

基于单目相机的光热支架连接板双孔形位检测方法

程浩刚, 龚俊, 宁会峰, 张雪峰, 王一超

兰州理工大学机电工程学院

摘要: 针对槽式太阳能集热支架镜面连接板上的双孔进行形位检测, 提出了一种基于单目相机检测方法。该方法利用单目相机分别对镜面连接板上的两个孔进行正位拍摄, 并分别提取孔上下边缘的轮廓及圆心坐标, 求出孔的位置度误差, 利用“近大远小”的透视原理实现对孔的倾斜度检测。对于正位拍摄中相机光轴与孔心不重合引起的系统误差, 利用相机拍摄标准块以确定孔心坐标标准块的标定方法, 对加工孔的坐标进行矫正。

关键词: 单目相机; 透视原理; 双孔零件; 图像处理; 形位检测

中图分类号: TG806; TG839; TH741 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1000-7008.2021.02.022

Method for Detecting Shape and Position of Double Holes of Photothermal Support Connecting Plate Based on Monocular Camera

Cheng Haogang, Gong Jun, Ning Huifeng, Zhang Xuefeng, Wang Yichao

Abstract: Aimed at the shape and position detection of the double holes in the mirror connecting plate of the trough-type solar collector support, a detection method based on monocular camera is proposed. In this method, the monocular camera is first used to shoot the two holes in the mirror connecting plate in a positive position, and then the contour and the center coordinates of the upper and lower edges of the holes are extracted respectively, and the position error of the holes is calculated. In the meantime, the perspective principle of near big and far small is also used to detect the inclination of the hole. For the system error caused by the inconsistency between the optical axis of the camera and the center of the hole, the method of standard block calibration to determine the coordinates of the hole center through camera shooting is used to correct the coordinates of the machined hole.

Keywords: monocular camera; perspective principle; double hole part; image processing; shape and position detection

1 引言

目前, 发展可持续利用的新型能源成为国家的发展战略^[1], 而太阳能热发电以其电能质量高、可储能和绿色无污染等优点逐渐成为各个国家重点发展的新型产业。其中, 槽式太阳能热发电商业化程度最高、应用最广泛^[2]。

聚光器由聚光镜(反射镜)和支架两部分组成。槽式太阳能集热支架连接孔位于连接板上, 支架与反射镜之间采用螺栓连接。因此, 支架上连接孔的精度对于防止反射镜变形、延长反射镜使用寿命、降低制造成本起到了重要作用。

传统的孔组位置度检验方式是用验棒进行接触式检测, 但该方式测量过程复杂、效率低、易对检具造成磨损且只能进行定性检测。

随着光学、机械、电子和计算机科学等学科的发展和交叉融合, 逐渐衍生出非接触检测的新型测量方式。目前, 对于大中型零件上孔组的位置度检测主要有以下三种方法: 三坐标测量机检测、三维激光

扫描、以 CCD 相机作为主要传感器的视觉检测。

三坐标测量机的优点是通用性好、精度高, 但存在效率较低、价格昂贵等问题, 且测量精度对产品的加工精度有很大影响。沙眼、毛刺等缺陷均会对测量产生较大影响, 而且往往使测量具有不可达性。

三维激光扫描仪可以提供待测工件表面的三维点云数据, 但对于大中型构件, 只能采用分片扫描的方法。该方法费时费力, 效率较低, 设备价格也相对昂贵^[3-7]。

采用视觉的方法对孔进行三维检测时, 国内外大多采用以下两种方法: 一种是利用双目相机或者两台以上的摄像机从不同的角度进行拍摄, 然后根据拍摄角度的不同对待测零件孔进行三维建模, 从而达到三维检测的目的^[8], 但该方法需要对相机进行多次标定, 计算量较大, 且图像处理的算法比较复杂; 另一种是通过引导机器人手臂将内窥镜可靠地插入钻孔中, 以便进行孔内表面检查^[9], 但该方法对机械臂的精度要求较高, 且机械臂运行的轨迹算法较复杂。

