

车载式土壤电导率与机械阻力实时测量系统

孟超 杨玮 张淼 韩雨 李民赞

(中国农业大学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: 土壤电导率与土壤机械阻力是测定土壤理化特性的基础。为了在复杂农田环境中实时、快速检测这两种参数,开发了一种以圆盘犁和深松犁钩作为测量传感器电极的车载式土壤电导率与土壤机械阻力同步实时测量系统,测量原理分别依据电流-电压四端法与应变片电桥法。在室内土槽中对车载式同步实时测量系统进行仿真实验,电导率测量值与实际值 R^2 为 0.926 8,机械阻力测量值与实际值绝对误差为 0.2 ~ 2.7 N,系统稳定性实验结果的电压标准差为:电导率 0.059 764 mV,3 组应变片电桥依次为 0.230 42、0.102 203、0.109 624 mV,压力传感器 0.172 511 mV,说明该系统有较高的精确度、稳定性以及可行性。

关键词: 土壤; 电导率; 机械阻力; 测量系统

中图分类号: S237; S152.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)S0-0102-06

Development of Real-time Measurement System for Vehicle-mounted Soil Conductivity and Mechanical Resistance

MENG Chao YANG Wei ZHANG Miao HAN Yu LI Minzan

(Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Soil conductivity and soil mechanical resistance are the basis for determining the physical and chemical properties of soil, and soil texture and soil structure can be estimated. A vehicle-mounted real-time measurement system based on the current-voltage four-terminal method and the strain gauge bridge principle was designed and developed. It can be measured while plowing the ground, and can simultaneously measure soil conductivity and soil mechanical resistance. The system used a disc plow and a deep loose hook as the measuring sensor electrode. It had the functions of data measurement, transmission, display and storage, and had the characteristics of real-time, stability and accuracy. After the system was calibrated, the laboratory was tested in the laboratory. The conductivity part R^2 was 0.926 8 and the absolute error of the mechanical resistance part was 0.2 ~ 2.7 N, indicating high accuracy and feasibility. The system needed to be further refined and improved through a large number of farmland experiments. It was hoped that more measuring sensor electrodes can be added later to determine more soil physical and chemical properties.

Key words: soil; electrical conductivity; mechanical resistance; measurement system

0 引言

现代精细农业技术^[1]的核心是在获取作物产量和影响作物生长的环境因素差异性信息的基础上,按需实施定位调控,这在节本增效、环境保护等方面具有重要意义^[1]。土壤理化特性的获取是关

键,可以为定位调控提供指导数据。土壤理化特性包括土壤质地、结构、水分、气体、热量、颜色、电磁等,还有粘结性、粘着性、可塑性、胀缩性、剪切力、硬度、压缩性、土壤酸碱性、土壤氧化还原性等,其中电导率和机械阻力与土壤构造、土壤质地、盐分、含水量等密切相关,是测定土壤理化特性的基础^[2]。

收稿日期: 2019-04-25 修回日期: 2019-05-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700300-2016YFD0700304)和中国农业大学基本科研业务经费资助项目(2019TC124)

作者简介: 孟超(1996—),男,硕士生,主要从事精细农业系统集成研究,E-mail: mc6663@cau.edu.cn

通信作者: 杨玮(1981—),女,副教授,主要从事精细农业系统集成研究,E-mail: cauyw@cau.edu.cn

国内外学者对电导率和机械阻力的农田快速测量进行了积极探索。电导率的测量方法^[2]目前主要有3种：由DALTON等^[3]提出的基于TDR(Time-domain reflectometry)的土壤电导率测量方法、电流-电压四端法和电磁感应法。基于后两者,Veris公司以及Geonics公司分别研发出Veris3100以及EM38^[4]作为商品出售,并在世界范围内被广泛使用。陈玲等^[5]设计开发了一种便携式测量仪;裴晓帅等^[6]开发了一种车载式土壤电导率测量仪,相比于非连续性定点测量仪更高效,更适合农田使用。土壤机械阻力的测量主要有两种方法：采用土壤圆锥仪^[7]或硬度计测量土壤机械阻力,通过测量土壤对切土器械的作用力获取土壤机械阻力。SUN等^[8]设计开发了一种由两个直流电机驱动的土壤圆锥仪;ADAMCHUK等^[9]使用贴上3组应变片的犁来测量不同深度的阻力;盛文溢等^[10]利用力臂把土壤阻力传至力传感器从而测得土壤机械阻力。上述研究只针对单一目标进行测量,不能满足同时获得多种目标参数的需求,而且大多不适用于农田快速连续测量。

