doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.10.021

油茶果分层采收装置设计与试验

饶洪辉　王玉龙　李庆松　王保阳　杨家林　刘木华
(江西农业大学工学院, 南昌 330045)

摘要: 降低花苞损伤是油茶果机械采摘中的难点,为此,设计了一种油茶果分层采收装置。分析了分层采摘装置和果枝的相互作用原理,并运用 ANSYS Workbench 对分层机构与果枝作用模型、分层采摘机构与果枝作用模型进行应力仿真,随着分层胶辊距离增大,果枝弯曲程度越大,果枝横截面上的正应力和切应力增加;随着采摘胶辊间隙减小,果枝横截面所受的正应力和切应力增加,通过试验验证了分层采摘的可行性。以分层厚度、分层深度、胶辊间隙和胶辊转速为影响因素,以油茶果漏采率和花苞损伤率为评价指标,对赣无 1 油茶果进行了采摘试验。结果表明,影响油茶果漏采率的因素依次为胶辊间隙、分层深度、分层厚度、胶辊转速;影响花苞损伤率的因素依次为分层厚度、分层深度、胶辊转速、胶辊间隙;运用综合评分法,得到采摘赣无 1 油茶品种的最佳参数组合为:分层厚度 360 mm、分层深度 290 mm、胶辊间隙 18 mm、胶辊转速 65 r/min。在此工况下,油茶果漏采率为 13.33%,花苞损伤率为 6.33%。与未加分层机构的采摘装置相比,分层采摘装置的花苞损伤率降低了 6.22 个百分点。

关键词: 油茶果; 分层采摘; 胶辊; 应力
中图分类号: S225.93　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)10-0203-10　　**OSID**:

Design and Experiment of Camellia Fruit Layered Harvesting Device

RAO Honghui　WANG Yulong　LI Qingsong　WANG Baoyang　YANG Jialin　LIU Muhua
(*College of Engineering*, *Jiangxi Agricultural University*, *Nanchang* 330045, *China*)

Abstract: Aiming at the problem of reducing damage rate of flower bud in mechanical picking of Camellia fruit, a layered harvesting device for Camellia fruit was designed. The principle of interaction between layered picking device and fruit branch was analyzed. The model between layered mechanism and fruit branch, layered picking mechanism and fruit branch was established, and the stress between the layered mechanism and fruit branch, layered picking mechanism and fruit branch was simulated by means of ANSYS Workbench. The results showed that the bending degree of fruit branch was increased with the increasing distance of layered rubber roller, and the normal stress and shear stress of fruit branch cross section were increased, the normal stress and shear stress of fruit branch cross section were increased with the decreasing gap of picking rubber roller clearance. The feasibility of layer picking was verified by experiments. Taking the layer thickness, layer depth, rubber roller clearance and rubber roller speed as the influencing factors, and the leakage rate of Camellia fruit and the damage rate of flower bud as the evaluation indexes, the experiment was carried out with Ganwu No. 1 Camellia fruit. The results showed that the successive factors affecting the leakage rate of Camellia fruit were rubber roller gap, layer depth, layer thickness and rubber roller speed, the successive factors affecting the flower bud damage rate were layer thickness, layer depth, rubber roller speed and rubber roller gap. The best combination of parameters for Camellia of Ganwu No. 1 were obtained by comprehensive scoring method when the layer thickness was 360 mm, and the layer depth was 290 mm, the rubber roller gap was 18 mm, and the rubber roller speed was 65 r/min. Under this work condition, the leakage rate of Camellia fruit was 13.33%, and the damage rate of flower bud was 6.33%. Compared with the picking device without layered mechanism, the average damage rate of flower bud of layered picking device was reduced by 6.22 percentage points.

Key words: Camellia fruit; layered picking; rubber roller; stress

收稿日期: 2021-06-10　修回日期: 2021-07-02
基金项目: 国家自然科学基金项目(52065207)和江西省科技计划项目(20141BBF60057)
作者简介: 饶洪辉(1978—),男,副教授,主要从事现代农业装备研究,E-mail: rhh58@sohu.com

0 引言

油茶又称茶籽树,与橄榄、油棕、椰子并称世界四大木本油料,也是我国第一大木本油料[1]。截止2020 年底,全国共有 400 多万公顷油茶林,高产油茶林近百万公顷[2],且高产油茶林大多种植在缓坡地带。现有油茶果采摘基本靠人工完成,劳动强度大。农村劳动力短缺带来油茶果采摘成本上升,亟需实现机械化采摘[3-4]。

目前我国学者在油茶果采摘机械研制方面已取得了一定的成果,机械采摘方式主要有齿梳式、胶辊式和振动式等[5-7]。高自成等[8]设计的齿梳式油茶果采摘机在采摘头上升速度为 0.8 m/s、回转速度为 15 r/min 左右时,能使采摘范围内的油茶果漏采率控制在 3.2% 以内,花蕾掉落率为 3% 以内。罗时挺等[9]设计了一种齿梳拨刀式油茶果采摘装置,分析了采摘装置的工作原理,得出了影响拨刀采摘效果的主要因素。饶洪辉等[10]设计了一种电动胶辊旋转式油茶果采摘执行器,当胶辊直径、胶辊间距、胶辊旋转速度和胶辊线速度分别为 30 mm、25 mm、30 r/min和 0.833 m/s 时,直径 25 mm 以上的油茶果能全部被采摘,油茶果漏采率为 13.6%。高自成等[11]设计的悬挂振动式油茶果采摘执行机构在振动频率为 15 Hz,夹持高度 1 300 mm 时,得到油茶果漏采率为 4.9%,花蕾掉落率为 4.8%。伍德林等[12]设计了一种摇枝式油茶果采摘机,林间试验表明油茶果采净率为 95.2%,花苞损伤率为 17.2%。王东等[13]设计了一种振动式油茶果青果采收机,当夹持油茶树干距离地面 100 mm,振动频率为 25 Hz 时,油茶果采收机达到最佳采摘效果,此时采摘率为 95.6%,花苞损伤率为 3.3%。

振动式采摘是国外采用较为普遍和成熟的林果采摘方式[14-20],但振动采摘容易损伤油茶果枝和树根,影响油茶树翌年的产量。

为降低采摘油茶果时对花苞造成的损伤率,本文设计一种油茶果分层采摘装置。通过分析影响油茶果分层采摘效果的主要因素,确定采摘装置的主要工作参数。并以主要工作参数为因素,以油茶果漏采率和花苞损伤率为指标进行正交试验,以期在降低花苞损伤率的同时获得采摘装置较佳的工作参数组合。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

