



·脉冲功率技术·

## 铁基纳米晶磁芯的脉冲磁化特性测量 及其在磁开关中的应用\*

江进波<sup>1,2</sup>, 程廷强<sup>2</sup>, 黄国良<sup>3</sup>, 王佳栋<sup>2</sup>, 蔡宛辰<sup>2</sup>, 姚延东<sup>2</sup>

(1. 湖北省输电线路工程技术研究中心(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 3. 国网嘉兴供电公司, 浙江 嘉兴 314033)

**摘 要:** 磁开关是重复频率脉冲功率系统可选的工作性能优越的开关器件之一。目前磁开关的仿真模型是基于伏秒积分的宏观特性建立起来的纯电路模型, 未考虑磁芯饱和过程中磁芯特性的变化, 仿真难以准确预测磁开关负载上的预脉冲, 波形的前沿误差也较大。测试获得了快脉冲激励下的铁基纳米晶磁芯磁滞回线和初始磁化曲线, 利用磁芯磁滞回线的关键参数, 提取了脉冲激励下的磁芯 J-A 参数, 用于定义多物理场中磁开关模型的磁芯特性。针对磁开关脉冲压缩电路, 利用多物理场仿真软件 COMSOL 建立了磁脉冲压缩系统电路与磁开关电磁场的场路耦合仿真模型, 计算磁脉冲压缩电路的输出波形, 与实验结果对比, 预脉冲幅值误差为 2%, 峰值误差为 2%, 前沿误差为 5%, 证明了建立的场路耦合仿真模型的有效性和准确性。

**关键词:** 脉冲功率技术; 铁基纳米晶; 脉冲磁化特性; 磁脉冲压缩; 场路耦合方法

中图分类号: TN78

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.220304

## Pulse magnetic properties measurement of Fe-based nanocrystalline cores and its application in magnetic switches

Jiang Jinbo<sup>1,2</sup>, Cheng Tingqiang<sup>2</sup>, Huang Guoliang<sup>3</sup>, Wang Jiadong<sup>2</sup>, Cai Wanchen<sup>2</sup>, Yao Yandong<sup>2</sup>

(1. Hubei Provincial Engineering Research Center for Power Transmission Line (China Three Gorges University), Yichang 443002, China;  
2. College of Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;  
3. State Grid Jiaxing Power Supply Company, Jiaxing 314033, China)

**Abstract:** The magnetic switch is one of the switching devices with excellent performance that can be selected for the repetitive frequency pulse power system. At present, the simulation model of the magnetic switch is a pure circuit model established based on the macroscopic characteristics of the volt-second integral, without considering the change of the magnetic core characteristics during the core saturation process, it is difficult to accurately predict the pre-pulse on the magnetic switch load, and the front error of the waveform is also larger. In this paper, the hysteresis loop and initial magnetization curve of the Fe-based nanocrystalline magnetic core under fast pulse excitation are tested and obtained. Using the key parameters of the magnetic core hysteresis loop, the J-A parameter of the magnetic core under pulse excitation is extracted, which is used to define Magnetic core properties for a magnetic switch model in multi-physics field. For the magnetic switch pulse compression circuit, the field-circuit coupling simulation model was established by using the multi-physics simulation software COMSOL, and the output waveform was simulated. Compared with the experimental results, the pre-pulse amplitude error is 2%, the peak error is 2%, and the front error is 5%, which proves the validity and accuracy of the established field-circuit coupling simulation model.

**Key words:** pulsed power technology, Fe-based nanocrystalline, pulse magnetization curve, magnetic pulse compression, field-circuit coupling method

\* 收稿日期: 2022-09-27; 修订日期: 2023-01-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51707105); 国家重点实验室开放基金项目 (SKLIPR2008)

联系方式: 江进波, jinbojiang@163.com.

磁脉冲压缩技术最早于 1951 年提出,并应用于雷达系统。当时,由于磁芯磁滞损耗大和体积大,磁脉冲压缩器(MPC)中的磁开关(MS)效率低。随着高性能磁性材料的出现,高重频、大功率和高可靠性的磁开关得以实现,并开始被用作大功率闭合开关<sup>[1]</sup>。磁开关可以与气体火花开关配合提高开关的重复频率,磁开关与半导体开关配合减小开关损耗<sup>[2-3]</sup>。由于其高重复率、高稳定性和长寿命等优点<sup>[4]</sup>,在激光泵浦源<sup>[5]</sup>、污染处理<sup>[6]</sup>、材料表面改性<sup>[7]</sup>等领域有着非常广阔的应用前景。