本文设计一种适用于农田作业、可同时测量土壤电导率及土壤机械阻力的车载式测量系统。该系统在运行过程中可同时获得两种数据,实现实时测量、储存、显示、处理等功能。

1 测量原理

1.1 土壤电导率测量原理

电流-电压四端法是测量土壤电导率最为经典的方法,其原理结构图如图1所示,由恒流源为J、K间提供一个恒定的电流,由电压表测出M、N两端电压降,通过这个电压降来计算出土壤的电导率。

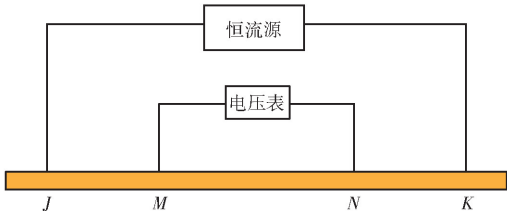


图1 电流-电压四端法原理图

Fig.1 Schematic diagram of current-voltage four-terminal method

当导体为规则形状时,其电导率为横截面积和长度的函数,然而土壤由各种颗粒状矿物质、有机物质、水分、空气、微生物等组成,是一种非常不规则的复杂物质,是无数土层层层排列组成的多孔分散体,因而无法测量到横截面积以及长度等,所以针对土壤结构,土壤电导率计算公式为^[11-12]

$$\sigma_{MN} = \frac{\frac{1}{d_{JM}} - \frac{1}{d_{JN}} - \left(\frac{1}{d_{KM}} - \frac{1}{d_{KN}} \right)}{2\pi} \frac{I}{V_{MN}} = K \frac{I}{V_{MN}} \tag{1}$$

式中 σ_{MN} ——由四端法计算得到的土壤电导率
 d_{JM} 、 d_{JN} 、 d_{KM} 、 d_{KN} ——探针之间的距离
 I ——恒流源电流 K ——系数
 V_{MN} ——M、N两探针之间电压

在稳幅交流电流源输出一定时,土壤电导率与电压端电压降呈反比关系。

1.2 土壤机械阻力测量原理

电阻应变片利用应变效应将力学量转变为电学量。将应变片粘贴在构件表面,当构件受力变形时,其中的金属箔也随着构件一起拉伸或者压缩,进而发生电阻变化。在产生应变效应时,应变与电阻变化率呈线性关系,经过一定的测量电路可以间接测得力。由4个应变片搭成一组惠斯通电桥,如图2所示。

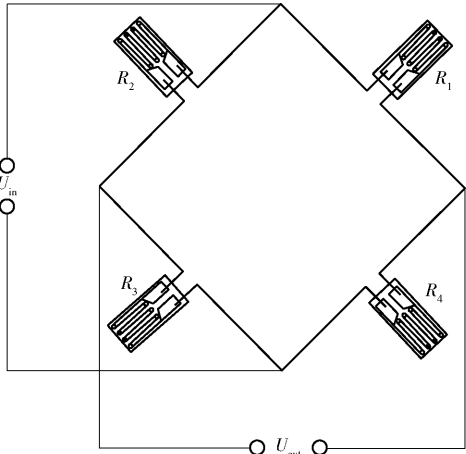


图2 应变片电桥原理图

Fig.2 Strain gauge bridge schematic

由于平衡电桥的特点,当温度变化导致应变片阻值发生变化时,4个桥臂的变化一致,可以达到温度补偿的目的。如图3所示,假定在测量过程中,贴在深松犁钩上的R1、R2应变片受力而伸长导致电阻增加;R3、R4应变片受力而压缩导致电阻减小,而其电阻变化值分别为 ΔR_1 、 ΔR_2 、 ΔR_3 、 ΔR_4 。根据文献[13-14]可以得到土壤机械阻力公式

$$U_{out} = U_{in} \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_4 - \Delta R_4} - \frac{R_2 + \Delta R_2}{R_2 + \Delta R_2 + R_3 - \Delta R_3} \tag{2}$$

