

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.10.010

# 咬合式柑橘采摘末端执行器优化设计与试验

马锒宏<sup>1,2</sup> 余煌<sup>1</sup> 谭励<sup>1</sup> 杜小强<sup>1,3</sup>

(1. 浙江理工大学机械工程学院, 杭州 310018; 2. 浙江省种植装备技术重点实验室, 杭州 310018;

3. 农业农村部东南丘陵山地农业装备重点实验室(部省共建), 杭州 310018)

**摘要:** 针对柑橘自动化采摘末端执行器剪切果柄难度大的问题, 设计了一种采用球形闭合进行咬合剪切果柄的柑橘采摘末端执行器。对柑橘果柄进行剪切力学特性研究, 通过对果柄直径、剪切速度、果柄斜角、树叶阻挡数、刀片间隙5个因素进行剪切试验, 基于最小二乘法多项式拟合建立响应面进行影响因素分析; 对末端执行器进行几何建模, 并以控制刀片间隙为主要约束条件, 以增大拢果定位容差为优化目标建立参数优化模型, 优化后拢果定位容差由9.2%~48.8%提升到26.0%~71.7%; 对关键部件进行了有限元仿真, 仿真得到球壳变形对刀片间隙的影响结果。最后设计柑橘采摘末端执行器样机, 在柑橘果园进行实地采摘剪切性能测试, 直径小于等于4 mm的果柄采摘断柄成功率达95%, 满足柑橘采摘要求。

**关键词:** 柑橘; 采摘; 末端执行器; 咬合式; 剪切

中图分类号: S225.93 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)10-0106-10

OSID:



## Optimization Design and Test of Occlusal End-effector for Picking Citrus

MA Zenghong<sup>1,2</sup> YU Huang<sup>1</sup> TAN Li<sup>1</sup> DU Xiaoqiang<sup>1,3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China

2. Zhejiang Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology, Hangzhou 310018, China

3. Key Laboratory of Agricultural Equipment for Hilly and Mountainous Areas in Southeastern China

(Co-construction by Ministry and Province), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Aiming at the difficulty of citrus automatic picking, a terminal actuator using spherical closure for occlusion and shearing of citrus fruit stalks was designed. Firstly, the shearing mechanical properties of citrus fruit stalks were studied, and the effects of five factors on the peak shear force were analyzed, i. e., stalk diameter (2~4 mm), shear speed (20~200 mm/min), stalk angle (0~75°), number of leaves blocked (0~3 pieces), and blade gap (0.5~2 mm). The test results showed that the peak shear force required to shear citrus fruit stalks was increased with the increase of stalk diameter. With the increase of shear speed, the peak shear force was decreased, but not significantly. The stalk angle was one of the factors affecting the peak shear force. Between 0° and 30°, the stalk angle had little effect on the peak shear force, but when it was between 30° and 70°, the peak shear force was increased significantly with the increase of the stalk angle. The blockage of a few leaves had little effect on the peak shear force. Blade clearance was one of the main factors affecting the peak shear force. Large blade clearance had a great impact on shearing thin stalks, which may be difficult to shear off. Controlling the blade clearance within 1 mm was critical for the success rate of the end effector picking. The geometry modeling of the end-effector was carried out, and the parameter optimization model was established with the main constraint condition of controlling the blade gap and the optimization goal of increasing the fruit positioning tolerance. The fruit positioning tolerance was increased from the original 9.2%~48.8% to 26.0%~71.7%. The static analysis of the model was carried out and the selection of the electric push rod was completed. At the same time, the finite element simulation of the model was carried out, and the

收稿日期: 2024-04-06 修回日期: 2024-05-06

基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2023C02053)、浙江省自然科学基金项目(LGN22C130006、LD24E050006)和国家自然科学基金项目(32372004)

作者简介: 马锒宏(1986—),男,副教授,博士,主要从事农业机器人研究,E-mail: mzhss@126.com

通信作者: 杜小强(1978—),男,教授,博士,主要从事智能农业设备和机械系统设计研究,E-mail: xqiangdu@zstu.edu.cn

influence results of the spherical shell deformation on the blade gap were obtained, and the strength of the structure was checked. Finally, the prototype of the citrus picking end-effector was developed, and the field picking and shearing performance test was carried out in the citrus orchard. For the fruit stalk with a diameter less than or equal to 4 mm, the success rate of the fruit stalk breaking was 95%, meeting the requirements of picking citrus.

**Key words:** citrus; picking; end-effector; occlusal type; shearing

## 0 引言

我国 19 个省(自治区、直辖市)都有柑橘栽培,柑橘产业已成为助推乡村振兴的重要支柱产业<sup>[1]</sup>。据国家统计局发布的数据显示,2022 年我国柑橘产量达  $6.00389 \times 10^7$  t,是我国第一大产量水果<sup>[2]</sup>。

柑橘果柄为木质柄,人工采摘时需要一手握果,一手持采果剪,并且需要使用足够大的握力才能完成柑橘采摘,采摘人员劳动强度大,效率低,亟需发展柑橘自动化采摘行业,同时对果蔬采摘机器人及其末端执行器提出了更高的要求。

苹果、番茄、梨等果实的果柄与枝条存在明显的断裂层,其采摘末端执行器一般仅需依靠夹持力作用下掰折、拉扭等动作就能完成断柄<sup>[3-9]</sup>,而柑橘由于木质柄的原因,仅使用夹持力断柄方式容易对柑橘果实与果柄连接处造成损伤,因此柑橘采摘末端执行器通常需要增加剪切机构。国外对于柑橘采摘末端执行器研究已经有一定基础<sup>[10-12]</sup>, HANNAN 等<sup>[13]</sup>设计了一种通过三指施加正压夹持柑橘进行旋转采摘的末端执行器,虽舍去了剪切机构,但采摘效果并不理想,在柑橘采摘场景中并不适用。国内针对柑橘采摘末端执行器也开始了研究,但大多都是夹持机构和剪切机构相分离,体积较大,采摘时增加了扰动<sup>[14-17]</sup>,或直接省去剪切机构<sup>[18]</sup>。文献[19-22]通过仿生学模仿蛇嘴咬合设计了一种咬合式柑橘采摘末端执行器,将气缸作为动力源实现了咬合剪切动作。YIN 等<sup>[23]</sup>设计了一种带有叉型切割机构的柑橘采摘末端执行器,并在底部安装有激光雷达以控制留柄长度,但拢果定位容差较小,非常依赖于视觉准确定位。上述研究对柑橘采摘末端执行器设计具有借鉴意义。总的来说,具有断柄机构的柑橘采摘末端执行器更符合实际采摘要求,而采用剪切方式断柄,采摘成功率更高,对柑橘损伤率更小,但夹持机构和剪切机构相分离又会使得末端执行器体积过大。剪切形式上双刀片更适合于剪切木质化的果柄,同时,刀片剪切参数对于剪切峰值力和剪切成功率有重要影响。

本文基于柑橘果柄剪切力学试验,设计一个咬合式柑橘采摘末端执行器,采用上下刀片咬合剪切方式断柄采摘,以提高剪切成功率;将剪切机构和夹

持机构相融合,半球形外轮廓能够在枝叶复杂环境中减少扰动空间;柑橘处于球壳内,以防止采摘过程中枝条对柑橘造成损伤。

## 1 柑橘物理特性

对成熟柑橘果实物理特性分析主要包含几何特性分析和果柄剪切力学特性分析,其中几何特性分析是用来确定末端执行器各关键构件尺寸,而果柄剪切力学特性分析是用来判断末端执行器刀片能否切断果柄,并且可以为设计末端执行器提供参考和优化依据<sup>[24-25]</sup>。

