

菊花机械化采摘技术研究现状与发展趋势

王荣炎^{1,2} 范憶莲¹ 钱军杰¹ 丁子健¹ 冯耀琪¹ 赵刚¹ 伍德林^{1,2}

(1. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036; 2. 安徽省智能农机装备工程研究中心, 合肥 230036)

摘要: 菊花作为药食两用的农作物发展迅猛, 已被人们常用在日常饮食生活中。菊花花形独特、生长情况复杂, 采摘难度大、易受机械损伤, 而采摘技术可反映花类作物收获机械化和现代化的发展水平。为此, 本文综述国内外菊花统采式和选择性智能采摘2类采摘技术与机械装置的研究现状及发展动态。首先介绍国内外菊花品种、种植模式和采摘农艺等方面的差异性, 然后从工作原理、结构形式、性能参数等维度对国内外菊花统采式收获机械进行对比分析, 从采摘目标感知、末端执行器结构设计、材料选型与力控策略等方面对选择性智能采摘技术进行综述。最后总结2类采摘技术面临的主要问题, 并分别提出相应的发展对策, 展望以智能化、低损化、高适应性为方向的采摘部件创新路径, 并强调应深化农机农艺融合, 以推动菊花采摘机械的技术升级与产业应用。

关键词: 菊花; 采摘; 目标感知; 末端执行器; 研究现状

中图分类号: S225 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2026)14-0120-18

OSID:



Research Status and Development Trends of Mechanized Chrysanthemum Harvesting Technology

Wang Rongyan^{1,2} Fan Yilian¹ Qian Junjie¹ Ding Zijian¹ Feng Yaoqi¹ Zhao Gang¹ Wu Delin^{1,2}

(1. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

2. Anhui Provincial Engineering Laboratory for Intelligent Agricultural Machinery Equipment, Hefei 230036, China)

Abstract: Chrysanthemum, as a dual-purpose crop for medicine and food, has developed rapidly and even become a pillar industry in some regions. It has been regularly included in people's daily diet and life. Chrysanthemums have unique flower shapes and complex growth conditions, making them difficult to harvest and susceptible to mechanical damage. Their harvesting techniques reflect the level of mechanization and modernization in the harvesting of flower crops. Therefore, the research status and development trends of two types of chrysanthemum harvesting technologies and equipment were summarized, namely, unified harvesting and selective intelligent harvesting, both domestically and internationally. Firstly, the differences in chrysanthemum varieties, planting modes, and harvesting requirements between domestic and foreign countries were introduced. Then, a comparative analysis of chrysanthemum harvesting machinery was conducted from the dimensions of working principles, structural forms, and performance parameters. The development status of selective intelligent harvesting technology was summarized from the aspects of harvesting target perception, end actuator structure, material selection, and force control strategy. Finally, the problems of unbalanced harvesting quality and efficiency, weak theoretical basis for low loss harvesting, and poor adaptability of agricultural machinery in the unified harvesting method were summarized. However, selective intelligent harvesting technology faced limitations in target perception technology, poor adaptability of harvesting end effector structure and materials, and control strategy limitations. It proposed corresponding development strategies based on the above issues. Based on this, the innovative path of mechanical components in the direction of intelligence, low damage, and high adaptability was discussed, and it was emphasized that the integration of agricultural machinery and agronomy should be deepened to promote the technological upgrading and industrial application of chrysanthemum harvesting machinery. It aimed to provide reference for further research and development of mechanized chrysanthemum harvesting technology.

Key words: chrysanthemum; harvesting; target perception; end effector; research status

收稿日期: 2026-01-07 修回日期: 2026-02-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(52305243)、安徽省自然科学基金项目(2308085QE160)和安徽省教育厅科研项目(2023AH051021)

作者简介: 王荣炎(1993—), 女, 讲师, 博士, 主要从事中药材生产机械化及智能农机装备研究, E-mail: wry@ahau.edu.cn

通信作者: 伍德林(1970—), 男, 教授, 主要从事现代农业装备与技术研究, E-mail: wudelin@126.com

0 引言

菊花 (*Chrysanthemum morifolium* ramat) 含有多 种挥发油类、多糖类及微量元素,具有降血压、降血 脂、清肝明目等功效^[1-3],药用价值和经济价值极 高^[4-7]。菊花有效成分含量与采摘时间密切相关, 及时、适时采摘是保证菊花质量与产量的关 键^[8-11],因此探讨菊花机械化采摘方式是必经 之路。

菊花可作为茶饮及保健品等提取原料^[9-16], 根据菊花用途对花朵完整性、开放度等指标的 不同要求,菊花机械化采摘主要可分为 2 种技术路 径:①针对菊花精油、饮料等加工用途的统采式收 获,目标是在一定损伤率下实现高效、快速采摘, 多采用梳齿式、梳刀组合式装置,但采摘的物料需 分级处理;②针对金丝皇菊等名优菊花的选择性 智能采摘,要求花朵保持完整且不带花柄,依据花 朵成熟度适时保质采摘,核心在于实现基于视觉 感知的成熟花朵识别、定位与精准低损采摘。2 类 采摘方式技术路径因目标函数与约束条件不同, 机械结构设计、关键技术难点与研究重点也存在 显著差异^[17]。

为此,本文将剖析国内外主要菊花品种、典型 种植模式及其机械化采摘的差异性要求,明确采 摘技术发展的农艺基础。再分别对国内外菊花统 采式和选择性智能采摘 2 类采摘技术及应用进展 进行综述。对于统采式,重点从工作原理、关键机 构设计、性能参数等方面对比分析国内外典型机 具的特点;对于选择性智能采摘方式,则聚焦采摘 目标感知与识别、末端执行器创新设计与柔顺控 制、力位混合控制策略等核心技术的研究进展。 最后,总结 2 类采摘方式面临的主要技术挑战,分 别提出发展对策,以期为推动国内菊花生产机械 化技术进步提供参考。

1 菊花种植模式及采摘农艺

1.1 菊花种植模式

菊花原产于中国,自 8 世纪起传入欧洲及北美 等地,逐步形成遍布世界的种植格局^[18]。《中国药 典》仅收录滁菊、亳菊、贡菊、怀菊 4 个菊花品种^[19], 随着产区变迁与长期人工选育,菊花现已繁育出数 多品种。当前,国内菊花主要分为丛栽与条栽 2 类 种植模式^[20],如图 1 所示。丛栽通过穴栽方式,每 穴定植 3~5 株,形成冠幅直径约 0.5 m 的菊丛,该 模式通风透光好,为单株菊花提供独立生长空间,以 单株产量最大化提高整体产量,适用于小规模或精 细管理的产区。条栽多采用单行或双行种植垄,每 公顷种植 45 000~750 500 株,行距 0.3~0.7 m,株 距 0.25~0.5 m,条栽因密植厌氧,枝条分支略少, 有利于实施机械化作业。受地理条件及栽培习惯影 响,不同产区甚至同一产区内种植模式存在显著差 异^[21-22]。以杭白菊为例,在国内主要产区种植模式 参数如表 1 所示,菊花种植模式不统一对采摘机械 的适应性及通用性提出了更高要求。

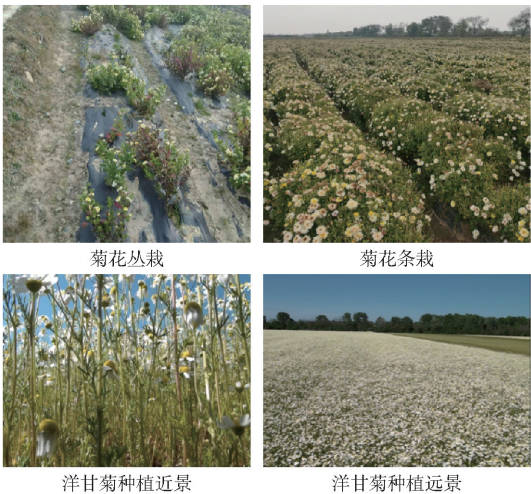


图 1 国内外菊花生长场景

Fig. 1 Chrysanthemum growth scenarios at domestic and foreign countries

表 1 不同产区杭白菊种植模式参数

Tab. 1 Planting mode parameters of Hangbai-chrysanthemum in different production areas

产区	畦面宽	墒沟宽	株距	行距	株高	花层高度差
江苏省盐城市射阳县	1.9~2.0	0.3~0.5	0.3	0.25	约 0.8	约 0.3
湖北省麻城市	1.0~1.2	0.3	0.5	0.7	0.6~0.9	约 0.35
河南省新乡市	0.8	0.3	0.3	0.4~0.5	0.6~0.8	0.3
河北省保定市高阳县	0.6	0.3	0.25	0.4	0.6~0.7	0.3

国外菊花以观赏菊和切花菊为主^[23]。食用菊 则以洋甘菊为代表,主要在德国等欧洲国家农场规 模化种植^[24](图 1)。洋甘菊多为密植,植株较矮 (0.3~0.4 m),茎秆直立、分枝少,田间管理及采摘

作业易于实现机械化。
1.2 菊花采摘农艺要求
菊花植株形态及栽培方式的差异,对机械化采 摘技术的应用构成了根本性挑战。以适于机械作业

的条栽模式为例(图2),菊花花朵组织柔嫩,易因机械接触发生损伤与褐变;花朵空间分布分散,花层高度差超过 30 cm,机械定位难度大。此外,菊花具有“采后复生”特性,收获期内需每 3 ~ 5 d 进行采摘,采摘装置需具备高度调节能力,以适应不同植株花冠高度差异,并在作业中避免碾压植株,保障后续轮次采摘。针对上述农艺特点,目前主要形成 2 种采摘技术路径:机械化统采式与选择性智能采摘,采摘方式选择取决于最终用途所决定的农艺要求。

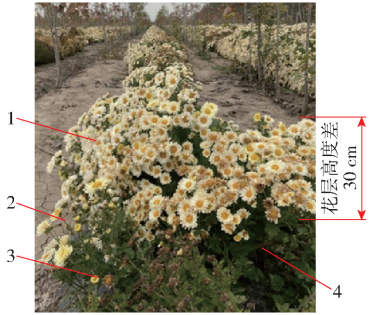


图2 条栽模式菊花植株结构

Fig. 2 Chrysanthemum plant structure under strip planting mode

1. 朵菊 2. 花柄 3. 胎菊 4. 枝条

1.2.1 机械化统采式

统采式收获主要适用于以提取精油、制备饮料或加工原料为目的的菊花生产,允许一定的花柄残留和轻微损伤。该方式追求在盛花期一次性高效收获,适用于国外洋甘菊大规模条播密植、植株矮化整齐的农场,以及国内逐步推行标准化、规模化条栽模式的产区。产业需求核心在于降低单位收获成本,提高作业效率与规模效益。

1.2.2 选择性智能采摘

选择性智能采摘则主要面向金丝皇菊等名优茶用菊,要求花朵完整、无梗、机械损伤极低。适用于花朵成熟期不一致、需分批采收的种植模式,特别是国内传统的丛栽或精细化管理的条栽模式。产业需求侧重于提升产品等级和附加值,通过“保质采收”满足市场价值。

相比之下,国外洋甘菊多以精油、提取物等形式销售,采摘农艺对花柄残留与机械损伤的容忍度相对较高,更注重采摘效率与规模效益,易于实现大规模机械化作业^[25-28]。未来,2 种技术路径将并行发展,统采式向更高效、更低损的趋势发展,智能采摘则向更高可靠性、更优性价比突破,共同服务于菊花产业的多元化需求。

