doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.08.007

蔬菜移栽机斜齿轮-非圆齿轮行星轮系取苗机构研究

周海丽[1,2]　刘建刚[1,3]　俞高红[1,2]　齐　鹏[1,2]　王　磊[1,2]　郑　剑[4]

(1.浙江理工大学机械工程学院,杭州 310018;2.浙江省种植装备技术重点实验室,杭州 310018;
3.武夷学院机电工程学院,南平 354300;4.杭州杭氧透平机械有限公司,杭州 310011)

摘要:针对完全非圆齿轮行星轮系取苗机构存在推苗角不够大,而不完全非圆齿轮轮系取苗机构存在冲击的问题,本文设计了一种满足蔬菜移栽取苗要求的具有较大推苗角的非圆完全齿轮行星轮系取苗机构。基于傅里叶函数设计了一种二次不等幅传动比曲线,开发取苗机构设计分析软件,分析傅里叶系数对取苗轨迹的影响规律,研究傅里叶系数对传动比曲线及从动轮和秧针速度特性的影响,揭示傅里叶系数对取苗机构运动学参数的影响规律,推导了不同傅里叶系数时取苗机构取苗角和推苗角的变化规律。制造和装配取苗机构,基于虚拟样机、高速摄像技术对取苗机构进行了旋转试验,通过对比取苗轨迹的理论、仿真和试验值一致性验证了取苗机构设计的可行性。对取苗机构进行了台架取苗试验,得出转速 40、50、60 r/min 时取苗机构的取苗成功率分别为 94%、90% 和 88%,通过取苗试验进一步验证了取苗机构设计的可行性。

关键词:蔬菜移栽机;取苗机构;傅里叶系数;非圆齿轮;推苗角

中图分类号:S223.9　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2023)08-0077-10　　**OSID**:

Design and Experiment of Seedling Picking Mechanism for Helical Gear - Non Circular Gear Planetary Gear System

ZHOU Haili[1,2]　LIU Jian'gang[1,3]　YU Gaohong[1,2]　QI Peng[1,2]　WANG Lei[1,2]　ZHENG Jian[4]

(1. *School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou* 310018, *China*
2. *Zhejiang Province Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology, Hangzhou* 310018, *China*
3. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Wuyi University, Nanping* 354300, *China*
4. *Hangzhou Hangyang Turbomachinery Co., Ltd., Hangzhou* 310011, *China*)

Abstract: There is a problem of insufficient pushing angle in the seedling picking mechanism of the complete non circular gear planetary gear system, while there is an impact on the seedling picking mechanism of the incomplete non circular gear system. A non circular complete gear planetary gear system seedling picking mechanism was designed with a large pushing angle that met the requirements of vegetable seedling picking. Based on Fourier function, a quadratic unequal amplitude transmission ratio curve was designed, and the influence of Fourier function coefficient on the seedling path was analyzed. The change relationship of Fourier function coefficient on the transmission ratio curve and the angular displacement of the driven gear was studied. The change law of Fourier coefficient on the dynamic parameters of the seedling picking mechanism was revealed. The change relationship of Fourier function coefficient on the seedling picking angle and the seedling pushing mechanism was deduced. Manufacturing and assembling the seedling picking mechanism. Based on the virtual prototype and high-speed camera technology, the rotation test of the seedling picking mechanism was carried out. The feasibility of the design of seedling experimental values of the seedling picking trajectory was done. The seedling picking mechanism was tested on the platform. The success rates of the seedling picking mechanism at different rotational speeds (40 r/min, 50 r/min, 60 r/min) were 94%, 90% and 88%, respectively. The feasibility of the design of the seedling picking mechanism was further verified by the seedling picking experiment.

Key words: vegetable seedling transplanter; seedling picking mechanism; Fourier coefficient; non-circular gear; pushing angle

收稿日期:2023-04-27　修回日期:2023-05-25

基金项目:上海市科技兴农项目(沪农科创字(2021)第 4-1 号)、国家重点研发计划项目(2022YFD2001800)、国家自然科学基金项目(52075497、32201676)和福建省自然科学基金项目(2021J011133)

作者简介:周海丽(1989—),女,讲师,博士,主要从事农业机械设计和气固两相流仿真研究,E-mail:zhouhl@zstu.edu.cn

通信作者:俞高红(1975—),男,教授,博士生导师,主要从事移栽装备创新设计和机构运动学与动力学研究,E-mail:yugh@zstu.edu.cn

0 引言

取苗机构是移栽机械实现自动移栽的关键核心零部件,国内外学者在取苗机构的研究方面取得了一定的进展,主要采用各种杆结构或 PLC 控制取苗的方式实现自动移栽取苗。相比各种杆机构,轮系取苗机构工作平稳,其对称旋转式分布旋转一周可以实现两次取苗和推苗动作,取苗效率高,学者也开展了大量研究[1-18]。

这些研究中,轮系取苗机构主要采用不完全的非圆齿轮实现间隙传动,而不完全的非圆齿轮传动不可避免存在一定冲击;部分机构采用完全非圆齿轮连续传动提高传动平稳性,但其推苗角还可进一步优化(增大推苗角可提高推苗时秧苗的直立度,提高成功率)。因此,设计一种完全非圆齿轮行星轮系取苗机构且进一步优化推苗角是轮系取苗机构提高取苗效率行之有效的方法。

非圆齿轮行星轮系取苗机构的运动特性取决于总传动比曲线和中心距。根据课题组前期的研究[19-23],传动比满足二次不等幅传动,可更好地调整和设计较优取苗轨迹。然而,前期提出的传动比曲线多采用样条函数对原始传动比数据进行拟合,这种拟合方法没有具体的传动比数学模型,无法获得传动比曲线设计参数对取苗机构取苗轨迹、取苗特性和传动比曲线的变化关系。

本文根据蔬菜自动移栽机取苗要求,提出一种新型行星轮系取苗机构,即一级传动采用完全非圆齿轮、二级传动采用斜齿轮(传动比 1∶1,增大重合度的方法);利用傅里叶函数初步设计机构二次不等幅传动比曲线,分析傅里叶函数系数(对应不同传动比曲线)对取苗机构取苗轨迹、传动特性、取苗角和推苗角影响的变化规律;基于人机交互设计方法获得满足取苗工作要求的傅里叶系数组合,由此设计一种具有较大推苗角的取苗机构,最后通过取苗试验验证该取苗机构设计的可行性。

1 取苗机构设计

1.1 取苗机构设计要求

根据蔬菜自动移栽机取苗要求,提出一种非圆齿轮行星轮系取苗机构,其设计目标为:取苗臂秧针为了能与秧箱配合,取苗角一般为 35°~50°;为保持钵苗能直立下落到投苗位置,推苗角一般为 60°~90°;为保证全程取苗臂之间不会发生干涉,取苗臂间距一般大于 5 mm;为保证取出的钵苗基质的完整性,尖嘴宽度一般小于 10 mm;入钵角过小或过大,易出现与钵盘或钵苗叶子及主体发生干涉,伤害钵苗,入钵角度一般为 10°~30°;出钵角过大,秧针夹紧钵苗后在钵盘内向上运动,导致钵苗基质与钵盘碰撞挤压,伤害钵苗根系以及钵盘,出钵角度一般小于 55°;取苗深度为 35 mm。

