doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.03.006

脉冲射流式水稻播种无人机一分四路分流装置设计与试验

廖一隆[1,2]　杨得帅[1,3]　林键沁[1,3]　姜　锐[1,4]　周志艳[1,5]

(1.华南农业大学工程学院,广州 510642;2.广东省农业人工智能重点实验室,广州 510642;
3.广东省农业航空应用工程技术研究中心,广州 510642;
4.华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室,广州 510642;
5.岭南现代农业科学与技术广东省实验室,广州 510642)

摘要:脉冲射流式水稻播种方法通过将水稻芽种在射流液柱的裹挟下加压,提升种子的出射速度以减小外部旋翼风场的干扰,从而实现无人机机载方式的成行成穴播种。一分多路分流装置是提高脉冲射流式水稻播种机作业效率的重要部件。针对播种装置作业时的播种均匀性问题,围绕脉冲射流式播种物料的液固两相流(液态物料 + 芽种),以粤农丝苗稻种为对象,建立了一分四路分流装置的 CFD - DEM 耦合仿真模型;为了优选出适合脉冲射流式水稻播种液固两相流的分流方案,以分流装置类型(直分式轴端型、直分式中间型及锥分式分流)、入流出流轴线夹角作为因素,运用层次分析法构建了各出口流速、流量、出种均匀性变异系数及总压损失构成的分流均匀性综合评价指标,进行了两因素三水平正交仿真试验,试验结果表明,锥分式分流装置入流出流轴线夹角 180°时,其分流均匀性综合评价指标为 19.71%,表现出较优的分流均匀性;为了进一步优选一分四路分流装置的几何参数,探究了缩径段长度(L_r)、分流板与分流装置入口距离(L_i)以及分流板长度(L_b)因素间交互作用对分流装置整体性能的影响,设计了三因素三水平正交仿真试验,响应面分析表明L_b影响最显著($L_b > L_r > L_i$),优选出的参数组合为L_i = 5 mm、L_b = 25 mm、L_r = 55 mm(出口内径 11.5 mm,出口中心距 30 mm),分流均匀性综合评价指标为 5.47%;制作了样机进行田间验证,试验结果表明,基于一分四路分流装置的脉冲射流式无人机播种作业,整机播种作业的总排种量稳定性变异系数在 0.5% ~0.7%间,种穴间的播种均匀性变异系数均低于 40%,种行间播种均匀性变异系数均低于 28%,田间验证试验的航线间总排量稳定性变异系数在 0.27% 以内,航线间总播种量均匀性变异系数为 3.86%,符合 GB/T 25418—2022 标准,验证了装置在田间作业时的可行性。

关键词:水稻;无人机;脉冲射流式播种;分流装置;CFD - DEM 耦合

中图分类号:S251　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)03-0057-10　　**OSID**:

Design and Testing of One-point-four-way Diversion Device for Pulse-jet Rice Seeding Drone

LIAO Yilong[1,2]　YANG Deshuai[1,3]　LIN Jianqin[1,3]　JIANG Rui[1,4]　ZHOU Zhiyan[1,5]

(1. *College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou* 510642, *China*
2. *Guangdong Provincial Key Laboratory of Agricultural Artificial Intelligence, Guangzhou* 510642, *China*
3. *Guangdong Engineering Research Center for Agricultural Aviation Application, Guangzhou* 510642, *China*
4. *Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, South China Agricultural University, Ministry of Education, Guangzhou* 510642, *China*
5. *Guangdong Laboratory for Lingnan Modern Agriculture, Guangzhou* 510642, *China*)

Abstract: The pulse-jet rice seeding method achieves rows and holes seeding in an unmanned aircraft airborne manner by pressurising the rice shoots under the wrapping of a jet liquid column, which enhances the seed ejection velocity to reduce the interference of the external rotor wind field. The one-point-multiplex diverter device is an important component to improve the operational efficiency of pulse-jet rice planter. Regarding the issue of seeding uniformity during the operation of seeding devices, focusing

收稿日期:2025 - 10 - 12　修回日期:2025 - 11 - 13

基金项目:井冈山农高区省级科技专项"揭榜挂帅"项目(20222 - 051252 - 02)、广州市重点研发计划项目(202206010149)和特定高校学科建设专项(2023B10564002)

作者简介:廖一隆(1999—),男,硕士生,主要从事农业航空应用技术研究,E-mail:liaoyilong122512@163.com

通信作者:周志艳(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事农业航空应用技术研究,E-mail:zyzhou@scau.edu.cn

on the liquid-solid two-phase flow of pulse-jet seeding materials (liquid material with germ seeds), using Yuenongsimiao rice seeds as the subject. A CFD - DEM coupled simulation model of a one-in-four branch device was established; in order to select the optimal branching scheme suitable for the liquid-solid two-phase flow of pulsed jet rice seeding, based on the type of branching device (straight-split axial end-type, straight-split intermediate-type, and conical-split diversion), and the angle of the inlet and outlet axes were used as factors, and the hierarchical analysis method was employed to construct a diversion scheme. As a factor, the comprehensive evaluation indexes of diversion uniformity for each outlet flow rate, flow rate, coefficient of variation of outflow uniformity and total pressure loss were constructed by using hierarchical analysis method, and two-factor and three-level orthogonal simulation tests were carried out, and the test results showed that, when the angle of inlet and outlet axial clamping angle of the cone-type diversion device was 180°, the comprehensive evaluation indexes of its diversion uniformity was 19.71%, which showed a better diversion uniformity. In order to further optimize the geometrical parameters of the one-part-four-way diverter device, the effects of the interaction between the length of the reducing section (L_r), the distance between the manifold and the inlet of the shunt device (L_i) and the length of the manifold (L_b) on the overall performance of the diverter device were explored, and a three-factor, three-level orthogonal simulation experiment was designed. The preferred parameter combinations were L_i = 5 mm, L_b = 25 mm, L_r = 55 mm (outlet diameter 11.5 mm, outlet centre distance 30 mm), and the comprehensive evaluation index of diversion uniformity was 5.47%; a prototype machine was made for field verification, and the test results showed that the total seed displacement of the whole machine sowing operation of the pulsed jet unmanned drone sowing operation based on a one-point-four-way diversion device was within 0.5% of the stability coefficient of variation. The coefficient of variation of stability was between 0.5% and 0.7%, the coefficient of variation of sowing uniformity between seed holes was lower than 40%, and the coefficient of variation of sowing uniformity between seed rows was lower than 28%. The coefficient of variation of stability of the total discharge between routes of the field validation test was lower than 0.27%, and the coefficient of variation of the total sowing uniformity between routes was 3.86%, which was in line with the standard of GB/T 25418—2022, and it was in accordance with the standard of GB/T 25418—2022, and the device's performance in the field operation was verified.

