

悬浮高压直流电源的分析和研究

唐 礴

(安徽工业大学电气与信息工程学院, 安徽 马鞍山 243000)

摘要: 悬浮高压电源在应用于医疗领域时, 对于高压输出的准确度和安全性要求极为严苛。为减小市电抖动、EMI 干扰的影响, 满足高压、小电流和小体积的要求, 设计了一套闭环控制系统。所提系统包括采样闭环、过电压保护等功能, 可实现高压输出 15 kV 的现场测试, 对输出电压准确度、稳定性和纹波等数据进行测量, 并且利用谐振元件消除了电路寄生振荡。应用电气隔离、并联谐振变换器等技术方案, 减小了电磁干扰, 实现了开关管的 ZVS。同时采用倍压整流技术, 解决了传统高压电源方案中变压器体积大的问题。介绍了这些技术并通过实验验证了方法的可靠性以及实用性。

关键词: 悬浮高压, 电气隔离, 闭环控制, 倍压整流

Analysis and research of suspended high voltage DC power supply

TANG Bo

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243000, China)

Abstract: When the suspended high-voltage power supply is used in the medical field, the precision and safety requirements of the high-voltage output are extremely strict. In order to reduce the influence of mains jitter and EMI interference and meet the requirements of high voltage, small current and small volume, a closed-loop control system is designed in this paper. The proposed system includes sampling closed-loop, overvoltage protection and other functions, which can realize the field test of high voltage output 15 kV, measure the output voltage accuracy, stability, ripple and other data, and use the resonant element to eliminate the circuit parasitic oscillation. In this paper, technical solutions such as electrical isolation and parallel resonant converters are applied to reduce electromagnetic interference and realize ZVS of switching tubes. At the same time, the voltage doubling rectification technology is adopted to solve the problem of the large volume of the transformer in the traditional high-voltage power supply scheme. These techniques are introduced in this paper, and the reliability and practicability of the method are verified by experiments.

Key words: suspension high voltage, electrical isolation, closed-loop control, voltage doubler rectification

0 引言

随着医学的发展, 在高电压、微电流的电源应用于治疗仪设备同时, 也带来了一些新的问题。例如出现悬浮电源高压工作时准确度不够、强弱电干扰以及电源体积过大等问题^[1]。电子技术的高速发展, 对电源的要求也是越来越高。高

效率、小体积是高压直流电源未来趋势。其次, 电源的安全可靠运行对医疗设备稳定运行起着至关重要的作用。因此, 基于高频高压电源的原理和应用设计了一套控制系统, 该系统有采样闭环、过电压保护和断续等功能。通过有效的控制方式, 保证了电源的安全运行, 稳定了电源的输

出^[2]。

电路设计中还使用了电气隔离及光隔离手段,实验证明可以很好地减小干扰。为了将电源体积做得尽量小,整流模块运用了倍压整流的方式^[3],减小了变压器的体积,简化了变压器设计。

1 电源的技术方案

本文所做的悬浮高压是一个供电电压DC 24 V、输出电压15 kV和输出电流2 mA的直流悬浮高压。原理方框图如图1所示。

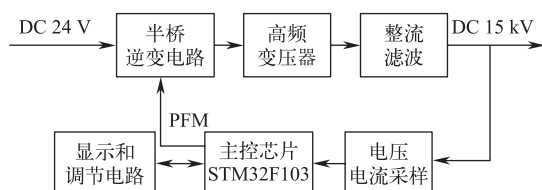


图1 直流电源原理方框图

Fig.1. Block diagram of the principle of DC power supply

系统采用DC 24 V输入,通过半桥逆变电路逆变高频脉冲施加在高频脉冲变压器上;变压器升压之后进行整流滤波并输出电压;电压电流采样电路用于采集输出电压电流,采样信号送入控制板,经过与设定电压比较后,调节驱动频率信号来调节输出电压。

