doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.029

基于往复插切的便携式香蕉落梳装置设计与试验

段洁利[1]　刘博成[1]　黄朝炜[1]　黄佳涛[1]　莫杏康[1]　马立哲[1]　杨　洲[1,2]
(1.华南农业大学工程学院,广州 510642;2.广东海洋大学机械工程学院,湛江 524088)

摘要:目前香蕉落梳仍依赖于人工,存在劳动强度大、作业效率低、人身安全隐患高等问题。基于往复式插切原理,本文设计了仿形落梳刀具与便携式落梳装置。为了优化装置落梳性能,搭建试验台架,开展了正交试验,采用三因素、两水平的 Box-Behnken 设计方法进行响应面分析,最终在田间试验中评估了装置作业性能。台架试验结果表明,刀具往复速率对切割效果的影响最为显著,其次是刀刃角和装置进给速度;落梳装置最佳工作参数为:刀具往复速率 2 316 冲程/min、装置进给速度 5.76 m/s、刀刃角度 15.6°。此时,峰值应力最大值为 11.10 kPa,落梳成功率为 98.01%,与响应面预测结果相对误差小于 5%。田间试验结果表明,该落梳装置较人工落梳切割力减小 91.09%,同时果柄切口表面粗糙度也显著优于人工插切,总体区域表面粗糙度降低 14.32%。往复插切摩擦作用能有效封闭果柄切口气孔,有利于延长香蕉保鲜期并提升商品价值。设计的落梳装置在降低劳动强度、提高作业效率的同时,实现了切口质量突破性提升。研究结果可为轻简化机械化落梳装备研制提供理论依据,对推动香蕉产业提质增效、实现高质量发展具有实践意义。

关键词:香蕉落梳;便携式;往复式切割;装置设计
中图分类号:S255.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)09-0377-08　　**OSID**:

Design and Experiment of Portable Banana De-handing Device Based on Reciprocating Insertion-cutting

DUAN Jieli[1]　LIU Bocheng[1]　HUANG Chaowei[1]　HUANG Jiatao[1]　MO Xingkang[1]　MA Lizhe[1]　YANG Zhou[1,2]
(1. *College of Engineering*, *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510642, *China*
2. *College of Mechanical Engineering*, *Guangdong Ocean University*, *Zhanjiang* 524088, *China*)

Abstract: At present, banana de-handing remains reliant on manual labor, posing challenges such as high labor intensity, low operational efficiency, and elevated safety risks. Building on the reciprocating insertion-cutting principle, a profiling reciprocating cutter and a portable de-handing device was developed, with subsequent optimization of its performance through bench testing. A three-factor, two-level Box-Behnken orthogonal experimental design was employed for response surface methodology (RSM) analysis, followed by field validation of operational efficacy. Bench test findings indicated that cutting tool reciprocating speed exerted the most pronounced influence on de-handing performance, succeeded by device feed speed and blade angle parameters. Optimal operational conditions were identified as 2 316 strokes per minute (SPM) reciprocating speed, 5.76 m/s feed velocity, and 15.6° blade angle, yielding a maximum peak stress of 11.10 kPa and achieving a 98.01% de-handing success rate less than 5% relative error compared with RSM predictions. The field trial results demonstrated that compared with manual de-handing, the developed de-handing device reduced cutting force by 91.09%, while significantly improving crown incision surface quality with an overall surface roughness reduction of 14.32%. Notably, the friction effect generated by reciprocating cutting effectively sealed the stomata at the crown incision, contributing to extended postharvest preservation period and enhanced market value of bananas. The de-handing device achieved a dual breakthrough: it substantially reduced labor intensity and enhanced operational efficiency, while simultaneously elevating incision quality to unprecedented levels. The research findings can provide theoretical and design foundations for developing simplified,

收稿日期:2025-04-07　修回日期:2025-05-09
基金项目:广东省现代农业产业技术体系创新团队建设项目(2024CXTD09)和国家现代农业产业技术体系建设项目(CARS-31-11)
作者简介:段洁利(1973—),女,教授,博士生导师,主要从事智能农业装备研究,E-mail:duanjieli@scau.edu.cn
通信作者:杨洲(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事水果生产机械化与信息化研究,E-mail:yangzhou@scau.edu.cn

lightweight mechanical de-handing equipment, holding significant practical value for promoting quality upgrading, efficiency improvement, and high-quality development in the banana industry.

Key words: banana de-handing; portable; reciprocating cutting; device design

0 引言

香蕉是世界鲜果中产量、贸易量和贸易额最大的水果之一[1-2]。它也是我国热带和亚热带地区重要的水果产业,在农村经济和社会发展中发挥着重要作用[3-4]。香蕉产后处理环节主要由采摘、田间运输、落梳、清洗消毒、包装运输等组成[5-6]。其中,落梳是指将香蕉果梳从果轴上分离出来,便于每一把果梳进行高效的包装[7]。目前,落梳仍依赖于传统的人工切割方式,面临劳动强度大以及工人易受伤等诸多问题[8]。

研究人员已开展了一系列香蕉落梳研究。明确最佳切割位置对于落梳刀具设计和落梳机械标准化作业至关重要。陈兆春等[9]分析了香蕉果柄结构特征和力学特性,明确了峰值切割力与果柄位置呈线性负相关。ZHAO 等[10-11]分析了香蕉果轴-果柄过渡区、果柄膨胀区和果柄-果指过渡区的切割特性,结果表明果柄膨胀区最大切割力、比切割能和切割强度均最小,其可作为最佳落梳工作区域。

