doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.007

油麦兼用型精量宽幅免耕播种机仿形凿式开沟器研究

王　磊[1,2]　廖宜涛[1,2]　张青松[1,2]　姚　露[1,2]　付云开[1,2]　廖庆喜[1,2]
(1.华中农业大学工学院,武汉 430070;2.农业农村部长江中下游农业装备重点实验室,武汉 430070)

摘要:针对播种作业地表不平、播种机宽幅导致各行播深均匀性和稳定性差等问题,设计了一种基于仿形辊弹性形变、实现仿形功能的凿式播种开沟器。阐述了凿式播种开沟器仿形开沟工作原理,确定了凿式刃口曲线方程,构建了开沟器与土壤互作关系力学模型,阐明了仿形机构的弹性形变与仿形阻力及仿形量之间的关系。以凿式曲面刃口宽度、仿形辊直径、入土角、播深为试验因素,采用二次回归正交组合试验方法,利用高速数字化土槽平台,开展了各试验因素对播深稳定性影响试验。试验结果表明,刃口宽度 12 mm、仿形辊直径 24 mm、入土角 22°时,播深稳定性较优。田间对比试验表明,在最优参数组合下,凿式开沟器的播深变异系数低于 9%,地表平整度低于 18.5 mm,作业通过性好,其开沟性能优于翼铲式开沟器;田间播种试验表明,以 4.8 m 工作幅宽、24 行播种的油麦兼用型精量宽幅免耕播种机播种的油菜、小麦,单行苗数变异系数、各行苗数一致性变异系数均低于 10%,小麦各行 1 m 内平均苗数为 35,春油菜各行 1 m 内平均苗数为 26,冬油菜各行 1 m 内平均苗数为 20,满足油菜、小麦精量播种及成苗率要求。

关键词:播种开沟器;凿式;油麦兼用;仿形
中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2019)11-0063-11

Design on Profiling Chisel Opener of Precision Broad Width No-tillage Planter for Rapeseed and Wheat

WANG Lei[1,2]　LIAO Yitao[1,2]　ZHANG Qingsong[1,2]　YAO Lu[1,2]　FU Yunkai[1,2]　LIAO Qingxi[1,2]
(1. *College of Engineering*, *Huazhong Agricultural University*, *Wuhan* 430070, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Wuhan* 430070, *China*)

Abstract: Considering the problems that the soil surface is uneven, large area, and broad width in the process of the sowing operation, which leads to the poor uniformity and stability of sowing depth in each line of the planter, a prototype of profiling chisel sowing opener was developed based on elastic deformation of profiling roller. The working principle of the profiling chisel sowing opener was elaborated. The curvilinear equation of the chisel blade edge was determined, the mechanical model of interaction between opener and soil was established, and the relationship between the elastic deformation of the profiling mechanism, the profiling resistance and the profiling quantity was clarified. The influence of chisel surface blade edge width, profiling roller diameter, entrance angle, and sowing depth on the sowing depth stability was tested with quaternary primary regression orthogonal combination test method and high speed digital soil slot platform. The experiment results indicated that when the blade edge width was 12 mm, the profiling roller diameter was 24 mm, and the entrance angle was 22°, the sowing depth stability was better. The field comparative experiment results showed that under the optimum combination of parameters the depth variation coefficient of the profiling chisel opener was less than 9%, the surface smoothness was lower than 18.5 mm, and the profiling chisel opener had non-tangled grass, piled-up earth. The ditching performance of the profiling chisel opener was superior to that of wing spade opener. The field seeding emergence test results indicated that as the rapeseed and wheat planting by the broad width precision no-tillage planter for rapeseed and wheat with 4.8m working breadth and sowing 24 rows,

收稿日期:2019-04-02　修回日期:2019-05-14
基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0700702)、国家自然科学基金项目(51875229)和国家油菜产业技术体系专项(CARS-12)
作者简介:王磊(1988—),男,博士生,主要从事油菜播种技术与装备研究,E-mail:wangchong12356@126.com
通信作者:廖庆喜(1968—),男,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

the variation coefficient of single row seedling number and variation coefficient of each row seedling number were both less than 10%, the average seedlings number of each row of the wheat, the spring rapeseed, and the winter spring was 35, 26 and 20 within a meter, respectively. The seedlings number of each row of the wheat and rapeseed could satisfy the requirement of precision seeding and seedling rate, which can provide reference for the design of planting ditch opener for rapeseed and wheat.

Key words: planting furrow opener; chisel; rapeseed and wheat; profiling

0 引言

油菜、小麦分别是我国主要的油料和粮食作物，其机械化播种工序相似。研制油麦兼用精量宽幅播种机对提高机械化生产效率、节约农时、提升油菜和小麦机械化种植水平具有重要意义[1-2]。作业地表起伏大、宽幅导致播种机各行播深均匀性与稳定性差是影响油麦兼用型播种机作业效果的关键[3-6]。设计具有仿形功能的播种开沟器可提高宽幅播种机播深稳定性、一致性，且适应高速作业。目前适应于油麦兼用种植农艺要求的通用高效排种装置已在生产中得到推广应用[7]，但缺少与之匹配的适应宽幅、高速作业的播种开沟器。

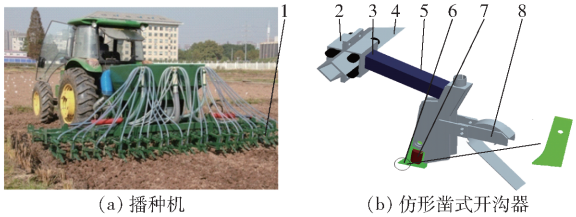
为提高播种开沟器性能、改善种子与种床土壤接触状态，贾洪雷等[8]设计了具有滑刀和仿形压土轮的大豆开沟器，以改善种床质量和提高播深一致性；赵淑红等[9-10]为解决土壤扰动大、播种深度均匀性差等问题，设计了一种开沟、回土、镇压等多功能集成式播种开沟器，并研发了双向平行四杆机构用于开沟器仿形；王超等[11]为解决东北地区秸秆覆盖量大、导致机具堵塞严重等问题，设计了一种非对称式大小圆盘开沟装置。国外对播种开沟器的研究较早，JAMES 等[12]通过对比分析研究了高速作业下 5 种不同入土角、刃口曲面结构的开沟器对土壤扰动量和沟底作用力的影响，并优化开沟器结构，以提高免耕播种的作业效率；AILI 等[13]研究了锄铲式、翼铲式、箭式开沟器对土壤扰动和牵引阻力的影响，得出锄铲式开沟器的综合开沟性能最优；ALIAKBAR 等[14]针对免耕播种开沟器开沟深度增大会加剧土壤抛撒的问题，研究了弯曲铲柄对开沟性能的影响，土槽试验表明，铲柄弯曲 45°倾角时，开沟性能最优。综上，现有播种开沟器的研究主要适应于玉米、大豆等大粒径、宽行距作物种子播种[15-16]，且仿形以弹簧配合四杆机构为主，而适应于播种窄行距的油菜、小麦宽幅播种机仿形开沟器研究较少，尤其对应用仿形辊仿形的凿式开沟器研究鲜见报道。

