

# 矩形波高频脉冲电解加工电源的研制

## Research on the High Frequency Squaring Pulse Power Supply for Electrochemical Machining

中航工业北京航空制造工程研究所 王洪国 江乐天 张明岐 程小元  
烟台供电公司 付荣华

**[摘要]** 精密振动电解加工是提高电解加工精度的有效技术途径,具有快速触发响应的矩形波高频脉冲电解加工电源是实现精密振动电解加工的关键之一。针对精密振动电解加工对脉冲电源快速触发响应及过流、短路保护的技术要求,利用开关电源充电、电容储能、IGBT斩波和大电流下高速关断等技术,实现了工程化设计,成功研制出了矩形波高频脉冲电源。同时介绍了脉冲电源的性能指标及样机研制方案、瞬时过压击穿、快速短路保护等研制中的主要技术难题的解决方法。经初步的加工试验,证明了此方案的可行性。

**关键词:** 矩形波高频脉冲电源 脉冲电解加工 IGBT斩波 快速短路保护

**[ABSTRACT]** Precise vibrating electrochemical machining (PECM) is the effective technical way of high accuracy electrochemical machining, high frequency squaring pulse power supply (HSPPS) is one of the key components for PECM. Aim at the arts demand of PECM, HSPPS, charging power supply, chopping circuit, IGBT chopping, high current switching technology have been developed in this paper. This paper introduces the specification of the power supply of HSPPS, the technical way of the break-down of the transient overvoltage, rapid protection of short circuit. The effectiveness of the developed power supply is finally verified by the machining experiment of some typical parts.

**Keywords:** High frequency squaring pulse power supply Pulse electrochemical machining IGBT chopping Rapid protection of short circuit

先进航空发动机中采用了大量高温合金、钛合金材料制造整体叶盘、整体机匣、扩压器等整体结构件,具有结构轻薄、型面复杂的特点。采用传统的数控铣削刀具消耗费用高,易造成表面烧伤、加工变形、被加工表面残余应力过大、表面质量差及生产效率低等缺陷。而电解加工方法具有加工效率高、无电极(刀具)损耗、无加工应力、不产生加工变形等特点。尤其是精密振动电解加

工,能实现稳定的小间隙加工,可以满足上述航空零件终成形精度要求。因此,精密振动电解加工技术是航空制造中重点发展的技术之一。而与精密振动电解加工相匹配的脉冲电源至关重要。常见的基于可控硅的一般脉冲电源存在容量偏小、波形畸变火花短路保护时响应速度慢等不足。为此,本文针对精密振动电解加工对脉冲电源快速触发响应及过流、短路保护的技术要求,利用开关电源充电、电容储能、IGBT斩波和大电流下高速关断等技术,成功研制出了精密振动电解加工所需的矩形波高频脉冲电源。

### 1 加工工艺对脉冲电源的基本要求

脉冲电流电解加工过程中,额定电压、额定电流、频率、占空比是脉冲电源最重要的参数。电解加工要求电源额定电压在5~24V区间连续可调,稳压精度为 $\pm 1\%$ ,频率纹波系数无要求;额定电流根据加工工件的面积决定,中小型工件在2000A左右,大型工件在6000A左右。频率在1kHz为宜,占空比不超过50%。脉冲前沿上升速度达到微秒级,关断时有适量的短时反向电流为好,这有利于快速去极化,提高加工精度,并可缩短脉间周期,以提高加工效率。此外,电解加工电源要求具有很强的耐蚀性;在发生火花短路时要能在微秒级时间内关断,使对工件的烧伤减到最小。

电源技术指标:

- (1) 充电电压:5~24V;
- (2) 输出电压:5~20V;
- (3) 稳压精度: $\pm 1\%$ ;
- (4) 输出电流:0~2000A;
- (5) 脉冲频率:0~1kHz;
- (6) 占空比:0.2~0.5;
- (7) 保护关断时间: $<20\mu\text{s}$ 。

### 2 电源整体方案

电源由充电电源、储能电容、斩波器、控制部分、短路保护和人机界面组成(图1)。本电源采用IGBT作为功率开关实现脉冲功率的导通和关断,将直流电快速斩

成所需的脉冲电输出负载。使用 DSP 作为信号发生器，输出频率、占空比可调得触发脉冲，用以触发 IGBT。

### 3 电源设计

#### 3.1 脉冲成形设计

如图 2 所示为脉冲成形原理图。脉冲成形部分使用自关断器件 IGBT 作为脉冲成形开关和自关断保护，通过改变 IGBT 触发信号的频率和脉宽来改变电源的频率和脉宽，同时 IGBT 兼做保护开关，在火花短路时，高速关闭 IGBT 以免烧伤电极工件。考虑到 IGBT 器件的保护、电流传输及 IGBT 配套件参数的匹配，特将此部分设计成专用组件并采用水冷方式散热。缓冲电容  $C_s$  的电容量取值由下式<sup>[1]</sup>可得：

$$C_s = \frac{I_p \times t_f}{2U_{max}}$$

其中， $I_p$  是集电极电流峰值； $U_{max}$  是 IGBT 关断时允许的集电极电压峰值； $t_f$  为集电极峰值电流从最大降到 0 的时间，得出  $C_s$  为  $10\mu\text{F}$ 。 $R_s$  应使  $C_s$  在最小导通时间  $t_{on}$  内放电至所充电荷的 5%，则有  $t_{on(min)} = 3R_s C_s$ ，则得  $R_s = 1\Omega$ 。

