

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.007

锥面导流水平盘式小麦精量排种器设计与试验

刘彩玲 都鑫 张福印 马拓 张皓瑒 黎艳妮

(中国农业大学农业农村部土壤-机器-植物系统技术重点实验室, 北京 100083)

摘要:为实现小麦低播量精密播种,提高小麦精密排种器播种精度,提出了一种锥面导流水平盘式小麦排种器,对关键参数进行了设计和理论分析,通过 EDEM 离散元软件完成了导条型式、型孔个数、锥盘转速、锥盘锥角对充种性能影响的单因素试验。在此基础上以锥盘转速、种层厚度和型孔长度为试验因素进行了多元二次回归旋转正交组合试验并应用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验数据进行分析,得到回归模型和因素对指标影响关系,确定了对单粒率影响由大到小依次为锥盘转速、型孔长度和种层厚度;对合格率影响由大到小依次为锥盘转速、种层厚度和型孔长度,转速和种层厚度、种层厚度和型孔长度间存在交互作用。基于回归模型进行多目标参数优化并对最优组合参数进行排种性能的台架试验验证,结果表明,在转速 19 r/min、型孔长度 8 mm、种层厚度为 8 mm 时排种合格率为 90.13%、漏充率为 9.87%、单粒率为 49.50%,与仿真优化结果相吻合,验证了仿真优化结果的可靠性。与原锥盘排种器的性能对比试验表明,设计的锥面导流水平盘式排种器在速度为 3、4、5 km/h 时,合格率分别提高了 3.4、2.1、1.9 个百分点,3 km/h 时破碎率降低了 0.2 个百分点,无论排种性能还是破碎率指标均优于原锥盘排种器。

关键词:小麦;排种器;渐开线条;离散元法;设计;试验

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)12-0056-10

Design and Test of Cone Diversion Type Horizontal Plate Wheat Precision Seed-metering Device

LIU Cailing DU Xin ZHANG Fuyin MA Tuo ZHANG Haoyang LI Yanni

(Key Laboratory of Soil - Machine - Plant System Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to achieve precision seeding of low sowing quantity of wheat and improve the accuracy of precision seeding of wheat, a kind of cone diversion type horizontal plate wheat precision seed-metering device was proposed. The design and theoretical analysis of key parameters were carried out. Single factor test on the effects of the guide bar form, number of holes, cone disc speed and cone disc angle on seed-filling performance were studied by EDEM discrete element software, and then the parameters were determined. On this basis, the multiple quadratic regression rotation orthogonal combination test was carried out with cone speed, seed-layer thickness and length of hole, and then the test data was analyzed by Design-Expert 8.0.6 software. The regression model and the influence of factors on the index were obtained. The influence relation of factors on the single rate was determined and the order of importance was the cone disc speed, length of hole and seed-layer thickness in turn. The order of importance of the qualified rate was the cone disc speed, seed-layer thickness and length of hole in turn. Interaction between the length of a hole and the seed-layer thickness, cone disc speed and seed-layer thickness cannot be ignored. Based on the regression model, the parameters were optimized and the seed metering device under the optimized parameter combination was tested for seed-metering performance. The results showed that the qualified seed-metering rate, the leakage rate and single rate was 90.13%, 9.87% and 49.50%, respectively, and the test results matched the simulation optimization results. The reliability of the simulation optimization result was verified. The performance comparison tests with the original cone seed-metering device showed that the designed cone diversion type horizontal plate wheat precision seed-metering device was better than the original cone disc seed-metering device in both metering performance

and breakage index. The qualified rate was increased by 3.4 percentage points, 2.1 percentage points and 1.9 percentage points at 3 km/h, 4 km/h and 5 km/h, respectively, and the damage rate was decreased by 0.2 percentage point at 3 km/h. The designed cone diversion type horizontal plate wheat precision seed-metering device can effectively improve seed filling performance and qualification index and reduce sowing quantity and breakage rate. The research results provided a reference for the design of wheat precision seeder used in wide seedling strip.

Key words: wheat; seed-metering device; involute guide bar; discrete element method; design; test

0 引言

小麦是我国主要粮食作物之一,在我国粮食安全生产上占有举足轻重的地位,提高小麦产量意义重大^[1]。近年来,随着中耕作物精密播种技术日趋完善,逐渐将精播技术用于传统的条播作物,小麦精密播种高产栽培要求种子株距、行距和播深精确,相对于传统的密集条播作业可减少基本苗,建立合理群体结构,培育壮苗,成穗率高,具有节省良种、降低成本、提高产量和经济效益的作用^[2-4]。

小麦精密播种新农艺的出现对精密排种器提出了更高的要求。我国学者从 20 世纪 70 年代开始研制小麦精密排种器,先后研制了水平环槽式、双辊式倾斜轮孔式、锥盘式、内充种轮式、倾斜外槽轮上排种式、新型组合吸孔式等多种形式的小麦精密排种器^[5-7],但应用于生产实际的并不多,主要原因在于没有合适的精密排种器,分析其原因,像玉米、大豆等近圆形的大粒种子已基本上实现了单粒精密播种^[8-13],但对于像小麦这种具有极不规则的侧面带“腹沟”的非圆纺锤状外形,充种过程复杂且具有不确定性,精密播种远比球形种子难实现。目前我国小麦精播仍停留在小播量的半精量播种作业,一般采用外槽轮式排种器,存在着因外槽轮式排种器的脉动性导致小麦播种机播种不均匀,幼苗拥挤生长,缺苗断垄或疙瘩苗的现象,无法满足小麦生产对精密播种的要求^[14-17]。

为提高小麦精密播种排种器的播种精度,实现低播量精密播种,本文基于小麦精播高产栽培技术,农机与农艺相结合,提出一种在锥盘锥面增加渐开线导条的锥面导流水平盘式小麦排种器,对关键参数进行设计和排种器工作性能的虚拟仿真分析,并通过台架试验优化关键参数,旨在提高充种性能和排种合格指数,降低播量和破碎率,以期小麦精密播种机的设计提供参考。

