doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.07.017

西南地区小型移栽机自适应定深栽植装置设计与试验

伞红军[1,2]　蒋文豪[1]　陈久朋[1,3]　张　帆[1,2]　李　昊[1]　龚梦莹[3]

(1.昆明理工大学机电工程学院,昆明 650500;2.云南省先进装备智能制造技术重点实验室,昆明 650500;
3.玉溪新天力农业装备制造有限公司,玉溪 652699)

摘要:针对西南地区山地、丘陵地形垄面不规则、传统移栽机难以自适应调节栽植深度的问题,本文提出一种面向西南地区小型移栽机自适应定深栽植装置。基于蔬菜钵苗农艺指标与机构设计要求,完成了机构运动学建模并分析了栽植系统工作原理。基于运动学建模结果,开发栽植机构计算机辅助分析与优化软件,研究结构参数与栽植轨迹的映射关系,通过建立目标优化函数并设置机构约束条件,运用逐次逼近法求解得到较优参数组合。开展定深栽植仿真试验,验证了所提机构可通过 5 组夹角变换来调节栽植深度,且能满足栽植运动轨迹与末端栽植速度的要求。开展机构栽植静轨迹试验,得出 5 组实际静轨迹与仿真静轨迹的最低点误差最大值为 6.86 mm,轨迹高度最大误差为 13.98 mm,每组轨迹具有较高重合度。定深栽植性能试验表明,在栽植频率为 15 株/min,机组速度 3.6 m/min 下,机构在平整与不平整垄面的穴口宽度均小于 100 mm,栽植合格率在 94.45% 以上,株距变异系数最大为 3.86%,平均栽植深度合格率在 92.22% 以上,验证了该机构自适应调节栽植深度的可行性。

关键词:西南地区;小型移栽机;定深栽植装置;多杆机构;运动学分析

中图分类号:TP242;TH112　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)07-0183-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Adaptive Depth Planting Device for Small Transplanters in Southwest China

SAN Hongjun[1,2]　JIANG Wenhao[1]　CHEN Jiupeng[1,3]　ZHANG Fan[1,2]　LI Hao[1]　GONG Mengying[3]

(1. *Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming* 650500, *China*
2. *Key Laboratory of Advanced Equipment Intelligent Manufacturing Technology of Yunnan Province, Kunming* 650500, *China*
3. *Yuxi Xintianli Agricultural Equipment Manufacturing Co., Ltd., Yuxi* 652699, *China*)

Abstract: Aiming at the problem of irregular ridge surfaces in the mountainous and hilly terrains of Southwest China, which makes it difficult for traditional transplanters to adaptively adjust the planting depth, an adaptive constant-depth planting device was proposed for small transplanters in Southwest China. Based on the agronomic requirements for vegetable plug seedlings and the design specifications of the mechanism, kinematic modeling of the mechanism was conducted, and the working principle of the planting system was analyzed. Using the results of the kinematic modeling, a computer-aided analysis and optimization interface for the planting mechanism was developed to study the mapping relationship between structural parameters and the planting trajectory. By establishing an objective optimization function and setting mechanism constraints, a relatively optimal parameter combination was obtained by using the successive approximation method. A simulation test for constant-depth planting was conducted, verifying that the proposed mechanism can adjust the planting depth through five sets of angle variations, while meeting the requirements for the planting trajectory and the velocity at the planting endpoint. A static trajectory test of the mechanism was carried out, showing that the maximum error of the lowest point between the five sets of actual static trajectories and the simulated static trajectories was 6.86 mm, and the maximum error in trajectory height was 13.98 mm, with a high degree of coincidence for each set of trajectories. The constant-depth planting performance test indicated that, at a planting frequency of 15 plants/min and a unit speed of 3.6 m/min, the hole width on both flat and uneven ridge surfaces was

收稿日期:2025-04-29　修回日期:2025-06-13

基金项目:云南省基础研究计划项目(202301AU070059)和云南省“彩云博士后”创新项目

作者简介:伞红军(1976—),男,副教授,博士,主要从事机器人技术及应用研究,E-mail:sanhjun@163.com

通信作者:陈久朋(1993—),男,副教授,博士,主要从事机器人技术及应用研究,E-mail:18314490225@163.com

less than 100 mm, the qualified planting rate was above 94.45%, the maximum coefficient of variation for plant spacing was 3.86%, and the average qualified rate for planting depth was above 92.22%, demonstrating the feasibility of the mechanism for adaptively adjusting the planting depth.

Key words: Southwest China; small transplanter; constant-depth planting device; multi-bar mechanism; kinematic analysis

0 引言

在我国西南丘陵山区,受限于地块细碎化、地形高差显著以及耕整地机械化程度不高等客观条件,现阶段移栽作业仍依赖人工操作或传统栽植工具完成[1-2]。由于国内不同地区的地形地貌、土壤条件差异较大,种植农艺不匹配,导致很多机型不适合在西南地区移栽[3-5],如 Ferrari Futura Twin、FMC 全自动移栽机等[6],其结构庞大,适用大田移栽;小型移栽机如洋马 PF2R 型移栽机、东风井关 PVHR 系列移栽机[7-8],其在不规则坡耕地下移栽效率低。因此,研发适应丘陵地带的钵苗移栽机具有实际意义。

在面对丘陵地带坡耕地垄形不规则时保证栽植深度一致性,国内外学者对移栽机的部件进行了大量仿形技术研究。洋马 PF2R 型移栽机采用基于单铰接摆动机构的被动仿形系统,通过限深轮调节栽植深度,有 10 挡栽植深度调节[9],但不具备深度实时性调节功能;日本 ISEKI 公司的 2ZY-2A 型垄上移栽机作业中主油缸通过仿形拖板-多连杆机构实现底盘升降,保持栽深一致,但机体倾斜时,需手动调节辅助油缸确保横向栽深均匀[10]。姚梦娇[11]设计了一种株距和栽植可无级调节的电动栽植部件,栽深平均合格率达 94.4%,但栽植部件仅用直线模组完成上下移动,栽植轨迹需进一步优化。文献[12]设计了一种基于五连杆机构的自定深仿形装置,工作时平均栽深合格率为 91.9%,但整个栽植系统占用空间过大,不适合丘陵山地作业。胡建平等[13]提出的 2ZXW-2 型移栽机与肖名涛等[14]设计的小型幼苗移栽机利用底盘液压仿形的方式来调节栽插深度,虽然栽植合格率得到了提升,但机械液压式仿形响应速度较慢,且液压动力单元需要较大额定电流,在实际工作时有一定的安全隐患。综上所述,在定深栽植时,栽植机构整体较大、机构末端轨迹有待优化、液压系统响应速度慢和存在安全隐患等问题,不能有效应对复杂的栽植环境。

针对上述问题,在多连杆式栽植机构研究基础上,本文设计一种可以根据垄高自适应调节栽植深度的电动栽植机构,建立机构夹角变化与栽植深度之间的运动学模型,开发机构的仿真与优化界面,通过逐次逼近获得一组较优参数。仿真分析栽植机构在 5 个不同位置的栽植轨迹特性以适应定深栽植要求。最后,搭建试验平台对栽植机构的性能及自适应调节栽植深度的可行性进行验证,为西南地区小型移栽机的研发提供重要参考。

1 栽植机构设计与工作原理

1.1 设计要求

针对西南丘陵地区坡耕地垄形不规则、作业空间受限等问题,本研究设计了一种紧凑型深度可控式鸭嘴移栽机构,其设计要求如下:

