DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.4.341 **中图分类号**：TM921.5 **文献标志码**：A

HIRFL-CSRe 二极铁高精度直流电源的研制

吴保宁[1,2]，陈改霞[1,2](中国电源学会会员)，柴正勇[1,2]，蔺满强[1,2]，
卢军祥[1,2]，杨亚洲[1,2]

(1.大型电气传动系统与装备技术国家重点实验室，天水 741000；2.天水电气传动研究所集团有限公司，天水 741000)

摘要：HIRFL-CSRe是兰州重离子加速器装置HIRFL(heavy ion research facility in Lanzhou)的后加速冷却储存环CSR(cooler storage ring)系统中的实验环部分，其中的二极铁磁铁对电源的性能提出了更高的要求。为满足此类磁铁电源高精度指标需求并解决其技术难点，研制高精度直流电源装置。电源主回路采用多重化电路拓扑结构，控制部分采用多变量耦合的数字模拟混合控制策略，工艺结构采用功率变换器等关键部件标准化设计。实验结果表明，电源输出电流稳定度≤5×10^{-6}/8 h，电源的其他性能指标也达到了加速器物理设计的要求，并通过了验收测试。

关键词：HIRFL-CSRe；直流电源；高精度；多重化拓扑；混合控制策略；高稳定度

Development of HIRFL-CSRe Bipolar Iron High-precision DC Power Supply

WU Baoning[1,2], CHEN Gaixia[1,2], *Member*, *CPSS*, CHAI Zhengyong[1,2], LIN Manqiang[1,2],
LU Junxiang[1,2], YANG Yazhou[1,2]

(1. State Key Laboratory of Large-scale Electric Drive System and Equipment Technology, Tianshui 741000, China;
2. Tianshui Electric Drive Research Institute Group Co., Ltd., Tianshui 741000, China)

Abstract: HIRFL-CSRe is an experimental ring part of the CSR system in the post-accelerated cooling storage ring of HIRFL in Lanzhou heavy-ion accelerator facility, in which the bipolar ferromagnet has higher requirements for the performance of the power supply. To meet the requirements of high-precision indicators for this kind of ferromagnet power supply and solve its technical difficulties, a high-precision DC power supply device is developed. The main circuit of the power supply adopts a multiplex circuit topology, the control part uses a multi-variable coupling digital-analog hybrid control strategy, and the process structure adopts standardized design for the power converter and other key components. Experimental results show that the output current stability of the power supply was less than or equal to 5×10^{-6}/8 h, and the other performance indicators of the power supply also met the physical design requirements for the accelerator. Finally, the power supply passed the acceptance test.

Keywords: HIRFL-CSRe; DC power supply; high precision; multiplex topology; hybrid control strategy; high stability

收稿日期：2024-06-24；**修回日期**：2024-08-16，2024-09-27；
录用日期：2024-11-26；**网络首发日期**：2024-12-23
基金项目：甘肃省科技重大专项计划 2021 年度(21ZD4GA025)
This work is supported by Gansu Province Major Science and Technology Special Project Plan for the year 2021 under the grant 21ZD4GA025

兰州重离子加速器装置HIRFL(heavy ion research facility in Lanzhou)是目前我国规模最大、加速离子种类最多、能量最高的重离子研究装置，是世界上几个重要的核物理研究设施之一。HIRFL由离子源ECR(electron cyclotron resonance)、扇聚

焦回旋加速器 SFC(sector focused cyclotron)、分离扇回旋加速器 SSC(separated sector cyclotron)、放射性束流分离线 RIBLL1(radioactive ion beam line Lanzhou 1) 和 RIBLL2(radioactive ion beam line Lanzhou 2)、冷却储存环主环 CSRm(cooler storage ring main ring)和实验环 CSRe(cooler storage ring experimental ring)等主要设施组成[1-4]。HIRFL 具有加速全离子的能力，可提供多种类、宽能量范围、高品质的稳定核束和放射性核束，用以开展重离子物理及交叉学科研究。磁铁的励磁电源作为加速器装置的重要组成部分，随着加速器装置更高能量、更高束流品质和更高束流传输效率的发展，励磁电源也向着更大电流、更高电压、更高精度、更快响应的方向发展[5-7]。

随着粒子加速器技术的发展，对电源的精度要求越来越高，尤其是加速器中关键的主电源的精度要求，对于输出稳定度在 1×10^{-5} 以内的大功率高精度直流电源，常规采用三相桥式可控整流和大功率调整管串联的方案来实现。三相桥式可控整流电路，根据工作特点，整流电压脉动幅值与带载的轻、重及平波电感、电容的大小有关，300 Hz 低频纹波电压波动范围宽、纹波大，对后级电流源的稳定度影响很大。电流的稳定性受电源电压的稳定性、电路中电阻元件的变化、其他元件参数的变化、温度变化及外界干扰等多种因素影响。粒子加速器装置中部分特殊要求的电源根据负载参数的差异化，针对性采用不同的技术方案来实现。