2 菊花采摘机械研究现状

鉴于国内菊花与国外洋甘菊在生物性状、种植模

式及采摘要求方面差异显著,分别综述 2 类菊花统采式机械技术与装置的研究进展,并对选择性智能采摘技术在菊花及相关作物中的应用进行梳理。

2.1 国外菊花统采式机械

自 20 世纪 70 ~ 80 年代起,德国等国家已实现以洋甘菊为代表的菊花规模化、机械化采摘^[29]。采摘机以牵引式与自走式为主,作业幅宽较大,根据采摘部件工作原理,可分为梳齿式、梳刀组合式、梳齿气动组合式等^[30]。

2.1.1 梳齿式

梳齿式采摘部件运动形式包括线性往复式与旋转滚筒式。旋转滚筒式作业时,花序进入滚筒工作区,高速旋转的梳齿将花朵梳脱,并借助惯性沿罩壳内壁运至螺旋输送机,最终经输送带送入收集箱^[31]。相较于线性往复式,旋转式采摘效率更高,但花柄、叶片等杂质含量也相应增加,且存在梳齿弹跳与滚筒回程等损失,采摘效果受机器行进速度、梳齿转速、安装倾角、滚筒作业高度以及输送装置结构等多因素影响^[32]。ONGsnc 公司生产的洋甘菊收获机(图 3a),采用 2 组同步旋转的梳齿滚筒,为减弱离心力影响,确保花朵落至输送带,滚筒转速需控制在 20 ~ 25 r/min,制约了作业效率。Euro Prima 公司开发的 NB2006 E/P 型采摘机(图 3b),梳齿沿轴向均匀分布,可切换作业模式,适应不同田块采摘需求。LINZ III 型收获机(图 3c)作业幅宽达 2.8 m,田间试验结果采摘损失率达 24.9%^[33]。VB 2-1.6 型收获机(图 3d)为全悬挂式,传送带和料斗位于旋转梳齿采摘单元正后方。Deutz-Fahr 公司的 M-1322 型收获机(图 3e)具有弹齿式采摘单元,相邻弹齿间距 40 mm,具备仿形与作业参数监控功能^[34]。Vangeyte 等^[35]设计的采摘装置(图 3f)通过偏心轮连杆机构实现梳齿伸缩与摆动,采摘后花朵由滚刷扫落至输送带。

2.1.2 梳刀组合式

梳刀组合式采用旋转梳齿与往复式割刀协同作业,割刀位于梳齿下方,用于切断已被梳齿夹持的茎秆;割刀组件主要包括电机驱动的切割丝、楔形滑轮轴及锯齿状刀片^[36-38]。如图 4a 所示,辊梳轴随行进方向旋转,将植株向后收拢,下方的切刀切断菊花茎秆,茎秆经螺旋推进器铺放于地面,以便后续捡拾,结构类似于谷物联合收割机的摘穗机构,采摘的物料含杂率极高。此类采摘机一般仅适用于最后一茬洋甘菊收获^[31-39]。为提升作业适应性,德国 Leibniz 农业工程研究所开发的洋甘菊采摘机(图 4b)引入超声波测距传感器,通过液压马达实现采摘高度自动调节,通过增大滚筒转速提高采摘



图 3 梳齿式洋甘菊采摘机

Fig. 3 Comb type chamomile harvesting machine



图 4 梳刀组合式洋甘菊采摘机

Fig. 4 Comb and blade combined chamomile harvesting machine

率,但转速过高会导致花朵所受离心力增大,难以从滚筒内顺利排出;基于此,该团队优化设计双刀梳齿结构(图 4c),其中固定层安装在滚筒上,线性往复振荡层(图 4d)则沿轴向作切割动作,快速切断花柄,配合内部螺旋输送器将切下花朵送至双滚筒间,再经输送带运入收集箱。改进后,提高滚筒转速可有效提升采摘率,但受植株高度不一致影响,振荡刀梳与地面距离越近,切割所得花柄越长,田间试验表明,仍有过长花朵花柄约 63%,需依赖清选加工^[31]。

2.1.3 梳齿气动组合式

梳齿气动组合式采用旋转梳齿进行采摘,借助气动系统实现花朵输送与收集。例如 VZR-6 型收获机(图 5),梳齿旋转方向与收获机驱动轮相反,自下向上梳刷菊花,通过 2 套负压风机与输送管,不仅可将采摘后的花朵吸入收集箱,还能辅助待采植株吸向梳齿,提升采摘效率^[40]。所用负压吸附技术



图 5 梳齿气动组合式洋甘菊采摘机

Fig. 5 Comb and pneumatic combined chamomile harvesting machine

有利于降低花朵损伤,整体作业效率较梳齿式与梳刀组合式更高。然而,为保证足够吸力,输送管横截面积通常较小,在实际作业中易出现堵塞问题,需进一步优化气流系统设计与管道结构。

2.2 国内菊花统采式机械

国内菊花机械化收获研究起步相对较晚,但针对统采式机械的研发已取得阶段性进展,相关专利与样机相继涌现^[41-42]。国内统采式采摘装置主要利用机械梳刷原理实现花朵采摘,根据结构和工作原理,可分为梳齿式与机械气动组合式 2 类。

2.2.1 梳齿式采摘技术

梳齿式采摘通过梳齿直接作用于花柄,实现花朵的梳刷脱落,如图 6 所示。图 6a 为手推梳刷式采摘样机,采用链条传动多排梳齿,在最优参数梳齿间距 8.5 mm、分花齿间距 17 mm、喂入深度 200 mm、电机转速 60 r/min 下,采摘率可达 97.61%,且损伤率低,但通过性与部件调节范围有限^[43]。祁正栋等^[44]研制的万寿菊采摘机(图 6b)采用柴油机驱动,前端安装高度可调的 4 排梳齿,通过旋转插入并自下而上提拉进行采摘,效率较高,但存在碾压植株、影响二次收获的问题。李彤等^[45]研制了集成激光雷达智能检测与升降控制系统的万寿菊采摘机(图 6c),通过梳齿式拔摘台实现菊花采摘。文献^[46-47]研发的手推式机型通过曲柄连杆机构(图 6d)和凸轮滚筒机构(图 6e),使梳齿分别进行平面复合运动与限定角度的旋转摆动,采摘所得花朵无花柄、损伤率与含杂率低,但工作幅宽仅 0.5 m、行进速度不稳定、收集装置易导致花朵掉落等问题仍有待改进。应理乾等^[48]结合条栽模式研发了仿生套采式菊花收获机(图 6f),通过仿生 Y 形柔性弹簧套采花朵,实现了采摘率 76.6%、损伤率 3.3%、含杂率 4.9%。

2.2.2 机械与气动组合式采摘技术

为改进收集效果,研究者将机械梳刷与气动输送相结合。王荣炎等^[49]设计了气动翻转梳齿式菊花采摘装置(图 7a),计算得到采摘梳齿最佳结构参数,并集成清齿机构与气动抛送系统,实现采摘、清



图6 梳齿式菊花采摘机

Fig. 6 Comb-type chrysanthemum harvesting machine

选与收集一体化操作。姬长英等^[50]研制的梳割气吸一体式采摘样机(图7b),在旋转梳齿间距8.5 mm、转速60 r/min、梳齿圆弧半径50 mm时完成采



(a) 气动翻转梳齿式
(b) 梳割气吸一体式

图7 机械与气动组合式菊花采摘机

Fig. 7 Mechanical and pneumatic combined chrysanthemum harvesting machine

摘,再利用气吸装置在风速8 m/s时收集花朵,采摘率为94.54%,损伤率与含杂率均较低,但同样面临采摘部件工作范围有限、整株采摘覆盖不足的问题。

2.2.3 采摘过程仿真研究

Wang等^[51]基于菊花植株的柔性体特性,建立了植株-机械互作仿真模型(图8a),运用ADAMS仿真,量化了菊花采摘脱落与机械损伤的加速度阈值,据此提出了动态匹配梳齿频率与角度的低损调控方法。范浩杰等^[52]分析了梳齿对菊花的作用力等参数(图8b),为采摘关键部件的运动学仿真分析提供了理论数据。于安记等^[53]分析了梳齿截面形状对菊花采摘效率的影响,并通过调节梳齿间距适用采摘不同时期的花朵(图8c)。

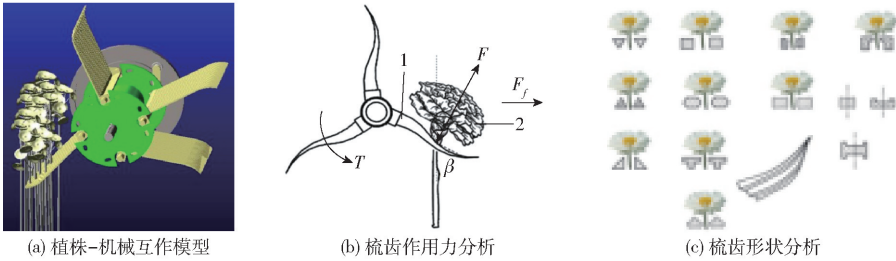


图8 菊花与机械互作参数及仿真研究

Fig. 8 Interaction parameters and simulation of chrysanthemums and machinery
1. 采摘头梳齿 2. 万寿菊花冠

表2汇总了几类已获国家专利授权的典型采摘装置,通过阐释并归纳采摘装置的结构组成与工作

原理,直观展示菊花采摘技术实现路径。整体而言,现有菊花采摘样机普遍存在适应行

表2 专利授权的菊花采摘装置主要类型及原理

类型	结构组成	采摘工作原理
梳齿式 ^[54-56]	行走底盘、采摘齿排、传动机构、收集装置;部分含鼓风机、输送带或偏心凸轮调节机构	梳齿旋转或往复运动,插入植株梳刷菊花,依靠重力或气流将花朵送入收集箱
梳齿链条式 ^[57-58]	电机、链条、链传动、采摘梳齿、限位板、收集盒;部分含清选振动筛	梳齿随链条旋转进入植株梳摘,梳齿在重力或机械作用下闭合,将菊花导入收集装置,部分机型含分级清选功能
梳刀式 ^[59-61]	分禾器、旋转切刀组、传动系统、收集箱;部分含振动筛分装置或柔性刷毛导入机构	梳齿、切刀旋转或往复运动切断花柄,菊花经传送带或直接落至收集装置,部分机型实现花杂分离
旋转扇板式 ^[61-63]	电机、采摘板或刷毛组、滚动杆、输送带、收集箱	采摘板或刷毛做圆周或拨动运动,收拢并摘下菊花,依靠重力落至输送装置
梳刀-气动组合式 ^[64-65]	转轴、梳刀组、电机驱动系统、传送机构、收集盒	梳刀组同步旋转,实现梳刷与切割结合,采摘后菊花由气动系统收集

距能力弱、作业效率低以及对植株产生物理损伤等共性挑战。表 3 从采摘效果的核心评价维度,对几类菊花采摘结构进行了分析,重点关注采摘效率、损伤率与含杂率等指标。

表 3 不同菊花采摘结构指标
Tab. 3 Indicators for chrysanthemum harvesting structures

典型结构	采摘效率	花朵损伤率	含杂率	核心特点
往复梳齿结构	中	较高,对花朵有机械冲击	较高,易卷入枝叶导致堵塞	结构简单,成本较低
旋转梳齿结构	较高,连续作业	中	中,可集成毛刷清理	调节转速与毛刷间距,可平衡效率与损伤
梳刀结构	中,避免了强行拉拽	较低	低,分离迅速	调节转速与毛刷间距,可平衡效率与损伤
气动抛送翻转结构	较高,连续采摘与抛送	较低,减少了因挤压堆积造成的二次损伤	低,快速将花朵抛离工作区域	利用气动动作,解决梳齿堵塞问题
气吸式收集结构	高	低,优化气流速度与梳齿参数	低,分离迅速	负压气流在切割后立即吸附输送花朵