1 工作原理与参数设计

1.1 结构与工作原理

锥面导流水平盘式精密排种器结构如图 1 所示,由种箱、嵌入导条的锥盘、种刷、底座、投种装置、

投种盘等组成。锥盘采用中央锥面与周向充种环带组合的结构将型孔区限制在窄小环带上,利用旋转离心力和斜面分力将种箱内种子压力集中在充种区,嵌入渐开线导条的锥盘增加对种子流动层的扰动,降低种子间摩擦力,利于引导种子沿曲面做定向流动,使种子长轴沿圆周切线方向排列,静、动导向结构使箱内混乱无序的小麦种子完成导向和排序,增加种子主动充填能力和囊种机率,提高充入长圆形型孔的单粒种子充填性能;弹条式投种装置结构简单,工作可靠,通过连接型孔之间的导种槽引导可靠投种,缓解了柱塞式投种器橡胶圈磨损、弹簧弹力对种子破碎的影响。

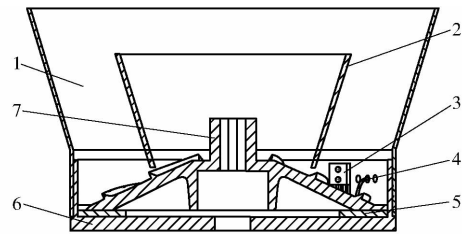


图 1 锥面导流水平盘式排种器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of cone diversion type horizontal plate metering device
1. 种箱 2. 种层厚度控制装置 3. 种刷 4. 投种装置 5. 投种盘 6. 底座 7. 锥盘

排种器工作原理如下:种箱内装有种子,种子通过种层厚度控制装置控制种子流动,确保种层厚度恒定,在重力、离心力、种间作用力及导条引导作用下,呈纺锤状或“拉长椭球状”小麦种子被水平旋转的排种盘按运动阻力最小的方向进行导流排序,以长轴沿圆周切线方向定向排列并作同心圆运动,顺利囊入周向排列的型孔内;当锥盘转动至种刷位置时清除型孔内多余的种子,最后在弹条式投种装置作用及自身重力作用下排出型孔,实现一器三行的小麦精密排种。

1.2 锥盘设计

1.2.1 锥盘直径和锥角

锥盘直径和锥角影响型孔充填性能,直径较小的种子充填性能降低,直径较大的可一定程度改善型孔充填性能;锥盘锥角影响斜面分力进而影响周向充种环带上的种子充填力,参考已有研究锥盘,直

径确定为 220 mm,设锥角分别为 30°、35°、40°、45° 进行优化。

1.2.2 锥盘导条型式

为提高种子充填性能,锥盘表面嵌入导条,以增加对种群的扰动和对种子进行梳刷、排序及导向,设定导条型式为渐开线导条、直导条和无导条的 3 种锥盘进行优化,如图 2 所示。

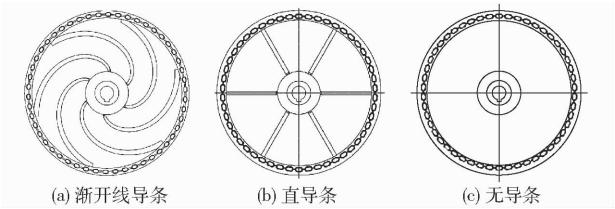


图 2 导条型式
Fig. 2 Guid bar forms

渐开线导条的轨迹线为渐开螺旋面与旋转锥面的交线,滚动角为 ϕ ,其渐开线方程为^[18]

$$\begin{cases} x = 28.5(\cos\phi + \phi\sin\phi) \\ y = 28.5(\sin\phi - \phi\cos\phi) \end{cases} \quad (1)$$

1.2.3 型孔设计

型孔参数是排种器设计关键。小麦种子尺寸长度大于宽度,宽度大于厚度,依据概率法计算种子平躺、侧卧概率远大于竖立的概率,同时依据最小势能原则,确定平躺状态为最稳定的充种方式^[19],如图 3 所示。

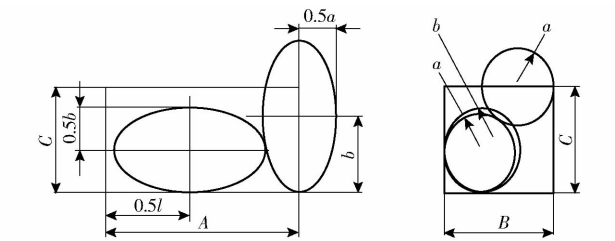


图 3 型孔尺寸计算示意图
Fig. 3 Schematic diagram of hole size calculation

型孔内只能囊括一粒种子且不能囊括两粒种子应满足

$$l_{\max} < A < l + \frac{1}{2}a \quad (2)$$

$$b_{\max} < B < 2a \quad (3)$$

$$B < l \quad (4)$$

$$b_{\max} < C < \frac{1}{2}a + \sqrt{a^2 - (B - a)^2} \quad (5)$$

$$B > C \quad (6)$$

式中 A ——型孔长度,mm
 B ——型孔宽度,mm
 C ——型孔高度,mm
 $l_{\max}$ ——小麦长度最大值,mm
 $b_{\max}$ ——小麦宽度最大值,mm

l ——小麦长度平均值,mm
 a ——小麦厚度平均值,mm

锥盘转动过程中带动种子长轴沿圆周切线方向定向排列并作同心圆运动,因此设计以沿圆周切线方向排列的长圆形型孔,以衡观 35 小麦种子为研究对象,测得长、宽、厚的平均值分别为 6.21、3.42、3.19 mm,型孔宽度固定为 5 mm,型孔长度在 6.5 ~ 11.3 mm 范围内变化,对其充种效果进行优化。型孔上表面设有 45°倒角利于种子顺利囊入型孔并减小破碎;型孔向下呈喇叭状,以利于种子在投种时顺利投落。采用导种环槽连接型孔,增加种子囊入型孔机率。型孔布置及型孔形状见图 4。

