

土壤水分测量技术与墒情监测系统研究

■ 王克栋 陈岩 编著

20	32	11	13.5
22	36	11	13.5
22.4	35.4	11	13.5
25	38	11	13.5
27	40	11	13.5
28	41	11	13.5
30	43	11	13.5
31.5	44.5	11	13.5
32	45	11	13.5



 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS

土壤水分测量技术与 墒情监测系统研究

王克栋 陈 岩 编著

机械工业出版社

本书结合土壤墒情信息采集、管理和决策支持系统设计和工程建设的实践经验,介绍了土壤水分测量技术研究的最新成果,可作为高等院校农业、水利和土壤学等专业学生的参考书,也可供农业、水利部门在防汛抗旱指挥系统建设与管理工作中参考。

图书在版编目(CIP)数据

土壤水分测量技术与墒情监测系统研究/王克栋,陈岩编著 —北京:机械工业出版社,2011 4

ISBN 978-7-111-33361-6

I ①土… II ①王…②陈… III ①土壤含水量-测量-研究②土壤-墒情-监测-研究 IV ①S15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 021028 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:牛新国 责任编辑:吕 潇 版式设计:霍永明

责任校对:张晓蓉 封面设计:路恩中 责任印制:杨 曦

北京市朝阳区展望印刷厂印刷

2011 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·12 印张·253 千字

0001 2500 册

标准书号 ISBN 978-7-111-33361-6

定价 39.80 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前言

写作背景

在现代农业中，准确有效地测量土壤含水量是推行精量灌溉技术、提高水资源利用率的基础。而对一定范围内的土壤墒情（旱情）进行实时监测和预测预报，并依此制定区域调水、配水方案和灌溉计划，则是防旱抗旱的重要手段之一。

本书作者长期从事土壤水分传感器与土壤墒情监测与预测预报系统的研究工作，积累了丰富的产品开发和工程建设经验。尤其是自 2006 年起，参与国家防汛指挥系统一期工程抗旱管理系统之贵州、安徽、重庆、黑龙江、吉林等省市的土壤墒情信息遥测系统的建设，设计和开发了基于传感器网络的土壤水分数据采集终端、土壤墒情远程监测系统和墒情信息管理与决策支持系统，本书便是在这些工作的基础上总结精炼而成。

主要内容

全书共分 9 章，其中第 2~5 章由王克栋执笔，约 10 万字；第 1 章、第 6~9 章由陈岩执笔，约 16 万字。全书由王克栋统稿。

第 1 章介绍了土壤水分测量与墒情监测的意义，及几种常见的土壤水分测量技术。

第 2 章介绍了使用介电法测量土壤含水量的物理原理，包括土壤介电常数与其含水量的关系、土壤水分探头的电参量模型、电磁波在探头上的传播规律。

第 3 章介绍了一种新的基于相位检测原理的时域反射式土壤水分测量系统（P-TDR），详细介绍了其工作原理和软硬件设计方法。

第 4 章介绍了 P-TDR 系统专用探头的结构及设计方法，并对其性能进行了理论分析。

第 5 章给出了采用 P-TDR 系统对多种不同的土壤进行测量得到的数据，根据这些数据对 P-TDR 系统的实际性能进行了分析。

第6章介绍了一种土壤水分数据采集终端的设计方法,以及采用该数据采集终端进行土壤墒情调查的结果。

第7章以在北京市大兴区土壤墒情试验站进行28个月连续监测得到的土壤墒情数据为例,研究了固定监测点的土壤墒情变化规律。

第8章研究了基于人工神经网络的土壤墒情预报模型,并对预测结果进行了分析。

第9章介绍了一种土壤墒情信息管理与决策支持系统的开发过程。

致谢

本书的出版得到了北京工商大学“北京市属市管高校人才强校计划”项目的资助,作者在此表示感谢。本书部分内容源自第一作者的博士学位论文,该论文是在其导师王一鸣先生的指导和帮助下完成的,作者在此向尊敬的导师致以崇高的敬意和衷心的感谢。作者还要感谢中国农业大学信息与电气工程学院、资源与环境学院的部分老师和博士研究生,本书的研究工作得到了他们的帮助,部分内容是与他们共同工作取得的成果,他们是杨绍辉、孙凯、冯磊、杨卫中、龚元石、李子忠和郑茹梅。作者感谢北京工商大学的所有同事,特别是吴静珠、孙梅、邢素霞、乔继红、肖洪兵和郭培源等老师,作者在工作中得到了他们的无私帮助才能有时间进行本书的写作。

