

# 用于瞬态电磁测试的脉冲磁场产生系统的研究

严来军<sup>1</sup>, 高椿明<sup>1</sup>, 陈霄<sup>1</sup>, 周鹰<sup>1</sup>, 钱美兴<sup>2</sup>

(1. 电子科技大学光电信息学院 成都 610054; 2. 中国人民解放军63610部队 新疆 库尔勒 841001)

**【摘要】**脉冲磁场作为一种优秀的激励源,可应用于许多材料性质的无损检测技术中,以提供瞬态电磁测试条件。在国际热核聚变实验堆(ITER)项目中,为了测试实验包层模块(TBM)材料的瞬态电磁性能,需要设计研制上升时间约为3 ms,磁感应强度可达0.8 T的脉冲磁场产生系统。首先,理论分析了脉冲磁场产生的原理,依据实验设备条件确定了系统各个参数,使系统能达到该测试项目的要求。其次,搭建了脉冲磁场产生系统,包括充放电电路、螺线管、工控系统、磁场测试系统、真空系统和数据采集处理系统。最后,对脉冲磁场产生系统进行了测试,并分析了影响系统的因素。测试结果显示,该系统产生的脉冲磁场,能够满足瞬态电磁测试项目的需要。

**关键词** 误差分析; 无损检测; 脉冲磁场; 瞬态电磁测试

**中图分类号** O441.4

**文献标志码** A

**doi:**10.3969/j.issn.1001-0548.2015.03.024

## Study of Pulsed Magnetic Field Generation System for Transient Electromagnetic Test

YAN Lai-jun<sup>1</sup>, GAO Chun-ming<sup>1</sup>, CHEN Xiao<sup>1</sup>, ZHOU Ying<sup>1</sup>, and QIAN Mei-xing<sup>2</sup>

(1. School of Opto-Electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

2. The Unit 63610 of Chinese People Liberation Army Kuerle Xinjiang 841001)

**Abstract** As a good excitation source to generate a transient electromagnetic testing condition, the pulsed magnetic field has been applied in many non-destructive testing techniques for property characteristic of varies materials. In International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) program, to test the transient electromagnetic property of test blanket module (TBM) material, a pulsed magnetic field generation system is needed, whose rise time is about 3 ms and magnetic induction can be up to 0.8 T. In this paper, the mechanism of the pulsed magnetic field generation system is theoretically analyzed. In the experiment, the parameters of the system were set to meet the demands of the test program and a pulsed magnetic field generation system was set up, which included a charge-discharge circuit, a solenoid, an industrial control system, magnetic field test system, a vacuum system, and a data sampling and processing system. The pulsed magnetic field generation system was tested and the factors affected the system were analyzed. The result shows that the system can generate a qualified pulsed magnetic field for the transient electromagnetic test program.

**Key words** error analysis; non-destructive test; pulsed magnetic field; transient electromagnetic test

脉冲磁场相比于稳态磁场,其磁场峰值更高,能够满足绝大部分科学研究的需要,因而得到各国科学家的广泛重视<sup>[1]</sup>。脉冲磁场能提供瞬态电磁测试条件,其作为一种优秀的激励源,广泛应用于半导体、金属以及生物材料性质的无损检测中<sup>[2-12]</sup>。而在国际热核聚变实验堆(ITER)项目中,包层材料瞬态电磁性能的仿真测试及实验测试尤为重要,关乎项目的安全;涉及实验包层模块(TBM)材料的瞬态电磁性能模拟仿真<sup>[13-16]</sup>和实验室测试项目,需要一个上升时间约为3 ms,磁感应强度可达0.8 T的脉冲

磁场。而目前的脉冲磁场产生系统是超强磁场或小微磁场<sup>[17]</sup>,不适用于该测试项目。因此,本文脉冲磁场产生系统的研究,首先能满足该瞬态电磁测试项目的需要,其次还能扩展其他基于脉冲磁场的无损检测技术在较强磁场强度下的应用。

### 1 脉冲磁场产生系统的结构

系统平台如图1所示,包括电源控制系统、磁场产生装置、磁场测试系统、真空系统、数据信号采集系统。为了保证在强电环境下控制系统的安全性

收稿日期: 2014-03-31; 修回日期: 2014-11-13

基金项目: 四川省青年基金人才培养计划(2011JQ0025)

