

# 原子钟钛泵高压电源及小电流检测电路设计\*

郭显鑫<sup>1</sup>, 卢旭<sup>2</sup>, 部英男<sup>2</sup>, 刘克承<sup>1</sup>, 王骥<sup>1</sup>

(1. 兰州空间技术物理研究所 兰州 730000; 2. 北京无线电计量测试研究所 北京 100039)

**摘要:**氢钟、铯钟等原子钟钛泵维持贮存泡、铯束管超高真空度,需要3 000、3 500 V高压电源供电,并检测高压电源供电电流以判断工作状态。采用 Buck 电流馈电推挽拓扑结合 Cockcroft-Walton 倍压整流电路,研制了钛泵高压电源。给出了3种 Buck 电流馈电电路的缓冲电路、基于 D 触发器的两路50%占空比的交错驱动电路和输出小电流检测电路;高压电源采用了真空灌封工艺、单面表贴化 PCB 设计和高压舱、低压舱两舱结构设计;此设计降低了整流管的应力,实现了0.5%的负载调整率、20~50 V宽输入电压范围、0~18  $\mu\text{A}$  电流检测,并通过了低气压放电试验,满足了原子钟钛泵的要求。

**关键词:**原子钟;钛泵;高压电源;电流检测

**中图分类号:** TH714 TM89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

## Circuit design of high voltage power supply and current sensing for titanium bump in atomic clock

Guo Xianxin<sup>1</sup>, Lu Xu<sup>2</sup>, Bu Yingnan<sup>2</sup>, Liu Kecheng<sup>1</sup>, Wang Ji<sup>1</sup>

(1. Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China;

2. Beijing Institute of Radio Metrology & Measurement, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Titanium bump in hydrogen maser and cesium clock require 3 000 and 3 500 V high working voltage to keep ultrahigh vacuum of storage bulb and cesium beam tube respectively, and needs to sense the output current of the high voltage power supplies to judge their working conditions. In this paper, buck-current-fed push-pull topology and Cockcroft-Walton voltage doubling rectifying circuit are employed to develop the high voltage power supply for titanium bump. The snubber circuits of three buck current feed circuits, 50% duty cycle alternative driving circuit based on D flip-flop and low output current sensing circuit are presented. The high voltage assembly adopts vacuum encapsulated process, single-sided surface mounted PCB design and the structure design of high voltage and low voltage cabins. This design decreases the voltage stress of the rectifier diodes. The high voltage power supply achieves 0.5% load regulation, 20~50 V wide input voltage range, 0~18  $\mu\text{A}$  output current sensing, and passes vacuum discharging test, which satisfies the requirement of titanium bump in atomic clocks.

**Keywords:** atomic clock; titanium bump; high voltage power supply; current sensing

## 1 引言

准确及高稳定度的原子钟是精密卫星导航系统中的关键设备,氢原子钟(以下统一称为氢钟)以其出色的频率稳定度而被欧洲伽利略导航卫星系统采用,铯原子钟(以下统一称为铯钟)以其优秀的长期稳定度和准确度而被俄罗斯的 GLONASS 导航卫星系统采用<sup>[1-2]</sup>。中国的

北斗导航卫星系统应用了自主研发的铷钟和氢钟,正在研制宇航应用的铯钟。钛泵是氢钟、铯钟的关键设备之一,维持氢钟物理部分的贮存泡和铯钟铯束管的超高真空度。氢钟和铯钟钛泵的工作分别需要3 000、3 500 V的高压,正常状态下工作电流不足20  $\mu\text{A}$ 。钛泵启动时,真空度低,钛泵工作电流大,呈现出1 000  $\mu\text{A}$ 峰值电流工作状态。钛泵电源是一个典型的小电流高压电源,是钛泵的关键组件;星载原子钟钛泵高压电源因其高压和

宇航真空环境应用特点,有其电路设计、绝缘材料和制造的特殊性<sup>[3,4]</sup>。

开关电源的功率级输出端一般为  $LC$  二阶均值滤波电路,常用的正激、推挽、桥式变换器输出级均为这类  $LC$  滤波电路。在高压输出情况,电感电流上升阶段、下降阶段,这个电感都会承受高压。在小电流应用中,为使得滤波电感工作在连续电流模式,电感的电感量非常大,通常为  $mH$  级,电感的制作需要较多的匝数,制作困难,并且承受的高压会导致电感电晕和飞弧。二阶  $LC$  均值滤波器不适用于高压电源的输出级,高压电源输出端一般采用一阶电容峰值滤波电路,常规的正激、推挽、桥式功率变换拓扑不适于做高压电源,常用的 PWM 闭环控制策略不适于高压电源设计<sup>[5-7]</sup>。由于需要升压,只能降压的线性调整方式也不适于高压电源的设计<sup>[8]</sup>。常用的高压电源设计方法是两级变换,前级是 PWM 闭环控制的开关变换,输出稳定的中间直流电压;再用一级开关变换,放大中间直流电压后,输出高压,这一级通常为一阶电容峰值滤波,并结合倍压整流等电路,一般不再闭环控制。负载调整率低是这种方法的一个重大缺陷,因为一阶电容峰值滤波电路对电压尖峰进行响应,输出随负载变化而变化,即便是负载变化非常轻微。对采用这种设计的高压电源的输出进行了测量,当  $1\text{ mA}$  电流负载时输出  $3\ 000\text{ V}$ ,当空载时输出  $4\ 700\text{ V}$ 。为保持高压输出的稳定性,有必要采用一定的控制策略进行负反馈闭环控制<sup>[9]</sup>。一阶峰值整流滤波输出型闭环稳压控制的高压电源的设计,关键在电路拓扑和控制策略的设计上。文献[10-12]公布了闭环控制的两级变换器的设计,克服了负载调整率低的问题,但是电路复杂;文献[5,13-19]公布了一级变换器设计的高压电源,采用了串联负载谐振型拓扑;这个拓扑的输出端不需要滤波电感,适合于高压电源的设计,缺点是控制电路设计复杂。文献[20-24]研制的高压电源采用了脉冲阶梯调制技术(pulse step modulator, PSM)解决了高压电源的可调和稳压,技术复杂,适合于高压大功率。