在支架实际装配过程中, 支架连接板上两个孔

的中心距、孔的位置度误差以及倾斜度误差决定了支架能否与镜面和扭矩管装配。孔直径不作为本文的必检项目。针对孔的位置度和倾斜度误差,本文提出采用单目相机的方法,对集热支架连接板上的孔进行形位检测。该方法计算简单,算法相对容易,只需一次标定即可实现。在用相机对孔进行正位拍摄和进行位置度检测时,不可避免地会引入因无法保证相机轴心和孔心重合而引起的系统误差,针对该问题,本文也给出了较好的解决办法。

2 检测原理

2.1 检测对象

测量对象为槽式太阳能热发电集热支架连接板,其集热支架见图1。图中,1和2为扭矩管连接板,3~8为镜面连接板。本文提出了一种全新的基于透视现象的厚板零件孔三维检测方法,利用单目相机对单块板上镜面连接板的孔进行非接触检测。

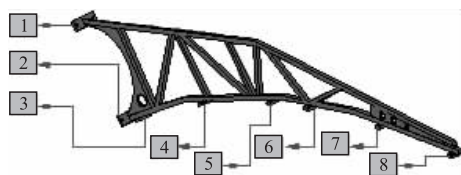


图1 集热支架

由图2可知,在加工过程中镜面连接板孔用 $\phi 8.5$ 的钻头进行加工,而在装配时采用 $\phi 8$ 的螺栓进行装配。因此,只要加工孔圆心在以理想孔的孔心为圆心且以 0.5mm 为半径的圆中运动,即可认为孔的位置度误差在允许范围内。允许孔的倾斜度偏差为 $\theta = \arctan \frac{1}{20} = 2.863^\circ$ 。

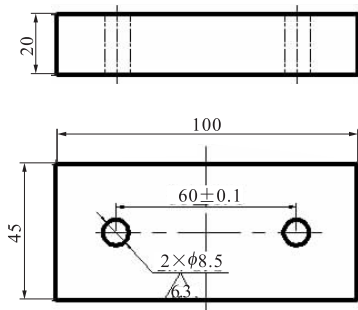


图2 镜面连接板

2.2 透视原理

对于孔的倾斜度偏差,本文提出的检测原理是基于透视现象。当人眼在一个固定位置处观察一个通孔时,由于孔的上边缘离眼睛比较近,而下边缘离眼睛比较远,会观察到一大一小两个圆,这是一种

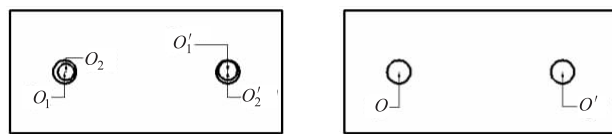
“近大远小”的透视现象。相机的工作原理与人眼相同,因此在用相机拍摄一个通孔时也会观察到这种现象,同时应注意到板厚对检测的影响。厚板零件由于“近大远小”现象较明显,可以用普通工业相机进行检测。由于薄板零件厚度较小,分辨率较低的相机很难区分上下两个圆的轮廓,即使能拍摄清楚,但因厚度较小,两个轮廓非常接近而很难提取。而且,对于薄板零件上打孔,一般只考虑其位置度误差,而不考虑其倾斜度误差。对于厚板零件,尤其是精度较高的厚板零件,不仅需要考虑其位置度误差,还需要考虑其倾斜度误差。本文对厚板零件孔的定义为 $L/d > 1$,其中, L 为孔的长度, d 为孔的直径^[10]。

利用上述原理可以在二维平面上实现对孔的三维检测。假设相机是理想的正位拍摄,如果孔的倾斜度为 0° ,拍摄到的图片为一大一小的同心圆;如果孔的倾斜度不为 0° ,则孔的上边缘为圆,下边缘由于圆心与相机光轴不重合,显示出来的轮廓是一个接近于正圆的椭圆,但二者的圆心坐标相同,这时通过椭圆拟合函数^[11]拟合出孔上下边缘,确定出圆心坐标,就能求出倾斜度。

