

● 焊接技术 ●

基于 RLC 串联谐振的 GMAW 磁控电源 电流波形实现方法

杜茵茵¹, 陈克选^{1,2}, 陈彦强¹, 董军强¹, 陈 鹏¹

(1. 兰州理工大学 材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘 要:外加交变纵向磁场可以有效改善大电流 GMAW 熔滴的过渡形式, 提高焊接过程稳定性。但在实际试验中发现, 当电源给定的交变电流频率较高时, 励磁电流波形发生畸变使其有效值降低。利用 RLC 串联谐振原理, 把频率在 2000~5000 Hz 的频率区间分成 3 段, 每段设定一个典型频率, 分别对 3 个典型频率下负载槽路参数进行设计, 并利用 Simulink 仿真软件对设计的参数进行验证。试验结果表明, 电路在设定的典型频率下实现谐振, 且在相应的频率区间内电流有效值均比不加谐振补偿电容时得到提高。

关键词: GMAW; 纵向交变磁场; RLC 串联谐振; Simulink 仿真

DOI: 10.14158/j. cnki. 1001-3814. 20210206

中图分类号: TG434.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2023)03-0120-04

Realization Method of Current Waveform of GMAW Magnetron Power Supply Based on RLC Series Resonance

DU Yinyin¹, CHEN Kexuan^{1,2}, CHEN Yanqiang¹, DONG Junqiang¹, CHEN Peng¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metal, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The external alternating longitudinal magnetic field can effectively improve the transition form of high current GMAW droplets and improve the stability of the welding process. In actual tests, it is found that when the frequency of the alternating current given by the power supply is relatively high, the excitation current waveform is distorted and its effective value is reduced. Using the principle of RLC series resonance, the frequency range of 2000-5000 Hz was divided into three sections, each section was set with a typical frequency, the load tank parameters at the three typical frequencies were designed respectively, and Simulink simulation software was used to verify the designed parameters. The actual experimental results show that the circuit achieves resonance at the set typical frequencies, and the effective value of the current in the corresponding frequency range is improved compared with that without the resonance compensation capacitor.

Key words: GMAW; longitudinal alternating magnetic field; RLC series resonance; Simulink simulation

利用电弧等离子体的良好导电性, 在大电流熔化极气体保护焊接(GMAW)技术中加入磁场来控制旋转射流过渡过程成为提高焊接效率的有效途径。樊丁等人在大电流 GMAW 焊接技术中加入纵

向交变磁场, 研究发现外加高频纵向交变磁场时, 旋转射流过渡时电弧更稳定, 焊接飞溅率降低^[1]。刘政军研究了间歇交变磁场对堆焊层金属组织及性能影响, 研究表明: 适当的交变磁场频率能有效地增加堆焊金属中硬质相的数量, 控制硬质相的生长方向, 提高堆焊层金属的硬度和耐磨性^[2]。肖磊通过对外加高频纵向磁场作用下的钨极惰性气体保护焊的电弧稳态三维数值模型分析, 结果表明外加高频纵向磁场感应产生环向电场, 形成环向电流, 环向电流与外加纵向磁场作用产生径向洛伦兹力, 能够使电弧收缩^[3]。但由于负载是电感, 变化的电流势必使得电感产生感应电动势来阻碍电流的变化, 且在高频

收稿日期: 2021-01-22

作者简介: 杜茵茵(1995-), 女, 甘肃靖远人, 在读硕士, 主要从事焊接过程控制与设备的相关研究; 电话: 18419610078;

E-mail: 2218116448@qq.com

通讯作者: 陈克选(1962-), 男, 山西临猗人, 教授, 博士, 主要从事新型弧焊电源及智能控制、焊接过程控制及计算机应用以及电弧增材制造设备等领域的研究; 电话: 13359432170;

E-mail: ckcs@sina.com

下这种阻碍作用愈加明显,因而当电源给定交变电流频率较高时,励磁电流波形发生畸变,有效值急剧降低。由电感和电容元件组成的交流电路,在一定条件下,端电压和总电流同相位,这样的现象称为谐振现象^[4]。谐振条件下电路阻抗最小,电流出现极大值。谐振技术被广泛应用于无线电工程和电子技术领域,近年来在高频感应加热电源中得到广泛应用。

本文利用串联谐振的重要特性,对较高频率下磁控电源负载谐振参数进行设计,并借助仿真手段对设计的参数加以论证,通过对比分析较高频率下加入谐振补偿电容和不加谐振补偿电容时的实验结果,为解决较高频率下磁控电源励磁电流难以提高的问题提供方法。

