

矩形内花键轮廓自主识别与视觉测量影响分析

张飞翔^{1,2}, 花海燕^{1,2}, 张杰^{1,2}, 郭浩浩^{1,2}

(1. 福建省智能加工技术及装备重点实验室, 福建 福州 350118;

2. 福建理工大学 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 针对小尺寸内花键轮廓特征检测难度大、效率低的问题, 开展基于视觉的轮廓特征识别与尺寸测量方法研究。以花键套筒为研究对象, 从矩形内花键几何特征分析入手, 建立轮廓特征识别与视觉测量分析机制, 提出了基于标志特征识别的图像自主找正与轮廓信息提取策略; 设计了视觉测量行为分层分析流程。通过实验分析了图像采集、预处理和特征提取3环节的行为变化对内花键几何参数测量的影响, 并实现行为优选。实验结果表明, 优选方案对槽宽的测量误差可控制在 $6.3\text{ }\mu\text{m}$ 以内, 外径测量误差在 $20\text{ }\mu\text{m}$ 左右, 内径测量误差在 $3\text{ }\mu\text{m}$ 以内, 单个被测量平均测量用时不高于 320 ms , 具有较高的测量精度和效率。

关键词: 矩形内花键; 自主识别; 视觉测量; 行为影响

中图分类号: TH124

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2025)01-0048-09

Influence analysis of contour autonomous recognition and visual measurement for rectangular internal spline

ZHANG Feixiang^{1,2}, HUA Haiyan^{1,2}, ZHANG Jie^{1,2}, GUO Haohao^{1,2}

(1. Fujian Key Laboratory of Intelligent Machining Technology and Equipment, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Aiming at the difficulty and low efficiency of contour feature detection for small-sized internal spline, the vision-based method for recognizing and measuring geometric contour feature was carried out. Starting from the analysis of the geometric characteristics for the rectangular inner spline by taking the spline sleeve as the research object, the contour feature recognition and visual measurement analysis mechanism was established. And then, a new strategy of image self-alignment and contour information extraction based on the recognition of key features was proposed. After designing the hierarchical analysis process of visual measurement behavior, the influence of behavior changes in image acquisition, preprocessing and feature extraction on the measurement of internal spline geometric parameters was analyzed through experiments, and the behavior optimization was realized. Results show that the measurement error for the keyway width can be controlled within $6.3\text{ }\mu\text{m}$. Meanwhile, the measurement error for the outer diameter is about $20\text{ }\mu\text{m}$ and that for the inner diameter is within $3\text{ }\mu\text{m}$. The average measurement time of a single measurement is no more than 320ms , which has high accuracy and efficiency.

Keywords: rectangular internal spline; autonomous recognition; visual measurement; behavior influence

矩形花键是一种应用广泛的花键类型, 由内、外花键组成, 其几何特征的加工精度对花键的传动性能至关重要。矩形花键几何参数测量通常采

用工具显微镜和三坐标测量仪等设备, 存在采点耗时长问题。随着视觉测量技术的发展, 为零件几何特征的自动化测量提供了有效途径, 在轴

收稿日期: 2024-03-18

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

第一作者简介: 张飞翔(1997—), 男, 安徽阜阳人, 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。

类^[1]、套类^[2]、盘类^[3]等各类典型零件中已得到了应用,在测量效率和精度上有明显提高^[4]。江磊^[5]采用视觉测量方法,通过拟合花键轮廓最大圆和最小圆,进行花键大小径的测量,该方法较为简单且适用性强,但相比之下,提取花键各键齿顶点和齿槽顶点,对提高大小径尺寸测量的准确性更为有利。对于矩形花键槽宽,廉凤慧^[6]采用线结构光测量方法,通过花键侧面光条中心点投射到投影平面的方式实现,师力力^[7]采用面结构光测量方法,通过提取花键表面点云的方式实现,但对于内花键,尤其是小尺寸内花键,这种方式因空间尺寸受限而难以施行。此外,视觉测量在齿轮^[8]、圆形薄片^[9]、摆线轮^[10]等其他具有复杂轮廓的零件中的应用也逐步开始探索,在图像采集、预处理和轮廓提取等环节的方法和算法上展开了研究。

综上可见,视觉测量技术在复杂轮廓识别和小尺寸测量方面具有一定优势,为矩形内花键几何参数测量提供了可行途径。但由于轮廓识别与测量过程影响因素众多,行为变化对测量结果可能产生很大影响,优化测量行为对实现高精度测量极为重要。基于此,本文以花键套筒为研究对象,开展矩形内花键轮廓识别与视觉测量行为影响研究,力图解决内花键轮廓的自主识别和快速测量问题,提高测量的效率和精度。

1 矩形内花键视觉测量分析机制建立

1.1 矩形内花键几何参数测量需求分析

花键键齿通常为周向均匀分布,以矩形轮廓最为常见。矩形花键型号规格多样,键齿数量在 4~10 个最为常见,一般是偶数。图 1 为本文所研究的花键套筒三维参数化模型,其内花键轮廓长度 L_i 小于套筒总长 L ,且花键端面低于套筒端面,内花键含有 4 个矩形键齿,内径 D_i 、外径 D_e 和键宽 B 为待测几何参数。

