

摘 要

超声波防垢技术具有在线连续工作、自动化程度高、工作性能可靠、无环境污染、运行费用低等优点,是工业管道防除垢技术的发展方向。超声波换能器作为一种能量转换器件,是超声防除垢设备的主要部件,其性能直接影响着防除垢的有效性和可靠性,因此对于超声波换能器性能检测系统的研究具有重要的现实意义。

目前工作在大功率下的超声波换能器的性能评价缺乏标准,一直以来是凭经验、靠手感来评价其性能,本课题对应用于工业管道防除垢的超声波换能器进行性能检测研究,提出了最大振幅,平均振幅和基波频率这3项性能检测指标,旨在评价超声波换能器能量发射的有效性和稳定性,提供较为科学和合理的品质分类依据。

超声波换能器性能检测系统的设计,采用高精度压电加速度传感器进行信号采集,加速度信号经信号调理后用高速 A/D 转换器 AD9201 进行模数转换,采用 Xilinx 公司的 FPGA 芯片 XC2S50 为主控制器,用 Verilog 硬件描述语言实现对数据采集、数据缓存和数据预处理的控制,利用高速通用串行总线(USB)所具有的传输速度快、支持热插拔、易于扩展和占用资源少等优点,将其与数据采集技术相结合,设计了以 USB2.0 专用接口芯片 CY7C68013 为核心的数据传输方式,以 Slave FIFO 的接口模式来实现 FPGA 与 PC 机之间的高速数据传输,并结合驱动程序完在 LabVIEW 开发环境下完成主机应用程序设计。

最后将系统的硬件和软件设计相结合,进行了对系统的调试和与性能测试。经过大量实验,验证系统检测平台稳定运行,性能检测结果实现了超声波换能器的性能评价,在品质合格检验中具有良好的效果。

关键词: 超声波换能器; FPGA; 性能检测; USB2.0; LabVIEW

The Design and Implementation of Ultrasonic Transducer Detection System

Abstract

Ultrasonic anti-scaling has advantages of serial running on-line, high-degree automation, high reliability, no pollution and low operating cost. The technology of ultrasonic will be the developing direction of anti-scaling. As an energy conversion device, ultrasonic transducer is main part of the ultrasonic anti-scaling equipment and its performance affects the efficiency and reliability of anti-scaling directly. Therefore, studying on the ultrasonic transducer performance detection system has important realistic meanings.

Now there is no standard strain on the high-power ultrasonic transducer evaluation. It was always depended on the touching feeling of experienced workers. This project focuses on the research of high-power ultrasonic transducer's detection performance, which has a wide application on anti-scaling in the industry pipeline. Specific performances indicators including maximum amplitude, average amplitude and frequency are proposed in this paper in order to evaluate ultrasonic transducer's efficiency and stability, and supply a reasonable standard on quality classification.

The design of ultrasonic transducer detection system uses piezoelectric acceleration sensor, high speed A/D converter AD9201 to acquire and convert signals respectively. XC2S50 FPGA is selected as the core controller and Verilog hardware description language is used to realize the data collection, data buff and data pretreatment control. The system takes advantages of USB include high-speed transmission, hot swap support, easy to expand and less resources-taken to combine the data collection technology together. For Data transmission design, USB2.0 interface chip CY7C68013 is used as the main core. In order to realize high speed data transmission between the FPGA and PC, Slave FIFO interface mode is utilized. Combing driving program the host application program is constructed under the LabVIEW environment.

At last the whole hardware and software designing are combined to debug and test the performance of the system. A large number of experiments indicate that the detection platform runs stably, the detection results well reflect the quality of the ultrasonic transducer, which provide a good criticize method in quality inspection.

Key Words: Ultrasonic Transducer; FPGA; Performance Detection; USB2.0; LabVIEW

大连理工大学学位论文独创性声明

作者郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用内容和致谢的地方外，本论文不包含其他个人或集体已经发表的研究成果，也不包含其他已申请学位或其他用途使用过的成果。与我一同工作的同志对本研究所做的贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

学位论文题目： 超声波换能器性能检测系统的设计与实现
作者签名： 石莫 日期： 2008 年 12 月 22 日

大连理工大学学位论文授权使用授权书

本人完全了解学校有关学位论文知识产权的规定，在校攻读学位期间论文工作的知识产权属于大连理工大学，允许论文被查阅和借阅。学校有权保留论文并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，可以将本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和汇编本学位论文。

学位论文题目： 超声波换能器性能检测系统的设计与实现

作者签名： 石英

日期： 2008 年 12 月 22 日

导师签名： 王学

日期： 2008 年 12 月 22 日

1 绪论

1.1 课题背景

超声波是超声振动在弹性介质中的传播的机械波，既是一种波动形式又是一种能量形式。从1916年P.Langevin在水中进行超声实验时发现了超声波的能量作用，到1927年Wood和Loomis发表了超声能量作用的实验报告^[1]，奠定了功率超声研究和应用的基础，再到现在超声技术广泛应用于国防和国民经济中，其用途可分为两大类：一类是超声波在强度较低时可以用其波动性能作为探测与负载信息的载体与媒介，称检测超声；另一类是当强度超过一定值时，可以用其能量形式通过它与传声媒质的相互作用使物质的一些物理、化学和生物特性或者状态发生改变，或者使这种改变过程加快，称为功率超声。使用适当的换能器可产生大功率的超声波，而通过聚焦、变幅杆等方法，还可以获得更高声强的超声^[2]。在液体中产生的空化现象，使得利用超声进行加工、清洗、焊接、乳化、粉碎、脱气、促进化学反应、医疗，以及种子处理等已经广泛应用于工业、农业、医学卫生等各个部门。

超声波换能器是超声学的核心部分，有它自己独立的学科地位，是超声工程技术中极其重要的部分之一，是声学换能器中发展最快的一个分支领域。换能器就是进行能量转换的器件，是将一种形式的能量转换为另一种形式的能量的装置^[3]。在声学研究领域，换能器主要是指电声换能器，它能实现电能和声能之间的相互转换。目前，从大到像整幢楼房的水声换能器基阵，到小到可以深入血管的小探针式换能器，各式各样声学换能器的应用已经使得声学技术深入到科学研究和工程技术的各个领域^[4]。

超声波换能器历来是各种超声应用设备超声不可缺少的关键部件，器件性能好坏直接影响着超声应用设备的准确性、可靠性，其品质在超声波设备中占有十分重要的位置。超声波防垢技术具有在线连续工作、自动化程度高、工作性能可靠、无环境污染、运行费用低等特点，与传统清垢方法有着本质区别，是工业管道防除垢的技术发展方向^[5]。本课题来源于某一换能器生产厂家，研究对象是应用于工业管道防除垢的大功率超声波换能器，属于功率超声应用，超声波换能器的稳定性和有效性对于超声防除垢效果起着至关重要的决定性作用。工作在大功率下的超声波换能器的性能评价缺乏行业规范，一直以来都是凭经验和手感来评价其性能，所以超声波换能器性能检测系统的研究与推广具有重要的现实意义。

1.2 课题研究现状

在功率超声设备方面, Langevin 发明了钢-石英-钢结构的夹心(复合)压电换能器,这种换能器突破了单一石英晶体换能器只能产生高频率超声的限制,能够产生低频大功率超声波,取得了功率超声技术的重大进展。二十世纪 40 年代, W.P.Mason 发明了超声变幅杆,可以将超声振动的能量集中在一个很小的面积上,并且能将振动幅值放大,从而获得了高强度超声,扩大了功率超声的应用范围,为工业应用奠定了基础。二十世纪 90 年代以来,大功率超声的产生、功率超声的物理效应和化学现象和功率超声应用技术的研究进入快速发展阶段。

我国在二十世纪 50 年代开始大功率超声的研究,在理论研究和应用开发方面都取得了一定成果。二十世纪 60 代,中科院声学所等研究单位集中研究夹心式压电换能器,开发了一种新型可调频率换能器,分别对纵向振动的单一变幅杆和组合变幅杆的特性进行了系统的分析,取得了一定的进展。我国科学家在世界上首次采用复变数解析映象理论研究了有负载的变幅杆^[6],建立了有负载变幅杆的阻抗映象图,取得了变幅杆理论研究的重要进展,出版了国内外第一部有关超声变幅杆的专著^[7]。二十世纪 70-80 年代,我国提出并发展了两种新型的功率超声换能器,一种是广泛应用于超声清洗设备的半穿孔结构宽频带压电换能器;另一种是用于超声乳化设备的双向辐射换能器。二十世纪 90 年代以来开展了大尺寸压电换能器的二维分析研究,利用二维分析理论进行了弯曲振动、扭转振动和复合振动的压电换能器设计计算和研究,研制了功率超声处理设备,为这类换能器在工业方面的应用奠定基础。90 年代以来研究设计了新型扭转振动变幅杆,并分析了几种扭振复合变幅杆,填补了这方面的空白^[8-10]。

根据换能器的各种性能参数可以了解换能器的设计情况,判断超声处理过程的有效程度。在小信号情况下,换能器的性能参数测量比较简单,传统的导纳圆法^[11]、曲线法^[12]等,基本上都可以测量换能器所有的性能参数。另有学者提出了一种通过测量换能器电端电压与电流之间的相位差来决定换能器等效电参数的方法,提高了换能器有载时的测量精度^[13]。

在功率超声的各种应用中,超声换能器工作在大功率状态下,由于大功率下换能器工作状态的复杂性,其各项指标与小信号下的测量值相比有着很大不同,使得换能器的性能参数测量比较困难。在大信号激励下,换能器的介电性、机电转换与机械特性都将超出常规变化范围,破坏了换能器输入信号幅度与输出信号幅度成正比的关系。大功率状态下工作的换能器经常处在非线性状态,此时换能器的导纳圆就不再是一个比较规则的几何圆,从一个畸变的导纳圆中很难精确地得出换能器的各种性能参数,驻波比法可

用于换能器的大功率性能测试,然而振动体内振速分布的绝对测量比较困难,因而限制了驻波比法的广泛利用。有学者提出了一种测量换能器实用状态下性能参数的高频电功率计法。由于需要测量换能器的机械损耗功率、介电损耗功率与换能器振速、其端电压之间的依赖关系,因此测量时间长。另有学者提出了一种测量功率超声换能器实用状态下各个性能参数的新方法,即在超声波发生器与换能器之间连接一个电匹配箱,在理想匹配的情况下,利用换能器的等效电路,根据匹配电路的匹配原理及匹配参数,得到换能器实用状态下等效电路中的各个等效电参数,从而间接得到换能器的辐射效率、声功率等标志大功率超声换能器工作性能好坏的重要性能参数^[14]。

超声设备应用广泛,且优点显著,但是超声波换能器性能评价没有规范的标准,尤其是大功率超声波换能器的性能评估更是缺乏评价依据,同时检测技术也很不规范和成熟。所以,超声波换能器性能检测需要加强研究和推广。

1.3 本文主要内容

本课题主要是应用于工业管道防除垢超的大功率超声波换能器性能检测的研究和性能检测系统的设计与实现。检测系统的任务是对不合格的换能器进行检测识别,为品质检验提供分类依据。针对该任务,具体分析了课题应用的特点,提出了本系统的性能指标及其相应的检测方案;设计了以 FPGA 为主控制器的性能检测系统,以 USB2.0 实现与 PC 机的数据传输,并在 LabVIEW 开发环境下设计了应用程序。

论文的结构安排如下:

第一章:介绍超声波换能器性能检测的意义,叙述了超声波换能器及其性能检测的研究现状,介绍了本文的主要内容。

第二章:介绍超声波换能器性能评价方法的研究。首先介绍了超声波及其超声波换能器,然后介绍了常用的性能评价指标,最后在分析本课题应用特点的基础上提出了针对本课题应用的性能评价指标。

第三章:介绍性能检测系统的总体,包括性能检测系统的设计流程及其设计方案,确定检测系统的技术实现方案。

第四章:介绍超声波换能器性能检测系统的具体设计与实现。在给出系统整体结构的基础上详细阐述了 FPGA 控制模块、A/D 转换模块、USB 数据传输模块、SDRAM 数据缓存模块和应用程序设计。

第五章:介绍系统调试与后期工作。首先介绍系统调试方法与步骤,然后给出了系统调试结果及其系统功能验证,最后提出了开发手持式性能检测仪表的后期设计方案。

结论:对论文的内容进行总结,给出系统的实现效果,提出了有效的改进方案。

2 超声波换能器性能评价方法

2.1 超声波换能器简介

2.1.1 超声波及其特点

振动在弹性介质内的传播称为波动，简称波。频率在 $16\sim 2\times 10^4$ Hz 之间，能为人耳所闻的机械波，称为声波；低于 16Hz 的机械波，称为次声波；高于 2×10^4 Hz 的机械波，称为超声波。图 2.1 为声波的频率界限图。

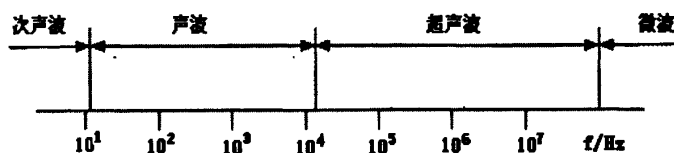


图 2.1 声波的频率界限图

Fig. 2.1 Limit graph of acoustic wave frequency

超声波是超声振动在介质中的传播，它的实质是以波动形式在弹性介质中传播的机械振动。因为超声波是机械波，所以，超声波的产生必须依赖于作高频机械振动的“声源”，同时，还必须依赖于弹性介质的传播。超声波的传播过程，包括机械振动状态和能量的同时传递。描述超声波的基本物理量主要有声速、频率、波长、周期、角频率。

声速：单位时间内，超声波在介质中传播的距离称为声速，用符号“ c ”表示。

频率：单位时间内，超声波在介质中任一给定点所通过完整波的个数称为频率，用符号“ f ”表示。

周期：声波向前传播一个波长距离时所需的时间称为周期，用符号“ T ”表示。

角频率：角频率以符号 ω 表示，定义为 $\omega = 2\pi f$ 。

上述各基本物理量之间的关系为：

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{2\pi\omega} = \frac{\lambda}{c} \quad (2.1)$$

超声波应用广泛，主要是基于以下显著的特点。

(1) 超声波的方向性好：超声波具有像光波一样良好的方向性，经过专门设计可以定向发射，犹如手电筒的灯光可以在黑暗中帮助人的眼睛探寻物体一样，利用超声波可在被检对象中进行有效的探测。

(2) 超声波的穿透能力强：对于大多数介质而言具有较强的穿透能力。例如在一些金属材料中，其穿透能力可达数米。

(3) 超声波的能量高：超声检测的工作频率远高于声波的频率，超声波的能量远大于声波的能量。研究表明，材料的声速、声衰减、声阻抗等特性携带有丰富的信息，并且成为广泛应用超声波的基础。

(4) 遇有界面时，超声波将产生反射、折射和波型的转换：人们利用超声波在介质中传播时这些物理现象，经过巧妙设计，可使超声检测工作的灵活性、精确度得以大幅度提高。

2.2.2 超声波换能器

换能器，就是将一种形式的能量转换为另一种形式的能量的能量转换器件。能量的形式是多种多样的，因而换能器的类型也各不相同。

超声波换能器，是实现电能量和声能量互相转换的能量转换器件，也称超声探头，或者简称探头。具体而言，就是利用各种能量转换器件，将其他形式的能量，如机械能、电磁能、光能等，转换为超声振动能量并向各种介质中发射，然后利用超声接收器（包括具有可逆效应的上述换能器）将超声场的各种声信号转换为便于处理的电信号或光信号，通过各种显示终端，变为可见显示信息。按照实现电—声转换的原理不同，可用于发射和接收超声信号的原理包括压电效应、磁致伸缩、电磁感应、静电效应、光电效应和机械振动等。

产生大功率超声的方法主要有两种：一种是利用电能转换成声能的电声换能器产生超声，另一种是利用流体作动力来产生超声。超声波换能器的种类很多，目前我国功率超声换能器有 3 种形式。一种是高压流体或气体声源，此类声源可获得较大的声功率，例如我国研制的簧片哨、旋涡哨都是利用流体作动力源，利用高速流体产生超声，其结构简单、声功率大，然而效率一般在 10% 左右，目前在超声除尘、超声乳化、超声粉碎、超声干燥等方面获得了应用。应用最广泛的电声换能器主要是压电换能器和磁致伸缩换能器^[15]。

(1) 压电换能器

1880 年，法国物理学家居里兄弟在研究晶体特性基础上，预言并测量了压电效应。不久，他们又证实了压电晶体同时具有逆压电效应。压电换能器是一种利用压电晶体或

具有压电效应的压电陶瓷等实现电声转换的换能器，其基本结构有圆片式和夹心式两种。作为压电型超声换能器，常的单晶体有石英、罗谢尔盐（四水合酒石酸钾钠， $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ）、铌酸锂等。其中石英性能稳定，利用不同的切割方向可构成各种不同振动方式，从而在媒质中产生不同波型。多用于制作标准超声换能器及各种超声探头。多晶体压电陶瓷，早期使用钛酸钡(BT)，后来研制出灵敏度更高的各种配方的锆钛酸铅(PZT)，包括各种掺杂改性及三元、四元系的 PZT 系列材料。当在压电材料（也称压电晶片）两面的电极上加上电压，它就会按照电压的正负和大小，在厚度方向产生伸缩。利用这一性质，若加上高频电压，就会产生高频伸缩现象，此即为压电效应。如果把这个伸缩振动设法加到被检工件的材料上，材料质点也会随之振动，从而产生声波。压电陶瓷材料制作工艺简单、成本低，可制成各种形状并通过不同极化方式制成各种形式的超声换能器。在功率超声应用中，常用夹心式换能器，或称郎之万型的复合振子，一般工作在 $20 \sim 100\text{kHz}$ 。多用于功率超声的各种处理，如水下声源，非金属材料检测及超声治疗等，其典型结构图如 2.2 所示。这种换能器机电转换效率高，控制使用方便，在功率超声技术中应用广泛。我国 20 多年来压电换能器取得了较大的进展，例如，大功率压电晶片的研制水平与国外水平相当，纵向压电换能器设计许多单位都有了自己的软件，有限元分析法、等效弹性分析法在设计中广泛应用。

