

电子科技大学

UNIVERSITY OF ELECTRONIC SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA

专业学位硕士学位论文

MASTER THESIS FOR PROFESSIONAL DEGREE



论文题目 高精度超声波流量计的研发

专业学位类别 工程硕士

学 号 201322080460

作者姓名 肖永良

指导教师 梁巍 副教授

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及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得电子科技大学或其它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谢意。

作者签名：_____

日期：2016年6月3日

论文使用授权

本学位论文作者完全了解电子科技大学有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权电子科技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，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

（保密的学位论文在解密后应遵守此规定）

作者签名：_____

导师签名：_____

日期：2016年6月3日

分类号_____密级_____

UDC 注1 _____

学 位 论 文

高精度超声波流量计的研发

(题名和副题名)

肖永良

(作者姓名)

指导教师

梁巍

副教授

电子科技大学

成 都

(姓名、职称、单位名称)

申请学位级别 硕士

专业学位类别 工 程 硕 士

工程领域名称

机械工程

提交论文日期 5 月 30 日

论文答辩日期 6 月 1 日

学位授予单位和日期

电子科技大学 2016 年 6 月 27 日

答辩委员会主席

评阅人

注 1：注明《国际十进分类法 UDC》的类号。

Design of High-Precision Ultrasonic Flowmeter

**A Master Thesis Submitted to
University of Electronic Science and Technology of China**

Major: **Master of Engineering**
Author: **Yong Liang Xiao**
Advisor: **Wei Liang**
School: **School of Mechatronics Engineering**

摘 要

超声波流量计，它是一种在超声波测量相关理论的基础上，通过对流体在管道内流动时的速度进行测量，经过相关信号处理和数据计算，进一步测得管道内流体流量的仪器，它关系到我们的日常生活各个方面。20 世纪以来，新的信号处理技术不断涌现，硬件电路单元也变的更加密集化，伴随着越来越多的新型超声换能器的出现，进一步提升了整个超声波流量检测领域的设计和加工水平。产品设计费用低廉，应用领域广泛、易于安装和使用等都是超声波流量计的一些特点，因此在石油开采、天然气勘探、航空制造、生物医疗等领域有着大量应用。流量计是工业发展不可缺少的工具，对于现代工业生产的需求来说，安装简单、更高精度和更加智能化的超声波流量计的设计是非常必要的。

本文基于超声波时差法测量流体流速的方法，结合以 ARM 芯片为核心的嵌入式硬件平台，设计出了新型的具有较高精度的超声波流量计，之后进行了相关流量测量的模拟实验，对本文设计的超声波流量计的检测效果进行了验证。

首先对超声波流量计的产生背景，以及近几年国内外超声波流量计的应用现状进行了分析，然后将超声波流量计的流量检测原理进行了阐述和对比，最后选择时差法作为本次设计的核心方法。

其次因为超声波自身的衰减特性和周围环境的噪声干扰等的影响，导致检测到的超声波信号能量较弱并且波形相对杂乱，需要经过相关的信号调理模块处理之后才能进一步分析。

然后通过设计相应的信号采集模块，以 ARM 微控制器芯片为核心，将信号采集处理后，通过以太网口的传送方式将数据发送给计算机进行后期数据处理。

最后在计算机上针对采集到的超声波信号的特点，使用 MATLAB 软件，结合经验模态分析（Empirical Mode Decomposition），希尔伯特黄变换（Hilbert-Huang Transform）等信号检测领域的分析方法对信号进行了后期处理，使测量结果更为准确，并在此基础上设计了基于 LabWindows/CVI 的超声波流量计的测量系统。

通过搭建相关实验平台，对模拟管道内流体流动的实验采集到的数据进行分析验证后，可以较为准确的得到流体流量，证明该超声波流量计的测量效果良好。

关键词：超声波流量计，时差法，经验模态分析，LabWindows/CVI

ABSTRACT

Ultrasonic flowmeter, it is a method related to the use of ultrasound, by measuring the flow rate of fluid in the pipeline, and then get the flow of the fluid in the pipe instrument through the relevant processing and calculation, it relates to all aspects of our daily lives. In recent years, with the signal processor technology, large-scale application of digital circuits, as well as the development of new ultrasound transducer, ultrasonic flow measurement technology has made great progress, which has the characteristics of high accuracy, low cost, easy to install, and good stability in complicated environment. It is widely used by industrial production in many fields, such as oil and gas exploration, aerospace, medical testing. Flowmeter is an indispensable tool for industrial development, higher precision and more intelligent ultrasonic flowmeter is very necessary for oil exploration and natural gas industry.

This paper is mainly based on the theory of ultrasonic transit-time measurement of fluid flow, it is combined with ARM microcontroller embedded platform to design a new type of high-precision ultrasonic flowmeter. The effect of the ultrasonic flowmeter made by this design and the accuracy of the data has been verified by several simulation experiments.

First, introducing the background and current development of ultrasonic flow meter domestic and abroad in recent years. Then finally choose the time difference principle as the core method of this design by analyzing the theories of ultrasonic detection and compare their characteristics.

And secondly because of the characteristics of ultrasonic attenuation and ambient noise, the received ultrasonic signal is too weak and does not meet expectations. It is needed to add the corresponding signal conditioning module for processing and further analysis.

Then design the appropriate signal acquisition module with the AVR microcontroller core, and send the signal acquisition and processing of data to the computer for post-processing through an Ethernet port.

Finally, capture the characteristics of ultrasonic signals on the computer, using MATLAB software, combined with Empirical Mode Decomposition, Hilbert-Huang Transform and other signal processing method for a signal post-processing to get more

accurate measurement results, and then design the measurement system with LabWindows /CVI software.

After the adoption of experimental platform for fluid flow within the pipeline simulation experiments, and analyze the collected data, this new kind of ultrasonic flowmeter can get a more accurate result.

Key words: ultrasonic flowmeter, time difference principle, EMD, LabWindows/CVI

<http://www.ixueshu.com>

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 流量计意义及相关背景	1
1.2 超声波流量计技术的发展与现状	2
1.2.1 超声波流量计的特点	2
1.2.2 超声波流量计的发展	3
1.3 虚拟仪器测试技术背景	3
1.4 论文研究内容及结构安排	4
第二章 超声波流量计设计理论	6
2.1 超声波流量测量概述	6
2.1.1 流量测量参数	6
2.1.2 超声波概述和分类	7
2.2 超声波流量计分类	9
2.3 时差法及其改进方案	12
2.4 影响测量精度因素及处理方法	13
2.5 超声波换能器	15
2.5.1 超声波换能器分类	15
2.5.2 超声波换能器性能指标	17
2.6 本章小结	18
第三章 基于 ARM 的超声波流量测量系统	19
3.1 系统总体结构	19
3.2 微控制器 STM32F407 设计	19
3.2.1 ARM 相关背景	20
3.2.2 STM32F407 设计原理	21
3.3 其他硬件模块设计	22
3.3.1 超声波发射和接收模块	22
3.3.2 信号调理模块	23
3.3.3 上位机通信模块	24
3.4 系统软件设计	24
3.4.1 软件设计流程	24
3.4.2 软件模块设计	27
3.5 本章小结	33

第四章 基于 EMD, HHT 的信号降噪设计	34
4.1 噪声来源	34
4.2 超声波流量测量中的降噪方法	34
4.2.1 数字滤波器	34
4.2.2 FFT 法降噪	35
4.2.3 小波变换法降噪	35
4.3 基于带通滤波器、EMD 和 HHT 的降噪设计	35
4.3.1 带通滤波器设计	36
4.3.2 经验模态分解原理	37
4.3.3 经验模态分解过程	37
4.3.4 希尔伯特-黄变换	39
4.4 仿真信号的噪声消除	40
4.5 传播时间差的测量方法	44
4.6 本章小结	45
第五章 基于 LabWindows/CVI 的上位机流量测量系统	46
5.1 虚拟仪器介绍	46
5.1.1 虚拟仪器背景	46
5.1.2 虚拟仪器特点	46
5.2 虚拟仪器系统	47
5.2.1 虚拟仪器硬件系统	47
5.2.2 虚拟仪器软件系统	49
5.3 LabWindows/CVI 综合设计	50
5.3.1 LabWindows/CVI 特点	50
5.3.2 超声波流量计上位机设计方案	51
5.3.3 实验验证	56
5.4 本章小结	60
第六章 总结与展望	61
6.1 论文工作总结	61
6.2 展望	62
致 谢	63
参考文献	64

第一章 绪 论

1.1 流量计意义及相关背景

在人们开始进行粗略的测量活动时，流体就已经被人们作为一种度和参照物所使用，直到今天，流体流量的测量在能源和化工行业被用于天然气，石油等的贸易结算，废水废气的排放测量。居民生活中的燃气，自来水的计量结算等也与流量计算不可分割，特别是在能源消耗速度急剧加快，环境污染日益严重的今天，流量测量在人们的生活有着重要地位，对于提高企业生产效率，改善产品质量和促进相关科学技术水平的进步有着不可忽视的重要影响。

古代历史记载的滴漏和漏刻，就是当时的居民想出来的一种利用流量来计算时间的计时装置，可以追溯到公元前 14 世纪时埃及使用的水钟。早在公元前 3000 多年的时候，人们就已经开始使用测量流量的方法来灌溉农作物和进行生活用品的交换，这可以被认为是流量计的历史起源^[1]。

16 世纪中期发明了风速计，17 世纪人们开始尝试用流速计测量明渠的流量。在 18 世纪初毕托管问世之后，瑞士科学家丹尼尔·伯努利在多年的努力之后，发表了关于伯努利方程的相关著作，这一理论为流体力学建立了最基本的方程式，是差压法测量水流量的早期应用^[2]。到后来 19 世纪赫谢尔对文丘里管的功能进行了完善，设计出了更为实用的流体流量测量装置。紧接着法拉第定律、能量守恒定律等新一批理论被提出，伴随着卡门涡街实验的展开，流量计的应用得到了初步推广，但受到当时科技和工艺水平的限制，流量计的测量应用水平还较为低下。

20 世纪以来，随着经济的迅速发展，电子技术和材料加工等领域的工艺水平也得到很大提高，流量计的使用量迅速增长，使用领域也得到进一步的扩充。近 30 年来，受到工业科学技术大幅进步的影响，流量计的设计面临着来自各种应用场合的复杂要求，测量环境也从以往的单一气体、液体到了混合流体，从以往的单一温度场合变化为低温到高温的范围分布，层流和混相流等复杂流动状态也成为了流量计的应用场合。出于对不同特性和流动状态的流体的测量需求，相继有热式流量计、现代电磁流量计、速度式流量计、相关式流量计、涡街流量计、超声波流量计等数十种流量计被研制出来并投入实际生产使用^[3]。由于实际测量场合的情况复杂多变，往往不能用单一的一种流量测量方法实现各种场合的流量测量，需要对现场的流体种类和流动状态等测量因素进行综合分析之后，选定与之相适应的测量方案。

表 1.1 不同流量计的特性对比

流量计种类	涡街式	电磁式	超声波式	孔板式
管径(mm)	50-300	2-3000	50-1600	50-800
量程比	30:1	100:1	300:1	3:1
对涡流	很敏感	较敏感	不敏感	很敏感
对流速分布	很敏感	不敏感	不敏感	很敏感
测脉动流	不适合	较适合	适合	不适合

现在人们生活中所使用的流量计大概有 200 多种，在各种场合应用的流量计已占整个仪表数目的 20%-25%，但仍然不能满足工业测量领域对流量计的需求，还有很多技术上的疑难问题有待解决，流量计在未来还有很广阔的发展空间。

我国的流量计制造和测量技术起步相对较晚，早先阶段不得不从国外进口工业生产所需的流量仪器，在 20 世纪中期开始投入建设和发展水表、燃气表等仪表产业，在 20 世界末期才达到生产体系相对完善和质量相对稳定的水平。总体上我国流量仪表的制造水平与世界先进水平相比还有差距，特别是在涡轮流量计的轴承、质量流量计的材料及工艺、超声流量计的工艺等方面，差距是较为明显的，需要通过不断的努力，才能与国际水平接轨。

1.2 超声波流量计技术的发展与现状

1.2.1 超声波流量计的特点

超声波流量计，是利用超声波在管道外壁入射后，在经过流体传播时，会受到流体流速、管道直径等一些因素的影响而表现出很多特殊的性质。通过对这些特性的分析和利用之后，可以计算出管道内流体的流量大小。与以往流量测量使用的传统流量计相比，超声波流量计具有以下一些特点：

- (1) 超声波流量计是一类不用直接接触待测流体的测试仪表，不仅安装使用方便，并且能耗较低，适用于任何管道直径较宽、管道内流体流量较大、以及河道明渠、地下暗渠的流体流量测量，具有很高性价比。
- (2) 超声波流量计不仅可以测量单相液体和气体在管道内的流量，也可以对双相介质，多相介质的流体进行测量，并且不会造成应用场合的压力损失和对流体本身的流场产生破坏^[4]。
- (3) 超声波流量计本身具有较高的耐腐蚀性，非导电性等特性，基本不受测量环境的湿度、压力、温度以及腐蚀等因素的限制。

1.2.2 超声波流量计的发展

超声波流量计(Ultrasonic Flowmeter)从 20 世纪初期开始在欧洲市场上出现,当时的法国在超声波流量计领域处于领先地位。世界各国纷纷开始投入对超声波流量计的研究。在起步阶段时,采用以相位差进行超声波流量测量的方法进行设计,但由于相关技术还有所欠缺,使得超声波流量计在很多场合的实际应用并没有取得令人满意的计量结果。接着,采用声循环法进行测量的设计在航空燃料领域取得了巨大成功^[5]。随后,以波束偏移法为设计原理的超声波流量计开始投入实际应用。随后到了 20 世纪末期,在相关工业技术水平的大幅提高下,以多普勒效应为设计原理的超声波流量计开始普及,这一成果使得超声波流量计改善了当时测量结果的灵敏度,并扩充了超声波流量计的应用场合。之后,在很多工程项目中的出色应用使得超声波流量计被用户所认可,与此同时,电子产业制造技术水平的不断提高,大大扩充了原有多普勒技术型超声波流量计的应用领域,也促进了新型的时差法超声波流量计的推广,使超声波流量计技术水平得到进一步提高。在集成电路和锁相技术取得突破进展后,已经成功设计出能够进行高精度的流量测量的超声波流量计,国外大型插入式超声波流量计的测量精度已经可以达到 0.2%~0.3%,小型外夹式的超声波流量计也可以达到 1%~2%。

目前,超声波流量计的使用数量在不断增长,据相关统计已经超过了每年 9% 的增长率,其中,日本、欧洲和美国占据了超声波流量计销售份额的绝大部分,国外的大型超声波流量计生产厂家有美国 GE、德国西门子、德国科隆、日本富士、日本横河、美国哈尼克等。

近些年来,我国超声波流量计生产技术也在迅速提高,国内厂家生产的超声波流量计销量也在逐步增大,其中较大的超声波流量计生产厂家有大连海丰、唐山汇中、唐山美伦、深圳建恒等。随着流量测量面临的的实际应用场合的日益复杂化,超声波流量计也不再局限于能源和化工行业中石油和天然气的相关测量,而是面向范围更广的应用领域。与此同时,温度适应能力更强和更智能化的设计是超声波流量计当今的主要发展方向^[6]。

1.3 虚拟仪器测试技术背景

虚拟仪器(Virtual Instrument)测试的相关概念最早是由美国国家仪器公司 NI(National Instruments)在几十年前所提出的仪器测试领域的新概念,是结合了仪器制造领域、信息通信领域、和计算机数据计算等领域先进技术的产物^[7]。虚拟仪器测试技术是依托当代计算机强大的计算能力,来达到相关硬件技术的软件化应用的目的,不仅实现了分离元件的模块化,也进一步改善了以往程序开发过于复

杂的情况，使得系统整体的灵活性和功能性得到增强。同时，由于其简单、直观的用户使用界面，使其对用户的专业技术要求大幅降低，极大缩短了数据采集、配置、显示和分析等任务的实现周期。同时，用户不再局限于以往传统仪器功能的限制，可以根据自己的需求来设计出功能更为实用的测试仪器系统^[8]。

在仪器测试技术经过了之前的模拟仪器测试阶段和智能仪器测试阶段以后，虚拟仪器测试技术成为新的第三代仪器测试技术。如今，以往一些如逻辑分析仪、示波器等的传统测试仪器都可以用虚拟仪器测试技术来实现，并且可以在其中加入相关控制系统实现更复杂的功能。

相比于以往生活中占有较高使用率的传统测试仪器，虚拟仪器展现出以下一些优秀性能：

- (1) 基于计算机强大的运算能力，虚拟仪器测试在应用时往往比以往的测试技术计算更快，性能更稳定。
- (2) 由于虚拟仪器测试技术是将硬件测试“软件化”，使得虚拟仪器不再局限于硬件的限制，能够以极少的改动进行升级，具有很高的灵活性
- (3) 在 NI 等相关公司所提供的具有高效率的软件架构和丰富的接口模块的软件平台下，大幅降低了搭建不同类型的产品平台的必要时间，实现了测试的无缝集成。

进行虚拟仪器测试开发的软件平台也在逐步增多，LabWindows/CVI, LabView, Visual Studio 等都是目前进行虚拟仪器测试的主要软件工具。在这当中，NI 公司推出的基于 ANSI C 的 LabWindows/CVI 交互式开发环境在经过长期开发和完善之后，已经开发出一套完整的针对软件体系结构各个层次设备的驱动程序和稳定的开发平台，其性能已经达到了较高水平。在此基础上，衍生出了一系列基于 PCI 总线、VXI 总线、GPIB 总线等的虚拟仪器测试产品。虚拟仪器由于其优越的性能，已经被越来越多的用户所认可，在很多大型测试方案中都有所应用。

随着计算机内部硬件性能的大幅提升，以及互联网相关产业的迅速发展，在网络中利用虚拟仪器来组建测试系统的方案，将成为虚拟仪器在未来应用的重要设计方式，虚拟仪器的测试功能将会更为强大，势必会代替以往传统测试仪器的地位，进一步发展成时代的主流^[9]。

1.4 论文研究内容及结构安排

本文主要是通过针对管道内流体在实际应用场合的流量测量需求，在分析管道内杂质、流速分布范围和流体成分等因素之后，参考了相关文献资料，提出了

以时差法超声波测速为出发点, 结合 ARM 芯片来搭建流量测量的硬件平台, 最后在 LabWindows/CVI 开发环境中设计出流量测量的软件系统。

具体工作内容安排如下:

第一章先对流量计的起源和应用, 以及超声波流量计的特点和发展历程做了简述, 之后对虚拟仪器测试技术作了相关说明, 对本文所采用的 LabWindows/CVI 开发环境进行了介绍。

第二章中先介绍了流量测试当中流量的相关参数和超声波的一些概念和特性, 然后对超声波流量计的具体分类和工作原理进行了介绍, 并且分析了不同超声波流量计的特点, 之后对采用的时差法进行超声波流量计的设计方案进行了详细说明, 并在此基础上提出来改进方案, 最后对超声波换能器这一关键器件进行了具体说明。

第三章中介绍了以 ARM 芯片为核心的硬件测试平台, 先介绍了超声波测量系统总体框架, 接着对超声波发射/接收模块、信号调理模块、数据采集模块、上位机通信模块等进行了说明, 并详细阐述了超声波测量系统的软件设计流程和实施方案。

第四章中对超声波测量过程中的噪声来源进行了分析, 在对比了 FFT 和小波变换等常用降噪方案后, 确定以经验模态分析(EMD)和希尔伯特黄变换(HHT)结合的方法来实施降噪方案。对采集到超声波信号进行降噪处理后, 提高了信号的纯净度, 确保了时差法相关数据的准确性并且进一步优化了设计方案。

第五章中先对虚拟仪器测试的硬件框架和软件构成等做了具体说明, 并根据前文的设计方案, 利用 LabWindows/CVI 软件开发工具设计出流量测量系统, 然后对该系统进行了实验验证。

第六章对本次论文展开的设计进行了总结, 证实了时差法超声波流量计的实用性, 并将实验中一些问题的产生原因进行了分析, 也对时差法超声波流量计的未来发展前景进行了展望。

第二章 超声波流量计设计理论

2.1 超声波流量测量概述

2.1.1 流量测量参数

1) 流量

在一定时间内流过管道横截面积的流体的量叫做流量，流量根据时间累积长短进一步还分为瞬时流量和与之相对应的累计流量^[10]。流量一般用 Q 表示，在流体流过的时间 t 很短时，流量与时间的比值被称为瞬时流量，用 q 表示，即：

$$q = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{Q}{t} \quad (2-1)$$

与此同时，瞬时流量又进一步分为体积流量 q_v (单位为 m^3/h)和质量流量 q_m (单位 kg/h)，分别有如下对应关系：

$$q_v = \frac{dv}{dt} = UA \quad (2-2)$$

$$q_m = \frac{dm}{dt} \rho UA \quad (2-3)$$

式中： v ——流体体积， m^3 ；

m ——流体质量， kg ；

t ——时间， s ；

ρ ——流体密度， kg/m^3 ；

U ——管道内平均流速， m/s ；

A ——管道横截面积， m^2 。

2) 粘度和雷诺数

流体粘度是指流体分子间阻碍相互运动的一种特性，是衡量流体内部摩擦力大小的一个参数，不同流体所对应的粘度也不同^[11]。当温度升高时，大多数液体的粘度随之降低，而与之相反的是，大多数气体的粘度在温度升高时也会增大。

当流体以 1m/s 的速度流动时，位于同一单位流体面积上的接触层之间的内摩擦力的大小被称为流体的动力粘度，用 μ 表示，单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ，其计算公式为：

$$u = \frac{\tau}{\frac{dv}{dh}} \quad (2-4)$$

式中: v ——流体流动速度, m/s ;

τ ——单位面积上的内摩擦力, N/m^2 ;

h ——相邻流程之间的距离, m ;

$\frac{dv}{dh}$ ——流体速度梯度, m^2 。

雷诺数又称为雷诺准数, 是在流体力学当中被用来表示粘性影响的相似准则数, 用 Re 表示, 是体现流体流动状态和流体流速分布的重要参数之一^[12]。

流体雷诺数和粘度之间存在如下关系:

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} \quad (2-5)$$

式中: v ——流体流动速度, m/s ;

l ——流体主要尺寸, m ;

ρ ——流体密度, kg/m^3 。

当流体的雷诺数数值越小, 则表示来自流体粘性力的影响效果在此时较为显著, 导致流场中原本存在的扰动会逐渐平缓, 致使流体呈现出相对稳定的流动状态, 此时, 流体处于层流状态。雷诺数越大则表明惯性力的影响效果占比更多, 使流体内部的细微扰动逐渐增强, 干扰流体流动, 这时, 流体出于紊流状态。

