doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.11.020

油菜毯状苗移栽机切缝-栽插装置优化设计与试验

蒋　兰　汤　庆　吴崇友　吴　俊　朱庭伟　王吉轩
(农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

摘要: 针对油菜毯状苗移栽机高速栽插作业时秧苗难入土、易倒伏、栽植质量不稳定等问题,本文提出了一种平畦切缝-推苗入缝栽插方式,通过栽植缝缝型分析、苗块入缝阻力力学试验和推苗入缝过程苗块动力学分析,确定了影响栽植质量的主要参数范围。选取栽植缝锥角、推苗弹簧刚度、栽植频率为试验因素,以栽深合格率和立苗率为试验指标,利用土槽试验台架设计了二次正交组合试验。试验结果表明,当栽植缝锥角角度为 70°、弹簧刚度为 2.32 N/mm、栽植频率为 280 穴/min 时,栽深合格率为 99.56%,立苗率为 91.55%。为验证优化后切缝-栽插装置实际工作性能,实际作业工况下进行了田间试验,结果表明,栽深合格率 97.76%,立苗率 92.22%,栽植合格率 91.84%,栽植质量较优化前明显提升,栽后苗块底部及两侧均能够与栽植缝较充分接触,有助于立苗和油菜苗生长。

关键词: 移栽机; 油菜毯状苗; 切缝装置; 栽插装置; 栽深; 立苗
中图分类号: S223.9　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)11-0212-11　　**OSID**:

Optimal Design and Experiment of Furrow-cutting and Planting Mechanism for Rapeseed Blanket Seedling Transplanter

JIANG Lan　TANG Qing　WU Chongyou　WU Jun　ZHU Tingwei　WANG Jixuan
(*Nanjing Institute of Agricultural Mechanization*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Nanjing* 210014, *China*)

Abstract: Aiming to address the challenges of seedling lodging, unstable planting depth, and inconsistent planting quality during high-speed operations of rapeseed blanket seedling transplanter, a novel flat-bed furrow-cutting and aligned planting method was proposed. The primary shape parameters of the planting furrow were determined based on the planting needle and seedling block parameters. Mechanical resistance test during seedling block insertion into furrow obtained the dynamic variations of soil resistance acting on the seedling block. Dynamic analysis of the seedling-pushing process into furrow revealed the interaction mechanisms between the planting mechanism, soil, and seedlings during transplantation. Ultimately, the critical parameter ranges affecting planting quality were determined. Utilizing a soil bin test-bed, a quadratic orthogonal combination experiment was designed with three critical factors: furrow cone angle (X_1), seedling-pushing spring stiffness coefficient (X_2), and planting frequency (X_3). Planting depth qualification rate and seedling uprightness rate were selected as evaluation indices. Experimental results demonstrated that the optimal performance was obtained when $X_1=70°$, $X_2=2.32$ N/mm, and $X_3=280$ hills/min, achieving 99.56% planting depth qualification rate and 91.55% seedling uprightness rate. To validate the operational performance of the furrow-cutting and planting mechanism, the field validation tests were conducted with an improved prototype. The results showed that the planting depth qualification rate was 97.76%, the seedling uprightness rate was 92.22%, the planting qualification rate was 91.84%. The planting quality was significantly improved before optimization.

Key words: transplanter; rapeseed blanket seedling; furrow-cutting mechanism; planting mechanism; planting depth; seedling uprightness

收稿日期: 2025-05-07　修回日期: 2025-06-25
基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2001001)、中国博士后科学基金项目(2023M740866)、江苏省农机新装备新技术研发与推广项目(NJ2024-01)、江苏省现代农机装备与技术推广项目(NJ2024-20)和江苏省工业和信息产业转型升级专项资金项目
作者简介: 蒋兰(1994—),女,助理研究员,博士生,主要从事移栽机械研究,E-mail: 595377419@qq.com
通信作者: 吴崇友(1959—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业机械化技术研究,E-mail: 542681935@qq.com

0　引言

油菜作为我国主要油料作物，在保障粮油安全和农业可持续发展中具有重要地位[1-3]。长江中下游冬油菜主产区广泛采用稻-油轮作模式，晚茬水稻（一季晚粳稻、再生稻、双季晚稻）收获期迟，油菜直播生长期不足导致产量下降[4-6]。育苗移栽技术可有效缓解茬口矛盾，其中油菜毯状苗移栽采用切块取苗-对缝栽插移栽方式，适应黏重土壤条件，成为稻茬田高效移栽的重要方式[7-9]。然而，现阶段油菜毯状苗移栽机高速作业时普遍存在秧苗入土困难、直立度差及栽植质量不稳定等问题。

近年来，国内外学者通过研究栽植机构-苗-土壤间互作机制，以解析移栽机作业过程中秧苗运动及姿态变化规律，从而提出有效的秧苗控制策略，提升移栽机作业效率和栽植质量[10-17]。穆桂脂等[18]设计了一种甘薯横向水平复式移栽机栽苗装置，构建了栽苗装置-柔性甘薯苗-薯垄耦合作用仿真模型，得出了栽苗装置关键结构和作业参数与栽插薯苗运动和姿态相关性，当机器移栽效率为 132 株/（行·min）时，栽深合格率和株距合格率均达到 90%。曾繁地[19]通过离散元仿真研究了鸭嘴式栽植器-沙性土壤-穴盘苗间相互作用，得出了穴盘苗在移栽和落入穴孔过程运动和受力，结合优化试验降低了栽植器和土壤对钵体的损伤。金鑫等[20]通过分析钵苗在鸭嘴栽植器内运动动力学，得到了钵苗下落过程中与鸭嘴栽植器间的运动受力方程，通过优化栽植器初始位置及结构参数将栽植机构转速提升至 80 r/min，有效提高了鸭嘴式移栽机作业效率。侯加林等[21]设计了一种插夹联动式末端执行器，采用 DEM - MFBD 方法揭示了取苗过程钵苗损失机理，分析了取苗针与基质和茎秆间相互作用，减少了取投苗过程的基质损失和茎秆损伤。现有研究多针对土壤为轻壤土或沙性土，取栽苗方式为夹苗式或针扎钵体式取苗、鸭嘴式栽苗，移栽对象为钵体苗或裸苗，对黏重土壤中苗块动力学平衡机制研究较少，且毯状苗移栽方式的栽苗机构参数与土壤对秧苗栽深及直立度的影响规律尚未明确，难以进一步提升毯状苗移栽机栽植质量。

本文提出一种适用于黏重土壤的平畦切缝-推苗入缝栽插方式，通过栽植缝缝型分析和苗块入缝阻力力学试验，揭示苗块入缝过程与土壤互作机制，得出苗块入缝过程阻力变化规律，基于苗块入缝阻力得到推苗栽插关键参数选取范围；通过推苗入缝过程苗块动力学分析，确定影响栽插苗块深度、直立情况关键参数。通过土槽台架试验对切缝-推苗栽插装置互作参数进行优化，并利用田间试验对油菜毯状苗移栽机栽植性能进行验证，以期提高油菜毯状苗移栽机栽插质量。

