doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.006

小麦宽苗带精量播种施肥机设计与试验

姜　萌　刘彩玲　魏　丹　都　鑫　蔡培原　宋建农
（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：为解决小麦宽苗带播种均匀性差和开沟阻力大的问题，设计了一种窝眼轮式精量排种、内四等分输种管间隔输种的小麦宽苗带精量播种施肥机。对关键部件进行了理论分析，并对旋耕覆土过程进行了离散元仿真研究，在此基础上进行了排种器台架试验和整机田间试验。台架试验结果表明，窝眼轮转速为 35 r/min 时，行内播种均匀性变异系数、各行排量一致性变异系数、种子破碎率分别为 9.31%、2.30% 和 0.38%。田间试验结果表明，窝眼轮式排种器配套内四等分输种管提高了种子在苗带上的分布均匀性，播种均匀性变异系数为 11.55%，苗带平均宽度为 8.2 cm，正转旋耕装置能有效清理苗带、避免秸秆杂草堵塞；利用旋耕抛土原理能够实现对种、肥的分层覆土，播种和施肥平均深度分别为 3.2 cm 和 9.4 cm，种肥深度垂直间距平均值为 6.2 cm，变异系数分别为 4.15%、2.97% 和 5.48%，较好地实现了种肥分层，整机设计满足大田播种农艺要求。

关键词：小麦；播种机；宽苗带；旋耕；试验
中图分类号：S223.2　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2019)11-0053-10

Design and Test of Wide Seedling Strip Wheat Precision Planter

JIANG Meng　LIU Cailing　WEI Dan　DU Xin　CAI Peiyuan　SONG Jiannong
(*Key Laboratory of Soil-Machine-Plant System Technology*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In order to solve the problem of poor uniformity and large trench resistance in the wide seedling strip wheat planter, a wheat precision planter based on cell wheel seed-metering device and seed conveying tube with inner-quartering part was designed. The planter could implement the following function at one time: seedling belt cleaning, fertilization, wide strip seeding, active covering soil and compacting and so on. The diameter of cell wheel seed-metering device was 60 mm, the number of cell columns was 4, and the number of each cell columns was 20. The cells were arranged in a horizontal staggered condition. In order to ensure uniform distribution of seed in the seedling strip, the inner-quartering seed conveying tube was designed. The tube can convey seeds in interval space. The outlet of the seed conveying tube was 32°. The seed and fertilizer were ordered covering by soil, which was thrown by rotary tillage. The rotating speed was 260 r/min. To ensure the capacity of soil covering, the position of seed and fertilizer conveying tube and fertilizer was devised by kinematic analysis of soil. The distance range rotary shaft from seed and fertilizer tube was 0.36 m and 0.50 m, respectively. The experiment of seed-metering device and the planter was conducted. The results of laboratory test showed that the coefficient of variation of inline uniformity, the coefficient of variation of row displacement, and the seed fragmentation rate were 9.31%, 2.30% and 0.38%, respectively, under condition that the rotation speed of cell wheel was 35 r/min. Field test showed that the coefficient of variation of uniformity in the wide seedling strip was 11.55%, and the average width of wide seedling strip was 8.2 cm. The results also showed that the rotary tillage could clean stubble well and avoid the problem of congestion by rank grass. At the same time, by using the principle of rotary tillage and throwing soil, and soil covered the seed and fertilizer with layered, the average depths of sowing and fertilization were 3.2 cm and 9.4 cm, respectively. And the average vertical spacing between seed and fertilizer was 6.2 cm. The variation

收稿日期：2019-04-10　修回日期：2019-06-11
基金项目：国家重点研发计划项目(2016YFD020060704)
作者简介：姜萌(1993—)，男，博士生，主要从事农业机械与农业装备研究，E-mail：740083534@qq.com
通信作者：刘彩玲(1972—)，女，副教授，博士生导师，主要从事农业机械与农业装备研究，E-mail：cailingliu@163.com

coefficients of sowing depth and fertilizing depth were 4.15% and 2.97%, respectively, and the variation coefficient of the distance between seed and fertilizer was 5.48%, which met the national standard and agronomic requirements.

Key words: wheat; planter; wide seedling strip; rotary tillage; experiment

0 引言

国外小麦精量播种机多为气力式,其结构复杂,动力需求大,不适于我国小地块作业[1-2]。传统小麦播种机多采用条播技术,播种后小麦种子密集地分布在细窄的苗带上,相互竞争激烈,不易构建合理群体结构,难以实现高产稳产。余松烈院士提出了小麦宽幅播种技术[3-5],使种子相对均匀分布在 8~10 cm 苗带上,相对于传统条播降低了麦苗对水肥光热的竞争强度,增产效果显著,因此引起众多学者对小麦宽苗带播种技术的研究。

在苗带撒播器方面,程修沛等[6]设计了燕尾槽式等高位宽苗带开沟撒播器,利用种子流下落速度冲击散种板打散种子形成宽苗带;杜瑞成团队[7-8]利用边行优势原理设计了中部凸起的宽苗带撒播器,把种子向苗带两侧导引,在苗带内形成中部稀疏、两侧密集的种子分布形式;翟萌萌[9]开发了燕尾槽播种铲,使种子在苗带上呈反正态形式分布。牛琪等[10]设计了基于籽粒自流打散原理的分种装置,提高了种子分布均匀性;祝清震等[11]对鸭掌型撒播器进行结构改进和参数优化,在一定程度上提高了撒播器横向匀种效果。目前宽苗带播种主要采用传统的开沟播种方式,排种器主要采用外槽轮排种器,通过输种端燕尾槽撒播器结构将种子流打散,因此排量大,难以实现精量播种,且苗带内种子分布均匀性差,同时宽苗带开沟宽度大,传统开沟器开沟方式导致开沟阻力较大。

针对上述问题,本文设计一种苗带旋耕覆土式小麦宽苗带精量播种机,通过窝眼轮式精量排种器及内四等分输种管(简称输种管)实现对各列窝眼排出种子的间隔输送,降低排种量且提高苗带内种子的分布均匀性;同时利用旋耕刀清理苗带,借助其抛土特性,实现对肥料和种子的有序分层覆盖,以避免施肥与播种二次开沟,降低作业阻力。

