

软开关逆变电阻点焊机主回路参数的优化及实验分析

于明^{1, 3} 张伟² 崔怀香³ 方臣富³

1.江苏宏微科技有限公司 常州 213022, 2.吉林省长春市大屯镇 65370 部队 65 分队 长春 130163, 3.江苏科技大学先进焊接实验室, 镇江 212003

摘要: 本文设计了软开关逆变式电阻点焊主电路, 采用带有饱和电感的全桥逆变主电路结构, 利用饱和电感的特殊作用, 在退出饱和时, 呈现出很大的感抗, 阻止了电流的进一步流动, 使电流保持在零状态, 为滞后臂开关管的导通与关断创造了零电流开关的条件。详细分析逆变频率在软开关逆变点焊机的作用。通过理论计算和Pspice电路仿真波形分析等方法进行主回路主要参数进行优化。经过实验测试分析, 本文设计的主回路参数合理, 焊机性能达到设计要求。

关键词: 软开关 电阻点焊 主电路 仿真

The parameter optimization and the experiment analyzes of main circiut of soft-switching inverter resistance spot welder

Yu Ming¹ Zhang Wei² Cui Huaixiang³ Fang Chenfu³

1.MacMic Science & Techonolgy Co. , Ltd Changzhou 213022. 2.Councry Da tun 65370 Army Team 65 Changchun 130163. 3. Advangced Welding Technology Provincial key laboratory,Jiangsu University of science and Technology, zhenjiang 212003

Abstract: The inverter main circuit of resistance spot welder has been designed, Which is used of soft-switching techonolgy in this article.

Full-bridage main circuit structure is adopted as well as having saturated inductance. Making use of saturated inductance effect , which appears so big inductive reactances that the current keeps zero condition because of hindered breaking, when removing from saturation , which provide condition for the lagging legs cutting off under zero current state. Frequency effect is analsed in soft-switching inverter spot welder in detailed.The main circuit parameters are optimizd, through analysis using the theoretical calculation and lectric circuit simulation of Pspice .

By the analysis of the experiment, we can conclude: the designed main circuit parameter is reasonable, the performance meets the designed requirements.

Keys: soft-switching resistance spot main circuit simulation

1 引言

电阻点焊是一种广泛应用的生产工艺, 近年来, 由于新材料、新技术的发展, 对电阻点焊工艺技术的要求越来越严格。电阻点焊工艺技术在航空航天、电子电器以及汽车等工业领域生产中占有较大比重, 尤其在航空航天工业中具有不可替代的地位。其焊接质量标准有独

特的要求，并且要求生产过程中必须保持质量的高稳定性。

电阻点焊机的发展经历了单相工频交流点焊机、直流脉冲点焊机、三相低频点焊机、次级整流式及电容储能点焊机的过程，80年代中期又出现了逆变式点焊机。日本、美国等国家先后推出逆变式电阻焊机产品，并应用于汽车、家电、电子行业，建立起以逆变点焊机器人为主的汽车车身焊装线，使逆变式电阻点焊机进入实际应用阶段。国外逆变点焊机的研究比较成熟，商品化程度也比较高。国内的逆变技术在弧焊领域的应用比较成熟，已形成弧焊逆变电源系列；但在电阻焊领域，这项技术的优点还未得到发挥，仍有待于进一步的研究与开发。为此，研制了软开关控制式逆变电阻点焊机^[1]。

2 主电路拓扑的选择

用于逆变电阻焊电源的主电路主要有双管正激电路和全桥电路。全桥电路中的变压器工作在双向励磁的模式下，可以减小变压器的质量和体积，而且全桥电路中变压器二次侧的最大占空比接近1，对比于双管正激电路，输出电流的上升速度大大提高。因此本文选用全桥逆变主电路拓扑结构，其原理图如图1所示。 V_{in} 是输入的直流电压源。 $Q_1\sim Q_4$ 是功率器件，本文均采用IGBT， $D_1\sim D_4$ 分别是 $Q_1\sim Q_4$ 的反向并联二极管， C_1 、 C_2 分别是 Q_1 、 Q_2 的寄生电容， C_b 为阻断电容。 L_k 是变压器的漏感。 T_r 是变压器， DR_1 和 DR_2 是输出整流二极管， R 是负载。