由于作者水平有限,书中难免有错误疏漏之处,敬请读者朋友不吝指正。

作 者

目 录

前言

第 1 章 土壤水分测量与墒情监测	1
1.1 土壤水分测量与墒情监测的意义	1
1.2 土壤水分测量与墒情监测的方法	4
1.2.1 烘干法	6
1.2.2 张力计法	7
1.2.3 中子仪法	8
1.2.4 FD 法	9
1.2.5 TDR 法	11
1.3 TDR 及其在土壤水分测量中的应用	13
1.3.1 TDR 技术研究现状	13
1.3.2 TDR 传感器探头研究进展	15
1.3.3 TDR 仪器研制进展	16
第 2 章 TDR 土壤水分测量技术的理论基础	18
2.1 麦克斯韦方程	18
2.2 电介质的极化与土壤表观介电常数	20
2.2.1 电介质的介电常数	20
2.2.2 介质极化的不同微观机制	22
2.2.3 交变电场下的介质极化	24
2.3 土壤介电特性	25
2.3.1 土壤磁导率	26
2.3.2 土壤电导率	26
2.3.3 土壤介电常数	28
2.4 土壤水分探头的电参量模型	30
2.5 波在探针上的传播和反射	34
第 3 章 基于相位检测原理的 P-TDR 系统	38
3.1 P-TDR 系统设计原理与总体设计方案	38
3.2 P-TDR 系统硬件设计	42

3.2.1	高频正弦电压信号源设计	42
3.2.2	铁氧体环形器简介	46
3.2.3	相位检测器工作原理	49
3.2.4	检波器工作原理	51
3.2.5	微处理器及其外围电路设计	53
3.3	P-TDR 系统软件设计	56
3.4	信号传播时间测量实验	57
第4章	P-TDR 土壤水分测试仪的传感器探头	59
4.1	P-TDR 传感器探头的基本结构	59
4.2	探头与同轴电缆阻抗失配的影响研究	61
4.2.1	探头首端反射信号的幅值和相位对测量结果的影响	62
4.2.2	探头首端信号反射率与探头阻抗的关系	63
4.3	P-TDR 探头阻抗特性研究	67
4.3.1	无绝缘涂层平行三棒式探头的阻抗特性研究	67
4.3.2	有绝缘涂层平行三棒式探头的阻抗特性研究	73
4.4	P-TDR 探头性能对比研究	77
4.4.1	不同几何尺寸探头对比研究	77
4.4.2	绝缘涂层影响对比研究	79
4.4.3	内部阻抗变化结构对比研究	80
第5章	P-TDR 土壤水分测试仪性能分析	82
5.1	实验材料与实验方法	82
5.1.1	实验材料	82
5.1.2	实验方法与实验数据	83
5.2	P-TDR 的土壤水分测试性能分析	87
5.2.1	研究方法与评价指标	88
5.2.2	对各种不同质地土壤的测量结果分别进行回归分析	89
5.2.3	对多种不同质地土壤的测量数据组合进行回归分析	92
5.2.4	不同容重对测量结果的影响分析	95
5.3	P-TDR 的土壤电导率测试性能分析	99
第6章	土壤水分数据采集终端	103
6.1	GPS 简介	104
6.2	土壤水分数据采集终端	111
6.3	土壤水分数据采集终端软件设计	113
6.4	河南省广利灌区的土壤墒情调查试验	116

