

# 旋压轮低对比度特征视觉测量系统设计与分析

林锦洪<sup>1,2</sup>, 花海燕<sup>1,2</sup>, 孙超<sup>1,2</sup>, 万丛城<sup>1,2</sup>

(1. 福建理工大学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:** 针对旋压轮低对比度特征测量难度大等问题, 开展旋压轮视觉测量系统研究, 搭建了基于组合照明的旋压轮视觉测量装置, 构建了视觉测量行为规划分析机制, 设计了低对比度特征提取方案, 并提出视觉测量行为优化与能力评价策略。以某型号旋压轮低对比度特征为对象, 开展测量行为和测量能力分析实验, 结果表明, 通过行为优化, 低对比度特征的测量均值波动幅度为 $3.4\ \mu\text{m}$ , 测量误差可控制在 $3.5\ \mu\text{m}$ 内, 测量波动极差在 $1.4\sim 5\ \mu\text{m}$ 之间, 对同族零件低对比度测量误差在 $4\sim 9\ \mu\text{m}$ 之间波动, 系统具有较高的测量精度和较好的稳定性, 能够满足旋压轮低对比度特征的测量需求。

**关键词:** 旋压轮; 视觉测量; 低对比度; 行为影响; 测量能力分析

中图分类号: TH124

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2026)01-0081-09

## Design and analysis of vision measurement system for low contrast features of spinning wheels

LIN Jinhong<sup>1,2</sup>, HUA Haiyan<sup>1,2</sup>, SUN Chao<sup>1,2</sup>, WAN Congcheng<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, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** Aiming at the difficulty of measuring the low contrast features of spinning wheels, a vision measurement system of spinning wheels was studied. A vision measurement device of spinning wheel based on combined illumination was established firstly. A visual measurement behavior planning and analysis mechanism was constructed. A low contrast feature extraction scheme was designed, and a visual measurement behavior optimization and capability evaluation strategy was proposed. After that, a certain type of spinning wheel with low contrast features was taken as the research object, the measurement behavior and measurement capability analysis experiments were carried out. Results show that through behavior optimization, the average fluctuation amplitude of low contrast features is about  $3.4\ \mu\text{m}$ , the measurement error can be controlled within  $3.5\ \mu\text{m}$ , and the measurement fluctuation range is between  $1.4\ \mu\text{m}$  and  $5\ \mu\text{m}$ . The measurement error for other parts within the same family is between  $4$  and  $9\ \mu\text{m}$ . This system has high measurement accuracy and good stability, which can meet the requirements for measuring the low contrast features of spinning wheels.

**Keywords:** spinning wheels; vision measurement; low contrast; behavior influence; measurement capability analysis

旋压工艺是一种能够加工复杂形状零件且具有省材优势的成型工艺<sup>[1]</sup>, 广泛运用于车辆、航天航空等领域。旋压轮是常见的旋压成型零件,

由轮毂、轮缘、轮盘凹槽和轮齿等构成, 轮毂和轮缘尺寸常采用游标卡尺或三坐标测量仪测量; 齿形参数常采用工具显微镜测量; 空间较大的凹槽

收稿日期: 2025-01-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51905100); 福建省技术创新重点攻关及产业化项目(2023XQ002); 福建省自然科学基金资助项目(2023J01929)

第一作者简介: 林锦洪(1999—), 男, 福建漳州人, 硕士研究生, 研究方向: 智能视觉检测等。

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。

尺寸采用游标卡尺或三坐标测量仪测量,空间较小的凹槽尺寸只能人工检测及依赖旋压工艺间接保证。视觉测量是近年来应用广泛的测量技术,其效率高但影响因素多,光照方式、光照强度、检测算法等对其测量精度均有影响,有些研究采用组合照明方案<sup>[2]</sup>和修正光照强度<sup>[3]</sup>改善图像质量,通过改进 Zernike 矩边缘检测<sup>[4]</sup>、Canny 边缘检测<sup>[5]</sup>、模拟卡尺<sup>[6]</sup>等提高测量精度,或开展智能视觉测量系统设计<sup>[7]</sup>,提高测量精度、实现自动化测量、闭环反馈误差调整加工参数等,这些研究为旋压轮高效高精测量奠定了基础。针对低对比度特征<sup>[8]</sup>,现有研究采用基于灰度分布直方图的阈值分割方法<sup>[9]</sup>和自适应对比度增强方法<sup>[10]</sup>等解决低对比度特征识别问题,但用于旋压轮检测时效果不够理想。

为了解决旋压轮低对比度特征的高精度测量问题,本文开展旋压轮视觉测量系统研究,探索针对低对比度特征的识别方法,研究测量行为对低对比度特征尺寸测量的影响,并进行行为优化与系统测量能力分析。