1 整机结构与工作原理

小麦宽苗带精量播种机结构如图 1 所示,主要由三点悬挂装置、传动装置、机架、镇压装置、导土板、内四等分输种管、输肥管、旋耕装置、丝杠调节装置等组成,可一次完成苗带清理、施肥、播种、覆土和镇压等作业环节,其主要技术参数如表 1 所示。

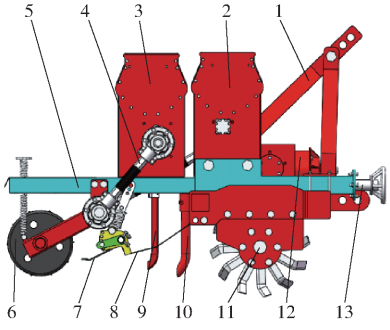


图 1 小麦宽苗带精量播种机结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of wide seedling strip wheat precision planter

1. 三点悬挂装置 2. 肥箱 3. 种箱 4. 传动装置 5. 机架 6. 镇压装置 7. 平土板 8. 导土板 9. 内四等分输种管 10. 输肥管 11. 旋耕装置 12. 变速箱 13. 丝杠调节装置

表 1 小麦宽苗带精量播种机技术参数

Tab. 1 Technical parameters of wide seedling strip wheat precision planter

参数	数值/形式
机具尺寸(长×高×宽)/(m×m×m)	1.48×2.20×0.97
作业行数	7
行距/cm	30
排种器形式	窝眼轮式
排肥器形式	外槽轮式
播种深度/cm	2~5
施肥深度/cm	7~10
防堵形式	旋耕主动防堵
施肥方式	正位深施
镇压方式	整体对行镇压
作业速度/(km·h^{-1})	4

田间作业时外槽轮排肥器和窝眼轮式排种器由镇压装置提供驱动力;拖拉机动力输出轴经变速箱驱动旋耕刀旋切并抛撒土壤,布置在输肥管和输种管之间的导土板对旋耕抛起土壤进行部分遮挡,遮挡下的土壤覆盖肥料并形成种床,未被遮挡而继续向后运动的土壤则实现对种子的均匀覆盖,最后由镇压器压实土壤,完成播种和施肥作业。种肥管与旋耕刀间的距离由丝杠调节装置调节,实现播种与施肥深度的调整。

2 关键部件设计

2.1 窝眼轮式精量排种器

根据播种农艺要求的苗带宽度 8 cm,设计窝眼列数为 4,且种子横躺姿态时势能最低,因此种子以

水平姿态充入窝眼较为容易，同时为提高种子分布均匀性，窝眼采用水平交错形式布置。以衡观 35 小麦种子为研究对象，测得长度 d_1 为 4.95 ~ 6.50 mm，厚度 d_2 为 3.25 ~ 3.76 mm，宽度 d_3 为 3.43 ~ 3.77 mm。依照种子轮廓外形设计单粒充种的窝眼结构，各项尺寸应满足[12]

$$\begin{cases} l_w = d_{1\max} + 0.5 \\ d_w = \max(d_2, d_3) + 1 \\ h_w = \max(d_2, d_3) \end{cases} \tag{1}$$

式中　l_w——窝眼长度，mm

d_w——窝眼宽度，mm

h_w——窝眼深度，mm

$d_{1\max}$——窝眼长度最大值，mm

由式(1)得到窝眼长度 l_w = 7.00 mm，宽度 d_w = 4.77 mm，h_w = 3.77 mm，其结构如图 2 所示；宽苗带播种行距一般取 30 cm，因此播种机作业幅宽内苗带数为 7，每条苗带内播种 4 列，播种粒距计算式为

$$\begin{cases} M = \dfrac{1\,000^2 Q}{q} \\ L = \dfrac{666.7 \times 7 \times 4}{MF} \end{cases} \tag{2}$$

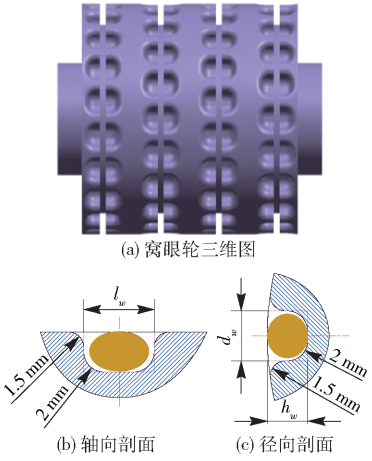
式中　M——公顷播种粒数

Q——公顷播种量，kg/hm^2

q——小麦种子千粒质量，42.5 g

F——播种机作业幅宽，2.1 m

L——播种粒距，m



(a) 窝眼轮三维图　(b) 轴向剖面　(c) 径向剖面

图 2　窝眼轮式排种器结构图

Fig. 2　Structure diagrams of cellular wheel seed-metering device

以精量播种播量 120 ~ 150 kg/hm^2 为设计目标[13]，由式(2)计算理论播种株距为 3.5 cm。参考以播麦粒为主的排种轮直径 40 ~ 60 mm 设计窝眼轮直径，直径过小会导致曲率变大，充种质量下降，确定窝眼轮直径为 60 mm；窝眼数量受排种轮直径和窝眼间距的制约，其数量影响排种轮的线速度，为保证充种率、降低对种子的损伤，窝眼轮线速度理论上不应超过 0.35 m/s[14]，窝眼数计算公式为

$$e = \frac{\pi R_w v_m}{L v_w} \tag{3}$$

式中　e——每列窝眼数量

R_w——窝眼轮直径，60 mm

v_w——窝眼轮线速度，0.35 m/s

v_m——播种机作业速度，1.1 m/s

由式(3)得到每列窝眼数 $e \geqslant 16.9$，在满足窝眼强度的基础上，应最大限度增加窝眼数量，因此圆周上平均分布 20 个窝眼。

设计的排种器结构如图 3 所示，主要包括排种盒、护种输种槽、毛刷、种层厚度隔离板、种层厚度调节板、窝眼轮、挡种板、清种卡片、下种杯等，其中种层厚度调节板可对种层厚度进行调节。