2.1.2 超声波概述和分类

人耳所能够分辨出的声音频率有限, 一般认为能够听到从 20Hz - 20000Hz 的声音^[9]。次声波是指频率低于 20Hz 的声波, 而超声波是指频率分布高于 20000Hz 的声波。超声波具有较强的穿透能力, 且易于将能量集中, 在传播过程中的方向性好, 易于携带大量信息, 能够对物体实现快速和准确的测量而不破坏物体表面, 因此, 超声波在医学诊断和军事探测设备等领域都有着重要应用。

超声波是机械波的一种, 因其具有较高的频率, 所以波长很短, 最短的只有几微米。当超声波在某种介质中以一定形式传播时, 由于受到介质对能量的吸收作用, 超声波在传播过程中会出现衰减现象, 如果超声波自身频率越高, 则衰减的过程越为迅速; 当同一种超声波在不同材料的介质中传播时, 介质密度越高, 则衰减越弱。

通常情况下, 根据超声波的传播方向和传播介质当中质点的振动方向是否相同, 可以将超声波分为横波、纵波、板波和表面波等^[13]。除此之外, 还有一些其他划分方式图 2-1 所示。



图 2-1 超声波的分类

不同波的传播速度计算方式受到振动特性和传播材质的影响，具体如下计算方式如下：

$$v_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \quad (2-6)$$

$$v_S = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\sigma)}} \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2-7)$$

$$v_R = \frac{0.87+1.12\sigma}{1+\sigma} \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\sigma)}} \quad (2-8)$$

式中： v_L ——纵波声速， m/s；
 v_S ——横波声速， m/s；
 v_R ——表面波声速， m/s；
 σ ——泊松比；

E ——弹性模量，MPa；

G ——剪切弹性模量，MPa；

ρ ——密度， g/cm^3 。

超声波在一些常见材料当中的传播速度如表 2-1 所示：

表 2-1 常用材料超声波声速

材料	声速
	m/s
空气	330
水	1480
甘油	1900
铝	6300
铜	4700
铁（铸铁）	4600
铁，钢，不锈钢	5900

超声波检测技术的原理是将某些待测的和声学无关的物理量（如物体的温度、表面硬度、流体流量等）用一些直接或间接的物理关系，进而用声学相关物理量参数表示出来，达到测量目的。

2.2 超声波流量计分类

目前在市场上常见的超声波流量计种类较多，根据测量原理上的差异可以分为多普勒效应法、传播时间差法、相关法、波束偏移法和噪声法等^[14]。按照探头的安装和配置方法不同又分为透过法、交叉法、反射法等。下面介绍一些检测原理不同的常见超声波测量方法：

1) 多普勒效应法

多普勒效应测量的原理是当管道内流体中含有杂质或者气泡时，利用从发射探头发射的超声波在管道内经过气泡或者杂质的反射后，到达接收探头时频率所发生的变化来测量流体流速。

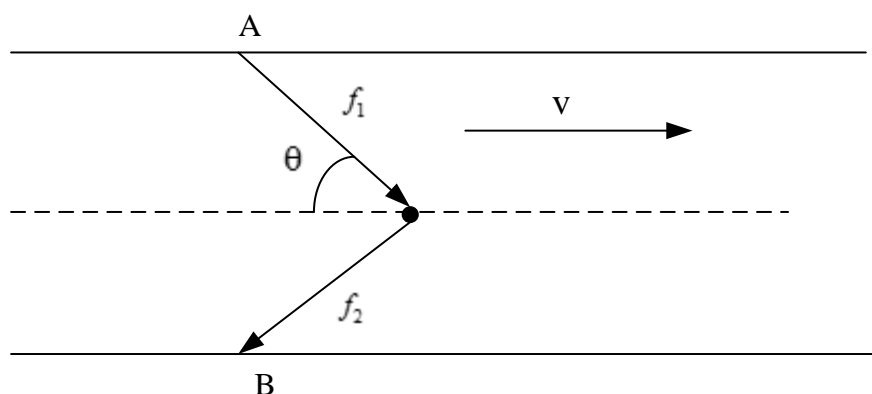


图 2-2 多普勒效应法示意图

如图 2-2 所示，超声波探头 A 发出的频率为 f_1 超声波在经过管道内杂质或者气泡的反射后，因为流体本身以速度 v 在运动，则到达探头 B 时的频率已变为 f_2 ，其具体关系为：

$$f_b = f_a \frac{c + v \cos \theta}{c - v \cos \theta} \quad (2-9)$$

进一步推算可知多普勒效应的频率变化量为：

$$f_{\Delta} = f_b - f_a = f_a \frac{2v \sin \theta}{c} \quad (2-10)$$

表明传播产生的频移 f_{Δ} 和待测流体本身的流速呈现出正比关系，当待测的流体管道确定后，则关系可进一步简化为：

$$v = \frac{c}{2 \cos \theta} \frac{f_{\Delta}}{f_a} \quad (2-11)$$

则其流量则其流量 Q 计算公式为：

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} v = \frac{\pi d^2 c}{8 \cos \theta} \frac{f_{\Delta}}{f_a} \quad (2-12)$$

应用多普勒效应法进行测量时，由于管道内的杂质和气泡分布不均，测量所测得的流体流速和管道内流体的平均流速也存在一些不同，因为这种不确定度，多普勒效应法的准确度受到一定影响^[15]。

2) 传播时间法

传播时间法是利用超声波在管道内顺流和逆流经过待测液体时，因为流体本身流速的影响，造成超声波在经过待测流体后沿着顺流方向传播时速度增大，沿着逆流方向传播时速度减小，导致超声波传播一段固定距离所需时间不同，利用

这段时间不同作为出测量发点的方法被称为传播时间法，根据测量量的不同又进一步分为时差法，频差法等^[16]。

3) 相关法

管道内的流体在流动时，在其内部会分布着因为各种原因产生的随机扰动，这些扰动产生的流动信号往往和流体流动状况密切相关。同时，这些信号往往具有一定相关性，对这些信号进行分析进一步计算流量的方法称为相关法^[15]。

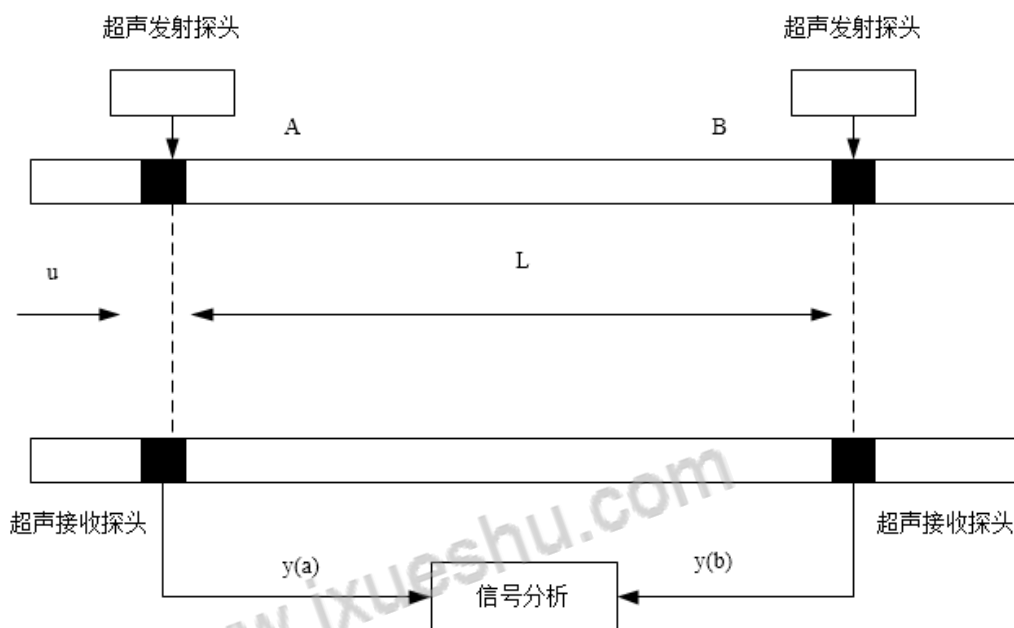


图 2-3 相关法示意图

如图 2-3 所示，在待测管道外壁上安装间距为 L 的两个入射超声波入射探头，在其对应的接收探头处分别检测接收到的流动信号 y_a 和 y_b ，为了获得两个信号的互相关函数，进行以下运算：

$$R_{ab}(\tau) = \int_0^{\tau} x(\tau)y(t-\tau)dt \quad (2-13)$$

当 A,B 之间的间距 L 变化不大时，信号 y_a 和信号 y_b 在一定程度上体现出相似性，上面求得的互相关函数 $R_{ab}(\tau)$ 会在某点产生峰值，则该点反应的时间位移量 τ_0 就是待测流体在管道截面 A 和管道截面 B 之间的流过时间，进一步可求得管道内流体的平均流速为：

$$v = \frac{L}{\tau_0} \quad (2-14)$$

则其流量 Q 计算公式为：

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} v = \frac{\pi L d^2}{4 \tau_0} \quad (2-15)$$

相关法的核心是分析两侧信号的相似程度，因此管道直径和流速等对测量结果的精度影响不大，当管道直径较大，流体流速较快时往往会有较大误差^[17]。

4) 噪声法

流体在管道内部流动时，其内部产生的噪声和流体的流速有存在着一定关系，通过对这些噪声信号的检测和分析，可以求得其流量，这种方法简单，但是测量结果精度达不到较高水平^[18]。

2.3 时差法及其改进方案

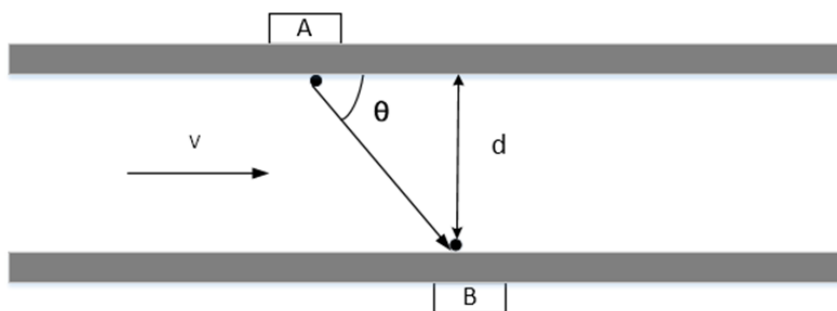


图 2-4 传播时间差法示意图

时差法是传播时间法的一种，其设计原理如图 2-4 所示：在待测流体管道的外壁分别安装超声波探头 A 和超声波探头 B，安装时使两者有一定倾斜角，实验时先从探头 A 入射超声波，将 B 探头接收到超声波时的时间记录为 t_a ；然后，从探头 B 入射超声波，将探头 A 接收到超声波时的时间记录为 t_b ，因为流体本身以速度 v 在流动，则顺流和逆流时的时间会有一定差异^[19]。

当超声波在待测流体静止时的流速为 c ，管道横截面直径为 d ，待测流体流速为 v ，当从探头 A 入射超声波，则在探头 B 接收到超声波时，其传播时间为：

$$t_b = \frac{d / \sin \theta}{c + v \cos \theta} \quad (2-16)$$

当从探头 B 入射超声波，则在探头 A 接收到超声波时，其传播时间为：

$$t_b = \frac{d / \sin \theta}{c - v \cos \theta} \quad (2-17)$$

通过进一步计算可得两次传播的时间差为：

$$\Delta t = \frac{2d}{\sin \theta} \frac{v \cos \theta}{c^2 - v^2 \cos^2 \theta} = \frac{2dv}{c^2 \tan \theta} \quad (2-18)$$

通常情况下，因为 c 远远大于 v ，上式可以进一步简化为：

$$v = \frac{c^2 \tan \theta}{2d} \Delta t \quad (2-19)$$

则其流量 Q 计算公式为：

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} v = \frac{\pi d c^2 \tan \theta}{8} \Delta t \quad (2-20)$$

从式（2-19）可以看出，超声波在待测流体中的传播速度 c 会影响待测流体的速度 v 的大小，当待测流体周围环境的温度改变时，超声波速 c 的数值往往会发生较大变化，增加了测量过程中不确定因素，较大程度的影响了待测流体的相关测量结果的准确度^[20]。

为了消除超声波波速 c 对待测流体速度 v 的测量结果的影响，提出以下时差法的改进方案：

当从探头 A 入射超声波，则在探头 B 接收到超声波时，有如下关系：

$$c + v \cos \theta = \frac{d}{t_b \sin \theta} \quad (2-21)$$

当从探头 B 入射超声波，则在探头 A 接收到超声波时，有如下关系：

$$c - v \cos \theta = \frac{d}{t_a \sin \theta} \quad (2-22)$$

将上述两式相减得：

$$v = \frac{t_b - t_a}{t_b t_a} \frac{d}{\sin 2\theta} \quad (2-23)$$

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} v = \frac{\pi d^3}{4 \sin 2\theta} \frac{t_b - t_a}{t_b t_a} \quad (2-24)$$

由式（2-23）可以看出，流速 v 的表达式中不再含有超声波波速 c ，因此避免了超声波波速 c 受到温度的影响发生变化时对测量结果产生的干扰，提高了相关超声波测量数据的准确性，保证了测量精度。

2.4 影响测量精度因素及处理方法

经过对流体流动环境和测量方法等的逐步分析，归纳出以下几种会对流量计的测量精度有较大影响的因素。

1) 流体流速分布因素

在待测管道内流动的流体，其流动状态一般可以划分为两种。当流体主要在管道轴向方向流动时为层流状态，当流体不仅在管道轴向方向流动，并且有剧烈的横向流动时，其为紊流状态。并且流体流动时其流速并不是均匀分布，处于流动截面不同位置的流体其流速也不相同，越靠近管道中心部分的流体速度越快。而在设计超声波流量计的过程中，用于推导过程和实验中测量得到的流速往往是超声波传播时位于声道上的线平均流速，而流过管道横截面的面平均流速才是测量流量的所需量^[21]。所以，在得到流速的测量结果后，需要对流速运用相关方法进行补偿，修正测量结果。

其中，面平均流速 \bar{v} 和线平均流速 v_m 之间存在如下关系：

$$v_m = K\bar{v} \quad (2-25)$$

式（2-25）中的 K 为相关流体动力学中的修正系数， K 的值会根据流体出于紊流状态还是层流状态而有所变化，并和雷诺数有一定关系^[22]。具体关系为：

当流体分布规律为对数类型，且雷诺数 $Re < 10^5$ 时，相关修正系数为：

$$K = 1.119 - 0.11 \log Re \quad (2-26)$$

当流体分布规律为对数类型，且雷诺数 $Re > 10^5$ 时，相关修正系数为：

$$K = 1 + 0.01 \sqrt{6.25 + 431 Re^{-0.237}} \quad (2-27)$$

当流体处于流速较低的层流状态时，待测管道内的流体流速的分布轨迹为抛物线形状，此时，相关修正系数为：

$$K = \frac{3}{4} \quad (2-28)$$

2) 机械因素

在整个设计方案中，超声波探头的安装角度、两探头之间的距离，待测流体管道的横截面直径等参数都属于机械因素^[23]。当这些参数直接或间接的发生改变后，都会进一步对时差法的关键量“传播时间”的测量带来重大影响，直接导致测量结果的精度大幅降低。因此，要选择合适的材料，在安装超声波探头时要对夹角度数和探头间距离进行准确测量，确保其正确性，才能减少由机械因素带来的误差，提高测量精度。

3) 时间延迟因素

在整个测量过程中，由电子设备构成的计时系统，驱动系统和运算系统等受到自身器件结构的限制，会带来一些时间上的运算延迟，这些延迟都属于电子因

素^[24]。当驱动超声波探头时，应尽量选择性能参数一致的探头，使其性能匹配，降低驱动探头时所带来的时间误差；在对计时系统和运算系统进行设计时，应充分考虑各器件的性能参数，对相应计算公式进行修正，减少时间延迟因素带来的误差。

2.5 超声波换能器

2.5.1 超声波换能器分类

在本章前面几节的内容中，详细描述了采用不同测量原理设计的超声波流量计的应用，这些不同方法的设计过程中都包含一个很重要的器件：超声波换能器，在超声检测领域又被称之为超声波探头^[25]。



图 2-5 超声波换能器

通常意义上的换能器，意义相对较广，能够实现能量在不同形式之间转换的器件都可以称之为换能器。超声波换能器则是实现将上一级系统输出中的电压、电流等电信号转化为一种超声波信号，并且转化的超声波承载了电信号的相关信息。同时，也可以将超声波通过换能器转化为电信号，将其承载的信息释放出来。

超声波换能器的种类相对较多，按照换能器内部的振动模式，可以分为剪切式振动换能器、扭转式振动换能器、纵向振动换能器、弯曲式振动换能器等^[26]。按照采用材料和能量转换原理的不同又分为机械超声换能器、压电效应换能器、磁致伸缩效应换能器、电容换能器、电磁换能器等。

1) 压电效应换能器

对某些电介质材料施压一定方向的外力,当外力逐渐增大,电介质会受压而发生形变,与此同时,其内部正负电荷中心也会因内部电场平衡被破坏而产生位移,进一步导致极化现象发生^[27]。在该电介质材料对应两侧端面上出现带电符号相反的束缚电荷,束缚电荷的能量密度和外部施加的应力成正比关系,这种电介质材料具有的特殊效应被称为正压电效应,通常用正压电效应来实现将声能(超声波含有机机械能)转化为电能的过程。

将某些电介质安放于电场中时,电介质内部的正负电荷由于受到电场力的作用而运动,产生相对位移,这种相对位移导致的结果从宏观的角度来看就是物体发生了形变,当电场强度越大时,形变也越为明显,这种电介质材料产生的特殊效应被称之为逆压电效应,逆压电效应通常被用来产生超声波。

通常以石英晶体、陶瓷和其他一些高分子材料为介质,结合正压电效应和逆压电效应原理设计出相关压电换能器。压电换能器的成本相对较低,具有灵敏度高、能量转换效率高的特点。

2) 磁致伸缩换能器

通常情况下,物体存在由温度引起的热胀冷缩现象,除了温度的影响外,某些电磁材料在磁场和电场的影响下也会导致物体外部形状的变化。在铁磁材料或者某些合金材料中,由于磁畴的存在,其内部磁场并不是均匀分布的,当受到外部磁场的干扰时,材料外部会沿着磁场方向产生伸长或缩短的形变现象,当外界磁场消失后,材料外部形状又逐渐恢复原样,这种现象称之为磁致伸缩效应^[28]。将具有磁滞效应的材料置于交变磁场中,利用其往复性的机械振动来产生超声波,这一方式被称为磁致伸缩换能器。

磁致伸缩换能器性能稳定,机械强度大,但因在制作时需要耗费大量铁磁材料,且转换效率较低,多数应用在功率超声等一些领域。

3) 电容换能器

电换能器又被称为静电换能器,其能量的转换是通过两端极板之间电容容值发生变化进一步引起极板之间电压变化来实现的,根据电压的差值可以求得声压的大小^[29]。通常情况下,采用刚性较好的金属薄片来制作电容换能器的前端极板和后端极板,这样做可以有效降低共振的影响。

电容换能器具有良好的频率响应特性,但同时由于其特殊结构使得其容易破损,很难应用于测量对象变化较大的场合^[30]。

4) 电磁换能器

电磁换能器（简称 EMAT），是一种利用洛伦兹力等电磁相关理论，在被测金属材料外部施加偏置磁场，金属材料内部所受到洛伦兹力也进而发生变化，最后导致金属材料内部形成机械振动，产生超声波^[31]。

由于对被测介质的耦合性要求不高，电磁换能器在某些环境危险、温度较高和远距离的测试中有着大量应用。

2.5.2 超声波换能器性能指标

超声波换能器目的是实现其他形式的能量和超声波振动能量类型的转换，涉及较多物理量，包括换能器工作频率、共振频率、频带分布宽度、电能和声能转换效率、耦合系数、品质因数以及灵敏度等用来描述其性能的物理量参数较多，因此，在进行相关测量设计时，必须根据测试要求进行筛选，制定出合理方案^[32]。

1) 换能器工作频率 f

工作频率对于超声波换能器而言是其首要技术参数，对超声波换能器的其他参数造成直接影响。一般设计中，应满足超声波换能器的工作频率与整个仪器的工作频率相一致的原则，并且使换能器频率离机械共振频率越近越好。

2) 换能器品质因数 Q

在电能通过超声波换能器转换为振动形式的机械能的过程中，品质因素是一个重要参数，在超声波检测相关领域，品质因数 Q 表示振动频率和振动功率之间的关系：

$$Q = \frac{\omega_r}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{\omega_r}{\Delta\omega} \quad (2-29)$$

式（2-29）中， ω_r 为谐振频率， ω_1 和 ω_2 为 ω_r 两边功率减小到 50% 时对应的频率值， $\Delta\omega$ 也被称之为频带宽度。

3) 换能器耦合系数

在超声检测中，耦合系数 K 指的是将换能器的工作过程用能量的形式来表示，其意义为电能和机械能之间的转换效率^[33]。

$$K = \frac{E_1}{E_2} \quad (2-30)$$

式（2-30）中， E_1 为换能器储存的机械能， E_2 为换能器从电源获得的总能量。

除了上面介绍的因素，还有一些与制作文艺相关的因素需要在实际设计中进行定性定量的分析，以确保满足设计要求。

2.6 本章小结

本章首先主要对超声波测量中的一些关键参数进行了介绍，列举了不同超声波流量计的工作原理。接着对本文采用的时差法进行了详细推导，在此基础上提出了改进方案。之后对影响测量精度的因素进行了分析并提出了一些改善方案。最后对超声波换能器进行了具体介绍。

第三章 基于 ARM 的超声波流量测量系统

3.1 系统总体结构

本次设计主要针对待测管道内的流体，设计出测量其内部流量大小的时差法超声波流量计。主要以 ARM 芯片 STM32F407 为核心展开相关硬件电路的设计，结合其他高性能的外围设备，再由上位机软件进行后期数据处理，使得流量测量结果具有较高的精度。具体的系统结构设计方案如图 3-1 所示。

