doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S1.023

蔬菜自动移栽机多叶片式鸭嘴栽植机构设计与试验

金永旺[1] 胡建平[1] 吕俊鹏[1] 姚梦娇[1] 刘 伟[1] 曾添懿[2]
（1. 江苏大学农业工程学院，镇江 212013；2. 润禾（镇江）农业装备有限公司，镇江 212013）

摘要：针对现有蔬菜移栽机栽植机构作业时栽植器对土壤的扰动量大、回流量低、穴口尺寸规则性差进而造成成穴效果差、露苗率高、直立度低的问题，基于鸭嘴形状设计了一种多叶片式鸭嘴栽植机构。阐述了整体结构组成及工作原理，通过理论分析和建立运动数学模型，对关键部件进行了结构和工作参数的初步设计；对影响土壤成穴效果的因素进行分析，以鸭嘴叶片数量、鸭嘴开合角度、鸭嘴开合速度为试验因素，土壤扰动量、土壤回流量、穴口尺寸规则性为成穴效果评价指标，设计了三因素三水平正交组合试验，运用Design-Expert软件建立了评价指标的回归数学模型，对试验结果进行了响应曲面对比分析，比较了3种因素对评价指标影响的显著性；通过对回归模型进行多目标参数优化，得到当鸭嘴叶片数量为4片、鸭嘴开合角度为22°、鸭嘴开合电机转速为70 r/min时，土壤扰动量、土壤回流量、穴口尺寸规则性分别为0.559、0.788、7.136 mm，此时土壤成穴效果最优;根据最优试验结果对关键部件的设计参数进行了优化和确定，并开展了大田栽植作业试验。试验结果表明，栽植作业试验与耦合仿真试验间评价指标平均误差分别为2.2%、2.3%、1.8%，符合仿真试验与实际试验间误差的要求；同时栽植作业后的露苗率和直立度合格率进行了评判，露苗率为3.6%，直立度合格率为96.7%,符合行业标准的要求，验证了多叶片鸭嘴栽植机构设计和理论分析的正确性。

关键词：栽植机构；多叶片鸭嘴栽植器；成穴效果；仿真；栽植试验
中图分类号：S223.92 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-1298(2024)S1-0217-13

Design and Experiment of Multi-blade Duck Bill Planting Mechanism for Automatic Vegetable Transpl anter

JIN Yongwang[1] HU Jianping[1] LÜ Junpeng[1] YAO Mengjiao[1] LIU Wei[1] ZENG Tianyi[2]
(1. *College of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang* 212013, *China*
2. *Runhe (Zhenjiang) Agricultural Equipment Co., Ltd., Zhenjiang* 212013, *China*)

Abstract: In order to solve the problems caused by large soil disturbance, low return flow, poor hole size regularity, poor hole forming effect, high dew rate and low upright degree, a multi-leaf duck bill planting mechanism was designed based on duck bill shape. The composition and working principle of the whole structure were described, and the structure and working parameters of the key components were preliminarily designed through theoretical analysis and the establishment of the mathematical model of motion. The factors affecting the soil cavitation effect were analyzed. With the number of duck bill leaves, the opening and closing angle of duck bill, and the opening and closing speed of duck bill as test factors, and the soil disturbance amount, soil return flow, and the regularity of the cavity size as evaluation indexes, a three-factor and three-level orthogonal combination experiment was designed. A regression mathematical model of the evaluation indexes was established by using Design-Expert software. The response surface of the test results was compared, and the significance of the three factors on the evaluation index was compared. According to the multi-objective parameter optimization of the regression model, when the number of duck bill leaves was 4, the opening and closing angle of duck bill was 22°, and the opening and closing speed of duck bill was 70 r/min, the regularity of soil disturbance amount, soil return flow rate and hole size were 0.559, 0.788 and 7.136, respectively, the soil cavitation effect was the best at this time. According to the optimal test results, the design parameters of the key components were optimized and determined, and the field planting experiment was carried out. The results showed that the

收稿日期：2024-07-20 修回日期：2024-09-25
基金项目：无锡市科技发展资金项目(N20231004)、上海市科技兴农项目(沪农科产字(2023)第2号)和镇江市科技计划项目(NY2022007)
作者简介：金永旺(1999—)，男，硕士生，主要从事农业机械设计及理论研究，E-mail: 1986882687@qq.com
通信作者：胡建平(1964—)，男，教授，博士生导师，主要从事果蔬作物移栽机械化与智能化技术研究，E-mail: hujp@ujs.edu.cn

average error of evaluation index between planting operation test and coupling simulation test was 2.2%, 2.3% and 1.8%, respectively, which met the requirement of error between simulation test and actual test. At the same time, the dew rate and orthostatic qualification rate after planting operation were evaluated, the dew rate was 3.6%, and the orthostatic qualification rate was 96.7%, which met the requirements of the machinery industry standard JB/T 10291—2013《Dryland Planting Machinery》with the dew rate not higher than 5% and orthostatic degree not less than 93%. The correctness of the design and theoretical analysis of the multi-leaf duck bill planting mechanism was verified.

Key words: planting mechanism; multi-leaf duck bill planter; cavitation effect; simulation analysis; planting test

0 引言

目前,蔬菜机械化移栽已逐渐成为我国蔬菜种植的主要方式。我国蔬菜机械化移栽主要分为半自动移栽和全自动移栽两种形式,半自动移栽主要由人工投苗后再由栽植机构进行栽植作业,而全自动移栽则由取苗机构自动取苗后进行自动化栽植作业。栽植机构作为蔬菜机械化移栽的关键部件,主要作用是在满足栽植质量的情况下将苗钵成功栽入土壤中。栽植器作为栽植机构的核心部件,影响着栽植作业后钵苗的直立度、露苗率等栽植质量[1-3]。在栽植作业时,栽植器的入土、开合、出土动作均会对土壤产生扰动和回流,以及土壤穴口尺寸的变化。土壤的扰动量越小、回流量越大,对栽植作业后苗钵的覆土效果就越好,能够有效降低露苗率;穴口尺寸规则性越好,苗钵落下覆土后的直立度就越高,栽植质量就越好。栽植作业质量作为推进蔬菜机械化移栽进程的重要因素,对栽植机构设计和研究起着至关重要的作用[4-5]。

现有蔬菜移栽机的栽植机构大多采用鸭嘴式栽植器,利用仿生鸭嘴片的特殊形状,不仅可以在移栽时对钵苗起到较好的扶持增立作用,而且可以在低阻力下实现出土、入土动作,可较好的实现对田垄和膜上的移栽作业[6]。王永维等[7]设计了旱地蔬菜钵苗自动移栽机,采用了吊杯式鸭嘴栽植器结构,对不同栽植频率下的栽植作业性能指标进行了验证,但吊杯式栽植器结构复杂,栽植鸭嘴轨迹受栽植频率影响较大,栽植作业时对土壤的扰动较大,且成穴效果不稳定;李慧霜等[8]设计了一种凸轮摆杆式鸭嘴栽植机构,采用两片式鸭嘴栽植器,减小了入土阻力,通过对摆杆和凸轮的设计参数进行优化,提高了栽植的直立度和株距的均匀性,但由于凸轮摆杆机构运动的不稳定性,导致鸭嘴栽植器对穴口的撕裂形状差异性较大,穴口规则性较差,影响其覆膜、覆土效果,不利于土壤保墒,影响栽植质量;刘洋[9]针对蔬菜移栽作业时鸭嘴栽植器的截面类型对穴口尺寸的影响进行了对比研究,通过入土成穴试验发现圆口截面锥形鸭嘴栽植器形成的穴口尺寸小于方口截面锥形鸭嘴栽植器的穴口尺寸,即对地膜穴口破坏程度更小,但未考虑鸭嘴栽植器对土壤扰动和回流的影响。李静[10]对两叶片式鸭嘴栽植器的3种外形结构进行了仿真对比试验,在栽植器入土速度和栽植深度的因素影响下以入土时的最小阻力为目标进行了单因素和多因素分析,选取了最优鸭嘴片形状,但未考虑鸭嘴片对土壤成穴效果及栽植质量的影响。虽然国内外众多学者都进行了栽植机构设计和研究,并取得了一定的显著效果,但大多数栽植机构结构复杂,作业效果不稳定,且大多采用两叶片式鸭嘴栽植器,对其影响土壤成穴效果和栽植作业质量研究相对较少[11-13]。

因此,本研究以提高栽植机构作业时对土壤的成穴效果并满足栽植作业质量要求为目标,基于仿生鸭嘴片的优良特性,设计一种多叶片式鸭嘴栽植机构。以土壤的扰动量、回流量、穴口尺寸规则性为评价指标,对不同鸭嘴片数目下的栽植器进行不同条件下的成穴效果对比试验,并对所设计的多叶片式鸭嘴栽植机构进行栽植质量验证试验,以期为提高蔬菜机械化移栽作业质量提供理论依据和技术参考。

1 整体结构与工作原理

1.1 整体结构

多叶片式鸭嘴栽植装置整体结构如图1所示,由两个对称的鸭嘴栽植机构、直线丝杆模组、伺服电机以及连接板组成,该栽植装置为双行式栽植作业模式。其中鸭嘴栽植机构由栽植筒、栽植开合机构、多叶片式鸭嘴栽植器、栽植筒连接板组成。两个鸭嘴栽植机构对称布置,可由伺服电机驱动直线丝杆模组来驱动栽植机构进行上下垂直运动,实现栽植机构的入土、出土动作。多叶片式栽植器通过连接片和开合片与栽植筒相连,可根据鸭嘴叶片数目对栽植器进行安装位置的调整。鸭嘴开合机构通过开合U形连接板与多叶片式鸭嘴栽植器连接,实现栽植鸭嘴的开合动作,并通过抱箍连接板与栽植筒壁相连,进而实现栽植机构整体入土、开合、出土作业。