## 1 旋压轮低对比度特征视觉测量系统设计

### 1.1 旋压轮几何特征分析

旋压轮种类繁多、型号多样,其轮毂、轮缘、轮盘凹槽等特征均具有径向尺寸测量需求,但用视觉方法测量的难易程度却不尽相同。如图 1 所示为某类型旋压轮三维参数化模型, $d_1$ 和 $d_4$ 分别为内、外径,公差精度等级通常为 IT6、IT7,其边缘可以透光,较容易提取轮廓图像,但精度要求较高; $d_2$ 和 $d_3$ 为轮盘凹槽处直径,按未注公差标准,精度通常要求中等或精密,其凹槽处不透光,轮廓与相邻特征的灰度差异小,属低对比度特征,轮廓较难分离。

### 1.2 旋压轮视觉测量方案设计

针对旋压轮不同透光特性几何特征尺寸测量需求,设计了视觉测量装置如图 2 所示。该装置使用组合光源照明方案,将白色同轴光源安装于双远心镜头和旋压轮之间,向下顺光照射,以提高对不透光轮盘凹槽低对比度特征的识别能力;将面光源放置于旋压轮下方平台上,向上背光照射,以便于提取旋压轮内外边缘的特征。根据实验零件尺寸,装置选用分辨率为  $2\ 448 \times 2\ 048$  的工业

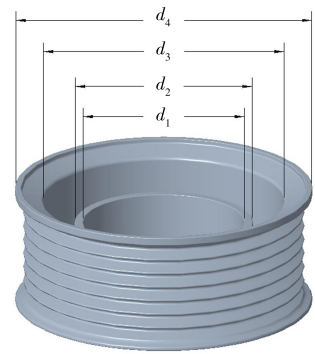
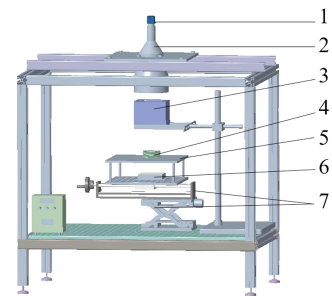


图 1 某类型旋压轮三维参数化模型

Fig.1 3D parameterized model of a certain type of spinning wheel

相机和畸变小的双远心镜头,并采用标尺进行系统标定,该系统视野范围为  $81.3\text{ mm} \times 68\text{ mm}$ ,可以满足后续低对比度特征测量需求。装置采用相机镜头不动、工作台升降的方式调节物距,使用水平仪使镜头和载物台在测量时处于水平状态。



1.面阵相机;2.双远心镜头;3.同轴光源;4.待测旋压轮;5.载物台;6.面光源;7.升降部件

图 2 旋压轮视觉测量装置

Fig.2 Vision measurement device of spinning wheel

### 1.3 视觉测量行为规划分析机制设计

为使视觉测量系统能够满足旋压轮不同透光特性零件族几何特征尺寸的测量需求,设计了视觉测量行为规划分析机制,包括应用层、功能层和资源层 3 个部分,如图 3 所示,能满足“行为优化与能力评价”和“批量零件测量”的应用需求。

(1)行为优化与能力评价。系统中设计了行为优化与能力评价双循环机制。通过功能层的规划模块、图像采集模块、测量模块、误差分析模块和评价模块,实现视觉测量系统行为优化与测量能力评价。根据分析结果做出行为更新的方案,若图像样本符合要求,则仅更新图像处理行为,而后直接进入测量模块,开始下一轮循环;若图像样本不符合要求,则需由规划模块重新规划整个行

为方案,重新采集图像,再进入新一轮循环,直至获得适用于被测零件的优选行为方案为止。

(2) 批量零件测量。在系统完成行为优化与能力评价的基础上,面向测量任务,从系统资源库中匹配最适宜的行为方案,通过测量模块和误差分析模块,进行批量零件的在线自动化测量,并根据测量结果判定零件制造误差是否满足生产要求,完成产品合格评价。

