

# 基于脉冲步进调制技术的 ECRH 全固态 阳极高压电源控制系统设计

饶益花<sup>1</sup>, 陈文光<sup>2,\*</sup>, 胡波<sup>2</sup>, 饶军<sup>3</sup>, 冯鲲<sup>3</sup>, 康自华<sup>3</sup>

(1. 南华大学 数理学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 南华大学 电气工程学院, 湖南 衡阳 421001;  
3. 核工业西南物理研究院, 四川 成都 610041)

**摘要:** 电子回旋共振管是产生高功率毫米微波的真空电子器件, 在可控热核聚变研究、雷达等领域中有重要的应用。针对可控热核聚变研究中 1 MW/105 GHz 回旋管加热系统阳极电源幅度可调且调制的要求, 使用高频开关电源技术和脉冲步进调制技术(PSM)研制了全固态阳极高压电源。重点阐述了阳极高压电源实现稳压、调制、前沿时间可调功能的软件控制算法, 并通过实验对设计进行了验证。该阳极高压电源具有单脉冲、多脉冲调制和六电平预置波形等 3 种模式输出功能; 输出参数达到 35 kV/200 mA, 波形前沿 3 ms 内可调, 最大调制频率为 1 kHz, 调节精度在 100 V 以内。设计的控制方法也可应用于其他大功率微波源。

**关键词:** 回旋管; 电子回旋共振加热; 脉冲步进调制; 高压电源; 控制系统

**中图分类号:** TM89; TN128      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-6931(2016)12-2276-07

**doi:** 10. 7538/yzk. 2016. 50. 12. 2276

## Design of Control System for All Solid Anode High-voltage Power Supply Based on Pulse Step Modulation for ECRH

RAO Yi-hua<sup>1</sup>, CHEN Wen-guang<sup>2,\*</sup>, HU Bo<sup>2</sup>, RAO Jun<sup>3</sup>, FENG Kun<sup>3</sup>, KANG Zi-hua<sup>3</sup>

(1. School of Mathematics and Physics, University of South China, Hengyang 421001, China;  
2. School of Electrical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China;  
3. Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** The gyrotron is a microwave vacuum electronic device based on electron cyclotron resonance (ECR), used to produce high power millimeter microwave in controlled thermonuclear fusion research, radar and other important application fields. According to the requirements of anode power supply of 1 MW/105 GHz gyrotron for Tokamak electron cyclotron resonance heating (ECRH), the high-frequency switching power supply technology and pulse step modulation (PSM) were used to develop the solid anode high voltage power supply. The control algorithm of voltage regulation and modulation function of anode high voltage power supply was expounded, and the design was verified

收稿日期: 2016-01-22; 修回日期: 2016-06-23

基金项目: 国家核聚变 ITER 计划国内配套专项资助(2013GB103000); 湖南省科技厅项目资助(2015GK3124)

作者简介: 饶益花(1968—), 女, 湖南耒阳人, 副教授, 硕士, 从事电力电子及物理实验研究

\* 通信作者: 陈文光, E-mail: toewg6666@126.com

by experiments. The output parameter of the anode power supply can reach 35 kV/200 mA with three kinds of output models, including single pulse, multi pulse modulation and six preset level of waveform. Its rise time can be adjusted within 3 ms. The maximum modulation frequency is 1 kHz and regulation accuracy within 100 V. The designed control method can also be applied to other high power microwave sources.

**Key words:** gyrotron; electron cyclotron resonance heating; pulse step modulation; high voltage power supply; control system

