

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.018

小麦联合收获机测产误差动态自校准方法设计与试验

周永华¹ 易志祥^{1,2} 罗长海^{2,3} 李立伟^{2,3} 安晓飞^{2,3} 张安琪^{2,3}

(1. 广西大学电气工程学院, 南宁 530004; 2. 国家农业智能装备工程技术研究中心, 北京 100097;

3. 北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 为了进一步提高小麦联合收获机谷物测产系统的准确性与稳定性, 本文在第1代基于光电漫反射原理的小麦联合收获机测产装置基础上, 结合定量螺旋输送原理, 设计了一套联合收获机测产误差动态自校准系统, 提出了一种在联合收获机动态条件下, 测产误差自动进行反馈校准的方法。该系统由谷物体积传感器、卸粮转速传感器、粮仓粮位传感器、数据采集与处理模块、显示终端和误差反馈校准软件组成。2020年6月在北京市小汤山国家精准农业研究示范基地分别进行了卸粮转速传感器性能试验、室内螺旋输送台架试验和室外田间动态自校准性能验证试验。卸粮转速传感器性能试验结果表明卸粮转速传感器相对误差小于2%。台架试验结果表明, 在不同的卸粮转速下, 系统监测值与实际输出值误差不大于2.5%, 定量螺旋输送谷物瞬时流量与转速呈线性关系, R^2 达到0.9937。田间试验表明, 采用测产误差动态自校准方法的测量误差在-2.95%~3.13%, 比未使用该方法的测产装置测量结果降低了0.45个百分点, 同时系统的误差波动减小。测产误差动态自校准方法为小麦田间产量信息的准确获取提供了一种新的测量手段。

关键词: 联合收获机; 小麦; 测产误差; 自校准

中图分类号: S225.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S2-0147-07

Error Dynamic Self-calibration Method for Grain Yield Monitoring Based on Combine Harvester

ZHOU Yonghua¹ YI Zhixiang^{1,2} LUO Changhai^{2,3} LI Liwei^{2,3} AN Xiaofei^{2,3} ZHANG Anqi^{2,3}

(1. School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China

2. National Research Center of Information Technology for Agriculture, Beijing 100097, China

3. Beijing Research Center of Information Technology for Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: It is one of the most important information to obtain accurate grain yield for precision agriculture. In order to further improve the accuracy and stability of grain yield monitor system, a new dynamic self-calibration method which was based on the first generation of photoelectric grain yield monitor system and the principle of quantitative screw conveying was designed. The system was composed of grain volume sensor, unloading grain cylinder speed sensor, grain tank state sensor, data acquisition and processing module, display terminal and error feedback calibration software. In order to verify the accuracy of the system, the simulation test of quantitative screw conveying which was at different rotation speeds and different inclination angles was carried out. In June 2020, the field performance experiments were carried out at Beijing Xiaotangshan National Precision Agriculture Research and Demonstration Base. The performance test results of the unloading speed sensor showed that the error of the unloading speed sensor was less than 2%. Bench test results showed that the error between the monitored value of the system and the actual output value was less than 2.5% at different unloading speeds. There was a linear correlation between the flow rate and the rotational speed, and the correlation coefficient was 0.9937. The field error dynamic self-calibration experiment result showed that the relevant error was -2.95%~3.13%, which was decreased by 0.45 percentage points compared with that of the measuring device without this system. At the same time, the error fluctuation of the system was reduced. The dynamic self-calibration system provided a new method to improve the accuracy of grain yield monitor.

Key words: combine harvester; grain; yield monitoring error; self-calibration

收稿日期: 2020-08-15 修回日期: 2020-09-20

基金项目: 现代农业产业技术体系专项资金项目(CARS-03)和国家重点研发计划项目(2016YFD0700300, 2016YFD0700303)

作者简介: 周永华(1962—), 男, 教授, 主要从事农业智能装备技术研究, E-mail: 250945560@qq.com

通信作者: 张安琪(1989—), 男, 高级工程师, 主要从事农业智能装备技术研究, E-mail: zhangaq@nrcita.org.cn

0 引言

智慧农业是将现代信息技术运用到传统农业中,实现信息感知、定量决策、精准实施,使农业生产、经营和管理过程更智慧、更高效、更精准,谷物产量信息在线获取是其中重要组成。智能农机将现代信息与通信技术、计算机网络技术、智能控制与检测技术汇集于农业机械的生产和应用中,联合收获机产量信息获取是其中重要一环。通过在联合收获机上搭载测产系统,既能够获取农田地块产量信息,也可以用于分析作物产量空间变异情况,为智能农机和智慧农业提供支撑^[1-6]。

