

# 直流高压缓冲器的研制

曹亮<sup>1</sup>, 李格<sup>2</sup>, 王海田<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240; 2. 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

**摘要:** 铁心缓冲器(core snubber)是中性束加热高压电源中最常用的一种抑制短路电流的装置,也是国家重大科学工程超导托卡马克聚变实验装置(EAST)的中性束注入器在高压打火故障时免于损坏的重要保障。为了研究所选铁心在高频脉冲放电情况下的特性,给设计提供依据,对测试件进行了短路放电测试。利用测量的电压电流得到了铁心的 $B-H$ 曲线,并对有无偏置电流进行了比较;根据实验得到的参数设计了100 kV电源缓冲器,最后通过仿真对该设计进行了验证。结果表明装置中加入偏置电流后,可大大增加铁心磁通密度的变化幅度,起到增加铁心利用率的目的。设计得到的缓冲器可以将短路电流限制在预设的300 A之内。该电磁计算和高频放电测试得到的数据可为缓冲器设计提供参考,并可进一步为高压直流电网短路缓冲设计提供有效的技术手段。

**关键词:** 短路缓冲器;  $B-H$ 曲线; 磁开关; 放电实验; 中性束注入; 高压直流

**中图分类号:** TM402 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6520(2010)05-1269-06

## Development of Iron Core Snubber

CAO Liang<sup>1</sup>, LI Ge<sup>2</sup>, WANG Hai-tian<sup>1</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;  
(2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Core snubber is one of the most important devices to protect the neutral beam injector (NBI) system during the breakdown period. To study the characteristics of the specified ferromagnetic material of the core in the high frequency discharge condition, the discharge voltage and current were measured. With the results, the  $B-H$  curve was then calculated. According to the derived parameters of the curve, the core snubber for a 100 kV NBI power supply was designed and simulated by MATLAB/SIMULINK. The results show that the bias current can enlarge the flux swing significantly. The designed snubber limits the short circuit current within 300 A. The magnetic analysis and the high frequency discharge test can shed more light on the design of the snubber of the high voltage DC power grid.

**Key words:** core snubber;  $B-H$  curve; magnetic switch; discharge experiment; neutral beam injector(NBI); HVDC

## 0 引言

国家重大科学工程超导托卡马克聚变实验装置(EAST)的中性束注入(NBI)系统由电源系统、高压传输线和中性束注入器等组成<sup>[1-3]</sup>。它的电源供电系统极其复杂,是由一组可调的大功率脉冲电源组成,主要包括离子源头部电源、束引出系统电源和偏转磁体电源。并且其大部分电源都悬浮于高压点位上<sup>[4-7]</sup>。某些时候,可能由于电极表面、气体压力等工作状态的不同,加速电极间会出现电击穿。当击穿发生时,必须要对其进行保护,如果负载故障时

吸收的能量大于几J(约 $>5$ J),离子源将受到严重损坏。因此必须加以保护。

负载故障时的放电能量主要来源于两个部分:一是接在等离子体电极的高压前级电源,在离子源打火时可以通过直流侧快速开关在几 $\mu$ s内切断和转移电流(能量);二是所有浮在高电位100 kV的设备及电缆等对地分布电容的储能。这些分布电容主要包括了电源系统分布电容、传输线分布电容和离子源分布电容<sup>[8-12]</sup>。设计时可以将其等效成一个电容值。根据国外同类型的装置,这些分布电容值约为 $3.5 \text{ nF}$ <sup>[2]</sup>。

缓冲器是一种利用变压器原理设计的吸收瞬态短路电流能量的装置。在稳态时,由于电源输出电流为直流电,缓冲器不对系统产生影响。一旦短路发生,缓冲器既可以限制短路放电的峰值电流,也能吸收掉大部分的能量。因此合理的缓冲器设计对NBI系统具有极其重要的作用。目前国内外主要对snubber等效电路和等效电路参数对电源系统的影

基金资助项目: EAST国家大科学工程辅助加热项目;教育部博士点基金(20060248012);上海-加拿大研究理事会合作基金(06SN07113)。

Project Supported by Large Scientific Project of EAST Auxiliary Heating Upgrade, Ph.D. Programs Foundation of Ministry of Education of China (20060248012), Shanghai-Canada Research Council Cooperation(06SN07113).