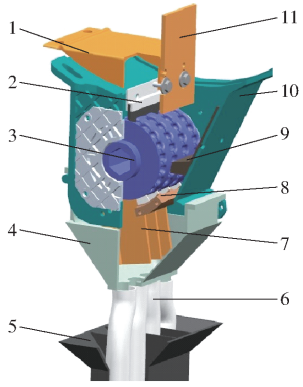


图 3　窝眼轮式排种器结构示意图

Fig. 3　Schematic of cellular wheel seed-metering device

1. 种层厚度隔离板　2. 毛刷　3. 窝眼轮　4. 下种杯　5. 内四等分输种管　6. 输种软管　7. 护种输种槽　8. 清种片　9. 挡种板　10. 排种盒　11. 种层厚度调节板

2.2　内四等分输种管

为提高苗带内种子行间、行内分布均匀性，匹配窝眼轮式排种器设计内四等分输种管，对排种轮各列窝眼所排种子进行独立输送。内四等分输种管底部采用圆弧过渡方式引导种子投射方向，实现种子平稳着床；对种子的运动速度分析如图 4 所示，根据零速投种理论[15]，种子着地角为 75° ~ 80°时弹跳最小，考虑本文设计为免耕播种机，作业速度相对较低，选取种子着地角为 75°。

忽略种子在输种管中的弹跳及滚动，根据动能定理对种子 A 在输种管中运动进行分析，计算式为

$$\frac{1}{2}mv_r^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = mgh - \int_0^h k\xi(v)\,\mathrm{d}h \tag{4}$$

其中　$v_0 = n_p \pi R_w$　　$\xi(v) = v^2$

式中　v_r——种子离开输种管时相对速度，m/s

v_0——种子排出窝眼轮时的初速度，m/s

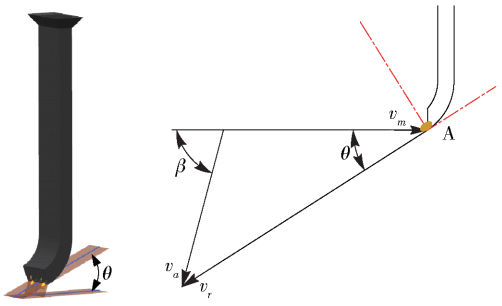


图 4 种子着地速度分析

Fig. 4 Touchdown analysis of seed speed

g——重力加速度,9.8 m/s^2

h——种子下落高度,0.65 m

n_p——窝眼轮转速,35 r/min

k——空气阻力系数,取 0.03

$\xi(v)$——物体速度关于阻力的函数

v——种子在输种管中的运动速度

由图 4 速度分析得

$$\begin{cases} v_a^2 = v_r^2 + v_m^2 - 2v_r v_m \cos\theta \\ v_m = v_r \cos\theta + v_a \cos\beta \end{cases} \tag{5}$$

式中 v_a——种子绝对运动速度,m/s

θ——输种管出口切线角度,(°)

β——种子着地角,(°)

作业速度 4 km/h 时,由式(4)计算种子离开输种管出口绝对运动速度 v_a = 1.58 m/s,联合式(5)得 θ = 32°,即内四等分输种管末端切线与水平面夹角为 32°。

2.3 苗带旋耕装置

2.3.1 旋耕防堵原理

我国黄淮海地区玉米秸秆残茬覆盖量大,易导致小麦机具发生堵塞,用苗带旋耕装置是提高小麦播种机田间通过性的有效方式[16-17]。正转旋耕机能够破碎表土并形成均匀的土流向后抛撒,进而实现对种肥的有序覆盖,因此本文选用正转旋耕方式,旋耕刀选用 R245 型直角刀;机器作业时田间秸秆残茬较多,耕深不宜过大,确定旋耕深度为 10 cm,作业速度为 4 km/h;为实现旋耕刀对秸秆清理并防止缠绕旋耕刀,根据文献[17],设计旋耕轴转速为 260 r/min。

旋耕刀切土节距对耕后土壤细碎度和沟底平整度有直接影响,设计时需考虑播种农艺要求和土壤含水率,北方进行小麦免耕播种时,土壤表层含水率在 10% 左右,结合小麦播种农艺需求,选择切土节距 50 mm,得同一圆周内旋耕刀数为[12]

$$z = \frac{60\,000 v_m}{nS} \tag{6}$$

式中 S——旋耕刀切土节距,mm

n——旋耕刀轴转速,r/min

z——同一圆周内旋耕刀数量

计算得 z = 4。

2.3.2 旋耕刀排布

旋耕刀采用中间传动的驱动方式,刀轴选用 ϕ80 mm 的空心钢管。为避免杂草缠绕、壅土以及保证播种机两侧受力均衡[18],采用 4 头对称螺旋线排布方式,保证每一时刻仅有一把刀入土且左右交替入土,旋耕刀排布如图 5 所示。

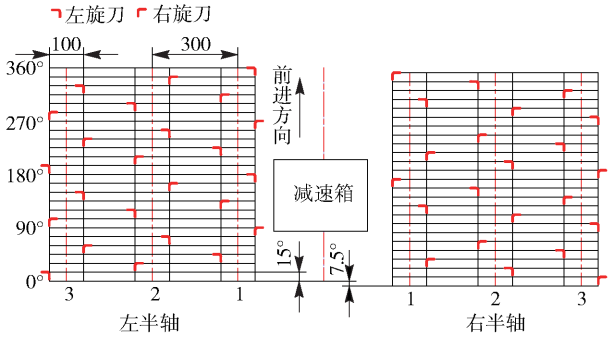


图 5 旋耕刀排列方式

Fig. 5 Arrangement of rotary blades

2.3.3 旋耕覆土原理

利用旋耕刀抛起的土壤对种子和肥料空间位置进行定位并覆盖,输肥管和内四等分输种管与旋耕刀轴的相对位置至关重要,因此对旋耕刀抛土性能进行分析,其刀片端点运动为刀轴旋转运动与机具前进运动的合成,当旋耕机刀轴以角速度 ω 旋转,机具前进作业速度为 v_m,旋耕刀旋转半径为 R 时,以刀轴旋转中心为坐标原点 O,播种机前进方向为 x 轴正向,垂直向上为 y 轴正向建立坐标系 xOy,刀片与 y 轴负方向重合时为初始位置;旋耕刀轴转速高于 180 r/min 时,应考虑旋耕刀正切面与土壤的撞击作用[19],当旋耕刀以线速度 v_b 切削土壤颗粒 C 时,建立以质点 C 为原点的动坐标系 NCT,旋耕刀对土块碰撞作用如图 6 所示。

