

离子推力器高效高可靠性屏栅电源设计^{*}

徐友慧, 胡延栋, 武 桐, 侯天明, 王少宁, 王先荣, 李媛婧, 陈丽萍

(兰州空间技术物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 为了进一步提高离子推力器的可靠性和使用寿命, 采用6个电源模块串联输出的方法设计了高效高可靠性的屏栅电源试验样机, 每个模块采用全桥LLC谐振变换器, 并对屏栅电源模块的性能、打火时开关管的瞬态电流应力分别进行了测试研究。结果表明: 屏栅电源模块采用全桥LLC谐振变换器, 可以实现零电压开通零电流关断, 整个电源的转换效率提高到96.9%; 单个电源模块输出电压为210V, 电源模块内部没有>250V的交流电压峰值, 简化了高压绝缘设计的难度; 变换器初级较大谐振电感的限流作用使得推力器出现打火时, 开关器件瞬态电流仅为40A。该设计能有效提高屏栅电源的效率和可靠性, 可以应用于小行星探测等深空探测航天器的电推进系统。

关键词: 离子体推力器; 屏栅电源; 高效; 高可靠性; 谐振变换器

中图分类号: V439.2; **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2021) 10-2393-08

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 200142

Design of High Efficiency and High Reliability Screen Supply for Ion Thruster

XU You-hui, HU Yan-dong, WU Tong, HOU Tian-ming, WANG Shao-ning, WANG Xian-rong,
LI Yuan-jing, CHEN Li-ping

(Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to further improve the reliability and service life of the ion thruster, a screen supply test prototype with high efficiency and reliability was designed by using six power modules in series. Each module adopted full bridge LLC resonant converter. And the transient current stress of the switch as well as the performance of the screen supply module were tested when the thruster was ignited. The results show that the screen supply module can be turned on and off with zero voltage and zero current by using full bridge LLC resonant converter, and the conversion efficiency of the whole power supply can be increased to 96.9%. While the output voltage of a single power supply module is 210V, the peak value of AC voltage is not more than 250V in the internal power supply module. This can simplify the difficulty of high-voltage insulation design. In addition, owing to the current limiting action of the larger primary resonant inductance, the transient current of the switch is only 40A when the thruster is ignited. This design can effectively improve the efficiency and reliability of screen supply, and can be applied to the electric propulsion system of deep space exploration spacecraft such as asteroid exploration.

Key words: Ion thruster; Screen supply; High efficiency; High reliability; Resonant converter

^{*} 收稿日期: 2020-03-18; 修订日期: 2020-05-14。

基金项目: 国家自然科学基金 (11705074)。

通讯作者: 徐友慧, 博士生, 研究领域为空间电子技术与航天器二次电源。

引用格式: 徐友慧, 胡延栋, 武 桐, 等. 离子推力器高效高可靠性屏栅电源设计[J]. 推进技术, 2021, 42(10): 2393-2400. (XU You-hui, HU Yan-dong, WU Tong, et al. Design of High Efficiency and High Reliability Screen Supply for Ion Thruster[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(10): 2393-2400.)

1 引 言

在离子电推进系统中,电源处理单元(Power processing unit, PPU)是一个相对复杂的二次电源变换设备,主要功能是为离子推力器提供所需的各种电压和电流、执行各路输出电源的开关功能,并向卫星平台提供各电源输出电压和电流的遥测数据及故障保护功能^[1-2]。典型的离子推力器 PPU 由屏栅电源、加速电源、阳极电源、阴极加热电源、阴极点火电源、中和器阴极加热电源、中和器触持极电源以及中和器阴极点火电源等组成^[3-4],其中屏栅电源功率占整个 PPU 的 80% 以上。由于离子推力器固有的结构,推力器打火是不可完全避免的现象。推力器出现打火时,导致屏栅电源输出端发生短路,开关管的电流应力较大,严重影响整个 PPU 以及推力器的可靠性以及使用寿命,所以屏栅电源是高效、高可靠性 PPU 设计的重点。