结合香蕉果柄结构特征变化幅度大的特点,研究人员大多对落梳刀具进行仿形设计,以实现果穗轴连续落梳。杨洲等[12]研制了一种回转式香蕉落梳装置,通过齿轮驱动落梳刀具进行旋转运动,实现周向落梳。段洁利等[13]提出了刀具自适应果轴的插切式落梳方案,通过交错排布的环状刀具张合获得了较好的切口质量。XU 等[14]设计了一种基于可展圆弧的仿形香蕉落梳装置,以提高香蕉落梳切口质量。此外,国内外也开展了一系列智能化落梳探索[15-16]。尽管落梳装置优化设计已提升作业成功率,但香蕉果穗形态不规则仍导致现有装置面临实际作业挑战。

往复式切割器通过刀片往复运动实现对作物茎秆切割,其在农业收获机械中应用广泛,如小麦、牧草等作物收获机械。近年来,针对各种作物特性,研究人员对往复式切割器性能进行了深入研究[17-18]。利用往复式切割特性可降低切割力,同时提升切口质量,通过试验优化选择最佳切割器参数,可获得最佳切割效果[19-20]。

针对蕉园生产环境中存在的种植规范缺失、劳动强度过高及设备适应性不足等问题,结合农业领域对便携式装备的迫切需求,本文研发便携式香蕉落梳装备。构建响应面分析刀具往复速率、装置进给速度和刀刃角。并开展田间试验,以期能够降低劳动强度、提升工作效率和果柄切口质量。

1 落梳装置构造与主要部件设计

1.1 落梳装置构造

基于插切与往复切割的香蕉落梳装置,采用锂电池驱动直流有刷电机(额定功率 500 W)作为动力源,经锥齿轮减速器与偏心轮机构将旋转运动转换为行程 15 mm 的刀具往复插切,速度为 0 ~ 2 500 冲程/min。装置通过调速器实现无级变速控制,通过高频次往复机械运动完成果柄切割。其工作原理及实物图如图 1 所示。为实现装置轻便化,锂电池外置于工人腰间,可进行更换。

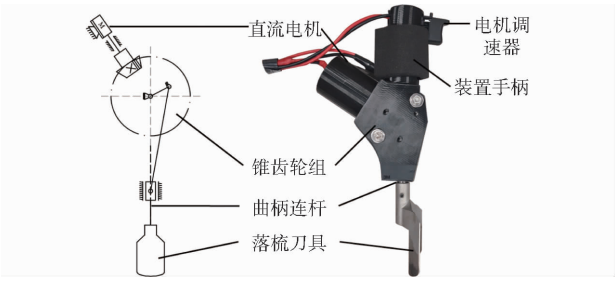


图 1 便携式落梳装置工作原理与实物图

Fig. 1 Working principle diagram and physical diagram of portable banana de-handing device

1.2 香蕉果柄参数与落梳刀具仿形设计

落梳装置中刀具结构和参数对装置落梳性能和果柄切口质量至关重要。影响切割果柄参数有果柄弧长、果柄厚度、果柄包络角等。选取市场占有率最高的巴西蕉为研究对象,其主要物理参数如表 1 所示。

表 1 香蕉果柄的部分物理参数

Tab. 1 Partial physical parameters of banana crown

参数	最大值	最小值	平均值
果柄弧长/mm	145.33	63.27	100.18
果柄厚度/mm	24.56	16.71	20.36
果柄包络角/(°)	208.00	159.00	177.00

基于果柄生物力学特性与人工插切刀具参数,对落梳刀具进行改进与仿形设计。其中,择高强度合金钢材料(316 L)并表面喷砂处理,提高刀具抗腐蚀性和抗粘附性,合金刀具寿命约为 650 h,经处理其寿命可提高约 30%;刀具长度选择 80 mm;刀具厚度选择 2 mm[21-22];刀具刃型选择凸圆刃,能够使切割阻力减小[23]。由于刀具弧长与弧度需匹配果柄参

数，弧长过小且弧度过大易致切口不连续、效率降低；反之则损伤果指或无法落梳。综合落梳试验与测量所得果柄参数，选择刀刃弧长为 83.87 mm，刀刃弧度为 180°。此外，装置采用模块设计，可通过更换不同参数的刀具以更好适应更多品种的香蕉。

2　落梳装置关键参数优化试验

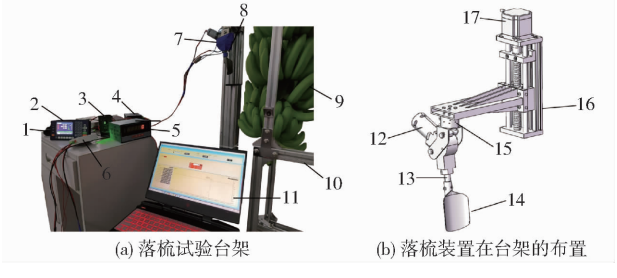
2.1　落梳装置关键参数优化方案

为了提高装置落梳性能，即降低落梳时切割力、提高落梳成功率、改善落梳后切口质量，通过搭建落梳试验台架进行落梳试验，选取相应的试验指标来衡量装置落梳性能，确定落梳装置最佳工作参数。

2.1.1　落梳试验设计

往复式切割器优化参数主要包括往复速率（刀具速度）、装置进给速度、刀具参数（包括刀刃型、齿形、刀刃角等）、滑切角等[24-25]。参照文献[21]试验选取往复速率、装置整体进给速度以及刀具刀刃角为工作参数。并分别对这 3 个关键参数进行单因素与多因素试验，通过试验得到最佳工作参数，并对最佳参数进行验证。

