

## 便携式土壤电导率测试系统的开发

王琦<sup>1,2</sup> 李民赞<sup>1,2</sup> 汪懋华<sup>1,2</sup>

(1. 中国农业大学 精细农业研究中心,北京 100083; 2. “现代精细农业系统集成研究”教育部重点实验室,北京 100083)

**摘要** 介绍了一种自行设计的,基于电流-电压四端法的便携式土壤电导率(EC)在线测试仪的开发情况。该测试仪包括土壤电导率传感器、控制与数据采集器和计算机应用软件等。传感器有4个电极,2个用于向土壤中输入恒流,另外2个用于检测与土壤电导率密切相关的电压降;控制与数据采集器把传感器产生的电压信号转换为数字信号,计算并显示电导率;计算机应用软件把接收到的数据存入 Microsoft Access 数据库。在实验室土槽内对该测试仪传感器的性能进行了测试,并与电导率仪测量结果进行了比较分析。结果表明,传感器输出电压与电导率仪测量值变化趋势一致,采用多种非线性数学模型对各组数据进行了曲线拟合,结果均在幂函数模型上获得最佳回归,测定系数( $R^2$ )大于0.99。

**关键词** 土壤;电导率;四端法;精细农业

**中图分类号** S24; TH7

**文章编号** 1007-4333(2003)04-0020-04

**文献标识码** A

## Development of a portable detector for soil electrical conductivity

Wang Qi<sup>1,2</sup>, Li Minzan<sup>1,2</sup>, Wang Maohua<sup>1,2</sup>

(1. Research Center Precision Agriculture, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, Beijing 100083, China)

**Abstract** A portable detector for soil electrical conductivity (EC) based on four-electrode measurement method was developed. The detector includes 3 parts, which are the sensor, the control and data acquisition box and the data processing software. The sensor injects stable electrical current into soil and detects the voltage drop in it. The voltage drop can be used to estimate the soil EC. The control and data acquisition box has the functions of data acquisition, calculation and communicating with a PC. The data processing software is designed to put the data from the data acquisition box into a Microsoft Access database for analysis. Laboratory test showed that the system performs well. Several nonlinear mathematical models are applied in the regression analysis, and the best result is obtained from the model of power function, in which the determined coefficient ( $R^2$ ) is greater than 0.99.

**Key words** soil; electrical conductivity; four-electrode; precision agriculture

土壤学的研究表明,土壤电导率包含了土壤养分与理化特性的丰富信息<sup>[1]</sup>。土壤电导率能不同程度地反映土壤中的盐分、水分、有机质含量,土壤质地结构和孔隙率等参数的大小。有效获取土壤电导率,对于确定各种田间参数时空分布的差异具有重大意义,从而也为基于信息和知识的现代精细农业的普及推广打下基础<sup>[2,3]</sup>。

传统的实验室测定土壤电导率的方法虽然精

确,但过程繁琐,给工程实践带来不便。目前国外应用于农业的土壤电导率快速测量传感器大体可以归为2种:接触式和非接触式。接触式土壤电导率传感器是一种电极式传感器,一般采用“电流-电压四端法”,即将恒流电源、电压表、电极和土壤构成回路;非接触式则利用了电磁感应原理。目前,我国尚无相关的商业化产品。

本研究的目标在于设计一种便携式土壤电导率

收稿日期:2002-11-28

基金项目:教育部留学回国人员科研启动基金资助项目

作者简介:王琦,硕士研究生;李民赞,博士,教授,联合指导教师,主要从事精细农业关键技术的研究, [pact@cau.edu.cn](mailto:pact@cau.edu.cn)

测试系统(以下简称系统),以满足我国广大农业科技工作者的需求。

## 1 系统开发

### 1.1 系统结构

系统包括以下 3 个主要部分:

1) 土壤电导率传感器。能够灵敏检测从表层到一定深度的土壤电导率变化。

2) 控制与数据采集器。能够调控系统各部分的运行,并接收、处理、显示和存储来自传感器的信号,能够与 PC 机进行通讯。

3) 计算机应用软件。能够接收数据采集器传送的数据,并将其保存在数据库中。

系统框图见图 1,虚线框内为系统的 3 个主要部分。为了将来实现土壤属性信息与定位信息的融合,本系统配置了 GPS 信号接收接口。本次试验以传感系统作为重点,暂不讨论 GPS 接口问题。

