doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.04.022

油菜毯状苗移栽机栽植机构优化设计与试验

蒋　兰　吴崇友　汤　庆　吴　俊　关卓怀　刘赛赛

（农业农村部南京农业机械化研究所，南京 210014）

摘要：为探究油菜毯状苗移栽机非圆齿轮行星系栽植机构因前进速度提升，导致倒伏率升高的根本原因，对栽植机构运移苗、推苗到苗块落地的运动过程进行了分析，建立了栽植过程动力学模型，推导了苗块与秧针、推苗部件、土壤作用的运动受力方程和立苗平衡方程；分析了椭圆齿轮行星轮系栽植机构轨迹参数对苗块落地角度、角速度和立苗的影响；基于 Matlab GUI 编写了毯苗运动过程辅助分析软件，优化出一组能够满足油菜毯状苗栽植工作要求的轨迹参数（椭圆齿轮偏心率为 1.5、齿轮模数为 2.3 mm、齿数为 19、行星架初始安装角为 38°、栽植臂与行星架初始相位角为 42°、行星轮中心到秧针尖长度为 142 mm）；进行了栽植轨迹验证和对比台架试验。结果表明：在苗龄 35 d、苗高 80 mm 油菜毯状苗、栽植频率 220 穴/min 作业条件下，随着前进速度增加，倒伏率增加、栽植合格率降低；在小于该试验条件下理论计算的立苗临界前进速度 670 mm/s 时，当前进速度为 600 mm/s 时，栽植机构倒伏率为 9.67%（较优化前降低 68.81%），栽植合格率为 88.67%（较优化前提高 31.69%），苗块落地姿态好，满足油菜毯状苗的移栽要求，验证了理论模型正确性和轨迹参数优化合理性。该研究可为油菜毯状苗移栽立苗机理分析和栽植机构优化设计提供参考。

关键词：油菜移栽机；毯状苗；栽植机构；栽植轨迹；立苗；动力学分析

中图分类号：S223.9　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2025)04-0241-11　　**OSID**：

Optimization Design and Experiment on Planting Mechanism of Rapeseed Blanket Seedling Transplanter

JIANG Lan　WU Chongyou　TANG Qing　WU Jun　GUAN Zhuohuai　LIU Saisai

(*Nanjing Institute of Agricultural Mechanization*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Nanjing* 210014, *China*)

Abstract: In order to investigate the primary reason of increased lodging rate due to increased operating speed of planting mechanism of rapeseed blanket seedling transplanter, the motion process of seedling transfer, seedling pushing and seedling block contacting the soil was analyzed, and the kinematics model was established. The equations of motion and force of the rapeseed blanket seedling block during the planting process and the equilibrium equations of the seedling standing were derived. The design parameters of the planting trajectory on the landing angle of seedling block, the landed angular velocity of seedling block and seedling standing situation were analyzed. Based on Matlab GUI, a blanket seedling motion process auxiliary analysis software was written to optimize a set of institutional parameters that could satisfy the requirements of rapeseed blanket seedling planting, mainly including the eccentricity of elliptical gear of 1.5, the gear module of 2.3 mm, the tooth number of 19, the initial installation angle of planet carrier of 38°, the initial phase angle between the planting arm and the planet carrier of 42°, the length from the center of the planetary gear to the seedling needle tip of 142 mm. Trajectory verification and bench testing were carried out. The results showed that when transplanting rapeseed blanket seedlings with seedling age of 35 d and seedling height of 80 mm, and setting the planting frequency of 220 holes/min, with the increase of forward speed, the lodging rate was increased and the planting

收稿日期：2024-10-10　修回日期：2024-12-04

基金项目：国家重点研发计划项目（2023YFD2001001）、国家农业核心技术攻关项目（NK2022160302）、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（油菜（蔬菜）钵毯苗智能联合移栽机工程化攻关）

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

qualification rate was decreased. The blanket seedling lodging rate was increased significantly when the forward speed was increased from 600 mm/s to 700 mm/s, which was basically consistent with the theoretical calculation of critical forward speed result of 670 mm/s for seedlings standing. When the forward speed was 600 mm/s, the lodging rate of the planting mechanism was 9.67%, which was 68.81% lower than before the optimization, and the qualified rate was 88.67%, which was 31.69% higher than before the optimization. Under this condition, the seedling blocks fell to the ground with upright posture, which achieved the transplanting requirements of rapeseed blanket seedlings. The correctness of the theoretical model and the reasonableness of the optimization of the trajectory parameters were verified by experiments.

Key words: rapeseed transplanter; blanket seedling; planting mechanism; planting trajectory; seedling standing; kinematics analysis

0 引言

我国长江流域稻-油轮作地区,由于晚粳稻收获期越来越迟同时种植面积逐步扩大,大多数高产油菜品种不能满足直播生长期的要求,导致直播油菜产量至少下降 30%,因此需要育苗移栽[1-3]。油菜毯状苗机械移栽是一种适用于稻茬田等黏重土壤条件的新型旱地移栽方式[4-6]。其栽植机构采用回转式作业,将取苗-运送-栽苗 3 个动作集成于一个机构连贯完成,苗块全程受控,具有目前旱地移栽最高的栽植频率[7]。然而,在移栽过程中,栽植机构随机器运移和本身运动使受控苗块产生较大的运动速度,苗块落地后极易前倾翻倒,影响栽后油菜苗的直立和成活[8-10]。

目前通过研究栽植过程苗块运动来提升移栽机栽植效率和质量方面研究相对较少,研究对象为钵体苗,移栽机构主要为栽植频率较低的导苗管式和鸭嘴式,土壤条件为具有流动性的轻壤土或沙性土[11-14],通过对栽植过程的动力学分析提升栽植机构的作业效率和性能[15-17]。在土壤具有流动性的情况下,采用鸭嘴式等移栽机构通过回流土壤稳苗和固苗,但在稻茬田等黏重土壤条件下,无法通过土壤回流稳苗和固苗,因此,研究苗块自身的动力平衡,提高立苗率成为油菜毯状苗移栽的关键问题。

为提高油菜毯状苗移栽机高速作业时的立苗率,本文通过分析油菜毯状苗移栽机栽植过程中栽植机构、苗块和土壤互作下苗块的运动和姿态变化规律,建立油菜毯状苗栽植过程立苗平衡方程,分析非圆齿轮行星轮系栽植轨迹参数变化对苗块姿态和运动速度的影响,由计算机辅助分析进行机构参数优化,得出满足油菜毯状苗栽植工作要求的机构参数,并进行台架试验验证,以提升油菜毯状苗移栽机栽植机构栽植性能,为栽植机构优化设计提供参考。

1 整机结构与工作原理

1.1 总体结构

油菜毯状苗移栽机整体结构如图 1 所示,核心部件包括供苗装置、切缝装置、栽植机构、覆土镇压装置。移栽行数 6 行、行距 30 cm、株距 12 ~ 22 cm,可一次性完成破茬切缝开沟、送苗、自动取苗-运送-栽苗、覆土镇压等作业环节。

