

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.023

基于驻波原理的锥式林区土壤含水率仪设计与性能分析

田昊^{1,2} 刘卫平^{1,2} 赵燕东^{1,2}

(1.北京林业大学工学院,北京100083;2.北京林业大学城乡生态环境北京实验室,北京100083)

摘要: 为了提高现有土壤含水率传感器在林区的测量性能及可使用性,在优化传感器结构的基础上,设计了一种基于驻波原理的锥式林区土壤含水率仪,其锥角 30° 、探头直径20 mm、探头长度150 mm。实验结果表明:传感器横向测量范围为10 cm,纵向测量范围为18 cm,输出线性拟合决定系数在0.96以上。静态特性分析表明,传感器测量范围为零到粘壤性土壤饱和含水率,测量精度为3%,稳定性标准差0.49%,超调量为0.48%,过渡时间0.582 s。通过与TDR(TRIME-HD2型传感器,德国)进行对比,测量结果线性拟合决定系数在0.97以上,两者测量性能相当,表明所设计的传感器能够达到实际使用的要求。本文设计的土壤含水率仪性价比更高,更适用于林区土壤含水率测量,使用更为便捷。

关键词: 土壤含水率仪;驻波原理;林区;设计

中图分类号: S237 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)08-0194-09

Design and Performance Analysis of Cone-type Forest Soil Moisture Sensor Based on Standing Wave Principle

TIAN Hao^{1,2} LIU Weiping^{1,2} ZHAO Yandong^{1,2}

(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The soil in forest area is more complicated than the soil in farmland, and the performance structure of real-time measuring instrument of water content is more demanding, in order to improve the measurement performance and usability of the existing soil moisture sensor in the forest area, on the basis of optimizing the sensor structure, the cone-type forest soil moisture sensor was designed based on standing wave principle. Cone angle was 30° , probe diameter was 20 mm and probe length was 150 mm. The transverse impact scope of the sensor was 10 cm and vertical scope was 18 cm, and the output linear fitting decision coefficient was over 0.96. Static and dynamic analysis showed that the measurement range of the sensor was from zero to saturated soil moisture content of clay soil, the measurement accuracy was 3%, the stability standard deviation was 0.49%, the overshoot was 0.48% and the transition time was 0.582 s. The linear fitting determination coefficient of the measurement results was above 0.97 by comparing with TDR (TRIME-HD2, Germany), the results of the two measurements were basically the same, and the results showed that the designed sensor met the actual application requirements. But the designed sensor was more suitable for measuring soil moisture in the forest area and more convenient to use, it provided an effective means for forest tending and forest ecological monitoring.

Key words: soil moisture content sensor; standing wave principle; forest zone; design

0 引言

水分是土壤的重要组成元素,在农林业生产、道

路交通、地质勘探等领域中,水分的测量具有重要作用,土壤含水率的变化可以作为评估环境条件的重要依据。目前土壤含水率的测量主要有烘干法、中

收稿日期:2018-02-28 修回日期:2018-05-16

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2015ZCQ-GX-04)、国家重点研发计划项目(2017YFD0600901)、北京市科技计划项目(Z161100000916012)和城乡生态环境北京实验室(北京市重点)项目

作者简介: 田昊(1992—),男,博士生,主要从事生态信息智能检测与控制研究,E-mail: thc1015@bjfu.edu.cn

通信作者: 赵燕东(1965—),女,教授,博士生导师,主要从事生态信息智能检测与控制研究,E-mail: yandongzh@bjfu.edu.cn

子仪法、电阻法、电容法等^[1-8]。比较常见的有英国 Delta-t 公司的 ThetaProbe 型传感器、德国 IMKO 公司的 TRIME-HD2 型土壤含水率传感器、Sentek 公司 EnviroSCAN 土壤含水率廓线系统和北京林业大学自主研发的 BD-III 型土壤含水率传感器^[9-16]。林区土壤构成复杂,土壤中常伴有枯枝落叶及碎石等物质,现有的土壤含水率传感器多针对于农田土壤的测量,应用于林区土壤含水率测量时易造成探针损坏,且对不同深度的林区土壤进行测量时存在不便。如 TRIME-HD2 型土壤含水率传感器在用于林区测量时不能直接插入土壤,必须使用预打打孔定位器确定好安装位置再插入探针,以防损坏探针^[17]; EnviroSCAN 土壤含水率廓线系统需采用 Sentek 专用工具安装^[18-19]; BD-III 型传感器需要先将传感器埋入林区土壤,存在供电不便^[20]; CS830 型土壤含水率仪探头具有放射性,只有经过注册及培训的专业人员才可以使用^[21]; FDS100 型含水率传感器不能将探针插入较硬的土壤,以防止损坏探针,测量时要埋入土壤^[22]。

因此,在前人研究的基础^[18,21]上,本文设计一种适用于林区的基于驻波原理的便携式土壤含水率仪。对该仪器测量敏感半径进行实验分析,通过烘干法进行标定,并对其性能进行静态测试,通过与 TDR 型传感器进行对比验证该仪器性能。

1 传感器设计

1.1 传感器测量原理

驻波原理测量土壤含水率是通过测量土壤的介电常数实现对土壤水分测量,当土壤介电常数不同,高频电磁波在沿传输线传播时,由于探头处阻抗与传输线阻抗不匹配,在传输线上形成驻波,进而引起传输线两端电压幅值的变化^[18-21],测量原理如图 1 所示。