### 1.1 柑橘果实几何特性

成熟柑橘果实几何特征研究是设计末端执行器整体结构的基础。本文采摘对象为浙江象山“红美人”柑橘,在 2022 年 11 月 13 日于浙江省金华市浙江景迪生态农业发展有限公司的柑橘种植基地内使用游标卡尺测量柑橘横向、纵向尺寸,如图 1 所示。随机选择 10 棵柑橘树,每棵树随机测量 10 个柑橘,共计 100 个,统计结果如表 1 所示。



(a) 横向尺寸测量

(b) 纵向尺寸测量

图 1 柑橘果实几何尺寸测量

Fig. 1 Citrus geometric size measurement

表 1 柑橘横向、纵向尺寸统计

Tab. 1 Statistics of horizontal and vertical dimensions of citrus

项目	横向尺寸	纵向尺寸
最大值	81.9	79.1
最小值	60.1	54.8
平均值	70.4	64.9

柑橘横向尺寸一般大于纵向尺寸,极个别纵向尺寸大于横向尺寸,呈椭圆形。但横向尺寸和纵向尺寸差值几乎都在 10 mm 之间,因此可以把柑橘果实模型视为直径为 60.1~81.9 mm 的球体。

### 1.2 柑橘果柄剪切力学特性

采用刀片咬合的方式进行柑橘断柄采摘,参考

剪刀的剪切模式,即上下刀片咬合的形式,所以需要 对柑橘果柄的剪切力学进行试验与数据分析。首先 实地对柑橘果柄直径进行测量,同样是随机选择 10 棵柑橘树,每棵树随机选 10 个柑橘的果柄进行测 量,结果如表 2 所示。柑橘果柄直径在 2~4 mm 之 间,呈正态分布,如图 2 所示。

表 2 柑橘果柄直径统计

Tab. 2 Statistics of citrus stalk diameter

果柄直径/mm	数量	果柄直径/mm	数量
0~2.0	2	3.0~3.5	32
2.0~2.5	15	3.5~3.9	8
2.5~3.0	42	>3.9	1

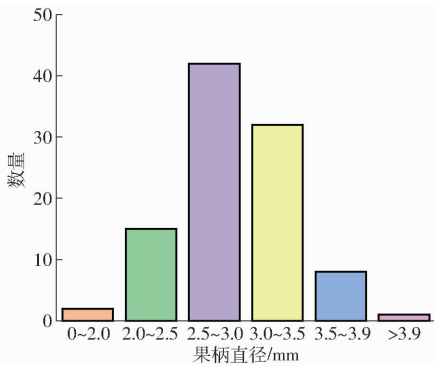
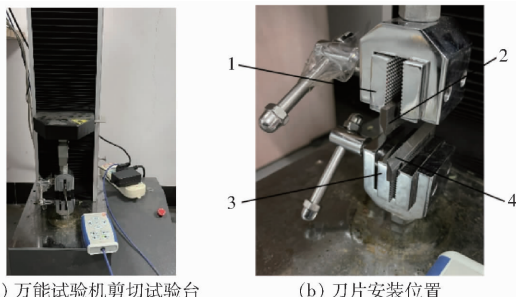


图 2 柑橘果柄直径统计图

Fig. 2 Statistical map of citrus stalk diameter

柑橘果柄剪切力学特性试验的试验仪器为微机 控制电子万能材料试验机(LDW-1型;最大载荷: 50 kg;功率:12 kW;制造商:上海松顿机械设备有 限公司),如图 3a 所示,可以通过配套软件按照设定 的速度上下移动并反馈力和位移等参数到计算机。在 上下两处夹具处安装上刀片,并调整刀片间距,确保 刀片能够有效剪切果柄,如图 3b 所示,刀片厚度为 4 mm,刀刃角度为 30°,刀片材料为 Cr12MoV。试验 中用到的果柄均为 24 h 内剪切的新鲜果柄。



(a) 万能试验机剪切试验台

(b) 刀片安装位置

图 3 柑橘果柄剪切力学试验平台

Fig. 3 Citrus fruit stalk shear mechanics experiment platform

1. 上夹具 2. 下夹具 3. 上刀片 4. 下刀片

在软件界面中可设置剪切速度,并得到剪切力- 时间曲线。根据试验设计和数据处理方法,影响剪 切试验的因素分为可控因素和不可控因素。采摘过

程中,可控因素为剪切速度和刀片间隙,不可控因素 为果柄直径、果柄斜角、树叶阻挡,在试验过程中对 可控和不可控因素下剪切特性均需分析。其中果柄 斜角为果柄轴心线与两刀片剪切时法线夹角  $\gamma$ 。

试验过程中发现剪切力-时间曲线的形状大体 类似,剪切力随着刀片位移慢慢增大,到达一个峰值 后陡降,如图 4 所示。试验中需要测量上述因素对 峰值剪切力的影响,因为剪切机构能提供的最大剪 切力需要比峰值剪切阻抗大才能够成功切断果柄, 并且可以为后续设计末端执行器提供参考和优化依 据。每组试验做 10 组并取平均值,基于最小二乘法 多项式拟合将离散点拟合成相应面。试验参数项及 数值如表 3 所示,每组试验设定 1 个变化参数项(取 变化数值),其余为固定参数项(取默认值)。分别 测试各变化参数项条件下,剪断不同直径柑橘果柄 所需的峰值剪切力。

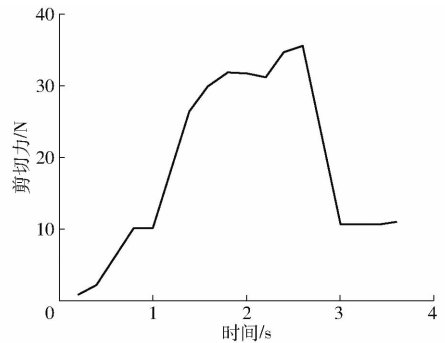


图 4 剪切力-时间曲线

Fig. 4 Shear force-time curve

表 3 剪切试验参数

Tab. 3 Shear test parameters

参数	数值	默认值
剪切速度/( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	20、50、100、200	100
果柄斜角/(°)	0、15、30、45、60、75	0
树叶阻挡数	0、1、2、3	0
刀片间隙/mm	0.5、1、1.5、2	0.5

第 1 组试验测试 4 种不同剪切速度下(20、50、 100、200 mm/min)切断 5 种果柄直径(2.0、2.3、 3.0、3.6、4.0 mm)所需的峰值剪切力,用二阶多项 式拟合模型 Poly22 进行响应面拟合,结果如图 5a 所示,拟合后响应面表达式为

$$z = 19.71 - 12.36x - 0.01981y + 5.215x^2 - 0.01934xy + 0.0001924y^2 \quad (R^2 = 0.9922)$$

(1)

