

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, 但并不能有效地提高 $f(T)$ 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 水分测量系统的硬件设计	5
2.1 硬件系统总体设计	5
2.2 硬件系统的基础性设计	6
2.2.1 系统电源设计	6
2.2.2 DSP最小系统设计	8
2.2.3 串口通信设计	9
2.3 光源信号驱动电路设计	10
2.3.1 激励信号发生器	10
2.3.2 恒流源驱动电路	11
2.4 模拟信号输入通道设计	11
2.4.1 信号放大电路	11
2.4.2 窄带带通滤波电路	11
2.5 模数转换电路设计	11
2.5.1 A/D芯片选型	11
2.5.2 A/D转换电路	11
2.6 温控电路设计	11
2.6.1 温度检测电路	11
2.6.2 半导体制冷电路	11
2.7 本章小结	11

参考文献	13
致谢	21

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 水分测量系统的硬件设计

本章主要围绕构成水分测量系统的硬件设计进行介绍。硬件电路主要包括 LED 光源的激励驱动信号的产生、模拟信号输入通道的设计、A/D 采集电路以及主控 DSP 控制器等部分。

2.1 硬件系统总体设计

本课题设计的水分测量系统主要由以下四部分组成：光源激励模块、信号处理模块、DSP 控制模块以及电源电路模块。其中信号处理模块由模拟信号处理模块和数字锁相放大器组成，数字锁相放大器由 DSP 微控制内部实现，所以硬件电路的实现上，信号处理模块主要是指模拟信号处理。硬件电路设计的主要功能是为 LED 光源提供激励信号，并对光电探测器接收到的电信号进行放大、滤波、采集等数据处理，并将采集到的信号传送到微控制器进行后续数据处理。硬件系统的整体结构框图如图 2.1 所示

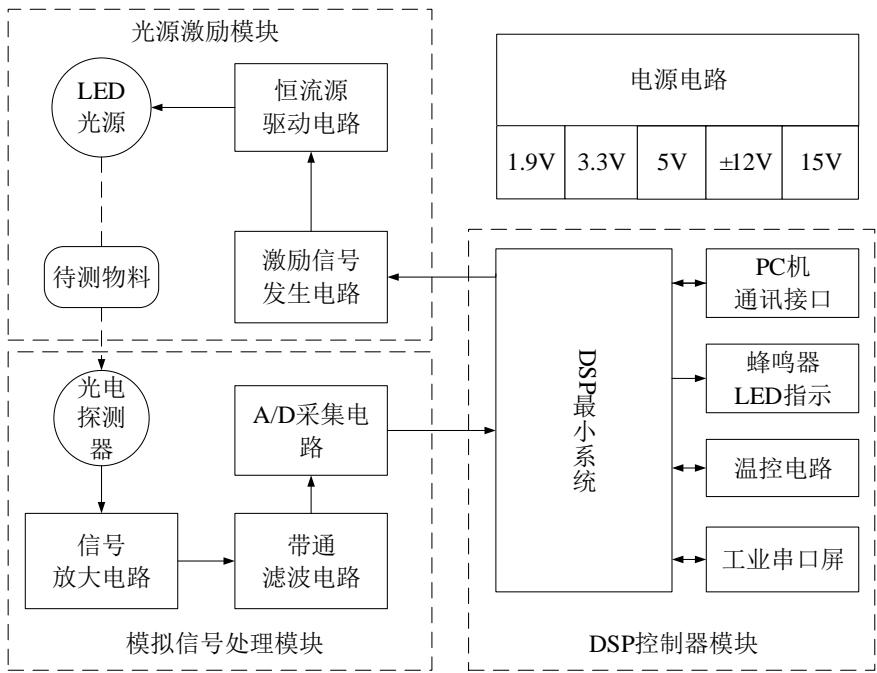


图 2.1 硬件电路总体框图

Fig. 2.1 The overall block diagram of the hardware circuit

下面将对以上各模块的工作过程做简单的阐述：

(1) 光源激励模块

该模块为 LED 光源提供正弦波激励信号，使 LED 光源能以固定频率的正弦激励照射到被测物的表面。标准的正弦波激励信号由 DSP 微处理器控制数字式频率合成器（DDS）芯片产生，再经过恒流源电路变成正弦电流激励供给 LED 光源。由于本课题

题采用了三波长测量手段,即一路测量波长和两路参比波长的光源同时照射被测物的表面,所以本文的光源激励硬件模块需要三路,分别给三路不同波长的光源提供同幅不同频的正弦波电流激励信号,本课题中三路激励信号的频率一次为 5kHz、6kHz 和 7kHz。

(2) 模拟信号处理模块

模拟信号处理电路包括信号放大电路和带通滤波电路。其中信号放大电路由两部分组成:低噪声前置放大器和次级放大器。从被测物表面反射回来的三路不同频率的光信号全部进入光电探测器后转化为电信号,但此时的有用信号非常微弱。为了得到满足后续 A/D 采样的电平范围要求,微弱的信号经过低噪声前置放大器和次级放大器进行信号放大,放大后的信号是三路不同频率正弦信号的叠加,再分别经过三路不同中心频率的窄带带通滤波器进行滤波,就得到了三路分离后的正弦波待测信号。本课题中这三路待测信号的频率依次为 5kHz、6kHz 和 7kHz,与提供的三路 LED 光源激励信号的频率相一致。将这三路待测信号全部通过 A/D 转换芯片进行模数转换后送入 DSP 微处理器,在 DSP 微处理器内部进行数字锁相放大器运算。所以该模块也是数字锁相放大器的信号输入通道。

