3 组
1	0.00	0.01	0.00	0.00
2	0.50	0.48	0.47	0.48
3	1.00	1.03	1.01	0.97
4	2.00	2.00	2.02	1.99
5	2.50	2.47	2.53	2.47

6.3 误差分析

基于超声波相位差的氢气检测方法测量精度高且较易实现，但由于各种因素的影响会导致测量误差，通过对测量理论和结果分析，得到可能引起误差的因素如下：

1. 传感器定位引起的误差：

课题在设计时取管长 $L=80\text{mm}$ ，但实际距离将存在一定偏差，造成由管长计算出的常数 K_2 偏离真实值，进而影响检测仪的测量精度。在测量过程中，传感器之间的配置距离即为超声波的传播距离， L 的设定是经过理论计算得到的。在实际的生产机械加工过程中，会使得 L 与理论值存在差距，即有定位误差 ΔL ，且此误差不可消除，因而在配置传感器时需要精密加工。定位误差的存在会使得在零点标定时显示结果不为零，但当测量中传感器的配置不再改变后，这种误差在每次测量时不再改变，所以此误差可通过软件进行补偿。

2. 环境温度引起的误差：

由于超声波在空气中传播速度受环境温度影响，当变送器工作环境温度改变时会影响测量精度，是误差产生的主要原因。为了补偿温度变化的影响，本检测仪设计了 DS18B20 实时测温电路，实现温度补偿。

3. 被测气体流速变化造成的影响：

检测系统运行中由于超声波传感器通气孔堵塞等原因，造成气样流速不

均匀、不稳定，使气室中的气体密度发生变化，造成测量误差。

4. 硬件电路误差：

由于本文所使用的超声波测量通道与参考通道双通道设计方法，在测量时存在两路通道的元器件参数不能完全一致，是产生误差的原因之一，因而可通过软件进行调零的方法进行修正。



图 6-3 样机内部结构

Fig. 6-3 Prototype internal structure

6.4 本章小结

本章内容主要介绍了氢气检测仪的调试方法以及测试方案，并对结果进行误差分析，设计了高效低成本的气体浓度配置的简易装置，并用这套装置配制出不同浓度的氢气完成相关实验。在完成超声波氢气检测仪硬软件设计的基础上，对检测仪的硬软件功能模块进行了调试，并给出了氢气检测仪的实际测量数据，同时对可能引起测量误差的因素进行了分析并给出了解决或补偿办法，从而保证氢气检测仪能够准确实时的测量氢气的浓度。

结 论

本文为了改善现有氢气检测技术普遍存在的问题，提出了超声波相位差氢气浓度测量法。进行了检测原理的分析，建立了数学模型，进行了温度影响和补偿方法研究，采用数字温度传感器进行了灵敏度补偿，提高了测量精度。进行了氢气检测仪硬件电路和软件设计，完成了氢气检测仪的整机设计与调试。本文完成的主要工作如下：

1. 本文依据超声波在不同成分和浓度中的传播速度不同的原理，对超声波传感器进行了深入研究，分析了超声波传感器的工作原理，应用超声波传感器的工作原理，结合测量方法，搭建了超声波双通道检测模块，将两组配置完全相同的超声波接收和发送传感器分别放置于纯净空气和被测气体中，用同一正弦波信号驱动超声波发射传感器，测量接收到信号的时间差，将时间差转换成相位差进行测量被测气体的浓度，通过这种方式可测量过程中的环境误差以达到对氢气浓度的准确测量，得到氢气浓度与环境温度、超声波相位差的关系公式。

2. 根据氢气检测仪的功能需要以及总体技术方案的要求，硬件以PIC系列单片机为核心，设计了温度检测电路、信号滤波及放大电路、红外遥控电路、超声波驱动电路、电源供电系统模块、显示电路、报警电路、连接故障报警电路以及频率输出模块电路等相关电路。

