

CSNS RCS 注入涂抹凸轨磁铁脉冲电源设计*

沈莉¹⁾ 池云龙 黄川 唐靖宇

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 中国散裂中子源(CSNS)快循环同步加速器(RCS)是一台高束流功率质子加速器, RCS注入系统是将直线加速器预加速的负氢离子束流通过剥离的方式注入到RCS环中, 注入系统采用凸轨方案和相空间涂抹技术并要求涂抹凸轨磁铁脉冲电源输出脉冲电流的下降沿能够被程序控制, 电源采用IGBT功率放大的方式产生脉冲电流, 用程序控制电源的给定波形, 通过电源反馈控制系统, 使电源的输出波形跟随电源的给定波形, 达到控制电源输出脉冲电流下降沿的目的. 电源输出脉冲电流的跟踪误差是涂抹凸轨磁铁脉冲电源的重要指标, 为了满足跟踪误差小于2%的指标, 要求IGBT拓扑频率大于400kHz. IGBT拓扑采用IGBT H桥串并联错相工作的方式达到分压、分流和提高频率的作用. 高功率、高频率、快速的响应时间和最佳的反馈控制策略是涂抹凸轨磁铁脉冲电源具有良好性能的关键.

关键词 IGBT H桥 等效频率 传递函数 反馈控制

1 引言

中国散裂中子源的加速器系统由直线加速器(80/130MeV Linac)和快循环同步加速器(1.6GeV RCS)组成, 重复频率25Hz. RCS注入系统是将直线加速器预加速的负氢离子束流通过剥离的方式注入到RCS环中. 在RCS环中, 有8块涂抹凸轨磁铁, 其中4块是水平涂抹凸轨磁铁, 另外4块是垂直涂抹凸轨磁铁. 它们分别串联使用, 各需要一台脉冲电源驱动, 这两台电源是水平涂抹凸轨磁铁脉冲电源(BHPS)和垂直涂抹凸轨磁铁脉冲电源(BVPS). 涂抹凸轨磁铁脉冲电源向涂抹凸轨磁铁提供一定幅度和形状的脉冲

电流, 让磁铁的磁场按脉冲电流的幅度和形状做周期性的变化, 使注入轨道周期性地凸起, 使质子注入到RCS环中. 束流的空间电荷效应是限制环累积流强的重要因素, 为了减小束流的空间电荷效应, 注入过程中需要采用相空间涂抹技术, 同时为了得到均匀涂抹, 必须通过尝试的方式, 改变凸轨的变化规律, 得到最佳的束流分布, 这就要求涂抹凸轨磁铁电源输出脉冲电流的下降沿能够被程序控制, 通过改变程序来控制它的下降沿, 找到一个最佳工作点, 得到最佳的束流分布^[1, 2]. 中国散裂中子源工程分为 I 期和 II, 表 1 是注入涂抹凸轨磁铁脉冲电源的参数.

表 1 注入涂抹凸轨磁铁脉冲电源参数

| | BHPS- I | BVPS- I | BHPS- II | BVPS- II |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 重复频率/Hz | 25 | 25 | 25 | 25 |
| 上升时间/ μ s | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| 平顶时间/ μ s | 50 | 50 | 50 | 50 |
| 下降时间/ μ s | 300-550Pro. | 150-400Pro. | 500-700Pro. | 250-450Pro. |
| 脉冲电流/A | 13832 | 8205 | 17856 | 10593 |
| 负载电感/ μ H | 6.16 | 8.52 | 6.16 | 8.52 |
| 负载引线电感/ μ H | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 最大下降速率/(A/ μ s) | 260 | 220 | 200 | 170 |
| 电感最大电压/V | 2399 | 2548 | 1855 | 1976 |
| 脉冲电流稳定度 | <0.5% | <0.5% | <0.5% | <0.5% |
| 跟踪误差 | <2% | <2% | <2% | <2% |

2008 - 01 - 07 收稿

* 中国散裂中子源工程预研项目资助

1) E-mail: shenl@ihep.ac.cn

2 注入涂抹凸轨磁铁脉冲电源的设计

2.1 电源方案设计

电源采用 IGBT 功率放大的方式产生脉冲电流^[3-6], 图 1 是电源的原理图. 电源的功率放大回路由 IGBT H 桥串并联拓扑组成, H 桥的并联起分流作用, H 桥的串联起分压作用, 同时, H 桥还起到倍频的作用, H 桥的串并联还起到提高拓扑频率的作用. 每个

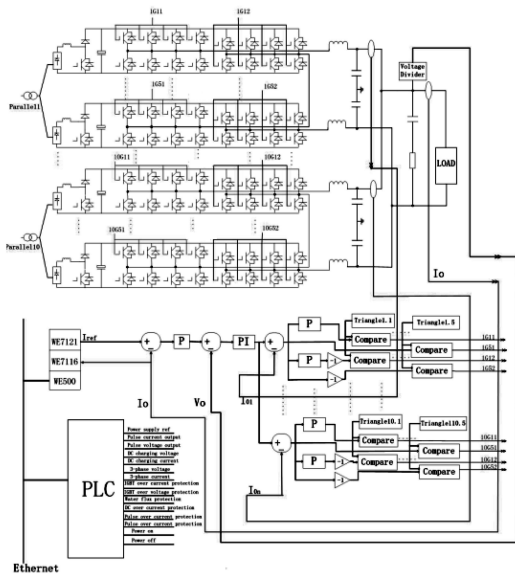


图 1 注入涂抹凸轨磁铁脉冲电源原理

H 桥桥臂是由几个桥臂并联组成, 起分流的作用. IGBT 工作在开关状态, IGBT 拓扑为 H 桥串并联错相工作, 均压采用 H 桥单独供电方式, H 桥内均流采用桥臂的并联, H 桥之间的均流采用闭环控制回路, 电源的反馈控制策略为比例和比例积分控制, 外环为

电流控制环, 内环为电压控制环; 用任意信号发生器模块 WE7121 对给定波形编程^[7], 将给定波形与电源输出脉冲电流进行比较, 通过电源反馈控制系统产生 PWM 信号, 控制 IGBT 栅极触发脉冲占空比, 使电源输出脉冲电流跟踪给定波形, 成为受程序控制的脉冲电流.

2.2 IGBT 拓扑的设计

电源的 IGBT 拓扑为 IGBT H 桥的串并联, 5 个串联的 H 桥为一个模块, 10 个模块并联, 每个 H 桥桥臂由 4 个桥臂并联组成. IGBT 额定参数为 450A/1200V, 这样电源可以承受的最大电流为 $450\text{A} \times 4 \times 10 = 18000\text{A}$, 电压 $1200\text{V} \times 5 = 6000\text{V}$, 如果每个 IGBT 工作频率为 10kHz, 那么 IGBT 等效开关频率可以达到 $10\text{kHz} \times 2 \times 10 \times 5 = 1000\text{kHz}$, 能够满足表 1 所示的电源参数. 电源输出脉冲电流的跟踪误差是涂抹凸轨磁铁脉冲电源的重要指标, IGBT 拓扑频率越大, 跟踪误差越小, 因为 IGBT 拓扑频率越大, 一方面波形越光滑越接近给定波形, 另一方面电源的滤波电感电容参数越小, 这样跟踪误差越小. 电源电路仿真表明, 为了达到 $<2\%$ 的跟踪误差, IGBT 等效开关频率 $> 400\text{kHz}$.

2.3 反馈控制系统

电源的反馈控制采用经典控制论, 控制策略采用比例和比例积分控制, 外环为电流控制环, 采用比例控制器, 提高电源响应速度; 内环为电压控制环, 采用比例积分控制器, 减小稳态误差. 衡量反馈控制系统的品质要求有三个: 稳定性、快速性、准确性.

根据劳斯稳定性判据, 系统稳定的充分必要条件是系统闭环传递函数特征方程的根都具有负实部^[8]. 通过计算得到电源闭环传递函数:

$$\frac{2.748 \times 10^{-20} s^5 + 1.096 \times 10^{-11} s^4 + 4.988 \times 10^{-6} s^3 + 0.4236 s^2 + 33.67 s + 504}{6.545 \times 10^{-28} s^6 + 2.801 \times 10^{-19} s^5 + 1.108 \times 10^{-11} s^4 + 4.998 \times 10^{-6} s^3 + 0.4236 s^2 + 33.67 s + 504}$$

通过计算得到特征方程的根分别为: -383920000 , -43590000 , -340000 , -120000 , -59.5 , -20

特征方程的根都具有负实部, 根据劳斯稳定性判据, 电源的闭环反馈控制系统是稳定的.

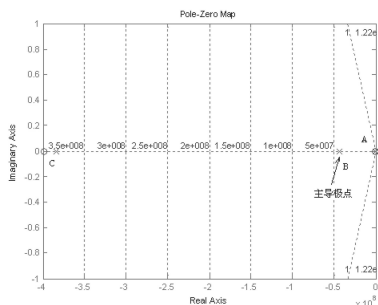


图 2 电源闭环传递函数零极图

系统时域响应的快速性与闭环极点距虚轴的距离有关, 距离越大, 响应越快^[8]. 图 2 是电源闭环传递函数零极图, A 处的零极点是相消偶极子, 对时域不产生影响, C 处的零极点距离很近, 可以看成为偶极子, 它们对时域的影响可以忽略不计, B 处的极点为主导极点, 距虚轴 10^7 (rad/s), 是距虚轴比较远的极点, 所以电源的反馈控制系统是快速响应系统.

准确性是稳态时系统输出量复现输入量的精度. 稳态误差 e_{ss} 是描述系统稳态性能的一种性能指标, 是系统控制精度的一种度量^[8]. 稳态误差越小, 输出量越接近输入量, 控制系统的准确性越高. 稳态误差:

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{1 + G(s)H(s)}, \quad (1)$$

其中 $R(s)$ 给定波形在时间域的方程式经拉普拉斯变换后, 得到的复频域方程式. 仿真中, 给定波形用4条直线拟合而成, 它是实际给定波形的极限形式, 能够满足实际给定波形的极限要求.

拉氏变换方程为

$$R(s) = \frac{337028}{s} - \frac{246 \times 10^6}{s^2}, \quad (2)$$

$G(s)H(s)$ 开环传递函数. 经计算, 电源给定波形 $G(s)H(s)$ 为

$$\frac{2.748 \times 10^{-23}s^5 + 1099.2 \times 10^{-14}s^4 + 498.8 \times 10^{-8}s^3 + 0.4236s^2 + 33.67s + 504}{2.517 \times 10^{-29}s^6 + 1.007 \times 10^{-21}s^5 + 2.285 \times 10^{-15}s^4 + 1.942 \times 10^{-10}s^3 + 3.822s^2 + 1.588 \times 10^{-6}s}, \quad (3)$$

将 (2), (3) 式代入 (1) 式得到电源稳态误差 $e_{ss} = 0.8A$

2.4 电源电路仿真

电源电路采用 MATLAB+PLECS 软件仿真, MATLAB 仿真反馈控制系统, PLECS 仿真 IGBT 功率放大电路, PLECS 嵌套在 MATLAB 中, 同时对电路仿真. 图3为电源输出脉冲电流仿真波形, 脉冲电流 13832A, IGBT 拓扑等效频率 400kHz, 最大下降速率 260A/ μ s, 跟踪误差 1.95%

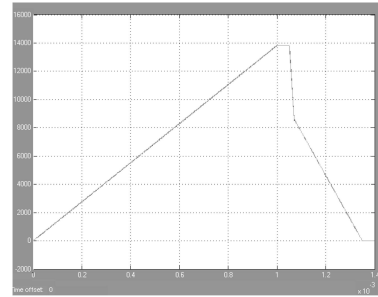


图 3 电源输出脉冲电流仿真波形

参考文献(References)

- 1 IHEP, China Spallation Neutron Source (CSNS) Concept Design, July 2004 (in Chinese)
(中国科学院高能物理研究所, 中国散裂中子源工程(CSNS)概念设计报告, 2004年7月)
- 2 TANG J Y. CHEN Y. CHI Y L et al. Injection System Design for the CSNS/RCS, EPAC2006
- 3 Dewan S. (DPS), Eng W. (BNL), Holmes R. (IE) et al. 1.12 MVA Peak Two Quadrant Pulse Switch Mode Power Supply for SNS Injection Bump Magnet, EPAC2002
- 4 Dewan S. (DPS), Eng W. (BNL) et al. 1400A, +/- 900V Peak Pulse Switch Mode Power Supplies for SNS Injection Kickers, EPAC2003
- 5 Yoshiro Irie (JAERI/KEK). Some Aspects of the J-PARC 3-GeV Rapid Cycling Synchrotron, October 13, 2006
- 6 Takayana T. Kamiya J. Watanabe M et al. Design of the Injection Bump System of the 3-GEV RCS in J-PARC, IEEE 2006
- 7 Peng Sheng. SNS Power Supply and Magnet Control System, 2006
- 8 YU C B et al. Automatic Control Principle, January 2006 (in Chinese)
(余成波等. 自动控制原理, 2006年1月出版)

Design of Injection Painting Bumper Magnets Pulse Power Supply for CSNS/RCS*

SHEN Li¹⁾ CHI Yun-Long HUANG Chuan TANG Jing-Yu
(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract The China Spallation Neutron Source (CSNS) Rapid Cycling Synchrotron (RCS) is a high beam power proton accelerator. The task of RCS injection system is to inject the negative hydrogen ions coming from linac into RCS by stripping method. This power supply demands that its output pulse current falling edge be controlled by the program. The power supply uses the IGBT power amplifying method to generate the pulse current and makes it follow the setting waveform by the power supply's feedback control system. The tracking error is one of the important specifications of the power supply. To satisfy the tracking error less than 2%, the frequency of the IGBT topology requested is more than 400kHz. The IGBT topology is connected by the IGBT H bridges in series and parallel, and works in the phase shifted method to divide the current, the voltage and improve the equivalent frequency. High power, high frequency, fast speed response and optimal feedback control strategy are the key to the good performance of painting bumper magnets pulsed power supply.

Key words IGBT H bridge, equivalent frequency, transfer function, feedback control

Received 7 January 2008

* Supported by China Spallation Neutron Source

1) E-mail: shenl@ihep.ac.cn