

# 电控锥盘式蔬菜播种机设计与试验

王方艳 孙光全 张 钦  
(青岛农业大学机电工程学院, 青岛 266109)

**摘要:** 针对蔬菜机械化播种成本高、播种质量有待提高等问题,考虑蔬菜种子尺寸小、播种株距小、播深浅等特点,设计了电控锥盘式蔬菜播种机。重点研究分析了播种机的播种原理、种子的运动特性、开沟器的受力及刃口曲线等,确定了锥盘排种器、供种器、开沟覆土器等关键部件结构及参数。通过设计闭环控制系统实现了排种盘转速与机具前进速度的匹配;采用供种器连续供种、锥盘排种器均匀排种、推种器滚轮推种的方式,解决了种子堵塞、损伤等问题;通过滑刀刃口及覆土板受力分析,确定了开沟及覆土稳定的开沟覆土器结构。大葱、白菜及菠菜的播种试验表明:该机结构紧凑、性能稳定,漏播指数小于5%,重播指数小于5%,播种合格指数大于90%,符合国家标准且满足蔬菜种植的农艺要求。

**关键词:** 蔬菜;精密播种;电控;锥盘排种器;滑刀开沟器

中图分类号: S223.2\*6      文献标识码: A      文章编号: 1000-1298(2021)04-0070-10      OSID: 

## Design and Experiment of Electric Control Cone Type Vegetable Seeder

WANG Fangyan   SUN Guangquan   ZHANG Qin  
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

**Abstract:** In view of the high cost of vegetable mechanized sowing and the problem that the sowing quality needs to be improved, an electric control cone disc vegetable planter was developed based on the characteristics of small size of vegetable seeds, small spacing of sowing plants and shallow sowing depth. The seeding principle and seed movement process of the metering device, the force and edge curve of the opener were studied, and the structure of the key components such as the cone disc metering device and the opener were determined. The machine was mainly composed of chassis, frame, seed metering device, closed-loop control system, trencher and pressing wheel. Through the closed-loop control system, the speed of seed metering plate and the forward speed of the machine were matched. With the help of the electric control system, the machine can control the sowing speed in real time to ensure the precision and quality of sowing; with the way of continuous seed supply, cone disc seed separation and rolling wheel seed pushing, it can ensure the quantity and precision of sowing; with the help of the construction of the slide knife curve and the stress analysis of the covering mechanism, it can realize the low resistance ditch opening and covering the soil on the ground. The force and movement of seed in the process of seed arrangement were analyzed, and the conditions of seed movement and smooth seed filling were determined. The height of cone  $h$  was 55 mm, the base angle  $\theta$  was  $30^\circ$ , the width  $W$  of seed groove ring was 2.5 mm, the depth  $T_1$  was 2 mm, the radius of hole was 1.25 mm, and the number of holes  $Z_2$  was 28. The key structure and motion parameters of the seed pusher were determined by the seed metering process and the matching relationship of the seed pusher structure. The diameter of the roller was 25 mm, the radian was 0.8 rad, and the structure size was the same. Based on the analysis of seed characteristics and seed quantity requirements, the primary and normal seed quantity of the seed feeder were determined. The effective length of the seed wheel groove  $l_g$  was 9 mm. The problems of seed blocking and damage were solved by means of continuous seed supply, cone plate seed arrangement and rolling wheel seed pushing, and the resistance of trench opening was reduced by means of sliding knife and covering soil on the ground. According to the requirements of trenching and covering soil, the edge of

收稿日期: 2020-06-28    修回日期: 2020-08-09

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2017NC121006、2019GNC106056)和国家自然科学基金项目(51775290)

作者简介: 王方艳(1979—),女,副教授,博士,主要从事农业装备技术研究,E-mail: wfy\_66@163.com

exponential curve and covering soil mechanism were determined to simplify the structure and improve the performance. The angle of penetration  $\alpha$  was  $120^{\circ}$ . With spinach, leek and cabbage as the representative vegetable seeds, the experiment of sowing different types of seeds was carried out. The test results showed that the machine had high sowing quality and stable performance. The qualified index was more than 90%, the replaying index was less than 5%, and the missed sowing index was less than 5%, which met the national standard and the agricultural requirements of vegetable planting in the field. The research results provided a technology, equipment and method for mechanized precision planting of vegetables.

**Key words:** vegetable; precision sowing; electric control; cone plate seed metering device; sliding knife ditcher

## 0 引言

蔬菜播种作业不仅人工劳动强度大、播种精度控制难,而且耗时费工、劳动成本高,因此迫切需要实现机械化播种<sup>[1]</sup>。蔬菜播种机主要包括机械式和气力式两种<sup>[2]</sup>。通常采用种子丸粒化技术来规范种子尺寸,从而保证机械化播种过程中的充种、携种和排种精度及准确性;采用种绳编织方法保证机械化播种株距,从而解决种子形状不规则及质量小、机械化播种效果不稳定的问题;采用气力播种技术适应种子外形及尺寸,从而提高单粒播种精度及播种适应性。但丸粒化技术和种绳编织方法都增加了蔬菜的制种成本,气力播种技术增大了播种机的制造成本。因此,降低播种成本、提高播种质量是实现蔬菜机械化播种的关键。研究蔬菜精密播种技术及研发裸种播种设备对推动蔬菜机械化生产具有重要意义。

国外对蔬菜播种技术及装备的研究起步较早,其自动化、智能化水平较高<sup>[3]</sup>。欧美发达国家以适于大田作业的气力式播种设备为主,其配套动力大、销售价格高,可实现开沟、播种、覆土、施肥等多种功能,且通过更换播种盘可适应不同的蔬菜种子,如马斯奇奥的气力式播种机。日韩以中小型动力配套的机械式播种机为主,其整机结构紧凑、轻巧,多适于种子丸粒后的播种,如矢崎 SYV-M600W 蔬菜播种机,但窝眼轮式排种器型孔较小,易被灰尘及杂质堵塞。国外播种机具价格高、播种成本高,并未在我国大面积推广应用。我国对蔬菜播种技术及装备的研究起步较晚,在引进消化国外先进技术的基础上,研制了多种中小型蔬菜播种设备,但播种理论及技术不够成熟,播种设备的性能及通用性还有待提高<sup>[4]</sup>。德易播农机公司生产的 DB 系列蔬菜播种机采用尼龙窝眼轮式排种器,具有良好的通用性,但存在窝眼堵塞、种子破碎及易漏播的问题,不适于高速工况<sup>[5-6]</sup>。青岛大顺精锋公司研发的 DS-3S 型精量播种机采用种绳播种机构,其作业速度可达 8.3 km/h,播种效率高,但需提前对种子进行包衣、缠绳,成本

