

## 弧焊逆变电源电流开关控制法

王建萍 费跃农

(深圳大学工程技术学院 深圳 518060)

**摘要** 弧焊逆变电源输出电流控制是满足不同焊接工艺需求和保证电源可靠运行的关键。本文就电弧电流控制提出了一种用开关量控制逆变电源脉宽调制的方法, 对其原理及系统静、动态性能进行了理论分析, 简化了目前使用较普遍的 PID、模糊等系统控制模式。同时介绍了研制的以单片机为核心的手弧焊、TIG 焊逆变电源的控制系统组成原理, 并利用开关控制法在该系统上加以应用, 理论分析和试验结果表明, 采用开关量控制法进行焊接, 在电弧负载整个变化范围内可实现焊接电流无超调快速控制, 有效地满足各种焊接工艺要求, 保证了弧焊逆变电源工作的稳定性和可靠性。

关键词: 开关控制 逆变电源 焊接电流 单片机

中图分类号: TG434



王建萍

## 0 序 言

弧焊逆变电源输出电流控制是满足不同焊接工艺需求和保证电源可靠运行的关键。由于焊接过程比较复杂, 并存在时变、非线性和干扰等诸多的因素<sup>[1]</sup>, 故要选择一种合理的控制方法就显得相当重要。作者在研制的一台服务于手弧焊、TIG 焊逆变电源的控制系统中, 采用本文提出的一种开关量控制法, 对逆变电源脉宽进行调制, 使系统控制模式得以优化。实践证明, 该控制方法合理、有效, 在整个电弧负载变化范围内和电网波动时, 均实现焊接电流无超调快速控制。

## 1 开关式弧焊逆变电源控制原理

开关式弧焊逆变电源焊接电流控制框图如图 1 所示, 调节电流给定值  $I_g$ , 输出不同的焊接电流  $I_f$ 。当焊接负载发生变化或电网扰动等各种因素出现时, 焊接电流  $I_f$  均可能偏离给定值  $I_g$ , 这时控制系统需给出相应的开关量  $SW_{out}$  来调节 PWM 的脉宽, 以使焊接电流  $I_f$  回到给定值  $I_g$ , 从而实现逆变电源的恒流外特性。

控制系统根据焊接电流  $I_f$  与给定值  $I_g$  的偏差极性  $e$  (正、负), 即刻确定当前控制逆变电源 PWM 的脉宽  $T_{on}$ 。

$$T_{on} = \begin{cases} W_{\min} & I_f > I_g \\ W_{\max} & I_f < I_g \end{cases} \quad (1)$$

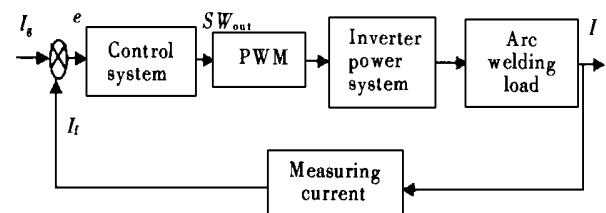


图 1 焊接电流控制系统方框图

Fig. 1 Block diagram of welding current control system

式中  $W_{\min}$ 、 $W_{\max}$  分别代表最小、最大脉宽。由于 PWM 脉宽调制器的输入与输出之间存在  $T_{on} = f_{PWM} (SW_{out})$ , 故系统给出开关量  $SW_{out}$  的形式由式(2)决定。图 2 显示了开关量  $SW_{out}$  控制输出电流  $i_1(t)$  的波形示意图。

$$SW_{out} = \begin{cases} "0" & I_f > I_g \\ "1" & I_f < I_g \end{cases} \quad (2)$$

