

doi: 10. 3788/gzxb20164503. 0312002

蒸发器支撑板板孔精密测量系统

蒋鑫, 李华, 朱辉, 刘杰

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

摘 要:建立了蒸发器支撑板板孔精密测量系统,并提出了基于边缘约束条件的轮廓参量测量方法.首先采用图像处理技术将待测目标转化为二维离散坐标点,计算其最小外接矩形并对轮廓进行预定位;然后将轮廓分割成相互重合的“扩展邻域轮廓”,建立以曲率角为原则的边缘约束算法对各轮廓段精确定界,实现对轮廓参量的精密测量.实验和误差分析表明,该系统测量准确度优于 0.02 mm,对具有复杂轮廓的零件参量测量有参考价值.

关键词:精密测量;复杂轮廓;图像处理;曲率角;边缘约束

中图分类号:TP394.1;TH691.9

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)03-0312002-5

Precision Measuring System for Tube Support Plate of Steam Generator

JIANG Xin, LI Hua, ZHU Hui, LIU Jie

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, CAS, Xi'an 710072, China)

Abstract: A precision measuring system for tube support plate of steam generator was built, and a parameter measurement method based on edge restriction condition was proposed. Firstly, two-dimensional discrete points were obtained by image processing technology, and the profile was pretreated by calculating the minimum enclosing rectangle of the points. Then, the profile was divided into a series of “extended neighborhood profiles”, and an edge restriction algorithm based on curvature angle was built for precision demarcation. Finally, the profile parameters of part were measured precisely. The experiment results and error analysis show that the measurement precision can reach 0.02mm, which has reference value for the precision measurement of components with complex profile.

Key words: Precision measurement; Complex profile; Image processing; Curvature angle; Edge constraint

OCIS Codes: 120.0120; 110.0110; 250.0250; 150.0150

0 引言

在核电设备制造过程中,支撑板板孔的加工是关键工序之一,支撑板直径约 $\varphi 3\ 880\ \text{mm}$,厚度约 28.6 mm,其上分布有 19986 个异型孔.在实际生产过程中,支撑板板孔零件参量的检测主要使用轮廓仪等测量仪器^[1],其测量速度和准确度难以满足现代工业的生产要求.随着数字图像处理技术的发展,利用机器视觉测量技术对零件进行检测已成为工业检测的一个研究热点,该技术将传统基于点对点的接触式测量方式转变为基于完整图像的非接触式影像测量方式,能够实现零件参量的高准确度、高效率、非接触和智能化

测量.

目前零件参量的精密测量主要针对圆孔、矩形等简单轮廓零件,对复杂轮廓零件的测量往往仅采用轮廓度进行评定^[2],对其几何参量难以精密测量.近年来有人提出基于机器学习的方法来测量零件参量,比如神经网络、支持向量回归等方法^[3-4],但这类方法的结果取决于学习样本的选择^[5-6],计算过程复杂繁琐,运算时间较长,适应力差,在实际生产中难以广泛应用.为了实现复杂轮廓零件参量的精密测量,本文提出了基于边缘约束条件的轮廓参量测量方法,以核电蒸发器支撑板板孔为研究对象,建立了支撑板异形孔测量系统,用来实现异形孔参量的高准确度测量.

基金项目:国家科技重大专项(No. 2010ZX06001-012)资助

第一作者:蒋鑫(1987-),男,助理工程师,硕士,主要研究方向为机器视觉及光电测量设备研发. Email:jiangxin@opt. ac. cn

收稿日期:2015-10-10; **录用日期:**2015-11-16

1 系统结构及测量原理

1.1 系统结构

测量系统主要由光学成像系统、精密机械调整结构、图像采集模块和图像处理及测量软件模块等组成,如图 1.

