

# 碟刹盘孔组位置度视觉测量及误差链分析

朱广磊<sup>1,2</sup>, 花海燕<sup>1,2</sup>, 王筠翔<sup>1,2</sup>

(1. 福建工程学院 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118;

2. 福建省智能加工技术及装备重点实验室, 福建 福州 350118)

**摘要:** 针对孔组位置度视觉测量过程多误差源影响测量效果的问题,以碟刹盘为研究对象,开展孔组位置度视觉测量及误差链分析研究。建立了基于“特征—行为”关联响应的孔组位置度视觉测量分析系统,提出了基于邻域搜索修正的位置度测量改进算法,设计了包含测量过程行为误差链分析及行为优化的位置度视觉测量流程,并以某型号碟刹盘为例进行位置度测量与误差分析实验。结果表明:对图像采集和图像处理过程实施多环节参数混合优化有利于降低多源误差带来的影响,运用“需求—应答”方式执行多阶段误差分析与分层优选,实现图像采集、图像处理、孔测量和位置度测量阶段的误差分离,有助于减少误差累积效应,提高测量的可靠性。

**关键词:** 视觉测量;位置度;误差链;误差分离;行为优化

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2023)03-0249-08

## Vision measurement of position degree and error link analysis for holes in brake discs

ZHU Guanglei<sup>1,2</sup>, HUA Haiyan<sup>1,2</sup>, WANG Yunxiang<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Fujian Key Laboratory of Intelligent Machining Technology and Equipment, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the multi-source errors produced in the process of position measurement for holes are easy to affect the measurement accuracy, the vision measurement of position degree and error link analysis for holes were studied by taking the brake discs as the research object. The vision measurement and analysis system of position degree for holes based on “feature-behavior” correlation response was constructed, and the improved measurement algorithm based on neighborhood search correction was proposed. The position degree visual measurement process including error link analysis and behavior optimization was designed. Position measurement and error analysis were carried out with a certain type of disc brake disc as an example. Results show that the hybrid optimization of parameters for the process of image acquisition and image processing is beneficial for reducing the influence of multi-source errors. Using the “demand-response” method to perform multi-stage error analysis and hierarchical optimization can realize error separation among image acquisition, image processing, hole measurement and position measurement. It is benefit for reducing error accumulation, and improve the reliability of measurement.

**Keywords:** vision measurement; position degree; error link; error separation; behavior optimization

碟刹盘安装孔的位置度误差是至关重要的形位误差<sup>[1]</sup>。如果碟刹盘安装孔的位置度精度不合格,将使得盘心安装位置偏移过大,易造成各方

向受力不均、运转时动平衡性差、制动性能降低等不良情况。因此,孔组位置度检测是碟刹盘制造过程的关键检测工序<sup>[2]</sup>。对位置度的检测通常

收稿日期: 2023-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51905100)

第一作者简介: 朱广磊(1994—),男,河南许昌人,硕士研究生,研究方向: 智能视觉检测。

通信作者: 花海燕,(1981—),女,福建三明人,副教授,博士,研究方向: 智能设计制造与检测、知识工程与专家系统等。

可采用位置度综合量规测量、三坐标测量机和工具显微镜等仪器测量或工业相机视觉测量。其中,位置度综合量规需要人工操作且只能进行定性检测;三坐标测量机、工具显微镜等仪器虽然能满足位置度的定量测量<sup>[3]</sup>,但工具显微镜仪器逐点采样比较耗时,三坐标测量机接触式测量对于小直径孔存在采点困难等问题。相较之下,采用工业相机通过获取孔特征的视觉测量,具有非接触和高效率的特点,能较好满足自动化生产的快速批量检测需求<sup>[4]</sup>。

孔组位置关系与视觉测量方案密切关联,文献[5][6]对被测孔和基准孔非共面情况的位置度测量问题进行研究,通过空间坐标变换建立位置度计算模型<sup>[5-6]</sup>;文献[7]分析了大型零件周向分布孔的位置度测量问题。文献[8]认为视觉测量过程的不同行为方法需要考虑的误差来源不同,改良图像采集与图像预处理的算法有利于提高测量精度。文献[9]分析了视觉测量中透视投影畸变对圆孔特征测量的影响,矫正图像的畸变有利于准确获取圆孔中心坐标,提高位置度测量准确性。文献[10~12]研究位置度误差修正方法、位置度测量寻优算法及位置度测量误差分析问题。从孔组位置度测量的研究现状看,当前对影响测量精度的因素分析和优化工作还较为缺乏,误差分析与补偿问题是实现智能化测量与高精度测量解决的重要问题<sup>[13]</sup>。