园艺化栽培的油茶成林后株间行距一般为 3.0 m×4.0 m 或者 4.0 m×4.0 m,未矮化的油茶果树平均高度为 3 m,树冠直径在 2.5 m 左右,油茶果主要分布在树层表面 200 ~ 300 mm[21]之间,且集中在果树的中上部 1.2 ~ 3 m 之间。现有的采摘装置整机体积较大,难以在油茶林中采摘作业。根据油茶林的株间行距和油茶果分布的高度范围,设计的油茶果分层采摘装置长为 1.5 m、宽为 1 m,采摘高度范围在 1.2 ~ 3 m 之间。液压技术具有操作简单、容易控制和功率大等特点,适用于工作环境恶劣且结构形态多变的农业机械[22]。因此,为提高油茶果分层采收装置的可靠性,选用液压系统驱动采摘头。油茶果分层采摘装置的整机模型如图 1 所示。其中采摘头主要由采摘胶辊、旋转胶辊组件、链轮、链条、链条盖、齿轮箱和液压马达等组成。

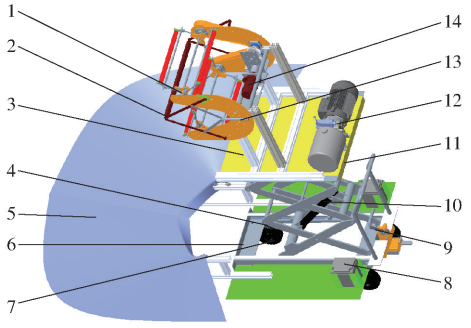


图 1 油茶果分层采收装置三维模型

Fig. 1 Structure model of layered harvesting device for Camellia fruit

1. 采摘头 2. 分层机构 3. 支撑架 4. 伸缩架 5. 收集伞 6. 底架 7. 行走轮 8. 蓄电池 9. 液压缸控制器 10. 升降液压缸 11. 承载板 12. 液压泵站 13. 电动推杆 14. 液压马达

1.2 工作原理

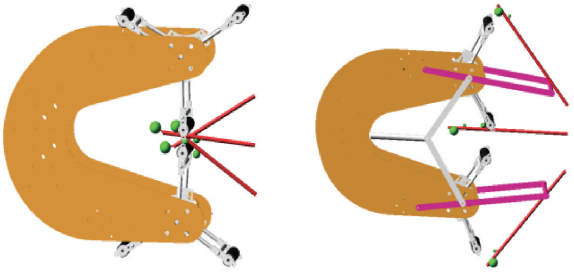
调节液压缸控制器使采摘头位于油茶果枝的前方,将左右两侧收集伞张开。启动分层机构,调整分层胶辊的初始距离并进入果枝将采摘层果枝的上、下层果枝推开,然后启动液压泵站带动液压马达旋转,经齿轮箱和链轮减速后,带动采摘头的上、下旋转胶辊组件同步反向转动实现采摘。由于采摘胶辊安装在轴承上,采摘胶辊在作业过程中受到摩擦和碰撞时会滚动,能够减小对油茶枝条和花苞的损伤。采摘胶辊在旋转和滚动过程中,不断把油茶果枝夹紧并将油茶果从果枝上挤压滚搓出来,完成油茶果的采摘。采落的油茶果掉在收集伞上,由塑料筐收集。

2 分层采摘装置与果枝相互作用分析

2.1 分层机构原理设计

自然生长的果树枝条较密,机械采摘油茶果时容易损伤油茶花苞,造成翌年油茶产量降低。为此,设计一种分层机构,将上、下层枝条推开,实现对单

层果枝(中层)的采摘,以降低油茶花苞的损伤率,分层采摘原理如图 2b 所示。



(a) 无分层　　(b) 有分层

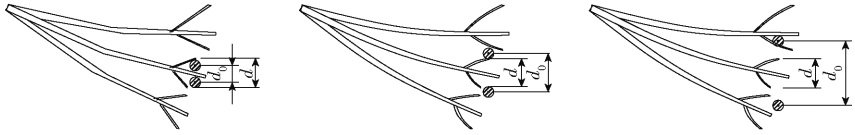
图 2　有无分层采摘原理图

Fig. 2　Schematics of layered picking and non-layered picking

分层机构为上、下对称结构,如图 3 所示,推杆安装在采摘头上可水平移动,左摇杆和右摇杆铰接在采摘头上,连杆分别与左右摇杆和推杆铰接。工作时推杆水平左移带动连杆转动,连杆将左摇杆和右摇杆抬起,分层胶辊随着左右摇杆的转动被抬起。分层胶辊可自转,以减少分层和采摘过程中对果枝和花苞的损伤。

2.2　分层机构进入条件

成林后油茶果枝生长茂密,为实现油茶果的分层采摘,分层机构进入油茶枝条是分层的首要条件。目前油茶次级枝以水平方向生长在主枝上居多,这种情况与分层胶辊方向一致,易实现分层;如果油茶次级枝生长在与主枝铅垂方向内,则分层需满足一定条件。由于油茶果生长在细枝条末端,体积较小,分层机构能否顺利进入油茶果枝主要取决于分层机构能否进入主枝铅垂方向的油茶枝,因此油茶果枝建模时进行了简化处理,忽略生长在细枝条末端油茶果的影响,如图 4 所示。



(a) 初始分层胶辊距离过小　　(b) 初始分层胶辊距离合适　　(c) 初始分层胶辊距离过大

图 4　不同分层胶辊距离进入果枝状态图

Fig. 4　State pictures of different layered rubber roller distance entering fruit branch

上、下分层胶辊距离 d_s 计算式为

$$d_s = d_0 - 2R \tag{1}$$

式中　d_0——上、下分层胶辊中心线距离,mm

R——上、下分层胶辊半径,mm

若初始上、下分层胶辊距离 d_s 等于欲采摘果枝的厚度 d 时,分层胶辊刚好能够进入枝条中,如图 4b 所示。考虑到油茶枝条的韧性,则初始上、下分层胶辊的距离 d_s 满足以下条件时,分层胶辊可进入油茶果枝。

$$d - \Delta l \leqslant d_s \leqslant d + \Delta l \tag{2}$$

式中　Δl——分层胶辊距离浮动值,mm

当初始上、下分层胶辊距离 $d_s < d - \Delta l$ 时,如图 4a 所示,分层胶辊将欲采摘的枝条推开,甚至可能将枝条折断,无法实现分层功能。当上、下分层胶辊距离 $d_s > d + \Delta l$ 时,如图 4c 所示,分层胶辊进入欲采摘枝条的上、下层枝条中,同样无法实现分层功能。

