

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.03.014

影响鲜莲子机械去心定位精度的几何参数测量

Measurement of geometric parameters affecting the positioning accuracy of fresh lotus seeds

马秋成¹ 刘昆¹ 龙辉¹ 李焱²

MA Qiu-cheng¹ LIU Kun¹ LONG Hui¹ LI Yan²

李俊雄¹ 郭耿君¹ 何剑¹ 肖江¹

LI Jun-xiong¹ GUO Geng-jun¹ HE Jian¹ XIAO Jiang¹

(1. 湘潭大学机械工程学院, 湖南 湘潭 411105; 2. 中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412000)

(1. School of Mechanical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan, Hunan 411105, China;

2. Science and Technology Co., Ltd of AECC HAPRI, Zhuzhou, Hunan 412000, China)

摘要:基于最小二乘法建立了鲜莲子截面圆的圆心坐标、直径、圆度误差以及鲜莲子几何轴线与莲心轴线的同轴度误差的测量模型,借助三坐标测量机测量了鲜莲子沿莲心轴线方向各截面的轮廓参数,将测量数据代入测量模型计算得到鲜莲子各参数的结果。结果表明,鲜莲子圆度误差沿莲心轴线方向呈近似抛物线规律变化,越靠近最大截面位置其圆度误差越小,反之越大,最大截面处的圆度误差最小,其平均值为 0.347 3 mm;在以莲心轴线为基准时,鲜莲子几何轴线和莲心轴线的平均同轴度误差为 0.914 0 mm;基于该同轴度误差测量结果,鲜莲子机械去心时,其冲头直径比莲心直径至少要大 0.914 0 mm。

关键词:鲜莲子;机械去心;测量方法;三坐标测量;最小二乘法;同轴度误差;圆度误差

Abstract: Fresh Xiang lotus, the relative parameters of fresh lotus seeds affecting the precision of mechanical core removal were measured and analyzed. A model of the section circle of fresh lotus seed is obtained with the attributes of circle center coordinates, diameter and roundness error, according to the coordinate parameters of each contour point on the same circle of fresh lotus seed. The center coordinates of each section along the axis of the lotus core are fitted with least square method. A linear equation of lotus geometry axis is established. The measurement model of coaxially error between lotus geometry axis and lotus core axis is developed. Furthermore, an accurate measurement of the contour parameters of each section of the fresh lotus seed is

implemented with the coordinate measuring machine. Based on the obtained measurement model, the center, diameter and roundness error values of the fitting circle for each section can be calculated. The measured data shows that the roundness error of fresh lotus along the direction of the lotus core approximates the parabolic law. The roundness error is minimal the maximum section circle and vice versa. The average value of the maximum section circle is 0.347 3 mm. Therefore, the contour near the maximum section is chosen as the positioning reference, in order to achieve optimal centering accuracy. Finally, the circle center data of five section fitting circles near the maximum section are selected, based on the proposed approach. An approximate geometric axis of the fresh lotus seed is fitted. The average coaxially error between the geometrical axis of lotus seed and the lotus core axis is 0.914 0 mm. It can be seen that the size of the punch should be at least 0.914 0 mm larger than the size of the lotus core, during the mechanical operation process. The measurement results provide a basic dataset for the development of the mechanical centering machine of the fresh lotus seed. The proposed method also provides a reference for the geometric center measurement of irregular objects, which have similar attribute to lotus seeds.

Keywords: fresh lotus; mechanical core removal; method of measurement; three coordinate measuring instrument; least squares; concentricity error; roundness error

莲子由莲壳、莲皮、莲仁与莲心组成,由于莲心味道苦涩,莲子成为食材之前需将其去除^[1-3]。目前,鲜莲子去心为手工作业,生产效率低,而且鲜莲子采摘后失水速度快,去心具有时效性,在莲子成熟的旺盛期,常出现用工荒。因此,突破鲜莲子机械去心技术极为迫切^[4-5]。

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:51575466)

作者简介:马秋成(1967—),男,湘潭大学教授,硕士。

E-mail: mqc@xtu.edu.cn

收稿日期:2018-11-27

要实现鲜莲子去心的机械化,首先要解决鲜莲子的定位问题。鲜莲子外形不规则,整体形状类似于椭球体,沿莲心轴线方向的各截面形状近似圆形,如图 1 所示。基于鲜莲子的几何特征,定位时只能以其外轮廓面作为定位基准,其定位精度与鲜莲子的形状尺寸、横截面圆度误差、莲心轴线与几何轴线的同轴度偏差有关,因此,得到鲜莲子的相关几何参数的精确数据是很有必要的。



