



分类号.....

UDC.....

密 级 公 开.....

黑 江 大 学

硕士研究生学位论文

基于 FDR 技术的土壤湿度检测装置研究

申 请 人： 钱立鑫

学 号： 2131263

培养单位： 电子工程学院

学科专业： 微电子学与固体电子学

研究方向： 传感器技术与应用

指导教师： 杜西亮 教授

完成日期： 2016 年 3 月 28 日



Y3007389

中文摘要

如今，我国水资源日益紧张，农业用水量十分巨大，解决合理灌溉、提高水资源使用效率等难题显得尤为重要，因此，土壤湿度检测有十分重要的意义。目前在土壤湿度测量方面最常用的仍是不能组网、效率低下的分立式传感器或烘干法，因此，需要一种能够实现网络化、低成本、精度高的土壤湿度检测装置。

本文阐述了 FDR 法的基本传感原理以及土壤湿度和土壤介电常数的关系，基于 FDR 技术（频域反射法），并结合 ZigBee 无线传输技术，研制了一种具有误差小、成本低、可大范围组网等优点的土壤湿度检测装置。之后标定并测试土壤湿度检测装置，对 ZigBee 进行数据传输测试，并设计了一套 PC 端软件在线监测土壤湿度。

结果表明，本设计具有误差小、成本低、操作方便等优点，与 ZigBee 的结合实现了土壤湿度的无线传输和智能化，有一定的应用价值。

关键词：FDR；土壤湿度；ZigBee；在线监测

Abstract

Nowadays,China is seriously lack of water resources,the agricultural water consumption is extremely large, and it is particularly important to solve the problem of rational irrigation and improve the efficiency of water resources, therefore, soil moisture detection is of great significance. In addition, at present the most commonly used in soil moisture measurement is discrete sensor or drying method, which is non-network and inefficient. Therefore, it will be very helpful to realize a networked, low cost, high precision soil moisture detection device.

This paper expounds the basic sensing principle of FDR, and the relationship between soil moisture and soil permittivity, developed a kind of soil moisture detection device based on the FDR technology (Frequency Domain Reflectometry) combined with ZigBee wireless transmission technology, which is small error, low cost, large-scale networking. Then calibrated and tested the device, tested to ZigBee for transmission, and design a set of PC software online monitoring of soil moisture.

The result showed that this device has the advantages of small error, low cost and convenient operation, the combination of ZigBee and realized wireless transmission and intelligent soil moisture, bringing the certain application value.

Key words: FDR; Soil moisture; ZigBee; On-line monitoring

目录

目 录

| | |
|------------------------------|----|
| 中文摘要..... | I |
| Abstract..... | II |
| 第 1 章 绪论..... | 1 |
| 1.1 课题的研究背景与意义..... | 1 |
| 1.2 土壤湿度检测方法研究进展..... | 2 |
| 1.3 频域反射法研究现状..... | 7 |
| 1.4 课题研究的主要内容..... | 8 |
| 第 2 章 FDR 土壤湿度检测装置的基本原理..... | 10 |
| 2.1 FDR 传感基本原理..... | 10 |
| 2.2 土壤的介电特性..... | 12 |
| 2.2.1 电介质的极化及介电常数..... | 12 |
| 2.2.2 介电弛豫与德拜方程..... | 15 |
| 2.2.3 土壤湿度与土壤介电常数的关系..... | 17 |
| 2.3 频率选择..... | 19 |
| 2.4 本章小结..... | 19 |
| 第 3 章 FDR 土壤湿度检测装置的硬件设计..... | 20 |
| 3.1 系统硬件整体设计方案..... | 20 |
| 3.2 控制模块硬件电路设计..... | 21 |
| 3.2.1 主控处理芯片的选型..... | 21 |
| 3.2.2 STM32 系列单片机简介..... | 22 |
| 3.2.3 Cortex-M3 内核简介..... | 24 |
| 3.2.4 控制模块硬件电路..... | 25 |
| 3.3 高频信号发生电路设计..... | 26 |

| | |
|--------------------------------------|-----------|
| 3.4 整流滤波电路设计 | 27 |
| 3.5 放大电路设计 | 28 |
| 3.6 探测单元设计 | 29 |
| 3.6.1 探测单元的类型与结构 | 29 |
| 3.6.2 探头尺寸设计分析 | 29 |
| 3.6.3 探头的选择 | 30 |
| 3.7 PCB 版图设计 | 30 |
| 3.8 通讯模块的硬件设计 | 31 |
| 3.8.1 通讯方式的选择 | 31 |
| 3.8.2 Zigbee 接口电路设计 | 34 |
| 3.9 本章小结 | 34 |
| 第 4 章 FDR 土壤湿度检测装置的软件设计 | 35 |
| 4.1 土壤湿度检测软件设计 | 35 |
| 4.1.1 嵌入式系统主程序 | 35 |
| 4.1.2 A/D 转换程序 | 36 |
| 4.2 ZigBee 无线传输软件设计 | 38 |
| 4.2.1 Zigbee 协议综述 | 38 |
| 4.2.2 Zigbee 的组网 | 41 |
| 4.2.3 Zigbee 数据传输及故障分析 | 43 |
| 4.3 PC 端软件设计 | 44 |
| 4.3.1 开发平台简介 | 45 |
| 4.3.2 PC 端软件模块化设计 | 46 |
| 4.3.3 PC 端软件设计 | 47 |
| 4.4 本章小结 | 49 |
| 第 5 章 系统测试与数据分析 | 50 |
| 5.1 土壤湿度检测装置的标定与测试 | 50 |

目录

| | |
|------------------------|----|
| 5.2 ZigBee 数据传输测试..... | 53 |
| 5.3 测试结果分析..... | 54 |
| 5.4 本章小结..... | 54 |
| 结论..... | 55 |
| 参考文献..... | 57 |
| 致谢..... | 64 |
| 独创性声明..... | 65 |

第1章 绪论

1.1 课题的研究背景与意义

生命活动的一切活动都离不开水。土壤湿度的测定在农林业、水文地理学、环境科学、气象科学等诸多领域都有着非常重要的意义^[1]。在农林业方面，土壤湿度是一项十分重要的指标，它不仅决定着作物能否正常生长，也影响着肥料中的养分在土壤中能否得到高效的吸收。倘若土壤湿度偏低，作物就无法将土壤中的肥料吸收，最终导致土地盐碱化，后果十分严重；反之，倘若土壤湿度偏高，既造成了大量的肥料和水资源的浪费，还直接污染了水源^[2]。

虽然中国幅员辽阔，水资源总量极为丰富，但是水资源利用率却非常低，存在十分严重的水资源浪费现象，被列为世界上 13 个贫水国之一。中国作为世界上人口最多的农业大国，全社会用水总量的 80%以上都被农业生产占据，水资源利用率为 30~40%，而发达国家已到达 70~80%之间。在中国，每立方厘米的水可以生产不到 1 公斤粮食，而在发达国家可以生产 2 公斤，在灌溉技术最发达的以色列可以生产 2.35 公斤粮食^[3]。此外，从人均水资源占有量来看，我国的人均水资源占有量仅为 2300m^3 ，只是世界水平的四分之一。由此可见，水资源的缺乏已经成为限制我国农业发展和经济可持续发展战略的障碍，对水资源的合理利用和对土壤湿度的测量就显得尤为重要，测定土壤湿度，掌握其变化规律对于中国这个农业大国具有举足轻重的意义。

此外，土壤湿度也是道路、建筑、铁路等大型工程项目进行过程中的一个不可或缺的重要参考点。由此可见，土壤湿度检测在国计民生的诸多领域中占有何等的重要性。因此，土壤湿度检测装置的研制，对于节水农业的发展、研究农作物需水规律、农作物健康生长乃至我国的可持续发展方面都具有重要意义，而且也是缓解我国水资源危机的有效途径。

1.2 土壤湿度检测方法研究进展

土壤湿度检测是一门具有无限潜力和广泛应用的学科，不仅与农林业的生产有紧密联系，还涉及到国计民生的诸多领域。在土壤湿度检测方面，经过国内外科学家的长期努力，已经得出相当多的科研成果，已有十多种土壤湿度检测技术得到应用，这都得益于国外专家学者在这一方面较早的起步。土壤湿度检测方法基本可以分为两大类：直接测量法和间接测量法。最常见的直接测量方法要属红外线法与烘干称重法；间接测量法主要包括时域反射测量法（TDR）、频域反射测量法（FDR）、中子仪测量法、驻波测量法（SWR）、张力计测量法等^[4]。其中，时域反射测量法、频域反射测量法和驻波测量法又被统称为介电法。土壤湿度检测方法的基本分类如图 1-1 所示。以下为各种常见的土壤湿度检测方法进行详细介绍。

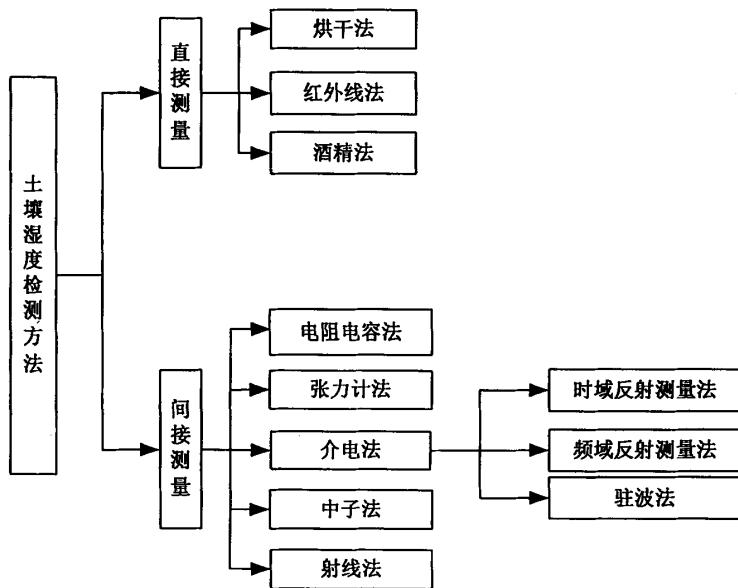


图 1-1 土壤湿度检测方法分类图

Fig. 1-1 Diagram of soil moisture measurement methods' class

1、烘干法测量土壤湿度

目前检测土壤湿度被认为结果最准确、最经典的方法是烘干法^[5]。以恒温烘箱烘干法为例，从田间取得土壤样品，放到 100℃左右的恒温烘干箱中十个小时以上，将土壤中的水分以水蒸汽的形式发散掉，然后得到土壤的净质量，烘干前的土壤质量减去烘干后的土壤质量即为含水量。其计算公式为：

$$\text{土壤含水量}(\%) = \frac{\text{湿土重量} - \text{干土重量}}{\text{干土重量}} \quad (1-1)$$

烘干法检测土壤水分结果准确，操作简单，结果易于分析，可以作为其他方法的参照结果，介电法、中子法等测量方法都使用烘干法进行标定的。但是，其缺点同样显而易见——从田间取回土壤，到放到烘干箱，再到最后的称重计算，耗费时间将达到 24 小时以上，最快也要 10 个小时左右。所以，烘干法无法做到快速、实时测量。而且整个过程中会耗费大量人力。另外，如果要连续测定土壤湿度时，不可能在原处取样，若是在另一处取样，又会带来其他误差。

2、中子衰减法检测土壤湿度

由于中子源能够在土壤中发散快中子，利用这一原理来检测土壤湿度的方法称为中子衰减法。快中子与土壤各种介质的原子和离子发生碰撞，在碰撞的过程中会发生方向的改变和能量的损失，最终变为慢中子。快中子与不同种类的介质碰撞，损失的速度也不尽相同。当快中子与水分中的氢元素碰撞时，损失最大，这种损失要远远大于和其他一般介质中的损失。所以，氢原子数随着土壤中水分的增多而增多，慢中子的相对数量就越多。通过测定慢中子密度和水分子数量的函数关系，就能够得出土壤湿度。

上世纪 50 年代，以美国和加拿大为代表的的西方国家就开始用中子法来测定土壤湿度。在之后的二十年内，中子衰减法被更多的国家研究和改进，得以更加完善。在 1979 年，Rahi、Shih 和 Myhre 等人对中子法检测土壤湿度做了敏感性分析^[6]。80 年代，人们开始着手研究高精度的中子测水仪，意图克服现有中子法检

测土壤湿度中由于密度及各种微量元素的影响所造成的误差^[7]。在 1988 年, Wilson 深入研究了中子法测定土壤湿度的测量精度问题, 他的研究结果表明, 中子法测量土壤湿度的精度可以达到±5%^[8]。

这一方法最显著的优点在于可以快速测量, 结果准确, 另外, 由于中子法检测土壤湿度不破坏土壤结构, 还可以在同一块土壤反复的多次测量, 得出多次结果, 确保了测量结果的准确性。但是, 中子仪极为高昂的价格直接限制了这一方法的进一步发展, 更为重要的是, 中子有很强的辐射性, 如果屏蔽措施不得当, 将造成中子泄露, 对自然环境形成巨大破坏, 甚至威胁人体健康。所以, 大多数国家在测量土壤湿度时已经不再使用中子法。

3、张力计法检测土壤湿度

张力计法是一种起步相对较早的土壤湿度检测方法, 并且有着其他十分广泛的应用。早在 1922 年, 科学家 Gaender 在测量非饱和土壤水的张力时开创性的使用了张力计法; 在 1949 年, Rechard 对张力计法作出了改进, 并把张力计法应用在田间和实验室中; 在 1976 年, Mekin 研究能够在寒冷地区使用的张力计, 采用凝固点低得多的乙二醇溶液代替了水溶液; 同年, Elzadftawy、Mansell、Gillham 等人把张力计与压力传感器相结合, 实现了测量系统的自动记录功能; 日本学者中司启二等人研制了将精细陶瓷技术与电子技术相结合的数字式张力计^[9]。张力计通过判断土壤对水的吸收能力来判断土壤湿度的大小, 土壤对水分的吸收能力也就是土壤水张力。土壤的吸水能力与土壤湿度成正比例, 土壤吸水能力越弱, 土壤湿度越低; 反之, 土壤吸水能力越强, 土壤湿度越高。

张力计法检测土壤湿度的优点是: 原理和结构简单, 能够在同一位置多次测量, 并且操作十分方便。但也有十分明显的缺点^[10]: 首先, 土壤质量会对它的测量范围产生重大影响, 仅适合部分土壤类型; 其次, 张力计法测必须通过土壤水分的非线性复杂曲线换算出土壤含水量, 而且土壤的各种理化特性都非常容易影响测量结果, 即便是同一块土壤, 土壤水分能量关系也十分难以分析, 这些制约都给张力计法测量土壤湿度带来许多困难, 而且误差也相对较大; 再次, 张力计

法存在的滞后和回环导致了测量速度相对较慢。所以，该方法由于以上限制，基本已经被其他方法取代。

4、介电法检测土壤湿度

土壤由固体物质、束缚水和自由水、空气、矿物质等物质组成，这些物质在电磁学上都是电介质。由于土壤类型的不同，土壤的具体组成成分和土壤密度不可能完全相同，但有一点可以确定，所有土壤表现出的介电常数都与土壤湿度存在着非线性单指数函数关系。目前主流的几种土壤湿度检测方法都属于基于土壤介电特性的检测方法。苏联科学家 Chernyak 在 1964 年发表的学术著作 *Dielectric Method for Investigating Moist Soil* 受到了广泛重视，成为土壤介电特性研究的第一人^[1]，此后介电法检测土壤湿度进入了高速发展。随后几年 TDR 示波器的成功研制使得介电法检测土壤湿度成为现实。

(1) 频域反射法 FDR

频域反射法 FDR (Frequency Domain Reflectometry) 是荷兰 Wageningen 农业大学的 Hilhorst 于 1992 年提出的^[12-14]。频域反射法基于电磁脉冲原理，即通过传感器发射理想频率电磁波，电磁波通过测量仪的金属探针进入到土壤中，最后返回测量仪，测量探针的输出电压。该方法是通过检测土壤介电常数的改变导致的频率改变，从而得出土壤湿度。其实质就是让实部和虚部从土壤介电常数分离开来，由虚部得到土壤电导率，由实部换得到土壤湿度。虽然土壤的组成成分非常复杂，但是水的介电常数达到了 80 左右，土壤固体物质约为 4，空气只有 1，由此可见，土壤中的水分对土壤介电常数起决定作用。所以，测定的土壤介电常数可以直接反映真实的土壤湿度情况。

频域反射法有许多优点^[15-17]：测量速度快，测量精度高，同一地点下可以连续多次测量且不破坏土壤，无放射性，零污染，仪器价格相对低廉等等。另外，在探头结构和工作频率方面，该方法有更多的选择。本论文采用的就是基于 FDR 法检测土壤湿度。

