

叶片式抛送装置功耗试验研究与参数优化

严伟^{1,2} 吴努² 顾峰玮¹ 林德志^{1,2} 周新星^{1,2} 胡志超^{1*}

(1. 农业部 南京农业机械化研究所, 南京 210014;
2. 南通大学 机械工程学院, 江苏 南通 226019)

摘要 为了提高全秸秆覆盖地免耕播种机作业质量,降低抛送装置的抛送功耗,采用 Box-Behnken 中心组合试验方法对抛送装置的工作参数进行试验研究,以叶轮转速、物料含水率、叶片倾角等影响作业质量的 3 个因素进行三因素三水平响应面正交试验,建立响应面数学模型,分析各影响因素对作业质量的影响,同时,对影响因素进行综合优化。试验结果表明:各因素影响抛送功耗的显著顺序依次为叶轮转速、物料含水率、叶片倾角;最优工作参数组合为:叶轮转速 1 600 r/min、物料含水率 63%、叶片倾角后倾 9°,对应的比功耗 919.89 m²/s²,且各性能指标与理论优化值的相对误差均 < 5%。研究结果可为抛送装置的结构完善设计和作业参数优化提供依据。

关键词 免耕播种机;抛送装置;数学模型;响应曲面;优化

中图分类号 S565.2 文章编号 1007-4333(2017)07-0099-08 文献标志码 A

Parameter optimization and experiment for the power consumption of impeller-blower

YAN Wei^{1,2}, WU Nu², GU Fengwei¹, LIN Dezhi^{1,2}, ZHOU Xinxing^{1,2}, HU Zhichao^{1*}

(1. Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China;
2. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract In order to improve the quality of whole straw coverage with no tillage planter and reduce the throwing power consumption. Box-Behnken central composite experimental design principle was adopted to study the working parameters of impeller-blower. Rotating speed, material moisture, vane slope angle were taken as three factors. Experiments on the three factors with three levels of response surface were conducted. A mathematical model of response surface was established. The influence of each factor on the working quality and optimize each factor comprehensively was analyzed. The results showed that the rotating speed, material moisture, vane slope angle in a decreasing order reduced power consumption significantly. The best model for comprehensive work parameters was set as following; when the rotating speed was 1 600 r/min, the material moisture was 63% and vane slope angle was 9°, the specific power consumption was 919.89 m²/s². Through comparing the mathematical model with the experimental result, it was discovered that the relative errors of all the property indices between these two were less than 5% indicating the model established was useful and could be used for predicting and optimizing.

Keywords no tillage planter; impeller-blower; mathematical model; response surface methodology; optimization

农作物收获后,地表上留有大量的碎秸、残茬,现行的免耕播种机作业时,机具入土部件挂草壅堵,进而导致架种、晾种等,这不仅影响作业质量而且影响作业顺畅性^[1-4]。全秸秆覆盖地免耕播种机,能够

很好的解决机具入土部件挂草壅堵、架种、晾种问题。秸秆清理装置中的叶片式抛送装置是全秸秆覆盖地免耕播种机的核心工作部件,其具有结构简单、工作稳定、容易整修、输送性能强以及低制造成本等

收稿日期:2016-06-15

基金项目:现代农业花生产业技术体系机械化装备岗位专项(CARS-14-机械化装备)

第一作者:严伟,硕士研究生,E-mail:974916120@qq.com

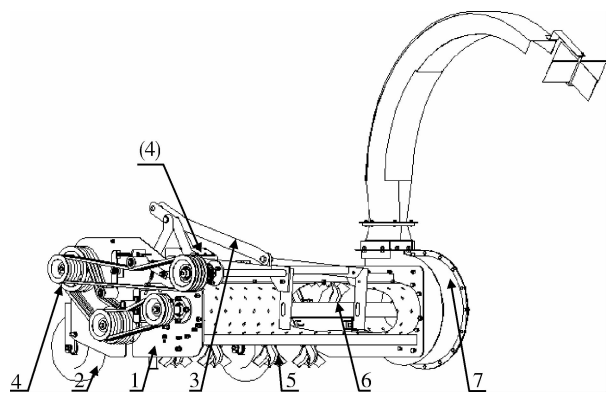
通讯作者:胡志超,研究员,博士生导师,主要从事农作物收获及产后加工技术装备研究,E-mail:zchu369@163.com

