

基于三角测量的菠萝外轮廓测量装置设计

李莹 董耀 王凯彬 何自芬 袁浩

(昆明理工大学机电工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: [目的] 解决菠萝自动化削皮机加工过程中菠萝尺寸不易获取, 缺乏加工数据的问题。[方法] 采用柱面坐标系描述菠萝表面点位置坐标, 结合接触式测量方式和三角测量方法计算所需参数, 设计出菠萝外轮廓测量机构的总体方案, 用 ANSYS 对测量杆进行静力和屈曲分析, 并搭建实验台进行验证实验。[结果] 测量杆在测量过程中承受的最大应力为 32.463 MPa, 最大变形量为 0.21 mm, 满足结构刚度要求; 测量试验的最大误差为 1.8 mm, 能控制在 1% 以内, 平均测量时间分别为 31.6, 35.2 s。[结论] 试验装置的测量精度和时间能够满足菠萝实际生产加工的需要。

关键词: 三角测量; 结构设计; 菠萝; 静力学分析; 屈曲分析

Design of pineapple outer contour measurement device based on triangulation

LI Ying DONG Yao WANG Kaibin HE Zifen YUAN Hao

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Technology, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract: [Objective] To solve the problem that pineapple dimensions are not easy to obtain and lack of processing data during the processing of pineapple automated peeling machine. [Methods] The cylindrical coordinate system was used to describe the positional coordinates of the pineapple surface points, the required parameters were calculated by combining the contact measuring method and triangulation method, the overall scheme of the pineapple outer contour measuring mechanism was designed, the static force and buckling analysis of the measuring rod was carried out by ANSYS, and the experimental bench was built to carry out the verification experiments. [Results] the maximum stress of the measuring rod during the measurement process was 32.463 MPa, and the maximum deformation was 0.21 mm, which meets the requirements of structural rigidity; The maximum error of the measurement test was 1.8 mm, which could be controlled within 1%, and the average measurement time was 31.6 and 35.2 s. [Conclusion] The measurement accuracy and time of the experimental setup can satisfy the needs of the pineapple's actual production and processing.

Keywords: triangulation; structural design; pineapple; static analysis; buckling analysis

菠萝果肉中富含钙、铁、镁等对人体健康有益的微量元素, 有着极好的药用价值和经济价值。去皮是菠萝制品加工工艺的一个重要环节^[1], 传统的菠萝削皮方式为手工削皮, 效率低, 劳动强度大, 还伴随危险性。

目前, 菠萝机械式去皮设备可分为手摇式菠萝去皮装置和电机驱动式菠萝去皮装置^[2]。郝思琦等^[3]将传统手工去皮工具进行了改进组合, 降低了受伤风险, 提高了切削质量, 但并未脱离人工参与, 也未从根本上解决菠萝去皮效率低的问题; 呼格吉乐等^[4]发明了一种手摇式菠萝去皮装置, 实现了菠萝机械化去皮, 但无法实现自动化去

皮; 朱贤华等^[5]设计的菠萝去皮机采用 V 型刀具去皮, 降低了操作难度, 提高了效率, 但只能实现固定大小菠萝的去皮; 杨红娟等^[6]利用步进电机驱动刀具实现了自动化去皮, 通过调节微调螺栓调整上下切削装置容腔大小, 适用于不同大小菠萝的切削, 但切削的菠萝果皮残留在装置中, 需人工清理; 张铁涛^[7]利用电机驱动使菠萝旋转, 与刀片往复移动, 调整弹簧实现对不同大小菠萝的切削, 但会出现削皮厚度不均的情况。现有的菠萝削皮机械加工装置的自动化和智能化水平依然偏低, 稳定性不够高, 无法保证不同大小、不同品种菠萝高效、精确削皮, 无法产业

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 62171206)

通信作者: 李莹 (1977—), 女, 昆明理工大学副教授, 博士。E-mail: 7114091@qq.com

收稿日期: 2023-09-13 **改回日期:** 2024-05-12

化^[8]。菠萝削皮机械要向自动化、智能化发展,对菠萝各项参数的检测非常重要,需测量出菠萝的相关数据如质量、横径、纵径、直径的变化程度、内刺尺寸、切削力等,才能为后续实现菠萝自动化切削加工提供依据,但目前尚未见关于专门测量菠萝外轮廓仪器的研究。

研究拟基于菠萝特性,结合三角测量原理^[9]设计一种专门用于测量菠萝外轮廓的装置,分析测量杆尺寸对测量误差的影响程度,进行力学性能仿真验证设计的合理性,并搭建测量试验台,以期菠萝自动削皮机的研制提供准确加工数据,推进菠萝加工产业的自动化进程。

1 测量方案设计

1.1 菠萝直径变化程度

张锡铜等^[10]对18种菠萝果实进行测量,单个果实最大质量为1 992.07 g,最小质量为377.44 g,最大横径为156.24 mm,最大纵径为193.23 mm。研究以云南香水菠萝为检测对象,从菠萝的底部开始,沿纵向以间隔10 mm用游标卡尺测量菠萝直径,测量结果见表1,菠萝半径差值最大值为4.5 mm,平均值为1.75 mm。