综上,针对孔组位置度视觉测量过程影响因素多、误差来源多的特点,开展面向碟刹盘零件族的孔组位置度视觉测量分析系统设计,力图建立能够根据待测特征响应测量行为需求的机制,分析测量过程行为所引起的误差并优化测量行为,为视觉测量过程行为的自主决策奠定基础。

## 1 碟刹盘孔组位置度视觉测量分析系统设计

### 1.1 面向零件族的视觉测量分析系统总体方案

所设计的视觉测量分析系统的架构如图 1 所示。整个系统包含响应层、图像处理层、测量分析层 3 个功能模块和零件族特征元、测量行为元及资源层 3 个资源模块。将零件族特征与视觉测量行为进行分解,响应层根据 I/O 可视化界面获取任务信息,由“特征—需求”模块响应当前任务的零件特征元,发送检测需求信息;由“应答—行

为”模块响应单组或多组行为方案。根据行为方案由图像处理层各子模块依次执行图像采集、图像预处理、特征提取等图像处理功能,从图像中提取的轮廓特征信息输入测量分析模块,依次完成孔拟合、位置度计算以及误差分析与行为评估。从图像预处理环节到误差分析与优化环节形成了图像处理层和测量分析层之间的内环循环,通过循环执行图像样本批量分析与评估,优选行为方案。若通过内环循环后需要改变图像采集方案继续分析,可执行响应层、图像处理层和测量分析层 3 模块组成的外环循环,当完成任务后,输出测量分析结果。

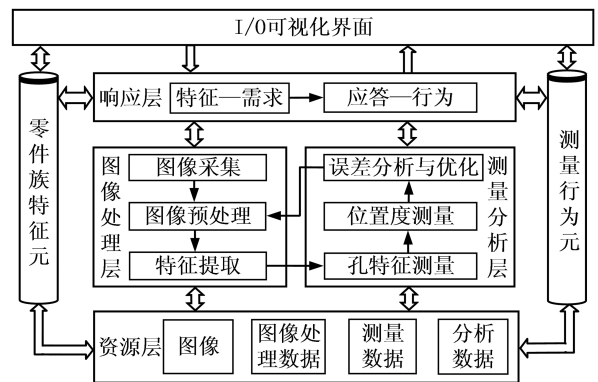


图 1 视觉测量分析系统框架

Fig.1 Frame of vision measurement and analysis system

该系统采用 Visual Studio 开发,通过 C++与 HALCON 混合编程实现碟刹盘孔组位置度测量与分析。由算子配置区、行为配置模式和参数优化模式组建行为方案,通过特征信息区和搜索优化信息区显示基本信息。

### 1.2 “特征—测量行为”关联网路建立

碟刹盘零件族是一种多孔薄盘类零件族,其尺寸系列多样且孔数较多。不同型号零件的孔数、轮廓形状和分布特征存在差异。在视觉测量过程中,测量行为会因零件几何特征不同而变化,且具有多样性特点。为了寻求最佳方案,将碟刹盘零件族几何特征和视觉测量过程行为进行分解,建立特征与行为关联网路,如图 2 所示。

首先对碟刹盘零件族进行特征分解,对于同族零件共性行为需求,在行为需求应答模块中建立图像处理、参数优化和误差分析 3 个公有应答,组建图像预处理及特征提取、参数优化策略及算子和误差链分析方案。将零件族拆分为基体、外

轮廓、中心孔、安装孔和散热孔 5 个特征属性分支,建立检测规划与测量算法需求应答。在系统执行过程中,根据“特征—需求”确定待测特征对应的行为需求列表,“应答—行为”对列表中各项需求,通过编码码位的 1/0 值确定是否被响应。

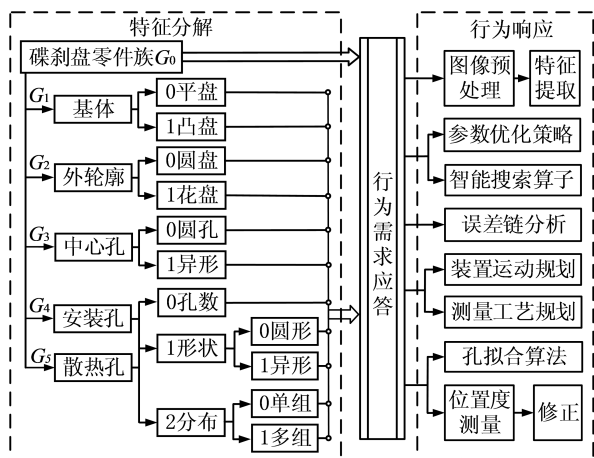


图2 特征—行为关系网络

Fig.2 Feature-behavior relationship network

将复杂的行为过程进行分解,便于灵活组合不同的方案,图2中行为需求应答列表可建立一对多关系,即一个需求可以有多个应答方案,再从中进行方案优选。本研究所含行为响应如下:

(1) 图像处理响应,用于决策从图像样本到轮廓提取所采取图像处理算子以及算子执行的先后顺序。可在系统界面手动点选配置算子,也可将算子组合方案编码存储于矩阵,通过自动遍历实现多方案应答。

(2) 参数优化响应,包含测量过程涉及的图像采集参数和算子参数等各类参数的响应。未响应的参数,不作为分析因素,需决策其取值;将被响应的参数作为分析因素,需确定各参数的经验取值区间等。还需应答参数所采用的抽样算法以及参数优化算法等。

(3) 误差分析响应,由于检测过程中各环节都可能产生误差,为了更便捷地分析行为引起的误差情况,自动分离误差、减小误差,建立误差分析应用以决策误差评定方案,实现视觉测量误差链分析。

(4) 测量规划响应,包括装置运动规划和测量工艺规划。由于碟刹盘零件族尺寸系列多样,在图像采集时存在视野所能容纳的孔数不同的情况。通过获取被测孔组几何信息,进行视野包容

方案规划。根据视野尺寸与孔组尺寸及方位的关系,决策是否能一次包容全部待测特征或只能包容部分特征,规划测量装置水平二维运动、工件旋转方位、特征采样顺序以及工位变换动作等工艺行为。在铅直方向还需根据零件基体的平凸信息,计算视觉设备铅垂方向的运动位移。

(5) 测量算法响应,包含孔拟合算法、位置度测量算法和位置度修正算法。孔拟合算法与图像处理采用相同的响应方式,可通过界面手动选取或列表遍历多种算子。位置度测量修正算法则采用变量控制法,通过偏移个体数目控制修正时的搜索步长。

## 2 基于邻域搜索修正的位置度测量改进算法

以中心孔为基准的圆周均布孔组位置度误差,可由径向误差和角度误差组成的综合误差评定<sup>[14]</sup>,先通过圆孔图像获取圆轮廓,拟合圆得到圆心坐标,再根据圆心坐标进行位置度误差计算。位置度测量原理图以四孔均布为例,如图3所示。

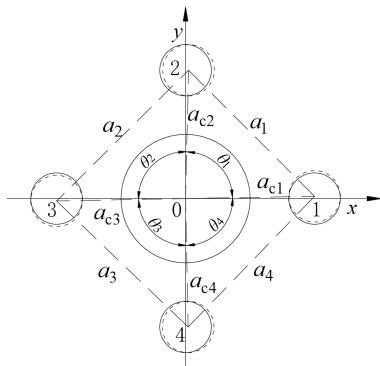


图3 位置度测量原理图

Fig.3 Schematic diagram of position degree measurement

任选一分布孔,与中心孔建立角向定位基准,以选取1孔为例,位置度测量算法具体步骤如下:

首先,根据中心孔与分布孔的孔心坐标,计算各安装孔与中心孔间的距离:

$$a_{ci} = \sqrt{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2} \quad (1)$$

式中,  $a_{ci}$  是中心孔与第  $i$  个安装孔的中心距,  $(x_c, y_c)$  是中心孔的孔心坐标,  $(x_i, y_i)$  是第  $i$  个分布孔的孔心坐标。

计算各分布孔间的距离:

$$a_i = \begin{cases} \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2} & (1 \leq i < N) \\ \sqrt{(x_N - x_1)^2 + (y_N - y_1)^2} & (i = N) \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $a_i$  是相邻分布孔的中心距,  $(x_i, y_i)$  是第  $i$

个分布孔中心坐标,  $N$  为分布孔个数。

根据孔心距计算相邻分布孔与中心孔连线的实际夹角  $\theta_i$ :

$$\theta_i = \begin{cases} \arccos \frac{a_{ci}^2 + a_{ci+1}^2 - a_i^2}{2 \times a_{ci} \times a_{ci+1}} & (1 \leq i < N) \\ \arccos \frac{a_{ci}^2 + a_{ci-1}^2 - a_i^2}{2 \times a_{ci} \times a_{ci-1}} & (i = N) \end{cases} \quad (3)$$

