

分类号 _____

密级 _____

UDC _____

学 位 论 文

基于数字锁相放大器的近红外水分仪研究

作 者 姓 名：李宇坤

指 导 教 师：李新光 教授

东北大学信息科学与工程学院

申请学位级别：硕士

学 科 类 别：工学

学科专业名称：检测技术及自动化装置

论文提交日期：2016年6月

论 文 答 辩 日 期：2016年6月

学位授予日期：2016年7月

答辩委员会主席：xxx

评 阅 人：XXX XXX

东 北 大 学

2016 年 6 月

A Thesis in Theoretical Physics

Constraining dark energy with Hubble parameter measurements

By Yu-Kun Li

Supervisor: Professor Xingguang Li

Northeastern University

June 2016

独创性声明

本人声明，所呈交的学位论文是在导师的指导下完成的。论文中取得的研究成果除加以标注和致谢的地方外，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得其他学位而使用过的材料。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。

学位论文作者签名：

日 期：

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解东北大学有关保留、使用学位论文的规定：即学校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。本人同意东北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、交流。

作者和导师同意网上交流的时间为作者获得学位后：

半年 ☐ 一年 ☐ 一年半 ☐ 两年 ☐

学位论文作者签名：

导师签名：

签字日期：

签字日期：

基于数字锁相放大器的近红外水分仪研究

摘要

20 世纪末两个宇宙学研究小组发现宇宙加速膨胀以来,人们便对其加速膨胀的原因进行了深入的研究。为了解释宇宙加速膨胀,当前有两种比较流行的观点:暗能量和修改引力。迄今为止,关于宇宙加速膨胀的问题,人们已做了大量的分析,但仍无法断定暗能量和修改引力谁更能合理地解释宇宙加速膨胀。因此,基于这两大理论的提出,人们建立了许多宇宙学模型。此外随着天文观测技术的不断进步,超新星、宇宙微波背景辐射、重子声学振荡以及哈勃常数 H_0 等天文观测也为研究宇宙加速膨胀提供了大量精确的信息。因此,使用不同的观测数据组合精确限制宇宙学模型是研究宇宙加速膨胀的主要思想。

本文从两个方面研究天文观测检验暗能量的问题。首先,我们研究了未来红移漂移观测对一种典型的修改引力模型 ($f(T)$ 模型) 参数限制的影响。红移漂移观测作为当前其他天文观测方法的重要补充,它可直接测量遥远类星体 Lyman- α 吸收线的红移漂移,其测量“红移沙漠”范围为 $2 \lesssim z \lesssim 5$ 。为了避免其检验数据与其他观测数据不一致,我们选用当前观测数据的最佳拟合模型本身为基准模型,模拟 30 年的红移漂移模拟数据。然后定量地分析这些模拟数据对 $f(T)$ 引力模型参数限制的影响。结果表明:30 年的红移漂移模拟数据可以有效地打破物质密度参数 Ω_m 和哈勃常数 H_0 在当前观测数据中的强简并,从而极大地提高 $f(T)$ 引力模型中自由参数 Ω_m 和 H_0 的限制精度,但不能有效地提高 $f(T)$ 模型自身参数的限制精度。

此外,近年来人们对哈勃参量 $H(z)$ 的数据观测问题进行了大量的研究。众所周知,目前较流行的天文观测量为光度距离和角直径距离。它们影响暗能量状态方程 w 需要对哈勃参量 $H(z)$ 进行一次积分,然而这个积分的存在必然会对宇宙观测信息检验暗能量造成一定的困扰。因此不同红移处哈勃参量 $H(z)$ 的直接测量对暗能量物理性质的研究具有重大意义。本文采用了 31 个红移在 $[0.07, 2.34]$ 区间的哈勃参量 $H(z)$ 的直接观测数据,并用它们分析一系列典型的暗能量模型,包括 Λ CDM 模型、 w CDM 模型、CPL 模型以及全息暗能量模型。事实上,红移漂移观测的本质也是直接测量高红移 $[2, 5]$ 范围内哈勃参量 $H(z)$ 的几何观测。因此,单独研究这些直接观测数据对暗能量限制的影响具有十分重要的意义。我们发现联合 10 年的红移漂移模拟数据与哈勃参量 $H(z)$ 的直接观测数据能够极大地提高对暗能量的限制。

关键词: 暗能量; 修改引力; 哈勃参量; 红移漂移; 宇宙学参数限制

Constraining dark energy with Hubble parameter measurements

Abstract

Since two observation teams found that the universe is currently undergoing an accelerating expansion, cosmologists have studied its origin in depth. In order to explain it, there are two popular arguments: dark energy and modified gravity. So far, whether dark energy or modified gravity hasn't been totally accepted by the public. Therefore people established all kinds of cosmological models based on them. In addition, with the development of technology in astronomy, many astronomical observations, including type Ia supernova, cosmic microwave background radiation, baryon acoustic oscillations, Hubble constant H_0 and others, also provide a number of important information for our research. Therefore that combining different kinds of observations constrains dark energy is our major method to study the cosmic acceleration.

In the thesis, we study the observational test of dark energy in the following two aspects. Firstly we analyze the effect of future redshift drift measurement on $f(T)$ model. Redshift-drift observation is an important supplement to current cosmological observations because it measures the redshift drift in the Lyman- α forest in the spectra of distant quasars, covering the "redshift desert" of $2 \lesssim z \lesssim 5$. To avoid data inconsistency, we use the best-fit models based on current combined observational data as fiducial models to simulate 30 mock data. We quantify the impact of these data on parameter estimation for $f(T)$ gravity theories. Two typical $f(T)$ models are considered, the power-law model $f(T)_{\text{PL}}$ and the exponential-form model $f(T)_{\text{EXP}}$. The results show that Redshift-drift observation can effectively break the existing strong degeneracy between the present-day matter density Ω_m and the Hubble constant H_0 in other cosmological observations. For the considered $f(T)$ models, a 30-year observation of redshift drift can improve the constraint precision of Ω_m and H_0 enormously but cannot effectively improve the constraint precision of the model parameters.

Otherwise, in recent years we have done lots of research about Hubble parameter measurements. As is known to us, the usual observables are the luminosity distances or the angular diameter distances, which measure the distance-redshift relation. Actually, the property of dark energy affects the distances (and the growth factor) by a further integration over functions of $H(z)$. Thus the direct measurements of the Hubble parameter $H(z)$ at different redshifts are of great importance for constraining the properties of

dark energy. In this thesis, we show how the typical dark energy models, for example, the Λ CDM, w CDM, CPL, and holographic dark energy models, can be constrained by the current direct measurements of $H(z)$ (31 data used in total in this paper, covering the redshift range of $z \in [0.07, 2.34]$). In fact, the future redshift-drift observations (also referred to as the Sandage-Loeb test) can also directly measure $H(z)$ at higher redshifts, covering the range of $z \in [2, 5]$. We thus discuss what role the redshift-drift observations can play in constraining dark energy with the Hubble parameter measurements. We show that the constraints on dark energy can be improved greatly with the $H(z)$ data from only a 10-year observation of redshift drift.