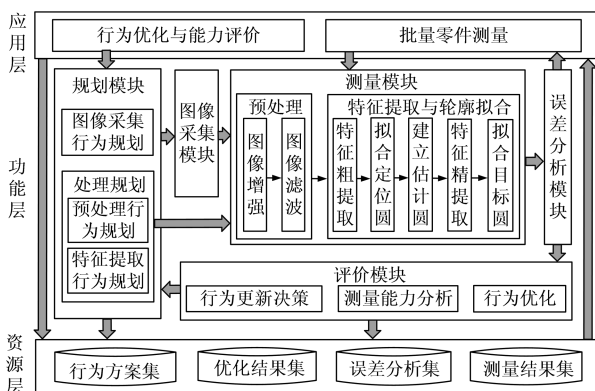


图 3 视觉测量行为规划分析机制架构

Fig.3 Framework of planning analysis mechanism for vision measurement behaviors

## 2 视觉测量行为优化与能力评价策略

### 2.1 低对比度特征提取方案设计

采用同轴光源顺光、面光源背光的组合照明方案,得到旋压轮图像,如图 4 所示。

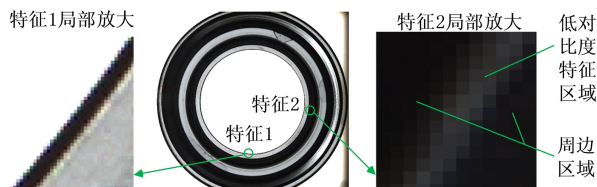


图 4 旋压轮图像

Fig.4 Image of spinning wheel

特征 1 为旋压轮内孔边缘特征  $d_1$ ,从其局部放大图可见明显的边缘特征;特征 2 为旋压轮凹槽特征  $d_2$ ,从局部放大图看,运用同轴光源,在一定条件下可以分割出低对比度特征区域和周围区域。例如,图 4 旋压轮图像在预处理前,轮盘凹槽低对比度特征区域灰度值大多在 25~50 之间,而其周边区域灰度值通常在 20 以下,凹槽边缘和周围区域的灰度值差异在 10~20 之间,如果曝光时

间、增益和光照强度等图像采集参数选取不合适,会使得低对比度区域灰度值差异更小,难以与凹槽轮廓分离。为此,测量低对比度特征必须确定合适的图像采集参数,以得到有效的图像样本。图像预处理中增强算子和滤波算子的应用,可以明显改变低对比度特征和周边特征的灰度值,灰度值差异可以增大几至十几。

由于低对比度特征与周围区域灰度值差异小,很难直接用 Canny 算子提取特征并拟合圆,故采取联合使用 Canny 算子和卡尺工具法<sup>[11]</sup>的特征提取方案,通过沿轮廓附近建立一组大小相同、周向规律分布的矩形区域,在区域中搜索梯度幅值最大的边缘点作为轮廓特征点,进而更精准拟合轮廓。图 5 是旋压轮低对比度特征提取方案示意图。以凹槽轮廓  $d_2$  的提取为例,先用 Canny 算子进行透光内孔  $d_1$  的特征提取,以所提取特征拟合圆,作为定位圆,再根据凹槽轮廓圆  $d_2$  和内孔  $d_1$  是同心圆的特点,运用内孔  $d_1$  的圆心和  $d_2$  的设计值,建立估计圆,如图 5(a) 所示;运用估计圆建立卡尺,用卡尺工具法实现凹槽轮廓  $d_2$  的特征提取,如图 5(b) 所示。由图 5(c) 可见,卡尺尺寸、数量和平滑系数等卡尺工具法的主要因素,均会影响所获取的特征点。

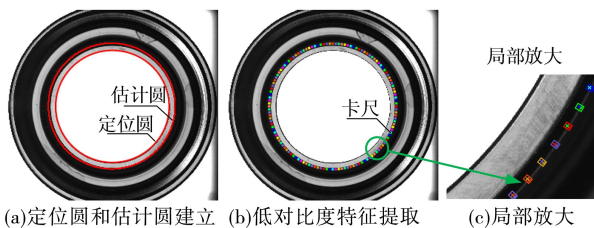


图 5 旋压轮低对比度特征提取方案

Fig.5 Low contrast feature extraction scheme for spinning wheel

### 2.2 行为分层规划分析方案设计

视觉测量的影响行为为多,且不同特征适用的行为不同,对低对比度特征的视觉测量受图像采集、预处理和特征提取等环节的显著影响。为快速获取较优的采样行为和图像处理行为参数,在规划模块中采用行为分层规划模式,行为规划分析方案如图 6 所示。对图像采集、预处理和特征点提取等 3 个环节进行行为规划,以图像采集环节的曝光时间、增益和光源亮度作为第一层行为变量;以图像增强参数、图像滤波参数、卡尺大小、数量和平滑系数作为第二层行为变量。

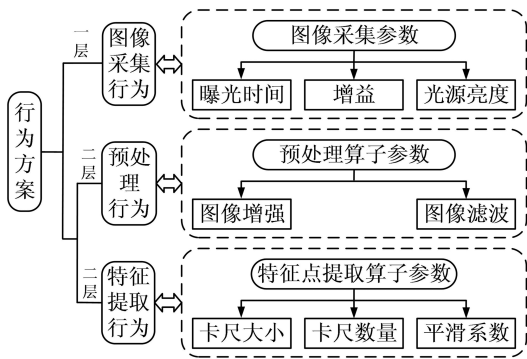


图 6 行为分层分析方案

Fig.6 Hierarchical behavior analysis scheme

### 2.3 基于 MSA 的低对比度特征测量能力分析

低对比度特征受测量行为影响,且可能因外界环境等不确定因素的影响而造成测量结果的波动。为了验证所建视觉测量系统对低对比度特征的测量能力,采用测量系统分析方法(measurement system analysis, MSA)<sup>[12]</sup>,从测量设备、方法和环境等因素产生的变差对整个测量系统的影响出发,着重考虑在不同测量行为方案、不同测量时间等外界环境变化下,进行低对比度特征测量实验,并运用 Minitab 软件进行测量系统重复性、再现性分析(repeatability & reproducibility, R&R)和稳定性分析,评价测量系统的测量能力。在测量系统中,能够可靠、有效地覆盖整个过程变异的不同分组数量为可区分类别数(number of distinct categories NDC),当满足  $R\&R < 30\%$ ,且  $NDC \geq 4$  的条件时,测量系统合格<sup>[13]</sup>。