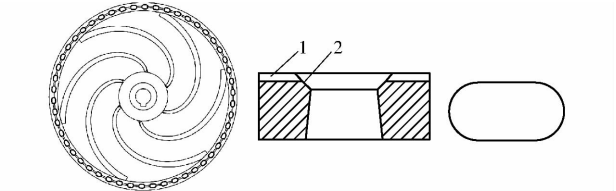


图 4 型孔布置和型孔形状
Fig. 4 Distribution and shape of hole
1. 导种环槽 2. 上表面倒角

2 排种器工作过程分析

2.1 种子在锥盘上的力学分析

种子从供种装置落下,在锥盘锥面和导条作用下流向周向充种环带。以种子所在位置为圆心,建立空间直角坐标系, x 轴过种子与导条侧面接触点沿切线方向并与锥盘母线垂直, y 轴垂直于导条侧面且于锥盘母线平行, z 轴方向过种子与锥面的接触点且垂直于锥面,种子在锥盘上受力如图 5 所示。

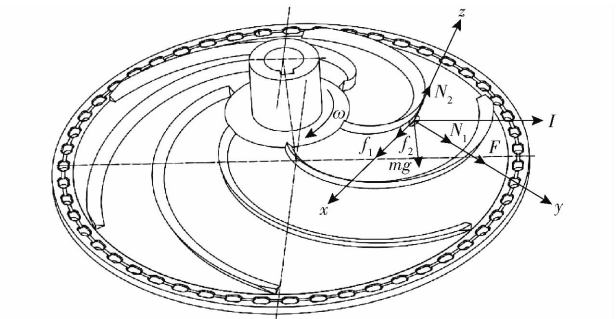


图 5 小麦种子在锥盘上的受力分析
Fig. 5 Force analysis of seed on cone disc

由图 5 可得

$$f_1 = \mu N_1 \quad (7)$$

$$f_2 = \mu N_2 \quad (8)$$

$$F = 2m\omega V_r \cos\theta \quad (9)$$

$$I = m\omega^2 r \quad (10)$$

式中 f_1 ——导条侧面对种子的摩擦力
 N_1 ——导条侧面对种子的支撑力

f_2 ——锥盘盘面对种子的摩擦力
 N_2 ——锥盘盘面对种子的支撑力
 μ ——种子与锥盘的静摩擦力因数
 F ——科氏力 V_r ——种子运动速度
 m ——种子质量 θ ——锥盘锥角
 ω ——锥盘角速度
 r ——种子所在位置半径
 I ——种子受到的离心力

2.2 种子充入型孔的运动学分析

种子是否落入型孔取决于其沿型孔的相对运动情况。单粒种子即将进入型孔时的运动学分析如图 6 所示, O 为种子质心, 以种子长轴方向为 X 轴方向, 则种子充入型孔的相对极限速度 V_{rmax} 及锥盘极限转速 n_{max} 为^[20]

$$V_{rmax} \leq (E + D - L) \sqrt{\frac{g}{2(L - P)}} \tag{11}$$

$$n_{max} \leq \frac{30}{\pi R} (E + D - L) \sqrt{\frac{g}{2(L - P)}} \tag{12}$$

式中 D ——型孔长度, mm
 L ——种子质量中心与排种盘距离, mm
 E ——上倒角宽度, mm
 P ——环槽深度, mm
 R ——锥盘半径, mm

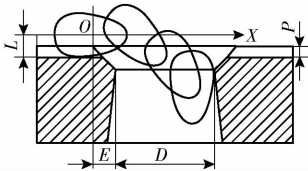


图 6 种子充入型孔时的运动学分析

Fig. 6 Kinematic analysis of seed filling holes

种子在锥盘上力学分析和种子充入型孔的运动学分析表明, 锥盘的转速、锥角、型孔参数均影响种子的充填过程。

2.3 清种过程分析

采用猪鬃毛刷进行清种。排种器工作时, 种子在锥盘带动下沿长轴方向排列, 随排种盘一起运动, 运动到刮种器前层层叠加, 水平种子层的相对速度自下而上递减, 最底层种子的拖带速度最大, 向型孔钻入的力最大, 其受力如图 7 所示。

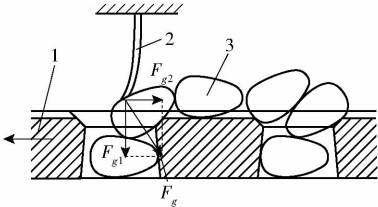


图 7 毛刷清种装置受力分析

Fig. 7 Force analysis of brush clearance device

1. 锥盘 2. 毛刷 3. 种子

毛刷给种子的梳刷力 F_g 可分解为水平分力 F_{g1} 和垂直分力 F_{g2} , F_{g2} 把型孔中露在外部的种子向后梳刷, 使其反向从型孔中退出; F_{g1} 则给种子一定的下压力, 受到下压力的种子在型孔中稳定地随锥盘一起转动。毛刷质地柔软, 适应性好, 减少种子损伤率。

2.4 投种过程分析

设计的弹条式投种装置采用刚性较好的钢丝, 弹性恢复系数好, 耐磨损, 对种子损伤小, 工作噪声小。投种区种子受力分析如图 8 所示, 种子在重力 G 和投种推力 F_i 的作用下完成投种。

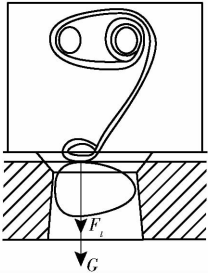


图 8 投种装置受力分析图

Fig. 8 Force analysis of seed-dropping device

3 EDEM 离散元仿真试验与优化

3.1 排种器仿真模型的建立

为便于仿真并减少计算量, 去除与接触无关部件。将 SolidWorks 软件创建的排种器三维模型导入到仿真软件 EDEM 中, 如图 9 所示。根据衡观 35 小麦种子的三轴尺寸, 使用多球面填充方式建立小麦颗粒模型。颗粒表面没有粘附力, 选择 Hertz - Mindlin 无滑动接触模型作为颗粒间及颗粒与排种器间接触模型。排种器用 ABS 工程材料注塑加工。为提高仿真精度, 颗粒与接触材料间的静摩擦因数与弹性恢复系数通过试验测定确定, 其余仿真边界参数参照文献[21 - 23], 确定仿真参数为: 小麦泊松比 0.42, 剪切模量 51 MPa; 颗粒与颗粒及颗粒与工程材料间的恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数分别为 0.42、0.53、0.07 和 0.25、0.56、0.05。为验证模型和仿真边界参数的正确性进行了小麦种子堆积角验证试验^[24], 测量 5 次求平均值, 得仿真休止角为 30.7°, 与实测休止角差值为 0.6°, 误差较小, 因此所建模型精度较高, 可用于仿真。