(1)栽植器末端运动轨迹要求

栽植机构在一个栽植周期需要经过 4 个阶段:接苗—送苗—栽植—回程。接苗阶段需要在轨迹最上方附近,要求该段运动曲线较为平稳且速度有所降低,使钵苗能平稳落入栽植器中。送苗阶段指钵苗掉入栽植器到栽植器入土前的运动过程,该阶段要求机构运动轨迹保持平滑,且栽植器入土角度应接近 90°。栽植阶段是鸭嘴从入土到完成栽植离开地面的过程,入土段和出土段轨迹保持重合或产生环扣(相交)以保证栽植直立度和较好的破土成穴效果,近似实现“零速”投苗[15]。回程阶段是完成栽植后机构返回接苗位置的复位过程,为下个周期接苗铺垫。

(2)栽植深度调节范围

基于文献[16]实测数据,丘陵地区垄面纵向高度差最大能达到 80 mm。在设计栽植机构时,为了应对地垄不平整时定深栽植作业,要保证在机构作业时栽植器末端纵向可调距离需达到 80 mm。

(3)栽植机构作业要求

为确保栽植机构的稳定运行和动作连续性,系统采用电力驱动方式。在控制系统的设计中,为满足实时采集垄面地形数据的需求,选用具备高速数据传输和快速运算能力的控制器。特别是在栽植深度调节环节,系统能够在返程阶段实现快速响应和精准调节,从而确保机构运行的流畅性,同时避免对后续接苗工序造成干扰。

1.2 设计思路和定深工作原理

在高速移栽作业中,栽植机构杆件数量的增加会显著加剧惯性力和振动现象,进而影响移栽过程

的稳定性。因此，在机构设计阶段应优先采用杆件数量较少的构型以满足栽植需求。为同时保证两个关键性能指标——通过末端执行器竖直姿态来提高钵苗直立度，以及增强机构整体稳定性和结构刚度，可采用平行四边形机构对栽植器进行固定[17]。关于定深栽植功能的实现，常规技术路径包括调整杆件几何参数或优化固定架的空间位置参数等。在机构选型时，要让整个机构耗能低、结构简单、便于安装与维护。

综上所述，采用曲柄摇杆机构与平行四边形机构的组合构型来实现栽植作业。如图 1 所示，系统以曲柄摇杆机构 $OABC$ 为核心，其中 OA 为主动曲柄。平行四边形机构 $BB'D'D$ 与曲柄摇杆机构共用连杆 BD，曲柄 $O'A'$ 与曲柄 OA 平行安装，两曲柄通过同步带实现角速度同步。平行四边形机构一端焊接栽植器来保证末端始终保持竖直状态，提高幼苗栽植直立度。整个栽植机构在保证点 C 固定的前提下自由度为 1，由电机 M_1 驱动可使鸭嘴末端形成唯一轨迹，满足栽植机构设计要求。

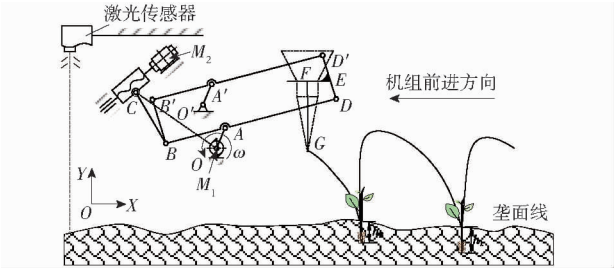


图 1　栽植机构工作原理图

Fig. 1　Working principle diagram of planting mechanism

栽植深度变化原理如图 2 所示，保持定深栽植具体过程如下：先确定点 C_0 与原点 O 的距离和 OC_0 与 X 轴正向夹角，以点 O 为圆心、OC_0 为半径画圆，过点 C_0 作该圆切线交 X 轴于点 M，当 OC_0 与 X 轴的夹角变化不大的情况下，可近似为点 C_0 在 MC_0 上移动。以点 C_0 为初始栽植状态，此时垄面为初始垄面，末端点为点 G；当激光传感器识别到下个栽植点低于初始垄面时，OC_0 与 X 轴正向的夹角变小，点 C_0 向右上移动到点 C' 时，栽植器末端点为点 G'，末端轨迹整体下移，完成定深栽植；当激光传感器识别到下个栽植点垄面高于初始垄面时，OC_0 与 X 轴正向的夹角变大，点 C_0 向左下移动到点 C'' 时，栽植器末端点为点 G''，末端轨迹整体上移，完成定深栽植。

图 3 为整个栽植系统的控制流程图。在前期准备工作中，设置机构栽植参数，控制器接收激光传感器反馈的距离信息来设定初始栽植高度。栽植时，电机 M_1 转动，机组前进，激光传感器传输下个栽植

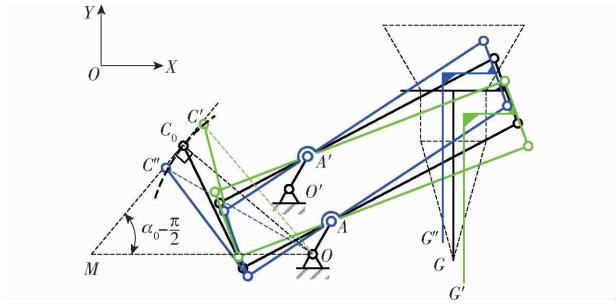


图 2　栽植深度变化原理图

Fig. 2　Schematic diagram of planting depth variation

点的垄面数据给控制系统来驱动电机 M_2，使得滑块 C 移动到与距离信息相匹配的位置，若传感器数据超过阈值时，滑块 C 保持上个栽植位置不变。持续栽植过程步骤来完成栽植作业，当栽植结束时，所有电机停止转动，移栽机停止作业。

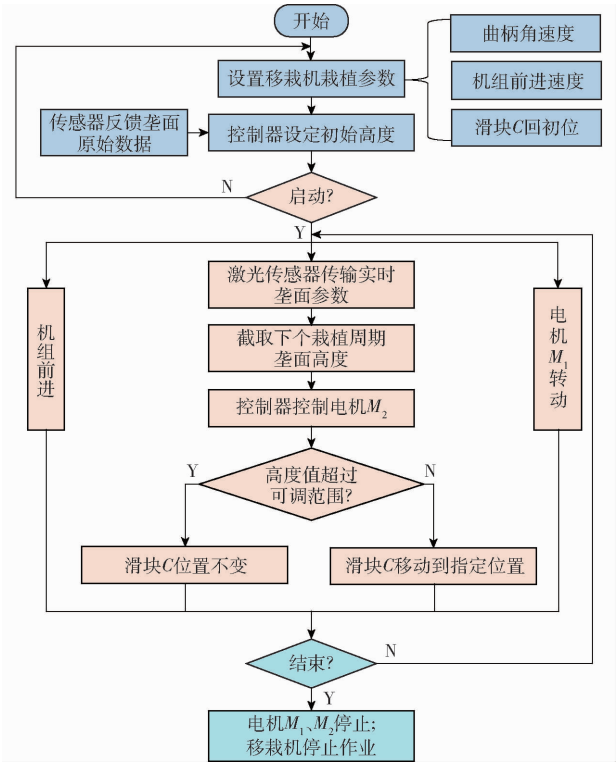


图 3　栽植系统控制流程图

Fig. 3　Control flowchart of planting system

2　数学模型建立

2.1　OC 夹角与点 C 坐标位置模型

如图 2 所示，设 OC_0 与 X 轴正向初始夹角为 α_0，为方便建模，位置坐标均采用 (x_i, y_i) 的形式表述。

点 C_0 的位移方程为

$$\begin{cases} x_{C_0} = l_8 \cos\alpha_0 \\ y_{C_0} = l_8 \sin\alpha_0 \end{cases} \tag{1}$$

