

高精度三维微结构微细电火花加工系统研究

林海波¹, 杨国哲²

(1. 台州职业技术学院 机电工程学院, 浙江 台州 318000; 2. 沈阳工业大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110023)

摘 要:针对微细电火花加工技术的特点, 开发、研制了高精度三维微结构加工的细电火花设备, 主要介绍了该装置的结构和数字比例、积分和微分(PID)结合双向静差补偿的控制方法, 实现放电间隙与放电状态的自适应调节, 并利用该装置进行了平台性能的试验研究, 试验结果表明该加工技术响应时间快、平稳、超低速和超高分辨率、加工效率较高, 可实现平台在 100 mm 行程内达到亚微米级精度, 最低速度为 0.1 $\mu\text{m/s}$, 闭环最小步进量为 100 nm, 可满足微细电火花加工的要求。

关键词:微细电火花加工; 超精密; 压电陶瓷电动机; 自适应调节; 双向静差补偿

中图分类号: TG662

文献标识码: A

Research on Micro EDM for High Precision Micro-structure Producing and Control System

LIN Haibo¹, YANG Guozhe²

(1. Dept. of Mechanical and Electrical Engineering, Taizhou Vocational & Technical College, Taizhou 318000, China;

2. School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China)

Abstract: A new equipment of micro-EDM with high precision three-dimensional micro microstructure has been developed according to the characteristics of micro-EDM technology and its technical features in this paper. Its structure and the controller of digital PID plus bi-directional static compensations are applied to reduce the output dead-zone of USM in the experiment system, the self-tuning regulator of discharge gap depending on discharge conditions is realized. The experimental study on the platform performance has been carried out by using the set-up. The results show that it can be quick response, smooth, ultra low speed, super resolution and machining efficiency etc and realize the submicron accuracy in a stroke of hundreds of millimeters, with the minimum speed of 0.1 $\mu\text{m/s}$ and the minimum closed loop step of 100 nm, which can meet the needs of micro-EDM.

Key words: micro EDM; Ultra-precision; Piezoelectric Ceramic Motor; self-tuning regulator; bi-directional static compensations

0 引言

近年, 精密和超精密加工技术飞跃发展, 全面提高了加工精度及整个机械制造业的技术水平, 并提高机械产品的质量, 性能和竞争力^[1]。人类在制造领域中采用的尺度将由微米迈向纳米。超精密加工已达纳米级, 甚至是亚纳米级(原子级)。学术界一般认为, 加工误差小于 0.01 μm 、表面粗糙度小于 0.025 μm 的加工方法属于超精密加工^[2-3]。

近年来, 微细电火花加工以其可进行三维复杂、微结构加工的能力和基于能量束加工原理, 为纳米级精度极微细电火花加工提供了良好的技术前

景^[3]。因为传统的加工工艺存在宏观切削力, 因此在加工微小零件, 特别是微米尺度时, 易产生变形、发热等问题, 精度难以控制^[4]。特种加工采用非常规的刀具或磨具对工件进行切削加工, 其是利用电能、光能、化学能、声能、磁能等物理、化学能量或几种复合形式、及其各种理化效应, 直接去除或增加材料加工具有高强度、高硬度和高韧性等难以加工的金属材料, 从而改变工件形状、去除材料、改变性能等, 属于一种非接触加工, 一般无机械切削力和切削热, 工件不会产生残余应力和变形, 也没有飞边毛刺, 因此在微小尺度零件、易变形和薄壁类零件的加

收稿日期: 2014-11-20

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(LY14E050001); 2013 年度浙江省高职高专院校专业带头人专业领军基金资助项目(IJ2013140)

作者简介: 林海波(1977-), 男, 浙江台州人, 副教授, 高级工程师, 硕士, 主要从事机电控制技术的研究。E-mail: linhaibo_tzvtc@163.com。

工中有不可替代的优越性^[4]。微细电火花加工不仅能加工微小孔,也能进行微细三维结构的加工,具有良好的加工潜力。微细电火花加工作为现代制造技术的一个重要分支受经济发达国家的高度重视,受研究者的广泛重视,也取得了很多令人惊喜的成果。

针对微细电加工所需要解决的问题进行研究,探索解决的途径,并通过实验,分析步进电机+压电陶瓷的宏微组合式驱动的三维极微细电火花加工系统的性能,验证了实现途径的正确性及实用性。