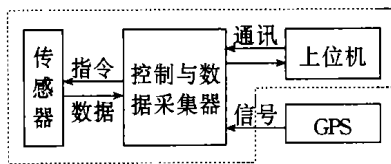


图 1 便携式土壤电导率测试系统框图

Fig.1 The scheme of the portable detector for soil EC

### 1.2 传感器设计

为测量不同深度土壤的电导率,传感器采用基于“电流-电压四端法”的接触式结构形式。

所谓电流-电压四端法,是指测试系统包括 2 个电流端和 2 个电压端。作为测量激励信号的恒定电流经过 2 个电流端流入大地,通过检测 2 个电压端的电势差,就可换算出介电材料(土壤)的电导率。测量系统的原理见图 2,其中恒流源为测试系统的激励。 $J$  和  $K$  为电流端, $M$  和  $N$  为电压端。

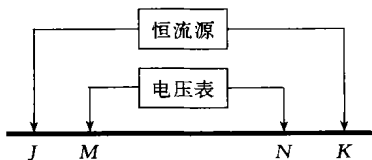


图 2 基于“电流-电压四端法”的电导率测试原理

Fig.2 The scheme of four-electrode method

由导体电导率的定义可知,如果测量对象的长度和横截面积确定,则导体的电导率很容易求得;然而,大地恰恰是一个长度与横截面积都不确定的复

杂测量对象。文献[4]给出的电导率的计算公式为

$$= \frac{\left( \frac{1}{d_{JM}} - \frac{1}{d_{JK}} \right) - \left( \frac{1}{d_{KM}} - \frac{1}{d_{KN}} \right)}{2} \frac{I}{V_{MN}} \quad (1)$$

式中: 为电导率,  $S \cdot m^{-1}$ ;  $I$  为恒流源提供的电流, A;  $V_{MN}$  为在  $M$  和  $N$  端测得的电压降, V;  $d_{JM}$ ,  $d_{JK}$ ,  $d_{KM}$  和  $d_{KN}$  分别为对应端之间的距离, m。假定在整个测试过程中  $I$  保持恒定,且  $d_{JM} = d_{KN}$ , 公式(1) 还可改变为

$$= k(d_{JM}, d_{MN}) V_{MN}^{-1} \quad (2)$$

其中  $d_{MN}$  为  $M$  端和  $N$  端间的距离。本研究中利用式(1)和(2),对系统的测试结果进行验证,以期获得理想的试验结果。

电流-电压四端法的 4 个引出端是传感器的探测部分,不同的应用场合,探测部分应该有不同的设计。针对本设计的“便携”要求,探头采用探针式设计,即将 4 根探针固定于 1 根硬质绝缘塑料横杆上,构成传感器探头。横杆长 1 m,每隔 50 mm 有 1 个固定孔,用于固定探针。4 根探针固定于不同的固定孔,就可以实现不同的探针间距。式(1)并没有对 4 个引出端的间距做严格的限制,因此横杆上共设计了 18 个孔,可以容易地改变探针的位置,以便在试验中找到理想的间距,适应不同的土壤类型和测试要求。

### 1.3 控制与数据采集器设计

控制与数据采集器的核心是单片机。从经济实用的角度考虑,本系统选用了 AT89C2051 芯片作为主控单元。它是具有 8051 内核、2 KB 快闪存储器(Flash Memory)的价格低廉的小型单片机,采用 20 管脚 DIP 封装模式。与传统 51 系列单片机相比,它的 I/O 口较少,只有 15 个,但对于小型系统的开发已经足够。除此之外,AT89C2051 与一般的 51 系列单片机没有差别。

检测到的电压降被实时转换为数字信号,以便传输,储存和计算。该电压降的最小变化量为 mV 级。本系统选用 12 位串行 A/D 转换器 MAX187,分辨率 1 mV,具有足够的精度来检测变化细微的土壤电导率;其串行通讯方式可以节省单片机的系统资源;具有采样保持功能,可以简化电路设计。