1　整机结构与工作原理

1.1　总体结构

油菜毯状苗移栽机主要由旋耕埋茬装置、切缝装置、栽插装置、自动送苗装置和切土式覆土镇压装置等组成，总体结构如图 1 所示，其中，切缝装置和栽插装置是高速栽插、黏重土壤稳苗立苗的关键部件。

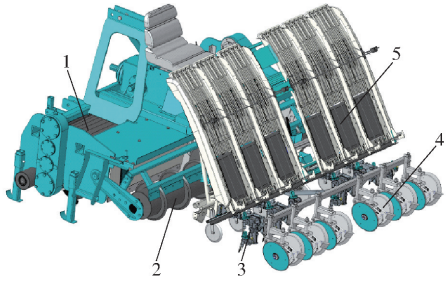


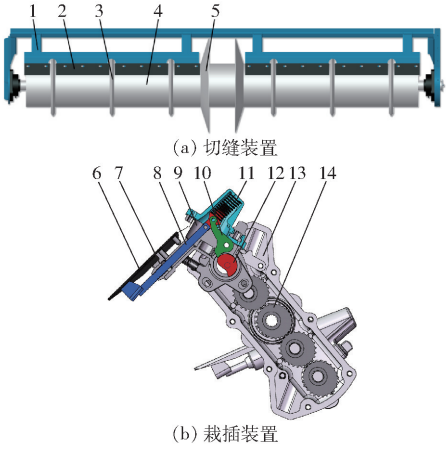
图 1　油菜毯状苗移栽机整机结构

Fig. 1　Overall machine structure of rapeseed blanket seedling transplanter

1. 旋耕埋茬装置　2. 切缝装置　3. 栽插装置　4. 切土式覆土镇压装置　5. 自动送苗装置

1.2　切缝-栽插装置结构与工作原理

切缝装置和推苗栽插装置共同实现推苗入缝栽插。切缝装置由平畦辊、切缝圆盘刀、锥形圆盘和挂土板等组成，其结构示意图如图 2a 所示。平畦辊设计为主动式圆形辊体，中间固定 1 对锥形圆盘，用于中间开排水沟。在两侧各安装 3 个切缝圆盘刀，实现整平畦面并在畦面上切出栽植缝。栽插装置由栽



（a）切缝装置

（b）栽插装置

图 2　切缝-栽插装置结构示意图

Fig. 2　Structural diagrams of furrow-cutting and planting mechanism

1. 机架　2. 挂土板　3. 切缝圆盘刀　4. 平畦辊　5. 锥形圆盘　6. 秧针　7. 套筒　8. 推苗杆　9. 栽植臂壳体　10. 拨叉　11. 推苗弹簧　12. 凸轮　13. 行星架　14. 椭圆齿轮组

植臂、行星架和椭圆齿轮组等组成,其中栽植臂上安装秧针和推苗机构,如图 2b 所示。推苗机构是栽插装置中重要的工作部件之一,其主要包括凸轮、推苗杆、拨叉和推苗弹簧。凸轮随行星架做匀速转动,拨叉固定在栽植臂壳体上,可绕拨叉轴转动,凸轮带动拨叉转动,从而带动推苗杆做直线运动,秧针取苗和运移苗时,凸轮与拨叉接触,推苗弹簧被拨叉压缩,推苗杆位于极限收缩位置,当秧针进入栽植缝内到达推苗点时,凸轮与拨叉脱离接触,在推苗弹簧回弹作用下,推苗杆迅速向下运动,将油菜苗根部的基质块推出,实现推苗动作。

推苗入缝栽插原理如图 3 所示,平畦辊带动切缝圆盘刀主动旋转挤压土壤形成一条栽植缝,同时通过平畦辊体旋转对切缝处扰动的土壤进行整平;秧针从秧箱中按设定尺寸切出油菜苗块,沿栽植轨迹将苗块运送至推苗点处,推苗杆弹出将苗块快速推入栽植缝底部,苗块在横向(垂直机器前进方向)受到栽植缝两侧土壤限制不会发生横向翻倒,纵向(沿机器前进方向)与缝内土壤相互接触,受到土壤挤压、摩擦阻力、惯性力等多种作用力的作用,若获得平衡,则不会发生纵向翻倒。

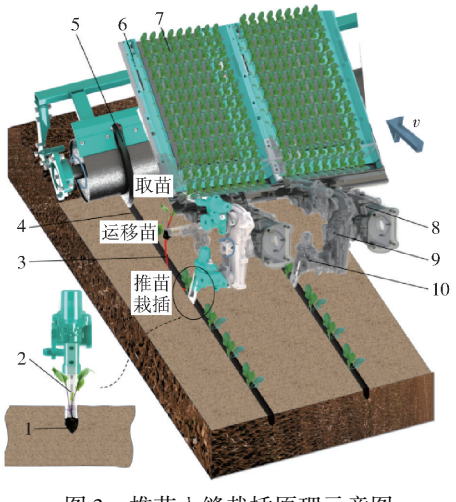


图 3 推苗入缝栽插原理示意图

Fig. 3 Planting principle of pushing seedling into planting furrow

1. 油菜苗块 2. 推苗杆 3. 栽植轨迹 4. 栽植缝 5. 切缝装置 6. 秧箱 7. 油菜毯状苗 8. 栽插装置传动箱 9. 行星架 10. 栽植臂

2 推苗入缝过程分析及主要参数确定

2.1 栽植缝参数与入缝阻力

2 个平底圆盘焊接形成具有一定厚度且带有切角的切缝圆盘刀,通过旋转挤压土壤可形成一条窄缝,其外形决定切出栽植缝形状,如图 4 所示,栽植缝两侧壁垂直畦面,底部呈锥角(截面图)。栽植缝

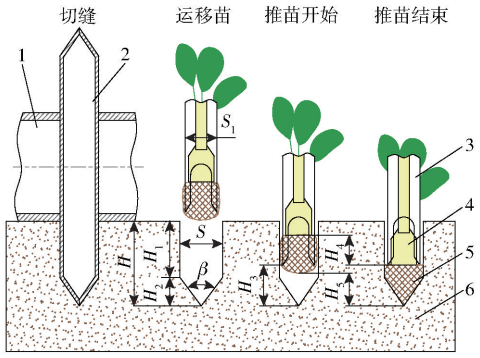


图 4 推苗入缝过程示意图

Fig. 4 Schematic of pushing seedling into planting furrow

1. 平畦辊 2. 切缝圆盘刀 3. 秧针 4. 推苗杆 5. 油菜苗块 6. 土壤

侧壁能限制苗块向两侧翻倒,底部锥角可通过与苗块接触挤压产生阻力有利于限制苗块前后翻倒,在土壤无法流动情况下模拟“土壤包裹”效果,有助于稳固和立苗[22-24]。栽植缝主要参数包括缝宽、缝深、锥角角度和锥角深度,各参数间满足关系

$$\begin{cases} \dfrac{S}{2H_2} = \tan\dfrac{\beta}{2} \\ H = H_1 + H_2 \end{cases} \tag{1}$$

