doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.05.013

基于占空比测量的谷物联合收获机产量监测系统研究

金诚谦[1,2]　蔡泽宇[1]　杨腾祥[1]　刘　政[1]　印　祥[2]　达飞鹏[3]

(1.农业农村部南京农业机械化研究所,南京 210014;2.山东理工大学农业工程与食品科学学院,淄博 255000;
3.东南大学自动化学院,南京 210096)

摘要:针对谷物联合收获机产量监测系统成本高、结构复杂和稳定性较低的问题,设计了基于占空比测量的谷物联合收获机产量监测系统,由对射式光电传感器、GPS 模块、数据处理单元、数据存储单元和可视化单元组成。系统工作时,通过对射式光电传感器监测刮板上谷物遮挡与不遮挡两种电压信号,通过软件系统处理信号中高度对应的占空比,利用占空比与产量计量模型的关系获得产量数据,并连同系统的绝对时间、GPS 数据存储到系统中。通过 EDEM 仿真和理论模型分析,推导了占空比测量值与谷物质量的正比例关系。利用台架试验对占空比测量值与谷物质量进行了全局模型和局部模型拟合,决定系数 R^2 均不小于 0.988。随后通过台架试验对全局模型和局部模型进行模型分析,台架试验结果表明,虽然局部模型可能对固定转速下的测量数据更优,但全局模型更具有通用性。随着系统测量数据的增加,相对误差逐步减小。田间试验中对系统测量的异常信号进行了统计和分析,为了减少异常信号对测产误差的影响,对系统测量值与实际产量进行了标定。田间试验结果表明,产量监测系统测产最大相对误差为 3.83%,平均相对误差为 0.40%,系统整体误差和误差波动均较小。

关键词:谷物联合收获机;占空比;产量监测系统;光电式传感器;谷物流量

中图分类号:S225.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2022)05-0125-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Yield Monitoring System of Grain Combine Harvester

JIN Chengqian[1,2]　CAI Zeyu[1]　YANG Tengxiang[1]　LIU Zheng[1]　YIN Xiang[2]　DA Feipeng[3]

(1. *Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing* 210014, *China*
2. *School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo* 255000, *China*
3. *School of Automation, Southeast University, Nanjing* 210096, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of high cost, complex structure and low stability of grain combined harvester yield monitoring system, a grain harvester yield monitoring system was designed based on duty cycle measurement, which consisted of photoelectric sensor, GPS module, data processing unit, data storage unit and visualization unit. When the system worked, two voltage signals of grain covering and non-covering on the scraper were monitored by the reflection photoelectric sensor, and the highly corresponding duty ratio in the signal was processed by the software system. The relationship between the duty ratio and the output measurement model was used to obtain the output data, which was stored in the system together with the time and GPS data of the system. Through EDEM simulation and theoretical model analysis, the direct proportional relationship between the measured duty ratio and grain mass was deduced. The global model and local model were fitted to the measured duty cycle and grain mass by bench test, and the R^2 of all the fitting lines were not less than 0.988. Then the global model and the local model were analyzed by the bench test. The bench test results showed that although the local model may be better for the measured data at fixed speed, the global model was more versatile. With the increase of measurement data, the relative error was decreased gradually. In the field experiment, the abnormal signals in the system measurement process were counted and analyzed. In order to reduce the influence of abnormal signals on the measurement error, the measured values of the system were

收稿日期:2021-06-21　修回日期:2021-08-10

基金项目:江苏省农业科技自主创新基金项目(CX(20)1007)、江苏省现代农机装备与技术示范推广项目(NJ2020-60)、现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-04-PS26)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(S202104-01)和中国农业科学院科技创新工程项目(农科院办(2014)216 号)

作者简介:金诚谦(1973—),男,研究员,博士,主要从事大田作物收获机械化与智能化技术研究,E-mail:412114402@qq.com

calibrated with the actual output. The field experiment results showed that the maximum relative error of the yield monitoring system was 3.83%, the average relative error was 0.40%, and the overall error and error fluctuation of the system were small.

Key words: grain combine harvester; duty ratio; production monitoring; photoelectric sensor; grain flow

0 引言

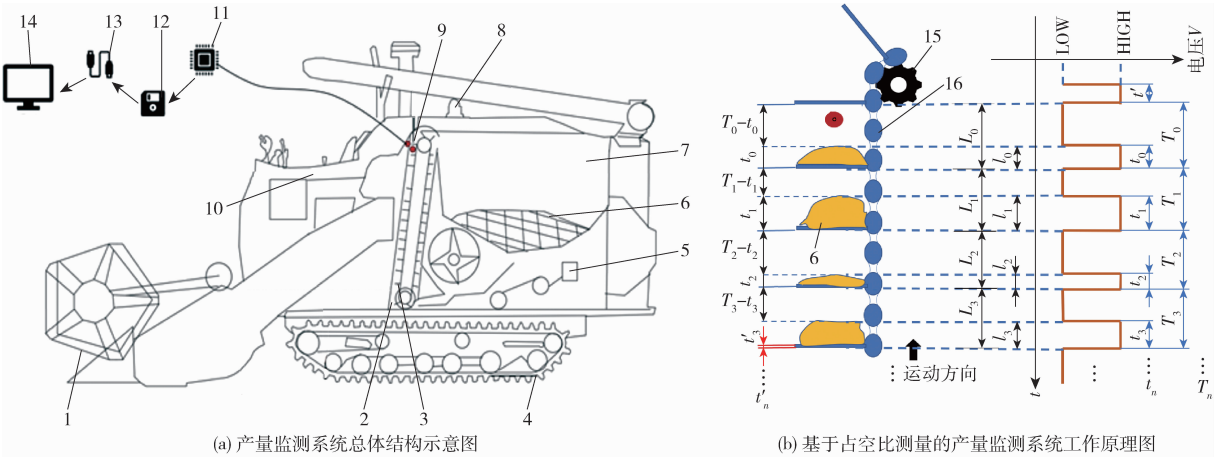
精准农业(Precision agriculture, PA),通过对耕种、植保、收获等环节的掌握和管理,达到形成良性农业生产系统的目的[1]。收获环节中作物产量分布数据是评价农业生产效果的重要指标,依赖于不同载体的产量监测方式很多,包括无人机图像[2-3]、无人机高光谱[4-5]、遥感[6-7]、联合收获机产量监测[8-10]等。其中无人机图像、无人机高光谱与遥感都是利用较强的特征对应关系建立特征值与产量的相关模型,方法受构建的模型和采集的数据质量影响较大。而联合收获机是谷物收获环节的直接参与者,通过对联合收获机作业过程的瞬时产量监测,可以准确获得大田中作物产量分布的实时信息。

联合收获机产量监测系统关键技术包括:产量测量技术[11]、收获损失测量技术[12-13]、谷物含水率测量技术[14-15]、产量图构建技术[16-17]、产量图解读与应用技术[18]。其中产量测量技术是产量监测系统的核心技术之一,20 世纪 80 年代以来,欧美等国对产量测量技术进行了大量的研究,分别提出了质量流量式产量监测系统和体积流量式产量监测系统,使用的传感器包括压力式传感器、扭矩传感器、应力测量传感器、γ 射线或 X 射线传感器、超声波传感器、电容式传感器、相机、激光传感器等。为了探讨不同的传感器和测量方式的优劣,研究人员对不同的产量监测系统进行了误差分析与相关对比试验。研究表明,不同测产方式的测量误差不存在明显差别,主要误差来源包括:不校准误差、传感器响应误差、谷物含水率测量误差、谷物流分布不均带来的误差。国内自 20 世纪 90 年代末,部分科研院所分别对测产理论、测产装置、系统优化、误差修正等关键技术开展了大量的研究和试验[19-21]。其中在冲量式产量测量方法及装置优化方面取得了显著成果,包括平行梁冲量式流量传感器设计[22]、基于回归差分信号处理方法的双板式冲量传感器设计[23-25]、自适应噪声对消算法[26]、均值滤波算法等[27]。

