



·脉冲功率技术·

## 用于地球磁尾三维磁重联实验的脉冲电源\*

马 勋<sup>1</sup>, 关 键<sup>2</sup>, 李松杰<sup>1</sup>, 赵 娟<sup>1</sup>, 肖金水<sup>1</sup>, 邓维军<sup>1</sup>,  
丁明军<sup>1</sup>, 康传会<sup>1</sup>, 佟为明<sup>3</sup>, 李洪涛<sup>1</sup>, 鄂 鹏<sup>3</sup>

(1. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 哈尔滨工业大学 电气工程系, 哈尔滨 150001;  
3. 哈尔滨工业大学 空间环境与物质科学研究院, 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 空间环境地面模拟装置是哈尔滨工业大学承建的国家重大科技基础设施项目, 其包含的空间等离子体环境模拟与研究系统是用于提供磁重联过程等基本物理过程的时空演化规律研究的平台。在研究地球磁尾三维磁重联时, 使用处于真空环境内的偶极磁场线圈和两个磁镜场线圈来提供研究所需的模拟背景磁场, 其中偶极场线圈为一个总电感为 17.4 mH、总电阻为 30.25 mΩ 的单个线圈, 而磁镜场线圈为两个线圈镜像对称设置并串联连接, 总电感 30.16 mH, 总电阻 58.81 mΩ。为了产生实验所需背景磁场的幅值和持续时间, 研制并测试了两套总能量 3.36 MJ 的脉冲电源, 在进行地球磁尾三维磁重联实验时两套电源需要同时工作。用于驱动偶极场线圈的脉冲电源按照实验需求可以在充电电压不大于 20 kV 的情况下, 能够提供超过 9 kA 的峰值电流, 95% 峰值电流的持续时间超过了 5 ms, 由峰值时刻降低到 10% 峰值时刻的时间不超过 130 ms; 用于驱动磁镜场线圈的脉冲电源按照实验需求可以在充电电压不大于 20 kV 的情况下, 能够提供超过 8 kA 峰值电流, 95% 峰值电流的持续时间超过了 5 ms, 由峰值时刻降低到 10% 峰值时刻的时间不超过 130 ms。

**关键词:** 地球磁尾; 三维磁重联; 偶极场线圈; 磁镜场线圈; 脉冲电源

中图分类号: TM833; TL823

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.220284

## Pulsed power supply for three-dimensional magnetic reconnection experiment of earth's magnetotail

Ma Xun<sup>1</sup>, Guan Jian<sup>2</sup>, Li Songjie<sup>1</sup>, Zhao Juan<sup>1</sup>, Xiao Jinshui<sup>1</sup>, Deng Weijun<sup>1</sup>, Ding Mingjun<sup>1</sup>,  
Kang Chuanhui<sup>1</sup>, Tong Weiming<sup>3</sup>, Li Hongtao<sup>1</sup>, E Peng<sup>3</sup>

(1. Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

3. Laboratory for Space Environment and Physical Sciences, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** A new large research infrastructure for fundamental researches on the space environment, Space Environment Simulation Research Infrastructure (SESRI), is being constructed. When studying the three-dimensional magnetic reconnection of the earth's magnetotail, the dipole coil and two magnetic mirror coils in vacuum environment are used to provide the simulated background magnetic field required for the study. To generate the amplitude and duration of the background magnetic field required by the experiment, two sets of pulsed power supplies with a total energy of 3.36 MJ are developed and tested. The pulsed power supply used to drive the dipole coil can provide a peak current of more than 9 kA when the charging voltage is not more than 20 kV, and the duration of 95% peak current is more than 5 ms, the time from peak time to 10% peak time does not exceed 130 ms; According to the experimental requirements, the pulsed power supply used to drive the magnetic mirror coil can provide a peak current of more than 8 kA when the charging voltage is not more than 20 kV, the duration of 95% peak current is more than 5 ms, and the time from peak time to 10% peak time does not exceed 130 ms. The two sets of pulsed power supplies need to work simultaneously in the three-dimensional magnetic reconnection experiment of the earth's magnetotail.