1 微细电火花加工平台的结构

三维微结构电火花加工系统主要包括进行三维扫描的工作台、脉冲电源、加工电极主轴头的进给、回退及工作液循环、过滤系统,如图1所示。

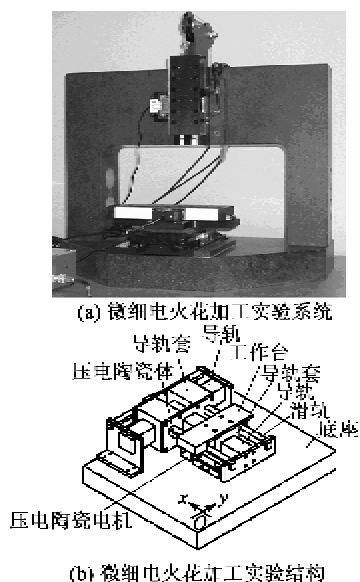


图1 微细电火花加工实验系统与结构

整个系统的基座全部由花岗岩组成,平台横梁采用整体式结构,避免了安装误差,花岗岩基座下加隔振元件,由于花岗岩具有绝缘性好、阻尼相对比较大和高的热稳定性、抗振性的优点,而适用于微细电火花加工。扫描工作台还包括了 x 、 y 、 z 三向的精密伺服机构,是实现三维运动的机构。 x 向平台与 y 向平台相互垂直置于花岗岩基座上, z 轴平台固定于的龙门型立柱上,主轴头直接安装在 z 轴运动部件上,由 z 轴运动部件带动主轴头做进给运动,放电电极安装在主轴头上,由脉冲电源提供电火花加工中的高频脉冲。 x 、 y 、 z 3个方向上都包括各自的传动系统、导向系统、驱动系统,行程分别为 $150\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 。;三个方向的驱动均

采用以色列 Nanomotion 公司的低速电机,该电机有 20 nm 的分辨率和理论上无限的行程,有高分辨率,无电磁干扰,运行无噪声,零输入自锁和快速响应,能实现高定位精度和重复定位精度,平台的各轴均以两组交叉的滚子导轨作为支撑。合理配置 REN ISHAW 的 RGH25 光栅精密光栅尺和电机的安装位置,尽量减小阿贝误差。与此同时,在该平台上,预留了安装具有大行程、六自由度的 PI 公司 P587 型的单模块压电陶瓷的纳米级精度的微动平台的位置,以期对平台的运动误差进行补偿,调整机构姿态,提高定位精度^[5]。

2 数字 PID 结合双向静差补偿控制与实验结果分析

由于脉冲放电能量极小,微细电火花在加工过程中材料的蚀出量很低,加工效率低,放电间隙仅数微米,与传统的电火花相比,放电稳定性差、切加工屑难以排出,脉冲利用率低。为保证火花放电的正常进行,伺服进给系统的进给量,必须控制在微米级的范围内^[6]。

为实现加工过程的稳定性,采用宏、微两者相协调控制的策略。以宏动扫描系统中的 z 轴作为放电间隙调整的宏动轴,主要作为为主轴进给的行程控制单元,但其具有一定的机械响应的滞后性,无法完全满足微细电火花加工的要求。以蠕动式的高频压电元件作为微动轴,满足间隙伺服调整的实时要求,实现高响应频率、精确、小步进的优势,可满足间隙伺服调整的实时要求。

主要通过放电状态的实时监测,实时检测电极与工件加工间隙,以间隙作为反馈信号,与正常、稳定加工时设置的间隙量进行比较,利用控制算法实时对放电间隙进行闭环控制,进而通过传送开路信号、短路信号、加工间隙的调整,保证加工的稳定进行。

采用压电陶瓷元件及压电陶瓷直线电机等先进技术相结合,通过数字 PID 结合双向静差补偿的控制方法,使平台在百毫米行程内达到亚微米级精度,确保伺服系统的高响应特性和低速稳定性,不出现爬行现象。

为测定、分析平台的最小步进能力,对各轴电机按设定值步进,从 $5\text{ }\mu\text{m}$ 开始逐步减少其步进量,监测平台的运行状态,直至得到最低的速度,实现平台平稳运动,最小步进的阶跃为 100 nm ,在空载条件

下对平台进行实验,图2为其实验的定位曲线,台阶为 100 nm。通过反复实验,在不同的控制参数下, x 、 y 、 z 3 轴均可达到 0.1 μm 的稳定的最小步距定