当全桥逆变电路对角的两个IGBT同时导通时，输入电源将能量送到输入端，与此同时原边阻断电容 C_b 充电， C_b 上电压从一个方向向另一个方向线性变化，饱和电感处于饱和状态。在超前臂（ Q_1 比 Q_4 先关断， Q_2 比 Q_3 先关断，故 Q_1 和 Q_2 组成的桥臂为超前臂， Q_3 和 Q_4 组成的桥臂为滞后臂）开关管状态转换过程完成后原边处于续流阶段时， C_b 上的电压近似保持恒定，极性与原边电流下降到零后将试图向反方向变化，但这时饱和电感已退出饱和，呈现出很大的感抗，阻止了电流的进一步流动，使电流保持在零状态，从而为滞后臂开关管的导通与关断创造了零电流开关的条件。

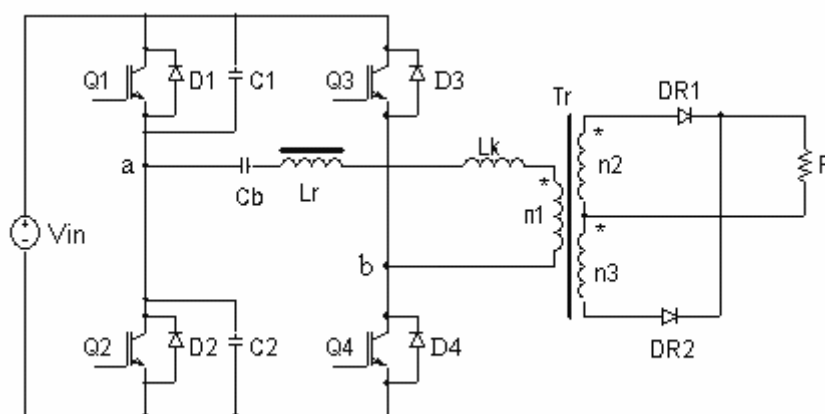


图 1 主电路拓扑结构

Fig.1 Main circuit topology

3 主回路参数的选择与计算

3.1 逆变频率的确定

软开关点焊电源采用 PWM 有限双极性控制方法，其功率调解方法是定频率调脉宽的，逆变频率直接影响系统的工作性能及电路响应特性。选择逆变频率要从电源的整体设计出发，盲目的追求高频率是毫无意义的，提高频率应以提高电源的性能为设计准则。

逆变频率对软开关点焊电源的影响是积极的，但频率的选择不当又会产生负面影响，因而逆变频率的确定是个选择—优化的过程。选择逆变频率要从两个方面考虑：

1. 逆变频率的积极作用

频率提高对阻焊变压器的设计参数影响最大。变压器匝数和铁芯截面积的乘积与工作频率成反比，提高逆变频率可以大幅度减小逆变阻焊变压器的体积和重量。

频率提高使焊机的控制周期缩短，从而提高系统动态响应性能、焊接电流的控制精度，能进行波形控制，实现无飞溅、质量稳定、高效节能的精密焊接。

2. 逆变频率的消极作用

由于阻焊变压器次级绕组一般只有一匝，匝数已不能减少；次级通过电流大，次级绕组截面积大，要求铁芯的窗口面积不能过小，所以逆变频率的进一步提高，对降低阻焊变压器尺寸及重量意义不大。

而且频率提高使变压器的涡流和磁滞增加，次级回路的感抗压降增加，限制电流的输出。虽然由于逆变频率采用了软开关工作方式，频率提高对开关管的开关损耗不那么明显，但二次回路的整流二极管仍处于硬开关的强迫换流方式，频率提高会增加开关损耗和整流二极管的发热量，反而会降低焊机的效率。此外，高频电路的分布参数影响比较大，容易产生高频振荡及电磁干扰，对系统的可靠性要求更高。