1.2 基于傅里叶函数的传动比曲线初步拟合设计

设计较大推苗角可以改善推苗效果,从而提高取苗机构的推苗成功率。同时,秧针取苗入钵和出钵时尽量保持直进直出,更有利于秧针入钵取苗。因此,设计取苗轨迹,应同时考虑推苗角和取苗角,从而综合提高取苗效果。

非圆齿轮行星轮系取苗机构传动比需满足二次不等幅传动[23]。利用傅里叶函数,初步设计一条如图 1 所示的二次不等幅传动比曲线[24],实现传动比曲线设计参数的量化表达。通过调整傅里叶函数系数(傅里叶系数)改变传动比曲线,并分析不同系数下的取苗轨迹以及从动轮和秧针的运动特性,进而实现取苗轨迹、取苗角和推苗角的合理设计。傅里叶函数公式为

$$i = c_0 + \sum_{n=1}^{8} \left(a_n \cos(\theta w) + b_n \sin(\theta w)\right) \quad (\theta \in [0, 2\pi]) \tag{1}$$

式中 a_n、b_n、c_0、w——傅里叶函数系数

θ——主动轮角位移

从动轮角位移 θ_c 计算公式为

$$\theta_c = \int_0^{2\pi} \frac{1}{i} \mathrm{d}\theta \tag{2}$$

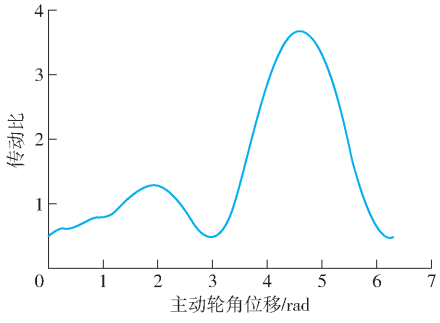


图 1 传动比曲线

Fig. 1 Transmission ratio curve

1.3 取苗机构设计方案

根据图 1 传动比曲线,设计如图 2 所示的行星轮系取苗机构,一级传动采用非圆齿轮,二级传动采用标准斜齿轮传动(传动比为 1∶1)。非圆的太阳轮固定在机架上与第 1 级中间非圆齿轮啮合,第 2 级中间标准斜齿轮与斜齿轮行星轮啮合,中间非圆齿轮和中间斜齿轮相互固定,取苗臂与二级行星轮固定,取苗臂秧针实现所需的取苗轨迹。行星架围绕旋转中心点 O 顺时针旋转,带动第 1 和第 2 级中间轮与行星轮在啮合传动的同时分别围绕旋转中心 O_1、O_2 进行自转。在 1 个周期内,2 个取苗臂沿取苗

轨迹共取苗 2 次。钵盘一般 45°放置。在轨迹 $A-B-C$ 段，取苗臂完成取苗过程；在轨迹 $C-D$ 段，取苗臂完成持苗过程；在轨迹 $D-E$ 段，取苗臂完成推苗过程；在取苗轨迹 $E-A$ 段，取苗臂完成一个周期的取苗过程，回程准备下一周期的取苗。取苗角和推苗角分别如图 2 中 δ 和 ζ 所示。

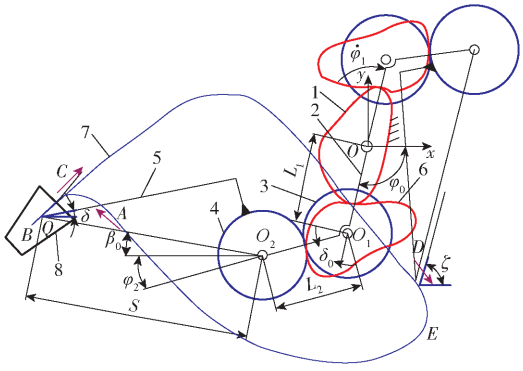


图 2　取苗机构简图

Fig. 2　Schematic of seedling picking mechanism

1. 太阳轮　2. 行星架　3. 中间斜齿轮　4. 行星斜齿轮轮　5. 取苗臂　6. 非圆中间轮　7. 取苗轨迹　8. 钵盘

2　取苗机构运动学分析

行星轮系取苗机构设计方案和传动原理如图 2 所示，对各回转中心的坐标和速度等运动学参数进行理论计算。

中间轮旋转中心 O_1 位移方程为

$$\begin{cases} x_{O_1} = L_1\cos(\varphi_0+\varphi_1) \\ y_{O_1} = L_1\sin(\varphi_0+\varphi_1) \end{cases} \tag{3}$$

式中　L_1——第 1 级齿轮中心距，mm

φ_0——行星架初始安装角位移，rad

φ_1——行星架角位移，rad

行星轮旋转中心 O_2 位移方程为

$$\begin{cases} x_{O_2} = x_{O_1} + L_2\cos(\varphi_0+\delta_0+\varphi_1) \\ y_{O_2} = y_{O_1} + L_2\sin(\varphi_0+\delta_0+\varphi_1) \end{cases} \tag{4}$$

式中　L_2——第 2 级齿轮中心距，mm

δ_0——第 2 级齿轮中心线相对于第 1 级齿轮中心线的角位移，rad

取苗臂秧针尖点 Q 位移方程为

$$\begin{cases} x_Q = x_{O_2} + S\cos(\varphi_0+\delta_0+\varphi_1+\varphi_2+\beta_0) \\ y_Q = y_{O_2} + S\sin(\varphi_0+\delta_0+\varphi_1+\varphi_2+\beta_0) \end{cases} \tag{5}$$

其中

$$\varphi_2 = \int_0^{\varphi_1}\frac{1}{i}\mathrm{d}\varphi_1$$

式中　S——行星轮旋转中心到秧针尖点距离，mm

φ_2——行星轮相对行星架角位移（由于 2 级传动为斜齿轮等比传动），rad

β_0——取苗臂相对于行星架的初始安装角位移，rad

取苗臂秧针尖点 Q 速度方程为

$$\begin{cases} v_{xQ} = \dot{x}_Q = \dot{x}_{O_2} - S\sin(\varphi_0+\delta_0+\varphi_1+\dot{\varphi}_2+\beta_0) \\ v_{yQ} = \dot{y}_Q = \dot{y}_{O_2} + S\cos(\varphi_0+\delta_0+\varphi_1+\dot{\varphi}_2+\beta_0) \end{cases} \tag{6}$$

3　傅里叶函数系数对取苗机构运动特性影响分析

根据取苗机构的设计目标及给定的初始传动比曲线，给定中心距 $L_1 = L_2 = 60$ mm。

开发人机交互式软件，调节取苗机构设计目标的参数直至获得一组适合蔬菜取苗的取苗轨迹非劣解，并开展取苗机构结构设计。如图 3 所示为软件开发流程图，设计的软件界面如图 4 所示。

