

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.01.007

电解加工微小孔误差分析及特征检测研究^{*}

张加俏, 张守阳

(南通大学 机械工程学院, 江苏 南通 226019)

摘要:针对电解加工微小孔特征检测问题,对影响加工精度的因素、特征检测方法、数字图像处理等问题进行了研究,对电解加工时工作圈长度与径向间隙、孔内电解液体积之间的函数关系进行了归纳,提出了一种基于 Matlab 数字图像处理技术的微小孔特征检测方法;对电解加工得到的微小孔图片进行了滤波、去噪、边缘检测和特征提取,得到了所加工微小孔圆度、锥度、粗糙度等几何特征参数值,根据检测结果定量评定了加工误差,及时调整了电解加工时的各项参数。研究表明:该检测方法设计合理,错检率、漏检率低,检测时间短。

关键词:微小孔;电解加工;Matlab;图像处理;特征检测

中图分类号:TH161;TQ151

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)01-0032-05

Error analysis and feature detection of electrochemical machining micro-hole

ZHANG Jia-qiao, ZHANG Shou-yang

(School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: Aiming at the problem of electrochemical machining small holes, the influencing factors of machining accuracy, the method of feature detection, the processing of digital image were studied, and the function relation between the working circle length and radial clearance, the volum of electrolyte in the hole was concluded when electrolytic machining. A method based on Matlab digital image processing technology was proposed, and the micro-hole images obtained by electrolysis were filtered, denoised, edge detected and feature extracted, and the geometric feature parameter values such as small hole roundness, taper and roughness were obtained by quantitative analysing of micro-hole images. Furthermore, the machining errors were quantitatively evaluated according to the test results, and the parameters of electrolytic machining were adjusted in time. The results indicate that the detection method which is well designed has low detection rate, low leakage rate and short detection time.

Key words: micro-hole; electrochemical machining; Matlab; image processing; feature detection

0 引言

随着航空技术和微型机械技术的发展,使用电解方式加工微小孔的工艺越来越广泛,但是加工质量受到多方面因素的影响,且微小孔特征不易检测。陈辉、王玉魁等人^[1]对电解加工时的径向误差进行了一定研究,但是没有考虑到在减小径向误差时,微小孔内液体体积也受到影响,从而影响到液体流动性。电解加

工微小孔时,所加工的孔的质量受工具电极工作圈长度、电压、电流、电解液等诸多因素的影响,而微小孔一般由于其几何尺寸过小,不易直接测量。何斌、马天宇等人^[2]提出了基于 Visual C++ 的图像处理技术,该技术编程复杂,图像处理速度受到一定影响;刘志刚、鲍加贞等人^[3]提出了一些关于圆孔图像特征检测的理论,但是仅仅从图形学上给出检测方法不符合机械加工中对圆度、锥度公差的定义,所提出的圆度测量方

收稿日期:2018-03-30

基金项目:江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏政办发[2014]37号);南通市应用基础研究项目(GY12016054);江苏省大学生创新创业训练计划重点项目(201810304051Z);南通大学大学生创业训练项目(2018199)

作者简介:张加俏(1995-),男,江苏沛县人,硕士研究生,主要从事机械设计与制造方面的研究。E-mail:2801391531@qq.com

法,仅仅是一种图形分散度的定义,并不能表示电解加工误差。在此情况之下,有必要对电解加工微小孔的理论进行更加深入的研究,获取工作圈长度和径向间隙及孔内电解液体积的关系。

本文将提出一种基于 Matlab 数字图像处理的技术,对电解加工得到的微小孔进行特征检测。

1 电解加工微小孔误差分析

电解加工利用金属的电化学反应,作为阳极的金属工件在电解液中进行阳极溶解而去除材料。在进行微小孔电解加工的过程中,工具电极逐渐深入到工件内部,微小孔侧壁始终处于被电解状态。因此,径向金属会发生二次溶解,从而会形成喇叭口误差^[4]。径向间隙图如图1所示。

