

曾荣, 陈亚欣, 赵状状, 等. 莲藕回转式仿形去皮装置设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2025, 44(5): 241-248.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.05.024

莲藕回转式仿形去皮装置设计与试验

曾荣, 陈亚欣, 赵状状, 刘婉茹, 唐楠锐, 陈立明, 张国忠

华中农业大学工学院/农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070

摘要 针对莲藕去皮机械效果不佳且依赖人工的问题, 设计一种由夹持回转和往复式仿形切削机构组成的回转式仿形去皮装置。对该装置的关键部件及转速关系进行理论分析, 确定圆弧去皮刀刃口半径为7 mm、限深支撑块的形状为半椭圆柱体、刀臂摆杆长度为85 mm, 确定莲藕与步进电机丝杆转速比值范围为0.51~1.03; 对整机开展试验, 以鄂莲5号为对象, 以去皮均匀度、去皮损失率为试验指标, 以莲藕转速、步进电机转速、扭力弹簧线径为试验因素开展Box-Behnken响应面试验, 确定最优参数组合为莲藕转速108 r/min、步进电机转速74 r/min、扭力弹簧线径1.6 mm。在该条件下开展验证试验, 得到莲藕去净率 $\geq 88.75\%$, 去皮损失率 $\leq 12.36\%$ 。

关键词 莲藕; 仿形去皮; 去皮刀; 机械去皮

中图分类号 S226.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)05-0241-08

莲藕(*Nelumbo nucifera* Gaertn)具有食用价值和药用价值, 是中国栽培面积最大的水生蔬菜^[1-2]。以莲藕为原材料的加工产品品种丰富, 包括藕粉、藕片、藕元、藕汤等, 经济价值显著^[3]。莲藕去皮是莲藕加工的初始工序, 作业质量上要求去除干净、去皮损失少。莲藕外形呈不规则椭圆柱形, 表面存在深浅、宽度不一的不规则沟壑、凹痕, 致使莲藕机械去皮研发难度大, 迄今仍广泛依赖人工去皮。随着莲产业的快速发展, 高质量机械去皮技术与装备需求迫切。

果蔬去皮有多种形式^[4-5], 其中机械去皮具有安全、方便等优势。如张树华^[6]设计了一种马铃薯去皮机, 采用2个固定磨轮缓慢摩擦去除外部果皮, 去皮效率较高。杨嘉鹏等^[7]基于揉搓原理设计了1种马铃薯去皮装置, 去皮损失率为11.1%。王文杰等^[8]利用步进电机和无刷电机实现茯苓的夹持和去皮, 基于PLC开发自动控制系统, 实现茯苓自动化去皮, 工作效率较人工去皮提升31.2%。Mahawar等^[9]通过丝杆带动圆弧刀平行于物料旋转轴移动方式对橘和橙进行去皮, 去皮效率为60~90 kg/h。对于形状不规则物料, 为保证去皮深度一致, 通常需进行仿形设计。如郭细成等^[10]、吴有明等^[11]发明的芒果去皮机, 采用2把具有柔性仿形功能的刀具沿芒果轴向往

复移动完成去皮。俞国红等^[12]基于甘薯物理特征设计一款柔性自适应仿形甘薯去皮机, 通过调节气缸进给压力实现自动仿形, 工作效率可达360个/h。

上述方案均采用刀具与物料之间相对运动实现物料表皮的去除, 为限制去皮深度, 也开发了多种限深装置, 研究对象聚焦于马铃薯、茯苓、芒果、甘薯等物料, 对莲藕机械去皮的研究鲜有报道。为满足莲藕机械去皮去净率高、损失小、表面平整等性能要求, 针对莲藕外形特征, 基于回转式仿形去皮原理设计一种由夹持回转和往复式仿形切削机构组成的去皮装置, 对其开展结构设计以及性能试验, 以期对莲藕去皮机械研究设计提供参考。

1 材料与方法

1.1 莲藕物理参数

莲藕呈枝节状, 由5~7节藕段组成, 段与段之间有藕节, 每个藕段称为主藕体^[13]。以全国广泛种植品种鄂莲5号为对象, 采用统计测量方法, 对60支无损伤主藕体外形及横截面进行测量, 得出其长、宽、高尺寸范围分别为98.16~238.57、62.51~91.11、57.57~86.48 mm; 对莲藕横截面进行测量, 典型藕体截面轮廓近似为下部内凹的椭圆, 内凹宽度7~15

收稿日期: 2024-08-17

基金项目: 湖北省农机装备补短板核心技术应用攻关项目(HBSNYT202218); 国家特色蔬菜产业技术体系专项(CARS-24-D-02); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目(T201934)

曾荣, E-mail: zengrong@mail.hzau.edu.cn

通信作者: 张国忠, E-mail: zhanggz@mail.hzau.edu.cn

mm^[14]。沿截面中心径向测得的藕孔到表皮距离称为孔边距,最小为3 mm。典型主藕体外形及横截面如图1所示。

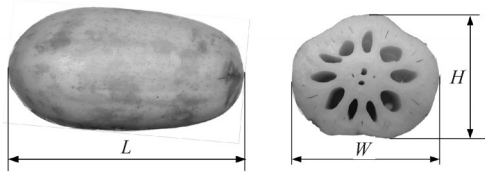
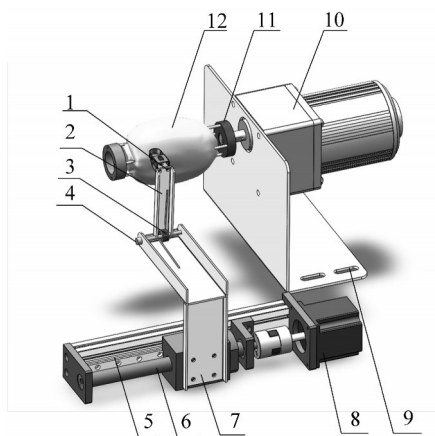


