

油菜铺膜打孔同步播种机关键部件设计与试验

廖庆喜^{1,2} 孙晓天^{1,2} 王磊^{1,2} 邓承诺^{1,2} 刘凯文^{1,2} 廖宜涛^{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: 春油菜播期因干旱少雨和气温偏低多采用铺膜播种方式,但传统铺膜播种存在工序复杂、机组作业时种子与膜孔位置不一致,导致出苗率低的问题,本文提出了滑切破膜+同步播种的工艺方案,设计了可实现旋耕、施肥、铺膜、覆土、打孔、播种一体化作业的油菜铺膜打孔同步播种机。分析了地膜转动条件与膜侧覆土影响因素,确定了铺膜覆土装置结构工作参数;基于凸轮摆动滚子机构运动原理设计了打孔机构,依据油菜种植农艺孔距、膜孔长度等要求,确定了打孔机构结构参数,建立了膜上打孔动力学模型,开展了机组运行参数匹配设计,得出了机具前进速度与凸轮转速间速比系数 λ 为2.0~2.5;开展了膜孔与种子同步性分析,确定了同步播种机构结构参数,分析了影响种子与膜孔同步率的主要因素为种盒水平约束种道长度 p ,取值为18~34 mm。运用DEM-MBD耦合仿真,以速比系数 λ 、种盒水平约束种道长度 p 为试验因素开展二次正交旋转试验,仿真结果表明,当速比系数 λ 为2.29、种盒水平约束种道长度 p 为27 mm时,种子与膜孔同步率为94.04%。以较优参数组合的田间试验结果表明,膜边覆土均匀稳定,平均膜边覆土宽度为80.44 mm,平均膜孔长度为49.44 mm,膜孔长度稳定性变异系数为5.30%,孔距为144.76 mm,同步率为85.60%,油菜种子与膜孔同步性较好。研究结果为春油菜产区铺膜打孔播种机开发提供了一个新途径。

关键词: 油菜铺膜播种机; 打孔同步播种; 凸轮机构; DEM-MBD

中图分类号: S223.2⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2026)06-0091-13

OSID:



Design and Experiment of Key Components of Rape Film Laying and Perforation Synchronous Seeder

LIAO Qingxi^{1,2} SUN Xiaotian^{1,2} WANG Lei^{1,2} DENG Chengnuo^{1,2} LIU Kaiwen^{1,2} LIAO Yitao^{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 practical problems of low seedling emergence rate due to drought and low temperature during the sowing period of spring rapeseed seeding method, the traditional film-laying sowing process is complex and the position of seeds and film holes is inconsistent during unit operation, the process scheme of sliding film cutting + synchronous seeding was proposed, a rapeseed laying and perforating synchronous seeder that can realize the integrated operations of rotary tillage, fertilization, film laying, soil covering, perforation and sowing was developed. The influencing factors of the plastic film rotation conditions and the membrane side covering were analyzed, the structure and working parameters of the film covering device was determined. Based on the motion principle of cam swing roller mechanism, the punching mechanism was designed, the structural parameters of the punching mechanism was determined according to the agronomic pore spacing and membrane pore length of rapeseed planting, the dynamic model of punching on the membrane was established, the matching design of the operating parameters of the unit was carried out, and the speed ratio coefficient between the forward speed of the machine and the cam speed λ was obtained as 2.0 ~ 2.5; the synchronization analysis of membrane pores and seeds was carried out, the structural parameters of the synchronous seeding mechanism were determined, the main factor affecting the synchronization rate of seeds and membrane pores was analyzed, the length of seed channel p was horizontally constrained by the seed box, and its value range was 18 ~

收稿日期: 2024-12-27 修回日期: 2025-02-08

基金项目: 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系项目(CASR-12-27)

作者简介: 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

34 mm。Using the DEM - MBD coupling simulation, the quadrature orthogonal rotation test was carried out with the speed ratio coefficient λ and the horizontal constraint of the seed box and the length p of the seed track as the test factors, the simulation results showed that the synchronization rate between seed and membrane hole was 94.04% when the speed ratio coefficient λ and the seed box horizontal constraint seed track length p were 2.29 and 27 mm. The results of field experiments with a combination of optimal parameters were as follows: the average width of the film edge covering was 80.44 mm, the average length of the film hole was 49.44 mm, and the coefficient of variation of the stability of the film hole length was 5.30%. The hole spacing was 144.76 mm, the synchronization rate was 85.60%, and the synchronization between rapeseed and membrane pores was good, which provided a way for the development of film laying and perforation seeder in spring rapeseed production area.

Key words: rapeseed film-covered seeder; hole-punching sowing in sync; cam mechanism; DEM - MBD

0 引言

根据各地播期我国油菜种植分为冬油菜和春油菜,由于春油菜产区在油菜种植期间气候干旱少雨、气温偏低,需要结合铺膜技术保证油菜生长所需的温度与水分条件^[1-3]。油菜铺膜打孔同步播种机能够一次完成旋耕、铺膜覆土、打孔播种等多重工序,省时省力,对我国春油菜种植具有降本增效作用。

铺膜覆土装置是完成膜上打孔与同步投种的重要前提,为实现不同类型种植方式的覆膜机械化作业,国内外学者针对铺膜覆土装置进行了大量研究^[4-6]。膜上打孔与投种同步性是油菜铺膜打孔同步播种的关键,国内外相关学者为提高机具膜上打孔播种装置性能,对不同机构进行了深入研究。滚轮式打孔播种装置常通过滚轮被动旋转,成穴器与地膜作用形成膜孔,同时通过附属部件将种子投入膜孔中。李辉^[7]设计的滚轮式膜上打孔播种装置通过微型铲开出种穴,伸缩管将分种盒内存储的稻种投入孔穴的方式,降低了孔穴错位率;侯守印等^[8]基于滑切破膜原理设计的滚轮式播种单体,利用凸轮摆杆机构保证成穴器在破膜的同时将玉米种子投入种穴,实现膜孔与种子同步。直插式膜上打孔播种装置常通过成穴器垂直插入地膜的方式完成打孔,同时打开成穴器将种子投入膜孔实现膜孔与种子的同步。赵建托等^[9]采用凸轮和曲柄组合机构控制成穴器上下运动形成种穴,并在成穴器出土时打开鸭嘴进行投种;赵武云等^[10-12]通过运用转动导杆机构与正弦机构进行串联而成的近等速补偿机构,结合鸭嘴式强排播种机构,设计了玉米全膜双垄沟直插式穴播器,避免撕膜、挑膜、穴孔错位问题。国外农机公司结合电控技术实现了打孔播种同步,如英国 SPAPPERI 公司研制的 SMP 系列铺膜打孔播种机采用滚筒式锥钉打孔,在打孔的同时通过气吹将玉米种子从锥钉内部射出以保证种子落入膜孔

内保证种子与膜孔同步^[13]。意大利 FORIGO 公司研制的 Modula JET 系列播种机通过传感器监测落种时机,实时调节打孔频率与投种频率保持同步,有效解决膜孔与种子错位问题^[14]。综上,国内外学者针对膜孔与落种位置保持一致的问题通过多种结构展开了研究,但主要集中在棉花、玉米、大豆等中大粒径作物,而油菜种子粒径小、质量轻,在采用滚轮式、直插式膜上打孔播种装置作业时,会因为成穴器粘土导致无法顺利排种而影响机具作业性能,采用电控系统会极大提升机具生产成本,因此研发一种适用于油菜种子的铺膜打孔同步播种机可有效提升春油菜生产效率。

针对油菜铺膜种植时油菜种子与膜孔难以同步的问题,本文提出一种滑切破膜 + 同步投种的工艺方案,设计油菜铺膜打孔播种机关键部件,运用 DEM - MBD 耦合仿真试验得到打孔同步投种装置较优参数组合,以期提高膜孔与种子位置同步性,提升春油菜生产效率,为油菜铺膜打孔同步投种播种机开发提供参考。

1 总体结构与工作过程

1.1 总体结构

油菜铺膜打孔同步投种播种机结构如图 1 所示,主要由覆土装置、刮土犁、开沟犁、负压管、正压管、肥箱、排肥装置、排种装置、铺膜装置、导种管、打孔同步投种装置组成,可一次完成旋耕、施肥、铺膜、覆土、膜上打孔、同步投种等功能,其中铺膜覆土装置、等距安装的 6 组打孔同步投种装置可实现厢面铺设地膜、膜上打孔及同步投种。该机主要技术参数如表 1 所示。