针对原子钟钛泵小电流高压电源,还可以选用反激拓扑电路设计<sup>[25-26]</sup>。反激拓扑的高压电源需要选用高压二极管。在宇航应用场合,高等级的高压二极管难以获得,目前国内没有高等级的  $2\ 500\text{ V}$  以上耐压的高压二极管。国军标 I 级电压降额的可靠性设计,  $2\ 500\text{ V}$  的高压二极管也只能用到  $1\ 500\text{ V}$ ,更加剧了高压二极管选用的严峻性。应用级联的方法<sup>[27]</sup>,反激拓扑多绕组级联的设计可以解决二极管耐压问题,却又带来了复杂的变压器的设计问题。

本文针对宇航应用的原子钟钛泵,采用了 Buck 电

流馈电型推挽拓扑,研制了一台高压电源。输出级采用了 Cockcroft-Walton 倍压整流滤波电路。本设计可以克服高压电感、复杂变压器的问题,并可以解决整流二极管耐压的问题。本文还给出了高压绝缘设计和性能测试方法。

## 2 高压电源电路设计和工作原理

### 2.1 主电路及其工作原理

本文提出的高压电源电路,如图 1 所示。它是一个脉宽调制型 Buck 电流馈电的推挽拓扑,完成 DC/AC 变换;Cockcroft-Walton 倍压整流滤波电路作为其输出级,完成 AC/DC 变换。开关管  $Q_1$ 、 $D_1$  和  $L_2$  组成了一个 Buck 预调节电路;开关管  $Q_2$ 、 $Q_3$  和变压器  $T_1$  形成了一个推挽变换电路;Buck 调节器放置于推挽逆变器前。Buck 预调节电路和推挽电路之间为 Buck 输出的扼流圈  $L_2$ ,没有滤波电容。推挽电路从 Buck 输出的扼流圈  $L_2$  获得能量, $L_2$  相当于一个高内阻的电流源,而不是低内阻的滤波电容。Buck 预调节器与推挽变换器组成了 Buck 电流馈电推挽变换电路。如果扼流圈  $L_2$  后是滤波电容,该电路成为 Buck 电压馈电推挽变换电路,这是一个典型的两级变换电路。Buck 电流馈电电路和 Buck 电压馈电电路各有优缺点。变压器  $T_1$  副边整流管之后的输出滤波器等效为一个电容器,反射到变压器的原边,等效为一个电容器,Buck 后的滤波电路为二阶  $LC$  均值滤波电路,Buck 预调节器的控制策略可以采用 PWM,图 1 中 Buck 正是 PWM 控制。滤波电感置于低压端,避免了其承受高压,并且电感量小,制作容易。Buck 预调节器将宽范围输入电压转换为一定电压  $V_1$ ;推挽拓扑工作在固定脉宽模式,一般为  $50\%$  占空比。Buck 电流馈电推挽变换电路不同于一般推挽电路在于,推挽电路开关管的占空比一般为  $50\%$ ,稍微大于  $50\%$  的占空比反而有利于电路工作。

Buck 电流馈电推挽逆变电路将输入的直流电压变换成不同幅值、固定频率、 $50\%$  占空比、正负极性的脉冲  $V_2$ ,完成 DC/AC 变换。Cockcroft-Walton 倍压整流滤波电路将交流脉冲  $V_2$  倍压变换成为直流输出电压  $V_0$ ,完成 AC/DC 变换和电压放大。当输入电压  $V_{in}$  或者负载电流  $I_0$  变化时,负反馈环路根据输出电压  $V_0$  调整 Buck 调节器的占空比,从而调整  $V_1$  和  $V_2$  的幅值以保持输出电压的稳定。Buck 预调节器差模电感输出电压波形如图 2 所示,几乎为稳定的直流输出电压,起稳压变换的作用。推挽变压器输出  $V_2$ ,即 Cockcroft-Walton 倍压整流输入端波形如图 3 所示,推挽变换起电压变换和隔离作用。

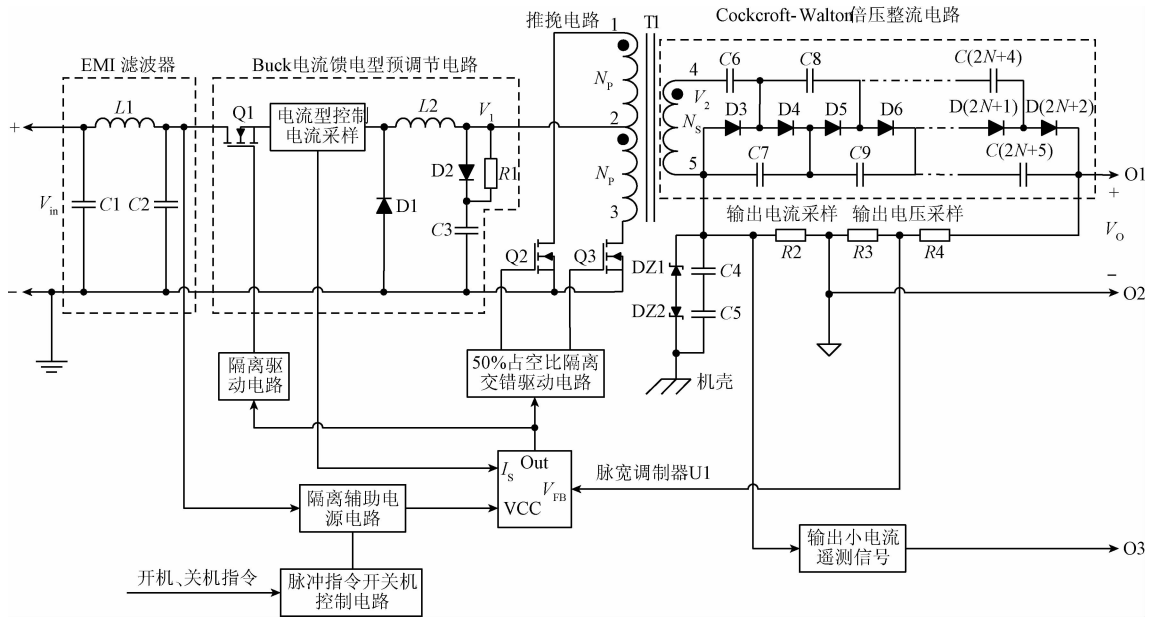


图1 高压电源电路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the high voltage power supply

