

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

陈建能^{1,2} 陈倩雯¹ 刘林敏³ 贾江鸣^{1,2} 贺磊盈¹ 赵新雨¹ 姚坤¹

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018; 2. 浙江省种植装备技术重点实验室, 杭州 310018;

3. 松阳县农业农村局, 松阳 323400)

摘要: 针对现有的名优茶采摘末端执行器存在结构复杂、单工位工作效率低或切口氧化发红的问题,设计了一种结构简单、工作效率高、采摘质量佳的采摘收集一体旋转式两工位末端执行器。执行器两端软体采摘手指通过正反转循环处于采摘和收集工位,实现采摘与收集功能。通过对末端执行器采收动作进行分析和预试验,得到影响末端执行器采收成功率的因素:舵机臂转角、安装板角速度和硅胶厚度。采用 Box - Behnken 研究各因素对茶叶采收成功率的影响,以采收成功率为响应值建立二次回归模型,得到影响显著性的主次排序为:安装板角速度、舵机臂转角、硅胶厚度。利用 Design-Expert 软件,以采收成功率为目标,对各因素进行优化得到最佳参数:安装板角速度为 $265.329(^{\circ})/s$ 、舵机臂转角为 40° 、硅胶厚度为 4.986 mm 。对优化后的参数取整并进行试验,试验值与预测值相对误差小于 5%。本文研究的旋转式两工位名优茶采摘收集一体末端执行器能够实现茶叶高质量高效采摘和收集。

关键词: 名优茶; 采摘机器人; 末端执行器; 两工位; 旋转式

中图分类号: S225.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)10-0136-09

OSID:



Design and Experiment of Rotating Two Workstations Integrated Effector for Famous Tea Picking and Collection

CHEN Jianneng^{1,2} CHEN Qianwen¹ LIU Linmin³ JIA Jiangming^{1,2} HE Leiying¹ ZHAO Xinyu¹ YAO Kun¹

(1. Faculty of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China

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

3. Bureau of Agriculture and Rural Affairs of Songyang County, Songyang 323400, China)

Abstract: Aiming at the problems of complex structure, low efficiency of single workstation work, or oxidation and redness of cut edges in the existing picking effector of famous tea, a simple structure, high work efficiency, and good picking quality rotary two workstations effector for harvesting and collection was designed. The two effectors of the soft picking fingers were in the picking and collecting station through a forward and reverse cycle, achieving the picking and collecting functions. By analyzing and pre-testing the effector harvesting action, the factors that affected the success rate of effector harvesting were obtained as follows: servo arm angle, installation plate speed, and silicone thickness. Using Box - Behnken to study the influence of various factors on the success rate of tea harvesting, a quadratic regression model was established with the success rate as the response value. The main and secondary order of significance was obtained as follows: installation plate speed, servo arm angle, and silicone thickness. Using Design-Expert software, with the goal of harvesting success rate, various factors were optimized to obtain the best parameters: installation plate angular velocity $\omega = 265.329(^{\circ})/s$, servo arm angle $\Delta\theta = 40^{\circ}$, silicone thickness $d = 4.986\text{ mm}$. The optimized parameters were rounded and experiments were conducted, with a relative error of less than 5% between the experimental and predicted values. The integrated effector of the rotary two workstations famous tea picking and collection system can achieve high-quality and efficient picking and collection.

Key words: famous and premium tea; picking robot; effector; two workstations; rotating type

收稿日期: 2024-02-26 修回日期: 2024-03-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(U23A20175、52305289)、浙江省领雁计划项目(2022C02052)和财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-19)

作者简介: 陈建能(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事机械设计及智能农业装备研究,E-mail: jiannengchen@zstu.edu.cn

0 引言

我国是茶叶生产和消费的大国^[1]。茶叶包括大宗茶和名优茶两类^[2]，其中大宗茶对采摘没有严格要求，而名优茶对采摘要求高^[3-4]，一般是采摘单芽、一芽一叶或一芽二叶初展的新梢^[5]。目前名优茶采摘全部依靠人工^[6]。但是，名优茶的生产季节性强^[7]，劳动密集程度高，采茶劳工市场用工紧缺，极大限制了茶叶产业的发展^[8-9]。研究采茶机器人可以有效解决采茶劳动力不足的问题，对茶产业发展起推动作用^[10-11]。

在名优茶智能化采摘末端执行器研究方面，高凤^[12]设计出刀片剪断后夹持茶叶的采摘末端执行器，此种结构会使茶叶断面发红，影响外观。陈建能等^[13]设计出分体刀具式末端执行器剪切嫩梢，异形刀具会卡入老梗导致剪切失败。郝森等^[14]提出一种可实现“提手采”的茶叶仿生采摘指，通过定位、固定、提拉等动作将新梢的茎拉断，对竖直向上提拉茶叶的定位精度要求极高，可能导致采摘失败。张于学^[15]设计的采茶末端执行器利用夹持机构和提升机构夹持、拉断叶柄，存在打滑问题。以上采摘末端执行器均为单一工位工作，只具备采摘功能，效率和采摘质量不能兼具。

在名优茶采后收集方面，尹俊方等^[16]提出基于“人-机-环境”系统的智能采收名优茶机在采摘结束后，通过机械臂滑动到收集通道口，松开机械夹，茶叶进入收集通道至收集箱。此种来回移动机械臂进行收集的方式效率较低。另有气力式的收集装置，如原艳芳^[17]提出在末端执行器中内筒的两端连接塑料软管，以吹气加吸气的方式收集已采摘鲜叶的方法；文献[18-19]提出通过负压收集茶叶的方式，但负压装置结构复杂，以及容易产生附壁导致堵塞收集管道。这些采茶机的收集装置与采摘装置独立设置，结构复杂。

