doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.18.034

基于机器视觉的深纹核桃定向破壳方法

王树才　陈若飞　程书阳　王慧宇　郑　侃
(华中农业大学工学院, 武汉 430070)

摘要: 针对目前核桃机械破壳过程施载方向及破壳间距随机导致破壳率与高露仁率不平衡的问题,本文以云南深纹核桃为研究对象,提出一种基于机器视觉与自动控制协同的定向破壳方法。开展核桃物理特性分析试验确定破壳最优方向,并结合赫兹接触理论设计内凹角 20°、端面外径 24 mm 且表面带阵列式环形筋条的破壳挤压头。通过引入轻量化共享细节增强检测头(Lightweight shared detail-enhanced convolutional detection, LSDECD)改进 YOLO v8n-Pose 姿态估计模型,提升微小特征感知能力。对深纹核桃缝合线端点进行特征训练,改进后模型目标框平均精度均值(mAP50-95)达 83.4%,特征点平均精度均值达 99.5%,且训练帧率达 322.6 f/s,实际应用场景帧率达 103.7 f/s。通过缝合线端点像素坐标计算其连线与水平坐标轴角度,该角度通过信号转换实现破壳夹臂角度补偿控制。开展核桃破壳接触方式与加载方向双因素试验,试验结果表明,在最佳作业参数下破壳率达 93.81%,高露仁率达 92.70%,与随机方向使用平型挤压头挤压破壳相比,分别提升 14.50、11.68 个百分点。研究结果为深纹核桃自动化连续输送定向破壳装备研发提供理论支撑与技术参考。

关键词: 深纹核桃; 物理特性; 机器视觉; 姿态估计; 定向破壳
中图分类号: S24　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)18-0395-12　　**OSID**:

Machine Vision-based Directional Shell-breaking Method for Deep-grooved Walnuts

Wang Shucai　Chen Ruofei　Cheng Shuyang　Wang Huiyu　Zheng Kan
(*College of Engineering*, *Huazhong Agricultural University*, *Wuhan* 430070, *China*)

Abstract: Aiming to address the imbalance between the shell-breaking rate and the high-quality kernel rate caused by random loading directions and cracking clearance during the mechanical walnut cracking process, a directional shell-breaking method synergizing machine vision and automatic control was proposed for Yunnan deep-grooved walnuts. Firstly, based on physical characteristic tests of the walnuts, the optimal shell-breaking direction was determined. Subsequently, guided by Hertzian contact theory, a customized concave shell-breaking indenter was designed, featuring a 20° concave angle, a 24 mm outer end-face diameter, and arrayed annular ribs on its surface. Secondly, to improve the perception of minute features, an improved YOLO v8n-Pose pose estimation model was developed by introducing a lightweight shared detail-enhanced convolutional detection (LSDECD) head. Trained specifically on the suture endpoints of deep-grooved walnuts, a mean average precision (mAP50-95) of 83.4% for bounding boxes and 99.5% for keypoints was achieved by the improved model. Furthermore, an ultra-high training frame rate of 322.6 f/s was demonstrated, with a real-time detection speed of 103.7 f/s in practical application scenarios. Next, the angle between the line connecting the suture endpoints and the horizontal axis was calculated by using their pixel coordinates, which was then converted into a control signal to achieve angle-compensation control of the shell-breaking clamping arms. Finally, a two-factor experiment on contact mode and loading direction was conducted. The experimental results showed that under the optimal operating parameters, a shell-breaking rate of 93.81% and a high-quality kernel rate of 92.70% were obtained. Compared with random-direction cracking with a flat indenter, these two indicators were improved by 14.50 percentage points and 11.68 percentage points, respectively. The

收稿日期: 2026-03-19　修回日期: 2026-04-23
基金项目: 云南省重大科技专项(202402AE090031)
作者简介: 王树才(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事农产品智能化检测与装备研究,E-mail: wsc01@mail.hzau.edu.cn
通信作者: 郑侃(1987—),男,副教授,博士,主要从事现代农业装备设计与测控研究,E-mail: zhengkan@mail.hzau.edu.cn

kernel-shell separation quality was effectively improved by this research, providing theoretical support and technical references for the development of automated, continuous-conveying, directional shell-breaking equipment for deep-grooved walnuts.

Key words: deep-grooved walnut; physical properties; machine vision; pose estimation; directional shell-breaking

0 引言

深纹核桃(*Juglans sigillata* Dode)是我国云南省广泛种植的核桃品类,具有重要的经济与营养价值。但因其具有表面纹理深、壳仁间隙小、缝合线紧密等独特的物理特性,导致破壳取仁难度高于普通薄皮核桃[1-2]。目前,深纹核桃脱壳严重依赖人工,而现有通用型机械破壳设备由于难以适应其特殊的几何结构,导致高露仁率过低,制约了核桃深加工产业的规模化发展[3]。

核桃物理力学特性是破壳装置设计的核心依据[4-6]。文献[7-9]研究表明,精准控制破壳方向是提升壳仁分离质量的先决条件。刘明政等[10]研究表明,沿最优受力方向破壳是提高破壳率的关键。破壳工具几何形状与挤压位移精确约束同样是保护果仁完整性的核心要素。基于核桃壳仁间隙设定合理的机械压缩形变量,采用与坚果外形曲率相匹配的加载面,能够优化表面接触应力分布,有效防止破坏应力向内层果仁的传递[11-13]。因此,针对深纹核桃最优受力方向挤压,并耦合适配其几何特性的破壳工具及破壳间距,是突破其破壳技术瓶颈的前提。

目前,核桃破壳设备多依赖纯机械结构实现[14]。在自动化加工过程中,纯机械结构无法保证最优的破壳效果。部分学者依据核桃物理特性设计了纯机械定向定距破壳装置,均有效提升了破壳整体质量,但存在定向精度差或定向方式依靠人工放置等问题[15-16]。刘海江等[17]利用柔性带差速原理设计的定向装置有效提升了自动化水平,但机械机构物理定向精度与稳定性极易受核桃个体形态差异的影响。基于以上机械结构分析,定向定距且仿生破壳工具是核桃破壳质量提升的关键,且应在保证自动化的同时提高破壳作业参数精度。

机器视觉姿态估计技术在农产品生产各领域应用广泛,在复杂背景下展现出卓越的定位能力[18]。在特征识别与目标空间定位方面,刘安稳等[19]以 YOLO v5 模型为核心实现了菠萝眼精准定位与自动去除;文献[20-22]利用机器视觉技术实现了果园复杂环境下果实精准检测与三维可视化。在目标姿态估计与自动化装备配合方面,同样存在广泛的研究[23-25]。Huang 等[26]利用改进 YOLO v8-seg 模型针对肉鸡进行图像分割,以像素数据模拟肉鸡物理尺寸实现高精度肉鸡生产线快速分段作业;但由于深纹核桃表面纹理极其复杂、端点特征不明显,现有通用姿态估计算法模型不适用。

依据深纹核桃几何与力学特性,本文提出一种基于机器视觉技术,结合机电控制的定向挤压破壳装置,设计关键挤压部件,开展最佳参数验证试验,以期为深纹核桃高质量破壳设备研究提供技术参考。