3.2 单因素仿真试验与结果分析

为便于参数设计, 对充种情况进行锥盘导条型式、型孔个数、锥盘转速、锥角的单因素仿真分析, 型孔长度为 7.5 mm, 各因素固定值分别为渐开线导条、50 个、15 r/min 和 30°, 试验指标合格为 1 ~ 2 粒/穴, 单粒为 1 粒/穴, 漏充为 0 粒/穴。

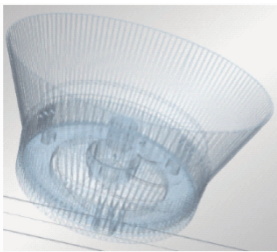


图 9 排种器仿真几何体模型
Fig. 9 Simulation model of seed-metering device

3.2.1 导条型式对充种性能的影响

导条型式分别为渐开线导条、直导条以及无导条时排种器的充种情况仿真结果如表 1 所示。

表 1 3 种导条型式下的仿真结果

Tab.1 Simulation results of three different guide bar types			
导条型式	单粒率/%	合格率/%	漏充率/%
渐开线导条	45.9	89.0	11.0
无导条	44.6	79.8	20.2
直导条	41.1	87.5	12.5

由表 1 可知,增加导条利于提高充种性能,渐开线导条优于直导条,直导条优于无导条,为进一步分析导条型式对充种过程的影响,从 EDEM 中输出不同导条型式下种子速度随时间变化情况如图 10 所示,可看出无导条时种子速度明显低于 2 种有导条情况,低于极限相对速度时增大相对速度可提高种子囊种的几率,计算种子速度的波动量由大到小分别为:无导条(0.005 923 m/s)、直导条(0.003 659 m/s)、渐开线导条(0.003 309 m/s),无导条时种子相对速度低且速度波动量大,种子不利于进入型孔且充填不稳定,因此,嵌入渐开线导条可提高排种器的充填性能。

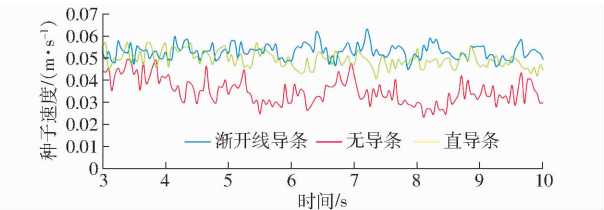


图 10 不同导条型式下种子速度随时间变化曲线
Fig. 10 Seed velocity changing curves in different guide strip types

3.2.2 型孔个数对充种性能的影响

合理配置型孔个数可消除型孔与型孔间种子混乱现象,为研究型孔个数对充种性能的影响,仿真分析了型孔个数分别为 39、42、50 个时排种器充种情况,结果如表 2 所示。

由表 2 可知,50 个型孔时充种性能较好,从图 11 可以看出,50 个型孔时种子速度最大,50、

表 2 不同型孔个数的仿真结果

Tab.2 Simulation results of different numbers of holes			
型孔个数/个	单粒率/%	合格率/%	漏充率/%
39	41.9	87.6	12.4
42	20.3	86.8	13.2
50	45.9	89.0	11.0

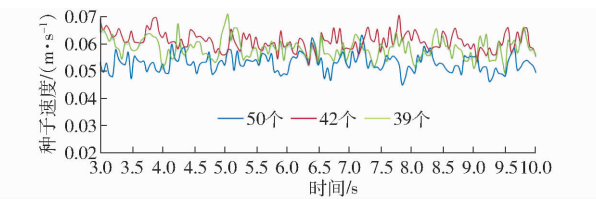


图 11 不同型孔个数下种子速度变化曲线
Fig. 11 Seed velocity changing curves in different numbers of holes

42、39 个型孔时,种子颗粒平均速度分别为 0.061 0、0.053 0、0.058 5 m/s,表明种子速度低于极限速度时,增大种子速度有利于提高充种性能,单粒率和合格率均有所增加,因此确定 50 个孔的型孔结构。

3.2.3 锥盘转速对充种性能的影响

转速对型孔囊种过程有重要的影响。转速为 15、20、25、30、35、40 r/min 时仿真数据结果如表 3 所示。

表 3 不同转速的仿真结果

Tab.3 Simulation results at different speeds			
锥盘转速/(r·min ⁻¹)	单粒率/%	合格率/%	漏充率/%
15	45.9	89.0	11.0
20	50.1	81.5	18.5
25	42.9	65.0	35.0
30	33.5	53.5	46.5
35	33.0	44.0	56.0
40	12.0	26.1	73.9

由表 3 可知,随锥盘转速增加合格率减小,漏播率增加。从图 12 可以看出,锥盘转速越大,种子的速度与速度的波动量都随之变大,种子速度远远超过极限速度导致合格率显著降低,漏播率显著上升,根据试验情况确定锥盘速度小于 30 r/min。

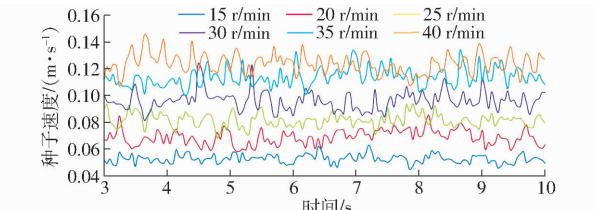


图 12 不同转速下种子速度随时间变化曲线
Fig. 12 Seed velocity changing curves at different speeds

3.2.4 锥盘锥角对充种性能的影响

基于前文分析研究锥盘锥角为 30°、35°、40°、45°时对充种过程的影响,仿真结果见表 4。

表 4 不同锥盘锥角的仿真结果

Tab.4 Simulation results at different cone angles

锥盘锥角/(°)	单粒率/%	合格率/%	漏充率/%
30	45.9	89.0	11.0
35	48.9	88.5	11.5
40	47.4	86.9	13.1
45	46.2	84.9	15.1