目前基于 PSpice 的磁开关电路仿真模型能满足一般的工程实践需求,但精度不高,如文献 [8] 和文献 [9] 采用 PSpice 建立磁脉冲压缩网络得到的输出波形与实验测得波形相比,脉冲前沿的误差较大,而且仿真波形没有预脉冲。分析可知电路模型是基于磁开关伏秒积分的宏观特性建立起来的,忽略了磁芯饱和过程中磁芯特性的变化,致使仿真结果与实验结果一致性较差<sup>[10]</sup>。因此,本文提出了基于场路耦合方法的磁开关模型,可以精确预测磁开关的输出波形。场路耦合的关键是建立脉冲条件下的精确磁芯模型,脉冲功率系统中磁芯总是在较高的磁化速率下磁化,磁芯因涡流和磁黏滞性的作用产生涡流损耗和附加损耗。此时磁芯的磁化特性与静态磁化过程有较大区别,如果用静态磁化曲线来描述磁芯的脉冲激励磁化过程,磁滞回线形状差异较大,为此需要对磁芯在脉冲激励下进行测试<sup>[11-12]</sup>,获取磁芯脉冲磁化特性。

本文基于实验室现有的脉冲变压器型脉冲源,搭建了磁脉冲压缩系统实验平台,其中脉冲变压器输出电压幅值 100 kV,上升沿 5  $\mu$ s。通过测试磁开关的输出性能,将实验结果与仿真结果进行对比,验证设计方法的可行性和仿真模型预测的准确性。

## 1 脉冲激励下磁芯的磁化特性测试

### 1.1 磁芯测试系统

图 1 为脉冲激励下环形磁芯的动态测试电路,其中 T 为试验变压器,  $D_0$  为硅堆,  $R_0$  为保护电阻,  $C$  为储能电容, S 为放电控制开关,  $R_s$  为杂散电阻,  $L$  和  $L_m$  为缠绕在磁芯上的 4 匝绕组构成的非线性电感,  $M_c$  是封装系数  $\eta$  为 0.82、尺寸为外径 120 mm×内径 60 mm×高度 30 mm 的铁基纳米晶磁芯。分别测量储能电容  $C$  两端电压  $U_0$ ,  $L_m$  两端电压  $u_m(t)$  和流过  $L$  的电流  $i(t)$ 。通过改变储能电容  $C$  的电容值,调节试验变压器的输出电压,可以测得不同磁化速率下的脉冲磁滞回线。磁感应强度  $B$  和磁场强度  $H$  可分别表示为

$$B = \frac{\int_0^t u_m(t) dt}{\eta N_m S_m} \quad (1)$$

$$H = \frac{N_m i(t) \ln(r_o - r_i)}{2\pi (r_o - r_i)} \quad (2)$$

式中:  $N_m$  为线圈匝数;  $\eta$  为封装系数;  $r_i, r_o$  分别为内外半径;  $S_m$  为磁芯有效横截面积。

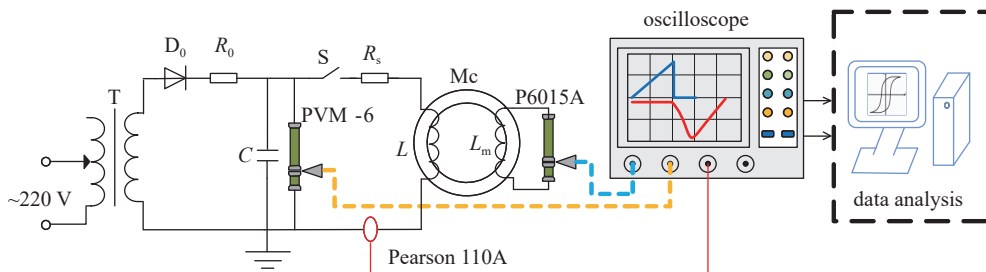


Fig. 1 Schematic diagram of magnetic core test system under pulse excitation

图 1 脉冲激励下磁芯测试系统示意图

### 1.2 测量结果及分析

当储能电容  $C=200$  nF、 $U_0=4.5$  kV 得到实测  $u_m(t)$  和  $i(t)$  的典型波形如图 2 所示。初始时刻的电压波形近似为平顶,磁芯以恒定速率磁化,可以表示为

$$\frac{dB}{dt} \approx \frac{\Delta B}{\Delta t} = \frac{U}{N_m S_m \eta} \quad (3)$$

