doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.04.020

夹送式万寿菊采收装置设计与试验

喻陈楠[1,2]　周雄军[1]　王青烨[3]　陈之威[4]　杨凯皓[1]　姚　坤[1]　陈建能[1,2]

(1.浙江理工大学机械工程学院,杭州 310018;2.浙江省农业智能感知与机器人全省重点实验室,杭州 310018;
3.浙江理工大学启新学院,杭州 310018;4.山东省农业科学院茶叶研究所,济南 250100)

摘要:为解决人工采摘万寿菊效率低、机械梳刷采摘损伤率高的问题,本文设计了一种夹送式万寿菊自动采收装置。利用手持末端机构进行田间试验,确定影响万寿菊损伤率的因素主要包括同步带轮中心距、同步带轮转速和采摘角度;采用三因素三水平的中心组合设计与响应面法分析各因素对采摘成功率的影响;以采摘损伤率为响应值建立二次回归模型,确定各因素对采摘成功率的影响主次排序。以采摘损伤率为目标对各因素进行优化,得到最优组合为:二同步带轮中心距 56 mm、同步带轮转速 200 r/min、采摘角度 30°,此时,预测损伤率为 6.59%。采用最优组合参数进行 3 组验证试验,结果表明末端采收装置能够有效完成万寿菊采摘工作,损伤率分别为 8%、4%、8%,试验值与预测值相对误差小于 4%。结合实际工作环境设计万寿菊采收装置机械臂模块,其设计紧紧围绕万寿菊生长特性和采收作业对精度与效率的要求,可以精准、快速地将末端执行器移动并定位到目标万寿菊位置,以稳定的支撑和驱动完成采摘动作。搭建试验台并进行采收试验,采收成功率为 93.01%,验证了夹送式万寿菊采收装置的可行性。

关键词:万寿菊;夹送式;采收装置

中图分类号:S225.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)04-0203-10　　**OSID**:

Design and Testing of Clamp-feed Type Picking Device for Marigold

YU Chennan[1,2]　ZHOU Xiongjun[1]　WANG Qingye[3]　CHEN Zhiwei[4]　YANG Kaihao[1]　YAO Kun[1]
CHEN Jianneng[1,2]

(1. *School of Mechanical Engineering*, *Zhejiang Sci-Tech University*, *Hangzhou* 310018, *China*
2. *Zhejiang Key Laboratory of Intelligent Sensing and Robotics for Agriculture*, *Hangzhou* 310018, *China*
3. *Qixin Honor School*, *Zhejiang Sci-Tech University*, *Hangzhou* 310018, *China*
4. *Institute of Tea Research*, *Shandong Academy of Agricultural Sciences*, *Ji'nan* 250100, *China*)

Abstract: Aiming to address the issues of low efficiency in manual harvesting and high damage rate in mechanical brushing harvesting of marigolds, an automated marigold harvesting platform with a clamp-feed type design was proposed. The structural design and testing of the harvesting end were carried out to meet the harvesting requirements. Through field tests of the handheld harvesting end mechanism, factors affecting the damage rate of marigolds were identified, including the center distance of the synchronous pulley, the rotation speed of the synchronous pulley, and the harvesting angle. A three-factor, three-level central composite design and response surface analysis were used to study the interaction effects of these factors on the harvesting success rate. A quadratic regression model was established with harvesting damage rate as the response variable, and the significance of each factor on the harvesting success rate was ranked. By optimizing the factors with the damage rate as the objective, the optimized parameters for the center distance of the synchronous pulley, the rotation speed of the synchronous pulley, and the harvesting angle were determined to be 56 mm, 200 r/min, and 30°, respectively, with a predicted damage rate of 6.59%. Three sets of validation tests were conducted with the optimized parameters, and the results showed that the end harvesting device could effectively complete the marigold harvesting task,

收稿日期:2025-06-24　修回日期:2025-09-10

基金项目:浙江省自然科学基金项目(LQN26E050030)、国家自然科学基金项目(32501806)、浙江理工大学校内科研启动基金项目(23242167-Y)和山东省重点研发计划项目(2024TZXD054)

作者简介:喻陈楠(1995—),男,讲师,博士,主要从事农业机械装备与技术和机构运动综合理论等研究,E-mail:yucn@zstu.edu.cn

通信作者:陈建能(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农机装备和农业机器人研究,E-mail:jiannengchen@zstu.edu.cn

with damage rates of 8%, 4%, and 8%, respectively. The relative error between the test values and predicted values was less than 4%. A marigold harvesting device with a mechanical arm module was designed based on the actual working environment, its design closely focused on the growth characteristics of marigold and the core requirements of precision and efficiency for harvesting operations. It can accurately and quickly move the end effector and locate the target marigold position to complete the picking action with stable support and drive. On this basis, a test platform was built, and harvesting tests were conducted. The success rate of the harvesting tests was 93.01%, confirming the feasibility of the clamp-feed type marigold harvesting device.

Key words: marigold; clamp-feed type; picking device

0 引言

万寿菊是菊科一年生草本植物,在我国多地均有栽培[1],是重要的经济花卉[2]。目前我国万寿菊种植面积达 6 700 hm^2,采摘方式主要依靠人工采摘,费时费力。因此,如何实现机械化采摘替代人工采摘成为了当前热点[3-5]。机械化采摘可提高采摘效率[6-8],但对于万寿菊采摘机械的研究停留在理论阶段。WILLOUGHBY 等[9]利用曲柄连杆连接 2 个不同直径的偏心轮和外轮上的梳刀组合进行菊花采摘。该采摘形式较为新颖,但花朵采摘率偏低,采摘花柄过多。王荣炎等[10]提出了一种气动翻转梳齿式菊花采摘装置,采摘机通过性较好,但采摘时容易将未开花苞一并摘下,误摘率高。为提高万寿菊采摘效率,欧解利[11]设计了一种便携式万寿菊摘花机,该机器结构紧凑、灵活轻巧、使用方便,与人工相比效率大幅提高,采净率可达 85%,成本较低,但含杂率高达 25%。针对人工采摘万寿菊会与花粉接触影响身体健康、采摘效率低等问题,雷少芳[12]设计一种万寿菊采摘器以实现非接触采摘,提高采摘效率。范浩杰等[13]针对南疆莎车县实际情况,为解决万寿菊采摘过程中花朵喂入难、采摘效率低、花朵损伤严重等问题,设计了一种万寿菊梳齿式采摘机,但因为万寿菊长势高低不一,采摘时会对枝叶造成破坏,影响下一茬菊花生长。

