

文章编号: 2095-2163(2024)01-0049-07

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

基于亚像素边缘搜索的气门几何参数检测

汤华椿^{1,2}, 谭棉^{1,2}, 王前^{1,2}, 罗太维^{1,2}, 陈望^{1,2}, 王林²

(1 贵州民族大学 数据科学与信息工程学院, 贵阳 550025;

2 贵州民族大学 贵州省模式识别与智能系统重点实验室, 贵阳 550025)

摘要: 气门几何参数检测问题是汽车、船舶、航空以及柴油发动机等工业缺陷检测领域的热点难题,其本质是气门边缘关键点的检测问题,目前应用在工业气门产业的成果较少。本文针对气门边缘关键点难以精准检测问题,设计了基于亚像素边缘搜索算法,该算法基于 Zernike 矩和亚像素边缘检测对气门边缘进行矫正,并结合图像投影和逐像素边缘搜索精确定位边缘关键点对其拟合,得到气门几何参数检测结果。为了验证所提算法的有效性,对不同尺寸的工件进行检测分析,结果表明该算法检测气门杆径的最大绝对值误差和最大极差分别低于 0.009 3 mm 和 0.036 3 mm,在检测精度和稳定性上均达到了工业要求,满足实际工业生产现场的检测需求。

关键词: 工业缺陷检测; Zernike 矩; 亚像素; 边缘搜索

Valve geometry parameter detection via sub-pixel edge search

TANG Huachun^{1,2}, TAN Mian^{1,2}, WANG Qian^{1,2}, LUO Taiwei^{1,2}, CHEN Wang^{1,2}, WANG Lin²

(1 School of Data Sciences and Information Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China;

2 Guizhou Key Laboratory of Pattern Recognition and Intelligent System, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Valve geometric parameter detection problem is a hot issue in industrial fields such as automobiles, ships, aviation, and diesel engines, which involves identifying critical points on valve edges. While progress has been made in related industrial valve applications, accurately detecting valve edge key points remains challenging. To address this difficulty, we design an edge search algorithm via sub-pixel. The algorithm corrects the valve edge based on Zernike moment and sub-pixel edge detection, and combines image projection and pixel-by-pixel edge search to accurately locate the key points of the edge, and fits them to yield valve geometric parameter detection outcomes. To verify the effectiveness of the proposed algorithm, the workpieces of different sizes are tested and analyzed. Experimental results demonstrate that maximum absolute error and the maximum extreme difference of the valve rod diameter detected by proposed algorithm are less than 0.009 3 mm and 0.036 3 mm, respectively. which meet the industrial requirements in terms of detection accuracy and stability, which can be applied to industrial production settings.

Key words: Industrial defect detection; Zernike moment; Sub-pixel; Edge search

0 引言

随着内燃机如汽车发动机、航空发动机、船舶发动机以及柴油发动机的快速发展,气门等零件的需求与日俱增,对其生产质量的要求也越来越高。为满足市场需求并提供高品质的产品,气门生产领域

亟需智能化生产和检测,以提高生产效率并确保产品质量。气门的检测通常包括几何尺寸表面缺陷、气密性、硬度和工作性能等。其中,气门几何尺寸检测对气门的性能和工作效果有着至关重要的影响,其杆径、凹槽直径、椎盘厚度以及椎盘倒角角度等参数的准确度对发动机的性能和可靠性具有重要影

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合基础-ZK[2022]一般195,黔科合基础-ZK[2023]一般143,黔科合平台人才-ZCKJ[2021]007); 贵州省青年科技人才成长项目(黔教合KY字[2021]104,黔教合KY字[2021]111); 贵州省教育厅自然科学研究项目(黔教技[2023]061号,黔教技[2023]012号)。

作者简介: 汤华椿(1998-),男,硕士研究生,主要研究方向:工业缺陷检测;王前(1999-),男,硕士研究生,主要研究方向:计算机视觉;罗太维(1999-),男,硕士研究生,主要研究方向:工业缺陷检测;陈望(2000-),男,硕士研究生,主要研究方向:计算机视觉检测;王林(1965-),男,博士,教授,主要研究方向:模式识别、图像处理。