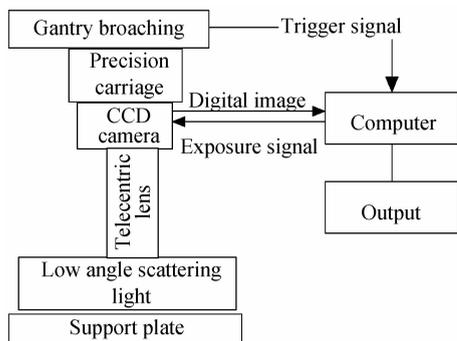


图 1 测量系统结构框图

Fig. 1 Framework of measuring system

1.2 测量对象

支撑板上分布近两万个板孔,板孔的形状呈三叶花瓣形,尺寸范围约 $25\text{ mm} \times 25\text{ mm}$,被测参量包括 21 项,最高测量准确度要求优于 0.02 mm .

图 2 为板孔参量示意图,被测尺寸包括外接圆半径 R_1 、内切圆半径 L_3 、过渡圆弧半径 R_2 、叶宽 L_1 、最小过渡平面 L_2 以及倒角半径 R_3 .

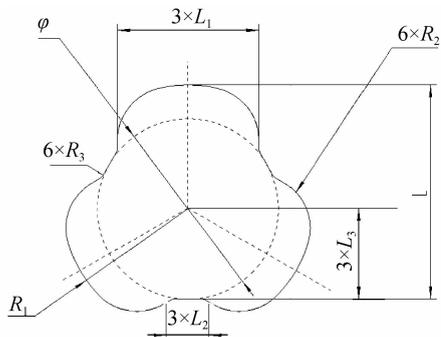


图 2 异形孔参量示意图

Fig. 2 Sketch map of tube hole

1.3 系统工作原理

光学成像系统采用物方远心光路,避免了测量过程中工作距离前后变化引起的测量误差。图像采集模块包括照明光源和 CCD 相机,为了获得稳定、清晰的轮廓边缘,系统采用高均匀度低角度散射光源。图像处理及测量软件模块用于对图像进行处理和分析,并实现参量测量、显示输出、数据存储等功能。高精度支撑架用于固定测量仪器与龙门拉床刀头,以借助拉床的数控系统实现测量系统的平移。

2 系统的关键算法

2.1 图像预处理

测量系统所采集图像具有轮廓清晰、目标区域与

背景区域的灰度分布均匀且容易区分的特点,采用形态学滤波、图像增强、Otsu 法分割图像、边缘跟踪、亚像素边缘提取等^[7-12]步骤获取图像边缘点坐标,将待测零件轮廓图像转化为一组二维离散点 $(x_i, y_i) (i=1, 2, \dots, n)$, n 为边缘点个数。

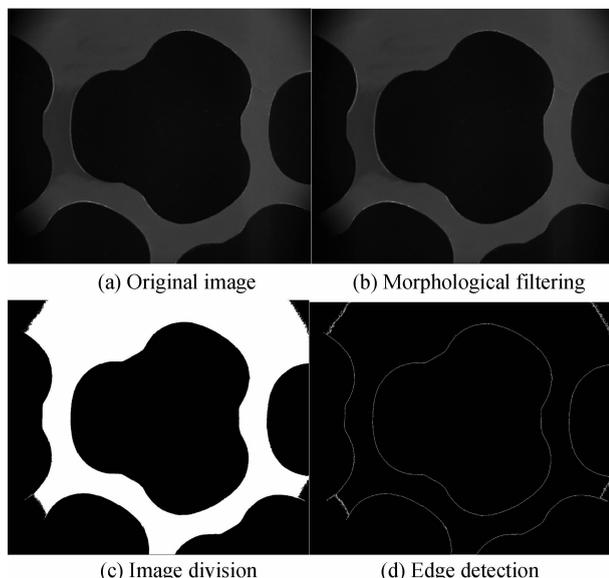


图 3 图像处理主要过程图

Fig. 3 Main course of image processing

2.2 轮廓预定位

由于每次测量所采集零件图像的位置和朝向并不一致,为实现自动检测,需要对轮廓进行预调整,从而保证被测轮廓的位姿状态保持一致。轮廓的定位中心通常选取零件轮廓的拟合中心,即对提取的坐标点利用式(1)求取重心 (x_c, y_c) ,将其作为定位中心。

$$\begin{cases} x_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \\ y_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \end{cases} \quad (1)$$

轮廓的旋转角通过计算轮廓的最小外接矩形得到:首先采用格林厄姆法求解轮廓凸包点^[13],再求取凸包的最小外接矩形,以最小外接矩形的长边与竖直方向夹角作为旋转角度 θ (以逆时针方向为正),最后利用旋转变换矩阵 $T = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$ 将轮廓旋转至预期位置,如图 4.