(2) 时域反射法 TDR

时域反射法 TDR (Time Domain Reflectometry) 也是通过测量土壤介电特性来测量土壤湿度。该方法的原理是，由于土壤介电特性的差异，电磁波在土壤中传播过程中会导致传播路径上的阻抗不匹配，从而产生回波信号，利用入射波信号和反射波信号的传输时间差可以间接土壤的介电常数，通过理论公式，可以推算出土壤湿度。Feidegg 于 1969 年在研究液体介质的介电特性与频率的关系时，首先奠定了 TDR 技术的基础；在 1975 年，Topp 和 Davis 突破性地将时域反射法引入到土壤湿度检测中；到了 1980 年，Topp 等人用时域反射法测量了电磁波在土壤中的传输线上的传输时间，同时得出了传输时间与土壤湿度之间成确定函数关系的结论^[18]，随后又测量出土壤中固相、液相、气相混合物的介电常数 ϵ ，运用统计学知识可以得出土壤湿度与介电常数之间的多项式如公式（1-2）所示^[19]：

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon^3 \quad (1-2)$$

式中， θ 为土壤湿度， ϵ 为土壤介电常数。

时域反射法检测土壤湿度不仅能够满足实施、快速的要求，又保证了测量很高的精度（可以达到 2%），且具有很高的安全性，还可以做成手持式设备在田间使用。但是，TDR 法土壤水分探测仪的价格普遍比较高昂。美国的 SoilMoisture Equipment 公司研制的 TRASE 系统，其价格甚至达到了 1 万美元。另外，由于易受土壤盐分的作用，TDR 法不适合测量盐碱地土壤湿度。

(3) 驻波法 SWR

为了弥补 TDR 法与 FDR 法的一些不足，在 1995 年，Gaskin 和 Miller^[19]研究了一种新的土壤湿度检测方法——驻波法 SWR (Standing-Wave Ratio)。SWR 法与 TDR 法和 FDR 法都是介电法。与 TDR 法相比，SWR 法最重要的区别在于，它不是测量高频电磁波在传输线上的入射-反射时间差，而是测量驻波比，通过驻波率进而得到土壤湿度。基于 SWR 法研制的水分测量仪主要包括以下几部分：探针、传输线路、高频信号源、检测电路等等。其成本要比 TDR 法水分测量仪已经有很大程度的下降，但在测量精度上却稍有不及。

SWR法兼具其他两种介电法的快速、安全、可连续测量等优点，并能适用于多种类型的土壤。缺点是高频电路的设计和信号处理比较复杂，增加了实现难度。

1.3 频域反射法研究现状

1992年，荷兰Wageningen农业大学的Hilhorst第一次提出频域分解解决方案。他认为在一个特殊频率下能够将土壤的介电常数的实部和虚部分解优化，由虚部得到土壤电导率，由实部得到土壤湿度。在1993年，一种专门用于FDR土壤湿度检测的芯片被Hilhorst等人研制成功，既大幅度提高了FDR土壤湿度传感器的稳定性，而且降低了生产成本，使其得到了进一步推广。另外，Hilhorst认为最佳测试频率应该在20~30MHz之间。

最近几年来，发达国家已经基本掌握了FDR技术，而且研制出很多性能出色的FDR设备。堪萨斯州立大学的张乃迁教授于2002年，利用专门进行土壤检测的FDR介电常数传感器，根据从接近直流到100MHz频率的响应数据，表明土壤的多个主要特征参数可以由复介电常数表现出来。2003年，Leib发现未经校准的FDR传感器就能够得到土壤湿度的变化曲线，但是测得的绝对含水量却并不准确^[21]。2013年，美国Decagon公司研制的EC-5传感器可以测土壤湿度。由于EC-5高频率特征，致使其读数不易受电导率与土壤类型的影响，适用于所有类型的土壤；另外，其较高的测量频率还使得传感器的准确度和量程大幅提高。同年，西班牙学者Tejero等人使用FDR传感器分别采用直接钻井和常规方式测量土壤湿度，发现直接钻井方式可以得到更准确的结果^[22]。

相对于西方发达国家，我国在FDR技术的研究起步较晚，虽然国内已有一些FDR产品生产，但更多的还是用国外进口元器件组装，DELTA公司的FDR产品已广泛用于60多个国家和地区^[23]。但是随着我国对于节约资源和农业发展越来越重视，特别是在节水灌溉和水资源利用率方面，FDR法显然更具优势，未来市场必定更加光明。2003年，郭卫华等人在半干旱区皇甫川流域利用FDR传感器对土壤湿度进行了连续动态检测^[24]；2008年，河南气象科学研究所和中国电子集团公司

第27研究所联合设计的GStar-I型土壤水分监测仪实现了实施连续自动采集土壤数据，记录土壤水分数据变化，并实现无线数据通信和上位机监控^[25]；2009年，陈海波等人^[26]对GStar-I型土壤水分监测仪做了标定，得到了与烘干法很接近的土壤水分变化曲线；2010年，高磊等人^[27]使用采用FDR技术的两种土壤湿度传感器对南京地区的黏土特性进行土壤湿度测试分析，结果显示FDR传感器具有一定的温度效应；2014年，刘蓓在研究其他因素对黄绵土湿度的影响时，发现温度、含盐量对FDR传感器的输出信号也有一定影响。

通过数十年的不断改进，FDR技术在土壤湿度检测上已经有了相当大的进步。相对于其他几种技术，它的优势主要体现在以下几个方面：

1. 精度高，误差小，误差一般在2%以内；
2. 安全可靠，无辐射性，对人和土壤均没有任何不良影响；
3. 能够与当今前沿的互联网技术融合，可以实现大范围的土壤湿度实施连续自动测量；
4. FDR技术不仅可以应用在土壤湿度检测方面，在检测石油天然气管道泄露、废物处理、路基监测、电缆检测、气象学等诸多方面同样起着重要作用。

1.4 课题研究的主要内容

本文是基于FDR原理在STM32嵌入式系统上构建的能够实现ZigBee无线传输的土壤湿度自动检测装置。该装置有实用性强、成本低廉等优点。论文将用五章详细阐述论文的结构和内容。

第1章介绍了课题研究的背景与意义，并阐述了土壤湿度检测方法的研究进展和频域反射法的发展现状。

第2章介绍了FDR法的基本传感原理，同时详细介绍了土壤的介电特性和电介质的极化过程，介绍了土壤含水量与土壤介电常数之间的关系，并将测量频率确定为100MHz。

第3章主要阐述了FDR土壤湿度检测装置的硬件电路设计，分别介绍了各个模块的硬件设计，然后介绍了探测单元的类型与几何参数，选择了ZigBee无线传输作为FDR土壤湿度的信号传输方式并给出了Zigbee接口电路原理图。

第4章主要介绍了FDR土壤湿度检测装置的软件设计，首先阐述了土壤湿度检测软件的设计，随后说明了Zigbee无线传输的软件设计，最后设计了PC端软件来实现土壤湿度的在线监测和历史数据查询。

第5章主要内容为土壤湿度检测装置的测试与标定，并测试了Zigbee的数据传输，进行了测试结果分析，最后对本文的不足提出合理的建议。

第2章 FDR 土壤湿度检测装置的基本原理

2.1 FDR 传感基本原理

FDR法是持续动态监测土壤湿度的有效方法。它利用电磁脉冲原理，根据电磁波在土壤中的传播频率来测试土壤表现出的介电常数，进一步通过一定的对应关系反演得到土壤湿度状况^[28]。严格来讲，基于FDR原理的传感器是一种变介电常数型的电容传感器。

基于FDR原理的土壤湿度检测原理如图2-1所示。设R为传输线的等效电阻，形成一个RLC谐振电路，电容两极板之间即为被测土壤^[29]。

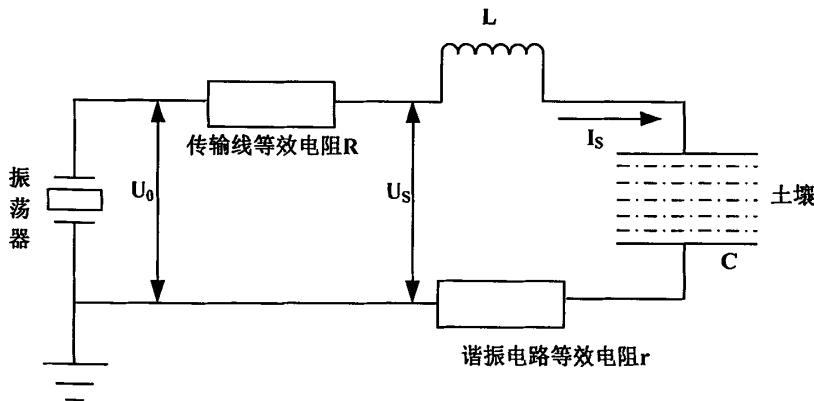


图 2-1 高频下的谐振电路

Fig. 2-1 Resonance circuit in high frequency

RLC谐振电路等效电阻如公式（2-1）所示：

$$Z_L = r + j(\omega L - 1/\omega C) \quad (2-1)$$

式中， r 是阻抗的实部， $j(\omega L - 1/\omega C)$ 是阻抗的虚部， ω 是角频率， L 和 C 分别是等效电路的电感和电容。

利用高频信号源在传输线开始端输出信号电压如公式（2-2）所示：

$$U = \alpha \sin 2\pi f t \quad (2-2)$$

式中， α 、 f 、 t 分别为振幅、振荡频率、时间，那么，叠加电压 U_0 如公式(2-3)所示：

$$U_0 = \alpha \sin 2\pi f t + \partial \rho \sin 2\pi f (t - \frac{2l}{v_p}) \quad (2-3)$$

式中， l 是传输线的长度， v_p 是传输线上的信号传播速度，假设把传输线长度设计为 $v_p/4f$ ，则叠加电压如公式(2-4)所示：

$$U_0 = \alpha(1 - \rho) \sin 2\pi f t \quad (2-4)$$

当谐振电路满足谐振条件 $1/\omega C = \omega L$ ，传输线上会出现两组相干波叠加，这两组相干波频率相同方向相反。此时， U_0 最大值如公式(2-5)所示：

$$U_{0\max} = \alpha(1 - \rho) \quad (2-5)$$

传输线与传感器结合部的最大电压值如公式(2-6)所示：

$$U_{S\max} = \alpha(1 + \rho) \quad (2-6)$$

两者的差值 ΔU 如公式(2-7)所示：

$$\Delta U = U_{S\max} - U_{0\max} = 2\alpha\rho \quad (2-7)$$

因为土壤是电容 C 中的电介质，所以，作为对土壤介电常数影响最大的土壤湿度的变化，将直接影响电容 C 的变化。使用扫频法，为满足谐振条件调整信号电源的频率，谐振电路的固有频率即为测出最大电压差时的频率^[30]。固有频率如公式(2-8)所示：

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2-8)$$

已知电容与介电常数存在的关系如公式(2-9)所示：

$$\varepsilon = C/C_0 \quad (2-9)$$

所以土壤的相对介电常数能够得出。公式 (2-9) 中, C_0 为空气作为介质时的电容值。

土壤介电常数 ε 与土壤湿度 W 存在的关系如公式 (2-10) 所示:

$$W = a\sqrt{\varepsilon} + b \quad (2-10)$$

式中, a 和 b 均为常数, 这两个常数的值随着土壤类型的改变而改变。

因此, 设计合理的传输线和与之相匹配的谐振电路, 使用扫频法, 找到满足谐振条件即固有频率, 利用这一频率可以得出电路中的电容阻抗, 最后得到土壤介电常数的变化和土壤湿度的变化。

2.2 土壤的介电特性

2.2.1 电介质的极化及介电常数

电介质内部的所有电荷几乎都是束缚电荷而没有自由电荷。在外电场作用下, 均匀电介质中出现极化电荷的现象称为电介质的极化。从广义角度来讲, 电介质可以是气态、液态、固态, 分布极广, 所有非金属, 甚至一定情况的金属, 都属于电介质^[31]。所以, 土壤也是一种电介质。

电介质分子的正负电荷中心并不总是重合的, 如果分子的正负电荷中心是重合的, 对外呈电中性, 叫做非极性分子; 如果分子的正负电荷中心不是重合的, 则叫做极性分子^[32]。当一定的外加电场作用于非极性电介质时, 非极性分子中的正负电荷会受到反方向的电场力, 正负电荷发生相对位移, 从而形成电偶极子, 其电偶极矩将沿着外加电场的方向排列。与此同时, 电介质的前后两表面也将沿外电场方向出现正负极化电荷; 当外电场撤去, 正负电荷中心再次重合, 这种极化形式被称为非极性分子的位移极化^[33]; 当一定的外加电场作用于由极性分子组成的电介质时, 本来杂乱无序的偶极子会在电场作用下做定向排列, 定向排列的程

度与温度成反比，这种极化形式被称为极性分子取向极化。电介质的极化过程与物质的微观构造息息相关，由于电介质分子、原子结构的各不相同，一共有四种极化形式：

(1) 电子位移极化

在外电场作用下，电介质组成粒子（原子、离子或分子）中围绕原子核的电子云相对带正电的原子核所作的弹性位移而产生感应电偶极矩，由于两者的质量差别极大，主要位移由电子所完成，所以这种极化称为电子位移极化^[34]。电子位移极化耗时极短，极化时间约为 $10^{-14}\sim10^{-15}$ 秒，属于快极化。不论电介质如何组成，只要有外加电场存在，任何电介质都会发生电子位移极化。

(2) 离子位移极化

无电场作用时，正负离子在空间中对称排列，电偶极矩为零并对外保持电中性，但在电场作用下，原有的电中性状态被打破，电荷不再对称排列而是产生相对位移，正离子位移方向与电场方向相同，负离子位移方向与电场方向相反，其结果是原来的中性分子转变为偶极子发生离子位移极化^[35]。离子位移极化耗时约为 $10^{-12}\sim10^{-13}$ 秒，属于快极化，相当于瞬间完成的，且在极化过程中不发生能量的损失。

(3) 转向极化

极性介质中的极性分子的偶极矩，由于分子热运动的影响，几乎平均分布在各个方向，介质不显电性，从宏观角度来看，其偶极矩为零。然而当外电场存在时，由于电场力矩的作用，每个极性分子都会出现了转矩，导致极性分子沿电场方向转向重新排列，就电介质整体而言，电矩不再为零而出现了与电场同向的宏观电矩，这一极化过程称为转向极化。转向极化属于慢极化，需要相对较长的时间才能建立转向极化，大约为 $10^{-6}\sim10^{-2}$ 秒甚至更长时间，这是因为该过程中受到分子热运动的无序化作用、电场的有序作用以及极性分子间的长程作用，而且极化过程中会有能量损耗^[36]。

(4) 空间电荷极化

空间电荷极化是非均匀电介质所表现出的主要极化形式之一。在电场作用下，正、负自由电荷开始由原来的无规则排布变为具有一定规律性的有序运动，其结果是较多的负电荷汇聚在正极板周围。实际上，这种空间电荷重新排布的过程形成了介质的极化，它是非均匀电介质或存在缺陷的晶体介质所表现出的主要极化形式之一，这类极化称为空间电荷极化。任何晶体介质都一定会存在一些缺陷（位错、杂质中心等）在电场作用下，晶体介质中的自由电荷移动过程中会被缺陷所捕获，从而造成电荷分布不均匀形成极化。空间电荷极化同样属于慢极化，并伴有更多的能量损失。

在外电场作用下，这四种极化过程可以通过宏观物理量 ϵ 表示出来，相对介电常数 ϵ 采用复数形式，它与频率 ω 存在的关系如公式 (2-11) 所示：

$$\epsilon(\omega) = \epsilon'(\omega) - j\epsilon''(\omega) \quad (2-11)$$

其变化规律如图 2-2 所示。

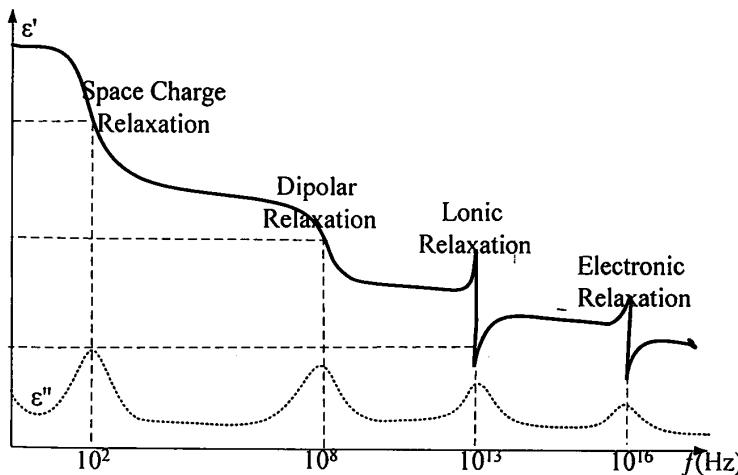


图 2-2 介电常数变化规律

Fig. 2-2 The variation regularity of dielectric constant

当一种介质处于相当低频（例如 1KHz）时，介电常数 $\epsilon(\omega)$ 近似于一个常数，

也可以称为静介电常数或低频介电常数。在频率上升过程中，外电场作用的剧烈程度开始超过分子固有电矩的转向极化程度。此时，实部 $\epsilon'(\omega)$ 有明显的减小趋势，而且在虚部有了一个峰值，这是一个弛豫过程。频率继续增加， $\epsilon'(\omega)$ 保持减小， $\epsilon''(\omega)$ 降到零值，转向极化结束。当频率进入红外区，发生了离子共振，实部 $\epsilon'(\omega)$ 陡然增加随后迅速下降，与此同时，虚部 $\epsilon''(\omega)$ 达到新峰值，之后离子位移极化不起作用。频率增加到可见光区后，实部 $\epsilon'(\omega)$ 变的更小，此时叫做光频介电常数，虚部对应于光吸收^[37]。

