

# 脉冲参数主动匹配式 micro-EDM 脉冲电源

孙术发<sup>1</sup>, 刘美爽<sup>1</sup>, 狄士春<sup>2</sup>

(1.东北林业大学 工程技术学院,150040 哈尔滨; 2.哈尔滨工业大学 机电工程学院,150001 哈尔滨)

**摘要:** 为了提高微细电火花加工(micro-EDM)效率,设计了一种脉冲参数主动匹配式 micro-EDM 脉冲电源.采用等能量加工的方法,对不同的脉冲匹配参数进行加工效率对比实验,设计了脉冲参数主动匹配式脉冲电源的结构、功能和控制策略,并进行了加工实验验证.结果表明:选定合适的脉宽和脉间参数,使极间电容单次充电和单次放电,可获得最高的加工效率;该电源脉冲参数可根据极间电压和极间电容的大小自动调整;进行微小孔加工,加工连续性较好,加工效率和加工质量较高.利用该电源可进行微细加工,加工效率较传统电源有显著的提升,并能保证较高的加工质量.

**关键词:** 主动匹配式;微细电火花加工;脉冲电源;脉冲参数;加工效率

中图分类号: V261.6

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2014)07-0118-05

## Research of active pulse parameters matching micro-EDM pulse power supply

SUN Shufa<sup>1</sup>, LIU Meishuang<sup>1</sup>, DI Shichun<sup>2</sup>

(1. School of Engineering and Technology, Northeast Forestry University, 150040 Harbin, China;

2. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China)

**Abstract:** To improve the efficiency of micro-EDM, we designed a pulse power supply which can actively match pulse parameters for micro-EDM. By using the processing method of equal energy, we conducted the comparison experiments of processing efficiency in different pulse parameters, designed the structure, function and control strategy of this pulse power supply, and carried out a machining experiment. The results show that the highest machining efficiency can be obtained by selecting the appropriate pulse width and pulse interval, making the electrode capacitance charge and discharge for only one time, and the pulse parameter of the pulse power supply can automatically adjust to electrode voltage and capacitance. When machining the micro holes, the power supply has good processing continuity, high processing efficiency and quality, and when used for micro machining, the power supply can obviously improve the processing efficiency and get good processing quality compared to the traditional power supply.

**Keywords:** active matching, micro-edm, pulse power, pulse parameters, machining efficiency

微细电火花加工(micro electro discharge machining,简称 Micro-EDM)属于微细电加工的一种<sup>[1-2]</sup>,Micro-EDM 可加工难加工材料<sup>[3-5]</sup>,所需电极材料要求不高<sup>[6-7]</sup>,机床成本不高,耗能低.Micro-EDM 脉冲电源是将工频交流电流转换成一定频率的单向脉冲电流,以供给极间蚀除材料所需的能量.传统的脉冲电源采用预制式脉冲参数设置方

法,自动化程度不高.目前,国内外开始研制自适应和智能脉冲电源,日本沙迪克公司率先将智能技术应用在微细电火花加工中,采用人工神经网络技术设计的脉冲电源具有无需人工设定,可自动优化出最佳加工条件的功能,并可通过模糊控制实现最佳控制<sup>[8]</sup>;英国 kao 等<sup>[9]</sup>运用 BP 神经网络在线监测 Micro-EDM 脉冲电源放电状态<sup>[9]</sup>;大连理工大学周明等<sup>[10]</sup>提出了采用模糊逻辑的简单判别原则和 VLQ 神经网络相结合的智能化脉冲电源,该电源占用计算机资源少,实时性强,经实验验证具有很好的预测效果,误差率在 10%以内.在微小尺寸加工方面,Micro-EDM 也取得了长足的进展,韩国理工

收稿日期: 2013-05-15.

基金项目: 中央高校基本科研业务费资助项目(DL13BB08).

作者简介: 孙术发(1980—),男,博士,讲师;

狄士春(1965—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 孙术发,ssf6868@aliyun.com.