自美国 NSTAR-30 离子推力器在“深空一号”(DS-1)和黎明号(DAWN)航天器上成功应用以来,英国、日本和中国等国相继在电推进研究方面取得较大进展,屏栅电源也经过多次技术突破。美国 NASA 格林研究中心(GRC)研制的 NSTAR-30^[5-6]离子推力器 PPU 功率等级为 2.3kW,屏栅电源功率占整个 PPU 的 85%,整个屏栅电源包含 4 个独立电源模块,每个电源模块输出 300V,采用非谐振全桥拓扑结构,由于开关管的导通和关断为硬开关控制,在大功率应用场合影响 PPU 效率。美国 NASA 应用于太阳系探索飞行任务的 NEXT^[7-10]离子推力器屏栅电源采用 6 个双全桥拓扑结构的单电源模块组成,单模块的输出功率达到 1.2kW,采用移相和 PWM 混合控制。在移相控制时,负载电流由 2 个桥共同均流,以减小传导损耗,提高了电路转换效率。PPU 输出率大于 2kW 以上, NEXT PPU 比 NSTAR-30 PPU 效率高,在输出 6.9kW 时高出 3%。Astrium Germany 公司根据 ESA 提出的高精度定位(LISA 任务)、定点访问(DARWIN 任务)以及阻力补偿(GOCE 任务)或长期持续飞行(Bepi-Colombo 任务)技术要求,采用多个软开关谐振电路串联输出设计了宽范围的(Multi-range)高压电源模块(HVPS),主变换器采用谐振式 DC/DC 拓扑,次变换器采用推挽电路实现输出电压的小范围调节,模块效率在功率 700~1400W 时可达 97%^[11-13]。通过调研,目前国外关于离子推力器打火对屏栅电源影响的研究公布的资料较少。我国应用在 DFH-5 和 DFH-4F 平台的 LIPS-300^[14]离子推力器屏栅电源

由 3 个 500V/1500W 电源模块输出串联组成,每个模块采用移相全桥(PSFB)拓扑结构,在全桥变换器的基础上实施零电压零电流开关(ZVSZCS)技术,减小了开关管的开关损耗,提高产品效率,产品测试电路的转换效率达到 95%。

本文采用 6 个电源模块串联输出的方式设计了高效、高可靠性的屏栅电源模块,每个电源模块均采用全桥 LLC 谐振变换器、变频控制。仿真研究屏栅电源模块的性能,对打火时开关管的瞬态电流应力进行测试,详细分析测试波形,并对整个电路的转换效率进行测试、分析。

2 离子推力器屏栅电源设计

屏栅电源(即高压电源)通常位于阳极和中和器阴极中间,用于离子光学组件供电,即屏栅电源的负载是推力器离子光学组件。由于离子光学组件变形或是存在金属碎屑易造成推力器打火或是短路,进而造成屏栅电源短路,直接影响整个 PPU 以及推力器的可靠性和使用寿命。且屏栅电源的输出功率占整个 PPU 的 80% 以上,是电源处理单元的重要电源,所以屏栅电源的高效、可靠性设计是整个 PPU 获得高效、高可靠性的关键。

航天器在执行空间飞行时,不同任务阶段(如位置保持、轨道转移、姿态控制等)需要不同的推力,这就要求离子推力器可以多模式工作,大推力工作时 PPU 高电压高功率输出,小推力工作时 PPU 低电压小功率输出。为此,本文采用模块化设计思路,将屏栅电源采分解为 6 个独立的电源模块输出串联,最高输出 1260V,原理框图如图 1 所示。图中每个模块输出 210V/800W,小于空气低气压放电阈值最小值范围 390~410V^[15],可以简化高压绝缘防护设计。通过自由组合可实现 420~1260V 五档输出,实现高电压大功率输出来满足推力器大推力需求、低压小功率满足推力器的小推力需求。

每个模块的技术指标如下:输入电压 $U_{i,min} \sim U_{i,max}$ 为 80~110V;额定输入电压 U_i 为 100V;额定输出电压 U_o 为 210V;额定输出功率 P_o 为 800W。

2.1 功率变换主电路的设计

在高压大功率电源的研究中,虽然 PSFB 的应用和设计比较成熟,但是在轻载时难于实现零电压开通(ZVS)、副边整流二极管存在反向恢复问题,以及副边占空比丢失。且副边需要体积较大的差模电感,整流二极管的电压应力较大,在负载短路时开关管的瞬态电流应力较大,限制了电路的可靠性。

