

# 新颖方波交流 TIG 电源二次逆变主回路的研究

杜春水, 张承慧, 张光先, 马永庆

( 山东大学, 济南 250061 )

**摘要** :为了提高方波交流双逆变电源的整机效率,降低成本,提出了一种半桥式二次逆变电路拓扑,它采用了耦合电感及恒压吸收电路,既提供了换流回路,又保证了交流电流过零的快速性。分析了其工作原理,并给出相关计算。实验表明该电路设计合理可靠,在较小输出电流情况下无需特殊稳弧装置便可获得满足焊接工艺要求的稳定电弧。

**关键词** 逆变;电源;焊接/绝缘栅双极晶体管

中图分类号:TM464;TG434.1 文献标识码:A 文章编号:1000-100X(2003)02-0056-04

## Study on a Novel Second Inverting Main Circuit of the Square-wave AC TIG Inverter

DU Chun-shui, ZHANG Cheng-hui, ZHANG Guang-xian, MA Yong-qing

( Shandong University, Jinan 250061, China )

**Abstract** :In order to improve the efficiency and reduce the cost of the square-wave AC TIG machine, a novel topology of half-bridge circuit is presented, which is composed of coupling reactor and snubbed circuit with constant voltage. Not only can it convert current but also make the AC current easily across zero. The principle of the main inverting stage of the machine is analyzed and the calculations of the correlative parameters are presented in this paper. Experiment shows that the design of the main circuit is rational and reliable. Without any other special devices, the pulse of stable arc created by the circuit structure itself can fit the need of the AC TIG welding.

**Keywords** inversion; power supply; welding; IGBT

## 1 引言

由于镁、铝及其合金材料具有耐腐蚀、密度小、重量轻、机械特性好等优点,越来越受人们的欢迎,尤其在一些特殊的部门如:航空、航天、核能等领域得到广泛的使用。但是它们的表面易氧化,形成一层致密的氧化膜,该氧化膜的熔点较铝的熔点高且不易破碎。国内外对镁、铝及其合金材料的焊接主要采用交流钨极氩弧焊,既能满足铝材的阴极雾化作用,又能减少钨极的损耗。

新一代高性能功率开关器件,尤其是绝缘栅双极性晶体管(IGBT),由于具有开关频率高、导通电阻小、开关功率额定大等优点,极大地提高了逆变电源的开关频率,它不仅省掉了成本高、体积大、效率低的工频变压器,而且改善了电源的动态特性,增大了电源的功率密度,大大提高了电源的控制精度,具有明显的节能效果。目前研制的方波交流电源在主回路上大都采用双逆变式结构,但是由于二次回路

的全桥式逆变结构对整机的工作效率影响较大,使得逆变节能的优势未得以充分发挥。

## 2 方波交流电源的主回路

近来,随着逆变焊接电源的蓬勃发展,方波交流电源的主回路大都采用了双逆变结构形式。在一次侧采用的电路形式主要有全桥式、半桥式、推挽式以及它们的拓扑结构。其主要功能是实现钨极氩弧焊电源的恒流输出焊接外特性及电源的动态特性。

控制策略也逐步由硬开关 PWM 方式发展为软开关 PWM 方式,大大地改善了功率器件的工作条件,提高了整机效率。二次侧逆变主回路大都采用全桥式电路结构<sup>[2,3,4]</sup>如图 1 所示。

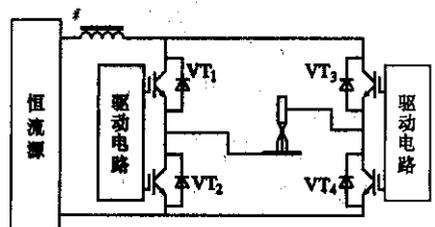


图 1 二次逆变主回路

该主电路形式有许多优点:原理简单、电流极性的转换比较快、电弧稳定、易单独形成回路,可制作成独立单元。但是考虑到目前电源的发展方向为高效率、节能、小型化,全桥电路形式存在以下的不足。

