

赵胜华, 张国忠, 张仕杰, 等. 基于薄膜传感器的横轴流脱粒滚筒实时喂入量测量系统设计[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(2): 160-169.

DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2020.02.020

## 基于薄膜传感器的横轴流脱粒滚筒 实时喂入量测量系统设计

赵胜华, 张国忠, 张仕杰, 付建伟, 谢千, MOHAMED Anwer

华中农业大学工学院/农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070

**摘要** 为实现水稻联合收割机脱粒滚筒实时喂入量监测, 基于薄膜传感器设计了一种脱粒滚筒喂入量测量系统, 其原理为通过薄膜传感器测出滚筒顶盖侧边因喂入量变化而产生的受力变化。以额定喂入量为 0.8 kg/s 的小型横轴流脱粒滚筒为试验对象, 以成熟的晚籼 98 和传奇丰两优 1 号水稻为主要试验材料, 在转速分别为 650、800、950、1 100 r/min、喂入量为 0.2~0.8 kg/s 的条件下开展台架试验, 结果显示: 薄膜传感器采集的实时信号与实时喂入量显著相关, 对喂入量和传感器信号进行线性关系拟合, 拟合效果较好。试验结果表明, 设计的测量系统可以通过传感器信号对喂入量进行测量。

**关键词** 收获机械; 脱粒滚筒; 薄膜传感器; 喂入量; 实时监测; 水稻

**中图分类号** S 225.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2020)02-0160-10

收获机田间收获时由于行走速度不稳定、作物因素(包括作物倒伏、成熟度、含水量以及田间生长状态不一致)以及其他因素等的影响, 导致实时喂入量存在波动。当实时喂入量超过收获机械的额定喂入量时, 脱粒滚筒易出现超载、堵塞、停机等现象, 不仅对收获部件产生严重损坏, 也严重影响生产效率<sup>[1-3]</sup>。因此, 国内外研究人员开展了滚筒工作状态监测和结构改进方面的研究。如凯斯、约翰迪尔等公司的多款联合收获机装备了故障诊断监测系统, 通过该系统可对堵塞情况进行监控和预警, 特别是凯斯公司生产的 AFS 系统联合收割机智能化程度很高, 装备有多种先进传感器, 通过传感器实时采集收割机的状态信息, 该机设备检测系统为便携式控制操作系统, 机手可以直接通过触摸屏操作监控系统实现对产量、燃油消耗、作业情况以及设备运转情况的监控<sup>[4]</sup>。英国 Massey Ferguson 公司在收割机上设计了农田之心系统, 该系统在收割机进行田间作业时能及时发现收割机出现故障的位置, 出现故障后, 该系统指示灯闪烁同时发出警报提示<sup>[5]</sup>。在滚筒结构方面欧美等国家大多采用大尺寸滚筒并配以大动力输出以降低堵塞出现的可能<sup>[6]</sup>。

钟成义等<sup>[7]</sup>通过传感器测量滚筒的实时转速和滚筒阻力, 实现了对收割机滚筒进料堵塞进行故障检测和主动调节。宋寿鹏等<sup>[8]</sup>在动力输出和动力输入皮带轮处分别安装霍尔传感器从而对皮带轮上的脉冲信号进行测量, 进而通过信号处理判断是否应进行预警或报警。李耀明等<sup>[9]</sup>设计了凹板间隙调节系统和凹板筛后侧油压力采集系统组成的脱粒滚筒负荷监测和凹板间隙调节装置, 该装置通过液压油缸压力来反映脱粒滚筒负荷的变化情况。卢文涛等<sup>[10]</sup>设计了谷物联合收割机脱粒滚筒液压无级变速系统, 通过传感器对该系统中封闭液压油的压力进行测量从而建立油压力与喂入量的线性关系, 试验结果表明油压力能够准确地反映喂入量。梁学修等<sup>[11]</sup>研究了谷物籽粒流量及滚筒扭矩、转速与喂入量关系, 结果表明喂入量在线监测具有较好的实用性。刘正怀等<sup>[12]</sup>改进了滚筒结构, 设计了一种可沿脱粒滚筒圆弧方向循环运转的回转式栅格凹板脱粒分离装置, 田间试验结果表明, 该装置工作效率较常规装置提高 30% 以上。王贵国<sup>[13]</sup>提出一种改进的弯钉齿与钉齿槽结合进行防堵的脱粒滚筒装置。谢方平等<sup>[14-15]</sup>采用柔性杆齿代替传统刚性齿的方式进

收稿日期: 2019-05-14

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0301404-05); 中央高校基本科研业务费专项(2662018PY038)

赵胜华, 硕士研究生. 研究方向: 智能农业装备与测控. E-mail: 327121590@qq.com

通信作者: 张国忠, 博士, 教授. 研究方向: 农业机械化与自动化. E-mail: zhanggz@mail.hzau.edu.cn

行了研究,对柔性齿脱粒进行了理论分析,通过与刚性齿的对比试验证明柔性齿脱粒更加柔和且所需功耗降低。

压阻式传感器基于压阻效应制作而成,工艺简单,目前在机器人<sup>[16]</sup>、水利<sup>[17]</sup>、煤矿<sup>[18]</sup>、爆破<sup>[19]</sup>、医疗<sup>[20]</sup>等领域均有应用。如熊利荣等<sup>[21]</sup>采用压阻式薄膜传感器结合相应的控制系统实现机械手抓紧力度的控制。乌兰图雅等<sup>[22]</sup>采用压阻式薄膜传感器测量了揉碎玉米秸秆对螺旋输送叶片的压力。刘竹琴等<sup>[23]</sup>采用该传感器作为主要测量元件设计了可有效测量土壤含水率的测量仪。彭开怀<sup>[24]</sup>采用压阻式薄膜传感器设计的足底压力分布检测仪可有效检测足底压力分布。邹亚<sup>[25]</sup>设计了水稻直播机播种滑板接地比压测试系统,该系统通过薄膜传感器测量土壤工作部件与土壤之间的接触力来确定接地比压。

