



·脉冲功率技术·

## 高功率高储能脉冲电源中重频电感的设计与分析

王 燕<sup>1,2</sup>, 张 钦<sup>1,2</sup>, 林福昌<sup>1,2</sup>, 李 化<sup>1,2</sup>

(1. 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 武汉 430074; 2. 华中科技大学 脉冲功率技术教育部重点实验室, 武汉 430074)

**摘 要:** 针对高功率脉冲电源集成系统连续放电的需求, 研制了一种用于该系统的重频水冷电感。水冷电感在系统中既调节电源的电流波形, 又能起到隔离作用。该重频水冷电感耐压高、通流大、充电间隔周期 6 s, 可连续工作 10 次放电。针对连续放电的需求, 通过去离子循环水对重频电感进行降温。现以单模块能量 334 kJ、电感量 30  $\mu\text{H}$ 、通流 100 kA 为例进行设计分析, 建立重频水冷电感温度场仿真模型, 通过 ANSYS 仿真软件对该电感内部温度瞬态特性进行分析。结果表明: 水冷电感通过去离子水冷却效果好, 电感每次工作后温度最高达到 47  $^{\circ}\text{C}$ , 在下一个工作点到来之前电感温度又恢复到 41  $^{\circ}\text{C}$ ; 同时该电感在没有加循环水的情况下通过了 112 kA 的电动力考核。试验结果与理论分析吻合较好, 重频水冷电感运行稳定, 从而验证了理论分析和设计的正确性。

**关键词:** 高功率脉冲电源; 重频水冷电感; 温度场; 连续放电

中图分类号: TM83

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210417

## Design and analysis of repetitive frequency inductor in high power and high energy storage pulse power supply

Wang Yan<sup>1,2</sup>, Zhang Qin<sup>1,2</sup>, Lin Fuchang<sup>1,2</sup>, Li Hua<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;  
2. Key Laboratory of Pulse Power Technology (Ministry of Education), Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074 China)

**Abstract:** To meet the requirement of continuous discharge in the integrated system of high power pulse power supply a repetitive frequency water-cooled inductor for the system was developed. In the system, the water-cooled inductor can not only adjust the current waveform of the power supply, but also play an isolation role. The repetitive frequency water-cooled inductor can withstand high voltage, large current, charge interval period of 6 seconds, and can work continuously for 10 times of discharge capacity. To meet the requirement of continuous discharge, deionized circulating water is used to cool the inductor. Taking the single module energy of 334 kJ, inductance of 30  $\mu\text{H}$ , and current of 100 kA as an example, the design and analysis are carried out to establish the temperature field simulation model of the inductor, and analysis is made on the transient characteristics of the internal temperature of the inductor through ANSYS simulation software. The results show that the inductor is well cooled by deionized water, and the maximum temperature of the inductor reaches 47  $^{\circ}\text{C}$  after each operation, and the temperature of the inductor recovers to 41  $^{\circ}\text{C}$  before the next operation point. At the same time, the inductor passes the 112 kA electrodynamic test without circulating water. The experimental results agree well with the theoretical analysis, and the inductor runs stably, which verifies the correctness of theoretical analysis and design.

**Key words:** high power pulse power supply, repetitive frequency water-cooled inductance, temperature field, continuous discharge

高功率脉冲电源的集成给不同类型的轨道炮提供能量, 轨道炮的能量是由特种集成电源系统供给的, 经过脉冲序列的释放, 达到其所要求的脉冲电流波形和幅值。电磁发射系统主要由初级储能单元、脉冲功率单元及发射单元组成。脉冲功率电源系统作为发射装置能量来源, 为发射装置提供瞬时高功率能量<sup>[1-2]</sup>。脉冲电源的主流方案

\* 收稿日期: 2021-09-23; 修订日期: 2021-12-10  
联系方式: 王 燕, yan7037@mail.hust.edu.cn。  
通信作者: 张 钦, zhangqin@mail.hust.edu.cn。