近年来,随着农业机械化与智能化技术发展,花卉采收装备呈精准化、低损伤化发展趋势。在国内,基于机器视觉的识别定位技术、多自由度机械臂精准操控技术和柔性采收技术已成为突破采收机械瓶颈的关键。马义东等[14]提出水培生菜叶展及叶面交错点视觉检测方法,并用于生菜柔性抓取参数调控。郭铁铮等[15]为突破目前应用较多的刚性末端执行器存在的适应性、柔顺性较差等问题,设计了一种基于 FRE 的柔性三指末端执行器。侯加林等[16]针对大蒜联合收获机在大蒜植株夹持输送过程中常出现的输送成功率低、漏持率和断茎率高、可靠性差等问题,设计了一种大蒜变刚度柔性夹持输送装置。荷兰、日本等国家在高精度传感技术、柔性夹持机构和自主导航系统等方面取得了显著进展[17-18],为实现高效低损伤采收提供了重要参考。

本文设计一种夹送式万寿菊采摘装置,通过导向齿与 3 自由度机械臂配合,利用带挡块的传送带及喂入口刀片,为花朵提供适宜的夹持力和剪切力,以期在保证采摘效率的同时,减少夹带枝叶和花朵损伤。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

结合万寿菊植株物理特性与采摘要求,设计了一套集视觉识别与机电控制的高效采摘装置,主要包括视觉识别定位模块、采收一体机械手、采摘机械臂直线模组和控制系统。整机结构如图 1 所示,主要由机架、深度相机、采摘末端、机械臂平移装置、工控机等核心部件构成。

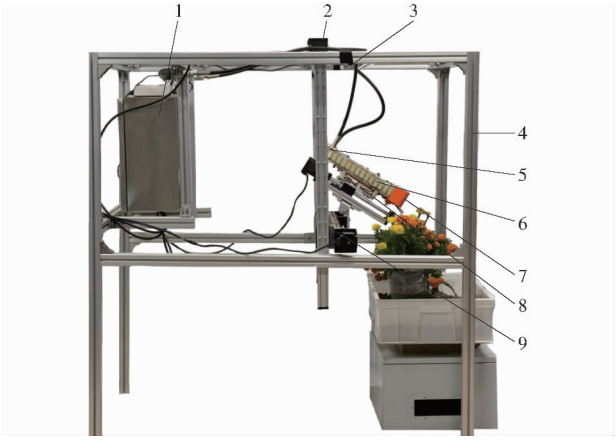


图 1 万寿菊采摘装置结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of marigold harvesting device

1. 工控机 2. 步进电机 3. 深度相机 4. 机架 5. 收集装置 6. 输送装置 7. 导向装置 8. 采摘末端 9. 机械臂平移装置

末端执行机构由 2 台直流电机协同驱动,借助软轴将动力高效传递至同步带轮,进而带动嵌有专用挡块的同步带完成花朵的握持与移送。软轴布置在设备下方,既确保传动可靠性,也最大限度减少对采收操作的干涉。为进一步提升作业连贯性、减少工序间隔,输送区段采用挡块集成式传送带结构,实

现了摘取与输送同步进行，同时在传送带下方加装防护挡板，有效避免花朵在输送过程中意外脱落，提高了采收成功率和完整性。

综合考虑整机配置、采收要求、机身稳定性等因素，确定整机主要技术参数如表 1 所示。

表 1　主要技术参数

Tab. 1　Main technical data

参数	数值/形式
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 080×800×1 500
作业部件驱动形式	电动
作业部件配套功率/W	76.8
采摘效率/(朵·min^{-1})	10～12
工作幅宽/mm	700
采摘高度/mm	700～1 300
同步带轮转速/(r·min^{-1})	0～200
采收方式	单个连续采收

1.2　整机工作原理

采摘作业前，先将底盘小车驶至最佳位置。采摘作业时，集成于机架的深度相机对田间万寿菊进行实时图像采集与处理，通过视觉算法识别植株上符合采收标准(花径大于 50 mm 且形态完整)的花朵，并输出其空间位置坐标至控制系统。工控机依据视觉定位信息控制机械臂平移装置调整采收末端至目标花朵处，完成精准夹持。夹持后的花朵在挡块同步带的带动下向后输送，在运动过程中花萼部分与导向装置中的定制刀片接触，实现花柄快速且低损伤切断，从而完成采摘。采收后花朵经传送带持续输送，最终通过收集装置集中落入收集盒内，实现从识别、采摘到收集的全程自动化和连续性作业。

2　夹送式采收末端关键部件设计

2.1　导向部件设计

导向部件主要作用是对末端定位误差给予补偿，在执行采摘作业时，将受干扰导致定位略微偏差的万寿菊引导至喂入口。导向部件由 2 个导向齿、刀片和导向板组成，导向齿受力关系如图 2 所示，其中导向齿倾角 α 需略大于采摘角 β，导向齿倾角 α 过大，会损伤茎秆，α 过小，使采摘点与刀口接触，增加采摘难度，导向齿倾角与采摘角需满足

$$\begin{cases}\alpha-\beta\approx10^\circ\\ 30^\circ\leqslant\beta\leqslant50^\circ\end{cases}\tag{1}$$

结合试验得导向齿倾角 α 取 40°～60°，采摘角 β 取 30°～50°，导向齿前端间距 L_1 取 70 mm，末端喂入口间距 L_2 取 30 mm，刀片固定在导向齿末端上方 5 mm 处。

假设万寿菊茎秆不受前进速度的影响且与导向

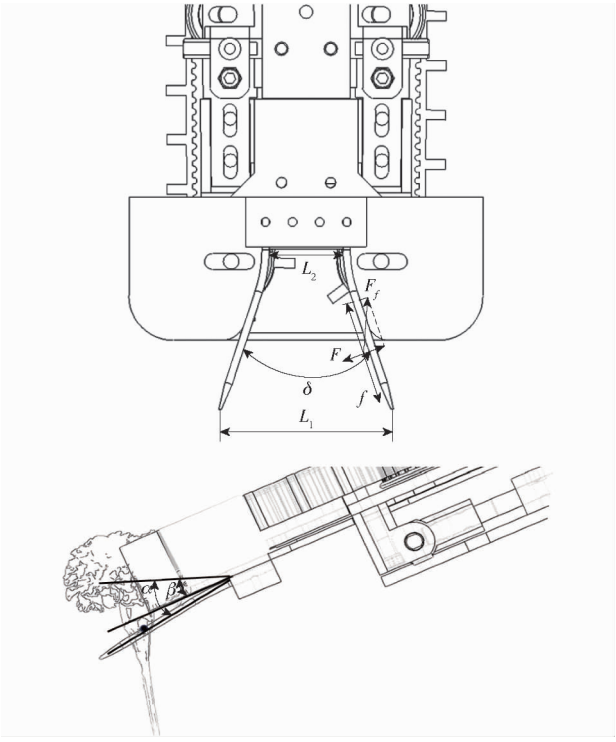


图 2　导向齿受力关系示意图

Fig. 2　Force relationship diagram of guide teeth

齿之间无相对移动，对万寿菊茎秆进行受力分析可得

$$\begin{cases}F_f\sin\dfrac{\delta}{2}=F\\ f=f_sF\end{cases}\tag{2}$$

式中　F——导向齿对万寿菊的作用力，N

F_f——导向齿对万寿菊静摩擦力，N

δ——导向齿两作用边夹角，(°)