位置度误差需要求取满足最小条件原则的位置度最优解, 即位置度误差的最大值趋于最小<sup>[14]</sup>。以中心孔和分布孔建立的角向定位基准所求出的角向误差并不一定满足最小条件, 故对角向定位基准设置了角向偏移修正量, 如公式(4):

$$f_{\alpha i} = \Delta\alpha_1 = -\frac{\alpha}{2} + \frac{\alpha}{K} \cdot k \quad (k=0, 1, \dots, n) \quad (4)$$

式中,  $\Delta\alpha_1$  是 1 孔作为基准时, 基准的角向偏移修正量, 该修正量采用邻域搜索寻优法在以中心孔和分布孔建立的角向定位基准的左右邻近区域搜索。其中,  $\alpha$  为设定搜索的邻域范围,  $K$  为设定的总步数,  $\alpha/K$  即为搜索步长,  $k$  为当前搜索步数。

由于基准进行了偏移修正, 其他孔的角向误差计算也可根据公式(5)得到对应修正。

$$f_{\alpha i} = \theta_{i-1} - \frac{\pi}{4} + f_{\alpha i-1} \quad (1 < i \leq N) \quad (5)$$

式中,  $f_{\alpha i}$  是第  $i$  孔的角度误差,  $\theta_{i-1}$  是前一相邻分布孔与中心孔的夹角。

第  $i$  孔的径向误差  $f_{Ri}$  由分布孔与中心孔之间的距离与理论半径之差求得, 如公式(6)所示, 其中,  $a_0$  是中心孔与分布孔的理论中心距。

$$f_{Ri} = a_{ci} - a_0 \quad (6)$$

由径向误差  $f_{Ri}$  和角向误差  $f_{\alpha i}$ , 可求得相邻分布孔相对于中心孔的位置度误差  $f_i$ :

$$f_i = 2 \times (\max \{ \sqrt{f_{Ri}^2 + (R \cdot f_{\alpha i})^2} \}) \quad (7)$$

式中,  $R$  为中心孔的半径。

为了能得到满足最小条件的位置度, 需依次以各分布孔建立角向定位基准, 同时通过邻域搜索的方式, 在各基准邻域内进行偏移修正量搜索, 寻找满足最小条件的角度偏移修正量, 并得到基于邻域搜索修正的位置度, 其位置度最小条件的满足公式(8):

$$\min f = \min \{ f_i \} \quad (8)$$

其中,  $\min f$  为基于邻域搜索修正的满足最小条件原则所评定的最终位置度误差值。

### 3 孔组位置度测量及误差链分析任务响应

#### 3.1 被测零件几何信息与位置度测量任务

本研究以某型号碟刹盘为对象测量 4 个  $\varphi 6$  安装孔对  $\varphi 42$  中心孔的位置度误差, 孔组位置度公差为 0.4 mm。

#### 3.2 基于误差链分析的位置度视觉测量行为应答

位置度视觉测量过程涉及的行为环节很多, 误差的源头也很多, 多源误差累积容易造成位置度测量误差大, 测量可靠性差。从视觉测量过程行为误差链分析及行为优化目标出发, 确定误差链分析应答方案如下:

(1) 图像采集阶段。图像的优劣是产生测量误差的源头, 所采用的工业相机精度、镜头类型、照明方案、标定方式、检测装置机械误差以及检测工位等均会影响测量精度。在上述条件相同的情况下, 图像采集时曝光、增益等参数设置和光照强度, 也会影响测量结果。本研究重点考虑曝光和增益两个因素作为误差分析的被响应参数。

(2) 圆孔测量阶段。位置度测量方法, 受基准孔和分布孔圆心位置测量的直接影响。在圆孔测量过程中, 所采用的增强、滤波、数学形态学处理等图像预处理算子和参数, 边缘提取、圆拟合等算子的使用均会影响圆孔的测量误差。本研究以增强、滤波、函数变换和边缘提取 4 个处理环节的参数作为误差分析的被响应参数。

(3) 位置度测量阶段。位置度测量算法也是误差来源之一, 算法步骤相同时, 角向定位基准、邻域搜索的区间和步长也可能影响测量结果。为此, 以所提出的基于邻域搜索修正的位置度测量改进算法作为被响应的误差分析对象。