表1 菠萝直径变化程度

位置	第一组		第二组		第三组	
	直径	半径差	直径	半径差	直径	半径差
0	73.0	—	75.0	—	70	—
10	82.0	4.50	81.5	3.25	80	2.0
20	88.0	3.00	87.0	2.75	86	3.0
30	92.0	2.00	90.0	1.50	90	2.0
40	95.0	1.50	93.0	1.50	93	1.5
50	96.0	0.50	93.0	0.00	96	1.5
60	96.5	0.25	93.0	0.00	97	0.5
70	96.5	0.00	91.0	1.00	96	0.5
80	96.0	0.25	88.0	1.50	95	0.5
90	94.0	1.00	83.0	2.50	92	1.5
100	91.0	1.50	77.0	3.00	89	1.5
110	86.0	2.50	—	—	84	2.5
120	78.0	4.00	—	—	78	3.0

1.2 测量方法

根据菠萝特性设置测量范围为长度方向0~160 mm,直径80~150 mm,测量误差范围选择±1 mm;测量方式采用旋转接触式测量。柱面坐标参数有容易被测量和不需要坐标转换计算的优点^[11],以此作为外轮廓测量数据的描述方式,如图1所示。 P 点为菠萝表面上任意一点, r 为点 P 距离主轴中心轴的距离,即到 z 轴的距离。 φ 为过 P 点

在 xy 平面的投影点和原点的直线与 x 轴的逆时针夹角, z 为 P 点到 xy 平面的距离。因此需要测量的参数有角度和长度两种。

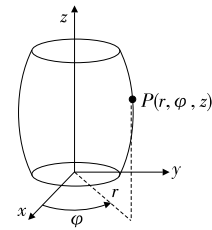


图1 菠萝柱面参考系

Figure 1 Reference frame of pineapple cylinder

“三角测量法”以三角形原理为基础进行测量和定位^[12],被广泛应用于物体三维形貌的测量,能够在不接触试件的情况下,准确测量出试件的三维形貌以及变化后的形貌特征^[13]。由于 P 点到主轴中心轴的距离 r 不能直接测量,研究采用一种三角测量方法,如图2所示,圆为菠萝的横截面, O 点为 Z 轴与菠萝横截面的交点; A 点为设备上的定点,到 Z 轴的距离为 L ;测量杆 AC 的长度即 L ; C 点是测量杆端部与圆的接触点。 $\triangle AOC$ 为等腰三角形,因此利用式(1)和式(2)可以计算出 r 和夹角 β 。

$$r = 2L \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right), \quad (1)$$

$$\beta = \frac{1}{2}(\pi - \alpha). \quad (2)$$

1.3 整体方案

菠萝外轮廓检测装置总体结构包括机架、传动机构、测量机构、装夹定位机构等部件(图3)。主轴传动系统和直线模组固定在机架上,提供动力;测量杆机构固定在直线模组的滑台上,随直线滑台作直线运动,将菠萝表面相对于主轴的位置信息转化为计算机可以识别的电信号^[14];固定装卡机构的指爪盘安装在主轴轴端,卡头固定在机架上,将主轴动力传递给菠萝并保证菠萝在设备中的运动姿态。

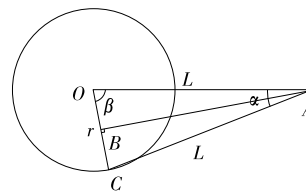


图2 三角测量原理图

Figure 2 Measurement schematic diagram

使用步骤:首先气缸带动顶针盘移动,扩大指爪盘与顶针盘之间的距离,保证菠萝可以轴向放置在指爪盘与顶针盘之间。气缸再次带动顶针盘运动,将菠萝夹在指

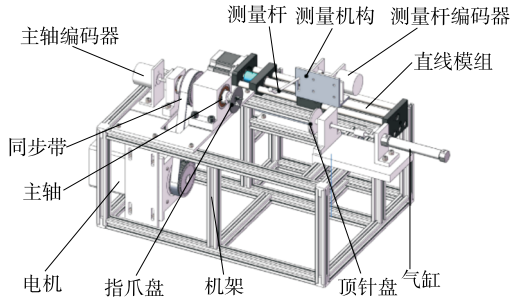


图 3 菠萝外轮廓测量机构总体结构图

Figure 3 Pineapple convex hull contour measuring mechanism overall structure drawing

爪盘和顶针盘之间;启动主轴,菠萝随主轴旋转,同时直线滑台带动测量机构运动,测量杆工作端与菠萝表面接触,测量出此时菠萝相对于机架的旋转角度以及测量杆的摆角信息,并将信息传递给上位机,即完成当前接触点的测量工作。

2 关键零件设计

2.1 测量杆设计

2.1.1 测量杆尺寸对测量误差的影响 为减弱菠萝凹凸表面对测量结果的影响,在测量杆工作端增加球形结构,球形头遇凹陷表面不会陷入其中。菠萝表面点到主轴轴线距离的测量方案原理图如图 4 所示,其中 AC 为测量杆, C 点为小圆的圆心, AC 绕 A 点转动, O 点为主轴轴心, O' 为菠萝截面圆心, AO 的距离与 AC 的长度均为 L , $\triangle AOC$ 为等腰三角形; $\angle CAO$ 是测量杆的摆动角度用 α 表示;大圆表示菠萝截面圆,半径为 R ; OO' 代表菠萝截面圆心与主轴轴心的距离 d ; D 点为线段 OC 与菠萝截面圆的交点; r 为测量杆工作端小圆半径; OD 的长度是理想测量结果。 DC 与 r 的长度差为测量误差 ΔR 。