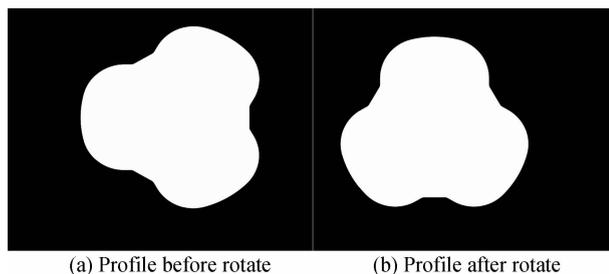


图 4 轮廓预定位

Fig. 4 Pretreating profile

旋转后的轮廓方向可能出现与预定方向相反的情况,需要对其朝向加以判断. 预定位后各轮廓的偏差小于 0.05° , 这为后续的参数计算奠定了基础.

3 基于边缘约束条件的参量测量

经过预定位处理,每次测量所获取轮廓的位姿状态基本一致,可通过角度区间将各曲线分段,再分别计算各曲线段参量. 但由于噪声和轮廓预定位准确度的影响,两曲线段交界点与角度分割点不一定重合,直接以角度分割线会引入误差,为此本文通过建立边缘约束条件实现轮廓参量的精密测量.

3.1 扩展邻域搜索边缘点

为使各曲线段完全包含属于本段的边缘点,本文引入“扩展邻域”的概念,即将分割角度区间向两边“扩张”一个小邻域范围 d , d 的大小通常等于曲线段上轮廓点个数的 $5\% \sim 10\%$, 从而零件轮廓可得到一系列相互重合的“扩展邻域轮廓”点集合. 如图 5, M 、 N 分别为曲线的角度分割点,经扩展后曲线分割点变为 P 、 Q .

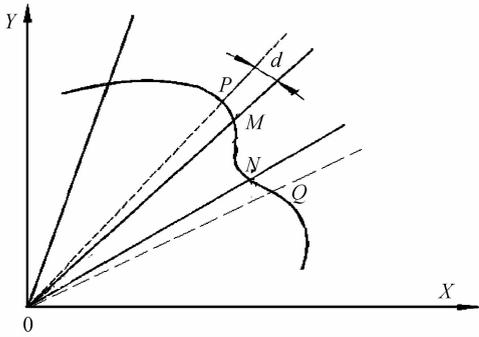


图 5 扩展邻域搜索边缘

Fig. 5 Extended neighborhood edges

3.2 曲率角计算

通过扩展邻域搜索的点集合包含不属于本曲线段的边缘点,必须以一定约束条件筛选. 而二维曲线的特征可以由轮廓上各点的曲率准确描述,因此可以通过计算曲线曲率来建立边缘约束原则. 对于连续曲线,某点的曲率可通过计算该点的一、二阶导数得到,而对于二维离散坐标点的曲率无法直接计算,通常采用曲率角替代. 曲率角与曲率正相关,它利用边缘点两侧相邻的边缘点(通常称为支撑区域)得出两个近似直线,两直线的夹角即为曲率角^[14].

设二维轮廓点可表示为 $r=(x(i), y(i))$, 由于噪声和图像数字化过程中都可能带来误差,在计算之前对数据进行去噪处理. 采用高斯卷积方法对数据进行平滑^[15], 对轮廓上各点的横坐标 $x(i)$ 和纵坐标 $y(i)$ 分别与高斯函数 $G(i, \sigma)$ 做卷积运算,即

$$\begin{cases} x(i, \sigma) = x(i) \cdot G(i, \sigma) = \\ \int_{-\infty}^{+\infty} x(v) \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(i-v)^2}{2\sigma^2}} dv \\ y(i, \sigma) = y(i) \cdot G(i, \sigma) = \\ \int_{-\infty}^{+\infty} y(v) \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(i-v)^2}{2\sigma^2}} dv \end{cases} \quad (2)$$

式中 $\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(i-v)^2}{2\sigma^2}}$ 为权值, dv 为步长,其值取决于噪声和曲线的复杂程度.