Keywords: dark energy; modified gravity; Hubble parameter; redshift drift; cosmological parameter constraints

目 录

独创性声明..... I

摘要..... III

Abstract..... V

目录..... VII

第一章 绪论..... 1

1.1 课题研究的背景与意义..... 1

1.2 近红外水分测量技术简介..... 1

1.3 水分检测的研究现状和发展方向..... 2

1.4 本课题的研究内容与主要工作..... 3

第二章 水分测量系统软件设计..... 5

2.1 水分测量系统整体软件设计..... 5

2.2 下位机软件设计..... 6

2.2.1 正弦信号发生程序的设计..... 6

2.2.2 数据采集程序的设计..... 7

2.2.3 数据通讯程序的设计..... 7

2.2.4 温度控制程序的设计..... 9

2.3 数字锁相放大器软件设计..... 9

2.3.1 参考信号的产生..... 9

2.3.2 相关运算的实现..... 11

2.3.3 数字滤波器的设计..... 12

2.4 工业串口屏软件设计..... 15

2.5 本章小结..... 17

第一章 绪论

1.1 课题研究的背景与意义

在塑胶、冶金、矿山、粮食、农林、造纸、纺织等行业，水分含量直接影响着产品的质量，决定了产品工艺的选择。在烧结生产中，众多技术指标在很大程度上取决于混合料水分、含碳量和操作控制手段，而水分在三者关系中起着先导作用，恰当的含水量可以改善混合料的透气性，有助于混合料燃烧及制球，直接影响烧结料的品质^[1]。由此可见在众多行业和领域中，对物质含水量的控制十分关键。而准确控制含水量的前提就是快速、准确地测量出物质含水量。

传统水分检测的方法有很多，例如电阻式水分测量方法、热干燥测定法、电容法等，但这些方法都存在一定的不足之处。尽管传统近红外水分仪被广泛应用，但是存在的一些不足却不容忽视：白炽灯、卤素灯等光源功耗大，有用光强占比较小，灯泡发热量大；光信号调制频率受机械转速的影响；仪器中可动部件多，稳定性差；光线通过旋转的滤光片分时照在被测物料上，测量光是断续的。同时，机械部件长期工作后，不可避免地产生磨损，其精度必然会发生变化，对仪器的稳定性和使用寿命造成影响。随着红外技术的发展，近红外水分测量成为了主流前沿技术。与传统的水分检测方法相比，近红外水分测量有着许多优点：它可以实现对物料的非接触无损检测，分析速度快，精度高，可进行实时、连续的在线测量[5]，这些特性适合许多工业领域，使得近红外水分仪能够广泛地应用在各种工业控制系统及生产线当中^[2]。

目前国内市场上的近红外水分测量仪器的种类比较少，并存在仪器的精度不够、体积和功耗较大、产品相对落后等问题。因此分析水分的测量方法，研制一种新型近红外水分仪，可以提高水分的检测效率从而提高生产效率，对许多行业的发展有着重要的意义。

1.2 近红外水分测量技术简介

本课题针对钢铁厂中的烧结混合料的含水量进行测量研究，实际生产现场环境较为恶劣，粉尘和水蒸气等干扰因素较多。因此对水分测量的方法有着一定的要求，所以选择合适的测量方法是设计水分仪检测系统的前提。测量水分的方法分为直接法和间接法两种方法。

水分测量的直接法主要有卡尔·费休法和干燥法。

(1) 卡尔·费休法：卡尔·费休法是测量固体、液体、气体等化学试剂产品中微水含量的通用方法，它是一种灵敏的化学分析方法，卡尔·费休法是以甲醇为介质以卡氏液为滴定液进行样品水分测量，它根据被测样本中的水分消耗卡尔费休液体的多少，从而测量出样品中的水分含量。这种方法不仅可以测出自由水，也可以测出结合水^[3]。

(2) 干燥法: 干燥法分为直接干燥法和间接干燥法, 直接干燥法又分为常压干燥法和真空干燥法。直接干燥法是指用精密称重仪器测量出含有水分的物质的重量, 然后把含有水分的物质放到常压烘箱或真空烘箱进行加热烘干, 其中放到常压烘箱进行烘干的方法称为常压烘干法, 放到真空箱进行烘干的方法称为真空干燥法。待含有水分的物质被完全烘干后, 取出并再一次称其重量, 计算出物质的前后变化的重量, 从而能够计算出被测物质中的含水量。间接干燥法可分为红外干燥法和微波干燥法等等。干燥法操作简单, 但是所需时间较长。

间接法是通过测量与水分含量相关的物理量, 从而测得物质中的水分含量。主要方法有电导法、中子法、微波法和近红外法等等。

(1) 电导法: 电导法是利用被测物含有不同水分的导电特性不同的原理, 通过测定待测物含有不同水分的电导率, 从而测量出物质中的含水量。电导法测量物料中的含水量需要将传感器与物料接触, 这样物料的温度、成分和密度等因素会对测量结果造成影响^[1]。

(2) 中子法: 中子法是利用中子源产生的快速中子与水中的氢原子相互反应的原理来测定物质中的含水量。这种测量方法与水分的物理状态无关, 测量速度快^[1]。但由于氢的散射特性不稳定, 被测物中如果含有除水以外的含有氢物质就会对测量结果造成影响。

(3) 微波法: 是利用微波透过含水的物质时, 由于水和其它物质的介电常数不一样, 因而含水量不同的物料的介电常数也不同, 透过物体微波的能量损耗、相位偏移、频率变化等也不一样。通过测量微波的参数变化, 可以间接测出物料中水分的含量^[1]。

(4) 近红外法: 近红外测量方法是根据水分子能够吸收特定波长的近红外光能量, 当用吸收系数较大的波长的近红外光照射被测物料时, 物料中的水吸收一部分近红外光能量, 吸收能力的多少与水分含量成正比关系。利用这个原理, 可以通过测量出近红外光照射到物料后散射出来的光能量大小来测量物料中水分的多少^[1]。

综上所述的水分测量方法, 其中直接检测法测量的时间长, 无法满足测量的需要。而在间接法中, 电导法是接触式测量, 由于烧结料是在传送带上运动的, 电极直接接触物料, 对电极的磨损较大, 并且容易受待测物的温度和密度等因素的影响。中子法属于接触式测量, 仪器的探头接触物料, 导致探头磨损, 测量的滞后性也很大, 物体结晶水及碳氢化合物组分的变化都会影响测量结果。近红外方法具有非接触式测量、测量速度快和在线测量等优点, 并且测量的结果与物料的流量和料层厚度无关, 对物料成分及配比的变化不敏感, 因而在实际生产中得到了广泛的应用。

1.3 水分检测的研究现状和发展方向

近红外检测技术作为一种快速、准确、有效的检测技术, 近些年来在食品、农牧、石油炼制、制药等领域得到了广泛的应用。例如在医学方面用来分析全血或者血清中

红蛋白载氧量、葡萄糖、尿素等含量的测定；在石油领域可以用来分析油中各种化学物质的含量；在制药领域可以用来对药物进行成分分析。

国际上有很多公司都在研制生产近红外水分检测仪，主要有英国的红外工程公司、日本的 Kett 公司和美国的 Raytek 公司等。

从20世纪80年代，国内很多科研院所和高校开始对近红外水分检测进行研究，并取得了一定的成就，实现了连续非接触式大面积的水分测量，并可以有效地消除光源变化和被测物质变化而引起的测量误差。但大部分高端产品被国外公司垄断，很多产品要从国外进口。国内水分仪厂商主要有上海英雷科技有限公司、北京九如仪器有限公司等。国内使用的近红外水分仪种类较多，主要型号有美国水分仪公司的 QB475 系列、英国公司的 NDCTM55 系列、美国 Zeltex 公司的 ZX 系列；国内公司生产的 IM-C 型、CA642 型等。

