

# 改善 HSPECM 电源工作波形畸变的技术途径

## Technical Approach for Improving Distortion of Operating Waveform of HSPECM Power Supply

华南理工大学电子与信息学院 袁炎成 王建业 余艳青  
海宁新艺机电有限公司 怀华培 戴立强

**[摘要]** 高频窄脉冲电解加工(HSPECM)电源工作波形能否满足电解加工工艺的特殊性要求,波形是否稳定,直接决定了产品的质量。精密400A电源样机已长期成功应用于剃须刀丝网刀片微细小孔(0.20mm)和弧形窄槽的试生产。在此基础上500A、25kHz工程化样机亦开始批生产。在电源研制及试生产的过程中,进行了一系列关于电源工作波形稳定性的试验,归纳出常见的波形畸变现象,进而提出并实现了改善波形畸变的技术措施。

**关键词:** 精密 HSPECM 电源 工作波形畸变 RCD 缓冲器

**[ABSTRACT]** Whether waveform of HSPECM (High Frequency Short Pulse Electro Chemical Machining) power supply meets the particular demand of ECM process and has good stability will directly affect product quality. The precision 400A model of HSPECM power supply has been applied to trial production of micro pore (0.20mm) and arc-shaped narrow groove in shaver. Based on this, the 500A, 25kHz industrialization model of precision HSPECM power supply is being applied to batch production. In process of development of HSPECM power supply, we have carried out a series of characteristic experiments about operating waveform distortion, and have summarized several common types of it and corresponding technical approaches to improve it.

**Keywords:** Precise HSPECM power supply Operating waveform distortion RCD snubber

高频窄脉冲电解加工工艺具有加工精度高、表面质量好、生产效率高以及工具无损耗等优点<sup>[1]</sup>。近年来随着该项工艺技术的不断开发与应用,有望在精密中小型和微细产品如电动剃须刀精密刀片、气门等制造领域广为应用。精密 HSPECM 电源是实现此项新技术的核心设备,迄今在国内外均未见能直接用于生产的商品化精密 HSPECM 电源。华南理工大学受新艺机电有限公司委托和资助,成功研制出400A电源样机,双方合作在现场进行了将电源应用于剃须刀丝网型精密刀片的开发

试验研究,已投入试生产达2年之久,实现了用微小间隙( $< 0.05\text{mm}$ )加工其精密微细小孔及成形窄槽,精度达到 $\pm 0.01\text{mm}$ 。期间电源参数稳定、工作可靠、故障率极低。在此基础上500A、25kHz工程化样机亦已研制完成并投入连续批生产近2个月,电源参数稳定,未曾出现故障。

精密 HSPECM 电源具有工作电流大且换流速度快的特点,工作波形常具有导通浪涌、反向电流过大、瞬态过压尖峰、耦合过压击穿等畸变现象,容易损坏功率器件。另外,HSPECM 电源在与 SCR 直流电源、机床及水泵等设备同步工作时,常会受到外界低频信号的干扰,所产生的高频谐波分量可能导致设备受损。因此,改善上述的波形畸变现象是 HSPECM 电源能真正用于生产的重要保证。

### 1 500A、25kHz 工程化样机的性能指标

频率 $f$ 、占空比 $D$ 、加工电压 $U$ 、电流密度 $i$ 是影响脉冲电流电解加工效果的主要参数。加工波形为矩形波有利于提高加工精度与加工效率<sup>[2]</sup>。陡峭的脉冲前后沿、关断时适量的反向电流有利于快速去极化,从而提高加工精度<sup>[3]</sup>。

根据加工工艺的要求,本工程化样机制定并实现了以下的性能指标:

- (1) 输出脉冲电流峰值为500A;
- (2) 输出脉冲电压峰值为24V,且能够实现负载端稳压;
- (3) 输出波形为双向脉冲,正向为矩形波,上升、下降沿最小可达到 $2\mu\text{s}$ ;
- (4) 满负荷时输出波形频率在100Hz~25kHz间连续可调;
- (5) 输出波形脉冲宽度在 $12\mu\text{s}$ ~5ms范围内连续可调;占空比可调范围为0.3~0.7,且频率、脉冲宽度、占空比3项中任意两项均可独立调整。
- (6) 快速短路保护:负载短路时,功率器件输出脉宽下降到 $10\mu\text{s}$ 以内,加工电流平均值降至接近零,并自动切断总电源及电极进给,确保功率器件不损坏,电极与工件不烧伤。