图1 主藕体外形及横截面尺寸测量

Fig.1 Measurement of main lotus root shape and cross section size

1.2 总体结构及关键部件

根据莲藕形状特征和去皮质量要求,基于回转切削原理,设计一种由夹持回转机构和往复式仿形切削机构组成的回转式仿形去皮装置,结构如图2所示。其中,夹持回转机构由固定夹持爪、调速电机等组成;往复式仿形切削机构由去皮刀、摆杆、扭力弹簧、固定销、刀架、滑轨、步进电机等组成。为实现仿形,去皮刀与刀臂摆杆、刀臂摆杆与刀架之间均采用扭力弹簧连接。



1. 去皮刀 Peeling knife; 2. 刀臂摆杆 Oscillating lever for peeling knives; 3. 扭力弹簧 Torsion spring; 4. 转动固定销 Fixed pin; 5. 滑轨 Slide rail; 6. 丝杆 Screw; 7. 刀架 Knife holder; 8. 步进电机 Stepper motor; 9. 电机固定架 Motor fixed bracket; 10. 调速电机 Alternating current motor; 11. 固定爪 Fixed claws; 12. 主藕体 The main part of lotus root.

图2 回转式仿形去皮装置

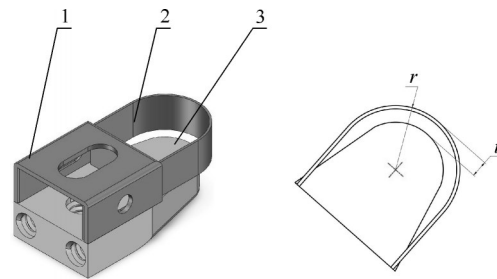
Fig.2 Matching peeling mechanism

回转式仿形去皮装置工作原理为:在夹持爪间夹紧主藕体(以下简称莲藕),电机带动其回转;去皮刀由丝杠机构驱动平行于藕体轴向移动,在扭力弹簧作用下实现自动仿形去皮。

关键部件主要包括去皮刀、限深支撑块、刀臂摆

杆和夹持机构。

1) 去皮刀。选用市场上常用的圆弧刀去皮刀,圆弧刀去皮刀由圆弧刀片、连接座、支撑限深块、连接螺钉等组成(图3)。根据前期测量统计得到的主藕体内凹宽度为7~15 mm,结合去净率高的设计要求,确定圆弧去皮刀刀口半径为7 mm;根据安装尺寸,确定刀体长度为30 mm。



1. 连接座 Connecting socket; 2. 圆弧刀片 Circular blades; 3. 限深支撑块 Depth-limiting support block; r 为圆弧刀片半径, mm; t 为去皮厚度, mm. r is the radius of the circular blade, mm; t is the peeling thickness, mm.

图3 圆弧去皮刀

Fig.3 Circular peeler

为避免过量切削,去皮刀去皮厚度应可调,考虑莲藕最小孔边距为3 mm,故设定理论去皮厚度 t_0 为2 mm,理论去皮宽度 S_0 按照式(1)确定:

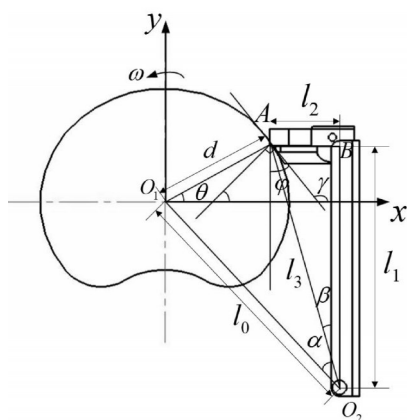
$$S_0 = 2\sqrt{r^2 + t_0^2} \quad (1)$$

式(1)中: S_0 为理论去皮宽度, mm; t_0 为理论去皮厚度, mm。由式(1)得理论去皮宽度为9.8 mm。

2) 刀臂摆杆。回转切削过程中,仿形能力对去皮质量产生直接影响。因此,参照本文“1.1 莲藕物理参数”测定的主藕体横截面尺寸,建立如图4所示去皮模型。去皮加工时,莲藕逆时针回转,为保证稳定去皮,去皮刀刀口应在 x 轴之上、莲藕顶部之下,假定莲藕回转中心 O_1 坐标固定,摆动中心 O_2 坐标可调,为保证刀具满足去皮要求,则刀具仿形摆杆摆动中心 O_2 与 O_1 间应满足一定几何关系,设 O_2 为 (x_0, y_0) , 则刀臂摆杆摆动中心 O_2 坐标应满足:

$$\begin{cases} l_{x_0} = |x_0| \\ l_{y_0} = |y_0| \\ |y_0| < |x_0| \\ \frac{H}{2} < |y_0| < H \\ \frac{K}{2} < |x_0| < \frac{K}{2} + l_2 \\ l_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: l_{x_0} 为摆动中心 O_2 横坐标的绝对值,



