

土壤水分介电频差式传感器的研究

马孝义¹, 马建仓²

(1 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨陵 712100;

2 西北工业大学高技术应用研究所, 陕西 西安 710048)

摘要: 在分析了非盐碱性土壤相对介电常数、电导率和最大电导损耗角变化规律的基础上, 提出了一种新型介电频差式土壤水分传感器, 研究了其量测特性。研究表明: 在测量频率段内非盐碱性土壤的电导损耗角正切值大, 土壤为高变损耗材料, 利用频差式 LC 谐振电路, 大幅度提高测量回路的品质因数, 可以有效消除土壤电导变化对介电常数测量的干扰, 以此为基础研制的土壤水分传感器可以基本上满足非盐碱性土壤定点水分测量的要求。

关键词: 土壤水分; 介电常数; 电导损耗角; 传感器

中图分类号: S 152.7; TH 79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2002) 02-0087-06

Development on Soil Moisture Measurement by Electromagnetic Method

MA Xiao-yi¹, MA Jian-cang²

(1 Water Conservancy and Architectural Engineering College, Northwest Sci-tech University of

Agriculture and Forestry, Yangling 712100, Shaanxi Province, China; 2 Institute of

High Technology Application of Northwest Industrial University, Xi'an 710048, Shaanxi Province, China)

Abstract: Based on the systematic analysis of the law of soil electric conduction and dielectric constant with soil text, density, moisture, salt content, the maximum soil dielectric loss factor is determined, a new inexpensive soil moisture sensor is developed, its basic principle, work characteristics, and application are presented. The experiment shows it has advantage of high precise, and the errors of soil kinds, bulk unit weight and salt constant are small.

Key words: soil moisture; dielectric properties; factor of loss; sensor

土壤水分是一切植物生长的基本条件, 土壤水分的实时快速测定是水利、农业和灌排自动化的关键环节, 早在上世纪初, 国内外就开始研究土壤水分测定问题, 至今已经提出了数十种方法。其中研究较多的有重量、能量、热特性、中子、阻抗、电容、时域反射(TDR)、微波、近红外、光学、X—射线、 γ —射线等方法及适于大面积的各种遥感法等^[1], 但由于土壤的复杂性和田间土壤理化特性变异性的存在, 而没有满意解决, 笔者以广义电磁波与物理相互作用原理为基础, 将上述方法分为: 基于高频、微波介电特性, 基于光的折射、透射、反射和近红外吸收, 基于土壤电磁射线衰减三大类测量方法^[1]。并通过研究土

壤理化特性变异对土壤复介电常数、复折射率、质量吸收系数等电磁参数的水分敏感性与土壤质地、容重等的田间变异对上述电磁参数的影响, 从物理机制研究得出光学法和电磁射线法受田间土壤理化特性的影响较大, 其适应性是很有限的, 进一步研究潜力不大, 而介电法水分敏感性强且受土壤理化特性影响小, 是最具研究潜力的土壤水分测定方法^[2]。本文的目的正是在此基础上, 分析非盐碱性土壤相对介电常数、电导率和电导损耗角的变化规律, 探讨其测试技术, 研制新型低成本介电式土壤水分传感器, 以期田间土壤水分的实时观测提供测量手段。

¹ 收稿日期: 2001-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(49871040); 国家重大科技产业示范工程项目“渠灌类型区农业高效用水模式与产业化示范区”(99-021-01-02)。

作者简介: 马孝义, 男, (1965-), 陕西凤翔人, 教授, 博士, 主要从事节水灌溉、土壤物理方面的研究。

1 土壤的电导损耗角及其与含水量的关系

1.1 土壤的相对介电常数

土壤相对介电常数影响因素很多,但土壤各成份的相对介电常数和相对含量是主要因素,据文献[1]、[3]从机理分析和资料拟合等方法结合分析得出:在不受土壤离子电导和介电弥散影响的电磁频段内,一般在 30 MHz- 200 MHz 之间,土壤的相对介电常数服从如下规律:

$$\epsilon = \theta \quad \epsilon_w + (\rho / G) \quad \epsilon_s + (1 - \rho / G - \theta) \quad \epsilon_a \quad (1)$$

