

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210498

基于机器视觉的汽车管件法兰尺寸检测系统*

赵凤胜 袁海兵 吴俊 夏播

(湖北汽车工业学院机械工程学院 十堰 442002)

摘要: 针对日前汽车管件法兰采用传统人工抽检测量时存在效率低、误检率高等问题,开发基于机器视觉的汽车管件法兰尺寸检测系统,提高检测效率与测量精度。使用 HALCON 软件对相机进行标定,采用中值滤波对待测图像进行去噪处理,然后采用灰度化进行图像增强,完成图像预处理,利用 Canny 算子对图像进行亚像素边缘检测后,使用最小二乘法对提取的亚像素边缘信息进行拟合得到连续的孔径轮廓,获得法兰端面尺寸,再通过 HALCON 与 C# 联合编程显示测量结果,最后与影像测量仪的测量结果进行对比分析。实验结果表明:该检测系统的测量精度可达 0.08 mm,满足测量精度要求;法兰检测时间为 1.2 s,与传统人工检测相比,检测效率提高 70%,可应用于实际生产现场。

关键词: 机器视觉;汽车管件法兰;HALCON;尺寸检测

中图分类号: TP391.4;TG806 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.99

Automobile pipe flange size detection system based on machine vision

Zhao Fengsheng Yuan Haibing Wu Jun Xia Lei

(School of Mechanical Engineering, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, China)

Abstract: Aiming at the problems of low efficiency and high error detection rate in the traditional manual sampling measurement of automobile pipe flange, a measurement system of automobile pipe flange size based on machine vision was developed to improve the detection efficiency and measurement accuracy. Use software HALCON of camera calibration, image using median filter to test to deal with the noise, then method of gray-scale image enhancement, complete the image preprocessing, image using Canny operator after the subpixel edge detection, using the least squares fitting to the extraction of subpixel edge information get continuous aperture outline, the flange end face size was obtained, and the measurement results were displayed through HALCON and C# joint programming. Finally, the measurement results were compared with those of image measuring instrument. The experimental results show that the measurement accuracy of the system can reach 0.08 mm, which meets the requirements of measurement accuracy. Flange detection time is 1.2 s, compared with the traditional manual detection, detection efficiency is increased by 70%, can be applied to the actual production site.

Keywords: machine vision; automobile pipe flange; HALCON; size detection

0 引言

目前企业中针对法兰的尺寸检测主要依靠检具或量具进行人工抽检,不仅检测效率低,而且误检率高,无法完全保证产品质量,影响汽车整车安全。

针对上述问题,国内外学者进行了大量研究。刘善江^[1]发明了一种用于检验法兰中心距是否合格的检具,能够检测出法兰孔中心距有无偏移和法兰孔椭圆度,但检测效率较低;郝孟娟等^[2]利用机器视觉设计了铁塔构件制孔在线检测系统,通过 LabVIEW 软件对采集的图像依次进

行数字图像预处理、特征提取、尺寸图像目标识别等操作,但测量精度较低;谢俊等^[3]利用机器视觉对孔类零件进行尺寸检测,采用中值滤波去除椒盐噪声,使用 Canny 算子进行边缘检测,去除高斯噪声,最后调用 Open eVision 图像处理软件进行尺寸测量,但由于金属零件表面反光,该方法所用环形光源调节不当会影响图像质量,产生误差。Huang 等^[4]利用双目视觉和动态局部平面相结合的方法测量孔半径和孔间距,提出了一种基于椭圆带收缩的倒角内边缘提取方法和一种基于冗余测量数据的自适应权值优化计算方法,以提高测量精度,但硬件成本较高。

收稿日期:2022-06-28

* 基金项目:教育部产学研合作协同育人项目(201902016046,201902118034)、十堰市科学技术研究指导项目(16Y97)资助

本文利用机器视觉对汽车管件法兰的孔径与孔中心距进行测量,使用背光源作为检测部分的照明方式突显法兰孔的边缘轮廓,通过亚像素边缘检测算法与最小二乘法相结合的方法拟合法兰孔,最后通过 HALCON 与 C# 联合编程创建界面显示测量结果,实现了从图像采集到测量结果显示的集成。该系统提高了测量精度,弥补了传统人工检测的诸多不足,降低成本的同时也提高了检测效率,满足实际生产现场在线检测要求。

