doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.019

小型方捆机草捆动态称量系统设计与试验

张安琪　孟志军　陈立平　武广伟　丛　岳　安晓飞
(北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 针对小方捆机作业过程中草捆连续、单捆动态分离称量难、捡拾器升降频繁、地面起伏大等问题,基于多传感器融合技术设计了一套方捆机草捆动态称量系统。提出了一种草捆动态分离、识别方法,构建了基于称量台实时下压力和俯仰角的双参数草捆动态称量系统,实现了单草捆动态独立称量。该系统由机械部分、传感器部分、数据采集模块、卫星定位模块、显示终端及上位机软件组成,传感器部分包括 4 个压力式称量传感器、称量台俯仰角传感器和草捆状态识别传感器。系统可以实时显示称量台下压力、称量台俯仰角、草捆质量、草捆状态和经纬度等信息。进行了草捆动态称量系统性能试验,结果表明,静态模式下系统的草捆质量预测值最大相对误差为 0.38%;动态模式下草捆质量预测值和真实值决定系数 R^2 达到 0.996,系统预测的相对误差为 -4.40% ~4.30%。说明系统具有较高的准确性及较好的鲁棒性,满足田间草捆称量的实际需要,为打捆机作业质量评价提供了一种快速测量手段。

关键词: 方捆机; 草捆; 传感器; 动态称量
中图分类号: S237　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)10-0170-06　　**OSID**:

Design and Experiment of Dynamic Weighing System for Small Square Baler

ZHANG Anqi　MENG Zhijun　CHEN Liping　WU Guangwei　CONG Yue　AN Xiaofei
(*Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture*, *Beijing* 100097, *China*)

Abstract: Aiming at the problems in the operation of small square baling machine, such as baling continuous, difficult dynamic separating and weighing a single bale, frequently rising and lifting of pickup, and ground up and down, a dynamic weighing system of square baling machine was designed based on multi-sensor fusion technology. A dynamic separation and identification method of bales was proposed by changing the track. A dynamic weighing system of straw bale based on real-time downforce and pitch angle of weighing platform was established. As a result, the dynamic independent weighing of single straw bale was realized. The system included mechanical part, sensor part, data acquisition module, satellite positioning module, display terminal and upper computer software. The sensor part includes four pressure-type weighing sensors, the tilt angle sensor of the weighing platform and the straw bale status identification sensor. The system could display real-time information such as pressure under weighing platform, pitch angle of weighing platform, bale weight, bale status, longitude and latitude, etc. In June 2020, the performance test of straw bale dynamic weighing system was carried out in Xiaotangshan National Precision Agriculture Research Base in Changping District, Beijing City. The results showed that the maximum relative error of the predicted bale weight in the static mode was 0.38%. In the dynamic mode, the R^2 of the predicted bale weight and the true value reached 0.996, and the relative error range of the system predicted weight was -4.40% ~4.30%. The results showed that the system had excellent accuracy and robustness, and the system could satisfy the practical needs of weighing grass bales in the field. The system provided a fast measurement method for the operation quality evaluation of baler.

Key words: square baler; straw bales; sensor; dynamic weighing

收稿日期: 2020-07-22　修回日期: 2020-08-24
基金项目: 北京市农林科学院创新能力建设专项(KJCX20200416)、现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-03)和 2020 年度农机北斗导航与智能测控北京市工程实验室建设项目(PT2020-22)
作者简介: 张安琪(1989—),男,助理研究员,博士,主要从事农机智能装备研究,E-mail: zhangaq@nercita.org.cn
通信作者: 安晓飞(1986—),男,高级工程师,博士,主要从事农机智能装备研究,E-mail: anxf@nercita.org.cn

0　引言

我国是农业大国，每年产出大量农作物秸秆，秸秆随意抛弃和焚烧现象带来一系列环境问题[1-2]。为从源头上解决秸秆焚烧问题，有效推进秸秆回收综合利用，国家对部分地区进行了打捆作业补贴，草捆质量是核算打捆作业补贴的最有效指标。我国耕地具有分散化、碎片化等特征，小方捆机在我国打捆机市场中占主要份额。因此，研发基于小方捆机的草捆动态称量系统对推进我国智慧农业发展和促进环境保护具有重要意义，对研究农作物秸秆的产量分布也具有实际意义[3-5]。

