

## 杂散参数对串联型磁脉冲压缩器输出特性的影响\*

李嵩,高景明,杨汉武,钱宝良

(国防科技大学光电科学与工程学院,湖南长沙 410073)

**摘要:**使用电路模拟软件分析了脉冲电容器自身电感、磁开关绕组匝间电容以及磁芯处于不同工作状态时磁开关绕组自身阻抗等杂散参数对串联型磁脉冲压缩器输出特性的影响。结果表明,匝间电容和磁芯处于未饱和状态下的绕组自身阻抗对系统的输出特性影响相对较小;磁芯处于饱和状态时,绕组自身阻抗对系统的电压传输效率影响较大;脉冲电容器的自身电感不仅会降低系统的电压传输效率,而且会同时影响到输出脉冲上升沿的宽度。基于以上结论,对基于电容负载的单级串联型磁脉冲压缩器进行了优化设计并研制了一台输出峰值电压 26kV,脉冲上升时间由 4.1ms 压缩到 1.2ms 的串联型磁脉冲压缩器,电压传输效率大于 92.5%。

**关键词:**脉冲功率技术;磁脉冲压缩器;杂散参数

**中图分类号:**TM78 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2015)02-009-05

## Influence of stray parameters on output characteristics of the series magnetic pulse compressor

LI Song, GAO Jingming, YANG Hanwu, QIAN Baoliang

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** P-Spice was used to analyze the influence of stray parameters, including self-inductance of the pulse capacitor and the inter-turn capacitance and the impedance of the winding in magnetic switch, on output characteristics of the series magnetic pulse compressor. Results show that inter-turn capacitance and the impedance in unsaturated state of the winding make minor influence on the output waveform. However, the impedance in saturated state of the winding reduces the voltage efficiency of the system, conspicuously. Moreover, the self-inductance of the pulse capacitor not only reduces the voltage efficiency but also influences the rise-time of the output voltage waveform. Based on former results, the single stage magnetic pulse compressor system was optimized and a series magnetic pulse compressor, with peak voltage of 26kV, whose pulse rise-time is compressed from 4.1s to 1.2s and whose voltage efficiency is over 92.5% was developed.

**Key words:** pulsed power technology; magnetic pulse compressor; stray parameters

国防和工业应用需求促使脉冲驱动源由高功率向高平均功率、高重复频率、高可靠性等方向发展<sup>[1-2]</sup>。串联型磁脉冲压缩器利用磁性材料的非线性特性实现对电脉冲信号的整形与压缩,具有固态化、寿命长、结构相对简单以及能量传递效率较高等优势,在高功率微波、材料表面处理以及食品加工处理等领域具有广泛的应用前景<sup>[3-7]</sup>。近些年来,随着磁性材料性能的不不断提升,磁脉冲压缩器逐步发展成为高功率脉冲驱动源技术走向工业应用的重要技术途径之一。20世纪90年代起,国外包括 RHEPP<sup>[4]</sup>、CLIA<sup>[8]</sup>以及 QM-1<sup>[9]</sup>等大型加速器的技术方案中均采用了这种器件对电脉冲进行压缩和整形,这些加速器都通过了长时

间、高强度的工作性能测试,并已经在诸多领域获得了良好的应用。西北核技术研究所以及中国科学院的研究人员针对并联型磁脉冲压缩器进行了深入的研究<sup>[10-11]</sup>。复旦大学开展了较低能量等级串联型磁脉冲压缩器在开关电源领域的应用研究<sup>[12]</sup>。然而,由于受到各种因素的限制,对高功率串联型磁脉冲压缩器的研究还相对滞后。因此,分析杂散参数对串联型磁脉冲压缩器输出特性的影响具有重要的现实意义。

### 1 串联型磁脉冲压缩器基本原理

单级串联型磁脉冲压缩器由脉冲电容器和磁开关构成,其工作电路如图1所示。其中, $C_0$ 和

\* 收稿日期:2015-01-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51377164)