1.2 轮廓特征识别与视觉测量分析总体框架

影响矩形内花键几何参数视觉测量精度的环节多,行为变化会对测量结果产生不同的影响,本文着重从采样、预处理和特征提取 3 个环节的可变行为展开分析。

(1)采样环节。花键套筒内花键端面到套筒端面距离不同,从不同方向采样,效果也不同;光

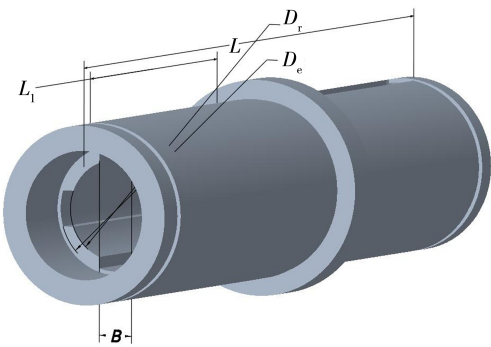


图 1 花键套筒三维参数化模型

Fig.1 Three-dimensional parametric model of spline sleeve

照方案、亮度和采样参数的变化都会直接影响采样效果。

(2)预处理环节。在特征提取之前,需进行图像对比度增强、噪声抑制和非线性灰度变换等预处理,以便更准确地提取特征。但预处理环节受算子和参数影响较大,需寻求合适的算子和参数。

(3)特征提取环节。由于花键图像周向角度存在任意性,为准确提取特征点,需能自主识别特征轮廓并进行周向找正,再根据提取的特征点拟合成直线或圆。特征点的提取方案和拟合算子也会影响测量结果。

设计了轮廓特征识别与视觉测量分析机制,总体框架如图 2 所示。由于测量过程行为环节和方案的多样性,同时进行全部行为的分析难度大,根据行为的顺序性,建立测量过程分层分析模块。通过行为规划拟定行为分析方案,分阶段实施影响分析与测量行为优化,各阶段反馈影响分析后的优选行为,修正行为分析方案,而后再进入下一阶段的分析,实现行为方案循环迭代更新。

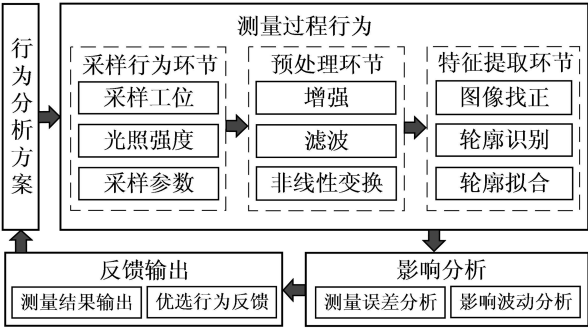
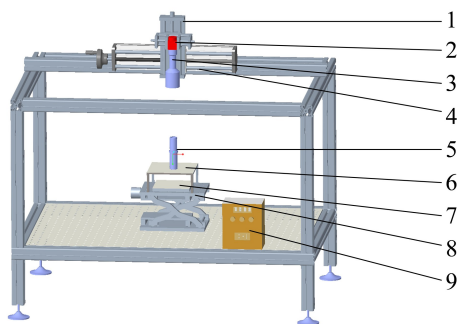


图 2 机制的总体框架

Fig.2 Overall framework of mechanism

1.3 矩形内花键尺寸视觉测量实验装置设计

搭建可实现静态图像采集的视觉测量装置,如图 3 所示。工业相机和镜头安装于 Z 轴滑台的夹持器上, Z 轴滑台安装于 X 轴滑台上, Z 轴滑台可上、下移动调节镜头与工件的距离; X 轴滑台可左、右移动调节镜头,使待测零件处于镜头视野范围中心。工件铅直放置在水平工作台上,通过升降平台亦可以调节工作台高度。通过工作台的调平和视觉设备的位置校准,保障镜头中心与零件轴线的一致性。镜头采用畸变小的双远心镜头,根据被测零件尺寸信息,配置与之相适应的放大倍率的镜头。采用背光方式照明以提高轮廓边缘的质量,光照强度通过数显光源控制器调节。



1- Z 轴滑台;2-工业相机;3-双远心镜头;4- X 轴滑台;5-待测工件;6-水平工作台;7-背光光源;8-升降平台;9-数显光源控制器

图 3 矩形内花键视觉测量装置

Fig.3 Visual measurement device for rectangular internal splines

2 内花键轮廓识别与测量方案设计

2.1 基于标志特征识别的自主找正与变换策略

矩形内花键需要测量槽宽、内径和外径等几何参数,要实现自动视觉测量,需解决两个问题。首先,矩形内花键键齿的角度随零件摆放位置的变化而变化,需对任意周向方位的零件,自主识别轮廓的方位信息。其次,矩形内花键轮廓由多段直线、弧线组成,在测量槽宽、内径和外径时,需要分离出对应的轮廓,获取轮廓上的特征点。但受图像采集和处理过程众多因素的影响,直线段、弧线段分割的情况会出现差异,导致测量结果受到影响。键数越多,情况越复杂。为快速获取目标轮廓,本文提出基于标志特征识别的图像自主找正与变换策略,其主要环节见图 4 所示。

