

超声复合电解加工在线参数检测、控制与试验研究*

张宇,孙继欣,赵青青,朱永伟

(扬州大学机械工程学院,扬州 225127)

[摘要] 超声复合电解加工的参数条件变化较大时,其系统共振条件难以维持,影响加工效率与精度。设计、构建在线参数检测与实时控制系统,选用激光、电流等高速高精传感器,进行超声频率及位移、超声发生器与脉冲电源的输出电压、电极间电参数进行在线检测,利用 PCI-1706U 数据采集卡、控制计算机等构建参数实时采集、控制系统,由单片机 STM32 控制数字电位器,实现超声参数在线检测、实时调节;电极间电压可由系统实时优化调节。采用 Visual C++ 6.0,通过多串口类进行系统软件设计,对各信号数据进行采集、处理、显示等。进行系统自动调节与手动调节对比试验,采用参数实时控制系统进行超声复合电解加工,在保持精度条件下,能有效提高加工过程稳定性和加工效率。

关键词: 超声复合电解;在线参数检测;实时控制;控制系统设计;对比试验

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.03.060



张宇

硕士研究生,研究方向为超声复合电加工技术。

随着尖端科学技术产品向高精度、高速度、小型化等方向发展,对产品微型化要求日益迫切^[1]。超声加工是硬脆性难加工材料的有效加工方法,但加工硬度高且韧性强的材料时,效率较低且工具头易磨损,而电火花、电解加工由于不受金属材料本身力学性能的影响,使得材料的加工过程变得简单容易且工具头磨损极低^[2-3]。

逐渐发展起来的超声复合电解加工,是将超声加工与电解加工复合的加工方法,该方法结合了二者的加工优势,在零部件的微细加工中发挥了重要作用^[4-5]。微细磨粒的存在使阴极与工件间保持很小的间隙,可避免发生电解短路,有效提高加工精度及表面质量^[6-7]。

但仅是将超声与电解作用的简单复合,机理上不能优化复合作用的能量匹配关系,对加工结果的改善还

有待进一步提高。保证超声复合电加工过程的稳定性,微机电系统开始向多功能化、智能化方向发展,提高工件的加工效率,改善加工质量,强化对加工过程参数的系统化检测与智能化控制过程^[8-9]。

本文基于计算机与采集卡构建的数据采集系统,将超声加工的物理量转换为用于计算机处理的数字量信号^[10]。在检测控制软件的设计中,利用研华数据采集卡提供的 SDK 函数,采用 VC++6.0 编程工具进行数据检测软件的设计,实现对超声复合电加工过程参数的检测功能。研华数据采集卡作为硬件基础,构建数据采集系统,该系统对超声复合电加工过程中,对直接影响加工精度、加工效率及加工过程稳定性的参数进行实时监测,并将加工过程中的实时参数信号高速采入到计算机中。将工作中选用的电压、

* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375428, 51775484);“十三五”装备预研领域基金资助项目(61409230304);江苏省精密微细制造重点实验室开放基金资助项目(2016)。

电流、位移、温度等信号传感器连接至数据采集卡的接线端子,利用数据采集卡与控制计算机进行通信,完成数据的在线采集检测和控制,加工试验中可在保证精度下,提高加工效率及稳定性。

超声复合电解加工机理及在线参数分析

超声复合电解加工原理如图1所示,工作液选用钝化性电解液,为避免工具电极与工件直接接触而造成短路,电解液中加入微细磨粒。将工具电极和工件分别接入直流电源的负极和正极,使用激光微位移传感器检测工具阴极端面的超声振动位移信号,并将位移电信号引入同步斩波器,处理获得斩波脉冲,实现对直流电源的开断过程控制,进而使工具阴极超声频振动与电源加电区间同频、同步。实现金属导电材料高精度、高效率的微细加工。

