

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.07.011

履带式高地隙油茶果振动采收机设计与试验

杜小强^{1,2} 宁晨¹ 贺磊盈^{1,2} 钱寅¹ 张国凤^{1,2} 姚小华³

(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;
3. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 杭州 310018)

摘要: 针对油茶人工采收效率低, 劳动力成本大, 且油茶果成熟期短、花果同期等问题, 设计了可实现连续振动落果和收集的履带式高地隙油茶果振动采收机。采收机采用骑跨式车架沿油茶树种植行行走, 利用曲柄摇杆机构驱动多排阵列的指排杆按照一定的运动轨迹对树冠两侧同时击打作业, 落果通过收集板汇集后输送到果箱。根据击打轨迹对采收机击打装置的曲柄摇杆机构进行设计, 并用 ADAMS 软件验证指排架运动轨迹。通过 ANSYS 软件对击打装置机架和采收机车架进行有限元模态分析, 获得其前 6 阶固有频率, 确定其不会发生共振。为接收振动掉落的油茶果, 设计了高低错落分布的收集板, 不仅能接收落果, 且能顺利避开树干, 实现整机在运动中完成振动落果和收集作业。最后, 加工装配振动采收机样机, 在击打液压马达转速为 360 r/min 条件下进行油茶林地整机试验, 试验结果表明, 油茶果采收率为 87.56%, 花苞掉落率为 25.86%, 满足油茶果采收要求。

关键词: 油茶果; 振动采收机; 高地隙; 果实采收率; 花苞掉落率

中图分类号: S225.93 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)07-0113-09 OSID: 

Design and Test of Crawler-type High Clearance *Camellia oleifera* Fruit Vibratory Harvester

DU Xiaoqiang^{1,2} NING Chen¹ HE Leiying^{1,2} QIAN Yin¹ ZHANG Guofeng^{1,2} YAO Xiaohua³

(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
3. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 310018, China)

Abstract: *Camellia oleifera* industry has developed rapidly in China, and the planting scale has increased year by year. Aiming at the problems of low efficiency of manual harvesting, high labor cost, short ripening period of *Camellia oleifera* fruit and synchronization of flowers and fruits, a crawler-type high clearance *Camellia oleifera* fruit vibrating harvester which can realize continuous vibration fruit dropping and collection was designed. A straddle frame was used to walk along the planting line of *Camellia oleifera*, and the crank rocker mechanism was used to drive the finger row rods of multi row array to strike both sides of the tree crown at the same time according to a certain motion track. The fallen fruits were collected through the collection plate and transported to the fruit box. According to the hitting track, the crank rocker mechanism of the hitting device of the harvester was designed, and the motion track of the finger frame was verified by ADAMS software. Through the finite element modal analysis of the hitting device frame and harvester frame with ANSYS software, the first six-order natural frequencies were obtained to determine that there would be no resonance. In order to receive the fallen *Camellia oleifera* fruit, a collection plate with staggered height distribution was designed, which can not only receive the fallen fruit, but also avoid the trunk smoothly, so as to complete the vibration fruit falling and collection operation of the whole machine in motion. Finally, the prototype of vibration harvester was processed and assembled, and the whole machine test of *Camellia oleifera* forest land was carried out under the condition of hitting the hydraulic motor speed of 360 r/min. The test results showed that the average recovery rate of *Camellia oleifera* fruit was 87.56%, the average drop rate of flower bud was 25.86%, which fitted the

收稿日期: 2022-03-07 修回日期: 2022-05-15
基金项目: 国家自然科学基金项目(31971798)、浙江省“领雁”研发攻关计划项目(2022C02057)、浙江省重点研发计划项目(2019C02065)、浙江省 151 人才培养计划项目和浙江省高校中青年学科带头人培养项目
作者简介: 杜小强(1978—),男,教授,博士,主要从事机械设计及理论研究,E-mail: xqiangdu@zstu.edu.cn

requirements of *Camellia oleifera* fruit recovery.

Key words: *Camellia oleifera* fruit; vibratory harvester; high clearance; fruit harvesting percentage; flower bud loss percentage

0 引言

作为世界四大木本油料树种之一,油茶与其他油料树种相比,具有很高的营养和经济价值^[1-2],在中国具有广泛的种植面积,同时也是南方丘陵地区重要的经济林树种^[3-4]。全国现有油茶种植已达 $4.7 \times 10^7 \text{ m}^2$,可实现约 $5.6 \times 10^6 \text{ t}$ 的年产量,每年产出约 $2.625 \times 10^5 \text{ t}$ 的茶油,种植面积和产量占全球的 95% 以上^[5]。油茶果采摘受季节性限制,适时采摘是关键^[6-7]。目前我国油茶果采摘作业主要是人工徒手采摘或半人工半机械采摘,劳动强度大,采摘效率低,严重制约了油茶的产业化发展^[8]。针对目前国内的油茶种植情况,需要设计一种越障性能较高,适用性较好的油茶果收获机,以实现油茶果的高效率采收作业目标,突破油茶产业机械化生产的瓶颈^[9],进一步推动国内油茶产业的发展。

目前油茶果机械化采收方式有齿梳式、摇枝式、切割式、振动式等^[10-21]。振动式采收机的研究较多,大多采用液压驱动式一字履带轮,能够适应复杂作业环境^[22-25],将采摘头安装在机械臂上,机械臂安装在履带轮底盘上,然后通过采摘头对油茶果进行振动式采收^[26-28]。但该类采收机均是单侧作业,且和树体之间需要保持一定距离,受到作业空间限制,机械化采收效率较低。针对该问题,本文结合液压驱动式履带轮优点,设计一种履带式高地隙油茶果振动采收机。该振动采收机采用骑跨式车架沿油茶树种种植行行走,利用曲柄摇杆机构驱动多排阵列的指排杆按照一定的运动轨迹对树冠两侧同时击打作业,增加作业范围,落果通过收集板汇集到输送带内,最后输送带将收集到的油茶果贮存在果箱内,以实现在运动中完成振动落果和收集作业,提高作业效率。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

