

基于场路耦合的磁开关优化设计方法研究

江进波^{1,2}, 赵鑫¹, 程廷强³, 黄国良⁴, 徐林¹, 陈锐¹

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学湖北省输电线路工程技术研究中心, 湖北 宜昌 443002; 3. 国网重庆市电力公司合川供电分公司, 重庆 401520; 4. 国网嘉兴市供电公司, 浙江 嘉兴 314033)

摘要: 磁开关具有高重频、长寿命和高平均功率等优点, 能够实现脉冲前沿的压缩, 已广泛应用于脉冲功率系统。目前磁开关的设计是采用伏秒积分方程确定磁芯结构体积以及绕组的匝数, 设计时的精度不高。通过测量铁基纳米晶磁芯的脉冲磁化特性, 据此使用多物理场仿真软件 Comsol 建立了考虑磁芯饱和过程的磁开关场路耦合模型, 通过 100 kV 级的高压脉冲压缩实验, 验证了仿真模型的准确性与有效性。利用磁开关仿真模型分析了磁芯的饱和时间以及杂散参数对磁开关输出波形的影响, 完成了磁芯饱和时间以及减小磁开关杂散参数的优化设计。采用的场路耦合仿真优化设计方法为磁开关等含磁芯脉冲功率元件的优化设计提供了参考。

关键词: 磁开关; 脉冲磁化特性; 磁芯饱和; 场路耦合

Research on the Optimization Design Method of Magnetic Switch Based on Field-circuit Coupling

JIANG Jinbo^{1,2}, ZHAO Xin¹, CHENG Tingqiang³, HUANG Guoliang⁴, XU Lin¹, CHEN Rui¹

(1. China Three Gorges University, College of Engineering and New Energy, Yichang Hubei 443002, China; 2. Hubei Provincial Engineering Research Center for Power Transmission Line, Yichang Hubei 443002, China; 3. Chongqing Power Supply Company State Grid Hechuan Power Supply Branch, Chongqing 401520, China; 4. Jiaying Power Supply Company State Grid, Zhejiang Jiaying 314033, China)

Abstract: The magnetic switch has been widely applied in pulse power system. It enables the pulse front to be compressed and has the advantages of high repetition frequency, long lifetime and high average power. At present, the design adopts the volt-second integral to determine the size of the magnetic core structure and the number of turns of the winding, which is not designed with high accuracy. Based on the measured pulse magnetic properties of the Fe-based nanocrystalline core, a magnetic switch field-circuit coupling model which considers the saturation process of the core is established in the multi-physics simulation software Comsol. The preciseness and effectiveness of the simulation model are verified by 100 kV high voltage pulse compression experiment. Then the simulation model is utilized to analyze the influence of the saturation time and stray parameters of the magnetic core on its output waveform, and the optimum design of them is completed. The field-coupling simulation optimization design method used in this paper provides a reference for the optimal design of core-containing pulsed power components such as magnetic switches.

Key words: magnetic switch; pulse magnetic properties; magnetic core saturation; field-circuit coupling

0 引言

脉冲功率技术的实质是将脉冲能量在时间尺度上进行压缩, 以获得在极短时间内的高峰值功率输出^[1-2]。开关是实现能量压缩的核心器件之一, 决定了脉冲功率装置的输出特性。近年来, 随着脉冲功率源向着小型化, 高重复频率运行等方面的发展, 全固态开关在脉冲功率领域得到了广泛的研究。磁开关的稳定性高、寿命长、功率容量大, 能够得到高重复频率、高平均功率、窄脉宽以及陡前沿的脉冲, 在高功率脉冲驱动源中已有广泛的应用, 磁开关性能的优化设计具有很好的研究价值^[3-6]。

磁开关工作性能较为稳定, 能够较为容易地获得

近似预期的输出波形^[7], 其中磁芯的体积是一个重要的参数, 对磁开关的整体性能、损耗有显著的影响。文[8]给出了在系统总的压缩比一定的情况下, 系统铁心总体积最小时, 磁开关串联级数的最佳值, 减少了系统中铁心材料的总体积, 但该方法不适用于串联级数较少的情况, 同时未考虑到系统中单个磁芯的尺寸。文[9]根据法拉第定律推导出伏秒积分方程, 据此来计算磁芯的有效截面积与绕组匝数, 并提到由于磁芯饱和后的磁开关电感较小, 在设计中不能忽略引线电感等其他杂散电感。该方法可以满足一般的工程需求, 但在设计过程中没有考虑对磁芯截面积的优化, 同时

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51707105); 强脉冲辐射环境模拟与效应全国实验室专项经费资助项目(SKLIPR2008). Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51707105), National Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect (SKLIPR2008).