作者简介: 严来军(1986-),男,博士,主要从事光声光热技术及其在成像和物性检测方面的研究。

和稳定性, 电源控制系统采用抗干扰能力强, 可靠性高的西门子可编程逻辑控制器(PLC)作为控制器, 配以西门子的工控机作为控制系统的上位机。电源控制系统控制充电和放电过程, 在放电的过程中, 磁场产生装置会产生瞬态电磁环境。

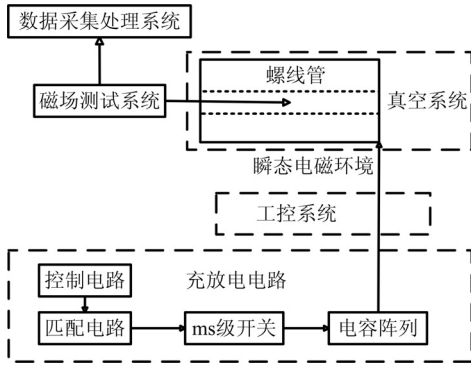


图1 脉冲磁场产生系统框图

通过磁场测试系统测量所产生的脉冲磁场, 由数据信号采集系统采集并做处理。为减少高压电离和周围环境的影响, 整个磁场产生装置放置于真空腔中, 由真空系统控制。

## 2 产生磁场原理分析及参数设计

磁场产生装置主要是螺线管, 放电过程中, 螺线管内电流急剧变化, 从而导致脉冲磁场的产生。螺线管如图2所示, 为多层线圈。

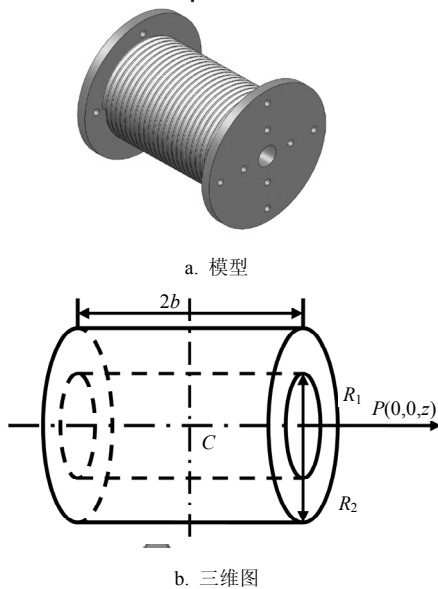


图2 螺线管模型及其三维图

在中轴线 $P(0,0,z)$ 处产生的磁感应强度为:

$$B(0,0,z) = \int_{R_1}^{R_2} \frac{\mu_0 NI(t)}{4b(R_2 - R_1)} \left( \frac{z+b}{\sqrt{r^2 + (z+b)^2}} - \frac{z-b}{\sqrt{r^2 + (z-b)^2}} \right) dr \quad (1)$$

式中,  $R_1$ 为螺线管内径;  $R_2$ 为螺线管外径;  $r=(R_1+R_2)/2$ ;  $2b$ 为螺线管长度;  $N$ 为线圈总匝数;  $\mu_0=4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ 为真空磁导率;  $I(t)$ 为通过螺线管的电流。

当 $z=0$ , 即螺线管中心处, 得最大磁场为:

$$B_{\max} = \frac{\mu_0 NI(t)}{2(R_2 - R_1)} \ln \left( \frac{R_2 + \sqrt{R_2^2 + b^2}}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + b^2}} \right) \quad (2)$$

式中,  $I(t)$ 由RLC放电回路决定, 有:

$$I(t) = \frac{U}{\sqrt{L/C - R^2/4}} e^{-\frac{R}{2L}t} \sin \left( \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}t \right) \quad (3)$$

式中,  $U$ 为电容初始放电电压;  $L$ 为电感值;  $R$ 为电阻值;  $C$ 为电容值。

为使最大磁场强度能达到0.8 T, 上升时间约为3 ms, 结合现有实验条件和元件参数, 设计的各个参数为螺线管内径 $R_1=5 \text{ cm}$ , 外径 $R_2=14 \text{ cm}$ , 螺线管长度 $2b=40 \text{ cm}$ , 总匝数 $N=142$ , 电感 $L=1.37 \text{ mH}$ , 电容 $C=4\ 400 \mu\text{F}$ , 电阻 $R=0.5 \Omega$ 。按照以上实际参数, 理论上螺线管中心处磁场为:

$$B_{\max} = 8.0522 \times 10^{-4} U e^{-182.48t} \sin(353.04t) \quad (4)$$

按照式(4), 当初始放电电压达到2 000 V, 在 $t=3.04 \text{ ms}$ 时, 螺线管中心处磁场可达最大0.821 7 T。因此, 以上参数理论上可以使系统达到设计要求。