通讯作者: 谭棉(1984-),女,硕士,副教授,主要研究方向:智能算法、模式识别。Email: tanmian@gzmu.edu.cn

收稿日期: 2023-10-08

哈尔滨工业大学主办 ◆ 学术研究与应用

响。气门几何尺寸的误差可能导致发动机噪音和燃油消耗增加,甚至可能引起机油泄漏和自燃等安全事故的发生^[1]。因此,确保这些参数的准确性对于保障发动机的正常运行和安全性至关重要。近年来,气门几何参数检测研究成为智能化检测过程中的热点和难点,引起了国内外学者和工业领域的广泛关注^[2]。

目前,零件几何尺寸检测方法主要包括传统检测和机器视觉检测两类。传统检测方法主要包括人工检测、光学投影检测和三坐标检测。人工检测一般采用百分尺、千分尺和千分表等传统检测工具,对操作人员的依赖性强,效率低,可能出现人为错误,使得产品质量不能得到有效保证^[3];光学投影仪和三坐标检测虽然精度较高,但读取过程繁琐,测量时间长,对专业设备和专业技术要求极高^[4]。

随着工业检测技术的发展,机器视觉方法在零件几何尺寸检测中得到了广泛应用,通过图像采集和图像处理技术实现高速、准确的检测,具有较低的人为误差率和较高的自动化程度,在零件几何尺寸检测领域具有显著优势^[5]。刘斌等^[6]设计了一种分层匹配算法对待测目标进行粗糙定位,然后通过阈值参数进行边缘精细定位,实现了丝网印刷版尺寸的精密测量;孔盛杰等^[7]基于曲率尺度空间(Curvature Scale Space, CSS)技术,提取齿顶角点,并通过补偿透镜畸变减小椭圆准偏心误差、实现了齿形结构齿顶圆的精密检测,显著提高了轮齿存在遮挡时齿顶圆圆心的精度;涂德浴等^[8]针对人工测量钢管壁厚效率低和无法实时测量,设计了一种钢管壁厚在线检测方法,提高了测量精度和检测效率,实现了钢管壁厚在线检测;赵朝朝等^[9]提出一种改进的自适应 Canny 算子测量手工捏花尺寸,引入均值漂移法和 Scharr 算子提取图像有效特征,准确率达到了 97%,与真实值误差 2mm 左右;巢渊等^[10]基于 Canny 边缘检测和多多阈值处理设计了一种基于 Zernike 矩算法的轴类零件尺寸测量方法,实现了自行车轴径的精准测量;李宝志等^[11]设计了一种基于图像识别的波纹补偿器轴向尺寸检测方法,结合高斯滤波、边缘检测、阈值分割、取反和孔洞填充等操作处理,实现了对波纹补偿器轴向尺寸的自动测量,很好地弥补位移传感器无法检测波纹补偿器相邻波纹之间的轴向尺寸的问题;林晓平等^[12]提出一种连杆裂解槽几何尺寸检测方法,通过滤波、图像增强和阈值分割检测等技术,实现对槽深在 0.3~0.7 mm,张角在 15°~35°,曲率半径在 0.1~0.3 mm 的连杆裂

解槽参数的实时检测;赵凤胜等^[13]设计了一种基于机器视觉的汽车管法兰尺寸检测系统,该系统基于 Canny 算子对汽车管法兰尺寸检测,测量精度可达 0.08 mm,平均检测时间为 1.2 s;粟序明等^[14]设计了一套自动定位和测量的轴类零件系统,并将其应用于实际轴类零件的测量,平均定位误差为 0.1 mm,平均角度误差为 1°,平均尺寸测量误差达到 0.2 mm,实用性不是很强;易焕银等^[15]基于最小二乘法拟合设计了一种基于机器视觉的压缩弹簧中段线径的测量方法,该方法能够在 200 ms 内完成数百个的检测点位的线径测量,测量精度和效率远高于传统的弹簧线径测量方法。然而,由于气门整体结构分为杆部和顶部,结构也有所不同,尤其是由弧面与斜面组成的交汇处,使得图像边缘关键点难以精准检测,像素级方法难以满足气门几何尺寸的检测要求,且检测时间和精度要求较高,上述方法并不适用于气门几何尺寸检测。

本文针对气门几何尺寸检测问题,设计了一种基于亚像素的边缘搜索算法,基于 Zernike 矩和亚像素边缘检测对气门图像进行矫正,并结合图像投影技术和逐像素搜索方法搜寻图像的边缘关键点,对其拟合,实现气门几何尺寸的精密检测。该算法不仅能够检测同一气门不同区域几何尺寸,还能检测多种不同尺寸气门的几何尺寸,且检测结果满足工业要求。

