

基于嵌入式力学传感器的圆锥指数仪设计与试验*

孟繁佳¹ 孙宇瑞¹ 王聪颖¹ 林剑辉²

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为消除在测量过程中因圆锥杆受被测材料摩擦力所产生的测量误差,改进了圆锥指数仪设计,将微型力学传感器嵌入到圆锥杆下端,实现了对土壤和青贮玉米饲料压实度的精确测量。试验结果表明,测量2种土壤压实度过程中,原有圆锥指数测量方法因圆锥杆受摩擦力作用所产生的测量误差可忽略不计。而在青贮玉米饲料压实度测量过程中,2种不同紧实度样本中圆锥杆受摩擦力约占压力传感器测量值32.56%和34.05%,当圆锥头不受阻力时,嵌入式力学传感器测量值为零,而压力传感器测量值约为110 N和280 N,表明原有测量结果存在较大误差。

关键词: 圆锥指数仪 土壤 青贮饲料 压实度 嵌入式力学传感器

中图分类号: S237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)01-0080-05

Design and Experiment on Improved Cone Penetrometer with Embedded Force Sensor

Meng Fanjia¹ Sun Yurui¹ Wang Congying¹ Lin Jianhui²

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: With the aim to preclude the effect of penetration friction component (PFC) between the penetration shaft and surrounding material during a penetration process, an improved cone penetrometer with a mini force transducer embedded in the cone tip was developed. This kind of cone penetrometer could measure the density of soil and silage correctly. The results showed that the effect of PFC could be negligible in the two kinds of soil samples. But during the density measurement of the two different density chopped maize samples, PFC accounted for 32.56% and 34.05% respectively in the measurement value of force sensor. When there was no resistance on the cone, the measurement value of embedded force sensor was zero, whereas the measurement value of force sensor were about 110 N and 280 N. Appreciable error was found in the original test results for chopped maize.

Key words: Cone penetrometer Soil Silage Density Embedded force sensor

引言

圆锥指数仪是一种常用的测量土壤压实度的仪器^[1],土壤压实度与种子发芽破土率、根系发育情况及产量密切相关^[2-3]。近年来,圆锥指数仪被应用于青贮饲料压实度测量领域^[4-5],由于青贮饲料的生产过程是在厌氧环境下进行的,青贮饲料压实度直接影响饲料品质,因此精细测定青贮饲料的压

实度分布对指导青贮饲料精细加工、提高饲料品质具有重大意义^[6-8]。

由圆锥指数仪测量得到的参数为圆锥指数(Cone index, CI),定义为圆锥探头插入被测物所受的阻力与圆锥上端截面积之比。目前国际上圆锥指数仪的设计大都采用“二力杆”结构^[2,9-10],即在圆锥杆上端安装压力传感器,在圆锥贯入被测材料过程中,将锥尖所受阻力传递到位于锥杆另一端的压

收稿日期: 2011-12-21 修回日期: 2012-01-29

* 国家自然科学基金资助项目(30971696)和国家国际科技合作项目(2010DFA34670)

作者简介: 孟繁佳,博士生,主要从事土壤和青贮饲料压实度精细测量方法研究,E-mail: mengfanjia@126.com

通讯作者: 孙宇瑞,教授,博士生导师,主要从事土壤物理特性测量理论与方法研究,E-mail: pal@cau.edu.cn

力传感器。为了消除由尺寸、操作速度等差异所引起的测量误差,美国农业与生物工程师协会(ASABE)制定了圆锥指数仪设计和操作标准^[11-12],其中规定,要保证圆锥以恒定速度(30 mm/s)贯入土壤,圆锥头底面直径规定为 12.83 mm,大于锥杆直径 9.53 mm,用于消除锥杆在贯入土壤过程中所受到的摩擦力。

