

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2023.05.026

## 逆变式等离子体点火系统电源研制

俞鸿鹏, 杨家龙, 游滨川, 余涛

(哈尔滨工程大学动力与能源工程学院, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 根据等离子体点火对低压直流电源的要求,设计了一种基于单管自激式拓扑结构的高压脉冲电源。该电源通过单管自激式拓扑结构实现电压的逆变功能,通过单结晶体管振荡电路提供的控制信号实现对可控硅的控制功能,通过充电电阻和电容的改变实现点火频率变化。为减小变压器漏感对开关管的影响,使用了保护电路。仿真对比逆变升压电路变压器漏感的影响,实现逆变升压电路与点火电路的参数匹配,通过搭建原理样机进行实验,验证了逆变式等离子体点火电源方案设计的有效性。设计升压电路输出电压1 000 V,输出电流0.3 A。通过实验获得等离子体点火电源输出电压大于10 kV,输出电流最大值约500 A,放电时间约52.89 ms。

**关键词:** 等离子体点火; 逆变电路; 脉冲电源

### Development on Power Supply of Inverter Plasma Ignition System

YU Hongpeng, YANG Jialong, YOU Binchuan, YU Tao

(College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** According to the requirement of plasma ignition to low voltage DC power supply, a kind of high voltage pulse power supply based on single pipe self-excitation topology is designed. The power supply realizes the inverter function of voltage through the single-tube self-excited topology, the control function of SCR is achieved by the control signal provided by the single-junction transistor oscillation circuit, and the ignition frequency variation is achieved by way of changing charging resistance and capacitance. For reducing the influence of transformer leakage inductance on the switch tube, a protection circuit is used. By simulating and comparing the influence of the leakage inductance of the inverter boost circuit transformer, the matching parameters of the inverter boost circuit and the ignition circuit are realized. The effectiveness of the design of the inverter plasma ignition power supply is verified by the experiment through setting up principle sample. The output voltage of the designed boost circuit is 1 000 V and the output current is 0.3 A. The output voltage of plasma ignition power supply which is obtained through experiment is over 10 kV, the maximum output current is about 500 A and the discharge time is approximately 52.89 ms.

**Key words:** plasma igniter; inverter circuit; pulse power supply

## 0 引言

航空发动机点火系统是发动机启动和再启动的关键部件,其工作特性和能力将直接影响发动机的启动与再启动过程,甚至整个发动机的安全<sup>[1-3]</sup>。等离子体点火器是一种能产生高温热源的点火设备,在航空发动机中采用等离子体点火技术,可以

很大程度上提高发动机的工作可靠性<sup>[4-6]</sup>。传统高压电源因体积和重量都很大,在特定的工作环境下,满足不了实际应用的需要。随着开关电源技术的发展,采用高频技术使得电源的体积减小,应用范围也越来越广。在现有基础上对电源进行研究并研制出结构合理、可靠性高、可重复性好的等离子体点火器电源具有重要的理论价值和意义。

点火系统一般由点火电源、点火电缆和点火电嘴组成。电点火装置根据储能方式的不同主要分为电感储能式和电容储能式两类点火系统。电感储能式点火系统其原理和结构比较简单,将低压直流电转换为电嘴所需的高压脉冲电,由电感线圈储存能量并向点火电嘴供电,储存的能量一般为几十毫焦,放电频率高不可控,电感储能式点火系统用于间接点火。电容储能式点火系统由电源变换电路、储能电路及放电电路等部分组成,储存的能量可以达到十几焦耳,放电频率低可控,电容储能式点火系统用于直接点火<sup>[1-3]</sup>。直接点火方式是通过点火电嘴直接点燃燃烧室主喷嘴,具有点火系统简单,重量轻,尺寸小等优点。