1 问题描述

气门几何参数是影响内燃机性能的重要参数,需要根据内燃机实际需求进行合理的设计和和生产,以使内燃机达到最佳性能。气门几何参数定义见表 1。

表 1 气门几何参数定义

Table 1 Definition of valve geometry parameters

几何参数	定义
杆径 D_1	气门杆圆柱面轴径或气门杆表面的最大直径
凹槽直径 D_2	气门顶部凹槽直径或凹槽最小中心圆直径
椎盘厚度 L	气门椎盘厚度或椎盘最大直径与椎底的距离
椎盘倒角角度 R	气门椎盘倒角角度或椎盘切口与轴线的夹角

企业要求的气门杆检测要求见表 2。

表 2 气门杆检测要求

Table 2 Valve rod detection requirements mm

	杆径	允许误差	凹槽直径	允许误差
工件一	5.5	±0.015	4.15	±0.05
工件二	10.5	±0.2	8.7	±0.2
工件三	16	±0.05	10.6	±0.05

在表 2 中, 工件一、工件二和工件三的气门杆径和凹槽直径是对应的标准尺寸。

企业要求的气门顶部检测要求见表 3。

表 3 气门顶部检测要求

Table 3 Valve top detection requirements

	椎盘厚度/ mm	允许误差/ mm	椎盘倒角角度/ (°)	允许误差/ (°)
工件四	3	±0.1	90.5	±0.5
工件五	6	±0.1	120	±1

在表 3 中, 工件五和工件六的椎盘厚度和椎盘倒角角度都是对应的标准尺寸。

气门杆和气门顶部结构有所不同, 导致不同区域的检测方法也存在差异。因此, 本文针对气门不同区域的几何参数检测设计了针对性解决方法, 具体流程如图 1 所示。

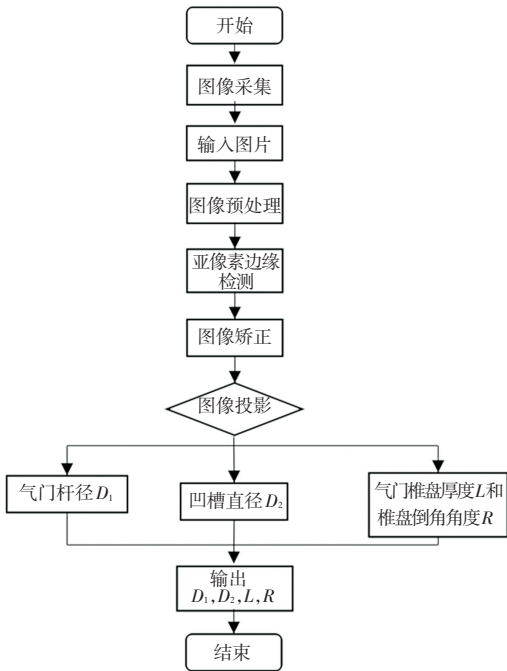


图 1 气门几何参数检测流程图

Fig. 1 Flow chart of valve geometric parameter detection

如图 1 所示, 首先进行图像采集, 再读取气门图像, 然后进行灰度化以增强图像的前景边缘特征, 并利用高斯滤波平滑图像的边缘和细节信息。随后, 基于亚像素边缘检测对图像进行矫正, 以提高边缘搜索的准确性和可靠性; 通过图像投影搜索矫正后气门杆图像的边缘关键点, 并利用这些关键点坐标计算气门杆径 D_1 和凹槽直径 D_2 。但由于气门顶部结构比较复杂, 单纯使用图像投影很难精确地搜索到气门顶部弧面与斜面交汇处关键点, 从而无法直接解决气门顶部椎盘厚度 L 和椎盘倒角角度 R 的检

测。为解决这一问题, 设计了逐像素边缘搜索方法, 结合图像投影搜索气门顶部图像边缘关键点, 最后, 使用最小二乘法拟合这些关键点, 以检测出气门椎盘厚度 L 和椎盘倒角角度 R 。