1.2 工作原理

该多叶片式鸭嘴栽植装置可适用于双行蔬菜自动移栽机,作业一次可栽两株钵苗,由于两个鸭嘴栽植机构工作原理相同,为避免重复阐述,本文仅针对一个鸭

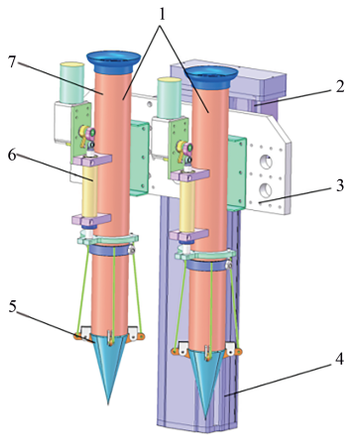


图1　多叶片式鸭嘴栽植装置整体结构图

Fig. 1　Overall structure diagram of multi-blade duck bill planting device

1. 鸭嘴栽植机构　2. 伺服电机　3. 连接板　4. 直线丝杆模组　5. 多叶片式鸭嘴栽植器　6. 栽植开合机构　7. 栽植筒

嘴栽植机构做理论研究和分析。图2为多叶片式鸭嘴栽植机构的作业流程图，开始作业时，由人工或取苗机构将蔬菜钵苗投入栽植筒接苗口，此时鸭嘴栽植器离作业垄面有一定的高度，为作业①；随后，伺服电机驱动直线模组并带动鸭嘴栽植机构向下运动，当栽植器向下运动至土壤一定深度时，此时为作业②；鸭嘴栽植器下降到指定栽植深度后，直线模组驱动栽植机构准备向上运动，同时鸭嘴开合机构开始工作，伴随着鸭嘴栽植器的上升，鸭嘴片逐渐张开至指定角度并保持一段时间，钵苗随着多叶片鸭嘴的张开落入穴孔中，当鸭嘴栽植器即将出土时鸭嘴片开始闭合，且保证闭合过程不伤苗，穴口在周围土壤的回流作用下被填充，此时为作业③；最后，随着栽植机构的向上运动，重新达到接苗点时，鸭嘴片在开合机构的作用下完全闭合，完成栽植作业，等待执行下次栽植动作，此时为作业④。

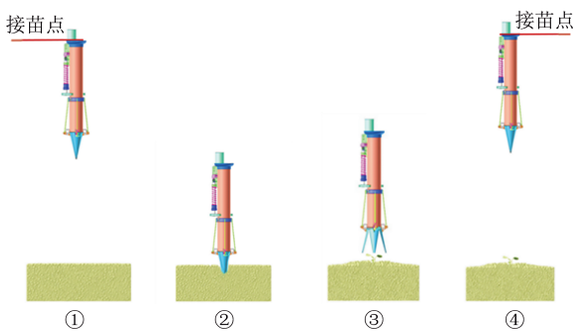


图2　多叶片式鸭嘴栽植机构工作流程图

Fig. 2　Flowchart of multi-blade duck bill planting mechanism

2　关键部件设计

2.1　多叶片式鸭嘴栽植器

移栽过程中，锥形鸭嘴栽植器空间既能够避免秧苗折损，又可以保证整个苗钵在其空间内是自由搁置，且容易入土，便于栽培，较好地模拟了手工栽植的灵活性和稳定性[14-18]。鸭嘴片形状和数目，对栽植器入土后成穴效果以及作业后栽植质量均会产生影响。基于蔬菜苗钵及苗叶的尺寸参数，建立苗钵三维模型，根据苗钵形状和目标鸭嘴片数目，初步确定单个鸭嘴片样条曲线的坐标点集，对多叶片鸭嘴的形状进行设计和改进，以满足对不同鸭嘴片数目下栽植器的设计和后续土壤成穴的模拟仿真试验分析[19,21]，如图3所示。

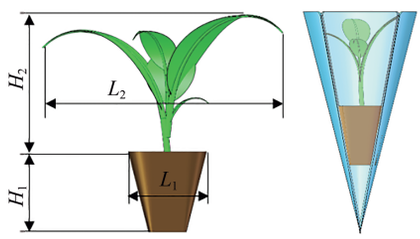


图3　栽植鸭嘴设计示意图

Fig. 3　Diagram of planting duck bill design

多叶片式鸭嘴栽植器既要完成对土壤的成穴作业，还要起到置放钵苗的作用，如图4所示，主要由仿生鸭嘴片、鸭嘴连接片、鸭嘴片拉杆、拉环组成，多个鸭嘴片均匀的围绕在栽植筒底部，通过连接片与栽植筒固定连接，在拉环以及鸭嘴片拉杆的作用下完成开合落苗动作。

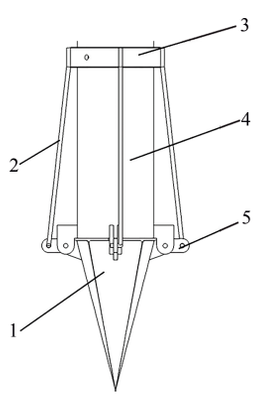


图4　多叶片式鸭嘴栽植器结构图

Fig. 4　Structure diagram of multi-blade duck bill planter

1. 仿生鸭嘴片　2. 鸭嘴片拉杆　3. 拉环　4. 栽植筒　5. 鸭嘴连接片

2.2　鸭嘴开合机构

鸭嘴开合机构是影响土壤成穴效果和栽植质量的关键部件，通过执行并传输动力，能够将栽植鸭嘴在合适的时间张开确定的角度。如图5所示，鸭嘴开合机构主要由开合凸轮机构和开合弹簧组成，它们决定着鸭嘴开合机构工作性能的稳定性与可靠性；开合凸轮机构主要由蜗轮蜗杆直流电机、凸轮、零点位置传感器、零点感应板、滚子轴承、开合弹簧、弹簧空心轴组成；工作时，开合直流电机带动凸轮转动，在凸轮轮廓的作用下推动从动件开合弹簧及空心轴上下运动，进而带动多叶片式鸭嘴栽植器工作，当凸轮转动到零点位置时，开合电机停止转动，鸭嘴片保持闭合。开合凸轮机构决定栽植鸭嘴

开合角度和开合速度，而不同的开合角度和开合速度对土壤的扰动量、回流量以及穴口尺寸都会产生不同的影响，因此，在对鸭嘴开合机构进行设计时不仅要保证工作稳定性与可靠性，同时也要满足土壤成穴效果要求。

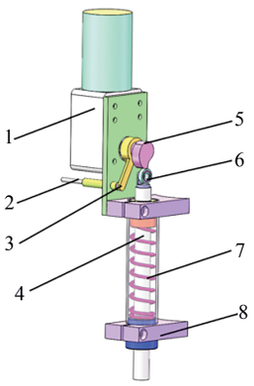


图5 鸭嘴开合机构结构图

Fig. 5 Duck bill opening and closing mechanism structure diagram

1. 蜗轮蜗杆直流电机 2. 位置传感器 3. 零点感应板 4. 弹簧空心轴 5. 开合凸轮 6. 滚子轴承 7. 开合弹簧 8. 连接板

2.2.1 开合凸轮机构设计

开合凸轮轮廓决定着鸭嘴栽植器开合角度和时间，通过对开合凸轮4个工作行程（推程、远休止、回程、近休止）在鸭嘴栽植器开合时的运动规律和作用进行分析，在满足工作稳定性和可靠性的前提下，结合凸轮机构设计手册，对开合凸轮的主要参数和轮廓曲线进行设计[21]。根据多叶片式鸭嘴栽植机构的工作形式，初步确定采用对心式直动滚子凸轮来保证鸭嘴栽植器快速开合。根据蔬菜钵苗外形尺寸，为了保证钵苗顺利落下且开合过程不伤苗，初步确定单个鸭嘴片开合角度为20°，同时可计算得到开合凸轮机构从动件运动行程。通过对栽植机构的整个工作流程进行分析，鸭嘴开合机构要保证与栽植直线丝杆模组在竖直方向上运动时序的配合，结合鸭嘴开合原理，初步确定凸轮机构从动件的运动规律。在满足凸轮负载及转速条件下，为减少运动时对凸轮刚性冲击，开合凸轮机构从动件推程和回程按余弦加速度运动规律运动。