脱粒滚筒工作时秸秆随滚筒回转的同时对顶盖产生挤压摩擦和冲击作用。本研究设计了一种基于压阻式薄膜传感器的脱粒滚筒喂入量测量系统,以喂入量和滚筒转速为试验因素,在喂入量为0.2~0.8 kg/s的条件下进行台架试验,对喂入量、滚筒转速和滚筒顶盖与滚筒下盖板边沿接触面间安置的薄膜传感器采集的电阻信号间关系开展研究,旨在为水稻联合收获机喂入量实时监测提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 工作原理

1)脱粒滚筒顶盖受力分析。脱粒滚筒是实现籽粒从秸秆上分离的核心工作部件,其核心工作部件梳齿对秸秆进行冲击、揉搓、梳刷以实现脱粒,工作过程复杂。以横轴流脱粒滚筒为例,在上述过程中,秸秆与滚筒顶盖、凹板筛产生挤压、摩擦、冲击作用,秸秆在滚筒梳齿带动下,对滚筒顶盖产生局部摩擦力 $F_{fi}$ 和挤压冲击力 $F_{ni}$ ,上述作用力进而对滚筒顶盖产生向上的推动力以及工作力矩 $M$ ,有使顶盖与脱粒室分离的趋势。沿滚筒垂直轴线方向取横截面,以平行该截面的竖直方向为 $Y$ 轴,水平方向为 $X$ 轴以及轴向方向为 $Z$ 轴,滚筒回转中心为原点 $O$ 建立笛卡尔坐标系,建立顶盖受力模型如图1所示。

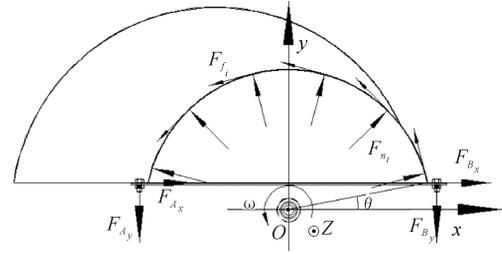


图1 顶盖受力示意图

Fig.1 Top cover force diagram

由图1可知,顶盖承受秸秆挤压力 $F_{ni}$ 与摩擦力 $F_{fi}$ 的联合作用,该横截面内顶盖承受轴向作用力 $\vec{F}_z$ ,垂直作用力 $\vec{F}_y$ 和水平方向上作用力 $\vec{F}_x$ ,并且可用式(1)表示:

$$\begin{cases} \vec{F}_x = \int_0^L \int_{\theta}^{\pi-\theta} (\vec{F}_{ni} \cos\alpha + \vec{F}_{fi} \sin\alpha) da dl \\ \vec{F}_y = \int_0^L \int_{\theta}^{\pi-\theta} (\vec{F}_{ni} \sin\alpha + \vec{F}_{fi} \cos\alpha) da dl \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: $\vec{F}_y$ 为顶盖竖直方向受力,N; $\vec{F}_x$ 为顶盖水平方向受力,N; $\theta$ 为挤压力 $F_{ni}$ 、摩擦力 $\vec{F}_{fi}$ 与水平 $X$ 方向的夹角,rad; $L$ 为顶盖在 $Z$ 方向上的长度,m。同时顶盖还受到力矩作用,其由垂直作用力 $\vec{F}_y$ 和水平方向上作用力 $\vec{F}_x$ 相对回转中心 $O$ 产生,可用式(2)计算:

$$\begin{cases} M_{Ox} = M_{Ox}(\vec{F}_{fi}) + M_{Ox}(\vec{F}_{Ax}) + M_{Ox}(\vec{F}_{Bx}) \\ \quad = \int_{\theta}^{\pi-\theta} \vec{F}_{fi} \sin\alpha \cdot r \sin\alpha da + (\vec{F}_{Ax} + \vec{F}_{Bx}) r \sin\theta \\ M_{Oy} = M_{Oy}(\vec{F}_{fi}) + M_{Oy}(\vec{F}_{Ay}) + M_{Oy}(\vec{F}_{By}) \\ \quad = \int_{\theta}^{\pi-\theta} \vec{F}_{fi} \cos\alpha \cdot r \cos\alpha da + (\vec{F}_{Ay} + \vec{F}_{By}) r \cos\theta \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: $M_{Ox}$ 与 $M_{Oy}$ 分别为顶盖相对回转中心在水平与竖直方向上的力矩,N·m; $F_{Ax}$ 与 $F_{Bx}$ 分别为顶盖左右两侧受到的外部水平方向联接作用力,N; $F_{Ay}$ 与 $F_{By}$ 分别为顶盖左右两侧受到的外部竖直方向联接作用力,N; $r$ 为顶盖圆弧半径,m。近似认为挤压力与摩擦力之间关系如下:

$$F_{fi} = \mu F_{ni} \quad (3)$$

式(3)中: $\mu$ 为摩擦系数。

顶盖最终外部作用力及力矩均平衡,即有:

$$\begin{cases} \vec{F}_x + \vec{F}_{Ax} + \vec{F}_{Bx} = \vec{0} \\ \vec{F}_y + \vec{F}_{Ay} + \vec{F}_{By} = \vec{0} \\ M_{Ox} = \vec{0} \\ M_{Oy} = \vec{0} \end{cases} \quad (4)$$

2)脱粒滚筒实时喂入量测量系统工作原理。滚筒工作前,顶盖受螺栓预紧力作用,在脱粒室支撑下受力平衡,安装于顶盖边沿与脱粒室接触面之间的压阻式薄膜传感器承受因预紧而产生的垂直方向的局部接触压力。

由前述受力模型分析可知,滚筒工作时,秸秆对顶盖产生作用力,当脱粒滚筒喂入量发生变化或堵塞时,摩擦力  $F_{fi}$  和挤压力  $F_{ni}$  及工作力矩  $M$  会发生变化,在顶盖与脱粒室边沿接触面之间的压阻式薄膜传感器承受的局部接触压力也会发生变化,基于压阻效应其电信号也会发生变化,从而可用于检测并反映脱粒滚筒工作状态变化。