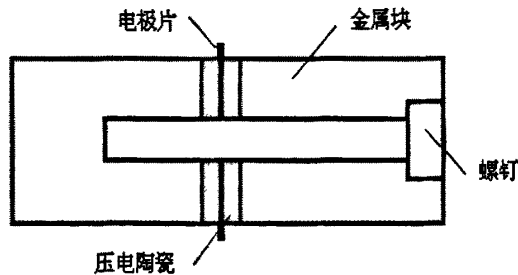


图 2.2 夹心换能器结构示意图

Fig. 2.2 Schematic illustration of sandwich transducer

压电超声换能器的种类很多，按组成超声换能器的压电元件形状分为薄板形、圆片形、圆环形、圆管形、圆棒形、薄壳球形、压电薄膜等；按振动模式分为伸缩振动、弯曲振动、扭转振动等；按伸缩振动的方向分为厚度、切向、纵向、径向等；按压电转换方式分为发射型（电——声转换）、接收型（声——电转换）、发射——接收复合型等。压电超声换能器当前的发展方向为大功率、低压驱动、高频、薄膜化、微型化、集成化。

压电换能器的应用十分广泛，它按应用的行业分为工业、农业、交通运输、生活、医疗及军事等；按实现的功能分为超声加工、超声清洗、超声探测、检测、监测、遥测、遥控等；按工作环境分为液体、固体、气体、生物体等；按性质分为功率超声、检测超声、超声成像等。

(2) 磁致伸缩换能器

某些材料在加上磁场以后，其几何尺寸将会发生变化；反之，当其几何尺寸变化时，又能改变原有的磁场，这种现象叫做磁致伸缩效应。磁致伸缩换能器是利用在磁致伸缩材料做成的铁芯外面绕以线圈制成的。当线圈中通以直流电流 I_0 产生最佳偏转磁场 H_0 后，再通以交流电 I ，从而产生交变磁场 H 重叠于 H_0 之上，这样铁芯中将产生以 H_0 值为中心的交变磁场。在交变磁场的作用下，由于材料的磁致伸缩效应，换能器的上下两端面就产生与交流电频率相同的交替伸缩，从换能器两端面辐射出超声波。当交变电流和换能器的共振频率一致时，振动幅度达到最大值。

与压电超声换能器相比，磁致伸缩超声换能器具有机械强度高，性能稳定，等效输入阻抗低，功率容量大，可在较低激励电压下输出较大声功率，其不足之处在于换能器的能力转换效率较低，激发电路复杂以及材料的机械加工困难等。近几年国内稀土超磁致伸缩材料研究不断取得进展，它的饱和磁致伸缩系数是传统磁致伸缩材料 Ni 的 40 倍，比压电材料的饱和应变大 5~10 倍，耦合系数达 94%，其能量密度比压电材料大 15~30 倍。在国内已在水声试验中研制了样机，声源级达 195dB 以上。在国外，根据美国工业协会 28 届年会报导 Etrema products 公司已制成 25kW 超声源在声化学和废水处理中应用。国内研制的样品目前价格还较贵，制成的材料棒状较多，薄片很少，因此适用于超声的磁致伸缩换能器还有待于材料的进展。

这种换能器主要应用于机械加工中的车削、铣削、刨削、钻孔、开槽、刻制螺纹、铰孔、磨削（甚至是镜面磨削）、雕刻以及抛光、下料等等，特别是对于坚硬材料的加工（如超硬合金、硬金属、陶瓷、玻璃、宝石、钻石、铁氧体、硬质合金）以及电子器件的微细加工，有着特殊的优势和较高的加工效率。

超大功率超声波技术可产生低功率超声技术所不能产生的新物理效应和新的用途，如它可使废旧轮胎脱硫再生，可使农作物大幅度增产，可加速化工过程的化学反应。有重大的经济、社会和环保效益；用该材料制造的电声换能器，可用于波动采油，可提高油井的产油量达 20%~100%，可促进石油工业的发展；用该材料制造的薄型（平板型）喇叭，振动力大，音质好，高保真，可使楼板、墙体、桌面、玻璃窗振动和发音，可作水下音乐、水下芭蕾伴舞的喇叭等。

换能器的内部电路系统，通常包含一个电容 C_0 或一个电感 L_0 的储能原件，当换能器处在发射状态时，从发射机的输出级送来一个电振荡信号，使其储能原件的电场或磁场发生变化，而借助电场或磁场的某种“力效应”，产生了一个对换能器的机械振动系统的动力，使之进入振动状态，从而向负载介质中辐射出声波信号，这就是发射声信号的全过程。

当换能器处在接收状态时，首先是声场的信号—声压作用在换能器的振动面上，使其机械振动系统进入振动状态，此时就引起换能器的电路储能原件的电场或磁场发生相应的变化，借助于系统的某种“电效应”，就在其电路系统中产生一个相应于声信号的电动势或电流，这就是接收声信号的全过程。

在超声处理的一些应用中，换能器的辐射端面常常连接一种变幅杆（聚能器），将换能器辐射端面的微小位移振幅（一般只有几个微米）加以放大，或者把超声能量集中在较小的截面上而产生大功率强超声，然后通过各种工具或直接对被处理对象进行加工处理。通常将由超声波换能器、变幅杆和各种工具组成的系统称为振动系统。

变幅杆的主要作用是放大机械振动位移、速度振幅或是将超声能量集中在较小的辐射面上，起到聚能的作用。此外它还是一种机械阻抗变幅器，连接在换能器和声负载之间，使声能更有效地向负载传输。变幅杆的种类很多，从振动模式分，有纵向振动和径向振动变幅杆，扭转振动及弯曲振动变幅杆；从结构分，有单一变幅杆和组合变幅杆；从几何形状分，有圆锥形、指数形、阶梯形、高斯线性以及各种形式组合的变幅杆等^[16]，如图 2.3 所示。



图 2.3 功率超声变幅杆

Fig. 2.3 Power ultrasonic amplitude transformer

2.2 超声波换能器性能评价

2.2.1 常用性能指标

超声波换能器作为一种能量转换器件,其学科研究的方向是,研究尽可能满足工程实用要求的声波阻抗,脉冲响应,频率响应,阻抗匹配,声学结构,换能材料及振动模式等特性,并设计和协调这些基本特性,达到电与声之间的最佳转换,其性能描述和检测需要许多参数。超声换能器的性能指标有工作频率、机电耦合系数、机电转换系数、品质因素、方向特性、发射功率、效率、灵敏度等。根据实际用处不同,以及使用场合的不同对不同的换能器性能提出不同的要求。发射换能器和接收换能器共同要求的性能特性如下所述^[3]。

(1) 工作频率

一般情况下,工作频率是根据对整个超声设备的技术论证针对一定的应用来确定的。大多工作频率选取在换能器的机械共振频率附近,因而所谓工作频率一般指换能器的机械共振频率或附近。

(2) 换能器的机电转换系数 n 和机电耦合系数 k

超声换能器的机电转换系数 n 指在机电转换过程中转换后的力学量(或电学量)与转换前的力学量(或电学量)之比。机电耦合系数 k 描述的是在能量转换过程中,能量相互耦合程度的一个物理量。

(3) 换能器的阻抗特性

换能器作为一个机电四端网络,具有一定的特性阻抗和传输常数。由于换能器在电路上要与发射机的末级回路和接收机的输入电路相匹配,所以在换能器设计时的匹配条件是非常重要的。

(4) 换能器的品质因素 Q_m

由于换能器由机械系统和电路系统两大部分组成,所以常用电路系统的品质因素 Q_e 和机械系统的品质因素 Q_m 来共同描述换能器的品质因素。

(5) 方向特性

对于一个发射换能器,方向特性曲线的尖锐程度决定了它的发射声能的集中程度。对于一个接收换能器,方向特性的曲线的尖锐程度决定了其探索空间方向角的范围。方向特性的好坏直接关系到超声设备的作用距离。

(6) 换能器的频率特性

换能器的频率特性是换能器的重要参数,指换能器的一些重要参数指标随工作频率变化的特性,如功率、声压、阻抗及灵敏度等随频率变化的范围。超声波换能器在应用

中在一定的带宽内获得平坦的阻抗频率特性有重大意义。因为往往在超声应用中的换能器负载是变化的，宽频带可以适应变化负载以保持匹配、高效率，而频带失配将导致电路发热，甚至损坏设备。在接收换能器中宽频带可以获得窄脉冲、短余振时间波形，获得极高的纵向分辨率。

发射换能器特别要求的性能特性包括发射声功率和发射效率。

(1) 发射声功率

发射声功率描述一个发射器在单位时间里向介质声场辐射声能多少的物理量，射声功率大小直接影响超声处理的作用效果。换能器的发射功率一般是随着工作频率而变化的，在其机械谐振时可以获得最大的发射声功率。

(2) 发射效率

换能器作为能量传输网络，其传输效率通常采用不同的三个效率概念来描写：机电效率、机声效率和电声效率。机电效率，换能器本身将电能转换为机械能的效率，其大小等于机械系统所获得的全部有功功率与输入换能器的总的信号电功率之比。机声效率，换能器的机械振动系统将机械能转换成声能的效率，其大小等于发射的声功率与机械系统所获得的有功功率之比。电声效率，换能器将电能转换成声能的总效率，其大小等于发射声功率与输入换能器的总的信号电功率之比。

接收换能器特别要求的性能特性包括灵敏度和等效噪声压。

(1) 接收换能器的灵敏度（接收声场的响应）

灵敏度是接收换能器的一个重要指标，又有电压灵敏度和电流灵敏度之分。所谓接收换能器的自由场电压灵敏度是指接收换能器的输出电压与在声场中引入换能器之前改点的自由声场声压的比值。所谓接收换能器的自由场电流灵敏度是指接收换能器输出电流与声场中引入接收器之前的自由声场声压的比值。

(2) 等效噪声压

当换能器用于接收器时，由于接收器内部电声转换器件在一定的温度下内部分子的热运动将产生噪声，成为自噪声或固有噪声。这种自噪声的大小决定了接收器所能测量的有用信号的最小可能值，它包含许多频率成分，可取在一赫兹频带宽带上的均方根电压来量度其大小。

2.2.2 超声波防除垢机理

超声波防垢技术具有在线连续工作、自动化程度高、工作性能可靠、无环境污染、运行费用低等特点，与传统清垢方法有着本质区别，非常适合应用于工业管道防除垢。超声波的防垢机理主要表现在以下几个方面^{[17][18]}：

(1) 空化效应

超声波的辐射能使被处理液体介质产生大量的空穴和气泡，也就是液体拉裂而形成无数极微小的局部空穴，当这些空穴和气泡破裂或互相挤压时，产生一定范围的强大的压力峰，能使成垢物质粉碎悬浮于液体介质中，并使已生成的垢层破碎导致其易于脱落。根据理论和实践测算，用 20 KHz 、 50 W/cm^2 的超声波对 1 cm^3 液体辐射时，其发生空化的气泡数为 5×10^4 个/s，局部增压峰值可达数百甚至上千大气压。

(2) 活化效应

超声波在液体介质中通过空化作用，可以使水分子裂解为 H^+ 和 HO^- ，甚至是 H^+ 和 HO^- 。而 HO^- 与成垢物质离子可形成诸如 $Ca(OH)_2$ 、 $Mg(OH)_2$ 等配合物，从而增加水的溶解能力，使其溶垢能力相对提高。也就是说，超声波能提高流动液体和成垢物质的活性，增大被水分子包裹着的成垢物质微晶核的释放，破坏垢类生成和在管壁沉积的条件，使成垢物质在液体中形成分散沉积体而不在管壁上形成硬垢。

(3) 剪切效应

水分子裂解产生的活性 H^+ 的寿命比较长，它在管道内的流体中产生还原作用，可以使生成的积垢剥落下来。另外，因为超声波辐射在垢层和管壁上，吸收和传播速度不同，从而产生速度差，在垢层与管壁界面上形成相对剪切力，导致垢层产生疲劳而松脱。

(4) 抑制效应

超声波改变了管道内流体的物理、化学性质，缩短了成垢物质的成核诱导期，刺激了微小晶核的生成。新生成的这些微小晶核，由于体积小、质量轻，悬浮于流体中，生成比壁面大得多的界面，有很强的争夺水中离子的能力，能抑制离子在壁面处的成核和长大，使既定结构的晶粒长大，因此减少了粘附于管壁上成垢离子的数量，从而减小了积垢的沉积速率。实验研究表明，当液体的过饱和系数一定时，在相同的超声波参数下，超声波作用时间越长，则成垢物质的成核诱导期越短。

此外，超声波辐射压力、声学毛细管现象、科努瓦诺夫效应和声流对积垢生成也有直接的防除垢效应。

图 2.4 为换能器在工业管道防垢应用中的安装示意图。

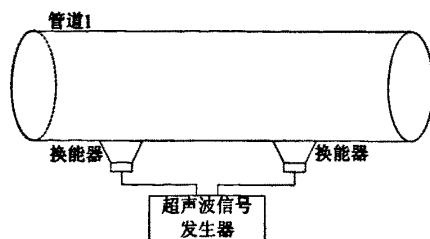


图 2.4 换能器安装图

Fig. 2.4 Installation diagram of transducer

在工业应用中的超声波管道防除垢系统，均遵循以防垢为主的原则，主要是利用超声波的空化效应在流体媒质中形成强大的空化场，最终使析晶污垢大量悬浮在流体媒质中，而不至于粘挂在管道内壁上形成积垢，把管道积垢问题的解决放在了积垢形成前的阶段。空化作用是只能在液体媒质中才能出现的一种重要的基本作用。超声空化是强超声在液体媒质中引起的一种特有的物理过程，它伴随许多奇妙的现象和惊人的效应。

对于超声空化场对污垢形成的抑制作用不强或者管道内已经形成了积垢的需采用以除垢为主的超声波管道除垢技术，主要应用超声波的剪切效应和空化效应，要求在保证一定剪切效应和空化强度的前提下，超声波声束和空化场与管道内壁的接触面积尽量大，从而把剪切效应和空化效应的作用发挥到最大，并且提高处理效应的持续性。

声波传播到原先静止的介质中，一方面使介质质点在平衡位置附近振动，同时在介质中产生了压缩和膨胀的过程，前者就使介质具有了振动的动能，后者使介质具有了形变位能，两部分的和就是由于声扰动使介质得到的声能量，扰动的传播使声能量也跟着转移，声波的传播过程实质上就是声振动能量的传播过程。波在介质中传播时，相应地能量随着振动状态沿波的传播方向传播。

2.2.3 超声波换能器性能评价指标

本课题的研究对象是应用于工业管道防除垢设备中的大功率超磁致伸缩型声波换能器。大功率超声传播有着独特的性质。在线性声学中，单频声在线性介质中传播时，除了振幅衰减和相位变化之外，其波形并不发生变化；而在非线性声学中（如由大振幅产生的运动非线性或是介质不均匀产生的非线性），单频声波会产生它的谐波、分频波、和频波以及差频波。由于这些波的出现，波的叠加原理不再成立。声的传播速度与流体的压力成正比，压缩的峰值处的压力就比别处压力大。所以压力峰值附近指点运动速度就比较快，快的愈快，慢的愈慢，声压的波形就会变成锯齿形，这就是声的非线性现象。振幅大的声波会发生由正弦波变成锯齿波，又变成正弦波的过程。因为正弦波变成了锯

齿波，就出现的高次谐波，把基波的能量转化为高次谐波，高次谐波的频率高，在介质中吸收衰减快，所以传播不了多少距离就衰减完了，波形又恢复成正弦波^[19]。由此可见，振幅的大小是个关键因素。

由上一小节的分析可知，管道放除垢中空化效应是起着决定性作用的效应，所以对于生产者和使用者来说就会更为关心超声场中空化强度的强弱，因为其决定着防除垢的效率。与超声空化强度直接相关的声学量是声能量以及工作频率，其中频率与空化阈值的关系非常密切，其决定空化泡成长的时间，频率越高空化泡崩溃前的成长就时间越少；而声能量决定空化泡的膨胀率。输入到声场中的能量大到一定程度，空化强度会减弱，说明并不是声能量越大越好，而是存在一个最有利的输入声能量。因此，声能量和频率对防除垢用超声波换能器是两个非常重要的指标。