f——万寿菊与导向齿内壁摩擦力，N

f_s——万寿菊与导向齿间摩擦因数，取 0.2～0.6

2.2　夹持输送部件设计

为解决万寿菊采摘后在输送至收集部件过程中造成损伤的问题，设计了万寿菊夹持输送部件，如图 3 所示，包括 1 组带有挡块的柔性夹持输送模块和间距调节模块。

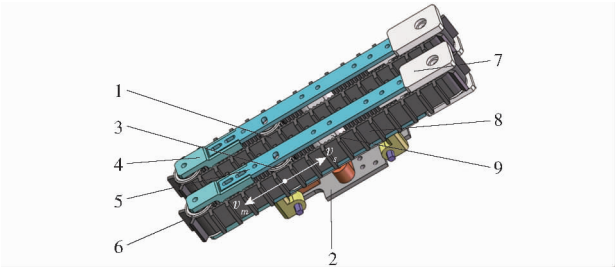


图 3　夹持输送部件结构图

Fig. 3　Structure diagram of conveying device

1. 夹持输送模块　2. 间距调节模块　3. 安装架　4. 带轮安装板　5. 同步带轮　6. 张紧轮　7. 软轴安装支架　8. 挡块同步带　9. 支撑块

为控制万寿菊收获的破损率与采摘效率,采用单行连续输送方式,为保证末端灵活性,设计输送距离为 330 mm。为减小对采摘对象以外的目标与枝叶干扰,输送装置宽度设计为 120 ~ 140 mm,为保证输送过程中花朵不会掉落,在输送模块与间距调节模块之间设置挡板,其中挡板与传送带间距设计为 5 mm,以防止花朵在输送过程中卡在输送带与挡板之间造成损伤。

2.2.1 夹持输送模块

夹持输送模块主要包含带轮安装架、带轮安装板、支撑块、35 mm 同步带轮、35 mm 张紧轮、挡块同步带、软轴安装支架、软轴、电机等部件;输送带上、下端同心套置于同步带轮上,上端同步带轮与软轴一端连接,与软轴安装支架配合,软轴另一端通过联轴器与电机连接,下端同步带轮内装有轴承通过螺栓与带轮安装架配合,软轴安装支架与带轮安装架通过安装板固定,2 条输送带呈倒“八”字安装,以增加采摘时对花朵的夹持力,提高采摘效率。

输送作业时,2 条输送带在驱动电机作用下以相反的转向工作,万寿菊经采摘后进入由 2 条夹持输送带构成的输送通道内,被稳定夹持后在花序梗处切断并输送至末端收集部件。输送过程中万寿菊所受到的夹持力由输送带挤压产生,夹持力过小会导致万寿菊切割时破损严重,夹持力过大则会夹伤花朵。为防止输送带与万寿菊产生打滑现象,在输送带上增设高 8 mm、间距 16 mm 的挡块,如图 3 所示。

输送带运动速度为末端 Y 轴机械臂移动速度 v_m 与输送带倾斜向上运动速度 v_s 的合成,如图 3 所示。

为保证万寿菊输送顺畅、不发生堵塞,输送带倾斜方向速度 v_s 须大于末端 Y 轴机械臂移动速度 v_m,因此输送带速度和机械臂移动速度需满足

$$v_s > v_{m\max} \tag{3}$$

其中

$$v_s = n_s \pi d_s / 60 \tag{4}$$

式中 $v_{m\max}$——Y 轴机械臂最大移动速度,取 3.84 m/min

n_s——同步带轮转速,r/min

d_s——同步带轮外圈直径,取 0.03 m

由式(3)、(4)可得 n_s 大于 64 r/min。设计中,同步带轮由直流无刷电机通过驱动器驱动,设计转速为 0 ~ 260 r/min,即输送带线速度为 0 ~ 0.48 m/s,可通过驱动器实现无级调速。

2.2.2 间距调节模块

间距调节模块对于万寿菊采摘起到重要作用,用于调节输送带间距并通过间距调节安装板连接末端与机械臂。输送带间距过大会使末端对花朵夹持力过小降低采摘率,输送带间距过小会增加花朵损伤率。间距调节模块主要由 3 根长 80 mm 导杆、2 根长100 mm 导杆、4 块调节安装块、2 块夹持块、活动块与间距调节安装板组成,如图 4 所示。

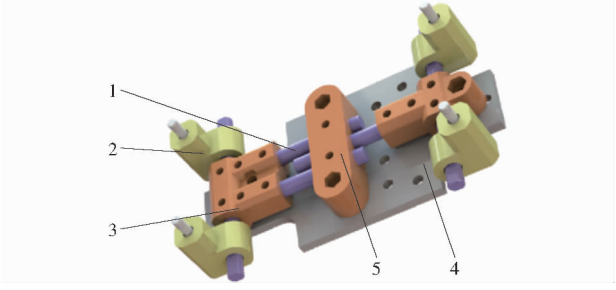


图 4 间距调节模块结构图

Fig. 4 Structure diagram of spacing adjustment module

1. 导杆 2. 调节安装块 3. 夹持块 4. 间距调节安装板 5. 活动块

其中 4 块调节安装块与夹持输送模块中的带轮安装板连接,每 2 块调节安装块与 1 根长 100 mm 导杆通过螺栓连接,且调节安装块间距可调;长 100 mm 导杆分别与夹持块连接,3 根长 80 mm 导杆穿过活动块,导杆两端与夹持块固定,通过螺栓将夹持块与调节安装块固定于间距调节安装板,同时将调节安装板固定在机械臂丝杆滑台上。其中,结合万寿菊花径物料特性确定同步带轮中心距可调范围为 50 ~ 70 mm。

2.3 收集部件设计

收集部件可将输送至传送带末端的万寿菊顺利收集,如图 5 所示。万寿菊脱离传送带后处于无约束完全自由运动状态,由于采摘角度的问题,万寿菊无法通过惯性落入收集袋。因此在输送装置末端安装收集部件,其作用是将万寿菊推送至收集袋口,使其顺利落入收集袋。万寿菊收获试验结果表明,收集部件可显著提高收获成功率。

