



河北工业大学

HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

硕士学位论文

MASTER THESIS

学 院： 信息工程学院

学科专业： 物理电子学

论文作者： 闫焕娜

指导教师： 徐晓辉 研究员

河北工业大学研究生院

2013

年 12 月

分类号: _____

密级: _____

UDC: _____

编号: _____

河北工业大学硕士学位论文

土壤湿度传感器的智能化研究

论文作者: 闫焕娜

学生类别: 全日制

学科门类: 工学

学科专业: 物理电子学

指导教师: 徐晓辉

职 称: 研究员

Dissertation Submitted to
Hebei University of Technology
for
The Master Degree of
Physical Electronics

Research on intelligent Soil moisture sensor

by
Yan Huanna

Supervisor: Researcher Xu Xiaohui

Dec 2013

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文不包含任何他人或集体已经发表的作品内容，也不包含本人为获得其他学位而使用过的材料。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人或集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：闫焕娜

日期：2013.12.10

关于学位论文版权使用授权的说明

本人完全了解河北工业大学关于收集、保存、使用学位论文的以下规定：学校有权采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供本学位论文全文或者部分内容的阅览服务；学校有权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；学校有权向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版。

（保密的学位论文在解密后适用本授权说明）

学位论文作者签名：

闫焕娜

日期：2013.12.10

导师签名：

徐晓强

日期：2013.12.10

摘 要

水是农业、工业、生产生活中不可或缺的物质，如今的水资源短缺制约着我国的可持续发展，避免水资源浪费已然成为我国当前的一项紧急任务。但是，农田灌溉用水占全国水资源总消耗的比例很大，传统的以人工经验判断作物缺水状况造成了水资源的严重浪费，所以对土壤湿度的准确测量成为节约用水的前提。目前，FDR 土壤湿度传感器因具有快速、便捷的特点，被广泛用来测量土壤含水量，但是，FDR 型土壤湿度传感器也存在一些缺点，它的输入输出具有非线性，并且存在零点漂移和温度的交叉敏感现象，测量结果的准确性完全依赖于传感器自身的稳定性和精密性水平，本文对 FDR 土壤湿度传感器进行了智能化研究，将 FDR 土壤湿度传感器与单片机结合，利用数值分析算法，改善传统 FDR 土壤湿度传感器的不足。

本文研究了 FDR 土壤湿度传感器的工作原理和决定其性能的各项指标，进行了大量的实验，分析相关数据，总结测量规律，并据此提出了改善线性度、灵敏度漂移、温度交叉敏感的算法，将 FDR 土壤湿度传感器与单片机分析、处理数据的技术有机的结合起来，通过软件设计了 FDR 土壤湿度传感器的快速校准、非线性自校正、温度补偿功能等各个智能化功能模块，提高了 FDR 土壤湿度传感器的智能化程度，使测量结果更加可靠。

关键字：土壤湿度传感器 FDR 单片机 智能化

ABSTRACT

Water is indispensable substance for agriculture, industry and production. Nowadays, water shortage restricts the sustainable development of our country, so avoiding the waste of water has become an urgent task of China. The consumption of farmland Irrigation water accounts for a large proportion of the total water resources. We often judge crop water shortage by the traditional experience which caused the serious waste of water resource, so the premise of saving water is the accurate measurement of the soil moisture. Currently, FDR soil moisture sensor has rapid and convenient features, so it had been widely used to measure soil moisture. However, there are some disadvantages, such as non-linear, zero drift and temperature cross-sensitivity, the accuracy of the measurement results completely depended on the stability and precision levels of itself. In order to improve the performance of FDR soil moisture sensor, this study designed intelligent FDR soil moisture sensor through combining FDR soil moisture sensor and MCU.

This paper studies the principle and the indicators of the FDR soil moisture sensor, makes a lot of experiments and analyzes the empirical data. Then the algorithm which can improve linearity, sensitivity drift, temperature cross-sensitivity of FDR soil moisture sensor was proposed. This paper designed intelligent function modules through software, including fast calibration, nonlinear self-correction, temperature compensation function modules. FDR soil moisture sensor becomes intelligent, the measurement results are more reliable.

KEYWORDS: soil moisture sensor FDR MCU intelligent

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 课题的研究背景和意义.....	1
1.1.1 土壤湿度测量方法的比较.....	1
1.1.2 传统 FDR 土壤湿度传感器的缺陷.....	2
1.1.3 智能化传感器的功能与实现.....	3
1.1.4 智能化 FDR 土壤湿度传感器的优势.....	4
1.2 国内外研究现状.....	4
1.3 本课题的主要研究内容.....	5
第二章 FDR 土壤湿度传感器测量原理及性能指标.....	7
2.1 土壤水分构成.....	7
2.2 土壤介电特性.....	7
2.3 FDR 土壤湿度传感器工作原理.....	8
2.4 传感器静态技术指标.....	10
第三章 智能化 FDR 土壤湿度传感器的硬件电路设计.....	13
3.1 FDR 土壤湿度传感器智能化的整体方案选择.....	13
3.1.1 集成化智能传感器.....	13
3.1.2 混合式智能传感器.....	13
3.1.3 非集成化智能传感器.....	14
3.1.4 本课题设计方案的确定.....	14
3.2 智能化 FDR 土壤湿度传感器整体方案设计.....	14
3.3 单片机的选择.....	15
3.4 单片机复位电路的设计.....	18
3.5 温度传感器的选择.....	18
3.6 电压转换模块.....	19
3.7 串行通信电路.....	20
第四章 系统软件的设计.....	23
4.1 软件整体功能设计.....	23

4.2 系统主程序.....	23
4.3 智能化自校准模块设计.....	24
4.3.1 FDR 土壤湿度传感器静态特性的不一致性.....	24
4.3.2 快速校准方法.....	25
4.3.3 校准模块的软件实现.....	30
4.4 非线性自校正模块设计.....	31
4.4.1 FDR 土壤湿度传感器的非线性.....	31
4.4.2 非线性自校正原理.....	31
4.4.3 非线性自校正方法.....	33
4.4.4 非线性校正模块的软件实现.....	35
4.5 零点漂移自补偿技术.....	36
4.6 智能化温度补偿技术.....	37
4.6.1 FDR 土壤湿度传感器对温度的交叉敏感.....	37
4.6.2 温度补偿方法.....	39
4.6.3 温度补偿系统的软件实现.....	41
4.7 上位机软件的设计.....	42
第五章 总 结.....	43
参考文献.....	45
攻读学位期间所取得的相关科研成果.....	47
致 谢.....	49

第一章 绪论

1.1 课题的研究背景和意义

水是生命之源，水资源在社会生活生产方面占有举足轻重的地位。我国虽然水资源总量丰富，但人均水资源占有量只有 2300m^3 ，加之水资源分布的不均性，有些地区出现严重的水资源短缺现象，农业、工业、生活都受到重大影响，显然，缺水已经成为制约我国经济发展的瓶颈。与此同时，我国存在一个矛盾现象，虽然水资源不足，但水资源浪费，农田灌溉水利用率低，更加重了水资源的匮乏^[1]。站在可持续发展的战略角度，节约用水已经成为我国的一项基本国策，建设节水型社会同时也成为当前的一项紧急任务。

目前，我国农田用水量占全国水资源总消耗的比例很大，其中主要用于农田灌溉，但可能由于对节水灌溉认识的局限性，我国农作物的需水状况主要靠人工经验观察管理，忽视了不同种类的作物在不同生长期的精确的需水量情况，这样既造成了水分的浪费，又不利于作物的产量的提高。因此，要大力推广高效节水的灌溉技术，节水灌溉是解决我国缺水问题的重要途径^[2]。具体来说，节水灌溉是尽量以最低限度的用水量来生产出最大的产量，其首要任务是能够精确测量土壤湿度，判断作物缺水状况，再根据作物不同时期对水分的需求进行合理的灌溉。

1.1.1 土壤湿度测量方法的比较

随着科技的进步，土壤湿度的测量方式也出现了多样性，如烘干称重法、中子仪法、时域反射法、频域反射法等测量方法，能够直接测量土壤含水量从而掌握土壤中水分的含量；还有张力计法、干湿计法等利用土壤水势表示土壤水分含量；还有一些声学方法、远红外遥测法等间接测量方法^[3]。这些方法都存在优点与不足，如表 1.1 为一些常用的土壤湿度测量方法的比较。

频域反射法（FDR）是最新发展起来的土壤湿度测量方法，FDR 土壤湿度传感器就是基于这种频域反射法，通过测量土壤的表观介电常数来测量土壤湿度，将土壤湿度转化为与之成比例的电压信号进行输出^[4]。由于 FDR 土壤湿度传感器具有很多优

点，所以被广泛用于对土壤湿度的实时监测。

表 1.1 土壤湿度测量方法的比较

名称	优点	缺点
频域反射法 (FDR)	具有快速、准确、连续测定等优点，不扰动土壤，精度不受限于测量时间，能自动监测土壤水分及其变化，使用方便简单，价格便宜，无放射性污染源 ^[5] 。	FDR 在野外水分监测应用中因土壤类型不同需要标定。
时域反射法 (TDR)	具有快速、准确、连续测定等优点，不扰动土壤，能自动监测土壤水分及其变化，使用方便简单，性能好，无放射性污染源。	TDR 测量精度受限于测量时间，价格较贵，因土壤类型不同需要重新标定。
烘干称重法	结果非常可靠，常作为其它测量方法的参照标准，无放射性污染源。	费时、费力，深层取样困难，定点测量时不可避免由取样换位而带来误差，取样会破坏样地土壤，长期水分定点监测受到限制。
中子仪测量法	中子散射法测量结果非常准确，是称重法之外的第二标准方法。	仪器设备昂贵，一次性投入大。中子仪还存在潜在的辐射危害，使中子仪可用于短期实时测量，但长期大面积动态监测几乎不可能 ^[6] 。

1.1.2 传统 FDR 土壤湿度传感器的缺陷

传统 FDR 土壤湿度传感器的设计和制造技术发展到现在，通过精密加工中心对其进行精细加工，加上日益完善的工艺，使得传感器的测量精度有了很大的提高。但

表 1.2 传统传感器的不足

缺 点	说 明
一	输入输出特性存在非线性，且随时间漂移
二	因结构尺寸大，故时间（频率）响应特性差
三	参数易受环境条件变化的影响而漂移，存在温度漂移
四	存在交叉灵敏度，选择性、分辨率低

是，这种传统的模拟传感器在技术上仍然存在着很多缺陷，如表 1.2 所示。

以上不足是传统 FDR 土壤湿度传感器性能不稳定、可靠性差、精度低的主要原因。FDR 土壤湿度传感器具有强烈的市场需求，人们亟需一种新的技术克服传统 FDR 传感器的不足，满足对传感器稳定性、精度的要求，所以，本文对 FDR 土壤湿度传感器进行智能化的研究，使其具有自校准、非线性补偿、温度补偿等功能。

1.1.3 智能化传感器的功能与实现

随着电子技术的突飞猛进，产生了智能化传感器。所谓智能化传感器，是将带数字总线接口的微处理器与具有获取信号功能的传感器、信号调理电路组合成一个整体，实现计算技术与测量控制技术的结合。智能化传感器的电路构成如图 1.1 所示，通过与微处理器的结合，使传感器具了检测、记忆、处理信息的能力，具体功能如表 1.3 所示^[7]。

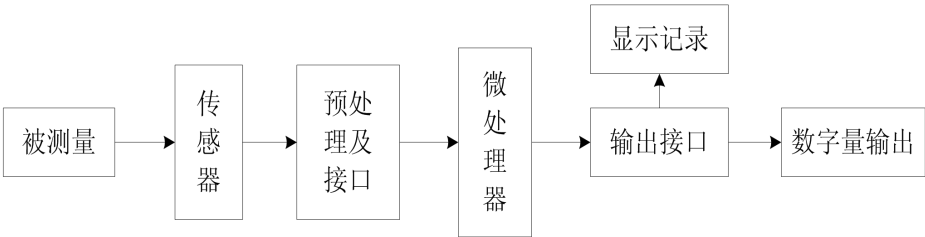


图 1.1 智能传感器结构原理图

传统传感器只能作为敏感元件，检测被测量的变化，而目前智能传感器则包括了测量信号的调理（如滤波、放大、A/D 转换等）环节、数据处理环节以及显示记录环

表 1.3 智能传感器的主要功能

功 能	说 明
自我完善	具有改善静态性能，提高测量精度的自校正、自校零、自校准功能
	具有提高系统响应速度，改善动态特性的智能化频率自补偿功能
	具有抑制交叉敏感，提高系统稳定性的多信息融合功能
自我管理	具有自检验、自诊断、自寻故障、自恢复功能
与自适应	具有判断、决策、自动量程切换与控制功能
自我辨识	具有从噪声中辨识微弱信号与消噪的功能
与运算处理	具有多维空间的图像辨识与模式识别功能
交互信息	具有双向通信、标准化数字输出及拟人类语言符号等多种输出功能

节等，几乎包括了仪器仪表的全部功能，可见智能传感器的功能已经延伸到了仪器仪表的领域。

1.1.4 智能化 FDR 土壤湿度传感器的优势

智能化 FDR 土壤湿度传感器采用数字化技术，将传感器技术和单片机技术相结合，在传感器系统内部对模拟传感器的输出进行 A/D 转换等预处理，根据数学模型编制出简单实用的补偿计算软件，由单片机对其温漂、非线性、蠕变等进行自动数字化补偿，从而实现智能化 FDR 土壤湿度传感器的设计^[8]，使之具有传统 FDR 土壤湿度传感器所不具有的功能优势：

