

利用边缘电场的电容式谷物水分传感器的研究

杨柳^{1,2} 杨明皓² 刘嫣红¹

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

摘要 研制一种利用边缘电场的新型谷物水分传感器。利用主动屏蔽极板从敏感区域聚集电场,以减小杂散电容对传感器测量精度的影响,从而提高了传感器的灵敏度。采用 2 MHz 左右的振荡器作为测量电路,通过测量振荡器的频率测量被动极板与测量极板之间谷物的介电常数,从而得到谷物的含水率。有限元法分析表明,主动屏蔽极板的采用提高了传感器测量精度和灵敏度。现场及实验室实验结果表明:传感器测量含水率的误差为 $\pm 1\%$; 测量温度范围 0~80℃; 传感器安装方便,不需要对干燥机进行较大的结构调整。

关键词 边缘电场; 电容测量; 谷物水分; 有限元法; 传感器

中图分类号 TN 219; TN 929.1

文章编号 1007-4333(2007)02-0058-04

文献标识码 A

Measurement of grain moisture with a coplanar electrode capacitance probe

Yang Liu^{1,2}, Yang Minghao¹, Liu Yanhong²

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract A fringe field capacitance probe that could work on hostile environments was used to measure the grain moisture. An active shield electrode can block the electric field out of the sense area, decrease the stray capacitance of the sensor and increase the sensitivity of the sensor. Finite element method was used to analyze the effect of the active shield electrode. The measuring principle is based on an oscillator working at approximately 2 MHz. The dielectric property of the grain between driven electrode and sensing electrode affects the frequency of the oscillator. According to the measuring experiment, a sensor was designed with errors within $\pm 1\%$ and working temperature range of 0 - 80℃.

Key words fringe field; capacitance measurement; grain moisture; finite element method; measurement

谷物干燥中含水率的测量结果直接影响干燥系统的控制精度。现有的谷物水分检测装置离线工作时精度较高,可靠性好,但不宜安装到工业现场,不能对谷物水分在线测量。目前,我国生产的大部分谷物干燥机还没有高质量的水分在线检测装置,烘后谷物过干或未达安全水分的情况相当普遍,既可靠又安装方便的在线谷物水分传感器已成为市场急需。

在线水分测量均为间接法,通过测量与水分相关的物性参数的变化,尤其是电特性的改变而获得谷物含水量的度量。谷物水分的间接测量方法主要

有电阻法、电容法、微波法、中子法、核磁共振法以及红外线法、声学方法等。电容法是根据不同含水量的谷物,其介电常数不同的原理来检测谷物水分的^[1]。对于平行极板电容器(图 1),电容 C 与介质介电常数 ϵ 、极板的相对面积 S 、两极板间的距离 d 等有关,当 S 和 d 为恒值时,有 $C = f(\epsilon)$ 。不同含水率的谷物,其介电常数不同。电容式水分传感器通过谷物电特性测定谷物含水率,是一种变介电常数的电容传感器^[2]。其优点是结构相对简单、价格便宜,测量速度快,可满足在线水分测量的即时性要

收稿日期: 2006-10-07

作者简介: 杨柳,副教授,主要从事农产品检测及自动控制研究, E-mail: apple_name@163.com; 杨明皓,教授,博士生导师,通讯作者,主要从事农业电气化研究, E-mail: mhyang@cau.edu.cn

求,但目前国内在线式电容传感器探头多为圆筒型和平行极板型^[3],这两种型式的传感器均需谷物从探头中间流过,传感器探头安装困难,需要把传感器探头嵌入干燥机谷物通道中,或者在干燥机上加装取样装置,这都会增加干燥设备的体积和投资。笔者拟研究一种利用边缘电场的新型电容水分传感器以克服上述安装困难,提高谷物在线测量精度。

