

文章编号 1004-924X(2006)06-0998-06

微细电火花加工的微细电极在线检测

郭锐¹, 赵万生², 李刚¹, 李志勇², 张勇¹

(1. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200030)

摘要: 设计了微细电极在线检测系统。系统由卤素灯光源、变焦显微镜头、CCD摄像机和6自由度支架组成, 具有1.61 μm 的分辨率和113~729的放大率。在Linux平台下, 基于V4L2 API开发了图像采集程序, 使用mmap()内存映射方法获取图像数据。实现了IplImage数据结构和QImage类的转换, 使图像既可以基于OpenCV进行处理, 又可以基于Qt进行显示, 通过Canny边缘检测算法提取了微细电极的边缘轮廓。实现了电极在线观测的G代码功能, 进行了块状电极电火花磨削微细轴的实验。实验结果表明系统可以在线观察电极状态和在线测量电极尺寸, 在线测量值与扫描电镜离线测量值的相对误差在5%以内, 解决了微细电火花加工的微细电极在线制造和检测等难题。

关键词: 微细电火花加工; 电极; 在线检测

中图分类号: TG661 **文献标识码:** A

Micro electrodes on-line measurement in micro EDM

GUO Rui¹, ZHAO Wan-sheng², LI Gang¹, LI Zhi-yong², ZHANG Yong¹

(1. *School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*; 2. *School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China*)

Abstract: An on-line measurement system was proposed. It is composed of a halogen type light source, a zoom lens, a CCD camera and a bracket that has 6-degree of freedom. It has a resolution of 1.61 μm and a magnification of 113~729. Based on the Linux operating system, an image capturing program was developed with the V4L2 API, in which the image data was acquired with the method of mmap() memory map. The conversion between the data structure of IplImage and the class of QImage was implemented. Therefore the image could be processed by using OpenCV, as well as showed with Qt. The contour of micro electrodes can be extracted by means of the Canny edge detector. Furthermore, the G code for on-line measurement was also developed. The experiment of block electrodes Electrical Discharge Machining (EDM) grinding was carried out. It shows that the relative error between the on-line measurement system (OMS) and the scanning electron microscope (SEM) is less than 5%. It also shows that the system can be used to deal with the difficulties in micro electrodes on-line fabrication and measurement in micro EDM.

Key words: micro EDM; electrode; on-line measurement

收稿日期: 2006-04-24; 修订日期: 2006-07-08.

基金项目: 上海市科委科技攻关重点项目 (No. 041111005)

1 引 言

在微细电火花加工中,由于三维复杂形状的微小成形电极本身很难甚至无法制造,而且严重的电极损耗现象也使成形电极的形状很快改变而无法进行高精度的加工,因此采用柱状微细电极进行微细孔和微三维结构的加工已经成为当前微细电火花加工的主流技术之一^[1]。(如不加说明,本文提到的微细电极均指柱状微细电极。)

微细电极的制造是微细电火花加工的关键技术问题。如果采用离线方式加工并二次安装的方法,则不可避免的产生安装误差和变形误差;如果采用在线方式加工,则需要解决在线观察和测量等问题。以前微细电极的检测一般采用试切方式进行,即通过电极所加工孔的尺寸来间接推算微细电极的直径,由于放电间隙和电极损耗现象的存在,这种测量方法精度差、效率低。哈尔滨工业大学的张勇博士利用接触感知功能,通过微细电极在 x 和 y 方向分别接触标准棒,在线测量微细电极的尺寸,但仍然存在放电间隙,而且二者轴线的平行度不易保证^[2]。上述两种方法都属于接触式测量,由于放电间隙的存在,测量精度受到了一定程度的限制,更重要的是,上述两种方法都无法在线观察微细电极,也就很难发现图 1 所示的微细电极制造过程中的断裂现象。当微细电极直径达到几微米时,通过肉眼或者手持放大镜的方法已经无法观察。作为微细电火花加工机床最高水平的代表,日本的 Panasonic MG-ED82W 和瑞士的 AGIE Compact 1 都装备有光学显微镜,可以清晰地观察电极状态,但是无法在线测量电极尺寸。日本的 Micro Research μ -spark2000 和哈尔滨工业大学特种加工及机电控制研究所研制的微细特种加工机床都装备有 CCD 数字显微仪,在 Windows 下既可以观察微细电极,也可以进行简单测量^[3]。但是由于选用的是通用的集成数字显微仪产品,没有针对微细电火花加工的工况进行优化,也没有进行系统标定,所以图像及其边缘不太清晰,测量精度也比较低。为了解决上述技术问题,本文为自行研制的微细电火花加工机床开发了微细电极在线检测系统,既可以清晰地在线观察微细电极的状态,又可以准确地在线测量微