是采用多个脉冲电源模块(PPM)组成脉冲成形网络(PFN),网络中PPM以并联方式运行<sup>[3-6]</sup>。高功率脉冲电源是电磁发射系统的关键组成部分与能量来源,其工作状态直接影响电磁发射效果<sup>[7-9]</sup>。脉冲功率电源单模块结构图如图1所示,在这种脉冲功率系统中,电感主要是波形调节器件。脉冲电感作为脉冲功率电源的关键器件,其性能影响着电源整体的性能。如果进行连续放电,常规的大电流保护电感或调波电感不能满足集成电源系统间隔6 s连续10次放电试验散热的要求,只能在满负荷条件下进行单次充放电试验,两次充电时间间隔至少30 min以上。脉冲电感的主要作用是限流、调节脉宽和中间储能,当多个脉冲成形单元(PFU)按一定时间顺序放电时,脉冲电感还能起隔离作用,各PFU模块之间相互不受影响,进而能进行时序放电。因此需要设计一种用于特种高储能密度集成电源系统连续放电的重频水冷电感。研制和设计重频水冷电感对不同类型的轨道炮和激光电源的应用有非常重要的现实使用价值和理论指导意义。

## 1 重频水冷电感设计

对于空心圆柱线圈自感、互感的计算,已有大量文献进行了讨论<sup>[10-18]</sup>。现以脉冲功率电源单模块334 kJ能量为例进行重频水冷电感设计,电感设计值为30  $\mu\text{H}$ ,通流100 kA。该电感主要由9部分构成,分别为绕组、绕组内绝缘筒、进水水嘴、出水水嘴、上引出电极和下引出电极以及绕组上端绝缘板和绕组下端绝缘板、包封层,其中绕组缠绕在绝缘筒上。首先根据预给定的电流值大小确定缠绕电感铜管的管径,确定其截面积,选取软态铜管外径为14 mm、内径为6 mm、管壁厚4 mm、铜管截面积为125.67  $\text{mm}^2$ ;其次根据给定的电感量 $L$ 的大小和给定的外形尺寸选取缠绕绝缘筒的外径 $D_1$ 和厚度以及筒高;确定绕线高度 $a$ 和电感线圈的平均直径 $d$ ,计算并查表得出空心电感公式中的随比值 $\phi$ ,线圈的电感量计算公式如公式(1)所示,按照电感量计算公式(1)计算,得到设计所需的电感值。最后再利用电阻定律公式(2),计算其电阻值。

$$L = \frac{\pi}{4} \mu_0 N^2 \frac{d^2}{a} \phi \quad (1)$$

式中: $\phi$ 为空心螺线管随比值, $\phi$ 按照短螺线管公式来计算; $L$ 为电感量; $d$ 为线圈直径; $a$ 为绕线高度; $N$ 为匝数; $\mu_0$ 为材料的磁导率。计算出重频水冷电感的匝数 $N$ 为13匝;该电感采用铜管缠绕,匝数13,螺距17.14 mm,线圈平均螺旋直径262 mm,线高240 mm。

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (2)$$

式中: $R$ 为电阻值, $\rho$ 为材料电阻率, $l$ 为导线长度, $s$ 为导线铜管的截面积。计算得到电阻值为1.63  $\text{m}\Omega$ 。

由式(1)、式(2)的计算结果可知,电感量和电阻值都满足要求,设计就完成;如果有一个没有达到要求就要重新选铜管的截面积及其绝缘筒的尺寸等,按上述步骤重新计算直到达到设计要求为止。

### 1.1 导线线径及温升引起的趋肤效应

为了满足脉冲功率电源单模块输出波形的需求,重频水冷电感量设计为30  $\mu\text{H}$ 。重频水冷电吸收能量按单模块334 kJ的80%能量为267 kJ进行绝热过程计算考虑,计算其温度为52.96  $^{\circ}\text{C}$ 。绕制电感导线的线径与温升关系如表1所示。趋肤深度受频率、材料磁导率的影响,由趋肤效应公式(3)可知;而材料的电阻率又受温度变化的影响,如公式(4)可知。

$$\delta = \sqrt{\frac{2k}{\omega\mu\gamma}} \quad (3)$$

$$K = 1 + (T - 20)/234.5 \quad (4)$$

式中: $\delta$ 为电流趋肤效应深度,对于铜材的磁导率 $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ , $\gamma$ 为材料的电导率, $k$ 为材料电阻率温度变化系数; $T$ 为铜管材料变化后温度;电流的趋肤效应与其工作频率和温度有关,工作频率越高,电荷就越向导体表层集