本系统研究的换能器属于发射换能器，通常情况下会用发射声功率这一指标来衡量，液体声场中的超声波强度（声功率）是超声波系统一个最主要的指标。前文中提到，所谓发射声功率，指的是一个发射器在单位时间里向介质声场辐射声能多少的物理量，它的大小直接影响超声处理的作用效果。目前大功率条件下声功率的测量主要有量热法，谐振导纳计算法，瓦特计法和谐振——失谐法。总的来说，大功率条件下声功率的测量是一个复杂的过程。日本 E.Mori 提出的瓦特计测量郎之万型换能器输出声功率的方法已经作为日本工业标准。1995 年第 26 届美国超声工业协会(UIA)会议也考虑将它作为工业标准。可见用于测量大功率换能器工作状态下输出声功率的瓦特计法已经得到了广泛的认同^[19]。

超声波是超声振动在介质中的传播，它的实质是以波动形式在弹性介质中传播的机械振动，既是一种波动形式又是一种能量形式。振动物体离开平衡位置的最大距离叫做振动的幅度，通常记为 A 。振幅是标量，在数值上等于最大位移的大小。振幅描述了物体振动幅度的大小和振动的强弱。超声波振动的振幅直接代表了超声波输出能量的大小，也关系到相关设备的强度和整机的使用寿命。无论对于生产超声波设备的厂家或者是使用超声波设备的用户，怎么强调它的重要性都不为过。振动的能量和振幅的平方成正比，由此可知，振幅越大，能量越大。换能器输出振幅的大小标志着声能量密度的大小，所以可将振幅作为评价超声波换能器有效性和稳定性的一个间接衡量标准。

在实际生产生活中，对于大功率超声波换能器的评价一直以来是凭经验、靠手感来确定超声波振幅（功率），这种方式很不科学，带有很多的不确定因素，不能很好的评价换能器。根据以上分析，本系统提出了最大振幅和平均振幅这两项指标，并寻求一种较为科学和准确的检测方式来得到振幅。振幅的直接测量存在困难，但是通过寻求间接方式可以得到振幅的信息。

对于超声波一个确定的点的波动方程，有：

$$y = A\sin(2\pi ft + \psi) = A\sin(\omega t + \psi) \quad (2.2)$$

因为物体的振动速度 v 是其位移 y 对其时间 t 的变化率，因此：

$$v = \frac{dy}{dt} = \frac{d\sin(\omega t + \psi)}{dt} = A\omega \cos(\omega t + \psi) \quad (2.3)$$

物体振动的加速度 a 是其速度 v 对其时间的 t 变化率，所以：

$$a = \frac{d^2y}{dt^2} = \frac{dv}{dt} = \frac{d[A\omega \cos(\omega t + \psi)]}{dt} = -A\omega^2 \sin(\omega t + \psi) \quad (2.4)$$

因此，可以得到振幅 A 和加速度 a_{\max} 之间存在以下关系：

$$a_{\max} = \omega^2 A \quad (2.5)$$

由 $\omega = 2\pi f$ 得到：

$$A = \frac{a_{\max}}{\omega^2} = \frac{a_{\max}}{4\pi^2 f^2} \quad (2.6)$$

根据式(2.6)，最大加速度和振幅存在确定的对应关系，从最大加速度可以得到振幅这一性能指标。由此得到了根据加速度信号来得到振幅信息，进而对换能器的性能进行评价。

根据磁致伸缩换能器的机理，当交变电流和换能器的共振频率一致时，振动幅度达到最大值。由此可知，频率直接关系到换能器的能量发射的有效性和稳定性，是个极为关键的重要指标。再者，超声波防除垢设备在管道中发挥主要作用的是基波成分。当超声设备的工作在换能器的机械共振频率时可以得到较高的能量转换效率。从信号分析上来看，仅靠直观分析换能器加度度的时域信号还不能满足实际表征换能器性能的需要，必须通过先进的数字信号处理技术对收波信号的内含信息进行数据挖掘，以达到对性能检测方法高效可靠的要求。傅立叶原理表明：任何连续测量的时序或信号，都可以表示为不同频率的正弦波信号的无限叠加。傅里叶变换将原来难以处理的时域信号转换成了易于分析的频域信号，可以得到该信号中不同正弦波信号的频率、振幅和相位。通过快速傅氏变换得到基波幅值和基波频率。定义基波频率为检测系统中的一个检测指标。

3 系统总体设计

3.1 系统设计流程

工作在大功率下的超声波换能器性能评价没有规范的标准，针对本课题的防除垢应用背景，对超声波换能器的性能检测指标进行了研究，然后设计了检测方案，具体的设计流程如图 3.1 所示。

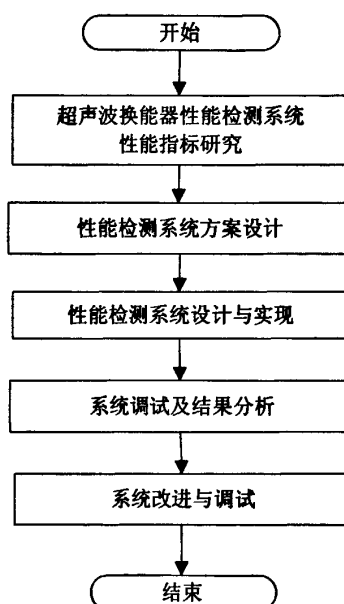


图 3.1 系统设计流程图

Fig. 3.1 Flow chart of system design

在 2.2.3 节中提出了超声波换能器的性能指标参数，接下来就是性能检测系统的设计与具体实现。系统的设计在结构上应该科学合理，在功能上能够实现特定应用情况下所确定标准的检测，性能检测系统设计需要满足以下原则：

(1) 先进性 先进性要考虑计算机及外设、基础软件的新版本，新的操作系统等先进设备、先进技术的应用。

(2) 可靠性 系统的可靠性包括两个方面的内容，一是系统运行的安全性；二是数据精度的可靠性和完整性。

(3) 实用性 系统能够真正解决实际问题，为生产实践服务。

(4) 可扩展性 考虑到科学技术在不断发展，用户需求不断变化，提高系统的可扩展性有助于提高系统的生命周期。为此，系统应能够进行二次开发，便于系统改进、扩充，使系统处于不断完善之中。

3.2 检测系统设计方案

性能检测系统主要目标是对应用于工业管道防除垢的超声波换能器的性能检测进行探索性研究。本系统对超声波换能器进行评价的前提在于实现对换能器加速度信号的采集和处理，设计采用压电加速度传感器来检测超声波换能器的振动加速度信号，根据采集到的加速度信号进行性能评价。充分参考目前市场情况和技术发展情况，设计方案充分利用 PC 机的强大数据分析、处理和存储能力。超声波换能器性能检测系统在功能实现上设计包括有 FPGA 主控模块、超声波信号发生模块、加速度信号接收和调理模块、数据采集模块、数据存储模块、USB 数据传输模块、PC 机应用程序设计模块。图 3.2 为检测系统的原理框图。

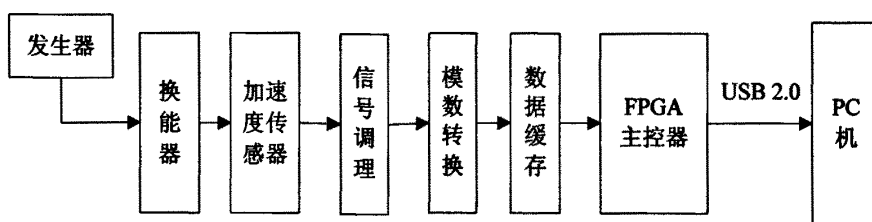


图 3.2 检测系统原理框图

Fig. 3.2 Diagram of detection system

其中 FPGA 主控模块是整个系统的核心模块，控制着整个系统的协调运行和数据的预运算处理；

超声波信号发生模块包括产生超声激励脉冲的发射电路和超声探头，产生激励脉冲激励探头发射超声波；

换能器加速度信号接收和调理模块包括前置放大电路，滤波电路，程控放大电路和检波电路；

数据采集模块将滤波后的回波模拟电压转换成数字信号，超声波频率较高，两尖峰之间的间隔很短，因此 A/D 转换速度要求比较高；

数据存储模块考虑到由于采集到的加速度信号数据量比较大，因此设置专门的存储芯片来缓存数据；

USB 数据传输模块能够将回波数据上传到 PC 机，利用微机强大的运算能力对加速度信号进一步的分析处理；

PC 机应用程序设计模块实现数据分析处理、性能指示和记录存储。

本文主要设计实现的模块为 FPGA 主控模块、数据采集模块、数据存储模块、USB 数据传输模块、PC 机应用程序设计模块。

从技术实现角度来看，超声波换能器性能检测系统需要在 FPGA 主控器的控制下完成两项任务：下位机实现对换能器振动加速度信号的采集，上位机对采集的加速度信号数据进行分析 and 处理得到性能指标参数。

FPGA (Field Programmable Gate Array, 现场可编程门阵列) 起源于 PLD 技术, 在 20 世纪 80 年代中期, 由美国硅谷 Xilinx 公司首创的全新概念, 它是作为专用集成电路 (ASIC) 领域中的一种半定制电路而出现的, 既解决了定制电路的不足, 又克服了原有可编程逻辑器件门电路数有限的缺点, 已经逐步成为数字系统设计的首选^[20]。如图 3.3 所示, FPGA 主要由以下几个部分组成: 可配置逻辑模块 CLB(Configurable Logic Block)、输出输入模块 IOB(Input Output Block)和内部连线 PI(Programmable Interconnect)。输入输出模块分布在芯片四周, 它是内部逻辑和芯片封装脚之间的接口。逻辑单元通过程序定义内部联接关系, 完成用户所需的逻辑功能, 逻辑单元与逻辑单元、逻辑单元与外界的连接关系以及矩阵开关的状态都通过程序定义。FPGA 借助于可编程内部连线 PI 把功能比较简单的逻辑块连接在一起, 从而实现复杂功能电路的设计。最新的 FPGA 器件中还集成了一些特定功能硬件模块, 包括存储器、锁相环、乘法器等。

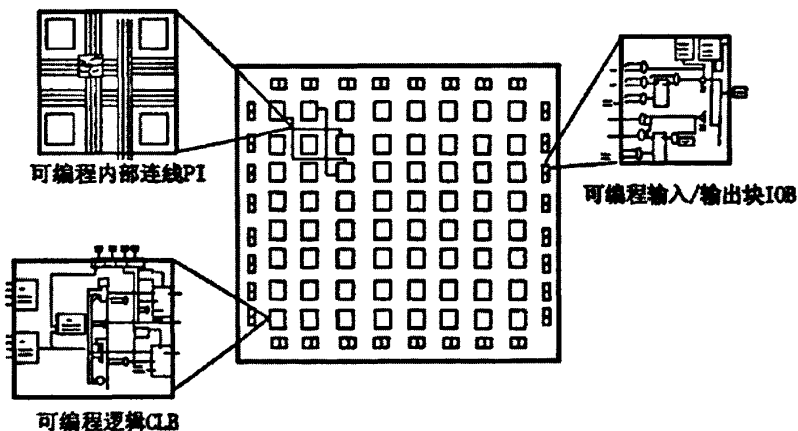


图 3.3 FPGA 的结构框图

Fig. 3.3 FPGA architecture chart

将 FPGA 选为本设计的主控制器，主要是基于 FPGA 优秀的性能表现。与其它器件相比，FPGA 的基本特点主要有以下几点：

- (1) FPGA 内部有丰富的触发器和 I/O 引脚。
- (2) FPGA 可应用于其它全定制或半定制 ASIC 电路。
- (3) FPGA 采用高速 CMOS 工艺，功耗低，可以与 CMOS、TTL 电平兼容。
- (4) FPGA 是 ASIC 电路设计周期短、开发费用低、风险最低的器件之一。
- (5) 采用 FPGA 设计 ASIC 电路，用户不需要投片生产，就能得到合用的芯片。
- (6) FPGA 芯片是小批量系统提高系统集成度、可靠性的最佳选择之一。

在数据采集领域，USB(Universal Serial Bus)数据采集技术在国外已处于高速发展的阶段，尤其是在高速数据传输速度、高实时性、高同步性等方面有雄厚的技术实力。近几年，USB 数据采集开发在国内迅速发展，水平不断提高。由于 USB 具有易用、真正的热插拔、高性能和系统造价低廉等优点，在国内也逐渐应用在工业数据采集系统中^[21]。与国外同类产品相比，国内 USB 数据采集系统性能有一定差距，如大部分产品仍采用 USB1.1 协议，数据采集频率低，精度和分辨率低，数据处理能力差，存储容量小等。综合和考虑本系统采集指标和开发成本，本设计提出了一种基于 USB2.0 专业接口芯片实现数据传输的设计方案。选择合适的 USB 接口控制芯片是成功进行数据传输的关键。从芯片的性价比、芯片的资料以及芯片的开发平台等方面综合考虑，选用的是嵌入通用微控制器内核的芯片作为 USB2.0 接口芯片：CYPRESS 半导体公司的 EZ-USB FX2 系列中 CY7C68013。

上位机的应用程序的设计开发，选择的是在一个具有革命性的图形化开发环境 LabVIEW(Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)下来完成，其简单、直观、易学的图形编程法代替了原来复杂、烦琐、费时的语言编程，可以极大地加快系统的开发进度。从最简单的仪器控制，数据采集和到尖端的测试和工业自动化，都可以发现 LabVIEW 的成果和开发产品。LabVIEW 内置信号采集，测量分析和数据显示功能，摒弃了传统开发工具的复杂性，提供了强大功能的同时还保证了系统的灵活性和开发的进度^[22]。

4 性能检测系统设计

4.1 系统整体结构

根据 3.2 节中超声波换能器性能检测系统的设计方案，系统以 FPGA 为控制核心，以 USB2.0 实现数据传输，在 LabVIEW 环境下开发应用程序。系统硬件包括信号接收与调理电路、A/D 转换电路、存储电路、配置电路、JTAG 电路、USB 接口电路、电源电路等。

超声波换能器性能检测系统总体硬件框图如图 4.1 所示，FPGA 采用的是 Xilinx 公司的 FPGA 芯片 XC2S50-PQ208，配置芯片采用的是 XCF01S，A/D 转换控制器采用的 AD9201，SRAM 采用的是 IDT1V416，USB 接口芯片采用的是 Cypress 公司 FX2 系列的 CY7C68013。

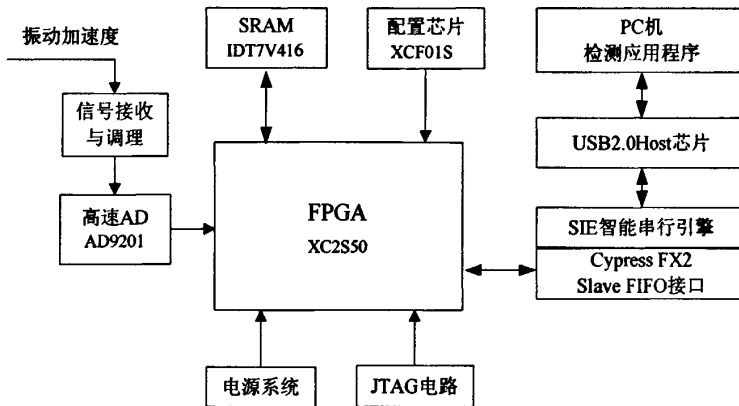


图 4.1 检测系统硬件框图

Fig. 4.1 Hardware structure diagram of detection system

超声波换能器性能检测系统的工作过程为：换能器的振动信息由压电加速度传感器将加速度信号转换为电压信号；电压信号经过信号接收与调理后进入高速 A/D 转换器 AD9201 的转换通道；FPGA 控制器 XC2S50 对来自 AD9201 转换后输出的数字信号量进行采集和数据预处理，然后通过 USB2.0 协议与 PC 机进行数据、指令以及状态信息的传递与交流；在 PC 机用户应用程序中综合分析所采集到的数据，经过合理的算法处理，最终得到性能参数检测结果，以数据或曲线的形式显示出来，同时对重要的数据记录存储。

4.2 FPGA 控制模块

4.2.1 XC2S50 概述

主控制器 XC2S50 是 Spartan-II 系列的 FPGA，封装是 PQ208。Spartan-II 2.5V 现场可编程门阵列家族使用先进的处理技术和改进的基于 Virtex 的结构，为用户提供了高性能、充裕的逻辑资源和丰富的特性集，但是价格却很低廉。该家族的 6 种器件可提供密度为 15000 到 200000 的系统门，系统最高频率可达 200MHz。Spartan-II FPGA 家族的可编程逻辑模块具有一个规则的、灵活的可编程结构。环绕在它周围是可编程输入、输出模块，4 个锁相环(DLL)分别位于管芯的四角，两列块 RAM 位于管芯的两侧，位于 CLB 和 IOB 之间。这些功能单位都通过一个强大的分布层布线实现互联。XC2S50 的主要特性有：

(1) 具有 1728 个逻辑单元，384 个 CLB，逻辑门达 50000 门，最大可用的用户 I/O 口达 176 个。

(2) 高性能的内部存储器 Select RAM 结构。每个块存储器容量为 18Kb，并且是完全的双口存储器结构。可提供内部分布式 RAM 可达 24576 位，块 RAM 位总数为 32K。