虽然冲量式测产方式平均测量误差小于 5%,但是受装置安装难度、维护成本、移植性等影响,尚未得到商业化应用。我国在非冲量的产量测量方法上研究较少,且在产量监测系统中大都采用转速测量传感器,成本高、易出现故障。本研究拟采用安装简单、维护方便的对射式光电传感器,基于占空比测量的方法,通过产量计量模型的计算,实现谷物联合收获机作业过程中产量信息的实时测量。

1 基于占空比测量的谷物产量监测原理

产量监测系统总体结构如图 1a 所示,包括:对射式光电传感器、GPS 天线、数据处理单元、数据存储单元和可视化终端。在联合收获机作业过程中,谷物由割台喂入然后进入脱粒清选装置,再经水平运输器输送至升运器的底部。随后谷物由刮板提升



(a) 产量监测系统总体结构示意图 (b) 基于占空比测量的产量监测系统工作原理图

图 1 基于占空比测量的谷物联合收获机产量监测系统结构图与原理图

Fig. 1 Principle of grain combine yield monitoring system based on duty cycle measurement

1. 割台 2. 升运器 3. 刮板 4. 底盘 5. 脱粒清选装置 6. 谷物 7. 粮仓 8. GPS 定位传感器 9. 对射式光电传感器 10. 驾驶室 11. 数据处理单元 12. 数据存储单元 13. 数据传输单元 14. 显示终端 15. 齿轮 16. 链条

并输送至粮仓，当刮板上谷物经过并遮挡住对射式光电传感器发射端的近红外光时，PNP 型传感器的输出电压信号由低电平转变成高电平（NPN 型相反），当刮板上谷物远离后，传感器的电压信号又恢复为低电平，如图 1b 所示，图中 l_n 为谷物堆积的高度，t_n 为谷物经过光电传感器的时间，L_n 为连续两个刮板之间的距离，T_n 为连续两个刮板经过光电传感器的时间，t'_n 为刮板经过光电传感器的时间，通过对采集到的信号进行处理，利用计量模型最终得到联合收获机中谷物进入粮仓的瞬时产量。

在升运器工作中，考虑到刮板与链条之间为刚性连接，因此刮板与刮板之间的距离 L_n 基本相等，刮板到刮板的运动时间 T_n 也基本相等。即使由于加工工艺、安装过程中存在误差或是刮板存在变形，都不影响刮板运动一圈的周期 T 和其对应行程 L，其中周期 $T = T_1 + T_2 + \cdots + T_i$，$i$ 为刮板的总数量。因此，通过测量高电平在周期下的累计占空比 $\sum(t_n/T_n)$，再经过处理可以获得谷物的产量，此外考虑到刮板厚度会对占空比测量值 t_n/T_n 产生影响，如图 1b 中 t'_3 所示，为消除刮板厚度的影响，通过预先测量刮板厚度对应的占空比 t'_n/T_n，最后在谷物产量测量中进行修正。根据产量监测系统的工作原理，占空比测量值 t_n/T_n 与产量 Y 关系为

$$Y = f\left(\sum\left(\frac{t_n}{T_n} - \frac{t'_n}{T_n}\right)\sum L_n\right) \tag{1}$$

式中　f——占空比对应的高度与产量的计量模型

t_n/T_n——系统测量占空比

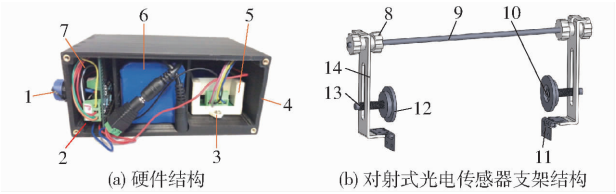
t'_n/T_n——刮板遮挡占空比

$\sum L_n$——T_n 周期下刮板的运动距离，一定周期内 $\sum L_n$ 为定值

2　产量监测系统设计

2.1　硬件选型及设计

根据产量监测系统的原理，系统中使用的模块和传感器包括对射式光电传感器、数据采集卡、非差分的 GPS 模块和 GPS 有源天线。对射式光电传感器为上海木西电子科技有限公司的 PM8 - T2MPB - Y3L2/C45 型，其供电电压为 10 ~ 30 V，响应时间小于等于 1 ms。数据采集卡为 NI 公司的 USB - 6001 型，其具有 4 路差分、8 路单端，ADC 分辨率为 14 位，最大采样率 20 kS/s，输入电压量程 ± 10 V。GPS/北斗定位模块为信智能科技有限公司的 HS6601 型，工作电压 5 ~ 28 V，定位精度 2.5 m，同时支持 GPS 定位和北斗定位。在硬件设计中，将对射式光电传感器的电路、电源和 GPS 模块设计为一体，其通过接口与各传感器和便携式计算机（PC）联系，其结构如图 2a 所示。其中，光电传感器需安装在升运器上，考虑到联合收获机作业中灰尘对传感器的影响，在安装支架设计中采用了图 2b 的结构，方便从丝杆处打开和维护传感器。



(a) 硬件结构　　(b) 对射式光电传感器支架结构

图 2　产量监测系统的硬件

Fig. 2　Voltage divider circuit of photoelectric sensor

1. 对射式光电传感器接口　2. USB - 6001 型采集卡接口　3. 便携式计算机接口　4. GPS 天线接口　5. GPS 模块　6. 电源　7. 光电传感器处理电路　8. 螺母　9. 丝杆　10. 对射式光电传感器发射端　11. 活动合页　12. 遮光罩　13. 对射式光电传感器接收端　14. 支撑架

2.2　软件设计

系统软件由初始化模块、校准模块、数据采集和处理模块、数据存储模块组成，流程图如图 3 所示。软件运行后，根据用户设定的采集板卡的物理通道、采样时钟、瞬时产量的记录间隔和模拟信号采样率等参数，系统进行初始化并等待用户指令。随后在校准模块中，对联合收获机空载状态下刮板厚度的占空比进行测量，用于系统对谷物高度的修正。在联合收获机进入田间作业后，软件进入数据采集和处理模块，程序对采集卡采集的电压信号进行占空比计算，得到谷物高度对应的占空比。随后系统将固定时间间隔内的累计占空比通过计量模型转换为瞬时产量，同时计算得到作业以来的总产量。最后在数据存储模块中将时间、瞬时产量、总产量、经度、纬度、航速、航向等数据定时存入数据库中。

3　占空比测量值与产量的计量模型构建

3.1　EDEM 仿真试验

为了建立软件中占空比测量值与产量的计量模型，本文利用 EDEM 仿真软件对谷物随刮板运动时的堆积状态进行分析[28-31]。在仿真计算求解之前，通过自制的三维点云扫描系统扫描出水稻表面的三维坐标，并获得 stl 文件，如图 4a 所示。随后将 stl 文件通过 EDEM 颗粒模板导入，利用球形填充生成谷物颗粒（图 4b）。此外，利用 SolidWorks 对联合收获机升运器机械结构进行了建模（图 4c）。为了分析升运器不同倾斜角下谷物堆积状态，将重力加速度 g 分别设置为与刮板运动方向平行、与刮板运动方向呈 36.9°、与刮板运动方向呈 45°共 3 种情况，并分别进行求解。