1. 鲜莲子 2. 凹槽 3. 莲心 4. 分型面
图 1 鲜莲子外形与莲心位置图

Figure 1 Fresh lotus shape and lotus core position

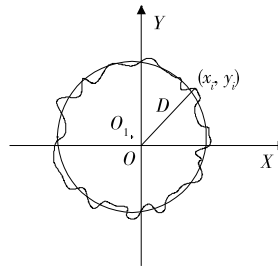
关于莲子几何参数和物性参数的测量,国内外学者进行了相关研究。在莲子几何参数研究方面,刘木华等^[6]对鲜莲子的外形尺寸、莲心直径及莲壳厚度等物理参数进行了测量,得到了鲜莲子的直径及长度分布区间;赵小广等^[7]采用游标卡尺对干莲子的三围尺寸和壳厚等物理参数进行了测量,得到干壳红莲和干壳白莲的球度、纵径、平均中径均值以及莲子壳厚度的值;叶香美等^[8]对不同含水率的莲子的外形尺寸进行了测量,得到了莲子外形尺寸随含水率的变化规律。在莲子圆度误差测量方面,主要采用两点法测量,本课题组^[9]在前期研究中用游标卡尺对干莲子最大横截面的圆度误差进行了测量,得到了干莲子的圆度误差均值为 0.46 mm。而关于鲜莲子莲心轴线与几何轴线的同轴度误差测量鲜有文献报道,但在机械零件不同表面的同轴度误差测量方面,则有较多文献^[10-13]进行了相关探讨。

为得到影响鲜莲子机械去心相关几何参数的精确数据,本研究基于最小二乘法建立鲜莲子截面圆的圆心坐标、直径、圆度误差以及鲜莲子几何轴线与莲心轴线的同轴度误差的测量模型,为保证测量精度,借助三坐标测量机为测量工具,根据测量结果分析鲜莲子圆度误差沿莲心轴线方向呈近似抛物线规律变化,并计算得到鲜莲子几何轴线和莲心轴线的同轴度误差。以为鲜莲子机械去心设备的研发提供基础数据。

1 鲜莲子测量模型的建立

1.1 鲜莲子截面参数及其圆度误差测量模型

由于鲜莲子的任意横截面形状近似于圆形,本研究采用最小二乘法^[14-16]对鲜莲子沿莲心轴线方向的横截面圆度误差进行分析,测量模型如图 2 所示。



X, Y 为以点 O 为原点的坐标系的横、纵坐标轴; (x_i, y_i) 为莲子横截面上的测点坐标, mm; D 为莲子最小二乘拟合截面圆的直径, mm; O_1 为莲子最小二乘拟合截面圆的圆心

图 2 莲子横截面测量模型图

Figure 2 Lotus cross section measurement model

在鲜莲子横截面上取 n 个均匀分布点进行测量,测得同一圆周上各测点的坐标数据 (x_i, y_i) ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)。假设莲子拟合截面圆的圆心 O_1 坐标为 (\hat{u}_1, \hat{u}_2) , 根据平面圆圆心及直径的最小二乘拟合通用算法^[17], 可求得莲子截面拟合圆圆心 O_1 的坐标, 如式(1)所示。

$$\begin{cases} \hat{u}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} b_i^2 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} a_i c_i - \sum_{i=1}^{n-1} b_i c_i \cdot \sum_{i=1}^{n-1} a_i b_i}{\sum_{i=1}^{n-1} a_i^2 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} b_i^2 - (\sum_{i=1}^{n-1} a_i b_i)^2}; \\ \hat{u}_2 = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} a_i^2 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} b_i c_i - \sum_{i=1}^{n-1} a_i c_i \cdot \sum_{i=1}^{n-1} a_i b_i}{\sum_{i=1}^{n-1} a_i^2 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} b_i^2 - (\sum_{i=1}^{n-1} a_i b_i)^2}, \end{cases} \quad (1)$$

式中 a_i, b_i, c_i 按式(2)求得:

$$\begin{cases} 2(x_{i+1} - x_i) = a_i; \\ 2(y_{i+1} - y_i) = b_i; \\ x_{i+1}^2 + y_{i+1}^2 - x_i^2 - y_i^2 = c_i, \end{cases} \quad (2)$$

式中:

x_i —— 第 i 个测点的 x 坐标值, mm;

y_i —— 第 i 个测点的 y 坐标值, mm。

根据式(1)求得的 O_1 坐标 (\hat{u}_1, \hat{u}_2) , 和圆周上各测点的坐标数据 (x_i, y_i) , 可以求得以拟合圆圆心 O_1 为中心过各测点所做圆的直径 \hat{D}_i 。

$$\hat{D}_i = 2 \cdot \sqrt{(x_i - \hat{u}_1)^2 + (y_i - \hat{u}_2)^2}, \quad (3)$$

