

自适应仿形甘薯削皮机优化设计与试验

俞国红 郑航 薛向磊

(浙江省农业科学院农业装备研究所, 杭州 310021)

摘要: 针对甘薯人工削皮劳动强度大、效率低,传统去皮方式污染严重等问题,基于甘薯的物理特征,设计了一种柔性自适应仿形甘薯削皮机。为确保甘薯削皮厚度的一致性与削皮作业的稳定性,首先对甘薯削皮过程进行理论分析,确定了影响仿形削皮性能的关键部件结构参数及取值范围,以仿形限位球半径、仿形力、电缸与卡爪转速比为试验因素,以甘薯削皮厚度均匀性为响应值,利用 Design-Expert 8.0.6 软件采用 BBD 法设计三因素三水平试验,建立了各因素与甘薯削皮厚度均匀性的回归数学模型,分析了影响削皮性能的主要原因。结果表明,各因素对甘薯削皮厚度均匀性影响的主次顺序为:仿形力、仿形限位球半径、电缸与卡爪转速比;最佳参数组合为仿形力 68.1 N、仿形限位球半径 28.1 mm、电缸与卡爪转速比 0.95。甘薯削皮性能验证试验表明,在优化后的工作参数下,该甘薯削皮机削皮效果较好,平均每个甘薯削皮时间为 10 s,工作效率达 360 个/h,满足甘薯削皮的工业化加工需求。

关键词: 甘薯; 削皮; 自适应仿形; 响应曲面法; 试验

中图分类号: S226.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)03-0135-08 OSID: 

Optimization Design and Experiment of Auto-adaptive Profiling Sweet Potato Peeler

YU Guohong ZHENG Hang XUE Xianglei

(Institute of Agricultural Equipment, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China)

Abstract: Aiming at the problems of high intensity and low efficiency of manual peeling of sweet potato, a technological scheme for adaptive cutter mechanism peeling of sweet potato was proposed based on the analysis of the shape characteristic of sweet potato. To ensure the consistency of sweet potato cutting thickness and the stability of peeling operation, firstly, a theoretical analysis of the sweet potato peeling process was carried out, and the structural parameters and value ranges of key components that affected the peeling performance were determined. For further study of the improved working performance of mechanism peeling for sweet potato, the Box – Behnken experimental design with three factors and three levels was performed, parameters such as radius of profiling ball, profiling force and rotational speed ratio of electric cylinder and jaw were selected as independent variables, which would influence the thickness uniformity of sweet potato peeling. The mathematical model was established, and the main reasons that affected peeling performance were analyzed as well. The test results showed that effects orders of three parameters on the sweet potato obvious rate from primary to secondary were as follows: profiling force, roller ball size, profiling force and rotational speed ratio of electric cylinder and jaw. The optimal working parameters were forward profiling force of 68.1 N and radius of profiling ball of 28.1 mm and rotational speed ratio of electric cylinder and jaw of 0.95. Confirmatory tests showed that the sweet potato peeling machine had a better peeling effect, the average peeling time of single sweet potato was 10 s, the working efficiency was 360 pieces/h, which can meet the design requirements of the sweet potato mechanical peeling with the optimized working parameters.

Key words: sweet potato; peeling; auto-adaptive profiling; response surface methodology; experiment

0 引言

我国是世界上最大的甘薯生产国,据联合国粮食及农业组织 (FAO) 相关数据显示,我国甘薯产量占世界总产量的 67%,甘薯种植单产是世界甘薯平均单产的 1.7 倍^[1-2]。去皮是甘薯深加工的必要环节,国内外甘薯去皮一般采取传统的人工去皮方式,其劳动强度大、去皮效率低、成本高,甘薯去皮成为产业链条最薄弱的环节。因此,研发一种高效的甘薯去皮机械显得尤为重要。

国内外学者针对果蔬类去皮进行了一系列研究^[3-6],主要包括化学去皮、蒸汽去皮、机械去皮、超声波与酶制剂去皮^[7-10]等方式,其中根块类果蔬以机械去皮为主。文献[11-12]设计了一种马铃薯、红薯清洗脱皮机,该机在清洗槽中安装一根带有搅拌杆的长轴,利用轴上搅拌杆的螺纹进行清洗脱皮。文献[13-15]针对地下茎块类农作物设计了一种滚筒式茎块类农作物清洗脱皮机,该机通过内筒螺旋叶片与螺旋叶片轴转向相反、形成剪切力,在内筒壁的砂轮以及水的作用下,对农作物进行清洗脱皮处理。高增法^[16]研发的芋头去皮机采用六角形滚筒,利用卧式离心摩擦技术对芋头去皮。上述均采用摩擦去皮方式,在去皮过程产生了大量的废液,造成了环境污染,因此并未得到广泛应用。文献[17-18]为甘蔗榨汁设计了一种甘蔗去皮机,通过 PLC 控制进给机构结合特殊刀具可实现甘蔗皮的自适应切削。吴有明等^[19]设计了一种自动芒果削皮机,该机采用传送带送料、柔性滚动装置进行夹紧以及带弹性杆的切削刀具进行去皮切削。田元^[20]通过分析胡萝卜切削工艺,设计了一款胡萝卜全自动削皮机,并对切削工艺参数和切削装置结构进行了优化设计,提高了切削效率,并降低了削皮损耗。上述切削去皮方式果蔬损失率低,切削工艺对环境无污染,但对于不规则物料,削皮仿形要求较高。