图2是整体控制流程图,电路以单片机STM32F103为核心设计控制电路。根据设定阈值保护电路、处理故障等。

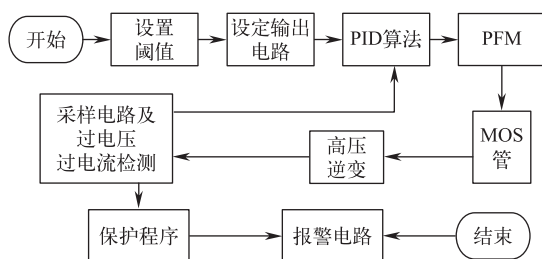


图2 控制器主程序流程图

Fig.2 Controller main program flow chart

PID算法^[4]具有简单可靠、动态稳定性好和控制方式灵活的特点,主要通过实际值和基准值之间的差值 $e(t)$ 来进行控制,其表达式为

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T \frac{de(t)}{dt} \right]$$

式中, K_p 为比例系数; T_i 为积分时间系数; T 为微分时间系数。

单片机实现的功能主要有:①对电源的控制与数据采集,根据数据采集并判断实现电源工作参数与状态的显示;②接受外部编码器信号,作为控制电源的依据。

2 电路原理分析

2.1 主回路拓扑

电源主回路拓扑采用了半桥逆变电路,图3为电路主回路拓扑示意图。由于开关管在高频驱动开通与关断时都有极大的开关损耗,而且容易过热损坏。运用谐振电路可以减小开关损耗,文中采用了LC并联谐振的方式实现零电压开通。谐振电容利用变压器的分布电容参数^[5],分布电容 C_0 和电感 L_2 产生谐振,降低开关损耗,提升效率。

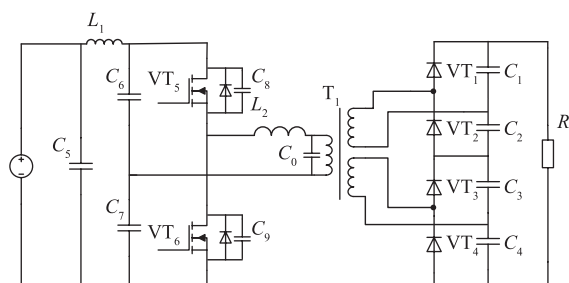


图3 半桥逆变主回路

Fig.3 Half-bridge inverter main circuit

变压器二次侧采用二倍压整流技术^[6],改进了沃尔顿倍压整流技术,降低了变压器的要求,减少了变压器的匝数比,缩小了体积。但是提高了整流器件要求,整流器件用高压硅堆SL100-20,高压硅堆工作电流为100 mA,电压为20 kV。

高电压会产生强大的电磁干扰,通过电磁耦合,静电耦合对弱电部分产生干扰,造成弱电电压不稳定、跳动等问题,如果电压够高^[7],还可能出现电压击穿、电压打火等现象。所以在高压电源中如何隔离强弱电是一个不得不面临的问题。

题。实验有两处用到了电压隔离。

2.2 电压电流采样

图4为电压采样电路图。根据设计要求, 15 kV的高压悬浮电源电压采样约为4 V, 4 V对于谐振回路上的芯片是安全电压, 单片机供电电压是3.3 V。 R_5 采样电压 V_S 的大小与设定阈值进行比较, 并进行电压闭环控制。根据阻值关系可计算 V_S 为

$$V_S = \frac{1}{4\ 001} \times 15\ \text{kV} = 3.75\ \text{V} \quad (2)$$

每一个分压电阻承受的电压 V_R 为

$$V_R = \frac{15\ \text{kV}}{4} = 3.75\ \text{kV} \quad (3)$$

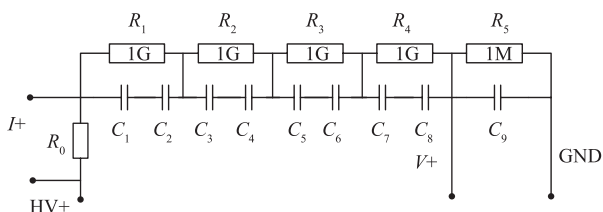


图4 电压采样电路图

Fig. 4 Voltage sampling circuit diagram

分析可知, 每个采样电阻分压都高达几千伏, 且需能承受15 kV高压, 故而对电阻耐压值要求很高, 这里采用了片状电阻FBX2-2-1G, 耐压30 kV, $C_1 \sim C_8$ 采用10 kV-100 pF, C_9 为47 000 pF。这是一个经典的RC匹配电路, 在纯电阻采样基础上, 每个电阻都并联电容, 用此电路闭环采样反应速度更快, 可以更好地调节电源输出, 使电源稳定。图4中, C_1 、 C_2 两电容串联容值为50 pF, RC匹配后, 随着输出电压的增长, 采样电阻的电压采样也会线性增长。

$$1\ 000\text{M} \times 50\text{P} = 50\ 000\text{MP}$$

$$1\text{M} \times 47\ 000\text{P} = 47\ 000\text{MP}$$

悬浮采样转换板如图5所示。进行压频转换、电光信号转换, 通过光纤传输送回主回路控制板。电流采样电路供电用磁环隔离, 一次侧和二次侧互相不干扰, 用脉冲的方式将电能传输到二次侧, 完美地将强电与弱电隔离开来。光纤传输示意图如图6所示。

