

香蕉落梳机气动夹持部件参数优化与试验

朱正波, 杨 洲^{*}, 孙健峰, 薛坤鹏, 牛萌萌,
邱 汉, 陈兆春, 朱卿创, 孙志全

(1. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 2. 南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642)

摘 要: 目前香蕉采收处理对蕉穗的夹持一般采用尖锐部件插入果轴的方式, 导致卸荷后果轴不能自动脱离夹持器, 不利于实现香蕉落梳机械化和自动化。针对上述问题, 设计出气动夹持装置和弧形夹持部件, 分析了夹持部件与果轴间的相互作用关系, 确定了影响夹持部件与果轴间当量摩擦力的关键因素。试验结果表明夹持部件材料、夹持部件内弧面面积、果轴直径和气缸气压 4 个因素对当量摩擦力具有显著性影响 ($P < 0.05$); 对当量摩擦力影响的主次顺序依次为夹持部件材料、夹持部件内弧面面积、气缸气压、果轴直径。正交试验回归分析表明采用橡胶夹持部件, 内弧面面积为 $1\ 885\ \text{mm}^2$, 气缸气压为 $0.5\ \text{MPa}$, 果轴直径为 $69\ \text{mm}$ 时当量摩擦力最大, 为 $359.494\ \text{N}$, 实测值为 $375.975\ \text{N}$, 与回归分析结果无显著性差异。该研究可为茎秆类植物体夹持方法和夹持部件的改进与应用提供参考。

关键词: 机械化; 农作物; 优化; 香蕉果轴; 夹持; 部件

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.04.005

中图分类号: S233.75; S229⁺.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-04-0033-07

朱正波, 杨 洲, 孙健峰, 薛坤鹏, 牛萌萌, 邱 汉, 陈兆春, 朱卿创, 孙志全. 香蕉落梳机气动夹持部件参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(4): 33—39. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.04.005 <http://www.tcsae.org>
Zhu Zhengbo, Yang Zhou, Sun Jianfeng, Xue Kunpeng, Niu Mengmeng, Qiu Han, Chen Zhaochun, Zhu Qingchuang, Sun Zhiquan. Parameter optimization and experiment of pneumatic holding part for banana crown cutting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(4): 33—39. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.04.005 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

全球约有 136 个国家和地区种植香蕉, 它也是仅次于水稻、小麦、玉米的世界第四大粮食作物^[1-3]。中国是世界上第二大香蕉生产国^[4-5], 2013 年香蕉产量为 1 237 万 t, 占世界香蕉总产量的 11.6%^[6]。香蕉采收处理包括采蕉、运送、落梳、包装等环节^[2,7-8]。其中落梳是利用刀具将香蕉从蕉穗上分离的操作。国内外香蕉的采收、运送、包装等环节都不同程度地使用了机械, 但落梳环节都是人工作业, 落梳机械基本空白, 这使得香蕉采收处理各环节的机械不能有效链接, 效率提升受到限制, 从而制约了香蕉采收处理机械化的发展^[9-11]。因此, 有必要对香蕉落梳机械进行研究, 而夹持方式及其装置就是设计落梳机首先要研究的内容。

Nakamoto Teruyo^[12]设计了一种蕉穗悬挂装置, 通过水平延伸臂带动抓钩固定蕉穗。Casutt Toni^[13-14]设计了一种蕉穗夹持装置, 工作部件插入果轴中。王红军等^[15]在研究香蕉农艺特性和收获特性的基础上, 运用仿生学原

理, 设计了一种香蕉采摘机械手, 该机械手夹持部分具有多个针状抓钩。叶敏等^[16]设计了水果采摘机器人通用夹具, 并理论分析该夹具对串类水果及球状水果采摘的力学特性, 但该夹具承载能力较小, 不宜用于香蕉果轴夹持。目前香蕉果轴夹持器均采用尖锐部件插入果轴内夹持, 导致卸荷后果轴不能自动脱离夹持器, 需手动摘除, 不利于实现香蕉落梳的机械化和自动化。

气动夹持方式具有安全性好、夹持速度快, 夹持力稳定等优点, 广泛应用于植物茎秆夹持^[17-18]、无损夹持^[19-20]和果实采摘^[21-22]等方面。因此, 设计一种果轴气动夹持器有利于夹持器自动逐一装卸蕉穗, 有利于实现香蕉落梳的机械化和自动化。为此, 在综合分析国内外相关研究现状的基础上, 本文提出以香蕉果轴为试验对象, 以夹持力产生的最大轴向拉力为目标, 试验研究果轴夹持力学特性, 将气动夹持部件作为香蕉果轴夹持器的末端执行部件进行研究, 优化夹持部件参数, 以期为香蕉果轴气动夹持器设计提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

