

段洁利, 易文峰, 王红军, 等. 香蕉串果夹持机构设计与试验 [J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(2): 116-123.
DUAN Jieli, YI Wenfeng, WANG Hongjun, et al. Design and test of banana skewer fruit holding mechanism[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(2): 116-123.

香蕉串果夹持机构设计与试验

段洁利¹, 易文峰¹, 王红军¹, 赵 镭¹, 王 玉¹, 杨 洲^{1,2}

(1 华南农业大学 工程学院, 广东 广州 510642; 2 广东省山区特色
农业资源保护与精准利用重点实验室, 广东 梅州 514000)

摘要:【目的】香蕉收获机械装备需要承担大质量蕉串, 设计一种夹持机构在保证动作灵活有效的同时, 具有较高的强度和可靠的夹持力。【方法】提出一种用于采摘香蕉的内掌带钉抱掌夹持机构, 对影响抱掌夹持力的不同组合因素进行了夹持效果测试, 搭建了夹持试验平台。选择影响夹持效果的气缸压力、钉子数量和钉子排列方式 3 个主要因素, 采用单因素试验和响应曲面法进行夹持力效果测试。【结果】在气缸压力试验中, 当气缸压强为 0.4 MPa 时, 对应的拉力为 500 N 左右, 最接近蕉柄和抱掌之间的最大静摩擦力, 可以稳定夹持。在钉子排列方式的试验过程中, 矩形可承受的摩擦力最大, 为 800 N, 大于蕉柄和抱掌之间的最大静摩擦力, 可以获得稳定的夹持效果。在钉子数量的试验过程中, 钉子数量分别为 8 和 10 个时获得的拉力比较接近, 原因可能是香蕉柄不是规则的圆柱形, 导致圆形抱掌上的钉子未必全部扎进蕉柄内, 钉子数量为 8 或 10 个时, 只有 6 个钉子扎进蕉柄进行有效的夹持; 钉子数量超过 10 个时, 拉力不升反降, 出现该现象的原因可能是钉子越多, 出现互相干扰的现象越严重, 导致有效钉子的数量不升反降。【结论】影响夹持机构夹持力效果的因素: 气缸压力>钉子排列方式>钉子数量, 最佳参数组合: 气缸压强 0.4 MPa、钉子数量 10 个、矩形排列方式。本文为平地蕉园香蕉收获机械装备关键部件夹持机构的设计提供了理论参考。

关键词: 香蕉采摘; 机械化; 钉子夹持; 响应曲面法; 设计与试验

中图分类号: S233.74

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2021)02-0116-08

Design and test of banana skewer fruit holding mechanism

DUAN Jieli¹, YI Wenfeng¹, WANG Hongjun¹, ZHAO Lei¹, WANG Yu¹, YANG Zhou^{1,2}

(1 College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

2 Laboratory of Conservation and Precision Utilization of Characteristic Agricultural Resources in Mountainous Areas, Meizhou 514000, China)

Abstract: 【Objective】Banana harvesters are equipped to carry large loads of bunches. We propose a nail holding mechanism for bananas which posses high strength and reliable clamping force while ensuring flexible and effective operation. 【Method】An inner palm holding mechanism with nails for picking bananas was designed, the clamping effects of different combination factors affecting the gripping force were tested, and the clamping test platform was built. The three main factors of cylinder pressure, the number and arrangement of nails affecting the clamping effect were selected, and the single factor experiment and response surface method were used to test the clamping force. 【Result】In the cylinder pressure test, when the cylinder pressure was

收稿日期: 2020-09-14 网络首发时间: 2020-11-17 08:45:09

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20201116.1611.002.html>

作者简介: 段洁利 (1973—), 女, 副教授, 博士, E-mail: duanjieli@scau.edu.cn; 通信作者: 杨 洲 (1972—), 男, 教授, 博士, E-mail: yangzhou@scau.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (51675189); 现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-31)

0.4 MPa, the corresponding tension was about 500 N closest to the maximum static friction force between the banana handle and the palm, and banana could be clamped stably. In the test of nail arrangement, the friction that the rectangle could withstand was the maximum with a value of 800 N, which was greater than the maximum static friction force between the banana handle and the palm, and the stable clamping effect could be obtained. In the test of nail number, when the numbers of nails were eight and ten, their pulls closed to. The reason may be that the banana handle is not a regular cylindrical shape, so that the nails on the round holding palm may not be all inserted into the banana handle. When the number of nails was eight or ten, only six nails plunged into banana handle and effectively clamped. When the number of nails exceeded ten, the tension dropped instead of rising. The reason for this phenomenon may be that the more nails there are, the more serious the mutual interference occurs, and the number of effective nails decreases instead of rising. 【Conclusion】 The factors influencing the clamping force effect of clamping mechanism are cylinder pressure > nail arrangement > number of nails. The optimal parameter combination is 0.4 MPa cylinder pressure, ten nails and rectangular arrangement. This paper provides a theoretical reference for the design of clamping mechanism of key components of banana harvester equipment in flat banana plantation.