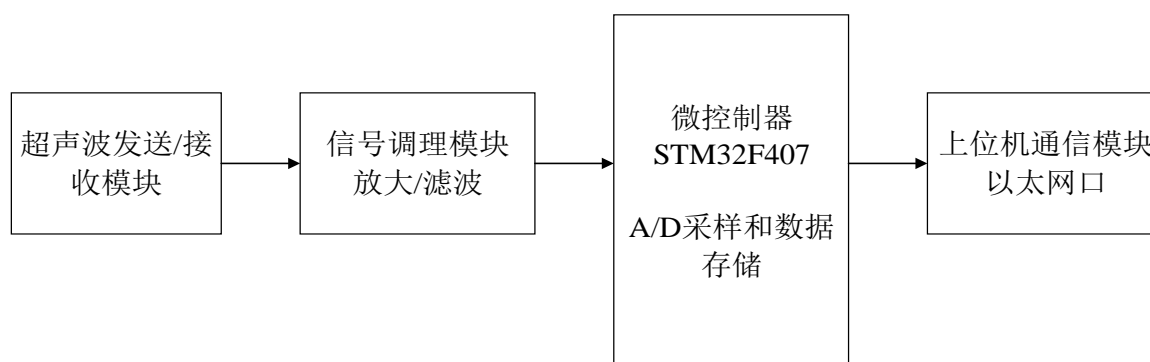


图 3-1 时差法超声波流量计系统结构图

整体硬件系统工作过程如下：整个系统在经外部电源供电后上电工作，超声波发送和接收模块内的驱动电路产生激励信号使入射超声波探头发出一定频率的超声波信号，超声波信号在流体中传播一定时间后，到达另一侧的接收探头，接收探头将收到的超声波信号传送给下一级信号调理模块，超声波信号在经过信号调理模块的放大和滤波作用后，由微控制器 STM32F407 对超声波信号进行 A/D 采样，将采样之后的数据由相应的存储器保存，最后在上位机通信模块中将采样数据用以太网口发送给上位机，上位机软件在接收到传递的相关数据后进行后期数据处理并计算出待测管道内流体的流速以及流量大小。

3.2 微控制器 STM32F407 设计

微控制器 STM32F407 是 A/D 采样模块和上位机通信模块中的核心器件，主要实现对上一级信号调理电路输出的超声波进行 A/D 采样，以及在上位机通信模块中控制存储数据的传输，并且为整个硬件系统提供统一的时序控制。

3.2.1 ARM 相关背景

ARM 公司（原名 Advanced RISC Machine 公司）最早于 1990 年 11 月在英国由 VLSI Technology、苹果公司和 Acorn 集团共同出资成立^[34]。ARM 公司主要生产基于 RISC（Reduced Instruction Set Computing，即精简指令集）的处理器，并且自身拥有处理器相关技术和软件的知识产权。

RISC 和 CISC（Complex Instruction Set Computing）的特点对比如表 3-1 所示。

表 3-1 RISC 和 CISC 性能对比

类别	CISC	RISC
指令系统	复杂，较为庞大	简单，较为精简
指令数目	大于 200	小于 100
指令字长	不固定	等长
可访存指令	无限制	只有 LOAD/STORE 指令
不同指令调用频繁度	有较大差距	无较大差距
不同指令花费时间	相差很大	相差很小
优化编译难度	较困难	较容易
程序代码长度	较短	较长

ARM 公司专注于新一代处理器芯片的设计，因而其自身并不制造芯片，只是授权其他合作公司生产，比较知名的有 ST（意法半导体）、TI（德州仪器）、Samsung（三星）等厂家。和以往其他型号的处理器相比，ARM 处理器具有以下优点：

1) ARM 处理器产品性能上毫不逊色于 MIPS 等同类产品，同时，在符合产品设计要求的条件下，尽可能将器件的功率消耗降到最低，并且购买相关器件的开发成本较低。

2) ARM 处理器在经过二十多年的发展后，相关芯片制造企业生产的 ARM 处理器种类越来越丰富，已经有几百种 ARM 各系列型号的产品被投放于市场，用户可以根据自己的设计需要来选择最合适自己的产品^[35]。

3) ARM 处理器具有自己的高效软件开发工具，并且对协议栈、操作系统等第三方应用设计的开发具有良好的兼容性，因此，可以很方便的实现跨版本、跨平台的应用移植。

ARM 处理器从最初的 ARM1 系列，一直发展到 ARM11 系列，在此之后，不再采用以往的命名方式，而是将处理器分为 Cortex-A 系列，Cortex-R 系列 Cortex-M 系列，其中，Cortex-A 系列主要用于尖端设备的制造和结构复杂的操作系统的设计，在工艺节点中体现出超高频率的卓越性能，现在市面上流行的智能手机、平

板电脑和数字电视很多都采用了这一系列芯片。Cortex-R 系列主要用于深层嵌入式系统的实时应用，提供具有高安全性、准确性的实时行为，该系列芯片功耗较低，且对平台的兼容性较好，在医疗仪器的控制系统、汽车的动力传送和制动系统中有广泛应用^[36]。Cortex-M 系列主要针对低功耗和低成本的应用方案设计，在保证中断响应的快速和准确的同时，尽可能的降低设计所需门数和功率消耗，在智能传感器、音频设备等小型电子系统中有着大量应用。

3.2.2 STM32F407 设计原理

3.2.2.1 芯片功能介绍

STM32F407 是 ST（意法半导体）公司在以往系列产品的基础上新推出的基于 ARM v7 架构和 Cortex-M4 内核的新款 ARM 芯片^[37]。



图 3-2 STM32F407 芯片

STM32F407VGT6 是一款性能优越、功能强大的 32 位处理器，其工作频率达到了 168MHz 之高，运行时可以达到 210DMIPS 的处理能力，可以实现更高的采样率，并且集成了 FPU（浮点运算单元）和 DSP 指令集，大幅增强了芯片的浮点运算能力，丰富了芯片的应用场合。新增了照相机媒体接口、高速 USB-OTG 接口、并且内部自带加密处理器同时，代码效率的大幅提高和对饱和缩放运算的简化，以及对多种语言的良好支持，使用户设计更为方便，进一步降低了开发难度。

设计采用了带 FIFO 模块的多个 DMA 控制器（通用的 2 个、Ethernet 和 USB HS 各 1 个）和 32 位 ART 加速器，以及 7 层 AHB 总线矩阵（7 个主要的、8 个从属的，包括 2 个 SRAM 块），一个内核专用的 SRAM 块的方案，对数据传输和资源分配进行了优化，实现了更高性能和超快速的数据传送。

采用 90 纳米的工艺设计使得处理器内核电压低至 1.2V，并且自适应实时加速器的应用有效降低了 Flash 的访问次数。当芯片工作在 VBAT 模式时，典型地 $RTC < 1\mu A$ ， V_{DD} 也从 3.6V 降低到 1.7V。电压调节器能够实时调节电源能力，当由电池供电或者低电压运行时，可以灵活的调整工作状态，降低电源的功率消耗。

芯片自带 1M 字节的内部 FLASH 和 196K 字节的内嵌 RAM 存储空间，以及复位电路，内部 RC 和 PLL 等设计，具有超高的集成度。并且自带 FSMC 接口，方便实现外部存储器的扩展。

3.3 其他硬件模块设计

3.3.1 超声波发射和接收模块

该模块主要负责实现超声波激励信号的产生以及超声波的发射和接收。常用的激励信号有很多种，要根据实际测量需求来选择合适激励信号^[38]。图 3-3 列举了一些常见的激励信号：

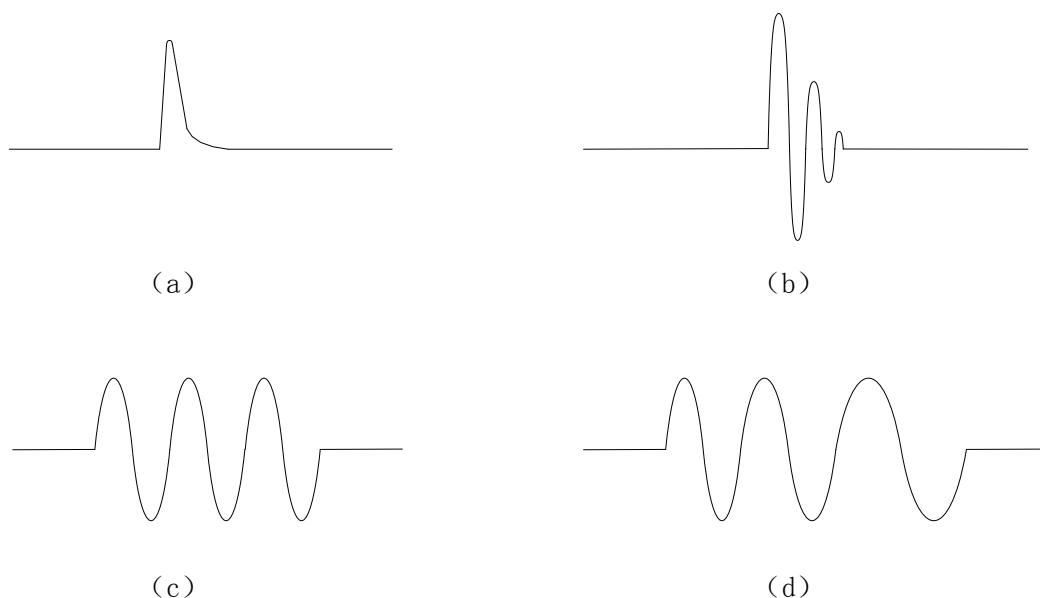


图 3-3 不同类型的激励信号

(a) 尖峰脉冲；(b) 振荡衰减

(c) 正弦信号；(d) 扫频信号

其中，图 a 所示波形对应频带较短的尖峰脉冲信号；图 b 所示波形对应振荡衰减信号；图 c 所示波形对应正弦信号；图 d 所示波形对应扫频信号。与此同时，测量时也可用方波波形的上升沿来实现对超声波探头的激励。

由于正弦信号在使用时其频率相对固定，导致其对应的频谱成分单一，进一步分析可知其能量主要分布于接近载波频率的频带内，使信号的能量得到较好的保存。在超声波流量测量领域中，作为激励信号的脉冲如果频率分布范围越窄，则其对应的分辨力就越容易提高，测量得到的信号往往具有较好的识别度，对比几种波形的分布情况之后，最终选择振荡衰减信号作为激励信号。

考虑到在进行超声波流量测量时器件的工作频率较高，且管道外壁并没有给超声波换能器的安装提供太多便利条件，因此，内部结构相对简单，对激励信号无苛刻要求，并且能够以较小的改动解决与大部分测量介质的阻抗匹配问题的压电效应换能器，被采纳为本次设计中的超声波换能器所使用的类型^[39]。

在本次设计中，由于使用的超声波频率为 240KHz~260KHz，为了达到最佳谐振效果，采用中心频率为 250KHz10%，即带宽为 225KHz~275KHz 的压电效应换能器进行超声波激励模块的设计。

3.3.2 信号调理模块

由于超声波自身在传播过程中会不断衰减，并且周围环境会引入很多干扰噪声。当超声波信号在管道流体中传播以后被接收探头检测到时，其信号能量往往较弱且波形紊乱，不利用进行波形观察和后期数据测量，因此，接收到的超声波信号需要经过信号调理模块的处理之后才能进一步使用^[40]。

信号调理模块一般包括功率放大模块、滤波电路、过电压保护和偏置电路等。这些电路不仅能够实现当信号电压过高时对电路中的元器件进行保护，还可以将接受到的微弱超声波信号进行功率放大，同时通过滤波电路消除超声波信号中的噪声，使电路的输出信噪比得到提升，其原理图如图 3-4 所示，实物图如图 3-5 所示。本模块设计中所采用的功率放大部分的增益为 40dB，意味着对输入信号的电压放大了 100 倍^[41]。

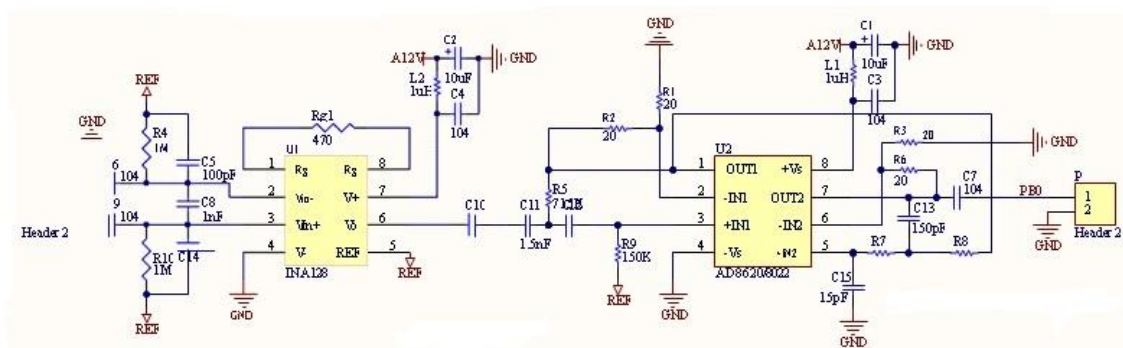


图 3-4 信号调理模块原理图



图 3-5 信号调理模块

3.3.3 上位机通信模块

上位机通信模块主要实现将上一级 A/D 采样模块中得到的时间量通过串口或者以太网口传输给上位机进行后期数据处理。

以往构成以太网通信的两大组成部分 MAC(媒体接入访问控制器)和 PHY(物理层接口芯片)都是被集成在不同的元件内部,实现相关控制的过程较为复杂,并且需要将添加的 TCP/IP 协议的相关代码交给 CPU 运行,占用了 CPU 的大量资源,降低了系统的整体性能^[42]。

W5300 是韩国 Wiznet 设计的一款基于 CMOS 工艺的 0.18 μm 级的单芯片器件,区别于其他产品设计,它内部包含 MAC 和 10M/100M 以太网控制器,以及将 TCP/IP 协议栈等集成在芯片内部,因为其工作性能稳定,使用方便,被广泛应用于嵌入式领域当中的以太网传输设计。

3.4 系统软件设计

3.4.1 软件设计流程

一个完整的设计系统是由硬件和软件共同组成,软件的设计是在硬件模块设计的基础上进行的,与硬件模块有着不可分割的联系。软件系统的设计是按照系统总体功能模块划分的分类来实现,分为 A/D 采样模块、上位机通信模块等。整个软件系统的具体设计流程如图 3-6 所示。

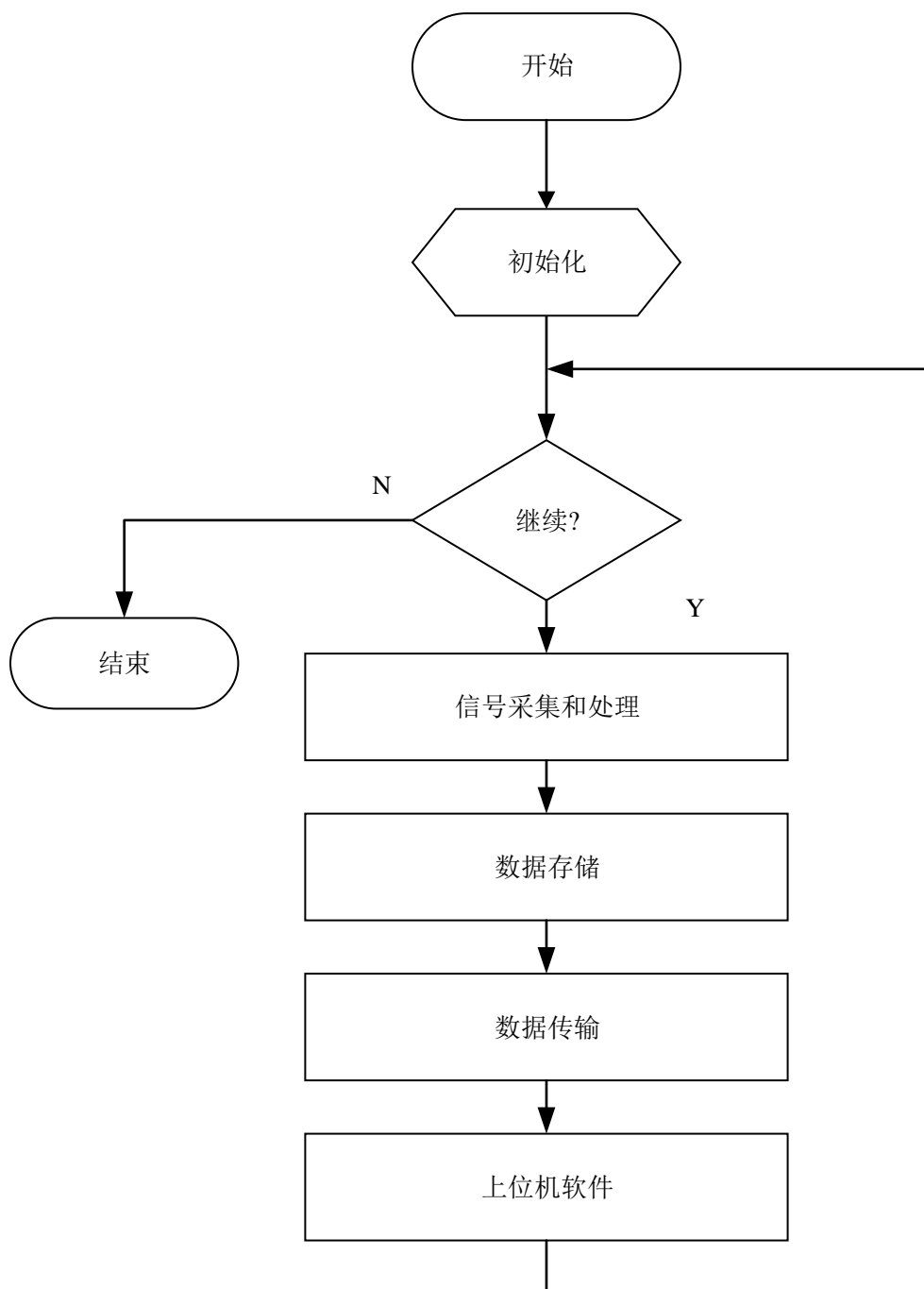


图 3-6 系统软件设计流程图

整体软件系统的工作过程如下：整个系统在上电后开始工作，并进行初始化，在进行完初始化后，ARM 的 ADC 模块开始对信号进行采样，并通过 DMA 将采样数据保存到相应存储器中，在与上位机建立连接后通过 W5300 将数据传送到上位机保存。其中，初始化的具体步骤和内容如图 3-7 所示。

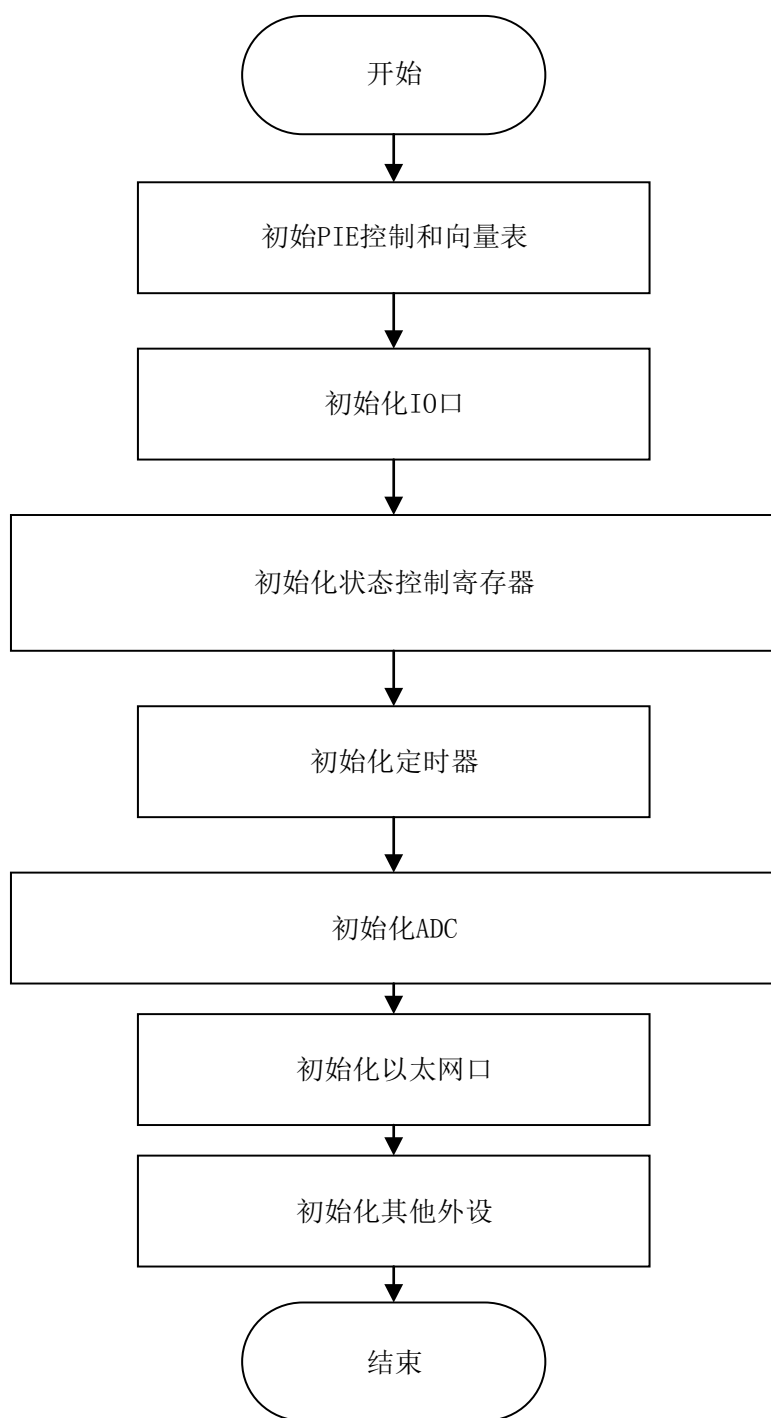


图 3-7 系统初始化具体流程

本次软件开发使用的是 Keil MDK 工具（也称 Keil uVision4），Keil MDK 专门针对 ARM7、ARM9、Cortex 等内核系列的产品设计，为用户开发和使用 ARM 芯片提供了性能优越的开发环境，如图 3-8 所示。