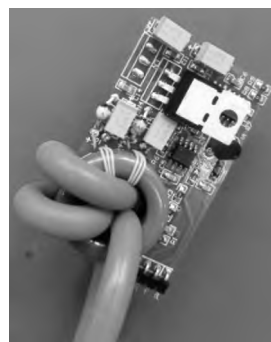


图5 悬浮采样转换板

Fig. 5 Suspended sampling conversion board

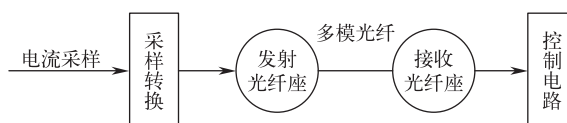


图6 光纤传输示意图

Fig. 6 Schematic diagram of optical fiber transmission

文中悬浮采样转换板的磁环一次侧的脉冲是由振荡板振荡产生的, 振荡脉冲转化为供电。振荡板振荡出的脉冲如图7所示。振荡板核心是UC2845芯片, 这是一种高性能固定频率电流型控制器, 芯片内部振荡器的工作频率由外接的阻容时间常数决定, 其表达式为

$$f = \frac{1.72}{R_i C_i} \quad (4)$$

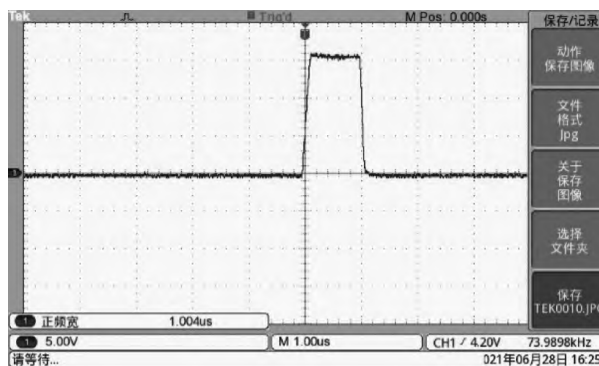


图7 振荡板振荡出的脉冲

Fig. 7 The pulse oscillated by the oscillating plate

经过多次实验调整参数, $R_1=470\ \Omega$, $C_2=4\ 700\ \mu\text{F}$, 输出频率为78 kHz, 脉宽约为1 μs 。

2.3 谐振控制板-半桥

本文所述的高压电源采用并联谐振拓扑^[8]。

如图3所示, VT_1 、 VT_2 组成一个半桥变换器, 由于所采用的MOSF管自带续流二极管, 续流在其内部完成。 C_8 、 C_9 并联在MOS管两侧, 能够吸收尖峰。 C_6 、 C_7 为直流侧电容, 负载电感可以将储存的能量反馈到直流侧电容, 直流侧电容起缓冲无功能量的作用^[9]。通过高压变压器T将高频电压进行升压, 经过二极管整流、电容滤波后得到直流高压输出。

控制部分实现对高压电源的监控功能。采样输出电压与提供的基准进行比较, 调节和稳定输出电压, 驱动逆变部分的IGBT工作。高压电源的工作频率选择为60~120 kHz, 采用PFM方式。

由于谐振电源具有恒流特性, 可短路工作, 因此具有极强的抗打火能力。并联谐振板在此电源中是重中之重, 属于最为关键的一部分, 此控制板提供驱动、优化软起、过电压保护、过电流保护、断续点和闭环操作, 协调电源的运行。

控制板的电压采样闭环能通过调节电压基准, 输出电压由低到高增长。且在输出能力很小时使得驱动频率达到上限, 此时不能再通过提高频率来降低电源的输出, 而是需要断续功能来调节。