基于以上研究现状,本文基于甘薯的物理特性,设计一种柔性自适应仿形削刀机构,对甘薯削皮过程进行理论分析,并确定关键部件结构参数及取值范围,通过试验确定最佳参数组合,优化甘薯削皮效果,以满足设计要求。

1 结构组成与工作原理

1.1 设计要求

甘薯机削皮是利用削皮刀作用甘薯表皮,均匀地削除甘薯外表皮,根据甘薯后期加工要求及甘薯表皮平整度情况,设定削皮厚度为 2~3 mm,要求甘

薯削皮完整度达到 90% 以上。

1.2 工作原理

甘薯削皮机采用电机驱动,通过齿轮啮合、丝杆滑块及气缸传动控制甘薯削皮过程。主要由机架、回转工作台、转座装置、削皮机构、抬升机构以及上、下切刀装置等组成,如图 1 所示。

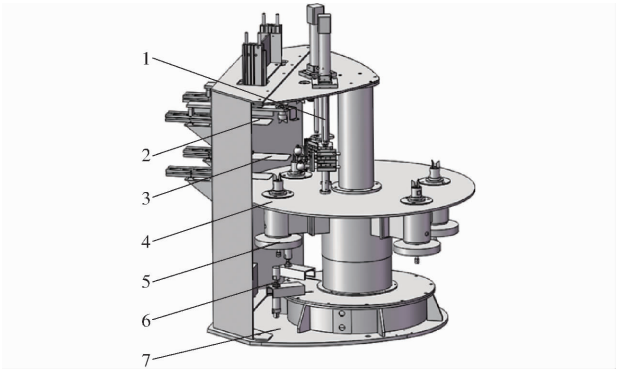


图 1 自适应仿形式甘薯削皮机结构简图

Fig. 1 Mechanism diagram of auto-adaptive profiling sweet potato peeler

1. 削皮机构 2. 上切刀 3. 下切刀 4. 回转工作台 5. 转座装置 6. 抬升机构 7. 机架

甘薯削皮机工作时,由人工将待削甘薯竖直插入转座装置的卡爪上,安装在机架的步进电机作为动力输出,通过齿轮啮合带动回转工作台转动,转座装置下方的齿轮与安装在机架槽钢侧面电动机带动的小齿轮啮合,配合上切刀的卡爪固定住甘薯的上端,使转座装置带动甘薯产生旋转运动;削皮机构的削皮气缸推动仿形刀具紧贴甘薯表皮,并配合丝杆滑块带动削皮机构上下运动开始削皮动作,根据甘薯的表皮形状调节气缸的进给压力,从而实现自动仿形;完成削皮后的甘薯以及削落甘薯皮掉落在回转工作台板上,通过安装在台板上的挡料块进行收集和集中处理;完成甘薯端部切除后,步进电机转动,通过齿轮啮合,将整个回转工作台运行 180°后,依次进行夹持、削皮以及去头等相应的工序操作。具体工作流程如图 2 所示。

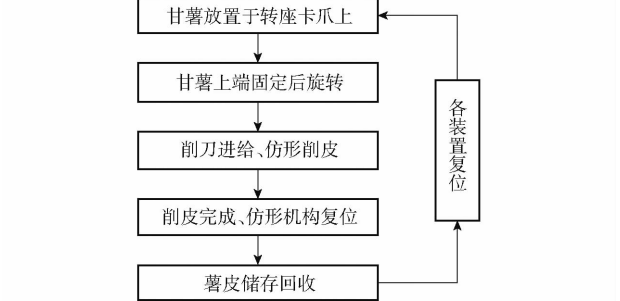


图 2 自适应仿形式甘薯削皮机工作流程图

Fig. 2 Auto-adaptive profiling sweet potato peeler working chart

2 自适应仿形机构设计

2.1 甘薯主要物理参数

甘薯品种繁多,为了确定甘薯削皮机各部件的结构尺寸,本文选用2019年产自浙江省的同一批次的不同品种甘薯(“浙薯13”、“浙薯75”),每一品种随机选取50个甘薯样本,由于该批次甘薯品种外形大都呈纺锤形或圆筒形,对甘薯样本进行了长轴径 L 、短轴径 D 以及质量 m 等物理参数测量(图3),测量结果为:甘薯长轴径主要分布在100.5~189.3 mm,平均值为157.5 mm;短轴径主要分布在59.8~86.9 mm,平均值为72.5 mm;甘薯表皮厚度主要分布在1.8~3.2 mm,平均值为2.5 mm;甘薯质量主要分布在303.1~580.1 g,平均值为420.3 g。