采样地点为广东省惠州市香蕉园, 品种为巴西蕉, 八成熟, 试样果轴 300 根。每根果轴试样长度约 150 mm。将果轴试样编号后装入帆布袋密封保存。实测果轴椭圆度平均 10.3%, 锥度平均 3:200, 含水率平均 94.8%。

收稿日期: 2015-09-09 修订日期: 2016-01-11

基金项目: 广东省自然科学基金(2014A030313460)。

作者简介: 朱正波, 男, 安徽合肥人, 博士生, 主要从事农业机械方面的研究。广州 华南农业大学工程学院, 510642。

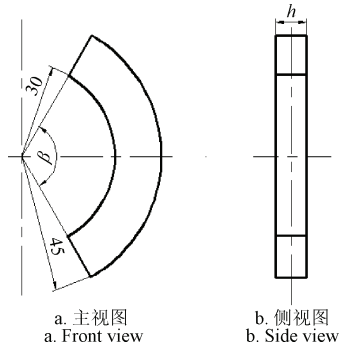
Email: zhuzhengbo12345@163.com

※通信作者: 杨 洲, 男, 山西襄汾人, 教授, 博士, 主要从事农业机械方面的教学和研究。广州 华南农业大学工程学院, 510642。

Email: yangzhou@scau.edu.cn

1.2 仪器装置

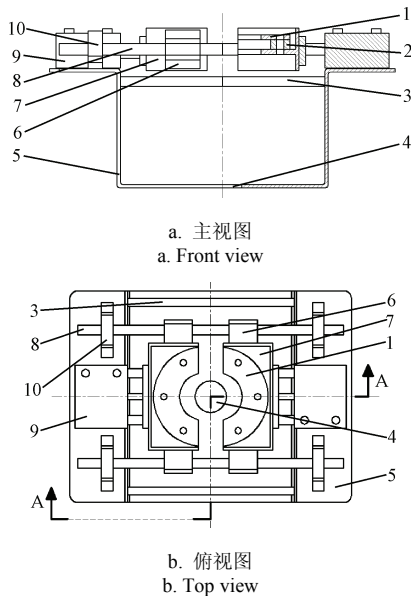
精密微控电子式万能材料试验机 (WD-E 型, 广州市广材试验仪器有限公司), 不同规格夹持部件 10 套 (自制), 气动夹持装置 (自制), 牵引托盘装置 (自制) 和游标卡尺 (FS-0601, 香港五羊工具 (国际) 有限公司) 等。其中, 夹持部件是指安装在气动夹持装置内接触并夹紧果轴的机械部件。夹持部件结构如图 1 所示, 其内侧弧面弯曲半径为 30 mm, 外侧弧面弯曲半径为 45 mm。



注: β 为夹持弧所对应的圆心角, rad; h 为夹持部件厚度, mm。
Note: β is central angle of hold part's inner arc, rad; h is thickness of hold part, mm.

图 1 夹持部件结构图
Fig.1 Structure diagram of hold part

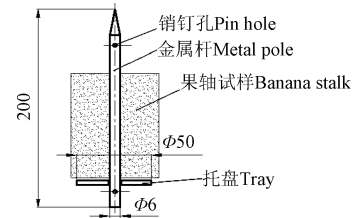
气动夹持装置结构如图 2 所示, 主要由气动系统、直线运动控制模块和夹持部件安装模块等构成。其中, 夹持部件安装模块包括夹持底座、厚度板和盖板, 这 3 个零件通过螺栓固定后形成具有弧形凹槽的机械结构, 该结构用于固定安装夹持部件。整个装置采用气动传动, 通过导杆气缸和直线运动控制模块的协同作用推动夹持部件安装模块内夹持部件夹持果轴, 夹持力方向垂直于果轴轴线。该试验装置夹持范围是 0~120 mm, 气缸气压输出范围是 0.12~0.7 MPa。



1. 盖板 2. 厚度板 3. 加强杆 4. 固定安装孔 5. 机架 6. 直线滑块 7. 夹持底座 8. 光轴 9. 导杆气缸 10. 整体式轴承
1. Cover plate 2. Thickness plate 3. Stiffener 4. Fixed orifice 5. Frame 6. Linear slider 7. Clamp base 8. Optical axis 9. Guide cylinder 10. Integral bearing

图 2 气动夹持装置结构示意图
Fig.2 Structure of pneumatic clamping device

牵引托盘装置结构如图 3a 所示。该装置主要由托盘和金属杆组成, 金属杆为细长杆, 顶端为锥形头, 两端设置有销钉孔。试验时, 将金属杆沿果轴轴线方向贯穿果轴芯部, 在金属杆末端安装托盘和销钉并压紧果轴试样, 保证托盘紧密接触果轴端面, 再将金属杆顶部通过销钉固定在拉力传感器下方。果轴顺纹抗压试验表明该装置在果轴端部受压变形较小情况下有效传递轴向拉力为 1.99~7.71 kN, 满足试验要求。



a. 牵引托盘装置结构图
a. Structure of pulling tray device



b. 当量摩擦力测量试验图
b. Spot diagram of equivalent friction measuring

图 3 当量摩擦力测量试验图

Fig.3 Spot diagram of equivalent friction measuring

1.3 试验方法

气动夹持部件夹紧果轴后, 当夹持部件与果轴之间产生缓慢匀速相对运动时, 夹持部件对果轴产生的轴向拉力等效为夹持部件与果轴之间的当量滑动摩擦力^[23-24], 当量摩擦力测量试验如图 3b 所示。