在误差分析与行为优化方案方面, 以孔径测量结果作为优选样本的评定依据, 进行图像采集参数优选与图像处理过程优化, 以减少因图像采集和处理过程产生误差累积到位置度中。由于每个图像样本中孔径数量多, 故建立图像样本的综合评价函数如公式(9):

$$x_i = \frac{\delta_{\max} - \delta_i}{\delta_{\max} - \delta_{\min}} \quad (9)$$

其中,  $\delta_{\max} = \max \{ \delta_i \}$ ,  $\delta_{\min} = \min \{ \delta_i \}$ ,

$$\delta_i = |D_{vi} - D_{oi}|$$

其中,  $D_{vi}$  为视觉测量直径值,  $D_{oi}$  为工具显微镜测量直径值,  $\delta_i$  为视觉测量值与工具显微镜测量值的差值的绝对值,  $\delta_{\max}$  为差值绝对值的最大值,  $\delta_{\min}$  为差值绝对值的最小值,  $x_i$  为归一化后的样本孔径综合评价指标,  $x_i$  越大, 说明样本越好。

### 3.3 基于“特征—行为”关联响应的位置度测量分析流程

以实现位置度测量及误差链分析为目标, 设计基于“特征—行为”关联响应的位置度测量分析流程如图 4 所示。

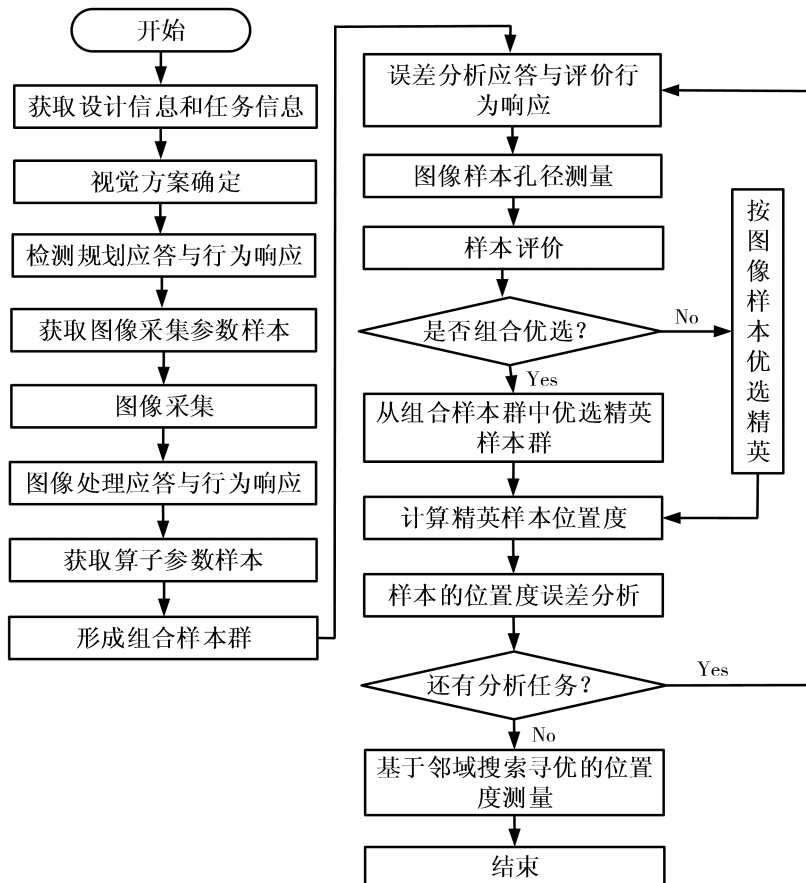


图 4 位置度测量分析流程图

Fig.4 Flow chart of position degree measurement and analysis

## 4 实验样本信息与测量结果对比分析

### 4.1 实验样本信息

根据图 4 流程, 采集某型号碟刹盘中心区图像, 表 1 是碟刹盘中心区待测特征信息, 包括被测孔径及圆心特征符号及图像采样图例。

本次实验考虑图像采集和图像处理两个阶段可变因素对测量结果的影响。图像采集阶段考虑曝光时间和增益对图像采样质量的影响, 采用双因素试验设计, 曝光时间范围取 22 000~30 000  $\mu\text{s}$ , 增益参数范围取 1.0~3.0 dB, 采用拉丁超立方抽样获得 50 张图像样本。图像处理阶段主要考虑增强、滤波、函数变换和边缘提取 4 个算子参数对