1 法兰尺寸检测需求分析

汽车管件法兰通过紧固件连接回油管与增压器,实现连接的紧密性。法兰盘与紧固件的配合关系是孔轴配合,所以主要是针对法兰端面3个孔的尺寸进行检测。本文将紧固件的尺寸(轴的尺寸)视为满足标准尺寸公差,当孔径检测尺寸满足标准尺寸公差的规定范围时,认定孔的尺寸合格,即法兰端面尺寸检测合格。

实际生产现场要求法兰测量精度不超过 0.10 mm,检测时间 5 s 以内。法兰端面几何信息示意图如图 1 所示。

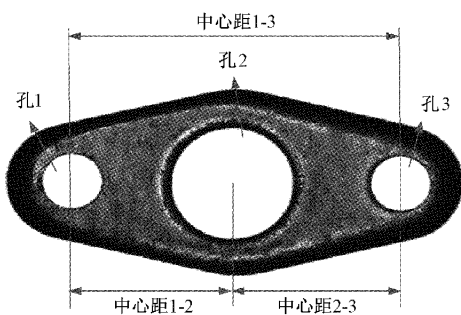


图1 法兰几何信息示意图

法兰端面上的3个孔自左向右记为孔1、孔2、孔3,测量参数包括的孔1、孔2、孔3的直径,孔1和孔2的中心距(记为中心距1-2),孔2和孔3的中心距(记为中心距2-3),孔1和孔3的中心距(记为中心距1-3)。根据图2所示的法兰端面尺寸标注信息,则法兰端面孔径的尺寸要求如表1所示。由于图中没有标注法兰端面孔中心距的尺寸,技术要求中说明未注公差按 GB/T1804-2000C 级执行^[5],则法兰端面孔中心距的尺寸要求如表2所示。

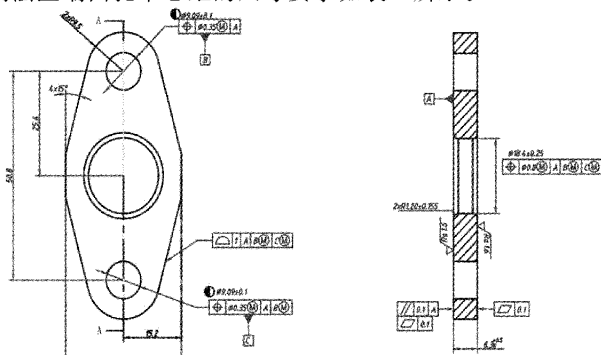


图2 法兰端面尺寸标注信息

表1 法兰端面孔径的尺寸要求

技术要求	直径/mm
孔1	$\Phi 9.09 \pm 0.10$
孔2	$\Phi 18.40 \pm 0.25$
孔3	$\Phi 9.09 \pm 0.10$

表2 法兰端面中心距的尺寸要求

技术要求	中心距/mm
中心距1-2	25.40 ± 0.50
中心距2-3	25.40 ± 0.50
中心距1-3	50.80 ± 0.80

2 检测系统搭建

2.1 硬件选型

1) 工业相机

目前工业相机依据芯片的类型可以分为两种:CCD相机和CMOS相机。本文的检测对象法兰为易反光金属材料,为了提高边缘检测精度,克服反光造成的影响,需要降低拍摄对象的对比度,为此选用更适合低对比度场景的CCD相机^[6]。

