

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.60071

# 椰青加工机的设计与试验

沈 飞 樊军庆 张宝珍 王自鑫 李列坤

(海南大学机电工程学院,海南 海口 570228)

**摘要:** [目的]提高椰青加工机械化、自动化程度。[方法]设计一款新的椰青加工机,该机由压紧旋转机构、侧顶一体切削机构、夹持机械手和切底机构等组成,通过对最关键的侧顶一体切削机构的力学分析计算、三维建模及有限元分析进一步优化设计方案。[结果]影响切削加工效果的主要影响因素顺序为刀具进给速度>椰青的旋转速度>刀具切削角。椰青加工机的最优参数组合为椰青旋转速度 450 r/min,刀具进给速度 1 mm/s,刀具切削角 16.7°。[结论]该机椰青加工成功率达 100%,效率可达 100 个/h,具有工程应用价值。

**关键词:**椰青;椰青加工机;机构设计;有限元分析;正交试验设计

## Design and experiment of tender coconut processing machines

SHEN Fei FAN Junqing ZHANG Baozhen WANG Zixin LI Liekun

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China)

**Abstract:** [Objective] To improve the mechanization and automation of tender coconut processing. [Methods] This paper designs a new tender coconut processing machine consisting of a compression rotating mechanism, a side-top integrated trimming mechanism, a clamping manipulator, and a bottom trimming mechanism. Mechanical analysis and calculation, 3D modeling, and finite element analysis are carried out on the most critical side-top integrated trimming mechanism to optimize the design scheme. [Results] The main factors influencing the trimming effect are ranked as the tool feed rate>tender coconut's rotation speed>tool trimming angle. The optimal parameter combination of the tender coconut processing machine is the tender coconut's rotation speed of 450 r/min, the tool feed rate of 1 mm/s, and the tool trimming angle of 16.7°. [Conclusion] The success rate of coconut green processing of the developed machine reaches 100%, with the efficiency reaching 100 pieces/h. Thus, the machine has high engineering application significance.

**Keywords:** tender coconut; tender coconut processing machine; mechanism design; finite element analysis; orthogonal experiment design

椰子是中国重要的热带经济作物,主要分布在海南地区<sup>[1]</sup>。近年来,椰子及其相关制品越来越受到消费者的青睐<sup>[2]</sup>。但椰子的形状不规则,不利于运输和贮藏,而加工成“粮仓状”的椰青后,产品一致性更好,可更好地满足市场需求<sup>[3-5]</sup>。

由于椰子外形不规则,机械化加工椰青比较困难,国内外常见的椰青加工方式仍以人工为主,生产效率较低,加工质量不稳定<sup>[3,6]</sup>。目前,有关椰青加工技术的研究较少,大多停留在理论研究阶段,有关样机试验的研究仅针对椰青侧面和顶部的切削工序,底部的切削仍依靠人工解决<sup>[7-8]</sup>。这种设计思路专注于椰青侧面和顶部的切削,简化了机器的设计难度,但机械化程度低,难以满足大规模自动化生产的需要。Jarimopas等<sup>[9]</sup>将切底环节也考虑

在内,实现了加工的全自动化,但此类椰青加工机的设计均采用多工位设计,椰子需辗转于各个工位进行分步切削加工,每个工位需要配备对应的电机和刀具。其机器结构复杂,尺寸大,成本高,工位多次切换还会影响加工速度与效率,难以进行行业推广<sup>[9-13]</sup>。研究拟提出一种新型椰青加工机设计方案,旨在解决椰青切底工序自动化和多工位融合简化两大难题,提高椰青加工机械化和自动化程度。

### 1 整机结构设计

采用侧顶一体式切削方式对椰青进行加工,将椰青的侧面与顶部的切削塑形工序合二为一,同时设计椰青切底机构,一方面可以缩减工艺工位,使机械结构更加紧

基金项目:海南省自然科学基金资助(编号:323RC416)

