

分体刀具式名优茶采摘末端执行器设计与试验优化

陈建能^{1,2} 李杭¹ 刘林敏³ 贾江鸣^{1,2} 赵润茂^{1,2} 武传宇^{1,2}

(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. 浙江省松阳县农业农村局, 松阳 323400)

摘要: 针对名优茶机械化采摘过程中侧芽无法采摘的问题, 根据顶芽、侧芽及茶梗的相关参数并结合茶园环境设计了一种末端执行器, 利用分体式刀具的刀齿弯曲变形适应茶梗的干扰从而采摘侧芽。通过有限元仿真刀具切割侧芽得到采摘成功率的影响因素为刀齿宽度、刀齿长度及刀具厚度; 采用三因素三水平的中心组合设计与响应面分析法研究各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, 确定各因素对采摘成功率的影响显著性主次排序为: 刀齿长度、刀齿宽度、刀具厚度。以采摘成功率为目标对各试验因素进行优化, 得到优化后的刀齿宽度、刀具厚度、刀齿长度分别为 2.6、0.9、20.0 mm。采用优化后的参数进行茶园采摘试验, 结果表明, 末端执行器能够有效完成茶叶采摘工作, 顶芽、侧芽采摘成功率分别为 93%、63%, 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; 采茶机器人; 末端执行器; 分体式刀具; 侧芽

中图分类号: S225.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)01-0039-08

OSID:



Design and Experimental Optimization of End Effector for Picking Famous Tea with Split-cutter

CHEN Jianneng^{1,2} LI Hang¹ LIU Linmin³ JIA Jiangming^{1,2} ZHAO Runmao^{1,2} WU Chuanyu^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, 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, Zhejiang Province, Songyang 323400, China)

Abstract: In response to the problem of side buds being unable to be picked during the mechanized picking process of famous tea, an end effector was designed based on the relevant parameters of top buds, side buds, and tea stems, combined with the tea garden environment, which used the bending deformation of the cutter teeth of the split cutter to adapt to the interference of tea stems to pick side buds. The influencing factors of picking success rate were obtained by finite element simulation of cutting lateral buds; cutter tooth width, cutter tooth length and cutter thickness; the central composite design with three factors and three levels and response surface analysis were used to study the interaction of various factors on the success rate of picking; taking the picking success rate as the response value, a quadratic regression model was established to determine the significant primary and secondary order of the influence of each factor on the picking success rate as follows: cutter tooth length, cutter tooth width, and cutter thickness. Taking the picking success rate as the goal, the experimental factors were optimized, and the optimized parameters were obtained: the cutter tooth width, cutter thickness, and cutter tooth length were 2.6 mm, 0.90 mm, and 20.0 mm, respectively. The optimized parameters were tested in tea garden picking, the results showed that the end effector could effectively pick tea leaves, and the success rate of picking top buds and side buds was 93% and 63%, the relative error between the experimental value and the predicted value was less than 5%, the optimized model was reliable.

Key words: famous tea; tea picking robot; end effector; split cutter; lateral bud

收稿日期: 2023-06-13 修回日期: 2023-07-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51975537, 52105284, U23A20175)和浙江省“领雁”研发攻关计划项目(2022C02052)

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

名优茶具有采摘周期短、季节性强、采摘要求高的特点^[1-3]。目前,名优茶的采摘主要依靠人工作业的方式完成,但在采摘时节往往面临采茶用工荒的问题,因此,名优茶的机械化采摘问题亟需解决^[4-7]。末端执行器作为采茶机器人的执行部件,负责将茶叶从树冠上分离出,故其工作性能直接影响采茶机器人的作业效果。

针对以上问题,国内外学者对机械化采茶进行了相关研究,以解决目前所面临的采茶用工荒现象。高凤^[8]设计的末端执行器采用电机作为源动件,丝杠带动左右两侧夹具相向运动,从而完成茶叶的采摘,但其并未进行茶园试验验证末端执行器的有效性。郝森等^[9]通过模仿人工“提手采”的动作设计末端执行器,采摘指通过定位、夹紧、提拉等动作实现对茶叶的选择性采摘,但该机械手尺寸过大,不适用于茶园采摘。朱任章^[10]针对侧芽无法采摘这一问题,设计了一种多自由度末端执行器,末端通过带动柔性指尖将待采茶叶嫩梢夹持,并利用腕部电机转动完成采摘,但每次采摘完成后需要将茶叶嫩梢放置于收集装置中,采摘效率较低。ZHU等^[11]设计的末端执行器采用舵机作为源动件,该末端通过钢丝绳及不完全齿轮的传动作用,间接形成了两刀片的剪切动作从而完成茶叶的采摘工作。陈建能等^[12]设计的末端执行器采用齿轮传动的方式完成两环形刀片的剪切动作,其中环形刀半径与螺纹管管口半径相适应,能够有效避免障碍物的干扰。贾江鸣等^[13]设计了一种手持式末端执行器,模拟人手指夹住茶叶并通过提拉动作采摘茶叶,具有结构简单、使用方便的优点。许丽佳等^[14]设计了一种可夹提式茶叶采摘末端执行器,通过夹持件的夹持及提拉作用完成茶叶的采摘,但该末端结构较大,在复杂的茶园环境背景下,难以实现机械化采摘。茶园环境中,茶叶与茶梗交错分布,以上提出的末端执行器无法在茶梗干涉的条件下采摘侧芽且采摘效率较低,故难以满足机械化采茶的需求。

针对上述问题,本文基于刀齿的弯曲变形设计一种末端执行器,采摘顶芽和在茶梗干涉的条件下采摘侧芽。以刀齿宽度、刀齿长度及刀具厚度为试验因素,以顶芽、侧芽采摘成功率为优化目标,采用有限元分析法及响应面分析法对末端执行器进行设计优化。

