

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.011

油菜离心式精量集排器枝状阀式分流装置设计与试验*

曹秀英 廖宜涛 廖庆喜 李兆东 雷小龙
(华中农业大学工学院, 武汉 430070)

摘要: 为提高油菜离心式精量直播机排种器田间作业的适应性,特别针对机组作业时存在倾斜、颠簸等工况,设计了一种多阶分-合分流装置。以枝状阀式分流装置为研究对象,分析了影响种子分流效果的影响要素,运用离散元仿真软件 EDEM 对分流装置结构形式开展了正交旋转试验,建立了集排器各行排量一致性的四元二次回归模型;利用 3D 打印技术加工成型枝状阀式分流装置,并与 1 阶分流装置进行倾斜对比试验。结果表明:枝状阀式分流装置 1 阶分流单元分枝长度为 59.95 mm、2 阶分流单元上部长度为 66.11 mm、分流角度为 89.74°、管径为 7.12 mm 时,其排种性能最优;在 0°~25°倾角范围内,枝状阀式分流装置的各行排量一致性系数不大于 5.71%,优于 1 阶分流装置,且可适应中高速(9 km/h)播种作业,满足油菜种植农艺要求。

关键词: 油菜 集排器 分流装置 枝状阀 优化
中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)09-0077-08

Design and Experiment on Valve-branch Distributor of Centrifugal Precision Metering Device for Rapeseed

Cao Xiuying Liao Yitao Liao Qingxi Li Zhaodong Lei Xiaolong
(College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: A multi-level shunt-merge distributor was investigated for improving the adaptability of centrifugal precision metering device in the field, especially under some special conditions such as incline and jolt. Some factors those influenced the performance of valve-branch distributor were analyzed. After a quadratic orthogonal rotary regression simulation test by discrete element method software EDEM, a quaternionic quadratic regression model about apiece row consistency variability coefficient of seeding quantity was established. Meanwhile, the optimized distributor was manufactured by using 3D printer. Contrast experiment was conducted by using both direct distributor and branch-valve distributor under the inclined position. The results indicated that, when the branch length of first level shunt cell was 59.95 mm, the top length of second level shunt cell was 66.11 mm, the angle of shunt cell was 89.74°, the inner diameter of distributor was 7.12 mm, and the seeding performance of the centrifugal metering device for rapeseed was very well. Concerning the range of 0° to 25° inclination, apiece row consistency variability coefficient of the device was no more than 5.71%, superior to the direct distributor, and it was also applied to the medium and high-speed planting, and satisfied the agricultural requirements of rapeseed planting.

Key words: Rapeseed Metering device Distributor Valve-branch Optimization

收稿日期: 2014-12-01 修回日期: 2015-01-11
* 国家自然科学基金资助项目(51275197、51405180)、“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2013BAD08B02)、国家油菜产业技术体系专项资助项目(CARS-13)、中央高校基本科研业务费资助项目(2014PY033)和武汉市高新技术产业科技创新团队资助项目(2014070504020240)
作者简介: 曹秀英, 博士生, 主要从事现代农业装备设计与测控研究, E-mail: caoxy_hb@163.com
通讯作者: 廖庆喜, 教授, 博士生导师, 主要从事油菜机械化生产技术与装备研究, E-mail: liaoqx@mail.hzau.edu.cn

引言

排种器是播种机的核心部件,按照播种形式可分为单排式与集排式,集排器是指1个排种部件、1个种子箱或1个统一的输种系统同时进行3行或3行以上的多行播种装置^[1]。集排器可简化播种机总体结构,有利于实现集中装种及装种机械化,精简排种系统传动部件,实现宽幅、高效作业,应用前景广阔,已成为国内外排种技术的主要发展趋势。

集排技术按其实现方式可分为机械式与气力式,很多学者开展了集排器的相关研究,包括新结构、新原理以及影响排种性能关键影响因素的研究^[2-11],其中实现排种系统各行排量一致性是最终目标^[12-14]。气力集排器依靠气流对种子的主动作用,对种子机械损伤小,适用于不同几何形状种子,是目前集排器的主要发展方向。机械式集排器主要有离心式集排器与由窝眼轮式排种器衍生的滚筒式集排器^[15-18]。传统离心式集排器均为非精量条播,其排种稳定性与各行一致性难以保证,而滚筒式集排器主要应用于较大粒径种子,且较难以适应高速播种作业。

油菜离心式精量集排器主要依靠离心力、种群作用力等将种子携带至内锥筒上沿型孔处并被型孔囊入由导种管进入输种管道,种子仅受重力、离心力等作用,种子的机械损伤较小,且可实现精量播种^[19-20]。前期研究表明,改进型孔结构,增大型孔直径可有效解决型孔堵塞问题^[21]。增大型孔直径,集排器出种量相应增大。田间作业过程中,因地表不平整引起的排种器倾斜、颠簸等工况导致种子在排种各行分布较不均匀,引起田间植株在各行分布存在较大差异,最终影响作物产量。