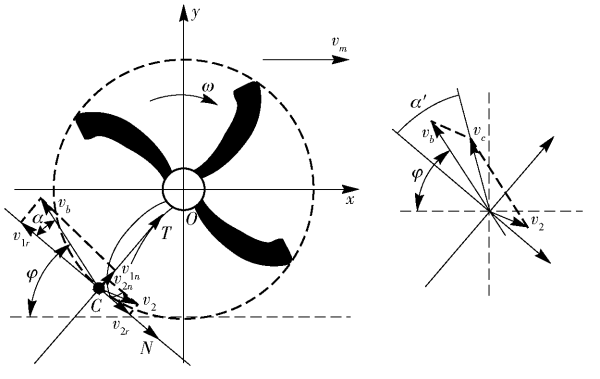


图 6 旋耕刀运动示意图

Fig. 6 Motion principle diagram of rotary blades

旋耕刀端点 B 运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x_B = v_m t + R\cos(\omega t) \\ y_B = -R\sin(\omega t) \end{cases} \tag{7}$$

旋耕刀端点 B 在 x、y 轴方向的速度分量为

$$\begin{cases} v_{Bx} = v_m - R\omega\sin(\omega t) \\ v_{By} = -R\omega\cos(\omega t) \end{cases} \tag{8}$$

则旋耕刀端点 B 的绝对速度 v_b 及其与 x 轴夹角为

$$\begin{cases} v_b = \sqrt{v_m^2 + R^2\omega^2 - 2v_m R\omega\sin(\omega t)} \\ \varphi = \arctan\dfrac{v_{By}}{v_{Bx}} \end{cases} \tag{9}$$

式中　φ——v_b 与 x 轴夹角，(°)

土壤相对速度的法向分量与切向分量撞击前后关系为[19]

$$\frac{v_{2n}}{v_{1n}} = \frac{v_{2n}}{v_b\sin\alpha} = i \tag{10}$$

$$\frac{v_{2r}}{v_{1r}} = \frac{v_{2r}}{v_b\cos\alpha} = 1 - j \tag{11}$$

其中　$\alpha = \varphi - \omega t$

式中　v_{1n}——旋耕刀法向分速度，m/s

v_{1r}——旋耕刀切向分速度，m/s

v_{2n}——撞击后土壤的法向分速度，m/s

v_{2r}——撞击后土壤的切向分速度，m/s

i——土壤碰撞恢复系数，取 0.4

j——土壤瞬时摩擦因数，取 0.5

α——v_b 与动坐标系 N 轴的夹角

在动坐标系 NCT 中对土壤颗粒 C 进行速度合成，可得到其绝对运动方程

$$v_C = \sqrt{(v_{1r} - v_{2r})^2 + (v_{1n} + v_{2n})^2} = v_b\sqrt{[(1+i)\sin\alpha]^2 + (j\cos\alpha)^2} \tag{12}$$

设土壤颗粒 C 在动坐标系中绝对运动速度方向为 α'，则

$$\tan\alpha' = \frac{v_{1n} + v_{2n}}{v_{1r} - v_{2r}} = \frac{1+i}{j}\tan\alpha \tag{13}$$

$$\alpha' = \arctan\left(\frac{1+i}{j}\tan\alpha\right) \tag{14}$$

忽略空气阻力及土块间相互作用，土壤颗粒 C 与旋耕刀端点碰撞后做斜上抛运动，其运动应满足

$$\begin{cases} x_C = v_C t\cos(\varphi - \alpha + \alpha') + x_0 \\ y_C = v_C t\sin(\varphi - \alpha + \alpha') - \dfrac{1}{2}gt^2 + y_0 \end{cases} \tag{15}$$

式中　(x_0, y_0)——土块的起始位置坐标

被抛土壤颗粒的轨迹方程为

$$y_C = (x_C - x_0)\tan(\varphi - \alpha + \alpha') - \frac{g(x_C - x_0)^2}{2(v_C\cos(\varphi - \alpha + \alpha'))^2} + y_0 \tag{16}$$

当土壤抛出角度为 $\pi/4$ 时，即 $\varphi - \alpha + \alpha' = 4/\pi$，此时 $v_{Cx} = v_{Cy}$，土壤的抛出距离最远，以机具实际作业参数旋耕刀转速为 260 r/min、旋耕深度为 0.1 m、机具作业速度为 1.1 m/s，代入式(16)可得土壤最远抛出距离为 78 cm；根据文献[20]并结合旋耕实际作业情况，旋耕最深处土壤位移较小，因此取旋耕深度为 0.09 m 进行计算，此时土壤抛出角度为 $\varphi - \alpha + \alpha' = 18.9°$，土壤起抛点坐标为(−6.9 cm，−23.5 cm)，代入式(16)计算得到土壤最小抛出距离为 61 cm，因此确定大部分土壤抛撒范围为距离旋耕刀轴后方 61～78 cm。为避免土壤回填沟底，造成施肥与播种的二次开沟阻力，输肥管出口与输种管出口应位于土壤回落区域前，即旋耕轴后方 60 cm区域内。施肥深度与旋耕深度基本一致，则施肥位置应在避免发生干涉的基础上尽量靠近旋耕刀轴，选定输肥管出口位置为排种轴后方 36 cm 位置处，输种管出口位置为旋耕轴后方 50 cm 处。设计旋耕深度为 10 cm，目标播种深度和施肥深度分别为 3、9 cm，因此输肥管及输种管出口在图 7 所示坐标系中为 U(−36 cm，−23.5 cm)和 V(−50 cm，−17.5 cm)。为保证小麦播种深度和施肥深度，在输肥管与输种管之间增设导土板，如图 7 所示，遮挡下 70% 土壤覆盖肥料，同时为后方种子铺设一定厚度种床，其余土壤因抛撒高度低于导土板弯折点继续向后方运动回落并覆盖种子。导土板弯折点位置决定了其挡土量的多少，导土板以点 G(−29 cm，6 cm)为起点，弯折点 $H(x_H, y_H)$ 为终点，为确保与导土板撞击的土壤落至折弯点前方，H 点位置应满足

$$\begin{cases} y_H \leqslant v_C t\sin(\varphi - \alpha + \alpha') - gt^2/2 + y_0 \\ x_H \leqslant v_C t\cos(\varphi - \alpha + \alpha') + x_0 \end{cases} \tag{17}$$