细电极的尺寸,成为微细电火花加工机床不可或缺的重要组成部分。

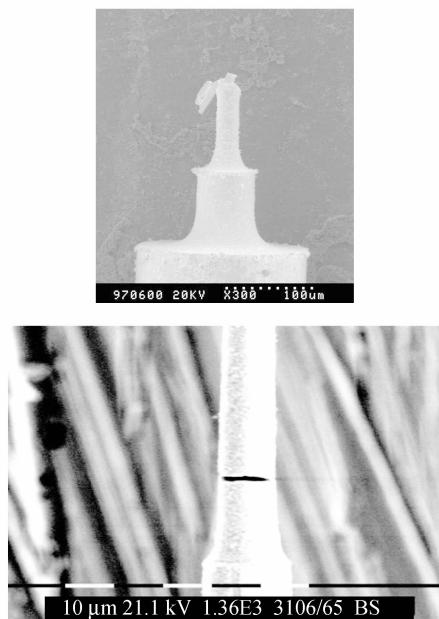


图 1 微细电极制造过程中的断裂现象

Fig. 1 Breakage in micro electrodes fabrication

2 在线检测系统的设计

微细电极在线检测系统由卤素灯光源、变焦显微镜头、CCD 摄像机和 6 自由度支架组成。卤素灯光源通过玻璃光纤与变焦镜头连接,实现同轴照明方式,便于观察电极状态。如图 2 所示,变焦显微镜头和 CCD 摄像机通过 6 自由度支架与机床本体连接,便于调节成像系统与机床本体的相对位置。当安装电极时使成像系统远离机床主轴,当安装电极后调整 6 自由度支架,使系统在最小倍率下通过图像显示找到电极,锁紧 6 自由度支架,保证成像系统与电极的空间相对位置不变;然后使系统处于最大倍率(景深最小,像深最大),调整前焦距,使得系统成像清晰;接着使系统处于最小倍率(景深最大,像深最小),调整后焦距,使得系统成像清晰;由于变焦显微镜头具有齐焦性(parfocal),因此通过上述过程后,系统在变倍时不需要做任何调整都可以清晰成像。

在校正了几何像差之后,衍射现象成为制约光学系统分辨率的重要因素,根据瑞利判据和阿贝正弦条件,显微物镜分辨率的计算公式为^[4]:

$$\delta = \frac{0.61\lambda}{NA}$$

式中 λ ——光线的波长；

NA——显微镜的数值孔径。

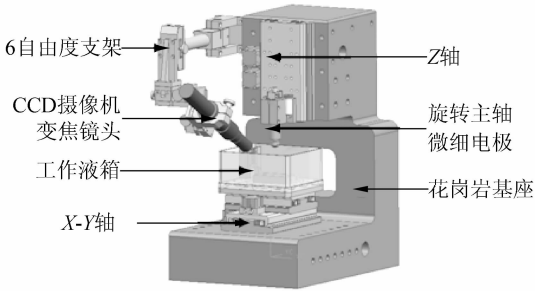


图 2 Micro-EDM 机床及其在线测量系统

Fig. 2 Micro-EDM machine tool and its on-line measurement system

因此,提高显微镜分辨率有两个途径,一是用短波长的光照明,二是提高显微镜的数值孔径。光学系统的分辨率不能用增大放大率的办法来提高,这是因为增大放大率虽然放大了像点之间的距离,但是每个像点的艾里斑也同样被放大了,光学系统原来所不能分辨的细节即使放得再大,仍然不能被肉眼或图像传感器所分辨。所以分辨率是在线检测系统必须首先确定的关键参数。目前先进的微细电火花加工机床可以加工出 $\Phi 5 \mu\text{m}$ 的微细孔及 $\Phi 3 \mu\text{m}$ 的微细轴,因此在线检测系统选择了具有 $1.61 \mu\text{m}$ 分辨率的变焦镜头,在该分辨率下变焦镜头的数值孔径是 0.225 ,选用的光源是具有 3100 K 色温的卤素灯。根据机床加工的实际工况,变焦镜头的其他参数包括 50 mm 左右的工作距离、 $2.1 \sim 13.5$ 倍的光学放大率。

在 13.5 倍的光学放大率下, $1.61 \mu\text{m}$ 的艾里斑半径在 CCD 上被放大为 $21.735 \mu\text{m}$ 。根据奈奎斯特采样定理,CCD 需要最少 2 个像素来分辨被研究对象的特征尺寸,因此 CCD 的像素尺寸最大为 $21.735/2 = 10.8675 \mu\text{m}$ 。基于以上分析,选择了 $1/2$ 吋面阵 CCD 具有 752×582 个像素,其像素尺寸为 $8.51 \mu\text{m} \times 8.25 \mu\text{m}$ 。

$1/2$ 吋面阵 CCD 的对角线尺寸是 8 mm , 17 吋 CRT 显示器的对角线尺寸是 431.8 mm 。在光学放大率的基础上,CCD 和 CRT 显示器又为系统提供了 $431.8/8 = 53.975$ 倍的视频放大率,

因此微细电极在线测量系统的总放大率为 $113 \sim 729$ 倍。

3 软件系统的设计

由于 Linux 具有开源免费、功能全面、高效灵活等特点,使得它在网络服务器和嵌入式系统领域拥有不可比拟的技术优势。同时,基于 Linux 的硬实时操作系统 RTLinux 和 RTAI 在航空航天、科学研究和工业控制等领域也得到了广泛的应用。本文目标机床的数控系统就是基于 Linux 开发的,为了与数控系统集成,微细电极在线测量系统也选择 Linux 作为软件开发平台。

3.1 图像采集

V4L(Video for Linux)是 Alan Cox 开发的 Linux 下操作视频设备的 API 和标准。V4L 采用分层的方法给驱动的开发提供了清晰的模型和一致的接口。V4L 是上层,为用户程序提供 API;硬件相关部分是下层,为设备提供驱动程序。由于 V4L 开发时考虑欠周密,支持的硬件也比较少,因此 Bill Dirks 开发了 V4L2(Video for Linux 2),提高了可扩展性和灵活性,支持了更多的硬件设备。支持 V4L 和 V4L2 标准的视频设备文件都是 UNIX 字符设备,主设备号都是 81 ,根据次设备号的不同区分不同类型的设备。当应用程序对设备文件进行诸如 open、close、read、write、ioctl 等系统调用操作时,Linux 内核将通过 file_operations 结构访问驱动程序提供的函数,实现相应的功能。

本文选用的图像采集卡的驱动程序符合 V4L2 标准,可以利用 V4L2 的 API 和数据结构开发图像采集程序,程序流程如图 3 所示。获取图像数据有两种方法:一是 read() 直接读取,二是 mmap() 内存映射。read() 通过 copy_to_user() 将内核空间的数据复制到用户空间,而 mmap() 通过 remap_page_range() 将设备内存映射到用户进程的地址空间。与 read() 方法相比,本文使用的 mmap() 方法提供给用户程序直接访问设备内存的能力,速度更快、吞吐量更大,适用于视频采集这种需要大量高速数据传输的场合。

