



·粒子束及加速器技术·

兰州重离子回旋加速器主场电源改造*

欧恒恒^{1,2}, 燕宏斌¹, 张 帅¹, 周 宁^{1,2}, 赵 鑫¹, 原振栋¹, 吴凤军¹

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000; 2. 中国科学院大学核科学与技术学院, 北京 100049)

摘 要: 为满足分离扇回旋加速器(SSC)对于磁场精度的需求,需对其主场电源进行改造。提出开关电源与线性电源相结合的方式作为 SSC 主场电源的改造方案。电源总体分为两部分,采用模块化的开关电源作为前级电压源,三极管线性调整电路作为后级模块的主电路,充分利用两种电源的优势,实现高稳定度、低纹波的电流输出,同时大幅度提升电源的功率密度和可靠性。文章介绍了电源的工作原理及改造过程,详细阐述了三极管线性放大原理以及管压降控制电路、输出电流控制电路的设计与实现,通过仿真对电路进行功能验证,最终在电源样机上进行实验测试。测试结果表明:改造后主场电源输出电流稳定度达到了 $\pm 3.99 \times 10^{-6}$,电流纹波达到了 2.7×10^{-9} ,各项性能均优于改造前。

关键词: 加速器电源;高稳定度;低纹波;线性调整

中图分类号: TL503.5

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210454

Reform of main power supply of the Lanzhou heavy ion cyclotron

Ou Hengheng^{1,2}, Yan Hongbin¹, Zhang Shuai¹, Zhou Ning^{1,2}, Zhao Xin¹, Yuan Zhendong¹, Wu Fengjun¹

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

2. School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To meet the needs of the magnetic field accuracy of the Separated Sector Cyclotron (SSC), the main field power supply must be modified. We proposed a combination of switching power supply and linear power supply as the transformation solution of new power supply. There are two parts of the power supply, modular switching power supply is used as the front-end voltage source, and the triode linear adjustment circuit is used as the main circuit of the back-end module. Making full use of the advantages of these two kinds of power supplies, a power supply with high-stability and low-ripple current output was achieved, while the power density and reliability was greatly improved. The article introduces the principle and the reformation process of the power supply, elaborates the linear amplification principle of the triode, the design of the tube voltage drop control circuit and the output current control circuit. The power supply was verified through the simulation, and tested experimentally on the power supply prototype. The test results show that the stability of the output current after the reformation has reached $\pm 3.99 \times 10^{-6}$, the current ripple has reached 2.7×10^{-9} , the performances are better than that before reformation.

Key words: accelerator power supply, high stability, low ripple, linear adjustment

兰州重离子加速器(HIRFL)是我国自行设计、建造的大型重离子加速器装置集群,其中分离扇回旋加速器(SSC)是 HIRFL 的关键组成部分^[1-2]。SSC 既可以单独运行,也可以作为冷却储存环(CSR)的注入器联合运行。2020 年,为了提升 HIRFL 性能,增加了一台常温直线加速器 SSC-Linac 作为 SSC 的注入器,SSC 的束流品质关系着整个 HIRFL 的性能,而束流品质与电源的性能息息相关。SSC 是 20 世纪 80 年代建成的,经过多年的运行,SSC 设备逐渐老化,性能也逐渐下降,其中主场电源性能下降尤为严重。SSC 现有主电源采用 24 脉波晶闸管相控整流电源,于 2004 年投入运行,该电源已运行多年,器件老化严重,运行故障明显增多,可靠性、安全性明显变差,电流长期稳定度逐年下降至 10^{-5} 乃至 10^{-4} 量级,但是物理实验对束流的要求却在逐渐提高,SSC 现有主场电源在故障率、

* 收稿日期:2021-10-26; 修订日期:2021-12-15

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(Y916010GJ0)

联系方式:欧恒恒,ouhengheng@impcas.ac.cn。

通信作者:燕宏斌,yanhb@impcas.ac.cn。

稳定度、纹波等方面越来越难以满足 SSC 高水平运行的需要,进行彻底改造已迫在眉睫。本文介绍了 SSC 主场电源的方案设计及改造过程,包括对改造电源的原理设计、开关电源与线性电源相结合的优势、线性放大电路的设计及控制电路的设计等进行详细介绍,最终通过测试结果得出改造后电源较改造前电源各方面性能都得到了较大提升。