凸轮主要设计参数包括压力角α、基圆半径r_b、滚子半径r_1等，是保证凸轮机构传动灵活、结构紧凑、受力合理的关键，也是凸轮轮廓曲线设计的依据。在凸轮机构中，压力角是衡量凸轮传动性能的指标，压力角愈大，传力性能愈好，但压力角过大时会发生自锁现象，考虑到鸭嘴开合机构的结构尺寸和开合凸轮的传动形式，凸轮推程和回程压力角不应较大，因此，在设计时，初选的开合凸轮推程压力角范围为$\alpha_{max}\leqslant[\alpha]=30°$，回程压力角范围为$\alpha'_{max}\leqslant[\alpha'_{max}]=80°$；基圆半径是决定凸轮轮廓的关键参数，在设计凸轮时，为保证凸轮的结构紧凑，提高机构的传动稳定性，基圆半径不宜过大，为增大凸轮的力学性能，提高凸轮的寿命，基圆半径不宜过小。因此，在压力角范围内，结合开合凸轮机构从动件运动规律与设计手册，初步选取开合凸轮的基圆半径为$r_b=10$ mm；对滚子半径进行设计时，不仅要保证开合凸轮表面和滚子之间有良好的接触，同时为保证凸轮接触强度，若滚子半径选择不当，会导致凸轮机构运动失真和疲劳损坏，凸轮的实际工作轮廓线会发生过度切割的现象[22-24]。结合基圆半径大小，初选凸轮机构滚子半径为$r_1=7.5$ mm。由初始鸭嘴开合角度可确定从动件推程为7 mm，在余弦运动规律下，默认栽植鸭嘴闭合时为初始状态，通过对鸭嘴栽植器开合时间和运动位移进行分析计算，初选开合凸轮推程角为25°，远休止角为195°，回程角为120°，近休止角为20°，根据从动件余弦加速度运动规律以及开合凸轮基本设计参数，可得各个阶段位移运动方程为

$$\begin{cases} S_1=0 & (0\leqslant\delta\leqslant\dfrac{\pi}{18}\text{或}\dfrac{35\pi}{18}<\delta\leqslant 2\pi) \\ S_2=\dfrac{h}{2}\left(1-\cos\left(\dfrac{\pi}{\delta_1}\left(\delta-\dfrac{\pi}{18}\right)\right)\right) & (\dfrac{\pi}{18}<\delta\leqslant\dfrac{7\pi}{36}) \\ S_3=h & (\dfrac{7\pi}{36}<\delta\leqslant\dfrac{23\pi}{18}) \\ S_4=\dfrac{h}{2}\left(1-\cos\left(\dfrac{\pi}{\delta_2}\left(\delta-\dfrac{23\pi}{18}\right)\right)\right) & (\dfrac{23\pi}{18}<\delta\leqslant\dfrac{35\pi}{18}) \end{cases} \tag{1}$$

式中 δ——凸轮转角

δ_1——凸轮推程角

δ_2——凸轮回程角

S_1——凸轮近休止运动方程

S_2——凸轮推程运动方程

S_3——凸轮远休止运动方程

S_4——凸轮回程运动方程

根据从动件各个阶段运动方程可得从动件滚子与开合凸轮接触点运动规律的理论位移曲线，如图6所示。

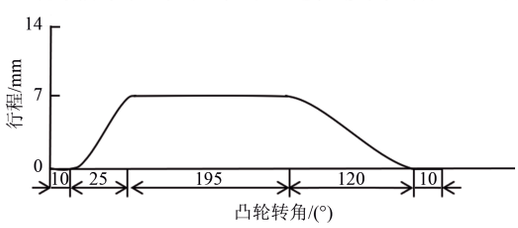


图6 从动件理论位移曲线

Fig. 6 Theoretical displacement curve of follower

通过对开合凸轮主要参数设计以及从动件运动规律分析，可利用反转法对凸轮轮廓曲线进行绘制[25]。假设开合凸轮静止不动，对从动件施加一个与凸轮转向相反的角速度，即$-\omega$，同时保持其预期的运动规律，做出滚子轴承的一系列位置，将滚子轴承中心的运动轨迹用光滑曲线连接，即为凸轮的理论轮廓曲线，然后以理论廓线上一系列点为圆心，以滚子半径为半径作一系列圆，再做此圆簇包络线，即为凸轮的工作轮廓曲线，如图7所示。

开合凸轮轮廓曲线可将鸭嘴开合过程分为4个工作

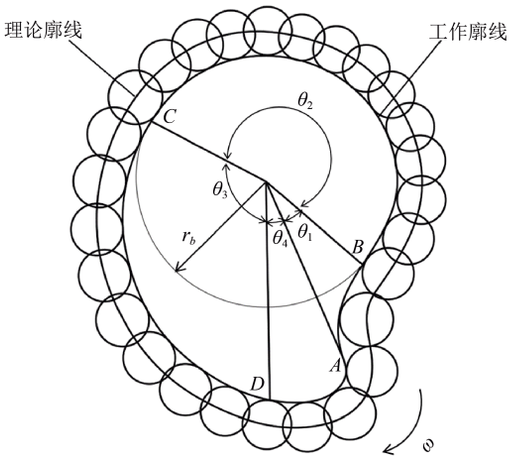


图7　开合凸轮轮廓曲线示意图

Fig. 7　Schematic of opening and closing CAM contour curve

阶段：①鸭嘴张开阶段，即凸轮的推程运动，曲线AB表示该阶段的凸轮轮廓曲线，θ_1为推程运动角，滚子轴承沿AB轮廓曲线运动到点B时，鸭嘴栽植器张开至指定角度。②鸭嘴张开保持阶段，即凸轮的远休止运动，滚子轴承沿着BC轮廓曲线运动，在该阶段内从动件弹簧形变量保持不变，栽植鸭嘴始终保持张开状态，保证钵苗完全落下，θ_2为远休止运动角。③鸭嘴闭合阶段，即为凸轮的回程，在该阶段内，从动件沿着凸轮轮廓曲线CD向下运动，弹簧被压缩，鸭嘴逐渐闭合直至点D鸭嘴完全闭合，θ_3为凸轮回程运动角。④鸭嘴闭合保持阶段，即为凸轮的近休止阶段，栽植鸭嘴闭合后，凸轮仍转动一定角度，保持鸭嘴的闭合状态，此时从动件的相对高度位置保持不变，滚子轴承沿着凸轮轮廓曲线DA运动，θ_4为凸轮近休止运动角。

通过对开合凸轮机构的运动规律、基本参数、轮廓曲线进行设计和分析，并绘制了开合凸轮机构从动件运动规律的理论位移曲线，为验证所设计的凸轮结构是否合理，运动规律是否正确，通过动力学软件RecurDyn来模拟开合凸轮机构的运动，分析运动仿真结果，与所得的理论位移曲线进行对比，验证其准确性，图8为开合凸轮动力学仿真模型。

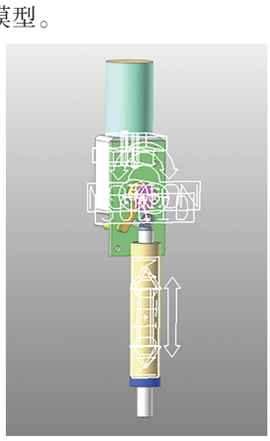


图8　开合凸轮动力学仿真模型

Fig. 8　Dynamic simulation model of opening and closing CAM

对仿真后的结果进行分析并导出凸轮的位移与时间的运动曲线，与理论运动方程所得出的运动曲线对比，趋势基本相同，符合所设计的余弦运动规律，验证了开合凸轮机构设计的合理性。图9为凸轮运动仿真位移曲线。

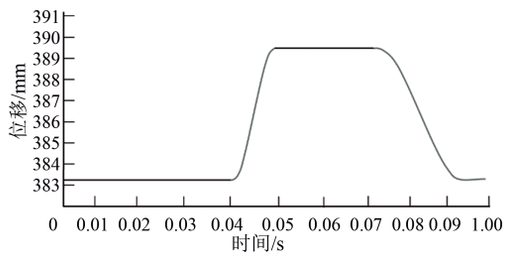


图9　开合凸轮运动仿真位移曲线

Fig. 9　Simulation displacement curve of opening and closing CAM motion

通过对开合凸轮的工作原理、主要设计参数以及运动规律的分析与计算，可得到开合凸轮初始设计参数：推程压力角α_{max}=30°，回程压力角α'_{max}=75°，基圆半径r_b=10 mm，滚子半径r_1=7.5 mm，结合凸轮余弦加速度运动规律，将推程角25°、远休止角195°、回程角120°、近休止角20°代入式(1)中可得到开合凸轮随角度变化的运动曲线，并根据主要设计参数利用反转法绘制凸轮轮廓曲线，利用仿真模型对凸轮轮廓曲线进行了相关验证，与理论设计方案一致。

2.2.2　开合弹簧参数设计

在开合凸轮的转动下，开合弹簧主要通过弹簧压缩形变产生的力来带动鸭嘴片的张开与闭合，作为开合凸轮与鸭嘴栽植器间的传动部件，其设计参数和工作性能直接影响鸭嘴开合机构工作的稳定性和可靠性。因此，根据开合机构原理确定弹簧所受工作载荷类型，并对影响开合弹簧参数的因素进行分析，保证弹簧设计参数的合理性。

由分析可知，在弹簧压缩力作用下，鸭嘴栽植器完成开合动作，根据对鸭嘴叶片初选的开合角度，可在动力学仿真运动中测得其初始开合阻力，即弹簧工作载荷F；根据多叶片式鸭嘴栽植器与开合弹簧间的运动示意图可建立开合过程的数学模型，推算出栽植鸭嘴开合角度与弹簧形变量之间的关系，得到在初始开合角度下的压缩形变量，如图10所示。