目前国内市场上的传统红外水分仪主要采用卤钨灯等大功率光源，光源工作一段时间之后，光强就会下降，因而需要及时更换光源。利用窄带通滤光片对光源滤出固定波长的近红外光，将多个滤光片安装在切光盘上，通过电机转动带动切光盘转动实现对光信号的调制，电机的转速具有一定的范围，这就限制了调制频率的大小，影响水分测量的速度。传统的近红外水分仪存在整体功耗大，光源需要及时更换，应用机械调制，可动部件多并存在精度不够、体积过大和稳定性差等问题。

1.4 本课题的研究内容与主要工作

本课题针对测量钢铁厂中的烧结混合料的水分，研究了近红外水分检测和锁相放大等相关理论。根据目前市场上传统的近红外水分仪的不足之处，提出了无可动部件的多波长近红外水分检测方案，采用近红外光源代替传统的大功率光源，采用电调制代替机械调制，设计一种新型的近红外水分测量仪器，从而降低近红外水分仪的功耗，提高精确度和稳定性。

设计并制作了水分检测系统，包括系统硬件的设计和制作、下位机和上位机软件的编写。主要工作内容如下：

- (1) 分析钢铁厂中烧结现场的环境，研究水分检测方法及原理和微弱信号检测相关理论，设计近红外水分仪的整体方案；
- (2) 采用近红外光源代替原有的大功率卤钨灯，设计并分析光学系统；
- (3) 设计光源驱动电路，采用电调制代替原有的机械调制；
- (4) 采用锁相放大技术对微弱信号进行检测，设计锁相放大电路；
- (5) 设计信号检测电路和数字电路，包括前置放大电路、隔离电路、滤波电路和单片机电路等，设计制作电路板并调试；
- (6) 编写水分检测系统的下位机和上位机程序；
- (7) 应用设计的水分检测系统对烧结混合料等物质进行水分测量实验。

第二章 水分测量系统软件设计

软件设计是本课题非常重要的一部分工作，本章将对水分测量系统的软件部分进行设计和说明，包括两大部分：下位机软件设计和上位机软件设计。下位机软件设计除了阐述正弦信号发生程序、数据采集程序、控制器与工业串口屏通信程序以及温控程序外，重点实现了数字锁相放大器的 C 语言算法实现。从 A/D 采集回来的正弦模拟量经过数字锁相放大器后能够得到高信噪比的信号幅值，从而参与烧结料水分含量的计算。上位机主要是组态工业串口屏软件的设计，串口屏能够直观、实时地显示当前物料的水分含量，是水分测量系统必不可少的人机交互窗口。

2.1 水分测量系统整体软件设计

水分测量系统的软件设计包括下位机 DSP 驱动程序的设计、数字锁相放大器算法设计以及组态工业串口屏设计。其中，DSP 驱动程序主要实现正弦信号的发生、模拟数据的采集、数据的实时通讯、温度的检测和控制以及指示报警等功能。系统整体的软件流程如图 2.1 所示。

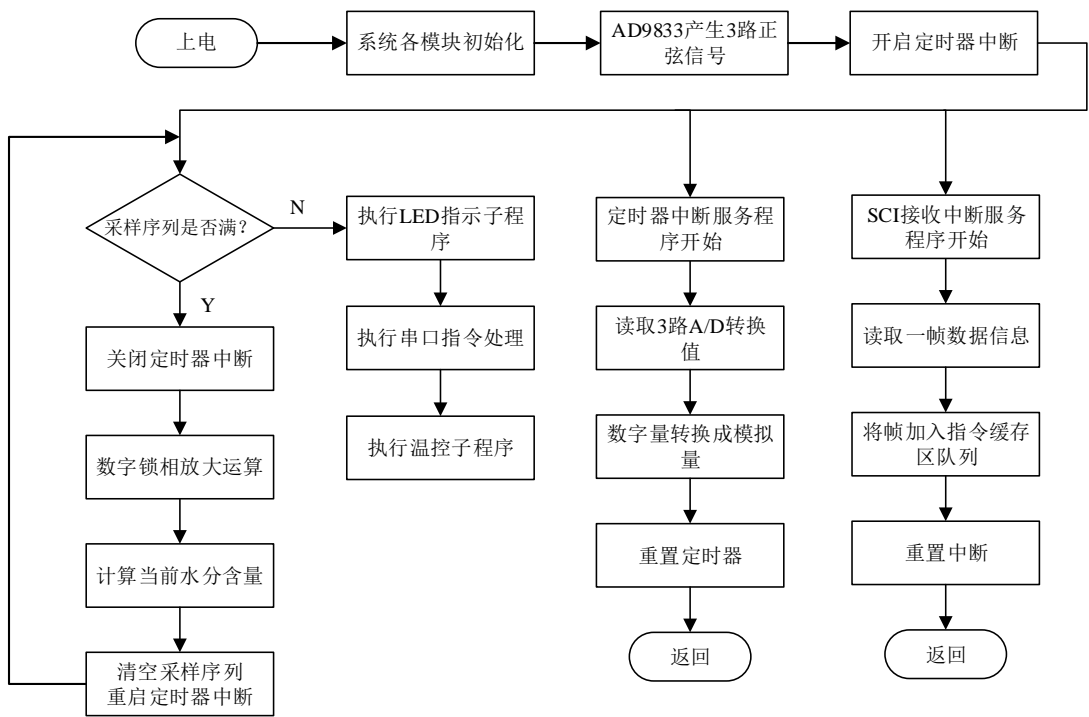


图 2.1 系统软件流程图

Fig. 2.1 System software flow chart

2.2 下位机软件设计

2.2.1 正弦信号发生程序的设计

DSP 控制器通过 SPI 接口方式可以对 AD9833 进行编程，从而控制其产生所需要的波形。这里采用 MOSI 主出从入的工作模式，即 DSP 作为主器件控制 AD9833。按照 AD9833 数据手册上 SPI 的控制时序图，在串口时钟的作用下，数据以 16 位的方式加载到设备上。

AD9833 内的寄存器为 16 位，通过对 AD9833 的控制寄存器、频率寄存器和相位寄存器写入控制字可完成对 AD9833 的配置。AD9833 的数据写入流程以下面的例子说明。如果要输出 100Hz 的正弦信号，相位为 0° ，则通过 SPI 输入数据依次为：0x2100，0x4A7C，0x4000，0xC000，0x0000。其中 0x2100 设置控制寄存器，表示进入配置状态；0x4A7C 与 0x4000 表示在频率寄存器 0 中写入 0x0A7C（低位在前）；0xC000 表示在相位寄存器 0 中写入 0x000；0x0000 表示输出使能，信号频率为频率寄存器 0 中存储的频率，相位为相位寄存器 0 中存储的相位，输出信号为正弦波。