式中:  $\Delta B$  为磁感应强度变化量;  $\Delta t$  为脉冲施加时间;  $U$  为初始电压平顶值。

图 2 中的  $t_1$  和  $t_2$  表示磁滞回线从  $+B_s$  到  $-B_s$  的时刻,等值频率定义为

$$f = \frac{1}{2(t_2 - t_1)} \quad (4)$$

根据式(1)、(2)编写 MATLAB 程序对测量得到的电脉冲参数进行处理得到磁滞回线如图 3 所示。

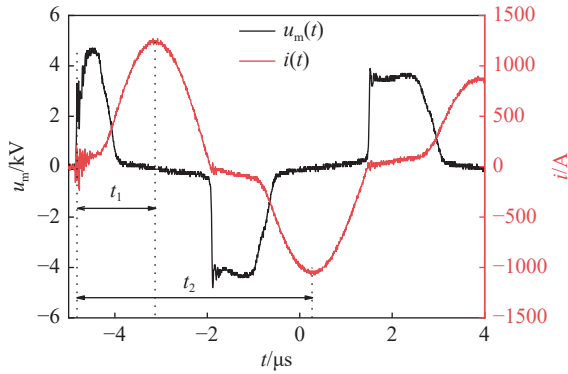


Fig. 2 Typical waveforms of  $u_m(t)$  and  $i(t)$

图 2 实测  $u_m(t)$  和  $i(t)$  的典型波形

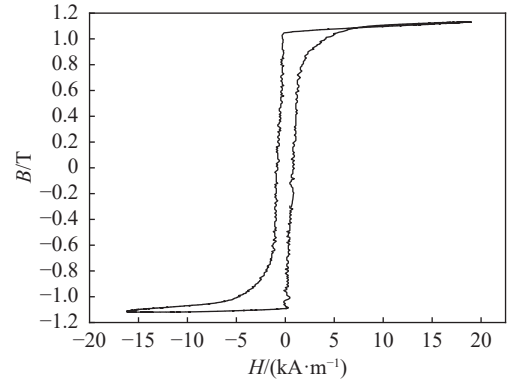


Fig. 3 Hysteresis curve of Fe-based nanocrystalline cores

图 3 铁基纳米晶磁芯磁滞回线

通过改变储能电容的值,在保证磁芯的伏秒积一定时,调节试验变压器的输出电压,得到磁芯不同磁化速率如表 1 所示。通过滤波算法平滑得到不同等值频率的磁芯脉冲磁滞回线如图 4 所示。分析可知当外加磁场随时间的变化速度越来越快时,即频率不断升高时,磁芯材料的反应速度相对于外部磁场将变得更加迟缓,在磁滞回线上表现为回线的形状发生水平方向加宽的变化,回线所包围的面积不断增大。

表 1 磁芯测试参数

Table 1 Magnetic core test parameters

$C/nF$	$U_0/kV$	$(dB/dt)/(T \cdot \mu s^{-1})$	$f/kHz$
2000	1.0	0.3	32
200	4.5	1.5	145
100	6.0	2.0	202
70	7.2	2.4	251
50	9.8	3.3	318

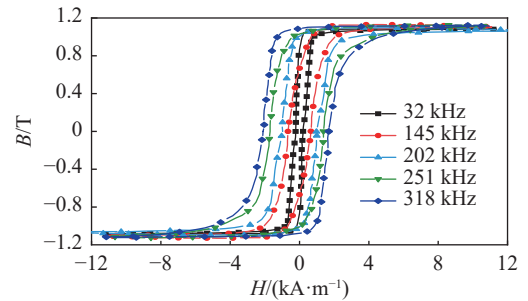


Fig. 4 Pulse hysteresis loops at different equivalent frequency

图 4 不同等值频率下的脉冲磁滞回线

磁芯在  $0.3 \sim 3.3 T/\mu s$  磁化速率下得到的初始磁化曲线如图 5 所示。随着磁化速率的增加,由于磁黏滞性和涡流的影响,磁化曲线缓慢上升。由式(5)得到铁基纳米晶磁芯的相对磁导率如图 6 所示。