基金项目:山东省自然科学基金资助项目,编号:Y2001G01

收稿日期:2002-04-23

定稿日期:2002-09-18

作者简介:杜春水(1973-),男,山东诸城市人,硕士研究生,研究方向为大功率变频逆变电源。

(1) 系统功耗较大, 不利于电源大功率化

由于铝材散热通常比较快, 焊接同样厚度的铝板采用的焊接电流要比焊接其他诸如合金钢、不锈钢板所用的焊接电流大, 因而所需的焊接电源的功率也大得多。假设不考虑开关器件的开关损耗, 仅对通态损耗一项进行研究便知, 该电路每一次开关都有两只功率管同时导通, 即使采用通态压降比较低的新器件 IGBT, 每只开关管饱和通态压降  $V_{ce}$  也约有 2V。设有一台型号为 WSME-350A 型的多功能交直流方波电源, 其额定输出电流  $I_o$  为 350A。则有通态损耗:  $P_{on} = 2V_{ce}I = 1400W$ , 而根据氩弧焊正常焊接时电弧电压计算公式  $U_o = 10 + 0.04I = 24V$ , 实际输出功率为:  $P_o = 8400W$ 。由此可以看出仅仅通态损耗占的比例为:  $\eta_2 = 1400/8400 = 16.7%$ , 而且随着输出电流的降低, 通态损耗占的比重变大。如果考虑整机效率, 设一次逆变电源的效率为:  $\eta_1 = 85%$ , 则整机最大效率:  $\eta = \eta_1\eta_2 = 71%$ 。另外, 还有功率器件开关损耗、阻容吸收电路耗去的能量等。由此可见, 方波交流电源的整机效率不算高, 逆变电源节能的优势得不到充分体现。

(2) 成本比较高

由于交流方波电源的功率一般都比较大, 而通过功率开关管 (IGBT) 的电流即是输出电流, 所以选择的器件不仅定额大, 而且价格较高, 还必须有相应的驱动电路、缓冲电路与保护电路, 因而不仅提高了成本而且损耗也增加了一倍。为了保证整机的负载持续率, 所需的散热器要大一倍。因此采用全桥式主回路的逆变电源成本比较高。

总之, 从以上分析可以看出, 采用全桥结构的主回路仍然存在诸多不足, 而在传统的半桥式逆变电路结构中, 主要存在着两点不足: ①不宜用作大功率电源的主回路; ②由于其中一个桥臂为电容, 因而在每一次转换时都要吸收能量, 特别是在电流较小的情况下不能起弧、稳弧, 无法进行正常的焊接。为了满足交流方波电源的工艺要求, 须加稳弧装置 (如高压脉冲器、高频引弧器等) 及其检测、控制电路, 既增加了成本, 又降低了设备的可靠性。

3 电路结构及特点

基于上述考虑, 提出了一种拓扑半桥式电路, 不需附加稳弧装置就能够实现电流较快过零 ( $100A/20\mu s$ )<sup>[1]</sup>, 而且整机效率高, 成本低。如图 2 所示。

方波交流电源所采用的策略为: 在电路的输出电流极性转换的时候采用耦合电感, 保证在输出端建立一个较高的电压, 一方面由于电感面对的是一方数据

个较高的电压使得流过它的电流迅速减小; 另一方面由于耦合作用, 在耦合电感上感应出较高的电压, 加速了另一方向的电流增大。另外, 由于采用单片机进行监控, 可以方便地对各种焊接参数进行控制, 特别是对电流过零时电流的控制, 不仅可以保证稳定的高性能焊接质量, 而且通过参数优化可以做到焊接时没有交流噪声, 大大地改善了工况条件。

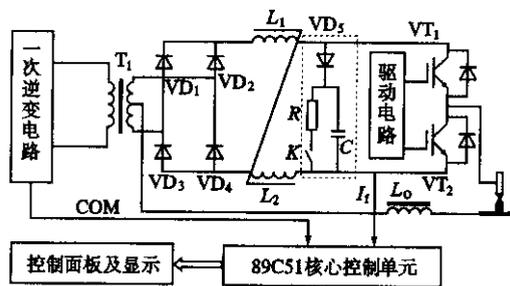


图 2 系统的结构框图

- 图中  $VD_1 \sim VD_4$  —— 中频变压器次级的快恢复整流二极管  
 $T_1$  —— 有中心抽头的中频变压器  
 $L_1, L_2$  —— 紧密绕在一个铁芯上的耦合电感  
 $VD_5$  —— 缓冲快恢复二极管  
 $C$  —— 缓冲储能电容  
 $R$  —— 放电电阻  
 $L_o$  —— 输出电路的等效电感  
 $K_1$  —— 放电用的功率开关管