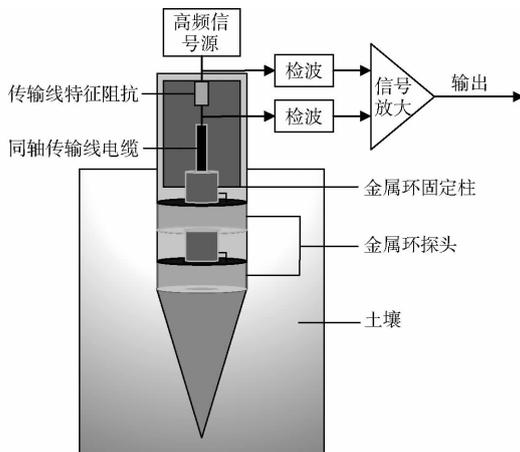


图 1 传感器测量原理图

Fig. 1 Principle schematic of sensor measurement

高频信号源采用 100 MHz 的正弦信号源作为激励信号,传输线特征阻抗为 50 Ω,探头采用不锈钢的双金属环构成,对传输线上两端的驻波进行检波后通过差分信号放大器进行小信号放大处理,根据基本传输线理论,可以将图 1 等效为集总参数电路,如图 2 所示。

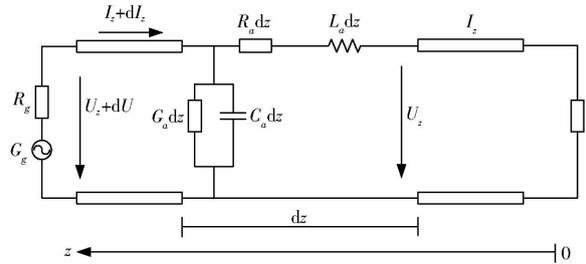


图 2 等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit

从 Z 轴上任意取一微元 dz,则微元 dz 对应的电压和电流分别为

$$dU_z = I_z Z_a dz \quad (1)$$

$$dI_z = U_z Y_a dz \quad (2)$$

对式(1)、(2)做二次微分即得到传输线的电报方程

$$\frac{d^2 U_z}{dz^2} - U_z Y_a Z_a = 0 \quad (3)$$

$$\frac{d^2 I_z}{dz^2} - I_z Y_a Z_a = 0 \quad (4)$$

对方程(3)、(4)求解得到电压 U_z 的瞬时表达式为

$$u(z, t) = A [\cos \omega t + \rho \cos(\omega(t - 2\beta z))] \quad (5)$$

式中 A——电压幅值

ρ ——传输线反射指数

β ——相移常数 ω ——相移角度

负载一端(z 为 0)的电压峰值为

$$\hat{U}_0 = A(1 + \rho) \quad (6)$$

同理,在传输线的另一端选择 $2\beta z = \pi$,则 z 为波长的四分之一处,得峰值电压为

$$\hat{U}_z = A(1 - \rho) \quad (7)$$

驻波的波峰和波谷恰在传输线的两端,传输线两端的电压差为

$$\Delta U = \hat{U}_0 - \hat{U}_z = 2A\rho = 2A \frac{Z_p - Z_L}{Z_p + Z_L} \quad (8)$$

式中 ΔU ——传输线两端电位差

Z_p ——测量探头阻抗

Z_L ——传输线阻抗

本设计中传输线阻抗 Z_L 为 50 Ω,在电压幅值 A 和传输线阻抗 Z_L 为恒定值时,传输线两端的电位差只和测量探头阻抗 Z_p 有关,而测量探头阻抗 Z_p 由

探头尺寸、测量处土壤介电常数和频率决定,探头尺寸和工作频率为固定值,即测量处土壤介电常数不同会引起测量探头阻抗 Z_p 的改变,进而反映在传输线两端电位差 ΔU 的变化上。又 Topp 公式^[15-16]

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \varepsilon - 5.5 \times 10^{-4} \varepsilon^2 + 4.3 \times 10^{-6} \varepsilon^3 \quad (9)$$

式中 θ ——土壤含水率
 ε ——土壤介电常数

由式(9)可知,土壤含水率与土壤介电常数存在单值数学关系,因而可以通过测量探头阻抗 Z_p 来测量土壤含水率。

1.2 传感器机械结构

1.2.1 探头设计

目前现有的土壤含水率传感器多针对于土质较均匀且松软的农田土壤的测量,在应用于林区土壤含水率测量时,由于林区土壤构成复杂,土壤中常伴有枯枝落叶及碎石等物质,存在使用不便,而且在使用过程中由于林区土壤复杂易损坏传感器探针,且在测量不同深度时现有传感器需要埋入测量。

针对上述林区土壤含水率测量存在的问题,本文设计了双金属环式含水率测量探头,双金属环式探头可以避免针式探针会折断的问题,同时双金属环的探头直径为 20 mm,下部安装锥角为 30°的圆锥头,便于插入土壤。通过螺纹连接到含水率测量探头上(采用 M16 的螺纹进行连接),两个金属环探头(外径 20 mm,内径 18 mm,间距 10 mm)嵌合在带有凹槽的实心刚玉柱上,刚玉柱两边为 M16 的螺纹用于连接锥头及锥杆。含水率测量探头上安装 3 个 PVC 环(外径 20 mm,内径 18 mm,安装间距 10 mm)对金属环探头进行绝缘隔离,以保证金属探头不会相互之间或与其他连接件之间构成短路。含水率测量电路安装在金属环探头上部(内径 14 mm,壁厚 3 mm,与刚玉柱连接处为 M16 的内螺纹,螺纹深度 5 mm),并对电路做防水处理,这样可以最大限度地降低同轴传输线周围阻抗变化对测量结果造成的误差。含水率测量探头整体长 150 mm(金属环探头安装部分长 60 mm,含水率测量电路安装部分长 90 mm),锥杆长为 630 mm。锥杆上加有刻度,可以同时得到当前测量深度。