## 3 脉冲磁场测试结果

实际磁场强度通过磁场测试系统测量得到。采用电磁感应法, 将感应线圈放入螺线管中心处, 当螺线管中通过瞬间大电流时, 感应线圈里将会产生大小为 $\varepsilon(t)$ 的感应电动势, 则实测螺线管中心处磁场为:

$$B_{\max} = \frac{1}{nS} \int \varepsilon(t) dt \quad (5)$$

式中,  $n$ 为感应线圈的匝数;  $S$ 为感应线圈的横截面积, 均为常数;  $\varepsilon(t)$ 由示波器实时测定。依据式(5)可以得到螺线管中心处的磁感应强度测量值。

如图3所示, 在放电电压为2 000 V时, 螺线管中心处的磁感应强度可达0.816 T, 上升时间为3.20 ms。

随着放电电压的增大,螺线管中心处的脉冲磁场最大磁感应强度也在增大,从图中可看出两者基本是线性关系。而比较磁感应强度测量值与理论计算值,可看出两者在磁场上升期比较吻合,但在下降期,理论负脉冲最小值为 $-0.176\text{ T}$ ,实测负脉冲最小值为 $-0.115\text{ T}$ ,有 $0.061\text{ T}$ 的偏差。

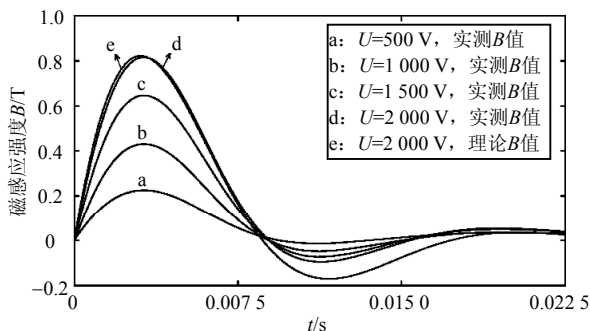


图3 同放电电压下,平台中心处的脉冲磁场磁感应强度

## 4 误差分析

### 4.1 续流回路对系统的影响

由于RLC放电回路的实际参数满足欠阻尼条件,电容上的电压会随时间而变化,有:

$$U_C(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt = -\frac{U}{\omega} e^{-\frac{R}{2L}t} \left( -\frac{R}{2L} \sin \omega t - \omega \cos \omega t \right) \quad (6)$$

电容上的电压会在某一时刻改变方向,导致电容在某一时间段承受瞬间的反压。若初始电压 $U$ 为 $2000\text{ V}$ ,则按照式(6)计算,反向电压最大能达 $400\text{ V}$ 。虽然电容没有极性,但如果加在电容上的电压方向改变,还是会对电容造成一定的伤害,降低电容的使用寿命。为了避免这一情况的出现,实际系统中RLC电路加了一个续流回路。

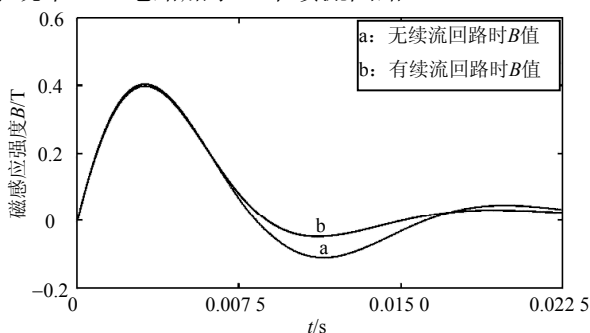


图4 续流回路对螺线管中心处磁场的影响

如图4所示,在 $1000\text{ V}$ 初始电压下的放电情况,有无续流回路对测量值的影响。从图中可以看出,当有续流回路时,测量值的负脉冲最小值为 $-0.05\text{ T}$ ,无续流回路时为 $-0.11\text{ T}$ ,负脉冲明显减小。因此,