为探究分层胶辊进入油茶果枝的深度条件,将果枝进行简化:用细长直圆柱代替果枝的主枝,忽略油茶细枝,得到如图 5 所示模型。

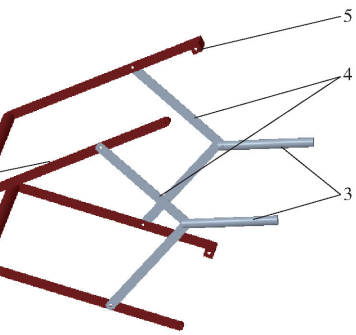


图 3　分层机构三维图

Fig. 3　Structure model of layered mechanism

1. 分层胶辊　2. 左摇杆　3. 推杆　4. 连杆　5. 右摇杆

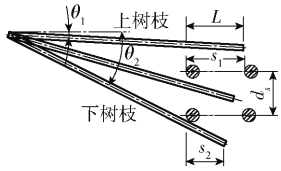


图 5　分层胶辊进入深度示意图

Fig. 5　Sketch of entry depth of layered rubber roller

由图 5 可知

$$\begin{cases} s_1 = L\cos\theta_1 \\ s_2 = L\cos\theta_2 \end{cases} \tag{3}$$

式中　L——油茶果表层分布深度,mm

s_1——上树枝的油茶果表层分布深度在水平方向上的投影,mm

s_2——下树枝的油茶果表层分布深度在水平方向上的投影,mm

θ_1——上树枝中心线与水平方向的夹角,(°)

θ_2——下树枝中心线与水平方向的夹角,(°)

为降低花苞损伤率,分层胶辊的进入深度应取 s_1、s_2 中较大的一个,即将上、下层果枝尽可能的推开,减少采摘胶辊采摘时对上下果枝的接触,实现单

层果枝的采摘。

2.3 分层机构与果枝相互作用分析

分层机构顺利进入果枝之后,分层胶辊将采摘果枝的上层果枝抬起,下层果枝压低。为探究分层机构对油茶果枝的作用力,对分层机构和果枝相互作用进行了简化,作用原理如图 6 所示。由于分层胶辊为上、下对称结构,现只分析上侧的分层胶辊对果枝的作用,果枝与树体相连的左端 A 点处可简化为固定端约束。

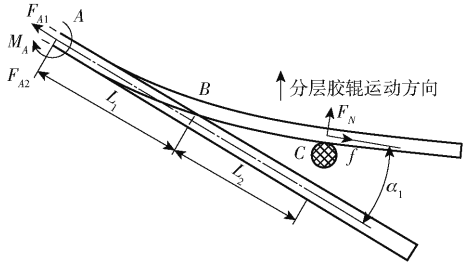


图 6 分层胶辊与果枝相互作用原理图

Fig. 6 Schematic of interaction between layered rubber roller and fruit branches

由于油茶树末端的枝条直径变化较小,可以将果枝简化为受轴向力和横向力的等直径圆柱,由图 6 油茶枝受力分析可得

$$\begin{cases} f=\mu F_N \\ F_{A1}=\mu F_N\cos\alpha_1-F_N\sin\alpha_1 \\ F_{A2}=F_N\cos\alpha_1+\mu F_N\sin\alpha_1 \\ M_A=(F_N\cos\alpha_1+\mu F_N\sin\alpha_1)(L_1+L_2) \end{cases} \tag{4}$$

式中 f——分层胶辊对果枝的摩擦力,N

α_1——摩擦力 f 与初始果枝轴线的夹角,(°)

F_N——胶辊对果枝的支持力,N

μ——胶辊与果枝接触的摩擦因数

L_1——A、B 两点间的距离,m

L_2——B、C 两点间的距离,m

F_{A1}——果枝受分层机构作用点 A 水平分力,N

F_{A2}——果枝受分层机构作用点 A 垂直分力,N

M_A——果枝受分层机构作用点 A 力矩,N·m

在分层胶辊的作用下,果枝将产生弯曲,则与固定端相距 L_1 位置处 B 点的弯矩为

$$M_{B1}=M_A-F_{A2}L_1 \tag{5}$$

联立式(4)、(5)求解得

$$M_{B1}=(F_N\cos\alpha_1+\mu F_N\sin\alpha_1)L_2 \tag{6}$$

果枝轴力 F_{A1} 产生的应力 σ_{t1} 为

$$\sigma_{t1}=\frac{4F_{A1}}{\pi D^2}=\frac{4(\mu F_N\cos\alpha_1-F_N\sin\alpha_1)}{\pi D^2} \tag{7}$$

式中 D——果枝横截面直径,mm

在点 B 由弯矩 M_{B1} 产生的弯曲正应力为

$$\sigma_{b1}=\frac{M_{B1}}{W}=\frac{(F_N\cos\alpha_1+\mu F_N\sin\alpha_1)L_2}{W} \tag{8}$$

式中 W——果枝的抗弯截面系数,mm^3

由应力叠加可知,在截面 B 处的综合正应力由轴向力 F_{A1} 产生的应力和弯矩 M_{B1} 产生的弯曲正应力两部分组成,可得

$$\sigma_{B1}=\sigma_{t1}+\sigma_{b1} \tag{9}$$

式中 σ_{B1}——果枝受分层机构作用点 B 综合正应力,MPa

由于木材的抗剪强度较差,需要考虑油茶果枝的切应力,根据圆形截面切应力的计算公式,果枝受到的剪力和切应力为

$$\begin{cases} F_{s1}=F_{A2}=F_N\cos\alpha_1+\mu F_N\sin\alpha_1 \\ \tau_1=\dfrac{16F_{s1}}{3\pi D^2}=\dfrac{16F_N\cos\alpha_1+16\mu F_N\sin\alpha_1}{3\pi D^2} \end{cases} \tag{10}$$

式中 F_{s1}——果枝受分层机构作用的剪力,N

τ_1——果枝受分层机构作用的切应力,MPa

为避免果枝受到破坏,应保证果枝受到的综合正应力和切应力均满足强度条件,即

$$\begin{cases} \sigma_{B1}\leqslant\sigma_u \\ \tau_1\leqslant\tau_u \end{cases} \tag{11}$$

式中 σ_u——果枝的极限正应力,MPa

τ_u——果枝的极限切应力,MPa

当分层胶辊的距离增大时,果枝受到的支持力 F_N 增大,根据式(9)、(10)可知,综合正应力 σ_{B1} 和切应力 τ_1 将会增大。

2.4 分层采摘装置与果枝相互作用模型分析

分层采摘装置在实现单层采摘时,会在分层胶辊处产生应力,因此需对果枝和分层采摘装置的相互作用进行力学分析,如图 7 所示。

由于旋转胶辊组件上、下对称,转速大小相同,转向相反,则果枝受到的支持力 F_{N1}、F_{N2} 和摩擦力 f_1、f_2 沿 y 方向分力相互抵消,只剩下 x 方向上的力,果枝在采摘胶辊 1、2 作用下受到的合力 F_x 为

$$F_x=F_{N1}\cos\alpha_3+F_{N2}\cos\alpha_2+f_1\sin\alpha_3+f_2\sin\alpha_2 \tag{12}$$

其中 $f_1=\mu F_{N1}\quad f_2=\mu F_{N2}$

式中 f_1——采摘胶辊 1 对果枝的摩擦力,N

f_2——采摘胶辊 2 对果枝的摩擦力,N

F_{N1}——采摘胶辊 1 对果枝的支持力,N

F_{N2}——采摘胶辊 2 对果枝的支持力,N

α_2——F_{N1} 与 x 轴夹角,(°)