缺少对杂散参数的具体研究，设计精度不够理想。

针对上述问题，使用 Comsol 仿真软件建立了磁开关场路耦合模型，并通过实验验证了其准确性与有效性。基于该仿真模型对饱和时间、截面积大小以及杂散参数等影响磁开关体积与压缩特性的因素进行深入研究。探究了磁开关体积与饱和时间的关系，分析了电阻、电感以及电容等杂散参数对磁脉冲压缩器输出特性的影响，提出一种磁开关场路耦合的优化设计方法。

1 磁开关的理论分析

1.1 磁开关的工作原理

磁开关(magnetic switch, MS)实质上是一种带磁芯的可饱和电感^[10-11]，磁芯未饱和时电感量较大，电路中仅有微小的漏电流，处于关断状态，当磁芯饱和后电感量锐减，磁开关中有大电流流过，处于开通状态。基于磁开关的磁脉冲压缩电路见图 1，电容器 C_1 、开关 S、电感 L 、电容 C_2 为磁开关前级的脉冲源等效电路，其中 C_1 为脉冲变压器或 Marx 发生器放电时的等效电容， L 为各器件电感与回路杂散电感之和。开关 S 闭合后，电容 C_1 向电容 C_2 放电，随着 C_2 电压的升高，MS 的励磁电流逐渐增大，磁芯逐渐饱和，电感量逐渐减小。当 C_2 电压达到峰值时，MS 中磁芯饱和，电感量锐减， C_2 通过 MS 向负载电容 C_3 放电，由于 C_2 、MS、 C_3 回路中的电感量远小于前级脉冲源中的电感 L ，电容 C_3 上的脉冲前沿相比于 C_2 上的脉冲前沿更小，实现了磁脉冲的压缩过程。磁脉冲压缩单元谐振电路见图 2。

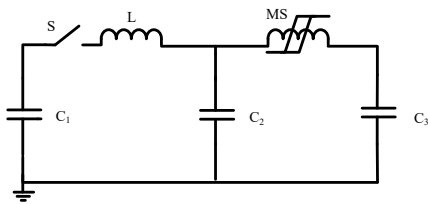


图 1 磁脉冲压缩电路

Fig. 1 Magnetic pulse compression circuit

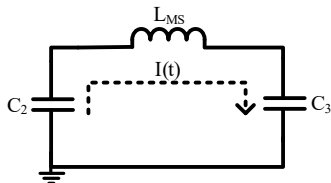


图 2 磁脉冲压缩单元谐振电路

Fig. 2 Magnetic pulse compression unit resonant circuit

磁脉冲压缩电路中电容的充电过程，可看作是 $C-L-C$ 电路的谐振过程。对图 1 中电容 C_2 、磁开关 MS 与电容 C_3 构成的磁脉冲压缩单元回路进行研究，设电容 C_2 的初始电压为 V_0 ，回路电流为 $I(t)$ ，谐振频

率为 ω ，磁开关饱和之后的电感为 L_{MS} ，列写 KVL 方程

$$V_0 - \frac{1}{C_2} \int I(t) dt = L_{MS} \frac{dI(t)}{dt} + \frac{1}{C_3} \int I(t) dt \quad (1)$$

得到回路电流为

$$I(t) = V_0 \left(\frac{C}{L_{MS}} \right)^{\frac{1}{2}} \sin \omega t \quad (2)$$

式(2)中：等效电容 $C = \frac{C_2 C_3}{C_2 + C_3}$ ； $\omega = \left(\frac{1}{CL_{MS}} \right)^{\frac{1}{2}}$ 。电

容 C_2 与 C_3 两端的电压分别为：

$$V_{C_2}(t) = V_0 \left(1 - \frac{C_3}{C_2 + C_3} (1 - \cos \omega t) \right) \quad (3)$$

$$V_{C_3}(t) = V_0 \frac{C_3}{C_2 + C_3} (1 - \cos \omega t) \quad (4)$$

电容 C_3 上的功率和能量为：

$$P(t) = I(t) V_{C_3}(t) = A \sin \omega t (1 - \cos \omega t) \quad (5)$$

$$E(t) = \int_0^t P(\tau) d\tau = \frac{A}{\omega} (1 - \cos(\omega t)) - \frac{1}{2} \sin^2(\omega t) \quad 0 < t < \frac{T}{2} \quad (6)$$

式(5)、(6)中： $A = V_0^2 \frac{C_2}{C_2 + C_3} \sqrt{\frac{C}{L_{MS}}}$ ；周期

$$T = 2\pi \sqrt{CL_{MS}}。$$

根据式(5)、(6)对脉冲压缩过程中电容 C_3 的功率、能量及其能量传递速率进行分析。在放电过程中，功率先增大后减小，在大约三分之二个周期时达到最大值；能量呈非线性增加趋势，放电的起始时刻与临近结束时刻的时间段内能量增加较慢，中间部分增加较快，当放电时间约为磁芯饱和时间的二分之一时，能量上升速率最大。经过上述分析可知，对磁芯饱和时间进行合理调控，能减小磁开关的体积和重量，提高磁开关的工作性能。后续将通过仿真模拟来进一步研究磁芯饱和时间与磁开关体积的关系。

1.2 磁开关的杂散参数

在磁脉冲压缩系统中，磁开关等效电感与其对应的两级电容构成 $C-L-C$ 谐振回路可以实现能量传递^[12-14]，在理想情况下输出脉冲由磁开关的饱和电感决定。但在实际情况中，系统中会存在杂散电阻、杂散电感和杂散电容，见图 3。由于磁开关的饱和电感非