**Key words:** earth's magnetotail, three-dimensional magnetic reconnection, dipole coil, magnetic mirror coil, pulsed power supply

\* 收稿日期: 2022-09-09; 修订日期: 2022-10-13  
联系方式: 马 勋, 13778053819@163.com。  
通信作者: 李洪涛, lht680526@21cn.com;  
鄂 鹏, epeng@hit.edu.cn。

在实验室中进行磁重联过程的模拟研究是研究磁重联现象的重要手段<sup>[1]</sup>。世界上已经有多个实验装置对空间等离子体磁重联现象进行了实验室模拟研究,但目前国内外设计和建造的磁尾等离子体研究装置只能提供二维或近似三维重联的模拟,并不能真实反映三维磁尾重联的结构特点<sup>[2-4]</sup>。为了更为准确地模拟三维磁尾重联结构,哈尔滨工业大学的空间等离子体环境研究装置(Space Plasma Environment Research Facility, SPERF)采用了包括两个对称设置的磁镜场线圈和一个位于双磁镜场线圈对称轴的偶极磁场线圈的技术路线来模拟地球磁尾三维磁重联的背景磁场环境。为了驱动两种线圈产生实验所需的磁场幅度和持续时间,需要脉冲电源为他们提供激励电流。在进行地球磁尾三维磁重联实验时,需要脉冲电源分别为偶极场线圈、磁镜场线圈提供数 kA、且维持峰值电流 95% 时间不小于 5 ms、脉冲后沿小于 130 ms 的脉冲电流<sup>[5-7]</sup>。本文研制了分别用于驱动偶极场线圈和磁镜场线圈的脉冲电源,通过放电电路的基本原理来确定主要元件的参数,对两套脉冲电源的进行了详细设计,并且对脉冲电源整机进行了放电测试,测试结果表明脉冲电源满足两种线圈对其输出电流的指标要求。

## 1 电源设计

### 1.1 电路设计

偶极场线圈和磁镜场线圈的脉冲电源都是采用高压脉冲电容器作为储能元件,由续流电阻和续流二极管串联组成的续流支路,这样不仅可以防止由于电压震荡损坏电容器,还可以通过续流支路中的电阻调节输出电流波形的下降沿以及耗散掉施加在负载线圈上的能量<sup>[8]</sup>,如图 1 所示。整个电路的工作过程可以分为两个阶段:(1)电容器的初始电压为  $U_0$ ,在电容器两端电压反向之前,电容对负载放电;(2)当电容器两端电压反向后,续流二极管导通,续流支路开始工作。

第一阶段中电路中电流  $I(t)$  和峰值电流  $I_{\max}$  可以表示为<sup>[9]</sup>

$$I(t) = I_L(t) = e^{-\alpha t} \frac{U_0}{L\omega} \sin\omega t \quad (1)$$

$$I_{\max} = e^{-\alpha t_1} U_0 \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{R}{2L} \quad (3)$$

$$\omega = \sqrt{\beta^2 - \alpha^2} \quad (4)$$

式中:  $R$  为放电回路的总电阻,  $L$  为放电回路的总电感,  $C$  为电容器的电容值,  $\beta = 1/\sqrt{LC}$  为电路工作在一阶段时放电回路的固有震荡频率。

当电容器两端的开始出现反向时,放电电路进入第二阶段,描述整个电路工作过程的微分方程为

$$\frac{d^2 U_c}{d(t-t_2)^2} + \left( \frac{R}{L} + \frac{1}{CR_c} \right) \frac{dU_c}{d(t-t_2)} + \frac{R_c + R}{LCR_c} U_c = 0 \quad (5)$$

