



·脉冲功率技术·

## 高鲁棒性双极性高压隔离采样电路设计\*

李 波, 马 勋, 赵 娟, 李洪涛, 张 信, 康龙飞, 康传会, 李松杰, 肖金水

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 根据大容量能库型装置双极性充电电源对采样电路的高鲁棒性、正负极性均可控等要求, 研制了一种隔离电压大于 30 kV、隔离转换电压误差小于 0.1% 的正负双极性直流高压隔离采样电路。采用电压/频率、频率/电压转换方法, 通过光纤、变压器隔离等措施, 实现了正负双极性直流高压同时隔离采样, 解决了目前双极性直流高压电源存在的正负极性电压不平衡、控制信号与高功率系统地隔离不完全问题, 提高了电源的抗电磁干扰能力。该电路在  $\pm 10$  kV 双极性充电输出时, 正负极性电压偏差小于 0.1%, 100 多台充电电源在 18.3 MJ 脉冲装置放电产生的复杂电磁干扰环境下可靠稳定运行。

**关键词:** 正负双极性隔离充电; 隔离采样; 压频变换; 频压变换

中图分类号: TM836

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220385

## Design of a high voltage isolated bipolar sampling circuit with high robustness

Li Bo, Ma Xun, Zhao Juan, Li Hongtao, Zhang Xin, Kang Longfei,  
Kang Chuanhui, Li Songjie, Xiao Jinshui

(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** According to the requirements of high robustness and positive and negative polarity controllability of the sampling circuit for bipolar charging power supply designed for a large capacity energy storage device, a positive and negative bipolar DC high-voltage isolation sampling circuit with isolation voltage  $\geq 30$  kV and conversion voltage fractional error  $\leq 0.1\%$  has been developed. The voltage/frequency and frequency/voltage conversion methods were adopted, integrated with optical fibers, transformer isolation and other measures, the positive and negative bipolar DC high voltage were isolated and sampled independently at the same time. The problems of the bipolar DC high voltage power supply, such as the voltage imbalance of positive and negative polarity, the incomplete isolation of ground wires between the control signal system and the high power system, and so on were solved. The EMI resistance of the power supply was improved. As the bipolar charging voltage output achieved  $\pm 10$  kV, the deviation of positive and negative polarity voltage is less than 0.1%. More than 100 chargers operated reliably and stably under the complex electromagnetic interference environment generated by discharge of the 18.3 MJ pulsed device.

**Key words:** isolated bipolarity power supply, isolated sampling, voltage-frequency conversion, frequency-voltage conversion

高精度直流高压充电电源需要配置高精度、高鲁棒性取样电路对其充电过程进行准确的反馈控制, 通过闭环控制实时对输出直流高压进行检测、调整, 以确保其输出直流电压的稳定性和可靠性<sup>[1-6]</sup>。在直流高压电源中为了实现电源控制系统安全可靠工作, 避免将输出高压噪声引入控制回路对电源控制系统造成干扰, 高压采样电路与控制电路进行电气隔离是必需的<sup>[7-11]</sup>。目前商售双极性直流高压电源的采样电路存在的问题包括: (1) 只对正极性直流高压进行采样和反馈控制; (2) 采样电路通常采用线性光耦合器实现隔离, 由于线性光电耦合器隔离电压较低, 一般为 5 kV 左右, 很难满足更高电压的需求; (3) 部分正负双极性高压采样电路地与控制信号共地。这些问题

\* 收稿日期: 2022-12-27; 修订日期: 2023-04-17

基金项目: 中国科协青年人才托举工程项目(2019QNRC001)

联系方式: 李 波, 120546232@qq.com。

通信作者: 肖金水, jinshui\_xiao@126.com。

使得现有的大部分双极性直流高压电源输出的正极性电压与负极性电压不平衡,且抗干扰能力差,不能满足复杂电磁干扰环境下可靠稳定运行的要求。本文针对以上问题,提出了一种正负双极性直流高压隔离采样电路。采用电压频率-频率电压转换电路,通过光纤、变压器隔离等措施,实现了正负双极性直流高压同时隔离采样,解决了目前双极性直流高压电源存在的正负极性电压不平衡、控制信号与高压地隔离不完全问题,大幅提升电源的鲁棒性和控制精度。