Key words: rice; UAV; pulse-jet seeding; diverter system; CFD - DEM coupling

0 引言

目前水稻播种根据播种方式不同可分为撒播、条播和穴播3种方式[1],撒播种子落地位置无序,不便于田间管理且产量不稳定,无人飞机条播作业过程中存在飞行安全性较低和丸粒化包衣稻种播前处理工艺复杂等问题[2-3]。

脉冲射流式水稻播种方法通过将水稻芽种在射流液柱的裹挟下加压,提升种子的出射速度以减小外部旋翼风场的干扰,从而实现无人飞机机载方式的成行成穴播种[4-5],而一分多路分流装置是提高脉冲射流式水稻播种机作业效率的重要部件。

在气力式集中排种系统中,分流装置是分种的核心部件,将单一气流分配为多股气流,是实现“一器多行”功能的核心执行机构[1,6]。气力式集中排种系统目前广泛应用在大型播种机上,播种机最大作业幅宽可达21.3 m[7-8]。

KUMAR 等[9]从分流器形状入手,设计了平行盘式、封闭漏斗式和流线型3种分流器,对气流速度变化及分配效果进行研究,结果表明:流线型的效果明显优于另外两种结构。KRAVTSOV 等[10]通过计算机仿真研究了气动播种系统中的压力分布与损失情况,结果表明,采用凹半球形盖的分流器压力损耗最大,而带有凸锥形盖的分流器压力损耗最小。MUDARISOV 等[11]为验证气-固两相流的参数,建立了谷物播种机分配系统分配过程的数学模型,并进行了谷物播种机分配系统的数值模拟。上述学者从装置形式入手对分流器的分流性能进行研究,为后续气力式分流装置研究人员提供了技术参考。

戴亿政等[12]、张晓辉等[13]分别以气力式水稻直播机和小麦播种机为对象,对分种器进行仿真分析,提高直播机分种的均匀性和稳定性。秦伟等[14]以水稻精量穴直播机的多分支管路为对象,采用单因素试验及 Fluent 仿真模拟对气吸式播种机气力系统多分支汇流管路的内流体流动及管路总体压力损失进行研究,明确了集管压力变化是影响各入口支管气流分配一致性的主要原因,采用量纲分析法建立了多分支汇流管路总体压力损失的预测经验公

式，研究结果可为气吸式播种机气力系统的管路设计与优化提供参考。曹秀英等[15]对油菜集排器的分流装置进行仿真分析，为排种分流装置提供了设计参考。

综上所述，现有关于两相流分流装置的研究多集中于气力式播种机与施肥机中的气-固两相流，普遍依赖气体这类柔性介质作为载体。然而，气体固有的易压缩性与易扰动性，导致分流过程中存在能量损失大、系统能耗高、出种高度受限等问题，难以适用于无人机播种作业。因此，研制一种适用于无人机水稻播种的新型分流装置，对提升脉冲射流式水稻播种无人机的作业效率具有重要意义。

为此本文拟设计一种适用于多行同步作业的脉冲射流式水稻播种一分多路分流装置。建立脉冲射流式播种物料的液固两相流仿真模型；系统对比不同液固两相流一分多路分流方法的均匀性综合指标，优选出适用于脉冲射流水稻播种工况的分流方案；对分流装置的关键几何参数进行仿真分析与多参数优化，确定可实现最优分流性能的结构组合；开展验证试验，分别在室外泥槽与实际田间环境下对分流装置的作业性能进行试验验证。

1　仿真建模

为节约时间与经济成本，采用 CFD－DEM 耦合仿真对分流装置分流过程进行液固仿真模拟，具体是 Fluent 和 EDEM 耦合进行仿真。

Fluent 与 EDEM 耦合仿真是通过两者之间的耦合程序，在进行仿真运算过程中，将 Fluent 计算出的流场参数与 EDEM 计算出的颗粒受力、位移等参数进行数据传递，并且交互计算，得到流场和颗粒之间的相互影响[16]。针对混合相中的颗粒相部分进行求解时，可以采取两种不同的处理方法：欧拉-欧拉方法（Eulerian－Eulerian methods）和欧拉-拉格朗日方法（Eulerian－Lagrangian methods）[17]，本文采用欧拉-拉格朗日方法进行仿真。

1.1　流体建模

控制所有流体流动的基本定律包括质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律，基于这些定律，可以推导出描述流体运动的 3 个基本控制方程：连续性方程、动量方程（Navier－Stokes 方程）和能量方程。

在流体运动的基本控制方程框架下，对于不可压缩流体的定常流动，入口速度、出口速度、入口压力与出口压力这 4 个参数中，若已知其中任意两个，原则上可通过联立连续性方程与伯努利方程求解其余两个参数。通常，若出口与大气环境直接相连，可将其静压设为大气压，即表压为零。入口速度一般可通过测量压力泵的出口速度近似确定。此外，流体的密度和黏度作为重要的物性参数，也需通过试验测量准确获取。

经实际测量得 Fluent 主要仿真参数为：密度为 1 027.8 kg/m^3、黏度为 1.504 5 kg/（m·s）、入口流速为 1.78 m/s。

1.2　离散元建模

水稻种子模型是影响仿真试验结果的重要因素，稻种模型的精度越高仿真结果越精准，但同时也带来巨大的计算量，致使仿真时间增加。基于此，本文采用 17 个小球颗粒填充成水稻种子（图 1），模型与测量的水稻三轴尺寸基本吻合，同时计算时间也较短。

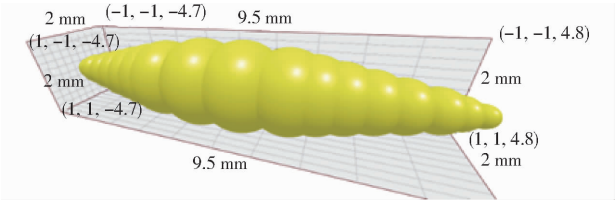


图 1　EDEM 稻种模型

Fig. 1　EDEM rice species model

离散元方法将固相视作离散相并在颗粒尺度上对其进行处理，即在拉格朗日框架下将每个颗粒视作质点并利用牛顿第二定律来描述其运动[18]。

接触参数与物性参数是 EDEM 软件中进行分析的基础参数，查阅相关文献后根据对应测量方法确定具体数值，如表 1、2 所示。

表 1　EDEM 接触参数

Tab. 1　EDEM contact parameters

接触参数	静摩擦因数	动摩擦因数	碰撞恢复系数
稻种-稻种	0.5	0.01	0.6
稻种-壁面	0.3	0.01	0.6

表 2　EDEM 材料基本参数

Tab. 2　Basic parameters of EDEM materials

基本参数	水稻种子	3D 打印材料
密度/（kg·m^{-3}）	1 117	1 130
泊松比	0.3	0.41
剪切模量/Pa	1.1×10^7	2.4×10^7

1.3　仿真设置

脉冲射流式水稻播种机在实际作业时脉冲频率为 10 Hz，因此选取总体仿真时长为一个脉冲周期，即 0.1 s。EDEM 软件对瑞利时间步长的要求在 5% ~ 30% 之间[19]，本文瑞利时间步长选择 5×10^{-6} s，占固定时间步长的 15.931 5%，符合上述要求，Fluent－EDEM 耦合仿真要求 Fluent 时间步长为 EDEM 时间