常小，这些杂散参数的存在会限制能量的传输时间，降低能量的传递效率。因此，对磁脉冲压缩系统的中杂散参数进行优化设计具有重要的实际意义。

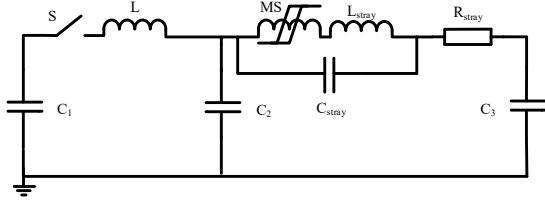


图3 磁开关杂散参数等效电路图

Fig. 3 Magnetic switch circuit diagram with stray parameters

杂散电阻主要由接线电阻与磁开关绕组的内阻构成。绕组的表面电阻会随工作频率的升高而增大，从而引起损耗增大。磁开关绕组的能量损耗还会造成磁开关磁芯局部温度升高，引起磁芯磁滞特性发生变化。磁开关绕组的杂散电阻可以表示为

$$R_{\text{stray}} = \frac{\rho l}{\pi[r^2 - (r - \delta)^2]} \quad (7)$$

式(7)中： ρ 为绕组导线电阻率； l 为绕组长度； r 为绕组导体截面半径； δ 为趋肤深度。在实际设计过程中，可以选择电阻率低，截面半径大的绕组导线，以减小磁开关杂散电阻。

磁开关绕组可以等效为非线性电感，当磁芯由不饱和状态切换到饱和状态时，等效电感值会迅速变小。由于系统通过 C - L - C 谐振传递能量，杂散电感的存在会增加磁脉冲压缩电路的谐振时间，导致磁芯饱和时间有一定延迟，对磁脉冲压缩系统的输出脉冲产生较大影响。杂散电感可以表示为

$$L_{\text{stray}} = 0.2l \left(\ln\left(\frac{4l}{d}\right) - 0.75 \right) \quad (8)$$

式(8)中： l 为导线的长度； d 为绕组导体的截面直径。设计中可以通过减小磁开关绕组的磁路长度，从而减少磁开关的杂散电感。

环形结构的磁开关存在匝间电容和匝间屏蔽电容两种杂散电容。实际设计中，尽量使磁开关与导线之间的距离足够小，可以使匝间屏蔽电容忽略不计。磁开关杂散电容会引起回路中的时间常数增加，从而对磁脉冲压缩系统输出波形产生影响。杂散电容可以表示为

$$C_{\text{stray}} = \frac{\pi^2 D \epsilon_0}{\ln(p/2r + \sqrt{(p/2r)^2 - 1})} \quad (9)$$

式(9)中： D 为匝径； p 为绕组节距； r 为导线半径； ϵ_0 为相对介电常数。绕组匝数越多，匝间电容越大，从而对输出波形影响越大。可以通过综合考虑绕组间距和绕组匝数，以减小磁开关的杂散电容。

后文将通过仿真输出波形具体分析杂散参数对磁开关工作特性的影响，实现对磁开关进行优化设计。

2 仿真模型建立

通过实验测量铁基纳米晶磁芯的脉冲磁化特性，得到磁滞回线和初始磁化曲线，从中提取出脉冲激励下的磁芯 J-A 参数见表 1，用于定义多物理场中磁开关模型的磁芯特性^[15]。利用多物理场仿真软件 Comsol 建立磁脉冲压缩电路的场路耦合仿真模型见图 4、5。磁场与电场通过磁开关绕组线圈进行耦合，由外电路对线圈提供励磁。通过电路模块中的“外部 IVS.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^[16]。

表 1 磁芯 J-A 参数

Table 1 The J-A parameters of the magnetic core

参数名称	值
饱和磁化强度/(A·m ⁻¹)	790 000.00
域壁密度/(A·m ⁻¹)	4.83
钉扎损耗/(A·m ⁻¹)	20.10
磁化可逆性	0.01
域间耦合	9.60×10 ⁻⁶

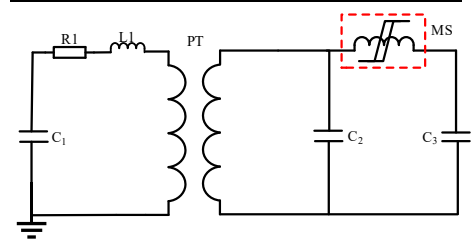


图4 磁脉冲压缩电路模型

Fig. 4 Magnetic pulse compression circuit model

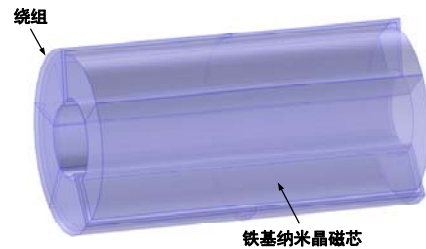


图5 磁开关电磁场模型

Fig. 5 Magnetic switch electromagnetic field model

图 4 中初级储能电容 C_1 为 6 μF ，初始电压 1.7 kV；脉冲变压器(pulse transformer, PT)的初级回路中电阻 R_1 为 0.02 Ω ，电感 L_1 为 2.5 μH ，变压器原边电感为 5 μH ，副边电感为 18 000 μH ，耦合系数为 0.9；脉冲电容器 C_2 和 C_3 均为 500 pF；图 5 中铁基纳米晶磁芯尺寸为外径 120 mm×内径 60 mm×高度 240 mm，绕组为