通信作者:樊军庆(1967—),男,海南大学教授,硕士。E-mail:junqing670615@163.com

收稿日期:2024-09-13 改回日期:2024-12-22

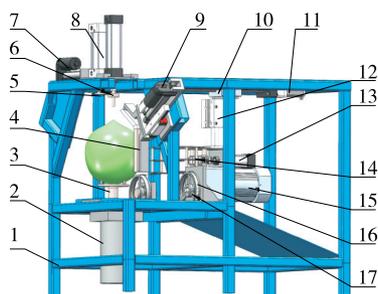
凑,另一方面可大大缩短加工时间,再辅以电气自动控制系统,即可实现椰青加工的全自动化。

### 1.1 机械结构

椰青加工机由压紧旋转机构、侧顶一体切削机构、夹持机械手及切底机构等组成(见图1)。设计方案的关键在于采用侧顶一体式切削方式对椰青进行加工,同时设计有切底机构,全机仅需两个工位即可完成加工,机械结构紧凑,理论加工效率与机械化程度高。

### 1.2 工作原理

椰青加工工序中,先将待处理的椰子妥善安置于旋



1. 机架 2. 旋转电机 3. 旋转钉盘 4. 一体式切削刀具 5. 压紧法兰 6. 定心杆 7. 电动推杆 a 8. 气缸 9. 电动推杆 b 10. 丝杠 11. 步进电机 12. 升降气缸 13. 夹爪开合气缸 14. 夹爪 15. 带锯电机 16. 带锯锯条 17. 带锯轮盘

图1 椰青加工机机械结构示意图

Figure 1 Structure of tender coconut processing machine

转式钉刺盘上。随后利用气动系统的驱动力,压紧法兰被气缸带动以向下压迫椰子,确保旋转钉盘的钉刺能够穿透并牢固锚定于椰子的底部区域。电动推杆 a 执行回缩动作,同步调整定心杆的位置以确保其精准对准旋转中心轴线,并在气动力的作用下驱动定心杆深入椰子顶部,以此实现椰子在高速旋转过程中的姿态稳定性控制。旋转电机启动,通过传动机制带动旋转钉盘及其承载的椰子进入匀速旋转状态。与此同时,电动推杆 b 启动,驱动刀具沿既定轨迹平稳前移,对椰子的侧面及顶端实施同步切削作业。侧顶切削阶段结束后,刀具随即按照原路径进行回撤操作。此时,夹持机械手动作,抓取半成品椰青,并在升降气缸的调控下,使椰青与旋转钉盘分离,并沿设定的轨迹向后移动抵达切底工位。在切底工位,带锯电机启动,驱动带锯锯条以恒定速度高速旋转。夹持机械手继续承载椰青沿既定方向后移,同时完成椰青底部的切削处理。机械手在行程末端将会打开,加工完的椰青便可因自重掉落。至此,整个椰青加工流程的所有步骤完成,实现从原料到成品的转化。

### 1.3 工作循环图设计

结合上述工作流程,将椰青自动加工机的工序拆解为夹紧、旋转、侧顶切削、转移和底部切削。根据工作流程设计与各执行机构的动作,可确定各执行构件的工作、空回和可能具有的若干个停歇区段,结合设计方案,绘制运动循环图如图2所示。