(3) 芯片核心电压为 2.5V，I/O 口电压为 3.3V，具有与通用 5V 数字电路直接连接的能力，并且使系统具有较低的功耗。

(4) 支持多达 17 种的单端接口标准和 6 种差分接口标准。输出信号的摆幅范围可达 1.14V 和 3.45V。

(5) 提供 4 个全局时钟多路复用缓冲器，构成了丰富的时钟资源，从而可提供灵活的系统时钟解决方案。

(6) 片内的数字化阻抗匹配技术和可编程输出电流，克服了因阻抗不匹配造成的系统不稳定性问题^[23]。

4.2.2 FPGA 开发流程

一个完整的 FPGA 设计流程主要包括设计与输入、功能仿真、综合、综合后的实现、时序仿真和下载配置等主要步骤^[20]，如图 4.2 所示。

设计与输入是根据设计者的设计方法将所设计的功能描述给 EDA 软件。常用的设计方法有硬件描述语言和原理图设计输入方法。目前进行大型工程设计时，最常用的方法是 HDL 设计输入法，其中最为广泛的 HDL 语言是 VHDL 和 Verilog HDL，波形输入法和状态机输入法是两种常用的辅助设计方法。

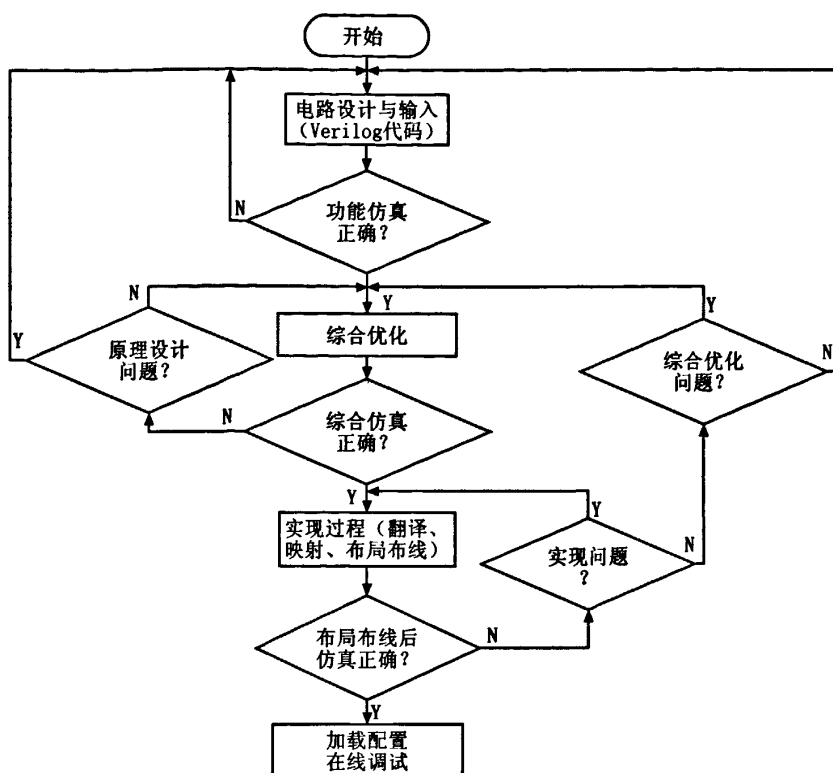


图 4.2 FPGA 设计流程图

Fig. 4.2 Flow chart of FPGA design

电路设计完成后,要用专用的仿真工具对设计进行功能仿真,验证电路功能是否符合设计要求。功能仿真有时也称前仿真。通过仿真能及时发现设计中的错误,加快设计进度,提高设计的可靠性。

综合(Synthesize)是指将 HDL 语言、原理图等设计输入翻译成与、或、非门, RAM, 寄存器等基本逻辑单元组成的逻辑连接网表,并根据目标与约束条件优化所生成的逻辑连接,输出 edf 和 edn 等文件,供 FPGA 厂家的布局布线器进行实现。

综合完成后,根据所选芯片的型号,将综合输出的门级网表适配到具体的 FPGA 器件上,这一过程称为实现(Implementation)过程。Xilinx 的实现过程分为:翻译、映射、布局布线等 3 个步骤。因为只有器件开发商最了解器件的内部结构,所以实现步骤必须选用器件开发商提供的工具软件。

布局布线之后做时序仿真,时序仿真中应该将布局布线的时延文件反标到设计中,使仿真既包含门延时,又包含线延时信息。

设计开发的最后步骤是生成配置文件,将配置文件下载到芯片中并进行调试。

4.2.3 XC2S50 配置

配置是 Xilinx 开发软件将对设计产生的位流载入到 FPGA 内部配置存储器的过程。FPGA 是基于门阵列方式为用户提供可编程资源的，其内部逻辑结构的形成是由配置数据决定的，这些配置数据通过外部控制电路或微处理器加载到 FPGA 内部的 SRAM 中。由于 SRAM 的易失性，每次上电时，都必须对 FPGA 重新配置，在不掉电的情况下，这些逻辑结构将会始终保持，从而完成用户编程实现的功能。

FPGA 采用采用主串(Master Serial)、从串(Slave Serial)、从并(Slave Parallel)、主并(Master Parallel)、JTAG 等方式进行配置，具体配置模式可以通过设置 FPGA 的 M2、M1、M0 引脚的电平。Spartan-II 器件支持以上四种扫描模式，用于配置的共有两类管脚：只执行相关特定配置功能的专用引脚和非专用引脚。给专用引脚在启动操作后可以作为通用的 I/O。专用管脚包括模式管脚 M2、M1、M0、配置时钟管脚 CCLK、PROGRAM 管脚、DONE 管脚和边界扫描管脚 TDI、TDO、TMS、TCK。本系统设计采用的是 JTAG 和主串配置模式配置^[24]。当系统调试时采用 JTAG 配置模式，系统调试完毕应用时采用主串行配置模式时，采用的外部配置存储器芯片是 XCF01S。图 4.3FPGA 的配置电路原理图。

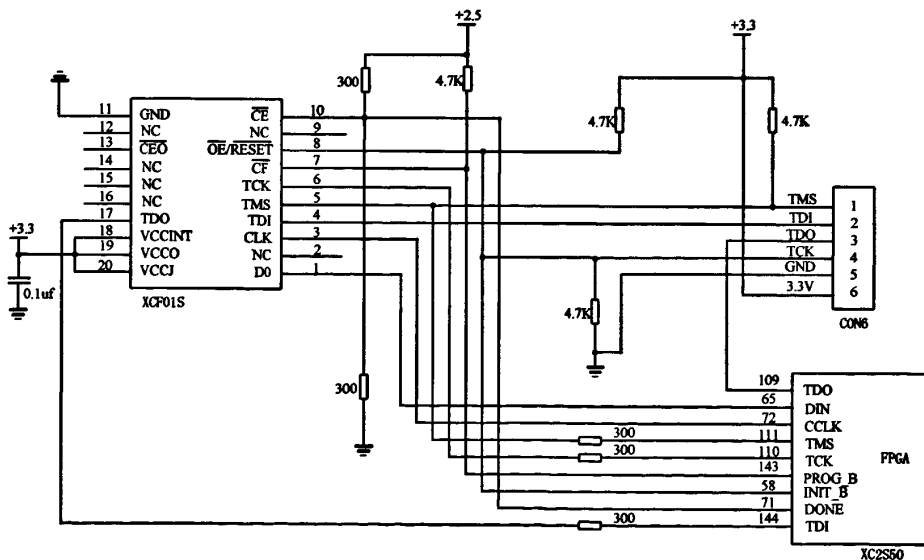


图 4.3 配置电路原理图

Fig. 4.3 Schematic diagram of configuration circuit

4.2.4 FPGA 控制模块设计

超声波换能器性能检测系统设计充分利用了 PC 机的强大计算和处理功能，信号数据的分析和处理由上位机应用软件来完成，因此 FPGA 作为主控制器主要用来控制系统各部分协调工作和实现数据预处理。如图 4.4 所示，主要的控制逻辑为以下几个模块：时钟模块、AD 控制模块，SRAM 缓存控制模块，USB2.0 接口芯片控制模块和数据预处理模块。

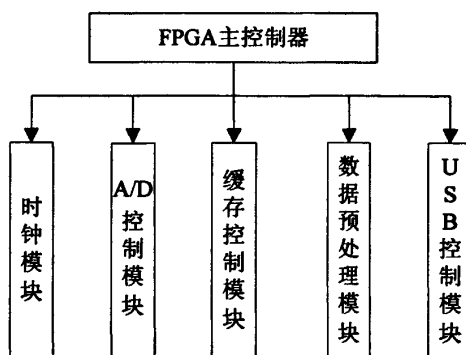


图 4.4 FPGA 模块控制图

Fig. 4.4 FPGA module control chart

(1) 时钟模块：该模块产生不同频率的时钟信号。时钟模块输入时钟信号为来自 USB 接口芯片的内部 48MHz 时钟信号，通过 FX2 的 CLKOUT 引脚进入 FPGA 的全局时钟引脚，通过分频产生模数转换器的 2MHz 采样频率信号。

(2) A/D 控制模块：该模块产生模数转换芯片 AD9201 需要的转换控制信号。

(3) SRAM 控制模块：该模块的功能是产生数据缓存芯片 IDT71V416 实现数据缓存的读写控制信号。

(4) 数据预处理模块：该模块对于采集的信号进行同步处理，便于上位机应用程序进行信号数据的处理。

(5) USB 控制模块：该模块根据 FX2 端点 FIFO 提供的时序信号、握手信号（空、满和可编程级信号）来控制读写信号和输出允许信号等。

这里重点阐述数据预处理模块的实现。数据预处理模块为信号数据通过同步信号，实现方法为将波信号的一个周期的信号数据作为一帧数据，即大约 80ms 的数据量为一帧数据，在一个信号周期起始处加入同步位。信号周期起始的判断通过对经过模数转换后的 10 位数字信号 `ad_data` 进行判断。为不遗漏判断期间的有效信号数据，确保信号数据

的完整性,在进行判断的同时进行信号延时保存,从而保留了有效信号及有效信号开始前的少量数据量。信号延时需要设计一个数据存储器,对 ad_data 信号数据进行缓存。

考虑到一般的 RAM 接口需要占用 FPGA 大量的 IO 口,在设计实现时采用 FPGA 芯片含有的块 RAM(BlockRAM),通过在 ISE 中调用 IP 核的生成工具(Core Generator)生成块 RAM。IP(Intellectual Property)核生成工具是 ISE 设计工具中的一个重要设计输入工具,它提供了大量成熟、高效的 IP 核为用户所用。IP 核是根据 Xilinx 公司的 FPGA 器件的结构特点设计,直接用 Xilinx FPGA 底层硬件原语进行描述,用户在调用时只需要提供相应的接口完成设计。本设计调用 IP 核来设计存储器时,调用的是 Block Memory Generator。调用指的是对 BlockRAM 的深度、宽度、接口读写模式、控制信号等进行设置。BlockRAM 的接口读写模式总共有以下 3 种模式^[25]:

(1) READ_FIRST 模式:在 READ_FIRST 模式下,同时读写 BlockRAM 的同一地址时,读出的数据与写入前的数据相同。可以理解为将该地址的数据输出后,再将数据输入端的数写入该地址中。

(2) WRITE_FIRST 模式:在 WRITE_FIRST 模式下,同时读写 BlockRAM 的同一地址时,读出的数据与当前写入的数据相同,即数据输入端存入的数据在写操作时,数据输出端同时输出该数据。

(3) NO_CHANGE 模式:在 NO_CHANGE 模式下,同时读写 BlockRAM 的同一地址时,读出的数据在数据写入时保持不变,即写操作时,数据输出端的数将保持不变。

本设计中调用的 BlockRAM 参数设置:深度设置为 1024,宽度设置为 10,读写接口模式为 READ_FIRST 模式。图 4.5 为 READ_FIRST 模式时序示意图。

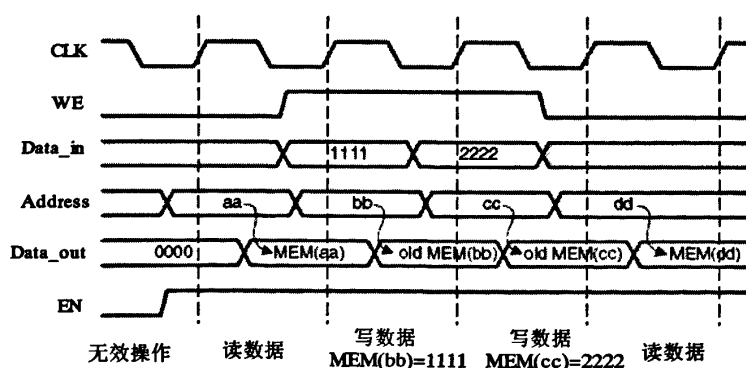


图 4.5 READ_FIRST 模式时序示意图

Fig. 4.5 The time sequence sketch map of READ_FIRST mode

4.3 A/D 转换模块

4.3.1 AD9201 概述

模/数转换器的任务是将一个连续的模拟输入信号用一个数字化的值来表示,以进一步用于处理、显示、记录和传输。ADC 是整个系统的重要部件,它的性能会影响到整个系统的技术指标。通常 A/D 转换器件的选择需要主要考虑转换器的精度,转换时间,转换器的价格,同时还要考虑到芯片的数据总线的类型、功耗、封装形式、质量标准、生命周期等。综合考虑以上因素并结合实际应用特点,本设计选用的模数转换器器件为 AD9201。

AD9201 是 ADI 公司推出的一款双通道、低电压的高速 A/D,每个通道采样速率可以达到每秒 20M 次采样。它的精度稳定可靠,在全采样带宽范围内,精度始终基本保持着 10 位的精度。其工作电压设置相当灵活,允许在 2.7V~5.5V 范围内变动,特别适合于便携式设备在低电压下的高速操作。模拟信号可差分输入,也可单端对地输入,信号的峰峰值通常设置为 1Vp-p 或者 2Vp-p。

4.3.2 A/D 转换器的接口电路设计

高速模数转换器 AD9201 的配置简便而灵活,具有四种不同的参考模式:1V 模式,2V 模式,可编程模式和外部参考模式。用户可以根据应用场合需要,通过不同的引脚连接方式在四种不同的参考模式中选择适合设计要求的模式。本设计中采用的是 2V 模式,模数转换电路原理图如图 4.6 所示。

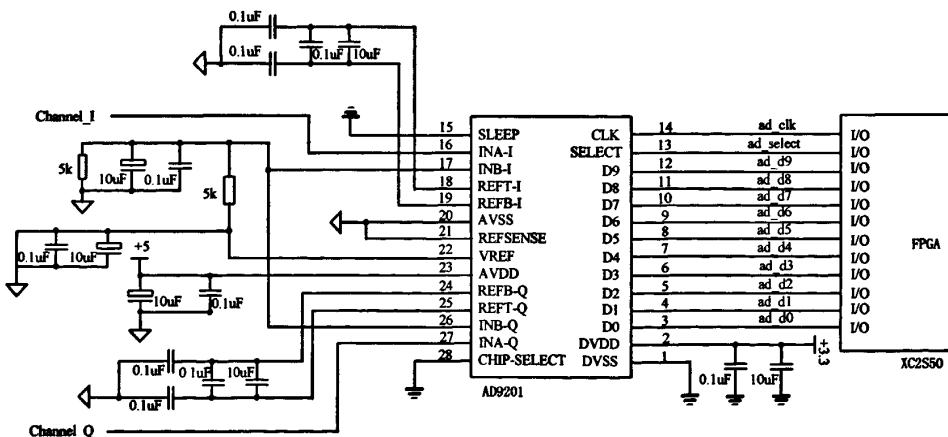


图 4.6 A/D 转换电路原理图

Fig. 4.6 Schematic diagram of A/D convert circuit

其中，SELECT、CLK、SLEEP、SHIP-SELECT 为 AD9201 转换器的控制信号，分别表示通道选择信号、时钟信号、低功耗选择信号、片选信号，D[9:0]为转换后的数字量信号，CHANNEL_Q、CHANNEL_I 为两路输入信号输入通道。当 SELECT 为高电平时选择通道 I，即发波通道有效，接收信号发生器产生的脉冲激励信号。当 SELECT 为低电平时选择通道 Q，即收波通道有效，接收换能器的振动加速度信号。如图 4.7 为 AD9201 的时序控制图，在采样时钟控制下，通道采样数据和转换结果的输出具有 3 个时钟周期的延时。系统在每个采样时钟的上升沿来临时对所选择的通道的模拟量进行采样，然后将 10 位转换结果在延时 3 个时钟周期后并行送到器件的 10 个输出管脚 D9~D0。

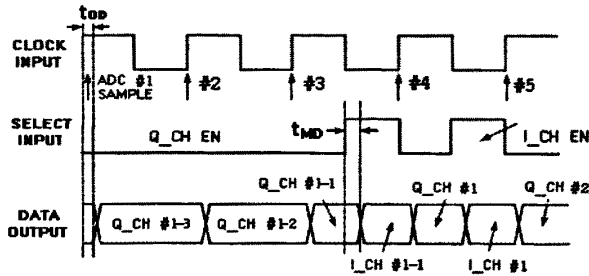


图 4.7 AD9201 时序图

Fig. 4.7 AD9201 timing sequence diagram

4.4 USB 数据传输模块

4.4.1 USB 数据传输

通用串行总线(USB)是 1995 年 Compaq 等公司为了解决传统总线的不足而推广的一种新型串行通讯标准。USB 总线是一个星型总线结构，它相对于以往的计算机外设总线如 RS232、RS485 等具有一下优点^[26-27]。

(1) 速度快。USB1.1 协议规定两种速度：低速 1.5Mb/s、全速 12Mbps，USB2.0 传输速率已经高达 480Mb/s，约 60MB/s 的峰值传输速率。