3.2 图像处理

OpenCV(Open Computer Vision)是 Intel 公司开发的图像处理库,针对 Intel x86 处理器进行

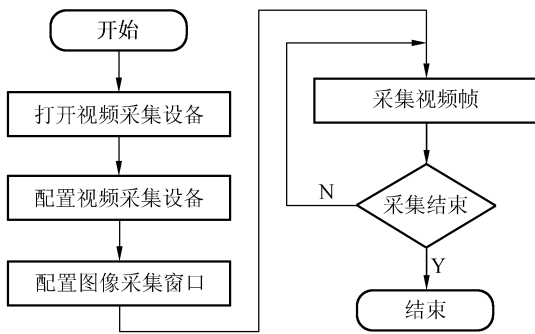


图 3 图像采集程序流程图

Fig. 3 Flowchart of the image capturing program

了优化,具有平台无关性,既可以在 Windows 下使用,也可以在 Linux 下使用。Qt 是基于 C++ 的 GUI 工具包,也具有平台无关性,同时支持 Windows 和 Linux。尽管 Qt 的 QImage 类提供了图像处理的相关函数,而 OpenCV 的 HighGUI 组件也可以显示图像,但是为了充分发挥二者的长处,本文利用 OpenCV 做图像处理,利用 Qt 做图像显示。图 4 是在 Linux 下基于 OpenCV 利用 Canny 边缘检测算法^[5]提取微细电极的边缘轮廓并基于 Qt 显示的图像。

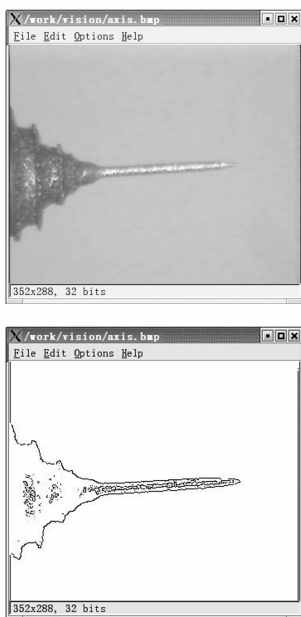


图 4 边缘检测

Fig. 4 Edge detection

在 OpenCV 中,数据结构 IplImage 包含了图像的所有信息。因此在图像处理显示过程中,需要在 IplImage 和 QImage 之间互相转换。将

QImage 转换为 IplImage 相对简单,只需利用 cvCreateImageHeader() 创建 IplImage 结构,然后将 QImage 的 bits() 返回值赋予 IplImage 的 imageData 项,这样就把 QImage 指向图像像素的指针复制给了 IplImage。代码片段示意如下:

```

cvImage=cvCreateImageHeader(图像格式);
cvImage->imageData=(char*)qImage->bits();
  
```

QImage 以 4 通道 32 位格式存储像素信息,格式为 AARRGGBB 或 _RRGGBB(忽略起始字节),而 IplImage 以 3 通道 24 位格式存储像素信息,所以经过上述转换后还必须通过 cvConvertImage() 将 32 位格式转换为 IplImage 要求的 24 位格式才能利用 OpenCV 进行图像处理。但是 cvConvertImage() 却不支持 24 位格式向 32 位格式的转换,因此将 IplImage 转换为 QImage 相对复杂,需要将 IplImage 的每个像素的每个通道的数据都复制给 QImage,因此算法速度较慢,但是不影响观察静止物体。代码片段示意如下:

```

for(y=0; y<height; y++, imageData+=step){
    for(x=0; x<width; x++){
        uint* p=(uint*)qImage->scanLine(y)+x;
        *p = qRgb ( imageData [ x* cvImage->
nChannels+2],
            imageData[x* cvImage->nChannels+1],
            imageData[x* cvImage->nChannels]);
    }
}
  
