

车载式土壤光-电特性参数采集系统研究^{*}

裴晓帅 孙 红 郑立华 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: 土壤电导率是衡量土壤传导电流能力的一种固然属性,除了能够反映土壤质地外,还能够反映土壤的含水率、含盐量、有机物含量等特性。利用土壤光谱数据可以分析出土壤含水率、养分等,且测量过程中无需采样、搅动土壤。通过土壤电导率数据和光谱数据的综合、校正,能够提高系统的精度。基于嵌入式技术开发了土壤电导率和光谱反射率综合检测系统。土壤电导率测量系统采用基于改进的电流-电压四端法原理,使用深松犁的尖端作为电极传感器,能够在测量的同时完成松土的作用。光谱测量系统使用微型光谱传感器采集光谱数据,并进行实时处理。在采集土壤电导率、光谱数据的同时,系统同步采集 GPS 信息,并和土壤电导率、光谱数据一起保存,供进一步绘制土壤特性分布图使用。系统能够实时综合处理多种数据,并进行显示、保存等操作,具有良好的应用前景。

关键词: 土壤电导率 光谱反射率 精细农业 全球定位系统 ARM
中图分类号: S237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)S0-0090-06

Development of Movable Acquisition System for Soil Optical-electrical Parameters

Pei Xiaoshuai Sun Hong Zheng Lihua Li Minzan

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

Abstract: Fast and efficient access to the information of farmland is the basis of precision agriculture. Soil is an important part of agriculture for crop growth. Soil electrical conductivity is used for measuring the capability of soil conduct current. In addition to soil texture, soil electrical conductivity is also capable of reflecting the properties of moisture content, salinity, organic content, etc. Soil spectral data can be used for analyzing soil moisture, nutrient content, etc., without sampling or stirring the soil. The correction of soil electrical conductivity and spectral data can improve the accuracy of the system. Based on the embedded technology, a soil electrical conductivity and soil spectral reflectance integrated detection system was developed. Based on the improved “current-voltage four terminal” principle, the soil electrical conductivity system used subsoiling plow as electrode sensor. It could conduct measurement and loose soil as well. STS – NIR miniature spectrometers were used for acquiring the real-time spectral reflectance data. GPS information was acquired and saved synchronously with soil electrical conductivity data and spectral reflectance data for soil characteristics distribution. The system can handle a variety of data real-timely, and display, save data synchronously, and it has good application prospects.

Key words: Soil electrical conductivity Spectral reflectance Precision agriculture Global position system (GPS) ARM

收稿日期: 2015-10-28 修回日期: 2015-11-20
^{*} 国家自然科学基金重点资助项目(61134011)和农业部引进国际先进农业科学技术计划(948 计划)资助项目(2011—G32)
作者简介: 裴晓帅, 博士生, 主要从事精细农业系统集成研究, E-mail: xiaoshuaipei@163.com
通讯作者: 李民赞, 教授, 主要从事精细农业研究, E-mail: limz@cau.edu.cn

引言

土壤是农业生产的基础,快速探测土壤养分、水分等参数可为田间施肥、灌溉等管理提供数据支持,对保障农业可持续发展具有重要意义。土壤光、电特性主要指土壤在外界光照和电场作用下所表现出来的某些特性参数,这些参数包含了大量的土壤物理和化学信息^[1],可以在一定程度上反映土壤养分含量,因此快速获取土壤的光电特性参数对现代精细农业生产很有必要^[2-4]。

测量土壤电导率的方法可以分为两大类:实验室测量法和现场测量法。尽管实验室测量法精度更高,但操作复杂、耗时长的缺点影响了它的广泛应用。现场测量法主要包括:电磁感应法、时域反射法(TDR)^[5]和“电流-电压四端法”(CVFT)^[6]。其中,基于“电流-电压四端法”,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先后设计了两代便携式土壤电导率测试仪^[7-8]。尽管便携式设备大大提高了测量速度,但工作量仍然较大。从提高测量效率角度考虑,继续开发车载式土壤电导率测量系统很有必要。