该履带式高地隙油茶果振动采收机主要由收集装置、击打装置、行走系统、液压系统、车架 5 部分组成。整机结构图如图 1 所示,其中行走系统有 4 组液压马达驱动的三角履带轮,同侧前后履带轮通过同步阀控制前后液压马达流量相同。车架为龙门式,4 条支腿用来安装履带轮,两侧腰线处安装行走液压系统和工作液压系统,且对称布置。两套液压系统的动力部分均由柴油机散热器、柴油发动机、液

压油泵、液压油箱、液压油箱散热器组成。工作液压系统给输送带和击打装置提供动力。行走液压系统给 4 个履带轮提供动力。击打装置由击打装置机架、角度调节机构、击打液压马达、曲柄摇杆机构、限位导轨和导靴组成。击打装置机架上垂直布置 2 根指排架,每根指排架上装有 10 根指排杆。曲柄摇杆机构安装在车架两侧中间位置,击打液压马达与曲柄连接。击打杆运动轨迹由曲柄摇杆机构确定,其动力由击打液压马达提供。本文击打马达转速为基于前期开展的油茶振动试验研究确定的最佳振动频率的转速。本文设计的采收机击打装置与前期试验的击打装置结构相同,均由指排杆组成,只是对运动轨迹进行了优化,由直线往复式运动调整为椭圆轨迹运动,但最大振幅均为 10 cm。因此,参考前期研究结果,本文击打马达转速选用前期试验结果的最优转速 360 r/min。收集装置由收集板、输送带、果箱、输送液压马达组成。收集板包括主板、连接板和鱼鳞板,收集板前半部分由鱼鳞板高低交错拼接而成,输送带动力由输送液压马达提供。电控柜为用电元件的通讯装置,用来接收遥控器的信号,操控各装置工作。

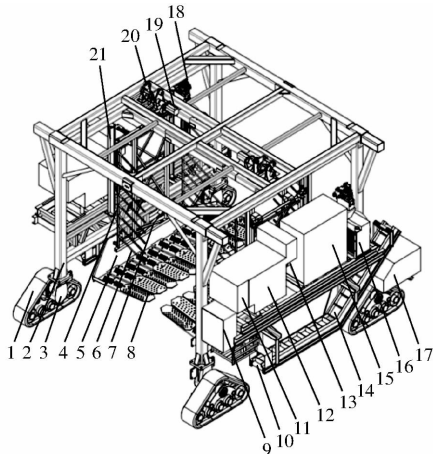


图 1 履带式高地隙油茶果振动采收机结构图

Fig. 1 Structure diagram of crawler-type high clearance *Camellia oleifera* fruit vibratory harvester

1. 三角履带轮 2. 车架支腿 3. 行走液压马达 4. 击打机架
5. 收集板 6. 指排杆 7. 角度调节机构 8. 鱼鳞板 9. 电控柜
10. 输送液压马达 11. 柴油机散热器 12. 柴油机 13. 油泵
14. 输送带 15. 液压油箱 16. 液压油箱散热器 17. 果箱 18. 电磁阀
19. 击打液压马达 20. 曲柄摇杆机构 21. 限位导轨和导靴

1.2 工作原理

液压系统动力由柴油机和液压油泵提供。液压站正常工作时,油泵工作,油液从油箱吸出,进入比

例多路换向阀,控制 4 个行走马达。击打马达为击打装置提供动力,带动曲柄转动,从而控制指排杆按设计的轨迹运动。指排杆通过直接或间接与油茶果接触,实现击落或振落果实的效果。输送马达为输送带提供动力,油茶果被振落到收集板上,然后滚入输送带内,输送带将收集到的油茶果输送到果箱内。

通过手动调节节流阀来控制击打马达与输送马达的转速。通过控制电磁换向阀改变击打马达和行走马达的转动方向。采收机的行走、击打、收集均通过遥控器操控。采收机整套系统除了液压油箱散热器为电驱,其余装置均采用液压驱动,液压系统原理图如图 2 所示。

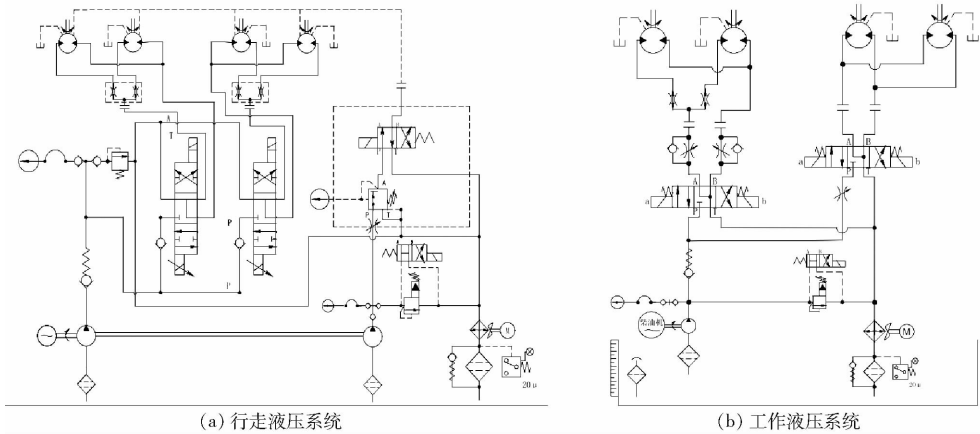


图 2 液压系统原理图

Fig. 2 Schematics of hydraulic system

2 关键部件设计

2.1 击打装置设计

高地隙油茶果振动采收机是利用指排杆的往复运动对油茶树冠进行一定频率和幅度的击打,使得油茶果受振动而脱落。为提高击打装置的击打效果,运用曲柄摇杆机构原理,将指排杆运动轨迹设计成近似椭圆形。油茶果振动采收机击打装置结构如图 3 所示。每套击打装置上配置 2 根指排架,每根指排架长 1 600 mm,间隔 160 mm 均匀分布 9 根塑胶材质指排杆,指排杆直径为 15 mm、长度为 700 mm。液压马达驱动曲柄摇杆机构运动,击打装置机架挂配在连杆中间部位的轴销上,导靴受导轨限位,确保机架在同一平面内接近似椭圆轨迹往复运动。通过