(3) DSP 控制模块

DSP 微处理器是整个水分测量系统的控制核心,它不仅控制 DDS 芯片产生所需的正弦波信号,同时用于产生数字锁相放大器所需的参考信号序列,并与三路待测信号依次进行数字锁相放大器运算,从而得到待测信号的幅值,进一步计算得到被测物的水分含量。DSP 控制模块还包括 PC 通讯接口电路、蜂鸣器及 LED 指示电路、温控电路和工业串口屏接口电路。其中,PC 通讯接口电路和工业串口屏接口电路均采用串口通信原理,用于将测量得到的数据实时传输到上位机进行显示和存储。

(4) 电源电路模块

电源模块用于给硬件电路的不同模块提供稳定的电源,模拟部分主要是给恒流源、运算放大器等器件供电,数字部分主要是给 DSP 微处理器、DDS 芯片等数字器件供电。本课题根据模拟部分和数字部分的供电需求,设计了输出稳定、低纹波、低噪声的不同输出电压的电源。

2.2 硬件系统的基础性设计

2.2.1 系统电源设计

电源电路的设计是水分检测系统的重要部分,电源的性能影响着水分仪的稳定性和准确度。因此设计并制作高可靠性、高效率、低纹波的电源是十分必要的。根据表 2.1 所示的硬件电路供电需求,本课题设计了独立的电源电路板给整个系统供电,用以减少板级间电源的相互影响。

为了简化电源电路实际的复杂性,本课题选用了金升阳的 LH 系列 AC-DC 模块电

表 2.1 硬件电路电源需求

Table 2.1 Hardware circuit power demand

电源类型	电源电压	供电单元	参数需求
模拟	+15V	3 路恒流源电路	纹波小, 电流较大, 功率 > 9W
	±12V	运算放大器, A/D 芯片等模拟电路	纹波小, 噪声低, 功率 > 9.5W
	+5V	波形发生器, 线性稳压芯片	纹波小, 电流大, 功率 > 5W
	+3.3V	DSP 控制器模拟电源	电压稳定, 功率很小
	+1.9V	DSP 控制器模拟电源	
数字	+5V	有源晶振、电平转换等数字芯片	电压稳定, 功率很小
	+3.3V	DSP 控制器数字电源、测温电路等数字电路	
	+1.9V	DSP 控制器数字电源	

源, LH 系列电源模块输入电压范围为 85~264VAC, 50/60Hz, 输出电源稳定、低纹波、低噪声, 具有输出短路、过流和过温保护功能。该系列的电源模块只需要几个电容电阻就能实现 AC-DC 的精确输出, 各输出电压的功率也能满足本课题的要求。

其中, +15V 电源由型号为 LH10-B15 电源模块产生, 输出功率能达到 10W。而 ±12V 电源由型号为 LH10-10A12 电源模块产生, 输出功率能达到 10W, 模拟部分的 +5V 电源由型号为 LH05-10B05 电源模块产生, 输出功率也能达到 5W, 完全能满足本课题的供电需求。其余的电源电压, 如数字部分的 +5V 电源、模拟及数字部分的 +3.3V、+1.9V 电源均由模拟部分的 +5V 电源通过电感器件和线性稳压电源芯片转化而来。

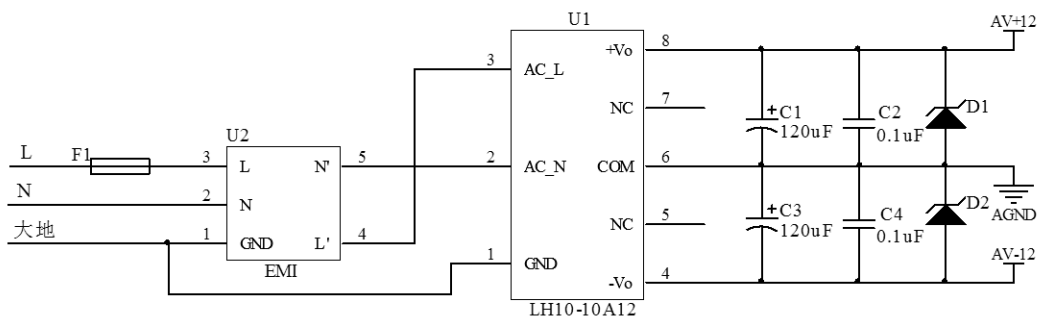


图 2.2 LH10-10A12 电源模块电路图

Fig. 2.2 The power supply circuit diagram about LH10-10A12

本文以 LH10-10A12 电源模块的电路原理图为例进行说明 (如图 2.2), 其他电源模块的电路原理图类似。图中 F1 为保险丝管, 对电路具有过流保护的作用。U1 为电源模块, U2 是型号为 FC-LX1D 的 EMI 滤波模块, 通过在电源模块的输入端安装 EMI 滤波模块, 可以提高仪器的抗电磁干扰能力, 减少外界对近红外水分仪的干扰, 保障水分仪的正常工作^[7]。D1、D2 为瞬变电压抑制二极管, 它是一种高性能的电路保护器

件，具有承受瞬间大电流的能力，当电路中有瞬变电压发生时，瞬变电压抑制二极管能够快速响应，耗散很大的瞬变电流，使电路电压箝位于低电压上，从而保护后面的电路。

本课题中数字电路的核心是主控芯片 TMS32F28335 处理器。为满足该 DSP 芯片内部功能模块的不同供电需求，设计了幅值为 3.3V 和 1.9V 的数字电源和模拟电源两种。数字电源电路采用了 DSP 专用电源芯片 PS767D301，能够同时输出两种电压，一路固定输出 3.3V，一路可以在 1.5V-5.5V 范围内调整。