尽管如此,由于土壤是复杂的弹-塑性多孔介质,一些学者认为锥杆与被测材料之间的摩擦力仍然存在,即安装在圆锥杆上端的压力传感器所获取的圆锥阻力是锥尖所受阻力和锥杆受被测材料摩擦力的叠加,而锥杆与被测量材料之间的摩擦力影响了圆锥阻力的测量精度。为了精确测量土壤圆锥指数,Armbruster 等^[13]和 Adams 等^[14-15]改进了圆锥指数仪设计。但所得出的结论相差较大,前者的研究表明安装在锥杆上端的压力传感器因锥杆受土壤摩擦力产生的测量误差高达 40%,而后者的研究表明圆锥头后端的压电式力学传感器和锥杆上端的压力传感器输出近似相同,误差范围为 $\pm 3%$ 。对于青贮饲料压实度测量,Buescher 等提出了一种应用圆锥指数仪测量青贮裹包饲料压实度的方法^[5],但在饲料压实度测量过程中,对测量得到的圆锥阻力值是否受锥杆摩擦力影响未作深入研究。

针对压电式力学传感器精度较低的缺点,本文采用应变原理并参照 ASABE 标准设计一种圆锥指数仪,用于精确测量土壤和青贮饲料的压实度,并对原有测量方法中锥杆所受摩擦力对圆锥指数测量精度的影响进行试验。

1 仪器原理与设计

1.1 嵌入式力学传感器结构与测量原理

嵌入式力学传感器结构示意图如图 1 所示,由圆锥杆、弹性体、圆锥头、铂电阻应变片和导线 5 部分组成。传感器几何尺寸严格按照 ASABE 标准设计,圆锥杆外径 9.53 mm,圆锥头底面直径 12.83 mm,圆锥角 30° 。弹性体呈圆柱形,材料选用 17-4PH 型不锈钢,其上下端均以螺纹形式分别与圆锥杆和锥头相连接。为了提高传感器的灵敏度和稳定性,选用 8 片基值为 350Ω 的铂电阻应变片,分为上、下两组,每组 4 片,分别按横向和竖向均匀粘贴于圆柱形弹性体四周(图 1),应变片尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 。在弹性体上端均匀分布有 4 个导线孔,圆锥杆中的导线可通过导线孔与各应变片相连接。