式中:  $U_c$  是电容器上的电压,而  $T=t-t_2$ ,  $R_c$  为续流电阻的阻值。为了避免整个电路出现震荡,整个电路应该工作在过阻尼状态<sup>[10]</sup>,因此续流电阻的阻值应该满足如下条件

$$0 < R_c < \frac{2L\sqrt{LC} - LCR}{4LC - R^2C^2} \quad (6)$$

由式(1)~(6),电源系统设计参数如表 1 所示。

### 1.2 模块化设计

偶极场线圈和磁镜场线圈的脉冲电源均由 5 个模块构成,每个模块具有独立充放电功能,模块由高压脉冲电容器、放电开关、触发、泄放、模块控制器与测量模块等组成。采用模块设计可以提高脉冲电源的维护效率,并且将较大的能量分散开,减少所有能量集中产生风险时的危害<sup>[11]</sup>,模块电路如图 2 所示。

各放电模块主要由保护电路和放电电路组成。保护电路可在放电装置故障的情况下降低充电机损坏的风险,

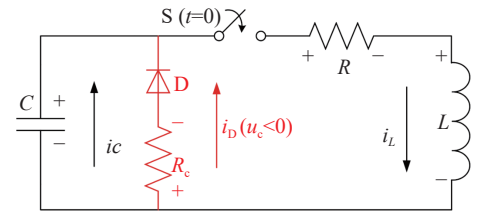


Fig. 1 Schematic of capacitive pulsed power supply with crowbar branch

图 1 带有续流支路的电容储能脉冲电源电路原理图

表 1 两套电源电容值和续流电阻值的设计参数

Table 1 Designed capacitance and crowbar resistance value of two sets of pulsed power supplies

pulsed power supply	total capacitance/ $\mu\text{F}$	total crowbar resistance/ $\text{m}\Omega$	number of modules	capacitance of each module/ $\mu\text{F}$	crowbar resistance of each module/ $\text{m}\Omega$
for dipole coil	8400	263	5	1680	2630
for magnetic mirror coils	8400	200	5	1680	2630