4 工作原理分析

下面对二次侧主电路中的 IGBT 在一个周期内各时刻工作情况进行分析:

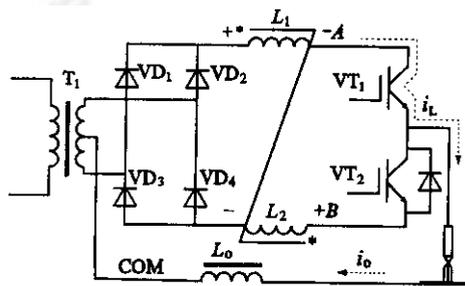


图 3  $VT_1$  开通

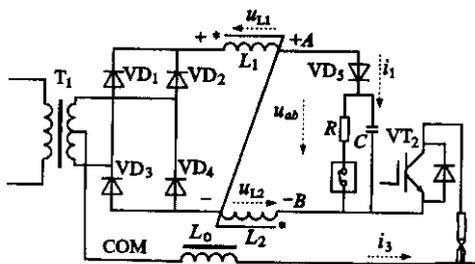


图 4  $VT_1$  关断

(1) VT<sub>1</sub> 开通

当 VT<sub>1</sub> 导通时,由于一次侧的逆变器工作,通过中频变压器次级全波整流,电流  $i_1$  的流向为:  $L_1 \rightarrow VT_1 \rightarrow$  电弧  $\rightarrow L_0 \rightarrow$  中频变压器的中心抽头。在电源输出为“正”半波的过程中,电感储存了能量,且电感端压极性为左“正”右“负”,如图 3 所示。

(2) VT<sub>1</sub> 关断

当 VT<sub>1</sub> 关断时,主要换流为电流  $i_1$ ,它的流向为:  $L_1 \rightarrow VD_5 \rightarrow C \rightarrow L_2$  输出电感较小,电流  $i_3$  将很快减小到零。由于 A、B 两侧的电势  $U_{ab}$  比较高(可以设定为 350V),所以电流衰减比较快,同时电感  $L_1$  端压的极性变为左“负”右“正”,而由于耦合作用,在耦合电感  $L_2$  端压  $u_{12}$  极性为左“正”右“负”,如图 4 所示。

(3) VT<sub>2</sub> 开通

VT<sub>2</sub> 开通后,输出电流为“负”半波,电流流向为 COM  $\rightarrow L_0 \rightarrow$  电弧  $\rightarrow VT_2 \rightarrow L_2 \rightarrow T_1$ (中频变压器)且此时电感  $L_2$  端压极性为左“负”右“正”,如图 5 所示。由于电感的限流作用,VT<sub>2</sub> 与 VT<sub>1</sub> 之间死区时间可以很小,甚至可以没有。耦合电感上的感应电压加上变压器的输出电压后加在输出电缆电感和电弧上,而输出电缆的电感比较小,因此输出电流  $i_o$  将过零后反向很快地增加。无须附加引弧脉冲电压或引弧电流,便可达到比较理想的稳弧效果,如图 5 所示。

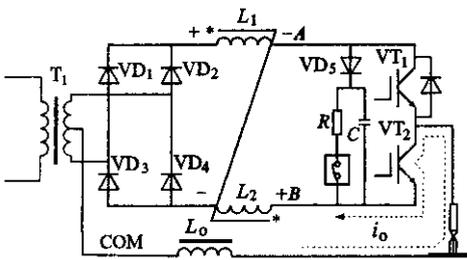


图 5 VT<sub>2</sub> 开通

(4) VT<sub>2</sub> 关断

当 VT<sub>2</sub> 关断时,由于电流快速地减小,耦合电感  $L_2$  端压极性为左“正”右“负”,而耦合电感  $L_1$  两侧的感应电压极性为左“负”右“正”,此时电流主要分量  $i_2$  的流向为  $L_2 \rightarrow VD_4 \rightarrow VD_2 \rightarrow L_1 \rightarrow VD_5 \rightarrow C$ ,另外一小部分来自输出电感的续流  $i_3$  与  $i_1$  相抵消,如图 6 所示。