AD9833 的软件流程图如 2.2 所示。

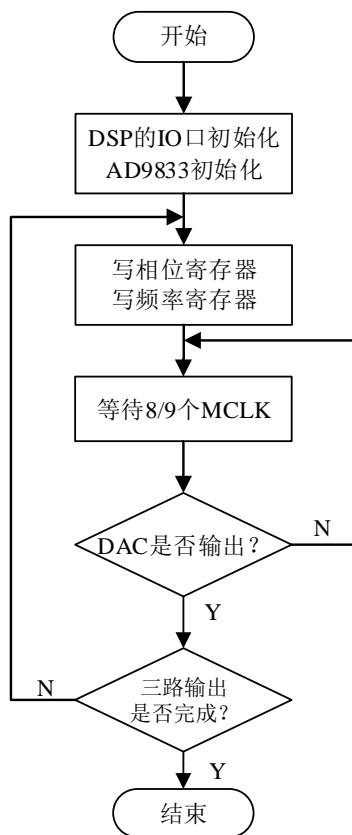


图 2.2 AD9833 软件流程图

Fig. 2.2 AD9833 software flow chart

2.2.2 数据采集程序的设计

本课题有三路正弦信号进入 A/D 转换通道进行同步模数转换，所以对于 AD7656 而言，其采样频率的选取应综合三路正弦信号频率满足奈奎斯特采样定律以及 AD 芯片最大转换速率进行考虑。基于第 3 章节对数字锁相放大器的仿真和分析，本文选用 120KHz 作为采样频率对这三路信号进行采样和转换，每路信号连续采集 420 个点序列。

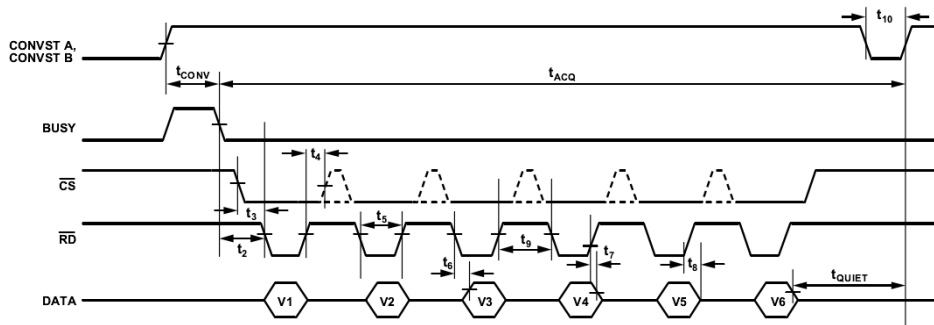


图 2.3 AD7656 并行接口模式工作时序图

Fig. 2.3 Work sequence diagram of AD7656 parallel interface mode

本文采用 AD7656 并行工作模式，图 2.3 所示是 AD7656 在并行方式下的工作时序图。首先通过脉冲激活 CONVST 输入来启动模数转换，并保持为高电平。当转换过程结束后，BUSY 信号会出现下降沿，此时，可通过控制片选和读信号引脚来依次读出各个通道的 AD 转换值。在读出转换值后，可改变 CONVST 为低电平，为下一次转换做准备。本课题通过控制 CONVST A 和 CONVST B 信号转换前 4 路通道的模拟信号，前 3 路信号为待测信号，第四路信号为模拟地。

本文设计的数据采集程序主要包括 TMS320F28335 的 IO 口初始化、AD7656 控制时序的产生及状态查询、采集数据的处理。其程序的流程图如图 2.4 所示。

2.2.3 数据通讯程序的设计

下位机的通讯程序主要功能是将 DSP 处理后的数据发送到组态工业串口屏进行显示，本文设计的通讯采用 TMS320F28335 的串行通信接口（SCI），与 UART 类似。SCI 接收器和发送器各自拥有一个 16 级深度的 FIFO，也各自拥有自己的使能和中断位，两者都能独立进行半双工通信，或者联立建立全双工通信。为了保证数据的完整性，SCI 模块会对接收到的数据进行简断检测、奇偶性、溢出和帧错误等检测。通过一个 16 位波特率寄存器的编程，可配置不同的通信速率。

本课题采用的组态工业串口屏是集 TFT 显示驱动、图片字库存储、GUI 操作、RTC 显示及各种组态控件于一体的串口显示终端。本章第 2.4 节将对该触摸屏做详细的介绍。

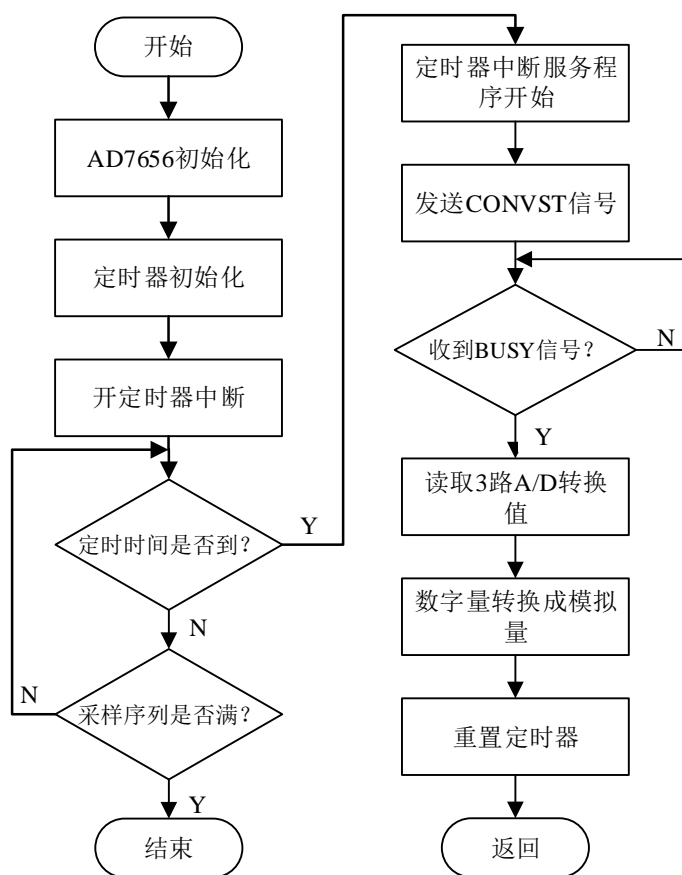


图 2.4 数据采集程序流程图

Fig. 2.4 Data acquisition program flow chart

工业串口屏通过指令帧的方式与微控制进行数据通信。当触摸屏有画面切换或动作更新时，会通过一定格式的指令帧将信息发送回下位机，下位机接收到帧信息并对帧信息解释后执行相应的处理，并通过指令帧的形式将动作信息或数据信息发送给触摸屏。一条完整的串口指令帧格式如表 2.1 所示。如果指令参数大于 1 个字节，则高字节在前、低字节在后。指令的最大长度为 1024 字节（包含帧头和帧尾），数值均为十六进制。串口格式：8 位数据位、1 位停止位、无效验位。