式中: ρ 、 G 、 θ 分别为土壤的容重、比重、体积含水量;
 ϵ_s 、 ϵ_w 、 ϵ_a 分别为土壤、水分、土壤颗粒、空气的相对介电常数,其中 $\epsilon_a = 1$, ϵ_s 随土壤颗粒的化学组成而变,其均值 $\epsilon_s = 5.45$, ϵ_w 随温度 t 而变,即:

$$\epsilon_w = 78.54[1 - 4.60 \times 10^{-3}(t - 25) + 8.8 \times 10^{-5} + 8.8 \times 10^{-5}(t - 25)^2] \quad (2)$$

1.2 土壤电导率的变化规律

土壤含水量、含盐量、质地、容重、温度等都对土壤电导率有影响,但土壤的含水量、含盐量是主要因素,据 Bohn^[4] (1982)、毛久庚^[5] (1990) 等的研究表明,土壤电导率随土壤含盐量和含水量的增大而增大,土壤质地、容重、结构、温度对其有一定影响,可近似用下式表达:

$$\sigma = k \sigma_w \theta^p \quad (3)$$

式中: σ 、 σ_w 分别土壤和土壤水的电导率; θ 为土壤体积含水量, k 、 p 分别受土壤质地和容重等因素影响的系数和指数, p 值一般为接近于 2 的值。

Smith 对同一地的三点取样的土壤样品电导率测定表明:土壤电导率变化相当大^[6],但对同一土壤样品,其含盐量、质地、容重、结构不变时,介电特性与含水量较稳定关系,三样品电导率分别可近似用下式表达:

$$\sigma = 1.64\theta^{2.17} \quad \sigma = 1.29\theta^{1.88} \quad \sigma = 6.04\theta^{2.45} \quad (4)$$

式中: σ 为土壤电导率, ms/cm , 可以看出, 尽管土壤电导率变化相当大,但对同一质地、容重、结构和含

盐量的土壤,其电导率与土壤体积含水量呈幂函数关系,且幂值接近于 2,符合式(3)关系。

1.3 非盐碱性土壤电导损耗角的变化范围

物质电导损耗角的变化范围对物质介电常数测量方法的选择至关重要,按电介质物理学理论^[7],土壤的电导损耗角 δ 的正切为:

$$\text{tg} \delta = \frac{\sigma}{2\pi f \epsilon_0 \epsilon} \quad (5)$$

式中: ϵ_0 为真空介电常数, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ 。

由式(5)和式(1)、(4)分析文献[6]三个典型土壤样品在电磁频率为 50 MHz 时不同含水量下的电导损耗角与其含水量的关系,见图 1。为简便计,用式(1)计算土壤相对介电常数时, $\rho = 1.35$ 、 $G = 2.65 \text{ mg/cm}^3$ 、 $\epsilon_s = 5.45$ 、 $t = 25$ 。

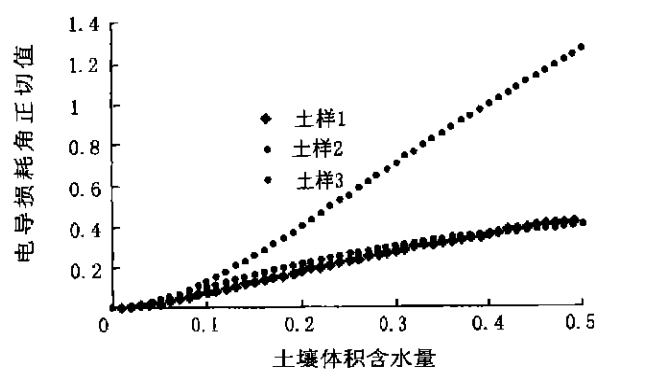


图 1 土壤电导损耗角正切与其含水量的关系(50 MHz)