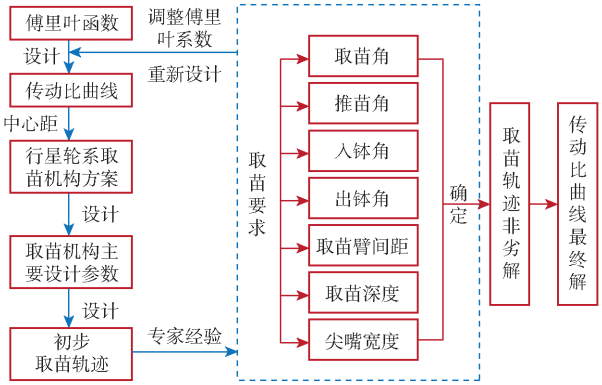


图 3　软件开发流程图

Fig. 3　Software development flowchart

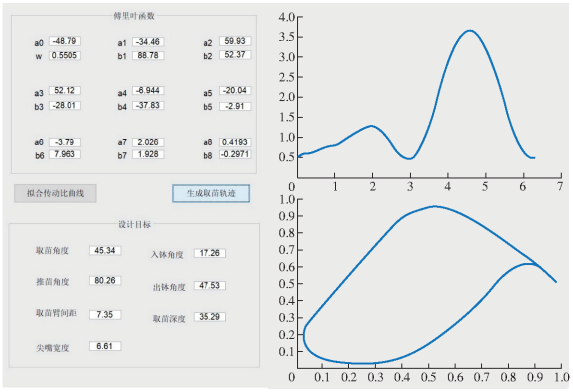


图 4　取苗机构设计软件界面

Fig. 4　Software interface for seedling picking mechanism design

通过分析可知，随系数 i 的增大，傅里叶系数 a_i 和 b_i（$i=1,2,\cdots,8$）对取苗轨迹的影响逐渐降低。本文仅列举分析前 3 组系数对取苗轨迹及取苗机构传动特性的变化关系，分别分析传动比曲线的傅里叶系数 c_0、a_1、b_1、a_2、b_2、a_3、b_3 及 w 对取苗轨迹、传动比曲线、从动轮角位移、角速度（从动轮角位移和角速度影响非圆齿轮传动的平稳性）及秧针尖点的速度（秧针尖点的速度影响秧针取苗和推苗的稳定性）传动特性，如图 5 ~ 14 所示。

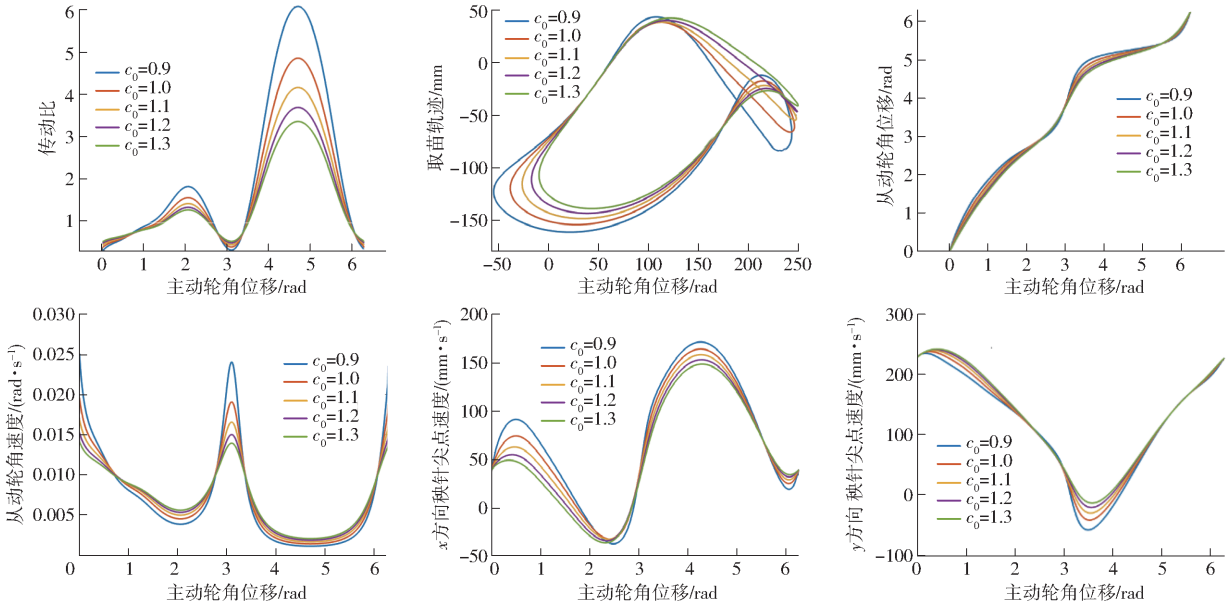


图 5 系数 c_0 对取苗机构运动特性参数影响的变化规律

Fig. 5 Variation law of c_0 coefficient on motion characteristic parameters of seedling picking mechanism

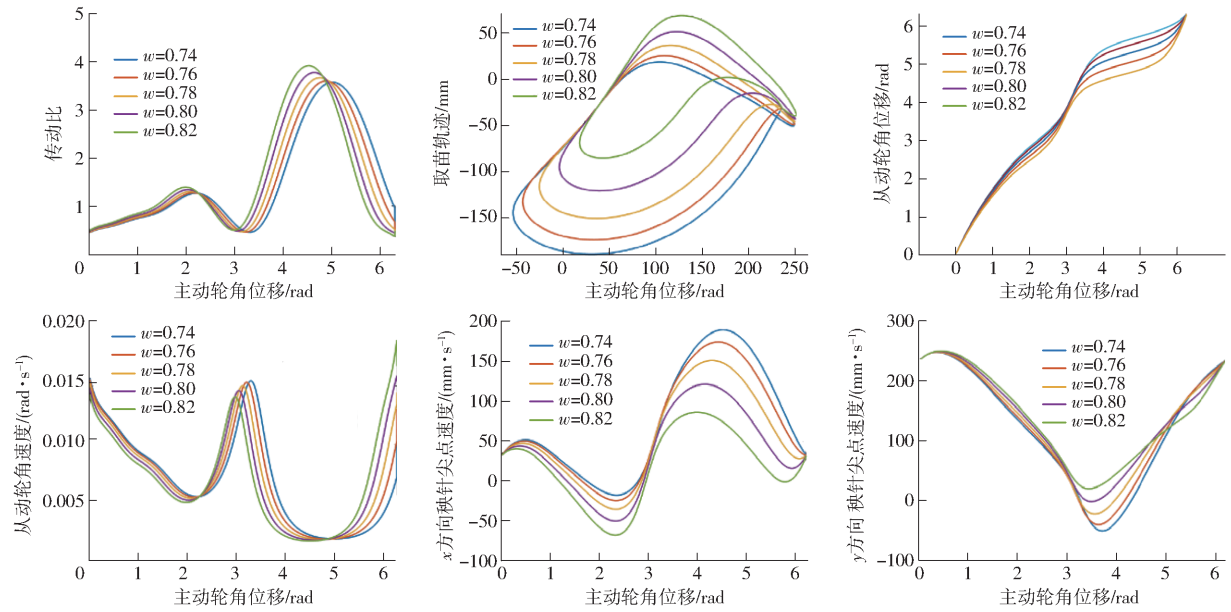


图 6 系数 w 对取苗机构运动特性参数影响的变化规律

Fig. 6 Variation law of w coefficient on motion characteristic parameters of seedling picking mechanism

傅里叶系数 c_0、w 对取苗机构运动特性的影响如图 5、6 所示。由图 5 可知，随着系数 c_0 的增大，传动比的 2 个波峰下降，且传动比曲线与横坐标轴的面积减小（小于 2π）；取苗轨迹的环扣由大变小至消失，并出现反向增大的环扣；从动轮角位移存在变小的趋势；从动轮角速度减小；秧针尖点 x 方向的速度整体减小；秧针尖点 y 方向的速度整体增大。由图 6 可知，随着系数 w 的增大，传动比的 2 个波峰提前向左移动出现，取苗轨迹变小，从动轮角位移呈现变小的趋势，从动轮角速度向左偏移，秧针尖点 x 方向的速度整体减小，秧针尖点 y 方向的速度整体增大。