### 2.4 视觉测量行为优化与能力评价流程设计

为满足低对比度特征测量需求,设计了视觉测量系统的执行流程,如图 7 所示,包括行为优化、能力评价和批量零件测量 3 阶段执行流程。

(1)行为优化阶段。系统建立了行为规划、图像采集、处理与特征测量、误差分析、行为优化以及行为更新决策等环节组成的循环流程。当获取优化分析任务时,先对图像采集行为和处埋行为进行规划,按规划方案设置图像采集行为,循环采集图像样本;根据所规划的图像处理行为,进行线性灰度变换图像增强和中值滤波等预处理,使对比度特征与周围区域灰度值差异符合要求;而后,选取旋压轮内孔为定位特征,运用 Canny 算法进行内孔轮廓粗提取,以拟合圆作为定位圆,并确定圆心坐标,再结合设计信息,建立各被测圆的估

计圆;在定位圆或估计圆上设置卡尺,通过卡尺工具法进行轮廓精提取,测得各圆轮廓直径。完成样本集的测量及误差分析后,若样本集所测特征的误差较大,则进行行为更新决策,重新规划后进入下一轮循环,直到行为优化完成。

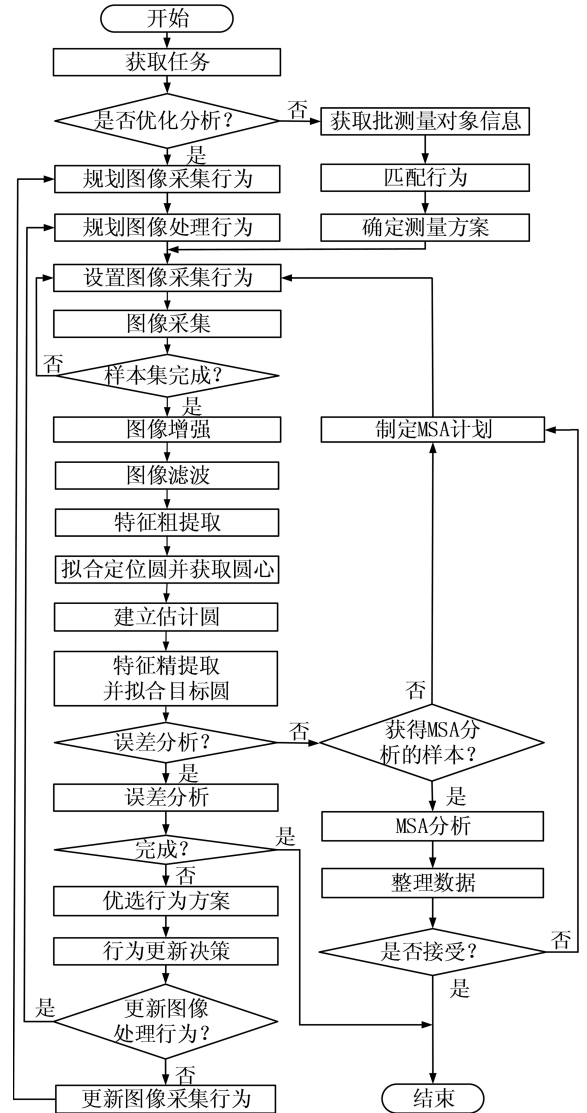


图 7 测量系统执行流程图

Fig.7 Execution flow chart of measurement system

(2)测量能力分析阶段。在完成行为优化后,对系统进行测量能力分析。先制定 MSA 计划,转入“设置图像采集参数”环节,开始采集图像样本并测量,得到 MSA 分析的样本集,进行 MSA 分析。若 MSA 分析结果可接受,则结束流程;若不可接受,则转入“制定 MSA 计划”环节,更改优选行为方案并重新制定计划,进入下一轮的 MSA 分析,直到接受为止。

(3) 批量零件测量阶段。若获取的任务非优化分析任务而是批测量任务,则获取批测量信息并在资源层匹配行为,确定测量方案,进入“设置图像采集行为”环节,开始执行图像采集与测量流程,测量结束后判定零件制造误差是否满足生产要求,完成产品合格评价。

通过上述执行流程,视觉测量系统在行为优化阶段可以通过分析与优选决策,获得一个或几个优选行为方案,再通过能力分析阶段,从中筛选测量能力最佳的一个测量方案,将其作为批量零件的测量方案,该系统可以用于测量具有相似特征的同族零件。

### 3 实验设计与系统测量分析

#### 3.1 实验方案设计

为了探究不同行为变化对测量结果的影响,并验证所建测量系统的测量能力,以图 1 所示旋压轮内孔  $d_1$  和轮盘凹槽直径  $d_2$  为对象开展实验,并使用型号为 TANGO-564,精度为  $3.5+L/300 \mu\text{m}$  的三坐标测量仪测得  $d_1$  的尺寸为  $39.960 9 \text{ mm}$ ,  $d_2$  的尺寸为  $45.002 7 \text{ mm}$ ,作为后续误差分析时的对比值。制定视觉测量实验方案。