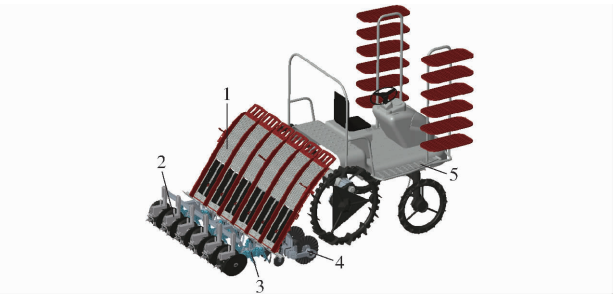


图 1 油菜毯状苗移栽机整机结构图

Fig. 1 Overall machine structure diagram of rapeseed blanket seedling transplanter

1. 供苗装置 2. 覆土镇压装置 3. 栽植机构 4. 切缝装置 5. 乘坐式底盘

1.2 行星轮系非圆齿轮栽植机构工作原理

油菜毯状苗移栽机栽植机构采用行星轮系非圆齿轮传动方式,主要由非圆齿轮组、行星架、栽植臂、秧针、推苗部件组成。其工作原理如图 2 所示,作业时,行星架高速旋转带动中间轮和行星轮作回转运动,栽植臂绕行星轮作变速摆动运动,带动秧针从秧箱中切下一定量苗块并运送到底部,推苗杆弹出将苗块与秧针分离并栽入苗缝内。推苗后秧针快速向上运动回到秧箱进行下一次取苗。

2 栽植毯状苗块运动过程分析与动力学建模

2.1 栽植毯状苗块运动过程分析

高速移栽作业时,苗块与栽植臂、土壤之间存在复杂的相对运动关系。栽植机构运移和推苗作用使苗块产生较大的速度,苗块与土壤接触后其运动和

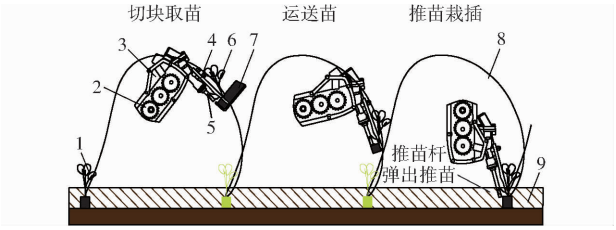


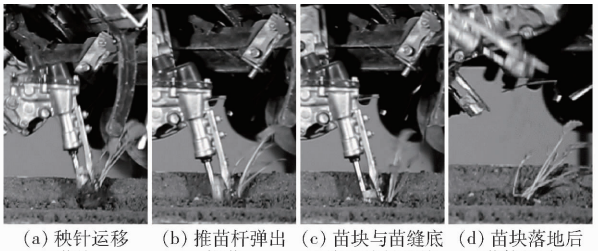
图 2　栽植机构工作原理图

Fig. 2　Schematic of planting device working principle

1. 苗块　2. 非圆齿轮组　3. 行星架　4. 秧针　5. 推苗杆　6. 油菜苗　7. 秧箱　8. 栽植动轨迹　9. 苗缝

姿态发生明显变化，对栽后苗块的直立情况影响很大[18-19]。为真实有效描述油菜毯状苗的栽植过程，通过高速摄像对苗龄 35 d、苗高 80 ~ 100 mm、基质块含水率约 70% 的油菜毯状苗进行栽植试验。分别对移栽机前进速度为 350 mm/s(低速)和 700 mm/s(高速)，株距 150 mm 毯状苗块的整个运动过程进行分析。

根据苗块与栽植臂和土壤的相对运动情况将苗块的运动分为 4 个阶段：①运移苗阶段(图 3a)：秧针携带苗块运动，此过程中苗块与栽植臂相对静止。②推苗阶段(图 3b)：推苗杆弹出推动苗块作平面运动。③苗块脱离秧针并与土壤面接触阶段(图 3c)：推苗杆完全弹出后，苗块与秧针分离，同时与地面的土壤接触碰撞。④苗块落地后苗体摆动阶段(图 3d)：苗块与土壤面碰撞结束时，质心与接触点存在速度差，作绕接触点定轴转动。



(a) 秧针运移苗块　(b) 推苗杆弹出推苗　(c) 苗块与苗缝底土壤面接触碰撞　(d) 苗块落地后苗体摆动

图 3　栽植油菜毯状苗块运动过程

Fig. 3　Movement process of planting rapeseed blanket seedling blocks

通过试验分析可知，栽植机构在不同作业速度下，苗块脱离秧针后运动情况发生很大变化，落地后会出现不同的运动姿态。当作业速度过快时，栽插的秧苗朝机具前进方向倾斜翻倒。

2.2　秧针运移苗块平面运动分析

非圆齿轮行星轮系栽植机构结构简图如图 4 所示，B 为行星轮转动中心，F 为秧针与栽植臂连接点，R 为太阳轮转动中心到行星轮转动中心长度，S 为行星轮转动中心到秧针尖点长度，φ_h 为行星架初始安装角，φ_a 为栽植臂初始相位角，定义机具前进方向水平向右，以太阳轮转动中心 A 为坐标原点，建立直角坐标系 XOY，其中，点 E 为秧针尖点，该点速度方程为

$$\begin{cases} v_{Ex} = R\omega\sin(\varphi_h - \varphi_1) + \\ \qquad S\omega i\sin(\varphi_h - \varphi_a - \varphi_2) + v \\ v_{Ey} = R\omega\cos(\varphi_h - \varphi_1) - \\ \qquad S\omega i\cos(\varphi_h - \varphi_a - \varphi_2) \end{cases} \tag{1}$$

式中　φ_1——某一时刻 AB 转过的角位移，rad

φ_2——某一时刻 BE 转过的角位移，rad

ω——行星架角速度，rad/s

v——移栽机前进速度，mm/s

i——太阳轮与行星轮间传动比

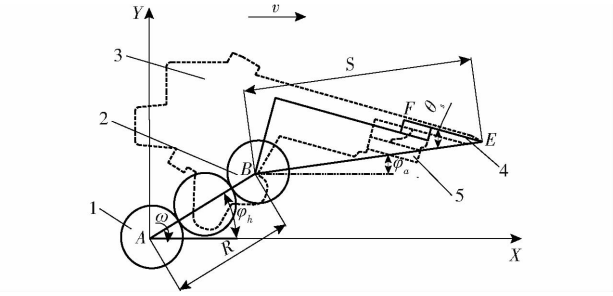


图 4　非圆齿轮行星轮系栽植机构结构简图

Fig. 4　Structural sketch of non-circular gear planetary wheel system planting device

1. 太阳轮　2. 行星轮　3. 栽植臂　4. 秧针　5. 推苗杆

定义 θ_t 为推苗杆与 X 轴负向间夹角，可表示为

$$\theta_t = \varphi_h - \varphi_a - \varphi_2 + \theta_s \tag{2}$$

式中　θ_s——BE 与 EF 夹角，rad

秧针切下的毯块上带有 1 ~ 2 株油菜苗，运移时油菜苗贴合于秧针外侧。运移过程中苗块速度分析简图如图 5(图中 C 为苗块质心点)所示，苗块作平面运动，苗块与秧针相对静止，根据栽植臂与苗块的相对位置关系求解运移过程苗块运动方程。

