


独 创 性 声 明

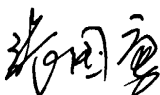
本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果,除了文中特别加以标注和致谢之处外,论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果,也不包含为获得天津工业大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名:  签字日期: 2010年3月6日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津工业大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津工业大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索,并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

(保密的学位论文在解密后适用本授权说明)

学位论文作者签名: 

导师签名:  刘建伟

签字日期: 2010年3月6日

签字日期: 2010年3月7日

学位论文的主要创新点

一、分析了浆体浓度测量原理和方法，以涂料浆为研究对象，提出了以超声衰减法测量浆体浓度的方法，并通过实验验证了超声衰减法测量浆体浓度的可行性和合理性。

二、研制出一种基于超声技术的浆体浓度测量仪器，对系统误差作了详尽的理论分析，提出了减小系统误差的相关措施，并分析了在浆体流动状态下，流速对测量结果的影响。

摘 要

在工业生产和科学实验过程中大量需要对浆体浓度进行检测。目前通常采用由密度推算浓度、机械式浓度传感器、光学浓度传感器等方法进行浆体浓度检测,而这些方法存在着测量精度低、可靠性差等缺点。本文将研究一种有效、实用、可靠的基于超声技术的浆体浓度测量仪器。

本文在深入了解国内外浆体浓度测量技术的基础上,分析了浆体浓度测量原理和方法,以涂料浆为研究对象,提出了以超声衰减法测量浆体浓度的方法。研制出一种基于超声技术的浆体浓度测量仪器;针对涂料浆浓度的测量,合理地选择了超声传感器—压电陶瓷片,采用微型计算机技术设计了该仪器的硬件电路;采用汇编语言设计了该仪器的软件;对系统误差作了详尽的理论分析,提出了减小系统误差的相关措施,并分析了在浆体流动状态下,流速对测量结果的影响。通过实验验证了超声衰减法测量浆体浓度的可行性和合理性。

本文所设计的超声波浆体检测仪能及时、准确、连续地对各种浆体进行在线测量,具有成本低、检测快速、功能完善、工作稳定可靠等优点。可广泛用于污水、矿浆、水煤浆、药液、纸浆等多种浆体的浓度监测。

关键词: 超声衰减; 压电陶瓷片; 浆体; 浓度测量。

Abstract

In the process of industrial production and scientific experiment, it is frequently required to test the slurry concentration. At present, the testing of the slurry concentration is usually calculated according to the slurry density, by the use of the mechanical concentration sensors and the optical concentration sensors. But these means there are disadvantages of low accuracy and poor reliability. This paper studies a kind of effective, practical and reliable slurry concentration measurement equipment based on ultrasonic technology.

Based on the in-depth understanding of both the domestic and foreign techniques of measuring the slurry concentration, this paper analyzes the principles and methods of slurry concentration measurement. With paint slurry as the research object, it puts forward the method of measuring the slurry concentration through the use of ultrasonic attenuation. This measurement instrument is a technique based on ultrasonic slurry concentration, focusing on the measurement of paint slurry concentration, with the ultrasonic sensors — piezoelectric ceramics reasonably chosen; with the instrument's hardware circuit designed through the use of micro-computer technology and the instrument's software designed through use of assembly language. The paper makes a detailed theoretical analysis of systematic error, proposes the related measures to reduce the systematic errors. Furthermore, the paper analyzes the impact of flow velocity on the measurement results in the slurry state. The feasibility and rationality of measuring slurry concentration through the use of ultrasonic attenuation are testified and verified by the experiments.

The ultrasonic slurry detector designed in the paper can conduct timely, accurate, continuous and online measurement of various slurry with low cost, rapid testing, full function, stable and reliable performance. It can be widely used in the monitoring of the concentration slurry of sewage, pulp, coal-water slurry, liquid medicine, paper pulp and so on.

Key words: ultrasonic attenuation, piezoelectric ceramic, slurry, concentration measurement

目 录

第一章 引言	1
1.1 课题的研究背景	1
1.2 本课题的目的和意义	2
1.4 本文主要研究的内容	3
第二章 浆体浓度检测的方法及原理	5
2.1 由密度推算浓度的方法	5
2.2 机械式浓度检测方法	5
2.3 光学浓度检测方法	6
2.4 电容式浓度检测方法	6
2.5 超声波浓度检测方法	6
2.5.1 超声浓度检测的研究现状	8
2.5.2 超声波换能器	10
2.5.3 超声检测浓度技术的原理及方法	10
2.6 检测方法的选择	16
第三章 浆体浓度检测仪设计方案	19
3.1 检测仪的总体设计要求	19
3.2 检测仪设计方案	19
3.2.1 检测仪原理框图	19
3.2.2 检测仪电路设计方案	20
第四章 检测仪硬件设计	23
4.1 单片机控制电路设计	23
4.2 波形发生电路设计	23
4.3 功率输出电路设计	25
4.4 接收放大电路设计	26
4.5 检波电路设计	26
4.6 通信接口电路设计	28

4.7 超声波发射器和接收器	28
4.7.1 超声压电陶瓷片的等效电路及参数分析	28
4.7.2 超声压电陶瓷片相关参数的分析与研究	30
第五章检测仪软件设计	35
第六章浆体流速对测量结果的影响及误差分析	37
6.1 浆体流速对测量结果的影响	37
6.2 检测仪的误差分析	42
6.2.1 超声换能器安装误差	42
6.2.2 检波电路部分误差	43
6.2.3 波形误差	44
第七章结论与展望	47
参考文献	48
作者在攻读学位期间公开发表的论文	52
致 谢	53
附录 浆体浓度检测仪硬件原理图	54

第一章 引言

1.1 课题的研究背景

在工业生产和科学实验过程中，浆体是一种很常见的流体类型，其种类也很多，如乳浆、泥浆、涂料浆、纸浆和煤浆等。浆体是一种固、液两相混合流体。固、液各相的流体动力学特性特别复杂，以浆体为代表的固、液两相流体及其它的多相混合流体都被称为“难测流体”。而浓度则是描述浆体性质的一个很重要的物理参数。它是指一定量的浆体中固相成分占整个浆体的百分数。浆体浓度又分为质量浓度和体积浓度。浆体的浓度在大多数工业生产过程中都是很重要的技术指标，如在建筑涂料的生产过程中，涂料的浓度直接决定了其质量；在矿业开采过程中，矿浆的浓度也是一个很重要的测量指标等。

传统的浆体浓度检测方法常采用间隙采样、称量、电解、化学滴定等离线测量的方法。而随着工业生产自动化水平的提高，对连续过程监控和对浆体浓度检测的要求也日益提高。很显然传统的浆体浓度检测方法很难适应这种要求，这就需要从新的或更好的在线浓度传感器获得有效的信息以提高过程控制的质量和产品的性能。常采用的浆体浓度检测方法有以下几类：

1. 由密度推算浓度的方法

这种方法先由密度传感器测得浆体的平均密度，然后根据密度和浓度之间的对应关系就可以推算出浆体的浓度。

根据密度传感器测得的浆体平均密度以及密度和浓度之间的对应关系就可以推算出浆体的固相百分含量，但实现这种方法的前提是固相和液相的密度有较大差别，而且两者密度能保持稳定。而对于多数浆体来说，这两个条件往往很难保证，因此这种测量方法精度不高，只能在某些场合下使用。

2. 用机械式浓度传感器的检测方法

这种方法是利用浆体的物理特性来检测出浆体的固相浓度。造纸工业中常用机械式浓度传感器来进行浓度检测。由于它是接触式测量，会改变浆体的流动状态，进而影响测量结果；传感器容易挂浆，必须勤维护、冲洗，拆洗多了，零点

漂移大；测量结果受温度的影响大；可动部件多，对安装要求高。这些缺点给使用带来许多不便。

3. 用光学浓度传感器的检测方法

这种方法是利用浆体对光的吸收、散射、透射能力或利用固相对偏振光具有去偏振作用与浆体浓度的关系来检测浆体浓度。其最大优点就是非接触式测量，但光学浓度传感器要求浆体透光性强，因此测量中、高浓度的浆体有一定困难。另外，浆体中固相的形状、大小对光的反（散）射影响较大，会带来较大的测量误差。

4. 用电容浓度传感器的检测方法

这是一种利用浆体的介电常数与浓度的关系来对浆体浓度检测的方法。电容浓度传感器具有非侵入性、实时性高等优点。但其还存在电容值与相浓度是非线性的关系，参数间关系复杂，传感器的电容测量易受杂散电容干扰，灵敏度低，测量易受流场分布不均匀的影响等问题。

5. 用超声浓度传感器的检测方法

超声技术是一种很先进的物性参数检测方法。与其它的物性分析传感器检测方法相比较，超声浓度检测方法具有很多的优点，如非接触式、无阻流部件测量；对过程及被测对象无有害影响；具有快速的响应能力；高精度和可重复性；指向性好、功耗低、稳定性好、能实现在线测量等。

1.2 本课题研究的目的和意义

通过对本课题的研究设计出一种满足要求的、性能优良的浆体浓度检测仪，可以给管理者提供准确、及时的现场信息，提高企业管理水平、产品质量，降低生产成本，具有巨大的社会效益和经济效益。

本文所设计的超声波浆体检测仪能及时、准确、连续地对各种浆体进行在线测量，具有成本低、检测快速、功能完善、工作稳定可靠等优点。可广泛用于污水、矿浆、水煤浆、药液、纸浆等多种浆体的浓度监测。

1.3 本文主要研究的内容

本课题的研究内容：探索一种可靠、实用的基于超声技术的浆体（主要以涂料浆为研究对象）浓度检测技术方法。通过深入了解国、内外相关技术研究现状，我们提出了一种运用超声衰减法检测流动浆体浓度的方法。在对超声衰减法进行理论分析的基础上，进行了整个测量系统的软、硬件设计和调试，并对其系统误差作了详尽分析。接下来对超声衰减法测量流动浆体的可行性与合理性进行了理论分析和实验验证。最后，给出本课题得出的结论，并对下一步工作进行了展望。

第二章 浆体浓度检测的方法及原理

本章首先介绍了浆体浓度检测常用的方法，并通过对几种检测方法进行了比较，从中选出更适合检测浆体浓度的超声波法作为本检测仪的测量方法。

2.1 由密度推算浓度的方法

这种方法先由密度传感器测得浆体的平均密度，然后根据密度和浓度之间的对应关系就可以推算出浆体的浓度。

浮子密度计和天平密度计是静态条件下的密度测量仪表，精度高，但只适合在实验室中离线测量。

科里奥利质量流量传感器和振动式密度传感器通过检测管道和流体谐振时的频率可实现质量流量和密度的在线测量，测量精度高，但其缺点是无法实现大口径管道的测量、测量浆体等二相流或多相流体时误差大。放射式同位素密度传感器^[1]通过测量 α -射线或 γ -射线穿越浆体时的衰减程度实现密度测量。其优点是非接触式测量、受外界干扰影响小，但价格昂贵、功耗高、安全性差使其推广使用受到制约。

根据密度传感器测得的浆体平均密度以及密度和浓度之间的对应关系就可以推算出浆体的固相百分含量，但实现这种方法的前提是固相和液相的密度有较大差别，而且两者密度能保持稳定。而在实际应用中，对于多数浆体来说，这两个条件往往很难保证，因此这种测量方法精度不高，只能在某些场合下使用。

2.2 机械式浓度检测方法

利用浆体的各种物理特性就可以检测出浆体的固相浓度。造纸工业中常用的机械式浓度传感器就属于这一类的浓度测量仪表。在造纸工业过程中，目前常用的机械式浓度传感器类型有刀式、外旋式、内旋式等。其原理是利用涂料浆流动时的阻力损失和涂料浆浓度之间的关系来实现浓度的测量，其测量范围

大都在中浓区域。由于它是接触式测量，会改变浆体的流动状态，进而影响测量结果；中浓刀式浓度计的测量刀容易挂浆，必须勤维护、冲洗，拆洗多了，零点漂移大；旋转式中浓浓度计由于机械摩擦，维修率高，稳定性差，管道分流又造成测控滞后大；测量结果受温度的影响大；可动部件多，对安装要求高。这些缺点给使用带来许多不便。

2.3 光学浓度检测方法

这种方法是利用浆体对光的吸收、散射、透射能力或利用固相（比如涂料浆中的纤维）对偏振光具有去偏振作用与浆体浓度的关系制成。其最大优点就是非接触式测量，工业管道内无可动部件，通常可以在不影响生产的情况下对传感器进行维修。但光学浓度传感器要求浆体透光性强，因此测量中、高浓度的浆体有一定困难。另外，浆体中固相的形状、大小对光的反（散）射影响较大，会带来较大的测量误差。近年来，有人根据光的后向散射理论，利用光的反射和折射原理，提出一种新的测量方法—激光光纤测量法，利用光纤传感器来测量浆体浓度。

