

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2024.10.003

耿端阳, 康云友, 王文丽, 等. 小麦宽苗带高速排种系统设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(10): 17-24

Geng Duanyang, Kang Yunyou, Wang Wenli, et al. Design and test of high speed seeding system for wheat wide seedling belt [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(10): 17-24

小麦宽苗带高速排种系统设计与试验*

耿端阳¹, 康云友², 王文丽³, 张仰猛³, 朱俊科¹, 王宪良¹

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 山东淄博, 255000; 2. 山东省农业机械技术推广站, 济南市, 274399; 3. 淄博市农机研究所, 山东淄博, 255000)

摘要:为改善小麦宽苗带播种与玉米轮作种植质量, 开发一种与轮作种植相配套的宽苗带小麦播种农艺, 并根据新开发农艺的要求, 设计一种小麦宽苗带高速排种器。对其关键结构参数进行理论分析, 建立确定排种器参数所需的理论数学模型。借助离散元仿真软件, 确定该排种器的结构参数。对所设计的小麦宽苗带播种系统进行台架试验, 结果表明, 其播种总排量稳定性变异系数、各行排量一致性变异系数和种子破碎率均满足国家要求, 试验测得苗带平均宽度为12 cm, 与理论设计宽度相符合。开展田间试验并利用Design-Expert对试验所得数据进行回归建模与方差分析, 利用建立的优化模型对回归方程进行分析。当排种轮转速为40 r/min、机具作业速度为10 km/h时, 样机的行间排量一致性变异系数最小为1.69%, 苗带分布合格率达到95.1%。

关键词:小麦; 宽苗带; 高速; 排种; 离散元

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 2095-5553 (2024) 10-0017-08

Design and test of high speed seeding system for wheat wide seedling belt

Geng Duanyang¹, Kang Yunyou², Wang Wenli³, Zhang Yangmeng³, Zhu Junke¹, Wang Xianliang¹

(1. School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo, 255000, China;
2. Shandong Agricultural Machinery Technology Extension Station, Jinan, 274399, China;
3. Zibo Institute of Agricultural Machinery Research, Zibo, 255000, China)

Abstract: In order to improve the quality of wheat wide seedling belt sowing and corn rotation planting, a new agronomy of wide seedling belt wheat sowing matching with corn rotation planting was developed, and a high-speed metering device of wheat wide seedling belt was designed according to the requirements of newly developed agronomy. The key structural parameters were analyzed theoretically, and the theoretical model of parameter determination was established. With the help of discrete element simulation software, the structural parameters of the seed metering device were determined. The bench test of the designed wheat wide seedling belt sowing system was carried out. The results showed that the coefficient of variation of the total seeding displacement stability, the coefficient of variation of each row displacement consistency and the seed breakage rate all met the national requirements. The average width of the seedling belt measured in the test was 12 cm, which was consistent with the theoretical design width. The field experiment was carried out, and the regression modeling and variance analysis of the experimental data were carried out by Design-Expert. The regression equation was analyzed by using the established optimization model. The results showed that when the rotation speed of the metering wheel was 40 r/min and the operation speed of the machine was 10 km/h, the minimum coefficient of variation of the inter-row displacement consistency of the prototype was 1.69% and the qualified rate of the seedling belt distribution reached 95.1%.

Keywords: wheat; wide seeding belt; high speed; seeding; discrete element

收稿日期: 2023年2月24日 修回日期: 2023年4月4日

* 基金项目: 山东省现代农业产业体系(SDAIT-02-12)

第一作者: 耿端阳, 男, 1969年生, 陕西澄城人, 博士, 教授; 研究方向为新型农业机械装备。E-mail: dygxt@sdut.edu.cn

0 引言

小麦作为我国北方地区主要粮食作物,其产量对国家粮食安全战略具有举足轻重的影响。近年来,虽然其种植面积有所下降(约为 $2.4 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 左右),但其单产有所增加,年产量基本稳定在 $(1.28 \sim 1.30) \times 10^9 \text{ t}$ 左右^[1]。由于我国人口基数较大导致小麦缺口有增大的趋势,如2022年累计进口 $9.96 \times 10^6 \text{ t}$,较2020年增长15%以上,所以在扩大小麦种植面积潜力有限的条件下,提高小麦单产就成为保证小麦产量,保障国家粮食安全的主要手段。国外小麦播种机多为气力式,其结构复杂、动力需求大、成本高^[2]。2009年,中国工程院院士余松烈院士提出小麦宽苗带播种技术,并证实了小麦宽苗带种植农艺可以提高小麦产量 $375 \sim 600 \text{ kg/hm}^2$;但是由于宽苗带涉及播种、开沟、种子分布等诸多问题,所以目前大多采用接近宽苗带播种的小双行播种农艺。