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H} \quad (5)$$

式中:  $\mu_0$  为真空磁导率;  $\mu_r$  为磁芯的相对磁导率。

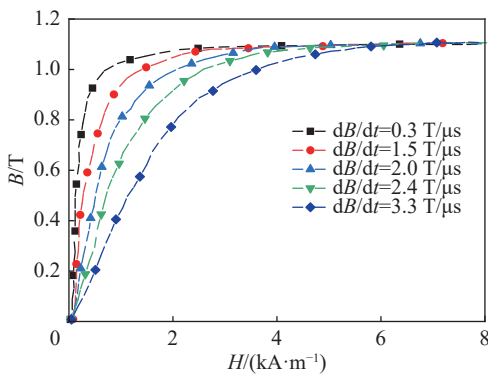


Fig. 5 Initial magnetization  $B-H$  curves

图 5  $B-H$  曲线的初始磁化曲线

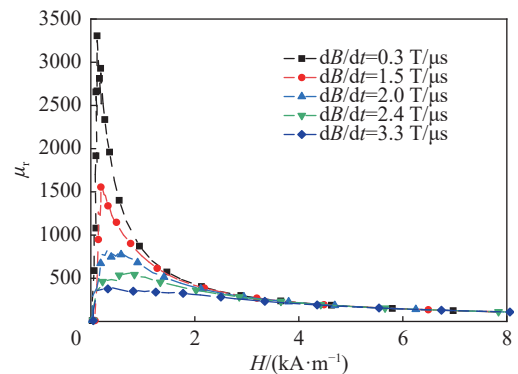


Fig. 6 Relative permeability curves under different  $dB/dt$

图 6 不同  $dB/dt$  下的相对磁导率曲线

## 2 磁脉冲压缩器及其优化设计

### 2.1 磁脉冲压缩器的基本原理

磁开关的工作原理是利用磁性材料的饱和现象来实现电路的通断<sup>[13]</sup>。磁脉冲压缩电路如图7所示,初始时刻开关S闭合,由电容 $C_{n-1}$ 通过电感 $L_{n-1}$ 向电容 $C_n$ 谐振充电。在这个过程中 $MS_n$ 磁芯工作点进入非饱和区域,磁芯相对磁导率较大,磁开关感抗很大,电路相当于断开。当 $C_n$ 上的电压达到峰值时,磁芯进入正向饱和点, $MS_n$ 绕组感抗减小,电路相当于导通。 $C_n$ 通过 $MS_n$ 向 $C_{n+1}$ 放电,完成磁脉冲压缩过程。

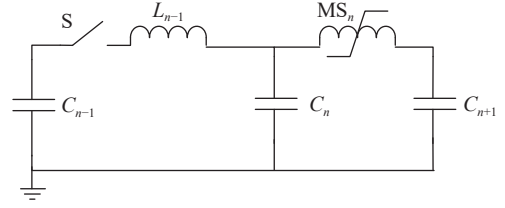


Fig. 7 Magnetic pulse compression circuit

图7 磁脉冲压缩电路

### 2.2 磁脉冲压缩器的设计

磁脉冲压缩器的设计首先需要选择磁开关的磁芯材料,然后确定磁芯尺寸和绕组匝数,最后确定脉冲电容器的大小<sup>[14]</sup>。

(1)磁芯材料的选择。适合做磁开关的材料要求具有高初始磁导率、高矩形比和良好的高频响应等特点<sup>[15]</sup>。综合对比各种磁性材料的性能,选择铁基纳米晶作为磁芯材料。根据对铁基纳米晶磁芯的脉冲磁化特性测试结果,其不饱和相对磁导率 $\mu_{\text{usat}}$ 为2800,饱和相对磁导率 $\mu_{\text{sat}}$ 为3。

(2)磁芯尺寸与绕组匝数。磁芯有效截面积与绕组匝数应满足环形磁芯的伏秒积平衡方程

$$\int_0^{t_0} V_0 dt = N_m S_m \Delta B \quad (6)$$

式中: $t_0$ 为脉冲施加时间; $V_0$ 为施加电压。本文选择8个外径为120 mm、内径为60 mm、高度为30 mm的铁基纳米晶磁芯叠加在一起构成磁开关的磁芯,有效截面积为60 cm<sup>2</sup>,绕组匝数为25匝。

(3)脉冲电容器的值。脉冲变压器输出的脉冲能量为2.6 J,磁开关的峰值电压为100 kV,根据式(7)得到电容器的值为520 pF,实际选用500 pF的脉冲电容器。

$$C = \frac{2E}{V^2} \quad (7)$$

(4)磁芯的复位。为了获得最大的磁感应增量 $\Delta B$ ,每次测量前对磁开关施加反向直流去磁,去磁电流 $I_{\text{rs}}$ 需要满足

$$I_{\text{rs}} > (1 \sim 1.5) \frac{H_c l_c}{N_m} \quad (8)$$

式中: $H_c$ 为磁芯矫顽力; $l_c$ 为磁芯有效磁路长度; $I_{\text{rs}}$ 为去磁电流大小。

## 3 场路耦合仿真分析

### 3.1 铁基纳米晶磁芯模型的建立

磁开关模型中关键的是建立精确的非线性磁芯模型。本文采用J-A模型来定义仿真中的铁基纳米晶材料。J-A模型是基于物理基础考虑铁磁材料磁畴壁运动的模型<sup>[16]</sup>,用5个参数来模拟磁性材料非线性的磁滞特性。