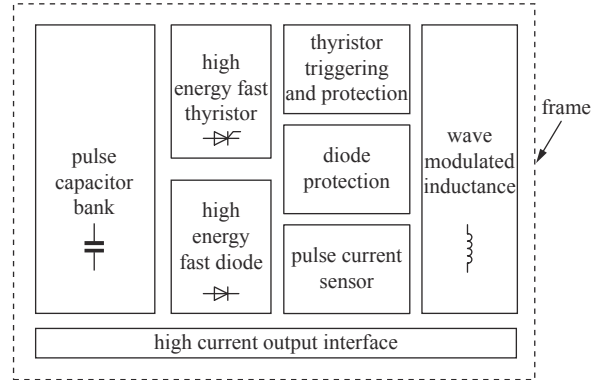


Fig. 1 Single module structure diagram

图1 单电源模块结构图

表 1 导线线径与温升的关系

Table 1 Relationship between wire diameter and temperature rise

number	$\Phi_0/\text{mm}$	$\Phi_1/\text{mm}$	energy/kJ	temperature/ $^{\circ}\text{C}$
1	14	6	267	52.96

中,温度越高,趋肤深度会随温度增加而有所增加;由于单模块输出脉冲电流脉宽为 5~6 ms,激励源频率的频率  $f$  在 200~166.7 Hz 之间,趋肤效应深度与频率/温度的关系如表 2 所示。从趋肤效应深度来看,频率固定,温度变化 17.5%,趋肤深度变化在 4.2%~5.6% 之间,由此可知温度对趋肤深度影响不大,可以暂不考虑温度对趋肤效应的影响。

表 2 趋肤深度与铜管水温、频率的关系

Table 2 Relationship between skin depth and temperature and frequency

number	frequency/Hz	temperature/ $^{\circ}\text{C}$	temperature of coefficient/K	skin depth/mm
1	200	47/40	1.1154/1.0853	3.707
2	166.7	47/40	1.1154/1.0853	4.117

从表 2 可以看出,重频水冷电感选取管径  $\Phi_0/14/\Phi_6$  铜管(即管壁厚 4 mm)的绕制是满足设计要求的,不会因趋肤深度造成电流不均引起严重发热。重频水冷电感的水冷循环由定制的水冷装置完成,水冷装置的主要功能主要是完成对脉冲功率电源的关键和重要器件进行冷却,与脉冲功率电源组成一个闭式循环系统,利用去离子冷却水的热容吸收脉冲功率电源工作时产生的损耗。

脉冲电源模块为间歇式工作制,间隔 6 s 工作一次,工作时间 15 ms,每个电源模块工作产生的热量实际为 55 kJ,连续工作 10 次,脉冲电源模块可脱离外部水箱独立工作,仅适用内置水箱时,冷却水温升不超过 30 K。

重频水冷电感的温度控制主要是由循环水控制回路,采用基于 PLC 编程的控制保护系统,从而实现对水冷装置的监控与保护;将水冷装置的工作状况上传给主控制器,对水冷装置进行远程控制。实现水冷装置系统进行循环水流量控制来确保电感的温度每次工作后恢复到初始温度。