1 磁控电源

磁控电源产生励磁电流幅值、频率和占空比均可调的交变电流作用在电感负载上。有铁芯的电感,安装在与焊丝同轴的保护气罩上来产生与磁控电源输出相匹配的纵向交变磁场,进而对焊接过程加以控制。由于感性负载对高频励磁电流会产生较大的感抗,所以要想在高频下得到较大的励磁电流,可以增大磁控电源容量或利用谐振技术。本文从安全性以及经济性的角度考虑,采用谐振技术来提高励磁电流。

2 谐振

电容 C 和电感 L 都是储能元件,一旦建立起稳定的交变电流,能量便储存在电路中,并在电容器和线圈之间来回交换。谐振时,回路和外电源之间的能量交换是单方面的,只有电源把必需的能量加到回路来补偿损耗,回路不会把能量返送到电源^[5]。

谐振电路有串联谐振电路和并联谐振两种,由于串联谐振电路简单,容易启动,对槽路布线要求比并联谐振电路低^[6],因此本系统采用串联谐振电路。

2.1 串联谐振电路工作原理

实际的串联谐振电路如图 1 所示, R 为电感绕组的交流等效电阻和电容器的介质损耗在内的等效总电阻。串联谐振电路按图 2 所示矢量图解法表示。从图 2 可以看出,当 $U_L=U_C$ 时,电感和电容峰值储能相等,就地实现能量交换,电源电压全部作用在等效电阻上,此时等效总阻抗最小,电路呈阻性。