试验时, 在试验机活动横梁上安装拉力传感器 (CELTRON STC-100 kg, 美国威世 (VISHAY) 集团), 牵引托盘装置将果轴试样固定于拉力传感器下方, 夹持部件固定在气动夹持装置夹持部件安装模块内。试验机拉伸速度为 30 mm/min, 数据采样速度为 25 个/s, 果轴试样铅垂向上移动距离为 50 mm。试验时先启动气动夹持装置再启动万能材料试验机进行拉伸试验, 获得拉力-位移曲线。单因素试验和正交试验重复 3 次。

1.4 试验指标

夹持试验中果轴受力分析如图 4 所示。果轴在牵引托盘装置轴向拉力 F 作用下与夹持部件之间发生相对滑动。同时, 果轴受到夹持部件径向压力作用, 产生滑动摩擦力。由于果轴含水率较高, 组织结构较软, 夹持部件会破坏果轴表皮结构, 产生剪切力。则有^[25]

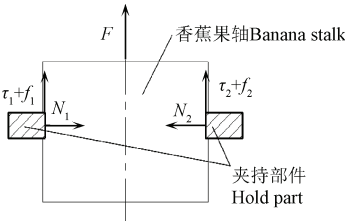
$$F=f, \quad (1)$$

$$N_1=N_2, \quad (2)$$

$$f=f_1+f_2+\tau_1+\tau_2. \quad (3)$$

式中 F 为万能材料试验机传递给果轴试样的拉力, N ;

N_1 和 N_2 为夹持部件对果轴的正压力, N; f_1 和 f_2 为正压力在运动方向上产生的滑动摩擦力, N; τ_1 和 τ_2 为夹持部件破坏果轴表皮结构产生的剪切力, N; f 为夹持部件与果轴间的当量摩擦力, N。



注: F 为万能材料试验机通过牵引托盘装置传递给果轴的拉力, N; N_1 和 N_2 为夹持部件对果轴施加的垂直于果轴轴线的夹持力, N; f_1 和 f_2 为夹持部件与果轴间滑动摩擦力, N; τ_1 和 τ_2 为夹持部件破坏果轴表皮结构产生的剪切力, N。
Note: F is the tension of electronic universal material testing machine transmitted by pulling tray device, N; N_1 and N_2 are clamping force perpendicular to the axis of banana stalk by hold part, N; f_1 and f_2 are sliding friction between hold part and banana stalk, N; τ_1 and τ_2 are shear force, N.

图 4 夹持试验果轴受力分析图
Fig.4 Force analysis of banana stalk in clamping test

试验指标为当量摩擦力 f , 由式 (1) 可知, 该力值等于万能材料试验机传递给果轴试样的拉力, 由拉力传感器获取。当量摩擦力大则表示夹持部件夹持效果好, 反之则表示夹持部件夹持效果差。实测蕉穗质量约 15~30 kg, 为保证夹持安全可靠, 当量摩擦力不低于 300 N。

1.5 试验设计

1.5.1 单因素试验设计

香蕉果轴含水率较高, 表皮结构不规则, 采用气动夹持装置夹持果轴时影响当量摩擦力的主要因素为夹持部件材料、夹持部件内弧面面积、果轴直径和气缸气压。单因素试验因素和水平如表 1 所示。其中

$$B=30\times\beta\cdot h。$$
 (4)

式中 B 为夹持部件内弧面面积, mm^2 ; β 为夹持部件夹持弧所对应的圆心角, rad, 取值范围为 $\beta=\{\pi/2, 2\pi/3, 5\pi/6\}$; h 为夹持部件厚度, mm, 取值范围为 $h=\{10, 20, 30\}$ 。

表 1 单因素试验因素和水平
Table 1 Factors and levels of single-factor test

水平 Levels	夹持部件材料 Material of hold part <i>A</i>	夹持部件内 弧面面积 area of hold part <i>B</i> / mm^2	果轴直径 Diameter of banana stalk <i>C</i> / mm	气缸气压 Cylinder gas pressure <i>D</i> / MPa
1	铁	628	52	0.3
2	酚醛树脂	943	57	0.4
3	尼龙	1 257	61	0.5
4	硅胶	1 571	65	0.6
5	橡胶	1 885	69	0.7
6	聚氨酯			