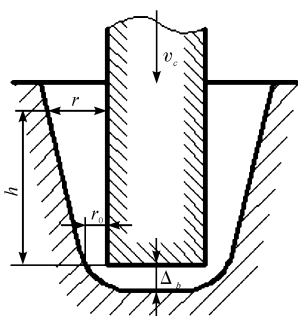


图1 径向间隙图

v_c —工具电极进给速度; r —径向间隙; r_0 —圆角半径;

h —进给深度; Δ_b —平衡间隙

在加工时刻 t , 进给深度为:

$$h = v_c t \quad (1)$$

对应的径向电解蚀速度为:

$$v_r = \frac{\eta \omega k U}{r} \quad (2)$$

径向间隙 r 与时间 t 之间的微分方程为:

$$dr = \frac{\eta \omega k U}{r} dt \quad (3)$$

对 r 求积分, 可得:

$$r = \sqrt{\frac{2\eta \omega k U}{v_c} h + r_0^2} = \sqrt{2\Delta_b h + r_0^2} \quad (4)$$

式中: Δ_b —端面平衡间隙, $\Delta_b = \eta \omega k \frac{U_R}{v_c}$, 一般取 0.25 mm ~ 0.4 mm。

当工具电极底侧面处的圆角半径很小时, 取 $r_0 \approx \Delta_b$, 则有:

$$r = \sqrt{2h\Delta_b + \Delta_b^2} = \Delta_b \sqrt{\frac{2h}{\Delta_b} + 1} \quad (5)$$

产生的锥度为上下圆孔直径之差与进给深度的比

值, 即:

$$\alpha = \frac{2(r - r_0)}{h} \quad (6)$$

可见, 径向间隙与加工微小孔时的进给深度有关, 孔越深, 径向间隙越大, 锥度随之减小, 孔径向误差加大。误差分析图如图2所示。

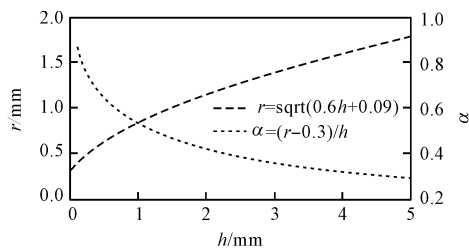


图2 电解加工误差分析图

为了减小微小孔在电解加工时产生的误差, 本研究将工具电极侧面进行绝缘, 只留下端部长度为 b 的工作圈, 此时的径向间隙为:

$$r = \sqrt{2b\Delta_b + \Delta_b^2} = \Delta_b \sqrt{\frac{2b}{\Delta_b} + 1} \quad (7)$$

径向间隙只与工作圈长度 b 有关, 保证工作圈以上的工件侧面不再遭受二次电解腐蚀, 径向误差减小, 内孔趋于平直^[5]。

工具电极添加绝缘层后如图3所示。

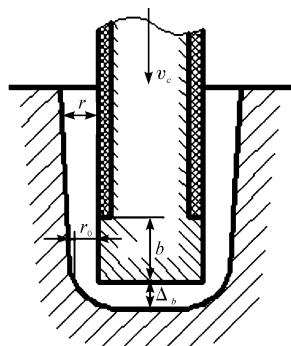


图3 工具电极绝缘设计图

v_c —工具电极进给速度; r —径向间隙; r_0 —圆角半径;

径; h —进给深度; Δ_b —平衡间隙; b —工作圈长度

工作圈长度 b 决定了径向间隙长度, 但也影响到所加工的微小孔内电解液体积, 单位深度电解液体积为微小孔实际面积与理想面积之差, 是关于微小孔理想半径 R 和工作圈长度 b 的函数, 即:

$$v = \pi(r + R)^2 - \pi R^2 = 2\pi\Delta_b \left(R \sqrt{\frac{2b}{\Delta_b} + 1} + b + \frac{\Delta_b}{2\pi} \right) \quad (8)$$

其关系如图4所示。

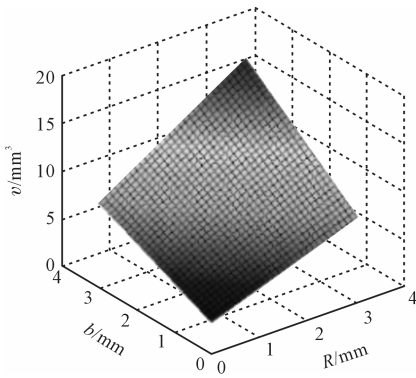


图 4 微小孔内电解液体积图

由图 4 可知:单位电解液体积与工作圈长度和微小孔直径成正相关,但所加工孔的直径精度又与工作圈长度成反相关,令 $v = r$,可得出关于 b 的解集,其中: $b_{\max} = 5.42 \text{ mm}$, $b_{\min} = 0.18 \text{ mm}$ 。