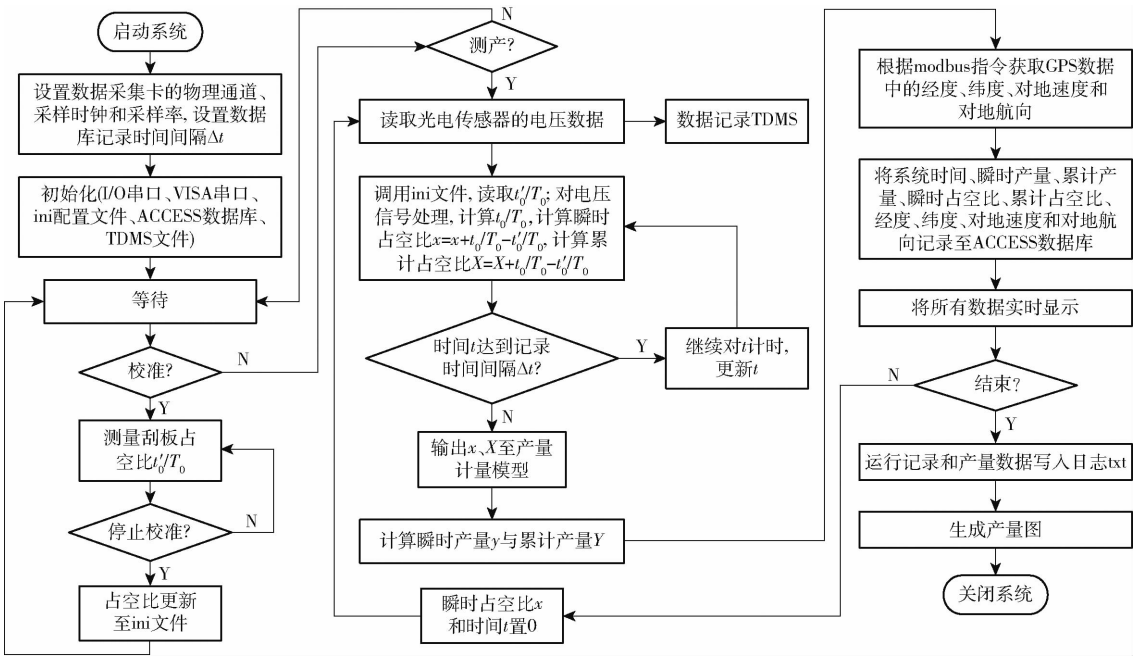
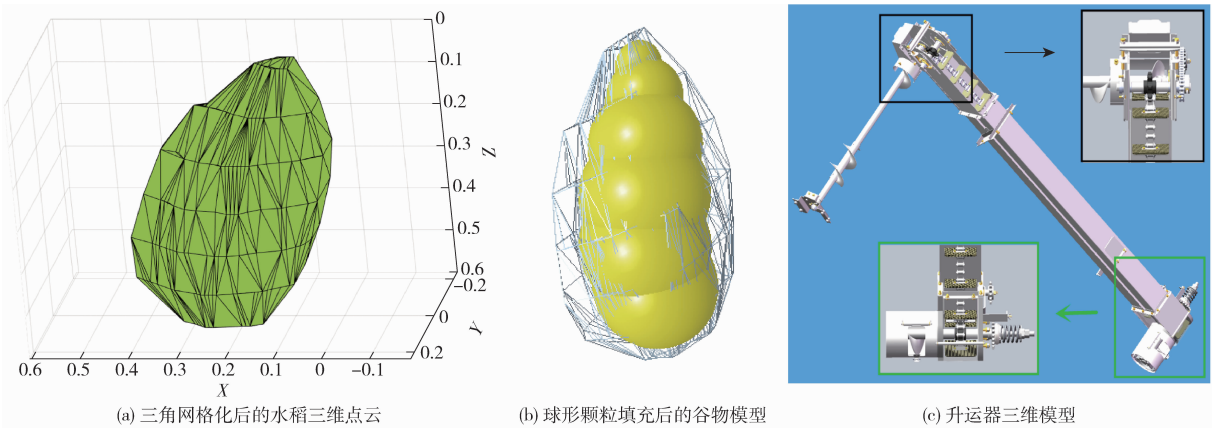


图 3 产量监测系统软件流程图

Fig. 3 Framework and flowchart of yield monitoring system software



(a) 三角网格化后的水稻三维点云 (b) 球形颗粒填充后的谷物模型 (c) 升运器三维模型

图 4 模型设计

Fig. 4 Model creation and import

水稻颗粒、钢板、水稻芽种与钢板的相互作用力学特性参数设置参考文献[32 – 33],具体设置的参数如表 1、2 所示。

表 1 EDEM 中物性参数的设定值

Tab. 1 Physical parameters set in EDEM

材料	泊松比	剪切模量/Pa	密度/(kg·m^{-3})
水稻	0.4	1.1×10^{7}	1 053
钢板	0.3	7.0×10^{10}	7 800

表 2 相互作用的力学参数设定值

Tab. 2 Mechanical parameters of interaction set

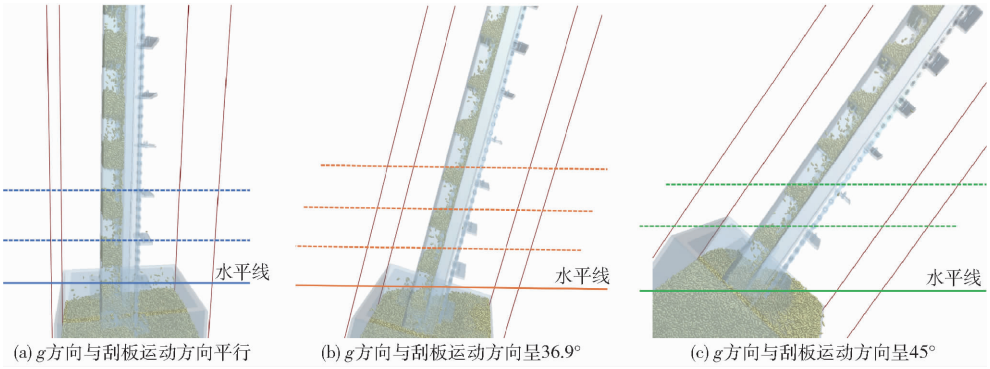
相互作用材料	恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
水稻与水稻	0.311	0.369	0.080
水稻与钢板	0.451	0.297	0.066

3.2 EDEM 仿真结果

在 EDEM Simulator 计算结束后,对 ANALYST 中谷物在升运器上运动过程中的堆积分布进行观察。在垂直方向运动中,重力加速度 g 与刮板运动方向平行时,无论是在粮食较少还是较多的情况下,谷物堆积的截面形状都接近于长方形,如图 5a 所示。在斜向 36.9°方向运动中,谷物在刮板上的堆积如图 5b 所示,其截面形状接近于梯形。当升运器与水平面的倾斜角度呈 45°时,谷物在刮板上的堆积如图 5c 所示,此时谷物堆积的截面中梯形顶部的角度越来越大。认为理想状态下,谷物堆积的顶部平面与水平面平行。