在小麦宽苗带相关研究方面,刘彩玲等^[3,4]设计了宽苗带勾型窝眼轮式小麦精量播种器,在单个苗带上可实现4行种子均匀交替排布,提高了排种均匀性;牛琪等^[5]基于籽粒自流打散原理设计了斜置三角式分种装置,提高了种子分布均匀性;翟萌萌^[6]开发了燕尾槽播种铲,种子通过两次分散分布进入布种器,实现小麦宽幅精量播种;于兴瑞^[7]、张银平^[8]等设计了小麦离心分种器,种子在离心力作用下被均匀分配到导种管,提高了分种均匀性、降低了籽粒破碎率。目前虽然黄淮海地区出现了类宽苗带效果的小双行播种,但对种子在该区域的分布规律研究不够,制约了小麦产量提高的潜力;其次,由于小双行的播种,也影响了小麦玉米轮作种植模式的配套性,增加了玉米播种的难度。

针对上述问题,本文以山东省小麦玉米轮作的种植制度为基础,结合小麦宽苗带播种的农艺要求,开发双排斜外槽轮式排种器以及呈中间凸起的燕尾槽式宽苗带布种器,建立排种器确定参数所需的理论数学模型,并通过EDEM仿真分析及试验,获得最优工作参数,以期提高作业效果、充分发挥小麦增产潜力。

1 小麦宽苗带种植农艺的确定

山东地区粮食生产多为小麦玉米轮作种植,所以在确定小麦的宽苗带播种农艺时必须综合考虑玉米的种植模式,以减少玉米/小麦根茬对小麦/玉米播种作业的影响,即在小麦/玉米播种时,其种植带尽量避开玉米/小麦根茬。根据余松烈院士推荐的作业规范,小麦宽苗带宽度与苗带间距的比例为 $1:(1.5 \sim 2)$ 为佳,最终确定的小麦宽苗带播种与玉米种植配套模式,如

图1所示。

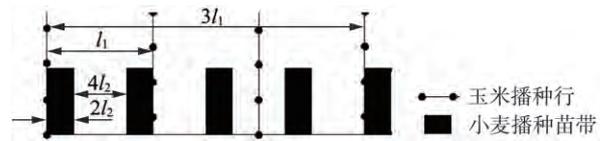


图1 小麦玉米轮作的宽苗带农艺示意图

Fig. 1 Agronomic diagram of wide seedling belt of wheat and corn rotation

考虑小麦行距较窄,田间秸秆容易拥堵开沟器,所以尽量选择较宽的小麦行距,从而形成一个玉米行播种两行小麦思想;进一步为了减少玉米根茬、秸秆对小麦播种的影响,则选在小麦播种的起始行紧贴玉米种植带,如图1所示。设玉米播种行距为 l_1 ,小麦苗带宽度为 $2l_2$,按照余松烈院士推荐的高产小麦种植模式达到小麦播种宽度与苗带间距比例为 $1:(1.5 \sim 2)$ 的要求,则可选小麦苗带间距为 $4l_2$,从而有

$$2l_2 + 4l_2 + 2l_2 = l_1 \quad (1)$$

$$l_1 = 8l_2 \quad (2)$$

在本设计中,玉米播种行距为60 cm,则小麦苗带宽度 $2l_2 = 15 \text{ cm}$;两苗带间距 $4l_2 = 30 \text{ cm}$ 。

2 宽苗带高速排种系统设计

针对当前小麦播种机外槽轮式排种器存在的诸多问题,结合当前土地集约化经营模式的逐渐普及以及大马力拖拉机的快速发展,开发适合大播量、高速作业、且对种子损伤小的小麦宽苗带排种器已成为实现上述播种农艺、提高小麦播种机械化技术水平的关键,所以首先对小麦宽苗带高速播种系统进行研究。

2.1 排种轮结构与排种器结构的确定

一般来说,小麦排种轮多为直外槽轮式排种轮结构,该排种器虽然结构简单,调整方便、且制造成本低廉,但由于结构限制,在播种过程由于齿脊阻隔出现种子流的脉动以及齿脊作用导致种子的损伤,从而使其多定位在低速、对播种质量要求不严格的条件下使用。针对上述问题,为了消除传统小麦播种存在的种子流脉动问题,本排种器将直外槽式排种轮改为斜外槽式排种轮结构,有效消除了播种过程种子流的脉动问题,提高了排种器播种的均匀性;进一步考虑斜外槽式排种轮作业过程会带来轴向力影响轴承寿命的问题,所以又将单排斜槽改为双排斜槽,且两排斜槽成对称结构,实现了排种器作业过程轴向力的自平衡;又考虑种子流动的顺畅性以及分种过程种子向排种轮中部聚流而使种子出现拥堵、甚至挤伤的问题,所以两排斜槽采用断开错位的方式进行分布,从而保证回流到中部的种子能转向流入另一排的排种槽,既保证了外槽排

种的均匀性,又避免了种子在此受到的损伤。斜槽的方向主要是考虑如果向外倾斜,则在排种过程会出现向两边聚流,而两边正好与排种盒侧壁形成封闭空间,从而出现种子在此的拥堵和损伤现象,所以其外槽旋向确定为使种子向中部聚流的结构,具体如图 2 所示。