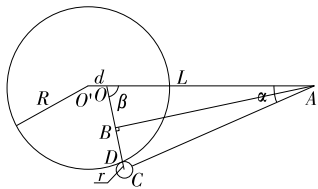


图 4 测量原理图

Figure 4 Measurement schematic diagram

根据图 4 中平面几何的关系可以得到理论误差,计算公式如式(3)~式(6)所示。

$$\begin{cases} x_0 = d \cos \theta \\ y_0 = d \sin \theta \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 - (R + r)^2 = 0 \\ (x_1 - L)^2 + y_1^2 - L^2 = 0 \\ R_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2} - r \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} y_2 = \frac{y_1 x_2}{x_1} \\ (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 - R^2 = 0 \\ R_2 = \sqrt{x_2^2 + y_2^2} \end{cases} \quad (5)$$

$$\Delta R = R_1 - R_2, \quad (6)$$

式中:

d —— O' 与 O 的距离,mm;

R ——以 O' 为圆心的大圆半径,mm;

r ——以 C 为圆心的小圆半径,mm;

L ——线段 AO 和线段 AC 的距离,mm;

θ —— $\angle AOO'$ 的大小,°;

R_1 —— D 到 O 的测出距离,mm;

R_2 —— D 到 O 的实际距离,mm;

ΔR ——测量误差,mm。

菠萝的半径为 40~75 mm,偏心距离 d 为 0~10 mm, $\angle O'OA$ 为 $0^\circ \sim 360^\circ$,将 L 、 R 、 r 、 d 和 $\angle O'OA$ 的初始值分别设为 120, 40, 5, 10 mm 和 0° ,代入式(3)~式(6),从中挑选一项参数进行调整,分析该参数对 ΔR 的影响。

由图 5 可知, ΔR 会随着 $\angle O'OA$ 的变化呈周期性变化,而 $\angle O'OA$ 对 ΔR 无影响, $\angle O'OA$ 的变化不会引入额外的测量误差。 L 对 ΔR 无贡献, L 取值不同只会影响最大误差出现的位置。测量误差 ΔR 随着菠萝截面半径 R 的增大而减小,但不是无限制地减小,随着 R 的增大, ΔR 会逐渐趋近于一个定值,该定值与测量端圆弧半径 r 有关, r 越小,界限值越小。圆弧半径 r 与测量误差 ΔR 之间近似直线线性相关,对 ΔR 影响显著。

综上,在 L 、 R 、 r 、 d 和 $\angle O'OA$ 5 个参数中, L 和 $\angle O'OA$ 对测量误差无直接影响;在 R 的取值范围内,随着其值的增大,其值对 ΔR 的影响越来越小; ΔR 会随着 r 和 d 的增大而增大, r 和 d 对测量结果影响显著。因此,设计测量杆机构时,采用尽量小的 r 和 d 。

2.1.2 测量杆形状尺寸设计 R 的取值范围为 40~75 mm,考虑到正弦函数的导数值会随着弧度增大而减小,要保证其导数值 > 0.9 ,就要保证 R 取最大值 75 mm 时, α 也要 $< \arccos(0.9) = 25.85^\circ$,计算 L 的取值需要 > 91.74 mm。考虑到安装结构、空间避让等因素,最终 L 的长度设置为 150 mm。

研究将直线测量杆进行了弯折处理,消除了直杆测量出现的干涉。测量杆的弯折位置距离工作端圆心 25 mm,弯折后角度为 149° 。在离弯折位置 30 mm 处设置弹簧,提供测量杆向上的拉力,保证测量过程中工作端与菠萝接触,测量杆的另一端呈直角弯折,用于与测量杆编码器连接。已知内刺为圆锥形,底面外接圆最大直径为 7.8 mm,平均直径为 6.1 mm,因此工作端圆弧半径 r 的取值要 > 3.9 mm,又因为 r 取值要尽可能小,所以将 r 设置为 5 mm。最终零件结构如图 6 所示。