1.2 工作过程

油菜铺膜打孔同步投种播种机由拖拉机提供动力,动力输出轴带动旋耕装置工作以平整地表,地轮通过链传动驱动排肥装置以及正负气压排种器进行排肥、排种。随着机组作业,地膜在挂膜架上被动扯

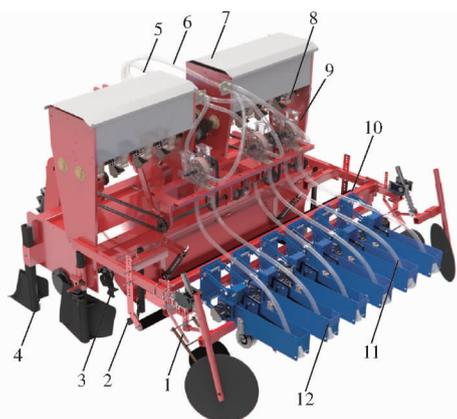


图 1 油菜铺膜打孔同步播种机结构示意图
Fig. 1 Schematic of structure of synchronous seeder for film laying and perforation

- 1. 覆土装置 2. 刮土犁 3. 旋耕装置 4. 开沟犁 5. 负压管
- 6. 正压管 7. 肥箱 8. 排肥装置 9. 排种装置 10. 铺膜装置
- 11. 导种管 12. 打孔同步投种装置

表 1 主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 100×2 560×1 500
配套功率/kW	≥60
作业速度/(km·h ⁻¹)	3~5
凸轮转速/(r·min ⁻¹)	360~600
作业幅宽/mm	2 100
播种行距/mm	250
播种深度/mm	20~30
膜孔长度/mm	30~50
膜孔宽度/mm	30~50
孔距/mm	120~150
地膜宽度/mm	2 000

出并在展膜辊作用下覆于厢面,两侧被压膜轮滚压至地表,覆土圆盘被动旋转作业,将畦沟中土壤积聚并翻转至膜边覆土,打孔同步投种装置打孔锥钉向下摆动入土,滑切破膜,同时,种子从种盒落入膜孔中,整机工作过程如图 2 所示。

2 关键装置结构设计

2.1 铺膜覆土装置

地膜铺设是完成膜上打孔与同步投种的重要基础,其主要工序包括平铺地膜与膜侧覆土。铺膜装置主要包括展膜辊与挂膜架,覆土装置主要包括压膜轮与覆土圆盘,为保证地膜转动性能与铺设效果,需确定满足铺膜要求的铺膜覆土装置结构参数。

2.1.1 铺膜装置

结合实际油菜直播机平台形成厢面宽度为 1 800~1 900 mm,将地膜卷宽度定为 2 000 mm。为

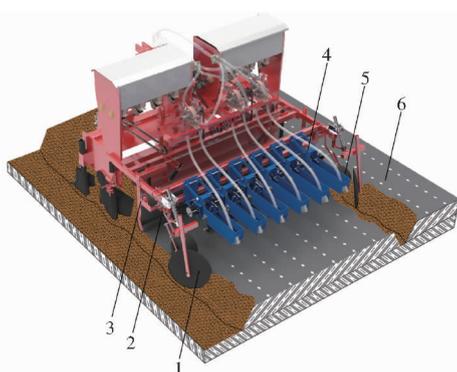


图 2 工作过程示意图

Fig. 2 Schematic of working process

- 1. 覆土圆盘 2. 展膜辊 3. 挂膜架 4. 打孔同步投种装置
- 5. 压膜轮 6. 打孔后地膜

便于更换地膜,将地膜卷空套于两侧挂膜架支撑管,拆卸时只需卸掉一端支撑管即可完成快速更换。支撑管固定于机架,为确保机组作业过程,地膜卷能够顺利转动出膜,对地膜卷进行受力分析如图 3 所示,其中,点 O_1 为支撑管转动中心,点 O_2 为展膜辊转动中心,点 O_3 为展膜辊仿形连杆转动中心,点 O_4 为地膜卷质心。

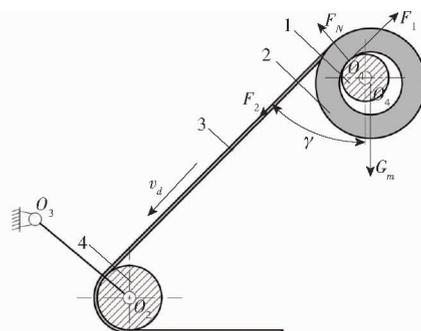


图 3 地膜卷受力分析示意图

Fig. 3 Schematic of force analysis of plastic film roll

- 1. 挂膜架支撑管 2. 地膜卷 3. 地膜 4. 展膜辊

为确保初始时地膜能够顺利转动,应满足

$$F_2 r_o - F_1 r_i > 0 \quad (1)$$

其中

$$F_1 = G_m \sin \gamma \mu_m$$

式中

- G_m ——地膜卷重力, N
- F_1 ——地膜卷所受支撑管摩擦力, N
- F_2 ——地膜卷所受拉力, N
- r_o ——地膜卷外径, mm
- r_i ——地膜卷内径, mm
- μ_m ——地膜卷内侧与支撑管摩擦因数,取 0.4

地膜卷能够顺利转动主要与地膜卷和展膜辊之间安装角度 γ 有关,安装角度 γ 越大,地膜卷所需拉力越大,地膜越容易被撕扯,但地膜与展膜辊接触包角越大,地膜铺设效果越好,结合地膜实际卷内径为 30 mm,支撑管外径定为 25 mm,并且综合考虑整机纵向布置, γ 取 $40^\circ \sim 50^\circ$ 。

2.1.2 压膜覆土装置

在覆土前,压膜轮需将地膜与沟壁紧密贴合,防止因地膜两侧飘起导致土壤翻转至地膜内侧,结合厢面宽度,将压膜轮宽度设计为 100 mm,压膜轮直径设计为 150 mm。

覆土质量与圆盘偏角 σ 、圆盘倾角 ξ 、圆盘直径 D 均有关,圆盘偏角越大,翻土、碎土能力越强,但牵引阻力越大,取值为 $40^\circ \sim 45^\circ$,圆盘倾角越大,越有利于土垡窜动,取值为 $15^\circ \sim 25^\circ$,由于前部有犁将旋耕后松软土壤刮至畦沟做覆土土量储备,因此综合考虑将圆盘偏角为 40° ,圆盘倾角为 15° ^[15],如图 4 所示。

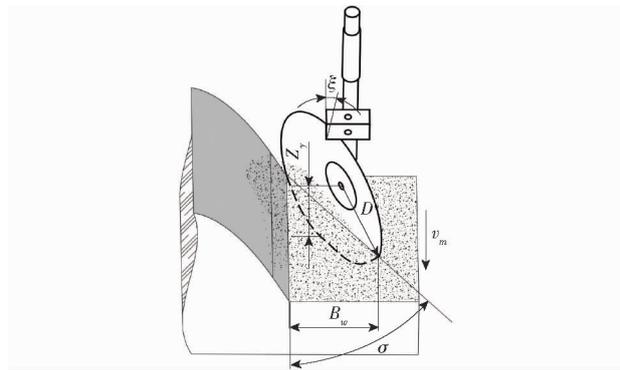


图 4 覆土圆盘工作示意图

Fig. 4 Schematic of working of covering disc

结合膜侧覆土宽度要求以及前期试验,覆土圆盘作业幅宽 B_w 为 150 ~ 180 mm,圆盘直径 D 应满足

$$\begin{cases} B_w = 2 \sqrt{\left(\frac{D \cos \xi}{2}\right)^2 - \left(\frac{D \cos \xi}{2} - Z_y\right)^2} \sin \sigma & (2) \\ D = K_F Z_y \end{cases}$$

式中 Z_y ——入土深度,mm

K_F ——径深比系数

普通覆土圆盘径深比系数通常为 4 ~ 6^[16],为保证机具适应多种工况, K_F 取 6。根据式(2)计算得圆盘直径 D 为 319 ~ 382 mm,根据覆土圆盘安装参数,取 D 为 350 mm。

2.2 打孔同步投种装置

打孔同步投种装置包括打孔机构、同步投种机构以及仿形机构 3 部分。其中,打孔机构由凸轮、滚子随动器、打孔摆杆组成,通过驱动凸轮周期性转动带动打孔锥钉摆动,在地膜上形成一系列膜孔;同步投种机构由同步连杆与种盒组成,同步连杆驱动种盒进行周期性摆动完成存种和投种;仿形机构主要包括仿形连杆,通过四杆仿形机构保证打孔深度与膜孔参数稳定性,如图 5 所示。