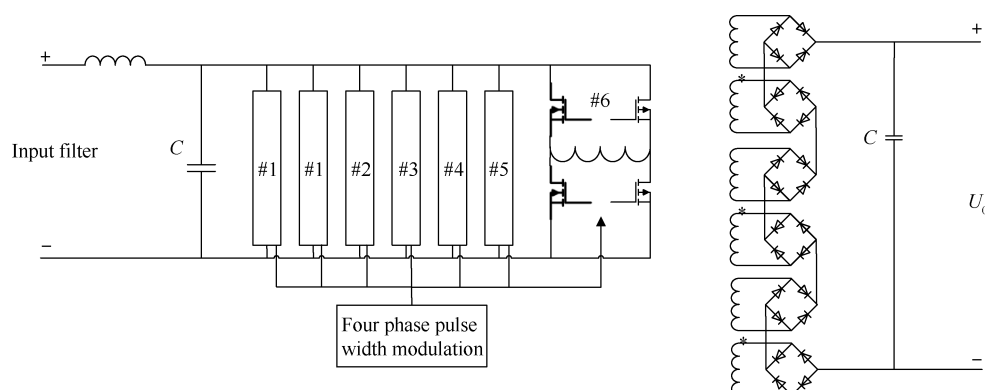


Fig. 1 Functional block diagram of the screen supply

本文在设计时采用全桥 LLC 谐振变换器,其中谐振频率为 100kHz,如图 2 所示。图中,开关管 Q1~Q4 组成全桥电路,谐振电感 L_r 、谐振电容 C_r 以及磁化电感 L_m 组成 LLC 谐振电路,在变压器副边无需输出电感,元器件少、结构简单,有效降低了模块重量。全桥 LLC 谐振变换器利用电路中的电感和电容谐振,使开关管两端上的电压或电流在一个周期内存在正弦变化而实现开关管的零电压或零电流条件下的开通或是关断,减小开关损耗,提高电路的转换效率。并且在负载发生短路时,原边较大的谐振电感可以起到限流作用,降低开关管的电流应力,可以避免推力器打火时造成 PPU 失效。

全桥 LLC 谐振变换器的设计与传统脉宽调制 (PWM) 变换器的设计过程差别很大,输入输出电压传输比是谐振变换器的重要特性,是设计元件的重要依据。为了实现较高的转换效率,谐振变换器一

般工作在谐振频率处,采用基波分析法进行稳态分析,电路的直流增益函数为^[15-17]

$$G(f_n, K, Q) = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{1}{K} - \frac{1}{Kf_n^2}\right)^2 + Q^2\left(f_n - \frac{1}{f_n}\right)^2}} \quad (1)$$

为了分析和设计方便,定义磁化电感与谐振电感之比为 $K = L_m/L_r$; C_r 与 L_r 的谐振频率 $f_r = 1/2\pi\sqrt{L_r \cdot C_r}$; 归一化频率 $f_n = f_s/f_r$, 其中 f_s 为开关频率; 品质因数 $Q = \sqrt{L_r/C_r}/R_{ac}$, 其中 R_{ac} 为等效的负载阻抗。

变换器特征阻抗呈现纯阻性时,电路的纯阻性直流增益函数见式(2)。在实际工程应用中, K 的取值一般为 3~7, 根据直流增益函数绘制的增益频率曲线,如图 3 所示,其中图 3(a)中的绿色曲线表示纯阻性直流增益频率曲线。

$$M(f_n, K) = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{1}{K} - \frac{1}{Kf_n^2}\right)^2 + \left[1 - \frac{1}{f_n^2}\right]\left(\frac{1}{Kf_n} \sqrt{\frac{(1+K)f_n^2 - 1}{-f_n^2 + 1}}\right)^2}} \quad (2)$$