由应变关系有

$$U_{out} = U_{in} \frac{\Delta R_1 - \Delta R_2}{2R} = U_{in} \frac{K_1 L x}{2EI_1} F \cos \alpha \tag{3}$$

式中 F ——土壤对深松钩子的阻力
 K_1 ——应变片灵敏系数,为常数

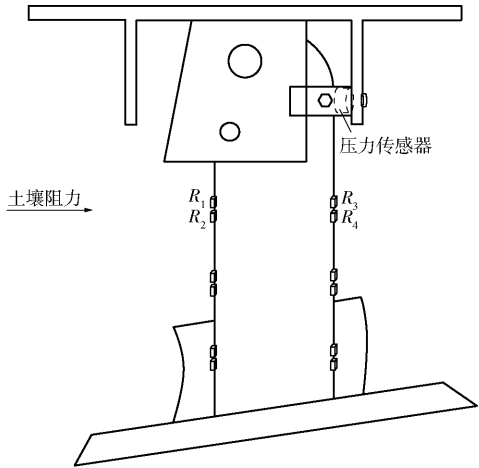


图 3 深松犁钩示意图
Fig. 3 Schematic diagram of deep hook

L ——应变片金属丝长度
 x ——应变片与横截面质心的距离
 E ——弹性模量
 α —— F 与水平方向夹角
 I_1 ——横截面惯性矩

又有 $F_x = F \cos \alpha$
故 $F_x = \frac{2EI_1}{U_{in} K_1 Lx} U_{out}$

式中 F_x ——深松钩子所受水平方向力
实际情况中经过实验室标定后,由标定方程可计算出土壤机械阻力。

2 系统设计与土槽实验

2.1 系统设计

系统结构如图 4 所示,实物图如图 5 所示。整体由后置式三点悬挂连接至拖拉机,两侧有两个限深轮,可以控制入土深度。硬件系统主要由 3 部分构成:测量电导率的圆盘式电极、测量土壤阻力的深松钩子和系统电路(包括恒流源产生电路、数据采集卡等)。测量土壤电导率部分(图中 1、2、3、5)有 4 个圆盘式电极,入土时与土壤紧密接触,减少了因土壤阻力引起的扰动,可以更精确地测得土壤电导率信息。外侧两个电极作为恒流源输出电极,内侧两个电极通过电极两侧的电刷将测得的电信号送往系统电路,经过处理与计算在工控一体机上显示。测量土壤机械阻力部分(图中 1、2、4、6)有一个深松钩子,由于应变片由凝胶固定在深松犁构表面,与土壤直接接触,秸秆沙石等摩擦阻力过大或者拖拉机的振动等因素可能会导致其脱落而影响测量,为了应对农田中复杂的土壤情况,设计了共 4 组测量装置:3 组应变片电桥与 1 组压力传感器。电阻应变片电桥有上、中、下 3 组,压力传感器与传动臂相接触,深松钩子入土时 3 组应变片桥与压力传感器输

