

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.07.010

正负气压式油菜割台分行落粒回收装置设计与试验

关卓怀 江涛 沐森林 李海同 张敏 吴崇友

(农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

摘要: 针对油菜联合收获分行剪切落粒多、损失高的问题,提出了油菜割台分行损失气力回收方法,设计了正负气压组合式油菜割台分行落粒回收装置。通过正压气流导向收集分行散落物料,并由负压气流定向输送回割台,实现回收减损。基于 Fluent 构建了回收管内部流场仿真分析模型,单因素试验确定了喉管直径、喉管倾角分别为 70 mm、120°,在一定范围内负压气流速度随渐扩角、渐缩角的增大而减小且存在交互作用;以进风口直径、渐缩段长度、出风口直径和渐扩段长度为试验因素,以负压气流速度为评价指标,开展了四元二次回归正交组合试验,结果表明影响负压气流速度的主次顺序为渐扩段长度、进风口直径、渐缩段长度、出风口直径,较优参数组合为进风口直径 94 mm、渐缩段长度 38 mm、出风口直径 115 mm、渐扩段长度 350 mm;建立了回收装置内部流场-物料 CFD-DEM 耦合仿真模型,研究了正压、负压气流速度对物料回收效果的影响,结果表明物料回收率随正压气流速度的升高先增大后减小、随负压气流速度的升高持续增大,明确了较优正压气流速度为 20 m/s;基于正、负压气流流量分析,确定了气流分配器中两路气流通道的截面积之比为 1:3;田间试验表明装备分行落粒回收装置后油菜割台损失率、竖割刀损失率分别为 1.26%、0.39%,分别下降了 21.8%、47.3%,有效降低了分行损失和割台损失。

关键词: 油菜;联合收获机;割台;分行损失;气力回收

中图分类号: S225.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)07-0103-10 OSID: 

Development and Test of Positive and Negative Pressure Combined Side Knife Cutting Scattered Seed Recovery Device for Rapeseed Header

GUAN Zhuohuai JIANG Tao MU Senlin LI Haitong ZHANG Min WU Chongyou

(Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: Mature rapeseed pods split easily. Under the shearing and vibration forces of the side knife, the pod splits, and the rapeseed scatters out of the header, resulting in high rapeseed losses. Aiming at the problem, side knife cutting scattered seed pneumatic recovery method was proposed, and positive and negative pressure combined side knife cutting scattered seed recovery device was designed. The scattered materials were collected by the positive pressure airflow direction and transported to the entrance of the negative pressure airflow, and then directed by the negative pressure airflow to recover and pneumatically transported back to the header to achieve recovery and loss reduction. The internal flow field simulation analysis model of the recycling tube was built based on Fluent. The results of the single-factor test showed that the negative pressure airflow velocity was decreased with the increase of the throat diameter and increased with the increase of the throat inclination angle, and the diameter and inclination angle of the throat were determined to be 70 mm and 120° respectively. Negative pressure airflow velocity was decreased with the increase of decreasing angle and decreasing angle in a certain range and there was an interactive effect, the determining factors were the inlet diameter, shrinkage length, outlet diameter and diffusion length. A quadratic regression orthogonal combination test was conducted using negative pressure airflow velocity as the evaluation index. The results showed that the importance of the factors affecting the negative pressure airflow velocity were length of the diffusion length, inlet diameter,

收稿日期: 2021-08-11 修回日期: 2021-09-27

基金项目: 中国农业科学院科技创新工程重大科研项目(CAAS-ZDRW202105)、中国农业科学院基本科研业务费专项(S202203)和财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-12)

作者简介: 关卓怀(1988—),男,助理研究员,博士,主要从事现代农业装备设计与测控研究,E-mail: Guan_zh@foxmail.com

通信作者: 江涛(1988—),男,助理研究员,主要从事农作物收获技术装备研究,E-mail: niam_justod@163.com

shrinkage length, and outlet diameter. The optimized parameter combination was inlet diameter of 94 mm, shrinkage length of 38 mm, outlet diameter of 115 mm and diffusion length of 350 mm. A coupled CFD – DEM simulation model of the internal airflow-material in the recovery device was developed to study the influence of positive and negative pressure airflow velocity on the material recovery effect. The results showed that the material recovery rate was firstly increased and then decreased with the increase of positive pressure airflow velocity, and continued to increase with the increase of negative pressure airflow velocity. The optimal positive pressure airflow velocity was determined to be 20 m/s. Based on the analysis of positive and negative airflow, the ratio of the cross-sectional area of the two airflow channels in the airflow distributor was determined to be 1:3. Field tests showed that the loss rate of rapeseed header and side knife were 1.26% and 0.39% respectively after equipping scattered seed recovery device, and the loss rate was decreased by 21.8% and 47.3% respectively. The header loss and side knife loss were effectively reduced. The study can provide a reference for the design of low loss rapeseed header.

Key words: rapeseed; combine harvest; header; side knife cutting loss; pneumatic recovery

0 引言

油菜在收获期分枝密布交叉且相互牵扯,机械化收获时需要在割台一侧加装竖割刀作为分行切割器,切开相互缠绕的油菜分枝^[1-2]。竖割刀分行切割振动强、扰动大,大量荚果、籽粒飞溅散落导致的分行损失约占割台损失的40%以上,占油菜联合收获机总损失的20%以上,是导致油菜机械化收获损失率高的主要原因之一^[3-6]。

国外大型油菜联合收获机多采用超大幅宽割台,减少分行次数,总体上降低了分行损失,但是单次分行作业损失并没有减少,没有从根本上解决竖割刀分行损失问题,缺少可以参考的分行减损技术^[7-9]。我国油菜收获多用中小型联合收获机,幅宽小分行次数多,分行损失更为严重。为减小割台损失,目前主要采用增设辅助结构^[10]、优化割台结构和工作参数^[11-13]、减小切割器振动冲击^[14-15]等技术手段。

受限于油菜的特殊生长性状,竖割刀分行损失高的问题难以通过割台机械结构改进或作业参数优化来彻底解决。油菜籽粒轻,在正压气流作用下的运动轨迹改变明显^[16-18],部分学者利用这一特点通过正压气流收集横割刀切割损失^[19-20]。然而正压气流无法有效约束油菜籽粒运动方向,难以收集竖割刀分行飞溅散落物料;负压气流可以实现籽粒的定向运移,但在开放空间中损失很快,有效范围小,应用于油菜割台分行损失回收方面的研究鲜见报道。

针对上述问题,文本提出油菜割台竖割刀分行损失气力式回收方法,设计正负气压组合式油菜割台分行落粒回收装置;探究回收装置关键结构参数对回收气流场的影响,建立气流速度与回收装置结构参数关系模型;分析回收过程气流场与物料的气

固耦合特征,研究回收装置运行参数对回收效果的影响;优化回收装置结构参数和运行参数,并开展田间试验,对正负气压式油菜割台分行落粒回收装置的减损效果进行验证。

1 回收装置结构与工作原理

1.1 总体结构

基于农业农村部南京农业机械化研究所研制的4LZ-6T型油菜联合收获机开展油菜割台分行落粒回收装置研究,联合收获机主要参数如表1所示。

表 1 联合收获机主要参数
Tab.1 Main parameters of combine harvester

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	6 940×3 280×3 460
整机质量/kg	6 450
割台宽度/mm	2 900
喂入量/(kg·s ⁻¹)	≤6
理论作业速度/(km·h ⁻¹)	1.6~7.2
作业生产率/(hm ² ·h ⁻¹)	0.7~1.5