由法兰端面孔径尺寸误差可知,像素当量应当小于 0.1 mm/pixel;法兰的最大截面尺寸为 60 mm,考虑到形状误差等因素,法兰最小成像视场(field of view, FOV)区域取 80 mm×80 mm,根据式(1)、(2)可计算纵横方向最小分辨率:

$$R_{h\min} = \frac{FOV_{h\max}}{S_h} \quad (1)$$

$$R_{v\min} = \frac{FOV_{v\max}}{S_v} \quad (2)$$

式中: $R_{h\min}$ 、 $R_{v\min}$ 分别为纵横方向上的最小分辨率, $FOV_{h\max}$ 、 $FOV_{v\max}$ 分别为纵横方向上的最大视场, S_h 、 S_v 分别为纵横方向上单个像素的最大尺寸。将参数带入式(3)、(4)后计算可得:

$$R_{h\min} = \frac{80}{0.1} = 800 \quad (3)$$

$$R_{v\min} = \frac{80}{0.1} = 800 \quad (4)$$

由上述计算结果可得,适合本实验的相机最小分辨率为 800×800。为此本文选用型号为 MV-EM120C 的 CCD 工业相机,分辨率为 1 280 pixel×960 pixel,像素尺寸为 3.75 μm×3.75 μm。

2) 镜头

根据式(5)可以计算视场(FOV)的大小:

$$FOV = \frac{S}{f} \times WD \quad (5)$$

式中: S 为传感器的尺寸; f 为焦距; WD 为工作距离。

由工业相机参数可计算出焦距 f 在 22.5~24 mm 之间。为此本文选用 AFT-2514MP 工业镜头,分辨率为 1 001 p/mm(2 MP),焦距 25 mm。

3)光源

汽车管件法兰为金属材质,在光线照射下极易出现反光,使得成像时法兰表面特征不够清晰。此外,法兰的孔 2 上有倒角,需要垂直的光线透过孔,才能减小孔的成像误差。为此,本文选用 LED 环形光源用于标定板标定过程中的照明方式,选用 LED 背光源作为汽车管件法兰尺寸检测部分的照明方式。

2.2 检测系统硬件设计

检测系统硬件部分主要由计算机、工业相机、镜头、背光源、环形光源以及测试台架组成。检测流程为:工业相机采集法兰端面图像传给计算机,计算机对采集的图像进行处理,并显示测量结果。检测系统如图 3 所示,硬件组成如表 3 所示。

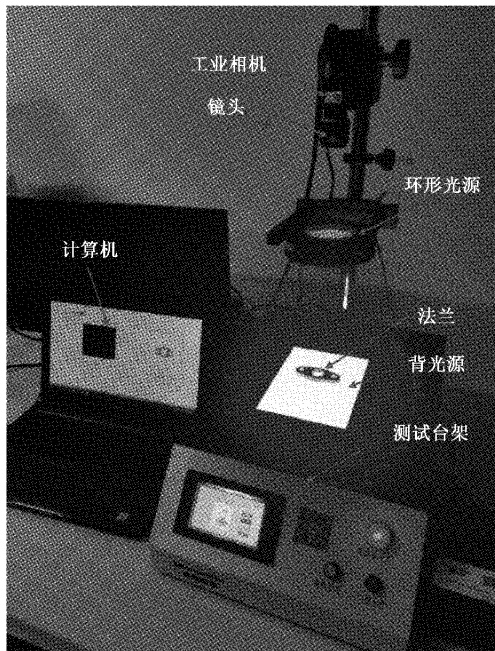


图 3 法兰尺寸检测系统

表 3 图像采集系统的硬件组成

硬件组成	型号
测试台架	MV-BR500
工业相机	MV-EM120C
镜头	AFT-2514MP
环形光源	AFT-RL12068W
背光源	MV-BL28X23-V
计算机	Windows10-16G-AMD Ryzen 5 4600H

2.3 检测系统软件设计

软件则采用 HALCON 12.0 与 C# 2022 联合编程的

方式进行。HALCON 通过其自带程序设计界面 HDevelop,可直接输出 C、C++、C# 等主流程序语言,被广泛的应用于尺寸检测、模板匹配检测等^[7]。HALCON 软件界面如图 4 所示。