惠斯通电桥的 4 个桥臂电阻分别由上、下两片应变片串联组成,使得每个桥臂电阻达到 700Ω ,有效降低了传感器的功耗。具体电桥线路如图 2 所

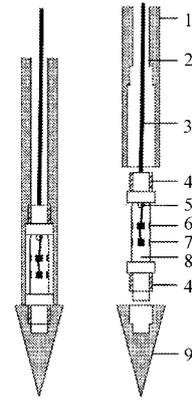


图 1 传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of structure of sensor

1. 圆锥杆 2. 通孔 3. 导线 4. 螺纹 5. 导线孔 6. 横向粘贴应变片 7. 纵向粘贴应变片 8. 弹性体 9. 圆锥头

示,当弹性体受压产生形变时,桥臂电阻也随之发生变化,电桥输出电压信号 U_0 计算公式为

$$U_0 = \frac{(R_1 + R_2)(R_5 + R_6) - (R_3 + R_4)(R_7 + R_8)}{(R_1 + R_2 + R_3 + R_4)(R_5 + R_6 + R_7 + R_8)} U$$

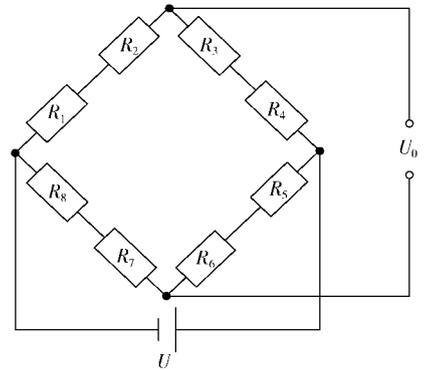


图 2 惠斯通电桥

Fig. 2 Wheatstone bridge

1.2 圆锥指数仪系统设计

圆锥指数仪采用齿轮齿条传动原理,结构如图 3 所示^[10]。依照 ASABE 标准,直流电动机以恒

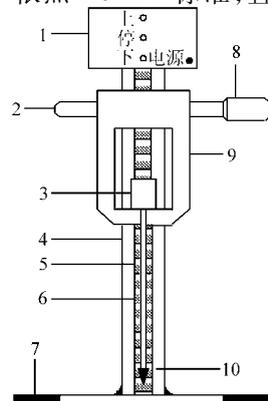


图 3 圆锥指数仪结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of penetrometer

1. 控制箱 2. 行进深度传感器 3. 压力传感器 4. 导轨 5. 圆锥杆 6. 齿条 7. 底座 8. 直流电动机 9. 滑块 10. 嵌入式力学传感器

定速度 30 mm/s 驱动滑块沿导轨上下移动。在嵌入式力学传感器圆锥杆上端安装有 HBM-C9 型压力传感器(量程 0~1 000 N,精度 $\pm 0.05\%$),当滑块向下滑动锥头受到阻力时,设备可同步实时获取两力学传感器信息。

测量与控制系统由数据采集与控制模块、传感器、直流电动机、PDA 和电池 5 部分组成,硬件框图如图 4 所示。数据采集与控制模块由 MSP430 单片机、控制电路、放大电路组成,负责接收 PDA 指令,并根据指令控制电动机的运转和采集多路传感器的信号,并实时传输到 PDA 进行存储。

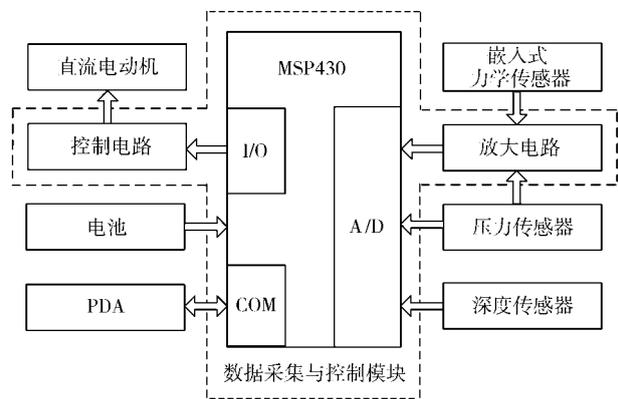


图 4 测量与控制系统框图

Fig. 4 Layout of control system

2 试验结果与分析

2.1 力学传感器标定试验

力学标定试验系统如图 5 所示,由圆锥指数仪、支架、压力弹簧筒、TCS-300 型数字电子秤组成。其中数字电子秤提供力参数测量基准,测量范围 0~300 kg,分辨率 0.05 kg,满量程测量精度为 $\pm 1\%$ 。圆锥指数仪放置于支架上,仪器底座用螺栓与支架上表面固定,压力弹簧安装在一个内径 50 mm、长

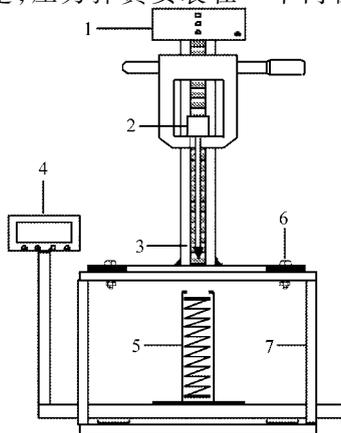


图 5 力学标定试验系统示意图

Fig. 5 Layout of calibration system for mechanics

1. 圆锥指数仪
2. 压力传感器
3. 嵌入式力学传感器
4. 数字电子秤
5. 压力弹簧
6. 锁紧螺栓
7. 支架

400 mm 的套筒内。同时记录压力传感器和嵌入式力学传感器输出信号与数字电子秤输出值,即可得到两传感器标定曲线(图 6)。图 6 为 0~1 000 N 范围内两传感器的标定结果,它表明二者输入-输出特性均呈严格的线性关系。