3.3 占空比测量值与产量计量模型的理论分析

根据 EDEM 仿真结果中的理想化模型,谷物堆积形状如图 6 所示[34 – 35]。谷物堆积模型可以分为 3 部分,下方的方体区域 *abfe* – *dijh*、顶部的三棱柱区域 *dic* – *hjg* 和需要去除的刮板与链条链接的长方体区域 *klmn* – *oprq*,谷物容积 V 计算公式为



(a) g方向与刮板运动方向平行　(b) g方向与刮板运动方向呈36.9°　(c) g方向与刮板运动方向呈45°

图 5　不同倾斜角下谷物堆积的仿真结果

Fig. 5　Simulation results of grain accumulation at different inclination angles

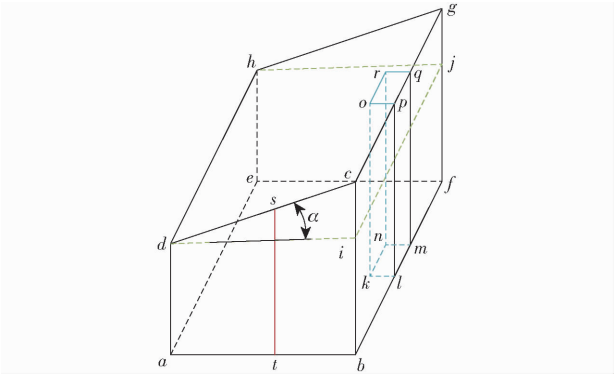


图 6　谷物堆积理论模型

Fig. 6　Theoretical model of grain accumulation

$$V = V_{abfe-dijh} + V_{dic-hjg} - V_{klmn-oprq} \tag{2}$$

已知刮板的长、宽分别为 l_{ab}、l_{bf}，升运器与水平面的角度为 α，与链条固定的预留口长宽分别为 l_{kl}、l_{mn}。光电传感器安装固定后，传感器在刮板的位置距离刮板的边缘长度 l_{at} 也唯一确定。不同高度的谷物从传感器前经过，产生了与长度 l_{st} 对应的占空比 η。因而根据本文的测量原理需要对 l_{st} 与谷物堆积的容积关系进行建模。

刮板上的谷物体积计算公式为

$$V = (l_{bf}l_{ab} - l_{kl}l_{lm})l_{st} + \left(\frac{l_{bf}l_{ab}^2}{2} + l_{kl}l_{lm}l_{at} - l_{bf}l_{ab}l_{at} - l_{kl}l_{lm}l_{ab}\right)\tan\alpha \tag{3}$$

从式(3)中可看出理想模型下谷物的堆积体积与光电传感器的测量值 l_{st} 之间存在线性关系。但本文的基于占空比的产量监测系统在空转对刮板的厚度进行校准后，当 l_{st} 为 0 时谷物的体积 V 也为 0，式(3)中常数项的值为 0。因此，系统中测量到的谷物质量 m 与 l_{st} 对应的占空比 η 呈正比关系，公式为

$$m = k\eta \tag{4}$$

式中　k——占空比与谷物质量的正比例系数

3.4　仿真结果下的理论分析与基于台架试验的计量模型构建

在获得占空比测量值与产量的正比例关系后，通过台架试验拟合出正比例系数，得到式(4)中产量与累计占空比正比例系数。试验台架结构如图 7 所示。试验时，由电机通过带传动带动螺旋输送器转动，粮食从粮箱横向输送至升运器，接着谷物随着升运器内的刮板向上输送。在升运器侧壁上安装有对射式光电传感器，产量监测系统实时监测谷物的高度信号，测量占空比的同时，人工从顶部的出料斗旁的横向螺旋输送器出口处接粮，通过多次试验获得拟合数据。

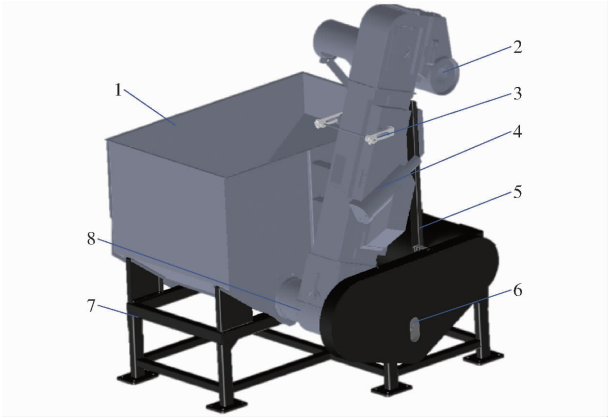


图 7　试验台架结构图

Fig. 7　Device for bench test

1. 粮箱　2. 升运器　3. 对射式光电传感器　4. 水分传感器　5. 电机　6. 传送带　7. 机架　8. 运输器

试验于 2020 年 9 月 2—4 日在农业农村部南京农业机械化研究所实验室完成，试验中谷物选用安徽省南陵地区的带壳早稻稻谷。用于试验标定的称量装置选用凯丰 K－FINE 型商用台秤，称量范围 0～200 kg，分度值 20 g，误差 50～200 g。考虑到不同转速的影响，试验分别在电机变频器设定值 10 Hz (190 r/min)、15 Hz(287 r/min)和 20 Hz(385 r/min) 3 个转速下进行了 28、16、15 组试验，系统中累计占空比测量值与台秤测量的谷物实际质量的数据如图 8 所示。

根据测量结果，使用 SPSS 软件对累计占空比和谷物实际称量质量进行拟合，参考理论公式(式(4))累计占空比和实际称量质量呈正比关系，

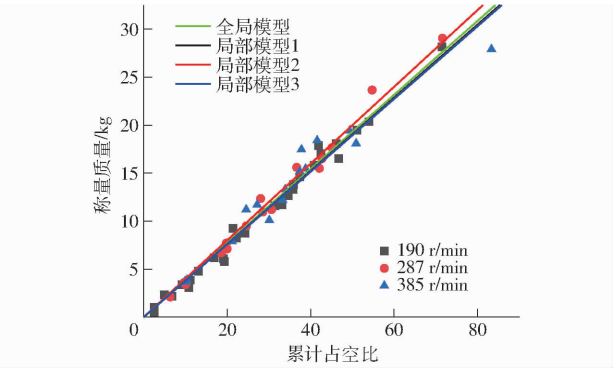


图 8 不同转速下台架试验建模数据与全局模型和局部模型的拟合曲线

Fig. 8 Fitting curves of modeling data and global model and local model of bench test at different rotating speeds

具有约束条件 $y=x=0$。因此,在 SPSS 软件回归分析中,采用不带常数项的线性回归拟合。分别对 190、287、385 r/min 3 种转速下的测量数据单独进行了拟合,拟合结果分别为:

局部模型 1

$$y=0.381x \tag{5}$$

局部模型 2

$$y=0.400x \tag{6}$$

局部模型 3

$$y=0.379x \tag{7}$$

最后对 190、287、385 r/min 3 种转速下的全部测量数据进行了拟合,拟合结果全局模型为

$$y=0.386x \tag{8}$$

4 个拟合曲线拟合效果显著,决定系数 R^2 分别为 0.996、0.996、0.988、0.993,4 个拟合曲线如图 8 所示。

由图 8 可以看出,在升运器转速为 190、287、385 r/min 3 种情况下,占空比测量数据与实际谷物质量的数据基本一致,甚至图中黑色与蓝色线基本重合,转速 287 r/min 时出现了微小偏差,其中拟合的差异可能是受样本量的影响。

