

# 基于加速度补偿的土壤紧实度测量方法与传感器设计

于文华<sup>1</sup> 田昊<sup>1,2</sup> 梁超<sup>1,2</sup> 李成豪<sup>1,2</sup> 赵燕东<sup>1,2</sup>

(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:** 针对目前基于圆锥指数的土壤紧实度测量中,无法消除土壤摩擦力对紧实度测量的影响,要求检测传感器匀速贯入土壤,因此存在使用不便、精度不高的难题。为了提高土壤紧实度实时测量方法的精度及可操作性,在圆锥指数方法基础上,设计了土壤紧实度实时检测传感器,并加入了加速度的同步测量,消除了使用过程中金属杆插入速度不均造成的误差,提高了土壤紧实度测量精度。通过大量试验验证了自制传感器具有较好的静态性能和动态性能,其测量范围为0~900 kPa,灵敏度为0.041 896,稳定性测量标准差为5 kPa,测量精度为±0.02% FS,超调量为7.81%,过渡时间为0.632 s。与美国SC-900型土壤紧实度仪对比其准确性的线性拟合决定系数均达到0.96以上,结果表明设计的土壤紧实度传感器与SC-900型土壤紧实度仪在实际测量中性能相当,且使用更方便、价格更低廉。为农林生产、环境保护及生态监测提供了一种具有自主知识产权、精准获取土壤紧实度的有效手段。

**关键词:** 土壤紧实度; 传感器; 加速度; 圆锥指数; 静态特性; 动态特性

**中图分类号:** S152.9; TU432 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)04-0250-07

## Soil Compactness Measuring Method Based on Acceleration Compensation and Sensor Design

YU Wenhua<sup>1</sup> TIAN Hao<sup>1,2</sup> LIANG Chao<sup>1,2</sup> LI Chenghao<sup>1,2</sup> ZHAO Yandong<sup>1,2</sup>

(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:** In view of the present measurement of soil compactness based on the cone index, eliminating the influence of soil friction on compactness measuring is impossible. It needs to ensure sensor is inserted into the soil at constant speed, thus it is difficult to use and the accuracy is not high. In order to improve the real-time measurement precision and maneuverability of soil compactness, a real-time soil compactness detection sensor was designed based on the cone index, and the synchronous measurement of acceleration was realized, which eliminated the error caused by different speed in the process of the metal rod inserting into soil, as well as improved soil compactness measuring precision. Homemade sensor had good static characteristics and dynamic characteristics through a large number of test. Measuring range was 0 ~ 7 800 kPa, sensibility was 0.041 896, the stability of the standard deviation was 5 kPa, measuring accuracy was ±0.02% FS, overshoot was 7.81%, and transient time was 0.632 s. Compared with SC-900 soil compactness meter of the United States, its accuracy of the linear fitting coefficient of decision reached more than 0.96. The results showed that the homemade soil compactness sensor and SC-900 soil compactness meter had consistency of performance in the actual measurement, and homemade soil compactness sensor was more convenient and cheaper.

**Key words:** soil compactness; sensor; acceleration; cone index; static characteristics; dynamic characteristics

### 引言

土壤是植物赖以生存及生长的源泉,对植物的

生长有重要影响,长期的研究中人们发现土壤紧实度是影响土壤物理性质的重要因素,土壤紧实程度影响着土壤的水肥气热状况进而影响植物生长,尤

收稿日期: 2016-07-26 修回日期: 2016-08-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(31371537)、北京市科技计划项目(Z11610000916012)和北京市共建项目专项

作者简介: 于文华(1956—),男,教授,主要从事林火监测与扑救研究,E-mail: yuwenhua56@sina.com

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

其土壤紧实度对土壤含水率的测量具有重要影响<sup>[1-8]</sup>,因此,对土壤紧实度进行有效测量可以提高土壤含水率测量的准确性,并为农业生产、林木抚育及生态环境检测奠定研究基础<sup>[9-10]</sup>。通过土壤紧实度传感器的研究设计,将为下一步研究土壤紧实度与土壤体积含水率的关系模型、基于标准土壤紧实度下的土壤体积含水率修正模型及建立适合植物生长的土壤紧实度标准奠定基础。