Key words: banana picking; mechanization; nail clamp; response surface method; design and experiment

近年来,随着我国农业劳动力的下降,收获高峰期找不到劳动力^[1-3],农业采摘机器人成为农业工程领域的研究热点^[4-9]。夹持机构作为与农业生物对象直接接触的末端执行器是农业采摘机械装备的关键机构。目前国内文献报道的夹持机构大多数针对体积较小、质量较轻的串形或单粒水果,如苹果、荔枝、葡萄和草莓等。尹建军等^[10]设计的葡萄采摘机构中,用电机通过连杆机构驱动四指,从果实外包络抓取葡萄。苗玉彬等^[11]设计的苹果夹持机构中,利用压力传感器测得所需要的夹持力,并将数值输给夹持末端,使得夹持力的数值比较精确。张凯良等^[12]设计的草莓夹持器中,先利用摄像头定位,再通过2个光纤传感器探测机械爪中是否存在果柄,并进行切割,在切割的同时机械手对草莓进行夹持,一次性完成草莓的采摘。陈燕等^[13]设计了具有4个自由度的结构,根据D-H坐标系建立了荔枝采摘机械手运动学模型并用于采摘荔枝。比利时的Baeten等^[14]研制出一种苹果采摘机器人,该机器人的手臂具有6个自由度,由液压升降装置驱动机械手臂作业。澳大利亚团队研制的香蕉采收机,以液压伸缩臂和切割机进行采收,节省了人力物力^[15]。日本研制了一种由多自由度的机械手臂和视觉控制系统构建而成的葡萄采收器^[16]。

中国是香蕉生产大国,与其他果蔬相比,香蕉属于串形水果,质量和体积大、果柄粗,难以用常规夹持机构夹持。人工采摘时,通常一人肩托着香蕉串、一人用刀砍断果柄^[17]。本研究模拟人抱紧香蕉串的动作行为,设计了一种夹持蕉串果柄的末端执行机构,即内掌带钉抱掌夹持装置;通过搭建夹持

试验平台,选择影响夹持效果的气缸压力、钉子数目以及钉子排列方式3个主要因素,采用单因素试验和响应曲面法进行了抱掌夹持力不同组合因素的效果测试,取得了较为理想的设计参数和试验数据,为夹持机构的进一步优化设计提供了理论和实践参考。

1 带钉抱掌夹持机构设计

模拟人工收获时手掌把握对象的夹持方式^[18],本夹持机构设计圆弧形抱掌,通过抱掌内表面设置钉子增大抱掌与蕉柄间的附着力,设计的香蕉果柄夹持机构如图1a所示。电机通过联轴器驱动丝杆转动,螺旋传动带动螺套往复运动,与螺套固连的抱掌在四杆机构驱动下实现张开与闭合。夹持机构推动抱掌闭合时,抱掌在抱紧蕉柄时的受力状态如图1c所示。

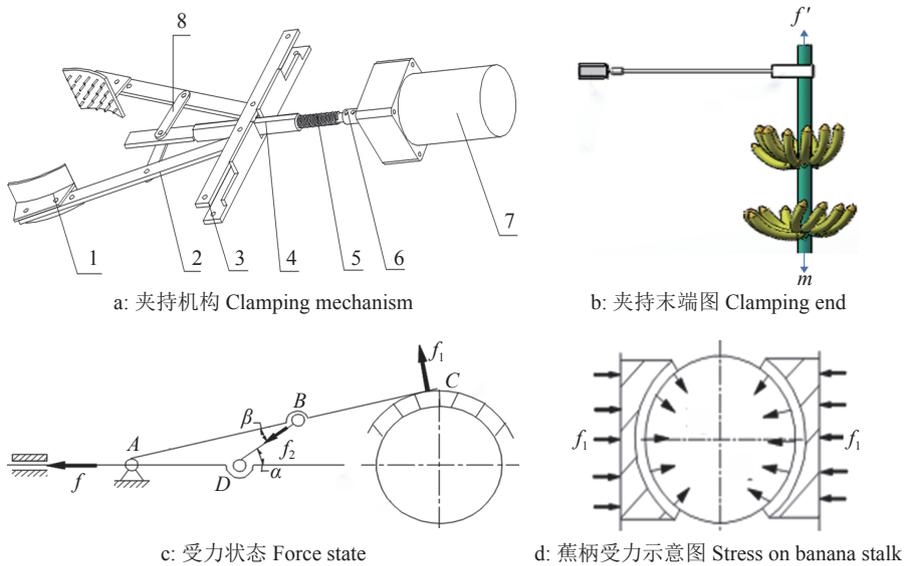
机构静力平衡关系如下:

$$f_1 = f_2 \sin \beta, \quad (1)$$

$$f_2 \cos \alpha = f/2, \quad (2)$$

式中, f_1 为钉子对蕉柄的挤压力, f_2 为连接杆对夹持杆的拉力, α 为连接杆和丝杆之间的夹角, β 为连接杆和夹持杆之间的夹角, f 为夹持机构对蕉柄的挤压力。