(5) 工作原理波形分析

如图 7 所示,在电源的输出周期中,当电源电流输出过零时,电源电压都会有一个比较高的电压尖峰出现,该脉冲能够促使电感中的电流很快衰减,同

时起到很好的稳弧作用。

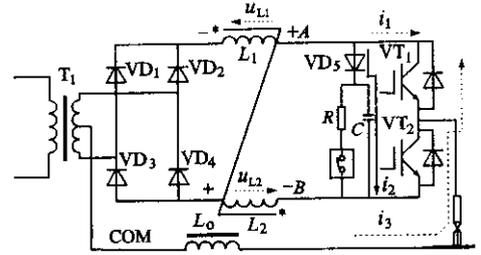


图 6 VT<sub>2</sub> 关断

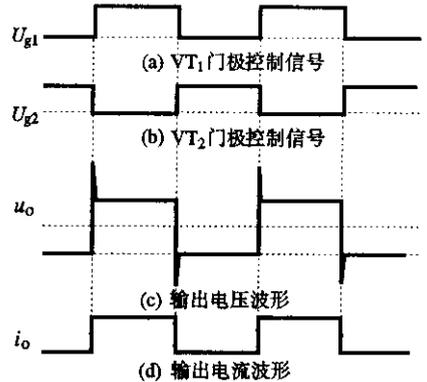


图 7 工作原理波形

为保证电容上的电压在一定范围内稳定,功率开关 K 的开关控制信号与输出的电压、电流周期没有固定的相位关系,而是随着输出电流、耦合电感的绕制工艺的不同而不同。当输出电流越大,功率开关 VT<sub>x</sub>(其中 x 为 1、2 转换一次给电解电容补充的能量越多,功率开关 K 的开关频率越高,反之亦然。

而当 VT<sub>1</sub> 开通时,由于一次侧开关电源工作周期  $T_s$  远大于二次侧输出的工作周期  $T_0$ ,在一个  $T_s$  中,二次侧的电感跟普通的直流电感一样起滤波作用。电容的电压虽然比电源的输出电压高得多,但是这个电压是相对于电源的负输出而言的,它仅在电流的极性转换过程中起作用,而交流方波电源恒流输出的焊接特性还是通过电源一次侧来保证的。

5 相关的计算

(1) 能耗的计算:

设耦合电感的耦合系数为  $m = 0.8$ ,电感为  $L = 40\mu\text{H}$ ,频率为  $f = 100\text{Hz}$  电感耦合过程能量的损失为:

$$W = \frac{1}{2} LI^2 (1 - m)^2$$

$$= 0.5 \times 40 \times 10^{-6} \times 350^2 \times (1 - 0.8) \times 100$$

$$= 49\text{W}$$

而此时若采用桥式结构仅一只 IGBT 的通态损耗为:

$$P_{on} = 2 \times 350 = 700W$$

由此可见,在耦合电感的情况下,能量转换过程中的损失与桥式电路相比明显减少。

### (2) 电解电容的计算:

由于电解电容上的电压不允许波动太大,所以当电感中的能量完全被吸收以后,其电压不应超过电容的额定电压、IGBT 额定电压以及整流二极管的反向压降。

$$\frac{1}{2}L\Delta I^2(1-m) = \frac{1}{2}C\Delta U^2$$

设  $\Delta U = 50V$ ,  $\Delta I = 350A$ ,  $L = 40\mu H$ , 则:  $C = 392\mu F$ 。故选取电解电容的型号为  $470\mu F/400V$ 。

## 6 实验结果及结论

根据焊接工艺要求及其实际的工作情况,实验设定工作频率为  $125Hz$ , 占空比为  $50\%$ 。测得输出电流(30A 左右)如图 8a 所示;测得输出电压如图 8b 所示,每一次电压过零时都存在着一个比较高的电压尖峰;工作电流与对应的耦合电感上的电压波形如图 8c 所示。在电流转换瞬间,耦合电感上有一个较高的电压,从而使得电流过零的变化比较快(电流的变化率大于  $60A/10\mu s$ )。焊接时无需特殊的稳弧装置,电弧工作稳定且交流噪音较小,焊缝成形好;一个输出周期中的耦合电感上的电压波形如图 8d 所示;吸收电容上的电压波形如图 8e 所示,当电压到达给定的上限值,便开通功率开关 K;当电压降落到一定值后,断开功率开关管 K,从而维持电容上的电压稳定。