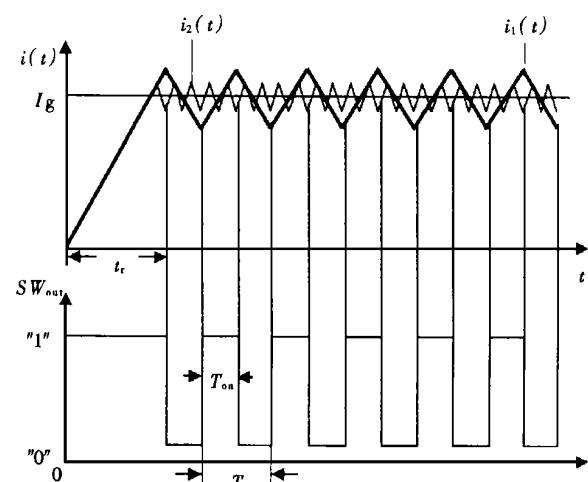


图 2 开关量控制输出电流波形

Fig. 2 Welding current waveform of switch control mode

## 2 系统稳态响应的数学分析

### 2.1 开环电路电弧引燃的过渡过程

弧焊逆变电源的简化等效电路<sup>[2]</sup>如图3a所示,开关 $S_1$ 、 $S_2$ 在图3b的高频脉冲 $CP$ 作用下不断向电弧输送能量。当在脉宽为 $T_{on}$ 时刻的脉冲到来时, $S_1$ 闭合, $S_2$ 打开,电源向负载提供能量;当在 $T-T_{on}$ 时刻脉冲消失后, $S_1$ 打开, $S_2$ 闭合,电感 $L$ 中的能量维持负载电流的连续。其中 $U_s(t)$ 为逆变电源的输入电压; $n$ 为脉冲变压器的变压比; $T$ 为 $CP$ 脉冲的周期; $T_{on}$ 为开环电路 $CP$ 脉冲控制的脉宽; $R(t)$ 为电弧等效电阻; $i(t)$ 为焊接电流。

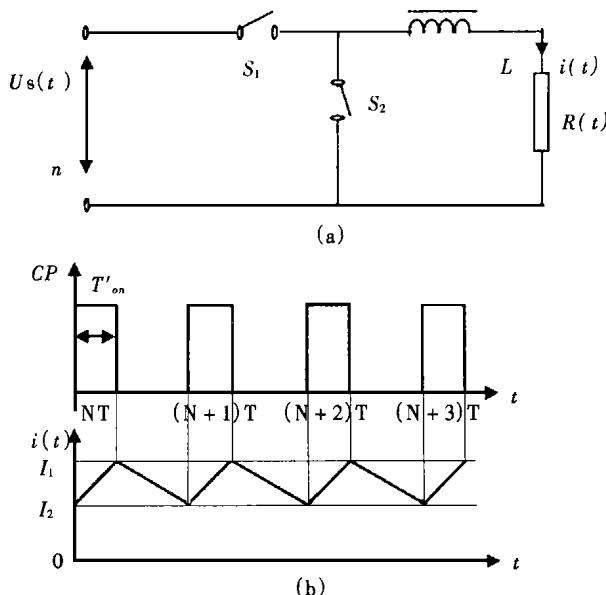


图3 弧焊逆变电源等效电路及输出电流时序图

Fig. 3 Equivalent circuit of arc welding inverter power source and welding current waveform

在高频脉冲 $CP$ 作用下,电弧从产生瞬间到稳定燃烧这一过渡过程可表示为

$$L \frac{di(t)}{dt} + R(t) \cdot i(t) = \frac{U_s(t)}{n} \quad (3)$$

$$NT < t \leq NT + T_{on}$$

$$L \frac{di(t)}{dt} + R(t) \cdot i(t) = 0 \quad (4)$$

$$NT + T_{on} < t \leq (N+1)T$$

式(3)、(4)代表的系统是时变、非线性的。现假设 $U_s(t) = U_s$ ,  $R(t) = R$ 为常数,则式(3)、(4)化为线性方程。考虑到脉冲在 $NT + T_{on}$ 或 $(N+1)T$ 的边界点上, $i(t)$ 均连续,根据现代电力电子技术和电弧物理基本理论,可以建立“逆变电源——焊接电弧”系统的离散化模型,即

$$I(NT + T_{on}) = \frac{U_s}{nR} (1 - e^{-\frac{T_{on}}{\tau}}) + I(NT) e^{-\frac{T_{on}}{\tau}} \quad (5)$$

$$I[(N+1)T] = I(NT + T_{on}) e^{-\frac{T-T_{on}}{\tau}} \quad (6)$$

式中  $\tau = L/R$

$N$ ——自然数

由图3b可见,电流在进入稳态时存在

$$I(NT) = I[(N+1)T] = I_2 \quad (7)$$

$$I(NT + T_{on}) = I[(N+1)T + T_{on}] = I_1 \quad (8)$$

把式(7)(8)代入式(5)(6),即可得到

$$I(NT + T_{on}) = \frac{U_s}{nR} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{T_{on}}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} = I(T_{on}) \frac{1}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} \quad (9)$$

