

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2024.07.014

唐华林, 李丽, 鲁磊, 等. 丘陵山地桑叶采收机取袋机构优化设计与试验 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(7): 137-148.

丘陵山地桑叶采收机取袋机构优化设计与试验

唐华林^{1,2,3}, 李丽^{1,2,3}, 鲁磊^{1,2},
卢世博^{1,2}, 张云峰^{1,2}1. 西南大学 工程技术学院, 重庆 400715; 2. 丘陵山区农业装备重庆市重点实验室, 重庆 400715;
3. 西南大学 宜宾研究院, 四川 宜宾 644000

摘要: 针对丘陵山地桑叶采收机收集装置自动取袋过程实现困难的问题, 通过桑叶取袋装袋过程运动学分析, 对取袋机构进行了优化设计与试验。首先通过分析整机结构与取袋机构工作原理, 建立了取袋机构运动学分析模型; 以最大横向取袋距离和取袋瞬间角度为目标, 建立了优化设计模型, 并开发了辅助分析设计软件, 确定了取袋机构参数的取值范围; 采用带基因策略的非支配排序遗传算法(NSGA-II)对模型求解, 获得最优设计参数。其次根据最优设计参数建立了三维模型, 利用 ANSYS 进行运动学仿真分析, 结果表明取袋机构末端执行器位移图像和速度曲线与设计要求一致, 可满足取袋机构设计要求。最后研制出桑叶采收机与取袋机构样机, 对取袋机构样机开展高速摄像试验, 验证了取袋机构运动轨迹与理论仿真结果基本一致。以曲柄转速、吨口袋种类、磁吸石外圆尺寸为试验因素, 取袋开袋成功率为指标开展桑叶取袋开袋正交试验, 并根据最优组合进行验证试验。试验结果表明: 曲柄转速为 0.1 r/s、吨口袋形状与尺寸为方体 550 mm、磁吸石外圆尺寸为 20 mm 时, 取袋开袋成功率为 97.50%, 表明该机构能完成取袋作业, 可实现桑叶采收机的取袋开袋功能。

关键词: 桑叶采收; 取袋机构; 连杆设计; NSGA-II 算法;

取袋试验

中图分类号: TH122; S225.93

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2024)07-0137-12

Optimized Design and Experiment for Bag Pickup Mechanism of Mulberry Leaf Harvesting Machine in Hilly Mountainous Area

TANG Hualin^{1,2,3}, LI Li^{1,2,3}, LU Lei^{1,2},
LU Shibao^{1,2}, ZHANG Yunfeng^{1,2}

收稿日期: 2023-11-09

基金项目: 宜宾市双城协议保障科研经费科技项目(XNDX2022020015); 重庆市杰出青年科学基金项目(2022NSCQ-JQX3984); “西南大学先导计划”2023 年度自然科学领域项目(Swu-XDJH202302)。

作者简介: 唐华林, 硕士研究生, 主要从事智能农机装备研究。

通信作者: 李丽, 教授, 博士研究生导师。

1. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;
2. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Equipment for Hilly and Mountainous Regions, Chongqing 400715, China;
3. Yibin Academy of Southwest University, Yibin Sichuan 644000, China

Abstract: Aiming at the problem of difficult to realize bag pickup process of collection device of mulberry leaf harvester in hilly and mountainous area, based on the kinematic analysis of mulberry leaf bag pickup and loading process, the bag pickup mechanism is optimally designed and tested. Initially, by analyzing the overall structure and working principles of the machine, a kinematic analysis model of the bag pickup mechanism was established. With the objectives of maximizing the lateral bag pickup distance and optimizing the angle at the bag pickup moment, an optimization design model was constructed. Additionally, an auxiliary analysis design software was developed to determine the parameter range of the bag pickup mechanism. The optimization process utilized a non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) with a gene strategy to obtain the optimal design parameters. Subsequently, a three-dimensional model was created based on the optimal design, and kinematic simulation analysis was conducted using ANSYS. The results demonstrated that the displacement image and velocity curve of the end effector of the bag pickup mechanism were in accordance with the design requirements, satisfying the design criteria for the bag pickup mechanism. Finally, a mulberry leaf harvester and a bag pickup mechanism prototype were developed. The bag pickup mechanism prototype was subjected to high-speed camera test, and the results verified that the bag pickup mechanism trajectory was basically the same as that of theory and simulation. The orthogonal test was carried out with crank rotation speed, the ton pocket type, the magnetic suction stone outer size as the test factors, and the success rate of bag opening as the index, and validation test was conducted according to the optimal combination. The test results show that with crank rotation speed of 0.1 r/s, the ton pocket shape and size of cube 550 mm, and the magnetic suction stone outer size of 20 mm, the success rate of bag opening was 97.50%, indicating that the mechanism can complete the bag pickup operation, and it can realize the bag opening function of the mulberry leaf harvester.

Key words: mulberry leaf harvesting; bag pickup mechanism; linkage design; NSGA-II algorithm; bag pickup test

中国是世界蚕桑商品出口大国, 具有悠久的蚕桑养殖文化. 国家出台了一系列政策促进蚕桑产业快速发展^[1-2]. 桑叶是蚕桑产业前端原料, 其机械化采收是目前该产业的“卡脖子”问题. 针对丘陵山地桑叶采收人工劳动强度大、采收作业成本高等问题^[3], 研究丘陵山地桑叶自动采收机对蚕桑产业的发展具有重要的意义.

目前一些学者开展了桑叶采摘方面的研究, 提出了摇杆式与往复式采摘机^[4-5], 并将视觉技术引入桑叶采摘^[6], 但相关研究仍然偏少. 茶叶采摘机械与银杏叶采摘装置^[7-9]对桑叶采收机的设计有一定的参考价值, 但没有将采摘与收集装袋两者结合起来; 廖凯等^[10]根据芦苇笋受力特点与生物特点研制了芦苇笋自动化采摘与收集作业装置, 为桑叶采摘与收集装袋相结合提供了思路.

取袋机构是桑叶自动采收机实现收集功能的关键核心部分. 工业上常见的取袋方式是利用吸盘对编织袋进行抓取与展开^[11], 但作业环境单一、占地面积大, 难以直接应用于丘陵山地农业装备的自动采收. 许多学者对取料机构的应用进行了研究, 将连杆机构应用在开袋与取料装置上^[12-14], 这对农业机械取袋机构的设计提供了参考. 由于桑叶采收机整体尺寸受限以及取袋机构的连杆机构需满足运动特性要求, 因此通过设计运动学辅助分析软件与参数优化来实现不同装置特定功能的连杆机构设计^[15-19], 在缩短设计周期的同时能更好地完成预期设计要求与特定工作需要, 基于此本文采用多连杆机构完成桑叶自动采收机的取袋

与开袋功能.