HIRFL 的 CSRe 实验环二极铁电源初次研制已完成，主电路拓扑结构为 24 脉动晶闸管整流[8]。电源自投入运行以来，存在输出电流纹波较大的问题，虽然经过整改，输出电流纹波有所改善，但仍无法满足物理实验的要求。因此，重新设计 CSR 实验环二极铁电源以满足物理实验的需求是当务之急。新的 CSR 实验环二极铁电源对技术指标提出了更高的要求，本文为此提出 1 种多重化电路拓扑结构，研究 1 种多变量耦合的混合控制策略，并进行相关实验验证，最终实现实验环二极铁直流电源装置的高精度、低纹波电流输出。后文提到的电源均为新研制的实验环二极铁直流电源。

1 电源技术参数及主回路拓扑设计

HIRFL-CSRe 实验环二极铁电源工作模式为稳流模式，感性负载，额定输出电流/电压为 1 300 A/520 V，其主要设计参数及指标见表 1。其中，输出电流长期稳定度≤5×10^{-6}/8 h，额定输出平均无故障运行时间 5 000 h 以上。

表 1 HIRFL-CSRe 实验环二极铁电源技术参数

Tab.1 Technical parameters of HIRFL-CSRe experimental ring bipolar iron power supply

参数	数值/指标
工作模式	直流、稳流
输出电流 I_R/A	1 300
输出电压 V_R/V	520
负载电阻/mΩ	47.2×8(8 台磁铁串联)
负载电感/mH	192.6×8(8 台磁铁串联)
输出电流稳定度	≤5×10^{-6}/8 h(电流 300~1 300 A)

本文针对 HIRFL-CSRe 实验环二极铁电源大电感(1.54 H)负载特点和高精度电源技术指标要求，主要从 3 个方面进行设计，包括主电路拓扑方案、控制策略和高精度数模控制器。

电源主回路拓扑如图 1 所示，图中：Q_1、Q_2 为进线断路器；T_{11}、T_{21} 为高压变压器；KM_{11}、KM_{21}、KM_{31}、KM_{41} 为软启接触器；R_{11}、R_{21}、R_{31}、R_{41} 为软启电阻；Q_{11}、Q_{21}、Q_{31}、Q_{41} 为主回路断路器；A_{11}、A_{21}、A_{31}、A_{41} 为三相整流桥模块；L_{11}、L_{21}、L_{31}、L_{41} 为工频电抗；C_{11}、C_{21}、C_{31}、C_{41} 为母线电容；A_{12}、A_{22}、A_{32}、A_{42} 为 H 桥斩波模块；$L_{1\text{-}1}$、$L_{1\text{-}2}$ 为高频电抗；C_1、C_4 为高频滤波电容；C_2、C_3 为储能电容；C_5、C_6 为滤波电容；R_1~R_4 为均压电阻；U_1、U_2、U_3 为电流传感器；U_4、U_5、U_6 为电压传感器；A_3 为调整管模组；V_1 为续流二极管。首次采用多重化拓扑结构[9-11]，主要为 6 脉波二极管整流与 H 桥变换器组成的 4 路电压源级联和多只大功率调整管并联组成的电流源。交流进线采用 2 台双副绕组的移相变压器，组成 24 脉波整流电路，24 脉波整流电路通过后级 H 桥变换器实现电压串联，通过 24 脉波整流提高