对于打捆机草捆称量技术，国外在大方捆机领域已经形成了较为成熟的技术方案。目前，关于大方捆机草捆质量监测的主流技术方案主要通过在放捆板或支撑链处布置张力传感器来实现，单草捆动态分离则主要通过在放捆板设置滚轮来实现[6-17]。近些年，对小方捆机的研究主要集中在机械结构优化方面[18]，较少涉及监测技术[19-24]。小方捆机机型小、放捆板结构简单，难以实现单草捆动态独立称量。高国民等[22]基于自走式方捆打捆机设计了一种草捆动态称量试验台，通过将称量槽与滑轨设置成 2 级阶梯结构实现草捆的动态分离，但是该试验台未考虑地面起伏及牵引式方捆机捡拾器升降带来的称量槽俯仰角变化的影响。

针对小方捆机作业过程中草捆连续、单捆动态分离称量难、捡拾器升降频繁、地面起伏大等问题，本文基于多传感器融合技术设计一套方捆机草捆动态称量系统，提出一种草捆动态分离、识别方法，构建基于称量台实时下压力及俯仰角的草捆动态称量模型，分别进行系统静态试验、模型标定试验和田间动态称量试验，测试系统的稳定性和准确性，以实现小方捆机作业过程中草捆质量的在线准确测量。

1　草捆动态称量系统设计

1.1　系统总体设计

通过分析国内外常见小型方捆机工作原理，结合作业过程中草捆的运动轨迹，设计了如图 1 所示的小型方捆机草捆动态称量系统，该称量系统主要由支撑板、称量台、压力传感器、角度传感器、限位开关组件、GPS 模块、数据采集处理单元、显示终端等组成。草捆从压捆室推出后，在自身重力作用下跌落至称量台，与后续草捆分离，通过实时采集称量台压力和角度数据，基于力学模型实时获取草捆的质量。

为能在打捆作业过程中对草捆动态分离、识别，实现单草捆动态独立称量，设计称量台与压捆室出口为 2 级阶梯结构。在支撑板靠近压捆室出口处设计限位开关组件，限位开关的安装高度低于压捆室下表面高度，略高于称量台高度，通过开关信号的通断精确判断草捆是否完全独立进入称量台，以此作为传感器信号解析计算的标志点。

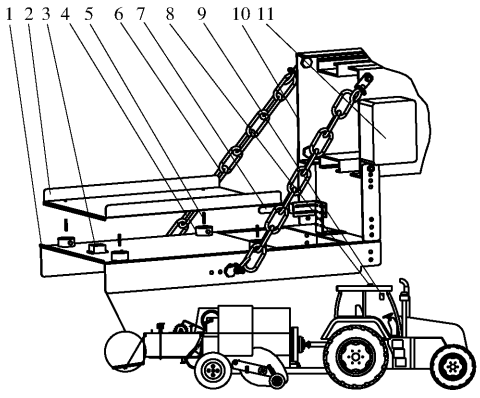


图 1　草捆动态称量系统示意图

Fig. 1　Schematic of bale dynamic weighing system

1. 支撑板　2. 称量台　3. 角度传感器　4. 压力传感器　5. 定位销　6. 支撑链组件　7. 限位开关组件　8. GPS 模块　9. 显示终端　10. 压捆室　11. 数据采集处理单元

为能够准确可靠获取草捆及称量台下压力，支撑板四周设计 4 个压力传感器，系统下压力为 4 个压力传感器数据的和。称量台通过定位销与压力传感器连接，其中定位销直径小于定位孔直径，确保定位销与定位孔之间只存在压力关系，而不存在拉力关系。

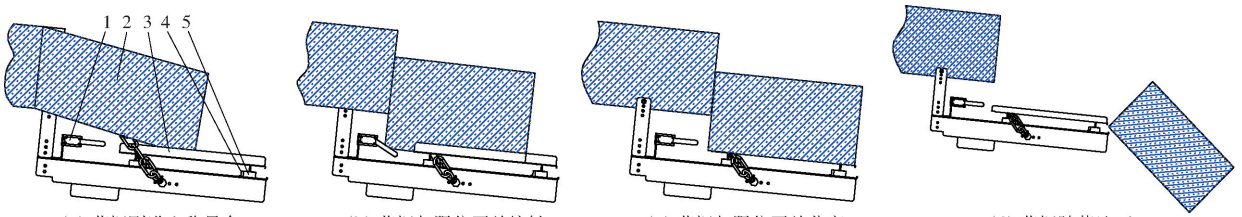
在打捆机作业过程中，受地面起伏及捡拾器升降的影响，支撑板及称量台的俯仰角会实时发生变化，由此导致称量台的下压力改变。基于此，在支撑板上表面设计安装角度传感器，实时采集称量台的俯仰角，实现对称量台下压力的动态修正。