大学 Lee 等<sup>[11]</sup>加工出了直径  $7.3 \mu\text{m}$ , 长  $452 \mu\text{m}$  的微细电极, 用时仅为  $884 \text{ s}$ ; 东京大学 Yu<sup>[12]</sup> 成功加工出长、宽、高分别为  $500, 300, 200 \mu\text{m}$  的微汽车模型; 哈尔滨工业大学在硅材料上加工出了微型燃气轮机的涡轮盘、球冠及微传感结构<sup>[13]</sup>。

虽然 Micro-EDM 相比于其他微细加工方法具有很多优点, 而且在技术上也取得了长足的进步, 但是仍然有一些制约其发展的因素没有得到解决<sup>[14-15]</sup>。例如, 微细电火花加工一直存在能量控制困难, 加工效率低的问题, 这也影响了 Micro-EDM 的加工精度和加工质量<sup>[16-17]</sup>。

本文设计了一种脉冲参数主动匹配式脉冲电源, 该电源可根据加工精度要求确定极间电压和极间电流, 控制放电能量, 脉冲参数根据设定的极间电压和极间电容情况主动调节。该电源可以明显提高微细电火花加工的加工效率, 并保证较高的加工质量。

## 1 脉冲参数匹配对加工效率的影响

微细电火花加工效率受工作液、工件材料、进给速度、电参数等多方面因素影响。在除电参数以外的影响因素一定的情况下, 单个脉冲能量取决于极间放电电压、放电电流和放电持续时间, 单个脉冲的放电能量  $W_M$  为<sup>[18]</sup>

$$W_M = V_p I_p t_{on} \frac{1}{t_{on} + t_{off}}$$

材料的蚀除率  $R_{MRR}$  可表示为

$$R_{MRR} = \alpha W_M = \alpha V_p I_p t_{on} \frac{1}{t_{on} + t_{off}} = \alpha V_p I_p t_{on} f. \quad (1)$$

式中:  $\alpha$  为材料蚀除相对常数, 指每单位电能的材料蚀除体积;  $V_p$  为极间电压;  $I_p$  为电流;  $t_{on}$  为脉宽;  $t_{off}$  为脉间;  $f$  为脉冲频率。

由式(1)可知, 在  $V_p$  和  $I_p$  等加工条件一定的情况下,  $R_{MRR}$  与脉宽和脉间的匹配有关。本文实验研究了脉冲参数匹配对加工效率的影响, 图 1 为脉冲电源充放电波形图。可见在未发生放电之前, 充电波形为阶梯式, 即  $t_{on}$  时间在充电,  $t_{off}$  时间为等待时间, 所以在达到击穿电压之前,  $t_{off}$  既不对电容充电也不放电加工,  $t_{off}$  时间为无效时间, 其影响充电效率, 进而影响加工效率。

为了验证脉冲参数匹配对微细点火加工效率的影响, 本文利用晶体管脉冲电源进行加工效率试验, 采用手动匹配脉冲参数, 测定不同参数匹配的加工效率值。电极直径选择  $0.5 \text{ mm}$  钨电极, 加工孔深度为  $0.5 \text{ mm}$ , 记录加工时间。具体实验参数见表 1。

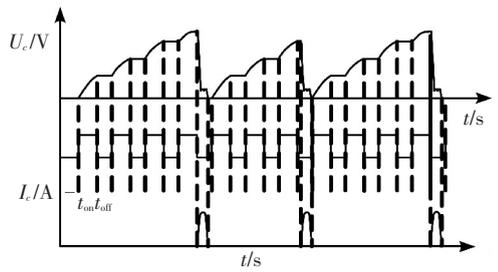


图 1 脉冲电源加工波形

表 1 实验参数

开路电压/V	参考电压/V	电流/A	加工极性	电机转速/( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ )	单次加工时间/s
250	180	0.42	正极性	2 000	5