步长的 10 ~ 100 倍,本文选择 10 倍,故 Fluent 时间步长为 5×10^{-5} s。

2 分流方法

在现代化生产过程中,管路系统是传递流体介质的有效载体,一分多路分流装置是实现多个负载协同作业的重要元件[20-21],其在输送流体介质时对复杂工况的适应性、对流体介质分配的高效性和维持设备运转的稳定性等优点使其受到了能源环境工程、机械工程、农业工程等领域学者的广泛关注和研究[22-23]。因此对脉冲射流式水稻播种一分多路分流系统的分流方法进行研究。

2.1 分流装置设计

目前,在气吸式水稻直播机中常采用多分支管路作为分流装置,根据气吸式水稻直播机的相关研究,多分支管路可以分为分岔型、轴端型和中间型 3 种结构形式[24],但由于脉冲射流式水稻播种装置采用破胸露白的稻种进行播种作业,若采用分岔型多分支管路,其多次分配流体的特性不仅会增加结构复杂性,还会显著提高堵种风险,同时加大堵种后的清理难度。因此,在脉冲射流式水稻播种装置的一分多路分流装置设计中,不考虑采用分岔型排布方案。

基于以上分析,脉冲射流式水稻播种装置的一分四路分流装置主要采用以下 3 种分流方案:直分式轴端方案、直分式中间方案以及锥分式方案。

根据脉冲射流式水稻播种压力组件所选用的商用压力泵出口内径,确定分流装置入口内径 D_i 为 52 mm;根据水稻种子的平均长径,确定分流装置出口内径 D_o 为 10 mm;将分流装置出口中心距 L_c、缩径段长度 L_r 固定为 50 mm,得到如图 2 所示的 3 种分流装置。

2.2 分流均匀性综合评价指标

选取分流装置各出口出种均匀性变异系数(A)、分流装置总压损失(B)、各出种口流速均匀性变异系数(C)以及分流装置各出口流量均匀性变异系数(D)4 个指标,构建综合评价指标体系。基于层次分析法对上述 4 个指标进行评分,评分表如表 3 所示,进一步可得到判断矩阵

表 3 各指标评分表

Tab. 3 Scoring for indicators

	A	B	C	D
A	1.00	2.00	3.00	4.00
B	0.50	1.00	2.00	3.00
C	0.33	0.50	1.00	2.00
D	0.25	0.33	0.50	1.00

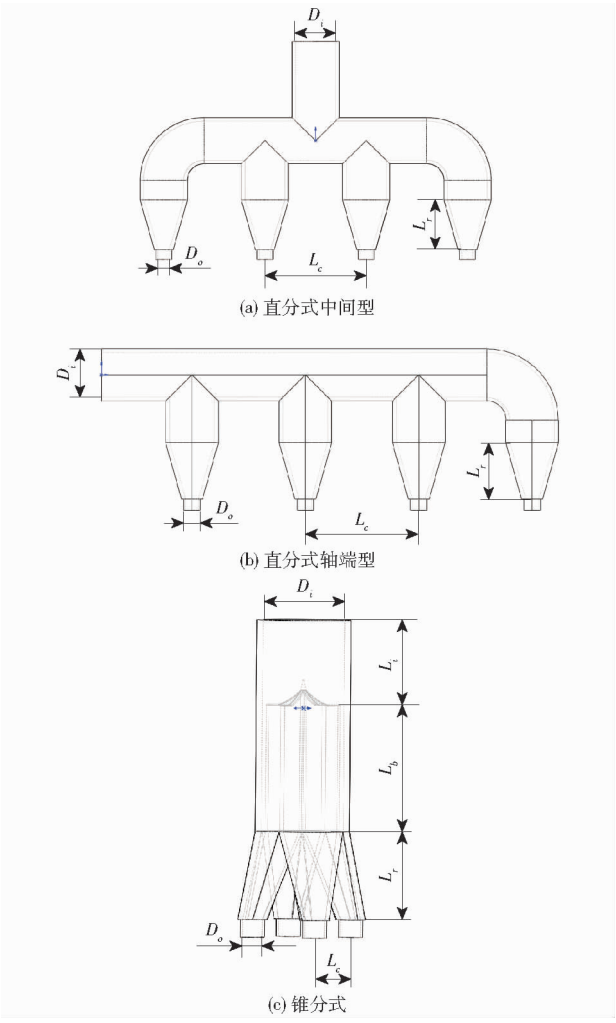


图 2 分流装置结构示意图

Fig. 2 Schematics of diversion device structure

$$\boldsymbol{P}=\begin{bmatrix}1 & 2 & 3 & 4\\ 0.5 & 1 & 2 & 3\\ 0.33 & 0.5 & 1 & 2\\ 0.25 & 0.33 & 0.5 & 1\end{bmatrix} \tag{1}$$

根据层次分析法计算出指标 A、B、C、D 的权重分别为 0.465 8、0.277 1、0.161 1、0.096。

由于指标 B 的单位与指标 A、C、D 不一致,因此需对指标 B 进行标准化转换,其转换公式为

$$z=\frac{\Delta P_i-(\Delta P_{\min}-10\,000)}{\Delta P_{\max}}\times 100\% \tag{2}$$

式中 z——总压损失标准化后数值

ΔP_i——第 i 种方案的压力损失值

$\Delta P_{\max}$、$\Delta P_{\min}$——所有方案的压力损失最大值、最小值

经计算得一致性比率 $C_R=0.01<0.1$,满足一致性检验要求。综上可构建均匀性综合评价指标 Y 公式

$$Y=0.465\,8A+0.277\,1B+0.161\,1C+0.096D \tag{3}$$

2.3　分流方法对比试验

2.3.1　试验设计

选取入流出流轴线夹角 θ 及分流装置类型为试验因素，以均匀性综合评价指标 Y 作为指标，开展各试验因素对分流装置整体性能影响的正交试验，试验各因素水平如表 4 所示，试验采用耦合仿真进行，重复 3 次取试验结果平均值。

表 4　分流方法对比试验因素水平

Tab. 4　Factors and levels for comparison test of diversion methods

水平	分流装置类型	入流出流轴线夹角 θ/(°)
1	直分式轴端型	90
2	直分式中间型	135
3	锥分式	180

2.3.2　试验结果与分析

分流装置模型采用软件 Solidworks 2020 建立，试验结果如表 5 所示。X_1、X_2为分流装置类型、入流出流轴线夹角的水平值。

根据试验结果：均匀性综合评价指标 Y 随分流装置类型变化呈现先增后减，最终到达最小值的变化趋势，对于直分式的两种方案，其研究结果与现有水平多分支管的研究结果一致，锥分式方案分流次数较少、整体行程较短，因此锥分式方案的试验指标比直分式方案指标小。均匀性综合评价指标 Y 随入流出流轴线夹角增加呈现单调递减的变化趋势，随着入流出流轴线夹角的增加混合悬浮液在分流装置内与管壁碰撞的概率越来越小，当入流出流轴线夹角达到 180°时，混合悬浮液不与管壁发生碰撞，因此总压损失和均匀性指标都较好。