3. 本文采用MPLAB IDE的开发环境，将C语言作为程序开发语言并完成程序设计，运用模块化的编程思想，包括了红外遥控模块、数据处理模块、补偿模块、出厂标定模块、数据存储模块、数据输出模块等，使系统更加稳定，抗干扰能力越强。

4. 本文了一种简易装置来进行氢气浓度的测量，用来提供测试所需的各种氢气气体浓度的环境，通过该装置可以配置出不同浓度的待测气体，从经济的角度来看节约了购买不同浓度气体的成本，且简单易于操作，更使测试及调试的效率得到了提高。

本文在实验室条件下进行，受实验室的环境因素等检测环境的局限性，有关实验研究进行不够充分，因而今后需要在更多不同实验条件下使用，传感器结构、算法等需更深入研究和改进。

参考文献

- [1] Chun-Young Oh, Jae-Hee Oh, Taegyung Ko. The Microstructure and Characteristics of Magnetite Thin Films Prepared by Ultrasound-Enhanced Ferrite Plating[J]. IEEE Transaction on Magnetics, 2002,38(5):3018-3020.
- [2] 杨迁. 基于超声波振腔的氢气检测系统研究与设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [3] 牛小民, 李世伟, 张广来等. 温度对催化燃烧式气体传感器影响研究[J]. 现代计算机(专业版), 2015, (27): 3-5.
- [4] 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, (05): 71-73.
- [5] 丁黎明, 赵景波. 催化燃烧型甲烷传感器的研究[J]. 微计算机信息, 2007, (01): 177-178.
- [6] 杜彬贤, 陈今润, 尹军. 热导式气体传感器工作原理及检测方法改进[J]. 化学工程与装备, 2010, (02): 64-66.
- [7] 刘殿素, 吴言荪, 欧勇. 新型气体热导传感器及其应用设计[J]. 仪表技术与传感器, 2007, (07): 5-6.
- [8] 黄为勇, 任子晖, 童敏明. 影响热导传感器气体检测性能的原因分析[J]. 计算机测量与控制, 2004, (10): 1005-1007+1010.
- [9] 陈长伦, 何建波, 刘伟, 刘锦淮. 电化学式气体传感器的研究进展[J]. 传感器世界, 2004, (04): 11-15.
- [10] 唐省吾, 陈耐生, 李学金等. 常温电化学式氧传感器[J]. 化学传感器, 1994, (02): 95-99.
- [11] 孙志胜, 汪尔康. 电化学式生物传感器的近期发展动向[J]. 分析测试通报, 1992, (05): 1-8.
- [12] 谢代梁, 葛慎, 胡朋兵等. 有源光纤式流量传感器的研究进展[J]. 中国计量学院学报, 2015, (01): 12-19.
- [13] 刘治军, 叶林, 陈斌等. 光纤式结冰传感器微弱信号检测电路的实现[J]. 仪表技术与传感器, 2012 (03): 79-81.
- [14] 张毅, 庄志, 黎启胜等. 一种温度补偿式光纤氢气检测技术[J]. 仪器仪表学报, 2012, (07): 1573-1578.
- [15] 张毅, 庄志, 黎启胜, 张敏, 杨振, 廖延彪. 光纤法布里珀罗氢气检测

