

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.01.014

欠驱动式茶叶采摘末端执行器优化设计与试验

林桂潮 郑晓鑫 曾文勇 何子健 李汪珩 朱立学

(仲恺农业工程学院机电工程学院, 广州 510220)

摘要: 针对名优茶采摘末端执行器作业成功率低的问题,对一款欠驱动式末端执行器进行优化设计。以英红九号为对象,对其嫩芽的物理和力学特性进行测定;分析末端执行器的结构及工作原理,根据末端执行器在初始、剪切和后抛等3个工作状态下的杆长几何关系建立多个等式和不等式约束条件,以杆长之和最小作为目标函数,运用信赖域寻优算法将总杆长缩短25.33%;对末端执行器进行静力学分析,解得所产生的剪切力为7.0 N,大于剪断茎秆所需的极限剪切力。对夹持位置、生长角度和一芽多叶等关键因素开展单因素试验,结果表明:当夹持位置为4~8 mm、生长角度为70°~90°、采摘对象为单芽或一芽一叶时,末端执行器作业效果达到最佳,成功率为93.30%~95.00%,平均采摘时间为0.64 s,均优于优化前末端执行器。优化后末端执行器作业成功率得到明显提高,体型明显减小。

关键词: 茶叶采摘机器人; 末端执行器; 欠驱动机构; 优化设计; 田间试验

中图分类号: TP391.4; S24

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2025)01-0133-08

OSID:



Optimization Design and Testing of Under-actuated Tea Harvesting End-effector

LIN Guichao ZHENG Xiaoxin ZENG Wenyong HE Zijian LI Wangheng ZHU Lixue

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510220, China)

Abstract: Aiming at the problem of low success rate of the end-effector of famous tea picking, an under-actuated end-effector was optimized. Taking Yinghong 9 as the object, the physical and mechanical properties of its buds were measured. The structure and working principle of the end-effector were analyzed. According to the geometric relationship of the rod length under the three working conditions of initial, shearing and post-throwing, several equations and inequality constraints were established. Taking the sum of the rod lengths as the objective function, the total rod length was shortened by 25.33% by using the trust region optimization algorithm. The static analysis of the end effector showed that the shear force generated was 7.0 N, which was greater than the ultimate shear force required to cut the stem. Single-factor tests were conducted on key variables, including clamping position, growth angle, and the presence of multiple leaves per bud. The results indicated that the picking success rate of the optimized end-effector was increased by 17.47 percentage points to 25.83 percentage points and 11.67 percentage points to 13.33 percentage points in the two single-factor experiments concerning clamping position and growth angle, respectively. The end-effector operated optimally with a clamping position ranged from 4 mm to 8 mm, a growth angle between 70 degrees and 90 degrees, and when the picking object was either a single bud or one bud with one leaf, achieving a success rate of 93.30% to 95% and an average picking time of 0.64 s, both of which were commendable. Following optimization, the success rate of picking operation of the end-effector was significantly enhanced, and the body shape was obviously reduced, providing a technological foundation for the efficient and intelligent mechanized harvesting of premium teas.

Key words: tea picking robot; end-effector; under-actuated mechanism; optimal design; field test

收稿日期: 2024-08-05 修回日期: 2024-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(32101632)、广东省基础与应用基础研究基金项目(2023A1515011496)、梅州市科技计划项目(2023A0304055)、广东省重点建设学科科研能力提升项目(2022ZDJS024)和广东省科技创新战略攀登计划项目(pdjh2023a0257)

作者简介: 林桂潮(1989—),男,副教授,博士,主要从事农业智能采摘装备研究,E-mail: guichaolin@zhku.edu.cn

通信作者: 朱立学(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事农产品采摘技术与装备研究,E-mail: zhulixue@zhku.edu.cn

0 引言

目前,广东省名优茶主要依赖人工手动采摘。近年来采茶工短缺现象日益严重,导致茶叶采摘人工成本高,茶叶经济效益持续下降^[1-4],因此研究茶叶智能采摘机器人非常重要。末端执行器用于分离目标和茎秆,是影响采摘机器人作业效果的关键因素^[5-11]。

许多学者对茶叶采摘末端执行器进行了深入研究。贾江鸣等^[12]通过模拟人手夹住和提拉动作设计一款手持式茶嫩芽采摘机械,采摘成功率仅为74.3%。罗坤等^[13]设计一种捏切组合式采摘器,该采摘器利用盘形凸轮将舵机旋转运动转换为采摘爪的捏切、送和抛等运动,稳定性高,但是结构复杂。陈建能等^[14]通过分体式刀具的刀齿弯曲变形采摘茶叶侧芽,采摘成功率为63%,但它对一芽一叶的可行性未知。周宇杰等^[15]设计一款由变径管套筒、切割机构和负压收集装置组成的末端执行机构。秦广明等^[16]和许丽佳等^[17]使用一对由平行四边形机构组成的机械手采摘茶叶,该机械手缺少收集功能,不利于高效采摘。韩余等^[18]设计一款弧形往复双动式茶叶切割器,芽叶采摘完整率为86.9%;杜哲等^[19]研制一款双动切刀往复式切割器;这两款末端执行器难以用于选择性采摘。郝森等^[20]通过结合人工“提手采”动作,设计一款通过气缸活塞杆带动连杆运动实现夹持和松开动作的仿生采摘指,采摘一芽一叶成功率仅为70%。