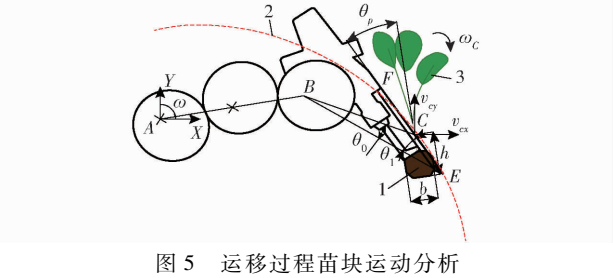


图 5　运移过程苗块运动分析

Fig. 5　Movement analysis of seedling block during transporting

1. 毯块　2. 栽植动轨迹　3. 油菜苗

苗块与栽植臂具有相同角速度，即

$$\omega_C = \dot{\varphi}_2 \tag{3}$$

式中　ω_C——运移过程中苗块角速度，rad/s

$\dot{\varphi}_2$——运移过程中栽植臂角速度，rad/s

根据栽植臂的运动可得苗块质心点 C 速度为

$$\begin{cases} v_{Cx} = R\omega\sin(\varphi_h - \varphi_1) + \\ \quad l_{BC}\omega i\sin(\varphi_h - \varphi_a - \varphi_2 + \theta_0) + v \\ v_{Cy} = R\omega\cos(\varphi_h - \varphi_1) - \\ \quad l_{BC}\omega i\cos(\varphi_h - \varphi_a - \varphi_2 + \theta_0) \end{cases} \tag{4}$$

式中 l_{BC}——质心 C 到 B 长度，mm

θ_0——BC 与 BE 夹角，rad

根据苗块在秧针上的位置，可求解出式(4)中 BC 长度、BC 与 BE 之间夹角，即

$$\begin{cases} l_{BC} = \sqrt{S^2 + l_{CE}^2 - 2Sl_{CE}\cos\theta_1} \\ \theta_0 = \arccos\dfrac{l_{BC}^2 + S^2 - l_{CE}^2}{2Sl_{BC}} \end{cases} \tag{5}$$

其中

$$\begin{cases} l_{CE} = \sqrt{h^2 + \dfrac{b^2}{4}} \\ \theta_1 = \arctan\dfrac{2h}{b} + \theta_s + \theta_p - \dfrac{\pi}{2} \end{cases} \tag{6}$$

式中 l_{BC}——点 B 到点 C 长度，mm

l_{CE}——质心 C 到点 E 长度，mm

θ_1——CE 与 BE 夹角，rad

h——苗块质心高度，mm

b——苗块底部宽度，mm

θ_p——秧苗茎秆偏离秧针角度，即切取苗完成时刻秧针与油菜苗之间夹角，rad

2.3 推苗过程苗块运动模型建立

栽插动作通过栽植臂中的推苗机构实现，为了求解推苗杆对苗块的推力，首先分析推苗杆运动和受力，如图 6 所示。

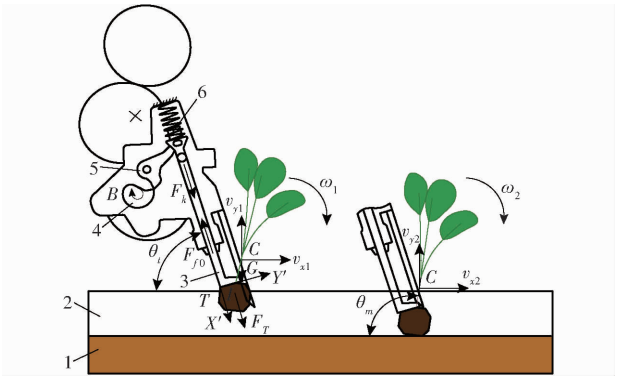


图 6 推苗过程运动受力分析

Fig. 6 Force and movement analysis during pushing seedlings

1. 苗缝底部土壤 2. 苗缝 3. 推苗杆 4. 凸轮 5. 拨叉 6. 推苗弹簧

推苗开始时，推苗机构中的凸轮转动到回程段，对拨叉的作用消失，推苗杆主要受到弹簧力和套筒的摩擦阻力，作直线运动。以推苗开始时刻推苗杆上最前端点 T 为原点，建立沿推苗杆运动方向的相对坐标系 $X'TY'$，利用牛顿定律得到点 T 运动微分方程

$$m_2\ddot{x}_t + k'x_t = k's_0 - F_{f0} \tag{7}$$

式中 m_2——推苗杆质量，kg

$\ddot{x}_t$——相对坐标系 $X'TY'$ 下推苗杆沿 X 方向加速度，mm/s^2

x_t——相对坐标系 $X'TY'$ 下推苗杆沿 X 方向位移，mm

k'——推苗弹簧刚度，取 2 N/mm

s_0——推苗前弹簧压缩量，根据栽植臂结构取 31.5 mm

F_{f0}——套筒对推苗杆摩擦阻力，通过力学试验机测得，取 32 N

式(7)为一微分方程，初始条件为 $x_{t0} = 0$，$\dot{x}_{t0} = 0$，油菜毯状苗移栽机设计的推苗杆最大弹出行程为 20 mm，因此以 $x_{t1} = 20$ mm 作为结束条件。在 Matlab 中采用 Runge - Kutta 方法求解该微分方程，求得推苗杆在推苗过程中每一时刻位移、速度和加速度以及推苗时间。

推苗过程中推苗杆与底部基质块接触，作用点处速度相同，根据动量定理，可计算推苗杆对苗块的推力 F_T，计算式为

$$F_T = m_1\frac{\mathrm{d}\dot{x}_t}{\mathrm{d}t} = m_1\ddot{x}_t \tag{8}$$

式中 $\dot{x}_t$——相对坐标系 $X'TY'$ 下推苗杆沿 X 方向速度，mm/s

m_1——苗块质量，kg

推苗过程苗块受力分析如图 6 所示。在高速运移作用下，推苗时的苗块具有初速度和角速度，苗块主要受到重力和推苗杆的推力，推力作用在底部土块上，推苗过程中苗块作相对秧针的移动和转动运动。以苗块质心为原点，建立直角坐标系，推苗过程中苗块运动微分方程为

$$\begin{cases} m_1\ddot{x}_c = F_T\sin\theta_p \\ m_1\ddot{y}_c = F_T\cos\theta_p + m_1 g \\ J_C\ddot{\theta}_c = F_T\sin\theta_p l_{CT} \end{cases} \tag{9}$$

式中 $\ddot{x}_c$——苗块质心 X 方向加速度，mm/s^2

$\ddot{y}_c$——苗块质心 Y 方向加速度，mm/s^2

$\ddot{\theta}_c$——苗块角加速度，rad/s^2

J_C——苗块绕其质心转动惯量，kg·mm^2

l_{CT}——质心 C 到推力作用点 T 长度，mm

g——重力加速度，m/s^2

式(9)中，初始条件为运移苗块至推苗开始时刻(设为 t_0)苗块质心速度和角速度，即

$$\begin{cases} v_{x1} = \dot{x}_{c0} = v_{Cx}(t_0) \\ v_{y1} = \dot{y}_{c0} = v_{Cy}(t_0) \\ \omega_1 = \dot{\theta}_{c0} = \omega_C(t_0) \end{cases} \tag{10}$$