其中　$$t = \frac{x_H - x_0}{v_C\cos(\varphi - \alpha + \alpha')}$$

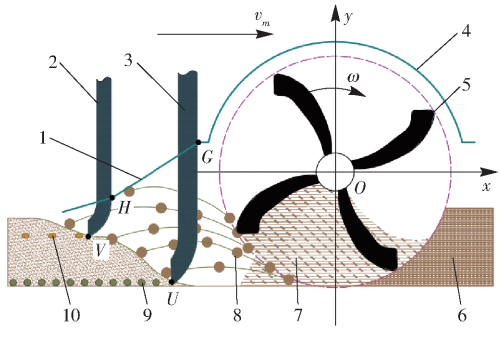


图 7　导土板挡土示意图

Fig. 7　Schematic of retaining board

1. 导土板　2. 内四等分输种管　3. 输肥管　4. 旋耕机罩壳　5. 旋耕刀　6. 未耕土　7. 已耕土　8. 土壤颗粒　9. 肥料颗粒　10. 麦种

由文献[12]知旋耕刀抛土过程中，浅层土壤的运动大于深层土壤，并随旋耕深度呈现递变规律，由

此分析得到当旋耕刀转动角度为 41.7°，即 ωt = 41.7°时被抛土壤量刚好满足小麦种床深度要求，为土壤颗粒通过导土板的临界点，此时被抛土壤颗粒初始位置(x_0，y_0)为(－16.22 cm，－18.38 cm)，代入式(17)求得导土板弯折点 H 位置为(－48.92 cm，－5.43 cm)，此时可以实现对种肥的分层有序覆盖。

3 旋耕覆土装置离散元仿真

3.1 旋耕覆土仿真模型

为分析旋耕刀抛土性能，验证旋耕覆土装置对种子和肥料的分层覆盖效果，运用离散元法对旋耕覆土装置的覆土性能进行仿真试验。应用 EDEM 仿真软件建立 200 cm(长)×30 cm(宽)×10 cm(高)土壤模型，并将建立的旋耕播种单元三维结构导入 EDEM，得到旋耕播种仿真模型。参考实际作业条件，试验地土壤为轻壤土，旋耕作业层土壤含水率在 10% ~15% 之间，土壤对旋耕装置粘附力较小，因此选用 Hertz－Mindlin(no slip)为土壤与旋耕装置(钢)的接触模型；土壤间接触模型选择使土壤具有法向粘聚力的 Linear Cohesion 接触模型，土壤颗粒间粘聚能密度设定为 6 430 J/cm^3，土壤颗粒选用直径 3 mm 的球体颗粒建模，相应仿真参数通过查阅文献[21－22]得到。设定旋耕深度 10 cm，旋耕刀转速 260 r/min，旋耕覆土单元前进速度 4 km/h，仿真步长设定为 4.16×10^{-6} s，仿真总时长为 4 s，土壤颗粒、肥料和小麦分布由不同颗粒工厂生成，其位置如图 8 所示，其中肥料颗粒工厂和小麦颗粒工厂分别随输肥管和内四等分输种管以 4 km/h 匀速前进。

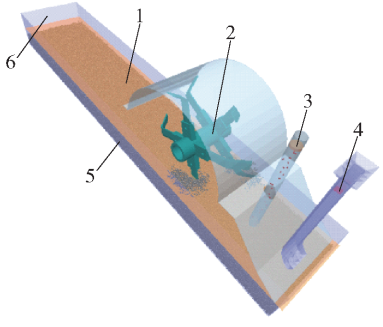


图 8 旋耕播种单元仿真模型

Fig. 8 Simulation model of rotary tillage and seeding unit

1. 土壤工厂 2. 旋耕播种单元 3. 肥料工厂 4. 小麦工厂 5. 待耕土层 6. 土槽

3.2 旋耕刀抛土性能分析

对旋耕刀抛土性能进行分析，使用 EDEMS 中 slices 功能沿前进方向选取旋耕中心处 5 cm 宽度土层，并将待耕土壤从上至下分为 4 层，如图 9a。仿真结束后在 F1 ~F4 层分别随机提取 50 粒土壤，对其编号为 1 ~50，并输出其沿机器前进方向(纵向)的位移数据，如图 9b、9c 所示。由图 9c 知随土层增加土壤扰动程度逐渐减小，因此土壤后抛距离波动幅度随土层增加而减小，其中 F1、F2 层受旋耕刀扰动程度较大，容易形成疏松土层，利于播种。由图 9b 知土壤颗粒后抛位移随土层厚度增加而减小，其中 F2 层土壤后抛位移最大，平均位移为 58.84 cm，大于旋耕刀轴与输种管之间的间距，最终落点位于输种管后方，为覆盖种子提供土量；F1、F3 层土壤平均后抛距离分别为 40.32、44.26 cm，该部分土壤最终落点位于输肥管和输种管之间，起到了覆盖肥料和创建种床的作用；F4 层土壤平均后抛距离为 32.70 cm，其受到较多上层土壤的重力作用导致后抛运动受到阻碍，因此后抛距离较理论距离小。

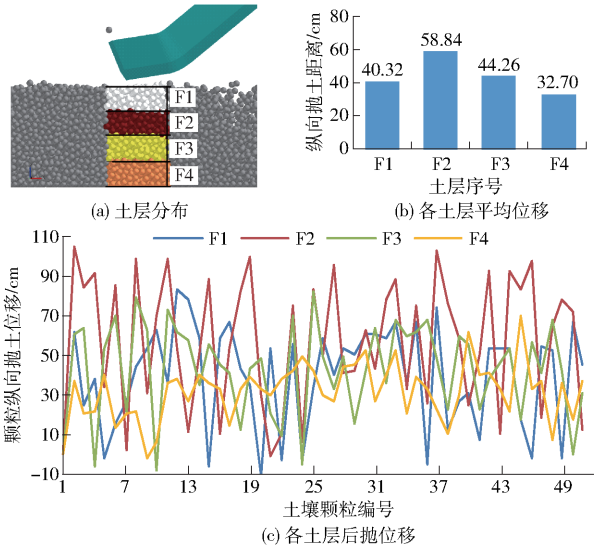


图 9 旋耕抛土性能分析结果

Fig. 9 Capability analysis for throwing soil of rotary tillage

3.3 分层覆土效果分析

为检验旋耕装置分层覆土效果，对仿真中肥料与种子的深度位置分布进行分析。利用 EDEM 剪辑群组命令获取种子与肥料分布截面如图 10a 所示。随机选取肥料颗粒和小麦颗粒各 60 粒，按照编