傅里叶系数 a_1、b_1 对取苗机构运动特性的影响如图 7、8 所示。由图 7 可知，随 a_1 的增大，传动比曲线第 1 波峰先增大后减小，第 2 波峰整体减小；取苗轨迹变化很大；从动轮角位移减小；从动轮角速度增大；秧针尖点 x 方向速度减小；秧针尖点 y 方向速度增大。在取苗机构设计时，对传动比曲线的设计，应合理调试系数 a_1，避免对取苗轨迹产生较大的变化。由图 8 可知，随系数 b_1 的增大，传动比曲线第 1 波峰值整体增大，第 2 波峰值整体减小；取苗轨迹整体变小；从动轮角位移减小；从动轮角速度减小；秧针尖点 x 方向速度减小；秧针尖点 y 方向速度增大。

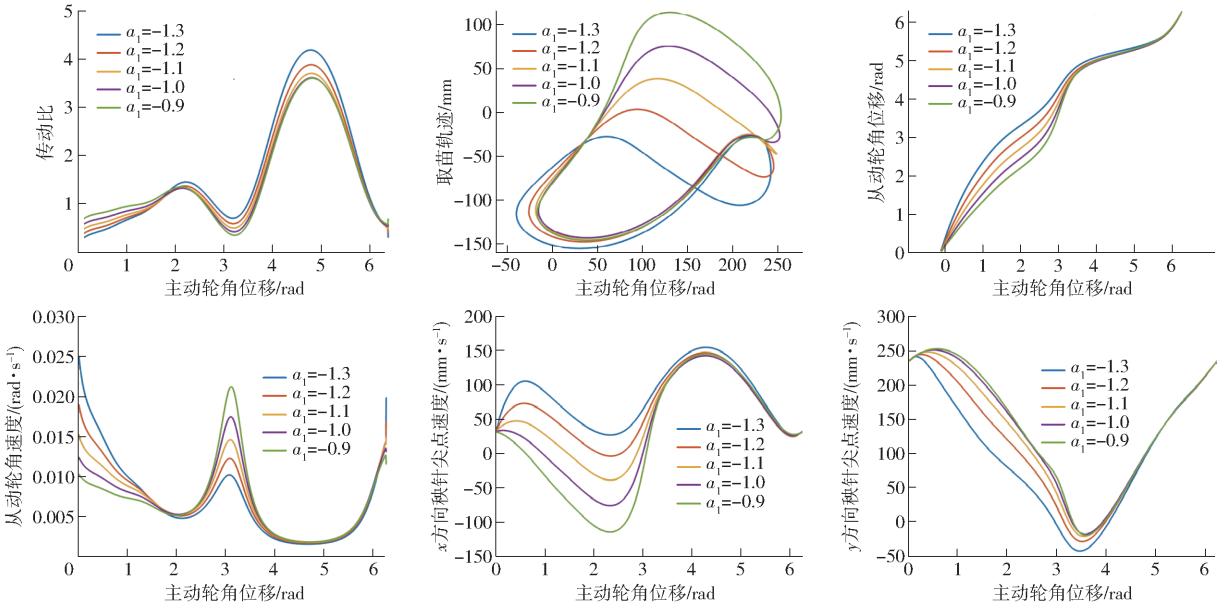


图 7　系数 a_1 对取苗机构运动特性参数影响的变化规律

Fig. 7　Variation law of a_1 coefficient on motion characteristic parameters of seedling picking mechanism

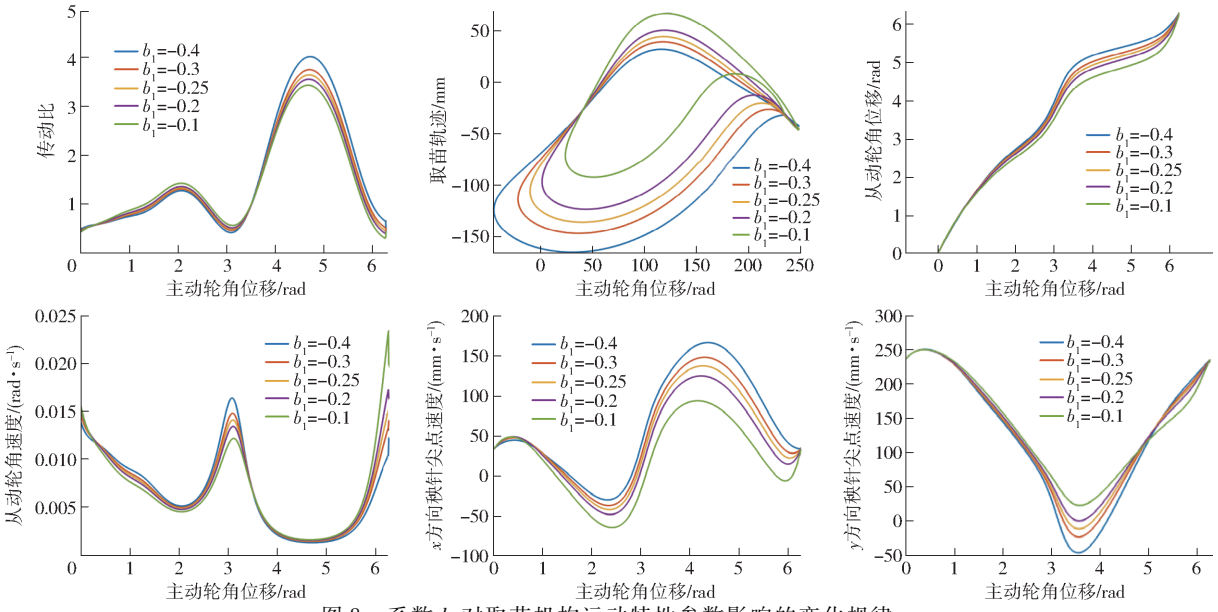


图 8　系数 b_1 对取苗机构运动特性参数影响的变化规律

Fig. 8　Variation law of b_1 coefficient on motion characteristic parameters of seedling picking mechanism

傅里叶系数 a_2、b_2 对取苗机构运动特性的影响如图 9、10 所示。由图 9 可知，随 a_2 系数增大，取苗轨迹及其取苗机构特性变化较为明显；传动比曲线的第 1 波峰出现先增大后减小，第 2 波峰增大；取苗轨迹影响较大；从动轮角位移减小明显；从动轮角速度前半个周期有明显波动，后半个周期变化不明显；秧针尖点 x 方向速度减小；秧针尖点 y 方向速度增大。在取苗机构设计时，对传动比曲线的设计，应合理调试系数 a_2，避免对取苗轨迹产生较大的变化。由图 10 可知，随系数 b_2 的增大，传动比曲线的第 1 个波峰出现先增大后减小，第 2 波峰增大；取苗轨迹变大；从动轮角位移前半个周期变化明显，呈现减小趋势，后半个周期变化不明显；从动轮角速度增大；秧针尖点 x 方向速度前部分减小明显；秧针尖点 y 方向速度增大。

傅里叶系数 a_3、b_3 对取苗机构运动特性的影响如图 11、12 所示。由图 11 可知，随系数 a_3 变化，取苗轨迹、取苗机构特性、从动轮角位移、从动轮角速度变化不明显；在传动比曲线及取苗机构的设计时，系数 a_3 适合用于对取苗轨迹进行微调。