式中　$\dot{x}_{c0}$——苗块质心 X 方向初始速度，mm/s

$\dot{y}_{c0}$——苗块质心 Y 方向初始速度，mm/s

$\dot{\theta}_{c0}$——苗块初始角速度，rad/s

将式(8)求解的 F_T 代入式(9)，通过积分可得到推苗过程中苗块质心速度 $\dot{x}_c$、$\dot{y}_c$、角速度 $\dot{\theta}_c$ 和角位移 θ_c。

当凸轮再次与拨叉接触的瞬间，推苗杆速度立即减小为 0，苗块与推苗杆和秧针分离。由于该减速过程速度变化极快，忽略该过程的时间和对苗块的作用，则苗块与秧针分离时的速度为推苗杆最大弹出行程时的速度。假设苗块与秧针分离后立即与地面接触，则苗块接触地面时质心速度和角速度为

$$\begin{cases} v_{x2} = \dot{x}_c(t) \\ v_{y2} = \dot{y}_c(t) \\ \omega_2 = \dot{\theta}_c(t) \end{cases} \tag{11}$$

式中　t——推苗时间，s

定义苗块落地角 θ_m 为苗块接触地面时茎秆与水平线之间夹角，即

$$\theta_m = \theta_t + \theta_p + \theta_c(t) \tag{12}$$

式中　$\theta_c(t)$——推苗过程苗块变化角度，rad

2.4　苗块与土壤接触过程力学模型建立

秧针切下的毯块底部边缘会散落少量基质颗粒，具有底部窄、上部宽的特点，因此进行土壤接触分析时，将毯块底部近似为梯形[20]。如图 7 所示，接触碰撞过程中，苗块受到土壤面的摩擦力和支持力，使苗块与地面接触部位的速度迅速减小，由于苗块质心没有与受力点重合，因此角速度会发生变化，根据冲量定理及冲量矩定理，碰撞前后苗块运动可表示为

$$\begin{cases} m_1 v_{x3} - m_1 v_{x2} = \sum I_x \\ m_1 v_{y3} - m_1 v_{y2} = \sum I_y \\ J_C \omega_3 - J_C \omega_2 = l_x \sum I_y - l_y \sum I_x \end{cases} \tag{13}$$

式中　v_{x3}——碰撞后苗块质心水平速度，mm/s

v_{y3}——碰撞后苗块质心竖直速度，mm/s

ω_3——碰撞后苗块角速度，rad/s

l_x——点 C 与点 P 之间水平距离，mm

l_y——点 C 与点 P 之间竖直距离，mm

I_x——水平方向冲量，N·s

I_y——竖直方向冲量，N·s

由于苗块与土壤碰撞时为面接触，为了便于计算，将土壤对苗块的分布作用力简化为作用点变化的集中力，定义 P 为苗块与土壤作用力点，苗块姿态直立时，作用点位于苗块底部中心点 M，苗块姿态越倾斜，点 P 越靠近点 Q。定义点 Q 为苗块与土壤面的接触点，以点 Q 为原点建立坐标系 XQY，将点 P 坐标定义为

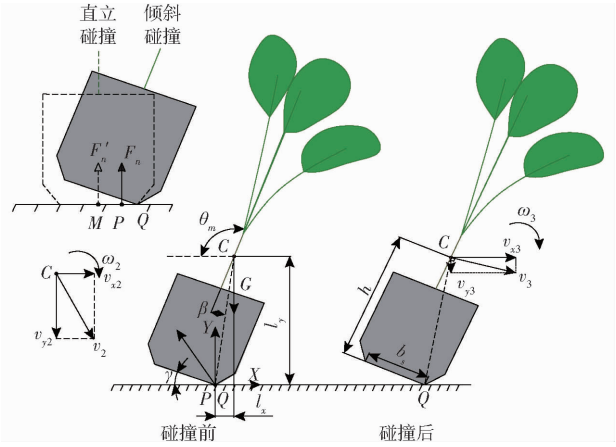


图 7　苗块与土壤碰撞过程受力及运动分析

Fig. 7　Force and movement analysis of collision process between seedling block and soil

$$P(x,y) = (x_P, 0) \tag{14}$$

苗块质心点 C 位置与质心高度和苗块落地倾斜角度有关，定义 γ 为苗块与地面碰撞时苗块底面与土壤面夹角，$\gamma = \theta_m - \pi/2$；$b_s$ 为苗块底部宽度。在坐标系 XQY 中，苗块质心点 C 坐标表达式为

$$C(x,y) = (l_{CQ}\sin(\beta-\gamma), l_{CQ}\cos(\beta-\gamma)) \tag{15}$$

其中

$$\begin{cases} l_{CQ} = \sqrt{\dfrac{b_s^2}{4} + h^2} \\ \beta = \arctan\dfrac{b_s}{2h} \end{cases} \tag{16}$$

式中　l_{CQ}——苗块质心点 C 到点 Q 长度，mm

β——CQ 与秧苗茎秆夹角，rad

综合式(14)～(16)得到苗块质心点 C 与作用力点 P 之间的水平距离 l_x 和竖直距离 l_y 为

$$\begin{cases} l_x = x_C - x_P \\ l_y = y_C \end{cases} \tag{17}$$

由于油菜移栽的土壤为高含水量黏重土，通过高速摄影试验观察到苗块与土壤面接触后粘滞在一起，因此不考虑碰撞过程中的滑动过程[21]。碰撞结束时，苗块绕点 Q 转动，则有 $v_{Q3} = 0$，此时苗块运动速度为

$$\begin{cases} v_3 = \omega_3 l_{CQ} \\ v_{x3} = v_3\cos(\beta-\gamma) \\ v_{y3} = v_3\sin(\beta-\gamma) \end{cases} \tag{18}$$

式中　v_3——碰撞后苗块质心速度，mm/s

结合式(13)～(18)得到苗块与土壤面碰撞结

束后速度、角速度为

$$\begin{cases} v_{x3} = \omega_3 l_{CQ}\cos(\beta-\gamma) \\ v_{y3} = \omega_3 l_{CQ}\sin(\beta-\gamma) \\ \omega_3 = \dfrac{ev_{x2}l_y - ev_{y2}l_x + \omega_2}{el_{CQ}l_y\cos(\beta-\gamma) - el_{CQ}l_x\sin(\beta-\gamma) + 1} \end{cases} \tag{19}$$

其中

$$e = m_1/J_C \tag{20}$$

2.5 立苗平衡方程建立

苗块与土壤面碰撞结束后，绕接触点 Q 作定轴转动，根据达朗贝尔原理，该过程的惯性力系可以简化成一个作用在质心 C 上的惯性力 F_I 和一个惯性力偶矩 M_I。由于苗块落地后的姿态和速度不同，会出现两种运动情况。

如图 8a 所示，当苗块落地后向倾斜方向运动时，定义 F_{In} 与 y 轴夹角为 λ，$\lambda = \beta - \gamma$，该过程苗块受力情况为

$$\begin{cases} \sum F_{x1} = F_{It}\cos\lambda - F_{In}\sin\lambda + F_f = 0 \\ \sum F_{y1} = F_{It}\sin\lambda + F_{In}\cos\lambda + F_n - G = 0 \\ M_{I1} = J_C\ddot{\gamma}_1 \end{cases} \tag{21}$$