电子回旋共振微波源在可控核聚变研究中承担等离子体加热、驱动、诊断及抑制非经典撕裂膜实验等功能<sup>[1]</sup>。根据中国环流 2M 装置电子回旋共振加热 (ECRH) 系统的规划,使用降压收集极技术的 1 MW/105 GHz 回旋管需要阳极高压电源。它是 ECRH 系统关键部分之一,也是 ECRH 系统设计难点之一。输出电压能大范围可调节,能调制并恒压输出以及快速保护等要求。为达到这些要求,目前国内外装置上将整个阳极电源设计成两部分:前级高压电源和调制器。前级高压电源使用晶闸管交流调压、变压器升压和二极管整流方案。HL-2A 装置 ECRH 中调制器使用真空四极管,工作在放大状态,通过改变栅极电压来改变输出电压<sup>[2]</sup>;美国 DIII-D 装置 ECRH 中调制器利用 NPN 和 PNP 晶体管构成单电源互补对称功率放大模块,并结合均压电路,使多个模块依次串联起来,使用给定电压和反馈电压形成的误差电压放大后隔离驱动各模块,从而达到改变输出电压的目的<sup>[3-5]</sup>。使用上述方法设计的设备具有体积大、效率低,不能实现全数字化控制等缺点<sup>[6-9]</sup>。多模块串联供电技术对开关器件的一致性要求低<sup>[10]</sup>,结合脉冲步进调制 (PSM) 控制,能很方便调压、调制,易容错运行<sup>[11]</sup>,但多个装置均使用次级多绕组工频变压器来给多模块供电,绝缘工艺要求高、体积大、成本高<sup>[12-14]</sup>。本项目组基于高频开关电源技术和脉冲步进调制控制技术<sup>[15]</sup>,研发了一种新的电子回旋管阳极高压电源系统。本文对该电源使用的 DSP 全数字控制系统的资源分配、输出模式、控制算法优化、中控通讯方式以及故障保护方法等进行介绍。

## 1 全固态阳极 PSM 电源硬件结构

基于高频开关电源技术与 PSM 技术设计的 ECRH 电源基本结构如图 1 所示。三相交

流电经过整流滤波,再经过全桥逆变电路变成频率约 25 kHz、幅值约 540 V 的交流电压,此高频交流电压由 A、B 两点间输出至 59 个相同的高频变压器的初级,经过升压、整流滤波后得到直流电压,即 59 个变压器初级并联,其次级经过 AC-DC 模块 (SM) 后,由每个模块中的场效应管控制直流电压是否叠加串联输出。由于 59 个模块均相同,所以各模块的输出电压均通过反馈第 1 个模块 (SM1) 的整流滤波后的直流电压 ( $V_{dc}$ ) 来实现电压闭环稳定,各模块电压稳定在 600 V。

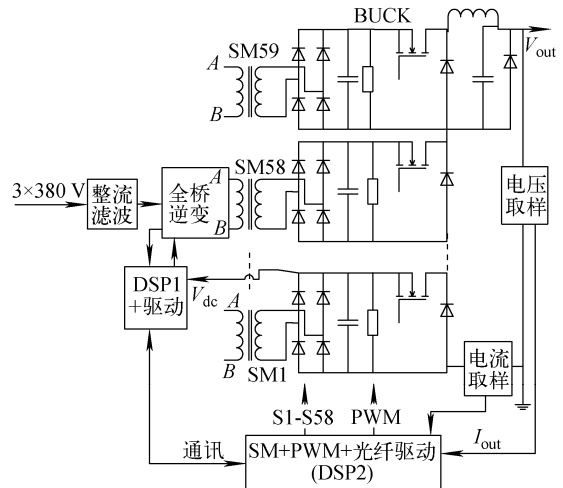


图 1 阳极电源系统总体结构

Fig. 1 Overall block diagram of anode power supply

前 58 个模块中的场效应管导通与关断控制,通过光纤 (S1-S58) 隔离控制;如果相应的模块接收到光信号,该模块输出电压就叠加到总的输出电压上,从而可实现输出电压为 600 V 的整数倍幅度改变和调制输出,此时模块中后面的并联二极管处于阻断状态;如果相应的模块未接收到光纤信号,二极管导通并处于串联

在输出回路中;不同位置的模块由于调制而处于空载和带载状态之间的转换,实际上输出的电压在前沿存在尖峰问题和幅度的变化,为解决此问题,在第59级模块(SM59)上,整流滤波后面使用BUCK降压电路,直接由1个微处理器(DSP2)输出高频PWM信号通过光纤对其进行控制,该模块的输出电压能在0~600V间可调,满足输出电压调节精度小于100V的控制指标。