油菜割台分行落粒回收装置主要包括风机、气流分配器、落粒收集仓、负压气道、正压气道、回收管等。落粒收集仓由一整块薄板折弯而成,与割台侧板、分禾器共同组成凹形半封闭空间,布置于竖割刀外侧后方,收集竖割刀分行飞溅散落物料。风机安装于割台背板,由液压马达提供动力。气流分配器与风机出风口通过橡胶密封垫连接,将产生的气流分为两路,由风管分别与正压气道和回收管连接。正压气道气流出口在分禾器内部,为U型结构。回收管末端通过风管与割台上的回收口连接,将回收的物料输送回割台。油菜割台分行落粒回收装置结构如图1所示。

1.2 工作原理

油菜联合收获机在作业过程中,竖割刀切割相

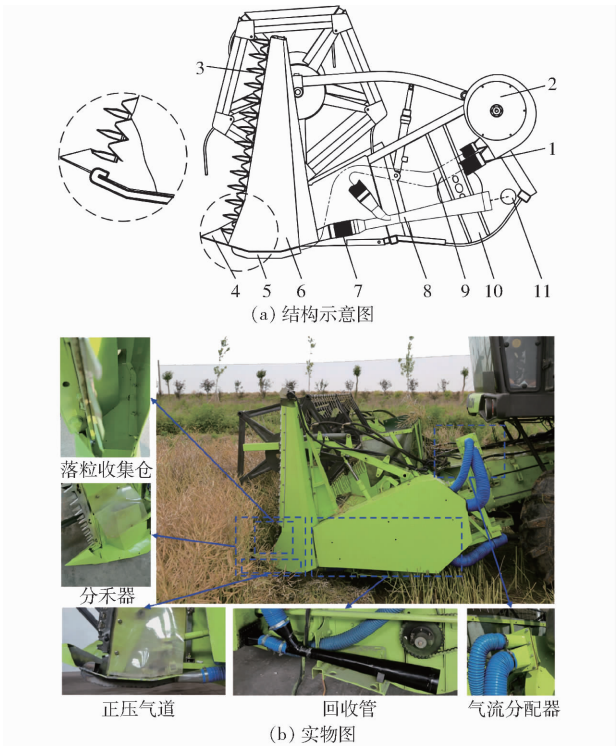


图 1 油菜割台分行落粒回收装置

Fig. 1 Diagrams of pneumatic recovery device for combine harvester side-cutting loss

- 1. 气流分配器 2. 风机 3. 竖割刀 4. 分禾器 5. 正压气道
- 6. 落粒收集仓 7. 负压气道 8. 回收管 9. 风管 10. 割台
- 11. 回收口

互缠绕的油菜分枝，散落物料在收获机前进速度的作用下相对于割台向后运动，在重力和机器前进速度的共同作用下进入落粒收集仓；液压马达带动风机产生气流，并由气流分配器将气流分为两路，一路气流经风管进入正压气道，将落粒收集仓中的物料吹向负压气道，实现正压导向收集；另一路气流连接回收管进气口，根据射流原理，在负压气道处产生负压气流，将落粒收集仓中的物料吸入回收管内，实现负压定向运移，并经由回收管、回收口输送回割台，完成落粒回收，气流、物料流动方向如图 2 所示。

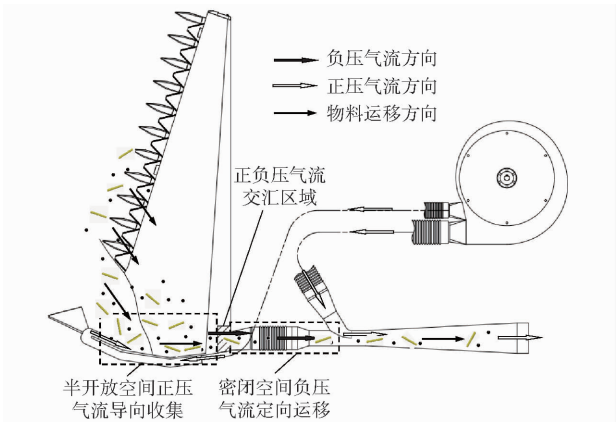


图 2 气流、物料流动方向示意图

Fig. 2 Sketch of airflows and material transportation path

2 关键参数设计与回收过程分析

2.1 基于气流场分析的回收管结构设计

负压气流是实现落粒回收的关键。由于油菜物料在风机内部会被高速叶片打碎并堵塞风机，所以不能直接利用风机进风口产生的负压气流。本文基于射流原理^[21-22]设计了能够产生负压气流的回收管，如图 3 所示。图中， d_1 为进风口直径，mm； d_2 为出风口直径，mm； d_3 为喉管直径，mm； d_4 为负压气道直径，mm； l_1 为渐缩段长度，mm； l_2 为渐扩段长度，mm； α 为喉管倾角，(°)； β 为渐扩角，(°)； γ 为渐缩角，(°)。

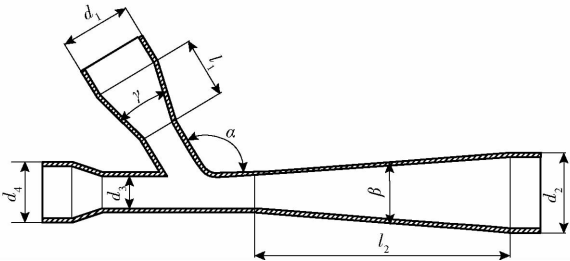


图 3 回收管结构图

Fig. 3 Structure diagram of recovery pipeline

竖割刀分行切割导致的散落物料中主要包括油菜籽粒和其他杂余，杂余中以荚果壳为主，实测荚果壳平均长度约为 65 mm。为确保流畅回收防止堵塞，设计负压气道直径 d_4 为 90 mm。由于割台空间和风机功率限制，所能够输出的负压气流有限，需要优化回收管结构，提高负压气流产生效率。为研究各结构因素对回收管负压生成效果的影响，基于 Fluent 构建了回收管内部流场仿真分析模型并开展仿真试验，计算方法选用标准 $k-\varepsilon$ 模型和 Enhanced wall treatment 函数法^[23]。设置进风口边界类型为 velocity - inlet，出风口边界类型为 pressure - outlet，负压气道入口边界类型为 pressure - inlet，湍流强度均为 5%，湍流粘度比均为 10。回收管内部气流场速度云图、矢量图和压力云图如图 4 所示，气流由负压气道向回收管内部运动，回收管可在负压气道处产生负压气流。

2.1.1 单因素仿真试验

回收管关键结构参数包括喉管直径 d_3 、喉管倾角 α 、渐扩角 β 、渐缩角 γ ，以产生的负压气流速度为评价指标开展单因素试验。仿真试验时固定进风口直径 $d_1 = 90$ mm，输入气流速度为 30 m/s，试验结果如图 5 所示。

由图 5a 可知，喉管直径 d_3 从 50 mm 到 90 mm 变化，增量为 10 mm。在试验条件范围内，负压气流速度在 4.1 ~ 14.2 m/s 间变化，随喉管直径的增大