x_0 为摆动中心 O_2 横坐标, mm; y_0 为摆动中心 O_2 纵坐标, mm; l_0 为摆动中心 O_2 与莲藕回转中心 O_1 距离, mm; l_1 为刀具摆杆长度, mm; l_2 为去皮刀长度, mm; l_3 为摆杆摆动中心至刀具刃口接触点距离, mm; H 为莲藕高度, mm; K 为莲藕宽度, mm; φ 为刀具切入角, ($^\circ$); θ 为莲藕回转角度, ($^\circ$); α 为摆杆摆动最大角度, ($^\circ$); γ 为刃口切点切线与 x 轴正向夹角, ($^\circ$); β 为摆动中心与切入点的连线 O_2A 与摆杆 O_2B 夹角, ($^\circ$)。 x_0 is the horizontal coordinate of the swing center O_2 , mm; y_0 is the vertical coordinate of the swing center O_2 , mm; l_0 is the distance between the swing center O_2 and the rotation center O_1 of the lotus root, mm; l_1 is the length of the tool pendulum, mm; l_2 is the length of the peeling knife, mm; l_3 is the distance from the swing center of pendulum to the contact point of the cutting edge of the tool, mm; H is the height of the lotus root, mm; K is the width of the lotus root, mm; φ is the angle of the tool φ is the cutting angle of the tool, ($^\circ$); θ is the rotation angle of the lotus root, ($^\circ$); α is the maximum angle of swinging of the pendulum, ($^\circ$); γ is the angle between the tangent line of the cutting point of the blade and the x -axis, ($^\circ$); β is the angle between the line between the swinging center and the point of cutting, O_2A , and the angle of the pendulum, O_2B , ($^\circ$).

图4 主藕体去皮模型

Fig.4 Peeling model of main lotus root

mm; l_{y0} 为摆动中心 O_2 纵坐标的绝对值, mm。因此, l_1 应满足:

$$|y_0| < l_1 < |y_0| + \frac{H}{2} \quad (3)$$

根据鄂莲5号外形统计结果, 初选 l_{x0} 、 l_{y0} 分别为 65、60 mm, 故由此得出 l_0 为 88 mm, $60 < l_1 < 100$ mm, $19 < l_2 < 34$ mm, 综合选定 l_1 、 l_2 分别为 85、30 mm。

3) 限深支撑块。为限制去皮深度, 防止过量切削, 在去皮刀下设计限深支撑块。在去皮过程中, 刀片下部限深支撑块始终与莲藕外表皮接触, 起限制切深和支撑刀具的作用。考虑莲藕表面近似椭圆柱形, 为减少接触阻力、提升仿形敏感度, 确定限深支撑块为如图5所示半圆柱体。

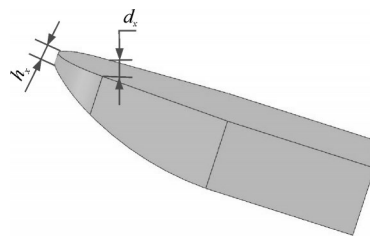


图5 限深支撑块

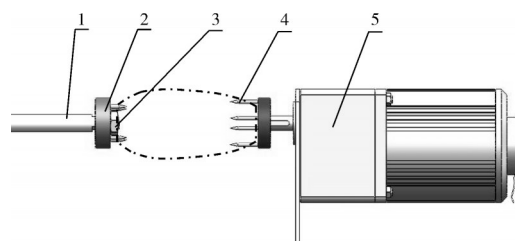
Fig.5 Depth-limited support block structure

考虑莲藕存在内凹面以及刀具尺寸不宜过大, 按照式(4)关系进行限深支撑结构尺寸设计:

$$\begin{cases} d_x < 2(r - t_0) \\ h_x < \frac{l_1}{15} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: d_x 为限深支撑块头部直径, mm; h_x 为限深支撑块高度, mm。根据结构设计, r 、 t_0 、 l_1 分别为 7、2、85 mm, 将上述参数值代入式(4)得出 d_x 、 h_x 分别为 10、6 mm。

4) 夹持机构。夹持机构由气动推杆、旋转盘、固定螺母、紧定插钉、调速电机等组成, 莲藕在气动推杆的作用下被2个夹持爪夹紧(图6)。莲藕去除藕节后的小端直径范围约为 40~50 mm, 因此, 设置旋转盘直径为 40 mm, 插钉距离为 35 mm。



1. 气动推杆 Pneumatic pusher; 2. 旋转盘 Rotating disk; 3. 固定螺母 Nut; 4. 紧定插钉 Tight pins; 5. 调速电机 Alternating current motor.