综合考虑以上因素，结合实际电路设计，选择 2KHz 作为本软开关点焊电源的工作频率。

3.2 饱和电感的设计

实现滞后臂 ZCS，在续流阶段时，当阻断电容 C_b 上的电压近似保持恒定，极性与原边电流下降到零后将试图向反方向变化，饱和电感必须退出饱和，呈现出很大的感抗。根据法拉第定律，可以得出饱和电感的最小匝数 n_{min} 的计算公式：

$$n_{min} = \frac{NB_s L_e}{\mu I_f} \quad (1)$$

式中：N 为逆变变压器的变比； B_s 为磁芯饱和磁感应强度； L_e 为磁芯磁路长度； μ 为磁芯的导磁率； I_f 为实现软开关要求的最低负载电流。

经过初步计算及校核，选用型号为 ONL-644020 的铁基纳米晶环形磁芯作为饱和电感的磁芯。其铁芯有效截面积 $S_e = 1.68 \text{cm}^2$ ，磁芯长度 $L_e = 1.63 \text{cm}$ ，磁芯饱和磁感应强度 $B_s = 1.25 \text{T}$ ，剩余磁感应强度 $B_r = 0.2 \text{T}$ ，导磁率 $\mu = 2 \times 10^4 G_s/O_e$ 。

新型软开关点焊电源用于精密件的焊接，设计的额定焊接电流为 1500A，在 10% 的负载电流时实现软开关^[3]，即 $I_f=150A$ 。根据公式 2，计算饱和电感的最小匝数：

$$n_{\min} = \frac{NB_s L_e}{\mu I_f} = \frac{100 \times 1.25 \times 16.3 \times 10^{-2}}{2 \times 4\pi \times 10^{-3} \times 150} \approx 5.7 \quad (2)$$

取饱和电感的匝数 $n=6$ 。

饱和电感未饱和时的电感值 L_s 为：

$$L_s = \mu m^2 \frac{S_e}{l_e} = 2 \times 6^2 \times 4\pi \times 10^{-3} \frac{1.68 \times 10^{-2}}{16.3} \approx 9.32 \times 10^{-4} (H) \quad (3)$$

3.3 超前臂电容的设计

超前臂电容的增大，IGBT关断损耗显著降低，但增大相同的电容值，损耗降低相对值越来越小^[3]。但为了考虑成本和实用性采用Pspice对主回路进行方针分析，仿真结果如图 2 所示， $P_{off}(Q_1)$ 为 IGBT (Q_1) 关断点。根据方针结果采用 50n。

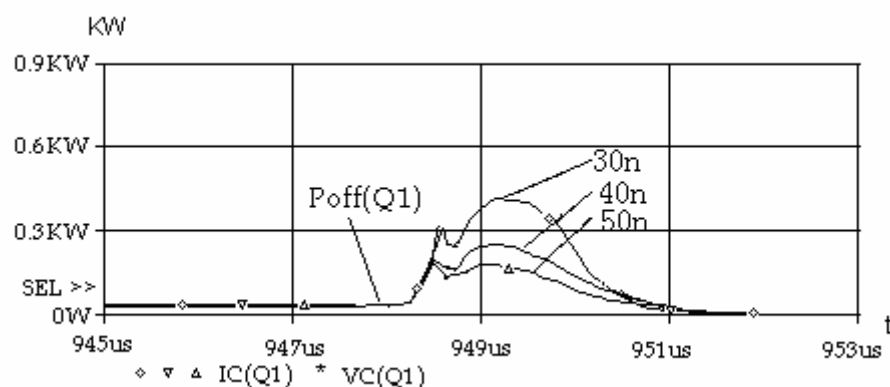


图 2 超前臂电容值对超前臂 IGBT 关断损耗的影响仿真波形

Fig.2 Simulation waveform of the influence of IGBT's Shutdown loss Under electric capacity function in leading leg

4 实验分析

如图 2.7 所示，当超前臂开关管 Q_1 开通时（管压降为零），驱动信号为零，即超前臂开关管是在零电压的条件下开通；当超前臂开关管 Q_1 关断时，驱动信号为零，即超前臂开关管是在零电压的条件下关断。