1.5.2 正交试验设计

在单因素试验的基础上选取正交试验的因素水平, 选取夹持部件材料、夹持部件内弧面面积、果轴直径和气缸气压 4 因素的 3 个水平进行正交试验, 选用 $L_9(3^4)$ 正交表。正交试验因素和水平如表 2 所示。

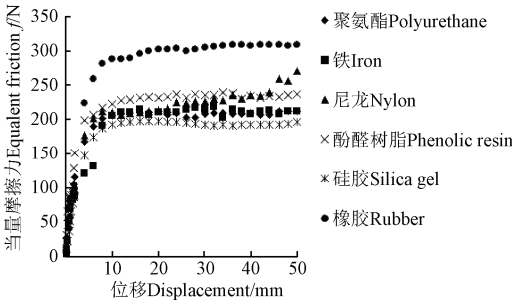
表 2 正交试验因素和水平表
Table 2 Factors and levels of orthogonal test

水平 Levels	夹持部件材料 Material of hold part <i>A</i>	夹持部件内 弧面面积 area of hold part <i>B</i> / mm^2	果轴直径 Diameter of banana stalk <i>C</i> / mm	气缸气压 Cylinder gas pressure <i>D</i> / MPa
1	硅胶 Silica gel	628	52	0.7
2	铁 Iron	1 257	61	0.5
3	橡胶 Rubber	1 885	69	0.3

2 结果与分析

2.1 当量摩擦力

在夹持部件内弧面面积为 628 mm^2 , 气缸气压为 0.5 MPa, 夹持部件正压力标定为 143.6 N, 果轴直径约为 61 mm 情况下, 夹持部件材料对果轴试样的当量摩擦力-位移曲线如图 5 所示。试验时当量摩擦力先是线性增加, 之后趋于稳定。



注: 夹持部件内弧面面积为 628 mm^2 , 气缸气压为 0.5 MPa, 夹持部件正压力标定为 143.6 N, 果轴直径约为 61 mm。
Note: Inner arc surface area of hold part is 628 mm^2 ; Cylinder gas pressure is 0.5 MPa; Calibration of hold part positive pressure is 143.6 N; Diameter of banana stalk is about 60 mm.

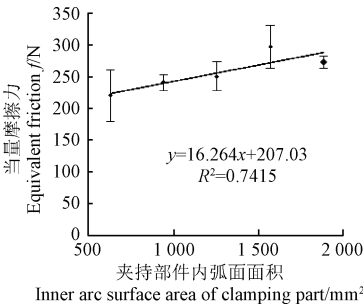
图 5 不同材料夹持部件的当量摩擦力-位移曲线

Fig.5 Effect of equivalent friction on displacement based on hold part material

2.2 单因素试验结果与分析

2.2.1 夹持部件内弧面面积对当量摩擦力的影响

当量摩擦力-夹持部件内弧面面积关系曲线如图 6 所示。将夹持部件内弧面面积与当量摩擦力进行线性拟合, 拟合结果表明线性函数关系具有较好拟合优度, 呈线性函数正相关关系。显著性分析表明, 夹持部件内弧面面积为 628 和 $1\,885\text{ mm}^2$ 时, 其对当量摩擦力影响显著 ($P<0.05$)。



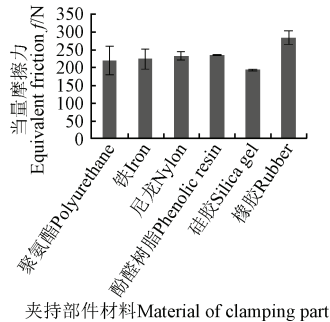
注: 夹持部件材料为聚氨酯, 气缸气压为 0.5 MPa, 夹持部件正压力标定为 143.6 N, 果轴直径约为 61 mm。
Note: Material of hold part is polyurethane; Cylinder gas pressure is 0.5 MPa; Calibration of hold part positive pressure is 143.6 N; Diameter of banana stalk is about 60 mm.

图 6 当量摩擦力-夹持部件内弧面面积关系曲线

Fig.6 Effect of equivalent friction on inner arc surface area of hold part

2.2.2 夹持部件材料对当量摩擦力的影响

当量摩擦力-夹持部件材料关系曲线如图 7 所示。显著性分析表明，材料分别为橡胶、铁和硅胶时，其对当量摩擦力影响显著 ($P<0.05$)。结果表明，夹持部件材料对当量摩擦力的影响大小顺序依次为橡胶、酚醛树脂、尼龙、铁、聚氨酯、硅胶，且橡胶材料当量摩擦力平均值比硅胶材料高 47.9%。

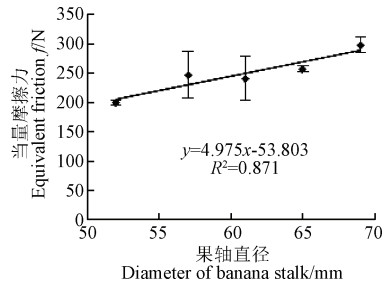


注：夹持部件内弧面面积为 628 mm²，气缸气压为 0.5 MPa，夹持部件正压力标定为 143.6 N，果轴直径约为 61 mm。
Note: Inner arc surface area of hold part is 628 mm²; Cylinder gas pressure is 0.5 MPa; Calibration of hold part positive pressure is 143.6 N; Diameter of banana stalk is about 60 mm.