由式(1)和式(2)可知,夹持机构对蕉柄的挤压力(f)是影响抱掌与蕉柄之间静摩擦力的主要因素, f 是选择电机功率和螺旋机构设计的重要参数。为了轻量化夹持机构并获得可靠的夹持力,需要研



1: 抱掌, 2: 夹持杆, 3: 支撑杆, 4: 内丝杆, 5: 外丝杆, 6: 联轴器, 7: 夹持电机, 8: 连接杆
 1: Clamping hands, 2: Clamping rod, 3: Support rod, 4: Internal lead rod, 5: External lead rod, 6: Coupling, 7: Clamping motor, 8: Connecting rod

图 1 夹持机构及受力图

Fig. 1 Clamping mechanism and force diagram

究夹持因素对夹持力的影响规律, 以获得优化的机构组合参数。

2 试验方法

2.1 夹持试验

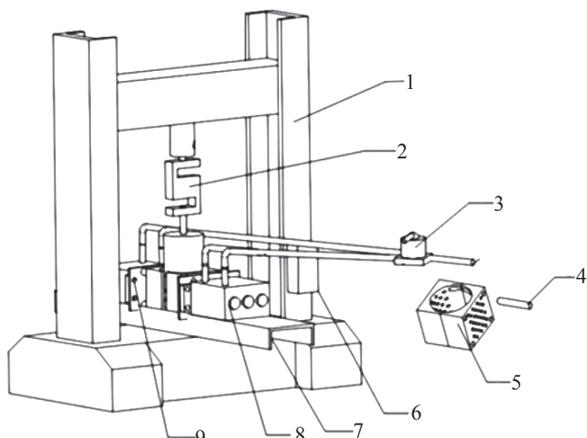
2.1.1 夹持力分析 夹持机构由螺旋机构和四杆机构组成。夹持过程中, 抱掌通过螺旋机构带动四杆机构运动, 获取作用在蕉柄上的压力, 当蕉串从蕉柄上切割分离后, 蕉串的质量 (m) 由抱掌与蕉柄之间产生的摩擦力 (f') 承担 (图 1b), 抱掌夹持状态下与蕉柄截面受力示意图如图 1d。由图 1d 可知, 夹持机构作用在抱掌上的挤压力 (f_1)、

抱掌内表面钉子的排列方式和钉子数量是影响抱掌和蕉柄之间静摩擦力的主要因素, 通过试验测试夹持各因素的影响规律及夹持效果, 获取最佳组合参数。

2.1.2 试验平台及试验材料 试验平台如图 2a 所示, 主要包括: 万能试验机、抱掌、夹持元件、动力系统。抱掌由半圆形夹套和钉子 (直径 5 mm) 构成, 夹持元件由支撑平台、挡板和支柱组成, 动力系统由空气压缩机、MGPM40-50Z 气缸、手动换向阀、气源两联件和气管等组成。试验材料选用落梳后的果柄, 切割成长度约为 150 mm 的蕉柄段, 方便放入抱掌中进行夹持试验。



a: 夹持试验平台 Clamping platform



b: 试验原理图 Experimental principle

1: 万能试验机, 2: STC-100 kg 拉力传感器, 3: 手动换向阀, 4: 钉子, 5: 半圆形夹套, 6: 调速器, 7: 支撑平台, 8: MGPM40-50Z 气缸, 9: 挡板

1: Universal testing machine, 2: STC-100 kg tension sensor, 3: Manual reversing valve, 4: Nail, 5: Semicircular jacket, 6: Governor, 7: Support platform, 8: MGPM40-50Z cylinder, 9: Baffle

图 2 试验平台和原理图

Fig. 2 Schematic diagrams of experimental platform and principle

2.1.3 试验过程 试验场景如图 2b。测试过程中, 由空气压缩机提供动力, 经过气源两联件的减压阀调节输入气缸的气压大小, 手动换向阀可调节气缸前进、后退和暂停 3 个档位。各元件安装好后, 打开手动换向阀, 抱掌在两侧气缸的推动下夹紧蕉柄, 然后启动万能试验机。根据拉拔试验原理向上拉动蕉柄, 模拟蕉柄切断后香蕉串的重力作用, 测试抱掌对蕉柄的夹持效果, 得出拉动过程中拉力和位移的数据信息, 分析得到各因素对夹持效果的影响。