## 1 系统结构及工作原理

双极性直流高压隔离采样电路系统组成如图1所示,由正负高压采样单元、双极性电压转换单元、变压器耦合隔离供电单元、光纤隔离传输单元及电压还原单元组成,其中光纤隔离传输单元(图1中虚线部分)由信号发送电路、光纤及信号接收电路组成。工作原理为:正负高压隔离采样单元将直流高压电源输出的正负直流高压衰减为直流低压模拟信号,该信号经双极性电压转换单元后输出两路高频信号,通过信号发送电路将两路高频信号转换为光脉冲信号,光脉冲信号经光纤传输至信号接收电路,信号接收电路将两路光脉冲信号转换为两路高频信号,最后电压还原单元将两路高频信号还原成正极性直流低压模拟信号。变压器耦合隔离供电单元分别为双极性电压转换单元、光纤隔离传输单元及电压还原单元供电。该电路具有以下特点:(1)双极性直流高压隔离采样电路隔离电压主要由光纤和隔离变压器的耐压等级决定,因此隔离电压可达30 kV以上;(2)通过调节电压还原电路参数,可任意调整直流信号隔离传输的变比;(3)可以对正负高压采样电路的采样电压进行精确调校;(4)采样信号通过光纤传输,实现与周围电磁场的完全解耦;(5)正极性与负极性独立隔离采样,实现正、负极性电压高精度反馈控制;(6)将输入正负双极性电压转换为两路正极性电压输出,便于后续处理和控制在。

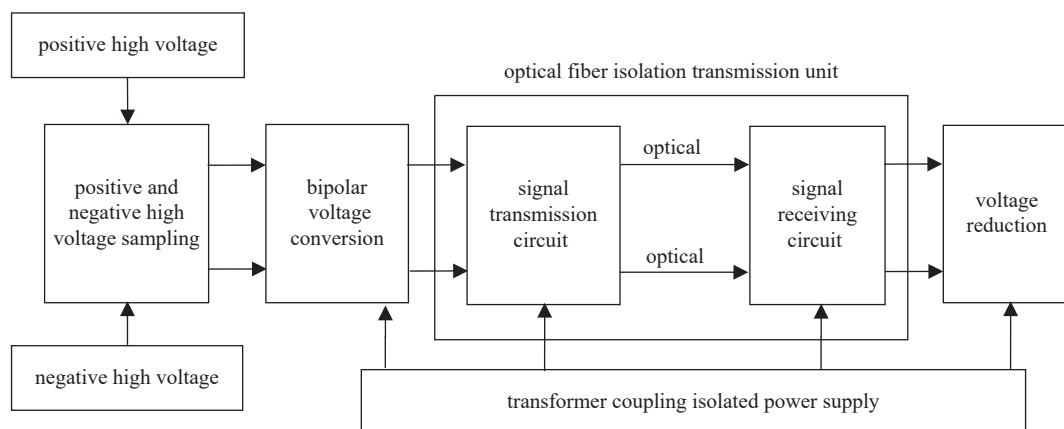


Fig. 1 Overall structure of the system

图1 系统总体结构图

## 2 电路设计

### 2.1 变压器耦合隔离供电电路

变压器耦合隔离供电电路采用电荷泵、线性稳压及开关电源方式产生不同的直流电压,为双极性电压转换单元、光纤隔离传输单元及电压还原单元供电,通过隔离变压器实现正负直流高压采样地(高压地)与控制电路地之间的电气隔离。变压器耦合隔离供电电路原理框图如图2所示,主要由DC/DC模块单元、PWM单元、驱动电路、全桥逆变器、谐振和隔离变压器、整流滤波、电压稳压1、电压稳压2及电荷泵组成。