实验一:不同测量方案对测量结果的影响分析实验。实验分析的行为变量包括图像采集阶段的 4 个变量和图像处理阶段的 7 个变量,由行为规划模块确定各变量的初始取值区间,如表 1 所示。根据图 6 所示的分层方案,在图像采集阶段对 4 个变量应用拉丁超立方抽样方法,获得 50 个图像采集行为样本;在图像处理阶段,对 7 个变量应用拉丁超立方抽样方法,抽取 20 个图像处理行为样本;将两组行为方案进行全样本搭配,共获得 1 000 个初始实验样本。按图 7 所示的流程对实验样本进行测量影响分析与行为优化实验。

表 1 行为变量及取值区间

Tab.1 Behavioral variables and value intervals

行为阶段	行为变量	行为变量取值/区间
图像采集	曝光时间/ $\mu\text{s}$	[15 000, 20 000]
	增益/dB	[0, 0.8]
	背光源亮度	[10, 20]
	同轴光源亮度	[150, 180]

表 1(续)

行为阶段	行为变量	行为变量取值/区间
	图像增强掩模尺寸/pixel	3×3, 5×5, 7×7
	对比度强度	[0.5, 1.5]
图像处理	中值滤波掩模尺寸/pixel	3×3, 5×5, 7×7
	卡尺长度/pixel	[5, 10]
	卡尺宽度/pixel	[3, 5]
	矩形框个数/个	[100, 400]
	卡尺高斯平滑系数	[0.5, 3]

实验二:低对比度特征测量能力分析实验。在优选行为方案基础上,进一步验证低对比度特征测量的重复性、再现性和稳定性,以轮盘凹槽直径  $d_2$  为对象,开展基于 MSA 的测量系统分析实验。考虑视觉测量的自动化特点,以不同时段外界环境因素和多次测量的不确定性因素,制订 MSA 计划并进行实验。

#### 3.2 不同测量方案对测量结果的影响分析

以筛选优质图像样本为目标,设置精英规模为样本量的 10%,按照高于零件加工精度要求 3 倍以上的原则,设置约束条件,初始约束条件为  $d_1$  的测量误差绝对值小于  $5 \mu\text{m}$ 、 $d_2$  的测量误差绝对值小于  $10 \mu\text{m}$ 。循环迭代过程中,  $d_1$  的误差绝对值调整步长为  $2 \mu\text{m}$ ,  $d_2$  的误差绝对值调整步长为  $5 \mu\text{m}$ 。测量 1 000 个实验样本的  $d_1$  和  $d_2$ ,对所得的 1 000 组测量结果进行第一轮影响分析与方案优选。根据结果,优选前 10% 为精英样本(即 100 个精英样本),按第一层行为变量(图像序号)出现频次统计,其分布情况如图 8 所示。由图 8 可见,第一轮优选后,有 14 个图像采集方案出现的最高频次为 4,图像采集行为精英规模为 28%,超过预设的精英规模,未达到优选中止条件,故按照调整步长提高精度约束条件并进行下一轮精英优选。

第二轮优选以  $d_1$  测量误差绝对值小于  $3 \mu\text{m}$ 、 $d_2$  测量误差绝对值小于  $5 \mu\text{m}$  为约束条件,优选结果如图 9 所示。有 4 张图像,即图像样本 2、18、19、50 入选精英样本,精英规模为 8%,满足预设条件。将这 4 个图像样本所对应的最佳测量行为方案作为后续实验的方案,优选的行为方案如表 2 所示。

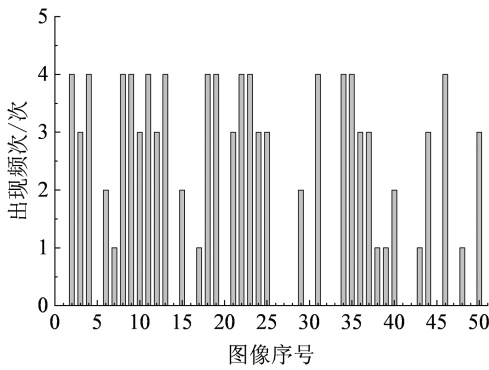


图 8 第一轮实验图像样本入选精英的频次

Fig.8 Frequency of being selected as elite in Round 1 of experiments for each image sample

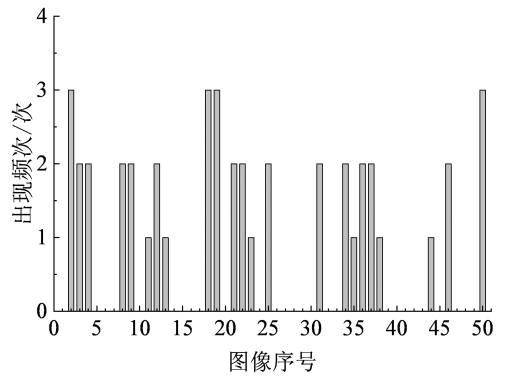


图 9 第二轮实验图像样本入选精英的频次

Fig.9 Frequency of being selected as elite in Round 2 of experiments for each image sample