角度调节机构来改变指排架倾斜角,有利于提高指排杆在冠层的通过性以及改变指排杆插入树冠的深度。

2.1.1 曲柄摇杆机构设计

曲柄摇杆机构是击打装置的传动机构,确定其指排架的运动轨迹。由于连杆上的轴销是整个机架承载元件,所以设计为双对称曲柄摇杆机构,以增大机构的承载能力和稳定性。如图 4 所示,两对称摇杆与连杆之间的旋转副用轴销连接,两对称连杆中心连接的轴销用来挂配击打装置机架,液压马达通过联轴器与曲柄连接。

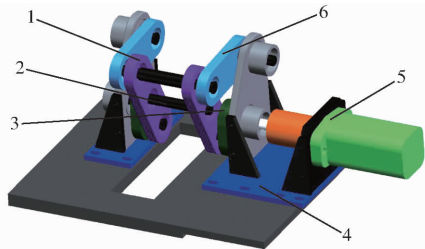


图 4 曲柄摇杆机构

Fig. 4 Structure of crank-rocker mechanism

1. 连杆 2. 轴销 3. 曲柄 4. 底座 5. 液压马达 6. 摇杆

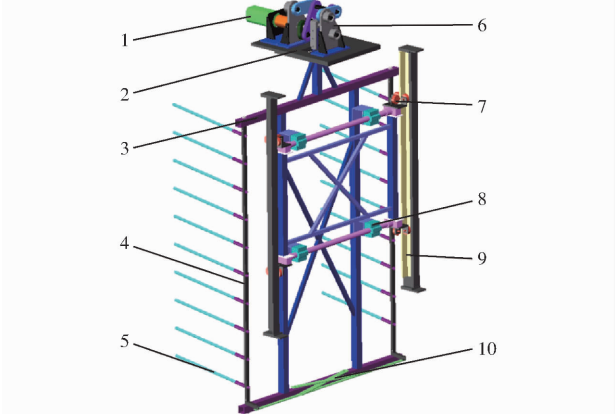


图 3 击打装置结构图

Fig. 3 Structure diagram of excitation device

1. 液压马达 2. 底座 3. 机架 4. 指排架 5. 指排杆 6. 曲柄摇杆机构 7. 导靴 8. 导向滑块 9. 导轨 10. 角度调节机构

该传动机构在课题组先前试验的击打装置基础上进行优化。此前击打装置的运动轨迹为直线往复式,指排杆往复行程为 80 mm。为了减小往复运动带来的冲击力,将运动轨迹设计成椭圆循环式,在文献[29]中选择了合适的椭圆形轨迹,可直接确定所设计的四杆机构长度比例,根据图谱中该四杆机构各杆长比值以及实际运动轨迹最大径长与图谱中椭圆轨迹的最大径长,算出四杆机构中各杆的实

际长度。测得图谱中椭圆轨迹最大径长为 10 mm, 图谱中曲柄长为 5 mm, 实际运动的椭圆轨迹最大径长设为 80 mm, 最后根据

$$\frac{L_A}{L'_A} = \frac{80}{5} \quad (1)$$

$$L_A:L_B:L_C:L_D = 1:4:3:3 \quad (2)$$

- 式中 L_A ——实际曲柄长度
 L'_A ——图谱曲柄长度
 L_T ——图谱椭圆轨迹最大径长
 L_B ——实际连杆长度
 L_C ——实际摇杆长度
 L_D ——实际机架长度

计算得出实际曲柄长度为 40 mm、连杆长度为 160 mm、摇杆长度为 120 mm、机架长度为 120 mm。

计算该曲柄摇杆机构最小传动角, 验证该机构传力性能。对于曲柄摇杆机构, $\gamma_{\min}$ 出现在主动曲柄与机架共线的两位置之一, 如图 5 所示, 根据

$$\gamma_1 = \angle B_1C_1D = \arccos \frac{b^2 + c^2 - (d - a)^2}{2bc} \quad (3)$$

$$\gamma_2 = \angle B_2C_2D = \arccos \frac{b^2 + c^2 - (d + a)^2}{2bc} \quad (4)$$

计算得出最小传动角 $\gamma_{\min} = 28.96^\circ$, 证明该曲柄摇杆机构设计合理。

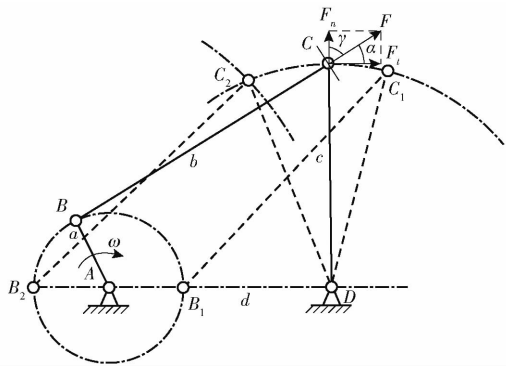


图 5 曲柄摇杆机构传动角

Fig. 5 Transmission angle of crank-rocker mechanism

通过 ADAMS 软件对曲柄摇杆机构进行轨迹仿真, 结果如图 6 所示, 连杆中心位置运动产生的近似椭圆形曲线为指排杆运动轨迹。该椭圆曲线轨迹与图谱中选定的轨迹保持一致。从椭圆形运动轨迹可以看出, 指排架纵向运动幅度比横向运动幅度大, 主要沿树冠高度方向激振, 同时在水平方向上也产生激振, 提高了树冠振动效果。