本文针对播种作业地势不平、播种机宽幅导致各行播深均匀性和稳定性差等问题，设计油麦兼用型精量宽幅免耕播种机仿形凿式开沟器，重点开展仿形辊弹性形变、实现开沟器仿形功能的研究，以期为提高宽幅播种机播种质量提供参考。

1 总体结构与工作原理

1.1 总体结构

油麦兼用型精量宽幅免耕播种机由地轮总成、机架、风泵总成、种肥箱、气送式排肥器、排种器、施肥开沟器、播种开沟器等组成，工作幅宽 4.8 m，该机可一次完成施肥、24 行播种、覆土、镇压等功能。24 组仿形凿式播种开沟器通过仿形支撑杆均布安装于播种机上。仿形凿式开沟器主要由仿形辊、仿形壁、仿形支撑杆、连接杆、凿式主体、导流板、覆土弹片等组成，播种机及开沟器结构如图 1 所示。



(a) 播种机 (b) 仿形凿式开沟器

图 1 宽幅播种机及仿形凿式开沟器结构示意图

Fig. 1 Structural diagrams of planter and profiling chisel opener

1. 仿形凿式开沟器 2. 仿形壁 3. 仿形辊 4. 仿形支撑杆 5. 连接杆 6. 凿式主体 7. 导流板 8. 覆土弹片

1.2 工作过程及工作原理

播种作业时，宽幅播种机的凿式开沟器凿尖首先与土壤表面呈一定角度入土，随着开沟器与土壤颗粒的交互作用，凿式曲面破坏、挤压、分流土壤，初步形成种沟，完成入土环节；被抛撒的土壤与导流板接触后回落到种沟两侧，形成完整的种沟，完成导流环节；种子通过导种管直接落到沟底，保证开沟深度与种子入土深度的一致，覆土弹片将种沟两侧的湿土回填入种沟内，覆盖于种子表面，实现覆土环节。

凿式开沟器与播种机机架采用弹性仿形辊连接，开沟器可绕仿形支撑杆转动，增加了开沟铲转动的柔性约束。开沟器入土至预定深度时，仿形辊与仿形壁之间摩擦力的力矩与开沟器受土壤作用力的力矩平衡，该平衡力矩可保持开沟器的仿形效果，仿形过程如图 2 所示。播种作业中，开沟器入土至预定深度，经平整地表时的状态为Ⅱ，当开沟器在状态Ⅱ经凸起地表时，开沟器绕中心(图 2 中 O 点)逆时

针转动至状态Ⅰ，开沟器向上转动，仿形量为 H_2；当开沟器在状态Ⅱ经凹陷地表时，开沟器绕中心顺时针转动至状态Ⅲ，开沟器向下转动，仿形量为 H_1，实现仿形功能。播种作业中，开沟器如遇较大障碍物，仿形开沟器与土壤间的作用力会超过仿形辊与仿形壁之间的摩擦阻力，实现开沟器逆时针翻转，开沟器过载保护，防止开沟器破坏。

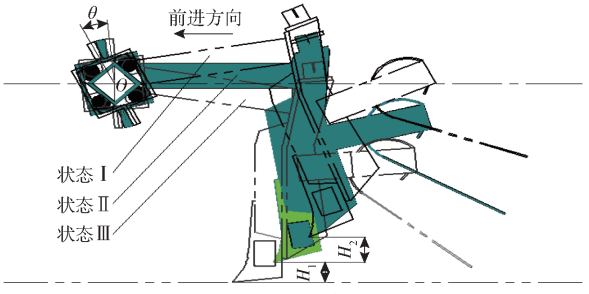


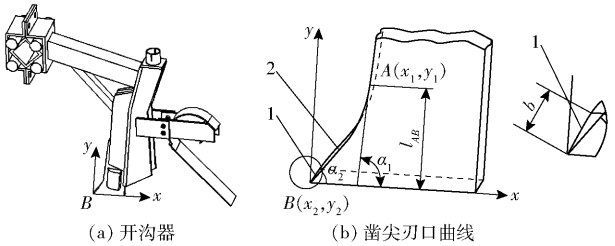
图 2　凿式开沟器仿形原理图

Fig. 2　Self-adaptive principle sketch of profiling chisel opener

2　凿式开沟器设计与分析

2.1　凿式曲面设计

凿式开沟器入土性能好、破茬能力较强，其入土角度对入土性能、破茬切土性能、凿尖强度、开沟深度稳定性有重要影响。选择合适的入土角度会改善开沟器开沟性能，且凿式刃口为曲线的开沟器比刃口为直线的开沟器阻力小[17]，故本文选取一元三次函数作为入土角刃口曲线，如图 3 所示，以确定合适的入土角度和刃口曲线形式。



(a) 开沟器　　(b) 凿尖刃口曲线

图 3　刃口曲线坐标图

Fig. 3　Coordinate system diagrams of chisel tip cutting edge

1. 刃口宽度　2. 凿式曲面

刃口曲线方程为

$$y = ax^3 \tag{1}$$

式中　a——刃口曲线三次项系数

取刃口曲线上终止点 $A(x_1, y_1)$、入土点 $B(x_2, y_2)$，并分别求得两点的斜率 $\tan\alpha_1$、$\tan\alpha_2$，根据 A、B 两点的 y 坐标可求得 A、B 两点间的垂直距离 l_{AB}，由图 3 几何关系和刃口曲线斜率可得方程组

$$\begin{cases} \tan\alpha_1 = 3ax_1^2 \\ \tan\alpha_2 = 3ax_2^2 \\ l_{AB} = y_1 - y_2 \end{cases} \tag{2}$$

式中　α_1——刃口曲线终止角，(°)

α_2——刃口曲线入土角，(°)

l_{AB}——刃口曲线高度，mm

联立式(1)、(2)可得

$$a = \frac{(\tan^{\frac{3}{2}}\alpha_1 - \tan^{\frac{3}{2}}\alpha_2)^2}{27l_{AB}} \tag{3}$$

将式(3)代入式(1)可得刃口曲线方程

$$y = \frac{(\tan^{\frac{3}{2}}\alpha_1 - \tan^{\frac{3}{2}}\alpha_2)^2}{27l_{AB}}x^3 \tag{4}$$

由式(4)可知，刃口曲线的形状由入土角 α_2、终止角 α_1、刃口曲线高度 l_{AB} 决定。由图 3 可知，$\alpha_1 > \alpha_2$，为满足长江中下游地区和新疆地区油菜、小麦播种开沟深度的要求，并符合新疆地区对高速免耕播种凿式开沟器结构强度高的需求，入土角 α_2 取 15°～31°[18]。刃口曲线高度 l_{AB} 由播种深度决定，长江中下游地区油菜播深 0～20 mm，小麦播深 20～40 mm，新疆地区油菜播深 20～30 mm，小麦播深 30～50 mm，综合考虑刃口曲线长度满足兼用要求，取 l_{AB} = 50 mm。刃口曲线在空间延伸至刃口宽度 b，形成凿式曲面。

