

谷物联合收获机自动测产系统产量模型*

李新成^{1,2} 孙茂真³ 李民赞¹ 郑立华¹ 张漫⁴ 王锡久³

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 青岛农业大学机电工程学院, 青岛 266109; 3. 山东省桓台县农业局, 淄博 256400;

4. 中国农业大学农业部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为了提高谷物联合收获机自动测产系统的测产精度,在研究了谷物联合收获机田间工作状态和升运器速度变异的基础上,通过分析谷物的运动学原理及其对冲量传感器作用的力学原理,建立了电压/升运器速度产量模型。为进一步消除收获机作业时的噪声干扰,在测产原始数据预处理时,先采用回归差分法降低振动噪声,然后采用双阈值滤波以及阈值取代法、前值取代法 2 种插值方法以消除差分电压中的奇异值,结果显示前值取代法效果较佳。此外,还提出了升运器速度归一化方法和冲量电压标准化方法以消除量纲影响并简化计算。田间测产试验结果表明,提出的电压/升运器速度模型比传统的质量-电压模型更能准确表征谷物运动实际情况,测产精度高,验证均方根误差为 2.03%。

关键词: 联合收获机 测产系统 产量模型 数据预处理 速度变异

中图分类号: TH823+.3; S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)07-0091-06

Modeling Algorithm for Yield Monitor System of Grain Combine Harvester

Li Xincheng^{1,2} Sun Maozhen³ Li Minzan¹ Zheng Lihua¹ Zhang Man⁴ Wang Xijiu³

(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China

3. Huantai County Agriculture Bureau of Shandong Province, Zibo 256400, China 4. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the research of working condition and speed variation of elevator on the grain combine harvester, the kinematics and physical mechanics of grain movement on the momentum sensor were analyzed, and then a model of the mass flow sensor named voltage/elevator rotating speed model was put forward to improve the estimation accuracy of grain yield, so that the relationship between grain mass flow and impact force was described deeply by the proposed model. In the harvesting experiments, there existed many vibration noises. In order to eliminate those noises and ensure the accuracy of yield prediction, the impact voltage signals needed to be further processed. Firstly, a regression difference method was used to reduce vibration interference. Secondly, a dual threshold de-noising method and two kinds of interpolation methods were proposed to eliminate the singular value of the difference voltages. One of the interpolation methods was threshold replacement and the other was former-value replacement. The former-value replacement method could relatively keep the real yield data, and its estimation error was smaller. Furthermore, the rotating speed was normalized to eliminate the influence of dimension and

收稿日期: 2015-04-09 修回日期: 2015-05-26

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA101901)和农业部引进国际先进农业科学技术计划(948 计划)资助项目(2011-G32)

作者简介: 李新成, 博士生, 青岛农业大学讲师, 主要从事农业信息获取技术研究, E-mail: xincheng_li@163.com

通讯作者: 李民赞, 教授, 博士生导师, 主要从事精细农业系统集成与农业信息化技术研究, E-mail: limz@cau.edu.cn

simplify calculation. Consequently, a standardized processing method of impulse voltage was put forward. The verification results showed that the proposed voltage/elevator rotating speed had a high accuracy and the RMSE was 2.03% , which could really characterize the actual situation of grain movement.

Key words: Combine harvester Yield monitor Yield model Data pre-process Rotational speed variation

引言

谷物自动测产系统是精细农业的关键技术之一,是实施农田精细管理的基础^[1]。目前应用的谷物产量监测系统主要为基于冲量原理的系统,此类系统在估算粮食产量时均需经过特定的处理来减少外界因素引起的误差,如传感器减振、频繁校准、控制谷物流量恒定等方式^[2]。王志全等^[3]研究了收获机车身振动信号对测产传感器的影响,进行了抗振动干扰的设计,使动态测量误差达到±5%以内;Loghavi等^[4]指出收获机机身倾斜会造成测产系统误差增大;Fulton等^[5]试验发现 John Deere 测产系统的误差与联合收获机的俯仰角度呈线性关系,使用倾角传感器修正后,倾斜误差得到明显降低;胡均万等^[6]采用双板差分冲击式谷物流量传感器的方法消除倾斜误差,也取得了较好的成效。