本文在前期研究基础上,利用水力运输过程中管网分流的原理^[22-23],提出利用多阶分流再合并的原理解决播种机田间作业不平导致各行排量一致性问题,设计一种具有自适应补偿的枝状阀式分流装置,实现导种环节种子的多阶分流与合并。运用离散元仿真软件 EDEM 对枝状阀式分流装置进行正交旋转仿真试验,得到枝状阀式分流装置最优结构参数组合,并开展1阶分流装置与枝状阀式分流装置的对比试验。

1 集排器工作原理

油菜离心式精量集排器主要由种箱、锥筒盖、分流装置、排种盘和外锥筒等组成,如图1所示。工作时,种子在重力作用下由种箱进入排种盘,动力源驱动排种轴旋转,带动排种盘转动。排种盘在离心力、重力等综合作用下,盘内种子上升至最高点,种子群

在离心力作用下做匀速圆周运动,当种子运动至型孔附近时,外锥筒上部型孔囊入种子,经投种环节,被排出至分流装置。分流装置内的种子经过分一合的分流路径被均匀分配至各行输种管道内。

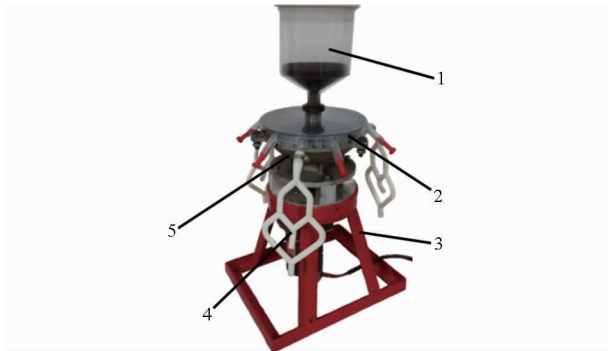


图1 集排器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of metering device

1. 种箱 2. 锥筒盖 3. 机架 4. 分流装置 5. 外锥筒

2 分流装置设计

2.1 分流装置工作原理

分流装置由多个分流单元组成,形成如图2所示的多阶分一合分流装置。

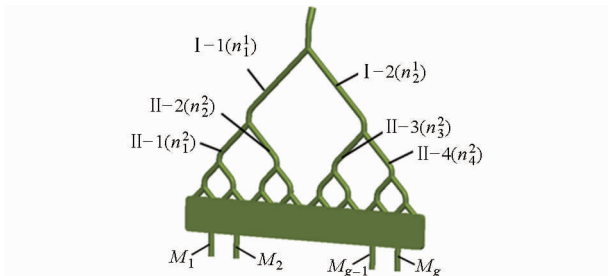


图2 多阶分一合分流装置示意图

Fig. 2 Diagram of multilevel distributor

工作时,型孔排出的种子经导种管进入分流装置第1阶分流单元I中,以一定比例在分流装置中被分配至2个分流管I-1、I-2;I-1、I-2内种子分别进入第2阶的各分流单元,种子被分配至4个分流管II-1、II-2、II-3、II-4中;以此类推,种子被持续分流,直至分流装置最底阶的各分流管,通过以各行排量一致性变异系数最小为目标函数进行最后一阶分流管的合并,以实现机具倾斜一定角度后,种子仍可均匀分配至各行,提高播种机作业性能。

建立排种系统各行排种量与最底阶各分流管内种量的关系模型 $F(M_m)$, 即

$$F(M_m) = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \vdots \\ M_m \\ \vdots \\ M_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1h} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2h} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ k_{m1} & k_{m2} & \cdots & k_{mh} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ k_{g1} & k_{g2} & \cdots & k_{gh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1^j \\ n_2^j \\ \vdots \\ n_i^j \\ \vdots \\ n_h^j \end{bmatrix} \quad (1)$$

目标函数为排种系统单个型孔下的各行排量一致性变异系数 $C_{\min}(M_m)$, 即

$$C_{\min}(M_m) = \frac{\sqrt{\sum_{m=1}^g (M_m - \bar{M})^2}}{\bar{M}} \quad (2)$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} k_{mh} = 0 \text{ 或 } k_{mh} = 1 \\ \sum_{m=1}^g k_{m1} = \sum_{m=1}^g k_{m2} = \cdots = \sum_{m=1}^g k_{mh} = 1 \\ n_i^j = f(u(\theta)) \quad (0 < u < 1) \\ \bar{M} = \frac{\sum_{m=1}^g M_m}{g} \\ \sum_{m=1}^g M_m = \sum_{i=1}^h n_i^j \end{cases} \quad (3)$$