## 2 HSPECM 电源的基本方案

图 1 为 HSPECM 电源的电气结构示意图,也是目前脉冲电解电源的典型架构。因此,下文就 HSPECM 电源工作波形畸变而展开的讨论具有实用性和普遍性。

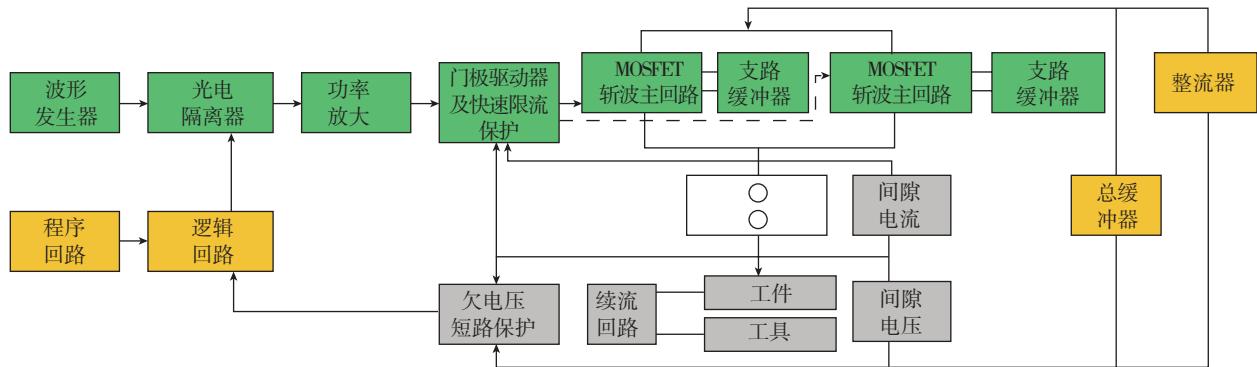


图1 斩波装置主回路及控制回路

Fig.1 Main circuit and control circuit of chopper

本电源采用 4 路并联的 MOSFET (金属 - 氧化物 - 半导体场效应管) 斩波装置,将 SCR 电源输出的直流电流快速换流成高频、窄脉冲的直流脉冲电流。波形发生器回路提供的矩形波信号经过功率放大和门极驱动模块后,控制功率器件 MOSFET 的工作状态。斩波装置中的各支路 MOSFET 分别由独立的门极驱动模块控制,同时并联了缓冲器作吸收瞬时过压之用。

电源的快速短路保护功能由快速限流保护模块和欠电压短路保护模块构成。前者是确保加工电极发生短路时免受烧伤的关键模块,后者是在限流保护生效后使电源自动停电和机床停止进给的保护系统。

## 3 HSPECM 电源常见工作波形畸变及相应改善措施

### 3.1 SCR 电源输出直流电压中纹波分量的影响及改善措施

#### (1) 畸变现象及分析。

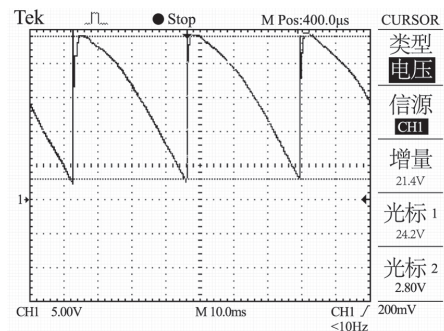
在三相 SCR 直流电源输出的直流电压中,一般会叠加数百 Hz 且幅值较大的纹波电压,见图 2 (a),该纹波电压的存在会在后级 HSPECM 电源的非线性器件中产生高阶的谐波分量,由此引起的浪涌电流会损坏功率器件、电极和工件。