#### 3.2 短路保护

短路保护系统在电解加工电源设计中至关重要，它不仅保护电源本身，而且在短路时使工件和阴极烧伤最小<sup>[2]</sup>。本电源采用最大电流限制法，即预先预设一个最大加工电流值，一旦加工电流超过电流设定值，电源在短时间内关断，同时通知控制系统停车。通过电流传感器取得加工电流信号，经过 RC 滤波之后和预设值比较，加工电流大于设定值时，则触发后继保护电路。这种短路保护办法电路简单，运行可靠，成功应用于多种型号

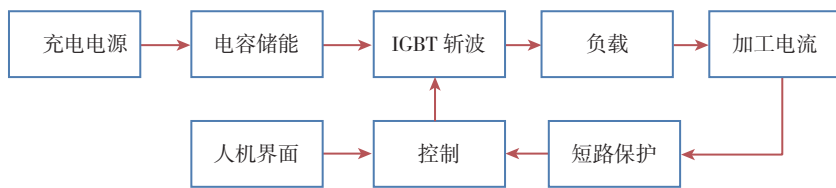


图1 电源整体方案  
Fig.1 Overall scheme of power supply

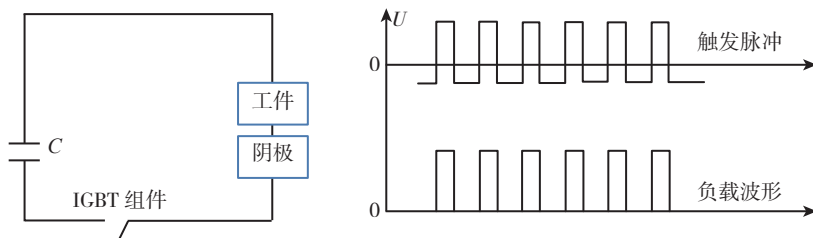


图2 脉冲成形原理图  
Fig.2 Pulse shaping principle

电解加工电源。

### 4 电源调试及加工验证

首先，采用电阻负载，在不同占空比、不同电压、不同负载下进行带载试验。输出波形如图 3 所示，结果表明，该电源输出在满载（20V、2000A），输出波形为矩形波，下降沿陡直，输出品质较高。进行了输出端短路后切断时间的测试，切断时间达到了设计指标。空载调试完成后，利用该电源，在 10%  $\text{NaNO}_3$  的电解液中，加工了直径 25mm 的 Ti 合金圆片，加工表面光滑，取得了良好的加工效果。

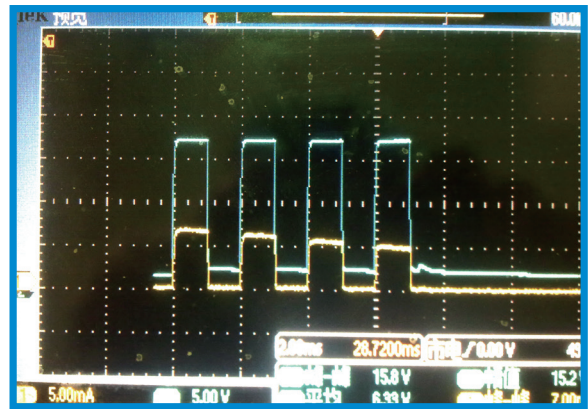


图3 输出波形  
Fig.3 Output waveform

### 5 结论

(1) 电源整体达到了设计指标，输出电压：5~22V 连续可调；最大输出电流 2000A；最大脉冲频率 1kHz；占空比：0.1~0.5 可调；保护关断时间： $<20\mu\text{s}$ 。(2) 本电源采用全桥变换器、电容储能、IGBT 斩波输出的方案，撇开了笨重的低频变压器，使电源的效率提高、体积减小。(3) 短路保护采用最大电流法，电路简单、运行可靠，且最大电流值可以根据工艺的不同设定不同数值。(4) 该电源的输出为矩形波，解决了当前电解加工脉冲电源电容量有余但波形不规则的问题，为精密振动电解加工机床国产化奠定了基础。

#### 参考文献

- [1] 张占松, 蔡宣三. 开关电源的原理与设计(修订版). 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [2] 梁伟因, 付翔, 杨军. 开关电源中 RC 缓冲电路的设计. 电子元器件应用, 2010, 12(6): 40-42.

(责编 小城)