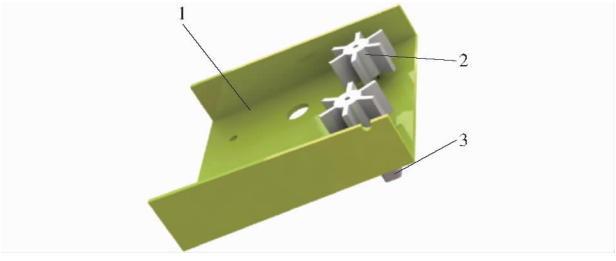


图 5 收集部件结构图

Fig. 5 Collection device structural diagram

1. 收集连接件 2. 推动轮 3. 微型电机

3 采收末端参数优化试验

3.1 试验方法

由单因素试验可得,万寿菊采摘时花朵损伤率

主要受同步带轮中心距、同步带轮转速和采摘角度影响。

为研究收集同步带轮中心距、同步带轮转速、采摘角度对万寿菊采摘损伤率的影响，使用 Design-Expert 13.0 软件[19-20]，根据 Box－Behnken 进行三因素三水平响应面试验，试验因素编码如表 2 所示。

表 2　试验因素编码

Tab.2　Test factors coding

编码	因素		
	同步带轮中心距 A/mm	同步带轮转速 B/(r·min^{-1})	采摘角度 C/(°)
－1	52	160	30
0	56	200	40
1	60	240	50

3.2　评价指标

以采摘损伤率 φ 为试验评价指标，其计算式为

$$\varphi = \frac{N_F}{N_A} \times 100\% \tag{5}$$

式中　N_F——万寿菊损伤数量，朵

N_A——万寿菊总数，朵

损伤的万寿菊如图 6 所示。



(a) 损伤茎秆　　(b) 大量花瓣脱落

图 6　试验后损伤的万寿菊

Fig.6　Damaged marigold after test

3.3　正交试验

使用万寿菊采收末端进行采收试验。根据要求进行 17 组试验，每组试验万寿菊数量为 25 朵，将每组试验中损伤的万寿菊数量进行记录，并通过式(5)计算损伤率。同时为了减小误差，同组条件将进行 3 次试验，结果求平均值，试验结果如表 3 所示。

3.4　试验结果分析与试验验证

3.4.1　回归模型建立与检验

利用 Design-Expert 13.0 软件得到收集损伤率回归模型，方差分析如表 4 所示，模型决定系数 R^2 为 0.926 4，说明模型拟合度高，且预测值与实际值误差较小，说明回归模型可行。采摘损伤率 φ 回归模型 P 为 0.003 3，表明该模型极显著。其中 A、A^2、B^2对采摘损伤率 φ 影响极显著，B、C 对采摘损伤率 φ 影响显著。通过对试验结果进行处理，得到同步带轮中心距、同步带轮转速、采摘角度对采摘损伤率 φ 影响的回归方程为

表 3　试验设计方案及响应值

Tab.3　Test design and response value

序号	因素			损伤率
	A/mm	B/(r·min^{-1})	C/(°)	φ/%
1	56	200	40	8
2	56	200	40	12
3	60	200	30	12
4	60	200	50	24
5	52	160	40	16
6	60	240	40	20
7	52	200	30	8
8	56	160	50	20
9	56	240	30	8
10	60	160	40	32
11	56	200	40	12
12	56	160	30	16
13	56	200	40	4
14	52	200	50	12
15	52	240	40	16
16	56	200	40	8
17	56	240	50	12

表 4　回归方程方差分析

Tab.4　Regression equation analysis of variance

方差来源	自由度	平方和	均方	F	P
模型	9	714.96	79.44	9.79	0.003 3 **
A	1	162.00	162.00	19.96	0.002 9 **
B	1	98.00	98.00	12.08	0.010 3 *
C	1	72.00	72.00	8.87	0.020 5 *
AB	1	36.00	36.00	4.44	0.073 2
AC	1	16.00	16.00	1.97	0.203 0
BC	1	1.137	1.137	1.401	1.000 0
A^2	1	156.67	156.67	19.31	0.003 2 **
B^2	1	156.67	156.67	19.31	0.003 2 **
C^2	1	3.41	3.41	0.420 3	0.537 5
残差	7	56.80	8.11		
失拟项	3	12.00	4.00	0.357 1	0.788 0
纯误差	4	44.80	11.20		
总和	16	771.76			

注：* 表示影响显著($0.01 \leqslant P < 0.05$)，** 表示影响极显著($P < 0.01$)。

$$\varphi = 1\,187 - 39.825A - 0.562\,5B - 1.78C - 0.018\,75AB + 0.05AC - 1.118BC + 0.381\,25A^2 + 0.003\,812B^2 - 0.009C^2 \tag{6}$$

3.4.2　交互因素对试验指标的影响

为了直观了解各因素对损伤率的影响，得到各因素之间响应面如图 7 所示。

图 7a 为同步带轮中心距与同步带轮转速的交互影响。当同步带轮转速固定时，随着同步带轮中心距增大，万寿菊损伤率呈先降低再增大趋势。因

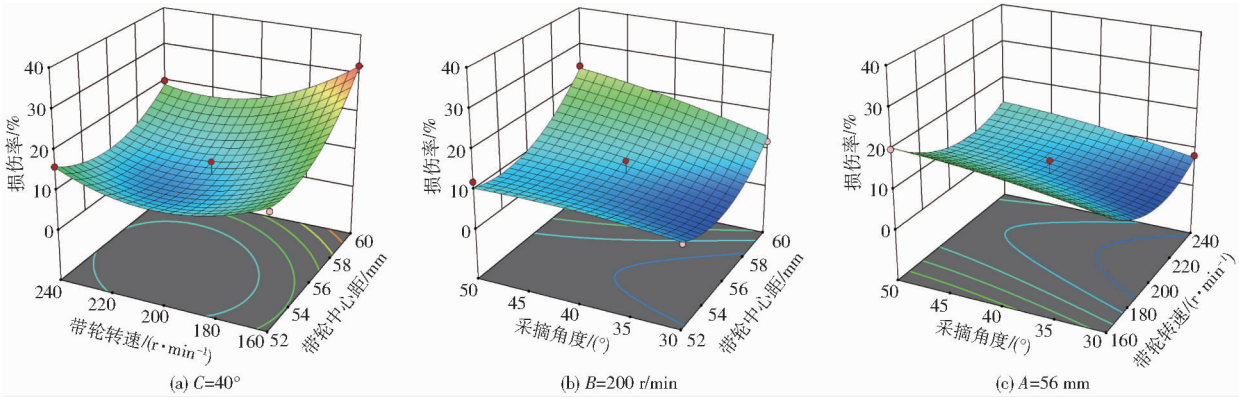


图 7 因素交互作用对损伤率的响应曲面

Fig. 7 Response surfaces of factor interaction on damage rate

为当同步带轮中心距增大时,同步带对万寿菊夹持力减小,对万寿菊损伤增大。而当带轮中心距固定时,随着带轮转速增大,万寿菊损伤率呈先降低后上升趋势,因为当转速过低时,导向装置刀片对万寿菊剪切力较小,无法实现高效采摘,而当转速过大时,冲击载荷增大、定位时间不足,使损伤率上升。所以当带轮中心距为 52 ~ 56 mm、带轮转速为 180 ~ 220 r/min 时,损伤率较低。