图 2 双排斜外槽轮式排种器结构

Fig. 2 Double-row sloped outer groove wheel type seed metering device structure

在上述研究基础上,借助传统排种器结构比较成熟的优势,开发了基于宽苗带播种的小麦排种器,其结构如图 3 所示。该排种器主要由排种轮、排种盒、排种轴、回转轴、排种舌和调节销组成。工作时,排种轮在排种轴的驱动下沿着逆时针方向转动,而小麦种子沿着排种盒后壁流向排种轮,并充满排种轮外槽腔体,借助排种轮与排种舌的定容约束,使得位于排种轮外的种子被逐渐向排种轮中部汇聚,而多余的种子通过中部错位间隙进入下一排种轮外槽腔体,从而保证了每个排种轮腔体分出种子数量的一致性,也避免了传统外排种轮种子必须通过排种舌和排种轮强制作用进入下一外槽腔体出现的种子损伤问题。

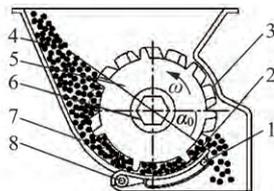


图 3 高速宽苗带小麦排种器结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the structure of the high-speed wide seedling belt wheat metering device

- 1. 调节销 2. 排种舌 3. 排种盒前壁 4. 小麦种子 5. 排种轮
- 6. 排种轴 7. 排种盒后壁 8. 回转轴

2.2 排种器结构参数的确定

2.2.1 齿脊数的确定

齿脊数对有效充种容积比 k_0 有很大的影响。如果齿脊数过少,则会影响排种的稳定性;如果齿脊数过多,则又降低了充种的有效容积,所以本排种器的齿脊数根据影响排种均匀性最大的排种舌最小包角、种子的自然堆放角以及圆柱齿轮最少齿数来确定。由于种子的自然堆放角为 α_0 (小麦种子堆放角为 $23^\circ \sim 38^\circ$),如图 3 所示,所以其排种舌的最小包角

$$\beta_{\min} = 2(90^\circ - \alpha_0) \quad (3)$$

考虑在该包角内,必须有 3 个齿脊才能形成 2 个相邻、完整的封闭空间,完成对种子的精量排送,所以

排种轮最少齿脊数

$$\begin{aligned} Z_{\min} &= \text{int} \left(\frac{360^\circ}{\beta_{\min}} \right) \times 2 + 1 \\ &= \text{int} \left(\frac{180^\circ}{90^\circ - \alpha_0} \right) \times 2 + 1 \end{aligned} \quad (4)$$

分别将小麦种子的堆放角最大及最小值代入式(4)中,则 Z_{\min} 的取值应为 5 或者 7。借助圆柱齿轮的设计理论,当齿数太少时,需要加快排种器转速,齿顶部分才能获得相同的线速度,由此带来排量稳定性会变差,所以排种器齿脊数的初值确定为 7。

2.2.2 排种轮直径的确定

排种轮直径对播种均匀性和种子损伤率影响较为明显。一般来说,当排种轮直径增大时,排种器转速可以适当降低,但是由此会造成排种均匀性的下降;反之,如果排种轮直径减小,又会因转速过高加剧种子损伤率。所以虽然《农业机械设计手册》推荐播麦类为主的排种轮直径为 40~51 mm,且以 40 mm 为多,但该理论值更适合低速播种,难以满足高速作业的需求^[9, 10]。

设外排种轮基圆直径为 d ,槽深为 h ,则排种轮外径为 $D = d + 2h$,如图 4 所示,排种轮宽度为 l ,种子的容重为 γ ,圆环面积

$$A_0 = \frac{\pi}{4} [(d + 2h)^2 - d^2] = \frac{\pi}{4} (h^2 + 2dh)^2 \quad (5)$$

排种轮工作区容积

$$V = A_0 l = \frac{\pi l}{4} (h^2 + 2dh) \quad (6)$$

假设齿槽工作区的有效容积比为 k_0 ,充种率为 η ,种子容重为 γ ,则排种器每转动 1 周,其排种量

$$q = \gamma V k_0 \eta = \frac{\pi}{4} \gamma l k_0 (h^2 + 2dh) \eta \quad (7)$$

设排种器最大转速为 n_{\max} ,则最大理论排种量

$$Q = q n = \frac{\pi}{4} \gamma l k_0 n (h^2 + 2dh) \eta \quad (8)$$

按照农艺要求,小麦播种量一般为 300~420 kg/hm² 之间^[11],取最大播量 $Q_n = 420 \text{ kg/hm}^2$,代入上述公式,则排种轮直径 $D \approx 60 \text{ mm}$ 。