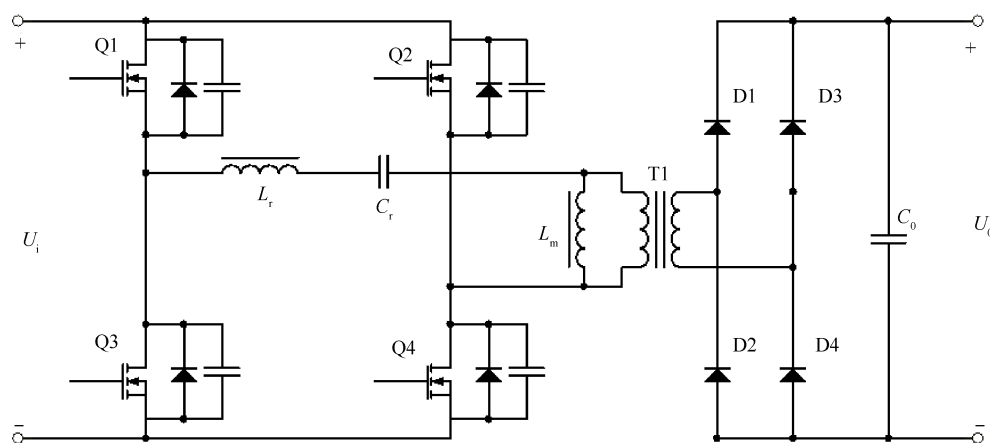


Fig. 2 Basic circuit of full-bridge LLC resonant converter

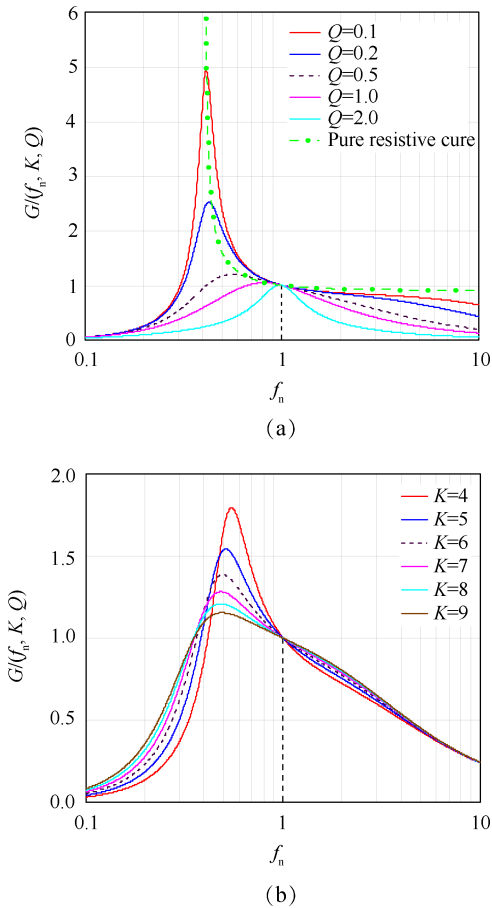


Fig. 3 Gain frequency curve of full-bridge LLC resonant converter

由图3可以得出, K 和 Q 是最大增益的主要影响因素, K 和 Q 越小,可获得增益范围越大。但是 K 越小,磁化电流越大,电路中流动的无功功率越大,电流有效值越大,金属半导体场效应晶体管(MOSFET)导通损耗越大。 K 不变的情况下, Q 值越小,增益频率曲线越平缓,获得最高增益对应的开关频率与谐振频率越远,导致开关频率变宽。由图3(a)可以看出,在 $f_n = 1$ 的左侧、纯阻性曲线的右侧,电压增益 $G > 1$,变换器工作在升压模式,变换器的输入阻抗感性,开关管可以实现零电压开通,同时实现副边整流管的零电流关断,所以在设计时应选择合理的 K, Q 值使变换器工作在该区间。

目前还没有成熟的 K 和 Q 的取值的最优解解法。依据图3,能通过最小开关频率基本假定 Q 的取值范围。再根据最小增益选择 K 的取值,然后通过计算机调整验证和实验优化。通过调整参数 K 和 Q ,在满足最大增益的情况下,尽可能选取合适的 K 值,以减少系统中的无功电流。调节优化后得到的 K 和 Q 值对应的增益特性曲线见图4,其中, $K=5.5, Q=0.414, 1.2Q$ 曲线代表过载情况, $0.5Q$ 代表半载的情况。

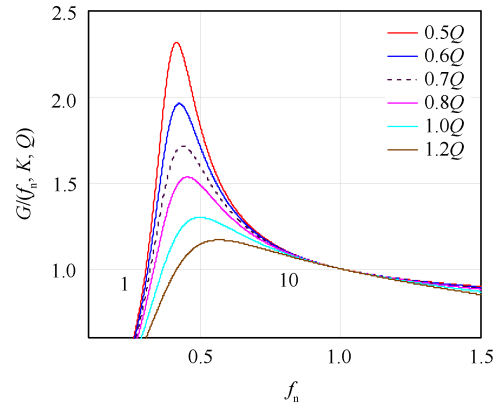


Fig. 4 Gain characteristic curves corresponding to Q and K

结合设计技术指标可以得出谐振参数: $L_m = 32\mu\text{H}, C_r = 0.44\mu\text{F}, L_r = 5.8\mu\text{H}$ 。

2.2 调频控制电路的设计

由图3的增益频率曲线可以知道,直流电压的增益随着归一化频率 f_n 的改变而改变,当确定了谐振频率时,可以通过改变开关管的频率来调节输出电压。变频控制时,可以通过设计变换器合理的工作区间,实现原边开关管的零电压开关和副边整流管的零电流关断,减小开关损耗,转换效率较高。本设计采用PFM(调制开关管频率)来控制输出电压,使用SG3525芯片来实现调制频率的功能。SG3525及外围电路如图5所示,它可以直接控制开关管的频率,内部集成了振荡器、PWM比较器、误差放大器、欠压锁定电路、软启动控制电路、基准电压产生电路,同时能限制最大占空比,并且其输出为推挽双通道输出,增加了驱动能力^[18-19]。

在SG3525中PWM的脉冲频率由内部振荡器的锯齿波频率决定,为锯齿波频率的一半,锯齿波频率 f 为

$$f = \frac{1}{C_T(0.7R_T + 3R_D)} \quad (3)$$

式中 C_T 为引脚5的外接电容, R_T 为引脚6的外接电阻, R_D 为引脚5与引脚7之间的放电电阻。由上式可以看出,锯齿波的频率是由 C_T, R_T 及 R_D 决定的,根据振荡器内部电路特性可知,本质上是由 C_T, R_D 及流过 R_T 的电流决定的。所以,可以通过改变引脚6的电流大小改变芯片输出控制PWM的频率。电流越大,PWM的脉冲频率越高,根据此特性设计了如图5所示的调频控制电路。在频率变化过程中,引脚6的电位几乎保持在3.5V不变。