(2) 连接简单灵活。在 USB 方式下，所有的外设都在机箱外连接，允许外设热插拔。USB 接口支持多个不同设备采用“级联”方式，一个 USB 控制器连接多达 127 个外设，而每个外设间距离（线缆长度）可达 5 米。USB 能智能识别 USB 链上外围设备的插入或拆卸，为 PC 的外设扩充提供了很好决方案。

(3) 采用总线供电。普通的使用串口、并口的设备都需要单独的供电系统，USB 设备提供总线供电和自供电这两种方式。对于所需电流小于 500mA，电压为 5V 的外设，可采用总线供电，从而降低设备成本，减小外设体积，提高性价比。

(4) 抗干扰性强。USB 外设置于计算机箱外，不受机箱内的板间电磁干扰。

(5) USB 设备不涉及主机中断请求(RIQ)冲突问题。USB 口单独使用自己的中断，不会同其它设备争用 PC 机有限的资源，同样为用户省去了硬件配置的。

另外，USB 设备一般都比同类设备的成本低。

USB 定义了 4 种传输类型：批量传输、中断传输、同步传输和控制传输。这些传输类型必须符合通过总线来传输不同数据类型的要求^[28]。

(1) 批量传输

批量传输是一种突发的传输模式。此种传输模式中，在全速方式时，以 8、16、32、64 字节信息包传输；在高速方式时，以 512 字节信息包传输。此外，由于其具有自动的错误数据校验机制(CRC)，所以批量传输能够确保其正确性。若总线上有可用的带宽时，则主机会安排批量信息包。另外，批量传输类型可通过握手包所提供的内建流程来控制。

(2) 中断传输

中断传输有点类似于批量传输。中断传输的信息包在全速方式时为 1~64 字节，而在高速方式时可达 1024 字节。中断端点必须设置轮询间隔，以保证经过主机做有规则的询问。因此，此种中断传输方式有点像 PC 主机的轮询方式。

(3) 同步传输

同步传输具有时间临界特性，应用在如音频和视频的数据流中。对于同步传输，传输的时间是最重要的请求信息。在每一个 USB 帧中，会声明某些带宽给同步传输使用。为了减轻带宽分配的负担，同步传输没有设置任何的握手包，而且也不会在发生错误时重试。错误检测仅限于 16 位 CRC 错误校验码。由于同步传输没有采用 data-toggle 机制，所以在全速方式中，同步传输仅使用了 DATA0 PID；而在高速方式中，同步传输使用了 DATA0、DATA1、DATA2 和 MDATA。在全速方式下，每一个端点、每一帧仅只有一个同步信息包能被传输；在高速方式下，可以有 3 个同步信息包。

(4) 控制传输

控制传输用于配置设备和给设备发送命令。由于控制传输的作用是如此重要，所以传输中采用了最强的 USB 错误校验。对于控制传输，主机在每一个 USB 帧中都留有余量（一般为 10%）。控制传输包含 2~3 个阶段。其中，SETUP 阶段中包含了 8 个 USB CONTROL 数据。如有必要，可执行 DATA 阶段，此阶段包含有更多的数据。在 STATUS（或握手）阶段中，允许设备指示一个控制操作已经成功完成。

传输类型选择的原则是根据工程应用的传输速度和可靠性。例如，语音传输，要求高速度和实时性，对于丢失帧的情况也可以接受，所以选择同步传输类型；打印机要求的速度较快，而且不能出现数据丢失，综合传输速度和可靠性，所以选择批量传输类型。超声波换能器性能检测系统中 USB 数据传输模块的主要任务是将采集的加速度信号传输到 PC 机应用软件进行分析和处理，对于数据的可靠性和传输速度具有相应的要求，属于大批量数据快速传输，选择的是批量传输类型。

4.4.2 CY7C68013 概述

CYPRESS 半导体公司的 EZ-USB FX2 是世界上第一款集成了 USB2.0 的微处理器^[29]。CY7C68013-56PVC 芯片是 EZ-USB FX2 系列中的一种，是一种既能满足 USB2.0 协议同时也能向下兼容 USB1.1 协议有着强大功能的接口芯片。图 4.8 为 FX2 系列 56 引脚芯片的结构图，主要包括 USB2.0 收发器、串行接口引擎(SIE)、增强型 8051 内核、8.5KB 的 RAM、4KB 的 FIFO、I/O 口、数据总线、地址总线、IIC 控制器和通用可编程接口(GPIF)^[30]。

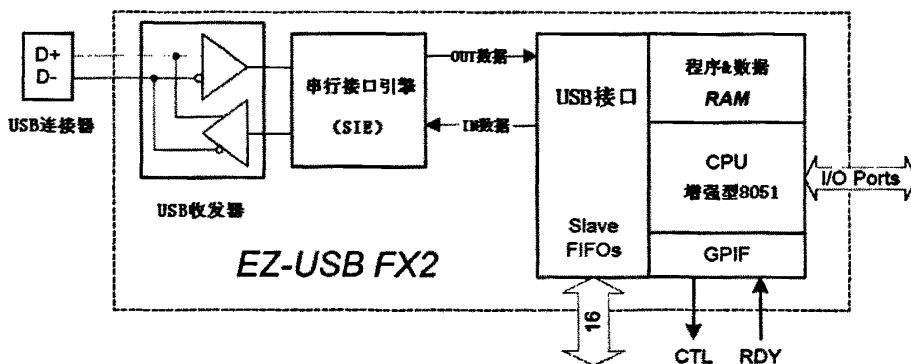


图 4.8 FX2 系列 56 引脚芯片结构图

Fig. 4.8 FX2 56-pin package simplified block diagram

USB2.0 专用接口芯片 CY7C68013 有以下一些特点：

(1) 集成一块增强型 8051 内核

与普通 8051 微处理器相比该处理器有如下两点改进：其一为完成每个指令周期只需 4 个时钟周期；其二为时钟频率可以软配置为 12/24/48MHz。

(2) 集成一个智能串行接口引擎(SIE)和一个 USB2.0 收发器

集成的 USB 收发器和 USB 总线上的 D+和 D-相连, SIE 对串行数据进行编码和解码, 进行错误验证、位填充以及其他的 USB 需要的信号层任务, 最终 SIE 和 USB 接口并行地进行数据传输。它们能完成大部分 USB2.0 协议的处理工作, 减少了用户对繁杂的 USB 协议的处理。

(3) 可软配置 RAM

采用重枚举(ReNumeration)技术, 固件程序可以保存在主机上, 每次上电后通过 USB 接口将固件下载到芯片 RAM 中, 具有很大的灵活性。

(4) 通用可编程接口(GPIF)

GPIF 是 FX2 的一个重要技术。它提供可编程控制的接口时序, 使得无需附加外部逻辑, 就能实现与外围芯片的连接。在运行中不需要 CPU 的干预, 仅通过一些寄存器和中断与增强型 8051 内核通信。

(6) 四个可编程端点

(7) 可编程缓冲区深度^[31]

考虑到设计的需要, 这里将对可编程端点进行重点分析。FX2 端点缓冲区深度具有可编程性能, 有利于主机与外设之间进行高速数据传输。FX2 的端点缓冲区被分为大、小两组。CY7C68013 拥有 EP0、EP1、EP2、EP4、EP6 和 EP8 六个端点, 端点缓冲区深度具有可编程性能, EP0 和 EP1 属于小端点, 他们都是 64 字节端点, 只能被 CPU 访问, 不能够直接与外部逻辑连接, 其中 EP0 是默认的控制端点 0。EP2、EP4、EP6 和 EP8 属于大的、可配置的并且能够满足 USB2.0 高速数据传输要求的端点。虽然数据通常通过由 FIFO 接口控制的大端点缓冲区传输, 但是, CPU 在需要的情况下也能够访问大端点缓冲区。FX2 可以在全速(12Mb/S)和高速(480Mb/S)两种模式下工作。这两种模式的有效承载数据量对传输速率的要求有所不同。总结来说, FX2 的结构为高速传输做了如下优化考虑:

(1) FX2 用较少的大缓冲区取代了大量小端点缓冲区;

(2) FX2 为大端点提供了 2 倍、3 倍或 4 倍的缓冲区;

(3) CPU 不参与高带宽数据传输。而由 FX2 逻辑和端点/接口 FIFO 以 USB2.0 的速度在芯片内外进行传输数据, 无需 CPU 干预。

图 4.9 中的下方带阴影的部分指示了大端点的各种配置方式中双、三、四缓冲区的情况。双缓冲区意味着, 一个数据包被 USB 总线存取时, 同时从同一个端点的另一个数据包可以由外部逻辑电路处理。三缓冲区增加了第三个包缓冲区作为储备, 根据需要通过任何一边 (USB 或接口) 来使用。四缓冲区则增加了第四个包缓冲区。

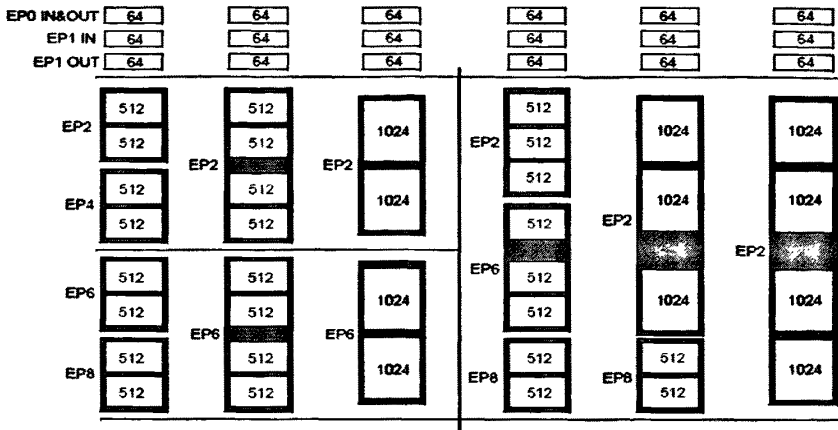


图 4.9 端点配置图 (高速模式下)

Fig. 4.9 Endpoint Configuration(High-speed Mode)

EP2 是唯一可以拥有最大 4096 字节缓冲区的端点，此时 EP2 倍设置为四缓冲区，每个缓冲区被设置为 1024 字节。本设计中为了保证数据传输的可靠性，采用 EP2 作为输入端点，并设置其为 4 倍共 4096 字节的最大缓冲区。

4.4.3 Slave FIFO 接口模式

基于 USB2.0 接口芯片 CY7C68013 完成数据传输，可设置工作在 3 种模式下：普通 I/O 模式、Slave FIFO 模式和 GPIF(General Programmable Interface)模式。三种方式各有特点，并分别被广泛应用在各种数据传输与采集方面。其中 Slave FIFO 方式是从机方式，外部控制器可像普通 FIFO 一样对 FX2 的多层缓冲 FIFO 进行读写。FX2 的 Slave FIFO 工作方式可设为同步或异步；工作时钟可选为内部产生或外部输入；其它控制信号也可灵活地设置为高有效或低有效。可编程接口 GPIF 是主机方式，可以软件编程读写控制波形，几乎可以对任何 8/16bit 接口的控制器、存储器和总线进行数据的主动读写，非常灵活^[32]。

FX2 和 FPGA 之间的通信模式既可以选择从属 FIFO 接口模式，也可以选择 GPIF 接口模式，通过配置 IFCONFIG[1:0]来选择。当 IFCONFIG[1:0]=11 时，选择从属 FIFO 接口模式；当为 IFCONFIG[1:0]=10 时，选择 GPIF 接口模式。本设计中以 FPGA 作为主控制器，采用的接口模式为 Slave FIFO 模式。

当 FX2 被设置为从属 FIFO 接口模式时，USB 数据在 PC 机和 FPGA 中传输，为满足高速传输的要求，数据可以在没有 CPU 参与的情况下直接从 USB 数据域传输到接口数据域。这时，端点 FIFO 被设置为自动模式。主控制器 FPGA 根据端点 FIFO 提供

的时序信号、握手信号（空、满和可编程级信号）来输出读写信号和输出允许信号等。图 4.10 为同步 FIFO 的写时序图。

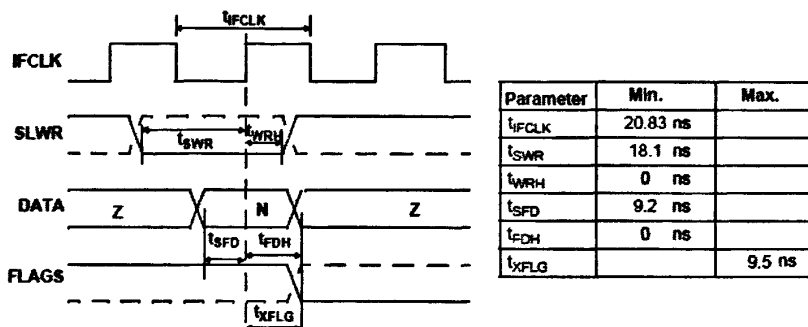


图 4.10 同步 FIFO 写时序图

Fig. 4.10 Synchronous FIFO Writing Timing

FX2 FIFO 能够自动配置为从 USB 或向 USB 提交包。对于 IN 端点，自动输入模式允许外部逻辑将数据连续传递到 FIFO 中，不需要由它或 FX2 固件程序来打包数据或发送信号到主机来确认，其结构如图 4.11 所示。为了配置一个 IN 端点 FIFO，应在对应 EPx FIFO CFG 寄存器中的 AUTOIN 位设置为 1。对于 OUT 端点，自动输出模式允许主机连续填充 FIFO，而不需要外部逻辑或 FX2 固件与每一个引入的包进行握手及提供端点缓冲区。同理，配置一个 OUT 端点 FIFO，应在对应 EPx FIFO CFG 寄存器中的 AUTOOUT 位设置为 1。

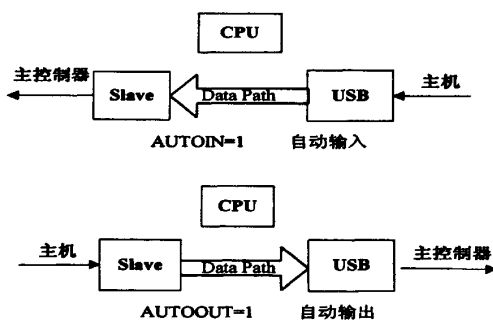


图 4.11 自动模式结构图

Fig. 4.11 Auto mode structure chart

图 4.12 为 USB 传输电路原理图，其中 FIFOADR[1:0] 引脚选择 EP2、EP4、EP6 和 EP8 中哪一个 FIFO 与 FD 总线连接。FLAGB 引脚输出 FIFO 满信号，FLAGC 引脚输出

FIFO 空信号, SLWR 引脚输入异步写脉冲, 它们的引脚极性都可以由 FIFOP 取 POLAR 寄存器改变。FD[15:0]输入外部数据, PKTEND 在数据传输结束时由外部主控器激活, 则 FX2 向主机提交一个 IN 包, 而不考虑包的长度是否达到默认的包长。

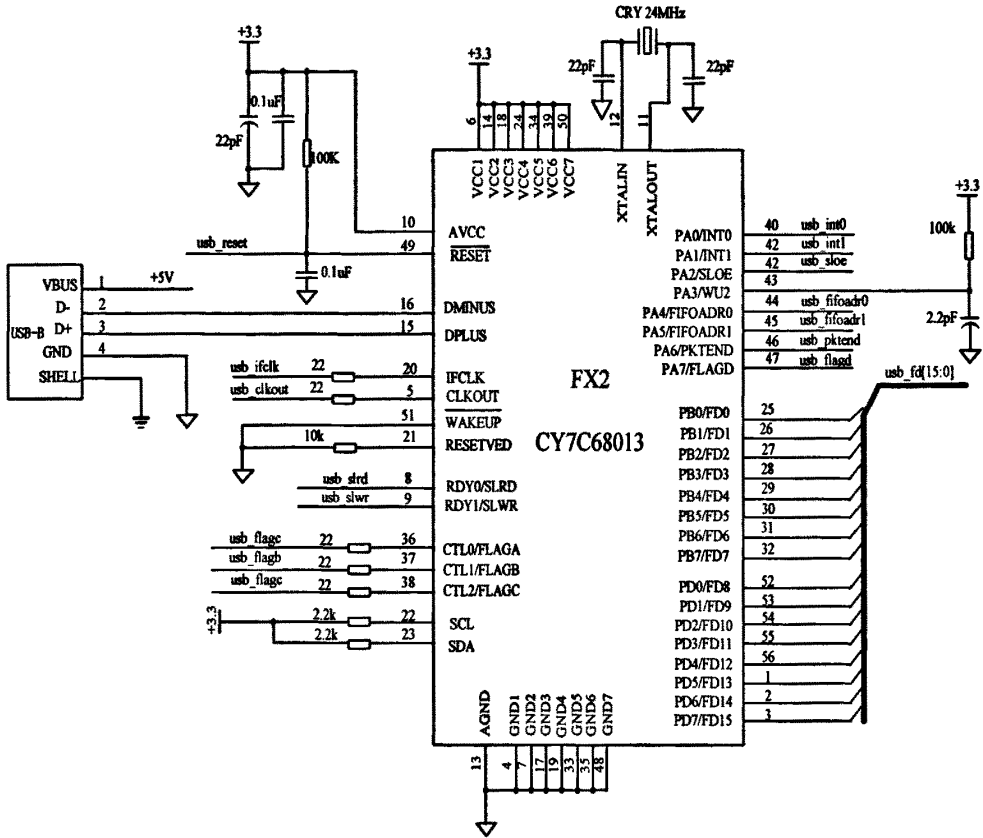


图 4.12 USB 传输电路

Fig. 4.12 Schematic diagram of USB transmission circuit

4.4.4 固件程序设计

所有基于微控制器及其外围电路的功能设备的正常工作都离不开固件的参与, 固件的工作就是辅助硬件, 或者说是控制硬件来完成预期的设备功能。对于 USB, 固件程序主要完成以下的工作^[33]:

(1) 初始化工作, 包括设置一些特殊功能寄存器的初值以实现所需的设备属性或者功能, 例如开中断、使能端点、配置端口等;

(2) 辅助硬件完成设备的重枚举过程，包括模拟设备的断开与重新连接，对收到的设置包进行分析判断，从而对主机的设备请求作出适当的响应，完成主机对设备的配置任务；

- (3) 对中断的处理；
- (4) 数据的接收与发送；
- (5) 外围电路的控制。

Cyress 公司为 EZ-USB FX2 芯片提供了用 Keil 51C 开发的固件库和固件框架。固件库中，fx2.h 定义了一些常量、数据结构、宏、通用函数；fx2regs.h 中包括位屏蔽定义和寄存器定义；EZUSB.LIB 包含库函数的二进制代码；USBJMPTB.OBJ 包含 USB 中断矢量和跳转表；另外固件库还包括一些函数和全局变量。固件框架实现了初始化芯片、处理 USB 标准设备请求及挂起状态下的电源管理等功能。专用固件文件包括 FW.C、PERIPH.C、DSCR.A51、EZUSB.LIB、USBJMPTB.OBJ，其中 DSCR.A51 是描述符；FW.C 是固件的原始程序代码，主要实现设备初始化和重新列举和响应设备请求；PERIPH.C 是用户子函数挂钩的相关定义，包括任务分配、设备请求和 USB 总线中断处理。

固件框架主要包含初始化、处理标准 USB 设备请求以及 USB 挂起时的电源管理等，提供了现成的 8051 程序代码，利用框架提供的结构函数，可以依次完善各函数的功能，逐渐开发出功能完善的 USB 外设。

固件框架首先初始化内部的状态变量，然后调用用户初始化函数 TD_init()。从该函数返回后，框架初始化 USB 接口到未配置状态并使能中断。然后每隔 1s 进行一次设备重枚举，直到端点 0 接受到一个 SETUP 包。一旦检测到 SETUP 包，框架将开始交互的任务调度，其任务调度的步骤如下：

- (1) 调用用户函数 TD_Poll()。这部分程序由开发者编写来实现 USB 外设主要功能。
- (2) 判断是否有标准设备请求等待处理。如果有，则分析该请求并响应。

(3) 判断 USB 内核是否收到 USB 挂起信号。如果收到，则调用用户函数 TD_Suspend()。从该函数成功返回后（返回值为 TRUE），再检测是否发生 USB 唤醒时间。如果未检测到，则处理器进入挂起方式；如果检测到，则调用用户函数 TD-Resume()，程序继续运行。如果从 TD_Suspend()函数返回 FALSE，则程序继续运行。标志请求和 Vendor 专用请求由框架分析和执行。默认情况下，对标准请求执行 USB 规定的响应。框架提供交互的连接，以允许用户程序处理或覆盖制定的设备请求。EZ-USB 中断也交给框架进行处理。固件框架流程图如图 4.13 所示。

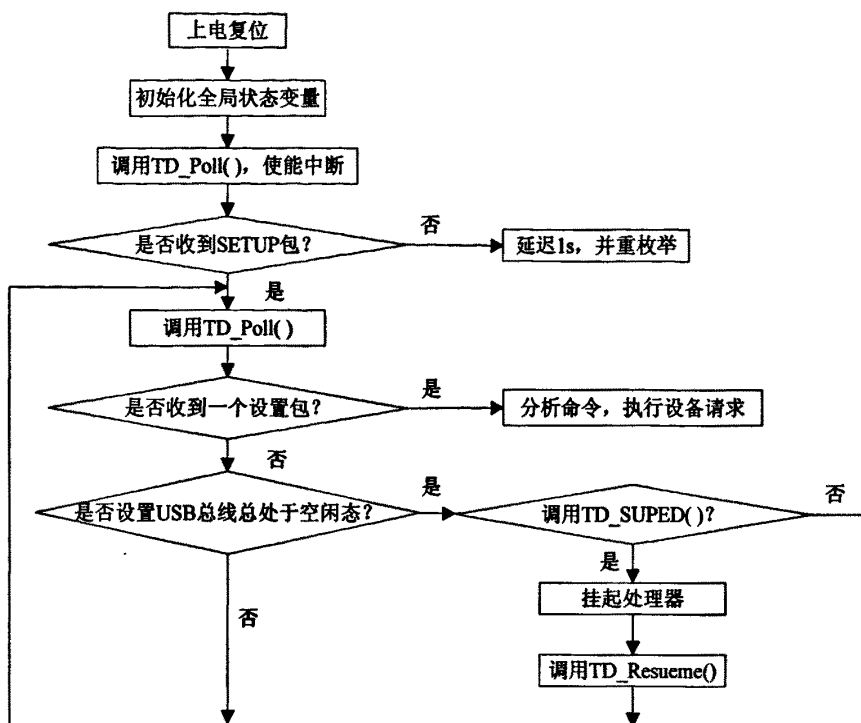


图 4.13 固件框架流程图

Fig. 4.13 Firmware framework flow chart

固件的主要工作是根据自定义设备修改 PERIPH.C。本设计中 CY7C68013 工作在 Slave FIFO 自动模式下，因此不需要在用户功能函数 TD_Poll() 中添加代码，主要是在 TD_Init() 函数中设置芯片的工作方式，即根据应用需求设置相关寄存器的值。

固件代码的存储位置有三种：

(1) 存在主机中，设备加电后由驱动程序把固件下载到片内 RAM 后执行，即“重新列举”；

(2) 把固件代码固化到一片 EEPROM 中，外设加电后由 FX2 通过 IIC 总线下载到片内 RAM 后自动执行；

(3) 把程序固化到一片 ROM 中，使之充当外部程序存储器，连在 FX2 的总线上。

在调试阶段采用了第一种方式，通过 Cypress 公司提供的控制面板中的 Download 功能按钮将经过 Keil C51 编译得到的 HEX 下载到片内 RAM；在应用阶段采用了第二种方

式,通过控制面板中的 EEPROM 功能按钮把由 Hex2bix.exe 转换来的 IIC 文件下载到配置的 EEPROM 中。设备配置、有效端点、工作方式、设备功能都可以通过改变固件进行再配置。

4.4.5 设备驱动程序

设备驱动程序介于硬件与用户应用软件之间,为应用程序访问硬件设备提供了统一的软件接口。驱动程序将使应用程序以一种规范的方式访问硬件,而不必考虑具体设备的物理连接、信号传输、信令控制以及与一个设备进行通信所需要的协议等细节。USB 驱动程序处于应用程序和设备端固件之间,使操作系统识别 USB 设备,并建立起主机端和设备端之间的通讯,是用户访问设备的接口。

CYPRESS 公司提供了通用的驱动程序(ezusb.sys),可用于基于 EZ-USB FX2 系列的芯片,能够完成基本的 USB 通信任务,用户也可以使用相关驱动开发工具经行定制开发^[34]。考虑到开发进度和系统功能实现的要求,设计中使用了 CYPRESS 公司提供的通用驱动程序。首先将 ezusbsys.h 文件拷贝到应用程序工程目录下,并添加到头文件列表中,然后将 USB_DEVICE_INFORMATION 和 USB_INTERFACE_INFORMATION 类型添加到所建工程的头文件中,这样就可以通过应用程序来读写 USB 设备了。

在头文件 ezusbsys.h 中,包含有块传输的结构和 IOCTL 代码的定义,其中, BULK_TRANSFER_CONTROL 用于控制块传输, IOCTL_EZUSB_BULK_WRITE 用于主机向 USB 设备发送块数据, IOCTL_EZUSB_BULK_READ 用于主机读取 USB 设备发出的块数据。

4.5 数据缓存模块

检测系统需要采集超声波换能器的发生器产生的激励信号和加速度信号,在设计中使用了两片外部静态存储器 SRAM IDT71V416。

IDT71V416 是 256K×16bit 的高速 CMOS 静态随机存储器,在高速数字电路设计中经常被采用。和其它类型的存储器相比其具有以下特点:通电状态中不需要类似 DRAM 刷新操作那样的存储保持操作;没有数据替换寿命的要求;不需要特殊的高电压能够快速替换;非操作时功耗非常低;断电后数据丢失。电路设计较为简单,如图 3.14 所示,它有 44 个管脚,其中包括片选端口、输出使能端、写使能端、高低字节使能端、18 位的输入地址,16 位的输出数据管脚。工作电压为 3.3V,所有输入输出管脚与 LVTTTL 兼容。地址获得时间最快为 10 纳秒,输出使能最快需要 5 纳秒。工作时不需要时钟或参考电压,操作简单、可靠,存取效率高,不需要严格的时序控制,在获得地址后,设置使能条件,便可对相应的地址进行读写。

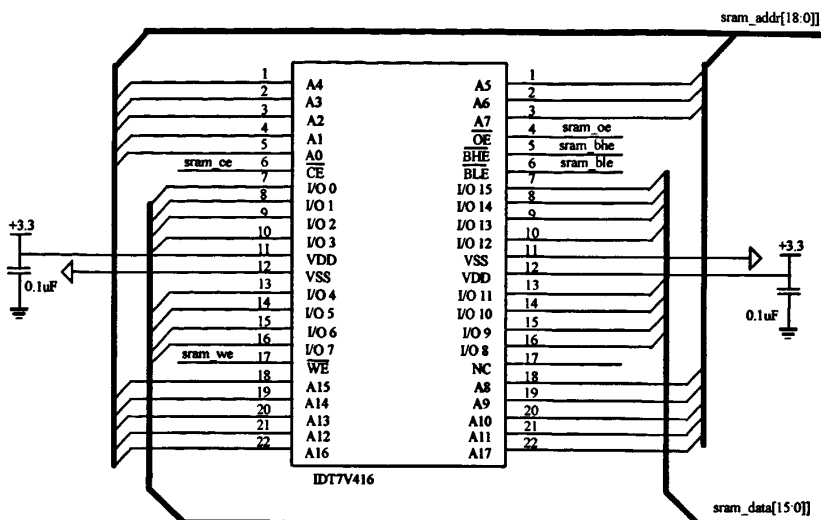


图 4.14 数据缓存电路原理图

Fig. 4.14 Schematic diagram of data buff circuit

对于 IDT71V416 的写操作，在满足片选为低，高低字节均为使能，写信号使能的情况下，即对相应的地址进行写操作。对于 IDT71V416 的读操作，在满足片选为低，高低字节均为使能，写信号为高，输出使能的情况下，即对相应的地址进行读操作。设计中通过检测 AD 通道选择信号的变换来合理控制两片 SRAM 的读写时序，当 SRAM_1 工作于写入状态时，SRAM_2 工作于读出状态，当 SRAM_1 工作于读出状态时，SRAM_2 工作于写入状态，以此实现两路数据的连续读取。

IDT71V416 的读写控制简单易操作，控制信号由 FPGA 主控制器给出。在程序设计中，数据输入和输出使用的是相同的数据口，用 Verilog 对 FPGA 进行编程时把 IO[15:0] 定义为 inout 端口，同时定义相应的寄存器作为 inout 端口的“映像寄存器”，并将 inout 端口和“映像寄存器”用一个三态门连接起来，实现数据读写。当 inout 用作输出时，将 inout 端口的映像寄存器设置成所希望的输出值，并将三态门选通，此时 inout 端口的值随映像寄存器的变化而变化。当 inout 用作输入时，三态门设为高阻态，断开映像寄存器与 inout 连接，此时像普通输入口一样操作^[35]。

4.6 应用程序设计

4.6.1 LabVIEW 开发平台

LabVIEW 是美国国家仪器^[36]公司开发的一种基于图形程序的虚拟仪表编程语言，广泛应用于测试与测量、数据采集、仪器控制、数字信号分析、工厂自动化等领域。LabVIEW 程序称为虚拟仪器程序（简称 VI），主要包括两个部分：前面板（即人机界面）和方框图程序。前面板应用于模拟真实仪器的面板操作，可设置输入数值和观察输出值，以及实现图表、文本等显示。框图程序应用图形编程语言编写，相当于传统程序的源代码，其用于传送前面板输入的命令参数到仪器以执行相应的操作。

LabVIEW 的强大功能就在于它的层次化结构，用户可以把创建的 VI 程序当作子程序调用，以创建更复杂的程序。而且，调用次数可以是任意的。LabVIEW 这种创建和调用子程序的方法使创建的程序模块化，易于调试、理解和维护。

LabVIEW 编程方法与传统的程序设计方法不同，它拥有流程图程序设计语言的特点，摆脱了传统程序语言线形结构的束缚。LabVIEW 的执行顺序是根据方块图间数据的流向来决定，而不像一般通用的编程语言那样逐行地来执行。在编写方框图程序时，只需要从功能模块中选用不同的函数图标，然后再以线条相互连接，即可实现数据的传输^[37-38]。

4.6.2 用于 USB 通信的 API 函数

用户程序通过对 API 函数的调用来实现与驱动程序进而与硬件的通信，API 函数的执行是与驱动程序中的 IRP 相对应的^[39]。表 4.1 是常用的 API 函数与驱动程序的 IRP 的对应关系表。

表 4.1 常用 API 函数和驱动程序的 IRP 对应关系

Tab. 4.1 Relationship between common API function and the driver's IRP

API 函数	IRP	说明
CreateFile	IRP_MJ_CREATE	打开设备
ReadFile	IRP_MJ_READ	从设备获取数据
WriteFile	IRP_MJ_	向设备发送数据
CloseFile	IRP_MJ_Close	关闭设备
DeviceIoControl	IRP_MJ_DEVICE_CONTROL	控制操作

在 USB 通信程序中主要执行以下几种对设备的操作：查找并打开设备、设备 I/O 控制、关闭设备。PC 应用程序首先通过调用 Win32 的函数 CreateFile() 来取得访问设备驱动程序的句柄。然后，应用程序使用 Win32 函数 DeviceIoControl() 来提交 IO 控制码，并且为 CreateFile() 函数返回的设备句柄设置 IO 缓冲区。

(1) 建立设备连接

USB 设备驱动程序可以和多台 USB 设备进行通信。对于每一个连接到主机的 USB 设备，USB 设备驱动程序都会为它们创建一个形如 EZUSB-i 的设备连接符，i 从 0 开始递增。调用 CreateFile() 函数，实际上就是为获取设备驱动程序产生的目标设备的句柄，它使用设备的连接符作为函数参数。

(2) 进行设备 I/O 控制

应用程序通过调用 Win32 函数 DeviceIoControl() 来向设备驱动程序发送请求，进行设备相关信息的读取。其主要是通过通过对函数设置不同的参数来实现其功能的，DeviceIoControl() 函数能够直接向 USB 外设发送不同的 IO 控制代码以实现其功能命令，USB 外设也将相应地返回不同的结果。

(3) 关闭 USB 设备

关闭 USB 端口是通过调用 CloseHandle() 函数来完成。

4.6.3 应用程序的设计

应用程序设计由两个部分组成：动态链接库和用户应用程序。动态链接库负责与内核态的 USB 功能驱动程序通信并接收应用程序的各种操作请求，而用户应用程序则负责对所采集的数据进行实时显示、分析和存储。

LabVIEW 提供了一个动态链接库函数的图标放在 Functions 模板内的 Advanced 子模板中。将其设置好以后，LabVIEW 在运行时就可以将 DLL 文件自动地连接起来，从而完成对数据采集的各种控制^[40]。本设计采用 VC++6.0 编制动态链接库，首先生成 DLL 框架，AppWizard 将自动生成项目文件，但不产生任何代码，所有代码均需用户自己键入。DLL 需要的文件主要有：

(1) .h 函数声明文件：.h 文件的作用是声明 DLL 要实现的函数原型，供 DLL 编译使用，同时还提供应用程序编译使用；

(2) .c 源文件：.c 文件是实现具体文件的源文件，它有一个入口点函数，在 DLL 被初次调用的运行，做一些初始化工作。一般情况下，用户无需做初始化工作，只需保留入口点函数框架即可；

(3) .def 定义文件: .def 文件是 DLL 项目中比较特殊的文件, 它用来定义该 DLL 项目将输出哪些函数, 只有该文件列出的函数才能被应用函数调用。要输出的函数名列在该文件 EXPOTRS 关键字下面。

本设计将 API 函数包装成一个 DLL 连接库程序文件, 其编程方法如下: 首先查找设备, 打开设备的句柄, 然后进行读写和控制操作, 最后关闭设备句柄。在本应用程序中创建的 DLL 中提供的主要接口函数有 3 个:

- (1) Open_device: 打开 USB 设备驱动;
- (2) Close_device: 关闭设备;
- (3) BulkStart: 获取 USB 设备发送到主机的数据。

对于 USB 端口数据的读写, LABVIEW 不能直接进行系统调用实现底层操作(如访问物理地址等)。在虚拟仪器系统开发中遇到这类问题, 利用 LABVIEW 所提供的与外部代码进行连接的机制(如动态链接库机制), 将其自身无法或不易实现的任务通过能够或更适于完成此类任务的外部代码来实现, 在这可通过调用 DLL 中的导出函数来完成数据的读写^[41]。在 LABVIEW 中, 调用 DLL 是通过使用一个重要的子 VI 来实现的, 但使用这个节点比较容易出错, 正确使用这个节点关键是它的配置。

