



尤泳,马朋勃,陈科,惠云婷,李思标,王德成,高晓宏,苏佳佳. 基于卷压力的圆捆机成捆密度监测系统设计与试验[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(09): 158-166.

YOU Yong, MA Pengbo, CHEN Ke, HUI Yunting, LI Sibiao, WANG Decheng, GAO Xiaohong, SU Jiajia. Design and experiment of density monitoring system for round baler based on rolling pressure[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(09): 158-166.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.09.14

基于卷压力的圆捆机成捆密度监测系统设计与试验

尤泳¹ 马朋勃¹ 陈科¹ 惠云婷^{1*} 李思标¹ 王德成¹ 高晓宏² 苏佳佳²

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083;

2. 中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院有限公司, 呼和浩特 010010)

摘要 针对当前国内圆捆机信息化程度低, 草捆密度缺乏有效监测手段等问题, 研究设计一种圆捆机成捆密度监测系统, 依据测量草捆成捆过程中的卷压力, 建立卷压力与成捆密度之间函数模型, 实现对成捆密度的实时监测。监测系统主要由控制器、信号采集模块、通信模块、显示模块以及电源模块等部分组成, 根据卷压力采集装置和侧拉力采集装置, 实现对圆捆机多个作业参数的监测; 搭建试验台, 开展成捆密度监测系统打捆性能试验, 分别以卷压力和侧拉力作为成捆指标, 对成捆密度进行监测, 对比其差异性; 进行小麦秸秆压缩规律试验, 建立草捆成捆过程中卷压力与密度之间函数模型, 并根据多次打捆试验对函数模型进行验证。试验结果表明: 1) 基于卷压力的圆捆机成捆密度监测系统, 可以实现对圆捆机成捆过程中作业参数的采集监测; 2) 以卷压力作为成捆指标时, 成捆密度最大偏差为4.38%, 变异系数为3.12%, 与侧拉力相比, 基于卷压力的密度监测方法能够更为准确地反映成捆密度; 3) 含水率为15%的小麦秸秆在打捆过程中卷压力与密度之间的关系符合二次函数模型, 相关系数为0.983, 计算值与测量值之间的最大偏差为5.06%, 成捆密度监测模型能够准确反映卷压力与密度之间的关系。综上, 利用本监测系统可实现草捆成捆密度的实时监测, 为圆捆机成捆密度控制提供参考。

关键词 圆捆机; 卷压力; 成捆密度; 监测系统

中图分类号 S225.8

文章编号 1007-4333(2024)09-0158-09

文献标志码 A

Design and experiment of density monitoring system for round baler based on rolling pressure

YOU Yong¹, MA Pengbo¹, CHEN Ke¹, HUI Yunting^{1*}, LI Sibiao¹, WANG Decheng¹,
GAO Xiaohong², SU Jiajia²

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

2. Hohhot Branch of Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Co., Ltd., Hohhot 010010, China)

Abstract In response to the current problems of the low degree of informatization of domestic round baler and lack of effective monitoring means for bale density, a set of bale density monitoring system for round baler was designed in this study. The real-time monitoring of bale density is realized by measuring the roll pressure during the bale forming process and establishing a function model between roll pressure and bale density. The monitoring system is mainly composed of controller, signal acquisition module, communication module, display module and power supply module, etc. It realizes the monitoring of several operational parameters of the round baler through the roll pressure acquisition device and side tension acquisition

收稿日期: 2023-12-12

基金项目: 内蒙古自治区科技成果转化专项资金项目(2021CG0011); 山东省重大科技创新工程项目(2022CXGC020704); 国家牧草产业技术体系(CARS-34)

第一作者: 尤泳(ORCID:0000-0002-6026-3414), 副教授, 博士生导师, 主要从事草业机械研究, E-mail: youyong@cau.edu.cn

通讯作者: 惠云婷(ORCID:0000-0003-0132-4448), 讲师, 主要从事草业机械化技术研究, E-mail: hyt@cau.edu.cn

device. In this study, a test bed is set up to carry out the bale performance test of the bale density monitoring system. Bundle density is monitored by using roll pressure and side tension as bale formation indexes to compare the differences respectively. This study conducted tests on the compression law of wheat straw, established a function model between roll pressure and density in the bale forming process, and verified the function model based on several bale tests. The results show that: 1) The bale density monitoring system of round baler based on roll pressure can realize the collection and monitoring of operational parameters during the bale forming process of round baler. 2) The maximum deviation of bale density is 4.38% and the coefficient of variation is 3.12% when using roll pressure as the index of bale formation. The density monitoring method based on roll pressure can more accurately reflect the size of bale density compared with the side pulling force. 3) The relationship between roll pressure and density of wheat straw with 15% moisture content in the baling process is in accordance with the quadratic function model, the correlation coefficient is 0.983, and the maximum deviation between the calculated value and the measured value is 5.06%, which makes the compression model able to accurately reflect the relationship between roll pressure and density. In conclusion, the monitoring system constructed in this study can realize the real-time monitoring of the bale density. This study provides a reference for the bale density control of round baler.