由图 1 可以看出: 尽管土壤电导率变化很大,但在同一电磁频率下,对同一质地、容重、结构和含盐量的土壤,由于其相对介电常数随其含水量增大幅度小于其电导率随含水量增大幅度,土壤电导损耗角随土壤含水量的增大而增大,也即对实际测量土壤水分时土壤的最大电导损耗角出现在土壤为饱和含水量时,为确定非盐碱性土壤的最大电导损耗角正切的变化范围,以下据文献[8]资料分析不同测量频率下非盐碱性土壤在饱和含水量时电导率及电导损耗角,见表 1。同上文,为简便计,用式(1)计算土壤相对介电常数时, $G = 2.65 \text{ mg/cm}^3$ 、 $\epsilon_s = 5.45$ 、 $t = 25$ 。

表 1 几种非盐碱性土壤在不同电磁测量频率下的最大电导损耗角正切值												
土 壤	颗粒组成/%			表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	饱和含水 量/%	干容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	介电 常数	电导率/ ($\text{m s} \cdot \text{cm}^{-1}$)	$\text{tg } \delta$			
	沙 粒	粉 粒	黏 粒						10MHz	20MHz	50MHz	100MHz
NetanyaC	95.2	0.9	3.9	7.9	0.37	1.67	22.56	0.69	5.5	2.75	1.1	0.55
Netanya B3C	85.1	4.5	10.4	45.1	0.39	1.62	23.82	0.76	5.74	2.87	1.15	0.574
Gilat	64.5	23.9	11.6	52.6	0.47	1.40	29.19	0.83	5.11	2.56	1.02	0.511
Netanya B	74.2	8.7	17.1	84	0.46	1.43	28.49	0.81	5.11	2.56	1.02	0.511
Kerem- Shalom	34.2	46.6	20.2	102	0.56	1.17	35.88	1.45	7.27	3.63	1.45	0.727
Bet Shean	9.7	37.7	52.6	289	0.63	0.98	41.56	1.81	7.83	3.92	1.57	0.783

注: 饱和土壤含水量为体积分数。

由表 1 可以看出: 非盐碱性土壤的最大电导损耗角正切随电磁频率的提高而降低, 在电磁频率在 10 ~ 100 MHz 之间时, 非盐碱性土壤的最大电导损耗角正切值大致在 0.5 ~ 10 之间变化, 土壤为高变损耗介质。

2 土壤水分传感器的原理与研制

2.1 土壤电学模型与传感器研制思路

将式(1)变换有:

$$\theta = \frac{\overline{\epsilon} - (\rho / G)(\overline{\epsilon} - 1) - 1}{\overline{\epsilon} - 1} \tag{6}$$

由于土壤颗粒相对介电常数远小于水的相对介电常数, 且土壤比重 G 基本稳定(约为 2.65 g/cm³), 由式(6)可分析得出: 含水土壤的相对介电常数主要取决于土壤含水量, 可由土壤相对介电常数的开方确定土壤含水量(θ); 土壤种类和干容重 ρ 对测量有一定影响, 但影响较小。介电法是把土壤相对介电常数的变化转换成电信号来实现土壤水分测量的, 其方法是制作电极, 据插入含水土壤中电极的电容量变化推求土壤含水量的。在一定电磁频率下, 插入含水土壤中的电极可简化视为一个以土壤为介质的阻容网络, 也即一个带损耗的电容器, 见图 2,

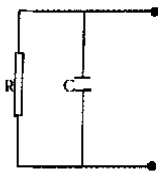


图 2 土壤电极的等效电路

其电学参数为:

$$C = \alpha \epsilon_0 \epsilon \tag{7}$$

$$R = 1 / \alpha \sigma \tag{8}$$

$$\operatorname{tg} \delta = \sigma / 2 \pi f \epsilon_0 \epsilon \tag{9}$$

$$Q = 2 \pi f C R = 2 \pi f \epsilon_0 \epsilon / \sigma = 1 / \operatorname{tg} \delta \tag{10}$$