超声加工的能量 J 为:

$$J = \frac{1}{2} \rho c (2\pi f A)^2$$

式中, A 为工具端面的振幅(mm); f 为超声振动频率(Hz); ρ 为弹性介质的密度; c 为弹性介质的波度。超声加工能量主要受振幅 A 和频率 f 影响,频率 f 为加工系统的共振频率,振幅 A 通过控制超声电源电压 U_1 来改变,电压越大振幅越大(电压与振幅成正比例关系),能量也就越大,加工效率提高,同时加工的精度会下降。

电解加工是利用阳极溶解作用去除材料加工,其能量 W_E 为:

$$W_E = \int u(t) i(t) dt$$

式中, $u(t)$ 为电解间隙中随时间而变化的电压(V); $i(t)$ 为电解间隙中随时间变化的电流(A)。电解加工能量主要受电流 i 影响,电压越大,电流越大,能量也越大,通过调节脉冲电源电压 U_2 来改变电流大小。电解加工的间隙也是影响加工效率的

重要因素,加工间隙直接影响加工电流 i ,加工间隙越小电流将会变大,电解能量也越强。

数据参数在线检测与采集

超声复合电解加工控制系统如图2所示。在超声复合电解加工系统中增设高速、高精传感器,如电压传感器、电流传感器、温度传感器和位移传感器等,该采集系统可对系统工作过程中的超声振动参数(超声频率 f 、激励电压 U_1 、振幅 A)、电加工参数(脉冲电压 U_2 、电加工电流 i 、温度 t 等)、工作台参数(由加工深度 h 表征)进行在线检测,将各传感器连接至数据采集卡,通过计算机实时显示所检测参数的动态变化。

在加工过程中激光位移传感器检测工具阴极振动,微位移传感器检

测工件的加工深度,工件由工作台在磁极排斥力作用下随之上升,保证工件表面与工具头表面始终能够保持接触状态。工作台进给单元由 X 、 Y 轴移动平台、360度旋转台、 Z 向磁悬浮装置以及安装板组成,通过手动调节,可实现 X 、 Y 方向的水平移动和周向转动,磁悬浮装置由一对磁极与螺旋测微仪组成,通过对测微仪距离的调节,可控制平台的高度。在加工前,将工件粘接于工作台上,通过调节 X 、 Y 旋钮,使工件在 X 轴和 Y 轴方向移动,使阴极工具头到达工件上预定加工的位置上方。通过对螺旋测微仪上的调节机构调整两个磁极之间的距离,使工作台保持一定的高度,在加工中,工具头与工件始终存在一定的静压力。