图3中磁感应强度测量值与理论计算值在下降后期出现的差异主要是因为实际系统中续流回路的影响。续流回路减小了反向电压,这就会导致磁场负脉冲强度的减小。

### 4.2 测量感应电动势所用示波器分辨率对测量值的影响

对电容初始电压为 $1000\text{ V}$ 情况下产生的磁感强度进行了3次重复测量,示波器分辨率分别为 $50\text{ mV}$ 、 $100\text{ mV}$ 、 $200\text{ mV}$ 格,得到的测量值和理论值如图5所示。从图中可以看出,随着示波器分辨率的降低,测量结果与理论值的差异依次为 $0.009\text{ T}$ 、 $0.012\text{ T}$ 和 $0.028\text{ T}$ ,逐渐增大。所以示波器的分辨率在量程足够的情况下应尽量选高分辨率。

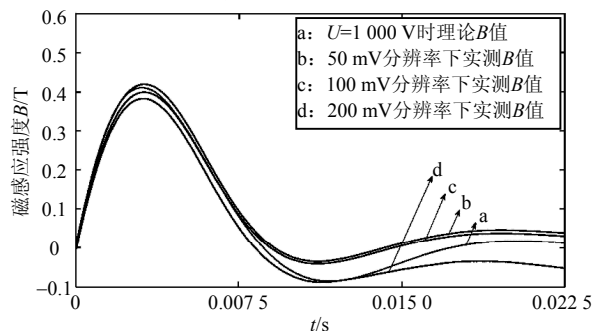


图5 测量感应电动势所用示波器分辨率对螺线管中心处磁感应强度测量值的影响

## 5 结论

理论上分析了脉冲磁场产生原理,结合设计目标和现有实验条件及元件参数,确定了本文系统各项参数,理论上螺线管中心处的磁感应强度最大可达 $0.8217\text{ T}$ ,上升时间为 $3.04\text{ ms}$ 。按照设计参数搭建了系统,实际测得螺线管中心处的磁感应强度最大可达 $0.816\text{ T}$ ,上升时间为 $3.20\text{ ms}$ 。分析了续流回路对脉冲磁场的影响,以及示波器分辨率对测量带来的误差。结果表明本文脉冲磁场产生系统能满足瞬态电磁测试项目的需要,通过了合作单位的验收。此外,本文系统还能扩展其他基于脉冲磁场的无损检测技术在较强磁场强度下的应用。

### 参考文献

- [1] 彭涛,辜承林. 脉冲强磁场发展技术[J]. 核技术杂志, 2003, 26(3): 185-188.  
PENG Tao, GU Cheng-lin. Technical development of strong pulsed magnet[J]. Nuclear Techniques, 2003, 26(3): 185-188.
- [2] 朱明原,刘聪,薄伟强,等. 脉冲磁场下水热法制备Cr掺杂ZnO稀磁半导体晶体[J]. 物理学报, 2012, 61(7): 506-510.