2.1.2 击打装置机架有限元模态分析

为避免激振频率在击打装置机架固有频率范围内产生共振, 对机架结构造成损坏, 需要对机架进行有限元模态分析。简化击打装置, 保留机架主要部分, 建立机架有限元模型, 为了均衡精度和速度的要

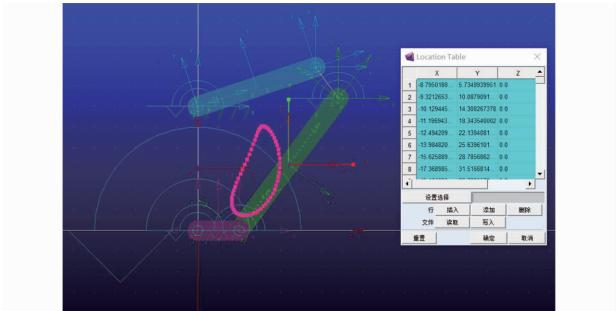


图 6 曲柄摇杆机构运动轨迹

Fig. 6 Motion trajectory of crank-rocker mechanism

求, 网格单元尺寸默认为系统自动划分, 划分结果所显示的节点个数为 66 628 个, 单元个数为 20 744 个。因为击打杆均为尼龙材质, 其重力对机架应力影响微小, 所以可忽略不计, 只需添加机架自身重力。在机架顶部施加周转副约束和固定约束, 然后进行模态分析。从 ANSYS 模态分析结果中可以提取到击打装置机架的前 6 阶固有频率, 如表 1 所示。其前 6 阶对应的频率振型图如图 7 所示。从振型图可以看出, 前 2 阶机架绕 X 、 Y 轴弯曲摆动, 第 3 到第 6 阶为指排架绕 X 、 Y 轴弯曲摆动。机架的前 6 阶固有频率为 10.55 ~ 46.01 Hz, 该范围避开了激励频率, 因此击打装置机架不会发生共振。

表 1 击打装置机架前 6 阶固有频率及振型特征
Tab. 1 The first six-order natural frequencies and modal shapes of excitation device frame

阶数	频率/Hz	振型特征
1	10.55	机架在 XOZ 平面内, 左右摆动
2	13.66	机架沿 Y 轴方向前后摆动
3	36.72	指排架绕 Y 轴反向弯曲摆动
4	43.86	指排架绕 X 轴同向弯曲摆动
5	44.41	指排架绕 Y 轴反向弯曲摆动
6	46.01	指排架绕 Y 轴同向弯曲摆动, 且绕 X 轴轻微弯曲摆动

2.2 车架设计

振动采收机车架采用骑跨式结构, 如图 8 所示。车架采用 Q235 钢材, 规格有角钢、槽钢和方管。动力系统安装架由角钢和槽钢焊接而成, 长 2 760 mm、宽 600 mm、高 550 mm, 角钢和槽钢厚度均为 6 mm, 槽钢上打有螺纹孔, 用于部件装配。立柱与横梁通过焊接固定, 且为了加固整机的骑跨式车架结构, 每个立柱内外侧按照三角结构各焊一根方管。由于液压系统要控制两侧元件工作, 液压油管需从骑跨式车架顶部通过, 所以在车架顶部方管上装有液压油管走线固定零件和用于安装击打装置的底座。根据拟采收的长林 3 号油茶树的基本参数 (平均树高 220 cm、树冠平均直径 230 cm)^[30], 确定了车架长、