2.2 单因素试验

选取刚采收下来的香蕉果柄, 裁截为便于夹持的蕉段, 香蕉柄外形近似为圆柱形, 蕉柄直径为 60~70 mm, 成熟度为 7~8 成熟。为获得气缸压强 (即挤压力)、钉子数量和钉子排列方式对香蕉柄的夹持影响规律, 分别对这 3 个因素进行单因素试验, 每组试验分别进行 3 次拉拔试验, 取平均值作为试验结果进行分析。试验取香蕉串质量 30 kg 为载荷参照, 安全系数取 1.5, 摩擦夹持情况下, 夹持机构和蕉柄的最大静摩擦力为 500 N 左右, 可保持夹持机构能有效夹持蕉串。

单因素试验设计见表 1。为测试气缸压强对夹持效果的影响规律, 选取钉子的排列方式为 X 型、钉子数量为 10 个、气缸直径为 40 mm, 拉拔速度 5 mm/min。在气缸压强对夹持的影响研究中, 确定了气缸压强至少 0.40 MPa 可以稳定夹持, 为此, 控制钉子数量为 10 个、气缸压强 0.40 MPa、拉拔速度

表 1 气缸压强、钉子数量和排列方式单因素试验设计

Table 1 Single factor test designs of cylinder pressure, number and arrangement of nails

因素 Factor	试验编号 Test number	气缸压强/MPa Cylinder pressure	钉子数量/个 Number of nails	排列方式 Nail arrangement
气缸压强 Cylinder pressure	1	0.30	10	X型
	2	0.35	10	X型
	3	0.40	10	X型
	4	0.45	10	X型
	5	0.50	10	X型
排列方式 Nail arrangement	1	0.40	10	X型
	2	0.40	10	三角形
	3	0.40	10	矩形
钉子数量 Number of nails	1	0.40	4	矩形
	2	0.40	6	矩形
	3	0.40	8	矩形
	4	0.40	10	矩形
	5	0.40	12	矩形
	6	0.40	14	矩形

5 mm/min; 参考加工的方便性, 分别选择钉子的排列方式为 X 型、矩形和三角形, 测试钉子的最优排列方式; 选择气缸压强 0.40 MPa 和矩形排列方式不变, 钉子数量分别为 4、6、8、10、12 和 14 个, 测试钉子数量的影响效果。

2.3 响应曲面法试验

响应曲面法的设计模型主要是中心复合设计 (Central composite design, CCD)^[19-20]。为验证 3 个因素的组合夹持效果, 本文采用 CCD 中的三因素三水平试验进行试验设计, 测试气缸压强 (x_1)、钉子排列方式 (x_2) 和钉子数量 (x_3) 对夹持效果的影响, 测试指标为拉力 (即夹持机构承受的重力, y), 表 2 给出了因素编码及试验设计水平。利用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验数据进行分析, 采用线性和二次多项式拟合得出线性回归方程, 确定最优的数学模型。

表 2 因素编码及试验水平¹⁾

Table 2 Factor coding and test level

编码 Coding	x_1	x_2	x_3
-1	0.3	X型	4
0	0.4	矩形	10
1	0.5	三角形	16

1) x_1 : 气缸压强, MPa; x_2 : 钉子排列方式; x_3 : 钉子数量

1) x_1 : Cylinder pressure, MPa; x_2 : Arrangement of nails; x_3 : Number of nails

3 结果与分析

3.1 单因素试验结果

3.1.1 气缸压强对夹持的影响 拉拔过程中蕉柄的滑移受力曲线如图 3a。由图 3a 可以看出, 拉力从零点至最高点的曲线段表示试验过程中蕉柄受力压缩阶段, 此时拉力并未达到蕉柄和抱掌之间的最大静摩擦力; 最高点为蕉柄和夹抱掌之间的最大静摩擦力点; 最高点之后的曲线段表示蕉柄在拉力作用下平缓滑动, 由于钉子的滑动使蕉柄表面破裂, 蕉柄和抱掌之间的滑动摩擦力减小, 蕉柄出现滑移, 夹持失效。试验曲线表明, 当气缸压强为 0.35 MPa、拉力还未达到 500 N 时, 蕉柄在抱掌中产生滑移的现象, 夹持失效; 当气缸压强为 0.40 MPa、拉力为 500 N 左右时, 最接近蕉柄和抱掌之间的最大静摩擦力, 可以稳定夹持; 当气缸压强为 0.45 或 0.50 MPa、拉力达到 600 或 800 N 时, 蕉柄在抱掌中出现滑移现象。