表 2 优选的行为方案

Tab.2 Preferred behavior schemes

方案 序号	采集参数				处理参数						
	增益/ dB	背光源 亮度	曝光时 间/ $\mu$ s	同轴光 源亮度	图像增强 掩模尺寸/ pixel	对比度 强度	中值滤波 掩模尺寸/ pixel	矩形框 个数/个	卡尺高斯 平滑系数	卡尺长 度/pixel	卡尺宽 度/pixel
2	0.0	13	18 367	161	7×7	0.6	3×3	132	1.4	5	4
18	0.3	15	16 327	151	7×7	0.6	3×3	132	1.4	5	4
19	0.3	14	16 531	167	5×5	1.0	5×5	147	1.0	6	5
50	0.8	13	17 041	160	5×5	1.0	5×5	147	1.0	6	5

3.3 低对比度特征测量能力分析实验

3.3.1 重复性和再现性分析

针对表 2 优选的 4 组行为方案,进行测量低对比度特征  $d_2$  的重复性和再现性分析。考虑不

同时段外界光线对测量结果的影响,在一天中选取 3 个测量时间,分别为 8 : 00AM, 2 : 00PM, 8 : 00PM,每次重复测量 5 次,测量结果如表 3 所示。

表 3  $d_2$  测量结果

Tab.3 Measurement results of  $d_2$

方案 序号	测量 时间	$d_2$ 测量结果/mm				
		第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次
2	8 : 00AM	45.028 9	45.028 1	45.030 0	45.027 5	45.028 9
	2 : 00PM	45.026 6	45.026 3	45.025 2	45.029 6	45.029 5
	8 : 00PM	45.026 8	45.032 6	45.028 6	45.024 9	45.029 3
18	8 : 00AM	45.015 5	45.014 2	45.011 4	45.011 3	45.013 1
	2 : 00PM	45.010 6	45.011 8	45.011 3	45.011 3	45.008 8
	8 : 00PM	45.011 4	45.011 6	45.010 5	45.011 7	45.011 9

表 3(续)

方案 序号	测量 时间	$d_2$ 测量结果/mm				
		第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次
19	8 : 00AM	45.005 7	45.005 4	45.006 4	45.006 6	45.006 1
	2 : 00PM	45.002 9	45.004 4	45.002 2	45.002 1	45.002 3
	8 : 00PM	45.005 5	45.006 2	45.004 4	45.003 7	45.004 1
50	8 : 00AM	45.005 9	45.005 9	45.004 9	45.006 0	45.006 3
	2 : 00PM	45.001 8	45.003 9	45.004 1	45.006 2	45.002 6
	8 : 00PM	45.008 2	45.005 9	45.005 3	45.004 3	45.003 9

整理测量数据,用 Minitab 软件分析重复性和再现性(R&R 分析),结果见表 4。该测量系统的重复性研究变异百分比为 13.06%,再现性研究变异百分比为 10.49%,量具 R&R 研究变异百分比为 16.75% $<30\%$ 。由公式(1)可得  $NDC = 8 > 4$ ,依据测量系统重复性和再现性的判定准则<sup>[13]</sup>,低对比度特征视觉测量系统合格。

$$NDC = 1.41 \times \frac{PV}{GRR} \quad (1)$$

式中,NDC 为可区分类别数,PV 为部件间变异的标准差,GRR 为测量系统变异的标准差。

表 4 测量系统的 R&R 分析结果

Tab.4 Repeatability and reproducibility analysis results of measurement system

来源	标准差	研究变异	研究变异 百分比/%
量具 R&R	0.001 8	0.010 7	16.75
重复性	0.001 4	0.008 4	13.06
再现性	0.001 1	0.006 7	10.49
部件间	0.010 5	0.063 3	98.59
合计变异	0.010 7	0.064 3	100

图 10 是 MSA 分析实验的极差控制图,显示 3 个测量时间段 4 个测量方案的测量极差值。从图 10 可以看出,在 8 : 00AM 和 2 : 00PM 时的极差比较稳定,在 4  $\mu\text{m}$  左右波动,而在 8 : 00PM 时,测量方案 2 的极差升至 8  $\mu\text{m}$ ,其余 3 种测量方案在 4  $\mu\text{m}$  左右波动。总体上,4 个测量方案的极差控制带仅 6.925  $\mu\text{m}$ ,说明系统对低对比度特征的测量重复性比较好。