表 2.1 无 CRC 校验指令帧格式

Table 2.1 No CRC check instruction frame format

指令	EE	XX	XX XX ... XXX	FF FC FF FF
说明	帧头	指令	指令参数	帧尾

为了使 DSP 控制能够很好的接收或发送指令来控制触摸屏显示，本课题设计如图 2.5 所示的程序驱动架构，其中最下层为用户处理串口的硬件驱动，往上一层为串口屏

的命令帧驱动，再上面一层是串口消息响应处理函数，最上面为用户应用代码。

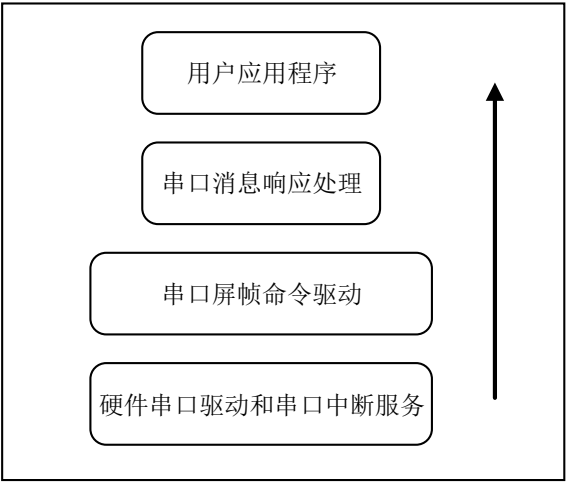


图 2.5 DSP 程序驱动框架

Fig. 2.5 DSP Driver Framework

基于以上程序框图，本课题的 DSP 与通信程序流程如图 2.6 所示。

2.2.4 温度控制程序的设计

2.3 数字锁相放大器软件设计

本文第三章节对数字锁相放大器进行过详细的分析，其核心的相关运算由 DSP 内部软件实现，主要包括：

- (1) 参考信号的产生。
- (2) 相敏检波运算的实现。
- (3) 数字低通滤波器的实现。
- (4) 幅值的计算输出。

2.3.1 参考信号的产生

基于 DSP 产生正弦序列的方法有很多，在精度和运算速度上也会有差异，下面将介绍几种常用的方法。

(1) 函数法

通过利用 DSP 内部的正弦函数直接计算，给出精确到每个角度的正弦波形值，该方法算法简单，占用的存储空间小，精度可以通过算法进行调整，但计算量大，耗时。通常用于精度要求高，实时性要求低的场合。

(2) 查表法

查表法是一种最直接的方式，设计者可以根据运算的需要提前计算好所有可能出现的正弦函数值，将这些结果编排成数据表，在使用时根据所需正弦信号的频率和相

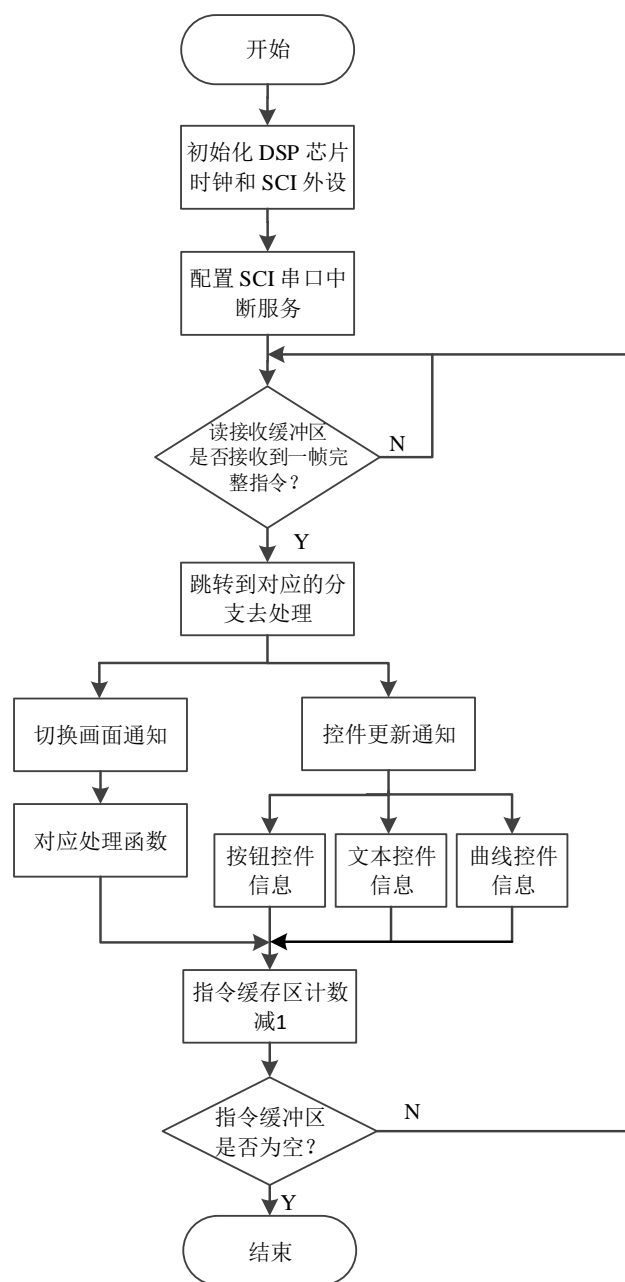


图 2.6 触摸屏串口通信程序流程图

Fig. 2.6 Program flow chart of touch screen serial communication

位在正弦表中找到对应的正弦值。该实时性好，可以快速产生所需正弦信号，但在精度要求高的情况下就需要使用很大的表来存储标准正弦信号，进而需要大量的存储空间来存储该表，故通常适用于实时性要求高，精度要求相对低的场合^[7]。

(3) 级数逼近法

级数逼近法是用级数的方法在某一自变量取值范围内去逼近数学函数，而将自变量取值在此范围外的函数值利用一些数学关系，用该范围内的数字来表示。对于正弦

信号。从正弦函数的对称性可知，只需要计算取值在 $[0, \pi/2]$ 内的函数值就可以推断出所有取值范围内的函数值。级数逼近法的最大优点是灵活度高，且不存在误差积累，使用范围较广，但是要获得较高的精度需要的时间复杂度也大。

本次设计选用了函数法和查表法相结合的方式产生正弦信号，由于三角函数的周期性，只要存储三角函数一个周期的函数值，就能获得整个采样序列所有采样点的正弦值。因此，使用正弦函数来产生一个周期三角函数值，将该周期采样值存入数组中，在使用时直接查找对应的正弦值即可。对一个周期的正弦值进行采样的代码实现是：

```
for (i = 0; i < N; i++)
{
    SIN_TAB[i] = sin(2πif/fs);
}
```

上述语句中， f 是正弦序列的频率， f_s 是正弦序列的采样频率， N 是一个周期的采样点数， $N = f_s/f$ ， N 必须是整数。

得到一个周期的采样值后，存储在数组 SIN_TAB[N] 中，可通过查表的方式获得整个序列的采样点值，代码实现是：

```
for (i = 0; i < Length; i++)
{
    sin_wave[i] = SIN_TAB(i%(Length/N)); // Length 为整个正弦参考序列的长度
}
```

上述设计的是正弦信号参考序列的生成方式，余弦信号序列可通过正弦信号移相 90° 的方式产生。

2.3.2 相关运算的实现

本节重点介绍数字锁相放大器的核心算法相关运算的 C 语言实现，带噪声的正弦信号与同频正弦参考信号做同相相关，与同频余弦参考信号做正交相关。根据式 ?? 编写程序来实现相关运算。

相关运算算法的流程图如图 2.7 所示。

Temp1 是正弦序列与待测信号乘累加之和，Temp2 是余弦系列与待测信号乘累加之和，待测信号的数据长度 Length 决定了乘累加运算的次数。每次乘累加运算后进行无偏估计，得到一个 R_{sin} 和 R_{cos} 值。因此最后能够得到一个长度为 Length 的 R_{sin} 序列和 R_{cos} 序列，即同相相关结果和正交相关结果。