由图 12 可知，随系数 b_3 的增大，传动比曲线整体减小；取苗轨迹环扣先减小后增大；从动轮角位移和角速度前半个周期波动较大，后半个周期变化不明显；取苗臂秧针尖点 x 方向的速度前半周期变化明显，后半周期变化整体增大；秧针尖点 y 方向速度变化不明显。

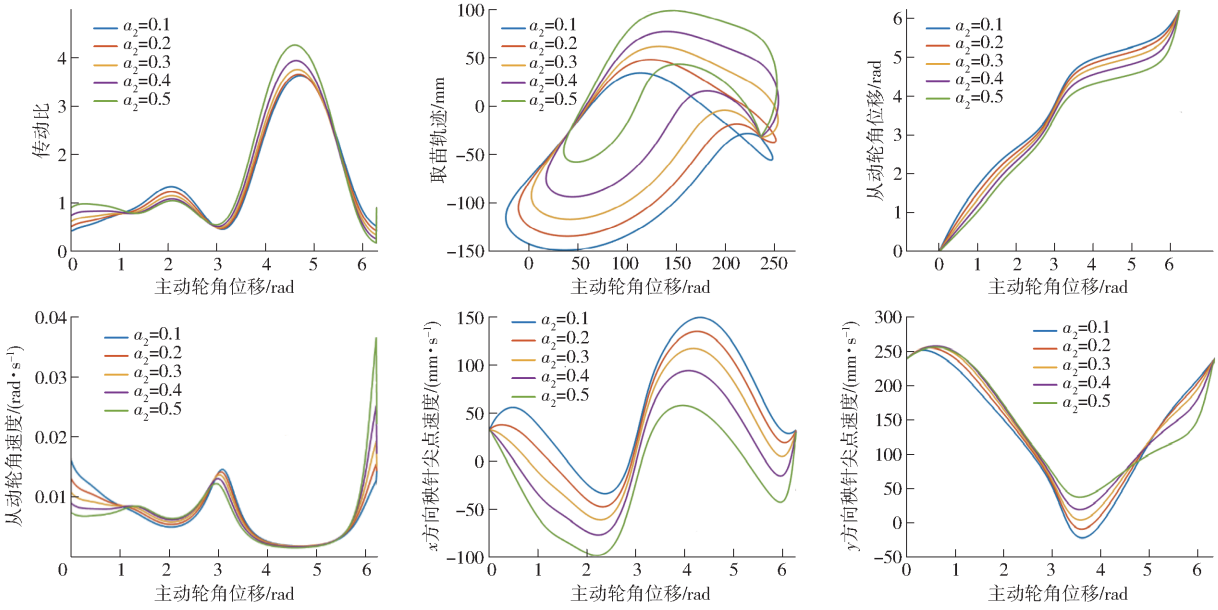


图 9 系数 a_2 对取苗机构运动特性参数影响的变化规律

Fig. 9 Variation law of a_2 coefficient on motion characteristic parameters of seedling picking mechanism

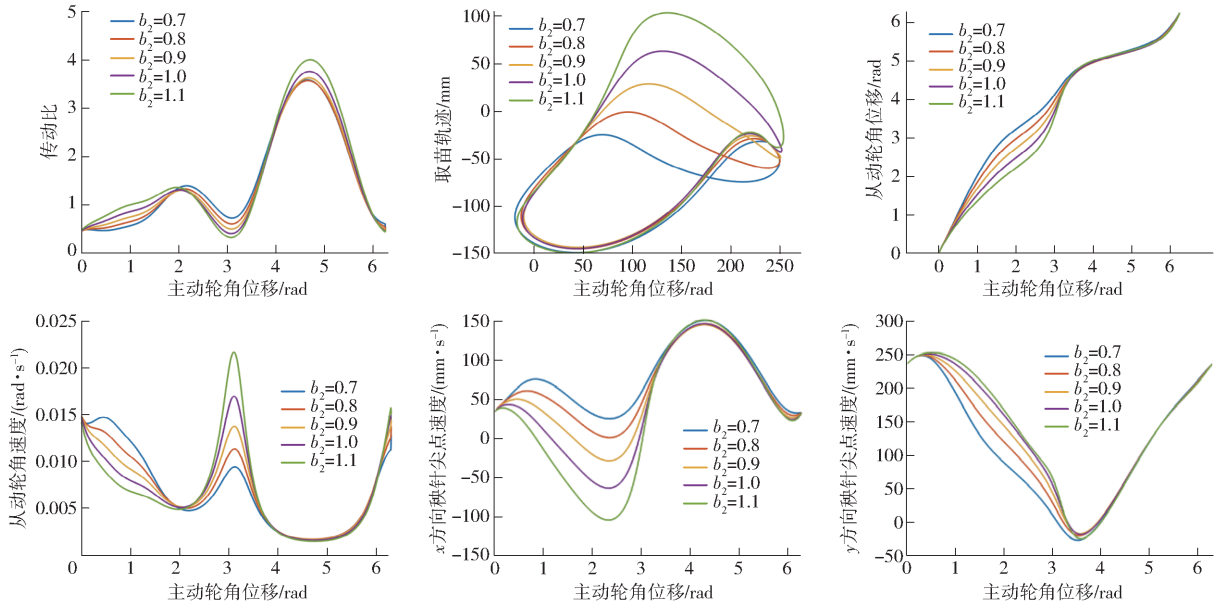


图 10 系数 b_2 对取苗机构运动特性参数影响的变化规律

Fig. 10 Variation law of b_2 coefficient on motion characteristic parameters of seedling picking mechanism

4 傅里叶函数系数对取苗和推苗角影响分析

取苗角和推苗角是取苗机构设计的关键因素，其大小影响取苗机构取苗成功率，增大推苗角可以提高推苗时秧苗的直立度，使其能够顺利落入植苗机构，从而提高推苗效果。因此，有必要研究传动比曲线设计的傅里叶系数对取苗机构的取苗角和推苗角的影响。

傅里叶系数对取苗角和推苗角的变化规律如图 13、14 所示。由图 13 可知，系数 b_1 和 b_3 与取苗角呈负相关；随 b_2 增大，取苗角出现最小值 31.06°；取苗角随其余参数的增大而增大。由图 14 可知，随傅里叶系数（w、c_0、b_2、b_3）的增大，推苗角会出现拐点，其中 w 和 c_0 出现最大值 90°，b_2 和 b_3 出现最小值分别为 78.5°和 78.4°，推苗角随其余参数的增大而减小。

通过人机交互的设计方法获得一条满足取苗工作要求的取苗轨迹对应的傅里叶系数：c_0 = 1.209，a_1 = −1.094，b_1 = −0.282 1，a_2 = 0.142 8，b_2 = 0.934 9，a_3 = 0.062 85，b_3 = −0.432 1，a_4 = 0.055 52，b_4 = 0.186，a_5 = 0.005 833，b_5 = 0.053 68，a_6 = 0.070 99，b_6 = −0.027 09，a_7 = 0.005 129，b_7 = −0.037 21，a_8 = 0.001 705，b_8 = −0.011 66，w = 0.786 3。最终设计的取苗机构主要参数为：S =