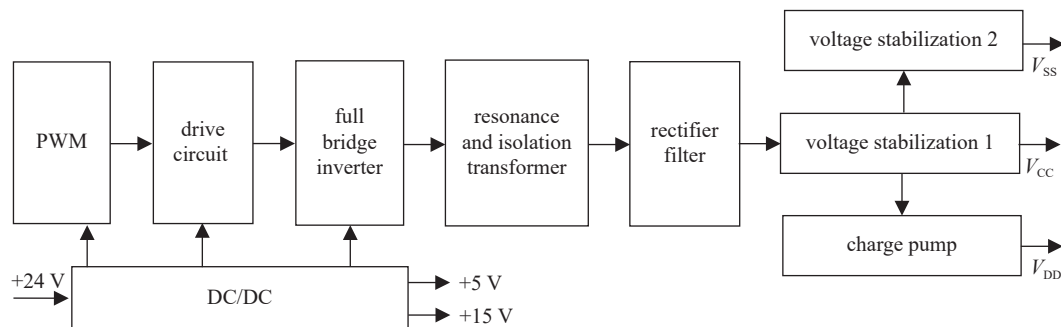


Fig. 2 Principle block diagram of transformer coupling isolated power supply

图2 变压器耦合隔离供电原理框图

单元、全桥逆变单元、串联谐振及隔离变压器单元、整流滤波单元、稳压三端 1、稳压三端 2 及电荷泵单元组成。

**DC/DC 模块单元：**将输入+24 V 直流电压转换成+15 V 直流电压和+5 V 直流电压。+15 V 直流电压分别为 PWM 单元、驱动电路单元、全桥逆变单元及图 1 中电压还原单元供电；+5 V 直流电压为图 1 中光纤隔离传输单元中信号接收电路和电压还原单元供电。

PWM 单元主要由 SG3525 型 PWM 芯片及外围电阻器、电容器组成，可以产生电压幅值+15 V，脉冲宽度 8.2  $\mu$ s，频率 50 kHz 的两路脉冲信号。该信号经驱动电路后作为全桥逆变单元开关控制信号。

驱动电路是主电路与控制信号电路之间的接口，对开关性能甚至整个装置的性能都有着重要的影响<sup>[12-14]</sup>。性能良好的驱动电路可以使器件工作在较为理想的开关状态，有利于缩短开关时间、减小开关损耗，对装置的运行效率、可靠性和安全性都有重要的意义。在驱动电路设计中，驱动脉冲电压幅值  $V_g$ 、栅极串联电阻  $R_g$ 、最大输出电流  $I_g$  是必须关注的基本参数，如果驱动功率或者输出电流能力不够，轻则驱动波形畸变，重则驱动不了开关。为了保障开关管可靠、快速关断，设计了驱动电路，该电路主要由半桥驱动器、栅极电阻等外围器件组成。驱动器电源最大供电电压 20 V，最大输出信号电流 2.2 A，驱动信号经栅极电阻进入全桥逆变单元，用于驱动全桥逆变单元开关管，使开关管交替快速导通。

全桥逆变、整流滤波、谐振及隔离变压器等单元组成隔离供电电路的主电路，主电路原理图如图 3 所示。由直流侧母线电压+15V、MOSFET 开关管  $Q_1 \sim Q_4$ 、47  $\mu$ F 聚丙烯谐振电容  $C_r$ 、高频隔离变压器 T、1.5KE36A 型续流二极管  $D_1 \sim D_4$ 、1N4148 型整流二极管桥  $D_5 \sim D_8$ 、CW7815 型稳压三端  $U_1$  及 100  $\mu$ F 滤波电容  $C_1$ 、 $C_2$  组成。其中高频变压器选用铁氧体磁芯，初级、次级匝数分别为 4 匝和 5 匝（初级采用横截面积 0.3  $\text{mm}^2$  导线绕制，次级采用耐压 40 kV 高压导线绕制），利用高频变压器初级电感作为 LC 谐振回路谐振电感  $L_r$ 。通过谐振高频变压器实现图 1 中正负双极性电压转换单元、信号发送电路与信号接收电路、电压还原单元的隔离供电，隔离电压高低主要由变压器次级绕组耐压和初、次级之间耐压决定，具体工作过程为：PWM 信号经驱动电路后使逆变开关  $Q_1$ 、 $Q_4$  和  $Q_2$ 、 $Q_3$  交替导通，与谐振电容及谐振电感形成 LC 谐振回路，产生电压幅度 15 V、谐振频率 110 kHz 交流信号，该信号经高频变压器隔离、升压与整流滤波电路后输出约 19 V 直流电压。