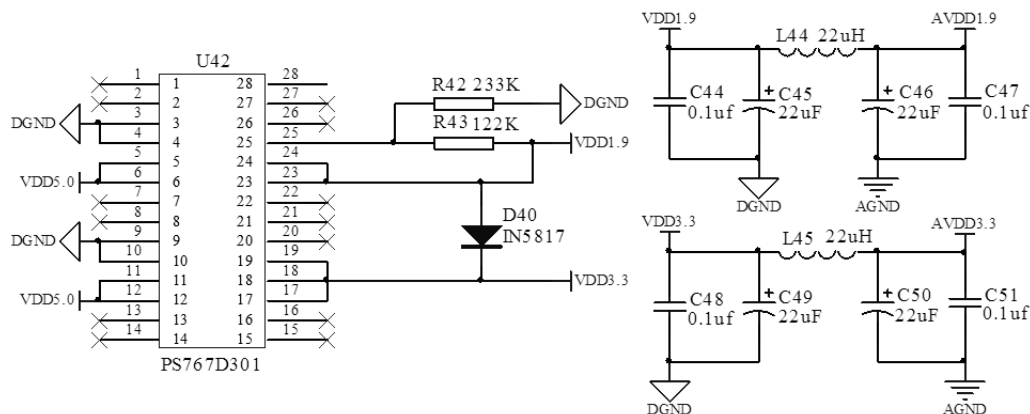


图 2.3 3.3V和1.9V电源电路图

Fig. 2.3 The 3.3V and 1.9V power supply circuit

3.3V 和 1.9V 电源电路原理如图 2.3 所示。两个输入端均接入数字部分的 5V 电压，第 2 路输出的电压为 3.3V，第一路输出的电压通过电阻 R42 和 R43 分压反馈到 24 引脚，使得输出电压稳定在 1.9V，这样便得到数字电源 3.3V 和 1.9V。再分别通过电感 L44 和 L45 得到模拟电源 3.3V 和 1.9V。C44–C51 均为滤波电容， $0.1\mu\text{F}$ 电容可以滤除高频干扰， $22\mu\text{F}$ 电容可以滤除低频干扰，使得电源能够稳定输出。

2.2.2 DSP最小系统设计

为了提高系统的处理速度，处理精度以及满足本系统要求的高速数字信号处理，本课题选用由 TI 公司推出的一款浮点型数字信号处理器 TMS320F28335DSP。

TMS320F000 系列 DSP 融合了控制外设的集成功能与微处理器（MCU）的易用性，具有强大的控制和信号处理能力以及 C 语言编程效率。TMS320F28335 是在已有的 DSP 平台上增加了浮点运算内核，能执行复杂的浮点运算，可以节省代码执行时间和存储空间，具有精度高、成本低、功耗小、外设集成度高、数据和程序存储量大等优点，可以为嵌入式工业应用提供更加优秀的性能和更加高效的软件设计。TMS320F28335 的主要特点总结如下：

(1) 高性能静态 CMOS 技术：主频可达 150MHz,指令周期为 6.67ns；内核电压为 1.9V，I/O 硬件电压为 3.3V。

(2) 高性能的 32 位 CPU：具有单精度浮点运算单元 (FPU)， 16×16 位和 32×32 位乘法累加操作，两个 16×16 位乘法累加器。能够快速执行中断响应，具有统一的寄存器编程模式。

(3) 哈佛流水线总线结构：程序存储器和数据存储器互相独立，可进行独立编址和访问。并允许数据在程序空间和数据空间互相传送。可用

(4) 片内存储：256K × 16 的 Flash 存储器，34K × 16 的 SARAM，以及 1K × 16 的 OPT（一次性可编程）ROM。

(5) 先进的仿真功能：支持 JTAG 实时在线仿真和边界扫描，具有分析和断点功能，能够硬件实时调试。

TMS320F28335 能够运行的最小系统包括以下几个部分：电源电路、晶振电路、JTAG 接口电路、看门狗及复位电路等构成。系统框图如图 2.4 所示。

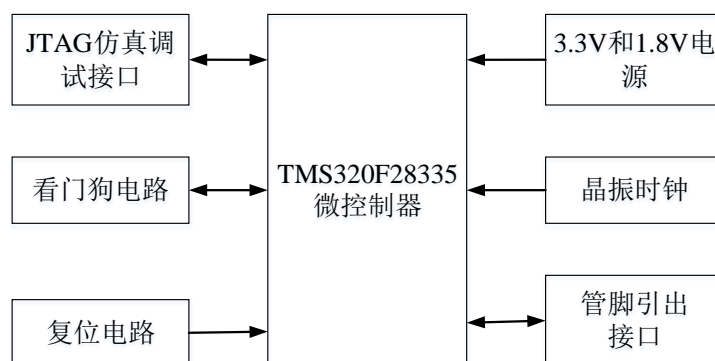


图 2.4 TMS320F28335 最小系统框图

Fig. 2.4 The minimum system block diagram on TMS320F28335

其中，3.3V 和 1.9V 电源电路在上一小结中已经介绍过，采用 TI 公司专用的 LDO 芯片即获得了满足微控制器双电压供电和功耗的要求的输出电压。本课题采用 30MHz 晶振提供系统时钟，可获得最高 150MHz 的 CPU 主频，JTAG 接口电路、看门狗及复位电路采用经典的电路连接方式，在此不再赘述。

2.2.3 串口通信设计

本课题设计了两路 RS232 串口通信接口，分别与上位机和工业触摸屏进行实时的数据交换。PC 上位机用于远端接收水分检测系统传输回来的历史数据，并在上位机软件进行显示和存储。工业触摸屏用于工业现场的实时水分数据的显示、水分测量系统的标定以及校正操作。

TMS320F28335DSP 芯片内部有三个全双工 UART 通讯接口，因此可以使用其中的两个来分别与上位机和工业触摸屏进行通信。通信电路如图 reffig44 所示，使用 MAX3232 芯片完成 TTL 电平与 RS232 电平的转换^[1]。01 通道连接工业触摸屏，02 通