由表 4 可知,随锥盘锥角增加合格率减小,漏播率增加,从图 13 也可以看出,不同锥盘锥角种子均在 0.05 m/s 附近波动,但锥角越大,种子速度波动量越大,充种不稳定导致合格率降低,漏播率增加,因此确定锥盘锥角为 30°。

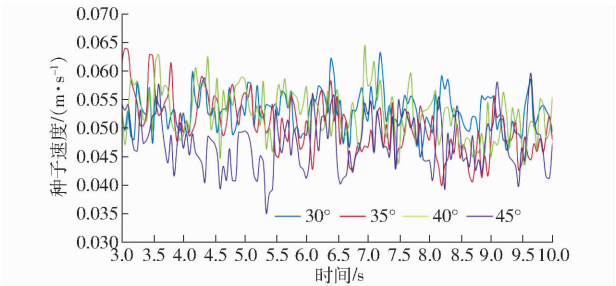


图 13 不同锥角下种子速度随时间变化曲线
Fig.13 Seed velocity changing curves at different cone angles

3.3 正交回归旋转中心仿真试验

基于单因素试验确定部分参数设计,锥盘为渐开线导条型式、型孔个数 50 个、锥盘锥角 30°,为进一步研究关键参数型孔长度、转速、种层厚度和各因素交互作用对排种器工作性能的影响,进行正交回归旋转组合试验,以确定最优参数组合。

3.3.1 仿真因素及水平

二次回归正交旋转组合试验因素编码如表 5 所示。

表 5 因素编码
Tab.5 Coding of factor levels

编码	因素		
	转速 $X_1/(r \cdot \min^{-1})$	种层厚度 X_2/mm	型孔长度 X_3/mm
-1.414	11.89	7.93	6.5
-1	15.00	10.00	7.2
0	22.50	15.00	8.9
1	30.00	20.00	10.6
1.414	33.11	22.07	11.3

3.3.2 试验设计方案与结果

采用 Design-Expert 8.0.6 对试验结果进行多元回归拟合分析,试验方案和结果见表 6。漏充率和合格率之和等于 100%,试验中没有出现每穴大于 2 粒及以上的充种情况,故漏充率回归模型检验、因素影响规律与合格率分析结论一致,因此只对合格率做方差分析。

表 6 二次回归旋转试验结果

Tab.6 Quadratic regression rotary experiment results

试验号	因素			单粒率 $Y_1/\%$	合格率 $Y_2/\%$	漏充率 $Y_3/\%$
	$X_1/$ $(r \cdot \min^{-1})$	$X_2/$ mm	$X_3/$ mm			
1	30.00	20.00	7.2	51.20	78.40	21.60
2	30.00	10.00	10.6	23.60	92.40	7.60
3	15.00	20.00	10.6	24.00	92.60	7.40
4	15.00	10.00	7.2	48.40	88.40	11.60
5	11.89	15.00	8.9	16.80	93.00	7.00
6	33.11	15.00	8.9	41.60	86.80	13.20
7	22.50	7.93	8.9	46.00	90.80	9.20
8	22.50	22.07	8.9	40.00	89.60	10.40
9	22.50	15.00	6.5	49.60	82.40	17.60
10	22.50	15.00	11.3	31.20	85.60	14.40
11	22.50	15.00	8.9	40.40	91.60	8.40
12	22.50	15.00	8.9	32.80	90.00	10.00
13	22.50	15.00	8.9	36.00	84.80	15.20

3.3.3 回归模型的建立与方程显著性检验分析

对数据进行二次多项式逐步回归拟合,依据系数间不存在线性相关性,剔除不显著因素但保留交互作用、高次项有影响的因素,对编码因素进行线性代换得单粒率 Y_1 、合格率 Y_2 回归响应面方程为

$$Y_1 = 195.17 + 2.23X_1 - 12.58X_2 - 18.24X_3 + 0.17X_1X_2 + 0.96X_2X_3 - 0.08X_1^2 \quad (11)$$

$$Y_2 = -7.04 + 1.25X_1 + 2.09X_2 + 15.85X_3 - 0.11X_1X_2 - 0.85X_3^2 \quad (12)$$

回归方程方差分析见表 7,单粒率、合格率回归模型 F 检验高度显著 ($P < 0.01$),失拟项均不显著 ($P > 0.1$),回归方程不失拟。依据表 7 中 F 值,转速对单粒率影响高度显著,型孔长度影响显著,三因素影响由大到小依次为转速、型孔长度和种层厚度,其中转速和种层厚度、种层厚度和型孔长度间存在交互作用;转速对合格率影响显著,其影响由大到小为转速、种层厚度和型孔长度,转速与种层厚度间交互作用不可忽略。

3.3.4 因素间交互作用的响应曲面分析

在试验因素范围内,分析因素间交互作用响应曲面。图 14 为转速和种层厚度交互作用对单粒率的影响,结果表明,在低转速区单粒率随种层厚度增加而减小,在高转速区呈相反规律,因为低转速时种层厚度增加加大底层种子正向压力,使种子充入型孔子的概率增加,因此单粒率降低;在高转速时种子与种盘相对速度增加,减少了种子与型孔接触机会,因此种层厚度增加时能一定程度上缓解转速带来的不利影响。在高种层厚度区单粒率随转速增加而增加,低种层厚度区随转速增加单粒率先增加后减小,

表 7 单粒率和合格率的方差分析

Tab.7 Variance analysis of single rate and qualification rate

方差来源	单粒率				合格率			
	自由度	均方差	F	P	自由度	均方差	F	P
模型	6	217.63	11.24	0.004 8	5	44.04	6.19	0.009 3
X_1	1	307.52	15.89	0.007 2	1	50.92	7.99	0.025 5
X_2	1	3.49	0.18	0.685 9	1	17.10	2.68	0.145 4
X_3	1	169.28	8.74	0.025 4	1	5.12	0.80	0.399 8
X_1X_2	1	84.36	4.36	0.081 9	1	31.50	4.94	0.061 6
X_2X_3	1	133.44	6.89	0.039 3				
X_1^2	1	148.05	7.65	0.032 6				
X_3^2					1	31.50	4.94	0.061 6
失拟项	4	21.76	1.49	0.438 6	5	3.86	0.31	0.876 5