设计的 GPS 模块主要用于获取打捆机作业位置及作业速度等信息，该模块为后续秸秆产量分布研究提供了支撑。

1.2　称量原理及模型构建

初始状态下称量台上无草捆，此时称量台下压力为自身重力分量。如图 2a 所示，在压捆室后续草捆的逐步推送下，草捆开始进入称量台，此时称量台下压力叠加草捆重力分量，称量台下压力逐步增大，直至草捆完全落入称量系统，并与限位开关接触（图 2b）。由于限位开关对草捆有一定的反作用力，此时称量台下压力并未达到最大，在后续草捆的推送下，草捆与限位开关分离并完全落入称量台（图 2c），此时称量台下压力达到最大并保持稳定。直至草捆跌落至地面（图 2d），称量台下压力回归到初始状态，并开始下一个测量循环。

如图 3 所示，通过对称量台下压力达到最大并



(a) 草捆刚进入称量台 (b) 草捆与限位开关接触 (c) 草捆与限位开关分离 (d) 草捆跌落地面

图 2 草捆动态称量工作原理图

Fig. 2 Working principle of bale dynamic weighing

1. 限位开关 2. 草捆 3. 称量台 4. 角度传感器 5. 压力传感器

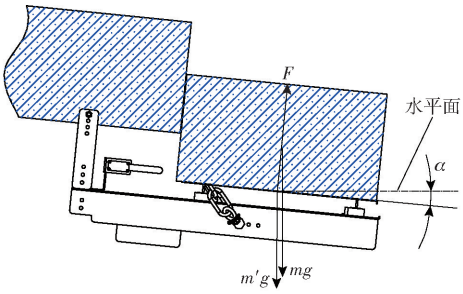


图 3 草捆在称量台上受力分析图

Fig. 3 Stress analysis diagram of straw bale in weighing table

保持稳定这一区间进行力学分析,可知这一区间称量台下压力与压力传感器的反作用力始终处于受力平衡状态,由此可建立数学模型

$$mg\cos\alpha + m'g\cos\alpha = F \tag{1}$$

式中 m——单个草捆质量,kg

m'——称量台质量,kg

α——称量台俯仰角,(°)

F——压力传感器测量值,N

g——重力加速度,m/s^2

由于 m'为常数,由此可通过实时获取 α 与 F 计算单个草捆的质量 m。

1.3 系统硬件设计

草捆动态称量系统硬件组成如图 4 所示,主要由信息采集单元、数据采集处理单元、数据显示存储单元 3 部分组成,可实现多路传感器信息的 A/D 转换、滤波、解析计算及显示存储等功能。

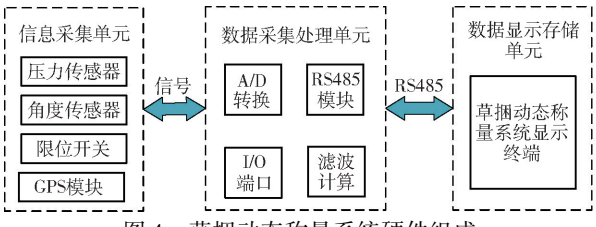


图 4 草捆动态称量系统硬件组成

Fig. 4 Hardware composition of bale dynamic weighing system

信息采集单元主要包括 4 路传感器,其中压力传感器为蚌埠大洋传感器系统有限公司生产的 DYZ-101 型压力传感器,供电电压 12 V,量程为 300 N,测量误差 0.03%。角度传感器为瑞芬 LCA318T 型单轴姿态传感器,供电电压 12 V,测量角度范围为 ±30°,动态模式下精度为 0.1°。限位开关为欧姆龙 WLCA12-2 型限位开关,预行程 15°,总行程 90°。GPS 模块选用 NV08C Mini PCI-E 模块,水平定位精度小于 1.5 m,垂直定位精度小于2 m,数据更新频率 1 Hz,采用 NMEA 0183 数据传输协议。