出电信号,经过信号调节器以及数据采集卡后,由工控一体机显示。

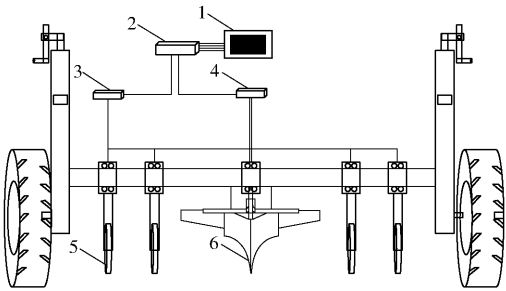


图 4 系统结构图
Fig. 4 System structure diagram

1. 工控一体机 2. 数据采集卡 3. 电路 1 4. 电路 2 5. 圆盘式电极 6. 深松犁钩



图 5 系统实物图
Fig. 5 System physical chart

系统结构原理图如图 6,整个系统中最为主要的部分是两种传感电极数据的采集,为了实现数据测量的实时性和快速性,电路中选择了一个高速数据采集卡以保证数据的流量与精确度。由于经过土壤的电信号很弱而且容易受到干扰,选择信号调节器过滤并放大毫伏信号,转化为与输入呈线性关系的选定输出,可以消除接地回路、共模电压,大幅降低噪声拾取。在横梁上设计了两个设备箱对称放置在两侧,12 V 供电锂电池与系统其他设备放置其中,通过螺丝与定制尺寸的凹形铁片固定各设备,缓解振动带来的影响,有效防止土壤灰尘以及雨水对设备造成的损害,并且增加配重使传感器电极与土壤充分接触。

该系统可以在深松土壤的同时,完成机械阻力

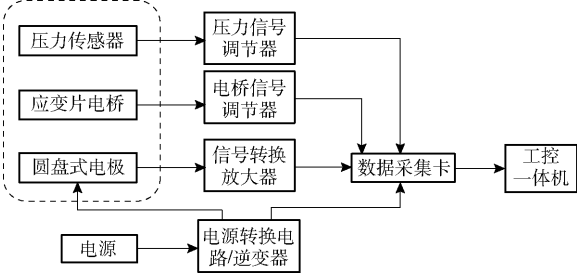


图 6 系统结构原理图
Fig. 6 System structure schematic

以及电导率的测量,而且该系统的所有电极与深松钩子都可快速安装与拆卸,保证系统可以在播种前使用以及在农作物生长时期使用,不会在作业过程中对农作物造成损伤。

使用直流电流-电压四端法测量土壤电导率时,存在极化问题,交流电流-电压四端法可避免这种现象。由 ICL803 正弦波信号发生器模块将 12 V 直流电逆变输出正弦交流信号。由芯片 LM1875 组成的恒流源电路^[15]如图 7 所示,该集成电路内部设有过载过热及感性负载反向电势安全工作保护,LM1875 工作稳定可靠、外围电路元件少、电流负载能力大、能够输出较大的电流、失真度小,可以在 ±12 V 电压下工作,可输出高达 2 A 的电流;输入端 OP07 作跟随级,提高输入阻抗,降低输出阻抗,减少输入信号的失真。调节 R_0 可以调整输出电流大小,根据不同的负载对应不同的阻抗。

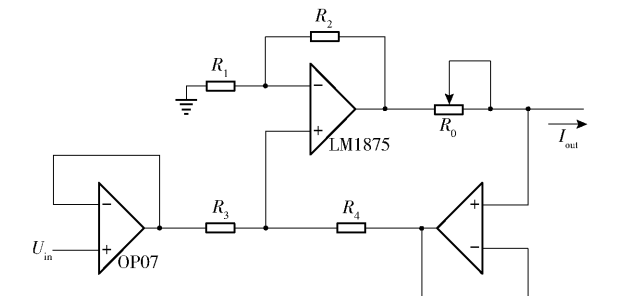


图 7 恒流源电路图

Fig. 7 Schematic diagram of constant current source circuit

2.2 阻力系统

2.2.1 应变片阻力标定

将深松钩子平稳固定,钩尖向上,在钩尖悬挂一个托盘,在托盘上放置重物用以模拟深松钩子在深松过程中受到的水平阻力,重物重量从小到大逐渐增大,分别为 100、300、500、700、900 N,分别测量每次增加重物时 3 组电阻应变片桥的输出电压,重复 3 次取平均值,将数据记录在 Excel 中并对输入-输出数据进行回归,绘出关系曲线(图 8)^[16-18]。