对于振动、温湿度变化和收获机倾斜等引起的零点漂移问题,周俊等^[7]、Shoji等^[8]提出通过拾取采样峰值之间的无谷物冲击信号,进行传感器零点自补偿的方法予以克服。Arslan等^[9]研究了流量传感器的误差来源,其中,谷物流量的不稳定性是一个主要的潜在原因。Burks等^[10]在阶跃、斜坡等类型的时变流量输入下,研究了 Green Star 测产系统的误差情况,在系统长时间工作于规定的流量操作范围内时,其最大累积流量误差约为5%。Schrock等^[11]的试验结果表明,谷物流量较大时,其流量与冲击力的大小呈现出较强的非线性关系。胡均万等^[12]、陈树人等^[13]通过调节联合收获机行进速度或流量挡位来改变割台喂入量,研究了谷物流量变化时质量流量模型标定系数与流量传感器电压之间的关系,提出了指数模型,田间测产试验误差小于5%。Shoji等^[14-15]提出了一种适用于日本国内收获机的非线性模型简化标定方法,并在升运器速度恒定前提下,提出了舍弃小脉冲的奇函数产量模型,其均方根相对误差为4.4%。Reinke等^[16-17]采用仿真手段等研究了收获机工作特性、谷物相互作用机理以及谷物的物理属性,开发了质量流量与动量、摩擦因数、谷物密度等参数之间的一种综合非线性模型,试验台最大测产误差为4.02%。

但是上述研究都是针对具体的生产环境进行

的,误差修正模型还不具备广泛的通用性,且未考虑谷物升运器速度对谷物冲击信号的影响。在收获机实际工作过程中,不仅机身震动激烈,而且其前进速度和升运器转速也非恒定^[18-19],这必将影响冲量传感器的输出信号,因此本文在研究升运器速度变异情况之后,建立以冲量传感器电压、升运器速度为自变量的二元质量模型,并考察不同阈值插值方法对测产精度的影响,以期提高产量估算模型的精度和通用性。

1 材料与方 法

1.1 试验材料与条件

谷物测产试验机型为中国一拖集团公司设计生产的东方红 4LZ-2.5 型自走式谷物联合收获机,其性能参数如表 1 所示。

表 1 4LZ-2.5 型联合收获机参数

Tab.1 Parameters of 4LZ-2.5 combine harvester

参数	数值
发动机功率/kW	67.5
最大喂入量/(kg·s ⁻¹)	2.5
工作质量/kg	4 300
割幅/mm	2 360
外形尺寸/(mm×mm×mm)	6 065×2 726×3 260

系统测产试验于 2014 年 6 月小麦收获季节在山东省桓台县逯家村小麦试验田进行,地处东经 117.9°、北纬 36.9°,试验现场气象条件良好:晴,风速不大于 2.5 m/s,气温 22~32℃。收获机作业速度 2~4 km/h。试验分为空载振动试验和谷物测产试验 2 个阶段。参照文献[20]给出的方法,通过空载振动试验,对前后板的振动噪声信号进行差分滤波,以降低振动干扰;通过谷物测产试验,进行产量模型的标定和验证。一个车次为谷物联合收获机一次往返作业,由于割幅为 2.36 m、试验农田长度为 118 m,则一个车次的作业面积约为 557 m²。

1.2 谷物联合收获机田间工作状态分析

图 1 为冲量型谷物自动测产系统工作原理示意图。当谷物流冲击到冲量传感器的冲击板时,会引起冲击板上受力的变化,通过测量冲击板上应变片的形变程度,可以达到测量谷物流量的目的。净粮升运器的运转是由收获机的发动机经传动轴来带动

的,田间作业时,在地块两头等边界位置以及田间障碍处,发动机转速无法保持恒定,所以升运器的转速也将随之同步改变。为准确计算出谷物流的质量,必须考虑升运器转速的波动。