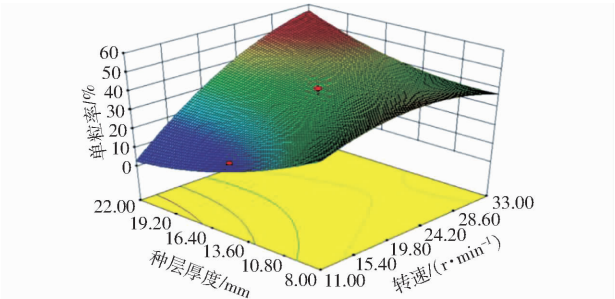


图 14 种层厚度与转速的交互作用(单粒率)

Fig. 14 Interaction between seed-layer thickness and speed

因为高种层厚度时转速越高越利于种子分层流动,正向压力促进种子进入型孔,低种层厚度时增加转速增加种子相对型孔的运动速度,过大的转速易使种子相对运动速度超过极限充种速度导致单粒率反而降低。

图 15 为种层厚度与型孔长度交互作用对单粒率的影响,结果表明,在低种层厚度区单粒率随型孔长度增加而减小,在高种层厚度区呈相反规律;在低型孔长度区,单粒率随种层厚度增大而减小,在高型孔长度区规律相反。主要原因为较小种层厚度时型孔长度越小,充入 2 粒种子的概率越小,单粒率增加,较大种层厚度使型孔中种子受到种群压力较大,加之型孔中种间作用力、型孔壁面摩擦力、底座摩擦力等综合力作用使型孔中状态不稳定的种子退出型孔,小范围内提高了单粒率。

转速与种层厚度间交互作用对合格率响应曲面图如图 16 所示,在低转速区合格率随种层厚度增大而减小,高转速区呈相反规律,因为低转速时种层厚度增加加大底层种子正向压力,使型孔充入种子概率增加,高转速时种子与种盘相对速度增加,减少种子与型孔接触机会,因此种层厚度增加时一定程度上缓解转速带来的不利影响,因此合格率增加;在低种层厚度区合格率随转速增加而减小,高种层厚度区呈相反规律,二者呈现较显著的相关性。

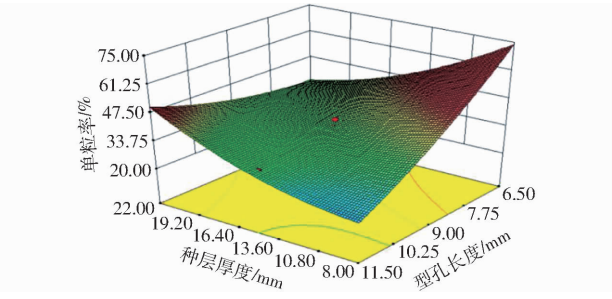


图 15 种层厚度与型孔长度交互作用(单粒率)

Fig. 15 Interaction between seed-layer thickness and hole length

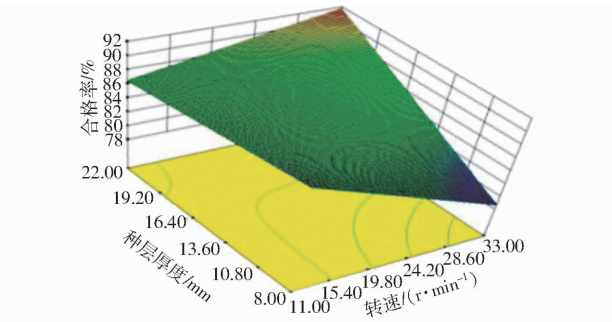


图 16 种层厚度与转速交互作用(合格率)

Fig. 16 Interaction between seed-layer thickness and speed

3.3.5 试验结果目标优化

为寻求约束条件范围内各因素最优组合,将合格率作为评价指标,结合因素边界条件建立数学模型,对充种性能指标回归模型进行多目标优化求解,优化目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \max Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t. } 11.89 \text{ r/min} \leq X_1 \leq 33.11 \text{ r/min} \\ 7.93 \text{ mm} \leq X_2 \leq 22.07 \text{ mm} \\ 6.5 \text{ mm} \leq X_3 \leq 11.3 \text{ mm} \end{cases} \quad (13)$$

求得优化解为转速 19.37 r/min、型孔长度为 7.90 mm、种层厚度为 8.00 mm 时,预测得到合格率为 89.50%,其中单粒率达到 50.60%。

4 排种器性能试验验证

4.1 排种器充种性能试验

为验证优化结果,选择与仿真条件一致的衡观 35 小麦种子进行试验,小麦千粒质量为 45 g,干基含水率为 11.3%,种子休止角为 31.3°,试验地点为中国农业大学排种试验室,试验装置见图 17,排种器组成见图 1。粒距合格率为合格粒距数与总粒距数比值,其中粒距小于 1.5 倍理论粒距为合格粒距,因为当型孔中充入 2 粒种子时,种子经排种器排出形成的两个粒距或将小于 0.5 倍理论株距,因此重播对于本文所设计的排种器来说仍满足 1~2 粒/穴的标准,属于合格粒距的范畴。

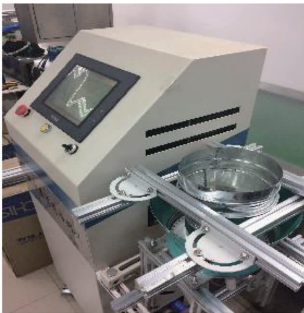


图 17 试验装置
Fig. 17 Test device

按照仿真优化参数 3D 打印嵌入渐开线导条锥盘,排种器参数设为转速 19 r/min、型孔长度 8 mm,种层厚度为 8 mm,锥盘锥角 30°,型孔个数 50 个,锥盘直径 220 mm,株距 5 cm,利用中国农业大学研制的排种器性能检测仪进行数据统计,对优化后的参数组合进行重复试验,重复 5 次后得粒距合格率平均值为 90.13%,漏充率为 9.87%,单粒率达到 49.50%,与仿真优化结果相吻合,验证了仿真优化结果的可靠性,但漏播率仍超过 5%,根据国家标准^[25],对于单粒精密播种机,当种子粒距不大于 10 cm 时,漏播指数不大于 15%,符合精播要求,因此设计的排种器符合国家标准。目前生产中应用的 2BJM 型小麦精密播种机粒距合格指数为 78.30%~87.94%^[26],因此优化后的锥面导流水平盘式排种器提高了排种精度。