Keywords round baler; roll pressure; bale density; monitoring system

在饲草秸秆收获和收集过程中,压缩成捆是一项重要的作业环节,打捆机是饲草秸秆机械化收获的关键装备,主要分为方捆机和圆捆机^[1-2]。圆捆机因其机型体积小、适应性强、操作简单、造价低廉等特点,在我国饲草收获设备中占主要地位^[3-5]。目前,国内圆捆机自动化水平低,尤其对草捆成捆过程缺乏有效监测手段,仅根据简单的机械结构判断草捆开仓时机,导致打捆后草捆密度一致性差,而草捆的成捆密度对于饲草料收获效率、收储运用效率有较大影响^[6-8]。圆捆机工作时,内部草捆处于滚动状态,此时难以对成捆密度进行测量,国内外研究多针对质量或其他物理量的测量侧面反映成捆密度大小。Loftis P J等^[9]设计了一种草捆出仓称重试验台,根据测量草捆出仓时溜草架最大偏转角度反映草捆重力大小,并根据试验验证了当陀螺仪安装于溜草架坡道前端边缘时误差最小;房佳佳等^[10]和王健等^[11]设计了一种卷压力测量方案,将应变片沿轴向粘贴于钢辊凸棱上,根据监测打捆时钢辊表面的微应变,结合有限元分析计算出草捆的卷压力;程成^[12]设计了一种轴端卷压力测量装置,在一钢辊2轴端均安装S型拉力传感器,根据测量圆捆机钢辊在 x 、 y 轴方向产生的微小位移,反映当前钢辊受力。综上,国内已有研究在圆捆机密度监测方面进行了一些探索^[13-16],并对草捆成捆机理进行相关分析,开展流变试验,但在密度监测控制等方面研究较少^[17-23]。

针对当前国内草捆成捆密度监测精度低,效果

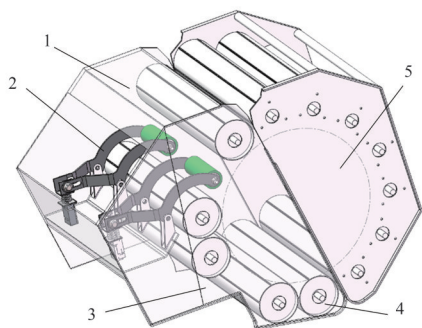
差等问题,本研究拟根据圆捆机机构特征和草捆成捆特性,设计一种基于卷压力的圆捆机成捆密度监测系统,对草捆成捆过程中的压力数据进行实时监测,以期获得更精准的成捆密度参数,为圆捆机成捆密度控制提供参考。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

在圆捆机成捆过程中,随着草捆成型后密度逐步增大,草捆内部的卷压力也逐渐增大,对成捆密度的监测,可以转化为对草捆卷压力的监测,并建立卷压力与成捆密度之间关系模型。因此,结合圆捆机工作特点,研究设计一种基于卷压力的圆捆机密度监测系统。试验台的整体结构主要包括:卷压力采集装置、钢辊、前仓室、后仓室等(图1)。前仓与后仓铰接在一起,共同组成圆捆机成捆室;钢辊作为圆捆机打捆时的主要运动部件,按照圆周排列分布在圆捆机的前后仓上,形成成捆室,钢辊轴端固定链轮,钢辊与钢辊之间采用链传动连接实现同步转动;卷压力采集装置安装于圆捆机上部2个钢辊空隙之间,工作时与成捆后的草捆直接接触。

试验台以上海世达尔现代农机有限公司生产的9JYD-60型圆捆机为主体,该圆捆机成捆室直径为610 mm、宽度为700 mm。成捆室内部由12根钢辊组成,其中前仓室内有5根钢辊,后仓室内有7根钢辊,采用顶部单液压油缸来进行开仓。试验台



1. 前仓室; 2. 卷压力采集装置; 3. 成捆室入口; 4. 钢辊; 5. 后仓室。
1. Front baling chamber; 2. Roll pressure monitoring device;
3. Inlet of baling chamber; 4. Steel roll; 5. Back baling chamber.

图1 试验台结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the test bench structure

动力输入电机选用河北安特机电设备制造有限公司生产的YE3132M-4型三相交流异步电机(额定功率为7.5 kW),电机输出的转矩经过联轴器传递给主动钢辊,从而带动其余钢辊旋转。同时,试验台采用传送带实现饲草秸秆喂入,传送带电机选用杭州三科变频技术有限公司生产的SKI600-4D0G型变频器,进行传送带速度调节。