2.2 串联谐振电路的重要特性

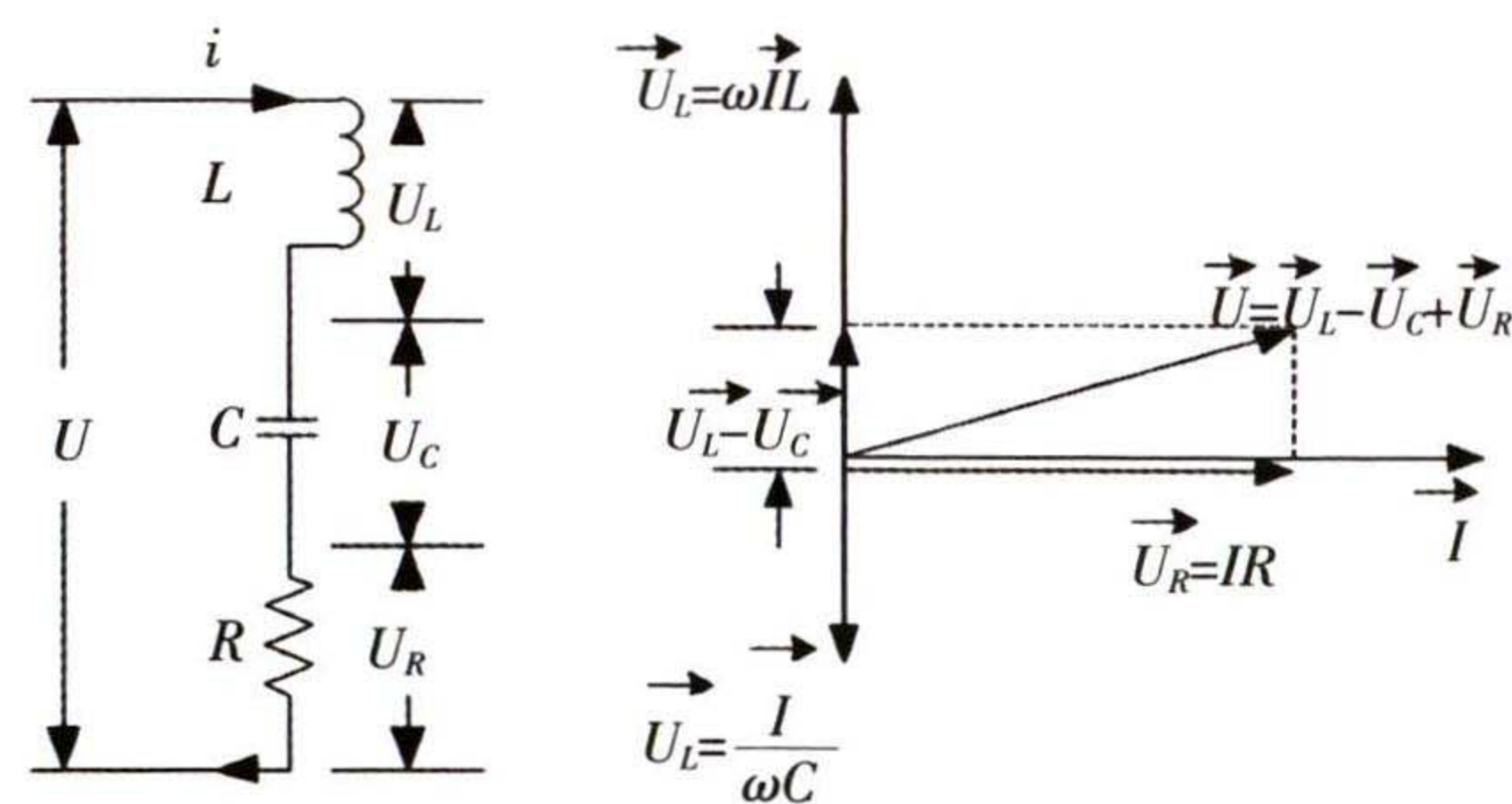


图 1 串联谐振等效电路 图 2 串联谐振电路的矢量图解
Fig.1 Series resonance equivalent circuit Fig.2 Vector illustration of series resonance circuit

从图 2 中容易看到总电压在垂直方向矢量的分量为 $|U_L-U_C|$,水平方向的分量为 U_R ,故总电压为:

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} \quad (1)$$

又

$$\left. \begin{aligned} U_R &= IZ_R = IR, \\ U_L &= IZ_L = I\omega L, \\ U_C &= IZ_C = \frac{I}{\omega C} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

故

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \quad (3)$$

串联电路的总阻抗 Z 为:

$$Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} \quad (4)$$

$u(t)$ 与 $i(t)$ 的相位差为:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{U_L - U_C}{U_R} = \tan^{-1} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \quad (5)$$

从式(5)可以看出,当 $\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$ 时, $\varphi = 0$, $u(t)$ 与 $i(t)$ 实现同相,此时 Z 值最小,在总电压 U 给定后, I 值最大。所以当 $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ 时发生谐振,由此求得谐振频率为:

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (6)$$

3 负载谐振参数设计及仿真

3.1 串联谐振式磁控电源负载的谐振参数设计

3.1.1 电感参数

磁控电源负载槽路的电感是一个由自行绕制的带坡莫合金铁芯,匝数为 160 匝的多层螺线管,经测定其电感值为 1.78 mH。本文利用 RLC 串联谐振

原理,把频率在 2000~5000 Hz 的频率区间分成 3 段,每段设定一个典型频率,分别为 2500、3500 和 4500 Hz。由 $Z_0=\omega_0 L=2\pi f_0 L$ 得三组频率下串联谐振回路的特征阻抗分别为 27.95、39.13、50.3 Ω 。

由于器件的非理想性,即当电容器两端施加电压时,内部介质形成漏电流产生介质损耗,同时,当高频交流电通过电感时,由于集肤效应电感的交流等效电阻要比直流电阻大很多且在本系统中为满足大的磁感应强度的要求,本文绕制的磁头匝数达到 160 匝。所以本文中谐振回路中的等效电阻 R 不可忽略,约为 17 Ω 。

3.1.2 电容参数计算

串联谐振电路的品质因数由式(7)计算。

$$Q=\frac{\omega_0 L}{R}=\sqrt{\frac{L}{C}}/R=Z_0/R \quad (7)$$

计算后 Q 取 3。谐振时有 $\omega_0 L=\frac{1}{\omega_0 C}$,即

$$C=\frac{1}{2\pi f_0 Z_0} \quad (8)$$

计算得 2500、3500 和 4500 Hz 三组频率下对应的补偿电容容量分别为 2.5、1.2 和 0.9 μF ,其耐压可根据 $U_c=QU_d$, U_d 为逆变器直流母线的输入电压,为 70 V,所以电容选择电压等级 500~2000 VAC,容量分别为 2.5、1.2 和 0.9 μF 的轴向式谐振电容。

3.2 仿真建模

基于 Simulink 中 Simscape 模块库所建的磁控电源系统模型,可以对磁控电源的动态过程进行仿真,得到系统的时域响应。建立磁控电源模型时,可以在 Simscape 的 PowerSystems 子库中添加所需要的模块,拖曳到图形化仿真界面,按照电路原理图连接器件,根据理论计算参数设置模型参数^[7],建立的磁控电源仿真模型如图 3 所示。为简化仿真模型,用一个 310 V 电压源代替单相整流滤波电路。

