



·脉冲功率技术·

TT-1 托卡马克装置垂直场电源大功率脉冲电感的研制

范文迪^{1,2}, 管锐^{2,3}, 张健^{2,3}, 黄懿赞^{2,3}

(1. 安徽大学 物质科学与信息技术研究院, 合肥 230039; 2. 中国科学院 合肥物质科学研究院, 等离子体物理研究所, 合肥 230031; 3. 中国科学技术大学 科学岛分院, 合肥 230026)

摘 要: 为满足等离子体放电需求, 垂直场电源需串联脉冲电感来改变输出电流参数。针对 TT-1 装置垂直场电源对输出电流的要求, 对脉冲电感进行了设计与研制。根据电感的运行工况及参数, 通过感应系数法和累积温升法进行详细的数学分析和结构设计。基于理论设计, 建立 Ansys 仿真模型对电感进行了磁场及温升的研究。最后完成电感的研制, 根据电桥测量和实验波形, 实际电感参数与理论分析高度吻合, 并对电感进行大电流条件下的疲劳实验和温升实验, 验证理论设计的可靠性。

关键词: TT-1 装置; 脉冲电感; 垂直场电源; Ansys 仿真

中图分类号: TL631.24

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220393

Development of high-power pulse inductor for vertical field power supply of TT-1 device

Fan Wendi^{1,2}, Guan Rui^{2,3}, Zhang Jian^{2,3}, Huang Yiyun^{2,3}

(1. Institute of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230039, China;

2. Institute of Plasma Physics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

3. Science Island Branch, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: To meet the demand of plasma discharge, pulse inductor should be connected to the vertical field power supply to change the output current parameters. To satisfy the need of the output current of the vertical field power supply of the TT-1 device, pulse inductor was designed and developed. According to the operating conditions and parameters of the inductor, the detailed mathematical analysis and structural design were carried out by the induction coefficient method and cumulative temperature rise method. Based on the theoretical design, an Ansys simulation model was established to study the magnetic field and temperature rise of the inductor. Finally, the inductor was developed. According to the bridge measurement and experimental waveform, the actual inductance parameters agree well with the theoretical analysis. The experiment of fatigue and temperature was carried out on the inductor under the condition of high current to verify the reliability of the theoretical design.

Key words: TT-1 device, pulse inductor, vertical field power supply, Ansys simulation

TT-1(Thailand Tokamak-1)装置是中国科学院等离子体物理研究所为响应“一带一路”号召研制的小型托卡马克装置, 目的为帮助泰国进行核聚变装置研发以及开展托卡马克放电实验^[1]。TT-1 装置的电源系统主要包括垂直场电源、水平场电源以及加热场电源。垂直场主要功能是控制等离子体的水平位移, 水平场主要功能是控制等离子体的垂直位移。当等离子体产生时, 需要一个较大的电流及磁场将等离子体位移至真空室的中心位置, 本文基于 TT-1 装置垂直场电源对输出电流的要求, 对脉冲电感进行了设计与研制。

为满足等离子体放电需求, 垂直场电源需串联脉冲电感来改变输出电流参数。脉冲电感是托卡马克装置脉冲电源系统中不可或缺的电气设备, 其性能影响着电源的整体性能, 在换流回路电容器放电过程中, 脉冲电感决定了脉冲电流的峰值、变化率和脉冲宽度。

* 收稿日期: 2021-11-02; 修订日期: 2023-03-28

基金项目: 中泰 TT-1 托卡马克装置重建项目(P640895)

