

文章编号:1673-5005(2009)06-0116-05

# 高效电压调节型电火花脉冲电源的设计

张海峰, 刘永红, 沈 蓉, 蔡宝平, 陈继明

(中国石油大学 机电工程学院, 山东 东营 257061)

**摘要:**在对传统脉冲电源和现有节能脉冲电源的工作原理、控制策略进行分析的基础上,针对传统脉冲电源存在电能利用率低的弊端,提出一种高效电压调节型火花放电脉冲电源。这种电源的电路具有自适应调节输出电压和等电流脉宽的特性,利用电路的拓扑结构进一步优化控制策略,演算电路的动态分析模型,同时对电路的各个主要器件进行设计和计算,给出实际电流电压波形以及自适应调压波形。结果表明:所设计的电源可实现空载电压、脉冲宽度、脉间宽度大范围独立可调,彻底取消耗能严重的限流电阻;电路具有较高的调压精度和较好的加工工艺效果。

**关键词:**脉冲电源;电火花加工;电压采集;自适应调压

**中图分类号:** TG 661

**文献标识码:** A

## Design of voltage-adjusting and high-effective EDM pulse generator

ZHANG Hai-feng, LIU Yong-hong, SHEN Rong, CAI Bao-ping, CHEN Ji-ming

(College of Mechanical and Electronic Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

**Abstract:** On the basis of analysis of the principle and control strategy for conditional and saved-energy pulse generators, a high-effective pulse generator with voltage-adjusting was presented in order to improve electric energy efficiency of conditional pulse generator. The output voltage can automatically be adjusted and the self-adapting current of equal pulse width can be produced in this pulse generator. The control strategy was optimized by new circuit topological structure and dynamic model of the circuit was given. Main technical parameters of the circuit were designed to fulfill faster response rate of output voltage. The true current and voltage-adjusting waveforms were presented. The results show that the large-scale unattached adjustments to no-load voltage, pulse width and intercostals width can be completed. Current-restricting-resistor is completely canceled in this circuit. The circuit has high voltage-adjusting precision and good machining effect.

**Key words:** pulse generator; electron discharge machining; sampled voltage; self-adapting voltage-adjusting

传统的脉冲电源主要是利用在主回路中串联限流电阻,对工件进行放电加工,加工过程中大约 75% 的能量以热量的形式消耗于限流电阻<sup>[1]</sup>,这在降低电能利用率的同时也对电源的散热系统提出了更高的要求。20 世纪 70 年代以来,出现了以逆变方式获得可调脉冲的电火花加工电源,其中以引入电流负反馈实现对放电电流的闭环控制方式为主,然而由于本身结构的特点,使得电流型逆变脉冲电源无法解决加工电流建立的爬升速度与电流纹波之间的矛盾<sup>[2-3]</sup>,暂态阶段电流爬升速度慢,脉间阶段存在电流拖尾等现象。笔者采用电压型 PWM 控制方式,在加工过程

中通过 SG3525 发生器接收来自采集电路的反馈电压信号,控制 DC/DC 变换器自动调节输出直流电压,加快系统的响应速度,通过计算高频脉冲变压器以及电路中关键器件的参数,设计加工时序脉冲控制器,以有效调节脉冲和脉间的宽度。

## 1 电火花脉冲电源的拓扑结构与工作原理

### 1.1 脉冲电源的主回路结构

图 1 为电压型电火花脉冲电源的原理图。电源分为两部分,前级 DC/DC 变换电路,C1 和 C2 为分

收稿日期:2009-02-20

基金项目:国家自然科学基金项目(50674099);山东省科技攻关项目(2006GG2204001)