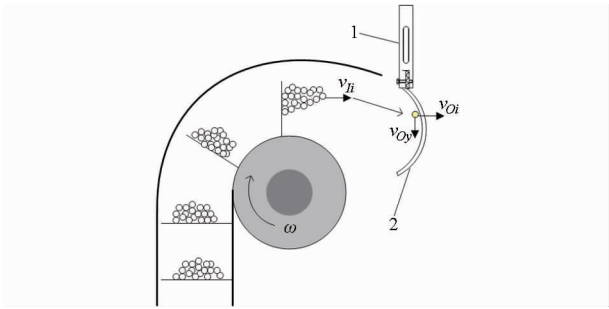


图 1 冲量型谷物自动测产系统工作原理示意图

Fig. 1 Diagrams of impact-type yield monitor

1. 弹性梁 2. 谷物冲击板

1.3 冲量传感器质量模型

图 2 是自主设计的双板冲量式谷物质量流量传感器,主要由弧形谷物冲击板、检振板、弹性梁、应变电桥、减振器、固定支架等 8 部分构成^[20],应变片在弹性梁内侧,沿垂直方向粘贴。冲量式质量流量传感器具有结构简单、安装方便的优点,但易受振动干扰、速度变化等因素的影响,如何准确地将冲量传感器电压转换为谷物质量是提高测产精度的关键^[21-22]。

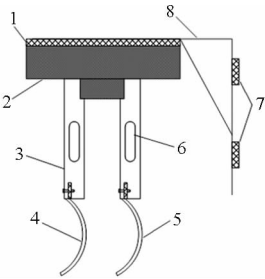


图 2 双板差分式冲量传感器结构示意图

Fig. 2 Structure sketch of double plates

differential impact sensor

1. 减振垫 2. 传感器底座 3. 弹性梁 4. 谷物冲击板 5. 检振板 6. 应变电桥 7. 减振器 8. 固定支架

由应变片在弹性梁上的粘贴位置以及应变原理可知,碰撞时仅谷物冲量中的水平分量可使应变片产生形变(图 1),碰撞前后的谷物水平方向动量守恒,因此根据冲量原理可以得到

$$f_i(t_{i+1} - t_i) = m_i(v_{li} - v_{oi}) \quad (1)$$

其中

$$v_{li} = \frac{\pi}{30} n_i r$$

式中 f_i —— $t_i \sim t_{i+1}$ 时间段内谷物冲击受到的水平方向冲击力, N

m_i —— $t_i \sim t_{i+1}$ 时间段内与冲击板发生碰撞的谷物质量, kg

v_{li} ——第 i 股离散谷物离开升运器刮板位置时的切向速度,即水平速度,也就是升运器传送带的速度, m/s

v_{oi} ——碰撞后第 i 股离散谷物水平方向的速度, m/s

n_i ——升运器瞬时转速, r/min

r ——谷物旋转半径, m

谷物碰撞冲击板后 v_{oi} 近似为零,与 v_{li} 相比非常小,可以忽略。当收获机结构固定时 r 可视为常数。

由于传感器的应变电桥输出电压 u_i 和冲击力 f_i 之间存在线性关系,可以推导出谷物质量的计算公式为

$$m_i = k u_i / n_i \quad (2)$$

式中 k ——比值系数

当采样频率等于谷物冲击频率时,根据式(2)将所有的冲击谷物质量求和,可以求出对应区域的谷物总产量为

$$M = \sum_{i=1}^p m_i = k \sum_{i=1}^p (u_i / n_i) \quad (3)$$

从式(3)可以看出,谷物质量 m_i 是输出电压 u_i 和谷物初始速度即升运器转速 n_i 的二元函数,且与电压 u_i 呈正比,与升运器转速 n_i 呈反比,把 u_i / n_i 的运算结果作为一个变量,则可实现二元谷物质量模型的解耦和降维。