2 基于亚像素的边缘搜索算法

2.1 图像矫正

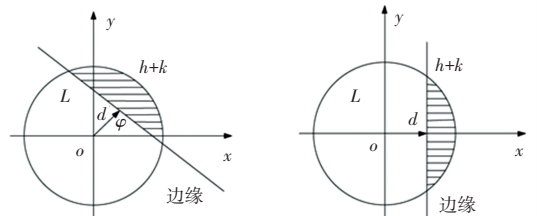
气门几何参数检测的本质是对图像中的像素点进行检测。但在图像采集过程中会存在图像偏移, 导致检测到的像素点与实际位置之间存在较大差距, 进而增大检测结果的误差, 难以满足工业检测的要求。为了解决这个问题, 本文基于 Zernike 矩和亚像素边缘检测方法对图像进行矫正。假设 $f(x, y)$ 表示气门图像, 则 $f(x, y)$ 的 n 阶 m 次 Zernike 矩 Z_{mn} 可以通过公式(1)计算:

$$Z_{mn} = \frac{n+1}{\pi} \iint_{x^2+y^2 \leq 1} f(x, y) \bar{V}_{mn}(\rho, \varphi) dx dy \quad (1)$$

其中, $n \geq 0, n - m$ 为偶数且 $|m| \leq n, \bar{V}_{mn}(\rho, \varphi)$ 表示 $V_{mn}(\rho, \varphi)$ 的共轭。

基于 Zernike 矩的亚像素边缘检测实质上是利用图像不同阶次的 3 个 Zernike 矩的旋转不变性计算理想灰度阶跃模型的 4 个参数, 即阶跃灰度 k 、背景灰度 h 、边缘线到原点的最短距离 d 、 d 与 x 轴的夹角 φ , 并将其与给定阈值对比分析, 以实现图像边缘特征的精确定位。

巢渊等^[10]设计的理想边缘模型如图 2 所示, 阴影部分是目标区域, 单位圆内包含的直线是图像理想边缘。



(a) 原始图像理想阶跃边缘 (b) 旋转后图像理想阶跃边缘

图 2 理想边缘模型

Fig. 2 Ideal edge model

图 2(b) 是图 2(a) 旋转 φ 后的边缘检测模型。设旋转后的图像为 $f'(x, y)$, 基于 Zernike 矩的亚像素边缘检测方法, 利用式(1)求出 Z_{00}, Z_{11} 和 Z_{20} 3 个 Zernike 矩。根据旋转后图像关于 x 轴对称的特性, 可以得到旋转后各阶 Zernike 矩 Z'_{00}, Z'_{11} 和 Z'_{20} , 式(2)~式(4):

$$Z'_{00} = h\pi + \frac{k\pi}{2} + k \arcsin(d) - kd\sqrt{1-d^2} \quad (2)$$

$$\mathbf{Z}'_{11} = \frac{2k(1-d^2)^{3/2}}{3} \quad (3)$$

$$\mathbf{Z}'_{20} = \frac{2kd(1-d^2)^{3/2}}{3} \quad (4)$$

根据 \mathbf{Z}'_{00} , \mathbf{Z}'_{11} 和 \mathbf{Z}'_{20} 可以计算出理想边缘的参数 k, h, d 和 φ , 式(5)~式(8):

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\text{Im}[\mathbf{Z}'_{11}]}{\text{Re}[\mathbf{Z}'_{11}]}\right) \quad (5)$$

$$h = \frac{\mathbf{Z}'_{00} - \frac{k\pi}{2} + k\arcsin(d) + kd\sqrt{1-d^2}}{\pi} \quad (6)$$

$$d = \frac{\mathbf{Z}'_{20}}{\mathbf{Z}'_{11}} \quad (7)$$

$$k = \frac{3\mathbf{Z}'_{11}}{2d(1-d^2)^{3/2}} \quad (8)$$

其中, $\text{Im}[\mathbf{Z}'_{11}]$ 表示 \mathbf{Z}'_{11} 的实部, $\text{Re}[\mathbf{Z}'_{11}]$ 表示 \mathbf{Z}'_{11} 的虚部。

考虑到模板效应,当模板为 $N \times N$ 时,根据式(9)得到亚像素坐标信息,用于提取图像边缘轮廓。

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \frac{N}{2}d \begin{bmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (9)$$

通过搜索图像边缘轮廓的矩阵,可以获取图像偏移角度。利用偏移角度对图像进行旋转矫正,克服拍摄过程中气门图像的倾斜或畸变,从而提供更加准确的气门几何参数检测结果,解决气门图像偏移所带来的影响,提高气门几何参数检测的准确性。