由图3可以看出,采集系统主要

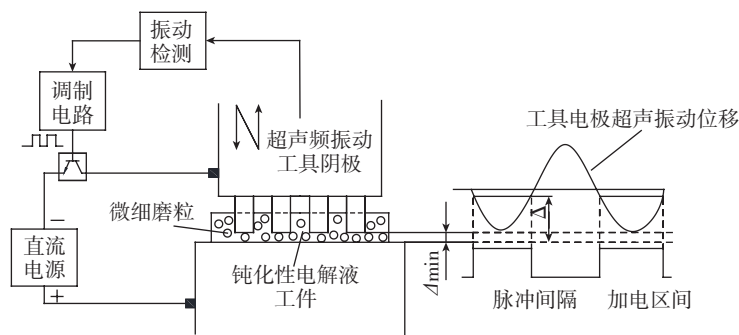


图1 超声复合电解加工原理图

Fig.1 Schematic diagram of ultrasonic combined electrochemical machining

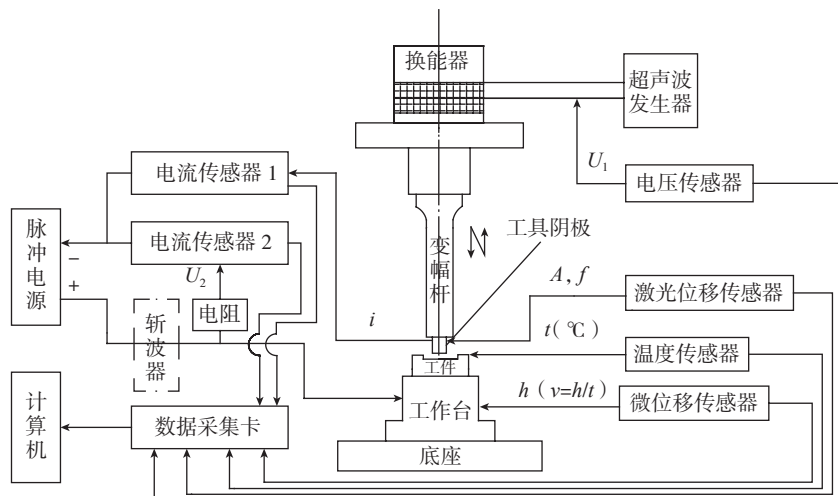


图2 超声复合电解加工控制系统图

Fig.2 Ultrasonic composite electrochemical machining control system diagram

用到了采集卡的模拟量输入功能,加工过程中采集的数据较多,为保证数据采集过程的高速性、可靠性和稳定性,优选 PCI 总线接口方式与控制计算机连接。

PCI-1706U 是一款功能强大的高速多功能卡,适用于 PCI 总线。PCI-1706U 的模拟量输入量程范围有 4 种,分别为 $\pm 10V$ 、 $\pm 5V$ 、 $\pm 2.5V$ 和 $\pm 1.25V$,则对应的 LSB 分别为 0.04V、0.04V、0.06V 与 0.08V。在超声复合电解加工过程中用于检测每种不同参数的传感器都对 PCI-1706U 采集卡的一个 AI 差分通道,每种型号传感器所对应系统参数的检测范围以及输出电压,根据传感器的输出电压选择每个 AI 通道的电压量程,各通道采集数据如表 1 所示。

在线参数控制软件设计

Windows 平台不支持直接对硬件的底层操作,将利用研华数据采集卡提供的 SDK 函数,采用 VC++6.0 编程工具进行数据检测软件的设计,实现对超声复合电解加工过程参数的检测功能。

多线程串口类 CSerialPort 类解决上位机与激光位移传感器、单片机 STM32 多串口同时通信问题,通过控制算法的编写与已检测参数的反馈,实现超声复合电解加工过程参数的智能控制功能^[11]。

CSerialPort 类适用于多串口函数编程的最大优点是消息接收函数的参数可以标明串口号,数据通信过程中,每个数据发送端口仅有一个与之匹配的接收端口,这使得多串口数据得以准确发送与接收^[12]。采用 CSerialPort 类进行多串口编程的主要步骤如下:

(1) 添加类文件和类对象。

将 SerialPort.cpp、SerialPort.h 两个文件复制到工程文件夹中并添加至工程,在视图类头文件中添加说

明: #include "SerialPort.h",并在构造函数中定义 10 个 CSerialPort 类对象。

(2) 多串口检测与初始化工作。

在 OnInitDialog() 函数中初始化 m_Ports[n],实现系统串口自动扫描并在相应组合框中列出的功能。串口的初始化工作是通过 InitPort() 函数来完成的,包括所要打开的串口的端口号、串口配置参数、通信事件与发送缓冲区大小。判断该串口是否被占用,并对该串口进行初始化。

(3) 添加消息映射机制。

第三方提供的 CSerialPort 类被加入工程后,不存在自动的消息映射机制,因此需手工添加,添加步骤为:

- 在头文件 StreamingAIDlg.h 中添加串口字符接收消息 WM_COMM_RXCHAR (接收缓冲区内有一个字符)的响应函数声明;
- 在 StreamingAIDlg.cpp 文件中进行 WM_COMM_RXCHAR 消息映射;

· 在源文件 StreamingAIDlg.cpp 中加入函数的实现。

把激光位移传感器、单片机与 PLC 的端口默认作为 COM1、COM2 与 COM3,与之相对应的 m_Ports^[1]、m_Ports^[2] 与 m_Ports^[3] 分别作为各个设备串口的类对象。

通讯设置管理模块:利用研华采集卡提供的 SDK 函数类库进行数据采集卡的通讯配置,并实现各模拟输入通道与激光位移传感器、电压、电流等传感器的数据通信;调用串口 CSerialPort 类,通过端口分配,实现上位机控制软件与激光位移传感器、单片机以及 PLC 的多串口交互通信,如图 4 所示。