式中: C ——土壤相对介电常数; R ——土壤电阻; α ——电极常数, 与电极的形式和尺寸有关; $\operatorname{tg} \delta$ ——土壤电导损耗角正切; Q ——将土壤电极简化为带损耗电容器时的电容器品质因数。

可以看出: 对特定形状和尺寸的电极, 其插入土壤后的电容值和电阻值取决于土壤相对介电常数和电导率, 测定插入含水土壤中电极的电容值就可推求土壤含水量。但从电测理论^[7]分析可知: 土壤电导损耗角正切 $\operatorname{tg} \delta$ 越大, Q 值越小, 对其介电常数测量干扰越大, 如何消除田间土壤质地、结构、含盐量等因素的变化而产生的土壤电极 Q 值变化对测量的

影响是研究关键。提高测量频率, 可以提高土壤电极品质因数, 但测量频率过高, 如数百 MHz 以上, 电路实现有相当难度, 电磁干扰也过大, 特别是随其电磁频率的升高, 介电常数迅速降低, 并伴随产生介电损耗, 其介电常数显著受到土壤质地、温度的影响。据文献[3]分析, 其电磁频率应在 200 MHz 以下, 而即使在这一频率段内, 土壤的电导损耗角仍相当大, Q 值很小, 寻找能消除田间土壤电极的 Q 值变化对测量影响的电子方法是研制传感器的核心问题。对这一问题有电桥法、阻抗法、谐振法几种测试方法。在如此高的频率下用电桥法来测量土壤这种高损耗物质的介电常数成本高, 易受土壤电导干扰, Galfy^[9]实验室研究也证明这一点。而阻抗法从测量机理上又很难排除被测土壤电导率变化对其相对介电常数的影响。只有 LC 谐振法灵敏度高, 受被测土壤电极品质因数变化影响相对较小, 实现技术相对简单, 是较为理想的方法^[7]。而 LC 谐振法又有并联 LC 谐振法和串联 LC 谐振法两种, 在不考虑其电路实现误差时按文献^[12]并经推导得出将带损耗电容器接入并联和串联 LC 谐振器时谐振频率分别为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (\text{并联 LC 谐振}) \tag{11}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \sqrt{\frac{1}{1 + 1/Q_m^2}} \quad (\text{串联 LC 谐振}) \tag{12}$$

式中: Q_m ——谐振回路的品质因数, 与被测土壤电极的 Q 值有关, 若直接将土壤电极接入谐振电路时, $Q_m = Q$ 。

显然串联 LC 谐振电路的振荡频率受被测土壤电极的 Q 值影响, 难以克服土壤电极 Q 值变化对测量的干扰, Bell 和 Dean 的研究也证明这一点^[13], 采用并联 LC 谐振电路更为有利。对并联 LC 谐振电路, 由于土壤电极的品质因数 Q 值很小且影响因素多, 若直接将电极接入振荡电路中不易起振, 电路工作不稳定。为提高谐振回路品质因数, 本项研究对土壤电极并联一个较大电容 C_0 , 再接入并联 LC 谐振电路, 见图 3。令: $H = C_0 / C$ 时, 谐振回路品质因数 Q_m 为:

$$\begin{aligned} Q_m &= 2\pi f (C_0 + C) R \\ &= (H + 1) 2\pi f C R = (H + 1) Q \end{aligned} \tag{13}$$