式中  $x$ ——果柄直径,mm

$y$ ——剪切速度,mm/min

$z$ ——峰值剪切力,N

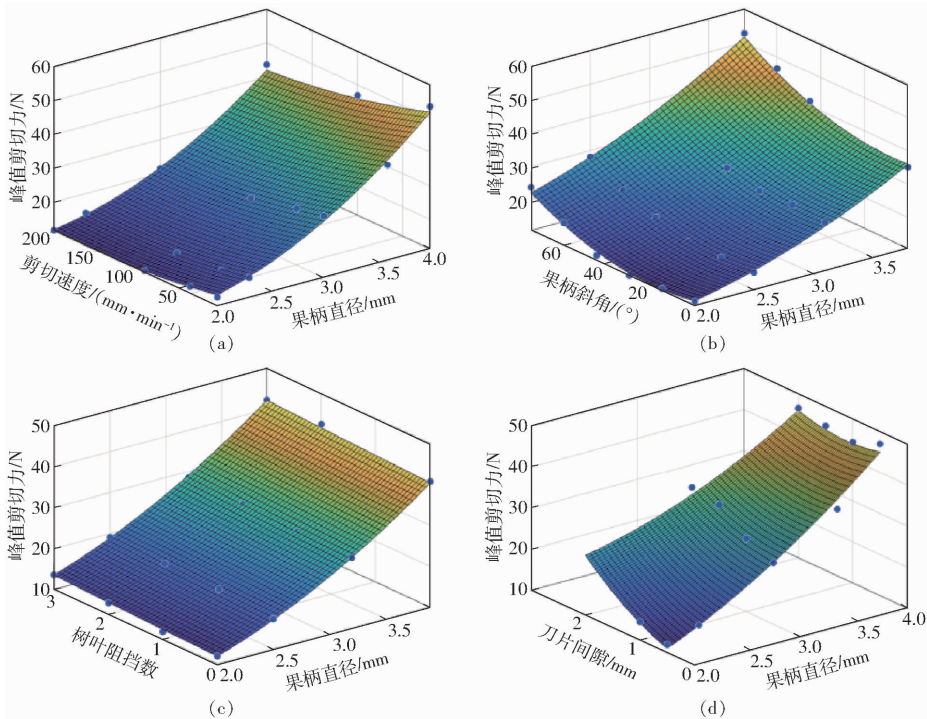


图 5 不同因素下峰值剪切力响应面

Fig. 5 Response surfaces of peak shear force under different factors

第 2 组试验测试 6 种不同果柄斜角 (0°、15°、30°、45°、60°、75°) 下切断 4 种果柄直径 (2.0、2.5、3.1、3.8 mm) 所需的峰值剪切力,用二阶多项式拟合模型 Poly22 进行响应面拟合,结果如图 5b 所示,拟合后的响应面表达式为

$$z = 11.98 - 6.782x - 0.2101y_1 + 3.441x^2 - 0.04275xy_1 + 0.003421y_1^2 \quad (R^2 = 0.9895) \quad (2)$$

式中  $y_1$ ——果柄斜角, (°)

第 3 组试验测试 4 种树叶阻挡数量 (0、1、2、3) 下切断 4 种果柄直径 (2.0、2.5、3.2、3.9 mm) 所需的峰值剪切力,用二阶多项式拟合模型 Poly22 进行响应面拟合,结果如图 5c 所示,拟合后的响应面表达式为

$$z = 6.476 - 3.47x + 0.2907y_2 + 3.119x^2 + 0.06311xy_2 + 0.03125y_2^2 \quad (R^2 = 0.9981) \quad (3)$$

式中  $y_2$ ——树叶阻挡数

第 4 组试验测试 4 种刀片间隙 (0.5、1.0、1.5、2.0 mm) 下切断 5 种果柄直径 (2.0、2.3、3.0、3.6、4.0 mm) 所需的峰值剪切力,用二阶多项式拟合模型 Poly22 进行响应面拟合,结果如图 5d 所示,拟合后响应面表达式为

$$z = -5.504 + 1.593x + 10.75y_3 + 2.901x^2 - 4.19xy_3 + 2.661y_3^2 \quad (R^2 = 0.9737) \quad (4)$$

式中  $y_3$ ——刀片间隙, mm

表 4 为不同刀片间隙、果柄直径下的剪切成功率。

表 4 不同刀片间隙和果柄直径下的剪切成功率

Tab. 4 Shear success rate under different blade gap and stalk diameters

刀片间隙/ mm	果柄直径/mm					%
	2.0	2.3	3.0	3.6	4.0	
0.5	100	100	100	100	100	
1.0	80	100	100	100	100	
1.5	0	50	100	100	100	
2.0	0	0	70	100	100	

从图 5 可看到,剪断柑橘果柄所需的峰值剪切力随着果柄直径增加而增加,并且是影响峰值剪切力最主要的因素。从图 5a 可看到,刀片剪切速度是影响峰值剪切力的因素之一,随着剪切速度的提高,峰值剪切力变小,但并不明显,因此在设计末端执行器时,提升刀片咬合速度并不是首要考虑因素。从图 5b 可以看到,果柄斜角是影响峰值剪切力的因素之一,果柄斜角 0°~30°对峰值剪切力的影响很小,但在 30°~70°之间,随着斜角的增加峰值剪切力明显增加,这为后续视觉定位果柄位姿、控制机械臂的采摘姿态提供了理论依据。从图 5c 可以看到,少数几片树叶的阻挡对峰值剪切力几乎没有影响,所以在末端执行器设计和采摘过程中可以忽略树叶对于刀片咬合断柄的影响。从图 5d 和表 4 可以看到,刀片间隙是影响峰值剪切力的主要因素之一,大间隙对于剪切细果柄影响很大,可能会难以切断。采摘过程中把刀片间隙控制在 1 mm 以内对于末端执行器来说非常关键。

## 2 柑橘采摘末端执行器设计

### 2.1 初步设计

考虑到剪切机构和夹持机构采用不同的动力源将会使机构变得冗余和复杂,增加体积和采摘扰动空间,不符合末端执行器设计初衷和理念。因此本文设计的柑橘采摘末端执行器在结构上进行了创新,剪切机构和夹持机构采用同一个动力源。借鉴人吞食行为,将末端执行器采摘过程类比成一个吞食动作,将剪切果柄刀片类比成动物牙齿,夹持机构类比成动物口腔。得此灵感先确定末端执行器机构简图,如图6所示,其中,图6a为初始状态,图6b为咬合状态,蓝色部分为上刀片支链,红色部分为下刀片支链,点G为上刀片刀刃点,点I为下刀片刀刃点。

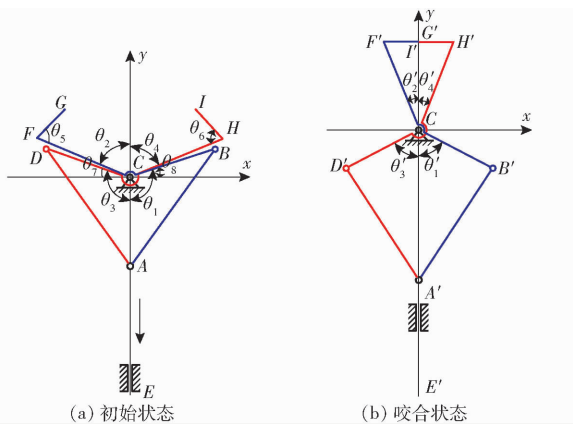


图6 末端执行器机构简图

Fig. 6 Schematic of end-effector mechanism

根据机构简图,为减少扰动空间,并增加剪切完果柄后承载柑橘果实功能,将杆BF和杆DH设计成球壳,并同时把杆AB、杆AD变成弧形连杆,通过Solidworks软件完成初步三维建模,如图7a所示。两个球壳为半径不同的内球壳和外球壳,如图7b、7c所示,通过穿过各自球心且同轴布置的两个铰轴可转动地定位在固定端上,从而实现定轴转动,并且能够避免发生运动干涉。外球壳中间开有通槽,该通槽沿着外球壳赤道部位布置;内球壳连杆接头穿过通槽延伸至外部再与一个弧形连杆的一端用铰轴铰接,外球壳连杆接头则与另一个弧形连杆的一端用铰轴铰接,两个弧形连杆的另一端则通过销轴共同与电推杆铰接。两个球壳与连杆接头相对的方位有两个固定耳,用于固定刀片及刀片座。通过实地测量得到柑橘直径为60.1~81.9 mm,为留有余量,将内球壳内壁直径设计为100 mm。