在土壤的光学特征研究方面,光谱技术作为一种快速、非破坏性的检测方法,已经被用于测量土壤的有机质、氮素、含水率等信息。在获取不同条件下土壤的可见光和近红外波段反射光谱信息方面,代表性产品有德国布鲁克公司生产的傅里叶光谱分析仪 MATRIX-I 型和美国 ASD 公司生产的光谱仪系列。其中傅里叶光谱仪主要用于实验室测量,需要取样、对样品进行预处理。ASD FieldSpec HH2 可用于农田现场测量,但也需要人工携带,导致测试效率不高。为了实时采集土壤光谱数据,Shibusawa 等研制了多功能田间在线土壤光谱仪^[9],输出光信号包括 256 个通道的可见光(400~900 nm)和 128 个通道的近红外(900~1 700 nm)光谱数据。国内,安晓飞等开发了一款便携式土壤全氮测定仪^[10-11],测量 7 个波段的光谱反射率。但上述设备结构复杂,操作繁琐,例如土壤全氮测定仪测量一个样本需要转动转盘 7 次,无法满足田间土壤光谱高效获取的应用需求。

本文拟开发一套操作简便、适用于田间的车载式小型化土壤光-电特性参数采集系统,包括硬件设备与软件系统。在农用车辆行进过程中,系统能够同时获取土壤电导率和光谱反射率数据。可以实现系统控制,以及光谱数据、土壤电导率数据、GPS 等信息的同步采集、处理、显示和保存等功能。

1 材料与方法

1.1 土壤电导率检测原理

土壤成分和结构复杂,各种参数测量繁琐,简化土壤参数的测量方法有非常重要的应用价值^[12]。改进的“电流-电压四端法”结构如图 1 所示,包括 1 对电流探针(J 和 K)和 2 对电压探针(M 和 N,P 和 Q)。稳幅正弦交流电流信号通过电流探针导入土壤;2 对电压探针用于采集土壤的电压降信号。正弦电压信号在系统中转换成直流电压信号进行 A/D 转换,测量结果用于计算土壤电导率。

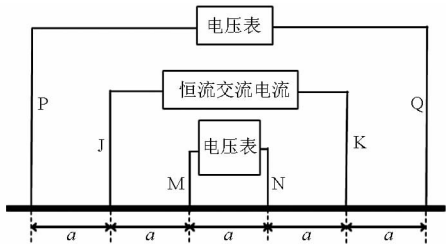


图 1 改进的“电流-电压四端法”原理图
Fig. 1 Improved “current-voltage four-terminal method” schematic

M 和 N 两端电压信号用于计算浅层(0~40 cm)土壤电导率,计算方法为^[13-16]

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

式中 σ_{MN} ——由探针 M 和探针 N 之间的电压计算得到的土壤电导率,S/m

d_{JM} 、 d_{JN} 、 d_{KM} 、 d_{KN} ——探针 J 和 M、J 和 N、K 和 M、K 和 N 间的距离,m

I ——恒流源的电流
 a ——2 个相邻探针间的距离,m
 V_{MN} ——探针 M 和探针 N 之间的电压,V

同理,利用探针 P 和探针 Q 之间的电压 V_{PQ} 可以求出深层(40~70 cm)土壤电导率 σ_{PQ} 。

1.2 土壤反射率检测原理

近红外光谱包括有机物中所有的含氢基团(O—H、C—H、N—H 等)组成状态等丰富的信息量。近红外光谱常规分析技术包括透射光谱和漫反射光谱 2 大类^[17]。农业中对土壤、作物叶片和冠层的光谱检测通常采用漫反射光谱分析方法。对于土壤、谷物等固体试样,根据 Kubelka—Munk 方程计算得到的吸光度与待分析的成分含量具有更好的线性度^[18],公式为

式中 D_{Sample} ——样本的光谱反射 DN 值
 $D_{\text{Whiteboard}}$ ——白板的光谱反射 DN 值

2.3 系统软件的设计与实现

设计开发了土壤光-电特性参数采集软件系统,包括主控制器(ARM1)的土壤数据采集与系统控制软件和光谱传感器控制端(ARM2 和 ARM3)的光谱传感器采集与控制软件。两者相互配合可以实现控制系统工作,采集土壤光谱反射率数据、土壤电导率数据、GPS 位置等信息,实时数据与光谱曲线的显示,并将数据实时保存到数据库,定时将数据库信息保存进 SD 卡中以及实现数据库的查询、删除等功能。