图 7 当量摩擦力-夹持部件材料关系曲线
Fig.7 Effect of equivalent friction on hold part material

2.2.3 果轴直径对当量摩擦力的影响

当量摩擦力-果轴直径关系曲线如图 8 所示。显著性分析表明，果轴直径约为 52 和 69 mm 时，其对当量摩擦力影响显著 ($P<0.05$)。将果轴直径与当量摩擦力进行线性拟合，拟合结果表明线性函数关系具有较好拟合优度，呈线性函数正相关关系，拟合方程和判定系数如图 8 所示。

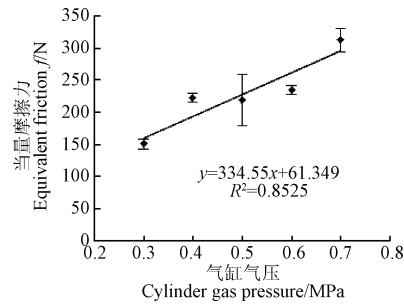


注：夹持部件材料为聚氨酯，内弧面面积为 628 mm²，气缸气压为 0.5 MPa，夹持部件正压力标定为 143.6 N。
Note: Material of hold part is polyurethane; Inner arc surface area of hold part is 628 mm²; Cylinder gas pressure is 0.5 MPa; Calibration of hold part positive pressure is 143.6 N.

图 8 当量摩擦力-果轴直径关系曲线
Fig.8 Effect of equivalent friction on banana stalk diameter

2.2.4 气缸气压对当量摩擦力的影响

当量摩擦力-气缸气压关系曲线如图 9 所示。显著性分析表明，气缸气压为 0.3、0.5 和 0.7 MPa 时，其对当量摩擦力影响极显著 ($P<0.01$)。将气缸气压与当量摩擦力进行线性拟合，拟合结果表明线性函数关系具有较好拟合优度，呈线性函数正相关关系，拟合方程和判定系数如图 9 所示。



注：夹持部件材料为聚氨酯，内弧面面积为 628 mm²，果轴直径约为 61 mm，夹持部件正压力标定为 143.6 N。
Note: Material of hold part is polyurethane; Inner arc surface area of hold part is 628 mm²; Diameter of banana stalk is about 60 mm; Calibration of hold part positive pressure is 143.6 N.

图 9 当量摩擦力-气缸气压关系曲线
Fig.9 Effect of equivalent friction on cylinder gas pressure

2.3 正交试验结果与分析

根据单因素试验分析结果，选择各因素合适水平进行多因素正交试验，试验结果如表 3 所示。

表 3 正交试验结果
Table 3 Results of orthogonal test

序号 No.	夹持部件材料 Material of hold part A	夹持部件内 弧面面积 Inner arc surface area of hold part B/mm ²	果轴直径 Diameter of banana stalk C/mm	气缸气压 Cylinder gas pressure D/MPa	当量摩擦力 Equivalent friction f/N
1	硅胶 Silica gel	628	52	0.7	84.116
2	硅胶 Silica gel	1257	61	0.5	130.617
3	硅胶 Silica gel	1885	69	0.3	126.785
4	铁 Iron	628	61	0.3	163.102
5	铁 Iron	1257	69	0.7	247.488
6	铁 Iron	1885	52	0.5	271.285
7	橡胶 Rubber	628	69	0.5	304.855
8	橡胶 Rubber	1257	52	0.3	273.237
9	橡胶 Rubber	1885	61	0.7	362.842
K ₁	120.506	184.024	209.543	231.482	
K ₂	227.292	223.781	225.520	242.252	
K ₃	313.645	253.637	226.376	187.708	
R	193.139	69.613	16.833	54.54	

由 R 值分析可知，4 个因素对当量摩擦力影响程度大小顺序依次为：夹持部件材料、夹持部件内弧面面积、气缸气压、果轴直径。即夹持部件材料对当量摩擦力影响最大，果轴直径对当量摩擦力影响最小，且夹持部件内弧面面积比气缸气压对当量摩擦力影响大。