式中　l_8——点 O 到点 C_0 的距离，mm

当 OC 与 X 轴正向夹角变为 α 时（此时点 C 在

线段 MC_0 及其延长线上移动),可得

$$l_{OC}=\frac{l_8}{\cos(\alpha-\alpha_0)} \tag{2}$$

点 C 的位移方程为

$$\begin{cases}x_C=\dfrac{l_8\cos\alpha}{\cos(\alpha-\alpha_0)}\\ y_C=\dfrac{l_8\sin\alpha}{\cos(\alpha-\alpha_0)}\end{cases} \tag{3}$$

2.2 栽植机构夹角 α 与栽深变化模型构建

建立栽植机构结构简图如图 4 所示。选择点 O 为坐标原点建立笛卡尔平面直角坐标系,定义左向为机组前进方向,速度大小为 v。以机构水平方向且背离机组前进方向为 X 轴正向,以竖直向上为 Y 轴正方向,构建栽植机构夹角 α 与栽植深度变化模型。

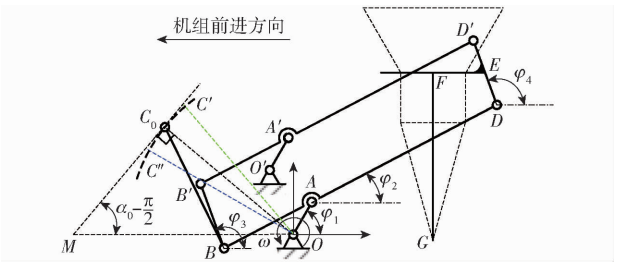


图 4 鸭嘴栽植机构结构简图

Fig. 4 Simplified structural diagram of duckbill planting mechanism

在初始位置时,设曲柄 OA 与 X 轴正向重合,有

$$\varphi_1=\omega t \tag{4}$$

式中 φ_1——曲柄 OA 与 X 轴正方向的夹角,(°)

ω——曲柄 OA 的角速度,rad/s

t——曲柄转动时间,s

点 A 的位移方程为

$$\begin{cases}x_A=l_1\cos(\omega t)\\ y_A=l_1\sin(\omega t)\end{cases} \tag{5}$$

式中 l_1——曲柄 OA 的长度,mm

点 B 位移方程为

$$\begin{cases}x_B=l_1\cos(\omega t)-l_2\cos\varphi_2\\ y_B=l_1\sin(\omega t)-l_2\sin\varphi_2\end{cases} \tag{6}$$

式中 l_2——连杆 AB 的长度,mm

φ_2——连杆 AB 与 X 轴正方向的夹角,(°)

点 C 的位移方程为

$$\begin{cases}x_C=x_B+l_3\cos\varphi_3\\ y_C=y_B+l_3\sin\varphi_3\end{cases} \tag{7}$$

式中 l_3——摇杆 BC 的长度,mm

φ_3——摇杆 BC 与 X 轴正方向的夹角,(°)

联立式(1)、(4)~(7),整理可得 φ_2 的计算式为

$$\varphi_2=2\arctan\frac{b\pm\sqrt{a^2+b^2-c^2}}{a+c} \tag{8}$$

其中

$$a=\frac{l_8\cos\alpha}{\cos(\alpha-\alpha_0)}-l_1\cos(\omega t) \tag{9}$$

$$b=\frac{l_8\sin\alpha}{\cos(\alpha-\alpha_0)}-l_1\sin(\omega t) \tag{10}$$

$$c=-\frac{a^2+b^2+l_2^2-l_3^2}{2l_2} \tag{11}$$

点 D 位移方程为

$$\begin{cases}x_D=x_A+l_4\cos\varphi_2\\ y_D=y_A+l_4\sin\varphi_2\end{cases} \tag{12}$$

式中 l_4——连杆 AD 的长度,mm

点 E 位移方程为

$$\begin{cases}x_E=x_D+\dfrac{1}{2}l_5\cos\varphi_4\\ y_E=y_D+\dfrac{1}{2}l_5\sin\varphi_4\end{cases} \tag{13}$$

式中 φ_4——连杆 DD' 与 X 轴正方向的夹角,(°)

l_5——连杆 DD' 的长度,mm

点 F 的位移方程为

$$\begin{cases}x_F=x_E-l_6\\ y_F=y_E\end{cases} \tag{14}$$

式中 l_6——导杆 EF 的长度,mm

点 G 的位移方程为

$$\begin{cases}x_G=x_F\\ y_G=y_F-l_7\end{cases} \tag{15}$$

式中 l_7——导杆 FG 的长度,mm

栽植机构静止时点 G 位移方程为

$$\begin{cases}x_G=l_1\cos(\omega t)+l_4\cos\varphi_2+\dfrac{1}{2}l_5\cos\varphi_4-l_6\\ y_G=l_1\sin(\omega t)+l_4\sin\varphi_2+\dfrac{1}{2}l_5\sin\varphi_4-l_7\end{cases} \tag{16}$$

点 G 的位移方程即为鸭嘴栽植器末端点的静轨迹方程。当栽植器以速度 v 运动时,末端栽植点 G 的位移方程可表示为

$$\begin{cases}x_G=l_1\cos(\omega t)+l_4\cos\varphi_2+\dfrac{1}{2}l_5\cos\varphi_4-l_6-vt\\ y_G=l_1\sin(\omega t)+l_4\sin\varphi_2+\dfrac{1}{2}l_5\sin\varphi_4-l_7\end{cases} \tag{17}$$

设夹角 α_0 为机构原始位置,建立夹角 α 相对于原始位置的栽植深度表达式,即

$$\begin{cases}\rho=\min(y_G(\alpha_0,t))\\ \sigma=\min(y_G(\alpha,t))\\ \Delta h=\rho-\sigma\end{cases} \tag{18}$$

式中 ρ——OC 与 X 轴正向初始夹角为 α_0 时,栽植轨迹末端最低点纵向位移,mm

σ——在初始夹角为 α_0 情况下，将 OC 与 X 轴正向夹角变为 α 时，栽植轨迹末端最低点纵向位移，mm

Δh——夹角调节后的轨迹末端最低点相对于初始夹角的轨迹末端纵向位移改变量，即栽植深度变化量，mm

结合式(17)，机组运动时，栽植机构末端轨迹速度方程为

$$\begin{cases} v_{x_G} = -l_1\omega\sin(\omega t) - \dfrac{\mathrm{d}\varphi_2}{\mathrm{d}t}l_4\sin\varphi_2 - v \\ v_{y_G} = l_1\omega\cos(\omega t) + \dfrac{\mathrm{d}\varphi_2}{\mathrm{d}t}l_4\cos\varphi_2 \end{cases} \tag{19}$$

栽植机构末端轨迹的加速度方程可通过对其速度方程求导得出。

3　参数优化与控制系统设计

3.1　约束条件与优化目标

栽植作业处于丘陵地带，曲柄 OA 尺寸越小，整个结构振动越小，设定曲柄 $l_1 = 45$ mm。如图 4 所示，l_6 和 l_7 是鸭嘴的安装尺寸和结构尺寸，不影响栽植轨迹，并且在零件选型时已确认具体数值，其中 $l_6 = 62.5$ mm、$l_7 = 200$ mm；在栽植机构工作时，l_4 决定鸭嘴与点 O 是否产生干涉，即

$$l_4\cos\varphi_2 - \frac{1}{2}l_5\sin\left(\varphi_4 - \frac{\pi}{2}\right) - 2l_6 > 0 \tag{20}$$

栽植机构需满足曲柄存在条件，即

$$\begin{cases} l_1 = \min(l_1, l_2, l_3, l_{OC}) \\ l_1 + l_2 - (l_3 + l_{OC}) \leqslant 0 \\ l_1 + l_3 - (l_2 + l_{OC}) \leqslant 0 \\ l_1 + l_{OC} - (l_2 + l_3) \leqslant 0 \end{cases} \tag{21}$$

结合部分茄果类钵苗移栽农艺参数[18]，以零速投苗和钵苗直立度为优化目标，需满足[19-21]：①栽植绝对轨迹与垄面线垂直距离（栽植深度）为 50 mm。②鸭嘴在入土与出土时相对地面的摆角差为 0°～20°。③穴口宽度在 0～30 mm 之间。④栽植轨迹的高度不大于 400 mm，以保证机构的紧凑性。⑤入土阶段和出土阶段的栽植轨迹保持重合或产生环扣（相交）。

3.2　栽植机构的运动仿真与优化

拟定机组前进速度为 300 mm/s、曲柄 OA 的角速度为 7.854 rad/s，基于建立的运动学模型，采用 Matlab GUI 编写了栽植机构计算机辅助分析与优化软件，界面如图 5 所示。结合各参数对栽植轨迹的影响趋势与栽植机构设计经验，使用逐次逼近方法[22]获得了一组较优组合参数：$l_1 = 45$ mm、$l_2 = 120$ mm、$l_3 = 160$ mm、$l_4 = 250$ mm、$l_5 = 82.5$ mm、$l_6 = 62.5$ mm、$l_7 = 200$ mm、$\varphi_4 = 110°$、$l_8 = 200$ mm、$\alpha_0 = 140°$。

栽植机构满足平整栽植地面栽植要求，但机构在非平整垄面作业时，需要调节栽植机构的栽植深度来满足定深栽植，在栽植机构参数优化过程中发现 α_0 的变化能大幅度改变栽植入土深度，在优化后可以通过改变 OC 与 X 轴的夹角来实现复杂垄面定深栽植。

激光位移传感器所测垄面数据是实时变化的，为避免传感器数据波动导致频繁调节栽植深度，设定 OC 与 X 轴正向夹角在 130°、135°、140°、145°、150°这 5 个值之间自由变化，如图 5 所示为 5 个夹角下的栽植轨迹，其中入土深度最大改变量能达到 88.61 mm，大于丘陵地区垄面纵向高度差，满足丘陵地区垄面纵向最大高度差可调节范围。

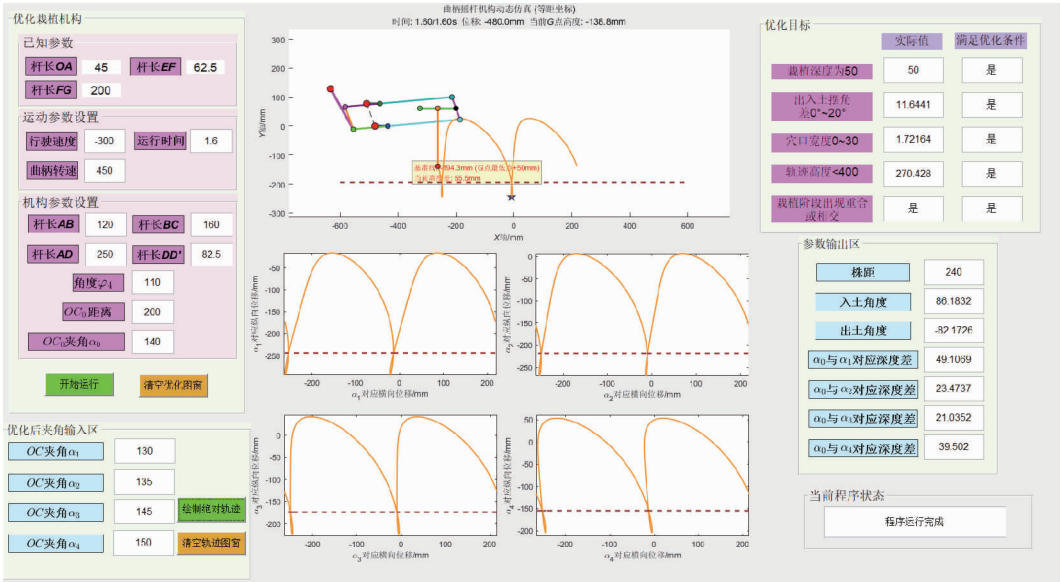


图 5　栽植机构计算机辅助分析与优化界面

Fig. 5　Computer-aided analysis and optimization interface for planting mechanism

3.3 虚拟样机仿真分析

根据优化出的机构参数,对栽植机构的杆件进行分析与简化,在 Solidworks 软件中建立栽植机构各个杆件的三维模型,装配完成后进行 motion 分析,将其保存为 .adm 格式并导入 Adams 软件中进行虚拟样机仿真分析。

由图 2 所示,栽植深度调节机构通过电机 M_2 驱动点 C 位置实现深度可调。在栽植作业过程中,激光测距传感器实时监测垄面高度,将距离信号反馈至控制器,控制器据此调节电机 M_2 的转动量,从而确保鸭嘴栽植器在后续作业中保持预设的栽植深度。仿真参数设置为:曲柄 OA 角速度 7.854 rad/s,整机水平向左移动速度 300 mm/s,仿真时长 1.6 s(覆盖两个完整栽植周期),仿真步数 500 步。通过该仿真模型,分别模拟了恒定垄高和非恒定垄高条件下的栽植机构运动特性,获得了栽植器运动轨迹及其速度变化曲线,仿真结果如图 6 所示。

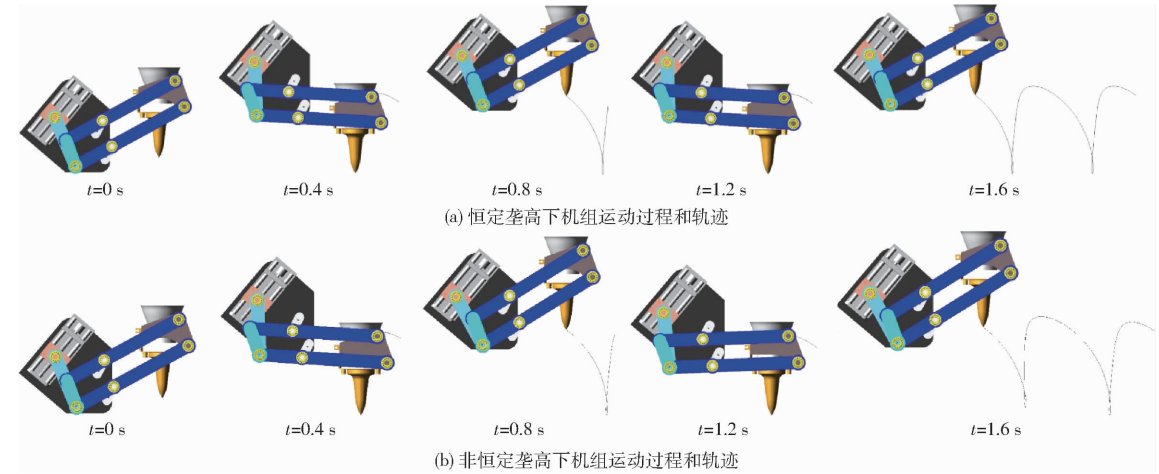


图 6 栽植机构栽植过程运动轨迹仿真结果

Fig. 6 Simulation results of motion trajectory of planting mechanism during planting process

图 6a 为恒定垄高下机组运动轨迹,仿真分析结果与计算机辅助优化结果基本一致,轨迹曲线在接苗处大体平稳,运动最低点距离整个栽植部件较远,整体无明显倾斜,满足优化要求。其末端轨迹对应速度曲线见图 7a,栽植机构运行到 0.11 s 时合速度出现第 1 个低点,在该点附近处于投苗阶段,速度降低有利于完成投苗过程。当 $t=0.486$ s 时,合速度出现第 2 个低点,水平速度为 43.2 mm/s,接近零速,保证了钵苗的直立度。图 6b 为垄面高度改变情况下机组运动轨迹,当激光测距仪识别到下个栽植点高于常规垄面高度时,立即驱动电机 M_2 转动来改变点 C 的位置以确保栽植定深。其末端轨迹对应速度曲线如图 7b 所示,在栽植机构完成栽植返程时,迅速改变点 C 的位置来保持插深,除在速度发生突变段外,其他时间段与图 7a 速度曲线近似吻合,不改变株距和栽植频率,综合以上栽植机构末端轨迹分析和栽植器末端速度分析,均能满足设计目标要求,为下一步制作物理样机奠定理论基础。

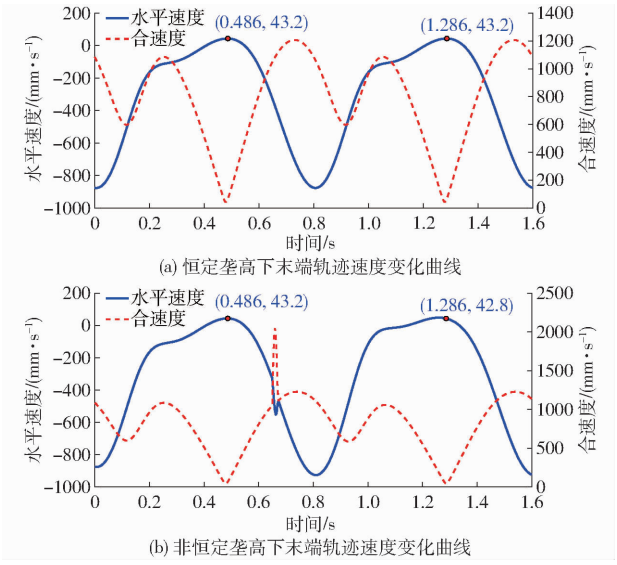


图 7 栽植机构栽植过程速度变化曲线

Fig. 7 Speed variation of planting mechanism during planting process

将夹角为 140°作为栽植部件初始位置,分成 5 组栽植数据,对应 OC 与 X 轴的夹角分别为 130°、135°、140°、145°和 150°,定义相邻节点距离为 x_0、x_1、x_2、x_3,计算得出对应值分别为 17.77、17.50、17.50、17.77 mm,使用 Adams 对栽植机构进行虚拟样机仿真,仿真结果如图 8、9 所示。图 8 为对应夹角下栽植器末端的动、静轨迹和垄面线示意图,图示栽植深度均保持 50 mm,在机组速度和曲柄角速度一定时,当夹角逐渐增大,栽植静轨迹整体逆时针转动,垄面线的高度呈现上升趋势。图 9 为栽植机构不同夹角时的动轨迹对应关系,随着夹角的增大,轨迹整体向上移动,入土夹角逐渐增大。

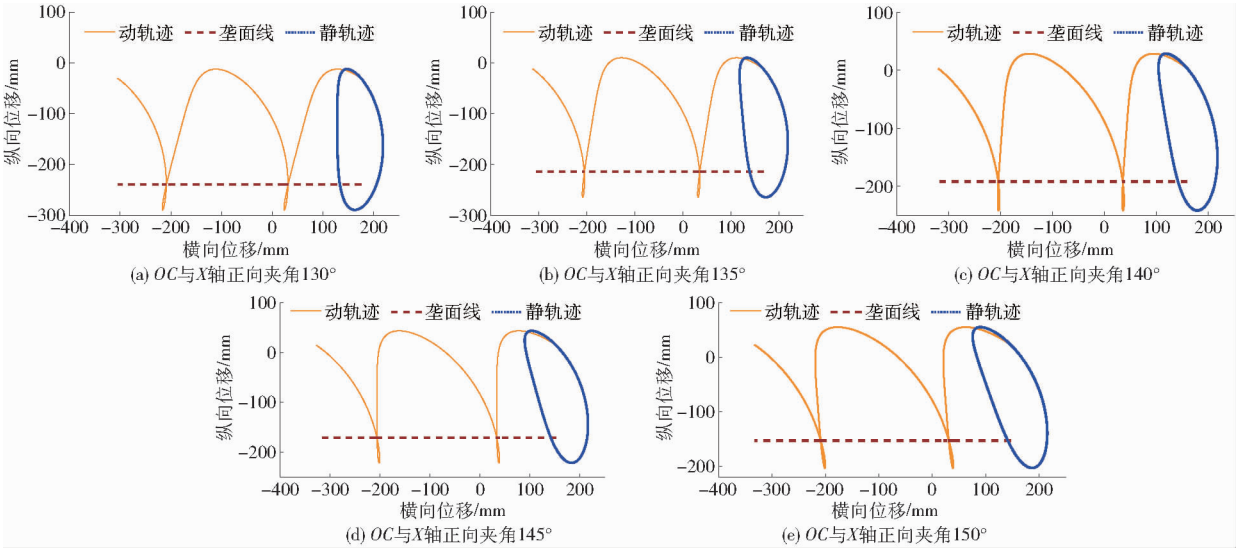


图 8　不同夹角所对应的动、静轨迹和垄面线

Fig. 8　Dynamic and static trajectories and ridge lines corresponding to different included angles

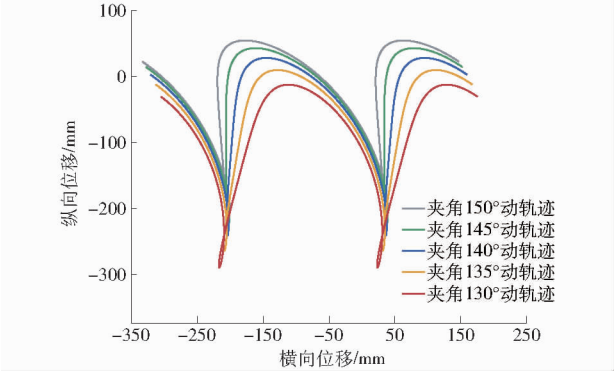


图 9　栽植机构中不同夹角下的末端动轨迹

Fig. 9　End-effector trajectory of planting mechanism at different angles

各夹角所对应的关键参数如表 1 所示，随着夹角的增大，株距没有发生变化，垄高最大变化差为 86.55 mm，出入土角度差逐渐减小，穴口宽度波动较小，整体满足约束条件和优化目标，进一步验证了栽植机构在虚拟仿真中变换不同形态后优化的合理性。

表 1　各夹角相对应关键参数

Tab. 1　Key parameters corresponding to each included angle

OC 与 *X* 轴夹角/(°)	垄高/mm	栽植深度/mm	出入土角度差/(°)	穴口宽度/mm
130	-239.54	50	12.13	0.55
135	-214.50	50	12.09	0.38
140	-191.59	50	11.53	0.43
145	-170.98	50	11.08	0.05
150	-152.99	50	10.11	0.89

注：垄高数值以点 *O* 为原点计算。

4　样机试验

4.1　实际轨迹试验

基于仿真优化结果加工样机零部件并完成物理样机装配，将完整的栽植系统集成安装在专用试验台架上，对各硬件模块进行系统调试与参数校准。如图 10 所示，整个控制系统通过激光测距传感器、栽植机构和移动土槽共同配合完成栽植作业，试验场地位于昆明理工大学机电工程学院一楼试验空地，试验土壤选用当地细黄土，按照标准农艺要求制备上垄宽 15 cm、下垄宽 30 cm、垄高 20 cm 的规范化试验垄体。试验材料选用苗高 12 ~ 16 cm（苗龄 20 d）的辣椒钵苗，确保符合实际生产中的移栽农艺标准。

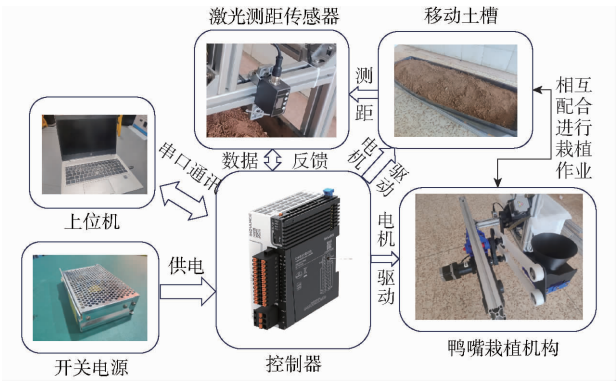


图 10　样机控制流程

Fig. 10　Prototype control process

试验所用仪器有：PLC（汇川 Easy302）、步进电机（57cm13 - 0 - 18）、激光测距传感器（BLF - 100NM - 485）、卷尺（Hilock - 19）、工业相机（MV - CS050 - 10GC）等。

为了验证栽植装置的实际运动轨迹与优化后仿真结果的吻合度，开展了轨迹验证试验。试验采用 5 组不同配置，使用工业相机分别记录栽植机构在 5 个预设夹角条件下的末端静轨迹。每组试验均设置多个栽植频率梯度，通过高速摄影技术获取运动图

像序列,采用图像处理算法提取栽植器末端特征点坐标,并剔除异常数据点,最终得到实际静轨迹曲线,将其与对应工况下的仿真静轨迹对比,如图 11 所示。

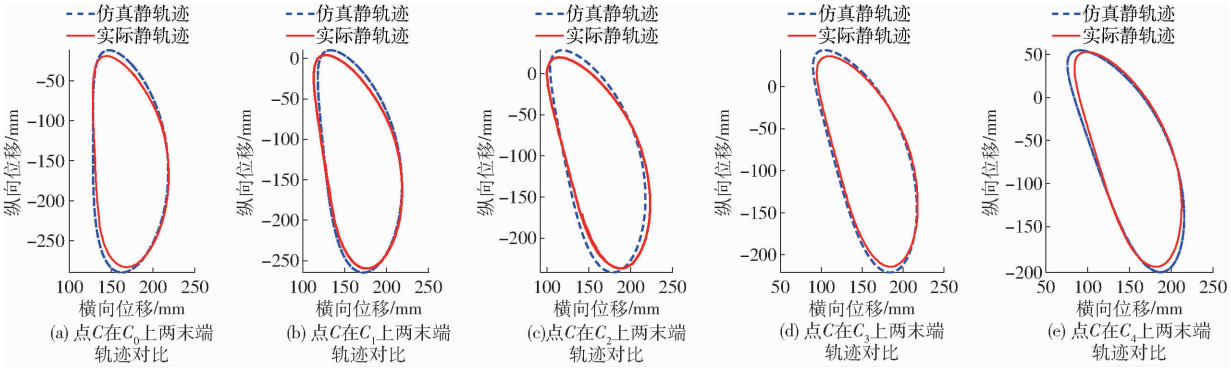


图 11 实际轨迹与仿真轨迹对比结果

Fig. 11 Comparison results between actual and simulated trajectories

表 2 所示为实际作业轨迹与仿真轨迹的相对误差对比数据,分别对应图 11 中的 5 组试验(图 11a、11b、11c、11d、11e)。试验结果表明,5 组不同配置下的轨迹最低点误差最大值为 6.86 mm,轨迹高度最大误差为 13.98 mm。实际测量轨迹与仿真结果具有较高的一致性。这一结果验证了样机的加工制造和装配精度符合设计要求。

表 2 实际轨迹与仿真轨迹相对误差

Tab. 2 Relative error between actual and simulated trajectories mm

试验组	最低点误差	轨迹高度误差
1	6.80	13.93
2	4.95	10.88
3	4.95	13.32
4	6.86	13.98
5	6.28	8.26

导致实际轨迹与仿真轨迹存在一定误差的原因主要有:①仿真中假设连杆为刚体,但在实际试验中,部分连杆采用 3D 打印而成,材料在载荷下可能发生微小变形,影响末端轨迹。②多个连杆的装配误差逐级传递,放大末端轨迹误差。

4.2 机构定深栽植试验

搭建试验样机平台如图 12 所示,将激光测距传感器安装在试验台架上与栽植原点水平相距 40 cm,且与机构轨迹末端在同一栽植平面上,为防止步进电机在高速情况下出现丢步现象并且能更直观地观察栽植过程(如植株直立度),及时调整栽植参数,设置机构栽植频率为 15 株/min,移动土槽移动速度为 3.6 m/min,整个移动土槽的长度为 120 cm,连续工作栽植数量为 4 株/次。

为验证栽植样机是否满足农艺要求的定深栽植性能,开展了系统的定深栽植试验。试验前,针对激光测距传感器与 PLC 的数据传输进行了精确标定:

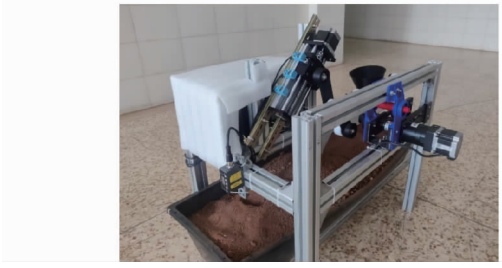


图 12 样机试验平台

Fig. 12 Prototype test platform

由仿真所得各个夹角所对应垄面数据,通过计算相邻数据点的中点值,将垄面高度划分为左闭右开的区间。根据传感器安装高度,以 20 mm 为间隔设置激光测距区间变量,建立了传感器测距值与实际垄面高度的精确映射关系,具体匹配关系如表 3 所示。该匹配关系的建立能够显著抑制传感器数据波动对栽植深度调节的干扰,有效避免了频繁调节现象的发生。这一匹配关系不仅确保了栽植深度控制系统的稳定运行和可靠性,更为后续试验数据的精确采集与可靠性分析提供了重要保障。

表 3 传感器距离信息与机构深度匹配关系

Tab. 3 Matching relationship between sensor distance information and mechanism depth mm

OC 与 X 轴正向夹角/(°)	激光测量数据	垄高范围	理论深度
130	[128,148]	[-239.54,-227.02)	50.0
135	[108,128)	[-227.02,-203.045)	50.0
140	[88,108)	[-203.045,-181.285)	50.0
145	[68,88)	[-181.285,-161.985)	50.0
150	[48,68)	[-161.985,-152.99]	50.0

栽植作业前需预先设定机构栽植参数,并同步匹配传感器数据与垄面高度信息,将滑块 C 调节至预设位置。栽植时,系统以 4 s 为周期实时采集传感器距离信息,动态调节滑块 C 位置以实现定深栽

植，当传感器检测数据超出有效范围时，系统将自动采用上一工作周期的栽植参数执行当前作业任务，从而保障栽植作业的连续稳定运行。

栽植作业时，记录不同夹角变化过程中响应时间，通过 PLC 中定时器功能记录所有夹角变化所需要的响应时间，每组变化记录 10 次取平均值，响应时间结果如表 4 所示。表 4 中所展示所有夹角变化所需要的响应时间均未超过栽植周期(4 s)，激光传感器和栽植机构相互配合能够在栽植周期内完成夹角变化，最终实现定深栽植。

表 4　各夹角变化对应响应时间

Tab. 4　Response time corresponding to changes in each angle

夹角变化/(°)	响应时间均值/s	夹角变化/(°)	响应时间均值/s
130→135	0.73	135→130	0.73
130→140	1.45	140→130	1.46
130→145	2.18	145→130	2.19
130→150	2.91	150→130	2.92
135→140	0.72	140→135	0.72
135→145	1.44	145→135	1.44
135→150	2.18	150→135	2.17
140→145	0.72	145→140	0.72
140→150	1.45	150→140	1.45
145→150	0.73	150→145	0.73

以栽植垄面是否平整作为试验因素做两组试验，在非平整垄面试验组中，以 2 cm 为高度梯度，分为 4、2、0、－2 和 －4 共计 5 种情况，随机选取 4 种组合在移动土槽中人为制造垄的高度进行栽植试验。每组试验因素下共进行 3 组试验，以栽植 60 株辣椒钵苗为 1 组试验，选择穴口宽度、栽植合格率、株距、株距变异系数和栽植深度合格率为试验指标开展栽植试验，试验数据统计和分析方法参照行业标准 JB/T 10291—2013《旱地栽植机械》。部分栽植试验如图 13 所示，机构栽植性能结果如表 5、6 所示。



图 13　钵苗栽植试验图

Fig. 13　Diagram of pot-seedling planting experiment

分析表 5、6 得到，在平整垄面和不平整垄面下进行栽植试验，穴口宽度分别为 92.12、95.56 mm，穴口宽度均小于 100 mm；平均栽植合格率分别为 95.00%、94.45%，满足栽植作业要求；平均株距分别为 24.65、24.39 mm，接近设计目标株距；平均株距变异系数分别为 3.86%、3.85%，栽植机构栽植状况稳定；平均栽植深度合格率分别为 92.33%、92.22%。各组试验指标均满足旱地栽植机械行业标准，验证了小型电动栽植机构栽植的稳定性与实用性，说明了该机构自适应调节栽植深度的可行性。

表 5　平整垄面栽植性能试验结果

Tab. 5　Test results of planting performance on flat ridge surface

序号	栽植株数/株	穴口宽度/mm	栽植合格率/%	株距/cm	株距变异系数/%	栽植深度合格率/%
1	60	92.53	96.67	24.77 ± 0.95	3.84	95.00
2	60	89.47	98.33	24.40 ± 0.73	2.99	91.67
3	60	94.35	90.00	24.77 ± 1.18	4.76	90.00
平均值	60	92.12	95.00	24.65 ± 0.95	3.86	92.33

注：株距表示“株距平均值 ± 标准差”。下同。

表 6　不平整垄面栽植性能试验结果

Tab. 6　Test results of planting performance on uneven ridge surface

序号	栽植株数/株	穴口宽度/mm	栽植合格率/%	株距/cm	株距变异系数/%	栽植深度合格率/%
1	60	95.30	95.00	24.33 ± 0.87	3.58	91.67
2	60	94.82	91.67	24.82 ± 1.06	4.27	88.33
3	60	96.57	96.67	24.03 ± 0.89	3.70	96.67
平均值	60	95.56	94.45	24.39 ± 0.94	3.85	92.22

影响栽植性能的原因主要有：①控制器反馈延迟导致控制误差：控制器接收激光测距传感器的距离信息经处理发送给机构进行栽深调节过程中有一定的延迟，造成栽植深度不合格。②长时间栽植影响栽植效果：长时间栽植鸭嘴内壁粘附土壤出现不出苗、挂苗的现象，降低了栽植合格率。

5　结论

(1)针对云南省丘陵山区移栽机械作业的特殊需求，提出了一种小型电动栽深可控式栽植机构设计方案。主要由曲柄摇杆机构和平行四边形机构协同构成执行系统，通过高精度激光测距传感器实时监测栽植深度，并将检测数据反馈至控制系统，动态调节机构点 C 的空间位置，从而实现栽植深度的自适应精准调节。

(2)建立栽植机构的运动学模型，根据栽植农艺参数和约束条件确定了几个固有参数，编写了该栽植机构辅助分析与优化软件来分析每个未知参数

对栽植机构轨迹变化的规律,使用逐次逼近方法得到了一组满足优化目标的参数组合:l_1 = 45 mm、l_2 = 120 mm、l_3 = 160 mm、l_4 = 250 mm、l_5 = 82.5 mm、l_6 = 62.5 mm、l_7 = 200 mm、φ_4 = 110°、l_8 = 200 mm、α_0 = 140°。

(3)建立各杆件的三维模型,仿真分析了栽植机构在平整与不平整垄面的栽植运动轨迹与末端速度,均能满足设计目标要求,并分析了 5 组 OC 的夹角来改变栽植深度,均保证了钵苗的栽植质量和精度,为后续的物理样机试制、栽植定深试验奠定了基础。

(4)搭建试验台架,以辣椒苗为移栽对象,开展实际静轨迹和定深栽植试验,将实际静轨迹与仿真轨迹对比,两者轨迹高度最大误差为 13.98 mm 且轨迹基本趋于一致;当栽植频率为 15 株/min,移动土槽模拟机组以 3.6 m/min 匀速运动组合下,在平整与不平整垄面上机构栽植穴口宽度均小于 100 mm,栽植合格率在 94.45% 以上,平均株距均在 24 mm 左右,平均株距变异系数最大为 3.86%,平均栽植深度合格率在 92.22% 以上。各组试验指标均满足旱地栽植机械行业标准,验证了栽植机构栽植的稳定性与实用性,说明了该机构自适应调节栽植深度的可行性。

参 考 文 献

[1] 王晓文,袁寿其,贾卫东. 丘陵山区农业机械化现状与发展[J]. 排灌机械工程学报,2022,40(5):535 - 540.
WANG Xiaowen, YUAN Shouqi, JIA Weidong. Current status and development of agricultural mechanization in hilly and mountainous areas[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(5): 535 - 540. (in Chinese)

[2] 张今旗,朱祺杰,吴垚,等. 丘陵山区油菜移栽机仿形及高度自行调整研究[J]. 中国农机装备,2024(4):46 - 48.
ZHANG Jinqi, ZHU Qijie, WU Yao, et al. Research on profiling and height self-adjustment of rape transplanters in hilly and mountainous areas[J]. China Agricultural Machinery & Equipment, 2024(4): 46 - 48. (in Chinese)

[3] 宋广龙,杨章,孙伟,等. 中药材机械化种植装备现状及发展趋势[J]. 林业机械与木工设备,2024,52(5):13 - 19.
SONG Guanglong, YANG Zhang, SUN Wei, et al. Current status and development trends of mechanized planting equipment for Chinese medicinal herbs[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2024, 52(5): 13 - 19. (in Chinese)

[4] 刘蒙滋,姜凯,王秀,等. 蔬菜自动移栽机研究现状与展望[J]. 农机化研究,2024,46(10):1 - 8,20.
LIU Mengzi, JIANG Kai, WANG Xiu, et al. Research status and prospects of automatic vegetable transplanters[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(10): 1 - 8,20. (in Chinese)

[5] 徐高伟,荐世春,宋裕民,等. 丘陵山地作物移栽机井窖式成穴机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(3):105 - 113,125.
XU Gaowei, JIAN Shichun, SONG Yumin, et al. Design and experiment of well-cavity hole-forming mechanism for crop transplanters in hilly and mountainous areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 105 - 113,125. (in Chinese)

[6] LOHAN S K, NARANG M K. Development of an electronic actuating control mechanism to operate a remotely controlled 2-wheel paddy transplanter[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2024, 61(1):1 - 14.

[7] GAIKWAD P B, SHAHARE P, PATHAK S, et al. Development and performance evaluation of four row self propelled paddy transplanter[J]. International Journal of Agricultural Engineering, 2015, 8(1):9 - 14.

[8] 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. Research progress of field mechanized transplanting technology and equipment [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 1 - 20. (in Chinese)

[9] LOHAN S K, NARANG M K, JAVED M, et al. Optimization and evaluation of machine-field parameters of remotely controlled two-wheel paddy transplanter[J]. Journal of Field Robotics, 2022, 39(6): 984 - 998.

[10] KORNECKI T S, KICHLER C. Development of a no-till transplanter for walk-behind tractors[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2022, 38(6):865 - 872.

[11] 姚梦娇. 电动自动移栽机苗盘输送与栽植的控制关键技术研究[D]. 镇江:江苏大学,2022.
YAO Mengjiao. Research on key control technologies of tray conveying and planting for electric automatic transplanter[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022. (in Chinese)

[12] 何腾飞,李慧,王永水,等. 基于五连杆移栽机构的自定深仿形装置设计与试验[J]. 干旱地区农业研究,2021,39(3):230 - 236.
HE Tengfei, LI Hui, WANG Yongshui, et al. Design and experiment of self-deep-profiling device based on five-bar linkage transplanting mechanism[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(3): 230 - 236. (in Chinese)

[13] 胡建平,王留柱,付鹏洋,等. 移栽机自动升降底盘设计与试验研究[J]. 农机化研究,2017,39(3):74 - 78.
HU Jianping, WANG Liuzhu, FU Pengyang, et al. Design and experimental research on automatic lifting chassis of transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(3): 74 - 78. (in Chinese)

[14] 肖名涛,孙松林,王金葵,等. 小型幼苗移栽机的设计及试验[J]. 农机化研究,2014,36(11):95 - 99.
XIAO Mingtao, SUN Songlin, WANG Jinkui, et al. Design and experiment of small seedling transplanter[J]. Journal of

Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(11): 95 - 99. (in Chinese)
[15] 胡飞,郭栋,陈彩蓉,等.复合曲柄摇杆式蔬菜膜上双行栽植装置设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(9):62 - 69.
HU Fei, GUO Dong, CHEN Cairong, et al. Design and experiment of a double-row planting device for vegetables on film with a compound crank-rocker mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 62 - 69. (in Chinese)
[16] 喻丽华,徐志波,韩忠禄,等.丘陵山区辣椒机械化移栽适应性分析[J].农机化研究,2020,42(10):184 - 188,194.
YU Lihua, XU Zhibo, HAN Zhonglu, et al. Adaptability analysis of mechanized transplanting of chili peppers in hilly and mountainous areas[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(10): 184 - 188,194. (in Chinese)
[17] 刘冲.往复式鸭嘴栽植装置的设计与试验[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院,2023.
LIU Chong. Design and experiment of a reciprocating duckbill planting device[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2023. (in Chinese)
[18] 朱兴亮,郭彦克,韩长杰,等.茄果类钵苗自动移栽机设计与试验[J].中国农机化学报,2021,42(5):19 - 26.
ZHU Xingliang, GUO Yanke, HAN Changjie, et al. Design and experiment of an automatic transplanter for solanaceous vegetable seedlings[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(5): 19 - 26. (in Chinese)
[19] 徐高伟.大垄膜上交错双行丹参移栽机关键部件研究及整机设计[D]. 哈尔滨: 东北农业大学,2019.
XU Gaowei. Research on key components and integrated design of double-row staggered salvia miltiorrhiza transplanter for large ridge with plastic film mulching[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019. (in Chinese)
[20] 张诺一.高速变姿态接苗鸭嘴式栽植机构优化设计与试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2020.
ZHANG Nuoyi. Optimization design and experiment of high-speed duckbill planting mechanism with variable posture seedling feeding[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020. (in Chinese)
[21] 姬江涛,杨林辉,金鑫,等.行星轮系滑道式钵苗栽植机构设计与参数优化[J].农业工程学报,2018,34(18):83 - 92.
JI Jiangtao, YANG Linhui, JIN Xin, et al. Design and parameter optimization of planetary gear train with slideway type pot-seedling transplanting mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 83 - 92. (in Chinese)
[22] 尹文庆,刘海马,胡飞,等.旱地栽植机八连杆栽植机构优化设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(10):51 - 60.
YIN Wenqing, LIU Haima, HU Fei, et al. Optimization design and experiment of eight-bar planting mechanism for dryland transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 51 - 60. (in Chinese)

(上接第 132 页)

[21] 张佳喜, 王学农, 陈发, 等. 秸秆粉碎还田回收机刀辊工作参数的研究[J]. 农业机械学报, 2007, 38(6): 82 - 85, 37.
ZHANG Jiaxi, WANG Xuenong, CHEN Fa, et al. Study on working parameters of knife roller of field straw chopper for mulching or reclaiming[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(6): 82 - 85, 37. (in Chinese)
[22] 史建新, 陈发, 郭俊先, 等. 抛送式棉秆粉碎还田机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2006, 22(3): 68 - 72.
SHI Jianxin, CHEN Fa, GUO Junxian, et al. Design and experimental research of the field straw chopper with throwing cotton-stalk[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(3): 68 - 72. (in Chinese)
[23] 谢伟, 彭磊, 蒋葭, 等. 收获期油菜薹茎秆双层粘结离散元模型建立与优化[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 112 - 120.
XIE Wei, PENG Lei, JIANG Pin, et al. Discrete element model building and optimization of double-layer bonding of rape shoots stems at harvest stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 112 - 120. (in Chinese)
[24] ZHAO W S, CHEN M J, XIE J H, et al. Discrete element modeling and physical experiment research on the biomechanical properties of cotton stalk[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 204: 107502.
[25] 张佳喜, 张彭, 张虎, 等. 新疆棉花秸秆离散元仿真参数标定研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1): 76 - 84, 108.
ZHANG Jiaxi, ZHANG Peng, ZHANG Hu, et al. Discrete element simulation parameters calibration for Xinjiang cotton straw [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 76 - 84, 108. (in Chinese)
[26] 黄伟. 离心式贝类播苗设备设计与试验研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2022.
HUANG Wei. Design and experimental study of centrifugal shellfish seeding device[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2022. (in Chinese)