(1) 标志特征识别确定工位信息。对于采集

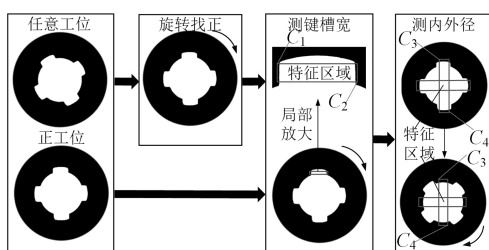


图 4 矩形内花键图像找正与变换处理环节

Fig.4 Processing of image alignment and transformation for rectangular inner spline

的矩形内花键图像,其周向方位可能是任意的。要测量内外径和各键槽槽宽尺寸,需要提取相应的轮廓特征,并进行拟合、测量。由于矩形内花键轮廓具有周向均布特点,槽侧面直线轮廓、内外径弧段与圆心的关系明显不同,故可根据内花键的设计信息,建立标志识别准则,见公式(1)和(2),找正前后标志特征信息如图 5 所示。

$$\begin{cases} \frac{D_r}{2\delta} + \Delta_2 < \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} < \frac{D_e}{2\delta} - \Delta_1 \\ \frac{D_r}{2\delta} + \Delta_2 < \sqrt{(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2} < \frac{D_e}{2\delta} - \Delta_1 \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{D_e - D_r}{2\delta} - a_2 < l_i < \frac{D_e - D_r}{2\delta} - a_1 \quad (2)$$

式中, D_r 和 D_e 分别为内、外径, mm; (x_0, y_0) 为圆心坐标; (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 分别为标志直线 A_1 、 A_2 端点找正前的坐标; Δ_1 、 Δ_2 为识别准则修正数, a_1 、 a_2 为长度许可偏差量, l_i 为第 i 轮廓的长度, pixel; δ 为像素当量。

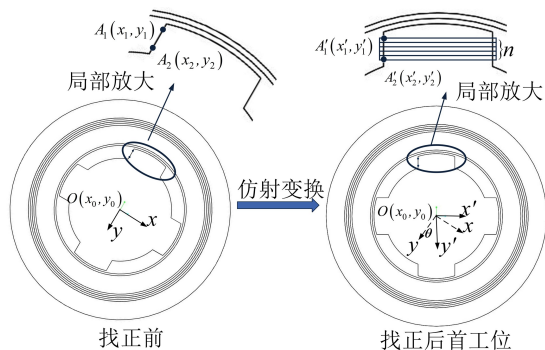


图 5 找正前后的标志特征信息

Fig.5 Information of key characteristics before and after aligning

在对图像进行工位信息识别时,以内花键区域初定圆心,通过轮廓识别与分割,提取直线轮廓组端点信息和长度信息;从所得直线轮廓组中的

第一条直线开始,按公式(1)(2)准则进行判别。由于图像采样和处理过程众多因素影响轮廓的分割,故在公式(1)中引入识别准则修正数 Δ_1 、 Δ_2 ,以避免图像分割时含过渡圆弧的直线段被误选为找正标志,导致找正产生偏差。公式(2)中引入长度许可偏差量 a_1 、 a_2 ,其目的是防止槽侧面直线轮廓被分割为小段,过短的直线也可能影响找正效果。该方法只要有一条直线符合准则,即以其作为找正的标志特征。若找不到符合准则特征或测量超差较大,表明轮廓识别可能受到影响较大,根据反馈的信息,调整优化图像采样处理行为、准则修正数或长度许可偏差量。对于不同型号规格零件,亦可通过反馈找正信息和误差信息,实现自主识别、反馈与调节,提高了算法鲁棒性。

(2)旋转找正。如图 5 所示,根据标志特征直线的端点信息,确定直线与 x 轴或 y 轴的夹角,建立旋转坐标系,进行图像仿射变换,将图像向最接近的竖直方向或水平方向进行旋转找正。若标志特征恰好为正工位,则直接进入特征提取与测量阶段。

(3)测量键槽宽。根据找正变换后的端点信息、键槽宽设计信息、像素当量信息等,确定测量槽宽所需的特征区域(见图 5),其角点 C_1 和 C_2 坐标分别见公式(3)(4)。

$$\begin{cases} x_{k1} = x'_1 - s_1 \\ y_{k1} = y'_1 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} x_{k2} = x'_2 + \frac{B}{\delta} + s_1 \\ y_{k2} = y'_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中, (x_{k1}, y_{k1}) 和 (x_{k2}, y_{k2}) 分别为角点 C_1 和 C_2 的坐标; s_1 为边缘修正量, pixel; B 为键宽, mm。对每个键槽的特征区域再细化分割 n 等分,从各细分区域中分别提取特征、拟合直线并求得宽度。采取图像旋转或特征区域周向阵列的方式,循环测量每个键槽宽度。

(4)花键内、外径测量。根据键槽几何信息、找正后图像特征信息,以齿顶轮廓正工位建立首个特征区域,角点 C_3 和 C_4 坐标分别见公式(5)(6)。根据花键键齿个数和分布特征,周向阵列特征区域,依次获取齿顶轮廓特征点,拟合外径。

$$\begin{cases} x_{k3} = x_0 - \frac{B}{2\delta} + s_2 \\ y_{k3} = y_0 - \frac{D_e}{2\delta} - s_3 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} x_{k4} = x_0 + \frac{B}{2\delta} - s_2 \\ y_{k4} = y_0 + \frac{D_e}{2\delta} + s_3 \end{cases} \quad (6)$$