式中 F_{x1}——苗块向倾斜方向运动时沿 X 轴方向受力，N

F_{y1}——苗块向倾斜方向运动时沿 Y 轴方向受力，N

F_{It}——F_I 在切线方向上分量，N

F_{In}——F_I 在法线方向上分量，N

F_f——地面土壤对苗块摩擦力，N

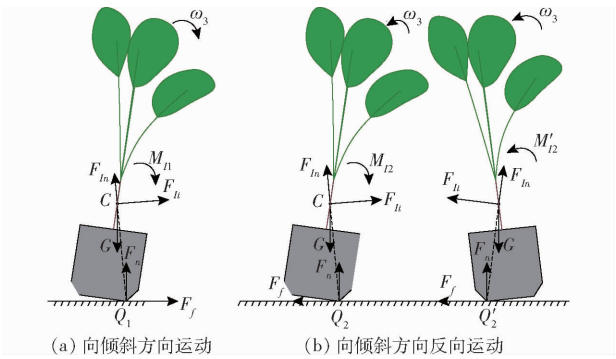
F_n——地面土壤对苗块支持力，N

G——苗块重力，N

M_{I1}——苗块向倾斜方向运动时惯性力偶矩，N·mm

$\ddot{\gamma}_1$——苗块向倾斜方向运动时角加速度，rad/s^2

对于 F_I，其在苗块质心加速度切线和法线方向上的分量分别为



(a) 向倾斜方向运动 (b) 向倾斜方向反向运动

图 8 苗块落地后运动分析

Fig. 8 Movement analysis of seedling blocks after landing

$$\begin{cases} F_{It} = m_1 a_{Ct} = m_1\ddot{\gamma}l_{CQ} \\ F_{In} = m_1 a_{Cn} = m_1\dot{\gamma}^2 l_{CQ} \end{cases} \tag{22}$$

式中 a_{Ct}——苗块质心切向加速度，m/s^2

a_{Cn}——苗块质心法向加速度，m/s^2

如图 8b 所示，当苗块落地后向倾斜方向反向运动时，苗块逐渐直立，该过程苗块受力情况为

$$\begin{cases} \sum F_{x2} = F_{It}\cos\lambda - F_{In}\sin\lambda - F_s = 0 \\ \sum F_{y2} = F_{It}\sin\lambda + F_{In}\cos\lambda + F_n - G = 0 \\ M_{I2} = J_C\ddot{\gamma}_2 \end{cases} \tag{23}$$

式中 F_{x2}——苗块向倾斜方向反向运动时沿 X 轴方向受力，N

F_{y2}——苗块向倾斜方向反向运动时沿 Y 轴方向受力，N

M_{I2}——苗块向倾斜方向反向运动时惯性力偶矩，N·mm

$\ddot{\gamma}_2$——苗块向倾斜方向反向运动时角加速度，rad/s^2

当苗块运动到直立状态时，如仍具有角速度，则会改变转动中心，绕点 Q' 继续转动，其受力为

$$\begin{cases} \sum F'_{x2} = F_{In}\sin\lambda - F_{It}\cos\lambda - F_s = 0 \\ \sum F'_{y2} = F_{It}\sin\lambda + F_{In}\cos\lambda + F_n - G = 0 \\ M'_{I2} = J_C\ddot{\gamma}'_2 \end{cases} \tag{24}$$

式中 F'_{x2}——苗块向倾斜方向反向运动第 2 阶段沿 X 轴方向受力，N

F'_{y2}——苗块向倾斜方向反向运动第 2 阶段沿 Y 轴方向受力，N

M'_{I2}——苗块向倾斜方向反向运动第 2 阶段惯性力偶矩，N·mm

为了判断苗块是否会出现翻倒，对苗块转动中心点 Q 求矩，为方便计算，设顺时针为正。在图 8a 的运动情况中，判断苗块发生翻倒的平衡条件为：作用于苗块上的外力对点 Q 的合力矩等于 0，即

$$\begin{aligned} \sum M_{Q1} = {} & M_{I1} + F_{It}l_{CQ1} - Gl_{CQ1}\sin(\beta-\gamma_1) = \\ & -m_1 g\sqrt{h^2 + \frac{b_s^2}{4}}\sin(\beta-\gamma_1) + \\ & \left(J_C - m_1h^2 + m_1\frac{b_s^2}{4}\right)\ddot{\gamma}_1 = 0 \end{aligned} \tag{25}$$

同理，苗块为图 8b 的运动情况时，判断苗块发生翻倒的平衡方程为

$$\begin{cases} \sum M_{Q2} = \left(J_C + m_1 h^2 + m_1 \dfrac{b_s^2}{4}\right)\ddot{\gamma}_2 - \\ \qquad m_1 g \sqrt{h^2 + \dfrac{b_s^2}{4}} \sin(\beta - \gamma_2) = 0 \\ \sum M'_{Q2} = \left(J_C + m_1 h^2 + m_1 \dfrac{b_s^2}{4}\right)\ddot{\gamma}'_2 + \\ \qquad m_1 g \sqrt{h^2 + \dfrac{b_s^2}{4}} \sin(\beta - \gamma'_2) = 0 \end{cases} \tag{26}$$

在第 1 种运动情况下(图 8a),为使苗块不发生翻倒,要求合力矩 $\sum M_{Q1} \leqslant 0$;第 2 种运动情况时(图 8b),苗块转动到直立状态前,合力矩 $\sum M_{Q2} \leqslant 0$,然后判断苗块在回正过程中角速度是否变为 0,如果苗块直立时仍具有角速度,则进一步要求 $\sum M'_{Q2} \geqslant 0$,则苗块不会翻倒。当给定一组参数时,可求解出运移、推苗、接触土壤各阶段苗块的姿态、速度和角速度,通过对式(21)~(24)的迭代计算可得到苗块落地后转动过程中的 $\ddot{\gamma}$ 及 $\dot{\gamma}$,进一步将其代入式(25)、(26)计算出 $\sum M_Q$,以判断立苗情况。

由式(25)、(26)可知,苗块翻倒平衡方程是关于 m_1、J_C、h、b_s、γ、$\ddot{\gamma}$、β 的函数,可得影响油菜毯状苗栽植过程苗块直立的主要因素包括苗块质量、绕质心转动惯量、质心高度、底部宽度、落地时角度和角速度。苗块落地时角度和速度由栽植机构运移和推苗过程决定,通过式(1)~(13)可知,其主要影响因素为机具前进速度、栽植机构运动轨迹和转速、推苗角度、推苗弹簧刚度。

3　栽植油菜毯状苗块运动过程编程与立苗分析

3.1　油菜毯状苗块运动过程辅助分析程序

基于 Matlab 平台编写油菜毯状苗栽植苗块运动过程辅助分析程序。通过人机对话,用户可以改变各参数数值,包括苗块质量、转动惯量、质心高度、苗块底部宽度、机具前进速度、栽植机构转速、推苗弹簧刚度、非圆齿轮系栽植轨迹设计参数,根据软件的输出可生成运移过程苗块角度、速度和角速度曲线和推苗过程苗块速度曲线、苗块落地角和角速度曲线、立苗平衡方程曲线,同时显示动画仿真及栽植轨迹,程序界面如图 9 所示。