在功率调节过程中,输出采样电压经PI电压补偿控制器生成输出电压误差信号值 Δu ,SG3525引脚

6输出的3.5V电压与 Δu 电压差加在 R_T 上, Δu 改变时即流过 R_T 的电流改变,从而改变芯片的振荡频率,改变芯片输出控制频率。当输出端电压下降时,电压误差信号 Δu 增大,经过 R_T 的电流减小,其输出频率变小,输出增加,则电压上升;当输出电压升高时则反之。

3 仿真与实验测试

3.1 电路性能仿真

为了验证所设计的电路性能,在Saber软件中根据谐振参数搭建电路模型,如图6所示。并对电路模型进行了仿真分析,其中开关频率与谐振频率相等,为100kHz,时钟信号Clock的频率为100Hz,占空比为0.005,仿真时间 $t=15\text{ms}$ 。当 $t<10\text{ms}$ 时,Clock为高电平,开关管SW1断开,全桥LLC谐振变换器正常运行; $t=10\text{ms}$ 时Clock为低电平,开关管SW1闭合,负载发生短路,此时代表推力器发生打火。仿真结果如图7-8所示。

图7(a)中,橘色是桥臂中点A,B之间的电压波形

U_{AB} ,绿色是开关管Q1的电压波形 U_{Q1} ,蓝色是Q1的驱动波形,红色是谐振电感 L_r 的电流波形 I_{L_r} 。从图中可以看出,在全桥LLC谐振变换器原边,谐振电感的电流波成正弦波,开关管电压及桥臂中点电压均为方波,在驱动电压为高电平即开关管导通时,桥臂中点电压值为输入电压,开关管电压已经降为零,实现了原边开关管零电压开通(ZVS)。图7(b)中分别是副边整流二极管D1的输出电流和电压波形,从图中可以看出,整流二极管在关断时电流自然回落至零,因此实现了整流二极管的零电流关断(ZCS),且其电压值为输出电压。图7(c)中是整流二极管D1,D2输出电流合成波形,可以看出,当变换器工作在谐振频率处,整流二极管的电流恰好处于临界连续状态,恰好可以实现ZCS。

图8是开关管Q1的电流波形图,从图中可以看出, $t=10\sim 10.05\text{ms}$ 时,电路负载发生短路,此时相当于推力器发生打火,开关管的电流出现峰值电流,由于谐振电感 L_r 的限流作用,最高峰值电流为40.281A。其中由于SW1闭合的时间是0.05ms,包含5个开关周