响进行了分析<sup>[13-16]</sup>,对 snubber 的电磁设计的研究甚少。因此本文给出了一种铁心性能测试的方法,并利用实验数据进行了 snubber 的电磁设计。最后通过电路仿真研究了其系统响应。

## 1 几种缓冲器的原理与几种缓冲器类型的比较

Snubber 的主要工作原理都是利用电感限制电流的幅值,利用电阻消耗系统储能。且电源系统为直流供电,在稳态时缓冲器不对系统产生影响。其主要的结构包括空心缓冲器和铁心缓冲器。

空心缓冲器 (air core snubber) 类似于一种大耦合系数的空心变压器,通过合理设计空心变压器二次侧的电阻,可以吸收系统短路时的大部分能量<sup>[2]</sup>。铁心缓冲器是由空心圆柱的软磁铁心构成,并包围在高压直流传输线上。由于铁心的存在,在铁心段会有一个比较大的电感,一旦系统发生短路,短路电流被铁心等效的大电感限制,同时放电能量转移到铁耗电阻(涡流损耗和磁滞损耗)上消耗掉。如果铁心损耗不足以消耗掉大部分储能,则可以在铁心上增加一个二次侧绕组,利用该绕组串联电阻消耗储能。

铁心缓冲器 (core snubber) 对传输线设计没有任何影响,仅仅是在靠近负载侧插入一段铁心。并且可以根据需要任意调整铁心的长度来调整铁心缓冲器的电感量。铁心缓冲器的绝缘设计也较简单。因为空心变压器在设计出较大的绝缘距离时也会减小耦合系数,使系统响应变差。两种缓冲器相比较,铁心缓冲器具有更大的优势。因此这种铁心缓冲器是目前为止研究最充分、性能最稳定、应用也最广泛的一种结构,也是本文将重点研究的对象。

## 2 铁心缓冲器

### 2.1 铁心缓冲器的特点

铁心缓冲器在系统中的位置如图 1。空心圆柱形的铁心与传输线同轴布置并尽可能靠近负载侧,以减小缓冲器和负载之间的分布电容。偏置电源提供一个恒定电流,其作用为了避免根据电源参数设计出的缓冲器体积过大。该缓冲器的反向偏置电路方向与主回路电流相反,以获得反向磁通初始值,防止磁饱和。并且将铁心偏置到负饱和位置也可使非故障时的铁心电感很小,减小甚至不影响主回路的正常运行<sup>[3]</sup>。

在图 2 的  $B-H$  曲线波形中,当通入偏置电流时,缓冲器铁心进入深度饱和,即图中的 R 点。在 NBI 正常工作时,主回路电流使得铁心的状态向回移动到点 S,此时铁心材料工作点仍然处于饱和区,

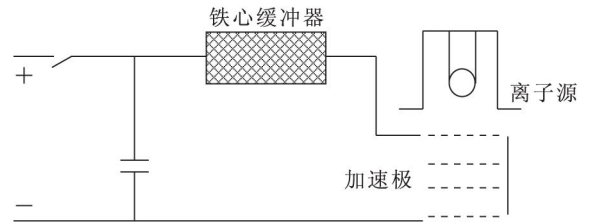


图 1 Snubber 系统结构

Fig. 1 Snubber position in the power supply system

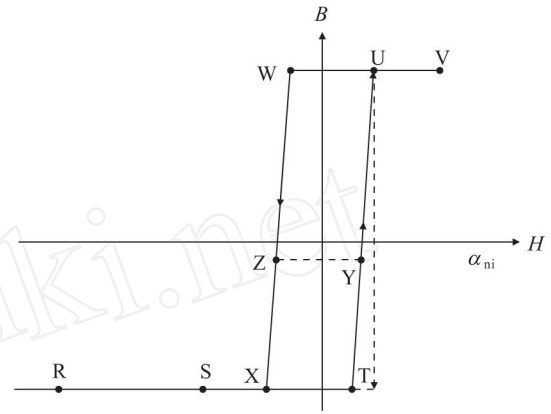


图 2 B-H 曲线

Fig. 2 B-H curve

但接近非饱和区。当电极打火时主回路电流会增大,使铁心进入非饱和状态,即由点 S 沿  $B-H$  曲线中的  $S-X-T-Y-Z-X-S$  移动。此时铁心磁导率比较大,会产生很大的电感,对电流具有较大的抑制能力,同时在铁心中会产生涡流以及磁滞损耗,消耗一部分分布电容  $C$  释放的能量<sup>[15]</sup>。