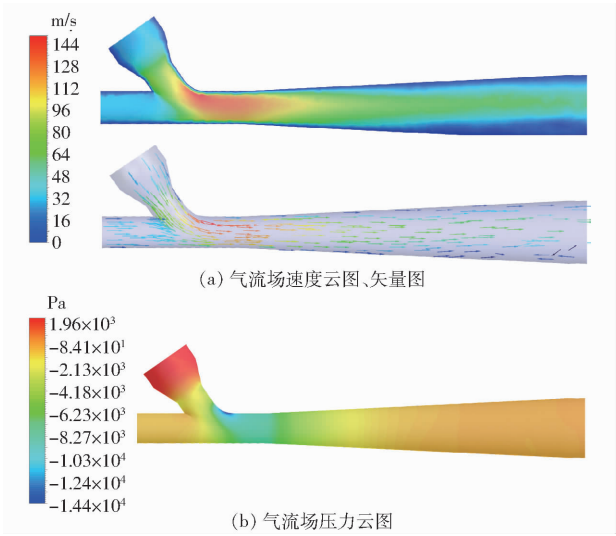


图 4 回收管内部流场

Fig. 4 Airflow in recovery pipeline

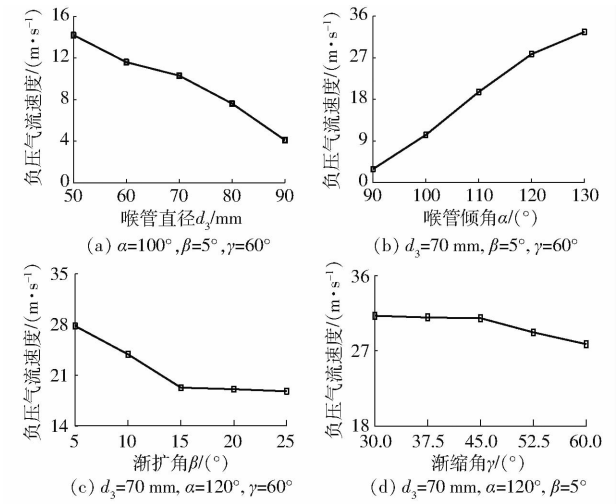


图 5 不同喉管直径、喉管倾角、渐扩角、渐缩角时负压气流速度变化曲线

Fig. 5 Variation curves of negative air speed under different throat diameters, throat inclinations, dilation angles and retraction angles

而减小。为获取较高的负压气流速度,应减小喉管直径,同时考虑物料尺寸避免堵塞,本文取喉管直径 $d_3 = 70$ mm。

由图 5b 可知,喉管倾角 α 从 90° 到 130° 变化,增量为 10° 。在试验条件范围内,负压气流速度在 $2.9 \sim 32.6$ m/s 间变化,随喉管弯角的增大而增大。为获取较高的负压气流速度,应增大喉管弯角,同时考虑实际装配时,喉管弯角过大风管需要大角度弯折且易与竖割刀发生干涉,本文取喉管倾角 $\alpha = 120^\circ$ 。

由图 5c 可知,渐扩角 β 从 5° 到 25° 变化,增量为 5° 。在试验条件范围内,负压气流速度在 $18.8 \sim 27.8$ m/s 间变化,随渐扩角的增大而减小,但渐扩角 β 大于 15° 时,负压气流速度基本不变。为获取

较高的负压气流速度,应适当减小渐扩角。

由图 5d 可知,渐缩角 γ 从 30° 到 60° 变化,增量为 7.5° 。在试验条件范围内,负压气流速度在 $27.8 \sim 31.2$ m/s 间变化。渐缩角 γ 小于 45° 时,负压气流速度变化不大,大于 45° 时,负压气流速度随渐缩角的增大而减小。为获取较高的负压气流速度,应适当减小渐缩角。

单因素试验结果表明,负压气流速度随喉管直径 d_3 的增大而减小,随喉管倾角 α 的增大而增大,在一定范围,负压气流速度随渐缩角 γ 和渐扩角 β 增大而减小。综合考虑回收物料尺寸和装配空间,设计喉管直径 $d_3 = 70$ mm,喉管倾角 $\alpha = 120^\circ$ 。

2.1.2 交互因素仿真试验

仅依据单因素试验结果尚无法确定渐缩角 γ 、渐扩角 β 较优值。其中渐缩角 γ 由进风口直径 d_1 和渐缩段长度 l_1 确定,渐扩角 β 由出风口直径 d_2 和渐扩段长度 l_2 确定。为进一步明确交互因素对负压气流的影响,确定回收管结构参数,以进风口直径 (A)、渐缩段长度 (B)、出风口直径 (C)、渐扩段长度 (D) 为试验因素,以负压气流速度 (y) 为试验指标开展四元二次回归正交旋转组合试验。依据单因素试验结果,选取各因素编码如表 2 所示。试验方案及试验结果如表 3 所示,共 29 个试验点,包括 24 个分析因子和 5 个零点估计误差。

表 2 试验因素编码

Tab. 2 Coding of experimental factors					mm
因素					
编码	进风口 直径 A	渐缩段 长度 B	出风口 直径 C	渐扩段 长度 D	
-1	90	34	100	150	
0	100	37	110	250	
1	110	40	120	350	

对负压气流速度 y 与试验因素的关系进行二次多元拟合,并对回归模型进行方差分析和回归系数显著性检验,结果如表 4 所示。

根据负压气流速度 y 二次多元拟合回归方差分析结果,回归模型 $P < 0.01$,极显著,失拟项 $P > 0.05$,不显著,说明模型能正确反映 y 与 A 、 B 、 C 、 D 之间的关系并对试验结果进行预测。其中因素 A 、 B 、 C 、 D 、 AD 、 CD 、 C^2 、 D^2 对 y 影响极显著, AC 、 B^2 对 y 影响显著。试验因素之间的交互作用对 y 的影响显著,剔除不显著因素后,负压气流速度 y 的二次回归模型为

$$y = -499.17 + 0.87A + 8.91B + 6.74C - 0.41D - 0.014AC + 0.0016AD + 0.0034CD - 0.11B^2 - 0.029C^2 - 0.00016D^2 \quad (1)$$

表 3 试验方案与结果

Tab.3 Schemes and results of experiment

试验号	A/mm	B/mm	C/mm	D/mm	y/(m·s ⁻¹)
1	110	34	110	250	23.6
2	100	37	100	150	25.1
3	110	37	100	250	25.3
4	90	37	110	350	30.5
5	100	37	120	150	15.0
6	100	40	100	250	25.1
7	110	37	120	250	19.9
8	100	37	120	350	29.6
9	100	40	110	150	21.9
10	100	37	110	250	28.5
11	110	37	110	350	29.2
12	90	37	100	250	26.3
13	100	34	100	250	23.2
14	100	40	120	250	27.1
15	100	34	110	350	29.0
16	90	40	110	250	30.9
17	100	37	110	250	28.5
18	90	34	110	250	27.2
19	100	34	110	150	18.2
20	100	37	110	250	28.5
21	110	40	110	250	25.1
22	100	34	120	250	21.6
23	90	37	110	150	25.8
24	100	40	110	350	32.6
25	100	37	110	250	28.5
26	100	37	100	350	26.1
27	100	37	110	250	28.5
28	90	37	120	250	26.3
29	110	37	110	150	18.1