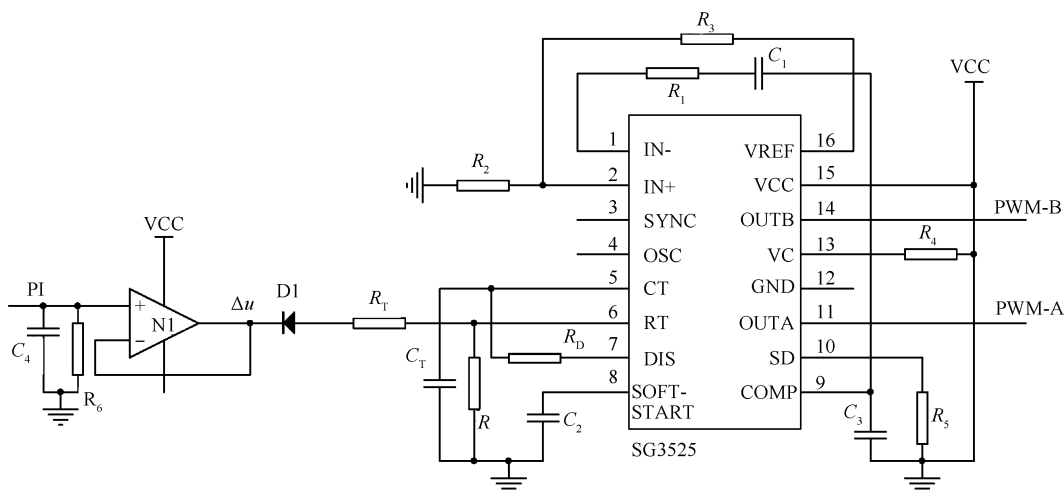


Fig. 5 PFM control circuit

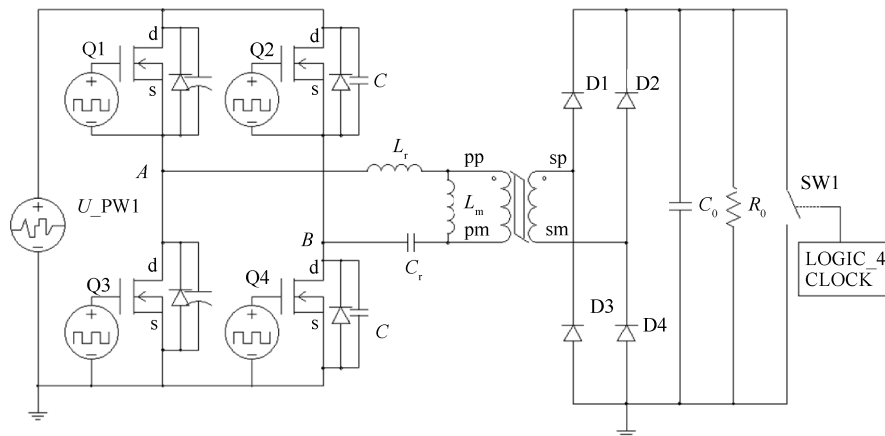


Fig. 6 Circuit model of LLC

期,因此图有 5 个震荡高峰。

3.2 实验测试

按照设计指标设计了屏栅电源模块的实验样

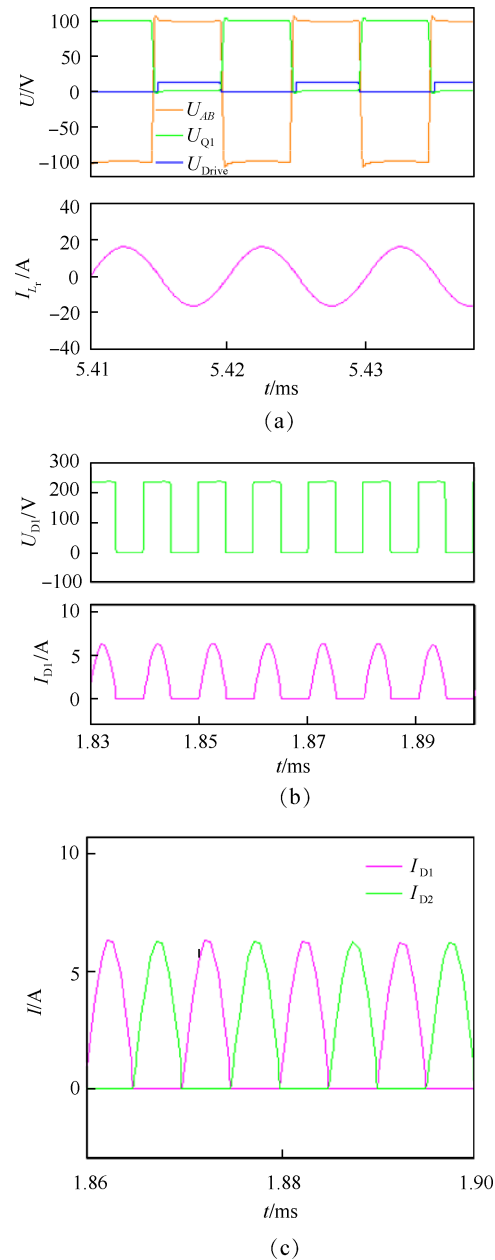


Fig. 7 ZVZCS of LLC resonance converter switch

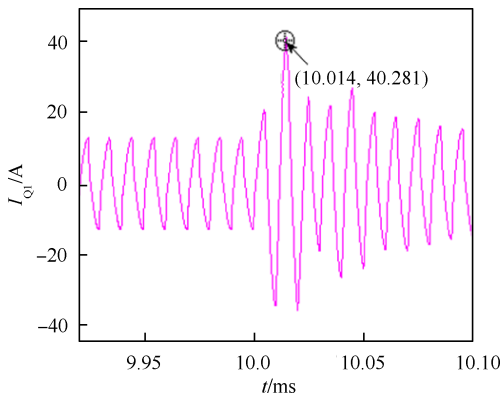


Fig. 8 Waveform of Q1 current

机,并对其进行了相应的实验测试,实验结果见图 9。图 9(a)中红色代表谐振电流 I_{L_r} 的波形,蓝色代表超两桥臂中点 A, B 两点间电压 U_{AB} 的波形,可以看出开关管开通时桥臂中点电压值 U_{AB} 为输入电压,开关管实现了零电压开通,消除了开关管的开通损耗;(b)中红色同样是谐振电流 I_{L_r} 的波形,蓝色是整流二极管电压 U_{D1} 的波形,图中在开关管的前半个周期中, t_0 所示时刻谐振电流与磁化电流相等,谐振网络不再向副边输出能量,二极管 D1 的电流降为零,实现了零电流关断,不存在反向恢复的问题,因此整流电路的损耗大大降低。图 9 显示,全桥 LLC 谐振变换器使整个电路实现了 ZVSZCS,有效提高了电源的转换效率。且图(b)中可以看出在二极管电流为 0 时,虽然其寄生电容与变压器漏感发生谐振,引起电压振荡,但模块内部并没有大于 250V 的交流电压峰值,可以不考虑交流局部放电对绝缘寿命的影响,由此简化了高压绝缘设计的难度,带来可靠性的提升。