2.3 理论检测模型

本文分两个步骤对双孔进行检测:

①平面位置度误差检测。与大多数孔的二维检测方式类似,首先拍摄清晰的图片,然后进行图像处理,提取出孔的上下边缘轮廓以及上边缘轮廓(以下称为大圆)的圆心坐标 $O_1(x_1, y_1)$,并与理想孔的圆心坐标作对比,见图3。通过圆心坐标对比可求出孔的位置度偏差,并计算此偏差是否在误差允许的范围。



(a) 加工孔的二维模型

(b) 理想孔的二维模型

图3 二维模型

②倾斜度误差检测。提取下边缘轮廓(以下称为小圆)圆心坐标 $O_2(x_2, y_2)$,并通过大小圆心的坐标偏差可以计算出孔的倾斜度,见图4。

孔的倾斜度计算如下

$$\Delta r = |O_1 O_2| = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (1)$$

$$\theta = \arctan(\Delta r/h) \quad (2)$$

式中, h 为板厚; Δr 为大小圆心之间的偏差。

2.4 实际检测模型分析

在实际检测过程中,很难保证相机的光轴和理

想孔的孔心重合,由此带来的误差属于测量系统误差。由于本文假定相机的光心在相机的几何中心(实际上相机的光心不一定在相机的几何中心),由此造成理想孔的孔心坐标与加工孔的孔心坐标的偏差较大。由于相机位置固定,在相机完成标定后,用标准块进行标定,就可以不考虑相机的光心是否与理想孔的孔心重合以及相机的光心是否在相机的几何中心。假设标定后测得标准块的左孔心坐标为 (x_{obj}, y_{obj}) , 右孔心坐标为, 实际测得左孔心坐标为 $O_1(x_1, y_1)$, 右孔心坐标为 $O_1'(x_1', y_1')$, 可用标准块的实际坐标矫正实际测量误差。

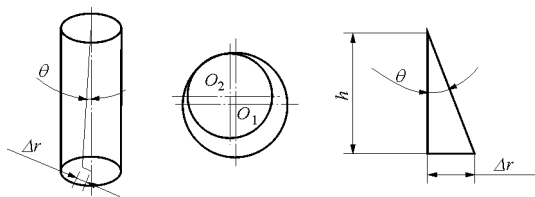


图 4 倾斜度测量模型

3 试验设计

3.1 相机标定

利用车床的导轨以及溜板箱的进给系统搭建试验平台,对扭矩管连接板上的两个孔进行三维检测。对相机进行标定,求出相机的内外参数,之后再行系统之间的标定。标定矩阵如下

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dX} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dY} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} a_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & a_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} [R|T] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 M_w = M X_w \quad (3)$$

式中, $a_x = f/dX$, 为 u 轴上尺度因子; $a_y = f/dY$, 为 v 轴上尺度因子; M 为 3×3 矩阵; M_1 为内参数矩阵; M_2 为外参数矩阵^[12]。

3.2 试验过程

采用 U500C 工业相机,其像素为 500 万,测量视场为 $120\text{mm} \times 90\text{mm}$,测量精度为 0.05mm ,满足检测精度的要求。为保证相机光轴与理想孔的孔心重合,进行如下标定:在平台上进行划线,以确定理想孔心的位置,并将量块工作面的底边与该线重合;将直角尺靠在量块上,使相机的侧边与直角尺接触,并以这条线为基准,假定相机的光心为其几何中心;在相机的相对位置确

定后固定相机,并用微型水平仪保证相机的成像平面与工件表面平行;利用车床溜板箱的进给系统移动相机,使相机光轴与理想孔的孔心重合;进行图片数据采集;然后再次移动溜板箱的进给系统,移动距离为两个孔心的中心距 60mm ;再次进行图片数据采集。测量平台见图 5。