第7章 定点土壤墒情变化规律研究	119
7.1 土壤墒情的时程变化规律	120
7.1.1 根系层土壤墒情数据预分析	120
7.1.2 不同阶段土壤墒情数据统计分析	121
7.2 土壤墒情的垂向变化规律	126
7.2.1 垂向上土壤墒情数据预分析	126
7.2.2 垂向上土壤墒情的相关分析	126
7.2.3 垂向上土壤墒情的聚类分析	128
7.2.4 垂向上土壤墒情的多元线性回归分析	131
7.3 土壤墒情的增长与消退规律	135
7.3.1 土壤墒情增长规律	135
7.3.2 土壤墒情消退规律	137
第8章 土壤墒情预报模型	140
8.1 人工神经网络	140
8.1.1 人工神经网络的基本原理	140
8.1.2 BP人工神经网络算法	142
8.2 BP人工神经网络模型的建立	147
8.2.1 学习样本的选择与处理	147
8.2.2 网络参数确定和网络结构	148
8.2.3 网络训练过程	149
8.3 预报结果分析	151
8.3.1 土壤墒情短期预报	151
8.3.2 土壤墒情中期预报	152
8.3.3 土壤墒情长期预报	153
8.3.4 土壤墒情预报结果的验证与比较	154
第9章 土壤墒情信息管理与决策支持系统	157
9.1 北京地区的自然概况	157
9.1.1 气象与水文	157
9.1.2 地形地貌	158
9.1.3 耕地与土壤类型	158
9.2 系统开发的目的意义	158
9.3 北京土壤墒情监测站的分布情况	159
9.4 系统的组成结构	162
9.5 系统软件开发	163

9.5.1	系统软件的开发环境	163
9.5.2	系统的建设目标与功能设计	166
9.5.3	系统的数据库设计	168
9.6	系统的应用	170
9.6.1	系统主界面	170
9.6.2	区域内土壤墒情的监测	170
9.6.3	区域内土壤墒情的预报	176
9.6.4	系统的其他应用	180
参考文献		184

第 1 章

土壤水分测量与墒情监测

1.1 土壤水分测量与墒情监测的意义

土壤水作为水资源的重要组成部分，是一切陆生植物赖以生存的基础。水不仅是一切生命的重要组成部分，而且土壤中许多物理、化学和生物过程常常需要在一定的水分条件下才能进行。植物从土壤获取所需要的营养元素也要从土壤溶液中获得，而土壤溶液的性质与土壤中的水分休戚相关。如果土壤过分缺水将导致肥料无法被作物充分吸收利用，造成土壤的盐碱化；如果土壤水分过多，将造成水分的渗漏，水中的溶质将随水分渗漏到地下水中，造成污染。目前由于过量灌溉或雨量过多使氮肥渗漏到地下水中已成为地下水污染的主要原因，这不但造成肥料和水资源的浪费，而且也破坏了地下水资源。此外，许多土壤物理性质，如结构性、塑性、压缩性、粘着性、粘结性等，都和土壤水分状况密切相关。所以，土壤水分的特性和存储状况也极大地影响着土壤中其他环境因子，进而影响植物和土壤生物的生存状况。

土壤电导率在农业上的主要作用是间接测量土壤含盐量，即土壤液相中的可溶性无机化合物微粒的含量，包括各种离子（如 Na^+ ， K^+ ， Mg^{+2} ， Ca^{+2} ， Cl^- ， HCO_3^- ， NO_3^- ， SO_4^{-2} 和 CO_3^{-2} ）、离子团和分子。在灌溉农业中，灌溉水不断将盐分带入土壤，由于水分的蒸发作用，导致剩下的土壤水中的盐分含量不断增加。土壤含盐量过高可能导致作物直立性丧失、降低生长速度和减产，严重的可能导致作物夭折。盐分的聚集会导致渗透压增大，蒸发速

率减低,水分不易被作物吸收,土壤溶液中的某些离子可能导致作物中毒或营养失衡。此外,土壤固体颗粒吸附某些离子还可能导致土壤板结从而影响耕作。

随着变量灌溉和变量施肥技术的推广和应用,在生产和科研活动中越来越需要实时、快速和准确地监测土壤水分和电导率,以确保对农作物适时、适量的灌溉和施肥,或者结合气象预报对未来土壤水分状况进行预测,作为区域调水、配水和制定灌溉计划的参考依据。虽然目前已有多种土壤水分和电导率测量方法用于科学研究,但它们在用于农田土壤水分和电导率的实时监测时都存在这样或那样的缺陷。