道连接上位机进行串口通信。

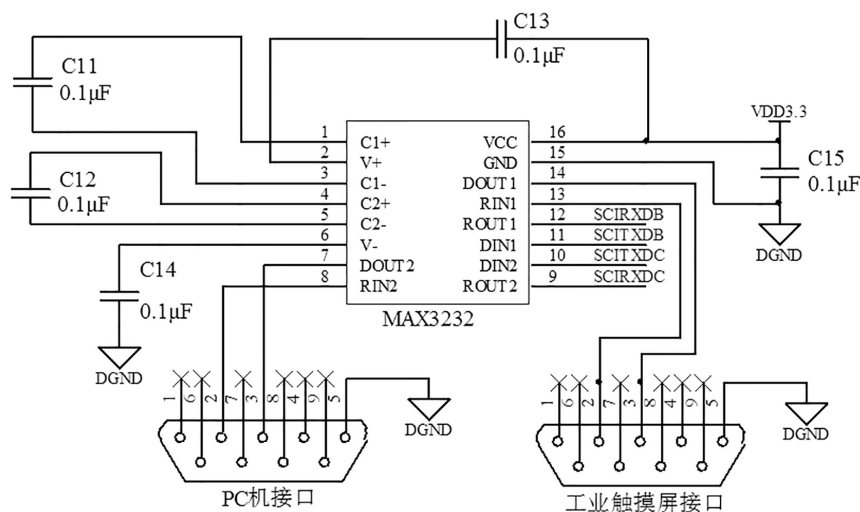


图 2.5 通信电路

Fig. 2.5 The communication circuit

2.3 光源信号驱动电路设计

光源驱动电路为近红外 LED 光源提供精密稳定按正弦规律变化的驱动电流，LED 光源的工作电压低，效率高。驱动电流过大会损坏电源，过低又会降低光源发出的光强。驱动电路不稳定也会影响到水分仪的测量精度，因此光源驱动电路的设计对整体系统的实现至关重要。

2.3.1 激励信号发生器

本课题三路光源分别采用 5kHz、6kHz 和 7kHz 频率的正弦信号调制。光电传感器检测到的信号经过电路中不同窄带通滤波器得到三路不同的信号。本课题中的正弦激励信号是由 AD9833 信号发生器芯片产生的，AD9833 是 ADI 公司生产的一款低功耗、可编程波形发生器，能够产生正弦波、三角波、方波输出。波形发生器广泛应用于各种测量、激励和时域响应领域。AD9833 的输出频率和相位都可通过软件编程设置，易于调节。主频时钟为 25MHz 时，精度为 0.1Hz；主频时钟为 1MHz 时，精度可以达到 0.004Hz。

ADA9833 是一块完全集成的 DDS 电路，仅需要一个外部参考时钟，一个低精度电阻器和一个解耦电容器就能产生高达 12.5MHz 的波形输出。其硬件电路如图 2.6 所示。

DSP 微控制器通过三线制 SCI 通信方式对 AD9833 的输出频率进行控制，其外部参考时钟由频率为 1MHz 的有源晶振生产。AD9833 的输出信号的峰峰值的典型值为 0.6V，而且是双极性波形，不能满足驱动后续恒流源电路的设计要求，所以在 AD9833 的波形输出端设计了一个 RC 低通滤波器，将双极性波形转换为单极性波形。

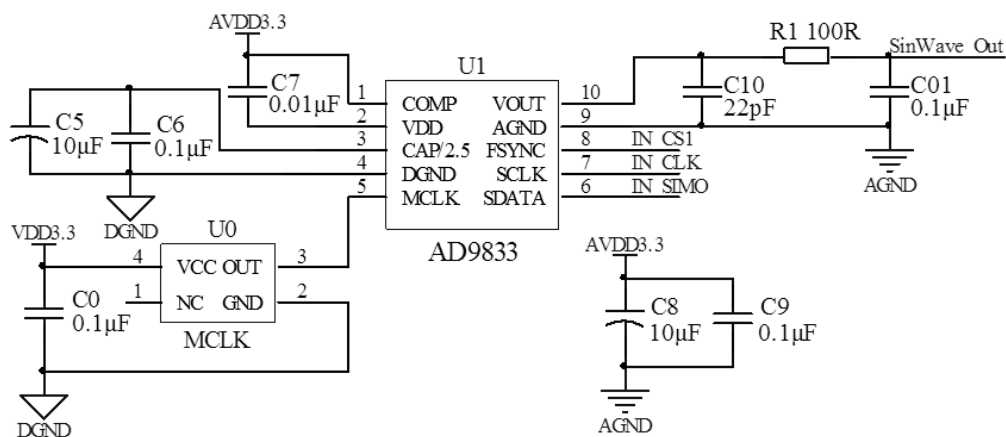


图 2.6 正弦波发生器电路

Fig. 2.6 Sine wave generator circuit

由于本课题需要的三种不同频率的正弦激励信号，而每路正弦波发生电路只能产生一种固定频率的正弦信号，所以在硬件电路的实际上，本课题分别设计了三路相对独立的正弦波发生电路用来输出不同频率的周期信号。其中，三路 AD9833 共用同一个外部有源晶振以及 SCI 的数据线和时钟线接口，DSP 通过控制 AD9833 的片选信号线对三路 AD9833 进行选通。同样的道理，三路 AD9833 的波形输出也将分别独立的进入到后续的信号放大电路和恒流源电路中。