式中 k_{mh} ——最底阶分流管 $j-2^0, j-2^1, \dots, j-2^j$ 的分流合并系数, 由于每个分流管仅进行 1 次合并, 其值取 0 或 1
 i ——对应第 j 阶分流管数量, 由于每个分流单元均为 1 分 2 结构, 取 $i = 2^j$
 $u(\theta)$ ——排种装置倾斜 θ 后, 各分流单元分配种子的比例
 n_i^j ——第 j 阶第 i 个分流管内种量, 与 $u(\theta)$ 相关
 g ——分流合并后的播种行数
 M_m ——最底阶各分流管经合并后每行的排种量

依据配套机组功率、幅宽与作物农艺要求确定 g , 各阶所有分流管出种量之和均等于总播种量, 即 g 行排种量之和。

2.2 枝状阀式分流装置设计

由上述分-合分流装置工作原理可知, 在倾斜条件下, 为保证排种的各行排量一致性, 对于 2 阶分流方式的分流装置(后统称为枝状阀式分流装置), 将第 2 阶分流单元 II 的不同侧分流管 II-2、II-3 合并得出种管 A, II-1、II-4 合并得出种管 B。集排器倾斜时, 倾斜侧的分流管种子流偏大, 另一侧偏小, 通过第 2 阶分流单元各分流管之间的有机合并, 即将出种量相对较多的分流管与出种量相对较少的分流管合并, 达到不同分流管种量的自适应补偿。

对于枝状阀式分流装置, 种子自集排器型孔排出后, 种子流状态接近于准液态, 准液态种子流在重力以及管壁的碰撞作用下, 经 1 阶分流单元、2 阶分流单元分流后再经合并的路径运动至出种口, 而种子在各分流单元的分配比例取决于种子在分流口处的速度矢量方向。理想的运动情况为: 种子经 1 阶分

流单元分流口流出后, 沿着 1 阶分流单元分枝长度 L_1 、2 阶分流单元上部长 L_2 运动, 在此过程中, 种子与分流管内壁不断发生碰撞, 由碰撞引起动能的衰减, 随着动能不断减小, 种子的速度矢量方向较接近于 z 方向, 则可看作种子仅在重力作用下(忽略空气阻力)运动; 且种子的碰撞具有随机性, 服从正态分布, 则种子在第 2 阶分流单元分流口处可实现较均匀的分流。由图 3, 1 阶分流单元分枝长度 L_1 、2 阶分流单元上部长 L_2 、分流单元分流角 α 影响种子到达第 2 阶分流单元分流口处的速度矢量, 管径 d 则会影响其动能的衰减程度。若种子到达第 2 阶分流单元分流口处的速度矢量接近于 x 方向, 以接近偏向 x 方向进入分流口, 将会导致较多的种子进入出种管 B, 从而引起分流的不均匀。故影响枝状阀式分流装置分流效果的因素分别为 1 阶分流单元分枝长度 L_1 、2 阶分流单元上部长 L_2 、分流单元分流角 α 以及管径 d 。

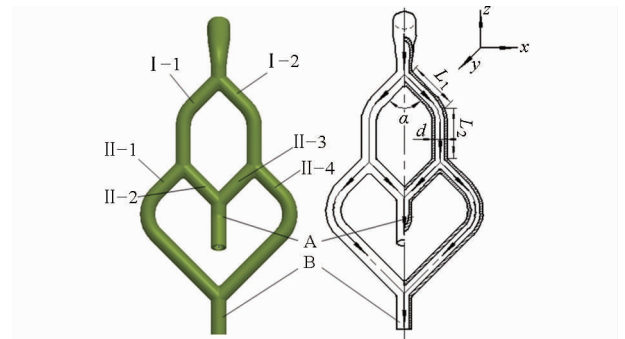


图3 枝状阀式分流装置示意图

Fig. 3 Diagram of valve-branch distributor

倾斜条件下, 设单位时间内集排器的单个型孔排种量为 m , 则进入理想结构的枝状阀式分流装置分流管 I-1 的输出种量 n_1^1 为 mu , 分流管 I-2 的输出种量 n_2^1 为 $m(1-u)$, 经第 2 阶分流, II-1、II-2、II-3、II-4 的输出种量分别为

$$\begin{cases} n_1^2 = mu^2 \\ n_2^2 = n_3^2 = m(u-u^2) \\ n_4^2 = m(1-u)^2 \end{cases} \quad (4)$$

