

# 同步获取土壤介电与力学参数的实验系统

林剑辉, 孙宇瑞, 马道坤

(中国农业大学精细农业研究中心, 北京 100083)

**摘要:** 土壤作为一种由惰性固体、活性固体、溶质、气体以及水组成的多元复合系统, 决定了其物理特性实验研究的复杂性。针对土壤物理实验中多变量信息同步实时获取的客观需要, 应用一个自行设计的双变量传感器和虚拟仪器(VI)技术, 研制了一台能够同时测量土壤力学特性与介电特性的智能化测试系统。该系统既能在 0~40 cm 深度之间提供土壤圆锥指数分布与含水率分布剖面, 而且还可运用信号处理中的相关理论分析双变量传感器输出信号间的相关特性。该系统为在实验室中分析土壤介电特性和力学特性研究提供了一个智能化的基础实验平台, 并已在与德国波恩大学农业工程研究所的合作研究中成功地应用于田间实际测量中。

**关键词:** 土壤; 测量; 实验系统; 介电; 圆锥指数; 含水率; 压实度

中图分类号: S126; TP206+.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)05-0147-04

## 0 引言

在农业生产过程中, 土壤不仅为植物的生长提供物理支撑, 也是植物生长的营养库。大量研究结果已经表明, 土壤含水率与压实度是影响农作物生长的两个至关重要物理参数。水是保证农作物生长的命脉, 土壤中所发生的一系列反应, 能量与物质交换均与水分有关, 它直接关系着作物产量与品质。土壤压实度不仅与种子的发芽破土率与植物的根系发育状况密切相关, 同时也直接影响着土壤水分的运移过程。

自从 TOPP 等(1980)应用统计实验方法揭示了土壤含水率与土壤介电特性之间的定量关系<sup>[1]</sup>以来, 基于土壤介电特性的基础性研究引起了土壤科学工作者的广泛关注与重视。另一方面, 土壤压实度尽管可以通过测量圆锥指数来刻画<sup>[2,3]</sup>, 但是多变量间耦合问题使得这种测量手段在实际应用上至今仍受到很大的局限性。在影响土壤水分与压实度测量精度的诸多因素中, 人们逐渐意识到土壤介电与力学特性之间的相互耦合关系已经成为决定测量精度的主要误差因素。近年来 Busscher 等(1999)曾尝试应用圆锥指数校正土壤含水率的测量<sup>[4]</sup>, 反过来 Newman 与 Hummel(1999)探讨了通过土壤含水率提高土壤压实度测量精度的可能性<sup>[5]</sup>。此外, 德国著名的 TDR 土壤水分测量仪生产厂家 Micro-modulteknik(2001)也对其生产的 TRME 系列产品给出了一个基于土壤容重在  $1.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  的校正公式<sup>[6]</sup>。遗憾的是这种补偿方法只适用于实验室中试验研究, 其根本原因在于实验室中标定土样容重的前提是土槽容积有界的, 而农田本身则是开放无界的。

综上所述, 运用多变量传感器信息融合技术实时同

步测量土壤物理相关参数已经成为近年来一个新的热点<sup>[7]</sup>。文献[8]基于这种信息融合思想设计出了一个可以同时输出土壤介电与力学信息的双变量传感器, 这种传感器是在尽可能不改变 A SAE 标准圆锥几何尺寸的基础上借助于电磁场的边缘耦合效应实现的<sup>[9]</sup>。但是由于土壤各物理参数间的耦合相关性极为复杂, 目前国内外对耦合与解耦的研究尚无结论性成果, 甚至对于其耦合的强弱是否达到了相互影响的程度也无系统性研究。本研究在文献[8]的基础上, 借助于虚拟仪器的强大智能化信息处理功能, 研制了一个同步获取土壤介电与力学信息的实验系统。该系统不仅可对同步获取的多种土壤物理信息分别进行统计分析处理, 还可实时地对不同土壤参数信息进行互相关分析。

## 1 测量原理

本实验系统中所用到的传感器结构如图 1 所示, 主要包括 3 个传感器: 压力传感器、介电传感器和深度传感器, 其中压力传感器与介电传感器经过特殊的工艺设计使其在圆锥上集成为一体化结构, 所以它也视为一个双变量复合传感器(Dual-Sensor)<sup>[8]</sup>。