2.3.2 恒流源驱动电路

2.4 模拟信号输入通道设计

2.4.1 信号放大电路

2.4.2 窄带带通滤波电路

2.5 模数转换电路设计

2.5.1 A/D芯片选型

2.5.2 A/D转换电路

2.6 温控电路设计

2.6.1 温度检测电路

2.6.2 半导体制冷电路

2.7 本章小结

参考文献

1. Perlmutter S, Aldering G, Goldhaber G, et al. Measurements of Ω and Λ from 42 high-redshift supernovae[J]. The Astrophysical Journal, 1999, 517(2): 565-586.
2. Riess A G, Filippenko A V, Challis P, et al. Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant [J]. The Astronomical Journal, 1998, 116(3): 1009-1038.
3. Spergel D N, et al. [WMAP Collaboration], First year Wilkinson microwave anisotropy probe (WMAP) observations: determination of cosmological parameters [J]. Astrophysical Journal Supplement Series, 2003, 148(1): 175-194.
4. Bennett C L, et al. First year Wilkinson microwave anisotropy probe (WMAP) observations: preliminary maps and basic results [J]. Astrophysical Journal Supplement Series, 2003, 148(1): 1-27.
5. Tegmark M, Strauss M A, Blanton M R, et al. Cosmological parameters from SDSS and WMAP [J]. Physical Review D, 2004, 69(10): 103501.
6. Abazajian K, Adelman-McCarthy J K, Agüeros M A, et al. The second data release of the sloan digital sky survey [J]. The Astronomical Journal, 2004, 128(1): 502-512.
7. Sahni V and Starobinsky A A. The case for a positive cosmological lambda-term [J]. International Journal of Modern Physics D, 2000, 9(4): 373-443.
8. Padmanabhan T. Cosmological constant-the weight of the vacuum [J]. Physics Reports, 2003, 380(5): 235-320.
9. Peebles P J E, Ratra B. The cosmological constant and dark energy [J]. Reviews of Modern Physics, 2003, 75(2): 559-606.
10. Copeland E J, Sami M, Tsujikawa S. Dynamics of dark energy [J]. International Journal of Modern Physics D, 2006, 15(11): 1753-1935.
11. Sahni V, Starobinsky A. Reconstructing dark energy [J]. International Journal of Modern Physics D, 2006, 15(12): 2105-2132.
12. Friedman J, Turner M and Huterer D. Dark energy and the accelerating universe [J]. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 2008, 46: 385-432.
13. Li M, Li X D, Wang S and Wang Y. Dark energy [J]. Communications in Theoretical Physics, 2011, 56(6): 525-562.
14. Bamba K, Capozziello S, Nojiri S, et al. Dark energy cosmology: the equivalent description via different theoretical models and cosmography tests [J]. Astrophysics and Space Science, 2012, 342(1): 155-228.

15. Weinberg D H, Mortonson M J, Eisenstein D J, et al. Observational probes of cosmic acceleration [J]. Physics Reports, 2013, 530(2): 87-255.
16. Mortonson M J, Weinberg D H, White M. Dark energy: a short review [J]. arXiv preprint arXiv:1401.0046, 2013.
17. Sahni V, Habib S. Does Inflationary Particle Production Suggest $m < 1$? [J]. Physical Review Letters, 1998, 81: 1766.
18. Parker L, Raval A. Nonperturbative effects of vacuum energy on the recent expansion of the universe [J]. Physical Review D, 1999, 60: 063512.
19. Dvali G, Gabadadze G, Porrati M. 4D gravity on a brane in 5D Minkowski space [J]. Physics Letters B, 2000, 485(1): 208-214.
20. Deffayet C, Dvali G, Gabadadze G. Accelerated universe from gravity leaking to extra dimensions [J]. Physical Review D, 2002, 65(4): 44023.
21. Nojiri S, Odintsov S D, Sasaki M. Gauss-Bonnet dark energy [J]. Physical Review D, 2005, 71: 123509.
22. Nicolis A, Rattazzi R, Trincherini E. Galileon as a local modification of gravity [J]. Physical Review D, 2009, 79: 064036.
23. Hu W, Sawicki I. Models of $f(R)$ cosmic acceleration that evade solar system tests [J]. Physical Review D, 2007, 76: 064004.
24. Starobinsky A A. Disappearing cosmological constant in $f(R)$ gravity [J]. Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters, 2007, 86: 157.
25. Bengochea G R, Ferraro R. Dark torsion as the cosmic speed-up [J]. Physical Review D, 2009, 79(12): 124019.
26. Linder E V. Einstein's Other Gravity and the Acceleration of the Universe [J]. Physical Review D, 2010, 81(12): 127301.
27. Harko T, Lobo F S N, Nojiri S, Odintsov S D. $f(R,T)$ gravity [J]. Physical Review D, 2011, 84: 024020.
28. Jimenez R, Loeb A. Constraining cosmological parameters based on relative galaxy ages [J]. The Astrophysical Journal, 2002, 573(1): 37-42.
29. Peebles P J E. Statistical analysis of catalogs of extragalactic objects. I. Theory [J]. The Astrophysical Journal, 1973, 185: 413-440.
30. Jimenez R, Verde L, Treu T, et al. Constraints on the Equation of State of Dark Energy and the Hubble Constant from Stellar Ages and the Cosmic Microwave Background [J]. Astrophysical Journal, 2003, 593(2): 622-629.