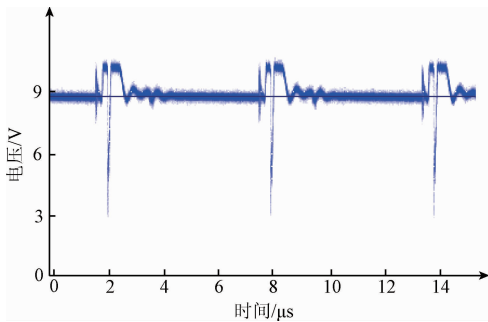


图2 Buck 预调节器差模电感输出电压波形

Fig. 2 Differential mode choke output voltage waveform of buck pre-regulator

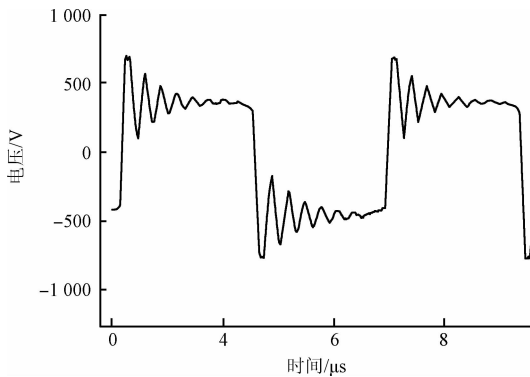


图3 变压器输出  $V_2$  波形

Fig. 3 Transformer secondary output  $V_2$  waveform

$2N$  倍压的 Cockcroft-Walton 倍压整流滤波电路,即:

$$V_o = 2 \times N \times V_2 \tag{1}$$

同样,忽略功率 MOSFET 器件 Q1、Q2 和 Q3 导通时的电压降,  $V_{in}$ 、 $V_1$  和  $V_2$  的数量关系为:

$$V_1 = V_{in} \times D \tag{2}$$

$$V_2 = V_1 \times \frac{N_s}{N_p} \tag{3}$$

$$V_o = 2 \times N \times V_{in} \times D \times \frac{N_s}{N_p} \tag{4}$$

式中:  $D$  是 Buck 调节器的占空比,  $N_p$  和  $N_s$  分别是功率变压器原边和副边绕组匝数,式(4)表明,可用 PWM 控制策略对输出电压进行闭环控制。

在图1中,输出电压采样信息不需要经过高压隔离直接传输到 PWM 芯片, PWM 芯片的供电需要高压隔离的辅助电源电路<sup>[28-29]</sup>。并且, PWM 芯片以输出回线为参考地,由于高压部分的电磁干扰较大, PWM 闭环特别容易受到干扰而环路振荡,只能通过减小环路带宽以稳定控制闭环。

### 2.2 推挽变换隔离驱动电路

为减小与开关频率有关的干扰, Buck 开关管 Q1 的开关频率为推挽工作频率的 2 倍。推挽拓扑的馈电是高阻抗的扼流圈,其惯性使得电流不能突变,推挽变换变压器原边的中心抽头处必须使电流能够不间断流动,原边各个绕组必须能够导通至少半个周期,也就是说推挽拓扑的两个开关管 Q2、Q3 的驱动信号的占空比至少为 50%。本文两个开关管 Q2、Q3 的驱动信号的占空比正好为 50%。推挽拓扑的开关管 Q2、Q3 的驱动信号既要

忽略整流二极管正向导通压降,输出级是一个  $N$  级

保证和 Buck 开关管“同频”，又要保证其占空比为 50%，其驱动电路的设计是一个关键设计。本文提出的 50% 占空比隔离交错驱动电路如图 4 所示。

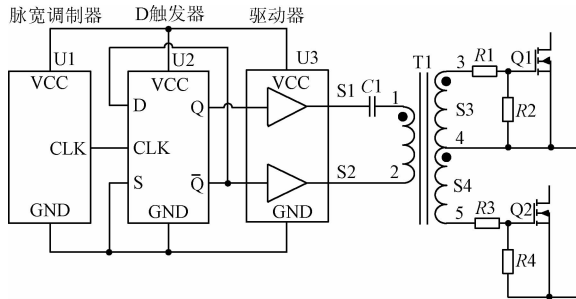


图 4 50% 占空比隔离交错驱动电路  
Fig. 4 50% duty cycle isolated interleaved drive circuit

在图 4 中, U1 为脉宽调制器, 供电以输出回线为参考; U2 为上升沿触发的 D 触发器; U3 为驱动器, 提高驱动能力。脉宽调制器 U1 的时钟信号为 D 触发器 U2 提供时钟信号, D 触发器输出信号的频率为 U1 的频率的一半。驱动器 U3 的两路输入信号为 D 触发器的输出信号及其反相信号, 保证了其两路输出驱动信号 S1 和 S2 为交错驱动信号, 占空比为 50%。驱动器 U3 的两路交错驱动信号经过脉冲变压器 T1 隔离驱动推挽变换的两个开关管 Q2、Q3, 并为开关管 Q2、Q3 关断期间提供负压, 保证关断的可靠性。开关管 Q2、Q3 的驱动波形如图 5 所示。

