

基于电容法的棉管籽棉质量流量检测*

周利明¹ 李树君² 张小超² 王书茂¹ 苑严伟² 董鑫²

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要: 针对传统平行板电容传感器易受环境干扰,设计了一种差分结构的电容传感器,以实现籽棉质量流量检测。研究了环境温度和棉花品种对传感器电容信号响应的影响,并在不同含水率条件下,确定了籽棉质量流量与电容响应关系,建立了基于籽棉含水率、籽棉质量流量与相对电容变化率的拟合回归模型,并对模型进行验证。试验结果表明:差分结构电容传感器能很好地消除环境温度干扰,所建立的回归模型针对籽棉质量流量检测的平均相对误差为 5.16%。

关键词: 籽棉 质量流量 电容传感器 含水率 差分结构

中图分类号: S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)06-0047-06

引言

目前机采棉作业正在逐步取代传统的人工采摘,鉴于棉花自身特点,采棉机械和棉花加工机械普遍采用管道气力输送籽棉^[1-3],这就决定了进行在线籽棉质量流量检测必须采用非接触式测量形式。目前,光学法^[4-9]是国内外研究普遍采用的测量方法,其基本原理是通过测量光线在经过棉花后的透射(或反射)衰减量,建立光强衰减量与物料质量模型,从而得到籽棉质量流量信息。鉴于其特点,这种方法易受环境温度、散射光线、落叶及器件表面覆土^[10-11]等影响,从而降低监测精度。一些学者已开展了其他原理的籽棉质量流量监测方法研究,如管路压差法^[12-13]、微波法^[14-15]等,但这些方法仍限于室内研究。

本文提出一种基于电容检测的籽棉质量流量测量方法,并设计基于差分电容结构的质量流量检测装置。以机采籽棉为试验对象,研究环境温度及棉花品种对电容信号响应的影响,建立电容响应与籽棉含水率、籽棉质量流量的关系模型,并对模型预测精度进行检验。

1 测量原理与装置

1.1 籽棉质量流量的电容转换

籽棉在通过电容传感器时,由于极板间物质介

电常数发生变化,传感器输出电容将发生变化。此时传感器的电容结构模型^[16]可近似为图 1 所示。

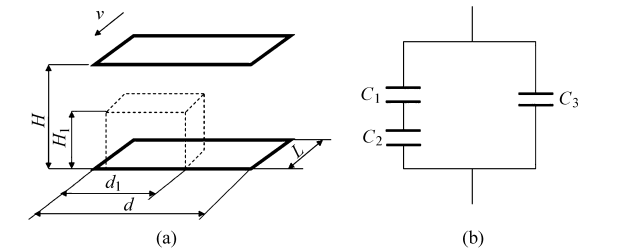


图 1 电容传感器内物料分布
Fig. 1 Material distribution in capacitive sensor
(a) 等效物料层分布 (b) 等效电容模型

假设物料厚度为常数,则传感器内物料质量流量的变化可等效为截面长度变化。整体电容模型可等效为图 1b,其中

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{r(\text{air})} d_1 L}{H - H_1} \tag{1}$$

$$C_2 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{r(\text{seedcotton})} d_1 L}{H_1} \tag{2}$$

$$C_3 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{r(\text{air})} (d - d_1) L}{H} \tag{3}$$

式中 H_1 ——物料层高度, m
 H ——电容极板间距, m
 d ——极板宽度, m
 d_1 ——物料层宽度, m
 L ——极板长度, m

收稿日期: 2014-01-20 修回日期: 2014-02-18
* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAF07B04)、国家自然科学基金资助项目(31301241)和北京市科技新星计划资助项目(Z121105002512069)
作者简介: 周利明, 博士生, 主要从事精准农业和测控技术研究, E-mail: haibol129@163.com
通讯作者: 张小超, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业机械自动控制与智能化仪器研究, E-mail: zxc@caams.org.cn

ϵ_0 ——真空介电常数,F/m
 $\epsilon_{r(\text{air})}$ ——空气相对介电常数
 $\epsilon_{r(\text{seedcotton})}$ ——籽棉相对介电常数
整体电容