1 基于边缘电场的电容水分传感器原理

与普通的平行极板电容传感器相比较,基于边缘电场的电容水分传感器(图 1)相当于把平行极板电容传感器的两块极板放在同一平面,谷物只在传感器探头的一侧,由其电力线分布看,是一种电场泄

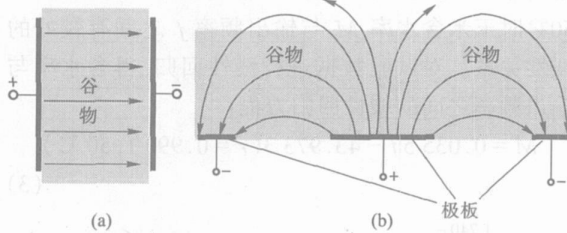


图 1 平行极板传感器(a)和边缘电场传感器(b)
Fig. 1 Parallel plate capacitor (a) and coplanar electrode capacitor (b)

漏型传感器^[4],其电力线分布是不平行的,穿透谷物的电场也呈不均匀分布,但和平行极板电容传感器一样,当谷物水分变化时,由于介电常数发生变化,穿透谷物的电场也发生变化,从而极板间电容发生改变,通过测量极板间电容,可间接测量谷物水分含量。这种传感器的优点是,谷物只在极板的一边,传感器探头在谷物干燥装置上安装十分方便;但采用这种探头的传感器在极板的另一边也有较强的电场存在,该电场受周围环境影响使得电场强度发生变化,从而使极板间电容值发生变化,影响谷物水分

测量精度。为克服上述缺陷,新研制的传感器(图 1 (b))在极板的另一边加上一块和正电位极板等电位的主动屏蔽极板,可消除周围环境对水分测量的影响,并提高测量灵敏度。

2 主动屏蔽探头周围电场分布

分析主动屏蔽极板对边缘电场谷物水分传感器的影响,就是要分析施加在主动屏蔽极板前后传感器探头周围的电场分布;由于平行极板电容器在忽略电场边缘效应后,电场分布计算非常简单,可用解析法求解;而边缘电场水分传感器电场分布较复杂,很难用解析法求解。一般电容传感器电场可看作准静电场,用忽略电磁感应效应的麦克斯韦方程组描述^[5]

$$\begin{cases} \nabla \times E = 0 \\ \nabla \cdot D = \rho \end{cases} \quad (1)$$

式中: E 为电场强度; D 为电位移向量, $D = \epsilon E$, 其中 ϵ 为介电常数; ρ 为电荷密度。引入标量电位 ϕ , 令 $E = -\nabla\phi$, 方程(1)变为泊松方程

$$\nabla^2 \phi = -\rho / \epsilon \quad (2)$$

对于边界条件和几何特征复杂的情形,方程(2)可用有限元法求解,并根据 $E = -\nabla\phi$ 求得电场强度在空间的分布。

本研究利用 Ansoft 公司的电磁场有限元分析软件 Maxwell^[6]求解边缘电场谷物水分传感器探头电场的空间分布,得到的等电位线见图 2。在图 2 的 2 个模型中,基板由聚酰胺制成,其相对介电常数为 4.3;谷物相对介电常数为 3.2^[7],作用于电容极板的电压分别为,驱动极板 5 V,接地板 0 V,屏蔽板电压为 5 V。

