



·脉冲功率技术·

一种固态化瞬态强场测试平台研制*

高景明^{1,2}, 李 嵩^{1,2}, 金尚东¹, 彭 伟¹, 刘 啸¹, 晏龙波¹, 杨汉武^{1,2}

(1. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 长沙 410073; 2. 脉冲功率激光国家重点实验室, 长沙 410073)

摘 要: 随脉冲功率技术向高重复频率、长寿命等方向发展, 储能元件和开关元件在瞬态强场条件下的稳定性检测十分必要。基于固态开关技术研制了一种百 kV, μs 时间尺度下的瞬态强场测试平台, 主要由高压直流充电电源、初级单元、脉冲变压器、磁脉冲压缩网络、复位系统和测试腔体组成, 实现了一体化结构, 使用便利。首先, 针对电容器测试条件, 建立了完整的电路模型, 详细设计了系统中各关键参量; 然后, 利用晶闸管组件作为初级单元控制开关, 利用磁开关进行两级脉冲压缩, 建立了实验装置; 最后, 给出了 40 nF 小批量陶瓷电容器的典型实验测试结果, 测试电压 50 kV, 脉冲宽度 1 μs , 重复频率 10 Hz, 运行时间 85 min (对应 51 000 个脉冲), 平台稳定可靠性良好, 为后续开展相关测试研究奠定了基础。

关键词: 脉冲功率; 固态开关; 强场测试平台; 晶闸管组件; 磁脉冲压缩; 脉冲电容器

中图分类号: TM836; TN78

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.210484

Development of solid-state platform for transient intense field test

Gao Jingming^{1,2}, Li Song^{1,2}, Jin Shangdong¹, Peng Wei¹, Liu Xiao¹, Yan Longbo¹, Yang Hanwu^{1,2}

(1. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. State key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: With the development of pulse power technology to high repetition rate and long life, it is necessary to test the stability of energy storage and switching components under transient intense field. This paper presents a solid-state platform for transient intense field test at several tens kilovolts with charging and discharging time in microsecond region. The platform consists of a high voltage power supply, a primary unit, a core-type pulse transformer, a magnetic compression network, core reset power supplies and a test cavity, hence it has an integrated structure and is easy to use. A circuit model is presented to optimize the electrical parameters of the platform. Then, the test platform is built up and experimented. A group of serial connected thyristors are used as control switch in the primary unit for pulse charging and high power magnetic switch is used for discharging in the test cavity. Preliminary results are obtained with ceramic capacitors of 40 nF under test, of which the test voltage is 50 kV, the pulse width is 1 μs with repetitive rate of 10 Hz and operation time of 85 min (51 000 pulses), indicating the platform is stable and reliable. The research results could setup good foundation for further investigation into related test.

Key words: pulsed power, solid-state switch, platform for transient intense field test, serial connected thyristors, magnetic pulse compression, high voltage pulse capacitor

随脉冲功率技术向高重复频率、长寿命等方向发展, 对储能元件和开关元件的稳定性要求越来越高^[1-10]。储能元件, 尤其是既要储能又要瞬间高功率释能的元件, 自身需要兼顾高电压、大电流和低电感, 其稳定性检测往往具有特殊性; 以陶瓷脉冲电容器为例, 单体耐压往往在百 kV 级, 实验中为降低直流充电的绝缘压力, 经常采用脉冲充电的方式, 针对性开展百 kV 级快速充放电的重复频率测试意义重大。同样, 对于开关元件, 尤其是基于新型电极材料的气体开关, 开展专门的重复频率长时间测试可为实际应用提供有力支撑。因此, 本文提出并建立一种固态化瞬态强场测试平台, 用于支撑储能元件和开关元件在瞬态强场条件下的稳定性检测。目前, 主要利用平台针对脉冲电容器开展了初步测试。关于脉冲电容器的测试已有较多文献报道, 典型的测试是在较长时间尺度

* 收稿日期: 2021-11-10; 修订日期: 2022-02-17

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目

联系方式: 高景明, megod818@163.com。

内恒电流充电不断提高电压至电容器损坏^[11];或者在一定充放电条件下测试其使用寿命,文献[12]报道了在百ms时间内充放电的重复频率测试研究,文献[13]报道了一种适合测试单个陶瓷电容的百kV实验装置。本文研制的固态化瞬态强场测试平台,利用晶闸管组件作为初级单元控制开关,利用磁开关进行两级脉冲压缩,充分发挥固态化开关无电极烧蚀的技术特点,从而获得较长的运行时间和使用寿命;适用于在百kV, μs 时间尺度下对小批量脉冲电容器进行测试,相比于个体独立测试有利于电容元件的性能对比和批量筛选。