#### (2) 改善措施。

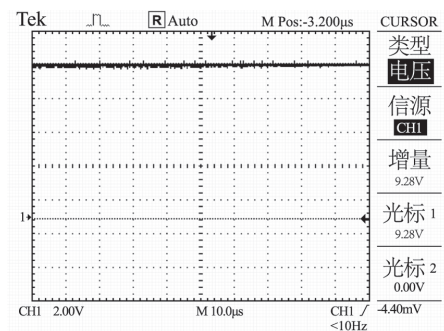
滤除大电流纹波电压的基本电路拓扑有电容并联、电感串联和 LC 组合电路滤波等。经过详细的比较试验得知,后两种方案由于电感的作用会导致加工波形严重畸变,最终选择了并联大电容的滤波方案。

在 SCR 直流电源的输出端即 HSPECM 电源的输

入端,并联接入若干个大容量的电解电容用于吸收纹波信号,见图 2 (b)。可选用容量大和纹波电流额定值高的铝电解电容。容量越大,对低频纹波信号的吸收效果越好。而纹波电流会使电容管芯升温,从而会影响其负载预期寿命,因此在设计方案时该项参数应留有一定的裕



(a) SCR 直流电源输出直流电压的纹波分量



(b) 经滤波处理后的输出直流电压

图2 滤波处理前后的 SCR 直流电源输出电压波形差异

Fig.2 Waveform difference of SCR DC supply output voltage before and after filtering processing

度。另外,采用薄片状的三明治结构来设计电容之间的导电路径能有效降低线路的寄生参数,防止脉冲电流波形的畸变。

### 3.2 MOSFET 电流波形畸变及改善措施

#### (1) 波形畸变分析。

由于 MOSFET 的开关速度极快(可达几百 ns),在

导过程中产生了幅度较大的高频浪涌振荡,如图 3(a)中①处所示;以及在关断过程中存在斜率、幅值较大的反向电流尖峰,如图 3(a)中②和图 3(b)中①所示等畸变现象。

高频浪涌振荡作为激励源会使得回路中的分布电容和寄生电感发生谐振,从而使电流产生多次幅度非常高的振荡<sup>[4]</sup>,降低了加工过程的稳定性,还会引起限流保护电路的误动作。而关断时有适量的短时反向电流,有利于快速去极化,从而提高加工精度和加工效率。但是,反向电流的幅值和电流下降率  $-di/dt$  一旦超过额定值,将导致功率管及其体内二极管的损坏。因此,在调试中必须在二者之间取得平衡。

### (2) 改善措施。

针对上述两种波形畸变现象,可从优化驱动电路参数和机械线路布局两方面加以改善。

图 4 为 MOSFET 及其驱动/快速限流保护电路框图。左侧芯片是 MOSFET 的门极驱动及过流保护模块 MGD,辅以外围元件搭建了 MOSFET 驱动/快速限流保护电路。VO 端口输出正向矩形波驱动信号,通过阻容控制回路送至 MOSFET 的栅极。CS 端口为过流检测端口,接收经过放大及滤波处理后的电流峰值信号,当检测到过流时,MGD 会在极短的时间内(约  $10\mu\text{s}$ )切断 VO 的输出达到限流的效果<sup>[6]</sup>。

在电路参数优化方面,反复试验表明,选择合适的栅极电阻和 MOSFET 的 G、S 极之间的泄放电阻可以改善高频振荡现象。在 MOSFET 的 G、S 极之间并联一个小容量的独石电容可在一定程度上控制其关断速度,从而使反向电流的下降率  $-di/dt$  和幅值大小在受控范围内,避免功率器件受损。

在线路布局方面,尽量缩短驱动电路与 MOSFET 的距离,避免信号传输过程发生畸变;选择低自感的外围分立元件,以降低回路的寄生参数,改善高频振荡现象;大电流回路各器件之间的贴合面要有很好的平整度,在安装时要求充分贴合,并选择合适的夹紧力矩,同时确保

没有额外的附加力,以避免功率器件通断瞬间发生跳火花现象。

### 3.3 MOSFET 极间耦合高压致使重复导通的畸变及改善措施

#### (1) 波形畸变及分析。

因 MOSFET 栅-源极之间的阻抗极高,在关断瞬间,其漏-源电压的突变会通过极间电容耦合到栅极,从而在  $V_{GS}$  上产生较大的尖峰电压,可能导致 MOSFET 栅-源极氧化层被击穿,造成永久性损坏。如果是正向的  $V_{GS}$  瞬态电压,还会引起器件的重复导通,导致该器件产生瞬态电流过载,如图 5 黑色虚线部分所示。