2.2.1 打孔机构

凸轮轮廓曲线决定了打孔锥钉尖点运动轨迹,影响膜孔质量。为避免打孔机构运动过程凸轮对滚

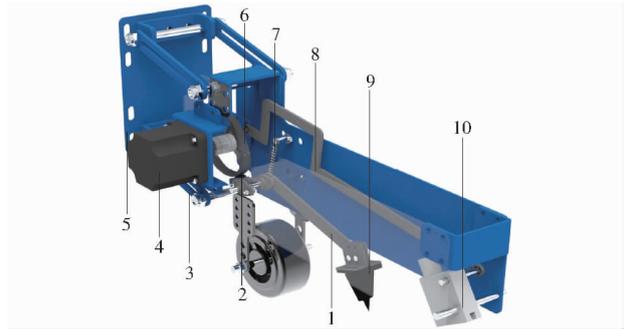


图 5 打孔同步投种装置结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of synchronized device with perforating and seeding

1. 打孔摆杆 2. 滚子随动器 3. 仿形连杆 4. 步进电机 5. 机架 6. 凸轮 7. 拉伸弹簧 8. 同步连杆 9. 打孔锥钉 10. 种盒

子随动器产生刚性冲击与柔性冲击,从动件运动规律采用正弦加速度运动规律^[17],运动关系为

$$\psi = \begin{cases} \psi_m \left(\frac{\varphi}{\phi} - \frac{1}{2\pi} \sin \frac{2\pi\varphi}{\phi} \right) & (0 \leq \varphi \leq \pi) \\ \psi_m \left(1 - \frac{\varphi}{\phi'} + \frac{1}{2\pi} \sin \frac{2\pi\varphi}{\phi'} \right) & (\pi < \varphi < 2\pi) \end{cases} \quad (3)$$

式中 φ ——凸轮转角,rad

ϕ ——凸轮推程转角,rad

ϕ' ——凸轮回程转角,rad

ψ ——打孔摆杆摆角,rad

ψ_m ——打孔摆杆最大摆角,rad

由于打孔摆杆转动中心一侧连接滚子随动器,另一侧连接打孔锥钉,为避免打孔摆杆在非打孔阶段摆动时,打孔摆杆右侧对地膜产生破坏,并综合考虑机构整体尺寸,将 ψ_m 定为 45° 。由于打孔过程是打孔锥钉进行周期性连续摆动,打孔锥钉无需在特殊位置停留,因此将凸轮远近休止角均定为 0° ,同时为提高机构运动平稳性,将凸轮推程转角 ϕ 与凸轮回程转角 ϕ' 均定为 180° 。

打孔机构在拉伸弹簧作用下使打孔锥钉被动入土,凸轮驱动打孔锥钉主动出土的方式完成膜上打孔作业,在外力锁合以及轻负载工况下,推程许用压力角越小,凸轮结构越大,考虑到装置整体结构,将打孔机构推程许用压力角定为 30° ^[18]。其中,凸轮滚子机构参数如图 6 所示。为满足压力角要求下最小基本尺寸比例要求,求出凸轮转动中心许用区域^[19]如图 7 所示。

通过对凸轮轴心许用区域边界图中边界曲线相交所形成的特征点的分析,许用区域内最小极径即凸轮基圆半径 R_b 与打孔摆杆转动中心右侧杆长 L_{AB} 二者之比最小值为 0.26。凸轮转动中心和打孔摆杆转动中心间中心距 L_{OA} 与 L_{AB} 比值为

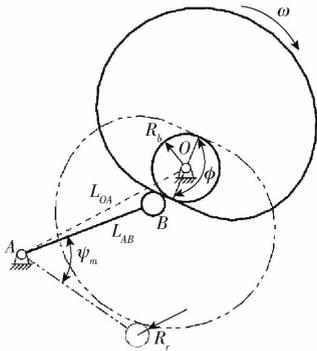


图 6 凸轮滚子机构参数示意图

Fig. 6 Schematic of parameters of cam roller mechanism

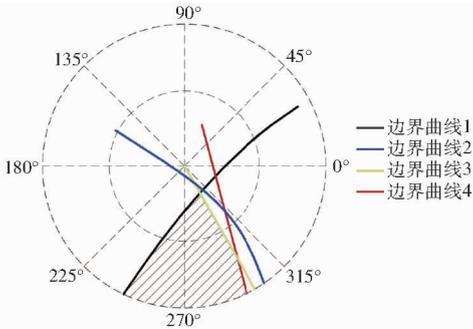


图 7 凸轮轴心许用区域边界图

Fig. 7 Diagram of allowable area of camshaft

$$\frac{L_{OA}}{L_{AB}} = \sqrt{\left(1 - \left(\frac{R_b}{L_{AB}}\right)_{\min} \cos\theta_o\right)^2 + \left(\left(\frac{R_b}{L_{AB}}\right)_{\min} \sin\theta_o\right)^2} \quad (4)$$

式中 θ_o ——最小极径所对应特征点在许用区域图中的极角, ($^\circ$)

结合 θ_o 为 300° , 通过式 (4) 得出 L_{OA} 与 L_{AB} 比值为 0.9。为满足凸轮运动不失真及凸轮实际轮廓曲线不出现尖点, 凸轮理论廓线上任意一点曲率半径应大于零, 其中, 曲率半径计算式为

$$\left\{ \begin{aligned} \rho &= \frac{1}{\frac{\cos a}{L_{OA} \sin a} \left\{ 1 + \frac{\cos a}{L_{OA} \sin a} \left[\left(1 - \frac{d\psi}{d\varphi} \right) \frac{d\psi}{d\varphi} \sin a - \frac{d^2\psi}{d\varphi^2} \cos a \right] \right\}} \\ \tan a &= \cot(\psi + \psi_b) - \frac{L_{AB} \left(1 - \frac{d\psi}{d\varphi} \right)}{L_{OA} \sin(\psi + \psi_b)} \\ \psi_b &= \arccos \frac{L_{OA}^2 + L_{AB}^2 - R_b^2}{2L_{OA}L_{AB}} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

式中 ρ ——凸轮理论廓线曲率半径, mm

a ——凸轮理论廓线任意一点压力角, ($^\circ$)

通过式 (5) 计算得基圆半径不小于 18 mm, 考虑到凸轮在转动过程不能与打孔摆杆转轴干涉, 将最小基本尺寸比例代入凸轮轮廓设计工具, 得出在同时满足压力角、实际轮廓曲线不失真条件下, 打孔摆杆摆角 ψ_m 不满足 45° 。通过逐步迭代基圆尺寸 R_b

与 L_{AB} 比例, 最终确定凸轮基本尺寸参数 R_b 为 28 mm, L_{AB} 为 90 mm, L_{OA} 为 105 mm, 滚子半径 R_r 为 19 mm, 并通过凸轮设计工具得出凸轮实际轮廓曲线。为降低打孔机构运动过程产生的动载荷, 对凸轮内部进行结构优化, 其结构示意图如图 8 所示, M' 为优化前凸轮质心, 与凸轮转动中心距 C' 为 31 mm, M 为优化后凸轮质心, 与凸轮转动中心距 C 降低为 16 mm, e 为 6 mm。

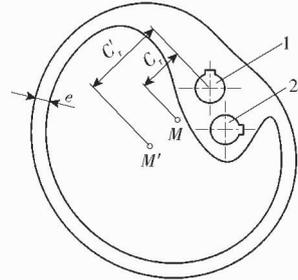


图 8 凸轮结构示意图

Fig. 8 Schematic of cam structure

1. 凸轮轴心 2. 同步连杆转动中心

对凸轮推程起始状态与凸轮终止状态打孔机构进行分析如图 9 所示。由于打孔机构在运动过程中不能接触到膜面导致地膜受损, 结合机具旋耕完厢面平整度^[20-21], 将打孔摆杆转动中心与厢面之间高度 H 定为 180 mm。在凸轮推程终止状态, 为了使打孔锥钉尖点与滚子距离厢面高度大于 120 mm, 则打孔摆杆结构参数为

$$\left\{ \begin{aligned} l_1 \cos\beta_2 &= H + h \\ l_1 \cos(\psi_m + \beta_2) &= (L_{AB} + R_r) \sin(\psi_m - \beta_1) \\ H - l_1 \cos(\psi_m + \beta_2) &> 120 \text{ mm} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