国内外研究人员设计了多种基于不同原理(基于冲量原理、光电原理、 γ 射线原理、激光原理、电容原理等)的谷物测产系统,但是测产精度和稳定性受到各种因素(机械结构、机械振动、地势、天气等)的影响^[7-11]。SHOJI等^[12-13]提出了一种适用于日本国内收获机的非线性模型简化标定方法,在升运器速度恒定前提下,提出了舍弃小脉冲的奇函数产量模型,其均方根相对误差为4.4%。周俊等^[14-15]设计了一种自适应陷波滤波器以消除测产传感器工作过程中存在的非稳定低频振动干扰,田间测产误差10%。张小超等^[16-18]基于称量原理设计了一种水平输送称量传感装置用于谷物流量在线检测,台架试验误差小于2%,但传感器装置结构复杂。李新成等^[19-21]提出了电压/升运器速度产量模型比传统的质量-电压模型更准确,并采用回归差分法降低振动噪声,采用双阈值滤波以及阈值取代法、前值取代法2种插值方法消除产量数据中的奇异值,田间测产试验验证均方根误差为2.03%。安晓飞等^[22-23]通过研究谷物(小麦)的运动特性构建出一种谷物产量光电转换模型,提出了一种双阈值动态均值滤波的数据处理方法,提高了测产数据的平滑度。

虽然国内外学者提出了许多不同的方法来提高测产系统的精度,但由于受国内地块碎片化严重、作业环境多变等因素影响,测产模型稳定性不高,误差波动较大。在研究联合收获机卸粮过程后发现,收获机卸粮时一般处于稳定状态,在螺旋输送机转速稳定状态下,卸粮输送量稳定。本文在第1代光电漫反射测产装置的基础上,结合定量螺旋输送原理,设计一套小麦联合收获机测产误差动态自校准系统,提出一种在联合收获机动态条件下,可以对测产误差自动进行反馈校准的方法,并分别进行卸粮转速传感器性能试验、室内螺旋输送台架试验和室外田间动态自校准性能验证试验。

1 材料与方方法

1.1 测产误差动态自校准方法原理

系统的整体结构如图1所示,系统主要由传感器模块、数据采集处理模块、显示终端组成。GPS和谷物体积传感器采集收获时的地理信息和升运器刮板上谷物的体积信号,嵌入在数据采集与处理模块中的光电计量模型对这2个信号进行处理得到实时产量、总产量、单位面积产量等信息,并通过终端显示;嵌入在数据采集与处理模块中的定量螺旋卸粮反馈模块在收获机卸粮时采集并处理卸粮转速传感器和粮仓粮位传感器信号,得到当次卸粮量。反馈部分是本系统的核心,其工作原理是:当收获机收获时光电测产计量模型获得测产监测值,卸粮时定量螺旋反馈单元获得卸粮值,卸粮结束后自校准模块获得光电模型的监测值和卸粮反馈值,通过反馈阈值判断是否对光电模型进行修正,减小系统误差。

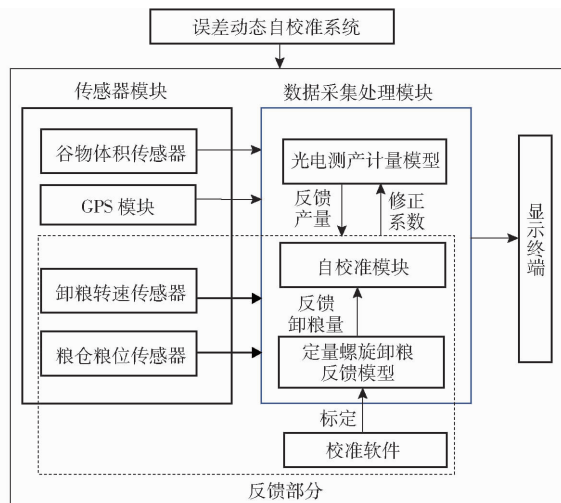


图1 系统整体结构框图

Fig. 1 Overall structure diagram of system

1.2 测产误差动态自校准系统硬件设计

为了实现自反馈校准功能,对第1代光电测产系统的传感器单元和数据采集与处理模块进行了改进。图2是改进后系统总体结构图,改进后的传感器单元包括:谷物体积传感器、粮仓粮位传感器和卸粮转速传感器。在卸粮时,螺旋输送机中谷物的运动速度由螺旋输送器的转速和谷物颗粒相对于螺片叶面的相对速度组成,这导致谷物在螺旋筒沿螺旋轴做直线运动,沿螺旋叶片做螺旋运动直到卸出^[5,24]。谷物颗粒在通过螺旋输送器的过程中,沿螺旋轴运动,输送量靠轴向速度来确定,而轴向速度由螺旋输送机转速决定,在卸粮转速稳定的状态下,可以保持螺旋输送器的输送量稳定输出^[25]。