优点。但叶片式抛送装置对物料的流动特性要求较高,而且若系统的结构参数和运动参数配置不当,会出现抛送功耗大的问题^[5-9]。为降低叶片式抛送装置的功耗,进一步增加机具适应性,本研究以全秸秆覆盖地免耕播种机的叶片式抛送装置为研究对象,以抛送功耗为主控目标,对影响抛送功耗的关键参数进行试验研究,分析各结构参数和运动参数影响抛送性能的主次关系,确定抛送装置的较优参数组合,以为新型全秸秆覆盖地免耕播种机设计与优化提供参考。

1 秸秆清理装置

1.1 工作原理

全秸秆覆盖地免耕播种机中秸秆清理装置主要由机架、地轮、悬挂装置、传动机构、秸秆粉碎装置、横向输送搅龙、抛送装置等部件组成(图1)。作业原理为:由拖拉机动力输出轴输出动力,通过万向节传至传动机构中的变速齿轮箱,经锥齿轮和三角带轮,带动秸秆粉碎装置、横向输送搅龙以及抛送装置高速旋转。秸秆经过秸秆粉碎装置粉碎后,在粉碎装置高速旋转产生的气流带动下进入横向输送搅龙,然后被推送至叶片式抛送装置,均匀的抛撒于播后区域。



1. 机架;2. 地轮;3. 悬挂装置;4. 传动机构;5. 秸秆粉碎装置;6. 横向输送搅龙;7. 叶片式抛送装置

1. Frame;2. Land wheel;3. Suspension device;4. Transmission mechanism;5. Straw crushing device;6. Horizontal auger;7. Impeller-blower

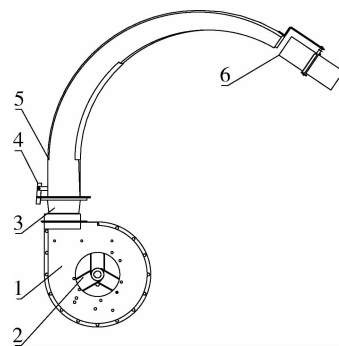
图1 秸秆清理装置

Fig. 1 Straw cleaning device

1.2 叶片式抛送装置及影响因素

全秸秆覆盖地免耕播种机中的抛送装置主要由外壳、叶轮、上下出料管道、上出料管道转向调节装

置等组成(图2)。其抛送物料主要分为3个阶段:1)物料进入抛送蜗壳内被抛扔的阶段。此过程中物料与气流同时受到离心力的作用,由于物料的主要能量来源是高速旋转的叶片,因此物料所受的相对较大。2)物料在离开抛送叶片后向出料直管流经的阶段。气流在第一阶段后获得较大的能量,并通过自身的能量协助输送物料流流出出料直管段。3)物料从出料直管进入弯管的阶段,此过程中物料首先与弯管上内壁碰撞,然后沿弯管上内壁滑动直至离开整个装置。



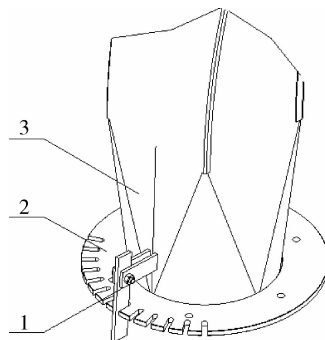
1. 抛送外壳;2. 抛送叶轮;3. 下出料管道;4. 上出料管道转向调节装置;5. 上出料管道;6. 秸秆抛洒机构

1. Throwing shell;2. Impeller blower;3. Discharge pipe;4. Outlet pipe steering adjustment device;5. Upper discharge pipe;6. Straw throwing mechanism

