

提采式名优茶选择性采摘机构设计与试验

陈霖¹ 宋彦^{1,2} 张航¹ 宁井铭³ 王荣炎^{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;

3. 茶树种质创新与资源利用全国重点实验室, 合肥 230036)

摘要: 目前名优茶主要通过人工采摘, 名优茶的机械化采摘存在茶茎剪切断口发红影响品质、末端执行器尺寸较大影响精准采摘的问题。为此设计了一种模拟手指夹紧茶茎并提拉的末端执行器, 以所测茶叶几何参数、生物力学参数为约束, 设计采摘机构、收集机构各杆件尺寸参数; 通过 Matlab 软件和 Solidworks 软件运动学仿真, 验证收集机构各杆件的尺寸参数。确定采摘成功率的影响因素夹具厚度、采摘高度和夹指张角的参数范围, 采用 Box - Behnken 响应面分析方法, 以采摘成功率为响应值建立二次回归模型, 研究各因素对采摘成功率的交互影响。各因素对采摘成功率的影响显著性主次排序为: 夹指张角、夹具厚度、采摘高度; 以采摘成功率为优化目标优化各因素, 将优化后的各参数最优组合近似处理为: 夹具厚度 6 mm、夹指张角 59°、采摘高度 3 mm。以优化后的参数进行田间试验, 结果表明末端执行器采摘成功率为 91.67%, 试验值与预测值的误差小于 5%, 影响因素优化结果可靠, 表明所设计采摘末端执行器可以达到茶叶高效采摘的要求。

关键词: 名优茶; 末端执行器; 复合曲柄滑块机构; 采摘成功率

中图分类号: S225.99

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)01-0227-12

OSID:



Design and Experiment of Selective Picking Mechanism for Premium Tea with Lifting-picking

CHEN Lin¹ SONG Yan^{1,2} ZHANG Hang¹ NING Jingming³ WANG Rongyan^{1,2}

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

2. Anhui Provincial Engineering Research Center of Intelligent Agricultural Machinery, Hefei 230036, China

3. State Key Laboratory of Tea Plant Germplasm Innovation and Resource Utilization, Hefei 230036, China)

Abstract: Currently premium teas are primarily harvested manually, as mechanical picking faces challenges such as the reddening of tea stem cut surfaces, which affects quality, and the large size of end effectors, impacting precision in picking. An end effector that simulated the action of human fingers in gripping and lifting tea stems was designed. The design of the picking mechanism and collection mechanism components was constrained by the geometric parameters and biomechanical properties of tea leaves, which were measured. Kinematic simulations using Matlab and Solidworks software were conducted to verify the dimensional parameters of the mechanism components. The key factors influencing the picking success rate—gripper thickness, picking height, and gripper opening angle—were identified, and their parameter ranges were determined. The Box - Behnken response surface analysis method was used to establish a quadratic regression model, with the picking success rate as the response value, to explore the interactive effects of these factors on picking success. The significance of each factor's impact on the picking success rate was ranked as follows: gripper opening angle, gripper thickness, and picking height. By optimizing these factors with the picking success rate as the objective, the optimization results were obtained as follows: gripper thickness was 6 mm, gripper opening angle was 59°, and picking height was 3 mm. Field experimental tests using the optimized parameters indicated a picking success rate of 91.67%, with the error between the experimental and predicted values being less than 5%, thereby

收稿日期: 2024-08-27 修回日期: 2024-11-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1601102)和安徽省自然科学基金项目(2308085MC84)

作者简介: 陈霖(1999—), 男, 硕士生, 主要从事智能农业技术与装备研究, E-mail: cl@stu.ahau.edu.cn

通信作者: 宋彦(1983—), 男, 副教授, 博士, 主要从事茶叶加工与品质分析研究, E-mail: songyan@ahau.edu.cn

confirming the reliability of the optimization results, indicating that the designed picking end-effector can meet the requirements for efficient tea picking.

Key words: premium tea; end effector; compound crank block mechanisms; picking success rate

0 引言

茶产业属于劳动密集型产业,目前名优茶主要依赖人工采摘^[1]。但人工采摘的劳动强度大,采摘效率低、成本高,成为制约茶产业持续发展的瓶颈^[2-3]。提高茶叶采摘作业机械化水平可以有效降低茶叶采摘的成本,名优茶机械化采摘的问题亟需解决。

末端执行器作为茶叶采摘设备的核心部件之一,直接作用于目标茶叶,将其采摘下来^[4]。末端执行器的设计问题引起学者广泛关注。原艳芳^[5]设计的末端执行器使用气缸驱动刀片剪切嫩梢,通过吹气加吸气完成收集。林桂潮等^[6]设计了一种平面连杆机构,对茶叶嫩芽进行剪切和抛扬收集。ZHU 等^[7]设计的末端执行器通过钢丝及齿轮控制末端刀片剪切茶叶完成采摘。罗坤等^[8]设计了一种柔性捏切一体采摘爪来完整茶叶采摘。陈建能等^[9]设计的末端执行器采用齿轮传动驱动两环形刀片剪切茶茎,并通过负压进行收集。上述研究均能够实现茶叶采摘,但部分设计采用刀片剪切,这一采摘方式既具有尺寸较小、适用性较强、成功率高的优点,又会使茶茎组织细胞破裂,细胞液中茶多酚成分与空气氧化使得断面变红,降低名优茶的经济效益^[12]。

为避免使用刀片剪切影响茶叶品质,有学者根据人工手采茶叶过程来设计茶叶采摘末端执行器。手工采茶一般使用“提采”的方法,利用拇指和食指指肚将茶叶嫩芽掰断,使用该方式可避免茶茎断口出现发红的情况^[13-14]。郝森^[15]设计了一种通过夹紧、提拉等动作实现茶叶采摘的仿生采摘指机构。贾江鸣团队^[16]设计了一种手持式名优茶嫩梢采摘末端执行器,模拟人手指将茶芽拉断后通过主从动手指的转动将茶叶送至采收盒内。XUE 等^[17]设计了一种夹紧茶茎后将其旋转拉断的采摘末端执行器,并通过传感器检测末端的夹持力。MOTOKURA 等^[18]模拟人手指采茶动作,设计一种具有 3 根手指的 6 自由度拉拔式采茶机械手。许丽佳等^[19]根据茶叶嫩梢的物理特性设计了一种可夹提式采茶末端执行器。王洪成等^[20]提出一种基于鲜叶上下表面摩擦力差异的鲜叶采摘机构,并具有可调的拉拔力。

本文模仿人手捏紧后拉断的采茶方式,设计一

种基于连杆机构传动的提采式名优茶采摘末端执行器。首先测量茶叶的几何参数和部分生物力学参数,以此为约束优化末端执行器的各连杆尺寸参数,并采用小尺寸的采摘机构,避免在采摘过程中与枝条发生干涉。其次采用三因素三水平的 Box - Behnken 响应面分析方法研究采摘夹指各因素对采摘成功率的影响,运用 Design-Expert 10.0 软件对末端执行器的工作参数进行二次回归模型优化,最后进行试验验证。

1 茶叶几何参数及生物力学参数测量

目标茶叶品种为安徽农业大学教学示范基地中的农抗早、安吉白茶,随机选取 60 个新鲜一芽一叶作为样本,对其几何参数、安全夹持力及拉断力进行测量,为后续末端执行器的尺寸参数设计提供依据。

1.1 茶叶几何参数测量

如图 1 所示,使用精度为 0.02 mm、量程为 200 mm 的游标卡尺测量茶茎直径 d_0 、芽叶顶距 a 、芽叶高度 h ,并统计测量结果。



图 1 茶叶几何参数

Fig. 1 Geometric parameters of tea leaves

茶叶几何参数测量结果统计如表 1 所示。结果表明,茶叶样本的芽叶顶距最大值为 45.34 mm,芽叶高度最大值为 34.68 mm,因此采摘时夹指的张开距离取 50 mm,夹指闭合时内部高度取 35 mm。