2.3 选择性智能采摘技术

随着信息技术在农业领域的深入应用,基于机器视觉的名优菊花选择性智能采摘技术已成为研究热点。菊花智能采摘机器人不仅需模仿人手采摘动作进行机构创新与控制,更须在枝叶遮挡频繁、花期不一致以及花朵本身柔软易损的条件下,实现快速识别采摘目标、定位最佳采摘点,并完成低损伤采摘^[66-67],目前应用于果蔬选择性智能采摘装备的组成及其工作过程如图 9 所示。尽管针对菊花智能采摘研究仍相对有限,但借鉴小目标作物选择性智能采摘的研究思路,分别从采摘目标感知技术、采摘末端执行器结构与材料、采摘末端执行器控制策略 3 个方面,对菊花采摘机器人关键技术展开分析。

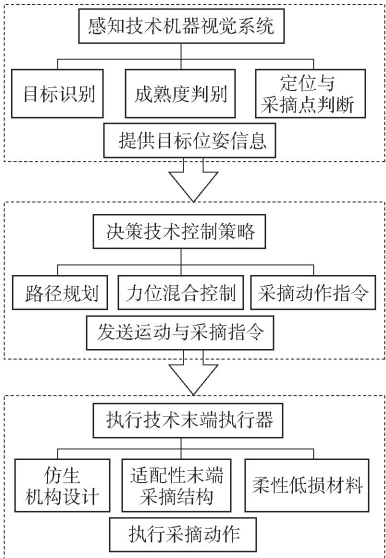


图 9 选择性智能采摘部件组成及工作流程
Fig. 9 Composition and workflow of selective intelligent harvesting components

2.3.1 采摘目标感知技术

采摘目标感知需要评估菊花花期、姿态、遮挡情

况及与植株的相对位置,进而输出可供执行的采摘点及置信度^[68-69]。关键性能指标包括定位精度、花期分类准确率、系统实时性以及对不同光照条件的鲁棒性^[70-72]。

该领域主要采用基于多模态视觉融合的目标检测方法,其中 YOLO 系列模型已成为主流^[73-75]。在基于 YOLO 的检测模型中,研究者针对菊花特点进行了多项改进。施国英等^[76]提出了改进的 YOLO v8s-RDL 模型(图 10a),可实现不同花期杭白菊的精准识别与分类;Qi 等^[77-78]提出了一种高度融合的轻量级检测模型 Fusion-YOLO(图 10b),用于对开花初期的菊花检测,为实现菊花选择性采摘奠定了技术基础;Liu 等^[79]针对金银花花期识别提出一种基于 YOLO v5s 算法的自动检测技术,识别准确率高于 90%;Qi 等^[80]构建了 TC-YOLO 菊花检测模型,平均精度达 92.49%,并得出光照条件对检测影响显著;喻陈楠等^[81]则针对遮挡问题提出 Hwc-YOLO v8n 模型,提升了对遮挡菊花的识别精度。Zhao 等^[82]通过注意力机制强调特征表示识别花蕾和花朵,提高了菊花检测的准确性和鲁棒性。Zang 等^[83]提出轻量级 YOLO-VTC 模型(图 10c),以实现复杂场景中菊花高效实时检测,并成功部署于边缘设备平台。

在传统图像处理与机器学习方法方面,Yang 等^[84]基于 HSV 颜色空间与模糊 C 均值模型实现杭白菊识别,对轻度遮挡目标识别准确率达到 85%;采用最小二乘支持向量机(LS-SVM)进行图像分割,精度达 90%(图 10d)。此类方法在特定环境下具有较好的实时性与稳定性。

深度学习方法在菊花分类与识别中得到较广泛应用,Yuan 等^[85-86]采用端到端卷积神经网络实现菊花花型与品种识别,平均识别率达 95%,准确

率与召回率均达到 98% 左右(图 10e);Cai 等^[87]结合高光谱成像与卷积神经网络模型,实现了 14 种菊花品类的检测,准确率为 80.13%。此外,Liu 等^[88]借助 VGG16、ResNet 等网络提取特征,提升了菊花品种与花期识别的精度与鲁棒性;Torre 等^[89]提出了食用花卉采摘机器人的视觉方法,通

过对不同品种食用花卉进行检测、姿态估计和采摘点估计,对所提出的计算机视觉框架进行了适应性验证;Xu 等^[90]通过轻量级深度学习模型(图 10f),实现了菊花分类、花朵分割及直径测量等形态性状的自动化高效提取,为高通量表型分析提供了可扩展的解决方案。

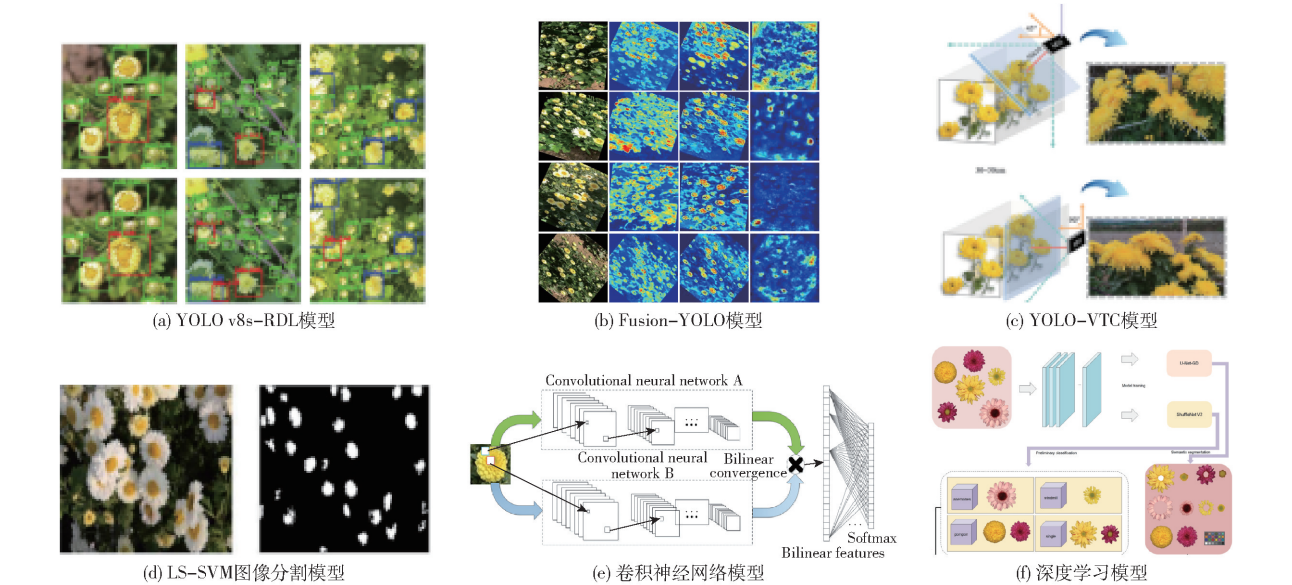


图 10 菊花采摘目标感知模型

Fig. 10 Target perception model for chrysanthemum harvesting

2.3.2 采摘末端执行器结构与材料

采摘末端执行器作为直接接触菊花的部件,接触力过大易导致花朵挫伤破损,过小则降低采摘效率,其结构形式与材料选择直接影响采摘质量^[91-92]。在设计中需统筹考虑采摘速度、采摘率与损伤率之间的平衡^[93-94]。

采摘末端执行器在结构上主要可分为剪切式、夹持旋转式、拉拔式、吸附与机械组合式等。剪切式结构包括王延鑫等^[95]设计的菊花采摘末端执行器(图 11a),通过传动部件联动包络部件与切割机构,定位并包络菊花后切割花柄;Masood 等^[96]设计了剪刀式末端执行器(图 11b),在实验室环境下配合五自由度串联机械臂精准切断辣椒果梗;Yeshmukhametov 等^[97]设计了边缘带刀片的半球形结构(图 11c),能连续抓取并分离番茄;Roshanianfard 等^[98]设计了五指结构的包封式机械手(图 11d),各指配备滚筒、稳定器及末端铰接头,结合上下切割机构实现采摘。夹持旋转式结构包括Fujinaga^[99]设计的三指夹持器(图 11e),由伺服电机驱动螺杆旋转,进而驱动 3 个手指同步开合实现番茄的抓取;Williams 等^[100]与 Li 等^[101]针对球形果实设计的夹持旋转式末端执行器(图 11f),在适应性方面表现良好,为菊花作物的采摘提供了参考。拉拔式结构则利用梳齿的梳刷与冲击作用使花柄断

裂^[43]。为提高采摘成功率和降低损伤,吸附与机械组合式末端执行器逐渐成为研究热点,Velasquez 等^[102]开发了一种串联致动夹持器(图 11g),采用多腔顺应吸盘实现初始吸附与定位,再通过凸轮驱动指爪完成夹持与分离,结合传感器检测与气压反馈,果实抓取成功率超过 96%。类似地,图 11h 所示执行器通过负压吸附稳定目标,再配合剪切或梳刷机构完成采摘,并可借助气流实现采摘后的收集^[103-104];Wang 等^[105]模仿章鱼捕食设计的末端执行器(图 11i),利用负压使吸盘产生凹形变形以贴合并吸附苹果表面,通过手腕旋转与拖动的复合动作分离果柄。吸附与机械组合式设计减少了单一机械动作可能造成的损伤,在花卉采摘中显示出良好应用潜力。此外,为提高设备的适应性,模块化末端执行器已成为发展趋势,可在田间快速更换夹爪、切割器等工具,从而提高整体采摘系统的通用性与作业效率^[106-108]。

综上,末端执行器主要分为单一结构与复合结构 2 类。单一结构包括剪切式、手指式及吸盘式,其中剪切式侧重于机构的精准切割;手指式依靠夹持力的精准控制与柔性材料,适用于带梗作物;吸盘式则以低损伤为主要优势,但适用对象有限^[109-110]。复合结构包括夹持切割组合式、吸附与机械组合式等,可通过传感器实现闭环控制,但系统相对复