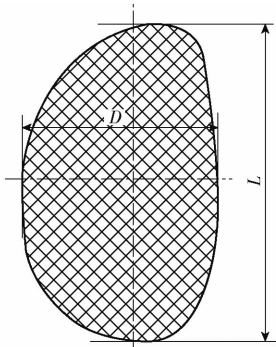


图3 甘薯纵向截面示意图

Fig.3 Schematic of longitudinal section of sweet potato

2.2 削皮仿形机构设计

甘薯表皮粗糙不平,柔性自适应削皮仿形机构是甘薯削皮机的关键,其性能直接影响削皮的效果。如图4所示,削皮气缸推动仿形刀具紧贴甘薯表皮,并配合丝杆滑块带动削皮机构上下运动开始削皮动作,根据甘薯的表皮形状调节仿形气缸的进给压力,从而实现自动仿形。本文削刀设计为U型刀,根据甘薯的外形尺寸参数,刀刃圆弧半径 R_i 设为16 mm;为了控制削刀削皮的厚度,设计了一种限厚块,根据所测量的甘薯表皮厚度,设置限厚间隙为2 mm;甘薯在削皮过程中做高速旋转运动,其表皮凸起部分会对削刀产生频繁的碰撞力,使削刀的角度发生较大的偏移导致削皮不连续,效果差,因此本文在削皮机构中设计了一个仿形限位球,来提高削刀在削皮过程中的稳定性和削皮连续性,改善削皮效果。

2.3 仿形削皮过程分析

2.3.1 仿形限位球尺寸设计

根据甘薯削皮机工作原理,分析甘薯削皮初始工作位置,如图5所示,为便于理论分析,假设甘薯圆周截面为圆形。甘薯固定轴心为 O ,刀具仿形限

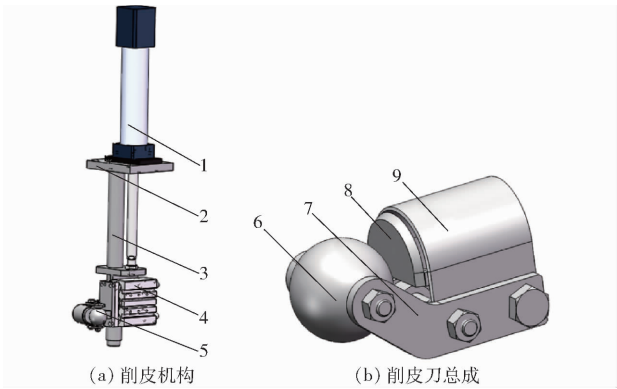


图4 削皮仿形机构结构简图

Fig.4 Diagram of cutter profile mechanism

1. 电动缸 2. 连接法兰 3. 导杆 4. 削皮气缸 5. 削皮刀总成
6. 仿形限位球 7. 连接板 8. 限厚块 9. U型削皮刀

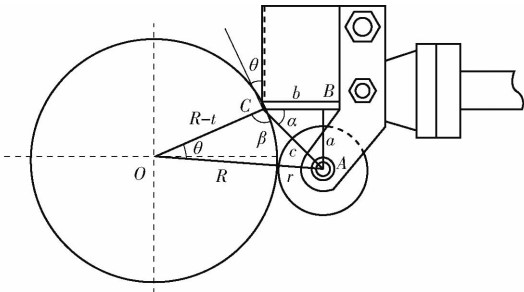


图5 削皮机初始工作位置示意图

Fig.5 Initial working position of peeler

位球中心为 A ,削皮过程中削皮刀总成在气缸作用下,使仿形限位球及U型削刀与甘薯表皮保持接触,接触点为 C ,甘薯半径为 R ,仿形限位球半径为 r ,削皮厚度为 t ,入切角为 θ , AB 垂直于 BC ,设 $l_{AB} = a$, $l_{BC} = b$, $l_{AC} = c$,角度关系如图5所示,削皮刀总成在削皮过程中可绕气缸连接处转动,入切角随之变化。

由几何关系知

$$\theta = \pi - \alpha - \beta \tag{1}$$

其中

$$\alpha = \arctan \frac{a}{b} \tag{2}$$

在三角形 AOC 中,由余弦定理可知

$$\cos\beta = \frac{(R-t)^2 + c^2 - (R+r)^2}{2(R-t)c} \tag{3}$$

根据上文甘薯参数统计结果: $25\text{ mm} < R < 75\text{ mm}$,由式(1)~(3)结合仿形机构设计尺寸得出入切角 $20^\circ < \theta < 35^\circ$,所以取值如下:当甘薯削皮点半径 $R_1 = 25\text{ mm}$ 时,入切角 $\theta_1 = 35^\circ$,当甘薯削皮点半径 $R_2 = 75\text{ mm}$ 时,入切角 $\theta_2 = 20^\circ$ 。

如图6所示,以甘薯支座中心 O_1 为坐标原点,建立坐标系 XO_1Y ,削皮后甘薯半径为 ΔR ,仿形限位球中心在坐标系 XO_1Y 中的位置参数为 (X_o, Y_o) 。当U型削刀入切角分别为 35° 和 20° 时,仿形限位球位置参数为 (X_1, Y_1) 和 (X_2, Y_2) ,削皮后的甘薯圆周

半径为 ΔR_1 和 ΔR_2 , 则有

$$\begin{cases} X_o^2 + Y_o^2 = (R + r)^2 \\ X_o = \Delta R \cos \theta + b \\ Y_o = \Delta R \cos \theta - a \end{cases} \quad (4)$$