重频水冷电感三维外形图如 2 和图 3 所示,电极 2 和电极 3 是重频水冷电感分别接入回路中的两个电极,水嘴 4 和水嘴 5 分别是进水水嘴和出水水嘴。

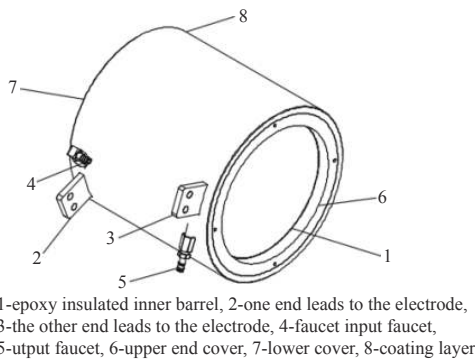


Fig. 2 Contour diagram of the repetitive frequency water-cooled inductor

图 2 重频水冷电感外形图

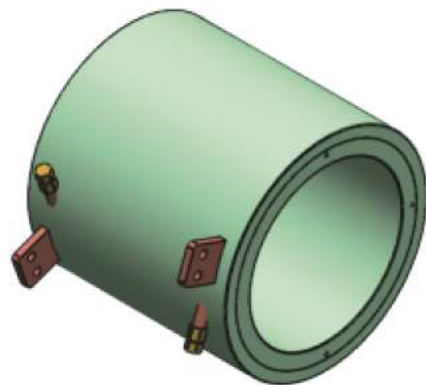


Fig. 3 3D diagram of the repetitive frequency water-cooled inductor

图 3 重频水冷电感三维图

## 2 重频水冷电感水流量特性计算

针对不同水流量通过电感时,计算电感内压力损失,得到如表 3 所示电感的流量特性试验数据,从表 3 可知,随着水流量增大,压力损失逐渐增大。

## 3 重频水冷电感热量管理分析

### 3.1 重频水冷电感热仿真分析

重频水冷电感绕制线圈实物图如图 4 所示。首先确定

表 3 电感流量特性实验数据表

Table 3 Experimental data of inductance flow characteristics

flow rate/(L/min)	pressure loss/MPa
5	0.257
5.5	0.309
6	0.364
6.5	0.413
7	0.512

边界输入条件,采用 ANSYS 软件,建立仿真模型。仿真得到重频水冷电感的温度分布云图。

### 3.1.1 输入条件

重频水冷电感线圈导线外径 14 mm,内径 6 mm,匝数 13,螺距 17.14 mm,螺旋平均直径 240 mm。因螺旋线从截面和走向上看,任意部位都是圆弧状,网格数量巨大,仿真时间超长,需将模型简化。为缩短仿真时间,只对 3 个周期进行仿真。前 2 s 不发热,然后 6 s 工作一次,每次工作 15 ms,发热功率 46 kW。

### 3.1.2 简化模型

重频水冷电感的仿真参数按照以上输入条件以及 15 ms 内发热量为 50 kJ 来考虑,那么 1/4 匝导线 15 ms 内发热量为 0.69 kJ,也就是说 1/4 匝导线发热功率为 46 kW。重频水冷电感温度场仿真模型图如图 5 所示。