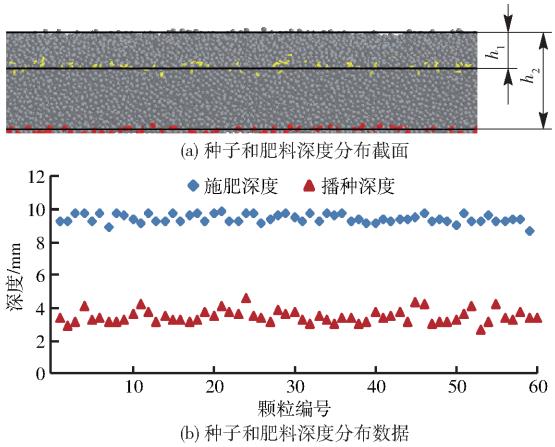


图 10 分层覆土效果分析结果

Fig. 10 Analysis result of effect of soil layered cover

号为 1 ~ 60，通过其坐标获得播种深度和施肥深度位置信息如图 10b，并计算得到平均播种深度 h_1 为 3.49 cm，比理论深度 3 cm 高 16.3%；平均施肥深度 h_2 为 9.46 cm，比理论施肥深度 9 cm 高 5.1%。

4　试验

4.1　台架试验

为验证窝眼轮式排种器各行排量一致性和种子破碎率，在中国农业大学工学院 JPS－12 型多功能排种试验台上进行了试验，如图 11 所示。试验用小麦种子为衡观 35，试验前在排种器下安装内四等分输种管，从左到右依次设置输种管出口序号为 1 ~ 4；为模拟播种机不同作业速度，排种轴转速选择为 20 ~ 40 r/min，试验时待排种器工作平稳后用纸杯分别接取各排种管 1 min 所排出种子，称量统计破碎率并记录，得到试验数据如表 2 所示。

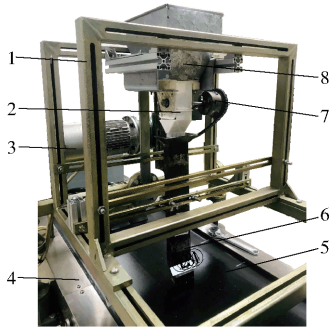


图 11　排种器性能测试试验

Fig. 11　Performance test of seed-metering device

1. 种箱安装支架　2. 窝眼轮式排种器　3. 电机　4. JPS－12 型多功能排种试验台　5. 输送带　6. 内四等分输种管　7. 卡盘链轮　8. 种箱

表 2　排种器性能测试结果

Tab. 2　Test result of performance for seed-metering device

转速/(r·min^{-1})	排种量/(g·min^{-1})				排量一致性变异系数/%	种子破碎率/%	排种总质量/g
	1 号	2 号	3 号	4 号			
20	37.3	39.0	38.4	37.6	2.34	0.20	152.3
25	46.1	45.5	47.4	46.2	1.75	0.25	185.2
30	52.5	51.2	53.8	54.5	1.44	0.31	212.0
35	55.3	57.6	60.7	59.9	2.30	0.38	233.5
40	61.2	62.7	64.1	62.8	2.60	0.44	250.8

由表 2 可知，相同转速条件下窝眼轮排种器 4 列窝眼排量基本一致，各列窝眼排量一致性变异系数均小于国标要求的 3.9%，排种器转速 35 r/min 时，满足作业速度 4 km/h 时播种量需求，各行排量一致性变异系数为 2.30%，种子破碎率为 0.38%。不同转速条件下，排种器各行排种量和总排种量呈线性增长趋势，排种器速度适应性较好，满足播种作业速度和 120 ~ 150 kg/hm^2 播种量需求；随着排种轴转速增加，种子破碎率有所增加，最高转速下破碎率为 0.44%，小于 0.5%，满足小麦播种机作业种子破碎率要求[23]。

为探究加装内四等分输种管对窝眼轮式排种器所排各列种子行内分布均匀性的影响，以排种器转速 35 r/min，输送带速度 4 km/h 进行试验。在排种试验台刷油输送带上取 20 cm 为测定区段统计其种子数量，随机测定 30 组数据，按照小麦株距为 3.5 cm 计算，20 cm 范围内理论上应播 5 或 6 粒种子，测得试验结果如表 3 所示。

表 3　排种器排种均匀性试验结果

Tab. 3　Measurement results of seeding uniformity

序列	种子粒数均值	种子粒数标准差	变异系数/%
1	5.6	0.48	8.62
2	5.7	0.54	9.46
3	5.8	0.58	10.02
4	5.8	0.53	9.13
平均值	5.7	0.53	9.31

由表 3 可知，窝眼轮式排种器播种均匀性变异系数平均值为 9.31%，外槽轮式播种机播种均匀性变异系数为 44%[24]，与之相比窝眼轮式排种器显著提高了种子在苗带上的分布均匀性，因此设计的排种器较常规外槽轮式排种器具有明显优势。

4.2　田间试验

4.2.1　试验条件

播种机田间试验于 2018 年 10 月在河北省任丘市阁辛庄进行，试验田上茬作物为玉米，秸秆多次还田处理，处理后秸秆较为细碎，秸秆覆盖量为 3.3 kg/m^2。试验前测得 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 30 cm 土壤含水率分别为 12.38%、21.37%、24.75%，土壤坚实度分别为 0.91、3.44、4.36 MPa。试验用拖拉机为双力美洲豹 SL1304 型拖拉机，作业速度 1.1 m/s，图 12 为播种机试验现场。