2.2.2 介电弛豫与德拜方程

1、介电弛豫

弛豫是一个缓慢的渐变过程，由一个稳定状态变为另一个稳定状态需要一定的时间才能完成，极化状态的建立或改变正是这样一个弛豫过程，称为介电弛豫。实际上，介电弛豫过程反映了微观粒子在极化过程中的一系列能量交换，在宏观方面表现为一种损耗。系统中微观粒子之间相互作用的性质决定了弛豫过程的宏观规律。

分析极化过程离不开对介电弛豫的分析，分析介电弛豫的最佳方法就是德拜弛豫方程。

2、德拜弛豫方程

相对介电常数 ϵ 可以被用来间接表现介电响应的宏观效果。在频率为 f 的正弦波交变电场作用下，介电弛豫现象可以用公式（2-12）来表示：

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} + \int_0^{\infty} \alpha(t) e^{j\omega t} dt \quad (2-12)$$

其中， $\alpha(t)$ 是衰减因子，衰减因子表现了在快速撤去外电场或者突然施加外电场之后介质极化变为稳定状态的规律，极化响应总是稍慢于电场的快速变化而显得有

一定的惯性。

大多数情况，可以假设：

$$\alpha(t) = \alpha_0 e^{-t/\tau} \quad (2-13)$$

将公式(2-13)带入公式(2-12)中，积分后 $\varepsilon(\omega)$ 如公式(2-14)所示：

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\alpha_0}{\frac{1}{\tau} - j\omega} \quad (2-14)$$

由于 $\varepsilon(0) = \varepsilon_s$ ，将其代入公式(2-14)，则 $\varepsilon(\omega)$ 如公式(2-15)所示：

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{\infty} + \tau \alpha_0 \quad (2-15)$$

所以， $\alpha(t)$ 将如公式(2-16)所示：

$$\alpha(t) = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{\tau} e^{-t/\tau} \quad (2-16)$$

$\varepsilon(\omega)$ 将如公式(2-17)所示：

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 - j\omega\tau} \quad (2-17)$$

其中， ε_s 是静态介电常数，即材料在频率为零时表现出的介电常数， ε_{∞} 是高频介电常数，即材料在频率无穷大时表现出的介电常数， τ 是弛豫时间。

由上式可以得出复介电常数 $\varepsilon(\omega)$ 的实部 $\varepsilon'(\omega)$ 和虚部 $\varepsilon''(\omega)$ ^[38]：

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + (\omega\tau)^2}, \quad \varepsilon''(\omega) = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty})\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (2-18)$$

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \varepsilon_{\infty} + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty})\omega\tau}{\varepsilon_s + \varepsilon_{\infty}\omega^2\tau^2} \quad (2-19)$$

$\varepsilon'(\omega)$ 表示介电常数的实部，它随着频率的增大而减小，反映了有外加电场作用时电介质的极化程度与能量存储程度； $\varepsilon''(\omega)$ 表示介电常数的虚部，反映了电介

质在极化过程中的能量耗散； $\tan \delta$ 表示损耗角正切。

德拜方程如公式（2-18）所示，当 ω 相当高时：

$$\varepsilon' \rightarrow \varepsilon_\infty \quad \varepsilon'' \rightarrow 0 (\omega \rightarrow \infty) \quad (2-20)$$

光频下的电介质弛豫现象比低频下简单的多。光频电场下介质极化的能量耗散以光吸收形式表现出来，此时的光频介电常数仍能用复数表示。德拜弛豫理论是研究高频下湿度检测的重要理论基础。 ε' 、 ε'' 、 $\tan \delta$ 与 ω 的关系如图 2-3 所示。

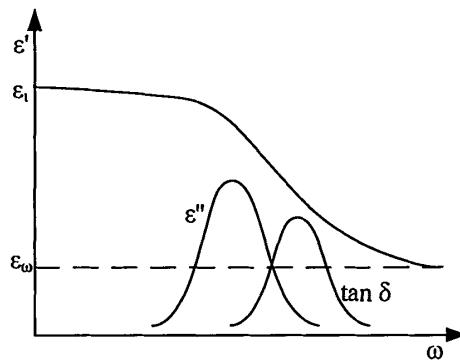


图 2-3 介电常数、损耗角正切与角频率的关系

Fig. 2-3 Relationship between dielectric permittivity, loss angle tangent and angular frequency

2.2.3 土壤湿度与土壤介电常数的关系

土壤是固相、液相、气相组成的三相体，主要有矿物质、有机质、水分和空气等组成的一种多孔介质，是最有代表性的一种复杂电介质材料。水分子是强极性分子，当水分子受到外部电场作用时，会有位移极化和很强的转向极化。这一过程将导致外加电场能量减少，而水分子势能增加，即发生了能量转化，用 ε' 来表示。另外，转向极化的运动要稍慢于外电场的变化，即弛豫现象。从宏观角度来看，弛豫产生的效果是水分子发生了能量的耗散，用 ε'' 来表示。在同样的外加电场下，水的极化程度远大于其他物质。在微波频段（300MHz~300GHz），水的介电常数与波长存在一定的曲线关系，如图 2-4 所示：当波长在 0.1~1m 范围内，

$\epsilon'(\omega)$ 为 77.2~30, $\tan \delta$ 为 0.17~1.2; 其它介质的 $\epsilon'(\omega)$ 一般为 1~5, $\tan \delta$ 一般为 $1 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-2}$ 。水的介电常数要远大于其它物质。因此, 只要能够测得微波频率下的水的介电常数, 就可以间接得出土壤的湿度。

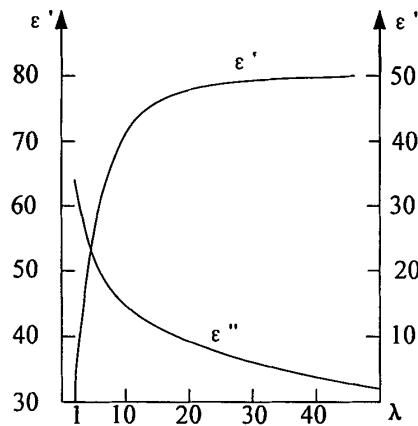


图 2-4 介电常数 ϵ' 与波长 λ 之间的关系

Fig. 2-4 Relationship between dielectric constant and wavelength

土壤主要成分的介电常数如表 2-1^[39]所示。

表 2-1 土壤主要成分的介电常数

Table 2-1 The dielectric constant of the main components of soil

| 土壤主要成分 | 土壤介电常数 |
|--------|-----------|
| 空气 | 1 |
| 冰 | 3 (-5°C) |
| 水 | 80 (20°C) |
| 玄武岩 | 12 |
| 花岗岩 | 7-9 |
| 砂岩 | 9-11 |
| 干土 | 3.5 |
| 干砂 | 2.5 |

Topp 的研究成果表明, 土壤含水量与土壤介电常数的关系如公式 (2-21) 所

示：

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \varepsilon - 5.5 \times 10^{-4} \varepsilon^2 + 4.3 \times 10^{-6} \varepsilon^3 \quad (2-21)$$

总之，测试土壤湿度的出发点就是了解土壤的组成和土壤各成分的介电特性，利用土壤的介电特性进行土壤湿度检测是一种十分重要的方法。

2.3 频率选择

影响土壤介电特性的因素有许多，主要有电磁频率、土壤湿度、土壤类型、含盐量等，其中电磁频率的影响很大。由德拜方程可知，在不同的频率下，复介电常数的实部和虚部的作用程度各不相同。当测量频率超过 30MHz 时，复介电常数中的实部起主要作用，虚部则明显减小。所以，选取 30MHz 以上的测量频率，可以有效降低虚部带来的影响。采用介电法检测土壤湿度时，值得注意的是，如果土壤的介电弛豫峰值频率低于测量频率，会导致其介电常数受土壤湿度的影响十分微弱，而土壤质地的影响却急剧增大^[40]。因此，介电法检测土壤湿度时，不能使测量频率高于土壤的介电弛豫最小峰值频率。

当测量频率接近土壤的介电弛豫最小峰值频率时，介电弛豫对土壤介电常数仍有很大影响，影响程度随着测量频率的增大而增大。对于我国的大部分土壤，当由于土壤质地导致测量湿度的误差不超过 1% 时，最大测量频率应为 180MHz，当这个误差不超过 2% 时，最大测量频率应为 250MHz^[41]。

为了能够更好的交汇各种类型的土壤频率特性，依据 Hilhorst 和 Dikresn 的研究，测试频率必须在 100MHz~150MHz 之间。从电路设计的难度和成本等方面综合考虑，本文中的测量频率选用 100MHz^[42]。

2.4 本章小结

本章详细介绍了FDR法的基本传感原理，同时重点阐述了土壤的介电特性和电介质的极化过程，并介绍了土壤湿度与土壤介电常数之间存在的关系，最后将土壤湿度的测量频率确定为100MHz。

第3章 FDR土壤湿度检测装置的硬件设计

3.1 系统硬件整体设计方案

FDR土壤湿度检测装置的整体硬件设计结构如图3-1所示。整个装置由检测部分和通讯单元部分两部分组成。

检测部分包括探测单元、控制模块、高频信号发生电路、整流滤波电路、放大电路等几部分组成。探测单元由三根金属电极组成电容结构，中间一根探针作为反馈探针，当金属电极插入土壤，电容极板之间的土壤就相当于电介质；高频信号发生电路采用100MHz的有源晶振产生信号；控制模块由主要由STM32芯片及其外围电路组成，负责数据的处理和A/D转换。通讯单元部分由一系列ZigBee无线收发模块组成。

有源晶振发出交流信号，该信号经探测单元送入土壤，反馈探针返回与土壤湿度相关的反馈信号，反馈信号经过整流滤波电路变为直流信号，通过放大电路、控制模块、A/D转换、输出与土壤湿度相关的电压信号^[43]。ZigBee发送端发出湿度信号，经由Zigbee接收端接收之后，发往上位机。

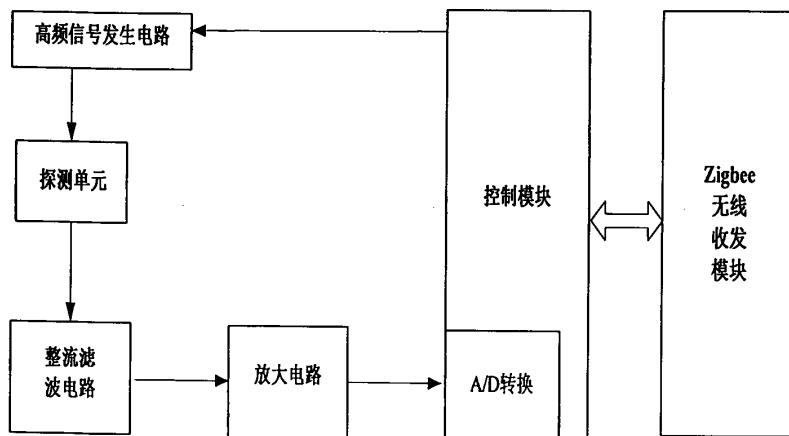


图3-1 FDR土壤湿度检测装置的硬件整体设计框图

Fig. 3-1 The overall hardware block diagram of soil moisture detection device base on FDR

3.2 控制模块硬件电路设计

3.2.1 主控处理芯片的选型

主控芯片是整个系统运行工作的“大脑”，一个性能优良的主控芯片是整个系统稳定运行的基本保障。随着信息技术尤其是微电子技术的迅猛发展，越来越多优秀的主控芯片可供选择，如ARM、DSP等。为了使整个系统的设计能够相对简单，采用的主控芯片最好能够自带A/D转换功能。此外，除了需要考虑系统的稳定性以及数据的准确性，还要考虑成本方面、开发难易程度和现场环境等多个方面^[44]，所以，在满足使用要求的前提下，尽量选择性价比高的主控芯片。

在主控芯片的选型上应参考以下三条准则：

- 1) 芯片的内部资源和功能是否能够达到系统设计的要求。比如，存储器的大小，处理器的速度，I/O引脚和片上外围器件，RAM和FLASH的容量。外部接口是否足够，系统中一般会使用USB、SPI、I²C、USART等外设，这些接口对微控制器需要支持多大的程序空间有很大的影响。另外，如果系统中有数字输入和输出、模拟到数字输入、PWM等接口，将意味着控制芯片需要提供更多的引脚数量。
- 2) 芯片的工作电压与工作温度是否能适应实际工作条件。绝大多数控制器都能在25℃，3V或者5V的情况下保证运行正常，但是不同的工程中，主控芯片就要面临不同的工作条件。所以，在进行一个项目之前，就应该知道该主控芯片能否胜任这样的工作环境。
- 3) 功耗和开发成本能否达到最低。当所选的主控芯片各个方面能够满足系统的设计要求时，这时应认真检查它们的功耗要求和价格。如果器件需要从电池和移动设备供电，那么确保器件低功耗绝对是优先考虑的因素，同时，高性价比的主控芯片不仅可以更好的节约资源，还可以创造更大的收益。

在本设计中，要使用主控芯片实现采集土壤湿度，并对其进行运算和存储，单片机和DSP都能够满足这些需求。DSP处理器最主要的优点是强大的数字信号处

理能力，例如图像处理，数据采集处理，它比单片要快很多，功能十分强大，但是价格要高出许多。相比之下，单片机不仅价格上要低廉许多，而且片上资源和I/O口也非常丰富，应用范围很广，开发相对简单、灵活，可以有效地降低系统的复杂性。此外，本设计对数据的处理并不是特别复杂，所以并不需要特别强大的处理器，性能一般的处理器就可以满足需求。最后经过综合考虑，本系统使用意法半导体公司生产的STM32F103CBT6芯片，这款芯片内部采用ARM公司设计32位处理器Cortex-M3内核，其CPU频率高达72MHz，具有128K的程序存储空间，20K的RAM，三个串口USART，I²C总线和SPI总线各两个，两路16位ADC，48个引脚，工作温度最高可达85℃，工作电压为3.3V，可以满足工作环境的需求。而且这款芯片价格便宜，市场售价仅为8~10元，在各行各业均有广泛应用。所以，鉴于这款芯片的超高性价比，选用该芯片作为主控芯片。

3.2.2 STM32 系列单片机简介

STM32系列32位闪存微控制器使用的是Cortex-M3内核，Cortex-M3内核是ARM公司设计的一款极具突破性的32位处理器内核，STM32F10x内部结构框图如图3-2所示。该内核最突出的特点是高性能、低功耗、实时应用，为嵌入式领域提供了一个更好的选择^[45]。由于Cortex-M3内核采用了更加强大的结构，使得STM32的性能有了极大的提升；所使用的Thumb-2指令集极大地提高了微控制器的性能和指令运行的效率，既有过去32位代码的性能，还有16位代码的密度；与此同时，Cortex-M3所需的逻辑门数少，先天就满足低功耗的要求，多种省电模式更加彰显了自身的低功耗特性^[46]。相比于传统单片机，STM32系列的优势如下：

1) STM32的Cortex-M3内核基于先进的哈佛架构。哈佛架构下指令数据各使用一条总线，数据各用另一条总线，两者分别存储，相互独立，指令和数据可以同时读取，而ARM7则采用的冯·诺依曼架构则是指令和数据共用总线和存储器。32位内核使STM32系列单片机的运行速度发生质的飞跃，STM32系列单片机内建

了嵌套向量中断控制器，允许多达240条外部中断输入，中断的嵌套不需要用软件代码而是在硬件上完成。另外，由于中断源不再由软件去判断，向量化的中断功能使中断延迟时间大幅缩短。