$$= I(T_{on}) \sum_{j=0}^N e^{-j\frac{T}{\tau}} \quad (9)$$

$$I[(N+1)T] = I(T_{on}) \cdot \frac{1}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} \cdot e^{-\frac{T-T_{on}}{\tau}} \\ = I(T_{on}) e^{-\frac{T-T_{on}}{\tau}} \sum_{j=0}^N e^{-j\frac{T}{\tau}} \quad (10)$$

$$式中 I(T_{on}) = \frac{U_s}{nR} (1 - e^{-\frac{T_{on}}{\tau}})$$

考虑到 $T_{on}/\tau \ll 1$ ,图3b中*i(t)*的上升和下降段可近似为直线,故输出电流的平均值为

$$I_0 = \frac{1}{2} (I_1 + I_2) = \frac{1}{2} \{ I(NT + T_{on}) + I[(N+1)T] \} \\ = I(T_{on}) \frac{1 + e^{-\frac{T-T_{on}}{\tau}}}{2} \sum_{j=0}^N e^{-j\frac{T}{\tau}} \quad (11)$$

有 $T_{on}/\tau \ll 1$ ,利用指数函数的近似计算可求得

$$I_0 \approx I(T_{on}) \sum_{j=0}^N e^{-j\frac{T}{\tau}} = I(NT + T_{on}) \quad (12)$$

从式(12)中可以得出以下结论。

(1)电流要尽快达到稳态取决于式(12)的收敛速度,即与 $T/\tau$ 有关。由此影响过渡时间的因素由 $L$ 、 $R$ 和 $T$ 决定。

(2)脉宽 $T_{on}$ 的增加会使平均电流增大。

(3)只要保证 $I(NT + T_{on})$ 点的电流恒定,输出电流就基本恒定。

### 2.2 闭环输出电流的稳定控制

在开环电路中脉宽 $T_{on}$ 是恒定的,而实际的输出电流会随着电弧负载的改变或干扰等各种因素的出现而发生改变。为此需闭环控制(图1),实时调节脉宽 $T_{on}(N)$ ,使输出电流稳定。脉宽 $T_{on}(N)$ 的大小受给定值 $I_g$ 与电流负反馈量 $I_f(NT)$ 的误差信号 $E(NT)$ 控制。只要确定 $T_{on}(N)$ 与 $I_f(NT)$ 之间关系,利用式(9)、(10)、(12),就可求出闭环电路的过

渡过程和平均电流。因系统是一个非线性离散模型,计算起来会十分复杂。

为此,要找出  $T_{on}(N)$  与  $I_f(NT)$  之间的关系,可以借助上述脉冲控制的特点,结合负反馈的原理,推出开关量控制输出电流的方法,即式(2)。从图 2 的波形特点可以看出,开关量控制信号  $SW_{out}$  与图 3b 高频脉冲信号的波形很相似,所不同的有以下几点。

(1) 高频脉冲信号由 PWM 脉宽调制器内部线路自动生成,而  $SW_{out}$  信号由软件生成。

(2) 开关量的频率  $f_{sw}(=1/T_{sw})$  与高频脉冲信号  $CP$  的频率  $f(=1/T)$  不同,两者信号间的频率关系是  $f_{sw} \leq f$ 。图 2 中比较  $i_1(t)$ 、 $i_2(t)$  可看出,在相同的平均电流和电感量下,提高开关量的频率,可使电流的变化差出现“高频收缩效应”,随着频率的进一步提高,电弧电流越趋恒定,电弧燃烧也就更稳定,但开关量频率的上限受闭环控制系统速度的限制,故要使用高速的 A/D 和 D/A 转换器。

(3) 开关量的脉冲宽度  $T_{on}$  只有两种选择  $W_{max}$  和  $W_{min}$ ,且是固定的,而高频脉冲信号的脉宽  $T_{on}$  可自由调节。

观察图 2 电流从起始值调整到给定值  $I_g$  时,系统一直送出开关量“1”,要求脉宽  $T_{on}$  始终送最大值  $W_{max}$ ,促使电流以最快的速度上升,获取最快的响应时间;当电流超过给定值电流  $I_g$  时,系统为加速进入稳定状态,此时送出“0”开关量,即给予一个负向脉冲( $T_{on}$  为  $W_{min}$ ),让电流迅速逼近给定值;当电流略低于给定值电流时,系统又送来正脉冲,整个稳态过程在正负脉冲之间进行切换。开关量的交替使用已形成一个深度的负反馈,以维持电流恒定。由于系统对输出电流在过给定值电流和欠给定值电流时能及时作反方向调节,快速返回平衡点,故克服了超调现象,实现无超调控制。