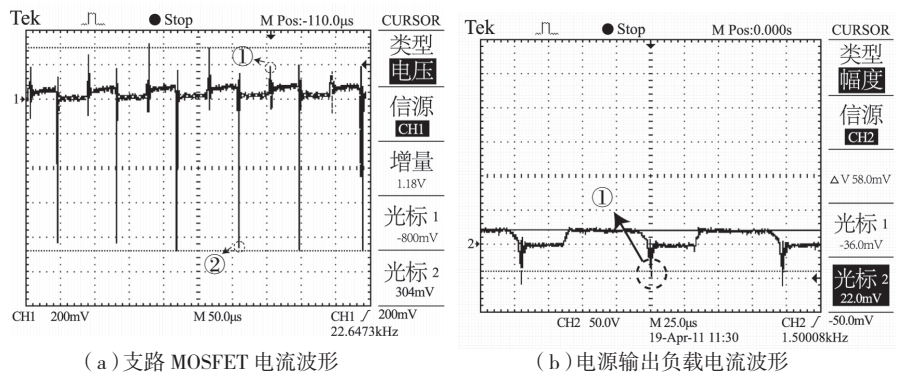


图3 HSPECM 电源支路MOSFET电流及负载电流波形

Fig.3 Waveforms of HSPECM power branch MOSFET current and load current

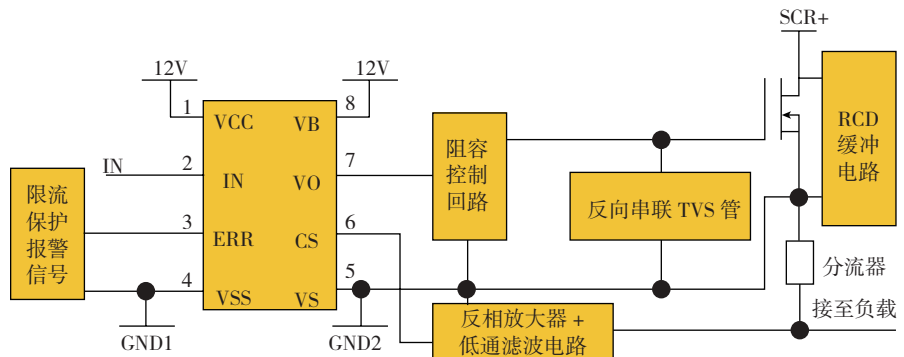
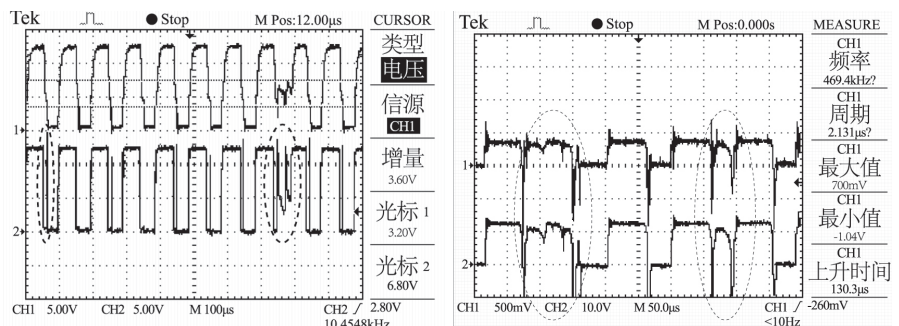


图4 MOSFET驱动/快速限流保护电路

Fig.4 MOSFET driver module and rapid current-limiting circuit



(a) 重复导通状态下的 MOSFET 驱动信号 (b) 重复导通状态下的加工电流电压波形

图5 MOSFET驱动信号与加工负载信号的波形畸变

Fig.5 Waveform distortion of MOSFET driving signal and load signal

(2) 改善措施。

在 MOSFET 的栅 - 源极之间并联一个稳定电压值约为 15V (视 MOSFET 的  $V_{GS}$  而定) 的 TVS 管, 当漏 - 源极之间的电压发生突变而产生  $V_{GS}$  尖峰时, TVS 管能在极短的响应时间 (约  $1 \mu s$ ) 内实现稳压, 确保栅 - 源极电压不超出  $V_{GS}$ , 从而有效避免了功率器件 MOSFET 被高压击穿的风险。