工作时,携带柑橘采摘末端执行器采摘机器人先通过RGB-D相机实时识别柑橘位姿,随后柑橘采摘末端执行器以斜向上、张开的姿态靠近柑橘。

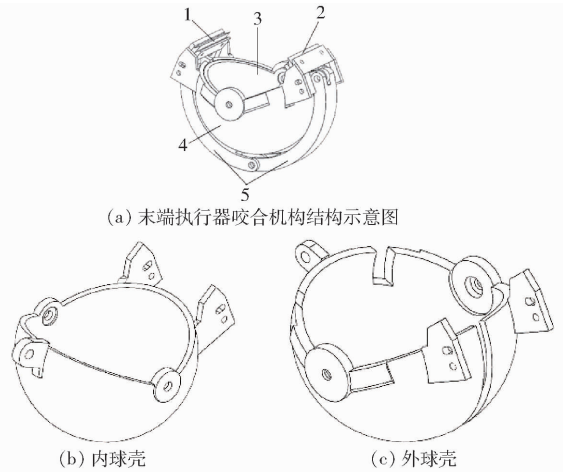


图7 末端执行器初步三维模型

Fig. 7 Preliminary 3D models of end-effector shell

1. 上刀片 2. 下刀片 3. 内球壳 4. 外球壳 5. 弧形连杆

当柑橘完全进入内球壳时,只需将电推杆通电,伸缩杆回缩,拉动弧形连杆向下,带动内外球壳向上转动,实现球形闭合,转动到一定角度时,此时柑橘基本处于球形空腔内,果柄位于两个刀片之间,两个刀片就能对果柄进行剪切。果柄切断后,柑橘位于球形空腔内,被两个球壳所保护,不会被树枝等碰撞发生损伤。末端执行器依靠机械臂移动到收集篮上方后,电推杆伸长,推动弧形连杆向上,带动内外半球壳向下转动,末端执行器慢慢张开,转动到限定位置后,柑橘即可脱离末端执行器,进入收集篮中,从而完成采摘。

### 2.2 柑橘采摘末端执行器几何建模

根据初始三维模型已知

$$l_{AC} = l_{BC} = l_{CD} = 67.5 \text{ mm}$$

$$\theta_1 = \theta_3 = 108.25^\circ$$

$$\theta_2 = \theta_4 = 67.5^\circ$$

$$\theta_7 = \theta_8 = 22.5^\circ$$

式中  $l_{AC}$ ——铰链点A、C之间距离

$l_{BC}$ ——铰链点B、C之间距离

$l_{CD}$ ——铰链点C、D之间距离

$\theta_1$ ——杆BC与y轴初始夹角

$\theta_3$ ——杆CD与y轴初始夹角

$\theta_2$ ——杆CF与y轴初始夹角

$\theta_4$ ——杆CH与y轴初始夹角

$\theta_7$ ——杆CF与x轴初始夹角

$\theta_8$ ——杆CH与x轴初始夹角

根据余弦定理可计算得到

$$l_{AB} = l_{AD} = 109.39 \text{ mm}$$

式中  $l_{AB}$ ——铰链点A、B之间距离

$l_{AD}$ ——铰链点A、D之间距离

在电推杆拉动铰链点A的过程中, $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 、 $\theta_4$

逐渐减小,直至刀片咬合、电推杆到达最大行程,如图 6b 所示。

根据余弦定理得到

$$\begin{cases} \theta'_1 = \arccos((l_{A'C}^2 + l_{BC}^2 - l_{AB}^2)/(2l_{A'C}l_{BC})) \\ \theta'_3 = \arccos((l_{A'C}^2 + l_{CD}^2 - l_{AD}^2)/(2l_{A'C}l_{CD})) \end{cases} \quad (5)$$

式中  $\theta'_1$ ——杆  $BC$  与  $y$  轴的最终夹角

$\theta'_3$ ——杆  $CD$  与  $y$  轴的最终夹角

$l_{A'C}$ ——铰链点  $A'$ 、 $C$  之间的距离

电推杆最大行程决定了末端执行器最终闭合角度,而通过确定最终闭合角度则可以反求出电推杆最大行程。给出闭合角度范围为

$$40^\circ \leq \theta'_2 + \theta'_4 \leq 45^\circ \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} \theta'_2 = \theta_2 - \theta_1 + \theta'_1 \\ \theta'_4 = \theta_4 - \theta_3 + \theta'_3 \end{cases} \quad (7)$$

式中  $\theta'_2$ ——杆  $CF$  与  $y$  轴最终夹角

$\theta'_4$ ——杆  $CH$  与  $y$  轴最终夹角

由式(5)~(7)计算得  $l_{A'C}$  为 121.7 ~ 125.2 mm, 则电推杆行程为 54.2 ~ 57.7 mm, 取电推杆最大行程为 55 mm。根据式(5)~(7)求出  $\theta'_1 = \theta'_3 = 62.65^\circ$ ,  $\theta'_2 = \theta'_4 = 21.9^\circ$ 。

根据笛卡尔坐标系,可得坐标  $F(-l_{CF}\cos\theta_7, l_{CF}\sin\theta_7)$ ,  $H(l_{CH}\cos\theta_8, l_{CH}\sin\theta_8)$ ,  $G(-l_{CF}\cos\theta_7 + l_{FC}\cos(\theta_5 - \theta_7), l_{CF}\sin\theta_7 + l_{FC}\sin(\theta_5 - \theta_7))$ ,  $I(l_{CH}\cos\theta_8 - l_{HI}\cos(\theta_6 - \theta_8), l_{CH}\sin\theta_8 + l_{HI}\sin(\theta_6 - \theta_8))$ 。其中  $\theta_5$  为上刀片与杆  $CF$  的固定夹角,  $\theta_6$  为下刀片与杆  $CH$  的固定夹角,  $l_{CF}$  为铰链点  $C$  与节点  $F$  之间的距离,  $l_{CH}$  为铰链点  $C$  与节点  $H$  之间的距离,  $l_{FC}$  为节点  $F$  与刀尖点  $G$  之间的距离,  $l_{HI}$  为节点  $H$  与刀尖点  $I$  之间的距离。

二维旋转变换公式为

$$\begin{bmatrix} x' & y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中  $(x', y')$ ——旋转后坐标