航空发动机的直流供电系统包括270 V高压直流和28 V低压直流供电系统。直流供电点火系统主要包括滤波电路、逆变升压电路、点火控制电路、储能电路以及保护电路等,高压直流供电点火系统的逆变升压电路升压比小,因此升压电路的体积和质量明显减小,但考虑到实际飞行器的运行过程中供电电源需要给各类机载设备和成附件供电,28 V低压电源的适用性更强<sup>[1-2]</sup>。

大部分航空发动机在地面能够正常点火且稳定燃烧,但在高空条件下,空气温度低、密度低、燃油雾化质量差,使用常规火花塞点火,点火能量和面积小,使得燃烧室中的混合气很难被点燃。常规点火系统采用的是热能机理,等离子体点火系统通过气体放电形成电弧,通过对电极周围空气电离产生大量的活性粒子,以高速射流的方式将等离子体喷射到燃烧介质中,产生化学和气动双重效应,实现快速点燃可燃混合气体或强化燃烧过程,强化点火效能。等离子体点火系统体积小,重量轻,比常规点火系统更具优点和发展潜力,使点火过程更加可靠<sup>[7-11]</sup>。

ALBINA等<sup>[12-13]</sup>设计了一种基于阶跃恢复二极管的等离子体点火电源,并通过实验与标准点火系统进行对比,研究发现等离子体点火电源放电形成的非平衡等离子体能够有效降低比油耗和排气中氮氧化物体积分数,显著提高发动机性能。JOONSIK等<sup>[14]</sup>通过实验研究微波辅助等离子体点火对发动机燃烧和排放特性的影响,研究表明微波辅助等离子体点火能够改善燃烧室的点火特性,有利于降低CO和NO<sub>x</sub>的排放。SIMONA等<sup>[15]</sup>通过实验研究不同火花塞形状和等离子体结构对燃烧室性能影响,研究发现在贫燃条件下,等离子体点火系统具有更高的稳定性,改善发动机工作性能,降低

了污染物排放。

综上所述,文中提出一种28 V低压直流供电的等离子体点火系统,采用电容储能方式的直流等离子体点火器电源的设计方案,电源系统采用自激式开关电源技术,实现DC-AC的变换过程,通过晶体管转换电压,实现直流电转换成交流电压的功能。分析了电源装置设计过程中关键参数对电路工作的影响,实现逆变升压电路与点火电路的参数匹配。

## 1 电源主电路方案设计

文中的主电路方案设计主要包括逆变升压电路,储能电路以及放电及保护电路。

### 1.1 技术要求

逆变升压电路预期性能指标为:直流输入电压24~31 V;额定输出电压1 000 V;额定输出电流0.3 A。

等离子体点火电源输出性能指标为:输出脉冲电压>10 kV;输出脉冲电流>100 A。

### 1.2 主电路参数的设计和选择

1)逆变升压电路<sup>[16-22]</sup>。逆变升压电路是等离子体点火电源的重要组成部分,它的高效和集成化对等离子体点火电路来说十分重要。文中所采用的逆变升压电路方案为单管自激式拓扑结构,基本电路图见图1。

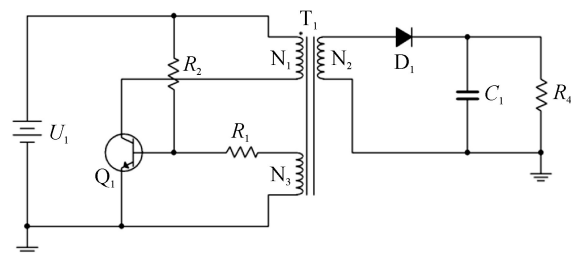


图1 单管自激式开关电源

Fig. 1 Self-excited switching power supply

逆变升压电路由三极管 $Q_1$ 和自制变压器 $T_1$ 构成单管自激式振荡器。变压器有3个绕组: $N_1$ 为初级绕组, $N_2$ 为次级绕组, $N_3$ 为反馈绕组。升压原理:当电源接通后,电阻 $R_2$ 提供启动电流,三极管 $Q_1$ 集电极电压流过变压器 $T_1$ 的初级绕组 $N_1$ ,在变压器次级绕组 $N_2$ 产生感应电动势,反馈绕组 $N_3$ 也产生感应电动势,其方向将加速三极管 $Q_1$ 导通。三极管 $Q_1$ 集电极电流将进一步增大,耦合到反馈绕组 $N_3$ 的感应电动势将进一步增加,形成正反馈的雪崩过程,三极管 $Q_1$ 很快从截止状态变为饱和状态。