2.4 电容浓度检测方法

基于浆体的电特性如介电常数与浓度的关系测量浆体浓度是一种有发展前途的检测方法。浆体中各相具有不同的介电常数，当浆体流过电容极板间形成的电场时，相浓度的变化会引起浆体等效介电常数的变化而使极板间的电容随之发生变化，检测出电容的变化值就能得出相应的固相浓度。电容浓度传感器具有非侵入性、实时性高等优点。但其还存在电容值与相浓度是非线性的关系，参数间关系复杂，传感器的电容测量易受杂散电容干扰，灵敏度低，测量易受流场分布不均匀的影响等问题。

2.5 超声波浓度检测方法

超声波是一种机械波，频率高于 20KHz，在工业应用中常采用的频率范围是 20KHz—10MHz。超声波具有如下特性：

- (1) 超声波可在气体、液体、固体、固熔体等介质中有效传播。
- (2) 超声波可传递很强的能量。
- (3) 超声波会产生反射、干涉、叠加和共振现象。
- (4) 超声波在液体介质中传播时，可在界面上产生强烈的冲击和空化现象。

超声学也是一门从生产实际应用中发展起来的学科，已有几十年的历史，涉及的应用范围非常广泛。归纳起来，超声应用无非是两大类：第一类是超声加工和处理技术；第二类就是超声检测与控制技术。

近年来，超声波的应用领域越来越广泛。而超声测量技术作为超声应用的一个重要分支，与超声加工处理技术相比，则着重在一些描述媒质超声传播特性的物理量（如声速、声衰减、声阻抗等）的测定。与其它的物性分析传感器技术相比，超声测量技术具有以下特点：

- (1) 非接触式、无阻流部件测量：超声波具有准光学的特性，如反射、折射等，具有很强的穿透性。所以利用超声波的这些特性，尤其在测量工业流体过程中，传感器可以不和被测量对象直接接触。无阻流部件，因而也就不影响流体的流动状态，使测量结果更为客观、真实；
- (2) 对过程及被测对象无有害影响：超声测量技术中运用的是一种低功率的超声波，因而也不会对被测对象的特性造成破坏；
- (3) 快速的响应能力：超声波在媒质中的传播速度快，所以其用作工业测量手段时具有响应能力快的特点；
- (4) 高精度和可重复性：随着超声相关技术的发展，超声仪器的测量精度也越来越高；
- (5) 指向性好、功耗低、稳定性好、能实现在线测量。

超声测量技术的这些优点使其在工业测量领域越来越受到重视，获得了日益广泛的应用。此外，超声测量仪器运用在工业测量场合时，其测量性能受温度、压强，尤其是温度等外界因素影响较大，所以在仪器设计和实际使用过程中，要特别注意这些对测量不利的因素的影响，采取必要的措施进行补偿或避免这些不利影响。

2.5.1 超声浓度检测的研究现状

早在 20 世纪 50 年代国外就有文献报道超声传感器用于流体密度测量,我国的一些化工厂在 70 年代使用超声传感器实现了氯丁橡胶比重的测量,但由于传感器制造技术和信号处理技术的落后,当时的超声密度传感器精度较低,不能满足工业在线连续测量的要求。随着近 20 年来材料科学、电子技术及信号处理技术的新发展,超声技术包括新型换能器的开发、流体超声特性的研究、超声发射和接收以及超声信号处理技术等已有了长足的进步。

国内外研究者始终关注着超声声速特性、声阻抗特性和声衰减特性理论的研究,并进行了大量旨在分析超声特性和浆体浓度关系的实验。同时也有不少产品问世,成功地应用于某些浆体的测量实践中。Stolojanu 采用超声传感器研究了固体颗粒直径为 $35\mu\text{m}$ 、 $70\mu\text{m}$ 、 $180\mu\text{m}$ 浆体的声速、声衰减特性,并提出了采用超声传感器实现固体颗粒直径的测量的方法。其实验结果与 Urlick、Ament 等人提出的经典声学特性模型进行了对比,得出了 10%—50% 浓度的浆体声速随浓度变化明显,而低于 10% 的浆体衰减和超声频率受浆体浓度影响更为显著的结论。Greenwood 研究了超声波频率与高岭土浆液超声衰减的关系,实验数据表明超声衰减与浆液浓度、超声波频率存在比例关系。Bamberger 研究的超声浆体特性传感器用于测量浆体中粒子的平均尺寸、分布和浓度,实验浆体的固体颗粒尺寸在亚微米和亚毫米之间,粒子平均直径的测量精度在 $\pm 1\mu\text{m}$ 内,浓度测量精度为 $\pm 1\%$ 。姚士强设计的基于超声衰减原理的超声浓度传感器实现了高水基流体的测量,实验表明高水基流体在 0%—8% 的范围内浓度与超声衰减有很好的线性度。马殿旗根据超声波衰减的原理测量泥浆的体积浓度,并使用经验参数修正的方法得到低浓度范围内的泥浆质量浓度,采用直接数字合成频率技术(DDS)提高了超声波的频率稳定性,采用自动温度补偿技术提高了仪器的测量精度和稳定性。Carlson 通过确定管道上两个超声接收换能器处的超声能量比来检测金属矿浆中固体颗粒的质量浓度,实验表明,在 3%—5% 的浓度范围内能量比和浓度有很好的线性度,在线测量精度优于 1%。

在前面提及的三个超声测量量(声速、声衰减、声阻抗)中,声速的测量在测量原理上(通过测量声时)易实现,且精度高,而声阻抗和声衰减的直接

测量较难实现，故而影响了传感器整体性能的提高。因此，大量文献报道的各种超声浓度、密度传感器的研究热点就是为了提高声阻抗和声衰减的测量水平：

1、设计或优化传感器（换能器）结构以提高传感器的性能

由于反射系数的直接测量相对困难，目前主要采用的传感器构造是使超声脉冲信号在传感器中间发生多次反射，从而使信号分离为测量信号和参考信号，通过测量这两个信号来确定声发射系数。Adamowski 提出了基于相对反射法（RRM）的超声液体密度检测技术，并采用集成宽带压电陶瓷发射换能器和 PVDF 接收换能器的超声传感器实现了大口径管道中流体密度的测量，误差小于 1.5%，但 PVDF 的温度特性（一般要求小于 60 度）限制了其实际使用范围。Greenwood 设计了在一个塑料楔形块上集成 5 个纵波超声换能器和 1 个剪切波超声换能器的浆体密度传感器，通过 3 个不同角度入射确定声阻抗和声速，单一成分液体的测量精度为 0.5%，浆体为 1%。Puttmer 等提出了一种用一个偏铌酸盐压电陶瓷换能器实现对称发射超声波的密度传感器构造，并分析研究了缓冲杆材料、传感器表面薄镀层及耦合层的影响、传感器几何尺寸设计与超声衍射的关系，使声阻抗测量有了较高的信噪比，实现了声阻抗和声速的同时测量，密度测量精度可以达到 $\pm 0.1\%FS$ 。该传感器构造示意图如图 2-1 所示。这些结构上的优化大大提高了系统的测量性能。

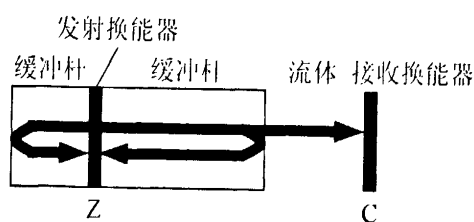


图 2-1 传感器构造图

2、采用数字信号处理技术提高声阻抗测量、声衰减测量和声速测量的精度

声阻抗、声衰减的测量精度直接取决于超声脉冲幅度的测量精度，超声传播时间的测量精度决定了声速的测量精度。Deventer 采用互相关算法和离散傅立叶算法确定不同媒质中的超声穿越时间。Puttmer 等采用直接数字化的超声脉冲峰值检测技术测量超声反射脉冲幅度，误差小于 0.025%（12 位 A/D 分辨率）。Higuti 在比较了时间域和单一频域下的声脉冲幅度测量的基础上提出了基于能

量谱密度 (ESD) 的反射系数算法, 实验显示测量精度小于 0.2%。Andria 等分析了相关算法和时域—频域变换算法 (小波变换和快速傅立叶变换) 在超声传播时间估计中的应用。刘镇清、朱士明等采用“过零检测数字平均法”提高了声时的测量精度。江泽涛等则采用了“随机多次测量后平均”的测时方法。这些都证明了采用各种数字信号处理方法能有助于改善传播时间的测量精度。

3、采用各种补偿方法减小传感器和电路老化、温度变化及浆体中的气泡等因素对测量的干扰

电子设备的老化和信号漂移使初始发射脉冲会发生变化, 一般可以在测量中引入参考信号消除漂移误差, 实现声脉冲幅度的相对测量; 传感器的几何尺寸、超声特性如声衰减、声速等以及流体的声速都会随温度的变化而变化, 这些变化都会对声阻抗和声速的测量带来误差, 可以进行传感器温度特性的分析和标定以补偿不同温度下的传感器特性变化, 何建德等将单片机引入补偿电路实现了超声测量中的温度补偿; 流体中的气泡对超声信号衰减、频率、声速有很大影响, 可以通过改善传感器的安装方式及软件的方法进行消除。

2.5.2 超声波换能器

超声波的发射和接收通常由换能器来实现。超声换能器的作用是使其他形式的能量转换成超声波的能量 (发射换能器) 和使超声波的能量转换成其他易于检测的能量 (接收换能器)。超声波换能器按其作用原理可以分为压电式、磁致伸缩式、电磁式等。电信号是使用方便的一种信号, 所以运用最为广泛的是电信号和超声信号相互转换的压电式换能器。压电换能器采用压电陶瓷制成。发射电路把电信号加到发射换能器上就可使它作超声振动, 并在周围的媒质中产生所需的超声波。接收换能器把接收到的声信号转换成为电信号, 采用适当的接收电路就可获得有足够能量的、可用于检测控制的电信号。

用于超声测量技术中的换能器应具有结构简单、功率较小、时间稳定性和温度稳定性好等特点。在超声工业测量技术中, 最常用的是依据压电效应和逆压电效应制成的压电换能器。实际使用的压电换能器品种较多, 外形有圆片形、圆柱形、圆管形等。

2.5.3 超声检测浓度技术的原理方法

超声波检测浆体浓度技术的基本工作原理是: 在脉冲波或连续波的激励下,

超声发射换能器以厚度振动模式向浆体发送超声波（平面纵波），使超声波与被测浆体发生交互作用。当超声波到达接收换能器时，超声信号携带了浆体浓度参数的信息。通过测量并分析声速、声阻抗或声衰减（超声检测中常用这三个超声量）等参数，就可以确定浆体的浓度。超声波具有很强的穿透性，可以实现非接触式在线测量。

在超声工业中测量技术中，常采用测量媒质的超声声速、声衰减和声阻抗这三种基本方法来确定媒质的非声量。

1、声速法

超声工业测量技术中应用最广的是媒质的声速这一物理量。这是因为：第一，媒质的声速与媒质的许多特性有直接或间接的关系。有些关系比较间接而且复杂，但在特定的条件下，仍可建立一些半理论或纯经验的关系式，例如对于二元电解质溶液，声速与电解质水溶液浓度在某个范围内存在线性关系，采用超声传感器测量超声传播时间就可以建立声速和浓度的关系，利用这些关系，就可以通过测量声速来确定这些媒质相应的参数。第二，媒质的声速和媒质所处的状态也有相互关系，如媒质的温度、压强的变化都可以引起媒质声速的变化，可以运用在测量媒质状态的场合。

声速是描述超声波在媒质中传播特性的一个基本物理量，测量方法很多。常用的测量方法主要有以下几种：

（1）共振干涉法

共振干涉法在早期就被用来测量声速，其原理就是通过测定声波波长 λ 和频率 f 来求声速，即 $c = \lambda \cdot f$ 。测量有两种途径：一种是采用固定频率 f 的超声波，调整传播距离以建立驻波共振状态，从而决定 λ ，最终求出声速 c ；另一种是采用固定的传播距离，改变超声频率来形成共振。相应的产品主要有变程干涉仪和定程干涉仪。