4.2 与原锥盘排种器的对比试验

为对比分析锥面导流水平盘式排种器与现有锥盘排种器的工作性能,3D 打印嵌入渐开线导条锥盘,二者试验条件相同,型孔长度 7.4 mm,种层厚度为 8 mm,其余试验条件同上。

4.2.1 合格率对比试验

设定机具前进速度分别为 3、4、5 km/h,株距为 5 cm,试验测试 251 粒小麦种子,重复 3 次试验取平

均值,试验结果见表 8。

表 8 不同机具前进速度单因素试验结果
Tab. 8 Single factor test results at different advancing speeds

前进速度/ (km·h ⁻¹)	试验序号	锥面导流水平盘		原锥盘	
		合格 率/%	平均株 距/cm	合格 率/%	平均株 距/cm
3	1	90.0	4.30	87.1	4.25
	2	89.2	4.35	87.8	4.35
	3	87.5	4.40	81.6	4.20
	均值	88.9	4.35	85.5	4.27
	变异系数/%	1.4	1.10	3.9	1.80
4	1	84.2	4.45	83.5	4.55
	2	84.1	4.55	82.1	4.50
	3	85.8	4.50	82.2	4.65
	均值	84.7	4.50	82.6	4.57
	变异系数/%	1.1	1.10	1.0	1.70
5	1	78.7	4.70	75.2	4.65
	2	81.5	4.60	77.0	4.75
	3	76.8	4.65	79.1	4.55
	均值	79.0	4.65	77.1	4.65
	变异系数/%	2.9	1.10	2.5	2.20

表 8 表明,随机具前进速度增加,排种器合格率均呈下降趋势,当排种盘型孔数与粒距一定时机具前进速度与排种器转速呈正相关,因此机器前进速度对排种器工作性能的影响与转速对其影响规律一致,与仿真分析所得结论一致,验证了仿真分析的正确性。同时锥面导流水平盘式排种器比原锥盘排种器在前进速度为 3、4、5 km/h 时合格率分别提高 3.4、2.1、1.9 个百分点,表明锥面导流水平盘式排种器排种性能指标优于原锥盘排种器,证明导条的设置加强了种群流动性及对种子导向作用,增大了充种机率,从而提高了合格率。

4.2.2 排种器破碎率对比试验

根据 GB/T 6973—2005 破碎率测定试验方法进行破碎率对比试验,试验条件同上,设定机具前进速度为 3 km/h。破碎种子采用人工挑拣方法进行筛选,每次试验取样 3 000 粒测量排出种子质量和破碎种子质量,各重复 3 次试验求取平均值,计算种子破碎率(破碎种子质量与排出种子质量比值),结果如表 9 所示。

从表 9 可以看出,锥面导流式水平盘排种器破碎率较低,比原锥盘排种器破碎率小 0.2 个百分点,主要原因为原锥盘排种器限量刮种器在限量通道入口处破损种子甚至造成种子被拦腰折断;柱塞式投种器投种轮与种子接触面积大,摩擦力大,造成种子姿态变化的机会多,无形中加大了种子与型孔壁面及底座的摩擦力,增大种子破碎机率。改进后的毛

表 9 破碎率试验结果
Tab.9 Crushing rate test results

类型	试验序号	总质量/ g	破碎 质量/g	破碎率/ %
锥面导流水平盘	1	142. 26	0. 40	0. 28
	2	138. 83	0. 49	0. 35
	3	143. 96	0. 46	0. 32
	平均值	141. 68	0. 45	0. 32
原锥盘	1	147. 00	1. 02	0. 69
	2	140. 20	0. 47	0. 34
	3	141. 74	0. 72	0. 51
	平均值	142. 98	0. 74	0. 52

刷清种装置与种子柔性接触,降低了种子在运动过程中承受的载荷;弹条式投种装置弹性恢复系数较好且弹力适中,与种子接触面积小,种子所受摩擦力较小且不影响种子在型孔中的姿态,种子可稳定地从型孔中被投出。

5 结论

(1)为实现小麦低播量精密播种,提高小麦精密排种器播种精度,提出了一种锥面导流水平盘式小麦排种器,完成参数设计和理论分析,并借助离散

元单因素仿真试验分析了导条型式、型孔个数、锥盘转速、锥盘锥角对充种性能的影响,确定锥盘为渐开线导条型式、型孔个数 50 个、锥盘锥角 30°。

(2)二次回归正交旋转试验得到单粒率和合格率的回归方程,方差分析结果表明对单粒率影响由大到小依次为转速、型孔长度和种层厚度;对合格率影响由大到小为转速、种层厚度和型孔长度,转速和种层厚度、种层厚度和型孔长度间存在交互作用。对回归方程进行多目标优化求解并对最优组合参数进行排种性能的台架试验验证,得到在转速 19 r/min、型孔长度 8 mm、种层厚度为 8 mm 时充种合格率为 90. 13%,漏充率为 9. 87%,单粒率为 49. 50%,与仿真优化结果相吻合,试验结果符合精密播种国家标准。

(3)性能对比试验结果表明,设计的锥面导流水平盘式排种器无论在排种性能还是破碎率指标均优于原锥盘排种器,证明在导条及毛刷清种、弹条式投种装置的综合作用下提升了原锥盘排种器的工作性能。锥面导流水平盘式小麦精量排种器有效提高了充种性能和排种合格指数,降低了播量和破碎率,研究结果可为小麦精量播种机的设计提供参考。

参 考 文 献

1 郭爱兵,路志国,郭鹏飞,等. 我国小麦精播技术研究现状及发展趋势[J]. 现代农业科技,2015(6): 75 - 76.