1.2.2 整体结构

便携式林区土壤含水率传感器由采集主板、含水率测量电路、连接线缆、含水率测量探头及手柄组成,如图 3 所示。

在实际测量时,含水率测量电路与金属环型探针之间的连接线也会作为测量金属环的一部分对外

界环境的介电常数产生感应而使得测量结果产生误差,本文通过将含水率测量电路嵌入到含水率测量探头,使得含水率测量电路与金属环型探针之间的连接线最短而尽可能的减小这种误差。传感器整体采用 304 不锈钢材料制作,传感器整体长 900 mm。

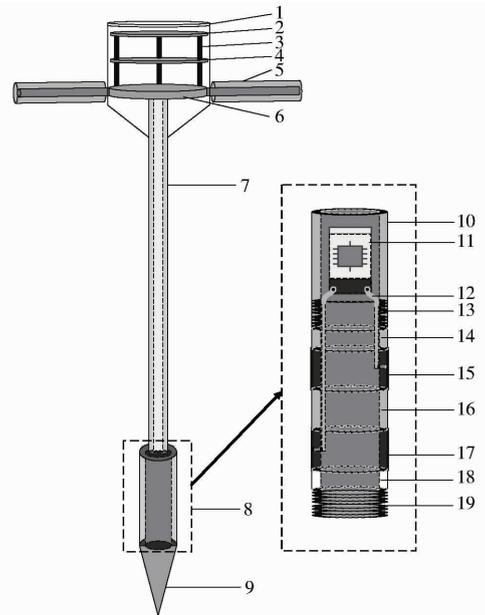


图 3 系统组成及结构示意图

Fig. 3 Sketch of system composition and structure

1. 传感器外壳 2. 显示及存储单元 3. 铜柱 4. 采集主板
5. 手柄 6. 固定底座 7. 外径 10 mm 空心钢管 8. 含水率测量探头 9. 锥头
10. 外径 20 mm 空心钢管 11. 含水率检测电路板 12. 导线 13, 19. M16 螺纹 14, 18. 高 5 cm 的 PVC 环
- 15, 17. 金属环探头 16. 高 10 cm 的 PVC 环

1.3 硬件电路设计

系统原理框图如图 4 所示,主要包括采集主板、含水率测量单元和显示控制单元。采集主板包括微控制器 STM32103ZET6、AD 采集模块、SD 卡存储模块、电源控制模块、时钟控制模块;含水率测量单元包括双金属环探头和含水率测量电路;显示控制单元包括 OLED 液晶显示屏和按键模块。

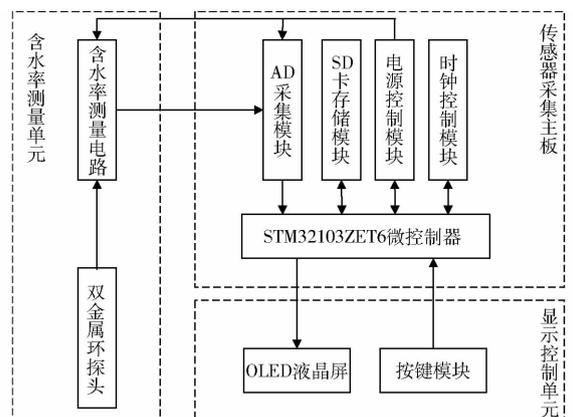


图 4 系统原理框图

Fig. 4 System principle block diagram

传感器工作电路供电电源为 5 V, 通过按键可以控制含水率的测量显示、数据保存和查询。进入测量模式时屏幕实时显示测量数据; 进入保存模式后 SD 卡以 TXT 文本保存当前测量数据, 便于后期通过计算机读取数据进行处理分析; 进入查询模式可以从 SD 卡中读取历史数据。

2 传感器性能分析与实验

2.1 传感器测量敏感性

传感器测量的敏感区域表示了传感器在测量过程中的测量范围, 是传感器的一个重要指标。为了对传感器测量范围进行分析确定, 对传感器的横向影响区域和纵向影响区域进行了实验。

2.1.1 横向影响区域

实验土壤样本取自北京林业大学实验基地

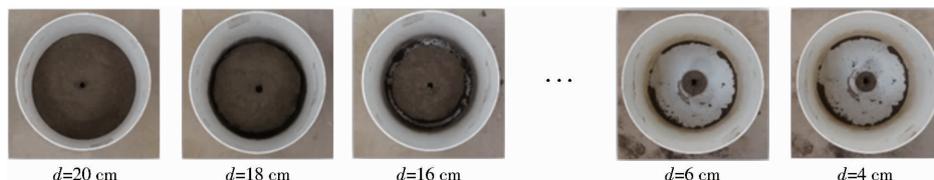


图 5 传感器横向影响实验过程

Fig. 5 Test process of sensor transverse impact

为了直观体现土体厚度的影响, 采用能量指数 K_a 表征传感器在纵向范围上的能量分布状况^[20], 即

$$K_a = \frac{V_c - V}{V_{soil} - V} \times 100\% \quad (10)$$

式中 K_a ——能量指数

V_c ——传感器实时测量电压

V ——传感器在空气中输出电压

V_{soil} ——传感器在未削薄土柱中的电压

将测量结果代入式(10), 传感器在体积含水率为 7.30%、11.72% 和 30.27% 的 3 种实验土壤样本中测得实验结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出, 能量指数 K_a 随着样本直径的增加而变大, 对于 3 种不同体积含水率的样本, 95% 的能量均匀分布在土柱直径为 10 cm 左右的范围内, 因此本文所设计的传感器横向影响直径为 10 cm, 且横向影响范围会随着体积含水率的增加而略微变大。