25 匝均匀分布。基于此模型，仿真得到不同时刻磁开关磁芯的磁通密度分布见图 6、7，磁芯在脉冲激励下逐渐饱和。

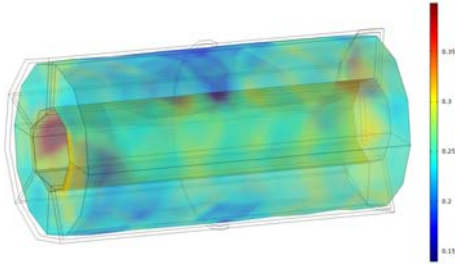


图 6 磁芯未饱和时的磁通密度分布($t=3 \mu\text{s}$)

Fig. 6 Distribution of magnetic flux density in unsaturation state of magnetic core ($t=3 \mu\text{s}$)

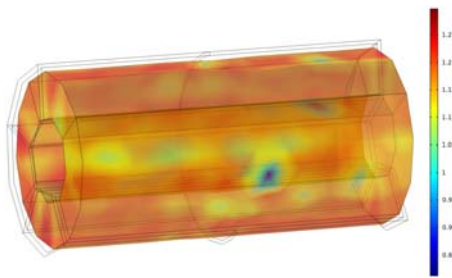


图 7 磁芯饱和时的磁通密度分布($t=5.5 \mu\text{s}$)

Fig. 7 Distribution of magnetic flux density in saturation state of magnetic core ($t=5.5 \mu\text{s}$)

为了验证场路耦合仿真模型的有效性和准确性，利用实验室中脉冲驱动源实验平台测试磁脉冲压缩系统的输出波形，磁脉冲压缩电路测试电路原理图见图 8。实验与仿真的输出波形对比见图 9，预脉冲电压误差为 2%，峰值误差为 2%，前沿误差为 5%。仿真波形与实验输出波形的误差较小，验证了仿真模型的有效性，可以基于此场路耦合模型进行磁开关的优化设计。此外，磁开关退饱和后，仿真与实验结果有一定偏差的主要原因有：①实验为测量电容器电压，在 C_2 、 C_3 两端并联接入了 5k: 1 的电阻分压器；②磁开关电磁场模型进行了简化等效处理，实验中采用 8 个外径 120 mm×内径 60 mm×高度 30 mm 的铁基纳米晶磁芯叠加，仿真模型中磁芯是一个整体，忽略了填充系数的影响。

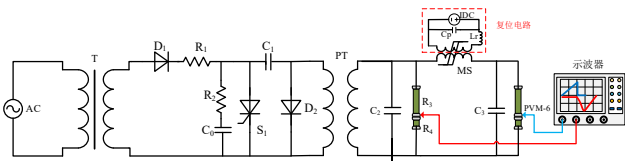


图 8 磁脉冲压缩电路测试电路图

Fig. 8 Magnetic pulse compression test circuit

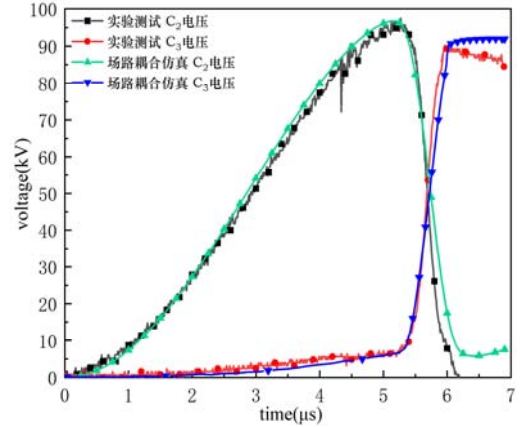


图 9 实验与仿真波形对比图

Fig. 9 Comparison of experimental waveforms and simulation waveforms

3 磁开关的优化设计

3.1 磁开关体积优化

磁芯体积的增大不仅会带来磁开关重量与成本的增加，还会导致更大的磁芯损耗，磁芯利用率不高。设计磁开关时，首先根据伏秒积分方程确定磁芯尺寸与绕组匝数，在尽可能缩小磁开关体积的情况下增加匝数。根据前文理论分析可知，磁脉冲压缩过程中，前级电容器放电临近结束时，后一级电容器中能量积蓄速度逐渐减慢。因此，在初步确定磁芯的体积与匝数后，通过调控磁芯饱和时间对磁开关的体积进一步优化。

磁脉冲压缩器工作时，电容器的充电电压波形为 $(1-\cos\omega t)$ 。伏秒积分方程可以表示为

$$\Phi = \frac{1}{2} \int_0^{\tau} V_0 (1 - \cos\omega t) dt = N \Delta B S_m, 0 < \tau < \tau_{sat} \quad (10)$$

式(10)中： Φ 为磁芯内部磁通量； V_0 为峰值电压； ω 为电路的谐振频率； N 为磁开关绕组匝数； ΔB 为磁通密度增量； S_m 为磁芯的有效截面积； τ 为磁开关的工作时刻。

将磁通量、电容电压与工作时间进行归一化处理，各归一化变量间的关系见图 10。由图 10 中曲线可知，电容电压与磁通呈非线性关系，在峰值电压附近时，电压增长速度变慢，磁通量的增长速度较快。归一化时间为 0.8 即饱和时间为原饱和时间的 80% 时，电容电压达到原峰值电压的 86%，而所需磁通量仅为理论磁通量最大值的 60%，相当于节省了 40% 的磁芯材料，使磁开关的体积与成本大幅下降。