正交试验方差分析如表 4 所示，由方差分析结果可知，夹持部件材料、夹持部件内弧面面积、气缸气压因子水平的改变对当量摩擦力影响极显著 ($P<0.01$)。

正交试验结果 K 值分析表明影响当量摩擦力最佳的组合方案是 A₃B₃D₂C₃，即最佳组合方案是橡胶夹持部件，内弧面面积为 1 885.0 mm²，气缸气压为 0.5 MPa，果轴直径约为 69 mm，但该参数组合未出现在正交试验表中。对正交试验结果进行线性回归分析如表 5 所示。

表 4 正交试验方差分析
Table 4 Variance analysis of orthogonal test

方差来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 df	均方和 Mean square	当量摩擦 力 Equivalent friction f	显著性 Sig.
夹持部件材料 Material of hold part A	168 487.691	2	84 243.846	259.443	**
夹持部件内弧面 面积 Inner arc surface area of hold part B	21 953.968	2	10 976.984	33.804	**
果轴直径 Diameter of banana stalk C	1 617.483	2	808.741	2.491	
气缸气压 Cylinder gas pressure D	15 021.764	2	7 510.882	23.130	**
误差 Error	5 845.015	18	324.723	-	-
总和 Total	1 525 443.802	27	-	-	-

注：**为 0.01 显著水平。
Note: ** shows significant correlation at 0.01 levels.

A 为夹持部件材料,取值范围是 $A=\{\text{硅胶, 铁, 橡胶}\}$ 。

表 5 回归系数分析
Table 5 Analysis on regression coefficient

模型 Model	非标准化系数		标准系数 Standardized coefficients	t 值	显著性 水平 Sig.	Beta 的 95.0%置信区间	
	Unstandardized coefficients					95.0% confidence interval for Beta	
	回归系数 Beta	标准误差 Std. error				下限 Lower Bound	上限 Upper Bound
常量 Constant	-158.020	47.035		-3.360	0.003	-255.565	-60.476
夹持部件材料 Material of hold part A	96.569	5.799	0.888	16.654	0	84.544	108.595
夹持部件内弧面面积 Inner arc surface area of hold part B	0.055	0.009	0.320	6.003	0	0.036	0.075
果轴直径 Diameter of banana stalk C	1.006	0.682	0.079	1.476	0.154	-0.408	2.420
气缸气压 Cylinder gas pressure D	109.435	28.993	0.201	3.775	0.001	49.307	169.562

3 结论与展望

本文首次开展香蕉落梳机气动夹持部件关键参数的试验研究,得到的结论如下:夹持部件材料、夹持部件内弧面面积、气缸气压和果轴直径 4 个因素对当量摩擦力具有显著性影响($P<0.05$)。对当量摩擦力影响大小顺序的影响因素依次为夹持部件材料、夹持部件内弧面面积、气缸气压、果轴直径,采用橡胶夹持部件,内弧面面积为 1 885.0 mm²,气缸气压为 0.5 MPa,果轴直径约为 69 mm 时当量摩擦力最大,正交试验回归分析结果为 359.494 N,实测值为 375.975 N,与回归分析结果无显著性差异。

香蕉果轴是一种植物茎杆,其成熟度、直径、椭圆度、含水率和表皮厚度等参数差异性较大,是产生试验误差的主要原因。进一步研究内容为开展果轴破坏程度与剪切力的关系,以及果轴与夹持部件间滑动摩擦力影响因素研究。

【参 考 文 献】

[1] 柯佑鹏, 过建春, 方佳, 等. 世界香蕉生产及贸易的发展趋势分析[J]. 世界农业, 2008(4): 38—39.
[2] 李佳琪. 世界香蕉贸易格局变化对中国香蕉市场的影响研究[D]. 海口: 海南大学, 2015.

为进一步以代数式表示回归分析结果, 设定 $A=\text{硅胶}=1$, $A=\text{铁}=2$, $A=\text{橡胶}=3$ 。由线性回归分析结果可知

$$f=96.569A+0.055B+1.006C+109.435D-158.02.$$
 (5)

式中 f 为当量摩擦力, N; A 为夹持部件材料, 取值范围是 $A=\{1, 2, 3\}$; B 为夹持部件内弧面面积, mm², 取值范围是 $B=\{628, 1257, 1885\}$; C 为果轴直径, mm, 取值范围是 $C=\{52, 61, 69\}$; D 为气缸气压, MPa, 取值范围是 $D=\{0.7, 0.5, 0.3\}$ 。模型的相关系数为 0.968。

根据式 (8) 可知, 当采用橡胶夹持部件, 内弧面面积为 1 885.0 mm², 气缸气压为 0.5 MPa, 果轴直径为 69 mm 时, 当量摩擦力为 359.494 N。

补充一组试验, 各因素水平为 $A_3B_3D_2C_3$, 即采用橡胶夹持部件, 内弧面面积为 1 885.0 mm², 气缸气压为 0.5 MPa, 果轴直径约为 69 mm 进行果轴夹持试验, 测得当量摩擦力平均值为 375.975 N, 与正交试验线性回归分析结果无显著性差异, 故当量摩擦力最大的参数组合为 $A_3B_3D_2C_3$, 正交试验结果可靠。