代入上述边界条件得

$$\begin{cases} X_2 - X_1 = \Delta R_2 \cos \theta_2 - \Delta R_1 \cos \theta_1 \\ X_2^2 - X_1^2 = (R_2 + r)^2 - (R_1 + r)^2 + (\Delta R_1 \sin \theta_1 - a)^2 - (\Delta R_2 \sin \theta_1 - a)^2 \end{cases} \quad (5)$$

解得

$$(R_2 + r)^2 - (R_1 + r)^2 + (\Delta R_1 \sin \theta_1 - a)^2 - X_1 = \frac{(\Delta R_2 \sin \theta_2 - a)^2 + \Delta R_1 \cos \theta_1 - \Delta R_2 \cos \theta_2}{2(\Delta R_2 \cos \theta_2 - \Delta R_1 \cos \theta_1)} \quad (6)$$

整理得 $X_1 = k_1 r + k_2 a + k_3$ (7)

其中

$$k_1 = \frac{R_2 - R_1}{\Delta R_2 \cos \theta_2 - \Delta R_1 \cos \theta_1}$$
$$k_2 = \frac{\Delta R_2 \sin \theta_2 - \Delta R_1 \sin \theta_1}{\Delta R_2 \cos \theta_2 - \Delta R_1 \cos \theta_1}$$

$$k_3 = \frac{R_2^2 - R_1^2 + (\Delta R_1 \sin \theta_1)^2 - (\Delta R_2 \sin \theta_2)^2 + \Delta R_1 \cos \theta_1 - \Delta R_2 \cos \theta_2}{2(\Delta R_2 \cos \theta_2 - \Delta R_1 \cos \theta_1)}$$

又因为 $R_2 - R_1 \approx \Delta R_2 \cos \theta_2 - \Delta R_1 \cos \theta_1$ (8)

故式(7)可简化为

$$X_1 = r + k_2 a + k_3 \quad (9)$$

将式(9)代入式(5)整理得

$$r = \frac{R_1^2 - k_3^2 - (1 + k_2^2) a^2 + 2(\Delta R_1 \sin \theta_1 - k_2 k_3) a}{2(ak_2 + k_3 - R_1)} \quad (10)$$

当 r 有解且大于 0 时, 得 $18.53 \text{ mm} < a < 20 \text{ mm}$, 则初定仿形限位球半径 r 为 28 mm 。

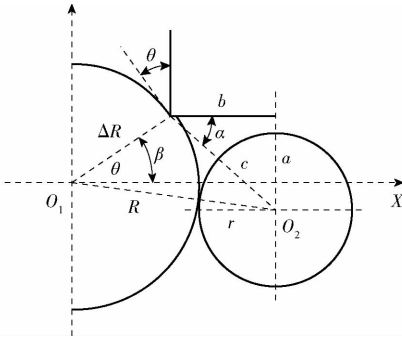


图 6 仿形机构尺寸简图

Fig. 6 Dimensional diagram of profiling mechanism

2.3.2 仿形力范围确定

如图 7 所示, 在甘薯削皮过程中, 在切削力 F_a 的作用下, 甘薯表皮从甘薯体分离脱落, 在仿形力 F_b 的作用下, 仿形限位球始终和甘薯表皮接触, 减少甘薯表皮因凸起部分对削刀所产生的碰撞力, 使

削刀的角度发生较大的偏移影响削皮效果。

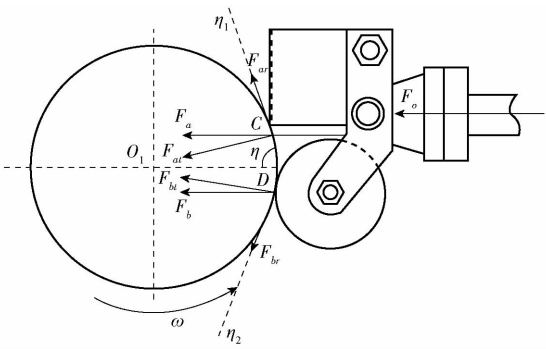


图 7 甘薯与削刀的受力分析简图

Fig. 7 Force analysis diagram of sweet potato and cutter

η_1 为过削刀与甘薯接触点 C 的切线方向, η 为切线方向 η_1 与甘薯水平方向之间的夹角, η_2 为仿形限位球与甘薯接触点 D 的切线方向, 根据安装位置确定切线方向 η_1 与 η_2 关于甘薯水平方向左右对称。各接触点的受力关系为

$$\begin{cases} F_{at} = F_a \sin \eta \\ F_{ar} = F_a \cos \eta \\ F_{bt} = F_b \sin \eta \\ F_{br} = F_b \cos \eta \end{cases} \quad (11)$$