式中 β——锥角角度,(°)

S——栽植缝宽度,mm

H——栽植缝深度,mm

H_1——栽植缝侧壁深度,mm

H_2——锥角深度,mm

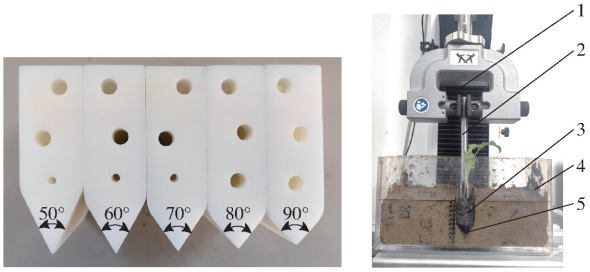
为保证苗块容易插到苗缝内并使推苗后苗块能够与栽植缝底部土壤充分接触,要求栽植缝宽度略大于秧针宽度且尽可能与苗块宽度相同,油菜毯状苗采用标准平底秧盘进行育苗,苗片宽度为 280 mm,按照横向取苗 12 次,每次切取苗块宽度约为 23.3 mm,选用秧针宽度 S_1 为 20 mm,因此设计栽植缝宽度 S 为 24 mm。油菜移栽深度为 30 ~ 50 mm,因此设定栽植缝深度 H 为 45 mm。根据推苗时推苗杆弹出位移 H_4 为 20 mm,即推苗过程苗块运动行程 H_5 为 20 mm,考虑到苗块位于秧针尖端且略微突出,为使苗块能够被推入栽植缝底部、保证栽插深度,计算出推苗开始时秧针距离栽植缝底部适宜高度 H_3 为 22 mm,由图 4 可知,缝宽 S、缝深 H 以及推苗时秧针离缝底高度 H_3 固定时,底部锥角 β 越小,锥角深度 H_2 越大,为保证秧针推苗时能深入栽植缝内但又不与土壤接触,计算得 $\beta \geqslant 48.9°$,β 过大会大幅增加切缝功耗,因此切缝圆盘刃角设计为锐角,综上,初步确定栽植缝锥角角度 β 为 50° ~ 90°。

栽植缝锥角会影响入缝过程中苗块变形程度和接触面积,进而改变土壤对苗块挤压作用力,是苗块入缝阻力的关键影响因素。因此在力学试验机上开

展苗块入缝阻力测定试验，以期为推苗机构关键参数确定提供依据。

试验所用油菜苗品种为宁杂 1838，苗龄 35 d，苗片盘根成毯，苗片厚度 22 mm，试验前按照移栽机取苗量将苗片切割成 23 mm × 18 mm 的苗块且至少带有 1 株健壮油菜苗，采用干燥法测定苗片平均含水率为 64.6%，在稻茬田中取土，测定土壤平均含水率为 26.3%。

为模拟推苗时苗块入缝过程，在透明容器中利用切缝器模型自制栽植缝，如图 5 所示，栽植缝锥角角度分别为 50°、60°、70°、80° 和 90°，采用美国 INSTRON 公司 3343 型电子万能材料试验机（测力范围 0 ~ 1 000 N，精度：±0.1 N）夹持推苗杆将苗块匀速推入栽植缝底，设定测试速度为 4 mm/s。



（a）切缝器模型　　（b）试验装置

图 5　苗块入缝阻力试验

Fig. 5　Mechanical resistance tests of seedling block during furrow entry

1. 力学试验机　2. 推苗杆　3. 苗块　4. 透明容器　5. 栽植缝

入缝过程苗块主要受到栽植缝底部土壤挤压和摩擦力，侧壁对苗块接触作用极小，因此侧壁与苗块间摩擦力忽略不计，受力情况如图 6 所示，苗块受力平衡方程为

$$F_g = 2N\sin\frac{\beta}{2} + 2f\cos\frac{\beta}{2} - G_1 \tag{2}$$

其中

$$f = \mu N \tag{3}$$

式中　F_g——推苗杆作用力，N

N——土壤挤压力，N

f——土壤摩擦力，N

G_1——苗块重力，N

μ——苗块与土壤摩擦因数

采用斜面滑动法试验测得 μ 为 1.0。

由式(2)、(3)可知，随推苗位移增加入缝阻力变化的主要原因与土壤挤压力有关，挤压力可表示为

$$N = \frac{F_g + G_1}{2\left(\sin\frac{\beta}{2} + \mu\cos\frac{\beta}{2}\right)} \tag{4}$$

试验测得推苗全程推苗杆作用力，依据式(4)计算出苗块受土壤挤压力，假设推苗杆完全弹出时苗块位于栽植缝最底部，设初始推苗时苗块入缝深度为 25 mm，推苗杆弹出位移为 20 mm，得到土壤挤压力与苗块入缝深度（25 ~ 45 mm）关系曲线如图 7 所示。

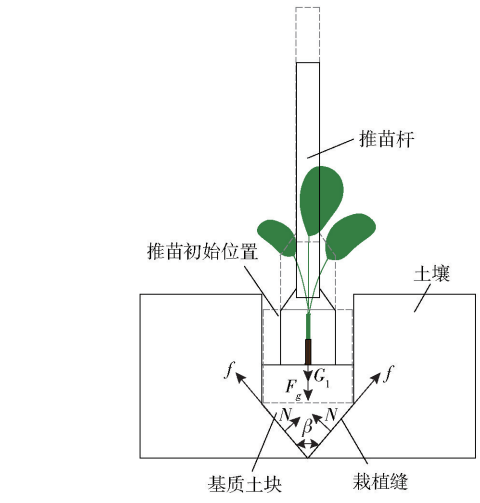


图 6　入缝过程苗块受力分析

Fig. 6　Force analysis of seedling block during furrow entry

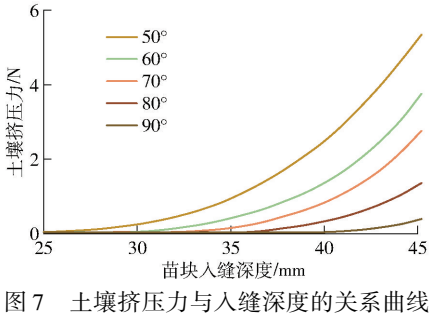


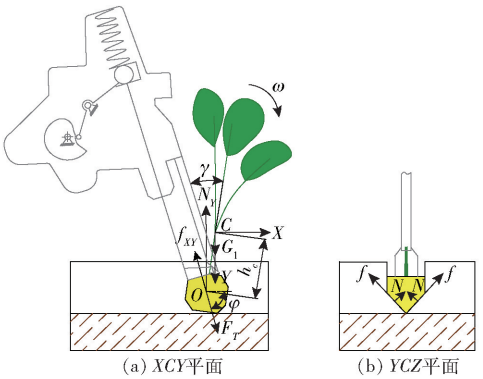
图 7　土壤挤压力与入缝深度的关系曲线

Fig. 7　Relationship curves of soil compaction stress and depth during furrow entry