3.4 MOSFET 关断瞬时过压尖峰噪声及改善措施

(1) 波形畸变及分析。

为了满足加工电流波形的要求, 在 MOSFET 关断时要求有较大的  $-di/dt$ 。当主回路中存在寄生电感量时 (图 6 黑色部分)<sup>[6]</sup>, 由公式  $U=L*(di/dt)$  可知, MOSFET 的 D、S 两端会产生较高的瞬时过压尖峰噪声  $U_1$  如图 7 (a) 所示, 同时伴随着一系列的阻尼振荡出现。当  $U_1$  增大到一定值时, 功率 MOSFET 将被击毁。

(2) 改善措施。

将母线系统设计成薄片形状 (即在 DC+ 和 DC - 金属排之间加入绝缘层构成三明治结构) 并设法缩短 SCR 直流电源与 MOSFET 之间的距离, 可大大减小主回路的寄生电感量。

在 MOSFET 的 D、S 两端并联安装 RCD 缓冲器以吸收其关断瞬时的  $U_{DS}$  过压尖峰 (图 7 (a)、(b) 中  $U_1$  处) 与阻尼振荡。高频振荡脉冲的幅度与频率 (图 7 (b))

中  $1/T$  处,  $T$  为高频振荡脉冲周期) 均与 RCD 缓冲器中的电容容量  $C$  成反比, 通过试验可获得合适的容量值, 一般为几  $\mu F$ 。缓冲器的二极管在 MOSFET 关断瞬间起整流作用, 应选用平均电流容量大以及反向恢复时间短的功率整流管。缓冲器中的电阻在 MOSFET 开通过程中提供了放电的通路, 一般为几  $\Omega$ 。另外, 还要计算电阻的耗散功率。由于耗散功率较大 (约几十 W), 建议采用带有散热底座封装的电阻并配置相应的散热器。TO-220 是目前广泛采用的封装格式, 具有体积小、易于安装和热稳定性好的特点。

在线路布局方面, 缓冲器各分立元件的布局应尽量紧凑, 设法减小缓冲器与 MOSFET 的物理距离, 以降低线路的寄生参数。

根据上述原则对 RCD 缓冲器进行优化参数配置, 使 MOSFET 的关断瞬时过压尖峰保持在 40V 以内, 较之额定击穿电压 (一般约为 100V) 具有 60% 的余量, 在有效确保器件安全工作的同时满足了加工波形的需要。

4 结论

(1) HSPECM 工艺技术对 HSPECM 电源工作波形的要求极高。本研究通过完成大量的重复性规律试验, 归纳出各种常见的工作波形畸变现象并提出相应的改善措施。

(2) SCR 直流电源输出的直流电压中包含着较大的纹波分量, 干扰了 HSPECM 电源中功率器件的正常工作波形。本电源采用大电容并联滤波结合三明治结构的线路布局方案, 有效地消除了纹波信号的影响。

(3) 功率器件的大电流快速换流过程会衍生出较严重的导通浪涌、反向电流尖峰、瞬时过压尖峰以及阻尼振荡等波形畸变现象。本电源采用了优化的 MOSFET 驱动 / 限流保护电路、RCD 缓冲器、低电感的超快速元器件等措施, 同时选择合理的线路布局方案, 显著改善了各种电流、电压信号的畸变现象。

在 500A 精密 HSPECM 电源的工程化样机研制过程中采取了上述多方面措施后, 较好地解决了电源工作波形畸变的问题, 有效提

(下转第 93 页)