(1) 由于用软件实现 FDR 传感器测量误差的补偿，所以能够灵活地去除生产过程中无法避免的随机误差，对硬件系统要求低，消除了人为因素对补偿效果的影响，软件编程容易移植修改，调试简单方便^[9]。

(2) FDR 土壤湿度传感器智能化后，不用着力于改善系统中每一个环节，只需通过软件，就可以实现 FDR 土壤湿度传感器的非线性刻度转换^[10]。

(3) FDR 土壤湿度传感器进行智能化后，可以采用多传感器数据融合等措施进行温度补偿，降低 FDR 传感器工作时，环境温度、供电电压的交叉敏感，提高传感器的测量精度^[11]。智能化传感器具备了微处理器的分析数据的能力，能够对采集到的测量值进一步完善，可以标记传感器各个状态的信息。

(4) 智能 FDR 传感器可以具有标准总线接口，可以方便地与测试设备进行连接通信，并且传输过程中抗干扰能力增强，使传感器具有了更稳定的测量结果。

1.2 国内外研究现状

目前，随着半导体集成电路的快速发展，各个国家研究开发传感器的思想发生变化，都在努力调整传感器的产品结构，使传感器具有更稳定、更精确的功能^[12]。

随着微处理器应用的日益广泛及其性能价格比的提高，传感器行业开始将微处理器应用于传感器上，这方面典型应用是美国霍尼韦尔公司（HONEYWELL）及日本东芝公司（TOSHIBA），它们分别推出了 ST-3000、H-SerieS 系列智能压力传感器，使压力传感器精度达到 0.1%，并带有自检、自校功能^[13]。瑞士公司在世界上率先研制成功 SHT11、SHT15 型智能化湿度/温度传感器，出厂前，每只传感器都在湿度室中做过精密校准，校准系数被编成相应程序存入校准存储器中，在测量过程中可对相对湿度进行自动校准，能准确测量湿度。

目前，国外对传感器提出了更高要求，如可与普通计算机甚至网络结点相连，并提出了 SDS 智能分布式系统及数据融合等设想，要实现这些设想，必须解决系统的传感器智能化问题^[14]。当前，美、日、欧很多的传感器生产、研制公司均在此领域大量投资，开展研究开发工作。

国内在智能温度传感器方面已取得一定成绩，在集成化智能传感器方面，由于技术要求较高，尚需做大量的研究工作。但对于单片机控制多路采集系统、混合电路设计及表面安装技术等已有成果及应用实例，因此研制智能传感器已有一定设计基础。

1.3 本课题的主要研究内容

本课题拟针对土壤湿度传感器进行智能化的研究，选择传统农业上常用的 FDR 土壤湿度传感器，力求研发出可以通用的 FDR 土壤湿度传感器智能化软硬件模块。论文结合传感器智能化的要求，完成 FDR 传感器与微处理器集合的全部硬件设计和各功能模块的软件设计，其研究的中心是构成一个具有自校正、自补偿等功能，并且能够实时测量土壤湿度的传感器。主要研究工作有：

- （1）首先研究土壤水分测量原理及 FDR 土壤湿度传感器工作原理；
- （2）提出系统的总体设计方案，设计单片机和各外围模块接口电路；
- （3）研究 FDR 湿度传感器的智能化技术原理，通过大量实验得到相关数据，利用软件编程，实现 FDR 传感器输出信号的校准、非线性自校正的智能化功能；
- （4）对性能优越的温度传感器进行研究，选择合适的温度传感器以实现 FDR 土壤湿度传感器的温度补偿；
- （5）对各功能模块软硬件进行整合与调试，对智能化 FDR 湿度传感器进行实验，完成功能测试，进行误差分析；
- （6）完成上位机控制界面软件的编写、调试工作。

第二章 FDR 土壤湿度传感器测量原理及性能指标

2.1 土壤水分构成

土壤是具有一定养分的、能够适应植物生长的物质层，是固-水-气三相物质组成的复杂的混合物^[15]，其中，土壤中的水分是土壤液体部分中最重要的成分。土壤水分位于地表水之下，是外界水分处于土壤固体颗粒之间形成的，对农作物的生长、存活、净生产力起着至关重要的作用^[16]。土壤中的水分不是固定不变的，当降雨时或者对农作物进行人工灌溉时，土壤含水量会增加，而随着农作物的消耗或者自然蒸发，土壤中的水分会减少，而且水分也会因渗透到地下水层而减少，土壤中的水分处于不断循环变化状态。

土壤水分是一个复杂的物理量，与土质有密切关系，不同的土质，土壤含水量的测量值就会有所差异。砂质土壤的颗粒疏松，不易形成团聚体，而粘质土壤孔隙小，结构稳定^[17]。土壤水分也会因土壤容重的不同而不同。土壤水分直接决定了土壤湿度，是植物的生长、营养吸收、矿物质转化的必要前提，是农产品产量的重要保障。水是土壤中不可或缺的物质，水分充足的土壤肥沃，而缺水的土壤往往贫瘠。因此，土壤水分具有重要作用，我们需要采取先进的技术测量土壤含水量，对土壤进行实时合理的灌溉，控制土壤水分状况，保障农作物的生长环境和土壤的肥力，减少水资源的浪费和土壤的沙漠化。

2.2 土壤介电特性

水是强极性分子，在外加电场作用下产生很强的取向极化，同时还产生位移极化。极化的结果将外加电场的能量转换成水分子的势能，即将从外加电场获得的能量储存起来，可用复介电常数的实部表示。由于分子运动的惰性，转向极化运动相对于外电场的变化在时间上存在滞后，即弛豫现象；弛豫在宏观上使水分子产生损耗，可用复介电常数的虚部表示。在外电场作用下，水的极化程度远大于其他物质^[18]。因此，通过测量含水物质在一定频率下的介电常数，便能间接得到物质的水分含量。

一定的电磁频率作用时，土壤中主要组成成分的介电特性如表 2.1 所示。通过观察可以看到，水的相对介电常数为 78.5，而其他物质的介电常数对于水来说非常小，可以忽略^[19]。土壤中水分的变化能明显改变土壤的介电常数，可以根据土壤介电特性随含水量的变化测量土壤介电常数，进而确定土壤的水分含量，由此产生了一种新的测量技术。

表 2.1 土壤主要成分的介电常数表

成 分	介电常数
水	78.5
空气	1
花岗岩	7-9
玄武岩	12
干肥土	3.5
干壤土	2.7
干沙土	2.5

含水土壤的介电常数是外加电场频率的函数，当电场频率大于 40MHz 时，盐分、有机质等基本不影响土壤含水量的测量，可以忽略不计^[20]。研究发现，土壤的介电常数也是温度的函数，温度变化时，土壤的介电常数也发生相对变化，也就是说温度影响土壤湿度的测量结果，所以我们也要考虑在内。土壤的电导率不同时，温度对测量结果的影响也是不同的。在一定温度范围内，对不同电导率的土壤的水分变化趋势进行分析，结果表明，它随温度改变的走向是不一样的^[21]。在电导率低于 0.2ms/cm 的情况下，随着温度的上升，土壤介电常数的增加量小于减少量，土壤介电常数是温度的减函数。相反，在电导率高于 1.5mS/cm 的情况下，随着温度的增加，土壤介电常数的增加量会大于减少量，土壤介电常数是温度的递增函数^[22]。通常，土壤水分的导电性强，在土壤温度增加的情况下，FDR 土壤湿度传感器的试验结果会产生增加的趋势。

2.3 FDR 土壤湿度传感器工作原理

物理电磁学实验证明，土壤含水量与土壤的表观介电常数存在一定的关系，从而产生了新的土壤水分测量技术。频域反射技术（FDR）就是通过测量电磁波在土壤中传播的频率，判断相应土壤的表观介电常数，含水量较低时，根据线性关系将其转换

为土壤含水量^[23]。本文要进行智能化设计的 FDR 土壤湿度传感器就是基于上述原理研发的测量土壤湿度的传感器。FDR 土壤湿度传感器的内部电路结构如图 2.1 所示。传感器的水分探头主要由平行的不锈钢金属棒组成，金属棒构成一个电容的正负极板，当插入土壤中使用时，土壤就成为待测电介质。FDR 土壤湿度传感器采用 100MHz 的晶体振荡器，经由驱动单元加到输出探针上，反馈探针得到与土壤湿度情况相关的反馈信号，经由反馈数据采集单元、放大单元，输出与土壤湿度情况相关的电压信号^[24]。

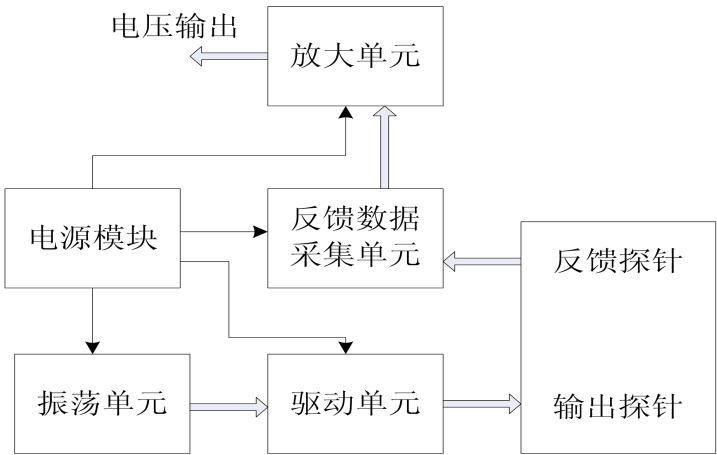


图 2.1 FDR 传感器内部电路结构图

图 2.2 为相应的外部结构，由图看出，传感器主要包括三个部分：输出反馈探针部分、FDR 土壤水分传感器主体部分、电源及输出电缆部分。FDR 土壤水分传感器

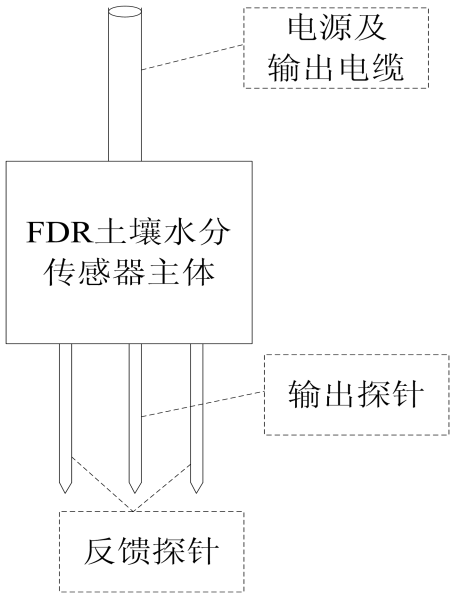


图 2.2 FDR 传感器外观结构图

主体采用树脂灌封、感知水分的探针采用不锈钢材料，这样能够有效降低 FDR 土壤水分传感器长期埋在土壤中使用，土壤、水分及其它物质对传感器单元、探针的损害和影响^[25]。

2.4 传感器静态技术指标

本文对 FDR 土壤湿度传感器进行智能化设计的任务就是改善 FDR 传感器本身的静态性能，从而提高 FDR 传感器测量土壤含水量的准确度。若想采取有效的措施完成 FDR 的智能化设计，我们必须首先了解 FDR 传感器的静态性能参数，和决定传感器性能的基本技术指标。所谓的传感器静态特性就是传感器测量的物理量不会随着时间的变化而变化，是一个恒定信号，这时，传感器的输入输出呈现的关系就是静态特性^[26]。决定静态特性的基本参数和技术指标如下：

（1）零位（零点）

当用传感器进行测量时，输入量（被测物理量） $x=0$ 时，传感器具有输出值，即 $y \neq 0$ 。如图 2.3，零位值为 $y=s_0$ 。

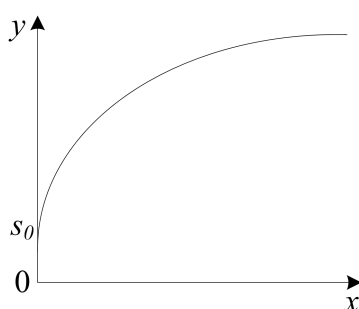


图 2.3 传感器的零点

传感器在使用过程中，由于一些原因，随着时间的漂移，零位值可能发生变化，我们应该利用校正技术将其消除，以免影响传感器的测量结果^[27]。消除零位值可以保证因零点漂移引起的传感器输入输出特性的不稳定性。

（2）灵敏度

用传感器进行测量时，当被测物理量的值发生改变，改变量用 Δx 表示，相应的传感器的输出值也随之发生改变，改变量用 Δy 表示， Δx 与 Δy 的比值就是传感器的灵敏度：

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (2.1)$$

传感器的静态特性为一理想直线时，直线的斜率即为灵敏度且为一常数。灵敏度 S 的数值越大，表示相同的输入变化量引起的输出变化量越大，则系统的灵敏度越高。当传感器的静态特性是非线性特性时，灵敏度不为常数。