式中:

\hat{D}_i —— 拟合圆直径, mm;

\hat{u}_1 —— 拟合圆心的 x 坐标值, mm;

\hat{u}_2 —— 拟合圆心的 y 坐标值, mm;

x_i —— 第 i 个测点的 x 坐标值, mm;

y_i —— 第 i 个测点的 y 坐标值, mm。

对 \hat{D}_i 取算术平均值, 则鲜莲子截面拟合圆直径 D 为:

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{D}_i \quad (4)$$

鲜莲子截面的最小二乘圆心 O_1 与测点间的距离 d_i 为:

$$d_i = \sqrt{(\hat{u}_1 - x_i)^2 + (\hat{u}_2 - y_i)^2} \quad (5)$$

根据圆度误差计算方法,鲜莲子截面的最小二乘圆度误差 f 为:

$$f = d_{\max} - d_{\min} \quad (6)$$

式中:

d_{\max} ——测点与 O_1 之间的最大距离,mm;

d_{\min} ——测点与 O_1 之间的最小距离,mm。

1.2 鲜莲子几何轴线的测量模型

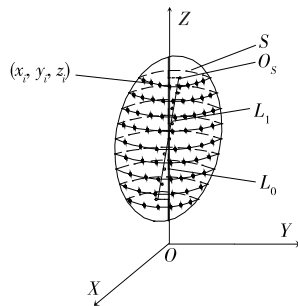
建立鲜莲子各截面圆度误差测量模型后,将鲜莲子各截面圆心用空间直线整体最小二乘法可拟合一条直线^[18],即为鲜莲子几何轴线。鲜莲子几何轴线的测量模型如图 3 所示,据此模型可推导鲜莲子几何轴线方程。

假设莲子几何轴线 L_1 的标准方程式为:

$$\frac{x - x_0}{A} = \frac{y - y_0}{B} = \frac{z - z_0}{C} \quad (7)$$

式中:

A, B, C ——分别为 L_1 的方向向量在 X, Y, Z 方向的分量。



X, O, Y, Z 组成莲子测量的空间直角坐标系; L_0 代表莲心轴线,其位置与坐标系 Z 轴重合; S 是莲子横截面曲线; (x_i, y_i, z_i) 为 S 上的测点坐标; O_s 为 S 的拟合中心; L_1 为莲子几何轴线,由各横截面 S 的拟合中心点 O_s 拟合而成

图 3 莲子几何轴线测量模型图

Figure 3 Lotus geometry axis measurement model

设 $a = \frac{A}{C}, b = x_0 - \frac{A}{C}z_0, c = \frac{B}{C}, d = y_0 - \frac{B}{C}z_0$, 则

莲子几何轴线 L_1 的方程式为:

$$\begin{cases} x = az + b; \\ y = cz + d. \end{cases} \quad (8)$$

用矩阵形式,可表示为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & z & 1 \end{bmatrix} [a \ b \ c \ d]^T \quad (9)$$

将式(9)改写成误差方程形式,可以得到莲子几何轴

线 L_1 的含有误差项的 EIV 测量模型,如式(10)所示。

$$V = B\hat{X} - L \quad (10)$$

式中:

V ——莲子几何轴线 L_1 的误差矩阵;

B ——莲子的截面圆心在 Z 方向的测量矩阵, $B =$

$$\begin{bmatrix} z & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & z & 1 \end{bmatrix};$$

L ——莲子的截面圆心在 X, Y 方向的测量矩阵, $L =$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix};$$

\hat{X} ——莲子几何轴线 L_1 的参数估计向量, $\hat{X} =$

$$[\hat{a} \ \hat{b} \ \hat{c} \ \hat{d}]^T。$$

将莲子的截面圆心 $O_{S1}(x_1, y_1, z_1), O_{S2}(x_2, y_2, z_2), O_{S3}(x_3, y_3, z_3), \dots, O_{Sn}(x_n, y_n, z_n)$, 带入测量矩阵 L 和 B , 得

$$L = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ \vdots \\ x_n \\ y_n \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$B = \begin{bmatrix} z_1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & z_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ z_n & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & z_n & 1 \end{bmatrix}。 \quad (12)$$

根据式(10),可求解出参数向量 $\hat{X} = [\hat{a} \ \hat{b} \ \hat{c} \ \hat{d}]^T$,则可以确定莲子几何轴线 L_1 的直线方程。