作者简介:张海峰(1975-),男(汉族),河北唐山人,博士研究生,主要从事电火花及机电一体化研究。

压滤波电容,把整流后的直流电压分成相等的两部分;IGBT 主开关管 Q1、Q2 由 PWM 控制器控制交替导通,提供高频脉冲变压器初级侧脉冲电压;快速恢复二极管 D2、D3 构成全波整流,D4 完成续流;T1 为高频脉冲变压器,初级绕组匝数为  $N_1$ ,两个次级绕组匝数相等,即  $N_{21}=N_{22}=N_2$ ,匝数比  $n=N_1/N_2$ ,电感 L1 和电容 C4 构成输出滤波器。

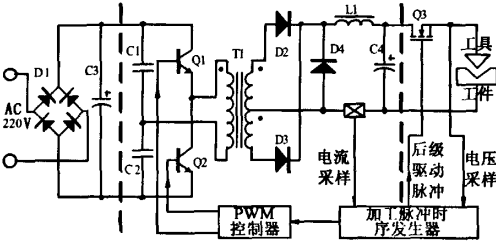


图1 电压型电火花脉冲电源原理图  
Fig.1 Schematic diagram of voltage-mode EDM pulse generator

后级为加工脉冲变换器,它包括脉宽、脉间调节器以及采集调压电路等。加工过程中根据对放电状态的检测结果自适应调节前级 DC/DC 变换器的直流输出电压幅值,从而提供击穿延时阶段所需的空载电压和放电阶段所需的维持电压<sup>[4-5]</sup>,在加工脉冲时序发生器的控制下实现电加工的循环往复。

1.2 脉冲电源动态电路分析

电压型电火花脉冲电源加工时,需要电源对放电间隙电压实时进行监测,完成维持电压和击穿电压之间快速的切换,因此建立电火花加工动态电路模型,能更好地研究电源的动态响应速度,优化电源的控制。

在电火花加工过程中,加工间隙是一个非线性负载,根据在放电期间加工间隙近似恒压的电气特性,把击穿后的间隙电压等效为直流电源  $U_2$ ,维持值为 25 V 左右,加工间隙电压的不确定变化当作电压源  $U_2$  的扰动<sup>[6]</sup>。因为图 1 电路分为前级和后级,两部分分别由相对独立的功率管控制,一个加工周期包含开通和截止两种工作模式,电火花脉冲电源在两种工作模式下的等效电路如图 2 所示。

导通时的状态方程为

$$L \frac{di}{dt} = u_1 - u_c, \quad C \frac{du_c}{dt} = i - \frac{u_c}{R}; \tag{1}$$

截止时的状态方程为

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} = -u_c, \\ C \frac{du_c}{dt} = i - \frac{u_c}{R}. \end{cases} \tag{2}$$

根据状态空间平均法的原则,脉冲电源的状态方程为

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} = k(u_1 - u_c) + (1 - k) - u_c, \\ C \frac{du_c}{dt} = k\left(i - \frac{u_c}{R}\right) + (1 - k)\left(i - \frac{u_c}{R}\right). \end{cases} \tag{3}$$

式中,  $k$  为前级电路的占空比。

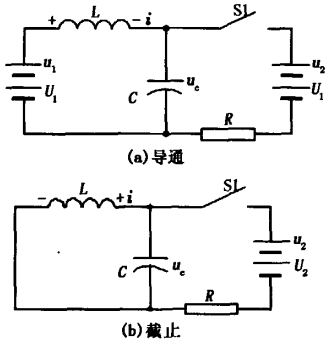


图2 脉冲电源两种模式下的等效电路  
Fig.2 Equivalent circuit of two models for pulse generator  
整理得

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} = ku_1 - u_c, \\ C \frac{du_c}{dt} = i - \frac{u_c}{R}. \end{cases} \tag{4}$$

对式(4)在工作点附近取小信号扰动为  $i = I + \hat{i}$ ,  $u_1 = U_1 + \hat{u}_1$ ,  $u_c = U_c + \hat{u}_c$ ,  $k = K + \hat{k}$ 。式中,  $K$  为占空比直流分量。