将顶盖视为刚体,将顶盖与脱粒室边沿接触面视为均匀贴合,螺栓预紧顶盖与脱粒室后,顶盖的侧边接触面承受联接力而产生弹性形变。在接触面间放入薄膜传感器后,承受并传递上述弹性变形,在滚筒空转情况下,可测得单个传感器此时承受的压力为  $F_{i空}$ ;在滚筒工作情况下,随秸秆喂入,滚筒工作负荷增加,顶盖受力变化,此时可测得单个传感器的压力为  $F_{i载}$ ;由此可检测到单个传感器承受的压力变化为:

$$\Delta F_i = F_{i载} - F_{i空} \quad (5)$$

在传感器量程范围内,薄膜传感器所受压力与其电阻间呈线性关系,可用式(6)表示<sup>[26]</sup>:

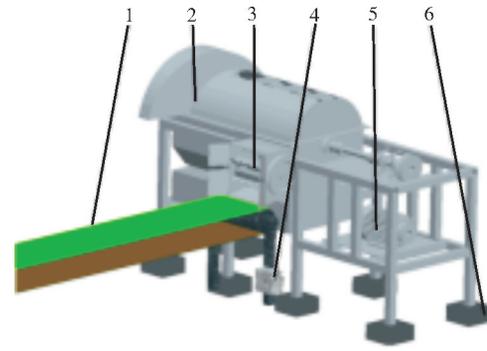
$$\Delta F_i = K \Delta R_i \quad (6)$$

式(6)中: $K$ 为线性系数,可由传感器标定测出。 $\Delta R_i$ 为测量系统测定薄膜传感器起始和工作电阻信号变化, $\Omega$ 。结合式(5)和式(6)即可检测出单个传感器感受到的滚筒工况变化。

## 1.2 试验台架搭建

1)试验台架。试验台架由强制喂入轮、杆齿式脱粒滚筒、带透明观测窗口的顶盖、凹板筛、接料箱、支架以及输送带、变频器调速系统、电机等组成,如图2所示。试验时,电机带动滚筒转动,通过变频器来控制电机转速,从而得到设定的滚筒转速。试验喂入水稻采用输送带输送,输送带速度由另一套变频器和电机控制。

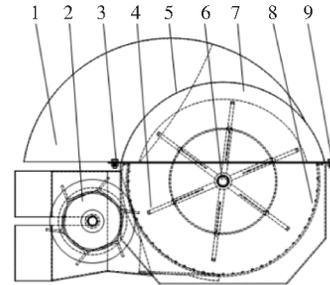
2)脱粒滚筒。以额定喂入量为  $0.8 \text{ kg/s}$  的小型横轴流杆齿式水稻脱粒滚筒为试验对象,该滚筒脱粒能力强、分离效果好,空间尺寸紧凑<sup>[27]</sup>,其结构简图如图3所示,基本参数如表1所示。



1.输送带 Conveyor belt; 2.脱粒滚筒 Threshing cylinder; 3.强制喂入轮 Forced feed wheel; 4.变频器 Frequency transformer; 5.电机 Electric machinery; 6.橡胶块 Block rubber.

图2 试验台架

Fig.2 Test bench



1.排草口 Rows of grass; 2.强制喂入轮 Forced feed wheel; 3.螺栓 Bolt; 4.脱粒杆齿 Threshing rod tooth; 5.顶盖 Cover; 6.回转中心轴 Rotary center axis; 7.导草板 Guide straw; 8.凹板筛 Concave screen; 9.接触面 Contact surface.

图3 横轴流杆齿式脱粒滚筒结构简图

Fig.3 Structural diagram of threshing drum

表1 试验用横轴流杆齿式水稻脱粒滚筒主要参数

Table 1 Parameters of rigid pole tooth of the horizontal-axial threshing drum for test

部件 Parts	参数 Parameter	取值 Value
脱粒滚筒 Threshing drum	直径/mm Diameter	382
	滚筒长度/mm Roller length	784
	脱粒齿工作高度/mm Threshing tooth working height	65
	螺旋头数 Number of spiral heads	2
	杆齿总数 Total number of rod teeth	60
	齿迹距/mm Tooth distance	33.3
	宽度/mm Width	245
强制喂入轮 Forced feed wheel	直径/mm Diameter	223
	与滚筒转速比 Speed ratio with drum	2 : 5
	与滚筒间隙/mm Clearance with drum	15

续表 1 Continued Table 1

部件 Parts	参数 Parameter	取值 Value
顶盖 Top cover	导草板高度/mm Height of guide board	40
	导草板块数 Number of guide plates	3
	间隙/mm Gap	12
	间距/mm Spacing	180
	导草板导角/(°) Guide vane guide angle	15
凹板筛 Concave screen	包角/(°) Wrap angle	200
	长度/mm Length	800
	筛孔尺寸/mm Screen size	30×30
	直径/mm Diameter	455
	脱粒间隙/mm Threshing gap	30
	型式 Type	编织筛 Woven sieve

### 1.3 测量系统设计

1) 系统功能分析。为对电机转速进行控制以及准确快速获取脱粒滚筒顶盖受力与喂入量之间的关系,设计了测量系统,该系统的结构图和数据采集流程分别如图 4 和图 5 所示。该测量系统具有如下功能:实现手动控制试验开始和停止,能自动保存数