实际的测量系统都不可能是单一输入的系统，一般都会受到其它输入量的影响，输出量的值可能是各个输入量共同作用的结果。如果除被测量之外的其它物理量变化都能引起输出量的变化，则系统存在“交叉灵敏度”^[28]。

一个存在交叉灵敏度的传感器，一定是一个低精度、性能不稳定的传感器。经典的传感器通常都存在对工作环境温度、供电电压的交叉灵敏度，传感器没有能力从输出改变量 Δy 来精确推断某一个输入量的变化值。人们一直在为减小交叉灵敏度而努力，如采用稳压源、恒流源供电，采用各种温度补偿措施降低温度的交叉灵敏度。智能传感器依靠软件功能在降低交叉灵敏度方面有重大突破。

(3) 灵敏度温度系数

传感器的静态输入输出特性一般是在标准条件下测得的，传感器在使用时所处的环境条件极有可能与标准条件有所不同，这样就会使测量结果产生附加误差，其中温度附加误差是最主要的附加误差^[29]。灵敏度温度系数是灵敏度随温度漂移的速度，在数值上等于温度改变 1°C 时，灵敏度的相对该变量的百分数，用 α_s 表示：

$$\alpha_s = \frac{S(T_2) - S(T_1)}{S(T_1) \cdot \Delta T} \approx \frac{y(T_2) - y(T_1)}{y(T_1) \cdot \Delta T} \quad (2.2)$$

式中： $S(T_2)$ 、 $S(T_1)$ 、 $y(T_2)$ 、 $y(T_1)$ 分别表示在相同输入量作用下传感器在温度 T_2 、 T_1 的灵敏度及其相应的输出值。

温度附加误差干扰了传感器测量的准确性，应该采取有效措施缩小温度系数，从而降低温度附加误差，提高传感器的温度稳定性^[30]。

(4) 线性度

线性度表示传感器输入输出特性曲线与某一规定直线 ($y=kx+b$) 一致的程度，如图 2.4 所示。在数值上通常用非线性引用误差 δ_L 表示传感器的线性度：

$$\delta_L = \frac{|\Delta L|}{Y(FS)} \times 100\% \quad (2.3)$$

式中： ΔL_m 表示静态特性与规定拟合直线的最大拟合偏差， $Y(FS)$ 表示传感器的量程。

线性度是影响传感器精度的重要指标之一，输入输出特性非线性的传感器肯定是一个精度低的传感器^[31]。传感器的科研人员常常为改善线性度，提高传感器的测量精

度，获得高性能的传感器而努力。

FDR 土壤湿度传感器的稳定性、测量精度、结果的可靠性都是由上述技术指标和性能参数决定的。本文对 FDR 土壤湿度传感器进行智能化研究，通过单片机与传感器智能化的结合，应用软件编程补偿技术及数值分析算法，实现消除零位值、灵敏度校正、线性化处理的功能，从而改善传感器系统的静态性能，提高对土壤水分测量的准确性，精确掌握土壤含水情况^[32]。

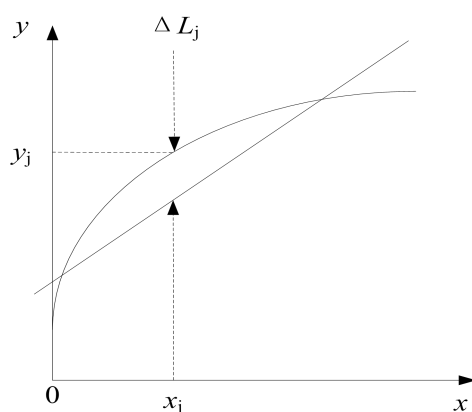


图 2.4 传感器的线性度

第三章 智能化 FDR 土壤湿度传感器的硬件电路设计

随着电子技术、信号处理技术的迅速崛起，传感器的研究开发不再只局限于新型电路的设计和新型材料的运用。人们不断突破设计理念，运用先进的信号处理技术和单片机技术，对传感器的输出进行相应处理，运用数值分析的相关方法，对传感器进行补偿和校正，得到理想的输出。

本课题是关于 FDR 土壤湿度传感器的智能化设计，基本出发点就是将 FDR 土壤水分传感器与单片机分析、处理数据的技术有机的结合起来，提高 FDR 土壤水分传感器的智能化程度，弥补传感器存在的缺陷，改善传感器的性能，输出更加精确的土壤湿度数据。

3.1 FDR 土壤湿度传感器智能化的整体方案选择

智能化传感器具有三种结构形式：集成化智能传感器、混合式智能传感器和非集成化智能传感器。

3.1.1 集成化智能传感器

集成化智能传感器就是利用大规模集成电路工艺把传统传感器与滤波、信号转换、微处理器等都集成起来，封装在一个壳体中，运用微处理器进行补偿，形成一个完整的电路结构，实现结构的一体化，成为一个整体，进行综合的分析和整体测试^[33]。FDR 土壤湿度传感器的内部结构是复杂的模拟电路，很难采用标准的集成电路工艺来制作，在一块芯片上实现智能传感器存在着许多困难。

3.1.2 混合式智能传感器

混合式智能是根据需要与可能，将系统各个集成化环节，如敏感单元、信号调理电路、微处理器单元、数字总线接口等，以不同的组合方式集成在两块或三块芯片上，并装在一个外壳里。

3.1.3 非集成化智能传感器

非集成化智能传感器是在不改变传统的传感器的前提下，将单片机及外围电路单独制作成一个模块，将其与传统传感器相连接，通过单片机实现传感器的智能化，强化传统传感器的功能。非集成化智能传感器拥有传统传感器的功能，同时兼具了智能化的优势，非集成化智能传感器的主要优点是：

（1）原有的生产设备、工艺可以保持不变，只需针对各自的传统传感器进行优化和进一步开发，构建自己的智能化传感器系统。

（2）不改变传统的传感器结构，使传感器具备智能化功能，是最经济、最快捷的途径。

（3）非集成化传感器系统比集成化系统更加稳定，测量结果也更加可靠。

（4）非集成化传感器系统中模块发生故障时可以单独更换，降低了维修费用。

3.1.4 本课题设计方案的确立

集成化智能 FDR 土壤湿度传感器生产成本很高，价格昂贵，而且在实际应用中并不是必需的。非集成化智能 FDR 传感器将现实中广泛应用的 FDR 土壤湿度传感器与单片机相结合，由于我国 FDR 土壤湿度传感器仍在市场中占有较大的份额，实现 FDR 传感器的非集成化智能传感器，节省了大量人力、物力，是一种快捷、经济的方式。基于这一思想，本课题设计非集成化智能 FDR 土壤湿度传感器，将 FDR 土壤湿度传感器与单片机组合成一个整体，实现软硬件模块的结合，提高 FDR 土壤湿度传感器的稳定性和可靠性。

3.2 智能化 FDR 土壤湿度传感器整体方案设计

本课题所设计的智能化 FDR 湿度传感器在硬件设计方面主要是简化电路，在最少硬件的基础上，利用一些简单的外围电路，实现 FDR 湿度传感器的智能化功能，整体框图如图 3.1 所示。该系统以单片机为核心，控制系统外围电路，并将 FDR 湿度传感器赋予智能，形成了智能化 FDR 传感器。FDR 传感器获得土壤湿度，将其按照一定的规律转换成对应的电压，经过采样保持和数据转换，将 FDR 传感器输出的电压转换为数字量，送入单片机按照预定的程序进行运算分析与处理，得到高精度的测量结果。与此同时，该智能化系统还包括温度传感器，实现对温度数据的采集，以消除 FDR 传感器对温度的交叉敏感，进行温度补偿，提高测量位置处土壤湿度的准确

度。根据实际需要,智能化 FDR 土壤湿度传感器可以将处理后的土壤湿度数据进行 LCD 显示、存储,也可以经由数据通信模块把数据传给上位机进行后续处理。

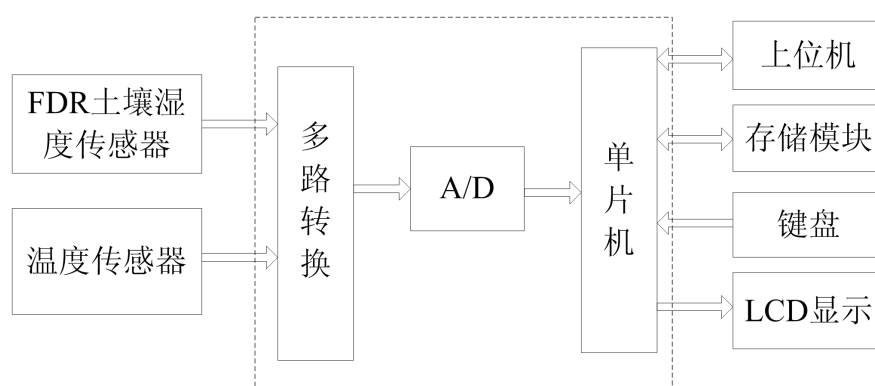


图 3.1 智能化 FDR 土壤湿度传感器系统框图

将制作的 FDR 土壤湿度传感器在环境温度范围内进行对比标定试验,把实验数据记录在表格中,按照精度要求,分析计算校正系数,将其输入到单片机进行存储。当应用智能化 FDR 土壤湿度传感器进行土壤含水量的测量时,由 FDR 传感器测得的土壤湿度和温度信号被送到单片机,单片机根据这两个信号的大小从内存中取出对应的补偿系数,经过计算处理,输出补偿后的湿度值。

3.3 单片机的选择

实现 FDR 土壤湿度传感器的智能化,最主要的就是提高 FDR 传感器的可靠性和稳定性,使其能够满足更精确的测量要求。在此基础上,要尽量降低成本,提高产品的性价比,因此,器件的选择要遵循上述原则。

随着科技的进步,市场上的单片机种类也层出不穷,我们在设计电路时,考虑到 C8051F35x 系列单片机具有良好的性能,而且性价比比较高,所以我们选取 C8051F35x 系列单片机。C8051F35x 系列单片机作为 Silicon Laboratories 公司推向市场的一款增强型 51 单片机,使用 Silicon Labs 的专利 CIP-51 微控制器内核。C8051F35x 系列单片机与 MCS-51™ 指令集完全兼容,可以使用标准 803x/805x 的汇编器和编译器进行软件开发,所以在编译程序时不用考虑与 MCS-51 指令系统不兼容的问题^[34]。C8051F35x 系列单片机可以外接设备,通常是以这样的方式来降低自身的功耗,该系列单片机采用流水式的指令执行方式,所以具备速度快、效率高的优点,同时,这款单片机的中断源、复位源等都有所增加,各方面都有所改进,功能也更加完善。

在本 FDR 土壤湿度传感器智能化系统中应用的单片机为 C8051F350 单片机,能够

满足本单元对芯片的要求，其组成如图3.2所示。该芯片内部集成了24或16位单端/差分A/D转换器和两个8位的电流输出D/A转换器，同时带有模拟多路器，不需要再另行配置，FDR湿度传感器输出的模拟电压信号，可以直接进入C8051F350单片机内部的A/D转换器，进行数字滤波，根据相应的算法进行数据处理，然后将其送到单片机自身的D/A转换模块，从而输出模拟量。因此，智能化FDR土壤湿度传感器即是一个数字传感器，也是可以输出模拟量，成为一个模拟传感器。图3.3为C8051F350单片机的顶视图。