设计铁心缓冲器时应注意系统短路时,铁心运行点不能超过图 2 中的 U 点,否则铁心会进入正向饱和,缓冲器电感又会变小。放电电流会急剧增大。

### 2.2 铁心缓冲器设计

铁心缓冲器 (iron core snubber) 类似于一个磁控开关,当加入偏置电流后,磁芯运行在磁滞回线的负饱和点附近,此时铁心的磁导率很小,近似于空心电感,因此其电感量很小,对系统主回路影响也较小。但当系统短路后,电流急剧增加,铁心会回到未饱和区域,使得电感增加,起到了限制短路电流的作用。因此在设计 snubber 时,铁心最重要的几个参数分别为饱和时磁导率  $\mu_s$ 、未饱和磁导率  $\mu_r$  和饱和点  $P(H_{sat}, B_{sat})$ ,其中,  $H_{sat}$  为饱和点的磁场强度;  $B_{sat}$  为饱和点的磁感应强度。

饱和磁导率决定了系统在正常运行时,铁心缓冲器对电源系统的动态响应的影响;饱和磁导率决定了系统短路时缓冲器对短路放电电流的抑制能力;而饱和点则决定了铁心缓冲器的体积大小。在设计时应

保证短路时铁心缓冲器可工作在非饱和区域。

根据系统要求,铁心缓冲器电感量必须满足式(1)才能将短路电流抑制到合理范围,即

$$L_{\text{snubber}} \left( \frac{U}{I_{\text{max}}} \right)^2 C_{\text{stray}} \quad (1)$$

式中,  $U$  为系统电源电压值;  $I_{\text{max}}$  为允许的短路最大电流值;  $C_{\text{stray}}$  为等效的分布电容的总和。在文[17]中,其铁心缓冲器严格按照临界阻尼状态来设计,其数值为式(1)的4倍。因为铁心缓冲器类似于单匝绕组的变压器,这样会使得铁心体积非常庞大。通过分析和仿真发现,按照公式(1)设计的电感参数就已经可以满足要求了。

为了使 snubber 不产生饱和,必须满足式(2)

$$\left( r_{\text{in}} + r_{\text{out}} \right) \frac{I_{\text{max}}}{H_{\text{sat}}} \quad (2)$$

式中,设 Snubber 磁环内径为  $r_{\text{in}}$ ;外径为  $r_{\text{out}}$ 。

如若增加了偏置电源则须满足式(3)即可使铁心运行在非饱和区,即

$$\left( r_{\text{in}} + r_{\text{out}} \right) \frac{I_{\text{max}}}{H_{\text{sat}} + H_{\text{bias}}} \quad (3)$$

式中,  $H_{\text{bias}}$  为偏置后运行位置的磁场强度。可见增加偏置电源可显著减小铁心缓冲器的体积。

假设铁心长度为  $l$ ,可计算出铁心缓冲器的未饱和时的电感值  $L_{\text{unsat}}$  和饱和时的电感值  $L_{\text{sat}}$  为:

$$L_{\text{unsat}} = \mu_r \mu_0 \left( \frac{r_{\text{out}} - r_{\text{in}}}{r_{\text{out}} + r_{\text{in}}} \right) \frac{l}{l}; \quad (4)$$

$$L_{\text{sat}} = \mu_s \mu_0 \left( \frac{r_{\text{out}} - r_{\text{in}}}{r_{\text{out}} + r_{\text{in}}} \right) \frac{l}{l} \quad (5)$$

### 2.3 铁心缓冲器的铁心材料性能测试

铁磁材料的高频脉冲情况下磁化特性和低频时差距较大,并且材料厂家也很难给出,因此需要进行实验研究其真实情况下的磁化特性,便于指导设计。其中饱和磁导率、非饱和磁导率,以及饱和点的位置尤为重要。

以下设计了一个放电实验来确定设计过程中所需要的几个参数<sup>[18]</sup>。其试验原理如图3,包括了高压充电电源、高压电容、被测铁心、偏置电流源以及球隙开关。图中球隙开关用来模拟离子源(即NBI系统负载)短路放电。实验步骤如下:

- 1) 首先在被测铁心上绕制线圈,其线圈匝数可根据测试需要进行调整。将铁心与球隙和高压模拟电容串接。
- 2) 当高压电源给模拟电容充电后即断开,然后触发球隙导通产生短路放电,测出放电电流和被测铁心的端电压。偏置电源用来改变铁心的工作点,可根据需要改变其输出电流数值。
- 3) 根据测试结果计算出铁心的特性参数。

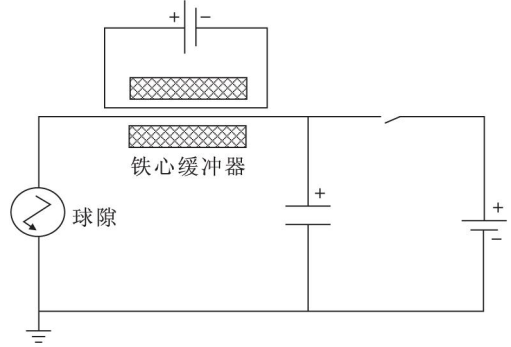


图3 实验电路  
Fig. 3 Experimental circuit



图4 铁心缓冲器实验装置  
Fig. 4 Core snubber

根据安培环路定律和法拉第电磁感应定律,被测铁心端电压  $U$  和电流  $I$  与铁心材料的  $B$  和  $H$  满足关系如下:

$$H = \frac{Ni}{l}; \quad (6)$$

$$B = \frac{1}{NS_0} \int U dt. \quad (7)$$

式中,  $N$  为线圈绕制匝数,  $S$  为铁心环向截面积。因此根据该公式,利用 MATLAB 对测试数据进行处理,可计算得到该材料的脉冲特性的  $B-H$  曲线。

按照以上描述的测试方法对图4所示的小型实验缓冲器(10:1模型)进行了测试。当给定初始电压为2500V,关闭偏置电源的情况下,测得的电压和电流波形如图5所示。电流(图5波形2)在起始阶段上升缓慢,此时磁芯处于非饱和状态;当电流超过某数值后开始急速上升,电流峰值冲的较高,即进入了饱和阶段。

利用公式(6)、(7)计算出该模型脉冲放电情况下的  $B-H$  曲线,如图6所示。

将偏置电源电流设置为50A,利用同样方法进行测试,测量的放电电压和电流波形如图7所示。

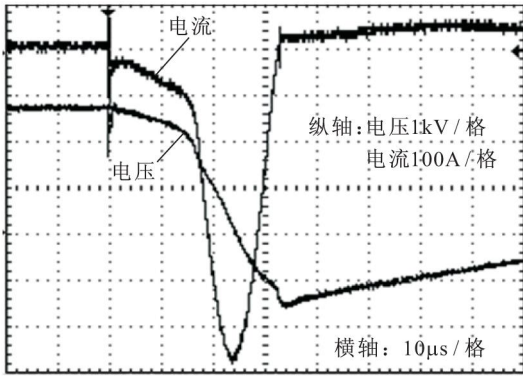


图5 脉冲放电波形(无偏置电流)

Fig.5 Pulse waveform(no bias current)

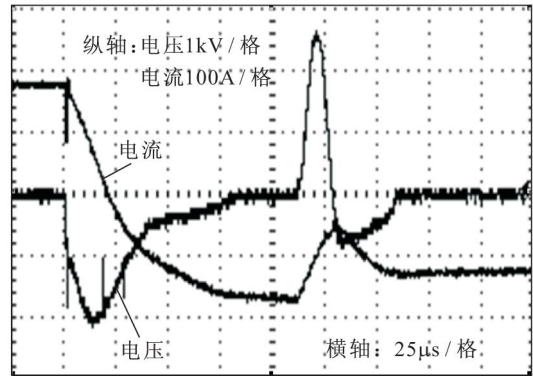


图7 脉冲放电波形(偏置电流 50 A)

Fig.7 Pulse waveform(bias current 50 A)