2.1.2 纵向影响区域

将 2.1.1 节中配置好的 3 份不同体积含水率的土壤样本分别配置不同高度土柱 (土柱直径 16 cm), 将传感器依次插入土柱中正中心, 记录土柱高度及传感器输出电压, 实验过程如图 7 所示, 并代入式(10)中计算得到对应的能量指数 (V_{soil} 此处为传感器在高 24 cm, 直径 16 cm 土柱中的电压), 能量指数随土柱高度的变化曲线如图 8 所示。

从图 8 可以看出, 能量指数 K_a 随着样本高度的

(116°21'14"E, 40°0'54"N) 的典型粘壤土, 浸出液的电导率为 0.02 mS/cm, 其成分构成为: 砂粒 11%、粉粒 71%、粘粒 18% (均为质量分数), 取回后首先自然风干并用孔径 0.4 mm 的筛网过筛, 然后放入干燥箱 (105°C, 24 h) 进行干燥。通过控制加入水分以配置体积含水率分别为 7.30%、11.72% 和 30.27% 的土壤样本 (体积含水率通过烘干法测量), 将配置好的实验土壤样本依次装入 3 个测试桶 (高 20 cm, 直径 20 cm) 中, 使用保鲜膜密封静置 48 h。静置完成后将传感器插入土壤样本正中心并记录传感器输出电压, 然后将传感器轻轻取出, 用土环刀以 1 cm 为梯度削薄土柱的厚度并记录土柱直径, 再将传感器插入土壤样本正中心并记录传感器输出电压, 重复上述过程直至完成土柱直径为 4 cm 时的测量。实验过程如图 5 所示。

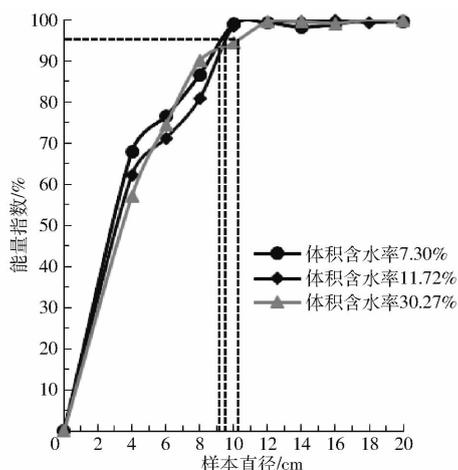


图 6 传感器横向影响能量指数变化

Fig. 6 Energy index change of sensor transverse impact

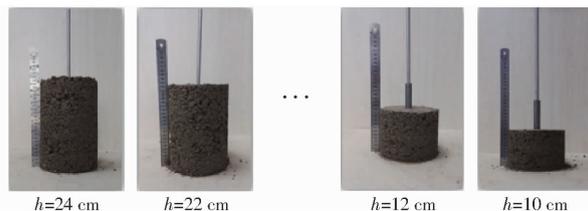


图 7 传感器纵向影响实验过程

Fig. 7 Test process of sensor longitudinal impact

增加而增加, 对于 3 种不同体积含水率的样本, 95% 的能量均匀分布在样本高度为 18 cm 左右的范围内, 因此本文所设计的传感器的纵向影响范围为 18 cm, 且纵向影响范围会随着体积含水率的增加而

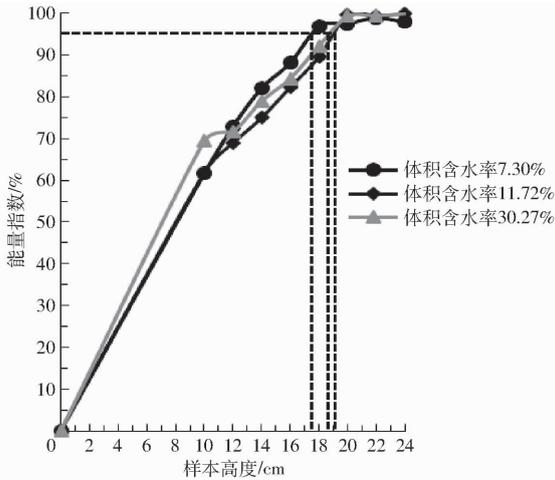


图8 传感器纵向影响能量指数变化

Fig. 8 Energy index change of sensor longitudinal impact

略微变大。

2.2 传感器标定实验

传感器标定选用3个土壤样本,样本分别为砂土(取自北京市顺义区共青林场,位置为 116.73°E , 40.11°N ,砂粒质量分数85%、粉粒质量分数10%、粘粒质量分数5%)、黄土(取自甘肃省庆阳市镇原县,经纬度为 107.03°E , 35.54°N ,砂粒质量分数15%、粉粒质量分数65%、粘粒质量分数20%)和粘壤土(取自北京林业大学实验基地,经纬度为 116.34°E , 40.00°N ,砂粒质量分数11%、粉粒质量分数71%、粘粒质量分数18%),3种土壤分别记作样本1、样本2、样本3。将3份土壤样本在自然条件下进行风干,用40目的筛网对土壤进行筛选去除其中较大的颗粒,用精密电子秤称量10 kg的干土。在土壤样本1中加入适量的水并搅拌(搅拌10 min)至均匀,使加水后的土壤含水率保持一致。然后将搅拌均匀的实验土壤等分为8份,将第1份实验土壤均匀铺放入PVC标定桶(底面直径32 mm,高30 mm)抹平,用直径50 mm(长50 cm)的尼龙棒进行压实(尼龙棒距离土壤表面3 cm左右自由落体落下进行压实,从外围向中间一点一点的旋转,保证整个标定桶中的土壤表面都进行了一遍压实后再重复一次,每层压实两遍)。然后加入第2份实验土壤,并重复上述压实过程,直至8份实验土壤都加入到标定桶中并压实。将标定桶密封静置48 h,保证桶中水分运移达到平衡,将含水率传感器插入标定桶中的土壤进行测量,每份土壤样本进行5次测量,5次测量结果去掉最大值和最小值,然后剩下3个值取平均值作为测量结果。同时对标定桶内的实验土壤利用环刀法取样,取两个环刀样本,将所取环刀样本放入干燥箱干燥(105°C 下干燥24 h),计算2份干燥土壤样本的体积含水率,并取平均值得出所测土