（2）临界角法

临界角法测声速利用了超声波的发射和折射的准光学特性，主要运用在测量超声波穿越固体媒质时的声速。一般不用于流体声速的测量。

（3）相位比较法

把一个发射换能器和接收换能器相对安放，如图 2-2 所示，用信号发生器

激发发射换能器发射超声连续波，此连续波透过被测媒质传到接收换能器，接收放大后加到示波器 Y 轴，而发射信号加到 X 轴，在示波器上就可以看到李萨育图形。

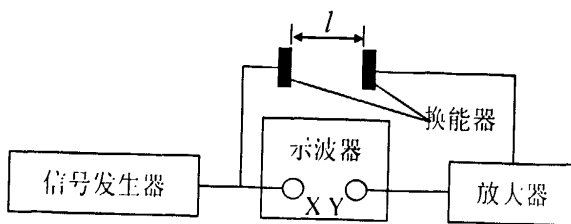


图 2-2 相位比较法

发射波和接收波之间有一定的相位差 ϕ ，这个相位差和声速 c ，频率 f ，角频率 ω ，波长 λ ，距离 l ，传播时间 T 等的相互关系如下：

$$\phi = \omega T = \frac{2\pi fl}{c} = \frac{2\pi l}{\lambda} \quad (2-1)$$

从上式可以看出，如果能读出 ϕ ，则可以求出声速 $c = 2\pi fl / \phi$ 。如果改变探头之间的距离 l ，那么相位差也随着改变，当 l 改变一个波长 λ 的距离时，相同的李萨育图形就重复出现一次，用这个方法就求出波长，也可算出声速 $c = f\lambda$ 。如果固定探头距离 l 而改变信号发生器的频率 f ， ϕ 也将随着变化，当 ϕ 每增加 2π ，李萨育图形就重复出现一次，若 f_n 是出现某种李萨育图形的频率，而 f_{n+1} 和 f_{n+m} 分别是 f_n 之后第一次和第 m 次重复出现相同图形时的频率，则由重现时的频率差也可以求出声速： $c = (f_{n+1} - f_n) \cdot l = (f_{n+m} - f_n) \cdot l / m$ 。

相位比较法也可以用来测量声速的变化。仍用图 2-2 的方框图，当声速变化时示波器上的李萨育图形就有变化，改变信号发生器的频率使波形不变，从频率变化的大小就可以知道声速变化的大小。

(4) 脉冲法

脉冲法可以用来测定媒质的声速和衰减，由于它有测量迅速、机械装置简便、容易实现连续自动测量、使用范围广等优点，所以得到了广泛的应用。通常采用透射或反射两种方法。用垂直透射法时要有两个换能器，一个作发射用，另一个用来接收超声脉冲信号，如图 2-3a 所示。而用垂直入射的反射法时（图 2-3b），可用同一个换能器兼做超声脉冲的发射探头和接收探头。用厚度振动的

晶片可以向媒质激发超声纵波。

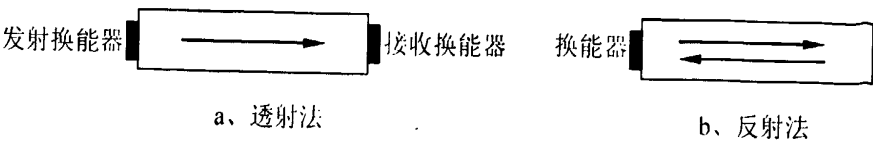


图 2-3 垂直入射的脉冲法

把发射和接收脉冲加到示波器上就可得到类似于图 2-4 的波形。出现的多个接收脉冲对应于声波在试样中来回反射多次的结果。以反射为例，在发射和第一接收脉冲之间或在每两个相继接收脉冲之间，声波在媒质中走了 $2l$ 的路程，如能测量出相应的时间间隔 $2t$ ，就可以求出声速 $c = 2l/2t$ 。而测量这段时间 $2t$ 的方法很多，如传播时间法、回鸣法、脉冲迭加法和脉冲重合法等。而且随着相关技术的进步，测量精度也越来越高。

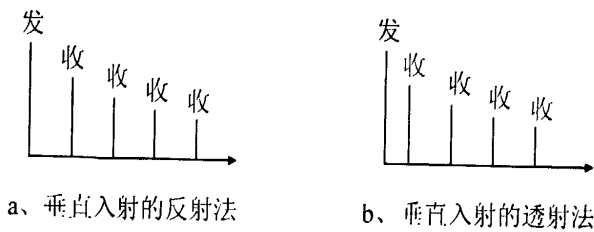


图 2-4 示波器上的脉冲波形

2、声阻抗法

声阻抗法也是一种较常用于媒质特性分析的技术。在这种技术中，所测定的声学量是换能器对媒质的辐射阻抗率。如果发射换能器在媒质中激起的是平面纵波行波，则辐射阻抗率就是声阻率 ρc 。当两种媒质的声速 c 几乎相同，但密度 ρ 有很大不同时，往往可以根据 ρc 的测量来加以区别。在同时测得声速的情况下，也可以用这种方法来测量液体的密度 ρ 。如果换能器是在流体中做弯曲振动的，则其辐射声阻抗率将与流体的密度 ρ 有关，因而使换能器的共振频率随 ρ 而变化，这也是一种可以精确测定液体密度的原理。在用这种方法测得流体的密度后，就可以推算出相关的浓度参数。

3、声衰减法

通过分析声衰减特性测定浆体浓度是另一种超声检测方法。例如可以应用

在测定浆体的浓度、粒子分布和大小等场合。

超声波在浆体中主要是以平面纵波的方式传播。假设一平面纵波在浆体中传播，当传播距离为 x 时，则其振幅随传播距离按指数规律衰减，如图 2-5 所示。

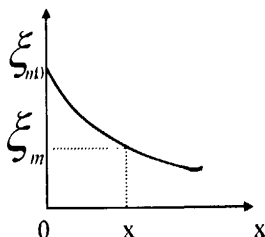


图 2-5 振幅变化图

即

$$\xi_m = \xi_{m0} e^{-\alpha x} \quad (2-2)$$

式中， ξ_m — 平面波传播了一段距离 x 后的振幅；

ξ_{m0} — $x=0$ 时的振幅；

α — 浆体对声波的衰减系数。

而声波的振幅与换能器上电信号的振幅成比例，所以由式 (2-2) 可得：

$$\alpha = \frac{1}{x} \ln \left(\frac{\xi_{m0}}{\xi_m} \right) = \frac{1}{x} \ln \left(\frac{V_0}{V} \right) \quad (2-3)$$

式中， V_0 — 加在发射换能器上的电信号（激励信号）的幅值；

V — 接收换能器上接收到的电信号的幅值。

另外，浆体的固相浓度与 α 成一定比例，由此可知，通过测量加在发射换能器上电信号的幅值 V_0 和接收换能器输出的电信号幅值 V ，计算出二者的相对衰减量，就可测得浆体的浓度。

浆体声衰减的特性由声衰减系数 α 表示， α 是一个与浆体多种物理特性有关的复杂的物理量，一般可以表示为：

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_{vis} + \alpha_{therm} + \alpha_{sc} + \alpha_{relax} \quad (2-4)$$

α_0 — 声吸收系数， α_{vis} — 粘度损失系数， α_{therm} — 热损失系数， α_{sc} — 散射损失

系数, α_{relax} —弛豫损失系数。Urlick、Allegra、Harker 等人研究并改进了液体超声特性的数学模型, 给出了声衰减与液体特性的关系。但浆体中的声衰减与浆体的吸收特性、粘度、温度、固体颗粒尺寸等因素之间的关系复杂。在外界因素中, 与其他因素(如压强)相比, 温度是对测量结果影响很大的一个因素, 需要对其影响进行补偿。声衰减的绝对测量很难做到。其原因是超声信号的强度变化不只是声衰减的结果, 其它因素对信号的衰减也有很大影响, 如界面的反射、声束扩散和传感器特性的漂移。所以, 在工业测量过程中, 往往采用测量相对声衰减量进行浆体特性分析的方法。

4、同时采用上述三种方法中的某几种方法, 来提高测量性能

近年来, 国内外研究表明采用声速特性和声阻抗特性相结合的方法可以提高超声传感器的测量性能, 获得更好的测量效果。

对于平面纵波, 声阻抗 $Z = \rho \times c$, 其中 ρ 为媒质密度, c 为声波在媒质中传播的速度。如图 2-6 所示, 当超声波从一种媒质垂直入射到第二种媒质时, 声反射系数 R 和声传输系数 T 与声阻抗有如下关系:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2-5)$$

$$T = 1 - R \quad (2-6)$$

Z_1 为第一种媒质的声阻抗, Z_2 为第二种媒质的声阻抗。

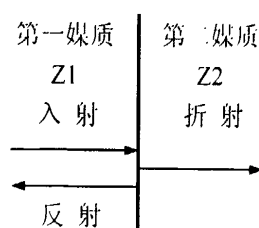


图 2-6 垂直入射的反射和折射

通过测量声波的幅度就可以确定反射系数 R , 进而确定出待测声阻抗 Z_1 (Z_2 已知); 声速 c 可通过测量定长距离(比如管道直径)的超声传播时间来测定, 由此可以确定媒质密度 ρ , 最后再推算出浓度。

上面分析介绍了超声测量浓度的几种技术方法。当需要采用声学方法来测定一个非声量时, 在声速、声衰减和声阻抗这三种技术途径中, 应选取与被测

的非声量关系密切的那种方法作为测量方法。

2.6 检测方法的选择

通过对以上几种浓度检测技术的比较,针对浆体的特点及浓度测量的要求,超声测量技术具有其他几种检测技术不可比拟的优点,而这些优点使其在工业测量领域越来越受到重视,获得了日益广泛的应用。故本课题选择了基于超声波浓度测量技术的浆体浓度检测系统的设计方案。

在本检测仪中,采用哪种超声方法来测量浆体浓度是需要首先解决的问题,科学合理地选用一种超声测量方法至关重要。

前面提到,超声波在媒质中传播时,媒质的声速、声阻抗和声衰减等超声量都和媒质的特性及状态有关。通过测量这些声学量,就能了解被测媒质的特性或状态的变化。因此,超声检测中常用的三种测量方法是声速法、声阻抗法和声衰减法。下面对三种测量方法的特点作一比较,进而选出本测试系统所采用的方法。

1、声速法

虽然测量声速的方法很多,但声速测量浓度的方法多用于测量某些成分已知的混合气体浓度、二元混合溶液浓度方面,而且测量溶液浓度时多用于中高浓度的场合。在多元混合溶液及多相混合流体中声速与浓度往往表现出非线性关系。当各相的声速相近时,声速测量对多元系统的浓度变化不敏感。另外声速受外界温度变化的影响较大。

2、声阻抗法

声阻抗的变化和浓度关系不明显、不直接、方法本身也比较复杂,而且大多数应用场合也需要同时测量声速,多用于测量硬度、强度和粘度等场合。

3、声衰减法

超声波在媒质中的衰减主要包括下列三个方面:第一,扩散衰减,在严格的平面波中这一衰减可以忽略,如果扩散不严重,也可以修正;第二,吸收衰减,这种衰减的原因很多,例如粘性、热传导以及边界摩擦等等都是;第三,散射衰减,媒质本身的晶粒结构、媒质中的悬浮粒子、杂质和气泡等都可以构成超声波的散射体而引起这种衰减。这三种衰减随频率变化的规律各不相同,

如果选择适当的频率，一定媒质的某种衰减就可以有突出的表现，如果与这种衰减有关的某种媒质特性发生变化时，这种衰减就能发生明显的变化，这就是利用衰减进行媒质特性分析的理论依据。而浓度的变化和超声波的幅值变化有直接、明显的关系。

选取超声测量方法时，按照应选取与被测的非声量关系密切的那种方法作为测量方法的原则，结合以上分析，前两种方法不适宜于用来测量浆体浓度。因此在本检测仪中，我们选用测量超声衰减的方法来检测涂料浆浓度。

第三章 浆体浓度检测仪的设计方案

本章将针对适合浆体浓度检测的超声衰减法提出本检测仪的设计方案。

3.1 检测仪的总体设计要求

超声衰减法检测浓度的理论依据公式是 $\xi_m = \xi_{m0} e^{-\alpha}$ 。这就要求检测仪能以尽可能高的精度测量出发射信号和接收信号的幅值，并且应能对所接收到的信号进行处理、显示。而且由于实验过程中需要用到多种频率的信号，所以要求所产生的激励信号频率应该可调。这些功能由硬件和软件相互配合来实现。后两章将对检测系统从硬件和软件两方面进行设计和分析。

3.2 检测仪的设计方案

3.2.1 检测仪原理框图

本课题采用测量超声衰减的方法进行浆体浓度的检测。激励信号选用连续的正弦波信号，只要测量出发射信号的幅值和接收信号的幅值，就可以得到超声波在一定浓度的浆体中传播了一段距离后的衰减程度，其衰减程度的大小用衰减系数 α 来表示。不同的 α 值对应不同的浆体浓度值。

检测仪原理框图如图 3-1 所示。

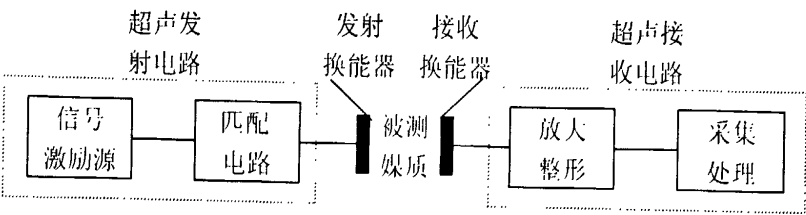


图 3-1 超声测量原理框图

具体的工作过程是：在连续波正弦波信号的激励下，超声发射换能器以厚度振动模式向浆体发送超声波（平面纵波），使超声波与被测浆体发生交互作用。当超声波到达接收换能器时，其幅值会发生衰减，造成接收波形的幅值比发射