表 1 茶叶几何参数测量结果

Tab. 1 Measurement results of geometric parameters of tea leaves

统计项	茶叶几何参数		
	茶茎直径	芽叶顶距	茶叶高度
最大值	2.56	45.34	34.68
最小值	1.42	20.96	28.24

1.2 茶茎安全夹持力测量

茶叶采摘时,一直施加在茶茎上的夹持力过大

会对嫩芽茶茎造成损伤,影响茶叶品质^[21]。夹持力直接影响茶茎是否会损伤,因此需要先确定茶茎的夹损力(茶茎被夹至损伤所受的力)大小,并将采摘时夹指的夹持力准确控制在夹损力之内,以保证采摘茶叶的质量。

通过质构仪测试样本的受压突变值,选取 20 个一芽一叶茶茎进行测量,测量工具是 TA.XT 质构仪(北京微讯超技仪器技术有限公司)。质构仪采集到的压力数据为减少茶茎的机械损伤提供重要依据,压力与压缩位移关系曲线如图 2 所示。压缩位移 L 是当质构仪探头开始接触茶茎起探头单向行进的距离,设定无压缩状态的压力为 0.049 N。由图可见,在样本测量过程中,当压缩位移 $L < 0.75$ mm 时,随着探头的下压,茶茎受到的压力逐渐增大,此时茶茎没有明显的塑性形变;当 $L \geq 0.75$ mm 时,茶茎受到的压力发生突变,说明茶茎此时已经发生损伤,其内部组织受到破坏。

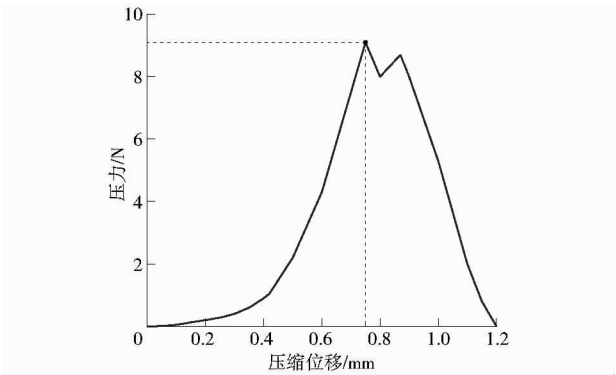


图 2 压力-压缩位移关系曲线

Fig.2 Relation curve of pressure – displacement

上述试验表明茶茎在受到突变值压力下已经发生损伤,即茶茎的夹损力略小于茶茎的压力突变值,并不代表茶茎受到的压力在小于压力突变值的情况下不会受损,因为茶茎本身具有一定柔软性,在压力达到突变值前,茶茎受到的损伤是随压力的增加而逐渐产生的,而非在某个值产生突变性的破坏。因此需要通过进一步试验确定茶茎能承受的安全夹持力。

对样本的压力突变值进行统计,如图 3 所示,图中每个点代表每个样本的压力突变值。由图 3 可

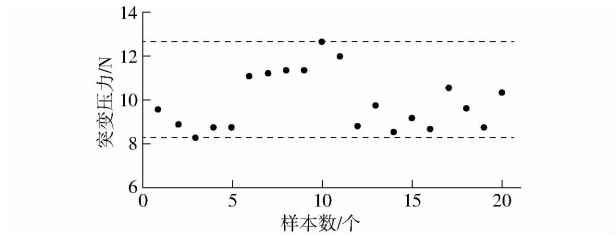


图 3 茶茎压力突变值测量结果

Fig.3 Measurement results of abrupt pressure change on tea stems

知,20 组样本的压力突变值的最小值、最大值及平均值分别为 8.31、12.6、9.92 N。重新随机选取 25 份样本均分为 5 组,并通过质构仪对其中 4 组样本分别施以 6、8、10、12 N 压力,每份样本受压以后切取其受压部分制成显微镜切片标本,放在 XSP-H1600 光学显微镜(深圳奥斯微光学仪器有限公司)下观察,从而确定不同大小的压力对茶茎的破坏程度。

在每组样本中选择一个具有代表性的受压样本。图 4 为不同压力下样本的观察图,其中图 4a 为对不同压力下试样的受压图像,图 4b 为正常未受压茶茎截面图作为参照对比,图 4c、d、e、f 分别为 6、8、10、12 N 压力下的典型试样图。在 6 N 及 8 N 压力下的试样中大部分细胞液泡饱满清晰,与正常未受压试样相比均无明显受损伤现象;10 N 压力下试样有大面积发黑现象,可能为细胞液泡受挤压发生破裂,细胞液大面积流出,试样此时受到了一定程度的损伤;12 N 压力下的试样中细胞液泡发生了严重的撕裂现象,说明试样此时已经遭到了破坏。在茶茎受到的不同压力水平进行 5 次观察可知,6 N 及 8 N 压力下的试样全部状况良好,10 N 压力下的试样有 2 份出现一定程度的损伤,而 12 N 压力下的试样有 3 份完全损伤。因此,取 8 N 作为夹持力的安全值是可靠的。

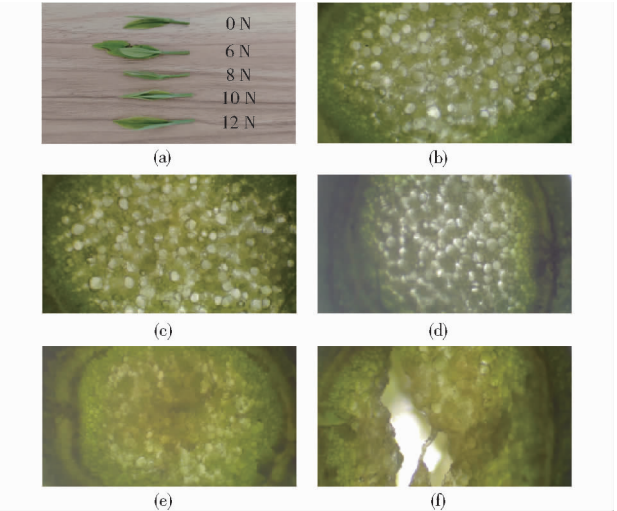


图 4 不同压力下茶茎截面图

Fig.4 Cross-sectional images of tea stems under different pressures

1.3 茶茎拉断力测量

选取 20 个随机一芽一叶样本进行拉伸试验,确定将茶叶嫩芽与茶茎分离需要的拉断力,试验设备为智能电子拉力试验机(济南兰光机电技术有限公司)。将预设的采摘点固定在试验机夹具下方,茶茎固定在移动端,设置加载速度 6 mm/min,回程速度 10 mm/min,进行试验并统计结果。

图 5 所示为典型样本的茶茎部分受拉力载荷情况下的拉力-时间变化曲线。由图 5 可见,受拉样本在 21 s 左右产生了一次突变,载荷急剧下降,此时刻即为样本被拉断瞬间,因此该样本茶茎的拉断力为 8.4 N。

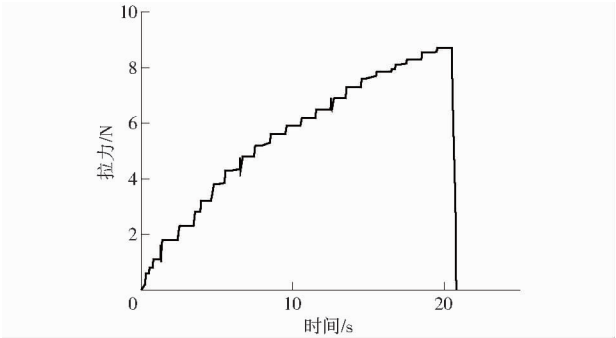


图 5 拉力-时间变化曲线
Fig.5 Curve of tension – time variation

图 6 中每个点代表每个样本的拉断力,由图可知 20 组茶茎的拉断力均处于 5.28 ~ 8.70 N 之间,因此将分离茶茎与嫩芽的最小值 F' 设为 9 N 可确保将目标茶叶顺利采摘下来,即 $F' = 9$ N。

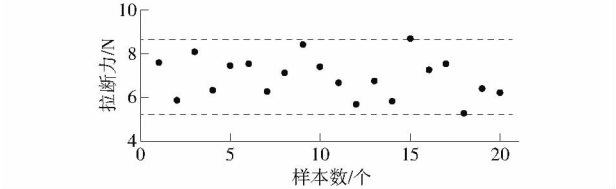


图 6 茶茎拉断力测量结果
Fig.6 Measurement results of tensile breaking force on tea stems

2 结构参数设计与仿真

2.1 基本结构与工作流程

名优茶生长分布在茶蓬面表面,采摘目标周围密集分布其他障碍物。因此需要末端执行器从茶蓬面上方到达目标位置并进行采摘^[22]。采摘末端执行器分为采摘部分和收集部分,均采用连杆机构进行传动,如图 7 所示。采摘部分由采摘基板、采摘曲柄、主动连杆、从动连杆夹指等组成,在到达预定采摘位置后,采摘舵机控制采摘曲柄旋转带动从动连杆上提,使机构末端的夹指闭合从而夹紧目标茶茎;收集部分主要由收集基板、收集曲柄、导杆、转动轴承、采收盒等组成,采摘部分刚性连接在导杆末端,在采摘部分夹指夹紧茶叶后,收集曲柄旋转带动导杆及其末端采摘部分转动,将目标茶叶与茶茎分离完成采摘,并将夹指处的茶叶运送到采收盒上方,茶叶被夹指松开后,落入采收盒内。

如图 8 所示,茶叶采摘末端执行器模拟人工采茶的动作采摘茶叶,主要包括到达位置、夹紧茶茎、

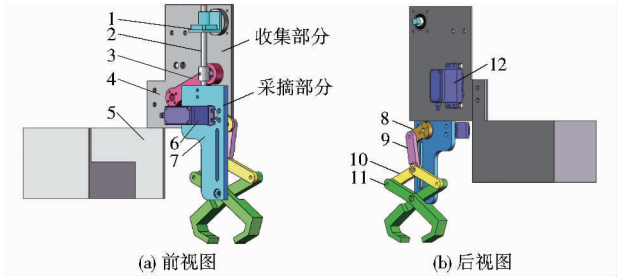


图 7 末端执行器三维图
Fig.7 3D diagrams of end effector

1. 转动轴承 2. 导杆 3. 收集曲柄 4. 收集基板 5. 采收盒
6. 采摘舵机 7. 采摘基板 8. 采摘曲柄 9. 主动连杆 10. 从动连杆 11. 夹指 12. 收集舵机

拉断茶茎、送料到盒、松开茶叶、夹指回位 6 个动作: ①图 8a 所示为末端执行器夹指到达目标茶叶采摘点。根据采摘点坐标,末端执行器由三维运动平台移动至预定坐标处,夹指到达采摘点。②图 8b 所示为夹指夹紧目标茶茎。夹指到达采摘点位置后,采摘舵机正转,并带动主动曲柄转动。通过连杆的传动,两侧夹指向目标点移动,最终将茶茎固定在夹指中间。③图 8c 所示为末端执行器拉断茶茎。收集舵机带动收集曲柄逆时针转动。由于采摘部分与收集部分末端刚性连接,因此夹紧固定在采摘部分末端的茶茎被拉断,完成茶叶采摘动作。④图 8d 所示为收集舵机带动收集曲柄继续逆时针转动,将采摘部分末端的茶叶运送到采收盒上方。⑤图 8e 所示为采摘舵机反方向转动控制夹指松开,茶叶落至采收盒内,完成茶叶收集动作。⑥如图 8f 所示,完成茶叶收集后,收集舵机反方向转动,驱动收集曲柄顺时针旋转恢复到初始位置,并准备继续执行下一次采摘动作。

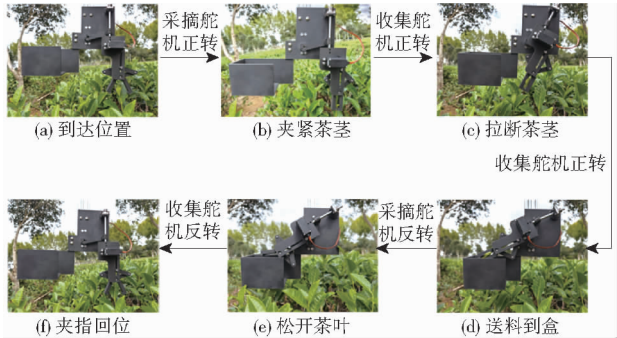


图 8 茶叶采摘过程
Fig.8 Tea leaf picking process

上述动作通过上位机控制两个舵机运动来实现。末端执行器到达预定位置后,采摘舵机执行角度转动指令正转,夹指夹紧茶茎,如图 8a、8b 所示;收集舵机通过延时指令延时 0.5 s,等待采摘舵机完成夹紧茶茎动作后执行角度转动指令正转,拉断茶茎并送料到盒,如图 8c、8d 所示;采摘舵机通过延时

指令延时1 s,等待茶茎被拉断并送到采收盒上方,执行角度转动指令反转到初始角度使夹指松开,茶叶落入采收盒中,如图8e;收集舵机通过延时指令延时0.5 s,等待夹指松开茶叶完成收集后,执行角度转动指令反转到初始角度,末端执行器恢复到采摘前的初始状态,如图8f。

2.2 采摘机构参数设计

采摘机构简图如图9所示,图9a为采摘结构初始状态简图,采摘机构分为主动曲柄滑块机构OAB和从动曲柄滑块机构DCB,通过B处滑块连接。图9b为采摘机构夹紧茶茎状态下的受力分析图。由于舵机扭矩固定,因此通过设计结构参数,对采摘机构采摘时的夹持力进行控制。采摘机构的结构参数主要包括夹指DG的尺寸和传动部件的尺寸参数。其中传动部件的尺寸参数包括复合曲柄滑块机构中主动曲柄OA、主动连杆AB、从动曲柄CD的长度以及滑块直线路径的偏置距离,故需对采摘末端执行器的上述结构参数进行设计。

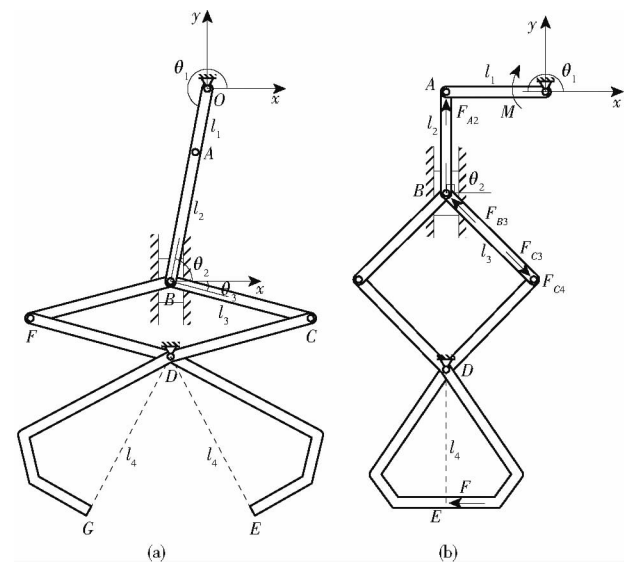


图9 采摘机构结构简图

Fig. 9 Structural schematic of picking mechanism

根据所测茶叶几何参数及力学参数并结合实际采摘环境,采摘机构在采摘茶叶时需要满足两个约束:①采摘时夹指末端的夹持力小于茶茎的安全夹持力。②采摘初始状态夹指的张开距离大于芽叶顶距。因此首先根据机构各点的位移方程及受力分析,计算夹指末端夹持力与舵机转矩之间的关系;其次通过夹指张开距离得到滑块的最大行程;最后通过以上两个约束条件确定机构各杆件的尺寸,完成采摘部分尺寸参数的设计。

2.2.1 采摘机构各点位移方程

由于点O位置不变,故以此点作为坐标原点建立对应的坐标系,如图9a。主动曲柄滑块机构的曲

柄OA与舵机直接相连,作为整个机构的输入端,从动曲柄滑块机构的曲柄CDG为采摘机构的夹指,作为整个机构的输出端。设主动曲柄OA、主动连杆AB、从动连杆BC和夹指DG的长度分别为 l_1 、 l_2 、 l_3 和 l_4 ,OA、AB、BC与坐标系X轴正方向的夹角分别为 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 。

主动曲柄滑块机构OAB中,点A的位置坐标为 (x_A, y_A) ,由该结构模型的几何关系可得点A的位移方程,即

$$\begin{cases} x_A = l_1 \cos \theta_1 \\ y_A = l_1 \sin \theta_1 \end{cases} \quad (1)$$

设滑块直线路径与Y轴偏置距离为 e ,连杆AB与X轴正方向的夹角为 θ_2 ,则点B的位移方程为

$$\begin{cases} x_B = -e \\ y_B = l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin \theta_2 \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{其中} \quad \theta_2 = \arccos \frac{e + x_A}{l_2} \quad (3)$$

设点D在点B下方且距X轴 e_0 ,则点D坐标为 $(-e, -e_0)$ 。由于BC与CD长度相等,可得点C位移方程为

$$\begin{cases} x_C = \sqrt{l_3^2 - \left(\frac{y_B - y_D}{2}\right)^2} + x_B \\ y_C = \frac{y_B + y_D}{2} \end{cases} \quad (4)$$

2.2.2 采摘机构力学分析

采摘机构受力分析如图9b所示。对从动曲柄滑块机构进行分析,在夹指夹紧茶茎时,夹指末端的力设为 F ,即点E的受力为 F ,方向垂直于DG。CD杆上点C受力 F_{C4} ,由于CDG杆转矩为零,则

$$F_{C4} l_3 = F l_4 \quad (5)$$

由于BC杆为二力杆,BC杆上点C受力 F_{C3} 与点B受力 F_{B3} 相等,且点C受BC杆作用力 F_{C3} 及CD杆作用力 F_{C4} ,二者互为作用力与反作用力,故

$$F_{C3} = F_{B3} = F_{C4} \quad (6)$$

滑块受到BC杆、AB杆在点B的力 F_{B3} 、 F_{B2} ,以及导轨对滑块在水平方向上的力 F_B 。由于滑块在竖直方向上受力平衡,且二力杆AB受力平衡,因此

$$F_{B2} \sin \theta_2 = F_{B3} \sin \theta_3 \quad (7)$$

$$F_{A2} = F_{B2} \quad (8)$$

已知舵机输入转矩 M ,由力矩关系得

$$M = F_{A2} l_1 \sin(\theta_1 - \theta_2) \quad (9)$$

由式(5)~(9)可得

$$F = \frac{M l_3 \sin \theta_2}{l_1 l_4 \sin \theta_3 \sin(\theta_1 - \theta_2)} \quad (10)$$

其中

$$\begin{cases} \theta_2 = \arccos \frac{x_A - x_D}{l_2} \\ \theta_3 = \arccos \frac{y_B - y_D}{2l_3} \end{cases} \quad (11)$$

2.2.3 采摘机构尺寸参数设计

茶叶几何参数及生物力学参数测量结果为采摘机构参数设计提供依据。根据芽叶高度及芽叶顶距确定夹指的尺寸及张开角度;根据采摘机构力学分析,结合茶叶生物力学参数测量试验所测数据确定采摘曲柄的长度;通过双曲柄滑块复合机构中对滑块行程的分析确定主动连杆长度。

由前期试验可得,芽叶高度的范围为 28.24 ~ 34.68 mm,芽叶顶距的范围为 20.96 ~ 45.34 mm。根据茶叶高度和芽叶顶距的最大值,确定夹指 DG、DE 段的长度为 50 mm。为确保夹爪运动的平稳性,令 BC 段的长度与 CD 段相等,滑块偏置距离 e 与曲柄长度 l_1 相等,且当 $\theta_1 = \pi$ 时,夹指夹紧目标茶茎,此时 BC 杆与 CD 杆垂直,则 $\theta_1 = \pi, \theta_2 = \frac{\pi}{2}, \theta_3 = \frac{\pi}{4}$, $l_4 = 50$ mm。

采摘机构动力源采用 SG5010 舵机,在 4.8 V 电压下工作扭矩(最大输出扭矩) $M = 490$ N·mm。由于夹指末端处夹持力 F 小于安全值 F_s ,将 $\theta_1、\theta_2、\theta_3、l_4$ 代入式(10)得

$$\frac{l_3}{l_1} \leq \frac{4}{7} \quad (12)$$

取 $l_1 = 42$ mm, $l_3 = 24$ mm。

设采摘机构在茶叶采摘前的初始位置,两个夹指的张开角度最大为 70° ;茶叶采摘时,两侧夹指闭合,BC 杆与 CD 杆垂直。单个夹指从初始位置到夹指闭合位置转动的角度为 $\gamma = 35^\circ$ 。设夹指从初始张开位置到闭合位置滑块的行程为 H ,滑块的最大行程为 $H_{\max}$ 。根据夹指转动的角度及连杆 l_3 的尺寸,可得

$$\begin{cases} H = \sqrt{(l_1 + l_2)^2 - l_1^2} - l_2 \\ H_{\max} = 2l_3(\cos\theta_3 - \cos(\gamma + \theta_3)) \end{cases} \quad (13)$$

由 $H \leq H_{\max}$ 可得 $l_2 \geq 15$ mm。考虑机构加工与装配需要,取 $l_2 = 25$ mm。综合上述设计得 $l_1 = 42$ mm, $l_2 = 25$ mm, $l_3 = 24$ mm, $l_4 = 50$ mm, $e = 42$ mm。

为使夹指到达采摘点后能够顺利夹紧茶茎,取夹具宽度为 15 mm,此时夹指在水平面内的投影面积为 660 mm²,在采摘时不易与障碍物发生干涉,影响采摘。

2.3 收集机构参数设计

收集机构以曲柄导杆机构的形式传动,包括基板、曲柄、导杆、转动轴承以及采收盒。舵机控制曲

柄旋转,曲柄末端与导杆相连,且导杆可绕曲柄转动;导杆末端与采摘部分刚性连接,且在固定于基板上的转动轴承中滑动。采摘部分夹紧目标茶茎后,曲柄逆时针旋转,完成茶叶的拉断、收集,并在茶叶落入采收盒内后进行复位。

采摘机构的加速度从零突变到某一值时,其突变值越大,对整个机构产生的冲击越大,机构末端的加速度越小则采摘动作越稳定^[23]。由于末端执行机构在运动初始时刻发生加速度突变,为减小末端执行机构在该时刻的冲击及振动,使其在开始运动时相对平稳,采摘机构在夹紧茶茎后开始运动的初始时刻应具有相对最小的突变加速度。由于该机构与导杆末端刚性连接,因此需要对导杆末端的加速度进行分析。同时采摘机构末端夹指处的拉力应大于茶茎的拉断力。不同的曲柄长度对应不同的导杆末端加速度及拉力,因此需要合理设计曲柄长度。首先由收集机构各点的位移方程得到导杆末端处的速度、加速度和拉力,并由拉力大于茶茎拉断力的约束条件得到曲柄长度的范围;其次对该范围内不同曲柄长度下的导杆末端加速度进行分析,寻找最小加速度对应的曲柄长度;最后分析该曲柄长度下导杆末端在运动过程中的速度及加速度,并进行运动学仿真。

2.3.1 收集机构末端位移方程

收集机构受力简图如图 10 所示,采摘部分固定于收集机构导杆末端的点 P,随导杆 PQ 运动到达采收盒上方。图中点 K 位置不变,故以该点为坐标原点建立对应的坐标系。设 KQ 段长度为 l_5 ,PQ 段长度为 l_6 。采摘部分与点 P 刚性连接,故点 P 的位移、速度和加速度即为采摘夹指末端点 E 的位移、速度和加速度,点 P 的加速度越小则夹指夹紧目标后拉断茶茎的动作越稳定。

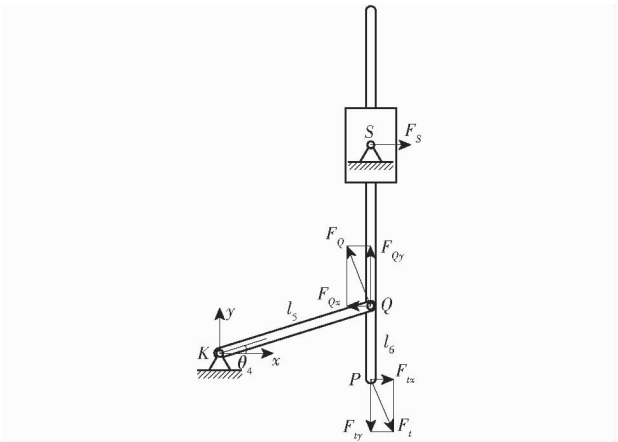


图 10 收集机构受力分析

Fig. 10 Force analysis of collecting mechanism

设 KQ 与 X 轴正方向之间的夹角为 θ_4 ,QP 与 X

轴正方向之间的夹角为 θ_5 , 点 S 坐标为 (x_s, y_s) , 则

$$\begin{cases} x_Q = l_5 \cos \theta_4 \\ y_Q = l_5 \sin \theta_4 \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} x_P = l_5 \cos \theta_4 - l_6 \cos \theta_5 \\ y_P = l_5 \sin \theta_4 - l_6 \sin \theta_5 \end{cases} \quad (15)$$

$$\theta_5 = \arctan \frac{y_s - l_5 \sin \theta_4}{x_s - l_5 \cos \theta_4} \quad (16)$$

式中 (x_Q, y_Q) ——点 Q 坐标

(x_P, y_P) ——点 P 坐标

2.3.2 收集机构末端速度方程

点 P 的速度包括点 Q 的平移速度 v_Q 和点 P 相对于点 Q 的旋转速度 v_{PQ} , 即

$$\mathbf{v}_P = \mathbf{v}_Q + \mathbf{v}_{PQ} \quad (17)$$

设曲柄旋转角速度为 ω_2 , 点 P 绕点 Q 的旋转角速度为 ω_3 , 点 Q 与点 S 间的距离为 l_7 , 则

$$\begin{cases} v_{Qx} = -\omega_2 l_5 \sin \theta_4 \\ v_{Qy} = \omega_2 l_5 \cos \theta_4 \\ v_Q = \sqrt{v_{Qx}^2 + v_{Qy}^2} \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} v_{PQx} = -\omega_3 l_6 \sin \theta_5 \\ v_{PQy} = \omega_3 l_6 \cos \theta_5 \\ v_{PQ} = \sqrt{v_{PQx}^2 + v_{PQy}^2} \end{cases} \quad (19)$$

$$\omega_3 = \frac{\omega_2 l_5 \cos(\theta_4 - \theta_5)}{l_7} \quad (20)$$

$$l_7 = \sqrt{(y_s - l_5 \sin \theta_4)^2 + (x_s - l_5 \cos \theta_4)^2} \quad (21)$$

因此, 将式 (18)、(19) 代入式 (17) 可得点 P 的速度。

2.3.3 收集机构末端加速度方程

点 P 的加速度包括点 Q 的加速度 a_Q 和点 P 相对于点 Q 的旋转加速度, 其中点 P 相对于点 Q 的加速度由相对加速度 a_{PQ} 和科里奥利加速度 a_{cor} 组成, 即

$$\mathbf{a}_P = \mathbf{a}_Q + \mathbf{a}_{PQ} + \mathbf{a}_{cor} \quad (22)$$

其中

$$\begin{cases} a_{Qx} = -\omega_2^2 l_5 \cos \theta_4 \\ a_{Qy} = -\omega_2^2 l_5 \sin \theta_4 \\ a_Q = \sqrt{a_{Qx}^2 + a_{Qy}^2} \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} a_{PQx} = -l_6 (\omega_3^2 \cos \theta_5 + \alpha_3 \sin \theta_5) \\ a_{PQy} = -l_6 (\omega_3^2 \sin \theta_5 - \alpha_3 \cos \theta_5) \\ a_{PQ} = \sqrt{a_{PQx}^2 + a_{PQy}^2} \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} a_{corx} = 2\omega_3^2 v_{PQy} \\ a_{cory} = -2\omega_3^2 v_{PQx} \\ a_{cor} = \sqrt{a_{corx}^2 + a_{cory}^2} \end{cases} \quad (25)$$

$$\alpha_3 = -\frac{\omega_2^3 l_5}{l_6} \cos(\theta_4 - \theta_5) \quad (26)$$

式中 α_3 ——点 P 绕点 Q 旋转的角加速度

因此, 将式 (23)、(24)、(25) 代入式 (22) 可得点 P 的加速度。

2.3.4 曲柄尺寸参数设计

由于茶叶竖直向上的生长特点, 曲柄导杆机构在采摘茶叶的初始位置需要令采摘机构保持竖直状态, 即 QP 杆竖直。对导杆 QP 进行分析, 如图 10 所示。设点 P 受茶叶的拉力为 F_t , 其方向为沿茶茎方向, 正交分解为水平方向的分力 F_{tx} 和竖直方向的分力 F_{ty} 。设点 Q 受力为 F_Q , 方向为垂直 KQ 杆, 可正交分解为水平方向的分力 F_{Qx} 和竖直方向的分力 F_{Qy} 。由于 QP 处于平衡状态, 因此在竖直方向上的分力为零, 则

$$\frac{M_2}{l_5} \cos \theta_4 = F_{ty} \quad (27)$$

式中 M_2 ——收集舵机输出转矩

为确保将茶叶顺利采摘下来, 点 P 竖直方向上的拉力 F_{ty} 需大于茶叶拉断力 F' , 即

$$F_{ty} > F' \quad (28)$$

将式 (27) 代入式 (28) 可得

$$l_5 < \frac{M_2 \cos \theta_4}{F'} \quad (29)$$

收集机构动力源采用 MG996R 舵机, 其工作扭矩 $M_2 = 920 \text{ N} \cdot \text{mm}$ 。设点 S 坐标为 $(60 \text{ mm}, 80 \text{ mm})$, 将 x_s, M_2 及 F' 代入式 (29) 可得 $l_5 \leq 78 \text{ mm}$ 。已知曲柄导杆机构在采摘茶叶的初始位置时, 采摘机构处于竖直状态, 因此曲柄长度需大于 x_s , 即 $l_5 > 60 \text{ mm}$ 。

设初始位置曲柄转角为 θ_{4s} , 此时 PQ 杆处于竖直状态, 因此

$$\theta_{4s} = \arccos \frac{x_s}{l_5} \quad (30)$$

将式 (30) 代入式 (22) ~ (25), 可得初始位置时不同曲柄长度时的点 P 突变加速度。由图 11 可知,

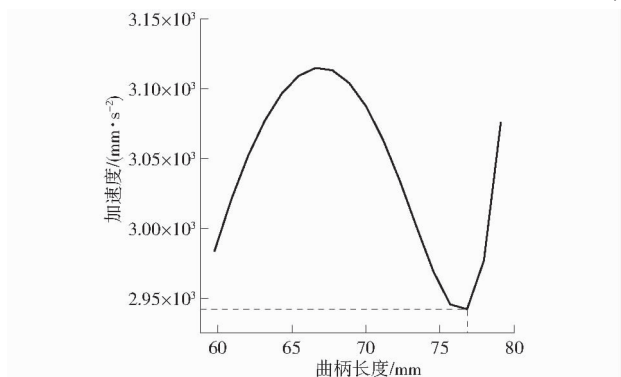


图 11 不同曲柄长度时点 P 加速度变化曲线

Fig. 11 Acceleration variation curves of point P at different crank lengths

曲柄长度为 76 mm 时,点 P 在初始位置的加速度取得最小值,即曲柄在该长度下末端的初始时刻运动相对较为平稳,对末端执行机构造成的冲击及振动相对较小,因此取 $l_5 = 76$ mm。

对点 P 在收集运动过程中的位移、速度及加速度进行分析,如图 12 所示。收集机构末端在初始位置 $x_p = 60$ mm,即收集机构将被夹指夹紧的目标茶

茎拉断时加速度最小。将茶叶采摘下来后,收集机构末端运动速度逐渐增大,在 $x_p = -70$ mm 处点 P 的速度和加速度均达最大值,是源于舵机带动曲柄导杆机构动作时各杆之间的夹角出现了持续变化。之后收集机构末端的速度和加速度在靠近采收盒的过程中开始减小,并在达到收集位置时速度趋于最小,使茶叶能够平缓落到采收盒中。

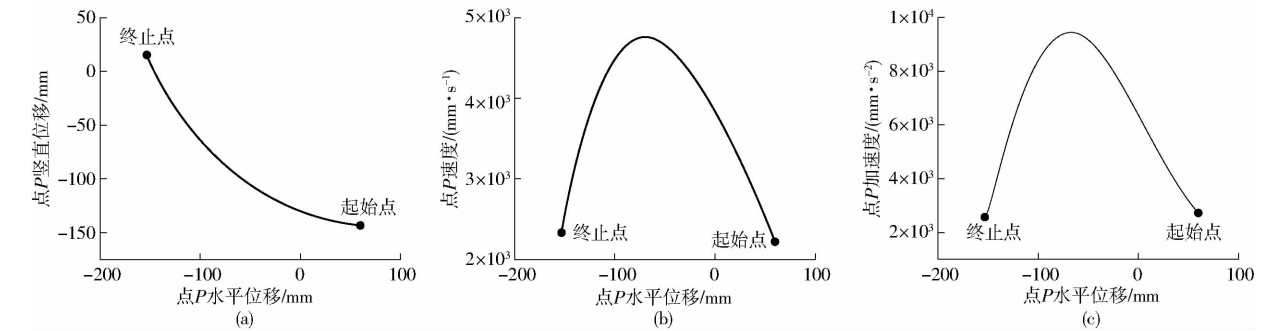


图 12 点 P 运动学参数变化曲线
Fig. 12 Variation curves of kinematic parameters for point P

2.3.5 收集机构运动学仿真

应用 Solidworks 软件建立末端执行器的三维模型并进行运动学仿真,收集机构末端点 P 速度、加速度变化曲线如图 13 所示。比较图 12b、12c 和图 13a、13b,可知二者基本一致,验证了收集机构运动学建模和参数设计的正确性。

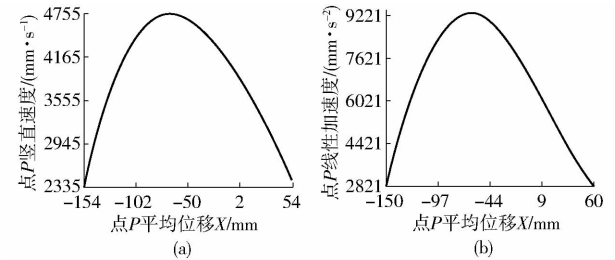


图 13 末端执行器运动学仿真曲线
Fig. 13 Kinematic simulation curves of end effector

3 末端执行器采摘成功率影响因素试验优化

3.1 单因素试验

茶叶采摘时,夹指作为直接与目标茶叶接触的零件,其参数直接影响采摘成功率。根据名优茶采摘末端执行器的采摘原理和结构特点,确定有 4 个因素可能影响实际采摘效果,分别为夹具厚度、夹指张角、采摘高度以及夹指宽度,如图 14 所示,分别设为 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 。

夹具厚度指夹指末端夹具的厚度。夹具厚度超过 10 mm 将影响采摘定位的灵活性,不利于茶叶的精准采摘。由茶叶几何参数测量试验测得茶茎直径的平均值为 1.73 mm,夹具厚度小于 4 mm 时,单个夹指与茶茎的接触面积小于 7 mm^2 ,采摘时茶茎与

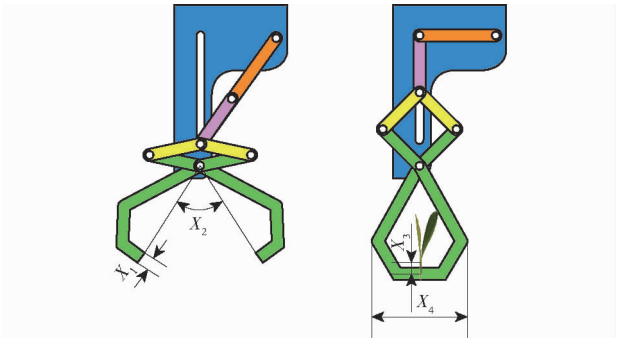


图 14 影响因素示意图
Fig. 14 Diagram of influencing factors

夹指接触面积过小可能导致茶茎发生脱落,从而采摘失败。因此将夹具厚度设置为 $4 \text{ mm} \leq X_1 \leq 10 \text{ mm}$ 。

夹指张角指采摘部分在采摘前初始状态下夹指的张开角度。由茶叶几何参数测量试验可得芽叶顶距的最大值为 45.53 mm,为使夹指张开时能够顺利套入茶叶到达目标采摘点,取夹指的最小张开距离为 50 mm。由 l_4 及夹指张开距离,可得夹指张角的最小值为 53.13° 。当夹指张开距离大于 70 mm,采摘时容易与周围障碍物发生干涉从而影响采摘,此时夹指张角为 70° 。张开角度过大则容易与目标周围障碍物发生碰撞,使采摘点的位置发生改变,因此将夹指张角设为 $55^\circ \leq X_2 \leq 70^\circ$ 。

采摘高度指预定采摘点与芽叶交点的距离。夹紧茶茎时,预定采摘点位于夹指夹具中点处。由夹具厚度的最小值为 4 mm 可得,当采摘高度小于 2 mm 时,采摘时夹具将会夹到茶芽部分,可能会对嫩芽造成损伤,因此采摘高度的最小值取 2 mm。由

茶叶几何参数测量试验结果可得,芽叶高度的最大值为 34.68 mm。已知夹指长度 l_4 为 50 mm,为确保采摘时采摘点上方茶叶被套入夹指内部并留有一定空间,取采摘高度最大值为 14 mm。因此将采摘高度设为 $2\text{ mm} \leq X_3 \leq 14\text{ mm}$ 。

夹指宽度指夹指末端在水平面内的最大宽度,夹指宽度过大可能会与周围障碍物发生干涉,影响采摘点的位置导致采摘失败,根据夹指结构及采摘特点,将夹指宽度设为 $55\text{ mm} \leq X_4 \leq 64\text{ mm}$ 。

对每个因素取 4 个水平,如表 2 所示,以 25 次采摘的茶叶采摘成功率为评价指标分别进行单因素试验,从而分析各因素对采摘成功率的影响程度。其中采摘成功率 Y 的计算公式为

$$Y = \frac{N_p}{N_a} \times 100\%$$

(31)

式中 N_a ——茶叶采摘总数
 N_p ——成功收集的茶叶数量

表 2 单因素试验因素水平

Tab.2 Factors and levels of simulation tests

水平	影响因素			
	夹具厚度	夹指张角	采摘高度	夹指宽度
	X_1/mm	$X_2/(\text{ }^\circ)$	X_3/mm	X_4/mm
1	4	55	2	55
2	6	60	6	58
3	8	65	10	61
4	10	70	14	64

试验结果如图 15 所示,在所选水平范围内,随着夹具厚度和夹指张角的增加,茶叶采摘成功率均呈现先上升后下降的趋势;其中,当夹具厚度为 4 mm 时,茶叶采摘成功率为 84%,当夹具厚度为 10 mm 时,茶叶采摘成功率为 76%;夹指张角为 55°时,采摘成功率为 72%,夹指张角为 70°时,采摘成功率为 68%,夹指张角过小容易导致套入茶叶失败,过大将于周围障碍物发生干涉,使目标茶叶的采摘点位置发生改变,影响采摘。随着采摘高度的增加,茶叶采摘成功率逐渐减小,当采摘高度为 14 mm

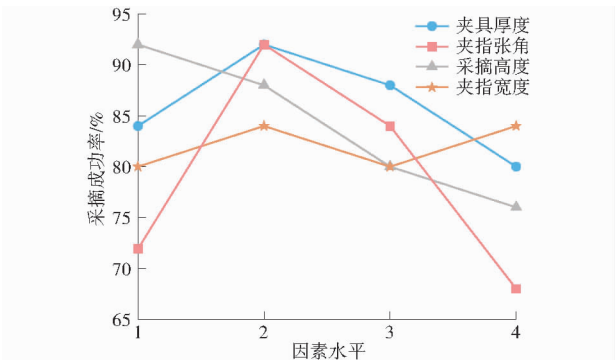


图 15 单因素试验结果

Fig. 15 Single factor test results

时,采摘成功率仅为 76%,末端执行器套入茶叶过深容易与周围障碍物发生干涉,导致采摘失败。夹指宽度的改变对采摘成功率无明显影响,为尽量减少夹指与目标周围障碍物的干涉,因此夹指宽度取最小值 55 mm。最终确定夹具厚度、夹指张角、采摘高度为影响茶叶采摘成功率的主要影响因素。

3.2 正交试验设计与结果

夹具厚度、夹指张角、采摘高度分别取 3 个水平,对茶叶采摘末端执行器进行三因素三水平的 Box – Behnken 茶叶采摘试验,因素编码如表 3 所示。

表 3 试验因素编码

Tab.3 Coding of experimental factors

编码	影响因素		
	夹具厚度 X_1/mm	夹指张角 $X_2/(\text{ }^\circ)$	采摘高度 X_3/mm
1	8	65	10
0	6	60	6
-1	4	55	2

茶叶采摘试验完成 17 组,每组试验采摘 20 个茶叶,统计成功采摘的茶叶数量,计算采摘成功率。为减少试验误差,每组试验重复 5 次并取平均值,试验结果如表 4。

表 4 试验设计与结果

Tab.4 Experiment design and results

序号	因素			采摘成功率/%
	夹具厚度/ mm	夹指张角/ ($^\circ$)	采摘高度/ mm	
1	4	60	2	70
2	8	60	2	90
3	4	60	10	85
4	8	60	10	60
5	4	55	6	75
6	8	55	6	55
7	4	65	6	80
8	8	65	6	80
9	6	55	2	75
10	6	55	10	80
11	6	65	2	85
12	6	65	10	80
13	6	60	6	80
14	6	60	6	95
15	6	60	6	85
16	6	60	6	95
17	6	60	6	95

3.3 正交试验结果分析

3.3.1 回归模型建立与检验

通过 Design-Expert 软件对试验数据开展多元回归拟合分析,建立采摘成功率对夹具厚度 X_1 、夹指张角 X_2 以及采摘高度 X_3 3 个自变量的二次多项

式响应面回归模型,方差分析见表 5。

表 5 采摘成功率方差分析

Tab. 5 Variance analysis of picking success rate					
方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	607. 87	9	67. 54	13. 04	0. 001 3
X_1	12. 50	1	12. 50	2. 41	0. 164 2
X_2	28. 12	1	28. 12	5. 43	0. 052 6
X_3	3. 13	1	3. 13	0. 60	0. 462 7
$X_1 X_2$	6. 25	1	6. 25	1. 21	0. 308 3
$X_1 X_3$	56. 25	1	56. 25	10. 86	0. 013 2
$X_2 X_3$	25. 00	1	25. 00	4. 83	0. 064 0
X_1^2	252. 89	1	252. 89	48. 83	0. 000 2
X_2^2	9. 47	1	9. 47	1. 83	0. 218 3
X_3^2	177. 89	1	177. 89	34. 35	0. 000 6
残差	36. 25	7	5. 18		
失拟项	6. 25	3	2. 08	0. 28	0. 839 5
纯误差	30. 00	4	7. 50		
综合	644. 12	16			

注: 0. 01 ≤ P < 0. 05 表示影响显著, P < 0. 01 表示影响极显著。

采摘成功率的回归模型 $P < 0. 05$, 表明该模型显著。模型的失拟项 $P > 0. 5$, 表明该模型失拟项并不显著, 回归模型的拟合程度高。模型的决定系数 $R^2 = 0. 943 7$, 表明该模型能够解释 94. 37% 以上响应值的变化。 $R^2_{Adj} = 0. 871 4$, $R^2_{Pre} = 0. 772 0$, 二者差值小于 0. 2; 各因素对采摘成功率的影响由大到小为: 夹指张角、夹具厚度、采摘高度。夹具厚度与采摘高度的交互作用对采摘成功率有显著影响。各影响因素对采摘成功率 Y 的回归方程为

$$Y = -748. 937 5 + 0. 437 5X_1 - 7. 781 25X_2 + 28. 325X_3 + 0. 156 25X_1X_2 + 0. 375X_1X_3 - 0. 125X_2X_3 - 1. 937 5X_1^2 - 0. 093 75X_2^2 - 0. 26X_3^2 \quad (32)$$

3. 3. 2 交互因素对试验指标影响分析

由表 5 可得夹具厚度、夹指张角、采摘高度存在交互影响。为探究各因素对采摘成功率的影响, 忽略不显著的交互影响因素, 绘制各因素交互效应对采摘成功率的响应面图。图 16a 所示为采摘高度为

6 mm 时, 夹具厚度与夹指张角对采摘成功率的影响。夹具厚度一定时, 采摘成功率随着夹指张角的增大呈现先增大后缓慢减小的趋势; 夹指张角一定时, 采摘成功率随着夹具厚度的增大而先增大后快速减小, 这是因为夹具厚度对采摘成功率有显著影响。图 16b 为夹具厚度为 6 mm 时, 采摘高度与夹指张角对采摘成功率的影响。采摘高度一定时, 采摘成功率随夹指张角增大而先增大后缓慢减小; 夹指张角一定时, 采摘成功率随采摘高度的增大而快速减小, 这是由于末端执行器套入目标茶叶越深, 受到周围其他障碍物干扰越多, 因此采摘成功率受到影响。

3. 4 参数优化

茶叶采摘成功率是衡量采茶末端执行器作业效果的重要指标, 为提高茶叶采摘成功率, 运用 Design-Expert 10. 0 软件中的 Optimization 功能, 以采摘成功率为优化指标, 建立优化函数和边界约束条件为

$$\begin{cases} \max Y \\ \text{s. t.} \begin{cases} 4 \text{ mm} \leq X_1 \leq 8 \text{ mm} \\ 55^\circ \leq X_2 \leq 65^\circ \\ 2 \text{ mm} \leq X_3 \leq 10 \text{ mm} \end{cases} \end{cases} \quad (33)$$