综上分析, 本文研究了一种丘陵山地桑叶自动采收机取袋机构, 按照设计要求, 建立了多连杆数学分析运动学模型, 根据分析辅助软件与非支配排序遗传算法 (NSGA-II) 完成优化设计, 并建立三维模型, 完成机构运动仿真, 最后进行样机试验, 验证了取袋机构设计的准确性和正确性.

1 整机结构与取袋机构工作原理

1.1 整机结构与取袋机构

我国大部分桑园位于丘陵山地, 行宽为 2 m, 坡度为 $0^{\circ}\sim 25^{\circ}$, 因此采用履带式底盘作为桑叶自动采收机的行驶工具. 丘陵山地桑叶采收机结构如图 1 所示, 整体装置主要由桑叶采摘装置、桑叶采摘机架、桑叶收集装置、履带车底盘组成.

桑叶收集装置包括底板、接料机构、导料机构、送袋机构和取袋机构, 其中取袋机构是其核心部分, 取袋机构结构如图 2 所示. 当桑叶采摘装置完成桑叶采摘后, 接料机构开始工作将桑叶运到收集部分. 桑叶进入料仓后, 导料机构通过旋转拨料的方式, 将桑叶具有方向性地转运入袋; 该采摘机采用链条式送袋机构, 以实现吨口袋的定向输送; 取袋机构上配置有电磁吸铁, 根据吸合原理取出安装在送袋机构上的吨口袋 (设有磁吸石), 吨口袋通过取袋机构运动实现袋口的展开, 最终实现桑叶的采收及装袋功能.