根据式(1),各试验因素对负压气流速度 y 影响的主次顺序为 D 、 A 、 B 、 C ,交互作用显著因素间的响应曲面如图 6 所示。根据图 6a 可知, A 增大时 y 减小, C 增大时 y 先增大后减小,响应面曲线沿 A 方向的变化更快,进风口直径 A 对负压气流速度 y 的影响比出风口直径 C 显著。根据图 6b 可知, A 增大时 y 减小, D 增大时 y 增大,响应面曲线沿 D 方向的变化更快,渐扩段长度 D 对负压气流速度 y 的影响比进风口直径 A 显著。根据图 6c 可知, C 增大时 y

表 4 回归方程方差分析

Tab.4 Variance analysis of regression equation

差异来源	平方和	自由度	均方差	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	471.06	14	33.65	52.34	<0.000 1 **
<i>A</i>	55.47	1	55.47	52.64	<0.000 1 **
<i>B</i>	33.00	1	33.00	53.31	<0.000 1 **
<i>C</i>	11.21	1	11.21	31.72	0.005 4 **
<i>D</i>	233.20	1	233.20	10.78	<0.000 1 **
<i>AB</i>	1.21	1	1.21	224.12	0.290 3
<i>AC</i>	7.29	1	7.29	1.16	0.019 1 *
<i>AD</i>	10.24	1	10.24	7.01	0.007 3 **
<i>BC</i>	3.24	1	3.24	9.84	0.099 4
<i>BD</i>	0	1	0	3.11	0.961 6
<i>CD</i>	46.24	1	46.24	0	<0.000 1 **
<i>A</i> ²	4.55	1	4.55	44.44	0.055 2
<i>B</i> ²	8.96	1	8.96	4.37	0.010 9 *
<i>C</i> ²	59.85	1	59.85	8.61	<0.000 1 **
<i>D</i> ²	19.30	1	19.30	57.52	0.000 7 **
残差	14.57	14	1.04		
失拟项	14.57	10	1.46		
误差	0	4	0		
总和	485.63	28			

注: ** 表示影响极显著 ($P < 0.01$), * 表示影响显著 ($0.01 \leq P < 0.05$)。

先增大后减小, D 增大时 y 增大,响应面曲线沿 D 方向的变化更快,渐扩段长度 D 对负压气流速度 y 的影响比出风口直径 C 显著。

2.1.3 参数组合优化

为寻求各因素最优参数组合,以表 2 中各因素范围为约束条件,以负压气流速度回归模型(式(1))为目标函数,求解其最大值。得负压气流最大速度为 33.76 m/s,优化解为进风口直径 93.72 mm、渐缩段长度 37.80 mm、出风口直径 114.15 mm、渐扩段长度 349.82 mm,此时渐扩角 $\beta = 7.2^\circ$,渐缩角 $\gamma = 35.8^\circ$ 。

将优化参数进行仿真验证,得负压气流速度为 34.80 m/s,与优化结果基本相吻合。综合考虑油菜

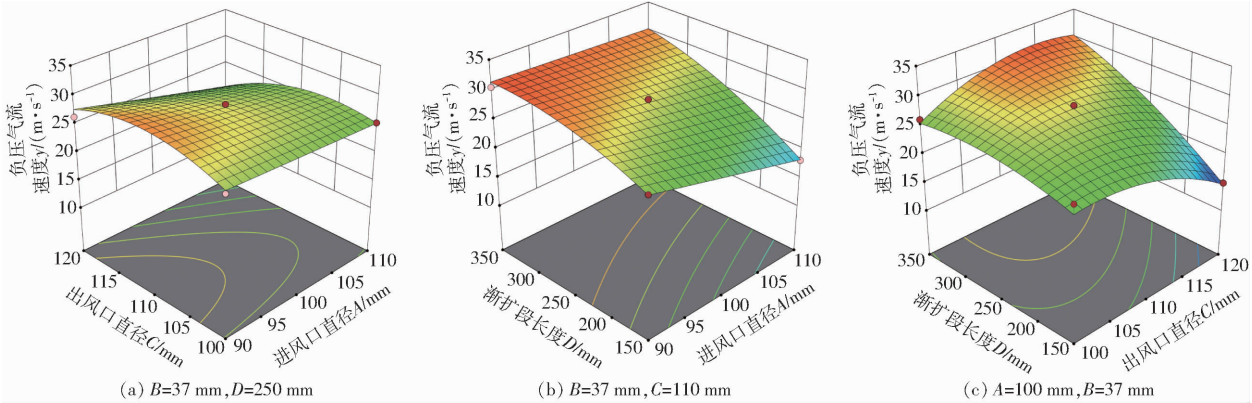


图 6 交互因素对负压气流速度影响的响应曲面

Fig.6 Effects of interactive factors on negative air speed

割台分行落粒回收装置工作要求和加工制造水平,确定实际进风口直径 $d_1=94\text{ mm}$,渐缩段长度 $l_1=38\text{ mm}$,出风口直径 $d_2=115\text{ mm}$,渐扩段长度 $l_2=350\text{ mm}$ 。

2.2 基于 CFD-DEM 的回收装置运行参数设计

2.2.1 CFD-DEM 耦合分析模型及参数

油菜割台分行落粒回收装置关键运行参数为正压气流速度和负压气流速度。为进一步分析回收过程气流场与物料的气固耦合特征,研究回收装置运行参数对回收效果的影响,优化回收装置结构参数和运行参数,构建了回收装置内部流场-物料气固耦合分析模型,如图 7 所示。为量化油菜分行损失物料成分,2019 年 9 月 21 日在张掖市民乐县开展了油菜分行损失物料成分测定试验,油菜品种为科乐 521,千粒质量 3.5 g 。试验行程为 10 m ,重复 3 次,试验结束后统计落粒收集仓中物料数量。结果表明,油菜分行切割散落物料主要包括油菜籽粒和其他杂余,杂余中以荚果壳为主;油菜联合收获机平均前进速度为 1.1 m/s 时,落粒收集仓中油菜籽粒数为 $4\,840$ 个(平均 532.4 个/s),荚果壳为 $1\,770$ 个(平均 194.7 个/s)。为便于进行仿真,不考虑其它物料成分,根据文献[24]对油菜物料特性的测定,建立油菜籽粒、杂余颗粒模型,如图 7b、7c 所示。

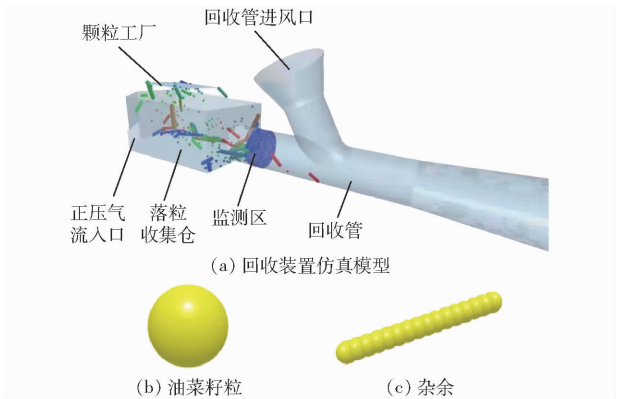


图 7 回收过程气固耦合仿真模型

Fig.7 CFD-DEM simulation analysis model of recovery process

CFD-DEM 耦合仿真选用 Eulerian-Lagrangian 方法耦合,气流作用于颗粒上的力选择 Freestream Equation 流体阻力、Saffman 升力和 Magnus 升力模型。气体流动为湍流运动,连续相的气流场模拟采用 Fluent 软件中标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型。仿真中模型外壳材料为钢板,各物料和钢板的材料特性及其相互间的力学特性参数如表 5 所示^[25-26]。由于 DEM 仿真的时间步长低于 CFD,DEM 和 CFD 的时间步长分别设为 $3\times 10^{-5}\text{ s}$ 和 $1.5\times 10^{-3}\text{ s}$,总仿真时长为 5 s 。根据油菜分行损失物料组成测定试验结果,