式中 F_{at} ——接触点 C 受到的法向力, N
 F_{ar} ——接触点 C 受到的切向力, N
 F_{bt} ——接触点 D 受到的法向力, N
 F_{br} ——接触点 D 受到的切向力, N
甘薯与削皮刀总成的受力平衡满足

$$F_o = F_a + F_b \quad (12)$$

式中 F_o ——仿形气缸的输出推力, N

$$F_o \eta_o = \frac{P_o \pi D_o^2}{4} \quad (13)$$

式中 P_o ——仿形气缸的进气压力, 可根据调压阀来选择合适的进气压力, Pa

η_o ——仿形气缸的负载率, 根据时间、运行速度, 取 200%

D_o ——仿形气缸缸径, mm

削皮刀对甘薯的切削力为

$$F_{at} = \frac{P_o \pi D_o^2 \sin \eta}{8 \eta_o} \quad (14)$$

其中

$$\eta = \frac{\pi}{2} - \theta$$

根据上文得刀具入切角 θ 范围为 $20^\circ \sim 35^\circ$, 确定仿形缸径 $D_o = 16 \text{ mm}$, 通过试验发现, 当 F_o 取值范围在 $60 \sim 80 \text{ N}$ 之间时, U 型削刀能顺利切入甘薯表皮且不会将甘薯从卡爪中顶翻。

2.3.3 电缸与卡爪转速比计算

图 8 为削皮刀在切削甘薯表皮上下运动过程示

意图。甘薯在夹具上的角速度为 ω , λ 为过削皮刀与甘薯表面接触点在竖直平面的法线方向,与竖直方向的夹角为 γ 。图中阴影区域表示甘薯表皮已切削部分,其中 S_0 表示上一圈削皮宽度, S_t 表示最新一圈削皮宽度, ΔS 表示相邻两圈削皮重叠宽度。

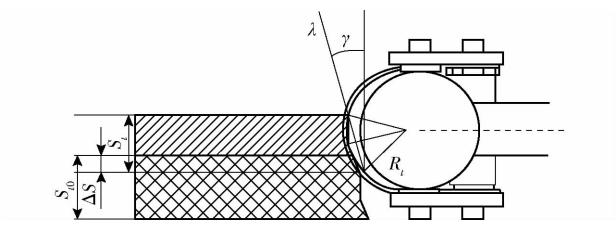


图8 甘薯削皮示意图

Fig.8 Schematic of sweet potato peeling

由几何关系得

$$S_t = 2\sqrt{2R_t t - t^2} \cos\gamma \tag{15}$$

根据文献[21]知,为实现较佳的削皮效果, ΔS 需满足

$$0 \leq \Delta S \leq \frac{S_t}{2} \tag{16}$$

$$\Delta S = \frac{Pn_2}{n_1} = \sqrt{2R_t t - t^2} \cos\gamma \tag{17}$$

式中 P ——丝杆导程,取10 mm
 n_1 ——卡爪转速,r/min
 n_2 ——丝杆转速,r/min
分别取U型刀圆弧半径 R_t 为16 mm,削皮厚度 t 为2~3 mm,夹角 γ 为 $0^\circ \sim 30^\circ$,则转速比 $i = n_2/n_1$ 应满足 $0.68 \leq i \leq 1.18$ 。

3 试验结果与分析

3.1 试验条件

试验材料为遂昌好川薯条厂所用的加工型甘薯,品种为“浙薯13”,平均质量为395 g,其外形如图9所示。



图9 “浙薯13”样品

Fig.9 Sweet potato samples of “Zheshu 13”

试验设备以及仪器装置包括甘薯削皮试验样机、变频器、空压机、电子秤、游标卡尺等。

3.2 试验方案

由削皮原理和关键部件计算结果可知,仿形限位球半径、仿形力、电缸与卡爪转速比是影响削皮性能的重要参数。试验过程中通过更换不同直径的仿

形限位球来对比不同限位球半径对削皮效果的影响,仿形力由仿形气缸的压力控制,通过调节变频器的输出频率控制电缸与卡爪转速比。甘薯的削皮性能主要体现在甘薯的削皮完整性和削皮厚度均匀性,经过前期大量试验可知:甘薯表面凸起部分在10 mm以内,凹陷部分在6 mm以内,本文设计的自适应仿形削皮机构削皮率可达到90%以上,满足“浙薯13”的机械削皮设计要求,在此基础上,重点研究各参数对甘薯削皮厚度均匀性的影响。采用Box-Behnken设计试验方案^[22-25],以仿形限位球半径(x_1)、仿形力(x_2)、电缸与卡爪转速比(x_3)为自变量,随机取削下来的甘薯皮条5段,量取每段厚度 h_i 与设计削皮厚度 h_0 (2~3 mm)的差值 Δh 为响应值,其分值评定如表1所示,各试验因素编码如表2所示,实施17组响应面分析试验,各组试验结果如表3所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值, $Y_1 \sim Y_5$ 为5次试验分值, Y 为总分值,表征削皮厚度均匀性, Y 越大表示均匀性越好。

表1 分值评定
Tab.1 Score evaluation

等级	Δh /mm	分值
1	0~0.30	3
2	0.31~0.60	2
3	0.61~0.90	1
4	>0.90	0

表2 因素编码
Tab.2 Coding of factors

编码	因素		
	仿形限位球半径 x_1 /mm	仿形力 x_2 /N	电缸与卡爪 转速比 x_3
-1	26	60	0.7
0	28	70	0.9
1	30	80	1.1

3.3 结果与分析

采用Design-Expert 8.0.6软件对以上数据进行多元回归模型拟合,得到削皮厚度与仿形限位球半径、仿形力以及电缸与卡爪转速比之间的回归方程为

$$Y = 14.2 + 0.88X_1 - 1.75X_2 + 0.38X_3 + 0.5X_1X_2 - 0.75X_1X_3 - 2.5X_2X_3 - 4.23X_1^2 - 5.98X_2^2 - 1.72X_3^2 \tag{18}$$