2.2 关键点拟合

由于气门结构复杂,使得图像边缘关键点难以精准检测,尤其是顶部弧面与斜面交汇处的边缘关键点,使得气门几何参数检测面临着极大的挑战。针对该问题,本文首先通过图像矫正方法对图像矫正;其次,结合图像投影技术搜索图像边缘关键点即气门杆起始点、终点、凹槽最低点,以及气门顶部斜面的起始点和终点等信息,拟合关键点信息可以得到气门杆径 D_1 和凹槽直径 D_2 , 完成对气门杆上几何参数的检测。

气门顶部结构相对复杂,仅通过图像矫正和图像投影技术无法完成对气门顶部几何参数,即椎盘厚度 L 和椎盘倒角角度 R 的检测。因此,本文基于气门顶部结构特征设计了一种逐像素边缘搜索方法。首先,利用图像投影技术获取气门顶部椎盘斜面边缘的起始点 $p_0(x_0, y_0)$; 其次,以 p_0 为基准,沿图像 x 轴负方向和 y 轴正方向逐像素搜索气门顶部椎盘斜面的边缘点 $p_i(x_0 - i, y_0 + j)$, 通过像素阈值 t 判断是否找到

了有效的边缘点,根据搜索区域呈梯形形状,引入梯形中位线定理判断是否完成了对气门顶部弧面与椎盘斜面交汇处边缘关键点的搜索;最后,通过最小二乘法对边缘关键点 p_0 进行拟合,得到气门顶部椎盘厚度 L 和椎盘倒角角度 R 的检测结果。

2.3 基于亚像素的边缘搜索算法

为解决气门几何参数检测问题,本文设计了一种基于亚像素的边缘搜索算法。该算法主要包括两部分:

(1) 图像矫正,结合 Zernike 矩和亚像素插值提取边缘轮廓,根据图像边缘轮廓水平偏移角度对图像进行矫正;

(2) 关键点拟合,通过图像投影技术和逐像素搜索方法完成对图像边缘关键点的搜索,然后对其拟合,实现对气门几何参数的检测。设 G 表示图像像素值, t 表示像素阈值, p_i 表示第 i 个边缘点坐标, l_i 表示第 i 个边缘点与 x 轴的距离, i 表示沿 x 轴负方向遍历的第 i 个像素点, j 表示沿 y 轴正方向遍历的第 j 个像素点, s 为一个无穷大的数, α 为无限接近 0 的常数,第一个循环中初始值的最大值设置为 3。具体检测流程如算法 1 所示。

算法 1 基于亚像素的边缘搜索算法

输入 图像 $f(x, y)$;

- 1 //图像矫正;
- 2 使用 Canny 边缘检测得到图像初步边缘位置信息;
- 3 通过式(9)计算图像边缘的亚像素坐标;
- 4 根据边缘坐标确定边缘轮廓得到图像水平偏移角度 r ;
- 5 根据 r 旋转矫正气门图像 $f(x, y)$;
- 6 //关键点拟合;
- 7 通过图像投影寻找矫正后气门杆边缘关键点坐标并计算出 D_1 和 D_2 ;
- 8 利用图像投影搜索矫正后气门顶部椎盘斜面的起始点 (x_0, y_0) ;
- 9 for $i = 1 : 3$ do
- 10 for $j = 0 : s$ do
- 11 if $G_{(x_0-i)(y_0+j)} \leq t$ do
- 12 $p_i = (x_0 - i, y_0 + j), l_i = j$;
- 13 break
- 14 else
- 15 continue
- 16 end if
- 17 end for
- 18 end for

```

19  $i = 3;$ 
20 while  $l_{i-1} - \alpha \leq \frac{l_i + l_{i-2}}{2} \leq l_{i-1} + \alpha$  do
21    $p_i = (x_0 - i, y_0 + j), l_i = j;$ 
22   for  $j = 0 : s$  do
23     if  $G_{(x_0-i)(y_0+j)} \leq t$  do
24        $l_i = j;$ 
25     break
26   else
27     continue
28   end if
29 end for
30 end while
31 利用最小二乘法拟合  $p_i$  得到  $L$  和  $R$ ;

```

输出 $D_1, D_2, L, R;$

在算法 1 中,算法流程的第 2~5 行是图像矫正部分,主要利用 Zernike 矩和亚像素边缘检测方法提取图像边缘轮廓,并获取图像的偏移角度。根据偏移角度实现图像的矫正,以提高气门几何参数检测的准确度;第 7~31 行是关键点拟合部分,通过图像投影技术和逐像素边缘搜索方法搜索图像的边缘关键点,对其进行拟合,从而得到气门几何参数的检测结果。