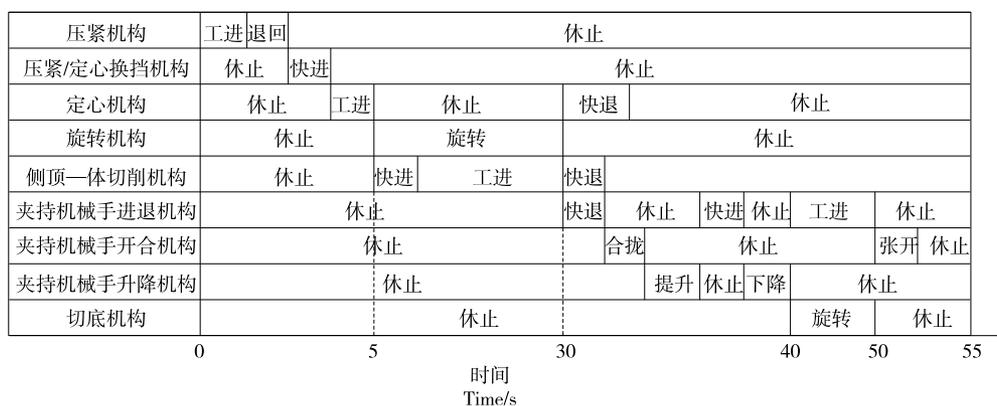


图2 椰青加工机运动循环图

Figure 2 Motor cycle of tender coconut processing machine

## 2 关键机构设计

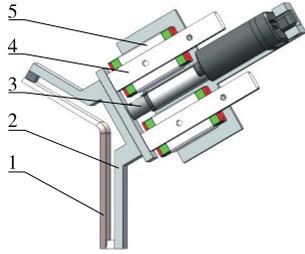
### 2.1 侧顶一体式切削机构

2.1.1 结构设计 侧顶一体式切削机构为椰青加工机最关键的组成部分,其具体结构如图3所示。

图3中,一体式切削刀片分为两段,夹角为120°,进刀方向与水平方向夹角成30°,由电动推杆控制匀速进退刀,工作时一体式刀具的长边垂直于工作台面,对椰青侧

面进行切削,短边对椰子顶部进行切削,完成对椰青侧面和顶部同时切削的目标,切削过程如图4所示。该切削机构使用两段导轨滑块配合进退刀动作,可以显著降低切削过程中刀具振动和抖动,提高切削机构的稳定性。

该一体式刀具的进刀方向采取与水平方向夹角成30°,可以平衡侧顶同时控制切削进刀量,防止刀具受力不均。在切削加工过程中,只要控制好刀具的行程和进给速度,便可以轻松将形状不规则的椰子加工成形状一致



1. 一体式切削刀片 2. 刀片支架 3. 电动推杆 4. 直线导轨 5. 滑块

图 3 侧顶一体式切削机构

Figure 3 Side-top integrated trimming mechanism

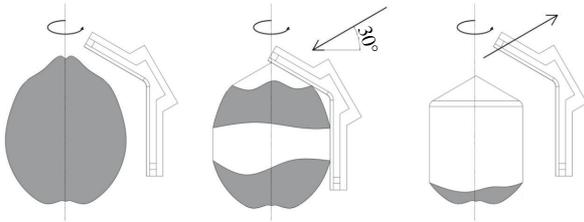


图 4 一体式刀具切削过程示意图

Figure 4 Processing of integrated trimming tool

的椰青。

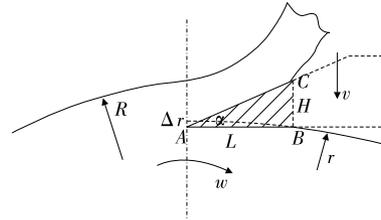
2.1.2 力学分析 刀刃受力如图 5 所示。刀具对椰子进行切削的过程中,椰子绕旋转轴做匀速圆周运动,刀片沿径向做进给运动。此时刀刃将受到椰衣纤维垂直于刀刃底面的反作用力  $F$ 、椰衣纤维对刀具的摩擦力  $f_f$ 、所切削下来的椰衣纤维对刀刃斜面的反作用力  $N$  及椰子纤维对刀刃斜面的摩擦力  $f_N$ 。

由力学知识可推导出:

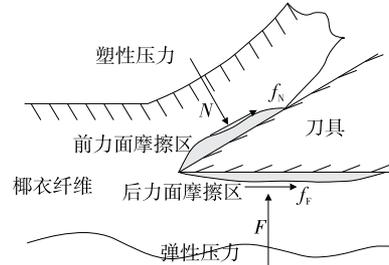
$$f_N = \mu \cdot N = \mu \cdot \sigma \cdot S_1 \quad (1)$$

刀刃切削部分呈三角形,如图 5 中  $\triangle ABC$ 。根据设计方案,刀刃底边  $AB$  长 10 mm,刀刃高度  $BC$  为 3 mm,则  $\tan \alpha = 0.3$ 。实际切削加工中,真正起作用的只有刀尖部分,因此进行估算时,取  $L = 1$  mm。在 SolidWorks 中测得该刀刃的斜面面积  $S_1$  为 277.6 mm<sup>2</sup>。基于椰子的生物力学特性可知,椰子的屈服强度  $\sigma = 0.375$  MPa,弹性模量  $E = 2.9$  MPa<sup>[6, 14]</sup>。将屈服强度代入式(1),则切削下来的纤维部分对刀刃斜面的反作用力约为 104.1 N。查阅机械手册,金属与潮湿的植物纤维之间的摩擦系数  $\mu$  一般取 0.2,可得  $f_N$  约为 20.82 N。

假设旋转过程中,椰子在  $\Delta t$  时间内整体转过了一定角度,使得原先位于刀尖  $A$  点处的椰子纤维来到  $B$  点,此时可近似将刀刃底部长度  $AB$  视为该点转过的距离。此时  $\Delta t$  时间内刀具进刀距离  $\Delta r$  对椰衣纤维产生弹性压力为:



(a) 刀刃进给运动示意图



(b) 刀刃切削原理示意图

$R$  为椰子半径,mm; $\omega$  为转速,r/min; $\alpha$  为刀刃倾角, $^\circ$ ; $v$  为刀具进给速度,mm/s

图 5 刀刃截面受力示意图

Figure 5 Force of blade section

$$F = \frac{E \cdot S_2}{2D} \left( r - v \cdot \frac{L}{\omega \cdot r} \right) \quad (2)$$

使用设计方案中各参数的理论最大值进行估算。取  $v = 5$  mm/s,  $\omega = 1\ 000$  r/min,  $D = 2r = 190$  mm,刀刃底部长度  $L = AB = 10$  mm,在 SolidWorks 中测得刀刃底部面积  $S_2 = 346.8$  mm<sup>2</sup>。取椰子的弹性模量  $E = 2.9$  MPa,可得  $F$  约为 251.4 N,  $f_f$  约为 50.3 N。

对以上 4 个力进行合成,合成为垂直于刀刃底面的进给力  $F_x$  和沿着刀刃方向的主切削力  $F_y$ ,两者合成为刀刃所受切削力  $F_{切}$ ,如图 6 所示。

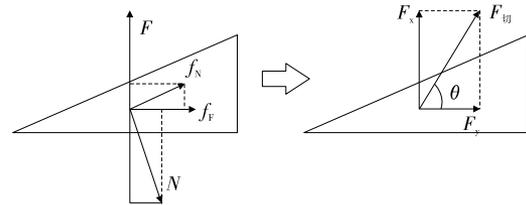


图 6 刀刃受切削力的合成分解示意图

Figure 6 Synthesis and decomposition of force on blade

$$F_x = F + f_N \cdot \cos \alpha + N \cdot \sin \alpha, \quad (3)$$

$$F_y = N \cdot \cos \alpha + f_N \cdot \sin \alpha + f_f, \quad (4)$$

$$F_{切} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}, \quad (5)$$

$$\tan \theta = \frac{F_x}{F_y} \quad (6)$$

通过计算可知,  $F_x$  约为 144.4 N,  $F_y$  约为 100.3 N,  $F_{切}$  约为 175.8 N,  $\theta$  约为 56.3 $^\circ$ 。因此,对进刀装置进行选型时,