1 深纹核桃物理力学特性及破壳方向

1.1 深纹核桃几何尺寸测定及分级标准

试验材料为产自云南省楚雄市的深纹核桃(图 1),以核桃缝合线为空间基准,物理外观特征分为核桃横径、纵径、棱径[27]。

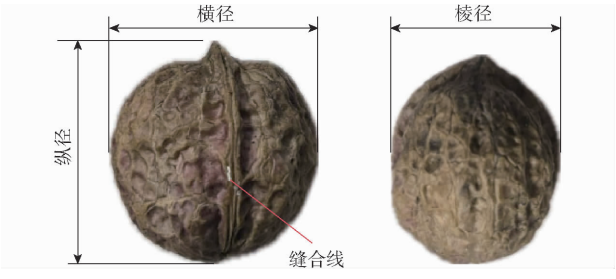


图 1 核桃外形尺寸图

Fig. 1 Geometrical dimensions of walnut

为提高破壳装置设计合理性,需对尺寸各异的深纹核桃进行分级处理,但由于目前深纹核桃自动化分级设备分级基准较多,因此需制定适用于定向破壳装置分级标准。根据最小势能原理,随机抽取 200 颗深纹核桃以自由落体形式模拟实际上料过程,在光滑平面上缝合线自然朝上状态为 198 颗,验证了核桃在平面静置及连续输送过程,自然状态趋于重心最低的稳定平衡状态,即缝合线自然朝上的稳定姿态[28]。因缝合线凸出易影响纵径、棱径测量,且稳定姿态横径完全显露,选取横径作为核桃分级主要判据,以上述 200 颗深纹核桃进行尺寸测量统计,结果呈近似正态分布特征。其中横径为 32 ~ 37 mm 的核桃占比 64.5%,定义为中果;32 mm 以下的核桃占比 17%,定义为小果;37 mm 以上的核桃占比 18.5%,定义为大果。

为进一步获得深纹核桃壳仁结构参数特征,选

取小果、中果和大果等级核桃各 50 颗作为测量样本。采用精度为 0.02 mm 游标卡尺分别测量核桃外壳及核桃仁 3 径尺寸，采用精度为 0.001 mm 千分尺测量核桃壳厚。结合核桃外壳尺寸、核桃仁尺寸及壳厚数据，定义 3 个正交方向上壳体内壁与果仁表面之间的径向距离平均值为核桃壳仁间隙。壳仁间隙计算式为

$$C_1 = \frac{(D_1 - d_1) + (D_2 - d_2) + (D_3 - d_3) - 6S}{6} \quad (1)$$

式中　C_1——核桃内壳与核桃仁间隙，mm

D_1、d_1——核桃外壳、核桃仁横径，mm

D_2、d_2——核桃外壳、核桃仁纵径，mm

D_3、d_3——核桃外壳、核桃仁棱径，mm

S——核桃壳厚，mm

对测量数据进行统计分析，计算各等级核桃外壳 3 径、核桃仁 3 径、壳厚及单侧壳仁间隙平均值与标准差，结果如表 1 所示。

表 1　深纹核桃物理尺寸数据

Tab. 1　Physical dimension data of deep-grooved walnuts

核桃尺寸等级	占比/%	核桃壳外径/mm			核桃仁外径/mm			核桃壳厚/mm	壳仁间隙/mm
		横径	纵径	棱径	横径	纵径	棱径		
小果	17.0	30.21 ± 1.73	31.43 ± 1.75	26.51 ± 1.54	24.93 ± 1.82	25.41 ± 1.90	20.77 ± 1.77	1.31 ± 0.31	1.53 ± 0.21
中果	64.5	34.53 ± 1.17	36.19 ± 1.23	29.34 ± 1.16	28.52 ± 1.32	29.37 ± 1.40	23.93 ± 1.42	1.53 ± 0.26	1.51 ± 0.12
大果	18.5	38.10 ± 1.81	39.27 ± 1.64	34.31 ± 1.66	30.48 ± 1.93	31.74 ± 1.86	28.49 ± 1.79	1.74 ± 0.37	1.76 ± 0.19

1.2　深纹核桃破壳力学特性分析

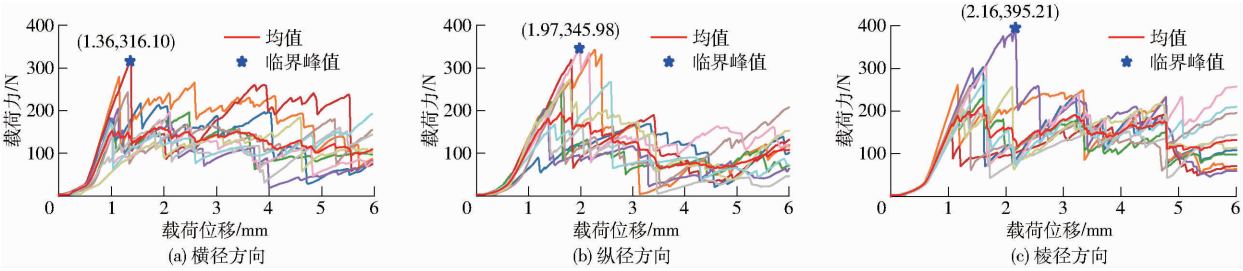
深纹核桃几何物理特性可为破壳装置关键结构尺寸设计及压缩位移阈值设定提供理论依据，而力学特性试验则是确定最优施力方向的关键。随机选取 60 颗深纹核桃中果样本，利用尚仪卤素水分仪（SN－DHS－16 型，分度值为 5 mg）测量 30 颗深纹核桃样本含水率，测量得样本含水率平均值为 5.34%，变异系数为 2.96%，符合试验标准。随后以另外 30 颗深纹核桃样本，使用 TMS－PRO 型质构仪（力值测量精度 0.015%）开展单轴压缩试验。试验分别沿核桃横径、纵径和棱径 3 个正交方向进行加载，以探究核桃不同轴向破壳力学响应特性。通过程序设定试验参数：加载速度 50 mm/min，触发力 0.1 N，最大压缩行程 6 mm，回程速度 100 mm/min，回程距离 25 mm。加载过程系统实时采集载荷－位移数据，同时观测记录核桃壳体破裂形式及果仁损伤情况。不同施载方向破壳效果如图 2 所示，力学试验结果如图 3 所示。



(a) 横径破壳　(b) 纵径破壳　(c) 棱径破壳

图 2　深纹核桃 3 径破壳效果对比

Fig. 2　Comparison of shell-breaking results for deep-grooved walnuts across tri-axial dimensions



(a) 横径方向　(b) 纵径方向　(c) 棱径方向

图 3　深纹核桃力学特性

Fig. 3　Mechanical characteristics diagram of deep-grooved walnut

由图 3 可知，深纹核桃破壳力学特性及破壳效果表现出明显各向异性。横径加载最大破壳载荷为 316.10 N，且均值载荷-位移曲线最为平缓。该加载方式裂纹主要沿壳厚均匀部位扩展，避开缝合线等凸出区域，因此有效避免了应力突变，最大程度保障了果仁完整性。纵径加载受核桃两端几何结构及缝

合线的刚性约束,最大临界破壳峰值为 345.98 N。加载时缝合线尖端向内塌陷导致壳仁嵌入,后续壳仁分离困难;该方式裂纹扩展沿纵向横截面,虽然裂纹扩展最为充分,但易导致长条状仁体发生中部断折。棱径加载由于缝合线加厚凸出使初始应力集中,出现高达 395.21 N 临界破壳峰值,且棱径受压易使核桃外壳沿缝合线直接断裂,裂纹扩展最小,导致核桃破壳率低。综合力学稳定性和破壳效果等工程化评价指标,确定横径方向为深纹核桃破壳最优加载方向。