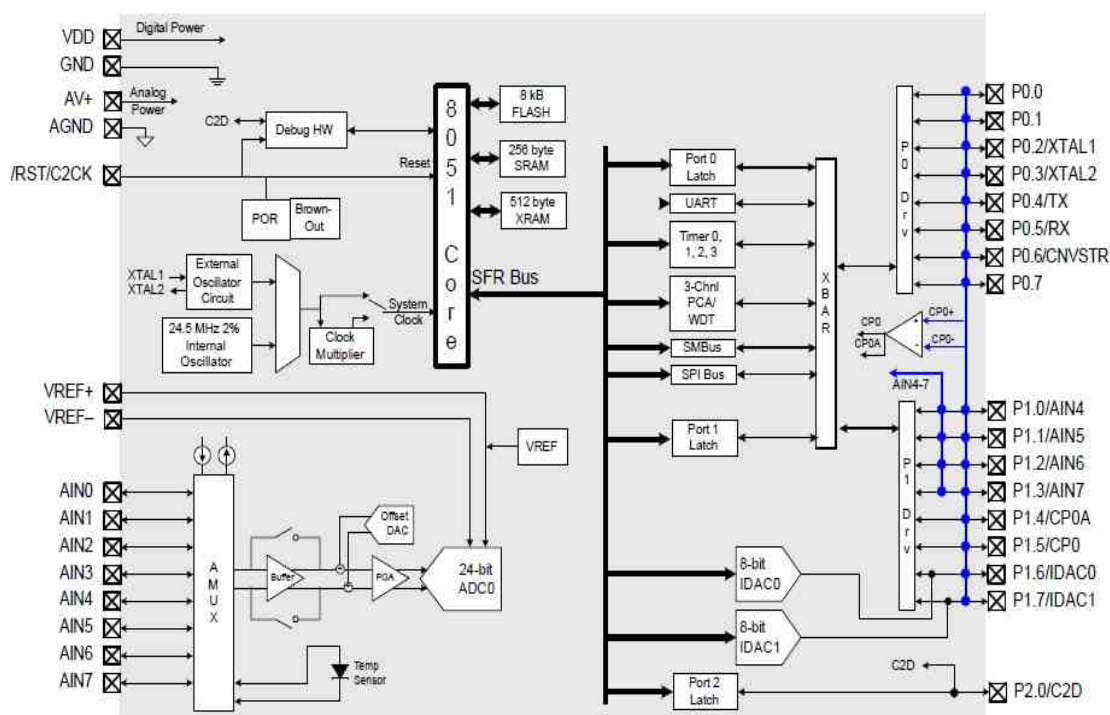


图 3.2 C8051F350 单片机的原理框图

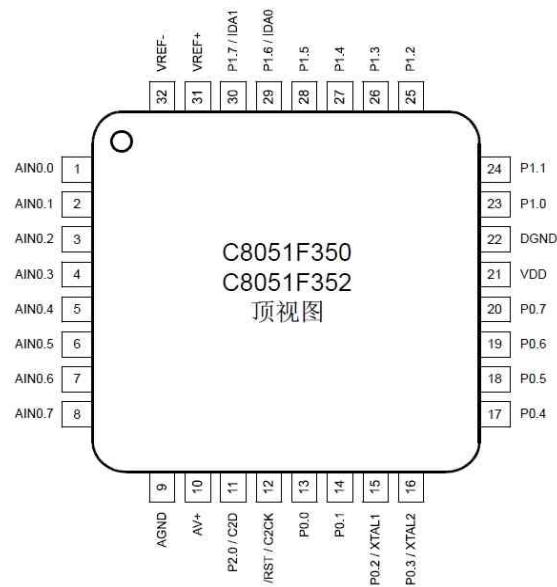


图 3.3 C8051F350 单片机的顶视图

C8051F350的主要性能如表3.1所示。

表3.1 C8051F0350的主要性能

名 称	性 能
最大系统时钟频率	50MHz
MIPS（峰值）	50MIPS
片内 RAM（bytes）	768
FLASH 存储器（bytes）	8K
程序寄存器空间（bytes）	8K
数据存储器空间（bytes）	256
通用 16 位定时器	4 个
全双工 UART	2 个
增强型 SPI 端口	1 个
I/O 口	17 个
特殊功能寄存器（SFR，bytes）	128
中断源	12 个
电源管理方式	2 种：空闲方式和停机方式

3.4 单片机复位电路的设计

C8051F350单片机具有上电复位、掉电复位、外部复位、PCA看门狗定时器复位等多种复位方式，单片机进行复位时，无论单片机在何种状态下，都可以方便的将控制器设置成预定状态，同时CIP-51停止运行，初始化SFR，将设置外部引脚，停用定时器和中断，这样可以使程序重新运行，也可以避免单片机进入死循环。

C8051F350 单片机提供了外部复位方式，可以使单片机进行强制复位，将复位端加入低电平有效信号，单片机就可以进入复位状态。本文进行了简单复位电路的设计，如图 3.4，能够随时实现单片机复位功能，在/RST 引脚上接入去耦电容，同时，加一个外部上拉电阻，避免强噪声引起复位。

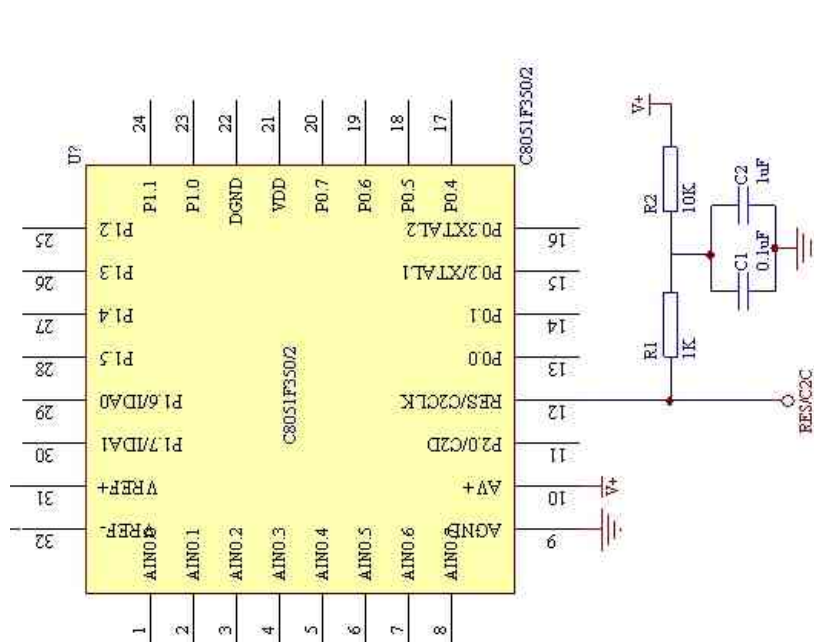


图 3.4 单片机复位电路

3.5 温度传感器的选择

当温度发生改变时，存在一些物质，它们的某些特性会随之发生变化，通常就是利用物质的这种特性来间接测量温度。经物理学研究，随着温度的改变，金属铂电阻的阻值有所变化，并且呈现一定的规律，可以利用铂电阻的这种随温度变化的规律研制成一种铂电阻温度传感器。目前，市场上广泛存在的铂电阻温度传感器，在温度为 0℃ 时，铂电阻的电阻值为 100 欧姆，称为 PT100 温度传感器^[35]。PT100 测温精确，性能好，是广泛使用的一种测量温度的传感器。本文选用 PT100 温度传感器测量土壤温

度，从而确定该温度下对应的土壤含水量，减小因温差的影响造成土壤含水量测量误差。

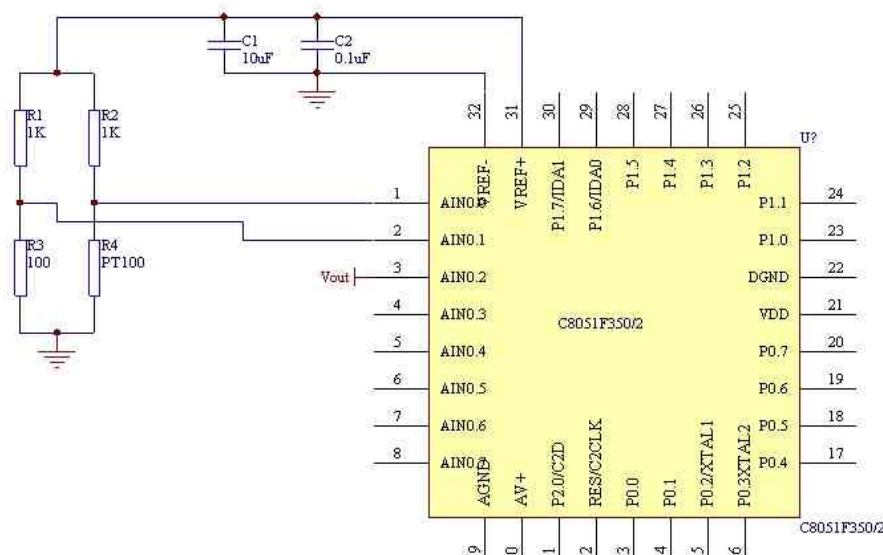


图 3.5 PT100 温度传感器与 C8051F350 接口电路图

PT100温度传感器与单片机接口电路如图3.5所示，电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 、PT100构成温度传感器的测量电桥，当环境温度发生变化时，PT100的电阻值发生相应的变化，电桥桥臂出现不平衡情况，产生差分信号，输入到C8051F350单片机的AIN0.0、AIN0.1引脚，它们是单片机C8051F350的模拟输入端，是单片机内部模数转换器ADC0的输入通道，单片机对温度进行数据采集，并进行A/D转换，将电压值转换为温度值，即得到FDR土壤水分传感器所测土壤的温度值^[36]。

3.6 电压转换模块

电路中集成运算放大器需要正负电压，而电池只能提供正向电压，所以需要设计电压转化模块，将正电压转换成相应的负电压，保证放大器对正负电压的需求，使其能够达到正常的工作状态。本设计的电源转换模块采用 LM2600 与 LP2981 芯片，具体电路结构如图 3.6 所示。

LP2981 是微 100mA 超低压降的稳压器，能够输出 2.5V~5V 范围的 11 个固定电压值，容差输出电压为 0.75%，可作为标准电源，满足电池供电应用的要求。进入睡眠模式时，静态电流小于 1 μ A，对线路和负载的动态响应速度快，具有过热过流保护功能，外围电路设计简单，使用方便。

LM2660 是一种常用的电压转换器，采用开关电容方式，能够将 1.5V~5.5V 范围

的正电压转换为相应的负电压，以满足正负电压的需要。LM2660 使用两个低成本电容器提供 100mA 的输出电流，没有以电感为基础的转换器的相关成本、尺寸和 EMI 问题，仅需 120 μ A 的操作电流，并且效率比 90% 的负载大，LM2660 有用于电池供电系统的理想的特性。

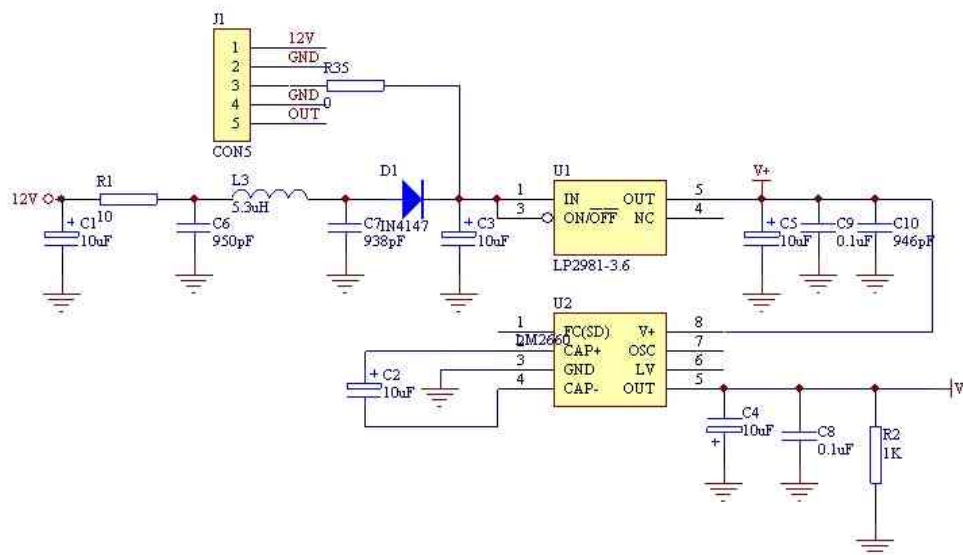


图 3.6 电压转换电路

3.7 串行通信电路

FDR 土壤湿度传感器经过 C8051F350 进行智能化处理后，将测量数据传输到上位机进行显示，并可以利用上位机控制 FDR 土壤湿度传感器的各个智能化功能，达到实时监控的目的，但单片机输出电平为 TTL 电平，计算机电平为 RS-232 电平，所以单片机与上位机不能直接连接，必须经过电平转换芯片^[37]。MAX232 是最常用的电平转换芯片，其内部有一个电压转换器，只给予 +5V 供电就可以使其正常工作，MAX232 芯

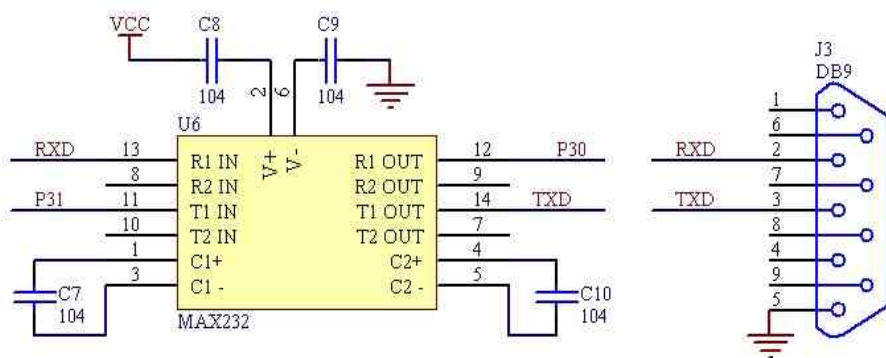


图 3.7 串行通信电路

片集成度高，硬件接口简单，只需外接 4 个 $0.1\sim 100\mu\text{F}$ 的电容就可以将 RS-232 电平转换为 TTL 电平，图 3.7 为具体电路图。

第四章 系统软件的设计

软件是智能化 FDR 土壤湿度传感器最关键的组成部分，数据的输入输出、FDR 传感器的非线性补偿、温度补偿、零点校正等数据处理都是通过软件编程实现的，所以软件设计的优良性决定了智能化 FDR 湿度传感器的可靠程度。

智能化 FDR 土壤湿度传感器的软件设计采用结构化与模块化相结合的设计原则，将整个程序按照功能的不同，划分为各个模块分别实现，可以使程序结构清晰，方便每个功能模块的调试，使软件易于维护^[38]。对每个子模块分别编程，实现各自特定的功能，然后将这些子程序组装起来，进行整体的调试，实现 FDR 土壤湿度传感器智能化的整体软件设计。这种思路对于可重复使用的子程序显得尤为优越，因为不仅程序结构清晰，而节约程序存储空间。