2 冯伟,李世莹,王永华,等. 宽幅播种下带间距对冬小麦衰老进程及产量的影响[J]. 生态学报,2015,35(8): 2686 - 2694. FENG Wei, LI Shiyiing, WANG Yonghua, et al. Effects of spacing intervals on the ageing process and grain yield in winter wheat under wide bed planting methods[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(8): 2686 - 2694. (in Chinese)

3 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. LI Shuanliang, REN Changhong, GE Sangquzhen, et al. Effect of no-tilled wide planting pattern on growth, yield and quality of winter wheat[J]. Journal of Wheat Crop, 2015, 35(1): 80 - 85. (in Chinese)

4 彭强吉,荐世春,何青海,等. 小麦单粒精密播种机的研制[J]. 农机化研究, 2017, 39(7): 71 - 75. PENG Qiangji, JIAN Shichun, HE Qinghai, et al. Development of a single grain of wheat precision seeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(7): 71 - 75. (in Chinese)

5 李洪昌,高芳,赵湛,等. 国内外精密排种器研究现状与发展趋[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(2): 12 - 16. LI Hongchang, GAO Fang, ZHAO Zhan, et al. Domestic and overseas research status and development trend of precision seed-metering device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(2): 12 - 16. (in Chinese)

6 梁素钰,封俊,曾爱军. 我国小麦精密播种机的现状与发展趋势[J]. 农业机械学报, 1998, 29(增刊): 85 - 88. LIANG Suyu, FENG Jun, ZENG Aijun. The situation and prospect of wheat precision planters in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998, 29(Supp.): 85 - 88. (in Chinese)

7 刘国明,周吉红,冯万红. 宽幅播种对小麦产量的影响[J]. 农业科技通讯, 2013(3): 55 - 58.

8 杨丽,颜丙新,张东兴,等. 玉米精密播种技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 38 - 48. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161106&flag=1. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 11. 006. YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38 - 48. (in Chinese)

9 刘艳芬,林静,李宝筏,等. 玉米播种机水平圆盘排种器型孔设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 37 - 46. LIU Yanfen, LIN Jing, LI Baofa, et al. Design and experiment of horizontal disc seed metering device for maize seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(8): 37 - 46. (in Chinese)

10 张昆,衣淑娟. 气吸滚筒式玉米排种器充种性能仿真与试验优化[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 78 - 86. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170710&flag=1. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2017. 07. 010. ZHANG Kun, YI Shujuan. Simulation and experimental optimization on filling seeds performance of seed metering device with

- roller of air-suction[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 78–86. (in Chinese)
- 11 DYLAN S J, DIANNE C H, ANDREW L G. Precision metering of *Santalum spicatum* (Australian Sandalwood) seeds[J]. Biosystems Engineering, 2013, 115(2): 171–183.
- 12 AN Xue, WANG Sheng, DUAN Hongyan, et al. Test on effect of the operating speed of maize-soybean interplanting seeders on performance of seeder-metering devices[J]. Procedia Engineering, 2017, 174: 353–359.
- 13 ANG J W, TANG H, WANG J F, et al. Optimization design and experiment on ripple surface type pickup finger of precision maize seed metering device[J]. International Journal of Agriculture and Biological Engineering, 2017, 10(1): 61–71.
- 14 刘彩玲, 王超, 宋建农, 等. 振动供种型孔轮式非圆种子精密排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 108–115. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180512&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.012.
- LIU Cailing, WANG Chao, SONG Jiannong, et al. Design and seed-filling test of cell-type precision seed-metering device with vibration technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 108–115. (in Chinese)
- 15 金鑫, 李倩文, 苑严伟, 等. 2BFJ-24 型小麦精量播种变量施肥机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 84–92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180510&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.010.
- JIN Xin, LI Qianwen, YUAN Yanwei, et al. Design and test of 2BFJ-24 type variable fertilizer and wheat precision seed sowing machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 84–92. (in Chinese)
- 16 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/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 52–59. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171107&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.007.
- NIU Qi, WANG Qingjie, CHEN Liqing, et al. Design and experiment on straw post-covering wheat planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 52–59. (in Chinese)
- 17 施印炎, 陈满, 汪小昆, 等. 稻麦精准变量施肥机排肥性能分析与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 97–103. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170712&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.012.
- SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaochan, et al. Analysis and experiment of fertilizing performance for precision fertilizer applicator in rice and wheat fields[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 97–103. (in Chinese)
- 18 艾运钧. 工程图学分析引论[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984.
- 19 刘俊峰, 杨欣, 冯晓静. 2BF-8 型小麦精播机播种均匀性影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2001, 17(6): 64–68.
- LIU Junfeng, YANG Xin, FENG Xiaojing. Analysis of influence factor on seeding uniformity of model 2BF-8 wheat precision planter[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(6): 64–68. (in Chinese)
- 20 张波屏. 播种机械设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- 21 刁怀龙, 张银平, 刁培松, 等. 基于 EDEM 的小麦宽苗带深松免耕播种机设计与试验[J]. 农机化研究, 2017, 39(1): 58–62.
- DIAO Huailong, ZHANG Yinping, DIAO Peisong, et al. Design and experiment of a no-tillage and wide band wheat planter with subsoilers based on EDEM[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(1): 58–62. (in Chinese)
- 22 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 CSAE, 2016, 32(12): 247–253. (in Chinese)
- 23 王成军, 李耀明, 马履中, 等. 小麦籽粒碰撞模型中恢复系数的测定[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 274–278.
- WANG Chengjun, LI Yaoming, MA Lüzhong, et al. Experimental study on measurement of restitution coefficient of wheat seeds in collision models[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(11): 274–278. (in Chinese)
- 24 贾富国, 韩燕龙, 刘扬, 等. 稻谷颗粒物料堆积角模拟预测方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 254–260.
- JIA Fuguo, HAN Yanlong, LIU Yang, et al. Simulation prediction method of repose angle for rice particle materials[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(11): 254–260. (in Chinese)
- 25 GB/T 6973—2005 单粒(精密)播种机试验方法[S]. 2005.
- 26 张珠让, 朱瑞祥. 2BJM 系列小麦精密播种机的使用[J]. 农业机械, 2007(20): 77.