3.3 仿真结果及分析

按照设计的负载谐振参数对仿真模型进行设

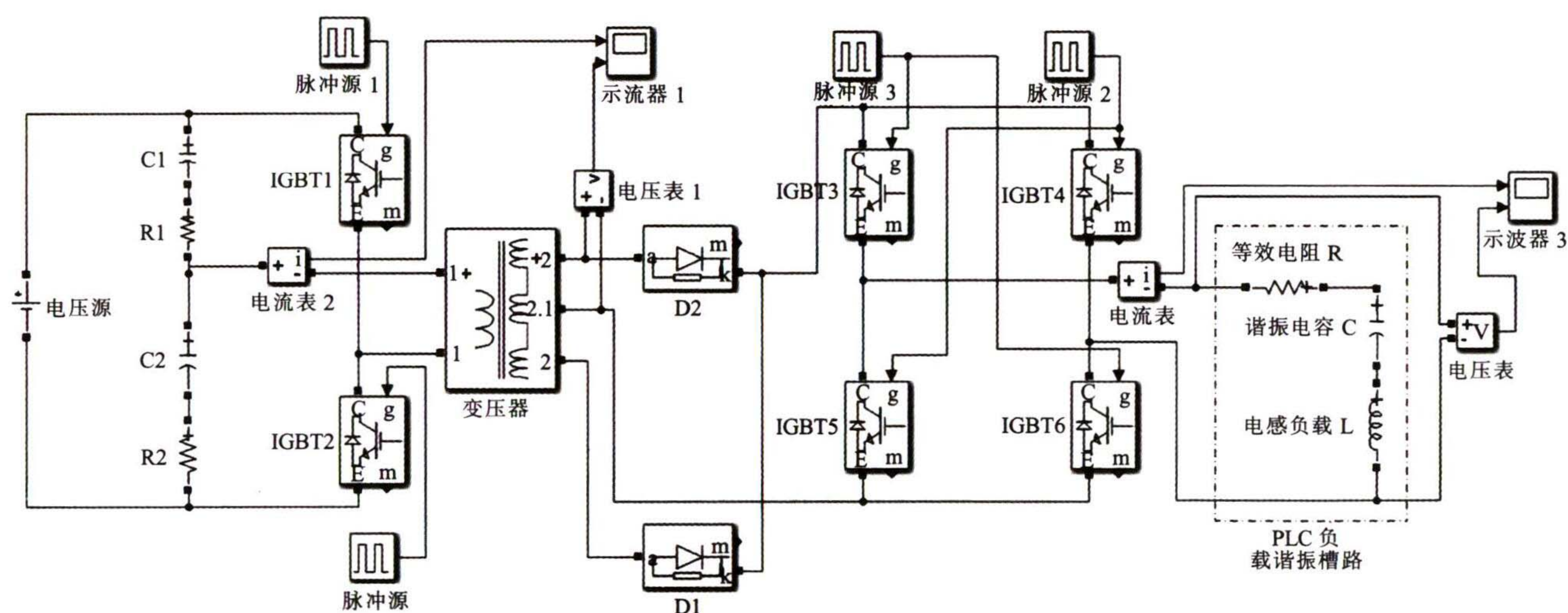


图 3 磁控电源仿真模型

Fig.3 Simulation model of magnetron power supply

置,仿真参数设计为:二次逆变前直流母线电压为 70 V,负载谐振槽路中等效电阻设置为 17 Ω ,电感参数为 1.78 mH。进行 3 组仿真试验:(1)谐振频率为 2500 Hz,电容容量为 2.5 μF ;(2)谐振频率为 3500 Hz,电容容量为 1.2 μF ;(3)谐振频率为 4500 Hz,电容容量为 0.9 μF 。

通过示波器 3 得到的仿真结果如图 4 所示。从仿真输出波形可以看到,当根据上述参数进行设置时,最终电流输出波形为正弦波,且在该频率下电压和电流波形同相位,则从理论上表明在设计的负载

谐振参数下能够实现谐振。

4 试验结果及分析

4.1 不加谐振补偿电容

不加谐振电容时,对谐振回路的励磁电流有效值随频率的变化进行测试并记录,得到如图 5 所示的曲线图。不加谐振电容时励磁电流随频率增大呈指数递减趋势,且频率到达 3500 Hz 以上时,由于频率越高,由感抗公式 $X_L=2\pi fL$ 得知负载产生的感抗越大,对电流的阻碍作用愈强,此时测得的励磁电流

