doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.01.005

基于无人机平台的气振式核桃采收机设计与试验

郭关柱[1]　杨李洋[1]　罗亚南[1]　许光明[2]

(1.云南农业大学机电工程学院,昆明 650201;2.云南省轻纺工业设计院有限公司,昆明 650041)

摘要:针对云南山地种植的深纹核桃树体高大造成现有机械难于采收,而人工爬树用竹竿击打采收成本高且伤亡大的问题,提出了搭载无人机的气振式核桃采收原理及方法,基于深纹核桃成熟果实的果柄连接强度的测试与分析结果,进行了核桃脱落的气振流动仿真分析,设计了搭载于六旋翼农业植保无人机上的气振式核桃采收机,分析了气振式核桃采收机在发射气振时的反冲稳定性,实施了气振式核桃采收机搭载无人机进行采收的试验验证,按效率优先和采净率优先两种采收模式,对气振式核桃采收机的采收效率和采净率做了预测分析。研究结果表明,核桃成熟度为 80%、90% 和 100% 时,使核桃果柄断裂实现落果的气振临界流速分别为 77.5、69.0、58.5 m/s;气舱容积为 20 L 且气压为 1 MPa 时,气振式核桃采收机的气动喷口至核桃挂果位置的最佳距离为 0.5 m,单次气振流动采收的最大有效面积的仿真值和试验值分别约为 0.09 m^2 和 0.10 m^2,最大有效采收面积随着到气动喷口距离增大而减小。

关键词:深纹核桃;无人机;气振流动;采收机;采收效率

中图分类号:U216.63　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2024)01-0055-10　　**OSID**:

Design and Validation of Pneumatic Vibration Walnut Picking Machine Carried by UAV

GUO Guanzhu[1]　YANG Liyang[1]　LUO Ya'nan[1]　XU Guangming[2]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming* 650201, *China*
2. *Yunnan Light Textile Industry Design Institute Co., Ltd., Kunming* 650041, *China*)

Abstract: In response to the Yunnan mountainous areas planted deep-striped walnut trees are tall and large, which makes the existing fruit picking machinery difficult to reach the planting to harvest the fruit, as well as manually climbing walnut trees with bamboo poles to hit the picking fruit was high cost and casualties. For the first time, the principle and method of pneumatic vibration picking walnut with UAV were proposed. Based on the test and analysis results of the connection strength of the stalk of deep-grained walnuts, the pneumatic vibration flow simulation analysis of walnuts dislodged by pneumatic vibration was carried out. A walnut pneumatic vibration fruit picking machinery installed on a six-rotor agricultural plant protection UAV was designed. The stability of the pneumatic walnut picking machinery was analyzed when the machine was subjected to the recoil of the airflow during the launch of the air-vibration flow. The pneumatic vibration fruit picking machinery for walnuts mounted on a UAV was tested and validated. According to the two harvesting modes of efficiency priority and harvesting rate priority, the fruit picking efficiency and net picking rate of the pneumatic vibration walnut picking machinery were predicted and analyzed. The results showed that the critical flow velocities at which pneumatic vibration caused walnut stalk breakage were 77.5 m/s, 69.0 m/s and 58.5 m/s when the ripeness of walnuts was 80%, 90% and 100%, respectively. The optimal distance from the pneumatic nozzle of the pneumatic vibration walnut picking machinery to the fruiting position was 0.5 m for a pneumatic compartment with volume of 20 L and pneumatic pressure of 1 MPa. The simulated and experimental values for the

收稿日期:2023-10-06　修回日期:2023-11-13

基金项目:云南省自然科学基金重点项目(202301AS070079)、兴滇英才支持计划产业创新人才专项(YNWR-CYJS-2018-050)和云南省教育厅科研基金项目(2023J0397)

作者简介:郭关柱(1973—),男,教授,博士,主要从事农林采收与加工专用机械研究,E-mail:guoguanzhu_616@126.com

通信作者:罗亚南(1972—),女,高级工程师,主要从事专用机械传动与控制研究,E-mail:1339706332@qq.com

maximum effective area of a single pneumatic vibration flow for fruit picking at this location were approximately 0.09 m^2 and 0.10 m^2, respectively. The maximum effective area for fruit picking in a single pass was decreased as the distance to the pneumatic nozzle increased.

Key words: deep-grained walnut; UAV; pneumatic vibration flow; picking machinery; harvesting efficiency

0 引言

云南深纹核桃种植面积近 2.9×10^6 hm^2,年产量 1.5×10^6 t,年产值超过 400 亿元,涉及 112 个县市和 1 500 万人口,对促进云南经济社会发展、巩固脱贫攻坚成果和乡村振兴发挥着重要支撑作用[1]。因山地陡坡种植且树体粗壮高大,其部分树体胸径达 1 m,树体高达 25 m,虽口感品质好但采收较为困难,目前均为人工采收,采收效率低、成本高和人员伤亡大成为制约云南核桃产业发展的关键问题[2]。

围绕高大树体挂果的机械化采收问题,国内外科研人员进行了大量研究。搭载大型自走机械的采收装备方面,陆怀民[3]设计了以集材-50 型履带式拖拉机为行走机构的林木球果采摘机器人,搭载的机械臂的最大采收高度可达 14 m。王长勤等[4]以电控履带车为载体,设计了偏心式林果振动采收机,偏心块旋转产生的离心力激振树干实现林果振动采收。缪友谊等[5]研制了可同步于六工位人工采收的自走式果园多工位收获装备。马锃宏等[6]基于气路设计了柔性末端执行机构,操纵左右履带连接或脱离动力源,实现控制底盘行走、停止和左右转向。国外众多学者研究了大型采收机械的不同采收方法、树干受激振动频率与幅度等采收性能及其对林果树伤损和生长的影响[7-13]。

便携式小型采收机械装备方面,曹成茂等[14]设计了便携式山核桃仿人工高空拍打采收机,采用凸轮驱动拍打装置拍打核桃结果枝条实现采收,研究表明采摘频率与果树损伤率成正比,随采摘频率增大,果树枝条的损伤率也加大。詹超等[15]设计了便携式山核桃高空采收机,利用直流电机旋转带动拍打机构旋转,通过拍打山核桃枝干使核桃脱落,伸缩杆最高采收高度可达 9 m。肖勇等[16]设计的便携式电动核桃采收机,利用电机驱动采收刀片旋转实现核桃采收,最高采收高度达 10 ~ 15 m,但采收刀片对枝芽和核桃的损伤率较大。

就云南山地陡坡种植的高大树体的深纹核桃采收而言,采收机械需要具备两点:陡坡种植地点至公路间会存在相应距离,要求人工能够搬运机械到种植地附近的指定位置;采收机械能够采摘高达 25 m 处树冠上的成熟挂果核桃。