3 实验设置及分析

3.1 图像采集及实验设置

为保证数据的可靠性,采用高分辨率的巴斯勒 a2A4504-5gmPRO 黑白工业相机(分辨率为 4504×4504),镜头使用灿锐 XF-10MDT05X110-1 远心镜头,工作距离为 110 mm。使用 XF-PTI037-G 的 PTI 远心光源,消除标准背光源漫反射导致的边缘模糊,提供高对比度照明和良好的镜头采样条件,光源照明方式采用背向照明。图像采集过程中,在相机焦距范围内可旋转气门工件改变角度,采集气门工件的不同截面。实验配置和图像采集环境见表 4。

表 4 实验配置

Table 4 Experimental configuration

操作系统和硬件环境	配置
Operating system	Windows 10
CPU	Intel(R) Core (TM) i5-7500 CPU @ 3.40 GHz 3.41 GHz
IDE	PyCharm
工业相机	a2A4504-5gmPRO
远心镜头	XF-10MDT05X110-1
远心光源	XF-PTI037-G

在实验中,像素阈值 t 设置为 127。另外,由于

搜索气门顶部边缘点是沿 x 轴逐像素开始搜索至第 i 个像素点,并逐一确定像素点 y 轴坐标值 j , 因此, i 初始化值设置为 1, j 和 l_i 初始化值设置为 0。

为验证算法的有效性和普适性,不仅对相同尺寸气门的几何参数进行检测,也对不同尺寸气门的同一几何参数进行了检测。

3.2 实验结果与分析

在实验中,选取气门杆径、凹槽直径、气门顶部椎盘厚度和椎盘倒角角度 4 个参数进行检测,每个参数进行 5 组实验,每组实验进行 20 次检测,取这 20 次检测结果的均值作为实验结果。实验初步结果是以像素为单位的,根据单位像素所占物体实际长度的比率作为像素与实际物体长度单位之间的转换媒介,从而取得最终的气门几何参数检测结果。其中,工件一、工件二和工件三这 3 类不同尺寸气门的气门杆径和凹槽直径检测结果见表 5。

表 5 显示了工件一、工件二和工件三这 3 类不同尺寸气门的杆径和凹槽直径检测结果。其中,用横线表示的是无参考意义的结果。由表 5 可知,气门杆径和凹槽直径的最大平均误差为 0.010 8 mm 和 0.028 1 mm,均低于检测的允许误差,结果表明,基于亚像素的边缘搜索算法在不同尺寸气门杆的检测任务上均达到了工业的误差标准。此外,表 5 中气门杆径和凹槽直径实验结果的最大极差为 0.036 3 mm 和 0.077 2 mm,均低于对应工业要求,且气门杆径和凹槽直径的方差最大值为 0.000 2 和 0.000 9,表明实验检测结果整体表现比较稳定。

实验结果显示,所提检测算法不仅能够同时解决同一工件气门杆上不同几何参数(气门杆径和凹槽直径),也可以对不同尺寸气门的同一几何参数进行检测,说明所提算法在气门几何参数检测上具有通用性。

另外,为验证算法在不同尺寸气门顶部上几何参数检测的有效性,对工件四和工件五的椎盘厚度和椎盘倒角角度进行检测,检测结果见表 6。

在表 6 中,工件四和工件五这两类气门椎盘厚度和椎盘倒角角度的最大平均误差为 0.027 2 mm 和 0.271 7°,均低于检测的误差要求,表明所提算法可以很好地完成气门顶部几何参数的检测任务。此外,表 6 中气门椎盘厚度和椎盘倒角角度的最大极差为 0.107 1 mm 和 0.557 9°,均低于工业要求,且气门椎盘厚度和椎盘倒角角度的方差最大值仅为 0.002 2 和 0.054 0,说明实验检测结果较为稳定,且所有实验测量结果均满足 GB/T1800.1-2009 标准。