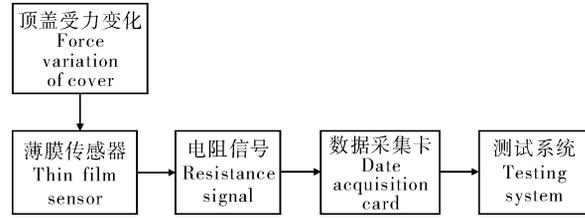


图 4 测量系统结构图

Fig.4 Structural chart of measuring system

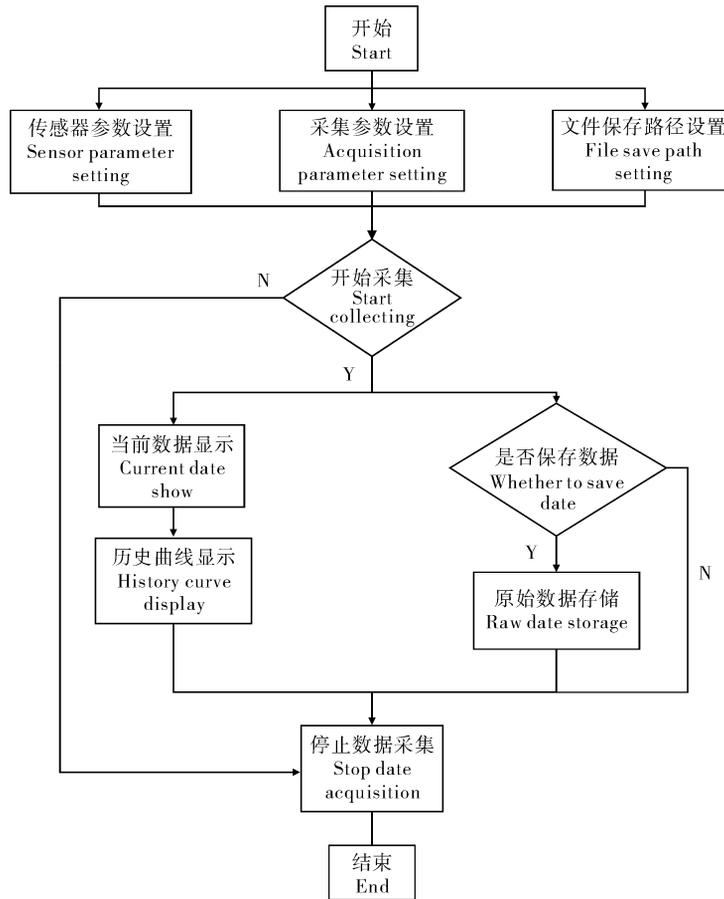


图 5 测量系统数据采集流程图

Fig.5 Flow chart of data acquisition in measurement system

据;设置参数设置区,能满足不同采样频率要求以保证试验精度;设置状态和图像显示区,能满足数据连接状态显示、当前值数据显示以及历史数据值曲线显示。

2) 系统组成。为实现多个传感器同时测量,设计了多通道采集系统,其由硬件和软件两部分组成,最多可以支持 6 组数据同时采集。硬件系统包括压阻式薄膜传感器、数据采集卡、装有 LabVIEW 软件

的计算机。软件系统由数据连接模块、参数设置模块、数据读取和显示模块、数据保存模块组成。薄膜传感器将受力信号转换为模拟电阻信号,数据采集卡对电阻信号进行采集,经 A/D 转换、信号放大等信号调理后再通过 USB 信号屏蔽线传输至计算机中 LabVIEW 软件进行处理。该采集系统前面板如图 6 所示。

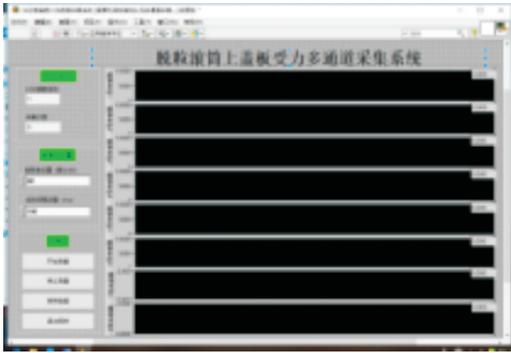
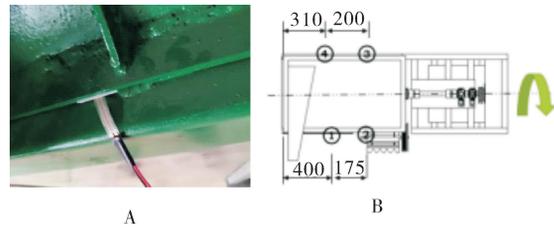


图 6 采集系统界面图

Fig.6 Acquisition system interface diagram

该系统各模块设计及功能包括:①数据连接模块。采用 USB-CH375 型数据采集卡,其通过外置式驱动和 DLL 动态链接库文件,配合编写的程序完成数据采集。②参数设置模块。外界参数设置使用函数  $\text{int32\_t CH375WriteData}(\text{int8\_t iIndex}, \text{const uint8\_t * oBuffer}, \text{int32\_t * ioLength})$ ,其中包含抽取率和采样间隔设置。③数据读取和显示模块。数据读取采用函数  $\text{uint8\_t CH375ReadData}(\text{uint32\_t index}, \text{uint8\_t * buff}, \text{uint32\_t * length})$ ,当面板上标志位显示为 1 时表示读取成功,显示为 0 则表示读取失败。④数据保存模块。对所得数据以 Excel 数据表格格式存储,文件名称为选择保存时的北京时间。

3)传感器安装。为保证测量信号稳定,对顶盖与脱粒室边沿接触面进行精加工,以保证其平直度;在顶盖侧边焊接了加强筋,增加顶盖边沿刚度,减少顶盖因螺栓预紧而产生的变形;采用 3D 打印机打印的 ABS 塑料薄片夹持传感器,塑料薄片长宽为 20 mm,厚度 1.5 mm,以保证薄膜传感器可均匀感受顶盖的侧边接触面承受联接力而产生的弹性形变,避免因接触不佳造成信号中断或者不连续。安装时保证传感器中心在相邻螺栓孔中心连线中点处。试验共放置了 4 枚传感器,传感器的安装及分布如图 7 所示。



A: 传感器安装 Sensor installation; B: 传感器布置 Sensor arrangement.