波形的幅值小，幅值衰减程度的大小与浆体浓度的大小有关系，而且这种关系比较直接、明显。这样通过测量超声波的衰减程度（用衰减系数 α 表示），就可以得知浆体的浓度信息。

超声发射电路发出的激励信号加在发射换能器上，发射换能器产生的超声波信号穿越被测媒质后到达接收换能器，同时被转换成电信号输出到后续电路进行处理、分析。

3.2.2 检测仪电路设计方案

检测仪电路部分主要由单片机控制电路、波形发生电路、功率输出电路、接收放大电路、检波电路、通信接口电路超声波发射器和接收器等几部分组成。主要完成超声信号的发射、接收处理等任务。其示意图如图 3-2 所示。

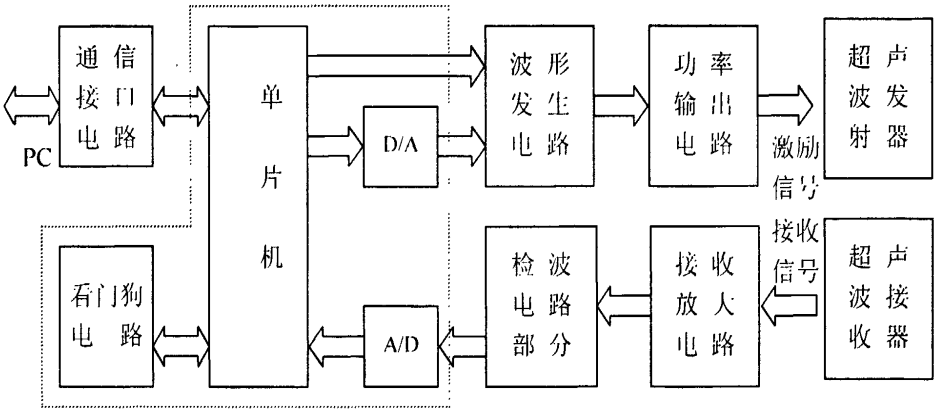


图 3-2 检测仪电路框

各部分电路功能如下：

1. 单片机控制电路

该部分电路主要完成系统的控制、运算等任务。

2. 波形发生电路

该部分电路主要用于产生频率可调的正弦波、三角波及方波。

3. 功率输出电路

该部分电路主要用于对波形发生电路产生的正弦波进行功率放大。

4. 接收放大电路

由于接收换能器输出的信号比较弱，所以输出信号需要放大后，才能被后

续电路进行处理。

5. 检波电路

接收换能器输出的正弦波信号经放大后, 送到幅值检波电路进行检波处理, 得到幅度近似为正弦信号幅值的直流信号。

6. 通信接口电路

该部分电路来实现单片机和上位机 (PC 机) 之间的通信。

7. 超声发射器和接收器

实现正弦波信号与超声波之间的转换。

第四章 检测仪硬件设计

作为整个检测仪的硬件平台,依据测量原理,硬件系统应具备信号发射、功率驱动、信号接收、信号处理、与上位机通信及相关的控制功能。本章将完成硬件电路的设计。

检测仪的详细电路图见附录。

4.1 单片机控制电路设计

单片机控制电路主要由 MCU、A/D、D/A 和复位监测电路(看门狗)几部分组成。

由于 MCS51 系列单片机具有性能稳定、工作可靠、价格低廉等特点,其应用相当广泛。一个 MCS51 系列的单片机(如 Atmel89cxx)内部包含有 RAM、FLASH ROM、两个或者三个 16 位的定时器/计数器、一个通用异步串行通信控制器(UART)等多种资源。因此本系统选用 AT89C2051。A/D 选用 12 位的 MAX187、D/A 则选用 12 位高精度的串行 MAX531。采用 MAX813 监控电路,可为 CPU 提供上电复位、掉电复位、手动复位、看门狗及电压比较器功能。

该部分电路主要完成系统的控制、运算等任务。MCU 的控制信号经 MAX531 数/模转换后输出到下一级的信号发生电路,控制输出的激励信号的频率。换能器的接收信号经放大、检波电路处理后,通过 A/D 芯片 MAX187 送入 MCU。单片机通过 MAX232 与 PC 进行通信。

4.2 波形发生电路设计

波形发生电路的核心部件是集成化波形发生芯片 MAX038。MAX038 是美国 MAXTM 公司推出的一种高频精密波形发生器件,它比起以前比较常用的函数发生器如 8038 系列,从频率范围、频率精确度、对芯片及波形的控制性能、用户使用的方便性等方面都有了很大的提高,因此可广泛应用于波形的产生、压控振荡

器、脉宽调制器、频率合成器以及 FSK 发生器等。只需连接少量的外围部件，就可产生从 0.1Hz 到 40MHz 的三角波、正弦波和方波。

MAX038 内部框图如图 4-1 所示。

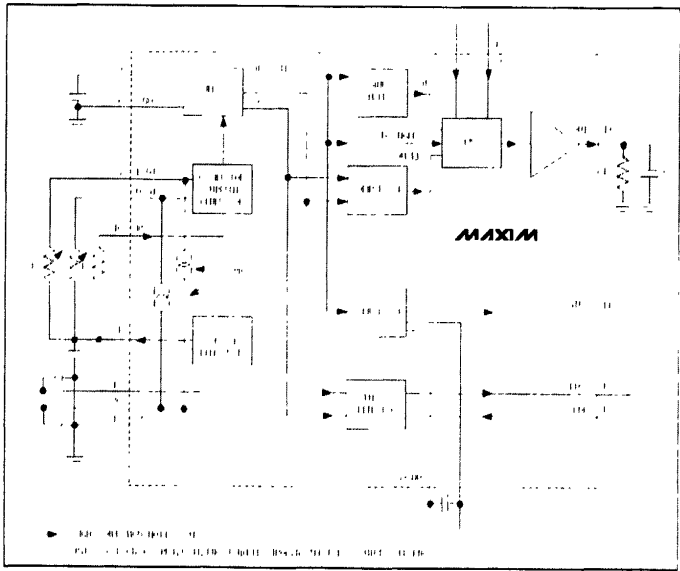


图 4-1 MAX038 内部原理框图

MAX038 工作电压采用±5V，功耗为 400mW。其内部的工作原理是：内部提供 2.5V 基准电压，通过外接可调电阻 R3、R1 向振荡电流发生器的 IIN 端和 FADJ 端提供频率粗调电流和频率细调电压；通过 R2 向 DADJ 端提供脉冲占空比调节电压。这三种参数经振荡电流发生器处理后，向振荡器提供充电电流，该电流对外接电容 C_i 充电，形成振荡，产生三角波信号。进而产生正弦波、方波和三角波信号。由 A0、A1 控制端选择其中的一种波形输出。

本系统采用了倍频方式使 MAX038 的输出频率加倍，则最大输出频率可以扩展到 40MHz。输出波形的频率 F_0 可用下面的公式表示：

$$F_0 = \frac{2 \times I_{IN}}{C_i} \quad (i = 1 \sim 8) \tag{4-1}$$

式中 I_{IN} 为输入 MAX038 IIN 引脚的频率控制电流， C_i ($i = 1 \sim 8$) 为连接在 MAX038 的 COSC 引脚和地线间的一组外部电容。

系统设计了 MAX038 IIN 引脚的电流 I_{IN} 由单片机和 D/A 转换器进行控制，调

节范围为 $80\mu A$ — $400\mu A$ 。本波形发生电路的输出频率分为 8 个频段，依据式 (4-1) 计算得出各个频段范围，如表 4-1 所示。选定 C_i 后，可在对应的频段内调节 I_{IN} 的大小以达到控制输出频率的目的。

表 4-1 电容 C_i 与频率对照表

i	1	2	3	4	5	6	7	8
C_i	20pf	0.1nf	0.47nf	1nf	4.7nf	0.01 μ f	0.047 μ f	0.1 μ f
F_0 (Hz)	8M-40M	1.6M-8M	0.34M-1.7M	160K-800K	34K-170K	16K-80K	3.4K-17K	1.6K-8K

系统中，输出波形的选择由单片机的两个 I/O 引脚控制 A_0 、 A_1 两个引脚的逻辑电平来设定，当 $A_1=1$ 、 $A_0=X$ 时，输出波形为正弦波。

4.3 功率输出电路设计

在整个系统的测量过程中，对输出波形具有一定的功率要求。我们选用 MAX477 对输出信号进行功率放大。MAX477 是一种低噪声、高精度、高输出电流的高频运算放大器，其供电电压为 $\pm 5V$ ，-3dB 带宽可达到 300MHz，最小输出电流为 100mA。如图 4-2 所示，系统中 MAX477 以负反馈放大器的方式进行工作，即 MAX038 的输出端 OUT 通过一个电阻(82 Ω) 连接到 MAX477 的 IN-端，以一个 1K Ω 的可变电阻作为反馈电阻，通过调节反馈电阻值就可以改变输出电压放大倍数，电压最大可放大 10 倍。因此，整个系统的输出功率可达到数瓦。

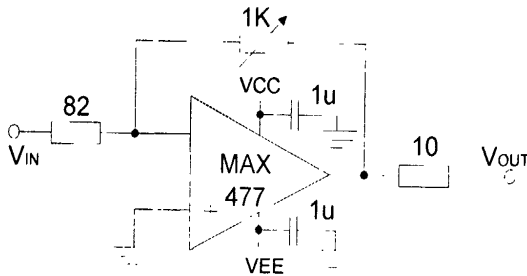


图 4-2 功率输出电路示意图

另外，由于放大电路的负载是作为发射换能器的压电陶瓷片，属于容性负载，

所以在二者之间串联一个 10Ω 的电阻，以驱动发射换能器。正、负电源引脚和地之间各加一大小为 $1\mu F$ 的去耦电容。

4.4 接收放大电路设计

由于接收换能器输出的信号比较弱，所以输出信号需要放大后，才能被后续电路进行处理。采用 MAX477 组成负反馈放大器就可以满足要求。

4.5 检波电路设计

接收换能器输出的正弦波信号经 MAX477 放大后，送到幅值检波电路进行检波处理，得到幅度近似为正弦信号幅值的直流信号。这个直流信号通过 A/D 转换器送到 MCU，初步处理后送到上位机进行显示处理（也可直接通过高速数据采集卡送到上位机）。系统中采用二极管检波电路。电路如图 4-3 所示。

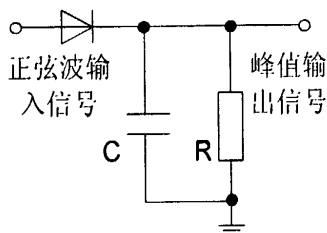


图 4-3 二极管检波电路图

要实现幅值检波测量，上图电路中各元件的参数值必须满足下面的两个条件：

$$RC \gg R_d C \quad (4-2)$$

$$RC \gg T \quad (4-3)$$

式中， R —检波器的负载电阻（即电容器的放电电阻）；

C —检波器电容；

R_d —二极管正向电阻（即电容器充电电阻）；

T —被测信号的周期。

该检波电路的优点是输入阻抗可以做得很高。其等效阻抗为 $R/2$ ，从提高输入电阻来看，希望检波器负载电阻 R 尽可能地高，但 R 的增加受到多方面的限制。

系统中，二极管选用 1N4148，这是一种快速二极管，其反向恢复时间为 4ns，反向电阻约为 $800\text{M}\Omega$ 。考虑到 R 应远小于二极管的反向电阻（否则就破坏了二极管的单向导电性），系统中 R 选用阻值为 $1\text{K}\Omega$ 的电阻，电容 C 的值为 $0.1\mu\text{F}$ 。这样当系统信号频率为 1MHz 时：

$$RC = 1 \times 10^3 \times 0.1 \times 10^{-6} \text{ s} = 100 \mu\text{s} \gg T = 1 \mu\text{s} \quad (4-4)$$