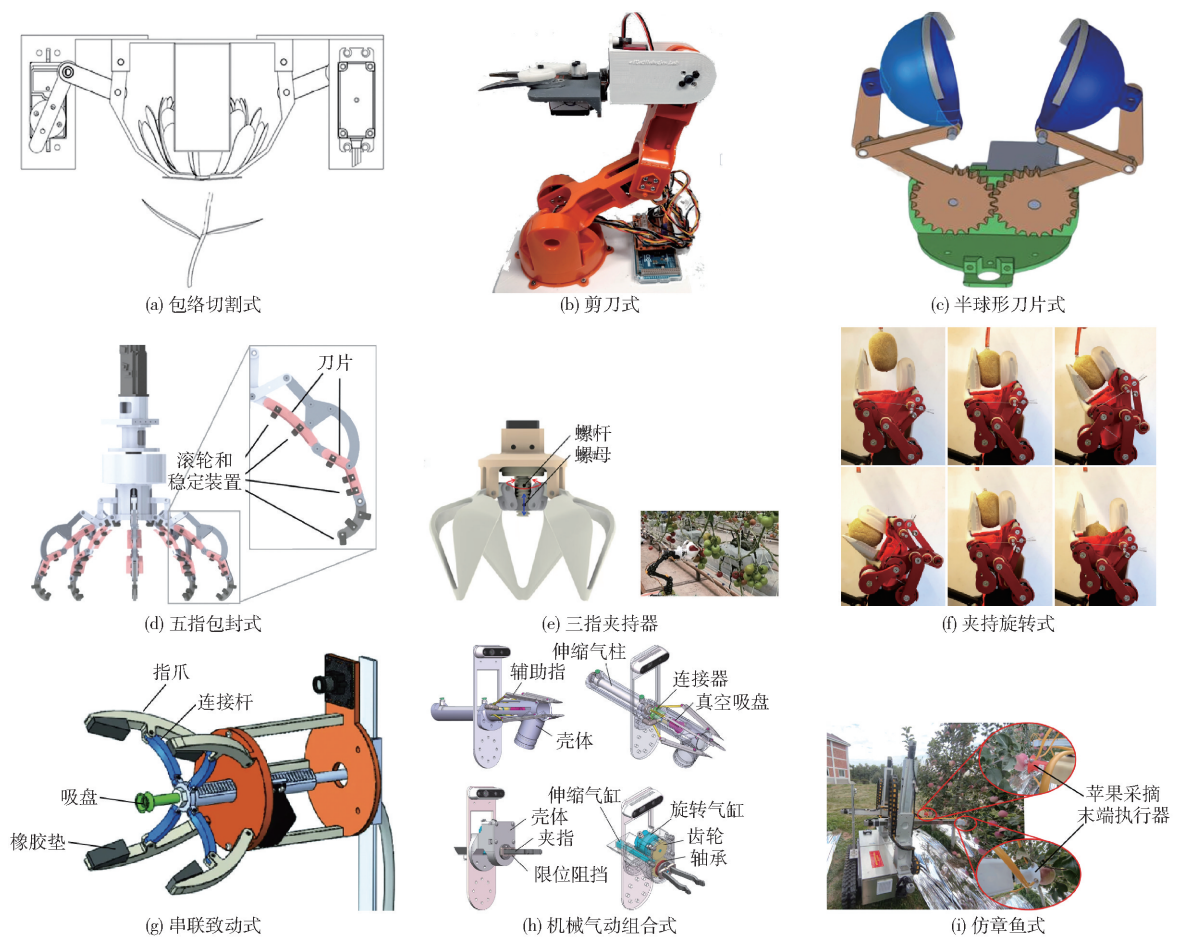


图 11 采摘末端执行器结构类型

Fig. 11 Structural types of harvesting end effectors

杂^[111-112]。此外,仿生与柔性包裹式等结构以低损伤为目标,依托软体机器人等前沿技术,处于研究探索阶段^[113-116]。表 4 为各类末端执行器采摘效果。

表 4 不同末端执行器模式采摘效果

Tab. 4 Harvesting effects of different end effector models

指标	末端执行器模式				
	剪切式	手指式	吸盘式	组合式	仿生/柔性包裹式
速度	中,定位后切割动作快	高,开合动作快,但需定位	高,吸附动作迅速	中,多步骤协同,耗时稍长	低,包裹动作时需较长
精准度	高,可精确定位花柄、果梗切割点	高,可精确抓持花柄或果梗	中,依赖物料表面平整度	高,先稳定抓取,再精确定点切割	中,依赖包裹的贴合度
损伤率	中,切割本身损伤小,但需配合夹持或吸附固定,可能引入二次损伤	高,接触应力易导致损伤	低,非接触式采摘,无挤压损伤	低,协同作业能极大降低单独夹持的应力	低,大面积柔性接触,分散压力
适应性	高,通用性强	低,尺寸定制,适应性差	低,仅适用于表面光滑的物料	高,通过模块组合,适应多种作物	中,对形状有一定要求

由于菊花花朵较为脆弱,末端执行器接触部位材料选取,要求保证抓持力的同时减轻表面压迫和机械损伤。当前研究主要集中于仿生软体材料,如硅胶、热塑弹性体及 3D 打印软材料等,在果蔬采摘中已展现出低损伤优势^[117-119]。如 Wang 等^[120]设计的番茄采摘末端执行器采用硅胶材料,实现大面积接触,有效分散压力;Vanhenten 等^[121]

设计的黄瓜采摘末端执行器,在夹爪内侧衬垫聚氨酯泡沫,通过柔性包裹实现低损伤采摘;类似地,Arad 等^[122]采用硅胶及带有柔性涂层的自适应手指对甜椒进行柔顺抓持采摘;Guo 等^[123]受鱼类鳍条启发,设计了柔性聚合物驱动夹爪,适用于草莓等易损果实。

相关学者引入可变刚度结构实现末端执行器柔

软与可控间的有效平衡,文献[124–125]提出刚柔结合的夹持器,指尖部分采用颗粒阻塞技术实现刚度可调;文献[126–127]提出了基于梯度点阵结构的变刚度柔性夹持机构设计方法,实现了对末端执行器的变刚度柔顺控制;文献[128–129]提出了基于层流阻塞原理的可变刚度软体夹爪,通过调节层间摩擦改变整体刚度,在灵活抓取与稳定持握之间取得良好平衡;魏树军等^[130]提出的纤维增强型气动弯曲执行器为农业采摘爪设计提供了重要参考;Ellferich 等^[131]结合柔性铰链结构开发了适用于易损水果的夹持器;此外,Ye 等^[132]对软体气动执行器进行建模研究,为包裹式软夹指的设计与控制提供了理论支持。

软体夹爪通常通过气动驱动实现柔性抓取,李健等^[133]将硅胶材料制成的气动夹爪集成于草莓采摘机器人,通过田间试验验证了低损伤性能;Ilievski 等^[134]利用硅橡胶等软材料制成气动抓取器,借助充气变形包裹对象,分散接触应力,从而降低损伤;姬江涛等^[135]面向蘑菇采摘设计的柔性夹持器,基于柔性材料模型构建,采用气动腔体通过正、负压力变化实现抓取与释放,其变形行为经仿真与试验验证满足采摘要求。总体来看,采摘末端执行器的材料研究主要集中采用柔性接触面、增大包络面积、结合可变刚度机制与触觉反馈,在确保可靠抓持的同时最大限度降低机械损伤。

2.3.3 采摘末端执行器控制策略

采摘末端执行器负责接收决策指令并完成与目标物体的交互操作^[136–137]。面对菊花选择性采摘,在目标定位、接触、采摘等环节,末端执行器控制方法主要包括基于感知与规划的开环控制、基于力或触觉反馈的闭环控制与混合传感的协同控制等^[138–140]。

视觉引导与路径规划常作为前期目标定位与全局运动的基础,王延鑫等^[95]采用立体视觉定位菊花茎秆,引导机械臂到达采摘位置。针对采摘机械臂因负载变化产生的振动问题,刘德馨等^[141]提出了自适应输入整形控制方法,通过实时调整脉冲参数有效消除了末端残余振动;文献[142–143]优化机械臂逆动力学性能,减少横向摆动与惯性冲击,进一步降低了接触过程碰撞损伤。在路径规划层面,文献[93,144]分别针对番茄与芦笋采摘开展了协同控制与动作规划策略研究;Li^[145]基于视觉反馈和神经网络算法对智能采摘机器人进行路径规划,提高了采摘动作的平稳性与成功率。而在接触与采摘阶段,力与触觉反馈控制成为保障无损采摘的关键,Huang 等^[146]设计了具有关节自锁与解锁机构的执行器,并提出基于二进制反馈信号的控制方法,实现了对多种形状果蔬的自适应、非破坏性采摘;文献[147–149]分别针对苹果、甜椒和茄子设计了具有有力反馈的柔顺抓取器,通过阻抗调节避免果实损伤;文献[150–152]则针对易损水果提出自适应阻抗控制方法,根据果实硬度实时调整抓取力。

在大模型驱动具身智能实践中,Wake 等^[153]提出基于 GPT-4V 的多模态任务规划框架,增强了机器人在复杂环境中感知与执行能力。中科原动力研发的具身智能番茄采摘机器人,通过融合环境理解与自适应作业策略,较传统固定策略机器人采摘效率提升 28.7%,展示了智能控制技术在采摘领域的应用潜力^[154]。

将采摘动作分解为靠近、接触、采摘、收集多个工序,从轨迹跟踪精度、力控精度、运动稳定性及适用场景等方面,对几类典型控制方式控制效果进行了分析,如表 5 所示,以期为菊花采摘控制方法选择与优化提供参考。

表 5 典型控制方法控制效果
Tab.5 Control effect of typical control methods

控制方法	轨迹跟踪精度	力控精度	运动稳定性	适用场景
融合路径规划	高,全局优化	不直接涉及	高,避障平滑	动态障碍物环境,复杂空间
立体视觉引导	中,依赖视觉精度	低	中,受光照及遮挡影响	结构化场景,视觉特征需清晰
自适应阻抗控制	中,柔顺调整	高	高,接触缓冲	不确定接触环境,需人机/物交互
力闭环抓取控制	低	极高	高,实时力调节	易损伤对象,需精确力控抓取
变刚度抓取控制	低	中,刚度可调	高,抗扰动	对象形变大、硬度差异大
吸附拉扯协同控制	低	中,依赖吸附力	中,协同难度大	表面规则、可吸附的物料

2.4 菊花采摘装备产业研发进展

国内外多家企业与科研机构围绕菊花及同类作物,已积极开展采摘装备的研发与试点应用。例如,德国 Bosch 公司开发的 Selective Flower Harvester,针对洋甘菊等花卉,配备高精度视觉系统与仿生柔性

夹爪,可实现花朵成熟度识别与选择性采摘,已在德国部分农场进行试点应用;德国企业如 EuroPrima 持续优化洋甘菊采摘机系列,推出的 NB2006 E/P Pro 型具备自动驾驶功能,通过集成超声波传感器与电液控制系统,实现了作业高度自动调节,已在规

模化农场应用。在国内,各界也在菊花采摘装备领域取得了实质性进展。企业方面,苏州书农科技有限公司生产的万寿菊采摘机器人采用轻量化移动底盘、多自由度机械臂与视觉识别系统,可实现万寿菊的选择性采摘,具备花朵识别、定位、低损采摘与收集一体化功能,目前已在新疆莎车县等规模种植园开展采摘验证及示范作业^[155]。科研院校方面,南京农业大学工学院设计并研制了跨垄式金丝皇菊采摘机器人,提出基于 LiDAR 多维点云优化算法和改进纯跟踪算法可以有效提高导航精准度,从而保证采摘机器人的精准作业,在最优工作参数下,采摘成功率为 91.37%^[156];此外,由中国农业大学等单位研发的菊花采收样机,在湖北麻城市菊花基地进行了现场试验,每日可采收菊花 0.67 ~ 1 hm²,人工替代比高达 1:50,为国内菊花自动化采收机工程化应用提供了重要参考^[157]。

以上采摘装备的研发与试点为相关技术实用化与规模化推广奠定了初步基础,同时也反映出当前菊花采摘装备在成本、可靠性与复杂环境适应性等方面仍面临挑战。

3 菊花机械化采摘技术瓶颈与发展对策

3.1 机械统采式面临的主要问题及其优化路径

3.1.1 采摘质量与作业适用性难以兼顾及其优化路径

当前机械统采式采摘面临的核心矛盾在于无法同时保证采摘质量与广泛的作业适用性。国外机型(图 3 ONGsnc 等)虽效率高,但采摘后花柄残留过长(图 12a ~ 12d),不符合国内“无梗”采摘标准,且宽幅设计与国内的行距难以匹配,因而直接应用受限^[35-39]。国内设备虽向机电一体化发展,但多数仍处于试验阶段,普遍存在刚性采摘装置因缺乏有效的浮动仿形能力,在面对自然生长的高低起伏、疏密不均的花层时,出现高位花损伤与低位花漏采并存的问题(图 12e、12f),同时通过性、作业效率及收集可靠性亦有待提升。为此,发展重点应转向研发具备主动浮动与自适应调节能力的采摘执行机构。例如,可采用聚氨酯与碳纤维等复合材料设计仿生采摘头,通过可调间距与柔性接触模拟手指梳捋动作,以贴合花冠曲面,并集成触觉传感器实现接触力的实时监测与反馈控制,从而在复杂花层中兼顾采收率与低损伤。同时,需开发模块化、参数可调的采摘部件,使其能够快速适应不同地区的行距与垄作模式,提升机具的跨区域适用性。