把扰动信号代入式(4),忽略小信号的乘积项如  $\hat{a}\hat{k}$  和直流项如  $KU_1$ ,整理得

$$\begin{cases} L \frac{d\hat{i}}{dt} = k\hat{u}_1 + \hat{k}U_1 - \hat{u}_c, \\ C \frac{d\hat{u}_c}{dt} = \hat{i} - \frac{\hat{u}_c}{R}. \end{cases} \tag{5}$$

对式(5)进行拉氏变换得

$$\begin{cases} Ls\hat{I}(s) = \frac{KU_1(s)}{s} + \frac{\hat{K}(s)}{s}U_1 - \frac{\hat{U}_c(s)}{R}, \\ Cs\hat{U}_c(s) = \frac{\hat{I}(s)}{s} - \frac{\hat{U}_c(s)}{sR}. \end{cases} \tag{6}$$

由于电路输出反馈量为电压  $u_c$ ,消去公式(6)中的电流  $I(s)$ ,因此电路具有两个独立的输入变量  $U_1(s)$  和  $K(s)$ ,一个输出变量  $U_c(s)$ ,整理得

$$U_c(s) = \frac{RK}{(RLCs^4 + k)}U_1(s) + \frac{U_1R}{(RLCs^4 + R)}K(s). \tag{7}$$

由式(7)得脉冲电源的传递函数框图见图 3。

图 3 中虚线部分第一项为输入电压扰动对输出电压影响的传递函数,第二项为占空比扰动对输出电压影响的传递函数。 $G_{uc}(s) = k_{uc}$  为输出电压的反馈信号传递函数。

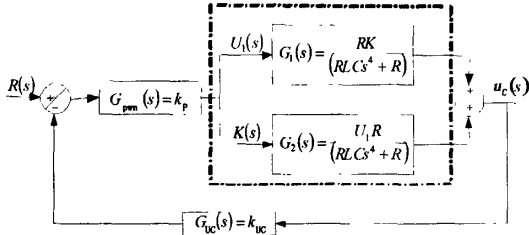


图 3 新型电火花脉冲电源闭环传递函数框图

Fig.3 Close-loop transfer function diagram of new type EMD pulse generator

### 1.3 脉冲电源自适应调压原理

脉冲电源自适应调压系统由放电状态检测电路、加工脉冲时序控制电路、PWM 控制器、模拟切换等电路组成。不同于电流型电源,这里采用直接采集输出电压进行判别<sup>[7-8]</sup>,然后对 PWM 波占空比进行控制,使得放电加工时电压维持在 25 V 左右。

PWM 控制器采用了 SG3525 脉宽调制型控制器,它能同时驱动两路开关器件完成半桥式 DC/DC 变换,器件具有欠压锁定、过压保护和软启动等功能,原理如图 4(a)所示。

自适应控制时  $u_r$  为 SG3525 误差放大器反相输入端,接到输出电压相连的电阻分压器上,将电源输出电压分压后与基准电压相比较<sup>[9]</sup>;  $u_r$  通常接基准电压的分压电阻,与  $u_r$  的取样电压相比较<sup>[9]</sup>,输出结果再与振荡电路三角波交叠产生 PWM 信号,最后控制输出电压的占空比宽度。由于电火花加工过程所需电压只是击穿电压和维持电压,因此控制 DC/DC 控制器时,对应两种占空比如图 4(b)和(c)所示。

电火花加工的独特负载特性决定了加工过程伴随着频繁的击穿延时到放电加工,再到消电离,因此采集电路对放电状态的检测一定要迅速及时地传递到模拟开关器,由它控制图 4(a)中的开关 S 进行切换。利用一个两路输入的或门,对采集得到的光耦输出脉冲加工信号以及脉冲时序发生器的互补信号相或,形成 PWM 控制器控制信号所需波形,其原理如图 5 所示。