作者简介:李嵩(1987—),男,辽宁大石桥人,博士研究生,E-mail:song\_li1121@hotmail.com;

高景明(通信作者),男,副研究员,博士,E-mail:megod818@163.com

$C_1$  为电容值相等的脉冲电容器;  $S$  为闭合开关;  $L_0$  为谐振电感;  $MS$  为磁开关;  $Z$  为负载。初始时刻, 初级能源 (未标注在图 1 中) 对脉冲电容器  $C_0$  进行充电。达到峰值电压时,  $S$  闭合,  $C_0$  通过  $L_0$  向  $C_1$  谐振放电。随着  $C_1$  电压的上升, 磁开关  $MS$  中的磁通量  $\Phi$  逐渐增大, 磁芯处于未饱和区。此时, 磁芯内部的磁感应强度随磁芯周围磁场强度的增加剧烈变化, 即磁芯的相对磁导率很大, 磁开关  $MS$  的未饱和电感  $L_{uns}$  很大。由于此时的绕组电感远大于  $L_0$ , 后续电路相当于处于断开状态。合理设计电路参数, 当  $C_1$  两端电压达到最大时刻 ( $t_{close}$ ), 磁芯的工作状态刚好由非饱和态转变为饱和态, 磁开关  $MS$  的饱和电感  $L_{sat}$  瞬间减小, 此时的电路处于短路状态。  $C_1$  开始通过  $L_{sat}$  向负载  $Z$  放电, 直至能量全部转移到脉冲负载上。

压缩器电路模型进行模拟。软件中没有磁开关元件模型, 可以根据磁开关基本工作原理, 通过未饱和电感和饱和电感  $L_{sat}$  以并联关系连接实现, 磁芯工作状态的切换过程由一个与饱和电感  $L_{sat}$  串联的理想闭合开关  $CS$  等效。等效电路如图 2 所示。通过仿真, 可以得到脉冲电容器  $C_1$  和负载  $Z$  的电压波形如图 3 所示。

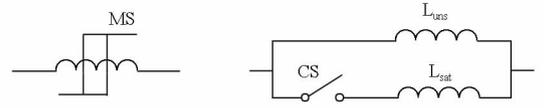


图 2 磁开关 P-Spice 等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of magnetic switch in P-Spice

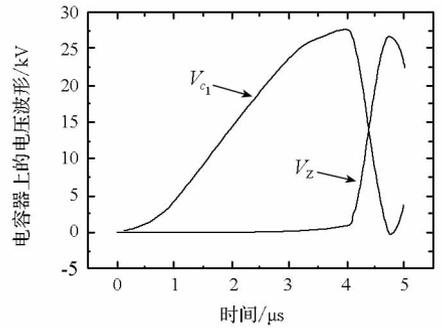


图 3 单级磁脉冲压缩器理想电压输出波形

Fig. 3 Ideal output voltage waveform of the single stage magnetic pulse compressor

表 1 单级串联型磁脉冲压缩器参数表

Tab. 1 Parameters of the single stage series magnetic pulse compressor

$C_0$ 、 $C_1$ 脉冲电容值 (nF)	谐振电感 $L_0$ ( $\mu$ H)	磁开关未饱和电感 $L_{uns}$ ( $\mu$ H)	$C_1$ 设计峰值电压 (kV)	设计饱和时间 $t_{close}$ ( $\mu$ s)
160	20.26	516	27.35	4

可以看出, 设计的单级磁脉冲压缩器能够实现对电脉冲进行压缩和整形的目的, 输入电脉冲的上升时间由约  $4\mu$ s 压缩到  $1\mu$ s。脉冲电容器  $C_1$  和负载  $Z$  上的峰值电压分别为  $27.33\text{kV}$  和  $26.73\text{kV}$ , 电压传输效率达到  $97.8\%$ 。

## 2 杂散参数对串联型磁脉冲压缩器工作特性影响的仿真研究

实际工作环境中, 串联型磁脉冲压缩器的杂散参数主要包括脉冲电容器的自身电感、磁开关绕组的匝间电容以及磁开关在不同工作状态下的自身阻抗。分析杂散参数对器件输出特性的影响有助于对串联型磁脉冲压缩器进行更加准确的设计, 有效指导实验研究。