2.2　仿形壁受力分析

运用弹性仿形辊仿形机构，可显著提高播种开沟器对地势起伏的快速响应性。为更好地实现仿形功能，仿形辊初始安装时需有一定弹性压缩量，以施加力矩保证凿式开沟器有效入土。仿形辊以仿形支撑杆为中心轴向对称安装，结构如图 4 所示。

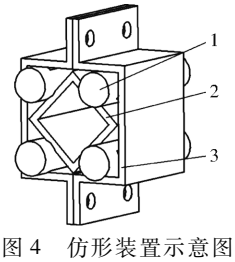


图 4　仿形装置示意图

Fig. 4　Sketch of self-adaption profiling device

1. 仿形辊　2. 仿形支撑杆　3. 仿形壁

播种作业时，凿式开沟器入土受土壤的反作用力使开沟器整体有逆时针转动的趋势。当土壤施加作用力产生的力矩大于仿形辊与仿形壁之间的静摩擦力产生的力矩时，根据圆柱体弹性力学原理，仿形辊将自由扭转，并发生翘曲[19]。开沟器逆时针转动角度在 0°～45°范围变化时，仿形辊形变量逐渐增大，其与仿形壁之间的滑动摩擦力将逐渐增加。取凿式开沟器将逆时针转动瞬时进行受力分析，仿形壁的受力情况如图 5 所示。

根据图 5 受力分析，当 4 根仿形辊沿轴心 O 点轴向对称分布时，仿形壁的 4 个壁面分别在 x、y 轴

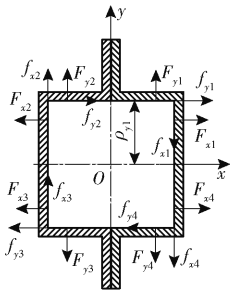


图 5 仿形壁受力示意图

Fig. 5 Sketch of forcing on profiling wall

上的压力、摩擦力到轴心 O 点的力臂均相同。图 5 中,F_{x1}、F_{x2}、F_{x3}、F_{x4}为仿形壁 4 个壁面在 x 轴方向所受的压力,F_{y1}、F_{y2}、F_{y3}、F_{y4}为仿形壁 4 个壁面在 y 轴方向所受的压力,f_{x1}、f_{x2}、f_{x3}、f_{x4}为仿形壁 4 个壁面在 x 轴方向所受的摩擦力,f_{y1}、f_{y2}、f_{y3}、f_{y4}为仿形壁 4 个壁面在 y 轴方向所受的摩擦力,ρ_{y1}为仿形壁各壁面到轴心 O 的力臂。以此建立 4 根仿形辊对仿形壁 4 个壁面上的压力和摩擦力的力学方程

$$\begin{cases} F_{x1} - F_{x2} - F_{x3} + F_{x4} = 0 \\ F_{y1} + F_{y2} - F_{y3} - F_{y4} = 0 \\ f_{x1} - f_{x2} - f_{x3} + f_{x4} = 0 \\ f_{y1} + f_{y2} - f_{y3} - f_{y4} = 0 \\ f_{x1} = \mu_x F_{x1} \\ M_l = \rho_{y1} f_{x1} + \rho_{y1} f_{x2} + \rho_{y1} f_{x3} + \rho_{y1} f_{x4} \end{cases} \tag{5}$$

式中 μ_x——仿形辊与仿形壁面间的摩擦因数

M_l——单根仿形辊与仿形壁面间力矩

由图 5 和式(5)可知,当开沟器有逆时针转动趋势时,仿形壁的 4 个壁面受仿形辊的压力、摩擦力大小均相同;仿形壁受仿形辊的压力、摩擦力的合力均为零;仿形壁所受的压力合力矩为零。仿形壁所受的滑动摩擦力产生的力矩是阻碍开沟器逆时针转动的主要因素,仿形壁对轴心 O 的力矩 M_h 是 4 根仿形辊与仿形壁面间力矩之和,即

$$M_h = 4M_l = 4\rho_{y1}\mu_x F_{x1} \tag{6}$$

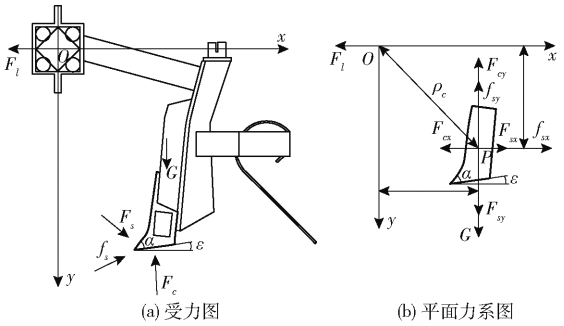
由式(6)可知,仿形壁到轴心 O 的力臂 ρ_{y1}、仿形辊与仿形壁的摩擦因数 μ_x、仿形壁所受的压力 F_{x1}是影响开沟器逆时针转动趋势的关键因素。增大仿形辊直径,仿形壁所受的压力增加,仿形壁与仿形辊之间的摩擦力也相应增大。故增大仿形辊直径及仿形壁到轴心的距离,可降低凿式开沟器入土后逆时针转动的趋势,提高开沟器入土深度。

2.3 开沟器受力分析

开沟器入土时,基于开沟器与土壤的互作关系,土壤对开沟器的作用力包括:种沟底部对凿式主体的反力 F_c,凿式主体侧壁受挤压所产生的摩擦力 f_s,开沟器前进方向刃口曲面前端土壤对开沟器的阻力 F_s。

入土瞬时,开沟器以悬臂式挂接方式连接于仿形支撑杆上,为顺利入土,应使开沟器重力 G 绕中心点 O 的力矩、仿形壁绕中心点的力矩 M_h与凿式主体受土壤阻力绕中心点形成的力矩平衡[20]。凿式主体在平面 xy 内力系平衡,力系如图 6 所示。图 6b 是将凿形主体受力平移至开沟器主体质心 P 上的受力图。基于平面力系平衡,力系的主矢、主矩均为零,即 $F=0$,$M=0$。建立平衡方程

$$\begin{cases} F_l + F_{cx} = F_{sx} + f_{sx} \\ G + F_{sy} = F_{cy} + f_{sy} \\ M_h + G\rho_{cx} + F_{cx}\rho_{cy} + F_{sy}\rho_{cx} = F_{cy}\rho_{cx} + F_{sx}\rho_{cy} + f_{sx}\rho_{cy} + f_{sy}\rho_{cx} \end{cases} \tag{7}$$



(a) 受力图 (b) 平面力系图

图 6 开沟器力系示意图

Fig. 6 Sketches of force system on opener

图 6 中,F_{cx}、F_{cy}、F_{sx}、F_{sy}、f_{sx}、f_{sy}分别是 F_c、F_s、f_s在 x、y 轴上的分力,ρ_{cx}、ρ_{cy}是 ρ_c在 x、y 轴上的力臂,则可得

$$\begin{cases} F_l = F_s\cos\alpha + f_{sx} - F_c\sin\varepsilon \\ G = F_c\cos\varepsilon + f_{sy} - F_s\sin\alpha \\ M_h = \rho_c(F_c\cos\varepsilon + f_{sy} - F_s\sin\alpha - G)\cos(\alpha+\varepsilon) + \\ \qquad \rho_c(F_s\cos\alpha + f_{sx} - F_c\sin\varepsilon)\sin(\alpha+\varepsilon) \end{cases} \tag{8}$$