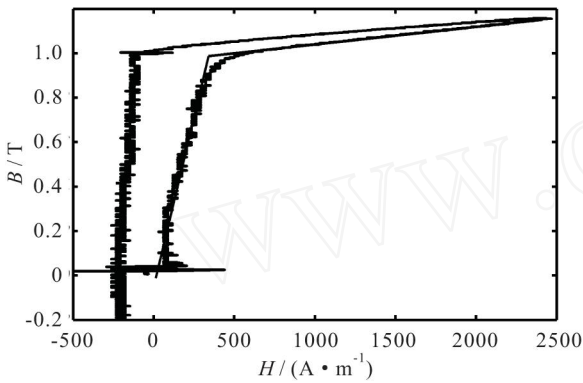


图6 脉冲情况下 B-H 曲线

Fig.6 B-H curve (no bias current)

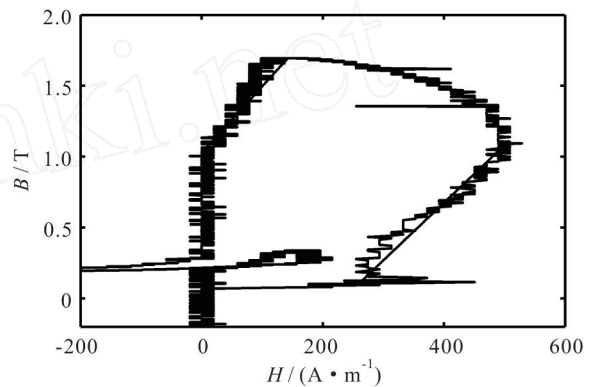


图8 B-H 曲线(偏置电流 50 A)

Fig.8 B-H curve (bias current 50 A)

该测试得到的第一个电流脉冲波形中未出现电流的急剧增加,即在增加偏置电流后,铁心未达到饱和状态。同样利用公式(6)、(7)计算出该情况下的 B-H 曲线如图 8 所示。

比较两种情况不难发现,在加入偏置电流后,本来应在 1 T 就达到饱和的铁心在达到 1.5 T 后仍未饱和。可见增加偏置电流可以起到增加铁心利用率的目的。

从得到的 2 个 B-H 曲线(图 6 和图 8)中可看出,在电流上升阶段,铁心的磁导率约为一个常数。并且图 6 和图 8 在这个阶段的磁导率也非常接近。图 6 中的 B-H 曲线达到饱和后,磁导率又变为常数。因此将该曲线分段线性化后,可以得到关键的饱和时磁导率  $\mu_s$ 、未饱和磁导率  $\mu_r$  和饱和点 P ( $H_{sat}, B_{sat}$ ) 数值,见表 1。

### 3 缓冲器设计及系统仿真

利用测试得到的铁心材料的脉冲特性参数(见表 1)可对铁心缓冲器进行参数设计。该 100 kV/100 A 直流电源供电系统要求短路时电流不能超过 300 A。且根据国外同类设备,该系统的系统分布电

表 1 材料测试参数

Tab.1 Parameters of the material

参数	$\mu_r$	$\mu_s$	$H_{sat}/(A \cdot m^{-1})$	$B_{sat}/T$
数值	2000	265	400	0.95

表 2 设计参数

Tab.2 Designed parameters

参数	$r_{out}$	$r_{in}$	$l$
数值	0.38	0.14	7.45

容约为 3.5 nF,根据式(1)~(3)留余量后设计出缓冲器参数见表 2,设计非饱和电感为 388  $\mu$ H,饱和电感为 51  $\mu$ H。

利用 MATLAB/SIMULINK 对已设计好的铁心缓冲器进行系统仿真,验证该缓冲器对系统的影响。铁心缓冲器相当于一个原副边电压比为 1:1 的变压器,因此可将其等效成一个电感和一个电阻的并联形式。系统仿真模型见图 9,用  $R_s$  和  $L_s$  并联表示缓冲器。电路仿真中认为铁心缓冲器处于工作

状态,电感值可用上述计算结果中的非饱和值。 $C_s$ 表示等效的分布电容,仿真时给定两端电压初始值为100 kV。

取不同的缓冲器电阻值进行仿真(1 k, 500, 333 和 200)。从仿真结果(见图10)可看出,缓冲器电阻对其短路电流影响也较大。该电阻值越小,短路电流的振荡就越大,相应的峰值电流就越大;而该阻值越大,短路电流振荡越大。仿真中不难发现当该阻值取  $U_s / I_{max} = 333$  时可达到最好的效果。既可将短路电流抑制到300 A以内,又不会有太大的电流振荡,即同时满足了限制电流和吸收放电能量的目的。实际应用中如果铁心损耗过小,可以给缓冲器增加二次绕组并接一个电阻负载以调节输出的衰减。