图10中L_1、L_2、L_3、L_4分别为栽植鸭嘴机构尺寸，θ为单个鸭嘴片张开角度，Δx为鸭嘴片张开角度θ下开合弹簧推程，开合角度θ与开合弹簧推程Δx之间的关系为

$$\begin{cases} y_1 = L_1 \sin\theta \\ \Delta y = L_1 \cos\theta - y_2 \\ y_3 = \sqrt{L_4^2 - \Delta y^2} \\ y_1 + y_3 = x_2 \\ x_2 - x_1 = \Delta x \end{cases} \tag{2}$$

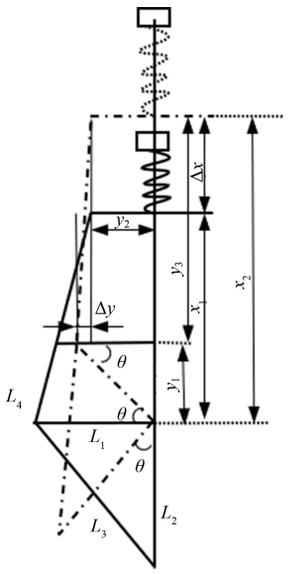


图10 开合弹簧运动示意图

Fig. 10 Diagram of opening and closing spring movement

根据《机械设计手册》并结合弹簧工作条件，所选弹簧应较软，刚性小，易绕制，故初选弹簧旋绕比C为5，由压缩弹簧材料和加工工艺，确定弹簧许用切应力τ_p，由初始开合角度θ为20°所对应的弹簧形变量f为7 mm及未触土状态下工作载荷F为92 N，可确定弹簧主要参数：弹簧丝直径d、弹簧有效圈数n、刚度K应满足[26]

$$\begin{cases} k = \dfrac{F}{f} = \dfrac{Gd^4}{8nD^3} = \dfrac{GD}{8nC^4} \\ d = 1.6\sqrt{\dfrac{KCF}{\tau_P}} \\ n = \dfrac{Gd^4 f}{8D^3 F} = \dfrac{GD}{8C^4 k} \end{cases} \tag{3}$$

式中 D——弹簧中径，mm

G——材料切变模量，MPa

根据式(2)中鸭嘴叶片开合角度与弹簧形变量之间的关系，可以得到不同开合角度θ下弹簧形变量ϕ；根据式(3)中弹簧主要参数的设计公式，结合弹簧初步选型参数与初始角度下的形变量f，将已知参数代入式(3)，计算得到初始开合角度下所对应开合弹簧丝直径d=5 mm，弹簧中径D=25 mm，有效圈数n=14.5，弹簧刚度K=13 N/mm，可以初步确定弹簧类型和主要设计参数。对弹簧参数进行初步设计后，对其施加试验载荷进行弹簧特性校核和疲劳强度校核，验证弹簧设计参数的合理性。

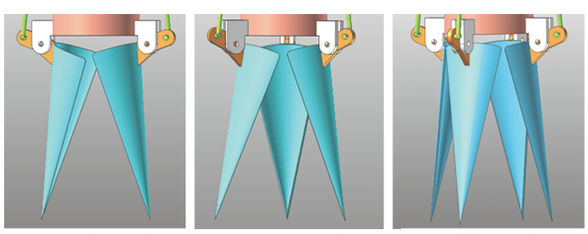
由分析可知，在对开合弹簧进行设计时，对其施加的工作载荷F以及弹簧压缩形变量f均对弹簧的设计参数有影响，而在不同的鸭嘴栽植器和开合角度下进行栽植作业时，所对应的弹簧工作载荷和压缩形变量也不同。因此，可通过对鸭嘴栽植器在不同类型、不同开合角度下的作业进行对比仿真试验，选取成穴效果最优下组合因素所对应的工作载荷和压缩形变量来对开合弹簧进行参数优化设计，既保证弹簧结构设计的合理性，又能够提高鸭嘴开合机构工作性能的稳定性和可靠性。

2.3 土壤成穴效果影响因素

将多叶片式鸭嘴栽植机构对土壤成穴效果评价指标确定为：土壤扰动量、土壤回流量、穴口尺寸规则性（穴口长度与宽度之差）。根据对多叶片式鸭嘴栽植机构的结构组成及设计原理分析可知，影响土壤成穴效果主要因素为：鸭嘴叶片数、鸭嘴片开合角度、鸭嘴开合速度。通过对鸭嘴栽植器作业时在不同交互因素下的各个指标进行耦合仿真试验分析，以成穴效果最优为目标，得到最优目标下组合因素。

2.3.1 鸭嘴叶片数

通过对鸭嘴栽植器调研和理论分析，鸭嘴叶片数目会对土壤扰动量、回流量以及穴口形状产生一定的影响。基于本文所设计的栽植机构，将鸭嘴栽植器分为3种类型进行对比试验，来探究对土壤成穴效果，即两叶片式鸭嘴、三叶片式鸭嘴、四叶片式鸭嘴，如图11所示。



(a) 两叶片式 (b) 三叶片式 (c) 四叶片式

图11 多叶片式鸭嘴模型

Fig. 11 Multi-leaf bill model

2.3.2 鸭嘴开合角度

鸭嘴开合角度不仅要保证苗钵顺利从鸭嘴中脱落，又要保证栽植成穴效果能够满足栽植质量的需求。针对同一种栽植鸭嘴类型进行分析，当单个鸭嘴片开合角度大于等于20°时蔬菜苗钵可顺利掉落，考虑到土壤成穴效果，在开合角度20°~24°中等差选择5组角度进行单因素对比试验。由于鸭嘴开合角度主要受凸轮轮廓影响，通过对鸭嘴片开合角度与弹簧压缩量之间的转换，确定从动件运动行程，进而可以确定不同开合角度下凸轮轮廓模型，如图12所示。

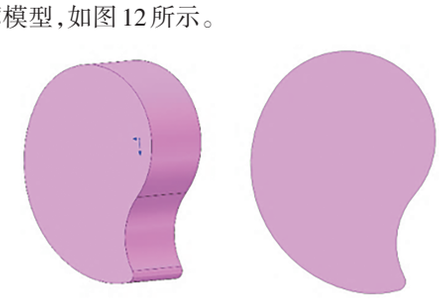


图12 凸轮轮廓模型

Fig. 12 CAM profile model

2.3.3 开合速度

鸭嘴开合速度由直流电机转速决定，不同开合速度会对土壤的成穴效果产生不同的影响。因此，基于对开

合机构运动过程及时间的分析，对开合电机转速进行合理设计，根据开合直流电机扭矩与转速之间的关系，初步选取50、60、70、80、90 r/min作为耦合仿真试验的开合电机转速。

3　成穴效果仿真试验

3.1　RecurDyn-EDEM耦合仿真模型建立

根据对栽植机构关键部件的设计及分析，可初步在Solidworks软件中建立栽植机构的三维模型。通过在动力学仿真软件RecurDyn中对多叶片式鸭嘴栽植机构施加相应运动约束，建立动力学仿真模型，来模拟栽植作业时的运动状态；通过在离散元仿真软件EDEM中建立与田间试验土壤参数相似的土槽模型，并施加与栽植机构相互作用的接触参数，通过软件间的耦合窗口可将栽植鸭嘴的作业状态进行实时模拟[27-28]。根据影响土壤成穴效果的3种主要因素，可对仿真模型以及运动约束进行调整，以此完成多组耦合仿真对比试验。图13为多叶片式鸭嘴栽植机构耦合仿真模型。

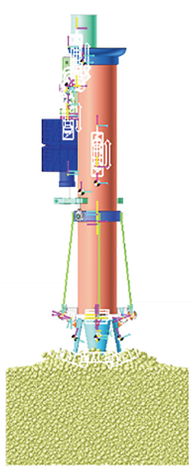


图13　多叶片式鸭嘴栽植机构耦合仿真模型

Fig. 13　Coupling simulation model of multi-blade duck bill planting mechanism

3.2　仿真试验

3.2.1　试验因素及评价指标

基于对影响土壤成穴效果的试验因素进行分析，为了能够更加了解三因素对土壤成穴效果的影响程度，以及探究在不同交互因素下栽植机构的成穴效果，对各组因素水平进行分类，进行三因素三水平二次正交试验，并定义土壤扰动量、回流量以及穴口尺寸规则性的评价指标[29-32]。表1为三因素三水平试验因素编码。

对3种影响土壤成穴的主要因素在相同的栽植深度下进行耦合仿真试验，通过对仿真后的土壤成穴效果进行分析，对土壤回流量、土壤扰动量、穴口尺寸规则性的评价指标进行定义。定义鸭嘴在完全打开时所成穴孔高度h_1与完全闭合出土后穴孔高度h_2之差为回流高度，