为了实现名优茶智能采摘,课题组在前期研制了一种欠驱动式末端执行器^[21],利用平面五杆机构对茶嫩芽进行夹持、剪切和后抛收集,结构简单,但是该执行器存在作业成功率较低、体型大等问题。为此,本文对末端执行器的杆长进行优化设计,以期减小其体型和提升其作业成功率。

1 茶叶嫩芽物理与力学特性分析

以英红九号茶叶为对象,于2024年1月6—7日在广东省农业科学院茶叶研究所白云基地采集了100片茶叶嫩芽(一芽一叶)。使用游标卡尺测量嫩芽长度、宽度和高度,其中高度为芽尖到芽叶交点的距离,长度为主平面上芽叶跨度,宽度为副平面上芽叶跨度,如图1所示。统计结果如表1所示。

采用东莞市智取精密仪器有限公司生产的ZQ-9908-01型电动拉伸压缩试验机(多功能版)作为试验平台(图2),试验机拉力范围为0~500 N,力分辨率为0.01 N,位移分辨率为0.01 mm。使用倾斜角为45°、材料为高速钢的定制

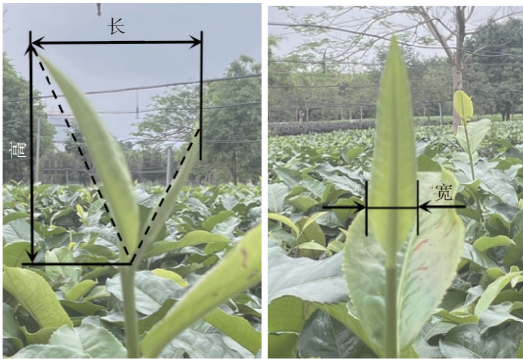


图1 茶叶嫩芽外形结构图

Fig. 1 Shape structure diagram of tea buds

表1 茶叶样本物理参数

Tab. 1 Physical parameters of tea samples mm

统计项	高度	长度	宽度	可夹剪长度
最大值	40.20	35.50	17.40	11.90
最小值	29.10	10.20	7.30	8.10
平均值	31.30	22.50	12.40	10.50
标准差	13.38	22.70	10.39	4.19

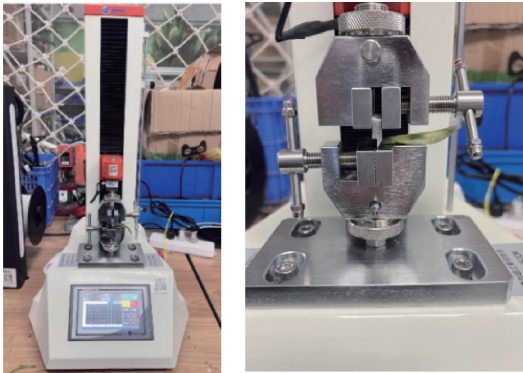


图2 ZQ-9908-01型电动拉伸压缩试验机及试验场景

Fig. 2 ZQ-9908-01 electric tensile compression testing machine and test scene

刀片对100个样本的茎秆进行剪切,记录剪短茎秆所需的剪切力。分析可知,剪断茎秆所需最小剪切力为2.8 N,最大剪切力为4.7 N,平均剪切力为3.5 N。

2 末端执行器结构与原理

为了同时实现茶叶嫩芽的剪切和收集任务,提高采摘机器人作业效率,课题组前期设计了一款欠驱动式采摘末端执行器^[21],如图3所示,由收集抽屉、限位块、曲柄、连杆、阶梯轴、法兰盘、舵机臂、舵机、挡杆、下颚、定制刀片、刀片座、防漏固定盒、机架等组成,其中刀架、定制刀片和刀片座合称为“上颚”。

该末端执行器有4个活动构件,分别为曲柄、连杆、上颚和下颚,旋转副数量为5,自由度为2,是一种欠驱动机构,其工作原理:首先,末端执行器上颚

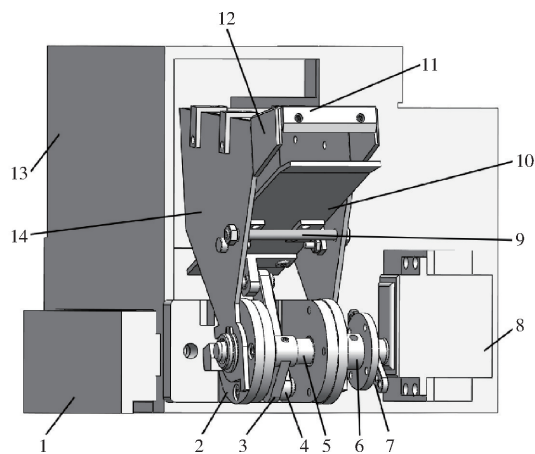


图 3 末端执行器结构示意图

Fig. 3 Schematic of end effector structure

1. 收集抽屉 2. 限位块 3. 曲柄 4. 连杆 5. 阶梯轴 6. 法兰盘 7. 舵机臂 8. 舵机 9. 挡杆 10. 下颚 11. 定制刀片 12. 刀片座 13. 防漏固定盒 14. 刀架