Fig. 4 Diagram of repetitive frequency water-cooled inductor coil

图 4 重频水冷电感线圈

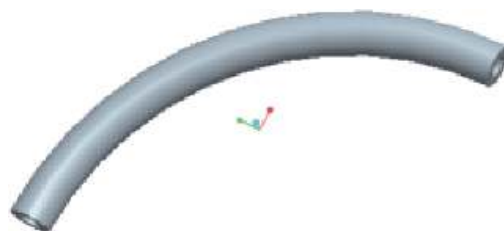


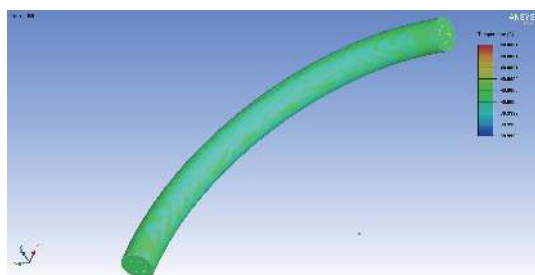
Fig. 5 1/4 turn traverse model

图 5 1/4 匝导线模型

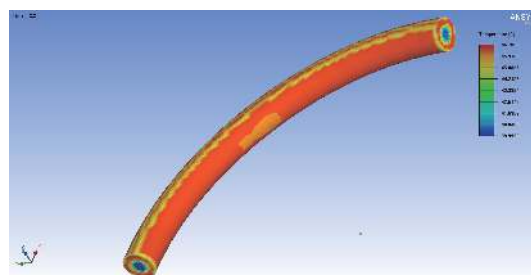
从重频水冷电感仿真温度分布云图图 6(a)~(g)的结果可以看出,图 6(a)为其初始状态温度的分布云图,温度为 40 °C;第一次工作时温度为 46.785 °C(图 6(b));图 6(c)经循环水冷却后温度为 41.2072 °C;图 6(d)第二次工作时温度为 47.0297 °C;图 6(e)再次冷却后温度为 41.6269 °C;图 6(f)第三次工作时温度为 47.6543 °C;图 6(g)再次冷却后温度为 41.7557 °C。由以上仿真结果分析得知,电感在冷却水流量 4 L/min 情况下,电感每次工作后温度最高达到 47 °C,在下一个工作点到来之前电感的温度又恢复到 41 °C 左右,保证了电源模块输入的均衡性要求。在实际配置方案中,电感冷却水流量为 5 L/min,可满足设备运行要求。

## 4 重频水冷电感电动力仿真计算

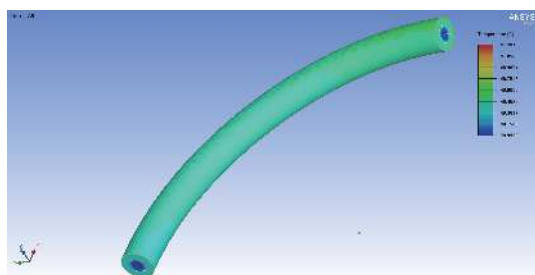
采用电磁-结构耦合仿真,针对 30  $\mu\text{H}$  电感线圈在峰值 100 kA 电流作用下,采用 ANSYS 2D 计算得到铜导线上的表面电磁力密度以及电感内部的应力(压强)的分布情况,该电感匝数 13,螺距 17.14 mm,螺旋平均直径 240 mm,线圈导线外径 14 mm,内径 6 mm 紫铜管,当导体中通过电流 100 kA 时,导体上受力最大的部位是线匝的中间位置,其线圈内部导体上的应力分布如图 7 所示,线圈导体表面的电磁密度如图 8 所示。因此在设计、制作电感的时候