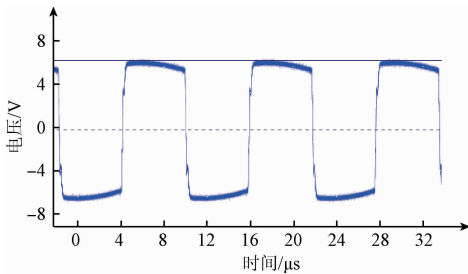


图 5 推挽变换开关管的驱动波形  
Fig. 5 MOSFET drive waveform for push-pull converter

### 2.3 Buck 电流馈电电路的缓冲

在图 1 中, 推挽变换器的开关管 Q2、Q3 的驱动电路如图 4 所示, 其驱动信号占空比各为 50%, 开关管 Q2、Q3 各开通半个周期, 扼流圈 L2 电流始终能通过变压器的某一个原边绕组, 保证了扼流圈 L2 输出电流的连续性。然而, 由于开关管 Q2、Q3 的开通延时不同等因素, 开关管 Q2、Q3 的开通时间可能小于半个周期; 一旦开关管 Q2、Q3 的开通时间小于半个周期, 扼流圈 L2 的电流连续性不能保证; 尽管采用了图 4 所示的电路后, 这个断流的时间相对短, 但是一旦电感 L2 断流, 扼流圈 L2 的输

出端, 如图 1 中的  $V_1$  所示, 呈现高压, 高压电源的电磁干扰发射大大增加, 并可能导致开关管 Q2、Q3 过压失效。因此, 对扼流圈 L2 输出端  $V_1$  的缓冲(或者是吸收)非常重要, 在图 1 中二极管 D2、电容 C3 和电阻 R1 组成的 RCD 电路正是其中的一种缓冲电路, 适用于小功率电源。当扼流圈 L2 的输出端在变压器 T1 原边的中心抽头处出现了断流时, 这个电流经过二极管 D2, 流入电容 C3。由于二极管 D2 的反向阻断特性, 电容 C3 的电荷只能通过电阻 R1 流入变压器 T1 的原边中心抽头。这样, 没有改变 Buck 拓扑的高阻抗输出特性, 仍然保证了推挽拓扑的馈电是 Buck 拓扑电流馈电。

在功率较大的电源中可以采用图 6 所示的缓冲电路, 在图 6 中, 二极管 D3 和瞬态抑制二极管 DZ3 组成了电流馈电扼流圈 L1 的另外一种缓冲电路, 当 L1 输出端  $V_1$  由于电流通路受到阻塞时, 电压  $V_1$  迅速升高, 超过直流输入电压  $V_{in}$  和 DZ3 的击穿电压时, 缓冲电路工作, 扼流圈 L1 的输出电流通过 DZ3 和 D3 反馈到输入端, 实现对  $V_1$  的箝位和缓冲。但是这个缓冲电路并不是没有缺陷的, 由于扼流圈 L1 输出端的电压  $V_1$  被箝位在直流输入电压  $V_{in}$  和瞬态抑制二极管 DZ3 的击穿电压, 当输入电压较高时, 电压  $V_1$  太高; 并且  $V_1$  随输入电压  $V_{in}$  变化而变化。于是, 在大功率应用场合, 采用了电容 C2 的吸收电路, 为了不改变 Buck 电流馈电输出的高输出阻抗特性, 电容 C2 的容值不能大, 根据后级功率器件的散热能力和能承受的电压来确定。

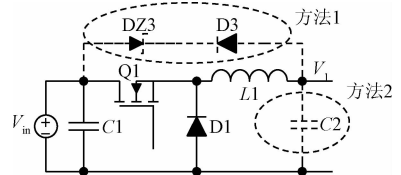


图 6 Buck 电流馈电扼流圈 L1 的缓冲电路  
Fig. 6 Snubber circuit for buck current-fed choke L1

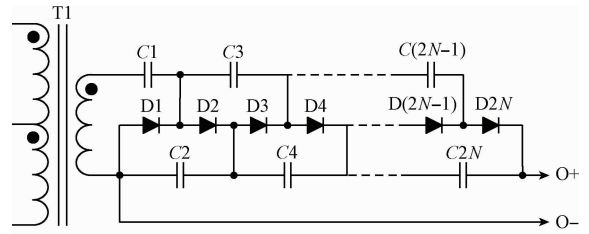
### 2.4 倍压整流电路的设计

对于 3 000、3 500 V 钛泵高压电源而言, 输出电压并不高, 但是由于面临低气压环境下正常工作的要求, 需要对变压器的原副边和副边绕组的层间进行良好的绝缘, 绕组的匝数太多, 变压器的制作难度比较大; 并且, 变压器绕组的匝数过多, 变压器的层间寄生电容和匝间寄生电容增大, 寄生电容会导致出现大的充放电电流和噪声, 使得电源变压器原边的功率级产生很大损耗, 带来大的电磁干扰, 通过增加绕组的匝数来提高输出电压的方法并非良策; 对高压电源遥控、遥测要求, 使得高压电源连接了控制设备, 高压电源大的电磁干扰会导致控制设备不能正常工作; 并且由于高等级的宇航应用的高压二极管的电压等级不高, 高压的获得依赖于电路设计, 这里采用倍压整流电路。

倍压整流的方法和电路形式较多, Delen-Greinacher 倍压整流滤波电路<sup>[30-31]</sup>、Villard 倍压整流滤波电路是常用的千伏特、百伏特数量级输出电压的倍压整流电路; 更高电压输出的高压电源输出级需要用到串级型倍压整流电路, 如 Schenkel 倍压整流电路和 Cockcroft-Walton 倍压整流电路<sup>[6-7, 32-33]</sup>。

Delen-Greinacher、Cockcroft-Walton 倍压整流电路如图 7 所示, Delen-Greinacher 倍压整流滤波电路的变压器副绕组数量更多; 两者的各个副绕组输出峰值电压相同, Delen-Greinacher 倍压整流滤波电路对变压器的设计要求高, 对 PCB 设计的要求高, 对电容的电压要求低。本文采用了 Cockcroft-Walton 倍压整流电路, PCB 布线容易实现单面布线, 对变压器设计的要求低。

Cockcroft-Walton 倍压整流电路输出端接上负载后, 输出电压降低, 同时产生纹波电压。输出电流增加, 输出电压降和纹波增大。假设 Cockcroft-Walton 倍压整流电路所用电路级数为  $N$ , 开关频率  $f$ , 输出电流  $I_o$ , 所用的电容数量为  $2N$  个, 变压器输出电压为  $V_T$ , 所用电容的容量相等, 为  $C$ , 则输出电压纹波  $V_{or}$ 、输出电压降  $V_{od}$ 、输出电压  $V_o$  分别如式(5)~(7)。