经分流管合并后, 出种管 A 的出种量为 $m(2u-2u^2)$, 出种管 B 的种量比例为 $m(2u^2-2u+1)$ 。

利用出种管 A、B 种量分配比例差的绝对值来衡量分流装置的分流效果。对于枝状阀式分流装置, 该差值的绝对值为 $m(2u-1)^2$ 。对于 1 阶分流装置, 该差值的绝对值为 $m|2u-1|$ 。

由于 $0 < u < 1$, 则

$$(2u-1)^2 < |2u-1| \quad (5)$$

由式(5)得出, 在倾斜条件下, 枝状阀式分流装置的分流效果优于 1 阶分流装置。

3 EDEM 仿真试验

3.1 仿真模型建立

离散单元法是将分析对象分解为充分多的离散单元,每个颗粒或块体为一个单元,根据每一时刻各颗粒间的相互作用计算接触力,再运用牛顿运动定律计算离散单元的运动参数,这样交替反复运算,实现对象运动状态的预测^[24-25]。离散元根据颗粒接触模型的不同,可分为硬球模型与软球模型。油菜籽粒表面光滑、流动性好,仿真中颗粒接触模型设为硬球接触模型,仿真选用 Hertz - Mindlin 接触模型,种子数量设为 22 500 粒,仿真时间为 10 s(前 1 s 充种,1 s 后内锥筒开始运动),采用瑞利波法确定仿真计算时间步长为 1.08×10^{-5} s,输出时间步长为 0.01 s。油菜籽粒与集排器不同材质部件相互作用力力学特性参数见表 1。

表 1 油菜种子与集排器相互作用力力学特性参数

Tab.1 Mutual acting mechanics parameters between rapeseed and metering device

材质名称	碰撞恢复系数	静摩擦因数	动摩擦因数
油菜种子	0.60	0.5	0.01
工程塑料 ABS	0.75	0.3	0.01
铝合金	0.60	0.3	0.01

3.2 仿真模型验证

为验证上述模型与参数选择的合理性,开展集排器 EDEM 模拟仿真与台架试验的结果对比。试验以安装有 1 阶分流装置的集排器为研究对象,以集排器转速为试验因素,转速范围取 130 ~ 200 r/min,每间隔 10 r/min 为一个水平,每个处理重复 5 次,试验方法参照文献[19],试验指标为集排器各行排量一致性均匀度 E_v ,即

$$E_v = 1 - \frac{s}{x_i}$$

(6)

其中

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2}{n - 1}}$$

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad x_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij}$$

式中 N ——重复次数,取 5
 n ——测定行数,取 6
 x_{ij} ——出种管出种量
 $\bar{x}_i$ ——出种管平均出种量
 s ——各行间排种量标准差

由仿真试验与台架试验结果可知:集排器转速在 130 ~ 200 r/min 范围内,其各行排量一致性均匀度的仿真值与台架试验实测值的绝对误差占比在

0 ~ 6.57% 之间,此误差可接受,表明上述 EDEM 的模型建立与参数选择较合理。

表 2 仿真试验与台架试验结果对比

Tab.2 Results between simulation test and bench test

试验 编号	转速 /(r·min ⁻¹)	仿真 值/%	实测 值/%	绝对 误差/%	占比 /%
1	130	90.30	94.37	4.07	4.31
2	140	95.72	95.72	0	0
3	150	90.86	96.75	5.89	6.08
4	160	94.40	97.49	3.09	3.10
5	170	94.31	96.90	2.59	3.00
6	180	93.70	97.72	4.02	4.11
7	190	91.34	97.76	6.42	6.57
8	200	94.61	97.19	2.58	2.65

3.3 分流装置 EDEM 仿真试验

3.3.1 试验设计

由前述,影响枝状阀式分流装置分流效果关键因素分别为 1 阶分流单元分枝长度 L_1 、2 阶分流单元上部长度 L_2 、分流角 α 、管径 d 。为考察集排器分流装置的最优参数组合,以枝状阀式分流装置为试验对象,由前期试验得到各参数取值范围: $30 \text{ mm} \leq L_1 \leq 100 \text{ mm}$ 、 $30 \text{ mm} \leq L_2 \leq 100 \text{ mm}$ 、 $30^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ 、 $6 \text{ mm} \leq d \leq 10 \text{ mm}$ 。试验指标为集排器各行排量一致性变异系数,其对排种性能指标的衡量与各行排量一致性均匀度相反,各行排量一致性变异系数越小,即均匀度越高,表明各行间的排种量越均匀。

枝状阀式分流装置结构参数的正交旋转组合设计试验因素水平编码如表 3 所示^[26]。

表 3 试验因素水平与编码值

Tab.3 Experimental values and coded levels

编码	分枝长度 L_1/mm	上部长度 L_2/mm	分流角 $\alpha/(\text{^\circ})$	管径 d/mm
1.682	100	100	150	6
1	85.81	85.81	125.71	6.81
0	65	65	90	8
-1	44.19	44.19	54.29	9.19
-1.682	30	30	30	10