计算平滑处理后的轮廓点曲率角,以 $p(i)$ 为支撑区域中心,建立半径为 R 的支撑区域,即

$$s(i) = \{p(i) = [x(j), y(j)] \mid j \in (i-R, i+R)\}$$

首先计算 $p(i)$ 前后两个区域的几何中心点 $[p_f(i), p_b(i)]$

$$\begin{cases} p_f(i) = [x_f(i), y_f(i)] = \\ \left[\sum_{j=i-R}^{i-1} x(j)/R, \sum_{j=i-R}^{i-1} y(j)/R \right] \\ p_b(i) = [x_b(i), y_b(i)] = \\ \left[\sum_{j=i+1}^{i+R} x(j)/R, \sum_{j=i+1}^{i+R} y(j)/R \right] \end{cases} \quad (3)$$

然后计算 $p(i)$ 与 $p_f(i)$ 、 $p_b(i)$ 所构成直线的方向角为

$$\begin{cases} \theta_f(i) = \arctan [(y(i) - y_f(i)) / (x(i) - x_f(i))] \\ \theta_b(i) = \arctan [(y_b(i) - y(i)) / (x_b(i) - x(i))] \end{cases} \quad (4)$$

最后可得曲率角. 可以看出,曲率角的计算十分简洁,通过支撑区域也降低了噪声的影响.

3.3 建立边缘约束条件计算参量

测量对象通常是由多种圆弧和直线连接而成的闭合轮廓,而根据曲率角定义容易看出直线的曲率角为零,圆弧的曲率角为非零常量,不同半径圆弧的曲率角也不同,因此可根据曲率角对轮廓点是否在某段曲线上进行判断. 对某曲线的而言,它与相邻曲线的连接形式可分为三种:直线与圆弧、圆弧与圆弧、直线与直线. 三种连接形式的曲率角曲线通常表现为阶跃型或屋脊型,此时相邻两段曲线段的交点应为曲率角曲线的一阶微分极值点. 因此,以曲率角为原则建立边缘约束条件求取曲线分界点,步骤为:

1) 分别计算“扩展邻域轮廓”上各离散点曲率角 $\{\theta(i), i=1, 2, 3, \dots\}$. 其中支撑区域半径 R 是由“扩展邻域轮廓”中点的个数 n 和约束参量 δ 确定的整数, $R = n/\delta$, δ 一般取 $8 \sim 15$.

2) 由于噪声和数字化采样的影响,即使同一圆弧(或直线)上各点的曲率角也不完全相等,其值在区间

内波动,采用高斯平滑算法对曲率 $\theta(i)$ 处理可得到较平滑的 $\theta(i)$. 此外,通过增大支撑区域半径 R 也可减少曲线波动,但 R 过大会导致曲率角曲线在两曲线交点处的变化不明显,不利于交点的精确定位.

3) 由于“扩展邻域轮廓”是该曲线段向两侧扩展得到的,其曲率角曲线应有两个一阶微分极值点. 对于离散点,用一阶差分代替一阶微分,对曲率角曲线作一阶向前差分 $g(i) = \theta(i+1) - \theta(i)$, $g(i)$ 的两个极值点对应的坐标即为该曲线段的两个分界点. 由于噪声影响,可能出现极值点个数不为 2 的情况,改变约束参量 δ 取值,重复步骤 1)~3) 直至得到两个极值点. 在该扩展邻域边缘上,两个分界点之间的离散点即作为计算参量的点集合.

3.4 三叶孔参量的理论计算

采用基于边缘约束条件方法对板孔图像进行处理得到各曲线的离散坐标集合,然后通过直线拟合或圆拟合对各点集合处理获得直线或圆的参量,最后通过几何关系求取板孔各参量.