α_3——F_{N2} 与 x 轴夹角,(°)

由图 7 可得

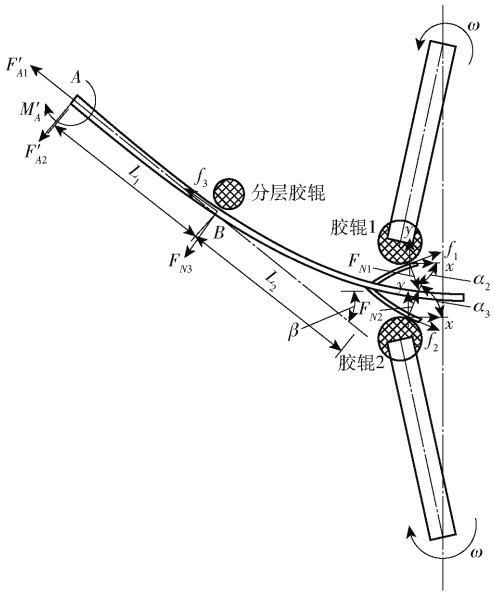


图 7　分层采摘装置和果枝相互作用理论模型

Fig. 7　Theoretical model of interaction between layered mechanism and fruit branch

$$\begin{cases} F'_{A1} = F_x\cos\beta - f_3 = F_x\cos\beta - \mu F_{N3} \\ F'_{A2} = F_x\sin\beta - F_{N3} \\ M'_A = F_x\sin\beta(L_1 + L_2) - F_{N3}L_1 \end{cases} \tag{13}$$

式中　β——果枝轴线与 x 轴的夹角，(°)

f_3——分层胶辊与果枝之间的摩擦力，N

F_{N3}——分层胶辊对果枝的支持力，N

M'_A——果枝受分层采摘机构作用点 A 力矩，N·m

由轴向力 F'_{A1} 引起的拉伸正应力为

$$\sigma_{t2} = \frac{4F'_{A1}}{\pi D^2} = \frac{4F_x\cos\beta - 4\mu F_{N3}}{\pi D^2} \tag{14}$$

使用截面法得沿 B 截面弯矩和弯曲正应力为

$$\begin{cases} M_{B2} = M'_A + F'_{A2}L_1 \\ \sigma_{b2} = \dfrac{M_{B2}}{W} = \dfrac{M'_A + F'_{A2}L_1}{W} \end{cases} \tag{15}$$

式中　M_{B2}——果枝受分层采摘机构作用点 B 截面的弯矩，N·m

σ_{b2}——果枝受分层采摘机构作用点 B 弯曲正应力，MPa

用叠加法得截面 B 处综合正应力 σ_{B2} 为

$$\sigma_{B2} = \sigma_{t2} + \sigma_{b2} \tag{16}$$

果枝受到的剪力和切应力为

$$\begin{cases} F_{s2} = F'_{A2} = F_x\sin\beta - F_{N3} \\ \tau_2 = \dfrac{16F_{s2}}{3\pi D^2} = \dfrac{16F_x\sin\beta - 16F_{N3}}{3\pi D^2} \end{cases} \tag{17}$$

式中　F_{s2}——果枝受分层采摘机构作用的剪力，N

τ_2——果枝受分层采摘机构作用切应力，MPa

为避免分层采摘装置作业时损伤果枝，应满足

$$\begin{cases} \sigma_{B2} \leqslant \sigma_u \\ \tau_2 \leqslant \tau_u \end{cases} \tag{18}$$

当采摘胶辊间隙变小时，胶辊对果枝的挤压会加大，则 F_{N1}、F_{N2} 将增大，由式(12)可知 F_x 增大，由式(16)、(17)可知果枝受分层采摘机构作用的综合正应力 σ_{B2} 和切应力 τ_2 增大。

3　基于 ANSYS Workbench 的分层采摘装置与果枝应力分析

3.1　果枝与分层机构相互作用应力仿真分析

本模型在 Creo 6.0 中完成各零件的建模，组装成装配体并导出 .x_t 文件，然后导入到 Workbench 中，将模型做相应的简化和修复，如图 8 所示。此模型考虑果枝最大弯曲时的应力情况，即在建模时使分层胶辊为闭合状态，使果枝与分层胶辊接触。

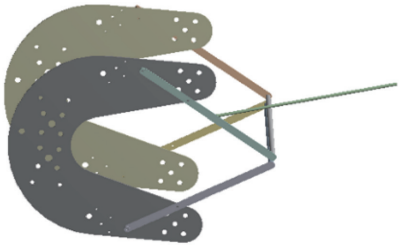


图 8　分层机构和果枝相互作用模型

Fig. 8　Interaction model between layered mechanism and fruit branch

在 Workbench 材料库中定义 3 种材料：果枝、分层胶辊和机架。果枝、胶辊和钢材的参数如表 1 所示[11]。

表 1　材料参数

Tab. 1　Material parameters

材料	密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/GPa	泊松比
果枝	1 345	3	0.17
胶辊	1 140	2.83	0.40
钢材	7 850	210	0.30

由于本模型分析果枝的应力，将上、下分层胶辊和果枝设置为柔性体，其余设置为刚体处理，以加快求解速度。U 型板与地面添加固定连接，左、右摇杆与机架添加转动副，分层胶辊与摇杆添加转动副。设置分层胶辊与果枝为摩擦接触，摩擦因数设为 0.2，设置求解时间为 0.2 s，油茶果枝右侧为固定端约束，采用六面体划分网格，有限元模型如图 9 所示。

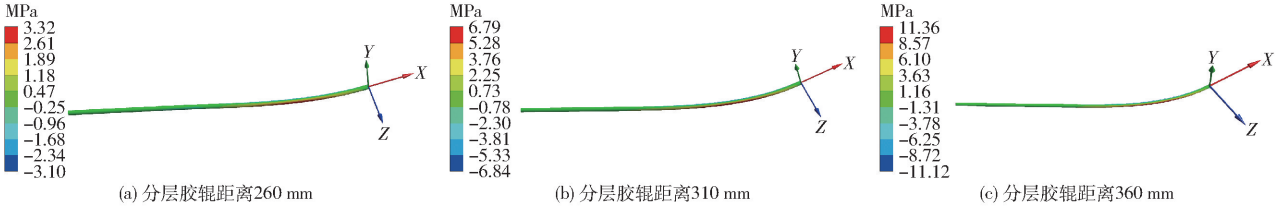
由试验得到赣无 1 油茶品种的单层果枝平均厚度为 310 mm，为分析不同分层胶辊厚度下油茶果枝所受分层机构作用的应力变化规律，分层胶辊厚度取值范围在平均厚度的基础上下浮动 50 mm，分别为 260、310、360 mm，求解 3 次。