图 7b 为同步带轮中心距与采摘角度的交互影响。同步带轮中心距固定时,万寿菊损伤率随采摘角度的减小而减小。较小的采摘角度有利于引导花梗顺利进入剪切区域,减少偏载和弯折造成的损伤。当同步带轮中心距为 54 ~ 56 mm、采摘角度为 30° 时,损伤率达到最小。

图 7c 为同步带轮转速与采摘角度交互影响。采摘角度一定时,随着带轮转速增大,万寿菊损伤率呈先降低后增大趋势。当带轮转速为 200 ~ 220 r/min、采摘角度为 30°时,损伤率最小。

3.4.3 参数优化与试验验证

运用 Design-Expert 13.0 对目标函数进行优化,得到最优参数组合为同步带轮中心距 56 mm、同步带轮转速 200 r/min、采摘角度 30°,此时,损伤率 φ 为 6.59%。利用最优参数进行收集试验,如图 8 所示,试验重复 3 次,每次采收 25 朵,损伤率分别为 8%、4%、8%。与预测值相对误差小于 4%,表明优化结果有效。



图 8 现场作业

Fig. 8 Field operation diagram

4 机械臂模块设计

4.1 机械臂选型

机械臂是实现万寿菊采收的重要模块,其作用是驱动末端进行采摘和收集工作。在采摘执行系统机械臂设计中,通常有 4 种主要的结构类型:极坐标型、直角坐标型、圆柱坐标型和关节坐标型[21-22]。

(1)极坐标型:通常包括 1 个能够旋转的底座、1 个沿半径方向可伸缩的臂段以及 1 个用于调整末端执行器方向的可旋转关节。体积小,动作范围大,但避障性能差。

(2)直角坐标型:由 3 个相互垂直的移动关节组成,在 3 个垂直方向(X、Y、Z 轴)上移动。定位精度高,稳定性好,易于控制,但灵活性差。

(3)圆柱坐标型:圆柱坐标型机械臂通常由 1 个垂直轴、1 个沿着垂直轴旋转的水平臂以及 1 个沿着水平臂移动的滑块组成。其结构简单,但灵活性较低,无法适应某些复杂的空间需求。

(4)关节坐标型:关节坐标型机械臂设计类似于人类手臂,具有多个可旋转关节,通常由基座、大臂、小臂等组成,灵活性高,但传动效率低。

本文所设计的机械臂主要工作是实现末端对单个万寿菊的采收,需要较高的精度和效率。因此综合分析上文不同类型机械臂特点,选用直角坐标型作为装置机械臂模块。

4.2 机械臂自由度设计

自由度体现了一个机械臂灵活性和复杂性,合适的自由度设计能够大大提高末端采收效果和整机的工作性能[23]。当机械臂设计为 6 个自由度时,在机械臂工作精度符合条件前提下,基本能够实现末端任何姿态和位置精准控制,但对控制系统及上位机计算要求较高,无法实现万寿菊高效采收。由前文可知,3 个自由度能满足末端对目标采收需求。但由于万寿菊花朵生长姿态并非全部垂直向上生

长，自然环境下万寿菊生长姿态完全无法预测。根据相机安装在机架上的视角对万寿菊进行拍摄可发现其花朵顶端普遍存在轻微弯曲。结合参数优化试验结果，将机械臂 Y 轴自由度设计与花垄平面呈 30°夹角方向，为 3 个平移自由度。

4.3　机械臂设计

设计的机械臂结构如图 9 所示，主要由 X 方向平移模组、Y 方向平移模组、Z 方向平移模组、步进电机、直线模组连接件组成。各直线模组驱动选用 57 型步进电机。

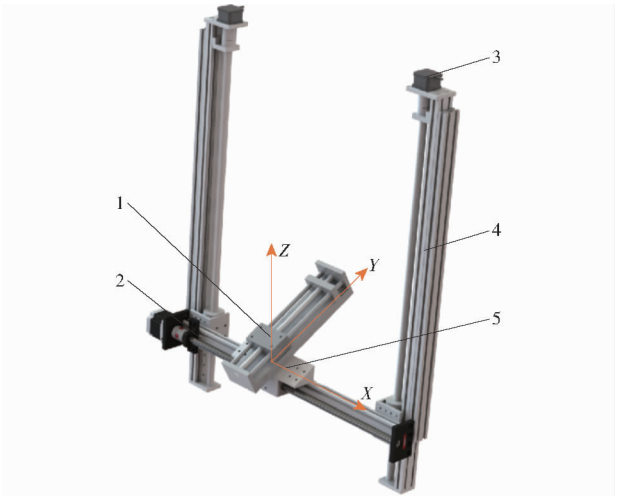


图 9　采摘机械臂结构

Fig. 9　Harvesting robotic arm structure

1. Y 轴直线模组　2. X 轴直线模组　3. 步进电机　4. Z 轴直线模组　5. 机械臂连接件

为确定机械臂各臂行程，需要结合万寿菊生长空间分布情况。根据试验田测量分析，可构造万寿菊大致分布范围，如图 10 所示。其中，万寿菊分布高度 h 为 500 ~ 1 100 mm。为保证大多数万寿菊能在末端执行器采摘范围内，末端所能够运行至的工作空间需大于万寿菊生长分布空间，图 10 中矩形虚线框表示机械臂所能带动的末端工作空间。

结合末端工作空间，机械臂 Z 轴工作行程 d_z 需满足

$$d_z > h_1 - h_2 - H \tag{7}$$

根据上垄高 H、万寿菊分布最大高度 h_1 和最小分布高度 h_2，计算得 Z 轴工作行程 d_z 应大于 600 mm。X 轴行程 d_x 应大于上垄宽 W_1，故确定机械臂 X 轴工作行程为 700 mm。Y 轴工作行程作为末端采收工作行程确定为 260 mm。