1 系统设计与电路模拟

1.1 系统设计

系统采用初级半导体开关和后级磁脉冲压缩相结合的两级功率压缩方式进行脉冲压缩,再通过高功率磁开关快速放电,从而实现 μs 时间尺度的快速充放电。固态化瞬态强场测试平台系统框图如图1所示,主要包括高压充电单元、初级单元、闭环磁芯脉冲变压器、磁脉冲压缩网络、复位单元和测试腔体。

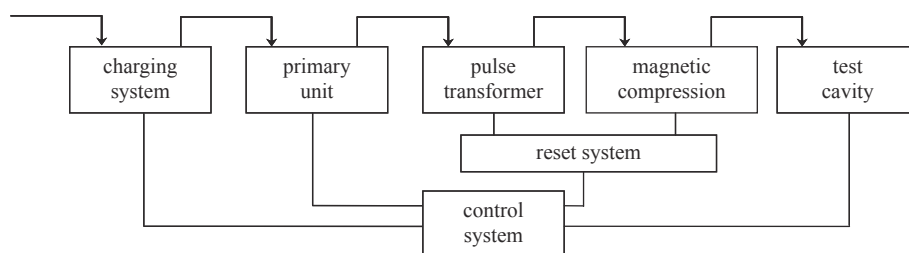


Fig. 1 Block diagram of the transient field test platform

图1 固态化瞬态强场测试平台系统框图

功率压缩过程开始于初级单元,使用晶闸管组件将初级单元的能量转换给脉冲变压器,变压器输出脉冲经单级磁压缩网络再次功率压缩后,进一步为测试腔体内的电容样品快速充电,最后,测试腔中的电容样品经磁开关对负载放电。

1.2 电路模拟

利用 PSpice 软件建立了测试平台电路仿真模型如图2所示,虚线框内为测试腔体。其中: C_0 为初级单元的储能电容; PSS1 为初级单元的晶闸管组件,初级单元产生的脉冲经闭环磁芯变压器 XF 进行升压,为后级磁压缩网络的电容器 C_1 充电; MS_1 为磁脉冲压缩网络的磁开关,用于完成进一步功率压缩; Test Cell 包括了待测的脉冲电容器网络和用于放电的磁开关 MS_2 ; R_L 是负载等效电阻;电路模型中可饱和电感与可饱和变压器的制作借鉴了子电路建模方法的用户自定义元件^[14]; I_{r1} , I_{r2} 和 I_{r3} 是3个直流电源,分别用于复位变压器 TF 和磁开关 MS_1 - MS_2 ; L_{r1} - L_{r3} 是复位绕组; C_{i1} - C_{i3} 和 L_{i1} - L_{i6} 分别是隔离电容和隔离电感,均用于保护直流电源。

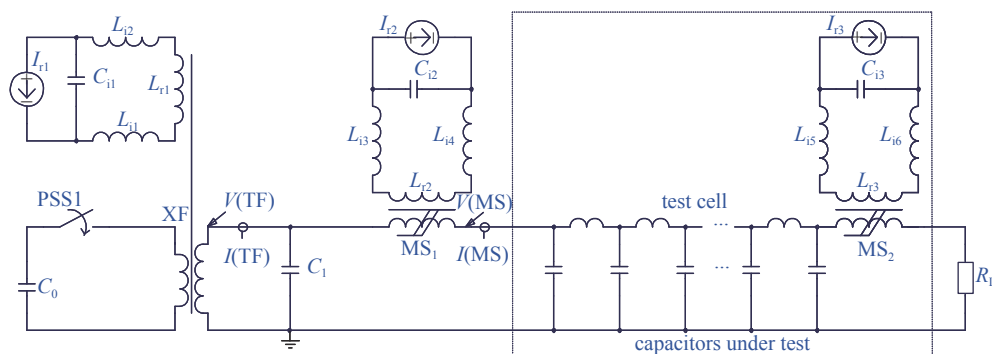


Fig. 2 Schematic of the solid-state transient intense field test platform

图2 固态化瞬态强场测试平台的电路示意图

各元件的参数设置如表1所示,初级电容 $C_0=2\ \mu\text{F}$,额定电压为20kV,次级电容 $C_1=40\ \text{nF}$,额定电压为200kV,脉冲变压器 XF 原边漏感约 $12.7\ \mu\text{H}$,变比为1:5;由 C_0 , C_1 和 TF 的参数配置可以看出, C_1 能够获得 TF 变比以上的充电电压;第一级压缩的磁开关 MS_1 伏秒积为 $384\ \text{mV}\cdot\text{s}$,测试腔内的磁开关 MS_2 伏秒积为 $32\ \text{mV}\cdot\text{s}$,负载阻值为 $4.7\ \Omega$ 。