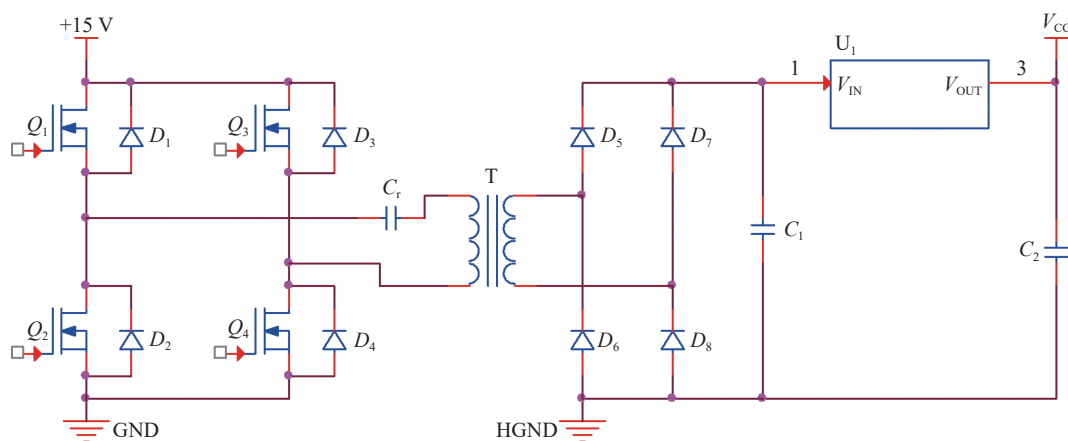


Fig. 3 Schematic diagram of resonance main circuit

图 3 谐振主电路原理图

稳压三端 1 主要由 CW7815 型稳压三端及外围电阻、电容器组成，将整流滤波单元输出 19 V 直流电压转换为  $V_{CC}=+15$  V 直流电压。 $V_{CC}$  主要为以下 3 部分供电：(1) 直接为双极性电压转换单元中 AD652 芯片正电源供电；(2) 经 CW7805 型稳压三端 2 产生  $V_{SS}=+5$  V 直流电压，分别为双极性电压转换单元中晶振和光纤隔离传输单元中信号发送电路供电；(3) 经电荷泵产生  $V_{DD}=-15$  V 直流电压，为双极性电压转换单元中 AD652 芯片负电源供电。

## 2.2 双极性直流高压采样及转换电路

双极性直流高压采样及转换电路原理如图 4 所示。正负高压采样电路主要采用变比 2000:1 阻容分压器实现，其中高压臂电阻  $R_1$ 、 $R_4$  选用 20 M $\Omega$ /20 W 高压玻璃釉电阻器，低压臂电阻  $R_2$ 、 $R_3$  选用 10 k $\Omega$  金属膜电阻器，高压臂电容  $C_1$ 、 $C_4$  采用 50 pF/30 kV 高压瓷介电容器，低压臂电容  $C_2$ 、 $C_3$  选用 100 nF/50 V 瓷介电容器， $D_1$ 、 $D_2$  为瞬态电压抑制二极管。通过阻容分压器实时对电源输出正负极性高压进行采样，并输出 0~ $\pm$ 5 V 直流电压，通过微调低压臂电阻阻值可以提高采样精度。