由图 7 可知，随着苗块入缝深度增加，苗块所受土壤挤压力呈指数增加，苗块入缝阻力增加。栽植缝锥角越小，苗块被推入栽植缝所受挤压力越大。苗块位于栽植缝最底部时，即入缝深度为 45 mm，栽植缝锥角角度为 50°、60°、70°、80°、90°时苗块所受土壤挤压力分别为 5.35、3.76、2.76、1.36、0.40 N。

2.2　推苗入缝过程分析

推苗机构作业性能对栽插效果具有重要影响[25]。苗块因栽插装置高频运转速度与推苗杆弹射速度的叠加，具有较大动能和角动能，如无法有效控制则会导致苗块倒伏[26-28]。推苗过程苗块受力分析如图 8 所示，推苗开始时苗块具有质心速度 v_c 和角速度 ω，推苗杆推出过程对苗块产生推力，在推力作用下苗块沿推苗杆推出方向运动，同时由于作用点不在苗块质心，苗块存在转动，推苗过程中苗块进入栽植缝并与土壤接触，苗块除受推苗杆推力外，还受到土壤挤压力和摩擦阻力，在以苗块质心点 C 为原点的 XCY 平面坐标系中，建立苗块动力学方程为



(a) *XCY*平面 (b) *YCZ*平面

图 8 推苗过程苗块受力分析

Fig. 8 Force analysis of seedling block during seedling pushing process

$$\begin{cases} F_T\cos\varphi - f_{XY}\cos\varphi = m_1 a_x \\ F_T\sin\varphi + G_1 - f_{XY}\sin\varphi - N_Y = m_1 a_y \\ (F_T - f_{XY}) h_c\sin\gamma - N_Y h_c\sin\left(\varphi + \gamma - \dfrac{\pi}{2}\right) = J_c\alpha \\ f_{XY} = 2f\cos\dfrac{\beta}{2} \\ N_Y = 2N\sin\dfrac{\beta}{2} \\ f = \mu N \end{cases} \tag{5}$$

式中 F_T——推苗杆对苗块推力,N

f_{XY}——土壤与苗块摩擦力在 *XCY* 平面分力,N

N_Y——土壤对苗块挤压力在 *Y* 方向分力,N

a——苗块加速度,mm/s^2

α——苗块角加速度,rad/s^2

γ——油菜苗茎秆与秧针夹角,(°)

φ——推苗时推苗杆与水平面夹角,(°)

J_c——苗块绕质心转动惯量,kg·mm^2

m_1——苗块质量,kg

h_c——苗块质心高度,mm

由式(5)可知,推苗杆推力 F_T、推苗角度 φ、栽植缝锥角角度 β、土壤挤压力 N 和苗块与土壤间摩擦因数 μ 是影响栽植质量的主要因素。增大推力和栽植缝锥角角度或减小苗块摩擦因数可提高苗块入土能力,使苗块充分与土壤接触,保证栽插深度;推力过大会使秧苗向前速度和转动角速度在推苗时急速增加,苗块动能过大,土壤阻力难以抵消、控制,导致秧苗倒伏和栽植质量下降;推力较低可降低苗块动能和角动能,提高栽插秧苗稳定性,但会降低入土作用力,导致栽深不够。因此需根据苗块最小入缝阻力合理设计推苗机构推力,以保证栽插深度,并提高立苗率。

为求解推力,对推苗杆进行动力学分析,如图 9 所示,推苗前凸轮与拨叉接触,弹簧处于压缩状态,推苗杆相对静止,推苗时凸轮与拔叉分离,凸轮与拔叉间无作用力,推苗杆主要受到弹簧回弹力、苗块对推苗杆阻力和栽植臂套筒对推苗杆摩擦力,推苗杆作变速直线运动。在推苗杆上点 *O* 建立坐标轴 *OX*,在 *X* 方向推苗杆受力平衡方程为

$$\begin{cases} F_P - f_1 - f_2 = m_2\ddot{x} \\ F_P = k(\delta_t - x) \\ \delta_t = l_0 - l_1 \end{cases} \tag{6}$$

式中 F_P——弹簧回弹力,N

f_1——苗块对推苗杆阻力,N

f_2——套筒与推苗杆间摩擦力,N

m_2——推苗杆质量,kg

l_0——弹簧原始长度,mm

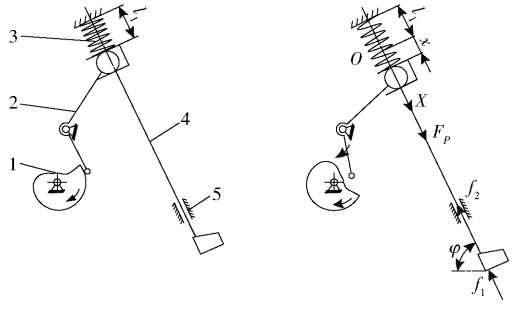
l_1——推苗前被压缩弹簧长度,mm

δ_t——推苗前弹簧压缩量,mm

x——推苗过程弹簧恢复长度,mm

$\ddot{x}$——推苗杆沿 *X* 轴运动加速度,mm/s^2

k——弹簧刚度,N/mm



(a) 推苗前 (b) 推苗过程中

图 9 推苗机构动力学分析

Fig. 9 Kinetic analysis of seedling pushing mechanism

1. 凸轮 2. 拨叉 3. 推苗弹簧 4. 推苗杆 5. 套筒

式(6)中,栽植臂结构确定条件下,推苗前被压缩弹簧长度 l_1 不变,当苗块入缝阻力 f_1 不变时,推苗过程中推苗杆推出速度和对苗块推力主要由推苗弹簧力决定,弹簧刚度 k 和原始长度 l_0 越大,推苗杆速度和对苗块推力越大。

推苗过程中推苗杆与苗块接触,作用点处具有相同速度,根据动量定理,建立推苗杆对苗块推力与苗块入缝阻力的关系

$$m_1\frac{\mathrm{d}\dot{x}}{\mathrm{d}t} = F_T - f_{XY} - N_Y\sin\varphi \tag{7}$$

式中 $\dot{x}$——推杆沿 *X* 轴运动速度,mm/s

为保证苗块栽插深度,推苗杆推力需克服苗块入缝阻力。已知推苗过程弹簧压缩量逐渐变小,使推力减小,苗块入缝深度逐渐增加,使土壤对苗块阻力增大。则苗块能够被推入栽植缝底部需满足:推苗杆完全弹出时推力大于苗块在栽植缝底部时所受土壤阻力,即

$$F_T + G_1\sin\varphi - f_{XY} - N_Y\sin\varphi > 0 \tag{8}$$

通过调节弹簧刚度来改变推苗杆对苗块推力，联立式(5)～(8)得到苗块被推入栽植缝底部最小弹簧刚度为

$$k > \frac{2N\left(\mu\cos\frac{\beta}{2} + \sin\varphi\sin\frac{\beta}{2}\right) + f_2 - (m_1 + m_2)g\sin\varphi}{\delta_t - x} \tag{9}$$