(b) Cockcroft-Walton 倍压整流滤波电路  
(b) Cockcroft-Walton voltage doubling rectifying filtering circuit

图 7 常用的两种倍压整流滤波电路  
Fig. 7 Two commonly used voltage doubling rectifying filtering circuits

$$V_{or} = I_o N(N + 1) / 4fC \tag{5}$$

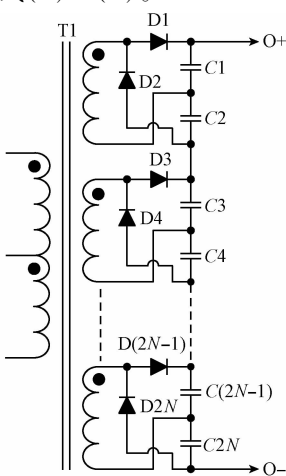
$$V_{od} = I_o (4N^3 + 3N^2 + 2N) / 6fC \tag{6}$$

$$V_o = 2NV_T - I_o (4N^3 + 3N^2 + 2N) / 6fC \tag{7}$$

### 3 小电流检测电路设计

高压电源为钛泵供电, 钛泵维持贮存泡和铯束管的超高真空度, 真空度差, 会影响原子钟的正常工作, 此时高压电源的负载重, 输出电流较大。高压电源输出电流反映了贮存泡和铯束管的工作信息, 是一个重要的遥测参量。

钛泵的小电流检测电路如图 8 所示, 这是一个由运放组成的小信号负反馈放大电路。为使得电流遥测输出在 0~5 V, 采用了 5 V 单电源供电电路。钛泵工作电流  $I$  经过供电回线端串联的电阻  $R1$  进行电流检测, 得到一个负压输出  $V_1$ , 经运放  $N1$  反向放大输出一个正电压  $V_2$ 。运放  $N1$  输出  $V_2$  经过滤波电路和保护电路输出电流遥测电压  $V_3$ 。正常工作时, 钛泵工作电流一般不足 10  $\mu A$ 。在钛泵开机瞬间, 贮存泡和铯束管的真空度差, 电流大, 钛泵工作电流大。 $D1$  为瞬态抑制二极管, 防止开机瞬间高压源电流输出过大损坏电流检测电路。



(a) Delen-Greinacher 倍压整流滤波电路  
(a) Delen-Greinacher voltage doubling rectifying filtering circuit

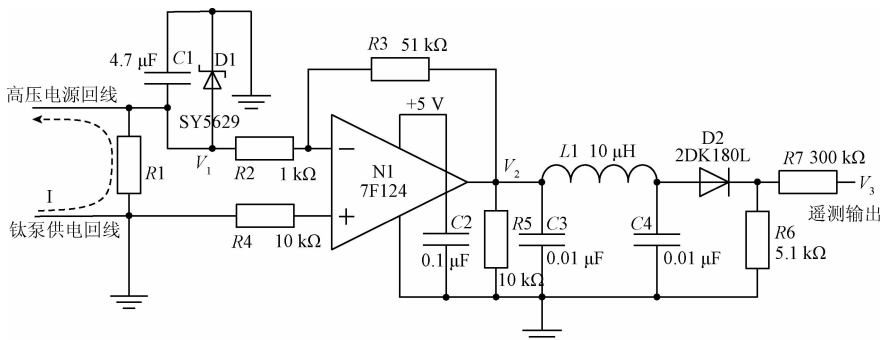


图 8 钛泵小电流检测电路

Fig. 8 Low current sensing circuit for titanium bump



在图8中,数量关系为:

$$\begin{cases} V_1 = -I \times R1 \\ V_2 = -V_1 \times \frac{R3}{R2} \\ V_2 = I \times R1 \times \frac{R3}{R2} \\ V_3 = I \times R1 \times \frac{R3}{R2} - V_{D2} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $V_{D2}$ 为二极管D2的正向压降,这里选择的是一个正向压降很小的二极管,以使得遥测输出和电流近似成正比关系。氢钟高压电源输出电流实测遥测数据如图9所示。

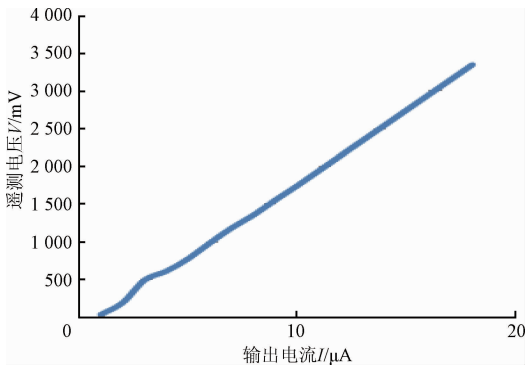


图9 氢钟钛泵高压电源输出电流遥测曲线  
Fig.9 High voltage power supply output current telemetering curve for the titanium bump in hydrogen maser

## 4 高压电源制造关键技术

### 4.1 绝缘设计

高压电源研制,要求对电子电路、绝缘以及材料有充分的理解和掌握。对高压电源的绝缘设计给予足够的关注是非常重要的,包括绝缘方法和绝缘材料。理论上,宇航应用的深空中没有任何气体,从而没有任何电荷载体,因此,在深空中,真空是一种绝佳的绝缘体。然而,这种绝缘体—真空并不存在,因为航天器总存在非金属材料的放气、邻近表面升华、航天器的漏气等。本文讨论的高压电源,必须给予足够的绝缘设计的重视,以防止低气压放电的产生,如电晕放电、电击穿等。

气体绝缘、液体绝缘<sup>[34]</sup>和固体绝缘是3种绝缘方法。本文采用了灌封的固体绝缘方法。为减轻产品的重量并解决产品的维修性问题——灌封后的产品几乎不具有可维修性,图1所示为电路分成了高压组件和低压组件,本文仅对高压组件进行了灌封。灌封的高压组件电路如图7(b)所示。