相对较高,且需播种后浇水,播种精度由缠绳种子间距决定<sup>[7]</sup>。青岛农业大学研制的气力式蔬菜精量播种机通过更换排种盘来适应不同蔬菜种子的播种要求,采用电机驱动排种盘从而调整播种株距,但价格高于机械式播种机。目前,我国蔬菜播种机研究已取得一定进展,但多样的种植条件及种子特性对蔬菜小株距、浅播深的精密播种提出了更高的要求。为此本文提出电控锥盘式蔬菜播种机,以期实现白菜、菠菜等裸种的低成本、精密、高效播种。

## 1 整机结构与工作原理

电控锥盘式蔬菜播种机由汽油发动机提供动力,采用手扶导向前进的工作方式,主要由镇压轮、开沟覆土器、地轮、旋转编码器、汽油发动机、减速器、机架、排种管、锥盘排种器、直流电机、供种器、扶手、机架、闭环控制系统等组成。整机结构如图 1 所示。

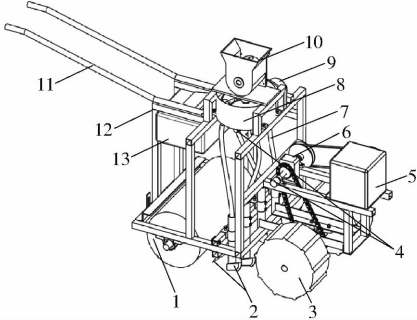


图 1 电控锥盘式蔬菜播种机结构简图  
Fig.1 Structure diagram of electric control cone type vegetable seeder

- 1.镇压轮 2.开沟覆土器 3.地轮 4.旋转编码器 5.汽油发动机 6.减速器 7.排种管 8.锥盘排种器 9.直流电机 10.供种器 11.扶手 12.机架 13.闭环控制系统

作业时,根据蔬菜种子的播种要求,在闭环控制系统中设置株距。旋转编码器分别检测前轮动力输入轴与排种轴的转速,并反馈至闭环控制系统。针对不同前进速度,闭环控制系统调节供种器转速及锥盘排种器转速,实现前进速度与排种速度匹配,实现播种精度控制。播种时,发动机提供动力驱动前轮前进,操作人员辅助导向,并控制前进速度。直流

电机为供种器及锥盘排种器的旋转提供动力。种子由供种器连续落入锥盘排种器,沿着锥盘面均匀散落至锥盘的种环槽内,伴随锥盘的转动被推种器推入排种管内,然后经排种管掉落到滑刀开沟器开好的种沟内,完成播种过程。该机可以更换不同型孔尺寸的排种盘,实现多种蔬菜的播种作业。整机技术参数如表 1 所示。

表 1 技术参数  
Tab. 1 Technical parameters

| 参数                                       | 数值            |
|------------------------------------------|---------------|
| 外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)                   | 800×1 000×500 |
| 播深/mm                                    | 0~20(可调)      |
| 株距/mm                                    | 30~300(可调)    |
| 播种行数                                     | 4             |
| 适应行距/mm                                  | 150~250       |
| 前进速度/(km·h <sup>-1</sup> )               | 0~3.6         |
| 工作效率/(hm <sup>2</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | 0.2           |

2 传动及控制系统

2.1 传动系统

汽油发动机为机具的前进提供动力,直流电机为供种器及锥盘排种器的转动提供动力。其中,汽油发动机动力通过带传动、减速器、链传动后,带动机具前进。直流电机一路动力经链传动带动供种器转动,另一路动力经锥齿轮转向带动锥盘排种器转动。传动系统原理图如图 2 所示。

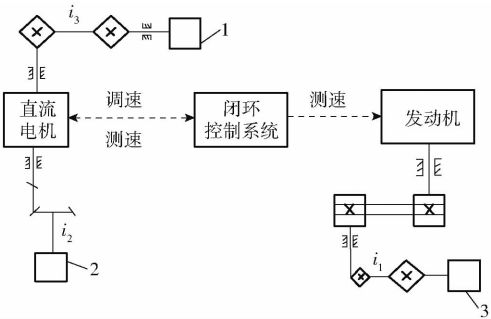


图 2 传动系统原理图  
Fig. 2 Principle diagram of transmission system  
1. 供种器 2. 锥盘排种器 3. 行走轮

该机行驶动力消耗主要包括行走功率和开沟功率。其中,行走功率  $P_1$  和开沟功率  $P_2$  满足<sup>[8-9]</sup>

$$P_1 = \frac{fmgv_m}{1.02\eta_1}$$
 (1)

$$P_2 = Fv_m/1\,000$$
 (2)

式中  $f$ ——滚动阻力系数  
 $m$ ——机具质量,kg  
 $\eta_1$ ——传动效率  
 $F$ ——开沟阻力,N

$g$ ——重力加速度,m/s<sup>2</sup>  
 $v_m$ ——机具前进速度,m/s

通常滚动阻力系数  $f$  为 0.085~0.17,传动效率  $\eta_1$  为 0.8~0.9,单个滑刀开沟器工作阻力为 200~400 N<sup>[10]</sup>,人步行速度为 1.6~2.5 km/h,机具质量约 200 kg。取滚动阻力系数  $f=0.1$ ,传动效率  $\eta_1=0.9$ ,单个滑刀开沟器工作阻力  $F=400$  N 进行计算,机具前进速度为 0.7 m/s,则 4 行播种机的行驶驱动功率约为 1.27 kW。

直流电机功率由供种器工作功率  $P_3$  和锥盘排种器工作功率  $P_4$  组成,且满足<sup>[11]</sup>

$$P_3 = \eta_2 \frac{\tau_1 n_1}{9.55}$$
 (3)

$$P_4 = \eta_3 \frac{\tau_2 n_2}{9.55}$$
 (4)

式中  $\tau_1$ ——供种轴阻力矩,N·m  
 $\tau_2$ ——排种轴阻力矩,N·m  
 $n_1$ ——供种器转速,r/min  
 $n_2$ ——锥盘转速,r/min  
 $\eta_2, \eta_3$ ——传动效率

参照水平圆盘排种器,排种器的极限线速度为 0.30~0.35 m/s<sup>[10]</sup>,转轴阻力扭矩不超过 10 N·m,经预试验选定排种盘极限转速为 170 r/min,确定电机功率为 356 W。

2.2 闭环控制系统

闭环控制系统由主控制器、速度检测模块、触摸屏、电机驱动模块等组成。考虑机具田间工作环境的复杂性及振动、粉尘的影响,选用抗干扰性强、可靠性高、维护方便的 ZK3U 型 PLC。采用 24 V 直流电源,通过航空插头联接电路各模块,利用 DC-DC 技术供电。闭环控制系统框图如图 3 所示。