式中 l_1 ——打孔锥钉尖点与打孔摆杆转动中心间距离, mm

h ——打孔深度, mm

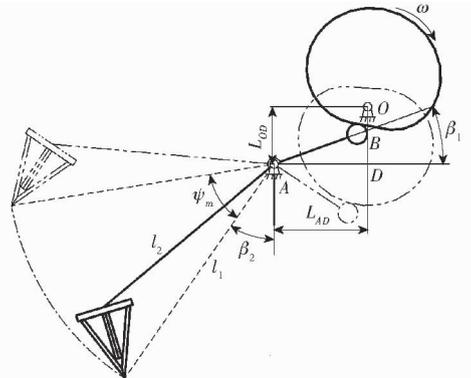


图 9 打孔摆杆参数

Fig. 9 Punch pendulum parameters

结合打孔深度 h 为 20 ~ 30 mm, 通过式 (6) 可得 β_2 应该大于 31° , 同时 β_2 越小, l_1 越小, 打孔机构结构越紧凑。因此 β_2 取 31° , 代入式 (6) 得出 l_1 为 233 ~ 245 mm, 定为 233 mm, β_1 为 13° 。确定凸轮转动中心

与打孔摆杆转动中心相对位置,即

$$\begin{cases} L_{AD} = L_{AO} \sin \left(\arccos \frac{L_{OA}^2 + L_{AB}^2 - R_b^2}{2L_{OA}L_{AB}} + \beta_1 \right) \\ L_{OD} = L_{AO} \cos \left(\arccos \frac{L_{OA}^2 + L_{AB}^2 - R_b^2}{2L_{OA}L_{AB}} + \beta_1 \right) \end{cases} \quad (7)$$

式中 L_{AD} ——凸轮与打孔摆杆中心水平距离, mm

L_{OD} ——凸轮与打孔摆杆中心竖直距离, mm

计算得 L_{OD} 为 98 mm, L_{AD} 为 36 mm。

基于课题组前期研究^[22-23], 采用的打孔锥钉主要由横向割刀和纵向割刀 2 部分组成, 如图 10 所示。打孔锥钉运动与纵向割刀结构决定实际膜孔长度, 由于打孔锥钉在破膜过程中, 打孔锥钉尖点最先破膜但 S 侧割刀最晚出土, 因此打孔锥钉尖点形成的理论膜孔长度 G 小于实际膜孔长度 G' , 结合打孔锥钉结构参数, 得出理论膜孔长度 G 与实际膜孔长度 G' 为

$$G' = G + h \cos \kappa_1 \quad (8)$$

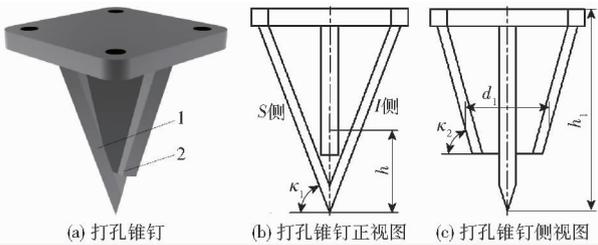


图 10 打孔锥钉结构示意图

Fig. 10 Schematics of structure of punching taper

1. 纵向割刀 2. 横向割刀

在凸轮推程期与回程期打孔锥钉尖点均会与地膜作用形成膜孔, 结合打孔摆杆运动规律, 通过凸轮在此期间转动角度, 得出理论膜孔长度 G 为

$$G = \frac{\psi^{-1} \left(\arccos \frac{H}{l_1} - \beta_2 \right) s}{\pi} \quad (9)$$

式中 ψ^{-1} ——从动件运动规律反函数

通过式(9)得出理论膜孔长度 G 与孔距 s 比值为 0.30。由于膜孔长度一般不大于 50 mm, 结合式(8)将打孔锥钉纵向刀片结构中 κ_1 定为 80° , 实际膜孔长度 G' 为 39 ~ 48 mm。横向割刀结构决定膜孔宽度。在凸轮推程阶段起始时, 打孔锥钉尖点处于打孔最深处, 此时横向割刀在高度 h 位置时宽度 d_1 即为膜孔宽度, 定为 30 mm, 满足膜孔宽度要求。

在凸轮回程阶段, 打孔锥钉在弹簧力作用下破膜入土, 为保证打孔锥钉滑切破膜, 对打孔锥钉纵向割刀和横向刀片割刀与地膜接触点进行滑切角分析如图 11 所示。其中, v_{r1} 为纵向刀片刀刃与地膜接触点相对于机具前进方向的相对速度, v_{a1} 为其绝对速度, 与纵向刀片接触点法线夹角 τ_1 为滑切角。 v_{a2} 为

横向刀片刀刃与地膜接触点绝对速度, 与横向刀片接触点法线夹角 τ_2 为滑切角。列出纵向割刀片与横向割刀滑切角与打孔锥钉结构关系为

$$\begin{cases} \frac{v_m}{\sin(\eta_1 - \tau_1)} = \frac{\omega l_1}{\cos(\tau_1 - \eta_1 - \arcsin \frac{l_1 \sin \eta_1}{H \sin \eta_1})} \\ \tau_2 = \kappa_2 \end{cases} \quad (10)$$

式中 v_m ——机具前进速度, mm/s

ω ——凸轮转动角速度, rad/s

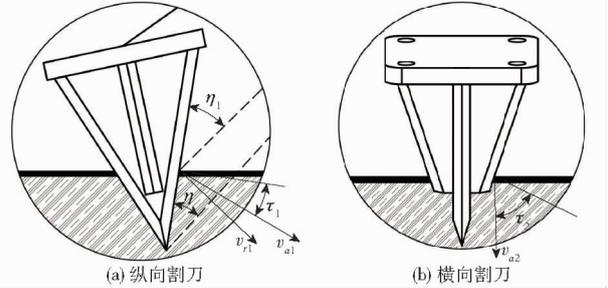


图 11 滑切角分析示意图

Fig. 11 Schematics of sliding cut angle analysis

结合打孔锥钉运动轨迹, 并根据式(10)可得纵向刀片破膜打孔滑切角主要与 η_1 相关, 且打孔锥钉纵向刀片在割膜过程, η_1 逐渐减小, 滑切角 τ_1 逐渐增大。因此可得纵向割刀在破膜过程中最小滑切角为

$$\tau_{1\min} = \arccos \frac{h_1^2 + l_1^2 - l_2^2}{2h_1l_1} - \left(\frac{\pi}{2} - \kappa_1 \right) \quad (11)$$

式中 l_2 ——打孔摆杆转动中心左侧杆长, mm

h_1 ——打孔锥钉高度, mm

横向割刀滑切角保持不变, 值恒为 κ_2 。为确保打孔锥钉纵向刀片在滑切破膜时有滑切效果, 对纵向刀片、横向刀片滑切破膜进行受力分析, 如图 12 所示, 并得出满足滑切效果时打孔锥钉结构参数为

$$\begin{cases} F_{f(1,2)} = \frac{F_{n(1,2)} \tan j}{\sin \frac{i}{2}} \\ F_{T(1,2)} \geq F_{f(1,2)} \\ F_{T(1,2)} = F_{n(1,2)} \tan \tau_{(1,2)} \end{cases} \quad (12)$$

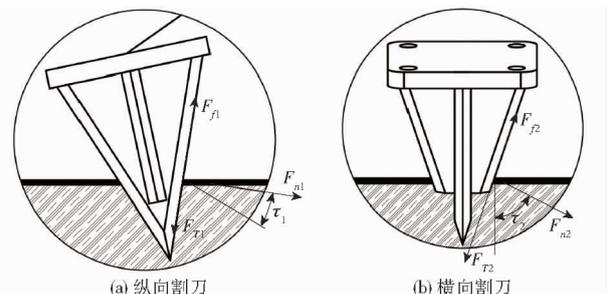


图 12 破膜受力分析示意图

Fig. 12 Schematics of permeabilization force analysis

式中 j ——地膜与刀刃摩擦角, ($^{\circ}$)
 i ——打孔锥钉刀片刃口角, ($^{\circ}$)
 $F_{T(1,2)}$ ——刀刃作用于地膜的切向力, N
 $F_{n(1,2)}$ ——刀刃作用于地膜的法向力, N
 $F_{f(1,2)}$ ——地膜与刀刃之间的摩擦力, N

地膜与刀刃摩擦因数为 0.33, 对应的摩擦角 j 为 18° , 采用的打孔锥钉刀片刃口角 i 为 30° , 为保证滑切效果, 根据式 (12) 得滑切角应该大于 52° 。结合式 (11), 得出打孔锥钉高度 h_1 为 80 mm, 打孔摆杆转动中心右侧杆长 l_2 为 210 mm 时, 纵向刀片最小滑切角为 53° 。横向刀片滑切角为 60° , 满足破膜滑切效果要求。