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} + C_3 \tag{4}$$

另外,传感器内物料质量流量

$$Q = d_1 H_1 v \rho \tag{5}$$

式中 ρ ——籽棉密度,kg/m³
 v ——籽棉运动速度,m/s

将式(1)、(2)、(3)和(5)代入式(4)后得

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r(\text{air})} dL}{H} + \frac{Q \epsilon_0 (\epsilon_{r(\text{seedcotton})} - \epsilon_{r(\text{air})})}{H v \rho (\epsilon_{r(\text{seedcotton})} H - \epsilon_{r(\text{seedcotton})} H_1 + \epsilon_{r(\text{air})} H_1)} = \frac{A + BQ}{A + BQ} \tag{6}$$

由式(6)知,籽棉密度 ρ 、籽棉相对介电常数 $\epsilon_{r(\text{seedcotton})}$ 可以视为常数,则系数 A 、 B 视为常数,从而电容 C 与质量流量 Q 呈线性关系。

1.2 电容传感器设计

考虑到田间作业环境的恶劣性,传统的平行板电容传感器结构极易受到外界干扰,从而影响测量准确性。基于此,设计了差分结构的电容式质量流量传感器,将籽棉质量流量转换为差分电容变化量,通过检测电容变化获得籽棉流量信息。

传感器主要由传感器极板、绝缘支撑体框架、信号调理电路和屏蔽外管等组成。如图 2 所示。

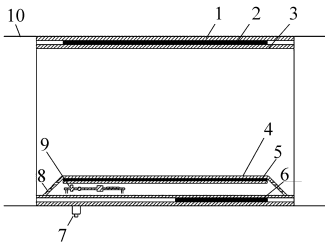


图 2 籽棉质量流量传感器结构

Fig.2 Diagram of seedcotton mass flow sensor

1. 绝缘支撑体外框 2. 电容极板 1 3. 保护板 4. 中间端板
5. 电容极板 2 6. 差分极板 7. 电缆插头 8. 通风孔 9. 信号调理电路 10. 屏蔽机壳

绝缘支撑体框架包括支撑外框和中间端板,由 ABS 材料经 CNC 快速成型法加工得到,为传感器敏感元件提供支撑。加工完的支撑体外框长 450 mm,宽 330 mm,高 180 mm,壁厚 5 mm。中间端板高 20 mm,壁厚 5 mm。传感器极板选择 0.1 mm 厚紫铜带制作,利用 302 胶粘贴于支撑体内侧表面。其中电容极板 1 粘贴于支撑体内侧上表面,电容极板 2 粘贴于中间端板下表面,差分极板 3 粘贴于支撑

外框的内侧下表面。所有传感器极板均需在表面另外粘贴一层厚度为 1 mm 的 ABS 薄板,以保护极板。中间端板将绝缘支撑体分为上下 2 个区域,在端板首末端分别开有两排各 16 个直径为 2 mm 的通孔。工作时,籽棉穿过端板上部由电容极板 1 和 2 组成的测量电容传感器,而部分输送气流则由通孔穿过电容极板 2、差分极板 3 组成的参考电容传感器。由此,即构成差分结构的电容传感器。信号调理电路固定在中间端板下部,通过短导线与传感器极板相连。屏蔽机壳固定于绝缘支架外侧,采用厚度为 1 mm 的镀锌铁板加工而成并接地,以提高测量的稳定性与可靠性。

1.3 电容检测电路设计

电容检测电路是获取高精度电容信号的关键,传统的阻抗式和谐振式检测电路很难实现微弱电容信号的高精度测量。本文采用电容数字转换芯片 AD7746 检测电容,并结合单片机 PIC18F2580 完成数字电容信号采集处理。AD7746 是一款具有 24 位分辨率的高精度电容检测芯片,其检测精度约为 4 fF,量程为 ± 4 pF,最大共模电容 17 pF,AD7746 内部包含 2 路电容通道,同时集成有温度传感器。由于所设计的传感器基础电容较大,为扩展 AD7746 的电容测量范围,设计了基于低阻抗运算放大器 AD8515 的电容输入范围扩展电路。扩展系数为

$$F = \frac{R_1 + R_2}{R_1 - R_2} \tag{7}$$

这里 R_1 与 R_2 均选择金属膜精密电阻,其中 $R_1 = 10$ k Ω , $R_2 = 52.3$ k Ω 。最终扩展后系统测量范围为 (25.037 ± 6.03) pF。扩展电路如图 3 所示。