2 深纹核桃定向破壳装置

2.1 总体结构与工作原理

2.1.1 总体结构

深纹核桃定向破壳试验机基于机电协同控制理念设计,核心硬件主要由视觉感知设备、角度补偿机构及气动挤压破壳机构 3 部分组成。如图 4 所示,视觉感知系统选用大恒 MARS-900-120GTC 型彩色工业相机(120 f/s,900 万像素)搭配 12 mm 焦距工业镜头,通过千兆网口与上位机实时通讯,实现高分辨率核桃图像快速传输。角度补偿机构以 57 型二相步进电机(最大转速 500 r/min)为动力源,通过同步带机构(减速比 $i=6$)驱动分度头轴,分度头基座与气缸轴向连接,配合电机驱动器 16 细分控制技术,有效提升角度控制分辨率和平稳性,从而保证破壳挤压头与核桃横径方向的精准对齐。气动挤压破壳装置以亚德客 SCLB50×50 型气缸为核心执行元件,配套佳普空气压缩机(储气量 30 L、排气流量 220 L/min)与气源三联件提供动力。系统额定工作压力设定为 0.8 MPa,气缸理论输出推力约为 1 570 N,综合考虑气动回路压力损失及机械摩擦损失(取效率为 0.8),实际有效推力可达 1 250 N,完全覆盖深纹核桃破壳所需的临界载荷峰值,并具备充足的动力裕量。气缸驱动自定心夹臂及内凹型压头,利用双向同步夹持原理配合夹臂连杆自身结构限位实现核桃稳定居中夹持与准静态挤压破壳。

2.1.2 工作原理

破壳系统作业流程遵循视觉感知解算、协同角度补偿、定距挤压破壳顺序控制逻辑。作业起始时,人工将核桃放置于传送带平台(速度 3 m/min),输送过程中,工业相机采集图像并上传,上位机通过集成 YOLO v8n-Pose-LSDECD 视觉模型算法识别核桃缝合线特征点,利用识别点像素坐标解算端点连线对于基准轴初始偏转角度 θ。随后,上位机下发角度补偿指令,STM32 控制器依据运动学模型将角度转换为驱动脉冲数 P_1,相应转换公式为

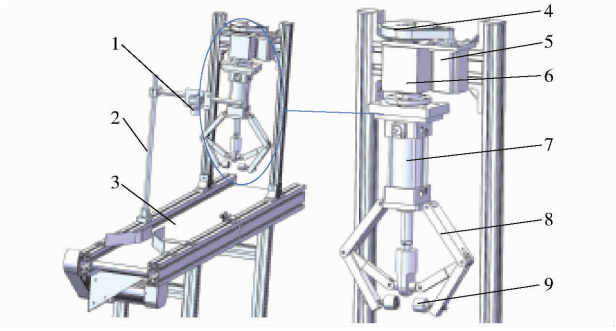


图 4 深纹核桃定向破壳机示意图

Fig. 4 Schematic of directional cracking machine for deep-grooved walnuts

1. 工业相机 2. 相机支架 3. 传送带平台 4. 同步带 5. 步进电机 6. 分度头基座 7. 气缸 8. 破壳夹臂 9. 破壳挤压头

$$P_1=(\theta/\theta_s)ni \tag{2}$$

式中 θ_s——步进电机固有步距角,(°)

n——驱动器细分系数

控制器据此输出对应脉冲信号驱动步进电机带动分度头旋转,实现破壳挤压头与核桃横径方向的轴向对齐。定向完成后,系统经短暂延时消除惯性抖动,控制电磁阀换向,驱动气缸活塞伸出施加准静态挤压载荷,当挤压头下压至设定工程间距并短暂保持压力以引导裂纹充分扩展后,气缸自动排气复位,夹臂张开卸料,完成单次定向破壳循环。图 5 为气动挤压破壳机构运动简图。实际定向破壳过程中气缸与分度头基座连接,具备周向旋转自由度以完成角度补偿,在气动挤压破壳阶段,该周向旋转已锁定,此时以气缸外壁作为该工况下固定机架。其中摆动连杆与挤压连杆以自身结构限位 70°,限制挤压连杆向外侧摆动。

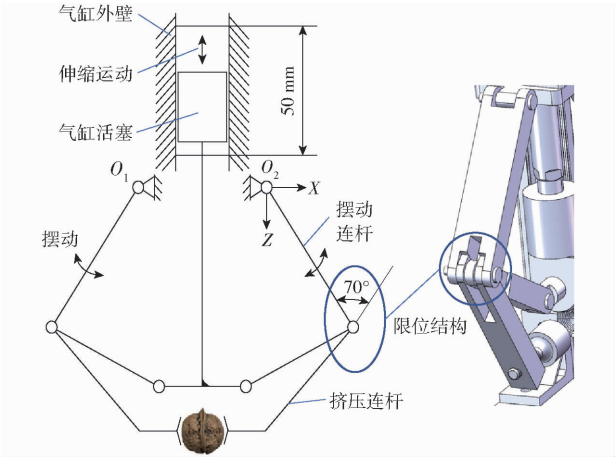


图 5 气动挤压破壳机构运动简图

Fig. 5 Kinematic schematic of pneumatic pressing shell-breaking mechanism

2.2 破壳挤压头尺寸设计

2.2.1 挤压头凹角

为提高破壳质量并保证受载稳定性,破壳挤压

头需对核桃形成有效包络。相较于平面挤压，内凹结构可有效扩大接触面积、避免应力集中；而在内凹构型中，内凹锥面结构加工难度远低于内凹弧面，且能有效避免破壳后核桃与挤压头发生的“自锁”现象，保证顺畅卸料。因此，选用内凹锥面挤压头，以兼顾定向破壳作业经济性与实用要求。为避免破壳时发生“几何架空”现象，需定量分析挤压头内凹角 α 对接触区域的影响。深纹核桃可近似为三轴椭球体，棱径投影截面视为椭圆。定义挤压头与核桃在横径方向最大允许几何投影接触宽度为有效接触半宽 W_{eff}。基于初始刚性接触假设，核桃初始接触中心主曲率半径 R_1 与挤压头有效接触半宽可表示为

$$\begin{cases} R_1 = \dfrac{a^2}{b} \\ W_{\mathrm{eff}} = R_1 \sin\alpha \end{cases} \tag{3}$$

式中　a——核桃纵半径，mm

b——核桃横半径，mm

由式(3)可知，增大挤压头内凹角 α 能够扩大几何包络范围，为后续弹性变形与载荷分散提供必要的几何空间。弹性接触分析如图 6 所示，图中 F_1、F_2、F_3 和 F_4 表示挤压头锥面不同区域针对核桃横径方向施载的等效力。在破壳挤压接触区域内，依据局部曲率展开原理，锥面接触区可近似为局部二次曲面。因此，可通过引入等效曲率半径描述其局部特征，进而利用经典赫兹接触理论求解两接触体之间的三维弹性接触力学特性。

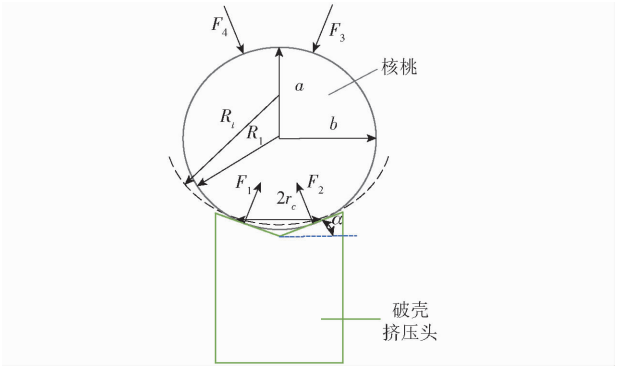


图 6　破壳挤压头挤压弹性接触力学分析

Fig. 6　Analytical diagram of elastic contact mechanics for shell-breaking indenter