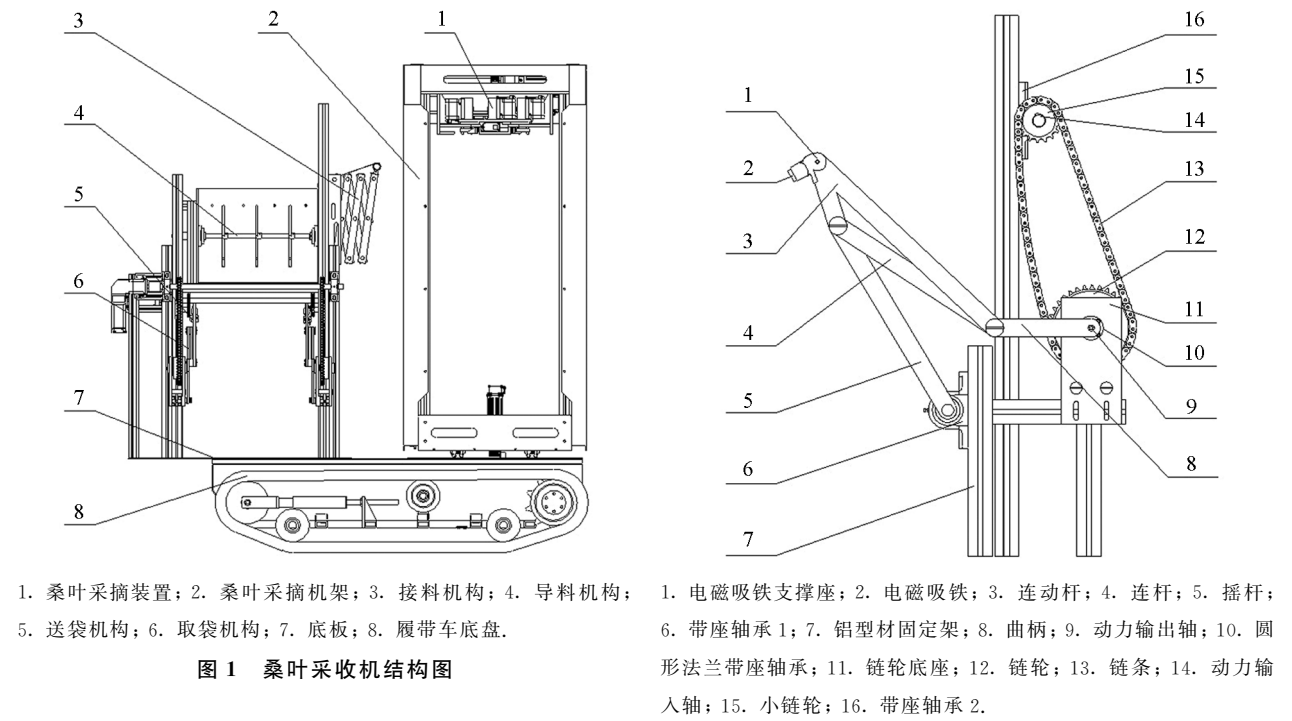


图 1 桑叶采收机结构图

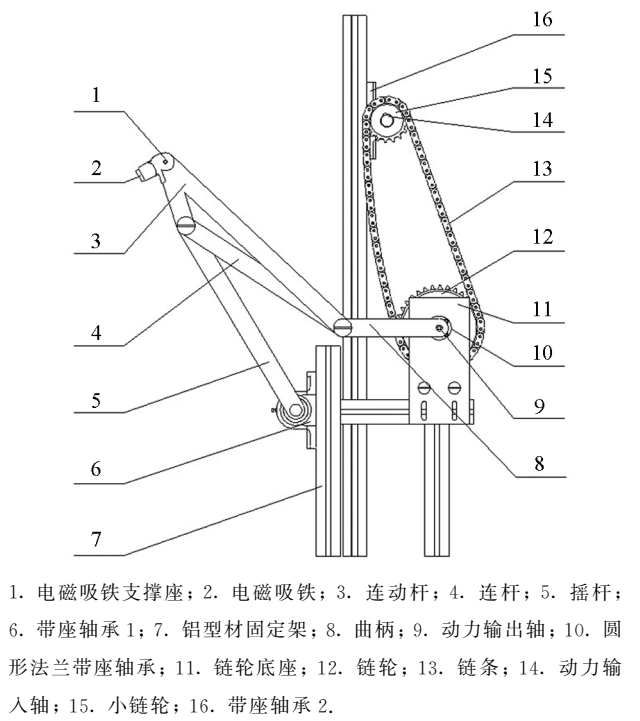


图 2 取袋机构结构图

1.2 取袋机构的工作原理

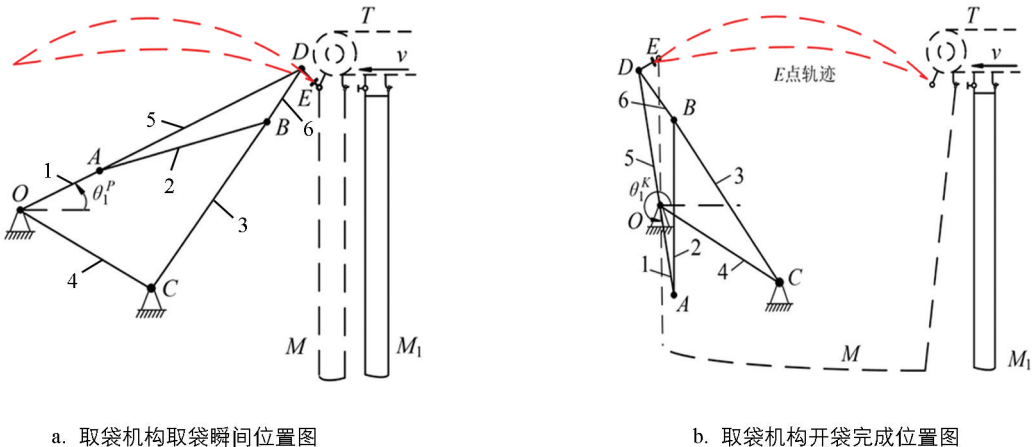
鉴于桑叶采摘收集作业环境限制, 为了实现准确取袋功能及结构轻量化, 本文提出了一种多连杆取袋机构, 该机构由曲柄、连杆、摇杆、机架、连动杆、连动杆附杆、末端执行器电磁铁组成. 工作原理图如图 3 所示, 其中 T 为送袋机构, v 为送袋方向, M 为待取袋位置, M_1 为待输送袋位置, θ_1^p 为取袋时刻曲柄与水平轴的正向夹角, θ_1^k 为装袋时刻曲柄与水平轴的正向夹角. 取袋机构的工作过程可分为取袋、开袋与装袋过程.

在多连杆取袋机构中, OC 为固定机架, 在图 3a 取袋瞬间时刻, 送袋机构 T 保持静止, 曲柄转角为 θ_1^p , 末端执行器电磁铁 DE 在通电状态下与待取袋磁吸石相接触, 实现吸合并完成取袋过程. 为保证末端

执行器顺利与磁吸石贴合,在取袋时刻 E 点速度应尽量小.经测试,电磁铁末端平面为斜 45° 时,取袋效果最佳.通过优化取袋机构设计参数,可得到末端电磁铁在取袋瞬间极限位置 DE 时刻的取袋夹角最优值.

如图 3b 所示,当曲柄持续旋转到 θ_1^k 时,曲柄停止转动并完成开袋过程.为了确保开袋效果的平稳性,末端执行器速度幅值波动应较小.在取袋与开袋过程中,送袋机构保持静止状态.开袋完成后进行桑叶采收装袋.桑叶装袋作业一定时间后,电磁铁断电,送袋机构沿着指定方向运动,使得袋口自动脱落,完成装袋过程.曲柄继续旋转,电磁铁通电,逐渐回到图 3a 取袋瞬间时刻,从而完成一次循环并开始重复作业.

在前期开袋试验后,选取型号为 KK-P34/25 吸盘式电磁铁作为执行件,其基本尺寸参数为圆外径 34 mm、长度 25 mm、吸力 25 kg.考虑电磁铁实际尺寸参数与电磁铁支撑座尺寸,最终确定末端执行器 DE 总长度为 50 mm.



1. 曲柄; 2. 连杆; 3. 摇杆; 4. 机架; 5. 连动杆; 6. 连动杆附杆.

图 3 取袋机构工作原理图

2 取袋机构运动学模型的建立

取袋机构主要由连杆运动机构与末端执行器电磁铁 2 部分组成.图 4 为取袋机构的运动分析图,以曲柄动力输入位置 O 为坐标原点,水平右方向为 x 轴正方向,竖直向上方向为 y 轴正方向建立笛卡尔直角坐标系.

根据封闭图形 $OABC$ 构建解析方程为:

$$\begin{cases} l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 = l_4 \cos \beta + l_3 \cos \theta_3 \\ l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 = -l_4 \sin \beta + l_3 \sin \theta_3 \end{cases} \quad (1)$$

引入辅助线连接 AC , 可得:

$$\cos (\theta_1 + \beta) = \frac{l_1^2 + l_4^2 - l_{AC}^2}{2 l_1 l_4} \quad (2)$$

$$\varphi_1 = \arcsin \left(\frac{l_1}{l_{AC}} \sin (\theta_1 + \beta) \right) \quad (3)$$

$$\varphi_2 = \arccos \left(\frac{l_{AC}^2 + l_3^2 - l_2^2}{2 l_{AC} l_3} \right) \quad (4)$$

进而求得 CB 杆件角位移 θ_3 与 AB 杆件角位移 θ_2 为:

$$\theta_3 = \pi - \varphi_1 - \varphi_2 - \beta \quad (5)$$

$$\theta_2 = \arccos \left(\frac{l_2^2 + l_{AC}^2 - l_3^2}{2 l_{AC} l_2} \right) - \pi + \theta_3 + \varphi_2 \quad (6)$$

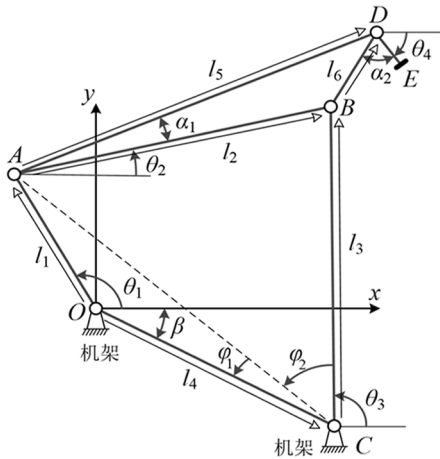


图 4 取袋机构运动分析图

在封闭图形 ADB 中可以求得 D 点位移方程:

$$\begin{cases} x_D = l_1 \cos \theta_1 + l_5 \cos (\alpha_1 + \theta_2) \\ y_D = l_1 \sin \theta_1 + l_5 \sin (\alpha_1 + \theta_2) \end{cases} \quad (7)$$

式中: x_D, y_D 为 D 点横坐标和纵坐标, mm. 其中 α_1 由余弦定理得到:

$$\cos \alpha_1 = \frac{l_2^2 + l_5^2 - l_6^2}{2l_2 l_5} \quad (8)$$

由几何关系可得:

$$\theta_4 = \alpha_2 + \arccos \left(\frac{x_D - l_1 \cos \theta_1 - l_2 \cos \theta_2}{l_6} \right) - \pi \quad (9)$$

由式(9)得 E 点的位移方程为:

$$\begin{cases} x_E = x_D + l_{DE} \cos \theta_4 \\ y_E = y_D + l_{DE} \sin \theta_4 \end{cases} \quad (10)$$

式中: x_E, y_E 为 E 点横坐标和纵坐标, mm. 在式(9)位移方程中对时间求一阶导数, 得到 E 点的速度方程:

$$\begin{cases} v_{Ex} = \dot{x}_E = \dot{x}_D - \dot{\theta}_4 l_{DE} \sin \theta_4 \\ v_{Ey} = \dot{y}_E = \dot{y}_D + \dot{\theta}_4 l_{DE} \cos \theta_4 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\dot{x}_E, \dot{y}_E$ 为 E 点横坐标和纵坐标的速度分量, mm/s.