1.3 同轴度误差测量模型

计算鲜莲子几何轴线与莲心轴线的同轴度误差时,以莲心轴线为基准,用一个圆柱面来包络莲子几何轴线与各截面的交点,所得圆柱的直径即为二者的同轴度误差,包络圆柱的直径为所有交点与莲心轴线的最大距离的 2 倍^[19]。假定莲心轴线的方向与测量坐标系 Z 轴重合,其方向向量为 $\vec{S} = (0, 0, 1)$,莲子几何轴线与所测莲子各截面的交点为 O_J ,则各交点跟莲心轴线距离 R_J 为:

$$R_J = \frac{|\vec{O}_J \times \vec{S}|}{|\vec{S}|} (J = 1, 2, \dots, n) \quad (13)$$

式中:

R_J ——各交点跟莲心轴线距离,mm。

因此,莲子几何轴线与莲心轴线的同轴度误差 φf 为:

$$\varphi f = 2 \cdot \max\{R_J\} (J = 1, 2, \dots, n) \quad (14)$$

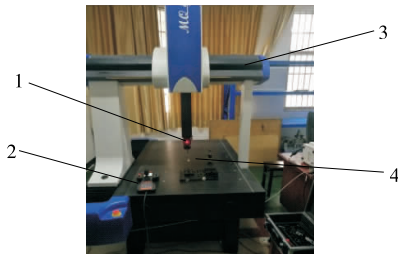
2 测量试验

2.1 试验样本

试验样本选用湘莲“寸三莲”品种,产自湖南湘潭县花石镇。试验样本为剥去外壳的成熟鲜莲子,随机选取500粒作测试样本,长度在20.0~23.0 mm,直径在15~19 mm,含水率为68.9%,千粒重1 980 g。

2.2 试验仪器与设备

试验仪器采用三坐标测量机(MQ8106型,西安爱德华测量设备有限公司)。测量机由主机、电器系统、软件系统及测头所组成,整体结构为悬臂式,测头为接触式测头,测头探针直径为4 mm,测量精度为0.002 mm,软件系统采用AC-DMIS。为保证测量精度,测量前将室温控制在20℃,湿度控制在45%~60%,测量现场如图4所示。



1. 测头 2. 操作盒 3. 测量主机 4. 鲜莲子
图4 莲子圆度误差三坐标测量现场图

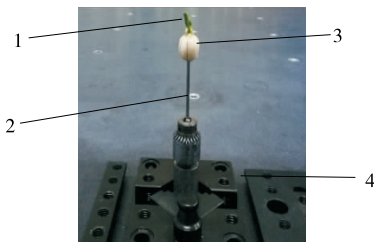
Figure 4 Picture of three coordinate measurement of lotus seed roundness error

2.3 测量方法

为准确测量鲜莲子外轮廓参数,取鲜莲子莲心轴线作为鲜莲子几何参数测量的测量基准。由于莲心位于鲜莲子内部,采用鲜莲子手工去心方法,用直径为2.5 mm的圆柱形顶针将莲心顶出,以顶针轴线代替莲心轴线(为减少误差,以顶针顶出完整莲心为判断条件)。在顶出莲心后,将顶针安装在测量台夹具上,如图5所示。

鲜莲子外轮廓参数的测量步骤:

(1) 校准位置,建立测量坐标系。先对三坐标测量机的测头进行校准,再通过操作盒,控制测头在夹具的基准



1. 莲心 2. 顶针 3. 莲仁 4. 夹具
图5 鲜莲子测量夹具实物图

Figure 5 Picture of fresh lotus seed measuring fixture

圆柱上取一圆截面测其3点,在AC-DMIS中生成1个圆,以其圆心为坐标原点,建立测量基准坐标系,将顶针的位置调到与坐标系Z轴重合的位置,并将其固定。

(2) 轮廓周向测量。从鲜莲子顶端开始,选取靠近顶端且截面形状近似圆形的横截面作为第1个测量截面(距顶端约2~3 mm),在AC-DIMS中选择曲线扫描命令,以XOY作为测量平面,为使测点数量既能满足拟合莲子截面圆的准确性,又减少数据处理的工作量,将周向测量步长设置为2 mm。三坐标测量机根据设置参数自动调整测头位置,沿莲子截面轮廓周向每隔2 mm让探针与莲子外表面接触1次,测得接触点的坐标值。根据截面大小,在鲜莲子横截面周向测得20~35个点的位置坐标。