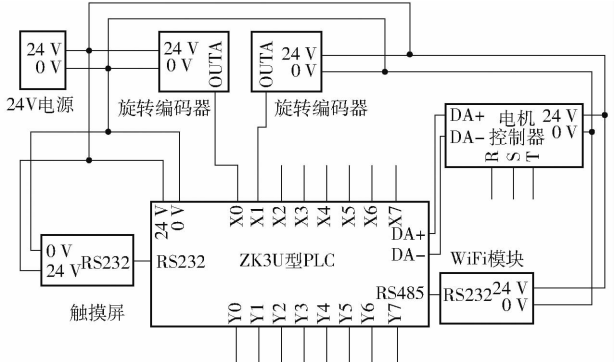


图 3 闭环控制系统框图  
Fig. 3 Wiring diagram of electric control system

机具驱动轮的棱条结构增加了其与地面的摩擦因数,避免了机具行进打滑。根据操作员的行走速度,设定播种机的前进速度为 0~2.5 km/h,得出锥盘排种器回转一周的时间为 3~28.5 s,选用

80BL100S40-445TK9型直流电机控制排种器及供种器转速。工作时,通过2个旋转编码器实时获取机具前进速度及锥盘排种器的回转速度,借助闭环控制系统控制电机转速,实现播种速度与前进速度的实时匹配。

### 3 关键部件设计

#### 3.1 锥盘排种器

锥盘排种器是蔬菜直播机的核心部件,直接影响机具的播种效果,主要包括锥盘、分种螺帽、推种器、固定架、壳体等,结构如图4所示。工作时,种子从供种器落到锥盘后顺着锥盘面呈放射状滑落入凹形结构的种槽环内,并由刮种板刮掉多余的种子,保证种子单粒排序及充种。推种器固定在壳体上,利用锥盘转动和推种器滚动使种子在固定位置落种,实现种子的主动排种。

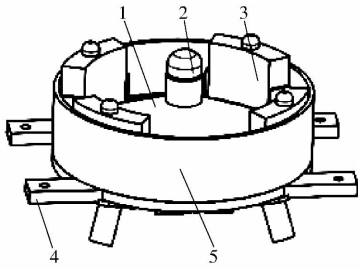


图4 排种器结构示意图

Fig.4 Structural schematic of seed metering device

1. 锥盘 2. 分种螺帽 3. 推种器 4. 固定架 5. 壳体

##### 3.1.1 种子运动特性

供种器的种子流经分种盖沿锥盘面滑落时,锥盘处于匀速回转状态,使得种子的运动状态复杂。以锥面上任意下落的单粒种子为研究对象,建立如图5所示坐标系。

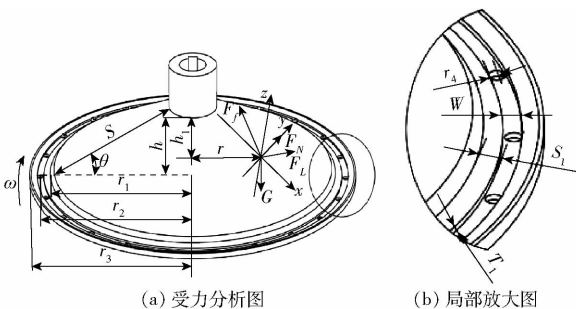


图5 种子运动特性分析

Fig.5 Analysis of seed motion characteristic

种子受力包括滑动摩擦力 $F_f$ 、空气阻力 $F_h$ 、离心力 $F_L$ 、科氏力 $F_k$ 、支承力 $F_N$ 、种子间作用力 $P$ 及重力 $G$ 。因种子间的相互作用力 $P$ 方向和大小随时变化,且供种器持续供种量不大,除去相互抵消的作用力之后, $P$ 可忽略不计<sup>[12]</sup>。种子沿锥盘向下运动过程中横向位移很小,因此空气阻力 $F_h$ 干扰可忽略

不计。科氏力 $F_k$ 与锥盘转速、种子相对锥盘速度 $v_r$ 成正比,即

$$F_k = 2m_1 v_r \omega \sin(90^\circ - \theta)$$

式中  $m_1$ ——种子质量

$\omega$ ——锥形排种盘角速度,rad/s

$\theta$ ——锥体底角, ( $^\circ$ )

由于锥盘转速不高、小籽粒蔬菜种子质量很小,可忽略种子的科氏力 $F_k$ 。因此,要保证种子不脱离锥体表面,均匀顺利滑入锥盘种槽<sup>[13]</sup>,需要满足

$$\begin{cases} G \sin \theta + F_L \cos \theta - F_f \geq 0 \\ F_L \sin \theta - G \cos \theta + F_N = 0 \\ F_f = \mu F_N \\ F_L = m_1 \omega^2 r \\ F_N \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中  $\mu$ ——摩擦因数

$r$ ——种子所在点与锥盘中心的距离,m

由式(5)可得  $G \cos \theta \geq F_L \sin \theta$ ,求得

$$\omega = \sqrt{g \cot \theta / r} \leq \sqrt{g / h} \quad (6)$$

式中  $h$ ——锥盘高度,m

由式(5)、(6)可知,当种子在 $x$ 轴方向的合力大于等于零, $y$ 轴方向的合力等于零时,种子沿锥面顺利下滑,且不离锥面。种子在锥盘表面顺利滑落时的锥盘角速度 $\omega$ 与锥盘高度 $h$ 有关。研究表明,排种过程中的种子弹跳与投种高度及种子落点所在面的倾角存在线性关系,即投种高度越大、倾角越大,跳种现象越明显<sup>[14]</sup>。结合预试验发现当锥体底角 $\theta$ 不大于 $50^\circ$ 时,分种螺帽与供种器的距离不大于20 mm,种子会在锥体表面发生一次弹跳但弹跳高度较小,弹跳后种子沿着锥盘表面均匀滑落到种环槽内。

种子由分种盖沿锥盘面滑落后进入种槽环内,且落入种槽环的状态取决于种子相对于锥盘的相对运动。设种子为圆形,种槽环宽度为 $W$ ,种子沿着锥盘的径向方向进入种沟,运动学分析如图5所示。种子进入种沟时,其极限速度 $v_{\max}$ 为

$$v_{\max} \leq (W - r_1) \sqrt{\frac{g}{2r_4}} \quad (7)$$

式中  $r_1$ ——锥盘半径,mm

$r_4$ ——型孔半径,mm

在滑落过程中,种子受到的外力有重力 $G$ 、滑动摩擦力 $F_f$ 及 $F'_f$ 、支承力 $F_N$ ,忽略种子降落的初始速度。由动能定理可得

$$m_1 g s \cos(90^\circ - \theta) + F_f s \cos 180^\circ + F'_f s_1 \cos 180^\circ = \frac{1}{2} m_1 v_i^2$$