由表4可知,二次回归模型的 $P < 0.001$,说明该回归模型极显著;失拟项 $P > 0.05$,失拟不显著,说明模型所拟合的二次回归方程能准确反映削皮厚度均匀性与仿形限位球半径、仿形力和电缸与卡爪转速比之间的关系,能够通过拟合模型对甘薯削皮

表 3 响应面试验设计与结果

Tab.3 Response surface test design and results									
试验号	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y
1	1	0	-1	2	2	1	2	2	9
2	0	-1	-1	1	2	1	1	1	6
3	0	1	1	1	0	1	0	0	2
4	-1	1	0	0	0	0	1	0	1
5	1	1	0	0	1	1	1	1	4
6	0	-1	1	2	3	2	2	2	11
7	-1	-1	0	1	1	1	1	1	5
8	0	1	-1	2	1	2	1	1	7
9	0	0	0	3	3	3	2	3	14
10	0	0	0	3	3	3	3	3	15
11	-1	0	-1	1	1	2	1	1	6
12	1	0	1	2	2	2	2	1	9
13	0	0	0	3	3	3	3	2	14
14	0	0	0	2	3	3	3	3	14
15	-1	0	1	2	2	2	1	2	9
16	1	-1	0	2	1	1	1	1	6
17	0	0	0	3	3	3	3	2	14

表 4 回归方程方差分析

Tab.4 Variance analysis of regression equation						
方差来源	平方和	自由度	均方和	F	P	显著性
模型	319.57	9	35.51	97.47	<0.000 1	**
X_1	6.13	1	6.13	16.81	0.004 6	**
X_2	24.5	1	24.5	67.25	<0.000 1	**
X_3	1.13	1	1.13	3.09	0.122 3	
X_1X_2	1	1	1	2.75	0.141 5	
X_1X_3	2.5	1	2.5	6.18	0.041 9	*
X_2X_3	25	1	25	68.63	<0.000 1	**
X_1^2	75.16	1	75.16	206.32	<0.000 1	**
X_2^2	150.32	1	150.32	412.64	<0.000 1	**
X_3^2	12.53	1	12.53	34.39	0.000 6	**
残差	2.55	7	0.36			
失拟	10.50	1.75	3	0.58	0.163 9	
误差	0.8	4	0.2			
总和	322.12	16				

注: ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$); * 表示差异显著 ($P < 0.05$)。

厚度均匀性试验进行优化。其中一次项因素仿形力

对模型影响极显著,仿形限位球半径对模型影响极显著,电缸与卡爪转速比对模型影响不显著;二次项因素 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 极显著;交互项因素中 X_2X_3 极显著, X_1X_3 显著, X_1X_2 不显著。根据模型各因素回归系数,得到影响甘薯削皮厚度的因素主次顺序为:仿形力、仿形限位球半径、电缸与卡爪转速比。

3.4 模型交互项分析

根据回归模型(式(18)),通过 Design-Expert 8.0.6 软件分别得到甘薯削皮厚度均匀性与 3 个工作参数之间的响应曲面,基于响应曲面分析各相互因素对甘薯削皮厚度均匀性的影响。

如图 10 所示,在参数设计范围内,随着仿形限位球半径、仿形力以及电缸与卡爪转速比增大,甘薯削皮厚度均匀性呈现先提高后降低的趋势,其中仿形力和仿形限位球半径对甘薯削皮厚度均匀型影响较大,主要原因是当仿形力不足或者仿形限位球尺寸过大时,U 型削皮刀不能很好地贴紧甘薯表面,导致出现漏削或者削皮太薄现象,当仿形力过大或者仿形限位球半径略小时,U 型削皮刀仿形效果较差,导致出现削皮太深或者削皮深浅不一现象。

3.5 工作参数优化

应用 Design-Expert 8.0.6 优化求解器,设置每个参数的取值范围,仿形限位球半径为 26 ~ 30 mm,仿形力为 60 ~ 80 N,电缸与卡爪转速比为 0.7 ~ 1.1,在 maxY 目标下进行优化求解,当仿形限位球半径为 28.1 mm、仿形力为 68.1 N、电缸与卡爪转速比为 0.95 时,得到试验最优指标 $Y = 14.4$ 。

考虑到各个工艺参数调整的方便性,最终确定仿形限位球半径为 28 mm,仿形力为 68 N,电缸与卡爪转速比为 0.95,在此参数下进行 5 次削皮试验,试验条件与 3.1 节一致,如图 11 所示,削皮过程中机器运行稳定,平均每个甘薯削皮时间为 10 s,工作效率达 360 个/h。优化试验结果如表 5 所示,5 次甘薯削皮厚度均匀性的平均值为 14.4,表明各因素