设置杂余生成速率为 200 个/s,总量 $1\,000$ 个,籽粒生成速率为 550 个/s,总量 $2\,750$ 个。颗粒工厂在半开放落粒收集仓上方,模拟进入落粒收集仓的散落物料;正压气流入口、回收管进风口边界类型均设置为 velocity-intet,回收管出风口和落粒收集仓上表面边界类型均设置为 pressure-outlet,湍流强度均为 5% ,湍流粘度比均为 10 ;监测区设置在回收管负压气道内部。

表 5 仿真特性参数

Tab.5 Simulation mechanical properties

类别	参数	数值
籽粒	三轴尺寸/(mm×mm×mm)	$2\times 2\times 2$
	直径/mm	4
杂余	长度/mm	45~65
	碰撞恢复系数	0.3
杂余-籽粒	静摩擦因数	0.4
	滚动摩擦因数	0.01
杂余-杂余	碰撞恢复系数	0.2
	静摩擦因数	0.4
	滚动摩擦因数	0.01
杂余-装置	碰撞恢复系数	0.2
	静摩擦因数	0.5
	滚动摩擦因数	0.01
籽粒-籽粒	碰撞恢复系数	0.6
	静摩擦因数	0.5
	滚动摩擦因数	0.01
籽粒-装置	碰撞恢复系数	0.6
	静摩擦因数	0.3
	滚动摩擦因数	0.01

2.2.2 正压气流速度对回收过程影响分析

落粒收集仓中的物料在正压气流的作用下向负压气道运动,实现正压导向收集。为量化分析正压气流速度对回收过程的影响,仿真分析正压气流作用下落粒收集仓中物料的运动规律,如图 8 所示,正压气流速度为 15 m/s 。

由图 8 可知,正压气流作用下,物料整体向负压气道方向运动,但由于负压气道内气流速度较低,对物料群体的作用力不够,物料在管道内部产生堆积,仅有少量物料能够通过负压管。定义回收率为通过负压管的物料量与总物料量的百分比,进一步分析回收率随正压气流速度的变化规律,如图 9 所示。物料回收率随正压气流速度的升高呈现先升高后下降的趋势。正压气流速度小于 15 m/s 时,气流对物料的推动能力不足,易造成物料堆积,回收率较低;随着正压气流速度的升高,物料推动能力增强,回收率逐渐增加;正压气流速度大于 25 m/s 后,物料回收率随正压气流速度的升高而降低,主要由于高速气流在壁面间的折射导致流场和物料运动紊乱,加

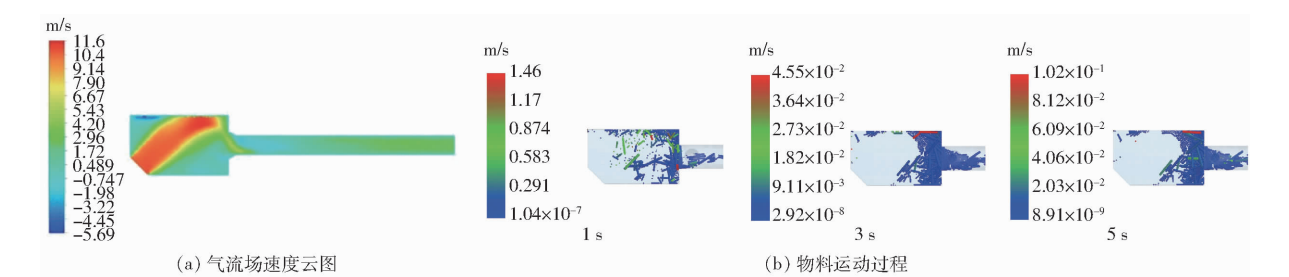


图 8 正压气流作用下物料运动仿真结果

Fig. 8 Simulation result of materials motion under positive pressure airflow

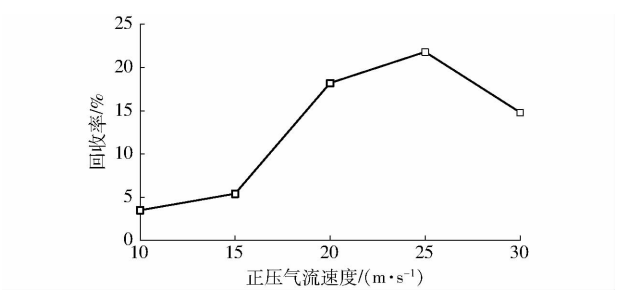


图 9 回收率随正压气流速度的变化曲线

Fig. 9 Relationship between positive pressure airflow velocity and recovery rate

剧了物料-物料间和物料-壁面间的碰撞。根据仿真结果,确定正压气流较优速度范围为 15 ~ 25 m/s。

2.2.3 正负气压组合气流速度对回收过程影响分析

负压气流将物料吸入回收管内,实现负压定向运移。为量化分析正负气压组合气流速度对回收过程影响,仿真分析正负气压组合气流作用下回收仓内物料的运动规律,图 10 所示为正、负气流速度均为 15 m/s 时物料的运动规律。

物料在正压气流的推送导向作用下移动到正、负压气流交汇区域,当进入气吸负压气流的作用覆

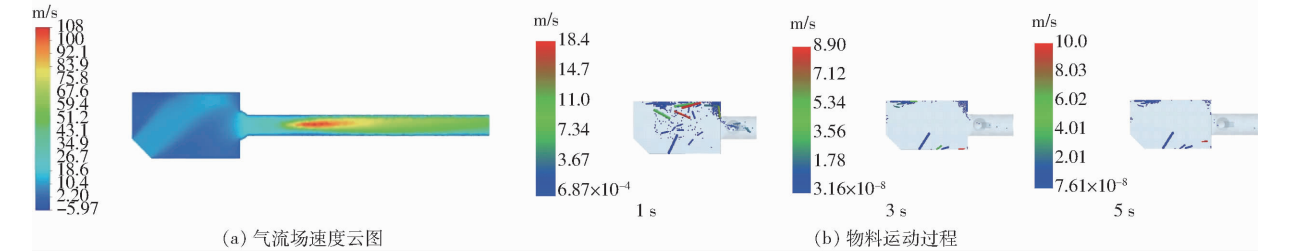


图 10 正负气压组合气流作用下物料运动仿真结果

Fig. 10 Simulation result of materials motion in composite pneumatic airflow

盖范围后被吸入负压气道并向回收管输送完成籽粒回收,相较仅有正压气流时,回收效果明显提升。进一步分析回收率随不同正压、负压气流速度组合的变化规律。试验方案和试验结果如表 6 所示,并对试验结果进行方差分析,结果如表 7 所示。

表 6 回收率仿真试验方案与结果

Tab. 6 Simulation results of recovery rate

试验序号	正压气流速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	负压气流速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	籽粒回收率/ %
1	15	15	85.1
2	15	20	89.2
3	15	25	92.0
4	20	15	92.6
5	20	20	94.7
6	20	25	97.2
7	25	15	91.8
8	25	20	93.2
9	25	25	93.9