式中 ε——开沟器隙角,(°)

联立式(6)、(8)可得仿形壁、凿式主体与中心的力臂关系

$$\rho_{y1}/\rho_c = [(F_c\cos\varepsilon + f_{sy} - F_s\sin\alpha - G)\cos(\alpha+\varepsilon) + (F_s\cos\alpha + f_{sx} - F_c\sin\varepsilon)\sin(\alpha+\varepsilon)]/(4\mu_x F_{x1}) \tag{9}$$

由式(8)可知,x 轴方向,开沟器工作所需的牵引力与刃口曲面前端土壤对开沟器的阻力 F_s、凿式主体侧壁受挤压所产生的摩擦力 f_s、沟底反力 F_c、入土角 α、隙角 ε 有关,F_s、f_s、α 越大,F_c、ε 越小,开沟器所需要的牵引力越大。F_s、f_s、F_c的大小均受刃口宽度 b 影响,刃口宽度越大, F_s、f_s、F_c越大,故开沟器刃口宽度是影响开沟器牵引力的主要因素之一;y 轴方向,F_c、f_{sy}越大,F_s、α、ε 越小,开沟器入土需垂

直地面的压力越大。由式(8)、(9)可知，开沟器自身质量越大，开沟器入土性能越好，且所需仿形辊对仿形壁的摩擦力产生的力矩越小。为实现凿式开沟器对油菜、小麦播种的适应性，一般开沟器隙角 ε 取 5°[21]，$\sin\varepsilon < \cos\varepsilon$。当土壤秸秆量大，土质黏重板结时，$F_c$、$F_s$、$f_s$将增大，会阻碍开沟器顺时针转动。通过改变开沟器质心 P 和仿形壁到轴心 O 的力臂，调整仿形辊直径，开沟器可满足不同种类土壤的开沟要求。

2.4　仿形机构设计

综合考虑播种机整机结构、播种开沟器布局及开沟器强度要求，确定仿形支撑杆为边长 50 mm 方钢，仿形壁选用边长 73 mm 结构钢。根据几何关系，仿形支撑杆与仿形壁组成的空间可安装仿形辊且仿形辊无弹性形变的最小直径为 22 mm。为实现开沟器有效入土，自适应仿形机构逆时针转动时，仿形辊产生对仿形壁的摩擦力形成的力矩应大于入土阻力产生的力矩。

为提高自适应仿形机构对地表起伏的响应能力，需确定合理的仿形辊直径范围。基于仿形壁与仿形支撑杆组成的空间关系，可安装直径为 22 ~ 30 mm 的仿形辊。采用质构仪对仿形辊进行压缩试验，仿形辊弹性形变中，质构仪施加的压力与压缩距离成正比，当压缩距离大于 4 mm 时，仿形辊发生塑性形变，压力急速增大，且形变不可恢复。基于试验分析和实际仿形机构的空间关系，当仿形辊直径大于 26 mm 时，安装于仿形壁与仿形支撑杆组成的空间内的仿形辊将发生塑性形变，仿形复位性能急速恶化，故合理的仿形辊直径范围为 22 ~ 26 mm。弹性形变范围内，仿形辊的压力与压缩距离关系为

$$F_t = \tau x_t \tag{10}$$

式中　τ——仿形辊弹性系数，N/m

x_t——仿形辊压缩距离，m

基于质构仪压缩试验、仿形机构空间尺寸关系、实际开沟器土壤工况及播种机整机质量，并参考文献[6]，设计仿形机构最大载荷为 800 N，开沟器绕中心旋转角度应小于 45°，以保证仿形辊保持弹性形变和有效仿形量。简化开沟器结构，开沟器几何尺寸关系如图 7 所示，A 点为开沟器凿尖点，A'为仿形过程中 A 点的位置，由几何关系可得仿形量计算公式

$$l_{a'b} = 2\sqrt{l_{oc}^2 + l_{ac}^2}\sin\frac{\theta}{2}\sin\left(90° + \frac{\theta}{2} - \arctan\frac{l_{oc}}{l_{ac}}\right) \tag{11}$$

式中　θ——仿形过程中凿尖旋转的角度，(°)

l_{oc}——轴心 O 到凿尖的垂直距离，mm

l_{ac}——轴心 O 到凿尖的水平距离，mm

$l_{a'b}$——理论仿形量，mm

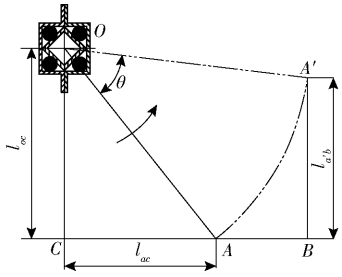


图 7　仿形量几何关系示意图

Fig. 7　Sketch of profiling geometric relationship

结合式(9)~(11)可得仿形量 $l_{a'b}$ 计算公式为

$$l_{a'b} = 2\{(4\mu_x\tau x_t\rho_{y1})/[(F_c\cos\varepsilon + f_{sy} - F_s\sin\alpha - G)\cos(\alpha+\varepsilon) + (F_s\cos\alpha + f_{sx} - F_c\sin\varepsilon)\sin(\alpha+\varepsilon)]\}^{\frac{1}{2}} \cdot \sin\frac{\theta}{2}\sin\left(90° + \frac{\theta}{2} - \arctan\frac{l_{oc}}{l_{ac}}\right) \tag{12}$$

由式(12)可得仿形量与仿形辊压缩距离 x_t、开沟器受力、作用力矩之间的关系。依据设计尺寸，l_{oc} 为 365 mm，l_{ac} 为 285 mm，当最大转角 θ 为 45°时，计算得最大理论仿形量 $l_{a'b}$ 为 308 mm。

2.5　导流板设计

2.5.1　土壤导流原理

开沟器作业时，开沟器凿式主体入土后，被翻动的土壤向种沟两侧抛撒，土壤颗粒碰撞到导流板后，导流板曲面可使接触的土粒抛撒速度下降，并阻止土粒继续向种沟两侧更远距离运动，实现被抛撒土壤回落地表。开沟器未安装与安装导流板时，简化后的土壤流动特性如图 8 所示。