针对云南山地陡坡种植深纹核桃采收的实际需求,从核桃采收机原理方法和搭载工具方面入手,文献[17-18]设计了一种基于空气振动波采收挂枝成熟核桃果实的方法和装置,无人机作为搭载工具和气振波作为采收动力,调整气振的强度和分布位置提高采收效率,以实现陡坡种植的树体高大的深纹核桃成熟果实的机械化采收。本文基于无人机平台搭载气振式核桃采收机,基于工作原理和核桃果柄连接强度分析,通过气振流场仿真分析确定采收的气振强度,农用六旋翼无人机搭载气振式核桃采收机采果试验验证流动仿真的准确性,开展采收性能试验分析,为云南深纹核桃气振式核桃采收装备的研究奠定基础。

1 气振系统工作原理

气振系统工作原理如图 1 所示。高压气通过充气阀向气罐进行充气,气罐压力达到额定值时,切换充气阀使气罐与减压器接通。减压器通过电控阀连接到气振组件,向气振组件补充高压气。气振发射时,电控阀关闭,切断气罐与气振组件间的连接管路;发射结束后,如需再次发射,则控制电控阀打开,向气振组件补充高压气,进行再次发射。

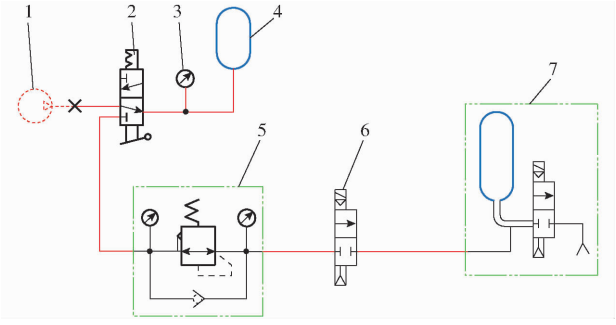


图 1 核桃采收气振系统工作原理图

Fig. 1 Working principle diagram of pneumatic vibration system for walnut harvesting

1. 高压气源 2. 充气阀 3. 压力计 4. 高压气罐 5. 减压器 6. 电控阀 7. 气振组件

气振组件是气振式核桃采收机形成气振的关键部分,其组成如图 2 所示。高压气贮存在气舱内,高压气舱与气振主阀连通,远程遥控无线控制器,给电磁线圈通电,电磁线圈控制驱动器打开气振主阀,气舱内贮存的高压气从气振主阀流出,形成的气振流

动由喷嘴向下部空间扩张。电磁线圈断电后，气振主阀自动关闭，远程遥控无线控制器，对气舱进行补气，气舱每充气一次，可气振发射一次。

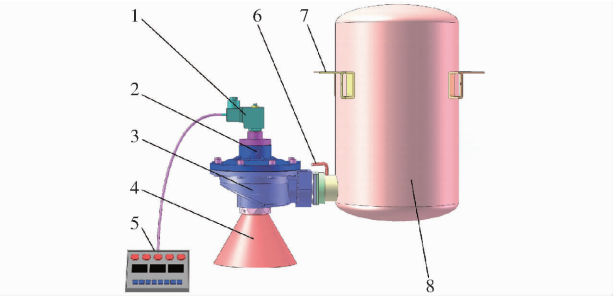


图 2　气振组件构成图

Fig. 2　Schematic of pneumatic vibration components

1. 电磁线圈　2. 驱动器　3. 气振主阀　4. 喷嘴　5. 无线控制器　6. 接管　7. 支架　8. 气舱

气振式核桃采收机工作原理是采用泄压释放气振技术，利用高速气流形成气振使核桃从果柄处脱落。依据气舱贮气容积与压力、气振阀开口面积与喷嘴形状，在喷嘴出口一定空间范围内，将树枝端部成熟核桃吹落。

2　总体结构与关键部件设计

2.1　总体结构

搭载无人机的气振式核桃采收机主要由六旋翼植保无人机、固定架、支撑架和气振式核桃采果装置等组成，如图 3 所示。气振式核桃采果装置包括减压器、无线控制器、喷嘴、气振阀、补气接管、高压气罐及连接管线等。

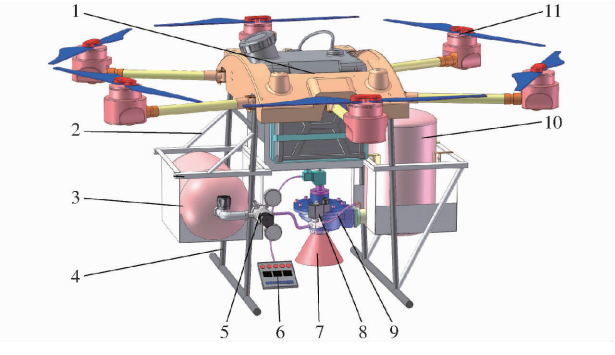


图 3　基于无人机平台的气振式核桃采收机总体结构图

Fig. 3　General structural diagram of pneumatic vibration harvesting walnut machine carried by UAV

1. 六旋翼植保无人机　2. 固定架　3. 高压气罐　4. 支撑架　5. 减压器　6. 无线控制器　7. 喷嘴　8. 气振阀　9. 补气接管　10. 气舱　11. 旋翼

气振式核桃采收机通过固定架安装在六旋翼植保无人机支撑架上，由无人机携带至核桃树冠上方实施采收作业。气振式核桃采收机配带的无线控制器接收地面遥控器的指令，控制气振阀的开启或关闭，对气舱进行充气。

2.2　无人机选型

核桃采收季节性较强，因品种和气候不同而异，果实成熟期可相差 10 ~ 25 d。为提高设备利用率并降低使用成本，无人机的选型应兼顾其他用途。另外，在核桃树生长海拔 600 ~ 3 800 m 范围，无人机需携带气振式核桃采收机正常飞行。无人机承载能力越强，气振式核桃采收机允许质量越大，高压气罐可贮气量越多，单次飞行采收次数也越多。

综合考虑上述因素，选择 30 型农业植保无人机，其主要性能参数如表 1 所示。该型无人机广泛用于农林业喷药撒肥，平时用于喷药。核桃成熟季节，兼顾用于搭载气振式核桃采收机的综合应用成本较低。

表 1　无人机相关性能参数

Tab. 1　Relevant performance parameters of UAV

参数	数值
外形尺寸(长 × 宽 × 高)/(mm × mm × mm)	2 160 × 2 100 × 775
主旋翼数量/个	6
电机功率/kW	6
整机质量(含电池)/kg	37.8
额定载质量(海拔 800 m)/kg	30
满载悬停时间/min	8
最大起飞海拔/m	2 000
额定起飞载质量/kg	68
最大起飞载质量/kg	114