图 9 分层机构和果枝相互作用的网格模型

Fig. 9 Mesh model of interaction between layer mechanism and fruit branch

定义 X 轴垂直果枝的圆柱截面,查看在局部坐标系下沿 X 轴的正应力,分层机构和果枝相互作用的正应力云图如图 10 所示。从图中可知,不同分层胶辊距离下的果枝最大应力均发生在果枝弯曲部位,弯曲部位凹下去的受压,凸起来的受拉,在果枝弯曲位置的上、下边缘有应力最大值。当分层胶辊距离分别为 260、310、360 mm 时,果枝的正应力最大值分别为 3.32、6.84、11.36 MPa,表明随着分层胶辊距离增大,果枝弯曲程度越大,果枝横截面上的正应力增加。



(a) 分层胶辊距离260 mm (b) 分层胶辊距离310 mm (c) 分层胶辊距离360 mm

图 10 不同分层胶辊距离下的果枝正应力云图

Fig. 10 Normal stress nephograms of fruit branch under different layer rubber roller distances

查看局部坐标系下 YZ 面上的切应力,分层机构和果枝相互作用的切应力云图如图 11 所示。从图中可知,弯曲部位的切应力较小,切应力最大值在右侧固定端。当分层胶辊距离分别为 260、310、360 mm 时,果枝 YZ 面上的切应力最大值分别为 0.39、0.6、0.78 MPa,表明随着分层胶辊距离增大,果枝横截面上的切应力增加。



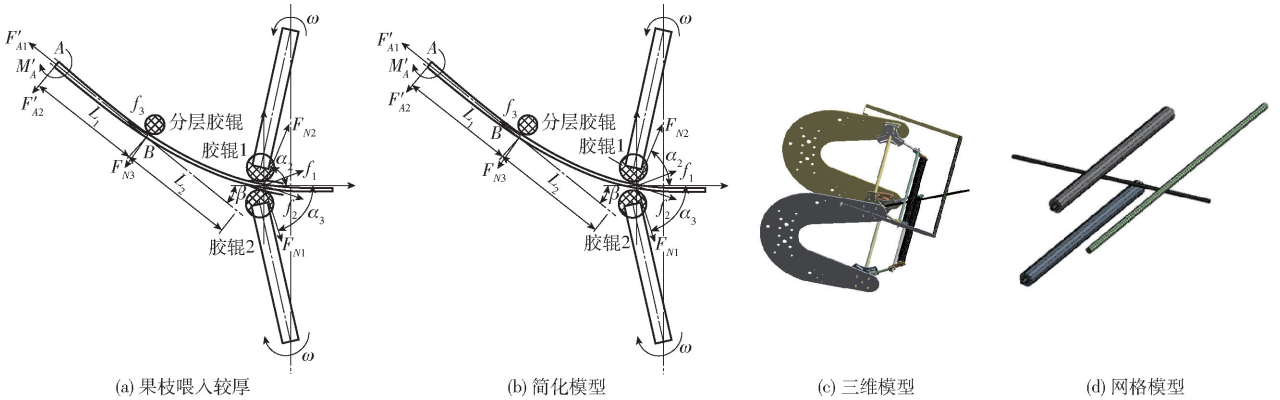
(a) 分层胶辊距离260 mm (b) 分层胶辊距离310 mm (c) 分层胶辊距离360 mm

图 11 不同分层胶辊距离下的果枝切应力云图

Fig. 11 Shear stress nephograms of fruit branch under different layered rubber roller distances

3.2 果枝与分层采摘装置相互作用应力仿真分析

当分层胶辊间隙较大,果枝喂入较厚时,图 7 中油茶果枝上的侧枝将进一步被采摘辊压紧,如图 12a 所示,甚至侧枝完全紧贴油茶枝,这种情况下分层采摘装置对油茶枝的损伤在理论上为最大。因此,为了减少仿真计算量和分析分层采摘装置对油茶枝的损伤,将油茶枝和侧枝视为整体,在其力学作用效果等效情况下,简化建模如图 12b 所示。在 Creo 6.0 中完成各零件的建模,组装成装配体并导出 .x_t 文件,导入到 Workbench 中将模型做相应的简化和修复,设置上、下旋转架与轴承座为转动副连接,上、下采摘胶辊与胶辊旋转组件转动副连接,其余设置同图 9 模型,得到如图 12c 所示的模型。实物中上下采摘胶辊共有 3 组,由于对果枝的作用原理相同,图 12c 中只添加一组分析,材料定义同表 1。采用六面体划分网格,有限元网格模型如图 12d 所示。



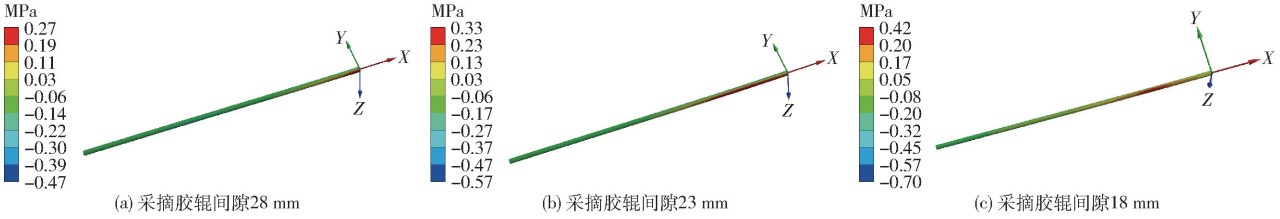
(a) 果枝喂入较厚 (b) 简化模型 (c) 三维模型 (d) 网格模型

图 12 分层采摘装置和果枝相互作用模型

Fig. 12 Models of interaction between layered picking device and fruit branch

本模型以最危险工况为前提，分析果枝受到的应力，即采摘胶辊取最大转速 65 r/min 时，求解时间 0.5 s。赣无 1 品种的油茶果平均直径为 25 mm，花苞平均直径为 8 mm[23]，若胶辊间隙过小则花苞损伤增加，若胶辊间隙过大则油茶果漏采率上升。仿真试验时采摘胶辊间隙取 18、23、28 mm，求解3 次。

查看在局部坐标系下沿 X 轴的正应力，分层采摘装置和果枝相互作用的正应力云图如图 13 所示。当采摘胶辊间隙分别为 28、23、18 mm 时，果枝的正应力最大值分别为 0.47、0.57、0.7 MPa。表明当采摘胶辊间隙变小时，采摘胶辊对果枝的挤压增大，则果枝横截面上的正应力增加。