需提供 150 N 的推力。故选用行程 100 mm,工作电压 24 V,推力 1 400 N 的电动推杆,以满足加工需要。

2.1.3 三维建模及仿真 将绘制好的切削机构三维模型导入 ANSYS 仿真软件中。根据设计方案,侧顶一体式切削机构的刀片部分使用 W18Cr4V 高速钢,该高速钢硬度高、抗磨性强、热稳定性佳,应用广泛。将 W18Cr4V 高速钢的相关力学参数导入软件,同时进行网格划分处理,结合相关力学计算结论,定义结构模型的边界条件。运行求解器,得到刀具在加工过程中的应力云图和变形云图如图 7 所示。

由图 7 可知,刀具工作过程中受到的最大压力集中在刀刃的尖端,为 15.086 MPa,而 W18Cr4V 高速钢在室温下的屈服强度 $\geq 422$  MPa;最大变形发生在刀刃的长边一段,变形量为 0.025 mm。显然,该机构设计方案合理,强度符合工作要求。

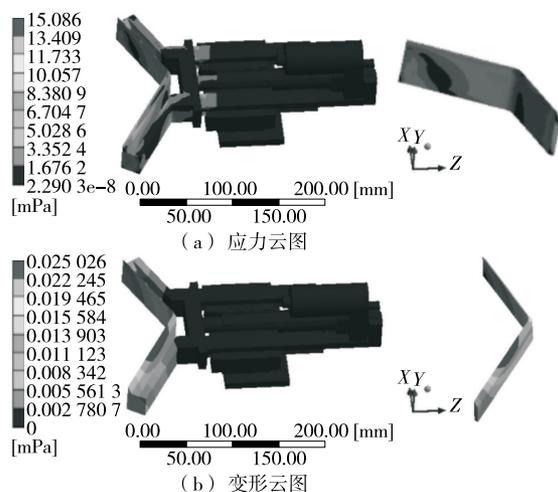


图 7 一体式切削机构的应力云图与变形云图

Figure 7 Stress cloud map and deformation cloud map of integrated trimming mechanism

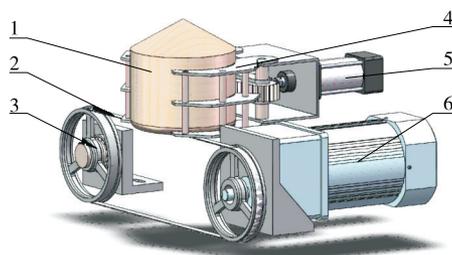
## 2.2 切底机构

在完成椰青的侧顶两面的切削后,由切底机构进行椰青的底部切削,切底机构设计如图 8 所示。使用夹持机械手夹住半成品椰青,在向后做水平运动的过程中,带锯对椰青底部进行切削加工。侧顶一体式切削和底部切削相结合,实现了椰青加工全过程的机械化。

## 3 试验及结果

### 3.1 样机试制

结合上述研究所确定的结构和相关参数,使用三维软件 SolidWorks 对椰青加工机进行三维建模,校验各部件装配和工作时有无干涉现象。确认无误后联系厂家进行样机的试制和装配,样机的控制系统连接、样机试验与优化选择在海南大学机电工程学院热带农机工程加工中



1. 椰青 2. 带锯锯条 3. 带锯轮盘 4. 夹爪 5. 夹爪开合气缸 6. 带锯电机

图 8 椰青切底机构示意图

Figure 8 Tender coconut bottom trimming mechanism

心进行。

### 3.2 试验设计

试验时间:2023 年 9 月—2024 年 1 月,共 5 个月。

3.2.1 切削主要影响因素的确定 试验发现,对椰青加工效果影响程度最大的环节为椰青的侧顶一体式切削环节的试验,并确定该试验的主要影响因素分别为椰青旋转速度、刀具进给速度和刀具切削角。对可能影响加工效果的其他因素进行控制,减少因外部因素导致试验误差增大的情况。