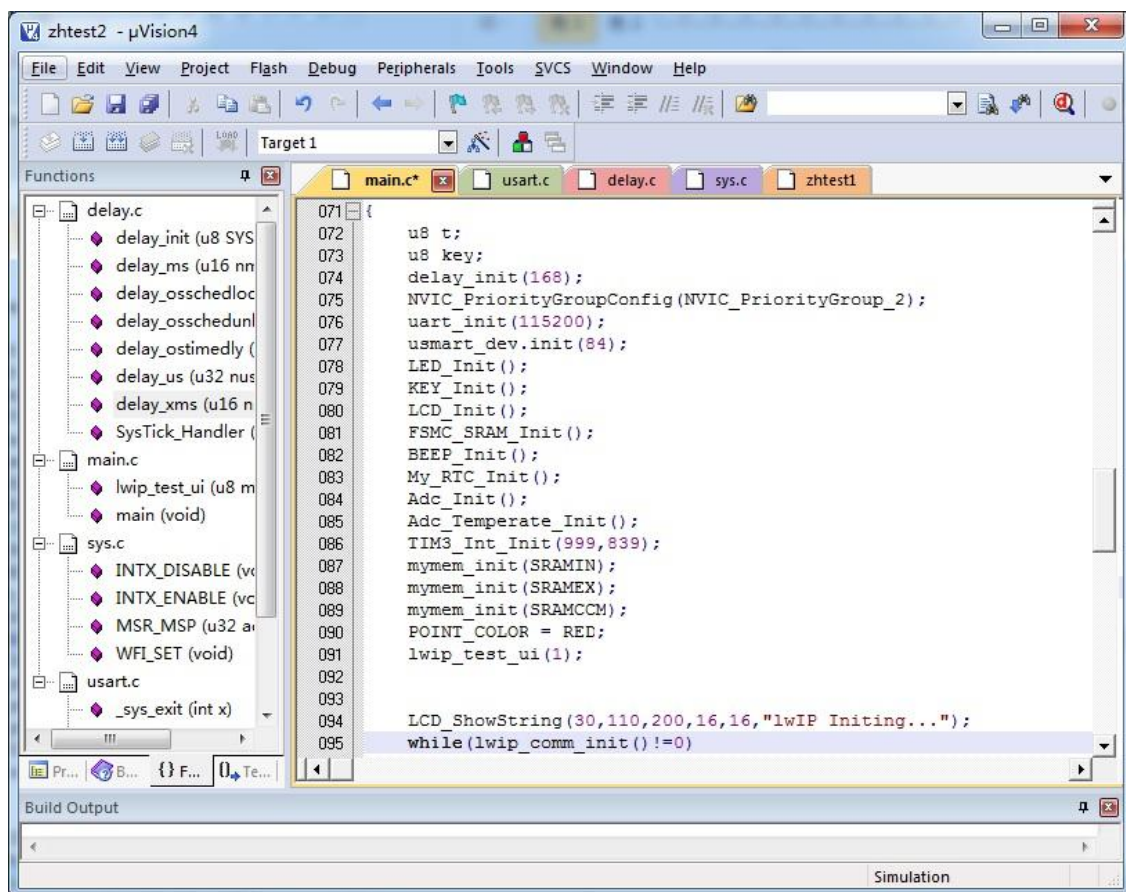


图 3-8 Keil 软件开发环境

Keil MDK 拥有业内领先的 ARM C/C++编译工具，支持市场上绝大部分 ARM 芯片生产厂家的相关产品。其操作界面简洁而且友好，并且支持 TCP/IP 等多种协议的应用，提供了丰富的 GUI 库来对图形用户接口的进行支持。Keil MDK 采用 C 语言进行编程，通过编译器编译之后，进一步生成可执行文件，使用 J-Link 仿真器将程序下载到 ARM 芯片中运行。

3.4.2 软件模块设计

3.4.3.1 存储器模块

程序存储器、数据存储器、寄存器和 I/O 端口按照相同顺序排列在 4GB 的地址空间内，各字节按小端格式在存储器中编码。字中编号最低的字节被视为该字的最低有效字节，而编号最高的字节被视为最高有效字节。

可寻址的存储空间共分为 8 个主要块，每个块为 512MB。所有可用的外设按照表 3-2 进行地址映射。

表 3-2 STM32F407VGT6 存储器外设地址映射表

边界地址	外设	总线
0xA000 0000-0xA000 0FFF	FSMC 控制寄存器	AHB3
0X5006 0800-0X5006 0BFF	RNG	AHB2
0X5006 0400-0X5006 07FF	HSH	AHB2
0X5006 0000-0X5006 03FF	CRYP	AHB2
0X5005 0000-0X5005 03FF	DCMI	AHB2
0X5000 0000-0X5003 FFFF	USB OTG FS	AHB2

3.4.3.2 ADC 模块

STM32F407VGT6 集成的内部 ADC 是 12 位的逐次趋近型模数转换器，它具有多达 19 个复用通道，可以对 VBAT 通道信号和最多 16 个外部信号源、2 个内部信号源进行测量。可以根据测量需求工作在单次采样和连续采样两种不同工作模式下，相关采样数据的运行结果存储在一个 16 位数据寄存器中。

本次设计中入射超声波频率为 250KHz，在满足采样定律的前提下，为了达到较好的采样效果，相应的将 ADC 的采样频率为设置在 1MHZ，可以更好的发挥 ARM 芯片的性能。为了获得较为准确的传播时间数据，需要进行多次测量，相应的设置 ADC 工作在连续采样模式，转换过程的时序如图 3-9 所示。

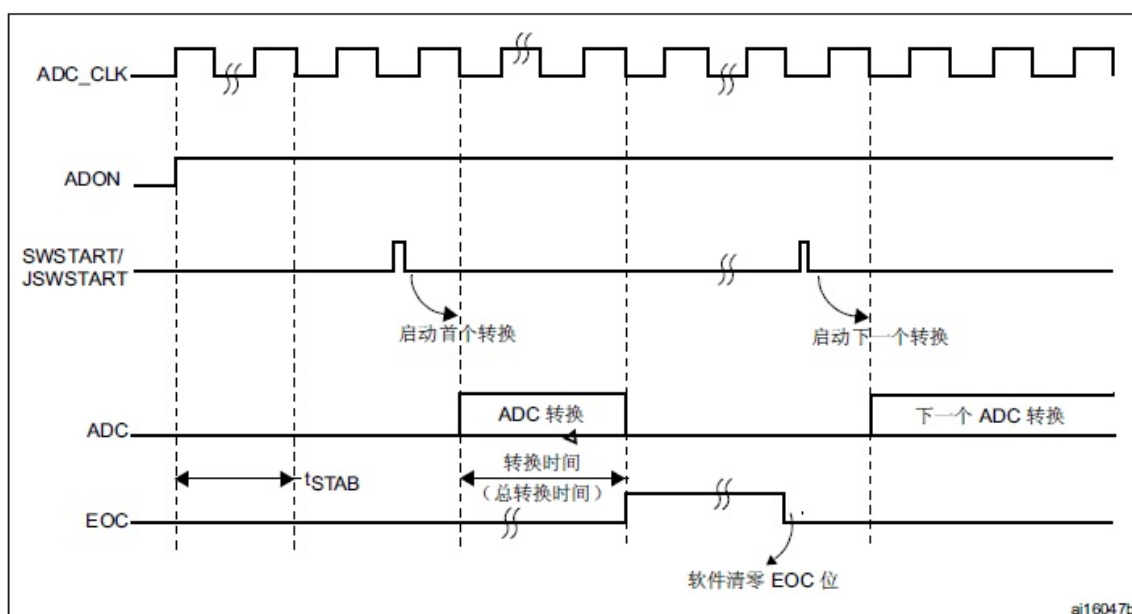


图 3-9 ADC 工作时序图

3.4.3.3 DMA 模块

DMA（直接存储器访问控制模块）是嵌入式设计领域中为了解决以往在外设和存储器，以及存储器与存储器之间传输大量数据时速度较慢且效率较低的问题而设计的^[43]。可以不通过 CPU 操作对数据进行高速发，节约了大量 CPU 资源，提高了系统整体性能。

STM32F407VGT6 芯片的 DMA 控制模块基于矩阵结构的复杂总线设计，将 AHB 总线与独立的 FIFO 结合在一起，进一步优化了系统带宽的使用效率。内部集成的两个 DMA 控制模块总共有 16 个数据流（每个控制模块 8 个）。每个 DMA 控制模块都可以响应来自一个或多个外设的访问请求，并且每个通道都带有一个仲裁器，根据 DMA 访问请求的优先级进行排序传输。同时，它还具备以下一些特性：

（1）具有双 AHB 主总线的特殊架构，其中一条总线用于存储器访问，另一条总线用于外设访问；

（2）对源地址和目标地址可以按照增量或者非增量的方式进行寻址；

（3）每个数据流可以关联最多 8 个通道或请求，可以通过软件来设置外设请求 DMA 响应的数目；

（4）源地址和目标地址的数据传输可独立进行：当源地址和目标地址的数据宽度不相等时，DMA 会自动对一些数据进行打包/解包，对带宽进行优化，这种功能只有在 FIFO 模式下才可以使用；

（5）每个数据流都支持循环缓冲区管理；

（6）每个 DMA 控制器都包含 8 个数据流，每个数据流可以关联最多 8 个通道或请求；

（7）8 个数据流当中的每一个都可以连接到专用硬件 DMA 通道（请求）；

（8）每个数据流都有独立的四级 32 位先进先出存储器缓冲区 (FIFO)，可以设定数据流工作在直接模式或者是 FIFO 模式：

—FIFO 模式：该模式下可通过软件将阈值级别选取为 FIFO 大小的 1/4、1/2 或 3/4；

—直接模式：此时每个 DMA 请求会立即启动对存储器的数据传输。当工作在直接模式（禁止 FIFO）下，如果将 DMA 请求配置为按照存储器到外设模式传输数据时，DMA 只会将一个数据从存储器预加载到内部 FIFO，从而确保一旦外设触发 DMA 请求时，立即进行数据传输。

通过硬件可以将每个数据流配置为：

— 支持从外设到存储器、存储器到外设和存储器到存储器传输数据的常规通道；

— 支持在存储器设置双缓冲区通道；

(9) DMA 数据流请求之间的优先级可用软件编程来设定，共分为 4 级（4 个级别：非常高、高、中、低），在软件优先级相同的情况下可以通过硬件决定优先级（例如，请求 0 的优先级高于请求 1）；

(10) 数据流也可以通过软件触发来实现存储器和存储器间的传输（仅限 DMA2 控制器）；

(11) 可以通过 DMA 控制器或者外设来设置要传输的数据长度：

— DMA 控制器：要传输的数据长度范围是 1 到 65535，可用软件编程

— 外设控制器：要传输的数据长度范围未知，并由源或目标外设控制，这些外设通过硬件发出传输结束的信号；

(12) 支持按照 4 个、8 个和 16 个节拍的增量来进行突发传输。突发增量的大小可由软件配置，通常设置为外设 FIFO 大小的一半；

(13) 5 个事件标志（DMA 半传输、DMA 传输完成、DMA 传输错误、DMA FIFO 错误、直接模式错误），进行逻辑或运算，产生每个数据流的单个中断请求；

DMA 控制器因为采用 AHB 主总线，它可以通过控制 AHB 主总线来实现数据在外设到存储器、存储器到存储器、存储器到外设等不同方式的高速传输。

3.4.3.4 上位机通信模块

上位机通信模块设计采用 W5300 芯片来设计，W5300 内部集成了众多如 TCP、UDP、IPV4、ICMP、IGMP、ARP、PPPOE 的硬件通信协议技术，并且将数据存储器扩展到 120K 字节来实现高性能数据传输的目的。可以用 16 位数据总线与 ARM 通信，数据的高速传输可以通过 8 个独立端口来实现。

本次设计将 W5300 工作在 UDP 连接方式，由于 W5300 内部固化了 TCP/IP 协议栈，只需建立相应的 Socket 端口即可实现与上位机的以太网通信，简化了这一部分的软件设计流程。

Socket 初始化和接收测试的部分程序伪代码如下：

(1) 初始化 SOCKET

```
{
    START:
    Sn_MR = 0x02; /*设置为UDP传输模式*/
    Sn_PORTR = source_port; /*设置端口号*/
    Sn_CR = OPEN;
```

```
/*等待直到成功设置为UDP为止*/
```

```
if (Sn_SSR != SOCK_UDP) Sn_CR = CLOSE; goto START;
```

```
}
```

(2) 数据接收

```
{
```

```
if (Sn_RX_RSR != 0x00000000) goto Receiving Process stage;
```

```
}
```

采用 UDP 通信的过程中，每个 UDP 数据包中都有一段长度为 8 个字节的标识部分，这个标识部分都包含有发送端的端口号和 IP 地址信息，以及传送数据的长度。接收端必须通过数据包中的标识部分的信息来剔除不需要的数据包。当传输的数据长度大于存储器剩余空间时，传输过程将中断。

```
{
```

```
temp = Sn_RX_FIFOR; /*提取目的IP地址*/
```

```
dest_ip[0] = ((temp & 0xFF00) >> 8);
```

```
dest_ip[1] = (temp & 0x00FF);
```

```
temp = Sn_RX_FIFOR;
```

```
dest_ip[2] = ((temp & 0xFF00) >> 8);
```

```
dest_ip[3] = (temp & 0x00FF);
```

```
dest_port = Sn_RX_FIFOR; /*提取目的端口号*/
```

```
pack_size = Sn_RX_FIFOR; /*提取数据长度*/
```

```
if (pack_size is odd ?) read_cnt = (pack_size + 1) / 2;
```

```
read_cnt = pack_size / 2;
```

```
for ( i = 0 ; i < read_cnt ; i++ )
```

```
{
```

```
data_buf[i] = Sn_RX_FIFOR;
```

```
}
```

```
Sn_CR = RECV;
```

```
}
```

(3) 发送数据

```
{
```

```
/*读取存储区剩余空间大小*/
```

```
FREESIZE:
```

```
get_free_size = Sn_TX_FSR;
```

```

if (get_free_size < send_size) goto FREESIZE;
/*设置接收端信息*/
Sn_DIPR0 = dest_ip[0]; //or 255; /*设置长度为4字节的IP地址*/
Sn_DIPR1 = dest_ip[1]; //or 255;
Sn_DIPR2 = dest_ip[2]; //or 255;
Sn_DIPR3 = dest_ip[3]; //or 255;
Sn_DPORTR = dest_port; /*设置长度为2字节的端口号*/
Sn_DPOif (send_size is odd ?) write_cnt = (send_size + 1) / 2;
else write_cnt = send_size / 2;
/*复制数据到传送存储区*/
    for (i = 0; i < write_cnt; i++)
    {
        Sn_TX_FIFOR = data_buf[i]; /*数组长度为16位*/
    }
/*设置发送数据长度*/
Sn_TX_WRSR = send_size;
Sn_CR = SEND;
}
(4) 检查是否完成传送
    当上一次数据传送完毕，进行下一次传送之前，需要对上一次的发送是否完成进行检测。
    {
        /*检查send命令是否结束/
        while(Sn_IR(SENDOK)==? )
        {
            /*检查是否超时*/
            if (Sn_IR(TIMEOUT)==1) Sn_IR(TIMEOUT)=1; goto Next stage;
        }
        Sn_IR(SENDOK) = 1;
    }
(5) 关闭端口，停止发送数据
    {
        /*清除中断标志*/

```

```
Sn_IR = 0x00FF;  
IR(n) = 1;  
Sn_CR = CLOSE;  
}
```

3.5 本章小结

在本章中，说明了本次时差法超声波流量计嵌入式平台设计的具体系统框架，将系统的硬件部分为超声波发生和接收、信号调理、A/D 采集、时间差计算和上位机通信五个模块，并分为分别对硬件部分用到的模块进行了介绍，之后对软件设计流程、设计步骤及使用的开发环境就行了阐述，综合完成了整个以 ARM 芯片为核心的系统设计。

第四章 基于 EMD,HHT 的信号降噪设计

4.1 噪声来源

在第二章中介绍了影响超声波流量测量的一些因素,如温度因素、机械因素、时间延迟因素等,但除了这些因素之外,还有一种因素,也会对超声波流量测量的准确性造成较大影响,那就是噪声。超声波流量测量过程中的噪声来源相当复杂,整个测量系统不仅有模拟电路部分(如信号调理电路,超声波换能器驱动电路),也有数字电路部分(如 A/D 采样模块和时间计算模块)^[44]。综合分析下来,超声波信号噪声的来源大概可以分成下述三种:

第一种是由外部供电模块带来的电源噪声,这部分噪声往往会使供电电源的输出电压差生波动,严重影响输出信号的信噪比,后面数字电路的逻辑控制和信号参数分析也会因此受到影响,导致系统输出紊乱,产生错误测量结果。

第二种是由整个电路系统中的各个元器件带来的噪声,这部分噪声由于其功率谱近似于定值,可以等同于白噪声进行分析。

第三种是声学噪声,主要是由于待测管道的管壁对超声波的反射,以及待测环境中存在的振动等对压电效应换能器中的压电晶片产生激励而造成的,由于压电效应换能器的原理限制,这种声学噪声不可避免的会出现在本次时差法超声波流量计的设计过程中。

4.2 超声波流量测量中的降噪方法

基于前一小节的分析,可以得出必须对采集到的超声波信号数据进行降噪之后,提取出其中的有效成分,才能进行下一步数据处理。常见的信号降噪方法有 FFT、小波变换等^[45]。

4.2.1 数字滤波器

数字滤波器,是通过数字电路或者计算机编写设计的软件程序,来实现对信号滤波降噪的目的。数字滤波器根据通频带的不同可以分为高通、中通、低通等,也可以按照其他方式分为时变的和时不变的,因果和非因果的等不同类型。当原始信号中的噪声成分较为单一,频率分布相对集中时,可以取得较好效果。对于本次设计而言,超声波流量测量过程中的噪声成分往往相对复杂,且噪声信号频率分布范围较广,采用单一的数字滤波器进行降噪的效果并不理想。

4.2.2 FFT 法降噪

FFT（快速傅里叶变换）是 DFT 的一种快速算法，用于解决以往 DFT 运算量太大，计算过程冗杂，在实际使用中受到诸多条件限制的问题。Cooley—Tukey 在 1965 提出了简化型的 FFT 算法，使得 FFT 的分析应用得到了进一步推广。FFT 进行降噪的出发点是对于某些平稳噪声信号，对其在时域进行分析比较困难时，可以将其通过快速傅里叶变换将其转换到频域进行观察，往往能够获得很大收获。快速傅里叶变换算法能够对噪声当中的整数次谐波进行精确分析^[46]。尤其是当噪声和有效信号在频域内处于不同的频率范围时，则可以设计相应的滤波器直接对噪声进行滤除。

但是对噪声当中的非整数次谐波进行检测和分析时，快速傅里叶变换就显得较为乏力，会存在栅栏效应和频谱泄漏等问题，导致测量结果出现较大误差，以及在超声波流量计测量过程中的噪声信号并不是平稳信号，其频率也不是集中分布在某一频段，而是无规律的分布在多个频段，所以采用 FFT 进行降噪的方法并不适用于本设计方案。

4.2.3 小波变换法降噪

小波变换（Wavelet Transform，简称 WT）是在短时傅里叶变换（STFT）的基础上发展而来的新型降噪方法，在噪声分析领域有着广泛应用。它将 STFT 对信号进行局部加窗分析的思想继承了下来，但不同于傅里叶变换采用无限长的三角函数基进行运算，小波变换采用的是有限长的会衰减的小波基，这样不仅能够实现对噪声信号频率的检测，还可以定位到噪声出现的时间^[47]。

由于小波变换不具有自适应性，在选定了小波基函数以后很难做出改变。在超声波流量计进行测量的过程中，噪声成分构成复杂，如果选取的小波基函数不恰当，长度有限的小波基同样会对超声波信号的能量造成泄漏。与此同时，受到 Heisenberg “测不准原理”的限制，使得小波变换很难给出超声波信号在时间、能量、频率方面的综合分布状态。

4.3 基于带通滤波器、EMD 和 HHT 的降噪设计

针对超声波流量测量中的噪声频率带宽较广且成分复杂的特点，上一小节中提到的传统的降噪方法并不适用于超声波流量测量过程中的噪声消除，很难实现降噪目的，必须借助一种新的信号分析方法来进行降噪。本文采用一种在带通滤波器技术的基础上，将经验模态分解（EMD）和希尔伯特-黄变换（HHT）相结合的方法来对超声波流量测量过程中的噪声进行消除^[48]。

4.3.1 带通滤波器设计

带通滤波器的功能是以原始信号的中心频率为基准，对分布在原始信号中心频率一定范围内的信号进行保留，对范围外信号的进行滤除。

本文设计所采用的带通滤波器是由软件程序编写而成，其实质是一段卷积函数，带通滤波器的作用就是将原信号 $X(\exp(j\omega))$ 当中低于 ω_1 和高于 ω_2 的频率成分滤除，其中， ω_1 和 ω_2 分别为滤波器的下限截止频率和上限截止频率。

此时，滤波器两端的输入信号和输出信号存在频域内存在如下关系：

$$Y(e^{j\omega}) = X(e^{j\omega})H(e^{j\omega}) \quad (4-1)$$

式 (4-1) 中， $H(e^{j\omega})$ 为带通滤波器传递函数的频域响应。

设计带通滤波器的关键参数主要有 4 个，分别是阻带的上限频率、通带的上限频率、通带的下限频率、阻带的下限频率。根据需求的不同可以设计成切比雪夫 I 类、切比雪夫 II 类、巴特沃斯等不同类型。本次设计中为了降低滤波器阶数过高所带来的时间延迟和降低设计难度，采用切比雪夫 I 类作为设计方案。

在分析了超声波流量测量过程中的信号特征之后，将带通滤波器的阻带上限频率设为 500KHz，通带上限频率设为 450KHz，通带下限频率设为 25KHz，阻带下限频率设为 20KHz，通带衰减设置为 0.1dB，阻带衰减设置为 60dB，并用 Matlab 软件中的 fdatool 模块进行配置，滤波器的通带曲线如图 4-1 所示。

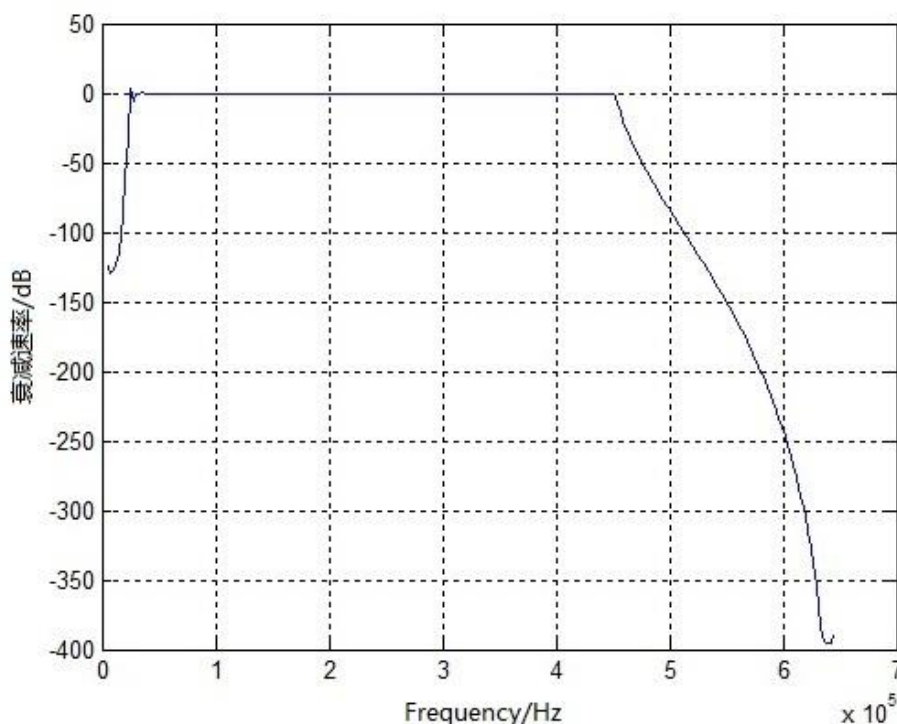


图 4-1 滤波器通带曲线图

4.3.2 经验模态分解原理

经验模态分解 (Empirical Mode Decomposition, 简称 EMD) 是由以美国国家宇航局的黄锷 (N.E.Huang) 为首的一些研究人员于 1998 年首次提出的^[49]。