当初级电容充电 11 kV 时,得到模拟结果如图3所示。测试电容为 40 nF 情况下,快速充电电压约 54 kV,充电

表 1 测试平台电气参数

Table 1 Electrical parameters of the test platform

voltage/kV	current/mA	repetition rate/Hz	test cell capacitance (typical)/nF	test cell voltage (maximum)/kV	core reset current/A
0~20	500	0~10	40	100	2

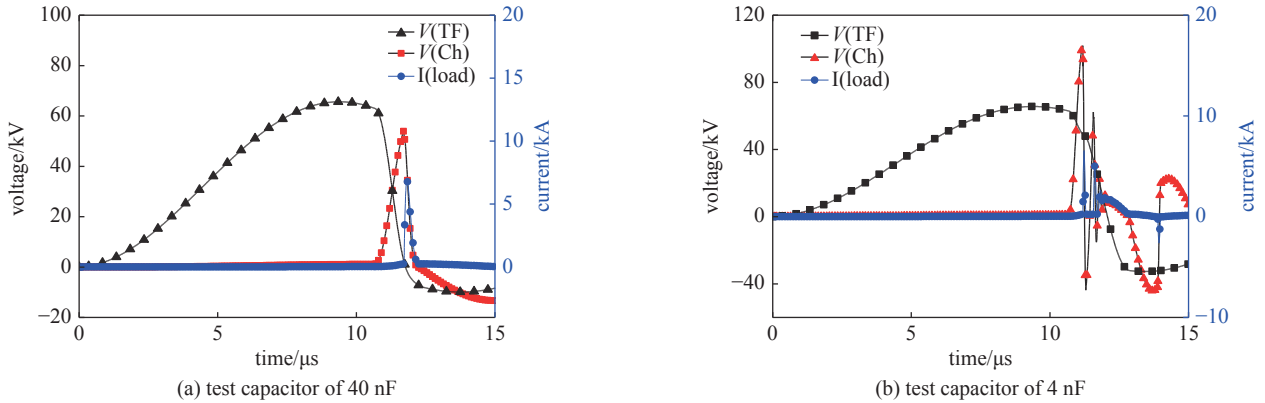


Fig. 3 Typical simulation results of the transient intense field test platform with different capacitors

图 3 在电容负载情况下测试平台的电路模拟结果

时间约 $1 \mu\text{s}$; 测试电容为 4 nF 情况下, 快速充电电压约 104 kV 。实际应用中, 可通过调整待测电容值和负载电阻, 使测试装置具有较宽的工作范围。通过以上电路模拟得到了测试平台中各元件的电参数, 用于进一步指导测试平台的建设。

2 实验研究

2.1 平台建立

根据系统设计框图和电路模拟结果建立了实验装置(技术参数见表 1), 系统结构示意图如图 4(a) 所示。实现了一体化设计, 连接市电即可进行本地和远程操控运行, 使用方便。其中, 控制单元、复位单元和充电单元工作于空气介质, 初级单元、脉冲变压器、磁脉冲压缩和磁开关工作于变压器油介质, 负载电阻是水电阻形式, 测试腔体为密闭空间, 可密封小于 1 个相对气压的绝缘气体。测试平台实物如图 4(b) 所示, 体积约 1 m^3 , 便于整体移动。