J-A模型中,磁化强度 $M$ 可以表示为可逆磁化强度 $M_{\text{rev}}$ 和不可逆磁化强度 $M_{\text{irr}}$ 的线性叠加<sup>[17]</sup>,即

$$M = M_{\text{irr}} + M_{\text{rev}} \quad (9)$$

$$M_{\text{rev}} = c(M_{\text{an}} - M_{\text{irr}}) \quad (10)$$

式中: $c$ 为磁畴壁弯曲常数; $M_{\text{an}}$ 为非磁滞磁化强度,可用Langevin方程表示为

$$M_{\text{an}} = M_s \left[ \coth \left( \frac{H + \alpha M_{\text{an}}}{a} \right) - \left( \frac{a}{H + \alpha M_{\text{an}}} \right) \right] \quad (11)$$

式中: $M_s$ 为饱和磁化强度; $a$ 为形状参数; $\alpha$ 为域间耦合参数。

根据能量守恒原理可得

$$\mu_0 \int M dH_c = \mu_0 \int M_{\text{an}} dH_c - \mu_0 k \delta \int \frac{dM_{\text{irr}}}{dH_c} dH_c \quad (12)$$

最终可以简化得到

$$M = M_{an} - \delta k \frac{dM_{irr}}{dH_e} \quad (13)$$

式中： $\delta$ 为方向系数； $k$ 为磁滞的牵制系数，表征牵制点的影响与能量损耗之间的关系。

根据上述方程得到的J-A模型方程为

$$\frac{dM}{dH} = \frac{(M_{an} - M) + c\delta k(dM_{an}/dH)}{\delta k - \alpha(1-c)(M_{an} - M)} \quad (14)$$

通过公式(9)~(14)编写J-A模型参数辨识程序<sup>[18]</sup>，计算与实验测得的磁滞回线如图8所示。

### 3.2 场路耦合方法

在COMSOL仿真软件中，构建磁开关的电磁场模型并耦合其外电路建立场路耦合仿真模型。磁场模块的线圈激励选择为“电路(电流)”节点，表示线圈的励磁由外电路提供。通过电路模块中的“外部I VS. U”节点将磁开关线圈与对应的电路相连接，即对磁场模块下的线圈域电压进行测量并作为电路中两个节点之间的电压源，且两节点间的电流作为电流源耦合回磁场模块。

场路耦合求解时，磁场模块有以下边界条件及初始条件

$$\mathbf{m} \times \mathbf{A} = 0 \quad (15)$$

$$\mathbf{A}(t_0) = 0 \quad (16)$$

$$\mathbf{M}(t_0) = 0 \quad (17)$$

式中： $\mathbf{A}$ 为矢量磁势。式(15)表示在变压器油域的边界 $\mathbf{m}$ 处，矢量磁势 $\mathbf{A}$ 的切向分量为0。式(16)表示在场域中， $t_0$ 时刻的矢量磁势为0。式(17)表示在场域中， $t_0$ 时刻的磁化强度 $\mathbf{M}$ 为0。

电路模块的初始条件为 $U_0=1.7\text{ kV}$ 。

在电路模块下，以外电路元件的电流和电压为求解变量，控制方程为基尔霍夫定律。在磁场模块下，以矢量磁势 $\mathbf{A}$ 、电势 $\varphi$ 为求解变量，控制方程为麦克斯韦方程组。

瞬态磁场分析过程中有如下本构关系

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (18)$$

由Maxwell方程组，可将安培定律写为

$$\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \mathbf{A} - \mathbf{M}) - \sigma \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) + \sigma \nabla \varphi = \mathbf{J}_e \quad (19)$$

取式(19)的散度获得连续性方程

$$\nabla \cdot \left( -\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \sigma \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) - \sigma \nabla \varphi + \mathbf{J}_e \right) = 0 \quad (20)$$

式中： $\mathbf{J}_e$ 为外部电流密度； $\mathbf{v}$ 为导体移动速度； $\sigma$ 为电导率。式(19)、(20)即为矢量磁势 $\mathbf{A}$ 和电势 $\varphi$ 的方程组。

各方程中 $\mathbf{J}_e$ 表示为

$$\mathbf{J}_e = \frac{N_m I_{cir}}{S_d} \mathbf{e}_{coil} \quad (21)$$

式中： $I_{cir}$ 关于于电路，为线圈对应回路的电流； $S_d$ 为导线截面积； $\mathbf{e}_{coil}$ 为单位矢量，代表线圈电流方向。