3 取袋机构优化设计与仿真

3.1 目标函数

通过对连杆长度、安装角度的合适选择与设计, 可确保在有限作业空间内, 更好地完成取袋和开袋过程, 并确保取袋机构电磁铁在右极限位置顺利完成取袋动作. 因此对多连杆机构运动过程提出了设计要求, 确定了 2 个设计目标:

1) 为了在限定作业空间内实现最大取袋距离, 并实现多连杆机构轻量化设计, 选定合适的连杆设计参数范围后, 使 E 点在图 3 中两极限工作时刻拥有最大横向位移. 为了更好地观测帕累托前沿结果, 选择将最大横向平移添加负号形式表达, 即用 E 点最小值位移减去最大值位移, 计算公式如下:

$$\min f_1(d_{x_E}) = x_E^K - x_E^P \quad (12)$$

式中: x_E^P 为取袋时刻末端执行器 E 点的 x 轴线性位移, mm; x_E^K 为装袋时刻末端执行器 E 点的 x 轴线性位移, mm; d_{x_E} 为开袋距离, mm.

2) 末端执行器电磁铁与待取袋上设置的磁吸石在取袋瞬间相互贴合, 经过测试, 末端取袋与水平夹角为 45° 时, 取袋效果最佳, 则有:

$$\min f_2(\theta_4) = \left| \theta_4^P + \frac{\pi}{4} \right| \quad (13)$$

式中: θ_4^P 为取袋时刻 θ_4 的角度.

3.2 优化变量

通过建立机构模型与优化目标分析, 确定取袋机构的设计变量为曲柄 OA 的长度 l_1 、连杆 AB 的长度 l_2 、摇杆 BC 的长度 l_3 、机架 OC 的长度 l_4 、连动杆 AD 的长度 l_5 、连动杆附杆 BD 的长度 l_6 , 末端执行器 DE 与连杆 l_6 之间的夹角 α_2 .

3.3 约束条件

1) 根据格拉霍夫定理, 曲柄摇杆机构 $OABC$ 需要满足杆长条件, 即最短杆与最长杆的长度之和小于或等于其他两杆的长度之和, 曲柄为最短杆且与机架相邻, 可得:

$$l_1 + l_3 \leqslant l_2 + l_4$$

(14)

2) 根据三角不等式, 三角形 ADB 需要满足两边之和大于第三边, 即最短杆与中间杆长度之和大于最长杆, 可得:

$$l_2 + l_6 > l_5$$

(15)

3) 为确保装袋顺利进行并保证机构平稳性, E 点在取袋瞬间与装袋时刻两极限位置的 y 轴坐标值之差不宜过大. 此外, 末端执行器 DE 与连杆杆附杆 l_6 之间的夹角 α_2 将决定末端执行器最终取袋时的姿态位置.

根据设计要求, 基于 Matlab App Designer 编写了取袋机构辅助分析设计软件, 界面如图 5 所示. 其中包括参数输入区、图像输出区、按键控制区和信息输出区 4 个模块, 用于分析连杆运动状态、 E 点轨迹图像、 E 点速度、合位移和关键数据输出, 可简化设计过程, 缩短开袋机构设计周期^[20-22]. 在设计软件中进行参数调试, 当曲柄长度增大时, 机构整体尺寸也会随之变大; 曲柄长度太短则取袋距离过小, 不满足设计要求. 为控制取袋过程中末端执行器 y 轴幅度不宜过大且能实现开袋最大距离, 参考霍肯连杆近似直线机构, 调试各杆件参数, 最后确定各杆件 l_i 与 α_2 的取值范围, β 取值为 30° , DE 由上文得知为 50 mm .

$$\left\{ \begin{array}{l} 138\text{ mm} \leqslant l_1 \leqslant 160\text{ mm} \\ 258\text{ mm} \leqslant l_2 \leqslant 312\text{ mm} \\ 327\text{ mm} \leqslant l_3 \leqslant 362\text{ mm} \\ 244\text{ mm} \leqslant l_4 \leqslant 299\text{ mm} \\ 327\text{ mm} \leqslant l_5 \leqslant 407\text{ mm} \\ 100\text{ mm} \leqslant l_6 \leqslant 112\text{ mm} \\ 22.5^\circ \leqslant \alpha_2 \leqslant 90^\circ \end{array} \right.$$

(16)