即  $2g s \sin \theta - 2\mu s (g \cos \theta - \omega^2 r \sin \theta) - 2\mu g s_1 = v_i^2 \quad (8)$

式中  $s_1$ ——锥盘底部到种槽环之间的距离,mm  
 $s$ ——锥盘母线长度,mm  
 $v_t$ ——种子滑落到种槽环边缘的速度,m/s  
由式(7)、(8)可得

$$\frac{h}{\mu} \geq s_1 \geq \frac{h}{\mu} - r + \frac{\omega^2 rh}{g} - \frac{(\omega - r_1)^2}{4\mu r_1} \quad (9)$$

由式(9)可知,距离  $s_1$  受锥盘高度  $h$ 、半径  $r_1$ 、回转角速度  $\omega$  的共同影响,是锥盘结构尺寸的关键参数。

3.1.2 锥盘结构

锥盘由中心圆锥面与圆环凹面组成。种子沿锥盘锥面滑落进入种槽环,并在推种器滚轮与刮种板的辅助下自然排序。随着锥盘的转动,落入型孔的种子在推种器滚轮的作用下推出型孔,实现顺利排种。其中,锥盘的转速影响种子运动状态及充种效果。同时,锥盘转速过高时,种子易飞离锥面,不利于种子落入种沟及种子型孔,且缩短了型孔与推种器的作用时间,易造成漏播<sup>[15-17]</sup>。下种盘的落种孔采用槽孔结构,如图6所示,锥盘型孔、下种盘槽孔、壳体槽孔中心在同一轴线  $E$  上,且下种盘槽孔、壳体槽孔尺寸大于锥盘型孔,有利于种子的顺利下落,避免落种时切种、伤种及堵塞。

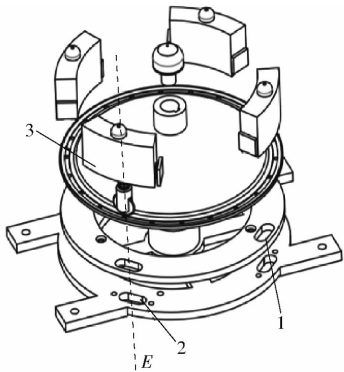


图6 排种器辅助视图  
Fig. 6 Auxiliary view of seed metering device  
1. 下种盘槽孔 2. 壳体槽孔 3. 推种器

为方便种子落入锥盘的型孔,保障种子排列、充种稳定、及时,选择圆形型孔并保证型孔数量,且播种时型孔个数  $Z_2$ 、型孔半径  $r_4$ 、种槽环宽度  $W$ 、深度  $T_1$  应分别满足<sup>[18-19]</sup>

$$Z_2 = 240v_m / (Sn) \quad (10)$$

$$r_4 = \frac{l_{\max} + (1 \sim 1.5)}{2} \quad (11)$$

$$\begin{cases} W = l + (1 \sim 1.5) \\ T_1 = b + \Delta T \end{cases} \quad (12)$$

式中  $S$ ——株距,mm  
 $n$ ——锥盘转速,r/min  
 $l_{\max}$ ——种子最大长度,mm

$b$ ——种子平均宽度,mm  
 $l$ ——种子平均长度,mm  
 $\Delta T$ ——种槽环间隙,mm

参照蔬菜种子的滑动摩擦因数及常用锥面排种器的结构,经预试验确定锥盘高度  $h$  为 55 mm,锥体底角  $\theta$  为  $30^\circ$ ,求得  $r_1$  为 95 mm,型孔的分布半径  $r_2$  为 100 mm,锥盘外轮廓的半径  $r_3$  为 110 mm。针对蔬菜种子尺寸,确定菠菜种子锥盘上的种槽环宽度  $W$  为 2.5 mm,深度  $T_1$  为 2 mm,型孔半径  $r_4$  为 1.25 mm,型孔数量  $Z_2$  为 28 个;白菜种子锥盘上的种槽环宽度  $W$  为 2.5 mm,深度  $T_1$  为 2 mm,型孔半径  $r_4$  为 1.5 mm,型孔数量  $Z_2$  为 20 个;大葱种子锥盘上的种槽环宽度  $W$  为 1.5 mm,深度  $T_1$  为 2 mm,型孔半径  $r_4$  为 0.5 mm,型孔数量  $Z_2$  为 30 个。

3.1.3 推种器结构

推种器固定于排种器的外壳,由压板、刮种板及推种器滚轮组成,结构如图7所示。工作时,刮种板将种沟外的种子刮离。滚轮沿种槽底部被动滚动,并在弹簧力辅助下滚压种子。当锥盘型孔与隔板投种口重合时,型孔内的种子被滚轮推出,避免卡塞或遗漏种子。

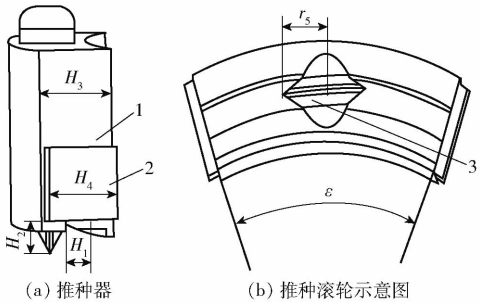


图7 推种器结构示意图  
Fig. 7 Schematic of seed press  
1. 压板 2. 刮种板 3. 推种器滚轮

推种器与锥盘结构相互配合,并固定于排种器的外壳内侧,且滚轮位于种环的正上方,则通道宽度  $H_1$ 、高度  $H_2$ 、推种器的厚度  $H_3$  应满足

$$\begin{cases} H_1 = W \\ l \leq H_2 \leq 2l \end{cases} \quad (13)$$

$$H_3 = r_3 - r_2 + r_4 + \Delta h_3 \quad (14)$$

式中  $\Delta h_3$ ——推种器凹面与推种轮之间距离,mm  
推种的弧度  $\varepsilon$  满足

$$\varepsilon = 2\arccos \frac{r_2}{r_2 + c + r_4} \frac{\pi}{180} \quad (15)$$

式中  $c$ ——推种器滚轮到固定点的安装距离,mm  
刮种板用两个螺钉固定在推种器两侧,宽度  $H_4$  与推种器厚度  $H_3$  保持一致,并采用橡胶材质减少对种子的损伤。考虑蔬菜种子尺寸的范围,取种槽环