前述局部曲率展开原理，在破壳挤压接触区域内，可将破壳挤压头内凹锥面近似等效为曲率半径为 R_t 的局部二次曲面。在法向接触载荷 F 作用下，根据赫兹接触理论，挤压头与核桃发生局部弹性形变并形成近似圆形的接触面。三维接触半径 r_c 与等效相对曲率半径 R^* 力学关系可表示为

$$\begin{cases} \dfrac{1}{R^*} = \dfrac{1}{R_1} - \dfrac{1}{R_t} \\ r_c = \sqrt[3]{\dfrac{3FR^*}{4E^*}} \end{cases} \tag{4}$$

式中　E^*——等效弹性模量，MPa

由式(4)可知，随着挤压头曲率半径 R_t 接近核桃曲率半径 R_1，三维接触半径 r_c 扩大，然而，弹性接触区域的扩大须严格受限于宏观几何边界(即 $r_c \leqslant W_{\mathrm{eff}}$)。若挤压头内凹角 α 持续增大，挤压头斜率将超过核桃表面轮廓切线角，导致中心区域脱离核桃表面，产生“几何架空”现象。基于深纹核桃物理尺寸特性，将二维有效接触半宽 W_{eff} 限制在核桃纵半径 a 50% ~60% 以内时，接触区域处于核桃腹部曲率平缓区。为保证安全裕量，设定有效接触边界系数 λ 为 0.5。结合前期深纹核桃测定数据(大、中、小果横纵比分别为 0.970、0.954、0.961)，结合式(3)，可构建挤压头宏观几何不干涉条件及工程设计上限推导模型

$$\begin{cases} W_{\mathrm{eff}} \leqslant \lambda a \\ \sin\alpha_{\max} \leqslant \lambda \dfrac{b}{a} \\ \alpha_{\mathrm{design}} \leqslant K_1 \alpha_{\max} \end{cases} \tag{5}$$

式中　α_{design}——理论设计内凹角，(°)

$\alpha_{\max}$——不发生几何干涉最大理论内凹角，(°)

K_1——考虑核桃表面不规则性引入的几何安全系数，取 0.75

根据式(5)计算可得，挤压头内凹角理论设计上限 α_{design} 约为 21.5°。综合上述理论边界条件与机械加工常用的倒角模数，最终优选 $\alpha = 20°$ 作为破壳挤压头内凹角。该参数安全置于几何不干涉区间内，既充分利用核桃腹部平缓曲率以扩大受力面积，又保留充足的几何避让空间，确保破壳初期力学接触的绝对稳定性。

2.2.2　挤压头端面尺寸

基于深纹核桃样本呈高度几何相似性的统计规律及产线中多级分选破壳的工程需求，提出以中果为基准的挤压头比例缩放配置策略(即内凹角 $\alpha = 20°$ 不变，外径尺寸等比例设计)。为保证挤压头能完全覆盖有效接触带宽区域；同时防止破壳过程挤压头边缘接触核桃放置平面、避免挤压头边缘直接压迫甚至越过棱线，引发非预期方向脆性破裂及核桃相对滑脱现象。即挤压头端面半径 R_d 需满足

$$c - l \geqslant R_d \geqslant W_{\mathrm{eff(max)}} \tag{6}$$

式中　c——深纹核桃棱半径，mm

l——挤压头单侧安全避让裕量，mm

根据腹部曲率平缓区定义,结合中果尺寸测量数据计算可知 $W_{\mathrm{eff(max)}}=\lambda a=0.5\times18.10=9.05$ mm。考虑核桃受压因泊松效应在非加载方向产生的鼓胀形变,核桃棱厚度等因素,取 $l=2.67$ mm。综合上述双重约束,可知 9.05 mm$\leqslant R_d\leqslant$12 mm。

为满足最佳破壳效果,设计破壳挤压头端面半径 R_d为 12 mm,内凹角为 20°,内凹锥面设置周向环形筋,预防核桃破壳过程发生轴向转动,同时阵列式凸出筋有效降低破壳初始临界力学峰值。基于深纹核桃横径比例,可确定大果、小果破壳挤压头尺寸放缩比例为 1.1、0.87。图 7 为破壳挤压头示意图。图中 H_d为破壳挤压头端面与底点的距离。

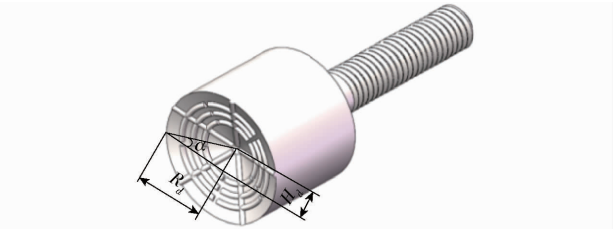


图 7 破壳挤压头示意图

Fig. 7 Schematic of shell-breaking indenter

2.3 定向破壳测控系统设计

基于机电一体化的分层式控制架构,实现了破壳全过程的集成化控制和可视化检测。图 8 为控制系统流程图。系统下位机以 STM32F103 单片机为核心,与上位机采用 UART 异步串口进行通信。为保障系统抗干扰能力,硬件采用强弱电分离供电设计:STM32 主控单元及其通信电路采用独立 5 V 稳压供电,DM542 步进电机驱动器及气动电磁阀等执行器件由 24 V 工业开关电源统一供电。作业时,上位机视觉系统解算偏转角度并下发串口指令,单片机计算最优旋转路径后输出脉冲信号驱动步进电机进行角度补偿,定向动作完成后控制电磁阀换向,驱动气缸完成定距挤压与延时复位,实现定向破壳的自动化闭环控制。上位机软件基于 Python 语言开发,集成 OpenCV 图像处理库与 PyQt 可视化框架。

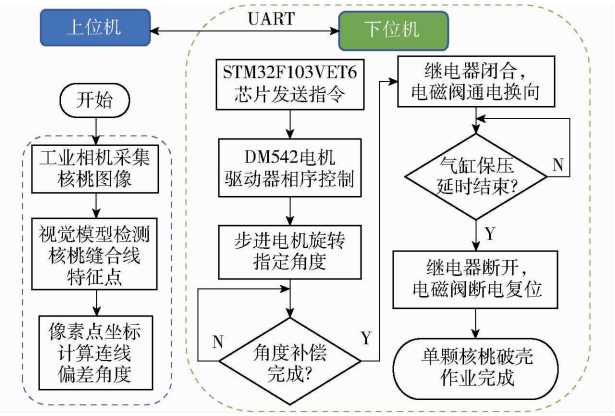


图 8 控制系统流程图

Fig. 8 Control system flowchart

该软件界面采用模块化协同设计:相机控制区与模型检测区调节相机参数和选择加载算法模型;串口通信区用于建立与下位机数据链路;破壳调试区进行破壳工艺参数设置;图像信息显示区集成实时监控画面、核桃缝合线偏转角度显示及系统运行日志实时反馈功能,如图 9 所示。