4.1 软件整体功能设计

智能化 FDR 土壤湿度传感器主要完成的功能如下：

（1）智能化自校准功能的实现：采用智能化方式，对 FDR 土壤湿度传感器进行校准，使经过校准的 FDR 传感器具有与标准传感器相同的输入输出特性曲线，降低因特性漂移而引入的测量误差，保证测量值更接近真实值。

（2）非线性自校正功能的实现：采用智能化方式，对 FDR 土壤湿度传感器进行非线性补偿，使 FDR 土壤湿度传感器的输入-输出具有良好的线性关系，改善 FDR 土壤湿度传感器线性度，保障灵敏度的稳定性。

（3）零点漂移自补偿功能的实现：采用智能化方式，实现 FDR 土壤湿度传感器的自校零功能，消除零点漂移现象，提高了测量精度。

（4）温度补偿功能的实现：采用智能化软件补偿方式，结合曲线拟合方法，消除 FDR 土壤湿度传感器对温度的交叉灵敏度，降低温度对 FDR 传感器输出值的影响。

4.2 系统主程序

FDR 土壤湿度传感器智能化设计的主程序流程图如图 4.1，单片机上电，开始执

行主程序，首先进行初始化设置，测量键按下时，采集 FDR 土壤湿度传感器的输出电压，然后将其分别送入快速校准、非线性补偿、零点校正、温度补偿模块进行处理，最后将测量结果进行显示、上传到上位机等，这个过程进行可以由单片机的独立键盘控制，也可以通过上位机进行控制。

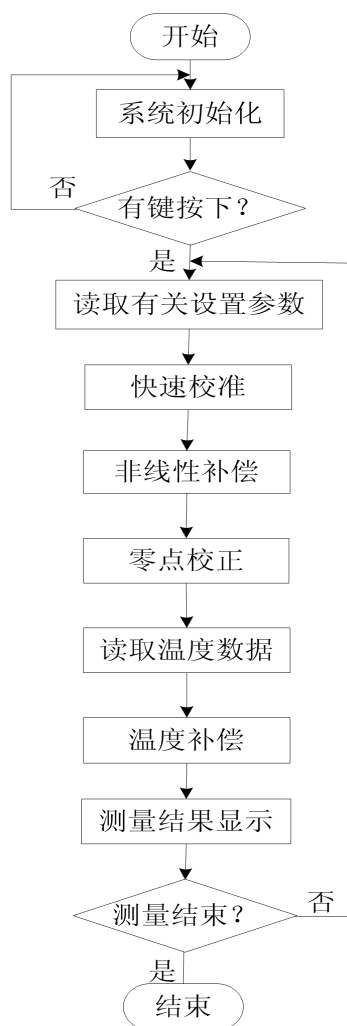


图 4.1 系统主程序框图

4.3 智能化自校准模块设计

4.3.1 FDR 土壤湿度传感器静态特性的不一致性

目前国内外有很多厂家在生产 FDR 土壤湿度传感器，但是没有一家的产品成为主流产品。虽然传感器的测量原理相同，但由于不同厂家的 FDR 湿度传感器的电路结构、设备或生产工艺的不同，产品参数的分散性，而且在生产过程中可能有随机误

差的影响,导致 FDR 土壤湿度传感器具有不同的输入输出特性。使用不同厂家的 FDR 土壤湿度传感器进行测量时,数据不能通用,没有统一的标准,不能直接将一家厂家的标定数值直接应用于另一家的 FDR 传感器上,也不能用不同厂家的传感器测量值直接进行土壤湿度比较,造成 FDR 传感器市场的混乱,引起不必要的麻烦。此外,在长期使用过程中,由于自身老化、温度等一些因素的存在,引起传感器的输入输出特性发生漂移,偏离作为参考的标准 FDR 土壤湿度传感器的标定曲线,实际标定曲线难免与理论上的标定曲线存在差异,造成测量值偏离真实值,引入了测量误差,降低了测量精度。

为了提高 FDR 土壤湿度传感器的测量的准确性,本文研究了一种快速校准方法,设计了相应校准模块,对出厂前和使用一段时间后的 FDR 土壤湿度传感器进行快速校准,使其具有统一的标准,相同的输入输出特性,而且可以消除特性漂移引入的误差,保证测量值更接近真实值。

4.3.2 快速校准方法

本文使用的待校准 FDR 土壤湿度传感器为 FDR-100 型土壤湿度传感器,如图 4.2,参考的传感器为标准土壤湿度传感器,如图 4.3,它们都是基于频域反射原理研发的,具有基本相同的电路结构和外部形态。



图 4.2 FDR-100 型土壤湿度传感器

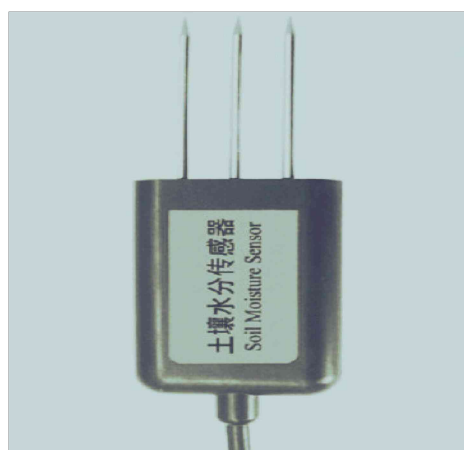


图 4.3 标准土壤湿度传感器

从已有研究来看，大多数关于 FDR 传感器的校准是在田间或将土壤采集到室内进行的，而根据以往的实验数据发现，田间土壤具有较大的变异性，而且很难在短时间内控制土壤含水量，低含水量条件很难达到，而室内校准容易受人为因素影响，土壤压实度很难控制，造成无法准确校准 FDR 土壤湿度传感器^[39]。

本文将两个传感器垂直插入到一个上下均匀的圆柱形容器中，依次向容器中加水，水没过传感器探针的高度就会随着水体积增大而增大，直到 FDR 土壤湿度传感器的探针完全浸入水中，停止向容器中加水，用不同体积的水取代不同含水量的土壤进行实验，由 FDR 土壤湿度传感器的工作原理推断，两传感器的土壤含水量—电压特性曲线与水体积—电压的特性曲线大致相同。通过软件把 FDR-100 与标准传感器的水体积—电压特性曲线尽可能调成一致，就可以完成 FDR-100 型土壤湿度传感器的快速校准。用这种方法校准 FDR 土壤湿度传感器方便快捷，大大减少了工作量，同时避免了用土壤实验时产生的误差，提高了准确性。具体实验步骤如下

- (1) 将两种传感器连入测量电路，如图 4.4 所示，传感器接入 12V 的直流电压，并将输出端连接高精度的万用表，以记录传感器的输出电压；
- (2) 将两种土壤湿度传感器垂直放入干燥的圆筒容器中，用固定夹固定；
- (3) 打开电源及万用表开关，读取容器中未加水时万用表的读数，并记录；
- (4) 依次向容器中加入 10ml 水（没过传感器探针 0.45cm），读取万用表读数并记录，直至水面高度完全没过探针；
- (5) 依次从容器中抽出 10ml 水，读取万用表读数并记录，直至将水全部抽出；
- (6) 反复进行多组试验，计算出输出电压的平均值，填入表 4.1，正向为注水时的电压值，反向为抽水时的电压值。

(7) 以水体积为横坐标，传感器输出电压为纵坐标，生成曲线图 4.5，观察分析曲线。



图 4.4 FDR 的测量电路

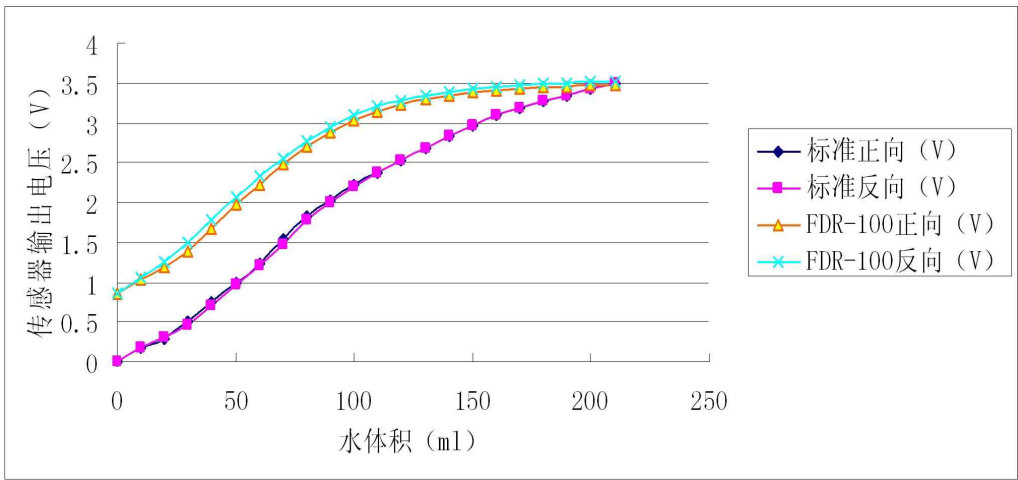


图 4.5 各传感器对应的特性曲线

表 4.1 各传感器输出电压与所加水体积的对应表

水体积 (ml)	标准正向 (V)	标准反向 (V)	FDR-100 正向 (V)	FDR-100 反向 (V)
0	0	0	0.86	0.86
10	0.17	0.18	1.04	1.05
20	0.29	0.31	1.18	1.25
30	0.51	0.47	1.39	1.5
40	0.74	0.71	1.68	1.78
50	0.99	0.96	1.97	2.06
60	1.23	1.2	2.23	2.32
70	1.53	1.48	2.49	2.56
80	1.83	1.79	2.71	2.78
90	2.03	2	2.89	2.95
100	2.21	2.19	3.04	3.1
110	2.38	2.37	3.15	3.2
120	2.53	2.53	3.24	3.28
130	2.69	2.68	3.3	3.34
140	2.84	2.83	3.35	3.39
150	2.97	2.97	3.39	3.43
160	3.09	3.09	3.41	3.45
170	3.19	3.19	3.43	3.47
180	3.27	3.28	3.45	3.49
190	3.35	3.35	3.46	3.5
200	3.42	3.42	3.47	3.51
210	3.5	3.5	3.48	3.51

观察图 4.5 可知，在相同湿度土壤中使用时，FDR-100 型土壤湿度传感器与标准传感器具有不同的输出电压，现设：

$$\left. \begin{array}{l} \text{FDR-100 输出电压 } u_{1i}: u_{11}, u_{12}, u_{13}, \dots, u_{1N} \\ \text{标准传感器输出电压 } u_{2i}: u_{21}, u_{22}, u_{23}, \dots, u_{2N} \end{array} \right\} i=1,2,\dots,N \text{ (} N \text{ 为标定点的个数)}$$

利用曲线拟合法，采用 2 次多项式来逼近两种传感器的输出电压关系曲线，该多

项式方程的各个系数由最小二乘法确定，具体方法如下：

设曲线拟合方程为：

$$u_{2i}(u_{1i}) = a_0 + a_1 u_{1i} + a_2 u_{1i}^2 \quad (4.1)$$

式中 a_0 、 a_1 、 a_2 为待定常数，根据最小二乘法原则来计算，基本思想是，由多项式方程（4.1）确定的各个 $u_{2i}(u_{1i})$ 值，与标准传感器的输出电压 u_{2i} 之均方差应最小，即

$$\sum_{i=1}^N [u_{2i}(u_{1i}) - u_{2i}]^2 = \text{最小值} \quad (4.2)$$

式中 u_{1i} 为 FDR-100 型传感器输出的第 i 个电压， $u_{2i}(u_{1i})$ 为通过曲线拟合方程得到的电压， u_{2i} 为标准传感器的输出电压。为了求得函数最小值时的常数 a_0 、 a_1 、 a_2 ，我们对函数求导并令它为零，经整理后得矩阵方程：

$$\begin{cases} a_0 N + a_1 F + a_2 G = B \\ a_0 F + a_1 G + a_2 H = C \\ a_0 G + a_1 H + a_2 I = D \end{cases} \quad (4.3)$$

式中：N 为标定点个数， $F = \sum_{i=1}^N u_{2i}$ ， $G = \sum_{i=1}^N u_{2i}^2$ ， $H = \sum_{i=1}^N u_{2i}^3$ ， $I = \sum_{i=1}^N u_{2i}^4$ ， $B = \sum_{i=1}^N u_{1i}$ ，

$$C = \sum_{i=1}^N u_{1i} u_{2i}，D = \sum_{i=1}^N u_{1i} u_{2i}^2。$$

对方程组（4.3）进行编程运算，计算出校准方程（4.1）的系数，再对（4.1）式进行编程，编程算式就成为 FDR-100 土壤水分传感器快速校准模块。

4.3.3 校准模块的软件实现

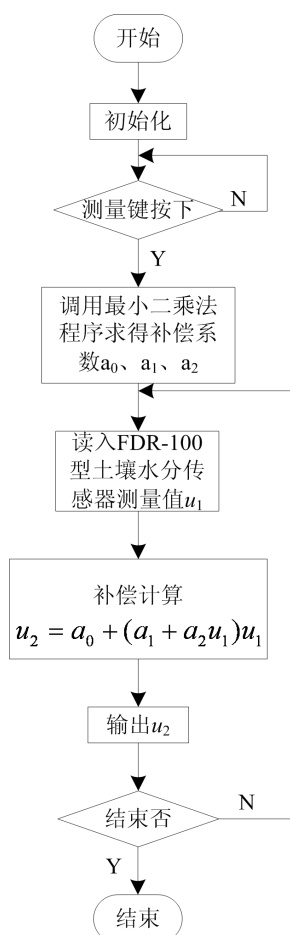


图 4.6 校准模块流程图

采用灵活的软件功能对 FDR-100 型土壤湿度传感器进行快速校准,具体流程图如图 4.6 所示,初始化主要是对 C8051F350 单片机内部特殊功能寄存器、A/D 转换等进行初始化状态的设定。系统上电进入校准模块后,待电压稳定,调用最小二乘法程序,计算出两个传感器输出电压拟合关系曲线的系数并储存,然后通过公式(4.1)对 FDR-100 的输出电压进行修正校准,最后输出校准后的电压值。