上述结果表明, 气缸压强约为 0.4 MPa 时, 夹持状态最佳。查阅 MGPM40-50 气缸手册, 气缸压强为 0.4 MPa 时, 气缸输出压力为 500 N, 即挤压力 (f_1)=500 N^[21]。

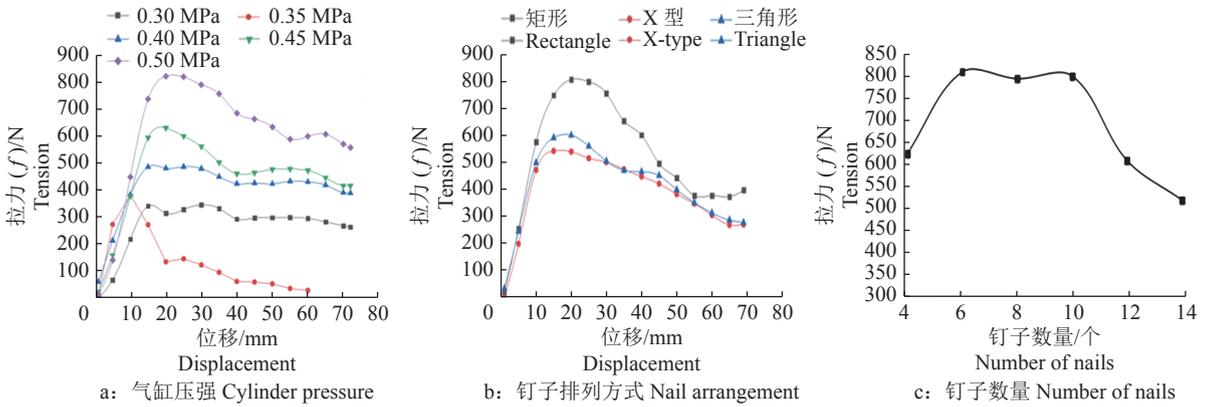


图 3 气缸压强、钉子排列方式和钉子数量的拉拔试验结果

Fig. 3 The results of drawing tests of cylinder pressure, nail arrangement and number of nails

3.1.2 钉子排列方式对夹持的影响 图 3b 为不同钉子排列方式下,拉拔过程中香蕉柄的滑移受力曲线。从图 3b 可以看出,零点至最高点的曲线表示拉拔过程中蕉柄的受力压缩阶段,最高点之后是蕉柄在拉力作用下的滑动阶段。在气缸压强 0.40 MPa、钉子数量为 10 个时,矩形排列方式拉力最大,最高点拉力为 800 N,说明在滑动位移相同时,矩形可承受的摩擦力最大且最大值 (f_{\max}) 为 800 N,大于蕉柄和抱掌之间的 f_{\max} ,因此,选择矩形的排列方式可以获得稳定的夹持效果。

3.1.3 钉子数量对夹持的影响 图 3c 是蕉柄在不同钉子数量情况下可承受的最大拉力。由图 3c 可知,钉子数量分别为 6、8 和 10 个时,可承受的拉力均为 800 N 左右,大于蕉柄和抱掌之间的 f_{\max} ,说明这 3 个水平均可获得稳定的夹持。钉子数量为 8 和 10 个时获得的拉力比较接近,并未因钉子数量增加而拉力增加,其原因可能是香蕉柄不是规则的圆柱形,导致圆形抱掌上的钉子并未全部扎进蕉柄内,钉子数量为 8 或 10 个时,只有 6 个钉子扎进蕉柄进行有效夹持。钉子数量超过 10 个后,拉力不升反降,出现该现象的原因可能是钉子越多,出现互相干扰的现象越严重,成为有效钉子的数量不升反降。试验结束后,观察蕉柄表面的滑痕,进一步印证了该结论。

3.2 响应曲面法的结果与方差分析

用 Design-Expert8.0.6 软件对试验因素进行分析,结果见表 3。对表 3 中的数据进行回归拟合,保留显著性因素,对拉力进行二次回归方程方差分析,结果见表 4。表 4 的结果表明,模型的 $P=0.0002 < 0.01$,达极显著水平,拟合系数 (R^2) 为 0.9702; 拉力失拟项的 $P=0.1090 > 0.05$,不显著,这主要是因为蕉柄的表面不规则导致钉子有部分没有刺入,造成了试验误差。由于 R^2 大于 0.80,根据响应曲面法拟合系数的有效性参数原则,评价该系数有效,说明本