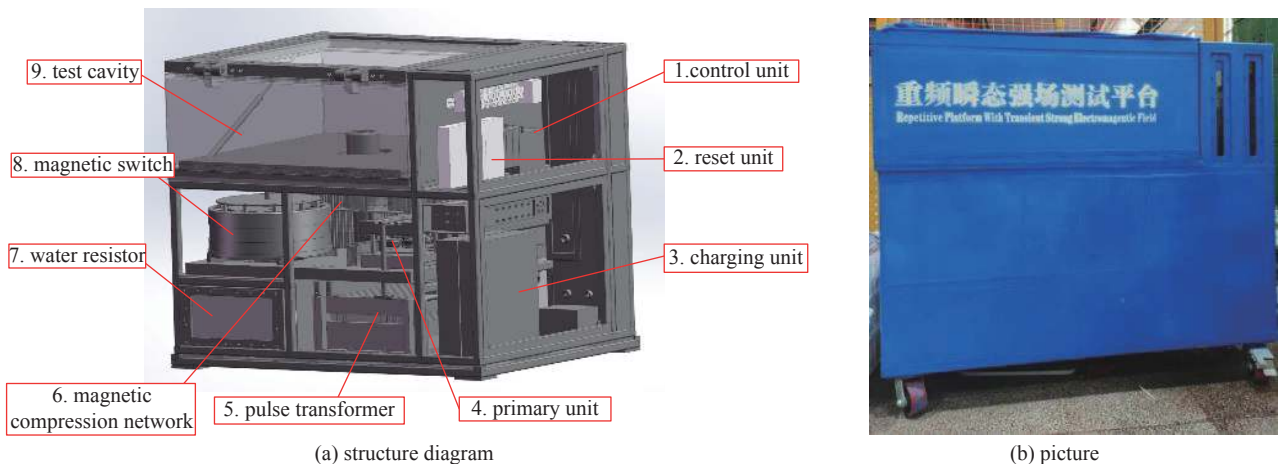


Fig. 4 Structure of the solid-state transient intense field test platform

图 4 固态化瞬态强场测试平台

充电单元的充电电压 $0 \sim 20 \text{ kV}$, 充电电流 500 mA ; 初级单元的晶闸管组件采用 6 个管子串联, 每支管子的额定电压 4.2 kV , 额定电流 30 kA ; 脉冲变压器采用跑道型闭环磁芯实现紧凑结构, 在提升初级电压的同时保持较高的能量转换效率; 磁脉冲压缩网络中磁开关的绕组为 15 匝双线并绕结构^[15], 磁芯为铁基非晶磁环, 具体参数如表 2 所示。

为实现稳定测试, 平台自身的可靠性非常重要, 主要体现在电特性和热特性等方面。所建平台采用晶闸管开关和磁开关相结合的固态化脉冲调制方式, 以及储能元件降额使用方式, 能够有效解决电特性稳定问题; 通过实验

表 2 铁基非晶磁芯技术指标

Table 2 Specifications of the Fe-based amorphous core

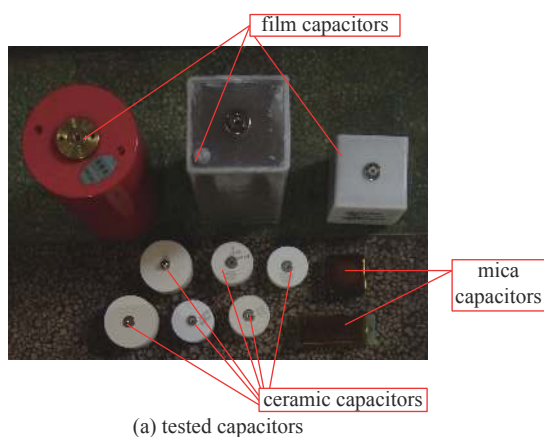
core material	outer diameter/mm	inner diameter/mm	height/mm	thickness/ μm	width/mm	B_s/T	B_r/T	insulation per layer/ V	stacking factor
2605SA-1	406	274	20	25	20	~ 1.56	≥ 1.4	120	~ 0.82

测试摸索系统的热特性,从而为确定重复频率长时间运行模式提供支撑。系统在 10 Hz 重复频率运行 1 h 情况下,负载方面对测试基本没有影响,因为水电阻的体积约 100 L,自身不进行循环且绝热情况下温升约 10 °C;开关方面,由于开关过程中最高等效工作频率约 MHz,磁开关发热较少,在油介质中能够实现热平衡。分析认为,限制系统连续运行时间的主要环节可能是晶闸管组件,并且其内部实际温度难以准确监测,在晶闸管结温和壳温未达到热平衡的情况下,功率器件表面温度也不是恒定的^[16]。

因此,有针对性地开展了缩比条件下的晶闸管温升实验测试,一种自然空气冷却型的测试器件如图 5 所示,在通流 kA、脉冲底宽 10 μs 情况下,单管连续工作 3.5 h,局部最高温度达到 44.9 °C,温升为 26.6 °C,经分析对应内部 PN 结温升高约 50 °C,该结果为初步测试结果,可为测试平台重复频率运行提供了一定参考,但更为准确的结果需要专门研究。在测试平台中,晶闸管工作的脉宽和通流条件与前面测试相近,产品手册中说明该型晶闸管安全结温为 125 °C,所以,针对 10 Hz 重复频率运行 1 h 的情况,并在油浸环境中使用,能够满足安全使用要求。