3.1.2 低损采摘机理不清与设计依据建立

菊花机械化低损采摘缺乏系统的理论指导与精

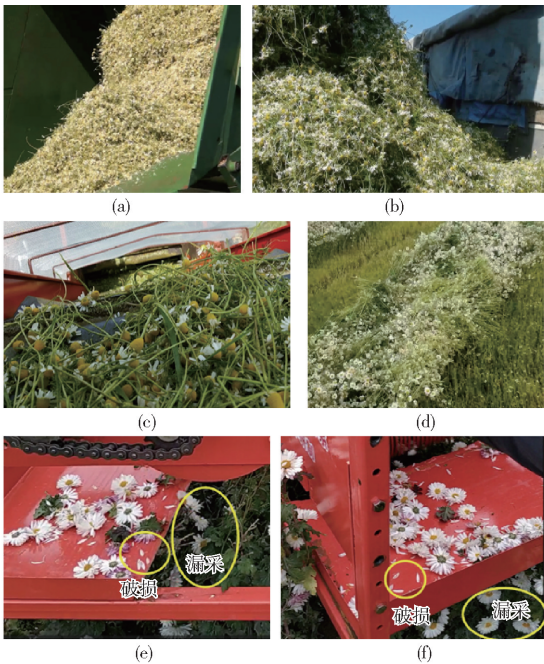


图 12 统采式下洋甘菊与菊花采摘效果

Fig. 12 Harvesting effect of chamomile and chrysanthemum under unified harvesting

准设计依据,关键瓶颈在于尚未建立毫菊、杭白菊等主要菊花品种的花朵-花梗分离界面的力学阈值数据库,以及随成熟度、含水率变化的动态模型。现有采摘动力学模型多借鉴其他作物,导致采摘力设置不合理,且机械接触导致的组织损伤累积效应及其阈值不明,相关生物力学表征仍属空白。为解决这一问题,须开展菊花植株关键力学特性的试验研究,量化花朵、花柄及枝条的剪切力、拉断力等参数,构建多尺度力学数据集。在此基础上,结合离散元与有限元耦合仿真,模拟机械与植株的互作过程,揭示损伤机制,从而为采摘装置的结构几何、运动参数与材料选择提供精准依据。推动采摘装置从经验设计转向基于生物力学模型的仿生优化,为实现低损伤采摘提供理论支撑。

3.1.3 农机农艺适配性差与协同优化策略

国内菊花种植模式异质化严重,各产区在行距、垄高等方面差异显著,缺乏适于机械化作业的标准化种植体系,导致现有采摘机具通用性低、适应范围窄。多数机具仅为特定区域设计,未从农机农艺协同角度进行优化,限制了大规模推广应用。未来必须强化农机与农艺的深度融合:一方面,对于适合统采的品种,应通过栽培管理促使株型整齐、花期集中,形成适宜机械作业的群体结构;另一方面,采摘机械的设计需充分考虑可调节性,使采摘高度、幅宽等关键作业参数能够灵活匹配不同的农艺规范。建议通过建立农机农艺融合示范田,集成品种筛选、标准化种植与机械化采摘技术,实现从种植到收获的

全链条标准化,提升整个产业的机械化水平与经济效益。

3.2 选择性智能采摘关键技术问题与改进方向

3.2.1 田间目标识别鲁棒性不足及主动视觉融合提升途径

当前基于视觉的菊花识别在实际应用中面临“看不清”和“认不准”2大难题。“看不清”问题主要源于自然光照变化、花朵重叠与枝叶遮挡,导致特征提取失稳、关键采摘点不可见,从而引发漏检或错检。尽管 RGB-D 相机提供了深度信息,但识别模型高度依赖训练数据,在品种、生长阶段和光照条件上泛化能力弱,造成“认不准”,难以适应多地域复杂场景。此外,为适配低功耗边缘设备而简化的模型往往牺牲了细节特征识别能力,且多数算法缺乏大规模田间重复验证,实际部署稳定性不足。为提升感知可靠性,需发展多模态传感融合技术,例如结合 RGB-D 图像与近红外光谱,利用光谱特征增强花朵与背景区分度,并利用深度信息缓解遮挡问题。同时,应研究面向小样本与多品种的迁移学习与域自适应算法,并引入主动视觉机制,通过移动平台进行多视角观测,结合遮挡恢复算法主动重构目标完整信息。在部署层面,须通过轻量化网络设计与边缘计算集成,实现高精度与低功耗的有效平衡。

3.2.2 末端执行器自适应能力缺乏及柔性结构创新设计

现有末端执行器多采用固定开合模式,对 1 ~ 3 mm 范围内花柄直径微小变化的夹持自适应能力不足,易导致采摘不全、夹持过紧或定位偏移,在密集环境中作业灵活性也受限于体积与自由度。材料方面,刚性材料易损伤花朵表面,而现有柔性材料在菊花采摘中应用较少,在其他果蔬应用中存在驱动力传递效率低、反复使用易疲劳等问题。同时,执行器小型化与模块化设计不完善,难以在有限空间集成多传感单元。为降低机械损伤并提升适应性,应创新设计具有自适应能力的柔性采摘结构,例如基于导电硅胶等兼具柔性与自感知功能的材料,以在抓取时降低局部应力并实时反馈接触状态。

3.2.3 控制系统响应滞后及闭环自适应控制策略

现有末端执行器控制多采用感知—规划—执行的开环模式,依赖预设轨迹,存在因视觉定位、机械臂运动与末端抓取之间时序延迟导致的动态误差累积,且未能充分融合实时传感反馈,在植株晃动、遮挡等动态场景中缺乏实时纠偏能力。同时,系统对花柄抓取力在线感知与自适应调整机制不足,易因力度不当影响采摘质量。为提升控制精度与响应速度,应构建“视觉—力觉”融合的闭环控制系统。在

运动控制层,可采用自适应阻抗控制策略,将末端执行器建模为虚拟弹簧—阻尼器,通过在线调节参数,在接近目标时呈现低刚度、高阻尼以吸收冲击,抓持后瞬时提高刚度确保成功采摘。在决策层,需开发结合视觉与力伺服反馈的动态规划算法,在线补偿目标位移与姿态变化。该策略已在部分果蔬采摘中验证低损伤优势,后续可结合菊花力学特性进行参数优化,并探索多臂协同作业模式,以提升系统整体效率与稳定性。

4 总结与展望

本文系统梳理国内外菊花机械化采摘技术研究现状与发展动态,明确统采式与选择性智能采摘 2 类技术路径的适用场景、核心差异及关键技术瓶颈。统采式方面,对比分析梳齿式、梳刀组合式、梳齿气动组合式等典型装置的结构原理与作业性能,揭示国外机型效率与国内“无梗”采摘标准的适配性矛盾,以及国内样机在浮动仿形能力、作业通过性与收集可靠性等方面的共性不足。选择性智能采摘方面,从采摘目标感知、末端执行器结构与材料选型、力位混合控制策略等维度综述研究进展,指出复杂田间环境下目标识别鲁棒性差、末端执行器自适应能力不足、控制系统响应滞后等突出问题。

结合菊花种植模式多样、花层分布复杂、花朵组织柔嫩等农艺特点,分析制约 2 类采摘技术发展的深层原因。统采式核心矛盾在于采摘质量与作业适用性难以兼顾,低损采摘机理不清、设计依据缺乏,农机农艺适配性差。选择性智能采摘技术受限于感知模型泛化能力弱、末端执行器结构材料适应性不足、控制策略难以实现实时纠偏与自适应调整。针对上述问题,提出发展对策:统采式方面,研发具备主动浮动与自适应调节能力的采摘执行机构,构建基于生物力学特性的菊花采摘力学数据库,推动采摘装置从经验设计向仿生优化转变,强化农机农艺融合,建立标准化种植与机械化采收协同体系。选择性智能采摘方面,发展多模态传感融合与主动视觉机制,创新设计具有自适应能力的柔性末端执行器,探索变刚度结构与自感知材料应用,构建“视觉—力觉”融合的闭环控制系统,提升采摘动作精准性与稳定性。

展望未来,菊花机械化采摘技术将向智能化、低损化、高适应性方向发展。深度学习、柔性机器人、多传感器融合与边缘计算等前沿技术不断成熟,采摘机器人有望实现从“识别—定位—采摘”到“自主决策—自适应执行—智能反馈”的全面升级。耦合仿真技术将在采摘装置机理研究、结构优化与动态

行为预测中发挥重要作用,为低损伤、高效率采摘提供理论支撑与设计工具。推动农机农艺深度融合,构建标准化、模块化、智能化的采摘技术体系,是实现菊花产业机械化、现代化与可持续发展的关键路径。本文旨在为进一步推动菊花机械化采摘技术研究与应用提供参考。

参 考 文 献

[1] 戴思兰,温小惠. 菊花的药食同源功效[J]. 生命科学,2015,27(8):1083-1090.
Dai Silan, Wen Xiaohui. Efficacy of the medicinal and food chrysanthemum[J]. Chinese Bulletin of Life Sciences, 2015, 27(8):1083-1090. (in Chinese)

[2] 黄霞. 杭白菊多糖三种提取方法及体外生理活性的比较研究[D]. 雅安: 四川农业大学,2016.
Huang Xia. Extraction and biological activities of polysaccharides from *Chrysanthemum morifolium* [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University,2016. (in Chinese)

[3] Fan D G, Liu Z Z, Li Y Y, et al. Effects of different drying methods on the chemical components and activities of Taihang chrysanthemum (*Opisthopappus taihangensis*) [J]. Food Chemistry, 2025, 466: 142262.

[4] Huang Z, Ci H T, Liu Z Y, et al. Comprehensive evaluation on yield and quality of medicinal *Chrysanthemum morifolium* varieties based on principal component analysis and cluster analysis [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(5): 271-280.

[5] Zhong J, Hu H L, Wang J W, et al. Influence of volatile components from ‘qiyueju’ (*Chrysanthemum morifolium* ramat.) flowerheads on the mycelial growth of *pleurotus ostreatus* [J]. Journal of Essential Oil Bearing Plants, 2021, 24(6): 1428-1438.

[6] Abalkhail T, Alkubaisi N A, Aziz I M, et al. Evaluation of the antioxidant, anticancer, and antibacterial activities of flower and leaf extracts of chrysanthemum indicum[J]. ChemistryOpen,2025, 14(10): e2500252.