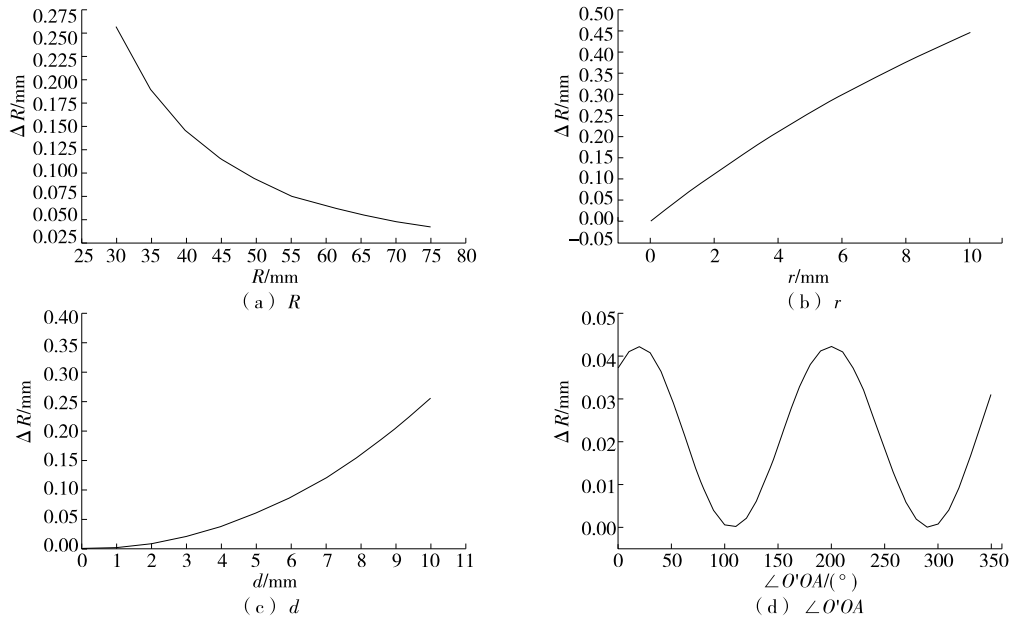


图5 测量误差分析

Figure 5 Measurement error analysis



图6 测量杆

Figure 6 Measuring rod

2.2 夹紧定位机构设计

2.2.1 菠萝固定方式 采用双端固定,用两个平面限制菠萝的轴向运动,在平面上设计指刺结构限制菠萝的径向移动,合理布置指刺的数量和位置,限制菠萝围绕主轴转动,如图7所示。

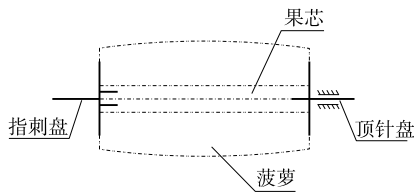


图7 菠萝固定方式

Figure 7 Pineapple fixation method

2.2.2 指爪盘设计 切削菠萝时,菠萝受到的力有自身重力 F_0 ,刀具压力 F_1 和切削力 F_2 ,如图8所示。为了保证菠萝受力平衡,固定机构还需要向菠萝提供等效力 F_3 和等效矩 M_0 。研究对市场上的菠萝固定器进行了优化改进,改进结果如图9所示,利用3个指刺,指刺之间夹角为 120° 周向均匀分布;增加定位圆盘;刀片形状为直角三角形,直角形的斜边朝向定位圆盘圆心,刀刃部位于直角三角形斜边上。

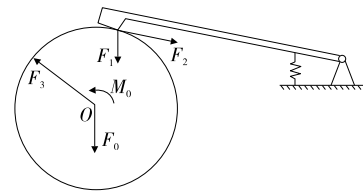


图8 受力分析

Figure 8 Stress analysis

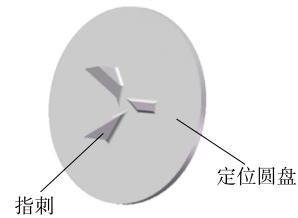


图9 指爪盘

Figure 9 Finger prick disc

利用万能试验机得到菠萝最大切削力为 23 N ,为保障设备可靠性,计算时切削力按 30 N 计算。受力点到主轴中心的最大距离为 75 mm ,通过力矩计算式可得到切削力作用在主轴上的最大力矩为 $2.25\text{ N}\cdot\text{m}$,每片指刺需要提供的最大扭矩 T 为 $0.75\text{ N}\cdot\text{m}$ 。建立指刺扭矩模型如图10所示,指刺受力面为直角三角形,三角形斜边靠近主轴的轴心线,令最近距离为 h_0 ,指刺距离主轴轴心线最远距离为 h_1 ,指刺上任意一点距离主轴轴心线的距离为 h , θ 为刃倾角,指刺转矩按式(7)计算。

$$T = \int_{h_0}^{h_1} Ph(h - h_0) \tan \theta dh, \quad (7)$$

式中:

T ——指爪盘上指刺产生的扭矩, $\text{N}\cdot\text{m}$;

P ——指爪盘上指刺作用在菠萝果肉上的压强, MPa ;

h ——指爪盘指刺上一点到主轴轴心的距离, mm ;

h_0 ——指爪盘指刺边界距离主轴轴心最近的距离, mm ;

h_1 ——指爪盘指刺边界距离主轴轴心最远的距离, mm ;

θ ——靠近主轴主线两边界线的夹角, $^\circ$ 。

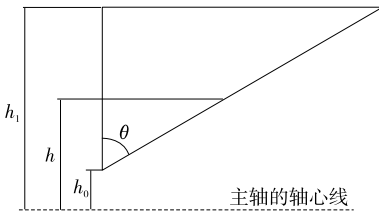


图 10 指刺与主轴几何关系图

Figure 10 Geometric relation between finger claw and spindle

P 为菠萝果芯能够承受的最大压强。增大刃倾角会减小刺入菠萝的阻力,但指刺的耐磨性和强度均会降低,参考常用刀具刃倾角后,选择 θ 为 45° , $\tan \theta = 1$;已知菠萝果芯的平均直径为 26.4 mm 。所以 $h_1 = 20 \text{ mm}$,菠萝果芯可承受的压强 P 为 0.52 MPa ,代入式(7)可以计算出 h_0 值为 5 mm 。