图2 叶片式抛送装置

Fig. 2 Impeller-blower

机具在田间作业时,遇到的工况可能比较恶劣,如风向不定等,这时可以通过调节转向调节装置(图3),使粉碎后的秸秆能够均匀的铺洒于播后区域。该调节装置可在 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 范围内随意调节,能够很好地适应各个风向。



1. 调节手杆;2. 压盘;3. 上出料管道

1. Adjusting rod;2. Pressure plate;3. Upper discharge pipe

图3 转向调节装置

Fig. 3 Steering adjustment device

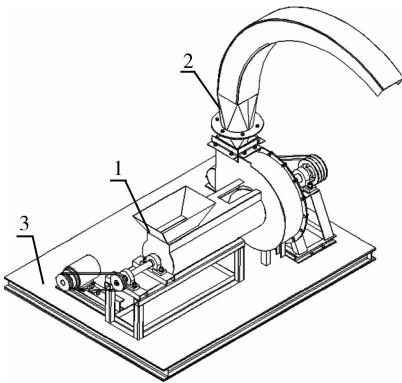
2 材料与方法

2.1 试验材料

试验材料为江苏农业科学院六合试验基地中的玉米秸秆切碎段,切碎长度 < 110 mm。

2.2 试验仪器设备

功耗试验仪器设备主要有变频器、组合式转速表、功率测量仪、以及抛送装置试验台等。其中抛送装置主要由喂料装置、物料抛送装置以及平板三大部分组成(图 4)。抛送装置工作过程是待整个装置稳定运转之后,通过喂料装置将物料喂入到物料抛送装置中,随后抛出。



1. 喂料装置; 2. 物料抛送装置; 3. 平板

1. Drawing-in device; 2. Material throwing device; 3. Flat

图 4 抛送装置结构简图

Fig. 4 Throwing device structure diagram

2.3 目标函数及试验因素

抛送功耗对抛送装置设备动力选取有决定作用,因此选择抛送功耗为目标函数。研究表明^[10-12],叶轮转速、物料含水率、叶片倾角对抛送功耗影响较大,因此本研究选取这 3 个因素作为变量。

2.4 试验设计

本研究依据 Box-Behnken 设计原理,采用三因素三水平 2 次回归正交试验设计方案,试验共 17 个试验点,其中包括 12 个分析因子,5 个零点估计误差;试验以抛送功耗 Y_1 作为评价指标,对叶轮转速 X_1 、物料含水率 X_2 、叶片倾角 X_3 等因素开展响应面试验^[13-16]。试验因素及水平见表 1。

2.5 试验指标的测定

本研究采用比功耗 P_k ,即单位质量功耗分析抛送装置的能耗^[17-20],公式为

$$P_k = \frac{P_1}{Q} \quad (1)$$

式中: P_1 为抛送物料时所消耗的功率,W; Q 为生产率或物料喂入量,kg/s。

试验过程中,采用功率测量仪测量消耗的功率。具体的测试步骤为:待装置按照设定的工况稳定运转,在无物料喂入即空载状态下,记录此时消耗的功率;喂入物料时,观察仪表消耗功率数值的变化,记录其中的最大值,即为负载下消耗的功率。

表 1 响应面试验因素及水平

Table 1 Factors and levels of response surface test

试验水平 Level	因素 Factors		
	叶轮转速 X_1 /(r/min)	物料含水率 X_2 /%	叶片倾角 X_3 /(°)
	Rotating speed	Material moisture	Vane slope angle
-1	1 600	60	0
0	1 800	65	5
1	2 000	70	10

2.6 数据分析及处理

试验数据采用 Design-Expert 8.0.6 软件(Stat-EaseInc., USA)进行抛送功耗 2 次多项式回归分析,并利用响应面分析法对各因素相关性和交互效应的影响规律进行分析研究^[21-23]。