壤的体积含水率。重复上述过程完成对土壤样本2和土壤样本3的配置,通过控制加入水的多少配置不同体积含水率的土壤,将含水率传感器输出的电压和实验土壤样本体积含水率(烘干法测量)进行线性拟合,结果如图9所示。

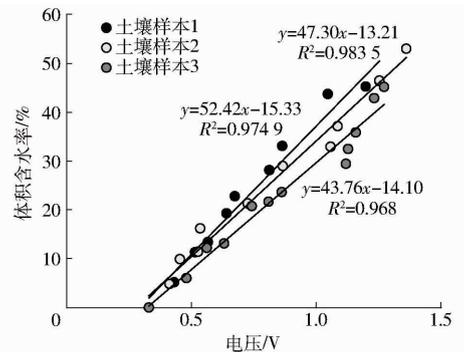


图9 传感器输出电压变化曲线

Fig. 9 Changing curves of sensor output voltage

由图9可以看出,3个土壤样本的线性拟合曲线的拟合决定系数分别为0.9749、0.9835和0.968,拟合决定系数达到0.96以上,表明传感器输出电压与被测土壤样本的体积含水率具有良好的线性关系。

2.3 传感器静态特性测试

静态特性表示输入为常量或者输入变化极慢时,传感器的输入输出关系特性,针对含水率传感器使用要求及林区特点,本文所设计的传感器的静态性能测试主要包括测量范围、测量精度、稳定性和分辨率^[23]。

2.3.1 测量范围

传感器测量范围是指传感器所能测量的最小值与最大值之间的范围,本文所设计的锥形林区土壤含水率传感器测量的是土壤体积含水率,将传感器置于空气中(视此时体积含水率为零)时传感器输出电压为0.33 V,从图9可看出,空气中传感器输出最小,并且随着土壤体积含水率的增加直至饱和时传感器输出电压同时增加,因而传感器的测量范围为零到饱和含水率。

2.3.2 测量精度

传感器测量精度表示测量结果的可靠程度,一般用量程范围内的最大误差和满量程之比的百分数进行表示。

传感器的测量精度通过以下实验进行验证,按照2.2节中土样配置方法,将3种土壤样本每种配置4个不同含水率的土样,共12个样本,每个样本通过烘干法得到土壤体积含水率,并将传感器插入每个样本进行含水率测量,每份样本测量8次并记录测量结果,取8次测量中的误差测量最大值计算

测量精度(此处满量程选择 100%),得到数据如表 1 所示。

表 1 传感器测量精度
Tab. 1 Sensor measurement accuracy

土壤样本	烘干法体积含水率/%	传感器测量误差最大值/%	测量精度/%
1	5.68	8.41	2.73
	13.37	15.00	1.63
	22.71	20.06	2.65
	32.20	30.16	2.04
	43.71	40.89	2.82
2	4.85	7.10	2.25
	10.80	9.77	1.03
	20.09	21.81	1.72
	32.12	34.50	2.38
3	46.44	44.33	2.11
	5.83	7.93	2.10
	12.39	13.72	1.33
	21.66	22.95	1.29
	32.46	35.40	2.94
	42.87	39.91	2.96

从表 1 可以看出,传感器的测量精度在 3% 以内,达到实际使用要求。

2.3.3 稳定性

传感器稳定性指相同环境中,传感器在长时间内输出的结果的差异情况或者是进行多次测量时输出的差异情况。为了测试传感器的稳定性,按照 2.2 节中方法配置了直径为 100 cm、高度为 20 cm 的土壤样本并进行了 100 次测量,记录传感器输出结果,得到数据如图 10 所示。

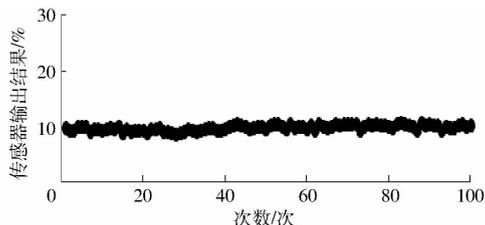


图 10 传感器输出变化曲线

Fig. 10 Changing curve of sensor output

图 10 中所测量数据最大体积含水率为 10.68%,最小体积含水率为 8.74%,标准差为 0.49%,可以看出传感器输出的稳定性较好,可以用于重复测量。

2.3.4 传感器分辨率

传感器分辨率指传感器可感受到的被测量的最小变化的能力。本文所设计含水率传感器中基于驻波原理的含水率检测电路通过对传输线两端的驻波进行检波后通过放大器放大输出模拟电压信号,之

后通过 AD 采样模块对电压采集处理得到土壤体积含水率,因此传感器的分辨率由 AD 模块的采样精度决定。AD 采样精度为 0.8 mV,对应的分辨率最小为 0.05%。

2.4 传感器动态特性测试

动态特性指传感器对随时间变化的输入量的响应特性,将传感器插入土壤这一过程看为输入信号,此时输入为一阶阶跃信号,通过测量输出随输入的变化得到动态特性。按照 2.2 节中土壤样本配置方法配置 1 份土壤样本,将传感器置于土壤表面并开始测量,然后将传感器快速贯入土壤直至输出结果稳定,传感器会实时将测量结果记录并储存在 SD 卡中,通过读取 SD 卡中的数据绘制动态特性曲线如图 11 所示。