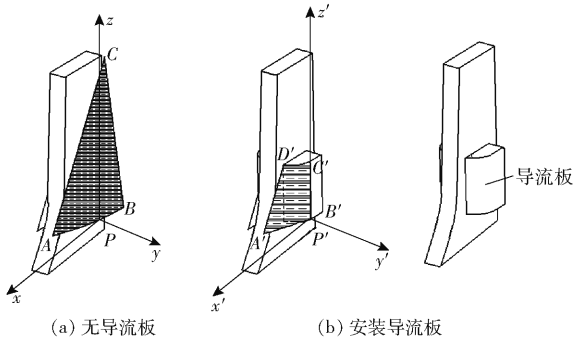


图 8　土壤抛撒示意图

Fig. 8　Sketches of spilling soil

图 8 中，x 轴为开沟器运动方向，AB、$A'B'$为耕地地表，被开沟器扰动抛出的土壤对称抛撒至凿式主体两侧，形成堆积的扇形圆弧区域。未安装导流板时，抛撒的土壤沿 x、y、z 轴方向运动距离比安装导流板时更远，增加了土壤抛撒的无序性，土壤颗粒在 y 轴方向运动距离越远，越难以保证被扰动抛出的土壤顺利覆盖种沟，增加了覆土弹片设计的难度。

安装导流板时,土壤被抛撒到弧形倒流板上,形成扇形圆弧区域 $A'B'C'D'$,土壤颗粒撞击到导流板后速度下降,降低了土壤颗粒回落到土壤表面的速度,减少了土壤颗粒在 y 轴方向的抛撒距离,更利于覆土。

2.5.2 参数确定

开沟器入土后,被抛撒的土壤为散粒体,假设土壤颗粒撞击到导流板后,初始速度为零[22],土壤颗粒接触导流板后的质点动力学分析如图 9 所示。

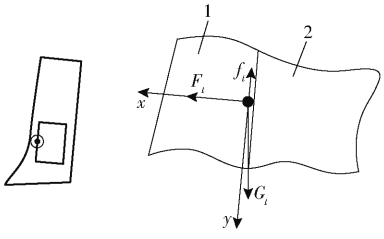


图 9 土壤颗粒受力分析示意图

Fig. 9 Sketch of soil particle force analysis

1. 凿式主体 2. 导流板

土壤颗粒受重力 G_t、导流板壁面对其产生的支持力 F_t 和摩擦力 f_t 作用。土壤沿导流板壁面下滑时,沿 x 轴方向的加速度 a_x 为 0。

以土壤颗粒为研究对象,建立平衡方程

$$\begin{cases} G_t\cos\gamma - f_t = ma_y \\ G_t\sin\gamma - F_t = 0 \\ f_t = F_t\mu_t \\ G_t = mg \end{cases} \tag{13}$$

式中 γ——导流板与竖直方向的安装夹角,(°)

μ_t——土壤颗粒与导流板之间的摩擦因数

由式(13)可得 y 轴方向的加速度为

$$a_y = g\cos\gamma - g\mu_t\sin\gamma \tag{14}$$

加速度决定抛撒至导流板上土粒的回流速度,加速度 a_y 越大,则回流到地表上的速度越快,更利于土壤快速在地表聚拢。由式(14)可知,摩擦因数 μ_t、导流板壁面与竖直方向的夹角 γ 是影响 a_y 的主要参数。γ 越小,土粒回流速度越快,当安装角 γ 过小时,导流板易缠绕秸秆,综合考虑开沟器对播种区域的适应性,取 γ 为 5°。

3 高速数字化土槽试验

3.1 试验设备

试验于华中农业大学工程训练中心室内土槽开展。试验设备为高速数字化土槽试验台,试验装置为凿式播种开沟器,可通过土槽车的液压系统调节开沟器的入土深度[23]。地表平整度采用三维激光扫描仪(美国天宝公司,Trimble TX8,精度 2 mm)测量。土槽内土壤含水率为 18.53%,平均土壤紧实度为 580.46 kPa,地表平整度计算方法参考文献[24],试验工作速度为 4.5 km/h,试验装置如图 10 所示。



图 10 土槽试验装置

Fig. 10 Soil-bin test device

3.2 沟深稳定性测量

种沟深度的稳定性直接影响种子播深及出苗效果。测试前,调整覆土装置与地面的距离。沟深测量时,开沟器前进 20 m,沿种沟中段取 10 m 的范围,等距取 10 个横断面,测量原地表到沟底的垂直距离作为开沟深度。开沟深度稳定性系数计算式为

$$U = 1 - V \tag{15}$$

其中

$$V = \frac{S}{h} \times 100\%$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(h_i - h)^2}{n-1}}$$

式中 h——开沟深度平均值,mm

h_i——第 i 个测量点的开沟深度,mm

S——开沟深度的标准差,mm

n——测量的横断面样本数

V——开沟深度变异系数,%

U——开沟深度稳定性系数,%

3.3 试验方案

基于对凿式开沟器的设计与参数分析,确定刃口宽度、仿形辊直径、入土角、播深为影响开沟深度稳定性的主要因素,试验指标为开沟深度稳定性系数。采用响应面优化法开展二次回归正交组合试验,获取凿式开沟器最佳参数组合。试验因素水平如表 1 所示。

表 1 因素水平

Tab. 1 Factors and levels

水平	因素			
	刃口宽度 b/mm	仿形辊直径 d/mm	入土角 α_2/(°)	播深 l/mm
1	10	22	15	10
2	11	23	19	20
3	12	24	23	30
4	13	25	27	40
5	14	26	31	50

3.4 试验结果分析

应用 Design-Expert 软件处理试验数据,试验方

案与试验结果如表 2 所示。通过回归分析处理试验结果，获取方差分析如表 3 所示（x_1、x_2、x_3、x_4 为因素水平值），建立开沟深度稳定性系数水平值的回归方程，并检验其显著性。

由表 3 可知，影响开沟深度稳定性的主次顺序为 x_2^2、x_2、x_3^2、x_1^2、x_4^2、x_3、x_4、x_1x_4、x_3x_4、x_1，其中 x_2^2、x_2、x_3^2、x_1^2、x_4^2、x_3、x_4、x_1x_4、x_3x_4 对开沟稳定性影响极显著（$P<0.01$）；x_1 对开沟稳定性影响较显著（$0.01<P<0.05$）。将不显著的交互作用项的自由度及回归平方和并入残差项，再开展方差分析。获取开沟稳定性受各因素影响的回归方程

$$Y=93.49+0.13x_1+4.93x_2-0.78x_3-0.74x_4+0.28x_1x_4-0.28x_3x_4-2.03x_1^2-5.22x_2^2-2.33x_3^2-1.42x_4^2 \quad (16)$$

对回归方程（16）进行失拟性检验，P 值为 0.23，不显著。表明影响试验指标的其他主要因素不存在，试验指标和试验因素存在显著的二次关系。

表 2　试验方案与结果

Tab. 2　Experiment scheme and results

序号	刃口宽度 b/mm	仿形辊直径 d/mm	入土角 α_2/(°)	播深 l/mm	开沟深度稳定性系数 U/%
1	13	23	19	20	78.25
2	12	24	23	30	93.51
3	11	23	27	40	75.43
4	12	24	23	10	89.45
5	12	24	23	50	86.54
6	11	23	19	40	77.62
7	14	24	23	30	85.72
8	11	25	27	20	87.58
9	11	23	27	20	77.86
10	12	24	23	30	93.31
11	13	23	27	40	75.94
12	11	25	19	20	88.68
13	12	24	23	30	93.72
14	11	25	19	40	86.93
15	13	25	27	40	86.15
16	10	24	23	30	85.42
17	12	24	23	30	93.51
18	13	23	27	20	77.52
19	13	23	19	40	78.28
20	12	24	31	30	82.81
21	12	22	23	30	62.78
22	12	24	23	30	93.65
23	13	25	27	20	87.51
24	13	25	19	20	88.7
25	12	26	23	30	82.71
26	11	23	19	20	78.82
27	12	24	15	30	85.91
28	13	25	19	40	87.93
29	12	24	23	30	93.21
30	11	25	27	40	84.82