3 结果与分析

3.1 试验结果

根据试验因素及水平(表 1)进行试验,试验方

案与结果见表 2。

3.2 回归模型建立及显著性检验

针对比功耗,利用 Design-Expert 8.0.6 软件开展多元回归拟合分析,建立比功耗 Y_1 对叶轮转速 X_1 、物料含水率 X_2 、叶片倾角 X_3 3 个自变量的 2 次多项式响应面回归模型,如式(2)所示:

$$Y_1 = 1\,033.95 + 132.16X_1 + 23.33X_2 - 10.25X_3 - 3.37X_1X_2 + 4.49X_1X_3 + 0.4X_2X_3 + 22.95X_1^2 + 31.09X_2^2 - 1.59X_3^2 \quad (2)$$

对回归方程进行方差分析^[24-25],结果见表3。由比功耗方差分析结果可知,比功耗 Y_1 的响应面模型的显著水平 $P < 0.0001$,表明回归模型高度显著;失拟项的显著水平 $P > 0.05$ (0.0716),表明回归方程拟合度高;其决定系数 R^2 值为0.989,表明98%以上的响应值均可以由这个模型解释。从而,该模型可以用来优化抛送装置工作参数。同时比功耗 Y_1 响应面模型式(2)中的 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 对模型影响极显著($P < 0.01$); X_1X_2 对模

型影响显著($P < 0.05$); X_2X_3 、 X_3^2 对模型影响不显著($P > 0.05$)。剔除模型不显著回归项,对模型 Y_1 式(2)进行优化,如式(3)所示,分析优化后的模型,可知模型 Y_1 式(3)中的显著水平 $P < 0.0001$ 、失拟项的显著水平 P 为0.088,表明优化模型可靠。

$$Y_1 = 1\,033.28 + 132.16X_1 + 23.33X_2 - 10.25X_3 - 3.37X_1X_2 + 4.49X_1X_3 + 22.87X_1^2 + 31.00X_2^2 \quad (3)$$

表2 试验设计方案及响应值结果

Table 2 Experiment design and response values

序号 No.	因素水平 Level			比功耗 $Y_1 / (\text{m}^2 / \text{s}^2)$ Specific power consumption
	叶轮转速 X_1 Rotating speed	物料含水率 X_2 Material moisture	叶片倾角 X_3 Vane slope angle	
1	0	-1	1	1 031.54
2	0	0	0	1 033.68
3	0	0	0	1 035.77
4	-1	-1	0	930.00
5	0	1	1	1 078.39
6	-1	0	1	906.25
7	-1	1	0	982.41
8	1	0	-1	1 195.39
9	0	0	0	1 034.66
10	0	-1	-1	1 047.69
11	1	1	0	1 239.23
12	0	0	0	1 032.21
13	-1	0	-1	939.28
14	0	0	0	1 033.42
15	0	1	-1	1 096.15
16	1	-1	0	1 200.31
17	1	0	1	1 180.32

3.3 因素影响效应分析

由各因素 F 值(表3)可知,3个因素对抛送功耗影响的重要性顺序为: $X_1 > X_2 > X_3$ 。根据回归方程

分析结果,考察叶轮转速 X_1 、物料含水率 X_2 、叶片倾角 X_3 交互因素对比功耗 Y_1 性能指标的影响,并利用Design-Expert 8.0.6软件绘制响应面图(图5)。

表3 比功耗回归方程方差分析

Table 3 Variance analysis of regression equation

方差来源 Source	离均差平方和 Sum of Squares	自由度 Freedom	均方差 Mean square deviation	F 值 F value	显著水平 P Significant level
模型 Model	1.52×10^5	9	16 854.45	3 322.45	$<0.000 1$
X_1	1.4×10^5	1	1.4×10^5	27 564.03	$<0.000 1$
X_2	4 354.31	1	4 354.31	858.35	$<0.000 1$
X_3	840.71	1	840.71	165.72	$<0.000 1$
$X_1 X_2$	45.50	1	45.50	8.97	0.020 1
$X_1 X_3$	80.64	1	80.64	15.90	0.005 3
$X_2 X_3$	0.65	1	0.65	0.13	0.731 3
X_1^2	2 218.37	1	2 218.37	437.30	$<0.000 1$
X_2^2	4 068.80	1	4 068.80	802.07	$<0.000 1$
X_3^2	10.66	1	10.66	2.10	0.190 4
残差 Residual	35.51	7	5.07		
失拟 Lack of fit	28.31	3	9.44	5.24	0.071 6
误差 Pure error	7.20	4	1.80		
总和 Cor toal	1.52×10^5	16			
决定系数 R^2 Coefficient of determination	0.989				
决定调整系数 R_{Adj}^2 Coefficient of adjustment	0.986				