优化得到各参数的最优组合为: 夹具厚度 $X_1 = 6. 009 \text{ mm}$, 夹指张角 $X_2 = 59. 163^\circ$, 采摘高度 $X_3 = 3. 229 \text{ mm}$, 采摘成功率 $Y = 93. 1\%$ 。

4 田间试验

由于末端执行器各部件通过 3D 打印加工, 受限于加工精度及采摘精度, 将上述优化后的参数近似处理并进行采摘试验, 近似处理后夹具厚度 $X_1 = 6 \text{ mm}$ 、夹指张角 $X_2 = 59^\circ$ 、采摘高度 $X_3 = 3 \text{ mm}$ 。试验重复 3 组, 每组试验重复采摘 20 次, 采摘成功率分别为 90%、90%、95%。试验现场见图 17。采摘成功率的相对误差小于 5%, 表明响应面仿真试验能够有效实现优化。由于采摘过程中有很多不可控

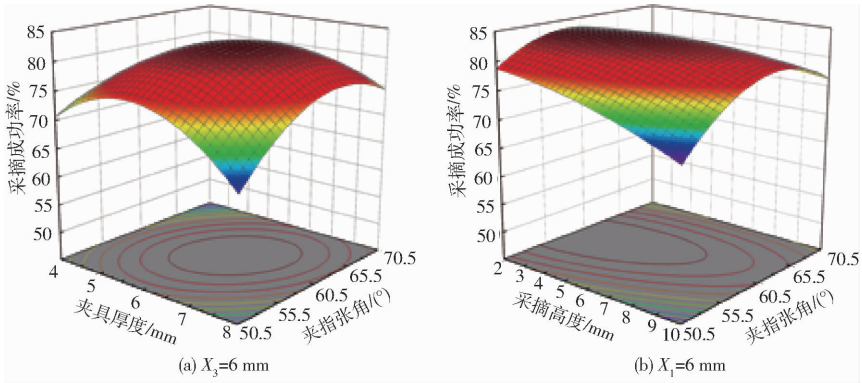


图 16 因素交互作用对成功率影响的响应曲面
Fig. 16 Response surfaces of influence of factor interacting on success rate

的因素,如茶叶嫩梢的生长姿态不同,目标周围障碍物的干扰等,因此采摘成功率有待进一步提高。

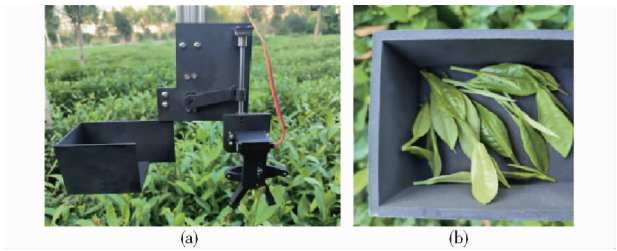


图 17 采摘现场作业
Fig. 17 Picking field operations

5 结束语

设计了一种名优茶选择性采摘末端执行器,以茶叶生物力学参数测量试验所测茶叶几何参数、安全夹持力和拉断力为约束,根据力学分析和运动学

仿真计算确定末端执行器各连杆的结构尺寸参数。通过单因素试验确定影响采摘成功率的主要因素,运用 Design-Expert 10.0 软件进行了三因素三水平的 Box – Behnken 试验,确定夹指各因素对采摘成功率的影响显著性主次排序为:夹指张角、夹具厚度、采摘高度。运用 Design-Expert 10.0 软件,以采摘成功率最高为优化目标,确定优化参数为:夹具厚度 6 mm、夹指张角 59°、采摘高度 3 mm。现场采摘试验表明,以优化后参数实现的采摘末端执行器 3 组试验的采摘成功率为 90%、90%、95%,试验值与预测值的误差小于 5%。

本文设计的名优茶选择性采摘机构能够避免剪切式采摘对茶茎造成的损伤,同时经过田间试验验证,茶叶采摘成功率较高,在实际采摘中能够顺利完成茶叶采摘任务。

参 考 文 献

[1] 贾江鸣,王登艺,贺磊盈,等. 名优茶采摘机器人整机机械技术研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2025,56(8): 193 – 206.
JIA Jiangming, WANG Dengyi, HE Leiying, et al. Research progress and prospects of mechanical technology for whole machine of high-quality tea picking robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(8): 193 – 206. (in Chinese)

[2] 靳红玲,朱海军,张昕杰,等. 山地茶园模块化全向动态四点调平装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024,55(9): 205 – 215.
JIN Hongling, ZHU Haijun, ZHANG Xinjie, et al. Design and experiment of modular omnidirectional dynamic four-point leveling device for mountain tea plantations[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 205 – 215. (in Chinese)

[3] 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)

[4] 苑进. 选择性收获机器人技术研究进展与分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 1 – 17.
YUAN Jin. Research progress analysis of robotics selective harvesting technologies[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 1 – 17. (in Chinese)

[5] 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)

[6] 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 and Electrical Engineering Technology, 2023, 52(9): 42 – 45, 172. (in Chinese)

[7] 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. (in Chinese)

[8] 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)

[9] 陈建能,李杭,任萍,等. 螺纹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)

[10] ZHANG L, ZOU L, WU C, et al. Method of famous tea sprout identification and segmentation based on improved watershed algorithm[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 184(1): 106108.

[11] 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)

[12] 王文明, 肖宏儒, 宋志禹, 等. 茶叶生产全程机械化技术研究现状与展望[J]. *中国农机化学报*, 2020, 41(5): 226–236.
WANG Wenming, XIAO Hongru, SONG Zhiyu, et al. Research status and prospects of tea production mechanization technology[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2020, 41(5): 226–236. (in Chinese)

[13] 陈光明, 毛奔, 章永年. 名优茶采摘机器人关键技术研究[J]. *中国农机化学报*, 2023, 44(12): 174–180.
CHEN Guangming, MAO Ben, ZHANG Yongnian. Research on key technologies of famous tea picking robot[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2023, 44(12): 174–180. (in Chinese)

[14] 张开兴, 王文中, 赵秀艳, 等. 滚筒式茶叶热风复干机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(5): 377–386.
ZHANG Kaixing, WANG Wenzhong, ZHAO Xiuyan, et al. Design and experiment of drum-type hot air re-dryer for tea[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(5): 377–386. (in Chinese)

[15] 郝森. 高档名优绿茶嫩芽识别与仿生采摘指研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2019.
HAO Miao. Researches on the identification of tender leaves and bionic plucking fingers for high-quality green tea[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2019. (in Chinese)

[16] 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)

[17] XUE P, LI Q, FU G. Design and control simulation analysis of tender tea bud picking manipulator[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(2): 928.

[18] MOTOKURA K, TAKAHASHI M, EWERTON M, et al. Plucking motions for tea harvesting robots using probabilistic movement primitives[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(2): 3275–3282.

[19] 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)

[20] 王洪成, 白子豪, 徐海浩, 等. 基于提采动作的便携式名优茶鲜叶采摘机[J]. *浙江农业学报*, 2024, 36(5): 1161–1172.
WANG Hongcheng, BAI Zihao, XU Haihao, et al. Portable famous tea fresh leaves picking machine based on lifting-picking action[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2024, 36(5): 1161–1172. (in Chinese)

[21] 罗坤. 名优茶嫩梢低损采摘机理与装备研发[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2023.
LUO Kun. Low-loss picking mechanism and equipment development of high-quality tea shoots[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[22] 李亚涛. 茶叶采摘机器人的视觉检测与定位技术研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2022.
LI Yatao. Research on the visual detection and localization technology of tea harvesting robot[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2022. (in Chinese)

[23] 云志豪. 双凸轮式取苗末端执行器设计与试验[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2023.
YUN Zhihao. Design and experiment of double cam seedling end-effector[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)