表 3　开沟深度稳定性系数方差分析

Tab. 3　Variance analysis of stability on sowing depth

方差来源	方差和	自由度	均方差	F	P
模型	1 473.45	14	105.25	1 855.23	<0.000 1
x_1	0.41	1	0.41	7.24	0.016 8
x_2	584.5	1	584.5	10 303.32	<0.000 1
x_3	14.42	1	14.42	254.10	<0.000 1
x_4	12.97	1	12.97	228.55	<0.000 1
x_1x_2	0.26	1	0.26	4.50	0.051 1
x_1x_3	0.006 4	1	0.006 4	0.11	0.741 6
x_1x_4	1.24	1	1.24	21.91	0.000 3
x_2x_3	0.000 1	1	0.000 1	0.001 8	0.967 1
x_2x_4	0.13	1	0.13	2.35	0.146 2
x_3x_4	1.23	1	1.23	21.72	0.000 3
x_1^2	112.73	1	112.73	1 987.13	<0.000 1
x_2^2	751.27	1	751.27	13 242.99	<0.000 1
x_3^2	148.88	1	148.88	2 624.39	<0.000 1
x_4^2	55.39	1	55.39	976.36	<0.000 1
残差	0.85	15	0.057		
失拟项	0.66	10	0.066	1.74	0.28
纯误差	0.19	5	0.038		
总和	1 474.3	29			

3.5　参数优化

依据试验结果和数据分析，以开沟深度稳定性系数最高为目标，通过 Design-Expert 8.06 软件分析，可得多个最佳参数组合，列举其中 4 个符合期望的优选方案，如表 4 所示。分析方差分析表 3 和回归方程（16）可知，仿形辊直径是影响开沟深度稳定性关键因素。由于仿形辊直径的变化，会影响其在弹性形变中对仿形壁的摩擦力产生的力矩，进而影响对地表变化的响应能力。仿形辊直径在合理范围内时，凿式开沟器遇到地表起伏时，可形成合适的仿形量。综合考虑长江中下游和新疆地区油菜、小麦的播种深度要求和实际加工制造水平，确定开沟器实际加工尺寸为刃口宽度 12 mm、仿形辊直径 24 mm、入土角 22°。田间播种作业中，根据作物播种实际农艺要求，适当调整播深，以满足作物出苗要求。

表 4　开沟深度稳定性系数优选方案

Tab. 4　Optimization scheme of stability on sowing depth

刃口宽度 b/mm	仿形辊直径 d/mm	入土角 α_2/(°)	播深 l/mm	开沟深度稳定性系数 U/%	期望度
12.39	24.28	21.47	31.75	94.02	1
12.09	24.34	22.10	29.63	94.63	1
11.69	24.54	20.49	23.25	93.74	1
12.56	24.44	22.84	30.43	94.09	1
12.39	24.28	21.47	31.75	94.02	1

4　田间试验

田间试验用以验证最佳参数组合下的开沟器的

作业效果,包括田间作业性能对比试验和田间播种试验。通过田间作业性能对比试验,分析设计的凿式开沟器与购置的翼铲式播种开沟器开沟性能差异;通过田间播种试验,观测凿式开沟器播种油菜、小麦的出苗效果。

4.1 作业性能对比试验

4.1.1 试验方法

2017 年 10 月 14 日、2018 年 5 月 8 日、2018 年 11 月 1 日分别于湖北省监利县、新疆维吾尔自治区伊犁昭苏县 77 团、湖北省农业科学院试验基地开展田间作业性能对比试验。试验设备为油麦兼用型精量宽幅免耕播种机,配套动力为约翰迪尔 1054 型拖拉机,试验装置为凿式播种开沟器、翼铲式开沟器,试验装置如图 11 所示。试验仪器包括:皮尺(100 m)、直尺(3 m)、耕深尺(精度:0.01 mm)、三维激光扫描仪(美国天宝公司,Trimble TX8,精度 2 mm)、磁性水平尺(三箭工具有限公司,精度 0.002 9°)、土壤紧实度仪(浙江托普仪器有限公司,TJSD - 750 Ⅱ 型,±0.5% FS)、土壤水分测试仪(浙江托普仪器有限公司,TZS - 2X 型,0.01%)。湖北省监利县为机收后稻茬田,播种前田块经过旋耕处理,地表平整,秸秆量少,土壤类型为黄棕壤,土壤含水率为 22.53%;新疆地区为一年一熟油菜小麦轮作田,因秸秆自然消减,故地表基本无秸秆残留,地表平整度为 13.28 mm,土壤类型为灰钙土,土壤含水率为 7.56%、土壤紧实度为 302.14 kPa;湖北省农业科学院试验基地为机收后稻茬田,播种前田块经过旋耕处理,地表平整,秸秆量少,土壤类型为黄棕壤,土壤含水率为 20.95%。试验过程中,设定开沟铲的播深为 30 mm,播种机沿直线方向作业距离 50 m,选取中间 30 m 作为测量区域,沿机组前进方向每隔 3 m 测量开沟深度,每行程种沟测 10 个点,试验重复 5 次,计算播后地表平整度[22],并观测作业通过性。



(a) 试验整机 (b) 导流板

图 11 开沟器田间试验

Fig. 11 Field experiment photos of opener

1. 翼铲式开沟器 2. 凿式开沟器

4.1.2 试验结果分析

通过对 2 种不同类型开沟器开沟深度、地表平整度的测定,计算开沟深度变异系数和地表平整度,并观测开沟器 5 次重复试验中拖拽秸秆及壅土的次数,即作业通过性。试验结果如表 5 所示,其中序号 1、2、3 分别为湖北省监利县、新疆维吾尔自治区伊犁昭苏县 77 团、湖北省农业科学院试验基地测定数据结果。

表 5 作业性能对比试验结果

Tab. 5 Contrastive experiment results of operational performance

开沟器类型	序号	开沟深度/mm	深度标准差/mm	深度变异系数/%	播后地表平整度/mm	拖拽秸秆次数	壅土次数
凿式开沟器	1	27.5	2.41	8.76	18.4	1	1
	2	28.7	2.18	7.53	17.6	0	0
	3	27.9	2.33	8.35	18.2	1	1
翼铲式开沟器	1	26.2	3.18	12.15	19.8	2	3
	2	27.1	2.53	9.33	18.9	0	2
	3	26.9	2.96	11.02	19.5	3	4