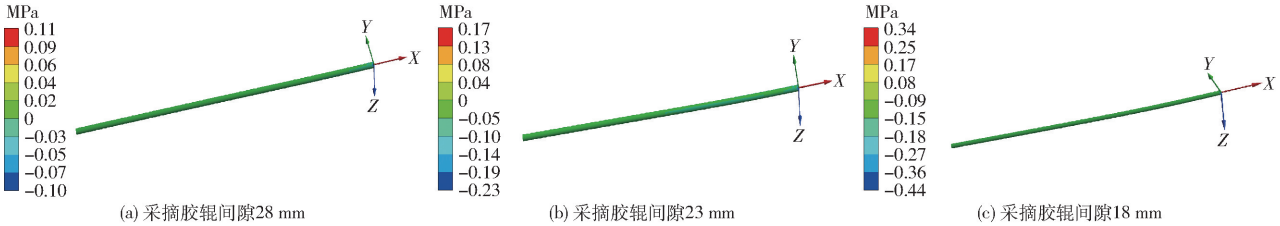


(a) 采摘胶辊间隙28 mm　(b) 采摘胶辊间隙23 mm　(c) 采摘胶辊间隙18 mm

图 13　不同采摘胶辊间隙下的果枝正应力云图

Fig. 13　Normal stress nephograms of fruit branch under different picking rubber roller clearances

查看在局部坐标系下 YZ 面上的切应力，分层采摘装置和果枝相互作用的切应力云图如图 14 所示。当采摘胶辊的间隙为 28、23、18 mm 时，果枝的切应力最大值分别为 0.11、0.23、0.44 MPa，表明当采摘胶辊间隙变小时，果枝横截面上的切应力增加。



(a) 采摘胶辊间隙28 mm　(b) 采摘胶辊间隙23 mm　(c) 采摘胶辊间隙18 mm

图 14　不同采摘胶辊间隙下的果枝切应力云图

Fig. 14　Shear stress nephograms of fruit branch under different picking rubber roller clearances

3.3　果枝剪切和拉伸试验

为避免油茶果枝剪断和拉断，需测量油茶果枝破坏的切应力和拉应力。使用 TMS－Pro 型质构检测仪进行拉伸和剪切破坏试验，由于仪器最大量程为 1 000 N，若选取油茶果枝过粗则会超过量程，经测试选取油茶果枝直径小于 5 mm 时较为适宜。

取无打滑 10 次有效试验，统计油茶枝拉断力和直径，结果如表 2 所示。

表 2　油茶果枝拉伸试验结果

Tab. 2　Experimental results of tensile of Camellia fruit branch

试验号	拉断力/N	直径/mm	试验号	拉断力/N	直径/mm
1	135.4	2.48	6	82.2	2.24
2	125.6	2.28	7	89.2	2.03
3	105.8	2.54	8	91.7	1.97
4	106.1	2.59	9	138.6	2.76
5	107.8	2.11	10	94.6	1.94

将表 2 数据代入公式[24]

$$\bar{\delta}=\frac{1}{10}\sum_{i=1}^{10}\frac{4F_{Ni}}{\pi D_i^2} \tag{19}$$

式中　$\bar{\delta}$——平均抗拉强度，MPa

F_{Ni}——拉断破坏力，N

D_i——油茶果枝 i 直径，mm

得油茶果枝平均抗拉强度为 26.44 MPa。根据木材顺纹抗拉强度与顺纹抗压强度比值约为 2[25]，可知油茶果枝的平均顺纹抗压强度为 13.22 MPa。根据前面的仿真分析可知，油茶果枝在采摘作业时受到的最大正应力为 11.36 MPa，均小于试验分析数据的抗拉强度和抗压强度。

选取 10 段油茶果枝进行 10 次试验，统计油茶枝破坏剪力和直径，试验结果如表 3 所示。

将表 3 数据代入公式

$$\bar{\tau}=\frac{1}{10}\sum_{i=1}^{10}\frac{4F_{si}}{\pi D_i^2} \tag{20}$$

式中　$\bar{\tau}$——平均剪切破坏应力，MPa

F_{si}——剪断力，N

得平均剪切破坏应力为 9.02 MPa。由前面的仿真数据可知，果枝在采摘作业时受到的最大切应力为 0.78 MPa，小于果枝的平均剪切破坏应力。

由于果枝受到的最大正应力和切应力仿真结果小于试验测定的拉伸和剪切破坏应力，因此分层采摘装置作业时不会对油茶果枝产生拉压和剪切破坏。

表 3 油茶果枝剪力试验结果

Tab. 3 Experimental results on shear force of Camellia fruit branch

试验号	剪力/N	直径/mm	试验号	剪力/N	直径/mm
1	153.906 5	4.29	6	70.920 8	4.02
2	231.826 6	4.74	7	99.079 3	4.21
3	161.206 8	4.24	8	88.501 2	4.24
4	183.703 9	4.56	9	157.631 1	4.38
5	105.783 7	4.80	10	140.050 7	4.87

4 采摘试验

4.1 试验影响因素

由于油茶果枝的厚度不同,若分层厚度过小则会导致枝条无法喂入,若分层厚度过大则使喂入枝条的数量增加,无法实现对单层枝条的采摘,因此需要设置合理的分层厚度水平。试验前对赣无 1 油茶树果枝厚度进行了测量。选取 10 株不同的油茶果树,每株果树上取长势相同的两层果枝,测量每层果枝的最大厚度,测量 2 次。得到油茶枝条单层的最小厚度为 250 mm,最大厚度为 410 mm,平均厚度为 311.25 mm,则分层胶辊厚度(分层胶辊距离)的取值范围为 250 ~ 410 mm。以单层果枝的平均厚度为参考,为方便分层胶辊厚度的调整,取 310 mm,上下浮动 50 mm,则分层厚度的 3 个水平分别为 260、310、360 mm。分别对分层厚度的 3 个水平进行分层机构进入果枝测试试验,如图 15 所示。结果表明当分层厚度为 260、310、360 mm 时,分层装置均能顺利进入果枝。



图 15 不同分层厚度进入试验

Fig. 15 Entry test with different layer thicknesses

油茶枝条生长茂密,若分层过深则抬起的枝条过多无法分层;若分层过浅则枝条会从分层胶辊上滑落,也无法分层。为确定合理的分层深度,对赣无 1 油茶品种表层分布范围进行了测量。测量方法为取 14 株果树上不同的 3 层果枝,每层果枝测量 2 次,得到每层油茶果的平均表层深度为 290 mm。根据油茶果在树冠生长分布范围,在油茶果平均表层深度的基础上,上下浮动 100 mm,则分层深度的水平分别为 190、290、390 mm。

4.2 试验方案

为考察油茶果分层采收机构参数变化对油茶果采摘试验的影响,取分层厚度、分层深度、胶辊间隙和胶辊转速 4 个因素进行试验。其中胶辊转速必须大于油茶果受胶辊作用脱落的临界速度,满足一定的采摘效率,其水平选取参照文献[23],采用四因素三水平正交试验表,因素水平如表 4 所示。