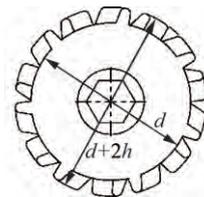


图 4 排种轮直径确定

Fig. 4 Determine the diameter of the seed row wheel

进一步,考虑该排种器在工作过程,需要多余的种子能在斜槽面推动下向排种轮中部聚流,再多的种子必须由第一个斜槽滑入下一排的错位斜槽,所以根据

可靠性理论中种子流动过程自动沿着阻力最小的方向运动,即沿着长轴方向穿过两错位分布的斜槽间隙,所以要求这两个斜槽在此的间隙必须大于3倍的种子厚度 b' ,由此确定了排种轮基圆直径为

$$\pi d \geq Z_{\min} \cdot 3b' \cdot 2 \quad (9)$$

代入相关数据可知,排种轮基圆直径 $d \geq 42.8$ mm。

综合考虑排量需要和斜外槽排种器螺旋面的厚度,最终取 $D = 60$ mm。

2.2.3 斜排种轮角度确定

为了消除直外槽排种器存在的脉动问题,该排种轮的外槽设计为斜槽结构;为了消除分种过程的轴向力,将其斜槽设计为螺旋角相等的对称结构,如图5所示,设排种轮宽度 $l = 2\delta$,斜槽与排种轮轴线夹角为 α_1 。显然,斜槽与排种轮轴线夹角为 α_1 越大,则越有利于种子在分种过程向中部聚流,但是该角度过大,又容易出现自流,影响斜槽腔体的充满度,故以临界状态为例,种子的受力情况如图6所示。小麦种子受到前方种子对其的阻力 N_0 、斜槽面对其支撑力 N_3 以及阻止种子沿斜槽面滑向中部摩擦力 F ,记 φ 为种子与排种器材料之间的摩擦角,显然,要保证种子受到前方阻力作用下向排种轮中部聚流,则小麦种子受到的阻力 N_0 沿斜槽面的分力 N_1 必须大于种子受到斜槽面的摩擦力。

$$N_1 \geq F \quad (10)$$

$$\begin{cases} N_1 = N_0 \sin \alpha_1 \\ F = \tan \varphi N_3 \end{cases} \quad (11)$$

$$N_3 = N_2 = N_0 \cos \alpha_1 \quad (12)$$

将式(11)、式(12)代入式(10)中,可以得出 $\alpha_1 \geq \varphi$ 。结合对小麦种子与尼龙材料摩擦系数(本排种轮采用尼龙注塑而成)的测定, $\varphi = 19^\circ \sim 28^\circ$ 。故斜槽与排种轮轴线夹角 α_1 的初值确定为 30° 。

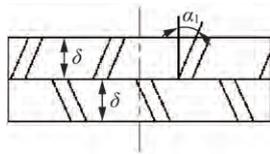


图5 排种轮结构

Fig. 5 Row wheel structure

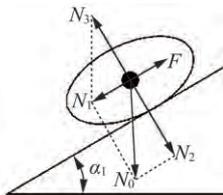


图6 种子受力分析

Fig. 6 Seed stress analysis

2.2.4 排种轮宽度确定

排种槽宽度对排种量的调节范围影响很大,如果

该宽度过大,则对小播量的控制精度影响较大;如果该宽度过小,则在播量要求较大时,排种轮必须在较高转速下工作,从而加大了种子损伤的风险;考虑本排种器要兼顾高低速播种的要求,以及其播量主要采用改变排种器转速的方式来实现,所以该排种器只要满足最小排量稳定性要求即可。设种子的长度为 l_z ,变异系数为 c_{l_z} ,槽宽为 δ ,其变异系数为 c_δ ,故根据满足种子顺畅进入种槽的可靠性要求,有

$$\phi\left(\frac{\delta - l_z}{\sqrt{(c_\delta \delta)^2 + (c_{l_z} l_z)^2}}\right) \approx 1 \quad (13)$$

查正态分布表可得

$$\frac{\delta - l_z}{\sqrt{(c_\delta \delta)^2 + (c_{l_z} l_z)^2}} = 3.8 \quad (14)$$

参考山东省种植最为广泛的小麦为济麦22,其种子长度均值为8 mm,变异系数0.1;槽宽的变异系数也为0.03,则计算可得 $\delta = 11.3$ mm,即排种器槽宽 $\delta_{\min} \geq 11.3$ mm,即可在理论上保证种子顺畅地充入种槽。

当然,也可以按照农业机械设计手册推荐的方法,即外排种轮排种器的 $\delta \geq (1.5 \sim 2) l_z$ 来确定,即 $\delta \geq 12 \sim 16$ mm。

由于该排种轮为两边完全对称,结构相互错位的螺旋槽结构组成,所以排种轮宽度为 2δ 。最终确定排种轮宽度为30 mm。

2.3 导种管结构确定

宽苗带播种不是简单的加宽小麦的播种宽度,而是需要考虑小麦生长过程的采光、通风以及土壤中水、肥供给的均衡性,根据小麦生长的边际效应,即苗带两边的植株有着比较充足的光、水、肥条件,而苗带中部的植株水肥供给相对受限,最终决定了苗带植株分布最佳为中疏边密结构^[12-14],从而对导种提出了新的要求。