Li Jiaqi. The Study on World Banana Trade Pattern and Its Influence on Chinese Banana Market[D]. Haikou: Hainan University, 2015. (in Chinese with English abstract)
[3] 李玉萍, 方佳, 董定超, 等. 世界香蕉产业的发展现状与发展趋势分析[J]. 广东农业科学, 2008 (2): 115—119.
[4] 柯佑鹏, 过建春, 夏勇开, 等. 2013-2014 年中国香蕉产销形势分析与预测[J]. 广东农业科学, 2014(15): 184—188. Ke Youpeng, Guo Jianchun, Xia Yongkai, et al. Analysis and prediction of production and marketing situation for China banana from 2013 to 2014[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014(15): 184—188. (in Chinese with English abstract)
[5] 刘以道, 张慧坚. 世界香蕉产业发展概况及发展趋势[J]. 世界农业, 2013(10): 76—79.
[6] 联合国粮食及农业组织统计司[EB/OL]. [2015-09-09]. <http://faostat3.fao.org/download/Q/QC/E>.
[7] 刘嘉龙, 李君, 杨洲. 香蕉采收处理装备的发展现状[J]. 农机化研究, 2014(11): 249—252. Liu Jialong, Li Jun, Yang Zhou. Review current status of postharvest handling equipment for banana[J]. Journal of Agricultural Mechanization, 2014(11): 249—252. (in Chinese with English abstract)
[8] 徐贞贞, 孙洁, 赵靓, 等. 香蕉产地初加工技术分类及集

- 成[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊 1): 332—336.
- Xu Zhenzhen, Sun Jie, Zhao Liang, et al. Classification, integration of preliminary processing technology in banana producing areas of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(Supp.1): 332—336. (in Chinese with English abstract)
- [9] 周昆华, 杨建辉. 浅谈香蕉生产机械化管理[J]. 热带农业科技, 2010, 33(1): 24—25.
- Zhou Kunhua, Yang Jianhui. An Elementary introduction to mechanized management of banana[J]. Tropical Agricultural Science & Technology, 2010, 33(1): 24—25. (in Chinese with English abstract)
- [10] 李君, 杨洲, 陆华忠, 等. 香蕉园电动滑车式索道运送系统动力学研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 211—216.
- Li Jun, Yang Zhou, Lu Huazhong, et al. Dynamics of electric pulley conveying cableway system in banana plantation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 211—216. (in Chinese with English abstract)
- [11] 李壮哲, 朱立学, 马稚昱. 香蕉采收技术现状及机械化生产对策[J]. 世界热带农业信息, 2013(10): 23—27.
- Li Zhuangzhe, Zhu Lixue, Ma Zhiyu. Current situation of banana harvest techniques and countermeasures for banana harvest mechanization[J]. World Tropical Agriculture Information, 2013(10): 23—27. (in Chinese with English abstract)
- [12] Nakamoto T. Banana hanger[P]. Japan: 2006296222, 2006-11-02.
- [13] Casutt T. Banana holder[P]. Canada: 1052759, 1979-04-17.
- [14] Casutt T. Banana holder[P]. United States: 4141529, 1979-02-27.
- [15] 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.
- Wang Hongjun, Huang Guogang, Chen Jiaxin, et al. Structural design and prototype test for a bananas picking manipulator[J]. Journal of Machine Design, 2013, 30(6): 13—17. (in Chinese with English abstract)
- [16] 叶敏, 邹湘军, 蔡沛锋, 等. 水果采摘机器人通用夹持机构设计[J]. 农业机械学报, 2011, 42(增刊 1): 177—180.
- Ye Min, Zou Xiangjun, Cai Peifeng, et al. Clamping mechanism of fruits harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.1): 177—180. (in Chinese with English abstract)
- [17] 何雪军, 王进, 陆国栋, 等. 自锁式茶梗夹持器设计[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 157—162.
- He Xuejun, Wang Jin, Lu Guodong, et al. Design of self-locking gripper for tea stalks[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 157—162. (in Chinese with English abstract)
- [18] 楼建忠, 李建平, 朱盘安, 等. 斜插式蔬菜嫁接机砧木夹持机构研制与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(7): 30—35.
- Lou Jianzhong, Li Jianping, Zhu Pan'an, et al. Design and test of stock clamping mechanism for vegetable grafting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(7): 30—35. (in Chinese with English abstract)
- [19] 钱少明, 都明宇, 杨庆华. 3 自由度气动柔性手指包络抓持力模型研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 66—72.
- Qian Shaoming, Dou Mingyu, Yang Qinghua. Static model of envelop grasping for 3-DOF flexible pneumatic finger[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 66—72. (in Chinese with English abstract)
- [20] Ho C, Muammer K. Design and feasibility tests of a flexible gripper based on inflatable rubber pockets[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006(46): 1350—1361.
- [21] 李秦川, 胡挺, 武传宇, 等. 果蔬采摘机器人末端执行器研究综述[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 175—179.
- Li Qinchuan, Hu Ting, Wu Chuanyu, et al. Review of end-effectors in fruit and vegetable harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 175—179. (in Chinese with English abstract)
- [22] 鲍官军, 高峰, 荀一, 等. 气动柔性末端执行器设计及其抓持模型研究[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 121—126.
- Bao Guanjun, Gao Feng, Xun Yi, et al. Flexible end-effector based on flexible pneumatic actuator and its grasping model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(10): 121—126. (in Chinese with English abstract)
- [23] 陈燕, 蔡伟亮, 向和平, 等. 面向机器人采摘的荔枝果梗力学特性[J]. 农业工程学报, 2012, 28(21): 53—58.
- Chen Yan, Cai Weiliang, Xiang Heping, et al. Mechanical properties of litchi stem for harvesting robots[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(21): 53—58. (in Chinese with English abstract)
- [24] 崔鹏, 陈志, 张小超. 苹果采摘机器人仿生机械手静力学分析与仿真[J]. 农业机械学报, 2011, 42(2): 149—153.
- Cui Peng, Chen Zhi, Zhang Xiaochao. Statics analysis of apple-picking robot humanoid manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 149—153. (in Chinese with English abstract)
- [25] Nakazawa N, Kim I, Inooka H, et al. Force control of a robot gripper based on human grasping schemes[J]. Control Engineering Practice, 2001(9): 735—742.