宽度  $W$  为 2.5 mm,  $0 < \Delta h_3 < s_1/2$ ,  $c$  为 8 mm, 经预试验确定通道宽度  $H_1$  为 2.5 mm, 高度  $H_2$  为 2 mm, 厚度  $H_3$  为 21.25 mm,  $\varepsilon$  为 0.8 rad。

推种器滚轮直径是影响推种效果的关键参数, 若推种器滚轮直径过大推种效果不明显, 若过小则会损伤种子<sup>[20]</sup>, 推种位置如图 8 所示。推种器滚轮半径  $r_5$  应满足

$$\frac{s_3}{1 - \sin\vartheta} \leq r_5 \leq \sin \frac{\varepsilon}{2} r_2 \quad (16)$$

式中  $\vartheta$ ——型孔倒角, ( $^\circ$ )

$s_3$ ——推种行程, mm

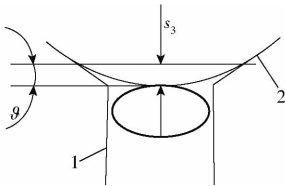


图 8 推种过程示意图

Fig. 8 Schematic of seed pushing process

1. 型孔 2. 推种器滚轮

为适应不同类型的小籽粒蔬菜种子, 保证种子被顺利推出型孔, 取  $\vartheta$  为  $45^\circ$ 、推种行程  $s_3$  为 1 mm, 则  $3 \text{ mm} \leq r_5 \leq 15 \text{ mm}$ 。为提高推种装置的适应性, 取  $r_5$  为 7.5 mm。因推种器滚轮质量较小, 则推种器的推种力由弹簧力决定。弹簧力过大, 会损坏种子; 弹簧力过小, 则推种效果不明显, 不利于种子的下落。为保证低损投种, 经预试验初定弹簧压力为 5 N, 选择推种弹簧刚度为 5 N/mm。

### 3.2 供种器

供种器位于锥盘排种器的上方, 与直流电机、链轮、链条、闭环控制系统组成种量控制系统。为保障锥盘排种器内的种量稳定、满足播种要求, 采用槽轮式排种结构连续取种、排种, 通过闭环控制系统控制供种轮的转速, 调节供种器与锥盘排种器的速度匹配关系。供种器由传动轴、分种箱、传动链轮、供种轮组成, 结构如图 9 所示。

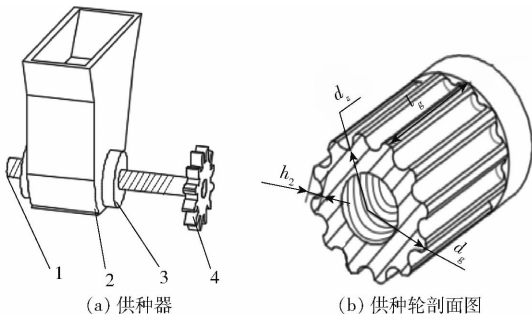


图 9 供种器结构图

Fig. 9 Structure of seed feeder

1. 传动轴 2. 分种箱 3. 供种轮 4. 传动链轮

针对蔬菜种子特性及尺寸, 考虑播种的种量要求, 控制排种器的实时种量, 设计合理外槽轮结构 (槽轮直径、槽深、凹槽半径等), 利用传动轴及槽轮孔的螺纹连接形式, 调节供种器的有效工作长度, 从而实现种量的精确控制, 避免因槽轮尺寸大而发生种量的脉动现象。

播种前, 锥盘槽环内需要充满种子, 初次供种量  $q_1$  应满足<sup>[21]</sup>

$$q_1 = \frac{WT_1 \times 2\pi r_2}{l^3} \quad (17)$$

正常工作后, 供种轮每转 1 圈的供种量  $q_2$  应满足<sup>[22]</sup>

$$q_2 = 2\pi d_g l_c \rho \left( \frac{\alpha_0 f_g}{t_g} + \gamma \right) \quad (18)$$

其中  $l_c \geq 2l$  (19)

式中  $d_g$ ——外槽轮外径, mm

$l_c$ ——供种轮有效工作长度, mm

$\rho$ ——种子密度, g/cm<sup>3</sup>

$\alpha_0$ ——槽内种子充满系数

$f_g$ ——单个种槽横截面积, mm<sup>2</sup>

$t_g$ ——种槽节距, mm

$\gamma$ ——带动层特性系数

为了方便种子顺利进入供种轮凹槽, 凹槽深度  $h_3$  应适应种子尺寸。凹槽深度  $h_3$  应满足

$$h_3 = d_g \left( 1 - \cos \frac{\xi_1}{2} \right) + r_g \left( 1 - \cos \frac{\xi_2}{2} \right) \quad (20)$$

式中  $r_g$ ——外槽轮凹槽圆弧半径, mm

$\xi_1$ ——槽轮两齿数间夹角, ( $^\circ$ )

$\xi_2$ ——凹槽圆弧所对应的夹角, ( $^\circ$ )

单个种槽横截面积  $f_g$  为

$$f_g = \frac{d_g^2}{8} (\xi_1 - \sin \xi_1) + \frac{r_g^2}{2} (\xi_2 - \sin \xi_2) \quad (21)$$

考虑供种轮空间结构及播种效果, 小籽粒种子播种轮不宜过大, 且种槽数多、槽浅时播种量均匀<sup>[23]</sup>。如菠菜种子每次播种 4 行,  $W = 2.5 \text{ mm}$ ,  $T_1 = 2 \text{ mm}$ ,  $r_2 = 100 \text{ mm}$ ,  $l = 1.5 \text{ mm}$ , 初次供种量  $q_1$  为 930 粒。经预试验确定种子充满系数  $\alpha_0$  为 0.3, 槽半径  $r_g$  为 1 mm, 带动层特性系数  $\gamma$  为 0.2, 外槽轮半径  $d_g$  为 28 mm, 供种轮凹槽个数  $Z_1$  为 12, 供种轮有效工作长度  $l_g$  为 9 mm。

### 3.3 开沟覆土器

开沟覆土器与土壤直接接触, 主要完成开沟、导种及覆土任务。锄铲式开沟器和宽幅翼铲式开沟器开沟阻力较大、工作幅宽较大且工作不稳定, 不适用小籽粒蔬菜播种; 圆盘式开沟器易将干湿土混合, 不利于保墒, 且种子在椭圆形种沟内易造成播深不一