对土壤紧实度的测量主要有容重法、坚实度计法、电磁评估法和圆锥指数法等<sup>[11-14]</sup>,国际上常采用圆锥指数来评估土壤的紧实度,通过测量圆锥贯入土壤过程中锥头底面所受阻力表征土壤的紧实程度。为准确测量圆锥指数,原美国农业工程师学会(ASAE)标准要求探针在贯入土壤的过程中必须保持匀速<sup>[15-16]</sup>,但是实际环境中土壤组成多样,尤其是林区由于常年落叶积累和腐烂使得林区土壤组成更加复杂,土壤质地不均一,且由于操作者自身原因,在使用过程中,很难保证匀速贯入土壤,从而造成较大的测量误差<sup>[17]</sup>。为弥补以上缺陷,本文设计一种带有加速度补偿的土壤紧实度测量传感器,在常规压力测量的基础上,增加加速度测量,获取锥头底面所受到的有效阻力(包括土壤的作用力及摩擦力),进而计算得到圆锥指数,以消除非匀速贯入土壤造成的测量误差,使得土壤紧实度的测量更加准确,操作更加方便。

## 1 圆锥指数测量方法的改进

### 1.1 基于圆锥指数的土壤紧实度测量方法

土壤圆锥指数(Cone index, CI)通常被用来描述土壤的强度,表示土壤对圆锥头匀速贯入阻力的大小<sup>[18]</sup>。即标准圆锥仪匀速贯入土壤时作用于圆锥头单位面积上的平均压力。ASAE规定了2种圆锥头规格,直径分别为12.83 mm和20 mm,圆锥头锥角为30°,计算公式为

$$C_I = N / (1\ 000S) \quad (1)$$

式中  $C_I$ ——土壤圆锥指数

$N$ ——圆锥头匀速插入土壤时所受的阻力

$S$ ——圆锥头底面积

在圆锥仪匀速贯入土壤过程中,可忽略土壤摩擦力的作用,根据牛顿第一定律,圆锥仪处于受力平衡状态,所以在匀速贯入时圆锥头受到的阻力等于施加在圆锥仪上的压力与圆锥仪重力之和,即

$$N = G + F \quad (2)$$

式中  $G$ ——圆锥仪的重力

$F$ ——匀速贯入时施加在圆锥仪上的压力

### 1.2 基于加速度补偿的土壤紧实度测量方法

在实际使用中,由于土质构成不均一、操作者不同,很难保证圆锥头匀速插入土壤,所以圆锥头插入土壤过程中,受到的有效阻力为施加在圆锥仪上的压力、圆锥仪的重力及产生加速度的力,通过圆锥头贯入土壤过程中对加速度的同步测量,可进一步计算得到土壤圆锥指数 $C_I$ ,进而消除插入过程中快慢不一造成的测量偏差。

有效阻力表达式为

$$\bar{N} = G + \bar{F} - ma \quad (3)$$

式中  $\bar{N}$ ——加速度补偿下圆锥头受到的有效阻力

$\bar{F}$ ——施加在圆锥仪上的压力

$m$ ——圆锥仪的质量

$a$ ——圆锥头插入过程中的加速度

假设要测量A点的土壤紧实度,如图1所示,通过测量圆锥头在插入以A点为中心、深度为 $\Delta L$ 的土体过程中的加速度和压力,利用式(3)计算得到圆锥头受到的有效阻力,再进而计算得到土壤圆锥指数 $C_I$ ,当 $\Delta L$ 很小时测量得到的 $C_I$ 表示A点土壤紧实度的真实值,因此通过土壤圆锥指数 $C_I$ 可以表征土壤紧实程度。

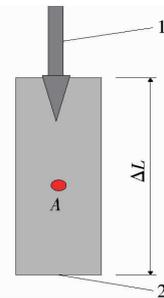


图1 土壤紧实度测量原理

Fig. 1 Soil compactness measuring principle

1. 圆锥头 2. 土壤

## 2 传感器结构设计

### 2.1 传感器机械结构设计

整体由圆锥体、锥杆和固定底座3部分组成,锥杆和上部固定底座通过螺纹连接,锥体和锥杆为一体成型,锥杆上部固定底座上安装压力传感器和加速度传感器。传感器的整体结构如图2所示。

传感器整体采用304不锈钢材料制作,根据ASAE标准,圆锥头直径为12.83 mm,圆锥锥角为30°,锥杆直径为10 mm,压力传感器与锥杆之间采用M8螺纹(孔深14 mm、螺纹深14 mm)连接,锥杆整体长度为700 mm,为防止锥头锥尖在使用过程中对人造成伤害,锥尖进行倒角去尖,去尖后圆锥头高度为22 mm。圆锥头后部为长48 mm的锥柱,此部