同时， R 值也远大于二极管的正向导通电阻。这样就满足了式 (4-2) 和 (4-3)，符合检波条件。

在设计实际电路之前，首先在 OrCAD 中对检波电路进行了模拟仿真，完成了初步设计。仿真结果如图 4-4 所示。

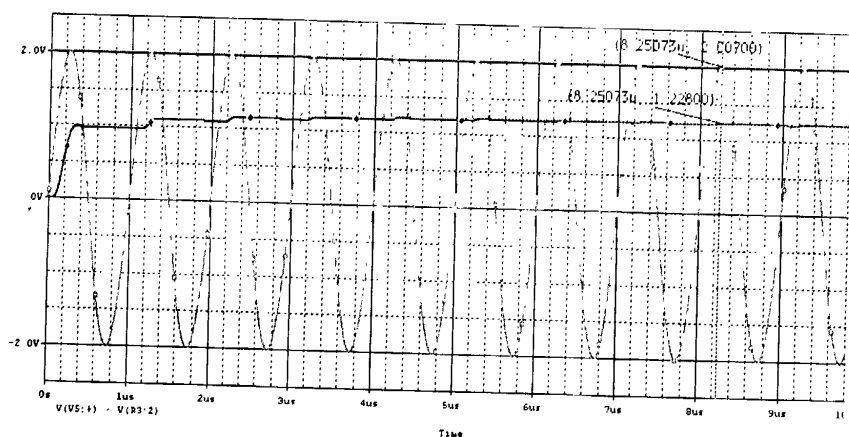


图 4-4 二极管检波电路仿真图

图 4-4 中给出的是 $0\sim 10\mu\text{s}$ 之间的仿真结果，可以看出刚开始时，有一个上升过渡过程，这之后电路逐渐达到稳定状态。图中标识的两个点分别是 $(8.25073\mu, 2.00700)$ 和 $(8.25073\mu, 1.22800)$ ，输入信号幅值与检波输出直流信号幅值之差为 0.779V ，这是由于二极管的正向压降及其他系统误差引起的。

在仿真设计完成之后，对实际电路进行了实测。表 4-2 中给出了当输入频率为 1MHz 的交流信号时，二极管检波电路的实际测量结果。输入的交流电压信号幅值以 V_A 表示，检波后输出的直流电压信号幅值以 V_D 表示。

表 4-2 二极管检波电路实测数据表

$V_A(V)$	1.125	1.256	1.551	1.752	2.007	2.262	2.529	2.770	3.034
$V_D(V)$	0.540	0.638	0.822	0.948	1.109	1.284	1.444	1.620	1.808

在实验过程中，发现当输入电压信号的幅值大于 2V 时，检波效果比较好，这主要是由于二极管本身的正向压降造成的。比较仿真结果和实测数据，当输入信号幅值同为 2.007V 时，仿真结果是 1.228V，而实测数据为 1.109V，这个差异说明实测电路中有一些其他系统误差影响了测量结果。

4.6 通信接口电路设计

测试系统中采用 MAX232 来实现单片机和上位机(PC 机)之间的通信。MAX232 的 R1OUT、T1IN 引脚分别与单片机 AT89C2051 的 RXD、TXD 引脚相连；R1IN、T1OUT 与上位机的 COM 口相连。

4.7 超声波发射器和接收器

应用超声波进行浓度检测，必须要解决的问题是选择发射与接收元件。常用的是依据压电效应和逆压电效应进行电能和超声能量转换的压电换能器。本检测仪中选用的是压电陶瓷片。

4.7.1 超声压电陶瓷片的等效电路及参数分析

本检测仪中选用的换能器—压电陶瓷片规格为：直径为 10mm 的圆形片、单面翻边电极。其示意图如图 4-5 所示。

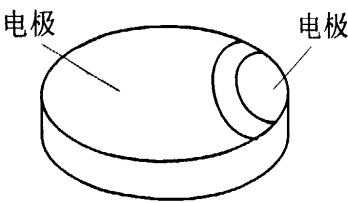


图 4-5 压电陶瓷片示意图

当压电陶瓷片受到外电场作用时，发生与外加交变电压相同频率的振动，从而产生同频率的超声波。系统中选用的压电片以厚度振动模式工作。所谓厚度振

动模式，即陶瓷片沿厚度方向上作一维振动的工作模式，产生平面纵波。当压电片作厚度振动时的等效电路如图 4-6 所示。

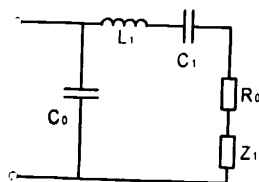


图 4-6 压电陶瓷片的等效电路图

上图中， C_0 为静止状态下压电陶瓷片的电容， Z_1 为负载阻抗，反映周围媒质对换能器的影响，它决定于周围媒质的特性和周围媒质中的波动情况。当陶瓷片在机械共振频率处发生共振时， L_1 、 C_1 相调谐。所以当工作时，由于 C_0 的影响，压电陶瓷片是一个容性负载。

压电陶瓷片等效电路的 Q 值是衡量压电片的重要指标，压电片的 Q 值可以用两类 Q 值来衡量，即机械 Q 值 Q_m 和电 Q 值 Q_E 。由图 3-7（等效电路图）分析可知，机械 Q 值就是串联机械支路的 Q 值，在空载（ $Z_1=0$ ）和有负载（ $Z_1=R_1$ ）时的机械 Q 值 Q_{m0} 和 Q_m 分别是：

$$Q_{m0} = \frac{L_1 \omega_0}{R_0} = \frac{1}{C_1 \omega_0 R_0} \quad (4-5)$$

$$Q_m = \frac{L_1 \omega_0}{(R_0 + R_1)} = \frac{1}{C_1 \omega_0 (R_0 + R_1)} \quad (4-6)$$

在机械支路的串联共振频率时，从电路的角度来看，整个换能器相当于 C_0 和 R_0 （或 $R_0 + R_1$ ）相并联，所以空载或有负载时的电 Q 值 Q_{E0} 和 Q_E 分别为：

$$Q_{E0} = C_1 \omega_0 R_0 \quad (4-7)$$

$$Q_E = C_1 \omega_0 (R_0 + R_1) \quad (4-8)$$

在超声测量中，一般希望有较低的 Q_m 和 Q_E 。在制作超声探头时，通常用浇注吸收块来降低 Q_m ，用和 C_0 并联电感或电阻的办法来降低 Q_E 。

另外，压电陶瓷片的谐振频率也是一个很重要的参数。

4.7.2 超声压电陶瓷片相关参数的分析与研究

要实现超声检测浆体浓度的目的，需要对压电陶瓷片进行实验选型并验证所采用测量方法的可行性。下面就主要以涂料浆为测量对象，对如何通过实验进行压电陶瓷片选型、并验证超声衰减法测量涂料浆浓度的可行性内容进行详细研究。

4.7.2.1 测试分析方法设计

由于不同浓度的浆体的衰减特性与超声工作频率有关，为了确定测试系统中选用哪种规格的压电陶瓷片，最终验证超声衰减法测量涂料浆浓度的可行性，需要进行一系列实验来测定。这里压电陶瓷片需要确定的参数主要是中心频率（标称频率），即选用哪种中心频率的片子。

为此，首先需要设计一个科学合理的实验测试方法：本论文中将测试分为静态测试和动态测试两种。通过静态测试来验证声衰减法测量涂料浆浓度的可行性，以及来确定系统中最终所选用的压电陶瓷片的型号。动态测试则更好地模拟了实际生产现场，其目的是来测试浆体的流速对声衰减的影响、进一步验证声衰减法测量浆体（涂料浆及其他浆体和溶液）浓度的可行性。在两种测试中，配制不同浓度的涂料浆进行测试。最后得到声衰减和涂料浆浓度、流速之间的关系，为系统的最终实现奠定可靠的实验基础。

另一方面需要依据所确定的实验测试方法来研究最佳的测试装置，以便以后实现最终的仪器化测试目的。在设计测试装置时，需要考虑的因素是：

- 1、测试装置应尽可能好地模拟实际生产现场；
- 2、要能保证测试过程的稳定性和可重复性；
- 3、测试装置要有尽可能强的抗干扰能力，以此来提高测量结果的可靠性和准确性。

下面分别对静态和动态测试方法、实验进行详细介绍并对实验结果、所得数据进行详细分析研究。

4.7.2.2 实验设计

实验的目的——一是从中心频率分别为 0.8MHz、1MHz、1.5MHz、2MHz、2.5MHz、3MHz 的压电陶瓷片中选出合适频率的片子，作为测试系统的压电换能器；二是验证超声衰减法测定浆体浓度的可行性以及确定一些要解决的技术问题。为此设计了相应的测试装置，其示意图如图 4-7 所示。

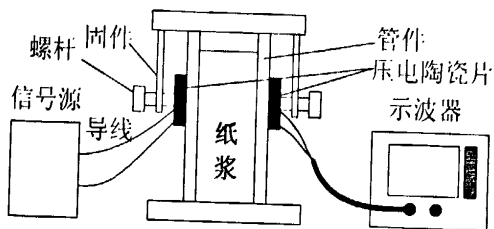


图 4-7 系统测试装置示意图

如图 4-7 所示，涂料浆盛于—实际管件之中，以便更好地模拟实际使用环境。图中黑色部分表示压电陶瓷片。信号源输出接发射换能器，接收换能器的输出则连接—高频数字示波器，在示波器上直接观测所得信号。系统中信号的频率比较高，为了降低干扰，实验中的导线选用屏蔽导线。

系统上电工作后，信号源发出与压电陶瓷片相应频率的正弦波作为发射换能器的激励源，发射换能器在信号源的激励下，依据逆压电效应、按厚度振动模式产生超声波，该声波穿过浆体后，到达接收换能器，依据压电效应，接收换能器产生同频率的正弦波信号。接收到的这一正弦波信号由于是穿过涂料浆后的信号，其幅值已经发生了衰减，较加在发射换能器上的信号的幅值小，在同样的条件下，衰减的程度与涂料浆的浓度之间有一确定的关系。所以测量出该衰减就可以得知涂料浆的浓度信息。这就是声衰减法测量浆体浓度的原理。

在测试过程中，由于压电陶瓷片的标称频率和实际频率往往不相同，所以需要在标称频率附近调整激励信号的频率，使接收信号的幅值达到最大，此时对应的频率就是系统中超声信号的工作频率。

为了研究超声波在不同浓度涂料浆中的衰减，配制了浓度分别为 0、0.50%、1.0%、1.56%、2.0%、2.5%、2.94%的涂料浆。同时，为了保证测量的可重复性，安装好一种型号规格的陶瓷片后，直到测量完各个浓度值的涂料浆后，再重新安装另一种型号的陶瓷片进行测量。这样可以避免由于因多次安装同一种陶瓷片而引起的测量误差。实验时，将不同浓度的涂料浆倒入容器中，进行测试。

4.7.2.3 实验结果与分析

首先对中心频率分别为 600KHz、800KHz、1MHz、1.5MHz、2MHz、2.5MHz、3MHz 和 5MHz 的压电陶瓷片进行了初步实验测试，以水为媒质。实验结果表明，频率为 2MHz 以上的陶瓷片接收信号发生了失真，频率为 600KHz 的陶瓷片效果也不是很理想。而另外三种频率的陶瓷片则有理想的效果。因此，我们最后选用频率为 800KHz、1MHz、1.5MHz 三种型号的陶瓷片作为系统中的换能器，进行后续对不同浓度涂料浆的静态、动态测试。相关实验数据如表 4-3 所示。

表 4-3 压电陶瓷片静态测试数据表

频率(Hz) \ 浓度		0.0000	0.0050	0.0100	0.0156	0.0200	0.0250	0.0294
800K	V 发(V)	6.83922						
	V 收(mv)	620.13	596.078	563.66	530.196	498.824	454.902	349.281
	a (Np/m)	43.646	44.366	45.381	46.494	47.603	49.279	54.083
1M	V 发(V)	6.83922						
	V 收(mv)	616.85	551.111	534.379	493.595	471.634	421.438	272.95
	a (Np/m)	42.525	45.791	46.351	47.795	48.622	50.668	58.566
1.5M	V 发(V)	6.46275						
	V 收(mv)	577.255	528.104	477.909	427.712	370.196	324.183	221.177
	a (Np/m)	43.919	45.537	47.353	49.370	51.996	54.409	61.361

表 4-3 中 $V_{发}$ 表示加在发射换能器上的激励信号的电压峰—峰值， $V_{收}$ 则是从示波器上读到的接收换能器输出信号的电压峰—峰值。信号的衰减程度用衰减系数 α 来表示，单位是奈培/米，其与激励信号的幅值和接收信号幅值的关系如下：

$$\alpha = \frac{1}{x} \ln \left(\frac{V_{发}}{V_{收}} \right) \tag{4-9}$$

式中， x 一发射换能器和接收换能器之间的距离；

$V_{发}$ 一激励信号的电压峰—峰值；

$V_{收}$ 一接收信号的电压峰—峰值。

这样，我们根据直接测量得到的发射信号幅值和接收信号的幅值，就可以换算出衰减系数 α 的值，进而建立超声衰减系数 α 和涂料浆浓度(以 c 表示)的关系，从而验证超声衰减法测量涂料浆浓度的可行性。