本文针对上述传统末端执行器单工位工作效率低、采摘和收集分别由 2 个独立部件完成而结构复杂的问题，设计一种结构简单、工作效率高的两工位名优茶采摘末端执行器，将采摘和收集装置集为一体，摒弃结构复杂的吸附装置，并且较机械臂移动收集的方式减少收集时间。同时，利用合适的硅胶作为采摘手指，模仿手工采摘时拇指和食指捏住茶叶嫩梢茎秆后弯折拉断茶叶的提拉方式^[20-22]，以有效提高采摘的名优茶质量。

1 旋转式两工位采摘收集一体末端执行器设计

如图 1 所示，旋转式两工位采摘收集一体的末

端执行器由电机、暂存盒、连接件、采摘手指、安装板、舵机、舵机臂、传动连杆组成。电机固定在连接件上，其输出轴上固定有安装板；暂存盒固定在连接件的另一端上；安装板的两端设有关于安装板的转动中心对称的 2 个采摘手指；舵机固定在安装板上，其输出轴上固定有舵机臂，舵机臂的一端铰接 2 根传动连杆；2 个传动连杆的另一端分别与两侧采摘手指上的螺栓铰接。两工位分别指采摘工位和收集工位，两端软体采摘手指通过正反转循环处于采摘和收集工位。

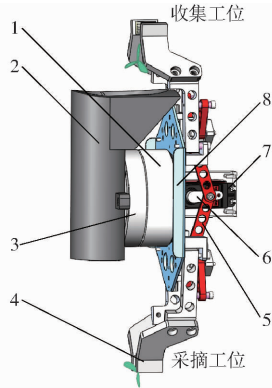


图 1 名优茶采摘末端执行器整体结构示意图

Fig.1 Schematic of overall structure of picking end of premium tea

1. 电机 2. 暂存盒 3. 连接件 4. 采摘手指 5. 传动连杆
6. 舵机臂 7. 舵机 8. 安装板

工作时，通过相机识别到目标嫩梢，控制器控制机械臂移动，采收末端随之移动至目标嫩梢的上方。舵机上的舵机臂逆时针摆动一定角度时，下方的传动连杆受舵机臂的作用力，拉动下方的采摘手指闭合，夹持住目标嫩梢；此时，上方的采摘手指张开，被夹持的嫩梢依靠重力掉进暂存盒中，实现收集功能。电机反转 180°，上方采摘手指转动至下方进行新嫩梢采摘，即采摘手指从收集工位转动至采摘工位；下方手指转动至上方，收集刚才采下的嫩梢，即采摘手指从采摘工位转动至收集工位。接下来依次循环，进行一端采摘、一端收集。

2 采摘手指驱动机构设计

采摘手指驱动机构主要由滑动机构、抓取机构组成，如图 2 所示。其中滑动机构由支承块、滑块、定轨组成。固定在滑块上的支承块受传动连杆力的作用，在定轨上下直动。抓取机构由硅胶安装板、手指安装架、连杆、硅胶组成。工作时，当支承块向上直动时，连杆受到力的作用带动固定在手指安装架上的硅胶安装板和硅胶闭合，夹紧嫩梢的首段茎秆，安装板转动后拉断嫩梢，被拉断的嫩梢受两闭合的硅胶板的夹持作用。当下方的硅胶安装板旋转到暂

存盒的正上方时,支承块受到连杆向上的作用力会使滑块沿着定轨向上直动,硅胶安装板张开,使被硅胶板夹持住的茶叶收集进暂存盒中。

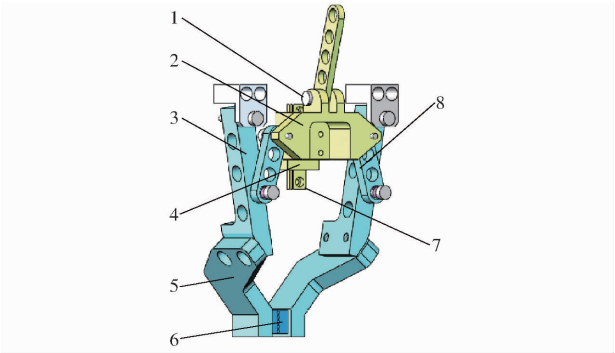


图 2 采摘手指驱动机构
Fig.2 Picking finger drive mechanism

1.螺栓 2.支承块 3.手指安装架 4.滑块 5.硅胶安装板
6.硅胶 7.定轨 8.连杆

3 暂存盒及硅胶夹紧区域设计

2023 年 6 月 13 日,在杭州市余杭区径山产业园的茶叶实验基地随机摘取 50 片一芽两叶的鲜叶,测量物理参数,为末端执行器设计提供基本依据。所测量的物理参数具体含义如图 3 所示。得到茶叶嫩梢物理参数如表 1 所示。

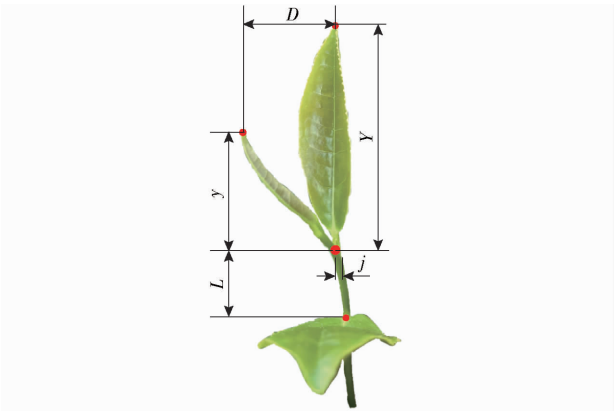


图 3 名优茶参数示意图
Fig.3 Parameters of famous tea

表 1 茶叶嫩梢物理参数统计

Tab.1 Statistics of physical parameters of tea tender tips

参数	最大值	最小值	平均值	标准差
芽叶顶点水平距离 D/mm	32.0	8.5	15.9	7.62
茎粗 j/mm	2.1	1.1	1.7	0.33
芽长 y/mm	14.7	7.5	10.6	2.28
叶长 Y/mm	26.2	16.5	20.8	3.06
首段茎秆长度 L/mm	15.8	10.2	11.6	1.1
茶茎弹性模量 E/MPa	3.2	1.9	2.6	0.5
茶茎密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	813.0	785.3	805.0	11.6