$(x, y)$ ——旋转前坐标

$\theta$ ——旋转角

点  $F$ 、 $G$  旋转角为  $-90^\circ + \theta_7 + \theta'_2$ , 点  $H$ 、 $I$  旋转角为  $90^\circ - \theta_8 - \theta'_4$ , 计算得到  $F'(-l_{CF}\sin\theta'_2, l_{CF}\cos\theta'_2)$ ,  $H'(l_{CH}\sin\theta'_4, l_{CH}\cos\theta'_4)$ ,  $G'(-l_{CF}\sin\theta'_2 + l_{FC}\cos(\theta_5 + \theta'_2 - 90^\circ), l_{CF}\cos\theta'_2 + l_{FC}\sin(\theta_5 + \theta'_2 - 90^\circ))$ ,  $I'(l_{CH}\sin\theta'_4 - l_{HI}\cos(\theta_6 + \theta'_4 - 90^\circ), l_{CH}\cos\theta'_4 + l_{HI}\sin(\theta_6 + \theta'_4 - 90^\circ))$ 。

## 2.3 柑橘采摘末端执行器参数优化

### 2.3.1 优化模型建立

柑橘采摘咬合剪切关键:①在一定机构尺寸范围内使末端执行器张开时两刀片刀刃点的距离最大,增加拢果定位容差<sup>[26-27]</sup>。②控制整个咬合剪切

过程中刀片间隙在一定范围内且不产生干涉,因此柑橘采摘末端执行器以此为约束条件和优化目标。

为在一定机构尺寸范围内使末端执行器张开时两刀片刀刃点的距离最大,选  $l_{CF}$ 、 $l_{CH}$ 、 $l_{FC}$ 、 $l_{HI}$ 、 $\theta_5$ 、 $\theta_6$  作为变量,即  $\mathbf{X} = (l_{CF}, l_{CH}, l_{FC}, l_{HI}, \theta_5, \theta_6)$ 。

在整个咬合过程中,刀片一共会有 3 种咬合剪切模式,如图 8 所示。

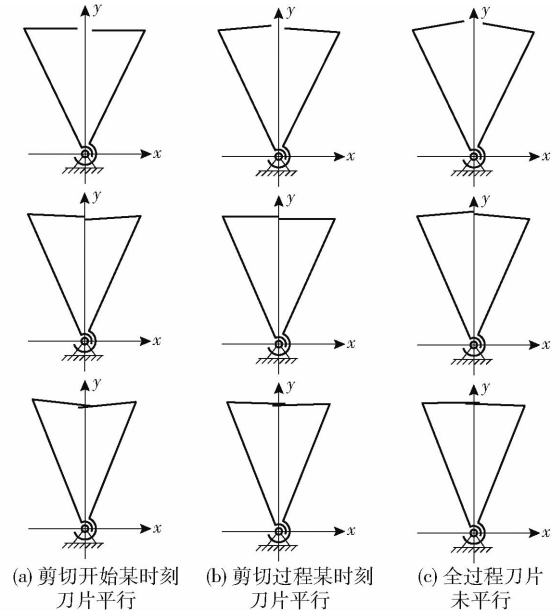


图 8 刀片咬合剪切模式

Fig. 8 Blade bite shear modes

咬合剪切机构张开时两刀片刀刃点距离可表示为

$$l_{GI} = \sqrt{(x_G - x_I)^2 + (y_G - y_I)^2} \quad (9)$$

式中  $l_{GI}$ ——刀刃点  $G$ 、 $I$  之间的初始距离

$x_G$ ——刀刃点  $G$  横坐标

$x_I$ ——刀刃点  $I$  横坐标

$y_G$ ——刀刃点  $G$  纵坐标

$y_I$ ——刀刃点  $I$  纵坐标

优化目标函数为

$$F(\mathbf{X}) = \max(\sqrt{(x_G - x_I)^2 + (y_G - y_I)^2}) \quad (10)$$

为控制整个咬合剪切过程中刀片间隙在一定范围内,将两刀片刀刃点  $G'$ 、 $I'$  到点  $C$  距离之差控制在 0 ~ 1 mm 之间,可使刀片在咬合剪切时刀片间隙在 0 ~ 1 mm 之间,故约束方程为

$$0 \text{ mm} \leq l_{CC} - l_{CI} \leq 1 \text{ mm} \quad (11)$$

其中

$$\begin{cases} l_{CC} = \sqrt{l_{CF}^2 + l_{FC}^2 - 2l_{CF}l_{FC}\cos\theta_5} \\ l_{CI} = \sqrt{l_{CH}^2 + l_{HI}^2 - 2l_{CH}l_{HI}\cos\theta_5} \end{cases} \quad (12)$$

式中  $l_{CC}$ ——铰链点  $C$  与刀刃点  $G$  之间的距离

$l_{CI}$ ——铰链点  $C$  与刀刃点  $I$  之间的距离

为控制整个咬合剪切过程中不产生干涉,使下刀片刀刃点  $I'$  到点  $C$  距离小于杆  $F'I'$  到点  $C$  的距

离,约束方程为

$$l_{C'} \leq l_{CF} \sin \theta_3 \quad (13)$$

为保证剪切成功率,使最终两刀片刀刃点均超过  $y$  轴 2 ~ 3 mm,约束方程为

$$\begin{cases} 2 \text{ mm} \leq x_{C'} \leq 3 \text{ mm} \\ -3 \text{ mm} \leq x_{F'} \leq -2 \text{ mm} \end{cases} \quad (14)$$

式中  $x_{C'}$ ——刀刃点  $G'$  横坐标

$x_{F'}$ ——刀刃点  $I'$  横坐标

最理想的剪切模式是两刀片在整个剪切过程中始终处于平行状态。由于两个刀片随着球壳做圆周运动,因此两个刀片在咬合剪切过程中只能在某一瞬间平行。对于 3 种咬合剪切模式,为了让整个咬合剪切时间段内刀片近乎于平行,把平行的一瞬间设置在整個咬合剪切过程的中间部分,因此就形成如图 8b 所示较理想的第 2 种咬合剪切模式。

咬合结束时刻  $\theta'_2 = \theta'_4 = 21.9^\circ$ ,因此将角度  $\theta_3$ 、 $\theta_6$  限定在  $67^\circ \sim 68^\circ$  之间,即

$$\begin{cases} 67^\circ \leq \theta_3 \leq 68^\circ \\ 67^\circ \leq \theta_6 \leq 68^\circ \end{cases} \quad (15)$$

对于其他需优化变量,条件限定为

$$\begin{cases} 60 \text{ mm} \leq l_{CF} \leq 80 \text{ mm} \\ 60 \text{ mm} \leq l_{CH} \leq 80 \text{ mm} \\ 20 \text{ mm} \leq l_{FG} \leq 50 \text{ mm} \\ 20 \text{ mm} \leq l_{HI} \leq 50 \text{ mm} \end{cases} \quad (16)$$

### 2.3.2 目标函数求解及结果分析

根据建立的优化模型,通过 Matlab 中的 Optimize Live Editor Task 功能,输入优化目标函数和约束条件,选择 fmincon 非线性编程求解器,求解目标函数最值及自定义变量  $\mathbf{X}$ 。

利用自动优化程序进行优化,当算法迭代 25 次,程序自动停止,故通过 fmincon 非线性编程求解器迭代 25 次所得设计变量的值为最终优化结果,优化计算结果为  $\mathbf{X} = (80, 79.987 0, 31.839 3, 31.834 5, 68, 67.975 7)$ ,目标函数值  $F(\mathbf{X}) = 103.169 8 \text{ mm}$ 。与初始设计的机构张开时两刀片刀刃点距离 89.43 mm 相比,增大 15.4%,拢果定位容差计算公式为

$$\eta = \frac{L_g - D_h}{D_h} \times 100\% \quad (17)$$

式中  $L_g$ ——进果最大尺寸,mm

$D_h$ ——果实直径,mm

计算得到拢果定位容差由原来的 9.2% ~ 48.8% 提升到 26.0% ~ 71.7%。较大的拢果定位容差弥补了一定的机械臂运动精准度和视觉识别定位精度,增大了采摘时容错率,并减小了对柑橘果实的损伤率。同时保证了两刀片在咬合剪切时刀片间

隙在 0 ~ 1 mm 之间,提高了采摘成功率。

### 2.3.3 静力学分析

对柑橘采摘末端执行器剪断果柄时刻的静力学进行分析。为表示清晰将该时刻的受力状态拆解成两个图进行分析,如图 9 所示。根据设计,杆  $A'E'$  作为主动件受到电推杆能够承受一定最大负载  $F_A$  的恒定速度拉动,忽略质量和摩擦的影响。

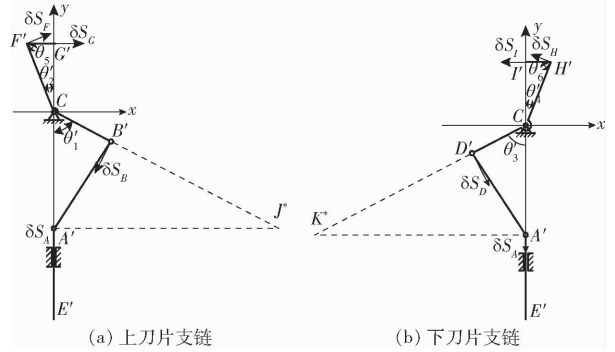


图 9 末端执行器剪切时的受力状态图

Fig. 9 Force state diagram of end-effector during shearing

由于杆  $A'E'$  受到电推杆的拉动,设在接触瞬间杆  $A'E'$  有虚位移,对于上刀片支链,如图 9a 所示,此时杆  $A'B'$  的瞬心为  $J^*$ ,则通过瞬心法可得铰链点  $B'$  处虚位移为

$$\delta S_B = \delta S_A l_{B'J^*} / l_{A'J^*} \quad (18)$$

式中  $l_{B'J^*}$ ——铰链点  $B'$  与瞬心  $J^*$  之间距离

$l_{A'J^*}$ ——铰链点  $A'$  与瞬心  $J^*$  之间距离

由于节点  $F'$  与铰链点  $B'$  处于同一杆件,可计算节点  $F'$  虚位移为

$$\delta S_F = \delta S_B l_{CF} / l_{BC} \quad (19)$$

同理计算得刀尖点  $G'$  虚位移为

$$\delta S_G = \delta S_F \sin \theta_3 \quad (20)$$

对于下刀片支链,如图 9b 所示,此时杆  $A'D'$  瞬心为  $K^*$ ,则通过瞬心法可以得到铰链点  $D'$  处虚位移为

$$\delta S_D = \delta S_A l_{D'K^*} / l_{A'K^*} \quad (21)$$

式中  $l_{D'K^*}$ ——铰链点  $D'$  与瞬心  $K^*$  之间距离

$l_{A'K^*}$ ——铰链点  $A'$  与瞬心  $K^*$  之间距离

由于节点  $H'$  与铰链点  $D'$  处于同一杆件,可计算节点  $H'$  虚位移为

$$\delta S_H = \delta S_D l_{CH} / l_{CD} \quad (22)$$

同理计算得到刀尖点  $I'$  虚位移为

$$\delta S_I = \delta S_H \sin \theta_6 \quad (23)$$

由虚功方程,有

$$F_A \delta S_A - F_C \delta S_C - F_I \delta S_I = 0 \quad (24)$$

式中  $F_C$ ——果柄对上刀片剪切阻抗力

$F_I$ ——果柄对下刀片剪切阻抗力

将式(18)~(23)代入式(24),即可算出果柄对

上下刀片的剪切阻抗力,等同于刀片对果柄的剪切力,即

$$F_l \approx F_G = \frac{F_A l_{BC} l_{A'J^*}}{2 l_{CF} l_{B'J^*} \sin \theta_5} \quad (25)$$

在咬合剪切过程中,  $\theta_5$ 、 $l_{AB}$ 、 $l_{CF}$  都为恒定值,  $l_{A'J^*}/l_{B'J^*}$  不断增大,即剪切过程中电推杆能提供的剪切力不断增大。由电推杆 4 种备选型号可知,提供 4 种最大负载  $F_A$ : 100 N (160 mm/s)、150 N (100 mm/s)、500 N (30 mm/s)、1 000 N (10 mm/s)。剪切完成时能提供的单边剪切力为 50.2、75.3、250.9、501.7 N。由于计算过程中忽略质量和摩擦的影响,并且在剪切开始时的剪切力小于剪切完成时刻,结合前文峰值剪切力学试验选择 500 N (30 mm/s) 的电推杆作为动力元件。

柑橘采摘末端执行器最终三维模型图如图 10 所示。

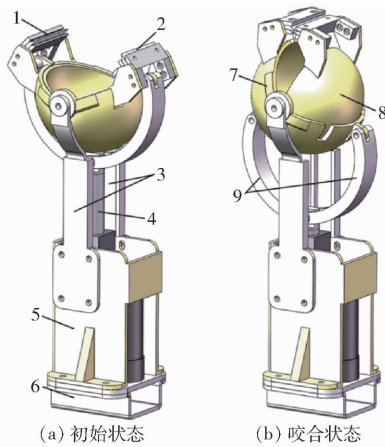


图 10 柑橘采摘末端执行器三维模型

Fig. 10 3D model of citrus picking end-effector

1. 上刀片 2. 下刀片 3. 支架 4. 电推杆 5. 支座 6. 机械臂连接件 7. 外球壳 8. 内球壳 9. 弧形连杆

### 3 结构有限元仿真

对于末端执行器的样机制作,由于两球壳结构复杂,暂不适合机加工,故选择 3D 打印加工。综合

考虑打印精度和强度,选择黄绿树脂。由于 3D 打印材料在剪切过程中会发生韧性变形,需要对其进行有限元仿真。

#### 3.1 参数设置

为了分析球壳在剪切时刻的形变和所受应力,因此对球壳进行瞬态仿真。将 Solidworks 中的三维模型另存为 (\* .x\_t) 格式,导入 ANSYS 中的 workbench 有限元仿真软件中。首先设置刀片、果柄、球壳的 3 种材料参数,刀片材料是 Cr12MoV,果柄这里将其视为一根规则圆柱体,内外密度、弹性模量和泊松比均相同,球壳材料参数用商家给的黄绿树脂物性表参数,如表 5 所示,其余部件均视为刚体。

表 5 有限元材料属性参数

Tab. 5 Finite element material properties

材料	密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	杨氏模量/Pa	泊松比
Cr12MoV	7.85	$2.18 \times 10^{11}$	0.28
果柄	0.992 5	$1.16 \times 10^9$	0.38
黄绿树脂	1.15	$2.70 \times 10^9$	0.42

将导入的模型进行网格划分,单元尺寸设定为 2 mm。网格划分完成后,创建连接,连接分为连接副与接触,对于末端执行器各部件之间,按照装配关系创建连接副,两个支架与地面创建固定副。最后创建果柄与两个刀片之间的接触,由于果柄和刀片先接触,选择接触类型为绑定<sup>[28]</sup>。设置好边界条件后开始仿真求解。

#### 3.2 仿真结果分析

从图 11a 可以看到,上刀片和下刀片在咬合过程中均因为球壳的变形产生  $y$  轴方向上的位移,上刀片刀刃点位移为 0.781 23 ~ 1.253 3 mm,下刀片刀刃点位移为 0.309 18 ~ 0.781 23 mm,两刀片并不会产生错位。两个球壳铰链点处变形量最大达到 -4.411 3 ~ -5.827 5 mm,根据韧性材料特性,需要对其进行位移补偿,才能够有效传递剪切力。根据仿真结果,选择增加电推杆行程 5 mm 作为补偿。

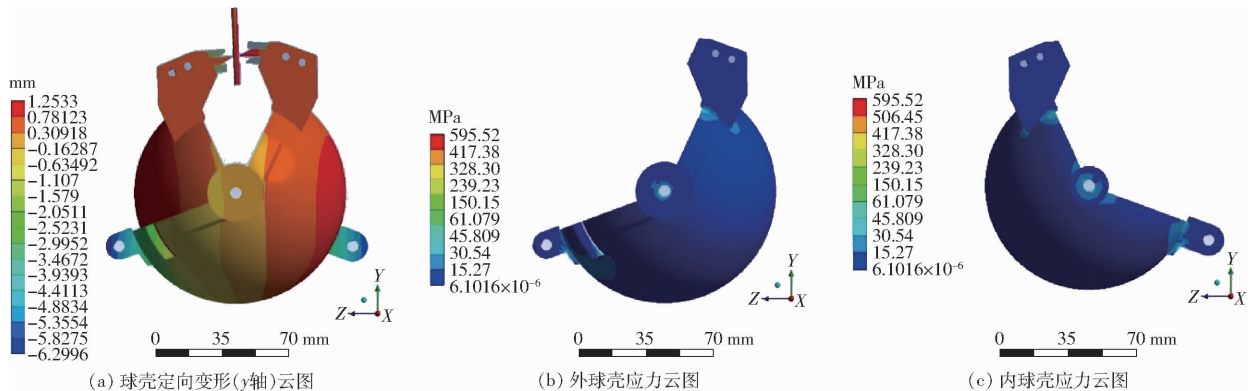


图 11 有限元仿真结果

Fig. 11 Finite element simulation results



最后校核两个球壳的强度是否符合要求。通过两个球壳应力云图,如图 11b、11c 所示,可得其所受的最大应力为 30.54 ~ 45.809 MPa。与商家给出的物性表参数作比较,比拉伸强度 49 ~ 58 MPa 和弯曲强度 69 ~ 76 MPa 都小,强度符合采摘要求。

## 4 柑橘剪切试验

### 4.1 试验条件

为进一步验证柑橘采摘末端执行器的真实剪切性能,设计了柑橘采摘末端执行器样机,如图 12 所示,并于 2023 年 11 月 28 日在浙江省金华市浙江景迪生态农业发展有限公司的柑橘种植基地进行剪切性能试验。试验仪器设备包括柑橘采摘末端执行器样机、游标卡尺和角度测量仪等。

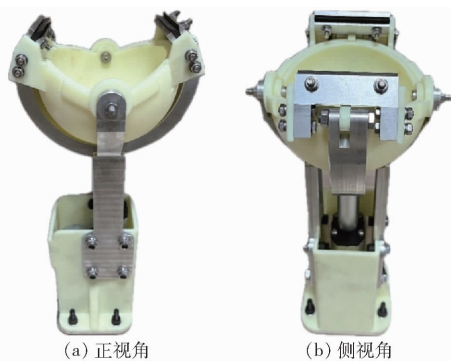


图 12 柑橘采摘末端执行器样机

Fig. 12 Citrus picking end-effector prototype

### 4.2 试验结果及分析

试验选择不同的 10 棵“红美人”柑橘树,共进行 20 次剪切性能试验,如图 13 所示。记录柑橘残留果柄直径、剪切切面斜角和采摘结果,试验结果如表 6 所示。由表 6 可知,柑橘采摘末端执行器剪切性能试验的采摘成功率达到 95%,能够满足柑橘采摘需求。但手持剪切试验只能测试末端执行器对柑橘果实的剪切性能,并不能检验其自动化作业的采摘性能,后续考虑将其集成到柑橘自动化采摘平台的机械臂上进行采摘试验,通过 RGB-D 相机视觉伺服定位柑橘果实实现自动化采摘,并评价其采摘指标。

## 5 结论

(1)实地测量了柑橘尺寸和果柄直径,通过柑



图 13 手持剪切测试

Fig. 13 Hand shear test

表 6 剪切试验测试结果

Tab. 6 Shear test results

序号	果柄直径/mm	断柄斜角/°	采摘结果	序号	果柄直径/mm	断柄斜角/°	采摘结果
1	3.1	11	成功	11	3.3	10	成功
2	3.1	0	成功	12	3.9	15	成功
3	2.8	14	成功	13	2.9	22	成功
4	3.6	22	成功	14	2.6	0	成功
5	3.2	6	成功	15	2.5	6	成功
6	2.6	33	成功	16	3.0	17	成功
7	4.0	8	成功	17	3.9	30	失败
8	4.0	12	成功	18	3.2	17	成功
9	3.5	3	成功	19	3.0	35	成功
10	2.7	25	成功	20	2.3	10	成功

橘果柄剪切力学试验平台进行了柑橘果柄剪切力学试验,得到了不同因素下对峰值剪切力的影响。

(2)针对柑橘果园场景,设计了一种柑橘采摘末端执行器。该末端执行器采用球形闭合进行咬合剪切果柄,进而实现柑橘采摘,结构紧凑,扰动空间小,并能保证柑橘果实在球壳内不被枝条蹭伤。

(3)对末端执行器建立了参数优化模型,以控制刀片间隙为主要约束条件,以增大拢果定位容差为优化目标,拢果定位容差由 9.2% ~ 48.8% 提升到 26.0% ~ 71.7%。

(4)在柑橘果园进行了末端执行器的剪切性能测试,在电推杆最大负载 500 N 下,对于 4 mm 以内的果柄采摘成功率达 95%,可以满足采摘柑橘要求。

## 参 考 文 献

- [1] 杨红,伍小雨,全津莹,等. 四川柑橘产业现状及发展对策[J]. 东南园艺,2021,9(3):55-60.  
YANG Hong, WU Xiaoyu, QUAN Jinying, et al. Current situation and development countermeasures of citrus industry in Sichuan Province[J]. Southeast Horticulture, 2021, 9(3): 55-60. (in Chinese)
- [2] 国家统计局. 中国统计年鉴[J]. 北京:中国统计出版社,2023.
- [3] 金波,林龙贤. 果蔬采摘欠驱动机械手爪设计及其力控制[J]. 机械工程学报,2014,50(19):1-8.

