

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.07.006

旱地钵苗移栽复式作业机栽植机构优化设计与试验

那明君<sup>1</sup> 滕乐<sup>1</sup> 周坤<sup>1</sup> 王金武<sup>1</sup> 董欣<sup>1</sup> 周脉乐<sup>2</sup>

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 江苏大学农业工程学院, 镇江 212013)

**摘要:** 为节省工时,提高劳动效率,提出了一种旱地钵苗移栽复式作业机;并针对作业机栽植轨迹不理想导致钵苗栽植合格率低以及栽植器粘土堵塞导致漏苗率高的问题,优化设计了移栽复式作业机栽植机构。该机构由曲柄、平行摇杆、摆杆及夹指式栽植器构成,实现接苗、运苗、扶苗栽植和复位功能,使栽植轨迹和运动姿态满足栽植农艺要求。夹指式栽植器为敞开式结构,夹指在注水冲刷与闭合瞬间振动的作用下,解决了传统鸭嘴栽植器粘土堵塞的问题。建立栽植机构运动学模型,基于 Visual Basic 6.0 开发计算机辅助优化设计软件,多目标参数优化设计得出满足农艺要求的移栽运动轨迹和栽植机构参数;建立栽植机构三维模型,利用 ADAMS 运动学仿真分析,验证了栽植机构优化设计的合理性;样机田间试验表明,在钵苗高度约为 15 cm、作业速度 20 m/min 工况下,钵苗栽植合格率达 98.1%、漏苗率 0.4%、株距变异系数 4.3%、栽植深度合格率 96.5%,满足旱地钵苗移栽要求。

**关键词:** 旱地钵苗; 移栽; 夹指式栽植器; 复式作业

中图分类号: S223      文献标识码: A      文章编号: 1000-1298(2022)07-0067-07      **OSID:** 

Optimal Design and Experiment of Planting Mechanism of Dryland Pot Seedlings Transplanting Compound Machine

NA Mingjun<sup>1</sup> TENG Le<sup>1</sup> ZHOU Kun<sup>1</sup> WANG Jinwu<sup>1</sup> DONG Xin<sup>1</sup> ZHOU Maile<sup>2</sup>

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China  
2. School of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** In order to save man-hours and improve labor efficiency, a dual-operating machine for transplanting dry land pot seedlings was proposed, and aiming at the problems of low planting qualification rate due to unsatisfactory planting trajectory and high missing seedlings rate due to planting claws clogged in the transplanting process, a dryland pot seedling planting mechanism was designed. The mechanism was composed of crank, rocker, pendulum and finger-type planter, and the functions of receiving, transporting, planting and resetting seedlings were realized, so that the planting trajectory and movement posture reached the optimal state of planting agronomic requirements. The finger-type planter was designed as an open structure, the clamping finger solved the problem of soil clogging by flushing with water and closing momentary vibration. Based on the theoretical analysis of the transplanting mechanism, the kinematics model was established. The computer-aided optimization design software was developed by using Visual Basic 6.0 software, and a group of mechanism parameters that corresponded to the best trajectory of the planting mechanism was obtained. A 3D modeling of the planting mechanism was established, and the kinematics simulation analysis was carried out by using ADAMS software, which verified the rationality of the mechanism design. The prototype field experiment results showed that under the working conditions of pot seedlings with a height of about 15 cm and an operating speed of 20 m/min, the planting qualification rate was 98.1%, the seedling leakage rate was 0.4%, the coefficient of variation of plant spacing was 4.3%, and the qualified rate of planting depth was 96.5%, meeting the requirements for transplanting dry land pot seedlings.

**Key words:** dryland pot seedlings; transplanting; finger-type planter; compound work

0 引言

目前我国旱地钵苗移栽仍以人工移栽为主,功能单一的半自动移栽为辅<sup>[1-3]</sup>。半自动移栽机存在作业质量不能满足生产要求、作业效率低、机具投入产出比低等问题,开展旱地钵苗移栽复式作业机研究,满足机具一次进地完成成穴、穴内施肥、移栽、注水覆土和覆膜所有农艺要求,提高机具综合作业效率,具有重要的现实意义<sup>[4-6]</sup>。

栽植机构是旱地钵苗移栽机械核心工作部件,国内外学者对栽植机构进行了大量研究。JEONG-HYEON 等<sup>[7]</sup>研究的凸轮式栽植机构,漏苗率低且不易伤苗,但秧苗栽植轨迹不理想,秧苗栽植合格率低;YOUNG-BONG 等<sup>[8]</sup>提出了一种四连杆凸轮式移栽机构,栽植轨迹理想,但栽植过程中振动大,漏苗率高;于英杰等<sup>[9]</sup>提出了双曲柄五杆式移栽机栽植机构,机构运行平稳,可适应复杂地形,但结构较复杂;何亚凯等<sup>[10]</sup>设计了一种凸轮摆杆式栽植机构,钵苗栽植直立度优良,但其凸轮结构精度要求高,加工制造难度较大;金鑫等<sup>[11]</sup>提出了曲柄滑槽式栽植机构,移栽轨迹较优,但运动时受滑槽限制,振动噪声明显。

本文设计一种曲柄连杆附加平行四杆的栽植机构,实现接苗、运苗、扶苗栽植和复位等功能;开展栽植机构理论分析与运动学分析,得到满足移栽农艺要求的接苗和扶苗栽植运动轨迹和运动速度;开展样机田间试验,验证栽植机构设计的合理性与正确性。

1 设计要求与工作原理

1.1 设计要求

栽植机构是旱地钵苗移栽机的核心部件,作业时人工将钵苗投入输苗盘,由输苗盘送入栽植器后完成田间自动移栽。综合考虑旱地钵苗栽植农艺特点、机具功能要求和现有栽植机构试验结果<sup>[12-13]</sup>,提出一种曲柄连杆机构。连杆末端点  $E$  的两个自由度实现了栽植器运动轨迹的要求;机构附加的两个联动的平行四杆机构  $BB'C'C$  和  $BDEF$ ,使栽植器增加了一个转动自由度,保证了栽植器始终与垄面垂直。栽植机构在曲柄  $OA$  驱动下带动栽植器,实现接苗—送苗导入—扶苗栽植—回程复位移栽运动轨迹与运动姿态,如图 1 所示。

旱地钵苗移栽复式作业机的栽植轨迹与栽植机构设计需满足如下要求:

(1)为保证可靠接取秧苗,接苗段  $cd$  的水平位移尽量小、运动速度低,与栽植器夹指保持闭合状态;前期接苗试验研究表明,栽植器在接苗段的水平

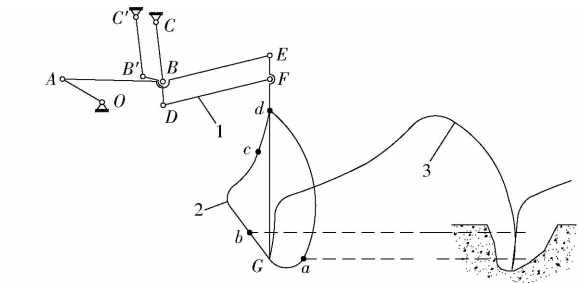


图 1 栽植机构运动轨迹  
Fig. 1 Movement track of planting mechanism

1. 栽植机构 2. 相对轨迹 3. 绝对轨迹

位移需小于 40 mm。

(2)送苗导入段  $da$  栽植器夹指保持闭合状态。

(3)栽植段  $ab$  的水平运动速度趋近零,即栽植器入土、在点  $a$  逐渐开启,随后触底、提升这一栽植过程中水平方向的绝对位移应趋于零<sup>[14-15]</sup>。为保证栽植后钵苗的直立度和稳定性,栽植机构在栽植段运动轨迹应保持与地面近于垂直<sup>[16]</sup>且有足够高度(前期实验表明其高度大于等于钵体高度 185% 效果较优)。

(4)复位段  $bc$  栽植器完成扶苗上移至  $b$  开度达最大,夹指临近点  $c$  快速闭合;栽植机构的栽植器夹指开启范围的变化应满足在栽植过程具有对钵苗扶苗作用和栽植后避让秧苗的功能,以确保钵苗移栽的稳定性;为避免栽植器粘土堵塞,在栽植过程中的栽植段与复位段利用机具向钵苗注水覆土作业同时对栽植器的夹指冲刷(针对粘土),并利用栽植器上的复位弹簧快速复位产生的振动抖落粘附夹指上的土壤。

1.2 结构组成

旱地钵苗移栽复式作业机如图 2 所示,机具由成穴机构、传动系统、栽植机构(图 3)、输苗盘、施肥机构、注水机构、覆土圆盘、覆膜机构及机架等构成,机具一次进地完成垄上成穴、穴内施肥、移栽、注水

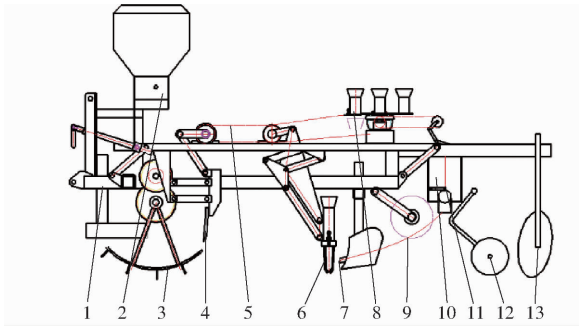


图 2 旱地钵苗移栽复式作业机结构示意图

Fig. 2 Schematic of structure of dryland pot seedling

transplanting compound machine

1. 机架 2. 肥箱 3. 地轮 4. 成穴机构 5. 传动系统 6. 栽植器 7. 注水管 8. 输苗盘 9. 地膜轮 10. 水箱 11. 注水控制机构 12. 压膜轮 13. 覆土圆盘

覆土和覆膜移栽作业,可适用于多种旱地钵苗的移栽,如西瓜、甜瓜、茄子、草莓、烤烟等。

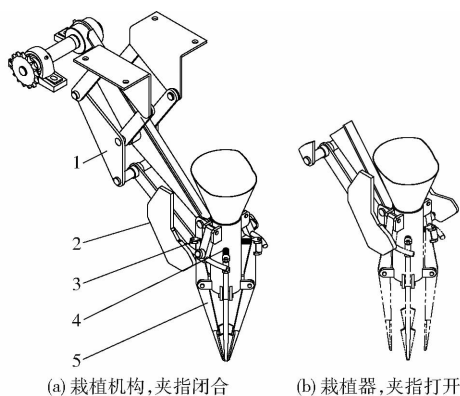


图 3 栽植机构结构简图

Fig. 3 Planting mechanism structure diagram

1. 杆机构 2. 开度控制板 3. 压杆 4. 复位弹簧 5. 夹指

### 1.3 工作原理

移栽作业时,在拖拉机牵引下地轮通过传动机构带动各执行机构运动。成穴机构由固定在杆机构上的成穴铲在回转曲柄驱动下垂直端面做往复运动,与机具合成运动挤压土壤形成穴坑;施肥机构通过软管连接排肥器与成穴铲;多工位回转输苗盘转动至栽植器上方将钵苗投入到栽植器内;栽植器由曲柄摇杆带动的平行四杆机构将钵苗栽植至穴坑底部;当栽植器接近穴坑底部时,夹指逐渐开启栽植钵苗,水流在注水机构控制下经水管流出冲刷穴坑边缘,水流裹挟土壤流至穴坑中心完成对钵苗钵体覆土;栽植器上移回程接近接苗区时,夹指闭合进入接苗阶段,最后覆膜机构对钵苗进行覆膜作业,完成整个栽植过程。

栽植器铰接在杆机构上构成栽植机构。栽植器圆周上均布 4 个铰接的夹指,当栽植器进入栽植段(图 1 轨迹  $abc$  段)时,摆臂受到开度控制板(该板与机架固定)的挤压绕固定轴摆动,摆臂上的压杆压动夹指上端使夹指开启。在栽植区,夹指接近穴坑底部时逐渐开启;上移扶苗过程中开度逐渐加大,此阶段完成注水(水量视土壤墒情确定)覆土、同时完成对夹指冲刷;进入复位阶段夹指达到最大开启状态(避免与钵苗叶片刮碰),临近接苗段时脱离开度控制板的控制,在复位弹簧的作用下夹指快速闭合时产生振动,抖落粘附的土壤。夹指式栽植器与传统“对开封闭”鸭嘴栽植器相比,夹指式栽植器夹指间的相对运动,使粘附在夹指上的土壤散落,结构上利于解决栽植器的拥堵。

## 2 栽植机构运动学分析

### 2.1 栽植机构结构模型

为建立机构运动学模型,简化栽植机构结构,建

立了旱地钵苗栽植机构结构模型,该机构是以曲柄为原动件的七杆机构,执行机构栽植器具有 3 个自由度,如图 4 所示。其中,曲柄  $OA$  的驱动位置点  $O$  作为坐标原点,为分析方便,在该点建立平面直角坐标系,取  $x$  轴水平向右为正方向, $y$  轴垂直向上为正方向,曲柄  $OA$  逆时针转动为正,顺时针转动为负,点  $G$  为栽植器夹指末端点。通过建立栽植机构运动模型<sup>[17-19]</sup>,结合钵苗移栽农艺要求,优化机构结构参数。

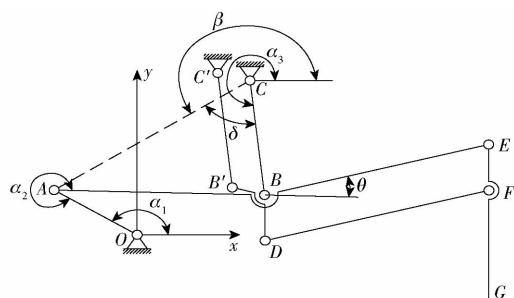


图 4 栽植机构结构模型

Fig. 4 Structural model of planting mechanism

### 2.2 栽植机构运动学模型建立

在钵苗栽植机构工作过程中,曲柄  $OA$  逆时针匀速转动,由图 4 建立机构的位移矢量方程

$$\mathbf{L}_{OA} + \mathbf{L}_{AC} = \mathbf{L}_{OC} \quad (1)$$

曲柄  $OA$  端点  $A$  的位移方程为

$$\begin{cases} x_A = L_{OA} \cos \alpha_1 \\ y_A = L_{OA} \sin \alpha_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中  $L_{OA}$ ——曲柄  $OA$  长度, mm

$\alpha_1$ ——曲柄  $OA$  角位移, ( $^\circ$ )

摇杆  $BC$  端点  $B$  的位移方程为

$$\begin{cases} x_B = x_A + L_{AB} \cos \alpha_2 = x_C + L_{BC} \cos \alpha_3 \\ y_B = y_A + L_{AB} \sin \alpha_2 = y_C + L_{BC} \sin \alpha_3 \end{cases} \quad (3)$$

式中  $L_{AB}$ ——连杆  $AB$  长度, mm

$L_{BC}$ ——摇杆  $BC$  长度, mm

$\alpha_2$ ——连杆  $AB$  绕  $OA$  角位移, ( $^\circ$ )

$\alpha_3$ ——摇杆  $BC$  角位移, ( $^\circ$ )

$x_C, y_C$ ——点  $C$  位移

拐杆  $BE$  端点  $E$  的位移方程为

$$\begin{cases} x_E = x_B + L_{BE} \cos(\alpha_2 - \theta) \\ y_E = y_B + L_{BE} \sin(\alpha_2 - \theta) \end{cases} \quad (4)$$

式中  $L_{BE}$ ——拐杆  $BE$  长度, mm

$\theta$ ——杆  $AB$  与杆  $BE$  间夹角, ( $^\circ$ )

摇杆  $BC$  的角位移为

$$\alpha_3 = \beta + \delta \quad (5)$$

其中

$$\delta = \arccos \frac{L_{AC}^2 + L_{BC}^2 - L_{AB}^2}{2L_{AC}L_{BC}}$$

$$\beta = \arctan \frac{y_A - y_C}{x_A - x_C}$$

式中  $\beta$ ——AC 连线与水平方向夹角, (°)  
 $\delta$ ——AC 连线与摇杆 BC 夹角, (°)

根据两组平行四杆机构可得栽植器端点 G 始终在点 E 的垂直下方,栽植器端点 G 的位移方程为

$$\begin{cases} x_G = x_E \\ y_G = y_E - L_{EG} \end{cases} \quad (6)$$

式中  $L_{EG}$ ——栽植器 EG 长度, mm

2.3 机构速度方程

对点 A 的位移方程求一阶导数,得点 A 速度方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_A = -L_{OA}\dot{\alpha}_1 \sin\alpha_1 \\ \dot{y}_A = L_{OA}\dot{\alpha}_1 \cos\alpha_1 \end{cases} \quad (7)$$

对点 B 的位移方程求一阶导数,得点 B 速度方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_B = \dot{x}_A - L_{AB}\dot{\alpha}_2 \sin\alpha_2 = \dot{x}_C - L_{BC}\dot{\alpha}_3 \sin\alpha_3 \\ \dot{y}_B = \dot{y}_A + L_{AB}\dot{\alpha}_2 \cos\alpha_2 = \dot{y}_C + L_{BC}\dot{\alpha}_3 \cos\alpha_3 \end{cases} \quad (8)$$

对点 E 的位移方程求一阶导数,得点 E 速度方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_E = \dot{x}_B - L_{BE}\dot{\alpha}_2 \sin(\alpha_2 - \theta) \\ \dot{y}_E = \dot{y}_B + L_{BE}\dot{\alpha}_2 \cos(\alpha_2 - \theta) \end{cases} \quad (9)$$

对点 G 的位移方程求一阶导数,得点 G 速度方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_G = \dot{x}_E \\ \dot{y}_G = \dot{y}_E \end{cases} \quad (10)$$

3 栽植机构参数优化与仿真

根据所建立的栽植机构数学模型,基于 Visual Basic 6.0 可视化编程开发平台,开发出“旱地钵苗栽植机构优化设计软件”。

3.1 优化目标与参数优化

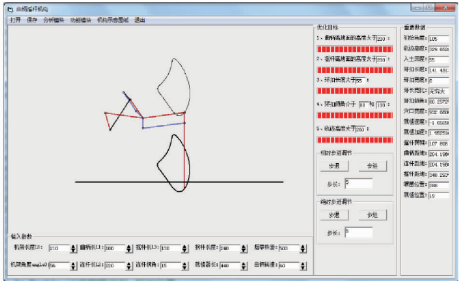
根据旱地钵苗移栽的农艺要求,结合栽植机构的轨迹形态与前期研究基础设立栽植机构优化目标 4 个:栽植机构在接苗段相对于机架的水平位移需小于 40 mm;栽植段轨迹应保证栽植器垂直于地面,即栽植器端点在栽植阶段的水平分速度近似为零,依据统计结果可知,适于本机具移栽的秧苗营养钵平均高度为 40 mm,经模拟试验确定栽植区绝对轨迹直线段高度大于等于营养钵高度的 185%;为确保栽植机构与地面不干涉,曲柄运动最低点离地高度需大于 150 mm。

选择  $L_{OC}$ 、 $L_{OA}$ 、 $L_{AB}$ 、 $L_{BC}$ 、 $L_{BE}$ 、 $L_{EG}$ 、 $\theta$  作为优化变量。

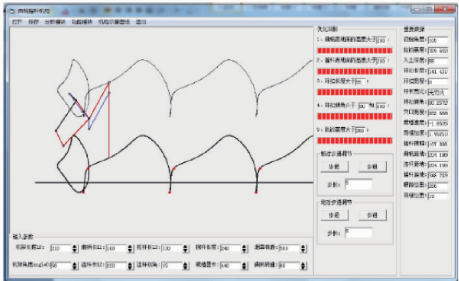
根据设计要求,在优化软件中输入农艺参数:栽

植株距 500 mm、作业速度 20 m/min 和机构初始参数,界面显示对应的栽植机构工作轨迹和姿态。

为了进行机构优化设计,基于课题组自主研发的计算机辅助优化设计平台,利用 Visual Basic 6.0 设计了旱地钵苗栽植机构计算机辅助优化设计程序。结合移栽农艺与优化目标,在优化软件中输入农艺参数和机构初始参数,根据所建立的钵苗栽植机构理论模型,对栽植机构参数进行优化。通过人机交互优化得到满足要求的理想轨迹<sup>[20-23]</sup>(图 5)和一组满足移栽要求的较优机构参数: $L_{OC}=210$  mm; $L_{AC}=210$  mm; $L_{OA}=100$  mm; $L_{AB}=220$  mm; $L_{BC}=130$  mm; $\theta=15^\circ$ ; $L_{BE}=240$  mm; $L_{EG}=440$  mm。



(a) 相对运动轨迹



(b) 绝对运动轨迹

图 5 移栽轨迹优化结果

Fig. 5 Transplanting trajectory optimization results

由优化参数得到栽植器末端点速度曲线如图 6 所示,由图可知,栽植机构的栽植器移栽作业运动是不等速传动。

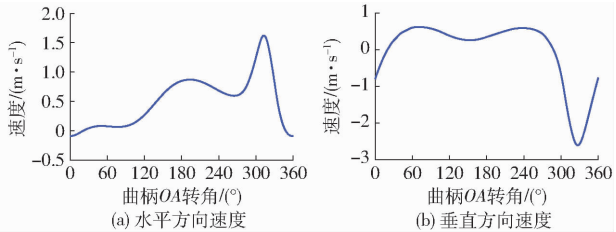


图 6 优化参数下速度曲线

Fig. 6 Speed curves under optimized parameters

3.2 参数优化结果分析

3.2.1 相对运动与绝对运动分析

相对运动为旱地钵苗栽植机构栽植器端点相对移栽机机架的运动,其运动轨迹如图 5a 所示。在轨迹上端附近,栽植器在接苗段相对于机架的水平位移为 30 mm,小于 40 mm,满足优化目标。



绝对运动为旱地钵苗栽植机构相对地面的运动,栽植器端点绝对运动轨迹如图 5b 所示。曲柄最低点与垄面距离为 200 mm,大于 150 mm,满足优化目标要求。栽植机构的绝对运动轨迹在栽植区域形成长度约 100 mm、与水平方向的夹角为 83°的重叠直线段,满足栽植区绝对轨迹直线段高度大于等于营养钵高度的 185% (74 mm)、与环扣倾角介于 80°~100°的优化目标要求。

3.2.2 运动速度分析

旱地钵苗栽植机构栽植器端点的绝对速度(水平和垂直)曲线如图 6 所示,初始位置(曲柄逆时针转动、角度为 0°)设为栽植器端点即将入土的时刻。经分析可知,当曲柄转速为 40 r/min 时(移栽频率 40 株/min),栽植区域(曲柄转角 15°~95°)栽植器端点相对地面的水平速度趋近零速,完成近零速栽植。在栽植过程中,栽植器垂直方向速度由快至慢,直至速度降为零触底,此时栽植器夹指进入开启状态,而后由慢到快向上提升一段距离后完全张开,以配合注水覆土动作,栽植器端点速度变化保证了钵苗栽植的直立度,满足机构方案对栽植段速度的设计要求。栽植器在接苗过程(曲柄转角 220°~280°),接苗速度下降,与钵苗相对速度降低,减小了对钵苗的冲击作用,保证了接苗质量。

3.3 运动学仿真分析

根据优化出的机构参数,对栽植机构进行结构设计,应用 SolidWorks 软件对旱地钵苗栽植机构的各零部件三维建模,完成数字样机建立与干涉分析<sup>[24-25]</sup>。

将栽植机构数字化样机模型导入 ADAMS 软件进行旱地钵苗栽植机构运动学仿真<sup>[24-25]</sup>,得到栽植器端点的轨迹曲线与速度曲线,如图 7 所示。

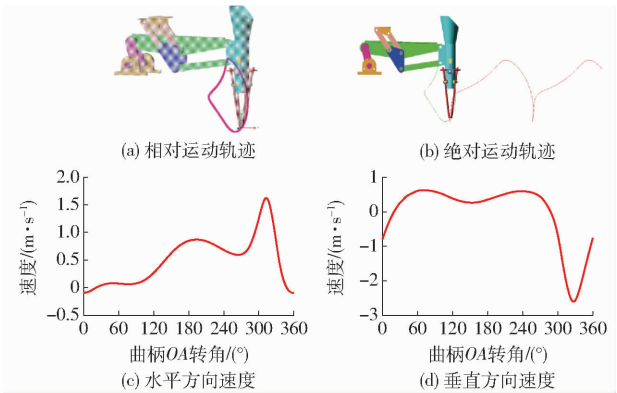


图 7 仿真分析结果  
Fig. 7 Simulation analysis results

将仿真分析轨迹曲线(图 7)与计算机辅助优化设计软件优化出的轨迹曲线(图 5)对比可知,两者运动轨迹基本一致,验证了栽植机构结构设计的合

理性。

移栽机构栽植器端点的速度特性仿真分析结果表明,仿真分析得到的速度曲线与优化设计软件的栽植器夹指末端速度结果基本一致,相互验证了理论分析、优化设计软件和虚拟样机仿真的正确性。

4 样机田间移栽试验

研制的旱地移栽复式作业机适用于西瓜、甜瓜、茄子、烤烟、草莓等多种作物的移栽,试验选用种植农艺最为复杂的烤烟为试验对象进行栽植试验,以考查样机栽植机构的作业性能。

4.1 试验材料

样机田间移栽试验在黑龙江省肇东市五站镇进行,土壤为黑钙土,土壤坚实度 16.2 kPa,依据 GB/T 1931—2009 测定土壤含水率均值 18.7%。移栽垄距 110 cm,垄高 17 cm,垄顶宽 40 cm,烤烟品种为“龙江 911”,苗龄 60 d,适栽期内烟苗高度为 6~18 cm。营养钵基质为加肥土壤,形状为圆台形,其顶部直径 40 mm,底部直径 15 mm,高 40 mm。为防止钵苗含水率发生变化,移栽试样采集后当天完成试验。

4.2 试验方法

旱地钵苗移栽复式作业机作业环节包括成穴、穴内施肥、移栽、穴内注水覆土和覆膜,栽植器不能将钵苗投入穴坑内即为漏苗<sup>[26-27]</sup>。

试验选择作业速度和钵苗高度为试验因素,开展田间样机单因素五水平钵苗栽植试验研究<sup>[28-29]</sup>,如图 8 所示。选择移栽合格率、漏苗率、株距变异系数和栽植深度合格率为试验指标,2 组单因素试验共有 10 种处理,每种处理试验重复 5 次取均值,每种处理测试样本 144 株。



图 8 样机田间试验  
Fig. 8 Scenes of field experiment

4.3 试验结果与分析

田间试验方案与结果如表 1 所示。试验过程中,栽植器在注水冲刷与振动作用下未发生积土堵塞情况,达到预期效果。

由表 1 可知,在株高一定的条件下,随着作业速度的提高,栽植合格率和栽植深度合格率逐渐降低,漏苗率和株距变异系数逐渐增大。主要原因是:随作业速度的提高,栽植器取苗时间缩短,导致接苗成功率降低,使栽植合格率降低;随着作业速度的提高栽植器运动频率加快,栽植器对钵苗扶持时间缩短,

钵苗覆土过程的稳定性降低,导致栽植合格率和栽植深度合格率降低、株距变异系数增大。

表 1 试验方案与结果

Tab.1 Experimental design and results

| 序号 | 试验因素        |                                 | 合格率/<br>% | 漏苗<br>率/% | 株距变<br>异系<br>数/% | 栽植深<br>度合格<br>率/% |
|----|-------------|---------------------------------|-----------|-----------|------------------|-------------------|
|    | 钵苗高<br>度/cm | 作业速度/<br>(m·min <sup>-1</sup> ) |           |           |                  |                   |
| 1  | 15          | 20                              | 98.1      | 0.4       | 4.3              | 96.5              |
| 2  | 15          | 25                              | 97.1      | 0.5       | 4.8              | 96.2              |
| 3  | 15          | 30                              | 96.2      | 0.6       | 6.5              | 94.5              |
| 4  | 15          | 35                              | 93.8      | 1.6       | 6.6              | 90.5              |
| 5  | 15          | 40                              | 90.3      | 5.1       | 8.5              | 87.5              |
| 6  | 6           | 20                              | 95.6      | 0.3       | 6.8              | 90.5              |
| 7  | 9           | 20                              | 96.8      | 0.4       | 5.6              | 95.1              |
| 8  | 12          | 20                              | 97.5      | 0.5       | 4.8              | 96.3              |
| 9  | 15          | 20                              | 97.9      | 0.6       | 4.5              | 96.6              |
| 10 | 18          | 20                              | 96.4      | 0.9       | 7.5              | 93.0              |

在移栽机作业速度一定的条件下,随着株高的增大,栽植合格率与栽植深度合格率由小到大后再减小;株距变异系数由大到小后再变大;漏苗率逐渐增大。这是因为当栽植器离开栽植区进入复位阶段

时,其移动速度加快,钵苗过高与夹指刮碰,导致栽植合格率与栽植深度合格率降低、株距变异系数增大;钵苗过低,栽植器夹指在栽植区扶苗作用减弱,钵苗稳定性降低,导致栽植深度合格率降低、株距变异系数增大;过高的钵苗周向几何尺寸增大,进入栽植器后与栽植器内壁摩擦力增大,延缓了钵苗下降速度,导致漏苗率加大。

5 结论

(1)建立了旱地钵苗移栽复式作业机栽植机构的运动学模型,应用开发的计算机辅助设计软件,优化获得栽植机构理想的栽植轨迹和机构优化参数。

(2)运动学仿真分析栽植轨迹与计算机辅助优化设计软件优化得到的栽植轨迹基本一致,验证了栽植机构设计的正确性和可靠性。

(3)基于优化设计的样机田间试验表明,旱地钵苗移栽复式作业机的栽植机构能够实现钵苗移栽作业,在株高约 15 cm、作业速度为 20 m/min 时,栽植合格率达 98.1%、漏苗率 0.4%、株距变异系数 4.3%、栽植深度合格率 96.5%,满足钵苗移栽要求。

参 考 文 献

[1] 陈大军,侯加林,施国英,等. 国内旱地移栽机技术现状分析[J]. 中国农机化学报,2018,39(7):98-102.  
CHEN Dajun, HOU Jialin, SHI Guoying, et al. Alysis on the curent situation of tecnology of domestic dryland transplanter[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(7): 98-102. (in Chinese)

[2] 刘旺. 烤烟移栽机取苗方式研究及其栽植器的设计[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2017.  
LIU Wang. Study on the seedling-taking mode of flue-cured tobacco transplanting machine and the design of planting mechanism [D]. Harbin:Northeast Agricultural University,2017. (in Chinese)

[3] 谢学虎,张永,刘召,等. 大蒜播种机种植机构的设计[J]. 农业工程学报,2015,31(1):34-39.  
XIE Xuehu, ZHANG Yong, LIU Zhao, et al. Design of planting mechanism for garlic planter[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1):34-39. (in Chinese)

[4] HUANG Guanlong, YANG Qizhi. Design of automatic transplanting machine of plug seedling for greenhouse[J]. International Core Journal of Engineering, 2020, 6(4):64-72.

[5] 周福君,芦杰,杜佳兴. 玉米钵苗移栽机圆盘式栽植机构参数优化及试验[J]. 农业工程学报,2014,30(1):18-24.  
ZHOU Fujun, LU Jie, DU Jiaying. Parameters optimization and experiment of corn-paper transplanting machine with seedling disk [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(1):18-24. (in Chinese)

[6] NANDEDE B M, RANJEET K, PADHEE D. Evaluation of multistage automatic vegetable transplanter (MAVT) for pot seedlings of tomato[J]. BIOINFOLET-A Quarterly Journal of Life Sciences,2013,10(1b):193-195.

[7] JEONG-HYEON P, SEOK-JOON H, JU-SEOK N. Operational characteristics of a cam-type vegetable transplanter and mechanism of a transplanting device[J]. Journal of Agriculture & Life Science,2019,53(4):113-124.

[8] YOUNG-BONG M, JEONG KYUNE K, RYU C. Development of an onion transplanter: performance analysis and optimum shape investigation of a 4bar link-cam type transplanting device[J]. Journal of Agriculture & Life Science,2016,50(4):213-224.

[9] 于英杰,秦伟,赖庆辉,等. 花椰菜钵苗移栽机栽植机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊1):102-112.  
YU Yingjie, QIN Wei, LAI Qinghui, et al. Design and experiment of planting mechanism of cauliflower pot seedling transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(Supp.1):102-112. (in Chinese)

[10] 何亚凯,李树君,杨学军,等. 凸轮摆杆式栽植机构运动分析及性能试验[J]. 农业工程学报,2016,32(6):34-41.  
HE Yakai, LI Shujun, YANG Xuejun, et al. Kinematic analysis and performance experiment of cam-swing link planting mechanism[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(6):34-41. (in Chinese)

[11] 金鑫,杜新武,杨传华,等. 移栽机曲柄滑槽式栽植机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(5):83-90.  
JIN Xin, DU Xinwu, YANG Chuanhua, et al. Design and experiment on crank-chute planting mechanism of transplanting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(5):83-90. (in Chinese)

[12] 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-trainslip type pot seedling

- planting mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(18):83-92. (in Chinese)
- [13] 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 on eight-linkage planting mechanism of dryland transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(10):51-60. (in Chinese)
- [14] 廖庆喜,刘明峰,张照,等.油菜钵苗移栽机双五杆栽植机构多目标优化设计[J].农业机械学报,2015,46(11):49-56.  
LIAO Qingxi, LIU Mingfeng, ZHANG Zhao, et al. Multi-objective optimization design of double five-bar transplanting mechanism for rape pot seedling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(11):49-56. (in Chinese)
- [15] 陈建能,黄前泽,王英,等.钵苗移栽机非圆齿轮行星轮系栽植机构参数分析与反求[J].农业工程学报,2013,29(8):18-26.  
CHEN Jianneng, HUANG Qianze, WANG Ying, et al. Parametric analysis and inversion of transplanting mechanism with planetary non-circular gears for potted-seedling transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(8):18-26. (in Chinese)
- [16] 肖名涛,孙松林,罗海峰,等.双平行多杆栽植机构运动学分析与试验[J].农业工程学报,2014,30(17):25-33.  
XIAO Mingtao, SUN Songlin, LUO Haifeng, et al. Kinematic analysis and experiment of dual parallelogram multi-pole planting mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(17):25-33. (in Chinese)
- [17] 叶秉良,俞高红,陈志威,等.偏心齿轮-非圆齿轮行星系取苗机构的运动学建模与参数优化[J].农业工程学报,2011,27(12):7-12.  
YE Bingliang, YU Gaohong, CHEN Zhiwei, et al. Kinematics modeling and parameters optimization of seedling pick-up mechanism of planetary gear train with eccentric gear and non-circular gear[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12): 7-12. (in Chinese)
- [18] 赵匀.农业机械分析与综合[M].北京:机械工业出版社,2008.
- [19] 赵匀.农业机械现代设计方法综述[J].东北农业大学学报,2012,43(2):1-5.  
ZHAO Yun. Overview of modern design method in agriculture machinery[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2012,43(2):1-5. (in Chinese)
- [20] 肖名涛,孙松林,李凯,等.油菜移栽机槽轮间歇式送苗机构的优化设计[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2014,40(2):211-215.  
XIAO Mingtao, SUN Songlin, LI Kai, et al. Optimal design of intermittent seedling feeding geneva mechanism for rape transplanter[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2014,40(2):211-215. (in Chinese)
- [21] 赵匀,朱慧轩,辛亮,等.拟合齿轮五杆水稻钵苗移栽机构的机理分析与试验[J].农业工程学报,2016,32(1):12-21.  
ZHAO Yun, ZHU Huixuan, XIN Liang, et al. Mechanism analysis and experiment of transplanting mechanism with fitting gear five-bar for rice pot seedling[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(1):12-21. (in Chinese)
- [22] 尹大庆,张诺一,周脉乐,等.高速变姿态接苗鸭嘴式栽植机构优化设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(6):65-72.  
YIN Daqing, ZHANG Nuoyi, ZHOU Maile, et al. Optimal design and experiment of high speed duckbill planting mechanism with variable catch-seedling attitude[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(6):65-72. (in Chinese)
- [23] 胡建平,潘杰,张晨迪,等.行星轮栽植机构优化设计与试验[J].农业机械学报,2018,49(11):78-86.  
HU Jianping, PAN Jie, ZHANG Chendi, et al. Optimization design and experiment on planetary gears planting mechanism of self-propelled transplanting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(11):78-86. (in Chinese)
- [24] 李旭英,王玉伟,鲁国成,等.吊杯式栽植器的优化设计及试验[J].农业工程学报,2015,31(14):58-64.  
LI Xuying, WANG Yuwei, LU Guocheng, et al. Optimization design and test of dibble-type transplanting device[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(14):58-64. (in Chinese)
- [25] 左彦军,曹鹏,赵匀,等.B样条非圆齿轮行星轮系水稻钵苗移栽机构的设计与优化[J].农业工程学报,2014,30(15):10-17.  
ZUO Yanjun, CAO Peng, ZHAO Yun, et al. Design and optimization of transplanting mechanism with B-spline non-circular planet gear train for rice pot seedling[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(15):10-17. (in Chinese)
- [26] JB/T 10291—2013 旱地栽植机械行业标准[S]. 2013.
- [27] ZHANG Jiqiang, NIU Zirui, LI Tianhua, et al. Design and optimization of planting process parameters for 2ZYX-2 type green onion ditching and transplanting machine[J]. Phyton, 2019, 88(3):147-166.
- [28] 韩霞,陈海涛.番茄链式钵钵苗移栽机栽植机构参数优化试验[J].东北农业大学学报,2018,49(4):79-86.  
HAN Xia, CHEN Haitao. Parameter optimization experiment of paper pot seedling transplanting machine for tomato[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018, 49(4): 79-86. (in Chinese)
- [29] 李鹏斌,颜华,王品隆,等.移栽机小株距栽植机构杆件优化与试验[J].农业机械学报,2020,51(增刊2):72-78.  
LI Pengbin, YAN Hua, WANG Pinlong, et al. Optimization and test of small plant spacing planting mechanism rod for transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(Supp.2):72-78. (in Chinese)