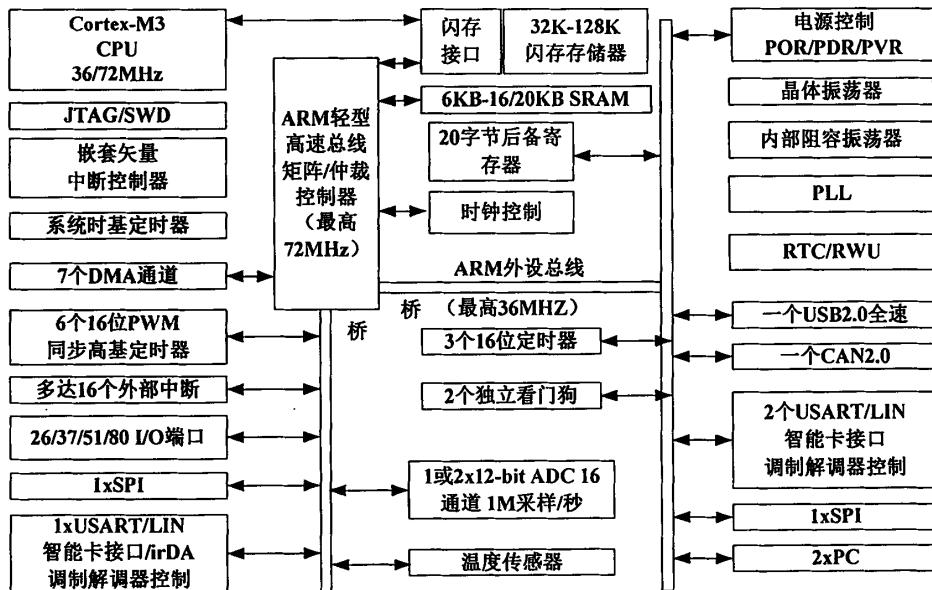


图 3-2 STM32F10x 内部结构框图

Fig. 3-2 Diagram of STM32F10x internal structure

2) 出色的低功耗优势。高性能并不总是伴随着高功耗。STM32微处理器对各种工作状态下的性能优化做了很多处理，即运行状态下高效率的动态耗电机制、电池供电时的低电压工作能力和待机时极低的电量消耗。这样，使用者就可以根据实际需求做出性能/功耗的合理优化。

3) 极丰富的内部资源、极高的集成度。STM32内部有USART、I²C、SPI、CAN等总线接口，还有ADC、看门狗、PWM定时器等相当多的资源。得益于STM32内嵌的电源监控器，最大程度上的减少了对外部器件的需求；使用一个主晶振即可驱动整个系统；LQPF100封装芯片的最小系统只需要7个外部无源元件。这些优势让使用者可以很轻松地用STM32进行开发，同时降低了开发难度。

3.2.3 Cortex-M3 内核简介

2005年，ARM公司推出ARM Cortex系列内核^[47]，分别为：A系列、R系列和M系列，其中，M系列的产品有M0、M1、M3，Cortex-M3主要应用在MCU领域。Cortex-M3具有低成本、低功耗、高性能、中断响应速度快、逻辑门数少等特点。Cortex-M3内核中嵌入新的Thumb-2指令集，新的Thumb-2内核技术保留了紧凑代码质量，并与现有的ARM方案的代码兼容，Thumb-2融合了16位与32位指令，实现了密度和性能的最佳平衡。采用性能强大的哈佛总线架构，指令总线与数据总线相互独立，而不是像冯·诺依曼架构那样共用总线，所以指令和数据的读取能够同步完成，使得应用程序的运行速度得到大幅提升，带分支预测的取指、译码、和执行的三级流水线^[48]，Cortex-M3加入了32位除法指令并改进了乘法运算部件，改进后的乘法运算部件一个时钟周期就能够完成32位乘法操作，Cortex-M3的乘法、乘加运算处理能力已经不逊于其他通用处理器，甚至逼近DSP的性能。

本系统选用STM32F103CBT6型，STM32F103CBT6芯片管脚图如图3-3所示。

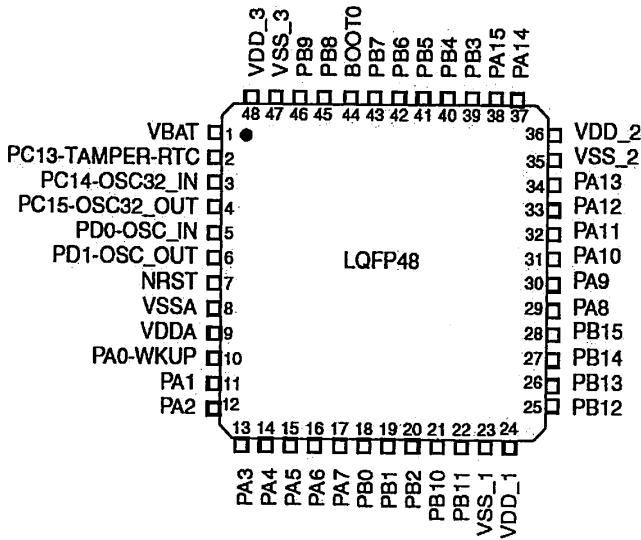


图 3-3 STM32F103CBT6 封装引脚图

Fig. 3-3 Encapsulation pin diagram of STM32F103CBT6

3.2.4 控制模块硬件电路

主控芯片的原理图如图3-4所示。晶振选取8MHz，并匹配两个22pF的电容。此外，还有一个为芯片内部实时时钟RTC提供基准计时的32.768KHz的晶振，同样有两个22pF的电容与之匹配。BOOT1和BOOT0均为连接100K电阻后接地，默认从用户闪存启动。

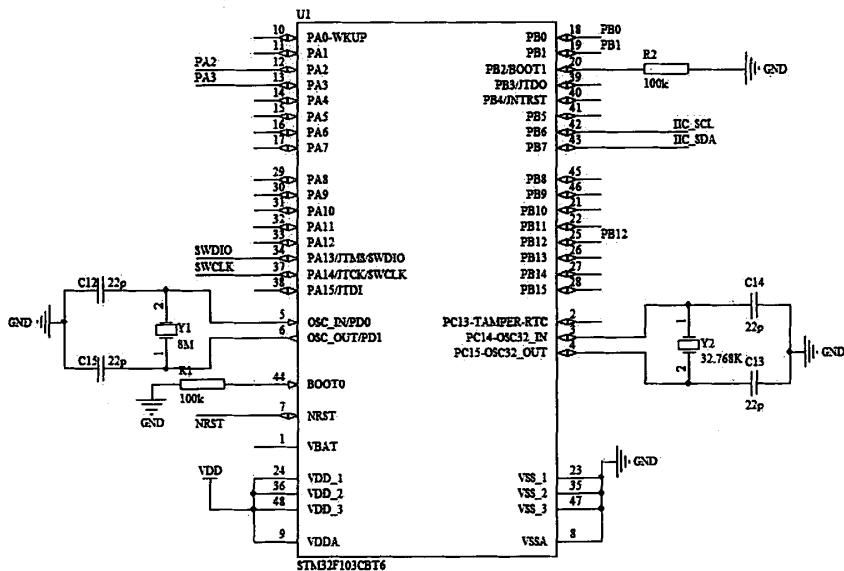


图 3-4 主控芯片原理图

Fig. 3-4 Schematic diagram of master chip

图3-5为系统复位电路，系统通过外部按键进行复位，当系统需要重启时，按下按键，主控芯片的NRST引脚立刻进入低电平，即完成复位。

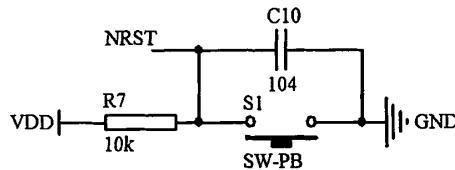


图 3-5 系统复位原理图

Fig. 3-5 Schematic diagram of system reset

本系统电源供电电路采用的芯片是AMS1117-3.3。AMS1117-3.3是一个正向低压降的线性稳压器，能将5V的输入电压降到3.3V输出，用来给ARM控制芯片供电，使电路可以获得稳定的电压。在芯片的输入端和输出端均有10uF和0.1uF的滤波电容，二极管的作用是防止电源反接。电路如图3-6所示。

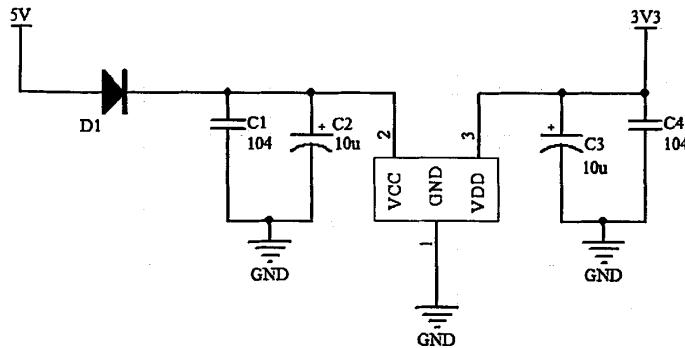


图 3-6 稳压电路原理图

Fig. 3-6 Schematic diagram of voltage stabilizing circuit

SWD调试接口电路原理图如图3-7所示。

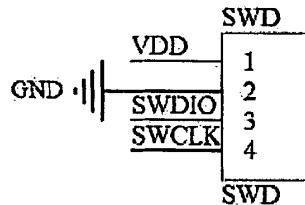


图 3-7 SWD 调试接口电路原理图

Fig. 3-7 Schematic diagram of SWD debugging interface circuit

3.3 高频信号发生电路设计

高频信号发生电路原理图如图3-8所示。采用一个频率为100MHz的有源晶振，它能够发出正弦电压信号，负责提供持续稳定的信号。该类型的有源晶振无需DSP的内部振荡器，3.3V电压供电。信号质量好，非常稳定，而且引脚少，连接方式

十分简单，无需复杂的配置电路。连接时，一脚(Tri-State)悬空，二脚接地(GND)，三脚接输出端(OUT)，四脚接电压(VDD)。为确保振荡器最佳性能，在距离GND和VDD之间最近的地方加一个0.1uF的电容。

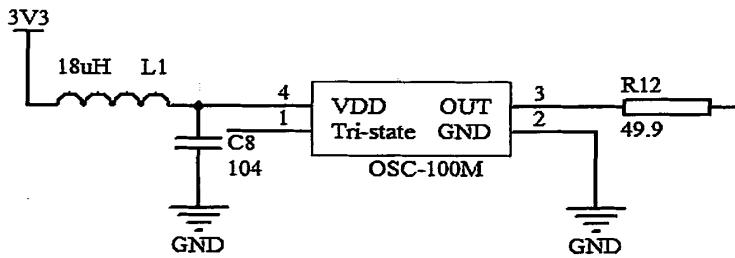


图 3-8 高频信号发生电路原理图

Fig. 3-8 Schematic diagram of high frequency signal

3.4 整流滤波电路设计

本设计采用HSMS-2805型肖特基势垒二极管作为整流二极管，由于HSMS-2805具有开关频率高、反向恢复速度快（几纳秒）、正向导通压降仅0.4V左右等优点，很适合用作高频整流二极管。HSMS-2805肖特基势垒二极管内部结构如图3-9所示。

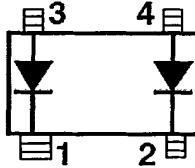


图 3-9 HSMS-2805 肖特基势垒二极管内部结构

Fig. 3-9 Inner structure of HSMS-2805 schottky barrier diode

在高频整流二极管后接入滤波电路，滤波电路采用 π 型RC滤波电路。 π 型滤波器实际上是一种二级滤波器，第一级电容和前级的输出阻抗组成一级滤波，初步滤除交流分量，由于前级的阻抗较小且电容对交流纹波而言仍有一定阻抗，所以经一级滤波后二级滤波之前还有一定的交流分量残留；再经由电阻和二级的电

容组成第二级滤波，再次减小纹波^[49]。滤波电路原理图如图3-10所示。

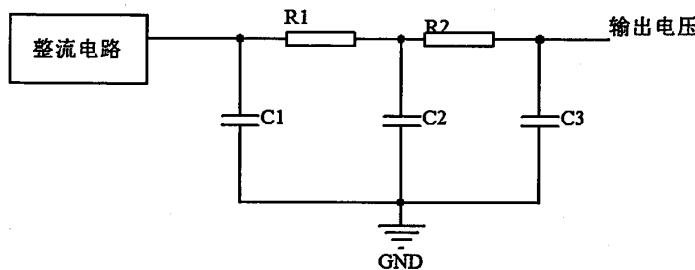


图 3-10 滤波电路原理图

Fig. 3-10 Schematic diagram of filter circuit

3.5 放大电路设计

放大电路使用的是LM224四运算放大器。LM224运算放大器具有电源电压范围宽，静态功耗小，可单电源使用，价格低廉等优点^[50]。探头采集的模拟信号经过整流滤波处理后，通过运放放大输入到单片机中进行后续的A/D转换和数据采集。在本设计中，LM224采用单电源工作，由于LM224不属于轨对轨放大器，所以输出电压要比其电源小1V多，采用5V电源输出3V多的电压。放大电路原理图如图3-11所示。

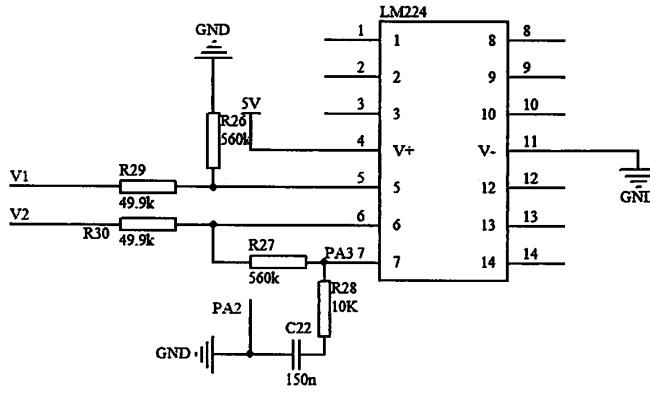


图 3-11 放大电路原理图

Fig. 3-11 Schematic diagram of amplifying circuit

3.6 探测单元设计

3.6.1 探测单元的类型与结构

探头的类型主要有平板式探头、两针式探头、三针式探头以及多针式探头等。平板式探头最显著的优点是两极板间的电场十分均匀，能够很好的避免针式探头的“趋肤效应”。但是其缺点同样明显，作为土壤湿度检测装置的探头，平板形状对土壤的破坏较大，这样很容易使测量结果失去准确性，而且过快的信号衰减速度也限制了平板式探头使用。针式探头中，两针式探头对土体的扰动最小，但是信号不集中且不稳定，噪声和信号损失有明显升高^[51]。解决方法是在探头和同轴电缆的连接处加入一个阻抗匹配器，这会使信号损失明显降低。三针式探头和多针式探头和同轴电缆在形式上十分接近，无需阻抗匹配器，而且信号非常稳定，几乎不破坏土体。

对于多针式探头而言，电磁场的大部分能量都聚集在探头的中间导体周围，这导致的结果就是测量结果极大程度上取决于中间探针周围介质的介电常数，中间探针周围微弱变化可能会造成相当大的误差，所以多针式探头也有很大的局限性。相比于三针式，两针式虽然对土壤扰动小，但是信号分散，信噪比逊于三针式，得出的信号没有三针式易于分析。综合考虑，本论文采用三针式金属探头。

过去几十年大多数的探头材料基本都在采用铜质材料，近些年的更多使用的是不锈钢材料，当然其他金属材料也是可以的。比如，1982年，Topp 和 Davis 等人用镀铝的 PVC 管制作了探头^[52]。验证表明，探头选择的材料对测试的结果并无明显影响，经济因素才是首先应该考虑的。

3.6.2 探头尺寸设计分析

1、探头的长度

理论上来讲，金属探头的长度与土壤湿度的测量是没有直接关系的，但从实际

来讲，两者是有紧密联系的。一般来说，探头越短，误差也就越大^[53]。当土壤是湿度较低的干土时，由于其介电常数较低，这种误差也更大^[54]。根据 Topp 等人在 1984 年的研究表明^[55]，采用 5cm 的探头时产生的误差相当大，他的结论是探头长度应该不小于 10cm。Mortl^[56]和 Beate Böhme^[57]分别在 2011 年和 2013 年对探头长度对土湿度的测试结果的影响做出了深入研究，研究结果验证了 Topp 的结论。另一方面，探头长度越长，导电介质上的信号衰减的越显著。

2、探头的直径和间距

探头的直径和间距是影响探测单元的特性阻抗的两个十分重要的因素。对于两针式探头来说，探测单元特性阻抗与探头间距成正比，而且探头也更方便插入土壤，因为受到的阻力相对较小，可是这会使更多的能量汇聚在在探头周围，这时得出的介电常数与实际的介电常数相差非常大。诸多实验表明，探头间距越大，图形越好，更容易分析。Knight 在 1992 年对在水平面上湿度变化的敏感性分析给出了详细的分析^[58]。根据研究，Knight 建议：对于两针式探头， d/s 应该不小于 0.1，这样探针周围的能量才不至于降低。对于三针式探头，Stein 和 Kane 在 1983 年的实验表明，探头平行与否对于测得的介电常数并无明显影响^[59]；Zegeliz 在 1989 年的实验表明，介电常数与三针式探头的间距无关^[60]。