根据表 7,正压气流速度和负压气流速度均显著影响回收率,其中正压气流速度对回收率的影响

表 7 正负气压气流速度对回收率方差分析

Tab. 7 Variance analysis of positive and negative pressure airflow velocities to recovery rate

差异来源	平方和	自由度	均方和	F	P	F 临界值
正压气流速度	166.04	2	83.02	99.09	1.92×10^{-10}	3.55
负压气流速度	87.1	2	43.55	51.98	3.32×10^{-10}	3.55
交互作用	18.08	4	4.52	5.39	0.004 9	2.93
内部	15.08	18	0.84			
总计	286.29	26				

更大。不同正压、负压气流速度组合与回收率的关系曲面如图 11 所示。

不同的负压气流速度下,随着正压气流速度升高,回收率均先增大后减小。产生该现象的原因是,物料运动速度随正压气流的增大而增大,负压气流作用时间降低,物料无法在有效负压范围内被吸入负压气道,回收率下降。不同的正压气流速度下,回收率均随负压气流速度的升高而增大。根据仿真试验结果,设计正压气流速度为 20 m/s,为使籽粒回收率大于 97%,负压气流速度应大于 25 m/s,且负压

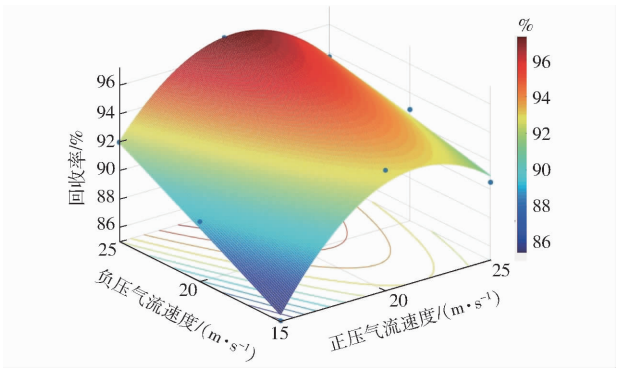


图 11 气流速度组合与回收率的关系曲面
Fig. 11 Relation surface between recovery rate and airflow velocities combination

气流速度越大,回收效果越好。

2.3 系统风量分析与气流分配器设计

2.3.1 系统风量分析

本文所设计的油菜割台分行落粒回收装置由单个风机提供回收物料所需要的正、负压气流,为合理分配两路气流,需明确正、负压气流风量。风量计算公式为

$$Q = 3\,600kSv \tag{2}$$

式中 Q ——风量, m^3/h

k ——气流衰减和沿途损失系数,为 1.3 ~ 1.6,本文取 1.5

S ——横截面积, m^2

v ——风速, m/s

正压气道 U 型气出口配置在割台分禾器内,根据其内部空间尺寸,将正压气道截面设计为 $70\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ 的矩形。依据所设计的正、负压气流速度和横截面积,由式(2)计算得正压气流风量 Q_1 为 $453.6\text{ m}^3/\text{h}$,负压气流风量 Q_2 应大于 $519.3\text{ m}^3/\text{h}$ 。

为明确回收管产生负压气流风量 Q_2 时所需的输入风量 Q'_2 ,根据前文所建立的回收管内部流场仿真分析模型,计算了不同输入风量下回收管的负压输出风量,结果如图 12 所示。

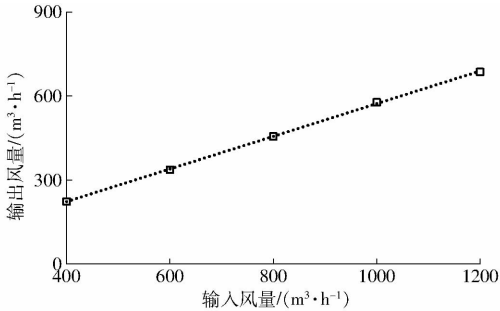


图 12 回收管负压输出风量与输入风量的关系曲线
Fig. 12 Relation curve of recovery pipeline negative pressure airflow output with airflow input

根据图 12,回收管风量输入 Q'_2 与负压气流风

量输出 Q_2 间的关系可拟合为线性方程

$$Q'_2 = 0.587Q_2 - 13.4 \tag{3}$$

依据式(3)计算得回收管风量输入 Q'_2 应大于 $907.5\text{ m}^3/\text{h}$,系统总风量应大于 $Q_1 + Q'_2 = 1\,361.1\text{ m}^3/\text{h}$ 。选择弘科 DF-1100 型多翼式鼓风机,额定风量 $Q = 1\,900\text{ m}^3/\text{h}$,全压 $1\,380\text{ Pa}$,转速 $2\,800\text{ r/min}$,外形尺寸 $338\text{ mm} \times 387\text{ mm} \times 400\text{ mm}$,满足系统需求。

2.3.2 气流分配器设计

气流分配器将风机输出的气流分为两路,提供物料回收所需的正压、负压气流,其中分配比例是气流分配器的关键设计参数。根据公式(2),相同风速下,风量与截面积成正比,将风机输出的气流视作均匀风场,则气流分配器中两路气流通道的截面积之比即为两路气流风量之比。根据前文分析,正压气流速度应为 20 m/s ,此时正压气流风量 Q_1 为 $453.6\text{ m}^3/\text{h}$,而负压气流速度越大越好。则风机在额定转速下输入回收管的风量应为 $Q - Q_1 = 1\,446\text{ m}^3/\text{h}$,则两路气流风量之比为 1:3.2。考虑实际加工水平,将气流分配器中两路气流通道的截面积之比设计为 1:3。

为验证油菜割台分行落粒回收装置的实际正、负压气流速度,运用 AR866A 型风速计测量正压气道、负压气道出口风速,试验过程中风机保持额定转速工作。测得正压气道出口风速为 22.4 m/s ,与设计值的误差为 11.2%,主要原因是理论计算视气流场为均匀流场,而实际气流管道和管道壁面附近存在非均匀流场,并且为了便于加工,将气流分配器截面比例进行了近似取整。测得负压气道出口风速为 25.9 m/s ,满足设计要求。

3 田间试验

为检验油菜割台分行落粒回收装置的作业效果,于 2020 年 6 月在江苏省盐城市大丰区进行田间试验。试验油菜品种为浙油 51,油菜物理特性如下:籽粒含水率 9.96%,茎秆含水率 52.27%,千粒质量 3.94 g ,产量 $3\,135\text{ kg}/\text{hm}^2$,割茬 35 cm 时谷草比为 0.12。

根据农业机械推广鉴定大纲 DG/T057《油菜联合收获机》和 NY/T 1231—2006《油菜联合收获机质量评价技术规范》中的试验方法开展田间试验。试验预备区长度 25 m,测区长度 25 m。油菜联合收获机以正常作业速度作业,试验重复 3 次取平均值。每次试验结束后,计算割台损失率和竖割刀分行损失率。

试验开始前,在测区内横向等间距放置 3 个尺

寸为 3 m×0.15 m×0.06 m 的钢板接料槽,槽内铺有绒布,超出割台割幅的部分放置于竖割刀一侧,接取机器经过测点时所掉落的籽粒和荚果,清选分离后称量籽粒质量。测区内割台损失质量的计算方法为

$$M_1=m_1\frac{N_1}{N_2}$$

(4)