为了直观形象地显示测量结果，采用 Matlab 对所得数据进行了处理。

1、中心频率为 800KHz 的压电陶瓷片

表 4-3 中，频率为 800KHz 的压电陶瓷片的实验数据经 Matlab 处理后得到的曲线如图 4-8 所示。

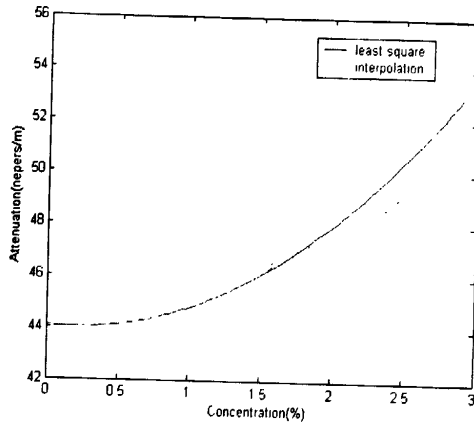


图 4-8 800KHz 的压电片的浓度—衰减曲线图

图中显示的是中心频率为 800KHz 的压电陶瓷片的超声衰减—浓度曲线。横坐标表示的是涂料浆浓度值，纵坐标则是声衰减系数 α 值，虚线表示的是数据经过插值法处理后得到的图形，实线则是数据经过最小二乘法处理后得到的图形。

从两条曲线中，都可以看出：超声衰减和涂料浆浓度成单调关系。而且，在实际工业现场中，涂料浆的浓度只是在一个很小的范围内变化，在这个范围内二者的关系就可以按线性关系进行处理。这样就建立起超声衰减和涂料浆浓度之间的关系，为应用超声衰减法测量浆体浓度提供了实验依据，从而验证了该方法测量浓度的可行性。

2、中心频率为 1MHz 的压电陶瓷片

表 4-3 中，频率为 1MHz 的压电陶瓷片的实验数据经过 Matlab 处理后得到的曲线如图 4-9 所示。

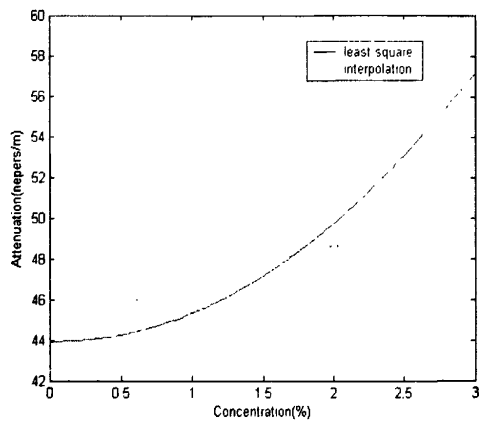


图 4-9 1MHz 的压电片的浓度—衰减曲线图

3、中心频率为 1.5MHz 的压电陶瓷片

表 4-3 中，频率为 1.5MHz 的压电陶瓷片的实验数据经过 Matlab 处理后得到的曲线如图 4-10 所示。

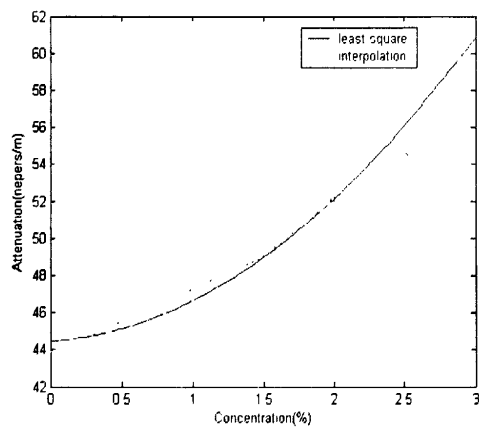


图 4-10 1.5MHz 的压电片的浓度—衰减曲线图

比较以上三种型号压电陶瓷片的实验曲线，并分析表 4-3 中的数据，可以看出，频率为 1.5MHz 的陶瓷片灵敏度较其他两种好些。也就是说，在穿过同一种浓度的涂料浆后，随着声波频率的不同，其衰减程度也不同。一般来说，超声的声衰减随着频率的增长而增大。这表明，在全面考虑了测量范围和灵敏度的情况下，可以按照实际需要选择不同频率的压电陶瓷片。

第五章 检测仪软件设计

检测仪的功能是由软件配合硬件来实现的。软件部分配合硬件完成波形的选择、参数的设定、信号的处理、显示等功能。

该软件由 51 汇编语言编制，完成波形的选择、频率的设定、接收信号的初步处理以及与上位机通信等任务。由主程序、D/A 转换子程序、A/D 转换子程序、T0 定时中断子程序和串行口中断子程序组成。各程序的程序框图如图 5-1 所示。

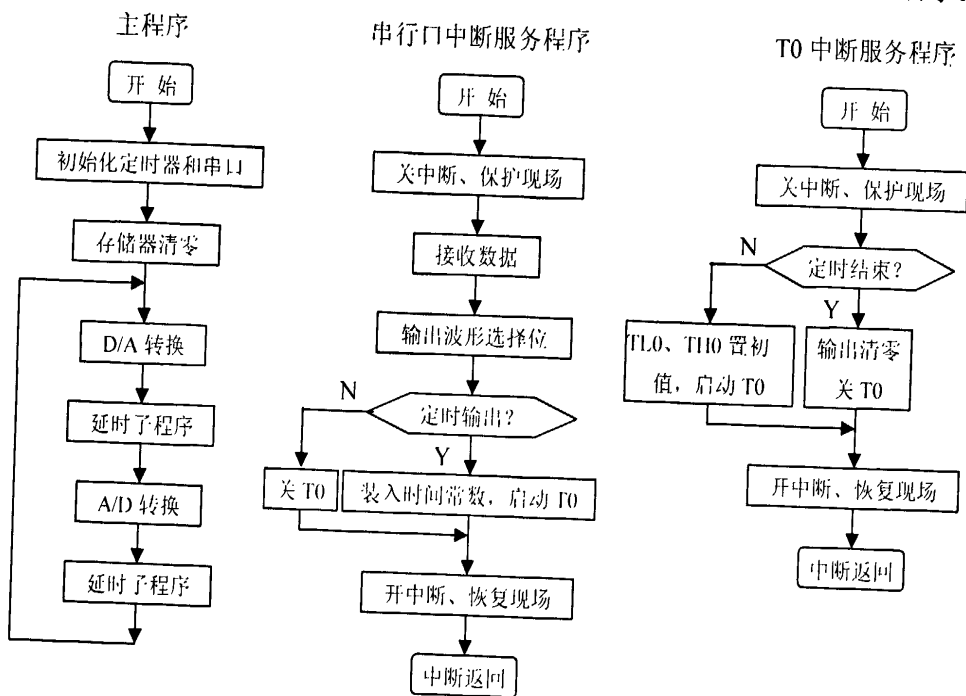


图 5-1 主程序及各子程序流程图

主程序：完成系统的初始化等功能。

D/A 转换子程序：波形发生芯片 MAX038 的频率调节输入电流 I_{IN} 的大小由 D/A 转换子程序控制产生。由上位机设定的输出信号频率值，存放于 30H、31H 中，经 D/A 转换子程序转换后，从单片机引脚 I/O 口输出至 I_{IN} ，从而完成输出信号频率值的自动设定。

A/D 转换子程序：接收换能器的输出信号在放大、检波后，经 A/D 转换电路转换成数字量后，由引脚 I/O 送入单片机中，A/D 转换子程序则对其进行接收、处理。接收到的数字量存放与 34H、35H 中，采用求取 256 次平均值的方法进行软件滤波处理，处理后的结果送到上位机。

T0 定时中断子程序：完成瞬时信号的输出功能。信号的输出方式有瞬时输出和连续输出两种。当选择瞬时输出时，输出信号持续时间的长短由 T0 中断子程序控制完成。

串行口中断子程序：完成与上位机的通信功能。输出信号的各种参数设定、输出控制以及下位机测量结果的传送都要涉及到上位机与下位机的通信，这些功能则由串行口中断子程序完成。

系统中的波形选择（正弦波、三角波和方波）、频率大小、波形连续输出/瞬时输出等各控制信号由单片机发出，控制 MAX038 产生符合要求的波形。接收换能器的信号经放大、检波、A/D 转换后，送到单片机中进行 256 次平均值软件滤波，最后通过串行口送到上位机处理、显示（也可直接通过高速数据采集卡送到上位机）。

第六章 浆体流速对测量结果的影响及误差分析

6.1 浆体流速对测量结果的影响

工业浆体绝大多数情况是通过一定直径的管道流动的。由于浆体粘度等因素的影响管道中浆体的流速分布不均匀。当在紊流状态下，对于光滑圆管来说，管道内浆体的速度公式如下：

$$u(r) = \left\{ 1 + \sqrt{\frac{\lambda}{2}} [1.875 + 1.25 \ln(1 - \frac{r}{R})] \right\} \bar{u} \quad (6-1)$$

即距管轴线距离为 r 点流速 u 与平均流速 \bar{u} 有着对数关系。式中 λ 为光滑圆管的阻力系数，它是流体雷诺数的函数； $R = \frac{D}{2}$ 为圆管半径。在管轴线处流速为最大值，而趋近于管壁附近时，流速按对数规律急剧下降到零。

由于流速分布的不均匀，在管道内流动的浆体对超声波在其中的传播路径有一定的影响，其路线轨迹如图 6-1 所示。

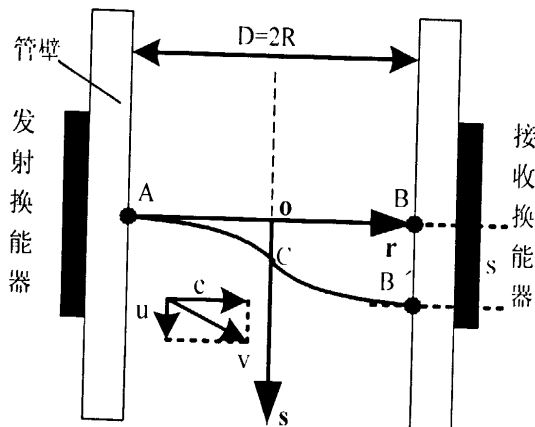


图 6-1 流动浆体中超声传播轨迹示意图

如上图所示，当浆体静止时，超声波在浆体中传播的轨迹为直线 AB，于 B 点处到达接收换能器。而浆体流动时，由于超声波在流体中任一点的速度 v 等于静止浆体中声速 c 与该点浆体流速 u 的矢量和，即 $\vec{v} = \vec{u} + \vec{c}$ ，而浆体的流速分布不均匀，所以超声的传播轨迹为一曲线 ACB'，于 B' 处到达接收换能器。这样就改变了超声的传播路径，造成了超声衰减程度的不同。同时，接收换能器接收到

的超声波能量也不同。但是，点 B' 相对于点 B 的偏移很小，图中 6-1 是为了分析方便夸大了这个偏移。

在图 6-1 所示的坐标系中（ r 为横坐标， s 为纵坐标），当系数 $\lambda=0.003$ 、声速 $c=1483\text{m/s}$ （ 20°C 时，水的声速）、平均流速 $\bar{u}=1\text{m/s}$ 、 $R=20\text{mm}$ 时，结合式 (3-10)，可以计算出点 B 到点 B' 的偏移距离 s 的大小为：

$$s = \int_R^r u(r) \cdot \frac{dr}{c} = 0.0276\text{mm} \quad (6-2)$$

这个距离仅为管道直径 40mm 的 0.069% 。当管道直径为 1448mm 时，这个偏移距离才为 1mm 。可见从理论分析看，流速对超声测量浓度的影响很小，在实际测量过程中完全可以忽略。下面我们就从实验的角度来进行分析研究。

通过动态实验，可以确定流速对超声衰减法测量浆体浓度的影响。而且也更好地模拟工业现场的实际情况。

实验装置的示意图如图 6-2 所示。

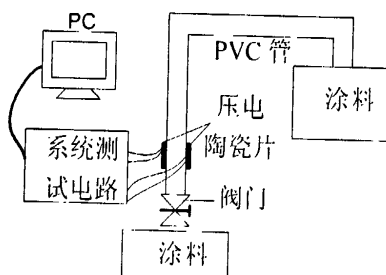


图 6-2 系统测试装置示意图

涂料浆预先盛于一容器中，发射换能器、接收换能器与系统中的硬件测试电路相连，而硬件测试电路与上位机连接。开始测试时，先测量出涂料浆静止状态下的接收正弦波信号的幅值。随后，将阀门打开，使涂料浆流动起来，测量出动态情况下的接收正弦波信号的幅值。然后对所获得的静态、动态数据进行分析，从而确定流动状态下，涂料浆的流速对涂料浆浓度的影响。实验中涂料浆的流速约为 1m/s 。

接收换能器的输出信号送到放大、检波电路处理后，原先正弦波信号的幅值被取出，将交流信号变成直流信号。A/D 转换后，被送到上位机显示出来。

装置中，涂料浆流过的管道采用直径为 20mm 和 40mm PVC 管。针对每种型号的 PVC 管、不同频率的压电陶瓷片分别测试。配置了浓度分别为 0% 、 0.1% 和 1% 的三种涂料浆，进行测试。

