

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.007

# 小麦精量播种机排种高精度检测系统设计与试验

陈建国 李彦明 覃程锦 刘成良

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

**摘要:**为实现小麦精量播种机播种量的精准检测,基于电容传感器设计了一套高精度小麦种子粒数检测系统。研究了小麦种子以单粒形式下落和多粒同时下落两种方式下的电容与小麦种子数目之间的关系。对于小麦种子以单粒形式下落,提出用差分动态阈值法检测小麦种子数目,试验表明检测的最大相对误差为1.54%;对于多粒小麦种子同时下落,排种轮转速从20 r/min到55 r/min,每增加5 r/min,分别建立小麦种子数目与电容积分值之间的最小二乘回归模型。试验结果表明,根据实际转速和速度最近原则选择相应的回归模型,该系统对不同的排种转速均具有较高的检测精度,相对误差介于-2.16%~2.23%之间。对于小麦精量播种机不同的排种模式或不同的排种速度,所设计的排种检测系统均有较高的检测精度。

**关键词:**小麦播种机;播种量;电容传感器;差分动态阈值法;最小二乘法

**中图分类号:** S126; S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)01-0066-09

## Design and Experiment of Precision Detecting System for Wheat-planter Seeding Quantity

CHEN Jianguo LI Yanming QIN Chengjin LIU Chengliang

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The precision detection of wheat-planter seeding quantity is the key of the automation control and the foundation of realizing precise seeding. Currently, existing seeding detection methods mainly include photoelectric-based methods, image-based methods and capacitance-based methods. For the photoelectric-based method, the detection accuracy of photoelectric sensor is affected by the vibration, light, temperature and other factors on the farmland. For the image-based method, its high precision detection provides a new way to improve the performance of wheat-planter seeding. However, image processing technology requires special equipment with high cost, and cameras are easy to be interfered by external light. Consequently, it is difficult to be widely applied in the complex environment on the farmland. Compared with photoelectric-based and image-based methods, the capacitance-based method is less affected by light and dust and thus has a strong environmental adaptability. Aimed at the problem of precision detection of wheat-planter seeding quantity, a precise detecting system for wheat-planter seeding quantity was developed based on the capacitance sensor. The corresponding parallel plates were designed to improve the detecting accuracy of the capacitance sensor. Then, the relationship between capacitance value and the quantity of wheat seeds under two modes of single-seed falling and several-seed falling was investigated in detail. For the mode of single-seed falling, a differential dynamic threshold method was proposed to detect the number of wheat seeds. The experiment results indicated that the maximum relative error was 1.54%. For the mode of several-seed falling, the least squares regression model between wheat seeds quantity and capacitance integral value was established at interval of 5 r/min ranged from 20 r/min to 55 r/min. The experiment results showed that according to the principle of the actual speed and the closest speed to select the corresponding regression model, the system had high detection accuracy for different seeding speeds, and the relative error was between -2.16% and 2.23%. Consequently, the proposed system can achieve high detection accuracy under the different seeding modes and different seeding speeds.

**Key words:** wheat-planter; seeding quantity; capacitance sensor; differential dynamic threshold method; least square method

收稿日期: 2018-07-23 修回日期: 2018-08-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD070030503, 2016YFD0700505)

作者简介: 陈建国(1989—),男,博士生,主要从事高精度智能农机研究, E-mail: jianguo890811@163.com

通信作者: 李彦明(1971—),男,副教授,主要从事机电系统辨识及自适应高精度控制研究, E-mail: ymli@sytu.edu.cn

## 0 引言

播种是农业生产中的关键环节,播种机播种性能的优劣直接影响农作物的生长与产量。随着精准农业技术的推广和精量播种技术的发展,精量播种已经成为现代农业播种技术体系的主要组成部分<sup>[1-2]</sup>。播种量的精准检测是实施精准农业自动化控制的关键,也是实现真正意义上精量播种的基础。

为了实现播种量的精准检测,国内外相关学者进行了广泛研究。目前,用于播种量检测的传感器主要有光电传感器<sup>[3-10]</sup>、图像传感器<sup>[11-15]</sup>和电容传感器。郝向泽等<sup>[4]</sup>采用红外检测装置获取种子下落时的脉冲信号,脉冲信号经单片机处理后统计种子下落时间间隔,并与设定理论时间间隔相比较,计算漏播率、重播率及播种量。为实现精播作业的实时监控,纪超等<sup>[5]</sup>设计了基于反射式红外光电感应的播种机播种监测系统。为了实现对多粒小麦种子同时下落的检测,一些学者则采用在排种管下方以水平阵列方式布置多个光电传感器的方法<sup>[6-9]</sup>。田间工况复杂,光电传感器易受振动、光线、温度等因素的影响,这些因素降低了检测精度,而且光电传感器自身存在散射现象,即使采取多层阵列布置光电传感器,也很难实现对多粒种子同时下落的精确检测。利用图像处理技术可以真实直观地反映精密排种器的排种均匀性,对排种量的检测具有较高的精度,为改善精密排种器的性能提供了一条新途径。然而,图像处理技术需要专用相机,成本较高,且相机容易受外界光线干扰,难以在农田等复杂工况下普及应用。

电容传感器具有非接触式测量、灵敏度高、抗污染能力强等优点。目前,电容传感器已成功用于含油率、含水率等物理量的检测<sup>[16-21]</sup>。然而,基于电容法检测谷物播种量的研究仍不多见<sup>[22-24]</sup>。为了提高玉米播种机排种量检测的可靠性,周利明等<sup>[22]</sup>设计了一种基于电容信号获取与分析的排种性能监测系统,然而,该系统不能实现对多粒(大于2粒)小麦同时下落时的检测。针对勺链式马铃薯排种器存在的漏种问题,孙伟等<sup>[23]</sup>提出了一种基于电容测量的漏种检测方法,然而,该方法不适用于小颗粒谷物的检测。因此,本文基于电容传感器设计一套高精度的小麦种子粒数检测系统。分别研究小麦种子以单粒形式通过电容传感器和多粒同时通过电容传感器时,电容值与小麦种子数目之间的关系,最后通过试验验证系统的检测精度,以期实现对小麦精量播种机播种量的精准检测。