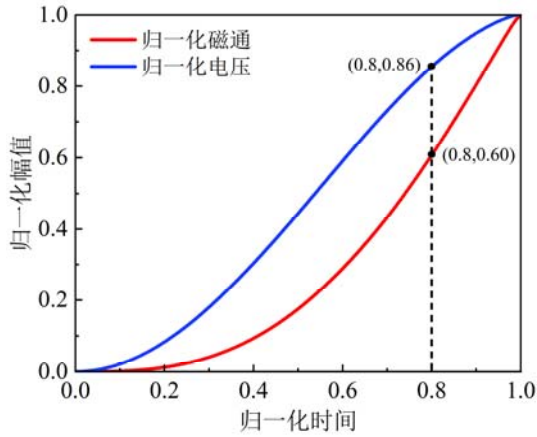


图 10 归一化变量关系图

Fig. 10 Relationship diagram of variable normalization

分析可知，通过减小磁芯截面积对磁脉冲压缩器的饱和时间进行合理调控，可以提高磁芯利用率，有效减小装置体积和重量，降低成本。

基于建立的磁开关场路耦合仿真模型，在保持封装系数与匝数绕组不变的条件下，通过改变磁芯的长度来改变磁芯的有效截面积，进而改变伏秒积的大小，达到调控磁开关饱和时间的目的，并对不同伏秒积情况下系统的输出波形进行分析。由于铁基纳米晶磁芯具有高矩形比的特性，仿真模型中不考虑磁芯的剩磁。伏秒积分别缩小为最大值 0.7 倍($\Phi/\Phi_{max}=0.7$)、0.8 倍($\Phi/\Phi_{max}=0.8$)、0.9 倍($\Phi/\Phi_{max}=0.9$)时 C_2 和 C_3 上的电压波形见图 11，各主要参数见表 2。根据图 11 和表 2 可知，随着磁开关 Φ/Φ_{max} 增大，磁芯饱和时间逐渐加长，磁芯从饱和到退饱和的时间增长， C_2 与 C_3 两端的电压均会升高。

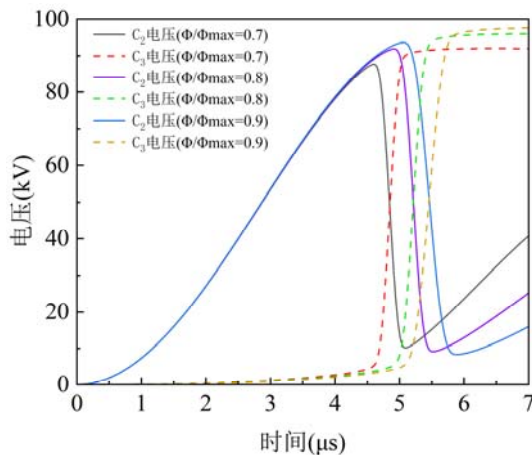


图 11 输出电压仿真波形图

Fig. 11 Output voltage simulation waveform

表 2 输出电压参数表

Table 2 Output voltage parameter table

参数名称	C_2 电压峰值时刻/ μs	C_2 电压峰值/kV	C_3 电压峰值时刻/ μs	C_3 电压峰值/kV

$\Phi/\Phi_{max}=0.7$	4.60	87.67	5.13	90.52
$\Phi/\Phi_{max}=0.8$	4.91	91.91	5.50	93.98
$\Phi/\Phi_{max}=0.9$	5.06	93.64	5.82	95.31

上述 3 种情况下系统输出电流波形见图 12，各主要参数见表 3。根据图 12 和表 3 可知，由于磁开关 Φ/Φ_{max} 增大，使其等效电感随之增大，从而使磁开关放电回路的等效阻抗增大，导致 MS 回路电流减小。

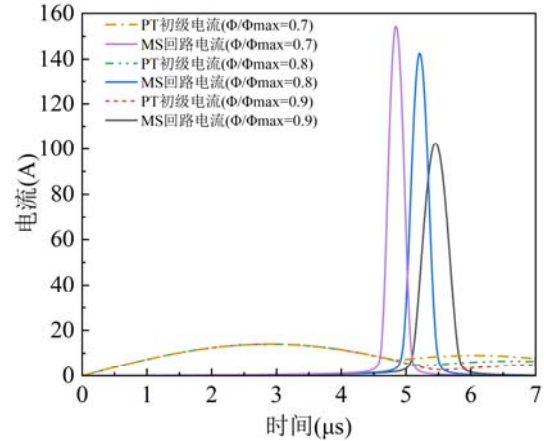


图 12 输出电流仿真波形图

Fig. 12 Output current simulation waveform

表 3 输出电流参数表

Table 3 Output current parameter table

参数名称	MS 回路	MS 回路	MS 回路	MS 回路
	电流激增时刻/ μs	电流峰值时刻/ μs	电流截止时刻/ μs	电流峰值/A
$\Phi/\Phi_{max}=0.7$	4.60	4.84	5.13	154.84
$\Phi/\Phi_{max}=0.8$	4.91	5.21	5.50	142.50
$\Phi/\Phi_{max}=0.9$	5.06	5.45	5.82	102.33