3 实验步骤与结果分析

按如图8所示搭建电路实验平台, 做好绝缘措施, 安全处理后打开电源、闭环, 母线输入24 V。打开使能开关, 观察到闭环断续状态下输出电压, 时断时续状态下电压为200 V。

缓慢放开基准, 驱动频率慢慢变小, 基准完全放开后, 输出到最大值。

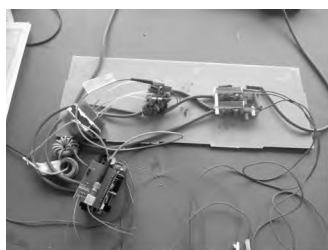


图8 实验平台

Fig. 8 Experimental platform

120 kHz时, 周期为

$$T_1 = \frac{1}{f} = \frac{1}{120k} = 8.33 \mu s \quad (4)$$

占空比为

$$D = \frac{3.417}{8.33} \times 100\% = 41.00\% \quad (5)$$

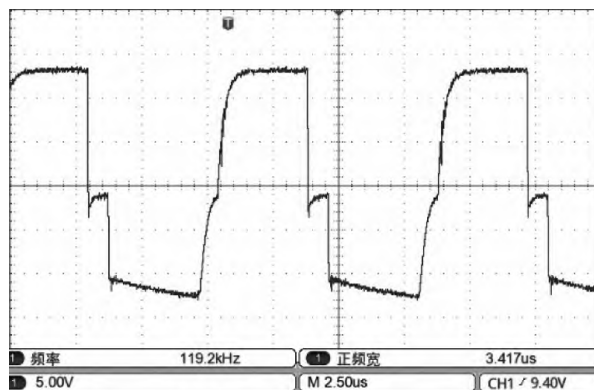
60 kHz时, 周期

$$T_2 = \frac{1}{f} = \frac{1}{62k} = 16.13 \mu s \quad (6)$$

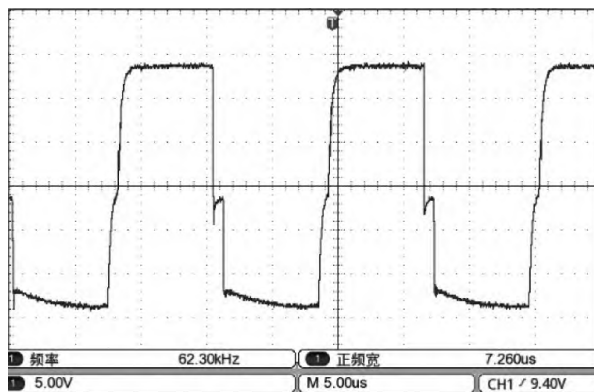
占空比

$$D = \frac{7.26}{16.13} \times 100\% = 45.01\% \quad (7)$$

示波器对MOS管的D、S两端测量驱动, 得到频率的上下限, 如图9所示。从图9中可以看出驱动频率上限是120 kHz, 正频宽是为3.417 μs , 死区时间为0.75 μs 的波形; 下限频率是为62 kHz, 正频宽为7.26 μs , 死区时间为0.75 μs , 符合理论值。



(a) 频率上限



(b) 频率下限

图9 高频驱动上下限

Fig. 9 High frequency drive upper and lower limits

不同频率数据对比见表1。由表1可以看出, 改变频率时, 死区时间不随之变化, 由于死区时间是固定的, 频率越低, 占空比就越大, 这样MOS管开通时间越长, 电压输出能力越强。测量结果与计算值相差无几, 说明理论的正确性。

表 1 不同频率数据对比

Tab. 1 Comparison of data at different frequencies

频率 / kHz	死区时间 / us	正频宽 / us	占空比 (%)	输出电压 / kV
62	0.75	7.26	45.01	15.5
120	0.75	3.417	41.00	0.5

在频率62 kHz, 输出电压最大15.5 kV, 闭环控制到15 kV, 通过检测, 输出抖动在20 V之内, 电源状态稳定。图10为高压探头监测电源工作状态, 图11为高频纹波。