2.3.1 布种口结构

如前所述,排种器出来的种子力求分布均匀,而苗带布种要求中疏边密,所以要实现该农艺,则必须对排种管结构进行改造,将燕尾槽式布种器设计为中间凸起。

2.3.2 种子在苗带截面的分布模型

为了实现中疏边密的播种要求,首先确定了种子在苗带宽度的分布规律,取单位长度的苗带进行布种量统计,设苗带中部的种植密度为 q_0 ,两边的种植密度的增长率为 k' 倍,则在苗带宽度为 $2l_2$ 的边际种植密度为 $k'q_0$,确定种子分布模型。如本研究考虑种子分布的连续性和降低布种口的制造工艺,选用了二次函数模型进行回归,即以布种口中部为 O 点,建立如图7所示的坐标系,则有

$$y = a_1 x^2 + b_1 x + c_1 \quad (15)$$

由上所述,该二次函数通过点 $(-b, k'q_0), (0, q_0)$ 和 $(b, k'q_0)$,代入式(15)有

$$\begin{cases} a_1 = k'q_0/b^2 \\ b_1 = 0 \\ c_1 = q_0 \end{cases} \quad (16)$$

即种子在苗带宽度的分布模型为

$$y = \frac{k'q_0}{b^2}x^2 + q_0 \quad (17)$$

进一步,按照种子在布种口斜面均匀分布,要满足上述农艺布种要求,则布种口的曲线应该与上述种子分布模型正好相反。即

$$y = -\frac{k'q_0}{b^2}x^2 - q_0 \quad (18)$$

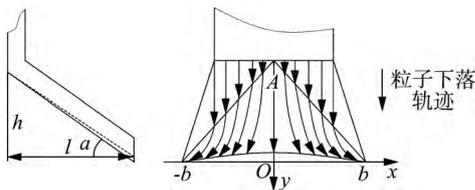


图 7 布种口结构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of seed port structure

2.3.3 布种口角度的确定

为了保证从导种管出来的种子沿着布种口能稳定滑落,要求布种口最高处与导种管的连线与水平面的夹角 ϵ 大于种子与导种管之间的摩擦角 φ' 以及种子的休止角 ζ 。

根据相关资料查阅,小麦种子与排种管的摩擦角为 $28.5^\circ \sim 36.8^\circ$,其休止角为 $23^\circ \sim 38^\circ$,结合该角度过大,则种子在水平方向的分速度越小,即作业速度对播种均匀性影响较大,故本研究将其确定为 $40^\circ \sim 45^\circ$ 。

根据理论分析并结合 EDEM 仿真优化,得出当布种器的下种角 $\epsilon = 45^\circ$,中间凸起的高度 $h' = 5 \text{ mm}$ 时,既能实现分种要求,又能保证排种顺畅。其最终排种效果如图 8 所示,苗带两边密、中间疏,满足新农艺要求。对苗带上种子分布情况进行统计和处理,得到苗带种子分布曲线如图 9 所示,阴影部分总面积为 s ,曲线为倒正态分布,函数表达式为

$$f(x) = -\frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} + k \quad (19)$$

式中: k ——调节系数。

其中 $\mu = 0; \sigma = 1$ 。



图 8 种子分布图

Fig. 8 Seed distribution map

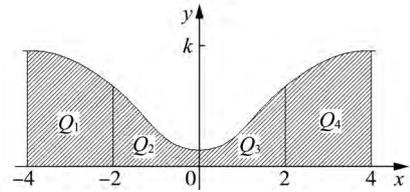


图 9 苗带种子分布曲线图

Fig. 9 Seedling belt seed distribution curve

根据边行优势和新农艺要求,对苗带种子分布合格率进行评定,若每组统计苗带长度过长则影响评测准确性,确定为每 1 m 为一组检测单位,分别记录统计每组分布在 Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 的种子数量,当 $(Q_3 + Q_4)/S \geq 0.7$ 时,即为合格。

3 离散元仿真

考虑到高速排种对种子的损伤较高,为降低种子的机械损伤,进一步优化排种轮齿参数,在理论分析的基础上应用 EDEM 仿真软件,对关键参数排种轮齿脊数进行优化分析并探索斜槽角度对排种效果的影响。

本研究所用小麦籽粒选用种植面积较广、品质较优的济麦 22,随机选取 100 粒籽粒,采用游标卡尺重复测量小麦籽粒长、宽、厚的尺寸参数取平均值。小麦籽粒模型的建立过程如图 10 所示,小麦籽粒粘结模型由 208 个直径为 0.3 mm 的球体颗粒粘结而成,其模型参数参考文献[20]。



图 10 小麦籽粒模型

Fig. 10 Wheat grain model

仿真过程采用颗粒替换实现在 EDEM 软件中生成小麦籽粒离散元模型,之后立即给颗粒添 BPM 黏结模型以便牢固黏结,并通过改变排种轮齿脊数 Z 和斜槽角度 a_1 进行两因素三水平仿真试验,试验指标为籽粒破碎率和排种均匀性,并将建立的排种器三维结构导入 EDEM,得到排种器仿真模型,其仿真环境如图 11 所示。