1.2 工作原理

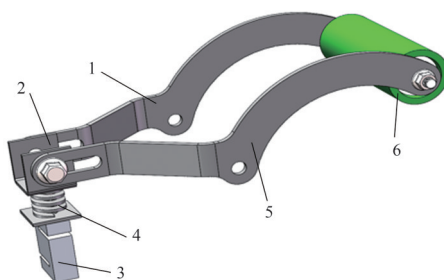
圆捆机进行作业时,由动力装置输入转矩带动圆捆机钢辊转动,饲草秸秆等物料平铺于传送带上,在传送带输送作用下,饲草秸秆持续进入成捆室中。在打捆作业前期,成捆室中的饲草秸秆处于翻涌卷积阶段,在钢辊以及后续饲草秸秆推动下进行卷捆作业,此时卷压力采集装置尚未与草捆发生接触;在打捆作业中期,随着饲草秸秆不断喂入和卷捆作业不断进行,草捆逐渐充满整个成捆室,松散的饲草秸秆经过不断卷积挤压形成具有一定紧实度的草捆,卷压力采集装置与草捆产生接触,开始受到草捆挤压作用;在打捆作业后期,随着饲草秸秆继续喂入,草捆会对成捆室产生挤压作用,当监测系统采集到的卷压力和侧拉力均达到设定值后,系统控制蜂鸣器报警,停止喂入饲草秸秆,并开始缠绳放捆,结束整个打捆过程。

2 关键部件设计

2.1 卷压力采集装置设计

卷压力采集装置由左连杆、U型板、模具弹簧、压力传感器、右连杆以及橡胶辊组成(图2),其中,左、右连杆一端采用螺母固定夹持橡胶辊、另一端

与U型板固定,根据销轴将中间孔铰接于前仓室机台上;U型板下方为模具弹簧及压力传感器,根据螺栓将U型板、模具弹簧、压力传感器固定到一起,传感器另一端固定在机台上;橡胶辊由轴芯、轴承和橡胶套组成(图3),卷压力根据连杆作用至U型板上,最终传递至压力传感器,当橡胶套与草捆接触时,橡胶套围绕轴芯自由转动,在促进饲草秸秆成捆的同时,实现草捆卷压力采集。

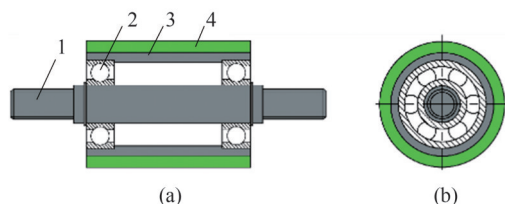


1. 左连杆; 2. U型板; 3. 压力传感器; 4. 模具弹簧; 5. 右连杆;
6. 橡胶辊。

1. Left connecting rod; 2. U-type plate; 3. Pressure sensor;
4. Mould spring; 5. Right connecting rod; 6. Rubber roller.

图2 卷压力采集装置结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of roll pressure measuring device



1. 轴芯; 2. 轴承; 3. 钢管; 4. 橡胶套。

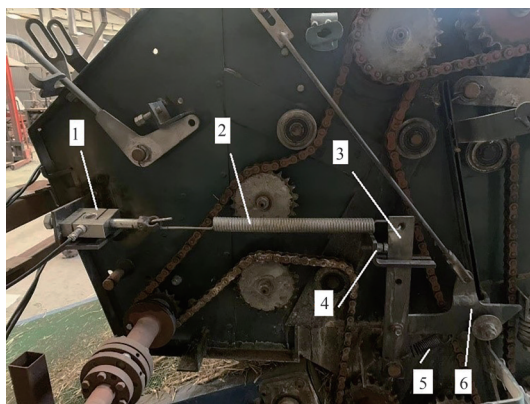
1. Axle core; 2. Bearing; 3. Steel tube; 4. Rubber sleeve.

图3 橡胶辊结构正视图(a)和左视图(b)

Fig. 3 Schematic diagram of rubber roller

2.2 侧拉力采集装置设计

相比于圆捆机打捆时草捆的卷压力,侧拉力也能够反映成捆密度变化情况。因此,在采用卷压力采集方式的同时,设计一套圆捆机侧拉力采集装置。根据采集挂钩与后仓室之间的作用力,反映圆捆机内部草捆的密度情况。侧拉力采集装置由拉力传感器、传力弹簧、连杆、复位弹簧以及挂钩等组成(图4),其中拉力传感器一端固定在角钢上,另一端根据连杆与弹簧连接,弹簧处于拉伸状态;连杆下端铰接在圆捆机上,中间与挂钩铰接,挂钩与后仓室侧壁上的立轴相连。



1. 拉力传感器;2. 传力弹簧;3. 预紧力调节螺栓;4. 连杆;5. 复位弹簧;6. 挂钩。

1. Tension sensor; 2. Spring; 3. Adjuster bolt of pretightening force; 4. Connecting rod; 5. Reset spring; 6. Hange.

图4 侧拉力采集装置结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of side tension measuring device

2.3 控制系统硬件设计

圆捆机密度监测系统主要由控制器、信号采集模块、通信模块、显示模块及电源模块等组成。控制器选用西门子S7-200smart ST20(12个数字量输入,8个数字量输出,可扩展6个EM模块和1个信号板,供电电压为DC24 V);采集模块选择AM06型,与控制器相配套;显示器选用西门子smart 700IE面板(分辨率为800像素×480像素);钢辊转速传感器选择欧迪龙SC12-20K-L霍尔式转速传感器(监测频率10 kHz,监测范围为4 mm);电压放大器选用GJ4507A;拉力传感器选用安徽蚌埠高精传感系统工程有限公司生产的GJBLS-I S型拉压力传感器(量程5~50 kg,激励电压10~15 V)。