3.6.3 探头的选择

综上所述，本文的探测单元选取不锈钢材料，探头长度 100mm，探头间距 13mm，探头直径 8mm。三根探头平行放置，由中间探头发送信号^[61]。最后，为了固定和保护作用，采用环氧树脂密封。

3.7 PCB 版图设计

PCB 版图设计采用 Altium Designer09 软件对系统进行 PCB 版图设计，Altium Designer09 是一个功能强大的一款软件开发平台，完美融合原理图设计、电路仿真、

PCB 版图绘制、拓扑逻辑自动布线、信号完整性分析和设计输出等诸多技术，给设计者提供了全新的设计解决方案，使设计者在设计时，大大提高了电路设计的效率^[62]。本设计的 PCB 版图是双层板，电源走线宽度 20mil，地线宽度 10mil，信号线宽度 8mil。版图如图 3-12 所示。

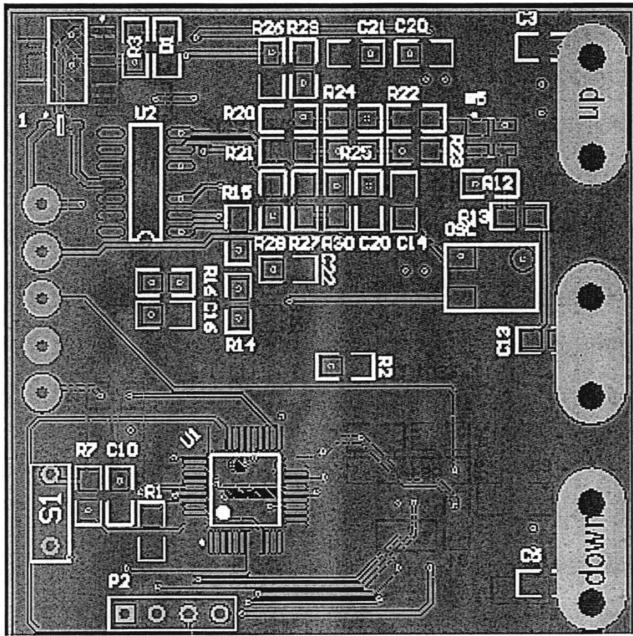


图 3-12 PCB 版图设计

Fig. 3-12 PCB circuit design

3.8 通讯模块的硬件设计

3.8.1 通讯方式的选择

通讯方式大体可分为两类：有线传输方式和无线传输方式^[63]。有线传输的最大优点是设计简单，而且无辐射，缺点是前期投资较高，铺设设备需要大量人力物力，而且易受地理环境、天气因素影响，局限性太大，在遇到一些地形复杂或是有移动物体等难以布线的特殊环境时，有线传输将面临很大的挑战^[64]。同时，

伴随着设备的老化，还需要后续的大量投入，这无疑再一次增加了成本。而无线传输却没有这些顾虑，无线传输方式不仅节省了人力物力，减少了投资，而且适应性要远远好于有线通讯，几乎没有地理环境方面的限制。尤其是在农林业方面，采取无线方式采集与传输土壤水分数据显然要比有线传输方式更有优势。

无线传输技术在当前最常用的有 WiFi、蓝牙、ZigBee、GPRS 技术等。其中，蓝牙、Wi-Fi、ZigBee 技术的工作频段都是全球通用使用的 2.4GHz ISM 无线频段。

1、Wi-Fi 技术

Wi-Fi 实际上是一种高频无线电信号，它以无线方式把个人 PC、手持设备等终端互相连接^[65]。Wi-Fi 技术的目的在于提高基于 IEEE 802.11 标准的各种无线网络产品之间的互通性，被 Wi-Fi 联盟所持有。Wi-Fi 的无线电波覆盖范围相对广，传播速度快，能够很好地满足个人和社会信息化的需求。虽然在安全性上没有蓝牙优秀，而且易受干扰，但是 Wi-Fi 在传输范围和传输速率方面有蓝牙技术无可比拟的优势。

2、蓝牙技术

蓝牙是生活中随处可见的短距离、低成本的无线传输技术^[66]，蓝牙的传输速率是 1Mb/s，传输距离大约在 10m 左右。蓝牙技术的应用十分广泛，大到医疗设备，小到耳机手机，都会见到蓝牙技术的影子。蓝牙的本质是建立一个通用的无线电空中接口，在互相之间没有电线或电缆连接的情况下，让不同厂家生产的便携式设备，能在短距离范围内具有互操作性的一门技术，从而真正的实现计算机和通信进一步结合。蓝牙技术有许多优点：蓝牙模块非常小，十分易于集成化，不需要特定的设备；全球范围使用；很强的抗干扰能力。

3、ZigBee 技术

ZigBee 是一种双向无线通讯技术，它的主要特点是近距离、低复杂度、低功耗、低速率、低成本，ZigBee 专注于短距离、低功耗和低传输速率的数据传输以及典型的有周期性数据（如传感器数据）、间歇性数据（如灯光控制）和快速反应数据传输（如安防系统）的应用^[67]。ZigBee 具有相当广泛的应用范围，包括家

庭和楼宇网络、工业控制、公共场所以及卫生医疗等方面。与蓝牙技术和 Wi-Fi 技术相比, ZigBee 技术具有两者不具备的网络扩展性, 网络节点数远远大于蓝牙的 263 个节点和 Wi-Fi 的 50 个节点, 达到了 65536 个节点^[68]。在网络覆盖范围内, ZigBee 模块之间可以直接进行数据传输, 通讯距离能够达到 75 米到几百米、几公里, 如果 ZigBee 模块组网, 距离甚至能够无限延伸。ZigBee 设备虽然传输速率不如蓝牙快, 但是功耗极低, 两节 5 号电池就能维持两年的使用时间, 相比之下蓝牙仅能工作数周, Wi-Fi 仅能维持数小时。而且, ZigBee 芯片的价格非常低廉。此外, ZigBee 还有极高的安全性, ZigBee 的循环冗余校验 (CRC) 的检查功能使数据包的完整性得到了有效保证, 而且为了让各个应用可以灵活的确定其安全性, 支持鉴权和认证和 AES-128 加密算法^[69]。ZigBee 独特的碰撞避免机制为数据传输的安全性提供了又一层有力保障。三种 2.4GHz 频段工作的无线传输方式的参数对比如表 3-1 所示。

表 3-1 三种无线传输方式的参数对比

Table 3-1 Comparing the parameters of three wireless transmission methods

| 通信方式 | Zigbee | 蓝牙 | 02.11b(Wi-Fi) |
|---------|---------------|-----------------|---------------|
| 单点覆盖距离 | 50~300m | 10m | 50m |
| 电池寿命 | 数年 | 数天 | 数小时 |
| 传输速率 | 250Kbps | 1Mbps | 1 to 11Mbps |
| 频段 | 868Mhz-2.4Ghz | 2.4Ghz | 2.4Ghz |
| 网络节点数 | 65000 | 8 | 50 |
| 安全性 | 128 bit AES | 64 bit ,128 bit | SSID |
| 集成度和可靠性 | 高 | 高 | 一般 |
| 使用成本 | 低 | 低 | 一般 |
| 调制方式 | DSSS | GFSK | DSSS |
| 系统资源要求 | 4Kb~32Kb | 512Kb | 1Mb |

通过以上的对比, 鉴于 ZigBee 的低功耗、低成本、优良的网络拓扑能力、安全性高等^[70]诸多方面优点, 本文采用 ZigBee 对 FDR 土壤湿度检测装置进行信号传输。

3.8.2 Zigbee 接口电路设计

ZigBee接口电路原理图如图3-13所示。测得的模拟信号经由单片机采集数据和A/D转换之后，得到的数字信号将直接利用串口送到ZigBee发送模块，随后，该信号经ZigBee发送模块送入ZigBee接收模块，再通过RS232串口发往上位机。

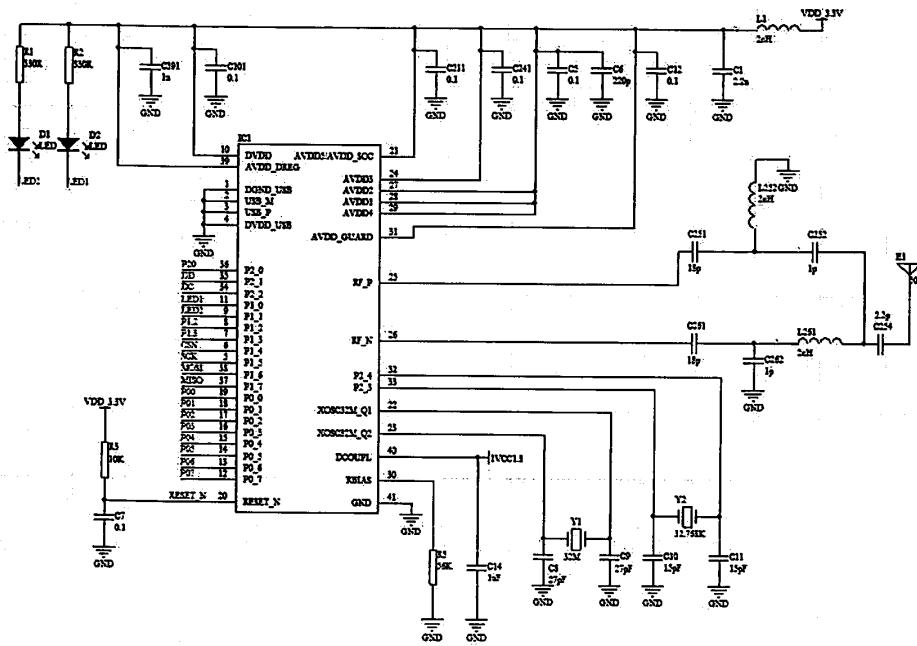


图 3-13 ZigBee 接口电路原理图

Fig. 3-13 Schematic diagram of ZigBee interface circuit

3.9 本章小结

本章介绍了整个系统的硬件结构。本设计采用 STM32F103CBT6 作为土壤湿度检测装置的控制器，并详细介绍了控制器的性能与特点；探测单元选择了平行放置的三针式结构，并给出了几何参数，最后选择了 ZigBee 无线传输方式实现 FDR 土壤湿度检测装置的信号传输。

第4章 FDR 土壤湿度检测装置的软件设计

4.1 土壤湿度检测软件设计

探测单元返回的模拟信号经过单片机进行 A/D 转换，单片机输出数字信号后送到 Zigbee 模块，最终发送到上位机，土壤湿度的信号处理过程如图 4-1 所示。

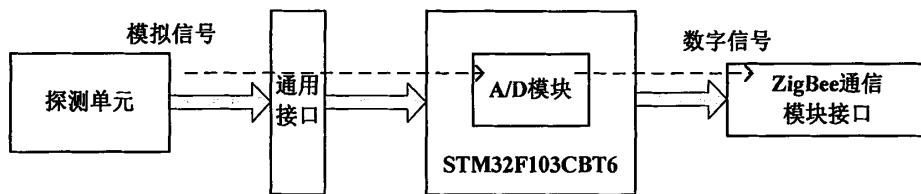


图 4-1 信号处理过程图

Fig. 4-1 Signal processing diagram

4.1.1 嵌入式系统主程序

系统的主程序的作用主要是将系统用到的所有模块的变量初始化，然后程序跳入 main 函数，为了使程序能够一直运行下去，在 main 函数中加入死循环。执行循环查询操作的模块有 ADC 采集电压，RTC 获取时间值，然后将返回值送到 Zigbee 模块。

main 函数采用无限循环方式运行整个程序，具体应用到的几个主要子函数如下：

```

while(1)
{
    update_rtc_time();
    time_and_voltage();
    data_to_trans ();
}

```

主程序流程图如图 4-2 所示：

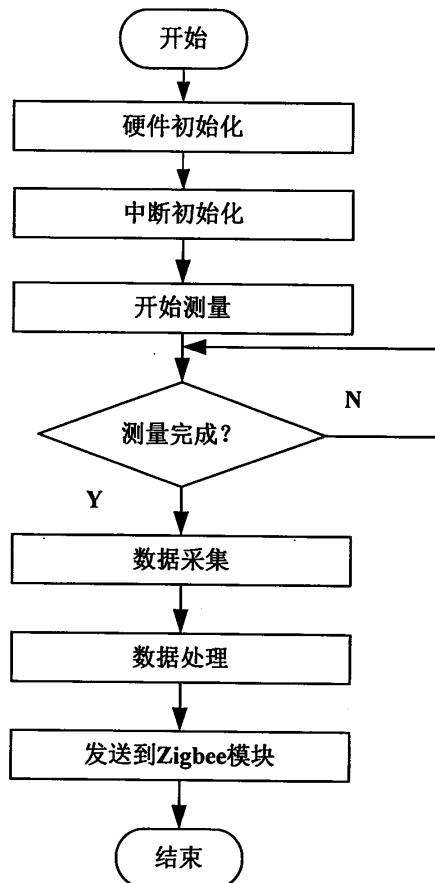


图 4-2 主程序的流程图

Fig. 4-2 The main program flow chart

4.1.2 A/D 转换程序

STM32 中的 AD 模块被设置在单通道模式下工作，并将其配置为单次转换模式，A/D 转换由软件触发启动，模拟信号转换为数字信号的程序流程图如图 4-3 所示。

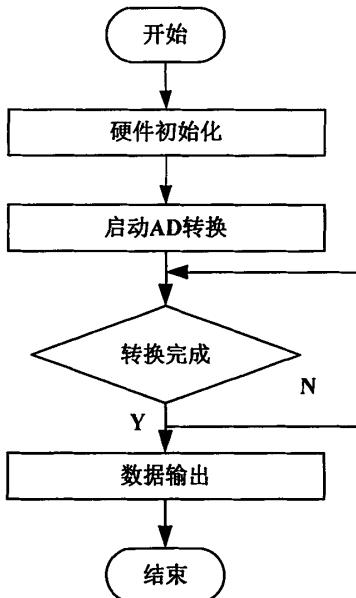


图 4-3 A/D 程序流程图

Fig. 4-3 A/D program flow chart

A/D 转换代码如图 4-4 所示。

```

167: void Adc_Init(void)
168:
169:     ADC_InitTypeDef ADC_InitStructure;
170:     GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStructure;
171:     RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_GPIOA | RCC_APB2Periph_ADC1, ENABLE); //使能ADC1通道时钟
172:     RCC_ADCCLKConfig(RCC_PCLK2_Div6); //设置ADC分频因子6
173:
174:     //PA2 作为模拟通道输入引脚
175:     GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = GPIO_Pin_2;
176:     GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AN; //模拟输入引脚
177:     GPIO_Init(GPIOA, &GPIO_InitStructure);
178:
179:     ADC_DeInit(ADC1); //复位ADC1,将外设 ADC1 的全部寄存器重设为缺省值
180:
181:     ADC_InitStructure.ADC_Mode = ADC_Mode_Independent;
182:     ADC_InitStructure.ADC_ScanConvMode = DISABLE; //模数转换工作在单通道模式
183:     ADC_InitStructure.ADC_ContinuousConvMode = DISABLE; //模数转换工作在单次转换模式
184:     ADC_InitStructure.ADC_ExternalTrigConv = ADC_ExternalTrigConv_None; //转换由软件触发启动
185:     ADC_InitStructure.ADC_DataAlign = ADC_DataAlign_Right; //ADC数据右对齐
186:     ADC_InitStructure.ADC_DutyOfChannel = 1; //顺序进行规则转换的ADC通道的数目
187:     ADC_Init(ADC1, &ADC_InitStructure);
188:
189:
190:     ADC_Cmd(ADC1, ENABLE); //使能ADC
191:     ADC_ResetCalibration(ADC1); //使能复位校准
192:     while(ADC_GetResetCalibrationStatus(ADC1)); //等待复位校准结束
193:     ADC_StartCalibration(ADC1); //开启AD校准
194:     while(ADC_GetCalibrationStatus(ADC1)); //等待校准结束
  
```

图 4-4 A/D 转换代码

Fig. 4-4 A/D conversion codes

4.2 ZigBee 无线传输软件设计

4.2.1 Zigbee 协议综述

ZigBee 标准堆栈架构是根据市场和应用的实际需要在 OSI 七层模型的基础上设计的，是在 IEEE 802.15.4 标准基础上建立的。完整的 ZigBee 协议栈自下而上包括物理层（PHY）、媒体访问控制层（MAC）、网络层（NWK）和应用层（APL）^[71]。IEEE802.15.4 工作委员会制定了 ZigBee 协议栈的物理层和媒体访问控制层协议^[72]；ZigBee 联盟负责制定了网络层、应用层规范。ZigBee 联盟同时负责 ZigBee 技术的互联互通测试和市场推广。ZigBee 体系结构框图如图 4-5 所示。