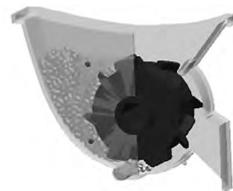


图 11 离散元仿真

Fig. 11 Discrete element simulation

仿真试验共分为 9 组,每组生成 1 200 粒小麦籽粒离散元模型进行试验(表 1),每组试验重复 5 次找出发生破碎的籽粒(图 12(a)),统计其发生破碎籽粒的数

量并取平均值,根据高速排种要求,排种轮转速选为45 r/min,各组排种效果情况如图12(b)所示。

表1 仿真试验分组
Tab. 1 Simulation test group

因素	分组								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Z/个	7	7	7	8	8	8	9	9	9
$\alpha_1/^\circ$	10	30	50	10	30	50	10	30	50

从图12(a)可以看出,籽粒最易在上下两端较细处以及中间腹沟处断裂破碎,符合小麦籽粒自身力学特性。从图12(b)可以看出,在排种轮转速相同的情况下,排种速度随排种轮齿脊数的增加呈现逐渐下降的趋势,原因是由于齿脊数的增加占据了排种空间;排种速度随斜槽角度的增加呈缓慢下降趋势,原因是由于角度变大,斜槽对种子摩擦力变小,滑移增加。籽粒破碎率随排种轮齿脊数的增加呈现逐渐升高趋势,原因是齿脊数增多,排种轮每转一周齿脊与籽粒碰撞的次数增大;斜槽角度为10°时,籽粒破碎率急剧上升,原因是籽粒在相间齿槽内流动性差,挤压严重,斜槽角度为30°和50°时,籽粒破碎率相近且较低。综合考虑最优参数组合为:齿脊数为7,斜槽角度为30°,可在满足高速排种的同时降低籽粒破碎。

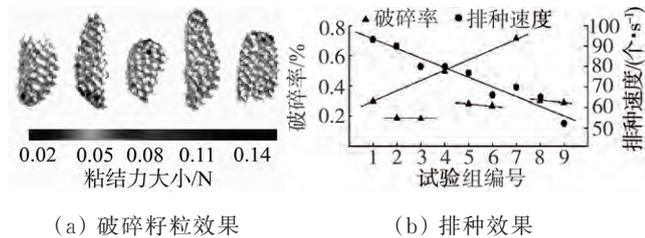


图12 破碎籽粒及排种效果

Fig. 12 Effect of grain breakage and seed

4 试验设计与结果分析

4.1 试验条件

依据上述设计要求,研发了相应的试验样机,如图13所示。本次试验在临淄富群农机合作社进行,试验田上茬作物为玉米,秸秆经1次还田和2次旋耕处理,处理后秸秆较为细碎,且与土壤混合均匀。试验条件为:耕层土壤深度为10 cm、20 cm、30 cm,土壤含水率分别为11.8%、19.7%、23.2%,土壤坚实度分别为1.1 MPa、3.7 MPa、4.6 MPa。试验材料为济麦22号,其物理特性为千粒质量44.6 g,容重773.2 g/L,含水率11.2%,净度99.2%以上,试验用拖拉机为约翰迪尔-1204型拖拉机,作业速度为8 km/h以上。主要的试验内容包括:排种器性能试验、总排量稳定性试验、各行排量一致性试验、苗带种子分布合格率试验等。



图13 试验样机田间作业

Fig. 13 Experimental prototype field work

4.2 性能试验

根据国家标准GB/T 9478—2005《谷物条播机试验方法》及机械行业标准JB/T 6274.1—2013《谷物播种机第1部分:技术条件》中规定的总排量稳定性测试方法进行试验。

- 1) 排种轴转速分别设置为25 r/min、30 r/min、35 r/min、40 r/min、45 r/min、50 r/min。
- 2) 每次试验的排种时间设置为30 s。
- 3) 分别测量排种轮在不同转速情况下排种器排出的种子质量,每组试验重复5次。
- 4) 计算平均排种量 \bar{x} 、标准差 S 和变异系数 φ 、种子破碎率 τ 。为方便各行小麦种子的收集,试验开始前需要用收集袋将排种口套住。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (20)$$

$$S = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2} & n < 30 \\ \sqrt{\frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x})^2} & n \geq 30 \end{cases} \quad (21)$$

其中,当 $n < 30$ 时,分母为 $n-1$;当 $n \geq 30$,分母为 n 。

$$\varphi = \frac{100S}{\bar{x}} \quad (22)$$

$$S_p = \frac{\sum S_i}{n} \quad (23)$$

$$\tau = \tau_1 - \tau_0 = \frac{S_p}{\bar{x}} \times 100\% - \tau_0 \quad (24)$$

式中: S_p ——平均破碎量,g;

S_i ——第 i 次破碎量,g;

n ——试验次数;

τ_1 ——试验后平均破碎率,%;