3.2.2 正交试验 选取同批的嫩椰子作为试验原材料,其直径约 180 mm,高度约 200 mm,单个椰子质量约 3 kg,挑选外形尺寸相接近的椰子以避免加工误差<sup>[15]</sup>。以椰青旋转速度、刀具进给速度和刀具切削角度为影响因素,进行三因素三水平正交试验设计,试验因素水平见 1,试验设计及结果见表 2。

表 1 椰青加工机试验因素水平表

Table 1 Factors and levels of test for the tender coconut processing machine

水平	A 椰青旋转速度/ ( $r \cdot \min^{-1}$ )	B 刀具进给速度/ ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	C 刀具切削角/ ( $^\circ$ )
-1	300	1	15
0	400	2	20
1	500	3	25

通过 Design-Expert 中的 Box-Behnken 响应模块进行数据处理,对成功率建立回归模型,得到成功率对变量指标的实际二次多元回归方程:

$$R_s = -396 + 1.52A + 28.5B + 16.4C - 0.075AB - 0.005C + 0.5BC - 0.001525A^2 - 5.25B^2 - 0.41C^2. \quad (7)$$

由表 3 可知,模型  $P < 0.01$ ,说明该模型显著,具有统计学意义。失拟项  $P = 0.7158 > 0.05$ ,表明该模型具有较高的拟合度。一次项 B 对成功率影响极显著 ( $P < 0.01$ ),

表 2 正交试验设计及结果

Table 2 Design and results of orthogonal experiment

试验号	A	B	C	成功率/%
1	-1	-1	0	70
2	1	-1	0	90
3	-1	1	0	60
4	1	1	0	50
5	-1	0	-1	60
6	1	0	-1	80
7	-1	0	1	50
8	1	0	1	60
9	0	-1	-1	90
10	0	1	-1	60
11	0	-1	1	80
12	0	1	1	60
13	0	0	0	80
14	0	0	0	90
15	0	0	0	100
16	0	0	0	80
17	0	0	0	90

二次项 A<sup>2</sup>、C<sup>2</sup>对成功率影响显著(P<0.05)。刀具进给速度对椰青切削的成功率影响最为明显,进给速度越小,成功率越高。

考虑到交互作用的影响,选择 AC 的交互作用进行分析,分析时采用控制变量法,固定刀具进给速度为 1 mm/s,利用软件中 Model Graphs 模块对数据进行分析,得到成功率随各因素变化的响应曲面如图 9 所示。由图 9 可知,

表 3 正交试验方差分析

Table 3 Variance analysis of orthogonal experiment

来源	平方和	自由度	均方和	F 值	P 值	显著性
模型	3 608.24	9	400.92	7.39	0.007 6	显著
A	200.00	1	200.00	3.68	0.096 4	
B	1 250.00	1	1 250.00	23.03	0.002 0	显著
C	200.00	1	200.00	3.68	0.096 4	
AB	225.00	1	225.00	4.14	0.081 2	
AC	25.00	1	25.00	0.46	0.519 2	
BC	25.00	1	25.00	0.46	0.519 2	
A <sup>2</sup>	979.21	1	979.21	18.04	0.003 8	显著
B <sup>2</sup>	116.05	1	116.05	2.14	0.187 1	
C <sup>2</sup>	442.37	1	442.37	8.15	0.024 5	显著
残差	380.00	7	54.29			
失拟值	100.00	3	33.33	0.48	0.715 8	不显著
纯误差	280.00	4	70.00			
总和	3 988.24	16				

在响应曲面上,沿着 A 和 C 方向的变化关系为 A>C,表明刀具进给速度不变时,椰青旋转速度对成功率的影响比刀具切削角的更大。因此,影响椰青加工成功率的主次因素为刀具进给速度>椰青旋转速度>刀具切削角。