为了在田间实时观测测量结果,系统还设计了液晶显示器(LCD),可以显示单片机计算得到的当前电导率值,实现即时读取。

电流-电压四端法需要的电流是恒定电流,且

mA 级就可以满足测量要求。从田间应用的角度出发,本系统主要以高能电池作为电源,使用三端调压器 LM317 和电位器构成一个 5 ~ 100 mA 可调恒流源给传感器供电。该恒流源电路也集成在控制与数据采集器内部,有专用开关控制其通断。控制与数据采集器和传感器共用一个 15 V 的直流电源,分别通过电压转换电路和恒流源电路供电。

图 3 示出控制与数据采集器的逻辑框图。单片机程序用 C 语言编写,结构框图见图 4。

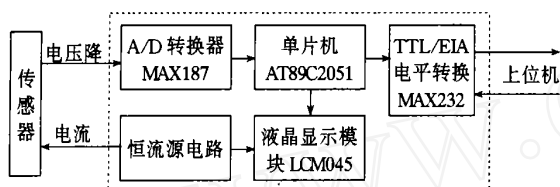


图 3 控制与数据采集器逻辑框图

Fig. 3 The scheme of the control and data acquisition box

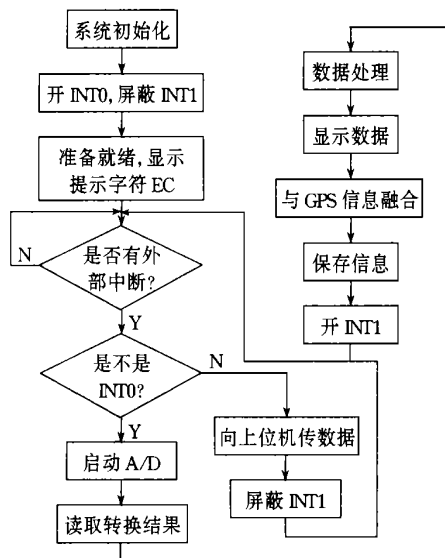


图 4 控制与数据采集器程序框图

Fig. 4 The flow chart of the program for control and data acquisition

#### 1.4 计算机应用软件设计

应用软件将大量测量结果存储到 Microsoft Access 数据库中,以便数据的进一步处理。其功能如下:

1) 接收数据采集器传送的数据; 2) 记录数据采集的日期、时间和相关说明; 3) 与 Microsoft Access 数据库连接,保存数据。

该软件使用 Microsoft Visual Basic 语言编写,程序的主工作窗口设有“设置”、“连接”和“帮助”等

按钮。接收数据前,使用“设置”对计算机的 RS232 串行接口进行设置,使之与单片机的串口参数相匹配,然后,点击“连接”按钮,程序进入接收状态,同时窗口中出现“断开”按钮。程序将接收到的数据存入数据库,并将其中的电导率值实时显示出来。接收完毕,点击“断开”,切断连接。此时,可以在窗口的下半部浏览和修改历史记录。窗口最下部有一个状态条,用于显示当前的连接状态、串行接口状态和日期。

## 2 试验结果与分析

利用实验室里的土槽,对开发的便携式土壤电导率测试系统的传感器性能进行了初步测试,土壤测量深度 15 cm。作为试验条件之一,确定了不同的电极间距离组合,其中  $d_{JM} (= d_{KN})$  为 5 ~ 20 cm,  $d_{MN}$  为 5 ~ 30 cm。

对于每一种组合,首先利用本系统测量电压降  $V_{MN} (= V_M - V_N)$ ,由式(1)计算得到电导率,然后采集约相当于 100 g 干土的土样密封保存,以备传统的土壤溶液分析方法分析土壤样品的电导率。采样之后,向土槽内均匀加入一定量的氯化钾 (KCl),人为改变土壤的电导率(盐分),为下一个组合的测量做准备。

土壤电导率的室内测量方法如下:先从密封土样中取出约一半的样品,用烘干法测量土壤水分;然后取出另一半土样,按照 1 份干土加 5 份水的比例,向土样中加入蒸馏水;充分搅拌,沉淀;取澄清液用于测量。

土壤溶液电导率的测量使用上海精密科学仪器厂生产的 DDB-303A 型便携式电导率仪,其主要性能参数为:测量范围  $0 \sim 10^4 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ ,电子单元基本误差  $\pm 1.0\%$ ,仪器基本误差 1.5%。