4 验证试验

4.1 模型台架验证试验

模型台架验证试验分别在 190、287、385 r/min 3 种转速下进行了 22、14、15 组试验。在原始占空比测量值的基础上,对所有测量数据分别利用式(5)~(8)的全局模型进行了产量预测。对不同模型的预测值分析相对误差,计算公式为

$$E_r=\frac{m_m-m_r}{m_r}\times 100\% \tag{9}$$

式中 E_r——相对误差 m_m——预测产量

m_r——实际产量

转速 190、287、385 r/min 下产量监测系统的测量数据、谷物实际质量、累计占空比、各个模型下预测值与真值的相对误差计算结果分别见表 3~5。

表 3 转速 190 r/min 下产量监测系统测量值

Tab. 3 Output monitoring system measured at speed of 190 r/min

谷物实际质量/kg	占空比测量值	全局模型计算值/kg	全局模型误差/kg	全局模型相对误差/%	局部模型 1 计算值/kg	局部模型 1 相对误差/%	局部模型 2 计算值/kg	局部模型 2 相对误差/%	局部模型 3 计算值/kg	局部模型 3 相对误差/%
12.90	35.68	13.77	0.87	6.76	13.59	5.38	14.27	10.64	13.52	4.83
16.90	46.69	18.02	1.12	6.65	17.79	5.27	18.68	10.51	17.70	4.71
18.35	45.38	17.52	-0.83	-4.53	17.29	-5.77	18.15	-1.08	17.20	-6.27
18.20	47.76	18.43	0.23	1.29	18.20	-0.02	19.10	4.97	18.10	-0.54
16.80	46.00	17.76	0.96	5.70	17.53	4.33	18.40	9.52	17.43	3.77
25.90	64.93	25.06	-0.84	-3.23	24.74	-4.48	25.97	0.28	24.61	-4.99
18.65	46.26	17.86	-0.79	-4.26	17.62	-5.50	18.50	-0.78	17.53	-5.99
18.90	44.68	17.25	-1.65	-8.75	17.02	-9.93	17.87	-5.44	16.93	-10.40
6.30	17.77	6.86	0.56	8.89	6.77	7.48	7.11	12.83	6.73	6.90
6.50	19.23	7.42	0.92	14.18	7.33	12.70	7.69	18.34	7.29	12.13
21.25	56.19	21.69	0.44	2.06	21.41	0.74	22.48	5.77	21.30	0.22
17.35	46.60	17.99	0.64	3.67	17.75	2.33	18.64	7.44	17.66	1.79
17.95	45.20	17.45	-0.50	-2.81	17.22	-4.07	18.08	0.72	17.13	-4.56
12.75	30.10	11.62	-1.13	-8.88	11.47	-10.06	12.04	-5.57	11.41	-10.53
15.45	40.03	15.45	0	0.02	15.25	-1.27	16.01	3.64	15.17	-1.80
13.40	35.11	13.55	0.15	1.13	13.38	-0.18	14.04	4.81	13.31	-0.70
10.90	28.88	11.15	0.25	2.28	11.00	0.95	11.55	5.98	10.95	0.42
14.85	38.52	14.87	0.02	0.11	14.67	-1.18	15.41	3.76	14.60	-1.69
11.60	30.34	11.71	0.11	0.97	11.56	-0.34	12.14	4.62	11.50	-0.87
18.10	43.77	16.89	-1.21	-6.66	16.68	-7.87	17.51	-3.27	16.59	-8.35
11.45	27.54	10.63	-0.82	-7.16	10.49	-8.36	11.02	-3.79	10.44	-8.84
6.45	14.37	5.55	-0.90	-14.00	5.48	-15.12	5.75	-10.88	5.45	-15.56

表 4　转速 287 r/min 下产量监测系统测量值

Tab. 4　Output monitoring system measured at speed of 287 r/min

谷物实际质量/kg	占空比测量值	全局模型计算值/kg	全局模型误差/kg	全局模型相对误差/%	局部模型 1 计算值/kg	局部模型 1 相对误差/%	局部模型 2 计算值/kg	局部模型 2 相对误差/%	局部模型 3 计算值/kg	局部模型 3 相对误差/%
24.30	58.62	22.63	-1.67	-6.89	22.33	-8.09	23.45	-3.51	22.22	-8.57
20.65	54.50	21.04	0.39	1.88	20.76	0.55	21.80	5.58	20.66	0.03
13.25	32.74	12.64	-0.61	-4.62	12.47	-5.86	13.10	-1.16	12.41	-6.35
7.50	19.08	7.37	-0.13	-1.78	7.27	-3.07	7.63	1.78	7.23	-3.58
14.55	36.93	14.26	-0.29	-2.02	14.07	-3.30	14.77	1.53	14.00	-3.80
16.00	41.63	16.07	0.07	0.43	15.86	-0.87	16.65	4.07	15.78	-1.39
18.75	48.17	18.59	-0.16	-0.83	18.35	-2.12	19.27	2.77	18.26	-2.63
16.45	39.32	15.18	-1.27	-7.74	14.98	-8.93	15.73	-4.39	14.90	-9.41
13.00	31.49	12.15	-0.85	-6.51	12.00	-7.71	12.59	-3.12	11.93	-8.19
6.30	15.81	6.10	-0.20	-3.14	6.02	-4.39	6.32	0.37	5.99	-4.89
9.15	23.82	9.19	0.04	0.48	9.08	-0.82	9.53	4.12	9.03	-1.34
14.90	37.60	14.51	-0.39	-2.59	14.33	-3.86	15.04	0.94	14.25	-4.36
13.50	30.27	11.68	-1.82	-13.46	11.53	-14.57	12.11	-10.32	11.47	-15.02
26.50	57.36	22.14	-4.36	-16.44	21.85	-17.53	22.95	-13.41	21.74	-17.96

表 5　转速 385 r/min 下产量监测系统测量值

Tab. 5　Output monitoring system measured at speed of 385 r/min

谷物实际质量/kg	占空比测量值	全局模型计算值/kg	全局模型误差/kg	全局模型相对误差/%	局部模型 1 计算值/kg	局部模型 1 相对误差/%	局部模型 2 计算值/kg	局部模型 2 相对误差/%	局部模型 3 计算值/kg	局部模型 3 相对误差/%
12.75	33.29	12.85	0.10	0.78	12.68	-0.52	13.32	4.44	12.62	-1.04
11.10	28.69	11.07	-0.03	-0.23	10.93	-1.52	11.48	3.39	10.87	-2.04
15.10	34.61	13.36	-1.74	-11.52	13.19	-12.67	13.84	-8.32	13.12	-13.12
21.20	50.55	19.51	-1.69	-7.97	19.26	-9.15	20.22	-4.62	19.16	-9.63
25.70	55.79	21.53	-4.17	-16.21	21.26	-17.29	22.32	-13.17	21.14	-17.73
16.70	42.77	16.51	-0.19	-1.15	16.30	-2.42	17.11	2.44	16.21	-2.94
10.90	27.14	10.48	-0.42	-3.89	10.34	-5.13	10.86	-0.40	10.29	-5.63
10.15	23.56	9.09	-1.05	-10.39	8.98	-11.56	9.42	-7.15	8.93	-12.02
5.15	12.00	4.63	-0.52	-10.05	4.57	-11.22	4.80	-6.80	4.55	-11.68
14.10	40.58	15.66	1.57	11.10	15.46	9.65	16.23	15.12	15.38	9.09
13.70	32.96	12.72	-0.98	-7.15	12.56	-8.34	13.18	-3.77	12.49	-8.83
22.00	51.64	19.93	-2.07	-9.39	19.67	-10.57	20.66	-6.11	19.57	-11.03
17.15	44.73	17.27	0.12	0.69	17.04	-0.63	17.89	4.33	16.95	-1.14
13.45	33.12	12.78	-0.66	-4.94	12.62	-6.18	13.25	-1.50	12.55	-6.67
8.50	21.96	8.48	-0.02	-0.27	8.37	-1.57	8.78	3.34	8.32	-2.08