图6 莲藕夹持机构

Fig.6 Lotus root holding mechanism

1.3 工作参数范围确定

回转式仿形去皮机工作参数主要包括入切角和丝杆与莲藕转速比。

1) 入切角。依据图4所示去皮模型, 将莲藕外形近似为凸轮轮廓, 刀具始终与莲藕外轮廓相接触, 根据凸轮反转法^[15], 假设莲藕固定不动, 刀具绕莲藕回转中心旋转, 同时随刀臂摆杆做往复运动。设 φ 为入切点 A 与莲藕回转中心 O_1 间连线 AO_1 与 x 轴所成锐角, 第一象限至第四象限 φ 为:

$$\psi = \begin{cases} \theta (0 < \theta < \frac{\pi}{2}) \\ \pi - \theta (\frac{\pi}{2} < \theta < \pi) \\ \theta - \pi (\pi < \theta < \frac{3\pi}{2}) \\ 2\pi - \theta (\frac{3\pi}{2} < \theta < 2\pi) \end{cases} \quad (5)$$

$$\cos \angle O_1 A O_2 = \frac{l_3^2 + d^2 - l_0^2}{2l_3 d} \quad (6)$$

$$\varphi = \beta + \gamma + \angle O_1 A O_2 - \psi \quad (7)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{l_2}{l_1}\right) + \arctan\left(-\frac{b^2 x}{a^2 x}\right) - \arccos\left(\frac{l_3^2 + d^2 - l_0^2}{2l_3 d}\right) - \psi \quad (8)$$

由上述关系可知,入切角 φ 与莲藕外形尺寸 l_0 、 l_1 、 l_2 、 l_3 、 d 等有密切关系,且入切角在切削去皮过程中,随莲藕回转变化的。在进行去皮作业时,刀具入切角 φ 一般为 $20^\circ \sim 40^\circ$ ^[16-17],依据式(5)~(8)计算,本研究中入切角变化范围为 $31.87^\circ \sim 36.81^\circ$ 时,满足去皮要求。

2)丝杆与莲藕转速比。建立刀具轴向移动去皮模型如图7所示,图7中黑色区域为莲藕表皮上1次切削部分,灰色区域为莲藕正在切削部分。图7中, τ' 为圆弧刀具刃口与莲藕表面接触点在长度方向上的切线; φ_i 为切线与刀具移动方向的夹角,范围为 $0^\circ \sim 30^\circ$ 。

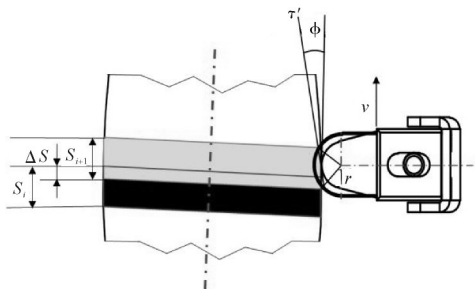


图7 刀具轴向移动去皮示意图

Fig.7 Schematic diagram of tool axial movement for peeling

由几何关系关系得:

$$\begin{cases} S_i = S_0 \cos \varphi_i \\ S_0 = 2\sqrt{2rt - t^2} \\ \Delta S_i = S_{i+1} - S_i \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中: S_i 为第 i 次去皮宽度,mm; S_{i+1} 为当前切削宽度,mm; S_0 为理论去皮宽度,mm; ΔS_i 为相邻2次刀具去皮重叠宽度,mm。为实现最佳去皮效果,去皮重叠宽度 ΔS_i 不宜过大,因此,去皮宽度 ΔS_i 需满足式(10):

$$\begin{cases} 0 \leq \Delta S_i \leq 0.4S_0 \\ \Delta \bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} (S_i) - N_2 p}{N_1 - 1} \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中: $\Delta \bar{S}$ 为整体去皮重叠宽度平均值,mm; p 为丝杆导程,mm; N_1 为莲藕去皮完成时莲藕转动圈数; N_2 为莲藕去皮完成时丝杆转动圈数。

由式(9)、(10)可推导式(11),其中 $\cos(\varphi_i)$ 的取值范围为 $\sqrt{3}/2 \sim 1$,取其最小值四舍五入后为0.9。

$$\Delta \bar{S} \approx \frac{0.9N_1 S_0 - N_2 p}{N_1 - 1} \quad (11)$$

分别取圆弧刀具圆弧半径 r 为7 mm,去皮厚度 t 为1~3 mm,由式(9)可得理论去皮宽度 S_0 为7.21~11.49 mm。由此得出转速比 i_{21} 应满足:

$$\begin{cases} i_{21} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{n_2}{n_1} \\ \frac{S_0}{p} (0.5 + \frac{0.4}{N_1}) \leq i_{21} \leq 0.9 \frac{S_0}{p} \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中: n_1 和 n_2 分别为莲藕和丝杠转速, i_{21} 为两者转速比值。根据结构设计, S_0 取10 mm; p 为丝杆导程,为10 mm;圈数 N_1 取10~40,综上分析得出布置刀具的理论转速比范围为:

$$0.51 \leq i_{21} \leq 1.03 \quad (13)$$

1.4 试验方法

1)台架试验。通过台架试验确定莲藕回转式仿形去皮装置的莲藕转速、丝杆转速、扭力弹簧线径最佳参数组合,并在该组合下开展工作性能验证试验。回转式仿形去皮台架试验装置如图8所示,夹持爪夹紧莲藕两端,电机驱动莲藕回转,丝杠机构驱动刀具沿藕体轴向移动,刀架通过扭力弹簧与机架连接,围绕摆动中心摆动,使刀具沿藕体轴向移动的同时始终紧贴莲藕表面进行仿形去皮。选取鄂莲5号莲藕为试验对象,保证每组试验莲藕外径尺寸直径差控制在 ± 5 mm以内,为保证夹持效果,对垂直莲藕轴向两端进行削平处理^[18]。