2.2 实验测试

利用该平台,针对多种脉冲电容器进行了小批量测试,如图 6(a)所示,能够实现相同批次器件的寿命对比和不同批次器件的筛选选型。针对总容值为 40 nF 的陶瓷电容器,在测试电容器没有损坏情况下,获得的一组典型实验结果如图 6(b)所示,测量了电容器的充电电压,以重叠模式显示,电压幅值约 50 kV,重复频率 10 Hz,运行 85 min,稳定可靠性良好,为进一步开展相关测试和器件应用奠定了基础。

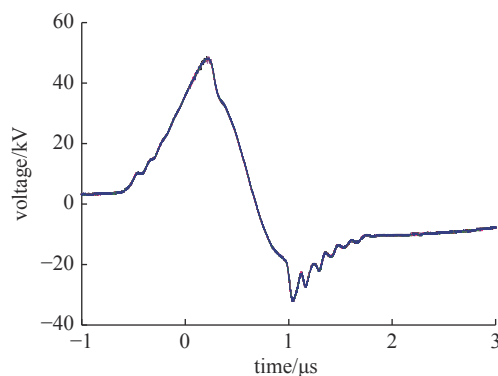


(a) tested capacitors



Fig. 5 Experimental test of thyristor temperature rise

图 5 晶闸管温升测试



(b) typical test results

Fig. 6 Typical results of the solid-state transient intense field test platform

图 6 固态化强场测试平台典型测试结果

3 结 论

基于晶闸管组件、闭环磁芯脉冲变压器和磁脉冲压缩等关键技术,研制了 1 台固态化瞬态强场测试平台。利用该平台,针对多种脉冲电容器进行了小批量测试,针对总容值为 40 nF 的陶瓷电容器,获得一组典型实验结果:测试电压 50 kV,脉冲宽度 1 μs ,重复频率 10 Hz,运行时间 85 min(对应 51 000 个脉冲)。

参考文献:

- [1] 王淦昌. 序言[C]//全国高功率粒子束十年文集. 1995. (Wang Ganchang. Preface[C]//Preface of the Decade Selected Works of High Pulsed Power in China.

- 1995)
- [2] 曾正中. 实用脉冲功率技术引论[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2003. (Zeng Zhengzhong. Introduction of pulsed power technology[M]. Xi'an: Shaanxi Technology Press, 2003)
- [3] 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)
- [4] 邓建军. 直线感应电子加速器[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006. (Deng Jianjun. Linear induction electron accelerator[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006)
- [5] 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, 2006. (Han Min, Zou Xiaobing, Zhang Guixin. Application of pulsed power technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006)
- [6] 布鲁姆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. (Bluhm H. Pulsed power systems: principles and applications[M]. Wang Weihua, Zhang Chi, trans. Beijing: Tsinghua University Press, 2008)
- [7] 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. Application of pulsed power technology[M]. Xi'an: Shaanxi Technology Press, 2016)
- [8] 江伟华. 高重复频率脉冲功率技术及其应用: (I)概述[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(1): 10-15. (Jiang Weihua. Repetition rate pulsed power technology and its applications: (I) introduction[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(1): 10-15)
- [9] 丛培天. 中国脉冲功率科技进展简述[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32: 025002. (Cong Peitian. Review of Chinese pulsed power science and technology[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32: 025002)
- [10] Gao Jingming, Yang Hanwu, Li Song, et al. Investigation on a high power, low impedance, and long pulse generator based on magnetic switches[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(4): 988-992.
- [11] Domingos H, Quattro D P, Scaturro J. Breakdown in ceramic capacitors under pulsed high-voltage stress[J]. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 1978, 1(4): 423-428.
- [12] Matthews E J, Kristiansen M, Neuber A A. Capacitor evaluation for compact pulsed power[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2010, 38(3): 500-508.
- [13] 马成刚, 李亚维, 李玺钦, 等. 重复频率电容器寿命测试平台[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26: 125002. (Ma Chenggang, Li Yawei, Li Xiqin, et al. Lifetime test platform for repetitive capacitors[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26: 125002)
- [14] Barrett D M. Modeling the characteristics of a magnetically switched pulse-forming line[C]//Proceeding of 7th IEEE International Pulsed Power Conference. 1989: 167-170.
- [15] Li Song, Gao Jingming, Yang Hanwu, et al. A gigawatt level repetitive rate adjustable magnetic pulse compressor[J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86: 084705.
- [16] 张星汝, 冯冰洋, 刘俊, 等. 高电压大电流晶闸管组件的热特性[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32: 025016. (Zhang Xingru, Feng Bingyang, Liu Jun, et al. Thermal characteristics of high voltage and high current thyristor assembly[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32: 025016)