选取不同重量的点对 3 组应变片电桥标定结果

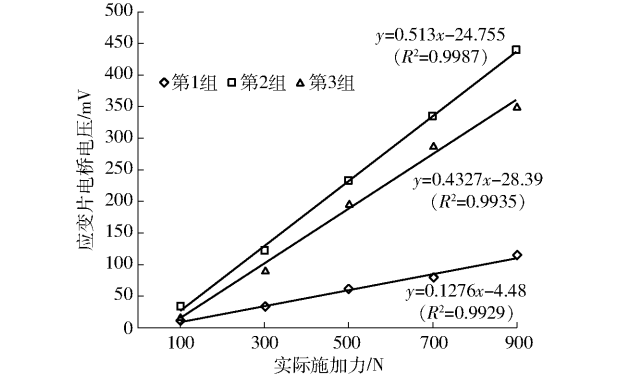


图 8 应变片电桥标定回归曲线

Fig. 8 Strain gauge bridge calibration regression curves

进行验证,从图 9 中可看出预测误差。

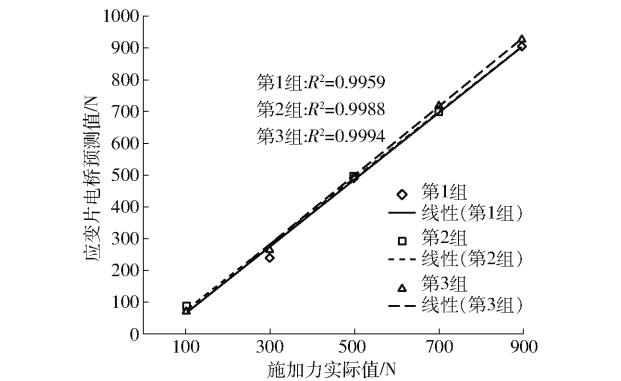


图 9 应变片电桥预测值-实际值对比

Fig. 9 Strain gauge bridge prediction error map

其中各组应变片电桥绝对误差以及相对误差如表 1 所示,具有较高精确度。

表 1 3 组应变片电桥误差

Tab. 1 Error of three sets of strain gauge bridges

组别	绝对误差/N	相对误差/%
第 1 组	0.5 ~ 60.2	0.07 ~ 20.07
第 2 组	1.1 ~ 35.0	0.11 ~ 11.67
第 3 组	7.0 ~ 30.5	1.40 ~ 10.75

误差可能是由于重物重心改变,而导致犁尖受力方向有一些偏差,应变片发生横向效应所导致。

2.2.2 压力传感器标定

使用美特斯 CMT5105 型微机控制电子万能试验机对压力传感器进行静态标定,将 0 ~ 6 kN 量程分为等间距点,从大到小每 500 N 施加标准力,记录下施加力与输出电压,从小到大重复 3 次取平均值记录在 Excel 中,并对输入-输出数据进行回归,绘出关系曲线,如图 10 所示。