3.3.2 仿真试验结果分析

利用颗粒离散元软件 EDEM 开展枝状阀式分流装置仿真试验,由仿真得集排器的各行排量一致性变异系数如表 4 所示,表 5 为不同因素对各行排量一致性变异系数的方差分析结果。

由上述模拟仿真试验结果,建立 1 阶分流单元分枝长度(x_1)、2 阶分流单元上部长度(x_2)、分流角(x_3)、管径(x_4)对集排器各行排量一致性变异系数的四元二次回归模型,即

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2, x_3, x_4) = & 0.009\,5x_1^2 + 0.011x_1x_2 - \\ & 0.011x_1x_3 + 0.077\,5x_1x_4 - 1.433\,6x_1 + 0.008\,5x_2^2 + \\ & 0.002\,8x_2x_3 - 0.337\,6x_2x_4 + 0.365x_2 + 0.005x_3^2 + \\ & 0.115\,3x_3x_4 - 24.028x_3 + 2.203\,2x_4^2 - \\ & 24.028x_4 + 170.155\,778 \end{aligned} \tag{7}$$

表4 试验方案与结果

Tab.4 Design and results of experiments

试验号	分枝长度 X_1	上部长度 X_2	分流角 X_3	管径 X_4	各行一致性 变异系数/%
1	1	1	1	1	25.21
2	1	1	-1	-1	22.81
3	1	-1	1	-1	11.22
4	1	-1	-1	1	50.72
5	-1	1	1	-1	4.42
6	-1	1	-1	1	2.77
7	-1	-1	1	1	44.25
8	-1	-1	-1	-1	16.08
9	1.682	0	0	0	8.91
10	-1.682	0	0	0	8.88
11	0	1.682	0	0	5.61
12	0	-1.682	0	0	9.68
13	0	0	1.682	0	24.04
14	0	0	-1.682	0	6.62
15	0	0	0	1.682	8.38
16	0	0	0	-1.682	3.71
17	0	0	0	0	2.82
18	0	0	0	0	2.82
19	0	0	0	0	2.82
20	0	0	0	0	2.82
21	0	0	0	0	2.82
22	0	0	0	0	2.82
23	0	0	0	0	2.82

表5 不同因素对各行排量一致性变异系数的方差分析

Tab.5 Variance analysis of each factor influence
to traction resistance

来源	平方和	自由度	均方	F 值	显著性
X_1	132.21	1	132.21	22.22	**
X_2	400.05	1	126.49	67.24	**
X_3	35.50	1	45.69	5.96	*
X_4	426.16	1	426.16	71.64	**
X_1X_1	271.24	1	271.24	45.59	**
X_1X_2	192.33	1	192.33	32.33	**
X_1X_3	559.61	1	559.61	94.07	**
X_1X_4	29.56	1	29.56	4.97	NS
X_2X_2	216.25	1	216.25	36.35	**
X_2X_3	29.56	1	29.56	4.97	NS
X_2X_4	559.61	1	559.61	94.07	**
X_3X_3	665.50	1	665.50	110.19	**
X_3X_4	192.33	1	192.33	32.33	**
X_4X_4	154.52	1	154.52	25.97	**
回归	3854.42	14	275.32	46.28	**
残差	47.59	8	5.95		
总和	3 902.01	22			

注：**表示极显著；*表示显著；NS表示不显著。

由表5可知,方程回归平方和 $F(14,8)=275.32>F_{0.01}=5.52$,表明所建立的各行排量一致性变异系数回归数学模型有意义且显著,回归方程决定系数 R^2 为0.988,表明回归方程拟合度较高。

利用 Matlab 分别对 $x_1、x_2、x_3、x_4$ 求偏导,可得

$$\left\{\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial x_1} = & 0.019\,0x_1 + 0.011\,3x_2 - 0.011\,2x_3 + \\ & 0.07\,75x_4 - 1.433\,6 \\ \frac{\partial f}{\partial x_2} = & -0.011\,3x_1 + 0.017\,04x_2 + 0.002\,8x_3 - \\ & 0.337\,6x_4 + 0.365 \\ \frac{\partial f}{\partial x_3} = & -0.011\,3x_1 + 0.002\,8x_2 + 0.01x_3 + \\ & 0.115\,3x_4 - 1.220\,1 \\ \frac{\partial f}{\partial x_4} = & 0.077\,5x_1 - 0.337\,6x_2 + 0.011\,53x_3 + \\ & 4.406\,5x_4 - 24.028\,3 \end{aligned}\right. \tag{8}$$