非屏蔽探头在空气侧电场分布较强,易受周围环境影响,加上主动屏蔽极板后,由于屏蔽板和驱动极板等电位,它们间的场强为 0,所以空气侧电场分

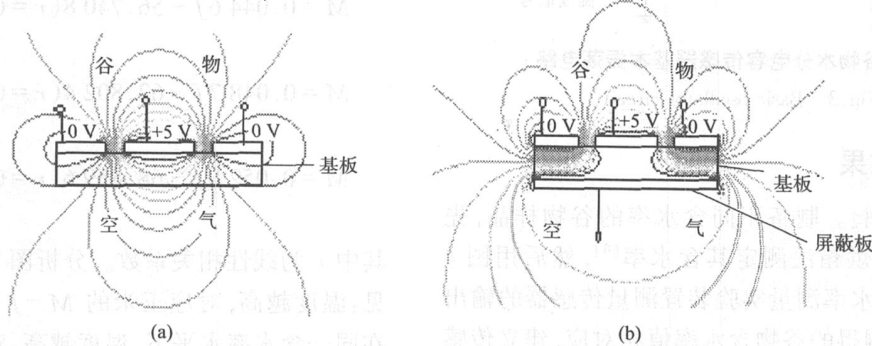


图 2 非屏蔽探头(a)和主动屏蔽探头(b)的电场分布

Fig. 2 Electric field of un-shield sensor (a) and active shield sensor (b)

布较弱,减少了周围环境对测量结果的影响。虽然屏蔽板和 0 V 极板间电场较强,但据叠加原理,屏蔽板对驱动板和接地板间的电容值无影响时,驱动板和接地板间的电力线受屏蔽板上电场的挤压,向谷物侧聚集,所以两者在驱动板电压相同时,主动屏蔽探头在谷物侧电场强度比非屏蔽探头的电场强,则主动屏蔽探头的灵敏度比非屏蔽探头高。

3 电容传感器电路的设计

电容的测量方法主要有电桥法、谐振回路法、充放电法等^[2]。本研究使用图 3 所示的基本 LC 振荡电路测量传感器的电容值,振荡器振荡频率约 2 MHz。影响谷物介电常数的因素主要有谷物品种、含水率和温度。当流过传感器探头的谷物的含水率改变时,其介电常数改变^[8],驱动极板和接地极板间的电容发生改变,振荡器输出频率也发生变化,则测量振荡器的输出频率就可间接得到所测谷物含水率^[4]。由图 3 可见,驱动极板与屏蔽极板通过电压跟随器相连,既保证了屏蔽极板和驱动极板电位始终相同,又避免了屏蔽极板对驱动极板的影响。考虑到温度对测量结果的影响,图 3 中设有测温电路,输出频率和温度信号都送入单片机,通过数据处理的软件补偿消除谷物品种、谷物温度对其含水率测量的影响,从而得到较精确的测量结果。作为在线水分传感器,该测量结果可通过单片机的串行口传送到干燥机的控制器,作为干燥控制的依据。

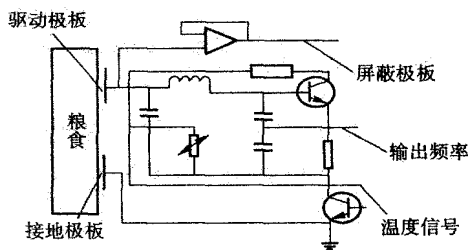


图 3 谷物水分电容传感器基本振荡电路

Fig. 3 Basic oscillator circuit

4 试验及结果

1) 测试试验。制备不同含水率的谷物样品,先用 105 标准烘箱法测定其含水率^[9],然后用图 4 所示的谷物含水率测量实验装置测量传感器的输出频率值,与所测得的谷物含水率值相对应,建立传感器输出频率与谷物含水率的对应关系模型。

以玉米为例,不同温度下玉米含水率与传感器



1. 取样装置; 2. 二次侧系统; 3. 电容式水分传感器; 4. 无级变速器; 5. 单相电机

图 4 谷物含水率测量实验装置图

Fig. 4 Device for grain moisture measurement

输出频率的关系见图 5。可见,20、25、30、40 和 50 时玉米含水率 M 与输出频率 f 之间有较好的线性关系。对试验数据进行线性回归,得含水率与输出频率之间的线性回归方程:

$$M = 0.0355f - 43.9733 (r = 0.9901, 50) \quad (3)$$

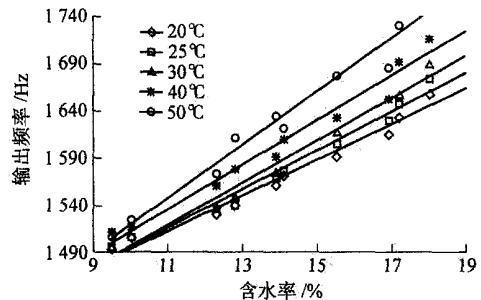


图 5 不同温度下玉米含水率与传感器输出频率的关系

Fig. 5 Relationship between frequency and corn moisture in different temperatures

$$M = 0.0412f - 52.1372 (r = 0.9880, 40) \quad (4)$$

$$M = 0.0446f - 56.7408 (r = 0.9889, 30) \quad (5)$$

$$M = 0.0487f - 62.8024 (r = 0.9911, 25) \quad (6)$$

$$M = 0.0528f - 68.8596 (r = 0.9916, 20) \quad (7)$$

其中 r 为线性相关系数。分析图 7 及式(3)~(7)可见:温度越高,对应玉米的 $M-f$ 方程的斜率越小;在同一含水率水平下,温度越高,对应的传感器输出频率值越大,温度对传感器输出频率的影响也越大。

2) 试验验证。利用式(3)~(7)在软件中实现对

谷物的温度补偿。以玉米作为谷物样本,表 1 示出多次重复试验不同温度下的玉米含水率。通过测量

数据可看出,所设计的传感器在谷物含水率小于 20 %时,其测量误差可控制在 $\pm 1.0\%$ 之内。

表 1 边缘电场谷物水分传感器多次重复测得的玉米含水率

Table 1 Repeatedly measuring data of corn moisture measured by fringe field grain moisture measurement %

项 目	测量次数										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
15 测量值	9.7	10.1	11.2	12.7	13.1	13.6	14.3	15.2	15.7	18.2	19.6
25 测量值	9.8	10.3	11.4	12.9	13.4	13.7	14.6	15.5	16.2	17.5	19.8
50 测量值	10.0	10.6	11.7	13.0	13.8	14.0	15	15.8	15.5	17.3	19.1
标准值	9.6	10.2	11.4	12.8	13.4	13.8	14.5	15.3	16.0	18.0	20.0
最大测量误差	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4	0.2	0.5	0.5	- 0.5	- 0.7	- 0.9

5 结束语

所设计的边缘电场谷物水分传感器是一种电场泄漏型传感器,由于谷物只在传感器探头的一边流动,因而传感器在干燥设备上的安装非常方便,便于在线测量。主动屏蔽极板的引入,减少了环境因素对测量结果的影响,提高了传感器的灵敏度。实验室测试结果及工业现场实际测量结果表明,该传感器有较高的测量精度,传感器测量含水率的误差为 $\pm 1\%$,测量温度范围 $0 \sim 80$,完全满足目前国内外谷物干燥系统的控制精度和对环境温度的要求。

参 考 文 献

[1] Stuardo, Nelson. Measurement and applications of dielectric properties of agricultural products[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1992, 41(1): 116-121

[2] Larry B. Capacitive sensors design and applications[M]. New York: IEEE Press, 1997

[3] 程卫东, 柏雪原. 干燥过程中谷物水分在线测量系统[J]. 农业机械学报, 2000, 31(2): 53-55

[4] Nelson S O. Dielectric properties of grain and seed in the 1 to 50 mc range[J]. Trans ASAE, 1965, 8(1): 38-48

[5] John A, Buck. 工程电磁场[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002

[6] Heerens W C. Application of capacitance techniques in sensor design[J]. Phys E Sci Instrum, 1986(19): 27-29

[7] Brooker D B. Drying and storage of grains and oilseeds [M]. New York: Van Nostrand Reinhold Press, 1992

[8] Kishore S. Moisture measurement in paper pulp using fringing field dielectrometry[D]. Washington: University of Washington, 2003

[9] Peter P. Finite elements for electrical engineers [M]. London: Cambridge University Press, 1996