### 3.3 仿真结果与分析

磁开关的电路原理图及其结构图分别如图9(a)和图9(b)所示。利用场路耦合仿真模型计算得到脉冲电容

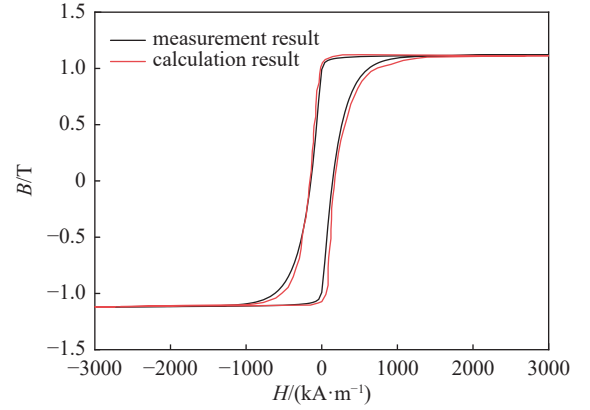


Fig. 8 Hysteresis loop fitting diagram

图8 磁滞回线拟合图

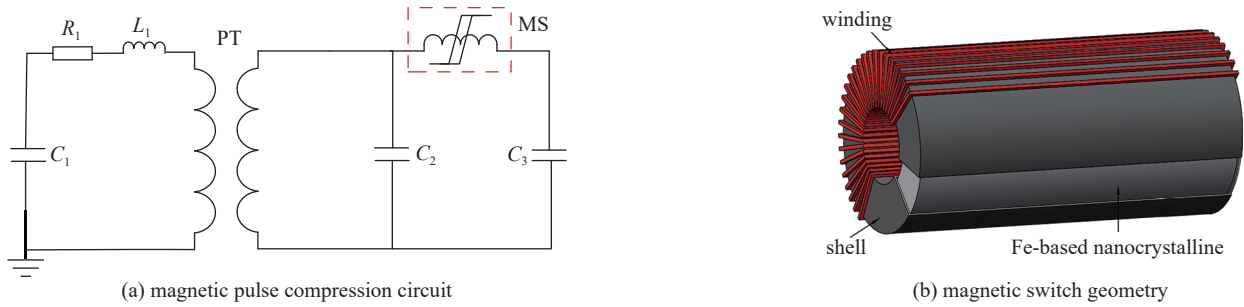


Fig. 9 Schematic circuit diagram and structure diagram of magnetic switch

图 9 磁开关原理电路图及结构图

器  $C_2$  和负载电容器  $C_3$  上的电压波形如图 10 所示, 在  $5.2 \mu\text{s}$  时,  $C_2$  电压达到  $96.5 \text{ kV}$ , 磁开关 MS 饱和导通,  $C_2$  开始向  $C_3$  放电, 在  $5.97 \mu\text{s}$  时  $C_3$  电压达到峰值  $91.1 \text{ kV}$ 。仿真结果表明, 电容  $C_1$  的充放电时间与设计的 MS 导通时间相同。通过单级磁开关对脉冲进行压缩后, 在  $C_3$  上输出一个前沿约为  $0.62 \mu\text{s}$ 、幅值约为  $91.1 \text{ kV}$  的高压窄脉冲。其中预脉冲电压约为  $8 \text{ kV}$ , 产生的原因是由于 MS 不是理想开关, 磁开关未饱和时,  $C_2$ -MS- $C_3$  回路存在漏电流且随着磁芯的逐渐饱和漏电流逐渐增大, 负载电容  $C_3$  上的电压逐渐增加形成预脉冲。