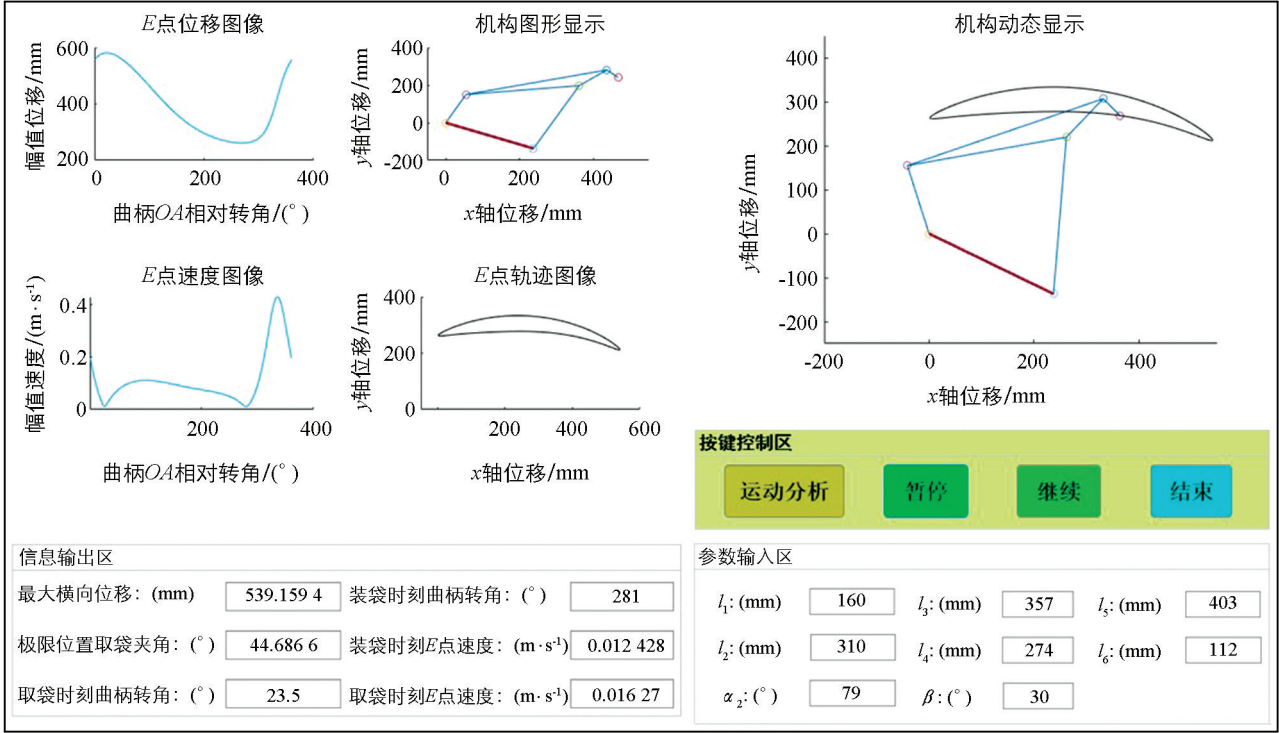


图 5 取袋机构辅助分析软件交互界面

3.4 基于 NSGA-II 非支配排序遗传算法的模型求解

带基因策略的非支配排序遗传算法(NSGA-II)是一种全局优化算法, 因其符合自然迭代规律及收敛速

度较快而被广泛应用于各种优化设计领域^[23-25]. 本文采用 NSGA-II 优化算法对多连杆机构的杆件长度及末端执行器安装角度建立优化模型求解, 其中每个染色体代表了多连杆机构参数及末端执行器安装角度的一个设计方案, 每个染色体具有交叉与变异能力(产生新染色体), 并安排其等级制度与支配关系(优胜劣汰), 以及一个目标函数(最大开袋距离与取袋角度). 父代种群中的每个个体都有突变与交叉能力, 产生子代种群, 同时整合种群, 依据等级制度淘汰掉不够“优秀”的染色体, 生成新的父代种群, 从而在较短的时间内找到最优解.

3.5 优化结果分析

本文 NSGA-II 算法的基本设置为: 种群规模 100、最大迭代次数 600、交叉概率 0.8、变异概率 0.15. 所得优化解集如图 6 所示.

结果显示, 最大横向位移取值较大时, 取袋位置夹角也偏大, 两者不能同时满足. 根据设计要求, 要求对取袋过程中末端执行器 DE 与水平之间的夹角 θ_4^P 更接近 $45\pm0.5^\circ$, 并在此基础上保证最大横向开袋距离, 综合考虑下选择取袋距离 $d_{x_E}=537.82\text{ mm}$, $\theta_4^P=44.996^\circ$ 的最优解. 根据实际加工条件, 最终选择表 1 所示实际参数结果.

表 1 优化结果与实际参数

优化目标	参数优化结果	实际参数	优化目标	参数优化结果	实际参数
l_1/mm	159.7	160	l_5/mm	403.2	403
l_2/mm	309.9	310	l_6/mm	112	112
l_3/mm	356.7	357	$\alpha_2/^\circ$	79	79
l_4/mm	273.8	274			

验证参数优化设计合理性, 将最终得到的连杆参数输入取袋机构辅助分析软件, 通过辅助交互界面得到最大取袋距离 $d_{x_E}=539.16\text{ mm}$, $\theta_4^P=44.69^\circ$, 满足设计要求; 得到多连杆机构姿态位置特征与末端执行器 E 点速度与轨迹图像, 如图 7 所示.

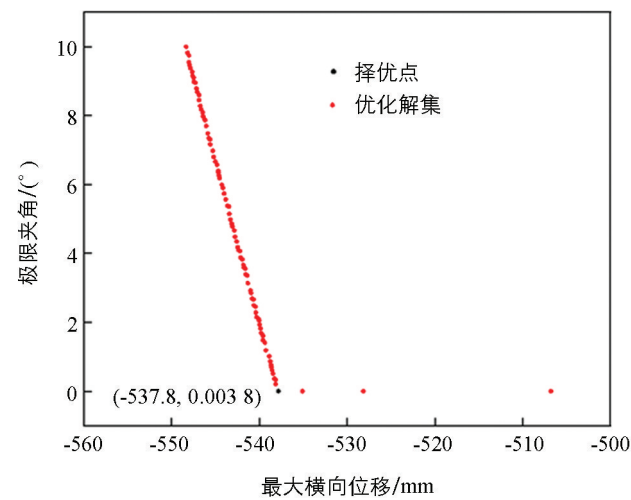


图 6 优化解集

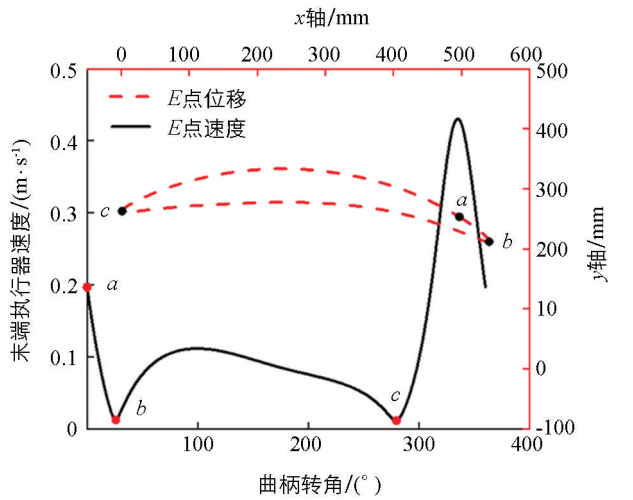


图 7 E 点理论位移与速度图像

分析图 7 中取袋、开袋与装袋过程. a 点为静止初始位置, 此时曲柄转角 $\theta_1=0^\circ$, 末端执行器位置为 $(496.6\text{ mm}, 253.3\text{ mm})$, 曲柄开始以 0.1 r/s 速度逆时针旋转; 当旋转到 b 点时为取袋瞬间, 达到右极限位置, 末端执行器速度缓慢降到 0.016 m/s , 满足取袋瞬间低速要求, 此时末端执行器位置为 $(540.8\text{ mm}, 212.7\text{ mm})$, 末端执行器电磁铁与水平之间的夹角为 44.69° , 完成取袋动作. 随后曲柄继续旋转, 进入 bc 段, 该过程为开袋过程, E 点速度波动不大, 符合开袋过程设计要求. 当曲柄旋转到达 c 点时, 速度不断减

小,末端执行器同时移动到最大距离,此时电磁铁的位置为(1.6 mm, 263.2 mm),曲柄停止旋转,曲柄转角为 $\theta_1=281^\circ$,此时为装袋时刻.最后回到 cb 段,即取袋阶段,此阶段利用连杆机构急回特性,可缩短取袋回程时间,提高工作效率.