致,不适用于精量播种<sup>[24]</sup>。滑刀开沟器入土性能较好,但长滑刀多用于播种大粒种子,短滑刀易压实土壤不利于种子萌发。结合蔬菜播深浅的特性,设计一种滑刀开沟器。该机构主要由开沟铲片、覆土板、开沟器定位杆、排种管及张紧弹簧等组成,结构如图 10 所示。

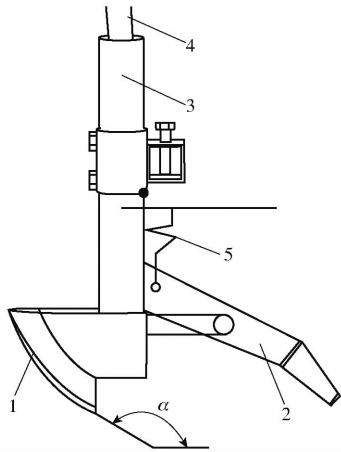


图 10 开沟覆土器结构简图  
Fig. 10 Trench cover structure

1. 开沟铲片 2. 覆土板 3. 开沟器定位杆 4. 排种管 5. 张紧弹簧

滑刀刃口采用钝角破土,侧板将土壤挤向两侧,种子从中部排种管落到沟底。为防止沟壁上层干土先落到沟底和覆盖种子,侧板尾部制成斜口,并逐渐向后收拢,使下层细湿土先落到沟中覆盖种子,以利于种子发芽。同时,减少滑刀刀片的长度,增加自适应刮土机构使其结构更加紧凑。弹簧有一定的预紧力,保障刮土板随地浮动,将种沟两侧的土壤刮送到种沟内,完成种子的覆土。开沟器的开沟阻力与滑刀刃的曲线有关。设刃口曲线为指数函数曲线<sup>[25]</sup>,如图 11 所示。

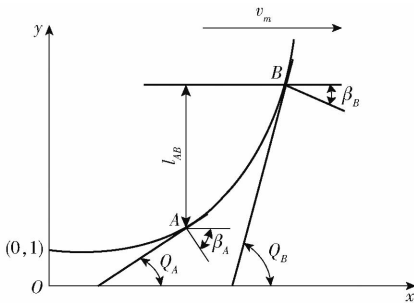


图 11 刃口曲线示意图  
Fig. 11 Design sketch of edge curve

刃口曲线公式为

$$y = e_1^x \quad (e_1 > 1)$$
 (22)

则  $y' = y \ln e_1$ , 设点 A 坐标为  $(x_A, y_A)$ 、点 B 坐标为  $(x_B, y_B)$ 。因为  $Q_A = \frac{\pi}{2} - \beta_A, Q_B = \frac{\pi}{2} - \beta_B$ , 则 A、B 两点的导数分别为

$$y'_A = y_A \ln e_1 = \tan Q_A = \tan \left( \frac{\pi}{2} - \beta_A \right)$$
 (23)

$$y'_B = y_B \ln e_1 = \tan Q_B = \tan \left( \frac{\pi}{2} - \beta_B \right)$$
 (24)

式中  $Q_A$ ——A 点处切线与 x 轴夹角,rad  
 $Q_B$ ——B 点处切线与 x 轴夹角,rad  
 $\beta_A$ ——滑切角,rad  
 $\beta_B$ ——初始滑切角,rad

因为  $y_B = y_A + l_{AB}$ , 求得  $e_1 = e^{(\cot \beta_B - \cot \beta_A)/l_{AB}}$ , 代入式(22)得 AB 曲线方程为

$$y = [e^{(\cot \beta_B - \cot \beta_A)/l_{AB}}]^x$$
 (25)

滑切角要满足滑切条件,摩擦角大于 23°,所以滑切角应不小于 23°。经实践得出,滑切角大于 55°时,工作阻力大,不易入土;而滑切角在 23°时,刀口滑切曲线曲率大,实际应用不可能<sup>[26]</sup>。因此,滑切角  $\beta_A$  为 23°~55°时,曲线 AB 适用于滑刀开沟器的刀口滑切曲线<sup>[27]</sup>。

开沟器接触土壤瞬间,土壤发生变形,受力如图 12 所示。其主要受到摩擦力  $F'$  和滑刀对土壤的法向压力  $N'$ 。为使刀刃切开土壤,减小工作阻力且使产生的土壤颗粒沿刀口向后运动,应使滑刀对土壤的法向压力  $N'$  的分力  $T'$  大于滑切过程中土壤质点受到的摩擦力  $F'$ <sup>[28]</sup>,即

$$T' > F'$$
 (26)

式中,  $T' = N' \tan \eta, F' = N' \tan \beta$ , 由于  $\beta + \eta = 90^\circ$ , 为实现顺畅滑切,故刃口角  $\eta$  应满足  $\eta < 90^\circ - \beta$ , 确定  $\eta$  为 60°。

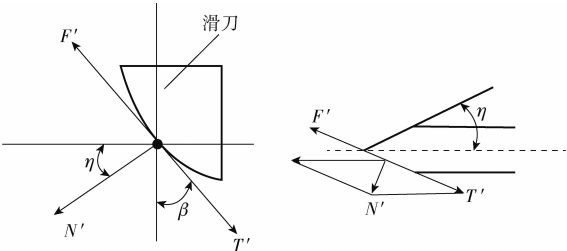


图 12 土壤颗粒受力示意图  
Fig. 12 Stress chart of soil particle

滑刀开沟器刀片厚度一般为 3~8 mm,考虑机具结构的紧凑性及安装要求,确定开沟器宽度 b 应比排种直径略宽,取 b 为 30 mm<sup>[29-30]</sup>。为保证滑刀与土壤之间产生滑切效果,滑刀入土角  $\alpha$  应满足<sup>[31-32]</sup>

$$\alpha > 90^\circ + \beta$$
 (27)

$\alpha$  为 14°~38°,在此选定入土角为 120°。

覆土板结构简单,主要借助自身重力及弹簧拉力实现随地起伏及土壤的刮送,其受力如图 13 所示,且满足

$$F_T L_1 = F_D L_2$$
 (28)

式中  $F_T$ ——弹簧对覆土板的力,N  
 $F_D$ ——地面对覆土板的力,N  
 $L_1$ ——弹簧力作用点到覆土板固定点距离,m  
 $L_2$ ——力  $F_D$ 作用点到覆土板固定点的距离,m