联系方式: 范文迪, wendi.fan@ipp.ac.cn。

通信作者: 黄懿赞, yyhuang@ipp.ac.cn。

根据调研,目前脉冲电感电感量多为 μH 量级,如韩国 KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research)装置失超保护系统使用了一款脉冲电感,采用平面螺旋结构,电感值为 $11\ \mu\text{H}$,电阻值为 $1\ \text{m}\Omega$ ^[2];我国的 CRAFT(Comprehensive Research Facility for Fusion Technology)装置失超保护系统使用了一款脉冲电感,结构为螺线管式,电感值达到了 $33\ \mu\text{H}$,电阻值为 $8\ \text{m}\Omega$ ^[3];ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor)装置极向场电源使用的一款多层螺线管式的脉冲电感,电感值为 $185\ \mu\text{H}$,电阻值为 $29.9\ \text{m}\Omega$ ^[4]。而 TT-1 装置垂直场电源脉冲电感为 mH 量级,工作应力大,分布电阻高,使得研制难度高、工艺复杂。设计和研制该大功率脉冲电感对核聚变装置脉冲电源的应用有非常重要的使用价值和工程意义。

1 参数设计

垂直场电源具有输出电流大,工作时间短的特点,是典型的脉冲放电的形式,因此采用依靠电容器充放电技术的脉冲电源,电源参数如表 1 所示。其电路拓扑如图 1 所示,其中包括高压直流充电机 V_1 、脉冲电容 C_v 、二极管 D_v 、脉冲晶闸管 S_v 、负载线圈电感 L_o 、负载线圈电阻 R_o 、脉冲电感电感值 L_v ,以及脉冲电感电阻值 R_v 。电源的工作过程包括充电、放电过程,首先高压直流充电机对脉冲电容充电,脉冲电容器储存能量,当电容器充电电压达到设定值时,停止充电,等待放电。当电源接收到放电指令,闭合脉冲晶闸管,电容器对负载放电,形成脉冲电流^[5-6]。脉冲电感的电流仿真波形如图 2 所示。

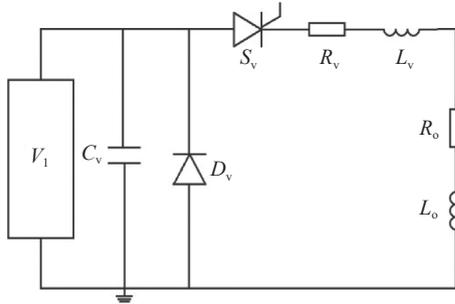


Fig. 1 Vertical field circuit topology

图 1 垂直场电源电路拓扑图

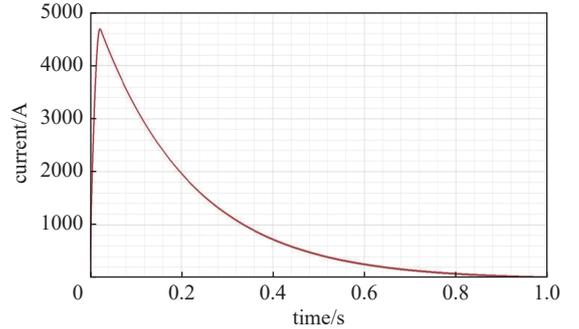


Fig. 2 Simulation waveform of pulse inductor current

图 2 脉冲电感电流仿真波形

表 1 TT-1 装置垂直场电源参数

Table 1 Main working parameters of pulse inductor

coil inductance L_o/mH	coil resistance $R_o/\text{m}\Omega$	pulse capacitors C_v/mF	charging voltage U_o/V	peak current I_p/kA	peak current time t_p/ms
8.4	67	3.6	9724	4.7	11

储能电容可以等效为一个直流源 U_o 和初始电压为零的电容串联,建立电路方程

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \int idt = U_o \tag{1}$$

式中: $R = R_o + R_v$, $L = L_o + L_v$, $C = C_v$ 。

对其进行拉氏变换,得到输出电流与直流源的传递函数

$$T(s) = \frac{I(s)}{U(s)} = \frac{\frac{1}{L}s}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}} \tag{2}$$

式中: $U(s) = \frac{U_o}{s}$ 。

由于电路工作在二阶 RLC 欠阻尼状态,且拉氏反变换得到输出电流时域表达式为

$$i(t) = \frac{U_o}{\sqrt{\frac{L}{C} - \left(\frac{R}{2}\right)^2}} e^{-\frac{R}{2L}t} \sin \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} t \tag{3}$$