(3) 沿莲心轴线测量多个截面。在完成1个截面轮廓参数测量后,手动调节操作盒,将测头位置沿Z轴向下移动1个截面间距,继续对第2个截面进行测量,直至最后完成莲子9个截面的测量。考虑样本莲子的长度为20.0~23.0 mm,为满足形状拟合要求,本试验将莲子分成9个截面,每粒莲子的截面间距根据莲子的实际长度和9个等分截面来确定。

3 结果与分析

3.1 莲子截面圆度误差分析

用上述方法测量鲜莲子外轮廓参数时,所测数据是莲子在各截面上均匀分布点的坐标值,表1给出了莲子1个截面的测量数据。结合1.1所述的鲜莲子截面参数及截面圆度误差测量模型,对所测莲子的截面参数和截面圆度误差进行计算。

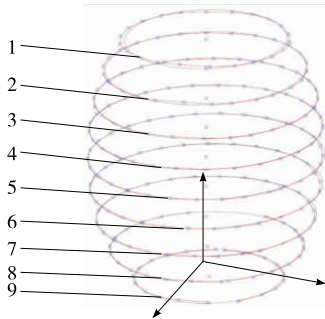
表1 莲子截面测量数据

Table 1 Lotus cross section measurement data

测点编号	x_i/mm	y_i/mm	测点编号	x_i/mm	y_i/mm
1	4.735 8	-6.940 0	17	-4.281 2	6.865 4
2	3.107 2	-7.809 3	18	-2.695 6	7.589 0
3	1.555 1	-8.286 8	19	-1.111 9	8.054 6
4	-0.107 7	-8.439 9	20	0.446 8	8.119 9
5	-1.802 8	-8.279 7	21	2.009 9	7.826 2
6	-3.391 5	-7.832 8	22	3.449 4	7.178 9
7	-4.889 3	-6.996 8	23	4.929 0	6.073 9
8	-6.220 2	-5.948 2	24	6.246 9	4.947 1
9	-7.239 0	-4.670 0	25	7.106 3	3.660 8
10	-8.013 4	-3.149 3	26	7.687 9	2.135 0
11	-8.451 3	-1.606 0	27	7.921 5	0.479 7
12	-8.494 9	0.029 0	28	7.881 6	-1.237 3
13	-8.235 9	1.677 3	29	7.558 6	-2.902 1
14	-7.653 1	3.215 3	30	6.955 6	-4.393 8
15	-6.730 7	4.661 8	31	5.917 0	-5.859 3
16	-5.601 5	5.912 5			

将表 1 数据带入式(2)、(4)中,计算可得此截面的拟合圆心坐标 O 为(0.217 9, -0.237 6),拟合圆直径为 16.509 6 mm。再将所得拟合圆心坐标和表 2 的测点数据带入式(5)、(6)得到截面拟合圆的圆度误差为 0.239 9 mm。

按上述方法,将单粒莲子所有截面测点数据进行回代,可得到单粒莲子 9 个截面的拟合圆心、拟合直径和截面圆度误差,拟合结果如图 6 所示,各截面参数如表 2 所示。



1~9 代表单粒莲子在拟合时不同位置的横截面编号
图 6 单粒莲子横截面拟合结果图
Figure 6 Single lotus seed cross-section fitting result graph

由表 2 可以看出,单粒莲子各测量截面的圆度误差存在差异,中间部位截面的圆度误差小于两端截面的。为准确分析莲子截面圆度误差的分布规律,参照图 6 所示单粒莲子测量截面位置,对所有莲子样本相同编号位置截面的圆度误差求平均值,得到莲子样本沿莲心轴线方向各截面平均圆度误差的分布规律,如图 7 所示。

由图 7 可以看出,所有样本鲜莲子圆度误差沿莲心轴线方向呈近似抛物线规律变化,越靠近最大截面位置,

表 2 单粒莲子各截面参数拟合结果

Table 2 The result of the parameters of each section of single lotus

截面编号	截面拟合圆心	直径/mm	圆度误差/mm
1	(-0.491 4, -0.651 8, 79.358 1)	12.413 2	0.516 0
2	(-0.390 8, -0.523 5, 77.350 7)	14.586 4	0.398 3
3	(-0.341 1, -0.523 5, 75.344 0)	15.803 2	0.279 0
4	(-0.284 6, -0.336 5, 73.346 9)	16.402 4	0.224 3
5	(-0.217 9, -0.237 6, 71.345 1)	16.509 6	0.213 6
6	(-0.155 3, -0.154 8, 69.353 9)	16.128 0	0.239 9
7	(-0.120 1, -0.090 1, 67.349 3)	15.158 0	0.342 0
8	(-0.131 4, -0.093 1, 65.356 0)	13.367 6	0.439 3
9	(-0.138 6, -0.113 7, 63.288 8)	10.421 2	0.691 4
平均圆度误差		0.371 5	