如图 2 所示，搭建试验台架实现参数定量调控。升降电机驱动滑台（速度 0 ~ 9 m/s）控制装置整体进给，往复电机调速器可实现刀具往复速率 0 ~ 2 500 冲程/min 无级控制，同时采用刀刃角 10° ~ 30°的可替换刀具。香蕉来自广州市增城区派潭镇，选取同批采收后大小相近的新鲜巴西蕉，果柄完整，无病虫害。为了减小香蕉果柄个体差异对试验结果的影响，每一参数条件下试验重复 3 次取平均值。



(a) 落梳试验台架　　(b) 落梳装置在台架的布置

图 2　落梳装置关键参数优化试验台架

Fig. 2　Experiment bench for optimizing key parameters of banana de-handing device

1. 锂电池　2. 升降电机控制器　3. 往复电机调速器　4. 升降电机电源　5. 霍尔传感器显示仪　6. 称量测力变送器　7. 落梳装置　8. 霍尔传感器　9. 香蕉　10. 香蕉悬挂装置　11. 便携式计算机　12. 往复电机（直流有刷电机）　13. 连杆　14. 落梳刀具　15. 压力传感器　16. 滑台　17. 升降电机（步进电机）

2.1.2　落梳性能评价指标

峰值应力作为衡量落梳装置落梳性能的另一个指标，取力传感器测得峰值作为香蕉果柄峰值切割力 F_{max}。因试验时香蕉果柄物理参数不同（果柄弧长、厚度、含水率、弹性模量等）会导致峰值切割力发生变化，为了适应所有的切割环境，峰值应力为果柄峰值切割力 F_{max} 与果柄截面面积比值。

切割功可以用来衡量落梳性能[26]，对切割力进行落梳时间积分可得切割功。

依据文献[27]切口质量从 0 ~ 100 分评分，得分越高表示其切口质量越佳。

落梳成功率 η 反映落梳装置对果穗上所有果梳切割的顺畅程度[28]，其计算式为

$$\eta = \frac{S_a - S_b}{S_a} \times 100\% \tag{1}$$

式中　η——落梳成功率

S_a——果柄纵切面的面积，mm^2

S_b——落梳过程中果柄未被插切部分对应纵切面面积与由于重力的作用被撕裂部分对应纵切面面积总和，mm^2

2.2　单因素试验

2.2.1　往复速率对落梳性能的影响

设定装置进给速度为 6 m/s、刀具刀刃角为 20°、往复速率为 1 700 ~ 2 500 冲程/min，分析刀具往复速率对落梳性能的影响，结果如图 3 所示。

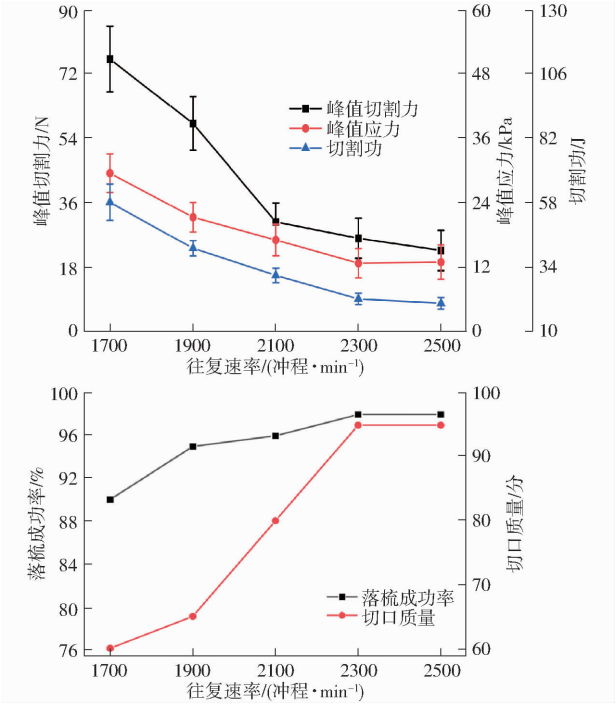


图 3　往复速率对落梳性能的影响

Fig. 3　Impact of reciprocating rate on banana de-handing performance

由图 3 可知，随着刀具往复速率增加，刀具对果柄的挤压距离减少，使得果柄更快到达撕裂极限，进而果柄峰值切割力、峰值应力和切割功逐渐降低。

同时,落梳成功率和切口质量显著提升。当刀具往复速率达到 2 300 冲程/min 时,落梳性能趋于稳定,对应的峰值切割力、峰值应力和切割功分别为 26.13 N、12.72 kPa 和 21.96 J,落梳成功率和切口质量分别达到 98% 和 95 分。