式中: 为 U_o 脉冲电容器初始储能。

根据 $\frac{di(t)}{dt} = 0$ 得输出电流峰值时间为

$$t_p = \frac{\arctan \sqrt{\frac{4L}{CR^2} - 1}}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}} \quad (4)$$

输出峰值电流为

$$I_p = \frac{U_o}{\sqrt{\frac{L}{C} - \left(\frac{R}{2}\right)^2}} e^{-\frac{R}{2L}t_p} \sin \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} t_p \quad (5)$$

考虑到脉冲电流的稳定输出以及整个脉冲电源的损耗,如果脉冲电感电阻过大,脉冲电流可能无法达到 4.7 kA,故而设定脉冲电感的电阻应小于 20 mΩ,根据式(4)和(5),计算得到脉冲电感的电感值 $L_v = 5.8$ mH,该电感的设计参数如表 2 所示。

表 2 脉冲电感主要设计参数

Table 2 Main designing parameters of pulse inductor

work cycle/min	pulse discharge time/s	inductance/mH	withstand voltage/kV	maximum working voltage/V	maximum working current/A	DC resistance/mΩ	duty cycle
5	1	5.8	10	3961	4693	<25	1/300

2 方案选择

根据绕制方式的不同,脉冲电感可分成螺旋管式脉冲电感、平面螺旋式脉冲电感及多层螺旋管式脉冲电感三种^[7-8],三种绕制方式如图 3 所示。螺旋管式电感结构简单、工艺成熟,但储能密度较低;平面螺旋式电感储能密度高、结构稳定,但存在漏磁现象;而多层螺旋管式脉冲电感储能密度高、结构稳定且不会有较大的漏磁现象,多层螺旋管式脉冲电感为本工况下的首选。

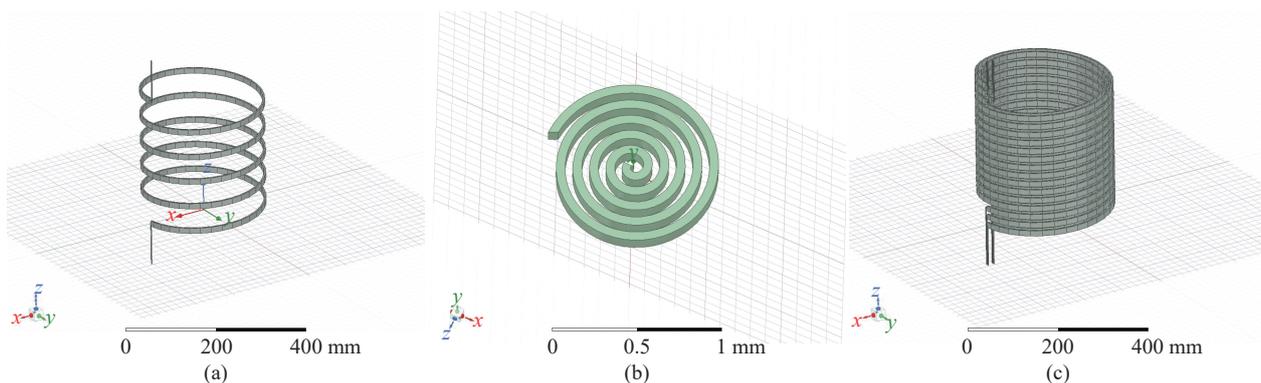


Fig. 3 Three winding methods of inductor

图 3 电感三种绕制方式

目前常见电感线圈材料主要有铜和铝两种。对比之下两种材料各有优势和劣势。在电感应用工况下,线圈材料的选择更多的是考虑材料的电性能及结构性能,因此对两种材料进行了研究和对比,其对比结果如表 3 所示^[9]。

由表 3,铝和铜各项参数对比可知:(1)能耗性——铜的电阻率相较铝更小,进而损耗更小;(2)抗疲劳性——铜材料的弹性模量更小,不容易发生断裂;(3)稳定性——铝材料相较铜材料更容易氧化,氧化会导致电阻率增大,增大脉冲电感的损耗;(4)柔韧性——铜材料的柔韧性更好,故而脉冲电感的加工会更加容易。根据以上分析,该脉冲电感材料选择铜。