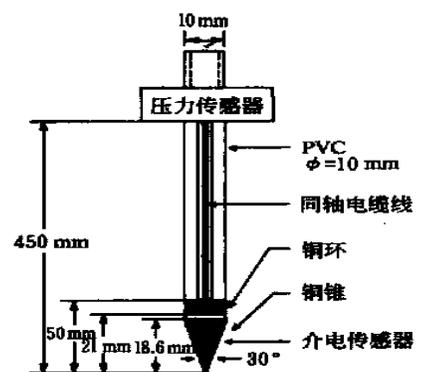


图 1 双变量复合传感器示意图  
Fig 1 Schematic diagram of the dual sensor

介电传感器的电极结构包括一个金属圆环与圆锥顶尖, 圆锥内部为一空腔, 电缆通过空腔与两个电极相连接。双变量复合传感器输出的电信号可根据 Roth 公式<sup>[10]</sup>

$$\epsilon^{\alpha} = \epsilon_f^{\alpha} a + \epsilon_s^{\alpha} s + \epsilon^{\alpha} \theta \quad (1)$$

收稿日期: 2003-11-10 修订日期: 2004-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(30270775)(30370823); 高校博士点专项科研基金(20030019012)

作者简介: 林剑辉, 北京 中国农业大学精细农业研究中心, 100083

通讯作者: 孙宇瑞, 教授, 博士生导师, 北京市清华东路 17 号 中国农业大学(东校区) 63#, 100083. Email: yurui828@yahoo.com

或 Gardner 修正公式<sup>[11]</sup>

$$\sqrt{\epsilon} = 1 + \frac{(\epsilon_s - 1)}{\rho_p} + 8\theta \quad (2)$$

求得土壤容积含水率与土壤容重。式(1)中  $\epsilon$  为水-土粒-空气混合物的相对介电常数,  $\epsilon_a$ ,  $\epsilon_s$ ,  $\epsilon_a$  分别各自表示空气、土粒和水的相对介电常数,  $f_a$ ,  $f_s$  和  $\theta$  分别表示空气、土粒与水的容积系数,  $\alpha$  取决于土壤质地, 其取值在 0~1 之间。式(2)中  $\rho$  表示土粒干容重,  $\rho_p$  为含水土壤混合物的空隙系数。

压力传感器的工作原理简述如下: 当锥体插入土壤过程中既受到施加的压力, 同时受到来自土壤的阻力, 其阻力值大小与土壤含水率, 压实度及土壤类型等诸多因素有关。锥体顶部结构完全按照 A S A E 标准设计<sup>[9]</sup>, 所测得压力传感器信息根据圆锥指数的数学定义转换成标准圆锥指数 (Cone Index) 并由此估计土壤容重<sup>[12]</sup>

$$DD = [(CI/C_1)C_2 + (MC - C_3)^2]^{1/C_4} \quad (3)$$

式中  $DD$  —— 干土容重,  $kg \cdot cm^{-3}$ ;  $CI$  —— 圆锥指数组,  $kPa$ ;  $C_1, C_2, C_3, C_4$  —— 根据土壤类型估计的常数。

从公式(1)到(3)可以看出, 在通过介电信号求土壤含水率时, 已经涉及到了土壤容重, 同样, 在通过圆锥指数求压实度的时候, 也涉及到了土壤含水率的影响, 因此可以由公式(1)或(2)与公式(3)联合得到

$$\begin{aligned} S_{dielectrics} &= f_1(\theta, \rho, \alpha) \\ S_{force} &= f_2(\theta, \rho, \alpha) \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $S_{dielectrics}$  —— 介电传感器输出信号;  $S_{force}$  —— 压力传感器输出信号;  $v$  —— 容积含水率;  $\rho$  与  $\alpha$  分别与式(1)定义相同, 即分别为土粒干容重与质地系数。

式(4)中, 当土壤类型确定后,  $\alpha$  也就唯一确定了。在这种情况下, 式(4)成为一个二元非线性方程, 理论上可以通过解析法或数值法解出  $\theta$  和  $\rho$  的值。

图 2 给出了所设计的整个实验系统, 带有复合传感器的圆锥被安装在一个液压阻尼装置上, 该阻尼装置可以保证圆锥杆在插入土壤过程中尽可能维持在一个恒定的速度下。对于本实验装置, 圆锥杆插入土壤的速率为  $6 \text{ cm/s}$ 。深度传感器主要由一个线性多圈精密电位器和齿轮与齿条等零部件所构成。精密



图 2 用于土壤介电与力学特性研究的实验装置

Fig. 2 Apparatus for testing soil dielectric and mechanics properties

电位器和传动齿轮被相对静止地固定在机架上, 测量过程中齿条与圆锥杆同步上下运动。通过齿条与齿轮的啮合运动旋转电位器的旋转轴, 电位器的阻值大小即可跟随着圆锥杆上下运动变化而线性地改变。