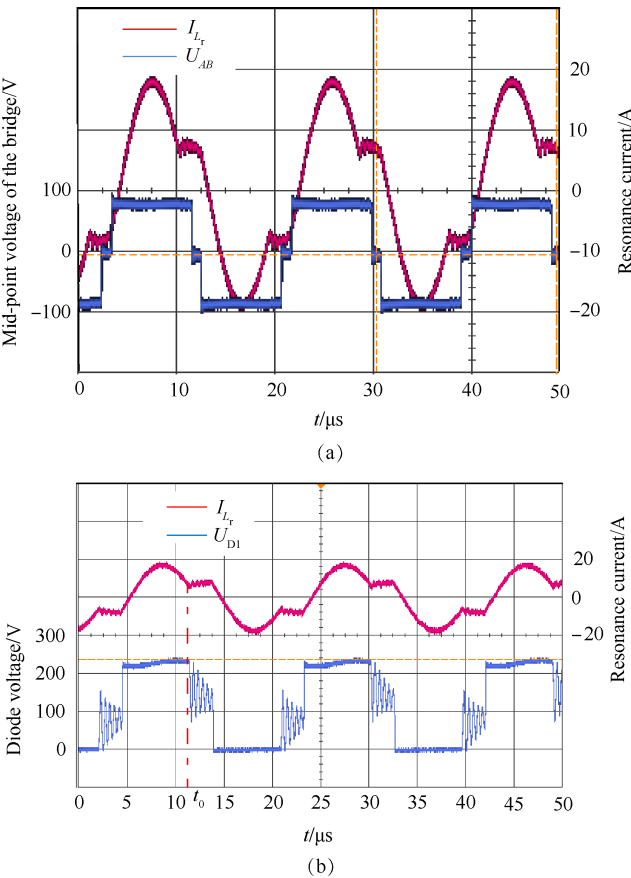


Fig. 9 Experimental waveform of screen supply

图 10 是屏栅电源打火时开关管瞬态电流应力测试波形图,图中在 175 μs 时出现打火,开关管 MOS 管的瞬态电流值最大为 40A,与仿真结果一致。且由于

PPU 针对打火时屏栅电源短路问题设计了专门的过流保护电路,出现短路时经过短暂的过流保护响应时间,在第二个开关管周期之前快速关断前级功率电路的输出,使开关管的电流变为 0,因此,图中只有一个震荡峰值。结果表明全桥 LLC 谐振变换器模块初级较大的谐振电感具有限流作用,有效抑制了开关管电流的上升,在应对推力器打火时,使电源模块更安全,整个 PPU 更可靠。

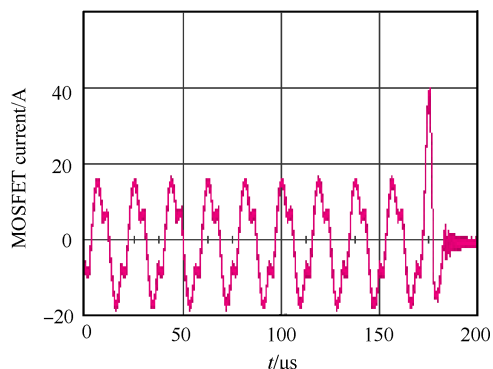


Fig. 10 Transient current stress testing waveform

图 11 是全桥 LLC 谐振变换器在不同输入电压下的效率曲线图。由图可以看出电源模块在 100V 输入时,变换器工作在谐振点,开关管频率等于谐振频率,此时效率最高。在 80V 输入时开关管频率最低,此时磁化电流最大,初级电流有效值增加,使得开关管得导通损耗增加,降低了变换器的转换效率。在 110V 输入时,电流波形接近于三角波,电流峰值增加,开关管的关断电流大,变换器效率降低明显。

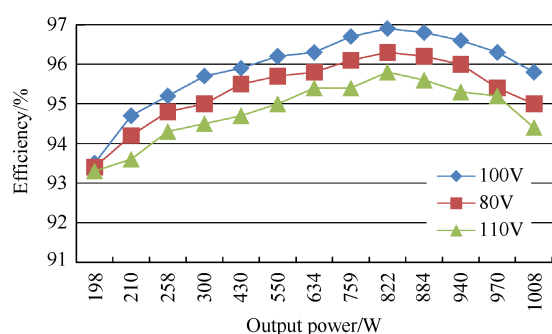


Fig. 11 Efficiency at different input voltage

在输入 100V 的效率曲线中,可以看出输出功率为 822W 时,屏栅电源模块的转换效率最高,最高效率为 96.9%。调研资料中,Astrium Germany HVPS-屏栅电源效率最高,为 97%,可以看出,本设计的电源模块效率达到了国外同类产品先进水平。同时相较于国内 LIPS-300 离子推力器屏栅电源的效率提高了 1.9%。