表1　三因素三水平试验因素编码

Tab. 1　Factors coding for three-factor three-level trials

编码	因素		
	鸭嘴片数目A/片	鸭嘴开合角度B/(°)	开合速度C/(r·min^{-1})
−1	2	20	50
0	3	22	70
1	4	24	90

回流高度与h_1比值为回流量，测定如图14所示。

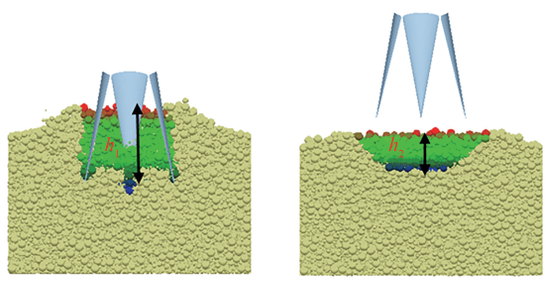


图14　土壤回流高度测定

Fig. 14　Soil reflux height determination

定义鸭嘴在到达栽植深度且未张开时所成穴孔形状截面面积为S_1，鸭嘴出土后完全闭合时所成穴孔形状截面面积为S_2，测定如图15所示，则土壤扰动量计算公式为

$$S = \frac{S_1 - S_2}{S_2} \tag{4}$$

式中　S——土壤扰动量

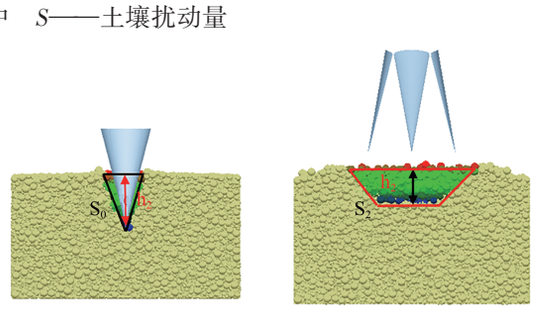


图15　土壤扰动量测定

Fig. 15　Soil disturbance measurement

将鸭嘴出土成穴后穴口尺寸规则性G定义为穴口长度L与宽度W之间差值，差值越大，穴口尺寸规则性越差，测定如图16所示。

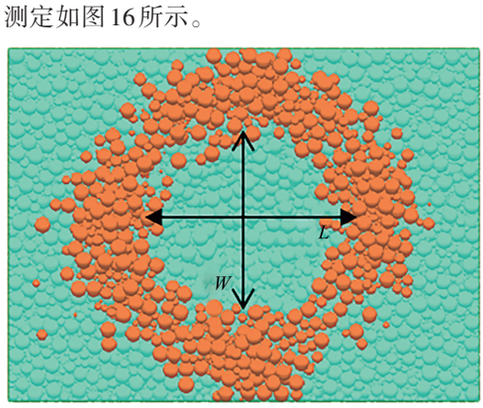


图16　穴口尺寸规则性测定

Fig. 16　Regular measurement of hole size

3.2.2 仿真试验方法

通过Design-Expert软件进行响应面试验设计，通过Box-Behnken试验原理设计三因素三水平仿真试验，表2为仿真试验方案与结果[33]。

表2 仿真试验方案与结果

Tab. 2 Simulation test scheme and resulting

试验序号	因素			土壤扰动量	土壤回流量	穴口尺寸规则性/mm
	鸭嘴片数目A/片	鸭嘴开合角度B/(°)	开合速度C/(r·min^{-1})			
1	4	22	90	0.564	0.693	7.13
2	3	22	70	0.571	0.687	22.42
3	2	20	70	0.483	0.525	52.22
4	3	24	50	0.802	0.576	22.49
5	2	22	50	0.602	0.621	52.18
6	3	22	70	0.567	0.680	22.13
7	3	20	50	0.495	0.517	21.92
8	3	22	70	0.559	0.779	22.38
9	3	20	90	0.513	0.492	22.37
10	3	24	90	0.812	0.582	21.89
11	3	22	70	0.563	0.686	22.19
12	2	22	90	0.614	0.587	52.47
13	4	20	70	0.412	0.693	6.56
14	4	24	70	0.741	0.750	7.30
15	2	24	70	0.796	0.587	52.13
16	4	22	50	0.559	0.689	6.71
17	3	22	70	0.553	0.677	22.34

通过对多叶片式鸭嘴栽植机构在不同交互因素下的耦合仿真结果进行对比，可以得到鸭嘴栽植机构对土壤扰动量为0.412~0.812，土壤回流量为0.492~0.779，穴口尺寸规则性变化范围为6.56~52.47 mm，故鸭嘴片数目、鸭嘴开合角度与鸭嘴开合速度对土壤成穴效果均有一定的影响。因此，为更加深入了解各种因素对栽植成穴效果的影响程度，并得到成穴效果最优下的因素组合，利用Design-Expert软件进行响应值的多元回归拟合分析。基于表2中的试验响应值，建立土壤扰动量X_1、土壤回流量X_2、穴口尺寸规则性X_3对鸭嘴叶片数目、鸭嘴开合角度、鸭嘴开合速度的二次多项式回归模型

$$\begin{cases} X_1 = 0.56 - 0.03I_1 + 0.16I_2 + 0.01I_3 + 0.004I_1I_2 - \\ \quad 0.002I_1I_3 - 0.002I_2I_3 - 0.01I_1^2 + 0.06I_2^2 + 0.03I_3^2 \\ X_2 = 0.70 - 0.06I_1 + 0.03I_2 - 0.01I_3 + 0.001I_1I_2 + \\ \quad 0.01I_1I_3 + 0.001I_2I_3 + 0.02I_1^2 - 0.08I_2^2 - 0.08I_3^2 \\ X_3 = 22.29 - 22.66I_1 + 0.09I_2 + 0.07I_3 + 0.21I_1I_2 + \\ \quad 0.03I_1I_3 - 0.26I_2I_3 + 7.36I_1^2 - 0.1I_2^2 - 0.03I_3^2 \end{cases} \tag{5}$$

式中 I_1、I_2、I_3——因素编码值

通过对各响应值的回归方程进行方差分析，可得到显著性分析结果如表3所示，结果表明：土壤扰动量、土壤回流量、穴口尺寸规则性回归模型均呈极显著（P<0.01）；失拟项均大于0.05，表明响应值回归方程拟合度高；回归模型决定系数R^2分别为：0.997 7、0.902 7、0.999 9，表明回归模型可以用于90%以上的评价指标，由此可知，该回归模型具有较好的可靠性。由表3中土壤扰动量的鸭嘴片数目和鸭嘴开合角度的P值均小于0.01可知，土壤扰动量受鸭嘴片数目I_1和鸭嘴开合角度I_2的影响极显著，鸭嘴开合速度I_3（P>0.05）的影响较弱；土壤回流量的鸭嘴片数目P值小于0.01，鸭嘴开合角度I_2和鸭嘴开合速度I_3的P值小于0.05，即鸭嘴片数目对土壤回流量的影响极显著，鸭嘴开合角度与开合速度的交互作用对土壤回流的影响较显著；由表3中穴口尺寸规则性的鸭嘴片数目P值小于0.01可知，对穴口尺寸规则性的影响较大的因素为鸭嘴片的数目，鸭嘴开合角度与开合速度的交互影响相对较弱。

为了能够更加准确地表示各个因素对相应响应值的影响，剔除原回归模型中影响不显著的交互项和平方项，得到重新优化响应值回归模型[34]

$$\begin{cases} X_1 = 0.56 - 0.03I_1 + 0.16I_2 + 0.01I_3 + 0.004I_1I_2 - \\ \quad 0.01I_1^2 + 0.06I_2^2 + 0.03I_3^2 \\ X_2 = 0.70 - 0.06I_1 + 0.03I_2 - 0.01I_3 + 0.001I_2I_3 - \\ \quad 0.08I_2^2 - 0.08I_3^2 \\ X_3 = 22.29 - 22.66I_1 + 0.09I_2 + 0.07I_3 + 0.21I_1I_2 + \\ \quad 7.36I_1^2 \end{cases} \tag{6}$$

3.2.3 试验结果与分析

为了能够更加直观地表达成穴效果评价指标之间的关系，基于回归方程，利用响应曲面分析不同交互因素对响应值的影响，图17为利用Design-Expert软件对不同回归模型进行分析得到的响应面。

由表3和图17a、17d、17g可知，鸭嘴叶片数目和鸭嘴开合角度P<0.01，即对土壤扰动量的影响极显著，且二者间的交互作用对土壤扰动的影响呈较显著趋势。随着鸭嘴叶片数的的减小，土壤扰动量逐渐增大，主要是由于当鸭嘴叶片数目较少时，打开相同的角度时土壤所受的挤压和推移方向不规则，对穴口内壁周围土壤的扰动较大，所形成的穴口面积相对较大；随着开合角度的增大，土壤扰动量逐渐增大，其主要原因是由于鸭嘴叶片对土壤穴口内部周围土壤产生的推移和挤压程度较大，进而导致形成较大的穴口面积，增大对土壤的扰动。

由表3及图17b、17e、17h可知，鸭嘴叶片数目以及鸭嘴开合角度、开合速度均对土壤回流量具有显著的影响，且在鸭嘴开合速度和开合角度的交互作用下，显著更加明显。随着鸭嘴叶片数目的增多，土壤回流逐渐增大，原因是在多叶片鸭嘴作用下，穴口周围的土壤颗粒受到多个方向的鸭嘴片触碰，在鸭嘴片闭合过程中会使得穴口周围的土壤颗粒朝着穴口方向滚动回流，减小鸭嘴出土闭合后土壤的穴口深度，进而增大土壤回流；随着鸭嘴开合角度和开合速度的逐渐增大，土壤回流量呈先增大后减小趋势，主要原因是由于随着开合角度和开合速度的逐渐增大，穴口尺寸逐渐增大，导致鸭嘴片在