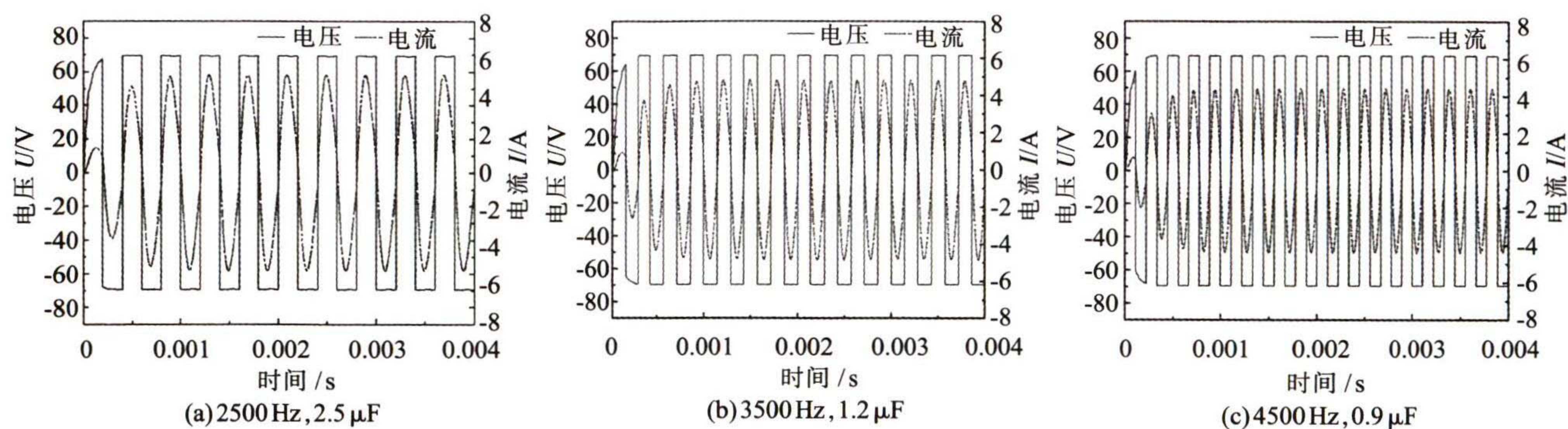


图 4 仿真输出波形

Fig.4 Simulation output waveforms

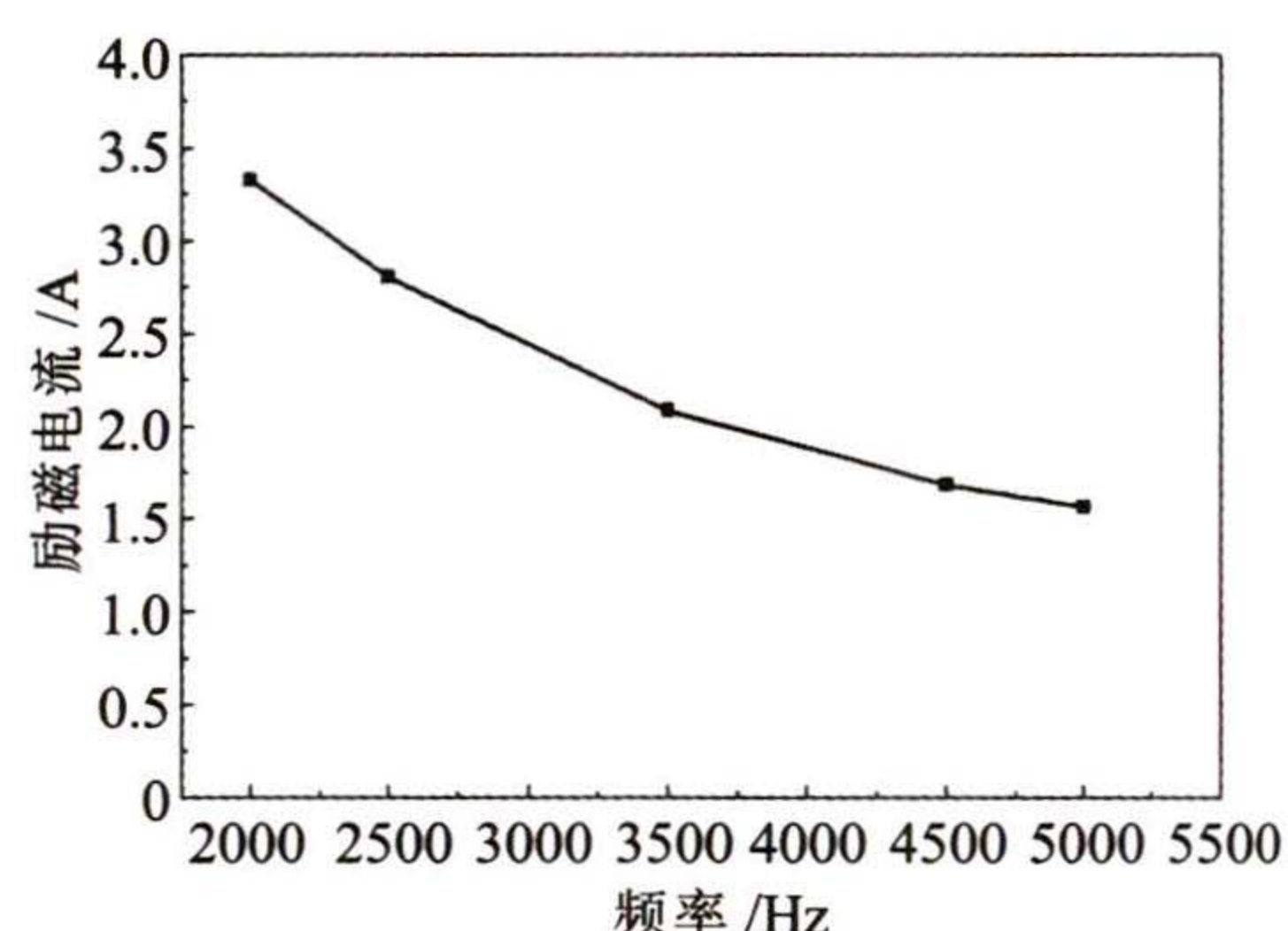


图 5 无补偿电容时励磁电流随频率的变化曲线

Fig.5 Curve of excitation current with frequency without compensation capacitor

值很小,基本低于 2 A。

4.2 加入谐振补偿电容

按照设计的 RLC 串联谐振参数,分别进行三组试验:①谐振频率为 2500 Hz,电容容量为 2.5 μF ;②谐振频率为 3500 Hz,电容容量为 1.2 μF ;③谐振频率为 4500 Hz,电容容量为 0.9 μF 。分别与自行绕制的坡莫合金磁芯电感串联,用示波器采集负载谐振槽路的电压与电流波形,同时测试励磁电流有效值并记录。测得的 3 组谐振参数下的实际电压与电流波形如图 6 所示,3 组频率下,电流与电压波形基本