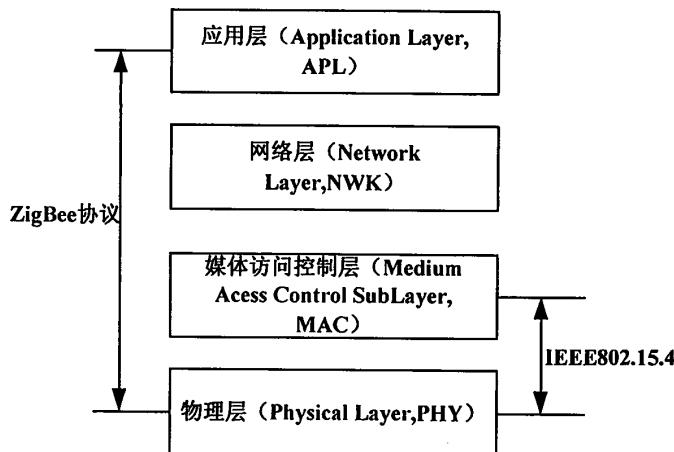


图 4-5 ZigBee 体系结构框图

Fig. 4-5 The architecture of ZigBee stack

1、物理层

物理层存在数据服务接入点和物理层实体服务接入点，为 MAC 子层提供物理连接，物理层主要有两项基本服务：物理层数据服务和物理层管理服务。具体功能有：ZigBee 设备的激活与关闭，检测当前信道的能量，信道频率的选择，空闲信道评估，通过收发器进行数据的接受和发送。

2、MAC 层

MAC 层介于物理层和网络层之间，MAC 层参考模型如图 4-6 所示。

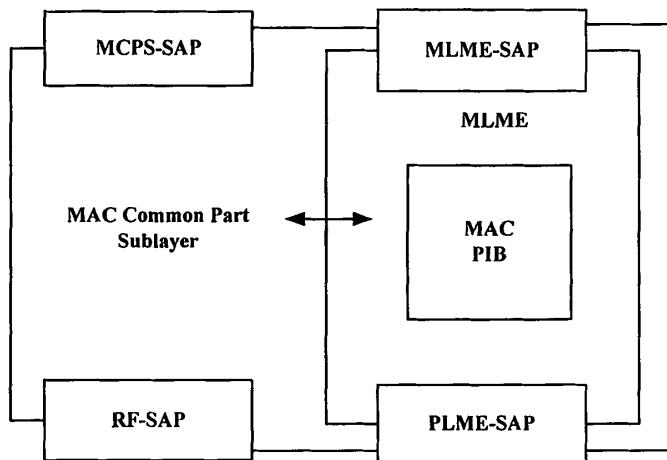


图 4-6 MAC 层参考模型

Fig. 4-6 MAC layer reference model

MAC 层同样包含两项服务：MAC 层数据服务和 MAC 层管理服务。所有的物理无线信道访问、网络信号与同步信号的产生都是由 MAC 层来处理；另外，两个对等 MAC 实体之间的有效链路，PAN 的连接和脱离也都是由 MAC 层来提供。

MAC 层的主要功能有：建立、维护和解除设备间的无线链路；管理广播信息；通道接入控制；确认模式的帧数据的收发；帧校验；预留时隙管理^[73]。

3、网络层

网络层介于 MAC 层和应用层之间，是 ZigBee 协议栈的核心。网络层为 MAC 层提供函数使其能够正常操作，同时提供给应用层服务接口，有了网络层，MAC 层和应用层才能够完成正常的数据传输。一个节点能否加入或离开网络、其他节点能否被该网络接收、路由查找及数据传送均由网络层来决定。网络层参考模型如图 4-7 所示。

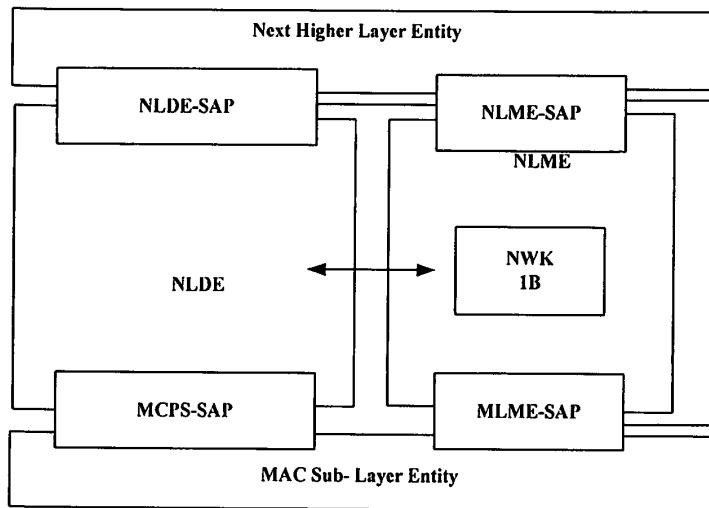


图 4-7 网络层参考模型

Fig. 4-7 NWK layer reference model

网络层的主要功能有：连接 MAC 层和应用层，并服务于上一层；加入和离开网络；把设备接入网络；发现和维护路由信息；发现一跳邻居的节点；存储邻居节点信息；信息库维护^[74]。

4、应用层

ZigBee 应用层是 ZigBee 协议栈的顶层，由三个部分组成：应用支持层（APS）、ZigBee 设备对象（ZDO）和制造商所定义的应用对象（ZigBee 应用层）^[75]。

应用支持层的功能有：构建和维护绑定表、在绑定的设备之间传送消息，促进数据的稳定传输。

ZigBee 设备对象（ZDO）的功能有：搜索网络中的其他设备，从而根据具体情况选择为其提供具体服务；定义网络中的设备的角色（如 ZigBee 协调器和终端设备）；开始和回答绑定请求；在网络设备之间建立安全机制。

ZigBee 应用层不仅为网络层提供适当的服务接口和一些必要函数它的另一个重要的功能是让应用者能在这一层定义自己的应用对象^[76]。

4.2.2 Zigbee 的组网

在一个 ZigBee 网络中，最多可以存在 65000 多个节点，其中的每个节点都具有数据的收发能力。这些节点互相通信，可以组成多种网络拓扑类型，主要有以下三种不同的拓扑结构：星型结构，网状结构和树型结构^[77]。根据不同的需要，可以选用不同的类型。三种拓扑结构如图 4-8 所示。

星型网络拓扑结构中，网络中的各个节点通过点到点的方式连接到一个中央节点，在整个网络中，存在且只存在唯一一个网络协调器，即网络的枢纽。网络中的其他节点之间的通讯必须通过协调器才能完成，协调器可起到路由器的作用。星型拓扑结构的最大的优点是控制简单，结构简单，连接方便，所有节点只和协调器连接，所以访问协议也非常简单，易于监控和管理；此外，一旦发生故障，协调器可以逐一对节点进行故障检查和定位，发生故障的设备不会影响其他设备。

树型网络拓扑结构属于星型网络拓扑结构的拓展型结构，同样只有唯一一个协调器，可以被当做多个星型网络拓扑结构的联合。所有终端节点和路由器都可以和网络协调器组成网络，节点之间若要通信，只能沿着树型网络建立时形成的路由路径，任意两个节点不产生回路，任意一条通路都可以进行双向传输^[78]。树型网络拓扑结构的优点在于连接方便，维护方便，但是这种结构对动态环境的要求非常高，一旦其中的某个路由器节点出现问题，以它为父节点的所有子节点也将停止工作，这个小网络就会脱离整个网络。所以，这种网络拓扑结构的可靠性较低，任何一个链路发生故障都会影响整个网络的运行。

网状网络拓扑结构是在树型网络拓扑结构基础上完成的。它与树型网络拓扑结构一样属于多跳网络，由唯一一个协调器，多个路由器和多个终端设备组成。网状结构与树型网络的区别在于，在网状结构中的所有具有路由功能的节点在网络中都可以直接互连，协调器和路由节点之间，两个路由节点之间，都能够完成通信。在转发数据时，一旦网络中的某个路由器失效，这个发送数据的节点会寻找一个替代的路由器完成转发，从而提高了可靠性。然而，由于传感器网络节点

数量大，分布随机分散，拓扑结构十分复杂，维护和修复十分困难，而且节点随时保持“监听”状态以监控网络状态变化，这不仅会增加能量损失、而且降低了网络寿命。

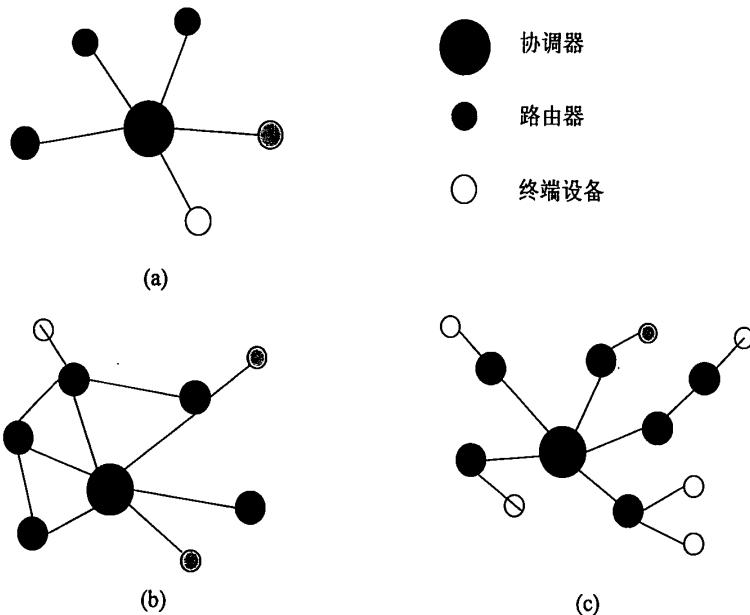


图 4-8 (a)星型拓扑结构, (b)网型拓扑结构, (c)树型拓扑结构

Fig. 4-8 (a)Star Topology,(b)mesh Topology,(c)tree Topology

三种网络拓扑结构的优缺点对比如图表 4-1 所示。

表 4-1 三种拓扑结构优缺点对比

Table 4-1 Comparing the advantages and disadvantages of three network topology

| 拓扑结构 | 优点 | 缺点 |
|------|---------------|-----------|
| 星形 | 结构简单、容易实现、延时小 | 中心节点易称为热点 |
| 树形 | 链接容易、维护简单 | 可靠性低 |
| 网状 | 可靠性高、易扩展 | 结构复杂、实现困难 |

从以上的分析可以得知，星型网络拓扑结构结构相对简单且易于实现，访问协议非常简单，组网方便，网络延迟时间较小，传输误差低，最重要的是成本较

低，所以最适合实验室应用，本文选取的就是这种结构。图 4-9 所示为 ZigBee 节点入网流程图。

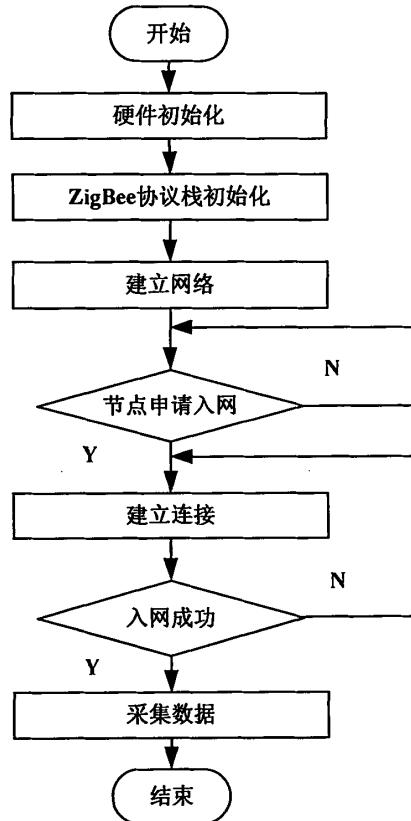


图 4-9 ZigBee 节点入网流程图

Fig. 4-9 ZigBee node joining network flow chart

4.2.3 Zigbee 数据传输及故障分析

在实验时，需要先进入 Zigbee 的参数配置状态，随后读取模块配置参数，该模块参数输出帧格式，为 2 字节节点地址+14 字节数据，具体格式如表 4-2 所示。随后在相应的位置上修改 14 字节数据，并将其写入命令。

表 4-2 字节格式

Table 4-2 Byte format

| 字节 | 内容 |
|-------|---------|
| 1 字节 | 节点地址高八位 |
| 2 字节 | 节点地址低八位 |
| 3 字节 | 网络 ID |
| 4 字节 | 网络类型 |
| 5 字节 | 节点类型 |
| 6 字节 | 发送模式 |
| 7 字节 | 波特率 |
| 8 字节 | 数据校验 |
| 9 字节 | 数据位 |
| 10 字节 | 数据类型 |
| 11 字节 | 串口超时 |
| 12 字节 | 信道 |
| 13 字节 | 发射功率 |
| 14 字节 | 数据源地址选项 |

ZigBee 网络中，如果整个网络的覆盖范围较大，可能会需要一个 ZigBee 路由器为传感器节点作为中转站，既可以把该路由器当做一个直接向协调器传输数据的传感器节点，也可以通过它把其他节点采集的数据间接向协调器发送。由于 ZigBee 路由器在 ZigBee 网络中的存在，数据的传输一定会发生时间延迟，这导致的结果是土壤湿度检测装置得到的数据缺乏实时性和准确性。另外，随着 ZigBee 路由器的增多，数据不仅会更频繁的由路由器中转，而且也增加了节点之间的距离，这将带来更大的功耗。所以，为了降低数据传输的延时、提高数据的实时性、降低功耗，应该尽可能的让终端节点与协调器直接进行数据传输，避免使用 ZigBee 路由器，并缩短节点之间的间距。

4.3 PC 端软件设计

为了把 FDR 土壤湿度检测装置测得的数据实时、快速且直观的在上位机上显示，使用户能够随时的查看土壤湿度的变化情况，设计了一套在 windows 平台上

运行的 PC 端软件，以 Visual Studio2010 作为开发环境，以 C# 作为开发语言，并结合 SQL Server 数据库软件，从而实现上位机的存储、查看等功能。

4.3.1 开发平台简介

微软公司开发的 Visual Studio2010 在教学、商业使用等众多方面均有着广泛应用。Visual Studio2010 具有集成开发环境(IDE)和可视化编程界面，还支持 C、C++、VB、C# 多种编程语言进行开发。可视化编程界面如图 4-10 所示。

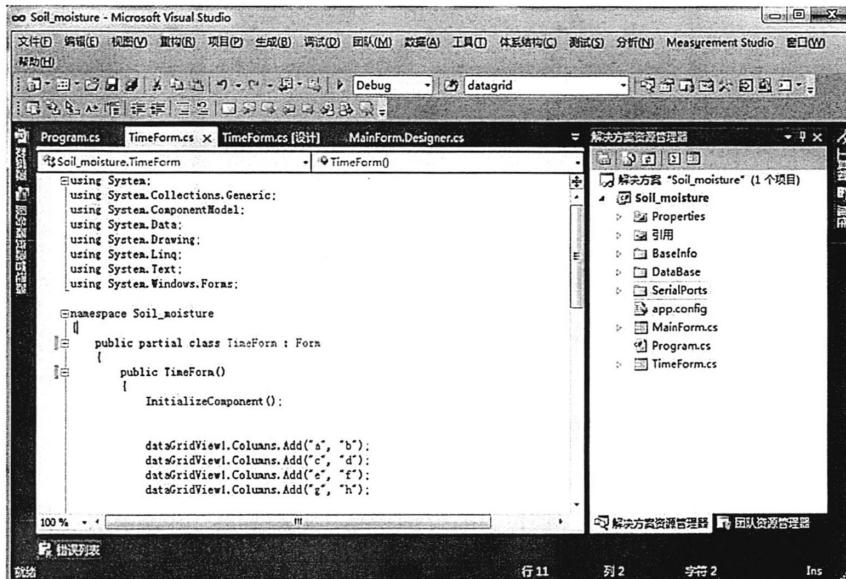


图 4-10 VS2010 可视化编程界面

Fig. 4-10 VS2010 visual program interface

解决方案管理器如图 4-11 所示。Visual Studio2010 的可视化编程特点为程序开发人员带来了极大的便利。本设计利用 C# 编程语言开发上位机软件。具体步骤如下：首先建立项目，选择 windows 窗体应用程序，设置存储名和存储路径；由于设计中用到了数据库和公共类函数，所以在解决方案管理器中，新建 BaseClass 和 Database 两个分类文件夹分别存储数据库和公共类，并新建一个 Image 文件夹来保存登陆界面背景图和存储界面。