根据油菜毯状苗移栽机单次切取苗块质量 m_1 取 0.006 kg；推苗杆质量 m_2 取 0.06 kg；采用前期设计的油菜毯状苗移栽机栽插装置椭圆齿轮行星轮系参数(表 1)，测量得知该运动轨迹下推苗时秧针与地面所呈夹角 φ 为 65°；根据栽植臂与推苗机构结构，推苗前将弹簧压缩至 36 mm，试验选用弹簧长度 72 mm，计算得 δ_t 为 36 mm；推苗杆完全弹出行程为 20 mm，取 x = 20 mm；通过力学试验机测得套筒与推苗杆摩擦阻力取 f_2 = 30 N；由 2.1 节得不同锥角角度 50°～90°栽植缝下，苗块入缝深度至 45 mm 时所受挤压力 N 为 0.40～5.35 N。将上述参数代入式(9)，计算得栽植缝锥角角度 50°、60°、70°、80°、90°时弹簧刚度分别大于 2.70、2.46、2.30、2.07、1.90 N/mm。

表 1　栽插装置椭圆齿轮组设计参数

Tab.1　Design parameters of elliptical gear set for planting mechanism

参数	数值
椭圆齿轮齿数	19
椭圆齿轮模数/mm	2.3
椭圆偏心率	0.15
行星轮中心到秧针尖长度/mm	142
行星架初始安装角/(°)	38
栽植臂与行星架初始相位角/(°)	42

2.3　推苗机构凸轮设计

通过图解法设计推苗机构所需凸轮轮廓线，如图 10 所示，推苗杆从开始伸出到完全伸出，凸轮处于回程状态，为避免栽插装置高频率转动时拨叉直接与推程段凸轮轮廓接触，导致推苗行程不足，设置回程角为 30°；为减轻拨叉与凸轮碰撞冲击作用，推苗结束后凸轮保持近休止状态，此时推苗杆短暂保持在伸出极限位置，近休止角为 35°；之后凸轮进入推程状态，推程角为 185°，此时栽插装置处于空转回程阶段，推苗杆缓慢缩回；在下一次推苗前，推苗杆保持在缩回极限位置，凸轮处于远休止状态，远休止角为 110°。为实现推苗杆弹出位移为 20 mm，根据图 11 所示推苗机构结构以及表 2 所示结构参数，通过计算设计凸轮基圆半径 r_0 = 4.5 mm，远休止处凸轮轮廓半径 r_1 = 13.8 mm，同时得拨叉最大摆角 ψ 为 36.6°。

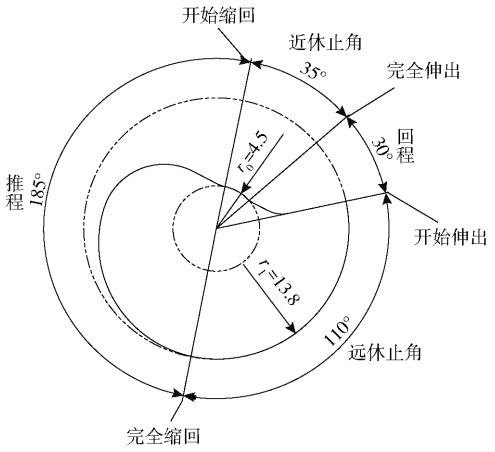


图 10　凸轮转角位置和轮廓线

Fig. 10　Cam rotation angle position and curve

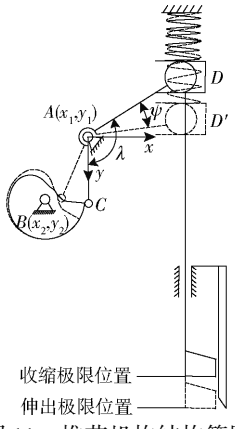


图 11　推苗机构结构简图

Fig. 11　Diagram of seedling pushing mechanism structure

表 2　推苗机构结构参数

Tab.2　Structural parameters of seedling pushing mechanism

参数	数值	参数	数值
x_1/mm	0	L_{AC}/mm	18
y_1/mm	0	L_{AD}/mm	32
x_2/mm	−15	λ/(°)	116.3
y_2/mm	−17.4		

图 11 中，点 $A(x_1, y_1)$ 为拨叉摆动中心；点 $B(x_2, y_2)$ 为凸轮转动中心；点 C 为滚子转动中心；D 为推苗杆极限收缩时拨叉与滑块连接点位置；D' 为推苗杆极限伸出时拨叉与滑块连接点位置；λ 为拨叉拐角。

3　栽插性能试验

3.1　试验条件

试验油菜品种为宁杂 1838。2024 年 9 月初在常州国机重工常林公司育苗实验室开始育苗，当苗龄达到 35 d，试验时平均苗高 95 mm、测定苗片含水

率 63.6%,试验地点为常州国机重工常林公司农业机械化实验中心,以现有油菜毯状苗移栽机为基础搭建试验台架,土槽内放置与田间土壤条件接近的稻田黏重土,测得土壤含水率为 25.2%,台架试验如图 12 所示。



图 12 土槽试验台架

Fig. 12 Soil bin test-bed

3.2 试验方法

根据推苗入缝过程分析和苗块入缝阻力试验研究结果,推苗弹簧刚度和栽植缝锥角角度会影响栽插过程苗块栽插深度和运动姿态,不同栽植频率下推苗时苗块速度不同,从而影响立苗率,故选取以上 3 个参数作为试验因素;油菜毯状苗移栽机栽植频率一般在 220 穴/min 以上,因此栽植频率取 220 ~ 340 穴/min;根据 2.1 节,当栽植缝锥角角度大于 80°时土壤对苗块阻力过小,稳苗立苗作用不足,锥角增加还会导致切缝圆盘作业功耗变大,因此栽植缝锥角角度选取为 50° ~ 80°;依据 2.2 节苗块入缝条件,设定推苗弹簧刚度为 2.1 ~ 2.9 N/mm,通过改变推苗弹簧线圈数获得试验所需弹簧刚度,弹簧刚度计算式为

$$k = \frac{Ed^4}{8nD^3} \tag{10}$$

式中 E——弹簧弹性模量,MPa

D——弹簧中径,mm

d——弹簧丝直径,mm

n——弹簧有效线圈数

采用碳钢丝材料、两端磨平的压缩弹簧,取 E 为 7 900 MPa、根据栽植臂壳体和推苗机构中部件结构,取 D 为 15.5 mm、d 为 1.8 mm,当 k 取 2.1、2.5、2.9 N/mm 时,计算出弹簧有效圈数 n 分别为 13、11 和 9.5[29]。通过力学试验机进行校正,测得实际弹簧刚度与理论值之间误差为 -50 ~ 50 N/m。试验前通过自制切缝模块手工切缝,开展三因素三水平响应曲面试验,统计时去除前后 10 穴油菜苗数据,每组测量中间区域共计 300 穴植株的栽植情况,试验因素编码如表 3 所示。