其中

$$N_1=25h$$

(5)

式中 M_1 ——割台损失质量,g
 m_1 ——接料槽中收集的籽粒质量,g
 N_1 ——测区面积,m²
 h ——割幅,通过测量收割前后作物边界线与标杆的距离获得,m
 N_2 ——3 个接料槽的槽内口面积之和,m²

沿竖割刀作业区域放置 3 个 1.5 m×0.3 m×0.06 m 的接料槽(长边与收获机前进方向平行),接取竖割刀分行造成的散落物料,清选分离后称量籽粒质量 m_2 ,测区内竖割刀分行损失总质量 M_2 为

$$M_2=\frac{25}{1.5\times3}m_2=\frac{50}{9}m_2$$

(6)

为便于分析分行落粒回收装置的作业效果,在回收管末端套接样袋,如图 13 所示。试验结束后称量接样袋中收集的籽粒质量 M_3 ,即为装置所回收的分行落粒质量。割台减损率 p_1 和竖割刀减损率 p_2 的计算公式分别为

$$p_1=\frac{M_3}{M_1+M_3}\times100\%$$

(7)

$$p_2=\frac{M_3}{M_2+M_3}\times100\%$$

(8)



图 13 田间试验
Fig. 13 Field trial

通过计算分析装备分行落粒回收装置后割台损失率和竖割刀损失率,检验装置作业效果。试验结果如表 8 所示。

根据表 8,装备有割台分行落粒回收装置的油菜联合收获机割台损失率、竖割刀损失率分别为

表 8 田间试验结果
Tab. 8 Results of field trial

参数	试验序号			平均值
	1	2	3	
前进速度/(m·s ⁻¹)	1.11	1.07	1.04	1.07
回收质量/g	36.8	49.8	54.3	47.0
损失质量/g	174.5	156.9	172.1	202.6
割台 损失率/%	1.37	1.18	1.22	1.26
减损率 p_1 /%	17.4	24.1	24.0	21.8
损失质量/g	58.7	49.4	48.0	52.1
竖割刀 损失率/%	0.46	0.37	0.34	0.39
减损率 p_2 /%	38.5	50.2	53.1	47.3

1.26%、0.39%,竖割刀损失仅占割台损失的 25.7%,而现有油菜联合收获机竖割刀损失在割台损失中的占比往往在 40% 以上^[4],分行落粒回收装置使油菜割台和竖割刀的损失率下降了 21.8%、47.3%。

田间试验结果表明,油菜割台分行落粒回收装置作业性能良好,能够有效降低竖割刀分禾落粒损失和割台损失。

4 结论

(1)提出了油菜割台分行损失气力回收方法,设计了正负气压组合式油菜割台分行落粒回收装置,通过正压气流导向收集分行散落物料,并由负压气流定向输送回割台,实现回收减损。

(2)基于 Fluent 构建了回收管内部流场仿真分析模型,单因素试验结果表明负压气流速度随喉管直径的增大而减小、随喉管倾角的增大而增大,确定了喉管直径、喉管倾角分别为 70 mm、120°,在一定范围内随渐扩角、渐缩角增大而减小;交互因素试验表明影响负压气流速度的因素主次顺序为渐扩段长度、进风口直径、渐缩段长度、出风口直径,较优参数组合为进风口直径 94 mm、渐缩段长度 38 mm、出风口直径 115 mm、渐扩段长度 350 mm。

(3)回收装置内部流场-物料 CFD-DEM 耦合仿真研究表明,物料回收率随正压气流速度的升高先增大后减小、随负压气流速度的升高持续增大,确定了较优正压气流速度为 20 m/s;基于正、负压气流流量分析,确定了气流分配器中两路气流通道的截面积之比为 1:3。

(4)田间试验表明,装备分行落粒回收装置后油菜割台损失率、竖割刀损失率分别为 1.26%、0.39%,分别下降了 21.8%、47.3%,有效降低了分行损失和割台损失。

参 考 文 献

[1] QING Yiren, LI Yaoming, LI Yang, et al. Development and experiments on reel with improved tine trajectory for harvesting

- oilseed rape[J]. *Biosystems Engineering*, 2021, 206(9): 19–31.
- [2] 马丽娜, 魏俊逸, 黄小毛, 等. 油菜联合收获机割台振动对田间收获落粒影响分析[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(增刊2): 134–138, 201.
MA Li'na, WEI Junyi, HUANG Xiaomao, et al. Analysis of harvesting losses of rapeseed caused by vibration of combine harvester header during field operation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(Supp. 2): 134–138, 201. (in Chinese)
- [3] 伍文杰, 吴崇友. 油菜联合收割机的割台参数优化[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2018, 44(4): 481–489.
WU Wenjie, WU Chongyou. Optimization for header parameters of rape combine harvester[J]. *Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.)*, 2018, 44(4): 481–489. (in Chinese)
- [4] 关卓怀, 吴崇友, 王刚, 等. 油菜联合收割机双向电驱动分行竖割刀设计[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(3): 1–8.
GUAN Zhuohuai, WU Chongyou, WANG Gang, et al. Design of bidirectional electric driven side vertical cutter for rape combine harvester[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(3): 1–8. (in Chinese)
- [5] 吴崇友, 肖圣元, 金梅. 油菜联合收获与分段收获效果比较[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(17): 10–16.
WU Chongyou, XIAO Shengyuan, JIN Mei. Comparison on rape combine harvesting and two-stage harvesting[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(17): 10–16. (in Chinese)
- [6] 李海同, 万星宇, 徐阳, 等. 油菜收获机割台螺旋输送器间隙自适应调节机构研究[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(11): 115–122.
LI Haitong, WAN Xingyu, XU Yang, et al. Clearance adaptive adjusting mechanism for header screw conveyor of rape combine harvester[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(11): 115–122. (in Chinese)
- [7] MOSES O, MBUYA T O, JUN S, et al. Kinematics of the tined combine harvester reel[J]. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 2012, 14(3): 53–60.
- [8] HOBSON R N, BRUCE D M. Seed loss when cutting a standing crop of oilseed rape with two types of combine harvester header[J]. *Biosystems Engineering*, 2002, 81(3): 281–286.
- [9] LUIGI P, ALBERTO A, ALESSANDRO S, et al. The yield losses during oilseed rape (*Brassica Napus* L.) harvesting at on-farm scale in the Italian area[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2012, 46(1): 453–458.
- [10] 罗海峰, 汤楚宙, 官春云, 等. 油菜机收割台茎秆分离装置设计与试验[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2012, 38(5): 548–550.
LUO Haifeng, TANG Chuzhou, GUAN Chunyun, et al. Experiment using stalk separator designed for the header of rape harvester[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2012, 38(5): 548–550. (in Chinese)
- [11] ZAREEI S, POUR S, MOGHADDAM M. Optimum setting of combine header for wheat harvesting using Taguchi method[J]. *Research on Crops*, 2012, 13(3): 1142–1146.
- [12] GUAN Zhuohuai, WU Chongyou, LI Ying, et al. Cutting speed follow-up adjusting system of bidirectional electric drive side cutter for rape combine harvester[J]. *Science Progress*, 2020, 103(3): 1–19.
- [13] 冉军辉, 沐森林, 李海同, 等. 油菜联合收获机往复式双动割刀行星轮驱动器设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(9): 17–25.
RAN Junhui, MU Senlin, LI Haitong, et al. Design and test of planet gear driver of reciprocating double-acting cutter for rapeseed combine harvester[J]. *Transactions of the CSAE*, 2020, 36(9): 17–25. (in Chinese)
- [14] 姬江涛, 徐龙姣, 庞靖, 等. 微型谷物联合收割机割台最小振幅点分析及挂接点优化[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(12): 28–33.
JI Jiangtao, XU Longjiao, PANG Jing, et al. Analysis of minimum amplitude points and optimization of connection position for header of micro grain combine[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(12): 28–33. (in Chinese)
- [15] 柴晓玉, 徐立章, 严超, 等. 油菜割台竖割刀切割频率随动调节装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(12): 93–99.
CHAI Xiaoyu, XU Lizhang, YAN Chao, et al. Design and test of cutting frequency follow-up adjusting device for vertical cutting knife of rapeseed cutting machine[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(12): 93–99. (in Chinese)
- [16] 宗望远, 黄小毛, 潘海兵, 等. 下落油菜籽粒在无秸秆正压纵向气流场中的漂移特性[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(3): 70–76.
ZONG Wangyuan, HUANG Xiaomao, PAN Haibing, et al. Drifting property of falling oil rape seeds in longitudinal positive pressure airflow field without stalks[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(3): 70–76. (in Chinese)
- [17] 潘海兵, 王廷廷, 黄小毛, 等. 油菜籽粒在割台纵向正压气流场中漂移运动的数值模拟[J]. *华中农业大学学报*, 2015, 34(3): 117–123.
PAN Haibing, WANG Tingting, HUANG Xiaomao, et al. Numerical simulation of drifting process of oil rape seeds in a longitudinal positive pressure airflow field of the cutting platform[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2015, 34(3): 117–123. (in Chinese)
- [18] 王朕, 黄浩, 易应武, 等. 小型油菜联合收割机吹禾气流管道结构优化设计与试验[J]. *中国农机化学报*, 2020, 41(9): 16–24.
WANG Zhen, HUANG Hao, YI Yingwu, et al. Optimization design and test of air-flow pipe structure in small-scale rape combined harvester[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2020, 41(9): 16–24. (in Chinese)
- [19] 李毅念, 易应武, 杜世伟, 等. 小区谷物联合收获机气吹式割台设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(6): 79–87.
LI Yinian, YI Yingwu, DU Shiwei, et al. Design and experiment on air blowing header of plot combine harvester for grain[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(6): 79–87. (in Chinese)