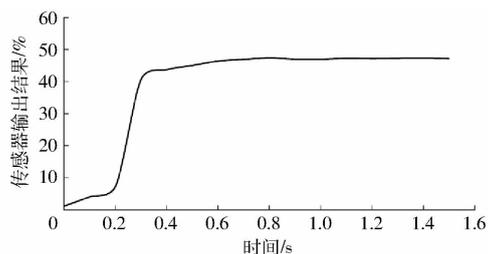


图 11 传感器动态特性曲线

Fig. 11 Sensor dynamic characteristic curve

由图 11 可以计算得到传感器的相关动态特性指标,如表 2 所示。

表 2 传感器动态特性指标

Tab. 2 Sensor dynamic characteristic parameters

动态特性指标	超调量/%	过渡时间/s	振荡次数/次	延迟时间/s	上升时间/s	峰值时间/s
数值	0.480	0.582	0	0.248	0.162	0.800

3 测量结果对比与验证

使用德国 IMKO 公司的 TDR 含水率传感器(测量精度 2%,测量范围 0~100%)和烘干法作为对比,分别进行了室内实验和室外实验。

3.1 室内实验验证

实验在实验室环境下完成,按照 2.2 节中方法对 3 个土壤样本配置不同体积含水率的土体,分别用本文所设计的传感器和 TDR 传感器测量土体的体积含水率,记录测量数据。

3.1.1 测量结果准确性对比

按照 2.2 节配置测量土体,每种土壤样本配置 12 个不同体积含水率的土体,共配置 36 份用于测量的土体样本,用本文所设计的传感器和 TDR 传感器测量土体样本体积含水率并记录数据,2 种传感器的测量结果对比如图 12 所示。

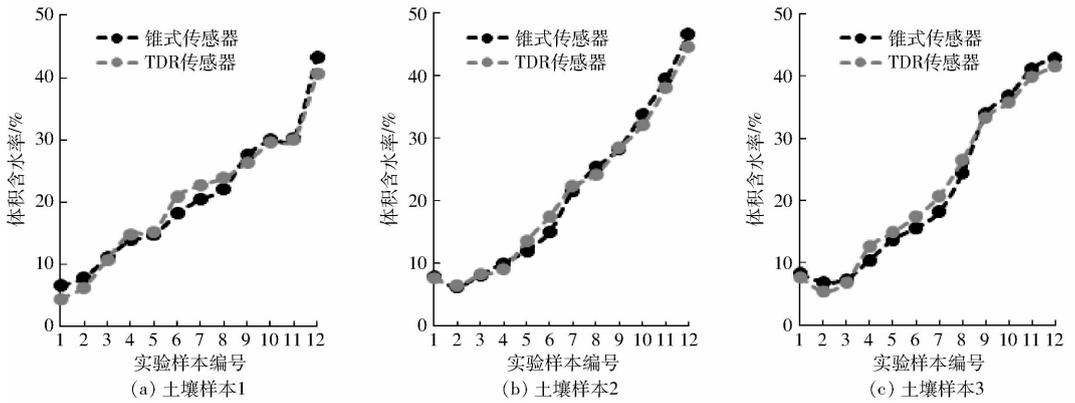


图 12 传感器测量结果准确性对比

Fig. 12 Accuracy comparison of sensor measurement results

由图 12 可以看出,3 种土壤样本下本文所设计的传感器与 TDR 传感器测量得到的结果基本相近,并进一步对本文设计的传感器和 TDR 传感器测量结果进行线性拟合分析,如表 3 所示,得到拟合决定系数分别为 0.975 0、0.992 9 和 0.988 1,表明本文所设计的传感器与 TDR 传感器的测量准确性相当,达到了实际应用的要求。但是本文所设计的传感器测量探头为金属不锈钢结构,和 TDR 传感器测量探头相比,更适合于林区环境下土壤体积含水率的测量。

表 3 传感器与 TDR 测量结果线性拟合

Tab. 3 Sensor measurements linear fitting with TDR measurement

土壤样本	一次线性拟合表达式	决定系数
1	$y = 0.9745x + 0.4743$	0.9750
2	$y = 0.9389x + 1.1125$	0.9929
3	$y = 0.9555x + 1.2446$	0.9881

3.1.2 测量结果稳定性对比

该实验在实验室环境下进行,按 2.2 节所述配置用于测量实验的土体,用土壤样本 2 (黄土) 配置 8 个不同体积含水率的土体,分别用本文所设计的传感器和 TDR 传感器对土体进行 3 次测量,并通过烘干法测量得到 8 份土体的体积含水率作为实验土体的真值,记录数据并用 Excel 计算测量数据的标准差对比如图 13 所示。

由图 13 可以看出,锥式传感器和 TDR 传感器测量结果波动基本一致,锥式传感器测量结果标准差最大为 2.32%,TDR 传感器测量结果标准差最大为 1.63%,说明本文设计的锥式传感器与 TDR 传感器性能相当。