由表 1 可知，选型无人机在海拔 800 m 以下应用时，额定载质量为 30 kg。相同温度下，海拔 2 000 m 时的大气压力是海拔 800 m 时的 86.0%，考虑整机质量后，可计算出此时无人机额定和最大起飞载质量分别为 20.7 kg 和 60.2 kg。海拔 3 800 m 时大气压力是海拔 800 m 时的 63.6%，此时重力加速度变化不大，为 9.79 m/s^2，可计算出无人机在该海拔下额定和最大起飞载质量分别为 5.4 kg 和 34.7 kg。

气振式核桃采收机样机的自身质量允许值越大，可携带的气振能量越多，搭载无人机至核桃树冠上方采收性能越好。由于云南山地种植深纹核桃多数主产区海拔低于 2 000 m，极少数位于海拔 3 000 m 及以上区域，因此综合权衡后确定气振式核桃采收机样机的设计质量接近且不超过 30 kg 为宜。

2.3　关键部件设计

高压气罐为存贮气源的部件，相同容积下，其承压越高，单次可携带的高压气越多。不降低承压压力条件下，为减轻高压气罐的重量以利于无人机携带，故高压气罐材料选用碳纤维。从该类气罐中，选择目前容积最大的标准碳纤维气罐，其容积为 9 L，质量为

5.24 kg,最高工作压力 30 MPa。充气温度 20℃和压力 30 MPa 时,高压气罐可充入空气质量为 3.22 kg。

气振阀开启时间越短且流通面积越大,越利于气振流强化和传播[19-21]。因此,从开启时间较短的 VZWE 膜片阀系列中选取公称通径最大的作为气振阀。所选阀的公称通径为 50 mm,打开时间为 0.03 s,介质最大压力为 1.0 MPa。阀体材料为铝合金,质量为 2.80 kg。

依据气振阀工作压力,确定气舱额定压力为 0.8 MPa。为防止锈蚀,材料选用 304 不锈钢,其屈服强度 $\sigma_{0.2}$为 205 MPa。受无人机支撑架的安装空间及气振式核桃采收机重心分布等限制,气舱外径为 248 mm,高度为 440 mm。依据压力容器设计标准,确定气舱壁厚为 1 mm。因此,纯气舱质量为 6.34 kg,容积为 20 L。

减压器选型不锈钢双级减压器,其进气压力为 1~30 MPa,输出稳定压力为 0.2~1.6 MPa,质量为 1.40 kg。电磁阀选二位二通常闭气动阀,额定压力 1.6 MPa。

起飞质量对无人机飞行控制有重大影响,气振式核桃采收机各部件选型设计质量见表 2。

表 2 气振式核桃采收机各部件质量分布

Tab.2 Weight distribution of components of pneumatic vibration walnut fruit picking machine kg

部件及附件	质量
高压气罐	5.24
气振阀	2.80
气舱	6.34
喷嘴	0.46
减压器	1.40
控制器	0.28
固定架	1.16
电控阀	0.16
气路附件(接头、管路和管卡等)	5.68
充入空气	3.46(最大)
总计	26.98

由表 2 可知,高压气罐和气舱充满空气条件下,气振式核桃采收机各部件总质量约 27 kg,满足无人机最大起飞和承载要求。

3 气振流动落果仿真分析

3.1 果柄连接强度确定

核桃生长过程中,青皮硬度、果皮开裂度是影响果柄分离力的主要因素[22-24]。果柄连接强度决定了核桃果实脱落需受到外部激励的力[25],可以通过果柄分离力、果柄与核桃连接处横截面积计算出果柄连接强度为

$$\sigma_W = \frac{4F_W}{\pi d_W^2} \tag{1}$$

式中 σ_W——核桃果柄连接强度,MPa

F_W——核桃果柄分离力,N

d_W——核桃果柄连接处直径,mm

果柄连接强度强烈依赖于果实成熟度,以核桃果实刚形成的成熟度为 0,青皮颜色转黄且无裂痕的成熟度为 80%,青皮颜色泛黄且有 1 或 2 个裂痕的成熟度为 90%,核桃青皮颜色淡黄且全裂开的成熟度为 100%。针对云南山地陡坡种植深纹核桃的果柄连接强度问题,选取昆明、大理和昭通等主产地部分挂果核桃,对成熟度不同的核桃果实,采用拉力计(量程 0~100 N;精度 ±0.1 N)测试分离力,游标卡尺(量程 0~160 mm;精度 ±0.02 mm)测量果柄直径等。结果表明,核桃纵轴长 40.0~49.0 mm 且横轴长 36.0~44.0 mm,不同成熟度的核桃分离力范围为 4.7~70.8 N,果柄直径范围为 4.2~8.4 mm。由式(1)计算测试结果,得到不同成熟度时果柄连接强度如图 4 所示。

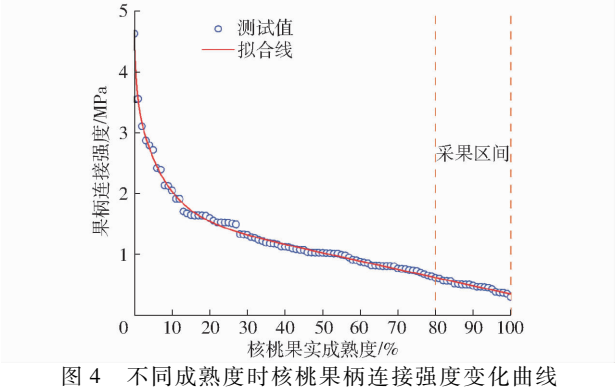


图 4 不同成熟度时核桃果柄连接强度变化曲线

Fig.4 Strength of walnut stalk different levels of maturity

采用三指数衰减(ExpDec3)函数对核桃果柄连接强度测试值进行拟合,得到图 4 所示曲线,核桃果实成熟度与果柄连接强度间关系式为

$$\sigma_W = -220.9 + 0.995\,7e^{-\delta_W/0.568\,4} + 1.928\,5e^{-\delta_W/7.041\,7} + 222.6e^{-\delta_W/16\,439.5} \tag{2}$$

式中 δ_W——核桃果实成熟度,%

3.2 流动仿真分析

3.2.1 流动理论基础

考虑实际气体与理想气体的状态差别,实际气体状态方程为

$$pV_0 = ZRT \tag{3}$$

式中 p——气体压力,Pa

V_0——气体容积,m^3

Z——修正系数,气体压力不高时近似为 1

R——气体常数,空气取 287.1 J/(kg·K)