数据采集处理单元采用 STM32F40 芯片,实现 2 路A/D 信号、1 路 I/O 采集,与上位机通过 RS485 通信,波特率为 9 600 b/s,无奇偶校验位。

草捆动态称量系统显示终端选用已经预装 Windows 7 操作系统的 VMC3000 车载终端(NEXCOM 公司,中国台湾),该终端具有 GPS、RS232、RS485、CAN 等多种数据通信接口,在田间和移动环境下运行稳定,能够满足复杂作业环境下草捆动态称量系统的信息处理和运算需求。

1.4 系统软件设计

草捆动态称量系统软件基于 Microsoft Visual Studio 2010 平台开发,采用 C++语言进行程序编写,可实现打捆机作业时各路传感器信息的接收、解析、计算、显示、存储等功能。图 5 为草捆动态称量系统软件界面,能够实时显示称量台下压力、称量台俯仰角、草捆质量、草捆状态、经纬度和时间等信息。软件还能实现数据采集频率、模型标定系数设置等功能。

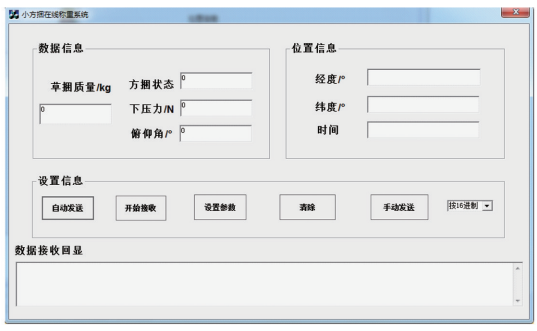


图 5 草捆动态称量系统的软件界面

Fig. 5 Software interface of bale dynamic weighing system

系统软件流程图如图 6 所示,首先对系统进行初始化参数设置,获取称量台初始质量并写入程序,然后检查数据通信是否正常,并检查数据是否正确。

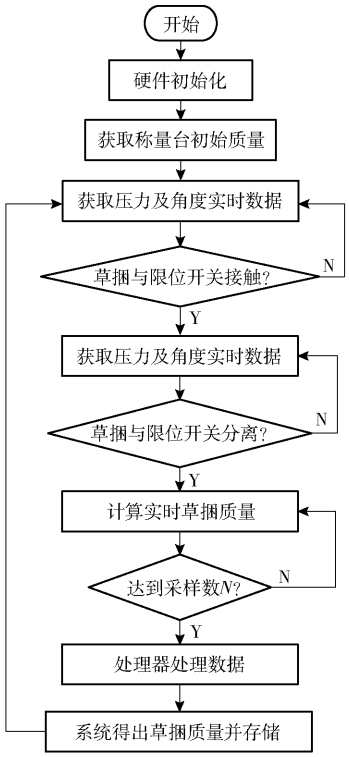


图 6　草捆动态称量系统软件流程图

Fig. 6　Software flowchart of bale dynamic weighing system

随后打捆机开始工作，系统开始接收各路传感器信息，当限位开关与草捆接触时，信号接通，输出低电平，当限位开关与草捆分离时，信号中断，输出高电平。当系统监测到低电平到高电平变化时，开始同步获取压力、角度等数据，并计算实时草捆质量，设置采样数为 N，通过对 N 个草捆质量数据进行求平均，得到最终的草捆质量 m。

草捆经过称量台时采集到的压力信号是由草捆的静态载荷和动态载荷两部分组成。静态载荷即所测草捆的真实质量；动态载荷主要是地面颠簸和机械传动引起的打捆机振动带来的叠加压力。为了获取准确的压力信号，需将原始信号中的动态载荷信号进行有效去除。打捆机振动引起的噪声信号是往复震荡的，本文利用移动平均滤波算法对采集的原始信号进行处理，降低动态载荷信号的峰值，减小动态载荷信号对原始信号的影响。考虑噪声信号强度及信号滞后性，本文设置采样频率为 20 Hz，每 20 个数据点求一次平均值。