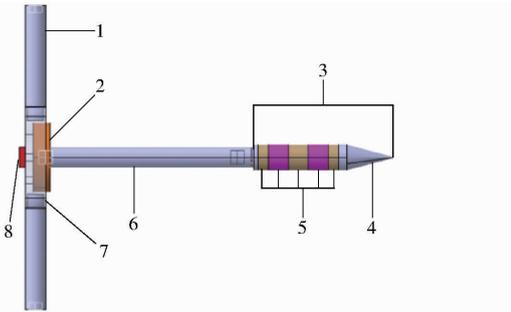


图2 土壤紧实度检测装置整体结构

Fig.2 Structure of soil compactness measuring device

- 1.手柄 2.压力传感器 3.锥体 4.30°圆锥头 5.预留结构  
6.锥杆 7.固定底座 8.加速度传感器

分为预留结构,用于安装水分测量装置,为后续安装合适的水分测量传感器及基于土壤紧实度下土壤体积分含水率的测量做准备。锥杆上标有刻度,测量精度为1 mm,用于测量圆锥头的插入深度。圆锥头加工精度为0.1 mm。

锥杆与压力传感器连接后,将压力传感器固定在固定底座上,固定底座中间是1个直径为34 mm的圆形凹槽,深度为6 mm。凹槽用于安装压力传感器,内部沿直径为26 mm的圆周均匀分布3个直径为4 mm的通孔,利用3个螺栓将压力传感器固定在固定底座上。固定底座左右各有1个M8的螺纹孔,用于安装手柄,手柄为长136.5 mm、直径10 mm的圆柱杆,圆柱杆上套有防滑柄套,通过工程制图软件CATIA进行设计。

## 2.2 土壤紧实度传感器的硬件结构设计

土壤紧实度传感器通过对压力信号、加速度信号的采集,得到所测土壤的紧实度,其硬件结构如图3所示。

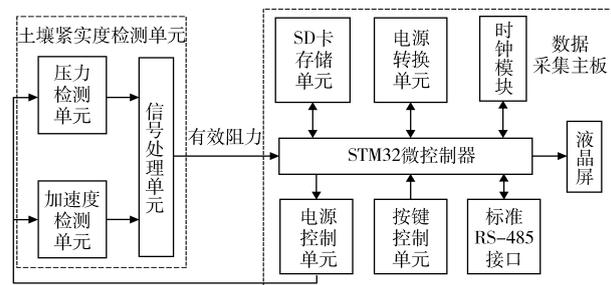


图3 土壤紧实度传感器硬件结构图

Fig.3 Soil compactness sensor hardware structure

土壤紧实度传感器硬件结构主要包括土壤紧实度检测单元和数据采集主板。土壤紧实度检测单元包括压力检测单元、加速度检测单元和信号处理单元;数据采集主板包括SD卡存储单元、电源转换单元、时钟模块、液晶屏、电源控制单元、按键控制单元和RS-485接口单元。土壤紧实度检测单元先对压力传感器和加速度传感器输出信号进行放大,放大器

采用双电源供电,再进行A/D转换,然后使用单片机进行双通道同步采样并处理得到土壤圆锥指数 $C_1$ (单位kPa)以表征土壤紧实度。电源控制单元用于控制土壤紧实度检测单元的供电,只有在圆锥头插入土壤进行测量时才给土壤紧实度检测单元供电以降低传感器功耗。圆锥头插入土壤的深度通过锥杆上的刻度值进行读取并通过按键控制单元将该次测量的深度输入到传感器,同时按键控制单元还可以控制传感器的开关并查看之前测量保存的信息。

## 3 土壤紧实度传感器的测量模型

已知土壤紧实度传感器质量为0.852 g,圆锥底面积为1.29 cm<sup>2</sup>,根据式(3)可得有效阻力为

$$\bar{N} = 8.3496 + \bar{F} - 0.852a \quad (4)$$

$\bar{F}$ 与 $a$ 共同对有效阻力 $\bar{N}$ 产生影响,土壤紧实度传感器的重力 $G$ 为固定值8.3496 N。为获取土壤紧实度传感器的测量模型,进行如下建模试验。