图 7 传感器的安装与布置示意图

Fig.7 Schematic diagram of installation and arrangement of sensors

#### 1.4 台架试验

1)试验仪器与场地。试验所用仪器主要有赛德仪器公司生产的 SDH-1202 型快速卤素水分测定仪、成都成量工具集团有限公司生产的游标卡尺、卷尺、TD1001 型电子天平、USB-CH375 型数据采集卡、三菱牌 FR-E740-7.5K-CHT 型和 FR-E740-3.7K-CHT 型变频器。试验地点为华中农业大学机电训练中心。

2)试验材料。主要试验水稻品种为晚籼 98 和传奇丰两优 1 号,均种植于华中农业大学水稻试验基地。种植方式为人工插秧,采用人工收割,留茬约 200 mm,然后运往试验地点进行试验。在华中农业大学农业装备实验室采用质构仪对晚籼 98 水稻茎秆进行了三点弯曲试验和剪切试验。取样方式为从茎秆底部开始依次向上截取 50 mm 长度,直至取完,去掉其中带节的小段茎秆。三点弯曲间距设置距离为 40 mm,测得的晚籼 98 的基本参数为综合含水率 49.95%、籽粒含水率 13.35%、平均弯曲强度 5.7 N、最大弯曲强度为 9.3 N、平均剪切强度为 172 N、最大剪切强度为 259.9 N、千粒重 25.34 g。

3)数据采集。输送带总长 6.0 m,输送带速度控制为 1.0 m/s,首端空余 1.0 m,后面 5.0 m 均匀铺放水稻秸秆,以便于输送带启动加速并保证水稻秸秆以稳定速度喂入。试验开始前水稻秸秆按照上述要求均匀铺放在输送带上。按照试验设计,结合本试验所用滚筒结构尺寸,参照水稻脱粒线速度要求<sup>[28]</sup>,将滚筒转速设置 650、800、950、1 100 r/min 4 个水平。试验前通过扭力扳手调节各螺栓预紧程度一致并使得各传感器均能感受接触压力并正常稳定显示数据。试验中不再调整螺栓预紧和传感器位置。试验时以滚筒转速、喂入量为试验参数,以滚筒空转和负载时的传感器信号数据对比值为指标进行

试验。

数据采集阶段包括滚筒静止、滚筒加速运转、滚筒恒速运转(空载)、秸秆开始喂入(没有茎秆排出)、秸秆正常脱粒(秸秆有喂入也有排出)即正常负载、秸秆排出(无秸秆喂入)、滚筒减速运转、滚筒静止。主要使用的数据段为空载和正常负载阶段。为准确选取数据段,采用了高速摄影的方式协助确定正常负载出现时间段。

镜头为尼康公司产的 AF Micro-Nikkor 60 mm f/2.8D。高速摄影仪安放于台架上,可沿着滚筒轴线方向移动,摄影距离为 1 023 mm,采样频率为 200 Hz。借助高速摄影仪获取的图像分析确定滚筒空载以及正常负载时间段。

## 2 结果与分析

试验过程中采集的典型电阻信号如图 9 所示。小波分析方法在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率,在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率,很适于探测正常信号中突变信号的成分,因此,对所测数据均采用小波分析进行信号的降噪处理<sup>[28-29]</sup>。本研究中设置的 1 号和 2 号传感器在承受顶盖受力变化的同时,还受到强制喂入轮喂入秸秆和脱粒滚筒脱粒两重负载变化的影响,为确保测量结果可信,主要以 3 号和 4 号传感器采集的信号进行分析。由前述分析可知,对传感器信号滤波后以负载与空载时的信号差值  $\Delta R_i$  即是喂入量引起的变化。3 号和 4 号传感器测得电阻信号变化如表 2 所示。



A: 顶盖受力采集 Force collection of cover; B: 高速摄影 High speed photography; 1. 传感器 Sensor; 2. 输送带 Conveyor belt; 3. 强制喂入轮 Forced feed wheel; 4. 笔记本电脑 a Computer a; 5. 变频器组 Inverter group; 6. 高速摄影台架 High-speed photographic stand; 7. 高速摄影仪 High-speed camera; 8. 笔记本电脑 b Computer b.

图 8 试验场景

Fig.8 Test scenario

在采样频率固定的情况下,为确保所提取的负载阶段的数据段准确可靠,采用高速摄影方式对秸秆在滚筒中的运动时间进行确定。在滚筒顶盖上开有大小为 640 mm×120 mm 的窗口,覆盖 5 mm 厚透明有机玻璃以便于观察。高速摄影仪采用德国 PCO 公司产的 PCO.dimax HD 高速摄影仪,摄像