表 5　分流方法对比正交试验结果

Tab. 5　Results of orthogonal tests comparing diversion methods

试验号	因素			Y/%
	X_1	X_2	空列	
1	1	1	1	41.37
2	1	2	2	31.89
3	1	3	3	22.38
4	2	1	2	45.10
5	2	2	3	38.39
6	2	3	1	28.43
7	3	1	3	25.99
8	3	2	1	25.06
9	3	3	2	19.71

综上所述：锥分式与入流出流轴线夹角为 180° 的分流方案均匀性综合评价指标最好，因此确定分流方案为锥分式、入流出流轴线夹角 180° 的分流方法进行后续研究。

3　装置参数仿真优化

3.1　通过性单因素仿真试验

3.1.1　试验设计

水稻播种机分流装置几何参数对颗粒通过性存在很大影响，拟对分流装置的几何参数对颗粒通过性的影响进行探究。所设计的分流装置结构示意图如图 3 所示。

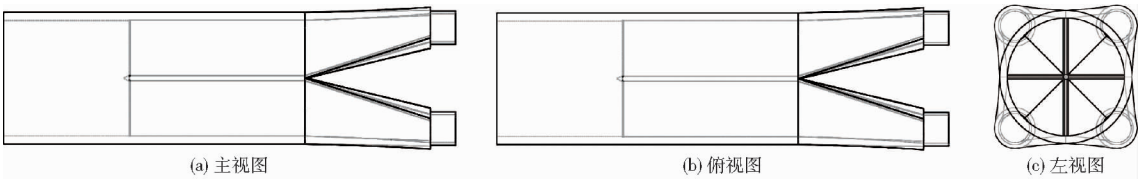


图 3　分流装置三视图

Fig. 3　Three views of diversion device

影响颗粒通过性的主要参数有分流装置出口内径 D_o、分流出口中心距 L_c，因素水平如表 6 所示。

表 6　通过性单因素试验因素水平

Tab. 6　Factors and levels for pass-through one-factor test　　mm

水平	D_o	L_c
1	9.5	30
2	10.0	40
3	10.5	50
4	11.0	60
5	11.5	70

因此，将上述两参数作为试验因素，根据前文提到的层次分析法以分流装置各出种口出种均匀性变异系数(A)、分流装置各出口流量均匀性变异系数(D)、分流装置堵种率(E)3 个指标构建对分流装置通过性的综合评价指标 Z 作为试验指标，指标 Z 表达式为

$$Z = 0.444A + 0.112D + 0.444E \tag{4}$$

3.1.2　试验结果与分析

3.1.2.1　出口内径D_o

由图 4 可知通过性综合评价指标 Z 随出口内径增大呈现递减趋势，在 11.5 mm 达到最小值，为较优水平。

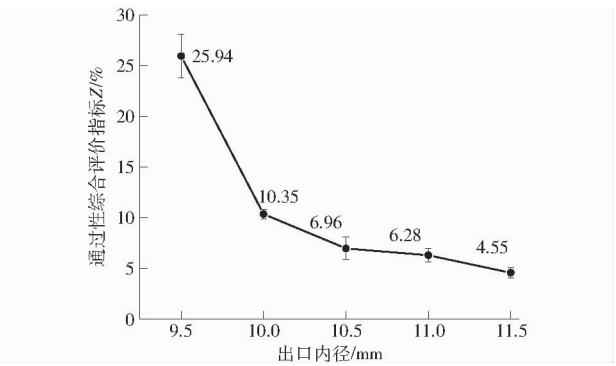


图 4 通过性综合评价指标 Z 随出口内径变化曲线

Fig. 4 Variation of adoption composite evaluation Z indicators with export calibre

3.1.2.2 分流出口中心距L_c

由图 5 可知随着出口中心距的增加性能综合评价指标 Z 呈现递增的趋势,在 30 mm 时为最小值,为较优水平。

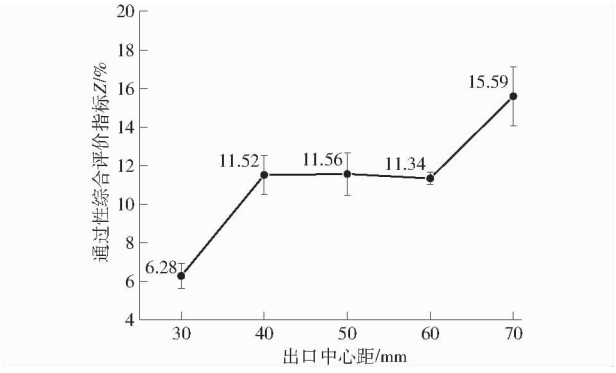


图 5 通过性综合评价指标 Z 随出口中心距变化曲线

Fig. 5 Variation of integrated evaluation Z indicator for passability with distance from centre of exit

当出口内径为 11.5 mm,分流装置出口中心距为 30 mm 时,分流装置的通过性达到最优,作为后续对均匀性的研究中相应参数取值。

3.2 均匀性单因素仿真试验

3.2.1 试验设计

根据流体力学理论,流道的长径比(即分流装置长度与出口直径之比)越大,流体在流道中停留时间越长,沿程阻力做功时间越长,分流装置整体总压损失越大,分流装置的分流均匀性也就越差,所以分流装置总体长度应该尽可能短,影响分流装置长度的参数为分流板与分流装置入口距离L_i、分流板长度L_b以及分流装置缩颈段长度L_r,以均匀性综合评价指标 Y 作为指标,开展各试验因素对分流装置整体性能影响的单因素试验。单因素试验方案如表 7 所示,试验采用耦合仿真进行,试验重复 3 次结果取平均值。

3.2.2 试验结果与分析

3.2.2.1 分流装置入口距离L_i

由图 6 可知分流均匀性综合评价指标 Y 随入口距离增加呈递增趋势,在 10 mm 时,分流装置分流均匀性较优。

表 7 均匀性单因素试验因素水平

Tab. 7 Factors and levels for one-way test of homogeneity mm

水平	L_i	L_b	L_r
1	10	20	30
2	20	30	40
3	30	40	50
4	40	50	60
5	50	60	70

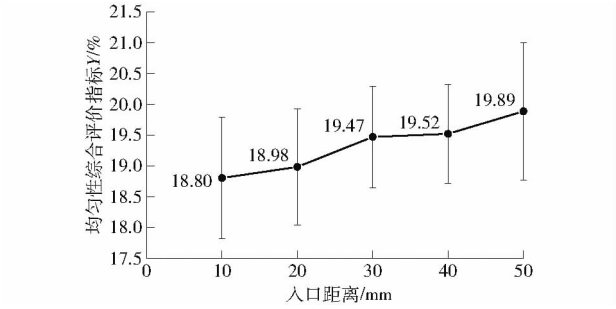


图 6 分流均匀性综合评价指标 Y 随入口距离变化图

Fig. 6 Variation of comprehensive evaluation Y index of diversion uniformity with entrance distance