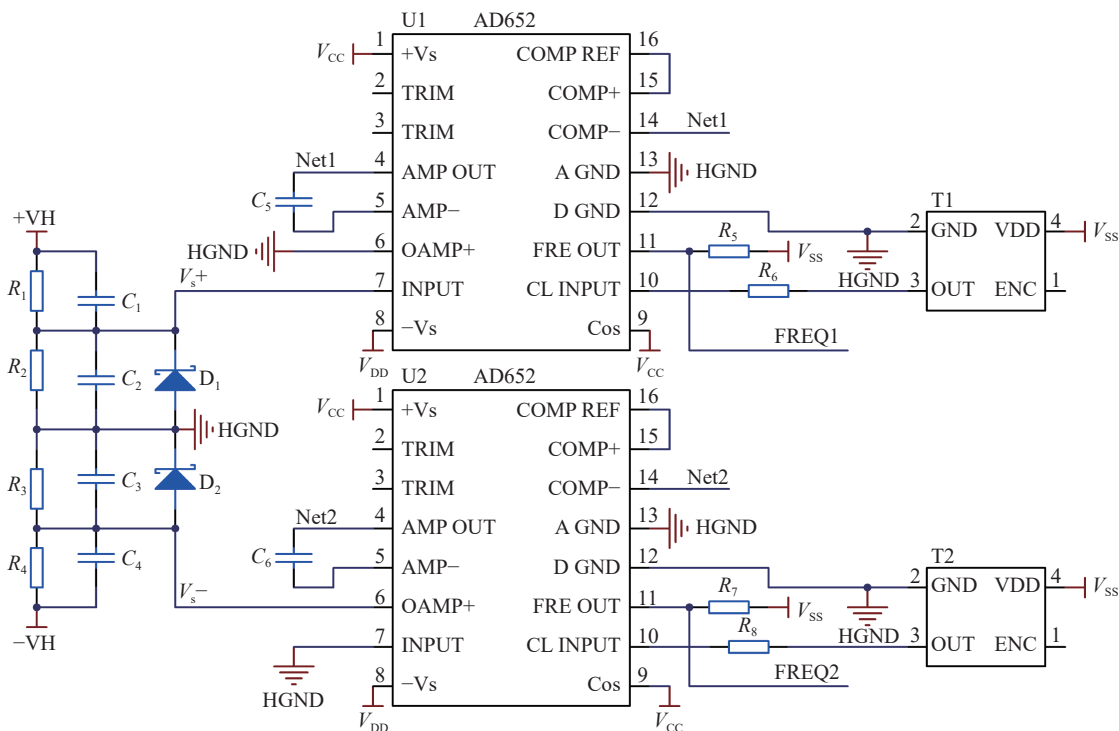


Fig. 4 Schematic diagram of bipolar DC high-voltage sampling and conversion circuit

图 4 双极性直流高压采样及转换电路原理图

双极性电压转换电路主要由 AD652 型电压频率转换芯片 U1、U2, 2 MHz 晶振 T1、T2, 电容器  $C_5$ 、 $C_6$  及电阻器  $R_5 \sim R_8$  组成。工作原理: 采用电压/频率转换技术, 将  $0 \sim \pm 5 \text{ V}$  直流电压转换为电压幅度 5 V、脉冲宽度  $0.6 \mu\text{s}$ 、频率可调的两路高频脉冲信号(当电源输出  $\pm 10 \text{ kV}$  直流高压时, 采样电压  $V_{s+} = +5.0 \text{ V}$ 、 $V_{s-} = -5.0 \text{ V}$ ;  $V_{s+}$ 、 $V_{s-}$  分别进入正负极性电压转换电路, 电压转换电路将  $\pm 5.0 \text{ V}$  直流信号转换为电压幅度 +5 V、频率 500 kHz、脉冲宽度  $0.6 \mu\text{s}$  的两路高频信号)。高频脉冲信号频率由输入电压幅值和输入电压范围决定, 通过电容器  $C_5$ 、 $C_6$  可以分别调节正负电压转换电路的输入电压范围, 若正负电压转换电路的正负输入电压范围及输入电压幅值相等, 则两路高频脉冲信号频率相同。

### 2.3 光纤隔离传输电路

光纤隔离传输电路主要作用是通过光纤实现两路高频脉冲信号隔离传输, 且输入信号与输出信号频率相等。单路光纤隔离传输电路原理如图 5 所示, 主要由信号驱动电路、信号发送电路、光纤及信号接收电路组成。其中驱动电路主要由驱动器  $U_1$  组成, 信号发送电路主要由光纤发射器  $U_2$  及外围电路组成, 信号接收电路主要由光电接收器  $U_3$  及外围电路组成。工作过程为: 双极性电压转换单元输出的高频脉冲信号经驱动电路后使光接收器发光, 产生光脉冲信号, 光脉冲信号通过光纤传输至光接收器, 光接收器将光脉冲信号转换为高频脉冲信号。