τ_0 ——原始平均破碎率,%。

试验结果如表2所示。由表2可以看出,在排种轮不同的转速下,试验过程中所测得的变异系数最大为0.59%,籽粒破碎率最大为0.35%,与离散元仿真试验结果一致。根据国家标准中总排量变异系数值不大于1.3%,籽粒破碎率均小于0.4%,符合排种器的性能要求,且对高低速作业具有较为稳定的作业性能。

表 2 排种器性能及各行排量稳定性测试结果

Tab. 2 Test results of performance and stability of discharge device

排种轮转速 (r·min ⁻¹)	各次试验总排量/g					平均排量/g	标准差	变异系数/%	种子破碎率/%
	1	2	3	4	5				
25	314.03	313.96	317.03	314.23	315.78	316.75	1.096	0.34	0.18
30	376.36	381.36	377.69	376.21	380.32	377.90	2.230	0.59	0.20
35	462.83	460.45	461.94	463.21	462.17	462.12	1.063	0.23	0.23
40	509.58	511.81	512.68	511.23	513.46	511.75	1.481	0.29	0.25
45	555.99	561.47	563.81	561.78	564.21	561.45	3.283	0.58	0.29
50	614.28	612.33	615.21	612.16	614.72	613.74	1.405	0.23	0.35

4.3 各行排量一致性、苗带种子分布合格率及播种密度试验

各行排量一致性测试是考核不同行间排种器作业性能稳定性的重要参数,根据国家标准 GB/T 9478—2005《谷物条播机 试验方法》规定的测试方法进行。

1) 机组前进速度分别取 8 km/h、10 km/h、12 km/h,三个水平;排种轴转速取 30 r/min、35 r/min、40 r/min、45 r/min、50 r/min,三个水平。

2) 分别测定在不同水平组合下各行的排量一致

性情况,每组测量时间为 30 s。

3) 每次测量时从 12 行中任取 6 行进行称重测量。

4) 计算各行平均排种量、标准差、变异系数、播种密度和分布合格率。试验结果如表 3 所示。

分布合格率

$$\phi = \frac{A}{x} \quad (25)$$

式中: A——符合宽苗带正态分布的排种量, g。

表 3 各行排量一致性、苗带种子分布合格率及播种密度试验

Tab. 3 Consistency of discharge in each row, the qualified rate of seed distribution in seedling belt and seeding density test

机具前进速度 (km·h ⁻¹)	排种轮转速 (r·min ⁻¹)	各行排量/g						平均排量/g	标准差	变异系数/%	播种密度 (g·m ⁻²)	分布合格率/%
		1	2	3	4	5	6					
8	30	31.50	32.33	33.10	32.76	32.50	30.61	32.13	0.92	2.86	10.64	94.5
	35	36.11	37.08	35.07	37.32	36.25	37.48	36.55	0.84	2.30	12.07	96.3
	40	42.68	41.23	43.12	40.29	41.28	40.41	41.50	1.17	2.82	13.40	93.7
	45	45.55	46.82	47.31	45.06	47.17	46.03	46.32	0.84	1.81	15.04	95.1
	50	50.32	51.23	53.86	51.35	52.23	49.29	51.38	1.57	3.06	16.78	95.6
10	30	32.45	32.31	31.89	33.51	32.21	31.68	32.34	0.64	1.98	9.25	93.8
	35	36.85	35.08	37.94	36.47	37.29	36.08	36.62	0.91	2.48	10.50	92.5
	40	42.28	42.31	41.32	42.48	43.16	42.24	42.13	0.71	1.69	11.88	95.1
	45	46.88	47.46	45.68	46.39	45.61	44.46	46.08	0.97	2.11	13.29	95.7
	50	51.76	52.13	50.67	53.35	52.22	53.12	52.21	0.97	1.86	14.87	93.5
12	30	31.76	32.12	30.14	31.65	33.02	31.42	31.69	0.94	2.97	7.52	94.3
	35	35.08	37.33	37.30	36.04	37.02	36.63	36.57	0.80	2.19	8.78	94.1
	40	42.86	41.32	41.03	40.28	42.39	41.32	41.53	0.94	2.26	10.63	92.7
	45	47.78	45.02	46.39	46.82	47.08	46.25	46.56	0.85	1.83	11.94	95.2
	50	52.08	53.65	51.72	50.66	51.25	50.76	51.69	1.11	2.15	13.58	94.5

由表 3 可以看出,在上述试验条件下,样机各行排量一致性变异系数 ≤ 3.06%,试验测定值小于 JB/T 6274.1—2013《谷物播种机第 1 部分:技术条件》中规定的各行排量一致性变异系数值 3.9%,因此,气力输送式小麦排种系统的各行排量一致性符合相关标准的要求。

经过排种器性能试验、总排量稳定性试验、各行排量一致性试验、苗带种子分布合格率试验,得到排种器

的各项指标皆满足国家技术要求。但是若机组前进速度过慢,排种轮转速过快,就会造成播种密度过高,不仅浪费苗种还会降低小麦的抗倒伏能力,且不利于采光、通风;若机组前进速度过快,排种轮转速过慢,就会造成播种密度过低,减产严重。所以根据文献可知,小麦最佳播种密度在 10.5~13.5 g/m²,且最低不低于 9 g/m²,最高不超过 15 g/m²。最佳的机组前进速度与