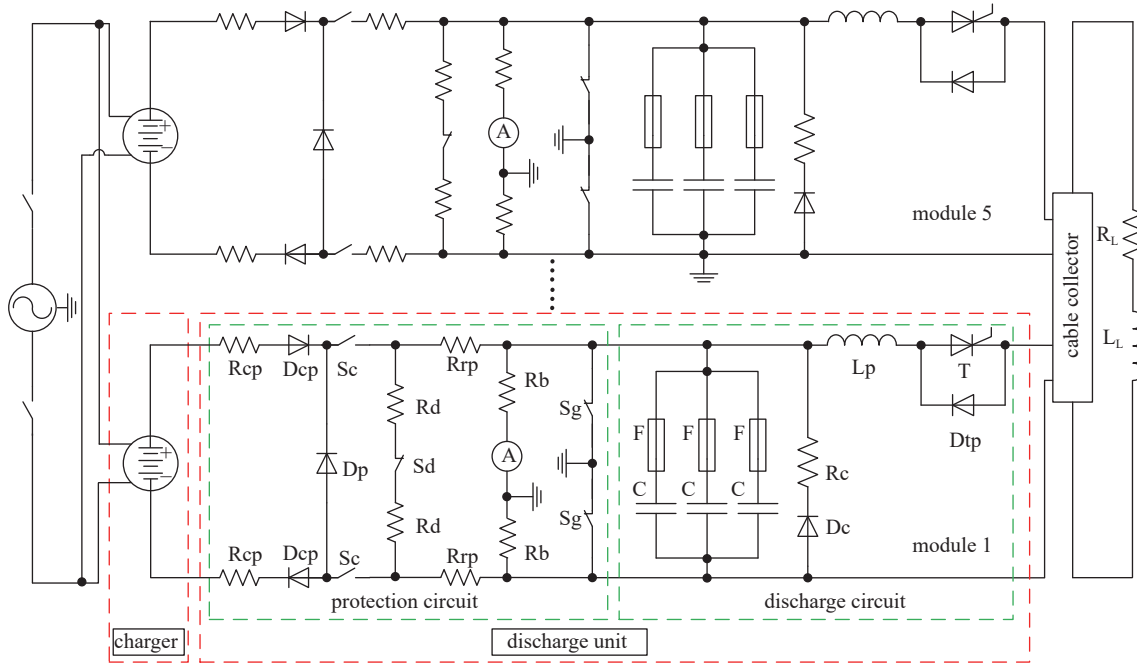


Fig. 2 Schematic circuit diagram of the pulsed power supply

图 2 脉冲电源电路原理图

并使用主动或被动方法耗散掉电容器中存储的能量。每个模块通过保护电阻( $R_{rp}$ )与泄放电阻( $R_d$ )相连。如果电容器充电后放电中止,则泄放电阻( $R_d$ )是一个关键的安全部件,通过它整个模块可以安全放电。此外,电容器放电后的剩余电荷也可以通过泄放电阻( $R_d$ )放电。当泄放开关( $S_d$ )闭合时,电容器的最大初始电压(20 kV)可在 30 s 内降至 36 V 的安全值。泄漏电阻( $R_b$ )与模块中的每个电容器并联连接,以在泄放电阻器和其他泄放措施发生故障时缓慢排空电荷。为了便于表达,将图 2 中的支路合并为一个,并包括在保护电路中。泄漏电阻( $R_b$ )应能在 12 h 内将电容器的最大初始电压放电至 36 V 以下,这是一种被动保护机制。当使用电压表测量每个电容器的实时电压时,由于其内阻较小,会导致泄漏支路的电阻显著降低。因此,采用与泄漏支路串联的电流表测量泄漏电流并将其转换为电压。为了确保电容器上没有剩余电荷,当脉冲电源不工作时,带常闭触点的接地开关( $S_g$ )应闭合。保护电路中使用的电阻器的详细参数如表 2 所示。其中每侧的  $R_{rp}$  由三个并联电阻组成,电阻约为 0.67 k $\Omega$ ,每个  $R_d$  由三个并联电阻组成,两个  $R_{rp}$  与两个  $R_d$  配合进行泄放动作。

表 2 保护电路电阻参数

Table 2 Resistor parameters of the protection circuit

resistor	resistance/ $\text{k}\Omega$	rated power/W	number
$R_{cp}$	0.022	20	2
$R_{rp}$	2	3000	6
$R_d$	2	3000	6
$R_b$	5000	100	2

### 1.3 控制与数据采集系统

在进行地球磁尾三维磁重连实验时,偶极场线圈和磁镜场线圈的脉冲电源需要根据及时的实验需求进行同步触发或者延迟触发,所以需要一套功能完整的控制系统对两套电源进行操作。控制系统是基于实验物理和工业控制系统(EPICS)软件基础设施的分布式控制系统。使用 EPICS 软件基础设施可以实现硬件和软件的高速、模块

化、可扩展性和健壮性<sup>[12-13]</sup>。控制系统的硬件主要由远程控制系统、本地控制器和模块控制器组成。脉冲电源控制系统功能如图 3(a)所示<sup>[14]</sup>。每套脉电源包含一个本地控制器,每个模块包含一个模块控制器。充电和停止充电命令由远程控制系统通过本地控制器发送给充电器,放电单元的倾倒和触发命令由远程控制系统通过本地控制器发送给模块控制器。模块控制器向继电器控制器发送指令来控制充电和卸载继电器,它们是由电磁阀控制的气动开关,而接地继电器是由手动气阀控制的气动开关。继电器控制器还控制风扇散热。此外,各个模块的数据上传,包括数据采集和故障反馈,也通过本地控制器发送到远程控制系统。操作人员可以使用 EPICS 客户端层的远程控制系统来实现上述控制操作并获取上传的数据,如图 3(b)所示。