过程分为三个阶段:  $t_1$  为击穿延时过程,在高压击穿电压作用下加工间隙开始被击穿延时,光耦采集电路输出高电平,互补信号低电平相或后,或门输

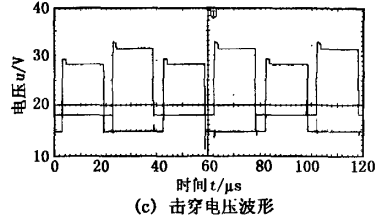
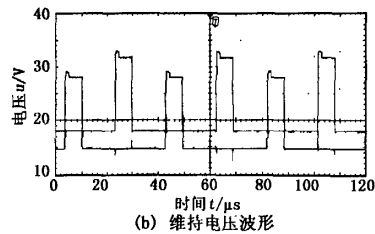
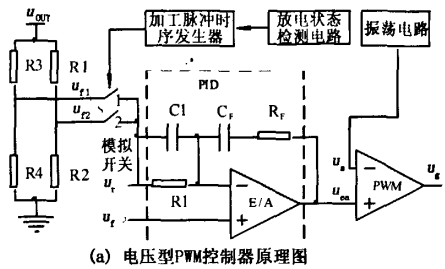


图 4 PWM 控制器原理图及输出波形

Fig.4 Schematic diagram and output waveforms of voltage-mode PWM controller

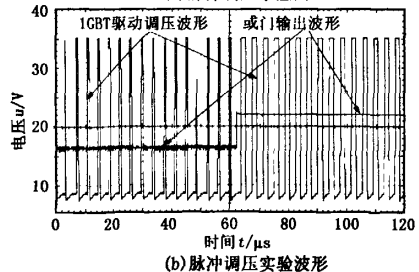
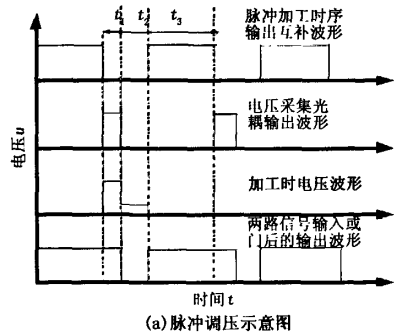


图 5 脉冲电源自适应调压波形

Fig.5 Self-adapting voltage-adjusting waveform of pulse generator

出高电平,PWM 控制器稳压输出; $t_2$  为放电加工过程,此时光耦采集电路给出低电平,互补信号仍为低电平,或门输出低电平,控制模拟开关切换到模式“ $S_2$ ”,误差放大器反相输入端信号  $u_i = u_n$ ,PWM 控制器以较小脉冲宽度输出,迫使输出电压快速下降,DC/DC 降压调节,输出电压  $u_{out}$  下降到维持电压; $t_3$  阶段为消电离过程,脉宽定时结束互补信号为高电平,或门输出高电平,模拟开关切换到模式“ $S_1$ ”,误差放大器反相端输入  $u_i = u_n$ ,PWM 控制器输出较大脉冲宽度,迫使输出电压  $u_{out}$  快速上升到空载击穿电压<sup>[10]</sup>。

## 2 关键电路参数的设计

### 2.1 输出纹波电压的计算

输出纹波电压是电源稳定性的重要参数,电源在加工过程中拥有可调脉宽、脉间的方波,同时在脉间到来时,电感、电容以及续流二极管形成了放电回路,当电感大于临界值时电流连续,因此整个电源可近似看作连续导电模式下(CCM)的 BUCK 变换器。最大输出峰纹波电压为<sup>[11]</sup>

$$U_{pp1} = \frac{U_o(U_{imax} - U_o)}{8LCf^2 U_{imax}} \quad (8)$$

式中, $U_o$  为输出电压; $U_{imax}$  为变换器输入电压最大值; $L$  为滤波电感值; $C$  为滤波电容值; $f$  为变换器工作频率。

显然  $U_{pp1}$  是电感  $L$  的单调函数,电感取值越大输出纹波电压越小。

### 2.2 输出滤波电感设计

电感的计算公式为

$$L = \frac{U_{omin}}{2 \times (2f_s) \times 10\% \times I_{omax}} \left[ 1 - \frac{U_{omin}}{\frac{U_{imax}}{2} - U_L - U_D} \right]$$