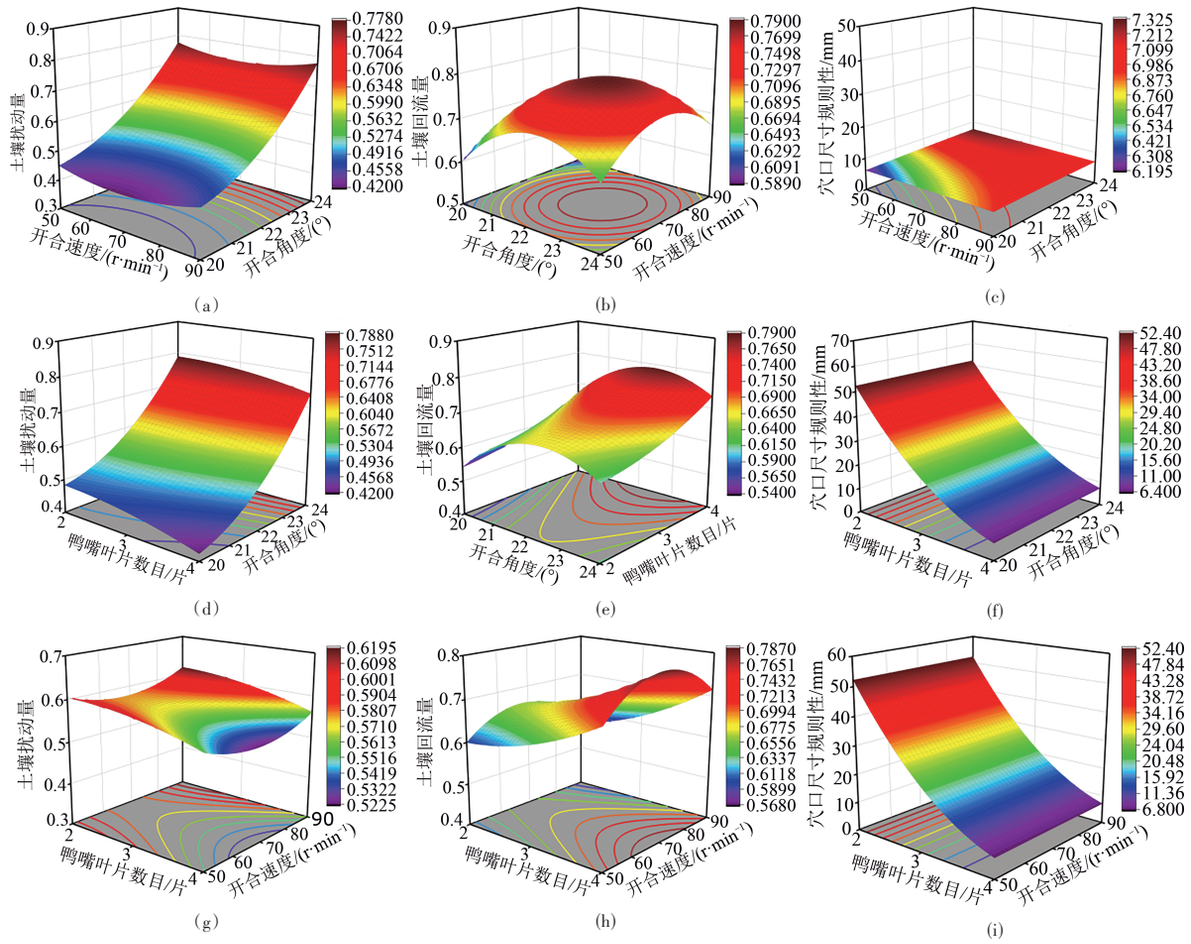


图 17　不同交互因素对成穴效果评价指标的响应曲面

Fig. 17　Response surfaces of different interaction factors to evaluation index of cavitation effect

表 3　方差分析

Tab. 3　Analysis of variance

方差来源	自由度	土壤扰动量			土壤回流量			土壤穴口规则性		
		平方和	*F*	*P*	平方和	*F*	*P*	平方和	*F*	*P*
模型	9	0.024 6	338.87	<0.000 1**	0.011 1	7.21	0.008 1**	482.02	16 268.52	<0.000 1**
I_1	1	0.006 0	82.54	<0.000 1**	0.031 9	20.80	0.002 6**	4 108.71	1.386×10^5	<0.000 1**
I_2	1	0.194 7	2 680.33	<0.000 1**	0.009 0	5.86	0.041 5*	0.068 5	2.31	0.172 4
I_3	1	0.000 3	3.48	0.070 2	0.000 3	0.195	0.250 9	0.039 2	1.32	0.288 0
I_1I_2	1	0.000 1	0.881 1	0.039 1*	6.25×10^{-6}	0.004 1	0.342 3	0.172 2	5.81	0.046 8*
I_1I_3	1	0	0.168 6	0.293 6	0.000 4	0.235 6	0.031 9*	0.004 2	0.142 5	0.070 7
I_2I_3	1	0	0.220 3	0.453 1	0.000 2	0.156 8	0.132 0	0.275 6	9.30	0.728 6
I_1^2	1	0.000 7	9.31	0.018 5*	0.001 9	1.25	0.300 0	227.94	7 688.53	<0.000 1**
I_2^2	1	0.014 2	195.51	<0.000 1**	0.030 0	19.57	0.003 1**	0.039 8	1.34	0.284 5
I_3^2	1	0.005 1	70.30	<0.000 1**	0.024 1	15.72	0.005 4**	0.003 1	0.105 5	0.754 9
残差	7	0.001 1			0.001 5			0.029 6		
失拟	3	0	2.14	0.197 9	0.001 1	0.569 0	0.664 4	0.048 2	3.05	0.154 5
误差	4	0			0.001 9			0.015 8		
总和	16									

注：**表示影响极显著（P<0.01），*表示影响较显著（0.01≤P<0.05）。

快速闭合的过程中穴口周围土壤颗粒的接触和碰撞更多，造成更多的土壤颗粒随着鸭嘴片的快速闭合向穴口中间产生位移，增大穴口回流，但当开合角度和开合速度过大时会使得穴口尺寸过大，会减小土壤颗粒与鸭嘴叶片间的接触与碰撞时间，且土壤颗粒对鸭嘴叶片的快速闭合而产生的位移量不能够满足回流需求，导致穴口深度较大，回流量较低。

由表 3 及图 17c、17f、17i 可知，穴口尺寸规则性主要受鸭嘴叶片数目的影响，且鸭嘴叶片数 P<0.01，其影响极显著，在与开合角度因素交互下，其 P 小于 0.05，具有

较显著的影响。随着鸭嘴叶片数目的增加，穴口尺寸规则性数值逐渐降低，即规则性逐渐提升。主要原因是由于随着鸭嘴叶片数目的增加，鸭嘴叶片所产生的穴口形状由长条形逐渐转变为圆形，即长度和宽度的尺寸差逐渐减小，随着开合角度的逐渐增大，即使穴口尺寸规则性不会产生较大的变化，但会造成穴口整体尺寸的增加，减小土壤回流作用。

3.3 试验结果目标优化

土壤扰动量、土壤回流量、穴口尺寸规则性是评价栽植器成穴效果的关键指标，为了能够得到约束条件范围内各因素的最优组合，同时为后续多叶片鸭嘴栽植机构的作业试验提供性能参数依据，将成穴效果的3个关键因素作为评价指标，结合各因素边界条件建立数学模型[35]，对成穴效果评价指标的回归模型进行多目标优化，约束条件和目标函数为

$$\begin{cases} \min X_1 \\ \max X_2 \\ \min X_3 \\ \text{s.t.} \begin{cases} 2 \leqslant A \leqslant 4 \\ 20^\circ \leqslant B \leqslant 24^\circ \\ 50\ \text{r/min} \leqslant C \leqslant 90\ \text{r/min} \end{cases} \end{cases} \tag{7}$$

利用Design-Expert软件对目标函数进行参数优化，得到鸭嘴叶片数目为4、鸭嘴开合角度为22°、鸭嘴开合速度为70 r/min时，对应的土壤扰动量、土壤回流量、穴口尺寸规则性分别为0.559、0.788、7.136 mm，此时土壤成穴效果最优。

4 栽植验证试验

4.1 试验条件与方案

基于正交仿真试验结果，对四叶片式鸭嘴栽植机构进行结构优化与加工，并搭建在课题组研制的两行自动移栽机上进行栽植作业试验，于江苏省镇江市世业洲试验田内进行实地栽植作业试验，以验证成穴效果与耦合仿真试验结果的一致性，同时对作业后的露苗率、直立度等栽植质量进行评判。

本次栽植试验是基于四叶片鸭嘴栽植器在不同的开合角度、开合速度下对成穴效果和作业质量的验证。作业时，栽植深度保持70 mm不变，通过简单替换开合角度为20°、22°、24°所对应的3种开合凸轮来实现不同开合角度下的试验；通过调节开合直流电机的转速来实现不同开合速度下的试验。分别对栽植作业后的土壤扰动量、土壤回流量以及穴口尺寸规则性进行测量与计算，并与耦合仿真试验的数据进行误差分析。栽植机构加工、搭建与试验如图18所示。

栽植试验结束后，对成穴效果和栽植质量进行数据统计和分析，记录栽植作业后的露苗率、钵苗直立度作为栽植质量评价指标，根据机械行业标准JB/T 10291—2013《旱地栽植机械》要求，栽植试验露苗率和直立度计