进一步可根据电解液的比热容和流速,在工作圈长度 b 的允许范围内选择合适的长度。

2 微小孔特征检测

本文提出了一种基于 Matlab 图像处理的微小孔特征自动检测方法,使用 CCD 摄像技术获取图片,由 Matlab 软件编程对电解加工的微小孔进行圆度、锥度、表面粗糙度等特征进行检测,并根据检测结果评定电解加工性能。

本研究选择一直径为 1 mm,深 10 mm 的模拟电解加工得到的微小孔图像进行处理,对检测方法的准确性进行验证。进行检测之前,需要对图像进行预处理。首先将微小孔原始图片灰度化,然后进行滤波。

噪声直方图如图 5 所示。

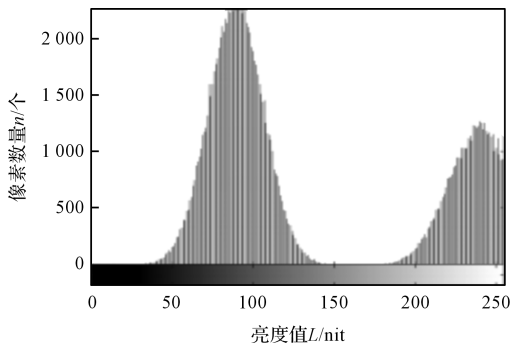


图 5 微小孔图像噪声直方图

由图像可知:图片中所产生的噪声主要是高斯噪声^[6],其概率密度函数为:

$$P_z(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}b} e^{-\frac{(z-a)^2}{2b^2}} \quad (9)$$

本研究使用 5×5 的滤波窗口对原始图像进行中

值滤波处理,得到的效果图如图 6 所示。

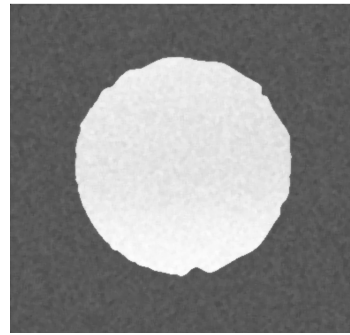


图 6 微小孔原始图像去噪图

本研究在图像进行去噪之后,使用 im2bw 命令和设定阈值的方法,将图片进行二值化,并取出所要研究的微小孔部分^[7]。二值化图形如图 7 所示。

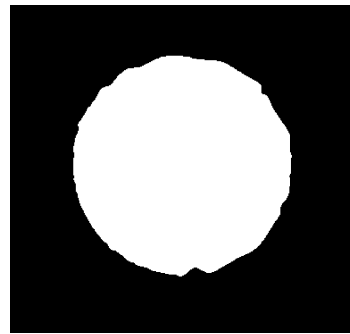


图 7 微小孔图像二值化图

2.1 圆度特征检测

本研究采用最小区域法,以包容边缘曲线轮廓的半径差为最小的两同心圆的半径差作为圆度误差,则相应的圆度误差为:

$$\delta = R_{\max} - R_{\min} \quad (10)$$

本研究通过 Sobel 算子对图像边缘检测,提取出微小孔的边缘曲线^[8]。所使用的 Sobel 算子梯度为:

$$G[f(x,y)] = |f'_x(x,y)| + |f'_y(x,y)| \quad (11)$$

式中: $f'_x(x,y)$ — x 方向一阶微分; $f'_y(x,y)$ — y 方向一阶微分。

所提取的圆度误差图如图 8 所示。

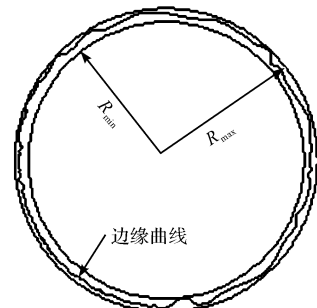


图 8 圆度误差图

在本例中, $\delta = R_{\max} - R_{\min} = 0.07$ 。分析图像可知:右侧圆跳动较大,主要是因为孔内电解液采用侧向流动方式,由左向右流动,因而电解液吸收左侧焦耳热后,造成右侧温度高于左侧,因此在进行电解加工时,电解液的流动方式可采用正流式或反流式。