- JIN Bo, LIN Longxian. Design and force control of an underactuated robotic hand for fruit and vegetable picking[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(19): 1-8. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] LI Ming, LIU Ping. A bionic adaptive end-effector with rope-driven fingers for pear fruit harvesting[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 211: 1-14.
- [6] 傅隆生,张发年,槐岛芳德,等. 猕猴桃采摘机器人末端执行器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(3): 1-8.  
FU Longsheng, ZHANG Fanian, GEJIMA Y, et al. Development and experiment of end-effector for kiwifruit harvesting robot[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(3): 1-8. (in Chinese)
- [7] 鲍秀兰,马志涛,马萧杰,等. 丘陵果园自然环境下柑橘采摘机器人设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(4): 124-135.  
BAO Xiulan, MA Zhitao, MA Xiaojie, et al. Design and experiment of citrus picking robot in hilly orchard natural environment[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(4): 124-135. (in Chinese)
- [8] 贾江鸣,叶玉泽,程培林,等. 细长果蔬采摘软体气动抓手设计与参数优化[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(6): 26-34.  
JIA Jiangming, YE Yuze, CHENG Peilin, et al. Design and parameter optimization of soft pneumatic gripper for slender fruits and vegetables picking[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(6): 26-34. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] HARRELL R C, SLAUGHTER D C, ADSIT P D. A fruit-tracking system for robotic harvesting[J]. *Machine Vision and Applications*, 1989, 2: 69-80.
- [11] YOU K, BURKS T. Development of a robotic fruit picking end effector and an adaptable controller[C]//*American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2016.
- [12] PARK Y, SEOL J, PAK J, et al. A novel end-effector for a fruit and vegetable harvesting robot: mechanism and field experiment[J]. *Precision Agric.*, 2023, 24(3): 948-970.
- [13] HANNAN M W, BURKS T F. Current developments in automated citrus harvesting[C]//*ASAE Annual Meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2004.
- [14] 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)
- [15] 黎梦婷. 柑橘采摘软体末端执行器的设计与试验[D]. 雅安:四川农业大学, 2022.  
LI Mengting. Design and experiment of citrus harvesting software end-effector[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [16] 秦雪静. 柑橘无损采摘机构末端执行器设计[D]. 重庆:重庆三峡学院, 2021.  
QIN Xuejing. Design of end effector of citrus non-destructive picking mechanism[D]. Chongqing: Chongqing Three Gorges University, 2021. (in Chinese)
- [17] 李子悦. 球形果采摘机器人末端执行器的设计与试验研究[D]. 十堰:湖北汽车工业学院, 2023.  
LI Ziyue. Design and experimental study of end-effector for picking robot of spherical fruit[D]. Shiyan: Hubei University of Automotive Technology, 2023. (in Chinese)
- [18] 虞浪,俞高红,吴浩宇,等. 欠驱动关节型柑橘采摘末端执行器设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(17): 29-38.  
YU Lang, YU Gaohong, WU Haoyu, et al. Design and experiment of the end-effector with underactuated articulars for citrus picking[J]. *Transactions of the CSAE*, 2023, 39(17): 29-38. (in Chinese)
- [19] 王毅. 柑橘采摘机器人咬合式末端执行器关键技术研究[D]. 重庆:重庆大学, 2021.  
WANG Yi. Research on key technology of bite-mode end-effector of citrus harvesting robot[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021. (in Chinese)
- [20] WANG Yi, YANG Yan, YANG Changhui, et al. End-effector with a bite mode for harvesting citrus fruit in random stem orientation environment[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 157: 454-470.
- [21] 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)
- [22] 张茂. 基于果柄剪切特性的柑橘采摘机器人末端执行器研究[D]. 重庆:重庆理工大学, 2018.  
ZHANG Mao. Research on the end-effector of citrus harvesting robot based on shearing characteristics[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2018. (in Chinese)

21(8): 2689.

- [15] 赵磊,赵新华,李彬,等.大范围转动弹性梁柔性动力学建模与扰动解耦[J].农业机械学报,2020,51(1):391-397.  
ZHAO Lei, ZHAO Xinhua, LI Bin, et al. Flexible dynamics modeling and perturbation decoupling of elastic beam in large overall rotation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1):391-397. (in Chinese)
- [16] HOWELL L L, MIDHA A. A method for the design of compliant mechanisms with small-length flexural pivots[J]. Journal of Mechanical Design, 1994, 116(1): 280-290.
- [17] LARRY L H. 柔顺机构学[M].北京:高等教育出版社,2007:108-109.
- [18] 张俊昌.菠萝自动采摘机的优化设计与分析[D].广州:仲恺农业工程学院,2014.  
ZHANG Junchang. Optimal design and analysis of pineapple automatic picker[D]. Guangzhou: Zhongkai College of Agricultural Engineering, 2014. (in Chinese)
- [19] 王月,王建港,齐绪平,等.菠萝采摘装置手持切力机构动力学分析[J].机械设计,2020,37(1):72-76.  
WANG Yue, WANG Jian'gang, QI Xuping, et al. Dynamic analysis on the hand-held shearing force mechanism of the pineapple-picking device[J]. Journal of Machine design, 2020, 37(1):72-76. (in Chinese)
- [20] 傅旻,李晨曦,郑兆启.半自动拧取式菠萝采摘收集机的设计与分析[J].工程设计学报,2020,27(4):487-497.  
FU Min, LI Chenxi, ZHENG Zhaoqi. Design and analysis of semi-automatic screw type pineapple picking-collecting machine [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2020, 27(4): 487-497. (in Chinese)
- [21] 李明,黎泽龙,王润涛,等.菠萝全向定位自动化采摘系统设计[J].南方农机,2023,54(19):45-48.
- [22] 马兴灶,连海山,弓满锋,等.菠萝采摘机械手结构设计与试验[J].山东农业大学学报(自然科学版),2020,51(4):727-732.  
MA Xingzao, LIAN Haishan, GONG Manfeng, et al. Structural design and experiment of pineapple picking manipulator[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2020, 51(4):727-732. (in Chinese)

(上接第 115 页)

- [23] YIN Hesheng, SUN Qixin, REN Xu, et al. Development, integration, and field evaluation of an autonomous citrus-harvesting robot[J]. Journal of Field Robotics, 2023, 40(6): 1363-1387.
- [24] WANG Yi, YANG Yan, ZHAO Hongmei, et al. Effects of cutting parameters on cutting of citrus fruit stems[J]. Biosystems Engineering, 2020, 193: 1-11.
- [25] WANG Yi, LIU Dun, LI Yali, et al. Effects of maturity of citrus fruits on their stalks cutting force[J]. Int. J. Agric. & Bio. Eng., 2022, 15(6): 23-30.
- [26] ZOU Xiangjun, YE Min, LUO Chengyu, et al. Fault-tolerant design of a limited universal fruit-picking end-effector based on vision-positioning error[C]//American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2016.
- [27] 王粮局,张铁中,褚佳,等.大容差高效草莓采摘末端执行器设计与试验[J].农业机械学报,2014,45(增刊):252-258.  
WANG Liangju, ZHANG Tiezhong, CHU Jia, et al. An efficient strawberry harvesting end-effector with large misalignment tolerance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 252-258. (in Chinese)
- [28] 李小平.圣女果采摘机器人末端执行器的结构设计与仿真分析[D].重庆:重庆三峡学院,2023.  
LI Xiaoping. Structure design and simulation analysis of end effector of cherry picking robot[D]. Chongqing: Chongqing Three Gorges University, 2023. (in Chinese)