超声复合电解加工系统中主要的控制模块设备为:激光位移传感器、单片机和 PLC。LK-G5000 激光位移传感器支持 RS232C 串口与外部设备连接及通讯,可通过命令获取测量值以及更改控制器的参数;STM32F1 单片机的 CH340 芯片具有

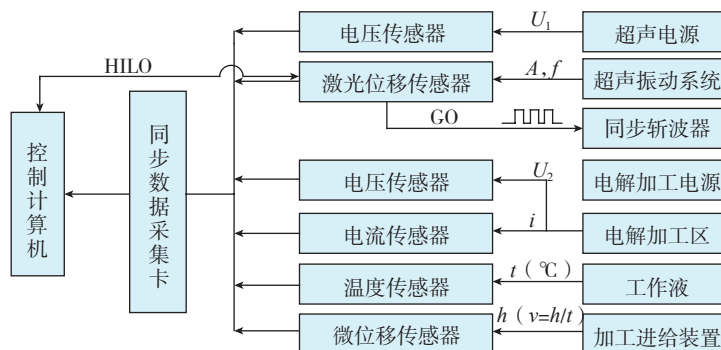


图3 加工过程参数采集框图

Fig.3 Process parameter collection block diagram

表1 PCI-1706U采集卡AI通道分配设置

通道	检测信号	传感器 / 型号	输出电压 / V	选择量程 / V
0	工具振幅 A	激光位移传感器 LK-G5000(H020)	-6~6	± 10
1	加工深度 h	位移传感器 IL-030	-5~5	± 5
2	超声电压 U_1	电压传感器 CHV-25P/400	0~ ± 5	± 5
3	脉冲电压 U_2	电流传感器 CHCS-LTSH-15A	$2.5 \pm (0.625 \times IP/IPN)$	± 5
4	电加工电流 i	电流传感器 CHB-15AD-15A	0~5	± 5

USB 转 RS232 的功能,通过 USB 线即可与控制计算机通信,同时起到为单片机供电的作用;由于控制计算机串行端口的数量有限,本文设计采用 USB 串口转接线实现 PLC 与计算机的连接与通信。控制模块的串口通信接线如图 5 所示。

超声复合电解加工试验

图 6 为超声复合电解加工系统图,其设备有超声振动系统、工作台、超声电源、高频单脉冲电源、同步斩波器、激光位移传感器、传感器板、数据采集卡、双通道数字存储示波器、单片机、PC 机等。

自动进给加工过程中,只要预设工具电极的超声振幅区间 $[A_0, A_1]$ 以及材料加工深度 h_0 ,即可实现自动加工过程。自动模式中以激光位移传感器所检测的超声振动幅值为判断信号(加工前先将系统调至共振,激光位移传感器直接测量工具头的振幅,加工过程中在工具与变幅杆之间安装长条金属薄片,激光位移传感器通过测量薄片的振幅,两数据误差相差不大),当所检测幅值小于预设幅值下限 A_0 或大于预设幅值上限 A_1 时,上位机向单片机发送指令使超声电压增大或减小,进而改变振动幅值,直至其在预设区间值内;加工过程中,还对材料的加工深度进行实时检测与对比,当达到预设加工深度值 h_0 时,上位机自动向单片机发出指令,使超声电源功率为零,且电加工电源关断,结束加工过程。

检测控制系统除了能准确反应加工中的各能量匹配关系,以及达到的加工效果,还应有友好的人机界面,可以让操作者更容易运行该系统。人机界面显示模块:包括检测模块、控制模块、显示模块、存储模块等,通过人机界面显示模块,操作者可以设置系统工作参数,选择所需设备端口与采集卡采样通道。