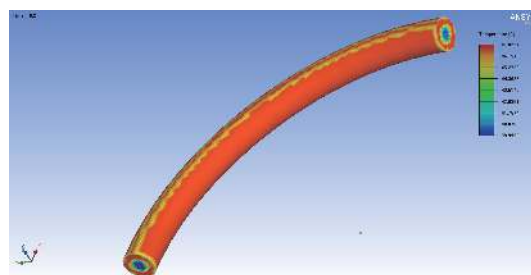
(a)  $t=0.6$  s, initial state



(b)  $t=2.2$  s, refrequency



(c)  $t=7.8$  s, after the first operation and before the second operation



(d)  $t=8.2$  s, refrequency at second operation



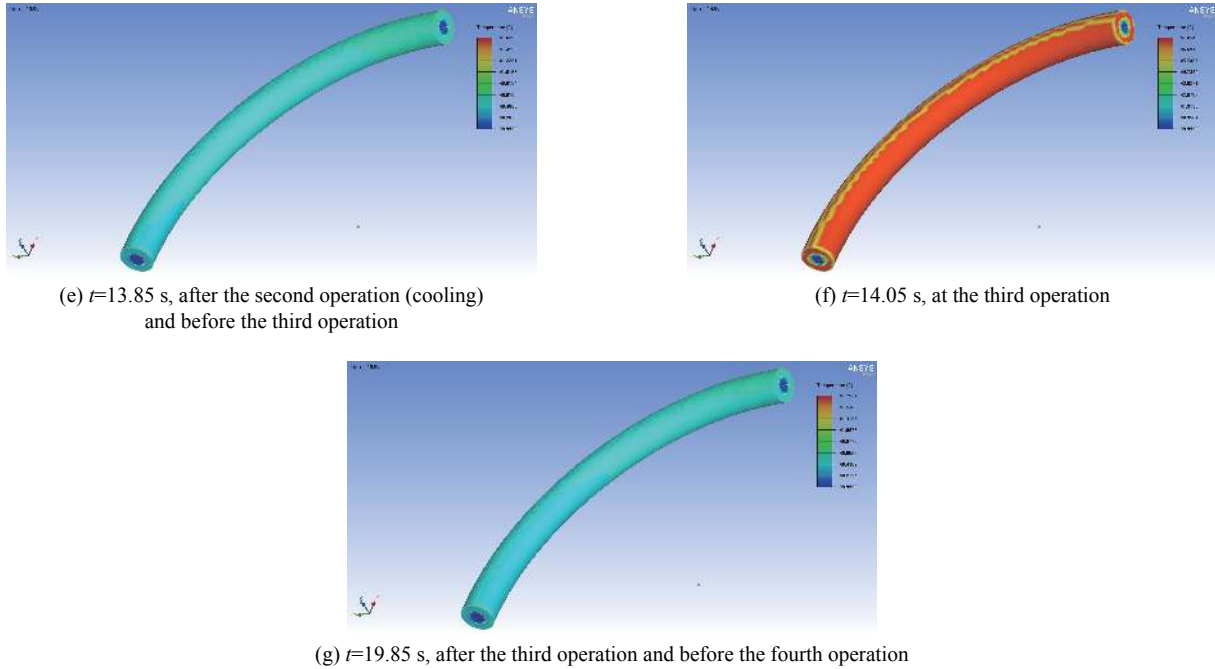


Fig. 6 Cloud map of temperature distribution of the repetitive frequency water-cooled inductor

图 6 重频水冷电感温度分布云图

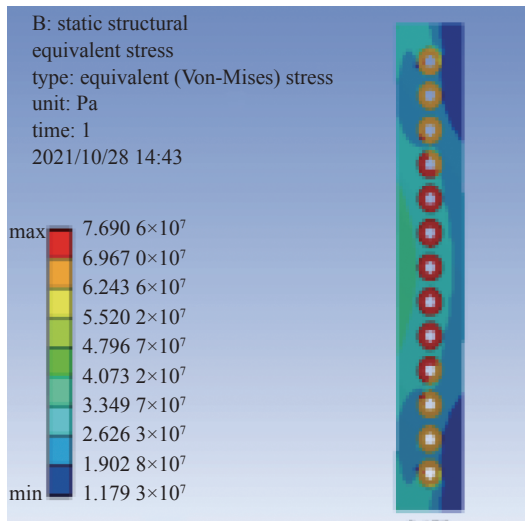


Fig. 7 Stress on conductor inside inductor coil

图 7 电感线圈内部导体上的应力

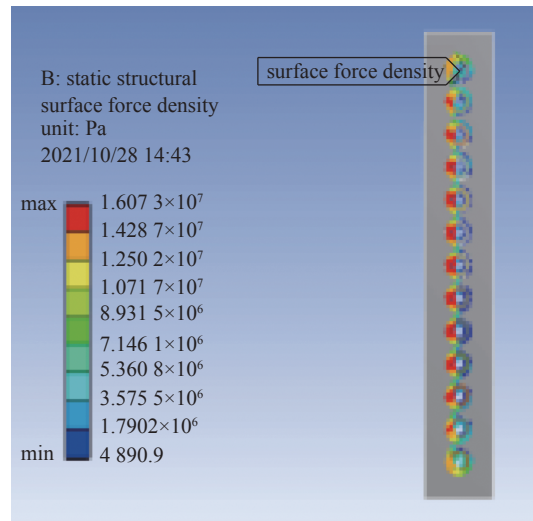


Fig. 8 Surface electromagnetic density of inductor coil conductor

图 8 电感线圈导体表面电磁密度

候,因需要在这些应力最大的部位进行力学性能的加强。由于电磁力的冲击力,为保证电感结构的稳定性,在线匝周围采用环氧灌封设置缓冲层,允许线匝在冲击力作用下有一定的摆动。

该电感的制作难点主要表现在大电流作用下强电磁应力的冲击以及引出电极的固定,以及小体积要求下绝缘耐受高压的能力。为此,在制作中需采用高力学强度材料、高绝缘强度的材料与结构,并通过结构改进,有效减小局部强电磁应力。