3.2　栽植轨迹参数对立苗的影响

根据农艺要求,选用油菜品种宁杂 1818、苗龄 35 d、苗高 80 mm、苗毯厚度 22 mm、切块尺寸 23 mm × 18 mm、含水率 70% 的油菜毯状苗,测量 20 株生长状态良好油菜秧苗的形态特征参数,并取其平均值,

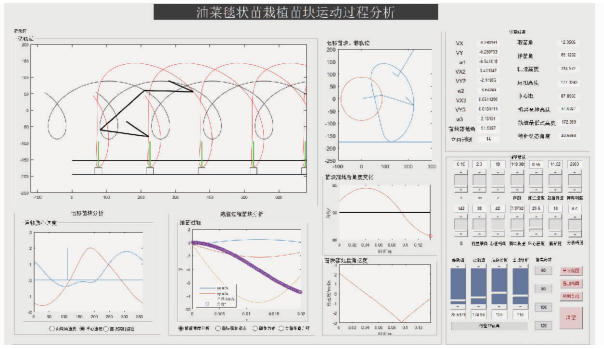


图 9　油菜毯状苗栽植苗块运动过程分析软件界面

Fig. 9　Analysis interface of motor process of blanket seedling

经测量秧苗根颈长 62 mm、根颈直径 2.1 mm、叶片长 36 mm 和宽 22 mm、秧苗质量 1.26 g、单次切块苗毯质量 7.38 g,构建油菜毯状苗模型,并通过三维软件计算出油菜毯状苗模型的质心高度为 23.5 mm,绕质心的转动惯量为 5.85×10^{-6} kg·m^2。

以椭圆齿轮为对象,优化设计适用于油菜毯状苗的栽植轨迹,对椭圆齿轮行星系栽植机构栽植轨迹有显著影响的参数有:椭圆齿轮偏心率 k、椭圆齿轮模数 m、椭圆齿轮齿数 z、行星轮中心到秧针尖长度 S、行星架初始安装角 φ_h、栽植臂与行星架初始相位角 φ_a[22]。结合油菜毯状苗外形特征及实际作业工况,初选 1 组轨迹参数 $k = 0.155$、$m = 2.2$ mm、$z = 19$、$S = 150$ mm、$\varphi_h = 36°$、$\varphi_a = 46°$,油菜移栽株距为 120~200 mm,设定株距 H 为 150 mm,机具前进速度为 550 mm/s(中速)条件下,综合分析变量参数对栽植轨迹、苗块姿态、运动和立苗的影响趋势。在满足栽植机构轨迹和姿态要求的基础上,以苗块落地姿态直立(即落地角接近 90°)、落地后角速度小、满足立苗平衡方程判断条件为目标,进一步优选设计参数,采用人机交互逐步调节,使栽植轨迹达到作业要求[23-24]。

3.2.1　椭圆齿轮偏心率

由图 10a 可知,k 增大使苗块落地角速度先降低后升高,同时使苗块落地角度增加,苗块落地姿态越倾斜,k 过大时,苗块过度前倾且具有较大角速度而极易倒伏;根据 k 对栽植轨迹的影响可知,随着 k 增加,环扣形状变尖,环扣最低点向后移动,使推苗点后置,回程秧针更易碰倒已栽秧苗[25]。由于 k 影响的参数众多,因此是需要优先考虑的对象,且可以初步分析出移栽油菜适合较小椭圆齿轮偏心率的栽植轨迹。

3.2.2　齿轮模数和齿数

由图 10b、10c 可知,模数 m、齿数 z 与苗块落地角和落地角速度的关系相类似,m、z 对苗块落地的角度变化影响很小,但对苗块落地后的角速度

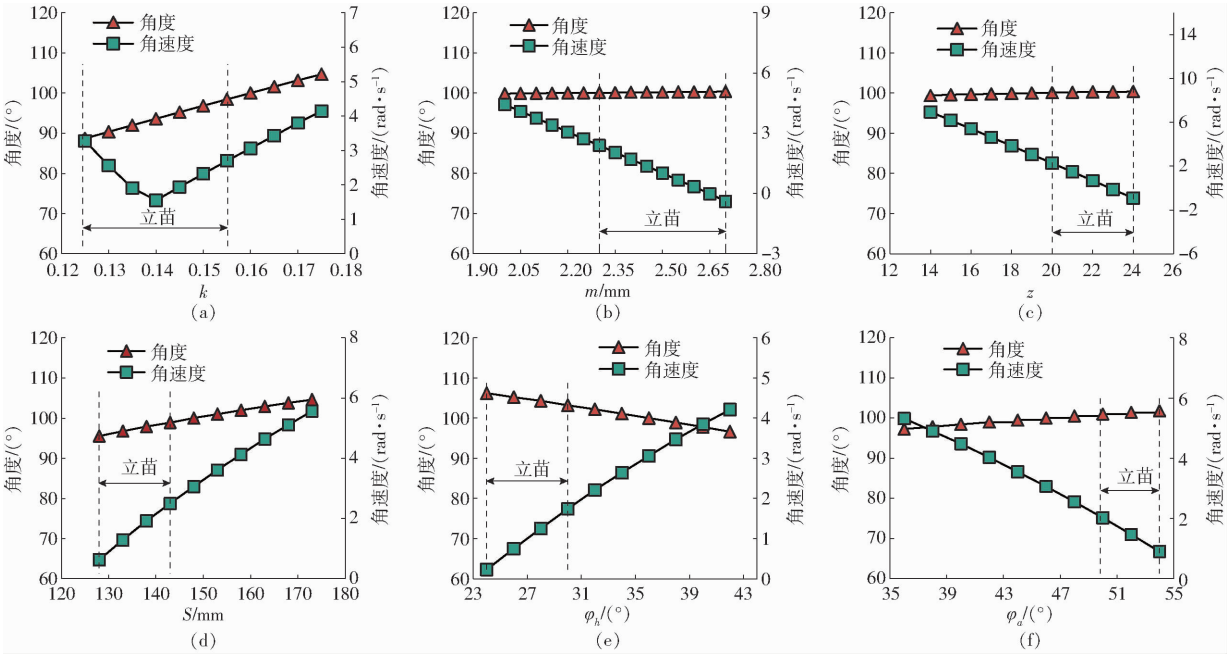


图 10 关键参数 k、m、z、S、φ_h、φ_a改变对苗块落地后运动参数的影响

Fig. 10 Influence of k, m, z, S, φ_h and φ_a on motion parameters of landed seedling block

影响较大，分析式(19)可知，m、z增加使运移苗水平速度v_{x2}减小，使苗块落地后角速度变小，有利于立苗；但增加m、z时，栽植轨迹整体放大，齿轮中心距增加，行星架尺寸变大[25]。因此在满足行星架设计尺寸要求情况下应尽可能增大模数和齿轮。

3.2.3 行星轮中心点到秧针尖点长度

行星轮中心点B到秧针尖点E长度S对苗块运动与姿态的影响如图10d所示，减小S使苗块落地角度变小、苗块落地后角速度变小，有利于栽植苗块直立。

3.2.4 行星架初始安装角和栽植臂与行星架初始相位角

行星架初始安装角φ_h、栽植臂与行星架初始相位角φ_a和苗块落地角、落地后角速度的关系如图10e、10f所示。φ_h与φ_a均会使轨迹曲线整体转动[25]，对苗块落地角和角速度均具有显著影响。减小φ_h或增加φ_a时，推苗角和取苗角均增大，使苗块落地角变大，苗块落地后角速度变小。