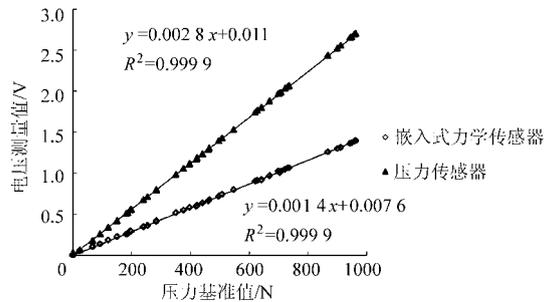


图 6 力学传感器标定结果

Fig. 6 Calibration result of force sensors

进一步对两传感器进行动态标定试验,电动机驱动圆锥以恒定速度贯入弹簧筒,圆锥指数仪同步实时采集两力学传感器信息。两传感器 1:1 动态标定结果如图 7 所示, $R^2 = 0.9996$,RMSE 为 3.2414,二者呈严格的线性相关关系,斜率为 1.0025,表明对于被测物压力弹簧,嵌入式力学传感器与压力传感器具有相同的测量结果。

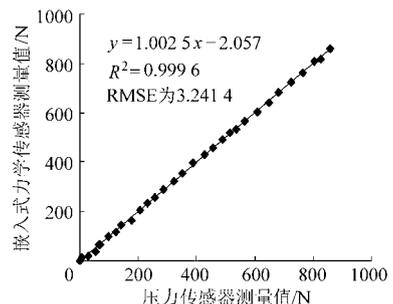


图 7 两传感器动态标定结果

Fig. 7 Dynamic calibration results of two sensors

2.2 对不同材料压实度的测量结果分析

为了实际检验嵌入式力学传感器性能,评价原有测量方法中锥杆所受摩擦力对圆锥阻力测量精度的影响,应用改进的圆锥指数仪对不同材料的压实度进行测量,并将嵌入式力学传感器与安装在圆锥杆上端的压力传感器测量结果进行对比,分别选用沙土、壤土和青贮玉米饲料作为试验材料,试验样本参数见表 1。试验系统如图 8 所示,圆柱桶高 500 mm,底面直径 200 mm,在其上顶盖和底面中心均有一圆形通孔。在装填材料前,在圆桶内底部放置一张塑料薄膜,防止在装填材料过程中,物料从下底面中心通孔遗漏。然后将材料均匀压入 PVC 圆柱桶中,电动机驱动圆锥以恒定速度从圆桶上顶盖中心贯入并从底面中心穿出,圆锥指数仪测量与控制系统同步实时获取两力学传感器信息。

表 1 试验样本参数

Tab.1 Information of samples

样本序号	材料	容重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	含水率/%
1	沙土	1.53	5.35
2	壤土	1.54	5.14
3	青贮玉米饲料 1	0.24	63.43
4	青贮玉米饲料 2	0.70	63.43

试验结果如图 9 所示,在圆锥贯入过程中嵌入式力学传感器与安装于圆锥杆上端的压力传感器测量结果非常相似,当圆锥从圆柱桶下底面穿出时,两传感器测量值均接近于零。测量结果相关分析表明(图 10),在沙土和壤土中,两力学传感器测量结果决定系数 R^2 分别为 0.978 7 和 0.989 2,斜率分别为 1.010 5 和 0.999 4,两力学传感器测量结果一致。这表明沙土和壤土可视为塑性材料,当圆锥贯入时使得沙土和壤土产生塑性形变,由于圆锥头底面直径为 12.83 mm,大于锥杆直径(9.53 mm),因此压力传感器测量得到的圆锥阻力中锥杆所受摩擦力影响很小,可忽略不计。