2.2.2 装置进给速度对落梳性能的影响

设往复速率为 2 100 冲程/min、刀具刀刃角为 20°、装置进给速度为 3 ~ 9 m/s,装置进给速度对落梳性能的影响如图 4 所示。

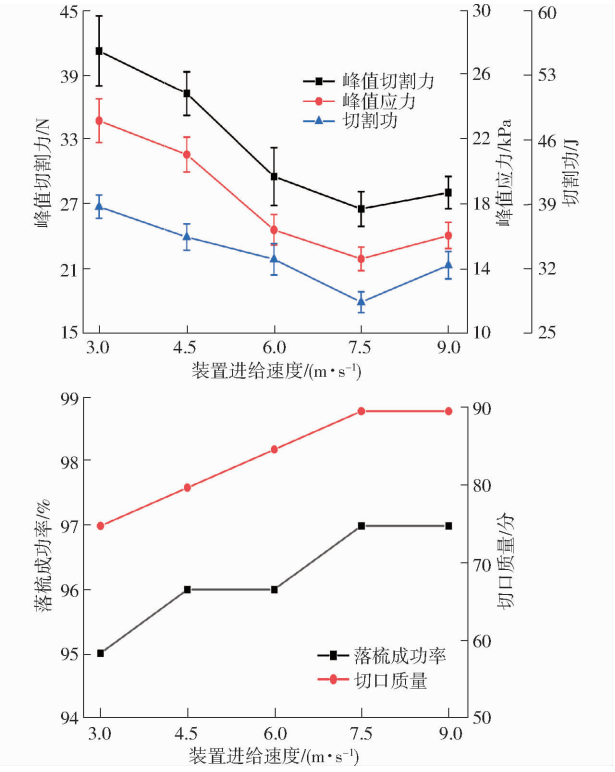


图 4 装置进给速度对落梳性能的影响

Fig. 4 Impact of device feed rate on banana de-handing performance

从图 4 可以看出,装置进给速度对落梳性能的影响与往复速率类似,这是因为装置进给速度与往复速率一样都是通过降低果柄切割时的挤压阶段所占比例来影响落梳装置落梳性能。当装置进给速度达到 7.5 m/s 时,落梳性能趋于稳定,对应的峰值切割力、峰值应力和切割功分别为 26.50 N、14.55 kPa 和 28.31 J,落梳成功率和切口质量分别达到 97% 和 90 分。

2.2.3 刀刃角对落梳性能的影响

设往复速率为 2 100 冲程/min、装置进给速度为 6 m/s、刀具刀刃角为 10° ~ 30°,刀具刀刃角对落梳性能的影响如图 5 所示。

从图 5 可以看出,随着刀刃角从 30°逐渐减小到 15°时,对落梳性能改善效果也越来越好,刀刃角为 15°时,对应的峰值切割力、峰值应力和切割功分别为 20.98 N、13.98 kPa 和 29.12 J,落梳成功率和切口质量分别达到 98 % 和 95 分;刀刃角减小到 15°后,对落梳性能的影响不再显著。

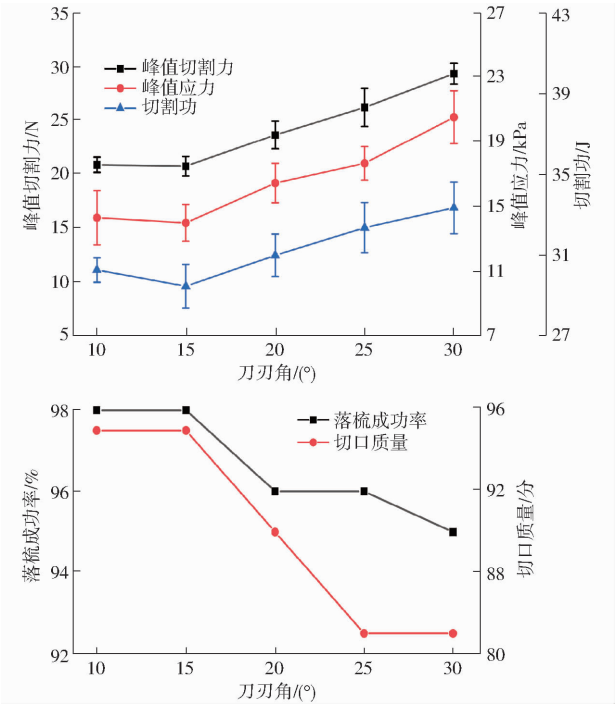


图 5 刀刃角对落梳性能的影响

Fig. 5 Impact of blade angle on banana de-handing performance

原因为香蕉果柄不是均匀体,在不同方向上的机械性能并不相同,随着削切角(切割方向与果柄纤维的法线方向的夹角)增大,刀刃沿果柄切向位移愈大,切割时所需的法向切削力(果柄纤维的法线方向上的分力)便愈小;同时齿刃刀刃口在切向沿果柄产生滑移,微齿起了切开果柄纤维的作用,则切割力减小;但当削切角增加到一定值时,对切割力的影响将不再显著[29]。

2.3 多因素试验与响应面

采用三因素两水平 Box - Behnken 设计方法,以峰值应力和落梳成功率为响应,对装置落梳过程中刀具往复速率、进给速度和刀刃角进行响应面优化,试验因素编码如表 2 所示。

多因素试验安排和试验结果如表 3 所示。优化模型为

表 2 试验因素编码

Tab. 2 Coding of experiment factors

编码	因素		
	往复速率 X_1/(冲程·min^{-1})	装置进给速度 X_2/(m·s^{-1})	刀刃角 X_3/(°)
1	2 500	9	30
0	2 100	6	20
-1	1 700	3	10

表 3　多因素试验结果

Tab. 3　Multi-factorial experiment results

序号	因素			峰值切割应力 Y_1/kPa	落梳成功率 Y_2/%
	往复速率 X_1/(冲程·min^{-1})	装置进给速度 X_2/(m·s^{-1})	刀刃角 X_3/(°)		
1	2 100	9	30	19.12	87
2	2 500	6	30	19.42	93
3	2 100	6	20	13.86	95
4	1 700	6	10	28.96	79
5	2 100	9	10	18.53	96
6	2 100	3	10	16.60	83
7	2 100	6	20	12.27	96
8	1 700	3	20	34.24	75
9	2 500	9	20	17.35	100
10	2 100	6	20	13.46	95
11	1 700	6	30	31.90	78
12	2 100	6	20	13.42	96
13	1 700	9	20	26.81	85
14	2 100	6	20	13.62	94
15	2 100	3	30	27.63	83
16	2 500	3	20	16.50	90
17	2 500	6	10	13.93	100

$$Y_1 = 279.880\,31 - 0.207\,608X_1 - 7.304\,23X_2 - 0.956\,737X_3 + 0.001\,724X_1X_2 + 0.000\,160X_1X_3 - 0.870\,49X_2X_3 + 0.000\,042X_1^2 + 0.406\,350X_2^2 + 0.034\,854X_3^2 \quad (R^2 = 0.996\,6) \tag{2}$$

$$Y_2 = -112.332\,81 + 0.125\,906X_1 + 8.341\,67X_2 + 2.615\,00X_3 - 0.003\,75X_1X_3 - 0.075\,00X_2X_3 - 0.000\,023X_1^2 - 0.441\,667X_2^2 - 0.397\,50X_3^2 \quad (R^2 = 0.991\,5) \tag{3}$$