T——气体温度,K

气振发生时，气舱放气过程极短，气振流为绝热流动。因此有

$$p_t = \left(\frac{m_t}{m_0}\right)^{\gamma} p_0 \tag{4}$$

式中　p_t——气舱内气体瞬时压力，Pa

m_t——气舱内气体剩余质量，kg

p_0——气舱内气体初始压力，Pa

m_0——气舱内初始气体质量，kg

γ——空气比热比，取 1.4

气体流动需满足连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{U}) = 0 \tag{5}$$

式中　ρ——流体密度，kg/m^3

$\boldsymbol{U}$——流体流速，m/s

t——时间，s

气体流动过程中动量方程成立，有

$$\rho\left(\frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial t} + (\boldsymbol{v}\cdot\nabla)\boldsymbol{v}\right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \boldsymbol{v} + \rho f \tag{6}$$

式中　$\boldsymbol{v}$——气体流速，m/s

μ——气体动力粘度，空气取 1.51×10^{-5} Pa·s

f——单位体积气体上施加的外力，N/m^3

气体流动时能量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{v} T) = \nabla \cdot \left(\frac{\lambda}{c_p}\nabla T\right) + S_T \tag{7}$$

式中　c_p——比热容，J/(kg·K)

λ——流体导热系数，空气取 0.092 W/(m·K)

S_T——流体的内热源与粘性作用产生的机械能转换的热能之和，J

仿真选用剪切应力传输模型——SST $k-\omega$ 湍流模型，双方程 $k-\omega$ 模型中 k 方程为[26]

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k1}}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + P_k - \beta^* \rho k \omega \tag{8}$$

ω 方程为

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 1}}\right)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right] + \alpha_1 \frac{\omega}{k} P_k - \beta_1 \rho \omega^2 \tag{9}$$

式中　k——湍流动能，J

U_j——j 方向流速，m/s

μ_t——气体实时动力粘度，Pa·s

P_k——平均速度梯度产生的湍流动能，J

ω——比湍流耗散率，s^{-1}

σ、α、β、σ_{k1}、$\sigma_{\omega 1}$、α_1、β_1——湍流模型系数

β^*——湍流模型常数，取 0.09

3.2.2　核桃脱落流动分析

针对图 4 中核桃采收区间成熟度分别为 80%、90% 和 100% 3 种情况，仿真分析核桃脱落需要的气振流动流速和压力。

3.2.2.1　仿真设置与网格划分

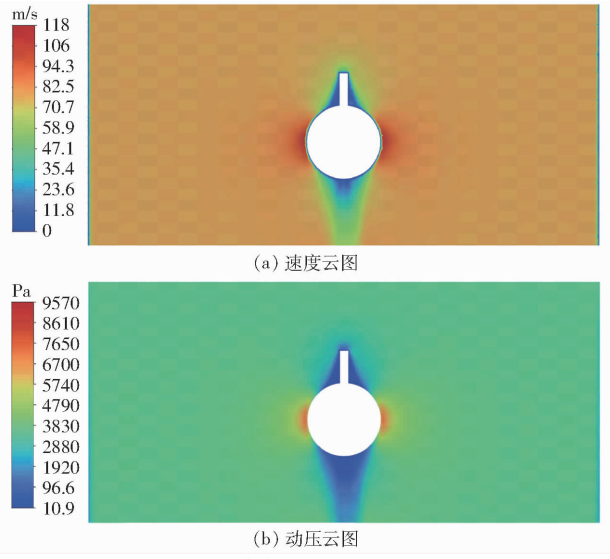
选取纵径和横径最接近测量平均值的实际核桃，构造核桃的三维实体模型，其纵径、横径和棱径分别为 43.08、38.58、42.73 mm，质量为 0.052 kg，果柄连接直径为 5.0 mm。

连接果柄的核桃放置于直径为 300 mm 和高为 140 mm 圆柱空间的气振流场内，在几何结构中，对核桃模型和流体域进行布尔运算，以流体域为目标几何体，以核桃模型为工具几何体，保留工具几何体。网格划分时，固定核桃模型实体，创建核桃和流体域之间的界面。

网格单元尺寸为 2 mm，划分网格为 10 506 352 个单元和 1 798 478 个节点。设置求解器为压力基，时间为瞬态。设置垂直向上为坐标轴 y 轴正方向，则重力加速度为 -9.81 m/s^2。能量打开，选择标准的 $k-\varepsilon$ 模型，标准壁面函数。初始温度设为 20℃，标准状态时气体密度取 1.225 kg/m^3，动力粘度为 1.51×10^{-5} Pa·s，导热系数为 0.092 W/(m·K)。时间步数为 150，时间步长为 0.001 s，最大迭代步数为 20，实际作用时间为 0.15 s。

3.2.2.2　结果分析

气振流动仿真时，针对不同成熟度的核桃，不断增加气流速度和动压至核桃连接果柄达到临界脱落状态，分析此时气振流速和气流动压。通常核桃果实成熟度 δ_W 达到 80% 以上考虑实施采收，当核桃果实成熟度为 80% 时，核桃果柄临界脱落的速度云图和动压云图如图 5 所示。



(a) 速度云图

(b) 动压云图

图 5　核桃果柄临界脱落的速度和动压云图(δ_W = 80%)

Fig. 5　Velocity and dynamic pressure cloud diagrams for critical stalks of walnut (δ_W = 80%)

图 5a 中，核桃果柄脱落的气流临界速度为

77.5 m/s;图 5b 中,核桃果柄脱落的气流临界动压为 9 485 Pa,最大动压为 9 570 Pa。

气振流动仿真结果表明,核桃果实成熟度为 90% 时,核桃果柄脱落的临界速度为 69.0 m/s,核桃果柄脱落临界动压为 7 511 Pa,最大动压为 7 620 Pa;核桃果实成熟度为 100% 时,核桃果柄脱落的临界速度为 58.5 m/s,核桃果柄脱落的临界动压为 5 446 Pa,最大动压为 5 510 Pa。

3.2.3 气振流场分析与有效采收范围

3.2.3.1 仿真模型建立

建立气振式核桃采收机的三维模型,在气振式核桃采收机周围设置长、宽、高均为 4 m 的外部流场域,然后抽取采收机的流体域模型。整个模型分为外部流场域、气振式核桃采收机固体及其内部流场域。

对模型进行网格划分。先对模型的各个面及区域进行命名,再对各个区域分别进行网格划分。对于流体区域,考虑到内部区域比较复杂,给定单元尺寸后,让其自动生成四面体网格。对于气振式核桃采收机的固体区域,给定单元尺寸后,采用补丁适形法生成四面体网格。因阀口处压力梯度变化较大,故阀口处进行网格加密,设置局部网格尺寸为 2 mm,以保证网格质量。初始网格共 9 061 048 个单元、1 543 765 个节点。