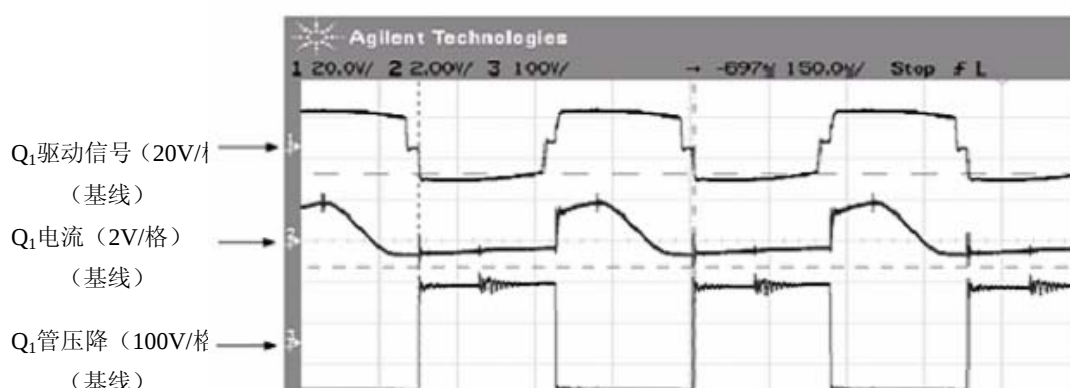


图 3 Q_1 的驱动信号、 Q_1 的管压降和电流的实测波形
Fig.3 driving signal of Q_1 , V_{CE} of Q_1 and current waveform

2. 4. 2 滞后臂软开关的实现

如图 2.8 所示，当滞后臂开关管 IGBT (Q_4) 开通时， Q_4 的电流为零，即超前臂开关管是在零电流的条件下开通；当滞后臂开关管 Q_4 关断时，通过 Q_4 的电流为零，即滞后臂开关管是在零电流的条件下关断。

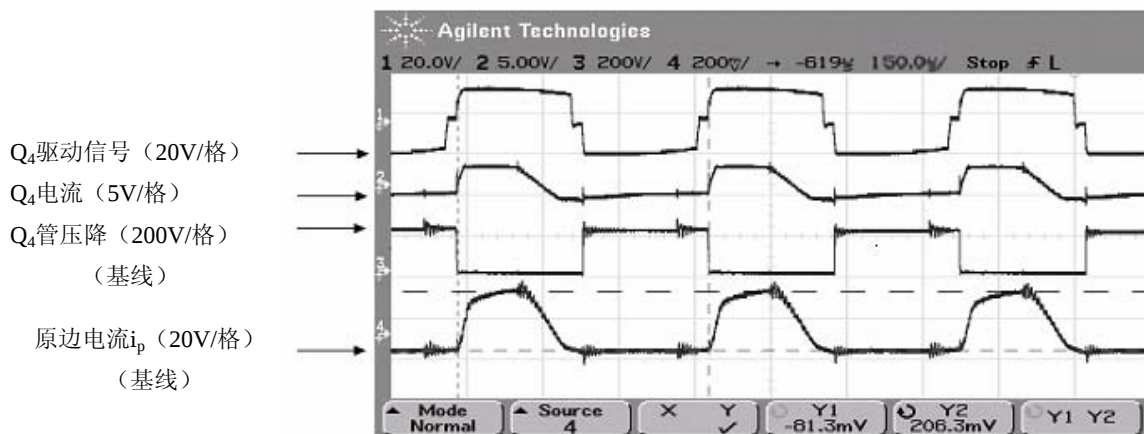


图 4 Q_4 的驱动信号、 Q_4 的管压降和电流的实测波形
Fig.4 driving signal of Q_4 , V_{CE} of Q_4 and current waveform

5 结 论

1) 所采用主电路变换器结构，通过加大桥臂并联电容改善了超前臂零电压的效果，滞后臂实现了零电流开关，消除了拖尾电流的影响，关断损耗和应力明显降低，通过合理设计阻断电容和最大占空比实现了全负载范围内软开关。

2) 通过实验测试分析，本文设计的主电路参数设计达到要求，实现了软开关，从而降低了开关损耗和开关应力。

3) 本文理论计算和仿真结果在实际焊接电源中得到应用。

参考文献

[1] 王福生. 国内外电阻焊设备的发展[J], 电焊机, 2005, 35 (2): 1-4

[3] 阮新波 严仰光. 脉宽调制 DC/DC 全桥变换器的软开关技术[M], 科学出版社, 1999

[3] 侯润石, 方臣富. 电流模式零电压零电流开关 TIG 焊机的研制[J], 电焊机, 2004, 34(11): 39-41

作者简介: 于明, 1979-, 黑龙江 讷河人, 硕士研究生, 江苏宏微科技有限公司应用产品开发工程师, 主要从事逆变电源、电力电子产品方面的研发工作。