3.3 试验评价指标

以栽深合格率和立苗率为试验指标。栽深合格率为栽植后苗块与栽植缝底土壤完全接触的植株穴数与总植株穴数比值。立苗率为栽植后秧苗主茎与地面夹角大于 30°的植株穴数与总植株穴数比值。计算式为

$$Y_1 = \frac{N_a}{N_0} \times 100\% \tag{11}$$

$$Y_2 = \frac{N_b}{N_0} \times 100\% \tag{12}$$

式中 Y_1——栽深合格率,%

Y_2——立苗率,%

N_a——栽深合格穴数,穴

N_b——立苗合格穴数,穴

N_0——总穴数,穴

表 3 试验因素编码

Tab. 3 Test factors and codes

编码	因素		
	栽植缝锥角角度/(°)	推苗弹簧刚度/(N·mm^{-1})	栽植频率/(穴·min^{-1})
-1	50	2.1	220
0	65	2.5	280
1	80	2.9	340

3.4 结果与分析

三因素三水平试验方案与结果如表 4 所示,表中 x_1、x_2、x_3 为因素编码值。

表 4 试验方案与结果

Tab. 4 Test scheme and results

序号	因素			栽深合格率 Y_1/%	立苗率 Y_2/%
	x_1	x_2	x_3		
1	-1	-1	0	59.7	75.3
2	-1	0	-1	83.3	75.3
3	-1	0	1	75.3	80.3
4	-1	1	0	94.7	76.3
5	0	-1	-1	87.3	87.7
6	0	-1	1	85.0	88.0
7	0	0	0	98.0	91.0
8	0	0	0	99.7	89.3
9	0	0	0	98.3	87.3
10	0	0	0	99.7	90.7
11	0	0	0	100	92.7
12	0	1	-1	100	69.0
13	0	1	1	95.7	73.7
14	1	-1	0	100	85.3
15	1	0	-1	100	68.7
16	1	0	1	99.3	74.3
17	1	1	0	100	59.3

方差分析结果如表 5 所示。由表 5 可知,栽深合格率 Y_1 和立苗率 Y_2 的回归模型 $P < 0.01$,失拟项均大于 0.05,说明回归模型准确,拟合度较好。其

中，x_1、x_2、x_1x_2、x_1^2、x_2^2 对 Y_1 影响极显著；x_3、x_3^2 对 Y_1 影响显著；x_2、x_1x_2、x_1^2、x_2^2、x_3^2 对 Y_2 影响极显著；x_1、x_3 对 Y_2 影响显著。

在 Design-Expert 8.0 软件下对试验数据进行多元回归拟合分析，建立栽深合格率 Y_1、立苗率 Y_2 与栽植缝锥角角度、推苗弹簧刚度和栽植频率二次多项式回归模型为

$$\begin{cases} Y_1 = 99.07 + 10.83x_1 + 7.25x_2 - 1.83x_3 - \\ \quad 8.75x_1x_2 + 1.75x_1x_3 - 0.58x_2x_3 - \\ \quad 6.58x_1^2 - 3.91x_2^2 - 3.08x_3^2 \\ Y_2 = 90.2 - 2.46x_1 - 7.25x_2 + 1.96x_3 - \\ \quad 6.75x_1x_2 + 0.17x_1x_3 + 1.08x_2x_3 - \\ \quad 10.52x_1^2 - 5.6x_2^2 - 5.02x_3^2 \end{cases} \tag{13}$$

表 5　方差分析结果

Tab. 5　Results of variance analysis

指标	变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
Y_1	模型	2 021.24	9	224.58	56.64	<0.000 1 **
	x_1	938.89	1	938.89	236.79	<0.000 1 **
	x_2	420.5	1	420.5	106.05	<0.000 1 **
	x_3	26.89	1	26.89	6.78	0.035 2 *
	x_1x_2	306.25	1	306.25	77.24	<0.000 1 **
	x_1x_3	12.25	1	12.25	3.09	0.122 2
	x_2x_3	1.36	1	1.36	0.343 3	0.576 3
	x_1^2	182.02	1	182.02	45.91	0.000 3 **
	x_2^2	64.32	1	64.32	16.22	0.005 **
	x_3^2	39.81	1	39.81	10.04	0.015 7 *
	残差	27.76	7	3.97		
	失拟项	21.22	3	7.07	4.33	0.095 3
	误差	6.53	4	1.63		
	总和	2 048.99	16			
Y_2	模型	1 460.18	9	162.24	35.56	<0.000 1 **
	x_1	48.35	1	48.35	10.6	0.014 *
	x_2	420.5	1	420.5	92.16	<0.000 1 **
	x_3	30.68	1	30.68	6.72	0.035 8 *
	x_1x_2	182.25	1	182.25	39.94	0.000 4 **
	x_1x_3	0.111 1	1	0.111 1	0.024 3	0.880 4
	x_2x_3	4.69	1	4.69	1.03	0.344 2
	x_1^2	465.69	1	465.69	102.06	<0.000 1 **
	x_2^2	132.04	1	132.04	28.94	0.001 **
	x_3^2	105.97	1	105.97	23.22	0.001 9 **
	残差	31.94	7	4.56		
	失拟项	16.03	3	5.34	1.34	0.3789
	误差	15.91	4	3.98		
	总和	1 492.12	16			

注：** 表示影响极显著（$P<0.01$），* 表示影响显著（$0.01 \leqslant P<0.05$）。

由表 5 可知，在各因素水平范围内，x_1 和 x_2 交互作用对栽深合格率 Y_1 和立苗率 Y_2 的影响极显著，其余因子的交互作用均不显著，故不进行响应面分析。因素 x_1 和 x_2 交互作用响应曲面如图 13 所示。

由图 13a 可知，固定栽植频率为 280 穴/min，当栽植缝锥角角度为 50°时，栽深合格率随弹簧刚度增大明显增大；当栽植缝锥角角度为 80°时，栽深合格率随弹簧刚度增大基本保持恒定较高值，结论与前文理论分析一致；当弹簧刚度为 2.1 N/mm 时，栽深合格率随栽植缝锥角角度增大而增大；当弹簧刚度为 2.9 N/mm 时，栽深合格率随栽植缝锥角角度增大基本保持恒定。

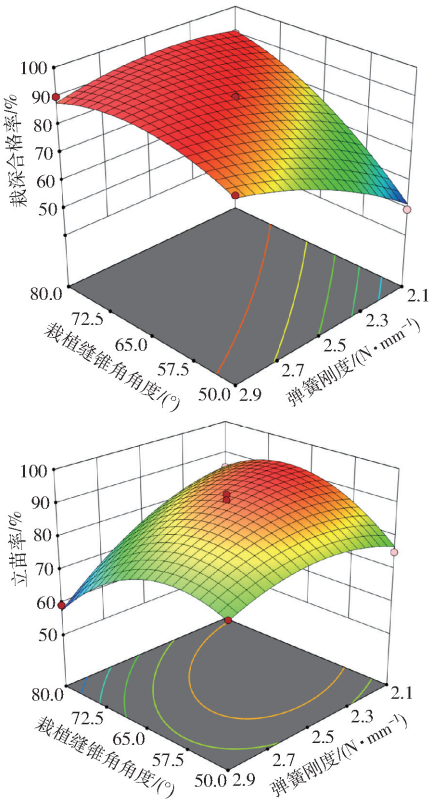


图 13　各因素交互作用的响应曲面（$x_3=0$）

Fig. 13　Response surfaces of interaction of various factors ($x_3=0$)