2.2.2 打孔机构动力学分析

由于孔距与机具前进速度、凸轮转速均有关, 孔距计算式为

$$\begin{cases} s = 2\pi \frac{v_m}{\omega} \\ \lambda = \frac{\pi v_m}{30\omega} \end{cases} \quad (13)$$

式中 λ ——速比系数

根据农艺要求^[22-24], 孔距 s 为 120 ~ 150 mm, 计算得机具前进速度与凸轮转速速比系数 λ 为 2.0 ~ 2.5。结合打孔摆杆摆角运动规律、打孔机构结构尺寸, 得出打孔锥钉尖点运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x = l_1 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta_2 - \psi\right) + v_m t \\ y = l_1 \cos\left(\frac{\pi}{2} - \beta_2 - \psi\right) \end{cases} \quad (14)$$

式中 t ——时间, s

根据运动轨迹方程, 打孔锥钉尖点、纵向割刀 I 侧和 S 侧接触点运动轨迹如图 13 所示。打孔锥钉上的点在打孔后出土时均沿着机具前进速度方向反向摆动出土, 即从已形成的膜孔中运动出土, 满足破膜要求。

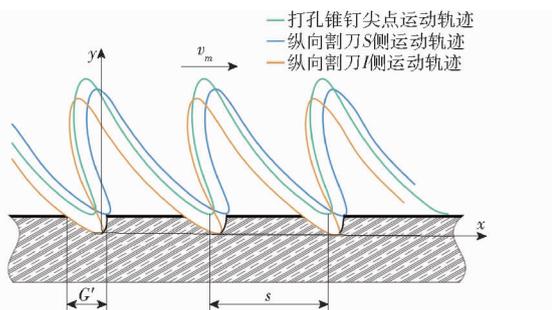


图 13 打孔锥钉运动轨迹示意图

Fig. 13 Schematic of movement trajectory of punched taper nail

为保证凸轮在回程阶段, 滚子能够始终与凸轮接触, 并且满足打孔深度要求, 根据打孔摆杆打孔过

程左侧杆与右侧杆的运动方向, 将拉伸弹簧一端安装于打孔机构上方, 另一端安装于打孔摆杆转动中心右侧, 对其进行受力分析如图 14 所示。

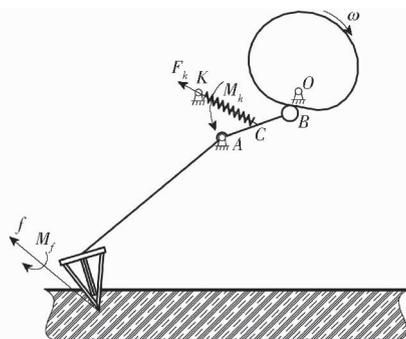


图 14 打孔摆杆受力分析示意图

Fig. 14 Schematic of force analysis of perforated pendulum rod

确保回程阶段滚子能够始终与凸轮接触, 应满足

$$M_k + M_g \geq M_f \quad (15)$$

式中 M_k ——弹簧力对打孔锥钉的转矩, N·mm

M_g ——重力对打孔锥钉的转矩, N·mm

M_f ——入土阻力对打孔锥钉的转矩, N·mm

由于打孔锥钉入土阻力不易测定, 结合式 (15), 初定 4 种圆形不锈钢丝圆钩拉伸弹簧^[25], 具体参数如表 2 所示。并通过台架试验可得打孔锥钉尖点打孔深度为 20 ~ 30 mm 时, 选择刚度为 3.6 N/mm 的拉伸弹簧。

表 2 弹簧参数

Tab. 2 Parameters of spring

线径/mm	中径/mm	刚度/(N·mm ⁻¹)	圈数
1.8	10	2.1	45
2.0	10	3.6	40
1.8	8	4.1	45
2.0	8	6.9	40

2.2.3 同步投种机构设计与同步性分析

打孔同步投种过程如图 15 所示, 在凸轮回程阶段, 打孔摆杆在拉伸弹簧驱动下向下摆动, 带动打孔锥钉尖点接触膜面, 此时种盒在同步摆杆驱动下转动至极限位置, 油菜种子沿着种盒水平约束通道向下运动, 落入上一个膜孔中。随着打孔逐渐深入, 种盒开始反向转动, 储存从排种器沿着导种管汇入的种子, 此时种子无法从种盒中排出。随着机具继续向前运动, 打孔锥钉周期性摆动在地膜上形成膜孔, 种盒同步进行投种与储种。其中, 种盒结构如图 16 所示。

为确保种盒不会接触到膜面, 将种盒转动中心点 J 与膜面距离 L_{JM} 定为 140 mm。由于打孔锥钉尖点刚接触膜面时, 种盒摆动到极限位置开始投种, 因

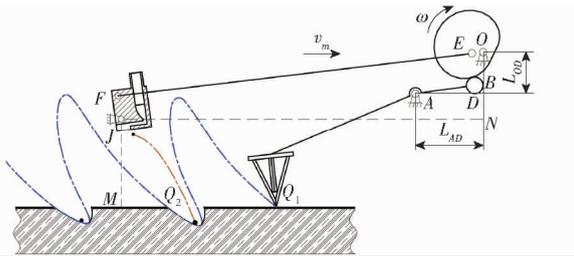


图 15 同步投种过程示意图

Fig. 15 Schematic of synchronous seeding process

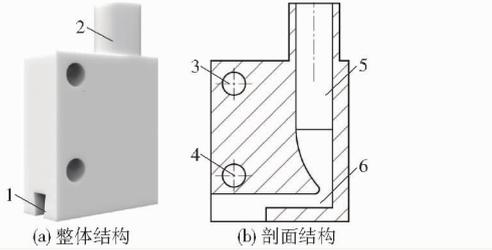


图 16 种盒结构示意图

Fig. 16 Schematics of structure of seed box

1. 落种口 2. 导种口 3. 同步连杆轴孔 4. 种盒固定轴孔 5. 竖直约束种道 6. 水平约束种道

此同步投种机构参数为

$$\begin{cases} L_{FJ} \cos \theta_1 + \sqrt{(L_{EF} - L_{OE})^2 - (L_{JN} - L_{FJ} \sin \theta_1)^2} = L_{ON} \\ L_{FJ} \cos \theta_2 + \sqrt{(L_{EF} + L_{OE})^2 - (L_{JN} + L_{FJ} \sin \theta_2)^2} = L_{ON} \\ L_{ON} = H + L_{OD} - L_{JM} \end{cases} \quad (16)$$

- 式中 L_{FJ} ——摇杆 FJ 长度, mm
 L_{OE} ——曲柄 OE 长度, mm
 L_{EF} ——同步连杆 EF 长度, mm
 L_{ON} ——机架 OJ 竖直方向长度, mm
 L_{JN} ——机架 OJ 水平方向长度, mm
 L_{OJ} ——机架 OJ 长度, mm
 θ_1 ——种盒顺时针摆动时与竖直方向最大角度, ($^\circ$)
 θ_2 ——种盒逆时针摆动时与竖直方向最大角度, ($^\circ$)

曲柄存在条件为

$$\begin{cases} L_{OE} < \min(L_{EF}, L_{FJ}, L_{OJ}) \\ L_{OE} + L_{OJ} < L_{FJ} + L_{EF} \end{cases} \quad (17)$$

结合打孔机构参数可得 L_{ON} 为 138 mm, 同时打孔锥钉尖点接触膜面时, 凸轮转动中心 O 与打孔锥钉尖点 Q_1 水平方向距离为 246 mm。根据孔距要求, 凸轮转动中心 O 与上一个膜孔进入点 Q_2 之间水平距离为 366 ~ 396 mm。

为了使排种器排种速率与打孔速率相匹配以确保膜孔与落种同步性, 参考打孔同步投种装置搭载的正负气压式播种机平台参数^[26], 排种盘型孔取值满足

$$Z = \frac{\pi M(1 + \delta)}{s i_0} \quad (18)$$

- 式中 Z ——排种盘型孔个数
 i_0 ——地轮到排种器链传动比
 M ——地轮直径, mm
 δ ——地轮滑移系数

根据式(18)将排种盘型孔个数定为 12。在种盒转动过程中, 为确保种盒能够有效储存种子, 根据前期预试验, 将 θ_1 定为 45° 。由于种子绝对运动是由机具前进与种子在种盒内运动叠加而成, 为确保种子在种盒摆动过程能够有效投种, 保证种子能够落入膜孔中, 对种子在种盒中的相对运动进行受力分析与运动分析如图 17 所示。种子受力计算为

$$\begin{cases} mg \sin \theta - F_{\beta} = ma_r \\ F_{\beta} = \mu mg \cos \theta \end{cases} \quad (19)$$