### 4 结论

a) 以 EAST 100 kV 高压直流电源用铁心 snubber 设计为背景,建立了一种测试铁心高频脉冲特性的方法,可以有效的得到缓冲器脉冲放电情况下的  $U-I$  和  $B-H$  特性曲线,并对波形铁心实验缓冲器进行了有偏置和无偏置电流的测试。结果表明,增加偏置电流可以起到增加铁心利用率的目的,使铁心不易达到饱和。并通过测试得到了铁心材料的特性参数值。

b) 以测试结果为基础,根据测试的材料特性,设计了可用于100 kV 直流电源的铁心缓冲器。对设计的缓冲器进行系统仿真,结果表明,当缓冲器电阻为333 时可达到较好的电流抑制和能量吸收的效果。

### 参 考 文 献

[1] 李 伟,刘小宁,黄懿赞. EAST中性束注入器打火保护的缓冲器设计[J]. 高电压技术, 2009, 35(3): 667-671.  
LI Wei, LIU Xiao-ning, HUANG Yi-zun. Snubber design for breakdown protection of neutral beam injector of EAST[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(3): 667-671.

[2] Bowen N, Deitz A, Murray H, et al. Design and test of the transmission line to the TFTR neutral beam ion sources[C] The 8th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research. New York, USA: [s. n.], 1979:705-708.

[3] 李 伟, EAST-NBI系统高压电源传输线及缓冲器(Snubber)的研究与设计[D]. 合肥:中国科学院等离子体物理研究所, 2009.  
LI Wei. Research and design of the transmission line and Snubber for EAST-NBI High-Voltage Power Supply [D]. Hefei: CAIPP, 2009.

[4] 刘智民, 蒋才超. NBI电源系统传输线及其 Snubber 技术要求 [R]. 合肥:中国科学院等离子体物理研究所, 2009.

[5] 杨 雷,傅 鹏,刘小宁. 采用脉冲阶梯调制技术的50 kV/100 A 直流高压电源设计[J]. 高电压技术, 2009, 35(9): 2220-

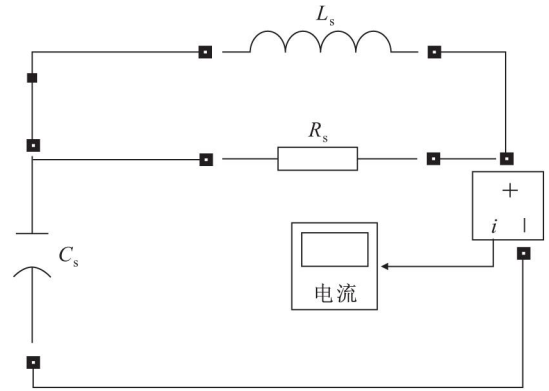


图9 电流仿真波形  
Fig. 9 Simulated current waveform

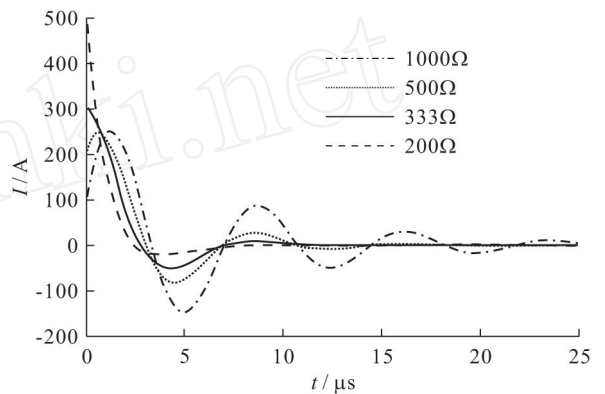


图10 电流仿真波形  
Fig. 10 Simulated current waveform

2225.  
YANG Lei, FU Peng, LIU Xiao-ning. Design of a 50 kV/100 A high voltage DC power supply using PSM technology[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(9): 2220-2225.