测量菠萝时,测量杆会作用在菠萝的柱面,要避免测量杆与夹具接触,因此圆盘直径要小于菠萝最小纵径,同时要与菠萝有足够的接触面积,保证指爪盘的定位功能,研究选择圆盘直径为 50 mm ,厚度为 2 mm 。

2.2.3 气缸选型 装载菠萝时气缸需要提供足够的压力,卸载时对力的需求主要是克服结构的摩擦力,所以只考虑气缸夹持压紧时所需的力。夹持装置插入菠萝的力为 46.8 N ,为了方便计算,将负载力圆整为 50 N ,气缸的缸径计算式为:

$$F_1 = \frac{\pi}{4} D^2 p \eta, \quad (8)$$

$$F_2 = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) p \eta, \quad (9)$$

式中:

D ——缸径, mm ;

p ——气缸工作压力, MPa ;

d ——活塞杆直径, mm ;

F_1 ——一号活塞杆的推力, N ;

F_2 ——二号活塞杆的推力, N ;

η ——气缸的机械效率, N 。

由于菠萝夹紧机构运动行程较短,对运动速度无要求,因此根据经验,选择气缸的机械效率为 0.7 (见表2)。已知装置刺入菠萝果芯的力 F_0 为 50 N ;空气压力 p 为 0.5 MPa ,根据式(8)和式(9)计算得到气缸直径 D 为 13.49 mm 。

表 2 负载率与负载运动状态关系表

Table 2 Relationship between load rate and load motion state

种类	运动状态	负载率 $\eta/\%$
静负载	夹紧、低速压铆	≤ 80
动载荷	气缸速度 $< 100 \text{ mm/s}$	≤ 65
	气缸速度 $100 \sim 500 \text{ mm/s}$	≤ 50
	气缸速度 $> 500 \text{ mm/s}$	≤ 30

气缸理想行程为菠萝纵向尺寸范围 $100 \sim 150 \text{ mm}$ 的尺寸差距,即 50 mm ,考虑气缸工作时需要一定的压紧力避免活塞与气缸端盖相撞,额外增加 20 mm 余量,最终气缸行程为 70 mm 。根据机构的运动轨迹和工作方式等特点,气缸类型选择单作用型无缓冲标准安装的气缸,经过查询亚德客气缸的选型表得到气缸的型号为MI16x75U。

2.3 数据采集器件选型

信号采集处理器选择STM32F103C8T6型号的MCU作为信号采集处理单元,工作电压为 3.3 V ,总线宽度 32 位、工作频率 72 MHz ,该单片机内部资源丰富,包括计数器、DMA、数模转换器等能够满足数据采集的需要^[15]。

角位移传感器选择光电式编码器对主轴角位移和测量杆摆动角度进行记录,为满足测量杆的小范围摆动和高检测精度的要求,选择分辨率为 2000 r^{-1} 的编码器,数据采集时通过芯片计数器的编码器模式可以将分辨率提升到 8000 r^{-1} ,最小采样角度间隔为 0.045° ,能够满足使用需要。主轴编码器的分辨率与采样间隔角度有关。

如图11所示, O 点为圆心,点 A 和点 B 在以 O 点为圆心, r 为半径的圆上不同的两点, $\angle BOA$ 的大小等于采样间隔角度。研究采用直线 AB 替换圆弧 AB ,直线 AB 上的点到原点 O 的距离小于等于圆弧 AB 上的点,当 $\angle COA = 1/2 \angle BOA$ 时,差值最大,为了保证测量误差 $< 1 \text{ mm}$,将误差最大值设定为 0.5 mm ,根据式(10)可知,相同采样间隔角度时,半径 r 越大,最大误差值越大,所以令 $r = 80 \text{ mm}$,计算采样角度间隔。利用式(11)求解得到采样间隔角度要 $< 6.40^\circ$,为了保证菠萝每旋转一周采样点数一致,且达到测量精度,将采样间隔角度设置为 3° ,因此主轴编码器的分辨率为 120 的整数倍,综合考虑,选择欧姆龙E6B2-CWZ6C型光电式编码器。

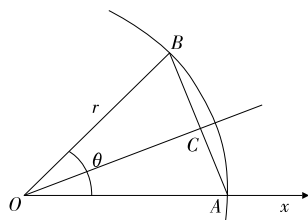


图 11 采样间隔与误差

Figure 11 Sampling interval and error

$$\Delta r = r \left[1 - \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \right], \quad (10)$$

$$\theta = 2 \arccos\left(1 - \frac{\Delta r}{r}\right). \quad (11)$$

3 测量杆受力性能分析

3.1 静力学分析

测量过程中,测量杆接触菠萝产生的冲击振动关系到测量精度,因此测量杆的结构强度和稳定性至关重要^[16]。根据受力分析可知,测量杆受到的菠萝的压力与弹簧的拉力是作用力与反作用力,因此简化其受力过程:弹簧对测量杆的拉力位于距测量杆直角弯折处 30 mm,受力大小与菠萝对测量杆的压力一致,方向相反。利用压力传感器测出菠萝在测量过程中对测量杆工作端的最大压力为 0.7 N,为了保障设计的可靠性,仿真时按 1 N 计算。