EMD 不需要像小波变换那样事先选定基函数, 也无需提前知道噪声信号的分布特点, 因此其具备 FFT 和小波变换都不具有的自适应性, 在这方面取得了突破性的进展。并且对于噪声中的非平稳、非线性信号, EMD 大幅改善了以往这些信号的频率特征和局部时间分析困难的处境, 加之 EMD 丝毫不会受到 Heisenberg 的“测不准原理”的制约, 可以进一步获得较高的分辨率^[50]。被认为是信号频谱分析领域自奠定傅里叶变换理论基础以后的又一重大突破, 给相关信号分析方法的设计提供了新的思路。

在很长一段时期内, 在信号频谱分析领域关于瞬时频率的定义方式和其物理意义一直存在争议, 直到 N.E.Huang 提出了本征模态函数 (IMF) 的概念, 这一状况才有所改善。如果一个信号可以被分解为许多的窄带信号, 那么每一个分量都是该信号的本征模态函数, 这样一来, 瞬时频率的物理意义便得到了体现。

通过提取信号的局部变化特征, 使原本混叠的信号分解成若干清晰的本征模态函数, 是 EMD 算法的目的所在, 分解成的 IMF 必须满足以下两个条件:

- 1) 信号的极大值和极小值的数目相加的结果与信号过零点的数目之差在一个以内 (包括一个);
- 2) 信号的上包络线 (由信号局部极大值构成) 和信号的下包络线 (由信号局部极小值构成) 的均值为零^[51]。

其中, 第一个条件也是采用其他方法进行窄带信号分析所要求具备的; 第二个条件则相对有创新性的引入了一个新的概念, 把以往的全局要求降低为局部限制。通过定义任意点的局部均值为零, 消除非对称波形的波动对瞬时频率的干扰。

4.3.3 经验模态分解过程

在没有限制条件的情况下, 并不是任何信号都能够进行 EMD 分解, 因此, N.E.Huang 提出了以下假设:

- 1) 至少含有一个极小值和极大值存在于检测数据中;
- 2) 待测数据极值点间的时间尺度是能够反映信号局部时域特征的唯一参数;
- 3) 如果数据中缺少极值点, 但同时有拐点存在, 这时可采用先多次微分求得数据极值, 再进行积分来实现分解过程的方法。

EMD 分解的一般步骤如下:

(1) 对原始信号 $x(t)$ 进行求极值的运算, 将 $x(t)$ 的全部极大值和极小值求解出来, 然后通过三次样条插值, 将 $x(t)$ 的极大值连起来后形成上包络, 同样的, 用三次样条插值方法将 $x(t)$ 的极小值连起来后形成下包络, 则此时上包络和下包络的区间内包含了所有 $x(t)$ 的数据, 将此时上包络和下包络的均值记为 $m_1(t)$, 对 $x(t)$ 进行如下运算:

$$x(t) - m_1(t) = y_1(t) \quad (4-2)$$

此时, 对 $y_1(t)$ 进行验证, 如果 $y_1(t)$ 满足本征模态函数的要求, 那么 $y_1(t)$ 就是原始信号 $x(t)$ 的第一个 IMF 分量; 如果 $y_1(t)$ 不满足本征模态函数的要求, 则需要用 $y_1(t)$ 代替原始信号 $x(t)$ 重复上面的步骤, 直到 k 次以后 $y_{1k}(t)$ 满足本征模态函数的要求为止, 此时, $y_{1k}(t)$ 和 $y_{1k(k-1)}(t)$ 满足如下关系:

$$y_{1k}(t) = y_{1k(k-1)}(t) - m_{1k}(t) \quad (4-3)$$

(2) 此时, 将 $y_{1k}(t)$ 记为 $c_1(t)$, 则 $c_1(t)$ 成为了 $x(t)$ 的第一个 IMF 分量。由于 $c_1(t)$ 是信号 $x(t)$ 的第一个 IMF 分量, 可以通过以下运算将 $c_1(t)$ 从 $x(t)$ 分离出来:

$$r_1(t) = x(t) - c_1(t) \quad (4-4)$$

将作为原始数据重复步骤 (1), 继续得到 $x(t)$ 的第二个、第三个...第 n 个 IMF 分量, 此时有如下关系成立:

$$\left. \begin{aligned} r_1(t) &= r_2(t) - c_2(t) \\ \dots \\ r_{n-1}(t) &= r_n(t) - c_n(t) \end{aligned} \right\} \quad (4-5)$$

(3) 当分解过程中产生的 $c_n(t)$ 或者 $r_n(t)$ 足够小, 或者 $r_n(t)$ 已经成为单调函数无法继续求取本征模态函数时, EMD 分解过程结束, 此时, 有如下关系成立:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (4-6)$$

从上面的过程可以看出, 可以将任何一个信号 $x(t)$ 通过 EMD 过程分解为有限个 IMF 分量 $c_1(t)$, $c_2(t) \dots c_n(t)$ 和一个残量 $r_n(t)$ 之和, 信号的频率成分从高频到低频包含在有限个 IMF 分量 $c_1(t)$, $c_2(t) \dots c_n(t)$ 当中, 当信号本身发生变化时, IMF 分量也会随着变化^[52]。EMD 分解的流程图如图 4-2 所示。

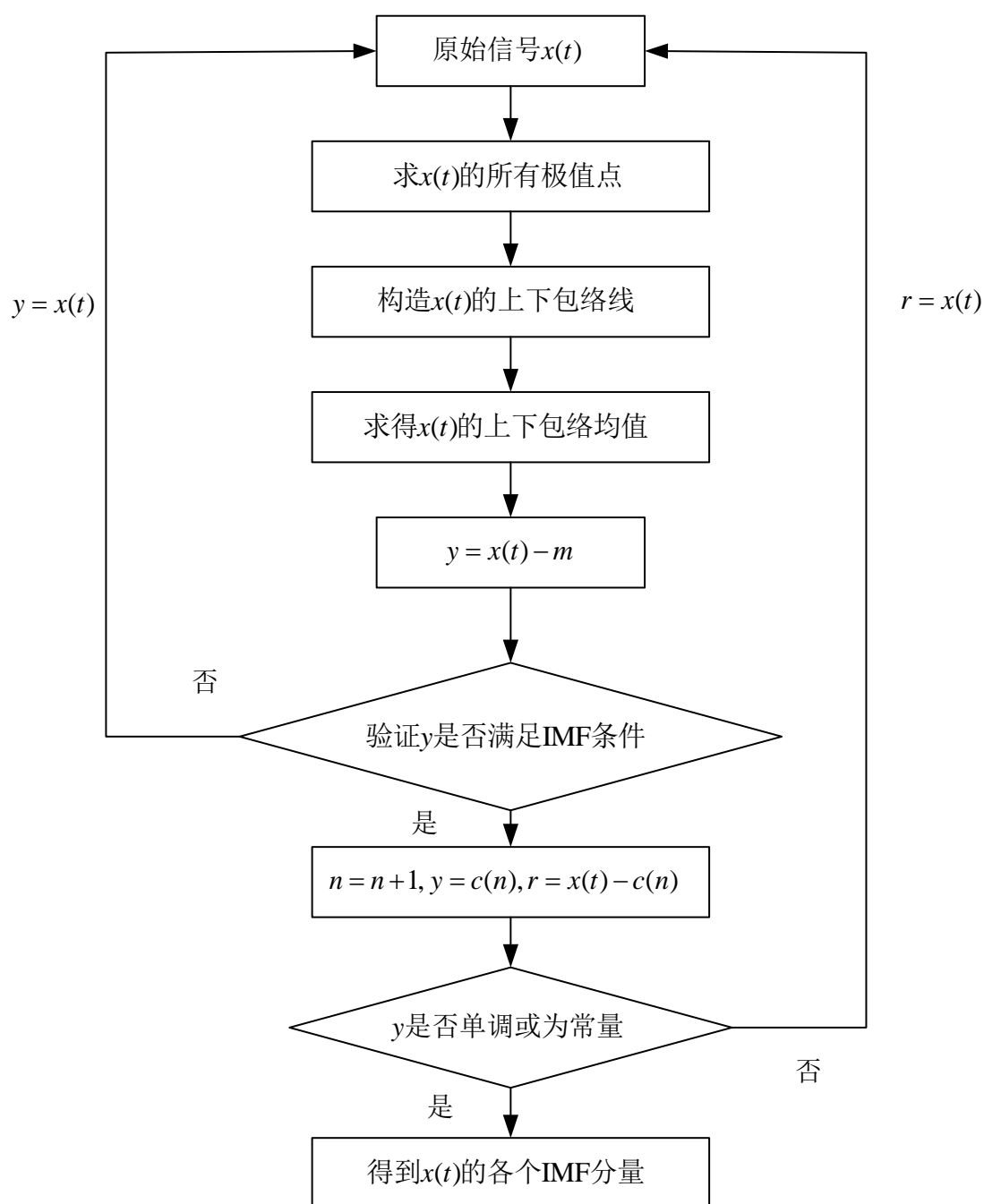


图 4-2 EMD 分解过程流程图

4.3.4 希尔伯特-黄变换

希尔伯特-黄变换(HHT)是由 N.E.Huang 在 1998 年在提出经验模态分解(EMD)的基础上,进一步引入了 Hilbert 谱的相关概念,并提出了新的 Hilbert 谱分析的信号分析方法,大幅降低了分析信号时频特性的技术难度^[53]。

希尔伯特-黄变换的过程包含两个步骤，第一步是 EMD 分解过程，将信号通过 EMD 分解以后得到有限个 IMF 分量。第二步是将这些 IMF 分量进行希尔伯特变换，产生与之对应的 Hilbert 谱，这样便得到了每个 IMF 对应的时频谱。通过将每个 IMF 的时频谱综合起来，最终可以得到原信号的 Hilbert 谱，可以利用原信号的 Hilbert 谱来分析信号的时频特性。

其中，希尔伯特变换的具体过程为：在式（4-6）的基础上，对每个进行如下变换：

$$H[c_i(t)] = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{c_i(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (4-7)$$

由式构造解析函数可以进一步得到其幅值函数 $a_i(t)$ 和 $\theta_i(t)$ 的具体表达式为：

$$a_i(t) = \sqrt{H^2[c_i(t)] + c_i^2(t)} \quad (4-8)$$

$$\theta_i(t) = \arctan[H[c_i(t)] / c_i(t)] \quad (4-9)$$

通过上面的计算，则原信号 $x(t)$ 可以按如下形式展开：

$$x(t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{i \int w_i(t) dt} \quad (4-10)$$

式（4-10）中每个分量的相位和幅值都是随着时间的变化而变化，将式的右部称为信号 $x(t)$ 的 Hilbert 时频表示，则可以进一步表示为：

$$H(\omega, t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{i \int w_i(t) dt} \quad (4-11)$$

在式（4-11）的基础上可以分析出原信号 $x(t)$ 的频率、幅值、和时间的关系，在此基础上可以进行更深入的时频分析^[54]。

4.4 仿真信号的噪声消除

对流量测量过程中的超声波信号进行分析，可以用双指数衰减振荡型函数来对其进行仿真，如式（4-12）所示：

$$y(t) = A(e^{-1.3t/\tau_1} - e^{-2.2t/\tau_2}) \cos(2\pi f_c t + a_c) \quad (4-12)$$

其中，A 是振幅， τ_1 、 τ_2 是振荡衰减系数， f_c 为对应的振荡频率。取 τ_1 为 19us、 τ_2 为 26us， f_c 为 250KHz，得到的仿真超声波信号波形如图 4-4 所示。

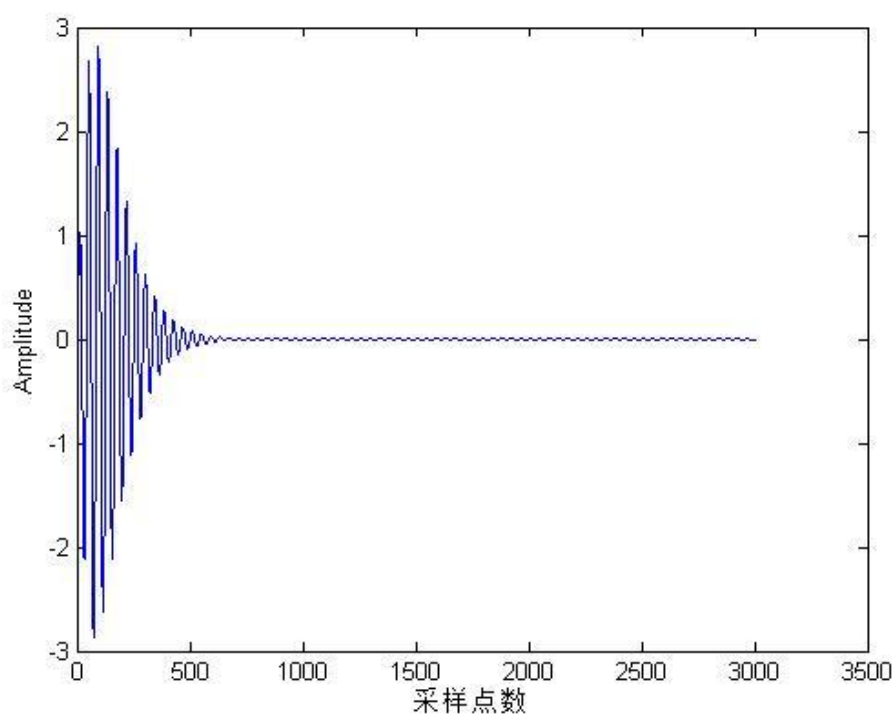


图 4-4 仿真超声波信号波形

采用频率为 10KHz、50KHz、200KHz、300KHz 和 800KHz 的正弦信号加白噪声来模拟超声波测量中的噪声信号,其中白噪声由 Matlab 中的 randn 函数产生。仿真超声波信号和仿真噪声信号混合后的波形如图 4-5 所示。

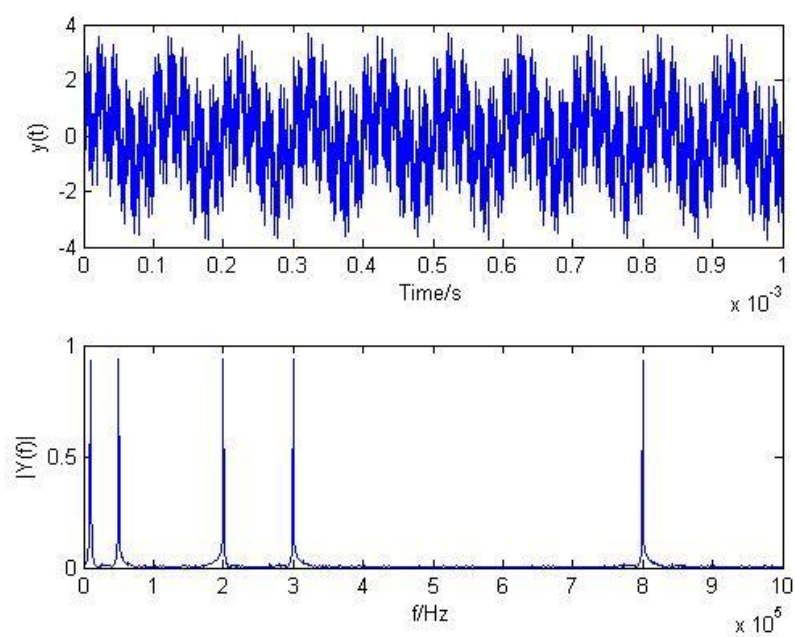


图 4-5 混叠噪声后的超声波信号波形

将仿真超声波信号用带通滤波器进行滤波，经过滤波过后的信号波形如图 4-6 所示，信号当中的低频和高频部分的噪声被滤除，达到了初步降噪的目的。

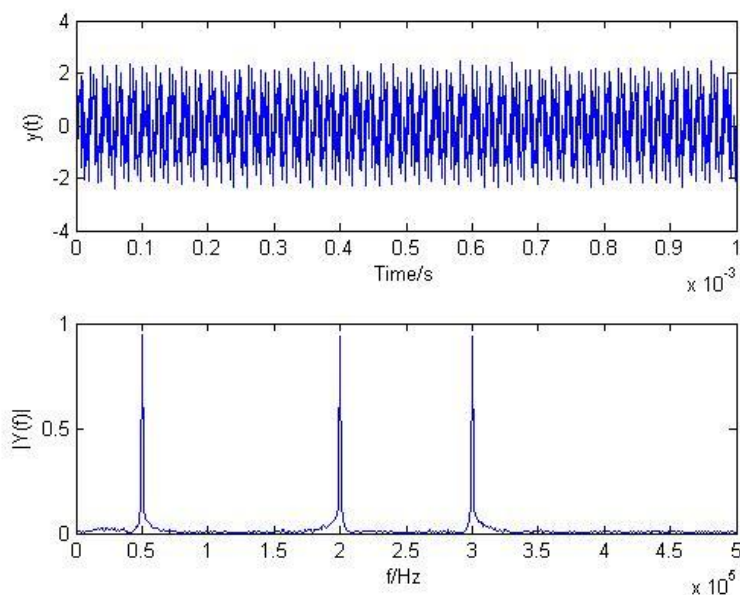


图 4-6 滤波后的超声波信号波形

对经过带通滤波器处理的超声波仿真信号进行 EMD 分解，最终将其分解为 9 个 IMF 分量，进一步对这 9 个 IMF 分量进行希尔伯特变换作出其时频谱。其中，前 6 个 IMF 分量的时频图如图 4-7 和图 4-8 所示。

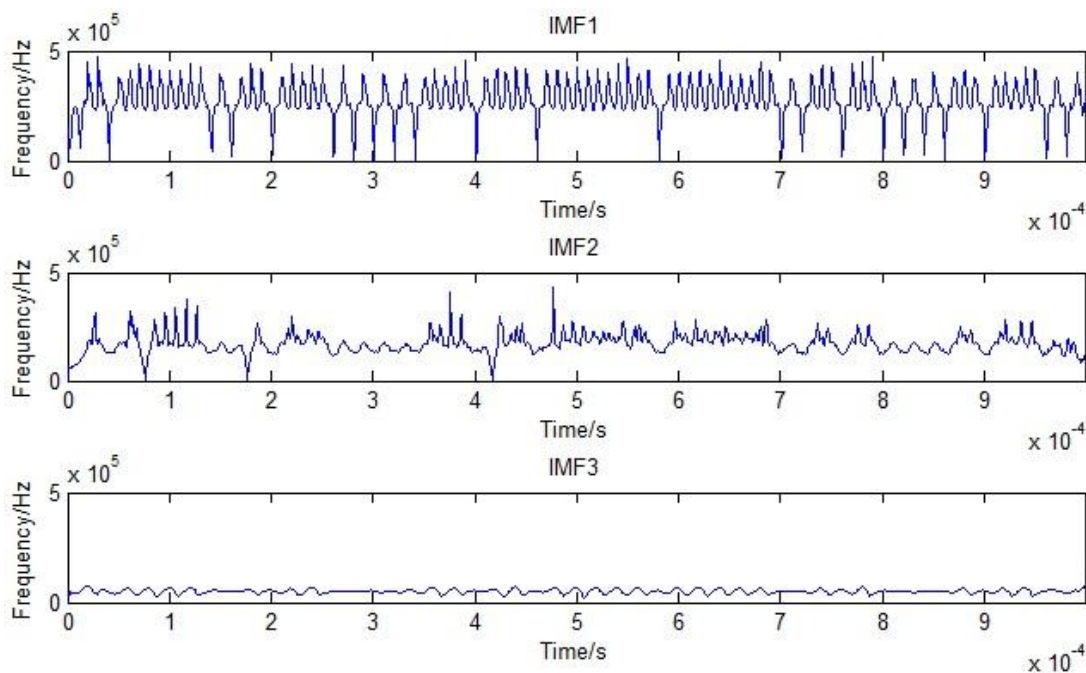


图 4-7 仿真超声波信号 EMD 分解前 1-3 个 IMF 分量时频图

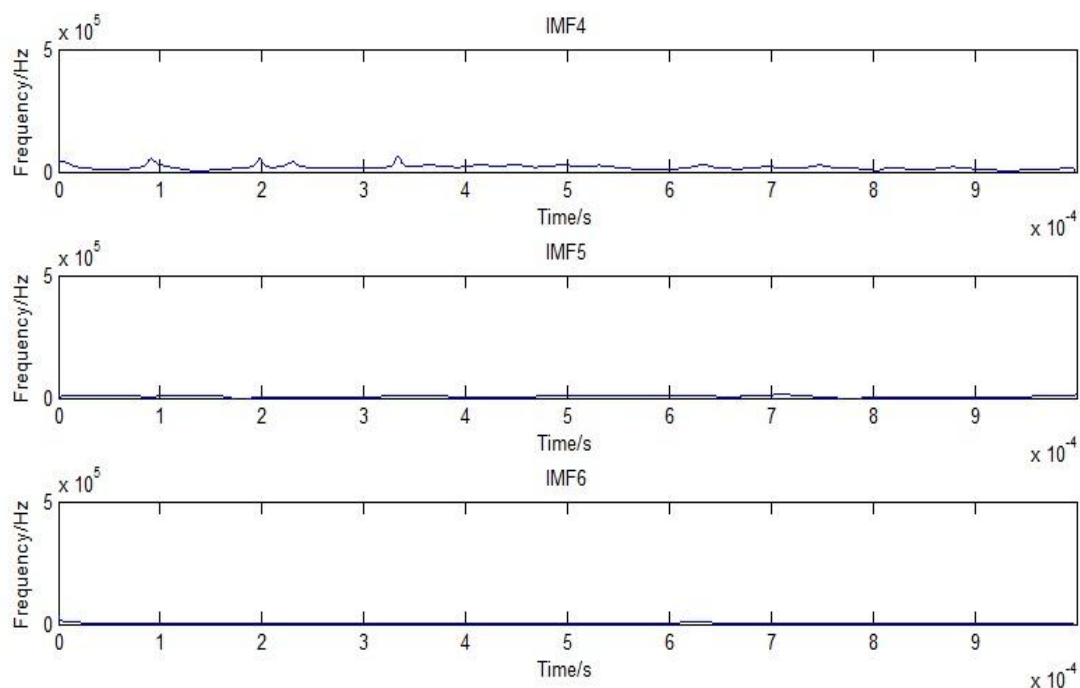


图 4-8 仿真超声波信号 EMD 分解第 4-6 个 IMF 分量时频图

由前 6 个 IMF 分量的希尔伯特时频图可以看出,在第 4 个 IMF 分量之后的 IMF 并没有实际意义,可以直接进行滤除。对剩下的 IMF 分量进行重构即可得到较为纯净的超声波信号,实现了降噪的目的,从而证明了本次降噪方案的可行性。