4.2　台架试验结果分析

对表 3～5 中不同转速下全局模型和局部模型的预测值与谷物实际质量的相对误差如图 9 所示。不同转速下的平均数据如表 6 所示。

图 9 表明，基于单一的光电式传感器产量监测系统，对小质量的谷物进行单次测量时会存在较大误差，最大随机误差可能超过 15%。图 9 中的中位数以及不同模型下的平均相对误差表明，占空比与产量的正比例模型在一定测量次数后，误差保持稳定，最大相对误差不超过 10%，平均相对误差小于 5%。由表 6 可以看出，对于某一转速，在该转速下

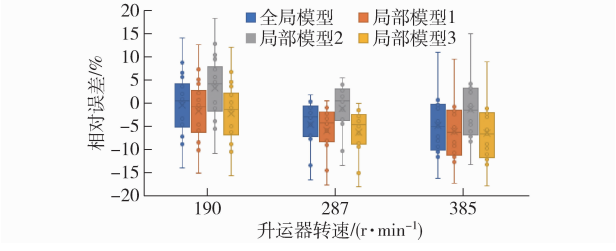


图 9　台架试验中不同模型计算值与真值相对误差箱型图

Fig. 9　Box diagram of relative error of bench test measurements in different model calculations

表 6 不同模型下 3 种转速时测量值的误差统计

Tab. 6 Statistics of errors of measured values under different models at three speeds

升运器转速/(r·min^{-1})	谷物实际质量/kg	占空比测量平均值	全局模型计算平均值/kg	全局模型平均相对误差/%	局部模型 1 平均计算值/kg	局部模型 1 平均相对误差/%	局部模型 2 平均计算值/kg	局部模型 2 平均相对误差/%	局部模型 3 平均计算值/kg	局部模型 3 平均相对误差/%
190	15.04	38.68	14.93	-0.73	14.74	-2.01	15.47	2.87	14.66	-2.53
287	15.34	37.67	14.54	-5.24	14.35	-6.46	15.07	-1.80	14.28	-6.95
385	14.51	35.56	13.73	-5.40	13.55	-6.63	14.22	-1.97	13.48	-7.12

数据拟合的局部模型中,误差比全局以及其他转速下的拟合模型误差小,如 190 r/min 在局部模型 1、287 r/min 在局部模型 2 中相对误差仅为 -2.01% 和 -1.80%;但 385 r/min 在局部模型 3 中的误差达到 -7.12%,说明转速对模型构建有影响,误差依赖于校准数据的准确性。全局模型虽然在特定转速下的误差不如该转速下的局部模型,但全局模型在不同转速下的平均误差较小,3 个转速下的平均相对误差分别为 -0.73%、-5.24% 和 -5.40%。

考虑到转速变化导致产量监测系统和模型存在误差,对 51 个测量样本的总产量利用全局模型进行预测并计算得到整体误差和相对误差,结果见表 7。

表 7 全局模型下台架试验数据总体误差

Tab. 7 Error of forecast value of total grain under bench test data

实际称量值/kg	测量值/kg	测量误差/kg	相对误差/%
763.35	737.95	-25.40	-3.33

结果表明,在联合收获机实际作业过程中,即使存在转速的变化,对基于占空比测量的产量监测传感器与其模型的影响很小。虽然测量装置在测量小体积谷物质量中具有较大不确定性,但是在累计产量的统计中具有极高的准确性,以台架试验的数据为例,转速 190 r/min 的测量数据在局部模型 2 中的最大相对误差达到 18.4%,此时单次谷物质量小于 60 kg;以不同转速下的整体数据为参考,单次测量的最大误差不超过 8%,此时谷物总质量小于 200 kg;而在 51 组样本的总体数据中,系统的测量误差小于 4%,此时谷物质量小于 500 kg;说明在实际使用中,可以增加校准次数,通过修正产量监测系统中的模型系数,提高产量监测系统的准确度。

4.3 产量监测系统大田性能验证试验

产量监测系统田间动态性能试验于 2020 年 10 月底至 11 月初在盐城响水黄海农场中德作物生产与农业技术示范园进行,水稻品种为甬优 4949,示范园区面积 150 hm^2。选用 CLAAS D370 型联合收获机,配套动力 151 kW,割幅 5 560 mm,粮仓容积 5 800 L,工作速度 30 km/h(图 10a)。对射式光电传感器安装在升运器的中部位置(图 10b),GPS 接收天线安装在联合收获机顶部(图 10c),下位机和便携式计算机放置在驾驶室内(图 10d、10e)。



(a) 用于大田试验的联合收获机 (b) 传感器安装位置 (c) GPS安装位置 (d) 下位机 (e) 便携式计算机

图 10 大田试验的联合收获机和产量监测系统安装图

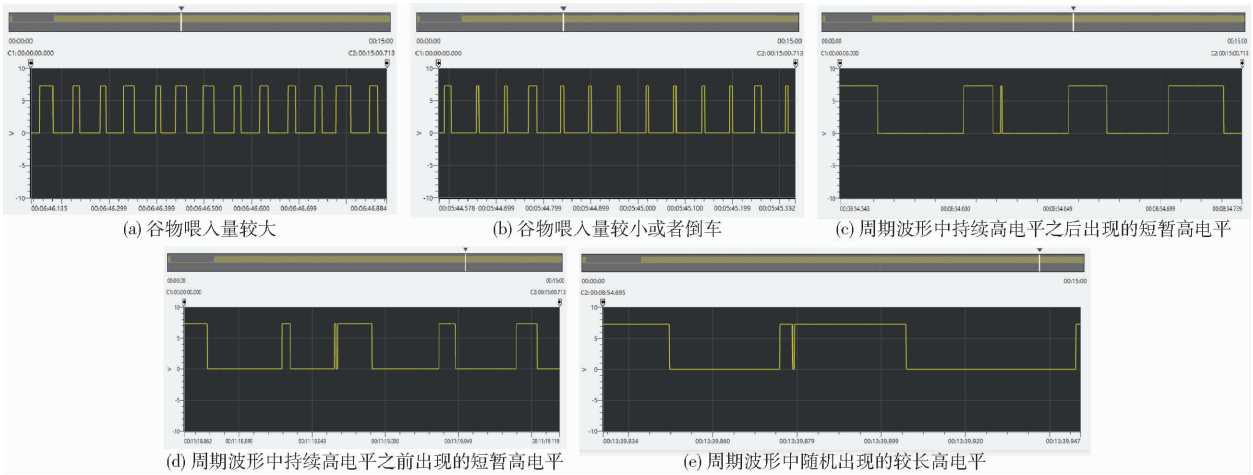
Fig. 10 Installation of combine harvester and yield monitoring system in field trial