整个电源系统使用两个DSP芯片TMS320F2812作为主控,其中DSP1控制前级全桥逆变器实现恒压,DSP2实现后级59个模块的输出稳压及调制等功能。本文重点介绍DSP2的控制功能。

图2为PSM电源控制系统的基本结构<sup>[16]</sup>。DSP2通过59根光纤控制59个模块。当系统处于远程控制模式时,DSP2通过外接串口转以太网模块,连接路由器,与ECRH中控的PC机进行数据传输;当处于本地控制模式时,所有的控制参数只能通过本地触摸屏进行控制。为保证控制系统能进行快速的故障响应,远程中控故障检测系统通过光纤对DSP2控制系统进行开关量监测,DSP2未收到光纤信号时,5 $\mu$ s内快速终止所有模块的输出。同时要对输入及输出电压、电流进行数据采集,并与触摸屏、ECRH中控状态等众多信号进行数据通信。由于DSP2微处理器的IO口数量有限,且每个IO口之间要延时控制,无法通过59个IO口一对一直接控制59个模块。经过优化分析,前30个模块分成3组,每组10个模块,分别由3个IO口控制,第31级~第59级模块分别由29个IO口独立进行控制,故59个模块控制就只需32个IO口。

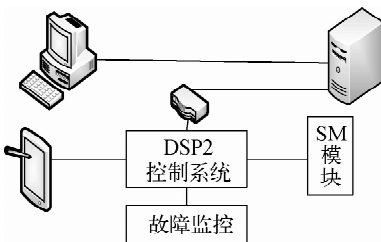


图2 控制系统结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of control system

## 2 控制算法及流程

### 2.1 控制思想

为适应复杂的实验过程要求,初期的设计控制算法是希望整个电源系统具有六电平任意波形输出的能力(图3)。 $V_1$ 到 $V_6$ 可设置为0~35kV之间的任意数值, $t_1$ 到 $t_6$ 可设置为500 $\mu$ s~1s之间的任意数值,这样设计的电源系统就可产生在一定的控制时间内具有六电平的任意波形。在设计程序时,把6个电压值放到控制输出电压数组Voltage[6],6个电平时间放到1个控制当前电平的输出时间数组Time[6],在本地控制或远程控制时,通过改变这12个数值就可改变当前输出电压的波形。

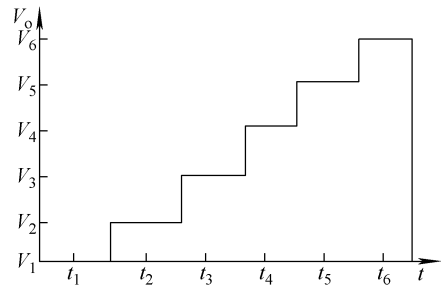


图3 波形控制参数示意图

Fig. 3 Schematic diagram of waveform control parameter

### 2.2 输出模块的优化

由于PSM电源各模块在带载与不带载状态下快速转化,按照常规顺序控制,同一个IO口控制的10个模块与9个独立IO口控制的模块之间相邻切换时会产生很大的尖峰脉冲,这种脉冲尖峰非常不利于整个电源系统的稳定与电磁兼容。为改变这种状况,使用表1所列的优化控制策略。以上所提到的情况,系统只会在输出时增加1个模块。

同时为满足系统的快速响应时间,通过建立输出模块与时间控制表以及IO端口之间的关系,查询当前DSP端口的控制时间输出值,从而控制相应的模块导通与关断。在实际应用中使用了TMS320F2812芯片中A、B、E、F这4个端口中的32个引脚,模块59使用了端口A中的1个PWM引脚。