灌封工艺需要重点关注,尤其是灌封材料的选择和灌封的实施。粘结性能、材料放气、绝缘强度和绝缘寿命

是选择灌封材料的重要因素。高压组件灌封后,灌封材料必须致密、无气泡,以防止气泡内气体的电击穿。一旦灌封材料含有气泡,灌封的质量大打折扣。一个简单的办法是对灌封材料进行抽真空操作。

灌封使得高压组件重量增加,为减小重量,本文对高压组件的PCB进行了特殊设计。对表贴元器件的PCB组件进行灌封,由于灌封材料的粘度一般较大,流动性能不佳,在器件与PCB界面处容易产生气泡,影响灌封质量。本文的高压组件选用了分立式高压元器件,并对高压元器件单面“表贴”组装在PCB上,并对其进行单面灌封,如图10和11所示。灌封材料为Dowcorning Sylgard 160硅橡胶,用硅橡胶进行灌封,在一定程度上可以提高返修性能—可以借助利器去除灌封胶,然后进行灌封组件维修。

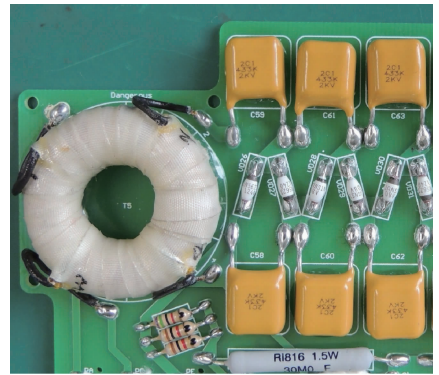


图10 分立高压器件在PCB上单面焊装  
Fig.10 High voltage single sided PCB assembly with discrete devices soldered



图11 高压组件灌封后实物  
Fig.11 Photo of the encapsulated high voltage PCB assembly

### 4.2 机械结构设计

本文采用了高压舱和低压舱的两舱机械结构设计,如图12所示,两舱是独立的、密封的,除去两舱之间的导线连接部分。低压电路组件放置于低压舱,高压电路组件放置于高压舱。这样,低压电路组件被金属机壳电场

屏蔽,从而实现低压电路组件对高压电路组件失效的物理隔离,如高压电晕放电、电击穿。

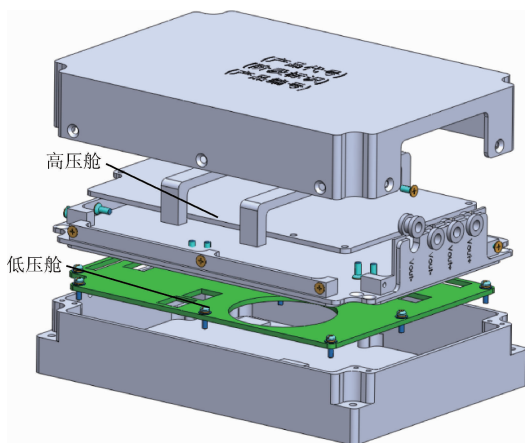


图 12 两舱结构设计的高压电源爆炸视图

Fig. 12 Exploded view of high voltage power supply with high voltage cabin and low voltage cabin

### 4.3 高压回线的处理

高压回线一般直接接到金属机壳。这样,高压输出电位参考于金属机壳,并且高压输出级电路的共模电压是确定的,由以下数学关系式计算:

$$V_c = \frac{V_+ + V_-}{2} \quad (9)$$

式中:  $V_+$ 、 $V_-$  为高压输出级参考于机壳的高电位和低电位,将高压回线连接至机壳,则  $V_- = 0$ 。

高压回线以及参考高压回线为低压的器件都可以视为低压,在 PCB 设计、绝缘设计时,都可以按照低压的规则进行设计。将高压回线接机壳,可以大幅度地减小输出电压共模噪声。对于高压开关电源,高压输出的噪声主要成分是共模噪声。减小共模输出噪声会大大地减小高压输出的噪声,改善高压输出的电质量。本论文研制的高压电源输出回线通过如图 1 所示的电路连接到机壳—瞬态抑制二极管 DZ1、DZ2 和电容 C4、C5,在没有 DZ1、DZ2、C4、C5 状态下,噪声为  $25.6V_{pp}$ ; 连接 DZ1、DZ2、C4、C5 后,噪声为  $2.32V_{pp}$ 。

## 5 试验结果

本文研制了氢钟和铯钟钛泵高压电源,氢钟钛泵高压电源按照航天的研制技术流程完成了研制,铯钟高压电源完成了原理样机的研制。研制的氢钟钛泵高压电源的主要性能指标如表 1 所示,高压输出级采用了六级十二倍压电路,高压二极管为易获取的高等级 1 000 V 耐压二极管。输出电压测试设备是高输入阻抗的电压表—被

测高压电源的输出电流很小,其输入阻抗为  $1\text{ G}\Omega$ 。本文的氢钟钛泵高压电源及小电流检测电路通过了低气压放电试验,经过了用户的应用,满足了使用需求。

表 1 主要性能指标

Table 1 Main specifications

项目	指标
输出电压/V	2 977
负载调整率/V (0 ~ 1 mA 输出)	2 977 ~ 2 990(0.5%)
线性调整率/V (20 ~ 50 V 输入)	2 977 ~ 2 978
噪声/V	2.32
效率/%	43
总质量/g	633
外形尺寸/mm	130 × 90 × 45
遥测电压/V (对应工作电流 0 ~ 18 μA)	0 ~ 3.35
电流检测输出阻抗/kΩ	3.51