大田试验前,预先对传感器实时电压进行了监测,发现产量监测系统存在少量的异常信号。在没有干扰的理想状态下,光电传感器在联合收获机中的电信号应该如图 11a、11b 所示。但分析 TDMS 数据中的信号,发现作业中会存在 3 种异常信号:①出现在刮板经过后,呈现为较长高电平后出现短暂脉冲信号(图 11c)。②出现在刮板经过之前,呈现为短暂脉冲信号在较长脉冲信号前(图 11d)。③随机出现的较长的电平信号(图 11e)。

从试验前的数据中随机抽取连续一段时间内的波形进行分析,3 种误差数量统计如表 8 所示。

异常波形出现的概率分别为 0.33%、0.34%、0.45%,所有异常脉冲占总脉冲数量的 1.12%,所有的误差都会导致传感器测量值偏大。3 种异常信号可能来源包括:粮食从刮板缝隙掉落,导致的短暂脉冲信号;谷物中植物茎秆等杂质对传感器的影响;谷物经过的瞬间,由于振动导致刮板上谷物出现空隙;较大体积的谷物从升运器缝隙中掉落;对射式光电传感器的光学回路上存在谷物堆积。

考虑到田间随机误差的存在,以及大田试验的



(a) 谷物喂入量较大　(b) 谷物喂入量较小或者倒车　(c) 周期波形中持续高电平之后出现的短暂高电平

(d) 周期波形中持续高电平之前出现的短暂高电平　(e) 周期波形中随机出现的较长高电平

图 11　工作状态下传感器信号的正常和异常波形图

Fig. 11　Abnormal waveforms in working condition

表 8　3 种异常波形出现次数统计

Tab. 8　Statistics of occurrence times of three abnormal waveforms

起始时间/s	终止时间/s	第 1 种异常信号数量	第 2 种异常信号数量	第 3 种异常信号数量	脉冲总数量	第 1 种异常信号占比/%	第 2 种异常信号占比/%	第 3 种异常信号占比/%	总异常信号数量的占比/%
48.85	360.50	18	19	25	5529	0.33	0.34	0.45	1.12

机型与台架的参数不一致的情况。大田试验前对产量监测系统的模型进行校准，读取联合收获机大田作业后的测量值，并获得卸粮后运粮车过地磅的准确数据，产量监测系统测量值为 5 472.78 kg，运粮车和粮食质量为 14 340 kg，运粮车质量为 8 450 kg，粮食实际质量为 5 890 kg。

根据产量监测系统的测量值和运粮车过地磅后计算得到的水稻实际质量，利用正比例函数获得大田试验的校准函数，关系为

$$y = 1.076\,235x \tag{10}$$

根据式(10)，将获得的校准函数输入到产量监测系统。然后继续利用产量监测系统获得了 5 次大田试验的测量值和运粮车过磅的统计数据。最后通过式(9)计算的相对误差如表 9 所示。

表 9　大田试验数据

Tab. 9　Field test data

序号	系统测量质量/kg	运粮车和粮食质量/kg	运粮车质量/kg	粮食实际质量/kg	绝对误差/kg	相对误差/%
1	5 645.124 142	14 180	8 450	5 730	−84.875 858	−1.48
2	5 928.572 280	14 160	8 450	5 710	218.572 280	3.83
3	4 234.545 350	14 040	9 650	4 390	−155.454 650	−3.54
4	2 420.475 115	10 830	8 450	2 380	40.475 115	1.70
5	5 760.098 378	14 134	8 450	5 684	76.098 378	1.34
合计	23 988.815 265			23 894	94.815 265	0.40

虽然田间试验条件复杂，但本研究的产量监测系统在大面积产量监测中具有优势，从表 9 可以看出，系统测量质量与实际称量质量最大相对误差为 3.83%，误差波动较小，5 次试验的平均相对误差为 0.40%。

4.4　讨论

本文系统在测产误差上取得较好表现，但是用于生成处方图的过程还依赖于 GPS 定位的准确度。由于本文在成本控制的条件下选择了未差分的 GPS 传感器，受天气以及 GPS 信号影响，系统测量的 GPS 数据会存在漂移、丢失以及精度欠佳的问题。下一步将考虑在系统中采用差分的 GPS 传感器来提高定位精度，并在小面积田块中对短路程上的产量数据进行验证。同时，本文系统在平原地区的示范性地块取得了良好的测量精度，但考虑到山地及非平整地上的适应性，下一步将考虑在系统中加入姿态角测量传感器，用于对联合收获机的左右倾斜误差进行补偿和修正。

5　结论

(1)基于占空比测量原理，利用对射式光电传

感器设计了联合收获机产量监测系统,由对射式光电传感器、GPS 天线、数据处理单元、数据存储单元和可视化终端组成。系统工作时,利用占空比与产量的计量模型获得产量数据,并连同系统的绝对时间、GPS 数据存储到系统中,实现谷物联合收获机在线测产。

(2)通过 EDEM 仿真、理论模型分析,推导了占空比测量值与产量的理论公式,系统校准后,占空比测量值与谷物质量呈正比例关系。对刮板不同输送速度下的台架试验数据,通过测量值与谷物实际质量之间的关系拟合了不同转速下的局部模型和所有数据的全局模型,通过台架试验对不同模型进行验证,结果表明全局模型更具有通用性,随着系统测量数据的增加,相对误差逐步减小。

(3)通过田间试验,对传感器模拟量异常信号进行了分析,对产量监测系统进行了标定。田间试验结果表明,基于占空比测量的产量监测系统最大相对误差为 3.83%,5 次试验平均相对误差为 0.40%,系统整体误差较小。

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. Development and engineering technology innovation of "Precision agriculture"[J]. Transactions of the CSAE, 1999,15(1):1-8. (in Chinese)

[2] 陶惠林,冯海宽,杨贵军,等.基于无人机数码影像和高光谱数据的冬小麦产量估算对比[J].农业工程学报,2019,35(23):111-118.
TAO Huilin, FENG Haikuan, YANG Guijun, et al. Comparison of winter wheat yields estimated with UAV digital image and hyperspectral data[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(23): 111-118. (in Chinese)

[3] 杨俊,丁峰,陈晨,等.小麦生物量及产量与无人机图像特征参数的相关性[J].农业工程学报,2019,35(23):104-110.
YANG Jun, DING Feng, CHEN Chen, et al. Study on correlation of wheat biomass and yield with UAV image characteristic parameters[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(23): 104-110. (in Chinese)

[4] 赵晓庆,杨贵军,刘建刚,等.基于无人机载高光谱空间尺度优化的大豆育种产量估算[J].农业工程学报,2017,33(1):110-116.
ZHAO Xiaoqing, YANG Guijun, LIU Jian'gang, et al. Estimation of soybean breeding yield based on optimization of spatial scale of UAV hyperspectral image[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 110-116. (in Chinese)

[5] 陶惠林,徐良骥,冯海宽,等.基于无人机高光谱遥感数据的冬小麦产量估算[J].农业机械学报,2020,51(7):146-155.
TAO Huilin, XU Liangji, FENG Haikuan, et al. Winter wheat yield estimation based on UAV hyperspectral remote sensing data [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 146-155. (in Chinese)

[6] 韩文霆,彭星硕,张立元,等.基于多时相无人机遥感植被指数的夏玉米产量估算[J].农业机械学报,2020,51(1):148-155.
HAN Wenting, PENG Xingshuo, ZHANG Liyuan, et al. Summer maize yield estimation based on vegetation index derived from multi-temporal UAV remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 148-155. (in Chinese)

[7] 高云. 基于 OCO-2 日光诱导叶绿素荧光遥感数据的区域作物估产研究[D].南京:南京大学,2020.
GAO Yun. The ability of OCO-2 sun-induced chlorophyll fluorescence data to estimate regional crop yield[D]. Nanjing: Nanjing University,2020. (in Chinese)

[8] VEAL M W, SHEARER S A, FULTON J P. Development and performance assessment of a grain combine feeder house-based mass flow sensing device[J]. Transactions of the ASABE,2010,53(2):339-348.