和下颚处于张开状态,在机械臂操控下末端执行器先后运动到茶叶嫩芽的正上方和采摘点位置(图 4a);接着,舵机逆时针旋转,通过舵机臂和阶梯轴带动曲柄旋转,曲柄带动连杆和下颚逆时针旋转,使下颚与上颚相互触碰,进而夹剪茶叶茎秆(图 4b);随后,舵机继续旋转,受下颚和上颚相互紧贴影响,曲柄、连杆、下颚和上颚绕阶梯轴一起做圆周运动(图 4c);接着,刀架在限位块的阻挡下停止运动,曲柄、连杆和下颚停止运动(图 4d);舵机顺时针运动,下颚轻微张开,舵机逆时针运动,下颚、上颚再次闭合,通过下颚轻微张开和闭合进行抖动,使茶叶沿着下颚被抛进收集抽屉(图 4e、4f);舵机顺时针运动,上颚和下颚分开,当下颚碰撞挡杆(图 4g),带动其他零件顺时针旋转,直至复位(图 4h)。该末端执行器结构和原理简单,具有剪切和收集功能,满足茶叶采摘机器人作业需求。

3 机构优化设计

3.1 设计变量

课题组在前期试验中发现,由于机构杆长设计不合理,该执行器存在成功率低和体型大的问题;其中,体型大还使得上颚和下颚等杆件撞击限位块时出现较大冲击力,影响执行器寿命。因此,有必要对执行器各个构件长度进行优化设计。本文将末端执行器近似为一个曲柄摇杆机构(图 5),其中 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 、 l_5 分别为曲柄、连杆、摇杆、机架和杆件长度,摇杆和杆件组成下颚。对 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 进行优化,以完善末端执行器。

3.2 约束条件

在不考虑上颚情况下,末端执行器可视为一种

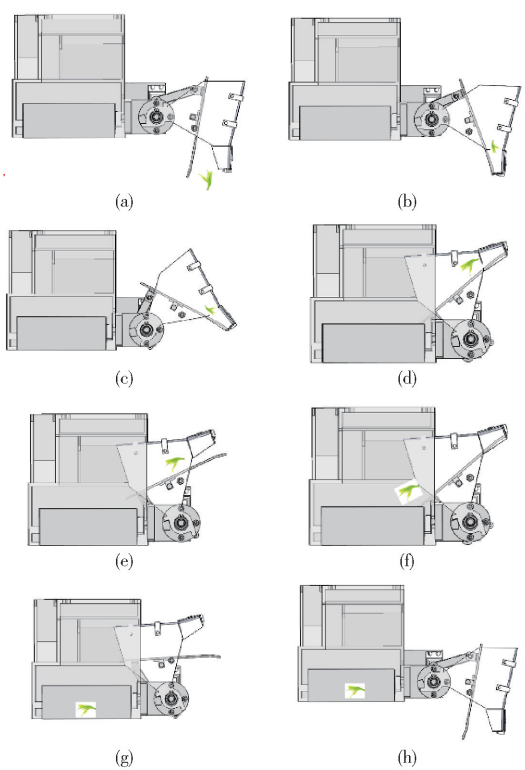


图 4 末端执行器采摘流程图

Fig. 4 End effector picking flowchart

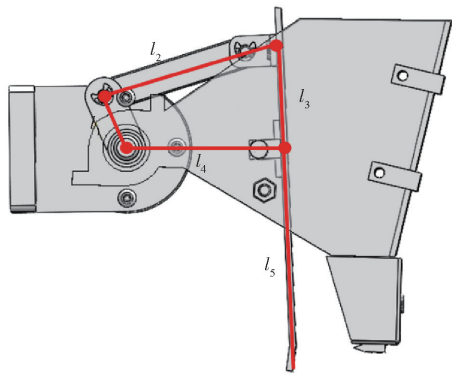


图 5 末端执行器近似曲柄摇杆机构示意图

Fig. 5 Schematic of end effector approximate crank-rocker mechanism

曲柄摇杆机构,有 3 个工作状态:初始状态、剪切状态、后抛状态。在初始状态下,曲柄和连杆共线(图 6 中的黑色线条,各个杆件交点分别为 A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1),下颚处于右极限位置,下颚与机架夹角为 α ;在剪切状态下,曲柄和机架共线(图 6 中的蓝色线条,各个杆件交点分别为 A 、 B 、 C 、 D),曲柄与机架之间的夹角为 180° ,下颚与机架之间的夹角为 β ,此时机构具有最大的传力角 γ ;在后抛状态下(图 6 中的绿色虚线条,各个杆件交点分别为 A_2 、 B_2 、 C_2 、 D_2),茶叶嫩芽会被甩入收集抽屉。设末端执行器在初始状态下颚与铅垂线之间的夹角为 θ_1 ,摇杆与铅垂线之间的夹角为 θ_3 ;剪切状态下下颚与铅垂线之间的夹角为 θ_2 ,摇杆与铅垂线之间的夹角为 θ_4 。

考虑茶叶嫩芽朝向随机,将末端张口设计为对称形状,即 $\theta_1 = \theta_2 = 40^\circ$ 。

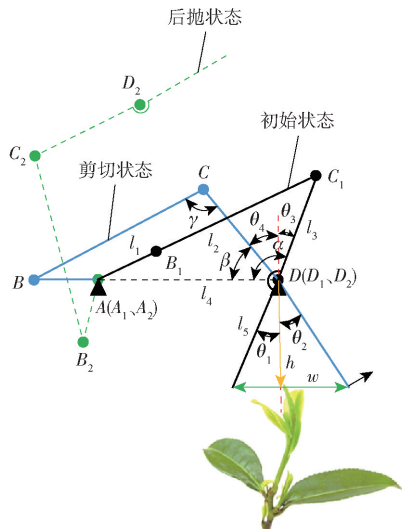


图6 末端执行器各个作业状态示意图
Fig.6 Schematic of each operation state of end effector

在初始状态下,曲柄和连杆共线,由于 θ_1 和 θ_3 互为对顶角,则有

$$\theta_1 = \theta_3 \tag{1}$$

则可得摇杆与水平机架之间的夹角为

$$\alpha = 90^\circ + \theta_1 \tag{2}$$

在 $\triangle A_1 C_1 D_1$ 中,由余弦定理可得

$$\cos\alpha = \frac{l_3^2 + l_4^2 - (l_1 + l_2)^2}{2l_3 l_4} \tag{3}$$

结合公式(1)~(3),可得等式约束关系式

$$\cos(90^\circ + \theta_1) = \frac{l_3^2 + l_4^2 - (l_1 + l_2)^2}{2l_3 l_4} \tag{4}$$

在剪切状态下,曲柄和机架共线,由于 θ_2 和 θ_4 互为对顶角,则有

$$\theta_2 = \theta_4 \tag{5}$$

此时可得摇杆与水平机架之间的夹角为

$$\beta = 90^\circ - \theta_2 \tag{6}$$

在 $\triangle BCD$ 中,由余弦定理可得

$$\cos\beta = \frac{(l_1 + l_4)^2 + l_3^2 - l_2^2}{2l_3 (l_1 + l_4)} \tag{7}$$

结合公式(5)~(7),可得等式约束关系式

$$\cos(90^\circ - \theta_2) = \frac{(l_1 + l_4)^2 + l_3^2 - l_2^2}{2l_3 (l_1 + l_4)} \tag{8}$$

另外在 $\triangle BCD$ 中,可得

$$\cos\gamma = \frac{l_3^2 + l_2^2 - (l_1 + l_4)^2}{2l_2 l_3} \tag{9}$$

由于传力角 γ 过大或过小会影响机构传力效果,将其约束为 $40^\circ \leq \gamma \leq 140^\circ$,据此建立不等式约束关系式

$$\cos 40^\circ \leq \frac{l_3^2 + l_2^2 - (l_1 + l_4)^2}{2l_2 l_3} \leq \cos 140^\circ \tag{10}$$

根据机构可构装配条件,结合末端执行器尺寸,对连杆长度进行约束限制

$$\begin{cases} l_1 \geq 18 \text{ mm} \\ l_1 \leq l_4 - 10 \end{cases} \tag{11}$$

末端执行器在初始状态到剪切状态的运动过程中,本质上是一个曲柄摇杆机构。根据曲柄摇杆机构的存在条件,有不等式约束

$$\begin{cases} l_1 \leq l_2 \\ l_1 \leq l_3 \\ l_1 + \max(l_1, l_2, l_3, l_4) \leq \frac{l_1 + l_2 + l_3 + l_4}{2} \end{cases} \tag{12}$$

3.3 目标函数

为了减低末端执行器质量,减缓冲击,且提高机构的传动性和作业效率,本文将各个连杆的质量之和最小作为优化目标。考虑各个连杆使用材料相同,该优化目标等价于各个杆长长度之和,即

$$L = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 \tag{13}$$

约束条件为式(4)、(8)、(10)~(12)。

3.4 参数求解

为了在满足上述约束条件下得到最佳杆长,使用带约束的信赖域优化算法^[22-23]对目标函数进行优化。信赖域方法是一种用于非线性优化的数值优化方法^[24],带约束的信赖域优化算法为信赖域算法的扩展,在约束范围内最小化或最大化目标函数,通过二次函数逼近目标函数得到信赖域算法子问题,求解局部模型最优解,比较与实际目标函数的优劣,以确定是否接受新解^[25],根据新解结果按规定比率调整信赖域半径,继续求解直到满足迭代终止条件^[26]。本文采用 Python 进行优化计算,通过调用科学计算库 SciPy 中的 optimize 模块实现带约束的信赖域优化算法,以原末端执行器的构件杆长为迭代初值,设置迭代次数为 15,容忍阈值为 0.001;试验平台硬件配置为:Windows 11 操作系统,12th Gen Intel(R) Core(TM) i5 - 12490F CPU, NVIDIA GeForce RTX 4060 显卡,16 GB Kingston 内存。

图 7 显示了连杆长度下降过程,可见信赖域优化算法收敛效率快。表 2 显示了杆长优化前后结果,可见:优化后杆长之和是优化前的 74.67%,明显缩短。

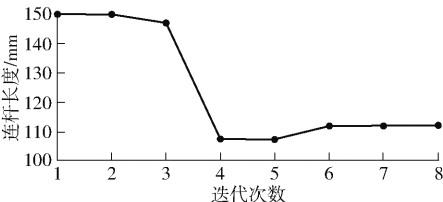


图7 迭代曲线
Fig.7 Iterative curve

表 2 各杆长优化前后数据

Tab. 2 Data of each rod length before and after optimization

参数	优化前	优化后
l_1	18.0	18.0
l_2	50.0	35.3
l_3	24.0	30.7
l_4	58.0	28.0
总计	150.0	112.0

3.5 杆件长度 l_5 求解

茶叶的剪切主要由摇杆和杆件组成的下颚与上颚相向运动来实现。杆件长度 l_5 会影响剪切效果，因此对它进行解算。

杆件长度需使茶叶嫩芽能够进入下颚在初始和剪切状态下所张开的三角形区域,如图 6 所示,设该区域宽度(绿色双向箭头)为 w ,高度(黄色双向箭头)为 h 。由表 1 知茶叶嫩芽高度和长度分别为 29.1 ~ 40.2 mm 和 10.2 ~ 35.5 mm。为了使末端执行器可有效采摘茶叶,取茶叶长度最大值 35.5 mm 作为宽度 w ;取茶叶高度最大值 40.2 mm 作为高度 h 。

根据正弦定理,可推得杆长 l_5 需满足

$$\frac{l_5}{\sin 90^\circ} \geq \frac{35.5}{2 \sin \theta_1} \tag{14}$$

$$\frac{l_5}{\sin 90^\circ} \geq \frac{40.2}{\sin(90^\circ - \theta_1)} \tag{15}$$

结合公式(14)、(15)和 $\theta_1 = 40^\circ$,可得 l_5 取值范围为

$$l_5 \geq 52.4 \text{ mm} \tag{16}$$

为了避免防漏固定盒接触和挤压茶树冠,将 l_5 设定为 65 mm。

4 剪切力分析

为验证优化后机构剪切力是否满足茶叶嫩芽剪切要求,对剪切力进行分析。使用舵机扭矩为 $M = 400 \text{ N} \cdot \text{mm}$ 。在剪切状态下,末端执行器受力情况如图 8 所示,其中 F_1 为舵机对曲柄作用在点 B (曲柄与连杆的连接处)所产生的扭力(扭力方向垂直于曲柄), F_2 为曲柄对连杆的拉力(拉力方向与连杆共线), F'_2 为连杆对摇杆的拉力(拉力方向与连杆共线), F_3 为连杆对摇杆产生的、垂直于摇杆的分力, F_4 为剪切位置的剪切力, φ_1 为 F_1 与 F_2 之间的夹角, φ_2 为 F'_2 与 F_3 之间的夹角, φ_3 为曲柄与连杆之间的夹角。

作用力 F_1 为

$$F_1 = M/l_1 \tag{17}$$

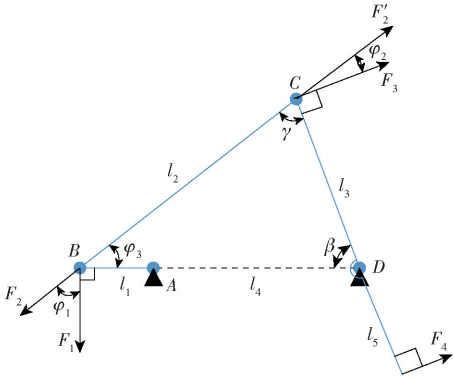


图 8 曲柄摇杆机构剪切状态受力分析
Fig. 8 Force analysis of crank-rocker mechanism in shear state

根据力的平行四边形定则,可推出作用力 F_1 在连杆上的分力 F_2 为

$$F_2 = F_1 \cos \varphi_1 \tag{18}$$

由于连杆为二力杆,可推出作用在点 C 上的作用力 F'_2 为

$$F'_2 = F_2 \tag{19}$$

根据力的平行四边形定则,可推得作用力 F_3 为

$$F_3 = F'_2 \cos \varphi_2 = F_2 \cos \varphi_2 \tag{20}$$

下颚由摇杆和杆件组成,它可视为以点 D 为转动中心的杠杆。根据杠杆原理,可推出作用力 F_4 为

$$F_4 = F_3 l_3 / l_5 \tag{21}$$

结合公式(17) ~ (21),可推出作用力 F_4 为

$$F_4 = (M l_3 \cos \varphi_1 \cos \varphi_2) / (l_1 l_5) \tag{22}$$

在 $\triangle BCD$ 中,由三角形内角和为 180° ,可得

$$\varphi_3 = 180^\circ - \gamma - \beta \tag{23}$$

由于 F_2 、 F'_2 与连杆共线,可推出 φ_1 、 φ_2 分别为

$$\varphi_1 = 180^\circ - \varphi_3 - 90^\circ \tag{24}$$

$$\varphi_2 = 180^\circ - \gamma - 90^\circ \tag{25}$$

结合式(7)、(9)、(23) ~ (25) 以及表 2 中数值,可推出 φ_1 、 φ_2 、 φ_3 分别为 48.08° 、 1.92° 、 41.92° 。

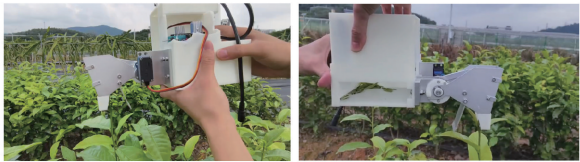
将 $\varphi_1 = 48.08^\circ$ 、 $\varphi_2 = 1.92^\circ$ 、 $l_1 = 18 \text{ mm}$ 、 $l_3 = 30.7 \text{ mm}$ 、 $l_5 = 65 \text{ mm}$ 和 $M = 400 \text{ N} \cdot \text{mm}$ 代入公式(22),可得 $F_4 = 7.0 \text{ N}$,大于剪断茎秆所需的极限剪切力 4.7 N,满足茶叶茎秆的剪切要求。

5 单因素试验

为验证末端执行器优化前后作业性能,对夹持位置、生长角度和一芽多叶共 3 个关键因素进行单因素试验,其中夹持位置指末端执行器上颚和下颚所形成的开口与芽叶交点的距离 H ,生长角度指嫩芽与水平线之间的角度 τ ,如图 9a 所示。试验地点均为仲恺农业工程学院白云校区英红九号试验田,试验时间为 2024 年 4 月 24 日。图 9b 为采摘场景。



(a) 夹持位置与生长角度



(b) 采摘场景

图9 田间采摘试验

Fig.9 Field picking experiment

5.1 夹持位置

在试验中,夹持位置设置为0~4 mm、4~8 mm、8~12 mm等3个水平,生长角度固定为70°~90°,采摘对象固定为一芽一叶。手持末端执行器接近茶叶进行采摘,每个水平试验20次,记录成功次数和作业时间,试验结果如表3所示。

表3 夹持位置单因素试验结果

Tab.3 Single factor test results of clamping position				
夹持位置/ mm	优化后		优化前	
	成功率/%	时间/s	成功率/%	时间/s
0~4	90.00	0.65	64.17	0.71
4~8	92.50	0.63	78.33	0.73
8~12	90.80	0.66	73.33	0.70

由表3可见,夹持位置为0~4 mm时,采摘成功率相较于优化前提升25.83个百分点,采摘时间缩短8.45%;夹持位置为4~8 mm,采摘成功率相较于优化前提升14.17个百分点,采摘时间缩短13.70%;夹持位置为8~12 mm,采摘成功率相较于优化前提升17.47个百分点,采摘时间缩短5.71%。结果表明,在不同夹持位置下,优化后末端执行器作业成功率和效率均优于优化前;当夹持位置为4~8 mm时,末端执行器作业效果达到最佳。

5.2 生长角度

在该试验中,生长角度设置为30°~50°、50°~70°、70°~90°等3个水平,夹持位置固定为4~8 mm,采摘对象固定为一芽一叶。手持末端执行器接近茶叶进行采摘,每个水平试验20次,记录成功次数和作业时间,试验结果如表4所示。

由表4可见,生长角度为30°~50°,采摘成功率相较于优化前提升11.67个百分点,采摘时间缩短9.33%;生长角度为50°~70°,采摘成功率相较于

表4 生长角度单因素试验结果

Tab.4 Single factor test results of growth angle				
生长角度/ (°)	优化后		优化前	
	成功率/%	时间/s	成功率/%	时间/s
30~50	70.00	0.66	58.33	0.72
50~70	87.50	0.63	74.17	0.71
70~90	91.67	0.65	79.17	0.70

优化前提升13.33个百分点,采摘时间缩短9.33%;生长角度为70°~90°,采摘成功率相较于优化前提升12.5个百分点,采摘时间缩短7.14%。结果表明,在不同生长角度下,优化后末端执行器作业成功率和效率均优于优化前;当生长角度为70°~90°时,末端执行器作业效果达到最佳。

另外,当生长角度为30°~50°时,两套末端执行器的成功率均较低,主要原因是上颚和下颚形成的开口难以进入茶叶夹持区域。尽管如此,试验发现生长角度为30°~50°的茶叶较少,对总体成功率影响不大。

5.3 一芽多叶

在该试验中,采摘对象分为单芽、一芽一叶、一芽两叶等3种,夹持位置固定为4~8 mm,生长角度固定为70°~90°。手持末端执行器接近茶叶进行采摘,每个水平试验20次,记录成功次数和作业时间,试验结果如表5所示。

表5 一芽多叶单因素试验结果

Tab.5 Single factor test results of one bud and many leaves				
茶叶类型	优化后		优化前	
	成功率/%	时间/s	成功率/%	时间/s
单芽	95.00	0.63	80.00	0.72
一芽一叶	93.30	0.63	76.67	0.71
一芽两叶	39.17	0.65	39.17	0.75

当采摘对象为单芽时,采摘成功率相较于优化前提升15.00个百分点,采摘时间缩短12.50%;当采摘对象为一芽一叶时,采摘成功率相较于优化前提升16.63个百分点,采摘时间缩短11.27%;当采摘对象为一芽两叶,采摘成功率持平,采摘时间缩短13.33%。结果表明,在不同采摘对象下,优化后末端执行器作业成功率和效率优于优化前;当采摘对象为单芽时,末端执行器作业效果达到最佳。

另外,当采摘对象为单芽和一芽一叶时,优化后末端采摘成功率均接近95%;当采摘对象为一芽两叶时,采摘成功率仅为39.17%,主要原因是一芽两叶的叶片体形大,容易堵塞在末端执行器内部,难以被甩入收集抽屉。因此,本文末端执行器适用于采摘单芽和一芽一叶。

6 结论

(1)测定了英红九号物理和力学特性,一芽一叶长、宽、高、可夹持长度分别为 29.1 ~ 40.2 mm、10.2 ~ 35.5 mm、7.3 ~ 17.4 mm 和 8.1 ~ 11.9 mm; 剪断茎秆所需的剪切力为 2.8 ~ 4.7 N。

(2)应用带约束的信赖域优化算法对欠驱动式茶叶采摘末端执行器杆长进行优化,优化后杆长相较于优化前缩短了 25.33%;静力学分析表明,优化后末端执行器的剪切力为 7.0 N,满足茎

秆剪切要求。

(3)对夹持位置、生长角度和一芽多叶等 3 个关键因素进行单因素试验,可知:在夹持位置和生长角度 2 个单因素试验中,优化后末端执行器采摘成功率分别提升 17.47 ~ 25.83 个百分点和 11.67 ~ 13.33 个百分点,平均采摘时间均约为 0.64 s,均优于优化前末端执行器;当采摘对象为单芽或一芽一叶、夹持位置为 4 ~ 8 mm、生长角度为 70° ~ 90°时,成功率为 93.30% ~ 95.00%,末端执行器作业效果达到最佳。

参 考 文 献

[1] 韩余,肖宏儒,宋志禹,等. 我国茶园机械化作业模式研究[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(3): 74 – 81.
HAN Yu, XIAO Hongru, SONG Zhiyu, et al. Research on mechanization technology mode of tea plantation and management [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2016, 18(3): 74 – 81. (in Chinese)

[2] 梅宇,梁晓. 2023 年我国茶叶产销及进出口形势分析[J]. 中国茶叶, 2024, 46(4): 18 – 26.
MEI Yu, LIANG Xiao. Analysis of China's tea production, sales, import and export situation in 2023[J]. China Tea, 2024, 46(4): 18 – 26. (in Chinese)

[3] 张智浩,朱立学,林桂潮,等. 名优茶采摘末端执行器关键技术研究进展[J]. 现代农业装备, 2022, 43(3): 7 – 12.
ZHANG Zhihao,ZHU Lixue,LIN Guichao, et al. Research progress on key technologies of the famous tea picking end effectors [J]. Modern Agricultural Equipment, 2022, 43(3): 7 – 12. (in Chinese)

[4] 沈童菲,王森培,张慧,等. 中国茶产业国际竞争力评价与发展对策[J]. 四川农业科技, 2019(9): 5 – 11.

[5] 高一聪,许晨,林琼,等. 茶叶生产装备自动化与智能化技术研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2024, 55(7): 1 – 14.
GAO Yicong,XU Chen, LIN Qiong, et al. Tea production equipment automation and intelligent technology research progress and prospects[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 1 – 14. (in Chinese)

[6] 韩豹,申大帅,郭畅,等. 可调节式甘蓝钵苗取苗末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 111 – 120.
HAN Bao, SHEN Dashuai, GUO Chang, et al. Design and experiment of adjustable end-effector of cabbage seedlings [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 111 – 120. (in Chinese)

[7] 崔永杰,卫咏哲,丁辛亭,等. 基于圆柱凸轮的株距可调式取苗末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 104 – 114.
CUI Yongjie, WEI Yongzhe, DING Xinting, et al. Design and experiment of adjustable spacing end-effector based on cylindrical cam[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 104 – 114. (in Chinese)

[8] LI Y, WU S, HE L, et al. Development and field evaluation of a robotic harvesting system for plucking high-quality tea[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 206: 107659.

[9] CHEN C, LU J, ZHOU M, et al. A YOLOv3-based computer vision system for identification of tea buds and the picking point [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 198: 107116.