31. Gaztanaga E, Cabré A, Hui L. Clustering of luminous red galaxies - IV. Baryon acoustic peak in the line-of-sight direction and a direct measurement of $H(z)$ [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2009, 399(3): 1663-1680.
32. Stern D, Jimenez R, Verde L, et al. Cosmic chronometers: constraining the equation of state of dark energy. I: $H(z)$ measurements [J]. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2010, 2010(02): 008.
33. Moresco M, Cimatti A, Jimenez R, et al. Improved constraints on the expansion rate of the Universe up to $z \sim 1.1$ from the spectroscopic evolution of cosmic chronometers [J]. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2012, 2012(08): 006.
34. Blake C, Brough S, Colless M, et al. The WiggleZ Dark Energy Survey: Joint measurements of the expansion and growth history at $z < 1$ [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2012, 425(1): 405-414.
35. Chuang C H, Wang Y. Modeling the anisotropic two-Point galaxy correlation function on small scales and single-probe measurements of $H(z)$, $D_A(z)$, and $f(z)$ and $\sigma_8(z)$ from the Sloan Digital Sky Survey DR7 luminous red galaxies [J]. Monthly notices of the royal astronomical society, 2013, 435(1): 255-262.
36. Busca N G, et al. Baryon acoustic oscillations in the Lyman- α forest of BOSS quasars [J]. Astronomy Astrophysics, 2013, 552: A96.
37. Anderson L, Aubourg E, Bailey S, et al. The clustering of galaxies in the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: measuring D_A and H at $z = 0.57$ from the baryon acoustic peak in the Data Release 9 spectroscopic Galaxy sample [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2014, 439(1), 83-101.
38. Font-Ribera A, Kirkby D, Miralda-Escudé J, et al. Quasar-Lyman α forest cross-correlation from BOSS DR11: Baryon Acoustic Oscillations [J]. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2014, 2014(05): 027.
39. Anderson L, Aubourg é, Bailey S, et al. The clustering of galaxies in the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: baryon acoustic oscillations in the Data Releases 10 and 11 Galaxy samples [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2014, 441(1): 24-62.
40. Zhang C, Zhang H, Yuan S, et al. Four new observational $H(z)$ data from luminous red galaxies in the Sloan Digital Sky Survey data release seven [J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2014, 14(10): 1221-1233.
41. Delubac T, Bautista J E, Rich J, et al. Baryon Acoustic Oscillations in the Lyman- α forest of BOSS DR11 quasars [J]. Astronomy Astrophysics, 2015, 574: A59.

42. Moresco M. Raising the bar: new constraints on the Hubble parameter with cosmic chronometers at $z \sim 2$ [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 2015, 450(1): L16-L20.
43. Sandage A. The Change of Redshift and Apparent Luminosity of Galaxies due to the Deceleration of Selected Expanding Universes [J]. The Astrophysical Journal, 1962, 136: 319.
44. Loeb A. Direct measurement of cosmological parameters from the cosmic deceleration of extragalactic objects [J]. The Astrophysical Journal Letters, 1998, 499(2): L111-L114.
45. Balbi A, Quercellini C. The time evolution of cosmological redshift as a test of dark energy [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2007, 382(4): 1623-1629.
46. Zhang H B, Zhong W H, Zhu Z H and He S. Exploring holographic dark energy model with Sandage-Leob test [J]. Physical Review D, 2007, 76: 123508.
47. Zhang J, Zhang L, Zhang X. Sandage - Loeb test for the new agegraphic and Ricci dark energy models [J]. Physics Letters B, 2010, 691(1): 11-17.
48. Martinelli M, Pandolfi S, Martins C, et al. Probing dark energy with redshift drift [J]. Physical Review D, 2012, 86(12): 123001.
49. Zhang M J, Liu W B. Observational constraint on the interacting dark energy models including the Sandage - Loeb test [J]. The European Physical Journal C, 2014, 74(5): 1-12.
50. Geng J J, Zhang J F, Zhang X. Quantifying the impact of future Sandage-Leob test data on dark energy constraints [J]. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2014, 2014(07): 006.
51. Geng J J, Zhang J F, Zhang X. Parameter estimation with Sandage-Leob test [J]. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2014, 2014(12): 018.
52. Yuan S, Zhang T J. Breaking through the high redshift bottleneck of Observational Hubble parameter Data: The Sandage-Leob signal Scheme [J]. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2015, 2015(02): 025.
53. Geng J J, Li Y H, Zhang J F, et al. Redshift drift exploration for interacting dark energy [J]. The European Physical Journal C, 2015, 75(8): 1-6.
54. Peebles P J E, Ratra B. Cosmology with a time-variable cosmological'constant [J]. The Astrophysical Journal, 1988, 325: L17-L20.

55. Ratra B, Peebles P J E. Cosmological consequences of a rolling homogeneous scalarfield [J]. Physical Review D, 1988, 37(12): 3406-3427.
56. Wetterich C. Cosmology and the fate of dilatation symmetry [J]. Nuclear Physics B, 1988, 302(4): 668-696.
57. Zlatev I, Wang L M, Steinhardt P J. Quintessence, cosmic coincidence, and the cosmological constant [J]. Physical Review Letters, 1999, 82(5): 896-899.
58. Caldwell R R, Dave R, Steinhardt P J. Cosmological Imprint of an Energy Component with General Equation of State [J], Physical Review Letters, 1998, 80: 1582-1585.
59. Caldwell R R, Kamionkowski M, Weinberg N N. Phantom energy and cosmic doomsday [J]. Physical Review Letters, 2003, 91(7): 071301.
60. Caldwell R R. A phantom menace? Cosmological consequences of a dark energy component with super-negative equation of state [J]. Physics Letters B, 2002, 545(1-2): 23-29.
61. Carroll S M, Hoffman M, Trodden M. Can the dark energy equation-of-state parameter $w < -1$? [J]. Physical Review D, 2003, 68: 023509.
62. Zhang X. Can the universe fragment into many independent causal patches at turnaround in cyclic cosmology? [J]. The European Physical Journal C, 2009, 59(4): 755-759.
63. Zhang X. Can black holes be torn up by phantom dark energy in cyclic cosmology? [J]. The European Physical Journal C, 2009, 60(4): 661-667.
64. Li X D, Wang S, Huang Q G, Zhang X, Li M. Dark energy and fate of the universe [J]. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 2012, 55(7): 1330-1334.
65. Feng B, Wang X L, Zhang X M. Dark energy constraints from the cosmic age and supernova [J]. Physics Letters B, 2005, 607(1): 35-41.
66. Guo Z K, Piao Y S, Zhang X M, Zhang Y Z. Cosmological evolution of a quintom model of dark energy [J]. Physics Letters B, 2005, 608(3): 177-182.
67. Li M. A model of holographic dark energy [J]. Physics Letters B, 2004, 603(1): 1-5.
68. Cai R G. A dark energy model characterized by the age of the universe [J]. Physics Letters B, 2007, 657(4): 228-231.
69. Wei H, Cai R G. A new model of agegraphic dark energy [J]. Physics Letters B, 2008, 660(3): 113-117.
70. Gao C, Wu F, Chen X, et al. Holographic dark energy model from Ricci scalar curvature [J]. Physical Review D, 2009, 79(4): 043511.