3.6 取袋机构运动学仿真分析

根据参数选择结果,利用 SolidWorks 三维设计软件建立了多连杆取袋机构的三维模型,并将装配体导入 ANSYS 仿真分析软件的刚体动力学模块中进行运动仿真分析.在仿真中,设置零件之间的相关约束条件,设置动力输出轴的转速为 0.1 r/s,通过仿真分析得到末端执行器电磁铁 E 点的轨迹图像与速度图像.图 8 为桑叶采收机收集装置三维模型与 E 点轨迹及速度仿真图.

比较图 7 与图 8b 之间末端执行器电磁铁 E 点轨迹图像、图 7 与图 8c 之间 E 点速度图像,可知仿真结果与理论结果基本一致,验证了多连杆取袋机构运动学模型建立的正确性和优化设计结果的合理性.

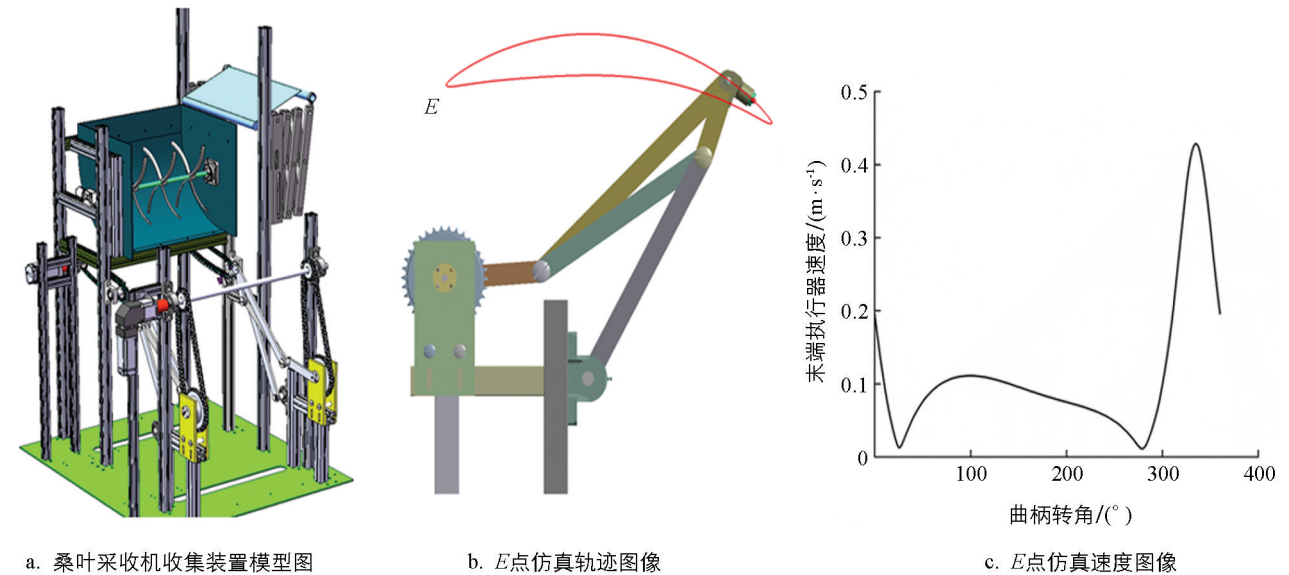


图 8 取袋机构仿真分析

4 取袋机构样机试验

完成桑叶采收机取袋机构运动仿真验证后,加工出物理样机,如图 9 所示.

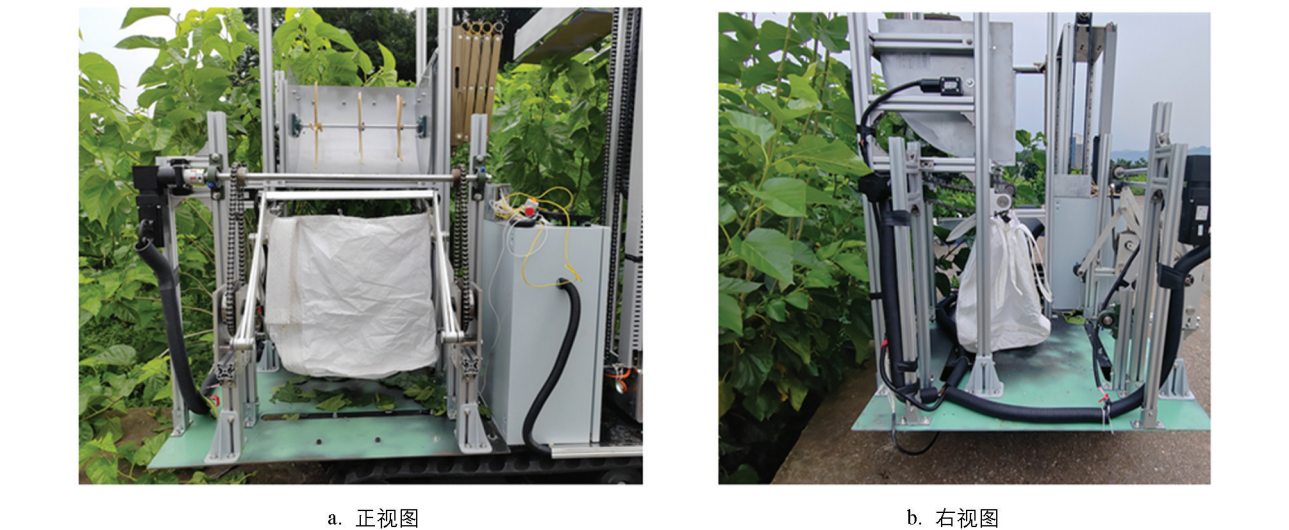


图 9 桑叶采收机收集装置样机图

4.1 高速摄像试验及参数测试试验

基于高速摄像技术绘制出取袋机构运动轨迹, 拍摄帧数设定为 500 f/s, 取袋机构电机选用汇川 40B30CB 伺服电机. 拍摄完成后在 After Effects 视频分析软件中进行分析, 根据电磁吸铁中心点 E 为描绘点, E 点特殊点位置与运动轨迹如图 10 所示, 其中 a, b, c, d 点分别为曲柄在静止初始位置、取袋时刻、装袋时刻、曲柄旋转 180° 的 E 点状态. 通过与 E 点理论轨迹图 7 和仿真轨迹图 8b 进行对比, 发现三者轨迹基本一致.