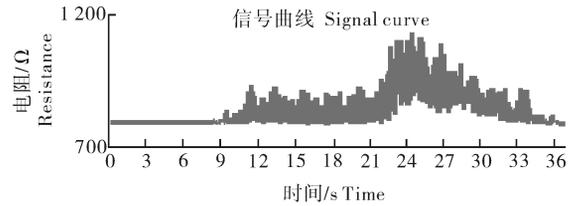


图 9 传感器信号图

Fig.9 Sensor signal diagram

表 2 3 号和 4 号传感器测得电阻信号变化

Table 2 Resistance signal measured by No.3 and No.4 sensor

Ω

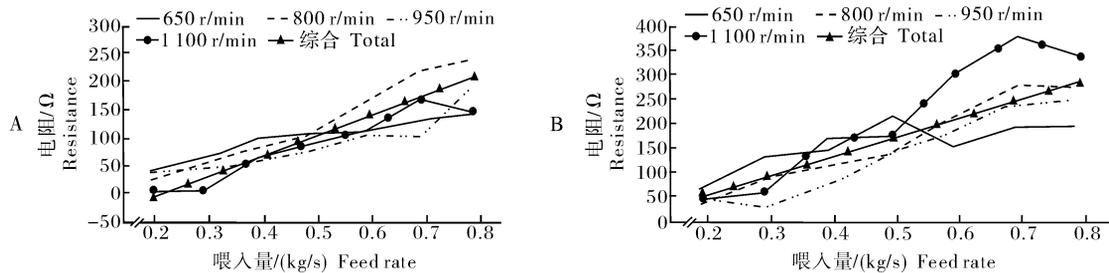
喂入量/(kg/s) Feedrate	转速/( r/min) Speed							
	650		800		950		1 100	
	No.3	No.4	No.3	No.4	No.3	No.4	No.3	No.4
0.2	41.5	65.7	26.1	40.9	40.0	52.8	5.4	48.6
0.3	62.0	135.5	58.4	93.0	40.3	32.9	7.5	61.8
0.4	99.7	149.1	81.1	120.1	58.0	74.4	65.5	172.3
0.5	110.5	217.2	106.6	144.3	74.8	149.0	91.6	178.0
0.6	109.3	156.1	167.2	214.1	106.4	182.5	115.4	304.4
0.7	132.4	197.0	221.4	280.3	107.4	244.9	169.3	381.5
0.8	145.8	198.4	244.5	275.7	196.0	255.1	145.7	340.9

对电阻信号变化进行双因素无重复方差分析, 均无显著性影响。在 2 种置信水平下喂入量对传感器信号变化有显著性影响。喂入量引起的信号变化趋势如图 10 所示。在取 0.01 置信水平下, 滚筒转速对传感器信号

表 3 3 号和 4 号传感器方差分析

Table 3 ANOVA table for No.3 and No.4 sensor data

差异源 Difference source	SS		df	MS		F		显著性 Significance	
	No.3	No.4		No.3	No.4	No.3	No.4	No.3	No.4
A 喂入量 Feed rate	79 547.1	765 804.0	6	1 325.9	127 634.0	28.6	8.58	***	***
B 滚筒转速 Drum speed	8 246.4	19 052.3	3	2 748.8	6 350.8	3.85	0.43	**	
误差 Error	12 832.4	267 683.4	18	712.9	14 871.3				
总和 Total	100 626	1 052 540	27						



A:3 号传感器 No.3 sensor; B:4 号传感器 No.4 sensor.

图 10 传感器信号-喂入量变化图

Fig.10 Sensor signal-feed volume change trend chart

根据滤波后所得数据, 推测信号增长与喂入量之间呈线性规律。因此, 采用线性拟合的方式建立相应的关系。在 MATLAB 输入数据, 使用 CFtool 工具进行线性拟合,  $Y_i$  表示电阻信号的变化值,  $\Omega$ ;  $i$  代表转速,  $r/min$ ,  $X$  代表喂入量,  $kg/s$ 。拟合结果如下, 显示拟合线性度较好。

3 号传感器的直线拟合:

$$Y_{650} = 165.5X + 17.44 \quad R^2 = 0.934$$

$$Y_{800} = 381.2X - 61.26 \quad R^2 = 0.976$$

$$Y_{950} = 231.9X - 26.92 \quad R^2 = 0.837$$

$$Y_{1100} = 293.7X - 56.09 \quad R^2 = 0.921$$

4 号传感器的直线拟合:

$$Y_{650} = 188.6X + 65.55 \quad R^2 = 0.633$$

$$Y_{800} = 418.9X - 42.55 \quad R^2 = 0.964$$

$$Y_{950} = 406.4X - 61.41 \quad R^2 = 0.937$$

$$Y_{1100} = 588.7X - 81.86 \quad R^2 = 0.917$$

本试验采用的脱粒滚筒额定喂入量 0.8  $kg/s$ ,

其直径为 382 mm, 结果显示 4 号传感器在转速 650  $r/min$  下线性拟合效果欠佳, 推测其原因可能在于脱粒速度过低时, 秸秆流动性降低, 秸秆对顶盖作用不稳定性增强, 致使传感器承受的力变化幅度增加所致。

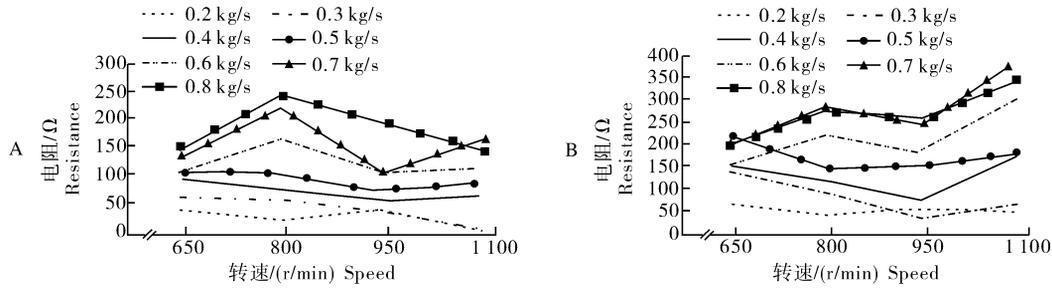
对 3 号与 4 号传感器信号与喂入量整体进行拟合, 拟合直线如图 10 所示, 线性度也较好, 整体拟合结果分别如下:

$$y = 365.6x - 31.71 \quad R^2 = 0.785$$

$$y = 400.8x - 30.15 \quad R^2 = 0.746$$

上式中,  $y$  表示信号变化值,  $\Omega$ ;  $x$  代表喂入量,  $kg/s$ 。

转速引起的信号变化趋势如图 11 所示。由图 11 可以发现, 滚筒转速对信号的影响在喂入量较低时比较平稳, 在喂入量较高时波动变大。原因主要是喂入量的增加导致秸秆在滚筒内的运动变困难所致。



A:3号传感器 No.3 sensor; B:4号传感器 No.4 sensor.