若 H 取较大值时, 即可较大幅度提高谐振回路的品质因数 Q_m , 保证测量电路稳定工作。但由于电容 C_0 远大于土壤电容 C 值, 且受温度等外界变化影

响,这对土壤电极的 C 值测量会产生相当大的干扰,为此采用频差测量法,通过测定电子开关通断时谐

振电路的频率差值来测定土壤电容 C 的变化,见图 3。

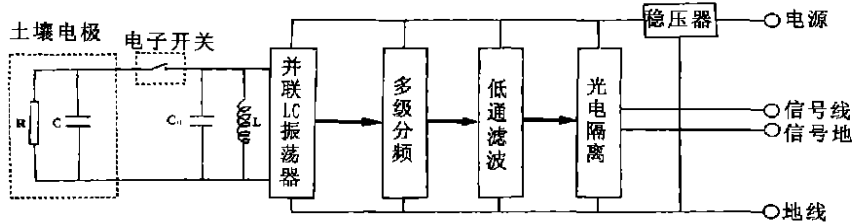


图 3 传感器原理电路简图

对电路中的高频 LC 振荡器,当其电子开关断开时,其振荡频率为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \tag{14}$$

当其电子开关闭合时,接入测试电极,其振荡频率为:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L(C_0 + C)}} \tag{15}$$

当 C/C_0 较小时,频差值为:

$$\Delta f = f_0 - f_1 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_0}} - \frac{1}{2\pi \sqrt{L(C_0 + C)}} \\ = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_0}} \left[\frac{1}{2} \frac{C}{C_0} \right] = \frac{1}{2} f_0 \frac{C}{C_0} \tag{16}$$

对确定的谐振电路,由于 C_0 和 f_0 为常数,且 $C = \alpha \epsilon$,令 $k = (1/2)f_0/C_0$,则:

$$\Delta f = k\epsilon \tag{17}$$

将式(17)代入式(6)分析可得:

$$\theta = \frac{\overline{\epsilon} - (\rho/G)(\overline{\epsilon^w} - 1) - 1}{\overline{\epsilon^w} - 1} \\ = \frac{\overline{\Delta f/k} - (\rho/G)(\overline{\epsilon^w} - 1) - 1}{\overline{\epsilon^w} - 1} \\ = a \overline{\Delta f} - b \tag{18}$$

式中: a 、 b 分别为传感器的特性参数, a 值取决于传感器的特性, b 值取决于土壤颗粒的介电常数(与土壤质地有关)和干容重。

$$a = \overline{K} / (\overline{\epsilon^w} - 1) \tag{19}$$

$$b = (\rho/G)(\overline{\epsilon^w} - 1) / (\overline{\epsilon^w} - 1) \tag{20}$$

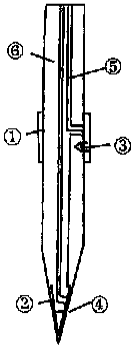
由式(18)得,土壤含水量与传感器频差值开方成正比,土壤种类、容重对其有影响,但影响较小。

2.2 传感器设计

测试电极:测试电极的形式对研制传感器至关重要,它应在插入土壤时,对土壤结构扰动小,保持土壤的原始状态,与土壤良好接触,可获得准确的电

学转换性能,且易插入土壤,制造难度较小。为此笔者采用锥形电极形式,如图 4 所示。它是在一锥形的胶木棒上,套上一对旋紧电极,再通过旋螺丝将电极固定,压紧连接导线,并经胶木棒内孔将导线引入变送电路。

变送电路:变送电路以高频振荡器为核心,由频率发生、分频、低通滤波、光电隔离等环节组成,见图 3。频率发生电路为并联 LC 振荡器,通过配套仪表控制传感器内的电子开关通断,并测量其振荡频率,计算频率差值及其开方值。由于高频率的电信号不便传输,为此采用了分频电路按固定比值降低电信号的频率,分频后的信号又经低通滤波电路,抑制高频噪音,其后信号再经光电隔离电路后传送到配套仪表。为消除导线长度不同而引起的电压降差异等带来的测量误差,传感器内设置了稳压电路。