3.2.3.2 动网格设置

通过 Visual Studio 2017 编写 UDF 文件控制气振阀芯的开启,使阀芯在 0.03 s 内由闭合状态到完全打开状态,即阀芯绕中心轴旋转 90°,运用动网格技术来调整和更新阀芯运动后的网格。采用动网格中的光顺和重新划分网格的方法,选择光顺中的弹簧/Laplace/边界层的方法,重新划分网格中选择局部单元和区域面的方法结合尺寸调整选项,从而实现网格的重新划分。

3.2.3.3 边界条件和求解设置

仿真过程中,外部流场域与喷嘴的正对面设置为壁面,相当于地面,其他边界设置为压力出口。气舱气体采用理想气体,此时 Energy 选项默认打开。气舱的初始压力在对流场进行初始化时通过补充定义来确定,初始压力设定为 1 MPa。

考虑重力加速度情况下,基于压力求解器进行瞬态计算。湍流模型选择 SST $k-\omega$ 湍流模型,标准 $k-\omega$ 模型对湍流切应力水平预测过高,但对自由流湍流特性不太敏感,而 $k-\omega$ 模型倾向于依赖自由流的湍流特性。同时 $k-\omega$ 模型不需要任何阻尼函数,而 SST $k-\omega$ 模型需要复杂的非线性阻尼函数以修正近壁面。这两个模型有不同优点和缺点,将两个模型结合起来,形成了两个方程 $k-\omega$ 模型。采用 coupled 算法处理压力-速度耦合问题,其他选项保持默认设置。

3.2.3.4 结果分析

仿真过程中,阀门在 0.03 s 时完全打开后保持全开状态,气流的速度会逐渐增加,直至气罐内的气体全部放完。气振阀打开后,气振式核桃采收机的喷嘴出口会形成相应的气振流动云图,图 6 为气振阀开启到 0.09 s 时气振流动速度分布云图。

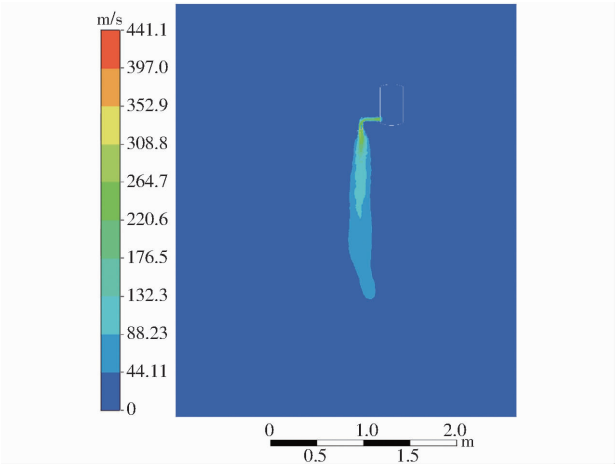


图 6 气振流动速度分布云图($t=0.09$ s)

Fig. 6 Velocity distribution cloud diagram of pneumatic vibration flow ($t=0.09$ s)

气振阀完全开启后,其喷嘴下方会形成高达 2 m 的近柱形高速气流场。详细分析气振流动的仿真结果,得到气振阀开启后,不同时刻至喷嘴不同距离处气振流的流速如图 7 所示。

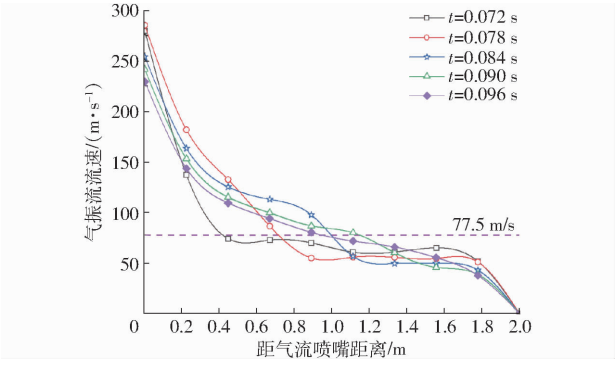


图 7 不同时刻至气流喷嘴不同距离处气振流流速变化曲线

Fig. 7 Flow velocity variation curves of pneumatic vibration at different times and distances to airflow nozzle

图 7 中,距气流喷嘴越远,气振流动速度越小。气振阀旋转开启过程会形成气流紊流,受气流的扰动叠加影响,局部会出现到气流喷嘴的距离增加流速未减小反而略增大的现象。$t=0.072$ s 时,距气流动喷嘴距离超过 0.4 m 时,气流速度低于 77.5 m/s;$t=0.078$ s 时,距气流喷嘴距离超过 0.75 m 时,气流速度低于 77.5 m/s;$t=0.084$ s 时,距气流喷嘴距离

超过 1.0 m 时，气流速度低于 77.5 m/s；t = 0.09 s 时，距气流喷嘴距离超过 1.1 m 时，气流速度低于 77.5 m/s；t = 0.096 s 时，气流喷嘴距离超过 0.9 m 时，气流速度低于 77.5 m/s。上述结果表明，速度为 77.5 m/s 时，距气流喷嘴最远距离为 1.1 m，气振式核桃采收机有效采收距离范围为距喷嘴出口 0.5 ~ 1.1 m。

有效采收距离范围内，与喷嘴不同距离的截面上，气流速度分布面积存在较大差异。截面内流速高于 77.5 m/s 的面积越大，有效采收面积越大，气振式核桃采收机的采收效率越高。分析气振流动仿真结果，得到距气流喷嘴出口 0.5 ~ 1.2 m 内不同位置处单次有效采收面积如图 8 所示。

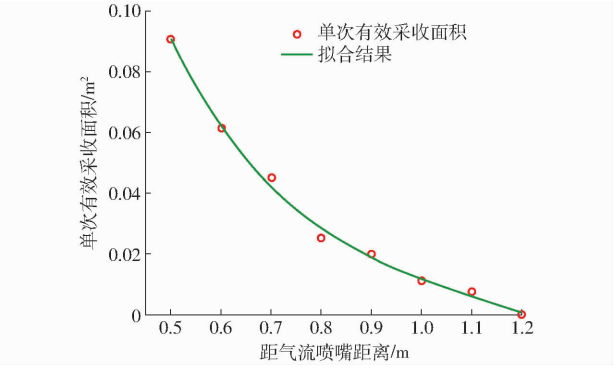


图 8　气流喷嘴不同距离处单次有效采收面积变化曲线

Fig. 8　Effective harvesting area at different distances from pneumatic nozzle

图 8 中，距气流喷嘴 0.5 m 处，单次有效采收的最大面积约 0.09 m^2。距离超过 0.5 m，则距离越大，气流速度场分布的有效采收面积越小。

3.3　气振反冲稳定性分析

气振发射时，高速气流形成的冲击力将对携带气振式核桃采收机的无人机产生反冲作用，反冲稳定性需要考虑。气振式核桃采收时，20 L 气舱内充入 1 MPa 高压气，初始温度为 293 K。