图 12　小麦宽苗带精量播种机试验现场

Fig. 12　Field experiments of wide seedling strip wheat precision planter

4.2.2　试验材料

根据河北省气候条件及播种作业时间选择河北省农科院培育的衡观 35 为试验用小麦品种，该品种小麦生育期为 240 d 左右，抗旱及抗倒伏能力较强，适于 10 月上旬播种。按照 GB/T 5262 规定种子性能试

验方法,测试种子千粒质量为 42.5 g,含水率 10.4%。

4.2.3 试验指标与方法

播种作业性能试验按照 GB/T 20865—2007《免耕施肥播种机》规定试验方法进行,并对作业指标进行检测。测试内容主要包括施肥与播种深度合格率、机具通过性、播种均匀性变异系数、苗带宽度等。试验数据采集工具有铁锹、钢直尺、卷尺、秒表、电子秤、土壤坚实度及水分测试仪等。

(1)苗带宽度及小麦种子分布均匀性

播种往返作业范围内交错选取 4 条苗带(左中右都应取到),每条苗带取 20 段 20 cm 长的检测区段,如图 13 所示,分别统计不同苗带宽度内种子数量。

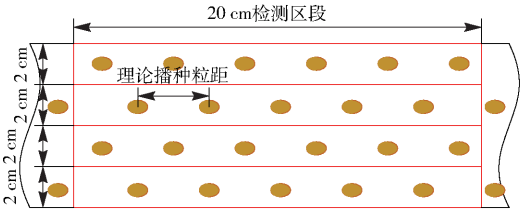


图 13 种子粒数统计示意图

Fig. 13 Schematic diagram of seed numbers statistics

(2)播种与施肥深度

往返每个行程内交错选取 4 行,每行取 20 个点作为播种和施肥深度测定区,分别对肥料和种子上部所覆土层厚度进行测量并记录数据。种子(肥料)深度合格率计算公式为

$$D = \frac{N'}{N} \times 100\% \tag{18}$$

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^{N} X_i}{N} \tag{19}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (X_i - \mu)^2}{N}} \tag{20}$$

$$C_v = \frac{\sigma}{\mu} \times 100\% \tag{21}$$

式中 D——播种或施肥深度合格率,%

N——试验所采集样本数量

N'——播种或施肥深度合格样本数

μ——播种或施肥深度平均值,cm

X_i——第 i 个测试点播种或施肥深度,cm

σ——播种或施肥深度标准差,cm

C_v——播种或施肥深度变异系数,%

(3)机具通过性

分别以 4、5 km/h 作业速度进行试验,在往返 4 个行程内观察机具作业各 60 m 以上秸秆壅堵现象。

(4)地轮滑移率

地轮滑移率采用定圈数测行进距离的方法测定,即在机具作业时测定地轮转 20 圈的前进距离,机具往返行程中各测定 2 次,地轮滑移率计算式为

$$\delta = \left| \frac{I - 40\pi R_d}{40\pi R_d} \right| \times 100\% \tag{22}$$

式中 δ——地轮滑移率,%

I——机器行进距离,m

R_d——驱动地轮半径,m

4.3 试验结果与分析

4.3.1 苗带宽度及小麦种子分布均匀性

试验测得苗带平均宽度为 8.2 cm,与理论设计宽度相符合;小麦种子分布均匀性试验结果如表 4,不同苗带宽度上小麦粒数无明显差异,实测平均值为 5.78 粒,比理论值 5.5 粒稍大,主要原因是窝眼存在充填两粒种子的情况;播种均匀性变异系数为 11.55%,可能由于播种机作业时产生振动导致种子出现弹跳,因而播种均匀性较室内台架有所降低。

表 4 种子分布均匀性试验结果

Tab. 4 Test results of seeds distribution

苗带宽度/cm	粒数平均值		标准差	均匀性变异系数/%
	实测值	目标值		
0~2	5.73	5.5	0.66	11.52
2~4	5.82	5.5	0.71	12.20
4~6	5.89	5.5	0.62	10.53
6~8	5.67	5.5	0.68	11.99
平均	5.78	5.5	0.67	11.55

4.3.2 播种与施肥深度

深度测定结果如表 5 所示,播种、施肥及种肥垂直间距平均深度分别为 3.2、9.4、6.2 cm,播种和施肥深度变异系数分别为 4.15% 和 2.97%,种肥垂直间距变异系数为 5.48%,与仿真结果基本吻合且满足播种施肥农艺要求。种肥垂直间距变异系数最大,播种深度变异系数次之,施肥深度变异系数最小,这是由于施肥器与旋耕轴相对位置确定时,施肥深度仅受旋耕深度影响,而播种深度不仅受旋耕深度影响还受到旋耕刀抛土量的影响,种肥深度垂直间距受播种与施肥深度的双重影响。

表 5 播种及施肥深度测定结果

Tab. 5 Results of sowing and fertilization depth

项目	平均深度/cm		合格率/%		标准差/cm	变异系数/%
	测量值	目标值	测量值	目标值		
种子	3.2	2~5	94.36	≥75	0.13	4.15
肥料	9.4	7~10	92.57	≥75	0.28	2.97
种肥垂直间距	6.2	5~7	91.71	≥75	0.34	5.48

4.3.3 机具通过性

机具分别以规定作业速度进行 60 m 的防堵性

能试验，未出现壅堵现象，主要是因为旋耕装置对播种苗带进行了有效清理，田间杂草、还田秸秆及玉米根茬被旋耕刀抛撒出播种行，从而提高了机具作业通过性。

4.3.4　地轮滑移率

地轮直径 30 cm，地轮转动 20 圈的实际前进距离平均值为 18.12 m，理论应行进距离为 18.84 m，计算滑移率为 3.8%，符合免耕播种机作业要求。

5　结论

（1）设计了窝眼轮式小麦精量排种器，同时采用内四等分输种管对各列窝眼种子独立输送。台架试验表明，排种器转速 35 r/min 时各行排量一致性变异系数 2.30%，种子破碎率 0.38%；行内播种均匀性变异系数平均值为 9.31%，较传统外槽轮有显著提高。