按照超声复合电解加工功能模

块规划其软件界面,实际设计运行的检测控制软件界面如图 7 所示。

(1) 电极制作。

在工具电极设计制作时,需选用强度、刚度足够高及耐磨性较好的材料,如可采用调质 45 钢作为工具电

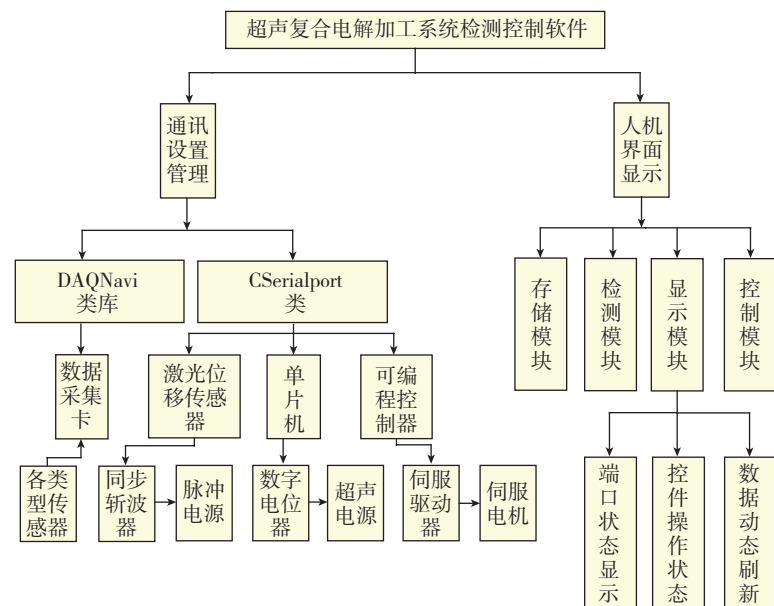


图4 超声复合电解加工系统检测控制软件的模块图

Fig.4 Module diagram of the detection control software of ultrasonic composite electrochemical machining system



图5 控制模块RS-232串口通信接线

Fig.5 Control module RS-232 serial port communication wiring



图6 超声复合电解加工系统图

Fig.6 Ultrasonic combined electrochemical machining system diagram

极制作材料。工具电极整体加工后,用微细组合电加工方式进行电极头端面加工,可有效保证加工精度^[13]。为便于电极头端面形状的制作,将电极凸起高度设计为3.0mm,其远大于所要加工的微凹坑深度,并留有较大加工损耗余量,可进行多次加工试验。工具电极形状设计如图8(a)所示,实物如图8(b)所示。

(2) 加工对比试验。

采用阵列正方形微凸起工具电极,材料为硬质合金YG8,加工参数:工件与工具间静压力2.0N,加工时间2min,磨料为1600目碳化硅,磨料悬浮液质量分数10%,电解液为质量分数5%的NaNO₃水溶液。3V电压超声复合电解人工控制调节加工结果如图9(a)所示。进行3V电压超声复合电解自适应控制加工试验结果如图9(b)所示。

根据体视显微镜观察、多组试验数据测量获得的平均试验数据,手动加工YG8材料平均深度为0.32mm,自动进给加工YG8平均深度为0.43mm。由图9两组试验结果进行对比分析可知,两种加工方式的加工精度相近,但与手动辅助调节加工比较,采用自动控制系统进行超声复合电解加工,其加工效率得到有效提高,且实际加工过程更加稳定。

结论

(1) 利用类库函数进行检测模块的设计,可对超声复合电解加工过程采集卡通道参数进行连续采样,检测的参数实时传输到计算机控制软件上,进而参数调节使加工过程更加稳定。

(2) 根据对加工过程参数的在线检测与控制要求,用控制软件进行自适应力加工试验与人工调节加工试验结果对比,采用自动控制系统进行超声复合电解加工,可显著提高加工过程的稳定性和加工效率。