气振发生时，无人机悬停于成熟挂果核桃枝上方，单次气振采收时间约 0.2 s，气振作用时间约 0.17 s。根据仿真分析可知，气流喷嘴处最高平均流速约 285 m/s。依据动量定理，气振流动所形成的反冲力为

$$F_t = mv_1/\Delta t \tag{10}$$

式中　F_t——无人机受到的反冲力，N

Δt——气流作用时间，s

v_1——气流平均流速，m/s

m——气振流出空气质量，kg

由气体状态方程有 $m = MP_0\Delta V_0/(RT_0)$，$M$ 为空气摩尔质量，为 0.029 kg/mol，P_0 为喷嘴出口气流压力，ΔV_0 为喷嘴出口气流流速，R 为空气气体常数，等于 8.31 J/(mol·K)，T_0 为喷嘴出口气流温度。依据式(10)，计算得到无人机受到的反冲力为 487 N。

依据动量守恒定律，无人机受气流反冲产生运动速度符合公式

$$mv_1 + m_2v_2 = 0 \tag{11}$$

式中　m_2——无人机及载荷总质量，kg

v_2——无人机受气流反冲产生的平均速度，m/s

由式(11)得到无人机受气流反冲产生的平均速度为 1.42 m/s。

反冲作用下，携带气振式核桃采收机的无人机被抬升高度 h 为

$$h = v_2\Delta t \tag{12}$$

将上述参数代入式(12)，计算得到无人机受气流反冲作用被抬升高度为 0.24 m。该上升高度会对无人机的悬停状态产生影响，垂直升降状态下，无人机可快速恢复悬停状态。为保持无人机的稳定性，重点是保证反冲作用力与重心在同一条垂直线上，避免无人机产生侧翻。

4　试验验证

4.1　试验地点与方法

试验地点选取云南省昆明市金殿后山原林草局核桃种植基地，当地海拔 2 080 m，核桃树高约 20 m，树冠宽约 6 m，挂果核桃成熟度在 80% ~ 100% 之间。

试验前，气振式核桃采收机安装到 30 型农用植保无人机上，完成无人机及气振式核桃采收机的状态检查。现场启动充气设备，向高压气罐内充入 20 MPa 高压空气，经由减压器向气舱内灌入 1 MPa 高压气。

试验时，操控 30 型农用植保无人机携带气振式核桃采收机起飞，悬停于距拟采核桃成熟果实树枝上方约 0.5 m 高度处。地面远程操作遥控器，控制打开气振阀，试验气振发生后核桃果实的落果情况，观察受气振反冲作用时无人机的稳定性和上升高度。由小型拍摄专用无人机在高空记录试验过程，作为试验分析反冲高度和采收性能的依据。

4.2　结果分析

气振式核桃采收试验过程如图 9 所示。图 9a 为无人机携带采收机起飞；图 9b 为无人机上升；图 9c 为无人机到达采收位置；图 9d 为气振阀刚打开；图 9e 为气振阀开启后 0.03 s；图 9f 为气振阀开启后 0.12 s；图 9g 为气振阀开启后 0.24 s；图 9h 为气振阀关闭，无人机恢复悬停状态；图 9i 为采下的核桃果实。

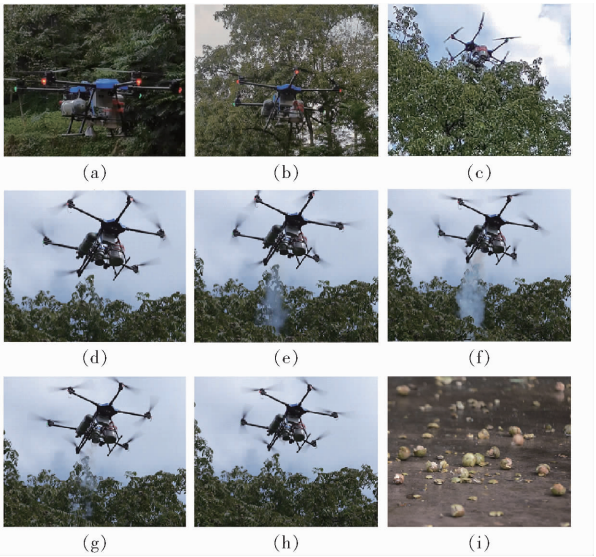


图 9 气振式核桃采收机采收验证试验

Fig. 9 Harvesting validation test of pneumatic vibration type walnut harvesting machine

分析试验获得的图像、视屏等资料,气振发射过程中,无人机均处于稳定状态,受气流反冲作用被抬升高度约为 0.20 m;气振流动作用下,核桃挂果树冠上落果区域面积约为 0.10 m^2,与仿真分析结果相一致。有效采收区域采净率约 85%,未落果核桃的挂果位置距地面高度近 20 m,从果皮表面颜色判断其成熟度不够。

5 采收性能预测

5.1 采收效率与采净率

气振式核桃采收效率和采净率强烈依赖于果实成熟度和单位面积内核桃的挂果质量。仿真分析表明,果实成熟度达到 80% 以上,成熟度越高,果柄脱落需要的气振流的流速越低,距气流喷嘴相同距离处,有效采收面积越大。

为分析核桃树冠单位面积内不同挂果密度出现的频数,随机选取大理、昭通和昆明等核桃种植基地挂果核桃树,统计 50 组树冠表面 1 m^2 面积内成熟核桃质量,结果如图 10 所示。

图 10 表明,树冠表面 1 m^2 内核桃挂果在 700 ~ 800 g 区间最多,占比达 24%;树冠表面 1 m^2 内核桃挂果质量最大值为 1 100 ~ 1 200 g,占比为 2.3%。

气振式核桃采收机的有效采收面积近似为圆面积,最佳采收距离处圆直径约为 0.34 m。考虑两种典型的采收模式,第 1 种是采收效率优先模式,第 2 种是采净率优先模式。第 1 种采收模式的采收点分布如图 11a 所示,有效采收处圆周相切,1 m^2 面积的树冠表面需采收 9 次;第 2 种采收模式的采收点分布如图 11b 所示,有效采收区域全覆盖,存在部分重

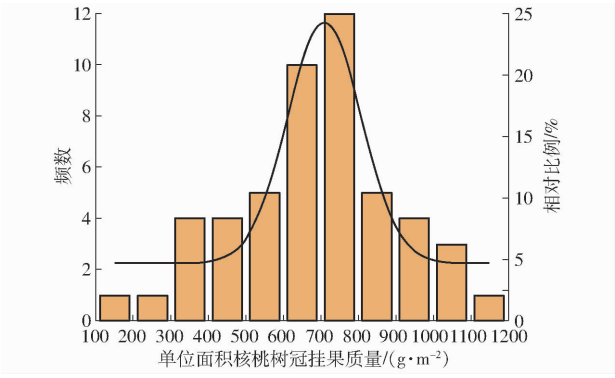


图 10 单位面积的核桃树冠不同挂果质量出现频数

Fig. 10 Frequency of different fruiting densities per unit area of walnut tree crown