71. Deffayet C, Dvali G, Gabadadze G. Accelerated universe from gravity leaking to extra dimensions [J]. *Physical Review D*, 2002, 65(4): 044023.
72. Sahni V, Shtanov Y. Braneworld models of dark energy [J]. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2003, 03(11): 014.
73. Kamenshchik A, Moschella U, Pasquier V. An alternative to quintessence [J]. *Physics Letters B*, 2001, 511(2): 265-268.
74. Bento M C, Bertolami O, Sen A A. Generalized Chaplygin gas, accelerated expansion, and dark-energy-matter unification [J]. *Physical Review D*, 2002, 66(4): 043507.
75. Chevallier M, Polarski D. Accelerating universes with scaling dark matter [J]. *International Journal of Modern Physics D*, 2001, 10(02): 213-223.
76. Linder E V. Exploring the expansion history of the universe [J]. *Physical Review Letters*, 2003, 90(9): 091301.
77. Huang Q G, Li M. Anthropic principle favours the holographic dark energy [J]. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2005, 2005(03): 001.
78. Zhang J F, Zhao M M, Cui J L, et al. Revisiting the holographic dark energy in a non-flat universe: alternative model and cosmological parameter constraints [J]. *The European Physical Journal C*, 2014, 74(11): 1-8.
79. Hubble E. A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1929, 15(3): 168-173.
80. Hubble E, Humason M L. The velocity-distance relation among extra-galactic nebulae[J]. *The Astrophysical Journal*, 1931, 74: 43.
81. Lewis A, Bridle S. Cosmological parameters from CMB and other data: A Monte Carlo approach [J]. *Physical Review D*, 2002, 66(10): 103511.
82. Conley A, Guy J, Sullivan M, et al. Supernova constraints and systematic uncertainties from the first three years of the Supernova Legacy Survey [J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2011, 192(1): 1.
83. Ade P A R, Aghanim N, Alves M I R, et al. Planck 2013 results. I. Overview of products and scientific results[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2014, 571: A1.
84. Wang Y, Wang S. Distance priors from Planck and dark energy constraints from current data [J]. *Physical Review D*, 2013, 88(4): 043522.
85. Ade P A R, Aghanim N, Arnaud M, et al. Planck 2015 results. XIV. Dark energy and modified gravity [J]. *arXiv preprint arXiv:1502.01590*, 2015.

86. Beutler F, et al. The 6dF Galaxy Survey: Baryon Acoustic Oscillations and the Local Hubble Constant [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2011, 416: 3017.
87. Padmanabhan N, Xu X, Eisenstein D J, Scalzo R, Cuesta A J, Mehta K T, Kazin E. A 2 percent distance to $z=0.35$ by reconstructing baryon acoustic oscillations - I. Methods and application to the Sloan Digital Sky Survey [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2012, 427(3): 2132.
88. Anderson L, et al. The clustering of galaxies in the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Baryon Acoustic Oscillations in the Data Release 9 Spectroscopic Galaxy Sample [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2013, 427(4): 3435.
89. Blake C, et al. The WiggleZ Dark Energy Survey: Joint measurements of the expansion and growth history at $z < 1$ [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2012, 425: 405.
90. Riess A G, Macri L, Casertano S, et al. A 3% solution: determination of the Hubble constant with the Hubble Space Telescope and wide field camera 3 [J]. The Astrophysical Journal, 2011, 730(2): 119.
91. Quercellini C, Amendola L, Balbi A, et al. Real-time cosmology [J]. Physics Reports, 2012, 521(3): 95-134.
92. Komatsu E, et al. [WMAP Collaboration]. Five-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Cosmological Interpretation [J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2009, 180(2): 330-376.
93. Komatsu E, Smith K M, Dunkley J, et al. Seven year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Cosmological Interpretation [J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2011, 192(2): 18.
94. Geng J J, Li Y H, Zhang J F, et al. Redshift drift exploration for interacting dark energy [J]. The European Physical Journal C, 2015, 75(8): 1-6.
95. Liske J, Grazian A, Vanzella E, et al. Cosmic dynamics in the era of Extremely Large Telescopes [J]. Monthly notices of the royal astronomical society, 2008, 386(3): 1192-1218.
96. Boyle L A, Caldwell R R, Kamionkowski M. Spintessence! New models for dark matter and dark energy [J]. Physics Letters B, 2002, 545(1): 17-22.
97. Armendariz-Picon C, Damour T, Mukhanov V. k-Inflation [J]. Physics Letters B, 1999, 458(2): 209-218.