校准后的 FDR-100 土壤湿度传感器的具体工作过程为,当 FDR-100 用于土壤含水量测量时,智能化校准系统将 FDR-100 的输出电压进行计算处理,使输出电压与相同条件下的标准土壤湿度传感器的输出电压达到相同的数值。这样,使用这两种 FDR 土壤湿度传感器进行测量时,数据能够通用,能够将一种 FDR 土壤湿度传感器的标定数据直接用于另一种 FDR 传感器上。智能化软件校准是实现校准功能最快的方式。

4.4 非线性自校正模块设计

4.4.1 FDR 土壤湿度传感器的非线性

线性度是影响传感器性能的因素之一，传感器输入输出特性是不是直线关系，在很大程度上决定了传感器的优劣，直接影响测量结果的准确程度^[36]。所以，人们希望 FDR 土壤湿度传感器的灵敏度是一个不变的常数，即输入输出特性是线性关系，但由于以下几个因素，FDR 土壤湿度传感器输入输出特性的非线性一直都存在。

(1) FDR 土壤湿度传感器本身的输出电压与土壤含水量之间存在着一定的非线性关系，尤其是土壤含水量较高时这种非线性关系明显表现出来；

(2) FDR 土壤湿度传感器自身包括非线性元器件，使传感器存在固有的非线性误差；

(3) FDR 土壤湿度传感器的内部结构、封装方法也会影响传感器非线性误差的程度，具有单一整体结构的传感器的非线性误差相对较小，反之，误差较大。这是由传感器的固有结构形式引起的非线性误差；

(4) FDR 土壤湿度传感器的生产加工过程可能产生非线性误差，加工精度、焊接过程都会影响传感器的输出结果，这是由人为因素造成的非线性误差。

由于 FDR 土壤湿度传感器输入输出特性存在非线性，如果按照线性关系进行刻度转换，就会引入误差，降低对土壤含水量测量的准确度，所以，对 FDR 土壤传感器非线性指标进行改善引起了广泛关注，多年来，科研工作者一直致力于实现传感器输入输出特性的线性化，提高传感器性能，在材料、工艺，结构、参数方面，倾注了大量的心血，传感器技术人员精心设计电路，采用先进的工艺，虽然传感器的非线性得到了一定程度的改善，但是成本却非常高，而且硬件校正电路的可移植性难度大，推广应用存在一定的局限性^[40]。FDR 智能传感器系统通过软件实现传感器的非线性刻度转换，装置简单，发挥了单片机的智能作用，使输出量与土壤湿度呈现线性关系，改善了线性度，实现了传感器的非线性自校正功能，使测量值更接近实际的真实值，获得了较高的测量精确度。

4.4.2 非线性自校正原理

FDR 土壤湿度传感器执行获取土壤含水量信息的任务，通过测量土壤含水量 θ_v ，将 θ_v 按一定规律转换为输出量 u 。输入值 θ_v 与输出值 u 可以用数学方程式 $u=f(\theta_v)$ 表示，如图 4.7 所示，就称为 FDR 土壤湿度传感器的正模型。

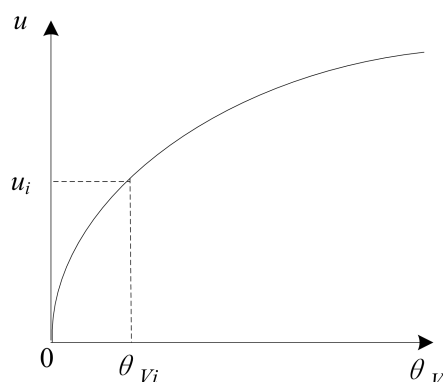
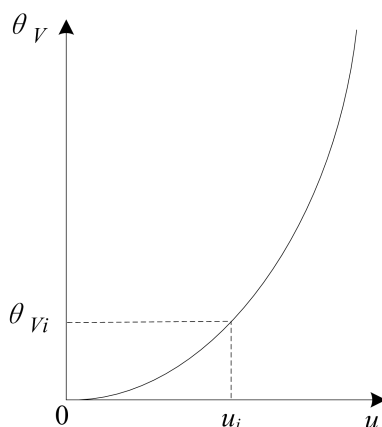


图 4.7 FDR 土壤湿度传感器正模型

单片机进行数据的处理、分析，其最基本的功能就是将 FDR 土壤湿度传感器的输出电压 u 转化为土壤含水量 θ_v ，并将信息传递出来，供灌溉参考，所以，本课题设计的智能 FDR 土壤湿度传感器的刻度转换功能在单片机中由软件实现。单片机数据处理部分的输入与输出关系的数学表达式 $\theta_v = g(u)$ ，如图 4.8，称为逆模型。对于该 FDR 土壤湿度传感器来说，其逆模型就是上述正模型 $u = f(\theta_v)$ 的反函数 $\theta_v = f^{-1}(u)$ 。



4.8 FDR 土壤湿度传感器逆模型

智能化 FDR 土壤湿度传感器的非线性自校正功能，是在单片机中应用软件开发非线性自校正模块，使之自动按照逆模型进行刻度转换，即将 FDR 传感器的输入电压转化为土壤含水量，最终实现整个智能传感器系统输入输出的线性化 $\theta_v = \theta_v$ ，如图 4.9 所示，即智能传感器系统的输入为土壤含水量 θ_v ，经过 FDR 土壤湿度传感器，按关系式 $u = f(\theta_v)$ 转化为电压，再经过单片机，按反函数 $\theta_v = f^{-1}(u)$ 转化为土壤含水量。

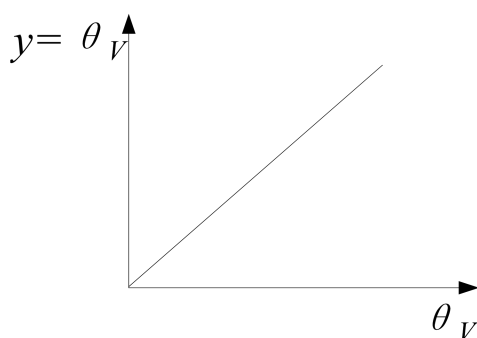


图 4.9 智能 FDR 土壤水分传感器输入输出特性

4.4.3 非线性自校正方法

基于上述非线性校正原理，为了能够在单片机中编程计算，改善 FDR 土壤湿度传感器的线性度，首先需要对 FDR 土壤湿度传感器进行标定实验，测出 FDR 传感器输出电压与土壤湿度的对应关系。本次实验所用的土样为天津市北辰区的粘性土，具体标定步骤如下：

(1) 从野外取回一定量的土，进行风干。风干后过 2mm 筛，使土质均匀，无土块，再对其进行烘干；

(2) 取 8 个相同的饭盒，并标号，分别将 800g 土置于每个饭盒中，依次加入不同量的水，配置体积含水量为 10%、20%、25%、30%、35%、40%、45%和 50%的土样。配置完后，将每个饭盒盖上盖子，静置 24 小时，以使水分均匀渗透到土壤中，同时降低水分蒸发量；

(3) 将 FDR 传感器探针插入到 1 号盒的土壤中，打开电源及万用表开关，待示数稳定后，读取万用表电压读数并记录。以同样方法获取其它各盒土壤中 FDR 传感器的输出电压读数。之后,取出探头，用清水洗净后擦拭干净。

(4) 将土壤含水量和对应的 FDR 传感器的输出电压填入表格，表 4.2 为详细的实验数据。

表 4.2 土壤含水量与传感器输出电压的对应表

标号	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号	7 号
土壤含水量 (%)	10	20	25	30	35	40	50
输出电压 (V)	0.79	1.78	2.23	2.72	3.03	3.27	3.5

(5) 根据上述表格数据和 FDR 传感器的零位值，绘制 FDR 土壤湿度传感器的反非线性特性曲线，如图 4.11，观察分析曲线。

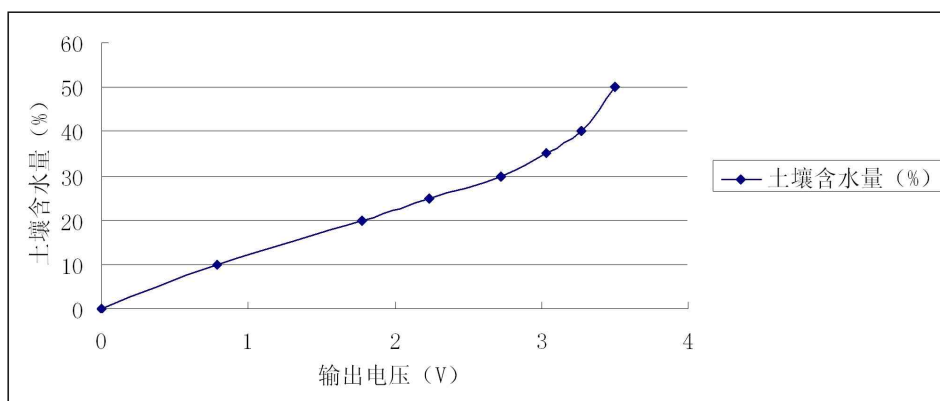


图 4.10 FDR 传感器的反非线性特性曲线

由图 4.10 可以确定 FDR 土壤湿度传感器的输入输出关系是非线性曲线，本课题采用分段直线拟合法进行刻度转换，改善 FDR 传感器的线性度。

分段直线拟合法是将多项式函数按照一定的区间端点进行划分，然后将多项式函数用端点连接成的直接近似表示，即用一条折线来代替原来实际的曲线。只要分点足够多，就完全可以满足对精度的要求，从而使问题化繁为简，分段时，区间的大小可根据实际需要确定。本文根据静态实验标定数据作为区间端点进行分段，设端点坐标为 $(u_0, \theta_{V0}) (u_1, \theta_{V1}) (u_2, \theta_{V2}) (u_3, \theta_{V3}) (u_4, \theta_{V4}) (u_5, \theta_{V5}) (u_6, \theta_{V6}) (u_7, \theta_{V7})$ ，每段分别用直线逼近，具体各段的拟合直线公式如下：

当 $u_0 \leq u < u_1$ 时，

$$\theta_V = \theta_{V0} + \frac{\theta_{V1} - \theta_{V0}}{u_1 - u_0}(u - u_0) \quad (4.4)$$

当 $u_1 \leq u < u_2$ 时，

$$\theta_V = \theta_{V1} + \frac{\theta_{V2} - \theta_{V1}}{u_2 - u_1}(u - u_1) \quad (4.5)$$

...

当 $u_6 \leq u < u_7$ 时，

$$\theta_V = \theta_{V6} + \frac{\theta_{V7} - \theta_{V6}}{u_7 - u_6}(u - u_6) \quad (4.6)$$

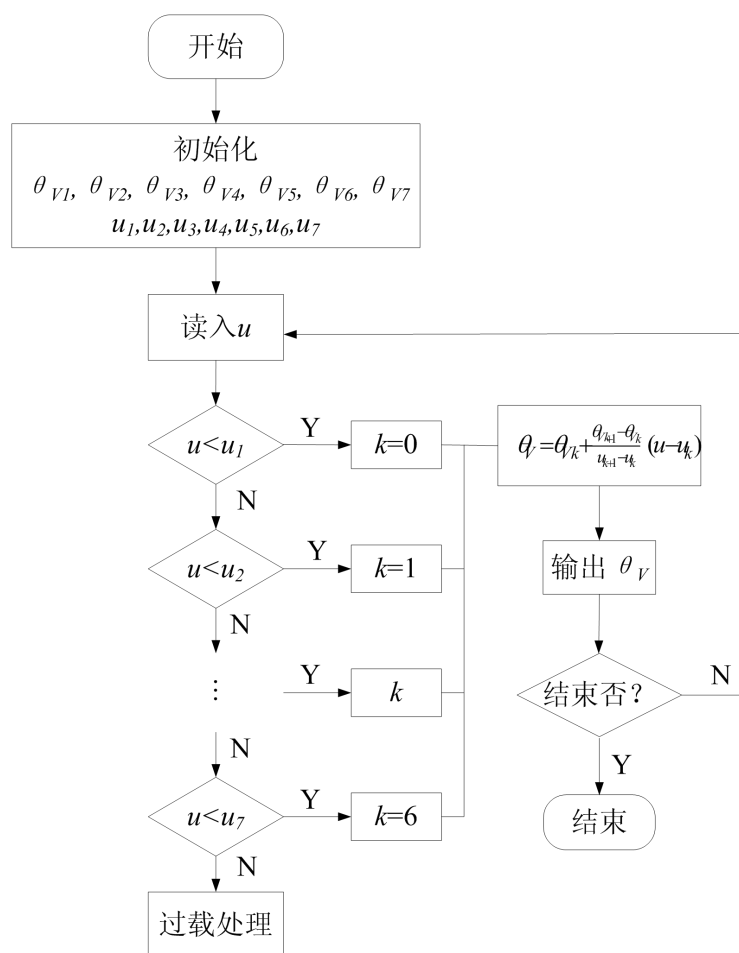


图 4.11 非线性自校正流程图

将折点坐标值存入单片机中，测量时，先判断传感器及其调理电路输出电压所在电压范围，然后单片机调用相应的直线拟合公式进行计算，得出土壤含水量。

4.4.4 非线性校正模块的软件实现

利用单片机软件编程将 FDR 土壤湿度传感器的输出电压转换为土壤含水量，实现 FDR 土壤湿度传感器的非线性自校正功能，具体流程图如图 4.11，系统上电进入非线性自校正模块后，先初始化将标定点的数据赋予单片机，FDR 传感器进行土壤湿度测量，将输出电压送入单片机，单片机比较电压大小，调用相应的公式将其转换为土壤含水量并输出。这样，智能化 FDR 土壤湿度传感器系统的输入输出特性近似成直线关系，提高了它的测量精度。