式中, (x_{k3}, y_{k3}) 和 (x_{k4}, y_{k4}) 分别为角点 C_3 和 C_4 的坐标; (x_0, y_0) 为圆心坐标; s_2 、 s_3 分别为边缘修正量, pixel。

对于内径的测量,可直接利用外径的特征区域,根据花键键齿个数、齿槽与齿顶的角度关系和分布特征,周向阵列特征区域,依次获取齿槽轮廓特征点,进行内径的拟合。若特征区域大小不适,可调整边缘修正量使其合适。

2.2 视觉测量影响分析流程设计

建立视觉测量行为分层分析流程,如图 6 所示。

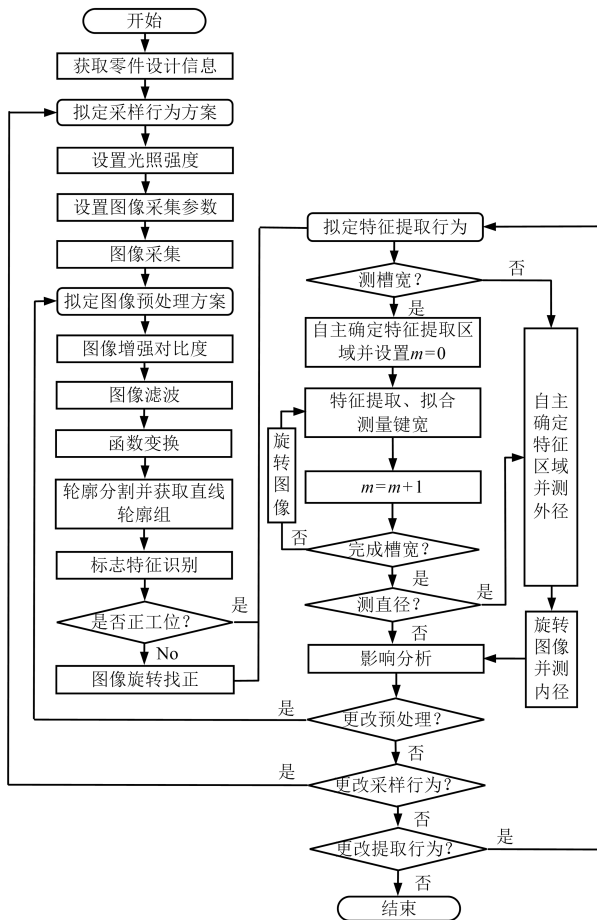


图 6 视觉测量行为分层分析流程

Fig.6 Hierarchical analysis process of visual measurement behavior

通过拟定采样行为方案、图像预处理方案和特征提取行为,分阶段更改测量过程行为,并分析

行为变化对测量结果的影响;运用该流程可多阶段同时更改测量过程行为,实现联合分析。根据影响分析结果,决策是否继续更改行为,以此实现对图像采样、预处理和特征提取行为的循环优化,从而提高测量可靠性。

3 影响分析实验方法

3.1 实验设计

以图 1 所示花键套筒为对象,实验样件矩形内花键内径 D_i 公称尺寸为 14 mm,IT10 级精度,上偏差为 0.07 mm,下偏差为 0;外径 D_o 公称尺寸为 17 mm,上偏差 0.035 mm,下偏差为 0;键宽 B 公称尺寸为 5 mm,上偏差为 0.025 mm,下偏差为 0。根据尺寸及精度要求,选取放大倍率 0.3 的双远心镜头,视野范围为 28.5 mm×23.8 mm。以精度要求较高的键宽 B 作为影响分析测量对象,对采样行为、预处理和特征提取环节开展测量过程行为影响分析实验,拟定的行为因素及分析任务见表 1。对这 3 个阶段中光照强度、曝光时间、对比度、滤波、特征区域分割、Canny 算子等 6 个行为因素进行分析。

表 1 行为因素及影响分析任务		
Tab.1 Behavioral factors and influencing analysis tasks		
行为阶段	行为因素	行为因素水平方案
采样	光照强度	{ 10, 15, 20 }
	曝光时间	[2 000, 30 000] μ s, $\Delta t = 500 \mu$ s
预处理	对比度	[0.3, 2.0], 间隔 0.1
	滤波	[1, 9], 间隔 1
特征提取	特征区域	{ 3, 4, 5, 6 }
	分段数	{ 3, 4, 5, 6 }
	Canny	[0.1, 1.1], 间隔 0.1

3.2 采样行为变化对测量结果的影响

根据表 1 制定的影响分析任务,分析光照强度和曝光时间两个因素。当光照强度较低时,如果曝光时间也较短,会导致图像整体过暗,图像存在大量噪声,导致边缘与背景灰度差距不大,影响边缘提取;当光照强度较高时,如果曝光时间取较大,会导致图像整体过亮,图像边缘丢失大量像素点,易产生较大误差。为此,需探索光照强度和曝光时间的合理搭配区间。根据表 1,光照强度取 3 个水平,曝光时间取 57 个水平,双因素共组合