对于角度传感器信号，受打捆机振动带来的影响，其原始信号同样存在较强的噪声，本文同样采取移动平均滤波算法对角度传感器原始信号进行处理，每 20 个数据求一次平均值，采样频率为 20 Hz。

2　性能验证试验

系统验证试验分为系统静态试验、模型标定试验、田间动态称量试验 3 个阶段。通过系统静态试验对称量系统的稳定性及可行性进行测试。通过模型标定试验对系统模型进行标定，以消除系统误差影响。通过田间动态称量试验对草捆称量系统的测量精度及可靠性进行考核。试验于 2020 年 6 月在北京市昌平区小汤山国家精准农业研究示范基地进行，小麦种植品种为京冬 22，系统安装在天津轩禾农业机械制造有限公司生产的 9YFQ－2.2 型小方捆机（图 7）上，牵引拖拉机为约翰迪尔 1204 型轮式拖拉机。

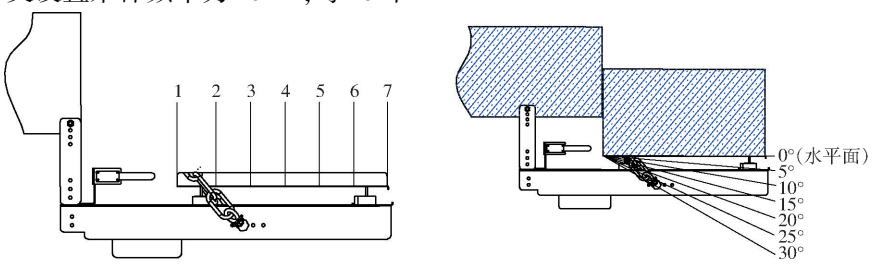


图 7　草捆动态称量系统实物图

Fig. 7　Physical picture of bale dynamic weighing system

2.1　系统静态试验

如图 8a 所示，将称量台按草捆运动方向等比例设置 7 个位置点，分别记为 1、2、3、4、5、6、7。使同一草捆重心分别处于称量台的 7 个位置点，且称量台俯仰角保持不变，分别读取称量台下压力数据，通过对比分析数据的离散性来测试称量系统的稳定性。如图 8b 所示，将质量为 16.25 kg 的草捆放在称量台上，通过调整支撑链及捡拾器升降，设置称量台



（a）称量台草捆重心位置点设置方案　　（b）称量台不同俯仰角设置方案

图 8　草捆动态称量系统静态试验方案

Fig. 8　Static test scheme of bale dynamic weighing system

俯仰角分别为 0°、5°、10°、15°、20°、25°、30°，获取称量台的下压力数据，基于草捆称量模型获取各角度下的草捆质量预测值，通过与真实值进行对比来验证系统方案的可行性。已知称量台质量为 3.6 kg，重力加速度 g 取 10 m/s^2。

图 9 为草捆重心位于称量台不同位置时，称量台下压力曲线图。由图 9 可知，称量台下压力在 199.89～201.48 N 之间，平均值为 200.56 N，标准差为 0.522 9 N，变异系数为 0.26%。表 1 为称量台位于不同俯仰角时，系统模型对同一草捆质量的预测结果，由表 1 可知，当称量台俯仰角变大时，称量台下压力逐步变小，该结果符合模型的变化规律。称量台位于不同俯仰角时，草捆质量预测值在 16.25～16.31 kg 之间，平均值为 16.27 kg，标准差为 0.02 kg，变异系数为 0.11%，预测结果最大相对误差为 0.38%。由此可以说明，在静态模式下，草捆动态称量系统预测精度高，数据稳定性好，方案设计可行，可以满足系统的设计要求。

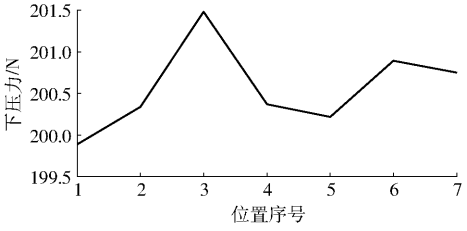


图 9 草捆重心位于称量台不同位置时的压力曲线

Fig. 9 Pressure curve of weighing platform when bale center of gravity was in different positions