对上述设计的相关运算代码进行测试，测试在 DSP 硬件平台上完成，图 2.8 是参与运算的输入信号和输出离散信号图。a 图是用于测试的信号，b 图是在 a 图所示的信号上叠加了随机白噪声，经过相关运算后，输出同相相关结果序列和正交相关结果序列，可以看到，两个相关结果序列的波形比较平滑，大部分的噪声被滤掉了。

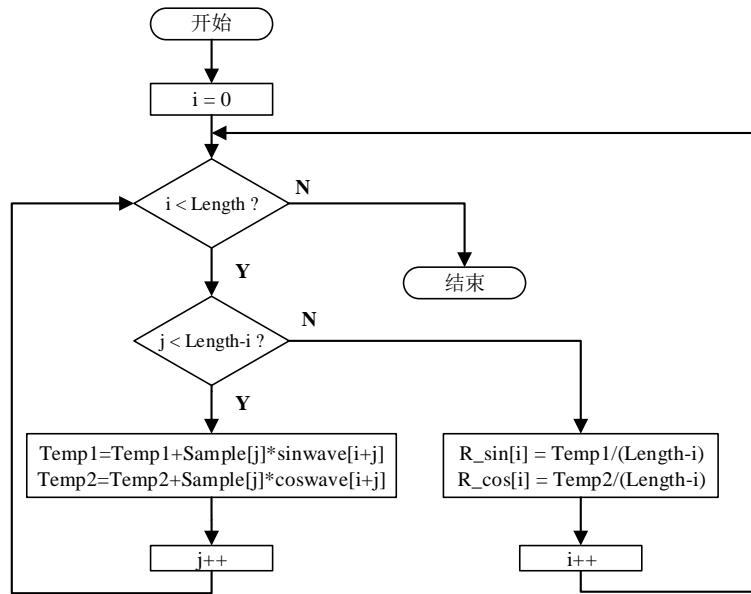


图 2.7 相关运算流程图

Fig. 2.7 Related operation flow chart

要想获得有用信号的输入信号的幅值，需对两相关结果序列进行幅值计算，根据式 ??，将同相相关结果序列和正交相关结果序列对应数据进行平方和再开方运算，得到输入信号的幅值序列，其实现代码为：

```

for (i = 0; i < Length; i++)
{
    ampli_out[i] = 2*isqrt(R_sin[i]*R_sin[i]+R_cos[i]*R_cos[i]);
}

```

2.3.3 数字滤波器的设计

经过相关运算得到的信号幅值序列中，包含了其它的频率的成分，只有通过低通滤波器滤掉高频成分，留下直流成分，才能真正的得到输入信号的幅值。本节将对数字低通滤波器进行设计。

2.3.3.1 FIR 滤波器的设计

DSP 处理器是专为数字信号处理设计的，所以在 DSP 上可以有效实现数字滤波器，且速度快、稳定性好、编程方便。数字滤波器分为无限冲激响应滤波器(IIR)和有限冲激响应滤波器(FIR)。FIR 滤波器在保证幅度特性满足技术要求的同时，很容易做到严格的线性相位特性。同时，FIR 滤波器没有反馈回路，稳定性高且过渡过程具有有限区间，所以本文采用 FIR 数字滤波器实现数字低通滤波。

FIR 滤波器的设计方法主要有窗函数设计法和频率抽样设计法等，其中窗函数设计法是最基本的设计方法。在设计 FIR 滤波器中，一个最重要的计算就是加窗，采用

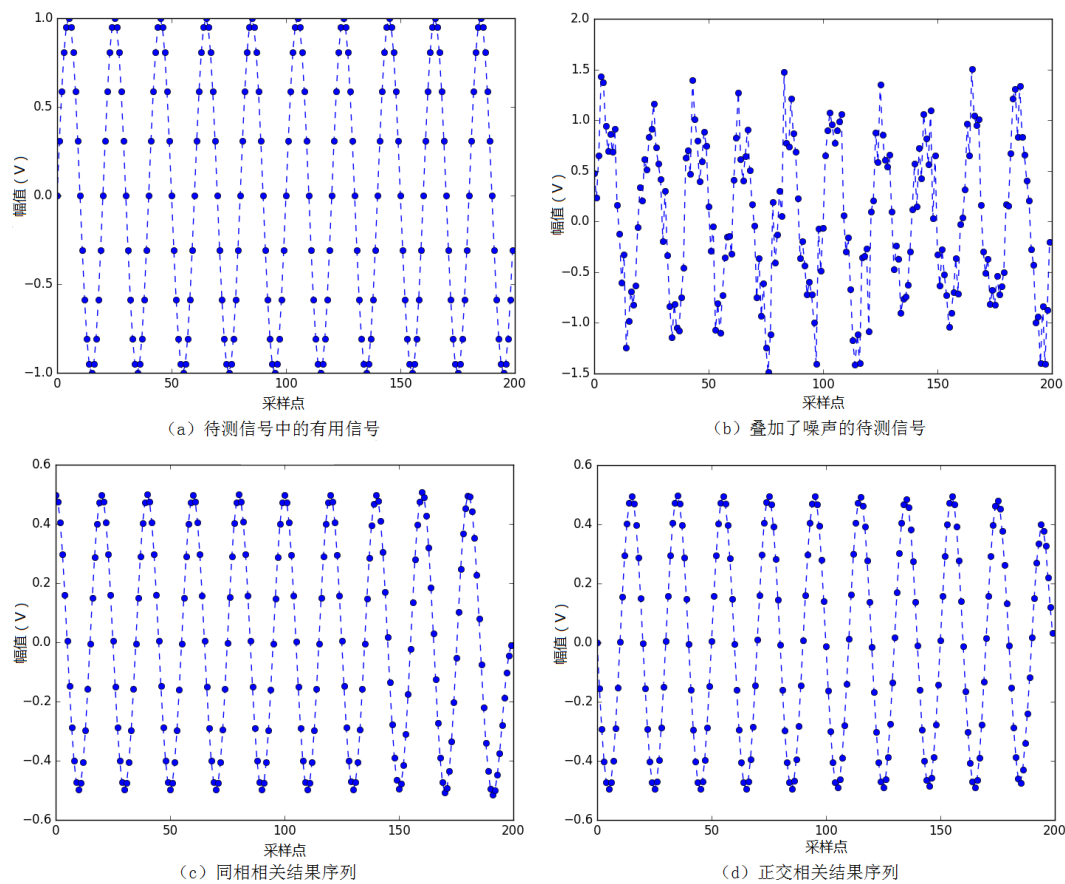


图 2.8 相关运算输入和输出结果图

Fig. 2.8 Correlation operation input and output result diagram

矩形窗是最直接和简便的方法，但采用矩形窗存在较大的 Gibbis 效应，且矩形窗的第一旁瓣与主瓣相比仅衰减 13 dB，因此实际设计中一般采用其他窗函数。表 2.2 列出了几种常用窗函数对比。

表 2.2 几种常用窗函数对比

Table 2.2 Compared to serveral windows function

窗函数	旁瓣峰值衰减 (dB)	过渡带 ($\Delta\omega$)	阻带最小衰减 (dB)
矩形窗	-13	$4\pi/N$	-21
三角窗	-27	$8\pi/N$	-25
汉宁窗	-31	$8\pi/N$	-44
三角窗	-41	$8\pi/N$	-53
布莱克曼窗	-57	$12\pi/N$	-74
凯撒窗	-57	$10\pi/N$	-80