3.3 参数优选

通过以上分析，得到各变量参数对栽植轨迹曲线和苗块运动姿态的影响趋势。图11为栽植机构工作示意图，图中θ_q为取苗角，θ_t为推苗角，H为株距，H_1为动轨迹环扣高度，H_2为轨迹高度，H_3为行星架壳体最低点离地高度。为了使栽植机构能够满足较高直立度要求，保证油菜毯状苗的栽植质量，在确定栽植机构参数时应满足以下优化目标：①为保证高速栽插作业下的立苗率，需苗块落地时姿态尽可能直立，需保证推苗角θ_t为50°~75°，与土壤接触后的角速度尽可能小，且满足立苗平衡方程的立苗判断条件。②为避免取苗造成钵苗损伤，保证切块完整，需保证取苗角θ_q为5°~15°。③为避免秧针回程时碰倒已栽秧苗，栽植动轨迹回程距离已栽秧苗越远越好，根据油菜毯状苗形态，动轨迹环扣高度H_1不小于80 mm。④为防止秧针拖苗、压苗，轨迹高度H_2应大于240 mm。⑤为避免行星架与地面障碍物接触造成损坏，行星架外壳回转最低点距离地面达到一定高度H_3。

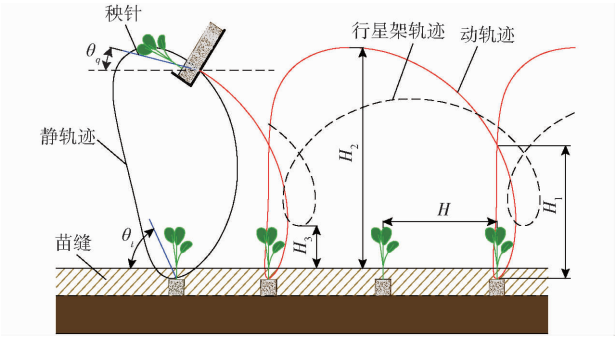


图 11 栽植机构工作示意图

Fig. 11 Schematic of planting device

根据优化目标，通过人机交互方式，最终得到一组较优参数：k = 0.15、m = 2.3 mm、z = 19、S = 142 mm、φ_h = 38°、φ_a = 42°，目标优化结果如表1所示，能满足提出的栽植机构优化目标要求。

将椭圆齿轮行星轮系栽植机构轨迹设计参数与作业参数代入式(1)~(26)，计算出苗块落地角度约为92°；在苗高80 mm、栽植频率220穴/min、株距120~200 mm移栽条件下，能够立苗的最高前进速

表 1　目标优化结果

Tab. 1　Targeted optimization result

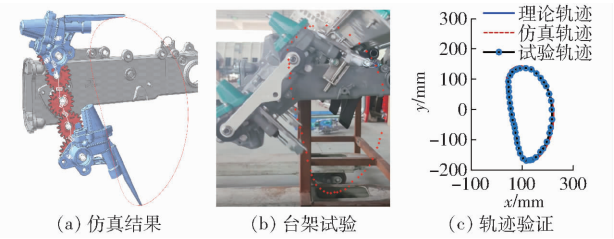
参数	数值	参数	数值
取苗角/(°)	12.9	中心距/mm	87.9
推苗角/(°)	65.1	轨迹高度/mm	315
动轨迹环扣高度/mm	177	行星架壳体动轨迹最低点离地高度/mm	51

度为 670 mm/s，落地姿态较好，落地后角速度小，栽后能够立苗。

4　轨迹验证与移栽试验

4.1　轨迹验证

根据优化得到的该组设计参数对栽植机构进行结构设计，将绘制的三维实体模型导入 RecurDyn 软件中进行运动仿真。仿真结果显示，齿轮运行平稳、2 个栽植臂不发生干涉。导出秧针尖点的仿真静轨迹，为了验证油菜毯状苗栽植机构的栽植静轨迹是否与仿真一致，加工了栽植机构的物理样机，并进行栽植轨迹验证。设置栽植机构转速 100 r/min，利用高速工业相机进行摄像，并使用高速摄影分析软件获得栽植机构秧针尖点运动轨迹。与理论计算和仿真的静轨迹进行比较，如图 12 所示，3 条轨迹基本一致，证明了栽植机构结构设计的正确性。



(a) 仿真结果　(b) 台架试验　(c) 轨迹验证

图 12　理论和仿真结果与台架试验静轨迹

Fig. 12　Theoretical, simulated and experimental static trajectories

4.2　移栽试验

4.2.1　试验方案

为了验证栽植过程动力学模型的正确性和优化栽植机构的作业性能，设计如图 13 所示台架试验装置。选取苗龄 35 d 左右的油菜毯状苗，土槽内放置与田间土壤条件接近的稻田黏重土，含水率为 26.4%。试验前测定苗毯含水率为 70.8%、平均苗高为 81.4 mm。移栽机栽植频率和前进速度是影响机构立苗效果的重要因素，试验设定栽植频率为 220 穴/min，前进速度为 500、550、600、650、700 mm/s，开展优化前后栽植机构在不同前进速度下对比移栽试验，统计数据时去除前后 10 穴油菜苗，每组测量中间区域共计 300 穴植株的栽植状态。依据油菜移栽种植农艺要求和《油菜毯状苗移栽机作业质量》行业标准[26]，选取立苗率、伤苗率和栽植合格率为评价指标。



图 13　台架试验

Fig. 13　Bench planting test

4.2.2　试验结果分析

试验结果表明，随着前进速度增加，倒伏率升高、栽植合格率降低(表 2)。优化后栽植机构在作业速度达到 650 mm/s 时，倒伏率明显增加，当前进速度提升至 700 mm/s 时，倒伏率大幅上升至 30.67%，由倒伏率变化趋势与立苗平衡方程理论计算得到的栽植频率 220 穴/min、苗高 80 mm 栽植条

表 2　台架栽植试验结果

Tab. 2　Bench planting test result

前进速度/(mm·s^{-1})	理论株距/mm	项目	伤苗数	伤苗率/%	倒伏数	倒伏率/%	栽植合格数	栽植合格率/%
500	137	优化后	4	1.33	16	5.33	280	93.33
		优化前	4	1.33	42	14.00	254	84.67
550	150	优化后	6	2.00	20	6.67	274	91.33
		优化前	5	1.67	59	19.67	236	78.67
600	164	优化后	5	1.67	29	9.67	266	88.67
		优化前	5	1.67	93	31.00	202	67.33
650	178	优化后	6	2.00	52	17.33	242	80.67
		优化前	6	2.00	122	40.67	172	57.33
700	191	优化后	8	2.67	92	30.67	200	66.67
		优化前	6	2.00	154	51.33	140	46.67

件下,能够立苗的最高前进速度为 670 mm/s,这与理论计算结果一致,验证了栽植机构改进设计的正确性。

对比优化前后栽植机构试验结果可知:在小于该试验条件下理论计算的立苗临界前进速度 670 mm/s 时,当前进速度为 600 mm/s 时,优化前后栽植机构作业倒伏率分别为 31.00% 和 9.67%、降低 68.81%,栽植合格率分别为 67.33% 和 88.67%,提升 31.69%,优化后栽植机构栽插的油菜毯状苗落地姿态直立,运动平稳,立苗效果好,满足油菜移栽栽植机构设计要求,栽植效果如图 14 所示。