[9] ARSLAN S, INANC F, GRAY J N, et al. Grain flow measurements with X-ray techniques[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2000,26(1):65-80.

[10] JASON N S, MATTHEW J D, ROBERT P M, et al. Design and development of a particle flow yield monitor for combine harvesters[C]//2018 ASABE Annual International Meeting,2018.

[11] 金诚谦,蔡泽宇,倪有亮,等.谷物联合收割机在线产量监测综述——测产传感方法、产量图重建和动力学模型[J].中国农业大学学报,2020,25(7):137-152.
JIN Chengqian, CAI Zeyu, NI Youliang, et al. Research review on online grain yield monitoring for combine harvester: yield sensing, yield mapping and dynamic model[J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(7): 137-152. (in Chinese)

[12] 张光跃,金诚谦,杨腾祥,等.联合收割机清选损失率监测系统设计与实现[J].中国农机化学报,2019,40(4):146-150.
ZHANG Guangyue, JIN Chengqian, YANG Tengxiang, et al. Design and implementation of cleaning loss rate monitoring system for combine harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(4): 146-150. (in Chinese)

[13] 莫恭武,金诚谦,陈满,等.谷物联合收割机智能化节粮减损检测装备研发现状浅析[J].江苏农机化,2020(6):15-18.
MO Gongwu, JIN Chengqian, CHEN Man, et al. Analysis of research and development status of intelligent grain saving and loss reduction testing equipment for grain combine harvester[J]. Jiangsu Agricultural Mechanization, 2020(6): 15-18. (in Chinese)

[14] 李泽峰,金诚谦,刘政,等.谷物联合收获机水分在线检测装置设计与标定[J].中国农机化学报,2019,40(6):145-151.
LI Zefeng, JIN Chengqian, LIU Zheng, et al. Design and calibration of on-line moisture detection device for grain combine harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(6): 145-151. (in Chinese)

[15] 钱长钱. 基于介电特性稻谷含水率无损检测研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2020.
QIAN Changqian. Study on non-destructive detective of rice moisture content based on dielectric properties[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University,2020. (in Chinese)

[16] 刘仁杰,孙意凡,张振乾,等. 基于产量监测系统的小麦产量图生成与空间变异性分析[J]. 农业机械学报,2019,50(增刊):136 - 143.
LIU Renjie, SUN Yifan, ZHANG Zhenqian, et al. Wheat yield distribution map generation and spatial variability analysis based on yield monitoring system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 136 - 143. (in Chinese)

[17] 王薇. 玉米智能测产成图系统研究与开发[D]. 长春:吉林大学,2011.
WANG Wei. Research and development of intelligent yield monitor mapping system for corn [D]. Changchun: Jilin University,2011. (in Chinese)

[18] ARSLAN S, COLVIN T S. Grain yield mapping: yield sensing, yield reconstruction, and errors[J]. Precision Agriculture, 2002, 3(2): 135 - 154.

[19] BLACKMORE B S, MARSHALL C J. Yield mapping: errors and algorithms[C]// Precision Agriculture, MN, Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture. MN: ASA - CSSA - SSSA,1996:403 - 416.

[20] PIERCE F J, ANDERSON N W, COLVIN T S, et al. Yield mapping[C]// Site-Specific Management for Agricultural Systems. WI: ASA - CSSA - SSSA,1997:211 - 243.

[21] BLACKMORE B S. Remedial correction of yield map data[J]. Precision Agriculture,1999,1(1):53 - 66.

[22] 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):127 - 129,133.
ZHOU Jun, ZHOU Guoliang, MIAO Yubin, et al. Damping design of impact-based grain yield sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005,36(11): 127 - 129,133. (in Chinese)

[23] 陈树人,杨洪博,李耀明,等. 双板差分冲量式谷物流量传感器性能试验[J]. 农业机械学报,2010,41(8):171 - 174.
CHEN Shuren, YANG Hongbo, LI Yaoming, et al. Dual-plates differential impact-based grain flow sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 171 - 174. (in Chinese)

[24] 胡均万,罗锡文,阮欢,等. 双板差分冲量式谷物流量传感器设计[J]. 农业机械学报,2009,40(4):69 - 72.
HU Junwan, LUO Xiwen, RUAN Huan, et al. Dual-plates differential impact-based grain flow sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 69 - 72. (in Chinese)

[25] 李新成,李民赞,王锡九,等. 谷物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)

[26] 谭玉芳. 联合收割机测产系统振动信号的抑制研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2010.
TAN Yufang. Inhibitory study of vibration interference signal on the combine yield-monitoring system[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2010. (in Chinese)

[27] 魏新华,张进敏,但志敏,等. 冲量式谷物流量传感器测产信号处理方法[J]. 农业工程学报,2014,30(15):222 - 228.
WEI Xinhua, ZHANG Jinmin, DAN Zhimin, et al. Signal processing method of impact-based grain flow sensor for predicted yield[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(15): 222 - 228. (in Chinese)

[28] OWEN P J, CLEARY P W. Prediction of screw conveyor performance using the discrete element method (DEM)[J]. Powder Technology, 2009, 193(3): 274 - 288.

[29] 戴恩亮. 基于离散元法的双螺旋输送机性能研究及优化[D]. 武汉:武汉大学,2018.
DAI Enliang. Performance research and optimization of double screw conveyors based on discrete element method[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018. (in Chinese)

[30] SPELLINGS M, MARSON R L, ANDERSON J A, et al. GPU accelerated discrete element method (DEM) molecular dynamics for conservative, faceted particle simulations[J]. Journal of Computational Physics, 2017, 334: 460 - 467.

[31] QI L, CHEN Y, SADEK M. Simulations of soil flow properties using the discrete element method (DEM)[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 157: 254 - 260.

[32] 李风姣,杨望,杨坚,等. 基于 DEM - MBD 的水稻电磁振动排种仿真模型研究[J]. 农机化研究,2021,43(12):192 - 197.
LI Fengjiao, YANG Wang, YANG Jian, et al. Simulation model of rice electromagnetic vibrated seeding based on DEM - MBD [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(12): 192 - 197. (in Chinese)

[33] 陈阳,胡志超,吴惠昌,等. 基于 EDEM 的单粒式谷物水分仪采样机构仿真研究[J]. 农机化研究,2016,38(7):239 - 244,262.
CHEN Yang, HU Zhichao, WU Huichang, et al. Simulation study on sampling mechanism of single grain moisture meter based on EDEM[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(7): 239 - 244,262. (in Chinese)

[34] 李伟. 联合收获机产量分布信息获取技术研究[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院,2012.
LI Wei. Study on yield distribution information acquisition technology for combine harvester[D]. Beijiing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2012. (in Chinese)

[35] 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)