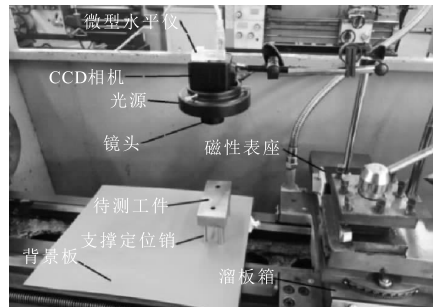


图 5 测量试验台

4 数据处理

图像处理流程见图 6。

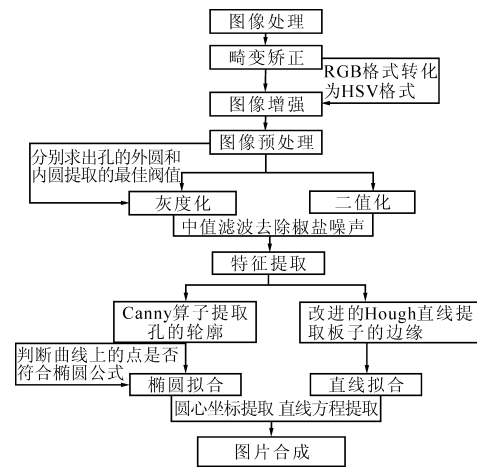
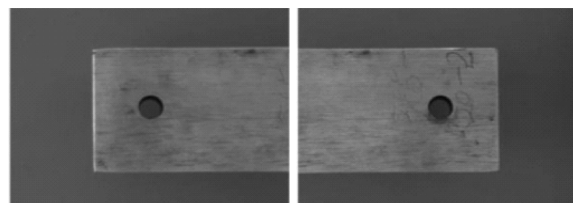


图 6 图像处理流程

4.1 图像预处理

利用相机标定得到的畸变系数对采集到的图片进行畸变校正,经过畸变校正后的图片见图 7。



(a)左孔 (b)右孔

图 7 畸变矫正后的图片

畸变矫正后再进行图像优化处理,可使图像更加清晰。为了方便图像处理,需要对采集的 RGB 格式图像进行转换,将其转换为 HSV 格式。

在实际工业检测中,大多数情况下现场环境较差,造成拍摄出的照片存在不均匀光照以及环境噪声干扰等现象。如果用自适应全局算法分割,则无法得到清晰的边缘。因为全局分割适用于呈现双峰直方图的灰度图像,而试验中采集到的图像灰度直方图并不是标准的双峰,图像中存在噪声,对其分割无法达到理想精度。在本试验过程中,图片的背景灰度分布一致。为了得到更高的精度,可采取人工试验方法进行阈值分割。在进行图像预处理时,发现图像中存在椒盐噪声,见图8。

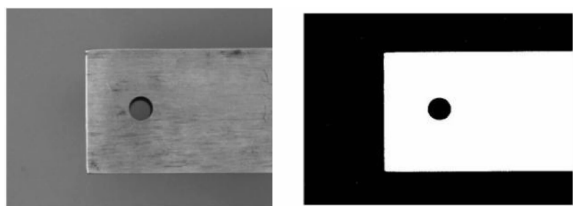
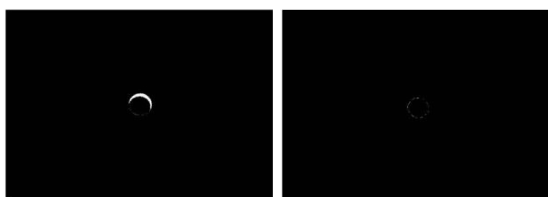


图8 图像预处理

由于中值滤波能很好地去掉椒盐噪声,因此对图像进行中值滤波以去除噪声^[13]。

4.2 特征提取

利用 Canny 算子^[14]进行边缘提取,可提取出孔的轮廓(见图9),并对孔进行更细化的提取。



(a) Canny 算子粗提取 (b) 孔的上边缘轮廓提取

图9 特征提取

利用改进的 Hough 变换^[15]进行直线提取,可提取出镜面连接板的三条直线。实际操作中,相机光心和理想孔的孔心极有可能不重合,因此拍摄出来的图像不是一个正圆。尤其在提取孔的下边缘时,由于孔可能发生倾斜,如果用圆的拟合函数进行拟合^[16],会有较大的误差。因此,采用椭圆拟合函数进行椭圆拟合,其中心思想是将提取出来的轮廓用椭圆公式进行判断,用符合椭圆公式最多的点拟合成一个圆,并求出其长轴、短轴以及圆心坐标。