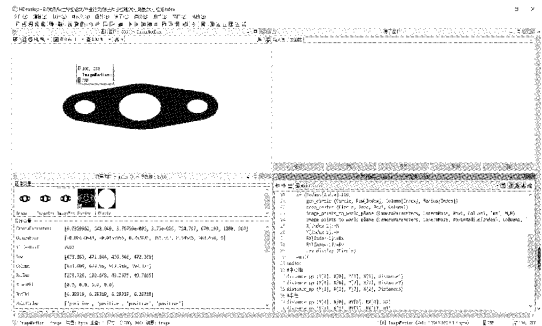


图 4 HALCON 软件界面

3 汽车管件法兰尺寸检测

3.1 相机标定

HALCON 的相机标定首先需要制作标定板,标定板的尺寸需要根据相机的视场大小进行选择,然后拍摄多张标定板图像进行标定,确定相机的内外参数^[8]。

1)标定板的制作

通过调用 HALCON 中的 gen_caltab() 算子设定标定板的尺寸,由于采集标定图像时标定板的尺寸需要满足相机视场的 1/3~1/2 位置范围,因此本实验所用标定板尺寸规格如表 4 所示^[9]。标定板图像如图 5 所示。

表 4 标定板尺寸规格参数

外形尺寸/ mm	阵列	直径/ mm	中心距/ mm	精度/ mm
50×50	7×7	3.125	6.25	±0.01

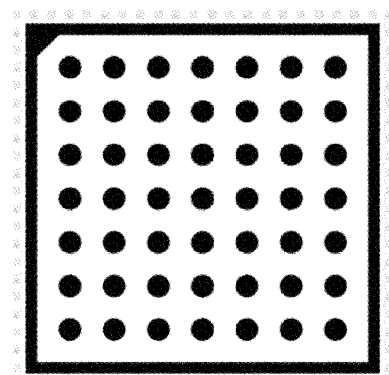


图 5 标定板图像

2)采集标定图像

本文通过调用 HALCON 中标定助手进行标定,首先对图像进行在线采集,在采集过程中,需设定一张图像为参考位姿,该图像应当处于相机视场的正中央位置;其次将检

测出“对比度太低”、“标志点提取失败”等品质问题的图像删除,重新采集,直至采集的图像无品质问题后完成标定程序,最终得到标定结果,即相机的内外参数^[10]。部分标定图像如图6所示,相机内部参数如表5所示,相机外部参数如表6所示。

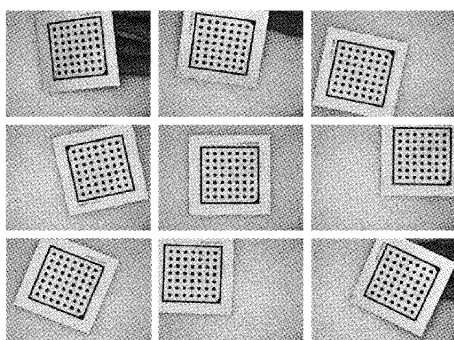


图6 部分标定图像

表5 相机内部参数

相机内参	标定值	相机内参	标定值
焦距 f/mm	25.136 6	单个像元的高 $S_y/\mu\text{m}$	3.75
畸变 k	-88.233 9	中心点 x 坐标 C_x/pixel	680.963
单个像元的高 $S_x/\mu\text{m}$	3.75	中心点 y 坐标 C_y/pixel	490.345

表6 相机外部参数

相机外参	标定值	相机外参	标定值
平移矩阵		旋转矩阵	
$\Delta x/\text{mm}$	-4.116 43	$\alpha/(\text{°})$	359.745
$\Delta y/\text{mm}$	-2.868 74	$\theta/(\text{°})$	359.547
$\Delta z/\text{mm}$	641.054	$\gamma/(\text{°})$	179.874

3.2 图像预处理

汽车管件法兰在图像采集过程中,图像效果除了受相机、镜头等自身因素影响外,还会被外界设备、环境等噪声因素影响,因此对图像进行预处理是实现视觉检测的必要环节,包括图像滤波、平滑、锐化等方式^[11-13]。