## 5 重频水冷电感电动力试验考核

通过 PSpice 软件仿真可知,重频水冷电感试验回路中需串联大功率电阻 62.5 m $\Omega$ ,系采用 8 个 500 m $\Omega$  的大功率电阻并联得 62.5 m $\Omega$  电阻,串接在气体开关与测试电感之间,此时充电电压为 17 kV 时可实现峰值电流 110 kA。试验回路的原理接线如图 9 所示,实际接线图如图 10 所示。重频水冷电感实测通流波形如图 11 所示,其中纵坐标为电流幅值,单位 kA, 30 kA/div,横坐标为时间,单位  $\mu$ s, 500  $\mu$ s/div。该电感通过了幅值为 112 kA 脉冲电流的电动力试验考核,该电流幅值比设计值大 11.2%,试验验证了理论设计的正确性。

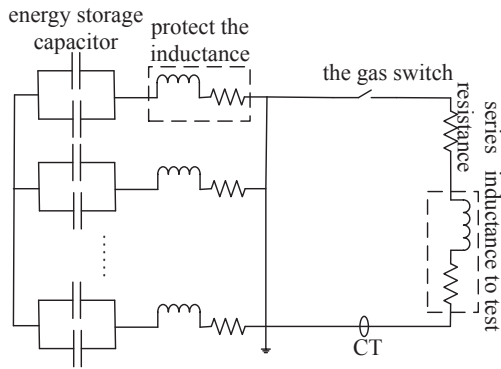


Fig. 9 Schematic diagram of repetitive frequency water-cooled inductor test circuit

图9 重频水冷电感通流试验原理图

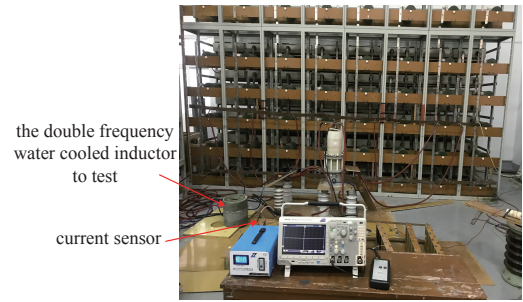


Fig. 10 Wiring diagram of repetitive frequency water cooled inductor flow test

图10 重频水冷电感通流试验接线图

## 6 结论

本文主要设计制造了高功率脉冲功率电源系统相匹配的重频水冷脉冲电感,电感值  $30 \mu\text{H}$ , 通流幅值达  $112 \text{ kA}$  脉冲电流。从其电磁力、结构及温度场等方面分析了重频水冷电感的性能。仿真结果表明,重频水冷电感管径的选取既要符合通流能力指标的要求,又要符合水流量压力指标的要求,大功率电源系统放电时系统稳定,无变形及裂纹出现,电源系统经过多轮次连续放电 10 次,电感温度变化趋势以及电流实测值与计算结果吻合,说明设计及计算方法的正确。该电感不仅可以用于高功率重频脉冲电源,也可以用于高功率非重频脉冲电源(如果非重频电源应用,价格会偏高),具有很好的应用前景。