171 个样本。在该组样本条件下采集图像,淘汰过暗与过亮的不合格图像,得到合格样本 107 个,不同光照强度下合格样本的曝光时间分布区间,如图 7 所示。

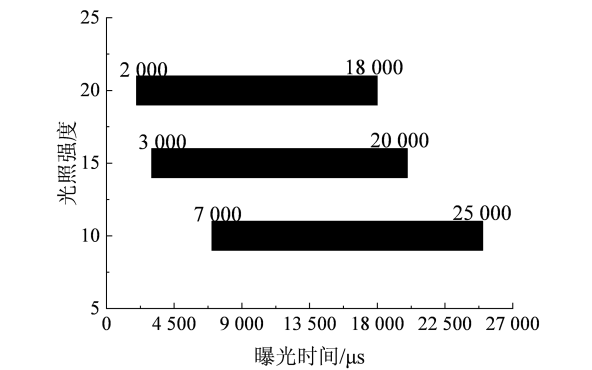


图 7 不同光强下合格样本曝光时间分布

Fig.7 Exposure time distribution of qualified samples under different light intensities

分析上述 107 个合格样本,观测光照强度和曝光时间对槽宽测量的影响,如图 8 所示。在相同光照强度下,随着曝光时间的增加,槽宽测量值呈非线性增大趋势。在曝光时间较小时,测量值增速更大;随着曝光时间的增加,测量值增速略变缓。在相同曝光时间下,光照强度增高也会使槽宽测量值增大。由图 8 可见,对于相同的测量结果,对应的是光照强度和曝光时间的搭配组合具有不唯一特性。图 8 的 3 条曲线最大极差 0.085 mm,最小极差 0.069 mm,超过了槽宽尺寸公差要求,这说明初次拟定的采样行为方案范围较大,需要进一步优选。

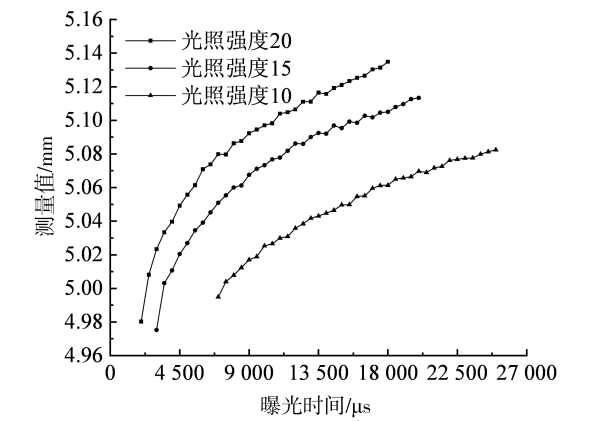


图 8 不同光照强度和曝光时间槽宽测量值

Fig.8 Measurement value of keyway width under different light intensity and exposure time

图 9 为不同光照强度和曝光时间下槽宽测量

误差绝对值,即视觉测量值与工具显微镜测量值之差的绝对值。由图 9 可见,虽然不同光照强度所适合的曝光时间区间不同,但均找到了最合适的采样条件。光照强度取值 20、15 和 10 情况下,最小误差分别为 2.2、1.64 和 0.96 μm 。由于不同零件测得的最低点可能会有偏移,其他因素的变化也可能对其有影响。为了对批量零件测量均有较强的可靠性,先确定光照强度和曝光时间的优选区间。取光照强度 20 时,曝光时间 2 500 ~ 6 000 μs ,光照强度 15 时,曝光时间 3 500 ~ 10 500 μs ,光照强度 10 时,曝光时间 7 500 ~ 18 000 μs 为初次优选采样条件。

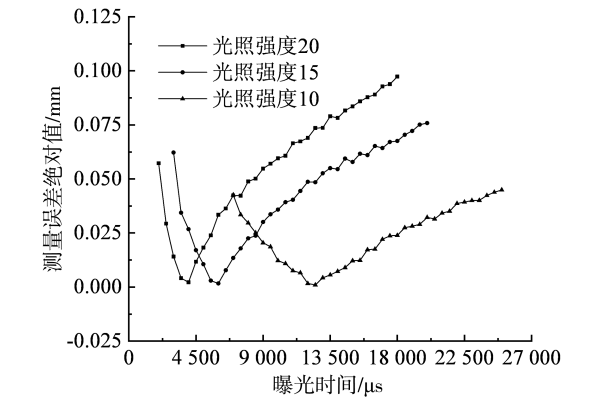


图 9 不同光照强度和曝光时间槽宽测量误差的绝对值
Fig.9 Absolute value of measurement error of keyway width under different light intensity and exposure time