磁芯的磁通密度变化曲线见图 13，磁芯在 1.11T 时进入到饱和区域，低于 1.11T 开始退饱和。饱和与退饱和时刻见表 4，与表 2、3 中的时刻完全一致。

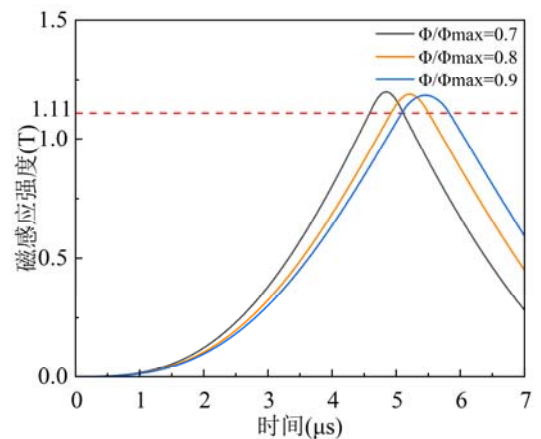


图 13 磁通密度变化曲线

Fig. 13 Magnetic flux density change waveform

表 4 磁通密度表

Table 4 Magnetic flux density parameter table

参数名称	磁芯饱和时刻/ μs	磁芯退饱和时刻/ μs
$\Phi/\Phi_{\max}=0.7$	4.60	5.13
$\Phi/\Phi_{\max}=0.8$	4.91	5.50
$\Phi/\Phi_{\max}=0.9$	5.06	5.82

从能量传递的角度分析, 初始时刻 C_1 开始向 C_2 放电, 在磁开关饱和之前, 不同 Φ/Φ_{\max} 情况下脉冲变压器初级回路的工作状态是一致的。当磁通密度达到饱和磁通密度 1.11 T 时磁开关导通, 其饱和时间随磁芯体积的减小 (Φ/Φ_{\max} 减小) 逐渐缩短。饱和时间越短会导致电容 C_1 在放电过程中传递给 C_2 的能量越少, 因此 C_2 、 C_3 两端电压的峰值随 Φ/Φ_{\max} 的减小而降低。当磁芯饱和时, Φ/Φ_{\max} 越小则 C_1 的剩余能量越多, C_1 剩余能量中的一部分会通过磁开关直接传递给 C_3 , 导致 C_3 的电压峰值大于 C_2 的电压峰值。磁开关退饱和后, C_1 剩余能量中的另一部分由 C_2 吸收, 使 C_2 的电压上升。因此, Φ/Φ_{\max} 越小的情况下充电结束后 C_2 两端电压上升的越高。

由上述仿真结果可知, 保持磁路长度以及绕组匝数不变时, 通过减小磁芯截面积来调控磁通量 Φ 可以减小磁开关的饱和时间。但磁芯截面积减小会导致负载 C_3 输出电压降低, 因此可以针对特定的输出电压利用此模型优化磁芯截面积, 提高磁芯的利用率。

3.2 杂散参数优化

3.2.1 杂散电阻

根据理论分析, 在仿真模型中加入杂散电阻, 分别取阻值为 0.005、0.05、0.5 Ω 后进行仿真分析, 在不同杂散电阻条件下磁开关输出电压波形见图 14、15。

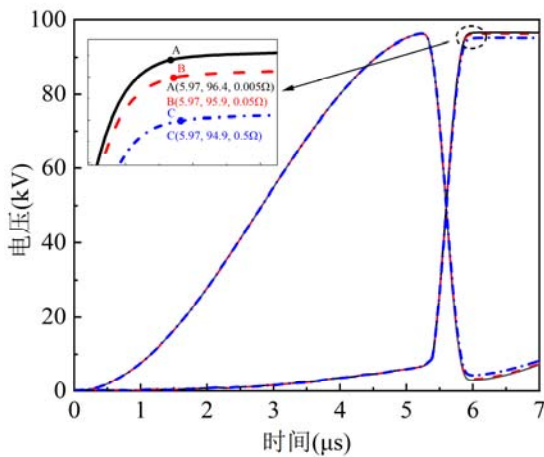


图 14 不同杂散电阻情况下的电压波形

Fig. 14 Voltage waveforms of different stray resistances

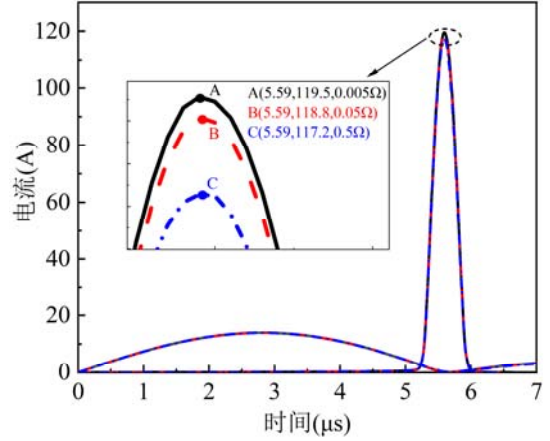


图 15 不同杂散电阻情况下的电流波形

Fig. 15 Current waveforms of different stray resistances

通过分析不同杂散电阻下的电压和电流波形可知, 不同杂散参数下, 输出电压最大值均出现在 5.97 μs 时刻, 分别约为 96.40、95.9、94.9 kV, 电压传递效率分别为 98.7%、98.1%、95.3%, 电压上升时间均为 0.55 μs 。随着杂散电阻的增大, 输出电压的峰值越来越小, 电压传输效率不断降低, 即输出脉冲衰减不断增大。输出电流最大值随杂散电阻的增大逐渐减小, 分别为 119.5、118.8、117.2 A, 达到峰值的时刻均在 5.59 μs 。不同杂散电阻下脉冲上升时间几乎不受杂散电阻影响。