2.3.1 总控制器端软件设计

总控制器(ARM1)的程序是 Android 程序,使用 Android Studio 开发软件,采用 Java 语言开发完成。程序的功能包括接收土壤光谱数据、电导率数据、GPS 数据等,并进行数据的处理。将同一时间采集到的数据处理后,按照时间、电导率、光谱反射率、经纬度的顺序保存进数据库中,并同时在屏幕上显示。每隔一段时间,数据库中的数据自动保存进 SD 卡中。软件同步显示 2 个光谱传感器的光谱曲线,曲线可以实现缩放等功能。

启动 Android 程序后,初始化串口、socket 等模块,点击“Open EC”、“Open Spec”、“Open GPS”等按钮后,程序开始接收土壤电导率数据、光谱数据、GPS 等信息。程序将同一时间接收到的信息处理后,按一定顺序排序,显示光谱数据的图形并保存,程序流程图如图 4 所示。

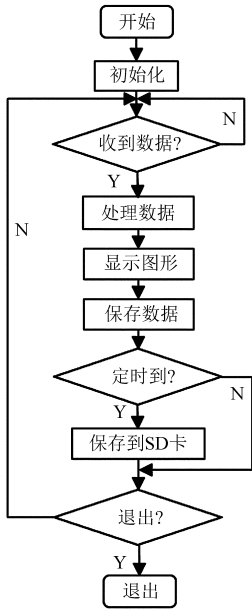


图 4 软件流程图
Fig. 4 Software flow chart

2.3.2 光谱采集控制器端软件设计

光谱传感器的控制端(ARM2 和 ARM3)安装了

Linux 系统,光谱传感器采集与控制软件由 Seabreeze 开源程序模块和 Shell 程序模块组成,可以在 Linux 平台上自动运行。其中 Seabreeze 程序模块用于光谱传感器的设置、数据的采集。Shell 程序模块可以调用 Seabreeze 程序采集光谱数据,将光谱传感器的数据进行计算、处理后,通过 socket 协议传输给总控制器(ARM1)。将 Shell 程序设置成开机自动循环执行上述过程,即可实现光谱传感器采集与控制软件的自动运行。

2.3.3 系统采集数据协议

系统定时采集土壤电导率数据、光谱数据和 GPS 等信息,按照表中的格式组成一条数据保存进数据库中。每隔一段数据,软件会将该时间段保存进数据库中的数据存入微型 SD 卡中。一条完整的数据格式实例如下:10:00:25; 226.923 4; 602.974 3; 40.133 606 16; N; 116.176 732 6; E; 10; 0.012 17, 0.013 27, 0.004 18, ...;数据各部分对应的变量如表 1 所示。

表 1 数据格式表
Tab.1 Data format

数值	对应的变量
10:00:25	采集数据的时间
226.923 4	探针 M、N 之间的电压
602.974 3	探针 P、Q 之间的电压
40.133 606 16 N	纬度
116.176 732 6 E	经度
10	可以收到的卫星数量
0.012 17	650 nm 波段的光谱反射率
0.013 27	651 nm 波段的光谱反射率
0.004 18	652 nm 波段的光谱反射率
:	其他波段的光谱反射率

2.4 系统应用测试

田间实验于 2015 年 4 月 17 日在北京市郊区中国农业大学实验农场进行。选择比较平整、杂物较少的农田进行实验,拖拉机挂 1 挡(大约 5 km/h 的速度)行驶。系统在车辆行驶的同时测量数据并实时保存。实验中,共采集了 24 组土壤样本。采集到的土壤样本在实验室中测量含水率和土壤电导率。

2.4.1 数据预处理

根据在农田和实验室测量的大量数据,可以推导出式(1)中 $k(a)$ 的值是 59 677。 V_{PQ} 与 V_{MN} 的相关系数是 0.71,关系式为

$$V_{PQ} = 1.85 V_{MN} + 238 \tag{5}$$

在理想条件下, V_{PQ} 与 V_{MN} 是线性相关的,即完全符合式(5)。电信号在农田中会受到噪声、土壤质地不均匀等因素的干扰,造成实际测量到的 V_{PQ} 和 V_{MN} 偏大或偏小, V_{PQ} 与 V_{MN} 的关系式偏离式(5)。

因此,在实验室中将偏离式(5)的数据认为是受噪声影响的数据,偏离程度越大,受到噪声影响的程度越大。结合式(5),电信号受噪声影响的程度可以表示为 $(1.85V_{MN} + 238 - V_{PQ})/V_{PQ}$ 。当它的值大于0.3时,认为该数据受噪声影响严重,删除该数据。