## 1 测量原理

小麦与空气的相对介电常数不同,当小麦种子通过电容传感器时,输出的电容值将发生变化,电容值的变化量可以用来判定小麦种子的粒数。

平行板电容的计算公式为

$$C = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 S}{d} \quad (1)$$

式中  $\varepsilon_0$ ——真空介电常数,  $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-15}$  F/mm

$\varepsilon_r$ ——相对介电常数

$S$ ——两平行板间相对覆盖面积,  $\text{mm}^2$

$d$ ——两平行板间的距离,  $\text{mm}$

种子通过平行板电容传感器时,传感器的介电常数<sup>[24]</sup>为

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V} \varepsilon_1 + \frac{V_2}{V} \varepsilon_2 \quad (2)$$

式中  $\varepsilon_1$ ——种子的相对介电常数

$\varepsilon_2$ ——空气的相对介电常数,  $\varepsilon_2 \approx 1.000585$

$V_1$ ——种子所占体积,  $\text{mm}^3$

$V_2$ ——空气所占体积,  $\text{mm}^3$

$V$ ——电容传感器两平行板间的总体积,  $\text{mm}^3$

当传感器内无小麦种子通过时,电容为

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_2 S}{d} \quad (3)$$

当传感器内有小麦种子通过时,电容变化量为

$$\Delta C = C - C_0 = \frac{S \varepsilon_0}{d} \frac{V_1}{V} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) = \frac{\varepsilon_0 V_1}{d^2} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (4)$$

由式(4)可知,当小麦种子通过平行板电容传感器时,电容的变化量与种子所占的体积成正比。对于大小均匀的小麦种子,可以通过检测电容变化量来检测小麦种子的数目。

## 2 系统设计

### 2.1 平行板电容传感器结构设计

平行板电容传感器由两块相对平行布置的电容极板、排种管接口、处理电路、对外接口和电路安装盒等组成,为了避免小麦种子与电容传感器的电容极板发生碰撞而影响检测精度,在电容传感器的排种管接口与电容极板之间设计了V型挡板,其实物图如图1所示。设计的传感器两端各有一个排种管接口,分别与排种管相连接,其中传感器上端排种管接口与排种器下方的漏斗口距离为20 mm,传感器的长度为80 mm,传感器下端排种管接口到排种管末端的距离为480 mm。排种器工作过程中,排种器排出的部分种子先与V型挡板接触,然后再通过电

容传感器的极板,避免小麦种子与电容极板发生碰撞而影响种子在电容极板之间的停留时间。V型挡板对小麦种子有汇集作用,虽然会影响部分种子的运动轨迹,但在实际的播种作业中对排种器工作质量的影响较小。



图1 平行板电容传感器实物图

Fig.1 Picture of parallel plate condenser

## 2.2 平行板电容传感器极板设计

文献[25]利用微波透射技术对小麦的相对介电常数进行了测量,得到小麦的相对介电常数为2.5~3.0。本文选取小麦相对介电常数为2.75。小麦长约6.5 mm,直径为3.4~3.8 mm,则单粒小麦种子的体积为  $V_s \approx \pi \times 1.7^2 \times 6.5 = 59.01 \text{ mm}^3$ 。代入式(4)有

$$\Delta C = C - C_0 = \frac{0.914}{d^2} \quad (5)$$

芯片AD7746的精度为0.004 pF,按照辨别出一粒小麦种子的要求,由式(5)得到需要满足的条件为  $d < 15.12 \text{ mm}$ 。据此两平行极板间距离设计为  $d = 15 \text{ mm}$ 。

排种轮排种示意图如图2所示。为了保证检测精度,应尽可能使小麦种子在通过电容传感器平行极板时被采样一次,种子通过平行极板时被采样一次的约束条件为

$$t_s < \Delta t < 2t_s \quad (6)$$

式中  $t_s$ ——采样周期,即两次采样的时间间隔,s

$\Delta t$ ——种子通过平行极板的时间,s

由式(6)可知,即使种子下落过程中与V型挡板发生接触而影响种子的速度,只要  $\Delta t$  满足上述范围,种子经过电容传感器时均会被采样一次。

种子通过平行极板的时间  $\Delta t$  由种子到平行极板上边界的速度  $v_1$  和平行极板的长度  $b$  决定,满足

$$b = v_1 \Delta t + \frac{1}{2} g \Delta t^2 \quad (7)$$

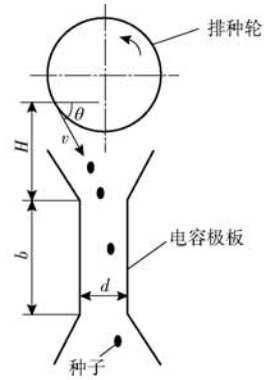


图2 排种轮排种示意图

Fig.2 Sketch of seeding process

$$\text{解得} \quad \Delta t = \frac{-v_1 + \sqrt{v_1^2 + 2gb}}{g} \quad (8)$$

式中  $g$ ——重力加速度,  $9.8 \text{ m/s}^2$

种子到平行极板上边界的速度  $v_1$  由小麦的初始速度  $v$ 、排种口至平行极板上边界的距离  $H$  和排种角  $\theta$  决定,有

$$\begin{cases} v = R\omega \\ v_1 = v \sin \theta + gt_1 \\ H = vt \sin \theta + \frac{1}{2} g t_1^2 \end{cases} \quad (9)$$

式中  $R$ ——排种轮半径,mm

$\omega$ ——排种轮角速度,rad/s

$t_1$ ——种子到平行极板上边界的时间,s

根据式(7)~(9)求得种子通过平行极板的时间为

$$\Delta t = \frac{\sqrt{(R\omega \sin \theta)^2 + 2g(H+b)} - \sqrt{(R\omega \sin \theta)^2 + 2gH}}{g} \quad (10)$$

在此基础上,确定了试验台尺寸参数。其中,排种器为购买的通用小麦排种器,实测得  $R = 27 \text{ mm}$ ,  $\theta = 1.0472 \text{ rad}$ ,根据经验设计平行极板的长度  $b = 30 \text{ mm}$ ,宽度  $a = 30 \text{ mm}$ 。根据工程实践中对采样时间  $\Delta t$  的要求以及考虑播种机的实际安装空间,设计了精量播种机的排种口至电容传感器平行极板上边界的距离  $H = 147 \text{ mm}$ ,并且  $H$  在  $142 \sim 152 \text{ mm}$  之间时满足要求。当排种轮转速为  $20 \text{ r/min}$  时,由式(10)求得  $\Delta t = 16.85 \text{ ms}$ ,根据式(6)初步设定采样周期为  $15 \text{ ms}$ 。