## 6 结 论

本文针对原子钟钛泵需要的 3 000、3 500 V 高压电源,提出了 Buck 电流馈电推挽变换结合 Cockcroft-Walton 倍压整流的电源电路设计。电路分析表明,推挽变换需要 50% 占空比的两路交错驱动信号使得推挽拓扑的两个开关管重叠导通,本文提出了一种基于 D 触发器获得 50% 占空比的两路交错驱动电路。本文分析了 Buck 电流馈电电路进行缓冲的必要性,给出了 3 种缓冲电路设计。本文给出了 μA 级电流检测电路,实现了 0 ~ 18 μA 的电流检测。本文还提出了分立器件单面表贴化的 PCB 设计、高压灌封的绝缘设计、高压舱、低压舱两舱结构设计方法。本文的高压电源实现了高压输出端的直接闭环控制,达到了 0.5% 的负载调整率;高压整流二极管耐压得到了大幅度的降低;本高压电源通过了低气压放电试验,能够在空间环境中应用,满足了国产化原子钟钛泵的高压电源需求。下一步的工作可以探讨一下应用本设计进行可调高压电源和扫描高压电源的设计,并进一步提升其自我保护性能,减小体积和重量。

### 参考文献

- [1] 王庆华, FABIEN D, PASCAL R. 用于 GNSS 的 SpT 星载原子钟及时间系统介绍[J]. 武汉大学学报:信息

- 科学版, 2011, 36(10):1177-1181.
- WANG Q H, FABIEN D, PASCAL R. SpT on board atomic clocks and timing systems in GNSS [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(10): 1177-1181.
- [2] 王孟芝, 高连山, 周铁中, 等. 蓝宝石氢钟的性能分析及研制[J]. 宇航计测技术, 2009, 29(1):43-45.
- WANG M ZH, GAO L SH, ZHOU T ZH, et al. Performance analysis and research & development of sapphire hydrogen maser [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2009, 29(1): 43-45.
- [3] 史平君. 几种特殊领域应用的高压电源及脉冲电源[J]. 电力电子技术, 2014, 48(12):18-21.
- SHI P J. High-voltage power supplies and pulse power supplies for special applications [J]. Power Electronics, 2014, 48(12): 18-21.
- [4] RUITBERG A P, GILLIS J A. Design techniques for miniaturized spacecraft high voltage power supplies [R]. NASA: Goddard spaceflight Center Technical Report.
- [5] 范鹏, 刘星辉. 10 kW 高压电源的研制[J]. 现代雷达, 2006, 28(12):97-99.
- FAN P, LIU X H. Developing of 10 kW high voltage supply [J]. Modern Radar, 2006, 28(12): 97-99.
- [6] 曾国强, 刘玺尧, 罗群, 等. 低纹波微型 X 射线管高压电源的研制[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(2): 366-371.
- ZENG G Q, LIU X Y, LUO Q, et al. High voltage power supply development for micro X-ray tube of low ripple [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49(2): 366-371.
- [7] 杨继先, 郭建军, 李际炜, 等. 一种新型低功耗小型高压电源 [J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8): 841-844.
- YANG J X, GUO J J, LI J W, et al. A new small volume and low consumption high-voltage power supply [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(8): 841-844.
- [8] 姚义, 马剑, 张建茂, 等. 可调直流稳压电源的设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22(增刊2): 366-370.
- YAO Y, MA J, ZHANG J M, et al. Designation of a new adjustable regulated power supply [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2008, 22(Suppl. 2): 366-370.
- [9] 冯清贤, 陈根余, 卓沛. 基于 SG3525 的小型化钛泵高压电源的研制[J]. 通信电源技术, 2015, 32(1): 27-33.
- FENG Q X, CHEN G Y, ZHUO P. Development of miniature titanium pump high voltage power supply based on SG3525 [J]. Telecom Power Technology, 2015, 32(1): 27-33.
- [10] 张国栋, 周东方, 郑锴, 等. 行波管高压电源变换器设计研究[J]. 高技术通讯, 2013, 23(11):1193-1198.
- ZHANG G D, ZHOU D F, ZHENG K, et al. Design of a high voltage power converter for traveling wave tubes [J]. Chinese High Technology Letters, 2013, 23(11): 1193-1198.
- [11] 李斌, 王文廷. 应用于行波管的新一代高压电源设计[J]. 通信电源技术, 2006, 23(5):44-47.
- LI B, WANG W T. Design of a new hi-voltage power supply applied to the TWT [J]. Telecom Power Technologies, 2006, 23(5): 44-47.
- [12] 陈宇, 王刚, 苏小保. 空间行波管放大器高压电源设计研究[J]. 真空科学与技术学报, 2015, 35(7): 792-800.
- CHEN Y, WANG G, SU X B. Development of high-voltage power converter for space traveling wave tube amplifier [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2015, 35(7): 792-800.
- [13] 李自成, 袁保山. 3.2 kV 高压开关电源的研制[J]. 电力电子技术, 2005, 39(4):68-70.
- LI Z CH, YUAN B SH. Research on 3.2 kV high-voltage switch power supply [J]. Power Electronics, 2005, 39(4): 68-70.
- [14] 张文利, 彭燕昌, 孙广平, 等. 高压开关电源的研制[J]. 高电压技术, 2002, 28(11):36-37.
- ZHANG W L, PENG Y CH, SUN G P, et al. Development of high voltage switching power supply [J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(11): 36-37.
- [15] 葛磊, 尚雷. 50 kV 全数字化电子枪高压电源设计[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(1):179-183.
- GE L, SHANG L. Design of full digital 50 kV electronic gun high voltage power supply [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, 48(1): 179-183.
- [16] 樊生文, 杜军, 王泽庭, 等. 串联谐振型电子束熔炼炉高压电源的研究[J]. 电力电子技术, 2015, 49(3):38-39.
- FAN SH W, DU J, WANG Z T, et al. Study of high-voltage power supply for electron beam furnace based on series resonance [J]. Power Electronics, 2015, 49(3): 38-39.