98. Zhang X, Wu F Q, Zhang J. New generalized Chaplygin gas as a scheme for unification of dark energy and dark matter [J]. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2006, 2006(01): 003.
99. Geng J J, Guo R Y, He D Z, et al. Redshift drift constraints on $f(T)$ gravity [J]. Frontiers of Physics, 2015, 10(5): 1-6.
100. Chen Y, Ratra B. Hubble parameter data constraints on dark energy [J]. Physics Letters B, 2011, 703(4): 406-411.
101. Farooq O, Ratra B. Constraints on dark energy from the Lyman- α forest baryon acoustic oscillations measurement of the redshift 2.3 Hubble parameter [J]. Physics Letters B, 2013, 723(1): 1-6.
102. Miralda-Escude J. Comment on the claimed radial BAO detection by Gaztanaga, et al [J]. arXiv preprint arXiv:0901.1219, 2009.
103. Kazin E A, Blanton M R, Scoccimarro R, et al. Regarding the line-of-sight baryonic acoustic feature in the Sloan Digital Sky Survey and Baryon Oscillation Spectroscopic Survey luminous red galaxy samples [J]. The Astrophysical Journal, 2010, 719(2): 1032-1044.
104. CabréA, Gaztanaga E. Have baryonic acoustic oscillations in the galaxy distribution really been measured? [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 2011, 412(1): L98-L102.
105. Chen Y, Geng C Q, Cao S, et al. Constraints on ϕ CDM model from strong gravitational lensing and updated Hubble parameter measurements [J]. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2015, 2015(02): 010.
106. Sahni V, Shafieloo A, Starobinsky A A. Model-independent evidence for dark energy evolution from baryon acoustic oscillations [J]. The Astrophysical Journal Letters, 2014, 793(2): L40.
107. Corasaniti P S, Huterer D, Melchiorri A. Exploring the dark energy redshift desert with the Sandage-Loeb test [J]. Physical Review D, 2007, 75(6): 062001.
108. Maor I, Brustein R, Steinhardt P J. Limitations in using luminosity distance to determine the equation of state of the universe [J]. Physical Review Letters, 2001, 86(1): 6-9.

致 谢

转眼间，两年的悠悠岁月已如同手中紧抓的沙子，无声无息的流失。2014年9月10日我怀着对东大这所名校的向往，对自我人生的无比希望踏上了东北这块肥沃的土地。往事似乎昨日情景，历历在目。而今却不得不承认，在这块土地上我已真真切切度过了两年之久。两年的研究生生活让我思索了许多，学到了许多，也成长了许多。此刻，对于这一切的一切，我的心中除了感激还是感激。

感谢我的恩师——张鑫教授。无论是在科研方面还是生活中，张老师都极具人格魅力。作为人师，张老师在培养学生方面有其独到的风格。张老师特别注重学生的培养，还记得研一刚来时，我对自己的研究方向不是很了解，也不怎么感兴趣，总是抱着敷衍的态度去完成一些工作。然而张老师认为“兴趣是最好的老师”，于是总会挤时间给我们讲一些比较前沿，励志的内容，从各个方面激发我们的兴趣。他常跟我们说年轻就是资本，而我們不该随便荒废自己手中的资本，将大把的青春浪费掉。日复一日，年复一年，张老师的付出，我们看在眼里，记在心里。张老师常吝于言敏于行，寥寥数语却总能醍醐灌顶，用无声的行动来展示治学为人的五彩哲学，他用严谨治学扎实研究的实践来诠释靛青般深厚的学术态度，用火红热情的赤诚之心来教育我们待人接物之道，用黄色雏菊般温暖关爱的教学方式让我们有了家庭式的幸福感，用有如蓝天般广褒宽容的胸襟来提点我们如何笑面生活，正视挫败，用青春活力积极乐观的绿色生活来告诉我们快乐其实可以随时随地。因此，作为他的学生，我们崇拜之余更多的是感激之情和不断努力的决心。同时也特别感谢我的师母——张敬飞老师。张敬飞老师是一位特别亲切的老师，她就像一个大姐姐一样细腻地关心着我们每一个人。在我们组这个小团体里，她总能给我们一种亲人的感觉，让我们在科研之余感受家的温暖。在此，我特别祝福张老师和师母身体健康，万事如意。

感谢同组的崔晶磊老师。在崔老师的身上，我学到了什么是对工作认真的态度，什么是无怨无悔的付出。无论是在生活上还是学习上，崔老师对我们每一位学生都非常关心。她的认真细致、严谨执着令我们十分敬仰。此外，我也特别感谢耿佳佳师姐，李云鹤师兄和赵明明师姐。我的第一个工作就是在耿佳佳师姐的帮助下完成的。尽管师姐平时很忙，但对于我的求助她总会耐心的回答并给出真诚的建议。在她的帮助下，我很快掌握了一些基本的技术并了解了一些相关的知识。因此，耿佳佳师姐也算是我科研路上的一位启蒙老师。我十分感谢李云鹤师兄对我工作中的帮助。师兄的机智与博学深深地令我敬仰，也是我们一直追逐的榜样。还有赵明明师姐，她的刻苦认真，孜孜不倦深深地感染着我们每一位学弟学妹。在她的身上，我意识到我应该比付出的努力还要努力。

感谢亚利桑那大学的 Fulvio melia 教授和美国堪萨斯州立大学的 Bharat Ratra 教授在我论文写作中给出的宝贵建议。同时，我也十分感谢东北大学理学院的各位老师，

是你们的热情让我感受到深深地师生情谊与东大深厚的校园文化。

感谢我的朋友贾敏，迟晓丹，以及 407 实验室的小伙伴们，是你们让我感受到了家庭的温暖，让我体味到了团结的力量，或许明天我们将会各自天涯，但我相信总有那么一根感情线牵引着我们，让我们彼此不会疏远；同时，还要感谢我的学习搭档：许跃耀和何东泽，是你们的陪伴让我觉得自己不是在孤军奋战。

最后，我要感谢我的父母，是他们的爱与支持让我一直顺利地走到今天。还有我特别感谢我的弟弟，弟妹以及可爱的侄女，是他们替我承担起了照顾父母的责任，同时给了我依靠，使我可以专心求学，轻松生活。