传感器采用上海迈得豪实业有限公司的CHE18-80PA-710型光电传感器,传感器测量精

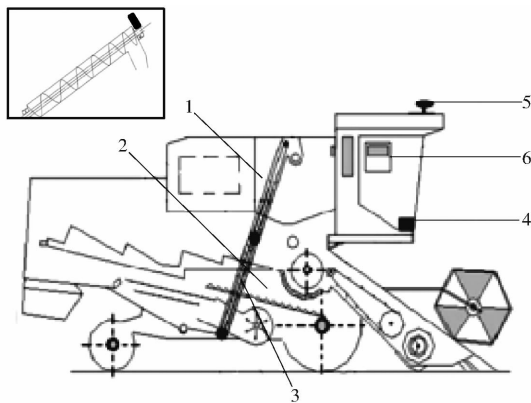


图2 改进后系统总体结构图

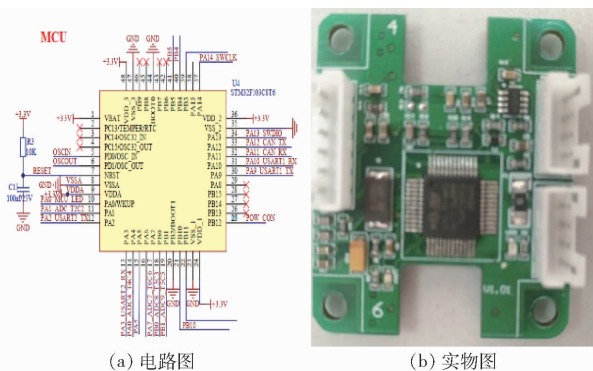
Fig. 2 Overall structure diagram of improved system

1. 卸粮转速传感器 2. 粮仓粮位传感器 3. 谷物体积传感器
4. 数据采集与处理模块 5. GPS 模块 6. 显示终端

度可达 99%，工作电压为 5 V，最大工作电流为 300 mA，检测距离为 50 ~ 800 mm，响应时间 0.1 ms，密封防护等级为 IP65。

谷物体积传感器安装在联合收获机升运器侧壁，将传感器的探测头伸入升运器侧壁内 1 ~ 2 mm 的距离，可以检测升运器刮板上谷物体积信息；粮仓粮位传感器安装在底部螺旋输送机正上方 30 cm、离仓壁 20 cm 处，光电响应距离 20 cm，可以检测粮仓谷物高度状态；卸粮转速传感器安装于卸粮筒螺旋输送机动力输出端，可以检测卸粮时的卸粮转速。

改进后系统数据采集与处理模块的 MCU 采用意法半导体的 STM32F103C8T6，是 STM32F103 系列的一款 32 位微控制器，内置 64 KB FLASH 存储容量，20 KB RAM 容量，处理器最高主频可达 72 MHz，内置 4 个定时器，3 个 U(S)ART 串口通信接口，外设资源丰富，可满足一般农业环境下作业需求。图 3 是数据采集与处理模块实物图。



(a) 电路图

(b) 实物图

图3 数据采集与处理模块

Fig. 3 Data acquisition and processing module

1.3 测产误差动态自校准方法设计

1.3.1 定量螺旋反馈单元标定方法设计

根据定量螺旋输送技术原理，谷物颗粒受到叶片的推力和离心力的作用，克服摩擦沿轴向运动，对

于某一输送机，所有参数都已确定，系统输出质量只与卸载速度成正比^[25-27]。对于固定型号联合收获机，卸粮螺旋输送机参数一定，卸载质量只与卸粮螺旋转速成正比。卸载瞬时质量 m_i 为

$$m_i = kpn_i \quad (1)$$

式中 k ——卸粮标定系数

p ——谷物容重, kg/m³

n_i ——卸粮螺旋输送机转速, r/min

将所有瞬时质量求和, 可得单车卸载总质量为

$$M_i = \sum_{i=1}^n m_i \quad (2)$$

式中 M_i ——卸载谷物总质量, kg

在实际卸粮过程中, 并不能将全部满载卸完, 对同一型号的收获机进行多次试验后发现, 粮仓剩余粮食质量 m 为

$$m = k_2p \quad (3)$$

式中 k_2 ——余粮标定系数

则卸粮总质量 M 为

$$M = \sum_{i=1}^n (kpn_i) + k_2p \quad (4)$$

为了对式(4)中的 k 和 k_2 进行标定, 至少需要两组卸粮测量值和卸粮实际值。

在定量反馈单元集成系统中, 对定量反馈单元的卸粮标定系数和余粮标定系数进行标定时, 需要进行 2 车次的卸粮试验, 通过误差反馈校准软件获得每车次的卸粮监测值 x , 通过人工称量获得每车次的卸粮实际值 y , 通过误差反馈校准软件将两组数据通过串口发送至系统, 系统对数据解析后, 结合式(4)计算获得新的卸粮标定系数和余粮标定系数, 并对系统自动进行更新。