### 3.1 土样

土样取自北京市顺义区共青团林苗圃(116°43'59"E、40°5'39"N)的典型砂壤土,成分构成为:砂粒55%、粉粒35%、黏粒10%,自然风干并用孔径为0.4 mm的网筛过筛,然后利用干燥箱在105℃下干燥24 h,称取15 kg干燥后的砂壤土,加水搅拌均匀,用电子秤按质量等分成8份,然后取1份土样均匀铺放在环形标定桶(高20 cm、内径30 cm)中,将直径为5 cm的尼龙棒从土体表面上方5 cm处自由落下,沿标定桶内壁向内旋转均匀压实1遍,然后再取1份土样均匀铺放在已经压实过的土样上,用尼龙棒再沿标定桶内壁向内旋转压实一遍,重复上述过程直至将8份土样全部压入环形标定桶完成土体的配置,每层压实次数保持相同,每层对应的压实次数记为所配置土体的压实次数,通过控制压实次数来配置不同紧实度土样。

### 3.2 数据获取

将土壤紧实度传感器加速插入所配置的土体中,记录此时传感器测量得到的有效阻力 $\bar{N}$ ( $\bar{F} + G - ma$ ),再将其安装在步进电动机上并固定在固定架上,控制步进电动机转速使传感器匀速插入土体,其他条件不变,获得锥头插入过程中受到的阻力为 $N(F + G)$ ,土壤紧实度传感器的重力 $G$ 为固定值8.3496 N,根据圆锥指数法可以计算得到土壤的圆锥指数 $C_1$ ,即此时土样的真值。配置18个不同紧实度的土体,进行8次重复测量取平均值并记录测量结果做线性拟合分析,其结果如图4所示。

由图4可得土壤紧实度传感器的测量模型为

$$C_1 = 8.0399\bar{N} - 13.593 \quad (5)$$

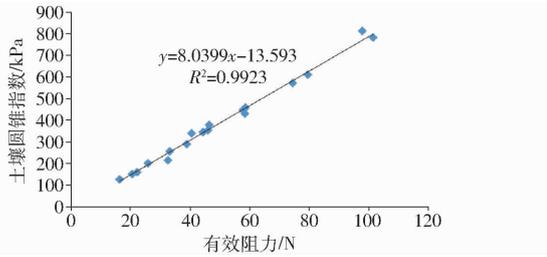


图4 匀速测量圆锥指数与有效阻力的关系

Fig. 4 Relationship between uniform measuring cone index and effective resistance

可以看出土壤紧实度传感器测量得到的有效阻力与土壤圆锥指数具有良好的线性关系,其线性决定系数  $R^2$  达到 0.9923。

## 4 土壤紧实度传感器性能测试

### 4.1 静态特性

传感器的静态特性是指当输入量为常量,或者输入变化极慢时,传感器的输入输出关系特性,它包括传感器的测量范围、灵敏度、稳定性和测量精度<sup>[19]</sup>。

#### 4.1.1 土壤紧实度传感器的测量范围

土壤紧实度传感器的测量范围包括圆锥指数测量范围和测量深度范围。

自制土壤紧实度传感器的测量结果输出下限为 0 kPa,输出度上限为 900 kPa。测量深度由锥杆长及锥杆上刻度决定,根据设计的刻度值锥头插入的下限为 0 mm,插入的上限为 400 mm。因此土壤紧实度传感器的输出结果测量范围为 0 ~ 900 kPa,测量深度范围为 0 ~ 400 mm。

#### 4.1.2 土壤紧实度传感器的灵敏度

土壤紧实度传感器的灵敏度是指传感器输出量的变化  $\Delta y$  与引起该变化量的输入量的变化  $\Delta x$  之比。其表达式为

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (6)$$

将自制土壤紧实度传感器固定并在其上放置不同质量的物体(用精密电子秤称量物体的质量),通过质量计算得到重力并将重力转化为传感器受到的压力,记录压力变化量和土壤紧实度传感器输出变化量。进行 10 次测量得到的数据如表 1 所示。

利用式(6)计算得到对应的灵敏度  $k$ ,测量 10 次通过求平均值减小试验误差,土壤紧实度传感器的灵敏度  $k$  为 0.041 896。

#### 4.1.3 土壤紧实度传感器的稳定性

传感器的稳定性是指在同样被测环境中,传感器在长时间内输出的差异情况或者进行多次测量输出的差异情况。为说明传感器的稳定性进行如下

表1 传感器灵敏度试验结果

Tab.1 Results of sensor sensitivity test

序号	输入变化量 $\Delta x/N$	输出变化量 $\Delta y/kPa$	$k$
1	2.578	0.101	0.039 019
2	3.266	0.124	0.037 912
3	5.703	0.201	0.035 281
4	7.913	0.341	0.043 034
5	9.897	0.449	0.045 354
6	11.827	0.472	0.039 916
7	14.993	0.627	0.041 809
8	17.875	0.789	0.044 161
9	20.176	0.913	0.045 261
10	22.949	1.083	0.047 211