2.4 控制系统软件设计

圆捆机密度监测系统启动后,需对程序进行初始化,监测系统开始对圆捆机工作参数进行监测,在打捆过程中,随着牧草不断喂入圆捆机,当采集到的卷压力和侧拉力达到设定值后,系统控制蜂鸣器报警,停止牧草喂入^[24-29]。工作流程图见图5。

2.4.1 滤波算法设计

圆捆机工作时往往伴随着较为强烈的振动,导致传感器采集的数据波动大,使得系统产生误判,进而过早发出开仓警报,导致成捆密度偏小。

针对圆捆机工作时振动所产生的波动,本研究采用中位值平均滤波法进行滤波,滤波原理为:将采集到的 N 个数据按大小进行筛选,去掉最大值和最小值,并将剩余 $N-2$ 个数据求平均值,将该值作为最终输出的滤波结果,本研究取 $N=50$ 。

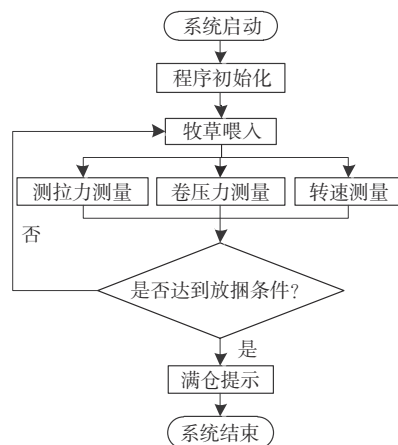


图5 监测系统工作流程图

Fig. 5 The process chart of monitoring system

2.4.2 显示程序设计

在Wincc Flexible中设计圆捆机密度监测显示程序,程序主界面见图6。界面左侧部分可以实时

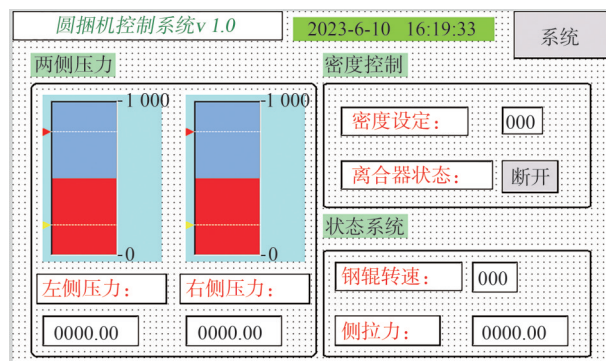


图6 显示程序界面

Fig. 6 Monitoring system display interface

显示试验台运行过程中2个侧卷压力数值,同时,在界面中添加卷压力柱状图显示区域,用以直观展示2个卷压力变化情况。右侧部分界面为密度控制模块以及状态参数模块,在密度控制模块中,可以根据更改IO域中数值设定开仓卷压力数值,从而实现草捆不同密度的控制;在状态参数模块中,界面显示当前的钢辊转速以及侧拉力的大小。

3 密度监测系统试验

3.1 密度监测系统性能试验

为验证监测系统在实际工作中的稳定性和可靠性,在河北石家庄鑫农机械有限公司的工厂内进行试验,试验所用材料为含水率15%的小麦秸秆。

在圆捆机作业工程中,秸秆均匀平铺于传送带上进行喂入,物料喂入速度与传送带运行速度成正比,因此,影响圆捆机卷压特性最重要的因素分别为:传送带速度、钢辊转速、物料含水率。在本次试验中,物料的喂入由传送带完成,将物料喂入速度设定为2 m/s,频率与传送带速度的计算公式如下:

$$f = \frac{vp}{2\pi r} \quad (1)$$

式中: f 为变频器输出频率,Hz; v 为传送带速度,m/s; p 为传送带电机极数; r 为主动钢辊半径,m。

在试验开始前,为确保监测系统能够正常地采集左右2个卷压力传感器、侧拉力传感器以及钢辊转速传感器的信号,并且能够将这些信息实时地反映到显示器上,需对软件部分进行测试。同时,分别对转速传感器、卷压力和侧拉力传感器进行标定,确保采集数据准确性。进行打捆试验时,按照试验设计参数配置用于控制传送带速度和钢辊转速2个变频器,将秸秆物料均匀放置在传送带上,在传送带输送下,物料被喂入到成捆室当中,开始缠绕成捆;成捆结束后,开仓放捆。利用传感器和数据采集系统采集全过程的卷压力和侧拉力数据。

3.2 卷压力和侧拉力监测对比试验

为了验证卷压力和侧拉力与成捆密度的相关性差异,进行卷压力和侧拉力对比试验,试验台分别以卷压力和侧拉力作为开仓判断指标,当传感器采集的数据达到设定值后,开仓放捆并记录草捆质量,并计算成捆密度,根据监测卷压力和侧拉力以反映成捆密度情况。对比试验采用变异系数作为