## 2.3 检测电路设计

电容传感器在实际工作中,自身的电容非常小,一般仅为几皮法,而且当一粒小麦种子通过电容传感器时,电容的变化值约为  $0.004 \text{ pF}$ ,微小的电容变化量很难被目前的显示仪表直接显示出来,必须采取测量电路来检测这一微小电容的变化。



因为微小电容传感器的电容量较小,传感器的调理电路容易受到寄生电容和环境的影响,难以实现高精度的测量,选用 AD7746 集成电路则能够有效降低这些因素引起的测量误差。按照可以

检测微小电容变化值和处理时间短等要求,设计了如图 3 所示的电路。该电路由 CY7C68013 单片机、电容模数转换芯片 AD7746、稳压器 ADP3303 等组成。

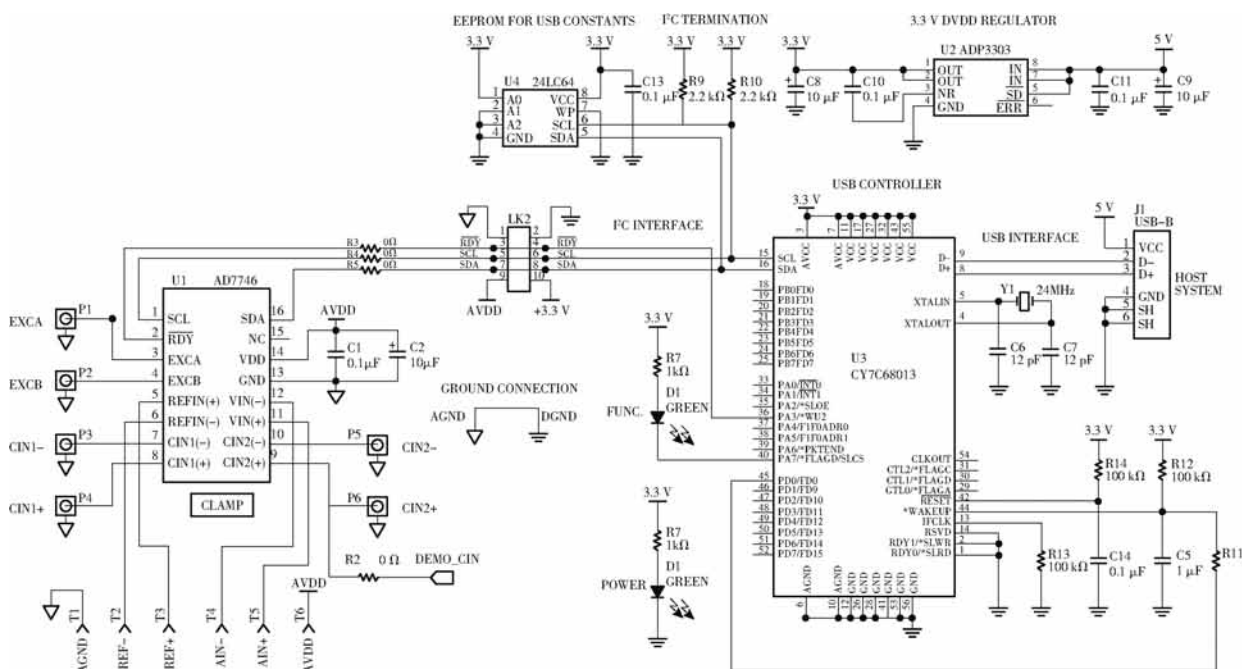


图 3 平行板电容传感器电路原理图

Fig. 3 Circuit design schematic of parallel plate condenser sensor

### 2.4 软件设计

小麦播种机排种高精度检测系统的软件部分主要包括系统初始化、数据采集和数据处理等模块。程序流程图如图 4 所示。

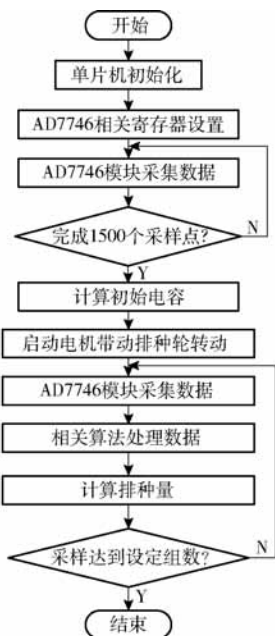


图 4 程序流程图

Fig. 4 Flow chart of program

单片机主程序执行 IO 端口设置以及 AD7746 容性通道、输入模式、转换速率、转换方式等设置。

当单片机初始化和 AD7746 相关寄存器设置完成后,AD7746 开始采集 1 500 个数据,而此时排种轮不转动,即没有小麦种子通过电容传感器,对采集到的 1 500 个数据求均值得到电容传感器的初始电容  $C_{aver}$ 。然后,启动步进电机带动排种轮转动,AD7746 采集电容数据,并利用相关算法求得排种量。

### 3 算法描述

#### 3.1 种子单粒形式下落时算法分析

为准确地提取脉搏主波位置和脉搏峰值,张爱华等<sup>[26]</sup>提出了基于动态差分阈值法的脉搏信号峰值检测方法。本文对动态差分阈值法进行了改进,然后应用于对单粒形式下落种子的精确检测。当小麦种子以单粒形式通过电容传感器时,会形成脉冲信号,此脉冲信号一般具有幅值大、一阶差分值大等特点。如图 5a 为一组 115 个点的采样信号,图 5b 为这段采样信号的一阶差分。由于排种器存在摩擦、振动等外界因素,小麦通过传感器时形成的脉冲信号存在多种表现形式,然而,通常情况下,这些脉冲信号均具有幅值大、一阶差分值大等特点。由于脉冲信号表现形式多样,仅通过阈值法较难准确地判别小麦的数目,且随着时间的变化,脉冲信号幅值也会发生变化,虽然短时间内这种变化不明显;同时,由于存在振动等外界干扰因素,仅通过差分也较