1 改造方案设计

加速器电源有直流电源与脉冲电源两个种类^[1],SSC 主场电源为直流电源,其参数如表 1 所示,改造前的电源原理图如图 1 所示。其中,电源负载电阻 R_o 为 46.25 mΩ,负载电感 L_o 为 636 mH。

表 1 电源参数
Table 1 Power parameters

$R_o/m\Omega$	L_o/mH	output current/A	output voltage/V	current stability (8 h)	current ripple
46.25	636	4000	185	$\leq \pm 8 \times 10^{-6}$	$\leq 8 \times 10^{-3}$

根据 SSC 主电源大电流、高稳定度、低纹波的指标要求,本次改造重点研究了三种方案。方案一为模块化设计的全开关电源,全开关电源方案的优势是高的电源的可靠性和灵活性,有利于减小电源体积,提高功率密度。但是开关电源高频噪声较大^[4-7],难以实现 $\pm 8 \times 10^{-6}$ 的长期稳定度和低纹波的指标要求。方案二采用线性调整原理,前级交流侧用调压器调压、直流侧二极管整流、后级三极管稳流。该方案技术成熟,但调压器体积特别大,电源响应很慢,且调压器自身运行噪音很大。方案三依旧采用线性调整原理,但是前级采用模块化的开关电源调压,后级采用三极管调流的方式。前级使用模块化的开关电源,实现了调压和整流两种功能,同时大幅度提高电源功率密度。方案三将开关电源和线性电源的优势结合在一起,因此 SSC 主场电源改造选择了方案三。

1.1 主电路拓扑设计

详细改造方案如图 2 所示,主电路拓扑包含前级电压源模块、用于储能及滤波的电容、线性放大模块、保护性的续流二极管及负载。电压源模块采用高频开关电源整流原理,由二极管整流、输入滤波、逆变电路、变压器、输出整流及滤波组成,将交流输入经过整流、滤波、高频变换、调压、高频整流及再次滤波后输出稳定的直流,具有体积小、质量小、转换效率高、输出稳定且易于调整等特点。电压源为后级线性放大电路提供比较稳定的电压。其模块化设计便于并联使用以满足不同的功率需求,提高了电源的灵活性和可靠性^[8]。三极管线性放大电路利用三极管的工作特性,通过控制回路实现电源输出电流的线性调节。

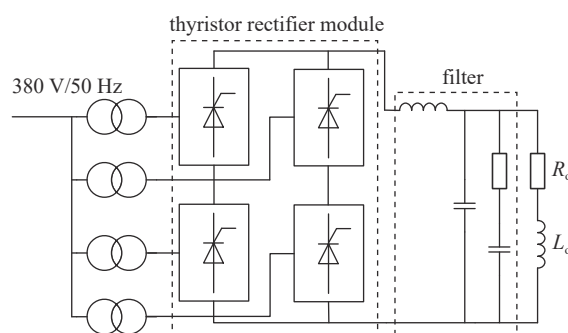


Fig. 1 Main circuit of main power supply of SSC before transformation

图 1 改造前 SSC 主场电源主电路

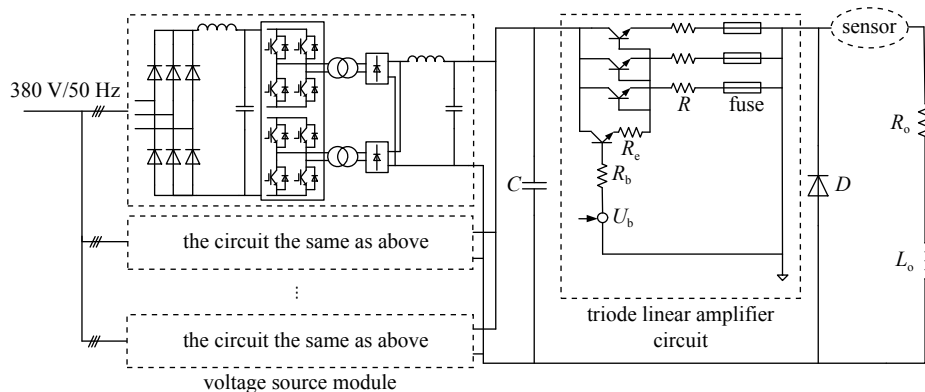


Fig. 2 Main circuit topology of main power supply of SSC

图 2 SSC 主场电源主电路拓扑

1.2 线性调整原理

SSC 主场电源后级线性调整是基于三极管的线性放大原理来实现的。三极管有三种工作区域：截止区、放大区和饱和区。当发射结正偏、集电结反偏时，三极管工作在放大区。此时，集电极电流 I_c 的值几乎仅与基极电流 I_b 有关，表现为 I_b 的大小控制着 I_c 的大小^[9]。式(1)表示 I_c 与 I_b 的控制关系，其中 β 为电流放大系数。

电源主电路选择具有电流放大作用的共集电路接法，通过静态分析，可以得到基极静态电流 I_{BQ} 、发射极静态电流 I_{EQ} 和管压降 U_{CEQ} 表达式分别为式(2)~(4)。基极电源 V_{BB} 、基极电阻 R_b 和发射极电阻 R_e 共同确定合适的基极静态电流。

$$I_c = \beta I_b \tag{1}$$

$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - U_{BEQ}}{R_b + (1 + \beta)R_e} \tag{2}$$

$$I_{EQ} = (1 + \beta)I_{BQ} \tag{3}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{EQ}R_e \tag{4}$$

基于三极管的共集放大电路原理，通过闭环控制基极电源，实现基极电流的控制，最终实现发射极电流的控制，利用反馈闭环调节使系统达到理想输出。由于电源输出电流较大，需采用多个三极管并联以实现额定电流输出。输出电流闭环控制三极管的基极电流，经过两级功率放大，将放大的电流分配给多个并联三极管作为基极电流，实现大电流输出。如图 2 所示，为使流过并联三极管的电流基本一致，需要在每个并联三极管的发射极上串联均流电阻，当某一支路电流大于其他支路电流时，其均流电阻两端电压升高，对应三极管的集射结电压 U_{ce} 减小，从而导致基极电流减小，集电极电流降低，最终实现各支路的电流平衡，整个过程是负反馈控制原理。同时，每一支路的三极管串联有熔断器进行过流保护。晶体三极管选用安森美的 MJL21194，根据三极管的特性，当集电极电流增大到一定数值时，电流放大系数 β 会减小，在同一输出电流下，基极电流会增大，致使损耗增加。为了得到比较大的放大系数，同时考虑到多三极管有利于输出电流的稳定度，每只三极管最大工作电流设计约为 3.1 A，设计 1300 只三极管用于输出电流放大，80 只三极管用于驱动。由于三极管具有热敏特性，为了减小三极管的发热量，将三极管的管压降设计值控制在 12 V 以下。在此条件下，三极管功耗最大约为 37.2 W，器件热阻为 0.7 W/°C，所以最大温升约 26 °C。系统要求输出电流 4000 A，输出电压 185 V，因此电源输出功率 740 kW。由于晶体管最大压降为 12 V，则晶体管总功率 48 kW，线路损耗按 10 kW 计算，总功率共计 798 kW。设计 800 kW 作为前级电压源的总功率，共由 20 台 40 kW 的电压源模块并联而成。

1.3 控制电路设计

电源整机采用基于 FPGA 的全数字控制器，该控制器既可以实现电源与上位机以 TCP/IP 协议进行数据与指令交换，同时实现电源内部的控制调节、状态监控及数据处理等。内部控制电路有两部分，分别是晶体三极管的管压降控制电路和电流环控制电路。

1.3.1 三极管管压降控制

当输出电流变化时，负载两端压降发生变化，三极管集射结电压也会发生变化，为了保证三极管工作于线性放大区，需要对前级电压源输出电压进行控制调节。管压降控制原理如图 3 所示，采集晶体管集电极、发射极之间的电压信号作限幅比较，若管压降高于或低于给定范围，则相应调节电压源的基准电压值。电压源的基准电压值

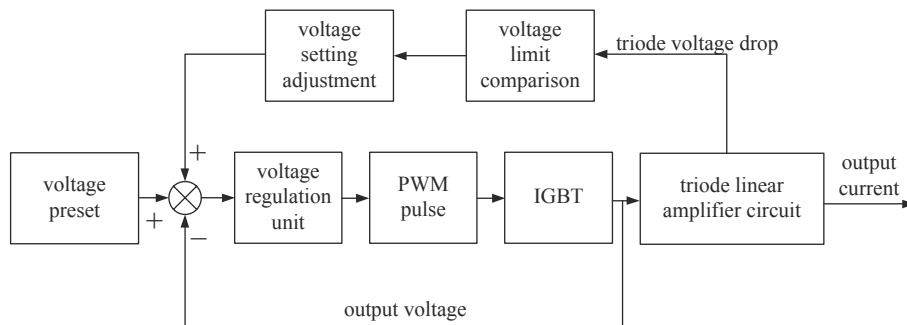


Fig. 3 Principle of triode voltage drop control

图 3 管压降控制原理

由电压预给定和三极管管压降限幅比较,与反馈的输出电压做差后,控制电压源输出电压改变。若设置管压降保持恒定值,会引起管压降的频繁调节,前级电压源输出频繁跳动,为避免引入干扰,管压降需要控制在一定范围内。根据前面的分析介绍,将管压降设计在8~12V范围内。

1.3.2 电流环控制

该电源设计的关键点是电流长期稳定度,因此电流环的设计非常重要。图4所示为输出电流控制结构图。电流环由DAC、DCCT、模拟调节器等组成,DAC选用的18 bit的DAC,积分非线性(INL)为 ± 0.4 LSB,差分非线性(DNL)为 ± 0.4 LSB,针对设计要求的电流稳定度小于 $\pm 8 \times 10^{-6}$ 而言,此DAC的分辨率为 3.8×10^{-6} ,线性度低于 $\pm 0.00015\%$,满足要求。此外,基准源的温漂系数及噪声指标等对系统最终的精度、稳定度有影响,若基准源受温度及干扰影响大,则测试结果难以达到要求^[10-11]。设计选用温漂系数最大为 $0.25 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$,电压噪声参数为 $0.25 \mu\text{V}_{\text{p-p}}$ 的ADA4077芯片作为基准源的核心芯片,若基准电压为10V,温度变化 $\pm 5^\circ\text{C}$,则电压噪声为 $2.5 \mu\text{V}$,温漂造成的误差为 $\pm 1.25 \mu\text{V}$,满足设计要求。设计所选用的DCCT噪声系数小于 0.25×10^{-6} ,线性误差小于 1×10^{-6} ,满足要求。

电流环采用模拟控制器,输出电流与经过D/A转换后的基准进行比较,误差信号经过调节器作为三极管的基极电压源信号。电流控制回路采用模拟PI控制方式,模拟PI相关器件的温漂系数要尽量低,本设计选用的器件温漂均低于 $\pm 3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。

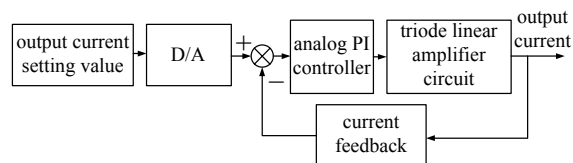
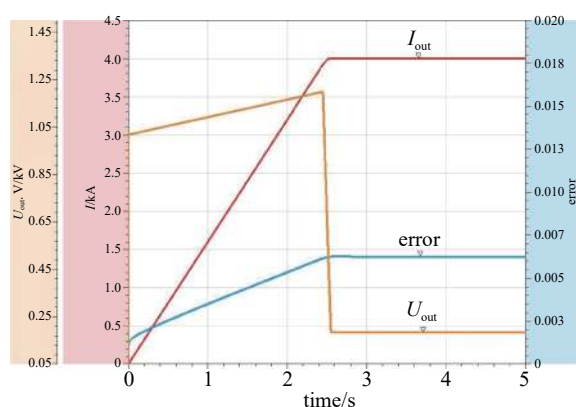


Fig. 4 Structure of output current control

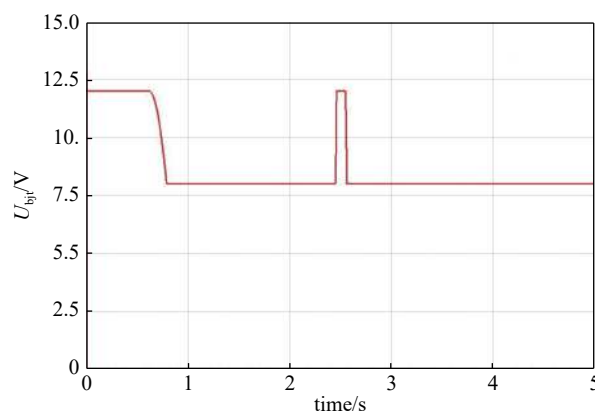
图4 输出电流控制结构

2 主电路功能仿真

利用Simplorer仿真软件搭建仿真电路,仿真结果如图5所示。图5(a)为电路输出电流 I_{out} 、输出电压 U_{out} 及给定与输出电流误差波形,为了观察在电流上升段三极管管压降是否稳定在一定范围内,仿真包含电流上升阶段,设置基准电流上升时间为2.5s,上升速率为1600A/s,输出电流为4000A。在仿真结果中可以看到:输出电流很好地跟随给定电流,在电流上升段的跟踪误差小于 1.5×10^{-6} ;恒流输出时,输出电流误差小于 1.57×10^{-6} 。



(a) output current (I_{out}), output voltage (U_{out}) and error



(b) simulation results of triode voltage

Fig. 5 Simulation results

图5 仿真结果

三极管的集电极与发射极间的电压 U_{bjt} 仿真结果如图5(b)所示。在仿真模型中,设定当晶体三极管集射结电压大于12V时,限制其为12V,小于8V时,限制为8V,若处于8~12V中间值,则按原值输出。从仿真结果可以看出,三极管集射结电压在控制范围内。

3 改造电源测试结果

2021年6~9月SSC主场电源进行了改造,图6为改造前后电源的实物图。可以看到,改造后电源较改造前体积为原来的一半。新电源接口全部采用数字化接口,操作更加简单。

3.1 输出电流稳定度测试

电源在输出电流 I_0 分别为2000,3500A时,进行8h稳定度测试。测试仪器选用Keithley公司的八位半数字万用表2002,PM公司4000A电流传感器等。在保持环境温度为 $(24 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的条件下测试,电流稳定度测试结果如图7

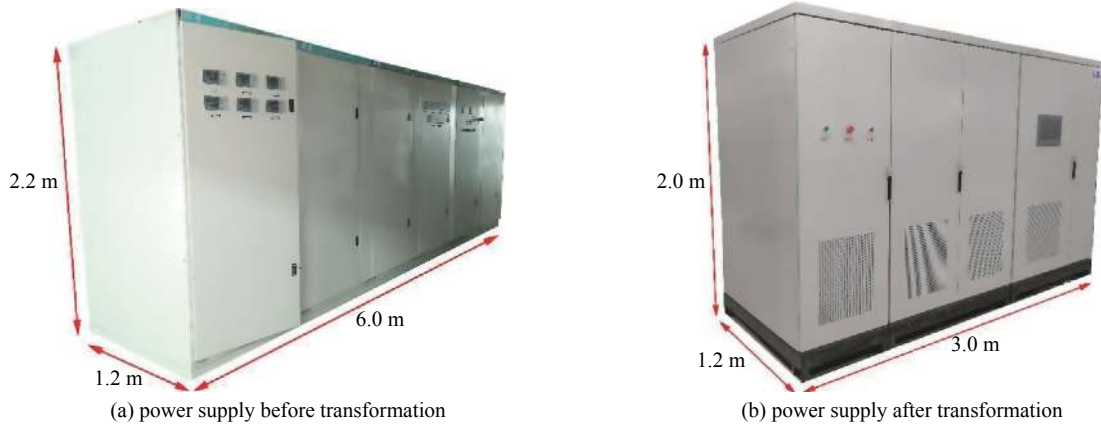


Fig. 6 Pictures of power supply

图 6 电源实物图

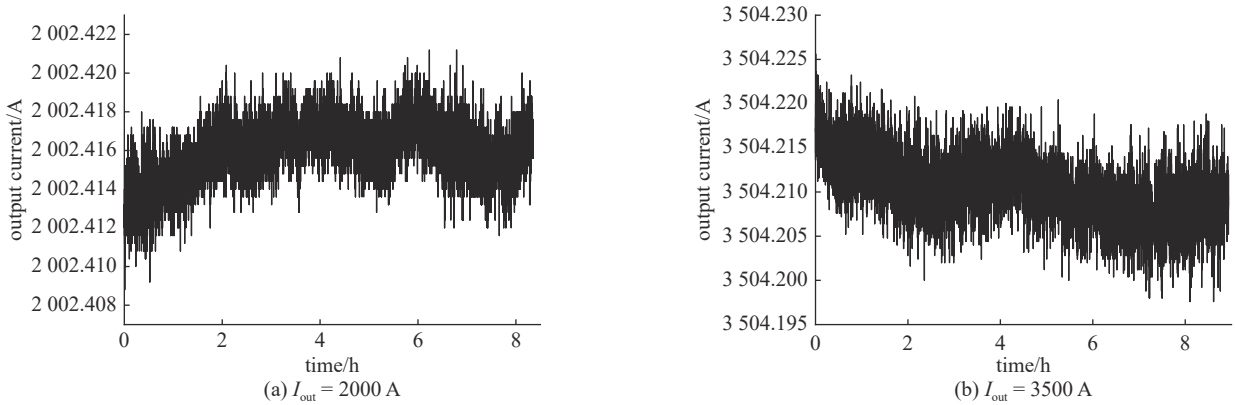


Fig. 7 Test results of output current stability

图 7 输出电流稳定度测试结果

所示。电流长期稳定度计算公式为

$$S = \pm \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (5)$$

式中： S 为给定时间段内、特定电流的输出电流稳定度； I_{\max} 为该段时间内电流最大值； I_{\min} 为该段时间内电流最小值。计算得到输出电流 2000 A 时，稳定度为 $\pm 3.1 \times 10^{-6}$ ，输出电流为 3500 A 时，稳定度为 $\pm 3.99 \times 10^{-6}$ ，达到设计指标。

3.2 输出电流纹波测试

输出电流 2000 A 时，进行输出电流的纹波测试。为了提高测量精度，一般测量输出电压纹波，通过对输出电压纹波进行傅里叶分析，确定各频率分量及幅值，计算方法为

$$I_r = \sum \frac{V_{rn}}{I_a \sqrt{(2\pi f_n L_o)^2 + R_o^2}} \quad (6)$$

式中： I_r 是总电流纹波； V_{rn} 是 n 次输出电压纹波； I_a 是当前电流平均值； f_n 是 n 次纹波频率； L_o 是负载电感； R_o 是负载电阻。测试仪器为 Tektronix MSO4034，测试结果如图 8 所示，在 12 kHz 以内，纹波主要在 50 Hz 和 1.94 kHz 两个频率点，电流纹波计算结果为 2.7×10^{-9} ，满足设计要求。

3.3 长期可靠性测试

对电源进行 1000, 2000, 2500, 3500 A 等多个电流值下的 72 h 运行考核，均稳定可靠。表 2 为电源测试结果，输出电流能达到 3995 A，并能保持稳定运行数 h，已满足加速器实验需求。在各电流值下长期运行测试，并提取数据分析，电流稳定度均好于 $\pm 3.99 \times 10^{-6}$ ，电流纹波均好于 2.79×10^{-9} 。电源从 2021 年 10 月投入运行以来，输出电流长期

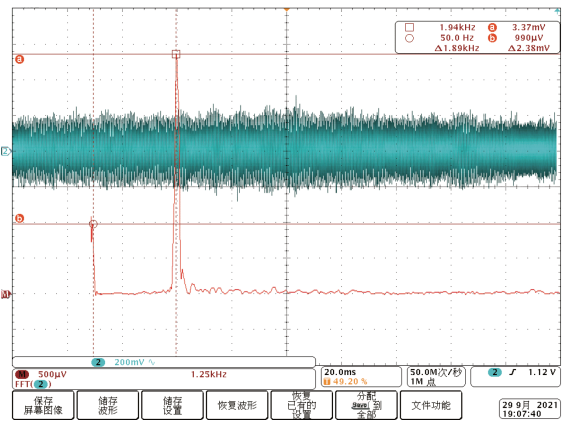


Fig. 8 Test results of output current ripple

图 8 输出电流纹波测试结果

表 2 电源测试结果
Table 2 Test results of power supply

	$R_o/m\Omega$	L_o/mH	output current/A	output voltage/V	current stability (8 h)	current ripple
design value	46.25	636	4000	185	$\leq \pm 8 \times 10^{-6}$	$\leq 8 \times 10^{-5}$
measured value	/	/	3995	184.8	$\leq \pm 3.99 \times 10^{-6}$	$\leq 2.79 \times 10^{-9}$

保持在 2000 A 以上, 运行可靠、稳定, 故障率低。

4 结 论

HIRFL-SSC 现有主电源已运行多年, 其稳定度不能满足加速器相关实验的需求。本文通过对多个改造方案对比分析, 最终选择了开关电源与线性电源相结合的改造方案。介绍了三极管线性调整原理, 给出了电路仿真结果。2021 年夏季, SSC 主场电源完成改造, 实际测试结果表明, 改造后电源输出电流稳定度、纹波、可靠性及功率密度均优于旧电源, 满足 HIRFL 供束的要求, 达到了改造目标。

参 考 文 献:

- [1] 夏佳文, 詹文龙, 魏宝文, 等. 兰州重离子加速器研究装置 HIRFL[J]. 科学通报, 2016, 61(s1): 467-477. (Xia Jiawen, Zhan Wenlong, Wei Baowen, et al. Heavy ions research facility in Lanzhou (HIRFL)[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(s1): 467-477)
- [2] 吴伟, 刘映杰, 许强, 等. HIRFL 电源改造的研究[J]. 甘肃科学学报, 2002, 14(1): 17-21. (Wu Wei, Liu Yingjie, Xu Qiang, et al. On reformation of power supply for HIRFL[J]. Journal of Gansu Sciences, 2002, 14(1): 17-21)
- [3] Li Kuang, Liu Jinjun, Xiao Guochun, et al. Novel load ripple voltage-controlled parallel DC active power filters for high performance magnet power supplies[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006, 53(3): 1530-1539.
- [4] 刘晓轩. 一种低压宽带线性稳压电源的设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019. (Liu Xiaoxuan. Design and realization of a high-bandwidth and low output regulator[D]. Xi'an: Xidian University, 2019)
- [5] 胡广亮, 李开宇, 李磊, 等. 高精度低纹波的可调线性稳压电源设计[J]. 电子测量技术, 2019, 42(20): 24-27. (Hu Guangliang, Li Kaiyu, Li Lei, et al. Design of high precision and low ripple adjustable linear regulated power supply[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(20): 24-27)
- [6] Teodorescu L, Brezeanu G. High efficiency low noise linear power supply for high power measurement systems[C]//2014 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE). 2014: 1-5.
- [7] 王逸洲, 王斌, 冯荣尉. 一种负极性直流高压线性电源设计[J]. 宇航计测技术, 2017, 37(5): 30-34. (Wang Yizhou, Wang Bin, Feng Rongwei. Design of a negative DC high voltage linear power supply[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2017, 37(5): 30-34)
- [8] 周志敏, 周纪海, 纪爱华. 模块化 DC/DC 实用电路[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004. (Zhou Zhimin, Zhou Jihai, Ji Aihua. Templated DC/DC practical circuit[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004)
- [9] 童诗白, 华成英. 模拟电子技术基础[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2015. (Tong Shibai, Hua Chengying. Fundamentals of analog electronic technology[M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2015)
- [10] 郭晓玲, 刘鹏, 韩超, 等. 高能同步辐射光源高精度直流稳流电源样机研制[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(8): 1523-1529. (Guo Xiaoling, Liu Peng, Han Chao, et al. Development of high precision and stability DC power supply prototype for high energy photon source[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, 53(8): 1523-1529)
- [11] Guo Xiaoling, Cheng Jian, Zhang Bo, et al. A new active power filter topology based on a chopper circuit[J]. Chinese Physics C, 2016, 40: 017005.