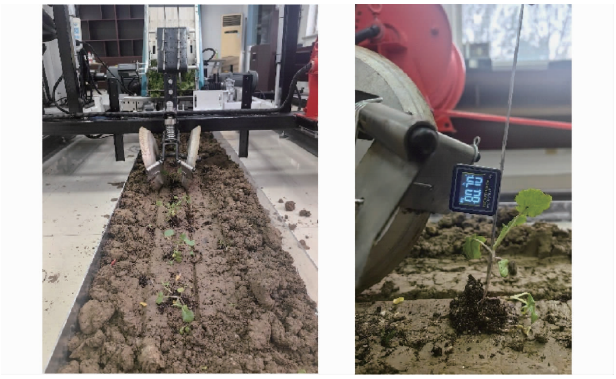


图 14 栽植效果

Fig. 14 Planting effect

5 结论

(1)通过理论分析油菜非圆齿轮行星轮系栽植机构运移和栽插油菜毯状苗块受力和运动过程,研究苗块落地后自身的动力平衡,构建了判断栽插后苗块翻倒的立苗平衡方程,分析了立苗影响因素。

(2)基于理论分析的苗块运动和受力情况,以提高立苗率为目标,对栽植机构运动轨迹进行优化。以椭圆齿轮为研究对象,综合分析了椭圆齿轮偏心率、模数、齿数、行星架初始安装角、栽植臂与行星架初始相位角、以及秧针尖端到行星轮中心长度等参数对苗块落地角度、落地后角速度和立苗的影响规律。通过人机交互方式优选出 1 组能够满足油菜毯状苗栽植工作要求的栽植轨迹参数。

(3)通过优化前后栽植机构的对比台架试验验证了栽植机构的栽植效果,试验结果表明:当移栽苗高 80 mm 油菜毯状苗、栽植频率为 220 穴/min 时,在小于该条件理论计算的立苗临界前进速度 670 mm/s 时,当前进速度为 600 mm/s 时,优化后栽植机构倒伏率为 9.67%,较优化前降低 68.81%,栽植合格率为 88.67%,较优化前提升 31.69%,提高了作业效率和栽植质量。

参 考 文 献

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

[2] 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)

[3] 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)

[4] 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)

[5] 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)

[6] 蒋兰,吴崇友,汤庆,等. 油菜毯状苗移栽机栽植过程动力学模型及参数优化[J]. 农业工程学报,2018,34(21):37 – 46.
JIANG Lan, WU Chongyou, TANG Qing, et al. Kinematics model and parameter optimization of planting process of rape carpet seedling transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(21): 37 – 46. (in Chinese)

[7] 俞高红,王磊,孙良,等. 大田机械化移栽技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报,2022,53(9):1 – 20.
YU Gaohong, WANG Lei, SUN Liang, et al. Advancement of mechanized transplanting technology and equipments for field crops[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 1 – 20. (in Chinese)

[8] 于晓旭,赵匀,陈宝成,等. 移栽机械发展现状与展望[J]. 农业机械学报,2014,45(8):44 – 53.
YU Xiaoxu, ZHAO Yun, CHEN Baocheng, et al. Current situation and prospect of transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 44 – 53. (in Chinese)

[9] 胡乔磊,王磊,李心志,等. 油菜基质块苗移栽机对辊式取苗装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2022,38(9):12 – 23.

HU Qiaolei, WANG Lei, LI Xinzhi, et al. Design and experiment of the counter roll seedling taking equipment for rapeseed substrate block seedlings transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(9): 12 - 23. (in Chinese)

[10] 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)

[11] 陈建能,张晓威,刘林敏,等. 夹茎式非圆齿轮玉米钵苗移栽机构设计与试验[J]. 农业工程学报,2023,39(18):30 - 40.
CHEN Jianneng, ZHANG Xiaowei, LIU Linmin, et al. Design and experiments of the clipping-stem type non-circular gear transplanting mechanism for corn pot seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(18): 30 - 40. (in Chinese)

[12] 王英,陈建能,吴加伟,等. 用于机械化栽植的西兰花钵苗力学特性试验[J]. 农业工程学报,2014,30(24):1 - 10.
WANG Ying, CHEN Jianneng, WU Jiawei, et al. Mechanics property experiment of broccoli seedling oriented to mechanized planting[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(24): 1 - 10. (in Chinese)

[13] 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)

[14] 王英. 面向高立苗率要求的栽植机构参数优化与试验研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2014.
WANG Ying. Parameter optimization and experimental study on high seedling erectness rate oriented planting mechanism[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2014. (in Chinese)

[15] 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)

[16] 陈建能,夏旭东,王英,等. 钵苗在鸭嘴式栽植机构中的运动微分方程及应用试验[J]. 农业工程学报,2015,31(3):31 - 39.
CHEN Jianneng, XIA Xudong, WANG Ying, et al. Motion differential equations of seedling in duckbilled planting nozzle and its application experiment[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 31 - 39. (in Chinese)

[17] 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)

[18] 高可杰. 椭圆齿轮行星系分插机构推秧装置振动特性分析与参数优化[D]. 合肥:安徽农业大学,2022.
GAO Kejie. Vibration characteristics analysis and parameter optimization of seedling pushing device of transplanting mechanism with planetary elliptic gears[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[19] 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.

[20] JIANG L, TANG Q, ZHANG M, et al. Improvement design and experimental study of seedling pick-up parameters of planting system for rape blanket seedling transplanter[J]. IAEJ, 2021,30(1):118 - 127.

[21] 王立宗,廖庆喜,张子龙,等. 油菜高速直播机开畦沟装置刀组优化与试验[J]. 农业工程学报,2024,40(3):50 - 62.
WANG Lizong, LIAO Qingxi, ZHANG Zilong, et al. Optimizing the blade group of ditching devices in rapeseed direct seeder [J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(3): 50 - 62. (in Chinese)

[22] 张敏. 水稻插秧机异形齿轮行星轮系高速分插机构设计及优化技术研究[D]. 南京:南京理工大学, 2018.
ZHANG Min. Design and optimization technique research for rice transplanter high-speed transplanting mechanism with special shape planetary gear train[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2018. (in Chinese)

[23] 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.

[24] 周海丽,刘建刚,俞高红,等. 蔬菜移栽机斜齿轮-非圆齿轮行星轮系取苗机构研究[J]. 农业机械学报,2023,54(8):77 - 86.
ZHOU Haili, LIU Jian'gang, YU Gaohong, et al. Design and experiment of seedling picking mechanism for helical gear - non circular gear planetary gear system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(8):77 - 86. (in Chinese)

[25] 张敏,张文毅,周长省,等. 非匀速三插臂水稻高速插秧机参数分析与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46 (12): 32 - 38,73.
ZHANG Min, ZHANG Wenyi, ZHOU Changxing, et al. Parameter analysis and experiment of three planting bars of high-performance rice transplanter with non-uniform rotation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 32 - 38, 73. (in Chinese)

[26] 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.