1) 图像滤波

本文通过实验对同一张汽车管件法兰图像分别进行均值、高斯和中值滤波,图像滤波对比如图7所示,通过对比以下三种图像滤波方法的实际效果,可以看出中值滤波在降低噪声的过程中没有导致图像模糊,法兰的边缘特征也比均值和高斯滤波的效果更加清晰。因此选择中值滤波对图像进行去噪处理。

2) 图像增强

由于成像系统的限制或噪声的影响,获取的图像往往因对比度不足、动态范围小等因素导致效果不佳。将经过

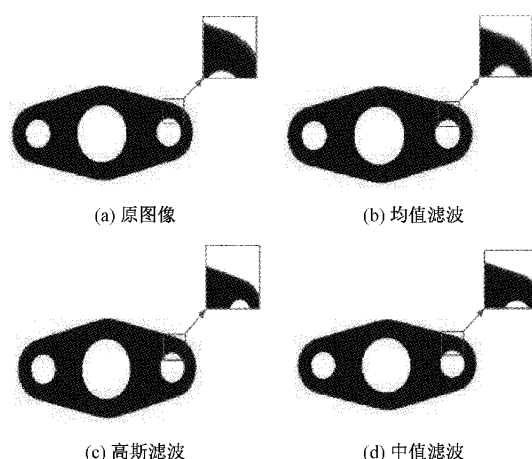


图7 不同图像滤波方法对比图

中值滤波的图像进行灰度化处理,灰度化处理前后图像对比如图8所示。通过对比可知,灰度化处理,法兰图像动态范围增大,对比度得到扩展,法兰轮廓变得更加清晰,减少图像后续处理时间。

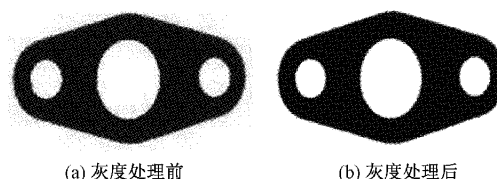


图8 灰度化处理前后对比图

3.3 边缘提取

边缘提取实质是通过边缘检测算法求出法兰孔的轮廓线,基本步骤如图9所示^[14-15]。

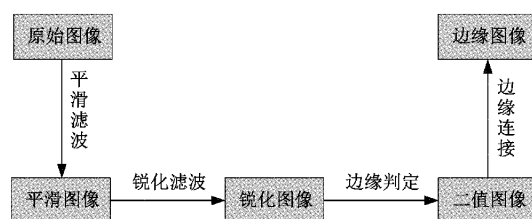
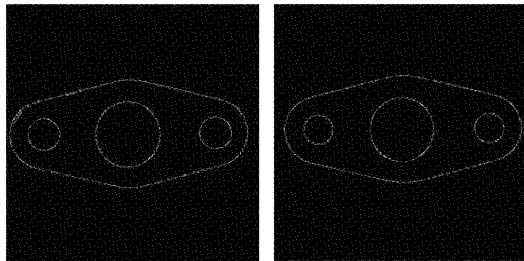


图9 边缘检测基本步骤

由于像素级边缘提取算子导致图像边缘信息丢失严重,不能满足本文检测要求,而通过提高相机分辨率来满足检测精度,在硬件成本上会增加几十倍,因此考虑采用亚像素级的边缘提取方法来提升检测精度,弥补硬件本身的不足。

亚像素级边缘提取实质是将构成图像的像素化分为更小的像素单位,从而提高图像的分辨率和精度。本文采用了HALCON软件现有的亚像素级边缘检测算子——edges_sub_pix算子,首先该算子可以选用不同的边缘检测算子来提取汽车管件法兰的像素级边缘,然后利用像素级边缘通过二次曲线拟合得到亚像素级边缘。选取一阶导数

边缘检测算子——Sobel 算子^[16]和二阶导数边缘检测算子——Canny 算子^[17]提取汽车管件法兰的像素级边缘进行对比分析,效果对比效果如图 10 所示。