当集电极电流达到最大电流时,即电流不再增加而保持一定,此时磁通不再变化,变压器绕组上感应电压消失,致使基极电流减小,集电极电压上

升,在变压器的反馈绕组上产生相反电动势,使基极电流越来越小形成正反馈,三极管 $Q_1$ 很快截止。次级绕组 $N_2$ 在三极管 $Q_1$ 关断过程中将能量传递到负载,释放能量,振荡器重复上述过程。

逆变升压电路的元器件选择及技术参数确定主要通过理论计算和实验来确定。元器件参数可通过以下计算初步确定。设定在三极管工作过程中最低开关频率 $f$ 为25 kHz。

初级绕组 $N_1$ 与副边绕组 $N_2$ 变比 $k$ 的选取原则为在最重载时,输入电压最低的条件下,此时输出电压仍能满足设计要求,考虑到线路压降等非理想因素的影响,变比 $k$ 为50。

考虑到电弧负载的负阻陡降特性,为使逆变升压电路更加稳定可靠,与电弧负载特性相匹配,通过反馈电阻与二极管并联的方式,改变反馈回路电流的阻抗,改善逆变升压电路的启动特性,增加三极管从饱和进入截止时间。电路图见图2。

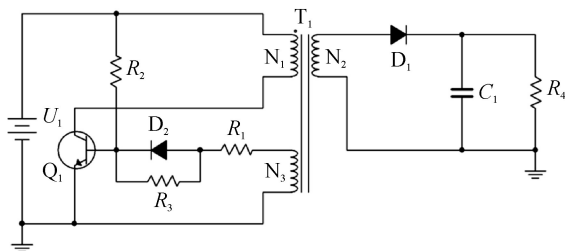
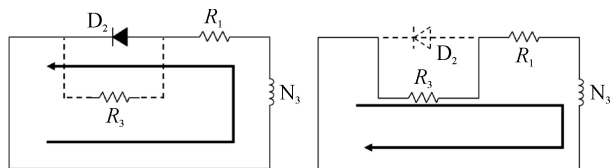


图2 反馈回路加入二极管

Fig. 2 The feedback loop adds the diode

反馈回路的工作过程分为两部分,电流流向见图3。电路启动时,三极管从截止趋于饱和的过程中,电流通过 $R_2$ 向三极管基极提供电流,反馈绕组 $N_3$ 产生感应电动势,通过电阻 $R_1$ 和二极管 $D_2$ 提供反馈电流, $R_1$ 为保护电阻,电流变化方向见图3(a);在三极管从饱和趋于截止的过程中,电流变化方向见图3(b),二极管 $D_2$ 反向截止,电流通过 $R_3$ 和 $R_1$ 改变基极电流,由于电阻 $R_3$ 较大,三极管从饱和趋于截止过程时间增大,提高能量传递效率。



(a) 三极管从截止趋于饱和 (b) 三极管从饱和趋于截止

图3 反馈回路工作过程

Fig. 3 Feedback loop working process

2)保护电路<sup>[23]</sup>。逆变升压采用的是单管自激式拓扑结构,在晶体管自激式振荡电路中,三极管承担着开关和振荡的双重做用,由于变压器中气隙的

存在,开关管 $Q_1$ 在关断瞬间会产生很大的尖峰电压,使得开关管承受较高的电压应力,甚至可能导致开关管损坏。因此,为确保变换器的正常工作,需要加入钳位电路吸收漏感能量。文中通过设置RCD钳位电路和能量回收绕组减少变压器漏感的影响。加入保护电路的电路结构见图4。