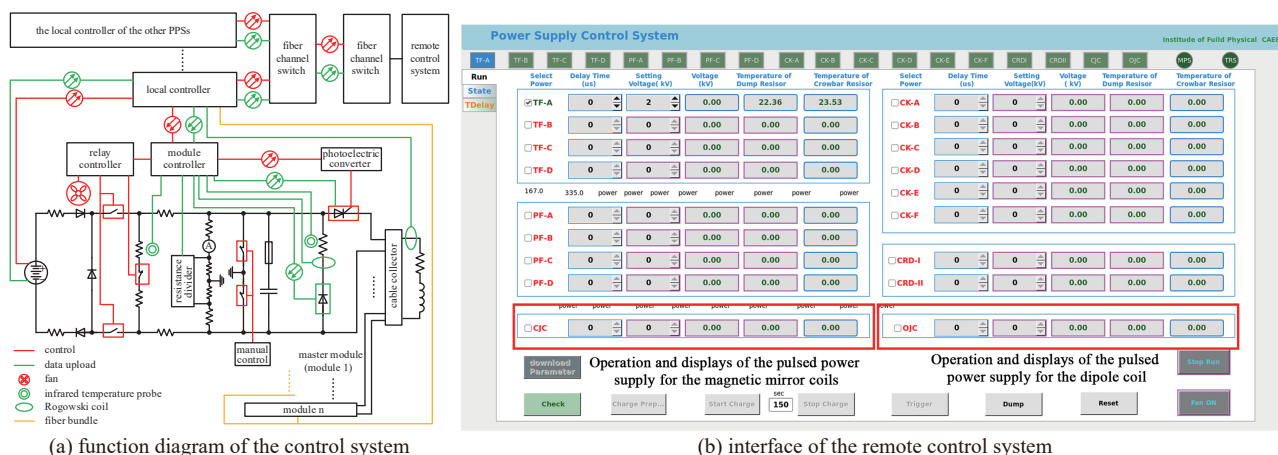


Fig. 3 Function diagram of the control and data acquisition system and remote control system interface

图 3 脉冲电源控制控制及数据采集系统功能图和远程控制系统界面

每套脉冲电源中的模块的控制功能和结构都是相同的。所有模块的充电器、晶闸管堆叠组件(T)和二极管堆叠组件(Dc)的故障反馈也相同。此外,每个放电单元都可以使用红外温度探头测量转储电阻和撬棒电阻的温度。但是,每套电源模块中只有一个是主模块,具有测量续流支路的电流和电容器的电压的功能。续流支路的电流和电容器的电压分别由 Rogowski 线圈和电阻分压器测量。负载的总电流也由罗氏线圈测量,测量数据由本地控制器直接上传到上位机。将模块控制器和继电器控制器集成到放电单元中,以提高放电单元的集成度并减小脉冲电源的尺寸。

## 2 脉冲电源的测试

组装完成的放电模块和充电器如图 4 所示,两套电源在进行放电测试前还需要进行耐压测试和放电模块的功能测试,当这两项测试完成后,所有放电模块、充电器、本地控制器均放置在货架上进行放电测试来验证脉冲电源是否满足设计需求。放电测试采用对模拟负载放电的方法<sup>[15]</sup>,模拟负载具有与真实负载近似的电阻和电感,出于成本的考虑,目前只具有偶极场线圈的模拟负载,而对于磁镜场脉冲电源的测试,由于两种电源模块数量相同,并且模块原理结构也相同,则通过偶极场线圈脉冲电源的放电结果结合计算来验证磁镜场脉冲电源的放电能力是否