2.4.2 数据处理结果

将实验农场采集的24个样本带回实验室测量其土壤溶液电导率,作为评价车载系统的标准值。将适量的待测土壤样本放在105°恒温干燥箱中干燥,24 h后取出碾碎,用孔径为1 mm的筛子过滤土壤。从过滤后的土壤中取出10 g 将其与去离子水按照液料比5 mL/g 在圆锥烧杯中配置成土壤水样。将标准土壤溶液置于阴凉处24 h,然后从圆锥烧杯中取出适量的澄清液,利用DDB-303A型便携式电导率检测仪(上海精细科学仪器有限公司)测量。

根据2.4.1节对数据进行预处理,删除受噪声影响严重和实验失误的点后,将数据按 V_{MN} 的大小排序,两两聚类。将 V_{MN} 、 V_{PQ} 、含水率、实验室测量得到的土壤电导率使用支持向量机(SVM)进行建模, R^2 为0.73,在农田现场测量的土壤电导率和在实验室测量的电导率关系如图5所示。

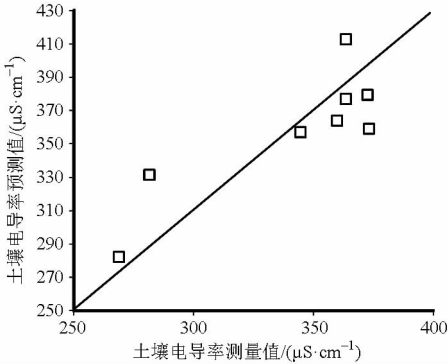


图5 实际土壤电导率和预测土壤电导率的关系

Fig.5 Relationship between actual and predicted soil electrical conductivities

在实验室中,对海洋微型光谱传感器STS-NIR进行了稳定性测试。将光谱传感器标定后,连续重复测一个样本10次,每次数据的相关系数都达到

0.999以上。任选5组数据绘制反射率曲线,如图6所示。

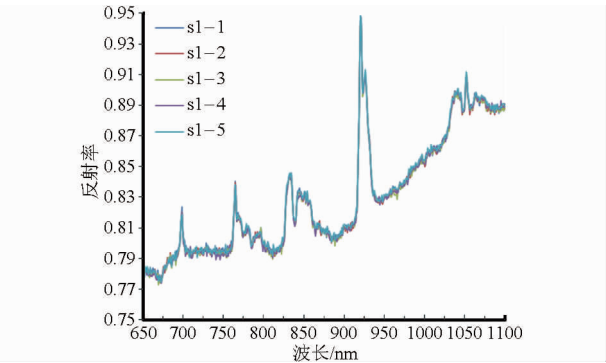


图6 光谱传感器重复测量图

Fig.6 Spectrometer repeated measurement diagram

3 结论

基于嵌入式技术开发了车载式土壤光-电特性参数采集系统,采用微型光谱传感器采集光谱反射数据、采用“电流-电压四端法”测量土壤电导率,融合GPS信息进行实时显示、保存。实验室实验表明微型光谱传感器具有较好的重复性;田间实验表明系统能够稳定工作并且获取的土壤电导率数据和实验室测量值有较好的相关性。主要结论如下:

(1)采用ARM作控制器,采用微型光谱传感器采集光谱数据,满足了小型化、便于集成等特点。系统既取得了较高的精度,又比较容易安装、拆卸,能够满足农业的需要。

(2)软件采用较新的Android编程技术,人机交互友好,操作简便,功能较强。数据采集、保存的自动化能够大大减少工作量,有较好的应用前景。

(3)改进了恒流电流源的设计,电源发生系统能够避免工作在非线性区以保证系统稳定性。恒流交流电流源随负载的改变很小。

(4)总结的预处理方法有助于减少噪声对实验结果的影响,田间测量的数据和实验室测量值有较好的相关性,表明系统能够在复杂的农田环境中稳定工作。

参 考 文 献

1 Bai Wei, Kong Lingwei, Guo Aiguo. Effects of physical properties on electrical conductivity of compacted lateritic soil[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2013, 5(5): 607-617.