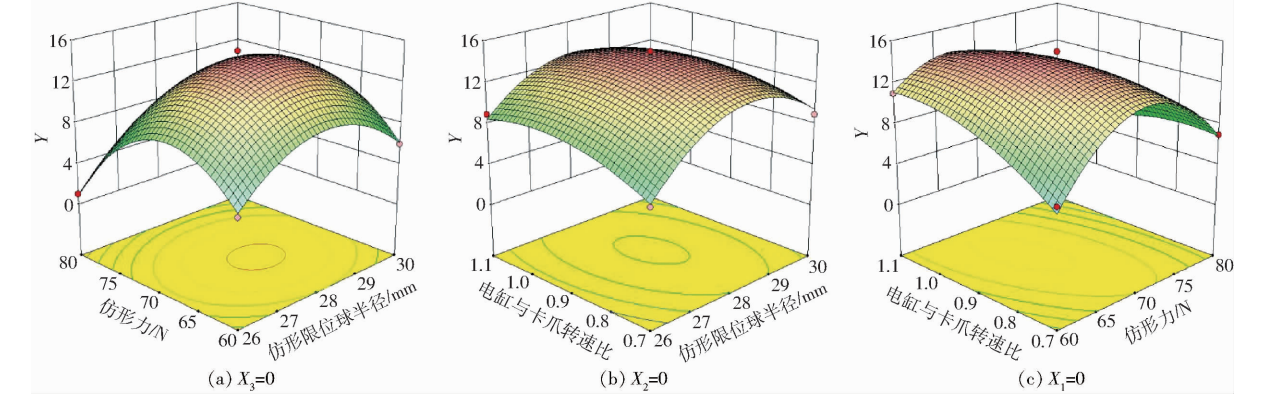


图 10 交互因素对甘薯削皮厚度均匀性的影响

Fig. 10 Impact of interaction factors on sweet potato peeling thickness uniformity

参数优化后,能够提高甘薯削皮厚度均匀性,进一步证明了所建回归模型的正确性。



图 11 甘薯现场削皮效果

Fig.11 Sweet potato peeling experiment results

表 5 优化试验结果

Tab.5 Test results of working machine

试验号	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y
1	3	3	3	3	3	15
2	3	3	3	2	3	14
3	3	3	3	3	2	14
4	3	3	3	3	3	15
5	2	3	3	3	3	14

4 结论

(1)设计了一种柔性自适应仿形削皮机构,对甘薯削皮过程进行了理论分析,确定了影响甘薯削皮性能的关键参数及取值范围。

(2)设计了三因素三水平正交试验,得到影响甘薯削皮厚度均匀性的因素主次顺序为仿形力、仿形限位球半径、电缸与卡爪转速比,并通过响应曲面法优化甘薯削皮性能,得到了最佳参数组合为:仿形力 68.1 N、仿形限位球半径 28.1 mm、电缸与卡爪转速比 0.95。

(3)基于优化结果进行了最佳参数下的削皮性能验证试验,结果表明,多次试验的甘薯削皮厚度均匀性的平均值为 14.4,甘薯削皮效果较好,平均每个甘薯削皮时间为 10 s,工作效率达 360 个/h,满足甘薯机械削皮的设计要求。

参 考 文 献

[1] 陆建珍,汪翔,秦建军,等. 我国甘薯种植业发展状况调查报告(2017 年)——基于国家甘薯产业技术体系产业经济固定观察点数据的分析[J]. 江苏农业科学,2018,46(23):393-398.

[2] 陆建珍,徐雪高,汪翔,等. 中国甘薯及其加工品进出口贸易现状分析[J]. 江苏师范大学学报(自然科学版),2018,36(4):30-35,87.

LU Jianzhen, XU Xuegao, WANG Xiang, et al. Analysis on the status of import and export trade of sweet potato and its processing products in China[J]. Journal of Jiangsu Normal University (Natural Science Edition), 2018, 36(4): 30-35, 87. (in Chinese)

[3] YEN K Y, RADHWAN H, SHAYFULL Z, et al. Design and analysis of garlic peeler machine[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 864(1): 012142.

[4] 曹希凡,党凯锋,杨静,等. 多自由度机械手臂在猕猴桃削皮加工中的应用[J]. 现代农机,2020(2):46-47.

CAO Xifan, DANG Kaifeng, YANG Jing, et al. Application of multi-degree-of-freedom mechanical arm in kiwifruit peeling processing[J]. Modern Agricultural Machinery, 2020(2): 46-47. (in Chinese)

[5] FADEYIBI A, AJAO O F. Design and performance evaluation of a multi-tuber peeling machine[J]. Agri. Engineering, 2020, 2(1): 55-71.

[6] 王超俊. 甘蔗削皮切断机设计研究[J]. 湖北农机化, 2018(12): 52-53.

WANG Chaojun. Design and research of sugarcane peeling and cutting machine[J]. Hubei Agricultural Mechanization, 2018(12): 52-53. (in Chinses)

[7] 刘振亚,曹晓虹,张佳佳,等. 马铃薯全粉加工关键工艺研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(8): 314-321.

LIU Zhenya, CAO Xiaohong, ZHANG Jiajia, et al. The resaerch process on the key technology of potato flour process[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(8): 314-321. (in Chinese)

[8] 王锦霞,甘婷婷,张妙,等. 莲子去皮方法及其产品开发研究进展[J]. 农产品加工, 2019(14): 65-68.