总之,该电路的拓扑结构不仅降低了方波交流电源系统功耗,提高了整机效率,节约了成本,而且电路实现容易,具有很好的适应性和可推广性。该电路结构对输出电流的大小、频率的高低都没有特

殊的要求,可以满足铝、镁及其合金高精度、高质量的焊接需要,更适合较大功率多功能方波交流电源的生产和研制。

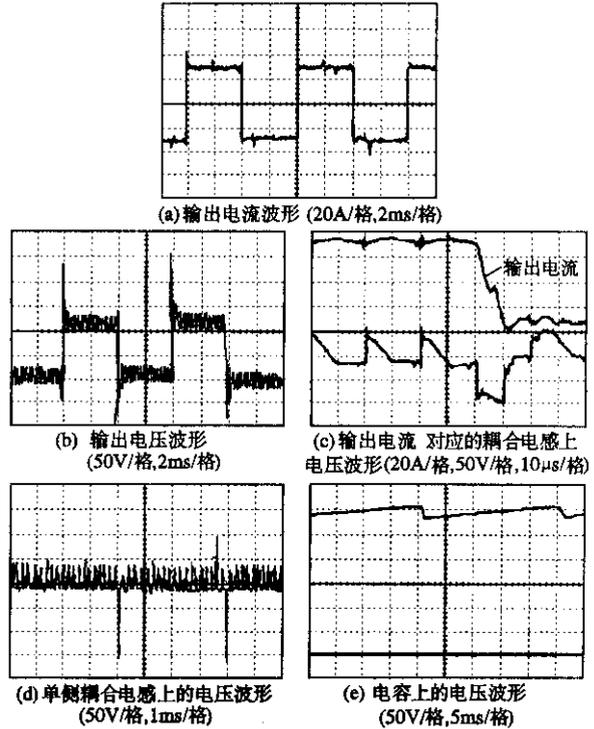


图 8 实验实测波形

### 参考文献:

- [1] 赵家瑞. 逆变焊接与切割电源[M]. 北京:机械工业出版社, 1995.
- [2] 罗树方, 余洪峰. 变极性方波电源研制[J]. 电焊机, 1998(2): 1~4.
- [3] 张广军, 殷树言, 等. 250A 变极性电源的研制[J]. 电焊机, 1997(2): 18~22.
- [4] 杜中义, 毛三可, 齐铂金. IGBT 双逆变式多功能弧焊电源[J]. 电焊机, 1994(1): 19~21.

(上接第 84 页)

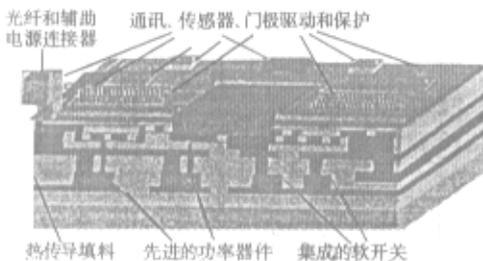


图 8

率功率电子模块封装技术中却可利用其作为输出电路的滤波电感和电容,变弊为利。又如原来为解决功率开关电路中的  $dv/dt$  和  $di/dt$  的不利影响,需

采用很多电阻电容和快恢复二极管组合的缓冲吸收电路,采用球栅阵列倒装裸芯片(Flip Chip)功率器件后,由于没有了连线  $dv/dt$  和  $di/dt$  的影响接近于零,所以不需要缓冲吸收电路,简化了电路结构,缩小了器件的体积重量,提高了电路可靠性。

## 5 结束语

用现代高技术提升连续无故障时间(MTBF),降低生产成本、缩短开发周期是当代科技发展对电力电子设备提出的目标,功率电子电路的模块化、系统集成技术和高功率密度封装技术是实现这一目标的有效途径。

(下转第 68 页)