1 ° 旋紧电极; (四) 固定螺丝; 1/2 连接导线; 1/4 胶木探头

图 4 锥形电极结构

2.3 配套仪表的设计问题

本项研究中采用低功耗单片机为核心研制了配套仪表,其功能是完成对传感器的控制、输出频率测量、频率差值及其开方值的计算、显示及土壤含水量的换算等。考虑到由于土壤含水量变化引起的传感器频差值变幅较小。为防止由于采样时间随机性所引起的 0~1 误差对测量的影响,软件中设计了多次采样值去最大、最小累加平均的数字滤波方法。同时为克服传感器和配套仪表可能出现连接不良而产生错误测量结果的情况,设计了自检程序,如其连接没

有问题, 由传感器特性, 仪表采集的频率必在一定的范围内。如不在则重复测量, 多次重复测量仍如此, 即指示出错。

3 传感器的工作特性

3.1 传感器的工作特性

对研制的传感器及配套仪表, 用西北农林科大节水灌溉试验站(中壤土)、陕西渭南沙王(沙壤土)、西安三桥(中壤土)三种土壤, 在其含盐量为 0.46‰~1.46‰, 容重为 1.3~1.40 的之间变化时传感器

输出与土壤体积含水量关系进行实验, 结果表明: 传感器输出(频差值开方 $\sqrt{\Delta f}$)与土壤体积含水量(θ)之间基本上呈线性关系, 误差较小, 见图 5。同时对西北农林科技大学节水灌溉试验站土壤, 在同一容重下, 通过加 NaCl, 是土壤含盐量在 0.46‰~1.46‰之间变化的结果, 见图 5 a, 可以看出: 由于土壤含盐量的变化, 造成测试点一定的离散, 但离散较小, 且土壤含盐量对传感器输出无趋势性的显著影响, 说明采用本文的方法可以有效消除土壤含盐量对土壤介电常数测量的干扰。