```

4 试验研究

4.1 系统标定

如果要精确测量物体的尺寸,必须先对测量系统进行标定。目前,图像测量系统的标定方法大都采用标准件法,即把标准件的精确尺寸 L 传递给数字图像,根据标准件的像所占有的 CCD 像素数 N ,计算得到每个像素所对应的尺寸系数 $K=L/N$ 。然后再对被测物体进行测量,测出目标所占有的像素数,乘以尺寸系数就可以得到物体的实际尺寸。为了去掉焦距和光线的变化等引起的系统误差,采用二次标定法来确定尺寸系数 K 。实验表明,被测物体的实际尺寸 L 和对应的像素数 N 之间满足下列关系,即 $L=K \times N+B$,

其中 B 就是测量中的系统误差。通过两次标定就可以确定 K 和 B 的值。这样可消除系统误差对测量准确度的影响。

4.2 试验方案

利用块状电极电火花磨削微细轴是一种简单高效的加工方法。为了兼顾加工效率和加工质量,应将微细轴分层磨削,外面几层使用较大的放电参数以提高加工速度,里面几层使用较小的放电参数以提高加工精度。每磨削一层后,在线观察微细电极的状态并测量尺寸,确定下一步的进给量。

数控系统采用 PMAC 作为运动控制器, PMAC 允许用户解释 G 代码,因此可以利用空闲的 G 代码(如 G60)在数控程序中实现观测电极的功能。如 G60 可以解释如下:

N60000

各轴按原轨迹回退到初始位置;

Z 轴快速运动到观测位置;

等待用户观测;

Z 轴快速运动到初始位置;

各轴按原轨迹运动到原加工位置;

RETURN

图 5 是在加工中在线观察的微细轴图像,图 5(a)表示加工过程中发生了断裂现象,需要及时将断裂部分去除,然后重新加工;图 5(b)表示加工过程中发生磨削不均的现象,需要更换进给伺服轴加工;图 5(c)表示加工顺利完成。图 6 是在线测量系统(OMS)在线测量和扫描电镜(SEM)离线测量的微细轴图像比较。图 6(a)是在加工

中在线测量的微细轴图像,图的右上角标定了 $100\ \mu\text{m}$ 的像素长度,经边缘检测后,微细轴的特征尺寸可以准确测量。图 6(b)是在加工后利用扫描电镜离线测量的微细轴图像,图的左下角显示了 $1\ \text{mm}$ 的标尺长度。表 1 将微细轴直径的在线测量系统(OMS)在线测量值与扫描电镜(SEM)离线测量值进行了对比,可以看出,二者的相对误差在 5% 以内,证明了系统的可行性。

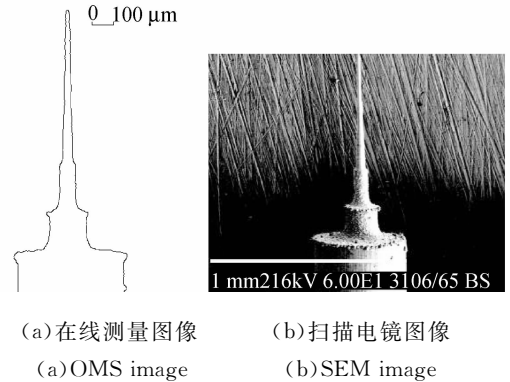


图 6 在线测量与扫描电镜测量的微细轴图像

Fig. 6 Image of micro axis measured by OMS and SEM

表 1 在线测量与扫描电镜测量的微细轴直径

Tab. 1 Diameter of micro axis measured by OMS and SEM

| OMS 在线 测量值(μm) | SEM 离线 测量值(μm) | 差值 (μm) | 相对差值 (%) |
|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------|-------------|
| 239.49 | 244.81 | 5.32 | 2.17 |
| 162.02 | 159.09 | 2.93 | 1.84 |
| 107.54 | 109.55 | 2.01 | 1.83 |
| 80.86 | 79.37 | 1.49 | 1.88 |
| 68.31 | 68.09 | 0.22 | 0.32 |
| 45.79 | 44.94 | 0.85 | 1.89 |
| 26.42 | 25.52 | 0.9 | 3.53 |
| 20.81 | 21.69 | 0.88 | 4.06 |
| 11.73 | 12.11 | 0.38 | 3.14 |