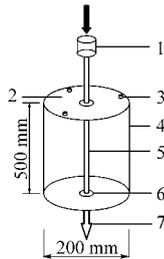


图 8 试验系统示意图

Fig. 8 Layout of experiment system

1. 压力传感器 2. 上顶盖
3. 螺栓 4. PVC 圆柱桶
5. 圆锥杆 6. 通孔 7. 嵌入式力学传感器

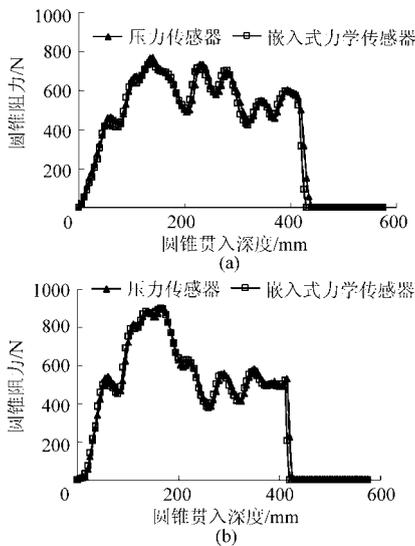


图 9 在沙土与壤土样本中两力学传感器测量结果
Fig. 9 Results of experiments in sand and loam samples

(a) 样本 1 (b) 样本 2

图 11a 为圆锥贯入青贮玉米饲料中两传感器测量结果,从图中可以看出,在圆锥贯入饲料初始阶段两传感器测量结果相同,但随着圆锥贯入深度的增加,圆锥杆受饲料摩擦力作用面积逐渐增大,安装于

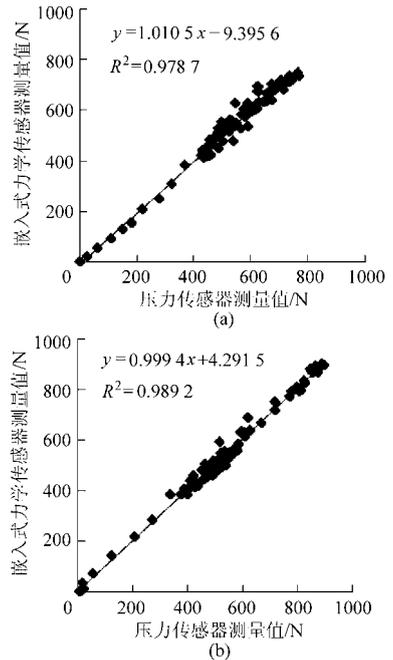


图 10 在沙土与壤土样本中两力学传感器测量结果相关分析

Fig. 10 Correlation analysis of results of experiments in sand and loam

(a) 样本 1 (b) 样本 2

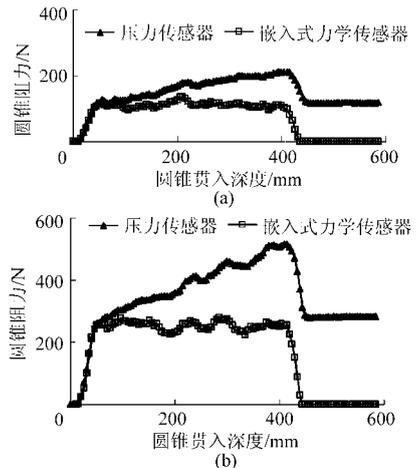


图 11 在青贮玉米饲料样本中两力学传感器测量结果

Fig. 11 Results of experiments in silage samples

(a) 样本 3 (b) 样本 4

圆锥杆上端的压力传感器测量值逐渐大于嵌入式力学传感器测量值。当圆锥从圆柱桶底面穿出后,圆锥头不再受到阻力,嵌入式力学传感器测量值为零,而压力传感器测量值稳定于 110 N 左右,此时压力传感器测量值即为圆锥杆所受饲料摩擦力值。增大圆柱桶中饲料的密度,如图 11b 所示,嵌入式力学传感器与压力传感器测量值均明显增加,而压力传感器测量结果中圆锥杆所受摩擦力也随之增大,当嵌入式力学传感器测量值为零时,压力传感器测量值稳定于 280 N 左右。

从表 2 的统计结果可以看出两力学传感器测量

表2 青贮玉米饲料样本测量结果统计分析

Tab.2 Statistical results of chopped maize samples

样本 序号	材料	压力传感器测量	嵌入式力学传感器	锥杆所受摩擦力	锥杆所受摩擦力平均值占
		平均值/N	测量平均值/N	平均值/N	传感器测量平均值百分比/%
3	青贮玉米饲料1	156.05	105.25	50.80	32.56
4	青贮玉米饲料2	361.39	238.34	123.05	34.05