难准确地判别小麦的数目。针对上述存在的问题,提出了差分动态阈值法,该方法可以有效提高检测系统对单粒形式下落种子的检测精度。

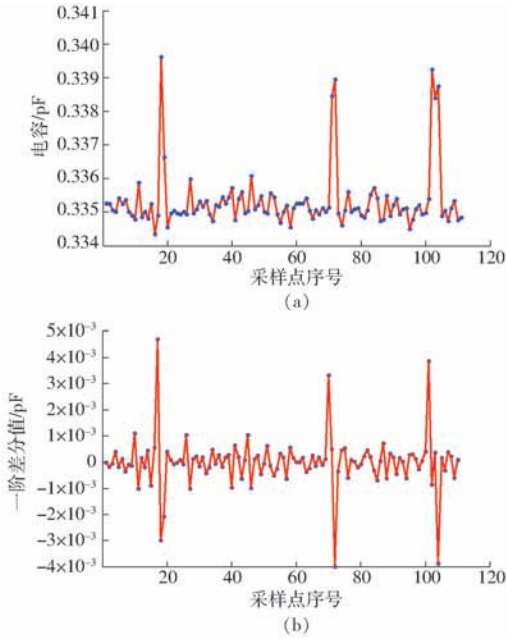


图5 采样信号及其一阶差分信号

Fig. 5 Amplitude and difference signal of sampling signal

### 3.1.1 初始阈值的设定

首先,采集1500个数据(没有小麦种子通过)计算初始电容  $C_{\text{aver}}$ 。其次,取一组采样信号(种子以单粒形式下落),根据其一阶差分值大于  $0.0028 \text{ pF}$  (即  $0.004 \text{ pF} \times 0.7$ ),且对应采样信号幅值介于  $C_{\text{aver}} + 0.0028 \text{ pF}$  与  $C_{\text{aver}} + 0.0052 \text{ pF}$  (即  $0.004 \text{ pF} \times 1.3$ ) 之间,提取前7个脉冲信号。 $0.004 \text{ pF}$  为单粒小麦种子通过电容传感器时引起的电容变化量,第1个  $0.7$  为一阶差分阈值系数,  $1.3$  和第2个  $0.7$  分别为幅值阈值上限和下限系数。去掉7个脉冲信号中一阶差分值的最大值和最小值,剩余的一阶差分值记作  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$ , 求其算术平均值,记作  $\bar{C}$ 。去掉7个脉冲信号中幅值的最大值和最小值,剩余的幅值记作  $H_1, H_2, H_3, H_4, H_5$ , 求取算术平均值,记作  $\bar{H}$ 。将初始一阶差分阈值设置为  $\tau = \bar{C}$ , 幅值的下限设置为  $H_\alpha = 0.7\bar{H}$ , 幅值的上限设置为  $H_\beta = 1.3\bar{H}$ 。

### 3.1.2 脉冲信号的检测

根据初始一阶差分阈值  $\tau$  寻找第1个脉冲信号,设任意两个连续采样点的幅值为  $H_i, H_{i+1}$ , 如果满足

$$H_{i+1} - H_i > \tau \quad (11)$$

则  $H_{i+1}$  为满足差分阈值的采样点,从  $H_{i+1}$  对应的采样点开始寻找过零点的采样点,设  $H_{i+1}$  后的3个连续点为  $H_{i+2}, H_{i+3}, H_{i+4}$ , 由于脉冲信号存在多种表现形式(可以连续判断5个点),如果满足

$$H_{i+2} - H_{i+1} > 0 \quad (12)$$

$$H_{i+3} - H_{i+2} < 0 \quad (13)$$

则  $H_{i+2}$  为一个可能的脉冲信号幅值,根据幅值判断准则:若  $H_\alpha < H_{i+2} < H_\beta$ , 则认为  $H_{i+2}$  是小麦经过传感器时产生的脉冲信号的幅值;若不满足,则幅值为  $H_{i+2}$  的脉冲信号可能是由振动等干扰因素产生的。

### 3.1.3 阈值更新

检测到一个脉冲信号后,利用此信号的信息对阈值进行更新。记  $C_{\text{new}} = H_{i+2} - H_i, H_{\text{new}} = H_{i+2}$ , 用  $C_{\text{new}}$  更新一阶差分阈值,即对  $C_2, C_3, C_4, C_5, C_{\text{new}}$  求其算术平均值,得到新的差分阈值  $\tau$ 。用  $H_{\text{new}}$  更新幅值上下限,即对  $H_2, H_3, H_4, H_5, H_{\text{new}}$  求其算术平均值,得到新的幅值下限  $H_\alpha$  和幅值上限  $H_\beta$ 。利用更新的阈值并依据脉冲信号的检测方法继续检测下一个脉冲信号。由于幅值上下限会不断更新,这样可以减少因幅值随时间缓慢变化引起的误判,因此该方法可有效提高检测系统对单粒形式下落种子的检测精度。

## 3.2 多粒种子同时下落时算法分析

为实现对多粒种子同时下落时的精确检测,建立种子数目与电容量积分值之间的最小二乘回归模型。

电容传感器在采集信号时,自身有  $0.0015 \text{ pF}$  左右的微小波动,通过设定阈值  $\delta$  的方法降低上述因素的影响,即只有满足阈值条件的脉冲峰值才被认为是有效的,需要满足

$$C_i - C_{\text{aver}} > \delta \quad (14)$$

式中  $C_i$ ——第  $i$  采样点的电容

控制步进电机带动排种轮转动,设置系统采样周期为  $15 \text{ ms}$ , 采样40组数据。在每组数据中,对满足式(14)的所有采样点处的电容进行积分,其公式为

$$C = \int (C_i - C_{\text{aver}}) dx \quad (C_i - C_{\text{aver}} > \delta) \quad (15)$$

在每组试验中,人工统计出实际通过电容传感器的小麦粒数  $G$ , 根据小麦粒数  $G$  与电容量积分值  $C$  建立线性模型

$$G = \beta_0 + \beta_1 C + \varepsilon \quad (16)$$

式中  $\beta_0, \beta_1$ ——模型系数

$\varepsilon$ ——随机误差变量

用样本统计量  $\beta_0$  和  $\beta_1$  代替模型未知参数  $\beta_0$  和  $\beta_1$ , 得到估计回归方程

$$\hat{G} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 C \quad (17)$$

根据最小二乘法的思想,使得因变量观测值与估计值之间的离差平方和最小,求得  $\hat{\beta}_0$  和  $\hat{\beta}_1$ , 即

$$\min Q(\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1) = \sum_{j=1}^n (G_j - \hat{G})^2 \quad (18)$$