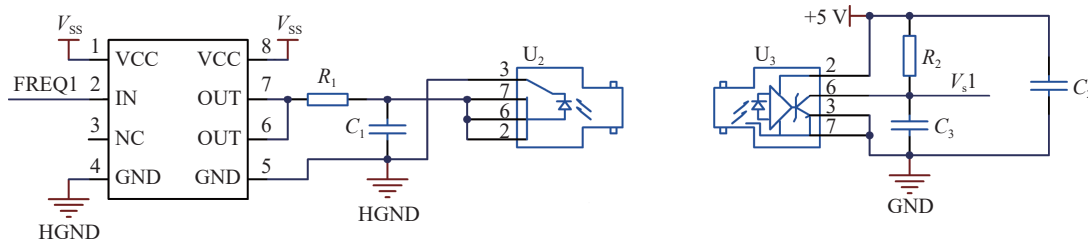


Fig. 5 Schematic diagram of optical fiber isolated transmission circuit

图 5 光纤隔离传输电路原理图

### 2.4 电压还原电路

电压还原电路主要作用是实现高频脉冲信号到模拟信号转换。单路电压还原电路原理图如图 6 所示, 主要由 AD652 型频率电压转换芯片、晶振 T3 及外围电阻器、电容器组成。工作过程为: 光纤隔离传输电路输出的两路高频脉冲信号进入电压还原电路, 电压还原电路根据输入信号的频率, 将两路输入信号转换成  $0 \sim +5 \text{ V}$  的直流电压,

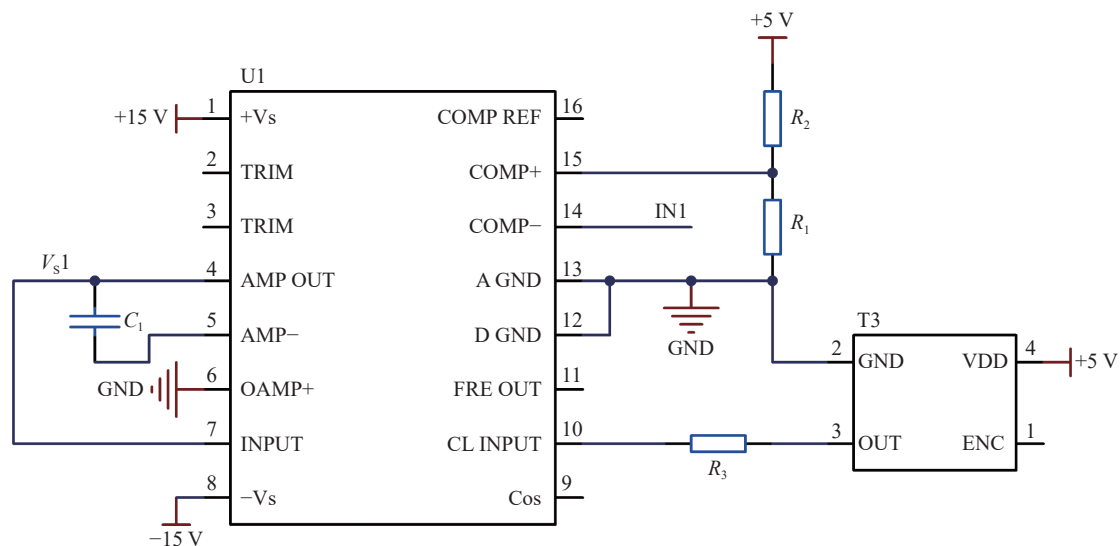


Fig. 6 Schematic diagram of voltage reduction circuit

图 6 电压还原电路原理图

该电压为电源输出正负极性直流高压的监测信号，监测信号可作为反馈信号直接送至电源控制电路，通过控制电路对反馈信号进行处理可实现电源输出直流高压的精确控制和正负极性电压不平衡检测。

### 3 实验结果

采用以上设计研制了一种正负双极性直流高压隔离采样电路，结合 IT6333B 直流电源和 DMM7510 型 7 位半多用表对电路的稳定性及电压转换精度进行了测试，各个电压点的正负极性电压测试结果如表 1 所示。可以看出：(1)在输入电压  $0 \sim \pm 6 \text{ V}$  范围内，正极性输入电压与输出电压偏差在  $0.004 \sim 0.002 \text{ V}$  之间，负极性输入电压与输出电压绝对值偏差在  $0.006 \sim 0.004 \text{ V}$  之间，电压偏差较小且比较稳定；(2)隔离转换电压偏差基本上随输入电压幅值的增大逐渐减小，在输入  $+5 \text{ V}$  下，隔离转换电压误差最小为  $0.04\%$ ；(3)正负极性隔离转换输出电压均小于输入电压，且比较稳定，可通过后端控制软件进行定值补偿，进一步提高隔离转换精度，减小误差。正极性输出电压加  $+0.004 \text{ V}$  直流电源偏置及负极性输出电压加  $+0.006 \text{ V}$  直流电源偏置后，该电路正负极性隔离转换电压精度均小于  $0.1\%$ 。