式中, $U_{omin}$  为最低输出电压,取为 25 V; $U_{imax}$  为最高输入直流电压,取为 342 V; $U_L$  为电感压降,取为 0.7 V; $U_D$  为整流二极管压降,取为 2.3 V; $I_{omax}$  为最大输出电流,取为 20 A; $f_s$  为开关管工作频率,取为 70 kHz;计算出  $H$ 。

考虑到电火花加工间隙频繁出现微短甚至短路故障,需要适当增加电感量来限制电流突变对开关管的冲击,因此选取电感量为 160  $\mu$ H。

### 2.3 输出滤波电容设计

输出滤波电容容量与输出电压纹波  $\Delta U_o$  有关,取  $\Delta U_o = 0.05\% U_o$ ,则输出滤波电容容量为

$$C_o = \frac{U_{omin}}{8L(2f)^2 \Delta U_o} \left( 1 - \frac{U_{omin}}{\frac{U_{imax}}{2} - U_L - U_D} \right) = 126 \mu F.$$

为了增强滤波效果,取 220  $\mu$ F/250 V 的铝电解电容与 1  $\mu$ F/250 V 的薄膜电容并联。为了抑制高频噪声,输出线之间接 0.1  $\mu$ F/500 V 旁路电容以滤出差模噪声。

## 3 试验结果分析

对一台工程样机进行试验,通过调节前级 DC/DC 变换器的最大占空比来调节变换器输出高压幅值,并分别在 100 V 和 120 V 时进行工艺试验以考察空载电压幅值对加工速度的影响。具体指标如下:加工峰值电流 20 A,脉冲间隔 500  $\mu$ s,加工时间 10 min。由试验数据绘制的空载电压与加工效率曲线如图 6 所示。

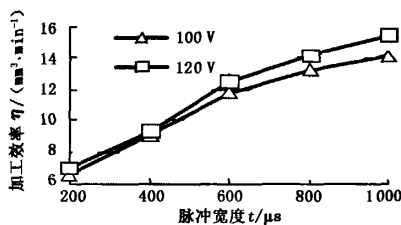


图6 加工效率与脉冲宽度的关系

Fig. 6 Relation between machining efficiency and pulse width

从图6中可以看出,空载电压为 120 V 时的加工速度要高于 100 V 时的加工速度。这主要是因为击穿电压为 120 V 时加工间隙更容易击穿,单位时间内有效放电脉冲数多,即脉冲利用率高;同时,由于输出电容的储能作用,击穿电压为 120 V 时击穿瞬间的瞬时爆炸力更大,这有利于蚀除材料。在脉冲间隔一定的情况下,加工效率随着脉冲宽度的增加而增加,但是增加的速度却逐渐变慢(曲线斜率变小)。这是因为随着脉冲宽度的增加,单个脉冲能量将近似线性增加,脉冲频率逐渐变小,但单个脉冲能量的增加速度比脉冲频率的下降速度要快,所以加工效率仍然会逐渐增加,这也验证了加工效率同时与单个脉冲能量和脉冲频率成正比的电火花加工规律。

加工过程中加工间隙电压波形与 DC/DC 变换器脉冲波形如图 7 所示。图 7 中显示,在脉冲间隔阶段消电离明显,没有电流拖尾现象。

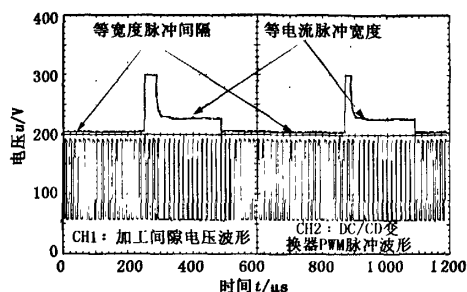


图7 加工间隙电压波形与DC/DC变换器脉冲波形  
Fig.7 Voltage waveform of machining clearance and pulse waveform of DC/DC converter