- ZHU Ming-yuan, LIU Cong, BO Wei-qiang, et al. Synthesis of Cr-doped ZnO diluted magnetic semiconductor by hydrothermal method under pulsed magnetic field[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(7): 506-510.
- [3] 王世伟, 朱明原, 钟氏, 等. 脉冲磁场对水热法制备Mn掺杂ZnO稀磁半导体的影响[J]. 物理学报, 2012, 61(19): 496-502.
- WANG Shi-wei, ZHU Ming-yuan, ZHONG Min, et al. Effects of pulsed magnetic field on Mn-doped ZnO diluted magnetic semiconductor prepared by hydrothermal method[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(19): 496-502.
- [4] 张永杰, 华骏山, 王恩刚, 等. 脉冲磁场作用于钢液熔体的电磁场数值模拟[J]. 材料科学与工艺, 2010, 18(5): 639-643.
- ZHANG Yong-jie, HUA Jun-shan, WANG En-gang, et al. Numerical analysis of electromagnetic field in the molten steel under pulsed magnetic field[J]. Materials Science and Technology, 2010, 18(5): 639-643.
- [5] 汪彬, 杨院生, 周吉学, 等. 脉冲磁场对Mg-Gd-Y-Zr合金凝固及力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(3): 519-522.
- WANG Bin, YANG Yuan-sheng, ZHOU Ji-xue, et al. Effect of the pulsed magnetic field on the solidification and mechanical properties of Mg-Gd-Y-Zr alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(3): 519-522.
- [6] 林凌, 贾方荣, 李刚, 等. 脉冲磁场对神经元瞬时外向钾电流的影响[J]. 光学精密工程, 2008, 16(9): 1746-1751.
- LIN Ling, JIA Fang-rong, LI Gang, et al. Effect of pulsating magnetic fields on neuron transient outward potassium channel[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(9): 1746-1751.
- [7] 林安利, 贺建, 张跃, 等. 脉冲磁场技术在高矫顽力稀土永磁测量领域的应用[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(6): 782.
- LIN An-li, HE Jian, ZHANG Yue, et al. Application of pulsed field technique to magnetic property measurements of rare earth based hard magnetic materials with high coercivity[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(6): 782.
- [8] 许可, 赵玉涛, 陈刚, 等. 脉冲磁场下原位合成 $(Al_2O_3+Al_3Zr)_p/Al$ 复合材料的微观组织及力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(4): 607-611.
- XU Ke, ZHAO Yu-tao, CHEN Gang, et al. Microstructure and mechanical properties of  $(Al_2O_3+Al_3Zr)_p/Al$  composites in-situ synthesized under pulsed magnetic field[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(4): 607-611.
- [9] 高原文, 缙新科, 周又和. 脉冲磁场激励下铁磁梁式板动力响应特征研究[J]. 振动工程学报, 2005, 18(3): 314-317.
- GAO Yuan-wen, GOU Xin-ke, ZHOU You-he. Analysis on dynamic characteristics for ferromagnetic beam-plate under the transverse pulse magnetic fields[J]. Journal of Vibration Engineering, 2005, 18(3): 314-317.
- [10] 李晖, 朱忠良, 李霞, 等. 脉冲磁场对应激大鼠海马神经干细胞增殖的影响[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(10): 1149-1151.
- LI Hui, ZHU Zhong-liang, LI Xia, et al. Effect of pulsed current magnetic fields on neural stem cell proliferation in hippocampus of stressed rat[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(10): 1149-1151.
- [11] LU Dong-li, XU Chen. Magnetization switching in a small disk with shape anisotropy[J]. Chinese Physics Letters, 2010, 27(9): 203-206.
- [12] WANG Bin, YANG Yuan-sheng, ZHOU Ji-xue, et al. Microstructure refinement of AZ91D alloy solidified with pulsed magnetic field[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18(3): 536-540.
- [13] 高椿明, 陈志, 冯开明, 等. 中国ITER实验包层模块电磁安全分析初步[J]. 核聚变与等离子体物理, 2006, 28(3): 205-209.
- GAO Chun-ming, CHEN Zhi, FENG Kai-ming, et al. Electromagnetic safety analysis during major disruption[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2006, 28(3): 205-209.
- [14] 赵斌兴, 高椿明, 刘华东, 等. 基于ANSYS的中国ITER实验包层电磁分析[J]. 实验科学与技术, 2008, 6(1): 151-154.
- ZHAO Bin-xing, GAO Chun-ming, LIU Hua-dong, et al. Electromagnetic analysis of test blank module based on ANSYS[J]. Experiment Science & Technology, 2008, 6(1): 151-154.
- [15] 陈颜静, 冯开明, 高椿明, 等. 中国ITER氦冷固态实验包层模块电磁安全分析[J]. 核聚变与等离子体物理, 2008, 28(3): 228-232.
- CHEN Yan-jing, FENG Kai-ming, GAO Chun-ming, et al. Electromagnetic safety analysis on Chinese ITER HCSB-TBM design[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2008, 28(3): 228-232.
- [16] 高椿明, 秦臻, 陈颜静. ITER中国实验包层在等离子主破裂下的电磁耦合评估[J]. 电子科技大学学报, 2013, 42(5): 678-683.
- GAO Chun-ming, QIN Zhen, CHEN Yan-jing. Electromagnetic coupling evaluations on ITER Chinese TBM under plasma major disruptions[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2013, 42(5): 678-683.
- [17] 黄涛, 张信军, 曾江涛, 等. 小型方波脉冲磁场装置的研制[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(4): 827-830.
- HUANG Tao, ZHANG Xin-jun, ZENG Jiang-tao, et al. Design of miniature square-pulsed magnetic field generator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(4): 827-830.