将测量杆模型从 SolidWorks 保存为 IGS 文件后导入有限元软件 ANSYS Workbench 中进行有限元模型建模^[17];用多区域法对模型进行网格划分,映射网格类型采用六面体,自由网格类型采用六面体内核^[18]。网格划分结果:节点 374 893 个,单元 227 787 个,网格划分质量 0.73,代表网格质量良好^[19],网格模型如图 12 所示。设置测量杆的材料为 316 型不锈钢,密度为 $7.969 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,弹性模量为 $1.95 \times 10^5 \text{ MPa}$,泊松比为 0.27,屈服强度为 252.1 MPa。对测量杆添加约束和载荷,解出测量杆应力和变形分析如图 13 和图 14 所示。

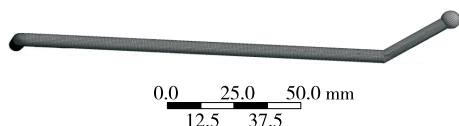


图 12 静力学分析网格划分示意图

Figure 12 Schematic diagram of meshing for static analysis

由图 13 和图 14 可知,测量杆承受最大的应力为 32.463 MPa,低于材料最低屈服强度 252.1 MPa,满足测量杆刚度要求。测量杆最大变形量为 0.21 mm,位于工作端位置,根据测量误差分析可知,测量杆的变形会导致测量

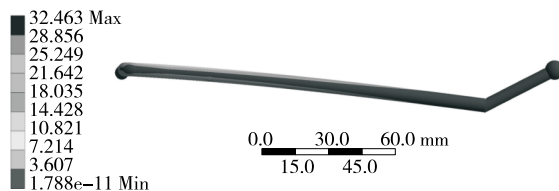


图 13 测量杆静力学应力云图

Figure 13 Static stress cloud of measuring rod

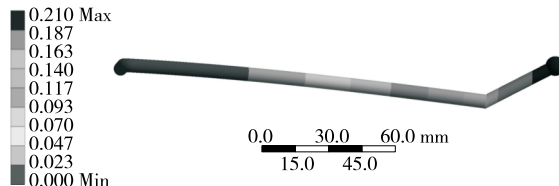


图 14 测量杆静力学变形云图

Figure 14 Static deformation cloud of measuring rod

值比实际值偏大,根据图 5,测量杆工作端最大变形量对测量过程与结果的影响较小,在允许的误差范围内。综上,测量杆的强度和刚度满足要求。

3.2 屈曲分析

测量杆为受压的细长杆结构,测量时不可避免地产生振动,这种振动会对设备的安全性和稳定性产生影响^[20]。因此,需进行特征值屈曲分析来检验其在测量过程中的结构稳定性^[21]。首先对模型的材料参数、约束、载荷及接触等级进行定义^[22],采用 ANSYS WORKBENCH 中的四面体网格进行网格划分,通过 Face meshing 控制曲面网格划分均匀度。网格划分结果:节点 35 674 个,单元 18 321 个,网格划分质量 0.68,代表网格质量良好,网格模型如图 15 所示。临界载荷等于施加的载荷乘负载系数,因此在测量杆工作端施加 1 N 的力即可^[23];在分析屈曲临界荷载时,一般仅取临界荷载的最低值,即第一阶屈曲临界荷载,因此只求解一阶的结果^[24],如图 16 所示。

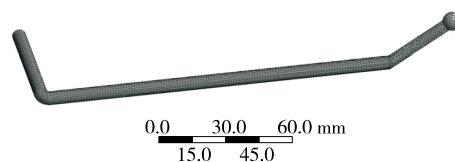


图 15 特征值屈曲分析网格划分示意图

Figure 15 Eigenvalue flexural analysis meshing diagram

计算得到的负载系数乘以施加的载荷得到临界载荷值为 5 375.5 N,说明测量杆在测量端载荷达到 5 375.5 N 时将发生失稳。由于实际测量过程中菠萝给测量端的最大压力为 1 N,远小于杆的屈曲临界荷载,因此,测量过程中测量杆不会发生失稳。

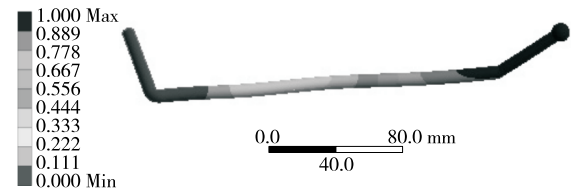


图 16 1 阶特征值屈曲模态变形图

Figure 16 1st order eigenvalue flexural mode deformation diagram

4 仿真试验

4.1 测量试验

为了测试菠萝轮廓测量机构的检测精度是否能够满足实际需要,搭建了测量试验台,从检测速度和精度方面进行分析。随机挑选两个不同大小的云南香水菠萝,分别对每个菠萝的中间和两端随机标记点,标记位置以数字 1~6 标示,用游标卡尺测量标记点处的菠萝横径,作为实际测量值参考。如图 17 所示,数据采集时将以 120 分辨率编码器的脉冲作为采样信号,采样间隔角度为 3°,由于菠萝削皮机主轴转速通常为 120 r/min,试验台主轴转