1.3.2 自校准模块方法设计

付兴兰等^[23]根据光电漫反射原理以及刮板所载谷物近似几何模型建立了光电测产模型, 模型嵌入测产系统后未针对不同收获环境进行产量模型修正, 导致测产系统在不同地块测产误差波动较大。为了对不同收获环境下的测产模型产量进行修正, 在原来的产量计量模型上增加了产量计量系数, 则收割总产量 M_2 为

$$M_2 = \sum_{j=1}^n k_3 m_j \quad (5)$$

式中 k_3 ——光电产量计量系数

m_j ——光电测产瞬时产量

通过卸粮反馈质量 M 和光电监测质量 M_2 得到误差评定系数 k_4 为

$$k_4 = \frac{M_2}{M} \quad (6)$$

误差评定系数范围为

$$1 - \varepsilon \leq k_4 \leq 1 + \varepsilon \quad (7)$$

式中 ε ——给定的误差限值

$$k_3 = \frac{k'_3}{k_4} \quad (8)$$

式中 k'_3 ——修正前的光电产量计量系数

当定量螺旋反馈单元标定完成后,系统自校准模块开始工作,系统自校准流程如图4所示。自校准模块通过获取传感器的信号来判断当前系统的工作状态,当谷物体积传感器有信号,卸粮转速传感器没有信号时,系统处于收获状态,嵌入的光电测产模型工作。当谷物体积传感器和卸粮转速传感器都无信号,粮位传感器信号为“1”(1代表粮仓内有粮)时收获结束,自校准模块保存光电模型监测值 M_2 。当谷物体积传感器无信号,卸粮转速传感器有信号,粮位传感器的信号为“1”时系统处于卸粮状态,当粮位传感器的信号由“1”变为“0”(0表示粮仓内无粮)时卸粮结束,自校准模块获得卸粮反馈量 M 。

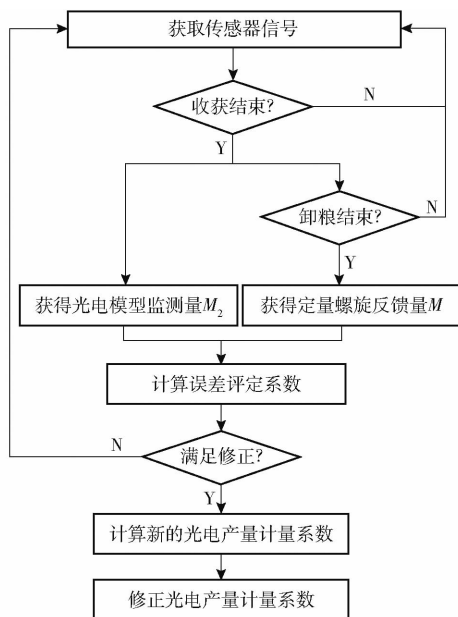


图4 系统自校准流程图

Fig. 4 System self-calibration flowchart

自校准模块获得 M_2 和 M 后,通过式(6)计算误差评定系数,设定误差限 ε 为 3%,即当误差评定系数在 0.97 ~ 1.03 之间时,表示此车收获的监测值与实际值在合理误差范围内,不对光电产量计量系数进行修正,当误差评定系数不在 0.97 ~ 1.03 之间时,表示此车收获的监测值与实际值不在合理误差范围内,需要通过式(8)得到新的光电产量计量系数,将新的光电产量计量系数替换旧的光电产量计量系数并存储在系统中为下一次测产做准备。

1.4 自校准系统误差反馈校准软件设计

自校准系统误差反馈校准软件采用 C++ 类库 MFC 进行编写,实现了对系统基本参数的设置、定量螺旋反馈单元的标定、传感器状态、卸粮信息的显示等功能。图5为误差反馈校准软件主界面,主要由通信单元、标定单元和显示单元组成。



图5 误差反馈校准软件主界面

Fig. 5 Error feedback calibration software

通信单元实现软件与下位机的数据正常通信,下位机通过 USART 模块发送数据,上位机采用 MFC 的 mscomm 控件进行串口通信,通过控件的 oncomm 事件接收来自串口的数据,并将下位机发送的原始数据显示在接收区,通过接收区的信息判断通信是否正常。串口通信协议定为:“9600, 1, 8, N”。