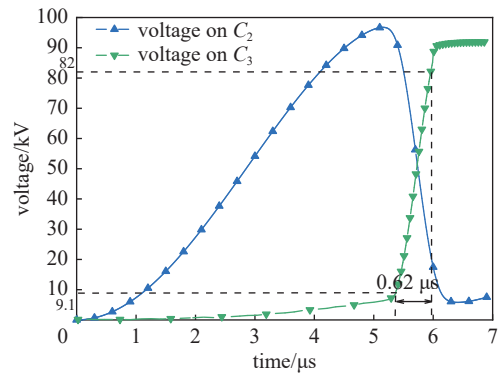


Fig. 10 Field-circuit coupling simulation waveform

图 10 场路耦合仿真波形

## 4 磁开关的实验测试

### 4.1 实验系统介绍

图 11 为磁脉冲压缩系统测试的电路图, 工频升压变压器通过整流硅堆  $D_1$  和限流保护电阻  $R_1$  给初级储能电容  $C_1$  充电, 充电过程中因硅堆  $D_2$  续流, 脉冲变压器的次级无电压输出。当  $C_1$  充满电后, 触发可控硅  $S_1$  导通,  $C_1$  与可控硅  $S_1$  和脉冲变压器的初级构成放电回路, 脉冲变压器 PT 的脉冲电容器  $C_2$  上感应出高压脉冲。  $R_3$  和  $R_4$  为电阻分压器测量脉冲电容器  $C_2$  上的电压, NorthStar PVM-6 测量脉冲电容器  $C_3$  上的电压。测量的脉冲电压信号通过电缆连接至示波器泰克 DPO4054, 带宽为  $1 \text{ GHz}$ , 采样速率为  $5 \text{ G/s}$ 。脉冲变压器输出电压达到近  $100 \text{ kV}$ , 因此脉冲变压器 PT、脉冲电容器  $C_2$  和  $C_3$ , 以及测量用的电阻分压器均安装在不锈钢油箱中, 变压器油为 25# 变压器油。电容器  $C_1$ , 可控硅  $S_1$ , 工频升压变压器 T 以及其他部件安装在控制箱内, 控制箱紧靠油箱布置, 减小初级回路中的电感。

### 4.2 实验结果与仿真结果对比分析

磁脉冲压缩电路输出波形如图 12 所示。可以看出, 脉冲电容器  $C_2$  和  $C_3$  上的电压分别为  $96 \text{ kV}$  和  $89 \text{ kV}$ , 电压传递效率约为  $92.7\%$ 。脉冲上升沿时间由  $5.2 \mu\text{s}$  被压缩到  $0.59 \mu\text{s}$ , 磁开关压缩比为  $8.8$ 。采用 PSpice 建立的纯电路模型, 其仿真波形与实验波形相比, 仿真波形不能预测预脉冲电压, 峰值误差为  $5\%$ , 前沿误差为  $17\%$ 。采用 COMSOL 建立的场路耦合模型, 其仿真波形与实验波形相比, 预脉冲电压误差为  $2\%$ , 峰值误差为  $2\%$ , 前沿误差

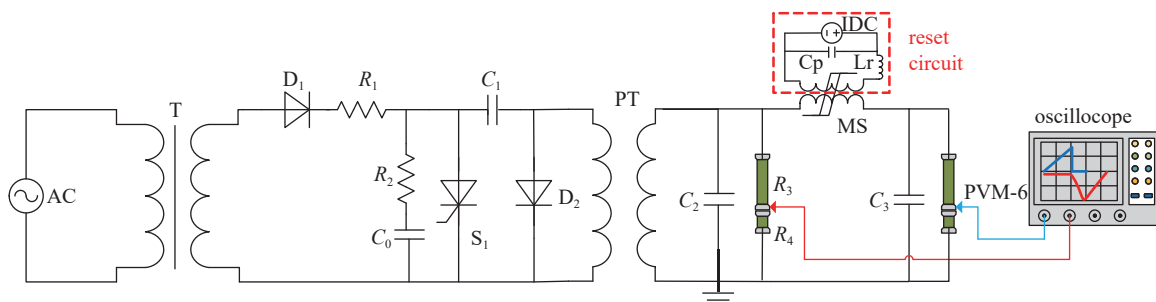


Fig. 11 Magnetic pulse compression system test circuit diagram

图 11 磁脉冲压缩系统测试电路图

为5%。场路耦合仿真与实验不符主要原因有：(1)磁芯的J-A模型还不够精确；(2)场路耦合模型中绕组进行了简化等效处理。以上因素都会影响到输出脉冲的波形参数，但仿真得到的波形能满足对输出波形预测及相关设计的要求。

## 5 结论

本文搭建了磁芯快脉冲测试平台对铁基纳米晶的重要参数进行测试，通过参数识别算法提取脉冲激励下铁基纳米晶磁芯的J-A模型参数。采用多物理场仿真软件COMSOL建立了磁脉冲压缩系统的电路与磁开关的电磁场场路耦合模型，预测磁脉冲压缩系统的输出波形，与实验对比，预脉冲幅值误差为2%，峰值误差为2%，前沿误差为5%，比纯电路模型模拟的结果一致性好。采用场路耦合方法来预测系统输出波形可以为磁性元件的设计及相关性能参数计算提供借鉴。