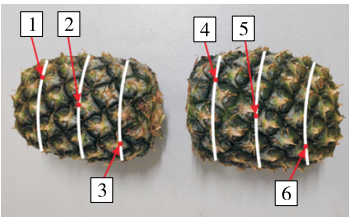


图 17 菠萝标记点位置

Figure 17 Pineapple marker point location

速设置为 120 r/min。

4.2 测量结果分析

统计各个标记点的测量值与平均值,计算与实际测量值的相对误差,用秒表记录每个菠萝 3 次测量过程的测量时间,计算平均测量时间,结果见表 3。由表 3 可知,测量最大误差为 1.8 mm,误差范围在 1% 以内;测量误差会随着菠萝直径的增大而减小,与误差分析理论符合;测量平均时间分别为 31.6, 35.2 s,测量时间受菠萝尺寸影响;综上,试验测量的精度和时间能够满足菠萝实际生产加工的需要。

表 3 测量结果

Table 3 Measurement results

测量位置	第一次测量值/mm	第二次测量值/mm	第三次测量值/mm	平均值/mm	实际测量值/mm	测量误差%	平均测量时间/s
1	82.1	81.8	84.3	82.7	83.6	1.07	31.6
2	100.8	102.3	101.7	101.6	101.2	0.39	
3	88.0	86.8	88.6	87.8	87.1	0.80	
4	92.3	91.2	92.5	92.0	91.5	0.55	35.2
5	104.9	103.6	103.2	103.9	104.2	0.29	
6	87.8	87.5	89.3	88.2	88.9	0.79	

5 结论

采用 ANSYS 对测量杆进行静力学分析,得到测量杆承受的最大应力为 32.463 MPa,小于材料的屈服强度,满足测量杆刚度要求;最大变形量为 0.21 mm,对测量误差的影响在可接受范围内。屈曲分析计算得到测量杆的临界载荷值为 5 375.5 N,根据实际测量过程中菠萝给测量端的最大压力为 1 N,说明测量杆能正常使用,在测量过程中运行稳定。仿真试验表明,测量中的最大误差为 1.8 mm,≤1%,两个菠萝的平均测量时间分别为 31.6, 35.2 s,实际测量结果表明测量误差会随着菠萝直径的增大而减小,说明理论误差分析与试验相吻合,测量的精度和时间能够满足菠萝实际生产加工的需要。后续将进行多组试验分析误差来源,通过优化测量杆的结构进一步提高检测精度,也可选择更先进的传感器来减少测量时间。

参考文献

[1] 任工昌, 张博文, 张膺之. QFD 与 TRIZ 在菠萝去皮机设计中的应用[J]. 包装工程, 2020, 41(7): 157-163.
REN G C, ZHANG B W, ZHANG J Z. Application of QFD and TRIZ in the design of pineapple peeling machine[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(7): 157-163.
[2] 宋玲, 史勇. 菠萝去皮装置的研究现状及发展趋势[J]. 中国农业化学报, 2017, 38(6): 109-113.
SONG L, SHI Y. Research status and development trend of pineapple peeling device[J]. Chinese Journal of Agricultural Chemistry, 2017, 38(6): 109-113.
[3] 郝思琦, 刘洋, 张志强, 等. 菠萝削皮机的结构设计[J]. 吉林化工学院学报, 2019, 36(7): 40-42.
HAO S Q, LIU Y, ZHANG Z Q, et al. Structural design of pineapple peeling machine[J]. Journal of Jilin Institute of Chemical Technology, 2019, 36(7): 40-42.