3.3 轮廓提取方案对测量结果的影响

对于矩形内花键,需检测每一个键槽是否符合要求,根据 2.1 节所述,通过自主识别定位,确定槽宽测量的特征区域,将该区域细分为 n 等分,区域分割的数量也就是轮廓分段数。以初次优选采样条件的图像样本为对象,分析段数变化对测量结果的影响。光照强度取值 20 的情况下,取不同段数时槽宽测量误差的绝对值如图 10 所示。对应相同曝光时间,轮廓分割段数不同,测量误差也有所波动,其中曝光时间 4 000 μs 时,误差波动仅 3.82 μm ,除了分割 3 段时测量误差略大外,分割 4~6 段的结果很接近,且测量误差的绝对值在 3 μm 以下,测量稳定性好。因此,考虑分段方案下,光照强度 20、曝光时间 4 000 μs 被选为优选采样条件。

光照强度取 15 时,不同段数方案槽宽测量误差的绝对值如图 11 所示。相比图 10,整体趋势和误差波动情况相似,但测量误差最低点位置不

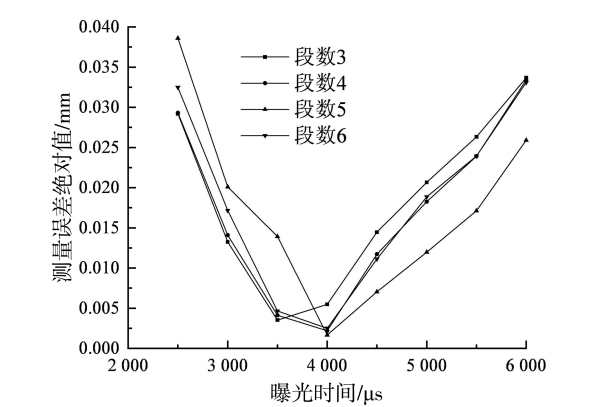


图 10 光照强度 20、不同段数方案槽宽测量误差的绝对值
Fig.10 Absolute value of measurement error of keyway width with different segment numbers under light intensity of 20

同。光照强度 15、曝光时间取 6 000 μs 采样条件下,测量误差波动小,仅为 3.04 μm ,也被选为优选采样条件。

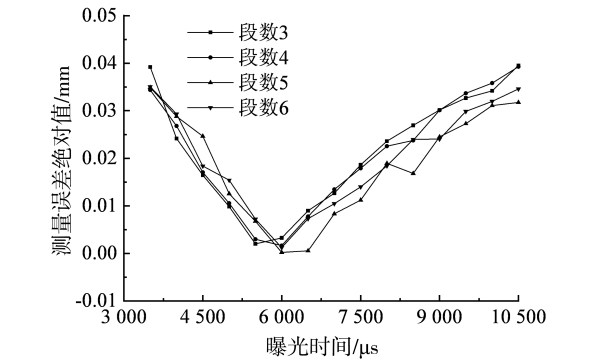


图 11 光照强度 15、不同段数方案槽宽测量误差的绝对值
Fig.11 Absolute value of measurement error of keyway width with different segment numbers under light intensity of 15

光照强度取 10 时,不同段数方案槽宽测量误差的绝对值如图 12 所示。对应相同曝光时间,段数取 5 时效果较差。段数取 3、4、6 时,在曝光时间为 12 000 μs 条件下,测量误差绝对值分别为 0.44、1.65 和 6.04 μm ;在曝光时间为 12 500 μs 条件下,测量误差绝对值分别为 1.99、0.96 和 1.43 μm ,测量误差相对较小。因此,光照强度取 10、曝光时间 12 000 和 12 500 μs 被选中为优选采样条件。

对比图 10~图 12,不同光照强度、曝光时间采样条件下,分段数取 3、4、6 时的测量结果比较接近,分段数取 5 时,测量误差波动较其他情况更大,稳定性更差。因此,综合光照强度、曝光时间

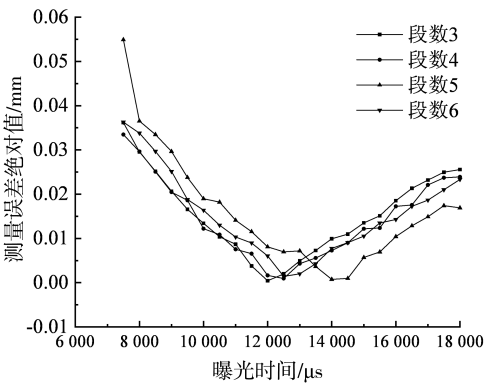


图 12 光照强度 10、不同段数方案槽宽测量误差的绝对值
Fig.12 Absolute value of measurement error of keyway width with different segment numbers under light intensity of 10

和轮廓分段数 3 因素,优选分段数为 4 段,光照强度 20、曝光时间 4 000 μs ,光照强度 15、曝光时间 6 000 μs ,以及光照强度 10、曝光时间 12 000 和 12 500 μs 为二次优选方案组。

3.4 预处理行为对测量结果的影响

在二次优选方案组的基础上,以槽宽为测量对象,分析增强对比度、滤波处理变化对测量结果的影响。基于图 6 所示流程,采用旋升法进行双因素优选,每一次单因素优选时,另一个因素固定在前一次优选所得最优点的水平上。以所得测量结果自主反馈循环优选的需求。