3 方案设计

首先需要考虑脉冲电感所选取的电缆截面积。载流量选取 $I_c = 2A/mm^2$,计算电流有效值时按峰值电流工作电

表 3 铝和铜材料性能对比

Table 3 Comparison of properties between aluminum and copper

	atomic weight	density/ (kg·m ⁻³)	resistivity/ (nΩ·m)	resistance temperature coefficient/ (nΩ·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	tensile strength/ MPa	positive modulus of elasticity/ GPa	linear expansion coefficient/ (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	specific heat capacity/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	thermal conductivity/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
aluminum	36.98	2700	28.3	0.1	150~200	63	23	900	231
copper	63.54	8890	17.77	0.09525	350~470	120	17	392	436

流 I_p 进行分析。电流有效值公式

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{t}{T}} I_p \quad (6)$$

电缆截面公式

$$S = \frac{I_{RMS}}{I_c} \quad (7)$$

工作时间 t 取 1 s, 周期 T 为 5 min, 峰值电流取 4.7 kA, 经 (6) 计算, 电流有效值为 $I_{RMS} = 191.87$ A, 再经式 (7) 得到, 电缆截面积为 $S = 135.6$ mm², 综合考虑电感的使用环境, 最终选择了 SBECB4.5×12.5 丝包扁线三根并绕的方式, 截面积达到了 $S_m = 4.5$ mm×12.5 mm×3 = 168.75 mm²。

当线圈间绝缘间距较小或线圈设计较为紧凑时, 其线圈间的间距可近似忽略, 线圈整体截面考虑为矩形, 如图 4 所示^[10]。图中 r 为线圈绕组截面的径向厚度, a 为导体线圈高度, D 为导体线圈平均直径。

电感计算公式

$$L = \frac{\pi}{4} \mu_0 w^2 D \phi - \delta \quad (8)$$

式中: μ_0 是真空磁导率, w 是线圈匝数, ϕ 为系数, 和 a 与 D 的比值有关, δ 为修正值。

令 $\alpha = a/D$, 则 ϕ 的表达式可表示为

$$\phi = f(\alpha) = \frac{4\pi}{3} \left[\sqrt{1+a^2} \left(K + \frac{1-a^2}{a^2} E \right) - \frac{1}{a^2} \right] \quad (9)$$

式中: K, E 为 k 值所决定的第一种和第二种全椭圆积分值, $k = 1/(1+a^2)^{1/2}$ 。 K 和 E 的表达式分别为

$$K = \int_0^{\pi/2} \left[\frac{dx}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 x}} \right] \quad (10)$$

$$E = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-k^2 \sin^2 x} dx \quad (11)$$

当 a 与 D 的比值 $\alpha \geq 0.75$ 时, 线圈可被视为长线圈。修正值 δ 的计算式为

$$\delta = \frac{\pi}{8} \mu_0 w^2 \left(\frac{4}{3} \alpha \rho - \frac{2}{3} \alpha \rho^2 \right) \quad (12)$$

式中: $\rho = r/D$ 。当 $\alpha < 0.75$ 时, 线圈被视为短线圈, δ 可近似表示为

$$\delta = \frac{\pi}{2} \mu_0 w^2 \left(\frac{\pi}{3} \gamma - \frac{25}{72} \gamma^2 - \frac{1}{8} \rho^2 \right) \quad (13)$$

式中: $\gamma = r/a, \rho = r/D$ ^[10]。

由于电感值, L 为 5.8 mH, 线圈平均半径 D 取 34.55 cm, 线圈高度 a 取 20.5 cm, 线圈宽度取 20.4 cm, 则 $\alpha < 0.75$ 且 $\gamma = 1, \rho = 0.6$, 考虑匝间耐压, 每层绕制匝数为 5 匝。因此 $r = (630 \text{ cm} - 140 \text{ cm})/2 = 245 \text{ cm}, D = 385 \text{ cm}, a = N/5$, 联立式 (8)~(12), 经计算得到 $w = 174.37$ 。考虑到电感器引出端长度, 结合电感器结构, 确定绕组共 175 匝, 分 35 层绕制, 每层绕制 5 匝。电感的三维模型如图 5 所示。