[7] 王黄振, 柳志勇, 王顺利, 等. 我国药用菊花品种资源调查与产业现状分析[J]. 中药材,2020,43(6): 1325-1329.
Wang Huangzhen, Liu Zhiyong, Wang Shunli, et al. Resources investigation of Chinese medicinal *Chrysanthemum morifolium* varieties and its industry status analysis[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2020,43(6): 1325-1329. (in Chinese)

[8] 程龙,任永申,李艳秋,等. 不同采收期对野菊花质量的影响[J]. 中南民族大学学报(自然科学版),2022,41(6): 663-667.
Cheng Long, Ren Yongshen, Li Yanqiu, et al. Effects of different harvesting periods on the quality of *Chrysanthemi Indici Flos* [J]. Journal of South-Central Minzu University (Natural Science Edition), 2022,41(6): 663-667. (in Chinese)

[9] 张伟,丁杨飞,陈慧芳,等. 菊花道地性成因及研究进展[J]. 安徽中医药大学学报,2023,42(1): 98-104.
Zhang Wei, Ding Yangfei, Chen Huifang, et al. Causes and research progress on the authenticity of chrysanthemum [J]. Journal of Anhui University of Chinese Medicine ,2023,42(1): 98-104. (in Chinese)

[10] 常相伟,魏丹丹,陈栋杰,等. 药用与茶用菊花资源形成源流与发展变化[J]. 中国现代中药,2019,21(1): 116-123,145.
Chang Xiangwei, Wei Dandan, Chen Dongjie, et al. Historical origin and development of medicinal and tea *Chrysanthemum morifolium* resources[J]. Modern Chinese Medicine,2019,21(1):116-123,145. (in Chinese)

[11] 江虹,熊琦,杨辉,等. 雪菊种植密度、摘心次数及采摘时间对产量和品质的影响[J]. 新疆农业科学,2017,54(5): 853-861.
Jiang Hong, Xiong Qi, Yang Hui, et al. The influence of planting density, pinching times and harvesting time on yield an quality of *Coreopsis tinctoria* [J]. Xinjiang Agricultural Science,2017,54(5): 853-861. (in Chinese)

[12] 钱佳仪,夏熠珣,侯姣靓,等. 采摘时期对菊花茶汤感官及理化属性的影响[J]. 食品与生物技术学报,2023,42(9): 56-65.
Qian Jiayi, Xia Yixun, Hou Jiaoliang, et al. Effects of harvesting period on sensory and physicochemical properties of chrysanthemum infusion[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023,42(9): 56-65. (in Chinese)

[13] Yu P L, Zhou Y, Liu J, et al. Extraction methods, structural features and bioactivity diversity of polysaccharides from the genus chrysanthemum: a review[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2025, 293: 139423.

[14] 王子骞,韩亚茹,李伟阳,等. 菊花种质资源研究的现状与展望[J]. 河北农业,2025(2): 89-92.

[15] 陈庆蕾,陈庆国,赵玉荣. 菊花的功效及其产品开发[J]. 中国果菜,2023,43(2): 61-65.
Chen Qinglei, Chen Qingguo, Zhao Yurong, et al. The efficacy of chrysanthemum and its product development [J]. China Fruit & Vegetable, 2023,43(2): 61-65. (in Chinese)

[16] 叶梦倩,邓静,彭杰,等. 菊花本草考证[J]. 中成药,2022,44(6):1912-1917.

[17] Yuan T L, Tian T, Chen Z A, et al. Extraction of polyphenols from *Chrysanthemum morifolium* ramat. leaves[J]. Industrial Crops and Products,2025,231: 121221.

[18] 黄璐琦. 药用植物种质资源研究(精)[M]. 上海:上海科技出版社,2008.

[19] 杨丹,聂紫璇,滕菲,等. 菊花《中国药典》标准含量测定方法的评估与优化[J]. 中国中药杂志,2022,47(5): 1286-1292.
Yang Dan, Nie Zixuan, Teng Fei, et al. Evaluation and optimization of content determination method of *Chrysanthemi Flos* in Chinese Pharmacopoeia[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2022,47(5): 1286-1292. (in Chinese)

- [20] 敖地秀, 罗昌, 陈东亮, 等. 大菊品种扦插生根规律的比较[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(18): 172–177.
Ao Dixiu, Luo Chang, Chen Dongliang, et al. Comparative study on rooting rules of cuttings of chrysanthemum varieties[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(18): 172–177. (in Chinese)
- [21] 李建民, 李华擎, 胡世霞. 杭菊花的产区 and 商品种类现状[J]. 中国药师, 2015(7): 1098–1100.
Li Jianmin, Li Huaqing, Hu Shixia. Current situation of production areas and varieties of chrysanthemum of Hangzhou[J]. Chinese Pharmacist, 2015(7): 1098–1100. (in Chinese)
- [22] 康四和, 聂晶, 刘义梅, 等. 药用菊花起源与演化规律研究[J]. 亚太传统医药, 2023, 19(3): 193–199.
Kang Sihe, Nie Jing, Liu Yimei, et al. Study on the origin and evolution of *Chrysanthemum morifolium* [J]. Asia-Pacific Traditional Medicine, 2023, 19(3): 193–199. (in Chinese)
- [23] Li X M, Chen F, Zhang F, et al. Comprehensive evaluation of ornamental traits and selection of pompon type cut chrysanthemum[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2021, 48(1): 107–116.
- [24] Orav A, Raal A, Arak E. Content and composition of the essential oil of *Chamomilla recutita* (L.) Rauschert from some European countries(Article)[J]. Natural Product Research, 2010, 24(1): 48–55.
- [25] Roby M H H, Sarhan M A, Selim K A H, et al. Antioxidant and antimicrobial activities of essential oil and extracts of fennel (*Foeniculum vulgare* L.) and chamomile (*Matricaria chamomilla* L.) [J]. Industrial Crops and Products, 2013, 44: 437–445.
- [26] Formisano C, Delfino S, Oliviero F, et al. Correlation among environmental factors, chemical composition and antioxidative properties of essential oil and extracts of chamomile (*Matricaria chamomilla* L.) collected in Molise (South-central Italy) [J]. Industrial Crops and Products, 2015, 63: 256–263.
- [27] Amaral W, Deschamps C, Machado M P, et al. Development of chamomile and essential oil yield and quality at different harvesting times[J]. Revista Brasileira de Plantas Mediciniais, 2014, 16(2): 237–242.
- [28] Šalamon I. View correspondence (jump link). effect of the internal and external factors on yield and qualitative quantitative characteristics of chamomile essential oil[J]. Acta Horticulturae, 2007, 749: 45–64.
- [29] Ghareeb Y E, Soliman S S, Ismail T A, et al. Improvement of german chamomile (*Matricaria recutita* L.) for mechanical harvesting, high flower yield and essential oil content using physical and chemical mutagenesis [J]. Plants (Basel, Switzerland), 2022, 11(21): 2940.
- [30] Pajić M. Optimization of mechanized harvesting of chamomile (*Matricaria chamomilla* L.) [D]. Belgrade: University of Belgrade, 2017.
- [31] Ehlert D, Beier K. Development of picking devices for chamomile harvesters[J]. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants, 2014, 1(3): 73–80.
- [32] Brabandt H, Ehlert D. Chamomile harvesters: a review[J]. Industrial Crops and Products, 2011, 34(1): 818–824.
- [33] Beier K, Ehlert D. Methods for evaluation of picking performance of chamomile (*Matricaria recutita* L.) harvesters. Part II: development of new methods[J]. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants, 2014, 1(2): 35–42.
- [34] Veselinov B, Adamovic D, Martinov M, et al. Mechanized harvesting and primary processing of *Calendula officinalis* L. inflorescences[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2014, 12(2): 329–337.
- [35] Vangeyte J, Baro J, Rijckaert J, et al. Study, design and development of a low-budget prototype harvesting machine for Roman chamomile: agricultural and biosystems engineering for a sustainable world [C] // International Conference on Agricultural Engineering, Hersonissos, 2008.
- [36] Očić V, Granatir M, Žutić I, et al. Impact of working speed of towed picker and combine harvester to the quality of chamomile harvesting[J]. Journal of Central European Agriculture, 2019, 20(2): 665–670.
- [37] Ehlert D, Roschow K. Current status and new approaches for harvesting of chamomile flowers (*Matricaria recutita* L.) [J]. Zeitschrift Fur Arznei- & Gewurzpflanzen, 2011, 16(3): 111–118.
- [38] Ivanovic S, Pajic M, Ivanovic L. Choosing type of chamomile harvester based on current value of usage costs[J]. Acta Horticulturae, 2007, 749: 259–264.
- [39] Chauhan R, Singh S, Kumar V, et al. A comprehensive review on biology, genetic improvement, agro and process technology of german chamomile (*Matricaria chamomilla* L.) [J]. Plants (Basel, Switzerland), 2021, 11(1): 29.
- [40] Salamon I, Petruška P. New harvester of flower inflorescences for the German chamomile [C] // The 3rd International Symposium on Agricultural Engineering, 2017.
- [41] 王荣炎, 郑志安, 姜大龙, 等. 单排梳齿往复式菊花采摘机的设计与仿真[J]. 农机化研究, 2022, 44(8): 181–186, 192.
Wang Rongyan, Zheng Zhian, Jiang Dalong, et al. Design and simulation of single row comb reciprocating chrysanthemum picking machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(8): 181–186, 192. (in Chinese)
- [42] 王嘉伟. 多排水水平梳齿式菊花采摘装置设计与试验[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2024.
Wang Jiawei. Design and testing of multi-row horizontal comb-type chrysanthemum picking device [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2024. (in Chinese)
- [43] 姬长英, 王春香, 顾宝兴, 等. 手推式杭白菊梳齿摘花机结构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 143–150.
Ji Changying, Wang Chunxiang, Gu Baoxing, et al. Structure design and experiment of hand-push *Chrysanthemum morifolium* comb-teeth picking machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 143–150,

142. (in Chinese)

[44] 祁正栋,连国党,李亮亮,等. 万寿菊机械式采摘技术现状与建议[J]. 农业工程,2020,10(9): 26–30.
Qi Zhengdong, Lian Guodang, Li Liangliang, et al. Present situation and suggestions on mechanical picking technology of marigold[J]. Agricultural Engineering,2020,10(9): 26–30. (in Chinese)

[45] 李彤,王关平,刘燕,等. 一种可智能升降电动万寿菊采摘机的设计与试验[J]. 林业机械与木工设备,2024,52(8): 64–71,78.
Li Tong, Wang Guanping, Liu Yan, et al. Design and experiment of an intelligent elevating electric marigold picking machine [J]. Forestry Machinery Woodworking Equipment,2024,52(8): 64–71,78. (in Chinese)

[46] 王荣炎,郑志安,鹿秀凤,等. 梳齿往复式杭白菊采摘装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(12): 73–79,97.
Wang Rongyan, Zheng Zhian, Lu Xiufeng, et al. Design and test of comb-teeth reciprocating *Chrysanthemum morifolium* picking device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(12): 73–79,97. (in Chinese)

[47] Wang R Y, Zheng Z A, Gao L, et al. Development and testing of a cam disc comb-type picking machine for chrysanthemum (*Dendranthema morifolium* (Ramat.) Tzvelev)[J]. Transactions of the ASABE, 2021, 64(6): 1967–1976.

[48] 应理乾,杨自栋,韩润哲,等. 套采式杭白菊收获机设计与试验[J]. 包装与食品机械,2025,43(3): 71–79.
Ying Liqian, Yang Zidong, Han Runzhe, et al. Design and experiment of sleeve-picking harvester for *Chrysanthemum morifolium*[J]. Packaging and Food Machinery, 2025, 43(3): 71–79. (in Chinese)

[49] 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 test of pneumatic flipping comb-type chrysanthemum picking device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 184–193. (in Chinese)

[50] 姬长英,张纯,顾宝兴,等. 梳割气吸一体式贡菊采摘机设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(11): 137–145.
Ji Changying, Zhang Chun, Gu Baoxing, et al. Design and experiment of shear-sucting mountain chrysanthemum picking machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(11): 137–145. (in Chinese)

[51] Wang R Y, Zheng Z A, Lu X F, et al. Design, simulation and test of roller comb type chrysanthemum (*Dendranthema morifolium* Ramat) picking machine[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2021, 187: 106295.

[52] 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, Jasenjan Bekli, Song Ling. Design of comb-type picker for marigold[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2023(4): 16–19. (in Chinese)

[53] 于安记,季明,史庆春,等. 杭白菊采摘机装置结构设计[J]. 包装工程,2021,42(3): 220–225.
Yu Anji, Ji Ming, Shi Qingchun, et al. Structure design of picking machine for *Chrysanthemum morifolium* [J]. Packaging Engineering, 2021, 42(3): 220–225. (in Chinese)

[54] 李庆彪. 一种防止漏摘的高效菊花采摘装置: 202411709743. 6[P]. 2025–01–21.