设计 4 组脉宽和脉间匹配参数, 分别记录加工时间, 绘制加工时间曲线图见图 2。

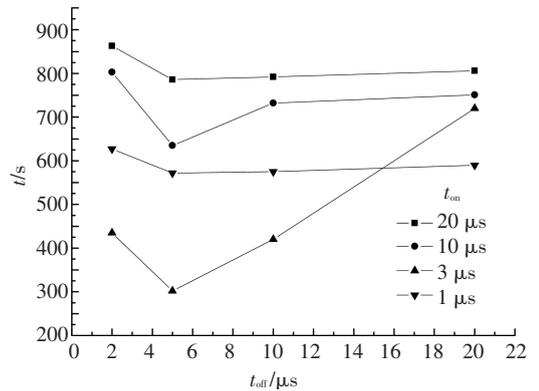


图 2 不同脉冲参数加工时间曲线

由图 2 可知, 脉宽对加工效率影响较大, 选取合适的脉宽可以显著提高加工效率; 脉间对加工效率影响没有脉宽显著, 但在选择合适的脉宽后, 应选择合适的脉间, 否则也会影响加工效率。

图 3 为脉宽在  $1, 3, 10$  和  $20 \mu\text{s}$ , 脉间为  $5 \mu\text{s}$  时采集的加工波形图。脉宽为  $1 \mu\text{s}$  时, 在单个脉宽时间内, 极间电容存在多脉冲连续充电的情况, 放电连续性不好, 这是影响其加工效率的主要原因; 脉宽为  $3 \mu\text{s}$  时, 在单个脉宽时间内, 极间电容单次充电并单次放电, 放电击穿电压都在最大开路电压值附近, 放电的连续性好, 放电均匀, 所以加工效率最高; 脉宽为  $10 \mu\text{s}$  时, 在单个脉宽时间内, 极间电容存在单脉冲多次放电的现象, 而且放电时的击穿电压大小不等, 这使得蚀除能量不均匀, 而且极间没有充分的电离, 导致短路的情况增多, 这些都影响微细电火花的加工效率; 脉宽为  $20 \mu\text{s}$  时的情况与脉宽  $10 \mu\text{s}$  时情况相似, 而且同一个脉宽内存在更多的多次放电现象, 低电压放电的情况和短路情况也更多, 这是导致其加工效率在 4 组参数中最低的主要原因。