- [4] 呼格吉乐, 高敏, 方园园, 等. 菠萝去皮装置: CN201110091167.X[P]. 2013-06-05.
Hugejile, GAO M, FANG Y Y, et al. Pineapple peeling device: CN201110091167.X[P]. 2013-06-05.
- [5] 朱贤华, 欧德明, 张银, 等. 菠萝去皮机: CN201420233742.4 [P]. 2014-09-24.
ZHU X H, OU D M, ZHANG Y, et al. Pineapple peeler: CN201420233742.4[P]. 2014-09-24.
- [6] 杨红娟, 崔嘉嘉, 陈继文, 等. 一种菠萝自动去皮装置: CN201510895950.X[P]. 2017-09-12.
YANG H J, CUI J J, CHEN J W, et al. A pineapple automatic peeling device: CN201510895950.X[P]. 2017-09-12.
- [7] 张铁涛. 菠萝去皮机: CN201520550490.2[P]. 2016-04-13.
ZHANG T T. Pineapple peeler: CN201520550490.2[P]. 2016-04-13.
- [8] 石伟琦, 孙伟生, 习金根, 等. 我国菠萝产业现状与发展对策[J]. 广东农业科学, 2011, 38(3): 181-186.
SHI W Q, SUN W S, XI J G, et al. The current situation and development countermeasures of pineapple industry in China [J]. Guangdong Agricultural Science, 2011, 38(3): 181-186.
- [9] RUEL S, LUU T, ANCTIL M, et al. Target localization from 3D data for on-orbit autonomous rendezvous & docking[C]// Proceedings of the 2008 IEEE Aerospace Conference. [S. l.]: IEEE, 2008: 1-11.
- [10] 张锡铜, 吴青松, 林文秋, 等. 18份菠萝种质果实外观性状比较分析[J]. 果树学报, 2022, 39(1): 78-85.
ZHANG X T, WU Q S, LIN W Q, et al. Comparative analysis of fruit appearance traits of 18 pineapple germplasm[J]. Journal of Fruit Tree, 2022, 39(1): 78-85.
- [11] ZHANG L, CHEN Q, ZUO C, et al. Real-time high dynamic range 3D measurement using fringe projection[J]. Optics Express, 2020, 28(17): 24 363-24 378.
- [12] 杨艳玲, 禹静, 林希萌, 等. 三维螺纹测量机接触式测头的优化设计[J]. 中国机械工程, 2021, 32(15): 1 812-1 817.
YANG Y L, YU J, LIN X M, et al. Optimal design of contact probe for 3D thread measuring machine[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(15): 1 812-1 817.
- [13] 徐永敏, 白鹏翔, 吴主峰, 等. 基于三角测量的卷烟包装密封度无损检测方法[J]. 食品与机械, 2022, 38(3): 118-124.
XU Y M, BAI P X, WU J F, et al. Nondestructive testing method of cigarette package sealing based on triangulation[J]. Food & Machinery, 2022, 38(3): 118-124.
- [14] 刘传和, 贺涵, 何秀古, 等. 我国菠萝品种结构与新品种自主选育推广[J]. 中国热带农业, 2021(4): 13-15, 76.
LIU C H, HE H, HE X G, et al. The structure of pineapple varieties in China and the independent selection and promotion of new varieties[J]. China Tropical Agriculture, 2021(4): 13-15, 76.
- [15] 叶帅, 李韶鹏, 余雪, 等. 基于 STM32F103C8T6 的气动隔膜泵测试系统设计[J]. 计量与测试技术, 2016, 43(4): 70-72.
YE S, LI S P, YU X, et al. Design of pneumatic diaphragm pump test system based on STM32F103C8T6[J]. Metrology and Testing Technology, 2016, 43(4): 70-72.
- [16] 孙智聪, 王志山, 徐雪萌, 等. 基于 TRIZ 理论的挂面垂直切断装置设计与仿真[J]. 包装与食品机械, 2023, 41(2): 84-89.
SUN Z C, WANG Z S, XU X M, et al. Design and simulation of vertical cutting device for hanging noodles based on TRIZ theory[J]. Packaging and Food Machinery, 2023, 41(2): 84-89.
- [17] 冯怡然, 陶学恒, 王学俊, 等. 细长状海蜇丝自动切割刀具设计与分析[J]. 食品与机械, 2021, 37(5): 120-125.
FENG Y R, TAO X H, WANG X J, et al. Design and analysis of automatic cutting tools for slender jellyfish shreds[J]. Food & Machinery, 2021, 37(5): 120-125.
- [18] 孟遥志, 石艳, 廖映华, 等. 基于动态特性回转复合压机模盒组件优化设计[J]. 食品与机械, 2023, 39(2): 87-93, 163.
MENG Y Z, SHI Y, LIAO Y H, et al. Optimized design of rotary composite press die box assembly based on dynamic characteristics[J]. Food & Machinery, 2023, 39(2): 87-93, 163.
- [19] 李凯, 周利平, 刘小莹, 等. 基于 ANSYS 的可换头麻花钻稳定性研究[J]. 工具技术, 2021, 55(4): 85-87.
LI K, ZHOU L P, LIU X Y, et al. ANSYS-based stability study of interchangeable head twist drill[J]. Tool Technology, 2021, 55(4): 85-87.
- [20] 蒋快乐, 陈治华, 李亚南, 等. 澳洲坚果脱皮机脱皮辊的力学特性仿真[J]. 食品与机械, 2021, 37(8): 110-114.
JIANG K L, CHEN Z H, LI Y N, et al. Simulation of mechanical properties of peeling rollers in a macadamia nut peeling machine[J]. Food & Machinery, 2021, 37(8): 110-114.
- [21] 甘泉, 韩伟, 沈佳铭, 等. 基于 ANSYS Workbench 的细长压杆屈曲分析研究[J]. 石化技术, 2017, 24(1): 46-47, 57.
GAN Q, HAN W, SHEN J M, et al. Study on flexure analysis of slender compression rod based on ANSYS Workbench[J]. Petrochemical Technology, 2017, 24(1): 46-47, 57.
- [22] 李晨阳, 单慧勇, 张程皓, 等. 基于 FEM 的鲢鱼去头加工装置运动参数优化试验[J]. 食品与机械, 2022, 38(11): 89-94.
LI C Y, SHAN H Y, ZHANG C H, et al. Optimization test of motion parameters of catfish deheading processing device based on FEM[J]. Food & Machinery, 2022, 38(11): 89-94.
- [23] 盛桂琳, 胡鹏辉, 杜文凤, 等. 新型装配式管廊支架体系及受力性能分析[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2023, 44(3): 46-53.
SHENG G L, HU P H, DU W F, et al. New assembled pipe corridor bracket system and force performance analysis[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 44(3): 46-53.
- [24] 庞欢, 王道成, 石东阳, 等. 折叠翼无人机集群发射装置设计与仿真[J]. 机械科学与技术, 2023, 42(5): 679-686.
PANG H, WANG D C, SHI D Y, et al. Design and simulation of folding-wing UAV cluster launcher[J]. Mechanical Science and Technology, 2023, 42(5): 679-686.