[55] 曾松伟,胡斌. 一种菊花采摘收集机: 202123216936. 2[P]. 2022–08–23.

[56] 徐磊,柳军,周科宏,等. 一种菊花采摘车:202011169759. 4[P]. 2020–12–15.

[57] 郑志安,王荣炎,高磊,等. 一种手推式菊花采摘装置: 201810965374. 5[P]. 2018–10–09.

[58] 松政,晋源,王明月,等. 一种排升式采摘装置: 202122909219. 1[P]. 2022–04–08.

[59] 陈砚,周厚高,张家豪,等. 一种采摘装置: 202320432291. 6[P]. 2023–07–04.

[60] 于菲,郑君豪,李春阳,等. 菊花采摘收获一体机: 202411991317. 6[P]. 2025–02–07.

[61] 何诗行,李文海,蔡少江,等. 一种仿生式菊花采摘设备: 202510385802. 7[P]. 2025–06–13.

[62] 李林,张跃朋,殷红清,等. 一种成熟菊花采摘收集装置: 202510562829. 9[P]. 2025–08–05.

[63] 章永年,王健,李照,等. 一种菊花采摘装置: 202211294659. 3[P]. 2023–01–10.

[64] 马相林,张志伟,王刚,等. 一种菊花采摘机: 202310946587. 4[P]. 2023–09–08.

[65] 杨晓龙,冯欢,孙琳博,等. 一种菊花采摘器: 202123442983. 9[P]. 2022–08–23.

[66] 李天华,孙萌,娄伟,等. 采摘机器人分割与识别算法的研究现状[J]. 山东农业科学,2021,53(10): 140–148.
Li Tianhua, Sun Meng, Lou Wei, et al. Research status of picking robot segmentation and recognition algorithms [J]. Shandong Agricultural Sciences,2021,53(10): 140–148. (in Chinese)

[67] Yang Q H, Chang C, Bao G J, et al. Recognition and localization system of the robot for harvesting Hangzhou white chrysanthemums[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2018,11(1): 88–95.

[68] Nguyen T K, Dang M, Doan T, et al. Utilizing deep neural networks for chrysanthemum leaf and flower feature recognition [J]. AgriEngineering, 2024, 6(2): 1133–1149.

[69] Wang J, Tian Y, Zhang R, et al. Multi-information model for large-flowered chrysanthemum cultivar recognition and classification[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 806711.

[70] 谢宇飞. 计算机视觉技术在农业采摘设备中的应用[J]. 现代农业科技,2024(16): 156–159.
Xie Yufei. The application of computer vision technology in agricultural harvesting equipment[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2024(16): 156–159. (in Chinese)

[71] 宋彦,杨帅,郑子秋,等. 基于多头自注意力机制的茶叶采摘点语义分割算法[J]. 农业机械学报,2023,54(9): 297–305.
Song Yan ,Yang Shuai, Zheng Ziqiu, et al. Semantic segmentation algorithm based multi-headed self-attention for tea picking

- points[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(9):297–305. (in Chinese)
- [72] Qu M, Hu B, Long Y, et al. Target segmentation and picking point detection method of mature tomatoes based on multi-color space fusion(Article)[J]. International Agricultural Engineering Journal,2018, 27(1): 237–249.
- [73] 邵延华,张铎,楚红雨,等. 基于深度学习的 YOLO 目标检测综述[J]. 电子与信息学报,2022,44(10):3697–3708.
Shao Yanhua, Zhang Duo, Chu Hongyu, et al. A review of YOLO object detection based on deep learning[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(10): 3697–3708. (in Chinese)
- [74] 王琳毅,白静,李文静,等. YOLO 系列目标检测算法研究进展[J]. 计算机工程与应用,2023,59(14):15–29.
Wang Linyi, Bai Jing, Li Wenjing, et al. Research progress of YOLO series target detection algorithms[J]. Journal of Computer Engineering & Applications, 2023,59(14):15–29. (in Chinese)
- [75] Kim M, Jeong J, Kim S, et al. ECAP-YOLO: efficient channel attention pyramid YOLO for small object detection in aerial image[J]. Remote Sensing, 2021, 13(23): 4851.
- [76] 施国英,纪嘉鹏,李天华,等. 基于改进 YOLO v8s 的杭白菊检测与花期分类[J]. 农业工程学报,2025,41(7):192–199.
Shi Guoying, Ji Jiapeng, Li Tianhua, et al. Detecting chrysanthemum to classify flowering stages using improved YOLO v8s[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(7): 192–199. (in Chinese)
- [77] Qi C, Nvalala I, Chen K, et al. Detecting the early flowering stage of tea chrysanthemum using the F-YOLO model[J]. Agronomy, 2021, 11(5): 834.
- [78] Qi C, Chang J, Zhang J, et al. Medicinal chrysanthemum detection under complex environments using the MC-LCNN model[J]. Plants, 2022, 11(7): 838.
- [79] Liu Y, Wang G, Sun W, et al. Honeysuckle flower stage identification based on improved YOLOv5s[J]. Agronomy Journal, 2024, 116(5): 2511–2522.
- [80] Qi C, Gao J, Pearson S, et al. Tea chrysanthemum detection under unstructured environments using the TC-YOLO model[J]. Expert Systems with Applications, 2022, 193: 116473.
- [81] 喻陈楠,伍永红,周杰,等. 基于改进 YOLO v8n 的非结构环境下杭白菊检测方法[J]. 农业机械学报,2025,56(5):405–414.
Yu Chennan, Wu Yonghong, Zhou Jie, et al. Improved YOLO v8n for detection of Hangzhou white chrysanthemum in unstructured environments[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(5):405–414. (in Chinese)
- [82] Zhao W, Wu D, Zheng X. Detection of chrysanthemums inflorescence based on improved CR-YOLOv5s algorithm[J]. Sensors, 2023, 23(9): 4234.
- [83] Zang S, Shu L, Han R, et al. Real-time detection of tea chrysanthemums in complex outdoor scenes[C]//2025 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2025.
- [84] Yang Q, Luo S, Chang C, et al. Segmentation algorithm for Hangzhou white chrysanthemums based on least squares support vector machine[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019, 12(4): 127–134.
- [85] Yuan P, Li W, Ren S, et al. Recognition for flower type and variety of chrysanthemum with convolutional neural network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(5): 152–158.
- [86] Yuan P, Qian S, Zhai Z, et al. Study of chrysanthemum image phenotype on-line classification based on transfer learning and bilinear convolutional neural network[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 194: 106679.
- [87] Cai Z, He M, Li C, et al. Identification of chrysanthemum using hyperspectral imaging based on few-shot class incremental learning[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 215: 108371.
- [88] Liu Z L, Wang J, Tian Y, et al. Deep learning for image-based large-flowered chrysanthemum cultivar recognition[J]. Plant Methods, 2019, 15(1): 146.
- [89] Torre F T D, Melgani F, Pertot I, et al. Artificial intelligence vision methods for robotic harvesting of edible flowers[J]. Plants, 2024, 13(22): 3197.
- [90] Xu S P, Lu J S, Wu Y, et al. Deep learning-based approach for extracting inflorescence morphology features in cut chrysanthemum[J]. Smart Agricultural Technology, 2025, 12: 101265.
- [91] 陈昕,华超,朱银龙,等. 水果采摘机器人末端执行器的研究进展[J]. 林业机械与木工设备,2020,48(9): 4–10.
Chen Xin, Hua Chao, Zhu Yinlong, et al. Research progress in fruit picking robot end effectors[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment,2020,48(9): 4–10. (in Chinese)
- [92] 陈青,殷程凯,郭自良,等. 苹果采摘机器人关键技术研究现状与发展趋势[J]. 农业工程学报,2023,39(4): 1–15.
Chen Qing, Yin Chengkai, Guo Ziliang, et al. Current status and future development of the key technologies for apple picking robots[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 38(4): 1–15. (in Chinese)
- [93] 陈子文,杨明金,李云伍,等. 基于气动无损夹持控制的番茄采摘末端执行器设计与试验[J]. 农业工程学报,2021, 37(2): 27–35.
Chen Ziwen, Yang Mingjin, Li Yunwu, et al. Design and experiment of tomato picking end-effector based on non-destructive pneumatic clamping control[J]. Transactions of CSAE, 2021, 37(2): 27–35. (in Chinese)
- [94] 徐丽明,刘旭东,张凯良,等. 脐橙采摘机器人末端执行器设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(12): 53–61.
Xu Liming, Liu Xudong, Zhang Kailiang, et al. Design and test of end-effector for navel orange picking robot[J].

- Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 53–61. (in Chinese)
- [95] 王延鑫,汪小昆,李培艺,等. 包络式金丝皇菊采摘机械手设计与试验优化[J]. 南京农业大学学报,2025,48(3): 671–685.
Wang Yanxin, Wang Xiaochan, Li Peiyi, et al. Design and experimental optimization of an enveloping golden chrysanthemum harvesting manipulator[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2025,48(3): 671–685. (in Chinese)
- [96] Masood M U, Haghshenas-Jaryani M. A study on the feasibility of robotic harvesting for chile pepper[J]. Robotics, 2021, 10(3): 94.
- [97] Yeshmukhametov A, Koganezawa K, Yamamoto Y, et al. Development of continuum robot arm and gripper for harvesting cherry tomatoes[J]. Applied Sciences, 2022, 12(14): 6922.
- [98] Roshanianfard A, Noguchi N. Pumpkin harvesting robotic end-effector[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2020, 174: 105503.
- [99] Fujinaga T. Realizing an intelligent agricultural robot: an analysis of the ease of tomato harvesting[J]. Smart Agricultural Technology, 2025, 12: 101538.
- [100] Williams H, Jones M, Nejati M, et al. Robotic kiwifruit harvesting using machine vision, convolutional neural networks, and robotic arms[J]. Biosystems Engineering, 2019, 181: 140–156.
- [101] Li Z Y, Yuan X J, Yang Z P. Design, simulation, and experiment for the end effector of a spherical fruit picking robot[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2023, 20(6): 1–13.
- [102] Velasquez A, Grimm C, Davidson J, et al. Compact robotic gripper with tandem actuation for selective fruit harvesting[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2025, 10(10): 11030–11037.
- [103] Vu Q Y, Ronzhin A. A model of four-finger gripper with a built-in vacuum suction nozzle for harvesting tomatoes[J]. Smart Innovation, Systems and Technologies, 2020, 154: 149–160.
- [104] Gao J, Zhang F, Zhang J X, et al. Picking patterns evaluation for cherry tomato robotic harvesting end-effector design[J]. Biosystems Engineering, 2024, 239: 1–12.
- [105] Wang M R, Yan B, Zhang S H, et al. Development of a novel biomimetic mechanical hand based on physical characteristics of apples[J]. Agriculture, 2022, 12: 1871.
- [106] 王凤云,刘继展,李萍萍. 采摘机器人末端执行器研究现状与展望[J]. 农机化研究,2011,33(11): 10–14.
Wang Fengyun, Liu Jizhan, Li Pingping, et al. Present situation and prospect of end-effector for harvesting robot[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(11): 10–14. (in Chinese)
- [107] Ochoa E, Mo C K. Design and field evaluation of an end effector for robotic strawberry harvesting[J]. Actuators, 2025, 14(2): 42.
- [108] Wang Z H, Xun Y, Wang Y K, et al. Review of smart robots for fruit and vegetable picking in agriculture[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022, 15(1): 33–54.
- [109] 林桂潮,郑晓鑫,曾文勇,等. 欠驱动式茶叶采摘末端执行器优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(1):133–140.
Lin Guichao, Zheng Xiaoxin, Zeng Wenyong, et al. Optimization design and testing of under-actuated tea harvesting end-effector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 133–140. (in Chinese)
- [110] 陈建能,陈倩雯,刘林敏,等. 旋转式两工位名优茶采摘收集一体末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报,2024, 55(10):136–144.
Chen Jianneng, Chen Qianwen, Liu Linmin, et al. Design and experiment of rotating two workstations integrated effector for famous tea picking and collection[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10):136–144. (in Chinese)
- [111] Xu Y, Lü M, Xu Q, et al. Design and analysis of a robotic gripper mechanism for fruit picking[J]. Actuators, 2024, 13(9):338.
- [112] 林桂潮,陈定贤,陈嘉辉,等. 剪切-收集一体式茶叶采摘末端执行器设计与试验[J]. 机电工程技术,2023,52(9): 42–45,172.
Lin Guichao, Chen Dingxian, Chen Jiahui, et al. Design and testing of a cutting-collecting integrated end-effector for tea picking[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2023,52(9):42–45,172. (in Chinese)
- [113] 张英坤. 仿生咬合式末端执行器的结构与控制系统设计[J]. 制造业自动化,2024,46(8): 186–190,215.
Zhang Yingkun. End-effector based on bionic occlusal mode: structure and control system design [J]. Manufacturing Automation, 2024,46(8): 186–190,215. (in Chinese)
- [114] 王毅,许洪斌,张茂,等. 仿蛇嘴咬合式柑橘采摘末端执行器设计与实验[J]. 农业机械学报,2018,49(10): 54–64.
Wang Yi, Xu Hongbin, Zhang Mao, et al. Design and experiment of bite-model end-effector for citrus harvesting by simulating with mouth of snake[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(10):54–64. (in Chinese)
- [115] 王开,陈晓宁,项旺娇,等. 一种仿生设计三爪机械爪与高精度剪切一体化末端执行器: 202510742732. 6[P]. 2025–08–12.
- [116] 仲天赐,陆明月,吴言言. 软体末端执行器的研究现状[J]. 机械管理开发,2023,38(10):50–51,54.