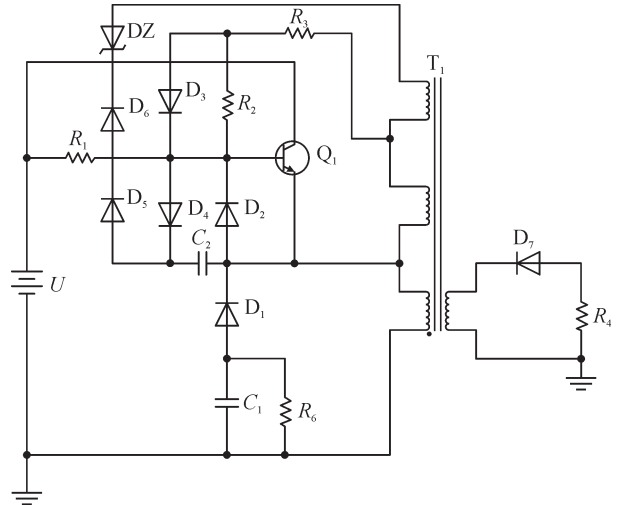


图4 加入保护电路的逆变升压电路

Fig. 4 Inverter boost circuit with protection circuit added

3)放电及储能电路<sup>[24-31]</sup>。文中设计的等离子体点火电路依据电容放电式点火电路,传统电容放电点火装置主要由储能电容、开关元件(可控硅)、点火线圈及点火电嘴组成,工作原理图见图5。

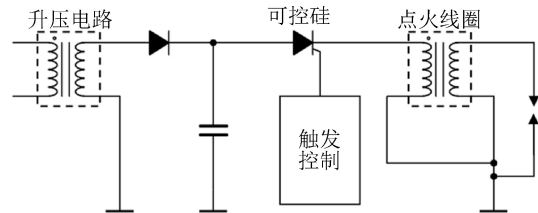


图5 传统电容放电点火装置工作原理图

Fig. 5 Diagram of traditional capacitor discharge ignition device

电容储能式点火系统基本原理是通过高压电源对电容进行充电,充电饱和后,通过开关接通放电电路,储能电容电压加载到电极上,形成放电通道,产生电弧,气隙被击穿,产生电火花放电现象。电容储存的能量与有效火花能量直接相关,电容器储存的能量可以计算为

$$E = CU_0^2/2 \quad (1)$$

在设计过程中,可以通过增大电容 $C$ 或提高充电电压 $U_0$ 来提高电容储存的能量 $E$ ,实现大能量点火过程。

空气间隙被击穿后,放电电路的储能电容、点火线圈的电感和电阻可近似为无输入的RLC电

路。电容放电式点火电路的工作原理可简化为电容放电式脉冲源电路见图6。

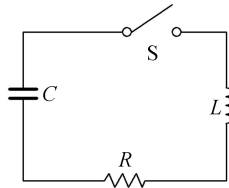


图6 等效电路图

Fig. 6 Diagram of equivalent circuit

放电过程存在如下关系

$$L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^{t_d} i(t) dt + Ri(t) = 0 \quad (2)$$

式(2)中: $i(t)$ 为电流; $R$ 为电阻; $L$ 为电感; $C$ 为电容; $t_d$ 为放电持续时间。根据实验与仿真研究,当电容以振荡方式放电时,有效火花能量占电容储能比例最高。

文中设计的等离子体点火电源的系统结构图见图7,在传统点火系统的基础上增加了储能电容 $C_1$ 、二极管 $D_1$ 、电阻 $R_1$ 。储能电容 $C_1$ 的作用是提供等离子体点火能量,二极管 $D_1$ 的作用是在点火线圈和电容之间阻断点火瞬间的离断电压,防止该电压损坏储能电容,电阻 $R_1$ 为保护电阻。