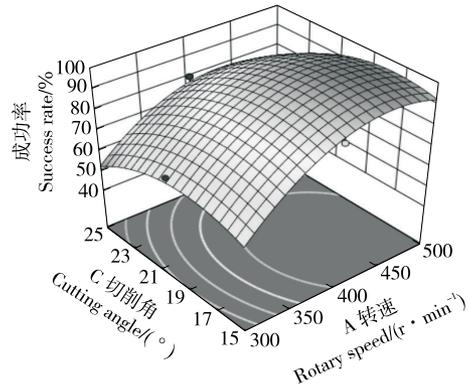


图 9 AC 响应面的交互作用

Figure 9 Interaction of AC response surface

通过 Design-Expert 中的 Optimization-Numerical 模块对椰青切削成功率进行分析,得到理论最佳因素为椰青旋转速度 444.4 r/min,刀具进给速度 1 mm/s,刀具切削角 17.9°,此时椰青加工成功率达到最高。

实际生产加工中,须考虑设备额定参数、零部件加工难度等因素,最终选择功率为 750 W,空载转速为 1 500 r/min,工作转速为 1 350 r/min 的 4 级电机,搭配减速比 3:1 的齿轮减速箱,此时椰青旋转电机的输出转速为 450 r/min;刀具的形态数据定为厚 3 mm,长 10 mm 的三角形,此时刀具切削角为 16.7°。

当椰青旋转速度为 450 r/min,刀具进给速度为 1 mm/s,刀具切削角为 16.7°时,理论成功率为 98.99%,符合设计需求。在此参数下重复进行 20 次椰青切削试验,整体成功率为 95%。其中 12 号椰子新鲜度不足,纤维过于干燥,加工时出现卡死现象。即使是纤维严重老化,已经不再适合作为加工目标的椰子,该椰青加工机仍可对其进行有效的、相当程度的加工处理,证明该机拥有非常强大的抗干扰能力。若排除该特殊情况,该机成功率可达 100%。

经测量,加工后所得椰青的尺寸数据符合预期,平均每个椰青的表面残余绿色椰衣占比约为 2.355%,最大不超过 4.6%;椰青加工机样机的单个椰青加工时间约为 49 s,其中侧顶切削的加工时间约为 35 s,可近似将 35 s 视为椰青加工节拍,则此椰青加工机的加工效率可达 100 个/h。

综上,椰青旋转速度为 450 r/min,刀具进给速度为 1 mm/s,刀具切削角为 16.7°时,样机运行平稳,动作流畅,

椰青产品的尺寸参数符合加工要求,表面残余绿色椰衣占比<5%,加工成功率可达100%,加工效率可达100个/h,达到设计目标。

## 4 结论

针对当前椰青加工机械化低的问题,设计了一款全自动的椰青加工机。结果表明,影响椰青加工成功率的主次因素为刀具进给速度>椰青旋转速度>刀具切削角。椰青加工机的最优参数组合为椰青旋转速度450 r/min,刀具进给速度1 mm/s,刀具切削角16.7°。该机结构紧凑,成本较低,运行稳定可靠,加工所得椰青的尺寸参数符合预期要求,表面残余绿色椰衣占比<5%,椰青加工成功率可达100%,效率可达100个/h。该机所加工的椰青产品一致性良好,可有效减少人工成本,提高生产效率,实现椰青加工的机械化与自动化,具有较高的工程应用价值。但在上料这一环节,仍然需要依靠人工操作。未来可继续进行自动化上料的研究,最终实现椰青加工的全自动化。