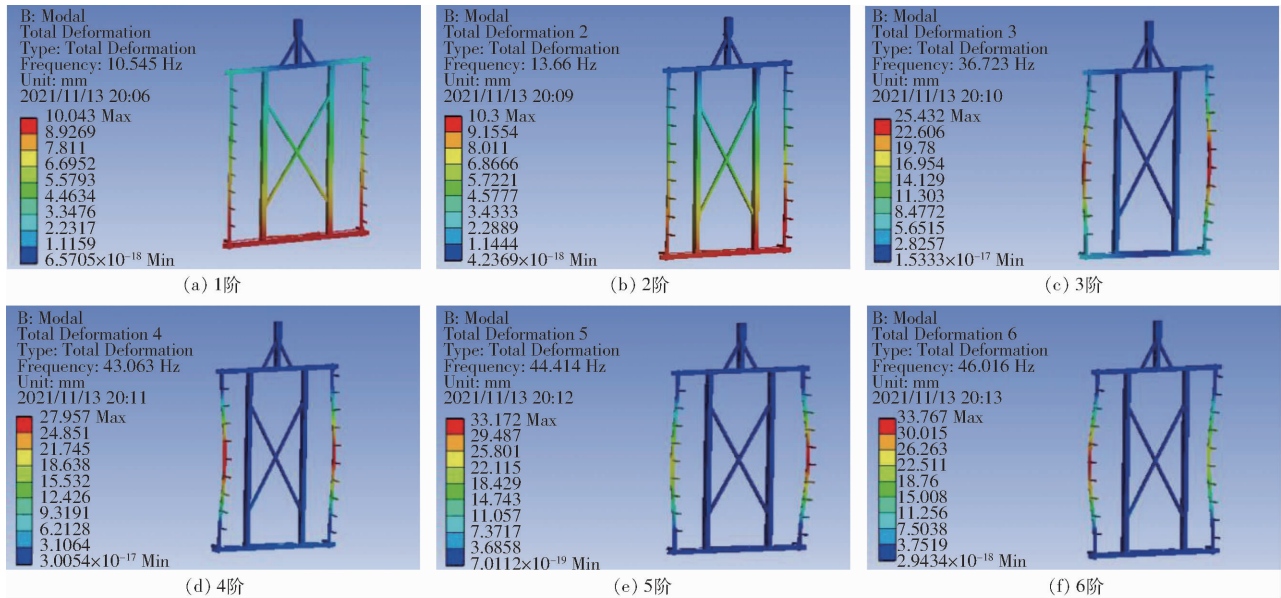


图 7 击打装置机架前 6 阶模态振型图

Fig. 7 The first six-order modal shapes of excitation frame

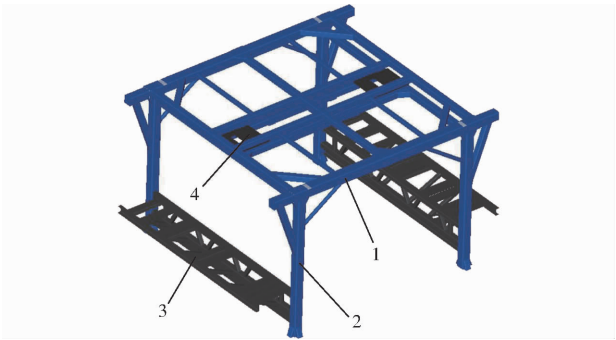


图 8 油茶果振动采收机车架结构图

Fig. 8 Chassis frame structure of *Camellia oleifera* fruit vibratory harvester

1. 车架横梁 2. 车架立柱 3. 动力系统安装架 4. 击打装置安装台

宽、高分别为 2 900、2 740、2 120 mm。

振动采收机在工作过程中,若激励频率与车架的固有频率相近时就会引起共振,从而影响整体稳定性,甚至会破坏车架部分结构件。为避免共振应使车架的固有频率避开激励频率,因此需要对车架进行有限元模态分析。本文在 ANSYS 中建立车架的有限元模型,为了均衡精度和效率,网格单元尺寸默认为系统自动划分,划分结果所显示的节点个数为 297 847 个,单元个数为 82 152 个。对车架关键承重部位施加载荷并确定底盘与地面之间的约束,最后进行模态分析。从分析结果中可以提取到车架的前 6 阶固有频率,如表 2 所示,前 6 阶对应的振型图如图 9 所示。前 2 阶振型图显示车架会绕 X、Y 轴弯曲摆动,第 3 阶振型图显示车架绕 Z 轴扭动,第 4、5 阶振型图显示车架顶层结构会上下摆动,第 6 阶振型图显示车架的动力系统安装架绕 Y 轴摆

表 2 车架前 6 阶固有频率及振型特征

Tab. 2 The first six-order natural frequencies and modal shapes of chassis frame

阶数	频率/Hz	振型特征
1	17. 50	车架绕 Y 轴弯曲摆动
2	18. 64	车架绕 X 轴弯曲摆动
3	30. 69	车架绕 Z 轴扭动
4	32. 33	顶层架内外收缩变形
5	40. 47	顶架上下摆动
6	47. 86	两侧车架绕 Y 轴摆动

动,造成这些振型的原因是骑跨式车架结构特殊,动力系统安装位置偏低及车架顶层结构距地面高度大。前 6 阶固有频率为 17. 50 ~ 47. 86 Hz,该范围避开了激励频率,因此车架不会发生共振。

2. 3 收集板设计

本文设计的高地隙油茶果振动采收机以骑跨油茶树方式沿油茶树种植行进行振动采收,要求收集板能够接收落果,且能顺利避开树干。如图 10 所示,收集板主要由主板、连接板、鱼鳞板组成。连接板分为上下两层,呈交替排列,鱼鳞板根据宽度分为两种型号:宽度为 26 cm 的鱼鳞板与上层连接板配合,宽度为 20 cm 的鱼鳞板与下层连接板配合。下层连接板通过 4 个螺栓直接固定在主板上,上层连接板通过橡胶垫块与螺栓固定在主板上。通过统计调查,油茶果的挂果量集中在距离树冠表层 26 cm 范围内^[30],中间的落果数量极少。为了使采收机具有良好的通过性,在设计收集板时设置了中间通道,根据统计测量结果确定通道间隙:在离地高度 60 cm 处,油茶树分叉树干平均宽度为 70 cm。因此,从整机综合性能考虑,收集板最高处距离地面