依据各行排量一致性变异系数越小,则集排器

的排种性能越优,令 $\frac{\partial f}{\partial x_1}=0、\frac{\partial f}{\partial x_2}=0、\frac{\partial f}{\partial x_3}=0、\frac{\partial f}{\partial x_4}=0$,可得枝状阀式分流装置各结构参数的最优组合: x_1 为59.95 mm, x_2 为66.11 mm, x_3 为89.74°, x_4 为7.12 mm。代入式(7),得 $f=-0.97$,符合排种最优性能指标。

4 性能试验与结果分析

4.1 性能试验

依据优化所得枝状阀式分流装置的结构参数,利用3D打印技术对该分流装置进行加工制造,所用材料为工程塑料ABS,并利用3D打印技术打印与枝状阀式分流装置具备相同分流角、管径的1阶分流装置。为考察增加枝状阀式分流装置与1阶分流装置对机具倾斜的适应性,开展2种分流装置条件下的排种性能试验。

将打印完成的2种分流装置分别安装于集排器导种管,集排器转速设定170 r/min,以集排器倾斜角为试验因素,倾角范围为0°~30°,每5°为一个水平,每个处理重复5次,进行集排器各行排量一致性性能测试。试验中,试验材料选取华油杂62;种子千粒质量为4.6 g;使用角度仪对倾斜角度进行测量,如图4;集排器动力由直流电动机提供。

由不同倾斜角度对集排器各行排量一致性变异系数影响的试验结果(图5)可知:倾斜角为0°~5°时,1阶分流装置与枝状阀式分流装置对各行排量一致性变异系数影响均较小,枝状阀式分流装置条

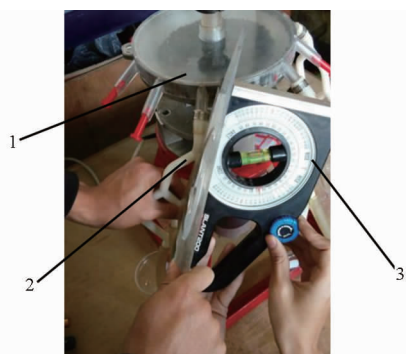


图4 倾斜角度测量

Fig. 4 Measurement of inclination angle

1. 集排器 2. 枝状阀式分流装置 3. 角度仪

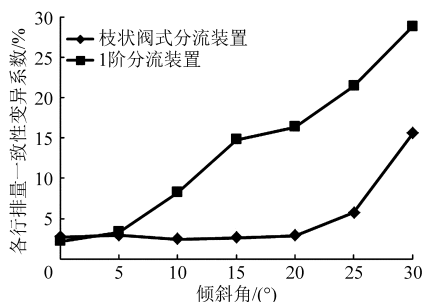


图5 1阶分流装置与枝状阀式分流装置倾角对比试验

Fig. 5 Contrast test between direct distributor and valve-branch distributor

件下,各行排量一致性变异系数不大于2.91%,1阶分流装置条件下,各行排量一致性变异系数不大于3.27%。

倾斜角为 $5^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 范围内,1阶分流装置的各行排量一致性变异系数随倾角的增大而增加,最大可达21.4%,表明1阶分流装置条件下倾斜对各行排量一致性的影响较显著;对于枝状阀式分流装置,各行排量一致性变异系数随倾斜角的增大其变化较为平缓,最大仅为5.71%。由于在2阶分流后种子流合并过程中,枝状阀式分流装置是通过将4股种子流中来自不同分流单元的不同侧的2股种子流合并以实现种子流分配过程中的自适应补偿,集排器最终输出为均匀的2股种子流,其各行排量一致性变异系数可降至较低,最低可达到2.51%,表明枝状阀式分流装置对机具倾斜的适应性较好。倾斜角大于等于 25° 时,1阶分流装置与枝状阀式分流装置的各行排量一致性变异系数均有所增加,但枝状阀式分流装置的分流效果仍优于1阶分流装置,与前述理论分析结果一致。根据油菜种植的生产实际情况,由地表不平整等原因引起的机具倾斜一般不超过 25° 。

对于2种分流装置与未加分流装置的集排器,若增加分流装置前后其播种行数相同,则增加分流装置后,集排器的总排量稳定性与各行排量一致性

均有显著提升。其一,由于增加分流装置,集排器型孔数量较未增加分流装置时的型孔数减少了一半,故总排量稳定性可明显改善;其二,由分流装置所引出的两行间的分流变异系数明显降低,故集排器的总排量稳定性与各行排量一致性均有显著提升。

综上,增加分流装置后,集排器的各行排量一致性得到显著提高;在不同倾斜角下,枝状阀式分流装置的排种性能优于1阶分流装置。

利用JPS-12型排种器试验台对枝状阀式分流装置的排种器进行了播量均匀性试验。试验设定种床带前进速度分别为2.0 km/h和9.0 km/h,在种床带上随机选取50段,测量单位长度(1 m)内种子的数量。根据油菜种植农艺要求,设定油菜平均株距为50 mm,则1 m内种子数量应为20粒。规定1 m内种子数为 (20 ± 3) 粒时符合测试指标。