### 参考文献

- [1] 卢琨, 侯媛媛. 海南省椰子产业分析与发展路径研究[J]. 广东农业科学, 2020, 47(6): 145-151.  
LU K, HOU Y Y. Analysis and development path of coconut industry in Hainan Province[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2020, 47(6): 145-151.
- [2] 刘蕊, 弓淑芳, 张照华. 鲜食加工兼用型椰子种质鉴定和综合评价[J]. 热带农业科学, 2024, 44(1): 9-17.  
LIU R, GONG S F, ZHANG Z H. Germplasm identification and comprehensive evaluation of fresh-eating and processing type coconut[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2024, 44(1): 9-17.
- [3] 邓宝华, 李向阳, 杨建振, 等. 椰子副产物精深加工及高值利用研究进展[J]. 中国果菜, 2023, 43(11): 25-30.  
DENG B H, LI X Y, YANG J Z, et al. Research progress in deep processing and high value utilisation of coconut by-products[J]. China Fruit & Vegetable, 2023, 43(11): 25-30.
- [4] 宋美静. 海南椰子新零售与新冷链协同发展路径[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(21): 229-230.  
SONG M J. Hainan coconut new retail and new cold chain collaborative development path[J]. Food Research and Development, 2022, 43(21): 229-230.
- [5] 沈晓君, 刘蕊, 王媛媛, 等. 椰青保鲜技术规程[J]. 科技视界, 2021(32): 21-22.  
SHEN X J, LIU R, WANG Y Y, et al. Technical regulations for preservation of coconut green[J]. Science & Technology Vision, 2021(32): 21-22.
- [6] PANDISELVAM R, MANIKANTAN M R, SUBHASHREE N, et al. Correlation and principal component analysis of physical properties of tender coconut (*Cocos nucifera* L.) in relation to the development of trimming machine[J]. Journal of Food Process Engineering, 2019, 42(6): e13217.
- [7] 伍湘君, 樊军庆, 毛舟, 等. 椰子剥衣机研究现状与发展趋势[J]. 食品与机械, 2014, 30(2): 262-265, 272.  
WU X J, FAN J Q, MAO Z, et al. Research status and developing tendency on coconut husking machine[J]. Food & Machinery, 2014, 30(2): 262-265, 272.
- [8] RATTANAPASKORN S. Design and development of semi-automatic cutting machine for young coconuts[J]. Maejo International Journal of Science and Technology, 2008, 1: 1.
- [9] JARIMOPAS B, RUTTANADAT N. Development of a young coconut fruit trimming machine[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(3): 752-757.
- [10] JARIMOPAS B, RUTTANADAT N, TERDWONGWORAKUL A. An automatic trimming machine for young coconut fruit[J]. Biosystems Engineering, 2009, 103(2): 167-175.
- [11] 张聪. 椰青在线连续切削成型设备设计[J]. 食品与机械, 2019, 35(4): 97-102.  
ZHANG C. Design of the on-line continuous cutting equipment for young coconut[J]. Food & Machinery, 2019, 35(4): 97-102.
- [12] 倪玮. 椰青自动加工关键技术的研究与试验[D]. 海口: 海南大学, 2021: 12-15.  
NI W. Research and experiment on the key technology of coconut green automatic processing[D]. Haikou: Hainan University, 2021: 12-15.
- [13] 刘廷娇, 李武朝, 汝绍锋. 自动转盘式剥椰塑型机结构设计及分析[J]. 食品工业, 2021, 42(5): 282-287.  
LIU T J, LI W Z, RU S F. Design and analysis of an automatic rotary coconut dehusking and shaping machine[J]. The Food Industry, 2021, 42(5): 282-287.
- [14] PANDISELVAM R, MANIKANTAN M R, KOTHAKOTA A, et al. Engineering properties of five varieties of coconuts (*Cocos nucifera* L.) for efficient husk separation[J]. Journal of Natural Fibers, 2020, 17(4): 589-597.
- [15] 汝绍锋, 王居飞, 樊军庆. 蜈蚣爪趾特性仿生钢丝辊刷除椰衣装置设计及参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(22): 27-35.  
RU S F, WANG J F, FAN J Q. Design and parameter optimization of removing coconut fiber device by bionic steel wire roller brush based on characteristics of claw-toe[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(22): 27-35.