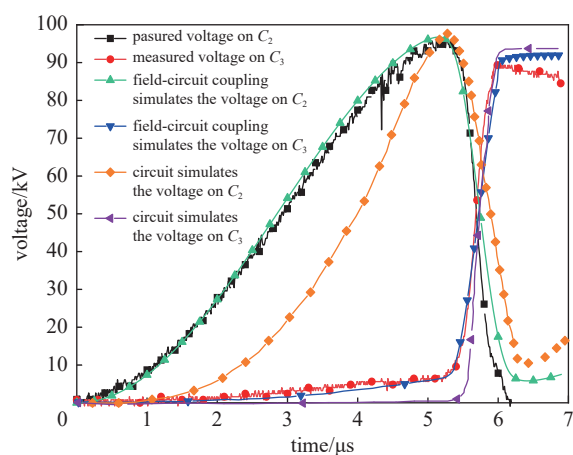


Fig. 12 Comparison of experimental waveforms and simulation waveforms

图 12 实验波形与仿真波形对比

## 参考文献：

- [1] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005. (Liu Xisan. High pulsed power technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005)
- [2] 江伟华. 高重复频率脉冲功率技术及其在应用: (3)磁开关的作用[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(6): 1269-1275. (Jiang Weihua. Repetition rate pulsed power technology and its applications: (III) the role of magnetic switches[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(6): 1269-1275)
- [3] 刘刚, 李黎, 林福昌, 等. 磁开关在强脉冲能源模块中的设计和应用[J]. 高电压技术, 2011, 37(12): 2945-2951. (Liu Gang, Li Li, Lin Fuchang, et al. Design and implementation of magnetic switch for pulsed power conditioning modules[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(12): 2945-2951)
- [4] 李嵩, 钱宝良, 杨汉武, 等. 固态脉冲功率驱动源主磁开关的特性[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(4): 863-867. (Li Song, Qian Baoliang, Yang Hanwu, et al. Characteristics of magnetic switch used as main switch of solid-state accelerator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(4): 863-867)
- [5] 邱爱慈. 脉冲功率技术应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2016. (Qiu Aici. Pulse power technology application[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2016)
- [6] Choi J. Introduction of the magnetic pulse compressor (MPC)—fundamental review and practical application[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2010, 5(3): 484-492.
- [7] 邵涛, 章程, 王瑞雪, 等. 大气压脉冲气体放电与等离子体应用[J]. 高电压技术, 2016, 42(3): 685-705. (Shao Tao, Zhang Cheng, Wang Ruixue, et al. Atmospheric-pressure pulsed gas discharge and pulsed plasma application[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(3): 685-705)
- [8] 米彦, 万佳伦, 卞昌浩, 等. 基于磁脉冲压缩的DBD高频双极性纳秒脉冲发生器的设计及其放电特性[J]. 电工技术学报, 2017, 32(24): 244-256. (Mi Yan, Wan Jialun, Bian Changhao, et al. Design of DBD high-frequency bipolar nanosecond pulse generator based on magnetic pulse compression system and its discharging characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(24): 244-256)
- [9] 张东东, 严萍, 王珏. 磁脉冲压缩系统的仿真研究[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(3): 497-500. (Zhang Dongdong, Yan Ping, Wang Jue. Simulation on a magnetic pulse compression system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(3): 497-500)
- [10] 时承瑜. 高功率磁开关同步运行技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019: 9-13. (Shi Chengyu. Study on the synchronization of high power magnetic switches[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019: 9-13)
- [11] 韩毅博, 刘毅, 刘思维, 等. 环形磁芯脉冲磁化特性测量分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4239-4246. (Han Yibo, Liu Yi, Liu Siwei, et al. Study on the measurement of pulse magnetization characteristics of toroidal magnetic cores[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4239-4246)
- [12] 方旭, 丁臻捷, 浩庆松, 等. 磁开关磁芯动态参数测试及分析[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29: 105001. (Fang Xu, Ding Zhenjie, Hao Qingsong, et al. Dynamic parameter test and analysis of magnetic switch core[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29: 105001)
- [13] 李嵩. 高功率磁脉冲压缩系统及其在长脉冲驱动源中的应用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015: 44-45. (Li Song. High-power magnetic pulse compressor and its application in the long pulse generators[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015: 44-45)
- [14] 杨实, 钟辉煌, 杨汉武, 等. 铁基非晶磁环磁开关设计[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(5): 1172-1176. (Yang Shi, Zhong Huihuang, Yang Hanwu, et al. Design of magnetic switch based on metglas magnetic core[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(5): 1172-1176)
- [15] 杨银辉, 郑义军, 朱子任, 等. 脉冲气体激光器用固态高压开关的研制[J]. 红外与激光工程, 2020, 49: 20200045. (Yang Yinwei, Zheng Yijun, Zhu Ziren, et al. Development of solid-state high voltage switch for pulsed gas laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49: 20200045)
- [16] Jiles D C, Atherton D L. Theory of ferromagnetic hysteresis (invited)[J]. Journal of Applied Physics, 1984, 55(6): 2115-2120.
- [17] 赵越, 李琳, 刘任, 等. 基于损耗统计理论的动态J-A磁滞模型[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(5): 90-96. (Zhao Yue, Li Lin, Liu Ren, et al. New dynamic hysteresis J-A model based on statistical theory of losses[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(5): 90-96)
- [18] Wilson P R, Ross J N, Brown A D. Optimizing the Jiles-Atherton model of hysteresis by a genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37(2): 989-993.