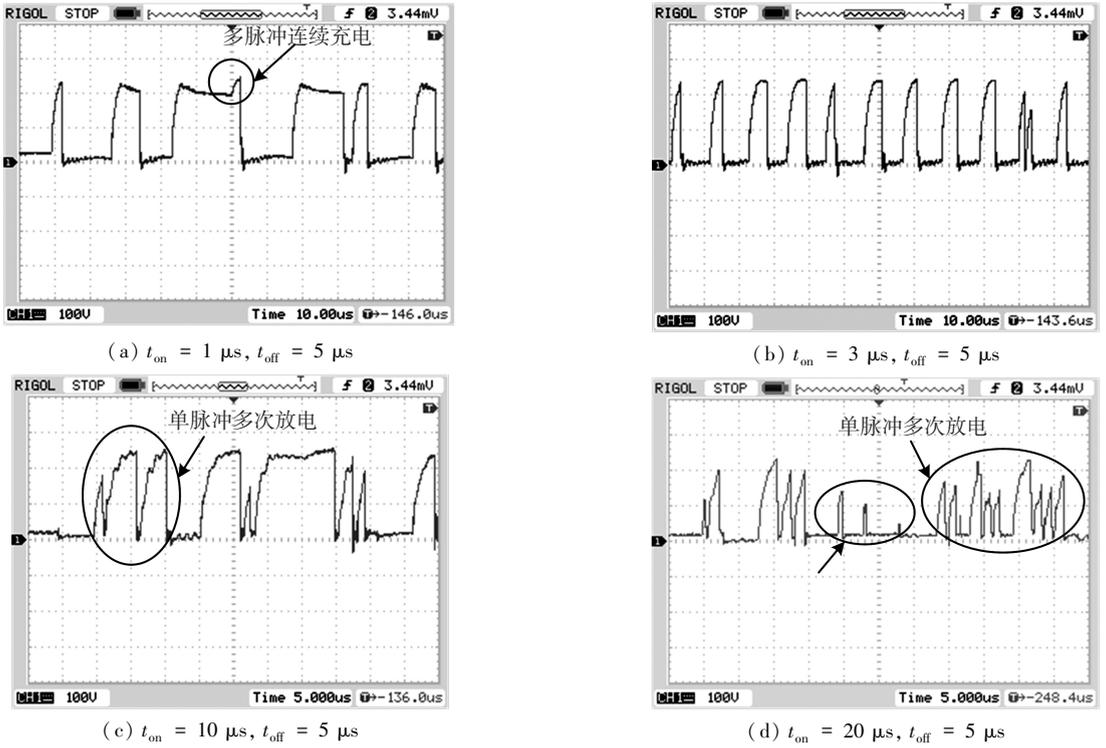


图 3 加工波形

通过实验分析发现,在等能量加工的情况下,选定合适的脉宽和脉间参数,使极间电容单次充电和单次放电,微细电火花加工效率最高.基于这一发现,本文提出一种脉冲参数主动匹配式脉冲电源,该脉冲电源脉冲参数根据极间电容的大小

自动匹配,可有效提高微细电火花加工效率.

## 2 脉冲参数主动匹配式脉冲电源设计方案

根据脉冲参数匹配原理,本文设计的脉冲参数主动匹配式脉冲电源的总体设计方案如图 4 所示.

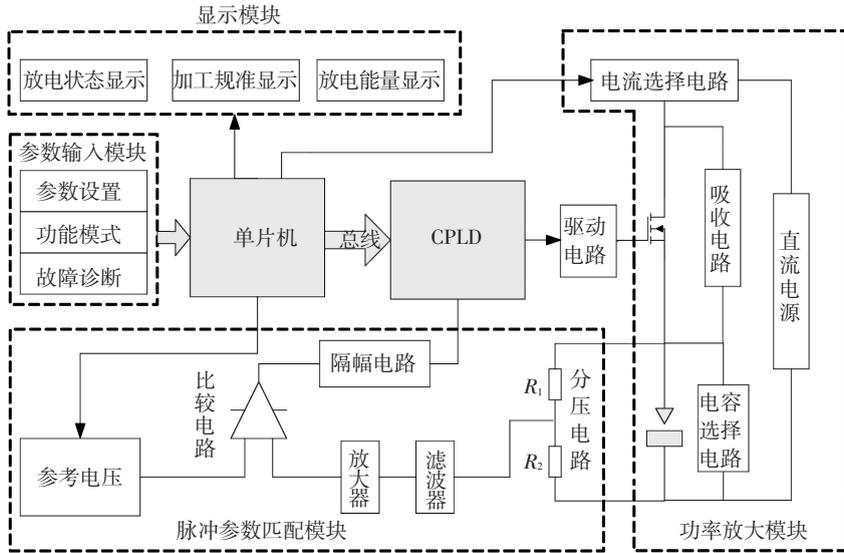


图 4 脉冲电源设计方案

脉冲参数主动匹配式脉冲电源主要包括:单片机、复杂可编程逻辑器件(CPLD)、参数输入模块、功率放大模块和脉冲参数匹配模块.单片机与CPLD是整个电源的核心部分,控制参数设定和脉冲信号的输出;参数输入模块实现加工前的参数预置,包括开路电压、电流和极间标称电容等参数的预录入,还包括脉冲电源功能模式的选择和故障诊断;功率放大模块主要完成放电电流的选

择、寄生参数的吸收、极间标称电容的选择和为电极与工件提供放电通道;脉冲参数匹配模块主要包括分压电路、滤波器、放大器、比较电路和限幅电路,用来采集极间电容两端的电压信息并传给CPLD,从而输出动态调整的脉宽和脉间.