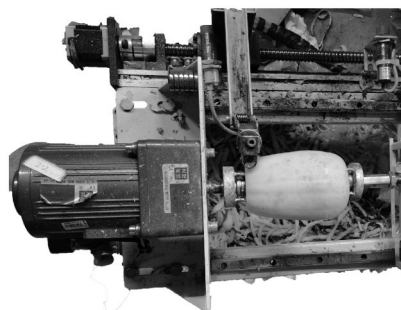


图8 去皮台架试验

Fig.8 Bench test of peeling lotus root contour

结合前期单因素预试验,确定影响去皮性能的 3 个主要因素为:莲藕转速 n_1 、丝杆转速 n_2 、扭簧线径 r_0 ,根据单因素预试验结果^[19],选取去皮效果较好的水平开展 Box-Behnken 试验(简称 BBD)。每个因素选取 3 个水平,试验因素及水平如表 1 所示。

表 1 试验因素水平表
Table 1 Test factor level

水平 Level	A 莲藕转速/(r/min) Lotus root speed	B 丝杆转速/ (r/min) Screw speed	C 弹簧线径/ mm Spring diameter
−1	70	50	1.4
0	100	70	1.6
1	130	90	1.8

2)评价指标。以去皮损失率、去皮厚度均匀性为评价指标,对去皮性能进行评价并对工作参数进行优化。去皮损失率按照式(14)进行计算^[11]。

$$Q_s=\frac{G_0-G_1}{G_0}\times 100\%$$
 (14)

式(14)中: Q_s 为去皮损失率,%; G_0 为去皮前莲藕总质量,kg; G_1 为去皮后莲藕总质量,kg。

定义厚度差 Δt 如式(15)所示。

$$\Delta t=|t-t_0|$$
 (15)

式(15)中: Δt 为去皮厚度差,mm; t 为藕皮厚,mm; t_0 为理论去皮厚度,mm。

为量化去皮厚度均匀度,对不同厚度差按区间进行划分,设定厚度差为 0~0.2、0.21~0.40、0.41~0.60 和大于 0.6 mm 时其分值分别为 3、2、1、0。去皮厚度均匀度按照如下方式确定^[20]:调节刀具去皮厚度 t_0 范围为 1.5~2.5 mm,随机选取莲藕上刀具刨削出的长条连续藕皮,沿其长度方向随机截取 18 mm 小段,随后再将其长度方向平均分成 6 段,每段长约 3 mm 测量其厚度 t ,按照表 2 计算其总分值 Y ,满分为 18 分, Y 越大,表明均匀性越好。

2 结果与分析

2.1 台架试验结果

试验方案及结果如表 2 所示。每组试验重复 3 次,取平均值。

1)去皮厚度均匀性。去皮厚度均匀性预测模型和方差分析结果分别如公式(16)和表 3 所示。此模型 $P<0.001$,有统计学意义,显著性大小依次为莲藕转速、弹簧线径、丝杆转速,失拟项 $P>0.05$,不显著(表 3),试验中未考虑的因素对试验结果影响小,该模型可作为莲藕去皮厚度均匀性的预测模型。

表 2 台架试验方案与结果

Table 2 Bench test scheme and results

序号 No	莲藕转速/ (r/min) Lotus root rotation speed	丝杆转速/ (r/min) Rotating speed of screw	弹簧线径/ mm Spring diameter	均匀度 (分值) Uniformity (value)	损失 率/% Loss rate
1	100	70	1.6	18	9.81
2	70	70	1.8	9	12.36
3	100	90	1.8	11	15.63
4	100	70	1.6	15	12.33
5	100	50	1.8	13	14.59
6	130	70	1.8	13	18.18
7	130	50	1.6	9	16.17
8	70	50	1.6	10	11.50
9	100	70	1.6	16	11.29
10	70	90	1.6	8	7.56
11	70	70	1.4	8	5.32
12	100	70	1.6	17	9.93
13	130	70	1.4	10	8.60
14	100	90	1.4	11	4.69
15	130	90	1.6	15	14.23
16	100	50	1.4	9	10.94
17	100	70	1.6	16	12.16

表 3 去皮厚度均匀性方差分析

Table 3 Analysis of variance of test results

来源 Source	平方和 Quadratic sum	自由度 Degree of freedom	均方 Mean Square	F	P
模型 Model	173.86	9	19.32	18.78	0.000 4
A—A	18.00	1	18.00	17.50	0.004 1
B—B	2.00	1	2.00	1.94	0.205 8
C—C	8.00	1	8.00	7.78	0.027 0
AB	16.00	1	16.00	15.56	0.005 6
AC	1.00	1	1.00	0.97	0.357 0
BC	4.00	1	4.00	3.89	0.089 2
A ²	50.12	1	50.12	48.72	0.000 2
B ²	25.27	1	25.27	24.57	0.001 6
C ²	36.64	1	36.64	35.62	0.000 6
残差 Residual error	7.20	7	1.03		
失拟项 Misfit term	2.00	3	0.666 7	0.512 8	0.695 0
误差 Error	5.20	4	1.30		
总和 Sum	181.06	16			

$$Y=16.40+1.50A+0.50B+1.00C+2.00AB+0.50AC-1.00BC-3.45A^2-2.45B^2-2.95C^2$$
 (16)