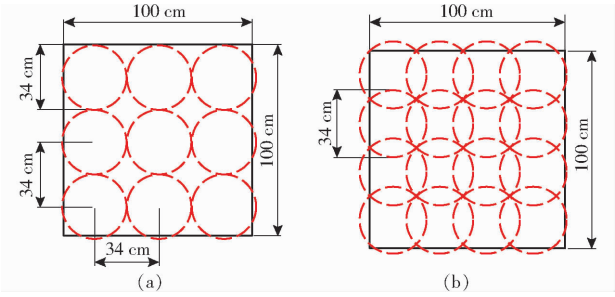


图 11 两种典型的气振采收点位置分布示意图

Fig. 11 Schematic distribution of locations of two typical pneumatic vibration harvesting

叠区域,1 m^2 面积的树冠表面需采收 16 次。

搭载无人机的气振式核桃采收机的采收过程可分为高压气罐充气、飞行与降落、定位与补气、悬停与气振采收 4 个阶段。如定位与补气时间为 6 s,悬停与气振采收时间为 2 s,则单次气振采收所需时间约 8 s,高压气罐充满后可实施气振采收 12 次,用时 96 s。

考虑高压气罐充气时间 12 s,飞行与降落时间为 12 s,则 1 h 内无人机可搭载气振式核桃采收机在核桃树冠与地面间往返采收 30 次,共计实现气振采收 360 次。

搭载无人机的气振式核桃采收机采收效率由单位时间内气振式核桃采收次数、单次采收平均时间和单次采收质量所决定,有

$$\eta = \frac{m_3}{nt_2}\psi \tag{13}$$

式中 η——采收效率,kg/h

n——单位面积内需要采收的次数

t_2——单次气振式核桃采收耗时,h

m_3——树冠表面单位面积挂果核桃质量,kg/m^2

ψ——采净率,%

采净率强烈依赖于采收模式,通过气振式核桃采收机在单位面积区域内有效采收面积与总面积的

比值确定，故有

$$\psi = \frac{nS_1}{S} \times 100\% \tag{14}$$

式中　S_1——单次采收有效面积，m^2

S——采收区域面积，m^2

就两种典型采收模式而言，采用效率优先模式采收时，由式（14）得到气振式采收机采净率为 81.7%。采净率优先模式采收时，核桃采收机采净率接近理想状况为 100%。

相关参数代入式（13），得到气振式核桃采收机在不同挂果密度时采收效率如图 12 所示。

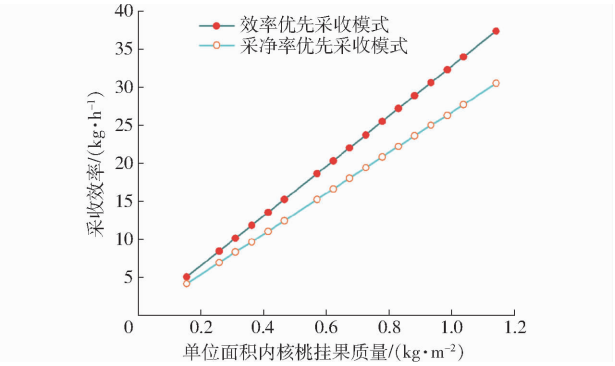


图 12　不同核桃挂果密度时气振采收效率

Fig. 12　Pneumatic vibratory harvesting efficiency at different walnut fruiting densities

图 12 中，采收效率随单位面积内核桃挂果质量增加而增大，当单位面积内核桃挂果质量最大达到 1.14 kg/m^2时，采用采收效率优先采收模式采收效率达 37.5 kg/h，采净率约 81.7%；采净率优先采收模式采收效率为 30.8 kg/h，采净率近 100%。

5.2　讨论

优先考虑采收效率时，搭载无人机的气振式核桃采收机的采收效率预测值仅为 37.5 kg/h，采收效率相对偏小。其主要原因在于气振喷嘴出口的有效采收截面圆面积较小，造成单次采收面积较小，从而降低了采收效率；用于采收时间较短，大量时间消耗在无人机携带气振式核桃采收机在地面补充气能及往返于地面与核桃树冠上方间飞行。

优先考虑采净率时，采收效率最低为 30.8 kg/h。实际应用时，由于核桃果实成熟时间不同，相同时间的成熟度存在差异，此种采收模式的适用范围相对较小。

如何提升搭载无人机的气振式核桃采收机的采收效率，是后续需要研究的重点。气振式核桃采收机的采收效率与采净率间存在矛盾，相同条件下，提升采收效率会导致采净率降低，需要寻找采收效率与采净率之间平衡点。具体提升性能的方向有：改变单个气舱和喷嘴的气振参数，采取多喷嘴同时发射气振流以增加单次采收的有效采收面积。

优化无人机飞行轨迹，缩短无人机由地面至核桃树冠挂果处往返起飞和降落时耗时；选用承载能力更强的无人机，增加气振式核桃采收机的气振能量；改进无人机的避障控制，使其悬停位置更利于气振式核桃采收性能提升。从而在不降低采净率的条件下，提升核桃成熟挂枝果实的采收效率。

6　结论

（1）针对云南山地种植深纹核桃树体高大，造成机械难于采收，而人工爬树用竹竿击打采收的成本高且伤亡大的问题，提出了气振式核桃采收的原理及方法，设计了搭载六旋翼农业植保无人机的气振式核桃采收机。

（2）基于深纹核桃成熟果实的果柄连接强度测试结果，开展的气振式核桃采收气振流动仿真分析表明，核桃成熟度为 80%、90% 和 100% 时，使核桃果柄断裂实现采收气振的临界流速分别为 77.5、69.0、58.5 m/s。气舱容积为 20 L 且气压 1 MPa 时，最佳的气振式核桃采收位置至气流喷嘴距离 0.5 m 处，单次采收最大有效面积约 0.09 m^2。超过 0.5 m，距离越远，则有效采收面积越小。

（3）验证试验结果表明，气振式核桃采收时受气振流动反冲作用，无人机被抬升高度约为 0.20 m，核桃挂果树冠上落果区域面积约为 0.10 m^2，有效采收区域果实采净率约 85%，试验结果与仿真分析结果基本一致，果实残留原因是成熟度不够。

（4）采收性能预测结果表明，单位面积内核桃挂果质量达 1.14 kg/m^2时，效率优先采收模式采收效率达 37.5 kg/h，采净率约 81.7%；采净率优先采收模式采收效率为 30.8 kg/h，核桃成熟度一致的采净率近 100%。

参　考　文　献

[1]　云南省农业农村厅. 2021 年度云南省核桃产业发展报告[R]. 云南省核桃产业工作组、云南省坚果产业专家组，2021.