Parameter optimization and experiment of pneumatic holding part for banana crown cutting

Zhu Zhengbo, Yang Zhou^{*}, Sun Jianfeng, Xue Kunpeng,

Niu Mengmeng, Qiu Han, Chen Zhaochun, Zhu Qingchuang, Sun Zhiquan

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

2. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Banana is one of the most important crops in the world, and ranks the fourth after rice, wheat and maize with annual production of more than 106.71 million tons in about 136 countries and regions in 2013. Banana postharvest treatments consist of collection, transportation, crown cutting, cleaning and sterilizing, packing and storage. Banana crown cutting is one of the central tasks for banana postharvest treatments. In this treatment, banana stalk is fixed and cutting tool is used to separate bananas from banana bunch. The mechanization application level of banana postharvest treatments is relatively high abroad and the well-found lossless harvest system has been established. But there is no research result of banana crown cutting machine. Rapidly developing banana industry in China in recent years made banana production reach a record of 12.37 million tons in 2013 which contributed to about 11.6% of the world's banana production. The construction of banana postharvest treatments' infrastructure facilities and the mechanization application level are relatively backward in China. Excessively low level of mechanization causes more than the banana loss of 1 million tons every year in China. So the research of banana crown cutting machine is particularly significant to banana industry both in China and abroad. The existing banana stalk clamping devices hold banana stalk by inserting sharp edge part into fruit axis of banana in banana postharvest treatments. In this way, banana stalk must be removed by manual operation, in which banana stalks can't be loaded and unloaded one after another automatically. So those devices cannot be applied to banana crown cutting machine. This paper designed pneumatic clamping device, traction tray device and curved holding part to solve the above problems. The pneumatic clamping device is mainly composed of pneumatic system, straight-line moving mechanism and installing module of holding part. The clamping force is perpendicular to the axis of banana stalk and it can be regulated by adjusting the pressure of air compressor. The traction tray device is mainly composed of metal pole and tray. It is used to fix banana stalk tightly to tensile strength sensor and prevented it from axially slipping in tests. Tension tests of banana stalk samples clamped by pneumatic clamping device were done on the personal computer controlled electronic universal material testing machine. The relations of interaction between the holding part and the banana stalk were discussed in this paper. The results of single factor experiments showed that material of holding part, inner arc surface area of holding part, diameter of banana stalk and cylinder gas pressure had significant effect on the equivalent friction ($P < 0.05$) between the holding part and the banana stalk. Results of multifactor orthogonal experiments showed that the influence sequence of experimental factors from high to low was material of holding part, inner arc surface area of holding part, cylinder gas pressure and diameter of banana stalk. Linear regression analysis of orthogonal experiments results showed that the equivalent friction increased significantly to a peak value of 359.494 N when using rubber holding part with inner arc surface area of 1 885 mm², banana stalk diameter of 69 mm and cylinder gas pressure of 0.5 MPa. There was no significant difference in equivalent friction between linear regression analysis result and actual value that was 375.975 N ($P < 0.05$). These researches are helpful for the design of banana stalk clamping device in banana crown cutting machine and are also beneficial to the improvement and application of clamping methods and clamping devices for stemmed plants.

Keywords: mechanization; crops; optimization; banana stalk; clamping; hold part