为进一步探究各因素间交互作用及与响应值的关系,运用 Design-Export 软件分析得到该模型的响

应曲面,如图9所示。在参数设计范围内,3个因素各自固定时,莲藕去皮均匀度随其余2因素交互作用的增加,先增加后减小。主要原因是当莲藕转速较低时,莲藕去皮切削速度较低,去皮阻力较大;当扭力弹簧线径较小时,仿形力较小,导致去皮刀对莲藕表面贴合度差,出现去皮太薄现象。当扭力弹簧线径较大时,仿形力较大,致去皮刀切入莲藕表皮过深,且由于莲藕表面不平整,导致出现去皮不均匀、去皮后莲藕表面不平整现象严重。基于响应曲面分析各因素交互作用对莲藕去皮厚度均匀性的影响,得出莲藕转速 108 r/min、丝杠转速 74 r/min、扭力弹簧线

径 1.6 mm 时,莲藕仿形去皮均匀度分值最高,预测为 16.7,均匀度较好,满足设计要求。

2) 去皮损失率。去皮损失率预测模型及方差分析结果分别见公式(17)和表4所示。由表4可知,此模型 $P<0.001$,有统计学意义,显著性大小依次为弹簧线径、莲藕转速、丝杠转速,失拟项 $P>0.05$,不显著,试验中未考虑的因素对试验结果影响小,该模型可作为莲藕去皮损失率预测模型。

表 4 去皮损失率方差分析结果

Table 4 Peel loss rate test results of variance analysis

来源 Source	平方和 Quadratic sum	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	<i>F</i>	<i>P</i>
模型 Model	209.63	9	23.29	23.62	0.000 2**
A—A	52.22	1	52.22	52.95	0.000 2**
B—B	15.37	1	15.37	15.59	0.005 5**
C—C	121.76	1	121.76	123.45	<0.000 1**
AB	1.00	1	1.00	1.01	0.347 5
AC	1.61	1	1.61	1.64	0.241 7
BC	13.29	1	13.29	13.47	0.008 0**
A ²	0.88	1	0.88	0.89	0.376 7
B ²	2.72	1	2.72	2.76	0.140 5
C ²	0.84	1	0.84	0.85	0.387 7
残差 Residual error	6.90	7	0.99		
失拟项 Misfit term	1.20	3	0.399 5	0.280 1	0.838 0
误差 Error	5.71	4	1.43		
总和 Sum	216.53	16			

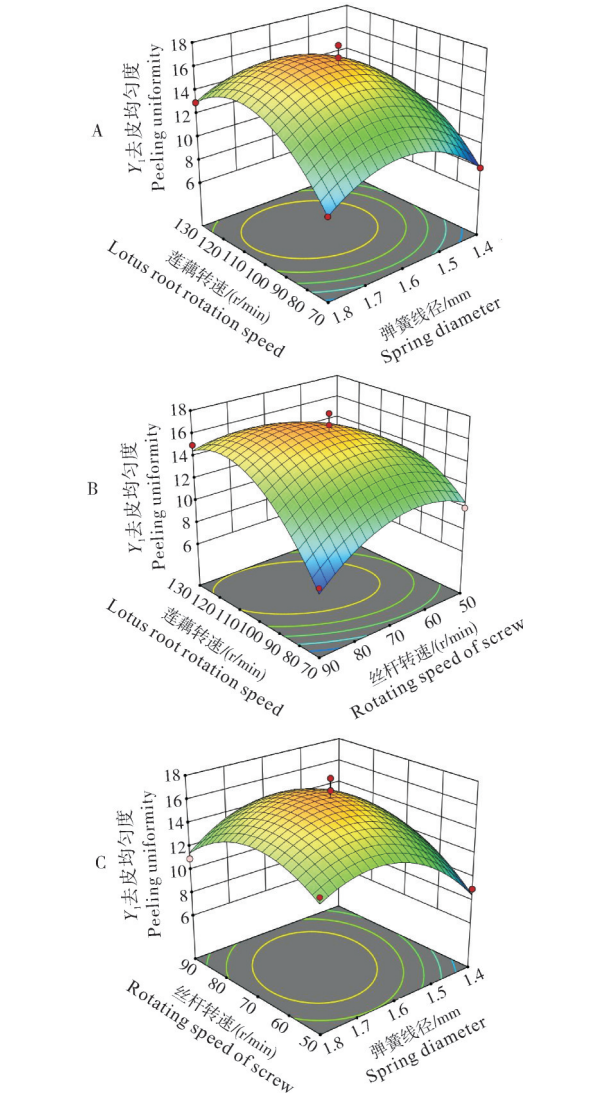
$$Y_1=11.10+2.56A-1.39B+3.90C+0.50AB+0.635AC-1.82BC+0.457A^2+0.804B^2-0.446C^2$$

(17)

结合去皮均匀性方差分析得出的最优参数,代入去皮损失率预测模型式(17),得出去皮损失率为 11.6%,满足设计要求。

2.2 最佳参数验证试验

根据 BBD 试验得出的最佳参数组合,开展验证试验。设定莲藕转速 108 r/min、丝杠转速 74 r/min、扭力弹簧线径 1.6 mm,以去节、洗净后的外径尺寸为 70~75 mm 莲藕进行去皮试验,去皮效果如图 10 所示,试验结果如表 5 所示。结果显示,莲藕去净率≥



A: 丝杠转速 70 r/min Rotating speed of screw 70 r/min; B: 弹簧线径 1.6 mm Spring diameter 1.6 mm; C: 莲藕转速 100 r/min Lotus root rotation speed 100 r/min.