试验。

将传感器安装在固定架上,固定架有 2 个固定环,固定环直径 11 mm,固定架可以保持传感器在竖直方向上的上下移动,防止传感器在水平方向上左右移动,将传感器在距离固定架底面 15 mm 处沿竖直方向自由落下,记录传感器的输出结果,共进行 52 次重复试验,所得数据如图 5 所示。

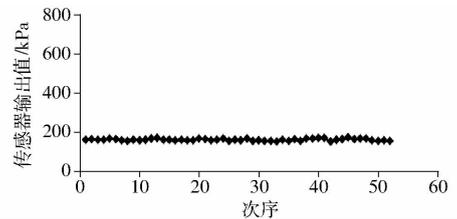


图5 稳定性试验结果

Fig. 5 Results of stability test

图 5 所测数据的标准差为 5 kPa,说明组间数据差异较小,进而说明传感器输出的稳定性较好,可以用于重复性测量。

#### 4.1.4 传感器的测量精度

传感器的测量精度是指测量结果的可靠程度,用其量程范围内的最大基本误差与其满量程的百分比表示。

自制土壤紧实度传感器的测量精度由压力传感器和加速度传感器的测量精度共同决定。已知压力传感器的测量精度为  $\pm 0.02\%$  FS,即其满量程范围(0 ~ 1 000 N)内最大基本误差  $\Delta \bar{F}$  为 0.2 N;加速度传感器的测量精度为  $\pm 0.06\%$  FS,即其满量程范围(0 ~ 1.7g)内最大基本误差  $\Delta a$  为 1 mg,自制土壤紧实度传感器的最大基本误差  $\Delta C_I$  为

$$\Delta C_I = (\Delta \bar{F} + ma) / S \times 1\ 000 \quad (7)$$

将已知条件代入式(7)可得  $\Delta C_I$  为 1.55 kPa,土壤紧实度传感器的满量程为 7 800 kPa,故计算得到土壤紧实度传感器测量精度为  $\pm 0.02\%$  FS。

## 4.2 土壤紧实度传感器的动态特性

传感器的动态特性是指传感器对随时间变化的输入量的响应特性,在分析自制土壤紧实度传感器的动态特性时,可以把传感器插入土壤的过程看成输入信号,此时的输入为一个阶跃信号,通过观测输出随输入的变化得到动态特性<sup>[20]</sup>。

该试验按照 3.1 节的方法压实 10 遍配置 1 份土体,用 25 N 的力施加在传感器上将传感器压入土体,测量传感器在插入土体表面时的动态过程,传感器插入过程的动态特性曲线如图 6 所示,可以计算得到传感器的动态性能指标包括超调量、过渡时间、振荡次数、延迟时间、上升时间和峰值时间。

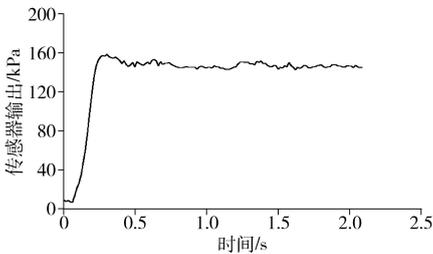


图 6 土壤紧实度传感器动态特性曲线

Fig. 6 Curve of sensor dynamic characteristic

(1)超调量:响应曲线第一次越过静态值达到峰点时,越过部分的幅度与静态值之比记为  $\sigma$ ,常用百分数表示。记  $y_{\max}$  为峰值,  $y(\infty)$  为响应曲线的静态值,则有

$$\sigma = \frac{y_{\max} - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\% \quad (8)$$

通过图 6 可得超调量  $\sigma$  为 7.81%。

(2)过渡时间:响应曲线最后进入偏离静态值的误差为  $\pm 5\%$  (也有取  $\pm 2\%$ ) 的范围并且不再超出这个范围的时间,记为  $t_s$ 。通过图 6 可得过渡时间  $t_s$  为 0.632 s。