当视 $n_i = n_0$ 为常数时,式(2)可简化为

$$m_i = k u_i / n_0 = k / n_0 u_i = k_0 u_i \quad (4)$$

当采样频率等于谷物冲击频率且升运器速度恒定时,根据式(3)可得谷物的区域总产量为

$$M = \sum_{i=1}^p m_i = k_0 \sum_{i=1}^p u_i \quad (5)$$

因此,当忽略升运器转速 n_i 影响时,可用式(5)所示的简略方程计算。

上述总产量计算公式的比值系数 k 或 k_0 可以通过试验标定获得。

2 试验结果与分析

2.1 数据预处理

在谷物收获过程中,农田地面不平整以及发动机、脱粒辊振动等原因会使测产精度降低,因此,在产量建模前需要对采样数据进行预处理以减小测产误差。针对图 2 所示的传感器,文献[20]提出了回归差分法以降低振动信号干扰。本文仍采用回归差分法对冲量传感器采样数据进行预处理。

由于采用刮板式升运器送粮,传感器的冲击板上存在着谷物冲击间隔,而且数据的采样频率与谷物冲击频率也不相等,因此,采样时刻与谷物冲击时

刻很难完全一致,造成奇异数据点。为确保产量预测的准确性,本文提出了时域双阈值滤波插值算法对差分预处理后的冲击电压信号再进行处理。

设实际产量对应的电压信号上限值为 u_{T1} ,下限值为 u_{T2} ,阈值滤波时对于超阈值范围的数据进行插值取代,为了比较不同滤波算法的效果,提出了 2 种滤波算法。根据取值方式不同,分为阈值取代法、前值取代法 2 种,具体算法如下:

阈值取代法

$$u_i = \begin{cases} u_{T1} & (u_i > u_{T1}) \\ u_i & (u_{T2} \leq u_i \leq u_{T1}) \\ u_{T2} & (u_i < u_{T2}) \end{cases} \quad (6)$$

当采样值大于最大阈值 u_{T1} 时,令采样值等于 u_{T1} ;当采样值小于最小阈值 u_{T2} 时,令采样值等于 u_{T2} ;否则保持不变。

前值取代法

$$u_i = \begin{cases} u_{i-1} & (u_i > u_{T1}) \\ u_i & (u_{T2} \leq u_i \leq u_{T1}) \\ u_{i-1} & (u_i < u_{T2}) \end{cases} \quad (7)$$

当采样值大于最大阈值 u_{T1} 或者小于最小阈值 u_{T2} 时,令采样值等于前一个采样值;否则保持不变。若

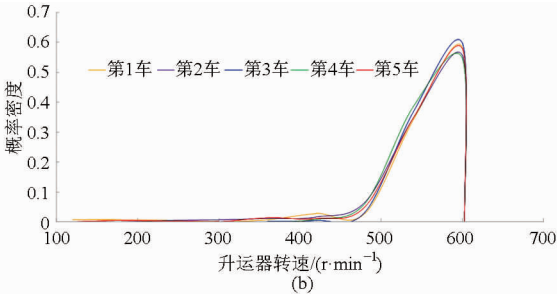
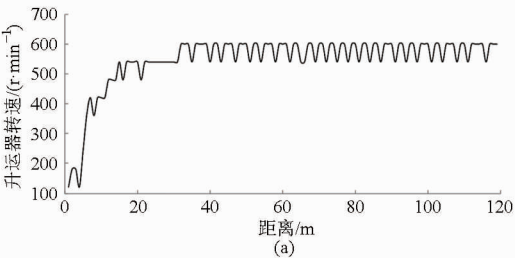


图 3 升运器转速波动曲线

Fig. 3 Fluctuation of elevator rotational speed

(a) 第 1 车升运器转速变化情况 (b) 各车次整车转速概率分布

表 2 标定试验中 5 个车次的升运器转速数据指标

Tab. 2 Data index of elevator revolving speed in five harvests

车次	平均值 /($r \cdot \min^{-1}$)	标准偏差 /($r \cdot \min^{-1}$)	变异系数 /%
1	562.8	68.06	12.09
2	563.3	53.84	9.56
3	573.1	35.11	6.13
4	568.2	38.70	6.81
5	566.0	53.32	9.42