1 名优茶采摘末端执行器设计

基于前期研究^[12]中一芽二叶的叶展、叶宽及自

然生长密度等参数,本文对茶叶、茶梗的相关参数开展进一步测量。浙江一带的茶叶品种多为龙井43、中茶108、安吉白茶等,几何尺寸及物理参数较为接近,本文以龙井43为例进行数据测量,试验地点为中国农业科学院茶叶研究所。

1.1 茶叶、茶梗几何尺寸测量

茶叶、茶梗几何尺寸的测量样本为随机选取的50片一芽二叶及50根茶梗。如图1所示,通过测量茶径 D_0 、茶梗径 D 、侧芽生长角 θ 以及侧芽节间距 l_0 来合理设计末端执行器结构并建立有限元仿真模型。测量工具是精度为0.01 mm的德国艾瑞泽游标卡尺、量角器。对测量结果进行统计,如表1所示,结果表明,一芽二叶存在较大的个体差异,因此,茶叶采摘末端执行器需具备较强的适应性。

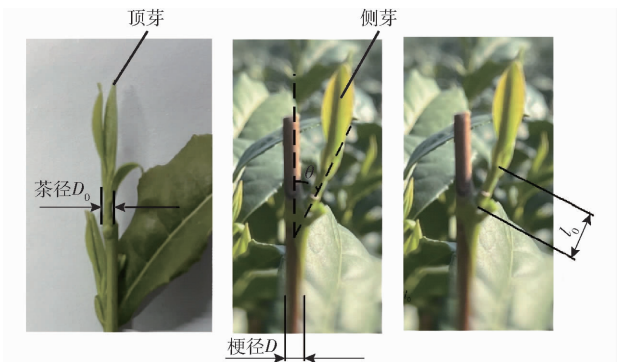


图1 茶叶及茶梗几何尺寸

Fig. 1 Geometric dimensions of tea leaves and tea tree stem

表1 茶叶及茶梗几何尺寸统计

Tab. 1 Statistics of geometric dimensions

参数	最大值	最小值	平均值	标准差
茶径/mm	2.30	1.80	2.00	0.13
侧芽节间距/mm	13.00	8.00	8.60	2.33
侧芽生长角/(°)	30.00	14.00	26.40	6.25
梗径/mm	3.20	2.80	3.02	0.12

1.2 茶叶、茶梗物理参数测量

如图2所示,选取茶叶、茶梗各20个测量剪切力及弹性模量,测量工具是精度为示值0.5%以内的WDW-1000型微机控制电子万能试验机(温州

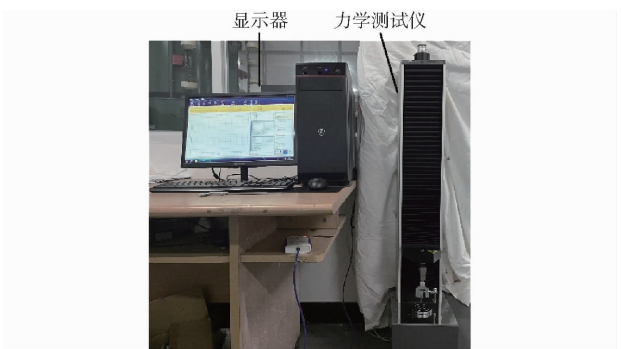


图2 剪切力及弹性模量测量

Fig. 2 Measurement of shear force and elastic modulus

韦度电子有限公司)。如图 3 所示,选取一芽二叶 60 个为一组,约 50 mm 长的茶梗 12 个为一组进行密度测定,工具是精度为 0.01 g 的 KFS 型电子秤(凯丰集团有限公司)及容量为 100 mL 的量筒,对试验结果进行统计,如表 2 所示。



图 3 茶叶及茶梗密度测量
Fig. 3 Measurement of density

表 2 物理参数统计结果

Tab. 2 Statistics of physical parameters

参数	最大值	最小值	平均值	标准差
茶茎剪切力/N	3.90	2.10	2.89	0.53
茶叶弹性模量/MPa	3.11	1.93	2.55	0.49
茶叶密度/(kg·m ⁻³)	812.90	785.30	804.60	11.56
茶梗剪切力/N	11.80	8.90	10.70	1.01
茶梗弹性模量/MPa	66.50	49.68	58.67	5.80
茶梗密度/(kg·m ⁻³)	1 009.66	881.43	931.15	56.17

其中,茶叶、茶梗弹性模量计算式为

$$E = \frac{FL}{\Delta LA} \tag{1}$$

式中 F ——试验压力

A ——试验前茶茎或茶梗截面积

ΔL ——茶茎或茶梗变形长度

L ——试验前茶茎或茶梗长度

密度计算式为

$$\rho = \frac{m}{V_2 - V_1} \tag{2}$$

式中 ρ ——密度 m ——质量

V_1 ——茶叶或茶梗浸水前量筒中的液面高度
对应体积

V_2 ——茶叶或茶梗浸水后量筒中的液面高度
对应体积

1.3 末端执行器结构设计

目前,国内外机械化采茶研究中均采用一体式刀具,该类型刀具采摘顶芽具有较好的效果;但由于侧芽生长在茶梗一侧,一体式刀具采摘侧芽时会受到茶梗的阻碍作用而无法完成刀具的闭合动作,故采摘侧芽容易失败。本文采用分体式刀具实现侧芽采摘,即分体式刀具在茶梗的阻碍作用下通过刀齿的弯曲变形实现刀具的闭合动作从而采摘侧芽。

根据茶叶嫩芽主要分布在树冠表层这一特点,采用自上而下的采摘方式可以有效减少障碍物的干扰。末端执行器结合轻量化、集成化的要求进行设计,如图 4a 所示,主要包括舵机、传动机构、剪切机构及负压管。

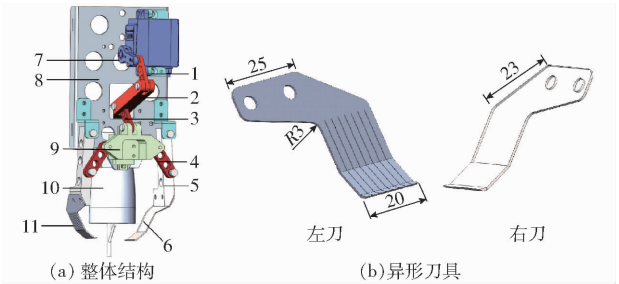


图 4 茶叶采摘末端执行器整体和异形刀具结构图
Fig. 4 Structure diagram of tea picking end effector and special shaped cutter

1.1 号连杆 2.2 号连杆 3.3 号连杆 4.4 号连杆 5.刀片安装板 6.一体式刀具 7.舵机 8.固定板 9.滑轨 10.负压管 11.分体式刀具

舵机作为源动件,其力矩与刀具所形成的剪切力密切相关。舵机型号为 DS3115,扭矩为 1.7 N·m,角速度为 6.5 rad/s。

传动机构采用连杆传动。各连杆间的连接采用铰连接;滑轨确保左右两侧刀具做同步运动;2 号连杆与 3 号连杆能够有效形成省力杠杆。在 Solidworks 软件中,通过对各连杆的设计,确定刀具从初始位置运动至剪切点时,舵机转角为 30°。由于各连杆间传递的力较小并结合轻量化的设计要求,选用铝作为各连杆材料。

如图 4b 所示,剪切机构为固定在刀片安装板上的刀具,左侧刀具经过线切割处理变为分体式,线切割加工精度为 0.01 mm,刀齿间隙为 0.2 mm。分体式刀具的工作原理:采摘侧芽时,两侧刀具在动力源的驱动作用下相向转动并首先夹持茶梗,随着刀具的继续运动,由于茶梗弹性模量较大,与茶梗所接触的分体式刀具的刀齿发生弯曲变形,而其他刀齿可与右侧一体式刀具相配合完成侧芽采摘;采摘顶芽时,由于茶茎的弹性模量较小,分体式刀具在不发生弯曲变形的情况下即可与右侧一体式刀具相配合完成顶芽采摘。

2 茶茎切割过程有限元分析

目前顶芽采摘技术相对成熟,采摘难点主要集中在侧芽,故着重分析侧芽采摘过程。茶叶采摘过程是复杂且随机的,刀齿的弯曲变形及茶茎的断裂属于刚柔耦合的范畴,常规方法难以观察到茶茎、茶梗与刀具的相互作用过程;此外,刀具与茶茎或茶梗

接触区域产生多重应力和变形,这直接影响采摘成功率,因此,采用 ANSYS (2021R1) 软件仿真末端执行器切割茶茎过程^[15-18]。

2.1 有限元模型构建

茶园采摘环境中,末端执行器的作业目标主要分为:生长在茶梗顶部的顶芽以及生长在茶梗侧边的侧芽。当末端执行器采用自上而下的方式采摘顶芽时,茶梗不会干涉刀具的采摘,因此可以忽略茶梗的存在;采摘侧芽时,分体式刀具的刀齿需要在茶梗的干涉下发生弯曲变形从而采摘侧芽,因此采摘侧芽时,茶梗不可忽略。由于刀具并不与茶叶的芽或叶发生相互作用,而是通过对茶茎的剪切实现采摘,因此有限元仿真中仅保留茶茎、梗茎的相关部分。利用 Solidworks2019 软件建立刀具采摘顶芽、侧芽的三维模型并导入到 ANSYS 软件中,建立顶芽、侧芽的有限元模型如图 5 所示。其中,仿真过程中茶茎、茶梗的几何尺寸及物理参数选取表 1、2 中的平均值。

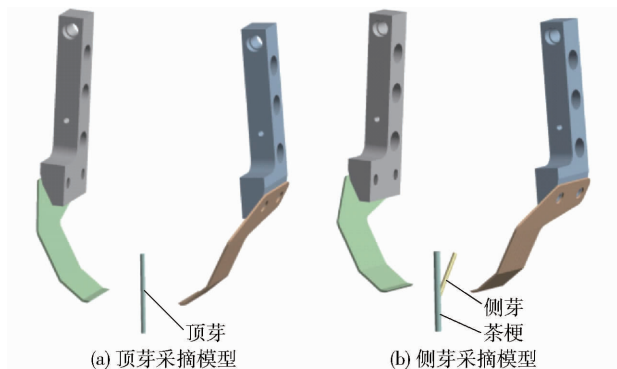


图 5 茶叶采摘有限元模型

Fig. 5 Finite element models of tea picking

2.2 材料设定及边界条件

对有限元仿真过程进行如下假设:试验前,茶茎及茶梗内应力为 0;仿真过程中,含水率及温度等不会发生改变;采摘点位置准确。

茶叶及茶梗泊松比设为 0.3^[19],密度、弹性模量等参数来源于表 2。刀具材料为 65Mn,泊松比为 0.3,密度为 7 850 kg/m³,弹性模量为 210 GPa,屈服极限为 440 MPa^[20]。

根据茶叶生长特性,对顶芽底部及长有侧芽的茶梗底部进行固定端约束。在仿真分析中对茶梗与侧芽进行共享拓扑处理,以实现主体相交处的网格划分。随着切割过程的进行,茶茎的部分元素将会失效,因此采用接触侵蚀控制。为了提高仿真精度,在刀具与茶茎接触区域进行网格加密处理。有限元仿真过程是在重力场的作用下进行的。

2.3 仿真过程分析

有限元仿真中的侧芽断裂及刀具应力变化过

程如图 6 所示。其中,图 6a~6c 为生长在茶梗上的侧芽断裂过程,可以发现:刀具与茶梗接触时开始产生应力并且茶梗发生轻微弯曲;随着刀具的继续运动,刀齿开始接触侧芽的茶茎,同时,茶梗的等效应力逐渐增大。由图 6a 可得:茶茎组织处于弹性变形阶段,茶茎表面并无损坏或破裂;刀具与茶茎的接触面为扁平或椭圆形的横截面;由图 6b、6c 可得:随着刀具的深入,茶茎组织由弹性变形变为局部屈服,最终茶茎达到失效应变,发生断裂,几何形状发生明显变化^[21]。

图 6d~6f 为分体式刀具在采摘侧芽过程中的应力变化图,整个切割过程的最大应力主要集中在与茶梗所接触的刀齿根部附近,然后等效应力以应力波的形式向周围扩散;随着切割过程的继续,与茶梗所接触的刀齿弯曲变形量逐渐增大,而其他刀齿可与一体式刀具相配合完成对侧芽的切割工作。在整个切割过程中,分体式刀具的刀齿通过弯曲变形来适应茶梗的干扰并完成侧芽采摘。

图 6g~6i 为一体式刀具应力变化图,最大应力出现在与茶梗所接触的刀刃口附近。

3 茶叶采摘影响因素分析

茶叶采摘成功率是评价末端执行器工作性能的重要指标。相比末端执行器中的动力源及传动机构,由于剪切机构是与茶茎、梗茎发生交互作用并实现茶叶分离的关键部件,故其对采摘成功率有重要影响。分体式刀具如图 7 所示,关键参数有:刀齿宽度 d 、刀齿长度 l 、刀具厚度 b 、刀刃角 α 及切割速度等。由于刀具厚度较小,难以加工出确切的刀刃角 α ,此外,不同型号舵机转速接近,因此,刀刃角及切割速度不再作为考量因素;其中,刀齿长度 l 计算式为

$$l = l_1 + l_2 \quad (3)$$

式中 l_1 ——刀齿根部至刀齿折弯处的距离

l_2 ——刀齿折弯处至刀口距离

当刀具接触茶茎时,由于存在茶茎表皮韧部组织,待切割茶茎可能会被刀具折弯而非剪断,为减少这种现象发生,上下刀啮合时的间隙应控制在 0.5 mm 内。由于茶茎自身抗弯刚度较弱,选用舵机作为动力源能够保证刀具具有较高的切割速度以获得茶茎较大的反向惯性力,从而有利于切割的完成^[22]。

3.1 刀齿宽度

由于刀具切割侧芽时需要在茶梗干涉的条件下进行,故刀齿宽度应满足

$$D_0 \leq d \leq D \quad (4)$$

刀齿宽度对茶茎能否完全被切断有重要影响。如图 8a 所示,当 $d < D_0$ 时,由于齿宽较小,茶茎仅是

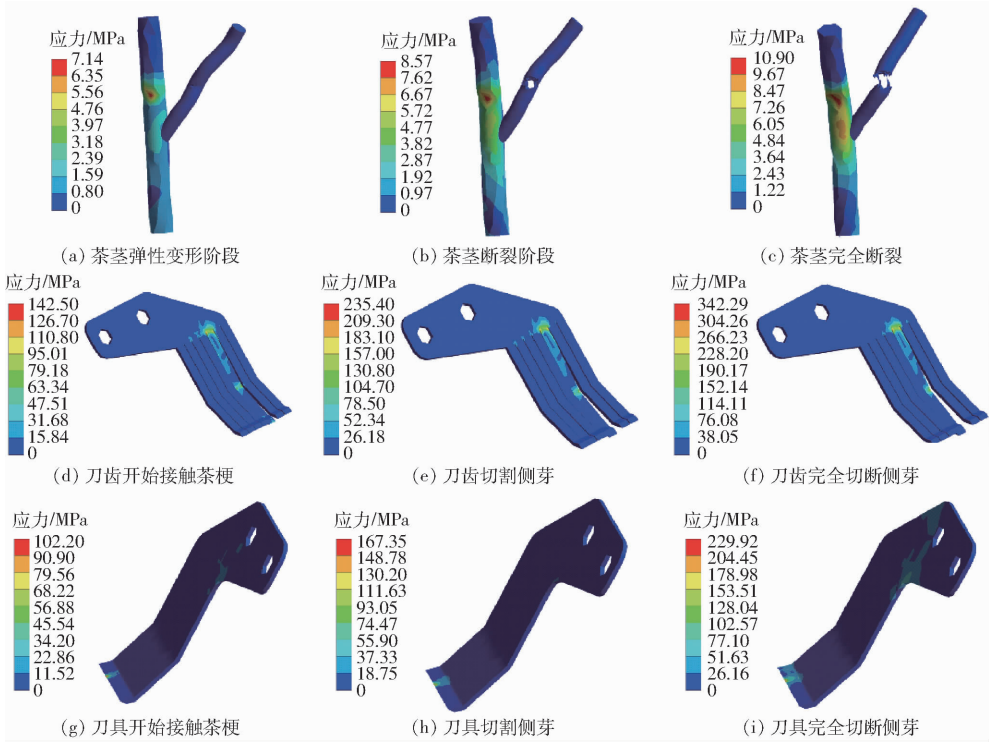


图 6 侧芽采摘过程应力云图

Fig. 6 Stress nephograms in process of picking lateral buds

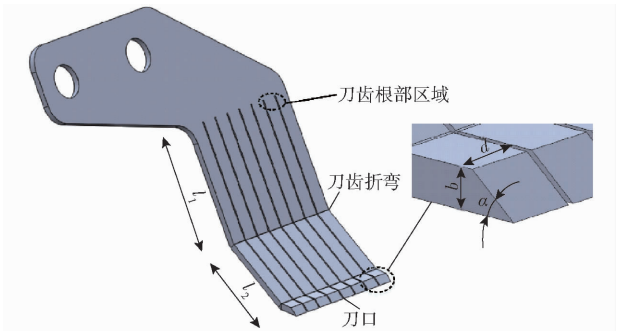


图 7 分体式刀具

Fig. 7 Wire cutting spring knife

局部切断,即采摘失败;如图 8b 所示,当 $d > D_0$ 时,由于齿宽较大,存在 1 个刀齿同时接触茶梗和侧芽的可能,此时侧芽无法采摘。因此,综合表 1 及式(4)可得:刀齿宽度水平为 2.3 ~ 3.1 mm。

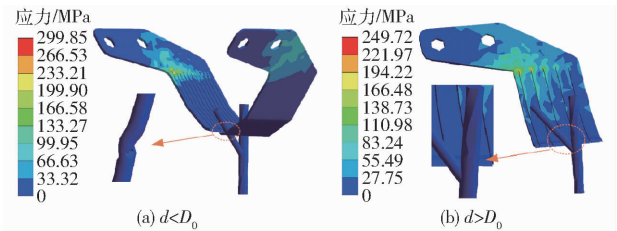


图 8 不同齿宽时茶茎切割应力云图

Fig. 8 Influence of tooth width on cutting

3.2 刀齿长度

刀齿发生弯曲变形时的挠度计算式为

$$w_b = -\frac{F_1 l^3}{3E_1 I} \tag{5}$$

式中 w_b ——挠度 F_1 ——茶梗支反力
 I ——惯性矩 E_1 ——刀具弹性模量

由式(5)可得:刀齿长度影响刀齿弯曲变形时的挠度,即刀齿越长,刀齿变形越明显。如图 9a 所示,当刀齿长度 $l < 20$ mm 时,采摘失败;如图 9b 所示,刀长 $l > 26$ mm 时,侧芽虽能成功被切割,但刀具的最大等效应力超过刀具的屈服极限,不宜使用。因此,设定刀齿长度水平为 20 ~ 26 mm。

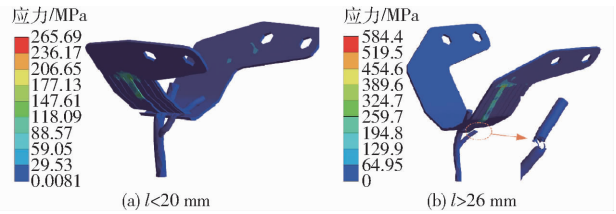


图 9 不同齿长时茶茎切割应力云图

Fig. 9 Influence of tooth length on cutting

3.3 刀具厚度

抗弯截面系数 W 计算式为

$$W = \frac{bd^2}{6} \tag{6}$$

刀具厚度是抗弯截面系数 W 的影响因素,而抗弯截面系数直接影响刀齿的弯曲变形进而影响采摘效果。如图 10a 所示,当刀具厚度 $b < 0.5$ mm 时,刀齿弯曲变形显著,但刀具整体刚度较差,切割顶芽、侧芽失败。如图 10b 所示,当刀具厚度 $b > 0.9$ mm 时,各刀齿接触茶梗时的弯曲变形不明显,切割侧芽失败;因此设定刀具厚度水平为 0.5 ~ 0.9 mm。

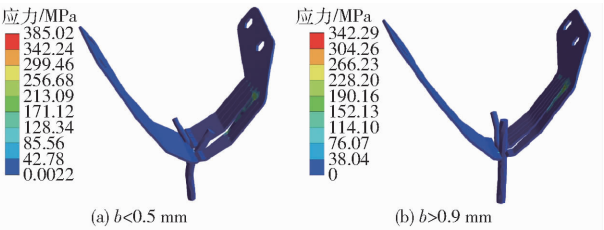


图 10 不同刀厚时茶茎切割应力云图

Fig. 10 Influence of knife thickness on cutting

4 响应面优化试验

以刀齿宽度、刀齿长度及刀具厚度为影响因素，以顶芽、侧芽采摘成功率为目标对影响因素进行优化。

4.1 试验设计

对分体式刀具进行三因素三水平的 Box - Behnken 茶叶采摘试验,试验因素编码如表 3 所示^[23-24]。

表 3 试验因素编码			
Tab.3 Coding of test factor			mm
编码	因素		
	刀齿宽度 <i>d</i>	刀具厚度 <i>b</i>	刀齿长度 <i>l</i>
1	3.1	0.9	26.0
0	2.7	0.7	23.0
-1	2.3	0.5	20.0

4.2 试验方案与结果

茶叶采摘试验中,顶芽和侧芽各试验 15 组。每组试验采摘 20 个茶叶,并统计成功采摘的茶叶数量,计算顶芽、侧芽采摘成功率。为减少试验误差,每组试验重复 3 次并取平均值。试验结果如表 4 所示。

表 4 试验方案与结果					
Tab.4 Test scheme and results					
序号	因素			顶芽采摘 成功率/%	侧芽采摘 成功率/%
	刀齿宽度/ mm	刀具厚 度/mm	刀齿长 度/mm		
1	2.3	0.7	26.0	90	40
2	3.1	0.7	26.0	72	43
3	2.3	0.5	23.0	93	50
4	2.7	0.7	23.0	78	47
5	2.7	0.5	20.0	90	50
6	2.3	0.7	20.0	88	37
7	3.1	0.9	23.0	60	23
8	2.7	0.5	26.0	93	60
9	3.1	0.5	23.0	90	57
10	2.7	0.9	20.0	63	37
11	2.7	0.7	23.0	82	47
12	2.3	0.9	23.0	67	28
13	3.1	0.7	20.0	73	42
14	2.7	0.9	26.0	60	27
15	2.7	0.7	23.0	80	43

4.3 试验结果分析

4.3.1 顶芽采摘成功率回归模型建立与检验

利用 Design-Expert 软件对试验数据进行处理,得到顶芽采摘成功率的回归模型,方差分析见表 5 (*A*、*B*、*C* 为因素编码值)。顶芽采摘成功率回归模型 $P < 0.05$,表明该模型显著,模型失拟项 $P > 0.05$,表明模型失拟项并不显著,回归模型拟合程度高。模型决定系数 $R^2 = 0.933\ 8$,表明该模型能够解释 93.38% 以上响应值的变化。调整决定系数 $R^2_{Adj} = 0.915\ 8$ 、预测决定系数 $R^2_{Pre} = 0.863\ 5$,二者差值小于 0.2;信噪比大于 4,实际值与预测值具有高度相关性,试验误差小。各因素对顶芽采摘成功率的影响由大到小为刀具厚度、刀齿宽度、刀齿长度。采用线性回归法拟合得到各因素对顶芽采摘成功率 φ_1 的回归方程为

$$\varphi_1 = 78.67 - 5.42A - 14.58B + 0.001\ 3C \quad (7)$$

表 5 顶芽采摘成功率方差分析

Tab.5 Variance analysis of success rate of terminal bud picking					
方差来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	1 935.88	3	645.29	51.73	<0.000 1
<i>A</i>	234.69	1	234.69	18.81	0.001 2 **
<i>B</i>	1 701.19	1	1 701.19	136.37	<0.000 1 **
<i>C</i>	0	1	0	1×10^{-6}	0.999 2
残差	137.23	11	12.48		
失拟项	131.65	9	14.63	5.24	0.170 3
纯误差	5.58	2	2.79		
总和	2 073.11	14			

注: ** 表示影响极显著 ($P < 0.01$)。下同。

4.3.2 侧芽采摘成功率回归模型建立与检验

对试验数据进行处理得到侧芽采摘成功率的回归模型,方差分析见表 6。侧芽采摘成功率回归模型 $P < 0.05$,表明该模型显著,模型失拟项 $P > 0.05$,表明模型失拟项并不显著,回归模型的拟合程度高。模型决定系数 $R^2 = 0.983\ 9$,表明该模型能够解释 98.39% 以上响应值的变化。 $R^2_{Adj} = 0.955\ 1$ 、 $R^2_{Pre} = 0.809\ 4$,二者差值小于 0.2;信噪比大于 4,实际值与预测值具有高度相关性,试验误差小。各因素对侧芽采摘成功率的影响由大到小为刀具厚度、刀齿宽度、刀齿长度。刀齿宽度与刀齿长度的交互作用对侧芽采摘成功率有显著影响;刀齿长度与刀具厚度的交互作用对侧芽采摘成功率有极显著影响。各影响因素对侧芽采摘成功率 φ_2 的回归方程为

$$\varphi_2 = 45.56 + 1.25A - 12.71B + 0.623\ 7C - 2.92AB - 0.417\ 5AC - 5.00BC - 4.45A^2 - 1.53B^2 - 0.693\ 3C^2 \quad (8)$$

表 6 侧芽采摘成功率方差分析

Tab. 6 Variance analysis of success rate of lateral bud picking

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	1 520. 93	9	168. 99	34. 06	0. 000 6
A	12. 50	1	12. 50	2. 52	0. 173 3
B	1 292. 10	1	1 292. 10	260. 41	<0. 000 1 **
C	3. 11	1	3. 11	0. 627 3	0. 464 3
AB	34. 05	1	34. 05	6. 86	0. 047 1 *
AC	0. 697 2	1	0. 697 2	0. 140 5	0. 723 1
BC	100. 00	1	100. 00	20. 15	0. 006 5 **
A ²	72. 98	1	72. 98	14. 71	0. 012 2 *
B ²	8. 62	1	8. 62	1. 74	0. 244 5
C ²	1. 77	1	1. 77	0. 357 7	0. 575 8
残差	24. 81	5	4. 96		
失拟项	17. 37	3	5. 79	1. 56	0. 414 0
纯误差	7. 44	2	3. 72		
综合	1 545. 74	14			

注：* 表示影响显著(0. 01 < P < 0. 05)。

4. 3. 3 响应面分析

由表 6 可得：刀齿宽度、刀齿长度、刀具厚度存在交互影响,为了探究各因素对侧芽采摘成功率的影响,忽略不显著的交互影响因素,绘制各因素交互效应对侧芽采摘成功率的响应面图,如图 11 所示。

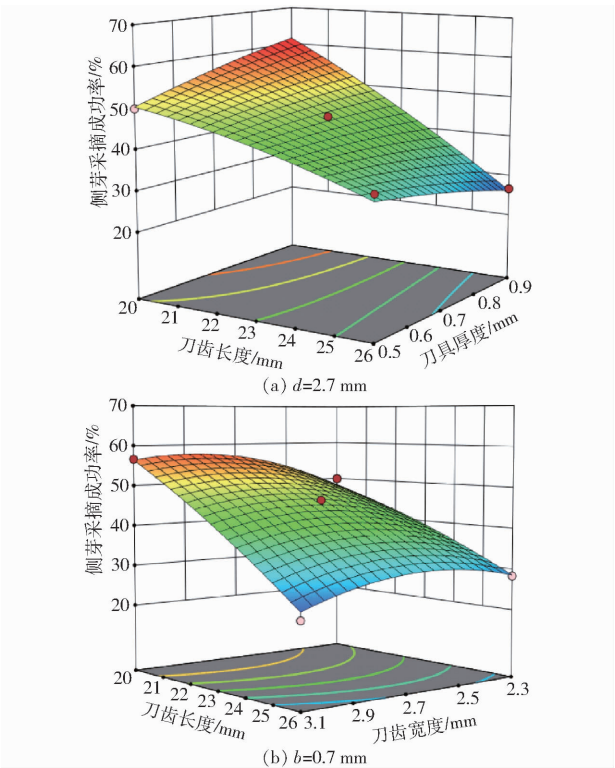


图 11 因素交互作用对侧芽采摘成功率影响的响应曲面
Fig. 11 Effect of factor interaction on success rate of lateral bud picking

图 11a 为刀齿宽度 $d = 2.7\text{ mm}$ 时,刀齿长度与

刀具厚度对侧芽采摘成功率的影响。刀齿长度较小时,侧芽采摘成功率随刀具厚度的增大而增大;刀齿长度较大时,侧芽采摘成功率随刀具厚度的增大而减小。刀具厚度一定时,侧芽采摘成功率随刀齿长度增大而减小,这是由于刀齿长度较大时,刀齿发生弯曲变形的挠度较大,对阻碍刀具运动具有显著影响,两侧刀具难以闭合,即侧芽采摘成功率低。

图 11b 为刀具厚度 $b = 0.7\text{ mm}$ 时,刀齿宽度与刀齿长度对侧芽采摘成功率的影响。刀齿长度一定时,侧芽采摘成功率随着刀齿宽度的增大呈现先增大后缓慢减小的趋势;刀齿宽度一定时,侧芽采摘成功率随着刀齿长度的增大而快速减小,这是因为刀齿长度对侧芽采摘成功率有显著影响。

4. 4 参数优化

茶叶采摘成功率是衡量末端执行器作业效果的重要指标,运用 Design-Expert 软件中的 Optimization 功能,以顶芽、侧芽采摘成功率最大为优化目标函数对刀具参数进行优化,得到最佳参数为 $d = 2.63\text{ mm}$ 、 $b = 0.90\text{ mm}$ 、 $l = 20.03\text{ mm}$,顶芽、侧芽采摘成功率分别为 94%、60%。

5 试验

为验证模型的准确性,搭建试验平台如图 12 所示,图 13 为末端执行器固定在直角机械臂上的局部视图。试验过程如图 14 所示:整机由工控机控制运动至某一位置,然后控制深度相机,根据 RGB-D 相机采集当前图像并传输至工控机缓存区域中;工控机使用提前训练部署的深度学习网络模型识别当前图像,检测图中所有茶叶嫩梢区域,结合深度图分别计算茶叶嫩梢的 3D 采摘点,通过先前标定的转换关系,将采摘点坐标转换至机械臂坐标系下的三维坐标点;然后将坐标点转换为 G 代码,驱动机械臂到达指定采摘点上方,此时通过 IO 口打开风机系统产生负压并驱动机械臂下降至采摘位置,最后驱动末端执行器进行剪切采摘,采下来的茶叶经过负压作用进入收集盒,与此同时,末端执行器复位。

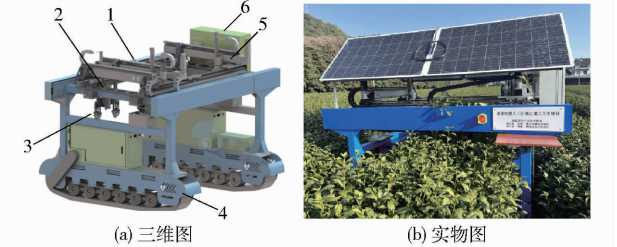


图 12 整机试验平台
Fig. 12 Whole machine test platform

1. 双目相机 2. 负压收集装置 3. 末端执行器 4. 底盘 5. 直角机械臂 6. 工控机



图 13 末端执行器实物图

Fig. 13 Real object diagram of end effector

对 4.4 节中软件优化后的参数进行试验验证。为简化刀具加工过程,取 $d=2.6\text{ mm}$ 、 $b=0.9\text{ mm}$ 、 $l=20.0\text{ mm}$,试验重复 3 次并取平均值,得到顶芽、侧芽采摘成功率分别为 93%、63%,试验值与预测值相对误差小于 5%。

6 结论

- (1)在测量顶芽、侧芽及茶梗相关参数的基础上,设计了一种基于刀齿弯曲变形的末端执行器,以实现在茶梗干扰的条件下采摘侧芽。
- (2)通过 ANSYS 有限元软件对刀具切割侧芽过程进行分析;通过单因素仿真得到采摘成功率的

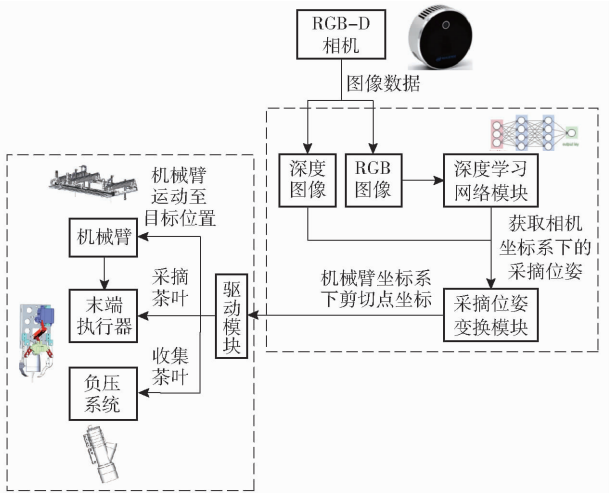


图 14 整机工作过程

Fig. 14 Working process of whole machine

影响因素(刀具厚度、刀齿宽度、刀齿长度)的参数变动范围。

(3)采用三因素三水平的中心组合试验,以顶芽、侧芽采摘成功率最大为目标确定优化参数,得到刀齿宽度、刀具厚度、刀齿长度分别为 2.6、0.9、20.0 mm。对优化后的参数进行茶园采摘试验,结果表明:茶叶采摘末端执行器能够有效完成茶叶采摘工作,顶芽、侧芽采摘成功率分别为 93%、63%,试验值与预测值相对误差小于 5%。

参 考 文 献

[1] 张兰兰. 机采名优茶鲜叶分级技术及分级机研究[D]. 杭州:浙江大学, 2012.
ZHANG Lanlan. Research on the classification technology and the classifier of machine-picking high quality tea[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)

[2] 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.

[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] FIROUZI S, AZARIAN F. Propellants of mechanical pruning and plucking of tea (a case of developing countries) [J]. Information Processing in Agriculture, 2019, 6(4): 454-461.

[5] 吴强. 名优茶采摘机械臂的设计与运动控制[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2022.
WU Qiang. Design and motion control of the robot arm for famous tea picking[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2022. (in Chinese)

[6] 高仁鹏. 基于图像处理的名优茶智能化采摘系统的研制[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
GAO Renpeng. Development of intelligent tea picking system based on image processing[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[7] 陆德彪, 尹军峰. 我国名优绿茶机械化采摘的意义与实现路径[J]. 中国茶叶, 2018, 40(1): 1-4.

[8] 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)

[9] 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)

[10] 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)

[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.

forest and continuous wavelet transform in an opencast coal mine[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(10):138 – 147. (in Chinese)

[31] WEI L F, YUAN Z R, ZHONG Y F, et al. An improved gradient boosting regression tree estimation model for soil heavy metal (Arsenic) pollution monitoring using hyperspectral remote sensing[J]. Applied Sciences, 2019, 9(9):1943.

[32] 贺军亮, 崔军丽, 张淑媛, 等. 基于偏最小二乘的土壤重金属铜含量高光谱估算[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(5):998 – 1004.

HE Junliang, CUI Junli, ZHANG Shuyuan, et al. Hyperspectral estimation of heavy metal Cu content in soil based on partial least square method[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(5):998 – 1004. (in Chinese)

[33] SAEYS W, MOUAZEN A M, RAMON H. Potential for onsite and online analysis of pig manure using visible and near infrared reflectance spectroscopy[J]. Biosystems Engineering, 2005, 91(4):393 – 402.

[34] 章明奎, 郑顺安, 王丽平. 土壤中颗粒状有机质对重金属的吸附作用[J]. 土壤通报, 2007(6):1100 – 1104.

ZHANG Mingkui, ZHENG Shun'an, WANG Liping, et al. Adsorption of heavy metals by soil particulate organic matter[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007(6):1100 – 1104. (in Chinese)

[35] 马闯, 王雨阳, 周通, 等. 污染土壤颗粒态有机质镉锌富集特征及其解吸行为研究[J]. 生态环境学报, 2022, 31(9):1892 – 1900.

MA Chuang, WANG Yuyang, ZHOU Tong, et al. Enrichment characteristics and desorption behavior of cadmium and zinc in particulate organic matter of polluted soil[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(9):1892 – 1900. (in Chinese)

(上接第 46 页)

[12] 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)

[13] 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)

[14] 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)

[15] MICKOVSKI S B, STOKES A, VAN BEEK R, et al. Simulation of direct shear tests on rooted and non-rooted soil using finite [J]. Ecological Engineering, 2011, 37: 1523 – 1532.

[16] KELLN C, SHARMA J, HUGHES D. A finite element solution scheme for an elastic-viscoplastic soil model[J]. Computers and Geotechnics, 2008, 35: 524 – 536.

[17] SOUZA V H S, SANTOS A A R, COSTA A L G, et al. Evaluation of the interaction between a harvester rod and a coffee branch based on finite element analysis[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 150: 476 – 483.

[18] MENG Y, WEI J, WEI J, et al. An ANSYS LS-DYNA simulation and experimental study of circular saw blade cutting system of mulberry cutting machine[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 157: 38 – 48.

[19] 施印炎, 陈满, 汪小岳, 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)

[20] 黄汉东, 王玉兴, 唐艳芹, 等. 甘蔗切割过程的有限元仿真[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 161 – 166.

HUANG Handong, WANG Yuxing, TANG Yanqin, et al. Finite element simulation of sugarcane cutting[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 161 – 166. (in Chinese)

[21] KOVACS A, KERENYI G. Physical characteristics and mechanical behaviour of maize stalks for machine development[J]. International Agrophysics, 2019, 33: 427 – 436.

[22] 吴昆, 宋月鹏. 农作物茎秆切割理论与方法研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 1 – 20.

WU Kun, SONG Yuepeng. Research progress analysis of crop stalk cutting theory and method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 1 – 20. (in Chinese)

[23] 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)

[24] XIE L, WANG J, CHENG S, et al. Optimisation and finite element simulation of the chopping process for chopper sugarcane harvesting[J]. Biosystems Engineering, 2018, 175:16 – 26.