(3)振荡次数:响应曲线在达到过渡时间之前静态值上下振荡的次数,记为  $n$ 。通过图 6 可得振荡次数  $n$  为 1。

(4)延迟时间:响应曲线首次达到静态值的 1/2 所需时间,记为  $t_d$ 。通过图 6 可得延迟时间  $t_d$  为 0.233 s。

(5)上升时间:响应曲线首次从静态值的 10% 过渡到 90% 所需的时间,记为  $t_r$ 。通过图 6 可得上升时间  $t_r$  为 0.135 s。

(6)峰值时间:响应曲线第一次达到峰点的时间,记为  $t_p$ 。通过图 6 可得峰值时间  $t_p$  为 0.300 s。

## 4.3 土壤紧实度传感器与 SC-900 型土壤紧实度仪的性能对比

为验证所设计的土壤紧实度传感器的性能,选用 SC-900 型土壤紧实度仪(美国 Spectrum 公司生

产,测量单位 kPa,分辨率为 35 kPa,测量精度为 103 kPa,量程为 0 ~ 45 cm 和 0 ~ 900 kPa,最大插入速度为 2.5 cm/s,最大承受负载为 95.25 kg)作为对比传感器,主要对比土壤紧实度传感器和 SC-900 型土壤紧实度仪在实际使用中的测量准确性和测量稳定性这 2 个关键性能指标。测试过程中,SC-900 型土壤紧实度仪须匀速贯入土壤,土壤紧实度传感器可加速贯入土壤。

### 4.3.1 测量准确性对比试验

本试验在实验室环境下进行,按照 3.1 节中的方法配置土体,通过用尼龙棒压实 3 次、6 次、10 次、15 次配置 4 种紧实度不同的土体,按紧实度由小到大依次编号为紧实度 1、紧实度 2、紧实度 3、紧实度 4。将土壤紧实度传感器和 SC-900 型土壤紧实度仪分别插入所配置的土体,测量并记录插入土体深度为 2.5、5.0、7.5、10.0 cm 时的数据。SC-900 型土壤紧实度仪与土壤紧实度传感器的输出结果对比如图 7 所示。

从图 7 中可以看出,不同紧实度土体下,2 种传感器测量结果决定系数  $R^2$  分别达到了 0.999 8、0.973 7、0.998 5 和 0.959 0,表明土壤紧实度传感器和 SC-900 型土壤紧实度仪的测量准确性相当,土壤紧实度传感器的准确性达到了实际应用中土壤紧实度测量精度要求。但加入加速度补偿之后,自制土壤紧实度传感器使用更便捷,更能满足不同环境下土壤紧实度测量的要求。

### 4.3.2 测量结果稳定性对比试验

该试验在实验室环境下进行,用 3.1 节中所述方法配置 2 份土体,通过用尼龙棒压实 4 次和压实 10 次配置 2 种紧实度不同的土体,分别记为紧实度 A 和紧实度 B,用 SC-900 型土壤紧实度仪和土壤紧实度传感器分别插入土样,插入土体深度为 2.5、5.0、7.5、10.0 cm,每个深度进行 5 次测量,然后用 Excel 计算测量数据的标准差。2 种紧实度下测量结果的标准差对比如图 8 所示,测量结果标准差如表 2 所示。

从图 8 可以看出对于紧实度 A 和紧实度 B,通过土壤紧实度传感器和 SC-900 型土壤紧实度仪进行测量,在 5 次测量中输出测量结果的波动基本一致。通过表 2 中的标准差可进一步看出土壤紧实度传感器与 SC-900 型土壤紧实度仪输出结果的标准差相差很小,综合图 8 和表 2,说明土壤紧实度传感器在稳定性上和 SC-900 型土壤紧实度仪的稳定性相当。