网侧的功率因数和降低网侧谐波，移相变压器一次侧电压 10 kV，二次侧每副绕组电压 115 V。

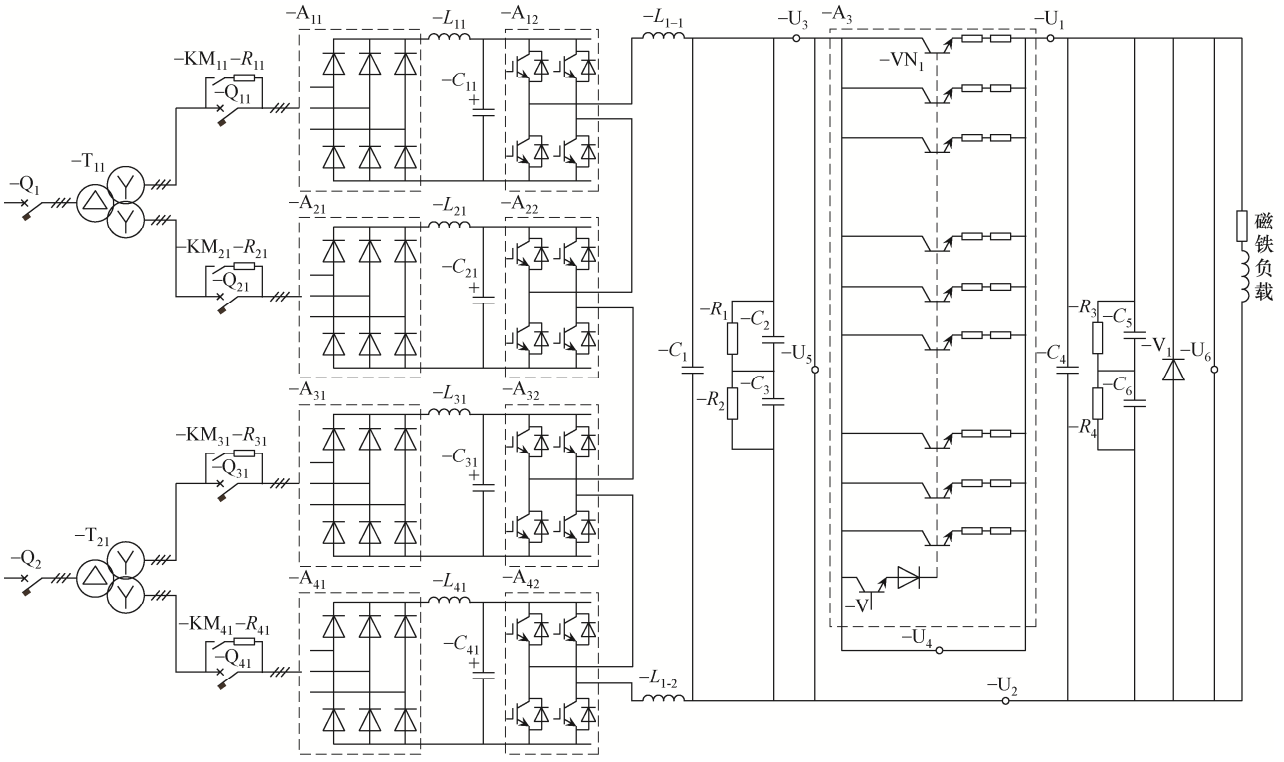


图 1　电源主回路拓扑示意

Fig. 1 Schematic of main circuit topology of power supply

每路电压源由三级电路构成，主要内容如下。第一级($-A_{11}$)由 6 脉波二极管整流电路和滤波电路组成，为后级 H 桥提供初始的母线电压 160 V 左右；第二级($-A_{12}$)采用 H 桥斩波电路，每路 H 桥斩波电路采用移相倍频技术，4 路 H 桥斩波电路级联，总输出实现 80 kHz 的高频可调直流电压源，电压源的输出电压根据负载电流的大小而调节，保证给后级提供低纹波的电压源；第三级($-A_3$)电流源的输入是前级输出的可调直流电压源，电流源采用多只(672 只)大功率的调整管并联，通过调整管参数选型、驱动电路一致性设计、均流限流电阻设计、模块化设计等措施，实现每个调整管输出电流不超过 2 A，保证单只调整管工作在理想区(温度和电流)，最终实现高稳定度的大电流输出。

2　控制方案设计

HIRFL-CSRe 二极铁直流电源对输出电流的长期稳定度及电流纹波的指标要求极高，因此采用合适的控制策略提高电源的稳定度并降低电流纹波至关重要。相比于传统加速器电源的控制方式，本文基于电源大电感负载特性和多重化主回路拓扑结构，设计了 1 种数字和模拟调节相结合的控制方案，这种混合控制方式结合了模拟控制和数字控制的优点，既有数字控制灵活和稳定的优势，又具有模拟控制响应快速和精度高的优势[12-14]。电源总体控制方案示意如图 2 所示，共包含 3 个控制回路，输出电流环、调整管管压降环和 H 桥桥口电压环。图中：A_1 为本地控制给定模块；A_2 为远程控制给定模块；A_3 为 PWM 预给定模块；A_4 为控制器控制算法模块；A_5 为电压调节单元；A_6 为电流调节单元；A_7 为脉冲单元；A_8 为 H 桥模块；A_9 为调整管模块；A_{10} 为负载；U_1 为负载电流；I_g 为给定电流；U_4 为管压降电压；U_5 为桥口电压。整个控制方案是通过调整管管压降环将管压降限制在 1 个稳定的范围内或参考值；H 桥桥口电压环给定为调

整管管压降环的输出，反馈为桥口电压，桥口电压跟随负载电压与管压降进行微调，二者比较后的误差经比例积分 PI(proportional-integral)调节后给 PWM 脉冲生成模块，通过调节 H 桥的 PWM 的脉宽来调节桥口电压的大小，最后通过输出电流环的 PI 调节器将输出电流调节至所需的稳流值[15-16]。