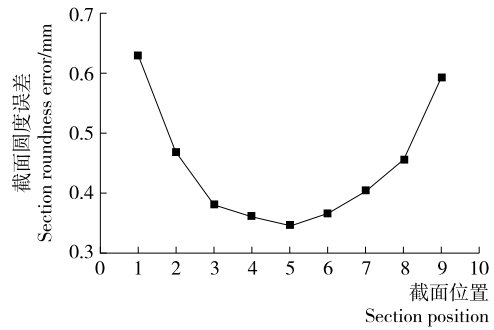


图 7 莲子截面圆度误差分布规律

Figure 7 Distribution of roundness error of lotus seed section

即莲子直径最大的部位,其圆度误差越小,反之越大。在最大截面位置,其圆度误差最小,由此说明莲子的形状是不规则的椭球体。

根据上述分析结果,鲜莲子机械去心时,如果采用滚动定心方法,以莲子的中间部位(莲子最大直径部位)作定位基准,其圆度误差最小,定心精度最高。

对 25 个莲子样本的最大截面处的直径和圆度误差进行了统计分析,统计结果如表 3 所示。

由表 3 可以看出,鲜莲子最大截面处圆度误差均值为 0.347 3 mm,极差为 0.259 9 mm,标准差为 0.074 5 mm。

3.2 莲子同轴度误差分析

莲子同轴度误差是指莲心轴线与莲子几何轴线的偏差,是以莲心轴线为基准,用一个圆柱面来包围莲子几何轴线与各截面的交点,所得圆柱面的直径即为二者的同轴度误差。

表 3 莲子最大截面处圆度误差统计数据

Table 3 Statistics of roundness error at largest cross section of lotus seed

莲子编号	圆度误差 r /mm	莲子编号	圆度误差 r /mm
1	0.267 9	14	0.332 9
2	0.356 6	15	0.321 9
3	0.474 4	16	0.413 7
4	0.422 5	17	0.357 5
5	0.274 2	18	0.416 1
6	0.326 7	19	0.214 5
7	0.326 9	20	0.356 1
8	0.239 9	21	0.420 9
9	0.450 5	22	0.385 7
10	0.256 5	23	0.356 9
11	0.352 6	24	0.318 0
12	0.310 9	25	0.452 0
13	0.278 7		

根据图 7 莲子截面圆度误差的分布规律,并考虑鲜莲子去心时主要采用直径较大的外轮廓作定位基准,因此,在计算单粒鲜莲子同轴度误差时,选择圆度误差较小的中间 5 个截面拟合圆的圆心数据来拟合鲜莲子的几何轴线方程。结合之前所述的鲜莲子几何轴线拟合方法,将表 2 中单粒莲子中间 5 个截面的拟合圆心坐标带入迭代算法中进行迭代运算^[20],得到单粒莲子几何轴线的直线方程参数向量 $\hat{X} = [-0.028\ 6\ 1.816\ 2\ -0.043\ 6\ 2.854\ 6]^T$,从而得到该莲子几何轴线方程为:

$$\begin{cases} x = -0.028\ 6z + 1.816\ 2; \\ y = -0.043\ 6z + 2.854\ 6. \end{cases} \quad (15)$$

再根据莲子几何轴线与莲心轴线同轴度的计算方法,先求出莲子几何轴线与其中间 5 个测量截面的交点,再由式(13)计算其与莲心轴线的距离,结果如表 4 所示。

表 4 单粒莲子几何轴线与截面交点及交点与莲心轴线距离

Table 4 Intersection of geometrical axis and cross section of lotus seed and distance between this intersection and lotus axis

截面编号	莲子几何轴线与截面交点	交点与莲心轴线距离/mm
3	(-0.341 1, -0.523 5, 75.344 0)	0.547 2
4	(-0.284 6, -0.336 5, 73.346 9)	0.443 6
5	(-0.217 9, -0.237 6, 71.345 1)	0.340 2
6	(-0.155 3, -0.154 8, 69.353 9)	0.238 1
7	(-0.120 1, -0.090 1, 67.349 3)	0.137 7

由式(14)可知,莲子几何轴线与莲心轴线的同轴度误差为莲子几何轴线与其各测量截面的交点到莲心轴线距离最大值的 2 倍,则鲜莲子几何轴线与莲心轴线的同轴度误差为 1.094 4 mm。