该电源与现有的微细电火花脉冲电源相比主要有两方面优点:一是该电源增加了脉冲参数匹配模块,可实现脉宽和脉间的在线动态设定,具有自

动化程度高, 参数匹配精度高的特点; 二是该电源在设计方面强调对寄生参数的控制, 通过增加吸收电路, 选择寄生参数小的元器件, 设计 PCB 时避免寄生参数发生等方法, 将寄生参数控制到最小。

### 3 脉冲参数主动匹配式脉冲电源控制策略

图 5 为脉冲参数主动匹配式脉冲电源脉冲控制策略图, 图中  $U_0$  为直流电源电压,  $U_{oc}$  为开路电压,  $V_{Href}$  为上限参考电压,  $U_d$  为驱动脉冲电压,  $V_{Lref}$  为下限参考电压,  $I_{pk}$  为峰值电流。

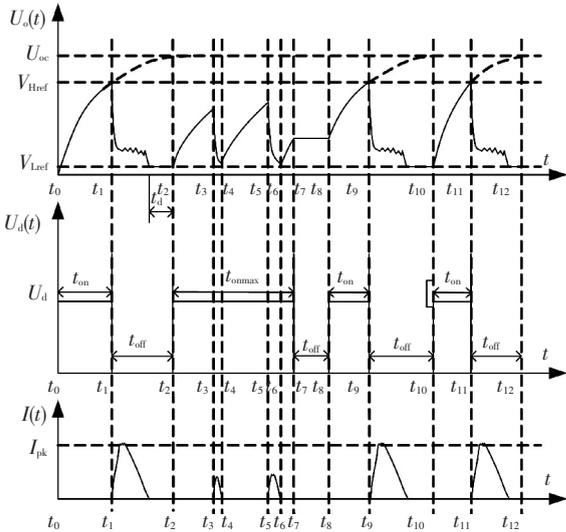


图 5 脉冲控制策略

$t_0 \sim t_1$  阶段: 脉冲处于脉宽  $t_{on}$  时间内, 极间电容充电, 在  $t_1$  时刻, 开路电压达到  $V_{Href}$  时, 功率管截止, 脉冲进入脉间  $t_{off}$  时间。

$t_1 \sim t_2$  阶段: 此阶段为脉间  $t_{off}$  时间, 在此期间的某一刻极间电容击穿间隙介质放电。当电压降为  $V_{Lref}$  时, 脉冲延迟  $t_d$  时间, 以充分消电离, 防止

短路情况发生。

$t_2 \sim t_3$  阶段:  $t_2$  时刻, 脉冲再次进入  $t_{on}$  时间, 但在开路电压并未达到  $V_{Href}$  时, 即在  $t_3$  时刻由于极间的复杂情况使脉冲发生了放电, 在  $t_4$  时刻放电终止, 此时极间电压并未下降到  $V_{Lref}$ , 所以在  $t_4$  时刻极间电容又开始充电, 如此反复, 在  $t_7$  时刻, 脉宽达到设定的最大值  $t_{on(max)}$ , 此时功率管强制截止, 脉冲进入  $t_{off}$  阶段, 这样可以避免脉冲始终处于脉宽时间的死循环。

$t_8 \sim t_9$  时间内, 脉冲进入  $t_{on}$  阶段, 之前极间电容中存在一定数量的电荷, 所以电容在此基础上继续充电。在  $t_9$  时刻达到  $V_{Href}$ , 脉冲即进入  $t_{off}$  时间, 并在此期间的某一刻放电。在此充放电周期内, 由于受到之前脉冲的影响,  $t_{on}$  时间较短。