1、管道为 $\Phi 40\text{mm}$ 、不同频率的压电陶瓷片的测试结果

(1)、频率为 800KHz 的压电陶瓷片测试结果

当所测涂料浆的浓度为 0%、0.1%时，在静态和动态情况下分别测得的正弦信号的幅值相同，其差值为 0。而当涂料浆浓度为 1%时，在静态和动态情况下测得的数据如表 4-1 所示，为了处理方便表中同时给出了二者的差值。

表 4-1 800KHz 压电片动、静态测试数据表

$V_{\text{静}}(\text{mv})$	118.64	132.94	110.98	107.96	123.53	110.98	126.67	139.22	129.80	117.26
$V_{\text{动}}(\text{mv})$	145.49	129.80	110.98	110.98	123.53	111.12	123.53	139.22	132.94	120.39
$V_{\text{动-静}}(\text{mv})$	-3.15	-3.14	0	3.02	0	3.14	-3.14	0	3.14	3.13
$V_{\text{动-静}}/V_{\text{静}}$	-0.7%	0.72%	0	0.74%	0	0.76%	-0.74%	0	0.73%	0.75%

表中， $V_{\text{静}}$ 表示静态时示波器接收到信号的电压峰—峰值， $V_{\text{动}}$ 表示动态时示波器接收到信号的电压峰—峰值， $V_{\text{动-静}}$ 为二者的差值，而 $V_{\text{动-静}}/V_{\text{静}} = (V_{\text{动}} - V_{\text{静}}) / V_{\text{静}} \times 100\%$ ，表示相对误差。

对上表中的数据在 Matlab 中进行了处理，所得处理结果如图 6-3 所示。图中给出的是测量次数和动、静态情况下接收信号幅值的差的相对百分数（相对误差）之间的关系。

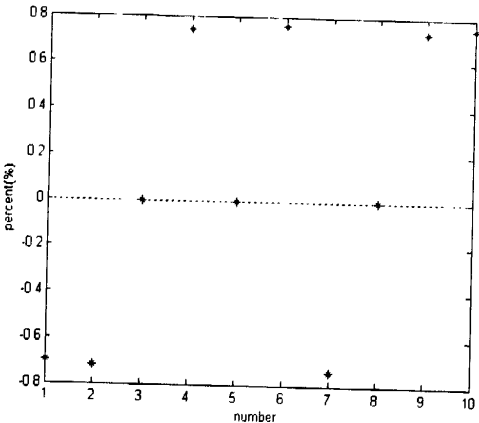


图 6-3 800KHz 压电片动态测试相对误差图

从中可以看出，动、静态情况下接收信号幅值差的相对百分数最大不超过 1%。而这些差的值为零、正值、负值都有。如果是因为流速的影响，这些值应该一直为正或负，所以引起这个差异的不是流速，而是别的因素。我们分析是由于实验装置过于简易，每次测量过程中打开阀门时可能使管道滑动而影响压电片造

成的。因此，我们认为，在理论分析上，虽然流速对浆体浓度的超声测量有影响，但是这个影响很小，以至在实际应用中可以忽略不计。

(2)、频率为 1MHz 的压电陶瓷片测试结果

与上述类似，图 6-4 为涂料浆浓度为 1% 时所得数据经 Matlab 处理后的结果。

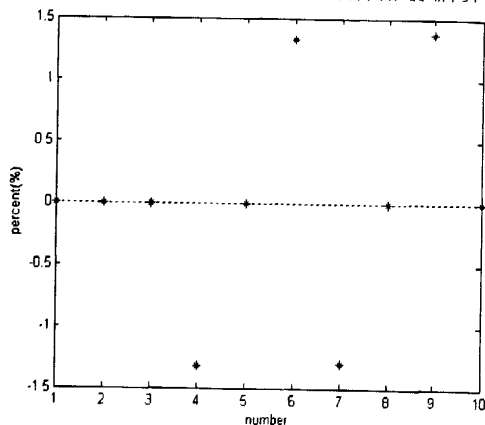


图 6-4 1MHz 压电片动态测试相对误差图

(3)、频率为 1.5MHz 的压电陶瓷片测试结果

实验结果与上述类似，图 6-5 所示是涂料浆浓度为 1% 时所得数据经 Matlab 处理后的结果。

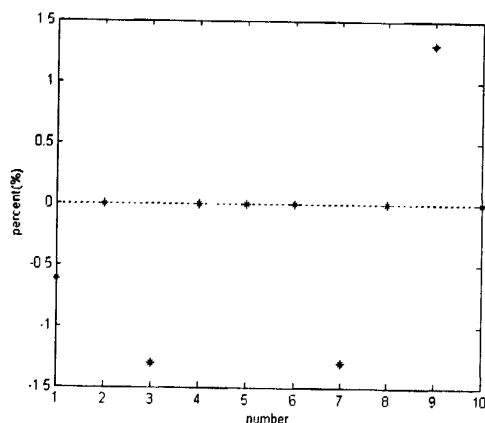


图 6-5 1.5MHz 压电片动态测试相对误差图

在上位机上用 LabVIEW 编辑了测量显示界面。并将一次连续的涂料浆浓度测量的最终结果在此界面上显示出来。该次测量过程是：在图 3-12 所示的测量装置上，打开阀门，将涂料浆由稀到浓分三次加入到容器中，这样就使流经两陶瓷片之间的涂料浆浓度发生变化，其变化范围是 0—1%。最终的测量结果如图 6-6 所示。

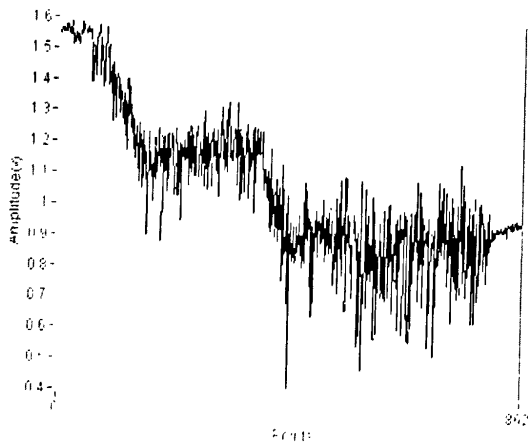


图 6-6 上位机测量结果显示图

由图中可以看出，所得曲线有明显的三个较稳定的电压值，而这正好对应了涂料浆的三个不同浓度值，与实际情况一致，进一步验证了系统方案的可行性。

为了验证超声衰减法在浓度测量应用上的广泛性，运用所设计的测试系统进一步测试了介质为一定浓度的面粉浆体、盐水溶液中的超声衰减，将测量显示结果列出如下。

1、面粉浆体

图 6-7 为一定浓度的面粉浆体在静态和动态情况下的测试结果。

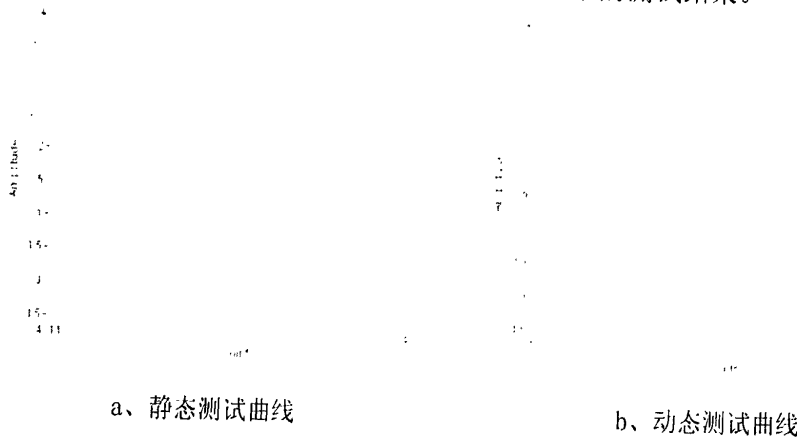


图 6-7 面粉浆体测试结果曲线

2、盐水溶液

图 6-8 为一定浓度的盐水溶液在静态和动态情况下的测试结果。

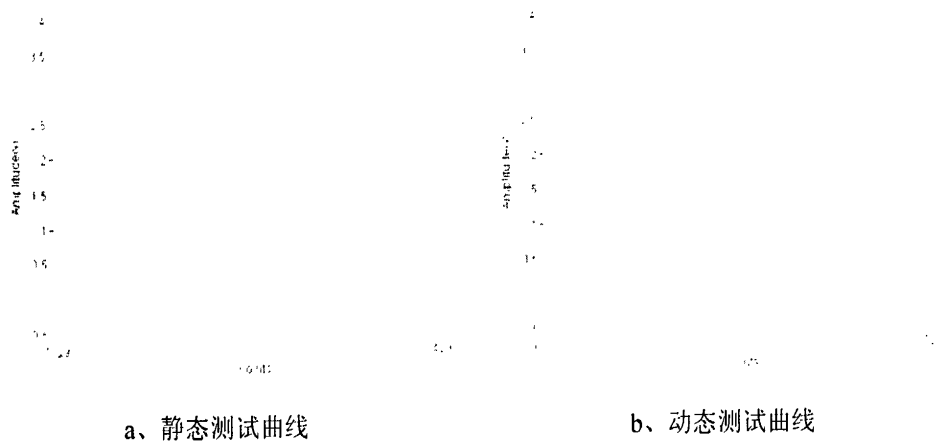


图 6-8 盐水溶液测试结果曲线

比较面粉浆体和盐水溶液的两种测试曲线图，可以看出，面粉浆体的测试曲线比盐水溶液的测试曲线波动大些。这是由于面粉浆体中有固体颗粒，而盐水溶液中则没有，所以会出现这种现象。更详细的分析，需要进一步研究浆体中固体颗粒的尺寸、形状等对超声测量的影响。而对于每种媒质来说，动、静态情况下得到的曲线差别不明显。由此进一步验证了媒质流速对超声测量浓度的影响很微弱，可以忽略。

6. 2 检测仪的误差分析

系统中误差主要包括超声换能器安装误差、检波电路误差和波形误差以及其他误差。

6. 2. 1 超声换能器安装误差

在实际使用过程中，需将超声换能器与耦合剂、保护外壳等做成超声探头。本测试系统采用超声垂直入射的方式，理论上，需要两个超声探头正对，使穿过浆体的超声波尽量被接收探头接收到，这样超声波强度的变化就更真实的反应了浆体浓度的变化。但在实际安装过程中，很难严格地做到使两个超声探头正对。这样，排除声束扩散的影响以外，就造成了超声接收探头不能全部接收到发射探头发出的超声波。另外，管道壁等超声穿过的媒质也会对超声波造成衰减。这些因素使接收到的超声波强度的变化并不唯一地反应浆体浓度的变化，形成一定的误差。但是这个误差可以在现场安装好探头以后，经过实际调试和现场标定来确

定。

6.2.2 检波电路部分误差

系统中的误差主要来源之一就是检波电路部分。由于检波电路处于测量电路输入的前置部分，所以这部分电路的性能对整个系统的影响较大。

在测量正弦波信号时，其误差主要包括以下几方面：

1、理论误差：检波器也就是峰值检测电路，其工作原理是依靠电容的充、放电，将输入正弦波信号的峰值检测出来，从而实现交流一直流转换。因此，在工作时有一个充电、放电过程，这就造成了实际峰值和测量到的峰值间存在一个差异，而且这个差异永远不可能等于零，否则检波器中就无法维持一个动态电流（即充电和放电电流），检波器也就停止工作了，这就形成了理论误差。理论误差主要是由于没有很好地满足条件 $RC' \gg R_d C$ 所造成的，可以通过很好地满足条件要求来降低这一误差，使其符合误差要求，但不能消除这一误差。当检波元件固定时，该误差可以在测量中修正。

2、频率误差：在本系统中，选用的信号频率比较高，所以，会带来高频误差，其主要原因是，检波器实际结构中存在各种分布参数的影响，以及检波管的高频特性不理想等。

由于在检波器中，两个输入端到检波管、电阻、电容之间都有一定的引线（包括各元器件本身的几何长度及其引线），故实际检波电路中总存在着引线电感以及各种复杂的分布电容，因此就造成了谐振误差。这个误差可以通过优化电路结构设计、器件选型来改善。

3、检波器非线性误差：检波器的灵敏度会受到检波二极管非线性特性的影响。当被测信号减弱时，这一影响就更加明显。这可以通过选用线性特性好、频率高的晶体二极管来降低影响。本测量系统中的检波输入信号是经过放大后再检波的，所以二极管的非线性特性影响较小。但二极管的正向压降是不能消除的。

上述几种误差都属于系统误差，一旦器件选定、工作信号频率确定和电路设计完成，就可以通过误差修正曲线加以修正。依据表 3-2（二极管检波电路实测数据表），下面给出了频率为 1MHz 的输入信号的检波误差值，以及据此得出的 Matlab 仿真误差修正曲线。分别如表 6-2 和图 6-9 所示。