峰值应力与落梳成功率方差分析结果(表 4)表明,峰值应力与落梳成功率优化模型均极显著($P < 0.01$),且失拟项 P 均大于 0.05,表明试验结果与优化模型预测值具有良好拟合度。

往复速率、装置进给速度和刀刃角交互作用对峰值应力 Y_1 与落梳成功率 Y_2 影响的响应曲面如图 6 所示。结果表明,随着往复速率和装置进给速度的增大,刀刃角减小,峰值应力呈先上升后下降趋势、切口质量呈增大趋势,符合单因素试验结果变化规律。

将落梳装置落梳性能评价指标峰值应力最小值和落梳成功率最大值作为优化目标,运用 Design-Expert 13 软件中的 Optimization 功能对落梳装置 3 个工作参数进行优化,目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \min Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \max Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 1\,700 \text{ 冲程/min} \leqslant X_1 \leqslant 2\,500 \text{ 冲程/min} \\ 3 \text{ m/s} \leqslant X_2 \leqslant 9 \text{ m/s} \\ 10° \leqslant X_3 \leqslant 30° \end{cases} \end{cases} \tag{4}$$

表 4　峰值应力和落梳成功率的回归方程方差分析

Tab. 4　Analysis of variance (ANOVA) for regression equation of peak stress and de-handing success rate

方差来源	峰值应力 Y_1					落梳成功率 Y_2				
	平方和	自由度	均方值	F	P	平方和	自由度	均方值	F	P
模型	821.29	9	91.25	229.09	<0.000 1 **	994.98	9	110.55	90.51	<0.000 1 **
X_1	17.07	1	17.07	42.85	0.000 3 **	0.000 1	1	0.000 1	0.000 1	0.994 2
X_2	56.30	1	56.30	141.34	<0.000 1 **	66.49	1	66.49	54.44	0.000 2 **
X_3	27.25	1	27.25	68.42	<0.000 1 **	20.27	1	20.27	16.59	0.004 7 **
X_1X_2	17.12	1	17.12	42.99	0.000 3 **	0.000 0	1	0.000 0	0.000 0	1.000 0
X_1X_3	1.63	1	1.63	4.10	0.082 4	9.00	1	9.00	7.37	0.030 0 *
X_2X_3	27.28	1	27.28	68.48	<0.000 1 **	20.25	1	20.25	16.58	0.004 7 **
X_1^2	191.37	1	191.37	480.43	<0.000 1 **	58.42	1	58.42	47.83	0.000 2 **
X_2^2	56.31	1	56.31	141.38	<0.000 1 **	66.53	1	66.53	54.47	0.000 2 **
X_3^2	51.15	1	51.15	128.41	<0.000 1 **	66.53	1	66.53	54.47	0.000 2 **
残差	2.79	7	0.40			8.55	7	1.22		
失拟项	1.28	3	0.43	1.12	0.44	5.75	3	1.92	2.74	0.18
纯误差	1.51	4	0.38			2.80	4	0.70		
总离差	824.08	16				1 003.53	16			

注：** 表示影响极显著($P < 0.01$)，* 表示影响显著($0.01 \leqslant P < 0.05$)。

通过对式(4)进行优化求解,得到落梳装置工作性能最佳参数:往复速率为 2 316 冲程/min、装置进给速度为 5.76 m/s、刀刃角为 15.6°,此时,峰值应力 Y_1 为 11.00 kPa,落梳成功率 Y_2 为 98.62%。