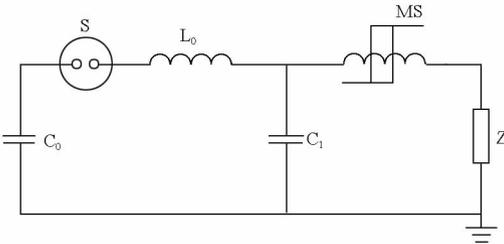


图 1 单级串联型磁脉冲压缩器电路图

Fig. 1 Circuit of single stage series magnetic pulse compressor

通过合理设计磁开关参数, 满足  $L_{sat} < L_0$ , 就可以实现对电脉冲上升时间的压缩。磁开关工作状态的转变时间  $t_{close}$  满足伏秒积公式

$$\Phi = \int_0^{t_{close}} V_{C_1}(t) dt = N\Delta BA_c \quad (1)$$

式中,  $V_{C_1}$  为加载到脉冲电容器  $C_1$  上的电压;  $N$  为磁开关绕组的匝数;  $\Delta B$  为磁性材料的磁感应强度变化量;  $A_c$  为绕组包围的区域内磁性材料的有效截面积。

磁开关绕组所包围区域的平均磁导率  $\mu_a$  可以表示为

$$\mu_a = \mu_0 [(\mu_r - 1)\alpha + 1] \quad (2)$$

式中,  $\mu_0$  为真空正的磁导率;  $\mu_r$  为磁性材料的磁导率;  $\alpha$  为绕组包围区域内的占空系数。

磁开关绕组的电感可以表示为

$$L = \mu_a \frac{N^2 H}{2\pi} \ln\left(\frac{R_o}{R_i}\right) \quad (3)$$

式中,  $H$ ,  $R_o$  和  $R_i$  分别为磁开关绕组所包围的总截面高度、外半径和内半径。

根据以上公式, 可以设计单级串联型磁脉冲压缩器, 具体电参数如表 1 所示。可以使用 P-Spice 数值模拟软件对理想情况下单级磁脉冲

## 2.1 脉冲电容器的自身电感

根据现有脉冲电容器的制造水平,在 P-Spice 软件中建立每个脉冲电容器的自身电感分别为 25nH, 50nH, 75nH 的模型进行仿真,得到的结果如图 4 所示。

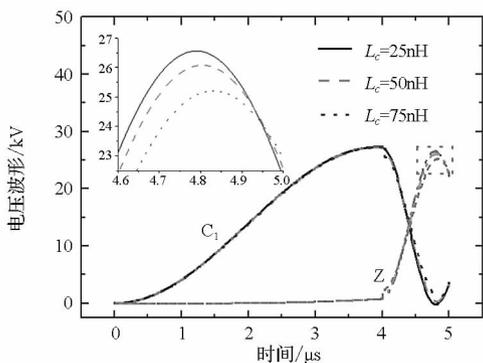


图4 脉冲电容器自身电感对输出波形的影响

Fig. 4 Influence of the self-inductance of pulse capacitor

从图 4 可以看出,在设定的范围内考虑脉冲电容器的自身电感时,尽管串联型磁脉冲压缩器的输出波形并不会明显的畸变,但随着电感值的增加,输出电脉冲的上升时间发生了一定的变化。电感值越大,上升时间的变化越大。此外,输出电脉冲的峰值电压也会有一定程度的下降。当脉冲电容器的自身电感分别为 25nH, 50nH, 75nH 时,脉冲电容器  $C_1$  的峰值电压为 27.291kV, 负载 Z 的峰值电压分别为 26.561kV, 26.078kV 和 25.207kV。脉冲电容器自身电感的引入会影响系统的能量传递效率。不同电感值对应的电压传递效率分别约为 97.3%, 95.6%, 92.4%。