图 11 传感器信号-转速变化关系图

Fig.11 Sensor signal-speed change diagram

### 3 讨 论

本研究以一种额定喂入量为 0.8 kg/s 的小型横轴流脱粒滚筒为对象,以成熟的晚籼 98 和传奇丰两优 1 号水稻为主要试验材料,以喂入量和滚筒转速为试验因素,在喂入量为 0.2~0.8 kg/s 的条件下开展了台架试验。利用自行设计的测量系统对薄膜传感器信号进行了实时采集,结果表明,薄膜传感器采集的横轴流脱粒滚筒顶盖受力信号与实时喂入量显著相关,喂入量为 0.3~0.7 kg/s 时,薄膜传感器采集的受力信号与滚筒实时喂入量存在很好的线性关系,喂入量为 0.2~0.8 kg/s 时线性拟合效果较好,但转速与电阻信号变化间关系因本试验转速选取的水平数有限,更深层的原因及规律有待进一步试验研究。由于试验受水稻收获季节限制,本研究未涉及田间试验,后期笔者所在研究团队将继续针对不同类型及规格脱粒滚筒开展相应田间试验,薄膜传感器电阻信号变化、扭矩传感器扭矩信号以及喂入量、转速间关系以及田间试验研究有待进一步开展。

#### 参考文献 References

[1] 卢康,张国忠,彭少兵,等.双割台双滚筒全履带式再生稻收割机的设计与性能试验[J].华中农业大学学报,2017,36(5):108-114.LU K,ZHANG G Z,PENG S B,et al.Design and performance of tracked harvester for ratoon rice with double headers and double-threshing cylinders[J].Journal of Huazhong Agricultural University,2017,36(5):108-114(in Chinese with English abstract).

[2] 刘爽,徐红梅,周杰,等.基于模态的联合收获机车身框架振动特性分析与结构优化[J].华中农业大学学报,2018,37(3):108-116.LIU S,XU H M,ZHOU J,et al.Analyzing vibration

characteristics and optimizing structure of combine harvester body frame based on modal analysis[J].Journal of Huazhong Agricultural University,2018,37(3):108-116(in Chinese with English abstract).

- [3] 王素珍,吴崇友,陆宝春,等.基于主元分析与小波神经网络的脱粒滚筒故障诊断[J].计算机应用,2016,36(S1):99-102.WANG S Z,WU C Y,LU B C,et al.Fault diagnosis of threshing cylinder based on PCA and wavelet neural network[J].Journal of computer applications,2016,36(S1):99-102(in Chinese with English abstract).
- [4] 徐元伦.美国凯斯公司精准农业系统(AFS)在中国的应用与发展[J].农机推广,2001(2):30-31.XU Y L.Application and development of cases precision agriculture system (AFS) in China[J].Agricultural machinery promotion,2001(2):30-31(in Chinese).
- [5] 金小亮.联合收割机滚筒堵塞故障监测系统研究[D].合肥:安徽农业大学,2014.JIN X L.Research on jam fault monitoring system for combine harvester threshing cylinder[D].Hefei:Anhui Agricultural University,2014(in Chinese with English abstract).
- [6] CRAESSAERTS G,BAERDEMAEKER J D,SAEYS W.Fault diagnostic systems for agricultural machinery[J].Biosystems engineering,2010,106(1):26-36.
- [7] 钟成义,朱思洪,王素珍,等.收割机滚筒进料堵塞故障检测和主动调节方法;CN104855060A[P].2015-08-26.ZHONG C Y,ZHU S H,WANG S Z,et al. Fault detection and active adjustment method for harvester drum feed blockage: CN104855060A[P].2015-08-26(in Chinese).
- [8] 宋寿鹏,易立单,马晓昆,等.联合收获机脱粒滚筒堵塞故障预警及报警方法;CN101595786[P].2009-12-09.SONG S P,YI L D,MA X K,et al.Early warning and alarm method for threshing drum blockage of combined harvester;CN101595786[P].2009-12-09(in Chinese).
- [9] 李耀明,王建鹏,徐立章,等.联合收获机脱粒滚筒凹板间隙调节装置设计与试验[J].农业机械学报,2018,49(8):68-75.LI Y M,WANG J P,XU L Z,et al.Design and experiment on ad-