## 2 数据采集卡

实验装置的硬件系统包括传感器、数据采集卡和通

用计算机。数据采集卡采用本实验自主开发的 SWV I 数据采集模块, 该模块具有 6 路模拟信号输入。与 PC 机通讯方式为串口通讯, 波特率可设, 最高可达 115200 Baud。信号输入范围 0~5 V, 精度为 1 mV, 采样速率为 200 kHz。供电电源为 5 V 直流源。图 3 给出了数据采集卡工作原理框图, 主要包括 CPU, 高精度 A/D 转换器, 数据缓存与串口通讯控制器 4 个主要部分。高精度 A/D 转换器为 24 位, 当采集卡供电后在 CPU 的控制下立即开始对 6 路输入信号进行实时采集, 并将采样值存于数据缓存区。当 CPU 接到上位机给出的通讯命令后, 从数据缓存区取出采样数据通过串口控制器将其发送给上位机。

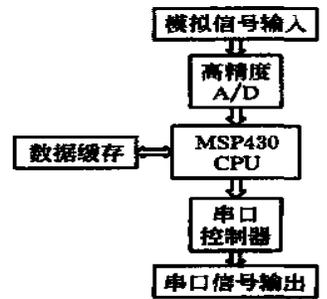


图 3 数据采集器结构图

Fig. 3 Block diagram of data acquisition board

## 3 软件实现

实验系统的软件部分为虚拟仪器平台, 也是整套实验系统的主要组成部分。该平台采用 National Instrument 公司的 LabV IEW 编程语言作为开发环境, 充分利用了 LabV IEW 语言的串口通讯、数据处理、图形化显示等强大功能<sup>[13]</sup>。程序总体流程如图 4 所示。在设计上, 采用多层次功能模块化设计的技术, 从下至上可分为 3 个层次:

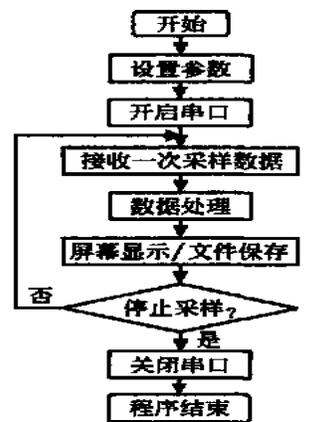


图 4 信号采集与处理流程图

Fig. 4 Flowchart of the signal acquisition and processing

1) 信号输入层, 为程序的最底层, 直接与硬件连接。该层主要包括串口通讯, 数据读入, 数据采集模块参数设置等, 以提供原始信号数据。

2) 数据处理层, 与硬件操作无关, 主要完成采样值平均, 计算行进速度, 计算自定义 Index, 计算信号相关函数, 文件保存等操作。

3) 图形显示层, 该模块主要包括显示数据曲线, 当前状态参数, 数据采集控制等操作。

LabV IEW 设计的优点在于各数据处理功能模块均可通过调用与组合子 V I 模块而实现。整套软件完全采用模块化设计, 全中文界面, 并且可以方便地根据实验中实际采集的数据类型对界面做修改。

虚拟仪器平台界面如图 5 所示, 总共包括 4 个部分: 数据曲线显示, 深度模拟显示, 实验参数输入, 及实验平台控制。数据曲线显示分为 5 个面板, 分别显示介