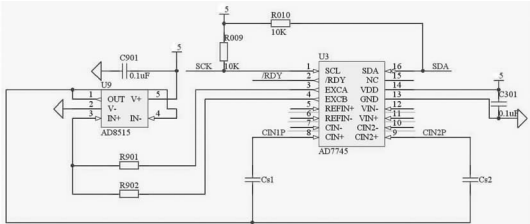


图 3 电容量程扩展电路图

Fig.3 Range extension circuit of capacitive sensor

1.4 数据采集软件

数据采集终端软件采用基于 Labwindows/CVI 的虚拟仪器技术开发完成。主要功能包括通讯参数配置、信号采集与显示、数据曲线图绘制、数据保存与回放等。在数据采集显示过程中采用了多线程与线程安全队列保护技术^[17-18]使系统在保证数据采集连续的同时,实现图形曲线的显示及存储,满足了实时性的要求。采集界面如图 4 所示。

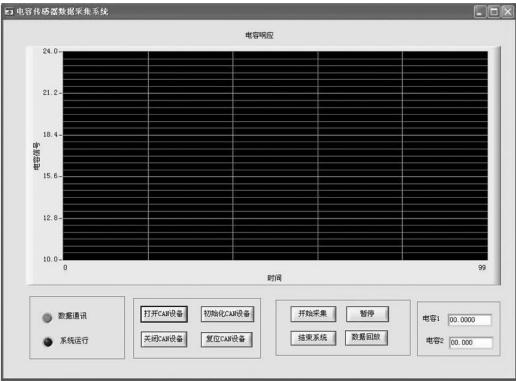


图 4 数据采集软件界面

Fig. 4 Software interface of data acquisition

2 籽棉气流输送试验台

为便于开展室内测试,设计加工的籽棉气流输送试验台架如图 5 所示。试验台主要由胶带输送机、离心风机、进料斗、输棉管、流量测量装置及集料袋等组成。胶带输送机用于喂入籽棉,选用 2 台 DGBL60 型(无锡华盛机电科技有限公司,DC 24 V, 60 W)电滚筒作为胶带动力源,其输送速度可由所附带的 DGBL 型电滚筒控制器进行无级调节。风机选用 CF-2A 型多翼式离心风机(九洲普惠公司, 380 V),转速 2 800 r/min,风量 1 248 ~ 2 258 m³/h,全压 1 150 ~ 839 Pa。风机由交流电动机直接驱动,变频器调节风机转速,使风机转速在 0 ~ 2 800 r/min 可调。电容传感器与输棉管末端相连接,物料经输棉管穿过电容传感器,进入集料袋内。

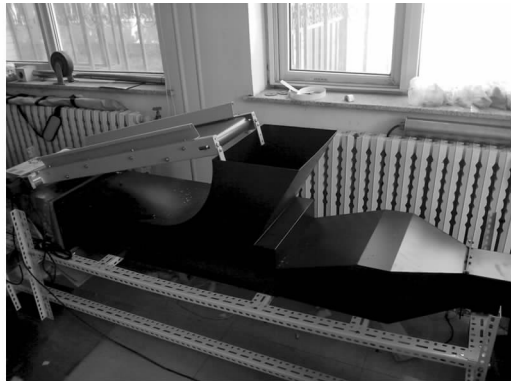


图 5 气流输送试验台架

Fig. 5 Seedcotton pneumatic conveying test-bed

3 试验与数据分析

针对差分电容结构,定义相对电容变化率为

$$\Delta C = \frac{C_1(t) - C_2(t)}{C_2(t)} \times 100\%$$
 (8)