测量的影响, 采用拉丁超立方抽样获取参数样本规模 100 组, 共得到 5 000 个组合样本数据。

表 1 碟刹盘中心区待测特征符号及图像范例

Tab.1 Characteristic symbols and image examples to be measured in the center area of brake disc

代号	直径	圆心坐标	实物成像范例
$C$	$D_C$	$(x_c, y_c)$	
$H_1$	$D_1$	$(x_1, y_1)$	
$H_2$	$D_2$	$(x_2, y_2)$	
$H_3$	$D_3$	$(x_3, y_3)$	
$H_4$	$D_4$	$(x_4, y_4)$	

### 4.2 按图像样本优选精英的测量结果分析

以所采样的 50 张图像样本为对象,对每张图像实施以 100 组算子参数样本设置的图像处理行为,并从中优选测量结果较好的参数样本。其优选规则是以公式(9)计算全部中心区孔径测量结果的综合评价值,评定出处理每张图像的最优参数样本,以此进行位置度误差计算。

50 张图像优选参数样本的位置度测量结果如图 5 所示。50 张图像以各自优选样本进行位置度计算,8 号图像优选样本测得的位置度值为 0.350 mm,48 号图像测得的位置度值为 0.362 mm,50 张图像优选样本测得的位置度最大差约 12  $\mu\text{m}$ 。其中有一部分图像样本的位置度值落在 0.350~0.353 mm,这部分图像质量测量结果比较稳定。

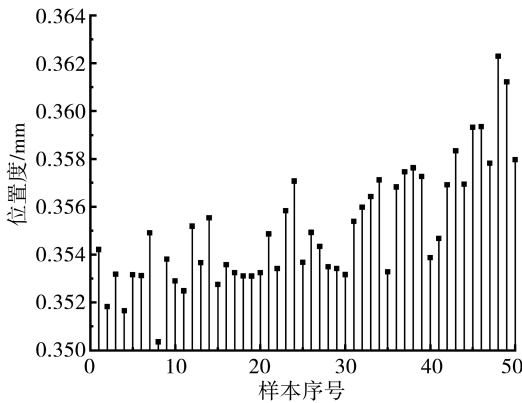


图 5 50 张图像优选参数样本的位置度测量结果

Fig.5 Measurement results of position degree for 50 samples with preference parameter values

选取图 5 中差异最大的 8 号和 48 号图像样本进行中心孔边缘局部区域放大对比,如图 6 所示。对比两个样本的灰度图以及经过增强、滤波和指数变换处理后的图像,8 号样本边缘的总体清晰度更好。

以所选 100 组参数样本对 8 号和 48 号图像进行处理,测量结果如图 7、图 8 所示。其最终测量所得位置度测量差值波幅保持在 3.5  $\mu\text{m}$  以内,表明其对位置度波动影响比较稳定。48 号比 8 号的位置度测量值整体误差偏大 10  $\mu\text{m}$  左右,从整体数据结果可反映出,8 号图像相比 48 号图像