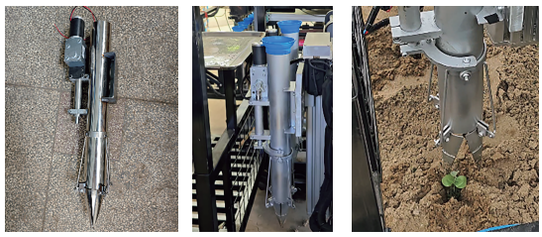


图18 四叶片鸭嘴栽植机构加工、搭建与栽植作业试验

Fig. 18 Processing, construction and planting experiment of four-leaf duck bill planting mechanism

算式为

$$E = \frac{n_1}{N} \times 100\% \tag{8}$$

式中 E——露苗率

n_1——露苗株数

N——测定的总株数

$$G = \frac{n_2}{N} \times 100\% \tag{9}$$

式中 G——直立度

n_2——蔬菜茎杆与地面之间的夹角大于45°的株数

根据表2，对在四叶片鸭嘴栽植机构下的4组仿真试验方案进行栽植试验验证，由表2中的试验序号，由小到大对4组试验方案进行先后排序。为了保证试验结果的可靠性，进行多组重复栽植作业试验，并对试验后的成穴效果的评价指标分别进行测量，取平均值作为与仿真结果的对比数据。

4.2 试验结果与分析

对栽植作业后成穴效果的评价指标以及栽植质量的评价指标进行测量、记录和计算，栽植作业后的成穴效果和栽植质量如图19所示。



图19 成穴效果和栽植质量试验

Fig. 19 Cavitation effect and planting quality verification

四叶片鸭嘴栽植机构栽植作业后成穴效果评价结果如表4所示。表4中的试验序号与表2中的试验序号

表4 四叶片鸭嘴栽植机构栽植作业试验结果

Tab. 4 Planting experiment results, simulation results and error values of four-leaf duck bill planting mechanism

试验序号	栽植作业试验值/mm			仿真试验值/mm			误差/%		
	X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3
1	0.576	0.710	7.24	0.564	0.693	7.13	2.1	2.5	1.5
13	0.420	0.707	6.68	0.412	0.693	6.56	1.9	2.0	1.8
14	0.759	0.771	7.45	0.741	0.750	7.3	2.4	2.7	2.0
16	0.573	0.704	6.83	0.559	0.689	6.71	2.5	2.1	1.7

相对应，根据表4中的试验结果，以折线图的形式与仿真试验结果进行曲线一致性对比，并对平均误差进行计算分析，验证仿真试验结果的正确性，图20为四叶片鸭嘴栽植机构栽植作业试验结果与仿真试验结果对比及误差分析。

根据对栽植作业试验结果与仿真试验数据对比可知，二者曲线趋势一致且基本重合，并且通过对实际数据与仿真数据间的平均误差计算可得：栽植作业试验与仿真试验间土壤扰动量的平均误差为2.2%；土壤回流量的平均误差为2.3%；穴口尺寸规则性的平均误差为1.8%，符合仿真试验与实际试验间的误差要求。并且对仿真试验与栽植试验进行综合分析，在四叶片鸭嘴下开合角度和开合电机转速分别为22°、70 r/min时，为成穴效果最优下的试验组合因素。通过对四叶片鸭嘴栽植机构在开合角度为22°、开合电机转速为70 r/min下进行栽植作业质量测量，露苗率为3.6%，直立度合格率为96.7%，符合机械行业标准JB/T 10291—2013《旱地栽植机械》中露苗率小于等于5%，直立度大于等于93%的要求。试验结果表明，对多叶片鸭嘴栽植机构的设计与理论分析均符合实际作业需求，且在四叶片鸭嘴栽植器下成穴效果和栽植质量更好。

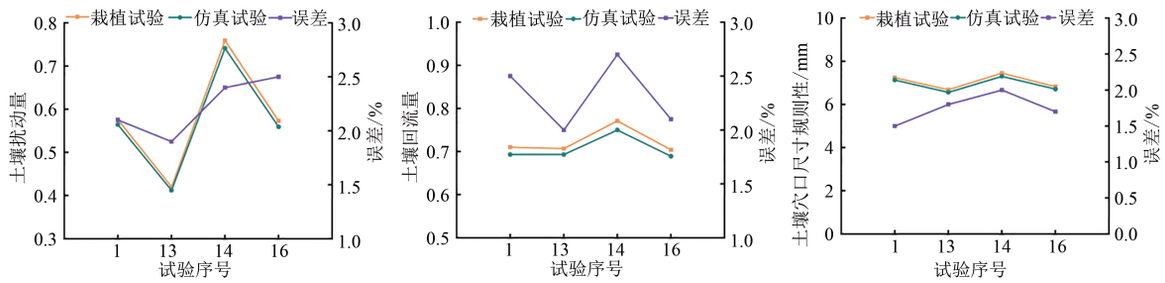


图20　栽植试验与仿真试验结果对比及误差分析

Fig. 20　Comparison and error analysis of results of planting test and simulation test

5　结论

（1）通过对多叶片鸭嘴式栽植机构的结构组成及工作原理进行分析，建立理论数学模型，对其关键部件进行结构设计，并结合动力学与离散元的耦合仿真，确定影响鸭嘴栽植机构栽植性能的关键参数以及对土壤成穴效果的因素。其中，影响成穴效果的因素为鸭嘴片数目、鸭嘴开合角度、鸭嘴开合速度，成穴效果的评价指标为土壤扰动量、土壤回流量以及穴口尺寸规则性。

（2）对影响多叶片鸭嘴栽植机构成穴效果的因素进行基于RecurDyn-EDEM耦合仿真试验，对试验水平和因素进行划分，设计二次正交旋转中心组合试验，建立回归模型，并对其响应曲面和方差进行分析，得到栽植机构对土壤成穴效果的影响由大到小为鸭嘴片数目、鸭嘴开合角度、鸭嘴开合速度，并且各个因素之间存在交互作用。对正交试验所建立的回归方程进行目标优化，确定了当鸭嘴叶片数为4片、鸭嘴开合角度为22°，鸭嘴开合电机转速为70 r/min时，土壤扰动量为0.559、土壤回流量为0.788、土壤穴口尺寸规则性为7.136 mm，此时成穴效果最优。

（3）根据仿真试验结果，对四叶片式鸭嘴栽植机构进行加工和搭建，并对耦合仿真试验结果进行大田栽植作业试验验证，同时以栽植作业后的露苗率、钵苗直立度合格率为指标对栽植作业质量进行评价。试验结果表明，在四叶片式鸭嘴栽植机构下，栽植作业试验结果与仿真试验结果曲线基本一致，成穴效果评价指标平均误差分别为：土壤扰动量2.2%，土壤回流量2.3%，土壤穴口规则性1.8%，符合仿真试验与实际试验间误差的要求；同时，栽植作业后露苗率为3.6%，直立度合格率为96.7%，满足机械行业标准JB/T 10291—2013《旱地栽植机械》中的要求。

参　考　文　献

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

[2]　李林林，邓干然，林卫国，等.作物移栽机械栽植机构发展现状与趋势[J].现代农业装备，2022，43(1)：2－7.
LI Linlin，DENG Ganran，LIN Weiguo，et al. Current situation and trend of crop transplanting machinery[J]. Modern Agricultural Equipment，2022，43(1)：2－7.(in Chinese)

[3]　全伟，唐叶，段益平.打穴式移栽机械发展现状与展望[J].农业工程与装备，2020，47(3)：18－22.
QUAN Wei，TANG Ye，DUAN Yiping. Development status and prospect of punching transplanting machinery[J]. Agricultural Engineering and Equipment，2020，47(3)：18－22.(in Chinese)

[4]　石铁.全自动玉米秧苗移栽机的研制与试验[J].农业工程学报，2015，31(3)：23－30.
SHI Tie. Development and experiment of automatic corn seedling transplanter[J]. Transactions of the CSAE，2015，31(3)：23－30.(in Chinese)

[5] ANKIT S ,SANJAY K .Current developments in vegetable transplanters in developing countries[J].International Journal of Vegetable Science,2022,28(5):417 - 440.

[6] 王洪波. 番茄自动移栽机栽植机构的设计与试验[D]. 泰安:山东农业大学,2018.
WANG Hongbo. Design and experiment of tomato automatic transplanter planting mechanism [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University,2018. (in Chinese)

[7] 王永维,何焯亮,王俊,等.旱地蔬菜钵苗自动移栽机栽植性能试验[J].农业工程学报,2018,34(3):19 - 25.
WANG Yongwei, HE Zhaoliang, WANG Jun, et al. Experiment on planting performance of automatic pot transplanter for vegetable seedlings in dry land[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(3):19 - 25. (in Chinese)

[8] 李慧霜,马月虹,曹新伟.手扶式移栽机栽植机构优化设计与试验[J].中国农机化学报,2022,43(11):24 - 31.
LI Huishuang, MA Yuehong, CAO Xinwei. Optimization design and experiment of planting mechanism of hand-Supported transplanter [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2022,43(11):24 - 31. (in Chinese)

[9] 刘洋. 蔬菜穴盘苗移栽苗钵破损机理及栽植器成穴运动优化与试验[D]. 镇江:江苏大学,2019.
LIU Yang. Damage mechanism of vegetable pot transplanting pot and optimization and experiment of planter cavitation movement [D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2019. (in Chinese)

[10] 李静. 多行密植自动移栽机设计及分苗栽植技术研究[D]. 镇江:江苏大学,2022.
LI Jing. Design of automatic transplanter for multi-row dense planting and research on separate planting technology [D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2022. (in Chinese)