评价指标,变异系数(CV)采用式(2)计算:

$$CV = \frac{\sqrt{\sigma}}{\mu} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\sqrt{\sigma}$ 为成捆密度的标准差; μ 为成捆密度平均值,kg/m³。

4 结果分析

4.1 密度监测系统性能试验结果

密度监测系统根据各个传感器采集到的数据见图7,整个打捆试验过程持续300 s,其中在前100 s左右的时间中,2个卷压力采集传感器以及侧拉力传感器所采集的数据均没有明显变化,表明此时物料尚未充满成捆室,草捆还没有与卷压力采集装置的橡胶辊发生接触,圆捆机也没有胀仓的趋势,此时卷压力采集的数据保持为0,侧拉力采集的数据为其预紧力的大小;在第100 s左右,卷压力采集装置开始有数据产生,表明草捆已经开始对橡胶辊产生挤压作用,且随着物料的喂入快速增大;在第230 s左右时,侧拉力传感器数据开始发生明显变化,表明草捆此时对后仓的挤压力已经开始推动后仓运动,产生胀仓作用。

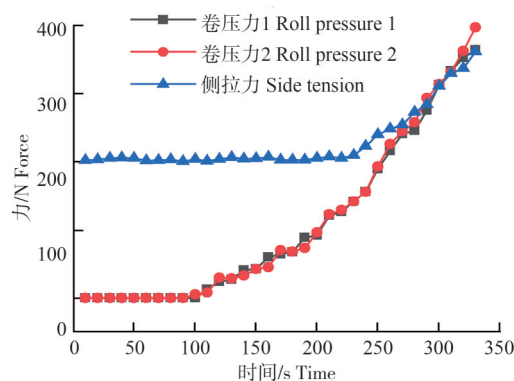


图7 密度监测系统卷压力和侧拉力试验结果

Fig. 7 The test results of density monitoring system roll pressure and side tension

侧拉力发生变化的时间与卷压力明显不同,当草捆与卷压力采集装置的橡胶辊接触后,传感器便可以采集到当前卷压力的数据变化情况,而此时成捆密度还远未达到胀仓的程度,因此侧拉力传感器数值没有变化;随着物料继续喂入,达到胀仓的阶段,前后仓之间产生拉力,才能被侧拉力传感器所监测到。此外,侧拉力在开始发生变化后,其变化

趋势相较于卷压力来说增速较快,这是因为此时草捆已经非常紧实,后续喂入的物料向内压缩比较困难,开始缠绕在草捆外表面,进一步促进了胀仓作用,因此,侧拉力出现后其增速较快。由此可以看出,卷压力的监测能够更加完整的反映整个打捆过

程中草捆受力变化情况。

4.2 卷压力和侧拉力监测对比试验结果

以卷压力和侧拉力分别作为试验开仓判定指标,进行卷压力和侧拉力监测对比试验,试验结果相关数据见表 1。

表 1 基于卷压力和侧拉力成捆密度监测结果
Table 1 The results of bale density monitoring based on roll pressure and side tension.

序号 Number	基于卷压力 Based on roll pressure			基于侧拉力 Based on side tension		
	草捆质量/kg	成捆密度/(kg/m ³)	偏差/%	草捆质量/kg	成捆密度/(kg/m ³)	偏差/%
	Bale weight	Bale density	Bias	Bale weight	Bale density	Bias
1	27.5	138.95	−1.36	28.2	142.48	4.95
2	28.6	144.50	2.58	26.7	134.90	−0.63
3	28.3	142.99	1.51	25.5	128.84	−5.10
4	26.8	135.41	−3.87	24.9	125.81	−7.33
5	29.1	147.03	4.38	25.9	130.86	−3.61
6	26.7	134.90	−4.23	28.7	145.01	6.81
7	28.4	143.49	1.87	27.5	138.95	2.34
8	28.7	145.01	−2.94	26.4	133.39	−1.75
9	26.9	135.91	−3.52	26.9	135.91	0.11
10	27.8	140.46	−0.29	28.0	141.47	4.21

基于卷压力进行成捆密度监测时,小麦秸秆成捆时平均质量为 27.88 kg,平均密度为 140.97 kg/m³。其中,最大成捆质量为 29.1 kg,对应密度为 147.03 kg/m³;而最小的成捆质量为 26.7 kg,对应密度为 134.90 kg/m³,成捆密度相较于平均密度之间的偏差最大为 4.38%。卷压力试验中成捆密度变异系数为 3.12%。

基于侧拉力进行成捆密度监测时,小麦秸秆成捆时平均质量为 26.87 kg,平均密度为 135.76 kg/m³。其中,最大的成捆质量为 28.7 kg,对应密度为 145.01 kg/m³;而最小的成捆质量为 24.9 kg,对应密度为 125.81 kg/m³,成捆密度相较于平均密度之间的相对偏差最大为 7.33%。侧拉力试验中成捆密度的变异系数为 4.60%。