整体情况更优,结果更可靠。

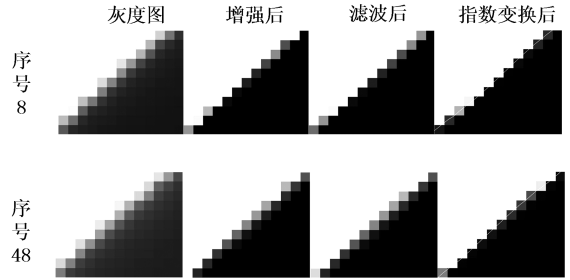


图 6 处理过程图像对比

Fig.6 Comparison of images during the process

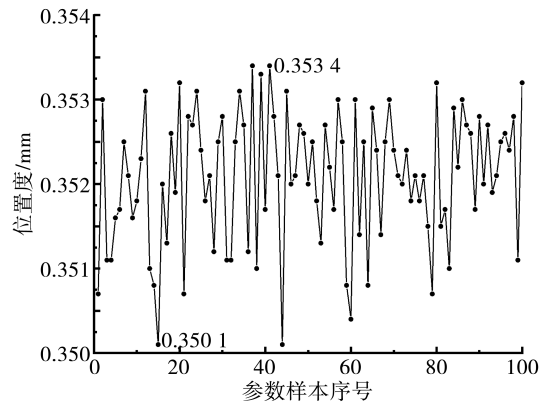


图 7 8 号图像 100 组参数样本的测量结果

Fig.7 Measurement results of 100 groups of parameter samples for image No. 8

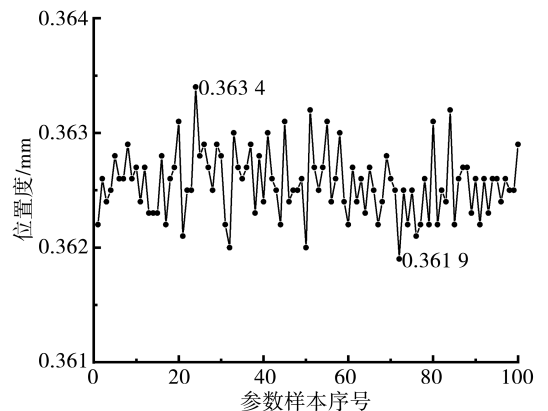


图 8 48 号图像 100 组参数样本的测量结果

Fig.8 Measurement results of 100 groups of parameter samples for image No. 48

### 4.3 按组合样本优选精英的测量结果分析

对 5 000 个组合样本进行精英优选,其优选规则是以公式(9)计算全部中心区孔径测量结果的综合评价值,从 5 000 组合样本中优选 50 个精

英样本,图 9 是组合样本群精英优选频次统计。所得 50 个样本中 4 号图像被选中 32 次,频次最高,2 号图像被选中 10 次,8 号图像被选中 8 次。

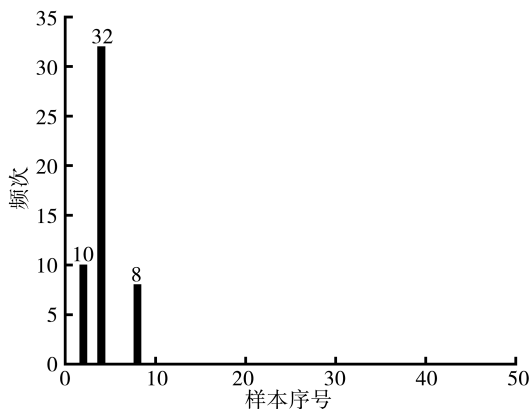


图 9 组合样本群精英优选频次统计

Fig.9 Elite selection frequency statistics of combined sample groups

图 10 是序号 2、4、8 图像在组合优选时被选中的精英样本位置度测量结果。组合优选的 50 个精英样本位置度测量结果在区间 0.350 ~ 0.356 mm 之间,说明这 3 组图像样本的位置度误差值的稳定性比较好。其中 4 号被选中的频次最多,说明这一图像在不同参数处理下位置度测量值整体较低;8 号图像则是出现了位置度测量值最小,与工具显微镜测量的位置度 0.265 mm 相差最小,选用该组图像采集参数样本可最大程度降低由曝光和增益两个因素产生的误差。

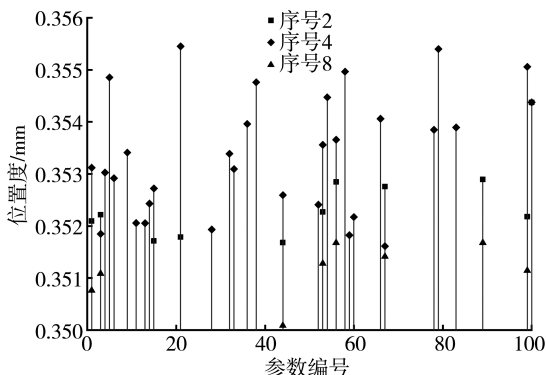


图 10 优选精英样本的位置度测量结果

Fig.10 Position degree measurement results of elite sample preferred

#### 4.4 评定优选样本位置度误差

采用第 2 节所述的邻域搜索法进行满足最小条件的位置度寻优。在孔心连线基准轴附近取邻域,进行位置度搜索寻优。

选 8 号图像样本为对象,对 4 个基准轴取偏移角度区间为  $[-0.5^\circ, 0.5^\circ]$ ,步长  $0.02^\circ$ ,邻域搜索数据结果如图 11 所示。以中心孔和孔 1、孔 2 中心连线为基准时,搜索过程中出现了最低点,其中以中心孔和孔 2 连线为基准,经邻域搜索后得到最小值为 0.346 mm。对比优选样本所测得的位置度 0.350 mm,减少了 0.004 mm。以中心孔和孔 3、孔 4 中心连线为基准时,在该搜索领域内未出现最低点,再扩大搜索域,也未能找到小于 0.346 mm 的情况。因此确定 0.346 mm 为位置度最优解。