试验共设置 9 种电极间距离组合,测量 15 个不同的电导率水平。试验结果的初步分析表明,利用本系统测得的电压降与室内电导率仪的测量结果之间具有一致的变化趋势。图 5 示出其中 4 种组合的结果,传感器输出电压  $V_{MN}$  由本系统测得,土壤电导率由 DDB-303A 型便携式电导率仪测得。

从图 5 可以看出,  $V_{MN}$  与 之间相当严格地遵循着某种规律。另外,由于二者呈非线性关系,故分别利用幂函数、指数函数和多项式等非线性模型,进行了曲线拟合,结果均在幂函数模型上获得了最佳回归。幂函数回归方程的一般形式为

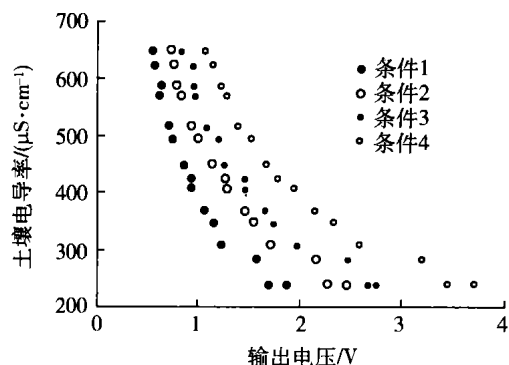


图 5 传感器输出电压和土壤电导率之间的关系

Fig. 5 The relationship between voltage drop and soil EC

$$y = k_1 x^{k_2} \quad (3)$$

这里,  $x, y$  分别表示本系统测得的电压降和电导率仪的测量值;  $k_1, k_2$  为回归系数。表 1 给出了回归结果, 测定系数  $R^2$  均高于 0.99, 表明利用该系统测得的电压降来检测土壤电导率可以达到很高的精度。其中  $k_1$  和  $k_2$  是电极间距的函数, 随电极布局的变化而变化; 是否还与其他因素(如土壤质地、土壤密度)有关, 有待进一步探索。

表 1 传感器输出电压和土壤电导率的回归结果

Table 1 The regressive result of voltage drop and soil EC

试验 条件	结构参数/cm		回归结果 ( $y = k_1 x^{k_2}$ )		
	$d_{IM}$	$d_{MN}$	$k_1$	$k_2$	测定系数 $R^2$
1	15	15	391.7	-0.8317	0.9902
2	20	20	496.2	-0.8097	0.9906
3	5	20	563.9	-0.8354	0.9901
4	15	30	689.6	-0.8137	0.9941

比较式(2)和(3), 以及表 1 可知, 式(2)是式(3)

的一个特例。形式上式(2)和(3)都是幂函数, 但式(2)假定  $k_2 = -1$ , 而式(3)将  $k_2$  作为回归系数, 即一个随传感器结构参数和土壤理化特性而变的变量; 另外, 式(2)给出了  $k_1$  的详细计算公式, 但计算结果与表 1 中的  $k_1$  具有较大的差异(尽管二者相关性很高)。因此, 在土壤电导率的实际测试时, 需要根据传感器结构参数和土壤理化特性对式(2)进行必要的修正。

### 3 结束语

开发了基于电流-电压四端法的便携式土壤电导率(EC)在线测试仪。该测试仪包括土壤电导率传感器、控制与数据采集器和计算机应用软件等, 测试系统在实验室测试中运行状况良好。对本系统测得的电压降和电导率仪得到的土壤电导率测量值进行了模型拟合, 确认二者之间存在幂函数回归关系; 回归系数  $k_1$  和  $k_2$  均受传感器结构参数等因素的影响, 应用时需要根据具体情况, 进行必要的标定和修正。

### 参 考 文 献

[1] Kitchen N R, Sudduth K A, Drummond S T. Soil electrical conductivity as a crop productivity measure for claypan soils[J]. J Prod Agric, 1999, 12: 607 ~ 617

[2] Sudduth K A, Drummond S T, Kitchen N R. Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2001, 31: 239 ~ 264

[3] Li Minzan, Sasao A, Shibusawa S, et al. Soil parameters estimation with NIR spectroscopy[J]. J Jap Soc Agri Mach (in Japanese), 2000, 62(3): 111 ~ 120

[4] 孙宇瑞, 汪懋华. 一种土壤电导率测量方法的数学建模与实验研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(2): 20 ~ 23