[6] 徐伟东,宣伟民,姚列英. PSM 高压脉冲电源单元研究[J]. 高电压技术, 2009, 35(6): 1409-1414.  
XU Wei-dong, XUAN Wei-min, YAO Lie-ying. Development of one PSM high voltage pulse power supply unit [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(6): 1409-1414.

[7] 潘圣民,傅 鹏,蒋 力. 采用 DSP 和 CPLD 的 100 kV 高压脉冲电源控制系统[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1667-1671.  
PAN Sheng-min, FU Peng, LIANG Li. Control system of 100 kV high voltage pulse source using DSP and CPLD[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1667-1671.

[8] Schwarz U, Schongen F, Braunsberger U, et al. The TEXTOR neutral injection 55 kV transmission line[C] Proceedings of the 12th Symposium on Fusion Engineering. Julich, Germany: Rergamon Press, 1987: 444-447.

[9] Haughian J, Lou K, Byrns R, et al. Fabrication and testing of the flexible transmission line to the TFTR neutral beam ion sources[C] Proceedings of the 10th Symposium on Fusion Engineering. Philadelphia, USA: [s. n.], 1983: 1629-1633.

[10] Mayhall D J, Shimer D W. Design and testing of low capacitance, 80 kV source cables for MFTF sustaining neutral beam power supplies[C] Proceedings of 8th Symposium on Engi-

- neering Problems of Fusion Research. New York, USA: [s. n.], 1979: 709-713.
- [11] 李伟,刘小宁,傅鹏,等. EAST中性束注入电源系统的杂散电容[J]. 高电压技术,2008,34(8):1662-1666.  
LI Wei, LIU Xiao-ning, FU Peng, et al. Analysis and calculation of the stray capacitance of EAST NBI power supply system [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(8): 1662-1666.
- [12] 杨雷,傅鹏,刘小宁. 大功率直流高压电源的变压器分布电容分析[J]. 高电压技术,2009,35(6):1403-1408.  
YANG Lei, FU Peng, LIU Xiao-ning. Analysis of the stray capacitances in the transformer of the high power high voltage DC power supply [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(6): 1403-1408.
- [13] Jaegu Choi, Takao Namihira, Takashi Sakugawa. Loss characteristics of a magnetic core for pulsed power applications[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2007, 35(6): 1791-1796.
- [14] Kupschus P H, Fricke K G, Reimer H, et al. A proposed alternative for protecting ion sources of neutral injectors against damage from high voltage sparking[C]. The 12th Symposium on Fusion Technology. Julich, Germany: Rergamon Press, 1982, 439-446.
- [15] Fink J H, Baker W R, Owren H M. Analysis and application of a transformer core that acts as an arc snubber[J]. IEEE Trans on Plasma Science, 1980,18(1): 33-38.
- [16] 蒋力,傅鹏,潘圣民. 高压电源短路能量吸收装置 LR-snubber 的研制[J]. 高电压技术,2009,35(11):2786-2790.  
JIANG Li, FU Peng, PAN Sheng-min. Development of energy assimilating LR-snubber for the high voltage power supply breakdown[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(11): 2786-2790.
- [17] Bigi M, Toigo V, Zanotto L. Protections against grid breakdowns in the ITER neutral beam injector power supplies[J]. Fusion Engineering and Design, 2007, 82: 905-911.
- [18] 张东东,严萍,王珏. Us级脉冲激励下磁开关磁芯磁性[J]. 高电压技术,2009,35(1):87-92.  
ZHANG Dong-dong, YAN Ping, WANG Jue. Dynamic characteristics of magnetic core under micro-second pulse excitation [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(1): 87-92.



CAO Liang  
Ph. D. candidate



LI Ge  
Ph. D., Professor

#### 曹亮

1982—男,博士生  
研究方向为电磁场计算;逆变器软开关技术;高压脉冲电源技术  
电话:(021)34203559  
E-mail: riyue2358@sjtu.edu.cn

#### 李格

1966—男,博士、教授、博导  
从事电机电器与控制、数字电源、火电站电除尘和脱硫硝技术方面的研究  
E-mail: lige@pp.ac.cn

收稿日期 2009-11-28 修回日期 2010-02-04 编辑 曹昭君