在 Labview 下对 DLL 调用可通过 CLF 调用库函数节点来实现, 具体方法是创建一个 VI, 在其图形代码窗口中, 选择 Functions→Advanced→Calling Library Function Node, 双击节点在弹出的对话框中对其进行配置。具体过程如下:

(1) 首先选择 DLL 所在的路径, 一般把 DLL 放在 windows/system 目录下, 也可放在 VI 所在的目录。

(2) 接着在 FunctionName 下拉列表中选择需要调用的库函数, 本例中调用的是函数 ADC()。

(3) 选择函数调用的规则, 本例选 C 调用规则。

(4) 然后在 Parameter 中的 returntype 不变, 在 Type 框中输入函数的返回类型 void。

(5) 通过点击 AddaParameterAfter 选项完成对函数所有传递参数及数据类型的配置。

(6) 还需要注意的是 CLF 对话框的右侧关于 DLL 是否可被多个线程调用的下拉菜单, RuninUI (为默认方式) 指 DLL 只能在用户面板线程中运行, 而选 Reen2trant 指多个线程可以同时运行该 DLL。本设计中只有单线程, 选默认方式即可。

(7) 最后点击 OK 就完成了对 CLF 节点的配置。完成了 CLF 的配置之后, 就是各个 DLL 参数节点编程的问题了。然后在前面板添加控制和显示控件, 在程序面板中完成连线, 就可以实现在 Labview 下对 DLL 的成功调用。以 DLL 中的函数 BulkStart 为例, 在 LabVIEW 调用它时, 按以上步骤得到配置好的“调用库函数”对话框如图 4.15 所示。

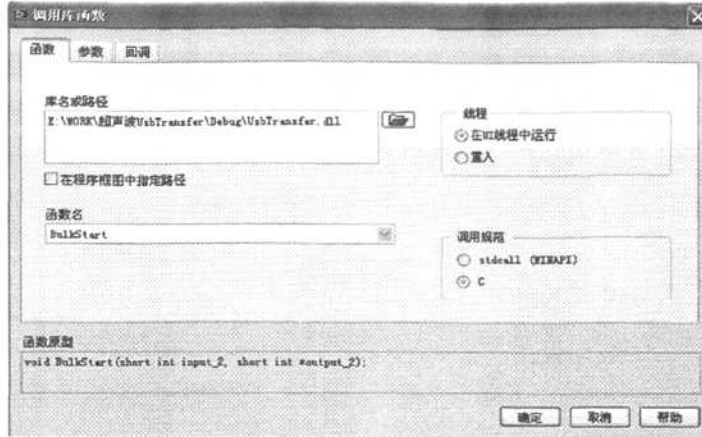


图 4.15 库函数调用示例图

Fig. 4.15 Example diagram of call library function block calling

LabVIEW 针对数据采集提供了丰富的控制资源，可以非常方便的设计出外观形象、功能丰富的仪器面板。图 4.16 是应用程序的设计流程图。

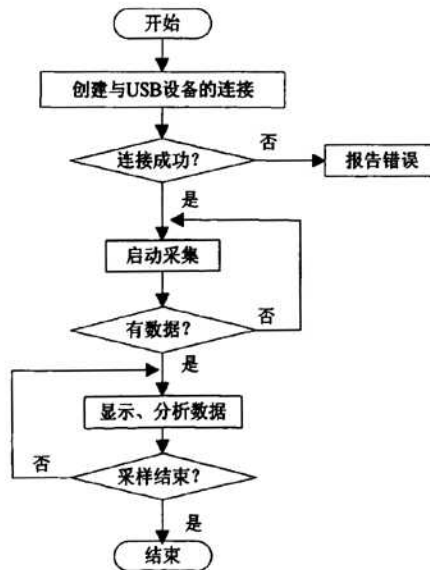


图 4.16 应用程序流程图

Fig. 4.16 Flow chart of application programe

5 系统调试及后期工作

5.1 调试方法

在完成系统的硬件和软件设计后，还需要对系统进行严格地调试。只有通过不断的调试，才能发现问题，从而改进与完善系统的设计。采用调试的步骤分为：硬件电路调试、软件模块调试、系统综合调试。

(1) 硬件电路调试

硬件电路调试主要是为了排除系统中的硬件故障，解决软硬件不协调的问题。调试的步骤如下：

首先在系统上电前必须检查电源线路是否正确防止电源的极性错误以及不稳定造成的损失。

然后对 FPGA 进行调试。先检查 FPGA 的电源和地，然后连接下载电缆线进行上电测试。在 Xilinx ISE8.2 开发环境下，将时钟分频程序通过 JTAG 方式和主串方式配置下载到 FPGA 和 XCF01S 中，通过示波器观察和检查相应的引脚功能是否正确，判断整个 FPGA 的下载配置电路是否正确。

FPGA 能够正常工作后，就对其它模块电路进行调试，包括信号接收与调理电路、AD9201 接口电路、SRAM 接口电路和 USB 接口电路等。具体调试的时候，由 FPGA 提供各种控制时序，对各个硬件模块分步调试。通过编写测试程序下载到 FPGA 中，观察各模块硬件电路工作是否正常。

超声波换能器性能检测系统运行关键的关键在于 USB 通信和数据传输，因此正确识别 USB 设备是系统运行的前提。对于 USB 设备的识别，USB 固件程序下载之后，系统会提示发现新硬件来提示安装驱动。驱动安装成功后，如图 5.1 所示在 PC 机设备管理器中可以看到如下的信息。

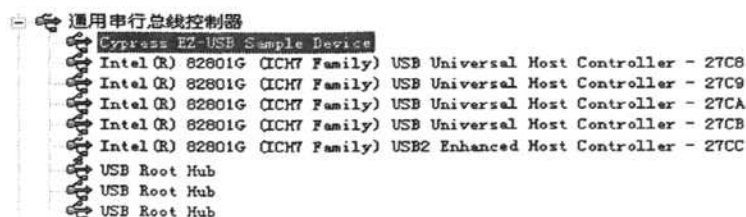


图 5.1 USB 设备识别指示

Fig. 5.1 USB device recognition indication

(2) 软件调试

FPGA 程序都是采用自顶向下的模块化的设计思想，调试的时候可以按照系统划分的功能模块，逐个调试。当各功能模块程序仿真正确后，再将配置文件下载到 FPGA 中调试。当全部功能模块程序都调试通过后，生成顶层文件。最后对顶层文件进行调试和修改。ChipScope（在线逻辑分析仪）来进行调试和分析实验数据。ChipScope 具有传统逻辑分析的功能，而且允许用户观察 FPGA 内部所有信号和结点，通过 ChipScope 内核插入器(Core Inserter)将分析内核直接插入到设计网表文件中，然后对新的网表文件进行实现和下载^[42]。通过下载线可以对 FPGA 进行实时调试。

USB 数据传输模块的调试首先在 CYPRESS 公司提供的 Control Panel（控制面板）和 Keil uVision2 中进行。首先在 Keil uVision2 中调试编译 USB 固件程序，将编译好的固件程序下载之后通过控制面板可以看到固件里的设备描述信息，如图 5.2 所示。

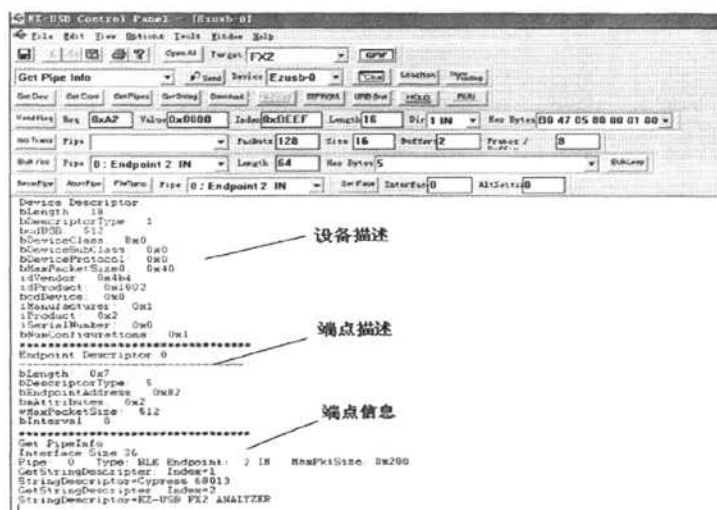


图 5.2 USB 设备描述信息：

Fig. 5.2 USB device description indication

看到正确的配置信息后用 FPGA 编制调试程序往 USB 设备送数据在控制面板中观测介绍数据进行数据传输调试。调试中采用的方法是在 FPGA 中产生 0~255 的循环数，在控制面板中点击 Bulk 按钮，可在控制面板中看到 16 进制的 0~255 的循环数，即可验证 Slave FIFO 方式下成功实现了 USB2.0 的数据传输。在 USB 传输模块调试成功后用 LabVIEW 8.2 来调试性能检测系统应用程序。

5.2 系统功能验证

超声波换能器性能检测系统的调试主要由两大部分：检测系统平台的调试和超声波换能器性能检测系统性能指标的在检测平台上的验证与改进。

(1) 系统检测平台的调试

本系统实现对超声波换能器性能的检测基于对接收到的振动加速度波形信号进行分析处理，因此系统检测平台的准确稳定运行是性能检测的基础。

USB2.0 的数据传输是检测系统实现性能检测的关键与基础。振动加速度波形信号在主控制器 FPGA 控制下通过 USB2.0 传输送给上位机实时显示，用 LabVIEW 应用程序实现接收与显示，如图 5.4 所示，接收画面中接收到了加速度的波形信号和信号发生器发射的脉冲激励信号。

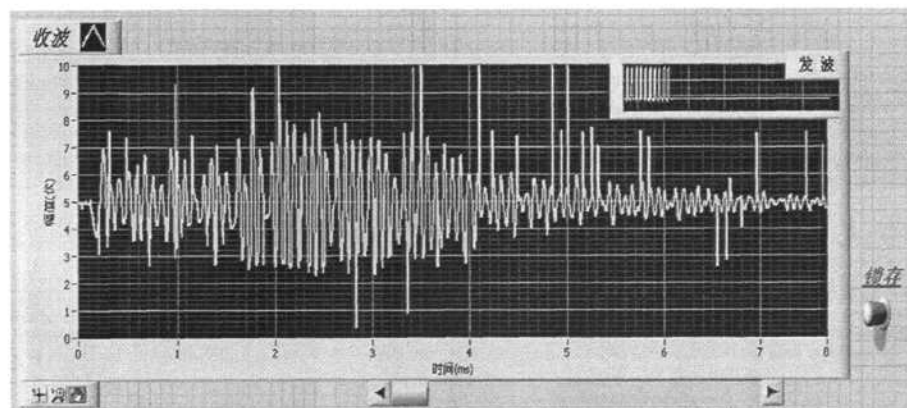


图 5.3 应用程序观测波形

Fig. 5.3 Wave observation via application program

通过比较图 5.3 中的波形信号和用示波器观察到的信号波形，可得到系统检测平台实现了数据的高速采集和传输，为性能检测系统进行数据分析与处理提供了保证。

(2) 超声波换能器性能检测系统性能指标的在检测平台上的调试

超声波换能器性能检测系统性能指标的在检测平台上的调试，指的是利用本系统构建的检测系统对换能器进行性能检测。

在实验室条件下，用超声波信号发生器产生信号激励脉冲波，对某公司生产的用于超声除垢用的同一批次的 6 个超声波换能器在相同脉冲信号激励下进行性能检测，表 5.1 为检测结果。

表 5.1 性能指标检测试验结果统计表

Tab. 5.1 Statistics table for performance indicators of detection experiment results

换能器	最大振幅 (μm)	平均振幅 (μm)	信号强度
换能器 1	0.32	0.31	0.57
换能器 2	0.36	0.34	0.61
换能器 3	0.33	0.31	0.58
换能器 4	0.26	0.23	0.40
换能器 5	0.38	0.36	0.64
换能器 6	0.34	0.32	0.59

由上可知，4号换能器最大振幅 $0.26 \mu m$ 、平均振幅 $0.23 \mu m$ 和信号强度 0.40，与其它换能器相比这三项指标均比较低。超声波换能器的性能指标没有国标，也没有常用的厂标，至今仍然处在一个探索的阶段，尤其是对于应用在超声防除垢领域的换能器更是缺乏评价指标。本课题对于超声波换能器的性能检测也是一个探索研究的过程，厂家提供的技术资料相对匮乏，对不同型号的换能器或是不同脉冲信号激励下的同一型号的换能器的评价指标值没有形成固定的标准。因此仍需借助传统的凭经验和手感来的方法来判断换能器的稳定性和有效性，根据厂家有经验技术工人的传统评判，4号换能器属于不合格产品。从本检测系统的检测结果来看，4号换能器的性能指标与其它5个换能器的性能指标存在较大的不同。综上所述，说明利用本检测系统可以检测出性能欠佳的换能器。

利用本检测系统对超声波换能器进行性能检测，需要在大量试验和试用中将有经验工人对换能器评价的振动强度的感觉进行量化，即根据试用中的统计数据得出不同应用情况下换能器振幅合格与否的界限指标，从而制定判断标准为产品合格检验与品质分类提供依据。

5.3 后期工作

在以上开发和调试的基础上，后期工作为开发手持式性能检测系统的开发，即将超声波换能器性能检测系统集成到一个设备中。系统总体设计思路不变，不同之处在于：没有了上位机部分的设计与 USB 数据传输模块的设计，在人机交互上采用的是 LCD 作为显示界面，同时配备了一定数量的控制按键，性能检测系统中上位机实现的信号数据分析与处理任务在 FPGA 控制器中来实现。

图 5.4 为手持式性能检测系统的硬件电路框图,包括信号调理电路、A/D 转换电路、存储电路、配置电路、JTAG 电路、键盘控制、LCD 显示电路等。不同之处在于在于 FPGA 需要协调各部分协调工作的同时还需要对接受到的信号数据进行处理和分析,所以 FPGA 采用的是 Xilinx 公司的 FPGA 芯片 XC3S200-TQ144,经处理得到的性能参数和波形在 LCD 上进行显示,液晶显示模块采用的是 SED1565,键盘控制按钮根据性能参数指标评价对系统进行调节与控制。

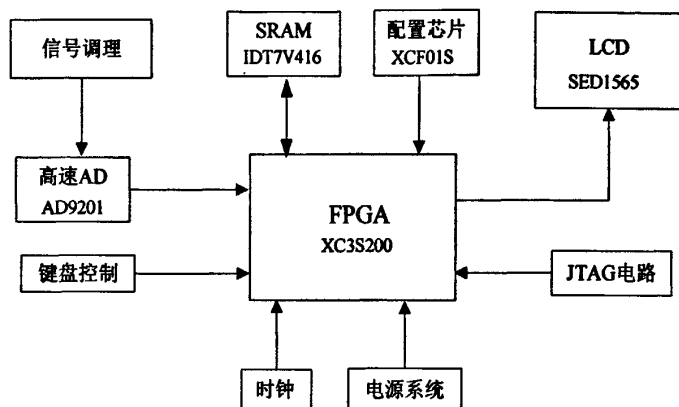


图 5.4 手持式检测系统的硬件框图

Fig. 5.4 Hardware structure of hand-held detection system

XC3S200 是 Spartan-3 系列的 FPGA,主要特性有:内部时钟频率可达 326MHz,可提供 4320 个逻辑单元,20 万个系统门;支持多达 17 种的单端接口标准和 6 种差分接口标准。输出信号的摆幅范围可达 1.14V 和 3.45V;高性能的内部存储器 Select RAM 结构,最多可提供 216Kb 的块存储器资源,以及 30Kb 的分布式存储器资源;支持高性能的外部存储器接口;专用的 18 位×18 位乘法器模块和超前进位逻辑链(Look-ahead Carry)构成了高性能的算术处理功能;多达 4 个数字时钟管理器模块和 8 个全局时钟多路复用缓冲器,时钟资源丰富。

手持式性能检测系统中 FPGA 作为主控制器,需要完成控制和计算功能,所以程序基于模块化的自顶向设计方法,采用 Verilog 语言对各个模块进行设计、仿真和实现^[43],如图 5.5 所示包括以下 6 个功能模块:

(1) 时钟模块:产生不同频率的时钟信号。时钟模块输入时钟信号为来 20MHz 有源晶振,与 FPGA 的全局时钟引脚连接,利用数字时钟管理器和软件分频来产生不同频率的时钟信号。

- (2) A/D 控制模块：产生模数转换芯片 AD9201 需要的转换控制信号。
- (3) SRAM 控制模块：产生数据缓存芯片 IDT71V416 实现数据缓存的读写控制信号。
- (4) 键盘控制模块：根据按键输入先进行但见防抖处理，然后送入功能控制模块进行相应参数调节。
- (5) 数据处理模块：对采集的发波信号和收波信号进行处理和分析，来得到性能指标参数。
- (6) 液晶控制模块：实现 LCD 的初始化，性能参数显示，波形显示和菜单显示功能。