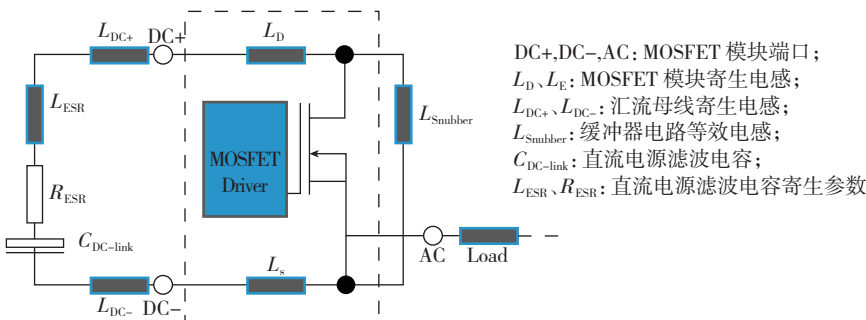


图6 电流回路中可能存在的电感量

Fig.6 Possible existing inductance value within main circuit loop

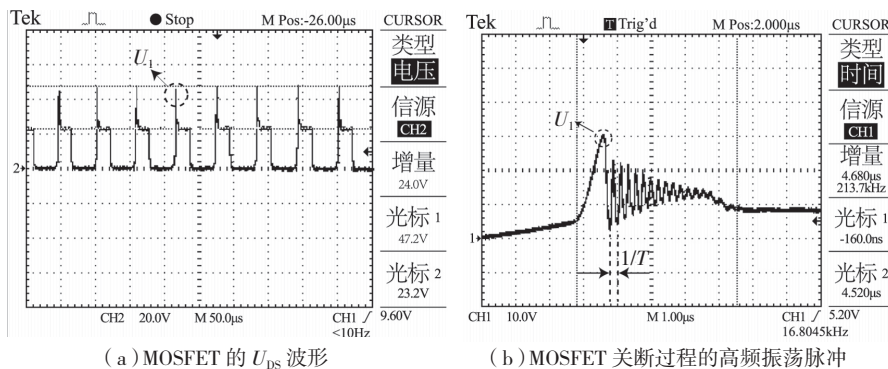


图7 MOSFET 的  $U_{DS}$  波形及其关断瞬间产生的高频振荡脉冲

Fig.7  $U_{DS}$  waveform of MOSFET and high-frequency oscillating impulses at the moment of MOSFET turning off

能略优于铸铁床身。

### 3.3 瞬态响应分析

在工程上引起振动的除周期性激振力外,还有冲击、瞬变等非周期性激振力。冲击是指动能传递到一个系统上,其发生传递的时间比这个系统的固有周期要短;瞬变现象是指激振力持续的时间可达到该系统振动的几个周期那样长。

对数衰减率是评价轴系振动稳定性的一个重要指标,其定义为轴系受到某种干扰力的作用后振动幅值随时间的变化。若振动幅值随时间延长而增大,则振动是发散的,轴系振动不稳定,最终导致共振现象发生。若振动幅值随时间延长而减小,则振动是收敛的。在稳定性分析中,一般用对数衰减率作为系统的稳定性评定标准,即对数衰减率的数值越大,说明系统的稳定性越高。对数衰减率与材料阻尼比有相关性,且材料阻尼比越大,振动衰减越快,系统动态性能越好。

前文讨论了在简谐激励、周期激振力作用下系统的稳态响应。由于阻尼的作用,瞬态响应会随时间很快消失。在某些情况下,尽管系统所受激励的瞬态过程时间极短,但振动幅值却很大,会使机器内部某些零部件产

生短时过应力现象,有较大的破坏力。因此对这类瞬态振动的研究非常必要。下文分别对人造大理石和铸铁两种床身结构施加作用时间极其短暂的冲力,两种结构的初阶频率均在 500Hz 左右,初阶固有周期为 0.002s,因此将冲击力作用时间定为 0.0004s。

图 5 为两种床身施加相同冲击力时的位移时间响应,其中人造大理石床身振动衰减地很快,而铸铁床身振幅衰减地相对慢一些。可见,人造大理石床身吸振性能优于铸铁床身。

## 4 结论

(1) 相较于铸铁床身,人造大理石床身不仅具有良好的抗腐蚀和电绝缘特性,而且具有较高的固有频率和阻尼比、很好的抗振和吸振性能。因此,人造大理石是作为电解加工设备床身基座的优良材料。