## 2.2 磁开关的匝间电容

受到磁性材料本身工作特性的限制,较高的工作电压会造成磁开关绕组匝数的增加。对于确定的磁芯尺寸而言,较大的绕组匝数又会导致绕组之间的间距较小。这不仅会给绝缘带来一定的压力,也会使得磁开关绕组本身的匝间电容较大。

磁开关绕组的匝间电容可以表示为

$$C_i = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A_l}{\Delta d} \quad (4)$$

式中,  $\epsilon_0$  为真空中的介电常数;  $\epsilon_r$  为磁脉冲压缩器内填充绝缘介质的相对介电常数;  $A_l$  为磁开关绕组侧壁的正对总面积;  $\Delta d$  为相邻两匝绕组之间的距离。

针对第 1 节中设计的串联型磁脉冲压缩器,理论计算得到磁开关绕组的匝间电容约为 8.58pF。因此,在 P-Spice 软件中建立磁开关绕组匝间电容分别为 5pF, 10pF 和 50pF 的模型进

行仿真,得到的结果如图 5 所示。

由图 5 可以看出,磁开关绕组的匝间电容分别为 5pF, 10pF 和 50pF 时,单级串联型磁脉冲压缩器输出特性几乎没有发生变化,两级脉冲电容器上的峰值电压分别为 27.33kV 和 26.73kV,电压传输效率约为 97.8%。即通常情况下,磁开关绕组的匝间电容不会对磁脉冲压缩器的输出波形造成较大的影响。

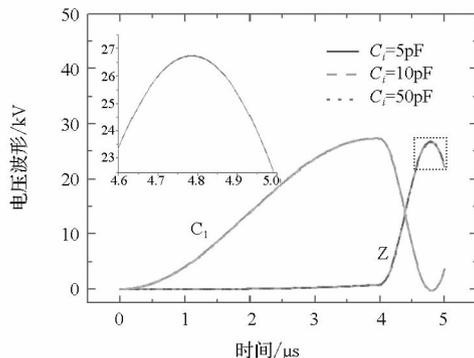


图5 磁开关绕组匝间电容对输出波形的影响

Fig. 5 Influence of the inter-turn capacitance of the winding

## 2.3 磁开关绕组的自身阻抗

磁开关绕组通常由长直导线绕制而成,输出电信号的频率达到 MHz 量级时,绕组的趋肤效应明显,直接导致绕组本身的电阻增大,进而影响到器件的输出特性。损耗在磁开关绕组上的能量会使得局部温度迅速升高,如果散热不够及时,有可能导致磁芯失去磁滞特性。

磁开关绕组的自身阻抗可以表示为

$$Z = \rho \frac{l_t}{\pi [R_w^2 - (\delta_w - \delta_w)^2]} \quad (5)$$

式中,  $\rho$  为金属导线的电阻率;  $l_t$  为绕组的总长度;  $R_w$  为绕组导体截面的半径;  $\delta_w$  为趋肤深度。对应第 1 节中设计的串联型磁脉冲压缩器,理论计算得到在两种工作状态下,绕组的自身阻抗分别为 56mΩ 和 119mΩ。

首先对磁芯处于未饱和状态时,磁开关绕组自身阻抗对期间输出的影响进行分析。在 P-Spice 软件中建立磁开关绕组自身阻抗分别为 25mΩ, 50mΩ 和 100mΩ 的模型进行仿真,得到的结果如图 6 所示。可以看出,磁芯处于未饱和状态下,磁开关绕组的自身阻抗在给定的范围内变动时,几乎没有对输出波形产生影响。

趋肤效应影响下的绕组自身阻抗与电信号频率呈正比关系。饱和状态下,对磁开关绕组自身阻抗分别为 50mΩ, 100mΩ 和 200mΩ 时进行模

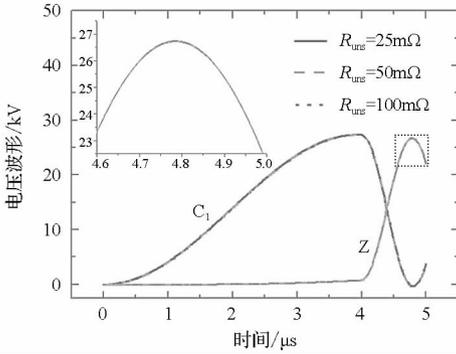


图 6 磁开关绕组自身阻抗对输出波形影响(未饱和状态)