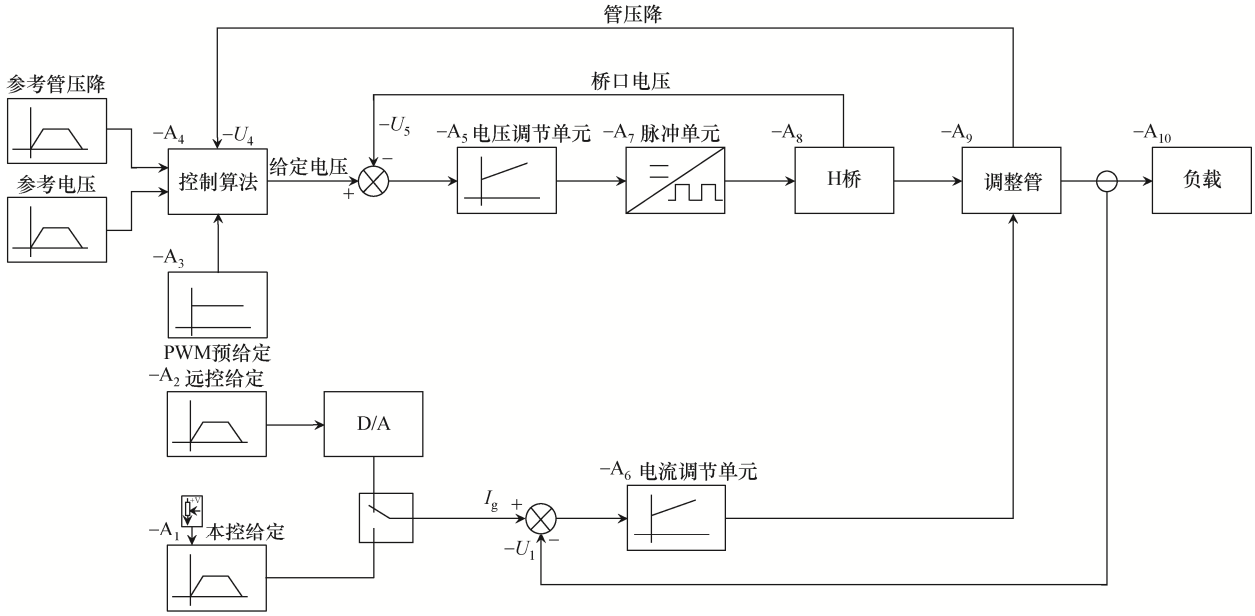


图 2 电源总体控制方案示意

Fig. 2 Schematic of overall control scheme for power supply

输出电流环采用模拟控制器调节线性调整管的基极电流从而控制其集电极电流，最终控制输出电流。电流环的给定有 2 种方式，一是采用高精度 24 位 DA 转换器实现数字给定，二是采用模拟给定。模拟给定采用 5×10^{-8}/℃低温漂的电压源基准 LTZ100，保证稳定度 1×10^{-6} 的模拟给定电压 0~10 V 输出。控制方式采用常规的 PI 调节器，主要器件包括运放、电阻、电容，使用高精度(±0.1)、低温漂(±5×10^{-6}/℃)的器件。模拟控制器不受 AD 采样精度和采样速度的限制，可实现输出电流变化时快速响应和极低纹波、高稳定度 1×10^{-6} 的指标要求。

电压环包含调整管管压降环和 H 桥桥口电压环，调整管管压降环的控制算法及 H 桥桥口电压环中 PI 调节器算法、PWM 脉冲生成均在数字控制器中完成。PWM 预给定是为了在电流输出前，给 H 桥斩波器提前建立设定的电压源，以保证后级调整管的电流输出。

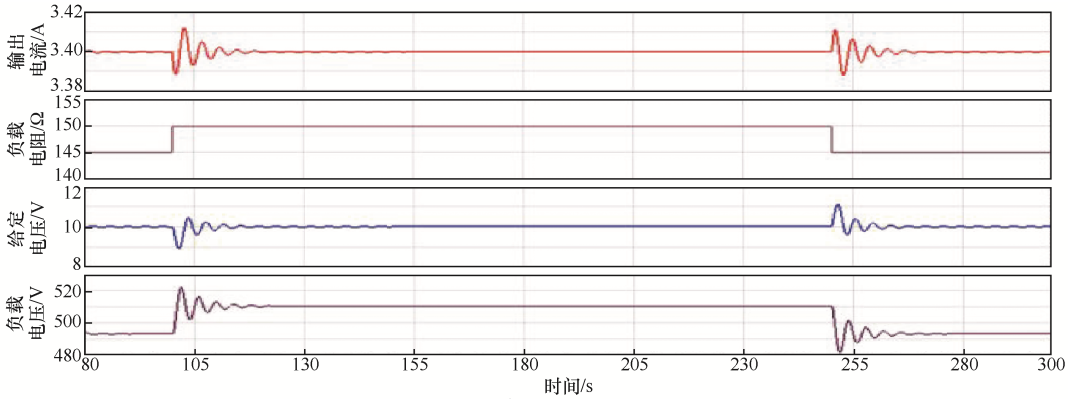
调整管管压降环的控制算法的设计是实现后面 H 桥桥口电压环和输出电流环的关键步骤，本文提出 4 种控制算法。控制算法 1：采用 PI 将管压降稳定在 10 V，即给定电压为 10 V；控制算法 2：若管压降超出 8~14 V，就采用 PI 将管压降调制回 10 V，然后输出给定电压，否则给定电压不变，为参考电压；控制算法 3：若管压降超出 8~14 V，就采用 PI 将管压降调制回 8~14 V 范围内，然后输出给定电压，否则给定电压不变，为参考电压；控制算法 4：将理想负载电压加上 2 倍理想管压降减去实际管压降作为输出给定电压。

为了验证控制策略的可行性，在 Simplorer 中建立电源仿真模型，对 4 种控制算法分别进行仿真，仿真参数见表 2，仿真参数对照电源真实参数进行同比例缩小，不影响仿真结果。负载电阻先增加 5 Ω，为 150 Ω；然后减小 5 Ω，为 145 Ω。仿真结果如图 3 所示。