单幅图像提取见图10。分别提取两幅图像孔的上下边缘,并求出其圆心和半径。由于相机仅在x方向上平移了一个中心距,可将提取的两幅图像特征放在同一个坐标系中。为方便展示,将左孔的理想孔心作为原点建立坐标系,在世界坐标系下最终的提取结果见图11。

5 加工孔质量评价及修正

(1) 检验标准

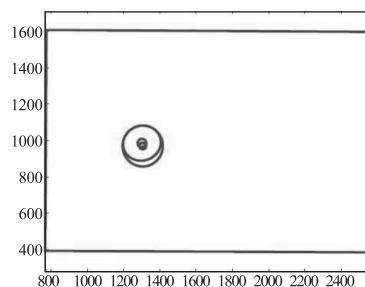


图10 像素坐标系下左孔的提取

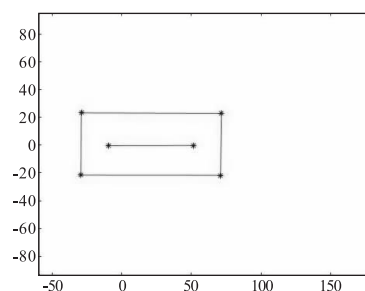


图11 最终提取结果

由图2可知,左侧理想孔的坐标为(0,0),直径为 $\phi 8.5\text{mm}$,深度 h 为20mm,右侧理想孔的坐标为(60,0),直径为 $\phi 8.5\text{mm}$,两孔的中心距为 $60 \pm 0.1\text{mm}$ 。经过图像处理提取的数据见表1。

表1 工件1,2提取的图片数据 (mm)

数据项	工件1	工件2
左侧外孔圆心坐标 O_1	(-9.361, -0.431)	(-10.870, -0.311)
左侧理想孔坐标 O	(0,0)	(0,0)
左侧内外孔距离 $ O_1 O_2 $	0.573	0.592
右侧外孔圆心坐标 O_2	(50.670, -0.314)	(49.420, -0.437)
右侧理想孔坐标 O'	(60,0)	(60,0)
右侧内外孔距离 $ O_1' O_2' $	0.674	0.595
圆心距 $ OO_1' $	60.035	60.290

将表1中数据代入式(2),得到工件1左孔的倾斜度 $\theta = 1.641^\circ$,右孔的倾斜度 $\theta = 1.929^\circ$ 。

同理得到工件2左孔的倾斜度 $\theta = 1.694^\circ$,右孔的倾斜度 $\theta = 1.704^\circ$ 。

(2) 误差分析

由于很难保证相机光轴与理想孔的孔心重合,使得造成理想孔的孔心坐标与加工孔的孔心坐标的偏差较大,因此需用标准块进行标定。经过标定,测得标准块的左孔心坐标为(-9.106, -0.402),右孔心坐标为(51.260, -0.061)。用标准块的实际坐标就可矫正实际测量误差。

(3) 误差矫正及质量评价

工件1的孔位置度偏差见表2。

表2 工件1的孔位置度偏差 (mm)

	x轴偏差	y轴偏差	径向偏差
左侧孔	9.361	0.431	9.371
左孔矫正	0.255	0.029	0.257
右侧孔	9.330	0.314	9.335
右孔矫正	0.224	0.253	0.338

由表2可知:经过矫正后,左侧孔的孔心位置度偏差为0.257mm,右侧孔的孔心位置度偏差为0.338mm,满足孔的平面位置度误差;左右孔的倾斜度误差均小于允许的最大倾斜度,满足孔的倾斜度要求;孔的中心距为60.035mm,满足中心距要求。因此,工件1加工合格。