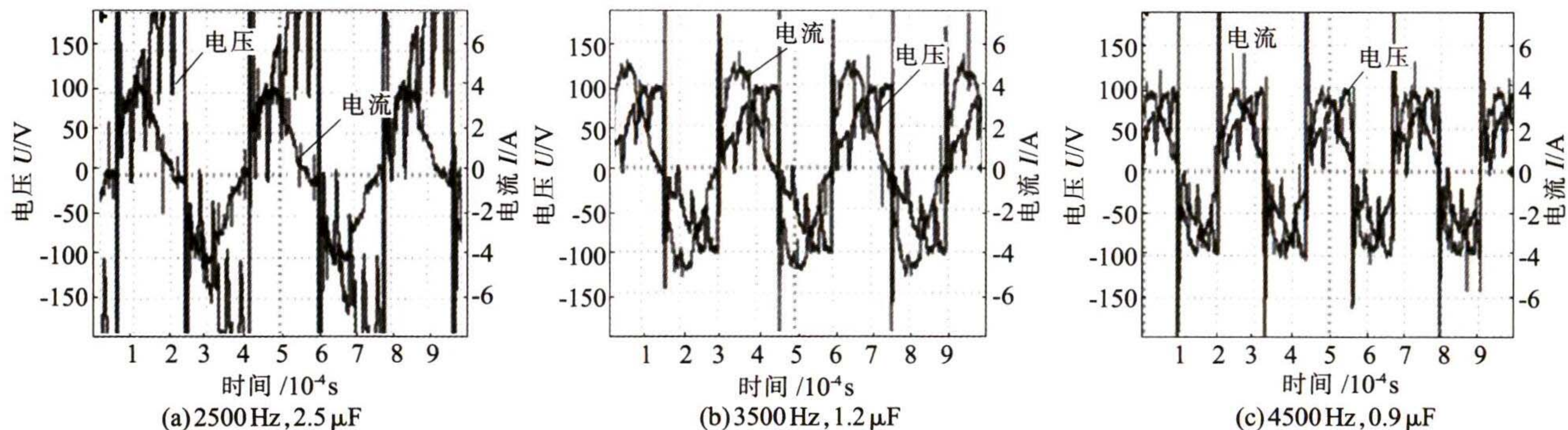


图 6 加入谐振电容时实际示波器测得的电流电压波形

Fig.6 Current and voltage waveforms measured by actual oscilloscope when adding the resonant capacitor

相同,即在设计的谐振参数下实现谐振。

进行每组典型频率谐振试验时,可以让其它参数不变,只改变频率,对不同频率下的励磁电流有效值进行测试并记录,绘制的曲线如图 7 所示。首先从图中可以看出,由于在典型频率下,电感和电容峰值储能相等时无功率在电容和电感之间进行交换,电源电压全部作用在等效电阻上,此时等效总阻抗最小,所以在 2000~3000 Hz,3000~4000 Hz,4000~5000 Hz 三个频率区间内,分别在 2500,3500,4500 Hz 左右处电流达到极大值。同时,在 2000~3000 Hz 时电流值约为 3.8~4.6 A,在 3000~4000 Hz 时电流值