注： $P < 0.01$ 为极显著； $P < 0.05$ 为显著。

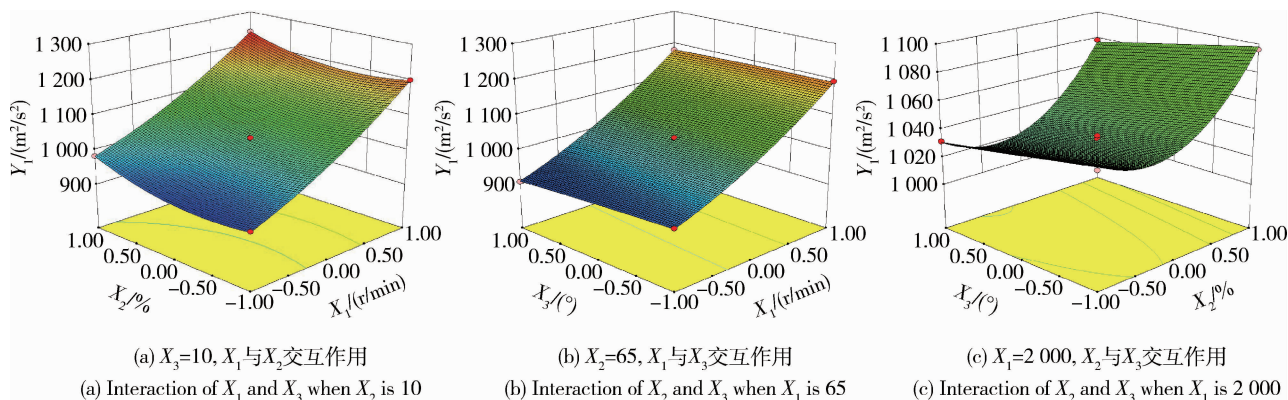
Note: $P < 0.01$ is highly significant; $P < 0.05$ is significant.

图 5(a) 示出当叶片倾角为 10° 时物料含水率与叶轮转速对比功耗的影响, 可知, 随着叶轮转速的增加, 叶片式抛送装置的比功耗呈上升趋势。物料含水率为 $60\% \sim 65\%$, 比功耗总体上呈下降趋势, 并且这种趋势随着转速的增加而缓慢的上升, 这主要是因为含水率增加, 一部分碎秸结成团, 易与叶片、蜗壳内壁发生摩擦、碰撞, 从而造成更多的能耗损失, 当转速相对较低时, 这种现象更为明显; 物料含水率为 $65\% \sim 70\%$, 比功耗总体上呈上升趋势, 转速相对较低的情况下, 比功耗的增幅更为明显, 造成这种现象的原因同上。从对应的等高线图可知, 叶轮转速为 $1\ 600\ \text{r/min}$ 左右、物料含水率为 65% 时, 比功耗有最小值。图 5(b) 示出物料含水率为 65%

时叶片倾角与叶轮转速对比功耗的影响, 可知, 随着叶轮转速的增加, 对应的比功耗也相应的增大, 但是这种增大的趋势从叶片倾角为 $0^\circ \sim 10^\circ$ 是逐渐减小的, 并且, 随着转速的增加这种趋势的幅度越小, 这主要是随着叶片倾角的增大, 物料与叶片之间的摩擦、碰撞相对较小, 有摩擦、碰撞消耗的功耗较低的原因; 另外, 从对应的等高线图可知, 当叶轮转速为 $1\ 600\ \text{r/min}$ 、叶片倾角为 10° 时, 有较低的比功耗。图 5(c) 为当叶轮转速为 $2\ 000\ \text{r/min}$ 时物料含水率与叶片倾角对比功耗的影响, 可知, 物料含水率为 $60\% \sim 65\%$, 比功耗总体呈下降趋势, 下降的幅度较为平缓; 物料含水率为 $65\% \sim 70\%$, 比功耗总体呈上升趋势, 而且上升的幅度较大; 这种下降与上升的