表 3 响应曲面法的试验结果¹⁾

Table 3 Experimental result by the response surface method

运行顺序	试验序号	x_1	x_2	x_3	f
Running order	Test number				
5	1	0.3	0	4	564
6	2	0.5	0	4	582
7	3	0.3	0	16	387
4	4	0.5	1	10	401
3	5	0.3	1	10	374
17	6	0.4	0	10	637
13	7	0.4	0	10	590
2	8	0.5	-1	10	411
1	9	0.3	-1	10	190
15	10	0.4	0	10	605
8	11	0.5	0	16	888
16	12	0.4	0	10	617
11	13	0.4	-1	16	307
10	14	0.4	1	4	336
9	15	0.4	-1	4	349
14	16	0.4	0	10	560
12	17	0.4	1	16	556

1) x_1 : 气缸压强, MPa; x_2 : 钉子排列方式; x_3 : 钉子数量; f : 拉力, N

1) x_1 : Cylinder pressure, MPa; x_2 : Nail arrangement; x_3 : Number of nails; f : Tension, N

试验采用的数学模型具有较好的拟合度。在设计因素水平范围内,由各因素的 F 值大小得出各因素对拉力的影响,由表 4 可见,排列方式的二次项有较好的拟合度,各因素对拉力的影响大小依次为:排列方式的二次项效应 (x_2^2) > 气缸压强 (x_1) > 气缸压强与钉子数量的相互作用 (x_1x_3) > 钉子排列方式 (x_2) > 钉子数量与排列方式的相互作用 (x_2x_3) > 钉子数量 (x_3) > 气缸压强与排列方式的相互作用 (x_1x_2) > 钉

表 4 拉力方差分析

Table 4 Variance analysis of tension

方差来源 ¹⁾ Source of variance	平方和 Square sum	F	P
模型 Model	435 000	25.36	0.0002
x_1	73 536	38.62	0.0004
x_2	21 012	11.04	0.0127
x_3	11 781	6.19	0.0417
x_1x_2	9 409	4.94	0.0616
x_1x_3	58 322	30.63	0.0009
x_2x_3	17 161	9.01	0.0199
x_1^2	1 646	0.86	0.3833
x_2^2	239 000	125.29	<0.0001
x_3^2	2 271	1.19	0.3109
残差 Residual	13 327		
失拟项 Lack of fit	9 961	3.94	0.1090
纯误差 Pure error	3 367		
总离差 Total deviation	448 000		

1) x_1 : 气缸压强, MPa; x_2 : 钉子排列方式; x_3 : 钉子数量
 1) x_1 : Cylinder pressure, MPa; x_2 : Nail arrangement; x_3 : Number of nails