暂存盒口设置 45°楔面,楔面深度 h 为 50 mm,

如图 4 和图 5 所示,利于茶叶落入暂存盒,提高采收成功率。根据表 1 茶叶嫩梢物理参数中的芽叶顶点水平距离 D 、芽长 y 、叶长 Y 的数据统计情况,考虑实际安装限制,设计暂存盒的盒口直径 B 为 150 mm。根据暂存盒至少容纳 50 个嫩梢的设计要求,盒内直径 b 为 100 mm,盒深 H 为 250 mm。



图 4 暂存盒结构示意图
Fig.4 Schematic of temporary storage box structure

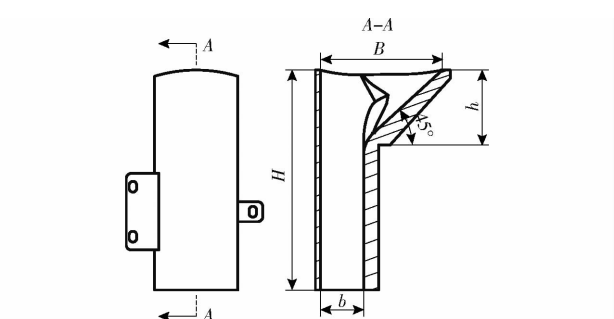


图 5 暂存盒剖视图
Fig.5 Section view of temporary storage box

采摘手指的硅胶尺寸应参考嫩梢的首段茎秆长度,以保证硅胶夹紧区域为嫩梢的首段茎秆。根据表 1 中的首段茎秆长度 L 和茎粗 j 的相关尺寸,设计硅胶为长 8 mm、宽 8 mm、厚度还需进行优化设计的长方体,避免挤压损伤嫩叶与嫩芽。

4 末端执行器关键结构参数设计

4.1 手指驱动机构参数优化

舵机臂转角 $\Delta\theta$ 决定了两端机械手在同一时刻的开合状态,为了保证两工位的顺利工作,需要进行手指驱动机构各杆件长度优化设计。

本末端执行器为上下对称设计,其一端的手指驱动机构如图 6 所示。对称轴为滑块直动所在直线,以点 O 为原点,作如图 6 所示的直角坐标系。曲柄 OA 的转角以 y 轴为起始边,杆件所在直线为终边,定义矢量角逆时针方向为角度的正方向,转角设为 $\Delta\theta_1$,即舵机臂转角。手指驱动机构运动学参数主要有舵机臂 OA 长度 l_1 、连杆 AB 长度 l_2 、滑块中心与铰链点 B 之间的距离 l_3 、滑块中心与铰链点 D 之间的距离 l_4 、连杆 DE 长度 l_5 、手指安装架 FE 段长度 l_6 、手指安装架 EK 段长度 l_7 、舵机臂 OA 与 y 轴转角 $\Delta\theta$ 、连杆 AB 与 y 轴夹角 θ_2 、连杆 DE 与 x 轴

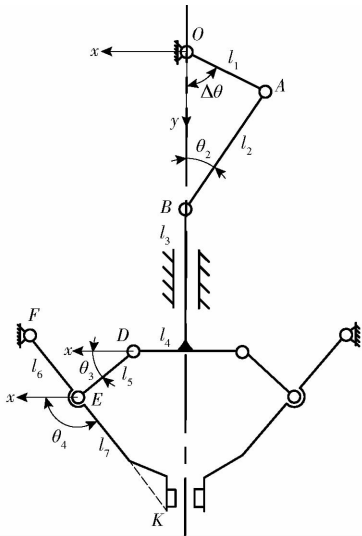


图 6 手指驱动机构简图

Fig. 6 Schematic of finger drive mechanism

夹角 θ_3 和手指安装架 EK 段与 x 轴夹角 θ_4 , 采摘手指夹紧时 EK 段与 x 轴夹角为 $\theta_{4'}$ 。

根据各杆的实际运动方向, 可以将点 A 、 B 、 D 、 E 、 F 5 点坐标分别表示为

$$\begin{cases} x_A = 0 \\ y_A = l_1 \cos \Delta \theta \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} x_B = 0 \\ y_B = y_A + l_2 \cos \theta_2 \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases} x_D = l_4 \\ y_D = y_B + l_3 \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases} x_E = x_D + l_5 \cos \theta_3 \\ y_E = y_D + l_5 \sin \theta_3 \end{cases} \tag{4}$$

$$\begin{cases} x_F = x_E + l_6 \cos \theta_4 \\ y_F = y_E + l_6 \sin \theta_4 \end{cases} \tag{5}$$

由杆长 l_5 、 l_6 可得机构的约束方程为

$$\begin{cases} (x_E - x_D)^2 + (y_E - y_D)^2 = l_5^2 \\ (x_F - x_E)^2 + (y_F - y_E)^2 = l_6^2 \end{cases} \tag{6}$$

假设舵机臂转角 $\Delta \theta$ 为 120° 时, 下端机械手夹紧, 同时上端的机械手张开最大距离; 舵机臂转角 $\Delta \theta$ 为 60° 时, 上端机械手夹紧, 同时下端的机械手张开最大距离。对手指驱动机构进行结构优化, 优化对象为 7 杆的杆长 $l = (l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6, l_7)$, 优化目标为: 采摘手指夹紧时, 连杆 DE 与手指安装架 FE 的传动角最大。约束条件为: ①运动过程中连杆 DE 与曲柄 FE 的传动角小于 90° 且不小于 60° , 以优化机构的传动性能。②点 K 在 x 轴上的运动位移在 $3 \sim 30 \text{ mm}$ 以内, 以满足在硅胶厚度为 3 mm 时, 夹具张开距离大于茶叶宽度。③运动过程中点 K 在 y 轴上移动的距离不能超过 10 mm , 以减少采摘时茶丛中相邻嫩梢的干涉。④铰链点 O 、 F 、 E 、 D 可近似为

曲柄滑块四杆机构, 铰链点 O 、铰链点 F 的距离与杆 DE 长度之和大于等于曲柄 FE 长度与铰链点 O 、铰链点 D 的距离之和来满足杆长条件。⑤铰链点 E 与 y 轴的垂直距离小于铰链点 F 与 y 轴的垂直距离, 以减小刀片张开时的冲击力。⑥为了末端整体结构轻巧, 限制杆长范围为: $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6 \in (0, 60] \text{ mm}$; $l_7 \in [100, 150] \text{ mm}$ 。

对应的约束方程为: ① $90^\circ \geq \theta_4 - \theta_3 \geq 60^\circ$ 。② $0.03 \geq x_F - (l_6 + l_7) \cos \theta_4 \geq 0.003$ 。③ $0.01 - (l_6 + l_7) (\sin \theta_4 - \sin \theta_{4'}) \geq 0$ 。④ $\sqrt{(\sqrt{x_F^2 + y_F^2} + l_5 - l_6)^2 - (l_1 \cos \Delta \theta + l_2 \cos \theta_2 + l_3)^2} - l_4 \geq 0$ 。⑤ $x_F - (l_4 + l_5 \cos \theta_3) \geq 0$ 。目标函数基于约束条件①, 为采摘手指夹紧时, 连杆 DE 与手指安装架 FE 的最大传动角: $\max(\theta_4 - \theta_3)$ 。

根据优化函数以及约束条件, 使用 Matlab 库中的遗传算法函数, 适应度函数 $P = \max(\theta_4 - \theta_3)$, 进行杆长优化。优化收敛过程如图 7 所示, 优化结果如表 2 所示。

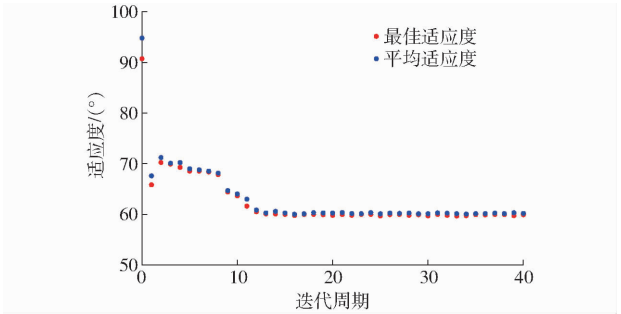


图 7 遗传算法优化收敛过程图

Fig. 7 Convergence process diagram of genetic algorithm optimization

表 2 杆件长度优化结果

Tab. 2 Results for member length optimization

参数	mm						
	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6	l_7
长度	25.1	54.8	10.2	33.4	30.5	49.8	100.1
取整后长度	25	55	10	33	31	50	100

根据优化结果, 适应度函数最优为 $P = 60^\circ$, 即目标函数值为 60° , 选定各杆长度为取整后的数据, 利用 Matlab 软件得到点 K 运动轨迹, 如图 8 所示。点 K 在 x 轴上的运动位移为 28 mm , 在 y 轴上移动的距离为 5 mm 。

4.2 采摘手指硅胶结构设计

将刀具剪断和硅胶拉断的嫩梢断面进行对比, 结果为刀具剪切下的嫩梢断面氧化后发红, 影响茶叶品质, 硅胶拉断的嫩梢断面不发红, 没有折痕等损伤, 与人手采摘的茶叶无差异^[23]。因此, 本设计选用硅胶材料进行名优茶采摘。

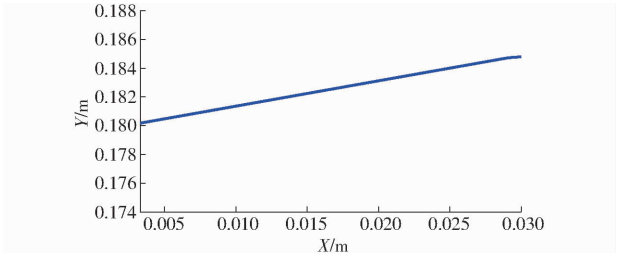


图 8 点 K 运动轨迹

Fig. 8 K-point motion trajectory

硅胶的结构形式会对茶叶摘取产生一定影响,若表面过于平整,摩擦力过小,会使茶叶难以拔下。MOORE^[24]为了准确描述一般情况下的硅胶材料的摩擦特性,提出

$$F = F_a + F_h \tag{7}$$

式中 F ——硅橡胶材料所受摩擦力

F_a ——接触面间因粘附力而产生的粘附摩擦力

F_h ——接触面不平整引起变形而产生的滞后摩擦力^[25]

据式(7),硅胶表面若带有微小凸起,可以增加滞后摩擦力,更顺利地拔断茶叶。预试验中,表面微小凸起的硅胶和表面平整硅胶分别采摘 50 个嫩梢,前者较后者拉断嫩梢的成功率高约 55%。图 9 为带有微小凸起的硅胶在茶叶拉断过程中的滞后摩擦力分析图。

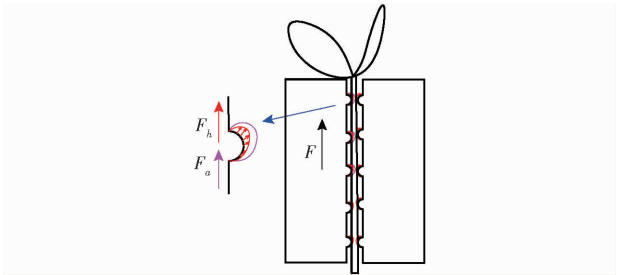


图 9 带有微小凸起的硅胶的摩擦力分析

Fig. 9 Friction analysis of silicone with slight protrusions

4.3 手指硅胶有限元分析及硅胶硬度选择

硬度是材料抵抗局部变形的能力。不同硬度的硅胶在夹紧茶茎时,硅胶的变形和茶茎所受应力分布也不尽相同。在考虑硅胶表面不平整的情况下,选择适当的硅胶硬度对于茶茎避免挤压损伤至关重要。

在 Abaqus 软件中建立硅胶夹块夹紧茶茎的模型,如图 10 所示。茶茎密度和弹性模量参考表 1,泊松比设为 0.3^[26]。硅胶夹块选取邵氏硬度分别为 30 HS、40 HS、50 HS、60 HS 硅胶材料,并分别对不同硬度的硅胶材料夹紧茶叶的动作进行仿真。根据文献[27]中的参数,将不同硬度的材料常数填入 Abaqus 软件,可得到茶茎被不同硬度的硅胶夹块夹紧时的应力图,如图 11 所示。

除了图 11d 硅胶夹紧茶茎时,茶茎有挤压变形,

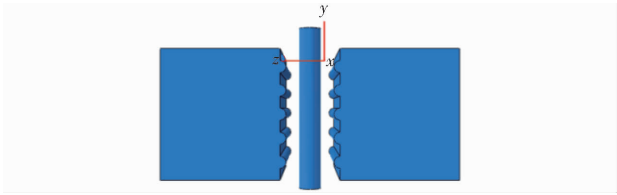


图 10 硅胶夹紧有限元模型

Fig. 10 Finite element model of silicone clamping

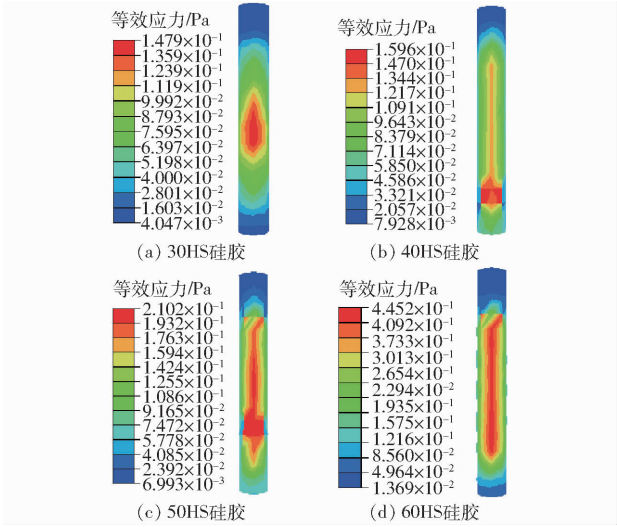


图 11 不同硬度硅胶夹紧茶茎时茶茎的应力分布

Fig. 11 Stress changes of tea stems clamped with silicone gel of different hardness values

其他硬度硅胶夹紧下的茶茎无明显变形。图 11a 中,硅胶在夹紧茶茎时,茶茎受到的最大应力分布最集中且数值最小,说明茶茎受到的损伤最小。

再对其损伤进行试验验证,分别用 30 HS、40 HS、50 HS、60 HS 的硅胶采摘 30 个嫩梢。将采下的嫩梢分组放置在同一平台上,20 min 后,除了 30 HS 硅胶采下的嫩梢几乎无损,其余硬度的硅胶采摘下的嫩梢夹紧处出现明显的氧化现象。因此,本文硅胶硬度选择 30 HS。

5 末端执行器采收成功率影响因素试验优化

5.1 茶叶采收影响因素分析及其参数范围的确定

采收成功率是指作业时成功落入暂存盒的嫩梢数量与采摘嫩梢总次数之比,是评价名优茶采摘机械手的主要性能指标。对该末端执行器进行初步室内采摘的单因素变量试验,分析此末端执行器的采收成功率,确定影响该末端执行器采收嫩梢成功率的因素主要为采摘手指拉断力、夹紧力,这 2 个因素直接影响末端装置对嫩梢茎秆的夹持力和在采摘过程中的稳定性,从而直接影响采收成功率。具体体现为末端装置中的安装板转速、舵机臂转角和硅胶厚度。其他因素如安装板旋转方向等在单因素变量试验操作中,不具有直接的、显著的影响。

采摘手指转动时切向力计算公式为

$$F_t = \frac{m\omega^2}{129\ 600r} \tag{8}$$

式中 F_t ——采摘手指圆周运动时切向力,N
 m ——转动部分质量,kg
 ω ——角速度,(°)/s
 r ——圆周运动半径,m

根据式(8),转动部分质量和转动半径一定时,末端执行器角速度越大,硅胶拉断嫩梢时的瞬时切向力越大,导致局部应力集中增加,更易拉断嫩梢茎秆^[21]。然而,角速度过大可能使装置不稳定,引入更大离心力,若超出茶叶强度,会影响嫩梢质量。因此设定安装板角速度为 $180(^{\circ})/\text{s} \leq \omega \leq 300(^{\circ})/\text{s}$ 。

舵机臂转角影响硅胶夹紧力。舵机臂初始夹角可设定为 90° ,上文计算中舵机臂转角为 30° 。通过压力传感器测量采摘手指夹紧力的预试验可知,硅胶夹具夹紧力随舵机转角增加而增加,当硅胶厚度为 3 mm ,舵机臂转角设定为 50° 时,夹紧力达到极限。因此设定舵机臂转角为 $30^{\circ} \leq \Delta\theta \leq 50^{\circ}$ 。

基于预试验和舵机臂转角的设计,硅胶厚度为 $3\text{ mm} \leq d \leq 7\text{ mm}$ 。过薄的硅胶无法有效地缓解夹持力对茶叶的压力,过厚的硅胶在夹持时可能产生更大的形变,导致硅胶与嫩梢的接触面积增加,嫩梢可能会受过度挤压或者压力分布不均,影响茶叶品质。

5.2 试验设计

对该末端执行器进行 Box - Behnken 茶叶采摘试验,试验因素编码如表 3 所示。为平衡试验效率和效果,在影响末端执行器采收成功率的 3 个因素的可行范围内选择三水平进行试验,分别为最小值、中间值、最大值。

表 3 试验因素编码
Tab.3 Coding of test factors

编码	因素		
	角速度	舵机臂转角	硅胶厚度
	$\omega/(^{\circ})\cdot\text{s}^{-1}$	$\Delta\theta/(^{\circ})$	d/mm
-1	180	30	3
0	240	40	5
1	300	50	7

5.3 试验指标

以此旋转式两工位末端执行器的采收成功率为试验指标,其计算公式为

$$\gamma = \frac{P_s}{P_t} \times 100\% \tag{9}$$

式中 γ ——嫩梢采收成功率,%
 P_s ——成功落入暂存盒的嫩梢(完整的单芽或一芽一叶)数量

P_t ——采摘嫩梢总次数

5.4 试验方案与结果

2023 年 10 月 15 日,在杭州市余杭区径山茶茶叶实验基地使用旋转式两工位名优茶采摘末端执行器进行名优茶(径山茶)采摘试验,试验现场如图 12 所示,试验方案与结果如表 4 所示。

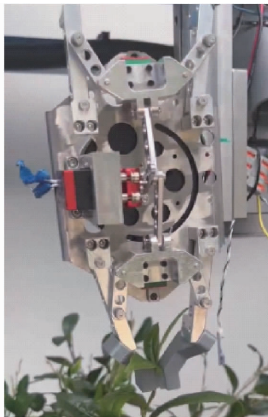


图 12 Box - Behnken 茶叶采摘试验
Fig. 12 Box - Behnken tea picking experiment

表 4 试验方案与结果
Tab.4 Experimental scheme and results

序号	角速度 $\omega/$ $((^{\circ})\cdot\text{s}^{-1})$	舵机臂 转角 $\Delta\theta/(^{\circ})$	硅胶 厚度/ mm	P_s	P_t	$\gamma/\%$
1	180	30	5	45	80	56.25
2	240	40	5	64	80	80.00
3	240	50	7	36	80	45.00
4	240	40	5	65	80	81.25
5	180	40	3	34	80	42.50
6	180	40	7	33	80	41.25
7	240	30	7	57	80	71.25
8	240	50	3	63	80	78.75
9	240	30	3	26	80	32.50
10	300	50	5	70	80	87.50
11	180	50	5	51	80	63.75
12	300	40	3	48	80	60.00
13	300	30	5	54	80	67.50
14	240	40	5	64	80	80.00
15	300	40	7	45	80	56.25
16	240	40	5	68	80	85.00
17	240	40	5	65	80	81.25

5.5 结果分析

5.5.1 回归模型建立与检验

利用 Design-Expert 软件对试验所得的数据进行分析处理得到采摘成功率的回归模型,方差分析见表 5,A、B、C 为角速度、舵机臂转角和硅胶厚度因素编码值。采摘成功率 γ 的回归模型 $P < 0.01$,表明该模型极显著;模型决定系数 R^2 为 0.992 7,表明该模型可以解释 99.27% 以上响应值变化,预测值

与实际值之间具有高度的相关性,试验误差较小。其中 A 、 B 、 BC 、 A^2 、 C^2 对采摘成功率 γ 影响极显著, AB 、 B^2 对采摘成功率 γ 影响显著,说明安装板角速度、舵机臂转角和硅胶厚度对茶叶采摘成功率存在交互影响。因此采用多元回归拟合的方式对试验结果进行处理,得到安装板角速度、舵机臂转角和硅胶厚度对采摘成功率 γ 影响的回归方程为

$$\gamma = 81.40 + 8.50A + 5.75B - 0.25C + 2.75AB - 0.75AC - 17.25BC - 10.33A^2 - 2.32B^2 - 21.33C^2$$

(10)

表 5 回归模型方差分析

Tab.5 Variance analysis of regression model

方差来源	均方	自由度	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	4 604.42	9	106.27	<0.000 1
<i>A</i>	578.00	1	120.06	0.003 9 **
<i>B</i>	264.50	1	54.94	0.001 9 **
<i>C</i>	0.50	1	0.10	0.76
<i>AB</i>	30.25	1	6.28	0.042 8 *
<i>AC</i>	2.25	1	0.47	0.522 1
<i>BC</i>	1 190.25	1	247.23	<0.000 1 **
<i>A</i> ²	448.87	1	93.24	<0.000 1 **
<i>B</i> ²	22.76	1	4.73	0.049 4 *
<i>C</i> ²	1 914.76	1	397.72	<0.000 1 **
残差	33.70	7		
失拟项	16.50	3	1.28	0.375 6
纯误差	17.20	4		
总和	4 638.12	16		

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

5.5.2 交互因素对试验指标影响分析

由表 5 可知,安装板角速度、舵机臂转角和硅胶厚度对茶叶采摘成功率存在交互影响。为进一步分析各因素对采收成功率的影响,利用软件 Design-Expert 绘制各交互因素对采收成功率影响的响应面图,如图 13 所示。

图 13a 为硅胶厚度位于中心水平 5 mm 时,安装板角速度与舵机臂转角对采收成功率的交互影响的响应面图。当舵机臂转角较大时,采收成功率随着角速度的增加而升高,这是因为较大的角速度在拉动茶叶时具有较大的切向速度,利于拉断嫩梢。当角速度一定时,采收成功率随着舵机臂转角的增加而升高,原因是舵机臂转角增加,硅胶夹块对茶叶的夹紧力增加,茶叶受力时不易从硅胶上滑落。

图 13b 为安装板角速度位于中心水平 240 (°)/s 时,舵机臂转角与硅胶厚度对采收成功率的交互影响的响应面图。当硅胶厚度较小时,采收成功率随着舵机臂转角的增加而升高,因为硅胶厚度较小时,舵机臂转角增加,硅胶对茶茎的夹紧力越大,采摘时

嫩梢不易滑落,有效提高采收成功率。当硅胶厚度较大时,采收成功率随着舵机臂转角的减小而升高,原因是舵机臂转角的增加会使具有较大厚度的硅胶产生较大的弹性变形,不利于茶叶采收。

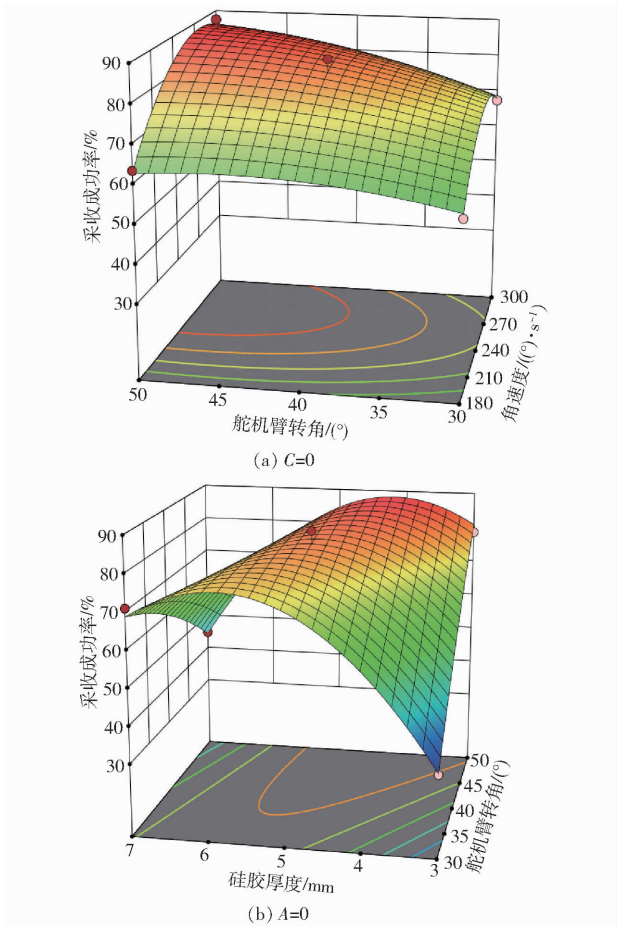


图 13 因素交互作用对采收成功率影响的响应面图
Fig.13 Response surface graphs of factors interaction on recovery success rate

5.5.3 参数优化与试验验证

利用软件 Design-Expert 的 Optimization 功能,以采收成功率最大为目标,对各因素进行优化得到最优参数为:安装板角速度 ω 为 265.329 (°)/s,舵机臂转角 $\Delta\theta$ 为 40°、硅胶厚度 d 为 4.986 mm,采收成功率 γ 为 83.194%。由于加工精度有限,对优化参数取整并试验。其中安装板角速度 ω 为 265 (°)/s,舵机臂转角 $\Delta\theta$ 为 40°,硅胶厚度 d 为 5 mm。试验重复 3 次并取平均值,得到采收成功率为 85%,采收一个目标茶叶的时间仅需 1.2 s;试验值与预测值相对误差小于 5%,表明响应面试验能够有效实现优化。整机试验平台和末端执行器如图 14 所示。

将旋转式两工位的名优茶采摘末端执行器与本团队研发的原单一工位名优茶剪切末端执行器^[5]先后安装至同一采茶整机上进行对比试验,分别收集生长状态大致相同的径山茶 60 个,得到试验数据如表 6 所示。由表 6 可知,旋转式两工位名优茶采



(a) 整机试验平台 (b) 末端执行器

图 14 整机试验平台与末端执行器

Fig. 14 Whole machine experimental platform and end effector

表 6 2 个末端执行器采摘名优茶效果对比

Tab. 6 Comparison of effects of two end-picking famous teas

末端执行器类型	效率/ (个·s ⁻¹)	断面口面	收集方式
原单一工位名优茶 剪切末端执行器	0.451	发红	单独的负压 收集装置
旋转式两工位名优茶 采摘末端执行器	0.833	不发红	采收一体

摘末端执行器的效率提高 85%。同时,采摘的茶叶断面口面不发红。整体机构更简单、紧凑。整体而言,

本末端执行器的名优茶采摘效果更佳。

6 结论

(1)2 个采摘手指旋转交替工作,避免使用结构复杂的收集装置。当电机角速度为 260(°)/s 时,采收一个目标茶叶的时间仅需 1.2 s,与原单一工位名优茶剪切末端对比试验表明,此末端执行器采摘效率提高 85%,采摘和收集效率高。

(2)利用软件 Abaqus 仿真试验和不同硬度硅胶采摘对比试验证明末端执行器选用合适的硅胶以提拉的方式采摘茶叶嫩梢,嫩梢茎秆几乎无损;与原单一工位名优茶剪切末端采摘品质对比,本设计可使断面不发红,提高茶叶品质。

(3)利用 Design-Expert 软件,进行 Box - Behnken 响应面分析,以采收成功率最大为优化目标,得到优化参数:安装板角速度 ω 为 265.329(°)/s、舵机臂转角 $\Delta\theta$ 为 40°、硅胶厚度 d 为 4.986 mm。并对优化后的参数取整,进行试验,3 次试验平均采收成功率为 85%,试验值与预测值的相对误差小于 5%,表明本文所建立的模型和开展的试验正确可靠。

参 考 文 献

[1] 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)

[2] 江新风,李琛,童忠飞,等. 不同修剪处理对春季名优茶机采效果的影响[J]. 蚕桑茶叶通讯,2022(4):22-25.