4 实验与误差分析

4.1 系统标定

测量系统中的相机采用 PointGrey 公司的 FL3-GE-50S5 型数字相机,分辨率为 $2\ 448 \times 2\ 048$,像面大小为 $2/3''$,像元大小为 $3.45\ \mu\text{m}$;镜头选用 VS-TCM022-150/S 物方远心镜头,放大倍率为 0.22,工作距离为 154 mm,镜头畸变很小. 采用标准圆作为标定件确立物像之间的尺寸比例关系. 保持测量系统的工作距离固定,对直径 20 mm 的标准光刻模板圆进行成像,通过基于边缘约束条件的轮廓参量测量方法获得圆直径的像素数 N ,像素当量为 $k = A/N$.

为了进一步降低成像畸变对测量结果的影响,对视场各区域分别求取像素当量,将其平均值作为整个视场的标定当量,最终像素当量为 $15.681\ 8\ \mu\text{m}/\text{pixel}$.

4.2 实验

将测量系统固定在高准确度电动平移台上,以三个异形孔标准件为被测对象,在视场内随机位置多次测量其几何参量.

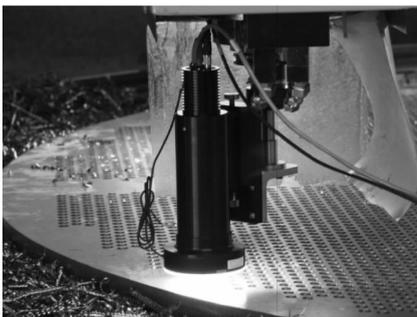


图 6 支撑板板孔精密测量系统

Fig. 6 Measurement system of tube support plate

限于篇幅仅列出内切圆半径 L_3 和外接圆半径 R_1 的测量结果,其中 $L_3 = 8.995\ \text{mm}$, $R_1 = 12.377\ \text{mm}$. (标称值通过高准确度 CCD 拼接测量系统得到,其测量准确度 $\leq (0.7 + L/600)\ \mu\text{m}$),测量数据见表 1.

表 1 L_3 和 R_1 的测量结果(单位/mm)

Group	Inscribed circle radius			Circumradius		
	1- L_3	2- L_3	3- L_3	1- R_1	2- R_1	3- R_1
1	8.990	9.003	8.990	12.370	12.368	12.372
2	8.991	9.004	8.990	12.372	12.366	12.371
3	8.992	9.003	8.988	12.374	12.369	12.372
4	8.992	9.001	8.987	12.376	12.366	12.370
5	8.994	9.002	8.990	12.372	12.368	12.373
3 σ	0.0044	0.0034	0.0042	0.0068	0.004	0.0034

由表 1 可见,系统具有较高的测量准确度和重复性准确度,完全满足设计要求.

4.3 误差分析

影响测量准确度的因素来源包括软件算法误差、成像系统几何畸变误差、光源误差以及噪声误差. 算法误差主要来源于边缘提取准确度,亚像素边缘定位准确度为 0.1 pixel,考虑到拟合效应的影响,算法误差不超过 $1.5\ \mu\text{m}$. 本文成像系统采用高质量物方远心镜头,视场边界处的畸变也很小,此外由于采用平均标定当量,进一步减小了成像畸变导致的误差. 光源亮度的变化也会引起测量误差,微调光源功率大小,定点对同一孔多次测量,其测量误差不大于 $2\ \mu\text{m}$. 考虑到其它影响因素,测量系统误差不超过 $4\ \mu\text{m}$,这与实测结果吻合.

5 结论

本文以基于边缘约束条件的参量测量算法为基础,实现了支撑板板孔参量的精密和高效测量,有效地辅助了核电蒸发器的安装过程. 实验表明,系统测量误差远小于 0.02 mm,测量过程无需人机交互操作,实现了零件参量的高准确度、高效率、智能化测量. 该测量方法对具有复杂轮廓的零件参量测量系统开发有参考价值.