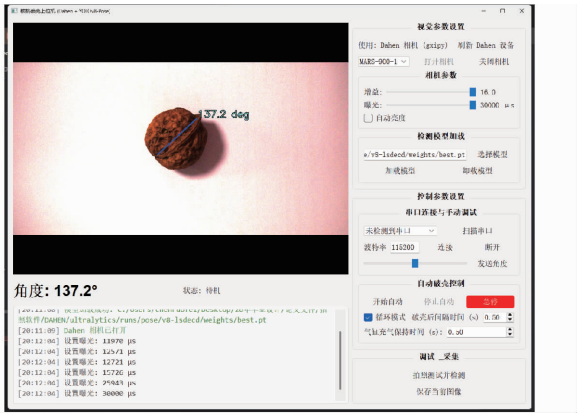


图 9 上位机软件界面

Fig. 9 Upper computer software interface

3 基于改进 YOLO v8n-Pose 模型的核桃缝合线端点检测

3.1 核桃图像数据集构建与预处理

为突破纯机械定向方式的精度瓶颈,采用机器视觉技术获取核桃图像信息,依据特征信息确定破壳挤压头偏移角以提高破壳试验系统定向精度。视觉模型训练样本选取 5 kg 表面无明显破损深纹核桃,图像采集设备为大恒 MARS-900-120 GTC 型彩色工业相机。为模拟真实 PU 白色食品级传送带输送环境,在自然光白色背景下随机变换核桃放置角度与位置,获取多姿态表面图像。经人工筛选剔除模糊、过曝及重影等低质量样本后,构建包含 1 000 幅原始图像的基础数据库。利用 Labelme 工具对图像进行精细化标注,将核桃主体定义为检测区域,标注为 walnut,并提取缝合线顶端凸出(point 1)与底端凹陷(point 2)作为姿态关键点,生成的 JSON 标注文件经脚本转换为 YOLO TXT 格式。为增强模型鲁棒性并抑制过拟合,采用旋转变换、噪声注入及色彩抖动等数字图像处理技术进行数据增强。增强后数据集扩充至 6 000 幅,并按照比例 8∶1∶1随机划分为训练集、验证集与测试集。图 10 为 Labelme 标注工具界面,图 11 为图像处理结果。

3.2 试验与结果分析

3.2.1 试验环境

试验平台基于 Windows 11、64 位操作系统搭建,深度学习框架采用 PyTorch 2.0.1,编程语言为 Python 3.9。硬件计算平台配置为:Intel Core i7-

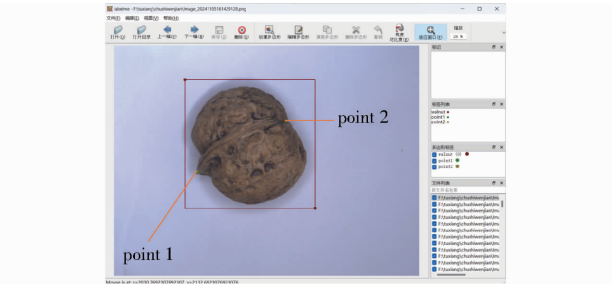


图 10　Labelme 标注工具界面

Fig. 10　Interface of Labelme annotation tool

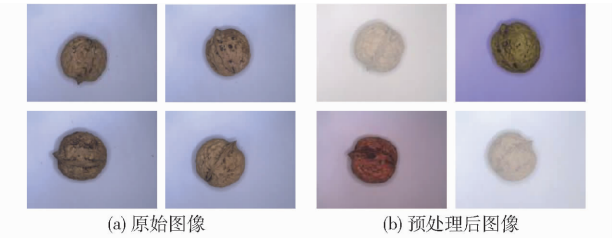


图 11　核桃图像预处理

Fig. 11　Walnut image preprocessing

12800HX 处理器，NVIDIA GeForce RTX 4070 显卡（8 GB 显存），32 GB DDR5 内存。所有模型均在相同软硬件环境下进行训练，并启用早停机制（Early stopping，耐受度设为 30 轮）以防止过拟合，混合精度训练设置为 False 以提升训练过程数值稳定性。模型训练超参数如表 2 所示。

表 2　模型训练超参数

Tab. 2　Model training hyperparameters

参数	数值
输入图像尺寸/（像素 × 像素）	640 × 640
训练轮次	100
批次大小	8
早停耐受度阈值	30

3.2.2　YOLO v8n－Pose－LSDECD 检测模型

模型结构如图 12 所示，由主干网络（Backbone）、颈部网络（Neck）及轻量化共享细节增强检测头（LSDECD Head）3 部分组成[29]。主干网络沿用 CSPDarknet 结构，通过 C2f 模块提取核桃图像多尺度特征信息；颈部网络采用 PANet 结构，实现深层语义特征与浅层纹理特征双向融合。

通过引进 LSDECD 模块替代原有的解耦头，引入轻量化卷积单元 Conv_GN（Convolutional layer with group normalization），将颈部网络输出的不同尺度特征图映射至统一的通道维度，在保证特征有效传递的前提下，大幅降低模型计算冗余与参数量；随后映射后特征进入由细节增强卷积（Detail-enhanced convolution，DEConv）构成的共享特征提取结构。DEConv 模块以差分卷积（Differential convolution，DC）为核心，通过计算特征图中相邻像素之间的差异，敏锐捕捉并放大图像的局部边缘与纹理细节；最后在回归分支末端引入可学习的缩放因子（Scale），根据样本特征动态调整回归值幅值分布，有效缓解了梯度振荡，提升了关键点坐标回归精度。

3.2.3　模型性能试验

为合理评估模型在核桃特征点检测精度及效率。采用模型参数量（Parameters）、浮点运算量（GFLOPs）及训练检测帧数（FPS）作为计算开销与实时性评价指标；采用平均精度均值（mAP50－95）、精确率（Precision）与召回率（Recall）作为检测精度评价指标。

通过量化模型计算开销、检测精度与实时性表现，评估模型在复杂环境中检测精度与检测速度平衡性与适用性。

为验证 YOLO v8n－Pose－LSDECD 有效性，将其与多个姿态估计模型在核桃数据集上进行试验对比。试验结果如表 3 所示。

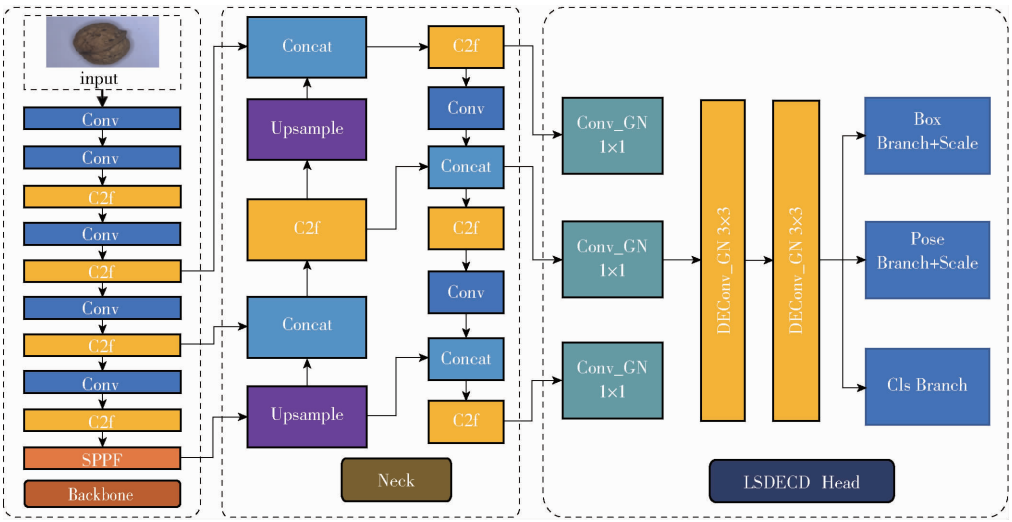


图 12　YOLO v8n－Pose－LSDECD 网络结构

Fig. 12　YOLO v8n－Pose－LSDECD network structure

表 3 不同模型试验结果

Tab. 3 Experimental results of different models

模型	参数量	浮点运算量	理论帧率/(f·s^{-1})	实际帧率/(f·s^{-1})	平均精度均值/%		精确率/%		召回率/%	
					Box	Pose	Box	Pose	Box	Pose
YOLO v8n - Pose - LSDECD	2.38×10^6	6.30×10^9	322.6	103.7	83.4	99.5	99.5	99.8	99.5	99.8
YOLO v8n - Pose	2.76×10^6	7.10×10^9	303.0	96.5	83.6	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5
YOLO v8s - Pose	1.01×10^7	2.43×10^{10}	192.3	86.9	84.1	99.5	99.8	99.8	99.8	99.8
YOLO 11n - Pose	2.65×10^6	6.60×10^9	294.1	92.0	81.5	99.4	99.5	99.8	99.5	99.8
YOLO 12n - Pose	2.58×10^6	6.10×10^9	243.9	66.5	80.6	99.3	99.5	99.5	99.5	99.8
YOLO 13n - Pose	2.52×10^6	6.40×10^9	217.3	50.7	81.6	99.4	99.5	99.8	99.5	99.8
HRNet - W32	2.85×10^7	1.60×10^{10}	62.4	21.6	—	99.7	—	99.9	—	99.8
ViTPose - S	2.31×10^7	2.13×10^{10}	42.7	15.3	—	99.6	—	99.8	—	99.7