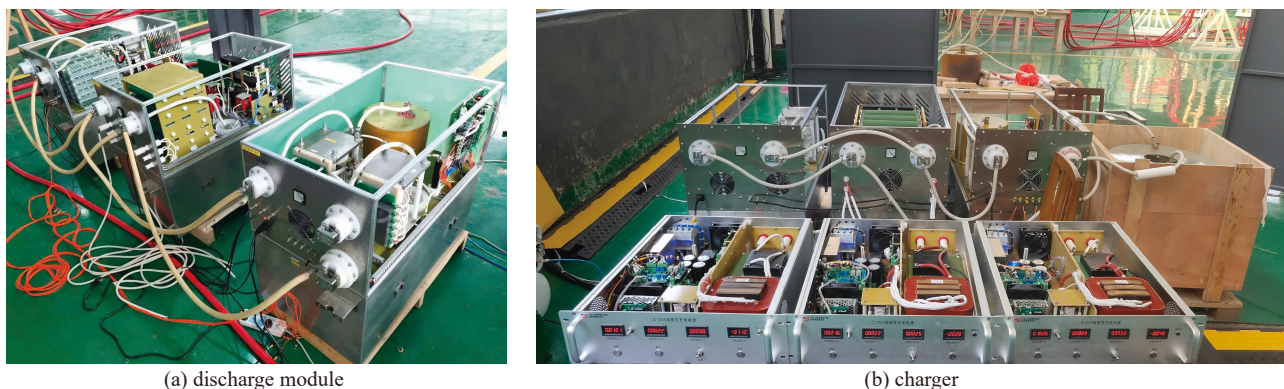


Fig. 4 Pictures of the discharge module and the charger

图 4 组装完成的放电模块和充电器

满足设计需求。

偶极场线圈脉冲电源的放电测试现场如图 5 所示, 每个模块的输出电缆通过汇流盘与模拟负载的输入输出电缆连接, 罗氏线圈放置在与模拟负载连接的输入或输出电缆上用来测量流过模拟负载的总电流。在充电电压为 20 kV 的情况下, 偶极场线圈的脉冲电源的放电波形如图 6 所示, 输出峰值电流为 12.3 kA, 95% 峰值电流持续时间为 8.15 ms, 由峰值电流时刻下降到 10% 峰值电流时刻的时间为 63.93 ms。另外对脉冲电源的电路模型进行了仿真, 以验证设计和测试结果, 从图 6 可以看出, 放电测试中脉冲的输出电流波略落后于模拟, 因为实际的虚拟负载由于加工误差, 其参数大于理论设计值, 并且存在杂散电路中的电感等因素所导致的。但是偶极场线圈的脉冲电源输出电流的指标依旧满足设计需求。