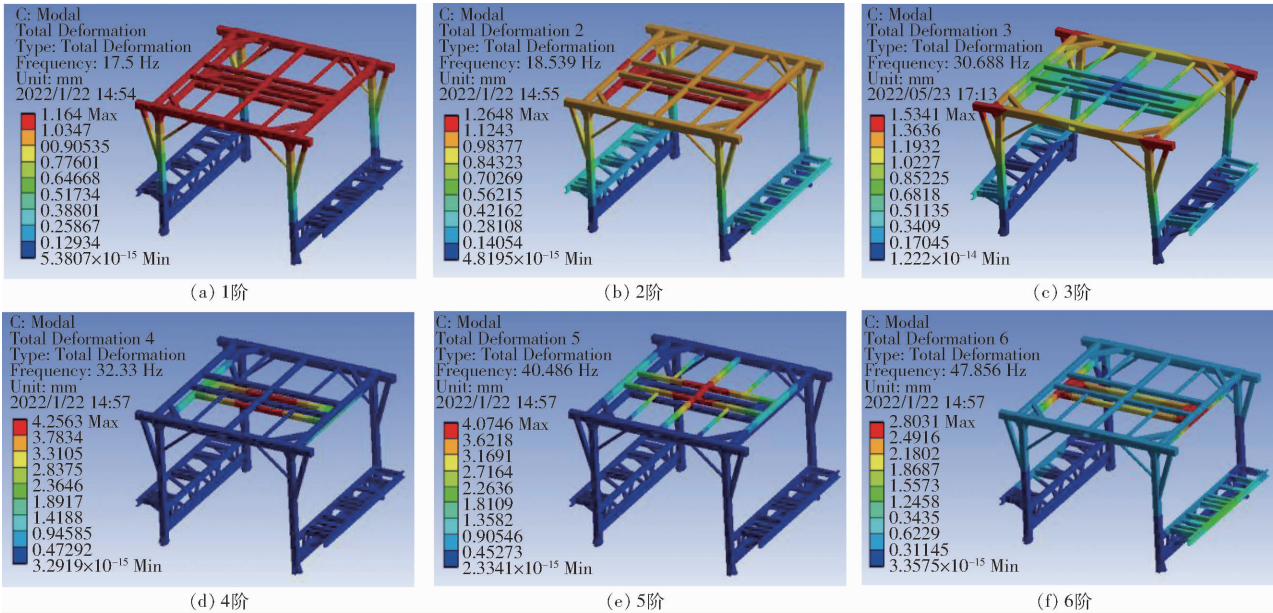


图9 车架前6阶有限元模态振型图

Fig.9 The first six-order modal shape diagrams of chassis frame

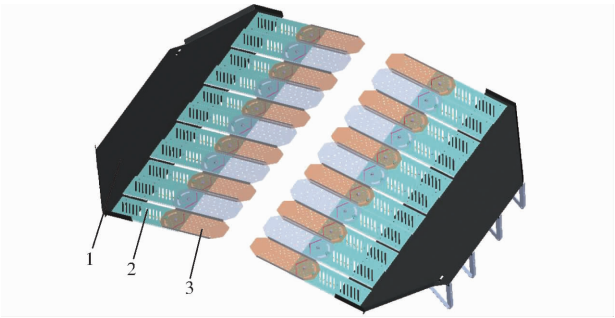


图10 收集板结构示意图

Fig.10 Structure of collecting plate

1. 主板 2. 连接板 3. 鱼鳞板

60 cm,中间留出的通道宽度为70 cm。

鱼鳞板具有双向转动、自动复位功能。如图11所示,鱼鳞板与连接板通过转轴、钩簧连接。转轴由螺栓、螺母、推力轴承组成。鱼鳞板钩柱与连接板钩柱通过钩簧连接,鱼鳞板钩柱可在圆心角120°的槽内滑移,利用钩簧的弹性形变自动恢复特性,实现鱼鳞板在双向转动之后,能自动复位功能。鱼鳞板采用PC材质,为提高板的刚度,在其两侧安装金属

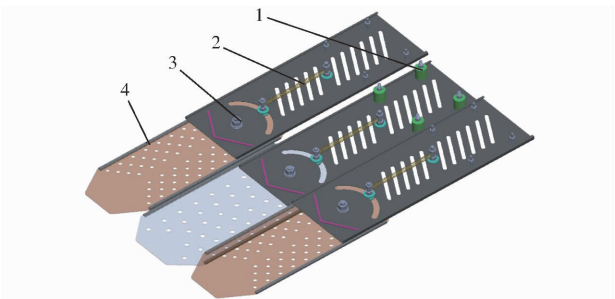


图11 收集板局部装配图

Fig.11 Partial assembly drawing of collecting plate

1. 橡胶垫块 2. 钩簧 3. 转轴 4. 金属框

框。鱼鳞板局部装配体侧视图如图12所示,鱼鳞板之间呈阶梯型,通过橡胶垫块将中间连接板垫高,鱼鳞板安装在连接板上,因此鱼鳞板高低交错,鱼鳞板转动时相邻之间的板件不会发生干扰。中间位置的鱼鳞板宽度为26 cm,比相邻宽度为20 cm的鱼鳞板宽6 cm,因此高处的鱼鳞板单边会多出3 cm板,覆盖在低处的鱼鳞板顶部,这样可以减小鱼鳞板工作时间隙,提高了落果的接收率。

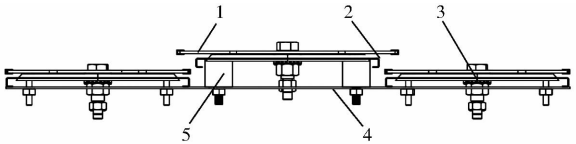


图12 鱼鳞板高低交错排布

Fig.12 Fish scale plates staggered in height

1. 鱼鳞板 2. 连接板 3. 推力轴承 4. 收集主板 5. 橡胶垫块

3 试验

3.1 样机

履带式高地隙油茶果振动采收机整机尺寸为3 965 mm×3 850 mm×2 800 mm,采收机实物如图13所示,其尺寸和作业幅宽满足油茶树标准种植模式中作业的基本条件。行走液压系统采用50 kW柴油发动机,工作液压系统采用35 kW柴油发动机作为动力源。本次试验,通过手动调节节流阀,将击打装置液压马达转速设定为360 r/min,检验振动采收机系统工作的效果。

3.2 林地油茶果采收试验

3.2.1 试验条件与材料

试验于2021年10月22日,在金华市东方红林场国家油茶油桐良种基地进行,当天试验天气晴朗,



图 13 履带式高地隙油茶果振动采收机实物图
Fig. 13 Photo of crawler-type high clearance
Camellia oleifera fruit vibratory harvester

气温 16 ~ 23℃。图 14 为试验场地的环境情况,林地横向坡度约为 10°,纵向坡度不明显。油茶树横向间距约为 4 m,纵向间距约为 3 m。油茶树有大小年之分,同一排油茶树挂果率相差大,且树冠冠幅不均,地面的平整性也较差。因此需选出合适的试验区域,并对其进行修整,主要包括对油茶树过长的枝条进行修剪和填充过大的土坑。



图 14 野外试验环境
Fig. 14 Field test environment

林间性能试验所用试验仪器及材料有:3 m 卷尺、电子秤、计时器、尼龙带、手持云台稳定器,图 15 为履带式高地隙油茶果振动采收机现场采收油茶果的作业情况。



图 15 履带式高地隙油茶果振动采收机作业试验
Fig. 15 Orchard test of crawler-type high clearance
Camellia oleifera fruit vibratory harvester

3.2.2 试验方法

试验开始前,清除已掉落在地面上的油茶果和花苞。发动机器,行走至作业区,将击打液压马达速度调节至 360 r/min,沿油茶树种植行,连续对 4 棵油茶树的冠层进行击打,分别统计每棵树的油茶果采收率和花苞掉落率,并统计采收作业时间。油茶