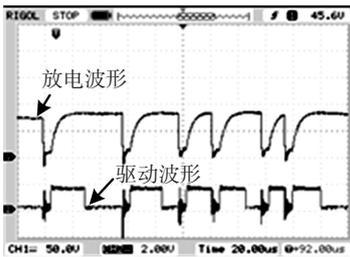
$t_{10} \sim t_{12}$  时间内, 脉冲又一次经历  $t_{on}$  充电与  $t_{off}$  时间内放电过程, 但由于受到极间介质中杂质和极间间隙大小不稳定的影响, 脉宽与脉间与之前的脉冲并不完全相同。

## 4 实验

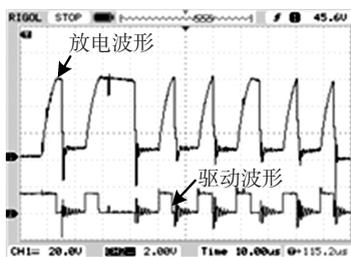
### 4.1 驱动脉冲与放电波形

对脉冲参数主动匹配式脉冲电源进行驱动脉冲和放电波形验证实验。调节参考电压值  $U_{ref}$  控制开路电压分别为 80、60、50 V, 通过示波器采集驱动波形和放电波形如图 6 所示。

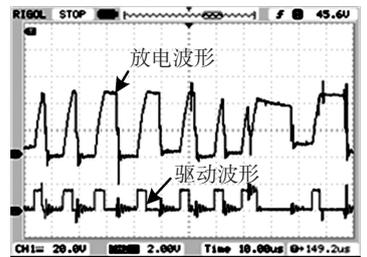
由图 6 可知, 脉冲驱动波形的脉宽与脉间根据开路电压的大小调整, 脉宽和脉间不固定。放电波形显示, 放电击穿绝大多数发生在设定的参考电压值附近, 极间电容在单个脉冲时间内只充电一次、放电一次, 这样保证了每次放电能量的一致性, 从放电波形看, 放电连续较好。



(a)  $U_{ref} = 80 \text{ V}$



(b)  $U_{ref} = 60 \text{ V}$



(c)  $U_{ref} = 50 \text{ V}$

图 6 驱动波形与放电波形

### 4.2 加工结果分析

为了检验该电源的加工效率, 本文进行微小孔加工实验, 对比分析了普通晶体管脉冲电源与本文设计的脉冲电源的加工效率。电极选择直径为 50  $\mu\text{m}$  钨电极, 工件电极选用 45 号钢, 孔深径比 4 : 1。采用 3 组加工参数, 加工后孔

SEM 图如图 7 所示, 脉冲电源的加工参数如表 2 所示。

由表 2 可知, 在 3 组参数中, 采用本文设计的主动匹配式脉冲电源加工时间最短, 效率最高, 相比于第 1 组参数, 效率提高了 1.31 倍, 相比于第 2 组参数, 加工效率提高了 1.67 倍。

表 2 脉冲电源的加工参数

电源	组	电压/V	电流/A	脉宽/ $\mu\text{s}$	脉间/ $\mu\text{s}$	加工时间/s
晶体管脉冲电源	1	100	0.11	1	5	238
晶体管脉冲电源	2	100	0.11	10	5	275
主动匹配式脉冲电源	3	100	0.11	自动	自动	103

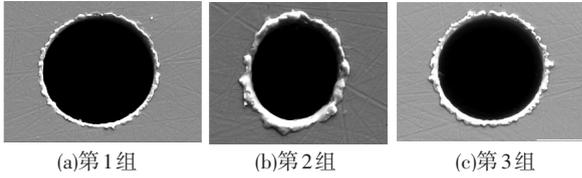


图 7 加工孔 SEM 图

由图 7 可知,采用新型脉冲电源加工后的微孔(第 3 组)圆度较好.利用共聚焦激光扫描显微镜对加工后的表面进行粗糙度测量,第 1 组中表面粗糙度为  $0.115 \mu\text{m}$ ,第 2 组中表面粗糙度为  $0.195 \mu\text{m}$ ,第 3 组中表面粗糙度为  $0.134 \mu\text{m}$ ,可见,采用新型脉冲电源加工可得到较好表面质量.