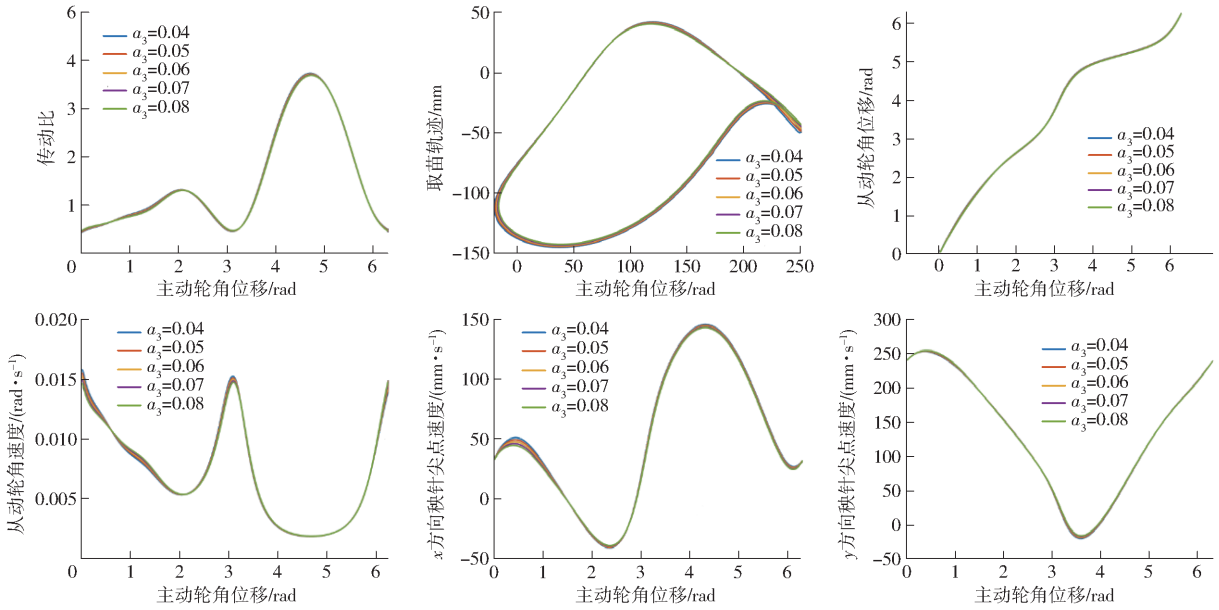


图 11　系数 a_3 对取苗机构运动特性参数影响的变化规律

Fig. 11　Variation law of a_3 coefficient on motion characteristic parameters of seedling picking mechanism

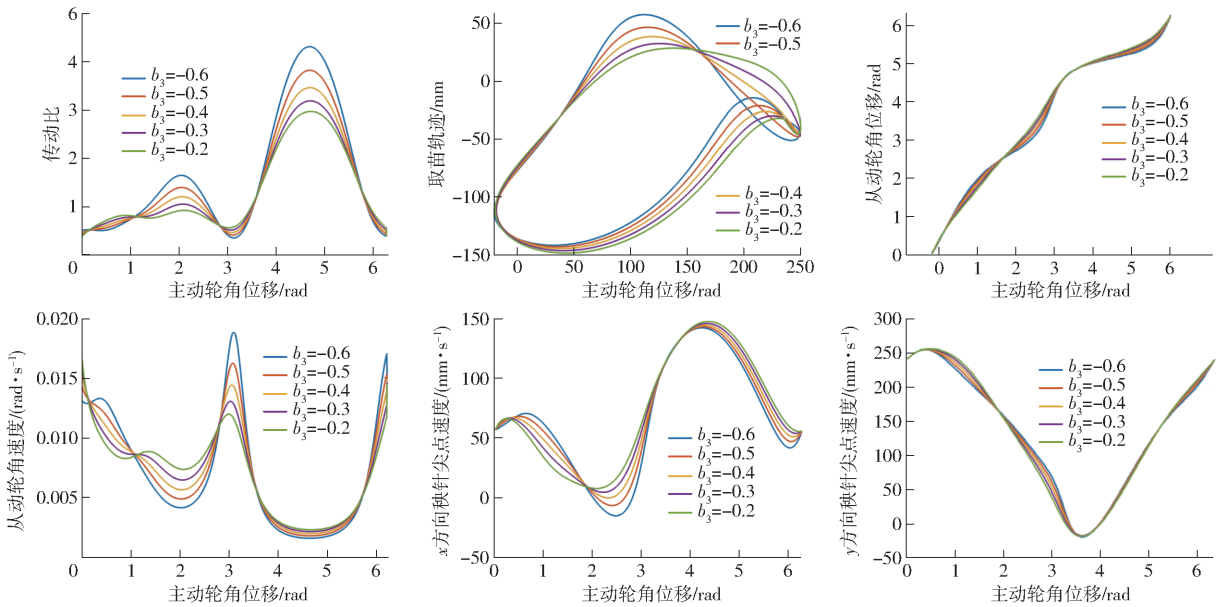


图 12　系数 b_3 对取苗机构运动特性参数影响的变化规律

Fig. 12　Variation law of b_3 coefficient on motion characteristic parameters of seedling picking mechanism

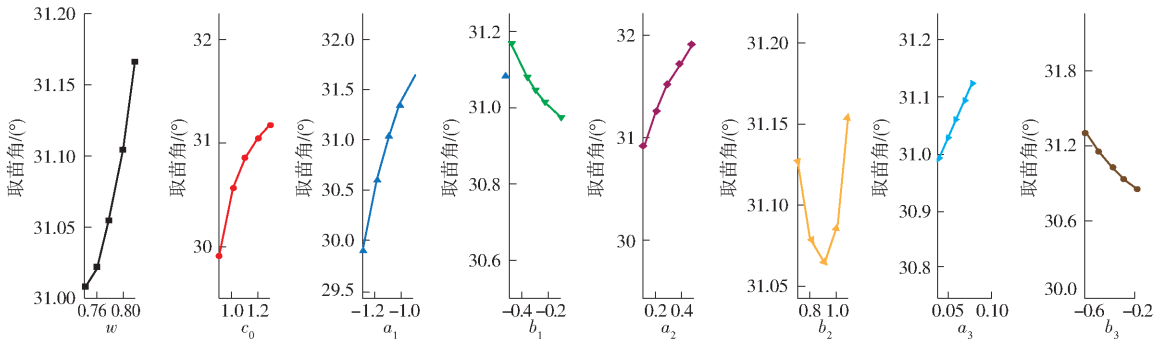


图 13　傅里叶系数对取苗角的影响

Fig. 13　Effect of Fourier coefficient on seedling angle

152 mm，φ_0 = 64°，β_0 = 11°，δ_0 = 62°，L_1 = L_2 = 60 mm。设计的取苗机构三维图如图 15a 所示。利用虚拟仿真软件对取苗机构进行三维仿真，仿真轨迹和理论轨迹对比如图 15b 所示。