以上为单粒莲子的几何轴线与同轴度误差的计算过程,为得到可以作为设计鲜莲子去心机构理论依据的同轴度误差数据,本研究对试验所测的 25 个湘莲样本的几何轴线与莲心轴线同轴度误差进行统计分析,结果如表 5 所示。

由表 5 可得,莲子样本的几何轴线与莲心轴线的平均同轴度误差为 0.914 0 mm,极差为 0.744 1 mm,标准差为 0.217 9 mm,由此可知鲜莲子采用机械去心时,其冲头直径比莲心直径至少要大 0.914 0 mm 才能将莲心完整顶出。

4 结论

(1) 基于最小二乘法原理,用三坐标测量机对鲜莲子的相关物理参数进行了测量,相较于用游标卡尺测量莲子的物理参数时,测量精度更高。

(2) 根据测量结果,鲜莲子圆度误差沿莲心轴线方向

表 5 莲子几何轴线与莲心轴线同轴度统计数据

Table 5 Concentricity statistics of lotus geometry axis and lotus axis

莲子编号	同轴度误差/mm	莲子编号	同轴度误差/mm
1	1.101 3	14	1.169 9
2	0.479 0	15	0.757 7
3	0.697 7	16	0.472 3
4	0.792 0	17	0.671 3
5	0.766 3	18	0.874 7
6	1.216 4	19	0.738 7
7	1.094 4	20	1.140 1
8	0.735 7	21	1.080 7
9	0.915 4	22	0.917 3
10	1.093 5	23	1.144 6
11	0.630 2	24	1.110 7
12	1.002 6	25	1.065 7
13	0.980 6		

呈近似抛物线规律变化,越靠近最大截面位置其圆度误差越小,反之越大,最大截面处的圆度误差最小,其平均值为 0.347 3 mm。因此,鲜莲子去心采用外轮廓定位时,选择靠近最大截面处的轮廓定位,其定心精度最高。并计算鲜莲子几何轴线与莲心轴线的同轴度误差,同轴度误差均值为 0.914 0 mm,极差为 0.744 1 mm,标准差为 0.217 9 mm,由此可知鲜莲子采用机械去心时,其冲头直径比莲心直径至少要大 0.914 0 mm 才能将莲心完整顶出。

(3) 由于不同品种的莲子之间的物理参数有差异,本试验的测量样本选择的是湘莲。而且不同含水率的鲜莲子的物理参数也有差异,本试验所用样本含水率为 68.9%。在今后研发鲜莲子机械去心设备时,还需要对更多的鲜莲子样本进行测量。

参考文献

- [1] 郑宝东, 郑金贵, 曾绍校. 我国主要莲子品种营养成分的分析[J]. 营养学报, 2003, 25(2): 153-156.
- [2] ZENG Hong-yan, CAI Lian-hui, CAI Xi-ling. Amino acid profiles and quality from lotus seed proteins[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2013, 93(5): 1 070-1 075.
- [3] RAJEEVB, KANDIKERE R S. Nutritional quality evaluation of electron beam-irradiated lotus (*Nelumbo nucifera*) seeds[J]. Food Chemistry, 2008, 107(1): 174-184.
- [4] 张永林, 易启伟, 余群, 等. 多联辊刀式莲子剥壳机的结构与工作原理[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 76-79.
- [5] 裴圣华, 饶洪辉, 刘木华. 莲子通芯机研究现状与展望[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(6): 43-45.

(下转第 109 页)