表5 气门杆几何参数检测结果

Table 5 Valve rod geometric parameters test results

mm

	杆径 D_1 实际值	杆径 D_1 测量值	绝对误差	允许误差 差要求	凹槽直径 D_2 实际值	凹槽直径 D_2 测量值	绝对 误差	允许误差 要求
工件一	5.5	1	5.497 5	0.002 5	4.15	4.143 2	0.006 8	± 0.05
		2	5.492 4	0.007 6		4.178 5	0.028 5	
		3	5.497 5	0.002 5		4.158 4	0.008 4	
		4	5.507 6	0.007 6		4.143 2	0.006 8	
		5	5.507 6	0.007 6		4.148 3	0.001 7	
		均值	5.500 5	0.005 0		4.154 3	0.010 4	
		方差	0.000 05	-		0.000 2	-	
		极差	0.015 1	-		0.035 2	-	
工件二	10.5	1	10.493 4	0.006 6	8.7	8.693 3	0.006 7	± 0.2
		2	10.493 7	0.006 3		8.701 8	0.001 8	
		3	10.492 1	0.007 9		8.730 6	0.030 6	
		4	10.490 7	0.009 3		8.730 8	0.030 8	
		5	10.498 1	0.001 9		8.770 5	0.070 5	
		均值	10.493 6	0.006 4		8.725 4	0.028 1	
		方差	0.000 008	-		0.000 9	-	
		极差	0.007 4	-		0.077 2	-	
工件三	16	1	15.980 3	0.019 7	10.6	10.617 1	0.017 1	± 0.05
		2	16.016 6	0.016 6		10.620 4	0.020 4	
		3	16.011 4	0.011 4		10.621 2	0.021 2	
		4	15.996 6	0.003 4		10.630 0	0.030 0	
		5	15.996 8	0.003 2		10.626 8	0.026 8	
		均值	16.000 3	0.010 8		10.623 1	0.023 1	
		方差	0.000 2	-		0.000 03	-	
		极差	0.036 3	-		0.012 8	-	

表6 气门顶部几何参数检测结果

Table 6 Detection results of geometric parameters of valve top

mm

	椎盘厚度 L 实际值/ mm	椎盘厚度 L 测量值/ mm	绝对 误差/ mm	允许误差 差要求/ mm	椎盘倒角 角度 R 实际值/ ($^{\circ}$)	椎盘倒角 角度 R 测量值/ ($^{\circ}$)	绝对 误差/ ($^{\circ}$)	允许 误差要求/ ($^{\circ}$)
工件四	3	1	2.952 4	0.047 6	90.5	90.420 7	0.079 3	± 0.5
		2	3.023 8	0.023 8		90.162 1	0.337 9	
		3	3.035 7	0.035 7		90.491 9	0.008 1	
		4	3.059 5	0.059 5		90.651 8	0.151 8	
		5	2.964 3	0.035 7		90.093 8	0.406 2	
		均值	3.007 1	0.007 1		90.364 0	0.196 7	
		方差	0.002 2	-		0.054 0	-	
		极差	0.107 1	-		0.557 9	-	
工件五	6	1	6.014 2	0.014 2	120	120.312 2	0.312 2	± 1
		2	6.088 0	0.088 0		120.426 1	0.426 1	
		3	6.023 2	0.023 2		120.512 2	0.512 2	
		4	5.998 2	0.001 9		119.982 9	0.017 2	
		5	6.012 5	0.012 5		120.125 1	0.125 1	
		均值	6.027 2	0.027 2		120.271 7	0.271 7	
		方差	0.001 2	-		0.047 1	-	
		极差	0.089 9	-		0.529 3	-	

实验结果显示,所提算法可以同时完成同一工件气门顶部不同几何参数(椎盘厚度和椎盘倒角角度)的检测,也可以完成对不同气门同一几何参数的检测,通用性较强。

综上所述,基于亚像素的边缘搜索算法在气门几何参数检测任务上的检测精度和实时性均满足实际生产现场检测要求。

4 结束语

气门几何参数是衡量气门性能的核心要素,本文针对气门图像边缘关键点难以精准检测问题,设计了基于亚像素的边缘搜索算法。针对图像偏移问题,设计了图像矫正方法,有效解决了采集图像时出现的偏移情况;在图像矫正的基础上,设计逐像素边缘搜索方法,结合图像投影技术搜索图像边缘,有效解决了图像关键点难以精确检测问题;采用最小二乘法拟合关键点得出气门几何参数的检测结果。实验结果表明,气门几何参数的最大绝对值误差和最大极差均低于工业误差的检测要求,满足工业生产的检测需求,可应用于实际生产现场。

未来研究工作:

(1) 针对气门几何参数检测问题,研究更加精确的边缘搜索算法;

(2) 针对气门表面缺陷,如凹坑、锈迹、划痕等问题,研究具有数据增强特性的迁移学习缺陷检测模型,为气门表面缺陷检测提供解决方案。

参考文献

[1] 李顺. 汽车发动机烧机油原因分析及故障维修策略研究[J]. 机

械与电子控制工程, 2022, 4(11): 214-216.