3.2.2.2 分流板长度L_b

由图 7 可知,分流均匀性综合评价指标 Y 随分流板长度增加呈递增趋势,分流板长度在 10 mm 时,分流装置分流均匀性较优。

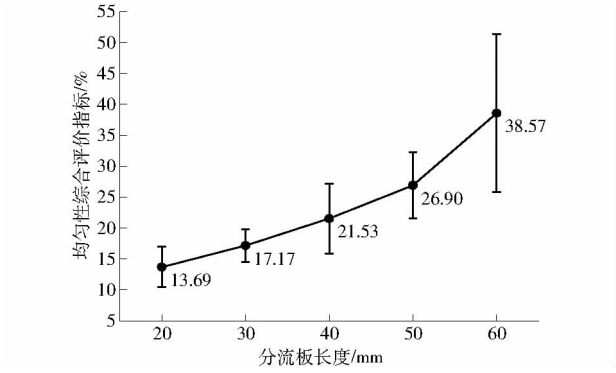


图 7 分流均匀性综合评价指标 Y 随分流板长度变化曲线

Fig. 7 Variation of comprehensive evaluation Y index of diversion uniformity with length of diversion plate

3.2.2.3 分流装置缩颈段长度L_r

由图 8 可知,均匀性综合评价指标 Y 随缩径长度增加呈现先增后减的趋势,在 50 mm 时达到最小值,为较优水平。

3.3 正交仿真试验

3.3.1 试验设计

分流装置起到排种和分种的作用,所以首先需要具有良好的通过性,因此将分流装置出口内径和

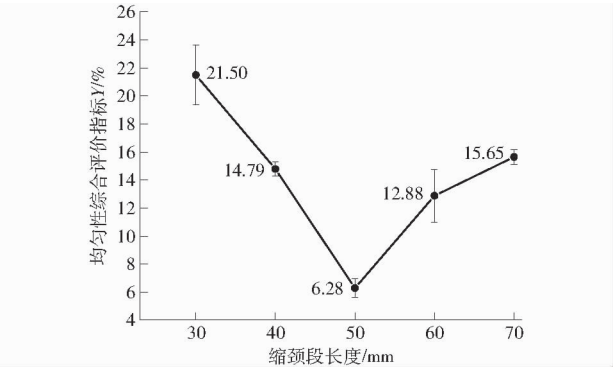


图 8　分流均匀性综合评价指标 Y 随缩颈段长度变化曲线

Fig. 8　Variation of comprehensive evaluation Y index of diversion uniformity with length of necking section

分流出口中心距固定在通过性较好的水平下，即 11.5 mm 和 30 mm；对分流板与分流装置入口距离、分流板长度以及分流装置缩颈段长度 3 个因素进行正交试验。

选取分流板与分流装置入口距离、分流板长度以及分流装置缩颈段长度作为试验因素，以均匀性综合评价指标 Y 作为指标，开展各试验因素对分流装置整体性能影响的正交试验。

利用 Design-Expert 软件中的 Box－Behnken 模块进行正交试验设计及数据分析，试验因素编码如表 8 所示，试验采用耦合仿真试验重复 3 次，结果取平均值。

表 8　正交试验因素编码

Tab. 8　Coding for orthogonal tests factors

因素	编码		
	－1	0	1
分流板与分流装置入口距离 U/mm	5	10	15
分流板长度 V/mm	15	20	25
分流装置缩颈段长度 W/mm	45	50	55

3.3.2　试验结果与分析

正交试验设计与结果如表 9 所示。

根据仿真试验结果，利用 Design-Expert 13.0 软件进行方差分析，探究因素间的交互影响，结果显示：因素 U、W 以及 V、W 间的交互作用对装置分流均匀性具有极显著影响，因素 U、V 间的交互作用对装置分流均匀性具有显著影响。

表 9　正交试验设计与结果

Tab. 9　Orthogonal test design and results

序号	因素			Y/%
	U/mm	V/mm	W/mm	
1	10	20	50	7.45
2	5	25	50	7.67
3	15	20	45	14.63
4	15	20	55	9.29
5	10	25	45	9.72
6	10	15	55	12.61
7	10	20	50	8.36
8	10	20	50	6.54
9	15	25	50	8.61
10	5	20	45	7.71
11	5	20	55	13.05
12	10	25	55	5.52
13	10	20	50	6.97
14	10	20	50	7.39
15	5	15	50	13.89
16	15	15	50	6.99
17	10	15	45	5.70

以分流均匀性综合指标 Y 为目标函数，各因素为自变量，拟合出回归方程

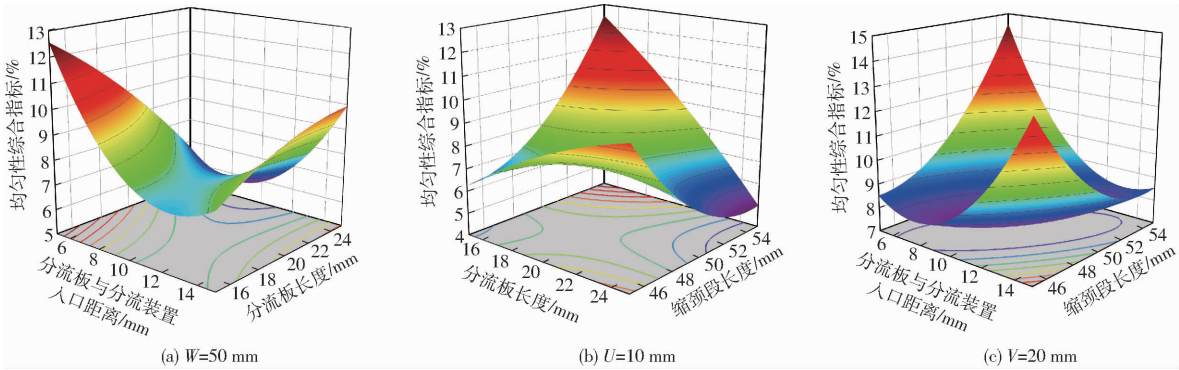
$$Y = 6.060\,4 + 1.809\,8X_1 + 5.246\,9X_2 - 2.493\,3X_3 + 0.078\,4X_1X_2 - 0.106\,8X_1X_3 - 0.111\,1X_2X_3 + 0.094\,6X_1^2 - 0.016\,7X_2^2 + 0.058\,5X_3^2 \quad (5)$$