对连杆进行 x 轴方向测绘, 得到平均最大开袋距离数值为 551 mm, 误差为 2.2%. 测量末端执行器电磁铁在取袋机构极限位置的角度, 得到其平均数值为 46.2° , 误差为 3.4%. 所有参数在误差允许范围内, 验证了该取袋机构设计的合理性, 满足桑叶收集取袋的工作要求.

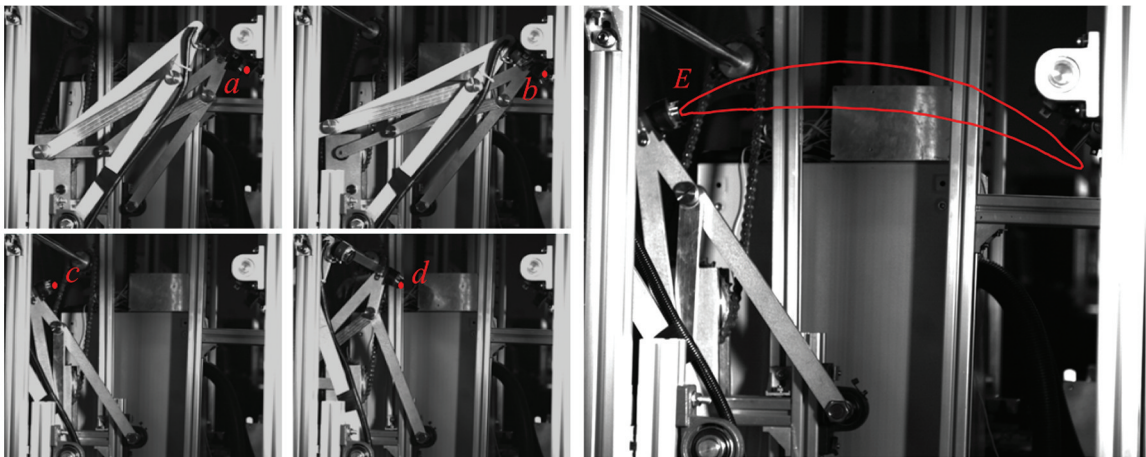


图 10 样机 E 点运动轨迹

4.2 试验条件

根据前期准备工作与分析, 曲柄转速大小决定取袋时刻与开袋过程的成功率. 转速过快, 取袋与开袋过程容易失败; 转速过慢, 工作效率降低. 吨口袋种类的形状与大小将决定袋子在取袋机构工作过程中展开时的流畅程度与袋子脱袋情况, 适配的吨口袋将决定取袋开袋的成功率. 取袋开袋过程中磁吸石与末端执行器相互作用, 磁吸石外圆尺寸大小将会影响取袋时刻能否顺利完成送袋以及开袋过程是否容易脱袋. 为探究曲柄转速(A)、吨口袋形状与尺寸(B)、磁吸石外圆尺寸(C)3 因素对桑叶采收机取袋机构取袋开袋效果的影响, 并以较少试验次数寻求较优组合, 开展取袋机构正交试验. 本次试验场地为西南大学后山桑园内, 试验材料为 6 月份桑叶, 桑叶长度约为 180~280 mm, 宽度约为 100~180 mm. 图 11 为一个完整取袋开袋过程, 分别为待取袋、取袋、开袋及装袋时刻的状态.



图 11 取袋机构关键运动时刻状态

4.3 试验指标与因素

试验以取袋开袋成功率为试验指标。取袋开袋成功率是指取袋机构工作过程中能完成整个取袋开袋过程的概率。取袋开袋成功率越高,桑叶收集装袋效果越好,取袋开袋成功率计算式如下:

$$S = \frac{Q - R}{Q} \times 100\%$$
(18)

式中: S 为取袋开袋成功率(%); Q 为取袋开袋试验次数; R 为取袋开袋试验失败次数。

通过前期试验与设计要求,曲柄转速取值范围为 0.1~0.3 r/s; 根据取袋机构的最大开袋距离为 551 mm,吨口袋尺寸过小会导致开袋失败,过大会导致袋口展开后发生变形,影响装袋效果。即可以选择方体 550 mm,圆柱体 600 mm * 600 mm,方体 600 mm 3 种规格吨口袋; 其中磁吸石外圆尺寸过大将会与送袋机构发生干涉,测试后得知应小于 25 mm。根据磁吸石参数标准,磁吸石可适配选择直径为 16 mm,20 mm,25 mm 3 个水平。试验因素水平如表 2 所示。

表 2 桑叶收集性能试验因素及水平

水平	因素		
	曲柄转速(A)/(r · s ⁻¹)	吨口袋形状与尺寸(B)/mm	磁吸石外圆尺寸(C)/mm
1	0.1	方体 550	16
2	0.2	圆柱体 600 * 600	20
3	0.3	方体 600	25

4.4 试验结果与分析

本试验选取 $L_9(3^4)$ 正交试验表进行试验,并添加一列空白列,在试验中每组分别完成 40 次取袋开袋试验以及 150 张桑叶转运入袋试验,每组分别完成 3 次取平均,正交试验方案与试验结果如表 3 所示。

表 3 送袋机构参数试验因素及水平

序号	A/(r · s ⁻¹)	B/mm	C/mm	空白列	取袋开袋成功率/%
1	0.1	方体 550	16	1	94.17
2	0.1	圆柱体 600 * 600	20	2	95.83
3	0.1	方体 600	25	3	92.50
4	0.2	方体 550	20	2	91.67
5	0.2	圆柱体 600 * 600	25	3	88.33
6	0.2	方体 600	16	1	86.67
7	0.3	方体 550	25	2	83.33
8	0.3	圆柱体 600 * 600	16	3	81.67
9	0.3	方体 600	20	1	84.17

由表 4 和表 5 可知, A 因素对取袋效果表现为极为显著, B、C 表现为显著,能较好地评价各试验因素与评价指标之间的参数关系,取袋开袋成功率影响的显著顺序为 A>C>B。结合各因素对试验指标的影响,得出最优试验因子组合为 A₁B₁C₂,即曲柄转速为 0.1 r/s,吨口袋形状与尺寸为方体 550 mm,磁吸石外圆尺寸为 20 mm。

表 4 极差分析

指标	因素	k_1	k_2	k_3	极差	优方案
S	A	94.17	88.89	83.06	11.11	A ₁
	B	89.72	88.61	87.78	1.94	B ₁
	C	87.50	90.56	88.06	3.06	C ₂
主次		A>C>B				

表 5 方差分析

指标	因素	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>p</i>
S	A	185.34	2	92.67	1 201.00	0.001
	B	5.71	2	2.86	37.00	0.026
	C	15.90	2	7.95	103.00	0.010
	误差	0.15	2	0.54		
	总和	207.10	8			

注: 其中 $p<0.01$ 为极为显著; $0.01<p<0.05$ 为显著; $p>0.05$ 为不显著.