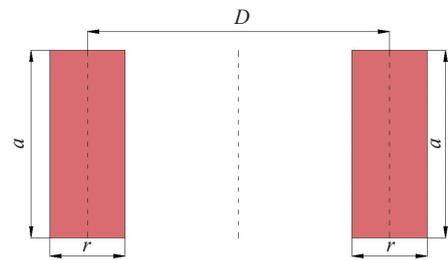


Fig. 4 Rectangular conductor coil

图 4 矩形导体线圈

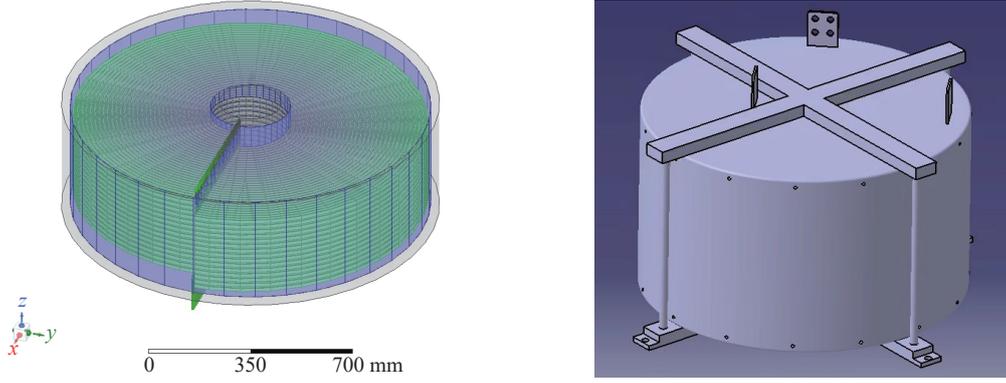


Fig. 5 Three dimensional model of inductor

图5 电感的三维模型

回路电感电阻为

$$R = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{Nl_v}{S} \quad (14)$$

式中： N 为线圈匝数， l_v 为线圈平均匝长，大小为 $l_v = \frac{\pi}{2}(630 \text{ cm} + 140 \text{ cm}) = 1.209 \text{ m}$ ， ρ 为铜的电阻率，大小为 $0.0175 \mu\Omega \cdot \text{m}$ ， S 为导线截面积。

根据式(14)计算电感电阻为 $17.8 \text{ m}\Omega$ ，满足电阻小于 $20 \text{ m}\Omega$ 的要求。

又考虑到电感工作限定单脉冲后线圈温升小于 1 K ，则累积温升总量应小于

$$Q = cm \Delta t \quad (15)$$

$$m = \rho LS \quad (16)$$

式中： ρ 为铜导体密度， L 为其长度， S 为其截面积^[11-12]。

极端应用工况下脉冲电流幅值为 4.7 kA ，则

$$Q = R \int I^2 dt \quad (17)$$

对该尺寸截面线圈采用累积温升法进行核算得温升约为 0.21 K ，符合设计要求。

4 建模仿真

在有限元仿真软件 Ansys Maxwell 电感矩阵计算中，磁链与电流的关系式为

$$\begin{cases} \psi_1 = L_{11}i_1 + L_{12}i_2 + \cdots + L_{1n}i_n \\ \psi_2 = L_{21}i_1 + L_{22}i_2 + \cdots + L_{2n}i_n \\ \cdots \\ \psi_n = L_{n1}i_1 + L_{n2}i_2 + \cdots + L_{nn}i_n \end{cases} \quad (18)$$