式中 ΔC——相对电容变化率,%
C₁(t)——检测电容,pF
C₂(t)——参考电容,pF

3.1 环境温度对传感器影响

已有研究表明环境温度是影响电容传感器性能的重要因素之一^[19-20]。为了验证所设计的差分传感器对环境温度变化的耐受性,需对传感器进行温度性能试验。

试验方法:将测量装置置于 202FBX-0 型电热干燥箱(上海立树仪器仪表有限公司,±1℃)内,启动测量装置并预热 5 min,待数据稳定后进入测试状态。以 5℃为梯度,自室温(20℃)逐渐调节干燥箱内部温度至 55℃,每次调节完毕,待显示温度稳定 1 min后分别记录此时传感器的电容 C₁、C₂及温度 T,进而得到相对电容变化率与温度变化响应曲线。另用电子天平(SL4001 型,上海民桥电子仪器厂)称取 75 g 籽棉样品(新陆早 43,含水率 5.8%)置入传感器测量区域内,并将测量装置放入干燥箱内,按上述步骤重复进行温度试验,并记录数据。试验结果如图 6 所示。

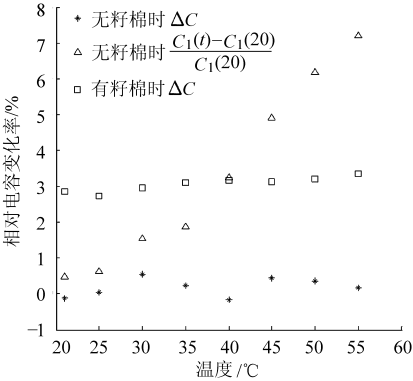


图 6 温度对输出电容的影响

Fig. 6 Effect of output capacitance under different temperature

根据图 6 知,在测量装置内无物料时,随着环境温度升高,传感器检测电容 C₁随之明显增大,在 55℃时,相对于 20℃时的电容已变化超过 7%。采用差分结构后,传感器内无物料时,温度升高,传感器相对电容变化率基本为零且无明显波动。传感器内置入籽棉样品后,随着温度升高,传感器相对电容变化率始终保持在 3%左右。可见采用差分结构,能够有效削弱环境温度变化对电容传感器的干扰。

3.2 不同棉花品种对传感器影响

试验材料:新陆早 43、新陆早 45 和新陆中 36 3 个品种籽棉作为试验用样品,样品取自新疆石河子市农八师 148 团棉田,由同 1 台 CASE CPX620 型采棉机采收,采收时间为 2013 年 10 月 8 日-10 日。籽棉样品含杂率约在 15%左右。

试验方法:为消除样品内部水分不一可能对传感器输出产生的干扰,需对样品进行预干燥处理。取 3 种籽棉样品各 500 g 放入恒温干燥箱内,在温

度为 105℃ 加热干燥 12 h 以上,移入干燥皿内冷却并装入塑料密封袋内备用。以电子天平分别称取 100 g 干燥后籽棉样品并置入电容传感器内检测,待数据稳定后记录电容值并计算相对电容变化率,按该步骤再次称取 200 g 干燥后籽棉样品置入传感器内并测量相对电容变化率。试验结果如图 7 所示。

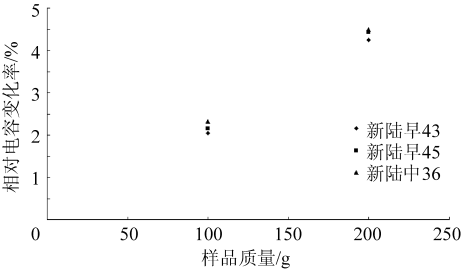


图 7 不同品种籽棉样品质量与输出电容关系
Fig. 7 Relationship of seedcotton mass with output capacitance under different cotton variety