电信号、压力信号、行进速度、自定义参数及介电与压力 相关函数随深度的变化曲线。

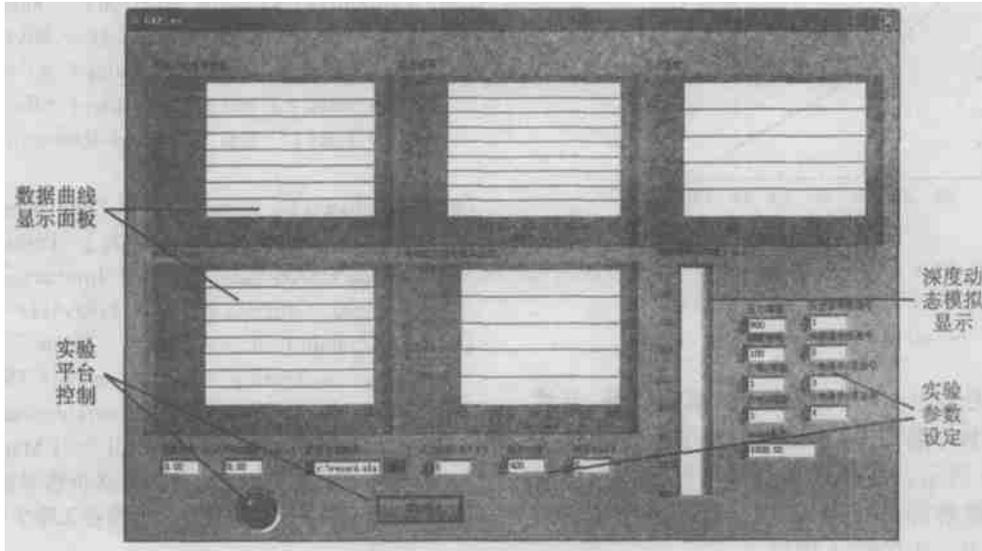


图 5 实验系统主界面

Fig 5 System panel by LabV IEW

自定义参数按如下公式计算

$$SDI = k \frac{D}{P} \quad (5)$$

式中  $SDI$ ——自定义参数;  $k$ ——常数, 与实验条件相关;  $D$ ——介电信号;  $P$ ——压力信号。

该自定义参数可以在实验过程中方便地修改成其它公式, 以反映介电信号与压力信号之间的某种关系, 并通过曲线变化发现某些规律性变化, 从而找出介电信号与压力信号之间存在的某种相关性。

相关函数的计算中, 则把介电信号与压力信号看成两个离散序列, 按信号处理的方法做如下计算<sup>[14]</sup>

$$r_{DP}(m) = \frac{D(n)P(n+m)}{n} \quad (6)$$

式中  $r_{DP}$ ——介电信号  $D(n)$  与压力信号  $P(n)$  的互相关函数;  $D(n)$ ——介电信号;  $P(n+m)$ ——压力信号;  $n, m$ ——表示离散序列,  $m$  取  $0 \sim 400$ 。

#### 4 田间试验

田间试验是 2003 年 9 月在德国波恩大学农业工程研究所试验田进行的, 该试验田内的土壤质地为粘壤土, 其成分分析结果如下: 粘土 36%、壤土 53%、沙土 11%。

图 6、7、8 分别是在一次数据采集中得到的介电信号随深度变化的曲线图, 压力信号随深度变化的曲线图, 以及介电与压力信号的相关函数曲线图。

由图 6 与图 7 可以看出, 介电与压力信号随测量深度的变化具有理想的同步跟随性。例如, 在  $0 \sim 50$  mm 范围内, 两个传感器的响应曲线均呈现出很快的上升趋势。对介电传感器而言这是因为两电极跨度尺寸约为 50 mm (见图 1), 从锥杆的纵向行进的速度看 ( $6 \text{ cm/s}$ ) 当两电极完全埋入土壤在时间上必然有一个过渡过程。

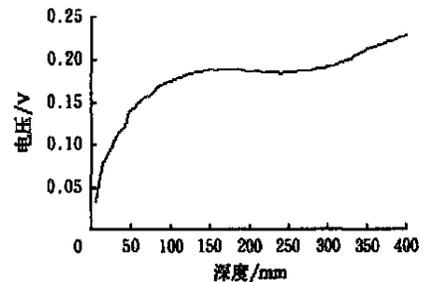


图 6 介电信号曲线图

Fig 6 Output of the dielectric sensor varying as depth increases

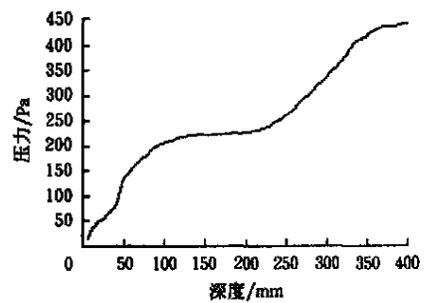


图 7 压力信号曲线图

Fig 7 Output of the force sensor varying as depth increases

对力学传感器而言, 表层土壤在与圆锥体相接触的过程中作用力与反作用力的形成与稳定必然也有一个类似的过渡过程。当测量深度大于 50 mm 后尽管两个传感器的响应曲线变化逐渐相对趋于平缓, 但其本身各自的数值波动恰恰包含着反映土壤含水率与压实度变化的相关信息。因为无论是介电传感器的输出信号还是压力