表 6-2 中以 V_A 表示检波电路输入交流信号的幅值电压，以 V_D 表示检波后得到的直流信号的幅值电压， $V_A - V_D$ 为二者的差值。

表 6-2 二极管检波电路误差数据表

$V_A - V_D$ (V)	0.585	0.618	0.729	0.804	0.898	0.978	1.085	1.150	1.226
V_D (V)	0.540	0.638	0.822	0.948	1.109	1.284	1.444	1.620	1.808

图 6-9 为依据表 6-2，在 Matlab 中运用最小二乘法所拟合出的误差曲线。

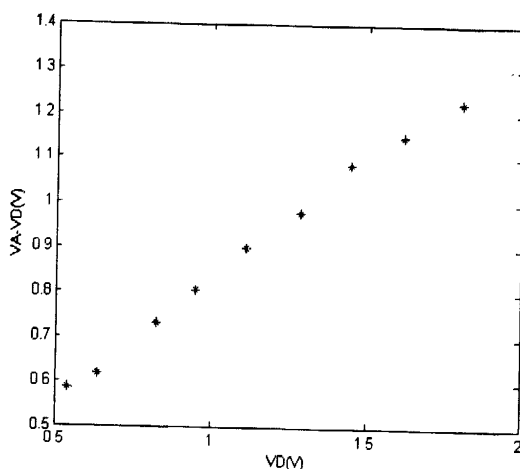


图 6-9 二极管检波电路误差曲线图

图 6-9 中的横坐标表示检波电路输出直流信号的电压值，纵坐标表示检波电路输入交流信号幅值电压值与输出直流信号电压值之差。在计算最终测量结果中，可以据此进行电压值补偿。

6.2.3 波形误差

系统中另外一个误差是被测信号的波形误差。当被测信号是纯正的正弦波信号时，用检波电路来测量有很好的效果。实际工作中，纯正弦波是没有的。在被测的正弦波发生失真的情况下，由于波形引起的误差往往是较大的。这主要是因为失真的正弦波中，除基波成分外，还含有各次谐波，这样由于各次谐波相位的不同，合成波形的峰值与基波的峰值有很大的差异。而当被测信号是非正弦波如方波、三角波等时，由波形引起的误差往往是很严重的。这也是本测量系统中选用正弦波作为压电陶瓷片激励信号的原因之一。从电路设计角度考虑，尽量选用性能良好的放大器以及提高电路的抗干扰能力，从而降低波形的失真度，减小波形误差。系统中选用 MAX477 作为检波电路输入信号的放大器。

关于系统中的其他误差如 A/D、D/A 转换时的量化误差，由于选用了 12 位精度的转换器 MAX187 和 MAX531，转换性能好，所以影响较小。

第七章 结论与展望

本文在总结各种浆体浓度测量方法的特点和工作原理的基础上,以涂料浆为测量对象,研究了超声衰减法测量流动浆体浓度的技术,并在所设计的实际测量装置中验证了其可行性与合理性。本文的主要研究内容及创造性结论总结如下:

1、在广泛、深入地了解了浆体浓度测量技术国内外发展状况的基础上,提出了运用超声衰减法测量流动浆体浓度的方法,并以涂料浆作为实验研究对象。

2、完成了测试系统的研制工作,对硬件设计和软件设计作了详尽分析,同时对其系统误差作了详尽的理论分析和实验测试,在此基础上提出了减小系统误差的相关措施。依据超声传感器的特点,经过对压电陶瓷片相关参数的详尽理论分析以及实验测试,合理地选择了压电陶瓷片的型号,提高了传感器的灵敏度。

3、运用所设计的测试系统对涂料浆、面粉浆体以及盐水溶液进行了静态和动态两种情况下的浓度测量。实验结果表明,超声衰减和涂料浆浓度成单调关系,在一定范围内可对二者按线性关系处理,从而验证了测量方案的可行性和合理性,得出了如下结论:可以运用超声衰减法测量流动浆体的浓度,测量结果受浆体流速的影响很小,在实际测量过程中,可以忽略不计。

本文的设计成果为超声检测浆体浓度技术的深入研究奠定了基础。为了使本研究成果尽快、更好地应用在实际的浆体浓度检测过程中,需要在以下几方面进一步深入研究:

1、进一步研究浆体中固相颗粒的尺寸、形状等因素对测量结果的影响,研究建立流动状态下流速、温度与超声衰减特性的数学模型,为进一步的信号处理打下理论基础。

2、进一步研究多传感器的一体化集成技术,可以从传感器的结构设计等方面提高其性能。

3、进一步探索声衰减法和声速法相结合的浆体浓度检测技术。

参考文献

- 【1】 康育英. 密度测量技术. 北京: 机械工业出版社, 1982.5.
- 【2】 卢佩等. 涂料浆浓度的在线测量方法与研究展望. 中国仪器仪表, 1994, (2): 16-19.
- 【3】 朱菊贤. 涂料浆浓度流量在线测控仪表的应用与体会. 仪表自控, 2000, (5): 35-36.
- 【4】 蓑轮, 善藏(日). 密度和浓度. 北京: 计量出版社, 1981.3.
- 【5】 陆国强等. 涂料浆浓度在线测量方法的研究. 计量学报, 2001, 21(1): 74-80.
- 【6】 M S A Abouelwafa. The Use of Capacitance Sensors for Phase Percentage Determination in Multiphase Pipeline. IEEE Transaction IM, 1980, 29(1): 24-27.
- 【7】 Xie C G. 8-electrode Capacitance System for Two Component Flow Identification Part 1, Tomographic Flow Imaging. IEE Proceedings, 1989, 136(4): 173-182.
- 【8】 金锋, 张宝芬. 电容式两相流相浓度传感器的仿真优化设计. 清华大学学报, 2002, 42(3): 380-382.
- 【9】 Huang S M. A High Frequency Stray-immune Capacitance Transducer Based on the Charge Transfer Principle. IEEE Transaction on IM, 1988, 37(3): 368-373.
- 【10】 Yang W Q. High Frequency and High Resolution Capacitance Measuring Circuit for Process Tomography. IEEE Proc-Cir Dev System, 1994, 141(3): 215-219.
- 【11】 MFM3100. Real-time Two Phase Mass Flow. www.progression-systems.com, 2002.
- 【12】 同济大学声学研究所. 超声工业测量技术. 上海: 上海人民出版社, 1977.9.
- 【13】 V. Strolojaun. Characterization of Slurry Systems by Ultrasonic Techniques. Chemical Engineering Journal, 2001, 84: 215-222.

- 【14】 M S Greenwood. Attenuation Measurements of Ultrasound in a Kaolin Water Slurry- A Linear-Dependence Upon Frequency. Journal of the Acoustical Society of America ,1993, 94(2): 908-916.
- 【15】 J A Bamberger. Ultrasonic Characterization of Slurry Density and Particle Size. American Society of Mechanical Engineers, New York, 1998.
- 【16】 姚士强. 用超声波方法检测高水基流体介质浓度的研究. 仪表技术与传感器, 2001,(9): 39-41.
- 【17】 马殿旗. 超声波污泥浓度监测仪. 中国(实用新型)专利, 00205264.4.
- 【18】 John Carlson. Ultrasonic Measurement of Particle Concentration in a Multiphase Flow. 1999 IEEE ULTRASONICS SYMPOSIUM, pp.757-760.
- 【19】 王朝阳等. 新型超声波污泥浓度计的研究. 中国机械工程, 2001, 12(3): 114-116.
- 【20】 汪兴亮等. 超声波浓度计用于检测浆体浓度的实践. 金属矿山, 1994,6(4): 38-40.
- 【21】 Julio C Adamowski. Ultrasonic Measurement of Density of Liquids Flowing in Tubes. IEEE TRANSACTIONS ON ULTRASONICS FERROELECTRICS AND FREQUENCY CONTROL, 1998, 485(1): 48-55.
- 【22】 M S Greenwood. Ultrasonic Sensor to Measure the Density of a Liquid or Slurry During Pipeline Transport. Ultrasonics, 2002, 40: 413-417.
- 【23】 Alf Puttmer. Ultrasonic Density Sensor for Liquids. IEEE TRANSACTIONS ON ULTRASONICS, FERROELECTRICS, AND FREQUENCY CONTROL, 2000, 47(1): pp.85-92.
- 【24】 A.Puttmer. Ultrasonic Density Sensor – Analysis of Errors Due to Deposits on the Sensor Surface. Sensors and Actuators, 1999, 76: 122-126.
- 【25】 A.Puttmer. Low Noise Design of Ultrasonic Tansducers. 1999 IEEE ULTRASONICS SYMPOSIUM, pp.1177-1180.
- 【26】 Jan van Deventer,An Ultrasonic Density Probe,1997 IEEE ULTRASONICS SYMPOSIUM, pp.871-875.
- 【27】 A Puttmer. High-accuracy Measurement of Pulse Amplitudes for New Applications of Ultrasonic Sensors. Sensors and Actuators, 1998, A 68:

451-459.

- 【28】Ricardo Tokio Higui. Energy Method to Calculate the Density of Liquids Using Ultrasonic Reflection Techniques. 2001 IEEE ULTRASONICS SYMPOSIUM, pp.319-322.
- 【29】Gregorio Andria. Digital Signal Processing Techniques for Accurate Ultrasonic Sensor Measurement, Measurement, 2001, 30: 105-114.
- 【30】刘镇清. 一种简便的超声波声时精密测量技术. 声学技术, 1996, 15(2): 81-84.
- 【31】朱士明等. 提高测量声时精度的“过零检测数字平均法”. 声学技术, 1990, 9(3): 36-40.
- 【32】江泽涛等. 超声乙醇浓度在线检测仪. 自动化仪表, 2001, 22(1):25-27.
- 【33】Jan van Deventer. Thermostatic and Dynamic Performance of an Ultrasonic Density Probe. IEEE TRANSACTIONS ON ULTRASONICS FERROELECTRICS AND FREQUENCY CONTROL, 2001, 48(3): 675-682.
- 【34】何建德等. 用单片机实现超声检测中的温度补偿, 仪表技术, 1996, 5(1): 22-24.
- 【35】朱士明等. 智能化双氧水浓度计的研制. 声学技术, 1991, 10(1): 45-47.
- 【36】Kiyoshi Ikeda. Ultrasonic Liquid-concentration Sensor With Temperature Compensation. 1998 IEEE INTERNATIONAL FREQUENCY CONTROL SYMPOSIUM, pp.652-659.
- 【37】刘镇清. 超声波过氧化氢水溶液浓度在线检测仪. 仪器仪表学报, 1994, 15(1): 49-54.
- 【38】Peter Hauptmann. Application of Ultrasonic Sensors in the Process Industry. Measurement Science and Technology, 2002, 13: 73-83.
- 【39】R J Urick. The Absorption of Sound in Suspensions of Irregular Particles. The Journal of the Acoustical Society of America, 1948, 20(3): 283-289.
- 【40】J R Alligra, S A Hawley. Attenuation of Sound in Suspensions and Emulsions: Theory and Experiments. Journal of the Acoustical Society of America, 1972, 51(5): 1545-1564.
- 【41】Harker, A.H., Temple, J.A.G. Velocity and Attenuation of Ultrasound in

- Suspensions of Particles in Fluids. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1988, 21(11): 1576-1588.
- 【42】 Peter Hauptmann. Ultrasonic Sensors for Process Monitoring and Chemical Analysis: State-of-the-art and Trends. *Sensors and Actuators*, 1998, A67: 32-48.
- 【43】 张权, 姚骏, 李斌. 一种基于 MAX038 的宽频程控波形发生器的设计. *测控技术*, 2004, 23(7): 13-15.
- 【44】 Maxim Inc. High-Frequency Waveform Generator. 2001.
- 【45】 金绍黑. 电子测量技术基础. 北京: 人民邮电出版社, 1986.6:42-43.
- 【46】 胡建恺, 张谦琳. 超声检测原理和方法. *超星数字图书馆*, 1993, 8(10): 92.

作者在攻读学位期间公开发表的论文

- (1) 柴洪涛, 张国勇, 苏双臣..利用单片机提高热电偶测温系统测量精确度.
北华航天工业学院学报 2008, 18(2)
- (2) 张国勇, 柴洪涛, 苗长云. 基于 Labview 的串口多点温度测量系统. 硅谷
2010, 2

致谢

在此论文完成之际，我要深深地感谢攻读工程硕士学位期间所有在学习和生活上给予过关心和帮助的人们。

首先，要衷心感谢我的导师苗长云教授。今天能够顺利完成论文的写作，无不凝聚着苗教授的心血与汗水。在论文的选题，研究方案的确定以及具体的实施过程苗教授都给予了细心的指导，他严谨的治学态度和系统的科研思路让我受益终生。同时，他平易近人、和蔼可亲的生活作风也给我留下了深刻的印象。在此谨向苗教授致以诚挚的谢意和崇高的敬意。

我还要感谢在一起愉快的度过三年学习生活的工程硕士班的同学们，正是由于你们的帮助和支持，我才能克服一个一个的困难，直至本文的顺利完成。

附录 浆体浓度检测仪硬件原理图