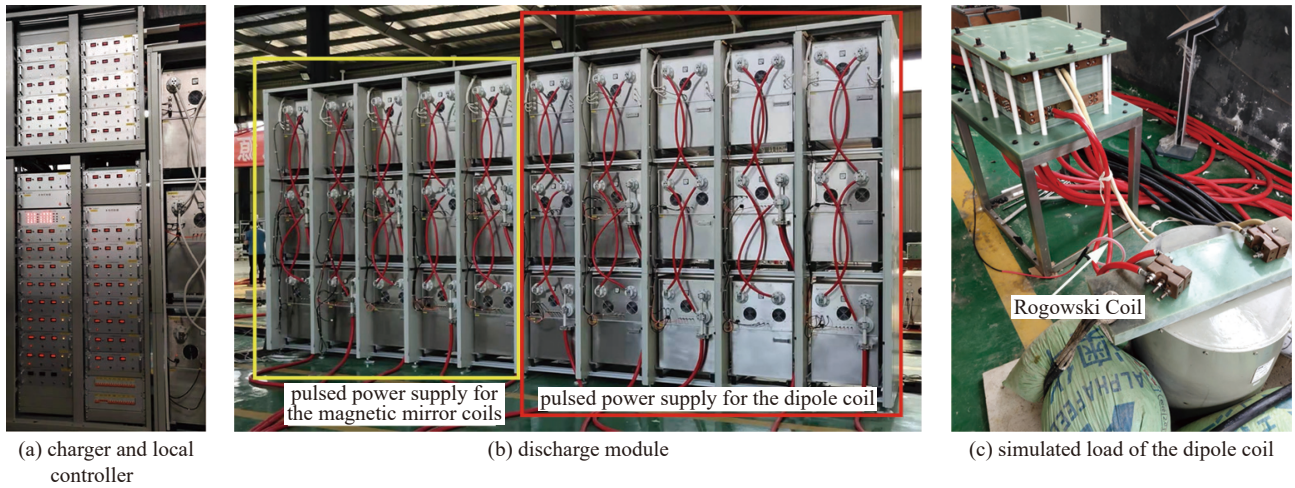


Fig. 5 Discharge test of the pulsed power supply

图 5 脉冲电源放电测试现场

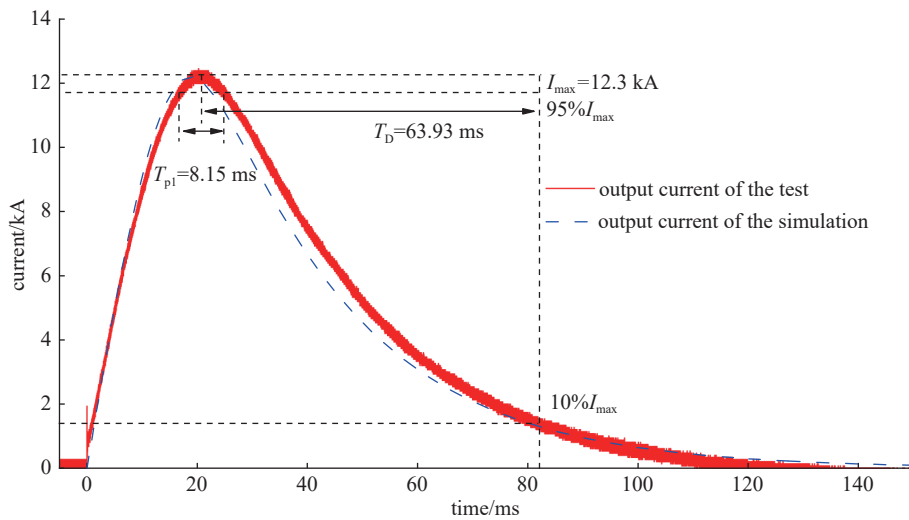


Fig. 6 Output current of the pulsed power supply for the dipole coil in the discharge test and the simulation

图 6 偶极场线圈脉冲电源放电测试中输出电流波形

对于磁镜场线圈脉冲电源的输出电流能力的验证, 由于实际负载尚未完成, 基于实验结果优化的电路模型仿真来验证, 磁镜场线圈脉冲电源的仿真结果如图 7 所示, 由图可见, 磁镜场线圈的脉冲电源也满足设计需求。

### 3 结 论

地球磁尾三维磁重联研究是空间等离子环境模拟与研究系统的一个研究内容, 为了实现实验所需的背景磁场, 系统使用一个偶极场线圈和 2 个串联磁镜场线圈来实现地球磁尾的磁场环境, 为了达到实验所需的磁场幅度和持续时间, 两种线圈分别由一套脉冲电源提供激励电流。本文对两种线圈的脉冲电源进行了详细设计, 并且进行放电测试来验证其是否满足设计需求。偶极场线圈脉冲电源在充电电压为 20 kV 时, 能够输出 12.3 kA 峰值电流, 95% 峰值电流的持续时间为 8.15 ms, 由峰值时刻降低到 10% 峰值时刻的时间为 63.93 ms。由于缺少磁镜场线

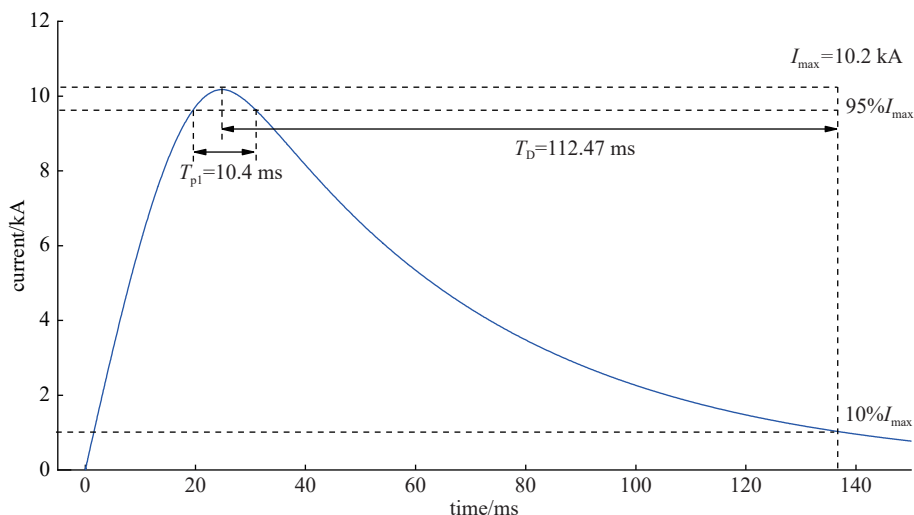


Fig. 7 Output current of the pulsed power supply for the magnetic mirror coil in the simulation