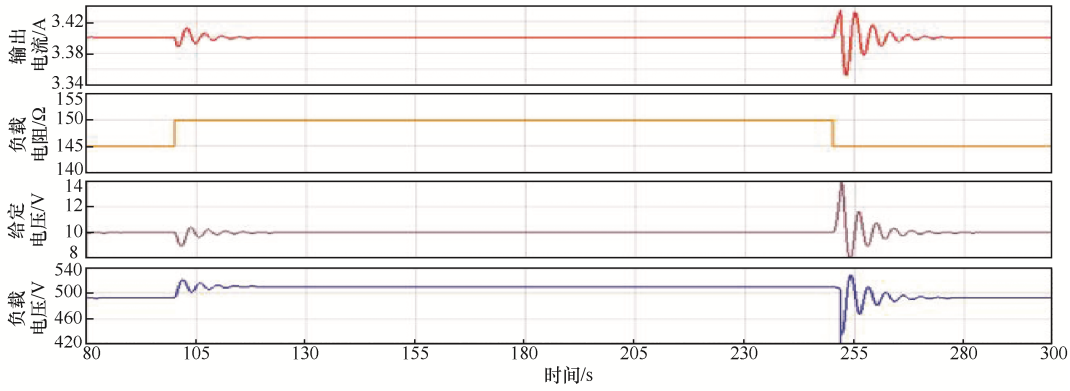
表 2 仿真参数

Tab.2 Simulation parameters

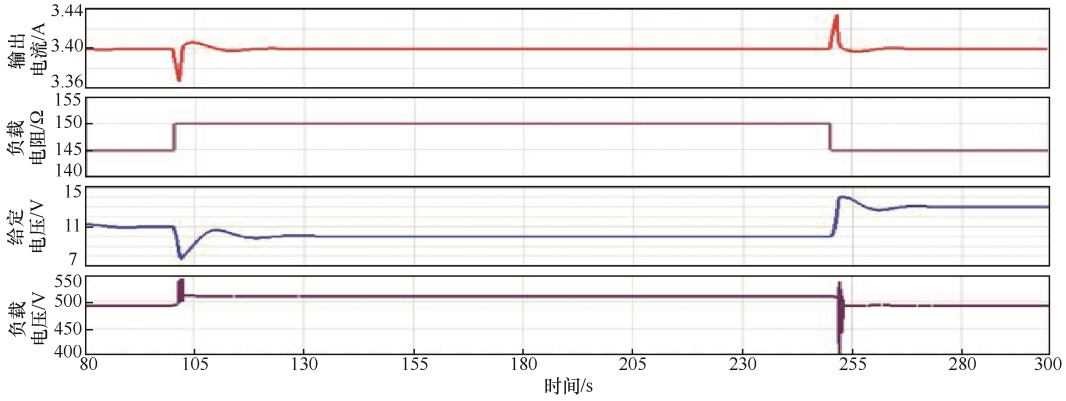
参数	数值/型号
负载电感/mH	591
负载电阻/Ω	145
输出电流/A	3.4
调整管	MJ15024，2 个并联
集电极电压源	可控理想电压源



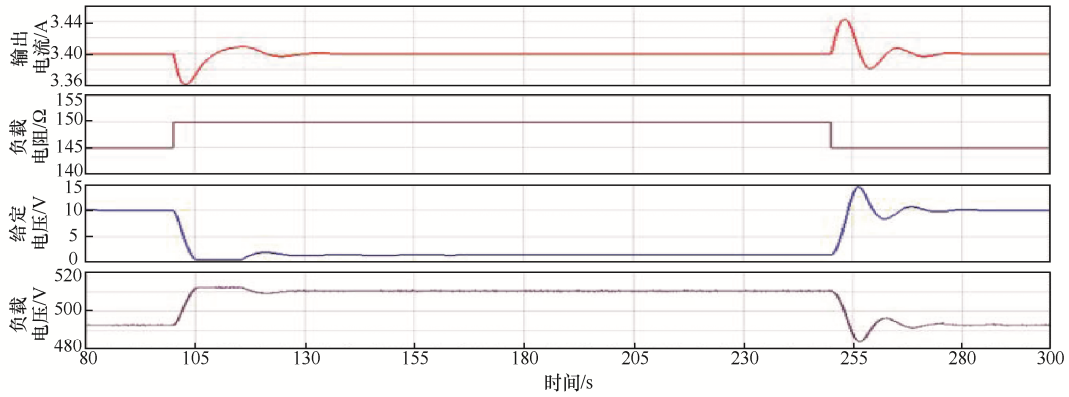
(a) 控制算法1



(b) 控制算法2



(c) 控制算法3



(d) 控制算法4

图 3　仿真结果

Fig. 3 Simulation results

由图 3 可见，控制算法 1 控制效果最佳，调节速度快，调节振幅小；控制算法 2 控制效果也好，相较于控制算法 1，由于要等到管压降超出范围后才调节，因此调节振幅相对略大，但具体到实际工况，磁铁的内阻如果没有发生阶跃突变，不会导致此问题；控制算法 3 控制效果不佳，因为在管压降临界范围会出现调节与不调节的来回切换，导致不稳定，调节振幅也较大；控制算法 4 对管压降并不进行直接控制，因此管压降能够稳定在任何值，会超出安全范围，不可采用。