表 1 输出控制模块方案  
Table 1 Output control scheme

输出电压 $V_{out}/kV$	输出方案
$V_{out} \leq 12$	开通 31~50 级中相应的模块
$12 < V_{out} \leq 18$	开通 1~10 级及 31~50 级中相应的模块
$18 < V_{out} \leq 24$	开通 1~20 级及 31~50 级中相应的模块
$V_{out} > 24$	开通 1~30 级及 31~59 级中相应的模块

2.3 控制算法及流程

图 4 为 PSM 阳极高压电源的控制系统结构。输出电压经过分压电阻进行分压后,与参考电压进行比较,这里的参考电压从前文中提到的数组 Voltage[6]中取出,比较后产生的误差电压与 600 相除,并进行取余和取商运算,商数通过判断决定按表 1 查表输出模块,然后打开相应的模块。余数为决定控制第 59 个模块 (SM59) 的 PWM 信号的占空比。图 5 为控制系统流程图,图中  $K_p$ 、 $K_i$  为 PI 控制的比例常数与积分常数,通过离线计算获得。

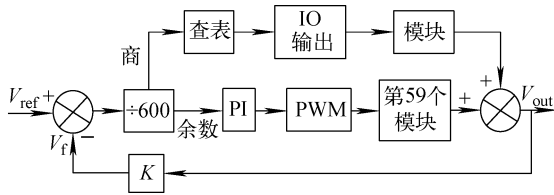


图 4 控制系统结构

Fig. 4 Control system structure

为满足 ECRH 系统的特殊要求,防止过快的电压变化造成回旋管内部的电弧,在图 5 的控制流程中加入了波形前沿控制功能,延时时间范围约为  $0 \mu s \sim 3 ms$ 、最大步进为  $100 \mu s$ 。图 6 为前沿控制实际测试效果波形图。该控制方法不仅可满足 ECRH 系统对电磁兼容性的要求,同时也能用来检测系统中是否有单个模块已损坏,图 6 中共有 30 个台阶,左边 3 个台阶代表输出的 30 级模块,右边 27 个台阶代表 27 级输出模块,所以共有 57 个模块电压输出。如果打开的模块个数与输出的台阶不对应,就表示相应模块损坏。