- 技术[J]. 传感技术学报, 2010, (10): 1386-1389.
- [16] 徐仁庆, 殷晨波, 何茂先. 基于虚拟技术的氢气传感器检测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2009, (05): 35-36+44.
- [17] 张兴磊, 花榕, 陈双喜等. 低浓度氢气检测方法研究进展[J]. 分析仪器, 2009, 5: 6-10.
- [18] 张振东. 氢气传感器及其检测技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 3-4.
- [19] Y. L. Hoo, W. Jin, H. L. Hoetal. Gas diffusion measurement using hollow-core photonic bandgap fiber[J]. Sensors and Actuators, 2005, 105(2):183-186.
- [20] 李云龙. 超声波物位传感器设计与测距算法研究[J]. 南京: 南京理工大学, 2012: 67.
- [21] 夏纪真. 无损检测导论[M]. 南京: 中山大学出版社, 2005, 1: 3-5.
- [22] 严锦洲, 蒋念平. 新型超声波流量计[J]. 仪表技术与传感器, 2014, 4: 28.
- [23] 王健. 超声测厚技术的试验应用与硬件设计[J]. 电子测试, 2012, 2: 83-86.
- [24] 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, 3: 491.
- [25] Ishikawa J, Mizutani Y. High-frequency drive-power and frequency control for ultrasonic transducer operating at 3MHz [J]. Industry Applications Conference, 1997, 2(2): 5-9.
- [26] 危鄂元. 基于时差法的单声道气体超声波流量计的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 9.
- [27] 林书玉. 超声技术的基石--超声换能器的原理及设计[J]. 物理, 2009, 38(3): 141-148.
- [28] 郭晓燕. 超声波甲烷浓度变送器设计[D]. 哈尔滨理工大学, 2015.
- [29] Sungbok Kim, Hyunbin Kim. Optimal Ultrasonic Sensor Ring with Beam Overlap for High Resolution Obstacle Detection[J]. IECON 2011-37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2011, 14(2): 240-245.
- [30] Lu Pan, Yan-yan Wang,Zhi-hong Sun. Correction Coefficient of Catalytic Combustion Gas Detector[A]. IE&EM 2012.Chinese Industrial Engineering

- Institution, CMES、Institute of Electrical and Electronic Engineers、Beijing Section,2012:4.
- [31] Maalej I, Ouali M. Modular Ultrasonic Sensor Platform for Mobile Robot[J]. Renewable Energies and Vehicular Technology (REVET), 2012, 24(2): 477-483.
- [32] 孙选, 徐可欣, 艾长胜等. 一种声电复合多元液体浓度传感器的研制[J]. 传感技术学报, 2006, 19 (1): 3-5.
- [33] 马向国, 刘同娟. PIC 单片机在瓦斯报警设备中的应用[J]. 电子产品世界, 2006, 10: 102-104.
- [34] 陈桂钧. PIC 单片机应用系统可靠性技术探究[J]. 科技创新导报, 2012, 06 (21): 14-20.
- [35] Ibrahim D. Chapter 3-MPLAB X IDE and MPLAB XC8 C Programming Language[J]. Pic Microcontroller Projects in C, 2014, 1:25-50.
- [36] 吴正民. PIC 单片机特点及应用时的注意事项[J]. 实验室研究与探索, 2003, 15 (12): 16-20.
- [37] 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.
- [38] 杨国宇, 顾威. 基于 PIC18F458 单片机的数据采集和通讯系统[J]. 工业控制计算机, 2006, 09: 3-4.
- [39] 郭超. 检相式超声波风速变送器设计[D]. 哈尔滨理工大学, 2013.
- [40] 宋丽梅, 李刚. 超高速鉴频鉴相器 AD9901[J]. 国外电子元器件, 2007, (6): 21-24.
- [41] 金宁, 汪伟, 张增耀, 黄咏梅. 高精度数字检相电路设计[J]. 中国计量学院学报, 2002, (01): 62-65.
- [42] 夏莉英, 陈雁. 基于 DS18B20 的温度测控系统设计[J]. 微计算机信息, 2011, 1: 116.
- [43] 王文, 王直. 基于 ARM 和 DS18B20 的温度监测系统[J]. 电子设计工程, 2011, 19 (20): 89-93.
- [44] 卞金洪, 王吉林, 周锋. 高精度压力传感器中温度补偿技术研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2011, 16 (6): 55-57.
- [45] 武文斌, 陈先玉. 4~20mA 电流环串行通信接口抗干扰研究[J]. 现代电子技术, 2014, 37 (12): 118.
- [46] 姚融融, 李纲园. 基于开关稳压电源与开关稳流电源并联系统的设计