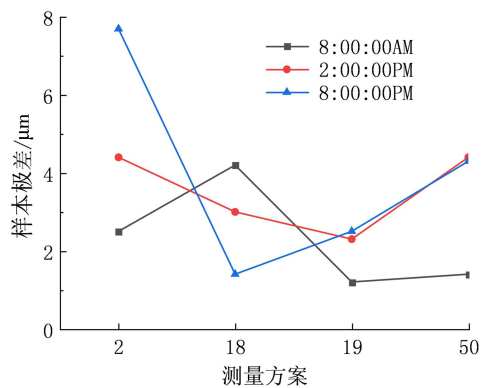


图 10 极差控制图

Fig.10 Range control chart

图 11 为 4 个方案的测量差异。由图 11 可看出,不同测量方案之间存在差异,同一测量方案的测量值差异较小。将视觉测量结果与三坐标测量仪的测量结果进行对比,方案 19 和方案 50 的测量结果与三坐标测量结果更为接近。

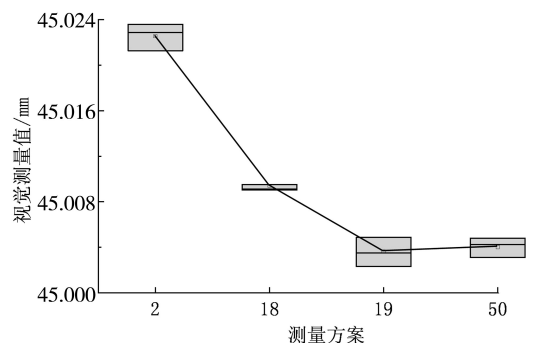


图 11 4 个方案的测量差异

Fig.11 Measurement differences of four schemes

图 12 为测量方案和测量时间的交互作用。由图 12 可见,4 种测量方案在 3 个测量时间中的测量趋势线基本平行,说明测量方案和测量时间

之间没有显著的交互作用,同一测量方案在不同测量时间,测量值差异比较小,说明测量系统的再现性较好。

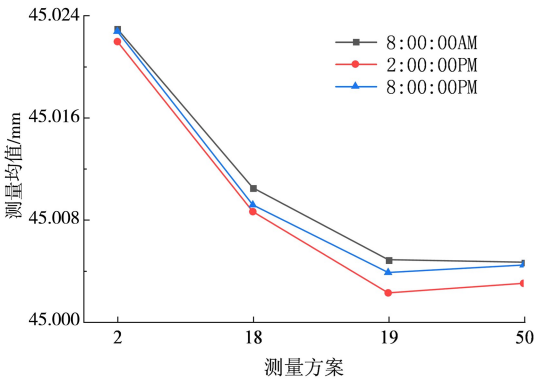


图 12 测量方案和测量时间的交互作用

Fig.12 Interaction between measurement scheme and measurement time

### 3.3.2 稳定性分析实验

在不同时间,应用相同的测量系统对同一零件的同一被测特征进行测量,观测其测量结果的稳定性。在一天中取 3 个测量时间,分别为 8:00AM,2:00PM,8:00PM,一共测量 3 d,每个时间样本重复测量 5 次,4 种测量方案同一时段 5 次测量的均值如图 13 所示。由图 13 可见,方案 19 和 50 在不同时间点,测量波动相对比较平缓,方案 19 的均值波动范围在 45.002 8~45.007 1 mm 之间,波幅为 4.3 μm;方案 50 的均值波动范围在 45.002 8~45.006 2 mm 之间,波幅为 3.4 μm。

4 种测量方案同一时段 5 次测量的极差值,如图 14 所示。方案 19 的极差波动在 1.2~10.7 μm 之间,方案 50 的极差波动在 1.4~5 μm 之间。综合图 12 和图 13 的分析结果,方案 50 的稳定性更好,方案最佳。

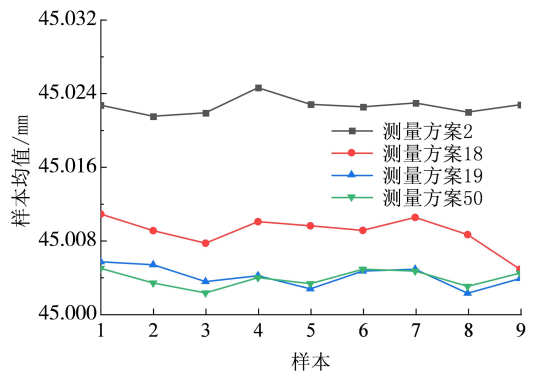


图 13 4 种测量方案的测量均值波动

Fig.13 Measurement mean fluctuation of four measurement schemes

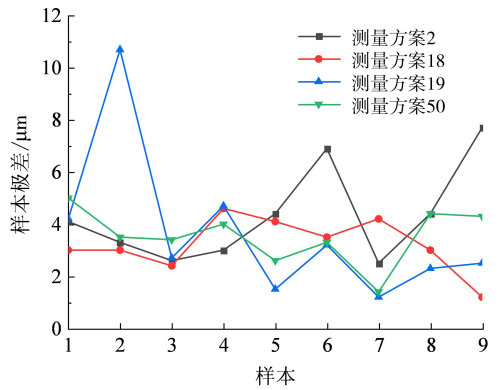


图 14 4 种测量方案同一时段 5 次测量的极差值

Fig.14 Ranges of five times of measurement for four measurement schemes in the same period