(a) Sobel算子边缘提取 (b) Canny算子边缘提取

图 10 Sobel 算子和 Canny 算子边缘提取对比效果

由图 10(a)可知,Sobel 算子边缘提取后的图像中存在很多伪边缘,属于真正边缘的边缘点未连接形成连续完整的边缘,而 Canny 算子边缘提取的图像中边缘信息保留更加完整,边缘质量更高,在实现边缘检测的同时又能很好的抑制噪声的影响,总体的边缘提取效果要优于前者。因此,本文选用 Canny 算子的边缘提取算法对汽车管件法兰端面图像进行亚像素边缘提取。

3.4 圆拟合

本文采用最小二乘法对提取的亚像素边缘信息进行拟合得到连续的圆轮廓。最小二乘法作为一种常被用来测量圆形图像的视觉测量方法,具有不受图像自身质量以及由光线干扰导致边缘缺失等因素影响的优点,其主要原理是使误差的平方最小化以及求得一组最为逼近真实轮廓的亚像素点的方式,实现圆形图像轮廓的亚像素级拟合。最小二乘法的算法原理主要分为以下几点:

1)假设待拟合圆的圆心坐标和半径分别为 (x_c, y_c) , R , 圆上任意一点坐标为 (x, y) , 最小二乘法拟合圆的曲线方程可以表示为:

$$f(x, y) = (x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 - R^2 = 0 \quad (6)$$

2)假设经过亚像素边缘提取后的边缘点为 (x_i, y_i) , 边缘点到圆心的距离可以表示为:

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2} \quad (7)$$

3)将圆形图像轮廓的边缘点进行优化残差,可表示为:

$$Q = \sum_{i=0}^n (d_i - r)^2 \quad (8)$$

根据最小二乘原理,当残差最小时,解得的圆心坐标和半径为拟合的最优结果。

3.5 测量输出界面

利用相机标定获得的相机内外参数,将拟合圆后图像上的像素坐标转换为世界坐标系,得到孔径和孔中心距的实际测量数据,结果由 C# 界面输出,测量输出界面如图 11 所示。

4 实验结果分析

为了进一步验证测量误差值,采用天准公司型号为

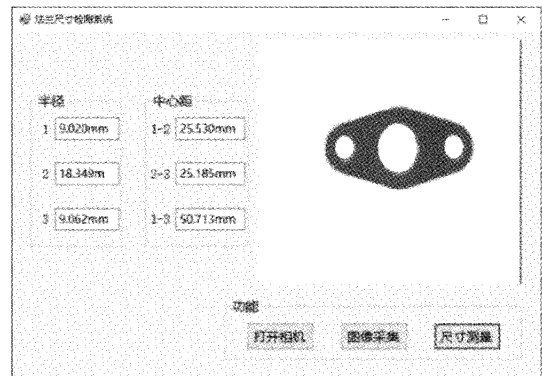


图 11 测量输出界面

VME222 的经济型影像测量仪进行对比测量。该型号的影像测量仪安装有三轴的高精密直线导轨、 $1.0 \mu\text{m}$ 工业级光栅尺以及 4 环 8 区环形落射光源,适用于高精度的二维基本尺寸检测。影像测量仪如图 12 所示。影像测量仪各项技术参数如表 7 所示。



图 12 VME222 经济型影像测量仪

表 7 影像测量仪各项技术参数

型号	VME222
测量行程/mm	200×200×200
测量精度/mm	0.02
外形尺寸/mm	1 040×740×1 620
重量/kg	240

影像测量仪测量汽车管件法兰尺寸的过程如图 13 所示。图 13(a)为影像测量仪自动对焦汽车管件法兰的过程,图 13(b)为影像测量仪测量汽车管件法兰尺寸的软件界面。

为了评定检测系统性能,本文针对法兰尺寸进行重复测量精度评估,对同一件几何尺寸合格的汽车管件法兰,分别采用本文方法和影像测量仪测量其孔径以及孔中心距 5 组,每组 10 次计算平均值,每次测量时任意改变法兰的摆