[2]　习学良，陈勤，范志远，等. 基于无人机的深纹核桃果实采收方法：202210528226.3[P]. 2022－08－09.

[3]　陆怀民. 林木球果采集机器人设计与试验[J]. 农业机械学报，2001，32(6)：52－58.
LU Huaimin. Design and experiment of forest cones collection robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2001，32(6)：52－58.（in Chinese）

[4]　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 fruit vibration harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(16): 10 - 16. (in Chinese)
[5] 缪友谊,陈红,陈小兵,等. 自走式果园多工位收获装备设计与试验[J]. 智慧农业(中英文), 2022, 4(3): 42 - 52.
MIAO Youyi, CHEN Hong, CHEN Xiaobing, et al. Design and test of self-propelled orchard multi-station harvesting equipment [J]. Smart Agriculture, 2022, 4(3): 42 - 52. (in Chinese)
[6] 马锃宏,王蓬勃,耿长兴,等. 自走式履带底盘遥控系统设计与试验 [J]. 中国农机化学报, 2018, 39(3): 42 - 45.
MA Zenghong, WANG Pengbo, GENG Changxing, et al. Design and experiment of remote-control in self-propelled track chassis[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(3): 42 - 45. (in Chinese)
[7] BLANCO-ROLDÁN G L, GIL-RIBES J A, KOURABA K, 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.
[8] POLAT R, GEZER I, GUNER M, et al. Mechanical harvesting of pistachio nuts[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(4): 1131 - 1135.
[9] LOGHAVI M, MOHSENI S. The effects of shaking frequency and amplitude on detachment of lime fruit[J]. IRAN Agricultural Research, 2007, 24(12): 27 - 38.
[10] TORREGROSA A, MARTIN B, ORTIZ C, et al. Mechanical harvesting of processed apricots objectives[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2006, 22(4): 499 - 506.
[11] CICEK G, SUMER S K, KOCABIYIK H. Effect of different harvest methods on olive yield and work capacity[J]. African Journal of Agricultural Research, 2010, 5(23): 3246 - 3250.
[12] TORREGROSA A, ORTI E, MARTIN B, et al. Mechanical harvesting of oranges and mandarins in Spain[J]. Biosystems Engineering, 2009, 104(1): 18 - 24.
[13] ERDOĞAN D, GÜNER M, DURSUN E, et al. Mechanical harvesting of apricots[J]. Biosystems Engineering, 2003, 85(1): 19 - 28.
[14] 曹成茂,詹超,孙燕,等. 便携式山核桃高空拍打采摘机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 130 - 137.
CAO Chengmao, ZHAN Chao, SUN Yan, et al. Design and experiment of portable hickory high-altitude patting picker[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 130 - 137. (in Chinese)
[15] 詹超,曹成茂,娄帅帅,等. 高空便携式山核桃拍打采摘机设计[J]. 农机化研究, 2017, 39(10): 119 - 123.
ZHAN Chao, CAO Chengmao, LOU Shuaishuai, et al. Design of high-altitude portable pecan tapping picker[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(10):119 - 123. (in Chinese)
[16] 肖勇,傅延祺,刘通,等. 便携式电动核桃采摘机的设计与试验研究[J]. 农机化研究, 2018, 40(1): 57 - 62.
XIAO Yong, FU Yanqi, LIU Tong, et al. Design and experimental study of portable electric walnut picker[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(1): 57 - 62. (in Chinese)
[17] 郭关柱,罗亚南. 一种基于空气振动波的挂枝成熟核桃果实采收装置:202211117993.1[P]. 2022 - 12 - 20.
[18] 郭关柱,罗亚南,习学良,等. 一种利用空气振动波采收挂枝成熟核桃果实的方法:202211118035.6[P]. 2022 - 12 - 20.
[19] 孔霖,苏健军,李芝绒,等. 不同装药坑道内爆炸冲击波传播规律的试验研究[J]. 火工品, 2012(3):21 - 24.
KONG Lin, SU Jianjun, LI Zhirong, et al. Test study on explosion shock wave propagation of different explosive inside tunnels [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2012(3): 21 - 24. (in Chinese)
[20] 刘晶波,闫秋实,伍俊. 坑道内爆炸冲击波传播规律的研究[J]. 振动与冲击, 2009, 28(6): 8 - 11.
LIU Jingbo, YAN Qiushi, WU Jun. The analysis of blast wave propagation inside tunnels[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(6): 8 - 11. (in Chinese)
[21] 杨科之,刘盛. 空气冲击波传播和衰减研究进展[J]. 防护工程, 2020, 42(3): 1 - 11.
YANG Kezhi, LIU Sheng. Progress of research on propagation and attenuation of air blast[J]. Protective Engineering, 2020, 42(3): 1 - 11. (in Chinese)
[22] 乔园园,牛长河,刘向东,等. 核桃果柄分离力与其影响因素的相关系数研究[J]. 新疆农业科学, 2014, 51(3): 524 - 531.
QIAO Yuanyuan, NIU Changhe, LIU Xiangdong, et al. Study on correlation coefficient of stem separation and its influencing factors of walnut[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2014, 51(3): 524 - 531. (in Chinese)
[23] 薄颖生,翟梅枝,彭少兵,等. 3 个核桃品种果实生长对其生理落果的影响[J]. 林业实用技术, 2018(5): 88 - 90.
BO Yingsheng, ZHAI Meizhi, PENG Shaobing, et al. The impact of three walnut varieties' fruit growth on their physiological fruit drop[J]. Forest Science and Technology, 2018(5): 88 - 90. (in Chinese)
[24] 薄颖生,翟梅枝,毛富春,等. 两个品种核桃果实生长模型及生理落果规律研究[J]. 北方园艺, 2013, 9(2): 33 - 35.
BO Yingsheng, ZHAI Meizhi, MAO Fuchun, et al. Study on two walnut varieties growth model and physiological fruit-dropping law[J]. Orthern Horticulture, 2013, 9(2): 33 - 35. (in Chinese)
[25] 吴道远,苏继龙,刘明财,等. 不同成熟度核桃振动采摘的最佳频率和振幅的研究[J]. 农机化研究, 2018, 40(9): 28 - 34.
WU Daoyuan,SU Jilong, LIU Mingcai, et al. Vibration picking different maturity walnut optimal frequency and appitude of the simulation[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(9): 28 - 34. (in Chinese)
[26] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. AIAA Journal, 1994, 32(8): 1598 - 1605.