Fig. 6 Influence of the impedance of the winding (unsaturated state)

拟,得到的结果如图 7 所示。由图可以看出,改变饱和状态下磁开关绕组的自身阻抗时,脉冲电容器  $C_1$  输出电压的峰值始终为 27.33kV,而负载  $Z$  上的峰值电压分别为 26.42kV, 26.11kV 和 25.52kV。即磁芯饱和状态下,绕组自身阻抗对能量传递效率具有较大的影响。仿真阻抗值对应的电压传输效率分别约为 96.6%, 95.5%, 93.4%。

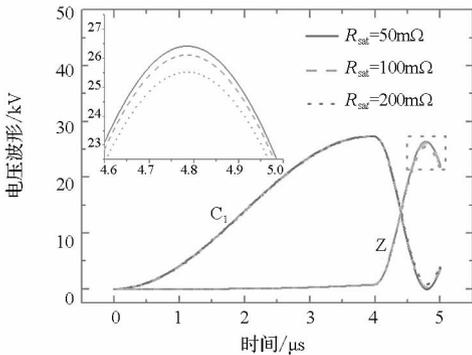


图 7 磁开关绕组自身阻抗对输出波形影响(饱和状态)

Fig. 7 Influence of the impedance of the winding (saturated state)

### 3 实验研究

基于以上的分析,尽管串联型磁脉冲压缩器存在杂散电感及绕组自身阻抗等杂散参数,但根据装置的基本工作原理,不同杂散参数对装置输出波形的影响程度并不相同。实际操作中可以利用所得结论,对设计的磁脉冲压缩器平台的设计和搭建进行最合理的优化。

根据 2.1 节中结论,脉冲电容器的自身电感对实验结果具有较大影响。由于脉冲电容器由厂家提供,自感已经确定,因此,实验中设计采用六个 80nF 的脉冲电容器,两两并联分别构成  $C_0$  和  $C_1$ ,以尽量减小脉冲电容器自身电感对实验结果的影响。根据 2.3 节中结论,磁开关绕组的自身

阻抗对磁脉冲压缩器的输出电压效率有一定影响。因此,实验中设计使用两根具有矩形截面,截面尺寸为  $8\text{mm} \times 2\text{mm}$  的编织线作为磁开关的绕组以在较高的工作频率下,尽可能减小绕组自身的阻抗。同时,采用双线并绕的方式制作磁开关绕组也能够一定程度上减小绕组阻抗。

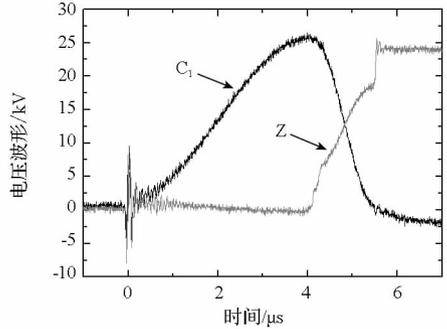


图 8 单级磁脉冲压缩器输出波形

Fig. 8 Output waveforms of the single stage magnetic pulse compressor

基于以上讨论,根据表 1 中的设计参数,在实验室搭建了一台单级磁脉冲压缩器。得到的输出波形如图 8 所示。可以看出,单级串联型磁脉冲压缩器的压缩结果与仿真结果基本相符。需要说明的是,由于磁开关导通后期,负载  $Z$  上的电压将超过  $C_1$  上的电压,根据磁开关工作原理,此时的磁芯将回到未饱和状态,导致磁开关电路断路,阻止了电脉冲能量向  $C_1$  释放。然而,仿真软件的等效模型中没有设置二极管来阻止能量回流,因此,造成了仿真结果与实验结果略有不同,但其不影响文章所关注的  $C_1$  向  $Z$  放电的过程。脉冲电容器  $C_1$  和负载  $Z$  上的峰值电压分别为 25.725kV 和 23.838kV。电脉冲上升时间由  $4.1\mu\text{s}$  被压缩到  $1.2\mu\text{s}$ ,电压传输效率约为 92.5%。通过分析杂散参数对串联型磁脉冲压缩器输出特性的影响,可以在一定程度上指导实验装置的搭建和优化设计。