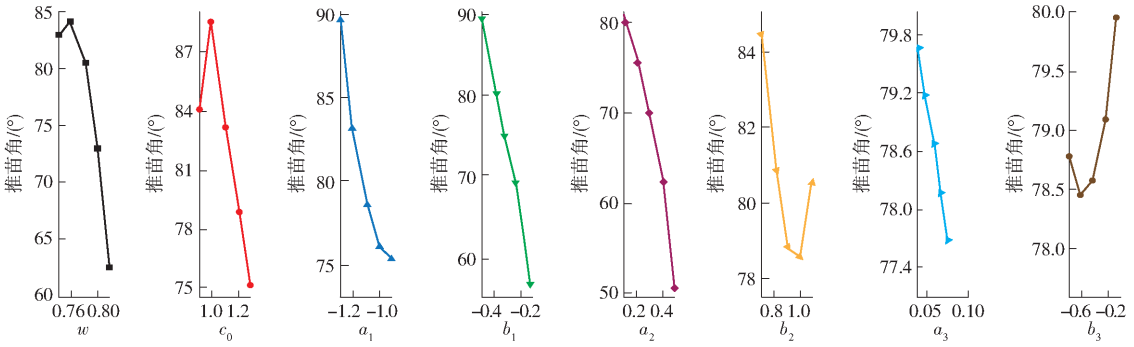
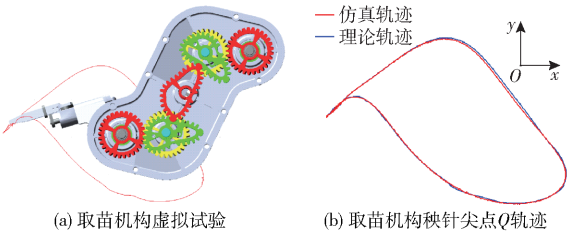


图 14 傅里叶系数对推苗角的影响

Fig. 14 Effect of Fourier coefficient on seedling pushing angle



(a) 取苗机构虚拟试验 (b) 取苗机构秧针尖点Q轨迹

图 15 取苗机构三维图

Fig. 15 Three dimensional diagrams of seedling picking mechanism

对取苗机构进行运动学计算,对比取苗臂秧针尖点 Q 的位移和速度曲线理论和仿真结果的一致性。由图 16 可知,秧针尖点 Q 的 x、y 方向位置坐标仿真值与理论值一致,x、y 方向速度仿真值和理论值基本一致。可见秧针尖点 Q 的运动学参数仿真值与理论值吻合,证明了该取苗机构的设计是可行的。

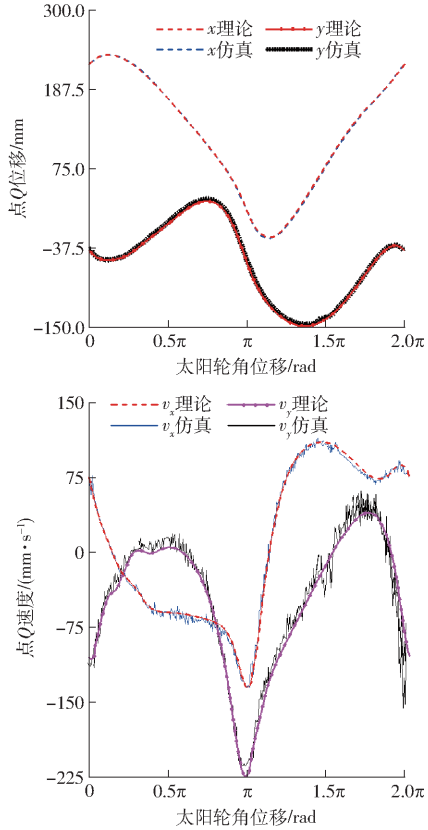


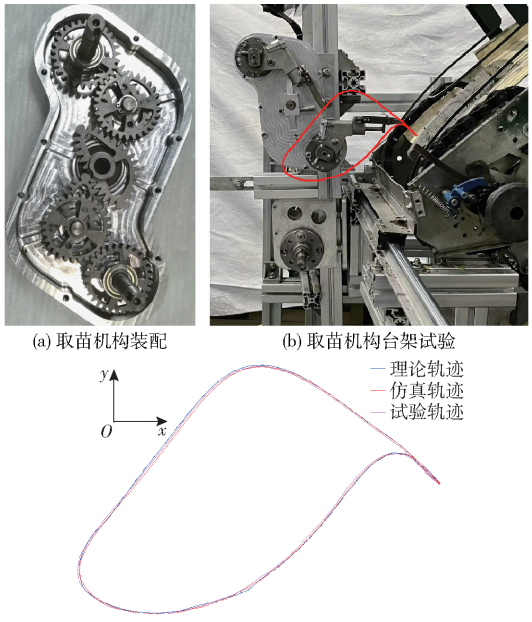
图 16 点 Q 运动学参数

Fig. 16 Kinematics parameters of Q point

5 取苗机构试验

5.1 取苗机构空转试验

根据取苗机构设计参数,制造并装配取苗机构,实物装配如图 17a 所示,取苗机构安装试验台进行空转试验如图 17b 所示。利用高速摄像技术描绘取苗轨迹如图 17b 所示,对比理论和仿真轨迹如图 17c 所示。由图 17 可知,取苗轨迹试验值与理论和仿真值基本一致,证明了该取苗机构设计的可行性。



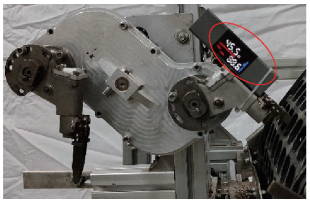
(a) 取苗机构装配 (b) 取苗机构台架试验

(c) 取苗轨迹理论、仿真和试验值

图 17 取苗机构实物装配图

Fig. 17 Physical assembly drawings of seedling picking mechanism

图 18 为行星轮系取苗机构的取苗角和推苗角的测量试验,利用倾角测量仪测量取苗机构在取苗和推苗时的角度,该取苗机构的取苗角和推苗角分别为 45.5°、81.2°。取苗角和推苗角理论值和测试值的对比如表 1 所示,误差小于 1.2%。



(a) 取苗角测量　　(b) 推苗角测量

图 18　取苗机构取苗角和推苗角测试试验

Fig. 18　Test experiment on seedling picking angle and pushing angle of seedling picking mechanism

表 1　取苗角和推苗角理论值和试验值对比

Tab. 1　Comparison between theoretical and experimental values of seedling angle and pushing angle

参数	理论值/(°)	试验值/(°)	误差/%
取苗角	45	45.5	1.10
推苗角	81	81.2	0.25

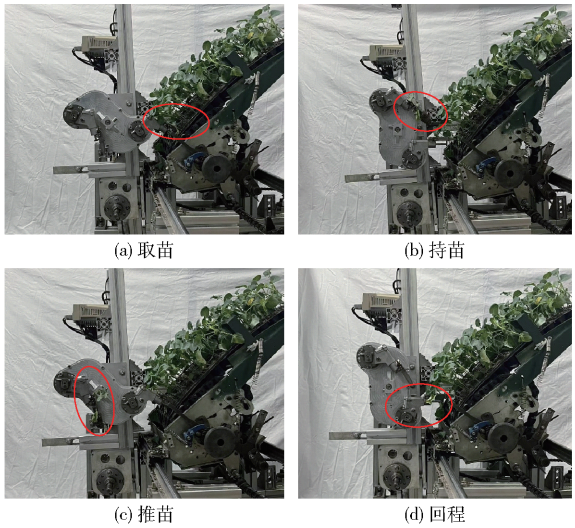
5.2　取苗机构台架取苗试验

为了验证非圆齿轮行星轮系取苗机构取苗效果，利用西兰花钵苗开展取苗机构取苗试验，如图 19 所示，试验参数为：每一盘穴盘含西兰花钵苗 100 株，开展取苗机构不同转速(40 ~ 60 r/min)的取苗试验，取苗结果如表 2 所示。