趋势会随着叶片倾角的增大而减小,造成这种现象的原因是叶片倾角相对较大,物料与叶片之间的摩

擦、碰撞较小,消耗的能耗也较小;并且,含水率为62%~65%、叶片倾角为9°~10°,比功耗有最小值。



X_1 、 X_2 和 X_3 分别为叶轮转速、物料含水率、叶片倾角; Y_1 为比功耗。

X_1 , X_2 and X_3 are respectively rotating speed, material moisture, vane slope angle; Y_1 is specific power consumption.

图5 交互因素对比功耗的影响

Fig. 5 Influence of interactive factors on the power consumption of contrast

4 参数优化与验证试验

4.1 参数优化

根据交互因素根据交互因素对比功耗影响效应分析可知:要获得较低的比功耗,就必须要求叶片倾角小,叶轮转速和含水率低。由于各因素对试验指标的影响不尽相同,因此,必须进行多目标优化,寻求满足切割性能的最佳参数组合。

本研究针对比功耗低的抛送作业要求,进行抛送装置工作参数优化。目标函数为: $Y_f \rightarrow Y_{fmin} > 0$,其中 $f = 1$;约束条件为: $-1 \leq X_m \leq 1$,其中 $m = 1, 2, 3$ 。采用 Design-Expert 软件对各参数进行优化求解,得到各因素最优工作参数,当叶轮转速为 1 600.11 r/min,物料含水率为 63.35%,叶片倾角为后倾 9.12°时,叶片式抛送装置的比功耗为 906.24 m^2/s^2 。

4.2 验证试验

为了验证模型预测的准确性,采用上述参数针对玉米秸秆进行 3 次重复试验。考虑试验的可行性,将抛送装置参数设置为叶轮转速 1 600 r/min、物料含水率 63%、叶片倾角后倾 9°,在此优化方案下进行试验,结果见表 4。通过分析表 4 结果可知,各性能指标试验值与理论优化值均比较吻合,试验值相对误差 $< 5\%$,因此,参数优化模型可靠。在抛送装置作业时,采用该优化参数组合,即叶轮转速 1 600 r/min、物料含水率 63%(针对玉米秸秆)、叶

片倾角为后倾 9°。

表4 优化条件下比功耗的实测值

Table 4 Experimental values of response at optimal condition

试验序号 Test number	比功耗/(m^2/s^2) Specific power consumption
1	914.34
2	924.56
3	920.76
平均值 Average	919.89
相对误差/% Relative error	1.5

5 结论与讨论

1)本研究采用 Box-Behnken 中心组合试验方法对叶轮转速、物料含水率、叶片倾角对抛送功耗的影响趋势进行了分析并建立了优化模型,通过试验对模型和优化结果进行准确性验证,其相对误差均小于 5%,表明模型可靠性较高。

2)抛送装置各因素对抛送功耗影响显著顺序依次为叶轮转速、物料含水率、叶片倾角。

3)抛送装置最优工作参数组合为:叶轮转速 1 600 r/min、物料含水率 63%(针对玉米秸秆)、叶片倾角后倾 9°,此工况下比功耗为 919.89 m^2/s^2 。

本研究对抛送装置工作参数开展多因素分析, 研究各因素对抛送功耗的影响。由于本试验仅仅考虑了叶轮转速、物料含水率、叶片倾角工作参数, 对物料喂入量、不同叶片宽度及管道结构参数等因素未开展相应试验, 因此进一步应考虑上述因素的基础上对抛送装置进行探讨。