为了实现定量螺旋反馈单元的标定及系统基本参数的设置,标定单元将标定原始参数以自拟的标定协议发送给下位机,下位机接收到数据后进行解析、配置和标定。

显示单元主要实现对传感器状态、卸粮信息、光电产量系数的显示。卸粮转速传感器、粮位传感信息可以用来判断收获机的作业状态;卸粮信息可以获得定量反馈单元卸粮的监测值。

1.5 评价方法

为了检验误差动态自校准系统的准确性和稳定性,采用相对误差和标准差进行评价,相对误差计算公式为

$$E_{Ri} = \frac{H_{Pi} - H_{Ai}}{H_{Ai}} \times 100\% \quad (9)$$

式中 E_{Ri} ——相对误差, %

H_{Pi} ——系统监测产量, kg

H_{Ai} ——实际收获产量, kg

标准差计算公式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - u)^2} \quad (10)$$

式中 N ——试验总次数

x_i ——第 i 次试验误差

u —— N 次试验平均误差

2 试验结果与分析

2.1 卸粮转速传感器性能试验

为了验证卸粮转速传感器的准确性和稳定性,在谷王 TB60 型收获机上对卸粮转速传感器进行了静态空载试验。在 70、100、130、150、180、210 r/min 6 个卸粮转速水平下进行测试,通过误差反馈校准软件获得卸粮转速传感器的监测值,通过德图仪器 testo 470 精密型光学/机械转速测量仪测量实际转速,计算得到卸粮转速传感器的相对误差等,试验结果见表 1。

表 1 卸粮转速传感器试验结果

Tab.1 Test data of unloading speed sensor

序号	最大值/ (r·min ⁻¹)	最小值/ (r·min ⁻¹)	平均值/ (r·min ⁻¹)	实际值/ (r·min ⁻¹)	标准差/ (r·min ⁻¹)	相对误 差/%
1	76	71	73	74	2.04	1.37
2	109	103	105	107	2.31	1.87
3	140	133	137	136	2.73	0.74
4	157	148	153	154	3.14	0.67
5	187	182	184	183	2.10	0.57
6	214	206	210	208	3.20	0.96

由表 1 可知,卸粮转速传感器监测的最大相对误差为 1.87%,低于 2%,准确性较高;各转速水平下的最大标准差为 3.2 r/min,离散程度较小,具有较好的稳定性。

2.2 谷物测产定量螺旋输送台架试验

为了验证定量螺旋输送的准确性,进行了室内定量螺旋输送台架试验。定量螺旋输送台架由变频器、电机、螺旋输送机、支架台、螺旋输送机外壳、台秤、谷物颗粒以及卸粮桶构成,如图 6 所示。

为了验证定量螺旋输送谷物卸粮计量的性能,分别对 80、150、200 r/min 3 个卸粮转速条件下进行了定量螺旋机卸粮试验。在每个转速水平下进行 30 次卸粮过程,通过人工往粮仓内加粮的方式使卸粮的范围在 50 ~ 560 kg,每次卸粮结束后记录系统的监测质量和台秤称出的实际卸粮质量。图 7 为试验结果。