在此取  $L_1 = L_2$ ,代入式(30)求得  $F_T = F_D$ 。

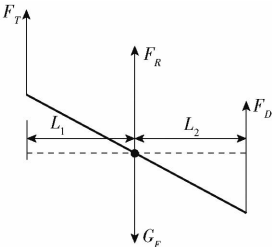


图 13 覆土板受力示意图  
Fig. 13 Stress diagram of overburden

在安装覆土板时应张紧弹簧施加预紧力,此时覆土板对地面有恒定的压力且保证覆土板下陷量不大,避免破坏种沟,覆土板下陷量  $Z_x$  与作用力  $F_D$  应满足<sup>[33]</sup>

$$Z_x = 6F_D / (5K_0B) \tag{29}$$

其中  $K_0 = k_0(1 + 0.27B)$   
式中  $B$ ——覆土板间距,mm  
 $K_0$ ——土壤物理特性相关参数  
 $k_0$ ——与土壤性质有关的参数

对刚松过土的粘土土壤来说,  $K_0 = 1.01$ 。根据种植要求及种沟深度取  $Z_x = 3\text{ mm}$ ,覆土板间距  $B$  根据适应行距要求取  $B = 100\text{ mm}$ ,代入式(29)经计算得到作用在覆土板上的力  $F_D = 252.5\text{ N}$ 。根据胡克定律  $F_T$  应满足

$$F_T = k_1 \Delta L \tag{30}$$

式中  $k_1$ ——张紧弹簧刚度  
 $\Delta L$ ——弹簧变形量,mm

取覆土板上下摆动的行程为  $10\text{ mm}$ ,求得  $k_1$  为  $25.2\text{ N/mm}$ 。

4 田间试验

4.1 试验条件与方法

试验用地为轻黏土,经旋耕碎土,地表平整,无大石块、秸秆、杂草等,土壤含水率为  $15.6\%$ ,土壤坚实度为  $720\text{ kPa}$ ,符合蔬菜种植要求。试验地块长  $50\text{ m}$ ,宽  $20\text{ m}$ 。

2018 年 5 月 20 日,在潍坊市对电控锥盘式蔬菜播种机进行试验,如图 14 所示。准备大葱种子、白菜种子、菠菜种子各  $1\ 000$  粒,平均分 3 次播种,每次试验播种距离为  $30\text{ m}$ 。由同一操作人员手扶

操作,试验地块前后各留  $10\text{ m}$  的启停距离。



图 14 电控锥盘式蔬菜播种机  
Fig. 14 Electric control cone type vegetable planter

4.2 评价标准

依据 JB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机 试验方法》和 JB/T 10293—2013《单粒(精密)播种机 技术条件》的要求,对样机播种效果进行统计测量,得到合格指数、漏播指数、重播指数等评价指标。

4.3 试验结果及分析

在播种试验过程中,电控锥盘式蔬菜播种机工作性能稳定。种子的播种合格指数大于  $90\%$ ,重播指数小于  $5\%$ ,漏播指数小于  $5\%$ ,满足播种要求,具体参数如表 2 所示。由于人工操作不稳,使得机具前进速度不稳定。种子的漏播、重播误差主要来自种子落入种沟后会发生弹跳,后期需进一步完善。

表 2 试验结果  
Tab. 2 Operating results %

| 试验指标 | 品种    |       |       | 标准值 |
|------|-------|-------|-------|-----|
|      | 大葱    | 白菜    | 菠菜    |     |
| 合格指数 | 94.33 | 93.37 | 95.57 | ≥80 |
| 重播指数 | 2.57  | 2.95  | 2.16  | ≤15 |
| 漏播指数 | 3.10  | 3.68  | 2.27  | ≤8  |

5 结论

(1)通过闭环控制系统实时控制播种速度,保证了播种精度及质量;通过连续供种、锥盘排种器分种、滚轮推种的播种方式,保证了排种量及播种精度;通过滑刀曲线构建及覆土机构受力分析,确定了开沟覆土器结构及参数。

(2)通过锥盘排种器排种过程中种子的受力与运动分析,明确了种子顺利充种的条件,确定了推种器的关键结构及运动参数。借助种子特性及种量分析,确定了供种器初次供种量、正常供种量及供种轮结构参数。结合开沟及覆土要求,确定指数函数曲线刃口及覆土机构。主要参数为:锥盘高度  $h$  为  $55\text{ mm}$ ,底角  $\theta$  为  $30^\circ$ ,锥盘半径  $r_1$  为  $95\text{ mm}$ ,型孔的分布半径  $r_2$  为  $100\text{ mm}$ ,锥盘外轮廓的半径  $r_3$  为  $110\text{ mm}$ ;推种器通道宽度  $H_1$  为  $2.5\text{ mm}$ ,高度  $H_2$  为  $2\text{ mm}$ ,厚度  $H_3$  为  $21.25\text{ mm}$ ,弧度  $\varepsilon$  为  $0.8\text{ rad}$ ,推种器滚轮半径  $r_5$  为  $7.5\text{ mm}$ ,推种弹簧刚度为  $5\text{ N/mm}$ ;开沟覆