参考文献 References

- [1] 陈超玲, 杨阳, 谢光辉. 我国秸秆资源管理政策发展研究[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(8): 1-11
Chen C L, Yang Y, Xie G H. Study of the development of crop straw management policy in China [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2016, 21(8): 1-11 (in Chinese)
- [2] 陈有庆, 吴峰, 顾峰玮, 王伯凯, 马标, 胡志超. 麦茬全秸秆覆盖地花生免耕播种机试验研究[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(2): 132-135
Chen Y Q, Wu F, Gu F W, Wang B K, Ma B, Hu Z C. Test on peanut no-till planter under the coverage of the wheat straw [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2014, 35(2): 132-135 (in Chinese)
- [3] 林德志, 胡志超, 于昭洋, 顾峰玮, 吴峰, 吴努. 免耕播种机秸秆处理装置研究现状与发展[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(11): 13-16
Lin D Z, Hu Z C, Yu Z Y, Gu F W, Wu F, Wu N. Research status and development of straw treatment device of no tillage seeding machine [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43(11): 13-16 (in Chinese)
- [4] 胡志超. 我国免耕播种技术研发取得突破性进展: 南京农机化所破解全秸秆覆盖旱地机械化夏直播技术难题[J]. 农机科技推广, 2013(7): 10
Hu Z C. Breakthrough progress in the research and development of no tillage seeding technology in China [J]. *Agriculture Machinery Technology Extension*, 2013(7): 10 (in Chinese)
- [5] 翟之平, 高博, 杨忠义, 吴雅梅. 叶片式秸秆抛送装置功耗分析与参数优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 26-33
Zhai Z P, Gao B, Yang Z Y, Wu Y M. Power consumption and parameter optimization of stalk impeller blowers [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(10): 26-33 (in Chinese)
- [6] 胡凯, 王吉奎, 李斌, 蒋蓓, 丁双双, 李天文. 棉秆粉碎还田与残膜回收联合作业机研制与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 24-32
Hu K, Wang J K, Li B, Jiang B, Ding S S, Li T W. Development and experiment of combined operation machine for cotton straw chopping and plastic film collecting [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(19): 24-32 (in Chinese)
- [7] 翟之平, 杨忠义, 高博, 李健喙. 基于 Mixture 模型的叶片式抛送装置内气固两相流模拟[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 50-58
Zhai Z P, Yang Z Y, Gao B, Li J X. Simulation of solid-gas two-phase flow in an impeller blower based on Mixture model [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(22): 50-58 (in Chinese)
- [8] 翟之平. 叶片式抛送装置抛送机理研究与参数优化[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008
Zhai Z P. Study on throwing/blowing mechanism and optimizing parameters of an impeller blower [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2008 (in Chinese)
- [9] 翟之平, 王春光. 叶片式抛送装置试验台的研制与试验研究[J]. 农机化研究, 2009, 31(1): 170-173
Zhai Z P, Wang C G. Development and experiment research of test unit of a impeller-blower [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2009, 31(1): 170-173 (in Chinese)
- [10] 索海霞, 王春光, 陈大兴, 吴海辉. 叶片式抛送装置抛送性能的试验[J]. 机械设计与研究, 2009, 25(3): 103-105
Suo H X, Wang C G, Chen D X, Wu H H. Experiment research of throwing capability of a impeller-blower [J]. *Machine Design and Research*, 2009, 25(3): 103-105 (in Chinese)
- [11] 索海霞. 叶片式抛送装置气流场分析及抛送试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009
Suo H X. Study on airflow analysis of an impeller-blower and blowing experiment [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2009 (in Chinese)
- [12] 翟之平, 王春光, 杨忠义. 叶片式抛送装置气流运动仿真与参数优化[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(10): 1352-1356
Zhai Z P, Wang C G, Yang Z Y. Simulation and parameter optimization of air flow in the blade throwing device [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2010, 29(10): 1352-1356 (in Chinese)
- [13] 于昭洋, 胡志超, 王海鸥, 彭宝良, 谢焕雄, 吴峰. 大蒜果秧分离机构参数优化及试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 40-46
Yu Z Y, Hu Z C, Wang H O, Peng B L, Xie H X, Wu F. Parameters optimization and experiment of garlic picking mechanism [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(1): 40-46 (in Chinese)
- [14] 丁素明, 薛新宇, 方金豹, 孙竹, 蔡晨, 周良富, 秦维彩. 手持式风送授粉机工作参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 68-75
Ding S M, Xue X Y, Fang J B, Sun Z, Cai C, Zhou L F, Qin W C. Parameter optimization and experiment of air-assisted pollination device [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(8): 68-75 (in Chinese)
- [15] 陆永光, 吴努, 王冰, 于昭洋, 林德志, 胡志超. 花生荚果碰撞模型中恢复系数的测定及分析[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(8): 111-118
Lu Y G, Wu N, Wang B, Yu Z Y, Ling D Z, Hu Z C. Measurement and analysis of peanuts' restitution coefficient in