解得

$$\begin{cases} \beta_1 = \frac{n \sum_{j=1}^n C_j G_j - \sum_{j=1}^n C_j \sum_{j=1}^n G_j}{n \sum_{j=1}^n C_j^2 - \left( \sum_{j=1}^n C_j \right)^2} \\ \beta_0 = \bar{G} - \beta_1 \bar{C} \end{cases} \quad (19)$$

其中  $\bar{C} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n C_j$   $\bar{G} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n G_j$

式中  $n$ ——试验组数

## 4 试验

### 4.1 试验平台

试验平台由步进电机及驱动器、小麦播种盒、种箱、电容传感器、台架、接种盒和上位机等组成。步进电机控制排种轮的转速,进而控制小麦的流量。排种轮的圆柱面上阵列式布满窝眼,每个窝眼只可存放一粒小麦种子,这样有利于进行种子以单粒形式下落时的试验。电容传感器用于电容的采集,并将数据传送给上位机进行算法分析。

### 4.2 单粒种子下落试验

为检验该检测系统对小麦种子以单粒形式通过电容传感器时的检测精度,选用变地金公司生产的小麦种子进行试验。试验方法如下:通过步进电机带动排种轮转动,此时将种子一粒粒放入排种轮的窝眼中,排种轮的转动带动小麦种子以一定的时间间隔依次通过电容传感器,在电容传感器下方放置小麦种子接收盒。电容传感器将采集的信号传给上位机,上位机根据上述差分动态阈值法对采样的数据进行处理,得到理论小麦粒数,人工统计接收盒里面的小麦种子,得到实际小麦粒数。通过理论小麦粒数和实际小麦粒数计算出该检测系统的检测精度。试验结果如表 1 所示。

表 1 小麦种子以单粒形式通过电容传感器时试验结果

Tab.1 Experimental results of wheat seeds passing through capacitance sensor by a single way

| 试验组号 | 计算粒数/个 | 实际粒数/个 | 相对误差/% | 试验组号 | 计算粒数/个 | 实际粒数/个 | 相对误差/% |
|------|--------|--------|--------|------|--------|--------|--------|
| 1    | 896    | 886    | 1.13   | 6    | 811    | 799    | 1.50   |
| 2    | 913    | 905    | 0.88   | 7    | 858    | 845    | 1.54   |
| 3    | 862    | 853    | 1.06   | 8    | 1051   | 1037   | 1.35   |
| 4    | 996    | 1004   | -0.80  | 9    | 841    | 832    | 1.08   |
| 5    | 929    | 915    | 1.53   | 10   | 962    | 948    | 1.48   |

由表 1 可知,当小麦种子以单粒形式通过电容传感器时,利用差分动态阈值法来检测小麦的粒数具有较高的检测精度,相对误差最大为 1.54%。可见,该检测系统对以单粒形式通过电容传感器的小麦种子或者类似谷物有很好的检测效果。

### 4.3 多粒种子同时下落试验

饱满的小麦种子经过电容传感器时引起的电容变化值约为 0.004 pF,取阈值  $\delta = 0.0028$  pF,这样可以排除电容自身微小波动引起的误判。

测量前先采样 1500 个数据计算初始电容  $C_{aver}$ ,然后控制步进电机以 20 r/min 带动排种轮转动,设置系统采样周期为 15 ms,采样 40 组数据,图 6 为某组采样信号图。在每组采样试验中,均在启动数据采样后再控制步进电机带动排种轮转动,在系统采样完成前关闭步进电机,以便准确获取小麦种子通过电容传感器时引起的电容变化量(以下试验数据采样均采用此方法)。在每组采样数据中,将满足式(14)条件的所有采样点处的电容进行积分,同时统计出经过电容传感器的小麦种子粒数,结果如表 2 所示。

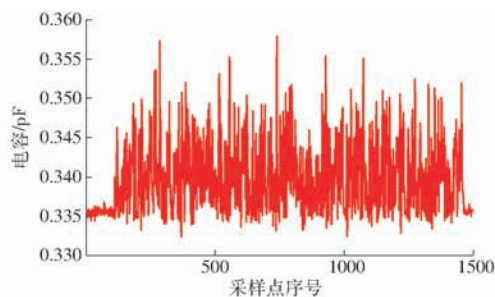


图 6 多粒种子试验采样信号

Fig.6 Sampling signals for multiple seed trials

将表 2 中电容积分值与实际经过电容传感器的小麦粒数进行最小二乘拟合,得到两者之间的关系为

$$G = 143.6549C + 2.0082 \quad (20)$$

计算得到其线性相关系数为 0.997,这表明电容积分值与实际经过电容传感器的小麦粒数之间存在很高的线性相关性。

为进一步检验该系统的可靠性和检测精度,分别在 20、25、35 r/min 3 种排种轮转速下进行试验。设置系统采样周期为 15 ms,每种转速下进行 5 组试验。在每组试验的采样数据中,将满足式(14)的所有采样点处的电容进行积分,再根据式(20)计算出小麦的籽粒数,由计算出的粒数与人工统计的实际粒数相对比,计算相对误差,其结果如表 3 所示。

可以发现:在步进电机为 20 r/min 时,利用拟合关系式(20)计算得到的小麦粒数与实际粒数两者之间的相对误差较小,介于 -1.57% ~ 1.37% 之间。然而,在步进电机为 25、35 r/min 时,利用拟合关系式(20)计算得到的小麦粒数与实际粒数两者之间的相对误差较大,而且随着转速的提高,相对误差逐渐增大。