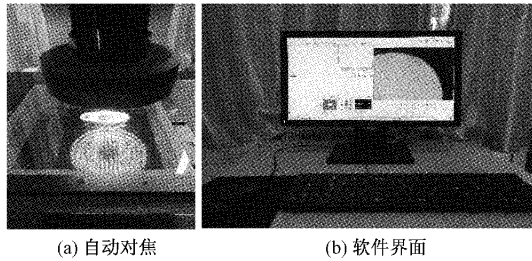


图13 影像测量仪测量展示图

放角度、位置,测量结果如表8~13所示。

表8 孔1直径的测量结果 mm

组次	实验测量值	影像仪测量值	误差	重复测量误差
1	9.020 0	9.008 1	0.011 9	
2	9.039 0	9.014 3	0.024 7	
3	9.026 0	9.011 5	0.014 5	0.031 0
4	9.045 0	9.009 2	0.035 8	
5	9.051 0	9.010 5	0.040 5	
均值	9.036 2	9.010 7	0.025 3	

表9 孔2直径的测量结果 mm

组次	实验测量值	影像仪测量值	误差	重复测量误差
1	18.349 0	18.295 0	0.054 0	
2	18.332 0	18.309 2	0.022 8	
3	18.351 0	18.310 1	0.040 9	0.036 0
4	18.315 0	18.293 6	0.021 4	
5	18.339 0	18.310 6	0.028 4	
均值	18.337 2	18.303 7	0.033 5	

表10 孔3直径的测量结果 mm

组次	实验测量值	影像仪测量值	误差	重复测量误差
1	9.062 0	9.051 3	0.010 7	
2	9.098 0	9.049 8	0.048 2	
3	9.087 0	9.054 0	0.033 0	0.036 0
4	9.079 0	9.061 5	0.017 5	
5	9.084 0	9.056 1	0.027 9	
均值	9.082 0	9.054 5	0.027 5	

由表8~13可知:法兰孔径与中心距重复测量5组的误差与重复测量误差如表14所示。

由误差均值与重复测量误差可说明在测量小孔径和小中心距时测量误差较为平稳,在测量大孔径和大中心距时测量误差会随之变大,测量结果整体表现比较稳定。根据表中各项误差可知,最大误差为0.079 2 mm,因此法兰端

表11 中心距1-2的测量结果 mm

组次	实验测量值	影像仪测量值	误差	重复测量误差
1	25.530 0	25.497 4	0.032 6	
2	25.526 0	25.510 7	0.015 3	
3	25.504 0	25.492 8	0.012 2	0.033 0
4	25.529 0	25.509 5	0.019 5	
5	25.537 0	25.496 1	0.040 9	
均值	25.525 2	25.502 9	0.022 3	

表12 中心距2-3的测量结果 mm

组次	实验测量值	影像仪测量值	误差	重复测量误差
1	25.185 0	25.156 0	0.029 0	
2	25.154 0	25.140 1	0.013 9	
3	25.177 0	25.147 6	0.029 4	0.035 0
4	25.173 0	25.152 3	0.020 7	
5	25.188 0	25.149 7	0.038 3	
均值	25.175 4	25.149 1	0.026 3	

表13 中心距1-3的测量结果 mm

组次	实验测量值	影像仪测量值	误差	重复测量误差
1	50.713 0	50.650 6	0.062 4	
2	50.678 0	50.648 9	0.029 1	
3	50.679 0	50.638 4	0.040 6	0.045 0
4	50.700 0	50.659 7	0.040 3	
5	50.723 0	50.643 8	0.079 2	
均值	50.698 6	50.648 3	0.050 3	

表14 误差与重复测量误差 mm

名称	最大误差	误差平均值	重复测量误差
孔1	0.040 5	0.025 3	0.031 0
孔2	0.054 0	0.033 5	0.036 0
孔3	0.048 2	0.027 5	0.036 0
中心距1-2	0.040 9	0.022 3	0.033 0
中心距2-3	0.038 3	0.026 3	0.035 0
中心距1-3	0.079 2	0.050 3	0.045 0

面尺寸检测系统的测量精度可达0.08 mm,能够满足实际生产现场0.10 mm的测量精度需求。

通过生产现场实际测试,本系统检测100个法兰用时120 s,平均检测时间为1.2 s,与传统人工检测4 s相比,检测效率提高70%,满足实际生产现场5 s的检测时间要求。