3.2.2 杂散电感

取杂散电感分别为 1、50、100 nH 进行仿真分析, 得到磁开关输出电压波形见图 16, 输出电流波形见图 17。

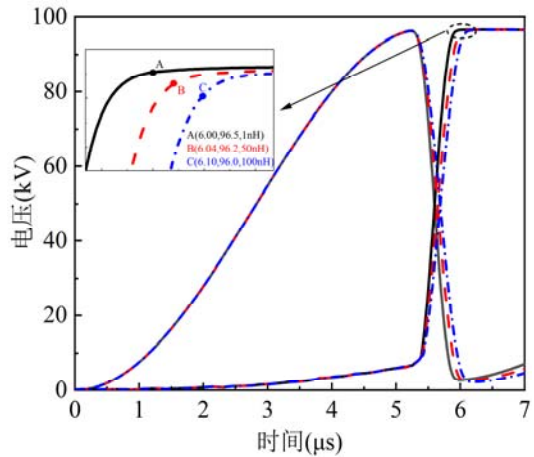


图 16 不同杂散电感情况下的电压波形

Fig. 16 Voltage waveforms of different stray inductances

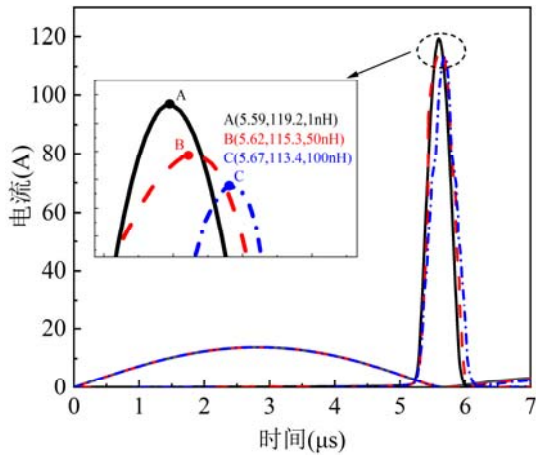


图 17 不同杂散电感情况下的电流波形

Fig. 17 Current waveforms of different stray inductances

根据仿真波形可知，不同杂散电感下，输出电压的最大值分别为 96.5、96.2、96.0 kV，对应的时刻分别为 6.00、6.04、6.10 μs ，磁脉冲压缩器输出电压的上升时间分别为 0.54、0.58、0.64 μs ，电压传递效率分别为 98.7%、98.1%、95.3%。电流最大值分别为 119.2、115.3、113.4 A，对应的时刻分别为 5.59、5.62、5.67 μs 。分析可得，随着杂散电感的增大，输出电压、电流的峰值会不断减小，并且达到最大值的时间会发生延迟，电压传递效率不断降低。

3.2.3 杂散电容

同上，取绕组匝间电容分别为 0.1、1、10 pF 进行仿真分析，得到输出电压波形见图 18，输出电压波形见图 19。

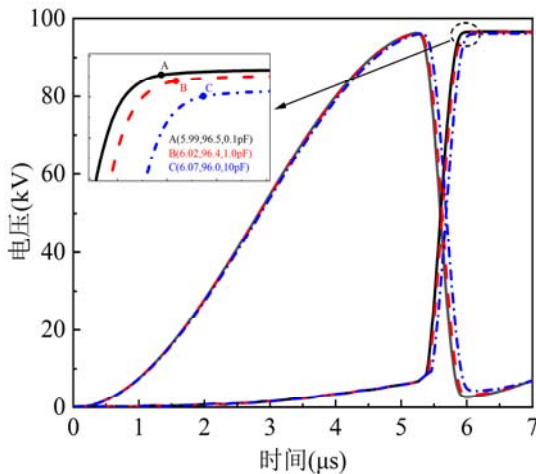


图 18 不同杂散电容情况下的电压波形

Fig. 18 Voltage waveforms of different stray capacitances

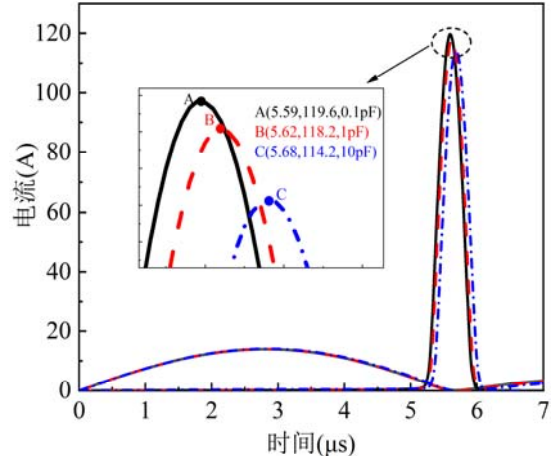


图 19 不同杂散电容情况下的电流波形

Fig. 19 Current waveforms of different stray capacitances

根据仿真波形可知，杂散电容为 0.1 pF 时，输出电压最大值为 96.5 kV，对应时刻为 5.99 μs ，电压传递效率为 98.8%，对输出波形影响较小；杂散电容为 1 pF 时，输出电压最大值为 96.4 kV，对应时刻为 6.02 μs ，电压传递效率为 98.3%；杂散电容为 10 pF 时，输出电压最大值为 96.0 kV，对应时刻为 6.07 μs ，电压传递效率为 97.2%。当杂散电容为 0.1 pF 时，电流最大值为 119.6 A，对应时刻为 5.59 μs 。随着杂散电容的增大，输出电压、电流的峰值会不断减小，并且达到最大值的时间会发生延迟，电压传递效率不断降低。