为使得该系统能够满足较大速度范围内的排种



表2 采样时电容积分值和经过传感器的小麦粒数  
试验结果

Tab.2 Integral quantity of capacitance in sampled data  
and number of wheat grains passed through sensor

| 采样组别 | 电容积分值/pF | 实际小麦粒数/个 | 采样组别 | 电容积分值/pF | 实际小麦粒数/个 |
|------|----------|----------|------|----------|----------|
| 1    | 3.0518   | 448      | 21   | 2.5099   | 353      |
| 2    | 2.8903   | 420      | 22   | 2.1608   | 315      |
| 3    | 2.8507   | 417      | 23   | 2.0369   | 298      |
| 4    | 2.5163   | 366      | 24   | 0.9546   | 141      |
| 5    | 2.4120   | 352      | 25   | 2.4303   | 344      |
| 6    | 2.8339   | 406      | 26   | 2.7326   | 405      |
| 7    | 2.5383   | 366      | 27   | 2.8803   | 400      |
| 8    | 2.6339   | 387      | 28   | 2.5794   | 377      |
| 9    | 2.1171   | 312      | 29   | 2.3853   | 354      |
| 10   | 1.6922   | 247      | 30   | 1.7658   | 251      |
| 11   | 2.2177   | 319      | 31   | 1.8422   | 261      |
| 12   | 2.9131   | 427      | 32   | 1.9048   | 274      |
| 13   | 2.2244   | 332      | 33   | 1.5409   | 223      |
| 14   | 2.3948   | 346      | 34   | 1.1321   | 163      |
| 15   | 1.9617   | 286      | 35   | 1.1957   | 177      |
| 16   | 2.3994   | 336      | 36   | 1.5403   | 218      |
| 17   | 2.5659   | 364      | 37   | 1.2677   | 187      |
| 18   | 2.8019   | 395      | 38   | 2.2191   | 309      |
| 19   | 1.9016   | 273      | 39   | 1.5942   | 232      |
| 20   | 1.7651   | 259      | 40   | 2.2932   | 333      |

表3 不同转速下的试验结果

Tab.3 Experimental results at different speeds

| 排种轮转速/<br>(r·min <sup>-1</sup> ) | 电容积分<br>值/pF | 计算<br>粒数/个 | 实际<br>粒数/个 | 相对<br>误差/% |
|----------------------------------|--------------|------------|------------|------------|
| 20                               | 3.4271       | 494.3      | 498        | -0.74      |
|                                  | 2.8180       | 406.8      | 412        | -1.26      |
|                                  | 2.9170       | 421.1      | 417        | 0.98       |
|                                  | 2.8792       | 415.6      | 410        | 1.37       |
|                                  | 3.0491       | 440.0      | 447        | -1.57      |
| 25                               | 3.9998       | 576.6      | 591        | -2.44      |
|                                  | 3.9823       | 574.1      | 587        | -2.20      |
|                                  | 3.5523       | 512.3      | 517        | -0.91      |
|                                  | 4.3992       | 634.0      | 657        | -3.50      |
|                                  | 3.8334       | 552.7      | 560        | -1.30      |
| 35                               | 5.2759       | 759.9      | 806        | -5.72      |
|                                  | 5.1123       | 736.4      | 785        | -6.18      |
|                                  | 5.0927       | 733.6      | 795        | -7.72      |
|                                  | 4.9900       | 718.9      | 784        | -8.31      |
|                                  | 5.1342       | 739.6      | 798        | -7.32      |

量检测,排种轮转速从 20 r/min 到 55 r/min,每增加 5 r/min 时,分别建立小麦种子数目与电容积分值之间的最小二乘回归模型,根据实际转速和速度最近原则选择相应的回归模型。通过试验,在 20、25、30、35、40、45、50、55 r/min 转速下回归模型的拟合关系式为

$$\left\{ \begin{aligned} G &= 143.6549C + 2.0082 \\ G &= 144.9426C + 7.9834 \\ G &= 148.3156C + 11.4361 \\ G &= 151.4426C + 15.4834 \\ G &= 154.2712C + 19.0417 \\ G &= 157.4650C + 22.1593 \\ G &= 160.1836C + 25.8479 \\ G &= 163.5528C + 28.6324 \end{aligned} \right. \quad (21)$$

为进一步检验该系统在任意排种速度下的可靠性和检测精度,在 18、23、29 r/min 等转速下进行试验。每组试验前先采样 1 500 个数据以计算每组试验时的初始电容  $C_{aver}$ ,然后控制步进电机分别以 18、23、29 r/min 等转速带动排种轮转动,设置系统采样周期为 15 ms,每种转速下进行 4 组试验。在每组试验的采样数据中,将满足式(14)的所有采样点处的电容进行积分,再根据式(21)计算出小麦的粒数,由计算出的粒数与人工统计的实际粒数计算相对误差,其结果如表 4 所示。

检测系统安装在上海世达尔公司生产的 2BGKY-14 型小麦播种机上,机具播种宽度为 2.2 m,播种量一般要求为 105~225 kg/hm<sup>2</sup>,小麦播种机正常工作时,行驶速度为 1.4~4.1 km/h。当播种量为 105 kg/hm<sup>2</sup>,车速为 1.4 km/h 时,耗时约 3.255 h(195.3 min)。在 195.3 min 内,播种机需排种 105 kg,播种机共有 14 个排种器,则每个排种器每分钟需要排种 38 g(7.5/195.3=0.038 kg/min)。

实测得单个排种器每转一圈排种量为 50 粒,约 2.2 g(小麦种子大约为 22.8 粒/g),则排种轮每分钟需转 17.3 圈(38/2.2)。得到排种轮转速近似计算公式为

$$n_p = 1.765v_c\alpha \quad (22)$$

式中  $n_p$ ——排种轮转速,r/min  
 $v_c$ ——播种机行驶速度,km/h  
 $\alpha$ ——播种量,kg/hm<sup>2</sup>

由式(22)可知,排种轮转速与播种机行驶速度和播种量有关,在实际农业生产中,排种轮转速可根据播种机行驶速度和播种量计算得到。现对 18、23、29 r/min 等试验排种轮转速,以小麦播种量为 105 kg/hm<sup>2</sup>和 225 kg/hm<sup>2</sup>分别计算得到拖拉机行驶最高和最低速度,其中播种量为 105 kg/hm<sup>2</sup>时对应播种机行驶最高速度,播种量为 225 kg/hm<sup>2</sup>时对应播种机最低行驶速度,结果如表 4 所示。

通过表 4 中的数据可以发现:在任意排种轮转速下,根据实际转速和速度最近原则选择相应的拟合关系式,该系统的相对误差介于 -2.16%~2.23% 之间,这表明该系统对不同的排种轮转速均