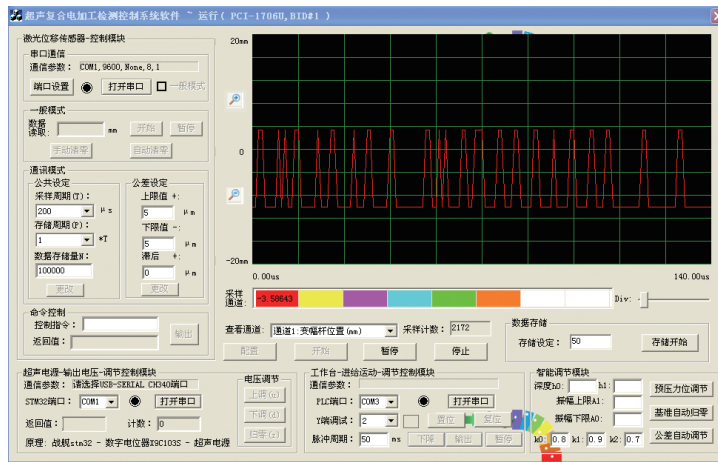


图7 超声复合电解加工系统检测控制软件

Fig.7 Ultrasonic combined electrochemical machining system test control software

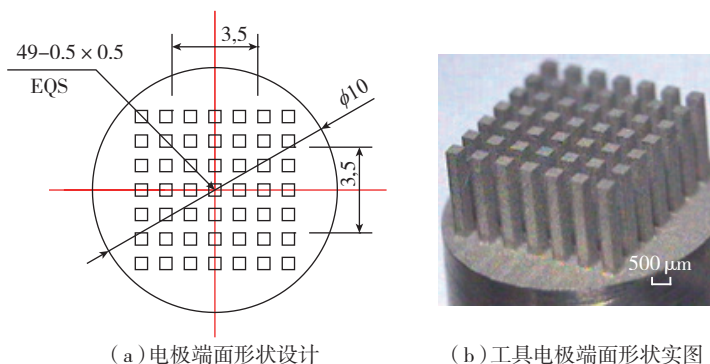


图8 工具电极设计及实物图

Fig.8 Tool electrode design and real figure

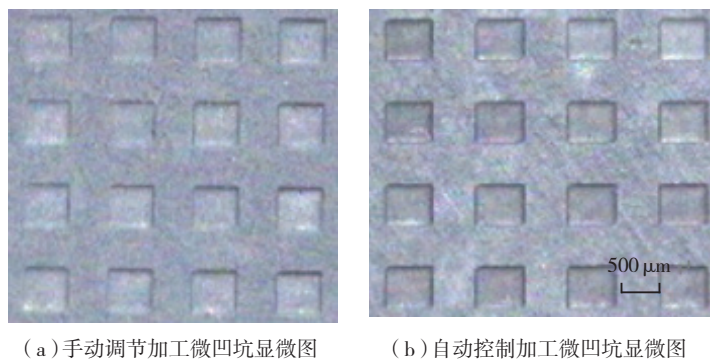


图9 两种加工方式加工效果对比图

Fig.9 Comparison of processing effect of two processing methods

参考文献

[1] 袁哲俊,王先奎.精密和超精密加工技术[M].北京:机械工业出版社,2012.
YUAN Zhejun, WANG Xiankui. Precision and ultra-precision machining technology[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2012.
[2] 肖强,李言,李淑娟.硬脆材料超声波精密加工机理及影响因素研究[J].兵器材料科学与工程,2010,33(3):26-28.

XIAO Qiang, LI Yan, LI Shujuan. Ultrasonic precision machining mechanism and influencing factors of hard and brittle material[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2010, 33(3): 26-28.

[3] WANG Z H, ZHU Y W, FAN Z J, et al. Mechanism and process study of ultrasonic combined synchronizing pulse electrochemical micro machining[C]//The 16th International Symposium on Electro-machining(ISEM XVI).

Shanghai, 2010: 351-355.

[4] 赵万生, 顾琳, 康小明, 等. 从 ISEM-XV 看特种加工技术的最新进展 [C]// 中国机械工程年会论文集. 长沙, 2007.

ZHAO Wansheng, GU Lin, KANG Xiaoming, et al. The latest development of special processing technology from ISEM-XV[C]// Proceedings of the annual conference on mechanical engineering of China. Changsha, 2007.

[5] ZHANG C, RENTSCHER, BRINKSMEIER E. Advances in micro ultrasonic assisted lapping of microstructures in hard brittle materials: A brief review and outlook[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45: 881-890.