参考文献

- [1] ZHANG Jin, WANG Zhong, LI Chao, *et al.* Evaluation algorithm of curve profile based on discrete points [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(11):2281-2285.
张进,王仲,李超,等. 离散点的线轮廓度评价算法作者[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(11):2281-2285.
- [2] WANG Zhong, CAO Jing-jing, ZHANG Li-kun, *et al.* Measurement and evaluation for profile tolerance based on images[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(2):395-401.
王仲,操晶晶,张立昆,等. 基于图像的轮廓度测量与评定方法研究[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(2):395-401.
- [3] STEVE G. Support vector machines classification and regression [C]. ISIS Technical Report. Image Speech &

- Intelligent Systems Group, University of Southampton, 1998.
- [4] ALEX J. SMOLA BERNHARD SCHOLKOPF. A tutorial on support vector regression[J]. *Statistics and Computing*, 2004 (3)
- [5] HE Qiu-wei, WANG Long-shan, LIU Qing-min, *et al.* Evaluation algorithm of curve profile based on discrete points [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(4): 557-563.
贺秋伟,王龙山,刘庆民,等.基于支持向量回归的小尺寸零件精密测量[J].*光学精密工程*,2007,**15**(4):557-563.
- [6] LIAO Ping. Calculating of complex surface profile error based on subdivision approach algorithm and genetic algorithm[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, **46**(10): 1-7.
廖平.基于遗传算法和分割逼近法精确计算复杂曲面轮廓度误差[J].*机械工程学报*,2010,**46**(10):1-7.
- [7] DUAN Rui-lin, LI Qing-xiang. Summary of image edge detection[J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(3): 415-419.
段瑞玲,李庆祥.图像边缘检测方法研究综述[J].*光学技术*, 2005,**31**(3):415-419.
- [8] DU Qi, XIANG Jiang-yong, YUAN Teng-chun, *et al.* An improved method of maximum classes square error [J]. *Infrared Technology*, 2003, **25**(5): 33-36.
杜奇,向健勇,袁胜春,等.一种改进的最大类间方差法[J].*红外技术*,2003,**25**(5):33-36.
- [9] YANG Xiao-jun, SU Xiu-qin, HAO Wei, *et al.* The study at automatic focusing systems and methods of calibrated focal length used in precision measurement [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1921-1924.
杨小君,苏秀琴,郝伟,等.用于精密测量的自动变焦系统及标
- 校方法的研究[J].*光子学报*,2005,**34**(12):1921-1924.
- [10] SHEN Man-de, CHEN Liang-yi, HE Jun-hua, *et al.* Research on key technique of measure system for fragment windward area[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(S1): 157-160.
沈满德,陈良益,何俊华,等.破片迎风面积测量系统关键技术研究[J].*光子学报*,2007,**36**(S1):157-160.
- [11] ZHANG Zhi-jing, DU Fang, JIN Xin, *et al.* Study on edge detection algorithms of micro accessory [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **2**(2): 356-361.
张之敬,杜芳,金鑫,等.微小尺寸零件复杂边缘识别算法[J].*光学精密工程*,2009,**2**(2):356-361.
- [12] CHEN Lu, HE Hong-jie, CHEN Fan. A fast image defogging algorithm based on edge-maximum filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(11): 1110003.
陈露,和红杰,陈帆.基于边界邻域最大值滤波的快速图像去雾算法[J].*光子学报*,2014,**43**(11):1110003.
- [13] LIU Run-zong, FANG Bin. A fast convex hull algorithm with maximum inscribed circle affine transformation [J]. *Neurocomputing*, 2012, **77**: 212-221.
- [14] ZHANG Wen-jing, XU Xiao-ming. Approach to extract feature points on boundary based on curvature [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 1999, **33**(5): 592-595.
张文景,许晓鸣.一种基于曲率提取轮廓特征点的方法[J].*上海交通大学学报*,1999,**33**(5):592-595.
- [15] LOWE D G. Organization of smoothing image curves at multiple scales [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1989, **3**(2): 119-130.