在图像增强环节,调节对比度将引起测量结果变化。不同对比度下槽宽测量误差的绝对值如图 13 所示。随着对比度取值的增加,槽宽测量误差的绝对值呈先减小再增大的趋势,对比度取值 0.3 时,误差最大,在某些条件下甚至将近 0.02 mm,显然对比度对结果影响也很敏感,需进一步优选取值。对应 4 组优选方案,对比度变化引起的测量误差波动不同,误差最小时对应的对比度取值也不同,但均能找到误差最低点。其中,对比度取 1.5 时,误差波动最小。对不同优选方案,测量误差能控制在 3 μm 以内,测量稳定性最好。

在滤波环节,采用中值滤波并分析其掩膜半径对槽宽测量误差绝对值的影响,如图 14 所示。光照强度 15、曝光时间 6 000 μs 的采样条件下,中值滤波掩膜半径变化引起测量误差波动的幅度为 4.58 μm ,波幅最大;光照强度 20、曝光时间

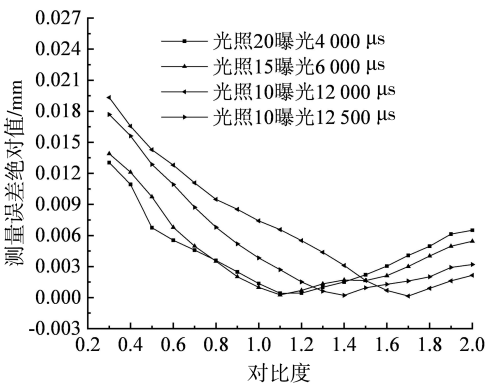


图 13 不同对比度槽宽测量误差的绝对值
Fig.13 Absolute value of measurement error of keyway width at different contrast levels

4 000 μs 的采样条件下,波动幅度为 2.79 μm ,在 4 个方案中波幅最小;光照强度 10、曝光时间 12 000 μs 的采样条件下,整体测量值偏低。相比对比度,中值滤波掩膜半径变化引起的误差波动幅度较小。综合影响分析结果,在前述优选组的基础上,中值滤波掩膜半径取 5 pixel。

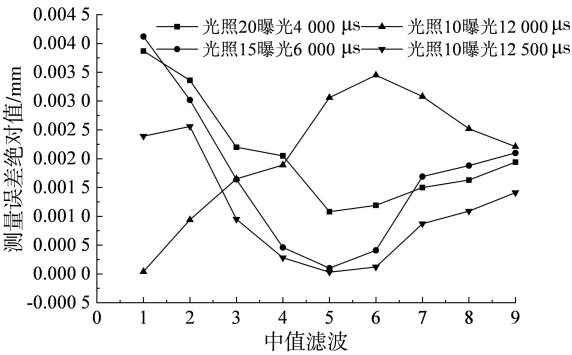


图 14 不同中值滤波槽宽测量误差的绝对值
Fig.14 Absolute value of measurement error of keyway width at different median filters

3.5 亚像素边缘提取行为对测量结果的影响

Canny 算子是应用非常广泛的亚像素边缘提取算子,其参数变化对槽宽测量误差绝对值的影响如图 15 所示。从整体看,该算子参数变化对 4 组方案的影响波动比较平缓。将其与工具显微镜测量值比较,当 Canny 算子参数取 0.5 时,测量误差较小,仅为 1.08 μm ,因此取其作为优选值。

3.6 稳定性验证

基于影响分析结果,获得了测量行为的优选方案,见表 2 所示。以表 2 方案对花键套筒不同键槽进行测量,结果见表 3,4 个键槽最大测量误

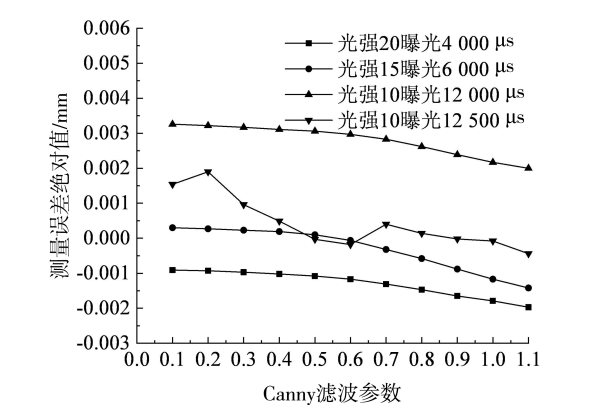


图 15 不同 Canny 算子参数槽宽测量误差的绝对值
Fig.15 Absolute value of measurement error of keyway width with different Canny operator parameters

差为 6.3 μm。其中,第 2 组方案 4 个键槽测量结果与工具显微镜的测量结果相比,最大测量误差为 3.3 μm;综合 4 个键槽的误差波动幅度为 3.4 μm,测量稳定性较好。键槽测量的平均用时最长为 287.8 ms,测量效率远高于工具显微测量。

表 2 测量行为分析优选方案
Tab.2 Measurement behavior analysis optimization scheme

编号	光照强度	曝光时间/μs	段数	对比度值	中值滤波	Canny
1	20	4 000	4	1.5	5	0.5
2	15	6 000				
3	10	12 000				
4	10	12 500				