工件2孔的位置度偏差见表3。

表3 工件2的孔位置度偏差 (mm)

	x轴偏差	y轴偏差	径向偏差
左侧孔	10.870	0.311	10.874
左孔矫正	1.764	0.091	1.766
右侧孔	10.580	0.437	10.589
右孔矫正	1.474	0.376	1.521

由表3可知:经过矫正后,左侧孔的孔心位置度偏差为1.766mm,右侧孔的孔心位置度偏差为1.521mm,不满足孔的平面位置度误差;左右孔的倾斜度误差均小于允许的最大倾斜度;孔的中心距为60.290mm,不满足中心距要求。因此,工件2加工不合格。

6 结语

本文提出用单目相机来检测镜面连接板上双孔的形位误差,也可用于其他厚板零件上的通孔检测。该方法检测原理简单易实现,且精度较高。相机只需要一次标定即可实现检测,且通过对标准板的标定,较好地解决了相机的光轴和孔心不重合引入的误差。相比采用多台相机以及机械臂带动内窥镜进行三维检测,该方法显著降低了计算难度和图像处理算法的复杂程度,对工程应用具有实际意义。

参考文献

- [1]朱卫东,任志远,向成兵. 清洁能源开发利用对于实现可持续发展的研究[J]. 中国战略新兴产业,2018(44):29.
- [2]顾煜炯,耿直,张晨,等. 聚光太阳能热发电系统关键技术研究综述[J]. 热力发电,2017,46(6):6-13.
- [3]张亚伟,王冬,陈度,等. 大型收获机械发动机孔组位置度误差在线检测方法[J]. 农业机械学报,2017,48(s1):71-78.

- [4]唐海燕,于丽娟. 基于三坐标测量机的齿轮轮齿相对键槽位置度检测方法[J]. 机械传动,2014,38(5):163-165.
- [5]唐君萍,张丽艳,刘胜兰,等. 飞机复杂零件上大量小尺寸导孔的快速视觉检测[J]. 中国机械工程,2015,26(18):2456-2465.
- [6]张启福,孙现申. 三维激光扫描仪测量方法与前景展望[J]. 北京测绘,2011(1):39-42.
- [7]Lukasz Pieczonka, Lukasz Ambroziński, Wiesław J, et al. Damage detection in composite panels based on mode-converted Lamb waves sensed using 3D laser scanning vibrometer[J]. Optics and Lasers in Engineering,2017,12(99):80-87.
- [8]Malassiotis S, Srinivasan M. Stereo vision system for precision dimensional inspection of 3D holes[J]. Machine Vision and Applications,2003,15(2):101-113.
- [9]Biegelbauer G, Vincze M. 3D vision-guided bore inspection system[C]. Fourth IEEE International Conference on Computer Vision Systems (ICVS'06),2006:22.
- [10]苑国英,蒋庄德,陈祖安. 评定厚板零件孔组位置度的新方法[J]. 计量技术,1996(1):8-10.
- [11]宦海,黄凌霄,张雨,等. 基于最大内切圆的椭圆孔组检测[J]. 计算机应用,2015,35(4):1101-1105.
- [12]张广军. 视觉测量[M]. 北京:科学出版社,2008:35.
- [13]Rafael C Gonzalez, Richard E Woods, Steven L. Eddins digital image processing using MATLAB second edition [M]. Gatesmark Publishing.
- [14]段红燕,邵豪,张淑珍,等. 一种基于Canny算子的图像边缘检测改进算法[J]. 上海交通大学报,2016,50(12):1861-1865.
- [15]赵小川,罗庆生,陈少波. 改进型图像中的直线快速检测[J]. 光学精密工程,2010,18(7):1654-1660.
- [16]龚昕,张楠. 基于Hough变换的圆检测算法的改进[J]. 信息技术,2020,44(6):89-93,98.

第一作者:程浩刚,硕士研究生,兰州理工大学机电工程学院,730050 兰州市

First Author: Cheng Haogang, Postgraduate, College of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

通信作者:龚俊,研究员,兰州理工大学机电工程学院,730050 兰州市

Corresponding Author: Gong Jun, Researcher, College of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China