式中　X_1、X_2、X_3——因素编码值

回归方程决定系数 $R^2 = 0.900\,2 > 0.9$，说明回归方程拟合度较好。

利用 Design-Expert 13.0 软件进行响应面分析，得到如图 9 所示的响应曲面。

经方差分析可得出分流装置的分流板与分流装置入口距离、分流板长度以及分流装置缩颈段长度三因素间的交互作用都对均匀性综合评价指标具有显著的影响。



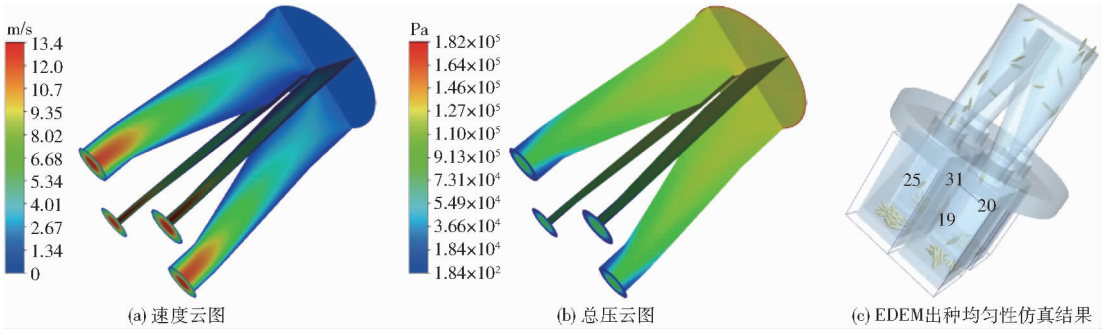
(a) W=50 mm　　(b) U=10 mm　　(c) V=20 mm

图 9　各因素对均匀性综合指标影响的响应曲面

Fig. 9　Response surfaces of influence of various factors on comprehensive evaluation index Y for uniformity

因分流装置的均匀性综合评价指标和分流装置性能成反比,即综合评价指标值越大分流装置分流性能越差,所以选择几何参数时应尽量降低分流性能综合指标值,基于此利用 Design-Expert 13.0 软件进行响应面优化,得出结果:当分流板与分流装置入口距离 L_i = 5.55 mm,分流板长度 L_b = 24.55 mm,缩径段长度 L_r = 54.34 mm 时,均匀性综合评价指标 Y 达到最小值,为 5.28%。

为验证优化结果,取分流板与分流装置入口距离 L_i = 5 mm,分流板长度 L_b = 25 mm,缩颈段长度 L_r = 55 mm,出口内径 D_o = 11.5 mm,出口中心距 L_c = 30 mm,进行建模以及仿真验证,速度、总压云图以及 EDEM 仿真结果如图 10,仿真结果显示该分流装置的均匀性综合评价指标 Y 为 5.47%,与预测结果基本符合,说明响应面分析与优化结果正确,因此采用上述优选出的分流装置进行下一步研究。



(a) 速度云图 (b) 总压云图 (c) EDEM出种均匀性仿真结果

图 10 最优几何参数下分流装置仿真结果

Fig. 10 Simulation results of diversion device with optimum geometrical parameters

4 验证试验

4.1 室外泥槽试验

4.1.1 试验设计

为探究设计的分流装置实际作业性能,在华南农业大学启林北风洞实验室外地块进行室外泥槽测试(图 11),利用大疆 T60 农用无人机作为飞行平台,采取 1 050 g 硅藻土 + 450 g 膨润土 + 9 L 水 + 270 g 稻种的配方进行混合悬浮物料的制备,设定飞行高度 2.3 m,飞行速度 2 m/s,半开式叶轮泵工作电压 22 V,电磁铁频率 10 Hz 进行室外泥槽测试。



图 11 室外泥槽测试现场图

Fig. 11 Outdoor mud flume test site plan

4.1.2 试验指标及数据采集方法

以同时落于 4 条种行内的种子的行间播种均匀性变异系数为指标,分析一分四路分流装置的作业性能。

采用 PVC 管制成 100 mm × 20 mm 的采样框进行采样,采样方法示意图如图 12 所示,统计同时落于 4 条种行中的稻种数量,计算种行间的播种均匀性变异系数。

同时落于 4 条种行内的种子播种均匀性变异系数计算公式为

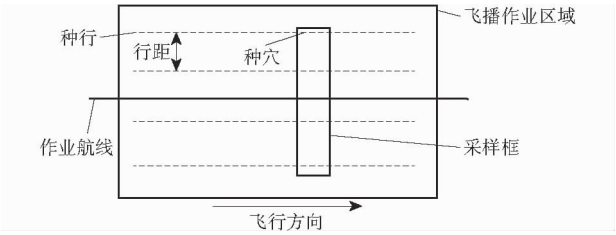


图 12 数据采集方法示意图

Fig. 12 Schematic of data acquisition method

$$C_w = \frac{S_w}{\overline{w}} \times 100\% \tag{6}$$

其中

$$S_w = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(w_i - \overline{w})} \tag{7}$$

$$\overline{w} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} w_i \tag{8}$$

式中 S_w——分流装置出口稻种数的标准差,个

n——分流出口数量,个

i——各分流出口对应序号,$i = 1, 2, \cdots, n$

$\overline{w}$——各分流出种个数的均值,个

w_i——各分流出口对应的出种数量,个

C_w——同时间内落于 4 条种行内的种子播种均匀性变异系数

4.1.3 试验结果与分析

按照试验采样方法连续采样 5 次,分别计算播种均匀性变异系数,结果如图 13 所示。

由图 13 可知:分流装置播种均匀性变异系数均值为 30.18%,满足 GB/T 25418—2022 中对水稻直播无人机播种均匀性变异系数不大于 45% 的要求。

播种均匀性变异系数较仿真有所增大,这是因

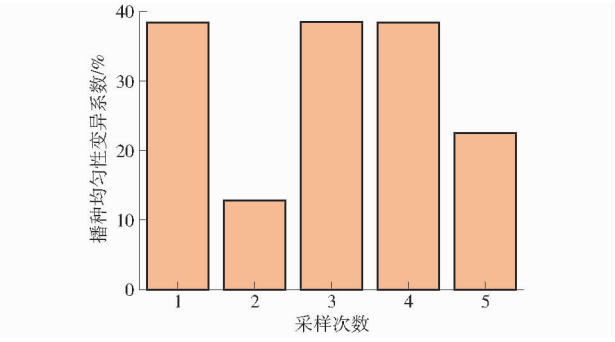


图 13　各次采样播种均匀性变异系数

Fig. 13　Coefficient of variation of sowing uniformity across samples

为下方脉冲发生装置和飞行作业平台会在作业过程中产生振动，振动导致均匀性变异系数有所上升，但总体均匀性变异系数都不超过 45%，说明装置满足飞机播种技术要求。4 条种行存在种行 1 和种行 4 中稻种数小于种行 2 和种行 3 的情况，这是因为种行 1 和种行 4 的分流出口处于种行 1 和种行 3 上方，由于重力作用稻种有向下运动的趋势，装置整体的振动加剧了这一趋势。

可知，搭载有一分四路分流装置的脉冲射流式水稻播种系统满足无人机水稻直播的作业要求，因此进行田间验证性试验，验证搭载有一分四路分流装置的系统装置田间作业性能。

4.2　田间试验

4.2.1　试验设计

为了探究脉冲射流式水稻播种装置的田间作业效果，于 2025 年 2 月 23 日在湛江市雷州市英利镇保禄仔村（20°33′40.453 200″N，110°05′1.964 400″E）开展田间播种试验。播种当天气温为 16 ~ 20℃，东风 3 级，环境相对湿度为 82%。利用风速仪测得播种作业时间段的环境平均风速为 4.3 m/s。