2.4　验证试验

随机选取 3 串生长状态良好的成熟巴西蕉,对优化模型得到的装置最佳参数准确性进行验证。验证试验设定刀具往复速率为 2 316 冲程/min、装置

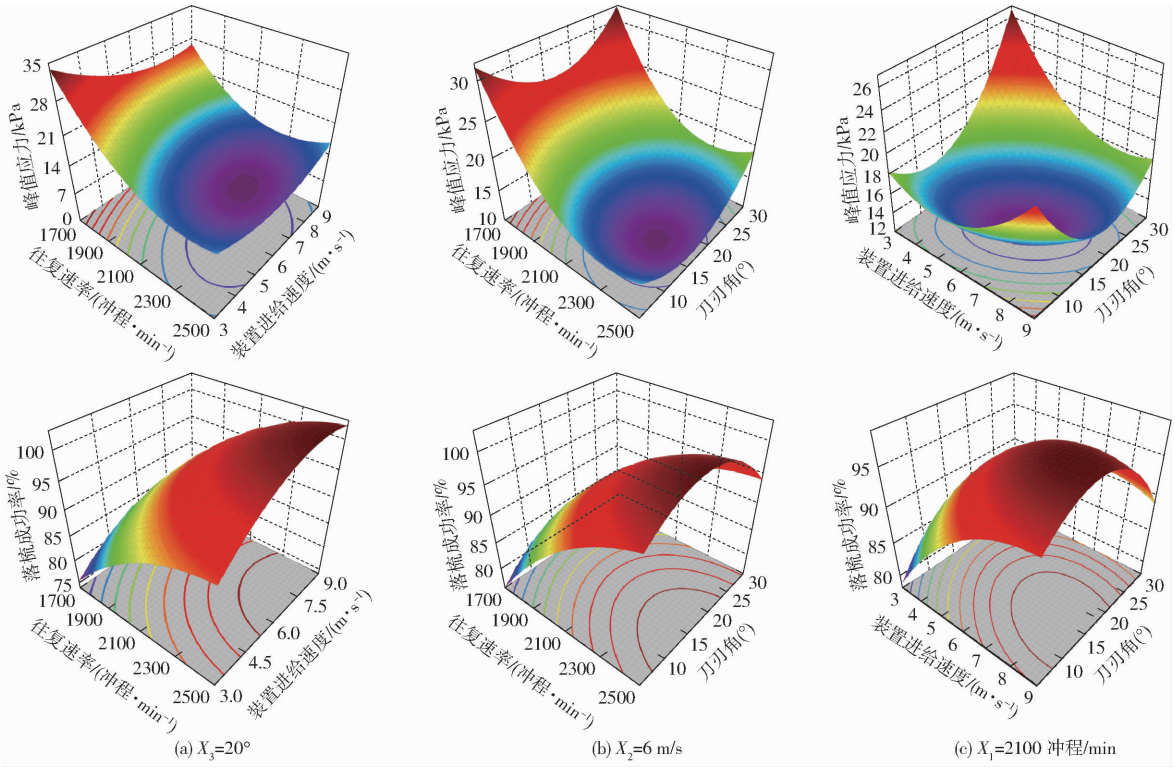


图 6 评价指标对各试验因素交互作用响应曲面

Fig. 6 Response surfaces of evaluation metrics to interaction effects among various experimental factors

进给速度为 5.76 m/s、刀刃角为 15.6°,试验重复 12 次,以果柄的峰值应力和落梳成功率的平均值作为试验结果。结果表明,平均峰值应力为 11.10 kPa,平均落梳成功率为 98.01%,其与优化模型峰值应力预测值(11.00 kPa)和落梳成功率预测值(98.62%)相对误差小于 5%,证明了以峰值切割力和落梳成功率为响应优化模型的有效性和准确性。

3 田间试验

3.1 与传统人工插切落梳性能对比

开展田间试验对落梳装置可行性进行验证,并与人工插切落梳进行对比。通过拍摄便携式装置与人工插切落梳的完整落梳过程,截取刀具接触果柄至果梳分离的关键帧,进而确定单个果梳落梳时间;装置预期使用寿命为 2 年,人工落梳刀具使用寿命一般为 2 个月;刀具适应性由落梳后果柄切口质量评定,结果如图 7 和表 5 所示。

结果表明,由于刀刃存在微观锯齿状结构,导致在往复插切过程中产生锯切现象,从而增强果柄延性断裂,有助于降低切割力[30]。与人工插切落梳相比,便携式落梳装置峰值切割力约降低 91.09%。此外,对于落梳效率,便携式落梳装置亦有显著提升,对比未经过落梳培训的工人效率提升 3 倍以上。

3.2 果柄切口

果柄纤维呈现三层堆叠形态,即韧皮部、木质部

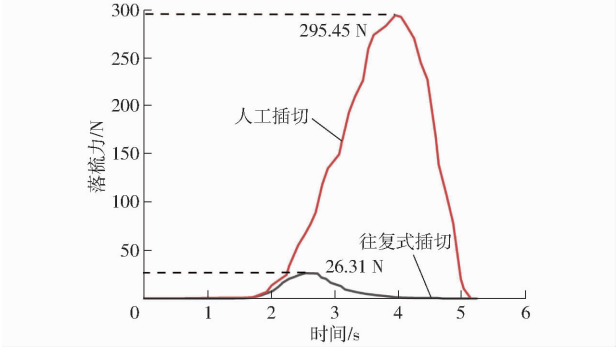


图 7 便携式落梳装置与传统人工插切落梳力对比

Fig. 7 Comparison of de-handing forces between portable banana de-handing device and traditional manual insertion-cutting

表 5 两种落梳工具田间试验对比

Tab. 5 Comparative field trial analysis of two banana de-handing tools

参数	便携式落梳装置	人工插切落梳刀具
质量/g	1 052	246
单果梳平均落梳时间/s	0.50~1.20	0.50~1.50(熟练工人) 3.50~6.50(生疏工人)
峰值切割力/N	26.31	295.45
刀具适应性	良好	一般
续航时间/h	2~3	-
落梳技能掌握时间/d	1~2	3~5
装置成本/元	494	35
每日作业成本/元	1.42	0.80

注:熟练工人为长期进行落梳作业的蕉园工人,生疏工人为不从事落梳作业的蕉园工人。

和形成层，如图 8 所示。其中，韧皮部和形成层属于基本组织，木质部属于机械组织。

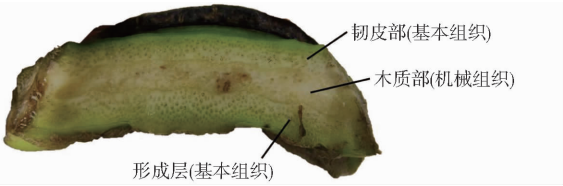


图 8　香蕉果柄纤维分层分布形态

Fig. 8　Layered morphology of fiber distribution in banana crown

为了量化落梳装置和人工落梳对果柄纤维 3 层堆叠形态的影响，对切割完成后果柄进行抗氧化、切片处理，通过超景深显微镜（VHX－900F 型，KEYENCE 基恩士有限公司）对果柄切口断面处进行观察，表面粗糙因子 r 由切口观察面表面积与其投影面积比值确定，切口形态如图 9 所示，表 6 为人工插切和快速往复式插切下（作业参数为往复速率 2 316 冲程/min、装置进给速度为 6 m/s、刀刃角为 20°）果柄切口表面的粗糙因子。