- 式中 m ——种子质量, kg
 θ ——种盒斜面夹角, ($^\circ$)
 F_{β} ——种盒对种子的摩擦力, N
 a_r ——种子相对加速度, m/s^2
 g ——重力加速度, 取 $9.81 m/s^2$
 μ ——种子在种盒中的滑动摩擦因数

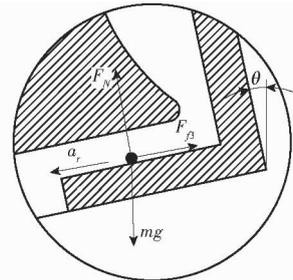


图 17 种子受力分析示意图

Fig. 17 Design of contour curve of cam mechanism

由式(19)可知, 种子相对加速度与种盒转动倾角有关, 为确保种盒转动至极限位置时, 种子能够沿着种盒内水平约束种道落种, 则水平约束种道长度 p 为

$$p \leq \int_0^{\theta_2(t)} a_r dt \quad (20)$$

结合种子在种盒内相对加速度, 为保证种盒及时投种, 将种盒逆时针摆动时极限倾角 θ_2 定为 $15^\circ \sim 25^\circ$, 水平约束种道长度 p 定为 18 ~ 34 mm。为确定投种时种子运动状态, 投种时种子绝对速度为

$$\begin{cases} v_{0x} = v_m - \cos \theta_2 \int_0^{\theta_2} a_r dt \\ v_{0y} = \sin \theta_2 \int_0^{\theta_2} a_r dt \end{cases} \quad (21)$$

- 式中 v_{0y} ——落种时种子竖直方向分速度, m/s
 v_{0x} ——落种时种子沿机具前进方向速度, m/s

结合机具前进速度要求, 并通过式(21)计算得落种前种子水平分速度 v_{0x} 与机具前进速度近似, 竖

直分速度 v_{0y} 为 0.05 ~ 0.08 m/s。同时为保证种子能够落入膜孔中,应满足

$$\begin{cases} L_{JM} + h = v_{0y}t_1 + \frac{1}{2}gt_1^2 \\ L_{JN} = v_{0x}t_1 + s + L_{AD} + \sqrt{l_1^2 - H^2} \end{cases} \quad (22)$$

式中 L_{JM} ——种盒转动中心 J 与厢面竖直距离, mm

结合孔距 s 要求,得出同步投种机构中 L_{JN} 为 498 mm。结合式(16)、(17)对同步投种机构进行迭代求解,得出满足作业要求的同步投种机构参数: $L_{OE} = 24$ mm, $L_{EF} = 492$ mm, $L_{FJ} = 50$ mm。

3 基于 DEM - MBD 的打孔同步投种仿真

油菜种子只有精准落入地膜孔内才能保证其生长所需的土壤以及水分条件,并顺利出苗。为此构建虚拟仿真模型以验证打孔同步投种装置作业效果。利用离散元软件 EDEM 建立土壤与油菜种子颗粒模型,并通过多体动力学软件 Recurdyn 定义打孔同步投种装置各零部件之间的连接以及运动关系,将 EDEM 与 Recurdyn 软件进行耦合开展仿真实验验证试验。

3.1 打孔同步投种装置仿真模型建立

为缩短仿真计算时间,只留下 2 行打孔同步投种装置,以及长 × 宽 × 高为 2 500 mm × 300 mm × 40 mm 的土壤床。应用 Solidworks 软件建立仿真模型并将其导入到 Recurdyn 软件,依次对相关零部件添加约束与运动,仿真模型如图 18 所示。在 EDEM 中,油菜种子直径设置为 2 mm,由于打孔同步投种装置作业种床为旋耕后土壤,土壤较松散细碎,因此土壤颗粒选取颗粒建模,半径设定为 6 mm。土壤颗粒-打孔锥钉,油菜籽-种盒接触模型选择 Hertz - Mindlin (no slip) 接触力学模型。同时,为更好模拟实际土壤工况,土壤颗粒-土壤颗粒接触模型选择 JKR 接触力学模型,其他接触相关参数如表 3 所示^[27-29]。

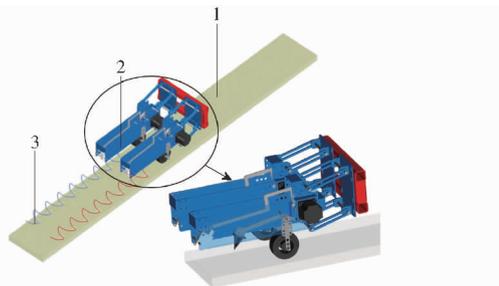


图 18 仿真模型示意图

Fig. 18 Schematic of simulation model

1. 种床 2. 打孔同步投种装置 3. 打孔锥钉尖点运动轨迹

3.2 试验因素与指标

为探究主要参数对打孔同步投种装置作业性能

表 3 仿真模型相关参数

Tab. 3 Relevant property parameters of simulation model

项目	参数	数值
油菜籽	密度/(kg·m ⁻³)	1 060
	泊松比	0.25
	剪切模量/Pa	1.1 × 10 ⁷
土壤颗粒	密度/(kg·m ⁻³)	2 600
	泊松比	0.38
	剪切模量/Pa	5.0 × 10 ⁷
工程塑料 ABS(种盒)	密度/(kg·m ⁻³)	1 060
	泊松比	0.394
	剪切模量/Pa	8.96 × 10 ⁸
钢(打孔锥钉)	密度/(kg·m ⁻³)	7 800
	泊松比	0.3
	剪切模量/Pa	7.9 × 10 ¹⁰
土壤颗粒-土壤颗粒	碰撞恢复系数	0.21
	静摩擦因数	0.68
	动摩擦因数	0.27
油菜籽-油菜籽	碰撞恢复系数	0.28
	静摩擦因数	0.57
	动摩擦因数	0.01
油菜籽-工程塑料 ABS	碰撞恢复系数	0.36
	静摩擦因数	0.49
	动摩擦因数	0.04
土壤颗粒-钢	碰撞恢复系数	0.54
	静摩擦因数	0.31
	动摩擦因数	0.13

的影响,采用二因素二次回归正交仿真试验方法。由于地膜材质与结构复杂,打孔过程涉及到大量的物理参数以及复杂的变形过程^[30],因此通过打孔锥钉与土壤床作用形成的穴孔表征膜孔,种子落入穴孔中表征膜孔与种子同步性,以膜孔与种子同步率为评价指标,以机具前进速度与凸轮转速间速比系数 λ 、种盒水平约束种道长度 p 为试验因素,因素编码如表 4 所示。

表 4 试验因素编码

Tab. 4 Coding of test factors

编码	因素	
	速比系数	种盒水平约束种道长度/mm
-1.414	2.00	18.0
-1	2.07	20.3
0	2.25	26.0
1	2.43	31.7
1.414	2.50	34.0

3.3 仿真试验结果与分析

在 EDEM 后处理界面将种子与土壤颗粒设置不同的颜色,其中,黑色为油菜种子;同时在不同的土壤层高度设置不同颜色以突显膜孔位置,通过仿真试验结果中存在种子的膜孔数量以表征同步率,

仿真结果示意图如图 19 所示。

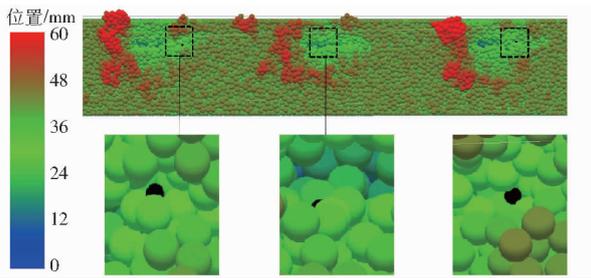


图 19 仿真结果示意图

Fig. 19 Schematic of simulation results

试验设计和结果如表 5 所示, X_1 、 X_2 为因素编码值, 借助 Design-Expert 10.0.7 软件对试验结果进行二次回归正交旋转试验分析和因素方差分析^[31-32], 如表 6 所示。