3 通信及故障保护

控制系统的通信功能主要包括两种:1) 与

触摸屏之间的通信,采取 MODBUS RTU 协议;2) 与服务器的通信,采用 MODBUS TCP/IP 协议。

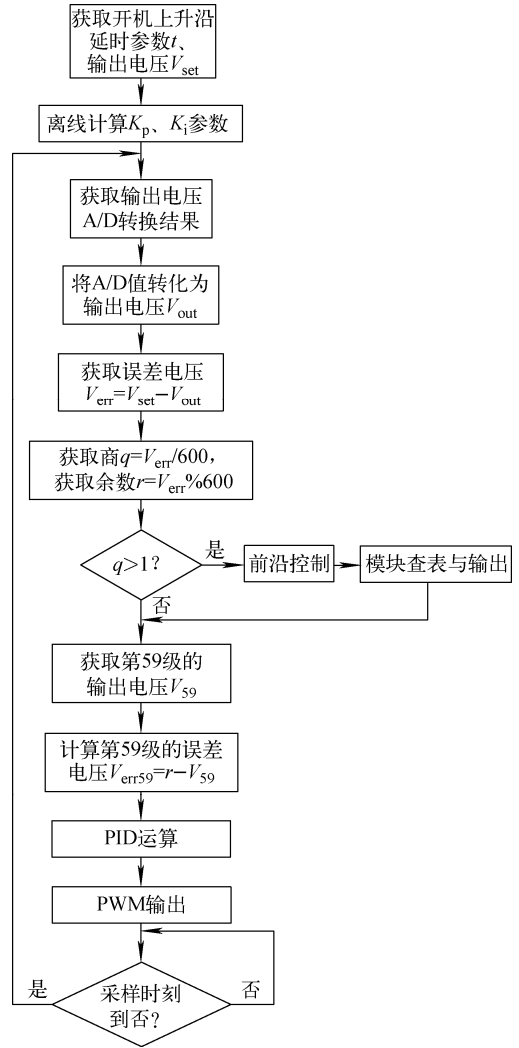


图 5 控制系统流程图

Fig. 5 Flow chart of control system

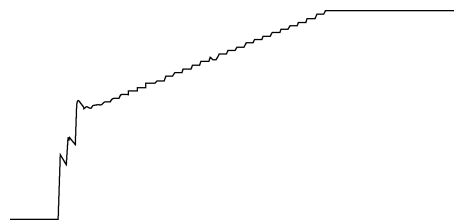


图 6 前沿控制效果波形

Fig. 6 Waveform under delay control

电源系统的保护除了硬件保护外,还有软件保护。软件保护分为 3 级:1) 通过关断母

线直流上的继电器进行保护;2) 通过关闭逆变器驱动信号进行保护;3) 关断输出 IO 口进行保护。一般调节时,通过开通和关断输出的 IO 口对输出电压进行调节与保护;当输出电流超过 200 mA 时,关闭逆变器驱动信号,并关断所有的输出 IO 口对电源进行小过流保护;当输出电流超过 300 mA 或检测母线上电流过流,关断母线继电器、停止逆变器驱动,关断所有的输出 IO 口对电源进行保护。3 种保护等级不同。图 7 为实际所测过流保护波形图。

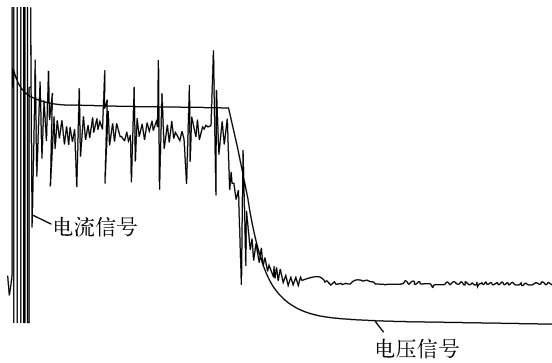


图 7 过流保护波形

Fig. 7 Waveform under over current protection

当 ECRH 系统产生故障时,ECRH 系统会向 PSM 电源系统发出下降沿或低电平作为保护信号,TMS320F2812 的外部中断模块通过捕捉下降沿或低电平进行快速的保护,可严格控制保护时间小于  $5 \mu\text{s}$ 。满足对回旋管打火的要求<sup>[17]</sup>。

#### 4 实验调试及测试效果

工程设计使用 ET070 组态软件编辑界面作为本地触摸屏控制界面,配置各项参数。可按照 3 个工作模式输出波形:单脉冲模式、调制模式和预置六电平波形模式。使用功率电阻为负载,使用泰克高压探头 P6015 测量,电阻分压比为 2.5 : 1。

图 8 为单脉冲模式输出波形。波形输出无前沿延时控制,时间长度为 0.5 s,平顶幅度为 13.36 kV,最大值为 14.4 kV。该模式主要用于 ECRH 长脉冲微波加热或驱动等离子体实验。从波形上看,输出的幅值有一下降过程,约

2.5 kV,这是由于电源直流母线上电压下降所致。

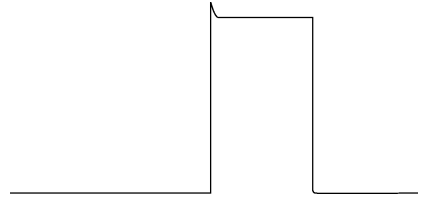


图 8 单脉冲模式输出波形

Fig. 8 Waveform under signal pulse control mode

图 9 为调制模式输出波形。最后 5 个模块使用延时控制,每个模块的延时时间最小为  $20 \mu\text{s}$ ,调制频率为 1 kHz,占空比为 50%,设置为 5 个脉冲波形输出。平顶幅度为 13.4 kV。该模式输出调制微波功率,主要可进行等离子体非经典撕裂膜等物理机理实验研究。后 5 级延时控制,可防止电极上的电压突变太快,引起回旋管打火现象的发生。通过程序优化,未来最大调制频率可达 5 kHz。