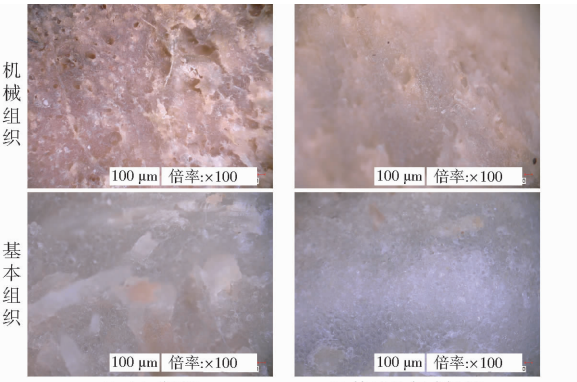


图 9　人工插切和往复式插切切口微观形态

Fig. 9　Incision morphology of traditional manual insertion-cutting and reciprocating insertion-cutting

表 6　香蕉果柄切口表面粗糙因子

Tab. 6　Surface roughness factor of incision on banana crown

切口区域	粗糙因子	
	人工插切	往复式插切
韧皮部（基本组织）	1.41	1.20
木质部（机械组织）	1.45	1.25
形成层（基本组织）	1.40	1.20

由表 6 可知，与人工插切时香蕉果柄断面存在着大量不平整的纤维，往复式插切显著降低了香蕉果柄韧皮部（降低 14.89%）、木质部（降低 13.79%）和形成层（降低 14.32%）的粗糙度。原因在于往复式插切是多次快速切割过程的叠加，刀具本身会与前次切割形成的切口断面比较平整。此外，由于往复式插切引起的剧烈摩擦作用，进而导致切口表面气孔封闭，有助于果柄切口的伤口愈合、防止微生物入侵及香蕉保鲜时间延长[31]。

4　结论

（1）设计了一种便携式落梳装置，与人工插切落梳相比，降低了劳动强度，可将落梳时峰值切割力降低约 91.09%，且落梳后切割表面粗糙度改善约 14.32%。

（2）试验结果表明，影响显著性依次为往复速率、刀刃角与装置进给速度；最佳工作参数为：往复速率 2 316 冲程/min、装置进给速度 5.76 m/s、刀刃角 15.6°，此时，平均峰值应力为 11.10 kPa，落梳成功率为 98.01%，与预测值相对误差小于 5%。

（3）田间试验结果表明，落梳装置可显著降低落梳力、降低落梳工人劳动强度，可提升落梳效率，由果柄切口不同区域图像可知，基于快速往复式插切方法切口比人工插切切口更光滑，同时可以减少气孔数量，可延长香蕉保鲜时间。

参　考　文　献

[1] 邹冬梅，范琼. 世界香蕉生产、贸易现状与产业展望[J]. 广东农业科学，2022，49(7)：131－140.
ZOU Dongmei，FAN Qiong. Present situation of globle banana production and trade and prospect for banana industry[J]. Guangdong Agricultural Sciences，2022，49(7)：131－140.（in Chinese）

[2] XIE B W，JIN M H，DUAN J L，et al. Design and analysis of a flexible adaptive supporting device for banana harvest[J]. Agriculture，2022，12(3)：18.

[3] 方伟，唐诚，王玉梅. 广东省香蕉产业发展现状、面临瓶颈及对策[J]. 中国果树，2022(12)：90－93.
FANG Wei，TANG Cheng，WANG Yumei. Current development status，bottlenecks，and countermeasures of the banana industry in Guangdong Province[J]. China Fruits，2022(12)：90－93.（in Chinese）

[4] 王芳，谢江辉. 我国香蕉产业“十三五”回顾与“十四五”展望[J]. 中国热带农业，2022(3)：15－22.
WANG Fang，XIE Jianghui. Review of Chinese banana industry during the 13th five-year plan period and outlook of this industry during the 14th five-year plan period[J]. China Tropical Agriculture，2022(3)：15－22.（in Chinese）

[5] 黄丽娜，魏守兴. 宝岛蕉优质生产技术[M]. 北京：中国农业科学技术出版社，2017.

[6] MOHAMED M A M，CORTESI P，SARACCHI M. Etiological agents of crown rot of organic bananas in Dominican Republic[J]. Postharvest Biology and Technology，2016，120：112－120.

[7] GUO J，YANG Z，KARKEE M，et al. Robotization of banana de-handing under multi-constraint scenarios：challenges and future directions[J]. Artificial Intelligence in Agriculture，2025，15(1)：1－11.