4.4　机械臂模块结构设计

将末端与机械臂配合组成机械手模块，其三维结构图如图 11 所示。主要由机械臂、连接件和采收末端 3 部分组成。连接件实现机械臂与采收末端间的配合。

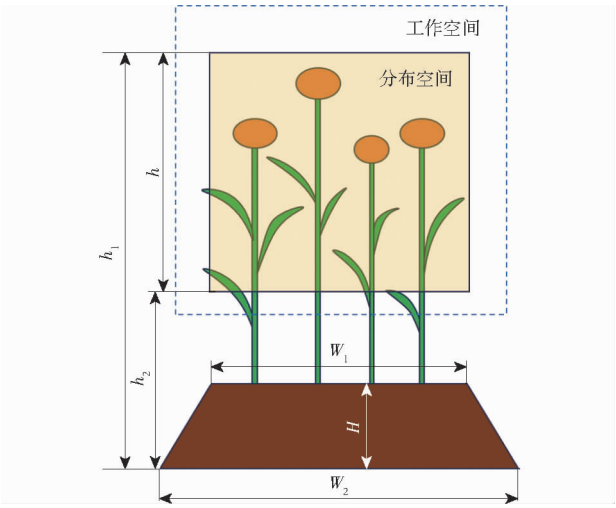


图 10　万寿菊分布示意图

Fig. 10　Marigold distribution diagram

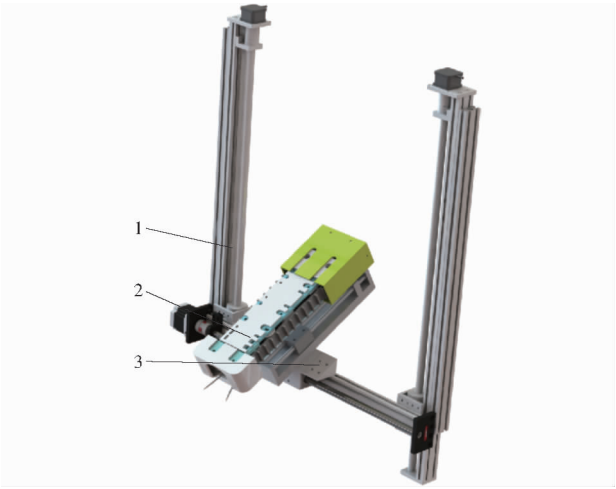


图 11　采摘机械手三维结构图

Fig. 11　Three-dimensional structure diagram of picking manipulator

1. 机械臂　2. 采收末端　3. 连接件

第 1 茬成熟万寿菊由于其植株高度普遍会超过 100 cm，茎秆会由于顶部重量略微倾斜。所以在采收时万寿菊的生长姿态并非与地面垂直，故将 Y 轴机械臂与 X 轴机械臂通过角度固定的连接件配合，如图 12 所示。采收末端通过连接件与 Y 轴机械臂滑台相连，在步进电机驱动下进行采收工作。

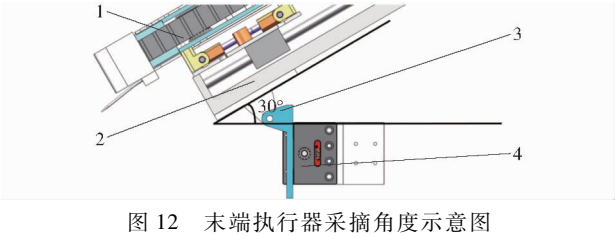


图 12　末端执行器采摘角度示意图

Fig. 12　End effector harvesting angle diagram

1. 末端执行器　2. Y 轴机械臂　3. 连接件　4. X 轴机械臂

机械臂模块工作流程如图 13 所示，根据相机识别定位获得万寿菊采摘点的三维坐标并控制机械臂

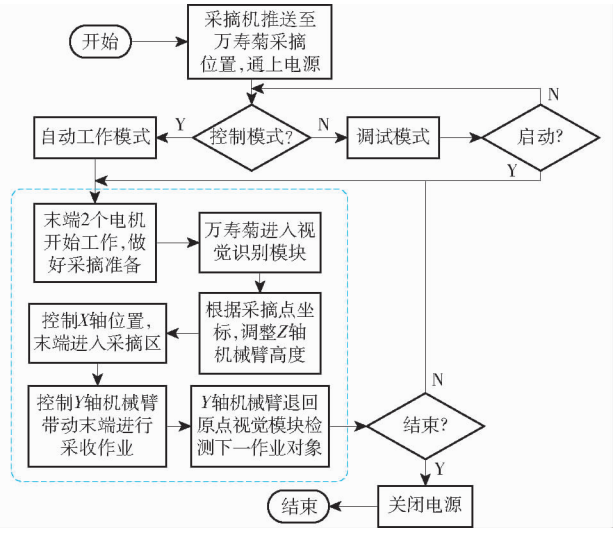


图 13 机械臂模块控制流程

Fig. 13 Robot hand module control process

进行 Z 轴与 X 轴方向移动,随后机械臂 Y 轴带动采收末端至采摘点位置处完成采摘。

5 万寿菊采收试验

5.1 试验台搭建

万寿菊智能采收装置由视觉模块、机械臂模块和末端执行器模块组成。视觉模块采用 Intel 公司的 RealSense L515 型深度相机[24];机械臂模块包含机械臂主体、步进电机、UNO 单片机、步进电机驱动器、电源等,机械臂主体选用莫卡科技三轴龙门模组机械臂,选用 FSL40 型丝杆滑台、MKX80 型丝杆滑台和 GGP 型双光轴丝杆滑台,X、Y、Z 三轴工作范围为 700、260、800 mm,Y 轴机械臂负载最大为 10 kg,末端质量为 1.87 kg。末端执行器模块包含减速电机、软轴、挡块同步带、直流电源、同步带轮等,步进电机型号为 57 步进电机,选用 TB6600 型步进电机驱动器,选用 LRS－75－24 型开关电源。试验台如图 14 所示。