（2）对旋耕抛土及覆土原理进行了理论分析，选择 R245 型直角刀，刀轴转速为 260 r/min，排列方式为 4 头螺旋线，确定了出肥口、出种口相对位置分别为旋耕刀轴后 36 cm 和 50 cm；旋耕刀抛土性能和对种子、肥料分层覆盖效果离散元仿真分析表明，平均播种深度和施肥深度满足理论设计要求，实现了旋耕刀抛土对肥料和种子的分层覆盖，避免了种肥开沟带来的二次阻力。

（3）对播种机进行了田间试验，测得苗带平均宽度 8.2 cm，播种均匀性变异系数为 11.55%；播种平均深度 3.2 cm，施肥平均深度为 9.4 cm，种肥深度垂直间距平均值为 6.2 cm，变异系数分别为 4.15%、2.97% 和 5.48%，与仿真结果相吻合；播种施肥深度稳定性较好，避免了肥料烧苗；对播种机的作业通过性进行了试验，未出现机具堵塞现象，通过性良好，整机设计满足大田播种农艺要求。

参　考　文　献

[1] DIEISSON P, PAULO D W, EDSON T, et al. Scientific development of smart farming technologies and their application in Brazil [J]. Information Processing in Agriculture, 2018, 5(1): 21 – 32.

[2] NEJADI J, RAOUFAT M H. Field performance of a pneumatic row crop planter equipped with cctive toothed coulter for direct planting of corn in wheat residue[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2013, 11(2): 327 – 334.

[3] 余松烈. 小麦精播高产栽培技术[J]. 山东农学院学报, 1980(2): 1 – 13.

[4] 李全起，陈雨海，周勋波，等. 不同种植模式麦田水资源利用率及边际效益分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 90 – 95.
LI Quanqi, CHEN Yuhai, ZHOU Xunbo, et al. Effects of different planting patterns on water use efficiency and marginal profits of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 90 – 95. (in Chinese)

[5] 石玉华，初金鹏，尹立俊，等. 宽幅播种提高不同播期小麦产量与氮素利用率[J]. 农业工程学报, 2018, 34(17): 127 – 133.
SHI Yuhua, CHU Jinpeng, YIN Lijun, et al. Wide-range sowing improving yield and nitrogen use efficiency of wheat sown at different dates[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(17): 127 – 133. (in Chinese)

[6] 程修沛，陈美舟，贾晓东，等. 小麦宽苗带等深播种装置设计与试验研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(11): 116 – 120.
CHENG Xiupei, CHEN Meizhou, JIA Xiaodong, et al. Design and experimental study for same depth of wheat wide planting device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(11): 116 – 120. (in Chinese)

[7] 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 CSAE, 2017, 33(3): 7 – 13. (in Chinese)

[8] 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/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 141 – 148.
YU Xingrui, GENG Duanyang, DU Ruicheng, et al. Design and experiment of wheat planter by pneumatic conveying with no-tillage[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 141 – 148. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2018s019&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.019. (in Chinese)

[9] 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.
ZHAI Mengmeng. Optimum design and test of wheat wide precision seeding device based on EDEM[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[10] 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.
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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20171107&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.007. (in Chinese)

[11] 祝清震，武广伟，陈立平，等. 小麦宽苗带撒播器弹籽板结构设计与优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1): 1 – 11.
ZHU Qingzhen, WU Guangwei, CHEN Liping, et al. Structural design and optimization of seed separated plate of wheat wide-boundary sowing device[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(1): 1 – 11. (in Chinese)

[12] 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.

[13] 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.
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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180510&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.010. (in Chinese)

[14] 张波屏.播种机械设计原理[M].北京:机械工业出版社,1979.

[15] 王泰恩,张宝库.零速投种导种筒工作面曲线设计的理论探讨[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 1993,7(1): 46-50.
WANG Tai'en, ZHANG Baoku. The theoretical exploration on working surface curve design of zero-speed[J]. Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University,1993,7(1): 46-50. (in Chinese)

[16] 何进,李洪文,陈海涛,等. 保护性耕作技术与机具研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2018,49(4):1-19.
HE Jin,LI Hongwen, CHEN Haitao, et al. Research progress of conservation tillage technology and machine [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(4):1-19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180401&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.001. (in Chinese)

[17] 张喜瑞,李洪文,何进,等. 小麦免耕播种机防堵装置性能对比试验[J]. 农业机械学报, 2010,41(2): 73-77.
ZHANG Xirui,LI Hongwen,HE Jin, et al. Comparative experiment on anti-blocking mechanism for wheat no-till planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(2): 73-77. (in Chinese)

[18] 贾洪雷,黄东岩,刘晓亮,等. 耕作刀片在刀辊上的多头螺旋线对称排列法[J].农业工程学报,2011,27(4): 111-116.
JIA Honglei, HUANG Dongyan, LIU Xiaoliang, et al. Symmetrical multi-spiral arrangement of tillage blades on rotor[J]. Transactions of the CSAE,2011,27(4):111-116. (in Chinese)

[19] 孔令德,王国林.旋耕抛土模型研究综述[J].江苏理工大学学报,1997,18(5):32-36.
KONG Lingde,WANG Guolin. A survey of research on rotary soil-throwing model[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology,1997,18(5):32-36. (in Chinese)

[20] 方会敏,姬长英,FARMAN Ali Chandio,等.基于离散元法的旋耕过程土壤运动行为分析[J/OL].农业机械学报,2016,47(3):22-28.
FANG Huimin,JI Changying,FARMAN Ali Chandio,et al. Analysis of soil dynamic behavior during rotary tillage based on distinct element method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(3):22-28. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160304&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.004. (in Chinese)

[21] UCGUI M, SAUNDERS C, FIELKE J M. Discrete element modeling of top soil burial using a full scale mouldboard plough under field conditions[J]. Biosystems Engineering,2017,160:140-153.

[22] 郑侃,何进,李洪文,等.基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究[J/OL].农业机械学报, 2016, 47(9):62-72.
ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen,et al. Research on polyline soil-breaking blade subsoiler based on subsoiling soil model using discrete element method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(9):62-72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160910&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.010. (in Chinese)

[23] NY/T 1143—2006 播种机质量评价技术规范[S].2007.

[24] 吕昊. 外槽轮排肥器优化设计新方法研究[D].长春:吉林大学,2014.
LV Hao. A new kind of method for the optimizated design of outer groove-wheel fertilizer apparatuses [D]. Changchun: Jilin University,2014. (in Chinese)