根据图 7 知,3 种样品籽棉在 2 次试验中当样品质量一致时,对应的电容传感器输出变化基本相同,意味着籽棉品种对传感器信号输出影响并不显著。

3.3 籽棉质量流量及含水率对电容输出影响

本试验在籽棉气流输送试验台架上进行。试验材料:新陆早 43 籽棉,含杂率 15%。在常温 20℃ 条件下,按照干燥法得到试验籽棉的初始含水率为 5.8%。另外称取 6 份初始籽棉样品,每份质量约 2 500 g,将其中 5 份样品通过添加去离子水配制含水率在 6.47% ~ 10.89% 之间的不同含水率样品。将计量好的去离子水以雾状形式加入称取的初始籽棉样品中,装入聚乙烯塑料密封袋后,置于 4℃ 的储藏柜内保存 7 d,以保证水分均匀分布。利用干燥法得到所配置样品的含水率分别为 6.47%、7.06%、8.32%、10.54%、10.89%。其中含水率 5.8%、6.47%、8.32% 和 10.54% 样品用于电容响应测试,含水率 7.06% 和 10.89% 样品用于试验验证。

试验方法:试验时,分别称取不同质量的籽棉样品均匀铺放在输送带上,铺放宽度为 250 mm,长度为 1 500 mm,设置输送带线速度为 1 m/s,通过铺放不同籽棉厚度模拟进料籽棉的质量流量变化。试验时,均匀铺放在输送带上的籽棉样品进入喂棉口,在风机气流作用下,经过传感器由尾部排出到集料袋内。记录传感器输出电容数据,每次试验重复 3 次,取平均值作为此次测量结果。试验测量结果如图 8 所示。

由图 8 可知,当样品含水率一定时,籽棉质量流量与相对电容变化率呈线性关系。经过进一步处理得到,4 种不同含水率条件下(含水率依次增大)籽

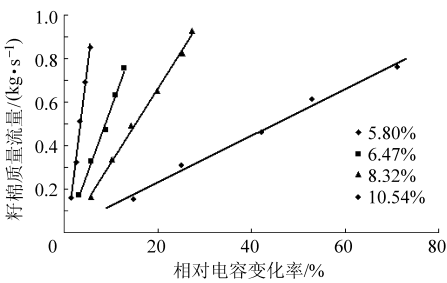


图 8 不同含水率条件下相对电容变化率与籽棉质量流量关系

Fig. 8 Relationship between capacitance and mass flow rate under different moisture content

棉质量流量与相对电容变化率的线性拟合决定系数 R^2 分别为 0.991 9、0.994 6、0.996 8 和 0.991 2。可见该线性关系相当显著。利用 Matlab R2008b 对试验数据进行多元回归拟合。建立相对电容变化率与籽棉质量流量和含水率的二元回归模型为

$$\Delta C = 107 - 26.28M_c - 105.8Q + 1.5M_c^2 - 9.5Q^2 + 19.1M_cQ \tag{9}$$

式中 Q ——籽棉质量流量,kg/s

M_c ——籽棉含水率,%

模型的 p 值小于 0.000 1,表明模型极显著。模型决定系数 $R^2 = 0.972 6$,说明籽棉相对电容变化率与籽棉质量流量及含水率间具有很好的相关性。根据电容响应与籽棉质量流量及含水率模型,测得输出电容和含水率后可以计算得到籽棉质量流量。

3.4 籽棉质量流量预测比较试验

传感器质量流量预测的比较试验条件与试验方法同 3.3 节。试验样品采用 3.3 节制备好的含水率为 7.06% 和 10.89% 籽棉样品。根据含水率信息和测得的电容信息,利用牛顿迭代法根据式(9)计算样品的质量流量,并与实际质量流量进行对比,结果如图 9 所示。

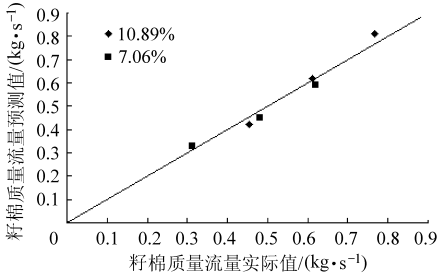


图 9 籽棉质量流量测量值与实际值比较

Fig. 9 Comparison of measured values of seed cotton mass flow with actual values

从图 9 知,籽棉质量流量的测量值相对于实际质量流量的点均匀且紧密分布在 45° 线的两侧,表明测量值与实际值相差不大,质量流量测量的平均相对误差为 5.16%。表明所设计的差分电容传感