时域反射(Time Domain Reflectometry, TDR)技术是当今世界上最先进的土壤水分快速测量技术之一。与其他方法相比,TDR技术具有以下优点:

- (1) 精度高,体积含水量测量误差一般在2%以内;
- (2) 测量结果受土壤类型影响较小,一般不需要对特定的土壤进行单独标定;
- (3) 无辐射,对土壤破坏性小;
- (4) 探针的几何结构对测量结果的影响较小;
- (5) 与数据记录仪配合可进行长期自动监测。

国外应用TDR技术还在监测山体滑坡、垃圾填埋、江河和水库堤坝安全等方面发挥重要作用,在农业、林业、园艺、水文学、生态学、土木工程、废物管理、食品加工、矿业和储藏业等领域均有广泛的应用。

TDR仪通过测量土壤含水量变化引起的电磁波信号在TDR探头上传播速度的变化来测量土壤水分,当探头长度一定时,就转化为对信号传播时间的测量。土壤含水量变化引起的电磁波信号传播时间变化量很小,以通常使用的15cm长探头为例,当探头置于空气中和水中时,电磁波信号在探头上传播一个来回的时间分别约为1ns和9ns,而当探头插入土壤中时,电磁波信号传播的时间介于二者之间。也就是说土壤含水量变化引起的电磁波信号传播时间的变化不超过8ns,为了达到一定的土壤水分测量精度,就要求TDR系统对时间测量的分辨率达到0.1ns,这对TDR系统的波形采样电路提出了很高的要求。此外,为了达到一定的测量精度,通常要求TDR系统的测试信号的上升沿时间小于200ps,这就对其信号发生器也提出了很高的要求。由于必须采用复杂且价格高昂的高频电子器件,使得现有的TDR仪器的价格都很贵,不利于在农业生产中大量推广使用。表1-1列出了几种商用TDR土

壤水分和电导率测试仪的价格。

目前仅少数国家掌握了设计制造 TDR 土壤水分和电导率测试仪所需的高速采样示波器、窄上升沿阶跃信号发生器、高频高精度时间基准等技术。我国生产和科研单位使用的 TDR 仪主要从美国和加拿大等国进口, 单机价格约一万美元, 成套设备价格则为几万美元, 由于我国尚无此产品, 进口价格比生产国本地价格高出很多。因厂家在国外, 缺乏完善的维修和配件供应服务, 出现故障后往往不得不返回原厂家进行维修, 影响监测的连续性。

表 1-1 现有的 TDR 土壤水分和电导率测试仪价格和产地

型号	1502(B,C)	FOM/mts	6050X3	6050X1	MP-917	TDR100	TRIME FM2
价格/美元	11695	4707	6895	9550	5350	3650	4370
尺寸 /cm × cm × cm	44 × 32 × 13	26 × 18 × 13	23 × 20 × 13	28 × 42 × 23	27 × 25 × 17	21 × 11 × 6	18 × 8 × 6
制造商	Tektronix Inc.	Easy Test Ltd.	Soilmoisture Equipment Corp.		Environmental Sensors Inc.	Campbell Scientific Inc.	IMKO GmbH
产地	美国	波兰	美国		加拿大	美国	德国

注: 表中价格均为仪器产地的价格。

近百年来, 由于工业、农业和城市的发展, 释放了大量的二氧化碳、甲烷等温室气体, 引起全球温度增温, 并产生了十分严重的后果, 特别是对各国的农业发展产生深刻的影响。随着全球性气候变暖, 干旱越来越成为困扰人类社会正常生产、生活的重大自然灾害。我国地处东亚大陆的东南部, 是典型的季风气候国家, 降水量受海陆、地形、季风和台风等多种因素的影响, 地区分布差异很大, 年内季节分配不均衡, 年际之间变化很大, 所以旱灾频繁。

对土壤墒情(旱情)进行监测和预报研究, 是进行防旱抗旱工作的基础。抗旱部门正是通过测定土壤墒情的变化, 来确定当前墒情程度和预报下一步墒情的发展演变趋势。在过去对墒情信息的采集与传递, 仍然停留在较低的水平上, 信息获取与传递的速度慢、效率低, 导致了墒情分析缺乏准确性、科学性、实时性; 难以为领导和上级部门提供及时准确的墒情和科学决策信息, 贻误抗旱时机。新中国成立以来, 我国各级政府投入大量的资金、人力、物资, 兴建了许多水利工程和抗旱系统。这些工程每年在减轻旱灾、