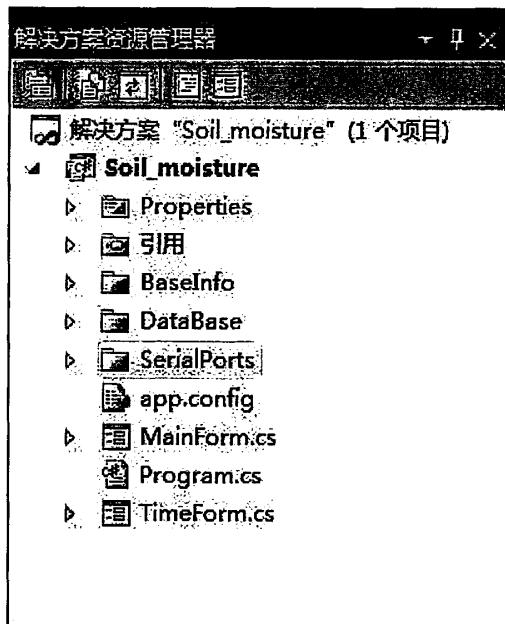


图 4-11 解决方案管理器界面

Fig. 4-11 Solution management interface

4.3.2 PC 端软件模块化设计

根据系统对功能的需求对软件做出逻辑划分，对系统进行模块化，按照逻辑关系连接每个模块，利用 API 接口进行连接和调用。模块化结构如图 4-12 所示。管理系统主要分为两个模块：串口设置模块和数据库管理模块。串口设置模块主要实现波特率设置、COM 口设置和数据位设置等功能；数据库管理模块主要实现土壤湿度数据的存入、土壤湿度数据的导出以及土壤湿度数据的查询功能。通过对软件设计进行模块化的区分，降低软件设计的复杂性，提高软件设计的效率，使程序设计、调试和维护等操作简单化。

数据库管理模块使用的是 SQL Server 2008。SQL Server 是一种关系采用了一套集成的管理工具以及相应的应用编程接口的数据库管理系统，这不仅促进 SQL

Server 的可操作性和可管理性，还可以更好地支持大型数据库配置^{[79][80]}。在 VS2010 添加必要的公共类函数之后，启动 Microsoft SQL Server Management Studio 建立数据表，数据表中包括区域编号、检测装置编号、日期、土壤湿度值等。

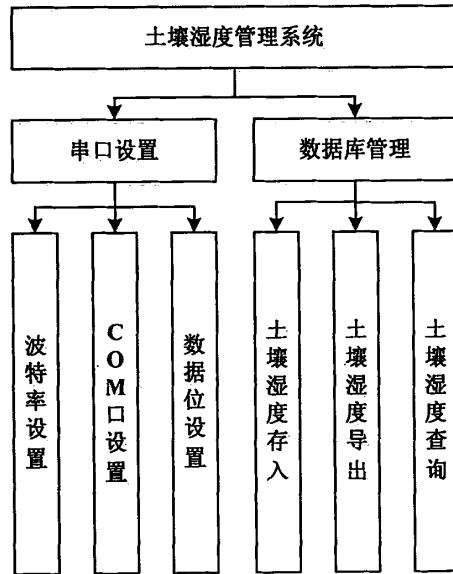


图 4-12 管理系统结构框图

Fig. 4-12 Diagram of management system structure

4.3.3 PC 端软件设计

将测试区域分为四个区，把每块区域分为3个小块，一个小块放置一个检测装置，并为其标号。通过上位机软件监控每个小区的土壤湿度变化情况，当需要了解某个区域的实时数据时，点击标号即可显示；点击历史数据选项可以查询湿度的历史数据；当某个节点出现故障时，可以快速找出故障设备；同时在湿度脱离正常范围时，会有湿度报警。采集频率设置为20分钟一次。土壤湿度在线监测系统界面如图4-13所示。

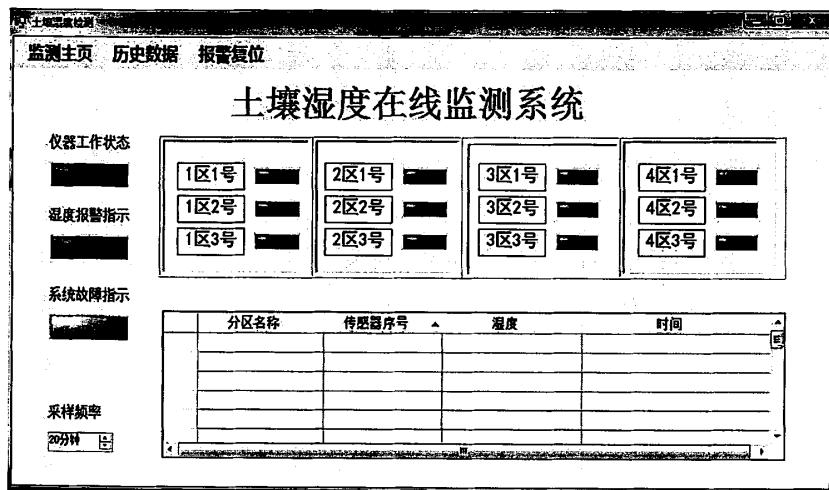


图 4-13 土壤湿度在线监测系统

Fig. 4-13 Soil moisture on-line monitoring system interface

上位机软件还实现了历史数据查询功能，如图 4-14 所示。用户根据自己的需要来查询或者导出一个时间段内的某一个具体的装置的历史数据，并以曲线形式呈现出来。

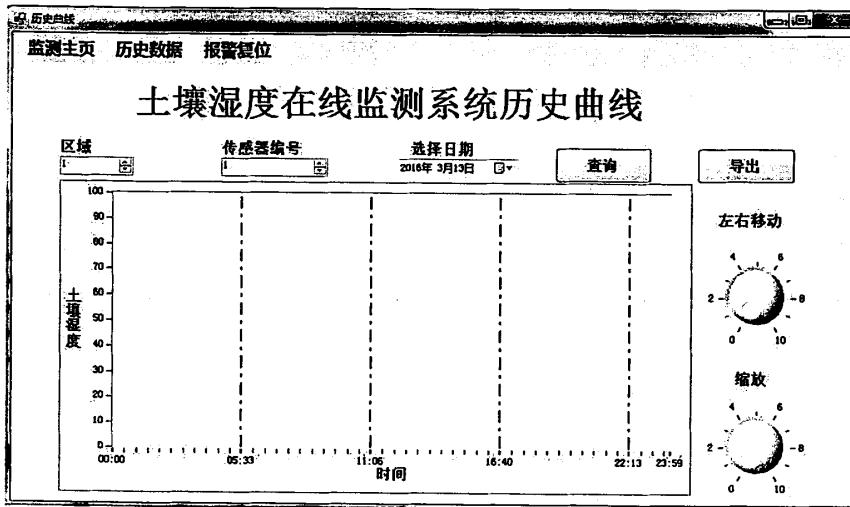


图 4-14 土壤湿度历史数据界面

Fig. 4-14 Soil moisture historical data interface

4.4 本章小结

本章详细介绍了土壤湿度检测装置的嵌入式系统软件设计、A/D 转换软件设计，然后介绍了 ZigBee 协议和三种网络拓扑结构，阐述了 ZigBee 无线传输的软件设计，最后设计了一套基于 VS2010 平台、在 Windows 系统下的 PC 端应用软件，实现了土壤湿度数据的在线监测功能。。

第 5 章 系统测试与数据分析

5.1 土壤湿度检测装置的标定与测试

标定方法使用的是烘干法。取一定量含有一定水分的土壤进行烘干，每间隔两个小时进行一次检测装置的电压值和质量含水量的记录，连续记录十组数据。标定数据如表 5-1 所示。

表 5-1 电压值和质量含水量的标定数据

Table 5-1 Calibration data of voltage and mass water content

| 电压 (V) | 质量含水量测量值 (%) |
|--------|--------------|
| 1.55 | 31.842 |
| 1.38 | 25.458 |
| 1.1 | 17.041 |
| 0.95 | 13.988 |
| 0.81 | 12.974 |
| 0.74 | 12.014 |
| 0.6 | 11.378 |
| 0.54 | 9.855 |
| 0.43 | 8.047 |
| 0.05 | 0 |

通过测量数据可以得到如图 5-1 所示的测试点趋势图。测试点趋势图形呈现三次曲线变化，所以利用三次多项式拟合，曲线拟合后得到的结果如公式 (5-1) 所示：

$$Y = 17.964X^3 - 37.206X^2 + 36.374X - 1.7397 \quad (5-1)$$

上式即为标定公式。式中，Y 表示质量含水量，X 表示土壤湿度检测装置测量的电压值。

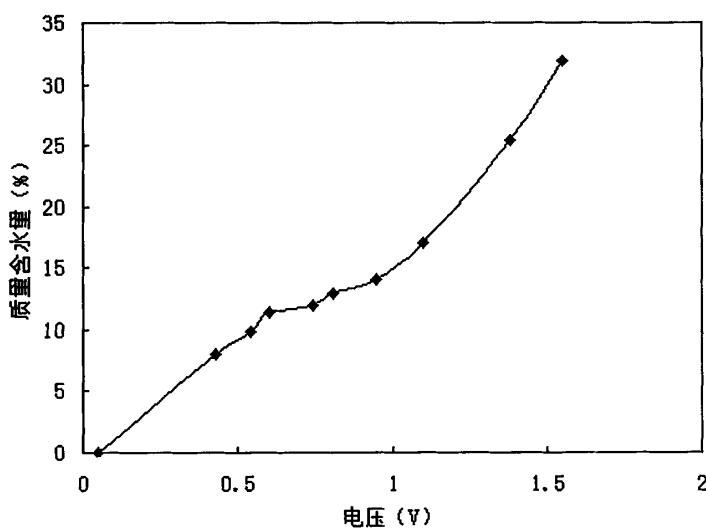


图 5-1 测试点趋势图

Fig. 5-1 Diagram of testing points trend

重复进行一遍以上的标定方法，再做一遍测试，验证公式（5-1）的正确性。

测试数据如表 5-2 所示。

表 5-2 电压值和质量含水量的测试数据

Table 5-2 Test data of voltage and mass water content

| 电压 (V) | 质量含水量测量值 (%) |
|--------|--------------|
| 1.58 | 31.296 |
| 1.42 | 26.372 |
| 1.25 | 19.356 |
| 1.03 | 14.135 |
| 0.93 | 13.541 |
| 0.79 | 12.178 |
| 0.63 | 11.534 |
| 0.57 | 10.132 |
| 0.48 | 9.084 |
| 0.25 | 7.014 |

通过公式(5-1)可以换算出土壤湿度理论值,从而得到土壤湿度测试值与理论值的对比如表5-3所示。

表5-3 质量含水量的测试值与理论值对照表

Table 5-3 Table of test values and theoretical values of mass water content

| 电压(V) | 质量含水量测量值(%) | 质量含水量理论值(%) | 误差(%) |
|-------|-------------|-------------|-------|
| 1.58 | 31.296 | 33.706 | 2.41 |
| 1.42 | 26.372 | 26.325 | 0.47 |
| 1.25 | 19.356 | 20.679 | 1.32 |
| 1.03 | 14.135 | 15.883 | 1.75 |
| 0.93 | 13.541 | 11.936 | 1.61 |
| 0.79 | 12.178 | 12.643 | 0.47 |
| 0.63 | 11.534 | 10.901 | 0.63 |
| 0.57 | 10.132 | 10.232 | 0.10 |
| 0.48 | 9.084 | 9.134 | 0.50 |
| 0.25 | 7.014 | 5.309 | 1.75 |

土壤湿度测量值在标定拟合曲线上的分布情况如图5-2所示。

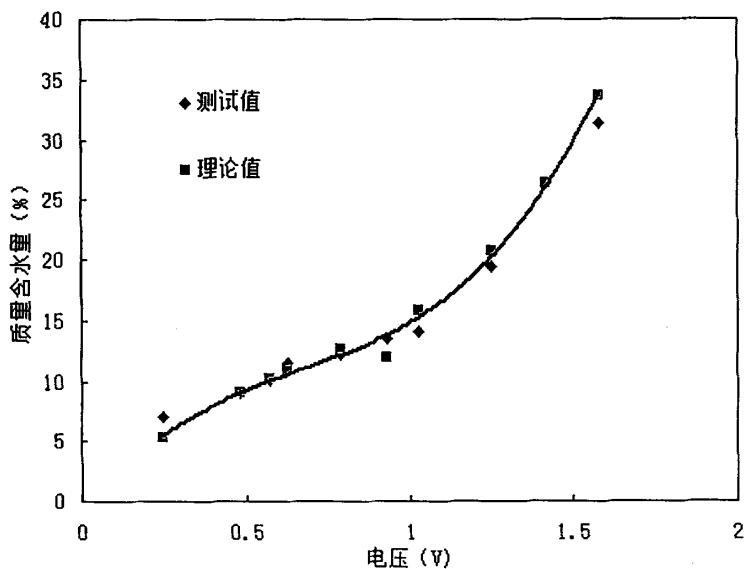


图5-2 测试值在标定拟合曲线上的分布图

Fig. 5-2 Diagram of test value distribution on the calibration fitting curve

由质量含水量的测试值与理论值对照表和测试值在标定拟合曲线上的分布图不难看出，测试点与拟合曲线具有很好的相关度，且误差低于3%，满足预期要求。

5.2 ZigBee 数据传输测试

ZigBee 星型网络使用一个 ZigBee 接收端和两个 ZigBee 发送端组成。测试平台如图 5-3 所示。ZigBee 接收端和 ZigBee 发送端在工作时，ZigBee 发送端把单片机 A/D 转换之后的数字信号发送到无线信道，随后，通过串口与 PC 机连接的 ZigBee 接收端开始接收无线信道的数据。在 PC 机上需要利用串口调试助手选择 COM 口、设置波特率、设置数据位和校验位。

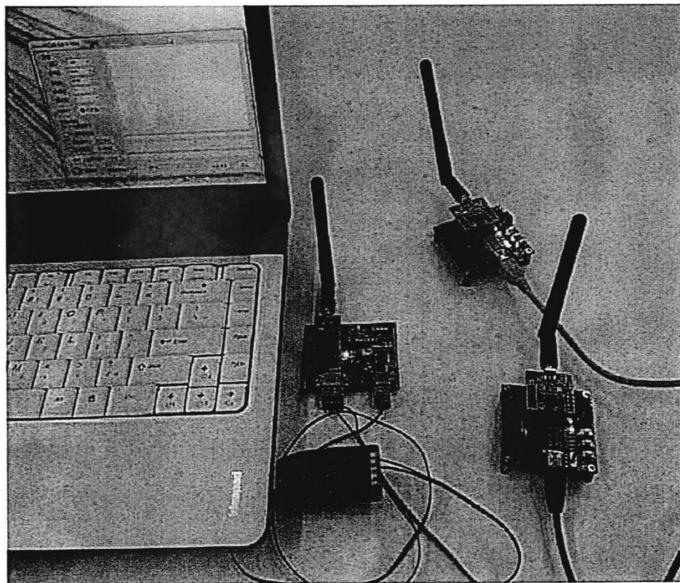


图 5-3 ZigBee 数据传输测试平台

Fig. 5-3 Data transmission test platform of ZigBee

ZigBee 数据传输可以稳定地长时间工作，并能进行数据的正常传输。通过测试，证明了 ZigBee 数据传输系统的可行性。

随后，连接 ZigBee 发送端与 FDR 土壤湿度检测装置，使测量的土壤湿度数据由发送端传输到接收端，最后连接 PC 端与接收端。实物图如图 5-4 所示。

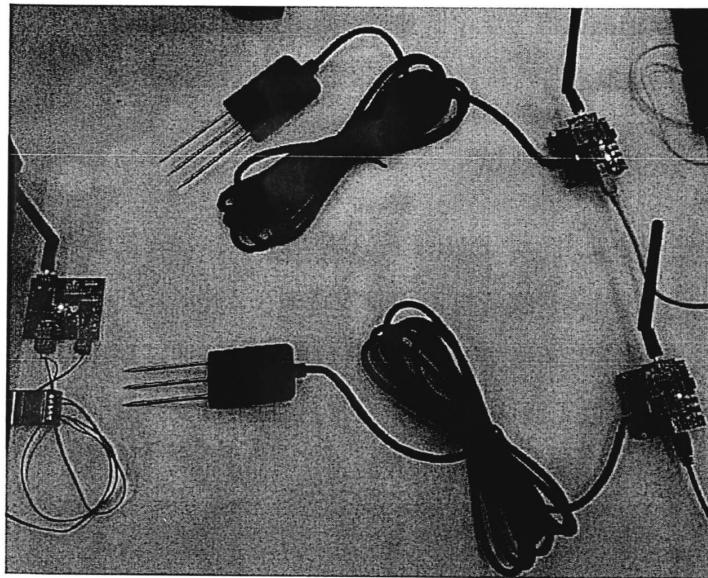


图 5-4 系统实物图

Fig. 5-4 System actual picture

5.3 测试结果分析

综合 FDR 土壤湿度检测装置、ZigBee 数据传输的整体测试，满足本设计的设计要求，大体达到了预期标准，但仍有一些细节有待改进。首先，如果可以不考虑成本问题，本设计可以采用性能更强大的 ARM 芯片；另外，在测量湿度较高的土壤时会有较大的误差；最后，本设计未将温度因素对土壤湿度的影响考虑在内，这可能会对测量结果有一定影响。因此，尽管系统可以达到预期效果，但仍有进一步提高性能和稳定性的空间。