(2) 使用该人造大理石床身的电解加工设备精度等各项指标均达到设计要求,设备运转情况良好,实际使用效果明显优于铸铁床身电解加工设备。

### 参考文献

- [1] 边守忠. 我国电解加工机床发展近况. 航空工艺技术, 1997(2):46.
- [2] 袁来朝. 浅谈人造大理石床身的加工. 金属加工, 2008(9):39-40.
- [3] 宋志勇, 商益存, 赵金刚. 人造大理石床身在普通数控磨床中的应用. 精密制造与自动化, 2008(2):27-28.
- [4] 向飞. 矿铸件材料在装备制造业中的应用. 机电工程技术, 2011, 40(7): 159-161.
- [5] 徐平, 牛艳奇, 于英华. 碳纤维聚合物混凝土机床床身动态性能仿真. 辽宁工程技术大学学报, 2003, 22(1):104-106.

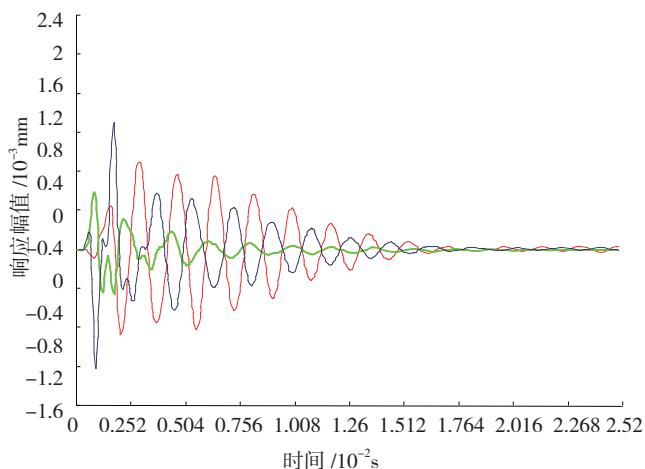
(责编 深蓝)

(上接第 86 页)

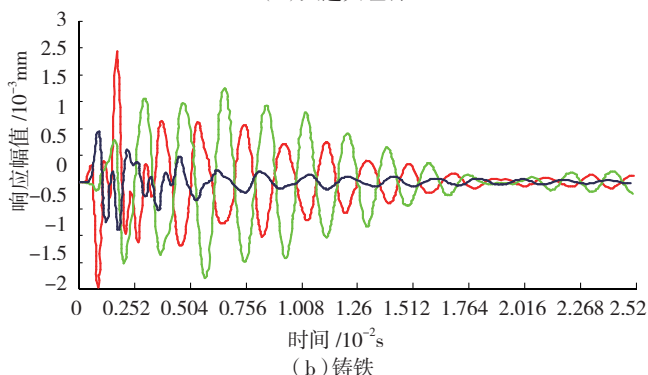
高了 HSPECM 电源的工作稳定性。在样机经过一定的生产使用考验定型后,就可以投入小批量制造,可生产用户加工中小、微型精密零件。

### 参考文献

- [1] 王建业, 罗天友, 莫桥彩, 等. 气门锻模高频窄脉冲电解加工的试验研究. 模具工业, 2000 (2):50-53.
- [2] 王建业, 徐家文. 电解加工原理及应用. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [3] 余艳青, 王建业, 韩冠军. MOSFET 高频窄脉冲电解加工工程化电源研制. 电加工与模具, 2005 (2):59-63.
- [4] 宋清亮, 晋兆国. 一种高精度功率 MOSFET 参数测试系统. 电力电子, 2010(6):46-49.
- [5] 袁炎成, 陈艳峰, 余艳青, 等. 提高高频, 窄脉冲电解加工电源短路保护系统的性能试验研究. 电加工与模具, 2007(2):20-24.
- [6] Semikron. IGBT Peak voltage measurement and snubber capacitor specification. Application Note AN-7006, 2008. (责编 深蓝)



(a) 人造大理石



(b) 铸铁

图5 人造大理石和铸铁床身的位移时间响应曲线

Fig.5 Displacement-time response curves of artificial marble lathe bed and iron lathe bed