对矩形内花键外径和内径尺寸进行稳定性测量实验,测量过程行为中,光照强度、曝光时间、对比度、滤波、Canny 算子等 5 个行为因素采用与表 2 相同方案,其测量结果见表 4 所示。对于外径,虽然 4 组方案测量结果与工具显微镜的测量结果存在 20 μm 左右的误差,但 4 组方案的测量结果比较接近,且更接近公称尺寸。对于内径,与工具显微镜测量的误差绝对值在 3 μm 以内。总体而言,优选方案对内、外径的测量也适用。同时,外径和内径的测量平均用时分别为 200.6 和 319.4 ms,测量效率高。由于内、外径的轮廓精度与键槽槽宽精度不同,轮廓获取和拟合的方式也不同,若未寻得优解可根据误差继续循环优化。

表 3 不同键槽槽宽测量结果
Tab.3 Measurement results of different keyway widths

键槽编号	方案编号	测量值/mm	显微测量/mm	测量误差/μm	测量平均用时/ms
1	1	5.038 6	5.037 5	1.1	287.8
	2	5.037 4	5.037 5	-0.1	
	3	5.034 4	5.037 5	-3.1	
	4	5.037 53	5.037 5	0.03	
2	1	5.036 8	5.030 5	6.3	278.9
	2	5.032 0	5.030 5	1.5	
	3	5.034 3	5.030 5	3.8	
	4	5.036 8	5.030 5	6.3	
3	1	5.041 5	5.035 2	6.3	281.6
	2	5.038 5	5.035 2	3.3	
	3	5.033 8	5.035 2	-1.4	
	4	5.038 7	5.035 2	3.5	
4	1	5.042 9	5.038 6	4.7	280.1
	2	5.040 3	5.038 6	2.1	
	3	5.041 8	5.038 6	3.6	
	4	5.039 8	5.038 6	1.6	

表 4 内外径测量结果
Tab.4 Inner and outer diameter measurement results

被测参数	方案编号	测量值/mm	显微测量/mm	测量误差/μm	测量平均用时/ms
D_e	1	17.008	17.028	-19.90	200.6
	2	17.007		-21.38	
	3	17.007		-20.59	
	4	17.006		-22.28	
D_r	1	14.120	14.119	-0.95	319.4
	2	14.116		-2.98	
	3	14.121		-2.19	
	4	14.112		-0.33	

4 结论

1)矩形内花键轮廓复杂,在进行几何参数测量时,需从复杂轮廓中分离出相应的轮廓点。所提出的图像找正与轮廓特征提取策略,以轮廓的

标志性特征确定找正信息,通过设计识别准则,并引入修正数和许可偏差量,既实现了图像的自主找正也提高了算法的鲁棒性;在设计特征区域建立与轮廓提取算法时,引入了边缘修正量,避免过渡轮廓特征点参与拟合,降低了图像采样与处理行为对其的影响。

2)视觉测量过程行为复杂,通过建立轮廓特征识别与视觉测量分析机制,反馈误差信息并优选行为方案;采用边缘修正量和区域细分数量,控制特征区域的尺寸、位置和分割数量,并实现闭环反馈与优化,使得特征区域的适应性得以提高,更

有利于满足不同型号规格矩形内花键的测量需求。

3)通过影响分析实验也表明,影响测量结果的因素众多,采用视觉测量行为分层分析方法,通过分阶段寻优与行为修正,有助于快速获得满足测量需求的行为方案。以优选方案进行测量,槽宽测量误差在 $6.3\ \mu\text{m}$ 以内,外径测量误差在 $20\ \mu\text{m}$ 左右,内径测量误差在 $3\ \mu\text{m}$ 以内,槽宽测量最大平均用时为 $287.8\ \text{ms}$,外径和内径测量平均用时分别为 200.6 、 $319.4\ \text{ms}$,可有效提高测量精度与效率。

参考文献:

- [1] 王锐锋,徐智浩,刘成沛,等. 机械系统直轴零件直径高精度视觉测量方法研究[J]. 仪表技术与传感器,2023(7): 111-116.
- [2] 吕宁. 基于机器视觉的轴套尺寸测量技术的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2022.
- [3] 李鹏阳,杨文辉,曹利平,等. 圆盘类零件几何量机器视觉测量技术研究[J]. 西安工业大学学报,2020,40(6):598-604.
- [4] DUAN Z Y, WANG N, FU J S, et al. High precision edge detection algorithm for mechanical parts[J]. Measurement Science Review, 2018, 18(2): 65-71.
- [5] 江磊,朱华炳,王烽,等. 基于机器视觉的汽车半轴花键参数检测[J]. 组合机床与自动化加工技术,2019(11): 119-122.
- [6] 廉凤慧. 基于线结构光的矩形花键轴视觉测量技术研究[D]. 长春:吉林大学,2019.
- [7] 师力力. 基于面结构光的矩形花键轴测量技术研究[D]. 西安:西安工业大学,2021.
- [8] MORU D K, BORRO D. A machine vision algorithm for quality control inspection of gears[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(1): 105-123.
- [9] 陈怡然,廖宁,刘超. 基于机器视觉的圆形零件尺寸参数测量[J]. 工具技术,2022,56(3): 109-113.
- [10] 尹婉婉,赵文辉,张静. 基于机器视觉的摆线轮精度综合测量[J]. 计量学报,2023,44(6): 844-851.

(责任编辑:陈雯)