- Technologies, 2021,27(4):1837–1844.
- [16] RAZA K, SONG H. Fast and accurate fish detection design with improved YOLO – v3 model and transfer learning[J]. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2020,11(2):7–16.
- [17] GRAY P C, BIERLICH K C, MANTELL S A, et al. Drones and convolutional neural networks facilitate automated and accurate cetacean species identification and photogrammetry[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2019,10(9):1490–1500.
- [18] WANG Y, SONG W, FORTINO G, et al. An experimental-based review of image enhancement and image restoration methods for underwater imaging[J/OL]. arXiv e-prints, 2019. <https://arxiv.org/abs/1907.03246>.
- [19] HUANG D M, WANG Y, SONG W, et al. Shallow-water image enhancement using relative global histogram stretching based on adaptive parameter acquisition[C]//International Conference on Multimedia Modeling. Springer, Cham, 2018: 453–465.
- [20] KONOVALOV D A, SALEH A, BRADLEY M, et al. Underwater fish detection with weak multi-domain supervision[C]//International Joint Conference on Neural Networks. IEEE Computer Society, 2019: 1–8.
- [21] NEUBECK A, GOOL L. Efficient non-maximum suppression[C]//International Conference on Pattern Recognition. IEEE Computer Society, 2006: 850–855.
- [22] ZUIDERBELD K. Contrast limited adaptive histogram equalization[J]. Graphics Gems, 1994,8(1):474–485.
- [23] HE K, JIAN S, TANG X, et al. Single image haze removal using dark channel prior[J]. Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2011,33(12):2341–2353.
- [24] IQBAL K, ODETAYO M O, JAMES A E, et al. Enhancing the low quality images using unsupervised colour correction method [C]//International Conference on Systems, Man and Cybernetics. IEEE Computer Society, 2010: 1703–1709.
- [25] PENG Y T, COSMAN P C. Underwater image restoration based on image blurriness and light absorption[J]. IEEE Trans. Image Process, 2017,26(4):1579–1594.
- [26] REDMON J, FARHADI A. YOLOv3: an incremental improvement[J/OL]. arXiv e-prints, 2018. <https://arxiv.org/abs/1804.02767>.
- [27] BOCHKOVSKIY A, WANG C Y, LIAO H. YOLOv4: optimal speed and accuracy of object detection[J/OL]. arXiv e-prints, 2020. <https://arxiv.org/abs/2004.10934v1>.
- [28] EVERINGHAM M, GOOL L V, WILLIAMS C, et al. The pascal visual object classes (VOC) challenge[J]. International Journal of Computer Vision, 2010,88(2):303–338.
-

(上接第 112 页)

- [20] 黄小毛, 查显涛, 宗望远, 等. 油菜联合收获割台落粒横流气压收集装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 227–233.
- HUANG Xiaomao, ZHA Xiantao, ZONG Wangyuan, et al. Design and test of transverse positive pressure airflow collection device for header losses of rape combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 227–233. (in Chinese)
- [21] 王新坤, 薛子龙, 徐胜荣, 等. 双喷嘴负压反馈射流喷头水力性能研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 278–284.
- WANG Xinkun, XUE Zilong, XU Shengrong, et al. Hydraulic performance of negative pressure feedback jet sprinkler with double nozzles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 278–284. (in Chinese)
- [22] 代祥, 徐幼林, 陈骏阳, 等. 射流混药器改进提高混药均匀性及动态浓度一致性[J]. 农业工程学报, 2019, 35(8): 65–74.
- DAI Xiang, XU Youlin, CHEN Junyang, et al. Improved jet mixer injection nozzle enhancing pesticide mixing uniformity and dynamic concentration consistency[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(8): 64–74. (in Chinese)
- [23] 李衍军, 刘瑞, 刘春晓, 等. 气送式排种器输种管内种子速度耦合仿真测定与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 54–61, 133.
- LI Yanjun, LIU Rui, LIU Chunxiao, et al. Simulation and test of seed velocity coupling in seed tube of pneumatic seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 54–61, 133. (in Chinese)
- [24] 陈立, 廖庆喜, 宗望远, 等. 油菜联合收获机脱出物空气动力学特性测定[J]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 125–130.
- CHEN Li, LIAO Qingxi, ZONG Wangyuan, et al. Aerodynamic characteristics measurement of extraction components for rape combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 125–130. (in Chinese)
- [25] LEI Xiaolong, HU Hongji, WU Wencheng, et al. Seed motion characteristics and seeding performance of a centralised seed metering system for rapeseed investigated by DEM simulation and bench testing[J]. Biosystems Engineering, 2021, 203: 22–33.
- [26] 王磊, 廖宜涛, 廖庆喜, 等. 气送式油菜播种机集排器供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 75–85.
- WANG Lei, LIAO Yitao, LIAO Qingxi, et al. Design and test on centralized metering seed feeding device of air-assisted planter for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 75–85. (in Chinese)