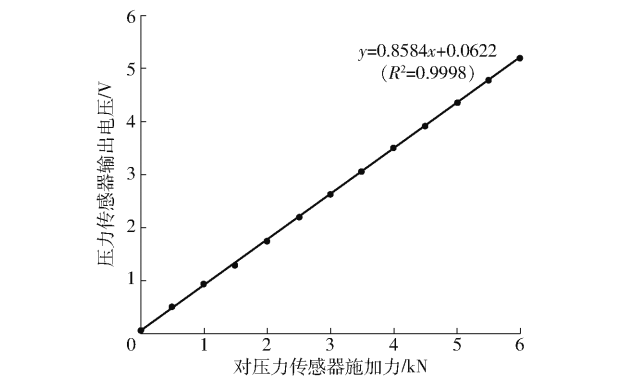


图 10 压力传感器标定回归曲线

Fig. 10 Pressure sensor calibration regression equation

压力传感器标定实验的回归方程为

$$y = 0.8584x + 0.0622 \quad (4)$$

式中 y ——压力传感器输出电压

x ——对压力传感器施加的力

在 0 ~ 6 kN 内随机选择 20 个点,对标定结果进

行验证,将实际施加力与预测值记录在 Excel 中,并绘出关系曲线,如图 11 所示。

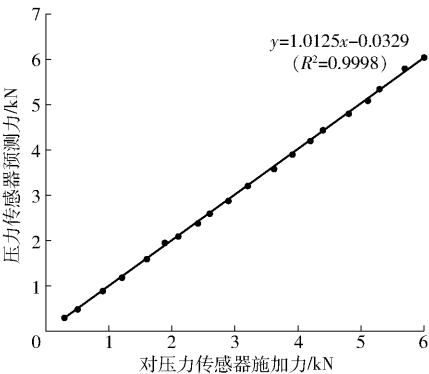


图 11 压力传感器预测对比

Fig. 11 Pressure sensor prediction contrast diagram

压力传感器绝对误差:0.01 ~ 0.045 kN,相对误差:0.28% ~ 8%,具有较好的精确度。

2.3 室内实验

对系统进行室内实验分析,使用实验专用土槽,将传感器电极放置在土槽中,整个设备静止固定得到一组土壤电导率数据,随机人为改变土槽内土壤环境,继续测量重复共 50 次。将 50 次不同的土样采集至实验室用以测量土壤溶液电导率,作为测量土壤电导率的实际值。将一组待测样品干燥并过筛,称取 1 mm 土样 20 g,放置在三角瓶中,加入 100 mL 蒸馏水使水土质量比为 5:1,震荡后静置在常温环境下 24 h,取适量的澄清溶液用电导率仪器测量电导率。人为去除异常点后绘出关系曲线如图 12 所示,其中绝对误差:0.020 ~ 0.253 mS/cm。

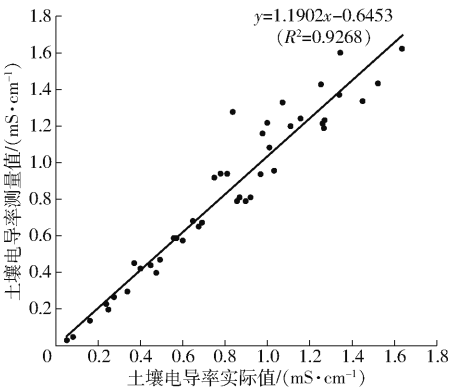


图 12 土壤电导率预测对比

Fig. 12 Soil conductivity prediction error map

在实验土槽中对土壤机械阻力进行了实验,保持 15 cm 的耕深使机械阻力系统在土槽中移动,得到压力传感器与 3 组应变片电桥的输出值,经过标定方程的计算得到受力值与时间关系如图 13、14,系统可以检测到土壤机械阻力的变化,以压力传感器作为标准值,3 组应变片电桥绝对误差为 0.2 ~ 2.7 N,具有良好的精度。

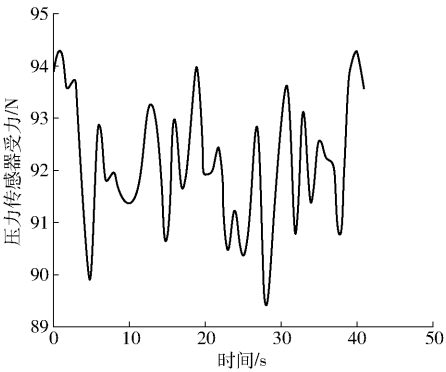


图 13 压力传感器测力曲线

Fig. 13 Pressure sensor force diagram

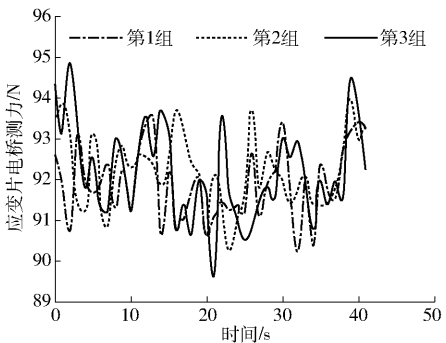


图 14 应变片电桥测力曲线

Fig. 14 Strain gauge bridge force diagram

对整体系统进行稳定性实验,将其放置在实验土槽中静置,保持室内以及土槽内土壤温度恒定,将采样周期设置为每隔 30 min 采集一次,连续采集 24 h,采集数据结果如图 15 所示,对所得电压数据进行标准差计算,电导率为 0.059 764 mV,3 组应变片电桥依次为 0.230 42、0.102 203、0.109 624 mV,压力传感器为 0.172 511 mV,每组数据内标准差很小,说明系统有较好的稳定性。