以卷压力作为成捆密度开仓判定指标进行试验的变异系数为 3.12%,小于以侧拉力作为指标进行试验的变异系数 4.60%,说明前者在进行试验时的成捆密度的离散程度小于后者,故卷压力监测装置相较于侧拉力监测装置能够更准确地反映成捆密度情况。

4.3 基于卷压力的成捆密度监测模型

为进一步研究草捆成捆过程中卷压力与成捆密度之间关系,建立小麦秸秆卷压过程中成捆密度监测模型。在不同的卷压力下开仓放捆,记录此时卷压力大小以及草捆质量,并计算出相应成捆密度。以打捆过程中的卷压力作为自变量,成捆密度作为因变量,在 SPSS 软件中进行非线性回归分析,建立小麦秸秆打捆过程中卷压力与密度之间的回归方程,结果表明,采用线性、对数函数、二次函数、幂函数和指数函数等 5 个预测模型的相关系数 R^2 依次为:0.900、0.919、0.983、0.957 和 0.840。

因此,当使用二次函数模型对卷压力和成捆密度进行拟合时相关系数 R^2 的值最大,相关系数为 0.983,说明对应的回归方程最为符合小麦秸秆打捆时的压缩规律,在相同的打捆条件下,可以根据圆捆机的实时卷压力计算出当前仓内草捆的密度。成捆密度预测模型为:

$$\rho = -0.001F^2 + 0.633F + 42.767 \tag{3}$$

式中: ρ 为成捆密度,kg/m³; F 为卷压力,N。图 8 示

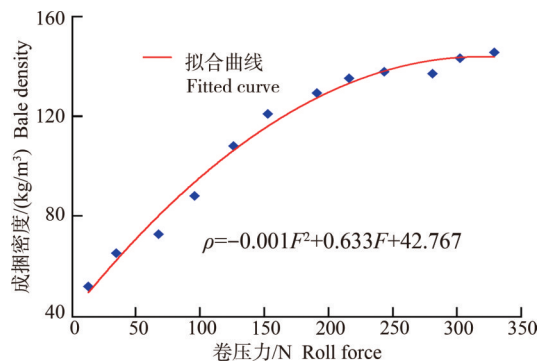


图8 卷压力(F)与成捆密度(ρ)的关系

Fig. 8 The relationship between roll pressure (F) and bale density (ρ)

出打捆过程中卷压力F与成捆密度ρ的关系。

为验证草捆密度监测模型的准确程度,使用小麦秸秆进行了9次打捆试验,根据成捆密度监测模型式(3)得出成捆密度的计算值,与打捆试验最终成捆密度的测量值进行对比,草捆密度预测模型验证试验结果见表2。计算值与测量值之间的最大偏差为5.06%,满足实际需求,表明该成捆密度监测模型能够较为准确地反映小麦秸秆打捆时卷压力与密度的对应关系。

表2 基于卷压力的成捆密度计算值与测量值

Table 2 Calculated and measured results of bale density based on roll pressure

序号 Number	卷压力/N Roll pressure	成捆密度/(kg/m³) Bale density		偏差/% Bias
		计算值 Calculated value	测量值 Measured value	
1	138.6	111.3	108.2	-2.78
2	145.6	113.7	115.9	1.91
3	166.8	120.5	115.6	-4.09
4	189.1	126.7	120.3	-5.06
5	201.7	129.8	135.7	4.58
6	233.5	136.1	133.4	-1.95
7	278.2	141.5	144.2	1.93
8	291.5	142.3	138.3	-2.82
9	323.5	142.9	144.9	1.41

5 结 论

本研究设计了基于卷压力的圆捆机密度监测系统,可以实现对圆捆机过程中卷压力、侧拉力等作业参数的采集监测,同时搭建了试验台,开展成捆密度监测系统对比试验,建立成捆密度监测模型,并对监测模型进行验证,试验相关结论如下:

1)以卷压力为指标进行打捆试验时成捆密度最大偏差为4.38%,变异系数为3.12%;以侧拉力为指标进行打捆试验时成捆密度最大偏差为7.33%,变异系数为4.60%。

2)含水率为15%的小麦秸秆在打捆过程中卷压力与密度之间关系符合二次函数模型,相关系数为0.983,成捆密度计算值与测量值之间最大偏差为5.06%,满足实际需求,本研究基于卷压力的圆

捆机密度监测系统对圆捆机成捆密度监测控制具有一定意义。

参考文献 References

[1] 李东,赵武云,辛尚龙,曲浩,刘小龙,梁加栋.膜面清洁打捆自卸式残膜回收机的设计[J].中国农业大学学报,2020,25(11):117-125
Li D, Zhao W Y, Xin S L, Qu H, Liu X L, Liang J D. Design of a self unloading film recycling machine for film surface cleaning and bundling [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(11): 117-125 (in Chinese)

[2] 张爱民,廖培旺,陈明江,刘凯凯,王振伟,陈永生.自走式不对行棉秆联合收获打捆机的设计与试验[J].中国农业大学学报,2019,24(9):127-138
Zhang A M, Liao P W, Chen M J, Liu K K, Wang Z W, Chen Y S. Design and experiment of self-propelled non-aligned cotton stalk combined harvest baler [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(9): 127-138 (in Chinese)