### 3 系统动态过程的实现

#### 3.1 单片机实现焊接电流的稳定输出

以单片机微机为核心的控制系统利用开关控制法成功地实现了对焊接电流稳定输出的控制。图 4 所示为用于手弧焊和 TIG 焊逆变电源的控制系统硬件结构图<sup>[3]</sup>。系统采用 LCD 的菜单显示形式,通过键盘设定焊接方式、焊接功能及各种参数指标。LCD 显示器用图形方式显示当前焊接顺序及对应的指标,图 5 展示了 LCD 其中一个功能图形和技术参数指标;对于每次键盘输入的功能和参数通过 E<sup>2</sup>PROM 芯片实现记忆功能;动作开关用以切换起

弧和收弧;采用霍尔元件作为电流转换器; PWM 用 UC3875 来完成; 高频脉冲信号的频率采用 20 kHz; 使用高速的光耦实现信号间的隔离。

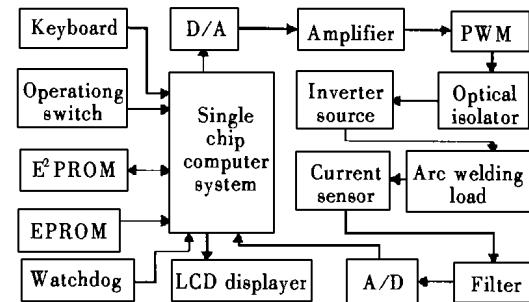


图 4 微机控制系统硬件结构框图

Fig. 4 Block diagram of single chip microcomputer control system for inverter source

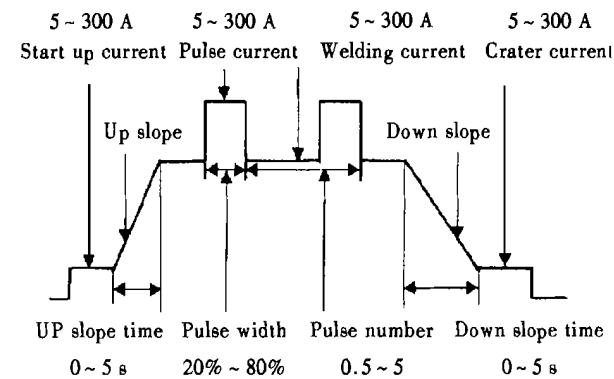


图 5 脉冲焊 LCD 显示的焊接顺序和对应的焊接参数范围

Fig. 5 Welding sequence and range of correlative welding parameters of LCD display within pulse welding

#### 3.2 开关控制法的补充说明

见图 5,在焊接上坡和下坡时,由于电流时刻发生变化,故在使用开关量控制法时应作适当处理,即把整个上坡(下坡处理方式相同)的过程用  $K$  段的台阶来逼近,而每个台阶使用开关量控制法。 $K$  段台阶参数可由下列方法确定为

$$\text{电流给定值 } I_{gK} = (I_{we} - I_{st})/K \quad (13)$$

$$\text{开关量调节时间 } t_K = t_{up}/K \quad (14)$$

理论上来说,  $K$  取得越大, 逼近斜线的程度就越好, 实际上  $K$  的最大值受  $I_{gK}$  和  $t_K$  的制约。 $t_K$  不能小于开关量控制的最快  $t_r$  响应时间,  $I_{gK}$  不能小于 D/A 对应的最小单位, 所以在实践中一定要在满足精度的条件下, 尽可能取大的  $K$ 。

#### 3.3 技术参数和试验结果分析

用单片机作控制系统,采用开关控制法调节弧焊逆变电源,实现恒流外特性,具有直流和低频载波脉冲功能。其主要技术参数如图 5 所示,空载电压 55 V,开关频率为 20 kHz。本电源 TIG 焊工艺条

件在焊件厚度 15 mm、焊接电流 80 A、焊接过程人为造成弧长 5 mm 的变化时, 系统在起弧、上坡和脉冲电流顺序工作下, 系统响应过程实测波形如图 6 示。从波形图上可见, 整个过程无超调, 响应速度快, 电流最大波动不超过 1 A, 误差小, 电弧弹性好, 燃烧稳定, 可以实现良好的焊接性能。