果采收率计算式为

$$R = \frac{Q_a}{Q_a + Q_n} \times 100\%$$
 (5)

式中 R ——油茶果采收率
 Q_a ——脱落的油茶果个数
 Q_n ——未脱落的油茶果个数
花苞掉落率计算式为

$$L = \frac{W_a}{W_a + W_n} \times 100\%$$
 (6)

式中 L ——花苞掉落率
 W_a ——掉落的花苞个数
 W_n ——未掉落的花苞个数

3.2.3 试验结果与分析

所有的试验指标均在当天测量完成,测得履带式高地隙油茶果振动采收机试验结果如表 3 所示,通过 4 组数据计算得出油茶果采收率为 87.56%,花苞掉落率为 25.86%。从试验结果看出,采收机性能良好,且液压马达转速为 360 r/min 时,采收率高,对花苞的损伤影响在可接受范围内。从表 3 中可知,第 1 棵油茶树的挂果数量和第 4 棵油茶树的挂果数量相差巨大,且花苞数量也相差巨大,这是因为油茶树有大小年的原因,上一年挂果多的树,则今年挂果就少,但花苞数量多。挂果多的树,采收率高,挂果少的树,采收率低。采收机最大行驶速度为 5.6 km/h,表 3 中的时间为采收机完成单棵油茶树采收实际所消耗的时间。采收试验过程中,采收机沿油茶树种植行边振动边前进,对于单棵油茶树的采收时间,从指排杆与该油茶树树冠接触开始计时,到指排杆离开该油茶树树冠时停止计时。由于每棵油茶树的冠幅不同,因此采收机实际耗费的时间不同。试验结果显示 4 棵油茶采收完成用时 84 s,平均每棵树完成采收耗时 21 s。油茶采收前后效果如图 16 所示。

表 3 履带式高地隙油茶果振动采收机试验结果
Tab.3 Field test results of crawler-type high
clearance *Camellia oleifera* fruit vibratory harvester

序号	果实脱落个数	果实未脱落个数	花苞脱落个数	花苞未脱落个数	时间/s	采收率/%	花苞掉落率/%
1	2 670	233	6	22	21	91.97	21.43
2	322	36	5	33	20	89.94	13.16
3	348	43	27	17	16	89.00	61.36
4	23	6	97	1 198	27	79.31	7.49

4 结论

(1)根据标准油茶林种植环境特点及机械化采收方式,设计了履带式高地隙油茶果振动采收机,整



(a) 采收前 (b) 采收后

图 16 采收前后油茶情况

Fig. 16 Situation of *Camellia oleifera* before and after harvest

机行走液压系统配套动力 50 kW, 工作液压系统配套动力 35 kW, 采用骑跨式车架结构, 4 个三角履带轮作为行走机构, 沿油茶树种植行行走, 在复杂的地

形下具有较好的通过性。

(2) 根据击打轨迹设计了曲柄摇杆机构, 驱动多排阵列的指排杆对树冠两侧同时击打作业。设计了高低错落排列的收集板, 使落果通过收集板汇集后输送到果箱中, 实现了在运动中完成振动落果和收集作业。

(3) 通过对车架和击打装置机架前 6 阶模态分析, 结果表明当击打液压马达转速为 360 r/min, 击打频率为 6 Hz 时, 车架和击打装置机架均不会发生共振。

(4) 通过林地试验, 验证了履带式高地隙油茶果振动采收机在击打液压马达转速为 360 r/min 的条件下, 具有良好的采收率, 且花苞掉落率在可接受范围内, 满足油茶果采收要求。

参 考 文 献

- [1] 饶洪辉, 黄登昇, 王玉龙. 液压驱动式油茶果采摘机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 133 - 139.
RAO Honghui, HUANG Dengsheng, WANG Yulong. Design and test of hydraulically driven *Camellia oleifera* fruit picker[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 133 - 139. (in Chinese)
- [2] 江俊飞, 应浩, 王燕杰. 油茶籽快速热裂解及产物分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, 38(1): 115 - 118.
JIANG Junfei, YING Hao, WANG Yanjie. Rapid pyrolysis of *Camellia oleifera* seed and analysis of its products[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2014, 38(1): 115 - 118. (in Chinese)
- [3] 庄端林. 中国油茶[M]. 北京: 中国林业出版社, 2008: 1 - 14.
- [4] 刘浩. 油茶果收获机液压系统动态特性研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2012.
LIU Hao. Study on dynamic characteristics of hydraulic system of *Camellia oleifera* harvester[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2012. (in Chinese)
- [5] 冯国坤, 饶洪辉, 许朋. 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.
FENG Guokun, RAO Honghui, XU Peng. Research status of mechanical picking equipment and technology of *Camellia oleifera* fruit[J]. Journal of Chines Agricultural Mechanization, 2015, 36(5): 125 - 127. (in Chinese)
- [6] 黄登昇, 饶洪辉. 我国油茶果机械化采摘设备研究现状及思考[J]. 林业机械与木工设备, 2019, 47(7): 11 - 13.
HUANG Dengsheng, RAO Honghui. Research status and thinking on mechanized picking equipment of *Camellia oleifera* fruit in China[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2019, 47(7): 11 - 13. (in Chinese)
- [7] 徐克生, 杜鹏东, 汤晶宇, 等. 油茶果预处理装备及发展趋势[J]. 林业机械与木工设备, 2021, 49(4): 8 - 14.
XU Kesheng, DU Pengdong, TANG Jingyu, et al. Pretreatment equipment and development trend of *Camellia oleifera* fruit[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2021, 49(4): 8 - 14. (in Chinese)
- [8] 倪金明, 王永友, 詹文勇. 谈我国油茶果机械化采摘设备研究现状[J]. 农业科学, 2019, 2(4): 1 - 2.
NI Jinming, WANG Yongyou, ZHAN Wenyong. Research status of mechanized picking equipment for *Camellia oleifera* fruit in China[J]. Agricultural Science, 2019, 2(4): 1 - 2. (in Chinese)
- [9] 林益平, 米承继, 赵近谊, 等. 一种新型油茶果摘果机研制及动态特性试验研究[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(5): 267 - 272.
LIN Yiping, MI Chengji, ZHAO Jinyi, et al. Development of a new type of *Camellia oleifera* fruit picker and experimental study on its dynamic characteristics[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(5): 267 - 272. (in Chinese)
- [10] WHITNEY J D, PATTERSON J M. Development of a citrus removal device using oscillating forced air[J]. Trans. ASABE, 1972, 15(5): 849 - 855.
- [11] TORREGROSA A, ORTÍ E, MARTÍN B, et al. Mechanical harvesting of oranges and mandarins in Spain[J]. Biosyst. Eng., 2009, 104(1): 18 - 24.
- [12] 王长勤, 许林云, 周宏平, 等. 偏心式林果振动采收机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 10 - 16.
WANG Changqin, XU Linyun, ZHOU Hongping, et al. Development and experiment of eccentric-type vibratory harvester for forest-fruits[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(16): 10 - 16. (in Chinese)
- [13] 罗时挺. 齿梳拨刀式油茶果采摘装置设计与研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2017.
LUO Shiting. Design and research on the camellia fruit picking machine with tooth comb dial knife[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [14] 徐国安. 固根摇枝式油茶果采摘装置的设计与试验[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019.
XU Guoan. Design and test of a camellia fruit picking machine picked by holding the roots and shaking the branches[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[15] 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]. 农业机械学报,2021,52(4):21-32.
WU Delin, YUAN Jiahao, LI Chao, et al. Design and experiment of twist-comb end effector for picking camellia fruit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(4):21-32. (in Chinese)