2.3 产量建模及模型优化

在测产试验数据采集和预处理之后,能否建立一个好的产量模型对于提高测产系统的精度以及通用性显得至关重要。本文尝试了含转运器转速参数和不含转运器转速参数的 2 种线性总产量模型,并

阈值设置不恰当,特别是当阈值下限设置过大或者谷物流量较小时,阈值法会使产量预测精度降低^[23]。根据实际产量对应的电压信号数值范围,此处取最大阈值 $u_{T1} = 1.2 \text{ V}$,最小阈值 $u_{T2} = 0 \text{ V}$ 。

2.2 升运器转速变异分析

谷物联合收获机田间作业时,因地面起伏不平(如田间灌溉设施、地垄)、电力线杆等田间障碍以及人为操作等原因将造成其行驶速度和升运器转速实时变化,特别是收获机卸粮前后,其速度变化较大。测产标定试验时第 1 车次的升运器速度变化曲线及各车次整车转速概率分布情况如图 3 所示。

从升运器速度变化曲线可以看出,在收获过程中,升运器速度主要集中于 500 ~ 600 r/min 范围内,但其转速时变,不稳定。图 3b 为 5 个车次的总体转速概率分布密度,其中 500 ~ 600 r/min 区间的总概率约为 0.9,且随着转速增大,其概率也基本呈线性增长。各车次升运器速度的数据指标如表 2 所示,总体升运器转速平均值为 566.7 r/min,平均标准偏差为 49.8 r/min,平均变异系数为 8.8%;测产时,谷物通过升运器输送到质量流量传感器的冲击板上,因此,升运器速度是产量计算中的一个重要参数。

对比了其预测效果。

2.3.1 不含转速参数的总产量模型

不考虑升运器速度变异时,将采样电压进行回归差分、阈值滤波和插值处理后,根据式(5)并利用最小二乘法线性拟合,可以得到不含转速参数的产量-电压模型。表 3 比较了电压产量模型在不同信号预处理方式下的性能。其中,前值取代法的产量回归方程为

$$y_1 = 2.1024x_1 + 169.28 \quad (8)$$

式中 y_1 ——谷物总产量,kg

x_1 ——差分电压累加和,V

169.28 为产量方程截距,kg,用于补偿谷物冲击损失和采样时刻与谷物冲击时刻不一致造成的误差;决定系数 $R^2 = 0.9933$ 。

表 3 电压模型标定指标

Tab.3 Data index of yield-voltage model in calibration experiments

标定指标	未阈值	阈值滤波	
	滤波	阈值取代法	前值取代法
决定系数 R^2	0.905 0	0.946 4	0.993 3
最大相对误差/%	16.40	15.35	3.44
标准偏差	63.239	47.478	14.537
均方根误差/%	13.63	10.56	3.15

由表 3 可见:阈值滤波数据的预测精度优于未阈值滤波的数据,其原因是阈值滤波消除了采样电压中的奇异值;而阈值滤波中的前值取代法又优于阈值取代法,原因是前者保留了较为真实的产量数据信息;前值取代法的标定均方根误差为 3.15%。

2.3.2 含转速参数的总产量模型

当考虑升运器转速的影响时,用式(3)中的 (u_i/n_i) 进行冲量电压标准化。式中的转速较大,直接计算会造成换算后的信号数量级过小,影响运算精度,为此,需对升运器速度进行归一化。定义归一化速度,即速度归一化系数

$$N_i = \frac{n_i - n_{\min}}{n_{\max} - n_{\min}} \tag{9}$$

式中 $n_{\min}$ ——升运器最小转速,r/min
 $n_{\max}$ ——升运器最大转速,r/min

测产试验中, $n_{\min} = 0, n_{\max} = 600$ r/min,则

$$N_i = \frac{n_i - n_{\min}}{n_{\max} - n_{\min}} = \frac{n_i}{n_{\max}} \tag{10}$$