## 参考文献:

- [1] Akiyama H, Sakugawa T, Namihira T, et al. Industrial applications of pulsed power technology[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2007, 14(5): 1051-1064.
- [2] 戴宇峰, 鲁军勇, 张晓, 等. 脉冲功率电源连续发射水冷模拟负载[J]. *国防科技大学学报*, 2016, 38(6): 6-11. (Dai Yufeng, Lu Junyong, Zhang Xiao, et al. Water-cooling simulated resistance for continuously launching pulsed power supply[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2016, 38(6): 6-11)
- [3] Hundertmark S, Liebfried O. Options for an electric launcher system[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(10): 4433-4438.
- [4] Li Zhenxiao, Zhang Yazhou, Wu Jinguo, et al. Design of a 30MJ capacitor-based pulsed power supply for EML[C]//Proceedings of the 21st International Conference on Pulsed Power. Brighton, UK: IEEE, 2017: 1-5.
- [5] Lehmann P, Peter H, Wey J. First experimental results with the ISL 10 MJ DES railgun PEGASUS[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2001, 37(1): 435-439.
- [6] Hundertmark S, Schneider M, Simicic D, et al. Experiments to increase the used energy with the PEGASUS railgun[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, 42(10): 3180-3185.
- [7] 张龙霞, 李碧清, 霍敏. 国外电磁炮发展概述[J]. *飞航导弹*, 2011, 40(10): 23-27. (Zhang Longxia, Li Biqing, Huo Min. Overview of foreign electromagnetic gun development[J]. *Maneuverable Missile*, 2011, 40(10): 23-27)
- [8] 范晶, 宋朝文. 舰载电磁轨道炮用高功率脉冲电源研究进展[J]. *电气技术*, 2010(s1): 70-72. (Fan Jing, Song Chaowen. Research progress of the high-powered pulsed power supply of naval electromagnetic rail gun[J]. *Electrical Engineering*, 2010(s1): 70-72)
- [9] 何巧, 马游春, 马子光, 等. 高功率脉冲电源电压测试系统设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2020(2): 46-49,113. (He Qiao, Ma Youchun, Ma Ziguang, et al. Design of high power pulse power supply voltage test system[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2020(2): 46-49,113)
- [10] Conway J T. Inductance calculations for circular coils of rectangular cross section and parallel axes using Bessel and Struve functions[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2010, 46(1): 75-81.
- [11] Conway J T. Inductance calculations for noncoaxial coils using Bessel functions[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2007, 43(3): 1023-1034.
- [12] Conway J T. Analytical solutions for the self- and mutual inductances of concentric coplanar disk coils[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, 49(3): 1135-1142.

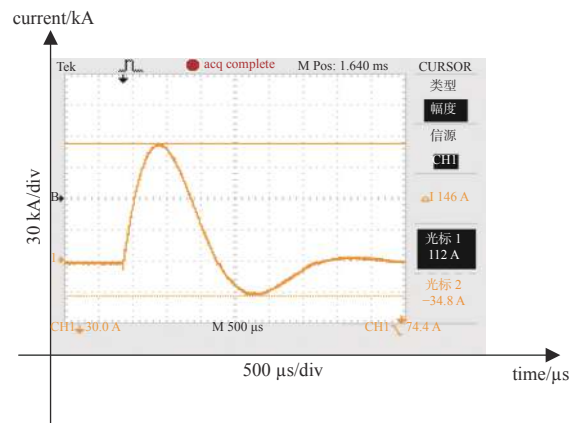


Fig. 11 Waveform of repetitive frequency water-cooled inductor passing a peak current of 112 kA

图11 重频水冷电感通过了 112 kA 电流峰值的波形图

- [13] Luo Yao, Chen Baichao. Improvement of self-inductance calculations for circular coils of rectangular cross section[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, 49(3): 1249-1255.
- [14] Babic S, Salon S, Akyel C. The mutual inductance of two thin coaxial disk coils in air[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2004, 40(2): 822-825.
- [15] 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. (Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей справочная книга[M]. Chen Tangming, Liu Baoan, Luo Yingli, et al, trans. Beijing: China Machine Press, 1992)
- [16] 罗垚, 陈柏超, 袁佳歆, 等. 倾斜轴空心矩形截面圆柱线圈互感计算[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 132-136. (Luo Yao, Chen Baichao, Yuan Jiaxin, et al. Mutual inductance calculations of inclined axial air-core circular coils with rectangular cross-sections[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 132-136)
- [17] 罗垚, 陈柏超. 空心矩形截面圆柱线圈自感计算的新方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 1-5. (Luo Yao, Chen Baichao. New method for self-inductance calculations of air-core circular coils with rectangular cross-sections[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 1-5)
- [18] 罗垚, 陈柏超, 周洪. 有限长圆柱磁屏同轴线圈电感计算方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 122-129. (Luo Yao, Chen Baichao, Zhou Hong. Approach for inductance calculations of coaxial circular coils shielded by cylindrical magnetic screen of finite length[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(14): 122-129)