保障农业及工业生产和挽回经济损失方面发挥着重大作用。

进行土壤墒情（旱情）监测与预报工作也能在水资源日益短缺情况下节约用水、高效用水、合理运用有效的水资源。中国水资源人均占有量仅为 2240m^3 ，约为世界人均的 $1/4$ ，是世界上最缺水的 13 个国家之一。然而由于不合理利用水资源，我国却在极度缺水的同时，大量地浪费着有限的水资源。我国农业用水的浪费占有水资源浪费的 80%。墒情监测与预报工作使人们能及时了解墒情的发生，对墒情作出有效的评估，并能适时对墒情进行预警，这样就有利于人们进行有效的抗旱决策，根据墒情具体情况对水资源进行有效的分配，实现“变量灌溉”，使有限的水资源得到优化配置和合理使用。

1.2 土壤水分测量与墒情监测的方法

土壤是一种典型的多孔介质，通常将其看作是由固态的土壤颗粒、液态的土壤水和气态的空气组成的三相混合物。土壤含水量（土壤水分）是土壤中液相体积或质量相对于土壤的一些特性指标如固相体积、固相质量、土壤总体积、土壤总质量、土壤孔隙容积等的比值。根据不同应用的需要，土壤含水量一般有以下几种定义或表示方法。

1. 质量含水量（ θ_m ）

质量含水量，是指土壤中所含水的质量（ m_w ）与干土质量（ m_s ）的比值，即

$$\theta_m = \frac{m_w}{m_s} \quad (1-1)$$

干土质量应该是指不含水分的土壤固相颗粒的质量，但在实际情况下很难测定固相颗粒的精确质量。这是由于土壤颗粒表面有极强的吸湿性，在常用的土壤含水量测定方法下，总会有一部分水分吸附于颗粒表面，难以与土壤颗粒分开，从而使测定的土壤颗粒的质量偏高，水分质量偏低，含水量低于土壤实际含水量。但是鉴于在常规测定方法下不能从土壤颗粒分离出来的水对土壤水分运动和植物生长的有效性很低，甚至是无效的，因此，以常规方法测定的土壤含水量可近似实际含水量，可以满足绝大部分土壤水分问题研究的需要。通常所说的干土是指在 105°C 下烘干的土壤。

含水量的精度应依据研究问题的特点及实用性具体对待。因土壤质地、

容重和有机质含量的不同, 土壤含水量的上限(饱和含水量)差异很大。对于矿质土壤, 其质量含水量一般在 25% ~ 60% 之间, 粘性土饱和含水量一般高于沙性土。

2. 体积含水量 (θ_v)

体积含水量是指土壤中水所占体积 (V_w) 与土壤体积 (V) 的比值, 或单位体积土壤中水所占的容积, 即

$$\theta_v = \frac{V_w}{V} \quad (1-2)$$

一般而言, 矿质土壤饱和体积含水量在 30% ~ 50% 之间; 粘性土壤饱和体积含水量可达 60%; 对于非膨胀土, 土壤饱和体积含水量与土壤孔隙度相等; 对于膨胀土, 由于土壤的孔隙度随土壤含水量增加, 所以土壤饱和时的体积含水量可能超过干燥时土壤孔隙度。体积含水量消除了土壤中三相介质密度的差异, 使得土壤物理工作者能从统一的空间角度研究问题, 能更直观地反映土壤水分存在情况, 揭示土壤水分运动各要素之间的关系, 因而在研究中比质量含水量应用得更广泛。一般不特别说明, 土壤含水量 θ 就指体积含水量。在实际研究和实践中, 广泛应用的烘干法直接测得的含水量往往是质量含水量, 但只要知道土壤的容重 ρ_b 和水的密度 ρ_w , 就可以通过下面的关系获得土壤体积含水量:

$$\theta_v = \theta_m \cdot \frac{\rho_b}{\rho_w} \quad (1-3)$$

3. 饱和度 (s)