[11] 韩长杰,肖立强,徐阳,等.辣椒穴盘苗自动移栽机设计与试验[J].农业工程学报,2021,37(13):20 - 29.
HAN Changjie, XIAO Liqiang, XU Yang, et al. Design and experiment of automatic seedling transplanting machine for pepper hole[J]. Transactions of the CSAE, 2021,37(13):20 - 29. (in Chinese)

[12] 尹智明. 全自动番茄移栽机栽植机构的设计与试验[D]. 雅安:四川农业大学,2022.
YIN Zhiming. Design and experiment of planting mechanism of automatic tomato transplanter [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University,2022. (in Chinese)

[13] 李慧,何腾飞,刘虎,等.丘陵山地甘薯膜上仿形扦插移栽机研制[J].农业工程学报,2023,39(16):26 - 35.
LI Hui, HE Tengfei, LIU Hu, et al. Development of cutting transplanting machine on film of sweet potato in hilly region[J]. Transactions of the CSAE,2023,39(16):26 - 35. (in Chinese)

[14] 杨启志,朱梦岚,贾翠平,等.穴盘苗高速移栽机吊杯式栽植器膜上成穴性能仿真与试验[J].中国农机化学报,2022,43(7):1 - 7.
YANG Qizhi, ZhU Menglan, JIA Cuiping, et al. Simulation and experiment on film cavitation performance of cup-type planter in high speed pot transplanter[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2022,43(7):1 - 7. (in Chinese)

[15] 全伟,吴明亮,罗海峰,等.油菜钵苗移栽机成穴作业方式及参数优化[J].农业工程学报,2020,36(11):13 - 21,327.
QUAN Wei, WU Mingliang, LUO Haifeng, et al. Method and parameter optimization of pot seedling transplanter for rape [J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(11):13 - 21,327. (in Chinese)

[16] DU Sheng , YU Junzhi , et al.Determining the minimal mulch film damage caused by the up-film transplanter[J].Advances in Mechanical Engineering,2018,10(3):1687814018766777 - 1687814018766777.

[17] 王永维,唐燕海,王俊,等.蔬菜钵苗高速移栽机吊杯式栽植器参数优化[J].农业机械学报,2016,47(1):91 - 100.
WANG Yongwei, TANG Yanhai, WANG Jun, et al. Parameter optimization of cup-type transplanter for vegetable pot seedling high-speed transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(1):91 - 100. (in Chinese)

[18] 金丽宇,张伟,付晓明,等.鸭嘴式蔬菜移栽机栽植机构设计与试验[J].黑龙江八一农垦大学学报,2021,33(5):100 - 105,134.
JIN Liyu, ZHANG Wei, FU Xiaoming, et al. Design and experiment of planting mechanism of duck bill vegetable transplanter[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University,2021,33(5):100 - 105,134. (in Chinese)

[19] 颜华,刘冲,李鹏斌,等.蔬菜移栽机栽植静轨迹可调式鸭嘴栽植装置设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(5):71 - 81.
YAN Hua, LIU Chong, LI Pengbin, et al. Design and experiment of duck bill planting device with adjustable static trajectory for vegetable transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(5):71 - 81. (in Chinese)

[20] 邵园园,刘艺,玄冠涛,等.多功能鸭嘴式蔬菜移栽机设计与仿真分析[J].中国农机化学报,2019,40(11):9 - 12,34.
ShAO Yuanyuan, LIU Yi, XUAN Guantao, et al. Design and simulation analysis of multi-function duck bill vegetable transplanter[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2019,40(11):9 - 12,34. (in Chinese).

[21] 金鑫,李树君,杨学军,等.膜上移栽钵苗栽植机构运动分析与参数优化[J].农业机械学报,2012,43(增刊):29 - 34.
JIN Xin, LI Shujun, YANG Xuejun, et al. Motion analysis and parameter optimization of transplanting mechanism of membrane transplanting pot seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(Supp.):29 - 34. (in Chinese)

[22] 孙恒,葛文杰. 机械原理(第9版)[M]. 北京:高等教育出版社. 2021.

[23] 付鹏洋,胡建平,刘发,等.齿轮连杆凸轮组合式栽植机构仿真与试验[J].农业机械学报,2014,45(增刊):52 - 56.
FU Pengyang, HU Jianping, LIU Fa, et al. Simulation and experiment of gear link CAM combined planting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(Supp.):52 - 56. (in Chinese)

[24] 王海滨，李志鹏，姜雪松，等.基于槽型凸轮传动的蓝莓采摘机设计与试验[J].农业机械学报，2018，49(10)：80－91.
WANG Haibin，LI Zhipeng，JIANG Xuesong，et al. Design and experiment of blueberry picker based on trough CAM drive [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(10)：80－91.（in Chinese）
[25] 白云鹏. 基于动力学的盘状凸轮机构凸轮轮廓的设计方法[D]. 沈阳：沈阳建筑大学，2015.
BAI Yunpeng. Design method of CAM profile of disc CAM mechanism based on dynamics [D]. Shenyang：Shenyang Jianzhu University，2015.（in Chinese）
[26] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京：化学工业出版社，2008.
[27] 孙宁，史先磊，陈艳，等.基于EDEM的马铃薯挖掘装置设计与试验[J].农机化研究，2024，46(11)：29－34，44.
SUN Ning，SHI Xianlei，CHEN Yan，et al. Design and experiment of potato digging device based on EDEM[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2019，46(11)：29－34，44.（in Chinese）
[28] 陈超鹏，全伟，吴明亮，等.基于离散元法的油菜移栽垂直入土式成孔部件参数优化[J].湖南农业大学学报(自然科学版)，2019，45(4)：433－439.
CHEN Chaopeng，QUAN Wei，WU Mingliang，et al. Parameter optimization of vertical penetrating parts in rape transplanting based on discrete element method[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science Edition)，2019，45(4)：433－439.（in Chinese）
[29] 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）
[30] 张荣芳，周纪磊，刘虎，等.玉米颗粒粘结模型离散元仿真参数标定方法研究[J].农业机械学报，2022，53(增刊1)：69－77.
ZHANG Rongfang，ZHOU Jilei，LIU Hu，et al. Research on parameter calibration method for discrete element simulation of corn particle bonding model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2022，53(Supp.1)：69－77.（in Chinese）
[31] ABHIJIT K，MATHUR S M. Design and development of an automatic vegetable transplanter using a novel rotating finger device with push-type mechanism for plug seedlings[J].International Journal of Vegetable Science，2022，28(2)：121－131.
[32] 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）
[33] 韩长杰，徐阳，尤佳，等.半自动压缩基质型西瓜钵苗移栽机成穴器参数优化[J].农业工程学报，2019，35(11)：48－56.
HAN Changjie，XU Yang，YOU Jia，et al. Optimization of pit parameters of semi-automatic compressed matrix watermelon pot transplanter[J]. Transactions of the CSAE，2019，35(11)：48－56.（in Chinese）
[34] 苑进，李金光，邹亮亮，等.基于离散元的菠菜收获机根切铲优化设计与试验[J].农业机械学报，2020，51(增刊2)：85－98.
YUAN Jin，LI Jinguang，ZOU Liangliang，et al. Optimal design and experiment of root cutter for spinach harvester based on discrete elements[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(Supp.2)：85－98.（in Chinese）
[35] 田立权，李红阳，胡华东，等.同轴双滚筒联合收获机设计与试验[J].农业机械学报，2020，51(增刊2)：139－146.
TIAN Liquan，LI Hongyang ，HU Huadong，et al. Design and experiment on coaxial double speed threshing for combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(Supp.2)：139－146.（in Chinese）

（上接第216页）

[21] XIAO M，MA Y，WANG C，et al. Design and experiment of fuzzy-PID based tillage depth control system for a self-propelled electric tiller [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering，2023，16(4)：116－125.
[22] CHEN C L，CHEN P C. Analysis and design of fuzzy control system[J]. Fuzzy Sets and Systems，1993，57(2)：125－140.
[23] 董馨雨. 两相混合式步进电机高精度闭环驱动控制系统及实验研究[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2021.
DONG Xinyu. Research on high accuracy closed-loop drive control system and experiment of two-phase hybrid stepping motor [D]. Shenyang：Shenyang University of Technology，2021.（in Chinese）
[24] SUDHA G，ANITA R. Performance based comparison between various ZN tuninng PID and fuzzy logic PID controller in position control system of DC motor[J]. International Journal on Soft Computing，2012，3(3)：55.
[25] SAIN D，MOHAN B M. Modeling，simulation and experimental realization of a new nonlinear fuzzy PID controller using center of gravity defuzzification[J]. ISA Transactions，2021，110：319－327.
[26] 张学东，刘立晶，宁义超，等.蔬菜移栽机顶夹式取苗装置末端执行器设计与试验[J].农业机械学报，2023，54(增刊1)：115－124，134.
ZHANG Xuedong，LIU Lijing，NING Yichao，et al. Design and experiment of end effector of seedling taking by jacking and clampling of vegetable transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(Supp.1)：115－124，134.（in Chinese）
[27] 车刚，刘威，万霖，等.水稻秧棚苗床精平机自动调平系统设计与试验[J].农业工程学报，2023，39(22)：9－17.
CHE Gang，LIU Wei，WAN Lin，et al. Design and experiment of the automatic leveling system for seedbed precision leveler in rice seedling nursery[J]. Transactions of the CSAE，2023，39(22)：9－17.（in Chinese）