土器入土角为  $120^\circ$ , 张紧弹簧刚度  $k_1$  为  $25.2 \text{ N/mm}$ 。

(3) 采用菠菜种子、大葱种子、白菜种子进行了不同类型种子的播种试验, 结果表明, 该机播种作业

质量高、整机性能稳定, 播种合格指数大于  $90\%$ , 重播指数小于  $5\%$ , 漏播指数小于  $5\%$ , 符合国家精密播种标准要求。

## 参 考 文 献

- [1] 祁亚卓, 相姝楠. 国内外蔬菜播种机的研究现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(1): 205–208.  
QI Yazhuo, XIANG Shunan. Research status and development trend of vegetable planter at home and abroad [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(1): 205–208. (in Chinese)
- [2] 贾洪雷, 陈玉龙, 赵佳乐, 等. 气吸机械复合式大豆精密排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 75–86, 139.  
JIA Honglei, CHEN Yulong, ZHAO Jiale, et al. Design and experiment of pneumatic-mechanical combined precision metering device for soybean[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 75–86, 139. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180409&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180409&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.009. (in Chinese)
- [3] 邱兆美, 张巍朋, 赵博, 等. 小粒种子电动播种机作业质量监测系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 77–83.  
QIU Zhaomei, ZHANG Weipeng, ZHAO Bo, et al. Design and test of operation quality monitoring system for small grain electric seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 77–83. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190409&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190409&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.009. (in Chinese)
- [4] COSKUN M B, IBRAHIM Y, CENGİZ O. Physical properties of sweet corn seed (*Zea mays saccharata* Sturt.) [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 74(4): 523–528.
- [5] 杜佳伟, 杨学军, 刘立晶, 等. 小粒种子精密播种机研究现状及发展趋势[J]. 农业工程, 2017, 7(6): 9–13.  
DU Jiawei, YANG Xuejun, LIU Lijing, et al. Research status and development trend of precision seeder for small seeds [J]. Agricultural Engineering, 2017, 7(6): 9–13. (in Chinese)
- [6] 杜铮, 舒虹杰, 卢泽民, 等. 小粒径蔬菜电动播种机的研制[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(11): 5–10.  
DU Zheng, SHU Hongjie, LU Zemin, et al. Development of small grain vegetable electric seeder [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(11): 5–10. (in Chinese)
- [7] 鲍余峰, 王方艳, 江景涛, 等. 蔬菜种子精密播种装备研究进展与发展趋势[J]. 农机化研究, 2021, 43(4): 247–254.  
BAO Yufeng, WANG Fangyan, JIANG Jingtao, et al. Research progress and development trend of precision seeding equipment for vegetable seeds [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(4): 247–254. (in Chinese)
- [8] 曹文, 丁俊华, 李再臣. 机械式精密排种器的研究与设计[J]. 农机化研究, 2009, 31(7): 142–145.  
CAO Wen, DING Junhua, LI Zaichen. Research and design of mechanical precision metering [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(7): 142–145. (in Chinese)
- [9] 王金武, 唐汉, 周文琪, 等. 指夹式精量玉米排种器改进设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 68–76.  
WANG Jinwu, TANG Han, ZHOU Wenqi, et al. Improved design and experiment on pickup finger precision seed metering device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 68–76. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20150910&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150910&flag=1&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.010. (in Chinese)
- [10] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [11] 陈蒋. 电驱动小麦播种机的设计与试验[D]. 郑州: 河南农业大学, 2018.  
CHEN Jiang. Design and test of electric drive wheat drill [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [12] 杨诚, 尚书旗, 杨然兵, 等. 锥体离心式排种装置理论研究[J]. 农机化研究, 2015, 37(6): 63–66.  
YANG Cheng, SHANG Shuqi, YANG Ranbing, et al. Theoretical study on the cone-centrifugal seed metering device [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(6): 63–66. (in Chinese)
- [13] 许鹏晓, 杨然兵, 尚书旗, 等. 锥体帆布带式小区播种机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2018, 40(3): 45–49.  
XU Pengxiao, YANG Ranbing, SHANG Shuqi, et al. Experimental study on damaged potato of secondary conveying and separating device [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(3): 45–49. (in Chinese)
- [14] 任文涛, 董滨, 崔红光, 等. 水稻种子与斜面碰撞后运动规律的试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 103–107.  
REN Wentao, DONG Bin, CUI Hongguang, et al. Experiment on the motion law of rice seeds after colliding with the slope [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 103–107. (in Chinese)
- [15] 张明慧. 小粒蔬菜种子播种机的研制[D]. 长春: 吉林大学, 2014.  
ZHANG Minghui. Development of the small grain of vegetable seed planter [D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)
- [16] 郑月男. 新型小区播种机排种系统的设计与试验研究[D]. 青岛: 青岛农业大学, 2011.  
ZHENG Yuenan. Design and experimental study of a new-type community planter seeding system [D]. Qingdao: Qingdao

- Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- [17] 郭玉明, 张东光, 郑德聪. 2BX 系列谷子精少量播种机的开发与研制[J]. 农业技术与装备, 2012(12): 18-21.  
GUO Yuming, ZHANG Dongguang, ZHENG Decong. Development and research of 2BX series seed-metering device for millet [J]. Journal of Agricultural Technology Equipment, 2012(12): 18-21. (in Chinese)
- [18] 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)
- [19] 侯华铭. 倾斜圆盘式小籽粒精少量排种装置的设计与试验[D]. 太原: 山西农业大学, 2016.  
HOU Huaming. The design and tests of tilt disc-type fine and small-amount seed-metering device for small grain seeds [D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [20] 张波屏 编译. 播种机械设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [21] 周海波, 梁秋艳, 魏天路, 等. 双级振动精密排种器外槽轮式定量供种装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 57-61, 83.  
ZHOU Haibo, LIANG Qiuyan, WEI Tianlu, et al. Design and experiment of quantitative seed supply device with fluted roller used for double-vibrating precision seed meter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 57-61, 83. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=2016s009&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2016s009&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.009. (in Chinese)
- [22] 梁方, 杨淦光, 许丰, 等. 外槽轮式播种机播量控制系统设计与试验[J]. 农机化研究, 2019, 41(10): 153-157.  
LIANG Fang, YANG Ganguang, XU Feng, et al. Design and test of the seeding rate control system of the external grooved wheel seeder [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(10): 153-157. (in Chinese)
- [23] 刘忠军, 张晋国. 斜槽轮式排种器工作长度的对比试验[J]. 农机化研究, 2009, 31(4): 137-138, 142.  
LIU Zhongjun, ZHANG Jinguo. Skewed slot wheeled seeding mechanism working length comparative trial research [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(4): 137-138, 142. (in Chinese)
- [24] 沈函孝. 外槽轮电动排种器设计与试验研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2016.
- [25] 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?flag=1&file\\_no=20130208&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130208&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.008. (in Chinese)
- [26] 张全贵. 滑刀式开沟器的研究[J]. 当代农机, 2014(5): 68-69.
- [27] 庞声海. 关于滑切理论与滑切角的选用[J]. 华中农学院学报, 1982, 6(1): 64-69.  
PANG Shenghai. On the theory of sliding cutting and the choice of its angle [J]. Journal of Huazhong Agricultural College, 1982, 6(1): 64-69. (in Chinese)
- [28] 吕金庆, 衣淑娟, 陶桂香, 等. 马铃薯播种机分体式滑刀开沟器参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 44-54.  
LÜ Jinqing, YI Shujuan, TAO Guixiang, et al. Parameter optimization and experiment of splitter sliding-knife opener for potato planter [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(4): 44-54. (in Chinese)
- [29] 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)
- [30] 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)
- [31] 权龙哲, 佟金, 曾百功, 等. 玉米根茬铲切刀具的滑切刃曲线优化设计[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 13-17.  
QUAN Longzhe, TONG Jin, ZENG Baigong, et al. Optimization design of sliding cutting edge curve of corn rootstalk cutting tool [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12): 13-17. (in Chinese)
- [32] 王家胜, 尚书旗. 自走式双行胡萝卜联合收获机的研制及试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 38-43.  
WANG Jiasheng, SHANG Shuqi. Development and experiment of self-propelled double-row carrot combine harvester [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(12): 38-43. (in Chinese)
- [33] 贾洪雷, 王文君, 庄健, 等. 仿形弹性镇压辊设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 28-34.  
JIA Honglei, WANG Wenjun, ZHUANG Jian, et al. Design and experiment of profiling elastic press roller [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 28-34. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150605&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150605&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.005. (in Chinese)