- [J]. 工业仪表与自动化装置, 2014, 4: 43-46.
- [47] 严崇光. 便携产品电源芯片的应用技术[J]. 电子设计应用. 2006, 1: 102-104.
- [48] 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.
- [49] 李厚春, 史延东, 宁飞. 通用红外遥控器检测仪的设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2011, 5: 40-42.
- [50] 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.
- [51] 朱高中. 基于单片机的红外遥控解码电路的设计[J]. 计算机与自动化, 2011, 30 (2): 68-71.
- [52] 王红美. 基于单片机的红外线遥控器设计[J]. 自动化应用, 2013, 9(25): 14.
- [53] 林志伟. 恒功率式热膜风速计设计[D]. 哈尔滨理工大学, 2014.
- [54] 刘玉宏. MSP430 单片机 C 语言和汇编语言混合编程[J]. 微计算机信息(测控仪表自动化), 2003, (10): 56-57.
- [55] 谭浩强. C 程序设计[M]. 第二版. 北京: 清华大学出版社, 1999: 30-34.
- [56] Seacord, R. Secure Coding in C and C++ of Strings and Integers [J]. IEEE Security & Privacy, 2006, 4(1):74-76.
- [57] 李泽光. 基于单片机的红外遥控器解码器的设计[J]. 现代电子技术, 2007, 30 (9): 36-37.
- [58] 欧阳禾嘉. 数字滤波技术在工程测试系统中的应用研究[J]. 微计算机信息, 2008, 24 (12): 229-230.
- [59] 刘祖龙. 标准气体配制装置[J]. 低温与特气, 2005, (1): 26-30.
- [60] 崔乃超. 便携式矿用多参数气体探测器设计[D]. 哈尔滨理工大学, 2014.

攻读硕士学位期间发表的学术论文

- [1] 丁欣, 丁喜波, 王丽杰, 王健, 邹一风. 基于超声波相位差法的氢气检测方法 & 仪器研制[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2016, 21(), ,
- [2] Dan WANG, Lijie WANG, Wenning DONG, Xin DING. Experimental Study with Rapid Measurement for Moisture Content of Iron Concentrate. 2015, 9, 2015 Fifth International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control,
- [3] 孙洪宇, 王丽杰, 袁业刚, 丁欣. 繁华商业区地下立体车库车辆堆垛测控实现[J]. 哈尔滨理工大学学, 2015,

致 谢

研究生两年半的生活一晃而过，回首这些岁月，我倍感充实和喜悦。通过本次的研究生毕业设计，我学到了很多也收获了很多。从选题开始到最终样机的完成，其中我曾走过不少弯路，遇到很多的难题，但最终都被我成功的克服，最终伴随我的是成功所带来的巨大喜悦。通过此次毕业设计，使我在学习和创新思维上都有了很大的提升，因为从选题，到方案的分析、论证，再到方案的确立，和具体电路的设计，在这些过程中我们虽然经历了很多失败和瓶颈，但就是这些帮助了我在不断地学习，不断地提升我的理论分析能力和专业素质。在具体电路的实现过程中，我曾动手搭建和调试电路，观察实验现象，分析出现问题的原因，正是这一点一滴的积累使我的实践能力有了不小的提升。

首先，我要特别感谢我的导师王丽杰老师，感谢您在我研究生学习生活中的悉心教诲。您的正直为人、不逐名利的作风、慈祥和蔼的性格深深感染着我。您是红烛，点亮了我们的希望，指明了我们前进的方向。

其次我要感谢我的家人，正是家人们对我学习生活上的关心，让我倍感温暖，使得我在前进过程中不管遇到任何情况都能够勇往直前。

我还要感谢实验室的师兄师姐、师弟师妹们，感谢你们在各个方面对我的帮助，感谢你们使实验室环境温暖如春。

感谢各位老师、专家、学者在百忙之中抽出时间审阅我的论文，您辛苦了，衷心感谢。最后祝愿大家以后都工作顺利，生活一帆风顺。