饱和度是指土壤水的容积 (V_w) 与土壤孔隙总容积 (V_0) 的比值, 即

$$s = \frac{V_w}{V_0} = \frac{V_w}{V_w + V_a} \quad (1-4)$$

式中, V_w 和 V_a 分别是土壤孔隙中的水和空气的体积。对于非膨胀性土壤, 由于土壤饱和容积含水量与土壤孔隙度相等, 饱和度也可以表示为

$$s = \frac{\theta}{\theta_s} \quad (1-5)$$

式中, θ_s 是饱和容积含水量或土壤孔隙度。由上式可知, 饱和度的变化范围在 0 ~ 1 之间。

由于饱和度可以更清楚地反映土壤水分在土壤孔隙中的填充状况,在研究土壤水分运动时经常用到。此外,由于土壤中存在一些不连续的孔隙(死孔)和微孔,在这些孔隙中的水往往流动性极差或者不流动,这部分孔隙对土壤水分的传输贡献率很小,一些研究中倾向于认为土壤在此含水量下导水率和扩散率为零,因而用有效饱和度(Θ)来反映土壤中的有效水分含量更为适宜,即

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (1-6)$$

式中, θ_r 是滞留含水量,目前并没有严格的定义,根据研究的需要通常取风干土含水量。

土壤的特性决定了在测量土壤含水量时,必须充分考虑到土壤容重、土壤化学组成、土壤含盐量等基本物理化学特性及变化规律。土壤含水量测量方法的研究经历了很长的道路,派生出多种方法,而且目前仍处于发展中。在此本文对几种常用的土壤水分测量方法加以介绍,特别是对土壤水分的介电测量法加以详细阐述。

1.2.1 烘干法

烘干法是通过湿土称重、干燥脱水、然后再干土称重来测定土样的质量含水量。烘干的经典办法是将土样放到 105℃ 的恒温箱中烘 24h (小时)。这种方法能去除颗粒间的大部分水分,但不能去除粘粒层间的水分子,而且还会挥发有机质的一些成分,因此,烘土的时间和温度在某种程度上影响测量的含水量精度。在一般情况下,105℃ 的恒温箱中烘 6~8h 已经具有足够的精度。微波作为一种快速干燥土壤的方法,受到一些研究者的青睐,烘干土壤大约只需 3~6min。虽然这种方法可以快速干燥土样,但也存在很多问题。由于微波工作的原理不同于烘箱,土样内的温度可能不均衡,在某些地方温度可能会很高。所以,一些研究者认为微波干燥法没有恒温箱干燥法准确。但取样大小和烘干时间可能才是引起误差的主要原因。称重天平应具有足够的精度,因为随取样质量的减少,测量相对误差可能增加。此外,烘干法测定的是土壤的质量含水量,而体积含水量通常应该应用更广,在大部分情况下还要通过式(1-3)把土壤质量含水量转化为体积含水量,这样就容易将容重的测量误差带入土壤体积含水量中。

在田间用取土钻采集土样，然后用烘干法测定土壤含水量，因其简单易行目前应用仍然比较普遍。而田间土壤的质地、结构等特性空间变异性很大，土壤水分分布也往往不均匀，这就造成取样的代表性可能不好。根据 Holmes 等人的研究，田间取样的变异系数为 10% 或更大。所以取样的大小和取样的多少是田间采用烘干法测定土壤含水量需要注意的问题。

虽然存在上述问题，但就目前来看，烘干法仍然是测定土壤含水量的标准方法，常作为其他测定方法的标定依据。

1.2.2 张力计法

张力计式土壤水分传感器是一种广泛成功地用于某些土壤的水分测量的传感器。这种仪表有个多孔瓷头，它通过充水的管子与真空表连接，该装置插入土壤的钻孔中，多孔瓷头与土壤紧密贴合，真空表设在地面之上。

对张力计式土壤水分测量仪的研究起步较早。在 1922 年，Gardner 就开始利用张力计来测定非饱和土壤水的张力，从而达到测量土壤含水量的目的；1949 年，Rechard 将其进行改进，使其能在田间和实验室研究；到了 1976 年 Mekin 采用乙二醇代替水作为溶液，研究寒冷地区的张力；Elzdfawy、Mansell 和 Gillham 等人分别在 1975 年和 1976 年将张力计和压力传感器结合，研究具备自动记录功能的测量系统；日本学者中司启二等人将精细陶瓷技术和电子技术相结合研制出了数字式张力计。