3.2 室外实验验证

室外实验选取北京林业大学林场(北京市鹫峰国家森林公园)和北京林业大学三顷园实验基地作为室外实验地点,在北京林业大学林场选取 9 m² 的

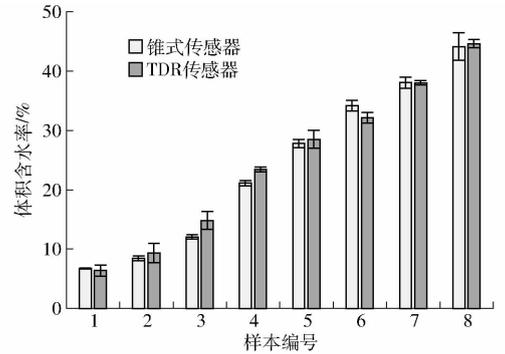


图 13 传感器测量结果稳定性对比

Fig. 13 Comparison of stability of sensor measurement results

正方形平整土地(海拔 642 m、116°4'36"E、40°3'42"N),使用本文所设计的锥式传感器测量实验土壤的体积含水率,测量深度为 25 cm,测量点为正方形土地的 4 个对角及正中心,共 5 个点测量,记录测量数据,并在选取测量点旁使用环刀取土壤样本进行干燥,通过烘干法计算得到实验样地土壤的体积含水率。同样,在北京林业大学三顷园实验基地选取 9 m² 的正方形平整土地(海拔 52 m、116°20'15"E、40°0'44"N),测量深度为 25 cm,按照上述方法进行测量并记录数据,表 4 为 2 个不同地点下传感器和烘干法测量得到土壤体积含水率的对比。

表 4 传感器与烘干法测量结果对比

Tab. 4 Comparison of measurement results between sensor and drying method %

测量点	三顷园实验基地		鹫峰国家森林公园	
	传感器测量 含水率	烘干法测量 含水率	传感器测量 含水率	烘干法测量 含水率
1	19.90	18.86	17.21	16.89
2	21.85	21.44	17.35	15.67
3	21.35	23.45	16.39	15.18
4	19.61	21.11	16.57	14.80
5	20.05	21.22	15.16	16.96

由表 4 可以看出,传感器测量结果和烘干法测量结果基本一致,最大误差为 2.10%,小于 3%,因

此本文设计的锥式林区土壤含水率传感器满足林区含水率测量的实际应用要求,相比烘干法更便捷。

4 结论

(1)设计了一种基于驻波原理的锥式林区土壤含水率传感器,采用不锈钢材料作为传感器的测量探针及支撑结构提高了传感器的抗损坏性,采用双金属环的探针结构,将含水率测量电路嵌入锥头,使得传输线最短,降低了传输线受到周围环境阻抗变化引起的测量误差。

(2)通过实验验证,表明传感器的横向影响直径为 10 cm,纵向影响高度为 18 cm,且影响范围会随着土壤体积含水率的增加而略微变大。通过标定实验得到拟合决定系数分别为 0.974 9、0.983 5 和 0.968,表明传感器能很好地表征土壤含水率的变

化。

(3)通过静态特性实验,得到传感器测量范围为零到饱和含水率,测量精度为 3%,传感器稳定性良好,分辨率为 0.05%;通过动态特性实验,得到传感器超调量为 0.48%,过渡时间为 0.582 s,振荡次数为零,延迟时间为 0.248 s,上升时间为 0.162 s,峰值时间为 0.8 s,表明传感器具有良好的静动态特性,能够达到实际使用要求。

(4)通过与国际公认的 TDR 含水率传感器进行对比,测量结果一次线性拟合决定系数为 0.975、0.992 9 和 0.988 1,测量结果标准差分别为 2.32% 和 1.63%,表明传感器和 TDR 的测量结果准确性和稳定性基本一致。通过在林区进行室外实验并和烘干法测量结果进行对比,表明传感器测量结果和烘干法测量结果基本一致。

参 考 文 献

- 赵燕东,王一鸣. 基于驻波率原理的土壤含水率测量方法[J]. 农业机械学报,2002,33(4):109-111,121.
ZHAO Yandong, WANG Yiming. Study on the measurement of soil water content based on the principle of standing-wave ratio[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2002,33(4):109-111,121. (in Chinese)
- KANG S, ZHANG J. Controlled alternate partial root-zone irrigation: its physiological consequences and impact on water use efficiency [J]. Journal of Experimental Botany,2004,407(55): 2437-2446.
- THOMPSON R B, GALLARDO M, VALDEZ L C, et al. Using plant water status to define threshold values for irrigation management of vegetable crops using soil moisture sensors [J]. Agricultural Water Management,2007,88(1-3): 147-158.
- SHENG W, SUN Y, LAMMERS P S, et al. Observing soil water dynamics under two field conditions by a novel sensor system [J]. Journal of Hydrology,2011,409(1-2): 555-560.
- 郑茹梅,李子忠,龚元石. 运用时域传输技术测定不同类型土壤的含水率[J]. 农业工程学报,2009,25(8): 8-13.
ZHENG Rumei, LI Zizhong, GONG Yuanshi. Measurement of soil water content for different soil types by using time domain transmission technology[J]. Transactions of the CSAE,2009,25(8): 8-13. (in Chinese)
- DEAN T J, BELL J P, BATY A J B. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique: Part I. Sensor design and performance [J]. Journal of Hydrology,1987,93(1-2): 67-78.
- HUTTON R J, LOVEYS B R. A partial root zone drying irrigation strategy for citrus-effects on water use efficiency and fruit characteristics [J]. Agricultural Water Management,2011,98(10): 1485-1496.
- 赵燕东,高超,张新,等. 基于驻波率原理的植物茎体水分无损检测方法研究[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(1):310-316. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160142&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.042.
ZHAO Yandong, GAO Chao, ZHANG Xin, et al. Non-destructive measurement of plant stem water content based on standing wave ratio[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(1):310-316. (in Chinese)
- GASKIN G J, MILLER J D. Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique [J]. Journal of Agricultural Engineering Research,1996,63(2): 153-159.
- 朱兆龙,孙宇瑞,马道坤,等. 一种土壤剖面水分与坚实度同步测量装置[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2007,28(4): 280-283.
ZHU Zhaolong, SUN Yurui, MA Daokun, et al. An instrument for simultaneous measurement of soil water content and compaction [J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition),2007,28(4):280-283. (in Chinese)
- PALTINEANU I C, STARR J L. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration [J]. Soil Science Society of America Journal,1997,61(6): 1576-1585.
- 高志涛,刘卫平,赵燕东,等. 多层土壤剖面复合传感器设计与性能分析[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(1):108-117. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160115&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.015.
GAO Zhitao, LIU Weiping, ZHAO Yandong, et al. Design and performance analysis of composite sensor for multilayer soil profile [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(1):108-117. (in Chinese)
- 李晓东,吴永烽,李光林,等. 基于太阳能的无线土壤水分传感器的研制[J]. 农业工程学报,2010,26(11): 13-18.
LI Xiaodong, WU Yongfeng, LI Guanglin, et al. Development of wireless soil moisture sensor based on solar energy [J]. Transactions of the CSAE,2010,26(11): 13-18. (in Chinese)