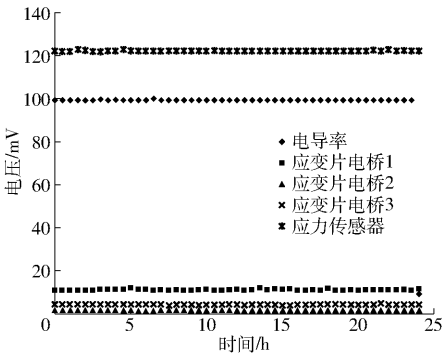


图 15 稳定性测试结果

Fig. 15 Stability test result chart

3 结论

(1)基于电流-电压四端法与应变片电桥法开发了土壤电导率与机械阻力测量系统,可同步测量得到两种参数,具有数据测量、传输、显示、保存等功能。为了应对农田复杂的土壤情况,土壤机械阻力

部分设计了4组测量装置,并且设计了放置电子设备的设备箱,以防止振动、噪声等因素对设备的干扰、防尘防水,以及增加配重使传感器电极与土壤充分接触。

(2)经过室内实验分析,测量相关性电导率部分 R^2 为0.9268、机械阻力部分绝对误差为0.2~2.7 N,系统稳定性实验结果的标准差为:电导率

0.059764 mV,3组应变片电桥依次为0.23042、0.102203、0.109624 mV,压力传感器0.172511 mV,说明系统可以实时、准确测量。

相比于市场在售的topsoil mapper仪器,自主开发的该系统价格低,仅为市售产品的10%;相比于EM38、Veris3100仪器,自主开发的该系统可以获得多参数信息^[19-22]。