由图 13b 可知，固定栽植频率为 280 穴/min，当栽植缝锥角角度为 50°时，立苗率随弹簧刚度增大先小幅度增大后减小，是因为弹簧刚度较小时无法将苗块栽插到栽植缝底部，当弹簧刚度过大时又会使苗块运动速度过大，都会造成立苗率下降；当栽植缝锥角角度为 80°时，立苗率随弹簧刚度增大而明显减小，是因为推力增大导致苗块落地速度过大而翻倒；当弹簧刚度为 2.1 N/mm 时，立苗率随栽植缝锥角角度增大先增大后小幅度减小；当弹簧刚度为 2.9 N/mm 时，立苗率随栽植缝锥角角度增大先增大后明显减小。

综合分析可知，推苗机构推力不足于入缝阻力时，栽深过浅、苗块无法与缝底土壤充分接触，进而导致土壤对苗块稳固作用降低，立苗率低；弹簧刚度增加使推力增大，推力较高可保证栽插深度，但会增大苗块入土惯性速度，苗块不稳易翻倒。因此需根据苗块入缝阻力合理设计推苗机构推力，以保证栽

植深度,提升立苗率。

为保证较高栽深合格率和立苗率,采用多目标优化方法对目标函数进行优化求解。目标函数及约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \max Y_2 \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant x_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant x_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant x_3 \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{14}$$

经求解,最优参数组合为:栽植缝锥角角度 70.3°、栽植频率 283 穴/min、弹簧刚度 2.352 N/mm,此时栽深合格率 100%、立苗率 90.9%。根据模型优化结果并适当调整参数:栽植缝锥角角度 70°、栽植频率 280 穴/min、弹簧刚度 2.32 N/mm,对应弹簧相关参数见表 6。进行 3 次重复性试验,测得栽深合格率 99.56%,立苗率 91.55%,试验平均值与优化值间相对误差均小于 5%,移栽作业效果良好,如图 14 所示。

表 6 推苗弹簧参数

Tab.6 Parameters of pushing seedling spring

参数	数值
线圈直径/mm	1.8
弹簧中径/mm	15.5
有效圈数	12
自由高度/mm	72



图 14 台架试验效果

Fig.14 Bench test effect

3.5 田间试验验证

为了验证移栽机实际栽植效果,2024 年在江苏省常州市新北区西夏墅镇进行田间性能试验。试验地为稻茬田,平均留茬高度 23 cm,土壤平均含水率 25.48%。试验用油菜苗品种为宁杂 1838,苗龄 35 d 左右、平均苗高 95 mm、苗片含水率 64.65%。

配套动力为东方红 1204 国四型拖拉机,基于优化参数加工平畦切缝部件和推苗弹簧,移栽机前进速度为 0.6 m/s,分别在株距 12、14、16 cm 3 挡下进行作业。随机选取移栽的 3 行为取样区,在取样区间段 20 m 为测量段,结合油菜移栽工作要求和旱地栽植机械行业标准[30],选取栽深合格率、立苗率和栽植合格率为评价指标。田间试验如图 15 所示。



图 15 田间试验效果

Fig.15 Field test effect

试验结果如表 7 所示,栽深合格率为 97.76%,立苗率为 92.22%,栽植合格率为 91.84%,油菜毯状苗移栽机栽植性能较优化前有明显提升,作业质量指标高于农业行业标准要求。观察移栽后苗块与缝底接触情况,发现苗块底部均能与栽植缝底部较充分接触,苗块两侧也基本与栽植缝两侧相贴合,有助于立苗和秧苗生长。

表 7 田间试验结果

Tab.7 Field test results

序号	理论株距/cm	立苗率/%	栽深合格率/%	栽植合格率/%
1	12	93.52	98.75	92.73
2	14	92.66	97.51	92.15
3	16	90.49	97.02	90.65
平均值		92.22	97.76	91.84

4 结论

(1)提出了一种适用于黏重土壤的平畦切缝-推苗入缝栽插方式。通过栽植缝缝型分析与苗块入缝阻力力学试验,确定了栽植缝形状参数,得到栽植缝底部锥角是影响苗块入缝阻力关键因素,揭示了苗块入缝过程中土壤挤压力与摩擦阻力的动态变化规律。对推苗入缝过程进行了动力学分析,基于苗块入缝阻力得出了推苗关键因素取值范围,确定了影响栽插效果(栽插深度、立苗情况)的关键因素。

(2)采用二次正交组合试验方法,分析了栽植缝锥角、推苗弹簧刚度、栽植频率对栽插效果的影响,并得出参数优化组合为栽植缝锥角角度 70°、弹簧刚度 2.32 N/mm、栽植频率 280 穴/min,此时,栽深合格率为 99.56%、立苗率为 91.55%,移栽效果良好。

(3)田间性能试验结果表明,移栽机在前进速度 0.6 m/s、株距 12、14、16 cm 作业工况下,栽深合

格率为 97.76%，立苗率为 92.22%，栽植合格率为 91.84%，栽植性能较优化前明显提升，栽后苗块底部能够与栽植缝底部较充分接触，苗块两侧也基本与栽植缝两侧相贴合，有助于立苗和秧苗生长。

参 考 文 献

[1] 万星宇，廖庆喜，廖宜涛，等. 油菜全产业链机械化智能化关键技术装备研究现状及发展趋势[J]. 华中农业大学学报，2021，40(2)：24－44.
WAN Xingyu，LIAO Qingxi，LIAO Yitao，et al. Situation and prospect of key technology and equipment in mechanization and intelligentization of rapeseed whole industry chain[J]. Journal of Huazhong Agricultural University，2021，40(2)：24－44.（in Chinese）

[2] QIONG H，WEI H，YAN Y，et al. Rapeseed research and production in China [J]. The Crop Journal，2017，5(2)：127－135.