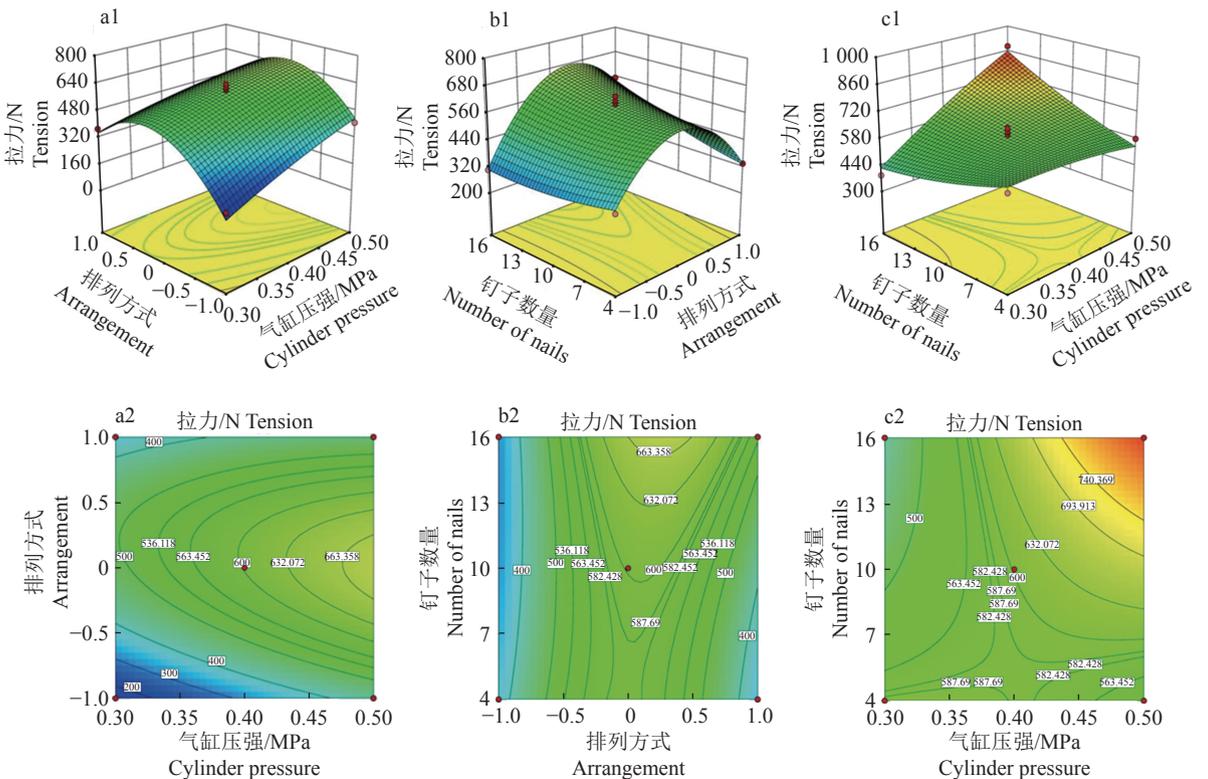
子数量的二次效应 (x_3^2) > 气缸压强的二次效应 (x_1^2)。

3.3 两因素相互作用对拉力的影响

两因素相互作用对于拉力的影响和单因素的影响大致相同 (图 4)。钉子数量为 10 个时, 气缸压强与钉子排列方式相互作用对拉力影响的 3D 响应曲面和等高线图见图 4a1 和 4a2。由图 4a 可以看出, 气缸压强对拉力的影响更大, 排列方式次之。在排列方式为矩形时, 随着气缸压强的增大, 拉力增大; 在气缸压强一定时, 排列方式对拉力的影响是先增大后减小。

气缸压强为 0.4 MPa 时, 钉子数量与排列方式相互作用对拉力影响的 3D 响应曲面和等高线图见图 4b1 和 4b2。由图 4b 可以看出, 钉子数量对拉力的影响更大, 排列方式次之。在排列方式一定时, 钉子数量增多, 拉力增大; 在钉子数量一定时, 排列方式对拉力的影响是先增大后减小。

钉子排列方式为矩形时, 气缸压强与钉子数量相互作用对拉力影响的 3D 响应曲面和等高线图见图 4c1 和 4c2。由图 4c 可以看出, 钉子数量和气缸压强对拉力影响均较大。在气缸压强一定时, 随着钉子数量增多, 拉力增大; 在钉子数量一定时, 随着气缸压强增大, 压力增大。



a: 钉子数量为 10 个; b: 气缸压强为 0.4 MPa; c: 钉子排列方式为矩形

a: The number of nails was 10; b: The cylinder pressure was 0.4 MPa; c: Rectangular arrangement of nails

图 4 两因素相互作用对拉力的影响

Fig. 4 Effect of the interaction of two factors on tension

3.4 参数优化与验证结果

根据以上的分析,得到最优的参数组合,利用 Design-Expert 软件的目标优化法,根据以下优化方程式:

$$\begin{cases} 0.3 \leq x_1 \leq 0.5 \\ -1 \leq x_2 \leq 1 \\ 4 \leq x_3 \leq 16 \\ y = f(x_1, x_2, x_3, y) \\ \text{Max } y \end{cases}, \quad (3)$$

得出预测和实测的优化值,结果见表 5。由表 5 可知,优化条件下的拉力预测值和实测值误差为 4.6%,该误差在考虑范围内,即优化结果具有可参考性。拉力预测值和实测值的散点值差别如图 5 所示,预测拟合度高。表明气缸压强 0.4 MPa、钉子数量 10 个、排列方式为矩形是抱掌夹持机构设计最佳组合。

表 5 优化条件下预测和实测的优化值

Table 5 Predicted and actual optimization values under optimized conditions

项目 Item	挤压力/MPa Extrusion	钉子排列方式 Nail arrangement	钉子数量/个 Number of nails	拉力/N Tension
最佳条件(预测) Optimum condition (forecast)	0.38	0.22	10.27	500
修改条件(实测) Modify condition (actual)	0.40	0	10	524