排种轮转速配比:机组前进速度为8 km/h,排种轮最佳转速范围为30~40 r/min;机组前进速度为10 km/h,排种轮最佳转速范围为35~45 r/min;机组前进速度为12 km/h,排种轮最佳转速范围为40~50 r/min。

5 结论

1) 针对山东省小麦玉米轮作的种植制度,结合小麦宽苗带播种的农艺要求,开发与玉米种植配套小麦宽苗带播种新农艺。

2) 设计小麦宽苗带高速排种器,对排种器的关键参数进行理论分析和离散元仿真研究,确定齿脊数为7,排种轮直径为60 mm,排种轮宽度为26 mm。

3) 基于宽苗带播种和边际效应的要求,建立布种器结构和苗带种子分布的数学模型,为不同地区、不同要求下的宽苗带布种器设计提供理论参考。

4) 对小麦排种器进行排种器性能试验,籽粒破碎率最大为0.35%;总排量稳定性试验,最大变异系数为0.59%;各行排量一致性试验,最大变异系数为3.06%;苗带种子分布合格率试验,合格率均大于92%。各项指标皆满足国家技术要求。

5) 对依据小麦宽苗带播种新农艺所设计的宽苗带播种系统进行试验,该排种器对高低速有着良好的作业适应性,且在作业速度为12 km/h、排种轮转速为45 r/min时,行间变异系数为1.83%,性能稳定;在上述条件下,通过宽苗带布种器形成的苗带中种子分布合格率达到95.2%,实现小麦宽苗带播种的农艺要求;试验测得苗带平均宽度为12 cm,与理论设计宽度相符合。

参 考 文 献

- [1] Jack D S, Hesterman D C, Guzzomi A L. Precision metering of Santalum spicatum (Australian Sandalwood) seeds [J]. *Biosystems Engineering*, 2013, 115(2): 171-183.
- [2] Nejadi J, Raoufat M H. Field performance of a pneumatic row crop planter equipped with active toothed coulter for direct planting of corn in wheat residue [J]. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2013, 11(2): 327-334.
- [3] 刘彩玲,魏丹,都鑫,等. 宽苗带勾型窝眼轮式小麦精量排种器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(1): 75-84.
- [4] 姜萌,刘彩玲,魏丹,等. 小麦宽苗带精量播种施肥机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(11): 53-62. Jiang Meng, Liu Cailing, Wei Dan, et al. Design and test of wide seedling strip wheat precision planter [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(11): 53-62.
- [5] 牛琪,王庆杰,陈黎卿,等. 秸秆后覆盖小麦播种机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(11): 52-59. Niu Qi, Wang Qingjie, Chen Liqing, et al. Design and experiment on straw post-covering wheat planter [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(11): 52-59.
- [6] 翟萌萌. 基于EDEM的小麦宽幅精量播种装置优化设计与试验[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
- [7] 于兴瑞,耿端阳,杜瑞成,等. 气力输送式小麦免耕施肥播种机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(S1): 141-148. Yu Xingrui, Geng Duanyang, Du Ruicheng, et al. Design and experiment of wheat planter by pneumatic conveying with no-tillage [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(S1): 141-148.
- [8] 张银平,杜瑞成,刁培松,等. 正反转组合式水稻宽苗带灭茬播种机设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(3): 7-13. Zhang Yinping, Du Ruicheng, Diao Peisong, et al. Design and experiment of wide band seeding rice seeder with reversed stubble cleaning and anti-blocking [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(3): 7-13.
- [9] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上册)[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [10] 张波屏. 播种机械设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [11] 赵金,郑超,张晋国,等. 差速充种沟式小麦单粒排种器优化设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(12): 65-74. Zhao Jin, Zheng Chao, Zhang Jinguo, et al. Parameter optimal and experiment of differential filling groove single grain seed-metering device for wheat [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(12): 65-74.
- [12] 李拴良,任长宏,格桑曲珍,等. 宽幅硬茬播种对冬小麦生长、产量及品质的效应[J]. *麦类作物学报*, 2015, 35(1): 80-85.
- [13] 孔令英,赵俊晔,于振文,等. 宽幅播种条件下种植密度对小麦群体结构和光能利用率的影响[J]. *麦类作物学报*, 2020, 40(7): 850-856.
- [14] 李世莹,冯伟,王永华,等. 宽幅播种带间距对冬小麦冠层特征及产量的影响[J]. *植物生态学报*, 2013, 37(8): 758-767.
- [15] 刘凡一,张舰,李博,等. 基于堆积试验的小麦离散元参数分析及标定[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(12): 247-253. Liu Fanyi, Zhang Jian, Li Bo, et al. Calibration of parameters of wheat required in discrete element method simulation based on repose angle of particle heap [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(12): 247-253.