[3] 胡乔磊，袁佳诚，李心志，等. 油菜基质块苗移栽机双向递进式送苗装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2022，53(2)：106－115.
HU Qiaolei，YUAN Jiacheng，LI Xinzhi，et al. Design and experiment of two-way progressive seedling feeder for rape substrate transplanters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2022，53(2)：106－115.（in Chinese）

[4] 郑娟，黄凰，廖宜涛，等. 长江中游地区油菜生产全程机械化技术进展与建议[J]. 中国油料作物学报，2024，46(2)：245－259.
ZHENG Juan，HUANG Huang，LIAO Yitao，et al. Progress and suggestions on full mechanization of rapeseed production in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences，2024，46(2)：245－259.（in Chinese）

[5] 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）

[6] 张青松，齐涛，燕桓，等. 稻茬田油菜直播秸秆覆盖还田装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2025，56(1)：186－196.
ZHANG Qingsong，QI Tao，YAN Huan，et al. Design and experiment of rape direct seeding straw mulching returning device in rice stubble field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2025，56(1)：186－196.（in Chinese）

[7] 吴崇友，吴俊，张敏，等. 油菜毯状苗机械移栽技术研究[J]. 中国农机化学报，2016，37(12)：6－10.
WU Chongyou，WU Jun，ZHANG Min，et al. Research on machine transplanting techniques of blanket rapeseed[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2016，37(12)：6－10.（in Chinese）

[8] 吴俊，俞文轶，张敏，等. 2ZY 6 型油菜毯状苗移栽机设计与试验[J]. 农业机械学报，2020，51(12)：95－102，275.
WU Jun，YU Wenyi，ZHANG Min，et al. Design and test of 2ZY 6 rapeseed carpet seedling transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(12)：95－102，275.（in Chinese）

[9] 汤庆，吴崇友，吴俊，等. 油菜旋耕移栽联合作业机穴距电液比例控制系统研究[J]. 农业机械学报，2020，51(10)：61－68.
TANG Qing，WU Chongyou，WU Jun，et al. Electro-hydraulic proportional control system of hole distance for rape seedling rotary tillage combined transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51 (10)：61－68.（in Chinese）

[10] YIN D，WANG J，ZHANG S，et al. Optimization design and experiments of a rotary-extensile type flowerpot seedling transplanting mechanism[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng.，2019，12(6)：45－50.

[11] YAN W，ZHANG W，HU M，et al. Design and experiment of compound transplanter for sweet potato seedling belt [J]. Agriculture，2024，14(10)：1738.

[12] JIN X，CHENG Q，ZHAO B，et al. Design and test of 2ZYM－2 potted vegetable seedlings transplanting machine[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng.，2020，13(1)：101－110.

[13] 金永旺，胡建平，吕俊鹏，等. 蔬菜自动移栽机多叶片式鸭嘴栽植机构设计与试验[J]. 农业机械学报，2024，55(增刊1)：217－229.
JIN Yongwang，HU Jianping，LÜ Junpeng，et al. Design and experiment of shaft cell-type single line spiral caving device for mountain crop transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(Supp. 1)：217－229.（in Chinese）

[14] 王超，张贺，宋建农，等. 气动下压式高速取投苗装置与吊杯时空匹配关系研究[J]. 农业机械学报，2024，55(6)：133－142.
WANG Chao，ZHANG He，SONG Jiannong，et al. Limit of synchronous seedling reaching of pneumatic ejecting type high-speed transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(6)：133－142.（in Chinese）

[15] 蒋兰，吴崇友，汤庆，等. 油菜毯状苗移栽机栽植机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报，2025，56(4)：241－251.
JIANG Lan，WU Chongyou，TANG Qing，et al. Optimization design and experiment on planting mechanism of rapeseed

blanket seedling transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4): 241 - 251. (in Chinese)

[16] WEN Y, ZHANG J, TIAN J, et al. Design of a traction double-row fully automatic transplanter for vegetable plug seedlings [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 182: 106 - 107.

[17] 刘洋,毛罕平,王涛,等. 吊杯式移栽机构中番茄穴盘苗运动分析优化与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(5):143 - 151.
LIU Yang, MAO Hanping, WANG Tao, et al. Collision optimization and experiment of tomato plug seedling in basket-type transplanting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 143 - 151. (in Chinese)

[18] 穆桂脂,王千翼,郑德慧,等. 甘薯横向水平复式移栽机栽苗装置设计及试验[J]. 农业工程学报,2023,39(24):1 - 10.
MU Guizhi, WANG Qianyi, ZHENG Dehui, et al. Design and experiment of the seedling planting device for a sweet potato horizontal multiple transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(24): 1 - 10. (in Chinese)

[19] 曾繁地. 基于离散元穴盘苗-栽植器-土壤相互作用的仿真分析与试验研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.
ZENG Fandi. Simulation analysis and experimental study on the interaction between seedling and planter and soil based on discrete elements[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[20] 金鑫,姬江涛,刘卫想,等. 基于钵苗运动动力学模型的鸭嘴式移栽机结构优化[J]. 农业工程学报,2018,34(9):58 - 67.
JIN Xin, JI Jiangtao, LIU Weixiang, et al. Structural optimization of duckbilled transplanter based on dynamic model of pot seedling movement[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(9): 58 - 67. (in Chinese)

[21] 侯加林,张二鹏,张康博,等. 基于 DEM - MFBD 的辣椒移栽机取投苗装置设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2023, 54 (12): 46 - 57, 87.
HOU Jialin, ZHANG Erpeng, ZHANG Kangbo, et al. Optimization design and test of seedling picking and throwing device of plug seeding transplanter based on DEM - MFBD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54 (12): 46 - 57, 87. (in Chinese)

[22] 汤庆. 油菜毯状苗联合移栽机关键技术研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2022.
TANG Qing. Research on key technology of rape blanket seedling combined transplanter[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2022. (in Chinese)

[23] 史玉鹏,薛博,臧传江,等 . 山地作物移栽机井窖式单线螺旋成穴装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(增刊1):103 - 114.
SHI Yupeng, XUE Bo, ZANG Chuanjiang, et al. Design and experiment of shaft cell-type single line spiral caving device for mountain crop transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 1): 103 - 114. (in Chinese)

[24] QUAN W, WU M, DAI Z, et al. Design and testing of reverse-rotating soil-taking-type hole-forming device of pot seedling transplanting machine for rapeseed[J]. Agriculture, 2022, 12: 319.

[25] 吴俊,汤庆,袁文胜,等. 油菜毯状苗移栽机开沟镇压部件设计与参数优化[J]. 农业工程学报,2016, 32(21):46 - 53.
WU Jun, TANG Qing, YUAN Wensheng, et al. Design and parameter optimization of ditching and compacting parts of rapeseed carpet seedling transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(21): 46 - 53. (in Chinese)

[26] 薛康. 基于刚柔流耦合动力学的水稻大苗机插茎秆损伤机理研究[D]. 合肥:安徽农业大学, 2022.
XUE Kang. Study on damage mechanism of big rice seedling stalks by mechanical transplantation based on rigid-flexible-fluid coupling dynamics[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[27] YE B L, YI W M, YU G H, et al. Optimization design and test of rice plug seedling transplanting mechanism of planetary gear train with incomplete eccentric circular gear and non-circular gears[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(6): 43 - 55.

[28] 陈建能,周丽莎,王英,等. 步行式插秧机等径凸轮强制推秧装置反求设计与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 69 - 73.
CHEN Jianneng, ZHOU Lisha, WANG Ying, et al. Reverse design and experiment of walking-type rice transplanter with equal-diameter cam seedling-pushing mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 69 - 73. (in Chinese)

[29] 成大先. 机械设计手册(第六版)[M]. 北京:化学工业出版社,2017.

[30] 中华人民共和国农业农村部. 油菜毯状苗移栽机作业质量: NY/T 3887—2021[S]. 北京: 全国农业机械标准化技术委员会, 2021.