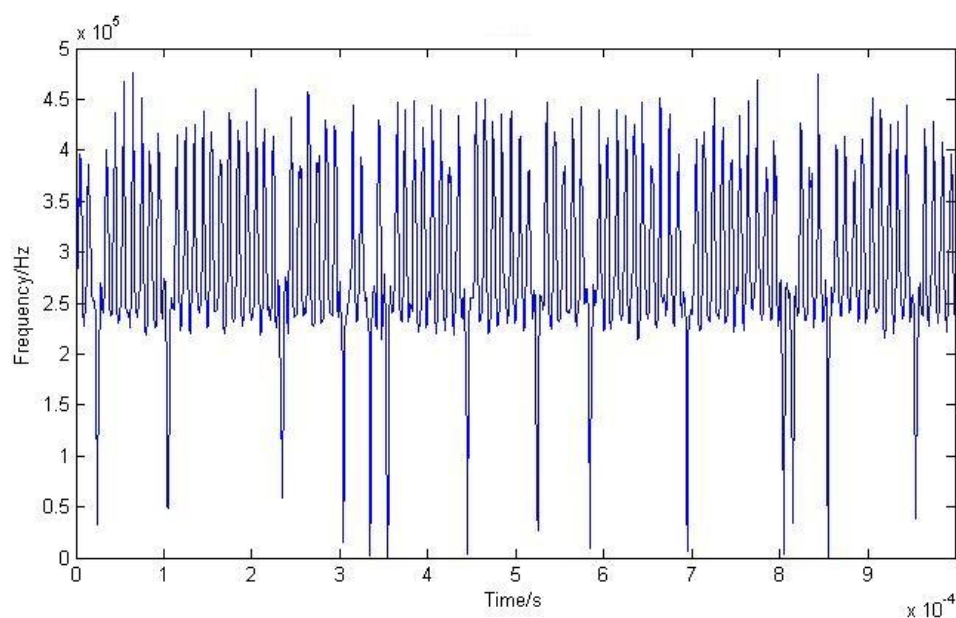


图 4-9 重构后的超声波信号时频图

4.5 传播时间差的测量方法

在前文对采集到的超声波信号进行降噪处理之后，如何提取信号当中所包含的超声波在传播过程中的时间差这一信息量成为关键问题。由于超声波在大多数流体介质中的传播速度超过 1000m/s ，而被测流体的流动速度相对较小，一般在 10m/s 以内，在待测流体管道直径很小的情况下，顺流和逆流传播过程中在时间上的差值往往在纳秒级，这就对传播时间的计算方法提出了较高要求。

常用的测量时差的方法有阈值法和过零点法两种，阈值法设计相对容易，计算量少，精度较高，但对信号的波形要求较高；过零点法的设计较为复杂，计算量相对较大。针对前文中经过 EMD 降噪后的波形已经相对稳定且含有的噪声较少，适合采用阈值法进行时间差的测量。

阈值法的测量原理就是在接收到的超声波电压幅值分布范围内，选定某一特定值作为参考阈值，常用的参考阈值一般为最大幅值的 $1/2$ 、 $3/4$ 等。当接收到的超声波信号电压幅值高于设定的阈值时，即认为信号已经到达，如图 4-10 所示。

经过对接收到的超声波信号的波形分析，采用超声波信号的电压最大幅值的 $3/4$ 为参考阈值，以降低所带来的测量误差。从超声波信号到达后的第 2 个峰值点时刻，减去一个信号周期的时间，所得的结果即为超声波在管道流体中的传播时间。

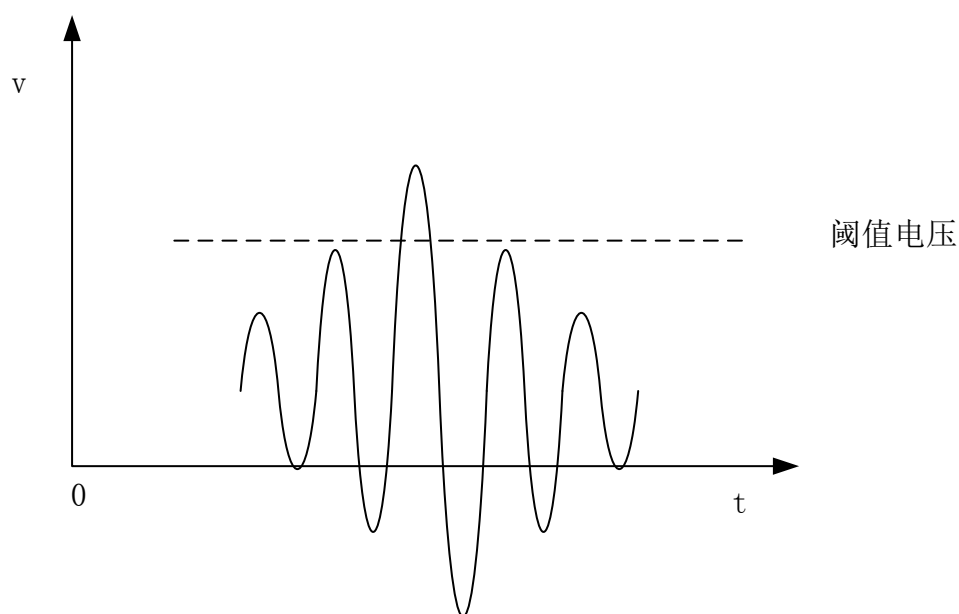


图 4-10 阈值法示意图

4.6 本章小结

本章中，首先对超声波流量测量过程中的噪声影响及其来源进行了分析，接着对在信号分析领域常用的 FFT 和小波变换降噪方法进行了介绍。在分析了超声波测量过程中的噪声特点之后，确定了常规的降噪方案并不适用，进而拟定了以带通滤波器为基础，进一步结合 EMD 和 HHT 为原理的降噪方案，通过对仿真超声波信号进行 EMD 降噪之后的波形分析，可以得出本次设计采用的降噪方案是实际有效的,并进一步阐述了时间差的测量方法。

第五章 基于 LabWindows/CVI 的上位机流量测量系统

5.1 虚拟仪器介绍

5.1.1 虚拟仪器背景

20 多年以前,美国国家仪器(NI)率先将虚拟测量仪器(VI)的相关概念介绍给用户,这种新型测量方式的出现,给以往传统仪器测量领域带来了颠覆性的影响,并进一步掀起了“软件就是仪器”的新思潮^[55]。虚拟仪器是将测试技术和仪器技术进行了更深层次结合的产物,在现代计算机辅助测试(CAT)相关领域中成为了一种重要测量方法。

虚拟测试仪器的实质就是将传统测试仪器的功能面板用软件显示的方式来模拟,将测量检测结果以不同形式表达,并依托计算机强大的运算能力来完成相关信号的分析 and 测量数据的处理^[56]。

5.1.2 虚拟仪器特点

虚拟仪器测试在工业测量、流量统计、信号分析、工程控制等领域都有广泛应用,其“硬件需求软件化”的独特设计中包含了以下特点:

(1) 内部资源丰富

虚拟仪器测试经过 20 多年的发展,已经积累了丰富的计算机软件资源,可满足各种测量环境的设计需求。

(2) 设计灵活

由于虚拟仪器是由软件设计产生的,可针对不同用户需求设计出属于用户自己的产品,具有较高的灵活性^[57]。

(3) 接口丰富兼容性好

虚拟仪器的制造商对虚拟仪器的不断更新,不仅实现了虚拟仪器对各种接口和协议的良好支持,并且对网络组建、自动化测试等跨平台测试提供了兼容性良好的设计方案。

和测试领域以往的传统仪器相比,虚拟仪器具有很多创新点,具体对比情况如表 5-1 所示。

表 5-1 传统测试仪器和虚拟测试仪器特性对比

内容	传统仪器	虚拟仪器
操作是否复杂	复杂	简单
功能是否单一	单一	多样
主要构成	硬件	软件
设计难度	较高	较低
产品周期	较长	较短
仪器成本	昂贵	低廉
兼容性	较差	较好

通过表 5-1 的对比可以发现,虚拟仪器在多数性能上都比传统仪器达到的水平高,随着测量领域信号分析检测技术的提高,以及互联网用户的大幅增加,虚拟仪器的应用必将获得更多用户的认可。

5.2 虚拟仪器系统

5.2.1 虚拟仪器硬件系统

计算机平台和 I/O 接口测试设备共同组成了虚拟仪器系统的硬件部分,是整个虚拟仪器系统的核心^[58]。

通常可以由普通电脑或者工作站等组成计算机平台, 主要实现信号采集和对虚拟仪器的硬件和软件资源的管理等。随着存储器容量的扩大、CPU 主频的倍增、显示仪器分辨率的提高和相关制造工艺技术的进步, 计算机的整体性能变得更为强大, 进一步推动了虚拟测试仪器的技术发展和应用范围。

I/O 接口设备根据实际测试时的总线接口类型, 对输入信号和输出信号采用相应标准进行转换, 在此基础上提供给其他模块使用。根据连接的硬件接口的不同, 构成虚拟仪器的方式可以分为以下几种, 如图 5-1 所示:

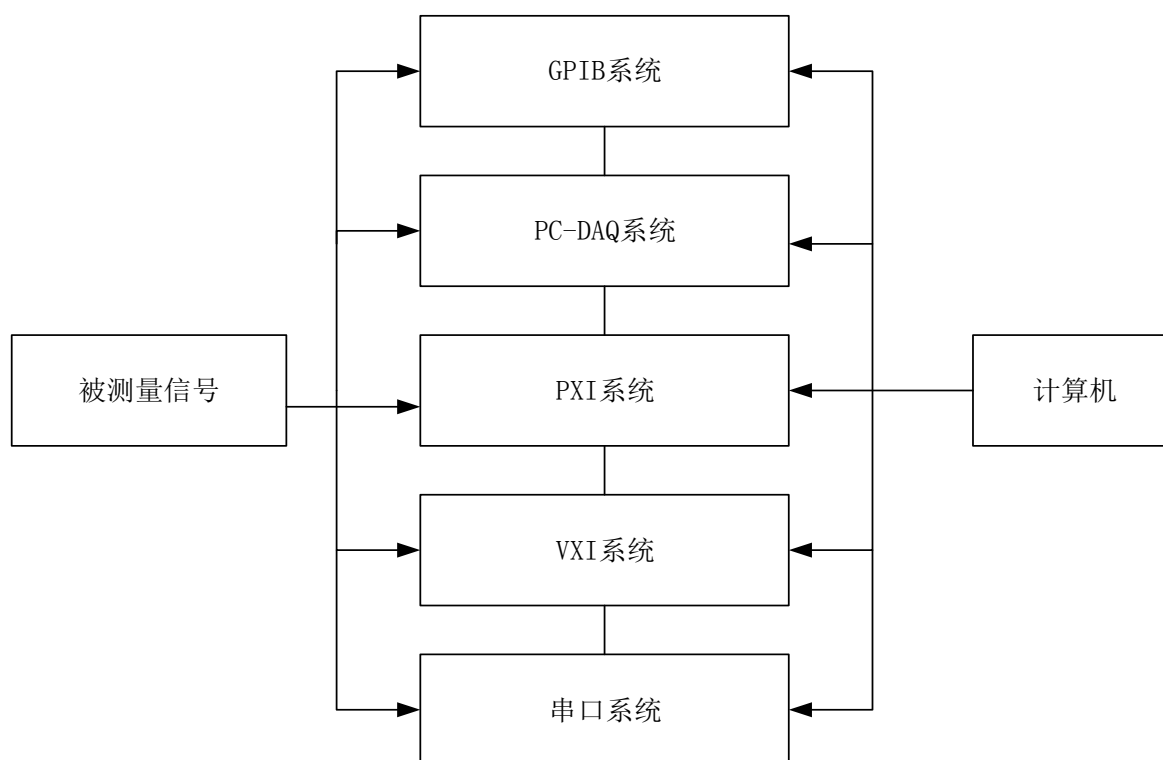


图 5-1 不同 I/O 接口仪器构成的虚拟仪器系统

（1） GPIB 系统

GPIB（General-Purpose Interface Bus）是仪器测试领域广泛使用的一种标准仪器接口，IEEE488.2 中已经收录了 GPIB 的相关硬件规格和软件协。GPIB 总线标准的推广大幅提高了仪器设备的性能指标。一般由一台计算机、一个带有 GPIB 接口的控制器和几个带有 GPIB 接口的测量仪器组成简单的 GPIB 测试系统，通过计算机对这些 GPIB 测量仪器进行控制，可以在此基础进行对校正和诊断，也可以组建相关网络来提升性能。由于 GPIB 的传输较慢，一般不高于 500Kb/s，并不适合对传送速度有较高要求的场合。

（2） PC-DAQ 系统

这种系统是围绕计算机硬件平台，并搭配信号调理模块和数据采集卡，在此基础上组合而成的一种插卡式的虚拟仪器系统。DAQ（数据采集卡）是在 ISA、USB、PIC 等计算机标准总线的基础上设计出来的，大幅提高了计算机的资源利用效率，给虚拟仪器测试系统的灵活性和可扩性带来了更大的发展空间^[59]。

随着电子制造工艺和信号调理技术等的发展和进步，DAQ 的采样率已经可以达到 1Gb/s，同时拥有 24 位的精度，以及能够和大多数器件良好兼容。

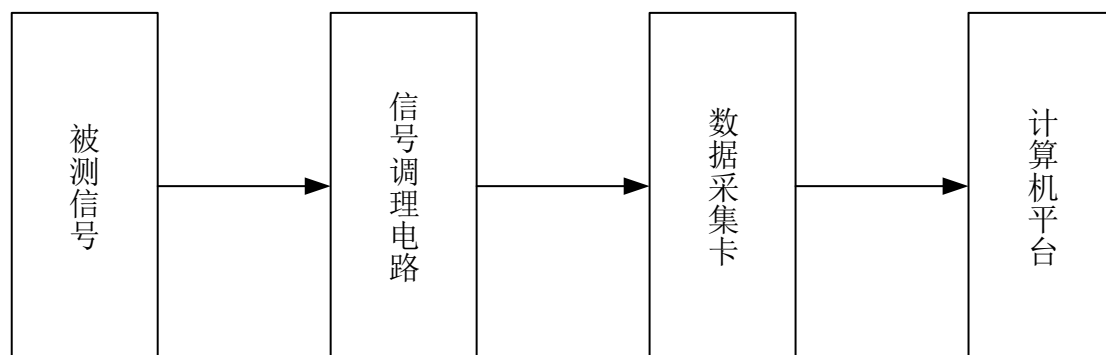


图 5-2 PC-DAQ 虚拟仪器系统

(3) PXI 系统

该虚拟仪器测试系统是以计算机为核心进行搭建，和带有 PXI 标准总线接口的相关测试仪器组合而成的一个系统。其中，PXI 总线标准是美国国家仪器(NI)在 1997 年发布的一种具有更高开放性的总线标准，是 PCI 总线的进一步推广。在 PCI 总线的基础上，PXI 总线设计额外加入了一些参考时钟、用于内部模块之间进行高速通信用途的局部总线和用于多板设计的触发总线等，满足了应用领域的各种测量需求。

(4) VXI 系统

它是指用带有 VXI 总线接口的的相关测量仪器模块和计算机平台共同组成的虚拟仪器测试系统，VXI 总线是 VME 总线在虚拟仪器测量领域的进一步扩展应用。由于该系统的设计采用了最先进的计算机技术，使得数据的吞吐量大幅度增加，仪器的设计周期也得到了很大缩短，在组建大规模测试系统，或者对测试精度和可靠性较高的应用场合时有着很大优势，但这种测试系统的缺点是其设计成本往往较高。

(5) 串口系统

该类系统是以带有 Serial 标准总线接口的相关测试仪器与计算机平台组合而成的，最初该系统只用于通信领域的数据传输用途，后来逐步被应用于工业控制和数据测量等相关领域，由于总线标准相对简单，使用起来较为方便，现在大多测试仪器都带有串口。

5.2.2 虚拟仪器软件系统

虚拟测试仪器的软件系统主要由 I/O 接口、测试仪器驱动软件、和测控程序等三部分组成，具体结构分布如图 5-3 所示：

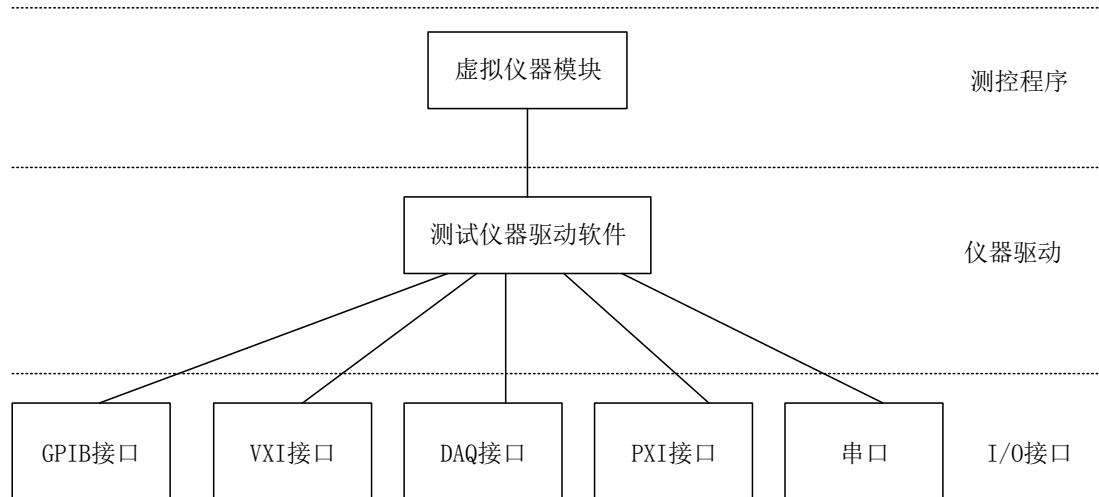


图 5-3 PC-DAQ 虚拟仪器系统

（1） I/O 接口

软件系统的 I/O 口主要指 I/O 口的标准函数库和对应的规范文件，一般称之为 VISA 库，用于执行测试仪器总线的相关功能，构成了接口测试仪器和计算机之间的软件层连接^[60]。

（2） 测试仪器驱动软件

测试仪器驱动软件，是为了实现某种特定测试仪器的通信和控制功能而开发出的程序包，为测控程序对仪器的控制搭建了桥梁。测试仪器的驱动程序是由厂家配套提供给用户的，用户直接进行调用和安装，简化了用户操作流程。

（3） 测控程序

测控程序一般包括两部分，一部分用于虚拟面板界面实现，一部分用于具体测试功能的相关代码设计。

在安装仪器驱动程序之后，内部集成了 GPIB、PXI 等标准协议规范的虚拟仪器测控程序开始对系统中的执行数据采集功能的硬件进行控制，利用编写好的程序获取采集卡上的数据，通过进一步的算法设计来完成信号分析工作，最终将结果直接、简介的显示出来。

5.3 LabWindows/CVI 综合设计

5.3.1 LabWindows/CVI 特点

LabWindows/CVI 是由美国国家仪器(NI)以 ANSI C 为核心，专门针对仪器测试和自动化控制等领域开发的一款虚拟测试仪器设计软件开发环境，能够在 Windows、Unix 和 Mac Os 等多种操作系统中进行开发。其丰富的库函数进一步扩

充了 C 语言的功能,提高了软件的灵活性,将一个优秀的开发环境提供给了仪器测试领域的工作人员^[61]。

经过十几年的发展,NI 公司已经对 LabWindows/CVI 进行了较为完善的优化,并提供了丰富的设计方案,相比于其他虚拟仪器开发工具,LabWindows/CVI 具有以下特点:

(1) 功能强大、种类丰富的函数库

LabWindows/CVI 不仅包含了字符串处理、数据运算等基本函数,还提供了曲线拟合、滤波器设计、概率统计和信号检测分析等众多方案设计中用到的函数,并且已经包含了 GPIB、PXI、VXI 等多种 I/O 接口的驱动程序。用户通过简单的函数调用即可实现复杂功能,大幅降低了软件开发周期,提高了设计效率。

(2) 交互式的程序设计方案

将仪器测试程序的源代码编写、编译器编译、链接和后期调试都集中在同一个交互式开发环境中,为用户解决了大量代码编写和调试时间。

(3) 灵活多样的程序调试方法

不仅提供了单步执行、参数检查、过程跟踪、断点执行等基本调试手段,还可以通过相应窗口对表达式的赋值和变量的内容进行观察,不仅给用户进行学习设计带来了方便,也为后期调试提供了数据支持。

(4) 开放式的软件架构

标准的 ANSI C 文件、DLL 文件(动态链接库)等外部文件都可以在 LabWindows/CVI 开发环境中进行方便的调用和二次设计,也可以在不更改开发工具的基础上实现和其他编译器的良好兼容,并且具有较强的移植性。

(5) 高效的程序编译环境

LabWindows/CVI 经过长期的更新,已经实现了代码的高效率编写,并可以自动生成一些模块的代码,进一步缩短了代码的手动输入量,带来了更好的用户体验。

基于以上 LabWindows/CVI 虚拟仪器开发环境独有的特点,再结合相关数据处理和信号分析的设计要求,确定了以 LabWindows/CVI 作为本次时差法超声波流量计的上位机软件开发环境。

5.3.2 超声波流量计上位机设计方案

在前面几个章节的基础上,在 LabWindows/CVI 开发环境中结合相关信号分析方法,实施超声波流量计的上位机软件设计,测试系统的框图如图 5-4 所示:

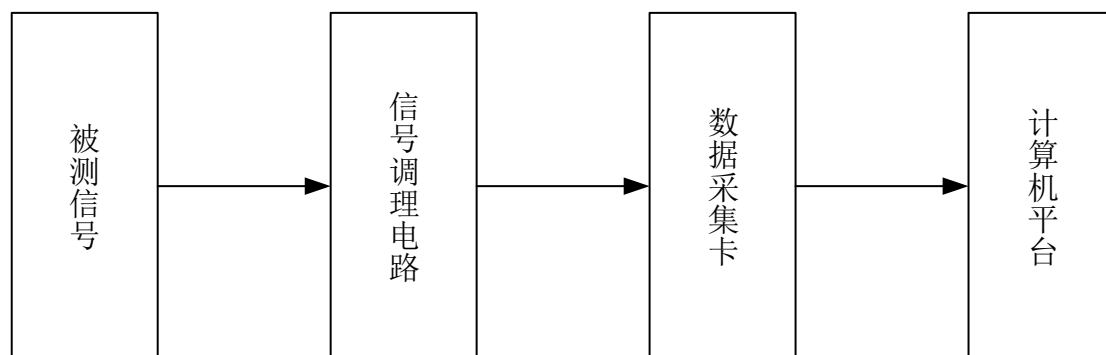


图 5-4 超声波流量计测试系统框图

其中，上位机部分采用 LabWindows/CVI 进行软件设计的方式如图 5-5 所示。

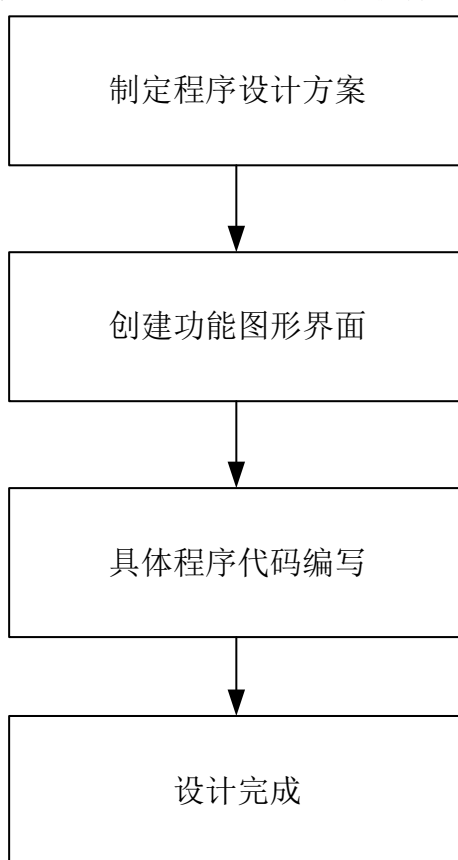


图 5-5 LabWindows/CVI 设计示意图

采用 LabWindows/CVI 设计的上位机软件主要包括 5 个功能模块，分别是参数设置、流量检测、打印和保存、查询历史记录和退出，如图 5-6 所示。

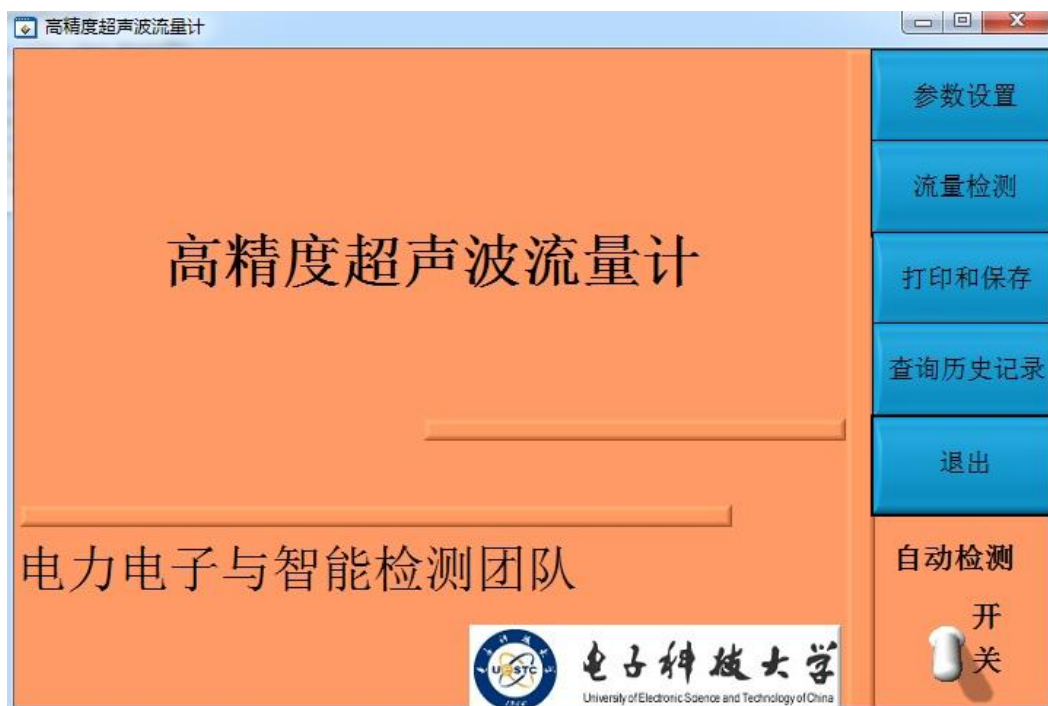


图 5-6 系统主界面

每个模块的设计都是从界面设计到代码编写的顺序来进行的，以“退出”功能模块为例，首先将 Command Button 的配置页打开，将 Constant Name 修改为 QUIT1，将 Callback Function 修改为 Quit1，将右下角 Label 中内容修改为“退出”并保存，如图 5-7 所示。

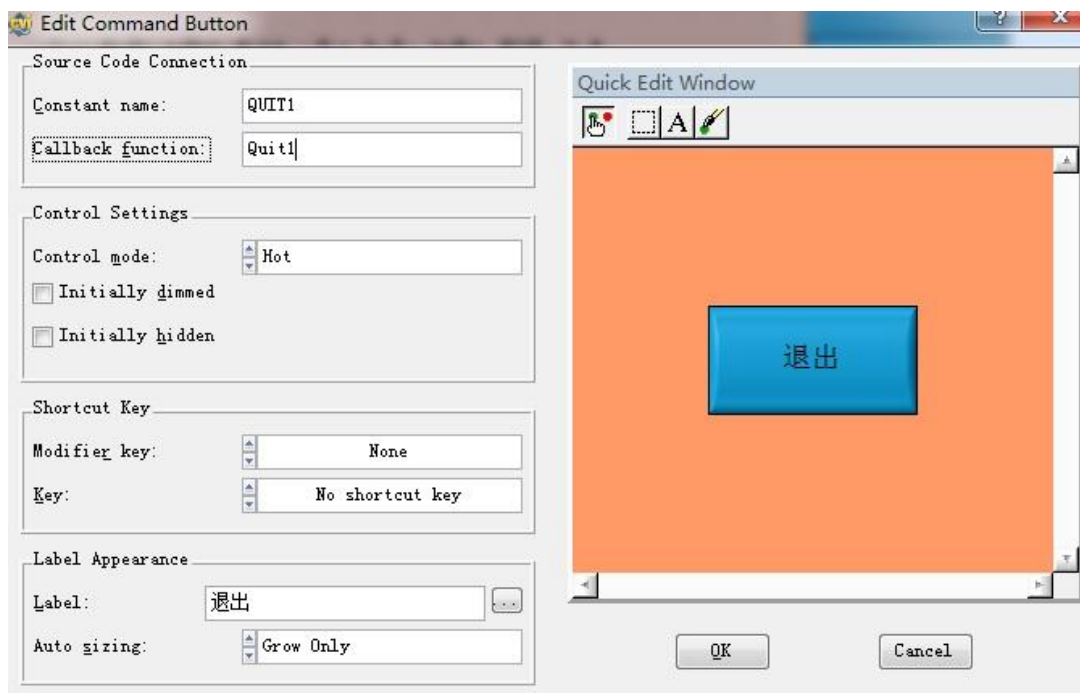


图 5-7 “退出”功能界面参数设置

因为“退出”模块主要用于实现主程序的关闭功能，并不涉及其他的函数调用等操作，当其他模块配置完毕后，在主界面 Code 菜单下选择 generate all code，在弹出的对话框中将最下面的函数标签项前面的 Quit1 选中，则基本完成了“退出”模块的配置，如图 5-8 所示。

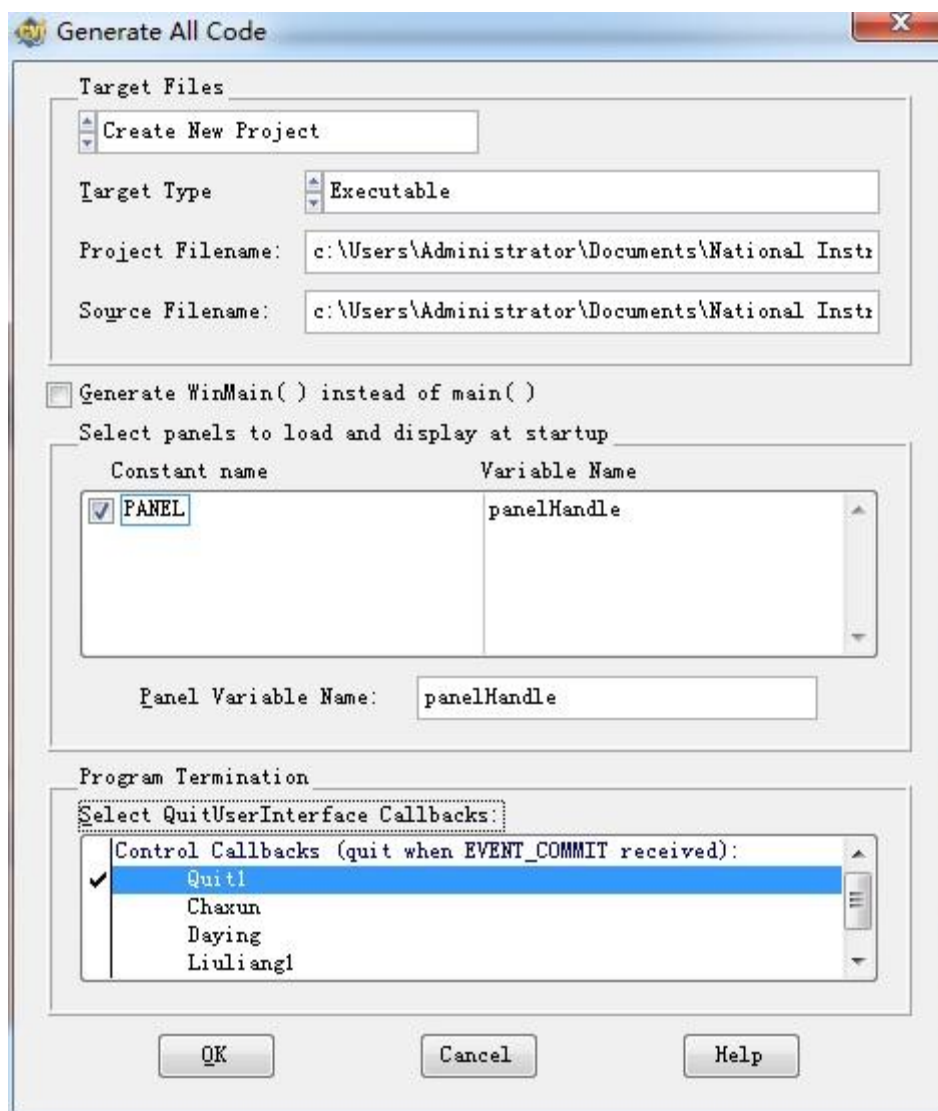


图 5-8 “退出”功能界面代码生成

其他功能模块的界面生成部分和“退出”相似，但是在生成代码之后需要对每个功能模块的事件部分进行修改，包括相关函数的修改和调用等，来实现模块对应的功能，如图 5-9 所示。

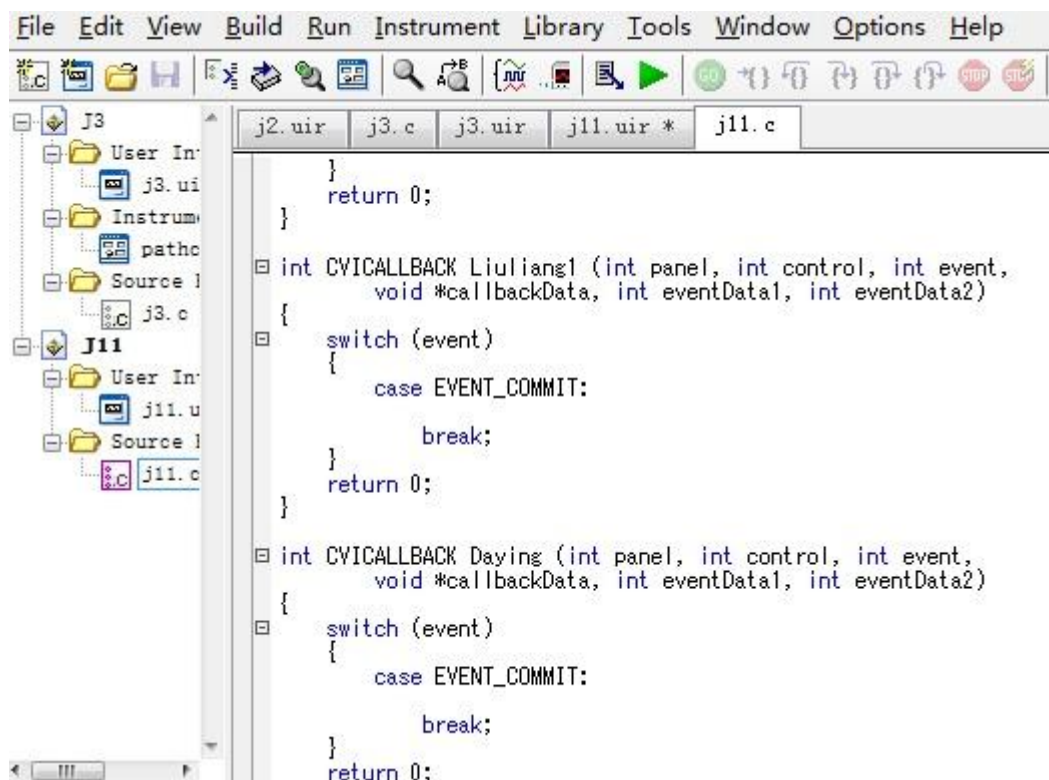


图 5-9 功能模块的事件配置部分

如图 5-10 所示，参数设置模块中分别包含超声波探头设置、采集卡设置等。该部分主要是采用 LabWindows/CVI 中的 Table、Command Button 等控件来实现。

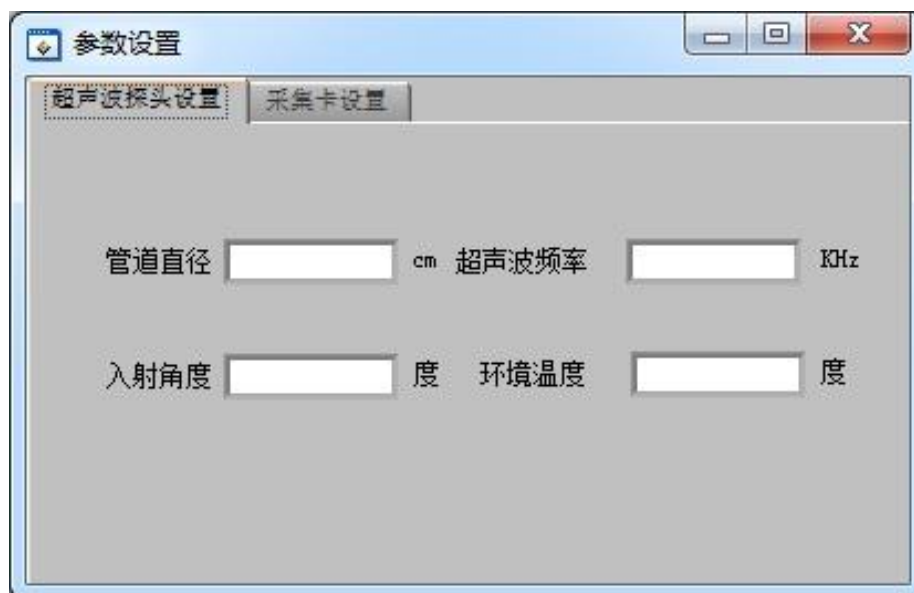


图 5-10 参数设置模块

其中，在超声波探头设置该子模块中，主要对待测管道直径、超声波从发射探头的入射角度、超声波频率和温度等参数进行相应设置，为后期进一步数据处理做准备。采集卡设置子模块主要是对系统采集卡部分的相应参数进行设置，主要包括采样频率、采样方式和存储空间等。

流量计算模块主要实现对采集卡采集到的数据进行数据处理和信号分析，并最终显示出测量流量的大小。流量测量模块的界面如图 5-11 所示，其中的数据文件导入是由 FileSelectPopup 和 Path Control 等 LabWindows/CVI 自带的控件和函数完成的。信号的降噪部分是基于前文中的相关设计进行的，主要用到了带通滤波器、EMD 和 HHT 等相关信号分析方法。数据保存是用 ActiveX 控件来实现的，该控件支持对 PDF、CAJ、Excel、Matlab 等第三方程序的调用，可以方便的进行数据处理和存储等操作。

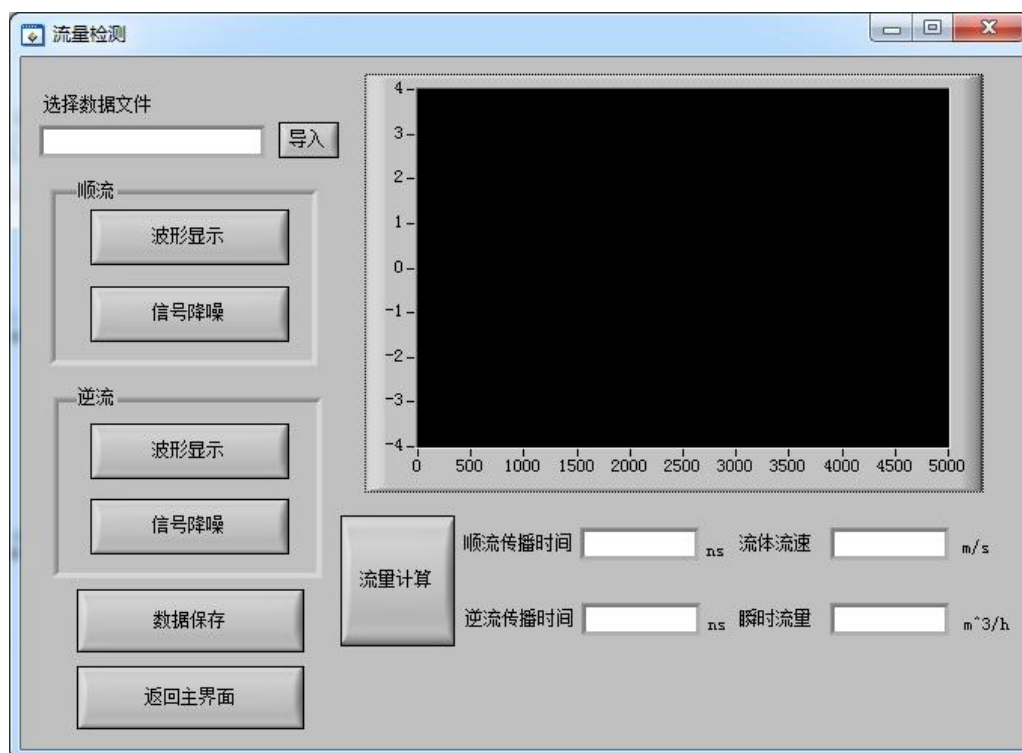


图 5-11 流量测量模块

5.3.3 实验验证

在完成相应模块的设计之后，通过进一步相关实验数据来验证测量效果。实验系统由前文设计中的超声波传感器、待测管道、数据采集模块、数据传输线等组成，实物图部分如图 5-12 所示。其中，待测流体管道直径分别为 8cm 和 12cm，流动液体为水，环境温度为 18°，超声波入射角度为 45°，并设置为 1M 的采样率。