对应矩阵形式可表示为

$$\begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ \cdots \\ \psi_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \cdots & L_{1n} \\ L_{21} & L_{22} & \cdots & L_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ L_{n1} & L_{n2} & \cdots & L_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \cdots \\ i_n \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中：对角线为 N 匝线圈自感值，非对角线为各匝间互感，通过电感储能值可以反推出电感值。电感中所储存能量 W 和电感值 L 及电流 I 关系式可表示为

$$W = \frac{1}{2} L \left(\frac{I}{N} \right)^2 = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} d\Omega \quad (20)$$

式中： \mathbf{B} 为空间内磁感应强度， \mathbf{H} 为空间内磁场强度^[13-14]。

由于电感能量在空间内由近到远逐渐减少，因此 Ansys 能量法对求解域的范围要求应在计算机允许范围内尽量大，如果求解域过小，则求得的储存能量值也较小，与之对应其计算获得的电感值也相应较小。

根据脉冲电感的设计尺寸,对脉冲电感进行简化建模,如图6所示。为提高仿真的准确性,初始网格采用TAU(Tracking area update)模式,并且将网格剖分边长设置为0.1 mm,再将如图7所示的简化的垂直场电路作为激励加入到模型中,作为仿真的激励源。

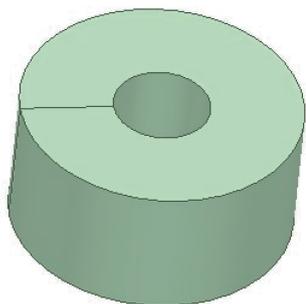


Fig. 6 Maxwell simulation model

图6 Maxwell 仿真模型

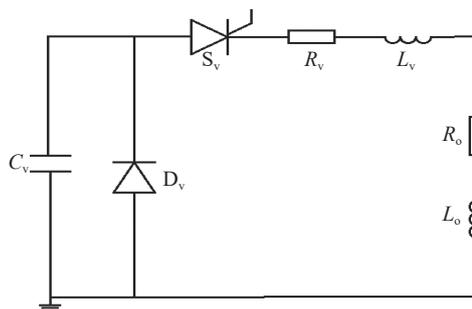


Fig. 7 Excitation circuit

图7 激励电路

利用Maxwell软件对电感线圈直流电感值进行计算并进行微调优化后,计算结果为5.9 mH,计算结果与设计要求吻合。

同时对电感的磁场分布,线圈温升进行仿真,仿真结果如图8、图9所示。仿真结果显示,磁场强度最强处位于电感线圈内测中心位置,磁场沿电感空心位置的中心向外逐渐减弱,磁场强度最弱处出现在电感线圈外侧中心位置。环境温度按20℃,损耗按平均损耗0.27 kW,得到的整体热量分布显示,温度由电感内侧往外逐渐减弱,电感的最高温度位于线圈内测位置,最高温度为38.12℃。

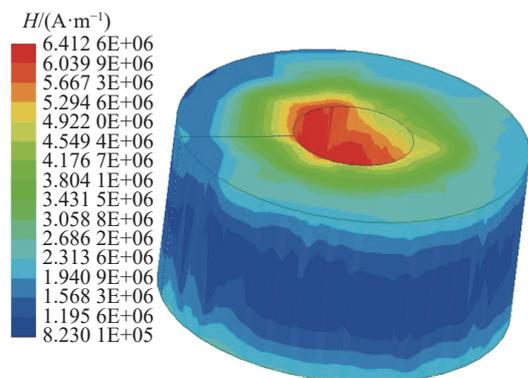


Fig. 8 Magnetic field distribution of pulse inductor

图8 脉冲电感的磁场分布

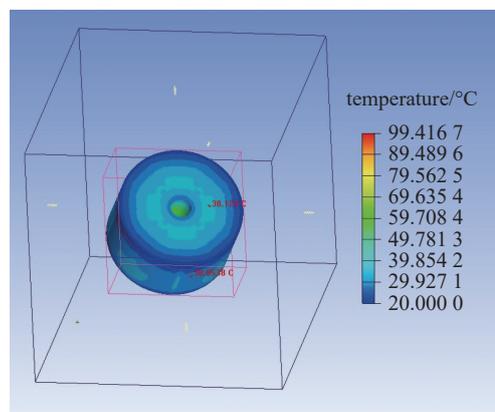


Fig. 9 Overall temperature rise of pulse inductor

图9 脉冲电感的整体温升

5 制造与实验

基于理论设计和仿真校核,完成脉冲电感的研制工作。利用LCR电桥验证脉冲电感的电感值,LCR电桥是利用交流信号下通过电桥的平衡信号来测量电感值。经过实际测量,该脉冲电感的电感值为5.98 mH,误差为3.2%,满足设计要求。