[10] YANG H, CHEN L, MA Z, et al. Computer vision-based high-quality tea automatic plucking robot using Delta parallel manipulator[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 181(7): 105946.

[11] ZHU Y, WU C, TONG J, et al. Deviation tolerance performance evaluation and experiment of picking end effector for famous tea[J]. Agriculture, 2021, 11(2): 128.

[12] 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)

[13] 罗坤,吴正敏,曹成茂,等. 茶鲜叶嫩梢捏切组合式采摘器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(13): 1 – 9.
LUO Kun, WU Zhengmin, CAO Chengmao, et al. Design and experiment of the combined pinch and cut picker for tea fresh leaf tips[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(13): 1 – 9. (in Chinese)

[14] 陈建能,李杭,刘林敏,等. 分体刀具式名优茶采摘末端执行器设计与试验优化[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1): 39 – 46.
CHEN Jianneng, LI Hang, LIU Linmin, et al. Design and experimental optimization of end effector for picking famous tea with split-cutter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 39 – 46. (in Chinese)

[15] 周宇杰,吴强,贺磊盈,等. 名优茶采摘机器人的系统设计与试验[J]. 机械工程学报, 2022, 58(19): 12 – 23.
ZHOU Yujie, WU Qiang, HE Leiyong, et al. Design and experiment of intelligent picking robot for famous tea[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(19): 12 – 23. (in Chinese)

[16] 秦广明,赵映,肖宏儒,等. 4CZ – 12 智能采茶机器人设计及田间试验[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(1): 152 – 156.

QIN Guangming, ZHAO Ying, XIAO Hongru, et al. 4CZ - 12 intelligent tea harvest robot design and field experiment[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(1): 152 - 156. (in Chinese)

[17] 许丽佳,刘琦,代建武,等. 茶叶嫩梢采摘末端执行器的设计研究[J]. 茶叶科学, 2021, 41(5): 705 - 716.

XU Lijia, LIU Qi, DAI Jianwu, et al. Design of end effector for picking tea shoots[J]. Journal of Tea Science, 2021, 41(5): 705 - 716. (in Chinese)

[18] 韩余,宋志禹,陈巧敏,等. 弧型往复双动式采茶切割器优化与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(24): 35 - 43.

HAN Yu, SONG Zhiyu, CHEN Qiaomin, et al. Optimization and experiment of arc type reciprocating double-acting tea picking cutter[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(24): 35 - 43. (in Chinese)

[19] 杜哲,胡永光,王升. 便携式采茶机切割器运动仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 221 - 226.

DU Zhe, HU Yongguang, WANG Sheng. Simulation and experiment of reciprocating cutter kinematic of portable tea picking machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 221 - 226. (in Chinese)

[20] 郝森,陈勇,潘志刚,等. 名优绿茶仿生采摘指研制[J]. 食品与机械, 2018, 34(10): 86 - 90.

HAO Miao, CHEN Yong, PAN Zhigang, et al. Development of a bionic plucking finger for high-quality green tea[J]. Food and Machinery, 2018, 34(10): 86 - 90. (in Chinese)

[21] 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.

LIN Guichao, CHEN Dingxian, CHEN Jiahui, et al. Design and testing of a shear - collection integrated end-effector for tea picking[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2023, 52(9): 42 - 45. (in Chinese)

[22] 王希云,王庆. 一种基于新锥模型的自适应信赖域算法[J]. 应用数学, 2010, 23(2): 307 - 312.

WANG Xiyun, WANG Qing. An adaptive trust region method on new conic model[J]. Mathematica Applicata, 2010, 23(2): 307 - 312. (in Chinese)

[23] 景书杰,于俊霞. 一个新的BFGS信赖域算法[J]. 数学杂志, 2015, 35(1): 131 - 134.

JING Shujie, YU Junxia. A new BFGS trust region method[J]. Journal of Mathematics, 2015, 35(1): 131 - 134. (in Chinese)

[24] 袁远. 信赖域子问题求解方法及其数值试验研究[J]. 大理大学学报, 2022, 7(6): 1 - 8.

YUAN Yuan. Study on the solution methods and numerical tests of trust region subproblem[J]. Journal of Dali University, 2022, 7(6): 1 - 8. (in Chinese)

[25] 丁玉恒,杨亚新,谢尚平,等. 基于信赖域策略寻优的后退虚源法面源氨扩散模型[J]. 世界核地质科学, 2024, 41(2): 386 - 395.

DING Yuheng, YANG Yaxin, XIE Shangping, et al. Area source radon diffusion model of virtual-point source method based on trust region strategy optimization[J]. World Nuclear Geoscience, 2024, 41(2): 386 - 395. (in Chinese)

[26] 张杰,朱子旋,芮绍平,等. 一种基于L-函数的非单调自适应信赖域算法[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2023, 39(4): 25 - 28.

ZHANG Jie, ZHU Zixuan, RUI Shaoping, et al. A non-monotone adaptive trust region algorithm based on L-function[J]. Journal of Shanxi Datong University(Natural Science Edition), 2023, 39(4): 25 - 28. (in Chinese)