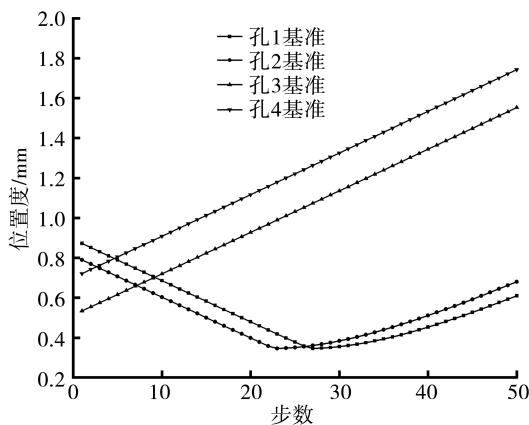


图 11 邻域搜索结果

Fig.11 Neighborhood search results

综上,采用视觉方法测量位置度,其过程行为环节较多,环环均可能存在误差。采用所设计视觉测量分析系统进行位置度测量与误差分析实验,通过图像采样参数、图像处理参数和基于邻域搜索的位置度测量算法 3 个阶段优化,误差依次减少了 0.012、0.002、0.004 mm,测得位置度最优解为 0.346 mm,相比工具显微镜测量结果 0.265 mm,还存在 0.081 mm 的差值。

通过本实验分离并消减的误差占整个误差链的 18.2%。利用本系统可继续开展其他环节的误差分析与分离,实现位置度测量及误差链分析的

自动化。

## 5 结论

本研究以碟刹盘为对象,开展孔组位置度视觉测量及误差链分析,通过碟刹盘孔组位置度测量和误差链分析实验,得到以下结论:

1)在误差链分析过程中,以孔径测量作为评价节点,通过优选样本,减少了图像采样和图像处理过程引起的孔径测量误差,以邻域寻优为手段进行基准偏移修正,减少了位置度测量算法引起

的误差,提高了测量的精度。

2)视觉测量过程包含的测量行为环节多,各个环节都可能影响测量结果,采用“特征—行为”关联响应策略,能够根据任务需求,应答并响应测量行为,有利于柔性地满足零件族孔组位置度测量分析需求。

3)设计的孔组位置度视觉测量分析系统,可以自动化实现批量样本的图像处理与测量分析,提高了位置度测量的效率。基于误差链分析的测量行为优化有利于提高测量稳定性。

## 参考文献:

- [1] 郭建东,黄晓光,崔丽娟. 汽车刹车盘孔组位置度的组合检测[J]. 制造技术与机床,2020(8):130-133.
- [2] ANSELMETTI B. Generation of functional tolerancing based on positioning features[J]. Computer-Aided Design,2006,38(8):902-919.
- [3] 陈淑丽,常建强,许世军,等. 圆周均布孔位置度误差的通用测量程序[J]. 计量技术,2010(1):17-19.
- [4] 谢俊,李玉萍,左飞飞,等. 基于机器视觉的孔类零件尺寸在线检测[J]. 电子测量技术,2021,44(2):93-98.
- [5] 王鹏,石永强,孙长库. 发动机缸体结合面孔位置度测量方法的研究[J]. 仪器仪表学报,2013,34(1):51-56.
- [6] SHI Y Q,SUN C K,WANG P, et al. High-speed measurement algorithm for the position of holes in a large plane[J]. Optics and Lasers in Engineering,2012,50(12):1828-1835.
- [7] 黄金娜. 周向孔位置分布的机器视觉测量系统研究[D]. 杭州:浙江大学,2018:225-227.
- [8] 邓伟伦,于涛,詹洪陈,等. 基于视觉技术的非接触测量精度优化研究[J]. 电子测量技术,2022,45(5):118-123.
- [9] 陈朝. 孔组位置度视觉测量技术研究[D]. 长春:吉林大学,2015.
- [10] 孙慧霖,杨晓峰,安浩俊. 保持架铆钉孔位置度测量方法[J]. 轴承,2021(9):65-67.
- [11] 熊安辉. 圆周均布孔组位置度测量中切向误差的修正[J]. 现代制造工程,2009(3):134-135.
- [12] 李兵,李洋,孙彬,等. 基于路径分段寻优的零件孔组位置度算法[J]. 仪器仪表学报,2018,39(11):116-124.
- [13] 宋帅帅,黄锋,江燕斌. 基于机器视觉几何量测量技术研究进展分析[J]. 电子测量技术,2021,44(3):22-26.
- [14] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 产品几何技术规范:GB/T 1958—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017.

(责任编辑:方素华)