注:HRNet - W32 与 ViTPose - S 为自上而下的姿态检测算法,原生网络不输出目标检测框,故不对比 Box 相关指标。

由表 3 可知,综合分析参数量、计算开销及检测精度,YOLO v8n - Pose - LSDECD 模型在核桃定向破壳场景中展现出最佳综合性能。与基准及同系列模型纵向对比,改进模型展现了明显的轻量化优势。与基准模型 YOLO v8n - Pose 相比,改进模型关键点检测精度达 99.5%,且召回率基本一致的前提下,参数量减少 13.8%,浮点运算量降低 8×10^8,单卡推理速度提升至 322.6 f/s,增幅达 6.5%。表明 LSDECD 模块通过共享特征提取与细节增强机制,有效削减了模型结构冗余,且未造成关键特征丢失。对比 YOLO v8s - Pose 模型,改进模型在 Box mAP50 - 95 上有 0.7 个百分点的差距,但运算量仅为其四分之一,推理速度大幅提升 67.8%,更加满足核桃破壳生产线对系统快速响应的严格需求。

与同系列迭代轻量化模型(YOLO 11n/12n/13n - Pose)对比,改进模型体现了更优的定位稳定性。上述迭代版本 Box(mAP50 - 95)指标分别低于改进模型 1.9、2.8、1.8 个百分点,同时,改进模型在保证参数量最低的情况下,推理速度分别高于上述模型 28.5、126.5、105.3 f/s。有效证明针对单一场景进行特定的细节增强设计,比直接采用通用轻量化模型更具优势。

与 HRNet - W32(High resolution network - width 32)及 ViTPose - s(Vision transformer pose - s)2 种非 YOLO 架构高精度模型相比,改进模型推理速度是上述模型的 5 ~ 7 倍,识别精度无明显差距。表明在作业背景环境受控(纯色、恒光)条件下,YOLO 系列模型能在保证精度要求的同时,实现高检测效率。

为进一步评估上述模型在实际核桃破壳流水线作业(工业相机单帧触发模式采集图像)中检测效率,设置单图输入(批次大小为 1)验证试验,获取模型真实推理延迟。YOLO v8n - Pose - LSDECD 模型实时运行帧率为 103.7 f/s,在与其余模型对比时仍表现出优势。改进模型最大限度地压缩了算法处理延时,为后续机械执行机构预留了充足的响应窗口,充分验证了其在工业流水线上落地可行性。

综上所述,改进模型在检测精度与速度之间取得更优平衡,高精度角度识别更易使挤压头表面贴合横径曲率稳定部位进行挤压,高帧率表现满足实时性作业要求。YOLO v8n - Pose - LSDECD 模型预测效果如图 13 所示。



图 13 YOLO v8n - Pose - LSDECD 模型预测效果

Fig. 13 Prediction performance of improved YOLO v8n - Pose - LSDECD model

4 破壳试验

4.1 试验装置及试验指标

试验装置选用自主设计深纹核桃定向破壳试验装置,材料为云南省深纹核桃。图 14 为核桃破壳装置实物。将核桃破壳后壳仁未分离核桃定义为“壳包仁”,破壳后核桃仁体积大于等于整个核桃仁 1/8 的定义为高露仁,小于 1/8 的定义为碎仁[30]。核桃破壳后破壳率 A_1 与高露仁率 B_1 计算式为

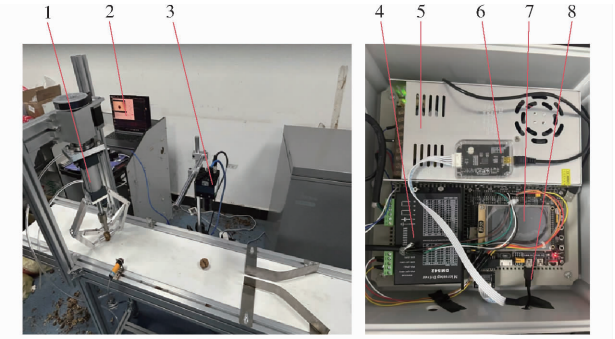
$$\begin{cases} A_1 = \left(1 - \dfrac{N_1}{N_0}\right) \times 100\% \\ B_1 = \dfrac{N_3}{N_2} \times 100\% \end{cases} \tag{7}$$

式中　N_0——核桃试验样本总质量，g

N_1——破壳后壳包仁质量，g

N_2——破壳后核桃仁总质量，g

N_3——破壳后高露仁质量，g



(a) 试验平台　　(b) 电控箱

图 14　破壳试验装置实物

Fig. 14　Shell-breaking test apparatus

1. 气动挤压破壳机构　2. 上位机　3. 工业相机　4. 步进电机驱动器　5. 开关电源　6. DAP 下载器　7. 下位机　8. 串口连接线

4.2　破壳间距参数优化及试验

不同尺寸等级深纹核桃需设置相应的挤压间距参数以降低碎仁率。以深纹核桃壳体发生脆性断裂的临界条件为基础，通过前述（1.2 节）准静态压缩试验数据，分析 10 组深纹核桃中果样本横径方向挤压的载荷-位移曲线数据。提取第 1 峰值点（即初裂点）的试验结果如表 4 所示。

表 4　深纹核桃横向准静态压缩破壳力学特性试验结果

Tab. 4　Experimental results of shell-breaking mechanical properties of deep-grooved walnuts under transverse quasi-static compression

样本	临界破壳力/N	临界破壳位移/mm
1	183.75	0.962 5
2	278.91	1.147 5
3	155.36	1.030 0
4	316.10	1.357 5
5	204.21	1.130 0
6	242.90	1.312 5
7	147.45	1.030 0
8	121.60	1.162 5
9	127.73	1.822 5
10	170.30	0.997 5
平均值	196.44	1.20

由表 4 可知，深纹核桃中果的临界破裂位移集中分布在 0.962 5 ~ 1.822 5 mm 区间，平均值 $\bar{\delta}_{\text{break}}$ 为 1.20 mm，标准差 σ_1 为 0.26 mm。为确保绝大多数样本能够被有效压裂，设机械压缩量下限为 $\delta_{\min} = \bar{\delta}_{\text{break}} + \sigma_1 = 1.46$ mm。为保证破壳过程核桃仁完整性，利用壳体与果仁之间的自然间隙作为机械挤压的安全缓冲带。由于机械挤压是双向受力（或单侧挤压导致双侧变形），有效安全阈值应取双侧壳仁间隙之和。深纹核桃中果单侧壳仁间隙均值 $\bar{C}_1$ 为（1.51 ± 0.12）mm，总安全间隙 $2C_1 = 3.02$ mm。综上，构建最佳压缩位移 δ_{opt} 模型为

$$\bar{\delta}_{\text{break}} + \sigma_1 \leqslant \delta_{\text{opt}} \leqslant 2\bar{C}_1 \tag{8}$$