4.3 误差分析

光学系统的误差主要是透镜像差、感光像元排列误差和透视误差。成像系统的几何畸变误差是典型的系统误差,它是多种误差的组合,是影响光学测量精度的关键因素之一,提高系统分辨率及采取各种标定方法能有效降低系统误差。噪声是图像在成像、数字化和传输等过程中受到各种干扰形成的,主要是由摄像机产生的。另外,视频

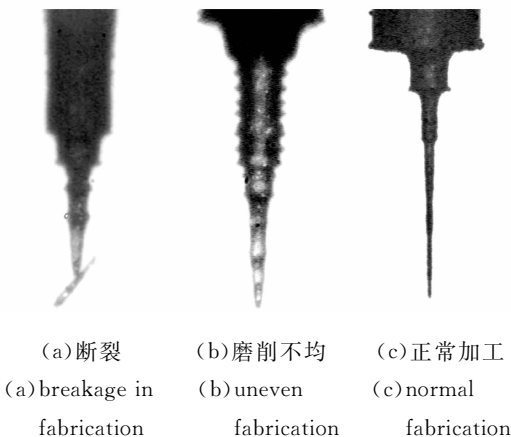


图 5 在线观察的微细轴图像

Fig. 5 Image of micro axis observed by OMS

图像采集的像素抖动也是噪声的重要来源。有效利用相关滤波可减弱或抑制各种噪声。软件算法误差主要是边缘检测差分近似导数时的算子误差^[6-8]。

5 结 论

微细电极的在线制造和检测一直是微细电

火花加工的技术难点,本文使用卤素灯光源、变焦显微镜头和 CCD 摄像机构建了微细电极的在线测量系统,基于 Linux 操作系统利用数字图像处理技术获取轮廓边缘,可以在线观察微细电极的状态以及在线测量微细电极的尺寸,测量结果与扫描电镜的离线测量值的相对误差在 5% 以内,为微细电火花加工向更高精度发展提供了重要的观测方法。

参考文献:

- [1] 赵万生. 先进电火花加工技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
ZHAO W SH. *Advanced electrical discharge machining technology* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [2] 张勇, 王振龙, 胡富强. 微细电火花加工中微细电极的制作与检测技术研究[J]. 制造技术与机床, 2004, (8): 96-98.
ZHANG Y, WANG ZH L, HU F Q. Research on technique of microelectrode on-line fabrication and its measuring in micro EDM [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2004, (8): 96-98. (in Chinese)
- [3] 贾宝贤. 多功能微细特种加工系统及加工技术的研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2005: 23-57.
JIA B X. *Research on multifunctional micro nontraditional machining system and key processes* [D]. Harbin Institute of Technology, 2005: 23-57. (in Chinese)
- [4] CARL D M, STEVEN T W. The theory of diffraction-limited resolution in microparticle image velocimetry [J]. *Measurement science and technology*, 2003, 14(7): 1047-1053.
- [5] CANNY J. A computational approach to edge detection [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8(6): 679-698.
- [6] SONKA M, HLAVAC V, BOYLE R. *Image processing, analysis, and machine vision* [M]. Beijing: People Post Press, 2002.
- [7] 吴晓波, 安文斗, 杨钢. 图像测量系统中的误差分析及提高测量精度的途径[J]. 光学精密工程, 1997, 5(1): 133-141.
WU X B, AN W D, YANG G. Error analysing and approaches of improving measuring precision in image measuring system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1997, 5(1): 133-141. (in Chinese)
- [8] 张少军, 苟中魁, 李庆利, 等. 利用数字图像处理技术测量直齿圆柱齿轮几何尺寸[J]. 光学精密工程, 2004, 12(6): 619-625.
ZHANG SH J, GOU ZH K, LI Q L, *et al.* Digital image processing technology for spur gear measurement[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(6): 619-625. (in Chinese)

作者简介: 郭锐(1978—), 男, 山东济南人, 哈尔滨工业大学博士研究生, 主要研究方向是数控系统、视觉系统、微细电加工技术等。E-mail: guoruihit@yahoo.com.cn