表 5 试验设计与结果

Tab. 5 Design and results of experiments

试验序号	因素		同步率 Y/%
	X_1	X_2	
1	-1	1	78.2
2	0	1.414	84.6
3	0	0	92.7
4	0	0	93.5
5	1	1	89.5
6	0	0	94.1
7	0	0	93.2
8	-1	-1	81.6
9	1	-1	77.2
10	0	0	94.4
11	1.414	0	84.2
12	-1.414	0	78.8
13	0	0	93.3
14	0	-1.414	79.5
15	0	0	94.3
16	0	0	93.4

由表 6 可知, 模型显著性检验 $F = 465.92$, $P < 0.0001$, 表明该回归模型极显著; 失拟检验中 $P > 0.05$, 为不显著, 表明该回归模型在试验范围内拟合

表 6 方差分析结果

Tab. 6 ANOVA results of experiments

项目	自由度	均方	F	P
模型	5	137.68	465.92	<0.0001
X_1	1	26.41	89.39	<0.0001
X_2	1	32.45	109.82	<0.0001
$X_1 X_2$	1	61.62	208.53	0.0270
X_1^2	1	297.03	1005.13	<0.0001
X_2^2	1	270.82	916.45	<0.0001
残差	7	0.3555		
失拟项	3	0.1555	0.4372	0.7334

度较高; X_1 和 X_2 对种孔同步有极显著影响, 通过二次多元回归拟合得回归模型为

$$Y = 93.61 + 1.82X_1 + 2.01X_2 + 3.92X_1X_2 - 6.09X_1^2 - 5.82X_2^2 \quad (23)$$

为寻求约束条件下各因素的最佳组合, 以种孔同步率最大为目标, X_1 和 X_2 为变量, 建立参数化优化模型, 目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \max Y(X_1, X_2) \\ -1.414 \leq X_1 \leq 1.414 \\ -1.414 \leq X_2 \leq 1.414 \end{cases} \quad (24)$$

根据回归模型方程及约束条件, 当速比系数为 2.29、种盒水平约束种道长度为 27.41 mm 时, 种孔同步效果较佳, 此时种孔同步率为 94.07%。结合实际加工条件, 在同步率最佳时选取最优参数组合速比系数 λ 为 2.29, 种盒水平约束种道长度 p 为 27 mm, 同步率为 94.04%。

4 田间试验

4.1 试验条件

为验证整机作业性能, 于 2024 年 9 月 20 日在华中农业大学现代农业科学试验基地进行油菜铺膜打孔播种田间试验, 试验前测得土壤坚实度为 1946.57 kPa、含水率为 15.68%。试验设备包括东方红 954 型拖拉机、油菜铺膜打孔同步投种播种机、TJSD-9570 型数显土壤坚实度测定仪(浙江托普云农科技股份有限公司, 精度 $\pm 0.005\%$) 等。

4.2 试验指标及测试方法

试验配套动力东方红 954 型拖拉机, 调节拖拉机挡位和手油门位置控制机具前进速度分别为 3、4 km/h, 调节打孔同步投种装置凸轮转速分别为 360、481 r/min。机组每个行程沿直线方向的作业距离为 60 m, 分别选取 2 种作业速度下中间 20 m 稳定作业区段作为测量区域。在测量区域内随机选择 5 处, 每处选取作业长度 1 m, 统计膜孔长度与孔距并求均值; 油菜播种 8 d 统计各选取区域油菜苗总数量以及膜孔数量。参照 NY/T 987—2006《铺膜穴播机作业质量》、NY/T 2709—2015《油菜播种机作业质量》以及油菜铺膜种植农艺要求, 确定平均膜孔长度、膜孔长度稳定性变异系数、孔距、同步率为测试指标。其中, 膜孔长度稳定性变异系数及同步率计算式为

$$V_L = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (L_i - L_a)^2} \times 100\% \quad (25)$$

$$M_c = \frac{n_c}{n} \times 100\% \quad (26)$$

$$L_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i \quad (27)$$

式中 L_a ——膜孔长度平均值, mm

n ——膜孔数量

L_i ——第 i 个膜孔膜孔长度, mm

V_L ——膜孔长度稳定性变异系数, %

M_c ——同步率, %

n_c ——出苗膜孔数量

4.3 试验结果与分析

田间试验效果如图 20 所示, 试验统计结果如表 7 所示。由图 20、表 7 可得膜边覆土均匀稳定, 平均膜边覆土宽度为 80.44 mm, 平均膜孔长度为 49.44 mm, 膜孔长度稳定性变异系数为 5.30%; 孔距为 144.76 mm, 油菜种子与膜孔同步性较好, 同步率为 85.60%。

田间试验结果表明, 本文设计的油菜铺膜打孔同步播种机可有效铺设地膜、膜边覆土以及膜上打孔与同步投种; 油菜种子与膜孔同步率和仿真结果

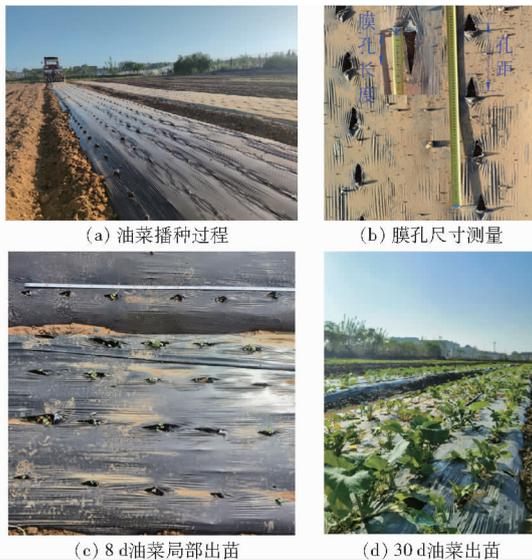


图 20 田间播种试验

Fig. 20 Field seeding experiment

存在差异是由于仿真结果能够显示种子与膜孔相对位置, 田间试验只能通过膜孔出苗表示膜孔与种子同步率, 而油菜出苗受多因素影响, 因此实际田间试验同步率比仿真试验同步率小。

表 7 田间试验结果

Tab. 7 Result of field experiment

试验序号	平均膜边覆土宽度/mm	平均膜孔长度/mm	膜孔长度稳定性变异系数/%	孔距/mm	同步率/%
1	81.71	50.50	5.37	145.12	85.45
2	80.81	46.50	6.09	141.94	84.45
3	78.82	51.31	4.45	147.22	86.90
均值	80.44	49.44	5.30	144.76	85.60

5 结论

(1) 提出了滑切破膜 + 同步投种的工艺方案, 研制了可实现旋耕、施肥、铺膜、覆土、打孔、播种一体化作业的油菜铺膜打孔同步播种机。

(2) 确定了铺膜覆土装置结构及工作参数, 根据油菜播种农艺的孔距、膜孔长度等要求, 确定了打孔机构结构参数, 建立了膜上打孔过程的动力学模型, 得到了机具前进速度与凸轮转速间速比系数 λ 为 2.0 ~ 2.5; 结合打孔运动轨迹对膜孔与种子的同步性进行了分析, 确定了种盒水平约束种道长度 p 为 18 ~ 34 mm。基于 DEM - MBD 耦合仿真确定了较优参数: 运动速比 λ 为 2.29、种盒水平约束种道长度 p 为 27 mm。

(3) 田间试验结果表明, 膜边覆土均匀稳定, 平均膜边覆土宽度为 80.44 mm, 膜孔平均长度为 49.44 mm, 膜孔长度稳定性变异系数为 5.30%, 孔距为 144.76 mm, 油菜种子与膜孔同步性较好, 同步率为 85.60%, 各项性能指标满足设计要求, 可为油菜铺膜打孔同步播种机开发提供参考。

参 考 文 献

- 田效琴, 李卓, 刘永红, 等. 播期和覆膜对直播冬油菜农艺性状、产量和品质的影响[J]. 西南农业学报, 2023, 36(2): 264 - 271.
TIAN Xiaoqin, LI Zhuo, LIU Yonghong, et al. Effect of sowing date and film mulching on agronomic performance, yield and quality of direct seeding winter rapeseed[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2023, 36(2): 264 - 271. (in Chinese)
- 张树杰, 王汉中. 我国油菜生产应对气候变化的对策和措施分析[J]. 中国油料作物学报, 2012, 34(1): 114 - 122.
ZHANG Shujie, WANG Hanzhong. Policies and strategies analyses of rapeseed production response to climate change in China [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2012, 34(1): 114 - 122. (in Chinese)
- 王静, 王弋博, 呼丽萍, 等. 多年覆膜改善冬小麦/油菜轮作地土壤提高产量[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 121 - 128.
WANG Jing, WANG Yibo, HU Liping, et al. Years of whole-field plastic mulching improving soil and crop yield on winter wheat/rape rotation field[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(6): 121 - 128. (in Chinese)
- 戴飞, 赵武云, 马明义, 等. 双垄耕作施肥喷药覆膜机工作参数优化[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 83 - 90.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, MA Mingyi, et al. Parameters optimization of operation machine for tillage-fertilization and spraying-