为验证正交试验结果的准确性, 以最优参数组合进行重复验证试验, 试验结果如表 6 所示. 试验结果表明, 在曲柄转速为 0.1 r/s、吨口袋形状与尺寸为方体 550 mm、磁吸石外圆尺寸为 20 mm 时, 平均取袋开袋成功率为 97.50%, 满足桑叶采收机工作要求.

表 6 验证试验结果

转速/($\text{r} \cdot \text{s}^{-1}$)	试验次数	成功次数	成功率/%
1	120	117	97.50
2	120	118	98.33
3	120	116	96.67
4	120	117	97.50
平均值	120	117	97.50

5 结论

本文针对丘陵山地桑叶自动采收机的取袋机构展开了深入研究, 建立了取袋机构运动学模型并对其进行参数优化, 最后完成仿真验证与样机试验.

1) 基于取袋原理, 设计了一种多连杆取袋机构, 建立了机构运动学模型并完成参数优化设计. 为了满足桑叶采收机的设计要求, 基于 Matlab App Designer 开发了取袋机构辅助分析设计软件, 并确定了机构参数的优化范围. 应用 NSGA-II 非支配排序遗传算法优化了设计参数, 并根据实际加工条件得到了以下结果: $l_1=160\text{ mm}$, $l_2=310\text{ mm}$, $l_3=357\text{ mm}$, $l_4=274\text{ mm}$, $l_5=403\text{ mm}$, $l_6=112\text{ mm}$, $\alpha_2=79^\circ$, 最大开袋距离为 539.16 mm, 取袋夹角为 44.69° .

2) 根据最终参数结果建立了取袋机构的三维模型, 进行虚拟样机的运动学仿真分析, 最后完成样机试验. 通过仿真得到了末端执行器 *E* 点的速度曲线和运动轨迹, 理论和仿真结果基本保持一致, 验证了运动学模型和优化结果的准确性. 进一步验证设计的准确性, 开展了样机试验. 试验结果表明: 在高速摄像技术下 *E* 点运动轨迹与理论和仿真基本一致. 以曲柄转速、吨口袋种类、磁吸石外圆尺寸为试验因素, 取袋开袋成功率为指标开展正交试验, 得到曲柄转速为 0.1 r/s、吨口袋形状与尺寸为方体 550 mm、磁吸石外圆尺寸为 20 mm 的最优组合. 以该组合进行验证试验, 结果表明: 平均取袋开袋成功率为 97.50%, 满足开袋的设计要求, 证明了取袋机构优化设计的正确性, 为农业桑园自动化水平的提升提供了技术支持.

参考文献:

[1] 中华人民共和国商务部. 商务部关于茧丝绸行业“十四五”发展的指导意见 [EB/OL]. (2021-09-15) [2023-07-06]. <http://scyxs.mofcom.gov.cn/article/jsc/202109/20210903198754.shtml>.

[2] 中华人民共和国中央人民政府. 六部门关于印发《蚕桑丝绸产业高质量发展行动计划(2021-2025 年)》的通知 [EB/OL]. (2020-09-26) [2023-11-09]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-09/26/content_5547331.htm.

[3] 马莹. 我国规模化蚕桑基地建设现状及发展对策研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2021.

- [4] 闫鑫. 往复式桑叶采摘机结构设计及各机构速度优化匹配研究 [D]. 柳州: 广西科技大学, 2015.
- [5] 柳怡成. 摇杆式桑叶采摘机的运动动力学仿真与优化 [D]. 柳州: 广西科技大学, 2020.
- [6] 任浩, 李丽, 卢世博, 等. 基于深度学习的复杂自然环境下桑树枝干识别方法 [J]. 中国农机化学报, 2023, 44(2): 182-188.
- [7] WENG X X, TAN D P, WANG G, et al. CFD Simulation and Optimization of the Leaf Collecting Mechanism for the Riding-Type Tea Plucking Machine [J]. Agriculture, 2023, 13(5): 946.
- [8] ZHANG S W, WANG Z L, WANG L, et al. Design and Experimental Study of Ginkgo Leaf Picking Device [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2021, 235(24): 7353-7362.
- [9] 王攀, 易文裕, 熊昌国, 等. 4CJZ-1000 型自走式采茶机的设计与试验 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(11): 228-233.
- [10] 廖凯, 古全元, 高自成, 等. 芦苇笋采收机研制 [J]. 农业工程学报, 2021, 37(15): 20-30.
- [11] 张少坤. 回转式给袋包装机取袋上袋机构的设计及优化 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2020.
- [12] 陈营, 陆佳平, 李国华, 等. 连续取袋接袋机构的设计 [J]. 包装与食品机械, 2016, 34(3): 33-37.
- [13] 张勇, 邓援超. 包装机八杆机构式灌装开袋装置的优化设计 [J]. 机械设计与制造, 2018(5): 106-109.
- [14] 邹阳, 唐火红, 冯宝林, 等. 水泥灌装机套袋机构设计与优化 [J]. 机械设计, 2015, 32(2): 56-60.
- [15] 叶秉良, 唐涛, 杨秋兰, 等. 柳树插条自动喂入装置取料机构优化设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 93-99.
- [16] 党玉功, 金鑫, 李衡金, 等. 单自由度四连杆取投苗机械臂设计 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(14): 39-47.
- [17] 沈从举, 张立新, 周艳, 等. 自走式果园气爆深松施肥机打穴机构运动学分析与试验 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(1): 44-52.
- [18] 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.
- [19] 魏志强, 宋磊, 阳尚宏, 等. 穴盘苗夹茎式取投苗机构优化设计与试验 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(4): 88-99.
- [20] 申屠留芳, 吴旋, 孙星钊, 等. 基于遗传算法的红薯栽植机构设计 [J]. 中国农机化学报, 2019, 40(12): 6-11.
- [21] 孟祥飞, 杨传民, 樊文涛. 给袋式包装机取袋机构结构参数的优化设计 [J]. 包装工程, 2017, 38(19): 168-172.
- [22] 郑占贺, 王莹, 任文营, 等. 青饲机青贮块间歇型自动撑袋机构的设计与优化 [J]. 包装工程, 2023, 44(3): 179-186.
- [23] 李丽, 甘镇瑜, 李聪波, 等. 面向高效节能的螺旋输送机设计参数优化方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(8): 2585-2594.
- [24] VERMA S, PANT M, SNASEL V. A Comprehensive Review on NSGA-II for Multi-Objective Combinatorial Optimization Problems [J]. IEEE Access, 2021, 9: 57757-57791.
- [25] 闫嘉, 李林峰, 林毓培, 等. 基于改进免疫遗传算法的汽车零件排样 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(5): 204-214.

责任编辑 柳剑

崔玉洁