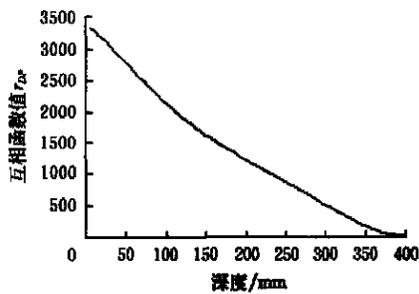


图8 介电-力特性相关曲线图

Fig 8 Correlation of the dielectric versus the force signal

传感器的输出信号均具有非周期信号的频谱特征,显然它们之间的相关数字特征应当满足非周期信号相关函数的性质,如图8所示。对于各种复杂情况下介电信号与压力信号相关性解译与分析,还应结合不同土壤物理学实验的需要做进一步的深入探讨。

## 5 结论

所研制的同步获取土壤介电与力学信息的实验系统不仅为土壤工作者在实验室环境下进行相关的土壤物理基础性研究提供了一个智能化的实验平台,在农田土壤含水率和压实度的实时测量中也具有很高的应用价值。由于实验系统的软件设计采用了虚拟仪器LabVIEW的可视化编程技术,为系统软件的进一步智能升级与性能扩展提供了更好的灵活性。考虑到土壤质地的不同对圆锥指数测量精度的显著影响,本研究对此将继续进行深入研究探讨,将某种人工智能模型辨识方法引入系统软件设计,使得在实现土壤水分与容重实时解耦的同时,土壤质地特征在线辨识也成为可能。

### [参考文献]

- [1] Topp G C, Davis J L, Anna A P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines[J]. *Water Resour Res*, 1980, 16: 574-582
- [2] Freitag D R. Penetration tests for soil measurements[J]. *Transactions of the ASAE*, 1968: 750-753
- [3] Perumpral J V. Cone penetrometer applications-A review [J]. *Transactions of ASAE*, 1987, 30(4): 939-944
- [4] Busscher W J, Bauer P J, Camp C R, et al. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil[J]. *Soil & Tillage Research*, 1997, 43: 205-217.
- [5] Newman S C, Hummel J W. Soil penetration resistance with moisture correction [A]. *Presentation for 1999 ASAE/CSAE-SCGR Annual International Meeting [C]*, Toronto, Ontario, Canada, 1999, 6, 18-21.
- [6] Micromodultechnik GmbH. Trime theory-theoretical aspect measuring moisture using TRIME [ED/OL]. Available at: [www.mesasystem.com/pdf\\_files/TRIME\\_Theory.pdf](http://www.mesasystem.com/pdf_files/TRIME_Theory.pdf), verified 2001 March 27.
- [7] 李小昱, 王为, 雷廷武, 等. 多传感器信息融合技术及在农业工程中的应用前景[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(3): 10-12
- [8] Sun Yurui, Peter Schulze Lammers, Lutz Damerow. A dual sensor for simultaneous investigation of soil cone index and moisture content[J]. *Agartechnische Forschung* 9, 2003, Heft 1, S. 12-19.
- [9] ASAE, ASAE Standards [S]. *Standards Engineering Practices Data Am Soc Agric Eng, Joseph, M I*, 1996, 719
- [10] Roth C H, Schulin R, Fluher H, et al. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach [J]. *Water Resour Res*, 1990, 26: 2267-2273
- [11] Gardner C M K, Dean T J, Cooper J D. Soil water content measurement with a high-frequency capacitance sensor[J]. *J Agric Engng Res*, 1998, 71: 395-403
- [12] Ayers P D, Perumpral J V. Moisture and density effect on cone index[J]. *Transactions of the ASAE*, 1982
- [13] 赵元杰. 基于LabVIEW的虚拟仪器设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000: 10
- [14] 胡广书. 数字信号处理—理论、算法与实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997: 8

## Experimental system for simultaneous collection of soil dielectric and mechanic parameters

Lin Jianhui, Sun Yurui, Ma Daokun

(Research Center for Precision Farming, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract** Due to the fact that soil is the mixture of solid, liquid and air, the difficulties and complexities in studying soil physics may be diverse. In order to simultaneously analyze soil mechanics and dielectric property, an experimental system based on dual-sensor and virtual instrument techniques was developed. In particular, this system is able to characterize soil cone index and water content profiles at the depths of 0~40 cm. Additionally, the correlation of the dual signals associated with soil mechanics and dielectrics can also be treated quantitatively at real-time. As an application example of the designed system, a field test was conducted in a cooperation project with the Department of Agricultural Engineering, University of Bonn.

**Key words:** soil; measurement; experimental system; dielectrics; cone index; water content; bulk density