由此可知，调整管工作在 8~14 V 的管压降区间，10 V 管压降最为理想，功耗、温漂最小，因此管压降环控制算法采用前文所述控制算法 1 或 2。控制算法 1 为常规 PI 控制方式，控制算法 2 采用滞环控制策略，将调整管参考管压降设定在 8~14 V 范围内，与反馈管压降进行比较：若反馈管压降低于参考管压降下限限幅值 8 V，电压给定按设定步长增大至 10 V；若反馈管压降高于参考管压降上限限幅值 14 V，电压给定按设定步长减小至 10 V；若反馈管压降在设定的区间范围内，电压给定不变，通过给定电压控制桥口电压。

从图 1 电源主回路原理可以看出，电源输出稳流电流时，输出电流和母线电压之间的关系为

$$I_{\text{out}}=\frac{4V_{\text{dc}}D-V_{\text{CE}}}{R} \tag{1}$$

式中：I_{out}为输出电流；V_{dc}为母线电压；D为 H 桥占空比；V_{CE}为调整管管压降；R为电路负载。

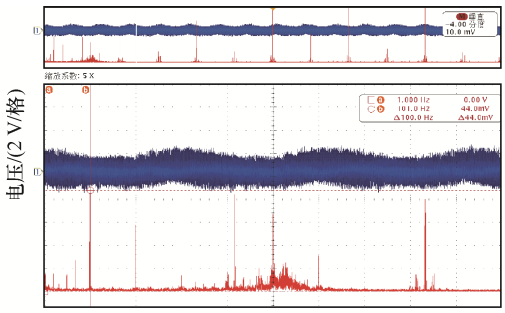
由式(1)可知，电源输出稳流且输出负载一定的情况下，输出电流由母线电压、占空比及调整管管压降决定。因此，母线电压的稳定度及精度、H 桥桥口电压环的稳定性、调整管管压降环的稳定性都直接影响输出电流的稳定度和精度。本文设计的混合控制策略采用输出电流环(模拟控制)、H 桥桥口电压环和调整管管压降环双环控制(数字控制)，结合模拟控制和数字控制的优点，可最大程度保证输出电流的高稳定性。

3 实验和测试

依据以上主回路设计、控制方案设计和工艺结构设计，生产二极铁高精度线性直流电源，对其进行实验测试，主要包括前级电压源的纹波测试和输出电流长期稳定度测试。测试负载为 8 台 47.2 mΩ 的电阻和 8 台 192.6 mH 的电感。

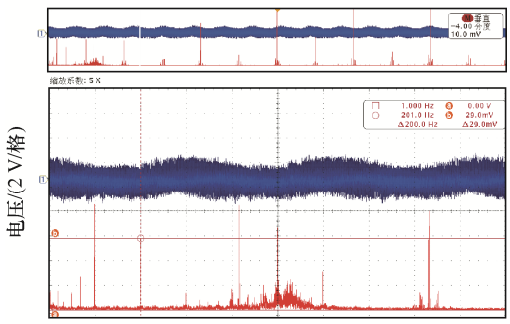
3.1 电压源纹波测试

本文所测电压源为 H 桥级联输出滤波后的直流源，称为电压源，电压源电压 540 V。示波器实测电压纹波如图 4 和图 5 所示，分别为低频 100 Hz 和 200 Hz 时的纹波，以及高频 1.6 kHz 和 76.8 kHz 时的纹波。从图中可以看出，电压源低频纹波低于 44 mV，高频纹波低于 446 mV。



时间/(200 ms/格)

(a) 电压源100 Hz



时间/(200 ms/格)

(b) 电压源200 Hz

图 4 示波器实测电压纹波(低频)

Fig. 4 Voltage ripple measured by oscilloscope (at low frequency)

3.2 电流稳定度测试

电源输出电流采用 2 只满量程 2 000 A 的高精度(1×10^{-6})电流传感器采集和测量，一只用于电流

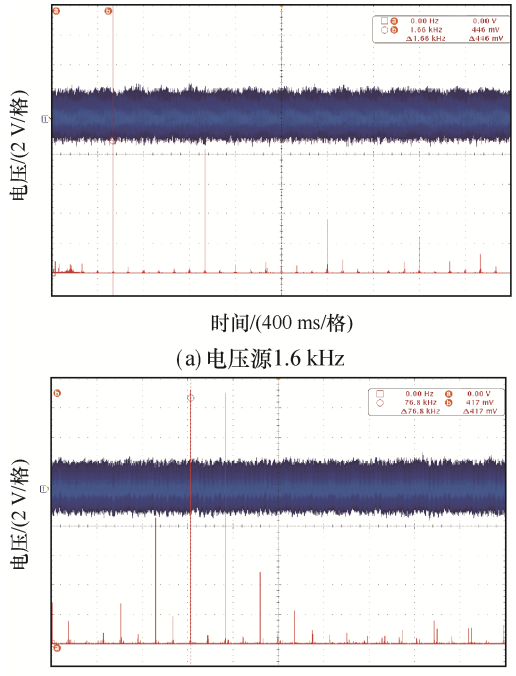


图 5　示波器实测电压纹波(高频)

Fig. 5 Voltage ripple measured by oscilloscope (at high frequency)

反馈闭环系统，另一只用于输出电流采集和稳定度测量，2 只电流传感器满量程输出为 2 000 A 对应 10 V。因此，800 A 电流对应电流传感器输出电压为 4 V，1 000 A 电流对应电流传感器输出电压为 5 V。

电流的长期稳定度计算公式为

$$S=\frac{I_{\max}-I_{\min}}{I_{\max}+I_{\min}} \tag{2}$$

式中：S 为稳定度；$I_{\max}$ 和 $I_{\min}$ 分别为电流传感器所测得电流的最大和最小值。

图 6 和图 7 分别给出了不同工作点的电流稳定度测试数据。图 6 中，电源运行 8 h，采集 7 841 个数值进行稳定度计算，$I_{\max}$=4.007 421 8，$I_{\min}$=4.007 392 6，计算出其稳定度为 3.64×10^{-6}；图 7 中，电源运行 8 h，采集 7 105 个数值进行稳定度计算，$I_{\max}$=5.007 419 8，$I_{\min}$=5.007 384 4，计算出其稳定度为 3.53×10^{-6}。综上所述，电源装置的稳定度达到了协议指标($S\leqslant5\times10^{-6}$/8 h)的要求。

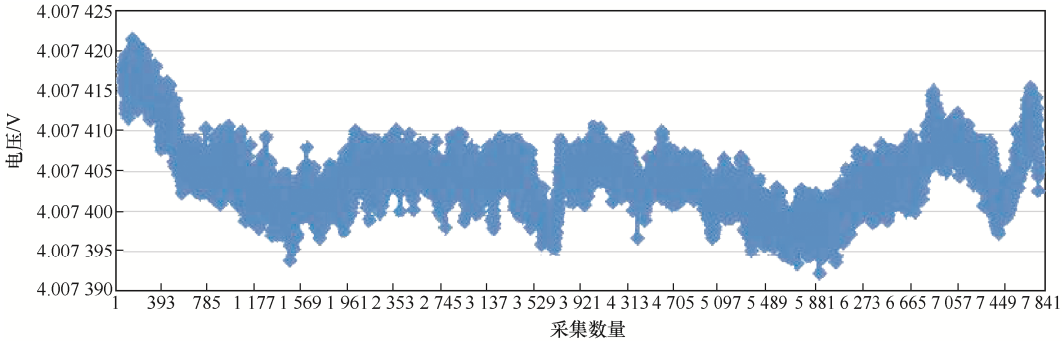


图 6　800 A 时的电流稳定度测试数据

Fig. 6 Test data of current stability at 800 A

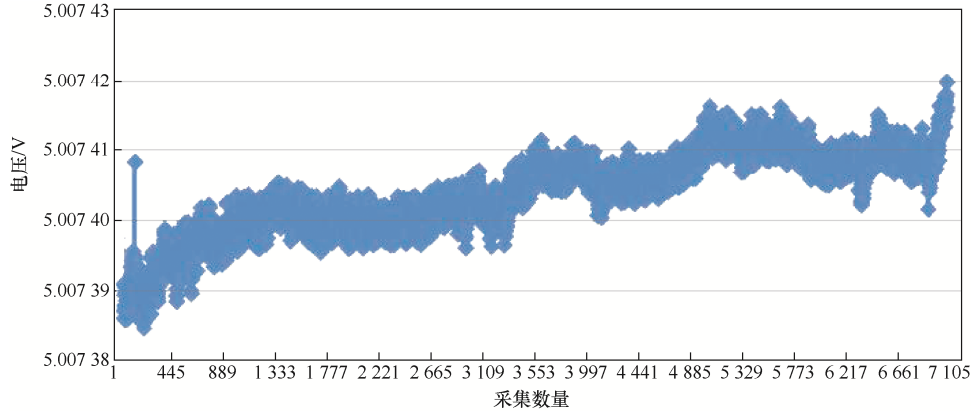


图 7　1 000 A 时的电流稳定度测试数据

Fig. 7 Test data of current stability at 1 000 A

4 结语

本文针对新的 HIRFL-CSRe 二极铁直流电源性能指标要求，通过设计多重化的主回路电路拓扑结构，采用多变量耦合的混合控制策略及模块化的工艺结构设计方案，解决了大科学装置中该类磁铁电源高压、大电流、大感性负载(1.54 H)、高精度($\leqslant 5\times10^{-6}$)的高性能指标的技术难题。并将所提设计方案在电源装置上进行了相关实验验证，且电源已投入使用。结果表明，本文提出的设计方案合理，输出电流稳定度达到了技术指标要求，电源满足实际物理实验运行需求。在电源的调试过程和实际运行中发现，温度对电源指标的影响较大，后续主要计划是控制策略的优化，引入温度补偿，以调节由于控制器件和负载的温漂带来的指标变化；其次是模拟控制器和调整管的恒温控制，通过恒温控制措施，保证电源高稳定度运行指标。

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. (in Chinese)

[2] Zhan W L, Xu H S, Xiao G Q, et al. Progress in HIRFL-CSR [J]. Nuclear Physics A, 2010, 834(1-4): 694c-700c.