[2] HUANG H, FENG F J, HUANG S Q, et al. Microscale searching algorithm for coupling matrix optimization of automated microwave filter tuning [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2023, 53(5): 2829-2840.

[3] 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: 1-9.

[4] 那晨旭. 光学投影式三维轮廓测量技术研究[J]. 中国新技术新产品, 2019, 403(21): 8-9.

[5] 金柯, 陈晓荣. 基于机器视觉的光纤端面几何参数测量研究[J]. 计量学报, 2023, 44(2): 165-170.

[6] 刘斌, 董正天, 胡春海, 等. 基于机器视觉的丝网印刷样板尺寸测量方法[J]. 计量学报, 2021, 42(2): 150-156.

[7] 孔盛杰, 黄翔, 周蒯, 等. 基于机器视觉的齿形结构齿顶圆检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4): 247-255.

[8] 涂德裕, 刘坤, 朱庆, 等. 基于机器视觉的钢管壁厚在线检测方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(16): 1.

[9] 赵朝朝, 江明, 殷宗琨. 改进 Canny 算子下的工件尺寸测量[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 36(8): 52-59.

[10] 巢渊, 唐寒冰, 刘文汇, 等. 基于改进 Zernike 矩的轴类零件尺寸测量方法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(3): 169-176.

[11] 李宝志, 倪洪启, 林思雨, 等. 基于图像识别的波纹补偿器轴向尺寸检测方法[J]. 工程设计学报, 2023, 29(1): 10-19.

[12] 林晓平, 王冠, 陈学灵, 等. 46MnV5S 连杆裂解槽在机器视觉的几何尺寸检测研究[J]. 现代制造工程, 2022, 42(4): 119-127.

[13] 赵凤胜, 袁海兵, 吴俊, 等. 基于机器视觉的汽车管片法兰尺寸检测系统[J]. 电子测量技术, 2023, 46(2): 154-160.

[14] 栗序明, 方成刚, 洪荣晶, 等. 基于机器视觉的轴类零件定位与测量系统[J]. 机械设计与制造, 2020(7): 250-254.

[15] 易焕银, 刘志明, 覃明俊. 基于机器视觉的压缩弹簧中段线径测量[J]. 机床与液压, 2023, 50(21): 125-131.

(上接第 48 页)

[12] TAN F, WANG J, JIAO Y Y, et al. Suitability evaluation of underground space based on finite interval cloud model and genetic algorithm combination weighting [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 108(6): 103743.

[13] 毕傲睿, 沈超, 朱洪云, 等. 基于直觉模糊信息的地下储气库安全性可拓评价模型研究[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(4): 172-180.

[14] 吴博, 赵法锁, 吴韶艳. 基于组合赋权-功效系数法的黄土边坡稳定性评价[J]. 灾害学, 2020, 35(2): 34-38.

[15] 任松, 李小勇, 姜德义, 等. 盐岩储气库运营期稳定性评价研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1465-1472.

[16] 翟强, 顾伟红, 赵映璿. 基于未确知测度理论的隧道施工瓦斯灾害风险评价[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(3): 803-812.

[17] 徐长宝, 王玉磊, 赵立进, 等. 基于信息趋势预测和组合赋权

的智能变电站继电保护系统状态模糊综合评价[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1): 162-168.

[18] 吕淑然, 田琦. 基于 DEMATEL-ANP-GRA 的大型泵站运行安全综合评价[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(4): 1-8.

[19] 王凤武, 徐翌森, 王哲凯, 等. 基于 DEMATEL-ANP 的重大件船舶大风浪航行安全指标选取[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(1): 62-69.

[20] 李志荣, 朱金善, 宋健, 等. 基于 C-OWA 算子和证据理论的船舶夜航光环境安全评价[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(12): 182-187.

[21] 罗樟圳, 江海凡, 付建林, 等. 基于组合赋权的离散车间生产计划综合评价[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(8): 1856-1865.

[22] AQ 2041-2012, 石油行业安全生产标准化井下作业实施规范[S].