4.5 零点漂移自补偿技术

理想的传感器，零点值应该是保持不变的常量，但传感器在长期使用过程中，由于环境影响或自身的老化，零位值会发生漂移现象，即输入量为零时，输出值发生变化，从而测量值出现误差，造成测量结果的不准。人们一直希望将零位漂移值控制在一定范围内，但引起了传感器成本的提高。

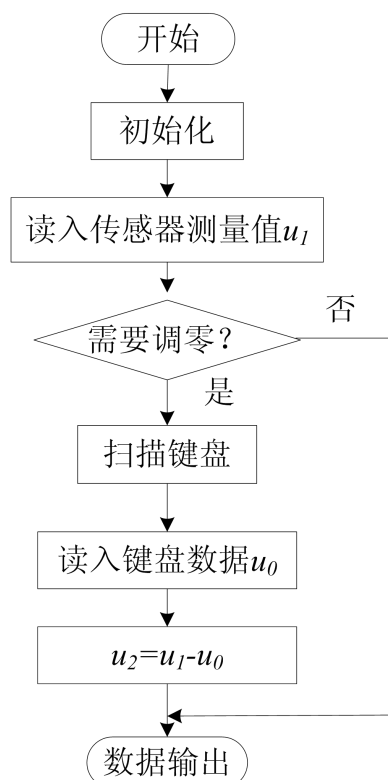


图 4.12 调零程序框图

智能化 FDR 土壤湿度传感器进行零点校正时，先测量零位值 u_0 ，把 u_0 暂存于内存中，利用 FDR 土壤湿度传感器进行测量，输出电压 u_1 ，用 u_1 减去 u_0 ，得到最终测量结果 $u = u_1 - u_0$ ，至此，就完成了 FDR 传感器的调零功能。调零程序如图 4.12 所示。对 FDR 土壤湿度传感器进行智能化设计，利用调零子程序，实现 FDR 传感器系统的零点漂移自动补偿功能，能够简单方便的解决传感器零位漂移的现象，提高测量精度。

程序功能体现在传感器特性曲线上就是曲线上所有点都减去零点飘移的电压值（或正或负），即待校正传感器在空气中的示数 u_0 。这一过程大大降低了输出的误差，使测量值更加接近真实值。

4.6 智能化温度补偿技术

4.6.1 FDR 土壤湿度传感器对温度的交叉敏感

从已有研究来看，大多数关于 FDR 土壤湿度传感器的研究，都忽略了温度对其的影响。但是，对于实际的传感器来说，基本都存在着对环境温度的交叉敏感。下面通过实验来验证温度对 FDR 土壤含水量测量结果是否存在影响。

本实验采用可以加热的木箱，控制温度的变化。将环境温度控制在 5~60℃ 的范围内，采用 FDR 土壤湿度传感器测量天津市北辰区的土样在不同温度环境中的含水状况，并对测量结果进行分析。实验步骤如下：

- （1）从野外取回一定量的土，进行风干。风干后过筛，使土质均匀，无土块，再对其进行烘干；
- （2）将土样依次加入不同量的水，配置成不同含水量的土样，配置环境温度为 20℃。配置完后，静置 24 小时，以使土壤含水量均匀；
- （3）对 PVC 饭盒进行编码，分别将土样装入饭盒中，横向插入 FDR 土壤湿度传感器，然后用塑料袋将饭盒密封，降低实验中土样水分的蒸发量；
- （4）将装有土样的饭盒放入实验木箱中，连接 FDR 传感器与万用表，连接好实验装置。
- （5）通过温度计测量土壤温度，先将温度控制在 25℃，FDR 土壤湿度传感器读数稳定后，进行读数并记录；
- （6）继续进行下一级温度的实验，将测量值填入表格 4.3。
- （7）以土壤含水量为横坐标，传感器输出电压为纵坐标，生成不同温度下 FDR 传感器的输入输出特性曲线图 4.13，观察分析曲线。

表4.3 不同温度时FDR传感器的输入与对应输出电压的实验标定值

含水量 (%)	25℃时输出电 压 (V)	30℃时输出电 压 (V)	35℃时输出电 压 (V)	40℃时输出电 压 (V)	45℃时输出电 压 (V)
2	0.10	0.13	0.15	0.19	0.22
4	0.29	0.33	0.36	0.41	0.45
6	0.50	0.54	0.57	0.62	0.66
8	0.65	0.71	0.76	0.83	0.89
10	0.88	0.94	1.01	1.06	1.12
12	1.15	1.20	1.26	1.30	1.35
14	1.34	1.39	1.45	1.49	1.54
16	1.58	1.66	1.75	1.82	1.87
18	1.75	1.81	1.87	1.98	2.04
20	1.91	1.97	2.01	2.14	2.20
22	2.04	2.13	2.23	2.31	2.40
24	2.21	2.29	2.36	2.45	2.53
26	2.37	2.46	2.54	2.64	2.73
28	2.53	2.62	2.70	2.80	2.89
30	2.78	2.86	2.93	3.02	3.10
32	2.92	3.00	3.07	3.16	3.24
34	3.04	3.12	3.20	3.28	3.35
36	3.15	3.24	3.32	3.42	3.51
38	3.24	3.32	3.40	3.48	3.57
40	3.33	3.42	3.52	3.60	3.69
42	3.40	3.50	3.61	3.69	3.81
44	3.46	3.56	3.65	3.76	3.86
46	3.51	3.61	3.70	3.80	3.92
48	3.55	3.64	3.74	3.83	3.94
50	3.58	3.68	3.77	3.87	3.98

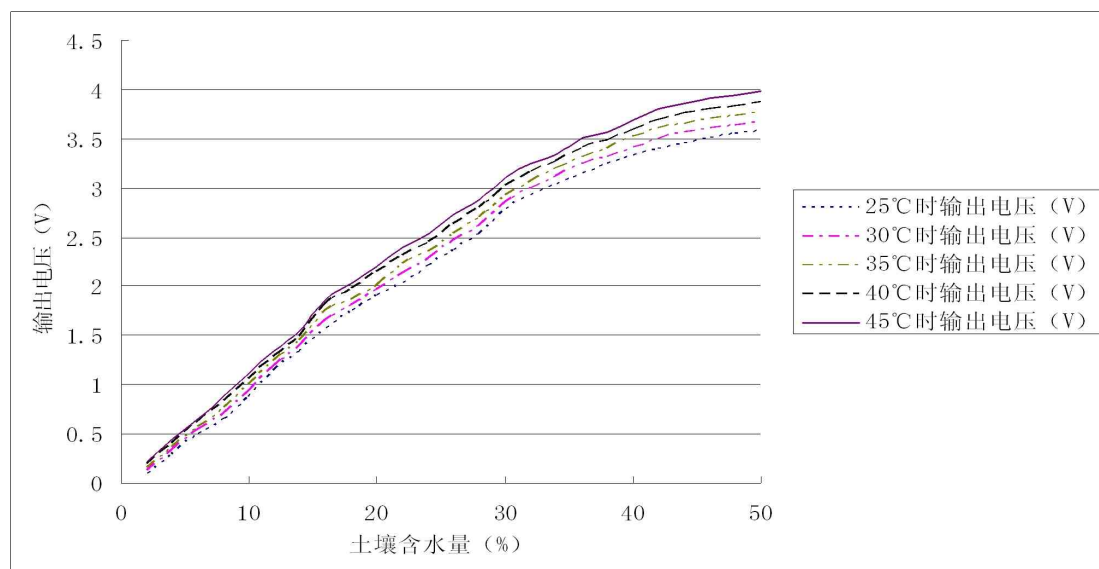


图4.13 不同温度下FDR传感器的输入输出特性曲线

通过曲线发现，土壤湿度相同时，由于环境温度的递增，FDR 土壤传感器的输出电压递增，说明 FDR 土壤湿度传感器的测量结果受温度影响，随温度的变化而变化，存在明显的温度交叉敏感现象。温度效应降低 FDR 传感器的测量精度，使其性能不稳定，所以，不能忽视温度对 FDR 传感器的影响。尤其是在昼夜温差大的地区使用 FDR 土壤湿度传感器时，要考虑温度的影响，采取相应的措施消除温度的影响。

4.6.2 温度补偿方法

目前，可以用硬件补偿或软件补偿对传感器进行温度补偿，但用设计硬件电路的方法进行补偿存在很多不足，如设计难度大、可移植性差、效果不理想等。本文采用软件补偿方法，利用温度传感器、FDR传感器、单片机搭建智能化多传感器系统，通过灵活的软件功能，结合曲线拟合方法，消除由于温度作用导致的FDR传感器的测量误差。

在不同的温度下，FDR土壤湿度传感器有不同的输入（ θ_V ）—输出（ u ）特性。如果知道任意工作温度 T 时，相应的 θ_V — u 的特性,并按其反非线性曲线读取土壤含水量，就不会引入温度误差。通过曲线拟合法进行温度补偿，确定任意温度时的输入输出特性，具体步骤如下：

（1）确定标定数据的反非线性拟合方程

将实验中得到的不同温度 T_i 下，FDR传感器的输入输出数据，用反非线性曲线方程表示出来：

$$\left. \begin{aligned} T_1: & \quad \theta_V(T_1) = \beta_{01} + \beta_{11}u + \beta_{21}u^2 + \beta_{31}u^3 \\ T_2: & \quad \theta_V(T_2) = \beta_{02} + \beta_{12}u + \beta_{22}u^2 + \beta_{32}u^3 \\ \dots\dots & \\ T_i: & \quad \theta_V(T_i) = \beta_{0i} + \beta_{1i}u + \beta_{2i}u^2 + \beta_{3i}u^3 \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

式中将相应温度下传感器的输入输出数据代入，利用最小二乘法原则来求解 β 。这样（4.7）式就可以确定了。

（2）列出 β 关于温度的曲线拟合方程

随着温度的变化，（4.7）式中系数是随之改变的，为确定任意温度下的FDR传感器静态特性曲线，将 β 与温度的关系用一维多项式表示为：

$$\left. \begin{aligned} 0\text{次项系数:} & \quad \beta_0 = A_0T + B_0T^2 + C_0T^3 + D_0 \\ 1\text{次项系数:} & \quad \beta_1 = A_1T + B_1T^2 + C_1T^3 + D_1 \\ 2\text{次项系数:} & \quad \beta_2 = A_2T + B_2T^2 + C_2T^3 + D_2 \\ 3\text{次项系数:} & \quad \beta_3 = A_3T + B_3T^2 + C_3T^3 + D_3 \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

通过（4.7）式求得的系数和对应的温度数值，可以得到：

$$\left. \begin{aligned} \beta_{11} &= A_1T_1 + B_1T_1^2 + C_1T_1^3 + D_1 \\ \beta_{12} &= A_1T_2 + B_1T_2^2 + C_1T_2^3 + D_1 \\ \beta_{13} &= A_1T_3 + B_1T_3^2 + C_1T_3^3 + D_1 \\ \dots\dots & \\ \beta_{1i} &= A_1T_i + B_1T_i^2 + C_1T_i^3 + D_1 \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

通过最小二乘法可以求得上式的系数 A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 。同理可以求得 A_0 、 B_0 、 C_0 、 D_0 ， A_2 、 B_2 、 C_2 、 D_2 ， A_3 、 B_3 、 C_3 、 D_3 ，所以可以知道 β 与温度的关系。

（3）计算任意温度对应的反非线性特性方程

FDR土壤水分传感器系统在使用过程中，PT100温度传感器测量土壤温度 T ，自动将温度代入（4.8）式中，计算出反非线性拟合方程的各项系数，从而可以知道，温度 T 时，FDR传感器的电压-湿度的关系曲线：

$$\theta_v(T) = \beta_0 + \beta_1 u + \beta_2 u^2 + \beta_3 u^3 \quad (4.10)$$

将上式进行编程计算，就可以根据FDR传感器的输出电压计算出土壤含水量，理论上消除了温度效应，测量结果更加真实可靠。

由表 4.3 的实验数据得 $\beta_0 = 0.006T - 0.4044$, $\beta_1 = 0.0005T - 0.1165$,
 $\beta_2 = -0.0011$, $\beta_3 = 0$ 。