表 1 不同称量台俯仰角下草捆质量的预测结果

Tab. 1 Prediction results of bale mass under different platform pitch angles

俯仰角/(°)	下压力/N	质量预测值/kg	相对误差/%
0	198.5	16.25	0
5	198.2	16.30	0.30
10	196.1	16.31	0.38
15	191.8	16.27	0.10
20	186.2	16.26	0.09
25	179.9	16.25	0
30	172.1	16.27	0.14

2.2 模型标定试验

在打捆作业过程中，受打捆机结构尺寸及装配等影响，称量系统会存在一定的系统误差，为消除系统误差的影响，进行模型标定试验，得到标定系数 k。模型标定系数 k 的计算公式为

$$k = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(m_{ti}/m_{pi}) \tag{2}$$

式中 m_{pi}——草捆质量预测值

m_{ti}——草捆质量真实值

n——试验打捆数

模型标定试验共连续打 10 个草捆，图 10 为打捆过程中称量台下压力及俯仰角实时变化曲线。由图 10 可知，在打捆作业过程中，每形成一个草捆，称量台下压力的波形分布规律是一致的，都是初期保持稳定不变，然后逐步上升，直至达到稳定，最后瞬间跌落至初始状态。这种波形变化规律与 1.2 节理论分析一致，而每段波形的持续时间存在差异，分析原因主要是打捆机捡拾量不均匀导致每个草捆从捆室推出所需时间不同。结果表明本系统可以实现单草捆的动态独立称量，符合设计预期。

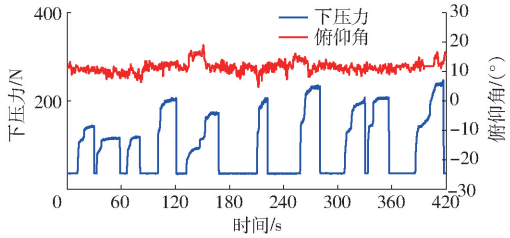


图 10 作业过程中称量台下压力及俯仰角实测结果

Fig. 10 Measured results of pressure and pitch angle of weighing platform during operation

在打捆作业过程中，称量台俯仰角变化规律不明显，而且存在较强噪声，分析原因是地面起伏较大导致。波形中几处俯仰角变化较大的位置是由人为调整捡拾器升降所致。

通过同步采集称量台下压力及俯仰角数据，基于系统模型进行解析计算，获得草捆质量的预测值如表 2 所示。由表 2 可知，模型未修正时草捆质量预测值的误差波动范围在 0.80%～7.85% 之间，误差全部是正误差，误差分布稳定，说明存在系统误差。通过式(2)获取模型的标定系数 k 为 0.96，经过标定系数修正后，草捆质量预测值相对误差在 −3.23%～3.53% 之间，数据符合统计学规律，模型标定准确。

表 2 模型标定试验结果

Tab. 2 Results of model calibration test

序号	草捆质量/kg		相对误差/%	
	预测值	真实值	未标定	标定后
1	10.82	10.53	2.71	−1.40
2	8.01	7.92	1.11	−2.94
3	8.17	8.11	0.80	−3.23
4	17.15	16.13	6.31	2.06
5	13.90	13.29	4.59	0.40
6	16.82	15.93	5.58	1.36
7	19.93	19.23	3.63	−0.52
8	16.25	15.74	3.22	−0.90
9	17.42	16.83	3.48	−0.66
10	20.61	19.11	7.85	3.53

2.3　田间动态称量试验

模型标定后，通过田间动态称量试验对系统的精度及可靠性进行验证。试验共打 50 个草捆，通过系统中的 GPS 定位模块得出，试验中打捆机作业速度在 3 ~5 km/h 之间。由系统计算出各个草捆质量的预测值，对比分析各个草捆质量预测值与真实值关系。

图 11 为田间动态称量试验中草捆质量预测值与真实值分布情况。由图 11 可知，系统获得的草捆质量预测值和真实值决定系数 R^2 达到 0.996，草捆质量预测值与真实值呈显著相关（$P<0.01$），模型预测的相对误差范围为 -4.40% ~4.30%，整体位于 5% 以内，且大部分位于 3% 以内。结果表明系统具有较好的准确性及鲁棒性，而且本系统预测效果优于国外同类技术产品的预测效果[6]，该系统满足田间草捆称量的实际需要。