- filming on double ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 83 - 90. (in Chinese)
- [5] 陈海涛, 窦玉宽, 王宇, 等. 小麦秸秆纤维地膜垄上敷设装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 117 - 126. CHEN Haitao, DOU Yukuan, WANG Yu, et al. Design and experiment of mulching device on ridge with wheat straw fiber film cultivation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 117 - 126. (in Chinese)
- [6] 王伯凯, 胡良龙, 王少康, 等. 甘薯双垄旋耕起垄覆膜机的设计及试验研究[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(7): 116 - 125. WANG Bokai, HU Lianglong, WANG Shaokang, et al. Design and experiment of sweet potato transplanting operation machine with rotary tillage, ridging and covering film functions[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(7): 116 - 125. (in Chinese)
- [7] 李辉. 水稻覆膜旱直播技术与装备研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021. LI Hui. Study on technology and equipment for direct-seeded rice using film mulching in dryland [D]. Changchun: Jilin University, 2021. (in Chinese)
- [8] 侯守印, 王升哲, 竹筱歆, 等. 纤维基地膜侧开式滑切破膜播种单体设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 155 - 165. HOU Shouyin, WANG Shengzhe, ZHU Xiaoxin, et al. Design and experiment of side-open sliding cutting film broken seeding unit based on straw fiber film[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 155 - 165. (in Chinese)
- [9] 赵建托, 赵武云, 任颜华, 等. 玉米全膜覆盖双垄沟播机直插式播种装置设计与仿真[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 40 - 43, 96. ZHAO Jiantuo, ZHAO Wuyun, REN Yanhua, et al. Design and simulation of direct insert corn planting device of furrow seeder with whole plastic film mulching on double ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 40 - 43, 96. (in Chinese)
- [10] 赵武云, 戴飞, 杨杰, 等. 玉米全膜双垄沟直插式精量穴播机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 91 - 97. ZHAO Wuyun, DAI Fei, YANG Jie, et al. Design and experiment of direct insert precision hill-seeder with corn whole plastic-film mulching on double ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 91 - 97. (in Chinese)
- [11] 戴飞, 赵武云, 石林榕, 等. 基于近等速机构的玉米全膜双垄沟穴播机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 74 - 81. DAI Fei, ZHAO Wuyun, SHI Linrong, et al. Design and experiment of hill-seeder with whole plastic-film mulching on double ridges for corn based on mechanism with approximate constant speed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 74 - 81. (in Chinese)
- [12] 石林榕, 赵武云, 孙伟, 等. 电驱式小区玉米膜上直插穴播机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(4): 32 - 38. SHI Linrong, ZHAO Wuyun, SUN Wei, et al. Development and experiment of electric driving insert hill-drop planter on film for plot corn[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(4): 32 - 38. (in Chinese)
- [13] SPAPPERI. SMP 气动铺膜打孔播种机[EB/OL]. [2024-08-10]. <https://www.spapperi.com/en/smp>.
- [14] FORIGO. MODULA - JET 铺膜打孔播种机[EB/OL]. [2024-08-10]. <https://www.forigo.it/en/modula.jet>.
- [15] 杜文斌, 杨春雷, 杨锦鹏, 等. 雪茄烟叶可调式苗床起垄铺膜机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 116 - 126, 295. DU Wenbin, YANG Chunlei, YANG Jinpeng, et al. Design and experiment of cigar tobacco adjustable seed-plot ridging and film spreading machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 116 - 126, 295. (in Chinese)
- [16] 张志君, 孙旭伟, 金柱男, 等. 大豆播种机破碎式仿生覆土装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 34 - 40, 73. ZHANG Zhijun, SUN Xuwei, JIN Zhunan, et al. Design and test of crushing bionic soil covering device of soybean seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 34 - 40, 73. (in Chinese)
- [17] 周福君, 王文明, 李小利, 等. 凸轮摇杆式摆动型玉米株间除草装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 77 - 85. ZHOU Fujun, WANG Wenming, LI Xiaoli, et al. Design and experiment of cam rocker swing intra-row weeding device for maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 77 - 85. (in Chinese)
- [18] 石永刚, 吴央芳. 凸轮机构设计与应用创新[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [19] 许春林, 单伊尹, 辛亮, 等. 探出开孔式高速水稻膜上插秧机分插机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 79 - 87. XU Chunlin, SHAN Yiyin, XIN Liang, et al. Design and experiment of high-speed rice transplanter with extensible mulch cutting mechanism in mulching cultivation system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 79 - 87. (in Chinese)
- [20] 杜文斌, 周国威, 张青松, 等. 油菜直播组合式埋茬防堵装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(5): 60 - 70. DU Wenbin, ZHOU Guowei, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of the anti-blocking device combined stubble

- burying for rapeseed direct seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(5): 60–70. (in Chinese)
- [21] 廖庆喜,林建新,张青松,等. 稻油轮作区铲锹式油菜直播种床整备机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 26–35
LIAO Qingxi, LIN Jianxin, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of shovel type seedbed preparation machine suitable for rapeseed direct seeding[J], Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 26–35. (in Chinese)
- [22] 廖庆喜,裴立民,张青松,等. 油菜铺膜打孔播种机滚动式割膜打孔装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 85–98.
LIAO Qingxi, PEI Limin, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of rolling film cutting and hole punching device for rapeseed seeder with film mulching and perforating[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 85–98. (in Chinese)
- [23] 廖庆喜,王迪,姚露,等. 油菜覆膜打孔穴播机打孔装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 62–72.
LIAO Qingxi, WANG Di, YAO Lu, et al. Design and experiment of membrane punch device for rapeseed film perforating and precision dibbling-planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 62–72. (in Chinese)
- [24] 廖庆喜. 油菜生产机械化技术[M]. 北京:科学出版社,2018.
- [25] 王尊,赵武云,石林榕,等. 直插穴播机成穴器垂直入土阻力研究[J]. 林业机械与木工设备, 2023, 51(8): 35–44.
WANG Zun, ZHAO Wuyun, SHI Linrong, et al. Research on the resistance to vertical penetration of the hole-former in direct hole-planting machines[J], Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2023, 51(8): 35–44. (in Chinese)
- [26] 莫定红. 油菜正负气压组合式穴播器设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学,2021.
MO Dinghong. Design and experiment of positive and negative pressure combined dibbler for rapeseed[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [27] 廖庆喜,沈文惠,王磊,等. 油菜高速机械离心式集排器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(7): 154–167.
LIAO Qingxi, SHEN Wenhui, WANG Lei, et al. Design and experiment of high-speed mechanical centrifugal centralized seed metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 154–167. (in Chinese)
- [28] 李晓冉,廖庆喜,王磊,等. 稻麦油兼用高速气送式集排器型孔轮设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(14): 35–48.
LI Xiaoran, LIAO Qingxi, WANG Lei, et al. Design and experiments of the type-hole wheel with high-speed air-assisted centralized metering device for rice, wheat and rapeseed [J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(14): 35–48. (in Chinese)
- [29] 李晓冉,霍佳琪,廖庆喜,等. 稻麦油兼用高速叶轮离心式集排器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(9): 42–51.
LI Xiaoran, HUO Jiaqi, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of high-speed impeller centrifugal centralized metering device for rice, wheat and rapeseed [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9): 42–51. (in Chinese)
- [30] FANG Weiquan, WANG Xinzong, HAN Dianlei, et al. Parameter optimization and disturbance analysis of the film picking device of the chain-type plough layer residual film recovery machine based on DEM–MBD coupling[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 222: 109041.
- [31] 廖庆喜,张季钦,张青松,等. 平行犁组翻扣与旋耕组合式油菜种床制备装置研究[J]. 农业机械学报, 2025, 55(10): 190–201.
LIAO Qingxi, ZHANG Jiqin, ZHANG Qingsong, et al. Design and test of rapeseed seed bed preparation device combined with parallel plow group turnbuckle and rotary tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 55(10): 190–201. (in Chinese)
- [32] 李云雁,胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京:化学工业出版社,2005.