## 4 结论

(1) 所研制的高效电火花脉冲电源具有自适应调压及等电流脉冲宽度特性, 可实现空载电压、脉冲宽度、脉冲间隔大范围独立可调, 彻底取消了耗能的限流电阻。

(2) 改进的电路拓扑结构以及相应的控制策略, 有效地解决了电流的拖尾现象。

(3) 电源具有较高的调压精度, 满足设计要求。

## 参考文献:

- [1] ROSARIO Casanueva, FRANCISCO J Azcondo. Series-parallel resonant converter for an EDM power supply[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004(149): 172-177.
- [2] FUZHU Hana, SHINYA Wachi. Improvement of machining characteristics of micro-EDM using transistor type isopulse generator and servo feed control[J]. Precision Engineering, 2004,(28):378-385.
- [3] 宋博岩. PWM 控制节能式电火花加工脉冲电源的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2001:2-14.
- [4] 陈道炼. 单级组合式不间断高功率因数 AC/DC 变换器研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(25):85-89.
- [5] CHEN Dao-lian. Research on single stage combined un-interruptible AC/DC converters with high power factor[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(25):85-89.
- [5] 吴磊涛, 杨兆华. DC/DC 开关变换器的无源控制方法[J]. 电工技术学报, 2004, 19(4):66-69.
- WU Lei-tao, YANG Zhao-hua. Investigation of assivity-based control of DC/DC converter[J]. Transactions of China Electro Technical Society, 2004, 19(4):66-69.
- [6] 宋博岩, 王玉魁, 赵万生. 节能式电火花脉冲电源的动态特性研究[J]. 中国机械工程, 2003, 14(16):1354-1356.
- SONG Bo-yan, WANG Yu-kui, ZHAO Wan-sheng. Research on dynamic characteristics of energy-saving EDM pulse generator[J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(16):1354-1356.
- [7] CASANUEVA, ROSARIO, AZCONDO, et al. Series-parallel resonant converter for an EDM power supply[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 149(1/3):172-177.
- [8] HAN Fu-zhu, MASANORI Kunieda. Development of parallel spark electrical discharge machining[J]. Precision Engineering, 2004(28):65-72.
- [9] 肖曙, 谢沅清. PWM 控制器 SG3525 的两种宏模型[J]. 北京邮电大学学报, 1996, 19(3):65-71.
- XIAO Shu, XIE Yuan-qing. Two marco models of PWM controller SG3525[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 1996, 19(3):65-71.
- [10] 刘永红, 陈继明. 调压式节能电火花加工脉冲电源: 中国, 200510044957.7[P]. 2006-05-17.
- [11] 刘树林, 刘建. Buck DC/DC 变换器的输出纹波电压分析及其应用[J]. 电工技术学报, 2007, 22(2):91-97.
- LIU Shu-lin, LIU Jian. Analysis of output ripple voltage of buck DC/DC converter and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(2):91-97.

(编辑 沈玉英)

(上接第115页)

- [6] 荆宏远. 落石冲击下浅埋管道动力学响应分析与模拟[D]. 武汉: 中国地质大学工程学院, 2007.
- [7] 都的箭, 刘志杰, 马书广. 埋地管线在爆炸冲击作用下的数值模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(2):181-186.
- DU De-jian, LIU Zhi-jie, MA Shu-guang. Numerical simulation for dynamical stress of buried pipelines under explosion ground sock waves[J]. Chinese Journal of Un-

- derground Space and Engineering, 2007, 3(2):181-186.
- [8] Itasca Consulting Group. 3DEC, 3 Dimensional Distinct Element Code; USA, 2000[P].
- [9] 牛志荣, 杨桂通. 冲击荷载下土体位移特征研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(11):1743-1748.
- NIU Zhi-rong, YANG Gui-tong. Studies on the displacement of soils subjected to the impact loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(11):1743-1748.

(编辑 沈玉英)