平均值差异较大,两者之差即为锥杆所受饲料摩擦力的平均值。该值占压力传感器测量平均值的百分比分别为32.56%和34.05%,表明青贮玉米饲料可被视为弹性材料,当圆锥贯入时饲料仅发生弹性形变,因此圆锥杆受饲料摩擦力影响显著。

3 结论

(1)设计了一种新型圆锥指数仪,将微型力学传感器嵌入到圆锥杆下端,圆锥几何尺寸严格按照ASABE标准设计。标定试验结果表明,设计的嵌入式力学传感器结构设计合理,具有良好的性能指标。

(2)对不同材料压实度进行实际测量结果表

明,在沙土和壤土中,嵌入式力学传感器和安装在圆锥杆上端的压力传感器测量结果相同,证明了圆锥指数仪在测量土壤压实度过程中,圆锥杆所受土壤摩擦力作用可忽略不计。而在青贮玉米饲料压实度测量中,圆锥杆受到饲料摩擦力影响显著,使得安装在圆锥杆上端的压力传感器获取的饲料圆锥阻力值存在较大误差。

(3)设计的新型圆锥指数仪可消除锥杆所受摩擦力的影响,精确获取土壤和饲料压实度信息,为拓展圆锥指数仪应用领域,对不同复杂弹-塑性材料压实度测量提供了更为精确的测量手段。

参 考 文 献

- Perumpral J V. Cone penetrometer application: a review [J]. Transaction of ASAE, 1987, 30(4): 946~952.
- Sun Yurui, Schulze Lammers P, Ma Daokung. Evaluation of a combined penetrometer for simultaneous measurement of penetration resistance and soil water content[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2004, 167(6): 745~751.
- Sun Yurui, Ma Daokung, Schulze Lammers P, et al. On-the-go measurement of soil water content and mechanical resistance by a combined horizontal penetrometer[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 86(2): 209~217.
- Fuerll C, Schemel H, Koeppen D. Principles for measuring density in silages[J]. Landtechnik, 2008, 63(2): 94~95.
- Sun Y, Buescher W, Lin J, et al. An improved penetrometer technique for determining bale density[J]. Biosystem Engineering, 2010, 105(2): 273~277.
- Muck R E, Savoie P, Holme B J S. Laboratory assessment of bunker silo density, part I: alfalfa and grass [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2004, 20(2): 157~164.
- Savoie P, Muck R E, Holmes B J. Laboratory assessment of bunker silo density, part II: whole-plant corn [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2004, 20(2): 165~171.
- Amours L D, Savoie P. Density profile of corn silage in bunker silos[J]. Canadian Biosystems Engineering, 2005, 47: 221~228.
- 孟繁佳,马道坤,孙宇瑞. 滚珠丝杠传动的土壤圆锥指数设计[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)
- 曾庆猛,孙宇瑞,马道坤. 应用电流法测量土壤圆锥指数[J]. 农业机械学报, 2006, 37(9): 61~63.
Zeng Qingmeng, Sun Yurui, Ma Daokun. Measurement of soil cone index using current method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(9): 61~63. (in Chinese)
- ASAE S313.3. Soil cone penetrometer[S]. 1999.
- ASAE EP542. Procedures for using and reporting data obtained with the soil cone penetrometer[S]. 1999.
- Armbruster K, Hertwig A, Kutzbach H D. An improved design of cone penetrometer[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1990, 46: 219~222.
- Adams B A, Topp G C. Frictional component of soil cone penetration resistance[J]. ASAE Paper, 98-1063.
- Adams B A, St-Amour G, Topp G C. Evaluation of a piezoelectric load cell for use on cone penetrometers[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2000, 76(2): 205~210.
- 李艳洁,刘翼晨,林剑辉,等. 圆锥指数仪贯入沙土过程的三维离散元法模拟[J]. 农业机械学报, 2012, 43(7): 63~68.
Li Yanjie, Liu Yichen, Lin Jianhui, et al. 3D DEM simulations of the cone penetration tests in sandy soil [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7): 63~68. (in Chinese)