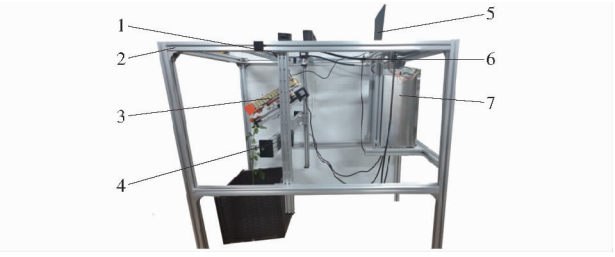


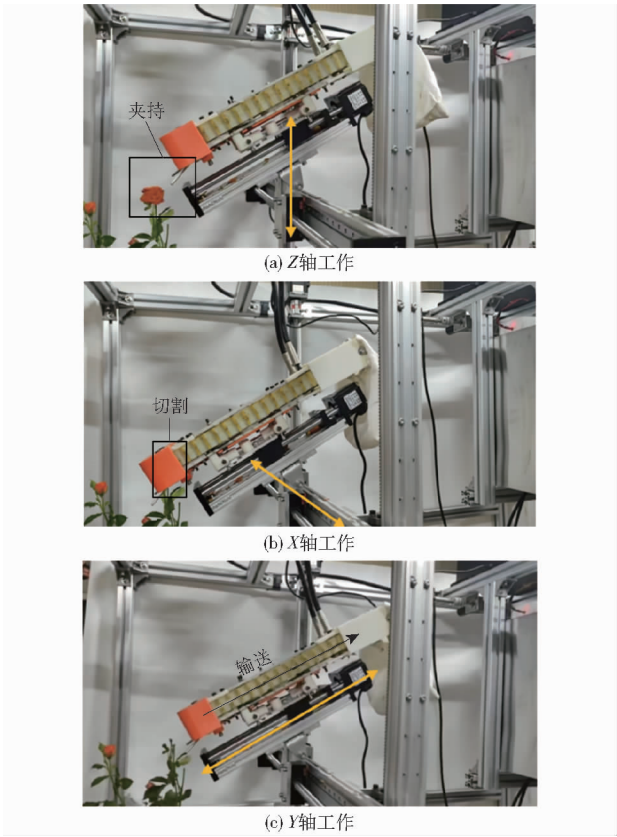
图 14 万寿菊采收装置样机

Fig. 14 Marigold harvesting device prototype

1. 相机 2. 机架 3. 末端执行器 4. 机械臂 5. 上位机 6. 软轴 7. 控制箱

5.2 试验条件与步骤

万寿菊采收装置试验对象为大花万寿菊,花高 1 m 左右,花径为 50～80 mm,密度为 15～20 株/m^2,花径大于 50 mm 且花朵完整符合采摘条件的即成熟花朵。试验于 2024 年 8—10 月期间开展,在试验过程关注机械臂控制末端采收结果。试验后对每组万寿菊采收成功率进行记录,根据记录结果对整机采收成功率进行评价,采收过程如图 15 所示。试验过程为:①图像获取:获取当前 RGB 图像与深度图像,完成对目标的识别检测。②采摘点定位:将步骤①所得到的目标结合深度图转换成点云,并获取目标采摘点。③采收:获得采摘点在世界坐标系下的三维坐标后换算为步进电机步数,控制机械臂带动末端移动至采摘点进行目标采收。④完成收集:万寿菊在收集部件作用下掉落至收集袋中完成收集。



(a) Z轴工作

(b) X轴工作

(c) Y轴工作

图 15 万寿菊采收过程

Fig. 15 Marigold harvesting process diagrams

5.3 评价指标

将采收成功率作为采收装置评价指标,计算式为

$$\eta = \frac{N_R}{N_S} \times 100\% \tag{8}$$

式中 N_S——识别成功万寿菊数量,朵

N_R——采收成功万寿菊数量,朵

η——采收成功率

5.4 试验结果与分析

共进行 5 组,每组 100 朵成熟万寿菊采收试验,结果如表 5 所示。由表 5 可知,平均采收成功率为 93.01%。末端执行器在采收过程中充分保证了万

表 5　万寿菊采收试验结果

Tab. 5　Marigold harvesting experimental results

组别	数量/朵	识别数量/朵	采收数量/朵	采收成功率/%
1	100	96	90	93.75
2	100	92	88	95.65
3	100	96	86	89.58
4	100	95	88	92.63
5	100	93	87	93.55

寿菊的完整性，满足万寿菊的后续加工要求。

试验过程存在 33 朵万寿菊采收失败的情况，分析采收过程，发现有 20 朵万寿菊定位误差较大；13 朵万寿菊定位精度符合要求，但采收时仍对目标造成损伤，视为采收失败，如图 16 所示。

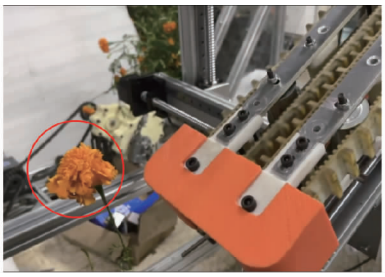


图 16　采收失败目标损伤案例

Fig. 16　Harvest failure target damage case

对采收过程以及定位结果进行分析，20 朵万寿菊最终定位花高与实际测量花高之间的误差超过 4 mm，原因为：①建立的线性模型在花径特定范围内拟合较好，但在模型建立时边缘花径覆盖不足，预测误差增大。可建立模型置信度评估机制，对于预测花高与基于点云估算的当前花高差异过大花朵，视为模型失效，触发备用定位策略，直接使用更保守的几何中心。②开环控制下，步进电机过载（如末端碰撞花茎）、加速过快或电压波动时易丢步，且误差不可恢复。单次丢步 0.1%，Y 轴误差可达 0.26 mm，空间耦合后实际偏差超 0.4 mm。可在 Y 轴增加编码器，建立闭环控制。

夹持力不足会导致万寿菊花瓣大量脱落，造成损伤。结果表明，过慢或过快的带轮转速均会导致夹持力不足。目前，仅对夹持力与转速匹配关系进行了定性分析。后续将深入定量探讨两者间的匹配关系。

6　结论

（1）提出了一种能实现低损连续采收的夹送式万寿菊自动采收装置，主要包括导向装置、输送装置与收集装置等部件，通过夹送式采收末端结合直线模组的升降平移实现了万寿菊的低损采收作业。

（2）采用三因素三水平响应面试验，将同步带轮中心距、同步带轮转速、采摘角度设为三因素，将万寿菊损伤率设为响应值，得到了三因素与响应值之间的回归模型。

（3）通过优化采收末端关键参数，得到最佳参数组合：同步带轮中心距为 56 mm、同步带轮转速为 200 r/min、采摘角度为 30°，此时，损伤率为 6.59%。田间 3 组验证试验结果表明，该参数条件下万寿菊损伤率分别为 8%、4%、8%，损伤率相对误差小于 4%，表明优化结果有效。

（4）综合现有机械臂结构类型及末端采摘方式，确定机械臂结构类型及自由度数。针对万寿菊生长空间分布范围确定机械臂参数，最终完成万寿菊采收装置样机搭建，采收试验结果表明，采收成功率为 93.01%，验证了万寿菊采收装置的可行性。

参　考　文　献

[1] 北京林业大学园林系花卉教研组. 花卉学[M]. 北京：中国林业出版社，2000：156－157.