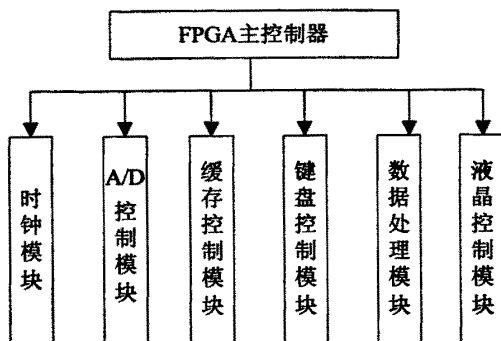


图 5.5 FPGA 控制模块图
Fig. 5.5 FPGA control module chart

其中数据数据处理模块的实现是重点，性能参数的计算需要在 FPGA 控制器内完成。对于软件编程硬件实现的 FPGA 来讲，很多运算比如除法，FFT 变换等都不能直接完成，需要调用 IP 核来简化设计。

作为智能仪表的信息显示及人机交互的界面，LCD 液晶显示器件具有低压、低功耗、信息显示量大以及寿命长等特点。本设计中选择的是 SED1565 图形点阵型液晶显示模块，128×64 点阵的 LCD 显示面板。图 5.6 为该液晶显示器接口电路原理图，数据线和控制线与 FPGA 的 IO 口直接连接，利用 FPGA 具有强大的控制功能，通过对 FPGA 编程，直接实现对 SED1565 进行逻辑控制。

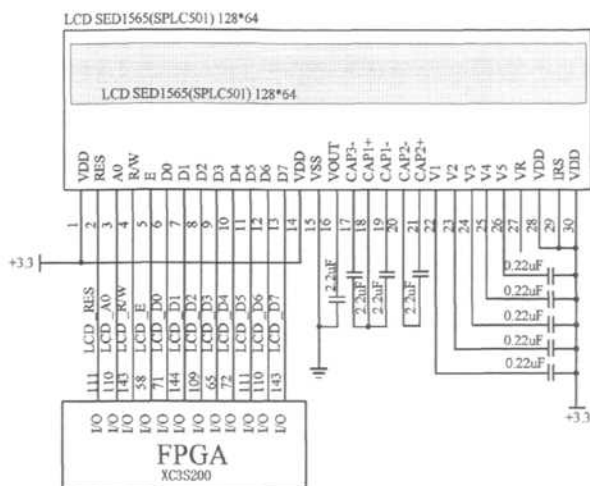


图 5.6 液晶显示器接口电路

Fig. 5.6 Schematic diagram of LCD interface circuit

液晶显示模块的软件设计主要是对显示控制器的控制逻辑，由 FPGA 产生包括初始化模块、写数据模块控制逻辑^[44]。

(1) 初始化模块

要使液晶显示器能正常工作，首先要对控制器 SED1565 进行一系列的初始化工作，图 5.7 为液晶显示模块初始化时序仿真图，在给定时序下进行初始化项设置即可完成液晶驱动，使液晶显示器正常显示。

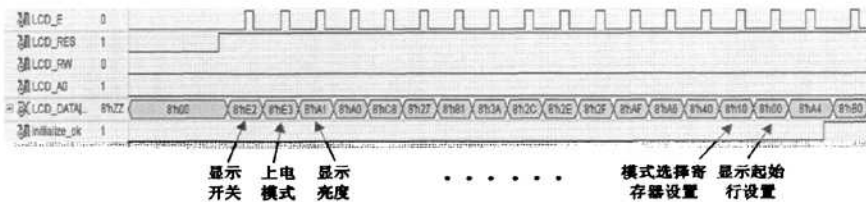


图 5.7 LCD 驱动仿真图

Fig. 5.7 LCD driving simulation chart

(2) 写数据模块

液晶初始化完成以后，便可以写入数据（字符或者波形）。写数据模块负责将控制芯片传送的数据通过 LCD 模块的 8 位数据总线写入到 LCD 模块中，LCD 模块再通过其内部的驱动芯片，将数据显示在屏幕上。该模块的显示数据既可以来自外部直接输入，也可以来自控制芯片内的用户自定义字符库。当来自外部直接输入时，控制

芯片将数据直接通过 8 位数据总线传给 LCD 模块；当显示数据来自用户自定义字符库时，控制芯片接收的只是自定义字符所对应的编码，控制芯片再查找其内部的用户自定义字符库，将该编码转换为对应的 LCD 显示数据，再通过 8 位数据总线将对应的显示数据传给 LCD 模块。控制芯片内的用户自定义字符库可以根据用户的需要，随时调整和更改，满足不同设备的显示需求。在本设计中，用 FPGA 上的 BLOCK RAM 资源通过初始化作为 ROM 使用来实现字符存储，根据控制信号产生的地址值来读取字符值，送显示器进行显示。

对于收波波形显示，主要步骤为信号数据采集和抽取、编码和修复显示。

在 128×64 的液晶显示器上显示经过 A/D 转换的信号数据，由于每次采集到的数据个数远大于显示屏所需的数据个数，如果所采集的数据并不全部显示，就需要根据设置进行等间隔抽取。

由于信号为 10 位数据，需要先对其进行编码，转换为显示对应的 8 位数据，编码原理 5.8 如图所示。高三位数据决定显示的页地址，低 7 为数据决定显示的列高度值，以列扫描方式对整屏数据实现数据显示和刷新。

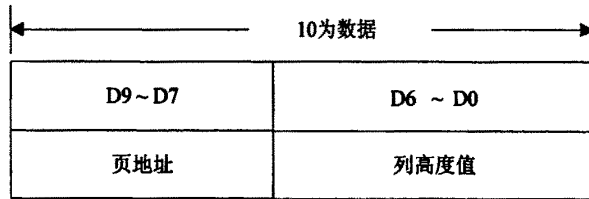


图 5.8 编码原理图

Fig. 5.8 Coding principle chart

在 LCD 屏显示一屏波形时使用 128 个数据点，如果只是在 LDC 上的相应位置打出点来波形看起来不是连续的，而是一个个的离散点，所以需要波形进行修复显示处理，在 LCD 屏上画出连续的信号波形。

为了便于工作人员的现场调试，本设计中配有按键输入作为人机交互的设备，操作人员可以根据需要来设置各种运行参数或实时显示各种参数。本系统中采用 K1~K4 这四个键来控制 LCD 的显示内容并设置一些参数，分别表示“Menu”、“Up”、“Down”、“Enter”，直接接到 FPGA 的 I/O 端口线上，低电平有效，图 5.9 为键盘设置原理图。

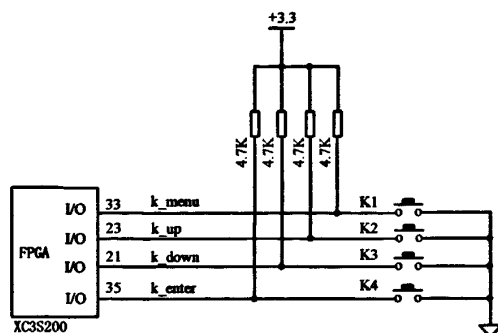


图 5.9 键盘设置原理图

Fig. 5.9 Schematic diagram of keyboard setting

四个按键是机械式开关结构，由于机械式开关的核心部件为弹性金属簧片，在开关切换的瞬间会在接触点出现来回弹跳的现象，即在键按下或释放的过程中会发生抖动从而引发误动作而影响到系统的正确性，因此，需要设计按键弹跳电路来消除抖动。

为使按键抖动消除模块简介并具有移植性好，本系统采用 FPGA 控制通过用计数器的方式实现消除抖动的功能。计数器模值的确定是按键抖动消除效果的关键问题，如果计数器模值过大，即采样时间过程，就会漏掉正确的信号，如果过小，采用时间过短，就会将毛刺认为是按键输入信号。计数器的模值 N 根据抖动信号的脉冲宽度和采用信号 CLK 的周期打下来决定。一般情况下，正常的按键速度小于 10HZ（每秒小于 10 次），所以按键时间大于 100ms，按占空比 50% 计算，按下的时间大于 50ms，由此认为如果按下的时间小于 50ms 的为抖动信号，按下的时间为 50ms 的为按键信号。所以将计数器模值定为： $N=50\text{ms}/\text{采样脉冲信号周期}$ ，即可把按键时间小于 50ms 的抖动信号过滤。此时可将经过消抖处理的按键信号送入控制器进行响应的按键处理。

目前，手持式性能检测系统的开发已经完成液晶显示和菜单控制功能，下一步的工作是总结超声波性能检测的系统的应用特点的基础上，在 FPGA 控制器上来实现对数据的分析和处理从而得到性能指标。

结 论

超声波换能器是各种超声应用设备不可缺少的关键部件,本文提出了针对于工业管道防除垢应用的大功率超声波换能器的性能检测指标,设计了性能检测系统。本文研究的主要结论有:

- (1) 提出了针对于工业管道防除垢的超声波换能器的性能评价指标;
- (2) 核心控制电路采用 FPGA 技术,满足了系统实时性的要求,提高了系统的可靠性,而且可以在线调试便于系统升级;
- (3) 设计并制作了基于 USB2.0 的数据传输的硬件系统,编写了 CY7C68013 的固件程序,设计了基于 LabVIEW 的主机应用程序;
- (4) 进行了系统的调试和大量实验,验证系统检测平台稳定、可靠运行,性能检测结果对于换能器的品质合格检验具有现实意义。

本文基本上实现了超声波换能器检测系统的要求,但是仍有一些值得改进的地方,系统将要进行下一步的研究工作是将超声波换能器性能检测系统集成在一块电路板上,完善手持式检测仪表以满足现场检测简单便携的要求。

参 考 文 献

- [1] 应崇福. 超声学. 北京:科学出版社, 1990.
- [2] 曹凤国. 超声加工技术. 北京:化学工业出版社, 2004.
- [3] 林书玉. 超声换能器的原理及设计. 北京:科学出版社, 2004. 6.
- [4] 尚志远. 检测声学原理和应用. 西安:西北大学出版社, 1996.
- [5] Jones D, Dawson J. Risk assessment to pipeline lifemanagement. *Pipes and Pipeline Intemational*, 1998, 43(1):5-18.
- [6] 林仲茂. 超声变幅杆的原理和设计. 北京:科学出版社, 1987.
- [7] Abramov O V. Action of high Intensity Ultrasound on solidifying. *Ultrasonics Sonochemistry*, 1987, 25(3):73-82.
- [8] 林书玉, 张福成. 大尺寸夹心式压电换能器的设计. *应用声学*, 1994, 13(3)30-33.
- [9] 林书玉. 纵-扭复合振动模式指数型复合超声变幅杆的研究. *应用声学*, 1997, 16(5):42-46.
- [10] 阮世勋. 扭振超声变幅杆谐振参数测定方法的研究. *应用声学*, 1996, 2:27-33.
- [11] W.P.Mason. *Physical Acoustics*. New York:Academic Press, 1964.
- [12] Z. Jagodziński. The Radiation Efficiency of Ultrasonic Transducers. *Archiwum Akustyki*, 1972, 7(2):151-167.
- [13] 林书玉, 钱建平. 一种近似测量换能器效率及其等效电参数的简易方法. *应用声学*, 1990, 9(5):29-32.
- [14] 林书玉. 超声换能器的高功率性能测试. *物理*, 1992, 04:34-236.
- [15] 林书玉. 功率超声技术的研究现状及其最新进展. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2001, 29(1):101-106.
- [16] 林仲茂. 超声变幅杆的原理与设计. 北京:科学出版社, 1987.
- [17] Pokrovsky O S. Precipitation of calcium and magnesium carbonates from homogeneous supersaturated solutions. *Journal of Crystal Growth*, 1998, 186(2):233-239.
- [18] 刘翠芬. 超声波防垢器的原理及其应用. *河南化工*, 2003, (12):28-30.
- [19] Eskin G I. Broad Prospects for Commercial Application of Ultrasonics. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2001, 8:319-325.
- [20] 王诚, 薛小刚, 钟信潮. *FPGA/CPLD 设计工具—Xilinx ISE 5. X 使用详解*. 北京:人民邮电出版社, 2003.
- [21] Wu Xia. High speed data acquisition system using USB interface. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2004, 1(2):1151-1155.
- [22] 路林吉. 虚拟仪器的应用. *电子技术*, 2000, 6:40-42.
- [23] 黄智伟. *FPGA 系统设计与实践*. 北京:电子工业出版社, 2005.
- [24] 王灵芝, 林培杰, 黄春晖. FPGA 的配置及其接口电路的设计. *电子测量与仪器学报*, 2007, 21(4):109-112.

- [25] Appiah K, Andrew H. A single-chip FPGA implementation of real-time adaptive background model. IEEE International Conference on Field Programmable Technology, Singapore, 2005:95-102.
- [26] 陈阳, 李希文. 通用串行总线(USB)的特点与应用. 应用与实践, 2000, 10:83-85.
- [27] 刘炎, 冯惠力等. 通用串行总线(USB)原理及接口设计. 电子应用, 2000, 20-22.
- [28] 王成儒, 李英伟. USB2.0 原理与工程开发. 北京:国防工业出版社, 2004. 1.
- [29] Cypress Semiconductor Corporation EZ-USB FX2 Technical Reference Manual, 2003, 11.
- [30] Cypress Semiconductor Corporation CY7C68013 Data Sheet EB/OL. 2003.
- [31] 蒋金涛, 杨鸣. USB2.0 控制器 EZ-USB FX2 的性能特点及其数据传输实现. 计算机工程与应用. 2005, (11). 94-96.
- [32] 钱峰. EZ-USBFX2 单片机原理、编程及应用. 北京:北京航空航天大学出版社, 2006. 3.
- [33] 刘延波, 郑世强, 王斌. USB 设备固件程序设计. 信息工程大学学报, 2004, 2:56-60.
- [34] 胡文静, 陈松. 基于 EZ-USB 芯片 CY7C68013 的驱动程序设计. 计算机应用研究. 2005, (9):220-221.
- [35] 王天盛, 李斌桥, 赵毅强等. ASIC 设计中基于 Verilog 语言的 inout (双向) 端口程序设计. 计算机工程与应用, 2003, (34):129-183.
- [36] NI 公司著. 汪敏生等译著. LabVIEW 基础教程. 北京:电子工业出版社, 2002.
- [37] 李刚, 林凌等. LabVIEW—易学易用的计算机图形化编程语言. 北京北京航空航天大学出版社, 2001.
- [38] USA National Instruments Corporation. Using External Code in LabVIEW. National Instruments Corporation, 2000, (7):1-33.
- [39] 尹邦政, 魏亚东, 邢达等. 基于 LabVIEW 的 USB 实时数据采集处理系统的实现. 电子技术应用. 2003, (7).
- [40] 李伯全, 潘海彬, 罗开玉. LabVIEW 平台下基于 DLL 的普通数据采集卡的驱动. 仪表技术, 2004, (2):22-24.
- [41] 周求湛, 钱志鸿, 刘萍萍, 戴宏亮等. 虚拟仪器与 LabVIEW 7 Express 程序设计. 北京:北京航空航天大学出版社, 2004.
- [42] 万翔. ChipScope Pro 在 FPGA 调试中的应用. 计算机与网络, 2005, (21):58-59.
- [43] Ciletti, Michael D. Advanced digital design with the Verilog HDL. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2004.
- [44] 王彦, 陈琼. 基于 FPGA 的 LCD 驱动设计. 真空电子技术, 2004, 6:55-58.

攻读硕士学位期间发表学术论文情况

[1] 石英, 孟华. 超声波换能器性能检测系统数据采集模块设计. 大连理工大学网络学刊. 2008, 11. 属于学位论文第 4 章.

[2] 孟华, 杨光伟, 石英. 一种定量自动称重控制器的设计与实现. 仪表技术与传感器 (沈阳仪表科学研究所主办, 国内核心期刊), 2007, 10. 属于相关章节 5.3.

致 谢

两年半的时间一晃而过，转眼间，我即将要结束我的研究生生涯，在这两年半中，我在自身知识、科研能力以及个人素质等多方面都得到了很大的提高。期间，我的亲人和众多的良师益友在学习上给我的指导和帮助、在生活上给我的关怀和照顾以及在思想上给我的鞭策和促进，使我受益匪浅，终生难忘。值此论文完成之际，谨向他们致以最诚挚的谢意！

首先要衷心感谢我的导师孟华副教授。孟老师知识渊博、治学严谨、经验丰富，对工作兢兢业业。我的点滴进步无不凝聚着孟老师的心血和汗水，孟老师丰富的科研经验，不计名利、无私奉献的高贵品质以及平易近人的长者作风深深地感染着我，使我在学习科学知识的同时也学会了做人的道理。孟老师不仅在学习上对我悉心指导，而且在生活上也给予了我无微不至的关怀和照顾，使得我能够顺利完成学业。在此向孟老师表示崇高的敬意和由衷的感谢。

同时，感谢王金城教授和李亚芬副教授在百忙之中审阅了我的论文并对论文提出了宝贵意见。

另外，感谢本教研室的所有同学。感谢师兄师姐对我遇到疑难问题时给我的帮助和鼓舞，感谢王仁圣同学和闫成彦同学在课题开展过程中的积极配合与帮助；感谢王鹏达同学、隋永盛同学、毛真同学在读研期间给我的帮助和支持，也感谢其他同学对我学习和生活上的帮助。

特别在此还要感谢我的父母和家人，他们给予了我默默无私的关爱，他们的悉心培养和全力支持，是我面对生活、面对挑战的动力源泉，谨以此文表达对他们的深深谢意，希望他们永远健康、快乐。

最后再次对所有关心、帮助和爱护我的人衷心地道一声：谢谢！