[3] 高大庆, 周忠祖, 吴凤军, 等. 强流重离子加速器装置电源预研及进展[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(10): 2048-2054.
Gao Daqing, Zhou Zhongzu, Wu Fengjun, et al. R & D progress of HIAF power supply system [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, 53(10): 2048-2054. (in Chinese)

[4] Yuan Y J, Yang J C, Xia J W, et al. Status of the HIRFL-CSR complex [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2013, 317: 214-217.

[5] Yang J C, Xia J W, Xiao G Q, et al. High intensity heavy ion accelerator facility (HIAF) in China [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2013, 317: 263-265.

[6] Farhni C, Rufer A, Bordry F, et al. A multilevel power converter with integrated storage for particle accelerators [C]// 2007 Power Conversion Conference-Nagoya. Nagoya, Japan, 2007: 1480-1483.

[7] 宋猛, 吴红飞, 吴嘉昊, 等. 低冗余高可靠模块化输入并联输出串联电源系统及其控制方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(6): 1898-1906.
Song Meng, Wu Hongfei, Wu Jiahao, et al. Low redundancy high reliability modular input-parallel output-series power system and control method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(6): 1898-1906. (in Chinese)

[8] 高锋阳, 赵斌, 高大庆, 等. CSRe 二极铁电源关键技术分析[J]. 兰州理工大学学报, 2008, 34(6): 121-124.
Gao Fengyang, Zhao Bin, Gao Daqing, et al. Key-technique analysis of power source with CSRe diploes [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2008, 34(6): 121-124. (in Chinese)

[9] 张纯江, 李旭明, 刘明, 等. 三电平双向全桥多谐振 DC-DC 变换器研究[J]. 电源学报, 2025, 23(1): 1-10.
Zhang Chunjiang, Li Xuming, Liu Ming, et al. Research on three-level bidirectional full-bridge multi-resonant DC-DC converter [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(1): 1-10. (in Chinese)

[10] 居鹏, 高格, 王林森, 等. 基于级联 H 桥逆变器的高精度电源综合保护系统设计[J]. 电源学报, 2019, 17(6): 70-76.
Ju Peng, Gao Ge, Wang Linsen, et al. Design of high-precision power supply integrated protection system based on cascaded H-bridge inverter [J]. Journal of Power Supply, 2019, 17(6): 70-76. (in Chinese)

[11] Watanabe Y, Adachi T, Someya H, et al. Power supply systems for rapid cycling synchrotron [J]. IEEJ Transactions on Industry Applications, 2006, 126(5): 681-689.

[12] 张华剑, 李晓辉, 张帅, 等. HIMM 数字电源远程调试软件系统的设计[J]. 电源学报, 2016, 14(5): 38-42.
Zhang Huajian, Li Xiaohui, Zhang Shuai, et al. Design of remote debugging software system for HIMM digital

power supplies [J]. Journal of Power Supply, 2016, 14(5): 38-42. (in Chinese)

[13] 叶怡伟, 陈敏, 徐德鸿. 软开关有源钳位逆变器逐波限流控制策略研究[J]. 电源学报, 2024, 22(6): 43-50.
Ye Yiwei, Chen Min, Xu Dehong. Research on cycle-by-cycle current limit strategies for active-clamped soft-switching inverters [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(6): 43-50. (in Chinese)

[14] Wang Xiaojun, Zhang Shuai, Gao Daqing. Analytic modeling optimal control with kinetic inductance fine turning method of pulsed power supply for accelerator magnet [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(3): 2780-2789.

[15] 申万增, 丁军怀, 燕宏斌, 等. 两级式数字扫描电源的设计与实现[J]. 电力电子技术, 2018, 52(2): 32-34.
Shen Wanzeng, Ding Junhuai, Yan Hongbin, et al. Design and realization of two-stage digital scanning power supply [J]. Power Electronics, 2018, 52(2): 32-34. (in Chinese)

[16] Li Yuan, Wu Fengjun, Wang Xiaojun, et al. Structure and reliability design and experiment of HIAF-BRing dipole magnet pulse power supply [C]// 2021 IEEE 1st International Power Electronics and Application Symposium (PEAS). Shanghai, China, 2021: 1-6.



吴保宁

作者简介：

吴保宁(1979—)，男，本科，高级工程师。研究方向：特种电源设计。E-mail：wu_bn02@126.com。

陈改霞(1987—)，女，中国电源学会会员，通信作者，硕士，高级工程师。研究方向：特种电源及其数字控制器设计。E-mail：cgx6711@163.com。

柴正勇(1978—)，男，本科，高级工程师。研究方向：粒子加速器电源设计。E-mail：ccc1978@126.com。

蔺满强(1989—)，男，本科，工程师。研究方向：粒子加速器电源设计。E-mail：lmq_0719@163.com。

卢军祥(1986—)，男，本科，工程师。研究方向：粒子加速器电源设计。E-mail：450191896@qq.com。

杨亚洲(1987—)，男，本科，工程师。研究方向：电力电子变换器设计。E-mail：1328364900@qq.com。

(责任编辑：耿越)