由图 19 和表 2 可知，该取苗机构取苗成功率较好，在转速 40、50、60 r/min 时取苗成功率分别为 94%、90%、88%。取苗失败的主要原因是钵苗叶子的杂序生长，导致在取苗夹紧阶段，钵苗叶子卡进推苗爪和取苗臂壳体的缝隙中，发生夹带和茎叶相互缠绕。取苗试验进一步验证了取苗机构设计的可行性。

6　结论

(1)基于傅里叶函数设计了一种二次不等幅传动比曲线，分析了傅里叶函数系数对传动比曲线、取苗轨迹、从动轮和秧针尖点速度特性及推苗角和取苗角的影响规律。



(a) 取苗　　(b) 持苗

(c) 推苗　　(d) 回程

图 19　取苗机构取苗试验

Fig. 19　Seedling picking test of seedling picking mechanism

表 2　取苗试验结果

Tab. 2　Seedling extraction experiment

转速/(r·min^{-1})	总株数/株	取苗成功数/株	成功率/%
40	100	94	94
50	100	90	90
60	100	88	88

(2)根据传动关系，采用人机交互设计了一种具有较大推苗角的非圆齿轮行星轮系取苗机构，并采用虚拟仿真对取苗机构进行了运动学分析，证明了机构设计的可行性。

(3)制造和装配取苗机构，通过取苗轨迹、推苗角、取苗角对比验证了试验结果与理论结果的一致性。对取苗机构进行转速 40、50、60 r/min 的台架取苗试验，得出取苗机构的取苗成功率分别为 94%、90%、88%。

参　考　文　献

[1] ZAFAR I M. Design of a gear driven hopper type dibbling mechanism for a 2.7 kW two-row pepper transplanter[D]. Daejeon: Chungnam National University, 2019.

[2] CHOI W C, KIM D C, RYU I H, et al. Development of seedling pick-up device for vegetable transplants[J]. Trans. of the ASAE, 2001, 45(1): 13 - 19.

[3] KANG T G, KIM S W, KIM Y K, et al. Analysis of pick-up mechanism for automatic transplanter(I)[J]. Journal of Agriculture & Life Science, 2017, 51(1):187 - 192.

[4] TSUGA K. Development of fully automatic vegetable transplanter[J]. Japan Agricultural Research Quarterly, 2000, 34(1):21 - 28.

[5] 伊藤尚胜，清水修一，和田俊郎，等. 移植机的苗移植机构:ZL99118740.7[P]. 2006 - 03 - 29.

[6] THOMAS E V. Development of a mechanism for transplanting rice seedlings[J]. Mechanism and Machine Theory, 2002, 37(4):395 - 410.

[7] 竹山智洋. 蔬菜移植机：ZL200480007602.4[P]. 2004 - 04 - 19.

[8] 徐高伟，刘宏新，荐世春，等. 基于五杆机构的丹参膜上移栽机构设计与试验[J]. 农业机械学报，2018，49(9)：55 - 65
XU Gaowei, LIU Hongxin, JIAN Shichun, et al. Design and test of transplanting mechanism on mulch-film of *Salvia miltiorrhiza* based on five-bar mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9):55 - 65. (in Chinese)

[9] 尹大庆, 王佳照, 周脉乐, 等. 探出取推钵式蔬菜钵苗取苗机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019,50(10):64 - 71.
YIN Daqing, WANG Jiazhao, ZHOU Maile, et al. Optimal design and experiment of vegetable potted seedlings pick-up mechanism for exploring and picking-pushing plugs[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10):64 - 71. (in Chinese))

[10] YIN Daqing, WANG Jinwu, ZHAO Yun. Automatic corn potted-seedling transplanter of cycloid gear trains[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 530:960 - 966.

[11] 周脉乐, 薛向磊, 钱孟波, 等. 探出式蔬菜钵苗打孔移栽机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1):77 - 83.
ZHOU Maile, XUE Xianglei, QIAN Mengbo, et al. Optimal design and experiment of potted vegetable seedling transplanting mechanism with punching hole[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1):77 - 83. (in Chinese)

[12] 崔巍, 赵亮, 刘立晶, 等. 二阶椭圆行星轮系取苗机构参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 2):79 - 84,98.
CUI Wei, ZHAO Liang, LIU Lijing, et al. Kinematic analysis and experiment of rotary pick-up mechanism on seedling pick-up device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2):79 - 84,98. (in Chinese)

[13] 廖庆喜, 张照, 胡乔磊, 等. 油菜纸钵苗移栽机气动取苗机构设计与轨迹分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 70 - 78.
LIAO Qingxi, ZHANG Zhao, HU Qiaolei, et al. Design and trajectory analysis of pneumatic picking-up mechanism for rape paper pot seedling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11):70 - 78. (in Chinese)

[14] 许春林,吕志军,辛亮,等.全自动草莓钵苗移栽机构优化设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(8):97 - 106.
XU Chunlin,LÜ Zhijun, XIN Liang, et al. Optimization design and experiment of full-automatic strawberry potted seedling transplanting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(8):97 - 106. (in Chinese)

[15] 俞高红, 虞佳萍, 童俊华, 等. 一种共轭凹凸型非圆齿轮机构的设计[J]. 中国机械工程, 2016, 27(16): 2155 - 2159, 2165.
YU Gaohong, YU Jiaping, TONG Junhua, et al. Design of a conjugate concave-convex non-circular gear mechanism[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(16): 2155 - 2159,2165. (in Chinese)

[16] YU Yaxin, LIU Jikun, YE Bingliang. Design and experimental research on seedling pick-up mechanism of planetary gear train with combined non-circular gear transmission[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 32(1): 1 - 13.

[17] YE Bingliang, ZENG Gongjun, DENG Bin, et al. Design and tests of a rotary plug seedling pick-up mechanism for vegetable automatic transplanter[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019, 13(3): 70 - 78.

[18] WANG L, YU G, SUN L, et al. Motion generation of a planar 3R serial chain based on conformal geometric algebra with applications to planar linkages[J]. Mechanical Sciences, 2022,13(1):275 - 290.

[19] 俞高红,王系林,刘建刚,等.蔬菜钵苗密植移栽机多行取苗机构设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(1):94 - 103.
YU Gaohong, WANG Xilin, LIU Jian'gang, et al. Design and experiment of multi row seedling taking mechanism for dense planting and transplanting of vegetable pot peedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(1):94 - 103. (in Chinese)

[20] 华瑶. 基于二次不等幅传动比行星轮系取苗机构的研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2019.
HUA Yao. Research of planetary gear train seeding pick-up mechanism based on two-unequal-amplitude transmission ratio [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2019. (in Chinese)

[21] LIU Jian'gang, YU Gaohong, TONG Zhipeng, et al. Design and experimental study of a planetary gearing mechanism based on twice unequal amplitude transmission ratio[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022, 15(1): 155 - 163.

[22] TONG Zhipeng, YU Gaohong, ZHAO Xiong, et al. Design of vegetable pot seedling pick-up mechanism with planetary gear train[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020, 33(1): 1 - 11.

[23] YU Gaohong, TONG Zhipeng, SUN Liang, et al. Novel gear transmission mechanism with twice unequal amplitude transmission ratio[J]. ASME J. Mech. Des., 2019, 141(9): 092304.

[24] LIU Jian'gang, TONG Zhipeng, YU Gaohong, et al. Non-circular gear transmission mechanism with variable-involute and variable-cycloid composite tooth profile[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2022, 36(5):2445 - 2459.