[3] 黄海涛,毛宇骁,李红莉,等. 茶鲜叶机械化采收装备与技术研究进展[J]. 中国茶叶,2023,45(8):18-23,31. HUANG Haitao,MAO Yuxiao,LI Hongli,et al. Research progress on mechanized harvesting equipment and technology for fresh tea leaves[J]. China Tea,2023,45(8):18-23,31. (in Chinese)

[4] 刘明丽,彭云,许艳艳,等. 我国名优茶机采机制的研究现状[J]. 食品工业,2023,44(5):287-291. LIU Mingli,PENG Yun,XU Yanyan,et al. Research status of mechanized picking mechanism of premium tea in China[J]. Food Industry,2023,44(5):287-291. (in Chinese)

[5] 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 Leiying,et al. Design and experiment of intelligent picking robot for famous tea[J]. Journal of Mechanical Engineering,2022,58(19):12-23. (in Chinese)

[6] 黄家才,唐安,陈光明,等. 基于 Compact-YOLO v4 的茶叶嫩芽移动端识别方法[J]. 农业机械学报,2023,54(3):282-290. HUANG Jiakai,TANG An,CHEN Guangming,et al. Mobile recognition solution of tea buds based on Compact-YOLO v4 algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(3):282-290. (in Chinese)

[7] 袁海波,滑金杰,邓余良,等. 名优绿茶机械化采摘技术[J]. 中国茶叶,2018(6):4-9.

[8] 朱任章. 名优茶采摘机器人结构设计与优化[D]. 南昌:江西农业大学,2022. ZHU Renzhang. Structural design and optimization of famous tea picking robot[D]. Nanchang:Jiangxi Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[9] 汪琳. 基于 SCARA 机械手的采茶机器人研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2020. WANG Lin. Research on the tea picking robot based on SCARA manipulators[D]. Hefei:University of Science and Technology of China,2020. (in Chinese)

[10] 王杰,蔡志坚,吉星. 生计资本对农村家庭创业的影响研究——基于家庭生命周期的异质性视角[J]. 世界农业,2022 (3):109-122. WANG Jie,CAI Zhijian,JI Xing. A study on the impact of livelihood capital on rural household entrepreneurship—a heterogeneous farm household perspective based on the household life cycle[J]. World Agriculture,2022(3):109-122. (in

Chinese)

- [11] 吴爱莲. 乡村产业发展视域下的农村劳动力困境探析——以陇南市徽县为例[J]. 农家参谋,2022(4):16–18.
- [12] 高凤. 名优茶并联采摘机器人结构与仿真[D]. 南京:南京林业大学,2013.
GAO Feng. Structural design and simulation of a high-quality tea parallel plucking robot[D]. Nanjing:Nanjing Forestry University,2013. (in Chinese)
- [13] 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):39–46,195.
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):39–46,195. (in Chinese)
- [14] 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 Machinery, 2018, 34(10): 86–90. (in Chinese)
- [15] 张于学. 一种采茶机的采摘装置:CN212812837U[P]. 2021–03–30.
- [16] 尹俊方,孙虎,冉秋艺. 基于“人-机-环境”系统的智能名优采茶机设计研究[J]. 包装工程,2021,42(12):183–190.
YIN Junfang,SUN Hu,RAN Qiuyi. Design and research of intelligent famous and excellent tea picking machine based on “human-machine-environment” system[J]. Packaging Engineering,2021,42(12):183–190. (in Chinese)
- [17] 原艳芳. 名优茶采摘机械手与采摘策略研究[D]. 武汉:华中农业大学,2017.
YUAN Yanfang. Research on the picking manipulator of famous tea and picking strategy[D]. Wuhan:Huazhong Agricultural University,2017. (in Chinese)
- [18] 陈建能,李杭,任萍,等. 螺旋管吸附式名优茶采收器设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(5):131–139.
CHEN Jianneng,LI Hang,REN Ping,et al. Design and experiment of threaded tube adsorption type famous tea harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(5):131–139. (in Chinese)
- [19] ZHU Y P,WU C Y,TONG J H. Deviation tolerance performance evaluation and experiment of picking end effector for famous tea[J]. Agriculture,2021,11(2):128.
- [20] 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 a handheld mechanical arm for picking tender tea shoots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(5):86–92. (in Chinese)
- [21] 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)
- [22] 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)
- [23] LUO Kun, WU Zhengmin, CAO Chengmao,et al. Biomechanical characterization of bionic mechanical harvesting of tea buds[J]. Agriculture,2022,12(9):1361.
- [24] MOORE D F. The friction of pneumatic tires[M]. New York:Elsevier Scientific,1975.
- [25] 常俊杰,程政. 关于橡胶材料摩擦特性的研究[C]//第八届全国摩擦学大会论文集,2007.
CHANG Junjie,CHENG Zheng. Research on friction characteristics of rubber materials[C]//Proceedings of the 8th National Tribology Conference,2007. (in Chinese)
- [26] 施印炎,陈满,汪小昆,等. 芦蒿有序收获机切割器动力学仿真与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(2):110–116.
SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaochan, et al. Dynamic simulation and experiments on *Artemisia selengensis* orderly harvester cutter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(2):110–116. (in Chinese)
- [27] 罗佳润. 海蚀环境下橡胶隔震支座性能劣化规律研究[D]. 广州:广州大学,2014.
LUO Jiarun. Research on the degradation law of rubber isolation bearings under marine erosion environment[D]. Guangzhou:Guangzhou University,2014. (in Chinese)