- point-to-plate collision mode [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2016, 21(8): 111-118 (in Chinese)
- [16] 丁素明, 薛新宇, 蔡晨, 崔龙飞, 陈晨. 梨树枝条切割装置刀片参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(Z2): 75-82
Ding S M, Xue X Y, Cai C, Cui L F, Cai C. Optimization and experiment of blade parameter for pear branches cutting device [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(Z2): 75-82 (in Chinese)
- [17] 霍丽丽, 田宜水, 赵立欣, 姚宗路, 侯书林, 孟海波. 农作物秸秆原料物理特性及测试方法研究[J]. 可再生能源, 2011, 29(6): 86-92
Huo L L, Tian Y S, Zhao L X, Yao Z L, Hou S L, Meng H B. Research on physical property of crop straw and test methods [J]. *Renewable Energy*, 2011, 29(6): 86-92 (in Chinese)
- [18] 张海琨, 付敏良, 王敦军, 赵荔娜. 秸秆揉搓机物料抛送过程的理论分析与试验[J]. 农机化研究, 2006(9): 69-70
Zhang H K, Fu M L, Wang D J, Zhao L N. Theoretical analysis and experiment of the material throwing process about the straw rubber [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2006(9): 69-70 (in Chinese)
- [19] 贾洪雷, 王增辉, 马成林, 陈忠亮. 玉米秸秆切碎抛送装置的试验研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(6): 96-99
Jia H L, Wang Z H, Ma C L, Chen Z L. Chopping and throwing mechanism of corn straw [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2003, 34(6): 96-99 (in Chinese)
- [20] 朱松明, 吴春江. 叶片式抛送器功耗与效率的研究[J]. 浙江农业大学学报, 1995, 21(2): 169-172
Zhu S M, Wu C J. Study on the power consumption and efficiency of the blade throwing device [J]. *Journal of Kasetsart University Zhejiang*, 1995, 21(2): 169-172 (in Chinese)
- [21] 陈莉, 屠康, 王海, 赵艺泽. 采用响应曲面法对采后红富士苹果热处理条件的优化[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 159-163
Chen L, Tu K, Wang H, Zhao Y Z. Optimization of the conditions for hot-air treatment of postharvest red Fuji apples using response surface method [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(2): 159-163 (in Chinese)
- [22] 张黎骅, 张文, 吕珍珍. 响应面法优化酒糟微波间歇干燥工艺[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 369-374
Zhang L H, Zhang W, Lv Z Z. Optimization of intermittent microwave drying technology for lees by response surface methodology [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(3): 369-374 (in Chinese)
- [23] 迟玉杰, 张波, 李冰. 超声波辅助 7S-麦芽糊精接枝反应的响应曲面法优化[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 195-201
Chi Y J, Zhang B, Li B. Optimization of ultrasound-assisted 7S-maltodextrin graft reaction by response surface methodology [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(11): 195-201 (in Chinese)
- [24] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008
Li Y Y, Hu C R. *Experimental Design and Data Processing* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008 (in Chinese)
- [25] 徐向宏, 何明珠. 试验设计与 Design-Expert、SPSS 应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010
Xu X Q, He M Z. *Experimental Design and Design-Expert, SPSS Application* [M]. Beijing: Science Press, 2010 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春