[3] 王德成,贺长彬,武红剑,尤泳,王光辉.苜蓿生产全程机械化技术研究

- 现状与发展分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 1-25
- Wang D C, He C B, Wu H J, You Y, Wang G H. Review of alfalfa full-mechanized production technology [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(8): 1-25 (in Chinese)
- [4] 李叶龙, 王德福. 钢辊式圆捆机卷捆功耗中关键生产信息的提取方法[J]. 沈阳农业大学学报, 2020, 51(5): 530-539
- Li Y L, Wang D F. Extraction method of key production information in baling power consumption of steel-roller round baler [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2020, 51(5): 530-539 (in Chinese)
- [5] 廖培旺, 刘凯凯, 宋德平, 王振伟, 李伟, 李明军, 张爱民. 基于侧喂入打捆机的棉秆压捆试验研究[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(8): 133-146
- Liao P W, Liu K K, Song D P, Wang Z W, Li W, Li M J, Zhang A M. Analysis of cotton stalk baling test based on side feed bundling machine [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(8): 133-146 (in Chinese)
- [6] 廖培旺, 刘凯凯, 陈明江, 王振伟, 张爱民. 滚筒式棉秆侧切机构的设计与试验[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(9): 131-138
- Liao P W, Liu K K, Chen M J, Wang Z W, Zhang A M. Design and experiment of a roller type cotton stalk cutting mechanism [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(9): 131-138 (in Chinese)
- [7] 王德福, 江志国, 李百秋, 王国富, 蒋亦元. 稻秆与圆捆机钢辊间滑动摩擦特性试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 44-51
- Wang D F, Jiang Z G, Li B Q, Wang G F, Jiang Y Y. Experiment on sliding friction characteristics between rice straw and baler steel-roll [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(21): 44-51 (in Chinese)
- [8] 雷军乐, 王德福, 李东红, 张全超, 杨星, 那明君. 钢辊式圆捆机旋转草芯形成影响因素分析与优化[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 18-25
- Lei J L, Wang D F, Li D H, Zhang Q C, Yang X, Na M J. Influence factors analysis and optimization of forming rotary straw core by steel-roll round baler [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(12): 18-25 (in Chinese)
- [9] Loftis P J, Kirk K R, Mueller J D, Andrae J G. Development of a round bale weighing system for spring-loaded bale ramps [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2019, 35(6): 969-977
- [10] 房佳佳, 张永, 杨明韶, 王破敏, 王健, 刘德环, 高津, 李海军. 紫花苜蓿圆捆机卷压过程的应力松弛特性与模型建立[J]. 农业工程学报, 2018, 34(16): 50-56
- Fang J J, Zhang Y, Yang M S, Wang A M, Wang J, Liu D H, Gao J, Li H J. Stress relaxation behavior and modeling of alfalfa during rotary compression [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(16): 50-56 (in Chinese)
- [11] 王健, 房佳佳, 张永. 9YG-1.3圆捆机试验台及控制监测系统设计与试验[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2022, 43(3): 61-66
- Wang J, Fang J J, Zhang Y. A test bench and control monitoring system design based on 9YG-1.3 round baler [J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition*, 2022, 43(3): 61-66 (in Chinese)
- [12] 程成. 圆捆机卷压性能参数数据采集系统的设计[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021
- Cheng C. Design of data collection system for rolling performance parameters of round baler [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021 (in Chinese)
- [13] 孙显顺, 刘亮东, 王德成, 何雄林, 郑奎华, 马治国, 胡佳宁. 棉花圆模成型装置的设计与优化分析[J]. 农机化研究, 2023, 45(1): 51-57
- Sun X S, Liu L D, Wang D C, He X L, Zheng K H, Ma Z G, Hu J N. Design and optimization analysis of cotton round mold forming device [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2023, 45(1): 51-57 (in Chinese)
- [14] 李叶龙, 王德福, 雷军乐. 基于多场耦合理论的钢辊式圆捆机卷芯过程研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2019, 50(4): 429-437
- Li Y L, Wang D F, Lei J L. Baling Analysis of the Steel-roll Round Baler based on Multi-field Coupling Theory [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2019, 50(4): 429-437 (in Chinese)
- [15] 高东明, 王德成, 李杰, 刘玉德, 乔晓东. 青饲圆捆机对数螺旋式成形装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 118-122
- Gao D M, Wang D C, Li J, Liu Y D, Qiao X D. Design and test of logarithmic spiral round baler chamber [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(7): 118-122 (in Chinese)
- [16] 武红剑. 圆草捆分段成型连续卷压工艺及装置的试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2019
- WU H J. Experimental study on continuous forming device for staged forming of round bales [D]. Beijing: China Agricultural University, 2019 (in Chinese)
- [17] 李叶龙, 王德福, 王沫, 李东红, 张全超, 雷军乐. 稻秆圆捆机辊盘式卷捆机构的设计及参数优化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 27-34
- Li Y L, Wang D F, Wang M, Li D H, Zhang Q C, Lei J L. Design and parameters optimization of roll-disk baling mechanism for rice straw round baler [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(6): 27-34 (in Chinese)
- [18] Flick D E, Nigon C M, Shinnors K J, Friede J C. Control system for a continuous compaction large square baler [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 165: 104969
- [19] Shang Y H, Meng Z J, Cong Y, Dong J J, Luo C H, Song Z H. Development of a control system with remote monitoring function for round baler [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 182: 106044
- [20] Le Roux P F, Ngwenyama M K. Static and dynamic simulation of an induction motor using matlab/simulink [J]. *Energies*, 2022, 15(10): 3564
- [21] 李叶龙, 王德福, 李东红, 王沫, 江志国, 雷军乐. 辊盘式圆捆机卷捆机理分析与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 45-52
- Li Y L, Wang D F, Li D H, Wang M, Jiang Z G, Lei J L. Theoretical analysis and experiment of baling mechanism of roll-disk round baler [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(12): 45-52 (in Chinese)
- [22] 王德福, 张全超, 杨星, 李超, 李东红, 王沫, 平忠源. 秸秆圆捆机捆绳机构的参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 55-61
- Wang D F, Zhang Q C, Yang X, Li C, Li D H, Wang M, Ping Z Y. Parameter optimization and experiment of rope-winding mechanism of straw round balers [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(14): 55-61 (in Chinese)
- [23] 高东明, 李杰, 王德成. 辊杠式圆捆机青贮打捆效率与功耗试验[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2017, 38(4): 428-433
- Gao D M, Li J, Wang D C. Experiment on silage baling efficiency and power consumption of Chain-crossbar round baler [J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2017, 38(4): 428-433 (in Chinese)
- [24] 尹建军, 吴启斌, 陈永河, 王新新. 小型圆捆机捆草-卸捆自动操纵与报警装置研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 96-101, 120
- Yin J J, Wu Q B, Chen Y H, Wang X X. Design of automatic manipulation and alarming device of straw-bundling and bale-unloading of minitype round baler [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(9): 96-101, 120 (in Chinese)