器能够较准确地测量籽棉质量流量。

4 结 论

- (1) 提出了基于差分电容原理的籽棉质量流量检测方法,并设计了相应的差分电容测量装置,构建微电容检测电路。
- (2) 研究了环境温度、籽棉品种对差分电容传感器的影响,结果显示差分电容传感器对环境温度变化有较好的耐受性,籽棉品种对传感器输出无显

著影响。

(3) 研究了在不同含水率条件下,籽棉质量流量与电容响应关系,建立了基于籽棉质量流量、含水率与电容响应的二元回归模型。模型决定系数达到 0.976 2,表明籽棉电容响应与质量流量和含水率具有很好的相关性。针对模型预测的测试结果显示利用所建立的模型在获得含水率及电容响应后,能够较为快速准确地得到籽棉质量流量信息。即利用差分电容传感器检测籽棉质量流量是可行的。

参 考 文 献

- 1 Yong Yan. Mass flow measurement of bulk solids in pneumatic pipelines[J]. Measurement Science and Technology,1996,7:1687 – 1760.
- 2 张彦娥, 张漫, 张文革, 等. 采棉机测产系统数据采集与处理的试验研究[J]. 农业机械学报,2005,36(4):95 – 98.
Zhan Yan'e, Zhang Man, Zhang Wen'ge, et al. Experimental research on collection and processing of cotton yields data on the cotton picker[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2005,36(5):95 – 98. (in Chinese)
- 3 李鹏. 采棉机测产系统智能监控技术研究[D]. 北京:中国农业大学,2005.
Li Peng. Research on an intelligent monitor for yield mapping of cotton picker[D]. Beijing:China Agricultural University,2005. (in Chinese)
- 4 Thomasson J A, Pennington D A, Pringle H C, et al. Cotton mass flow measurement:experiments with two optical devices[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1999,15(1):11 – 17.
- 5 Wilkerson J B, Moody F H, Hart W E, et al. Design and evaluation of a cotton flow rate sensor[J]. Transactions of the ASAE, 2001,44(6):1415 – 1420.
- 6 Wilkerson J B, Moody F H, Hart W E. Development and evaluation of a flow measurement device for cotton yield mapping[C]. 2001 ASAE Annual International Meeting ASAE Paper, 011172, 2001.
- 7 Sui R X, Thomasson J A, Mehrle R, et al. Mississippi cotton yield monitor: beta test for commercialization[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004,42(3):149 – 160.
- 8 苗中华, 褚剑钢, 刘成良, 等. 采棉机智能监控系统 CAN 应用层协议设计[J]. 农业机械学报,2012,43(1):180 – 184.
Miao Zhonghua, Chu Jian'gang, Liu Chengliang, et al. CAN application-layer protocol design of intelligent monitoring system for cotton-picking machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(1):180 – 184. (in Chinese)
- 9 安光辉, 马蓉, 芦帅, 等. 棉纤维质量密度光学检测模型的优化[J]. 农业工程学报,2012,28(10):253 – 258.
An Guanghui, Ma Rong, Lu Shuai, et al. Optimization of optical measurement model for mass density of cotton fiber[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(10):253 – 258. (in Chinese)
- 10 Thomasson J A, Sui R. Test of temperature and stray-light effects on mass-flow sensor for cotton yield monitor[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2002,18(4):429 – 434.
- 11 Vellidis G, Perry C D, Rains G C, et al. Simultaneous assessment of cotton yield monitors [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2003,19(3):259 – 272.
- 12 Funk P A, Gillum M N, Hughs S E, et al. Mass flow measurement of seed cotton[J]. Transactions of the ASAE, 2000,43(6):1401 – 1407
- 13 Mailander M, Moriasi D. Test of pressure transducer for measuring cotton mass flow[J]. The Journal of Cotton Science, 2011(15):137 – 143.
- 14 Joseph P J,Donald L G. Microwave flow sensor for a harvester; US, 6606571B2[P]. 2003 – 08 – 12.
- 15 Luz C, Filip S D. Seed cotton ultrasound properties for yield measurement[C]. 2001 ASAE Annual International Meeting, ASAE Paper 011185, 2001.
- 16 Kumbhala F, Vaclav Prosek, Milan Kroulik. Capacitive sensor for choppen maize throughput measurement [J]. Computer and Electronics in Agriculture,2010,70(1):234 – 238.
- 17 谭秀萍,吴晓辉,范蟠果,等. LabWindows/CVI 多线程技术在电负荷系统中的应用[J]. 测控技术,2011,30(8):79 – 82.
Tan Xiuping, Wu Xiaohui, Fan Panguo, et al. Labwindows/CVI multi-thread technology in electrical load system [J]. Measurement & Control Technology,2011,30(8):79 – 82. (in Chinese)
- 18 高亚奎,支超有. 多线程虚拟仪器测试软件的开发[J]. 计算机测量与控制,2003,11(12):986 – 987.
Gao Yakui, Zhi Chaoyou. Development of multi-thread virtual instrument test software [J]. Computer Measurement & Control, 2003,11(12):986 – 987. (in Chinese)
- 19 郭文川,王婧,刘驰. 基于介电特性的薏米含水率检测方法[J]. 农业机械学报,2012,43(3):113 – 117.
Guo Wenchuan, Wang Jing, Liu Chi. Predicating moisture content of pearl barley based on dielectric properties[J]. Transactions