2 汪懋华. “精细农业”研究与工程科技创新[J]. 农业工程学报, 1999, 15(1): 1-8.
Wang Maohua. Development of precision agriculture and innovation of engineering technologies[J]. Transactions of the CSAE, 1999, 15(1): 1-8. (in Chinese)

3 罗锡文,臧英,周志艳. 精细农业中农情信息采集技术的研究进展[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 167-173.
Luo Xiwen, Zang Ying, Zhou Zhiyan. Research progress in farming information acquisition technique for precision agriculture[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(1): 167-173. (in Chinese)

4 何勇,赵春江. 精细农业[M]. 杭州:浙江大学出版社,2010.

5 Mohammad Farzamian, Fernando A Monteiro Santos, Mohamed A Khalil. Application of EM38 and ERT methods in estimation of

- saturated hydraulic conductivity in unsaturated soil[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2015,112: 175 – 189.
- 6 张俊宁, 李民赞, 孔德秀, 等. 基于“电流-电压四端法”的温室栽培基质电导率测量[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2007, 37(2):484 – 488.
- Zhang Junning, Li Minzan, Kong Dexiu, et al. Measurement of substrate electrical conductivity in greenhouse based on electrical current-voltage four-electrode method[J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2007,37(2):484 – 488. (in Chinese)
- 7 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(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(7):175 – 177. (in Chinese)
- 8 李民赞, 孔德秀, 张俊宁, 等. 基于蓝牙和 PDA 的便携式土壤电导率测试仪开发[J]. *江苏大学学报:自然科学版*, 2008, 29(2):93 – 96.
- Li Minzan, Kong Dexiu, Zhang Junning, et al. Development of portable soil EC meter with Bluetooth and PDA[J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2008,29(2):93 – 96. (in Chinese)
- 9 Shibusawa S, Hirako S, Otomo A, et al. Real-time underground soil spectrophotometer[J]. *JSAM Journal*, 1999,61(3):131 – 133.
- 10 安晓飞, 李民赞, 郑立华, 等. 便携式土壤全氮测定仪性能研究[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(增刊): 283 – 288.
- An Xiaofei, Li Minzan, Zheng Lihua, et al. Performance of portable soil TN detector based on NIR spectroscopy [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(Supp.): 283 – 288. (in Chinese)
- 11 安晓飞, 李民赞, 郑立华, 等. 土壤水分对近红外光谱实时检测土壤全氮的影响研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(3):677 – 681.
- An Xiaofei, Li Minzan, Zheng Lihua, et al. Effect of soil moisture on prediction of soil total nitrogen using NIR spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013,33(3):677 – 681. (in Chinese)
- 12 Bu Chongfeng, Wu Shufang, Yang Kaibao. Effects of physical soil crusts on infiltration and splash erosion in three typical Chinese soils[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2014,29(4):491 – 501.
- 13 赵燕东, 李宁, 皮婷婷. 基于交流“四端法”的土壤电导率在线实时检测系统[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(8): 299 – 307.
- Zhao Yandong, Li Ning, Pi Tingting. Soil electrical conductivity online real-time detection system based on four-electrode method [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(8): 299 – 307. (in Chinese)
- 14 Anja Stadler, Sebastian Rudolph, Moritz Kupisch, et al. Quantifying the effects of soil variability on crop growth using apparent soil electrical conductivity measurements[J]. *European Journal of Agronomy*, 2015,64:8 – 20.
- 15 Hiroaki Murata, Masato Futagawa, Tadashi Kumazaki, et al. Millimeter scale sensor array system for measuring the electrical conductivity distribution in soil[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2014,102:43 – 50.
- 16 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)
- 17 张文娟, 张录达, 李军会, 等. 近红外漫反射光谱信息分解的数量分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008,28(8):1790 – 1794.
- Zhang Wenjuan, Zhang Luda, Li Junhui, et al. Quantity analysis of information decomposition for near-infrared diffuse reflectance spectra [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008,28(8):1790 – 1794. (in Chinese)
- 18 何东健, 杨成海, 杨青, 等. 面向精准农业的农田土壤成分实时测定研究进展[J]. *农业工程学报*, 2012,28(7):78 – 85.
- He Dongjian, Yang Chenghai, Yang Qing, et al. Research progress of real-time measurement of soil attributes for precision agriculture[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012,28(7):78 – 85. (in Chinese)
- 19 Pei Xiaoshuai, Zheng Lihua, Li Minzan, et al. Development of a vehicular soil electrical conductivity monitoring system based on ARM[C]// *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting*, 2014, 3:1747 – 1756.