上述结果表明，杂散电阻会降低磁开关的能量传递效率，但不影响磁开关的饱和时间，杂散电感和杂散电容不仅会减小能量传递效率，还会增大磁开关的饱和时间。因此在工程设计中，有必要选择电阻率低、截面半径大的绕组导线，同时减小绕组的磁路长度，并综合考虑绕组间距和绕组匝数，来减小磁开关的杂散参数，提高其工作性能。

4 结论

文中基于磁开关场路耦合仿真模型进行优化设计，分析了磁开关的饱和时间与体积之间的关系，并对不同杂散元件情况下的系统输出波形进行分析，研究结果表明：

1)随着磁开关体积的减小，磁芯进入饱和状态的速度变快，前级电容电压达到峰值的时间缩短，磁开关会更早进入导通状态，同时后级负载电容的输出电压会小幅度降低。

2)系统的电压传输效率会随着杂散电阻、电感、电容的增大而不断降低；杂散电感与杂散电容越大，磁开关的饱和时间也会随之增加。

3)通过对磁脉冲压缩器的饱和时间合理调控，可以有效减小磁芯体积、减轻装置重量、降低制造成本。

对杂散参数进行优化,能够有效降低输出脉冲的衰减、缩短脉冲上升时间、提高电压传递效率。该优化设计方法为磁开关等含磁芯的脉冲功率元件的优化设计提供了参考。

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 University Press, 2005.
- [2] 韩 旻, 邹晓兵, 张贵新. 脉冲功率技术基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
HAN Min, ZOU Xiaobing, ZHANG Guixin. Pulsed power technology fundamentals[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [3] 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(10): 113-119.
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(10): 113-119.
- [4] 刘宏伟, 袁建强, 马 勋, 等. 激光二极管触发的光导开关-磁开关串联型组合开关[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(7): 135-138.
LIU Hongwei, YUAN Jianqiang, MA Xun, et al. Investigation of a combined PCSS and magnetic Switch triggered by laser diode[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(7): 135-138.
- [5] RHEE J H, CHO Y M, BAEK J E, et al. Design of a low-stray inductance magnetic switch for high compression of the pulse width in a magnetic pulse compressor[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2018, 46(7): 2599-2604.
- [6] RHEE J H, CHO Y M, KIM S H, et al. Design for compression improvement of a magnetic pulse compressor by using a multiwinding magnetic switch[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(12): 3252-3257.
- [7] 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.
- [8] 聂剑红, 孙 力, 刘 英. 脉冲压缩磁开关串联系统的优化设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(5): 660-663.
NIE Jianhong, SUN Li, LIU Ying. Optimal design of pulse compression magnetic switch serial system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004, 36(5): 660-663.
- [9] 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.
- [10] 游利兵, 程 超, 方晓东. 全固态高压脉冲电源在半导体光刻光源中的应用[J]. 强激光与粒子束, 2019, 31(4): 110-118.
YOU Libing, CHENG Chao, FANG Xiaodong. Application of all-solid-state high-voltage pulse power supply in semiconductor lithography light source[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31(4): 110-118.
- [11] 米 彦, 万佳仑, 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.
- [12] 朱雨翔, 兰 生, 张宇航. 基于磁压缩开关高压脉冲发生器设计与研究[J]. 高压电器, 2017, 53(9): 60-65.
ZHU Yuxiang, LAN Sheng, ZHANG Yuhang. Design of high-voltage pulse generator based on the theory of magnetic pulse compression[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(9): 60-65.
- [13] DRIESSEN A B J M, BECKERS F J C M, HUISKAMP T, et al. Design and implementation of a compact 20 kHz nanosecond magnetic pulse compression generator[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(12): 3288-3299.
- [14] 杨银辉, 郑义军, 谭荣清, 等. 磁脉冲压缩电路的仿真分析[J]. 激光技术, 2021, 45(1): 13-18.
YANG Yinhui, ZHENG Yijun, TAN Rongqing, et al. Simulation analysis of magnetic pulse compression circuit[J]. Laser Technology, 2021, 45(1): 13-18.
- [15] 江进波, 程廷强, 黄国良, 等. 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[J]. 强激光与粒子束, 2023, 35(5): 113-119.
JIANG Jinbo, CHENG Tingqiang, HUANG Guoliang, et al. Pulse magnetic properties measurement of Fe-based nanocrystalline cores and its application in magnetic switches[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2023, 35(5): 113-119.
- [16] 江进波, 王佳栋, 程廷强, 等. 基于场路耦合方法的 100 kV 脉冲变压器设计与磁饱和特性[J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 4893-4903.
JIANG Jinbo, WANG Jiadong, CHENG Tingqiang, et al.

Design of a 100 kV pulse transformer based on field-circuit coupling method and its magnetic saturation characteristics research[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4893-4903.

江进波(1988—), 男, 博士, 硕士生导师, 主要从事高电压与绝缘技术、脉冲功率技术等方面研究工作(E-mail: jinbojiang@163.com)。