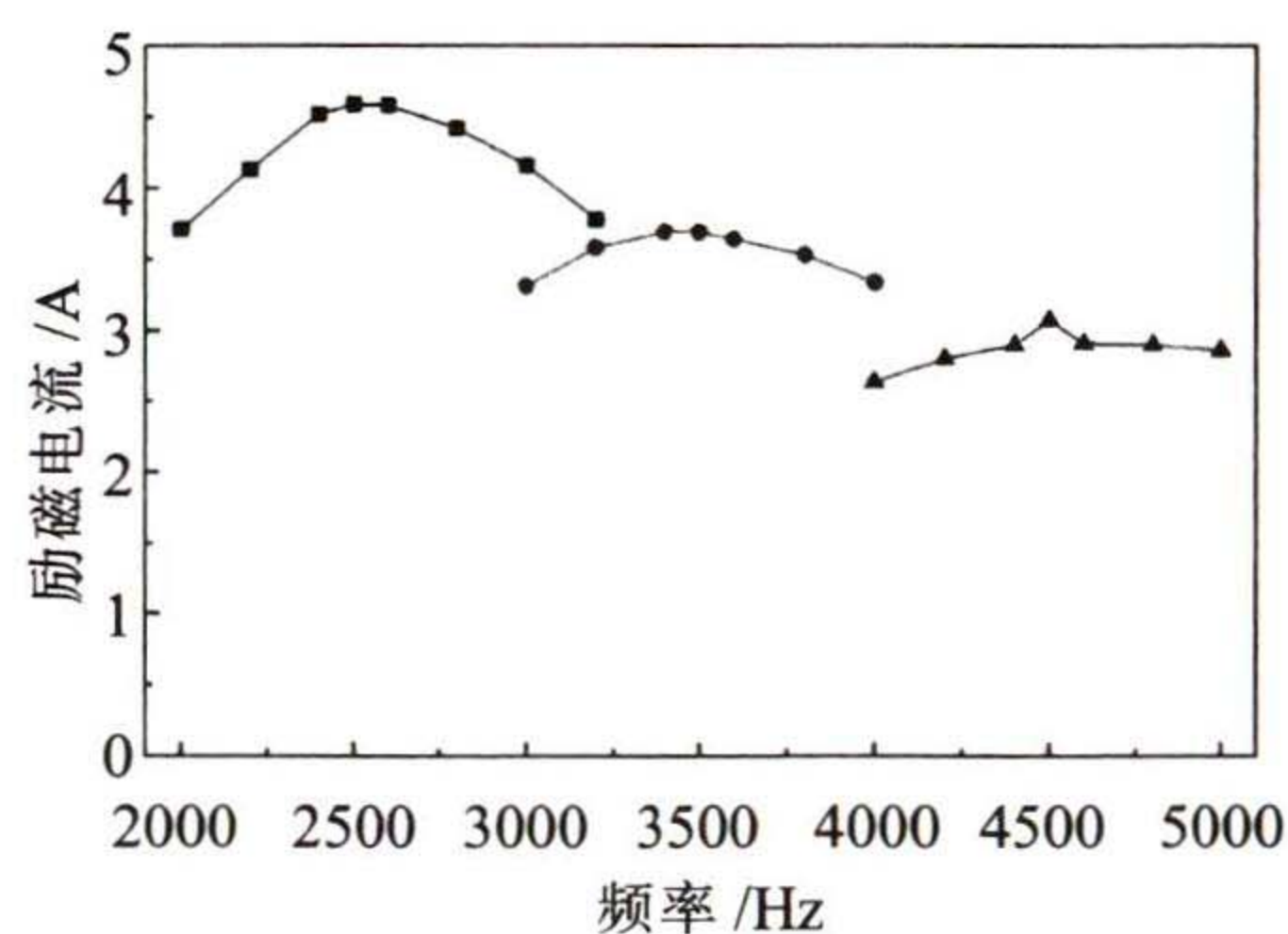


图 7 加入谐振电容时励磁电流随频率的变化曲线

Fig.7 Curve of excitation current changing with frequency when the resonant capacitor is added

(下转第 131 页)

较小,但会增大整体结构的焊接变形。

(3) 支耳主焊缝的焊接顺序对焊接残余应力和变形均有一定影响,本文提出的方案 d 即先焊中间后焊两边为最优焊接顺序方案。

参考文献:

- [1] 葛磊,董致新,李运华,等. 系列化液压挖掘机数字样机研究[J]. 机械工程学报,2019,55(14):186-196.
- [2] 黄东胜,邱斌. 现代挖掘机械 [M]. 北京:人民交通出版社,2003.
- [3] 张明松,程炼兵,李晓维. 基于 ANSYS Workbench 对铸造型挖斗的结构分析与优化 [J]. 农业装备与车辆工程,2015,53(11):41-44.
- [4] 孙方红,马壮,黄凤岐,等. 提高矿用挖掘机斗齿性能的研究进展[J]. 热加工工艺,2011,40(21):58-60.
- [5] 周广涛,刘雪松,闫德俊,等. 顶板焊接顺序优化减小焊接变形的预测[J]. 焊接学报,2009,30(9):109-112.
- [6] 李光耀. 基于有限元分析法挖掘机上车架焊接变形及校形研究[D]. 济南:山东大学,2014.
- [7] 区达铨. 挖掘机中框架焊接变形与残余应力数值模拟分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2018.
- [8] 张大雨,戴晴华,殷晨波,等. 液压挖掘机动臂体的焊接有限元模拟[J]. 焊接技术,2012,41(2):7-9.
- [9] 程中修. 液压挖掘机铲斗的失效分析和改进设计[D]. 济南:山东大学,2016.
- [10] 郭国林,吴永祥,顾玥琦,等. 挖掘机挖斗支耳板焊接工装设计[J]. 热加工工艺,2011,40(23):192-194.

- [11] 李志永. 挖掘机动臂焊接残余应力分析与焊接顺序优化[D]. 长春:吉林大学,2013.
- [12] Chen B Q, Soares C G. Effect of welding sequence on temperature distribution, distortions, and residual stress on stiffened plates [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86(9): 1-12.
- [13] Deng D. FEM prediction of welding residuals stress and distortion in carbon steel considering phase transformation effects[J]. Materials and Design, 2009, 30: 359-366.
- [14] 胡兴,戴培元,张超华,等. 合并焊道法对 SUS304 不锈钢平板对接接头焊接残余应力计算精度和效率的影响[J]. 机械工程学报,2019,55(12):72-82.
- [15] 董俊慧,霍立兴,张玉凤. 环焊缝管道焊接应力应变三维有限元分析[J]. 机械工程学报,2001(12):86-90.
- [16] 贾小磊,徐杰,刘兆衡,等. 热源模型参数对管道焊接的影响研究[J]. 压力容器,2013,30(8):27-32.
- [17] 郑乔,逯世杰,李索,等. 熔敷顺序和管壁厚度对异种钢板板接头焊接残余应力与变形的影响 [J]. 机械工程学报,2019,55(6):46-53.
- [18] Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. A new finite element model for welding heat sources [J]. Metallurgical Transactions B, 1984, 15(2): 299-305.
- [19] Jia X, Xu J, Liu Z, et al. A new method to estimate heat source parameters in gas metal arc welding simulation process [J]. Fusion Engineering & Design, 2014, 89(1): 40-48.
- [20] 贾小磊,徐杰,孙智,等. T 型焊接接头的单边重焊工艺参数模拟研究[J]. 焊管,2012,35(10):16-19. 

(上接第 123 页)

约为 3.3~3.8 A,在 4000~5000 Hz 时电流值约为 2.8~3.07 A。对比图 5 无谐振补偿电容时励磁电流随频率变化曲线,可以看出由于谐振电容的补偿作用,加入谐振电容时励磁电流整体得到提高。

5 结语

首先对 RLC 串联谐振电路工作原理和串联谐振重要特性进行了详细介绍,为磁控电源负载谐振参数设计提供理论依据。依据串联谐振的重要特性对 3 组典型频率下的负载槽路参数进行设计,并借助仿真手段对每组参数下的仿真输出波形进行分析,论证几组负载槽路参数设计的合理性。最后对加谐振电容和不加谐振电容时励磁电流有效值随频率的变化曲线进行对比,发现相比于不加谐振补偿电容时的励磁电流值,加入谐振电容的励磁电流值

得到提高,为解决较高频率下磁控电源励磁电流难以提高的问题提供了方法。

参考文献:

- [1] 樊丁,杨文艳,肖磊,等. 高频交变磁场对大电流 GMAW 熔滴过渡和飞溅率的影响[J]. 焊接学报,2019(7):1-5.
- [2] 刘政军,孙景刚,慈宏钢,等. 间歇交变磁场频率对堆焊金属组织及性能的影响[J]. 表面技术,2008,37(1):19-20.
- [3] 肖磊,樊丁,黄健康,等. 外加高频纵向磁场作用下的 TIG 焊电弧数值模拟[J]. 焊接学报,2017,38(2):66-70.
- [4] 赵凯华,陈熙谋. 电磁学[M]. 北京:高等教育出版社,1986.
- [5] 潘天明. 电子式高频加热装置[M]. 北京:冶金工业出版社,1977.
- [6] 李定宣. 现代高频感应加热电源工程设计与应用[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [7] 李一鸣. Matlab 在电力电子技术中的仿真研究[J]. 湖南理工学院学报(自然科学版),2009,22(4):47-50. 