[8] MERINO G，SILVA L D，MATTOS D，et al. Ergonomic evaluation of the musculoskeletal risks in a banana harvesting activity

through qualitative and quantitative measures, with emphasis on motion capture (Xsens) and EMG[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2019,69:80 – 89.
[9] 陈兆春, 杨洲, 朱正波, 等. 香蕉梳柄的结构特征及其力学特性试验[J]. 江苏农业科学, 2017,45(5):223 – 227.
CHEN Zhaochun, YANG Zhou, ZHU Zhengbo, et al. Structural characteristics and mechanical properties of banana comb handle[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(5): 223 – 227. (in Chinese)
[10] ZHAO L, YANG H J, XIE H, et al. Effects of morphological and anatomical characteristics of banana crown vascular bundles on cutting mechanical properties using multiple imaging methods[J]. Agronomy-Basel, 2020,10(8):15.
[11] ZHAO L, HUANG C W, YANG Z, et al. Characterization of banana crowns: microscopic observations and macroscopic cutting experiments[J]. Agriculture, 2024,14(10):12.
[12] 杨洲, 段洁利, 李君, 等. 一种回转式香蕉落梳装置: 201710211666.5[P]. 2017 – 08 – 29.
[13] 段洁利, 朱正波, 杨洲. 一种变径冲击插切式环形香蕉落梳装置: 201410314515.9[P]. 2014 – 11 – 05.
[14] XU Z Y, YANG Z, DUAN J L, et al. Design and experiment of symmetrical shape deployable arc profiling mechanism based on composite multi-cam structure[J]. Symmetry, 2019,11(8):17.
[15] ARM Hub, Hort Innovation, Australian Banana Growers Council. Feasibility of automated banana de-handing in Australia [EB/OL]. [2022 – 02 – 22].
[16] HE J Y, DUAN J L, YANG Z, et al. Method for segmentation of banana crown based on improved DeepLabv3 + [J]. Agronomy, 2023,13(7):16.
[17] 张悦湘, 罗海峰, 张恬静. 作物收获机械往复式切割器切割性能测试方法与试验设备研究进展[J]. 时代农机, 2020, 47(2):72 – 76.
[18] SOLEIMANI N, KAMANDAR M R, KHOSHNAM F, et al. Defining and modelling sesame stalk shear behaviour in harvesting by reciprocating cutting blade[J]. Biosystems Engineering, 2023,229:44 – 56.
[19] 张博文, 李爱潮, 郑志安, 等. 川麦冬往复切割式剪果装置设计与仿真试验[J]. 农业机械学报, 2023,54(增刊 2): 81 – 90.
ZHANG Bowen, LI Aichao, ZHENG Zhian, et al. Design and simulation experiments of reciprocating cutting tuber removal device for *Ophiopogon japonicus*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(Supp. 2):81 – 90. (in Chinese)
[20] ARUNA T N, SAHOO P K, KUSHWAHA D K, et al. Static and dynamic cutting forces in coriander crop harvesting: engineering insights for harvester optimization[J]. Smart Agricultural Technology, 2025,10:100772.
[21] 朱正波. 香蕉机械落梳关键技术研究[D]. 广州:华南农业大学, 2017.
ZHU Zhengbo. Research on key technologies of banana de-handing mechanization[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
[22] 陈兆春. 香蕉果柄切割特性与落梳过程研究[D]. 广州:华南农业大学, 2017.
CHEN Zhaochun. Study on cutting characteristics and cutting process of banana crown[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
[23] 王宏立, 张伟, 董晓威, 等. 玉米根茬剪切力学性能试验与分析[J]. 实验力学, 2014,29(1):73 – 82.
WANG Hongli, ZHANG Wei, DONG Xiaowei, et al. Experiment and analysis of shear mechanical property of corn stubbles [J]. Journal of Experimental Mechanics,2014,29(1):73 – 82. (in Chinese)
[24] 陈诚. 往复切割器式灌木平茬机切割力的研究[D]. 北京:北京林业大学, 2011.
CHEN Cheng. Research of cutting force for reciprocating knife bush harvester[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011. (in Chinese)
[25] PANG J, LI Y M, JI J T, et al. Vibration excitation identification and control of the cutter of a combine harvester using triaxial accelerometers and partial coherence sorting[J]. Biosystems Engineering, 2019,185:25 – 34.
[26] 宋占华, 宋华鲁, 耿爱军, 等. 棉花秸秆双支撑切割性能试验[J]. 农业工程学报, 2015,31(16):37 – 45.
SONG Zhanhua, SONG Hualu, GENG Aijun, et al. Experiment on cutting characteristics of cotton stalk with double supports [J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(16):37 – 45. (in Chinese)
[27] 许泽宇. 基于振动切割的香蕉仿形落梳机理研究[D]. 广州:华南农业大学, 2019.
XU Zeyu. Research on the mechanism of banana profiling cutting based on vibration cut[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2019. (in Chinese)
[28] 郭杰. 香蕉自适应仿形落梳机理及装置研究[D]. 广州:华南农业大学, 2022.
GUO Jie. Research on the mechanism and device of banana self-adaptive profiling de-handing[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2022. (in Chinese)
[29] 李耀明, 秦同娣, 陈进, 等. 玉米茎秆往复切割力学特性试验与分析[J]. 农业工程学报, 2011,27(1):160 – 164.
LI Yaoming, QIN Tongdi, CHEN Jin, et al. Experiments and analysis on mechanical property of corn stalk reciprocating cutting[J]. Transactions of the CSAE, 2011,27(1):160 – 164. (in Chinese)
[30] 辛迪, 党柯华, 邓家锋, 等. 基于压电效应的果实采收超声切割机理分析[J]. 农业机械学报, 2023,54(增刊 2):91 – 100.
XIN Di, DANG Kehua, DENG Jiafeng, et al. Mechanism analysis of ultrasonic cutting for fruit harvesting based on piezoelectric effect[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(Supp. 2):91 – 100. (in Chinese)
[31] 张军, 辛迪, 蓝伟科, 等. 簇生番茄果梗超声切割过程仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2024,55(3):153 – 161.
ZHANG Jun, XIN Di, LAN Weike, et al. Simulation and experiment on ultrasonic cutting process of clustered tomato stems [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(3):153 – 161. (in Chinese)