WANG Jinxia, GAN Tingting, ZHANG Miao, et al. Resaerch progress on peeling methods and product development of lotus seeds[J]. Farm Products Processing, 2019(14): 65-68. (in Chinese)

[9] 陈海峰,刘晴,曾书琴. 猕猴桃蒸汽热烫去皮工艺研究[J]. 食品科技, 2016, 41(6): 117-120.

CHEN Haifeng, LIU Qing, ZENG Shuqin. Technological on peeling kiwifruit by steam blanching[J]. Food Science and Technology, 2016, 41(6): 117-120. (in Chinese)

[10] 方楚楚,阚建全. 核桃仁超声波辅助碱液去皮工艺优化[J]. 食品工业科技, 2017, 38(18): 195-200.

FANG Chuchu, KAN Jianquan. Optimization of ultrasonic assisted alkali peeling process of walnut kernel[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(18): 195-200. (in Chinses)

[11] 付德春. 土豆、地瓜清洗机: CN202980091U [P]. 2013-06-12.

[12] 黄键裕,朱立学,李上振,等. 马铃薯清洗去皮一体机改进设计[J]. 农业工程, 2017, 7(6): 135-138.

HUANG Jianyu, ZHU Lixue, LI Shangzhen, et al. Improved design of potato cleaning and peeling machine[J]. Agricultural Engineering, 2017, 7(6): 135-138. (in Chinese)

- [13] 范卓,张华,董斌,等. 滚筒式茎块类作物清洗脱皮机的设计与研究[J]. 机械设计,2018,35(1):57-62.
FAN Zhuo, ZHANG Hua, DONG Bin, et al. Design research of drum-type machine for tuber crops washing and peeling[J]. Journal of Machine Design, 2018,35(1):57-62. (in Chinese)
- [14] 殷建国,刘滨. 马铃薯立式去皮机结构设计[J]. 中国农机化学报,2015,36(1):171-173.
YIN Jianguo, LIU Bin. Design of vertical potato batch peelers[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(1):171-173. (in Chinses)
- [15] 苗红涛,夏晶晶. 新型立式马铃薯连续去皮机仿真设计[J]. 食品与机械,2016,32(3):116-118.
MIAO Hongtao, XIA Jingjing. Visual design of three dimensional potato vertical peeling machine based on SolidWorks[J]. Food & Machinery, 2016,32(3):116-118. (in Chinese)
- [16] 高增法. 芋头去皮机的研制[J]. 机电技术,2013,36(3):6-8.
GAO Zengfa. Study and development of taro peeling machine[J]. Mechanical & Ectrical Technology,2013,36(3):6-8. (in Chinese)
- [17] 徐茂,张燕. 基于 PLC 控制的甘蔗去皮机的研究[J]. 农机化研究,2014,36(11):115-118.
XU Mao, ZHANG Yan. The study of sugarcane peeler based on the PLC[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014,36(11):115-118. (in Chinese)
- [18] 吴晓强,黄云战,赵永杰. 基于运动控制器的甘蔗去皮机设计[J]. 食品与机械,2015,31(6):124-126.
WU Xiaoqiang, HUANG Yunzhan, ZHAO Yongjie. Design of sugarcane peeling machine based on motion controller[J]. Food & Machinery,2015,31(6):124-126. (in Chinese)
- [19] 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):57-59,62.
WU Youming, MO Mingshao. A design of mango peeling machine[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2018(9):57-59,62. (in Chinses)
- [20] 田元. 胡萝卜自动削皮机虚拟样机设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨商业大学,2016.
TIAN Yuan. Carrot virtual prototype design for a automatic peeling machine[D]. Harbin:Harbin University of Commerce, 2016. (in Chinese)
- [21] 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):150-153,191.
NIU Nailong, SHI Jianxin. Design and experimental research of Hami melon peeler[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2014,36(10):150-153,191. (in Chinese)
- [22] 杨小平,魏宏安,赵武云,等. 4U-1600 型集堆式马铃薯挖掘机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(6):83-92.
YANG Xiaoping, WEI Hongan, ZHAO Wuyun, et al. Design and experiment of 4U-1600 set of pile type potato digger [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(6):83-92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200609&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.009. (in Chinese)
- [23] 薛党勤,张朝阳,王凤磊,等. 基于响应曲面法的带齿式马铃薯残膜回收装置参数优化及试验[J]. 中国农机化学报,2019,40(8):20-26.
XUE Dangqin, ZHANG Chaoyang, WANG Fenglei, et al. Experimental study and parameter optimization of belt-tooth type collector for potato film residues based on response surface methodology[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019,40(8):20-26. (in Chinese)
- [24] 袁雪,祁力钧,王虎,等. 温室摇摆式变量弥雾机喷雾参数响应面法优化[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(4):45-50,54.
YUAN Xue, QI Lijun, WANG Hu, et al. Spraying parameters optimazation of swing, automatic variables and greenhouse mist sprayer with response surface method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(4):45-50,54. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120410&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.010. (in Chinese)
- [25] 张燕青,崔清亮,郭玉明,等. 谷子茎秆切割力学特性试验与分析[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(4):146-155,162.
ZHANG Yanqing, CUI Qingliang, GUO Yuming, et al. Experiment and analysis of cutting mechanical properties of millet stem [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(4):146-155,162. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190416&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.016. (in Chinese)