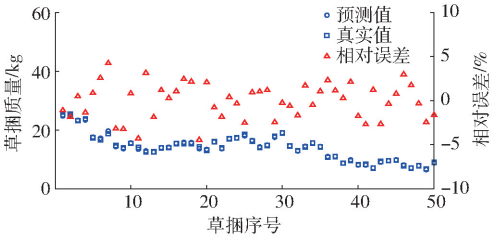


图 11　草捆动态称量结果

Fig. 11　Results of bale dynamic weighing

3　结论

（1）基于多传感器融合技术设计了一套方捆机草捆动态称量系统。提出了一种草捆动态分离、识别方法，构建了基于称量台实时下压力及俯仰角的草捆动态称量系统，实现了单草捆动态独立称量。

（2）进行了草捆动态称量系统性能试验，结果显示，静态模式下系统的草捆质量预测值最大相对误差为 0.38%；动态模式下草捆质量预测值和真实值决定系数 R^2 达到 0.996，系统预测的相对误差范围为 -4.40% ~4.30%。说明系统具有较高的准确性及较好的鲁棒性，系统能够满足田间草捆称量的实际需要，为打捆机作业质量评价提供了一种快速测量手段。

参　考　文　献

[1] 王金武，唐汉，王金峰. 东北地区作物秸秆资源综合利用现状与发展分析[J/OL]. 农业机械学报，2017，48(5)：1 -21. WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng. Comprehensive utilization status and development analysis of crop straw resource in Northeast China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 1 -21. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20170501&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.001. (in Chinese)

[2] 中华人民共和国国家统计局. 2016 中国统计年鉴[M]. 北京：中国统计出版社，2016：257 -273.

[3] 汪懋华. 精细农业[M]. 北京：中国农业大学出版社，2011：1 -6.

[4] 王德成，贺长彬，武红剑，等. 苜蓿生产全程机械化技术研究现状与发展分析[J/OL]. 农业机械学报，2017，48(8)：1 -25. WANG Decheng, HE Changbin, WU Hongjian, et al. Review of alfalfa full-mechanized production technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 1 -25. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170801&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.001. (in Chinese)

[5] 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)

[6] MAGUIRE S M, GODWIN R J, BLACKBURN K, et al. A dynamic weighing system for determining individual square bale weights during harvesting[J]. Biosystems Engineering, 2007, 98(2): 138 -145.

[7] KRAUS T J. Method for determining agricultural bale weight: US 201213633930[P]. 2012 -10 -03.

[8] SEEGER J, WAGGONER R, BRIAN B, et al. Bale chute weighing apparatus for crop balers: EP 20100768280[P]. 2010 -09 -13.

[9] SHINNERS K J, BARNETT N G. Measuring mass-flow-rate on forage cutting equipment[C]// St. Joseph: ASABE, 2000: 001036.

[10] SUN Y, BUESCHER W, LIN J, et al. An improved penetrometer technique for determining bale density[J]. Biosystems Engineering, 2010, 105(2): 273 -277.

[11] BEHME J A, SCHINSTOCKS J L, BASHFORD L L, et al. Site-specific yield for forages[J]. Computer Standards & Interfaces, 1999, 21(2):120.

[12] AARON T P, MICHAEL S P, LINDSEY B S, et al. Effect of stem crushing on the uniaxial bulk compression behaviour of switchgrass and miscanthus[J]. Biosystems Engineering, 2018, 175(9): 52 -62.

[13] WILD K, AUERNHAMMER H. A weighing system for local yield monitoring of forage crops in round balers[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 1999, 23(6): 119 -132.

[14] MARCHANT B P, SCARLETT A J, SPENCER D S, et al. Using acoustic emissions to monitor crop throughput of a large square baler[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 36(10): 33 -54.

[15] PRITCHARD G E, ARIZ G. Appartus and method for electrically weighing bales in a mobile crop baler: US 5384436[P]. 1995 -01 -24.

（下转第 185 页）

SHI Weidong, ZHANG Lingjie, ZHOU Ling, et al. Transient numerical simulation and verification of gas-solid two-phase flow in fluidized bed based on DEM [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(5): 404－409. (in Chinese)

[16] ARAOYE A A, BADR H M, AHMED W H, et al. Erosion of a multistage orifice due to liquid-solid flow[J]. Wear, 2017, 390: 270－282.