5.4 本章小结

本章主要对土壤湿度检测装置进行了标定和测试，随后又进行了 ZigBee 数据传输的测试，最后对整个系统进行测试。测试表明各个模块均能正常工作，整个系统运行正常，达到了预期设计要求，因此，本设计有一定的应用价值。

结论

本文设计了一个基于 FDR 技术的土壤湿度检测装置。通过网络和图书馆查阅大量相关文献，了解了目前土壤湿度检测的多种方法，研究出一种与 ZigBee 无线传输相结合的、能够实现无线数据传输的 FDR 土壤湿度检测装置，实现了高精度、速度快、可大规模组网的土壤湿度监测系统。本论文主要工作如下：

1、本文对 FDR 基本传感原理以及土壤的介电特性进行深入研究，并确定了检测装置采用的频率，设计了土壤湿度检测装置的硬件电路，详细介绍了各个模块的功能，并印刷成 PCB 版，形成硬件测试电路，重点说明了探测单元的设计，包括类型、结构和几何参数等。

2、完成了 FDR 土壤湿度检测装置的软件设计，并针对目前中国农业上较少采用无线组网的现状，本文将土壤湿度检测装置与 ZigBee 无线传输技术融合，重点分析了 ZigBee 无线传输的原理并对几种主要的网络拓扑结构进行分析，确定了星型网络拓扑结构作为本设计的组网方式，实现了土壤湿度检测的网络化。

3、设计了一套 PC 端软件，介绍运行在 windows 系统上的编程环境，利用 C# 语言软件编程，并与 SQL 数据库连接，实现对土壤湿度值的存储、查询等功能，实现了 ZigBee 无线网络与上位机的通讯。

4、标定并测试了土壤湿度检测装置，其误差不超过 3%，达到了设计要求；并对 ZigBee 数据传输功能进行了测试，星型网络拓扑结构的基本功能得以实现。最后通过整体测试，了解该设计的性能与稳定性能够达到预期要求。因此本设计能够在农业上测量土壤湿度方面应用，并且比传统上的分立式传感器有更高的效率。

虽然本文基于 FDR 原理的土壤湿度检测装置做出了深入研究并取得一定成果，但是仍有很多地方需要改进和更新，主要包括以下几方面：

首先，如果可以不考虑成本约束，本设计可以采用性能更强大 ARM 芯片，这样可以获得更快的处理速度；

结论

其次，在测量较高湿度的土壤时会有较大的误差，检测装置需要进一步优化。

再次，温度的变化可能会对土壤湿度的测量结果带来一定的误差，如果能消除温度影响，将会使检测装置得到更好的测量结果。

最后，上位机软件部分功能还能实现更大功能。

参考文献

- [1] P Guo. A New Algorithm for Soil Moisture Retrieval With L-Band Ratiometer[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2013, 6(03):1147-1155.
- [2] 王勇志.基于时域传输原理的土壤水分测试仪的研究与开发[D].硕士论文,北京林业大学,2013.
- [3] 赵燕东.土壤水分快速测量方法及其应用技术研究[D].博士论文,中国农业大学,2002.
- [4] 唐掌雄,胡江潮.中子法、电阻法、称重法测量土壤水分的比较[J].核农学通报, 1987,(06): 4-7.
- [5] 中国人民共和国水利部.1999.中华人民共和国国家标准土工实验方法标准[S].
- [6] G. S. Rahi, S. F. Shih, D. L. Myhre. Calibration and sensitivity of neutron moisture probe for Hilstosois[J]. Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings, 1979, (38):87-90.
- [7] 罗克勇.中子测水技术的应用[J].核农学通报,1987, (06): 1-3.
- [8] D.J.Wilson. Neutron moisture meters:the minimum error in the derived water density[J]. Australia Journal of Soil Research, 1988, 26(01):97-104.
- [9] 中司启二等.用陶瓷传感器测定土壤水分张力[J].日本科学中心,1991.
- [10] 迟天阳,杨方,果莉.节水灌溉中土壤湿度传感器的应用[J].东北农业大学学报,2006,37(01) :135-137.
- [11] D. Chernyak. Dielectric Method for Investigating Moist Soil [J]. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 1967, 20(04):53-55.
- [12] M. A. Hilhorst, J. Balendonce. MCM100 Smart Sensor Interface for Complex Impedance Measurement Datasheet and Application Note[J]. Project:50307 Nota, 1998, (06):50-98.

- [13] M. A. Hilihorst, J. Balendonce. A broad-band-width mixed analog/digital integrated circuit for the measurement of complex impedances[J]. IEEE J.of Solid-State Circuit, 1993, 28(07):764-769.
- [14] M. A. Hilihorst, K. V. Breugel. Dielectric sensors used in environment and construction engineering[J]. Mat.Res.Soc.Symp.Proc, 1996,(411):401-406.
- [15] S. R. Evett, J. L. Steiner. Precision of neutron scattering and capacitance type soil content gauges from field calibration[J]. Soil Sci.Soc.Am.J, 1995, 59(04):961-968.
- [16] G. J. Gaskin, J. D. Miller. Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1996, 63:153-160.
- [17] A. Fares, A. K. Alva.. Estimation of citrus evapotranspiration by soil water mass balance[J]. Soil Science, 1999, 164(05):302-310.
- [18] G. C. Topp, J. L. Davis, A. P. Annan. Electromagnetic determination of soil water content Measurement in coaxial transmission lines[J]. Water Resources. Res, 1980, 169(03):245-256.
- [19] G. C. Topp, J. L. Davis. Measurement of soil water content using time domain reflectometry a field evaluation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1985, 49:19-24.
- [20] G. J. Gaskin, J. D. Miller. Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1996, 63:153-160.
- [21] 宋克鑫.FDR 土壤含水率传感器的主要影响因子与其结构优化研究[D].硕士论文,西北农林科技大学,2013.
- [22] I. G. Tejero., V. D. Zuazo, F. P. Torres, Fernandez.J.L.M. Impact of direct drilling and conventional tillage on seasonal changes of soil water content in Chromic Haploxerert[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2013, 89(03):393-409.

参考文献

- [23] 张益,马友华,江潮晖等.土壤水分快速测量传感器研究及应用进展[J].中国农学通报,2014,30(05): 170-174.
- [24] 郭卫华,李波等.FDR 系统在土壤水分连续动态监测中的应用[J].干旱区研究,2003,20(04) :247-251.
- [25] 冶林茂,吴志刚等.GStar_型电容式土壤水分监测仪设计与应用[J].气象与环境科学,2008,31(03):82-85.
- [26] 陈海波,冶林茂等.基于 FDR 原理的土壤水分测量技术[C].中国气象学会 2008 年年会干旱与减灾,2008:165-168.
- [27] 高磊.温度对 FDR 测量土壤体积含水量的影响[J].冰川冻土,2010,32(05): 964-968.
- [28] 李元.FDR 在高寒草地土壤水分测量中的标定及其应用[J].干旱区地理,2006,29(04):543-547
- [29] 黄飞龙 ,李昕娣等 . 基于 FDR 的土壤水分探测系统与应用 [J]. 气象,2012,38(06) :764-768.
- [30] 黄飞龙,黄宏智等.基于频域反射的土壤水分探测传感器设计[J].传感技术学报,2011,24(09):1367-1370.
- [31] 方俊鑫,殷之文.电介质物理学[M].北京:科学出版社,1989:1.
- [32] 晋宏营 . 非极性电介质极化规律的信息论研究 [J]. 高师理科学刊,2012,32(03):40-42.
- [33] 任丽英.电介质极化的研究[J].西华大学学报,2008,27(06):95-97.
- [34] 代伟.对压电陶瓷极化特性的研究[J].大学物理实验,2009,22(04):4-8.
- [35] 陈伟.TDR 探头设计及含水量和干密度的联合监测技术[D].硕士论文,浙江大学,2010.
- [36] 孙目珍.电介质物理基础[M].广州:华南理工大学出版社,2002:48.
- [37] 方俊鑫,殷之文.电介质物理学[M].北京:科学出版社,1989:2-6.
- [38] P. Debye. Polar molecules[J]. Journal of the Society of Chemical Industry, 1929,

48(43): 1036-1037.

- [39] K. Noborio. Measurement of Soil Water Content and Electrical Conductivity by Time Domain Reflectometry[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2001,(31): 213-237.
- [40] 陈德万.普通物理学[M].北京:中国农业出版社,2000:5.
- [41] 马孝义.土壤水分介电测量的频率上限分析[J].水土保持研究,2002,9(02):82-86.
- [42] J. O. Curtis. Moisture Effects on the Dielectric Properties of Soils[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(01):125-128.
- [43] 徐晓辉,阎焕娜.FDR 土壤水分传感器的快速校准与验证[J].节水灌溉,2014, (03) :66-68.
- [44] 孟臣,李敏.SHT71 数字温湿度传感器原理与应用 [J].世界电子元器件,2003,(02):66-68.
- [45] 朱晓峰.基于 STM32 的污水处理 pH 值控制系统的设计[D].硕士论文,东华大学大学,2012.
- [46] 于继江,胡康.基于 Cortex-M3 的嵌入式系统的性能分析 [J].信息技术,2014,(10):147-150.
- [47] 广州周立功单片机发展有限公司.ARM Cortex-M3 处理器简介[Z].2016.
- [48] 江一舟,张怡聪,李斌.Cortex-M3 单片机在工业仪表中的应用 [J].仪表技术,2010,(06):24-26.
- [49] 董振旗,赵巍辉等.整流滤波电容的设计与选用方法研究 [J].电子设计工程,2012,20(14):56-58.
- [50] 黄闽海.LM324 四运放实用电路的设计[J].福建轻纺,2002,(08):26-29.
- [51] 陈赟,陈伟等.TDR 联合监测土体含水量和干密度的传感器的设计及应用[J].岩石力学与工程学报,2011,30(02): 418-426.
- [52] G. C. Topp, J. L. Davis. Electromagnetic determination of soil water content using TDR:Evaluation of installation and configuration of parallel transmission lines[J].

- Soil Sci.Soc.Am, 1982(46):678-684.
- [53] D. A. Robinson, S. P. Friedman. Parallel Plates Compared with Conventional Rods as TDR Waveguides for Sensing Soil Moisture[J]. Subsurface Sensing Technologies and Application, 2000, 1(04):497-511.
- [54] S. D. Logsdon. Effect of Cable Length on Time Domain Reflectometry Calibration for High Surface Area Soils[J]. Soil Sci.Soc.Am, 2000(64):54-61.
- [55] G. C. Topp, J. L. Davis. The measurement of soil water content using a portable TDR hand probe[J]. Soil Sci.Soc.Am, 1984(64):313-321.
- [56] A. Mortl, R. Muñoz-Carpena. Calibration of a combined dielectric probe for soil moisture and porewater salinity measurement in organic and mineral coastal wetland soils[J]. Geoderma, 2011(161):50-62.
- [57] Beate Böhme, Mathias Becker, Bernd Diekkrüger. Calibrating a FDR sensor for soil moisture monitoring in a wetland in Central Kenya[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2013(66):101-111.
- [58] J. H. Knight. Sensitivity of Time Domain Reflectometry Measurement to Latent Variations in Soil Water Content[J]. Water Resources Research, 1992, 28(09):2345-2352.
- [59] J. Stein, D. L. Kane. Monitoring the Unfrozen Water Content of Soil and Snow Using Time Domain Reflectometry[J]. Water Resources Research, 1983(19):1573-1584.
- [60] S. J. Zegelin. Improved Field Probes for Soil Water Content and Electrical Conductivity Measurement Using Time Domain Reflectometry[J]. Water Resources Research, 1989, 25(11):2367-2376.
- [61] Z. Xing, W. Zheng. The Measurement of Soil Water Content Using the Dielectric Method[C]. World Automation Congress. 19-23 Sept 2010:241-245.
- [62] 曹义,邢玉秀等.PCB 设计课程项目驱动教学改革的探索 [J].电子世

- 界,2014,(01):166-167.
- [63] 张返立.有线传输技术特点分析和发展方向[J].信息通信,2012(04):1.
- [64] 李凯.无线传输产品应用实践[J].城市建设理论研究,2011(29).
- [65] 余丹.无线通信技术发展趋势浅谈[J].中小企业管理与科技信息通信,2015(02):303-304.
- [66] 蒋伟民,毕红军.五种主流近距离无线技术比较[J].科技资讯,2007,(02): 1.
- [67] 刘向诚,雷斌.野外 WSN 监测系统数据透明传输的实现[J].现代电子技术,2015,38(05): 19-22.
- [68] 龙承志,马玉秋,沈树群.基于低速率的短距离无线通信网络新技术—ZigBee[J].数据通信,2005(01): 12-14.
- [69] 齐曰霞,韩正之.2.4 GHz 频段无线技术标准[J].现代电子技术,2011,34(09): 35-37.
- [70] 吴光荣,章剑雄,徐向华.ZigBee 网络系统节点硬件设计与实现[J].杭州电子科技大学学报,2008,28(04): 49-52.
- [71] 朱向庆,王建明.ZigBee 协议网络层的研究与实现 [J].通信技术,2006(1): 129-132.
- [72] K. Li, H. Jia. A ZigBee Wireless Sensor Network Using Physics Based Optimally Sampling for Soil Moisture Measurement[C]. 2011 Third International Conference on Communications and Mobile Computing. TsingTao, 18-20 April 2011:505-508.
- [73] 胡柯,郭壮辉.无线通信技术 ZigBee 研究[J].通信技术,2008(06): 1049-1051.
- [74] 刘新宇,李兵,黄珊等.一种 ZigBee 无线传感器网络拓扑发现算法[J].计算机工程,2012,38(04):97-99.
- [75] 李战明,刘宝,骆东松等.ZigBee 技术规范与协议栈分析[J].网络与通信,2009(05): 45-48.
- [76] 吴廷发.一种机房视频监控的设计与实现[J].科技前沿,2014(12):25.
- [77] 徐振峰,尹晶晶等.基于 ZigBee 协议栈的无线传感器网络的设计[J].电子设计工

参考文献

- 程,2012,38 (05): 75-77.
- [78] 吴亚军.计算机网络拓扑结构分析[J].软件导刊,2011,10(12):113-115.
- [79] 冯 艳 .SQL Server 数据库运用及其性能优化分析 [J]. 软件导刊,2012,11(03):166-168.
- [80] R. Cao, Y. Tan. Data Mining Program in Library Based on SQL Server 2005[C]. 2012 IEEE Symposium on Robotics and Applications. Kuala Lumpur, 3-5 June 2012:74-76.

致谢

三年的研究生学习匆匆而过，这些年在黑大的学习和生活，让我受益匪浅，感谢黑大这片肥沃的土壤让我茁壮成长，在我的学生时代结束之际，我的心里充满感激。

首先我要感谢我的母校黑龙江大学，它为我提供了良好的学习和生活环境，让我在这段青春之路上汲取知识，树立正确的人生价值观。

其次我要感谢我的导师杜西亮教授，杜西亮教授为人谦和，治学严谨，学识渊博。在我的整个论文写作过程中，他倾注了大量心血和时间，我的论文之所以能够完成，离不开杜西亮教授的无私帮助。这一切让我终生难忘，唯有向杜西亮教授致以诚挚的谢意。

然后，我要感谢整个实验室的各位同窗对我的帮助和鼓励，与他们相处的三年时光，是我学生时代最宝贵的财富。

最后我要深深感谢我的父母，是他们教会了我做人，给予了我勇气，你们的支持和理解是我一直向前的动力。

独创性声明

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

学位论文作者签名: 

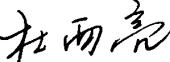
签字日期: 2016年 6月 12日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解黑龙江大学有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权黑龙江大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名: 

导师签名: 

签字日期: 2016年 6月 12日

签字日期: 2016年 6月 12日

学位论文作者毕业后去向:

工作单位:

电话:

通讯地址:

邮编: