doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.07.025

# 名优茶采收一体式末端执行器设计与试验

贾江鸣[1,2]　王登艺[1]　赵新雨[1]　武传宇[1,3]　陈建能[1,2]　俞钜尧[1]

(1.浙江理工大学机械工程学院,杭州 310018;
2.浙江农业智能感知与机器人全省重点实验室,杭州 310018;3.浙江海洋大学,舟山 316022)

**摘要**:针对现有名优茶采摘末端执行器结构复杂、收集效率低、稳定性差以及负压收集易出现附壁且当叶片上附着雨水时效果欠佳的问题,设计一种整机结构简单、效率高、稳定性好以及采摘质量佳的名优茶采收一体的末端执行器。通过漫反射传感器感应嫩梢、柔性同步带夹持输送并配合剪切式刀具剪切实现对茶叶嫩梢的连续采摘和收集作业。通过对末端执行器采摘与收集过程进行分析,得到影响输送成功率与采摘成功率的因素为两同步带间距和滞后时间。采用中心复合设计与响应面分析方法并运用 Design-Expert 13.0 软件进行试验设计与分析,研究两同步带间距和滞后时间对输送成功率和采摘成功率的影响规律。以输送成功率与采摘成功率最大为优化目标,得到最优参数组合:两同步带间距为 1.79 mm,滞后时间为 0.80 s。对优化后参数进行茶园验证性采摘试验,结果表明,末端执行器能够有效完成采摘和收集工作,输送成功率、采摘成功率分别为 96.7%、86.3%,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;末端执行器;采收一体;反射传感器;柔性同步带夹持

**中图分类号**:S225.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)07-0274-11　　**OSID**:

# Design and Experiment of Picking and Collection Integrated End Effector for Famous Tea

JIA Jiangming[1,2]　WANG Dengyi[1]　ZHAO Xinyu[1]　WU Chuanyu[1,3]　CHEN Jianneng[1,2]　YU Juyao[1]

(1. *School of Mechanical Engineering*, *Zhejiang Sci-Tech University*, *Hangzhou* 310018, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Intelligent Perception and Robotics of Zhejiang Province*, *Hangzhou* 310018, *China*
3. *Zhejiang Ocean University*, *Zhoushan* 316022, *China*)

**Abstract**: In response to the problem of complex structure, low collection efficiency and stability, as well as the tendency for negative pressure collection to cause adhesion to the wall and poor performance when rainwater adheres to the leaves in the end effector for high-quality tea picking, an end effector for integrated harvesting of high-quality tea was designed, featuring a simple overall structure, high efficiency, good stability, and excellent picking quality. Continuous picking and collection of tea leaves' tender shoots were achieved through diffuse reflection sensors for sensing, flexible synchronous belt clamping and combined with split type cutting tools. By analyzing the picking and collection process of the end effector, it was found that the factors affecting the success rate of transportation and the success rate of picking were the distance between the two synchronous belts and the lag time. Adopting the central composite design and response surface analysis method, and using the Design-Expert 13.0 software for experimental design and analysis, the influence of the distance between two synchronous belts and the lag time on the success rate of transportation and the success rate of picking was studied. And with the optimization objectives of maximizing the success rate of transportation and the success rate of picking, the optimal parameter combination was obtained: the distance between the two synchronous belts was 1.79 mm, and the lag time was 0.80 s. After conducting validation picking experiments on optimized parameters in tea gardens, the results showed that the end effector could efficiently and effectively complete the picking and collection work with high quality. The success rate of transportation and the

收稿日期:2024-12-10　修回日期:2025-02-19

**基金项目**:国家自然科学基金项目(32472009、U23A20175)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**:贾江鸣(1979—),男,副教授,博士,主要从事智能农业装备及农业机器人研究,E-mail:Jarky@zstu.edu.cn

**通信作者**:陈建能(1972—),男,教授,博士,主要从事机械设计及智能农业装备研究,E-mail:Jiannengchen@zstu.edu.cn

success rate of picking were 96.7% and 86.3%, respectively. The relative error between the experimental and predicted values was less than 5%, and the optimized model results were reliable.

**Key words**: picking of famous tea; end effector; picking and collection integrated; reflection sensor; flexible synchronous belt clamping

## 0　引言

中国作为全球最大的茶叶种植、消费和出口国[1]，名优茶产量占比呈逐年上升趋势[2]。但目前采摘环节仍多为人工采摘，虽然能确保茶叶的高质量[3-5]，但效率较低，加之当前社会老龄化问题严重，传统采摘方式面临严峻挑战。尽管切割式大宗茶采茶机在一定程度上有效缓解了采摘人工紧缺以及采摘效率低的问题，但其一刀切的采摘模式易导致茶叶嫩芽中老叶、碎叶多，不符合名优茶的采摘标准[6]。因此，研发能够实现精准选择性采摘的名优茶智能采摘机器人，对于提升名优茶采摘产量和效率，进而促进茶产业的发展具有重要意义[7-8]。

采摘末端执行器作为名优茶智能采摘机器人的关键核心机械部件，对采摘效率及采摘质量具有直接影响。张智浩[9]提出一种欠驱动式采摘末端执行器，通过平面连杆机构和偏心曲柄滑块机构，利用切割刀片进行剪切，完成对茶叶嫩芽的连贯采收动作，但切割方式对嫩梢采摘点的定位要求高，容易剪到老梗与碎叶，采摘成功率不高。朱任章[10]研制了一款带有小机械臂的多自由度柔性末端执行机构，柔性指尖将待采嫩梢夹持后，位于腕部的电机绕指尖轴线旋转，将嫩梢与茎秆分离，采摘完成后机械臂移动至收集装置上方并将采下的茶叶放入收集盒中，机械臂移动收集茶叶嫩梢，导致采摘效率较低。郝淼等[11]提出一种仿生采茶指的末端执行器，模仿“提手采”动作，通过定位、夹紧、提拉等动作模拟人工方式折断式采摘茶叶嫩梢，采下的嫩梢质量好，但结构复杂，采摘可靠性不高。林桂潮等[12]设计一种剪切和收集一体式的采摘末端执行器，通过单自由度平面连杆机构，实现对茶叶嫩梢的剪切和抛甩收集。罗坤等[13]设计的名优茶捏切组合式采摘末端执行器，完成茶叶采摘动作后，茶叶在运动惯性作用下被抛甩进收集盒内。抛甩式收集方式可减少茶叶在收集过程中出现损伤的几率，但茶叶在抛甩时会存在抛甩不到位的现象。罗坤[14]提出一种连续式嫩梢柔性采摘器，利用柔性皮带与圆盘刀的协同作用实现茎秆的切割。在此过程中，茶叶嫩梢被上方皮带夹持并向后提拉，随后被输送至后方气管口，在负压气流的作用下进入收集区；此外，设计理条夹持机构，通过两侧柔性夹持带挤压嫩梢，以便刀具切断茎秆，柔性带夹持方式有效提升了采摘器的采摘稳定性。现有采摘方式多为剪切式和折断式，其中剪切式可靠性较高、采摘速度更快、结构简单但对定位要求较高。收集方式也影响采摘效率，抛甩收集方式可靠性不高，同样机械臂移动收集方式的效率不高。

为提高名优茶收集效率，目前多数末端执行器采用负压收集方式进行收集。马智斌等[15]设计一种鹰嘴式名优茶采摘末端执行器，通过刀片对名优茶进行采摘并包裹在容器里，在负压气流的带动下进入收集盒。彭强[16]提出一种负压吸式茶叶采摘末端执行器，通过负压气流使嫩梢芽叶向中心靠拢，结合切割装置分离嫩梢，负压气流吸取嫩梢进行收集。ZHU 等[17]采用剪切式刀片完成茶叶采摘后，通过负压系统经由管道对茶叶嫩梢进行收集，负压吸式末端利用气流引导嫩梢先中心靠拢后执行采摘，可有效降低环境因素的影响，提高收集效率。负压气流收集的方式，对气流控制要求较高，且负压风机的功率较大，不适合长时间连续作业。陈建能等[18]设计的末端执行器通过舵机驱动齿轮传动完成环形刀片的剪切动作，采摘后的茶叶嫩梢在负压气流的作用下被吸入收集盒，试验中观察到嫩梢附壁现象，尤其在春茶采摘时期，雨水增加了嫩梢与管道之间的黏性，更易附壁堵塞管道。

针对多代采茶机器人在茶园采摘试验中存在的工程化改进需求，如降低能耗、减轻重量和避免负压收集方式（存在附壁现象）等，本文设计一种名优茶采收一体的末端执行器，通过漫反射传感器感应嫩梢、柔性同步带夹持输送并配合剪切式刀具剪切实现对茶叶嫩梢的连续采摘和收集作业。对关键结构进行分析，以两同步带间距以及滞后时间为影响因素，以输送成功率与采摘成功率为目标，采用中心复合设计与响应面分析方法对末端执行器进行参数优化和验证试验。

## 1　采收一体式末端执行器结构与工作原理

### 1.1　茶叶嫩梢尺寸参数测量

用于茶叶嫩梢尺寸参数测量的样本采集自杭州市径山产业园茶叶基地，随机选取 50 个新鲜一芽一叶茶叶嫩梢。如图 1 所示，通过测量嫩梢叶长 $l_1$、叶厚 $B$、茎秆直径 $D$ 以及嫩梢采摘区域长度 $l_2$，为后续




图 1 茶叶嫩梢尺寸参数

Fig. 1 Size parameters of tea shoot

名优茶采摘末端执行器结构设计提供参考,测量工具是游标卡尺,精度为 0.01 mm。对测量结果进行统计与分析,茶叶嫩梢尺寸参数如表 1 所示。

**表 1 茶叶嫩梢尺寸参数**

**Tab. 1 Size parameters of tea shoots** mm

| 尺寸参数 | 最大值 | 最小值 | 平均值 | 标准偏差 |
|---|---|---|---|---|
| 叶长 $l_1$ | 39.58 | 26.14 | 31.36 | 4.33 |
| 叶厚 $B$ | 3.21 | 1.64 | 2.42 | 0.53 |
| 茎秆直径 $D$ | 2.28 | 1.78 | 2.00 | 0.15 |
| 嫩梢采摘区域长度 $l_2$ | 7.34 | 4.35 | 5.57 | 0.79 |

根据表 1 所测茶叶嫩梢尺寸参数,为保证茶叶嫩梢能被柔性同步带夹持且不损伤嫩梢,考虑实际安装约束,参考嫩梢的叶厚 $B$ 和茎秆直径 $D$,两同步带间距最大值需小于叶厚 $B$ 的平均值,考虑加工精度问题,取两同步带间距最大值为 2.40 mm;此外,为降低外部因素对剪切效果的影响,参考嫩梢的叶长 $l_1$ 和嫩梢采摘区域长度 $l_2$,柔性同步带垂直方向运动行程应大于嫩梢叶长 $l_1$ 的最大值,即至少为 39.58 mm。基于上述测量数据,对末端执行器结构进行设计。

## 1.2 茶叶嫩梢静摩擦因数测量

选取一芽一叶或一芽二叶嫩梢共 20 组,测量茶叶嫩梢在干燥和潮湿的状态下,其与柔性同步带间的静摩擦因数,测量工具为 MXD-01 型摩擦系数仪(济南兰光机电技术有限公司),如图 2 所示。

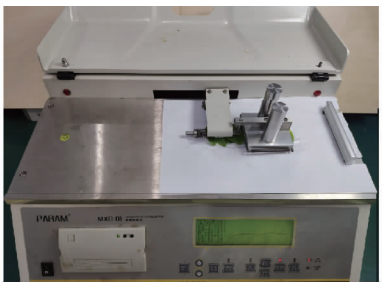


图 2 茶叶嫩梢与柔性同步带间静摩擦因数的测量

Fig. 2 Measurement of static friction coefficient between tea leaves and flexible synchronous belt

通过测量,茶叶嫩梢在干燥状态下,与柔性同步带间的静摩擦因数为 0.451;在潮湿状态下,与柔性同步带间的静摩擦因数为 0.408。

## 1.3 末端执行器结构设计

现有末端执行器主要依靠负压气流对茶叶嫩梢进行收集,但存在控制要求高、能耗大且出现附壁堵塞管道的问题;同时剪切式采摘方式采摘效率较高、作业稳定性较好但对茶叶嫩梢定位要求高。为提高名优茶智能采摘机器人的可靠性,提高工作效率和采摘质量,设计如图 3 所示采收一体式末端执行器,实现对茶叶嫩梢的连续采摘和收集作业。末端执行器主要由安装板、茶叶剪切机构、茶叶传送机构和收集盒组成。

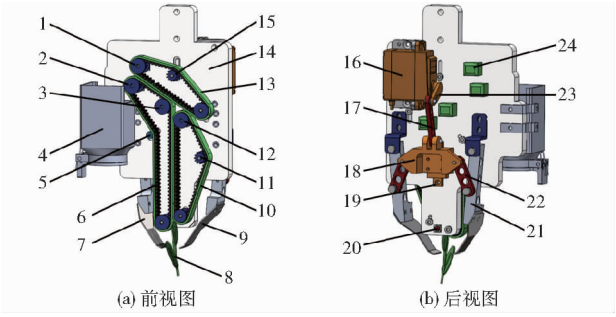



图 3 名优茶采收末端执行器结构示意图

Fig. 3 Structure diagrams of picking end effector structure for famous tea

1、2、3、12. 主动带轮 4. 收集盒 5、11、15. 张紧轮 6、10、13. 柔性同步带 7. 多齿弹簧刀具 8. 茶叶嫩梢 9. 一体式刀具 14. 安装板 16. 舵机 17. 推杆 18. 支撑块 19. 导轨 20. 漫反射光电传感器 21. 刀具安装块 22. 连杆 23. 摇臂 24. 电机

如图 3a 所示,茶叶传送机构为布置在安装板正面的茶叶传送通道,由 3 组柔性同步带和漫反射光电传感器组成。3 组柔性同步带构成的茶叶传送通道,其布局呈现倒“L”形结构,通道内相向安装的柔性同步带之间的间距应较小,使茶叶嫩梢在剪切后能被柔性同步带夹紧不掉落,亦不宜过小,以免茶叶无法顺利通过茶叶传送通道抵达收集盒;漫反射光电传感器安装至茶叶传送通道起始点,通过漫反射光线是否被反射回传感器来检测茶叶嫩梢。选用 M3 型漫反射光电传感器(深圳市川普电器有限公司),最大感应距离为 30 mm,NPN 常开,响应时间 5 ms 和 IP65 防护等级。根据所选同步带轮高 15 mm,有效感应距离调整至 15 mm;为防止雨水侵入,防水元器件布置远离柔性同步带的安装区域,电机被布置于茶叶传送通道的反面,控制电路布置于末端执行器的顶端。

如图 3b 所示,茶叶剪切机构布置在安装板的另一面,由带有摇臂的舵机、推杆、支撑块、刀具安装块、连杆、刀具等组成。其中,刀具安装块、连杆和刀具沿导轨竖直中心面对称布置;刀具使用一体式刀具与多齿弹簧刀具结合的形式,利用多齿弹簧刀具

刀齿闭合时可弯曲变形的特征实现对顶芽和侧芽的采摘；舵机作为动力装置，驱动刀片闭合将茶叶切断。

为避免柔性同步带因长期运行而发生塑性变形导致松弛现象，设计一种可调式张紧装置，如图 4 所示。该装置主要由张紧轮、张紧轮轴和螺母组成。通过在安装板上设置腰型孔，沿腰型孔移动张紧轮的轴心位置调节张紧力并用螺母进行固定。

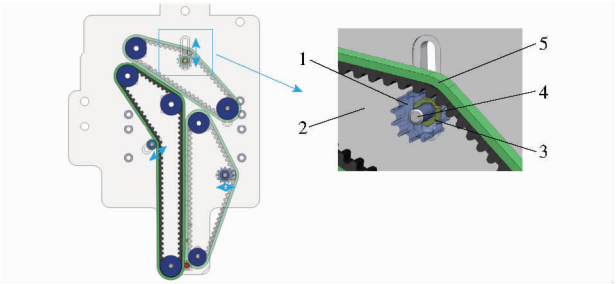



图 4　可调式张紧装置

Fig. 4　Adjustable tensioning device

1. 张紧轮　2. 安装板　3. 螺母　4. 张紧轮轴　5. 柔性同步带

### 1.4　末端执行器的采摘工作过程

如图 5 所示，末端执行器固定于名优茶智能采摘机器人 XYZ 型机械臂末端。当名优茶智能采摘机器人移动至茶叶采摘区域后，3D 相机对该采摘区域图像进行拍照并将所采集的图像和点云信息传回控制系统，控制系统对图像中的嫩梢进行识别并依据获取的点云信息确定茶叶嫩梢采摘点位置，进而控制机械臂带动采摘末端运动至相应采摘位置，最后驱动末端执行器进行采摘作业。

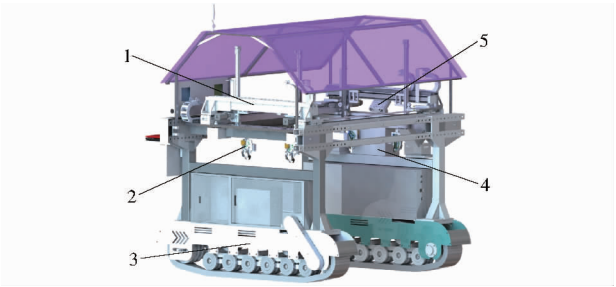



图 5　名优茶智能采摘机器人

Fig. 5　Famous tea intelligent picking robot

1. XYZ 型机械臂　2. 末端执行器　3. 采茶机器人底盘　4. 控制柜　5. 3D 相机

如图 6 所示，末端执行器采摘茶叶主要包括传感器检测、到达采摘点、嫩梢卷入、茶叶剪断、柔性夹持输送和收集 6 个步骤：①末端执行器到达目标茶叶上方后匀速垂直下降，漫反射光电传感器检测茶叶是否到达茶叶传送通道起始点，如图 6a 所示。②末端执行器向下移动过程中，当漫反射光线被反射回传感器时，传感器被触发，末端执行器停止下降，到达采摘点位置，如图 6b 所示。③传感器被触发，此时一小部分茶叶嫩梢被卷入传送带中，经短暂滞后时间延迟响应后，控制系统控制舵机驱动刀具剪断卷入的茶叶茎秆，如图 6c、6d 所示。④柔性同步带夹持剪断的茶叶嫩梢，沿茶叶传送通道输送至通道出口，随后在惯性以及重力作用下落入茶叶收集盒内，如图 6e、6f 所示。该末端执行器可实现对茶叶嫩梢的连续采摘和收集作业，采用柔性同步带夹持方式以提高剪切过程的稳定性并避免嫩梢在输送过程中遭受损伤。此外，通过传感器对嫩梢进行检测，进一步降低了对采摘点定位精度要求，采用 3D 相机的嫩梢定位与传感器检测相结合的方式，末端采摘成功率得到提升。

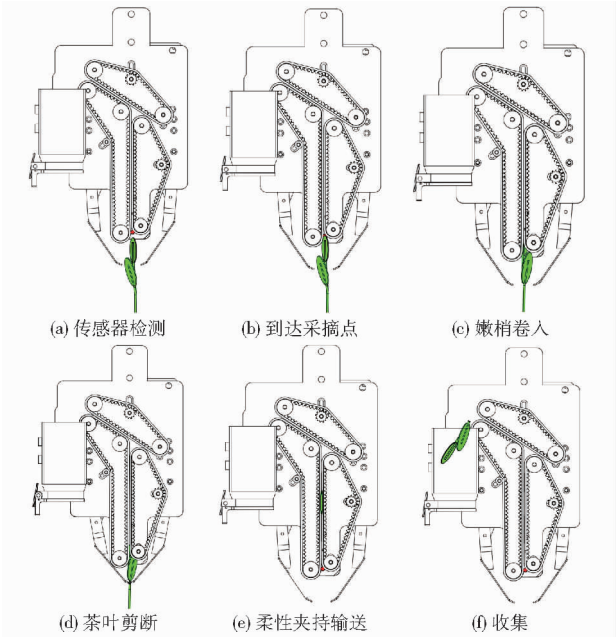



图 6　末端执行器工作过程

Fig. 6　Working process of end effector

## 2　关键部件设计

### 2.1　茶叶传送机构设计

#### 2.1.1　同步带轮尺寸设计

茶叶嫩梢能否被成功卷入柔性同步带是设计关键，因此对茶叶在柔性同步带入口处的受力进行分析。

参考棉花秸秆的皮带卷入分析[19-20]，在同步带卷入和末端执行器下降的共同作用下，茶叶嫩梢到达茶叶传送通道起始点位置，漫反射光电传感器被触发，末端执行器停止下降。此时茶叶嫩梢受到柔性同步带 6 施加的正压力 $N_1$ 和摩擦力 $f_1$，柔性同步带 10 施加的正压力 $N_2$ 和摩擦力 $f_2$，茶叶嫩梢的重力忽略不计，茶叶在入口处的受力情况如图 7a 所示。

将正压力和摩擦力进行分解，为保证茶叶嫩梢能顺利卷入茶叶传送机构，茶叶嫩梢沿进入柔性同

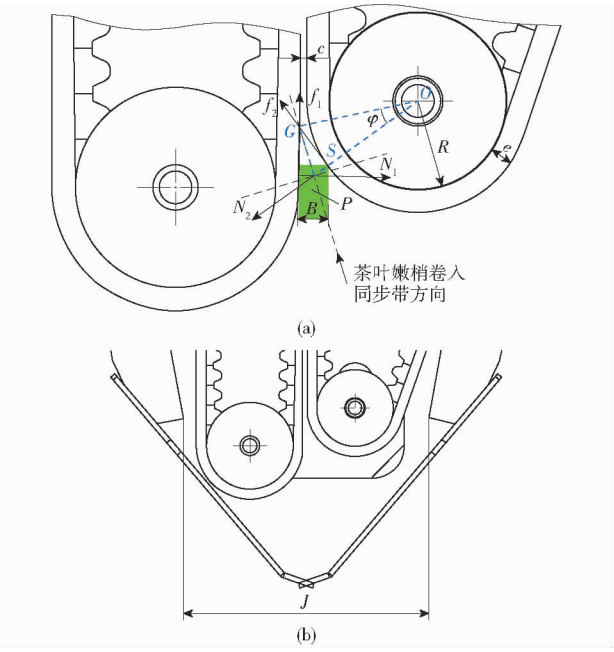



图 7 茶叶卷入柔性同步带阶段受力示意图

Fig. 7 Schematics of force of tea leaves rolling into flexible synchronous belt stage

步带方向的合力 $F$ 应大于零,其表达式为

$$F=(f_1+f_2)\cos\varphi-(N_1+N_2)\sin\varphi>0 \tag{1}$$

其中

$$\begin{cases}f_1=\mu N_1\\ f_2=\mu N_2\end{cases} \tag{2}$$

式中 $\varphi$——茶叶卷入柔性同步带的夹持角

$\mu$——茶叶嫩梢与柔性同步带间静摩擦因数

将式(1)化简可得

$$\mu>\tan\varphi \tag{3}$$

如图 7a 所示,在三角形 $OGS$ 以及三角形 $GPS$ 中,将 $GS$ 段长度设为 $l_{GS}$,$OS$ 段长度设为 $l_{OS}$,$PS$ 段长度设为 $l_{PS}$,有

$$l_{GS}=l_{OS}\tan\varphi=\frac{l_{PS}}{\tan\varphi} \tag{4}$$

将式(4)代入式(3)中,有

$$R+e>\frac{B}{2\mu^2} \tag{5}$$

式中 $R$——同步带轮节圆半径

$e$——柔性同步带厚度

由图 7b 可知,为防止同步带轮过大影响安装板背面两刀片的正常闭合,需满足关系式

$$4(R+e)+c<J \tag{6}$$

式中 $c$——两同步带间最小安装间距

$J$——刀片闭合时两刀具安装块之间最小间距

为保证茶叶嫩梢在干燥和潮湿状态下均能顺利卷入柔性同步带,取潮湿状态下茶叶嫩梢静摩擦因数代入式(5)。末端执行器刀片闭合时两刀具安装块间最小间距 $J$ 为 38.35 mm,由式(5)和式(6)可得,同步带轮的带轮齿数为 12,节圆直径为 11.46 mm,带轮高为 15 mm(齿槽宽 11 mm,两侧挡边各 2 mm),柔性同步带的厚度为 3 mm。

### 2.1.2 柔性同步带间距设计

茶叶夹持输送过程中,同步带轮以及同步带产生的挤压作用可能会对茶叶嫩梢造成机械损伤[21]。

在输送过程中,茶叶嫩梢主要受到两侧同步带施加的挤压力与摩擦力作用。影响茶叶嫩梢所受挤压力大小的主要因素包括同步带间距和同步带变形层材质等[22]。因此,在分析不同同步带间距对茶叶嫩梢所受挤压力的影响前,需选择合适的同步带变形层材质。

在挤压力测量试验台上,截取相同尺寸橡胶、绿棉和聚氨酯材质同步带带段分别粘贴于固定台以及力学传感器(DYZ-101 型,蚌埠大洋传感系统工程有限公司,量程为 10 N,精度为 0.1%)上进行试验,3 种带段尺寸均相同,试验对象为采集自杭州市径山产业园茶叶基地内的一芽一叶茶叶嫩梢,每组 25 个,挤压力测量试验台如图 8 所示。




图 8 挤压力测量试验台

Fig. 8 Extrusion force test bench

将茶叶嫩梢固定在固定台侧面,通过控制伺服电机(万图 CS2/CB2 低压驱动器伺服电机)运动,进而驱动安装至丝杠模组上的力学传感器以恒定速度 1 mm/s 朝固定台方向移动,力学传感器逐渐接触并挤压茶叶,显示器实时记录力学传感器的力学数据和位移信息,每组材质同步带带段试验重复进行 25 次,取平均值作为试验结果。不同同步带材质下茶叶嫩梢所受挤压力与位移变化曲线如图 9 所示。

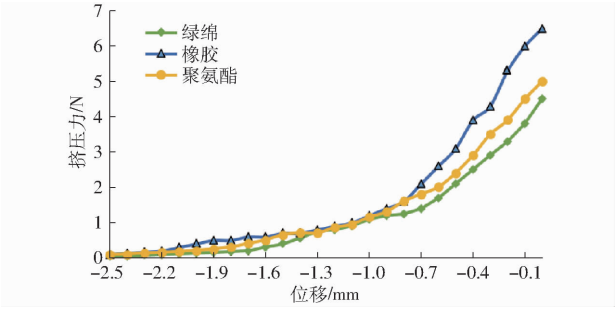



图 9 不同同步带材质挤压力-位移变化曲线

Fig. 9 Squeezing force - distance variation curves of different synchronous belt materials

由图 9 可知，绿棉材质相较于橡胶和聚氨酯两种材质，表现出更佳的柔软性。相同位移条件下，绿棉材质对茶叶嫩梢产生的挤压力低于橡胶和聚氨酯材质，更符合茶叶低损输送的要求。因此，选择绿棉作为同步带变形层材质。此外，图 9 中数据表明，绿棉材质同步带带段的压缩过程中，茶叶嫩梢所受挤压力与位移之间呈非线性关系。当位移从 −2.5 mm 变化至 −0.84 mm 时，挤压力稳定增长；而当位移从 −0.84 mm 变化至 0 mm 时，挤压力急剧上升。曲线斜率的急剧增大表明茶叶所受挤压力快速增加，茶叶开始出现损伤。因此，认为当茶叶嫩梢所受挤压力低于 1.25 N 时，茶叶嫩梢未发生损伤[22]。

利用 Matlab 中 Curve Fitting Tool 工具对曲线进行拟合计算，得到挤压力−位移变化曲线的拟合方程。绿棉材质同步带带段试验中挤压力−位移关系方程为

$$f(x)=0.303\,5x^4+1.958x^3+5.051x^2+6.888x+4.49 \tag{7}$$

得到决定系数 $R^2$ 为 0.997 4，拟合度较好。

由拟合方程可知，茶叶嫩梢发生损伤的临界位移绝对值为 0.844 75 mm，取整后为 0.90 mm。考虑到茶叶嫩梢存在尺寸差异，在确保茶叶不发生损伤的同时，还需确保茶叶能被柔性同步带稳固夹持，满足低损输送的要求，根据表 1 茶叶嫩梢尺寸参数可得，两同步带安装间距的最大值为 2.40 mm。因此，两同步带间距的可行范围为 0.90 ~ 2.40 mm。

### 2.2　刀具剪切滞后时间

茶叶嫩梢的完整采摘，需实现刀具可靠剪断茎秆，以及优选刀具剪切的时机。茶叶嫩梢能否被刀具剪断与刀具的几何参数以及闭合所产生的剪断力有关，而刀具闭合运动所产生的剪断力与舵机输出的力矩相关。文献[23]中基于刀齿弯曲变形的多齿弹簧刀具剪切茶叶，与本文的末端执行器剪切机构类似，选用舵机型号为 DS3115，扭矩为 0.167 N·m，舵机转速为 0.189 r/s，舵机转角为 30°。

剪切机构作为名优茶采摘装置的重要组成，通过控制系统控制舵机的小角度转动，进而驱动连杆、刀具安装块等相关零部件运动，最终实现刀具的闭合动作，以剪断茶叶茎秆。茶叶被剪断后其形状的完整性与刀具剪切的时机密切相关。对于高档西湖龙井和径山茶等名优茶，符合制作原料品质要求的茶叶嫩梢形态为单芽、一芽一叶以及一芽二叶[24]。由图 10 可知，若待剪芽叶过短，刀具延后闭合剪下一芽二叶；若待剪芽叶过长，刀具提前闭合剪下单芽。为实现对名优茶的高质量采摘，根据名优茶制作原料的品质标准，以采摘一芽一叶作为名优茶理想的采摘目标对刀具剪切的时机进行设计，通过设定统一的刀具闭合时间，使采下的嫩梢长度统一，确保采摘嫩梢的一致性和采摘质量。

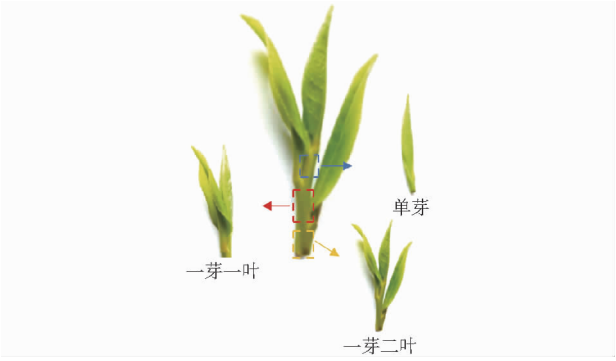



图 10　名优茶剪切状态分析

Fig. 10　Analysis of cutting state of famous tea

末端执行器的工作流程如下：首先茶叶嫩梢到达茶叶传送通道起始点位置时，传感器检测到从嫩梢反射回来的光线后被触发，并将电信号输出至控制系统。经短暂滞后时间延迟响应后，系统发出指令控制刀具闭合，剪断茶叶茎秆。在此时间 $t$ 内，茶叶嫩梢在同步带的作用下，其最佳采摘区域移动至刀片剪切点位置。茶叶嫩梢触发漫反射光电传感器至被剪断，所消耗的时间 $t$ 包括：①传感器响应时间 $t_1$ 指漫反射光电传感器接收到茶叶嫩梢反射光信号至输出电信号的时间，$t_1$ = 5 ms。②刀具剪切滞后时间 $t_2$ 指控制系统接收到电信号后，延迟一定的时间，在发出刀具闭合的电信号。③刀具闭合时间 $t_3$ 指控制系统发出闭合指令后，舵机转动一定角度使刀具闭合所需的时间。

根据所选舵机转动角度 $\theta$ 和角速度 $\omega$ 的取值，确定刀具从初始位置运动至剪切点所需的时间 $t_3$，即

$$t_3=\frac{\theta}{\omega} \tag{8}$$

当茶叶嫩梢与柔性同步带接触后，在正压力和摩擦力的共同作用下，以加速度 $a$ 沿进入柔性同步带方向做加速运动，经历时间 $T_1$；之后茶叶嫩梢向上输送速度与柔性同步带线速度达到一致，茶叶嫩梢以恒定速度 $v_1$ 沿茶叶传送通道做匀速运动，所经历的时间为 $T_2$。

结合图 7a、11，对茶叶嫩梢各段运动的过程进行分析，在加速阶段

$$\begin{cases} ma=F \\ T_1=\dfrac{v_1}{a} \\ v_1=v \\ x=\dfrac{1}{2}aT_1^2 \end{cases} \tag{9}$$

在匀速阶段

$$\begin{cases} T_2 = \dfrac{l - x}{v_1} \\ l = l_1 - l_3 \end{cases} \tag{10}$$

式中 $v$——柔性同步带绕同步带轮转动的线速度

$x$——加速阶段茶叶嫩梢运动的距离

$l$——漫反射光电传感器被触发时茶叶嫩梢最佳采摘区域位置与刀片剪切点距离

$l_3$——漫反射光电传感器布置位置与刀片剪切点的距离,取 19.55 mm

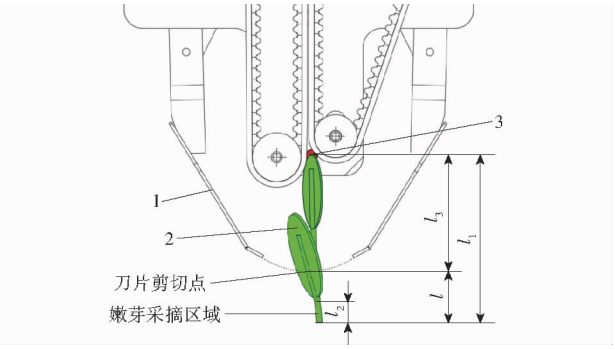



图 11 刀具剪切时机示意图

Fig. 11 Schematic of cutting timing for cutting tools

1. 剪切刀具 2. 茶叶嫩梢 3. 漫反射光电传感器

电机转速与喂入阶段茶叶嫩梢的采摘质量和效率密切相关。电机转速过快,柔性同步带线速度增加,茶叶嫩梢卷入柔性同步带的速度越快。若茶叶嫩梢从接触柔性同步带到被拉直的时间短于控制系统反应以及控制刀具剪切的时间,茶叶嫩梢与柔性同步带之间将产生滑动摩擦,在柔性同步带的摩擦力和茶叶茎秆的拉力作用下,茶叶嫩梢可能会被直接拉断从而损伤茶叶或因滑动摩擦造成茶叶损伤;若电机转速过低,单个茶叶嫩梢剪切耗时过长,茶叶输送速度慢,茶叶嫩梢在茶叶传送通道中易重合堵塞,影响收集效率。综合考虑茶叶嫩梢的采摘质量和效率,选取 12 - N20 型电机作为同步带轮的驱动电机,电机转速为 30 r/min。

根据所选同步带轮电机转速 $n_1$,确定柔性同步带的线速度

$$v = \frac{\pi R n_1}{30} \tag{11}$$

漫反射光电传感器被触发到茶叶最佳采摘区域移动至刀片剪切点位置所需要的时间为

$$t = T_1 + T_2 \tag{12}$$

因此,可得刀具剪切滞后时间

$$t_2 = T_1 + T_2 - t_1 - t_3 \tag{13}$$

根据对茶叶嫩梢尺寸参数的测定,由式(8)~(13)并结合所选电机转速、舵机转角和转速以及同步带轮尺寸,从而确定采用漫反射光电传感器感应嫩梢的采摘末端工作时,茶叶嫩梢触发漫反射光电传感器后控制系统延迟控制刀具闭合时间(滞后时间)的可行范围为 0.29 ~ 1.03 s。

## 3 优化试验

以两同步带间距和滞后时间为试验影响因素,以输送成功率和采摘成功率为目标对上述影响因素进行参数优化。优化试验如图 12 所示。



图 12 优化试验

Fig. 12 Optimization experiment

### 3.1 试验设计

根据上述理论分析可知,两同步带间距的取值范围为 0.90 ~ 2.40 mm,滞后时间的取值范围为 0.29 ~ 1.03 s。选取中心复合设计(Central composite design,CCD)方法[25]进行两因素五水平试验设计,设定因素编码如表 2 所示。

**表 2 试验设计因素编码**

**Tab. 2 Experimental factors coding**

| 因素 | 编码 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | -1.414 | -1 | 0 | 1 | 1.414 |
| 两同步带间距 $A$/mm | 0.60 | 0.90 | 1.70 | 2.40 | 2.70 |
| 滞后时间 $B$/s | 0.14 | 0.29 | 0.66 | 1.03 | 1.20 |

### 3.2 试验指标

以名优茶采摘末端执行器的输送成功率及采摘成功率为试验指标,输送成功率 $\rho_1$ 是指末端执行器作业时由柔性同步带输送并成功落入收集盒中未损伤的茶叶嫩梢数量占采摘茶叶总数的百分比;采摘成功率 $\rho_2$ 是指收集盒内完好的茶叶嫩梢数量占采摘茶叶总数的百分比。输送成功率的计算公式为

$$\rho_1 = \frac{N_c}{N} \times 100\% \tag{14}$$

采摘成功率的计算公式为

$$\rho_2 = \frac{N_p}{N} \times 100\% \tag{15}$$

式中 $N_c$——成功落入收集盒中未损伤的茶叶嫩梢数量

$N$——采摘茶叶总数

$N_p$——收集盒中完好的茶叶嫩梢数量

### 3.3　试验方案与结果

根据表 2 试验因素编码，利用 Design-Expert 13.0 软件进行试验设计并开展采摘试验，两同步带间距和滞后时间为试验因素，选取立方体点 4 组，星号点 4 组，中心点 5 组，共试验 13 组，每组试验采摘茶叶嫩梢共 100 个。统计收集盒中茶叶嫩梢总量以及完好的茶叶嫩梢数量，代入式(14)和式(15)中计算输送成功率及采摘成功率。试验结果如表 3 所示。

**表 3　试验方案与结果**

**Tab.3　Experimental scheme and results**

| 序号 | 因素 | | 输送成功率 | 采摘成功率 |
|---|---|---|---|---|
| | $A$/mm | $B$/s | $\rho_1$/% | $\rho_2$/% |
| 1 | 0.6 | 0.66 | 76 | 58 |
| 2 | 2.4 | 1.03 | 90 | 69 |
| 3 | 1.7 | 0.66 | 97 | 83 |
| 4 | 1.7 | 0.66 | 96 | 76 |
| 5 | 1.7 | 0.66 | 95 | 78 |
| 6 | 1.7 | 0.14 | 91 | 28 |
| 7 | 0.9 | 0.29 | 84 | 19 |
| 8 | 1.7 | 0.66 | 97 | 78 |
| 9 | 1.7 | 0.66 | 97 | 82 |
| 10 | 2.4 | 0.29 | 89 | 44 |
| 11 | 0.9 | 1.03 | 87 | 77 |
| 12 | 1.7 | 1.20 | 95 | 65 |
| 13 | 2.7 | 0.66 | 87 | 73 |

### 3.4　试验结果分析

#### 3.4.1　输送成功率回归模型建立

利用 Design-Expert 13.0 软件对试验结果进行处理得到输送成功率的回归模型，方差分析如表 4 所示。输送成功率的回归模型 $P<0.05$，表明该模型显著，模型的失拟项 $P>0.05$，表明该模型失拟项不显著，回归模型的拟合程度高。模型的决定系数 $R^2=0.975\ 8$，表明该模型能够解释 97.58% 以上响应值的变化。$R^2_{Adj}=0.958\ 5$、$R^2_{Pre}=0.864\ 9$，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。各因素对输送成功率的影响程度为：两同步带间距大于滞后时间。得到输送成功率的回归二次方程为

$$\rho_1=96.23+2.95X_1+1.26X_2-0.482\ 8X_1X_2-7.40X_1^2-1.56X_2^2 \tag{16}$$

式中　$X_1$、$X_2$——因素编码值

#### 3.4.2　采摘成功率回归模型建立

对试验结果进行处理得到采摘成功率的回归模型，方差分析如表 5 所示。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 $P>0.05$，表明该模型失拟项不显著，回归模型的拟合程度高。模型的决定系数 $R^2=0.972\ 2$，表明该模型能够解释 97.22% 以上响应值的变化。$R^2_{Adj}=0.952\ 3$、$R^2_{Pre}=0.840\ 2$，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。各因素对采摘成功率的影响因素程度为：滞后时间大于两同步带间距。得到采摘成功率的回归二次方程为

$$\rho_2=79.18+4.83X_1+17.55X_2-8.46X_1X_2-7.91X_1^2-17.22X_2^2 \tag{17}$$

**表 4　输送成功率方差分析**

**Tab.4　Analysis of variance in success rate of transportation**

| 方差来源 | 平方和 | 自由度 | 均方 | $F$ | $P$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 模型 | 464.18 | 5 | 92.84 | 56.45 | <0.000 1 ** |
| $A$ | 68.98 | 1 | 68.98 | 41.94 | 0.000 3 ** |
| $B$ | 12.78 | 1 | 12.78 | 7.77 | 0.027 0 * |
| $AB$ | 0.934 5 | 1 | 0.934 5 | 0.568 2 | 0.475 6 |
| $A^2$ | 366.30 | 1 | 366.30 | 222.73 | <0.000 1 ** |
| $B^2$ | 17.56 | 1 | 17.56 | 10.68 | 0.013 7 * |
| 残差 | 11.51 | 7 | 1.64 | | |
| 失拟项 | 8.31 | 3 | 2.77 | 3.46 | 0.130 7 |
| 纯误差 | 3.20 | 4 | 0.80 | | |
| 总计 | 475.69 | 12 | | | |

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

**表 5　采摘成功率方差分析**

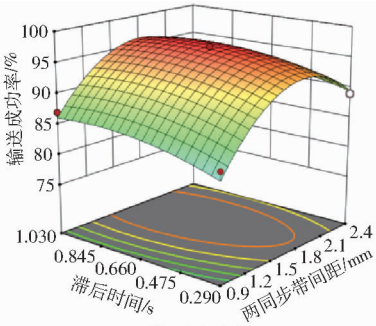
**Tab.5　Analysis of variance in success rate of picking**

| 方差来源 | 平方和 | 自由度 | 均方 | $F$ | $P$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 模型 | 5 107.45 | 5 | 1 021.49 | 48.90 | <0.000 1 ** |
| $A$ | 184.64 | 1 | 184.64 | 8.84 | 0.020 7 * |
| $B$ | 2 487.55 | 1 | 2 487.55 | 119.07 | <0.000 1 ** |
| $AB$ | 287.15 | 1 | 287.15 | 13.74 | 0.007 6 ** |
| $A^2$ | 418.71 | 1 | 418.71 | 20.04 | 0.002 9 ** |
| $B^2$ | 2 147.76 | 1 | 2 147.76 | 102.81 | <0.000 1 ** |
| 残差 | 146.24 | 7 | 20.89 | | |
| 失拟项 | 111.04 | 3 | 37.01 | 4.21 | 0.099 5 |
| 纯误差 | 35.20 | 4 | 8.80 | | |
| 总计 | 5 253.69 | 12 | | | |

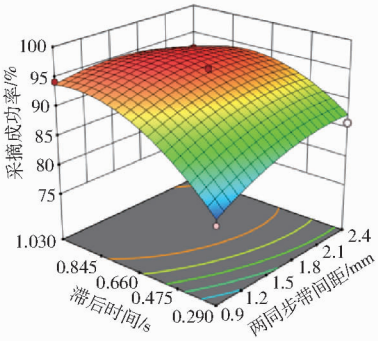
#### 3.4.3　响应面分析

采用响应面分析法对评价指标的影响因素进行研究，各因素对名优茶采摘末端执行器评价指标影响的响应曲面如图 13 所示。

如图 13a 所示，为两同步带间距和滞后时间对输送成功率的影响。在试验因素范围内，输送成功率随着两同步带间距的增大呈现先增大后减小的趋势，随着滞后时间的增加缓慢增大。这是由于当两同步带间距过小时，茶叶难以顺利进入茶叶传送通道内；当两同步带间距过大时，茶叶嫩梢在传送过程中未能被同步带有效夹持导致其从茶叶传送通道中




(a) 输送成功率




(b) 采摘成功率

图 13 交互因素对输送成功率和采摘成功率影响的响应曲面

Fig. 13 Response surfaces of interaction factors on transportation success rate and picking success rate

掉落,使得输送成功率低。

如图 13b 所示,为两同步带间距和滞后时间对采摘成功率的影响。在试验因素范围内,采摘成功率随着滞后时间的增大呈现先增大后缓慢减小的趋势,随着两同步带间距的增大而增大。这是由于当滞后时间过短时,一部分茶叶嫩梢刚进入茶叶传送通道即被剪断,导致收集盒内碎叶增多,使得采摘成功率低。

### 3.5 参数优化与试验验证

针对名优茶采摘末端执行器在作业过程中存在损伤、易掉落等问题,以输送成功率、采摘成功率为优化指标,运用 Design-Expert 13.0 软件的 Optimization 功能,以输送成功率以及采摘成功率最大为目标,对各影响参数进行优化,得到最优的参数组合为:两同步带间距 1.79 mm,滞后时间 0.80 s,此时输送成功率为 96.74%,采摘成功率为 83.37%。受限于加工精度,将所得参数取整并进行采摘验证试验,取两同步带间距为 1.80 mm,滞后时间 0.80 s。试验重复 3 组,得到输送成功率和采摘成功率分别为 96.7%、86.3%,试验值与预测值误差小于 5%,表明响应面优化模型试验结果可靠,能够有效实现优化。试验现场以及采摘过程如图 14、15 所示。

试验结果表明,采用柔性同步带的收集方式避免了负压吸式末端执行器吸取茶叶嫩梢时可能出现



图 14 试验现场图

Fig. 14 Experimental site diagram

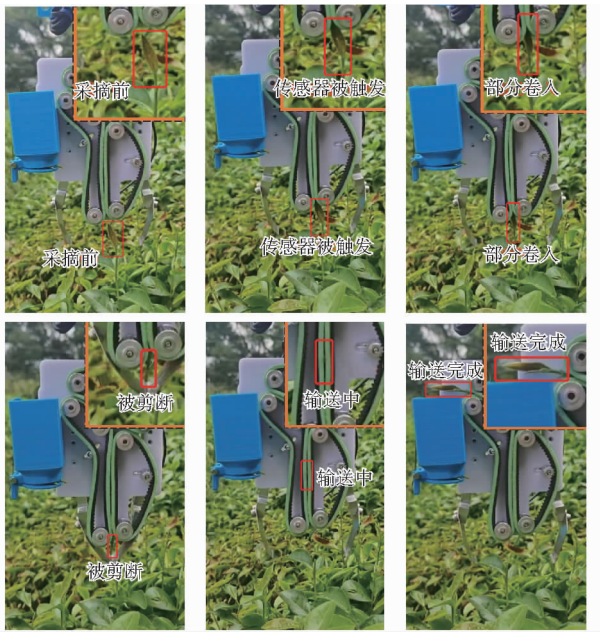



图 15 采摘过程图

Fig. 15 Tea picking process diagram

茶叶附壁和堵塞的问题[23],输送成功率达 96.7%。试验过程中发现,茶叶嫩梢在柔性同步带输送过程中未出现损伤现象,且针对部分叶片上附着雨水的情况,该末端执行器能够有效采摘,且采摘后的茶叶嫩梢符合名优茶后续加工要求,其中部分茶叶嫩梢在进入收集盒时掉落至收集盒外;末端执行器的采摘成功率与茶叶嫩梢的定位精度有关,在现有的 3D 相机定位精度下,通过柔性同步带夹持嫩梢以及传感器感应嫩梢的方式,提高了茶叶的采摘成功率,该末端采摘成功率为 86.3%,采摘后的嫩梢符合名优茶的采摘标准;同时实现了低功耗的嫩梢收集连续性,相较于负压吸附式和抛甩式,其稳定性更好,为采茶机器人末端的工程化研发提供思路。

本文设计的采收一体的末端执行器与其他末端执行器在采摘、收集方式以及采摘效率方面的对比如表 6 所示。

由表 6 所示的对比结果可知,本文设计的名优茶采摘末端执行器在保持采摘成功率不受影响的前

**表 6　名优茶末端执行器采摘、收集方式及采摘成功率对比结果**

**Tab. 6　Comparison results of picking and collecting methods and picking success rate of end effectors for famous tea**

| 末端执行器 | 采摘方式 | 收集方式 | 采摘成功率/% |
|---|---|---|---|
| 剪切-收集一体式[12] | 剪切式 | 抛甩式 | 75 |
| 智能采摘机器人[26] | 剪切式 | 负压吸附式 | 87.22 |
| 旋转式两工位[27] | 折断式 | 暂存盒收集 | 85 |
| 阶梯输送式[28] | 剪切式 | 传送式 | 77.9 |
| 采收一体(本文) | 剪切式 | 传送式 | 86.3 |

提下，摒弃了稳定性不高的抛甩式以及结构更为复杂的负压吸式收集方式，采用稳定性能更优、结构更简单的同步带传送式收集方式。使用柔性同步带夹持方式增强了剪切的稳定性并避免嫩梢在输送过程中遭受损伤的情况。同时该夹持方式可有效降低微风环境对嫩梢采摘点定位误差的影响，结合传感器对嫩梢进行检测，进一步降低了对采摘点定位精度的要求，末端采摘成功率得到提升。

## 4　结论

(1)设计了一种利用漫反射传感器感应嫩梢、柔性同步带夹持并配合剪切式刀具剪切以实现对茶叶嫩梢的连续采摘和收集作业的名优茶采摘末端执行器。

(2)利用力学传感器，对两同步带不同间距下茶叶嫩梢所受到的挤压力进行分析和测量，确定两同步带间距的范围为 0.90 ~ 2.40 mm；通过对茶叶剪切时机进行理论分析，确定漫反射光电传感器被触发后控制系统控制刀具剪切的滞后时间的范围为 0.29 ~ 1.03 s。

(3)借助 Design-Expert 13.0 软件进行试验设计与处理，得到各因素与评价指标的数学回归模型。各因素对输送成功率的影响程度为：两同步带间距大于滞后时间，两同步带间距与滞后时间的交互项对输送成功率的影响不显著。各因素对采摘成功率的影响程度为：滞后时间大于两同步带间距。以输送成功率以及采摘成功率最大为目标，对各影响参数进行优化得到最优的参数组合为：两同步带间距 1.79 mm，滞后时间 0.80 s。对所得参数进行取整，并进行采摘试验。结果表明，末端执行器能够有效完成采摘和收集工作，输送成功率、采摘成功率分别为 96.7%、86.3%，试验值与预测值的相对误差小于 5%，优化模型结果可靠。

## 参　考　文　献


[1] 郑航，傅童，薛向磊，等. 茶叶机械化采摘技术研究现状与展望[J]. 中国农机化学报，2023，44(9)：28 - 35.
ZHENG Hang，FU Tong，XUE Xianglei，et al. Research status and prospect of tea mechanized picking technology[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2023，44(9)：28 - 35. (in Chinese)

[2] 李虹. 四川巴中市茶产业现状调查及发展对策分析[D]. 雅安：四川农业大学，2017.
LI Hong. Investigation and development of the current status of tea industry in Bazhong City，Sichuan Province[D]. Yaan：Sichuan Agricultural University，2017. (in Chinese)

[3] ZHANG L，ZOU L，WU C Y，et al. Method of famous tea sprout identification and segmentation based on improved watershed algorithm[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2021，184：106 - 108.

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

[5] 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)

[6] 王明龙，徐垚，张智浩，等. 茶叶智能机械化采摘技术与装备研究进展[J]. 中国农机化学报，2024，45(9)：305 - 310.
WANG Minglong，XU Yao，ZHANG Zhihao，et al. Research progress of intelligent mechanized tea picking technology and equipment[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2024，45(9)：305 - 310. (in Chinese)

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

[8] 张巍，赵帮泰，杨昌敏，等. 名优茶智能化采摘关键技术研究进展[J]. 中国农机化学报，2024，45(5)：202 - 209，216.
ZHANG Wei，ZHAO Bangtai，YANG Changmin，et al. Research progress on key technology of intelligent picking of high-quality tea[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2024，45(5)：202 - 209，216. (in Chinese)

[9] 张智浩. 名优茶智能化采摘关键技术研究[D]. 广州：仲恺农业工程学院，2024.
ZHANG Zhihao. Research into the essential technique of intelligent harvesting of the famous tea[D]. Guangzhou：Zhongkai University of Agriculture and Engineering，2024. (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] 郝淼，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)
[12] 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 & Electrical Engineering Technology, 2023, 52(9):42 - 45, 172. (in Chinese)
[13] 罗坤, 吴正敏, 曹成茂, 等. 茶鲜叶嫩梢捏切组合式采摘器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(13):1 - 9.
LUO Kun, WU Zhengmin, CAO Chengmao, et al. Design and experiment of the combined pinch and cut picker for tea fresh leaf tips[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(13):1 - 9. (in Chinese)
[14] 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)
[15] 马智斌, 陈龙, 李修隆, 等. 一种鹰嘴式名优茶采摘机构: CN210247563U[P]. 2020 - 04 - 07.
[16] 彭强. 阵列式名优茶采摘机械手设计与全局路径规划研究[D]. 杭州:浙江理工大学, 2023.
PENG Qiang. Research on manipulator and global path planning for picking famous tea at the end of array[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2023. (in Chinese)
[17] ZHU Y P, WU C Y, TONG J H, et al. Deviation tolerance performance evaluation and experiment of picking end effector for famous tea[J]. Agriculture, 2021, 11(2):128.
[18] 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)
[19] 张佳喜, 芮照钰, 蔡佳麟, 等. 前置式皮带夹持输送棉秆起拔机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12):77 - 84, 152.
ZHANG Jiaxi, RUI Zhaoyu, CAI Jialin, et al. Design and test of front mounted belt clamping and conveying cotton-stalk pulling device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12):77 - 84, 152. (in Chinese)
[20] 蔡佳麟, 张佳喜, 叶尔波拉提·铁木尔, 等. 夹持带式棉秆收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 152 - 160.
CAI Jialin, ZHANG Jiaxi, YEERBOLATI · Tiemuer, et al. Design and test of clamping belt cotton straw harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10):152 - 160. (in Chinese)
[21] 邹亮亮, 刘雪美, 李金光, 等. 基于流变特性分析的菠菜有序收获机夹持输送装置研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10):72 - 79.
ZOU Liangliang, LIU Xuemei, LI Jinguang, et al. Clamping conveyer device of ordered spinach harvester based on rheological property analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10):72 - 79. (in Chinese)
[22] 宋烨本. 菠菜整株有序收获机拔取输送装置低损伤优化与试验[D]. 泰安:山东农业大学, 2019.
SONG Yeben. Low damage optimization and test of the pulling and conveying device of spinach whole plant orderly harvester [D]. Taian:Shandong Agricultural University, 2019. (in Chinese)
[23] 陈建能, 李杭, 刘林敏, 等. 名优茶采摘分体刀具式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)
[24] 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)
[25] 王方艳, 李凤刚, 张鹏程, 等. 对辊式干辣椒脱帽装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(7):191 - 199.
WANG Fangyan, LI Fenggang, ZHANG Pengcheng, et al. Design and experiment of double roller dried pepper pedicel removal device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7):191 - 199. (in Chinese)
[26] 李亚涛, 周宇杰, 王少卿, 等. 名优茶采摘机器人收获试验[J]. 茶叶科学, 2024, 44(1):75 - 83.
LI Yatao, ZHOU Yujie, WANG Shaoqing, et al. Experimental study on high-quality tea plucking by robot[J]. Journal of Tea Science, 2024,44(1):75 - 83. (in Chinese)
[27] 陈建能, 陈倩雯, 刘林敏, 等. 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[J]. 农业机械学报, 2024, 55(10):136 - 144.
CHEN Jianneng, CHEN Qianwen, LIU Linmin, et al. Design and experiment of rotating two workstations integrated effector for famous tea picking and collection[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10):136 - 144. (in Chinese)
[28] 刘皓央, 肖强, 李鑫, 等. 阶梯输送式茶叶采收分级一体机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(17):52 - 60.
LIU Haoyang, XIAO Qiang, LI Xin, et al. Design and experiment of the stepped transportation tea harvesting and grading integrated machine[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(17):52 - 60. (in Chinese)