[17] NOROUZI H R, ZAYGHAMI R, SOTUDEH-GHAREBAGH R, et al. DEM formulation[M]// Coupled CFD－DEM modeling: formulation, implementation and application to multiphase flows. John Wiley & Sons,2016.

[18] BLAIS B, BERTRAND F. CFD－DEM investigation of viscous solid-liquid mixing: impact of particle properties and mixer characteristics[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2017, 118:270－285.

[19] BLAIS B, BERTRAND O, FRADETTE L, et al. CFD－DEM simulations of early turbulent solid-liquid mixing: prediction of suspension curve and just-suspended speed[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2017, 123:388－406.

[20] BLAIS B, LASSAIGNE M, GONIVA C, et al. Development of an unresolved CFD－DEM model for the flow of viscous suspensions and its application to solid-liquid mixing[J]. Journal of Computational Physics, 2016, 318: 201－221.

[21] LI Y, LIU S, HU X. Research on rotating speed's influence on performance of Deep-Sea lifting motor pump based on DEM－CFD[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2019,37(8): 1－10.

[22] ZHOU L, ZHANG L, BAI L, et al. Experimental study and transient CFD/DEM simulation in a fluidized bed based on different drag models[J]. RSC Advances, 2017, 7(21):64－74.

[23] 王维军, 王洋, 黎义斌, 等. 基于涡动力学的离心泵内部流动诊断[J]. 中国农村水利水电, 2019(4):172－177.
WANG Weijun,WANG Yang,LI Yibin, et al. Internal flow diagnosis of centrifugal pumps based on vortex dynamics[J]. China Rural Water and Hydropower,2019(4):172－177. (in Chinese)

[24] 施卫东, 徐磊, 王川, 等. 蜗壳式离心泵内部非定常数值计算与分析[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(3):49－53.
SHI Weidong,XU Lei,WANG Chuan, et al. Calculation and analysis of unsteady internal value of volute centrifugal pump [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(3):49－53. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20140309&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.03.009. (in Chinese)

(上接第 175 页)

[16] GOTTLOBER D. Bale-density measuring system for baler: US 6248963(B1)[P]. 2001－06－19.

[17] VERHAEGHE O M. Baler with a weighing system: US 8635950(B2)[P]. 2014－01－28.

[18] 韩江,周宏平,王金鹏. 农林业打捆机的发展概况及趋势探讨[J]. 林业机械与木工设备, 2015, 43(8): 10－13.
HAN Jiang, ZHOU Hongping, WANG Jinpeng. Development and trend of agricultural and forestry bundling machines[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2015, 43(8): 10－13. (in Chinese)

[19] 刘超. 圆捆机草捆密度实时监测系统设计与试验[D]. 镇江:江苏大学,2017.
LIU Chao. Design and experiment of real-time bale density monitoring system of round baler[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017. (in Chinese)

[20] 刘超,尹建军,陈树人,等. WDB800 圆捆机草捆称量系统设计与试验[J]. 农机化研究, 2018, 40(7): 169－174.
LIU Chao, YIN Jianjun, CHEN Shuren, et al. Design and test of bale weighing system of WDB800 round baler [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(7): 169－174. (in Chinese)

[21] 高国民,郭辉,吕全贵,等. 方捆打捆机草捆动态称量试验台设计与试验[J]. 农机化研究, 2020, 42(4): 139－144.
GAO Guomin, GUO Hui, LÜ Quangui, et al. Design and experimental research on baling dynamic weighing test rig for square baler [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(4): 139－144. (in Chinese)

[22] 万其号,布库,焦巍,等. 一种打捆机监测显示系统: 203661663(U)[P]. 2014－06－25.

[23] 肖章,刘亮东,王光辉,等. 基于 PLC 的青贮圆草捆打捆机控制系统设计[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(6): 175－179.
XIAO Zhang, LIU Liangdong, WANG Guanghui, et al. Control system design of silage round baer based on PLC[J]. Journal of China Agricultural University, 2013, 18(6): 175－179. (in Chinese)

[24] 高东明,王德成,王光辉,等. 圆草捆自动缠网装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(8):99－104.
GAO Dongming,WANG Decheng,WANG Guanghui, et al. Self-wrapping net mechanism for round baler[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(8):99－104. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20120819&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.08.019. (in Chinese)