5 结 论

本文开发了一个基于机器视觉的汽车管件法兰尺寸检测系统,采用背光源代替环形光源的照明方式,减小孔的成像误差,提高图像采集质量,利用 HALCON 软件对图像进行预处理,使用 Canny 边缘检测算子提取亚像素边缘,通过最小二乘法拟合边缘图像,获取法兰端面的孔径和孔中心距尺寸,并使用 C# 联合 HALCON 库创建实时检测界面,实现对汽车管件法兰的在线检测。最后,以影像测量仪的测量结果作为实际值与法兰尺寸检测系统的测量结果进行对比分析,实验结果表明,该系统测量精度可达 0.08 mm,平均检测时间为 1.2 s,满足实际生产现场检测要求,有效避免传统人工误测现象,提高了法兰检测效率与测量精度,大幅降低人工成本。通过生产现场实际测试可知,该系统满足工业生产与处理上的各项要求,可应用于实际生产现场进行在线检测。

参考文献

- [1] 刘善江. 一种法兰孔中心距检具 [P]. 安徽: CN206146352U, 2017-05-03.
- [2] 郝孟娟,董桂西,高立鹏,等. 铁塔构件制孔尺寸机器视觉在线检测系统设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(2):123-127,131.
- [3] 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.
- [4] HUANG J H, QI M W, WANG Z, et al. High precision measurement for the chamfered hole radius and spacing of a large-size workpiece based on binocular vision combined with plane dynamic adjustment [J]. Applied Optics, 2021, 60(29): 9232-9240.
- [5] 国家机械工业局. 一般公差,未注公差的线性和角度尺寸的公差:GB/T 1804-2000 [S]. 国家质量技术监督局, 2000.
- [6] 林晓平,王冠,陈学灵,等. 46MnVS5 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(4): 119-127.
- [7] 杨桂华,唐卫卫,戴志诚,等. 基于机器视觉的芯片字符识别系统[J]. 电子测量技术, 2022, 45(5):105-110.
- [8] ZHANG M C, SHI H, YU Y, et al. A computer vision based conveyor deviation detection system [J]. Applied Sciences, 2020, 10(7), DOI:10.3390/app 10072402.
- [9] 黄刚. 双目视觉系统实现羽毛球实时跟踪[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(6):117-123.
- [10] XIAO G F, LI Y T, XIA Q X, et al. Research on the on-line dimensional accuracy measurement method of conical spun workpieces based on machine vision technology[J]. Measurement, 2019, 148(C):106881.
- [11] 李晋鑫,沙玲. 基于机器视觉的内丝接头尺寸测量系统设计[J]. 电子测量技术, 2021, 44(24):98-104.
- [12] 周鼎贺,宋志峰,林富生,等. 基于机器视觉的汽车零件涂装缺陷检测方法[J]. 电镀与涂饰, 2021, 40(16): 1292-1300.
- [13] HOU B, ZHANG C P, YANG S B. Computer vision tool-setting system of numerical control machine tool [J]. Sensors, 2020, 20(18):5302.
- [14] 韩克堃,胡桂川,任静,等. 图像处理在风电叶片法兰端面特征尺寸检测中的应用[J]. 计算机科学, 2019, 46(S1):562-565.
- [15] YANG G W, XU F C. Research and analysis of image edge detection algorithm Based on the MATLAB [J]. Procedia Engineering, 2011, 15(C): 1313-1318.
- [16] 祁欣,陈剑锋,罗伟林. 图像预处理算法的 FPGA 实现[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(2):102-107.
- [17] 黄梦涛,连一鑫. 基于改进 Canny 算子的锂电池极片表面缺陷检测[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(10):199-209.

作者简介

赵凤胜, 硕士研究生, 主要研究方向为零部件测量与控制。

E-mail:202111040@huat.edu.cn

袁海兵(通信作者), 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为汽车零部件测量与控制。

E-mail:yuanhb_jx@huat.edu.cn