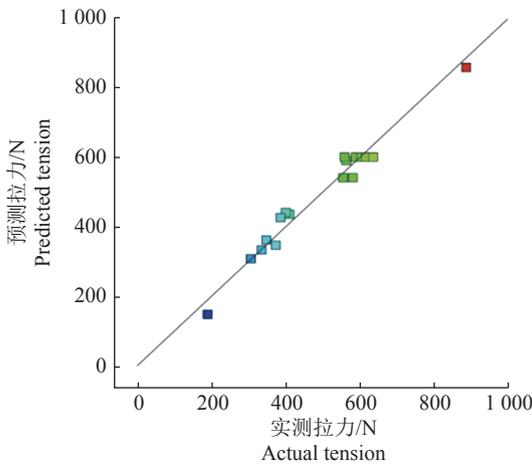


图 5 拉力预测值和实测值的散点分布

Fig. 5 Scatter distribution of predicted and actual tension values

4 结论

对于香蕉这类大质量串形水果的机械化采摘,可靠稳定的夹持方式是夹持机构设计的关键。本文通过搭建试验平台,进行夹持影响因素的单因素和正交试验测试,分析得如下结论:1)针对本次夹持装置中的研究对象,影响夹持效果的主次因素顺序为:气缸压强>钉子排列方式>钉子数量,最优组合为气缸压强 0.4 MPa、钉子数量 10 个、钉子排列方式为矩形,此时,实测拉力 524 N,大于最大静摩擦力,可以稳定夹持;2)在进行钉子数量的最优化试验过程中发现,当钉子数量超过一定数目时,实测拉力直线下降,甚至低于最大静摩擦力,原因是钉子数量过多,使蕉柄横截面破坏过大,蕉柄部分断裂;3)对于香蕉这种体积大的果蔬收获,传统摩

擦式夹持机构难以保证稳定的夹持,为了保证香蕉从采摘到运输至指定地点的平稳,采用钉刺夹持方式具有可行性。

参考文献:

- [1] 朱冬云,曲军远,刘世豪,等.海南香蕉采摘技术现状及发展趋势[J].热带农业工程,2015,39(1):25-27.
- [2] 杨洲,郭杰,金莫辉,等.基于恒力机构的香蕉落梳装置设计与自适应性分析[J].农业机械学报,2019,50(6):148-155.
- [3] 柯佑鹏,过建春,夏勇开.2011年海南省香蕉产业损害监督预警分析报告[J].中国热带农业,2012(2):20-23.
- [4] 罗陆锋,邹湘军,程堂灿,等.采摘机器人视觉定位及行为控制的硬件在环虚拟试验系统设计[J].农业工程学报,2017,33(4):39-46.
- [5] 罗陆锋,邹湘军,卢清华,等.采摘机器人作业行为虚拟仿真与样机试验[J].农业机械学报,2018,49(5):34-42.
- [6] WANG C, TANG Y, ZOU X, et al. Recognition and matching of clustered mature litchi fruits using binocular charge-coupled device (CCD) color cameras[J]. Sensors, 2017, 17(11): 2564.
- [7] LIU T, LUO G, EHSANI R, et al. Simulation study on the effects of tine-shaking frequency and penetrating depth on fruit detachment for citrus canopy-shaker harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 148: 54-62.
- [8] WANG C, LEE W, ZOU X, et al. Detection and counting of immature green citrus fruit based on the local binary patterns (LBP) feature using illumination-normalized images[J]. Precision Agriculture, 2018, 19(6): 1062-1083.

- [9] 王红军, 黄国钢, 陈佳鑫, 等. 香蕉采摘机械手结构设计及样机试验[J]. 机械设计, 2013, 30(6): 13-17.
- [10] 尹建军, 陈永河, 贺坤, 等. 抓持-旋切式欠驱动双指手葡萄采摘装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 12-20.
- [11] 苗玉彬, 郑家丰. 苹果采摘机器人末端执行器恒力柔顺机构研制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(10): 19-25.
- [12] 张铁中, 杨丽, 王粮局, 等. 高架草莓采摘机器人设计与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(9): 165-172.
- [13] 陈燕, 邹湘军, 徐东风, 等. 荔枝采摘机械手机构设计及运动学仿真[J]. 机械设计, 2010, 27(5): 31-34.
- [14] BAETEN J, DONNE K, BOEDRIJ S, et al. Autonomous fruit picking machine: A robotic apple harvester[J]. Springer Tracts in Advanced Robotics, 2008, 42: 531-539.
- [15] 杨洲, 严梁立, 李军, 等. 果园采摘机械化装备与技术: 创新农业工程科技 推进现代农业发展[C]//中国农业工程学会 2011 年学术年会论文集. 北京: 中国农业工程学会, 2011.
- [16] MONTA M, KONDO N, SHIBANO Y. Agricultural robot in grape prediction system[C]//Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Nagoya: IEEE, 1995: 2504-2509.
- [17] 王红军, 黄国钢, 陈佳鑫, 等. 香蕉采摘机械手结构设计及样机试验[J]. 机械设计, 2013, 30(6): 17-21.
- [18] 唐之富. 香蕉采摘机械手夹持实验及仿真分析[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [19] 任思婕, 胡吕霖, 沈清, 等. 响应面法结合模糊评价优化微波辣子鸡丁工艺[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(12): 52-57.
- [20] AMBATI P, AYYANNA C. Optimizing medium constituents and fermentation conditions for citric acid production from palmyra jaggery using response surface method[J]. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 2001, 17(4): 331-335.
- [21] SMC 中国有限公司. 气缸的型号选定步骤[EB/OL]. [2020-06-08]. <https://www.smc.com.cn/products/zh/get.do?type=GUIDE&id=CM-ZH>.

【责任编辑 周志红】