文献[9]中提出了一种关于微小孔圆度的描述方法,但是计算过程复杂、易错率较高。现对两种方法进行对比,具体结果如表 1 所示。

表 1 两种圆度算法检测性能对比表

	准确度 / (%)	时间 / s
文献[9]	85	1.31
本文	97	0.56

由表 1 可知:本文所提出的检测方法准确度更高,单张图片检测所需时间更少。

2.2 锥度特征检测

由式(6)可知:微小孔锥度与上下表面圆孔直径之差和所加工的微小孔深度有关。一般在进行孔加工工艺时,孔的深度是事先确定好的,因此只需要检测上下表面圆孔直径之差。对上表面圆孔图像 $X_1(x,y)$ 和下表面圆孔图像 $X_2(x,y)$ 作差,即:

$$Z(x,y) = X_1(x,y) - X_2(x,y) \tag{12}$$

得到上下表面圆孔直径之差的图像,代入式(6),可得到圆孔锥度的值。

由于每个对应的上下表面半径之差不相等,为保证测量结果的准确性,将图像作差得到的类圆环等分为 n 份,并求其平均值,在本例中为:

$$\alpha = \frac{2(r - r_0)}{h} = \frac{2}{hn} \sum_{i=1}^n Li = 0.01.$$

2.3 粗糙度特征检测

本研究采用轮廓的算术平均偏差来定量评定表面粗糙度^[10]。在一个取样长度 l_r 范围内,计算被评定轮廓上各点至中线的纵坐标值 $Z(x)$ 的绝对值的算术平均值,即:

$$Ra = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| \, dx \tag{13}$$

由上式可知:对于电解加工的微小孔,要得到表面粗糙度需要求出被评定轮廓与中线所围成的面积。先求出公差轮廓图,并使用 bwlabel 命令进行图像标记,通过 regionprops 函数求出轮廓面积 S_L ,此时单位为像

素^[11]。进一步地与标准面积 S_B 进行对比,通过公式(13)得到表面粗糙度值,即:

$$Ra = \frac{S_L}{S_B} \cdot \frac{\pi r^2}{2\pi r} = \frac{rS_L}{2S_B} \tag{14}$$

公差轮廓图如图 9 所示。



图 9 公差轮廓图

在该实例中:

$$S_{L1-61} = [24;3;1;1;4;2;3;2;2;1;55;1;1;1;1;1;1;1;2;6;2;28;3;3;1;1;9;2;36;1;2;1;2;12;13;1;1;1;2;44;37;1;4;47;2;4;45;154;1;1;104;2;19;5;14;1;111;2;1;48;7];$$

$$S_L = 878; S_B = 345\,99; Ra = 6.34 \, \mu\text{m}.$$

3 实验及结果分析

为了验证本文提出的检测方法的可行性,笔者从实验室获取微小孔图片 100 张,其大小均为 500×500 像素,并使用上文提出的基于数字图像处理的方法对其进行特征检测。同时,将该批样本送与专业人员进行人工检测,所使用的测量工具为千分尺和百分表^[12],二者最终检测情况如表 2 所示。

表 2 不同检测方法检测结果对比表

	检测数	错检率 / (%)	漏检率 / (%)	检测时间 / min
图像检测	100	1	0	5
人工检测	100	7	2	60

分析表 2 可知:使用数字图像处理技术对微小孔特征进行检测时,错检率、漏检率及检测时间均远小于人工检测。通过对待检微小孔图像进行集中采集、批量处理,可很好地杜绝漏检现象的发生。

(下转第 65 页)

本文引用格式:

张加俏,张守阳. 电解加工微小孔误差分析及特征检测研究[J]. 机电工程,2019,36(1):32-35,65.
ZHANG Jia-qiao, ZHANG Shou-yang. Error analysis and feature detection of electrochemical machining micro-hole[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019,36(1):32-35,65.
《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>