图 9 交互因素对去皮均匀度影响

Fig.9 Influence of interaction factors on the peeling uniformity

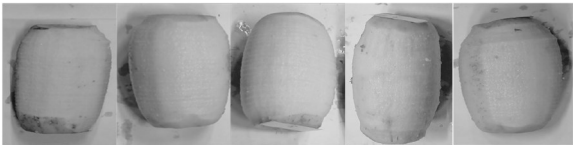


图 10 最佳参数莲藕去皮效果

Fig.10 Optimal parameters peeling effect of lotus root

表 5 最佳参数验证试验结果
Table 5 Best parameter verification test results

编号 No.	时 间/s Time	G_0 / g	G_1 / g	S_z / mm ²	S_L / mm ²	Q_1 / %	Q_s / %	均匀度 (分值) Uniformity(value)
1	16	300	263	28 040	1 703	93.93	12.33	16
2	16	296	260	23 440	2 171	90.74	12.16	17
3	14	265	239	22 376	2 200	90.17	9.81	18
4	14	272	245	21 557	1 263	94.14	9.93	16
5	15	275	241	22 993	2 586	88.75	12.36	17

88.75%、去皮损失率≤12.36%、去皮均匀度≥16分，去皮最佳工作参数满足设计要求。

3 讨 论

本研究设计了一种莲藕回转式仿形去皮装置，由夹持回转机构和往复式仿形切削机构组成，确定了其关键部件结构和工作参数。建立去皮厚度均匀度评价方法，并以其为标准，结合损失率指标，以莲藕转速、丝杠转速（刀具移动速度）、扭力弹簧线径为因素，设计了三因素三水平 Box-Behnken 响应面试验，结果表明，莲藕转速 108 r/min、丝杠转速 74 r/min、扭力弹簧线径 1.6 mm，莲藕仿形去皮均匀度分值最高，预测为 16.7。最佳参数下的去皮性能验证试验结果表明，去皮均匀度为 16.8、表皮去净率≥88.75%、去皮损失率≤12.36%。

本研究设计的莲藕回转式仿形去皮装置对莲藕凹凸表面具有自适应能力，可实现莲藕仿形去皮，去皮损失率和去皮效率优于人工去皮。但对尺寸过大或过小的莲藕，设计的装置存在夹持固定稳定性不足、去净率和去皮损失率矛盾等问题，后续需结合机器视觉等手段突破机械自适应的局限，进一步提高表皮去净率和降低去皮损失率。

参考文献 References

[1] FU Y R, LIU F L, LI S, et al. Genetic diversity of the wild Asian lotus (*Nelumbo nucifera*) from Northern China[J]. Horticultural plant journal, 2021, 7(5): 488-500.

[2] 程婷婷, 惠小涵, 尚欣欣, 等. 10个产地莲藕营养成分分析与品质综合评价[J]. 食品工业科技, 2021, 42(8): 320-325. CHENG T T, HUI X H, SHANG X X, et al. Nutrient composition analysis and quality comprehensive evaluation of lotus root in 10 producing areas[J]. Science and technology of food industry, 2021, 42(8): 320-325 (in Chinese with English abstract).

[3] 汪薇, 李晓, 杨宏, 等. 超高压处理对鲜切莲藕品质及其贮藏

性的影响[J]. 华中农业大学学报, 2016, 35(2): 101-107. WANG W, LI X, YANG H, et al. Effects of ultra high hydrostatic treatment on the quality of fresh-cut lotus roots during storage[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2016, 35(2): 101-107 (in Chinese with English abstract).

[4] 梁方, 马丽筠, 郭洲, 等. 荸荠去皮机设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(4): 163-168. LIANG F, MA L J, GUO Z, et al. Design and experiment of water chestnut peeler[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(4): 163-168 (in Chinese with English abstract).

[5] 王琛, 陈红, 田皓予, 等. 蒸汽处理的宽皮柑橘温度场分布及传热过程分析[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(2): 251-258. WAN C, CHEN H, TIAN H Y, et al. Temperature field distribution and heat transfer process of steam blanched *Citrus reticulata* Blanco[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42(2): 251-258 (in Chinese with English abstract).

[6] 张树华. 土豆自动去皮机: CN202320392456.1[P]. 2023-09-15. ZHANG S H. Potato automatic peeling machine: CN202320392456.1[P]. 2023-09-15 (in Chinese).

[7] 杨嘉鹏, 王庆惠, 闫圣坤, 等. 揉搓式马铃薯脱皮装置设计及试验研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(11): 100-103. YANG J P, WANG Q H, YAN S K, et al. Design and test of the rub peeling machine for potato[J]. Food & machinery, 2017, 33(11): 100-103 (in Chinese with English abstract).

[8] 王文杰, 郑志安, 吴敏, 等. 基于 PLC 的茯苓自动去皮机控制系统设计[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(9): 88-94. WANG W J, ZHENG Z A, WU M, et al. Design of *Poria cocos* automatic peeling machine control system based on PLC[J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2022, 43(9): 88-94 (in Chinese with English abstract).