用张力计来测量土壤含水量有了很大的发展，它的优点是结构及原理都比较简单，可以在线实时测量，而且可以确定水在土壤内的流动方向和渗透深度，但它的缺点也非常突出：

(1) 它的测量范围很大程度上受土质的影响。对于壤土和粘土来说，只有土壤水分负压高于 0.8bar 时，才能用张力计对土壤水分进行测定。而对沙土来说，由于其通气性好，所以，即便是土壤水分负压低于 0.8bar 时，也可以用张力计来测量土壤的含水量。

(2) 该方法所测量的是土壤水的吸力，需要依据土壤水分特征曲线来换算成土壤含水量，由于土壤水分能量关系非常复杂，呈非线性，且容易受到许多土壤物理化学特性的影响，即使对同一田块，这一关系也十分复杂，使得用张力推求土壤含水量时极为困难，不方便，带来较大

误差。

(3) 该方法存在滞后和回环, 影响其测量速度。

1.2.3 中子仪法

中子仪主要包括探头和计数器两部分。中子仪的探头由一个压缩的放射源和检测器构成, 可以在土壤中预先埋设的管中移动到不同的土壤深度, 如图 1-1 所示。

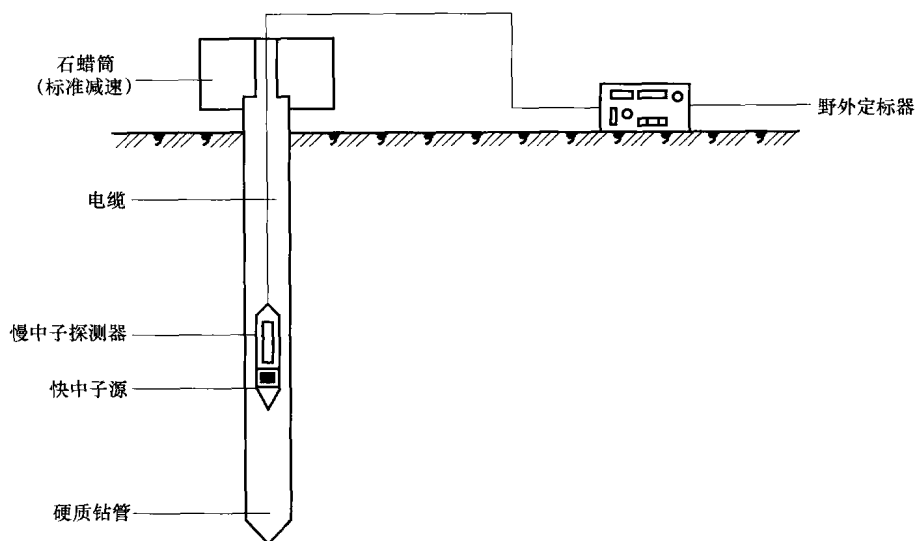


图 1-1 中子仪土壤水分测量系统示意图

探头的放射源通常是 Ra-Be 或 Am-Be 的混合物, Ra 和 Am 都可以反射出高能中子, 发射出的中子与周围土壤中原子核发生碰撞。因为大多数原子核都比中子重, 所以大多数的碰撞都不会减缓中子的原有能量状态。氢核质量与中子相当, 所以当中子与氢核碰撞时, 就会明显地减缓速度, 经过几次碰撞后, 中子就会达到土壤中氢原子热运动的特征速度, 所以热化中子的数量基本上与放射源附近的土壤中氢原子浓度成正比。而与放射源同侧的监测器仅对氢原子热化特征速度运动的中子敏感, 因此监测仪检测到热化中子数 (慢中子数) 可以反映探头附近土壤中氢原子的数量。此外, 由于土壤中的氢原子多以液态水的形式存在, 氢原子的浓度就可以代表土壤的体积含水量, 所以就可以得到一条监测器中子计数与土壤体积含水量之间的标准曲线。这个标准曲线通常是线性的, 可以由下式表示: