

# 兰州重离子深层治癌终端 脉冲电源研究与设计

史春逢<sup>1,2</sup>, 燕宏斌<sup>1</sup>, 吴凤军<sup>1</sup>, 高大庆<sup>1</sup>, 赵江<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院近代物理研究所, 甘肃兰州 730000; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:**研制了兰州重离子加速器深层治癌脉冲开关电源, 阐述了双闭环的控制原理, 给出了电流环与电压环的开环伯特图。进行了仿真, 并在1台电源上进行了比较研究和试验, 电流误差与单电流环脉冲电源相比明显减小。对测试结果进行了分析, 表明主电路结构和双闭环控制方案是切实可行的。

**关键词:**脉冲; 伯特图; 双闭环; 电流误差

**中图分类号:** TL503.5

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-6931(2012)03-0351-04

## Research and Design of Pulsed Switching Power Supply for Deep Tumor Therapy Facility With Heavy Ions Accelerator in Lanzhou

SHI Chun-feng<sup>1,2</sup>, YAN Hong-bin<sup>1</sup>, WU Feng-jun<sup>1</sup>, GAO Da-qing<sup>1</sup>, ZHAO Jiang<sup>1,2</sup>

(1. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

*2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

**Abstract:** The pulsed switching power supply was developed for deep tumor therapy facility with heavy ions in cooler-storage-ring of the heavy ions research facility in Lanzhou (HIRFL-CSR). The control principle of the dual closed-loop scheme was described and the open-loop Bode diagrams were given. The results of simulation and prototype experiment show that the current error gets much smaller than that of the single closed-loop pulsed switching power supply. Moreover, the simulation and test results were analyzed, and the circuit configuration and dual closed-loop strategy selected are practicable.

**Key words:** pulse; Bode diagram; dual closed-loop; current error

中国科学院近代物理研究所国家大科学工程——兰州重离子加速器为依托, 开展了重离子治癌基础研究和关键技术攻关, 目前已建成浅层、深层2个重离子临床治癌实验终端, 临

床实验取得了显著疗效, 使我国成为世界上第4个实现重离子临床治癌的国家<sup>[1]</sup>。实验终端四极铁励磁电源属稳流源<sup>[2]</sup>, 在脉冲平顶时用于束流引出, 因此对脉冲平顶的电流精度要求

较高。同时扫描患者的癌细胞时会用到不同能量的束流,导致脉冲的峰值会随周期而变化。因此输出电流既要保持很高的精度,又要具有很快的响应速度。而在高稳定的稳流电源中往往采用双环调节系统<sup>[3]</sup>,基于此,本工作研制双环控制的开关电源样机。

## 1 脉冲电源工作原理

### 1.1 技术指标

工作模式为脉冲;磁铁线圈电感  $L=20\text{ mH}$ ,电阻  $R=20\text{ m}\Omega$ ;输出最大脉冲平顶电流  $270\text{ A}$ ,电流上升时间  $7.5\text{ s}$ ,下降时间  $2.5\text{ s}$ ,平顶电流误差小于  $4\times 10^{-5}$ (脉冲的上升段与下降段的持续时间与束流运行模式有关,但对电流的精度要求不高)。

### 1.2 主电路设计

图1为主电路原理图,采用整流加速变的拓扑结构。工频  $50\text{ Hz}$  交流电首先经变压器调压得到合适的交流电(相电压  $70\text{ V}$ ),整流滤波后的直流电压  $V_{in}$  送入全桥变换器进行斩波,经高频滤波器后,在感性负载上得到脉冲电流。电流取样元件为零磁通电流传感器 DCCT,电压取样元件为霍尔电压传感器 CHV-25P/50。电源两象限工作,只需1对 IGBT,电路结构简单,无桥式电路的直通问题。

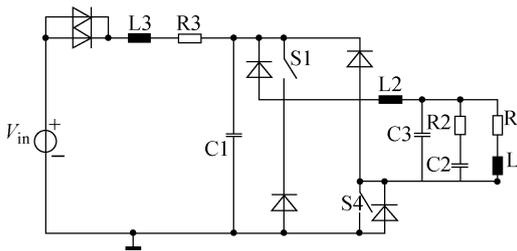


图1 主电路原理图

Fig. 1 Circuit configuration of simulation

### 1.3 控制策略

加速器励磁电源一般采用单电流闭环控制<sup>[4]</sup>,具有控制电路简单、易调试的优点,不足是系统带宽较窄、响应速度慢。而治癌所用的脉冲电源,尤其是点扫描,要求电源的响应速度快,同时保持很高的精度。

在一些稳定性要求较高的快脉冲电源系统中,由于负载的惯性较大,往往采用多回路反馈的多环调节系统,而磁铁电源的负载是感性的,亦属于大惯性环节。因此在电流环的基础上增加了1个电压内控制环,增大了系统的带宽,提高了系统的响应速度。电源系统控制框图如图2所示, $G_i(s)$ 、 $G_u(s)$ 分别为电流环、电压环调节器,一般采用PI算法; $K_{mod}$ 为脉冲宽度调制增益, $K_{pwr}$ 为主电路增益; $G_f(s)$ 为输出滤波器传递函数, $G_r(s)$ 为负载传递函数。外环是1个稳流环,用作内环的给定,主要用来抑制负载慢变化对电源输出的影响。内环是1个稳压环,主要用来减少电网快速波动对电源输出所造成的影响,因此其调节速度较电流环快。

## 2 基于双闭环控制技术的参数选择和系统的开环伯特图

### 2.1 参数选择

如图1主电路拓扑所示:滤波器采用文献<sup>[3]</sup>中的结构和计算公式, $L_2=0.3\text{ mH}$ , $C_2=10\text{ }\mu\text{F}$ , $C_3=47\text{ }\mu\text{F}$ , $R_2=1\text{ }\Omega$ 。二极管整流后的直流电压  $V_{in}=130\text{ V}$ ,储能电容  $C_1=20\text{ }000\text{ }\mu\text{F}$ ,电感  $L_3=0.1\text{ mH}$ 。

电流调节器和电压调节器共有4个参数,经 Simplerer 软件的仿真验证和样机调试, $K_i=300$ , $I_i=883\text{ }200$ , $K_v=10$ , $I_v=830$ 。

### 2.2 基于电源样机的小信号模型伯特图

在电感电流连续的情况下,经参数整定后,可将各数值代入图2所示的双闭环控制原理框

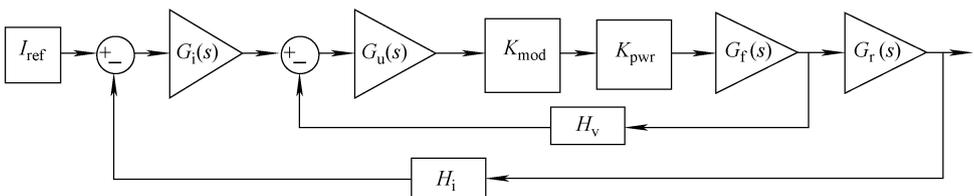


图2 电源原理框图

Fig. 2 Power supply control principle diagram

图中,得到各环节的传递函数。PI 调节器  $G_I(s) = K_i + I_i/s, G_u(s) = K_v + I_v/s^{[5]}$ ;  $K_{mod} = 1/10, K_{pwr} = 130; G_1(s) = (R_2 C_2 s + 1)/(R_2 L_2 C_2 C_3 s^3 + L_2 (C_2 + C_3) s^2 + R_2 C_2 s + 1); H_v = 0.1, H_i = 0.05$ 。

电压开环的传递函数  $G_v(s) = G_u(s) \cdot K_{mod} \cdot K_{pwr} \cdot G_I(s) \cdot H_v$ ,图 3 是用 Matlab 软件画出的电压开环波特图,其截止频率为 6.4 kHz,相位裕度为  $46^\circ$ ,开环增益约为 60 dB。因此电压环具有较宽的频带和适中的开环增益。

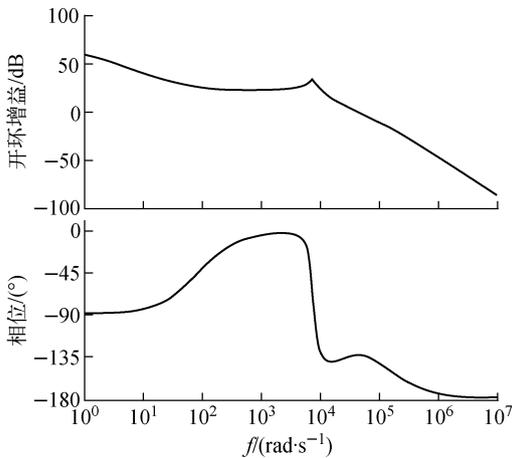


图 3 电压环开环波特图

Fig. 3 Voltage open-loop Bode diagram

电流环即系统的开环传递函数  $G_I(s) = G_I(s) \cdot G(s) \cdot G_v(s) \cdot H_i / (H_v + H_v \cdot G_v(s))$ ,图 4 是该系统的波特图,其截止频率为 1.3 kHz,相位裕度为  $68.3^\circ$ ,开环增益约为

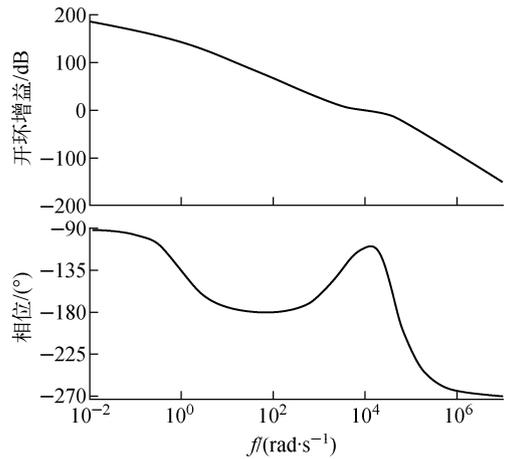


图 4 电流环开环波特图

Fig. 4 Current open-loop Bode diagram

200 dB。与电压环相比,电流环的带宽相对较窄,使得内环较外环具有更快的调节速度。同时,电流环的开环增益很大,系统的稳定度较好。

### 3 仿真与样机测试结果

利用 Simplerer 软件对电路进行了建模和功能仿真。图 1 即为主电路的仿真模型,图 5 为基于状态机的双闭环控制回路仿真模型。 $I_{ref}$ 为给定电流,脉冲或直流; $H_i$ 为电流反馈值,大小和正负可通过 EXT 模块改变,两者做差送入电流调节器,调节后的值再与电压反馈值  $H_v$ 做差,经电压调节器后,输出最终调节值 LIM。T1、T2 为相位相反的三角载波<sup>[6]</sup>,通过状态机得到主电路开关 S1、S4 的占空比控制信号 TR1、TR4,脉冲占空比大于 50% 时,S1、S4 共同导通,双管斩波模式运行。

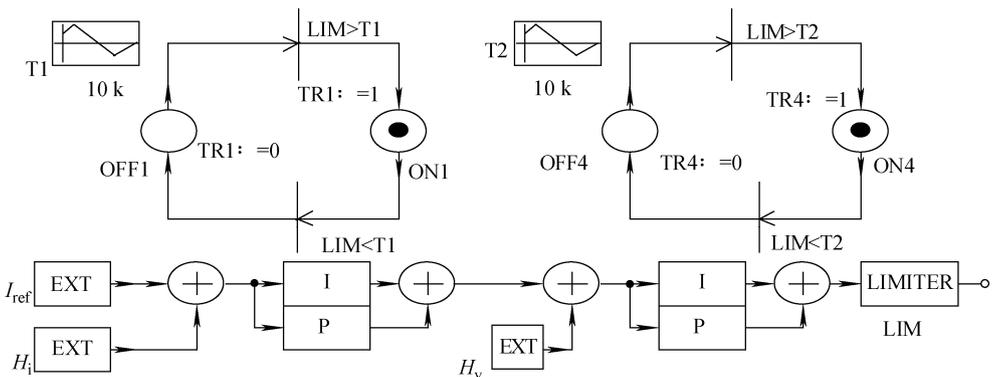


图 5 基于 Simplerer 软件仿真的双闭环控制回路

Fig. 5 Dual closed-loop control circuit with Simplerer simulation

图 6a 为仿真波形,曲线 1 为缩小 100 倍的负载电流,实际最大为 270 A,曲线 2 为放大 100 倍的跟踪误差。图 6b 为利用 Tek-TPS2024 示波器测试的负载电流与跟踪误差,实际输出电流仍为 270 A,经 DCCT 和电压采样电阻后,通道 1 观察到的脉冲幅度为 3.4 V,通道 2 为电流误差,仍放大 100 倍。从图形中可看出,仿真与样机的测试波形趋势完全相同。

从图 6 中可看出,电流误差随脉冲时间分为 3 段:上升段、平顶段、下降段,且平顶段效果最好(电流误差最小,为  $3 \times 10^{-5}$ ),上升段次之(电流误差为  $1 \times 10^{-4}$ )。这种阶梯状的误差带是与治癌的束流能量相关的。在辐照患者的癌细胞时,会用到不同能量的束流,而束流的引出

利用的是脉冲的平顶段,平顶段电流的大小即代表着不同能量的束流,而上升段和下降段即为不同能量束流的过渡时间,对束流的性能无影响。在给定电流波形时,电流的下降率较上升率高 2 倍以上,对于 1 个已给定的系统,不同斜率的谐波响应,电流误差就会有大小的区别。

同时,无论是仿真还是样机测试,在脉冲的转折处,电流误差均会出现毛刺现象,这是系统的响应速度和惯性所造成的。这种给定波形在转折处的急剧变化,使得系统不能做出快速响应,跟踪在瞬间变差,出现尖峰。如果给定波形在转折处保持一定的弧度来减小这种急剧的变化,电流误差的尖峰现象将大为缓解。

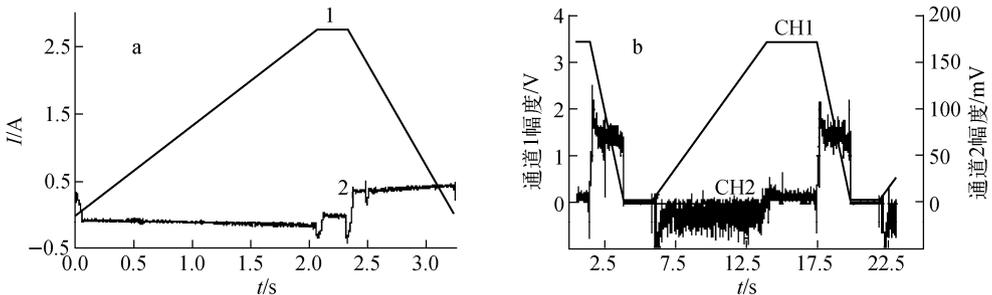


图 6 仿真(a)与样机(b)的负载电流和误差测试

Fig. 6 Output current and error of simulation (a) and real test (b)

## 4 结论

目前,兰州重离子加速器深层治癌终端的脉冲电源大多采用单环控制,电流误差为  $4 \times 10^{-4}$ ,采用电压电流双环控制后,从样机测试结果可看出,在脉冲的上升段,电流误差减小了 3 倍,平顶端电流误差减小了 10 倍,基于双闭环控制策略的设计是可行且有效的。下一步将逐步把深层治癌终端其他电源改造成双环控制,进一步提高深层治癌终端电源性能。

## 参考文献:

- [1] 肖国青,张红,李强,等. 中国科学院近代物理研究所重离子束治癌进展[J]. 原子核物理评论, 2007,24(2):85-88.
- XIAO Guoqing, ZHANG Hong, LI Qiang, et al. Progress of heavy-ion cancer therapy in IMP [J]. Nuclear Physics Review, 2007, 24(2): 85-

88(in Chinese).

- [2] 高大庆,武荣,周忠祖,等. 兰州重离子加速器冷却储存环脉冲开关电源[J]. 电力电子技术, 2003,37(2):15-16.
- GAO Daqing, WU Rong, ZHOU Zhongzu, et al. Research and design of HIRFL-CSR pulsed switching power supply[J]. Power Electronics, 2003, 37(2): 15-16(in Chinese).
- [3] 郑机. 电力半导体直流稳定电源[M]. 北京:机械工业出版社,1985:210-211.
- [4] 王进军. 加速器电源的数字化研究与设计[D]. 兰州:中国科学院近代物理研究所,2009.
- [5] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京:科学出版社, 2007:256-257.
- [6] VLATKOVIC V, SABATE J A, LEE F C, et al. Small-signal analysis of the phase-shifted PWM converter[J]. IEEE Trans Power Electron, 1992, 7(2): 128-135.