[9] MAHAWAR M K, JALGAONKAR K, BIBWE B. Development of composite mechanical peeler cum juice extractor for kinnow and sweet orange[J]. Journal of food science and technology, 2020, 57(12): 4355-4363.

[10] 郭细成, 刘天赐, 颜志成. 一种适用于多芒果自动化削皮机: CN111869896A[P]. 2020-11-03. GUO X C, LIU T C, YAN Z C. An automatic peeling machine suitable for multi mangoes: CN111869896A[P]. 2020-11-03 (in Chinese).

[11] 吴有明, 莫名韶. 一种芒果削皮机的设计[J]. 装备制造技术, 2018(9): 57-59. WU Y M, MO M S. Design of a mango peeling machine[J]. Equipment manufacturing technology, 2018(9): 57-59 (in Chinese with English abstract).

[12] 俞国红, 郑航, 薛向磊. 自适应仿形甘薯削皮机优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 135-142. YU G H, ZHENG H, XUE X L. Optimization design and experiment of auto-adaptive profiling sweet potato peeler[J]. Transactions of the CSAM, 2021, 52(3): 135-142 (in Chinese with English abstract).

[13] 焦俊, 张国忠, 杜俊, 等. 莲藕主藕体弯曲破坏离散元仿真分析[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(5): 217-225. JIAO J, ZHANG G Z, DU J, et al. Discrete element simulation of bend-

- ing failure of main lotus root[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(5): 217-225 (in Chinese with English abstract).
- [14] 陈亚欣, 曾荣, 陈龙, 等. 莲藕表皮力学特性试验研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2024, 59(1): 304-312. CHEN Y X, ZENG R, CHEN L, et al. Experiment on the mechanical properties of the epidermis of the lotus root[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2024, 59(1): 304-312 (in Chinese with English abstract).
- [15] 蒋兰, 曹成茂, 谢承健, 等. 山核桃破壳机敲击臂凸轮机构的设计与试验[J]. 机械设计, 2018, 35(6): 54-59. JIANG L, CAO C M, XIE C J, et al. Design and test on cam mechanism of striking-arm for pecan shell breaker[J]. Journal of machine design, 2018, 35(6): 54-59 (in Chinese).
- [16] 张喜瑞, 曹超, 张丽娜, 等. 仿形进阶式天然橡胶自动割胶机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 99-108. ZHANG X R, CAO C, ZHANG L N, et al. Design and test of profiling progressive natural rubber automatic tapping machine[J]. Transactions of the CSAM, 2022, 53(4): 99-108 (in Chinese with English abstract).
- [17] 牛乃龙, 史建新. 哈密瓜削皮机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2014, 36(10): 150-153. NIU N L, SHI J X. Design and experimental research of Hami melon peeler[J]. Journal of agricultural mechanization research, 2014, 36(10): 150-153 (in Chinese).
- [18] 张国忠, 陈立明, 刘浩蓬, 等. 旋刀式荸荠芽根同步切除装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(13): 10-19. ZHANG G Z, CHEN L M, LIU H P, et al. Design and experiment of the rotary blade type synchronous cutting device for water chestnut buds and roots[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(13): 10-19 (in Chinese with English abstract).
- [19] 陈亚欣. 莲藕仿形去皮机设计与试验研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023. CHEN Y X. Design and experimental research of peeling machine for imitating contour of lotus root[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023 (in Chinese with English abstract).
- [20] 龚晓茜, 王国强, 刘化君. 双刀型哈密瓜削皮机的改进与回归试验[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(8): 115-120. GONG X Q, WANG G Q, LIU H J. Improvement and regression test of double knife type Hami melon peeler[J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2021, 42(8): 115-120 (in Chinese with English abstract).

Design and testing of a rotary contour peeling device for roots of lotus

ZENG Rong, CHEN Yaxin, ZHAO Zhuangzhuang, LIU Wanru,
TANG Nanrui, CHEN Liming, ZHANG Guozhong

College of Engineering/Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Agricultural Equipment, Middle and Lower Yangtze River, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract A rotary contour peeling device consisting of a clamping rotary and reciprocating contour cutting was designed to solve the problem of ineffective mechanical peeling and the reliance on manual labor in peeling the roots of lotus. A theoretical analysis was conducted on the key components of the device and their relationship with the rotary speed. The radius of the arc peeling blade edge, the shape of the depth-limited support block, the length of the cutter arm pendulum, and the ratio of the rotary speed of the roots of lotus to the screw of the stepper motor was determined to be 7 mm, a semi-ellipsoidal cylinder, 85 mm and ranged from 0.51 to 1.03, respectively. Elan No. 5 was used to conduct a Box-Behnken response surface with the uniformity of peeling and the loss rate of peeling as indexes and the rotary speed of lotus root and stepper motor, and the diameter of torsion spring as factors. The optimal combination of parameters was determined to be a rotary speed of lotus root of 108 r/min, a rotary speed of stepper motor of 74 r/min, and a diameter of torsion spring of 1.6 mm. A verification experiment was conducted under these conditions, resulting in a removal rate of lotus root of $\geq 88.75\%$ and a loss rate of peeling of $\leq 12.36\%$. It will provide a reference for improving the design of peeling machinery for roots of lotus.

Keywords roots of lotus; contour peeling; peeling blade; mechanical peeling

(责任编辑:陆文昌)