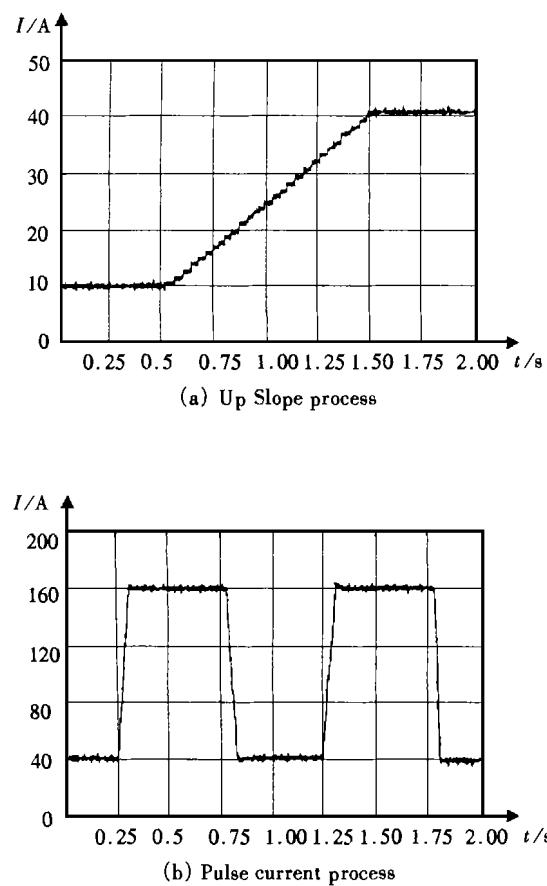


图 6 焊接电流响应过程的实测波形

Fig. 6 Real response waveforms of welding current

另外, 开关式电流输出波形呈三角形(图 2、6), 其频率就是 IGBT 开关工作频率。三角形波的峰值取决于焊接电路的时间常数、频率和脉冲宽度。当输出的焊接电流波形以低频周期变化时, 低频脉冲波形中均载有开关量控制的三角形波, 频率为 20 kHz 的电流波形。因此, 这种低频载波脉冲电弧也具有高频电弧的特性。

#### 4 结 论

(1) 基于开关控制法调节弧焊逆变电源的输出电流, 无超调, 响应速度快, 可以实现电弧燃烧稳定且挺度大。

(2) 无论是直流还是低频脉冲电流, 焊接电弧均具有高频电弧的特点, 故可提高焊接质量。

(3) 采用单片微机系统能够满足电弧控制的要求, 具有成本低, 控制灵活, 可靠性高的特点。

(4) 焊接过程良好的汉字图形界面, 易理解并可按规范操作。

#### 参 考 文 献

- 1 赵家瑞. 逆变焊接与切割电源. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- 2 王伟等. 单片微机控制弧焊电源外特性的研究. 电焊机, 1996, 6: 29~32
- 3 吴宪平, 等. IGBT 逆变式手弧、TIG 焊两用焊机的设计. 电力电子技术, 1996, 2: 21~23

**作者简介** 王建萍, 女, 1963 年出生。1988 年毕业于上海工业大学电磁测量专业, 获硕士学位, 讲师。一直从事教学和科研开发工作。研究的方向为电力电子技术、测试计量、智能控制和计算机的软硬件开发等。现已在国内核心刊物等杂志中发表论文 10 余篇。

#### 简 讯

#### 美国焊接学会理事长来哈访问

2000 年 1 月 12 日~14 日, 美国焊接学会理事长 Robert TEUSCHER 先生来到哈尔滨对中国焊接学会进行了参观访问。中国焊接学会前理事长吴林、顾问林尚扬、秘书长张彦敏及副秘书长朴东光等同志对他们进行了热情的接待, 并就中美焊接学会的情况进行了交流, 双方表示将于 2000 年 4 月在美国芝加哥签定新的中美焊接学会双边协议, 以加强今后的交流与合作。美国焊接学会理事长 Robert TEUSCHER 先生还分别参观了哈尔滨焊接研究所、哈尔滨中德焊接技术培训中心和哈尔滨工业大学现代焊接技术国家重点实验室。他对中国目前焊接技术的发展表示肯定, 对中国先进的焊接技术表示赞扬。通过这次访问, 增进了双方之间的了解, 加强了彼此之间的联系, 为促进中美焊接学术交流起到了积极的作用。