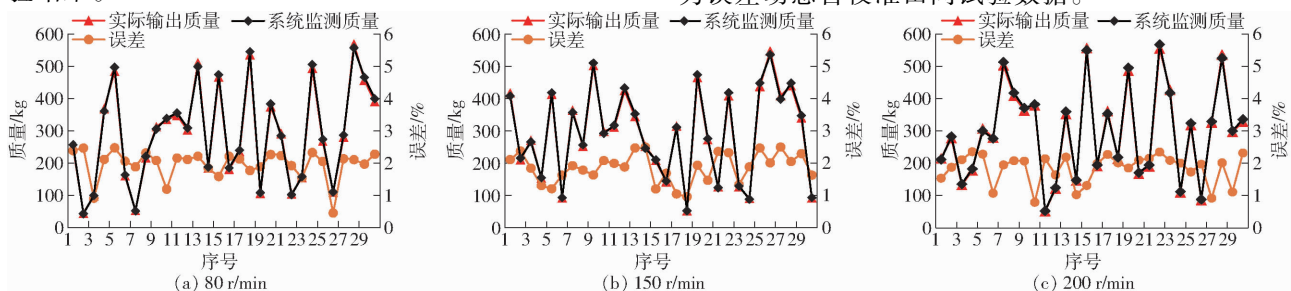


图 6 定量螺旋输送室内台架试验

Fig.6 Quantitative spiral conveyor laboratory bench test diagram

由图 7 可得,在 80、150、200 r/min 3 个卸粮转速条件下,系统监测值与实际输出值最大误差不超过 2.5%,系统准确性较高,误差主要在 1.0% ~ 2.3% 的范围内,说明系统稳定性较好。同时进一步研究了定量螺旋输送谷物瞬时流量与转速的关系,分别选取了 50 ~ 200 r/min 范围内多个卸粮转速进行试验,试验结果如图 8 所示。结果表明,卸粮转速与定量螺旋输送的瞬时流量呈线性关系,卸粮转速与实际瞬时流量决定系数 R^2 达到 0.993 7,结果表明在不同转速条件下,定量螺旋输送均可以准确测量卸粮质量。

2.3 田间动态自校准性能验证试验

误差动态自校准田间性能验证试验于 2020 年 6 月在北京市小汤山国家精准农业研究示范基地进行,如图 9 所示,试验地处 116.265 466° ~ 116.270 241°E,40.111 550° ~ 40.111 161°N,小麦种植品种为京冬 22,联合收获机为中国中联重科农业机械责任有限公司设计生产的自走轮式 TB60 型谷物联合收获机,其割幅宽度为 2.51 m,喂入量为 6 kg/s,行走速度为 2 ~ 4 km/h,外形尺寸为 6 600 mm × 3 000 mm × 3 420 mm。

对系统进行试运行 2 车得到 2 次卸粮值,通过误差反馈校准软件对定量螺旋反馈单元进行标定,标定成功后进行田间系统动态性能验证试验,试验共进行了 8 次,每车收获结束后记录产量监测值,卸粮结束后通过人工称量方式获得实际收获值。表 2 为误差动态自校准田间试验数据。

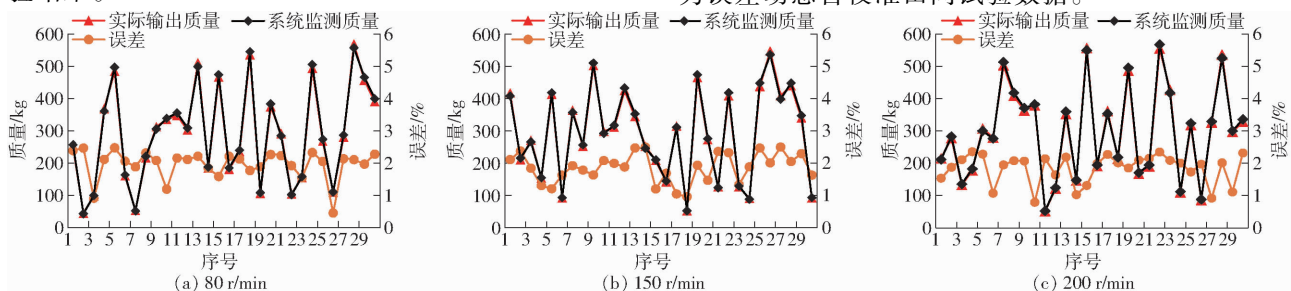


图 7 不同转速下卸粮试验结果

Fig.7 Experimental results of grain unloading at different rotating speeds

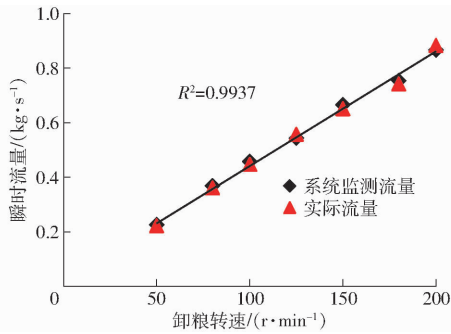


图8 定量螺旋输送谷物瞬时流量与转速关系曲线
Fig.8 Relationship between grain flow rate and rotation speed

系统第1次误差较大,这是因为第1次系统自反馈模块没有工作,光电计量系数为初始化值,当第1次卸粮结束后系统的自反馈模块开始工作了,对光电计量系数进行了修正,通过第2~8次可以看出,系统测产误差逐步趋于稳定,误差范围在-2.95%~3.13%,整体小于3.5%,说明系统具有较好的准确性和稳定性,完全满足田间实际测产需要。

通过图10可知,第1代光电测产系统的误差波动范围为-3.51%~3.36%,且误差有逐渐增大的趋势,而本系统当误差较大时能动态的对系统进行校准,保证误差在稳定的范围内波动。与第1代光电测产系统相比,本系统虽然误差只降低了0.45个百分点,但是能够对系统自动进行反馈校准,降低系统误差波动,减小系统误差,保证了系统的准确性和稳定性。