深纹核桃中果平均横径尺寸 $\bar{D}_1$ = （34.53 ± 1.17）mm。为兼顾破壳效率与质量，初步选取接近机械压缩量下限的保守变形量 δ_1 为 1.53 mm 进行计算，理论固定破壳间距（$H_{\text{theory}} = \bar{D}_1 - \delta_1$）为 33.00 mm。

随机抽取 100 颗深纹核桃中果，以理论破壳间距 33.0 mm 进行破壳试验。结果表明，大多数核桃壳体表面出现裂纹，但未发生贯穿性断裂，后续壳仁分离困难。原因为深纹核桃壳体属于生物复合材料，具有显著的粘弹性与弹性回复效应[31]。理论变形量（1.53 mm）虽然超过了脆性断裂阈值，但在卸载后壳体回弹，裂纹闭合。为克服弹性迟滞并实现壳仁结构性分离，引入过盈修正系数 ρ，采用“过量挤压”策略。修正后实际压缩变形量 δ_{actual} 表示为

$$\delta_{\text{actual}} = \rho\delta_1 \tag{9}$$

为确定修正系数 ρ 工程最佳取值，以 33.0 mm 为基准，设置 0.5 mm 为梯度步长，设计 5 组梯度试验。每组随机选取 500 g 深纹核桃中果进行横径方向定向破壳，统一采用凹型挤压头。试验结果如表 5 所示。

表 5　间距参数修正梯度试验结果

Tab. 5　Results of gradient experiment on spacing parameter modification

梯度组别	挤压间距/mm	修正系数	破壳率/%	高露仁率/%
1	33.00	1.00	73.59	96.31
2	32.50	1.33	81.64	94.93
3	32.00	1.65	89.84	93.89
4	31.50	1.98	93.66	92.41
5	31.00	2.31	95.13	85.65

由表 5 可知，随着挤压间距减小，破壳率呈单调上升趋势，而高露仁率在间距 31.00 mm 时出现断崖式下跌。当破壳间距缩至 31.50 mm 时，实际变形量达 3.03 mm（接近理论极限 $2C_1 = 3.02$ mm），此时深纹核桃破壳率为 93.66%，同时保持有 92.41% 的高露仁率，破壳效果如图 15 所示。

综合考虑破壳率与高露仁率的平衡性，确定实际深纹核桃中果最佳破壳间距 $H_{\text{actual}} = 31.50$ mm 为



图 15 31.5 mm 挤压间距破壳效果

Fig. 15 Shell-breaking performance of walnuts at a 31.5 mm cracking clearance

1. 高露仁 2. 壳包仁 3. 碎仁

深纹核桃中果的工程最佳破壳间隙。该参数对应的工程修正系数 $\rho \approx 1.98$，表明在实际作业中，需施加约为理论临界位移 2 倍的变形量，既能有效克服深纹核桃结构弹性，又可保证较佳的核桃仁完整性。

4.3 破壳性能试验

为进一步验证“视觉定向加凹型挤压头”系统在深纹核桃破壳作业中的有效性，设置接触方式（挤压头形状）与加载方向（定向/随机）双因素对比试验。试验共设置 4 个组别，每组样本选取 1 000 g 深纹核桃中果。破壳间距统一设定为工程最佳值 31.5 mm（凹型挤压头以内凹中心点为基准）。试验结果如表 6 所示。

表 6 挤压头形状与加载方向试验结果

Tab. 6 Test results of tool shape and loading direction

组别	挤压头	破壳方向	核桃质量/g	壳包仁质量/g	总露仁质量/g	高露仁质量/g	破壳率/%	高露仁率/%
1	凹型挤压头	横径方向	1 001.24	61.96	540.37	500.92	93.81	92.70
2	凹型挤压头	随机方向	1 012.37	124.62	536.95	464.19	87.69	86.45
3	平型挤压头	横径方向	1 003.91	164.34	529.71	447.13	83.63	84.41
4	平型挤压头	随机方向	1 008.05	208.57	534.33	432.91	79.31	81.02

由表 6 可得，凹型挤压头通过增加挤压接触面积改善应力分布，有效降低了果仁机械损伤风险，使横径加载下高露仁率由 84.41% 提至 92.70%；同时视觉定向系统通过规避随机方向破壳，将破壳率由随机方向的 87.69% 提至 93.81%。该试验验证了深纹核桃定向破壳试验装置的有效性，满足核桃初加工破壳质量平衡性要求。

5 结论

（1）通过针对云南深纹核桃开展物理特性分析试验，确定横径为深纹核桃破壳最优施载方向；结合赫兹接触理论设计内凹角 20°、端面外径 24 mm 且表面带阵列式环形筋条的破壳挤压头结构，并通过梯度试验确定横径方向最佳破壳间距为 31.5 mm。

（2）在 YOLO v8n - Pose 模型中引入轻量化共享细节增强检测头（LSDECD），提升了模型对微小特征的表达能力。训练试验结果表明，改进模型目标检测平均精度均值（mAP50 - 95）达 83.4%，关键点检测平均精度均值达 99.5%，训练推理速度达 322.6 f/s。验证试验结果表明，实际工况帧率为 103.7 f/s，在保证检测精度的同时，具有较高实时性。

（3）通过提取核桃缝合线顶端凸点与底端凹点 2 个关键点像素坐标，计算关键点连线与水平坐标轴之间的夹角，并将角度信息转换为步进电机控制信号，实现破壳夹臂角度补偿，使破壳挤压头能够沿核桃横径方向进行定向挤压。深纹核桃破壳试验结果表明，当破壳间距为 31.5 mm 时，系统破壳率达到 93.81%，高露仁率达到 92.70%。与随机方向使用平型挤压头破壳相比，破壳率与高露仁率分别提高 14.50、11.68 个百分点，有效提升了深纹核桃壳仁分离质量。

参 考 文 献

[1] Ni Z J, Zhang Y G, Chen S X, et al. Exploration of walnut components and their association with health effects[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(19): 5113 - 5129.

[2] 朱惠斌，张文锴，曹科高，等. 云南山地核桃振动采摘机的设计与试验研究[J]. 农机化研究，2023，45(2)：130 - 139.
Zhu Huibin, Zhang Wenkai, Cao Kegao, et al. Design and experiment of vibration picking machine for mountain walnut in Yunnan[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(2): 130 - 139. (in Chinese)

[3] 张有林，原双进，王小纪，等. 基于中国核桃发展战略的核桃加工业的分析与思考[J]. 农业工程学报，2015，31(21)：1 - 8.
Zhang Youlin, Yuan Shuangjin, Wang Xiaoji, et al. Analysis and reflection on development strategy of walnut processing industry in China[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(21): 1 - 8. (in Chinese)

[4] 李丽霞，万水龙，陈祥浩，等. 基于图像分割的深纹核桃挤压破壳裂纹规律研究[J]. 农业机械学报，2026，57(8)：397 - 406.