由表 5 可知,凿式开沟器的深度变异系数、播后地表平整度、作业通过性均优于翼铲式开沟器,且凿式开沟器拖拽的秸秆、壅土能从开沟器间流过,其性能满足 GB/T 20865—2007《免耕施肥播种机》的要求。翼铲式开沟器的翼铲对土壤扰动量大,且不易入土,难以控制播种深度且易堵塞;根据表 5 中数据可知,采用凿式开沟器,新疆地区的开沟深度变异系数为 7.53%,播后地表平整度为 17.6 mm,均低于湖北地区。主要在于新疆地区地表耕作区块平整度高、土壤松散,且无秸秆覆盖、含水率低,利于仿形功能的实现,开沟稳定性更优。

4.2 播种试验

4.2.1 试验方法

2018 年 5 月 11 日、2018 年 9 月 14 日、2018 年 11 月 4 日分别于新疆维吾尔自治区伊犁昭苏县 77 团、华中农业大学现代农业示范基地、湖北省农业科学院试验基地开展田间播种试验。试验中选择刃口宽度为 12 mm、仿形辊直径为 24 mm、入土角为 22° 的最佳参数开沟器。

新疆维吾尔自治区伊犁昭苏县 77 团开展春油菜播种试验,土壤类型为灰钙土,土壤含水率为 7.14%,土壤紧实度为 315.64 kPa,油菜品种为西禾油 3 号,播量 7.5 kg/hm^2,作业速度 10 km/h,播深 30 mm,播种中采用镇压辊镇压;华中农业大学现代农业示范基地开展冬油菜播种试验,土壤类型为黄棕壤,播种田块已旋耕,土壤含水率为 18.13%,油菜品种为华油杂 62,播量 4.275 kg/hm^2,作业速度 7 km/h,播深 20 mm;湖北省农业科学院试验基地开展小麦播种试验,试验田为机收后稻茬田,土壤类型

为黄棕壤，播种田块已旋耕，土壤含水率为19.54%，小麦品种为郑麦9023，播量195 kg/hm^2，作业速度8 km/h，播深40 mm。试验设备为油麦兼用型精量宽幅免耕播种机，工作幅宽4.8 m，24行播种。播种30 d后，每行测5段，测每段1 m长度内的油菜、小麦苗数[25]。播种试验和出苗情况如图12所示。



(a) 春油菜播种　(b) 冬油菜播种　(c) 小麦播种　(d) 油菜出苗

图12　播种试验及出苗情况

Fig. 12　Planting experiment and emergence

4.2.2　试验结果分析

开沟器的性能直接影响播种均匀性、出苗率及作物长势，可通过测定各行苗数、单行苗数变异系数和各行苗数一致性变异系数来表征开沟器开沟、覆土的综合性能。单行苗数变异系数通过分析单行油菜各测量段的苗数差异，可表明单个开沟器的仿形开沟效果；各行苗数一致性变异系数通过分析各行油菜测量段的出苗差异，可表明各行开沟器的仿形开沟效果及对宽幅作业的适应性。单行苗数变异系数计算公式为

$$V_z = \frac{S_z}{X_z} \times 100\% \tag{17}$$

式中　S_z——单行5次测量苗数的标准差

X_z——单行苗数平均值

V_z——单行苗数变异系数，%

各行苗数一致性变异系数计算公式为

$$V_g = \frac{S_g}{X_g} \times 100\% \tag{18}$$

式中　S_g——各行平均苗数的标准差

X_g——各行苗数的平均值

V_g——各行苗数一致性变异系数，%

由苗数测量数据和式(17)可得春油菜、冬油菜、小麦的各行苗数、单行苗数变异系数如图13所示。

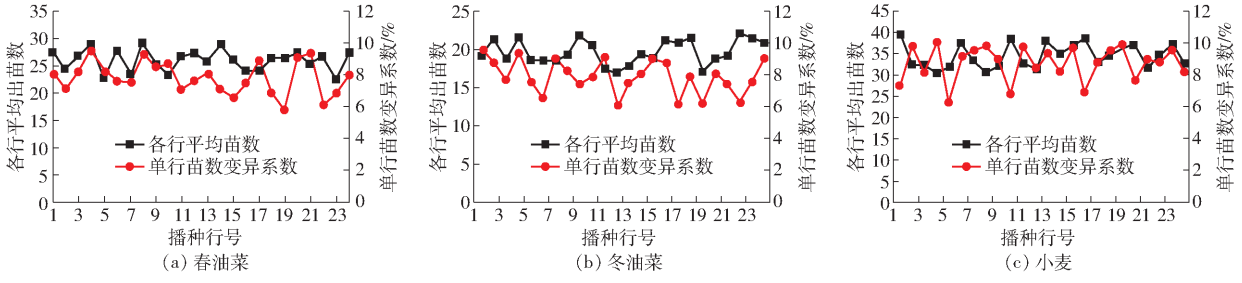


图13　单行苗数和苗数变异系数

Fig. 13　Seedling number and variation coefficient of seeding number

根据图13可知，油菜、小麦的各行平均苗数和单行苗数变异系数均在合理的范围内。春油菜各行1 m内平均苗数为26，单行苗数变异系数为5.82%~9.58%；冬油菜各行1 m内平均苗数为20，单行苗数变异系数为6.03%~9.03%；小麦的各行1 m内平均苗数为35，单行苗数变异系数为6.25%~10.15%。油菜、小麦的苗数和单行苗数变异系数均满足实际生产中油菜、小麦精量播种要求。由式(18)和图13可知小麦各行苗数一致性变异系数为8.11%，春油菜、冬油菜的各行苗数一致性变异系数分别为7.53%、7.91%。

综合田间作业性能对比试验和田间播种试验可知，采用仿形凿式开沟器开沟播种性能优于NY/T 1411—2007《小麦免耕播种机作业质量》和NY/T 2709—2015《油菜免耕播种机作业质量》的要求，表明仿形凿式开沟器可提高播深稳定性、各行播深一致性，并提高作业效率。

5　结论

(1)为提高宽幅油麦兼用型播种机的作业效率、播深稳定性和一致性，设计了一种基于仿形辊弹性形变、实现仿形功能的凿式播种开沟器，确定了凿式刃口曲线方程，分析了开沟器各部件与土壤互作关系力学模型，阐明了仿形机构的弹性形变与仿形阻力及仿形量的关系。

(2)通过二次回归正交组合试验，得出了曲面刃口宽度、仿形辊直径、入土角、播深与开沟器稳定性系数的二次回归方程。方差分析表明，仿形辊直径对开沟深度稳定性影响最显著，并得出最优参数组合为刃口宽度12 mm、仿形辊直径24 mm、入土角22°。