位,如图3示。实验验证,证明系统运行良好,平台能够达到百纳米的精度。此特性,平台在 500 nm 和 1 000 nm 步进运动上相似。

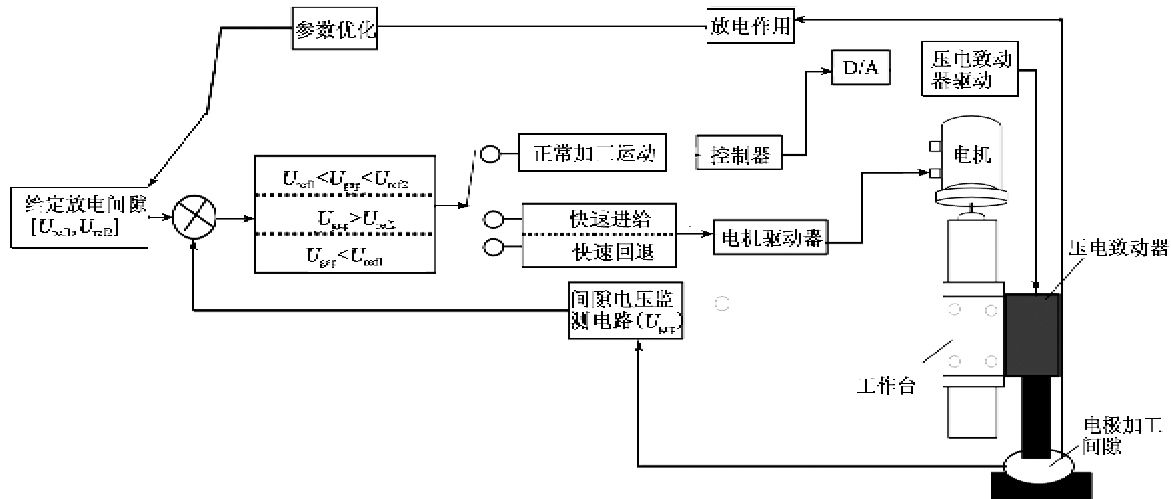


图2 伺服进给控制系统原理图

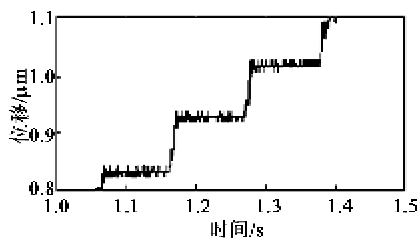


图3 100 nm 阶跃定位曲线

为了获得一个稳定的速度输出,进行引入一个反馈环节的闭环控制。减少在开环控制下,电机速度受由控制电压和接触表面摩擦状况影响较大的因素。压紧机构产生的摩擦力对无驱动输入的超声波电机进行定位,定子产生激励高频振动并产生位移是在输入数个脉冲波后,导致电机驱动死区。由此引入了静态误差,但预知死区宽度存在很大的困难,所以必须采用合理的控制算法补偿死区。通过实验确定的电机死区为 $-0.8 \sim 1.1$ V,可实现低速 0.1 $\mu\text{m/s}$ 输出,多轴联动能确保小于 2.5 μm 的跟踪精度。为提高闭环系统的精度,通过减小电机的死区特性影响来降低电机定位控制的静态误差,提高平台的定位精度。电机正负方向的死区边界值 $u_{d+} \neq u_{d-}$ (u_{d+} , u_{d-} 分别为电机输出死区正负边界值),采用双向静态误差补偿方法,通过确定电机的运动方向,设定不同的静态误差补偿值,当电机起动和换向时直接越过死区,以确保该电机处在线性的工作状态^[7]。实验表明,该实验平台在使用数字 PID+双静态误差补偿闭环控制,虽可使平台获得

纳米级精度,但系统的鲁棒性不佳,当控制条件改变时,通过不断调整静态误差与 PID 参数,可极大改善定位控制输出特性,提高平台闭环系统的运动精度,无爬行现象,如图4所示。

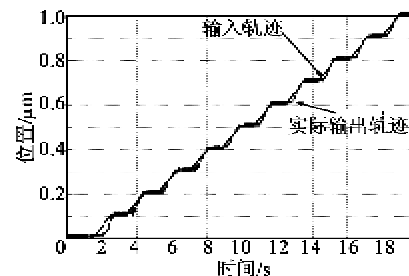


图4 系统定位控制最小步距 100nm

3 结束语

根据微细放电加工的特点和要求,针对三维定位系统的结构与性能进行了研究,着重解决该运动平台在组建过程中大行程与高精度之间的矛盾,使用压电陶瓷的电机作为驱动和滚动直线导轨作为传动,以实现高定位精度和重复定位精度。通过数字 PID 结合双向静差补偿的控制方法,较好地解决了微细电火花加工的控制问题。该方法能精确地反映整个实验平台的运行特性,基于该方法设计的双向静差补偿方案能有效地改善系统的误差和控制定位精度。经过平台的定位精度测试。实验结果表明,该平台可实现高精度自由、平稳的双向步进,满足微细电火花加工的要求,证明了该方案的有效性。

(下转第 532 页)