表4 电容传感器的相对误差

Tab.4 Relative error of capacitance sensor

| 排种轮转速/<br>( $r \cdot \min^{-1}$ ) | 行驶最低/最高<br>速度/( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ) | 电容积分<br>值/ $\mu\text{F}$ | 计算小麦<br>数/个 | 实际小麦<br>数/个 | 相对误<br>差/% | 排种轮转速/<br>( $r \cdot \min^{-1}$ ) | 行驶最低/最高<br>速度/( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ) | 电容积分<br>值/ $\mu\text{F}$ | 计算小麦<br>数/个 | 实际小麦<br>数/个 | 相对误<br>差/% |
|-----------------------------------|---|--------------------------|-------------|-------------|------------|-----------------------------------|---|--------------------------|-------------|-------------|------------|
| 18                                | 0.68/1.46   | 2.727 1                  | 393.8       | 386         | 2.02       | 41                                | 1.55/3.32   | 6.173 9                  | 971.5       | 986         | -1.47      |
|                                   |   | 2.658 0                  | 383.8       | 378         | 1.53       |                                   |   | 6.083 4                  | 957.5       | 976         | -1.89      |
|                                   |   | 2.617 0                  | 378.0       | 382         | -1.05      |                                   |   | 5.894 3                  | 928.4       | 944         | -1.65      |
|                                   |   | 2.634 2                  | 380.4       | 385         | -1.19      |                                   |   | 6.019 4                  | 947.7       | 935         | 1.36       |
| 23                                | 0.87/1.86   | 3.781 7                  | 556.1       | 547         | 1.66       | 46                                | 1.74/3.72   | 6.821 8                  | 1 096.4     | 1 081       | 1.42       |
|                                   |   | 4.132 5                  | 607.0       | 618         | -1.78      |                                   |   | 6.629 4                  | 1 066.1     | 1 088       | -2.01      |
|                                   |   | 3.894 2                  | 572.4       | 580         | -1.31      |                                   |   | 6.873 4                  | 1 104.5     | 1 125       | -1.82      |
|                                   |   | 4.056 6                  | 596.0       | 583         | 2.23       |                                   |   | 6.716 6                  | 1 079.8     | 1 066       | 1.29       |
| 29                                | 1.10/2.35   | 4.327 6                  | 653.3       | 641         | 1.92       | 52                                | 1.96/4.21   | 7.413 3                  | 1 213.3     | 1 231       | -1.44      |
|                                   |   | 4.619 6                  | 696.6       | 705         | -1.19      |                                   |   | 7.715 3                  | 1 261.7     | 1 246       | 1.26       |
|                                   |   | 4.589 5                  | 692.1       | 683         | 1.33       |                                   |   | 7.656 5                  | 1 252.3     | 1 280       | -2.16      |
|                                   |   | 4.474 2                  | 675.0       | 685         | -1.45      |                                   |   | 7.465 5                  | 1 221.7     | 1 238       | -1.32      |
| 34                                | 1.28/2.75   | 5.248 3                  | 810.3       | 794         | 2.05       | 57                                | 2.15/4.61   | 8.134 2                  | 1 359.0     | 1 377       | -1.31      |
|                                   |   | 5.352 8                  | 826.1       | 840         | -1.65      |                                   |   | 8.236 5                  | 1 375.7     | 1 359       | 1.23       |
|                                   |   | 5.431 6                  | 838.1       | 827         | 1.34       |                                   |   | 8.088 0                  | 1 351.4     | 1 381       | -2.14      |
|                                   |   | 5.283 4                  | 815.6       | 823         | -0.90      |                                   |   | 8.312 2                  | 1 388.1     | 1 373       | 1.10       |

具有较高的检测精度。

## 5 结束语

基于电容传感器设计了一套用于检测小麦种子数目的高精度检测系统。该检测系统既适用于小麦种子以单粒形式下落时的排种量检测,也适用于多粒小麦种子同时下落时的排种量检测。对于小麦种子以单粒形式下落的方式,通过检测脉冲峰值的个数来判断小麦种子的粒数。根据脉冲信号的表现形式,提出了差分动态阈值法,试验表明,使用该方法检测的最大相对误差为1.54%。对于多粒小麦种

子同时下落的情形,排种轮转速从20 r/min到55 r/min,每增加5 r/min,分别建立小麦种子数目与电容积分值之间的最小二乘回归模型。试验结果表明,在任意排种轮转速下,根据实际转速和速度最近原则选择相应的回归模型,该系统的相对误差介于-2.16%~2.23%之间。因此,对于不同的排种模式或不同的排种速度,所设计的排种检测系统均有较高的检测精度。此外,在每次工作前检测系统通过采样没有小麦下落时的数据获取系统的初始电容,降低了外界环境因素的影响。因而所设计的系统对工作环境具有较高的鲁棒性。

## 参 考 文 献

- [1] 杨丽,颜丙新,张东兴,等. 玉米精密播种技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(11):38-48. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20161106&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161106&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.006.  
YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38-48. (in Chinese)
- [2] 苑严伟,张小超,吴才聪,等. 玉米免耕播种施肥机精准作业监控系统[J]. 农业工程学报,2011,27(8):222-226.  
YUAN Yanwei, ZHANG Xiaochao, WU Caicong, et al. Precision control system of no-tillage corn planter [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(8): 222-226. (in Chinese)
- [3] 梅鹤波,刘卉,付卫强,等. 小麦精量播种高精度监测系统的设计与试验[J]. 农机化研究,2013,35(1):68-72.  
MEI Hebo, LIU Hui, FU Weiqiang, et al. The design and testing of the intelligent monitoring system for wheat precision sowing [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(1): 68-72. (in Chinese)
- [4] 郝向洋,何旭鹏,邹翌,等. 基于光电传感器的精密播种机排种性能监测系统的研究[J]. 华南农业大学学报,2017,38(1):120-124.  
HAO Xiangze, HE Xupeng, ZOU Yi, et al. Research on the sowing performance monitoring system for precision seeders based on photoelectric sensor [J]. Journal of South China Agricultural University, 2017, 38(1): 120-124. (in Chinese)
- [5] 纪超,陈学庚,陈金成,等. 玉米免耕精量播种机排种质量监测系统[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(8):1-6. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160801&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160801&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.001.  
JI Chao, CHEN Xuegeng, CHEN Jincheng, et al. Monitoring system for working performance of no-tillage corn precision seeder [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 1-6. (in Chinese)
- [6] 郑一平,花有清,陈丽能,等. 水稻直播机播种监测器研究[J]. 农业工程学报,2005,21(4):77-80.