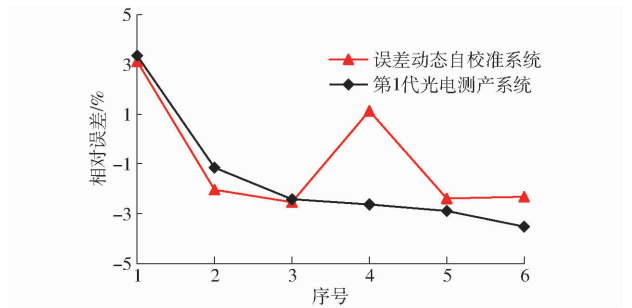


图10 误差对比
Fig.10 Error comparison diagram

3 结论

(1)设计了一套联合收获机测产误差动态自校准系统,提出了一种在联合收获机动态条件下,测产误差自动进行反馈校准的方法。

(2)卸粮转速传感器性能测试结果表明,卸粮转速传感器相对误差低于2%。室内台架试验表明,在不同的卸粮转速下,系统最大监测误差不大于2.5%,误差主要在1.0%~2.3%的范围;定量螺旋输送瞬时流量与转速呈线性相关,决定系数 R^2 达到0.9937。田间动态自校准性能验证试验表明,系统采用动态自校准方法后,系统动态测量误差范围在-2.95%~3.13%,系统准确性和稳定性可满足实际生产需要。



图9 误差动态自校准田间试验

Fig.9 Error dynamic self-calibration field experiment

表2 系统田间动态试验数据
Tab.2 System field dynamic test data

序号	产量监测值/kg	产量实际值/kg	测产误差/%
1	475.8	497.53	-4.37
2	560.4	543.40	3.13
3	797.8	814.37	-2.03
4	956.3	981.09	-2.53
5	820.6	811.32	1.14
6	1 002.7	1 027.18	-2.38
7	1 454.8	1 489.27	-2.31
8	1 582.1	1 630.17	-2.95

参 考 文 献

[1] 汪懋华.“精细农业”发展与工程技术创新[J]. 农业工程学报,1999,15(1): 1-8.
WANG Maohua. The development of precision agriculture and innovation of engineering technology [J]. Transactions of the CSAE, 1999, 15(3): 1-8. (in Chinese)

[2] 罗锡文,廖娟,胡炼,等.提高农业机械化水平促进农业可持续发展[J]. 农业工程学报, 2016,32(1): 1-11.
LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Improving agricultural mechanization level to promote agricultural sustainable development[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1): 1-11. (in Chinese)