稻种为粤农丝苗，经浸泡至破休露白之后备用。根据农艺学家建议，用种量为 45 kg/hm^2，田间试验所使用混合悬浮物料按照膨润土、硅藻土、水质量比为 7∶3∶50 的配方配成。

脉冲射流式水稻播种装置利用大疆 T60 农用无人机作为飞行平台，飞行高度设置为 2.3 m，飞行速度设置为 2 m/s，航线间距为 2 m，压力泵工作电压 22 V，脉冲射流组件频率 10 Hz，采用上文优选出的分流装置进行田间试验，数据采集方法与室外泥槽试验相同，在飞机每条航线上取样 10 次。

4.2.2　试验结果与分析

3 条航线的播种均匀性变异系数计算结果如图 14 所示。

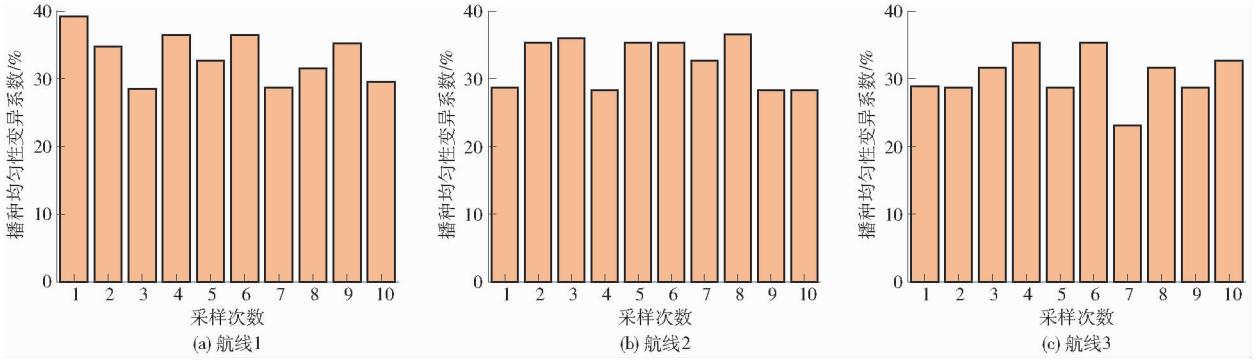


图 14　田间试验各航线的播种均匀性变异系数

Fig. 14　Coefficient of variation of sowing uniformity in each route of field trial

由图 14 可知：航线 1 分流装置播种均匀性变异系数均值为 33.35%；航线 2 为 32.47%；航线 3 为 30.45%，3 条航线的播种均匀性变异系数均满足 GB/T 25418—2022 中对水稻直播无人飞机播种均匀性变异系数不大于 45% 的要求，说明所设计的脉冲射流式水稻播种一分多路分流装置可以用于田间无人机飞播。

3 条航线的播种均匀性变异系数越来越小，出现这个现象的原因在于：随着播种作业的进行，料箱内物料越来越少，无人机所需提供的升力也越来越小，进而使无人机下洗风场强度变小，对射流液柱的影响也就越小。

5　结论

（1）本研究建立了脉冲射流式播种物料的液固两相流仿真模型，基于多相流动力学理论与离散元耦合机制，明确了边界条件与关键参数，为耦合仿真奠定了基础。

（2）基于正交试验设计，以分流装置类型和入流出流轴线夹角为因素开展多水平仿真试验。结果表明，锥分式分流装置在入流出流夹角为 180°时分流均匀性最佳，均匀性综合评价指标 Y 为 19.71%，因此确定该方案为脉冲射流式水稻一分四路播种的实施方案。

（3）针对锥分式一分四路分流装置的几何参数

开展仿真优化,以均匀性综合评价指标 Y 为依据,确定了关键参数组合为分流板与分流装置入口距离 5 mm、分流板长度 25 mm、缩颈段长度 55 mm、出口内径 11.5 mm、出口中心距 30 mm,该配置为后续集成与试验提供了设计基础。

(4)通过室外泥槽与田间验证试验,将优化设计的分流装置集成于大疆 T60 农用无人机进行性能评估。试验表明,该装置不仅满足脉冲射流式水稻播种的农艺要求,也符合 GB/T 25418—2022 中对水稻直播无人飞机的相关标准,具有良好的实用性与可靠性。

参 考 文 献

[1] 黄小毛, 刘宇, 朱耀宗, 等. 稻油兼用型成条飞播装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023,54(9): 111 - 121.
HUANG Xiaomao, LIU Yu, ZHU Yaozong, et al. Design and testing of a row-flying seeding device for combined rice oil use [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 111 - 121. (in Chinese)

[2] WANG L, HUANG X, LI W, et al. Progress in agricultural unmanned aerial vehicles (UAVs) applied in China and prospects for Poland[J]. Agriculture, 2022, 12(3):397 - 439.

[3] 宋灿灿, 王国宾, 韩金钢, 等. 农用无人机播撒装置与技术研究综述[J]. 农业机械学报, 2025,56(1): 110 - 122.
SONG Cancan, WANG Guobin, HAN Jingang, et al. Review of research progress on agricultural UAV spreading devices and technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 110 - 122. (in Chinese)

[4] 周志艳, 杨得帅, 林键沁, 等. 一种脉冲射流式的播种方法及播种无人机: CN117957975A[P]. 2024 - 05 - 03.

[5] 周志艳, 杨得帅, 林键沁, 等. 一种脉冲射流式的排种装置及排种方法: CN117751732A[P]. 2024 - 03 - 26.

[6] 周中林, 胡洪基, 郭金岳, 等. 杂交稻制种机不育系精量穴播集中排种装置的设计与试验[J]. 中国农业大学学报, 2023,28(8): 245 - 258.
ZHOU Zhonglin, HU Hongji, GUO Jinyue, et al. Design and experiment of precise hole sowing centralized seeding device for male-sterile lines in hybrid rice seed production[J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(8): 245 - 258. (in Chinese)

[7] MALEKI M R, JAFARI J F, RAUFAT M H, et al. Evaluation of seed distribution uniformity of a multi-flight auger as a grain drill metering device[J]. Biosystems Engineering, 2006,94(4): 535 - 543.

[8] MANZONE M, PAOLO M, MARIO T, et al. Performance evaluation of a cyclone to clean the air exiting from pneumatic seed drills during maize sowing[J]. Crop Protection, 2015,76: 33 - 38.

[9] KUMAR V, DURAIRAJ C D. Influence of head geometry on the distributive performance of air-assisted seed drills[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2000,75(1): 81 - 95.

[10] KRAVTSOV A, KONOVALOV V, ZAITSEV V, et al. Results of seeder pneumatic system distributor and aero-product stream flow in the pipeline numerical studies[C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020: 12111.

[11] MUDARISOV S, BADRETDINOV I, RAKHIMOV Z, et al. Numerical simulation of two-phase "air-seed" flow in the distribution system of the grain seeder[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020,168: 105151.