排种台架试验表明,当种床带速度分别为2.0、9.0 km/h时,排种单行播量均匀性变异系数分别为13.98%、15.35%,单位长度种子数符合测试指标的比例分别为86%、82%。

4.2 田间试验

4.2.1 坡地试验

为检验播种机具在倾斜作业条件下排种的各行排量一致性,在华中农业大学校内坡地进行了油菜离心式精量集排器枝状阀式分流装置的播种试验(图6),由角度仪测得机具倾斜角为 8° ,机具作业前进速度设定为慢I挡。试验中,将密封袋固定在输种管末端,每次试验完毕后对各密封袋内种子进行收集称量并记录,试验重复5次,测得各行排量一致性变异系数为9.19%。



图6 枝状阀式分流装置坡地试验

Fig. 6 Valve-branch distributor under inclination

4.2.2 田间播种试验

2014年10月10日在华中农业大学校内现代农业科技园的旱地开展了集排器的田间播种试验(图7),旱地前茬作物为玉米,地表土壤坚实度平均为1230 kPa。将带有枝状阀式分流装置的集排器安装于离心式多功能联合直播机上,牵引动力为东方红LX-954型拖拉机,试验分为低速挡和中速挡,机组前进速度分别约为2.18 km/h和9.17 km/h。油菜播后45 d幼苗长至4~5叶期,在田间随机选

取10段,以1 m为测量单位,测定幼苗的平均株距、播种均匀性与各行一致性变异系数。测得机组在低速挡、中速挡前进速度下,田间植株的平均株距分别为51.23 mm、65.79 mm,播种均匀性变异系数分别为31.22%、34.85%,各行排量一致性变异系数分别为33%、38.2%,符合油菜种植农艺要求。



图7 枝状阀式分流装置田间播种试验
Fig. 7 Filed test of valve-branch distributor

5 结论

(1) 提出了一种多阶分—合分流装置,通过对多阶分—合分流装置的种子流分析,构建了多阶分流

装置各行排量一致性变异系数模型。该装置可有效提高机具的适应性,解决在作业过程中因地表不平造成的倾斜、颠簸等工况导致各行排量一致性较差的问题,提高了播种机的作业性能。

(2) 通过对不同转速下集排器各行排量一致性仿真试验与台架试验的对比分析,验证了仿真模型建立与参数选择的合理性;基于此,开展枝状阀式分流装置的 EDEM 仿真试验研究,建立了各行排量一致性变异系数与枝状阀式分流装置结构参数之间的四元二次回归模型,仿真试验结果表明:枝状阀式分流装置1阶分流单元分枝长度为59.95 mm、2阶分流单元上部长度为66.11 mm、分流角度为89.74°、管径为7.12 mm时,其排种性能最优。

(3) 对优化后枝状阀式分流装置与1阶分流装置进行3D打印并开展倾斜条件下2种分流装置的对比试验,试验表明:倾斜角在0°~25°范围时,枝状阀式分流装置集排器的各行排量一致性变异系数不大于5.71%,优于1阶分流装置,且可实现机组前进速度为9.17 km/h的田间中高速播种作业。