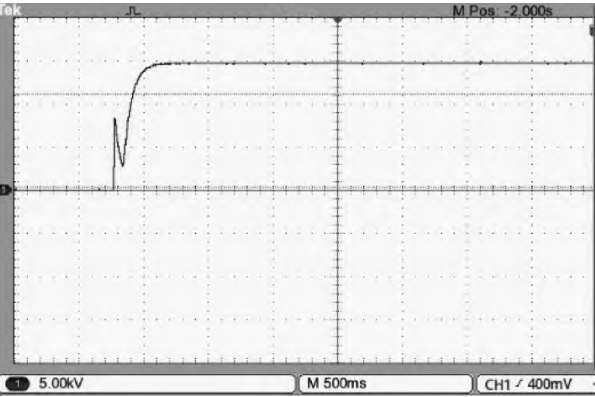


图 10 工作状态
Fig. 10 Working state

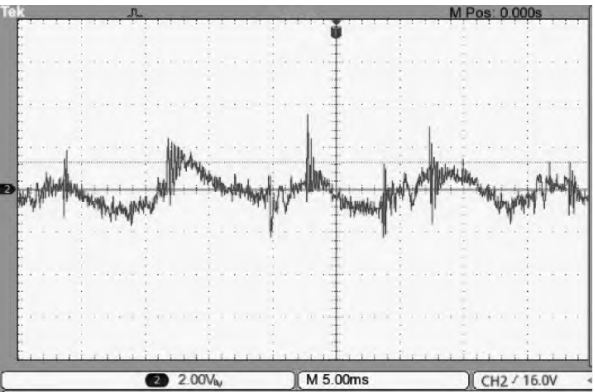


图 11 高频纹波
Fig. 11 High frequency ripple

为了安全, 需将输出电压迅速降低到安全状

态20 V之内。于是在输出端引入泄放电阻, 电阻需具有耐高压、耐高温、体积小和阻值大的特点。经过查找, 选择了RI81-3W-20K的电阻作为泄放电阻。由实验测量可得, 关闭电源1 s后, 电压从15 kV降到12 V左右, 完全低于人体安全电压36 V。实验各项数据检测见表2。

表 2 电源状态结果图

Tab. 2 Power state result graph

项目	测量数据	项目	测量数据
供电电压	DC (24±1) V	高频纹波	4 V
输出电压	15 kV	保护功能	过电压过电流保护
输出电流	2 mA	泄放功能	输出关闭1 s内降至12 V
准确度	1%		

4 结束语

设计了一种基于并联谐振变换器的高压直流电源, 输出电压15 kV, 电流2 mA。分析了其工作原理, 并推导了主要参数。

1) 谐振控制板为此电源的核心, 过电压保护、过电流保护闭环调节输出功能。实验结果测量电源波动小于1%, 过电压、过电流保护正常, 泄放正常。

2) 并联谐振的拓扑有效抑制了电路的寄生振荡, 实现了MOS管的ZVS。

3) 高低压绝缘隔离技术的实际应用, 电气隔离和光隔离的双重隔离方式减少了干扰, 保证了输出稳定性。

4) 采用倍压整流电路, 有效减小了变压器体积, 减轻了电源的体积和重量, 达到小型化的目的。

参考文献

[1] 张平川, 孙红杏, 曲培新, 等. 高压可调大范围开关电源设计与实现[J]. 电子设计工程, 2020, 28(4): 172-175.

[2] LEU CS, HUANG PY, A novel voltage doubler rectifier for high output voltage applications[C]. The 2010 International Power Electronics Conference -

- ECCE ASIA -, 2010: 2082-2085.
- [3] 张国超, 刘桂礼. 半桥LLC谐振变换器参数设计与验证[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(25): 28-31.
- [4] ZHENG Feilong, LU Yundan, Fu Shuguang. Research on temperature control of heating furnace with intelligent PID control algorithm[J]. Thermal Science, 2020, 24: 81.
- [5] 付志恒. 高压大功率平面变压器和电感器的优化设计[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [6] 闫良, 闫英敏, 杨凤彪. 倍压整流电路的分析和仿真[J]. 电子设计工程, 2017, 25(8): 119-123.
- [7] WANG Y, LI D, CAO S, et al. Design of high voltage pulsed power supply using storage battery as prime power source[J]. 2008 17th International Conference on High Power Particle Beams (BEAMS), 2008: 1-4.
- [8] 王广州, 师宇杰, 唐丽焕, 等. 串并联谐振倍压变换器高压电源的设计与研究[J]. 高电压技术, 2006(7): 98-101.

作者简介

唐礴(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高电压技术。

(收稿日期: 2022-01-05)