在窗函数的选择中，旁瓣幅度越低、旁瓣幅度下降越大、主瓣宽度越窄，则设计

的滤波效果越好。但在实际中，这三点是很难同时满足的。而凯塞窗（Kaiser）是在给定阻带衰减下给出一种大的主瓣宽度意义上的最优结果，所以它是一种适应性较强的窗，本文选择 Kaiser 窗来设计 FIR 滤波器。

MATLAB 中的 fdatool 工具集成了数字滤波器的各种设计方法，简化了设计过程。本文利用 MATLAB 中的 fdatool 工具设计一个基于 Kaiser 窗的 FIR 数字低通滤波器。

本课题要对三路待测信号分别进行数字锁相放大器运算，所以要分别设计三路不同截止频率的数字低通滤波器。图 2.9 是对其中一路的数字滤波器设计界面，其中设置采样频率为 50KHz，通带截止频率为 4.1KHz，阻带截止频率为 6KHz，通带衰减为 1dB，阻带衰减为 40dB。在设计完成后，由 fdatool 工具可导出单精度浮点数的滤波器系数，便得到了所要设计的 FIR 数字低通滤波器，滤波器阶次为 50。另外的两路数字低通滤波器系数可通过类似的方式获得。

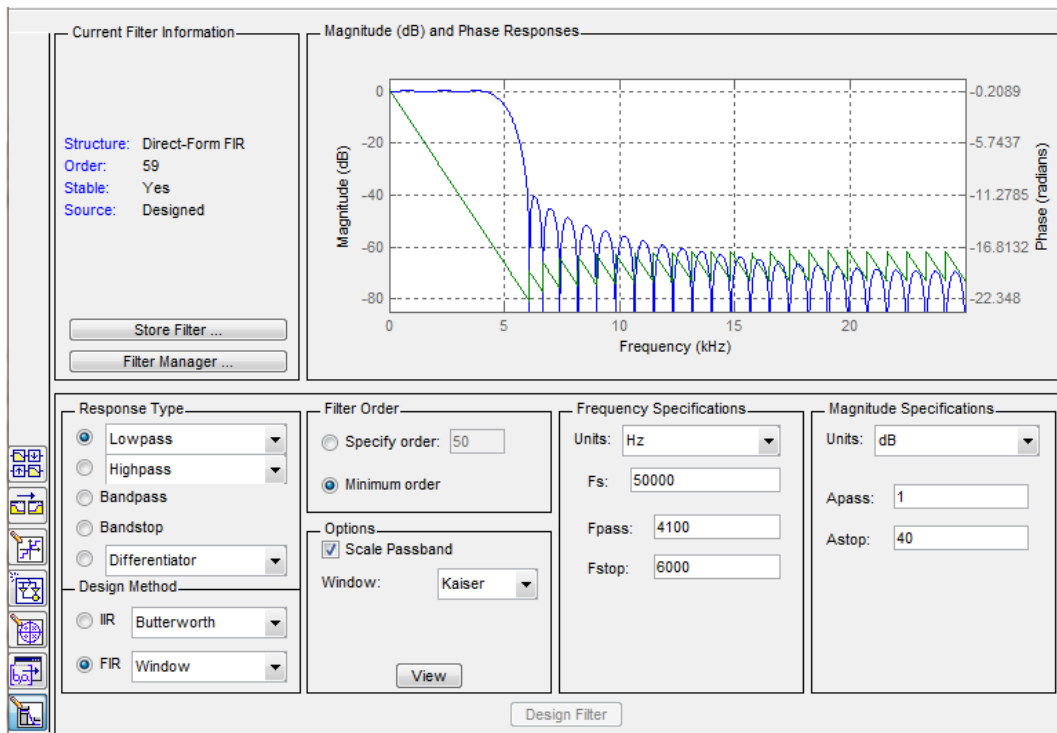


图 2.9 fdatool 数字低通滤波器设计界面

Fig. 2.9 Digital low pass filter design interface on fdatool

2.3.3.2 FIR滤波器的 DSP 实现

FIR 滤波器工作原理就是一个离散信号序列通过一个离散滤波系统，得到离散输出信号的过程，如果滤波系统的单位脉冲响应为 $h(n)$ ，信号序列为 $x(n)$ ，输出信号为 $y(n)$ ，则他们之间的运算关系式可表示如下：

$$y(n) = x(n) * h(n) = \sum_{m=0}^M h(m)x(n-m) \quad (2.1)$$

式 2.1 表示了 FIR 滤波器的输入信号与系统响应之间的关系，即为线性卷积运算。

一般有两种方式实现 FIR 滤波：直接卷积法和快速卷积法。直接卷积法是根据卷积的迭代运算直接计算输入信号序列与滤波器系数的卷积，得到滤波器输出信号，该方法运算关系简单，但耗时较长。

快速卷积法是利用时域的卷积等于频域的乘积的关系，将时域信号转换为频域信号，进行乘积运算之后再结果转换为时域信号而实现的。由于快速傅里叶变换（FFT）可以高效地将时域信号转换为频域信号，其运算的复杂度为 $O(N \cdot \log(N))$ ，因此三次 FFT 运算加一次乘积运算的总复杂度仍然为 $O(N \cdot \log(N))$ 级别，而卷积运算的复杂度为 $O(N \cdot N)$ 。所以快速卷积与直接卷积相比，虽然算法复杂了，但相同的点数下运算时间短，而且点数越多耗时就越短。

考虑到水分测量系统的实时性要求和三路锁相放大器运算对运算速度的要求，本文选择通过快速卷积法实现 FIR 滤波。

FFT 运算时假设其所计算的信号为周期信号，因此通过上述快速卷积法计算出的结果实际上是两个信号的循环卷积（或叫圆周卷积），而不是线性卷积。为了用 FFT 计算线性卷积，需要对信号进行补零扩展，使得其长度大于线性卷积结果的长度。在本课题中，如果低通滤波器的阶次为 300，而参与卷积的输入信号长度为 840 点，则需要将滤波器系数和输入信号长度均补零到至少 1139 个点，这将意味着 DSP 要做很多冗余的计算。为了有效地利用 FFT 计算卷积，可以使用分段卷积法（overlap-add 法）将信号分成若干段分别做卷积，其分段卷积过程如图 2.10 所示。

2.4 工业串口屏软件设计

本系统的人机交互采用组态串口触摸屏进行显示和按键等操作。当前工控领域 TFT 显示已成为发展趋势，传统的 1602、12864 以及数码管已经无法满足产品需求和用户体验。广州大彩光电科技有限公司推出的工业串口屏是集 TFT 显示驱动、图片字库存储、GUI 操作、RTC 显示及各种组态控件于一体的串口显示终端。用户单片机只需要发送相应的串口指令就可以轻松实现文本、图片和曲线显示。本课题采用了该公司生产的一款基本型工业串口屏——DC80480B070。

DC80480B070 能适应恶劣环境、强磁干扰和户外等工作场合。系统处理器采用 Cortex-M3+ 高速 FPGA 双核设计，ARM 主要进行协议解析和 USB 图片下载，FPGA 主要实现 Nandflash 的图片读取和 TFT 控制显示。内部结构如图 2.12 所示。

DSP 需要一个串口就能实现文本、GUI、图片、gif 动画显示和触摸控制等功能，支持多种常用组态控件：触摸控件、文本控件、进度条、滑动条和仪表控件等。设备内部有 4.7K 字节的指令缓存区，用户主机可无等待、连续发送多条指令后退出串口程序。整个过程操作简单，程序代码量大大降低。