## 5 结 论

1)研究了等能量加工条件下,微细电火花加工效率规律,即通过选定合适的脉宽和脉间参数,使极间电容单次充电和单次放电,加工效率最高.

2)根据微细电火花加工效率规律,设计了一种脉冲参数主动匹配式 Micro-EDM 脉冲电源,该电源改变了传统的脉冲参数预置模式,变为脉冲参数主动匹配模式.

3)制定了脉冲参数主动匹配式脉冲电源脉冲控制策略,并进行了微小孔加工效率对比实验,结果表明,该电源加工连续性较好,加工效率较传统电源有显著的提升,加工质量较好.

## 参 考 文 献

- [1] 范伟政,乔大勇. 微机电系统[M]. 西安:西北工业大学出版社,2011:1-12.
- [2] DUMAS N, TRIGONA C, PONS P, et al. Design of smart drivers for electrostatic MEMS switches [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2011, 167 (2): 422-432.
- [3] 彭秋菊,郭永丰,白基成. 绝缘陶瓷往复走丝线切割加工放电状态检测方法[J]. 电加工与模具,2010 (5): 27-30.
- [4] JIA Zhixin, GUO Yongfeng, LIU Yonghong, et al. The state of the machining of ceramic materials in china[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 62(1): 20-23.
- [5] PETERSON K E. Silicon as a mechanical material[J]. Processing of the TEEE, 1982, 70(5): 420-457.
- [6] 王海滨,肖生苓,徐凯宏.金属基金刚石砂轮电火花整形参数的研究[J].森林工程,2008,24(3):44-46.
- [7] DI Shichun, CHU Xuyang, WANG Zhenlong, et al. Analysis of kerf width in micro-WEDM[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49 (10):788-792.
- [8] KLOCKE F, LUNG D, THOMAIDIS D, et al. Using ultra thin electrodes to produce micro-parts with wire-EDM[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 149(1/2/3): 579-584.
- [9] KAO J Y, TARNG Y S. A neutral-network approach for the on-line monitoring of the electrical discharge machining process [J]. Journal of Materials Processing Technology,1997,69(1/2/3):112-119.
- [10]周明. 微细电火花加工放电状态辨识与预测的理论和方法[D]. 大连:大连理工大学, 2005:1-80.
- [11] LEE Jukyong. A study on the machining of high-aspect ratio micro-structures using micro-EDM [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 140 (1/2/3): 318-325.
- [12] YU Zuyuan. Three dimensional micro-EDM using simple electrodes [J]. Dissertation of the University of Tokyo, 1997 (3): 149-155.
- [13]董颖怀.一种微型涡轮发动机的关键结构及其制造技术的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2009.
- [14] KANEKO Yuji, ITO Shinji. Electric discharge machine power supply with current control at variable levels: Japan, US 08/156, 067 [P]. <http://www.google.com/patents/US5386095>.
- [15] JIANG Yi, ZHAO Wansheng, XI Xuecheng, et al. Vibration assisted edm of small-hole using voice coil motor [C]//Fifth CIRP Conference on High Performance Cutting. Amsterdam:Elsevier, 2012:645-650.
- [16] ALAN H E. Millimeter scale MEMS gas turbine engineer [C]//the 2003 International Joint Power Generation Conference. Atlanta: ASME,2003:669-696.
- [17] JAROSZ A, PFITZNER A. Evaluation of parasitic capacitances for interconnection buses crossing in different layers [J]. Microelectronics Reliability, 2005 (45):761-765.
- [18]王津,韩福柱,卢建鸣,等.电极加工时间对电火花加工效率影响规律研究[J].大连理工大学学报,2012, 52(5):652-656.

(编辑 杨波)