- [3] AN Xiaofei, MENG Zhijun, WU Guangwei, et al. Development of grain yield monitoring system based on CAN bus technology [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp. 2): 262 - 266. (in Chinese)
- [4] SINGH M, VERMA A, SHARMA A. Precision in grain yield monitoring technologies: a review [J]. Agricultural Mechanization in Asia, Africa, and Latin America, 2012, 43(4): 50 - 59.
- [5] YANG C, EVERITT J H, MURDEN D, et al. Spatial variability in yields and profits within ten grain sorghum fields in South Texas [J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(4): 897 - 906.
- [6] 张小超, 胡小安, 张银桥, 等. 联合收获机粮食产量分布信息获取技术 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊): 173 - 176. ZHANG Xiaochao, HU Xiaolan, ZHANG Yinqiao, et al. Yield distribution information measurement for grain combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.): 173 - 176. (in Chinese)
- [7] LOGHAVI M, EHSANI R, REEDER R. Development of a portable grain mass flow sensor test rig [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 61(2): 160 - 168.
- [8] 张小超, 王一鸣, 方宪法, 等. 精准农业的信息获取技术 [J]. 农业机械学报, 2002, 33(6): 126 - 128. ZHANG Xiaochao, WANG Yiming, FANG Xianfa, et al. Information acquisition techniques of precision agriculture [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(6): 126 - 128. (in Chinese)
- [9] ROBERTS A W. Design considerations and performance evaluation of screw conveyors [J]. Powder Technology, 2009, 19(3): 4 - 9.
- [10] OWEN P J, CLEARY P W. Prediction of screw conveyor performance using the discrete element method (DEM) [J]. Powder Technology, 2009, 19(3): 274 - 288.
- [11] MKHABELAA M S, BULLOCKA P, RAJB S, et al. Crop yield forecasting on the Canadian Prairies using MODIS NDVI data [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(3): 385 - 393.
- [12] SHOJI K, ITOH H, KAWAMURA T. In-situ non-linear calibration of grain-yield sensor-optimization of parameters for flow rate of grain vs. force on the sensor [J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2009, 2(3): 78 - 82.
- [13] SHOJI K, MIYAMOTO M. Improving the accuracy of estimating grain weight by discriminating each grain impact on the yield sensor [J]. Precision Agriculture, 2014, 15(1): 31 - 43.
- [14] 周俊, 刘成良. 平行梁冲量式谷物质量流量传感器信号处理方法 [J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 183 - 187. ZHOU Jun, LIU Chengliang. Signal processing method for impact-based grain mass flow sensor with parallel beam load cell [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(1): 183 - 187. (in Chinese)
- [15] 周俊, 周国祥, 苗玉彬, 等. 悬臂梁冲量式谷物质量流量传感器阻尼设计 [J]. 农业机械学报, 2005, 36(11): 121 - 123, 127. ZHOU Jun, ZHOU Guoxiang, MIAO Yubin, et al. Damping design of impact-based grain yield sensor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(11): 121 - 123, 127. (in Chinese)
- [16] 张小超, 胡小安, 张爱国, 等. 基于称重法的联合收获机测产方法 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 125 - 129. ZHANG Xiaochao, HU Xiaolan, ZHANG Aiguo, et al. Method of measuring grain-flow of combine harvester based on weighing [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3): 125 - 129. (in Chinese)
- [17] 李伟, 张小超, 胡小安, 等. 联合收获机称量式测产系统软件设计 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(增刊): 94 - 99. LI Wei, ZHANG Xiaochao, HU Xiaolan, et al. Design of intelligent yield monitoring software for combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.): 94 - 99. (in Chinese)
- [18] 梁学修, 陈志, 张小超, 等. 联合收获机喂入量在线监测系统设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊): 1 - 6. LIANG Xuexiu, CHEN Zhi, ZHANG Xiaochao, et al. Design and experiment of on-line monitoring system for feed quantity of combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.): 1 - 6. (in Chinese)
- [19] 李新成, 李民赞, 王锡九, 等. 联合收割机远程测产系统开发及降噪试验 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(2): 1 - 8. LI Xincheng, LI Minzan, WANG Xijiu, et al. Development and denoising test of grain combine with remote yield monitoring system [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(2): 1 - 8. (in Chinese)
- [20] 李新成, 李民赞, 郑立华, 等. 谷物联合收获机测产系统采样频率优化与试验 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊): 74 - 78. LI Xincheng, LI Minzan, ZHENG Lihua, et al. Test and optimization of sampling frequency for yield monitor system of grain combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.): 74 - 78. (in Chinese)
- [21] 李新成, 孙茂真, 李民赞, 等. 谷物联合收获机自动测产系统产量模型 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 91 - 96. LI Xincheng, SUN Maozhen, LI Minzan, et al. Modeling algorithm for yield monitor system of grain combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 91 - 96. (in Chinese)
- [22] 安晓飞, 付兴兰, 孟志军, 等. 光电信号与收割机谷物产量数据转换模型的构建与验证 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(增刊 1): 36 - 41. AN Xiaofei, FU Xinglan, MENG Zhijun, et al. Grain yield data transformation model based on photoelectric principle and its validation [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp. 1): 36 - 41. (in Chinese)
- [23] 付兴兰, 张兆国, 安晓飞, 等. 光电漫反射式联合收割机谷物产量计量系统研发与性能试验 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(3): 24 - 30. FU Xinglan, ZHANG Zhaoguo, AN Xiaofei, et al. Development and performance experiment on grain yield monitoring system of combine harvester based on photoelectric diffuse reflectance [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(3): 24 - 30. (in Chinese)
- [24] 李振亮, 付长江, 李亚. 定量螺旋给料机的结构研究 [J]. 盐业与化工, 2010, 39(1): 27 - 29.
- [25] 付兴兰, 安晓飞, 张兆国, 等. 基于单质点法的联合收割机谷物卸粮质量理论建模与分析 [J]. 江苏农业科学, 2018, 46(11): 208 - 211. FU Xinglan, AN Xiaofei, ZHANG Zhaoguo. Theoretical modeling and analysis of grain unloading mass measurement of combine-harvester based on single particle method [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(11): 208 - 211. (in Chinese)
- [26] 胡勇克, 戴莉莉, 皮亚南. 螺旋输送器的原理与设计 [J]. 南昌大学学报, 2000, 22(4): 29 - 33.
- [27] 宋欢. 定量螺旋输送机的优化设计及模拟 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2016. SONG Huan. Optimum design and simulation of quantitative screw conveyor [D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2016. (in Chinese)