of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(3):113 – 117. (in Chinese)
20 刘志壮,吕贵勇. 基于电容法的稻谷含水率检测[J]. 农业机械学报,2013,44(7):179 – 182.
Liu Zhizhuang, Lü Guiyong. Moisture content detection of paddy rice based on capacitance approach[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(7):179 – 182. (in Chinese)

Detection of Seedcotton Mass Flow Based on Capacitance Approach

Zhou Liming¹ Li Shujun² Zhang Xiaochao² Wang Shumao¹ Yuan Yanwei² Dong Xin²

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

2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Mass flow measurement during the crop harvest process is one of important ways of data collecting for precision agriculture. In this research, a method for detecting seedcotton mass flow rate was proposed. The principle of the method was based on the fact that the dielectric constant of air/seedcotton mixture between two parallel plates increased with seedcotton mass flow rate. In order to decrease the influence of environmental disturbance, a differential capacitive sensor was designed to perform the seedcotton mass flow rate measurement. One kind of seedcotton named Xinluzao43 was used as sample to study the influence of cotton moisture content on the output capacitance value of mass flow sensors, and the relationship of cotton mass flow and sensor output capacitance. Experiment results showed that, the relationship among cotton moisture content, mass flow rate and capacitance value could be described by a bivariate regression model. The change of ambient temperature and breed had no significant relationship with the sensor output. The average relative error of seedcotton mass flow sensor was 5.16% .

Key words: Seedcotton Mass flow Capacitive sensor Moisture content Differential configuration

(上接第 91 页)

Design of Anti-blocking Mechanism Combined Driven Divider
with Passive Residue Separating Device

Gao Nana Zhang Dongxing Yang Li Cui Tao

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: An anti-blocking mechanism combined driven divider with passive residue separating device was designed, using simulation method and fields experiment to determine key parameters of the components. Based on the results of the simulations, the optimum parameters of driven divider were 1.24 speed ratio, 5 bars and 150 mm diameter. The convex residue separating device with 750 mm average radius had the strongest diffluent ability. Field experiments of seeding performance of 2BYJMFQC – 4 maize precision no-till seeder, on which the anti-blocking mechanism combined driven divider with passive residue separating device was fixed, was conducted, and the results showed that the passing ability, the sowing quality, the sowing depth rate and the fertilization depth rate satisfied the requirements of the national standard. Above all, the anti-blocking mechanism combined driven divider with passive residue separating device was effective in solving straw blocking and ensuring the passing performance of the no-till maize planter.

Key words: No-till planter Driven divider Passive residue separating device Circling flow
Simulation