即归一化速度 N_i 等于实时转速除以最大转速,因此

$$n_i = N_i n_{\max} \tag{11}$$

将式(11)代入式(4),可得

$$M = k \sum_{i=1}^p (u_i/n_i) = k \sum_{i=1}^p [u_i/(N_i n_{\max})] = kn_{\max} \sum_{i=1}^p (u_i/N_i) = k \sum_{i=1}^p (u_i/N_i) \tag{12}$$

其中 $K = kn_{\max}$

式中 K ——总产量标定系数

定义 $u_{Ni} = u_i/N_i$ 为标准化冲量电压,即把冲量电压换算为质量电压;其中的 (u_i/N_i) 称为冲量电压标准化算式。

将采样电压进行回归差分、阈值滤波和前值取代法处理,并考虑升运器速度变异,对升运器速度归一化,进而得到标准化产量电压;再利用最小二乘法线性拟合,可以得到总产量的电压/升运器速度回归方程为

$$y_2 = 1.958\,2x_2 + 169.07 \tag{13}$$

式中 y_2 ——谷物总产量,kg
 x_2 ——标准化电压累加和,V

回归决定系数 $R^2 = 0.998\,3$ 。标定试验中,模型的最大相对误差为 2.23%,标准偏差为 7.29,均方根误差为 1.63%,与表 3 中的电压模型指标相比,误差得到抑制,预测精度明显提高。

标定试验之后进行了验证试验,验证试验共有 7 个车次,应用式(8)和式(13)所示的 2 种总产量模型分别计算了谷物实时产量,试验数据如表 4 所示,预测误差如图 4 所示。

表 4 2 种模型验证试验数据

Tab.4 Validation data of two yield models kg

车次	实际收获	预测产量	
	产量	电压模型	电压/升运器速度模型
1	430.0	415.2	420.4
2	446.0	460.5	454.2
3	469.5	484.4	475.5
4	857.5	856.6	857.1
5	523.0	509.2	518.9
6	409.0	374.8	393.7
7	367.5	363.0	368.5

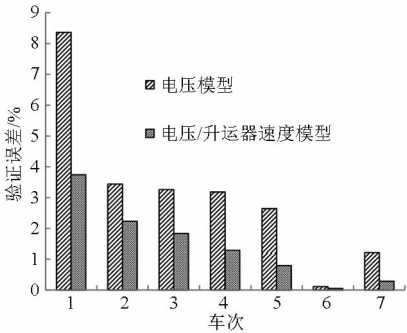


图 4 总产量模型的相对误差

Fig.4 Relative errors by different yield models

其中,电压产量模型(式(8))的总产量最大相对预测误差为 8.36%,均方根误差为 4.3%;而电压/升运器速度模型(式(13))的最大相对预测误差为 3.74%,均方根误差为 2.03%。这表明:电压/升运器速度模型的预测精度优于不计升运器速度变异的电压模型。图中第 1 车的预测误差最大,考察收获机工况和实地情况知,这是由第 1 车的升运器速度变异较大且收获区域内存在灌溉水渠、地面起伏较多所造成的。从图 4 也可以看出,前者的预测误差波动较小,说明模型具有较好的鲁棒性。另外,田间试验时,验证试验误差大于标定试验误差,这是由于试验时的地形状况、谷物流量、温湿度等参数存在差异所致。

3 结论

(1) 通过分析谷物运动及其对冲量传感器的作用

原理,得出了谷物产量预测的数学模型;研究了收获机升运器速度对测产精度的影响,根据测得的升运器转速得出谷物被抛离升运器刮板时的近似初速度,再配合流量传感器,可以更准确地计算出谷物流的质量。