参 考 文 献

- 1 张波屏. 现代种植机械工程[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
- 2 廖庆喜,黄吉星,刘光,等. 油菜播种机槽孔轮式精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2011,42(2):63-66.
Liao Qingxi, Huang Jixing, Liu Guang, et al. Design and experiment of precision metering device for slot wheeled seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 63-66. (in Chinese)
- 3 廖庆喜,张猛,余佳佳,等. 气力集排式油菜精量排种器[J]. 农业机械学报,2011,42(8):30-34.
Liao Qingxi, Zhang Meng, Yu Jiajia, et al. Pneumatic centralized metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 30-34. (in Chinese)
- 4 李明,刘晓辉,廖宜涛,等. 气力滚筒式油菜精量集排器[J]. 农业机械学报,2013,44(12):68-73.
Li Ming, Liu Xiaohui, Liao Yitao, et al. Pneumatic cylinder-type centralized precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 68-73. (in Chinese)
- 5 曹成茂,王安民,秦宽,等. 一器多行环槽推送式排种器的设计与试验[J]. 农业机械学报,2014,45(4):128-134.
Cao Chengmao, Wang Anmin, Qin Kuan, et al. Design and experiment of multi-line metering device with ring groove push movement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 128-134. (in Chinese)
- 6 赵晓顺,于华丽,张晋国,等. 槽缝气吸式小麦精量排种器[J]. 农业机械学报,2013,44(2):48-51.
Zhao Xiaoshun, Yu Huali, Zhang Jinguo, et al. Slot-type pneumatic precise wheat seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 48-51. (in Chinese)
- 7 张晓慧,宋建农. 针吸滚筒式水稻排种器设计[J]. 农业机械学报,2009,40(3):68-71.
Zhao Xiaohui, Song Jiannong. Design and research on rice precision needle-like vacuum seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 68-71. (in Chinese)
- 8 王朝辉. 气吸滚筒式超级稻育秧播种器的基本理论及试验研究[D]. 长春:吉林大学,2010.
Wang Chaohui. Research of theory and experiment on air suction cylinder device for tray nursing seeding of super-rice[D]. Changchun: Jilin University, 2010. (in Chinese)
- 9 Hassan A E. Precision drum seeder for uniform spacing[J]. Transactions of the ASAE, 1981, 24(4): 879-883.
- 10 Raheman H, Singh U. A manual drawn multi-crop drum seeder for dry land[J]. Journal-Agriculture, 2004, 85: 58-63.
- 11 胡建平,郭坤,周春健,等. 磁吸滚筒式排种器种箱振动供种仿真与试验[J]. 农业机械学报,2014,45(8):61-65.
Hu Jianping, Guo Kun, Zhou Chunjian, et al. Simulation and experiment of supplying seeds in box of magnetic precision cylinder-seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 61-65. (in Chinese)
- 12 李中华,王德成,刘贵林,等. 正压式气流排种器排种效果试验[J]. 农业工程学报,2009,25(1):89-93.
Li Zhonghua, Wang Decheng, Liu Guilin, et al. Experimental study on sowing seeds by air-stream metering mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(1): 89-93. (in Chinese)

- 13 常金丽,张晓辉. 2BQ-10 型气流一阶集排式排种系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 136-141.
Chang Jinli, Zhang Xiaohui. Design and test of one-step centralized type pneumatic seeding system[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 136-141. (in Chinese)
- 14 Prasanna Kumar G V, Brijesh Srivastava, Nagesh D S. Modeling and optimization of parameters of flow rate of paddy rice grains through the horizontal rotating cylindrical drum of drum seeder [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 65(1): 26-35.
- 15 李飞雄. 对离心式排种器设计参数的探讨[J]. 农业机械学报, 1964, 7(1): 38-48.
Li Feixiong. An investigation on the design parameters of the centrifugal seed feeding apparatus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1964, 7(1): 38-48. (in Chinese)
- 16 张波屏. 播种机械设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- 17 翁卫国, 李建庄. 离心排种器试验研究[J]. 农业机械学报, 1991, 22(2): 28-34.
Weng Weiguo, Li Jianzhuang. Study on centrifugal seed feeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1991, 22(2): 28-34. (in Chinese)
- 18 蹇兴东, 彭嵩植. 滚筒式小麦单粒精密排种器工作原理研究[J]. 农业工程学报, 1997, 13(4): 81-85.
Jian Xingdong, Peng Songzhi. Working principle of cylinder single-seed precision feeder for Wheat[J]. Transactions of the CSAE, 1997, 13(4): 81-85. (in Chinese)
- 19 廖庆喜, 张宁, 张朋玲, 等. 一器多行离心式油菜排种器[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 48-52.
Liao Qingxi, Zhang Ning, Zhang Pengling, et al. Centrifugal metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 48-52. (in Chinese)
- 20 廖庆喜, 张朋玲, 廖宜涛, 等. 基于 EDEM 的离心式排种器排种性能数值模拟[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 109-114.
Liao Qingxi, Zhang Pengling, Liao Yitao, et al. Numerical simulation on seeding performance of centrifugal rape-seed metering device based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 109-114. (in Chinese)
- 21 曹秀英, 廖庆喜, 丛锦玲, 等. 离心式油菜精量排种器型孔结构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊 1): 40-46.
Cao Xiying, Liao Qingxi, Cong Jinling, et al. Design and experiment on metering hole structure of centrifugal precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp. 1): 40-46. (in Chinese)
- 22 石喜. 灌溉管网非恒定流计算及应用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
Shi Xi. Research on calculation and application of unsteady flow in irrigation network[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2013. (in Chinese)
- 23 解清杰, 周清时, 江静, 等. 合流管网错峰分流减排技术及应用实例[J]. 工业安全与环保, 2014, 40(3): 66-68.
Xie Qingjie, Zhou Qingshi, Jiang Jing, et al. The time staggered shunt emission reduction technology of combined piping network and its applications[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2014, 40(3): 66-68. (in Chinese)
- 24 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2010.
- 25 王国强, 郝万军, 王继新. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010.
- 26 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.