表 1 正负极性电压测试结果  
Table 1 Positive and negative polarity voltage test results

unit: V

positive polarity input voltage	positive polarity output voltage	negative polarity input voltage	negative polarity output voltage
0.500	0.496	-0.500	0.494
1.000	0.996	-1.000	0.994
1.500	1.496	-1.500	1.494
2.000	1.997	-2.000	1.994
2.500	2.496	-2.500	2.495
3.000	2.997	-3.000	2.995
3.500	3.497	-3.500	3.495
4.000	3.997	-4.000	3.995
4.500	4.498	-4.500	4.496
5.000	4.998	-5.000	4.996
5.500	5.497	-5.500	5.496
6.000	5.997	-6.000	5.996

该电路用于  $\pm 10 \text{ kV}$  双极性充电电源，为  $560 \mu\text{F}$  负载电容器进行充电。采用 P6015A、HV-40 型高压探头检测负载电容器两端充电电压，结合万用表和示波器对电源整个充电过程电压波形及输出正负极性电压平衡性进行了测试。电源输出正负极性分别对地端的电压波形如图 7 所示，充电电压  $\pm 10.5 \text{ kV}$ ，充电过程中各个电压点的正负极性

电压测试结果如表2所示。试验结果表明:(1)该电路实现了 $\pm 10$  kV双极性直流电压的隔离采样,且充电电压平滑上升,正负极性电压上升速率几乎一样;(2)该电路作为充电电源反馈信号,使电源在整个充电过程中负载电容正负极性电压一致性较好(偏差在0.05~0.09 kV之间),且电源在 $\pm 10$  kV下正负极性电压偏差小于0.1%,偏差较小。

#### 4 结论

本文针对双极性直流高压电源采样电路现有技术存在的不足,提出了一种双极性直流高压隔离采样电路。采用电压/频率-频率/电压转换电路,通过光纤、变压器隔离等措施,研制了一种隔离电压大于30 kV、输入电压0~ $\pm 6$  V、输出电压0~+6 V、隔离转换电压误差小于0.1%的正负双极性直流高压隔离采样电路。实现了正负双极性直流高压同时隔离采样,解决了目前双极性直流高压电源存在的正负极性电压不平衡、控制信号与高压地隔离不完全问题,大幅提升电源的鲁棒性和控制精度。该电路用于 $\pm 10$  kV双极性充电电源,在输出 $\pm 10$  kV时,正负极性电压偏差小于0.1%,100多台充电电源同时工作给电容器充电,在储能18.3 MJ、单路放电电流最大540 kA的能库型脉冲功率装置放电产生的复杂电磁干扰环境下实现可靠稳定运行。

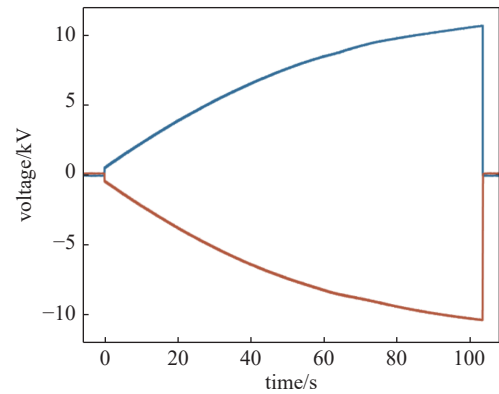


Fig. 7 Charging voltage waveform

图7 充电电压波形

表2 充电过程中的电压测试结果  
Table 2 Voltage test results during charging process

unit: kV

positive voltage	negative voltage	absolute deviation
1.01	-1.06	0.05
2.05	-2.10	0.05
3.03	-3.09	0.06
3.96	-4.02	0.06
5.09	-5.01	0.08
6.08	-6.00	0.08
7.08	-6.99	0.09
8.07	-7.99	0.08
9.09	-9.01	0.08
10.05	-9.96	0.09