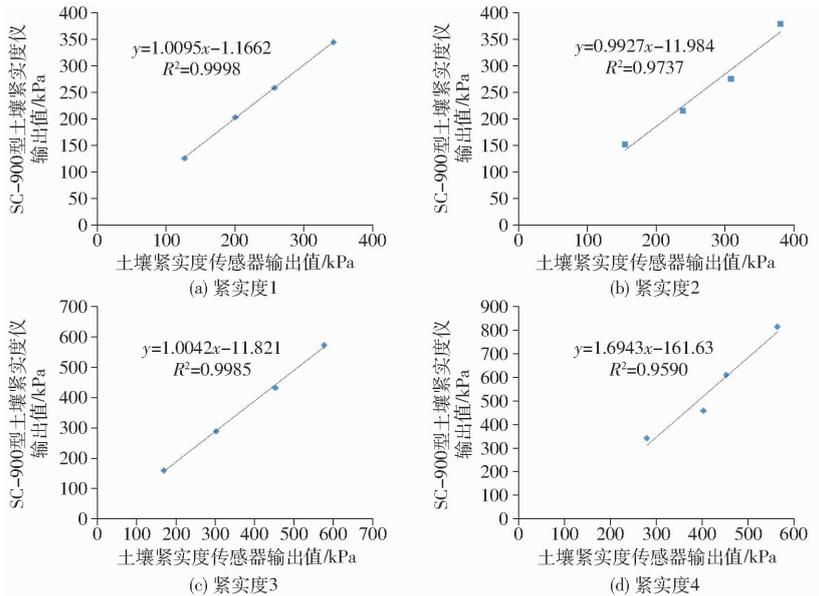


图 7 土壤紧实度传感器与 SC-900 型土壤紧实度仪测量结果对比

Fig. 7 Comparison of soil compaction sensor and SC-900

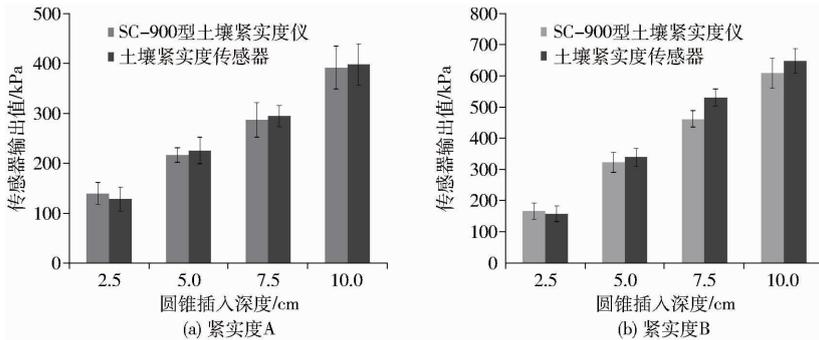


图 8 不同紧实度下土壤紧实度传感器与 SC-900 型土壤紧实度仪测量结果对比

Fig. 8 Comparison of soil compaction sensor and SC-900 at different compactnesses

表 2 传感器测量结果标准差

Tab. 2 Standard deviations of sensor measuring results

深度/ cm	kPa			
	紧实度 A		紧实度 B	
	土壤紧实度 传感器 标准差	SC-900 标 准差	土壤紧实度 传感器 标准差	SC-900 标 准差
2.5	24.85	22.14	24.32	26.19
5.0	26.71	14.00	28.64	33.11
7.5	21.12	34.78	26.87	26.19
10.0	41.55	43.09	39.47	47.89

## 5 结论

(1) 针对土壤紧实度仪在实际测量过程中,由于探针贯入快慢不一造成的测量误差,提出基于加速度补偿的土壤紧实度测量方法,并设计了土壤紧实度实时检测传感器,提高了测量精度,使得基于圆锥指数原理的土壤紧实度动态测量更加精准,操作更加方便。

(2) 通过试验建立土壤紧实度传感器的测量模型,其线性拟合决定系数为 0.992 3,为土壤紧实度传感器设计奠定了基础。

(3) 土壤紧实度传感器有着较好的稳态特性和动态特性,深度和紧实度测量范围分别为 0 ~ 400 mm 和 0 ~ 900 kPa,灵敏度为 0.041 896,稳定性误差为 5 kPa,测量精度为  $\pm 0.02\%$  FS,超调量为 7.81%,过渡时间为 0.632 s,振荡次数为 1 次,延迟时间为 0.233 s,上升时间为 0.135 s,峰值时间为 0.300 s。满足土壤紧实度实时测量的要求。

(4) 土壤紧实度传感器与 SC-900 型土壤紧实度仪进行了性能对比,4 种不同紧实度土体下 2 种传感器的线性拟合决定系数分别为 0.999 8、0.973 7、0.998 5 和 0.959 0;2 种不同紧实度土体下测量结果标准差没有明显差异,表明土壤紧实度传感器在实际应用中的测量准确性和稳定性与 SC-900 型土壤紧实度仪性能相当。