为了验证放电过程的数学分析,确保脉冲电感达到设计参数,搭建一套小型脉冲电源装置,电路原理图和脉冲电源装置如图10、图11所示,电路参数为电容器充电电压3200 V,电容39 mF,阻尼电感1.3 μH,负载电阻27.2 mΩ,实验波形如图12所示,脉冲电感通流能力达到7.6 kA,大于要求4.7 kA。根据式(4)、式(5),结合电流波形图,计算得到电感值为5.88 mH,电阻值为17.3 mΩ,各项参数满足设计要求。

为了验证脉冲电感的设计合理性,检验电感的重复工作能力,对电感进行了疲劳实验和温升实验。额定工况下,将电容器充电至1400 V,脉冲电感吸能27 kJ,1 min工作一次,每工作10次测量一次温度。环境温度为9℃,工作100次后,累积温升为12.4℃,平均温升为0.124℃,优于理论计算结果。过载运行情况下,将电容器充电至3200 V,脉冲电感吸能160 kJ,3 min工作一次,每工作5次测量一次温度。环境温度为22℃,工作50次后,累积温升为31.2℃,平均温升为0.624℃。温度最高点如图13位于电感中心位置。

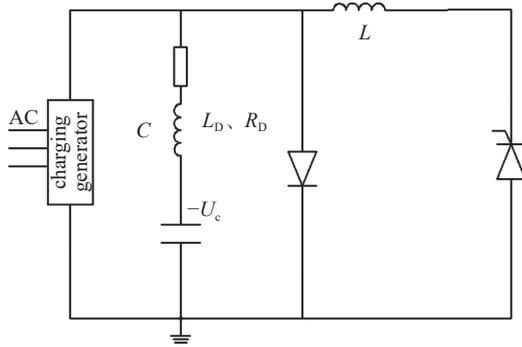


Fig. 10 Schematic diagram of test circuit

图 10 测试电路原理图



Fig. 11 Pulse power supply device

图 11 脉冲电源装置

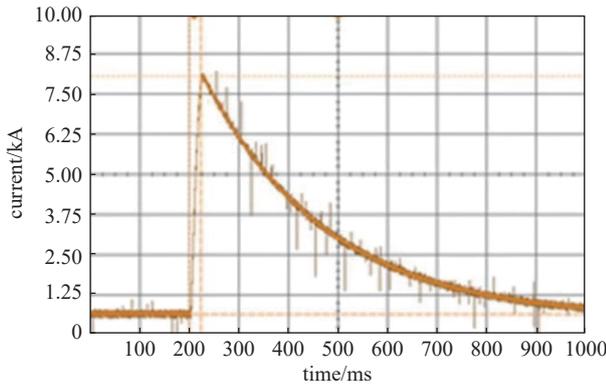


Fig. 12 Waveform diagram of pulse inductive current experiment

图 12 通流实验电流波形图



Fig. 13 Maximum temperature position of pulse inductor temperature rise experiment

图 13 温升实验最高温度位置

6 结论

本文研制了一款用于 TT-1 装置垂直场电源的大功率脉冲电感,对电感的电缆横截面选取、电感匝数的确定以及电阻和温升进行了详细的数学分析,对电感进行了三维的仿真并得到了磁场分布以及温度分布。最后对电感实物进行了通流实验、疲劳实验和温升实验,实验结果与理论计算高度吻合,说明了设计和计算方法的正确性。该脉冲电感的各项参数达到了设计要求,为 TT-1 装置的稳定运行奠定了基础。

参考文献:

- [1] 管锐,周宇,高宗球,等. HT-6M托卡马克加热场脉冲电源的设计[J/OL]. 电源学报, 1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20220506.1120.002.html>. (Guan Rui, Zhou Yu, Gao Zongqiu, et al. Design of pulsed power supply for HT-6M Tokamak heating field[J/OL]. Journal of Power Supply, 1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20220506.1120.002.html>.)
- [2] Jin Y S, Lee H S, Kim J S, et al. Compact 200 kJ pulse power system with a simple crowbar circuit[C]//Proceedings of the 14th IEEE International Pulsed Power Conference. 2003: 1239-1242.
- [3] 全玮. 大型超导装置失超保护系统换流回路及其关键问题研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021. (Tong Wei. Study on commutation circuit and key problems of quench protection system for large scale superconducting devices[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021)
- [4] 李传. ITER极向场变流器大功率大电流电抗器的设计与研制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016. (Li Chuan. Research and design on high-power large-current reactor applied to ITER poloidal field converter power supply[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016)
- [5] 王莹. 大功率脉冲电源[M]. 北京: 原子能出版社, 1991. (Wang Ying. High power pulse power supply[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1991)
- [6] 王莹. 脉冲功率技术综述[J]. 电气技术, 2009(4): 5-9. (Wang Ying. The summary for technology of pulsed power[J]. Electrical Engineering, 2009(4): 5-9)
- [7] 李松乘, 鲁军勇, 程龙, 等. 电磁发射用脉冲电抗器应力分析及结构设计[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(4): 39-45. (Li Songcheng, Lu Junyong, Cheng Long, et al. Stress analysis and structure optimization of pulse reactor for electromagnetic launch[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2019, 41(4): 39-45)
- [8] 刘佳, 董健年, 张小兵, 等. 电磁发射用电抗器温度场影响因素研究[J]. 弹道学报, 2014, 26(2): 100-105. (Liu Jia, Dong Jiannian, Zhang Xiaobing, et al. Research on factors influencing temperature of pulse inductor used in electromagnetic launch[J]. Journal of Ballistics, 2014, 26(2): 100-105)
- [9] 苏成. 小型化脉冲电感的研制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013. (Su Cheng. Research on a miniaturized pulsed inductor[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013)

- [10] 卡兰塔罗夫, 采依特林. 电感计算手册[M]. 陈汤铭, 刘保安, 罗应立, 等译. 北京: 机械工业出版社, 1992. (Kalantarov. Inductance calculation manual[M]. Chen Tangming, Liu Baoan, Luo Yingli, et al, trans. Beijing: China Machine Press, 1992)
- [11] 叶占刚. 干式空心电抗器的温升对其质量的影响[J]. [变压器](#), 1998, 35(3): 31-33. (Ye Zhangang. Influence of temperature rise on quality of dry-type air-core reactor[J]. [Transformer](#), 1998, 35(3): 31-33)
- [12] 叶占刚. 干式空心电抗器的温升试验与绕组温升的计算[J]. [变压器](#), 1999, 36(9): 6-12. (Ye Zhangang. Temperature rise test of dry-type air-core reactor and calculation of its winding temperature rise[J]. [Transformer](#), 1999, 36(9): 6-12)
- [13] 汪泉弟, 张艳, 李永明, 等. 干式空心电抗器周围工频磁场分布[J]. [电工技术学报](#), 2009, 24(1): 8-13. (Wang Quandi, Zhang Yan, Li Yongming, et al. The power frequency magnetic field distribution around dry-type air-core reactor[J]. [Transactions of China Electrotechnical Society](#), 2009, 24(1): 8-13)
- [14] 褚凡武, 付颖, 王琦, 等. 不同工况下干式空心滤波电抗器稳态磁场及电磁力分布规律[J]. [高压电器](#), 2019, 55(11): 41-47. (Chu Fanwu, Fu Ying, Wang Qi, et al. Distributions of steady-state magnetic field and electromagnetic force of a dry-type air-core filter reactor under different operating conditions[J]. [High Voltage Apparatus](#), 2019, 55(11): 41-47)