(3)田间作业性能对比试验表明，凿式开沟器的播深变异系数、播后地表平整度、作业通过性均优

于翼铲式开沟器,且凿式开沟器在新疆偏沙壤土区域作业性能优于长江中下游含水率高的棕壤土区域的作业性能。

(4)田间播种试验表明,安装自适应仿形开沟器的播种机作业效果较好,小麦的各行 1 m 内平均苗数为 35,单行苗数变异系数为 6.25% ~10.15%,各行苗数一致性变异系数为 8.11%;春油菜各行 1 m 内平均苗数为 26,单行苗数变异系数为 5.82% ~ 9.58%,各行苗数一致性变异系数为 7.53%;冬油菜各行 1 m 内平均苗数为 20,单行苗数变异系数为 6.03% ~ 9.03%,各行苗数一致性变异系数为 7.91%,满足油菜、小麦精量播种要求。

参 考 文 献

[1] 丛锦玲,余佳佳,曹秀英,等. 油菜小麦兼用型气力式精量排种器[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(1):46 - 52.
CONG Jinling, YU Jiajia, CAO Xiuying, et al. Design of dual-purpose pneumatic precision metering device for rape and wheat [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1):46 - 52. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20140108&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.008. (in Chinese)

[2] 雷小龙,廖宜涛,张闻宇,等. 油麦兼用气送式集排器输种管道气固两相流仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 57 - 68.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, ZHANG Wenyu, et al. Simulation and experiment of gas-solid flow in seed cosveying tube for rapeseed and wheat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3):57 - 68. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20170307&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.007. (in Chinese)

[3] 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 cosveying 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? file_no = 2018s019&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.019. (in Chinese)

[4] 刘宏新,唐师法,刘俊孝,等. 地轮中置式高机动性宽幅农具机架平台研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 105 - 114.
LIU Hongxin, TANG Shifa, LIU Junxiao, et al. Middle-mounted wheel high-mobility universal frame platform for wide-breadth farm implements[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11):105 - 114. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20171113&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.013. (in Chinese)

[5] KARAYEL D, ÖZMERZI A. Evaluation of three depth-control components on seed placement accuracy and emergence for a precision planter[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2008, 24(3):271 - 276.

[6] MUKHTAR A, DEBASHIS C, PRAMILA A, et al. Modelling soil water dynamics and crop water use in a soybean-wheat rotation under chisel tillage in a sandy clay loam soil[J]. Geoderma, 2018, 327(10): 13 - 24.

[7] 廖庆喜,雷小龙,廖宜涛,等. 油菜精量播种技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 1 - 16.
LIAO Qingxi, LEI Xiaolong, LIAO Yitao, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2017, 48(9):1 - 16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20170901&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.001. (in Chinese)

[8] 贾洪雷,郑嘉鑫,袁洪方,等. 仿形滑刀式开沟器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(4): 16 - 24.
JIA Honglei, ZHENG Jiaxin, YUAN Hongfang, et al. Design and experiment of profiling sliding-knife opener[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(4):16 - 24. (in Chinese)

[9] 赵淑红,谭贺文,王加一,等. 多功能集成式播种开沟器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 58 - 67.
ZHAO Shuhong, TAN Hewen, WANG Jiayi, et al. Design and experiment of multifunctional integrated seeding opener[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(11):58 - 67. (in Chinese)

[10] 赵淑红,蒋恩臣,闫以勋,等. 小麦播种机开沟器双向平行四杆仿形机构的设计及运动仿真[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 26 - 32.
ZHAO Shuhong, JIANG Enchen, YAN Yixun, et al. Design and motion simulation of opener with bidirectional parallelogram linkage profiling mechanism on wheat seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(14):26 - 32. (in Chinese)

[11] 王超,刘从京,李洪文,等. 非对称式大小圆盘开沟装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 28 - 36.
WANG Chao, LIU Congjing, LI Hongwen, et al. Design and experiment of asymmetric large-small double discs ditching device [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18):28 - 36. (in Chinese)

[12] JAMES B B, JACK M D, JOHN M F. Minimising soil disturbance and reaction forces for high speed sowing using bentleg furrow openers[J]. Biosystems Engineering, 2018, 171(7): 1 - 15.

[13] AILI H, YING C. Soil disturbance and draft force of selected seed openers[J]. Soil & Tillage Research, 2014, 140(7): 48 - 54.

[14] ALIAKBAR S, JOHN M F, JACKY M D, et al. Soil translocation by narrow openers with various bent leg geometries[J]. Biosystems Engineering, 2014, 127(11): 41 - 49.

[15] 贾洪雷,郑嘉鑫,袁洪方,等. 大豆播种机双 V 型筑沟器设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2017, 47(1): 323 - 331.
JIA Honglei, ZHENG Jiaxin, YUAN Hongfang, et al. Design and experiment of a double-V-shaped furrow opener soybean seeder[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Techonlogy Edition), 2017, 47(1):323 - 331. (in Chinese)

[16] KARAYEL D, ÖZMERZI A. Comparison of vertical and lateral seed distribution of furrow openers using a new criterion[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 95(1):69 - 75.

[17] 顾耀权,贾洪雷,郭慧,等. 滑刀式开沟器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 38 - 42.
GU Yaoquan, JIA Honglei, GUO Hui, et al. Design and experiment of sliding knife furrow opener[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2):38 - 42. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20130208&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.008. (in Chinese)

[18] 中国农业机械化科学研究院.农业机械手册(上)[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2007.

[19] 王光钦. 弹性力学[M].北京:中国铁道出版社, 2008.

[20] 西涅科夫, 潘诺夫. 土壤耕作机械的理论和计算[M].北京:中国农业机械出版社,1981.

[21] KHARMANDA G, IBRAHIM M H, AL-KHEER A A, et al. Reliability-based design optimization of shank chisel plough using optimum safety factor strategy[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 109(11): 162 - 171.

[22] 刘晓鹏,肖文立,马磊,等. 油菜联合直播机组合式船型开沟器设计与开沟质量试验[J/OL].农业机械学报,2017, 48(10): 79 - 87.
LIU Xiaopeng, XIAO Wenli, MA Lei, et al. Design and ditching quality experiment on combined ship type opener of direct rapeseed seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(10): 79 - 87. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20171110&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.010.(in Chinese)

[23] 张青松,汲文峰,廖宜涛, 等. 油菜直播机铧式开畦沟前犁曲面分析与阻力特性试验[J/OL].农业机械学报, 2014, 45(2): 130 - 135.
ZHANG Qingsong, JI Wenfeng, LIAO Yitao, et al. Surface analysis and resistance characteristics experiment on ditch plow ahead of direct rapeseed Seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2):130 - 135. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20140222&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.022.(in Chinese)

[24] 秦宽,丁为民,方志超,等. 复式耕整机耕深与耕宽稳定性分析与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 1 - 8.
QIN Kuan, DING Weimin, FANG Zhichao, et al. Analysis and experiment of tillage depth and width stability for plowing and rotary tillage combined machine[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(9):1 - 8. (in Chinese)

[25] 杨松,廖庆喜,陈立,等. 2BFQ-6 型油菜精量联合直播机播种油菜的田间植株分布规律[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 23 - 28.
YANG Song, LIAO Qingxi, CHEN Li, et al. Distribution of rapeseed sowed by 2BFQ-6 precision planter[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12):23 - 28. (in Chinese)