[12] 戴亿政,罗锡文,张明华,等.气吹集排式水稻旱直播机关键部件设计与试验[J].农业工程学报,2020,36(10):1 - 8.
DAI Yizheng, LUO Xiwen, ZHANG Minghua, et al. Design and testing of key components of an air-blown aggregate-row dry direct-seeding rice machine [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(10): 1 - 8. (in Chinese)

[13] 张晓辉, 王永振, 仉利, 等. 小麦气力集排器排种分配系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018,49(3): 59 - 67.
ZHANG Xiaohui, WANG Yongzhen, ZHANG Li, et al. Design and testing of a wheat pneumatic seeder seed distribution system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 59 - 67. (in Chinese)

[14] 秦伟, 王在满, 王钰静, 等. 气吸式播种机多分支汇流管路气压损失分析与试验[J]. 农业工程学报, 2023,39(10): 1 - 14.
QIN Wei, WANG Zaiman, WANG Yujing, et al. Analysis and experiment on air pressure loss of multi-branch manifold in pneumatic seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(10): 1 - 14. (in Chinese)

[15] 曹秀英, 廖宜涛, 廖庆喜, 等. 油菜离心式精量集排器枝状阀式分流装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 77 - 84.
CAO Xiuying, LIAO Yitao, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of a branch-valve type manifold device for centrifugal precision collecting and discharging of rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 77 - 84. (in Chinese)

[16] 刘巨保, 王明, 王雪飞, 等. 颗粒群碰撞搜索及 CFD - DEM 耦合分域求解的推进算法研究[J]. 力学学报, 2021, 53(6): 1569 - 1585.
LIU Jubao, WANG Ming, WANG Xuefei, et al. Research on the particle cluster collision search and domain-decomposed solving algorithm for CFD - DEM coupling[J]. Acta Mechanica Sinica, 2021, 53(6): 1569 - 1585. (in Chinese)

[17] LI Z, WU J, QUAN Z, et al. Research on the impact of wheat seed collisions on the distribution performance of an air-assisted centralized distribution device based on CFD - DEM numerical simulation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024,225: 109241.

(下转第 86 页)

220: 413 – 427.
[12] 武锦龙,吴虹麒,李浩,等. 基于改进 DeepLabv3 + 的荞麦苗期无人机遥感图像分割识别方法研究[J]. 农业机械学报,2024,55(5):186 – 195.
WU Jinlong, WU Hongqi, LI Hao, et al. Research on buckwheat seedling stage image segmentation and recognition from UAV remote sensing based on improved DeepLabv3 + [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 186 – 195. (in Chinese)
[13] 李安琦,马丽,于合龙,等. 改进的 U – Net 算法在遥感图像典型农作物分类研究[J]. 红外与激光工程,2022,51(9): 428 – 434.
LI Anqi, MA Li, YU Helong, et al. Research on typical crop classification in remote sensing images based on improved U – Net algorithm[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(9): 428 – 434. (in Chinese)
[14] CHEW R, RINEER J, BEACH R, et al. Deep neural networks and transfer learning for food crop identification in UAV images[J]. Drones, 2020, 4(1): 7.
[15] 赵子宇,石刚. 引入自注意力 U – Net 的无人机遥感农作物分类模型[J]. 现代电子技术,2023,46(4):125 – 129.
ZHAO Ziyu, SHI Gang. A crop classification model for UAV remote sensing images based on self-attention U – Net[J]. Modern Electronic Technology, 2023, 46(4): 125 – 129. (in Chinese)
[16] 郭金,宋廷强,孙媛媛,等. 改进 DeepLabv3 + 的双注意力融合作物分类方法[J]. 计算机工程与应用,2024,60(8):110 – 120.
GUO Jin, SONG Tingqiang, SUN Yuanyuan, et al. Crop classification method based on dual attention fusion with improved DeepLabv3 + [J]. Computer Engineering and Applications, 2024, 60(8): 110 – 120. (in Chinese)
[17] CHEN L C, ZHU Y, PAPANDREOU G, et al. Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation[C]// Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV), 2018: 801 – 818.
[18] CHOLLET F. Xception: deep learning with depthwise separable convolutions[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition,2017: 1251 – 1258.
[19] QIN D, LEICHNER C, DELAKIS M, et al. MobileNetV4: universal models for the mobile ecosystem[C]// European Conference on Computer Vision. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024: 78 – 96.
[20] SUN H, WEN Y, FENG H, et al. Unsupervised bidirectional contrastive reconstruction and adaptive fine-grained channel attention networks for image dehazing[J]. Neural Networks, 2024, 176: 106314.
[21] YANG J, LIU S, WU J, et al. Pinwheel-shaped convolution and scale-based dynamic loss for infrared small target detection [C]// Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2025: 9202 – 9210.
[22] LIN T Y, GOYAL P, GIRSHICK R, et al. Focal loss for dense object detection[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2017: 2980 – 2988.
[23] LI X, SUN X, MENG Y, et al. Dice loss for data-imbalanced NLP tasks[J]. arXiv preprint arXiv:1911.02855, 2019.

(上接第 66 页)

[18] 丁力, 杨丽, 武德浩, 等. 基于 DEM – CFD 耦合的玉米气吸式排种器仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018,49(11): 48 – 57.
DING Li, YANG Li, WU Dehao, et al. Simulation and experiment of corn pneumatic suction seed metering device based on DEM – CFD coupling [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 48 – 57. (in Chinese)
[19] SUN J, CHEN H, WANG Z, et al. Study on plowing performance of EDEM low-resistance animal bionic device based on red soil[J]. Soil and Tillage Research, 2020,196: 104336.
[20] AMANOWICZ A, WOJTKOWIAK J. Thermal performance of multi-pipe earth-to-air heat exchangers considering the non-uniform distribution of air between parallel pipes[J]. Geothermics, 2020,88: 101896.
[21] ICHA A, LEMONS D S. A student's guide to dimensional analysis[J]. Pure and Applied Geophysics, 2018,175(6): 2403 – 2405.
[22] XING H, WANG Z, LUO X, et al. Design and experimental analysis of rice pneumatic seeder with adjustable seeding rate [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021,14(4): 113 – 122.
[23] 宋鹏飞, 杨利然. 单相多分支并联管路流动特性研究与设计[J]. 炼油技术与工程, 2020,50(3): 42 – 47.
SONG Pengfei, YANG Liran. Research and design on flow characteristics of single-phase multi-branch parallel pipelines [J]. Refining Technology and Engineering, 2020, 50(3): 42 – 47. (in Chinese)
[24] 展鹏程, 夏俊芳, 周华, 等. 气力式水稻旱直播机气力系统负压特性试验[J]. 华中农业大学学报, 2017,36(4): 95 – 101.
ZHAN Pengcheng, XIA Junfang, ZHOU Hua, et al. Experimental study on the negative pressure characteristics of the pneumatic system of pneumatic dry direct-seeded rice seeder[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2017, 36(4): 95 – 101. (in Chinese)