- justing mechanism of concave clearance of combine harvester cylinder[J].Transactions of the CSAM, 2018, 49(8): 68-75 (in Chinese with English abstract).
- [10] 卢文涛, 刘宝, 张东兴, 等. 谷物联合收获机喂入量建模与试验[J].农业机械学报, 2011, 42(S1): 82-85. LU W T, LIU B, ZHANG D X, et al. Experiment and feed rate modeling for combine harvester[J]. Transactions of the CSAM, 2011, 42(S1): 82-85 (in Chinese with English abstract).
- [11] 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(S2): 1-6. LIANG X X, CHEN Z, ZHANG X C, et al. Design and experiment of on-line monitoring system for feed quantity of combine harvester[J]. Transactions of the CSAM, 2013, 44(S2): 1-6 (in Chinese with English abstract).
- [12] 刘正怀, 戴素江, 田立权, 等. 半喂入联合收获机回转式栅格凹板脱分装置设计与试验[J].农业机械学报, 2018, 49(5): 169-178. LIU Z H, DAI S J, TIAN L Q, et al. Design and experiment on rotary grate concave threshing-separating unit of head-feeding combine harvester [J]. Transactions of the CSAM, 2018, 49(5): 169-178 (in Chinese with English abstract).
- [13] 王贵国. 一种改进的联合收获机用脱粒滚筒装置: CN202524763U[P]. 2012-11-14. WANG G G. An improved threshing drum device for combine harvester: CN202524763U[P]. 2012-11-14 (in Chinese).
- [14] 谢方平, 罗锡文, 卢向阳, 等. 柔性杆齿滚筒脱粒机理[J].农业工程学报, 2009, 25(8): 110-114. XIE F P, LUO X W, LU X Y, et al. Threshing principle of flexible pole-teeth roller for paddy rice[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(8): 110-114 (in Chinese with English abstract).
- [15] 谢方平, 罗锡文, 卢向阳, 等. 柔性滚筒结构参数对水稻脱粒效果的影响试验[J].农机化研究, 2009, 31(9): 147-151. XIE F P, LUO X W, LU X Y, et al. Effect of roller structural parameter on flexible threshing character for paddy rice[J]. Journal of agricultural mechanization research, 2009, 31(9): 147-151 (in Chinese with English abstract).
- [16] 崔建鹏, 曹恒, 朱钧, 等. 基于 MEMS 倾角传感器和薄膜压力传感器的人体步态监测装置[J].中国测试, 2018, 44(8): 70-75. CUI J P, CAO H, ZHU J, et al. Human gait monitoring system based on MEMS tilt sensors and thin film pressure sensors[J]. China measurement & test, 2018, 44, (8): 70-75 (in Chinese with English abstract).
- [17] 蓝标. 压阻传感器在水利中的应用[J].水利水文自动化, 1998(2): 38-40. LAN B. Application of piezoresistive sensor in water conservancy[J]. Water conservancy and hydrology automation, 1998(2): 38-40 (in Chinese).
- [18] 王宗信, 谢万年. 固态压阻传感器及其在煤矿的应用[J].河北煤炭, 1986(2): 9-11. WANG Z X, XIE W N. Solid piezoresistive sensor and its application in coal mines[J]. Hebei coal, 1986(2): 9-11 (in Chinese).
- [19] 侯海周, 彭金华, 胡毅亭. 爆炸冲击波在酚醛层压材料中衰减特性的实验研究[J].火工品, 2016(2): 13-16. HOU H Z, PENG J H, HU Y T. Experimental study of shock wave attenuation properties in phenolic cotton fabric material[J]. Initiators & pyrotechnics, 2016(2): 13-16 (in Chinese with English abstract).
- [20] 秦钰. 固态硅压阻压力传感器及其在医疗仪器中的应用[J].医疗卫生装备, 1997(6): 15-17. QING Y. Solid silicon piezoresistive pressure sensor and its application in medical instruments [J]. Chinese medical equipment journal, 1997(6): 15-17 (in Chinese).
- [21] 熊利荣, 郑伟, 罗舒豪. 基于触觉感知的家禽净膛机械手及其控制系统的设计[J].农业工程学报, 2018, 34(3): 42-48. XIONG L R, ZHENG W, LUO S H. Design of poultry eviscerated manipulator and its control system based on tactile perception[J]. Transactions of the CSAM, 2018, 34(3): 42-48 (in Chinese with English abstract).
- [22] 乌兰图雅, 王春光, 祁少华, 等. 揉碎玉米秸秆螺旋输送性能试验分析[J].农业工程学报, 2015, 31(21): 51-59. WULAN T Y, WANG C G, QI S H, et al. Test and analysis of performance of screw conveyor for rubbing and breaking corn straw[J]. Transactions of the CSAM, 2015, 31(21): 51-59 (in Chinese with English abstract).
- [23] 刘竹琴, 白泽生. 土壤含水率测量仪的设计[J].微机计算机信息, 2009, 25(26): 207-208. LIU Z Q, BAI Z S. Design of soil moisture measuring instrument[J]. Control & automation, 2009, 25(26): 207-208 (in Chinese with English abstract).
- [24] 彭开怀. 基于嵌入式系统的足底压力分布检测仪[D].成都: 电子科技大学, 2015. PENG K H. A design of data analysis system based on the plantar pressure measurement device[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [25] 邹亚. 水稻直播机播种滑板接地比压测试系统设计与试验[D].武汉: 华中农业大学, 2017. ZOU Y. Design and experiment of grounding specific pressure test system for seeding slide of rice direct seeding machine[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [26] 彭银桥. 纳米薄膜电阻式压力传感器研究及软件设计[D].长沙: 中南大学, 2004. PENG Y Q. Research and software design of nano-film resistive pressure sensor[D]. Changsha: Central South University, 2004 (in Chinese with English abstract).
- [27] 卢康. 小型横轴流再生稻脱粒分离装置的设计与试验[D].武汉: 华中农业大学, 2017. LU K. Design and performance experiment of a small horizontal-axial threshing and separating device for ratoon rice[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017 (in Chinese with English abstract).

- [28] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007. China Academy of Agricultural Mechanization Sciences. Handbook of agricultural machinery design [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2007 (in Chinese).
- [29] REINKE R, DANKOWICZ H, PHELAN J, et al. A dynamic grain flow model for a mass flow yield sensor on a combine[J]. Precision agriculture, 2011, 12(5): 732-749.

## Designing a real-time feed measurement system for horizontal axial flow threshing drum based on thin film sensor

ZHAO Shenghua, ZHANG Guozhong, ZHANG Shijie,  
FU Jianwei, XIE Gan, MOHAMED Anwer

*College of Engineering, Huazhong Agricultural University/Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-Lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China*

**Abstract** A threshing drum feeding measuring system is designed based on the film sensor to realize the real-time feeding volume monitoring of the threshing drum of rice combine harvester. The system can monitor the working state of threshing drum and assist in determining the current real-time feeding quantity by using the thin film sensors to measure the force on the top cover. The bench test was carried out under conditions of 1 100 r/min and a feed rate of 0.2 to 0.8 kg/s, using a small horizontal axial flow threshing drum with a rated feed rate of 0.8 kg/s as test object, the mature Late indica rice 98 and Chuanqi Fengliangyou 1 rice as test materials with the rotational speeds of 650 r/min, 800 r/min, 950 r/min, respectively. The rated feeding capacity of the platform detachment device was 0.8 kg/s. The results showed that the film sensor was collected. Real-time signal was significantly correlated with real-time feeding. The linear relationship between feeding amount and sensor signal was fitted with good fitting effect. It is indicated that the measuring system designed can measure feeding amount through sensor signal.

**Keywords** harvesting machinery; threshing drum; film sensor; feeding volume; real time monitoring; rice

(责任编辑: 陆文昌)