### 3.4 低对比度测量稳定性验证

为进一步验证优选测量方案的稳定性,选取两个与图 1 同族的旋压轮作为被测零件,分别测量低对比度特征直径  $d_2$  和  $d_3$ ,重复测量 5 次,测量结果如表 5 所示。从表 5 可以看出,4 个被测直径的测量误差绝对值约在 4~9 μm 之间,可满足其低对比度特征的测量精度要求。

表 5 旋压轮不同测量对象的测量结果

Tab.5 Measurement results of different measuring objects for spinning wheels

零件名称	测量对象	视觉测量值/mm					视觉测量均值/mm	三坐标测量值/mm	测量误差绝对值/mm
		第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次			
旋压轮 1	$d_2$	44.997 4	44.997 0	44.999 4	44.999 8	45.000 9	44.998 9	44.993 2	0.005 7
	$d_3$	59.818 1	59.818 1	59.819 9	59.820 7	59.820 4	59.819 4	59.823 7	0.004 3
旋压轮 2	$d_2$	44.534 8	44.535 5	44.533 5	44.533 3	44.532 7	44.534 0	44.540 7	0.006 7
	$d_3$	59.891 1	59.877 0	59.875 7	59.875 8	59.875 5	59.879 0	59.887 6	0.008 6

## 4 结论

1)低对比度特征受图像采集行为和图像处理行为的影响大且影响关系复杂,面向零件族测量时,影响还会产生变化。所建立的视觉测量行为规划分析机制,能根据零件信息和测量需求,通过优化图像采样、图像预处理和特征提取行为,自主优选适用的行为方案,从而实现低对比度特征的自适应测量。

2)提出的特征粗提取和特征精提取方案,不仅能够高精度提取透光的边缘轮廓,还能够较好地识别低对比度特征,可以实现对不同透光特性的几何特征的同步测量。通过行为优选,透光孔

的测量误差绝对值可控制在 $3\ \mu\text{m}$ 以内,低对比度特征测量误差绝对值可控制在 $5\ \mu\text{m}$ 以内。对于同族零件低对比度特征,相同行为方案测量误差绝对值约在 $4\sim 9\ \mu\text{m}$ 之间波动。若面向不同对象,测量误差偏大,可运用所建系统进一步优化行为。

3)对于旋压轮低对比度特征,应用最佳行为方案在不同时段多次测量,均值波动幅度为 $3.4\ \mu\text{m}$ ,与三坐标测量仪相比,测量误差在 $3.5\ \mu\text{m}$ 内,极差波动在 $1.4\sim 5\ \mu\text{m}$ 之间,在保证安装准确性的情况下,具有较高的重复测量精度,且受不同时段环境影响较小,测量稳定性好。

## 参考文献:

- [1] 林忠钦,于忠奇,戴冬华,等. 复杂高筋薄壁构件旋压-增材复合制造技术发展展望[J]. 航空学报,2023,44(9):1-24.
- [2] 巢渊,曹震,杜帅帅,等. 大尺寸圆形零部件尺寸高精度视觉测量方法[J]. 电子测量技术,2024,47(11):138-150.
- [3] 刘凌霄,王德成,程鹏,等. 基于机器视觉的光照强度修正方法研究[J]. 制造业自动化,2022,44(9):1-4,35.
- [4] 刘利平,孙建,孙文悦. 改进 Zernike 矩的亚像素圆孔类零件测量方法[J]. 电子测量技术,2023,46(4):69-77.
- [5] LI B. Research on geometric dimension measurement system of shaft parts based on machine vision[J]. EURASIP Journal on Image and Video Processing,2018,2018(1):101.
- [6] 杜旺哲,陈康辉,李旭为,等. 高温 H 型钢截面尺寸视觉测量方法研究[J]. 机械工程学报,2025,61(6):43-52.
- [7] 欧建国. 基于精密定位平台的大尺寸零件智能视觉测量系统研究[D]. 广州:广东工业大学,2019.
- [8] 孙燮华. 数字图像处理:Visual C#.NET 编程与实验[M]. 北京:机械工业出版社,2010.
- [9] 王晓杰. 基于机器视觉的低对比度成像物体尺寸测量系统研究[D]. 马鞍山:安徽工业大学,2022.
- [10] YU J B, CHENG X, LU L, et al. A machine vision method for measurement of machining tool wear[J]. Measurement,2021,182:109683.
- [11] 李执. 基于 Halcon 的金属工件尺寸测量方法研究[D]. 桂林:桂林电子科技大学,2022.
- [12] MAJESKE K D. Approving vision-based measurement systems in the presence of within-part variation[J]. Quality Engineering,2012,24(1):49-59.
- [13] 张娅岚,罗素文,王代华. 测量系统 Gage R&R 在生产过程质量改进中的实践研究[J]. 现代信息科技,2021,5(20):167-170,174.

(责任编辑:马晓磊)