## 参 考 文 献

- 1 彭曾愉. 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 Zengyu. Research and development on soil moisture and soil compaction compound sensor[D]. Beijing: Beijing Forestry University,2011. (in Chinese)
- 2 朱兆龙,孙宇瑞,马道坤,等. 一种土壤剖面水分与紧实度同步测量装置[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)
- 3 HERRERA S M. Development of a sensor for soil continuous compaction measurement [J]. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 2011,20(1):6-11.
- 4 刘晚苟,山仑,邓西平. 植物对土壤紧实度的反应[J]. 植物生理学通讯,2001,37(3):254-260.  
LIU Wangou, SHAN Lun, DENG Xiping. Responses of plant to soil compaction[J]. Plant Physiology Communications,2001, 37(3):254-260. (in Chinese)
- 5 马纪琴. 播种行土壤实度测量系统的开发[D]. 太原:太原理工大学,2015.  
MA Jiqin. Development of system for measuring seed row compaction[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology,2015. (in Chinese)
- 6 张立彬. 土壤含水量和土壤紧实度对土壤圆锥指数值影响的试验研究[J]. 农业工程学报,1993,9(2):41-44.  
ZHANG Libin. Test on effect of moisture and density on soil cone indexes[J]. Transactions of the CSAE,1993,9(2):41-44. (in Chinese)
- 7 RANDRUP T B, LICHTER J M. Measuring soil compaction on construction sites: a review of surface nuclear gauges and penetrometers[J]. Journal of Arboriculture, 2001, 27(3):109-117.
- 8 SAEYS W, MOUAZEN A M, ANTHONIS J, et al. An automatic depth control system for on-line measurement of spatial variation in soil compaction[C]//Proceedings of AgEng 2004, Technologisch Instituut Vzw, 2004.
- 9 TEKIN Y, OKURSOY R. Development of a hydraulic-driven soil penetrometer for measuring soil compaction in field conditions [J]. Journal of Applied Sciences, 2007, 7(6):918-921.
- 10 杨世琦,吴会军,韩瑞芸,等. 农田土壤紧实度研究进展[J]. 土壤通报,2016,47(1):226-232.  
YANG Shiqi, WU Huijun, HAN Ruiyun, et al. A review of soil compaction in farmland[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016,47(1):226-232. (in Chinese)
- 11 RONAI D, SHMULEVICH I. Comparative analysis of some soil compaction measurement techniques [J]. International Agrophysics, 1995, 12(1):165-182.
- 12 AL-GAADI K A. Employing electromagnetic induction technique for the assessment of soil compaction [J]. American Journal of Agricultural & Biological Science, 2012, 7(4):425-434.
- 13 白丽珍,朱惠斌,孔祥莹. 土壤压实度测量系统研究进展[J]. 安徽农业科学,2014,35:12494-12496,12521.  
BAI Lizhen, ZHU Huibin, KONG Xiangying. Research progress of soil compaction measurement system[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014,35:12494-12496,12521. (in Chinese)
- 14 王萍. 探地雷达检测土壤紧实性的实验研究和信号反演[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2010.  
WANG Ping. The experimental study and signal inversion of ground penetrating radar for soil compaction detection[D]. Beijing: China University of Mining & Technology (Beijing),2010. (in Chinese)
- 15 孟繁佳,马道坤,孙宇瑞. 滚珠丝杠传动的土壤圆锥指数仪设计[J]. 农业机械学报,2009,40(5):52-55.  
MENG Fanjia, MA Daokun, SUN Yurui. Soil cone penetrometer with ball screw transmission[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(5):52-55. (in Chinese)
- 16 ASAE S313.3 FEB04. Soil cone penetrometer[S]. 1998.
- 17 GOUTAL N, KELLER T, DÉFOSSEZ P, et al. Soil compaction due to heavy forest traffic: measurements and simulations using an analytical soil compaction model[J]. Annals of Forest Science, 2013, 70(5):545-556.
- 18 洪添胜, BILLOT J F, MARIONNEAU A. 应用自动圆锥仪对土壤压实的试验研究[J]. 华南农业大学学报,1996,17(3):7-11.  
HONG Tiansheng, BILLOT J F, MARIONNEAU A. Experiments and studies on soil compaction with an automatic penetrometer [J]. Journal of South China Agricultural University, 1996,17(3):7-11. (in Chinese)
- 19 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)
- 20 徐科军. 传感器动态特性的实用研究方法[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1999.