- 14 范寿康,卢春兰,李平辉.微波技术与微波电路[M].北京:机械工业出版社,2003.
- 15 TOPP G C, DAVIS J I, ANNAN A P. Electromagnetic determination of soil water content using TDR: I. applications of wetting fronts and steep gradients[J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46(4): 672 - 678.
- 16 TOPP G C, DAVIS J L. Measurement of soil water content using time-domain reflectometry (TDR): a field evaluation [J]. Soil Science Society of America Journal, 1985, 49(1): 19 - 24.
- 17 吴涛,张荣标,冯友兵.土壤水分含量测定方法研究[J].农机化研究,2007,29(12):213-217.
WU Tao, ZHANG Rongbiao, FENG Youbing. Research in measuring method of soil water content [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(12): 213 - 217. (in Chinese)
- 18 高志涛,田昊,赵燕东.土壤剖面水分线性尺度测量方法[J/OL].农业机械学报,2017,48(4):257-264. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170433&journal_id=jcsam DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.033.
GAO Zhitao, TIAN Hao, ZHAO Yandong. Linear scale measurement method for soil profile moisture [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 257 - 264. (in Chinese)
- 19 赵燕东,董晓晨,李宁.线区域尺度土壤水分实时测量方法研究[J/OL].农业机械学报,2015,46(6):168-174. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150624&journal_id=jcsam DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.024.
ZHAO Yandong, GONG Xiaochen, LI Ning. Real-time soil moisture measurement method on line scale [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 168 - 174. (in Chinese)
- 20 高志涛,刘卫平,赵燕东.基于电容法的非接触式土壤水分传感器设计与性能分析[J/OL].农业机械学报,2016,47(11):185-191. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161125&journal_id=jcsam DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.025.
GAO Zhitao, LIU Weiping, ZHAO Yandong. Design and performance analysis of soil moisture sensor based on capacitance technology [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 185 - 191. (in Chinese)
- 21 彭曾瑜.土壤含水率及紧实度复合传感器的研究与开发[D].北京:北京林业大学,2011.
PENG Zenyu. Research and development on soil moisture and soil compaction compound sensor [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011. (in Chinese)
- 22 穆永航,李莉,王俊衡,等.基于频域法传感器的基质含水率检测性能研究[J/OL].农业机械学报,2017,48(增刊):341-346. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s052&journal_id=jcsam DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.052.
MU Yonghang, LI Li, WANG Junheng, et al. Performance evaluation of substrate moisture detection based on frequency domain sensor [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 341 - 346. (in Chinese)
- 23 隋文涛,张丹.传感器静态特性的评定[J].传感器与微系统,2007,26(3):80-81.
SUI Wentao, ZHANG Dan. Evaluation of static characteristics of sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2007, 26(3): 80 - 81. (in Chinese)

(上接第 193 页)

- 16 ANSOLA P G, GARCÍA A, DE LAS MORENAS J, et al. ZigID: improving visibility in industrial environments by combining WSN and RFID [J]. Journal of Zhejiang University—SCIENCE A, 2011, 12(11): 849 - 859.
- 17 DENG F, HE Y, LI B, et al. Design of a slotted chipless RFID humidity sensor tag [J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2018, 264: 255 - 262.
- 18 DENG F, HE Y, LI B, et al. Design of an embedded CMOS temperature sensor for passive RFID tag chips [J]. Sensors, 2015, 15(5): 11442 - 11453.
- 19 WICKRAMASINGHE A, RANASINGHE D C, FUMEAUX C, et al. Sequence learning with passive RFID sensors for real-time bed-egress recognition in older people [J]. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 2017, 21(4): 917 - 929.
- 20 CHEN H D, SIM C Y D, TSAI C H, et al. Compact circularly polarized meandered-loop antenna for UHF-band RFID tag [J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2016, 15: 1602 - 1605.
- 21 ZHANG J, SHEN Z. Compact and high-gain UHF/UWB RFID reader antenna [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2017, 65(10): 5002 - 5010.
- 22 DONNO D D, CATARINUCCI L, TARRICONE L. A battery-assisted sensor-enhanced RFID tag enabling heterogeneous wireless sensor networks [J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(4): 1048 - 1055.
- 23 PAVELKA M, ACOSTA M, MAREK M V, et al. Dependence of the Q₁₀ values on the depth of the soil temperature measuring point [J]. Plant and Soil, 2007, 292(1-2): 171 - 179.
- 24 OCHSNER T E, COSH M H, CUENCA R H, et al. State of the art in large-scale soil moisture monitoring [J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77(6): 1888 - 1919.
- 25 STEWART M G, SIEW W H, CAMPBELL L C, et al. Sensor system for monitoring soil moisture content in cable trenches of high-voltage cables [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(2): 451 - 455.