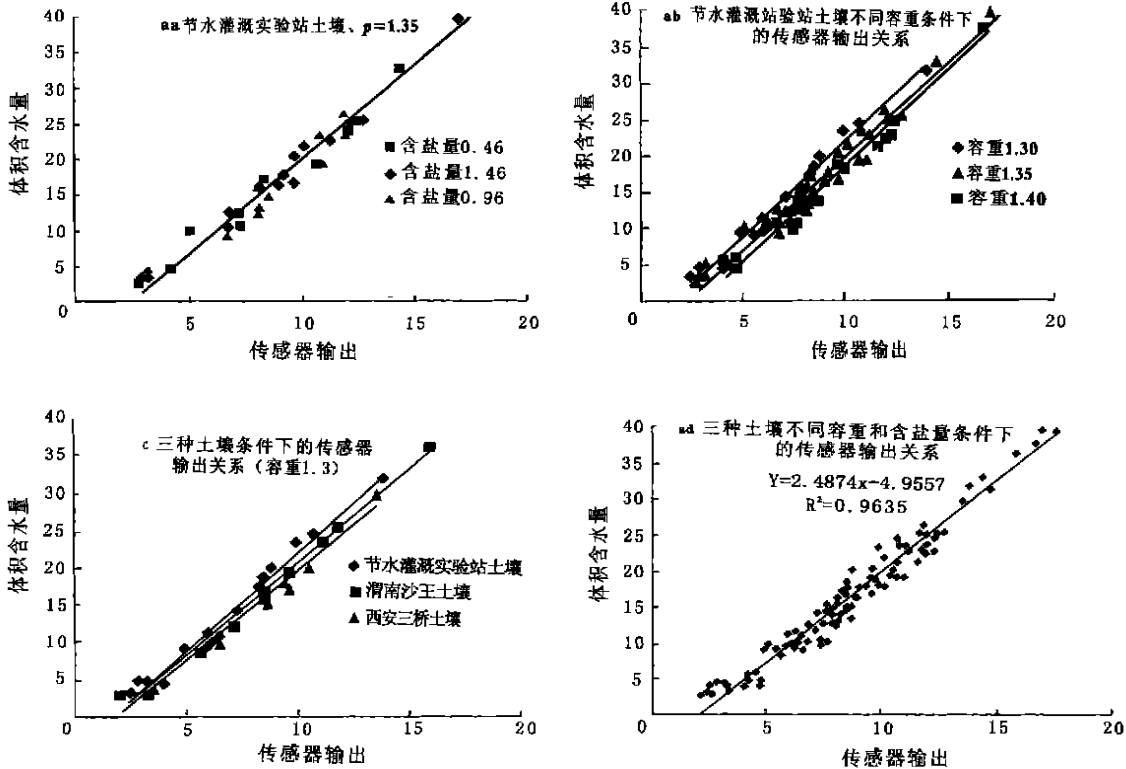


图 5 传感器输出($\sqrt{\Delta f}$)与土壤体积含水量(θ)的关系

3.2 土壤种类、容重对传感器输出的影响

上文分析表明: 传感器输出受土壤种类、容重等影响, 以下部分为实验结果。由图 5b 可看出: 土壤种类对传感器有一定影响, 但影响较小, 如需较高的精度, 可在测试中对每种土壤进行单独标定。

由式(6)可分析得出随容重增大, 传感器输出增大, 图 5c 为西农试验站土壤在容重 1.3~1.4 的结果。可以看出, 传感器输出与土壤含水量之间符合式(6)表达的关系, 可用容重对传感输出进行修正, 以提高传感器的测量精度。

对上述三种土壤, 容重在 1.3~1.4 g/cm³、含盐量在 0.46‰~1.46‰变化时, 用统一标定曲线。结果表明: 体积含水量平均测量误差为 1.48%, 最

大误差为 3.25%, 折算成重量含水量平均测量误差为 1.09%, 最大误差为 2.40%, 见图 5d。可满足非盐碱性土壤水分定点测量要求。

4 结 论

通过本文研究可以得出以下几点结论: 土壤相对介电常数随其含水量增大幅度小于其电导率随含水量增大幅度, 土壤的电导损耗角随土壤含水量的增大而增大, 在介电法测量土壤水分的电磁频率段内, 非盐碱性土壤的最大电导损耗角的正切值较大, 土壤为高变损耗材料, 寻找能消除田间土壤电导变化对测量影响的电子方法是研制土壤水分传感器的核心问题。

对土壤测量电极并联一个大电容,利用频差式并联 LC 谐振电路,可以大幅度提高测量回路的品质因数,有效消除田间土壤电导变化对土壤介电常数测量影响,研制的土壤水分传感器可以初步满足非盐碱性土壤定点水分测量要求。

参考文献:

[1] 马孝义.土壤水分电磁测量的理论与方法研究[D].[博士论文],杨陵:西北农业大学,1993.
[2] 马孝义,马建仓,康绍忠.土壤水分广义电磁测量方法的潜力分析[J],应用基础与工程科学学报,2002(1):25– 35.
[3] 马孝义,马建仓.土壤水分介电测量的频率上限分析[J].水土保持研究,2002,9(2).
[4] Bohn,HL, Ben- Asen, J, Hadi,ST et al. Theories and tests of electrical conductivity in soil[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1982, 46: 1143– 1146.
[5] 毛久庚,李成保.土壤直流电导率与含水量和容重的关系[J].土壤,1990,22(5): 241– 244.
[6] Smith- rose, R L. The electrical properties of soil for alternating currents at radio frequencies[J]. Proc. Roy. Soc. London, 140: 359– 377.
[7] [苏]克里切夫斯基著.水分检测的原理与装置[M].李福彬译,北京:中国计量出版社,1986.259.
[8] Nadler, A, Frenkel, H. Determination of soil solution electrical conductivity from bulk soil electrical conductivity measurement by four- electrode method[J]. Soil Sci. Soc. Am. J.,1980, 44:1 216– 1 221.
[9] Galfy,J. High frequency moisture probe[J]. Process Control Automation, 1984, 31: 102– 106.
[10] 黄昌宁,夏莹.晶体管电路[M],北京:科学出版社,1983.583.
[11] Bell,J,P,Dean Hodnett· MG· Soil moisture measurement by an improved capacitance technique · part I · sensor design and performance[J].J. of Hydrology, 1987, 93:79– 78.