#### 参考文献:

- [1] 樊波, 倪磊, 牛天林, 等. 基于SVPWM的军用储能电源双闭环模糊控制[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(2): 168-171,175. (Fan Bo, Ni Lei, Niu Tianlin, et al. Research on control strategy for military energy storage system rectifier based on SVPWM double-close-loop fuzzy control[J]. Fire Control & Command Control, 2017, 42(2): 168-171,175)
- [2] 刘福才, 金书辉, 赵晓娟. 串并联谐振高压脉冲电容充电电源的闭环控制[J]. 电力电子技术, 2012, 46(6): 69-72. (Liu Fucui, Jin Shuhui, Zhao Xiaojuan. Closed-loop control of high voltage pulse capacitor charging power supply based on series-parallel resonant[J]. Power Electronics, 2012, 46(6): 69-72)
- [3] 刘坤, 付荣耀, 高迎慧, 等. 高压重频充电电源控制系统的设计[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28: 045001. (Liu Kun, Fu Rongyao, Gao Yinghui, et al. Design of control system of high voltage repetition frequency charging power supply[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28: 045001)
- [4] 樊生文, 蔡斌峰, 王泽庭. 基于串联谐振的电子束焊机灯丝电源的研究[J]. 电源技术, 2016, 40(5): 1113-1115,1121. (Fan Shengwen, Cai Binpeng, Wang Zeting. Research on series resonant electron beam welding filament power supply[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(5): 1113-1115,1121)
- [5] 黄新波, 刘斌, 张周熊, 等. 调频式串联谐振试验电源数字控制器设计[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(7): 138-142,155. (Huang Xinbo, Liu Bin, Zhang Zhouxiang, et al. Design of digital controller for frequency-tuned series resonance power source[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7): 138-142,155)
- [6] 廖永福, 林磊, 李傲, 等. 移相串联谐振高压电容器充电电源谐振参数设计方法及其电流控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(16): 83-92. (Liao Yongfu, Lin Lei, Li Ao, et al. Resonant parameters design method and current control strategy of phase-shifted series resonant high-voltage capacitor charging power supply[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(16): 83-92)

- [7] 夏军. 一种实用的高压开关电源采样隔离反馈电路[J]. *高压电器*, 2006, 42(4): 295-297. (Xia Jun. A practical feedback circuit of output isolated sampling for high voltage switch supply[J]. *High Voltage Apparatus*, 2006, 42(4): 295-297)
- [8] 石一, 杨小卫, 高迎慧, 等. 光纤隔离变换器在高压充电电源中的应用[J]. *高电压技术*, 2008, 34(7): 1422-1426. (Shi Yi, Yang Xiaowei, Gao Yinghui, et al. Application of isolation converter of optical fiber in the high voltage charging power supply[J]. *High Voltage Engineering*, 2008, 34(7): 1422-1426)
- [9] 何光林, 黄科伟. 引信电子安全系统高压反馈电路研究[J]. *北京理工大学学报*, 2009, 29(1): 47-49. (He Guanglin, Huang Kewei. High voltage feedback circuit in the electronic safety and arming of fuzes[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2009, 29(1): 47-49)
- [10] 张小龙. 串联谐振软开关电容器充电电源研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009. (Zhang Xiaolong. Research on series resonant soft-switching capacitor charging power supply[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.)
- [11] 马建荣, 窦金生, 陈峰, 等. 静电除尘用高频电源直流电压检测电路[J]. *兵工自动化*, 2013, 32(3): 63-65,69. (Ma Jianrong, Dou Jinsheng, Chen Feng, et al. DC voltage detection circuit based on high frequency power in electrostatic precipitation[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2013, 32(3): 63-65,69)
- [12] 李波, 赵娟, 李洪涛, 等. 一种新型等离子体磁控溅射镀膜电源设计[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 040020. (Li Bo, Zhao Juan, Li Hongtao, et al. Design of new power source for plasma magnetron sputtering coating[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 040020)
- [13] 李波, 李博婷, 叶超, 等. 双极性脉冲磁控溅射电源设计[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 045004. (Li Bo, Li Boting, Ye Chao, et al. Design of bipolar pulsed magnetron sputtering power supply[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 045004)
- [14] 李波, 赵娟, 李洪涛, 等. 正负双极性直流高压充电电源设计[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 095016. (Li Bo, Zhao Juan, Li Hongtao, et al. Design of bipolarity DC high voltage charging power supply[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 095016)