### 4 结论

串联型磁脉冲压缩器利用磁性材料的非线性特性实现对电脉冲信号的整形与压缩,具有固态化、寿命长、结构相对简单以及能量传递效率较高等优势,能够适应脉冲功率的发展需求。针对一种单级串联型磁脉冲压缩器,分别对脉冲电容器自身电感、磁开关绕组匝间电容以及磁芯处于不同状态下的绕组自身阻抗等杂散参数对器件输出特性的影响进行了分析。结果表明,匝间电容和磁芯处于未饱和状态下的绕组自身阻抗对系统的

输出特性影响相对较小;磁芯处于饱和状态时,绕组自身阻抗对系统的能量传输效率影响较大;脉冲电容器的自身电感不仅会降低系统的能量利用效率,还会影响到输出脉冲上升沿的宽度。

## 参考文献 (References)

- [1] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2005: 380 - 401.  
LIU Xisan. High pulsed power technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 380 - 401. (in Chinese)
- [2] Bluhm H. 脉冲功率系统的原理与应用[M]. 江伟华, 张弛, 译. 北京:清华大学出版社, 2008:92 - 95.  
Bluhm H. Pulsed power systems principles and application[M]. Translated by JIANG Weihua and ZHANG Chi. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 92 - 95. (in Chinese)
- [3] Nunnally W C. Magnetic switches and circuits [R]. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, 1982: LA - 8862 - MS - Rev.
- [4] Schneider L, Reed K, Harjes H, et al. Status of repetitive pulsed power at Sandia national laboratories [C]//Proceedings of 12th IEEE International Pulsed Power Conference, 1999, 1: 523 - 527.
- [5] Rukin S N, Mesyats G A, Darznek S A, et al. SOS-based pulsed power: development and applications [C]//Proceedings of 12th IEEE International Pulsed Power Conference, 1999, 1: 153 - 156.
- [6] Buttram M. Some future directions for repetitive pulsed power [J]. Pulsed Power Plasma Science, 2001, 1: 3 - 8.
- [7] Wolman V W, Kaden H. On the eddy current delay in magnetic switching process [J]. Zeitschrift fur Technische Physik, 1932, 13(7): 330.
- [8] Ashby S, Drury D, James G, et al. CLIA - a compact linear induction accelerator system [C]//8th IEEE International Pulsed Power Conference, San Diego, California, 1991: 940 - 942.
- [9] Barret D M, Cockreham B D, Dragt A G, et al. A pulse power modulator system for commercial high power ion beam surface treatment applications [C]//12th IEEE International Pulsed Power Conference, 1999, 1: 173 - 176.
- [10] 苏建仓, 刘国治, 丁臻捷, 等. 基于 SOS 的脉冲功率驱动源技术新进展 [J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(8): 1195 - 1200.  
SU Jiancang, LIU Guozhi, DING Zhenjie, et al. Experiment and application of SOS based pulsed power [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(8): 1195 - 1200. (in Chinese)
- [11] Zhang D D, Zhou Y, Wang J, et al. A compact, high repetition-rate, nanosecond pulse generator based on magnetic pulse compression system [J]. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(4): 1151 - 1157.
- [12] 饶俊峰, 邱剑, 刘克富. 脉冲压缩电路磁开关动态特性 [J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(4): 859 - 862.  
RAO Junfeng, QIU Jian, LIU Kefu. Dynamic characteristics of magnetic switch with pulse compression circuit [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(4): 859 - 862. (in Chinese)