- [17] 刘鹏飞, 张海峰, 李正熙, 等. 基于 LCC 的电子束熔炼炉高压电源的研究 [J]. 电力电子技术, 2014, 48(12):41-43.  
LIU P F, ZHANG H F, LI ZH X, et al. Study of LCC-based high voltage power supply for electron beam melting furnace [J]. Power Electronics, 2014, 48(12): 41-43.
- [18] 范鹏, 刘星辉, 钟国俭. 16 kW 固态-前向波发射机高压电源 [J]. 现代雷达, 2015, 37(6):78-80.  
FAN P, LIU X H, ZHONG G J. 16 kW high voltage power supply of transmitter with the forward wave cross-field amplifier driven by solid-state amplifier [J]. Modern Radar, 2015, 37(6): 78-80.
- [19] KIM S H, EHSANI M, KIM C S. High-voltage power supply using Series-connected Full-bridge PWM Converter for Puled Power Applications [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(4): 1937-1944.
- [20] MA S X, ZHANG M, XIA L L, et al. Analysis and design of the module for PSM high-voltage power supply [J]. Journal of Fusion Energy, 2015, 34(2): 261-266.
- [21] XIA L L, ZHANG M, MA S X, et al. Analysis of the soft-start circuit of the high voltage power supply based on PSM technology [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(4): 1026-1031.
- [22] 杨雷, 傅鹏, 刘小宁, 等. 采用脉冲阶梯调制技术的 50 kV、100 A 直流高压电源设计 [J]. 高电压技术, 2009, 35(9):2220-2225.  
YANG L, FU P, LIU X N, et al. Design of a 50 kV/100 A high voltage DC power supply using PSM technology [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(9): 2220-2225.
- [23] 饶益花, 陈文光, 饶军, 等. 电子回旋共振加热系统中阳极高压电源研制及其控制技术 [J]. 高电压技术, 2015, 41(12):4036-4041.  
RAO Y H, CHEN W G, RAO J, et al. Anode high-voltage power supply and control technology for electron cyclotron resonance heating system [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(12): 4036-4041.
- [24] 徐伟东, 宣伟民, 姚列英, 等. PSM 高压脉冲电源单元研制 [J]. 高电压技术, 2009, 35(6):1409-1414.  
XU W D, XUAN W M, YAO L Y, et al. Development of one PSM high voltage pulse power supply unit [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(6): 1409-1414.
- [25] MIAO Z F, FAN M M, WANG Y P, et al. A high-voltage supply used on miniaturized RLG [C]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2016: 97962G-1-97962G-6.
- [26] 王栋, 张文学. 反激型开关电源变压器储能输出率研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2004, 18(增刊2): 756-761.  
WANG D, ZHANG W X. Study on transformer energy-storage output rate of flyback switching power supply [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2004, 18(Suppl.2): 756-761.
- [27] 张兰勇, 曹岸, 刘胜. 级联多电平变换器的新型混合 PWM 技术 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(10): 2234-2242.  
ZHANG L Y, CAO AN, LIU SH. Novel hybrid PWM for cascaded multilevel converter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(10):2234-2242.
- [28] 杨家志, 蒋存波, 范兴明, 等. 高隔离度高压脉冲电源的仿真与实验研究 [J]. 高电压技术, 2014, 40(4):1261-1266.  
YANG J ZH, JIANG C B, FAN X M, et al. Experiment and simulation research of high isolation high voltage pulsed power supply [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(4): 1261-1266.
- [29] 胡亮灯, 孙驰, 赵洽华, 等. 宽范围高电压输入两级 DC/DC 辅助电源 [J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 629-636.  
HU L D, SUN CH, ZHAO ZH H, et al. Wide-range high voltage input two-stage DC/DC Auxiliary power supply [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 629-636.
- [30] 刘克承, 王卫国, 郭显鑫, 等. 磁偏转质谱计高压扫描电源的设计 [J]. 通信电源技术, 2011, 28(2): 37-39.  
LIU K CH, WANG W G, GUO X X, et al. The design of a sweep high-voltage power supply applied in magnetic sector mass spectrometer [J]. Telecom Power Technology, 2011, 28(2): 37-39.
- [31] JANG S R, RYOO H J, AHN S H, et al. Development and Optimization of High-Voltage Power Supply System for Industrial Magnetron [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(3): 1453-1461.
- [32] LIU J Y, DONG Z W. A design for high voltage DC power supply [C]. The 5th international conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2015: 2227-2231.
- [33] 张春林, 严萍. 基于 DSP 的数字化高压直流电源的研究 [J]. 高电压技术, 2008, 34(10):2240-2243.  
ZHANG CH L, YAN P. Research of digital high-voltage

DC power supply based on DSP [ J ]. High Voltage Engineering, 2008, 34(10):2240-2243.

- [34] GIESSELMANN M G, VOLLMER T T, CAREY W J. 100-kV High voltage power supply with bipolar voltage output and adaptive digital control [ J ]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(10): 2913-2918.

## 作者简介



**郭显鑫**(通讯作者),2007年于中国矿业大学获得学士学位,2010年于中国空间技术研究院获得硕士学位,现为中国空间技术研究院工程师,主要研究方向为空间二次电源的设计开发。

E-mail:guoxianxin@126.com

**Guo Xianxin** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from China University of Mining and Technology in 2007 and M. Sc. degree from China Academy of Space Technology in 2010. Now he is an engineer in China Academy of Space Technology. His main research interest includes design and development of satellite-borne switching power supplies.



**卢旭**,分别在2009年和2012年于南京航空航天大学获得学士学位和硕士学位,现为北京无线电计量测试研究所工程师,主要研究方向为氢原子频标。

E-mail:luxuzidane@126.com

**Lu Xu** received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2009 and 2012, respectively. Now he is an engineer in Beijing Institute of Radio Metrology & Measurement. His main research interest is hydrogen maser.



**刘克承**,1997年于西安交通大学获得学士学位,分别在2005年和2010年于中国空间技术研究院获得硕士学位和博士学位,现为中国空间技术研究院研究员,主要研究方向为空间二次电源的设计开发。

E-mail:liuss\_22@sina.com

**Liu Kecheng** received his B. Sc. degree from Xi'an Jiaotong University in 1997, received his M. Sc. and Ph. D. degrees in 2005 and 2010 both from China Academy of Space Technology. Now he is a research fellow in China Academy of Space Technology. His main research interest includes design and development of satellite-borne switching power supplies.