(上接第 66 页)

[7] Lemmon H. Comax: an expert system for cotton crop management[J]. Science, 1986,233:29– 33.
[8] Zhu, Xin X, Simpson, Angus R. Expert system for water treatment plant operation[J]. Journal of Environmental Engineering, 1996, 122(9): 822– 829.
[9] 王文娥,汪志农,等.专家系统及其在节水农业中的研究与应用[J].西北农林科技大学学报,2001,29(3):125– 128.
[10] 王爱茹,刘书华,曹克强.基于规则和图形的苹果、梨病虫害诊断及防治专家系统[J].河北农业大学学报,1999,22(1):60– 62.
[11] 庄铁成,陈桂芬,等.多媒体玉米病虫害诊治专家系统[J].玉米科学,1997,5(2):69– 71.
[12] 曹卫星,李旭,罗卫红,等.基于生长模型的小麦管理专家系统[J].模式识别与人工智能,1999,12(增): 30– 35.
[13] 付炜.水土保持专家系统的探索与试验[J].干旱区研究,1994,11(3): 65– 72.
[14] 施鸿宝,王秋荷.专家系统[M].西安:西安交通大学出版社,1991.5.
[15] 李应能,黄修桥,吴景社.水资源评价与节水灌溉规划[M].北京:中国水利水电出版社,1998,5.
[16] 熊范纶,淮晓永,丁立志.基于软构件技术的新一代专家系统开发平台- 雄风 6.0[J].模式识别与人工智能,1999,12(增刊):8– 16.
[17] 刘晓燕.回顾与展望- 专家系统在我国农业上应用情况概述[J].计算机与农业,1997(1):1– 3.
[18] 吕明,蔡经球,吴顺祥,等.关于农业专家咨询系统及其开发平台的若干探讨[J].模式识别与人工智能,1999,12(增): 131– 134.
[19] 蒋文科,周桂红,陈丽萍.通用农业专家系统生成工具[J].模拟识别与人工智能,1999,12(增):186– 188.
[20] 王文娥.内蒙古河套灌区早秋浇节水保墒改土治碱决策专家系统研究[D]. [硕士论文] 杨陵:西北农林科技大学,2001.
[21] 赵双宁,陈毅伟,等.计算机在作物育种和栽培中的应用与展望[J].计算机农业应用,1993(1):1– 6.
[22] 赵春江,诸德辉.小麦栽培管理计算机专家系统的研究及应用[J].中国农业科学,1997,30(5):42– 49.
[23] 上官周平,王永庆.黄土旱塬小麦生产综合管理专家系统[J].计算机农业应用,1994(4): 1– 6.
[24] 周兴根,王来花.淮北小麦栽培专家系统的建立[J].计算机与农业,1998(4): 12– 15.
[25] 李旭,曹卫星.小麦管理智能决策系统的设计与实现[J].南京农业大学学报,1999,22(3):9– 12.
[26] 雪燕.小麦栽培技术查询系统的研制.[J] 计算机农业应用,1996(1):8– 10.
[27] 苗良,王强.冬小麦苗情预报专家系统[J].山东农业大学学报,1994,25(4):379– 386.
[28] 余华,李福超.小麦高产技术专家系统的研究[J].计算机农业应用,1996(1):1– 4.
[29] 曹卫星.小麦生长模拟与栽培决策[A].全国小麦高产栽培研讨会论文[C].1995,11,江苏.
[30] 杜艳艳,岳桂兰.我国农业专家系统在作物育种和栽培中的发展概况[J].辽宁农业科学,1995(6):25– 27.
[31] 曹卫星,李存东,李旭,等.基于作物模型的专家系统预测和决策功能的结合[J].计算机与农业,1998(2):8– 10.