操作时，用户首先利用配套的上位机 VisualTFT 软件，将预先设计好的美工图片

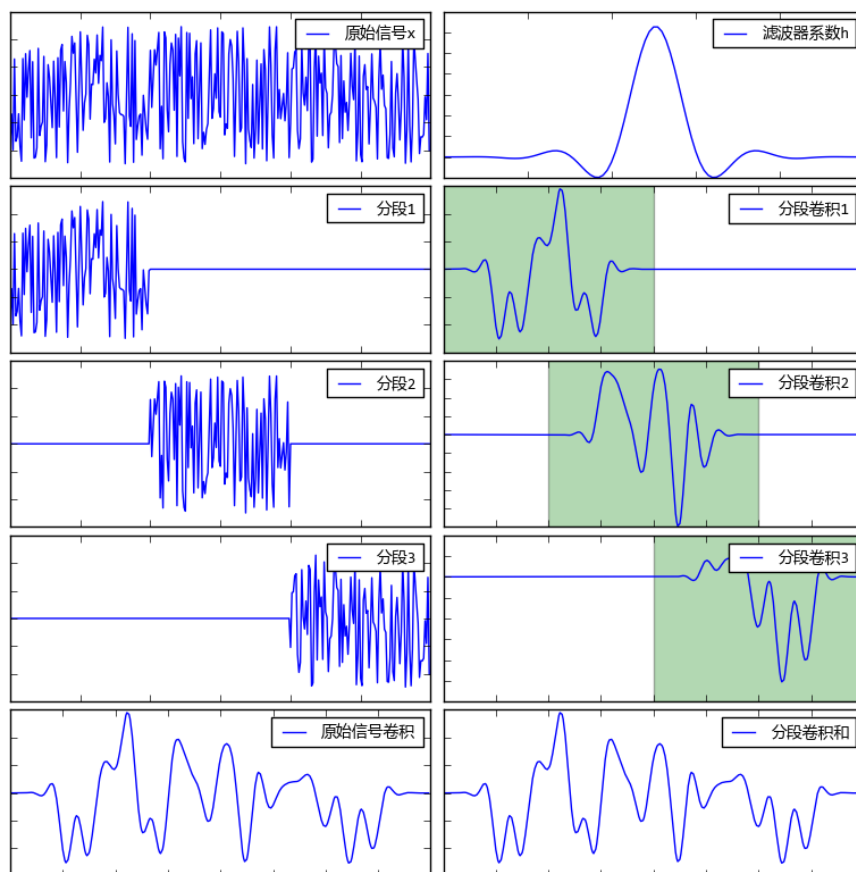


图 2.10 分段卷积过程演示图

Fig. 2.10 Demonstration of overlap-add process

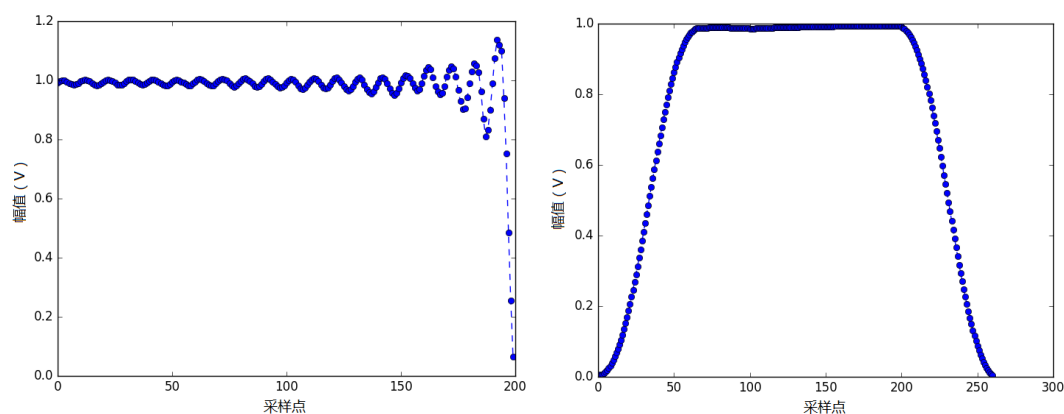


图 2.11 输入信号幅值图

Fig. 2.11 Useful signal amplitude of the signal to be measured

进行界面排版和控件配置，然后使用内置的“虚拟串口屏”进行模拟仿真，最后通过 UART 或 SD 卡方式将整个工程图片和配置信息下载到串口屏内部存储器中。下载之前，上位机将会对工程中的每个画面、图片和控件分配一个唯一的 ID。一旦触摸被按下，用户单片机串口就会收到屏幕上传的按钮 ID 值，通过解析 ID 值就可以判断当前

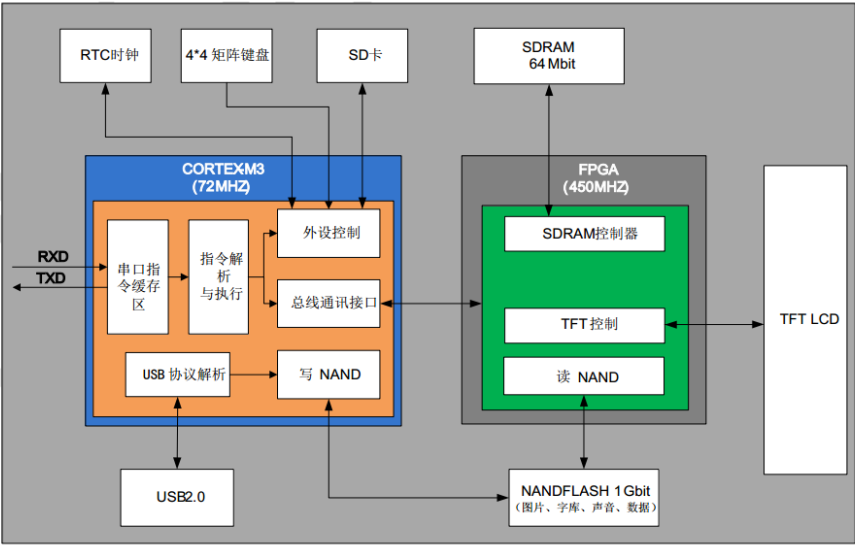


图 2.12 TFT 串口屏内部结构图

Fig. 2.12 TFT serial screen internal structure

哪个按钮被按下，然后发送相应的指令去控制画面的显示。

串口屏使用 VisualTFT 软件进行组态界面的设计，VisualTFT 串口屏配套的界面开发调试软件。用户新建工程后，导入设计好的美工图片，然后对每个画面中的按钮和其它控件进行配置，每一个页面和空间分配唯一的 ID。模拟仿真正确后，最后将整个工程下载到串口屏中。设备与 PC 连接成功后，可进行同步和调试显示。

本课题设计的界面分为六个界面，主界面如图5.6所示，用于显示实时水分值、探测器温度值和电机转速值。其余几个界面分别用于显示水分曲线、温度曲线和电机转速曲线、各通道的采样电压值以及设置参数。

2.5 本章小结

本章详细介绍了数据的采样与数字滤波处理。基于 STM32 单片机重新编写了软件程序，给出了各部分的程序流程图。对探测器的温度进行了控制，得出了温度控制曲线。简单介绍了工业组态串口屏，编写了组态界面以及程序，实现了文本显示、参数设置等人机交互。