表 4 试验因素水平

Tab. 4 Test factors and levels

水平	因素			
	分层厚度 A/mm	分层深度 B/mm	胶辊间隙 C/mm	胶辊转速 D/(r·min^{-1})
1	260	190	18	45
2	310	290	23	55
3	360	390	28	65

4.3 试验和结果分析

2020 年 10 月 23 日在江西省林业科学院油茶种植基地进行油茶果采摘试验,采摘头的胶辊直径为 32 mm。选取 9 株油茶树作为试验样本,进行9 组试验,每组试验选取长势大致相同的两层油茶枝条,每层枝条上均有油茶果和油茶花苞,每组试验重复 2 次取平均值,油茶果分层采摘装置试验情况如图 16 所示。以油茶果漏采率和花苞损伤率作为采摘评价指标,试验结果和极差分析结果如表 5 所示。



图 16 采摘试验

Fig. 16 Picking test

试验中分层采摘装置能够实现单层采摘的功能,且分层采摘装置和果枝相互作用时没有枝条拉断、折断,进一步验证了分层采摘的可行性。

由表 5 极差结果可得:$R_A = 0.15$,$R_B = 0.42$,$R_C = 0.83$,$R_D = 0.12$,四因素中胶辊间隙的极差远大于其他三因素,是影响油茶果漏采率的主要因素,四因素对油茶果漏采率影响由大到小为胶辊间隙、分层深度、分层厚度、胶辊转速。由花苞损伤率的极差结果得 $R_A = 0.73$,$R_B = 0.33$,$R_C = 0.09$,$R_D = 0.31$,四因素中分层厚度的极差远大于其他三因素,是影响花苞损伤率的主要因素,四因素对花苞损伤率影响的由大到小为分层厚度、分层深度、胶辊转速、胶辊间隙。

由表 5 可知,油茶果分层采摘装置的油茶果平均漏采率为20.45%,花苞平均损伤率为18.99%。

表 5　试验结果与极差分析

Tab. 5　Experimental results and range analysis

试验序号		因素				指标	
		A/mm	B/mm	C/mm	D/(r·min^{-1})	油茶果漏采率/%	花苞损伤率/%
1		260	190	18	45	6.67	27.33
2		260	290	23	55	31.67	10.67
3		260	390	28	65	24.10	23.52
4		310	190	23	65	20.00	41.89
5		310	290	28	45	26.11	23.17
6		310	390	18	55	7.14	26.14
7		360	190	28	55	30.00	4.00
8		360	290	18	65	13.33	6.33
9		360	390	23	45	25.06	7.84
油茶果漏采率	K_1	0.62	0.27	0.27	0.58		
	K_2	0.53	0.69	0.77	0.69		
	K_3	0.68	0.56	1.10	0.57		
	k_1	0.21	0.09	0.09	0.19		
	k_2	0.18	0.23	0.26	0.23		
	k_3	0.23	0.19	0.37	0.19		
	R	0.15	0.42	0.83	0.12		
花苞损伤率	K_1	0.62	0.73	0.60	0.58		
	K_2	0.91	0.40	0.60	0.41		
	K_3	0.18	0.58	0.51	0.72		
	k_1	0.21	0.24	0.20	0.19		
	k_2	0.30	0.13	0.20	0.14		
	k_3	0.06	0.19	0.17	0.24		
	R	0.73	0.33	0.09	0.31		

2019 年试验得到未加分层机构采摘装置的油茶果平均漏采率为 18.90%，花苞平均损伤率为 25.21%。与未加分层机构的采摘装置相比，油茶果分层采摘装置的油茶果平均漏采率增加了 1.55 个百分点，相差不大；而花苞平均损伤率降低了 6.22 个百分点，表明分层采摘装置能有效降低花苞损伤率。

4.4　最优方案

根据试验结果，用综合评分法[19]计算出最优方案，以油茶果采摘率和花苞完好率为评价指标，各自权重均占 50%，计算结果如表 6 所示。

表 6　综合评分结果

Tab. 6　Score of comprehensive results

试验序号	采摘率得分	花苞完好率得分	综合得分
1	93.33	72.67	83.00
2	68.33	89.33	78.83
3	75.90	76.48	76.19
4	80.00	58.11	69.06
5	73.89	76.83	75.36
6	92.86	73.86	83.36
7	70.00	96.00	83.00
8	86.67	93.67	90.17
9	74.94	92.16	83.55

由表 6 可知，赣无 1 油茶品种的最优方案为 $A_3B_2C_1D_3$，即分层厚度 360 mm、分层深度 290 mm、胶辊间隙 18 mm、胶辊转速 65 r/min。在此工况下，油茶果漏采率为 13.33%，花苞损伤率为 6.33%。

5　结论

(1)设计了油茶果分层采收装置，能在园艺化栽培油茶林间行走和作业，通过分层采摘装置实现对油茶果枝的单层采摘，能有效降低花苞损伤率。

(2)分层采摘装置和果枝的相互作用仿真分析表明，果枝受到的正应力随着分层胶辊距离增大而增大，果枝受到的切应力随着采摘胶辊间距减小而增大。验证试验表明，果枝在分层采摘装置的作用下不会产生拉伸和剪切破坏。

(3)影响油茶果漏采率的因素依次为胶辊间隙、分层深度、分层厚度、胶辊转速；影响花苞损伤率的因素依次为分层厚度、分层深度、胶辊转速、胶辊间隙。

(4)运用综合评分法得到了采摘赣无 1 油茶品种的最优方案为：分层厚度 360 mm、分层深度 290 mm、胶辊间隙 18 mm、胶辊转速 65 r/min。在此工况下，油茶果漏采率为 13.33%，花苞损伤率为 6.33%。与未加分层机构的采摘装置相比，油茶果分层采摘装置的花苞平均损伤率降低了 6.22 个百分点。

参　考　文　献

[1]　陈礼东，胡淑珍，任嘉嘉，等. 油茶果脱蒲分离机研究现状[J]. 农业工程，2020，10(8)：68－75.
CHEN Lidong, HU Shuzhen, REN Jiajia, et al. Research status of Camellia fruit separating machine [J]. Agricultural Engineering, 2020, 10(8): 68－75. (in Chinese)

[2]　黄俊毅. 全国油茶种植面积达 6 800 万亩 油茶产业总产值达 1 160 亿元[J]. 中国食品，2020(23)：159.
HUANG Junyi. The planting area of Camellia in China is 68 million mu, the total output value of Camellia industry reached 116 billion yuan[J]. Chinese Food, 2020(23): 159. (in Chinese)

[3]　冯国坤，饶洪辉，许朋，等. 油茶果机械采摘装备与技术研究现状[J]. 中国农机化学报，2015，36(5)：125－127，141.
FENG Guokun, RAO Honghui, XU Peng, et al. Research status of Camellia fruit mechanical picking equipment and technology [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(5): 125－127, 141. (in Chinese)

[4]　李帅，周健，李立君，等. 油茶果采摘机械臂工作空间分析与仿真[J]. 农机化研究，2015，37(3)：46－49.
LI Shuai, ZHOU Jian, LI Lijun, et al. Workspace analysis and simulation of *Camellia oleifera* fruit picking manipulator[J].