[2] 谭美微，李国玉，吕鑫宇，等. 万寿菊的化学成分和药理作用研究进展[J]. 中医药信息，2017，34(6)：138－141.
TAN Meiwei，LI Guoyu，LÜ Xinyu，et al. Advances in the chemical composition and pharmacological effects of marigold[J]. Traditional Chinese Medicine Information，2017，34(6)：138－141.（in Chinese）

[3] 尚书旗，李成鹏，何晓宁，等. 高酸苹果振动式采摘机设计与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(3)：115－125，168.
SHANG Shuqi，LI Chengpeng，HE Xiaoning，et al. Design and experiment of high-acid apple vibrating picker[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(3)：115－125，168.（in Chinese）

[4] ZHANG Z，LU R，IGATHINATHANE C. A time and motion study for evaluation of apple harvest processes with different harvest methods[J]. Journal of the ASABE，2020，63(6)：1957－1967.

[5] ZHANG K，LAMMERS K，CHU P，et al. System design and control of an apple harvesting robot[J]. Mechatronics，2021，79：102644.

[6] 王奋玲. 陕西省志丹县苹果产业发展研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2017.
WANG Fenling. Research on the development of the apple industry in Zhidan County，Shaanxi Province[D]. Yangling：Northwest A&F University，2017.（in Chinese）

[7] 韩振浩，朱立成，苑严伟，等. 山地果园履带底盘坡地通过性能分析与优化设计[J]. 农业机械学报，2022，53(5)：413－421，448.
HAN Zhenhao，ZHU Licheng，YUAN Yanwei，et al. Analysis of slope trafficability and optimized design of crawler chassis in

hillside orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 413 - 421, 448. (in Chinese)

[8] 刘志杰, 刘恒, 毛文菊, 等. 面向多机器人的传统苹果园无线通信信号传播特性研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 283 - 293.
LIU Zhijie, LIU Heng, MAO Wenju, et al. Wireless signal propagation characteristics of traditional apple orchard for multi-robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 283 - 293. (in Chinese)

[9] WILLOUGHBY R A, SOLIE J B, WHITNEY R W, et al. A mechanical harvester for marigold flowers[C]// The 2000 ASAE Annual International Meeting, Wisconsin, 2000.

[10] 王荣炎, 于慧爽, 陈安迪, 等. 气动翻转梳齿式菊花采摘装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 184 - 193.
WANG Rongyan, YU Huishuang, CHEN Andi, et al. Design and experiment of pneumatic overturning comb-tooth type chrysanthemum picking device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 184 - 193. (in Chinese)

[11] 欧解利. 万寿菊摘花机: CN103609253A[P]. 2014 - 03 - 05.

[12] 雷少芳. 一种万寿菊采摘器: CN202122035800.5[P]. 2022 - 01 - 14.

[13] 范浩杰, 亚森江·白克力, 宋玲. 梳齿式万寿菊采摘机的设计[J]. 新疆农机化, 2023(4): 16 - 19.
FAN Haojie, YASSENJIANG B, SONG Ling. Design of a comb-tooth type marigold harvesting machine [J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2023(4): 16 - 19. (in Chinese)

[14] 马义东, 冯腾潇, 金鑫, 等. 水培生菜低损采收柔性抓取参数视觉检测方法[J]. 农业机械学报, 2025, 56(7): 210 - 218.
MA Yidong, FENG Tengxiao, JIN Xin, et al. Visual detection method for flexible grasping parameters of low-damage harvesting of hydroponic lettuce[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 210 - 218. (in Chinese)

[15] 郭铁铮, 郑亦峰, 薄维希, 等. 采摘机器人柔性末端执行器仿真与实验研究[J/OL]. 机械设计与制造, 1 - 6[2025 - 12 - 02]. https://doi.org/10.19356/j.cnki.1001-3997.20251011.003.
GUO Tiezheng, ZHENG Yifeng, BO Weixi, et al. Simulation and experimental research on flexible end effector of picking robot[J/OL]. Machinery Design & Manufacture, 1 - 6 [2025 - 12 - 02]. https://doi.org/10.19356/j.cnki.1001-3997.20251011.003. (in Chinese)

[16] 侯加林, 刘鲁鹏, 赵桂洋, 等. 基于 EDEM - MFBD 的大蒜变刚度柔性夹持输送装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(6): 362 - 373.
HOU Jialin, LIU Lupeng, ZHAO Guiyang, et al. Design and experiment of variable stiffness flexible clamping and conveying device for garlic based on EDEM - MFBD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(6): 362 - 373. (in Chinese)

[17] MENNO S, VAN MARREWIJK B M, TOON T, et al. Design and evaluation of a robotic prototype for gerbera harvesting, performing actions at never-seen locations[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 228: 109671.

[18] TAKUYA F. Autonomous navigation method for agricultural robots in high-bed cultivation environments[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 231: 110001.

[19] 贾江鸣, 叶玉泽, 程培林, 等. 手持式名优茶嫩梢采摘机械手设计与试验优化[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 86 - 92.
JIA Jiangming, YE Yuze, CHENG Peilin, et al. Design and experimental optimization of hand-held manipulator for picking famous tea shoot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 86 - 92. (in Chinese)

[20] 罗丽琴, 王健华, 罗江南, 等. 响应面法优化山梨糖醇黄桃桃酥加工工艺[J]. 食品安全导刊, 2022(31): 136 - 140, 45.
LUO Liqin, WANG Jianhua, LUO Jiangnan, et al. Optimization of processing technology of sorbitol peach crisp by response surface method[J]. China Food Safety Magazine, 2022(31): 136 - 140, 45. (in Chinese)

[21] 王甲甲, 程志强, 张伏, 等. 果园采摘机械手研究现状综述[J]. 农机化研究, 2020, 42(5): 258 - 262.
WANG Jiajia, CHENG Zhiqiang, ZHANG Fu, et al. Review of the research status of orchard harvesting robots[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(5): 258 - 262. (in Chinese)

[22] 周宏甫, 魏百申. 机器人控制方法与理论[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2020.

[23] 王粮局. 基于动态识别定位的多机械手草莓收获机器人的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2020.
WANG Liangju. Research on multi-robotic arm strawberry harvesting robot based on dynamic recognition and positioning[D]. Beijing: China Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[24] 董乃深, 程泓超, 应仇凯, 等. 垄作草莓双臂采摘机器人设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(增刊 1): 29 - 40, 50.
DONG Naishen, CHENG Hongchao, YING Qiukai, et al. Design and experiment of double-arm picking robot for ridge-cultivated strawberries [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(Supp. 1): 29 - 40, 50. (in Chinese)