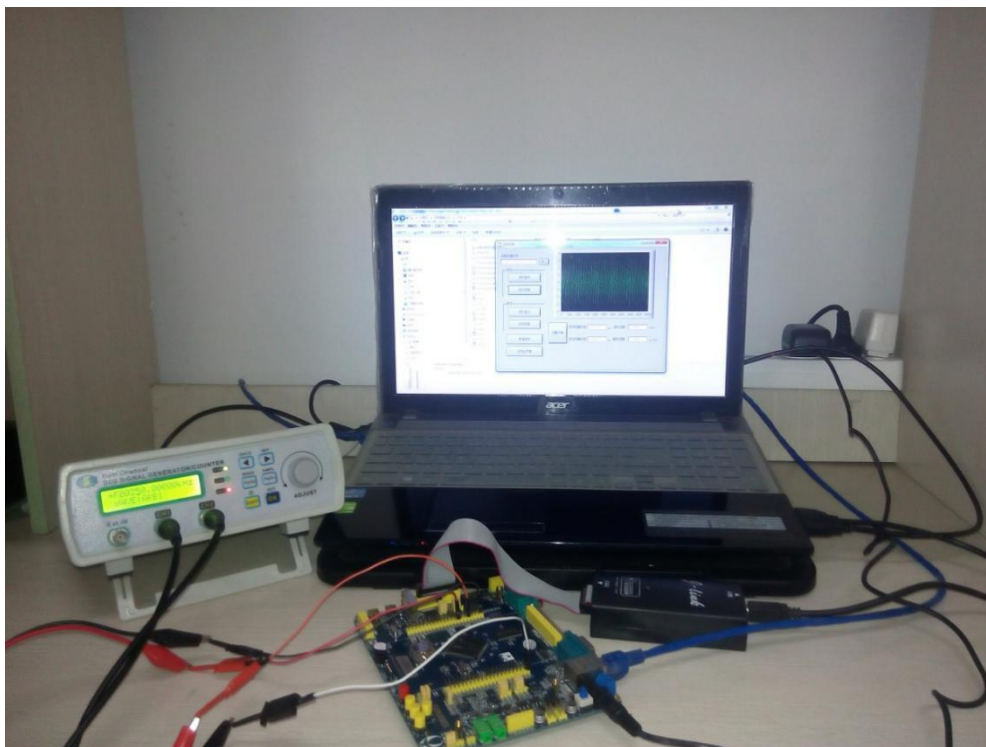


图 5-12 流量测量系统实物图

当待测管道直径为 12cm 时，采集到的实验波形和进行降噪后的实验波形分别如图 5-13 和图 5-14 所示。

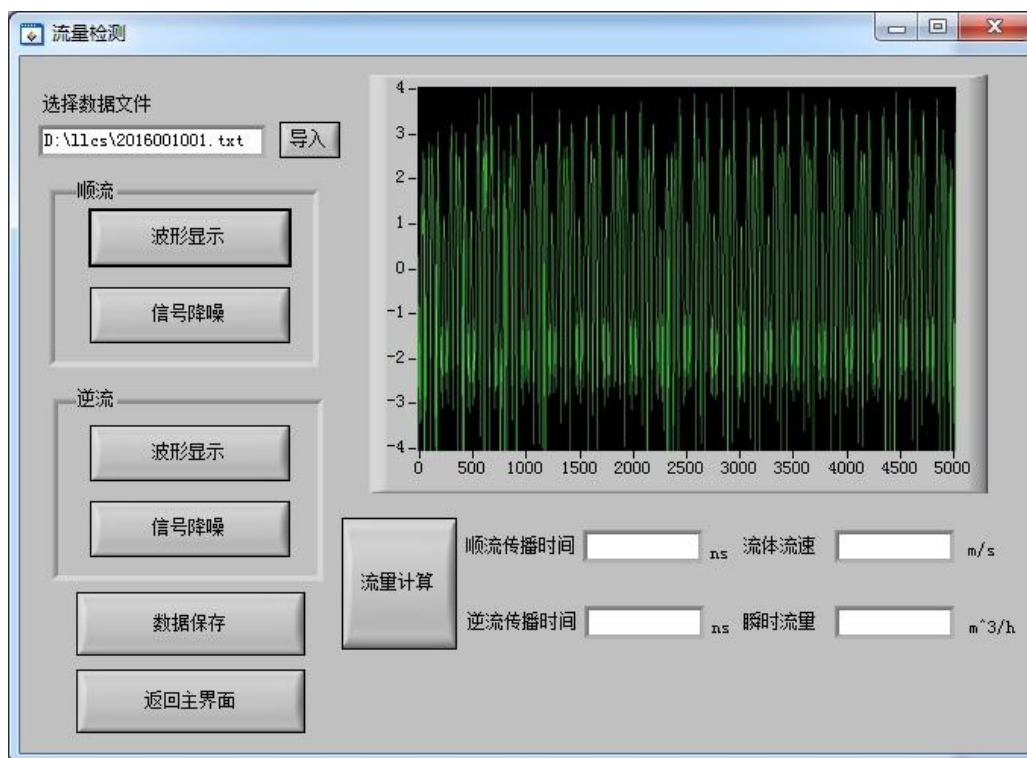


图 5-13 降噪前实验波形

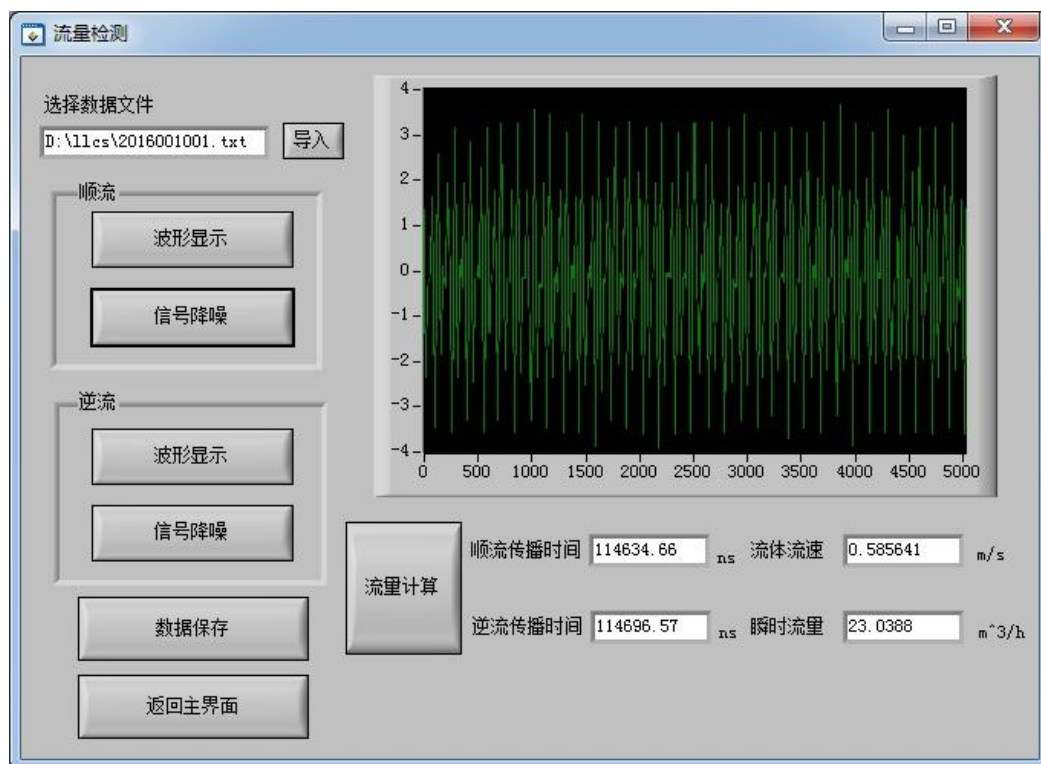


图 5-14 降噪后实验波形

将待测管道直径为 12cm 时进行多次实验的数据结果进行统计,如表 5-2 所示。

表 5-2 待测管道直径为 12cm 时测量数据

顺流时间 (ns)	逆流时间 (ns)	流速 (m/s)	瞬时流量 (m^3/h)
114634.88	114696.36	0.585677	23.0442
114634.66	114696.57	0.585641	23.0388
114634.74	114696.46	0.585674	23.0369
114634.86	114696.78	0.585696	23.0357
114634.44	114696.35	0.585731	23.0341
114634.73	114696.69	0.585663	23.0466
114634.42	114696.44	0.585685	23.0389
114634.80	114696.81	0.585714	23.0422
114634.76	114696.61	0.585688	23.0384
114634.64	114696.49	0.585650	23.0370

对表 5-2 中的数据进行筛选,去掉最大值和最小值之后的平均顺流传播时间为 114634.70ns, 平均逆流传播时间为 114696.55ns, 则对传播时间的测量值和测量均值之间的差值浮动在 0.9ns 内。进一步筛选得到平均流速为 0.585669m/s, 平均瞬

时流量为 23.0377。由前文中式 (2-23) 推导得出的实际流速为 0.596144 m/s，则可以按照式 (5-1) 计算其测量精度。

$$\delta = \frac{v_s - v}{v} \times 100\% \quad (5-1)$$

其中： δ 为相对误差， v_s 为实验测量的流速， v 为实际流速。

由式 (5-1) 可知，对流速和流量测量的精度为 98.24%，相对误差在 1.2% 以内，满足设计需求。

保持其他实验条件不变，将待测管道为 8cm 时所得到的实验数据结果进行统计，如表 5-3 所示。

表 5-3 待测管道直径为 8cm 时测量数据

顺流时间 (ns)	逆流时间 (ns)	流速 (m/s)	瞬时流量 (m ³ /h)
76428.84	76459.74	0.418782	7.57810
76428.22	76459.41	0.418745	7.57822
76428.52	76459.72	0.418811	7.57841
76428.44	76459.66	0.418763	7.57813
76428.75	76459.79	0.418758	7.57796
76428.34	76459.51	0.418774	7.57826
76428.61	76459.32	0.418769	7.57832
76428.58	76459.63	0.418771	7.57845
76428.60	76459.70	0.418775	7.57830
76428.48	76459.52	0.418763	7.57818

将表 5-3 中的数据进行处理，得到剔除最大值和最小值之后的平均顺流传播时间为 75428.54ns，逆流传播时间为 76459.61ns，则对传播时间的测量值和测量均值之间的差值浮动在 0.8ns 内。进一步统计出平均流速为 0.418769m/s，平均瞬时流量为 7.57824。再由式 (2-23) 推导得出的实际流速为 0.424263m/s，由式 (5-1) 可以计算出对流速和流量的测量精度为 98.69%，相对误差在 1.2% 以内，也满足设计方案的需求。

通过对 2 次具有不同待测管道直径的实验条件下的测量数据结果进行分析，不仅证明了本次设计方案的可行性，也对整体测量系统所能达到的测量精度进行了验证。

对实验数据进行相关统计和总结后，分析出本次设计虽然达到了高精度流量测量的任务要求，但仍存在一些误差，具体原因如下：

- (1) 受到实验器材和仪器等的限制，对管道直径、超声波入射角角度等的测量数据准确度有限，后期可以更换性能更好的仪器和设备来完善。
- (2) 超声波流量计设计理论和信号分析方法等运用还不够成熟，一些数据计算方法上还存在一定缺陷，需要进一步加深对相关理论的学习。
- (3) 受到系统硬件性能的限制和电磁干扰等，会给系统带来一些时间上的延迟和计算偏差，需要通过后期的调试对设计方案进行完善。

5.4 本章小结

本章首先将虚拟仪器的组成部分进行了介绍，并对比了虚拟仪测试仪器和传统测试仪器的特点，之后对设计采用的 LabWindows_CVI 开发环境进行了详细描述，介绍了相关功能模块的使用。在综合了前面几章超声波流量测量理论分析、嵌入式硬件平台搭建、仿真噪声信号降噪的成果之后，设计出超声波流量测量的上位机软件，将待测管道中流体流量的相关数据直观、简洁的展示出来。

第六章 总结与展望

6.1 论文工作总结

本次设计从工业生产和日常生活中对管道中流体流量的测量这一实际需求出发，结合超声波流量测量相关理论知识，在嵌入式硬件平台和虚拟仪器软件开发环境中进行具体方案实施，最终完成了高精度时差法超声波流量计的整个系统设计。在这些环节中取得的成果主要有：

（1）通过对超声波流量计的市场需求、应用背景和发展现状等的分析，从理论上确立了本次设计方案的必要性和实际意义。

（2）对比了不同原理的超声波流量计的特点和应用场合，在原有的超声波测量理论知识的基础上进行更加深入的分析，并根据这些理论对时差法设计方案进行了改进，降低了一些误差因素带来的影响。从设计原理的角度提高了测量的精度。

（3）采用高性能 ARM 芯片 STM32F407 为核心器件，与压电换能器、信号调理电路、上位机通信等应用模块相结合，从硬件设计上满足了测量的高精度需求。在 Keil MDK 专业软件开发环境中完成软件程序的代码编写，并在此之后进行多次后期调试后，对软件程序进行修正和完善，最终完成高精度超声波流量测量系统的综合设计。

（4）分析了超声波流量计测量过程中的噪声来源，在否定传统降噪方法的可行性后，以 EMD、HHT 等信号分析方法为出发点，提出适用于超声波流量测量过程中的降噪方案，并结合 Matlab 等仿真工具进行了验证。用切实有效的信号分析方法保证了高精度测量这一目的的实现。

（5）将虚拟仪器这种新型测量方法进行了理论分析，对比了虚拟仪器和传统仪器的区别和特点，并在 LabWindows_CVI 开发环境中完成了对上位机程序的设计，之后进行了多次实验，通过对实验数据的统计以及后期分析，对本次超声波流量计设计的可行性和精度进行了验证。

6.2 展望

本次设计首先参考了大量国内外有关超声波流量计、嵌入式设计和信号分析等领域的书籍，并在此基础上进行了深入研究，最终完成了时差法超声波流量计的整体设计。虽然取得的成果相对较好，但在本次设计中仍存在以下一些设计方面的不足，有待进一步研究和改善：

（1） 超声波激励和压电换能器的性能有限，进一步限制了采样电路的精度，并给后期信号分析和数据处理带来一定影响，需要在后期采用性能更好的相应器件进行改善。

（2） 嵌入式平台的搭建过程中，由于相关设计经验不足，在芯片的选取、电路的设计和软件代码的编写过程中，存在一些兼容性不好和效率不高的环节，需要在后期进一步优化。

（3） 对 EMD、HHT 等信号分析方法，以及 Matlab、LabWindows_CVI 等软件的理解和应用水平还需要进一步提高。

致 谢

时光飞逝，三年的研究生生活即将告一段落，在此特别向在我研究生生涯中指导过我的老师和那些帮助过我的同学表示感谢，是你们陪我共同度过了这段美好时光，谢谢你们给予我的支持。

在这三年里，梁巍老师学识渊博，对待科研工作认真负责，并注重理论和实践结合，锻炼我们的动手能力。在梁老师的教诲下，我逐步积累了硬件电路设计、传感器原理、嵌入式软件设计、无损检测、故障诊断、信号分析处理等多方面的设计和应用经验。

同时，要特别感谢团队里的陈亮老师、李晓宁老师、郝晓红老师还有龙波老师，是你们勤奋的工作和严谨的科研态度带动了我们整个团队的进步。另外，要特别感谢王恩报师兄、马豪师兄、贾薇师姐、肖强、洪敬贤、吴淑娴和付柯南在程序设计上提供的帮助，以及共同完成整个系统设计的师弟丁果和黄孟洋，大家共同讨论，解决问题，多亏你们，我的研究生生活才会如此精彩。

最后，感谢我的父母和家人在生活中给予我的关心和照顾。

参考文献

- [1] 王池,王自和,张宝珠,孙淮清.流量测量技术全书(上)[M].北京:化学工业出版社,2012,6
- [2] 杨震.基于超声波时差法管道流量计积分算法及实验研究[D].西安:西安理工大学,2006
- [3] 梁德福.时差法低功耗超声波流量计的设计与实现[D].广州:华南理工大学,2012,9
- [4] 陈静.超声波流量计的研制[D].西安:西安科技大学,2006,4
- [5] D. V. Mahadeva, R. C. Baker and J. Woodhouse. Further Studies of the Accuracy of Clamp-on Transit-Time Ultrasonic Flowmeters for Liquids[J].IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 58, no. 5, pp. 1602-1609, May 2009
- [6] 兰纯纯.时差法超声波流量计的研究[D].重庆:重庆大学,2006,9
- [7] 王建新,隋美丽.LabWindows/CVI 虚拟仪器测试技术及工程应用[M].北京:化学工业出版社,2011,9
- [8] 袁大伟.基于 LabWindows/CVI 的虚拟仪器系统的设计[D].辽宁:哈尔滨工程大学,2010
- [9] 李敏智.基于 LabWindows_CVI 的数据采集与监控系统的设计与实现[D].武汉:武汉理工大学,2009,5
- [10] 徐华英,王自和.流量计量(上)[M].北京:中国标准出版社,2012,12
- [11] 陈惠钊.粘度测量(修订版)[M].北京:中国计量出版社,2008
- [12] M. Hoffmann, A. Unger, A. Jäger and M. Kupnik. Effect of transducer port cavities in invasive ultrasonic transit-time gas flowmeters[J].Ultrasonics Symposium (IUS), 2015 IEEE International, Taipei, 2015, pp. 1-4
- [13] 周兵斌.基于 DSP 的时差法超声波流量计的研究[D].江西:南昌大学,2007,12
- [14] 杨剑.基于 FPGA 超声波流量计的设计[D].武汉:武汉理工大学,2012
- [15] 刘杰.基于时差法的超声波流量计设计[D].黑龙江:哈尔滨工程大学,2010
- [16] 郑鹏.基于 FPGA 的时差法超声波流量计系统的设计与实现[D].浙江:浙江大学,2006
- [17] 王铭学.基于 DSP 的超声波气体流量测量系统的研究[D].浙江:浙江大学,2008
- [18] 吴春华.时差法超声波流量计的研制及流场适应性研究[D].浙江:浙江理工大学,2015
- [19] D. V. Mahadeva, R. C. Baker and J. Woodhouse. Studies of the Accuracy of Clamp-on Transit Time Ultrasonic Flowmeters[J].Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2008. IMTC 2008. IEEE, Victoria, BC, 2008, pp. 969-973
- [20] 吕国胜.基于 ARM 的时差法超声波流量计设计[D].大连:大连理工大学,2010
- [21] 蔡清海.嵌入式低功耗超声波气体流量计设计[D].浙江:宁波大学,2015,6
- [22] 章梓雄.粘性流体力学[M].北京:清华大学出版社,2008

- [23] A. Luca, R. Marchiano and J. C. Chassaing. A discontinuous galerkin approach for the numerical simulation of transit-time ultrasonic flowmeters[J].IEEE International Ultrasonics Symposium, Chicago, IL, 2014, pp. 935-938
- [24] 晁智强,盛锋,韩寿松.时差法超声波流量计误差分析与研究[J].液压与气动, 2009(6):64-67
- [25] 何海浪.基于 ARM 的时差法超声波流量计设计[D].上海:华东理工大学, 2013
- [26] 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
- [27] 贾宝贤,边文凤,赵万生,等.压电超声换能器的应用与发展[J].压电与声光, 2005, 27(2):131-135
- [28] 王悦民,康宜华,武新军.磁致伸缩效应及其在无损伤检测中的应用研究[J].华中科技大学学报:自然科学版, 2005, 33(1):75-77
- [29] 张小凤,尚志远.静电式超声检测换能器的设计[J].陕西师范大学学报:自然科学版, 2006, 29(4):47-50
- [30] 姚丽,董卫,吴仲武.一种电磁式声电换能器的特性研究[J].电声技术, 2013, 37(1):33-38
- [31] 李家伟.无损检测手册[M].北京:机械工业出版社,2012, 139-200
- [32] 程杰,李福成.浅谈超声波流量计的使用[J].现代制造技术与装备, 2012(4):42-42
- [33] T. T. Yeh, P. I. Espina and S. A. Osella. An intelligent ultrasonic flowmeter for improved flow measurement and flow calibration facility[J].Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2001. IMTC 2001. Proceedings of the 18th IEEE, Budapest, 2001, pp. 1741-1746 vol.3
- [34] 李佳.ARM 系列处理器应用技术完全手册[M].北京:人民邮电, 2006
- [35] 马忠梅,马广云.ARM 嵌入式处理器结构与应用基础[M].北京:北京航空航天大学, 2006
- [36] 张永辉.ARM Cortex-M3 微控制器原理与应用[M].北京:电子工业出版社, 2013
- [37] 陈钱.基于 STM32F407 微糖检测仪开发[D].上海:华南理工大学, 2013
- [38] 钱济国.频响函数测量的脉冲激励方法[J].振动:测试与诊断, 2004(2):32-39
- [39] 姜勇.时差法超声波流量计设计与研发[D].浙江:浙江大学, 2006.6
- [40] 刘贵民, 马丽丽.无损检测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010, 1-106
- [41] 童诗白,华成英.模拟电子技术基础[M].北京:高等教育出版社, 2006, 25-148
- [42] 乔立岩,梁宇,赵浩然,等.基于 W5300 的以太网接口设计[J].电子测量技术, 2012, 35(7):129-132.
- [43] 史昕蕾,杨军,陆生礼.嵌入式 SoC 中的 DMA 控制器的设计与优化[J].电子工程师, 2004, 30(1):5-7
- [44] 文闻,宗光华,于洋,等.小管径超声波流量计去噪方法[J].中国空间科学技术, 2015, 35(2):77-83

- [45] 赵志宏,杨绍普,申永军.一种改进的 EMD 降噪方法[J].振动与冲击, 2009, 28(12):35-37
- [46] L. B. Soares, S. Bampi and C. D. P. Crovato. A fast EMD-based technique for Power Quality signals decomposition, compression, and time-frequency analysis[J].Digital Signal Processing (DSP), 2013 18th International Conference on, Fira, 2013, pp. 1-6
- [47] J. R. Razo-Hernandez, D. Camarena-Martinez, M. Valtierra-Rodriguez, D. Granados-Lieberman, J. P. Amezcua-Sanchez and C. A. Perez-Ramirez. The application of EMD methods to power quality signals[J].IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), Ixtapa, 2015, pp. 1-8
- [48] 赵亚梅, 杜红棉, 张志杰.基于 MATLAB 一种 IIR 数字带通滤波器的设计与仿真[J]. 微计算机信息, 2007, 23(13):285-287
- [49] Z. Shang-yue, L. Yuan-yuan and Y. Gong-liu. EMD interval thresholding denoising based on correlation coefficient to select relevant modes[J]. Control Conference (CCC), 2015 34th Chinese, Hangzhou, 2015, pp. 4801-4806
- [50] Z. Yang, J. Jiang, L. Yang, C. Qing, B. W. K. Ling and Q. Dai. A new bidimensional EMD algorithm and its applications[J].Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP), 2014 9th International Symposium on, Manchester, 2014, pp. 152-155
- [51] 侯丽霞,曾以成,熊民权.EMD 与自适应滤波相结合的语音增强法[J].计算机工程与应用, 2012, 48(9):104-107
- [52] 邵忍平,曹精明,李永龙.基于 EMD 小波阈值去噪和时频分析的齿轮故障模式识别与诊断[J].振动与冲击, 2012, 31(8):96-101
- [53] Y. Kopsinis and S. McLaughlin. Development of EMD-Based Denoising Methods Inspired by Wavelet Thresholding[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 57, no. 4, pp. 1351-1362, April 2009
- [54] 李欣,梅德庆,陈子辰.基于经验模态分解和希尔伯特-黄变换的精密孔镗削颤振特征提取[J].光学精密工程, 2011, 19(6):1291-1297
- [55] 孙晓云.基于 LabWindows/CVI 的虚拟仪器设计与应用[M].北京:电子工业出版社, 2010
- [56] Yang S F, Simbeye D S. Computerized Greenhouse Environmental Monitoring and Control System Based on LabWindows/CVI[J]. Journal of Computers, 2013, 8(2):399-408
- [57] Winters-Hilt S, Baribault C. A novel, fast, HMM-with-Duration implementation - for application with a new, pattern recognition informed, nanopore detector[J]. BMC Bioinformatics, 2007, 8 Suppl 7(Suppl 7):683-693
- [58] 王建新.LabWindows/CVI 虚拟仪器设计技术[M].北京:化学工业出版社, 2013
- [59] 秦树人.虚拟仪器--测试仪器从硬件到软件[J].振动、测试与诊断, 2006, 20(1):1-6

- [60] 应怀樵.虚拟仪器与计算机采集测试分析仪器的发展和展望[J].测控技术, 2007, 19(8):4-6
- [61] Liu N, Wang S, Wang H, et al. End Killing effect of the Light weapons test platform based on Labwindows[J]. Electronics World, 2014,9



专业学位硕士学位论文

MASTER THESIS FOR PROFESSIONAL DEGREE



知网查重限时 7折 最高可优惠 120元

本科定稿，硕博定稿，查重结果与学校一致

立即检测

免费论文查重: <http://www.paperyy.com>

3亿免费文献下载: <http://www.ixueshu.com>

超值论文自动降重: http://www.paperyy.com/reduce_repetition

PPT免费模版下载: <http://ppt.ixueshu.com>