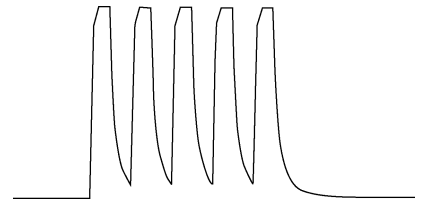


图 9 调制模式输出波形

Fig. 9 Waveform under multi pulse modulation control mode

图 10 为六电平预置模式输出波形。波形输出无前沿延时控制。图中 6 个电平幅度分别设置为 6、12、18、24、30 和 35 kV,时间间隔为 50 ms。最大平顶幅度为 13.4 kV。该模式主要用于在同一次实验过程中改变微波的输出功

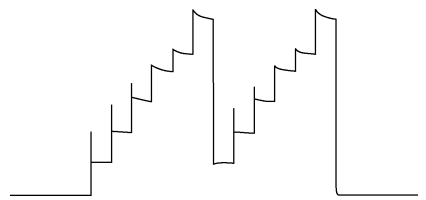


图 10 六电平预置模式输出波形

Fig. 10 Waveform under six preset level control mode

率,或在调试电子回旋管时快捷寻找灯丝电流、磁场电流、阴极电压、阳极电压与输出微波功率、微波模式之间的相互关系。工作最长时间大于 5 s。

从上述实验数据得出,本阳极高压电源系统完全满足 ECRH 系统的要求,输出参数达到 35 kV/200 mA,前沿时间 3 ms 内可调。

## 5 总结

ECRH 系统在磁约束核聚变的作用越来越重要,不但可辅助加热,也可进行等离子体诊断,还可改善约束。而阳极高压电源一直是 ECRH 系统的难点之一。本文使用高频开关电源及 PSM 技术设计了全固态阳极高压电源。在数字控制器 IO 口资源有限的情况下,研究了输出电压的调整方法、多种电压等级进行快速调制控制方法以及波形前沿控制的优化方法,具有 3 种波形的输出模式,阳极电源输出参数满足等离子体加热物理实验系统对 ECRH 系统输出微波功率及调制的要求。目前已在 1 MW/105 GHz 回旋管测试平台上成功应用,整个设备体积小,系统动态响应快,全数字控制,能长时间运行;这在有限空间内为 HL-2A 以及 2M 装置未来实验研究提供了多管更大 ECRH 微波源可靠的技术保障。这也是开关电源技术与 PSM 技术的有机结合。现有实验证明方法可行,对设计类似应用的大功率微波高压电源具有参考价值。

本项目得到核工业西南物理研究院聚变科学所托卡马克辅助加热研究室 ECRH 团队的支持,在此表示感谢。

## 参考文献:

[1] 饶军,李波,周俊,等. HL-2A 装置 2 MW 电子回旋共振加热系统研制[J]. 核聚变与等离子体物理,2009,29(4):324-330.  
RAO Jun, LI Bo, ZHOU Jun, et al. Development of 2 MW system on the HL-2A Tokamak [J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2009, 29(4): 324-330(in Chinese).

[2] 陈文光,康自华,王明伟,等. HL-2A 装置 ECRH 阳极高压电源系统研制[J]. 核聚变与等离子体物理,2009,29(3):239-243.

CHEN Wenguang, KANG Zihua, WANG Mingwei, et al. Development of anode high voltage power supply system for ECRH of HL-2A Tokamak[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2009, 29(3): 239-243(in Chinese).

[3] TOOKER J F, ANASTASI D D, GUZMAN T J, et al. Electron cyclotron heating power supplies on D III-D[J]. Fusion Engineering and Design, 2011, 86: 801-804.

[4] TOOKER J F, HUYNH P, FELCH K, et al. Gyrotron and power supply development for upgrading the electron cyclotron heating system on D III-D [J]. Fusion Engineering and Design, 2013, 88: 521-524.

[5] TOOKER J F, HUYNH P. Final design and test results of a high voltage amplifier for a gyrotron body power supply[J]. Fusion Engineering and Design, 2015, 96-97: 607-610.

