

手持式名优茶嫩梢采摘机械手设计与试验优化

贾江鸣^{1,2} 叶玉泽¹ 程培林¹ 朱赢鹏¹ 傅霞萍¹ 陈建能^{1,2}

(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)

摘要: 针对名优茶机械化采摘难的问题,根据茶叶采摘农艺要求和手工采摘动作的分析,设计了一种手持式名优茶嫩梢采摘机械手,模拟手指夹住茶叶并通过提拉进行采摘。通过采摘机械手的运动分析,得到了影响采摘效率的因素磁钢距离、主动手指角速度和主动手指转角的参数变动范围。采用 Box - Behnken 响应面分析方法,研究影响因素对采摘成功率的交互影响,以采摘成功率为响应值建立二次回归模型,各因素对采摘成功率的影响显著性主次排序为:主动手指角速度、磁钢距离、主动手指转角;运用 Design-Expert 11.0 软件的优化模块,以采摘成功率为优化目标对各因素进行优化,得到优化参数为:磁钢距离 40.04 mm、主动手指转角 153.0°、主动手指角速度 3.38 rad/s。以优化后的参数进行采摘试验,结果表明采摘成功率为 74.3%,3 次采摘平均速度为 25.2 个/min,试验值与预测值的相对误差小于 5%,优化模型结果可靠。

关键词: 名优茶; 采摘机械手; 响应面; 采摘成功率

中图分类号: S225.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2022)05-0086-07

OSID:



Design and Experimental Optimization of Hand-held Manipulator for Picking Famous Tea Shoot

JIA Jiangming^{1,2} YE Yuze¹ CHENG Peilin¹ ZHU Yingpeng¹ FU Xiaping¹ CHEN Jianneng^{1,2}

(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)

Abstract: In response to the difficulty of mechanical picking of famous tea, a hand-held famous tea shoot picking manipulator was designed based on the analysis of the agronomic requirements of tea picking and manual picking movements. The kinematic model of the picking manipulator was used to obtain the parameter range of magnet distance, active finger angular velocity and active finger turning angle, which were factors affecting the picking efficiency. The Box - Behnken response surface analysis method was used to investigate the interactive effect of the influencing factors on the picking success rate. A quadratic regression model was established with the picking success rate as the response value. The significance ranking of the influencing factors on the picking success rate was active finger angular velocity, magnet distance and active finger angle. The optimization module of Design-Expert 11.0 software was used to optimize the factors with the maximum picking success rate as the optimization objective, and the optimization results were obtained as follows: magnet distance was 40.04 mm, active finger rotation angle was 153.0° and active finger angular velocity was 3.38 rad/s. The picking experiment of famous tea was carried out with the optimized parameters, and the results showed that the picking success rate was 74.3%, the average speed of three picking was 25.2 pieces/min, the relative error between the test value and the predicted value was less than 5%, and the optimized model results were reliable.

Key words: famous tea; picking manipulator; response surface; picking success rate

收稿日期: 2021-06-01 修回日期: 2021-07-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51975537)和浙江省基础公益研究计划项目(LGN18E050002)

作者简介: 贾江鸣(1979—),男,讲师,博士,主要从事人工智能算法和软体机器人研究,E-mail: Jarky@zstu.edu.cn

通信作者: 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

近年来,我国人口老龄化加重^[1-3],导致在较短的采茶期内采茶工缺乏,且采茶工的劳动强度大,劳动成本高,制约茶叶的产量和效益^[4-10]。

针对以上问题,国内外学者开展茶叶采摘机械化的研究,以缓解茶叶采摘用工难的现状。文献[11]设计一种剪刀式茶叶采摘机,该采茶机由曲柄滑块机构、弹簧剪和螺纹丝杠等部件组成,具有结构简单、成本低和易维护的优点。文献[12]将茶叶采摘末端执行器安装在 Delta 并联机械臂末端,设计一种并联式茶叶采摘机器人,借助并联机械臂操作灵活的优点提升机械化茶叶采摘的效率。文献[13]开发一种自走式茶叶采摘机器人,适应多地形、多垄宽的茶叶种植环境。文献[14]模拟人手采茶动作设计一种 6 自由度拉拔式的茶叶采摘机械臂,虽然该机械臂有运动灵活的优点,但其控制难度较高。以上提出的采茶机器人结构较大,均需安装在自走平台上完成茶叶采摘作业。因此,面对我国茶叶种植区多为坡度较大的丘陵地带,这些茶叶采摘机器人难以大范围推广。

为提升我国丘陵地带茶叶种植区的机械化采摘水平,部分学者对便携式茶叶采摘机进行研究。文献[15-18]依据往复切割收获农作物的原理设计多种便携往复切割式采茶机,这些采茶机由单人或双人操作,可在丘陵地带茶叶种植区进行作业,采茶效率高。但便携往复切割式采茶机以“收割”的方式采摘茶叶,只适合经济效益较低的大宗茶采摘,难以对品相(长短、大小、完整度等)要求

较高的名优茶进行采摘。针对名优茶的采摘,文献[19]在研究茶叶形状的基础上设计一种名优茶剪切采摘机械手,但在剪切过程中,茶叶组织细胞破裂,细胞液中茶多酚成分与空气氧化形成黑色物质,茶叶断口呈现黑色,降低了名优茶的经济效益。

为了实现丘陵山区名优茶的低损采摘,减少茶农劳动强度,本文模拟人手采摘茶叶的方式,设计一种手持式名优茶嫩梢采摘机械手。采用三因素三水平的 Box - Behnken 响应面分析方法研究各因素对采摘成功率的交互影响,运用 Design-Expert 11.0 软件对该机械手的工作参数进行二次回归模型优化,最后进行试验验证。

1 采茶机械手设计

1.1 采茶机械手整体设计

目前最好的名优茶采摘工艺仍为手工采摘,手工采摘的名优茶具有质量高、品相好的优点^[20-22]。采茶过程中,拇指和食指夹紧茶梗,折弯提拉后使其断裂,对芽叶没有损伤,能够保持名优茶的品相和经济效益。本文模拟图 1 所示的手工采摘茶叶的动作设计手持式名优茶嫩梢采摘机械手,对手工采茶动作分解如下:①如图 1a 所示,拇指和食指张开一定距离,运动到茶叶上方并夹紧茶梗,此时夹紧位置为断梗位置。②如图 1b 所示,逆时针转动手腕,被夹紧的茶梗跟随手指转动,茶梗被折弯。③如图 1c 所示,折弯茶梗后,手臂向上拉动迫使茶梗在夹紧点断裂。④如图 1d 所示,将断裂的茶叶放至随身携带的茶叶采收筐中,完成茶叶采摘过程。

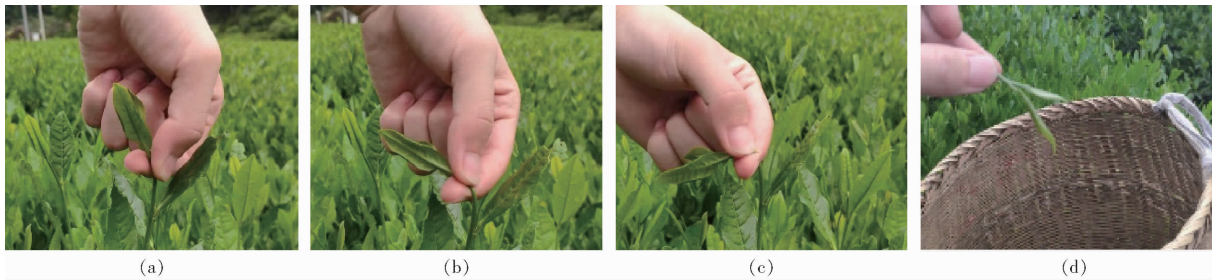


图 1 手工采茶过程动作分解

Fig. 1 Decomposition of actions of manual tea picking

模仿图 1 所示的手工采茶动作,设计如图 2 所示的手持式名优茶嫩梢采摘机械手。该机械手由送料机构、采摘机构和舵机组成。舵机驱动采摘机构完成茶叶采摘,如图 3 所示,主要由主动手指、从动手指、柔性夹紧块、对射光电开关、一对相互吸合的磁钢和磁钢安装板构成。其中,主动手指和从动手指相对安装,从动手指下端设置有弧形凹槽,与弧形凹槽对应的柔性夹紧块固定在主动手指下端,在两

手指夹紧状态下柔性夹紧块与弧形凹槽贴合,柔性夹紧块由与人手指硬度相近的硅胶材料制成;对射光电开关分别安装在主动手指和从动手指中部,以点射光源是否被遮挡来检测待采区是否有茶叶;一对相互吸合的磁钢分别安装在磁钢安装板和从动手指上,以磁钢的吸合力作为茶梗的拉断力。

1.2 采茶机械手工作原理

如图 4 所示,手持式名优茶嫩梢采摘机械手模

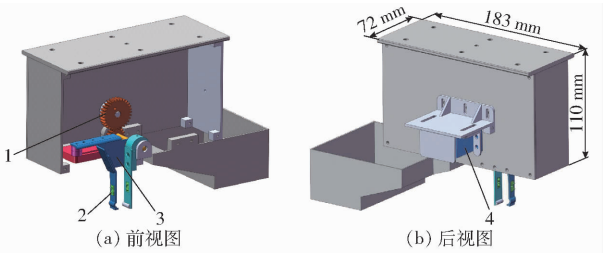


图 2 采茶机械手结构示意图

Fig. 2 Schematics of tea picking manipulator

1. 送料机构 2. 对射光电开关 3. 采摘机构 4. 舵机

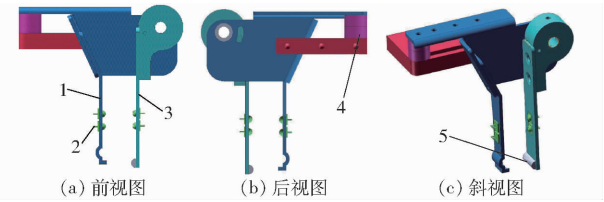


图 3 采摘机构图

Fig. 3 Picking mechanism diagrams

1. 从动手指 2. 对射光电开关 3. 主动手指 4. 磁钢 5. 柔性夹紧块

拟人工采茶的动作采摘茶叶,主要包括采摘检测、柔性夹紧和折弯、提拉断梗和送料 3 个动作:
①图 4a、4b 所示为采摘检测,机械手放置在茶叶上方,对射光电开关检测待采区是否有茶叶。机械手上下移动过程中,若待采区有茶叶,触发光电开关,舵机驱动采摘机构采摘茶叶。
②图 4c 所示为柔性夹紧和折弯,舵机带动主动手指沿顺时针转动,柔性夹紧块将茶梗夹紧在从动手指下端的弧形凹槽内,同时被夹紧的茶梗在弧形凹槽内被折弯。
③图 4d、4e 所示为提拉断梗和送料,茶梗被夹紧并折弯后,舵机带动主动手指继续沿顺时针转动,主动手指推动从动手指随动,安装在磁钢安装板和从动手指左端的一对磁钢从相互吸合的状态分离,茶梗被拉断。主动手指和从动手指继续沿顺时针转动,茶叶被送至采收盒内,完成茶叶采摘动作。如图 4f 所示,完成茶叶采摘后,舵机驱动主动手指和从动手指沿逆时针旋转回复到初始位置,并准备继续执行下一次采摘动作。

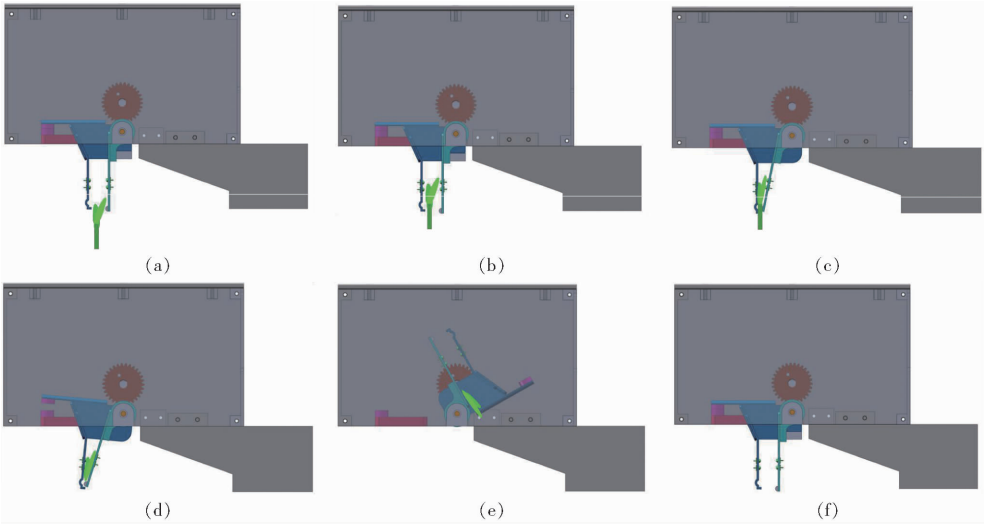


图 4 茶叶采摘过程

Fig. 4 Tea picking process

2 茶叶采摘影响因素确定与实现

通过对图 4 所示手持式名优茶嫩梢采摘机械手采茶动作的分析,确定影响该机械手采茶成功率的因素主要为磁钢安装点与主动手指旋转轴的距离(磁钢距离)、主动手指角速度和主动手指转角。

2.1 磁钢距离

为了控制主动手指与从动手指之间的夹紧力,根据手持式名优茶嫩梢采摘机械手模拟人工采茶的动作分析可知,主动手指在转动过程中克服一对磁钢的吸合力而拉断茶梗。图 5a 为拉断茶梗过程中的运动分析,对从动手指关于旋转轴的力矩平衡有

$$F_M l_M - F_N l_N = 0 \tag{1}$$

式中 F_M ——磁钢吸合力,测得为 4.16 N
 l_M ——磁钢安装点到主动手指旋转轴距离
 F_N ——柔性夹紧块对茶梗挤压力
 l_N ——夹紧点到主动手指旋转轴垂直距离,为 58 mm
若茶梗断裂,则有

$$\mu F_N = F_B \geq F_b \tag{2}$$

式中 μ ——柔性夹紧块与茶梗的摩擦因数,为 1.3
 F_B ——柔性夹紧块与茶梗之间摩擦力
 F_b ——茶梗拉断力

为计算磁钢安装点到主动手指旋转轴的距离 l_M ,需对茶梗拉断力 F_b 进行测量。如图 6a 所示,使用单轴拉伸试验机(QT-6203S 型,苏州谦通仪器设

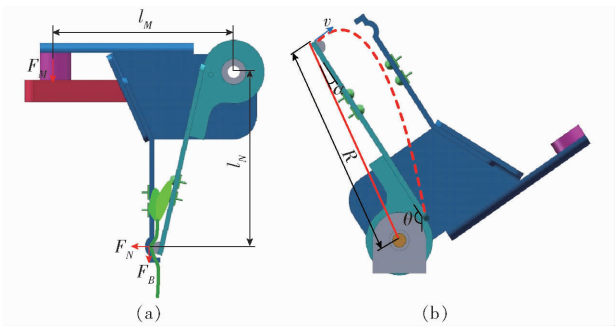


图 5 采摘机构运动分析

Fig. 5 Motion analysis diagrams of picking mechanism

备有限公司)测量茶梗的拉断力 F_b 。试验对象为在杭州茶叶研究所内采摘的带梗茶叶(龙井 43),拉伸数量为 200 根新鲜茶梗。为避免夹持器对茶叶的夹持损伤,在茶梗两端的夹持位置包裹一层硅橡胶,拉伸速度均为 0.1 mm/s。试验结果如图 6b 所示,200 根茶梗的拉断力呈正态分布,最大拉断力为 3.6 N。将最大拉断力代入式(1)、(2)可得磁钢安装点到主动手指旋转轴的距离 $l_M \geq 38.61$ mm, l_M 的最小值取为 40 mm。由预试验可知,当 l_M 大于 58 mm 时,茶梗会因柔性夹紧块的挤压力过大而损坏。因此,磁钢安装点到主动手指旋转轴的可行距离(磁钢距离)范围为 $40\text{ mm} \leq l_M \leq 58\text{ mm}$ 。

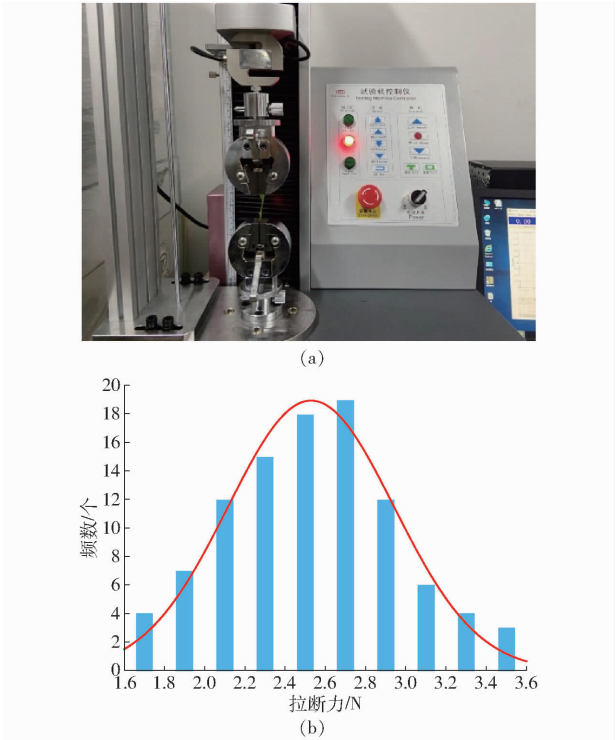


图 6 茶梗拉伸试验与拉断力统计

Fig. 6 Tensile test and breaking force statistics of tea stem

2.2 主动手指角速度

主动手指的角速度越大,采茶机械手的工作效率越高。主动手指角速度由舵机的角速度决定,受限于舵机性能,主动手指角速度 ω 最大为 3.39 rad/s。

由预试验可知,当主动手指的角速度 ω 小于 2.62 rad/s 时,茶叶易从两手指的侧面空隙掉落,降低采茶成功率。因此,机械手主动手指的可行角速度范围为 $2.62\text{ rad/s} \leq \omega \leq 3.39\text{ rad/s}$ 。

2.3 主动手指转角

主动手指的转角决定了茶叶是否能够从两手指末端掉落进茶叶采收盒,从而影响该机械手的采茶成功率。图 5b 所示为茶叶从两手指末端掉落进茶叶采收盒的临界状态,主动手指的转角为 θ ,茶叶在两手指之间的待采区内的运动路线呈抛物线。若主动手指的转角过小时,茶叶的落点仍在主动手指上,且手指回转变位的速度较快,导致茶叶较难进入采收盒,降低采茶成功率。在图 5b 所示状态下,忽略茶叶掉落过程中的空气阻力,则其在竖直方向和水平方向的位移为

$$R\sin\alpha\cos\theta = -v_0t\sin\theta + \frac{1}{2}gt^2 \tag{3}$$

$$R\cos\alpha\sin\theta = v_0t\cos\theta \tag{4}$$

式中 R ——主动手指末端转动半径
 α ——主动手指末端到轴心的连线与主动手指平面之间的夹角
 v_0 ——主动手指末端线速度
 t ——茶叶从抛出到进入茶叶采收盒的时间
主动手指末端线速度 v_0 与主动手指角速度 ω 的关系为

$$v_0 = \omega R \tag{5}$$

式中,受限于手持采摘机械手的尺寸 $R = 62.5\text{ mm}$,主动手指的最大角速度为 $\omega = 3.39\text{ rad/s}$ 。将以上参数代入式(3)~(5),可得临界状态下 $\theta = 140^\circ$ 。由于转角 $\theta > 170^\circ$ 时,从动手指与茶叶收集盒发生干涉,因此可行的转角范围为 $140^\circ \leq \theta < 170^\circ$ 。

3 影响因素试验优化

3.1 试验设计

对该机械手进行三因素三水平 Box - Behnken 茶叶采摘试验,试验因素编码如表 1。

表 1 试验因素编码

Tab. 1 Experimental factors

编码	因素		
	主动手指角速度	主动手指转角	磁钢距离
	$\omega/(rad \cdot s^{-1})$	$\theta/(^\circ)$	l_M/mm
1	3.39	140	58
0	3.00	155	49
-1	2.62	170	40

3.2 试验指标

以手持式名优茶嫩梢采摘机械手的采摘成功率

为试验指标,其计算公式为

$$\varphi = \frac{N_s}{N_t} \times 100\%$$

(6)

式中 N_t ——采摘茶叶总数
 N_s ——成功落入茶叶采收盒的茶叶数量

3.3 试验方案与结果

使用手持式名优茶嫩梢采摘机械手样机在杭州茶叶研究所进行名优茶(龙井43)采摘试验。该试验采用三因素三水平的 Box-Behnken 试验,共进行 17 组。每组试验采摘茶叶总数为 100 个,并统计成功采摘的名优茶数量,代入式(6)计算采摘成功率。为减小测量误差,每组试验进行 3 次取平均值,试验结果见表 2。

表 2 试验方案与结果

Tab.2 Experiment design and results

序号	磁钢距离 l_M/mm	主动手指转角 $\theta/(^{\circ})$	主动手指角速度 $\omega/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	采摘成功 率/%
1	49	140	2.62	58
2	49	140	3.39	62
3	49	170	2.62	30
4	49	170	3.39	71
5	40	155	2.62	56
6	40	155	3.39	72
7	58	155	2.62	52
8	58	155	3.39	44
9	40	140	3.00	74
10	40	170	3.00	44
11	58	140	3.00	38
12	58	170	3.00	62
13	49	155	3.00	45
14	49	155	3.00	35
15	49	155	3.00	38
16	49	155	3.00	37
17	49	155	3.00	49

3.4 结果分析

3.4.1 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 3(A 、 B 、 C 为因素编码值),采摘成功率 φ 的回归模型 $P<0.05$,表明该模型显著;模型的决定系数 R^2 为 0.883,表明该模型可以解释 88.3% 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 、 C 、 AB 对采摘成功率 φ 影响显著, BC 对采摘成功率 φ 影响极显著,说明磁钢距离、主动手指角速度和主动手指转角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,得到磁钢距离、主动手指角速度和主动手指转角对采摘成功率 φ 影响的回归方

程为

$$\varphi = 40.80 + 6.62A - 3.13B - 6.25C + 9.25AB - 6.00AC + 13.50BC + 7.98A^2 + 6.48B^2 + 7.22C^2$$

(7)

表 3 采摘成功率方差分析

Tab.3 Variance analysis of picking success rate

方差来源	均方	自由度	平方和	P	贡献率/%
模型	2 698.45	9	299.83	0.014 6 *	
A	351.12	1	351.12	0.034 3 *	2.41
B	78.13	1	78.13	0.256 1	1.94
C	312.50	1	312.50	0.042 6 *	2.39
AB	342.25	1	342.25	0.036 0 *	
AC	144.00	1	144.00	0.137 0	
BC	729.00	1	729.00	0.006 9 **	
A^2	267.79	1	267.79	0.055 8	
B^2	176.53	1	176.53	0.105 4	
C^2	219.79	1	219.79	0.076 7	
残差	357.55	7	51.08		
失拟项	216.75	3	72.25	0.2492	
纯误差	140.80	4	35.20		
总和	3 056.00	16			

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

根据模型方差的分析知主动手指转角对采摘成功率影响不显著,原因是两手指在夹紧茶叶后形成一个几乎封闭的通道,尽管主动手指转角对茶叶掉落有影响,但不显著。

3.4.2 交互因素对试验指标影响分析

Design-Expert 11.0 软件分析表明,主动手指角速度、主动手指转角和磁钢距离存在交互影响,需要进一步深入的分析各因素对采摘成功率的影响。为了直观了解各交互因素对试验指标的影响,忽略不显著的交互影响因素,通过 Design-Expert 11.0 软件得到交互因素对采摘成功率影响的响应面图,如图 7 所示。

图 7a 为磁钢距离位于中心水平(49 mm)时,主动手指角速度与转角对茶叶采摘成功率交互影响的响应面图。当主动手指角速度较低时,随着转角的减小采摘成功率有所提升,原因是茶叶刚拉断时具有较大的速度,易从两手指间掉落到收集盒,如转角增大反而不易掉落到收集盒。当转角较大时,随着角速度的增大采摘成功率增大,原因是较大的角速度带动茶叶具有较大的切向速度,有效提高采摘成功率。

图 7b 为主动手指角速度位于中心水平(3.00 rad/s)时,磁钢距离与主动手指转角影响采摘成功率的响应面图。当主动手指转角较小时,磁钢距离越小,茶叶采摘的成功率越大,原因是若

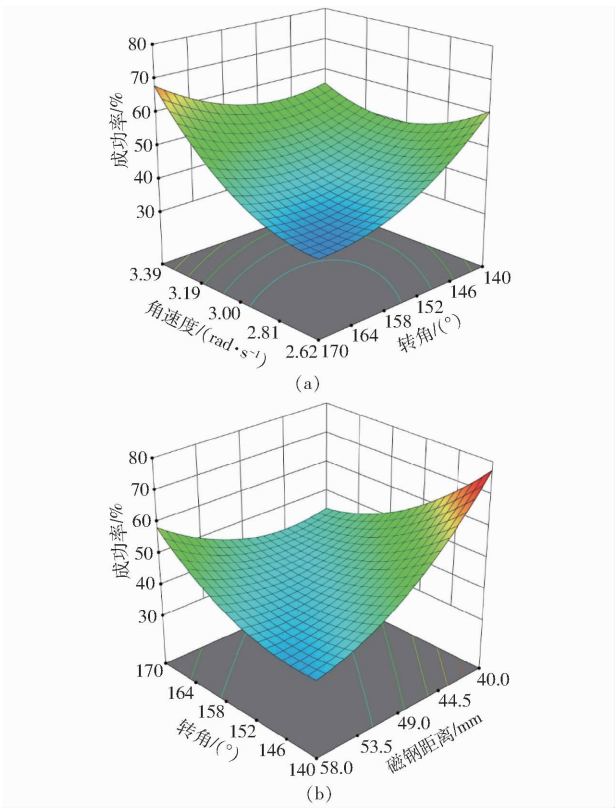


图 7 因素交互作用对成功率的影响曲面

Fig.7 Response surfaces of factor interacting on success rate

磁钢距离太大,手指转动所需的力矩过大,茶叶具有过大的运动速度,易从两指缝中甩出,不能掉落到收集盒。

3.4.3 参数优化与试验验证

茶叶采摘成功率是衡量采茶机械手作业效果的重要指标,运用 Design-Expert 11 软件中 Optimization 功能,以采摘成功率最大为目标函数,对各参数进行优化得最优参数为: $l_M = 40.038\text{ mm}$, $\theta = 152.994^\circ$, $\omega = 3.379\text{ rad/s}$,采摘成功率 $\varphi = 75.43\%$ 。受限于加工精度将上述优化后的参数近似处理并进行采摘试验,其中磁钢距离 $l_M = 40.04\text{ mm}$ 、主动手指转角 $\theta = 153.0^\circ$ 、主动手指角速度 $\omega = 3.38\text{ rad/s}$ 。试验重复 3 次,试验结果分别为 72%、74%、77%。试验现场作业与采摘过程分别见图 8、9。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的因素,如茶叶嫩梢的生长姿态不同;采摘点不断变化;采摘过程中,茶叶采摘点和采摘角度在自然环境下会随机变动,因此采摘成功率有待进一步提高。在 3 次采摘试验中,采摘时间均为 10 min,对每次试验采摘

的嫩梢个数进行统计并计算采摘速度为 25.4、26.2、24.0 个/min,3 次采摘平均速度为 25.2 个/min。整机质量 209 g,可进行长时间作业,有效降低了手工采茶劳动强度。



图 8 现场作业
Fig.8 Field operation

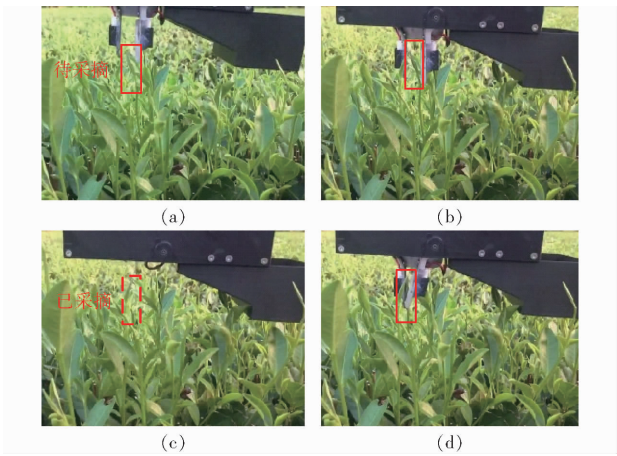


图 9 采摘过程
Fig.9 Tea picking process

4 结论

- (1)设计了一种模拟人手采摘茶叶的手持式名优茶嫩梢采摘机械手,通过初步试验和理论计算确定了影响该机械手采摘成功率的影响因素。
- (2)运用 Design-Expert 11.0 软件进行了三因素三水平的 Box – Behnken 试验,确定了各因素对采摘成功的影响由大到小为:主动手指角速度、磁钢距离、主动手指转角。
- (3)运用 Design-Expert 11.0 软件,以采摘成功率最高为优化目标,确定优化参数为磁钢距离 $l_M = 40.04\text{ mm}$ 、主动手指转角 $\theta = 153.0^\circ$ 、主动手指角速度 $\omega = 3.38\text{ rad/s}$ 。现场采摘试验表明,以优化后参数实现的采摘机械手 3 次试验的平均采摘速度为 25.2 个/min,采摘成功率为 74.3%,试验值与预测值的误差小于 5%。

参 考 文 献

[1] 付伟. 乡土社会与产业扎根——脱贫攻坚背景下特色农业发展的社会学研究[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2019, 19(5): 16–24.
FU Wei. Agricultural industrialization rooted in the rural community—asociological study of characteristic agriculture in the

- context of poverty alleviation[J]. Journal of Beijing University of Technology (Social Sciences Edition), 2019, 19(5): 16 – 24. (in Chinese)
- [2] 罗泽涌, 陈建, 方晶晶, 等. 我国丘陵山区茶园种植机械化现状与发展研究[J]. 农机化研究, 2020, 42(2): 1 – 7. LUO Zeyong, CHEN Jian, FANG Jingjing, et al. Current situation and development suggestions of tea garden planting mechanization in hilly and mountainous areas[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(2): 1 – 7. (in Chinese)
- [3] 刘继展. 温室采摘机器人技术研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 1 – 18. LIU Jizhan. Research progress analysis of robotic harvesting technologies in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 1 – 18. (in Chinese)
- [4] 杜建斌, 陈富桥, 姜仁华, 等. 斯里兰卡茶产业发展现状及对中国的启示[J]. 世界农业, 2017(4): 164 – 170, 227. DU Jianbin, CHEN Fugiao, JIANG Renhua, et al. Development of Sri Lanka tea industry and enlightenment to China[J]. World Agriculture, 2017(4): 164 – 170, 227. (in Chinese)
- [5] 汤一平, 韩旺明, 胡安国, 等. 基于机器视觉的乘用式智能采茶机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 15 – 20. TANG Yiping, HAN Wangming, HU Anguo, et al. Design and experiment of intelligentized tea-plucking machine for human riding based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 15 – 20. (in Chinese)
- [6] 易文裕, 程方平, 邱云桥, 等. 单人采茶机研究现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(11): 33 – 38. YI Wenyu, CHENG Fangping, QIU Yunqiao, et al. Research status and development trend of single tea-picking machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(11): 33 – 38. (in Chinese)
- [7] 袁海波, 滑金杰, 邓余良, 等. 基于 YJY – 2 型鲜叶分级机的机采茶叶分级分类工艺优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 276 – 282. YUAN Haibo, HUA Jinjie, DENG Yuliang, et al. Optimization of grading and classification technology for machine-picking leaves based on YJY – 2 type classifier[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6): 276 – 282. (in Chinese)
- [8] 石建军, 黄彪, 陈玮珩, 等. 茶叶采摘技术研究进展[J]. 农业科学, 2021, 11(2): 150 – 155. SHI Jianjun, HUANG Biao, CHEN Weiheng, et al. Some developments in the research of tea picking technology[J]. Hans Journal of Agricultural Sciences, 2021, 11(2): 150 – 155. (in Chinese)
- [9] 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.
- [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] 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)
- [12] 范元瑞. 并联式自动采茶机的设计与研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2019. FAN Yuanrui. Design and research of automatic tea picking machine based on parallel robot[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [13] 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, 169. 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, 169. (in Chinese)
- [14] 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: 3275 – 3282.
- [15] 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(1): 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(1): 221 – 226. (in Chinese)
- [16] 吴先坤, 李兵, 王小勇, 等. 单人背负式采茶机的设计分析[J]. 农机化研究, 2017, 39(8): 92 – 96, 101. WU Xiankun, LI Bing, WANG Xiaoyong, et al. Design and analysis of single knapsack tea plucking machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(8): 92 – 96, 101. (in Chinese)
- [17] 刘彪, 肖宏儒. 单人电动茶叶采摘机主要机构设计[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(5): 180 – 182. LIU Biao, XIAO Hongru. Design of main mechanism of a single electric tea-picking machine[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(5): 180 – 182. (in Chinese)
- [18] 王升. 便携式电动采茶机关键部件设计与试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018. WANG Sheng. Research design and experimental study on portable electric tea plucking machine[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018. (in Chinese)
- [19] 尚凯歌. 茶叶采摘机器人机械结构设计及控制系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2019. SHANG Kaige. Mechanical structure design and control system research of tea-picking robot[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [20] 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)
- [21] 韩余, 肖宏儒, 秦广明, 等. 国内外采茶机械发展状况研究[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(2): 20 – 24. HAN Yu, XIAO Hongru, QIN Guangming, et al. Studies on develop situations of tea-leaf picker both at home and abroad[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(2): 20 – 24. (in Chinese)
- [22] 张艳, 王鹏, 曾祥平. 轻便型电动采茶机的开发研究[J]. 四川农业与农机, 2016(3): 46 – 47. ZHANG Yan, WANG Peng, ZENG Xiangping. Development and research of portable electric tea plucking machine[J]. Sichuan Agriculture and Agricultural Machinery, 2016(3): 46 – 47. (in Chinese)