- ZHENG Yiping, HUA Youqing, CHEN Lineng, et al. Seeding detectors for rice drill [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(4): 77-80. (in Chinese)
- [7] 车宇, 伟利国, 刘焯韬, 等. 免耕播种机播种质量红外监测系统设计与试验[J]. 农业工程, 2017, 33(增刊1): 11-16.  
CHE Yu, WEI Ligu, LIU Xingtao, et al. Design and experiment of seeding quality infrared monitoring system for no-tillage seeder [J]. Agricultural Engineering, 2017, 33(Supp. 1): 11-16. (in Chinese)
- [8] 李雷霞, 郝志明, 杨薇, 等. 精密播种机排种性能检测系统的研制[J]. 农业工程, 2012, 2(8): 16-19.  
LI Leixia, HAO Zhiming, YANG Wei, et al. Design of seeding performance detection system for precision seeder [J]. Agricultural Engineering, 2012, 2(8): 16-19. (in Chinese)
- [9] 宋鹏, 张俊雄, 李伟, 等. 精密播种机工作性能实时监测系统[J]. 农业机械学报, 2011, 42(2): 71-74.  
SONG Peng, ZHANG Junxiong, LI Wei, et al. Real time monitoring system for accuracy of precision seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 71-74. (in Chinese)
- [10] 卢彩云, 付卫强, 赵春江, 等. 小麦播种实时监控系统设计及试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 32-40.  
LU Caiyun, FU Weiqiang, ZHAO Chunjiang, et al. Design and experiment on real-time monitoring system of wheat seeding [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(2): 32-40. (in Chinese)
- [11] 廖庆喜, 邓在京, 黄海东. 高速摄影在精密排种器性能检测中的应用[J]. 华中农业大学学报, 2004, 23(5): 570-573.  
LIAO Qingxi, DENG Zaijing, HUANG Haidong. Application of the high speed photography checking the precision metering performances [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2004, 23(5): 570-573. (in Chinese)
- [12] TAO G, YI S, WANG C, et al. Analysis on dropping processing of precision sowing device in rice seeding bowl by high-speed photography [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(26): 197-201.
- [13] 张海娜, 马玉芳. 基于图像处理的机器播种参数检测方法研究[J]. 测控技术, 2015, 34(2): 44-47.  
ZHANG Haina, MA Yufang. Research on performance testing method of machine sowing based on image processing [J]. Measurement & Control Technology, 2015, 34(2): 44-47. (in Chinese)
- [14] 陈进, 边疆, 李耀明, 等. 基于高速摄像系统的精密排种器性能检测试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 90-95.  
CHEN Jin, BIAN Jiang, LI Yaoming, et al. Performance detection experiment of precision seed metering device based on high-speed camera system [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9): 90-95. (in Chinese)
- [15] 周荣, 张学明, 刘志刚. 基于高速摄像系统和图像边缘检测的精密排种器设计[J]. 农机化研究, 2016, 38(9): 108-112.  
ZHOU Mo, ZHANG Xueming, LIU Zhigang. Design metering device for precision based on high-speed camera and image edge detection [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(9): 108-112. (in Chinese)
- [16] KANDALA C V, PUPPALA N. Parallel-plate capacitance sensor for nondestructive measurement of moisture content of different types of wheat [C] // Sensors Applications Symposium. IEEE, 2012: 1-5.
- [17] KANDALA C V, SUNDARAM J. Nondestructive measurement of moisture content using a parallel-plate capacitance sensor for grain and nuts [J]. IEEE Sensors Journal, 2010, 10(7): 1282-1287.
- [18] 焦敬品, 李亮, 何存富, 等. 厚度渐变结构介电性能测试用变间距叉指型相邻电容传感器设计[J]. 机械工程学报, 2017, 53(18): 1-9.  
JIAO Jingpin, LI Liang, HE Cunfu, et al. Design of improved interdigital capacitive proximity sensor used for dielectric property detection of thickness gradual changed structure [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(18): 1-9. (in Chinese)
- [19] 吕汉明, 王晓叶, 马崇启. 基于电容传感器的醋酸纤维含油率检测[J]. 纺织学报, 2017, 38(6): 106-110.  
LÜ Hanming, WANG Xiaoye, MA Chongqi. Testing of oil content of cellulose acetate fibers using capacitance sensor [J]. Journal of Textile Research, 2017, 38(6): 106-110. (in Chinese)
- [20] 郭文川, 刘驰, 杨军. 小麦秸秆含水率测量仪的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 33-40.  
GUO Wenchuan, LIU Chi, YANG Jun. Design and experiment on wheat straw moisture content meter [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(1): 33-40. (in Chinese)
- [21] 赵丽清, 尚书旗, 高连兴, 等. 基于同心轴圆筒式电容传感器的花生仁水分无损检测技术[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 212-218.  
ZHAO Liqing, SHANG Shuqi, GAO Lianxing, et al. Nondestructive measurement of moisture content of peanut kernels based on concentric cylindrical capacitance [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(9): 212-218. (in Chinese)
- [22] 周利明, 王书茂, 张小超, 等. 基于电容信号的玉米播种机排种性能监测系统[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 16-21.  
ZHOU Liming, WANG Shumao, ZHANG Xiaochao, et al. Seed monitoring system for corn planter based on capacitance signal [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13): 16-21. (in Chinese)
- [23] 孙伟, 王关平, 吴建民. 勺链式马铃薯排种器漏播检测与补种系统的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(11): 8-15.  
SUN Wei, WANG Guanping, WU Jianmin. Design and experiment on loss sowing testing and compensation system of spoon-chain potato metering device [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11): 8-15. (in Chinese)
- [24] 周利明, 张小超, 苑严伟. 小麦播种机电容式排种量传感器设计[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 99-103.  
ZHOU Liming, ZHANG Xiaochao, YUAN Yanwei. Design of capacitance seed rate sensor of wheat planter [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(10): 99-103. (in Chinese)
- [25] 秦瑶, 陈洁, 方广有, 等. 微波透射法对小麦介电特性的测量[J]. 农机化研究, 2010, 32(7): 156-159.  
QIN Yao, CHEN Jie, FANG Guangyou, et al. Microwave transmission method to detecting permittivity of wheat [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(7): 156-159. (in Chinese)
- [26] 张爱华, 王平, 丑永新. 基于动态差分阈值的脉搏信号峰值检测算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2014, 44(3): 847-853.  
ZHANG Aihua, WANG Ping, CHOU Yongxin. Peak detection of pulse signal based on dynamic difference threshold [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2014, 44(3): 847-853. (in Chinese)