(2) 提出了电压/升运器速度粮食产量估算模型,消除了升运器速度变化引起的误差,克服了传统的质量-电压模型预测精度高度依赖于标定试验条件的缺点。

(3) 采样电压回归差分处理后,为进一步消除电压中的奇异值,提出了阈值取代法、前值取代法2种阈值滤波方法,其中后者保留了较为真实的产量数据信息,误差较小。

(4) 提出了速度归一化、冲量电压标准化方法,消除了量纲的影响,方便了处理计算,试验结果表明,提出的电压/升运器速度模型具有较高的预测精度,满足了测产需要。

参 考 文 献

- 1 Reyns P, Missotten B, Ramon H, et al. A review of combine sensors for precision farming[J]. Precision Agriculture, 2002, 3(2): 169-182.
- 2 Taylor R, Fulton J, Mullenix D, et al. Using yield monitors to assess on-farm test plots[C]//2011 ASABE Annual Meeting Paper, ASABE Paper, No. 1110690.
- 3 王志全,杨方,欧阳斌林,等.联合收割机实时测产系统的抗振动干扰设计[J].东北农业大学学报,2011,42(2):38-42.
- 4 Loghavi M, Ehsani R, Reeder R. Development of a portable grain mass flow sensor test rig[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 61(2):160-168.
- 5 Fulton P, Sobolik J, Shearer A, et al. Grain yield monitor flow sensor accuracy for simulated varying field slopes[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2009, 25(1):15-21.
- 6 胡均万,罗锡文,陈树人.机身倾斜导致谷物流量传感器零点漂移的补偿[J].农业机械学报,2009,40(增刊):57-60.
Hu Junwan, Luo Xiwen, Chen Shuren. Zero drift compensation of impact based grain flow sensor for tilted combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.):57-60. (in Chinese)
- 7 周俊,刘成良.平行梁冲量式谷物质量流量传感器信号处理方法[J].农业工程学报,2008,24(1):183-187.
- 8 Shoji K, Itoh H, Kawamura T. A mini-grain yield sensor compensating for the drift of its own output[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2009, 2(2):44-48.
- 9 Arslan S, Colvin T. Grain yield mapping: yield sensing, yield reconstruction, and errors[J]. Precision Agriculture, 2002, 3(2):135-154.
- 10 Burks T F, Shearer S A, Fulton J P, et al. Effects of time-varying inflow rates on combine yield monitor accuracy[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2004, 20(3):269-275.
- 11 Schrock M D, Oard D L, Taylor R K, et al. Diaphragm impact sensor for measuring combine grain flow[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1999, 15(6):639-642.
- 12 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. Design of a dual-plate differential impact-based yield sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4):69-72. (in Chinese)
- 13 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. Experiment of dual-plates differential impact-based grain flow sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8):171-174. (in Chinese)
- 14 Shoji K, Itoh H, Kawamura T. In-situ non-linear calibration of grain-yield sensor—optimization of parameters for flow rate of grain vs. force on the sensor[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2009, 2(3):78-82.
- 15 Shoji K, Miyamoto M. Improving the accuracy of estimating grain weight by discriminating each grain impact on the yield sensor[J]. Precision Agriculture, 2014, 15(1):31-43.
- 16 Reinke R. Self-calibrating mass flow sensor[D]. Urbana, OH: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2010.
- 17 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.
- 18 梁学修,陈志,张小超,等.联合收割机喂入量在线监测系统设计与试验[J].农业机械学报,2013,44(增刊):1-6.
Liang Xuexiu, Chen Zhi, Zhang Xiaochao, et al. Design and experiment of on-line monitoring system for feed quantity of combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.):1-6. (in Chinese)
- 19 陈进,宁小波,李耀明,等.联合收割机前进速度的模型参考模糊自适应控制系统[J].农业机械学报,2014,45(10):87-91.
Chen Jin, Ning Xiaobo, Li Yaoming, et al. Fuzzy adaptive control system of forward speed for combine harvester based on model reference[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10):87-91. (in Chinese)
- 20 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)
- 21 Whelan B M, McBratney A B. A parametric transfer function for grain-flow within a conventional combine harvester[J]. Precision Agriculture, 2002, 3(2):123-134.
- 22 周俊,刘成良.平行梁冲量式谷物质量流量传感器弹性元件设计[J].农业工程学报,2007,23(4):110-114.
- 23 Jasa P J, Grisso R D, Wilcox J C. Yield monitor accuracy at reduced flow rates[C]//Proceedings of 2000 ASAE Annual International Meeting, 2000:2575-2586.