[16] 陈礼东,胡淑珍,姚占斌,等. 切割式油茶果脱蒲机设计与试验[J]. 农业工程,2021,11(5):80-85.
CHEN Lidong, HU Shuzhen, YAO Zhanbin, et al. Design and experiment of cutting type *Camellia oleifera* fruit shelling machine [J]. Agricultural Engineering,2021,11(5):80-85. (in Chinese)

[17] 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):9-15.
GAO Zicheng, ZHAO Kaijie, LI Lijun, et al. Design and experiment of suspended vibratory actuator for picking *Camellia oleifera* fruits[J]. Transactions of the CSAE,2019,35(21):9-15. (in Chinese)

[18] 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]. 农业机械学报,2020,51(11):177-182.
WU Delin, FU Liqiang, CAO Chengmao, et al. Design and experiment of shaking-branch fruit picking machine for *camellia fruit* [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(11):177-182. (in Chinese)

[19] 高自成,李立君,李昕,等. 齿梳式油茶果采摘机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 test of picking actor in oil-tea camellia fruit picking machine of tooth comb type[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(10):19-25. (in Chinese)

[20] 王东,汤晶宇,范志远,等. 振动式油茶青果采收机设计及试验[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 harvester[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment,2020,48(6):4-14. (in Chinese)

[21] 杜小强,倪柯楠,潘珂,等. 可调振幅单向拽振式林果采收机构参数优化[J]. 农业工程学报,2014,30(16):25-32.
DU Xiaoqiang, NI Kenan, PAN Ke, et al. Parameter optimization of stroke-adjustable and monodirectional pulling fruit harvester [J]. Transactions of the CSAE,2014,30(16):25-32. (in Chinese)

[22] 傅立强. 履带式油茶果机械采摘整机设计与试验[D]. 合肥:安徽农业大学,2020.
FU Liqiang. Design and test of crawler type machine for mechanized picking of *Camellia oleifera*[D]. Hefei: Anhui Agricultural University,2020. (in Chinese)

[23] 李耀明,陈劲松,梁振伟,等. 履带式联合收获机差逆转向机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(7):127-133.
LI Yaoming, CHEN Jinsong, LIANG Zhenwei, et al. Design and test of differential reverse steering mechanism of crawler combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(7):127-133. (in Chinese)

[24] 潘冠廷,杨福增,孙景彬,等. 小型山地履带拖拉机爬坡越障性能分析与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(9):374-383.
PAN Guanting, YANG Fuzeng, SUN Jingbin, et al. Analysis and test of obstacle negotiation performance of small hill side crawler tractor during climbing process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(9):374-383. (in Chinese)

[25] 李伟,杨术明,李茂强,等. 葡萄园履带式移动平台自动导航系统的设计与试验[J]. 甘肃农业大学学报,2021,56(5):178-184.
LI Wei, YANG Shuming, LI Maoqiang, et al. Design and testing of automatic navigation system for vineyard crawler mobile platform[J]. Journal of Gansu Agricultural University,2021,56(5):178-184. (in Chinese)

[26] 吴问天. 油茶果采摘机的关键部件设计与试验[D]. 合肥:安徽农业大学,2018.
WU Wentian. The design and test of key components of *Camellia oleifera* picking machine[D]. Hefei: Anhui Agricultural University,2018. (in Chinese)

[27] 谢承健. 油茶果采摘机关键部件设计与试验[D]. 合肥:安徽农业大学,2019.
XIE Chengjian. Design and experiment of key parts on picking machine for *Camellia oleifera* fruit [D]. Hefei: Anhui Agricultural University,2019. (in Chinese)

[28] 汪奇. 振动式油茶果采摘装置关键部件设计与分析[D]. 合肥:安徽农业大学,2019.
WANG Qi. Design and analysis of key components of vibrating *Camellia oleifera* fruit picking device [D]. Hefei: Anhui Agricultural University,2019. (in Chinese)

[29] 李学荣. 连杆曲线图谱[M]. 重庆:重庆出版社,1993:22.

[30] 陈开展. 油茶果树冠振动采摘装备的设计与研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2020.
CHEN Kaizhan. Design and research on canopy shaking harvester for *camellia fruit* [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University,2020. (in Chinese)