Journal of Agricultural Mechanization Research,2015,37(3):46 - 49. (in Chinese)
[5] 饶洪辉,罗时挺,余佳佳,等. 基于 ANSYS Workbench 的齿梳拨刀式油茶果采摘机拨果及花苞损伤仿真研究[J]. 浙江农业学报,2017,29(12):2134 - 2141.
RAO Honghui, LUO Shiting, YU Jiajia, et al. A simulation study on fruit picking and bud damage of toothed comb-and-poke type Camellia fruit harvester based on ANSYS Workbench [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis,2017,29(12): 2134 - 2141. (in Chinese)
[6] 伍德林,袁嘉豪,李超,等. 扭梳式油茶果采摘末端执行器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2021,52(4):21 - 33.
WU Delin, YUAN Jiahao, LI Chao, et al. Design and experiment of twist-comb end effector for picking Camellia fruit[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 21 - 33. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20210402&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.04.002. (in Chinese)
[7] 伍德林,李超,曹成茂,等. 摇枝式油茶果采摘装置作业过程分析与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(10):56 - 62.
WU Delin, LI Chao, CAO Chengmao, et al. Analysis and experiment of the operation process of branch-shaking type *Camellia oleifera* fruit picking device[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(10):56 - 62. (in Chinese)
[8] 高自成,李立君,李昕,等. 齿梳式油茶果采摘装置采摘执行机构的研制与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(10):19 - 25.
GAO Zicheng, LI Lijun, LI Xin, et al. Development and experiment of picking actuator of tooth comb type *Camellia oleifera* fruit picking device[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(10):19 - 25. (in Chinese)
[9] 罗时挺,饶洪辉,张立勇,等. 齿梳拨刀式油茶果采摘装置设计与试验[J]. 农机化研究,2017,39(2):84 - 88,157.
LUO Shiting, RAO Honghui, ZHANG Liyong, et al. Design and experiment on tooth comb type Camellia fruit picking device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2017,39(2):84 - 88,157. (in Chinese)
[10] 饶洪辉,张立勇,黄登昇,等. 电动胶辊旋转式油茶果采摘执行器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(9):115 - 121.
RAO Honghui, ZHANG Liyong, HUANG Dengsheng, et al. Design and test of motor-driven picking actuator of Camellia fruit with rotate rubber roller[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(9):115 - 121. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180913&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.013. (in Chinese)
[11] 高自成,赵凯杰,李立君,等. 悬挂振动式油茶果采摘执行机构设计与试验[J]. 农业工程学报,2019,35(21):9 - 17.
GAO Zicheng, ZHAO Kaijie, LI Lijun, et al. Design and experiment of suspension vibration actuator for *Camellia oleifera* fruit picking[J]. Transactions of the CSAE,2019,35(21):9 - 17. (in Chinese)
[12] 伍德林,傅立强,曹成茂,等. 摇枝式油茶果采摘机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(11):176 - 182,195.
WU Delin, FU Liqiang, CAO Chengmao, et al. Design and experiment of shaking-branch fruit picking machine for Camellia fruit [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(11):176 - 182,195. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20201119&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.11.019. (in Chinese)
[13] 王东,汤晶宇,范志远,等. 振动式油茶青果采收机设计与试验[J]. 林业机械与木工设备,2020,48(6):4 - 14.
WANG Dong, TANG Jingyu, FAN Zhiyuan, et al. Design and test of a vibratory *Camellia oleifera* fruit harvest[J]. Forestry Machinery and Woodworking Equipment,2020,48(6):4 - 14. (in Chinese)
[14] SESSIZ A, OZCAN M T. Olive removal with pneumatic branch shaker and abscission chemical[J]. Journal of Food Engineering,2006,76(2):148 - 154.
[15] POLAT R, GEZER I, GUNER M, et al. Mechanical harvesting of pistachio nuts[J]. Journal of Food Engineering,2007,79(4):1131 - 1135.
[16] TORREGROSA A, CHAPARRO O, MARTIN B, et al. Design construction and testing of an apricot tractor-trailed harvester [J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2008,6(3):333 - 340.
[17] BLANCORODÁN G L, GILRIBES J A, KOURABA K S, et al. Effects of trunk shaker duration and repetitions on removal efficiency for the harvesting of oil olives[J]. Applied Engineering in Agriculture,2009,25(3):329 - 334.
[18] TORREGROSA A, ORTI E, MARTIN B, et al. Mechanical harvesting of oranges and mandarins in Spain[J]. Biosystem Engineering,2009,104(1):18 - 24.
[19] SAVARY S K J U, EHSANI R, SCHUELLER J K, et al. Simulation study of citrus tree canopy motion during harvesting using a canopy shaker[J]. Transations of ASABE,2010,53(5):1373 - 1381.
[20] SURAJ A, MANOJ K. Integration of visible branch sections and cherry clusters for detecting cherry tree branches in dense foliage canopies[J]. Biosystem Engineering,2016,149(6):72 - 81.
[21] 张立勇,饶洪辉,罗时挺,等. 基于 ADAMS 的油茶果采摘机械臂试验设计及优化[J]. 农机化研究,2017,39(11):158 - 163.
ZHANG Liyong, RAO Honghui, LUO Shiting, et al. Experimental design and optimization of *Camellia oleifera* fruit picking manipulator based on ADAMS[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2017,39(11):158 - 163. (in Chinese)
[22] 柳涛. 液压技术在农业机械中的应用研究[J]. 河南科技,2011(20):56.
LIU Tao. Application of hydraulic technology in agricultural machinery[J]. Henan Science and Technology,2011(20):56. (in Chinese)
[23] 饶洪辉,黄登昇,王玉龙,等. 液压驱动式油茶果采摘机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(5):133 - 139,147.
RAO Honghui, HUANG Dengsheng, WANG Yulong, et al. Design and experiment of hydraulic-driven Camellia fruit picking machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(5):133 - 139,147. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190515&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.015. (in Chinese)
[24] 尹政,袁建宁,李显旺,等. 红麻茎秆力学特性试验研究[J]. 农机化研究,2021,43(12):166 - 173.
YIN Zheng, YUAN Jianning, LI Xianwang, et al. Experimental study on mechanical properties of Kenaf stalk[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2021,43(12):166 - 173. (in Chinese)
[25] 吴艳华,贾茹,任海青,等. 进口桃花心木木材物理与力学性能评价[J]. 木材工业,2019,33(2):44 - 47.
WU Yanhua, JIA Ru, REN Haiqing, et al. Evaluation of physical and mechanical properties of imported mahogany wood[J]. Timber Industry,2019,33(2):44 - 47. (in Chinese)