- [25] 刘家君, 郭辉, 吕全贵, 李林. 自走式圆捆机喂入量控制系统设计[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(7): 13-18, 25
Liu J J, Guo H, Lü Q G, Li L. Design of feeding control system for self-propelled round baler[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2021, 42(7): 13-18, 25 (in Chinese)
- [26] 张艺. 基于PLC的圆捆机试验台控制监测系统设计[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022
Zhang Y. Design of control and monitoring system for round baler test bench based on PLC [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022 (in Chinese)
- [27] 吴磊. 钢辊式圆捆机卷捆室力场数据采集系统的设计与试验[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022
Wu L. Design and test of force field data acquisition system for steel roller type round baler [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022 (in Chinese)
- [28] 张翔, 叶小华, 彭耀, 黄建中. 基于自抗扰控制的线材打捆机电液力控制系统[J]. 安徽工业大学学报: 自然科学版, 2022, 39(4): 449-455, 462
Zhang X, Ye X H, Peng Y, Huang J Z. Electro-hydraulic force control system for baler based on active disturbance rejection control[J]. *Journal of Anhui University of Technology: Natural Science*, 2022, 39(4): 449-455, 462 (in Chinese)
- [29] 李树森, 徐跃东, 贾勇, 喻磊. 秸秆打捆机的开式多斜度复压压缩装置设计与试验[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2020, 41(5): 61-66
Li S S, Xu Y D, Jia Y, Yu L. Design and test of open multi slope recompression device of straw baler [J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition*, 2020, 41(5): 61-66 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春



第一作者简介: 尤泳, 工学博士, 中国农业大学副教授, 博士生导师, 长期围绕牧草和饲草料生产、优质饲草料加工利用, 开展相关基础理论研究和应用研究, 主持国家自然科学基金项目、农业部公益性行业科研专项、“十三五”国家重点研发计划项目、“十四五”国家重点研发计划项目、山东省重大科技创新工程项目等多项国家、省部级项目。发表SCI/EI论文30余篇, 授权国家发明专利20项。获中华农业科技奖二等奖、中华农业科技奖三等奖、山东省科技进步奖三等奖、机械工业科学技术二等奖等省部级奖励4项。兼任中国农业工程学会理事、中国农业机械学会畜牧机械分会副主任委员、中国草学会草牧业机械分会秘书长、国家牧草产业技术体系岗位科学家。



通讯作者简介: 惠云婷, 工学博士, 中国农业大学讲师, 长期从事牧草和饲草料机械化生产、牧草种子机械化处理技术, 开展相关基础理论研究和应用研究, 围绕摩擦学理论、粘弹性力学特性、牧草压缩特性, 探索碎草料和机器部件间的互作关系。先后参与完成“苜蓿饲草料生产机械化关键工艺及装备的研发与示范”等多项国家和省部级项目, 以第一作者发表SCI论文5篇, EI论文5篇, 授权国家专利3项。兼任中国草学会草业机械专业委员会副秘书长。