4.6.3 温度补偿系统的软件实现

本文利用温度传感器、FDR 传感器、单片机搭建智能化多传感器系统，将测得的

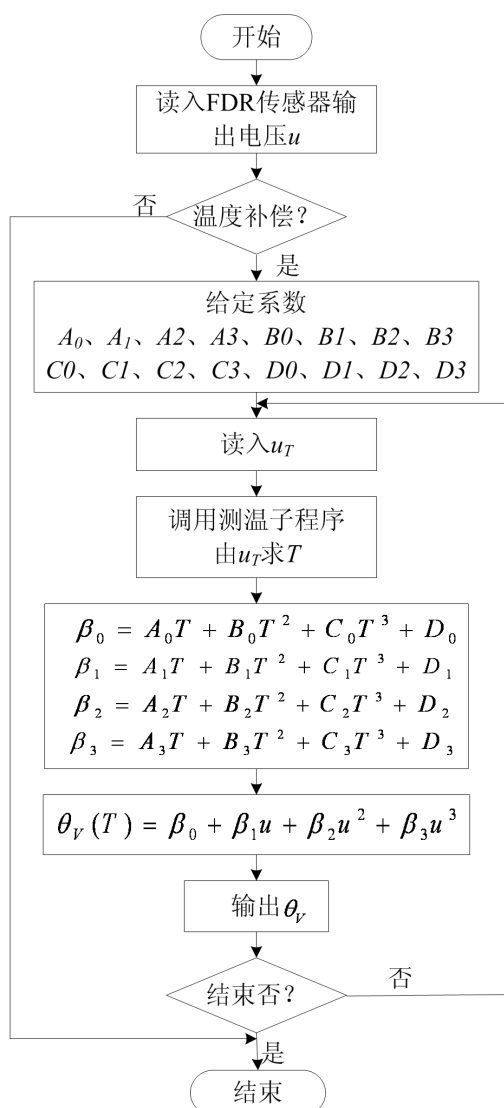


图 4.14 温度补偿系统的流程图

温度数据与 FDR 传感器的测量数据进行数据融合，消除温度的交叉敏感，提高 FDR 土壤湿度传感器的精度。温度补偿系统的流程图如图 4.14 所示，当 FDR 传感器需要温度补偿时，温度传感器进行温度采集，测量出工作环境的实时温度，调用计算公式计算出该温度下的反非线性特性方程的系数，将 FDR 土壤水分传感器输出的电压代入经系数修正后的反非线性方程，计算相应温度下的土壤湿度，从而消除了温度产生的附加误差，提高了传感器的测量精度。

4.7 上位机软件的设计

本文运用 VS 2008 软件开发环境，设计了上位机操作平台，可以通过计算机实现对 FDR 土壤湿度传感器智能化过程的控制，对其进行相关参数的设置，还可以通过上位机界面掌握 FDR 土壤湿度传感器的测量信息，主界面如图 4.15 所示，将智能化 FDR 土壤湿度传感器与上位机通信时，先选择对应的串行口，进行土壤湿度测量前按“调零”按键，先对 FDR 土壤湿度传感器进行调零设置，然后可以选择“直接采集”按钮，实现 FDR 土壤湿度传感器对土壤湿度的实时采集，并将结果显示在接收数据区，同时可以将湿度值进行存储。当需要对 FDR 土壤湿度传感器进行智能化设置时，可以选择工作模式中的按键，进入快速校准、非线性补偿、温度补偿等相关模块，实现 FDR 土壤湿度传感器的智能化参数的配置。



图 4.15 上位机主界面

第五章 总 结

随着科技的飞速发展，人们对传感器的性能、精度等各方面也有了更加严格的需求，智能传感器使传感器具备了处理数据、分析数据的能力，使传感器更稳定、更精确，成为未来传感器的发展趋势。FDR 土壤湿度传感器是目前测量土壤湿度常用的传感器，为了得到更精确的土壤湿度数据，减少节约农田灌溉用水的浪费，本文将 FDR 土壤湿度传感器与 C8051F350 单片机相结合，在原来 FDR 土壤湿度传感器的基础上，进行软硬件模块的设计，实现 FDR 传感器输出信号的校准、非线性自校正、零点校正、温度补偿等智能化功能。

在完成本课题期间，查阅了很多关于 FDR 土壤湿度传感器文献和传感器的智能化的方法，搭建实验平台，利用 FDR 土壤湿度传感器对土壤湿度进行了实际测量，得出 FDR 传感器的特性曲线，并测量了不同温度下土壤湿度的变化规律。概括起来，完成的工作主要有：

1. 分析了传感器智能化的发展方向和节约农田灌溉用水的重要性，提出了关于 FDR 土壤湿度传感器智能化研究的现实需要，并给出了主要的设计思路。

2. 对土壤的介电特性和 FDR 土壤湿度传感器的工作原理进行了相关资料的查阅，为后期实验和智能化方法的提出提供了基础。

3. 初步研究了 FDR 土壤湿度传感器的智能化方法，如用 FDR-100 型号和标准 FDR 土壤湿度传感器进行了对比试验，完成 FDR 土壤湿度传感器的快速校准算法的设计；对 FDR 土壤湿度传感器进行了标定实验，通过相关数据，完成非线性补偿算法的设计；对 FDR 土壤湿度传感器进行了随温度变化的测量实验，完成温度补偿算法的设计。

4. 选择 C8051F350 单片机，搭建硬件电路，通过相关补偿算法，完成 FDR 土壤湿度传感器智能化的软件编写和调试工作。

本设计的各项功能指标基本能够实现，但论文还有需要拓展的空间，比如还没有改善 FDR 土壤湿度传感器的动态性能、没有实现其故障检测等智能化功能，希望以后有机会能够对其进行进一步的研究和完善。

参考文献

- [1] 吴鸿亮,唐德善. 沈阳农田灌溉用水趋势及对策研究[J]. 安徽农业科学,2008,12:5124-5125
- [2] 孙景生,康绍忠. 我国水资源利用现状与节水灌溉发展对策[J]. 农业工程学报,2000,02:1-5
- [3] 赵燕东. 土壤水分快速测量方法及其应用技术研究[D]. 北京:中国农业大学, 2002
- [4] Boehme B, Becker M, Diekkrüger B. Calibrating a FDR sensor for soil moisture monitoring in a wetland in Central Kenya[J]. Physics and Chemistry of the Earth,2013,12:28-31
- [5] 刘燕,赵武,郭文远,等. 两种土壤水分检测仪测墒精度的比较[J]. 气象与环境科学, 2007,30:175-178
- [6] 张富,徐淑华. 浅析中子仪在土壤湿度测定中的应用效果[J]. 安徽农学通报,2009,06:42+54.
- [7] 井云鹏,范基胤,王亚男,等. 智能传感器的应用与发展趋势展望[J]. 黑龙江科技信息,2013,21:111-112
- [8] 刘君华. 智能传感器系统[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2000
- [9] 皇甫文. 智能压力传感器的研究与设计[J]. 科技资讯,2009,30:75-76
- [10] 崔淑琴,姜德谭. 智能压力传感器的研究与设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2005
- [11] 李强,梁莉,刘桢,等. 具有温度补偿功能的智能压力传感器系统[J]. 仪器仪表学报, 2008,29(9):1934-1938
- [12] 陈岚岚. 智能传感器的发展[J]. 科技资讯,2012,08:2-5
- [13] 王祁,于航. 传感器技术的新发展—智能传感器和多功能传感器[J]. 传感器技术, 2003,01:58-60
- [14] 阎军. 国外智能传感器的发展动向[J]. 自动化博览,2005,06:24-25
- [15] 马孝义,马建仓. 土壤水分介电频差式传感器的研究[J]. 水土保持研究,2002,9(2):87-92
- [16] 董亚峰,王一鸣. 基于驻波原理的无接触土壤含水率测量方法的研究[J]. 农机化研究,2007,1:85-88
- [17] 冯磊. 基于驻波率原理的土壤水分测量技术的研究[D]. 北京:中国农业大学,2005
- [18] 王晓雷. 附加电阻法高频电容土壤水分测试技术研究[D]. 郑州:河南农业大学,2009
- [19] 王晓雷,任学军,胡敬芳,等. 附加电阻高频电容法土壤水分传感器的研究[J]. 河南农业大学学报,2008,06:689-692
- [20] 张志勇. 基于驻波率原理的土壤水分测量方法的研究[D]. 太谷:山西农业大学,2005
- [21] Tian H, Ye L, Chen H. Study on effect of soil temperature on FDR soil moisture sensor in frozen

soil[C]. International Society for Optics and Photonics, 2013,11: 87-90

[22] 高磊,施斌,唐朝生,等. 温度对 FDR 测量土壤体积含水量的影响[J]. 冰川冻土, 2010,05:964-969

[23] 周奇,岑国平,郭晓,等. FDR 技术在黄土路基水分测定中的应用[J]. 公路, 2011,5:142-147

[24] 郭卫华,李波,张新时,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,2003,04:247-251

[25] 黄飞龙,李昕娣,黄宏智,等. 基于 FDR 的土壤水分探测系统与应用[J]. 气象,2012,06:764-768

[26] 刘平. 基于力敏导电橡胶的柔性触觉传感器静态特性和动态特性研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2010

[27] 赵彦晓. 压力传感器的热零点漂移补偿与非线性修正[D]. 天津:河北工业大学,2003

[28] 刘波. 高灵敏度光纤光栅压力传感器[D]. 武汉:武汉理工大学,2010

[29] 程向华,厉彦忠,谭宏博. 影响压力传感器温度特性的因素分析[J]. 低温与超导,2006,01:63-67

[30] 徐雁,叶妙元,罗苏南,等. 电光式光纤电压传感器温度影响及其补偿方法的研究[J]. 高压电器,2001,02:21-23

[31] 张家田,董秀莲. 非线性传感器的校正方法[J]. 石油工业技术监督,2002,06:27-29

[32] Jian S U N. Sensor Nonlinear Error Compensation Evolved by Neural Network and Particle Swarm Algorithm[J]. Electronic Components Materials,2005,12:5-7

[33] 周再发,秦明,张中平,等. 智能集成传感器系统的研究进展[J]. 微电子学,2003,05:428-431

[34] 霍富强,陈富安. 基于 C8051f350单片机的铅酸蓄电池智能检测仪研制[J]. 电子设计工程,2011,21:119-121

[35] 才智,范长胜,杨冬霞. PT100铂热电阻温度测量系统的设计[J]. 现代电子技术, 2008,20:172-174+177

[36] 李芸婷,万振凯. PT100温度传感器数据实时采集系统[J]. 仪器仪表用户,2007,05:24-26

[37] 刘艳玲. 采用 MAX232实现 MCS-51单片机与 PC 机的通信[J]. 天津理工学院学报, 1999,02:60-64

[38] 夏明忠,夏以轩,李兵元. 软件模块化设计和模块化管理[J]. 中国信息界,2012,11:56-59

[39] 李元寿,王根绪,程玉菲,等. 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(4):543-547

[40] 李占峰,张军昌,师帅兵,等. 压力传感器非线性补偿与实现[J]. 农机化研究,2003,3:126-132

攻读学位期间所取得的相关科研成果

- [1] 陈明,徐晓辉,宋涛,闫焕娜. 基于 Android 平台的节水灌溉客户端设计[J],中文核心期刊《节水灌溉》,2013 年第 8 期
- [2] 徐晓辉,闫焕娜,苏彦莽,孙立成. FDR 土壤水分传感器的快速校准与验证[J],中文核心期刊《节水灌溉》已录.

致 谢

随着毕业的临近，我的求学生涯也即将画上句号，回首发现，这一路上有过艰辛，有过汗水，也收获了颇多的帮助与感动。

经过研究生阶段，我不但为人处事更加成熟，专业技能也有很大提高，这些都离不开我的导师徐晓辉老师的帮助。徐老师在传感器方面具有极高的造诣和素养，对传感器的认识也具有独到的见解，及时将迷茫的我引入了关于 FDR 传感器的课题研究，给我指明了方向。徐老师常为我解答一些我想不通的问题，经常提出指导性的意见，使我收获了很多知识。在课题的研究过程中，徐老师不仅监督我做实验，还亲自参与其中，可见徐老师的严谨和负责。徐老师不仅是我学业上的导师，同时也是我生活上的导师，徐老师为人谦逊、宽以待人，让人感到一种亲和力，徐老师经常在生活上叮嘱我们，事无巨细，经常给我们讲授做人的道理，言传身教，使我受益颇深。再华丽的辞藻都无法表达我对徐老师的感谢，在这里我要深深的鞠一躬，道一声：“徐老师，谢谢您！”

特别感谢信息工程学院实验室老师苏彦莽老师和宋涛老师，他们给了我很多传感器课题方面的帮助和实验方面的指导，使我的思路更加清晰，知识更加系统。

感谢 11 级物理电子学的同学们，他们在学习上和生活中帮助我和关心我，同时感谢他们的配合，使我的班级工作能顺利进行。

最后我要感谢我的父母，感谢他们对我学业的支持，他们是我攀登知识高峰的动力源泉，他们给了我无尽的爱与宽容，是我心灵的依靠，女儿的感恩之情无以言表。



硕士学位论文

MASTER THESIS