4 结 论

本文设计了高效且在打火时具有高可靠性的屏栅电源,并进行了相关性能的仿真分析和实验测试。通过本文的研究,得出以下结论:

(1)单个电源模块输出电压为 210V,低于空气低气压放电阈值最小范围 390~410V,同时副边整流二极管的电压等于输出电压,在 210V 额定输出时,电源模块内部没有 >250V 的交流电压峰值,可以减小对绝缘寿命的影响,简化高压绝缘设计的难度,提高产品的可靠性。

(2)基于全桥 LLC 谐振变换器的屏栅电源模块,可以实现变换器原边开关管零电压开通,副边整流管实现零电流关断,有效减少开关损失,使转换效率提高到 96.9%,使得屏栅电源更高效。

(3)由于电源模块原边较大的谐振电感的限流作用,使得推力器在出现打火时,开关管的峰值电流仅为 40A,有效提高了屏栅电源的可靠性,使得推力器的可靠性和使用寿命均得到保障。

致 谢:感谢国家自然科学基金的资助。

参考文献

- [1] 成 钢,王少宁. 离子推进系统电源研究[J]. 电子设计工程, 2012, 20(20): 141-145.
- [2] 徐友慧,王少宁,陈昶文,等. 脉冲等离子体推力器电源处理单元技术研究[J]. 推进技术, 2019, 40(6): 1433-1440. (XU You-hui, WANG Shao-ning, CHEN Chang-wen, et al. Study on Pulsed Plasma Thruster Power Processing Unit[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(6): 1433-1440.)
- [3] 徐友慧,王先荣,王少宁,等. 离子推力器数字化电源处理单元设计分析[J]. 电子设计工程, 2019, 27(21): 146-150.
- [4] 王少宁,成 钢,赵登峰. 空间离子电推进系统电源处理单元设计[J]. 真空与低温, 2011, 17(4): 235-240.
- [5] Hamley J A, Cardwell G I, McDowell J, et al. The Design and Performance Characteristics of the NSTAR PPU and DCIU[R]. *AIAA* 98-3938.
- [6] 李 峰,康 庆,邢 杰,等. 大功率电推进电源处理单元技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(8): 1575-1583.
- [7] Pinero L R, Bond T, Okad A D, et al. Design of a Modular 5kW Power Processing Unit for the Next Generation 40cm Ion Engine[R]. *NASA-TM-2002-211359*.
- [8] Pinero L R, Hopson M, Todd P, et al. Performance of the NEXT Engineering Model Power Processing Unit[R]. *AIAA* 2007-5214.

- [9] Pifiero L R. Development of the Next Power Processing Unit[R]. *AIAA* 2003-4867.
- [10] Todd P C. Martinell, R, Wiseman S, et al. Status of the NEXT 7kW Power Processing Unit[R]. *AIAA* 2005-3868.
- [11] Gollo R M, Boss M, Herty F, et al. Generic High Voltage Power Supply-Next Generation [R]. *AIAA* 2007-5215.
- [12] Matthias G, Michael B, Frank H, et al. Generic High Voltage Power Supply with High Efficiency for Electrical Propulsion[R]. *AIAA* 2006-4340.
- [13] Michael B, Matthias G. Electric Propulsion Electronic Activities in Astrium Germany[R]. *AIAA* 2007-5167.
- [14] 武 桐, 翟 浩, 武 荣, 等. 大功率离子推力器屏栅电源拓扑技术进展与展望[J]. *航天器工程*, 2017, 26(4): 101-108.
- [15] 李 航. 几种典型气体低气压放电行为研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [16] Bo Yang. Topology Investigation for Front End DC/DC Power Conversion for Distributed Power System [D]. Blacksburg: *Virginia Polytechnic Institute and State University*, 2003.
- [17] Hang-Seok Choi. Design Consideration of Half-Bridge LLC Resonant Converter[J]. *Journal of Power Electronics*, 2007, 7(1): 13-20.
- [18] Sideng Hu, Junjun Deng, Chris Mi, et al. Optimal Design of Line Level Control Resonant Converters in Plug-In Hybrid Electric Vehicle Battery Chargers[J]. *Electrical Systems in Transportation*, 2014, 4(1): 21-28.
- [19] 屈百达, 马久祥, 杜 松. 基于SG3525调频控制的超声波电源[J]. *电源技术与设计*, 2014, 38(7): 1358-1360.
- [20] 刘中锋, 刘 春, 倪文斌. 基于SG3525芯片的大功率恒压/恒流LED电源研制[J]. *电源技术与设计*, 2016, 40(2): 404-407.

(编辑: 史亚红)