[6] WANG A C, YAN B H, LI X T, et al. Use of microultrasonic vibration lapping to enhance the precision of microholes drilled by micro electro-discharge machining[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42: 915-923.

[7] ZHU Y W, XU Y M, YUN N Z. The test study of ultrasonic combined electrochemical micro-machining[C]// Proceedings of The 15th

International Symposium on Electromachining. University of Nebraska-Lincoln. Pittsburgh: ISEM, 2007: 493-498.

[8] 陆永华, 赵东标, 云乃彰, 等. 基于六维力电解加工间隙在线检测试验研究[J]. 机械工程学报, 2006, 42(7): 126-131.

LU Yonghua, ZHAO Dongbiao, YUN Naizhang, et al. Experimental research of online monitoring interelectrode gap of electrochemical machining based on 6D forces[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(7): 126-131.

[9] 王希, 赵东标, 云乃彰. 基于力信号和智能控制的电解加工间隙检测与控制[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2005, 35(5): 719-723.

WANG Xi, ZHAO Dongbiao, YUN Naizhang. Measure and control of interelectrode gap of electrochemical machining based on force signal and fuzzy control[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2005, 35(5): 719-723.

[10] 冯雪. 数据采集卡性能指标与应用[J]. 工业控制计算机, 2008, 21(5): 10-11.

FENG Xue. Summarization performance

index and application of data acquisition card[J]. Industrial Control Computer, 2008, 21(5): 10-11.

[11] 李志刚, 张峰. 用 VC++ 开发 PC 与 PLC 间的一种通讯程序[J]. 电子质量, 2002(4): 25-26.

LI Zhigang, ZHANG Feng. A program with VC++ for Communication between PLC and PC[J]. Electronics Quality, 2002(4): 25-26.

[12] 王艳伟, 程放, 周玉成. 多线程 CSerialPort 类的多串口通信实现[J]. 木材加工机械, 2012(2): 1-4.

WANG Yanwei, CHENG Fang, ZHOU Yucheng. Realizing the multi-serial port communication based on the multithread Cserialport class[J]. Wood Processing Machinery, 2012(2): 1-4.

[13] QU N S. Micro wire electrochemical machining of microarray holes[C]// Proceedings of the 15th International Symposium on Electromachining. Pittsburgh: ISEM, 2007: 325-328.

通讯作者: 朱永伟, 博士、教授、博士生导师, 研究方向为机电系统控制及精密微细特种加工技术, E-mail: ywzhu@yzu.edu.cn。

Online Parameter Detection Control and Experimental Research of Ultrasonic Combined Electrochemical Machining

ZHANG Yu, SUN Jixin, ZHAO Qingqing, ZHU Yongwei

(College of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

[ABSTRACT] The system resonance is difficult to maintain in the machining process of ultrasonic combined electrochemical machining, because a manual adjustment of ultrasonic frequency generates test error. This problem can be solved by constructing and perfecting the online parameter detection and control system of ultrasonic combined electrochemical machining. This study build the data acquisition system of the signal parameters by selecting a variety of high speed and high precision sensor, vibration displacement of tool electrode in the process of ultrasonic power and pulse power output voltage, EDM electrode current of online detection, and the use of PCI-1706U data acquisition card; designs the vibration displacement signal of laser displacement sensor detection as the chopper voltage control signal of pulse power supply; uses digital potentiometer to replace the original mechanical potentiometer, ultrasonic power supply, the output resistance of the digital potentiometer controlled by MCU STM32 communication. By the tools of Visual C++ 6.0 design of compound ultrasonic EDM detection and control system software, through the data acquisition card library programming, data acquisition, processing, display functions including the signal detection module design parameters; design the control software module through the serial port. Compared with the manual control parameters, the control system of ultrasonic combined electrochemical machining test can guarantee precision, improve the process stability and machining efficiency.

Keywords: Ultrasonic combined electrochemical machining; Online parameter detection; Real-time control; Control system design; Contrast test

(责编 大漠)