Li Lixia, Wan Shuilong, Chen Xianghao, et al. Investigation into crack propagation laws in compression shell-breaking of deeply veined walnuts based on image segmentation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(8): 397 - 406. (in Chinese)

[5] 刘明政, 李长河, 张彦彬, 等. 柔性带差速挤压核桃脱壳性能试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 99 - 107.
Liu Mingzheng, Li Changhe, Zhang Yanbin, et al. Performance test of walnut shelling using flexible-belt and differential velocity extrusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 99 - 107. (in Chinese)

[6] 曹成茂, 李正, 罗坤, 等. 山核桃二次破壳取仁机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 128 - 135.
Cao Chengmao, Li Zheng, Luo Kun, et al. Design and experiment of secondary shell breaking machine for pecan[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 128 - 135. (in Chinese)

[7] Gharibzahedi S M T, Mousavi S M, Hamedi M, et al. Comparative analysis of new Persian walnut cultivars: nut/kernel geometrical, gravimetrical, frictional and mechanical attributes and kernel chemical composition[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 135: 202 - 209.

[8] 曹成茂, 蒋兰, 吴崇友, 等. 山核桃破壳机加载锤头设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 307 - 315.
Cao Chengmao, Jiang Lan, Wu Chongyou, et al. Design and test on hammerhead of pecan shell-breaking machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 307 - 315. (in Chinese)

[9] 张永成, 盖广鑫, 宗望远, 等. 基于 FDEM 的核桃挤压-剪切载荷下破碎机理与减损方法[J]. 农业机械学报, 2025, 56(3): 291 - 300.
Zhang Yongcheng, Gai Guangxin, Zong Wangyuan, et al. Crushing mechanism of walnut under extrusion - shear load based on FDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(3): 291 - 300. (in Chinese)

[10] 刘明政, 李长河, 曹成茂, 等. 核桃分级破壳取仁及壳仁分离关键技术与装置研究进展[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 294 - 310.
Liu Mingzheng, Li Changhe, Cao Chengmao, et al. Research progress of key technologies and devices for walnut grading, shell breaking, kernel extracting and shell-kernel separation[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(20): 294 - 310. (in Chinese)

[11] 李忠新, 刘奎, 杨莉玲, 等. 锥篮式核桃破壳装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊 1): 146 - 152.
Li Zhongxin, Liu Kui, Yang Liling, et al. Design and experiment of walnut-cracking device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(S1): 146 - 152. (in Chinese)

[12] Zhang H, Shen L, Lan H, et al. Mechanical properties and finite element analysis of walnut under different cracking parts [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(6): 81 - 88.

[13] 丁冉, 曹成茂, 詹超, 等. 仿生敲击式山核桃破壳机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3): 257 - 264.
Ding Ran, Cao Chengmao, Zhan Chao, et al. Design and experiment of bionic striking hickory nut shell breaking machine [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(3): 257 - 264. (in Chinese)

[14] 刘佳, 沈晓贺, 杨莉玲, 等. 核桃破壳技术与装备研究进展[J]. 食品与机械, 2023(9): 223 - 227,232.
Liu Jia, Shen Xiaohe, Yang Liling, et al. Research progress on walnut shell breaking technology and equipment[J]. Food & Machinery, 2023(9): 223 - 227,232. (in Chinese)

[15] 石明村, 刘明政, 李长河. 凸轮摇杆双向挤压核桃破壳装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 140 - 150.
Shi Mingcun, Liu Mingzheng, Li Changhe, et al. Design and experiment of cam-rocker bidirectional extrusion walnut shell-breaking device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 140 - 150. (in Chinese)

[16] Hussain S Z, Ammatullah B, Kanojia V, et al. Design and development of technology for walnut cracking[J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 55(12): 4973 - 4983.

[17] 刘海江, 王应彪, 罗思蓝, 等. 云南漾濞核桃定向破壳设备的设计与研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2020, 51(3): 487 - 494.
Liu Haijiang, Wang Yingbiao, Luo Silan, et al. Design and research on directional shell cracking equipment for Yangbi Yunnan walnut[J]. Journal of Shandong Agricultural University(Natural Science Edition), 2020, 51(3): 487 - 494. (in Chinese)

[18] 闫彬, 樊攀, 王美茸, 等. 基于改进 YOLO v5m 的采摘机器人苹果采摘方式实时识别[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 28 - 38,59.
Yan Bin, Fan Pan, Wang Meirong, et al. Real-time apple picking pattern recognition for picking robot based on improved YOLO v5m[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 28 - 38,59. (in Chinese)

[19] 刘安稳, 谢方平, 向阳, 等. 基于机器视觉的菠萝自动去眼方法与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(1): 80 - 89.
Liu Anwen, Xie Fangping, Xiang Yang, et al. Pineapple automatic eye removal method and experiment based on machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(1): 80 - 89. (in Chinese)

[20] Li L, He Z, Li K, et al. Object detection and spatial positioning of kiwifruits in a wide-field complex environment[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 223: 109102.

[21] Hou C, Zhang X, Tang Y, et al. Detection and localization of citrus fruit based on improved You Only Look Once v5s and binocular vision in the orchard[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 972445.

[22] Kang H, Chen C. Fruit detection, segmentation and 3D visualisation of environments in apple orchards[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 171: 105302.

[23] 唐涛, 叶秉良, 胡淼, 等. 面向莲蓬自动采摘的轻量级目标识别与精准定位方法[J]. 农业机械学报, 2026, 57(8): 13 - 22.
Tang Tao, Ye Bingliang, Hu Miao, et al. Lightweight target recognition and precise localization method for automated lotus seedpod harvesting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(8): 13 - 22. (in Chinese)

[24] 陈馨, 吴子炜, 周素茵, 等. 基于改进 YOLO v8n - pose 的巨峰葡萄采摘定位方法[J]. 华南农业大学学报, 2025, 47(1): 118 - 127.
Chen Xin, Wu Ziwei, Zhou Suyin, et al. Positioning method for Kyoho grape picking based on improved YOLO v8n - pose[J]. Journal of South China Agricultural University, 2025, 47(1): 118 - 127. (in Chinese)

[25] 尚志军. 基于机器视觉的枳壳自动定向系统研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.
Shang Zhijun. Research on automatic orientation system of *Fructus aurantii* based on machine vision[D]. Nanchang: Nanchang University, 2020. (in Chinese)

[26] Huang Z, Hou Y, Cao M, et al. Mechanisms of machine vision feature recognition and quality prediction models in intelligent production line for broiler carcasses[J]. Intelligent and Sustainable Manufacturing, 2025, 2(2): 10016.

[27] Jiang Y, Tang Y, Li W, et al. Determination method of core parameters for the mechanical classification simulation of thin-skinned walnuts[J]. Agriculture, 2022, 13(1): 104.

[28] 宛双林, 王应彪, 王周梅, 等. 基于振动的核桃姿态自适应定向运移方法及试验研究[J]. 中国油脂, 2025, 50(9): 144 - 152.
Wan Shuanglin, Wang Yingbiao, Wang Zhoumei, et al. Attitude adaptive orientation transport method and test study of walnut based on vibration[J]. China Oils and Fats, 2025, 50(9): 144 - 152. (in Chinese)

[29] Zhuo S, Bai H, Jiang L, et al. SCL - YOLO v11: a lightweight object detection network for low-illumination environments[J]. IEEE Access, 2025, 13: 47653 - 47662.

[30] 刘明政, 李长河, 张彦彬, 等. 柔性带剪切挤压核桃破壳机理分析与性能试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 266 - 273.
Liu Mingzheng, Li Changhe, Zhang Yanbin, et al. Shell crushing mechanism analysis and performance test of flexible-belt shearing extrusion for walnut[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 266 - 273. (in Chinese)

[31] Awad W M, Dalaq A S, Al-Handawi M B, et al. On the origins of toughness in *Orymbia calophylla* (Marri tree) nuts[J]. Advanced Science, 2026, 13: e15273.