- Zhong Tianci, Lu Mingyue, Wu Yanyan. Research status of soft end-effector[J]. Mechanical Management and Development, 2023,38(10):50–51,54. (in Chinese)
- [117] Cao M, Sun Y, Zhang J, et al. A novel pneumatic gripper driven by combination of soft fingers and bellows actuator for flexible grasping[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2023, 355: 114335.
- [118] 彭艳,刘勇敢,杨扬,等. 软体机械手爪在果蔬采摘中的应用研究进展[J]. 农业工程学报,2018,34(9): 11–20. Peng Yan, Liu Yonggan, Yang Yang, et al. Research progress on application of soft robotic gripper in fruit and vegetable picking[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(9): 11–20. (in Chinese)
- [119] 田辉,张驻军,王玲,等. 果蔬采摘刚度增强型软体抓手设计与试验[J]. 中国农机化学报,2021,42(10): 1–6. Tian Hui, Zhang Zhujun, Wang Ling, et al. Design and experiment of a soft gripper with enhanced rigidity for fruit and vegetable picking[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(10): 1–6. (in Chinese)
- [120] Wang T, Du W, Zeng L, et al. Design and testing of an end-effector for tomato picking[J]. Agronomy, 2023, 13(3):947.
- [121] Vanhenten E, VanTslot D, Hol C W, et al. Optimal manipulator design for a cucumber harvesting robot[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2009, 65(2): 247–257.
- [122] Arad B, Balendonck J, Barth R, et al. Development of a sweet pepper harvesting robot[J]. Journal of Field Robotics, 2020, 37(6): 1027–1039.
- [123] Guo Y Z, Liu S Y, Qi H M, et al. A pneumatic soft end-effector with multiple grasping modes[C]//2024 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 2024.
- [124] Zhou J, Chen S, Wang Z, et al. A soft-robotic gripper with enhanced object adaptation and grasping reliability[J]. IEEE Robotics and Automation Letters,2017, 2(4): 2287–2293.
- [125] Brown E, Rodenberg N, Amend J. Universal robotic gripper based on the jamming of granular material[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(44): 18809–18814.
- [126] 王昱,陈婉琼,曾山,等. 基于梯度点阵结构的浆果变刚度柔性夹持机构设计[J]. 华南农业大学学报,2024,45(2): 273–279. Wang Yu, Chen Wanqiong, Zeng Shan, et al. Design of berry compliant clamping mechanism with variable stiffness based on gradient lattice structure[J]. Journal of South China Agricultural University, 2024, 45(2): 273–279. (in Chinese)
- [127] Fang J M, Dai N Z, Xin Z B, et al. Design and interaction dynamics analysis of a novel hybrid bending-twisting-pulling end-effector for robotic tomato picking[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 231: 110011.
- [128] Liu L, Yang Q, He W, et al. Design and experiment of nighttime greenhouse tomato harvesting robot[J]. Journal of Engineering and Technological Sciences,2024, 56(3): 340–352.
- [129] Gao Y, Huang X, Mann I S, et al. A novel variable stiffness compliant robotic gripper based on layer jamming(article)[J]. Journal of Mechanisms and Robotics,2020, 12(5): 051013.
- [130] 魏树军,王天宇,谷国迎. 基于纤维增强型驱动器的气动软体抓手设计[J]. 机械工程学报,2017,53(13): 29–38. Wei Shujun, Wang Tianyu, Gu Guoying. Design of a soft pneumatic robotic gripper based on fiber-reinforced actuator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017,53(13): 29–38. (in Chinese)
- [131] Ellferich J F, Shahabi E, Della S C, et al. Berrytwist: a twisting-tube soft robotic gripper for blackberry harvesting[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2024, 10(1): 429–435.
- [132] Ye Y K, Scharff R B N, Long S F, et al. Modelling of soft fiber-reinforced bending actuators through transfer learning from a machine learning algorithm trained from FEM data[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2024, 368: 115095.
- [133] 李健,戴楚彦,王扬威,等. 面向草莓抓取的气动四叶片软体抓手研制[J]. 哈尔滨工业大学学报,2022,54(1): 105–113. Li Jian, Dai Chuyan, Wang Yangwei, et al. Development of pneumatic four blade soft grasp for grabbing strawberry[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022,54(1): 105–113. (in Chinese)
- [134] Ilievski F, Mazzeo A D, Shepherd R F, et al. Soft robotics for chemists[J]. Angewandte Chemie, 2011, 123(8): 1930–1935.
- [135] 姬江涛,李梦松,赵凯旋,等. 双孢菇柔性仿形采摘末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(1): 104–115. Ji Jiangtao, Li Mengsong, Zhao Kaixuan, et al. Design and experiment of flexible profiling picking end-effector for *Agaricus bisporus*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 104–115. (in Chinese)
- [136] Eskandary P K, Belzile B, Angeles J. Trajectory-planning and normalized-variable control for parallel pick-and-place robots [J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2019, 11(3): 031001
- [137] 李涛,邱权,赵春江,等. 矮化密植果园多臂采摘机器人任务规划[J]. 农业工程学报,2021,37(2): 1–10. Li Tao, Qiu Quan, Zhao Chunjiang, et al. Task planning of multi-arm harvesting robots for high-density dwarf orchards[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(2): 1–10. (in Chinese)
- [138] Hang X S, Yao M, Cheng Q, et al. A novel hand-eye calibration method of picking robot based on TOF camera[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 1099033.
- [139] Tereda A A, Yi S, Sankar J, et al. Trajectory and flow optimization for multi-part, multi-location pick-and-place tasks using nonlinear model predictive control[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2025, 22(1): 20966–20981.

[140] 王立谦,吴蕾. 基于 ARM 的采摘机械手运动控制及避障研究[J]. 农机化研究,2019,41(2): 74-77, 97.
Wang Liqian, Wu Lei. Research on motion control and obstacle avoidance of picking manipulator based on arm[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(2): 74-77, 97. (in Chinese)

[141] 刘德馨,张建成,李媛,等. 采摘机械臂自适应输入整形控制研究[J]. 控制理论与应用,2022,39(6): 1043-1050.
Liu Dexin, Zhang Jiancheng, Li Yuan, et al. Research on adaptive input shaping control of fruits and vegetable harvesting robot arm[J]. Control Theory & Applications, 2022, 39(6): 1043-1050. (in Chinese)

[142] Chen Z W, Chen Y H, Li H, et al. Design and control algorithm of a motion sensing-based fruit harvesting robot[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2025, 12(2): 190-207.

[143] Cos C R, Acosta J Á. Unified force and motion adaptive-integral control of flexible robot manipulators[J]. ISA Transactions, 2025, 158: 586-593.

[144] Zhang P, Dai N Z, Wang Z N, et al. A parallel dual-arm robotic control method of white asparagus based on moving-looking-harvesting coordination and asynchronous harvest cooperation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 232: 110046.

[145] Li H L. A visual recognition and path planning method for intelligent fruit-picking robots[J]. Scientific Programming, 2022, 2022(1): 1297274.

[146] Huang H B, Wang R G, Huang F Q, et al. Analysis and realization of a self-adaptive grasper grasping for non-destructive picking of fruits and vegetables[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 232: 110119.

[147] Chen K W, Li T, Yan T J, et al. A soft gripper design for apple harvesting with force feedback and fruit slip detection[J]. Agriculture, 2022, 12(12): 1802.

[148] Bac C W, Hemming J, Tuijl B, et al. Performance evaluation of a harvesting robot for sweet pepper[J]. Journal of Field Robotics, 2017, 34(6): 1123-1139.

[149] Blanes C, Ortiz C, Mellado M, et al. Assessment of eggplant firmness with accelerometers on a pneumatic robot gripper[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 113: 44-50.

[150] Li S, Sun W, Liang Q K, et al. Assessing fruit hardness in robot hands using electric gripper actuators with tactile sensors [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2024, 365: 114843.

[151] 丁一,姬伟,许波,等. 苹果采摘机器人柔顺抓取的参数自整定阻抗控制[J]. 农业工程学报,2019,35(22): 257-266.
Ding Yi, Ji Wei, Xu Bo, et al. Parameter self-tuning impedance control for compliance grasp of apple harvesting robot[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(22): 257-266. (in Chinese)

[152] Li Z X, He Z, Hao W, et al. Kiwifruit harvesting impedance control and optimization[J]. Biosystems Engineering, 2025, 251: 101-116.

[153] Wake N, Kanehira A, Sasabuchi K, et al. GPT-4V (ision) for robotics: multimodal task planning from human demonstration[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2024, 9(11): 10567-10574.

[154] Li X X, Ma N, Han Y H, et al. AHPPEBot: autonomous robot for tomato harvesting based on phenotyping and pose estimation[C]//2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2024.

[155] 中国新闻网. 新疆莎车县:“机器人”进田地 解农户“采摘之忧”[EB/OL]. (2023-09-01)[2025-12-19]. http://news.cnhubei.com/content/2023-09/01/content_16532243.html.

[156] 李培艺,汪小昆,王延鑫,等. 基于 LiDAR 多维点云优化的茎秆菊花采摘机器人自主导航方法研究[J]. 南京农业大学学报,2024,47(4): 809-822.
Li Peiyi, Wang Xiaochan, Wang Yanxin, et al. Autonomous navigation system for chrysanthemum picking robot based on LiDAR multidimensional point cloud optimization[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2024, 47(4): 809-822. (in Chinese)

[157] 黄冈市农业农村局. 菊花机械化采摘填补国内菊花自动化采收机械空白[EB/OL]. (2024-11-18)[2025-12-19]. <https://nynj.hg.gov.cn/xwdt/xsdt/1246435.html>.