参 考 文 献

- [1] 李民赞. 精细农业特征、现状与发展[J]. 农机市场, 2008(3): 38-41.
- [2] 李民赞, 郑立华, 安晓飞, 等. 土壤成分与特性参数光谱快速检测方法 & 传感技术[J]. 农业机械学报, 2013, 44(3): 73-87. LI Minzan, ZHENG Lihua, AN Xiaofei, et al. Fast measurement and advanced sensors of soil parameters with NIR spectroscopy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(3): 73-87. (in Chinese)
- [3] DALTON F N, HERKELRATH W N, RAWLINS D S, et al. Time-domain reflectometry: simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe[J]. Science, 1984, 224(4652): 989-990.
- [4] 李兵, 刘广明, 苏里坦, 等. 基于磁感式大地电导率仪的土壤盐分解译模型[J]. 土壤, 2017, 49(4): 789-794. LI Bing, LIU Guangming, SU Litan, et al. Interpretation model of soil salinity based on electrical conductivity meter of electromagnetic induction[J]. Soils, 2017, 49(4): 789-794. (in Chinese)
- [5] 陈玲, 李民赞, 赵勇. 便携式土壤电导率测试仪改进设计及实验[J]. 农机化研究, 2009, 31(7): 175-177. CHEN Ling, LI Minzan, ZHAO Yong. Improvement and experiment of the portable soil EC detector[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(7): 175-177. (in Chinese)
- [6] 裴晓帅, 孙红, 郑立华, 等. 车载式土壤光-电特性参数采集系统研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊): 90-95. PEI Xiaoshuai, SUN Hong, ZHENG Lihua, et al. Development of movable acquisition system for soil optical-electrical parameters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.): 90-95. (in Chinese)
- [7] 林剑辉, 孙宇瑞, 马道坤, 等. 土壤圆锥指数及其测量技术研究进展[J]. 湖南农业科学, 2011(13): 155-159. LIN Jianhui, SUN Yurui, MA Daokun, et al. Research progress of soil cone index and its measurement technology[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2011(13): 155-159. (in Chinese)
- [8] SUN Y, LIN J, ZENG Q. Using a hall-current-sensor to measure the penetration resistance[J]. Opatija, Croatia, 2006(1): 345-351.
- [9] ADAMCHUK V I, MORGAN M T, SUMALI H. Application of a strain gauge array to estimate soil mechanical impedance on-the-go[J]. Transactions of the ASME, 2001, 6(6): 1377-1383.
- [10] 盛文溢, 曾庆猛, 林剑辉, 等. 大田尺度下车载式土壤多参数测量方法研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 188-192. SHENG Wenyi, ZENG Qingmeng, LIN Jianhui, et al. On-the-go measuring method of soil parameters in field-scale[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 188-192. (in Chinese)
- [11] 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. SUN Yurui, WANG Maohua. A mathematical model and its experimental study for a kind of measurement method of soil electric conductivity[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(2): 20-23. (in Chinese)
- [12] 裴晓帅, 郑立华, 孙红, 等. 基于Android的车载式土壤电导率和光谱反射率检测系统[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊): 112-117. PEI Xiaoshuai, ZHENG Lihua, SUN Hong, et al. Vehicular soil electrical conductivity and spectral reflectance detection system based on Android[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp.): 112-117. (in Chinese)
- [13] 夏拥军, 丁为民. 土壤机械阻力的连续测定及空间变异结构分析[J]. 农业机械学报, 2006, 37(11): 70-73, 79. XIA Yongjun, DING Weimin. Measurement of soil mechanical resistance on-the-go and analysis of its spatial variability[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(11): 70-73, 79. (in Chinese)
- [14] 王岩, 储江伟. 扭矩测量方法现状及发展趋势[J]. 林业机械与木工设备, 2010, 38(11): 14-18. WANG Yan, CHU Jiangwei. Current status and development trend of torque measuring methods[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2010, 38(11): 14-18. (in Chinese)
- [15] 郭玉, 赵顺平. 一种交流恒流源电路的设计[J]. 电子技术, 2008, 45(12): 46-47. GUO Yu, ZHAO Shunping. Design of stable AC current power supply circuit[J]. Electronic Technology, 2008, 45(12): 46-47. (in Chinese)
- [16] 甄文斌, 杨丹彤, 黄世醒, 等. 土壤耕作阻力测试系统研制及标定[J]. 农机化研究, 2011, 33(7): 104-107. ZHEN Wenbin, YANG Dantong, HUANG Shixing, et al. Development and calibrating of soil tillage resistance measurement system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(7): 104-107. (in Chinese)
- [17] 赵占军, 韩长杰, 郭辉, 等. 基于Arduino的土壤机械阻力连续测量系统设计[J]. 农业工程, 2015, 5(4): 55-57, 62. ZHAO Zhanjun, HAN Changjie, GUO Hui, et al. Continuous measurement system design of soil mechanical resistance based on Arduino[J]. Agricultural Engineering, 2015, 5(4): 55-57, 62. (in Chinese)
- [18] 赵占军, 韩长杰, 郭辉, 等. 土壤机械阻力测量方法研究现状及趋势[J]. 农业工程, 2014, 4(4): 10-13. ZHAO Zhanjun, HAN Changjie, GUO Hui, et al. Research status and trend of soil mechanical resistance measurement method[J]. Agricultural Engineering, 2014, 4(4): 10-13. (in Chinese)
- [19] 张梦龙. 车载式土壤电导率测量系统开发[C]//中国农业工程学会2011年学术年会论文集, 2011: 1-5.
- [20] 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(3): 239-264.
- [21] KITCHEN N R, SUDDUTH K A, DRUMMOND S T. Soil electrical conductivity as a crop productivity measure for claypan soils[J]. JPA, 1999, 12(4): 607-617.
- [22] SUDDUTH K A, KITCHEN N R, BOLLERO G A, et al. Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of soil electrical conductivity[J]. Agronomy Journal, 2003, 95(3): 472-482.