[6] SANTINELLI M, CLAESSEN R, COLETTI A, et al. Solid-state gyrotron body power supply, test results[J]. Fusion Engineering and Design, 2007, 82: 633-638

[7] DAMMERTZ G, ALBERTI S, FASEL D, et al. Power modulation capabilities of the 140 GHz/1 MW gyrotron for the stellarator Wendelstein 7-X[J]. Fusion Engineering and Design, 2003, 66: 497-501.

[8] STERKA B, VERHOEVEN A G A, ECRH Team, et al. Design and R&D for an ECRH power supply and power modulation system on JET[J]. Fusion Engineering and Design, 2003, 66: 467-472.

[9] BRAND P, MUELLER G A. Circuit design and simulation of a HV-supply controlling the power of 140 GHz 1 MW gyrotrons for ECRH on W7-X [J]. Fusion Engineering and Design, 2003, 66: 573-577.

[10] 陈文光,饶军,饶益花,等. 采用 FPGA 控制的 IGBT 串联高压调制器研制[J]. 高电压技术, 2010,36(11):2 827-2 832.  
CHEN Wenguang, RAO Jun, RAO Yihua, et al. Development of the IGBT series high-voltage modulator using FPGA controlled[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(11): 2 827-2 832 (in Chinese).

[11] 徐伟东,陈文光,宣伟民,等. 基于 PSM 技术的 70 kV/90 A 高压脉冲电源的研制[J]. 电工技术

- 学报, 2011, 26(12): 129-135.
- XU Weidong, CHEN Wenguang, XUAN Weimin, et al. Development of the 70 kV/90 A high-voltage pulse power supply based on PSM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 129-135(in Chinese).
- [12] 杨雷, 傅鹏, 刘小宁, 等. 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): 2 220-2 225.
- YANG Lei, FU Peng, LIU Xiaoning, et al. Design of a 50 kV/100 A high voltage DC power supply using PSM technology[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(9): 2 220-2 225(in Chinese).
- [13] 陈滋健, 周君. NBI 高压电源数字控制 PWM-PSM 模块的研究[J]. 电力电子技术, 2010, 44(12): 67-69.
- CHEN Zijian, ZHOU Jun. Research on digital control PWM-PSM module for NBI high voltage power supply[J]. Power Electronics, 2010, 44(12): 67-69(in Chinese).
- [14] 赵庆明, 张健, 黄懿赟, 等. 基于 FPGA 的 PSM 高压电源脉冲控制器的研制[J]. 核电子学与探测技术, 2013, 33(3): 284-288.
- ZHAO Qingming, ZHANG Jian, HUANG Yiyun, et al. The design of pulse controller for PSM high voltage power supply based on FPGA [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2013, 33(3): 284-288(in Chinese).
- [15] 饶益花, 陈文光, 饶军, 等. 电子回旋共振加热系统中阳极高压电源研制及其控制技术[J]. 高电压技术, 2015, 41(12): 4 036-4 041.
- RAO Yihua, CHEN Wenguang, RAO Jun, et al. Anode high-voltage power supply and control technology for electron cyclotron resonance heating system [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(12): 4 036-4 041(in Chinese).
- [16] 张猛, 姚列英, 王英翘. 基于 CAN 总线技术的 PSM 电源远程控制通信系统[J]. 核聚变与等离子体物理, 2015, 35(1): 24-29.
- ZHANG Meng, YAO Lieying, WANG Yingqiao. A remote communication system based on CAN bus technology for PSM high-voltage power supplies[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2015, 35(1): 24-29(in Chinese).
- [17] 杨志刚, 张健, 黄懿赟, 等. 大功率高压直流电源输出短路故障的暂态分析[J]. 核聚变与等离子体物理, 2014, 34(4): 355-360.
- YANG Zhigang, ZHANG Jian, HUANG Yiyun, et al. Transient analysis of the output short-circuit fault of high power and high voltage DC power supply[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2014, 34(4): 355-360(in Chinese).