- alcohol copolymer films based on the release of oregano essential oil and green tea extract components[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 149: 9-16.
- [10] YU Xiao-qing, LIN Dong-mei, LI Peng, et al. Recent advances in the synthesis and energy applications of TiO₂-graphene nanohybrids[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2017, 172: 252-269.
- [11] ZHOU Jian-jing, WANG Si-yuan, GUNASEKARAN S. Preparation and characterization of whey protein film incorporated with TiO₂ nanoparticles [J]. *Journal of Food Science*, 2010, 74(7): N50-N56.
- [12] ZHANG Yi, NIU Fu-xiang, SUN Jian, et al. Purple sweet potato (*Ipomoea batatas*, L.) color alleviates high-fat-diet-induced obesity in SD rat by mediating leptin's effect and attenuating oxidative stress[J]. *Food Science & Biotechnology*, 2015, 24(4): 1 523-1 532.
- [13] TIAN Qing-guo, KONCZAK I, SCHWARTZ S J. Probing anthocyanin profiles in purple sweet potato cell line (*Ipomoea batatas* L. Cv. Ayamurasaki) by high-performance liquid chromatography and electrospray ionization tandem mass spectrometry[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2005, 53(16): 6 503-6 509.
- [14] TRUONG V D, DEIGHTON N, THOMPSON R T, et al. Characterization of anthocyanins and anthocyanidins in purple-fleshed sweetpotatoes by HPLC-DAD/ESI-MS/MS[J]. *J Agric Food Chem*, 2010, 58(1): 404-410.
- [15] CHEN Chen-wei, XIE Jing, YANG Fu-xin, et al. Development of moisture - absorbing and antioxidant active packaging film based on poly(vinyl alcohol) incorporated with green tea extract and its effect on the quality of dried eel[J]. *Journal of Food Processing & Preservation*, 2017, 42(1): e13374.
- [16] 毛建霖, 付成平, 郭灵安, 等. 可见分光光度法测定紫甘薯总花青素含量[J]. *食品与发酵科技*, 2010, 46(2): 101-104.
- [17] 陈晨伟, 许哲玮, 马亚蕊, 等. 聚乙烯醇薄膜中茶多酚向水中释放的不同动力学模型比较分析[J]. *食品科学*, 2019(3): 24-29.
- [18] MODITSI M, LAZARIDOU A, MOSCHAKIS T, et al. Modifying the physical properties of dairy protein films for controlled release of antifungal agents[J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 39(2): 195-203.
- [19] YOSHIDA C M P, BASTOS C E N, FRANCO T T. Modeling of potassium sorbate diffusion through chitosan films[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2010, 43(4): 584-589.
- [20] WANG Hua-lin, ZHANG Ru, ZHANG Heng, et al. Kinetics and functional effectiveness of nisin loaded antimicrobial packaging film based on chitosan/poly(vinyl alcohol)[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 127: 64-71.
- [21] MASTROMATTEO M, LECCE L, DE V N, et al. Plasma deposition processes from acrylic/methane on natural fibres to control the kinetic release of lysozyme from PVOH monolayer film[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 104(3): 373-379.
- [22] 吕飞, 叶兴乾, 丁玉庭. 桂皮醛在肉桂油/海藻酸钠抗菌薄膜中的释放动力学[J]. *中国食品学报*, 2011, 11(7): 36-40.
- [23] BUONOCORE G G, CONTE A, CORBO M R, et al. Mono-and multilayer active films containing lysozyme as antimicrobial agent[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2005, 6(4): 459-464.

(上接第 81 页)

- [6] 刘木华, 吴彦红. 莲子物理机械特性试验研究 I [J]. *江西农业大学学报*, 1999(3): 425-428.
- [7] 赵小广, 宗力, 谢丽娟. 干壳莲子物理参数试验研究[J]. *食品与机械*, 2006, 22(2): 53-55.
- [8] 叶香美, 白莲、红莲物理参数测试与分析[J]. *安徽农学通报*, 2006, 12(5): 69-70.
- [9] 马秋成, 卢安舸, 陈锴, 等. 莲子机械自动去芯自适应心技术与样机试验[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(21): 17-24.
- [10] 王文书. 三坐标测量机对同轴度误差测量方法的探索[J]. *制造技术与机床*, 2010(11): 94-97.
- [11] 潘汉军, 刘娅. 关于同轴度误差定义的分析与探讨[J]. *现代制造工程*, 2004(4): 69-70.
- [12] 陈立杰, 张镭, 张玉. 同轴度误差的数模研究[J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2007, 28(4): 549-552.
- [13] 叶宗茂. 用三坐标测量机正确测量同轴度误差[J]. *工具技术*, 2007, 41(3): 77-80.
- [14] 王亚平, 郑永红. 基于最小二乘原理建立坐标系方法的研究与实现[J]. *计算机测量与控制*, 2003, 11(10): 796-798.
- [15] 胡川, 陈义, 朱卫东, 等. 整体最小二乘和最小二乘拟合空间直线的比较[J]. *大地测量与地球动力学*, 2015, 35(4): 689-692.
- [16] 韩庆瑶, 肖强, 乐英. 空间离散点最小二乘法分段直线拟合的研究[J]. *工业仪表与自动化装置*, 2012(4): 107-109.
- [17] 田社平, 张守愚, 李定学, 等. 平面圆圆心及半径的最小二乘拟合[J]. *中国测试*, 1995(5): 23-25.
- [18] 姚宜斌, 黄书华, 孔建, 等. 空间直线拟合的整体最小二乘算法[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2014, 39(5): 571-574.
- [19] 张镭, 张玉. 同轴度误差的解析评定法与仿真研究[J]. *计量学报*, 1997(1): 32-37.
- [20] 孔建, 姚宜斌, 吴寒. 整体最小二乘的迭代解法[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2010, 35(6): 711-714.