图 7 磁镜场线圈脉冲电源仿真计算中的输出流波形

圈的模拟负载, 则使用仿真的方法来验证磁镜场线圈脉冲电源的输出能力, 由仿真可知磁镜场线圈脉冲电源在充电电压为 20 kV 时, 能够输出 10.2 kA 峰值电流, 95% 峰值电流的持续时间为 10.4 ms, 由峰值时刻降低到 10% 峰值时刻的时间为 112.47 ms。两种脉冲电源的设计满足设计需求。

#### 参考文献:

- [1] Stenzel R L, Gekelman W. Laboratory experiments on current sheet disruptions, double layers turbulence and reconnection[M]//Kundu M R, Holman G D. Unstable Current Systems and Plasma Instabilities in Astrophysics. Dordrecht: Springer, 1985.
- [2] Gekelman W, de Haas T, Daughton W, et al. Pulsating magnetic reconnection driven by three-dimensional flux-rope interactions[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116: 235101.
- [3] Gekelman W, Lawrence E, Collette A, et al. Magnetic field line reconnection in the current systems of flux ropes and Alfvén waves[J]. *Physica Scripta*, 2010, 142: 014032.
- [4] Stenzel R L, Gekelman W. Magnetic field line reconnection experiments 1. Field topologies[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1981, 86(A2): 649-658.
- [5] Mao Aohua, Ma Xun, E Peng, et al. An 18.3 MJ charging and discharging pulsed power supply system for the Space Plasma Environment Research Facility (SPERF). I. The overall design[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91: 084702.
- [6] Mao Aohua, Ren Yang, Ji Hantao, et al. Conceptual design of the three-dimensional magnetic field configuration relevant to the magnetopause reconnection in the SPERF[J]. *Plasma Science and Technology*, 2017, 19: 034002.
- [7] E Peng, Ling Wenbin, Mao Aohua, et al. Study on the magnetic forces of the dipole in the SPERF[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2020, 48(1): 266-274.
- [8] Saxena A K, Rawool A M, Kaushik T C. Crowbar scheme based on plasma motion for pulsed power applications[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2013, 41(10): 3058-3062.
- [9] E Peng, Guan Jian, Ling Wenbin, et al. An 18.3 MJ charging and discharging pulsed power supply system for the Space Plasma Environment Research Facility (SPERF): modular design method and component selection[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2021, 92: 034709.
- [10] 蒋成玺. 脉冲强磁场电源系统设计与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013. (Jiang Chengxi. Design and realization of pulse power supply system for pulsed high magnetic field[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013)
- [11] E Peng, Guan Jian, Ma Xun, et al. An 18.3 MJ charging and discharging pulsed power supply system for the Space Plasma Environment Research Facility (SPERF): the subsystem for the dipole coil[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2021, 92: 044706.
- [12] Leone D, Carrubba V, Mazzaro S, et al. EPICS application for ITER RH supervisory control system[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2021, 169: 11429.
- [13] Kim K H, Ju C J, Kim M K, et al. The KSTAR integrated control system based on EPICS[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2006, 81(15/17): 1829-1833.
- [14] E Peng, Guan Jian, Jin Chenggang, et al. An 18.3 MJ charging and discharging pulsed power supply system for the Space Plasma Environment Research Facility (SPERF): the subsystem for the magnetopause shape control coils[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2021, 92: 064709.
- [15] 李松杰, 赵娟, 康传会, 等. 240 kJ 模块化能库型脉冲放电电源研制[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 095015. (Li Songjie, Zhao Juan, Kang Chuanhui, et al. Development of a 240 kJ modularized pulsed power supply[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 095015)