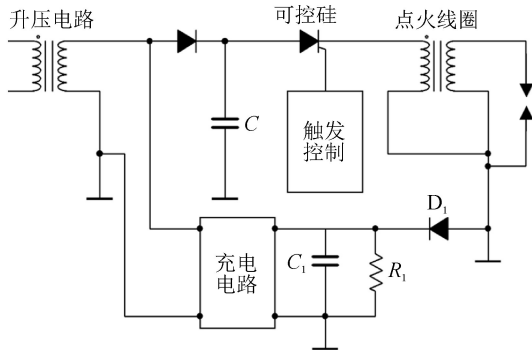


图7 等离子体点火系统示意图

Fig. 7 Diagram of plasma ignition system

等离子体点火系统的工作过程为:在电源导通后,对电容 $C$ 和 $C_1$ 进行充电,当可控硅导通时,在点火线圈副边产生最高10 kV的离断电压,击穿点火发生器阴极和阳极之间的空气间隙,产生电弧,形成放电通道,储能电容 $C_1$ 上的能量以电流脉冲的形式通过电弧,形成等离子体电流。在储能电容 $C_1$ 放电结束时,二极管 $D_1$ 截止, $C_1$ 不再放电,电源重新进入充电过程。

## 2 仿真及实验结果分析

### 2.1 仿真结果分析

通过Multisim仿真软件搭建如图4所示的逆变

升压电路进行仿真,通过改变变压器的漏感,得到变换器的输出电压见图8。

通过仿真分析可以得到,初级绕组与副边绕组的变比 $k$ 为50,可基本实现逆变升压电路的输出为1 500 V。当变压器漏感为0.1  $\mu$ H和1  $\mu$ H时,逆变升压电路产生脉冲电压输出,但由于漏感的影响会产生尖峰电压,对开关管的损害较大;当变压器漏感为10  $\mu$ H时,变压器输出呈现间歇振荡的形式,无法为点火电路提供稳定电压;当变压器漏感为0.1 mH时,变压器输出呈现不稳定的振荡变化;变压器漏感达到0.3 mH时,逆变升压电路能产生振幅较为稳定的交流电压,当漏感达到0.5 mH时,逆变升压电路输出稳定的交流电压,但变换器实现稳定振荡过程的时间延迟。通过理论计算与仿真确定,变换器的漏感为0.3 mH。

通过Pspice搭建电容放电式点火电路等效电路图进行仿真,等效电路模型见图9。

在仿真过程中,设置充电电压 $U$ 为300 V,电阻 $R$ 为5  $\Omega$ ,电感 $L$ 为5 mH,对比在不同电容条件下,点火线圈初级电流的变化,仿真结果见图10。

通过仿真结果得到,增大电容能够增大点火线圈初级电流的峰值,但达到峰值电流的时间增加,相应的,电容充电时间增加。根据实际电路的工作过程中的性能对比,用于形成电弧放电通道的储能电容选取4.7  $\mu$ F,形成等离子体电流的储能电容选取10  $\mu$ F。

### 2.2 实验结果分析

搭建等离子体非线性电源实验平台,对等离子体点火器的工作特性进行实验测量,实验平台示意图见图11,包括等离子体点火发生系统和测量系统。等离子体发生系统包括等离子体点火电源、等离子体点火电缆和等离子体点火发生器,测量系统包括高压衰减棒、霍尔电流传感器和示波器。高压衰减棒为品致公司的P6028A型,衰减倍数1 000:1,最大测量电压40 kV,上升时间为1.6 ns,见图12。霍尔电流传感器采用的是Pearson Electronic公司的Pearson Current Monitor Model 2877,最大峰值电流100 A,灵敏度为1 Volt/Ampere +1/-0%,见图13。示波器为Lecory公司的WaveSurfer 3000型,该示波器采样率高,为双通道输入,见图14。

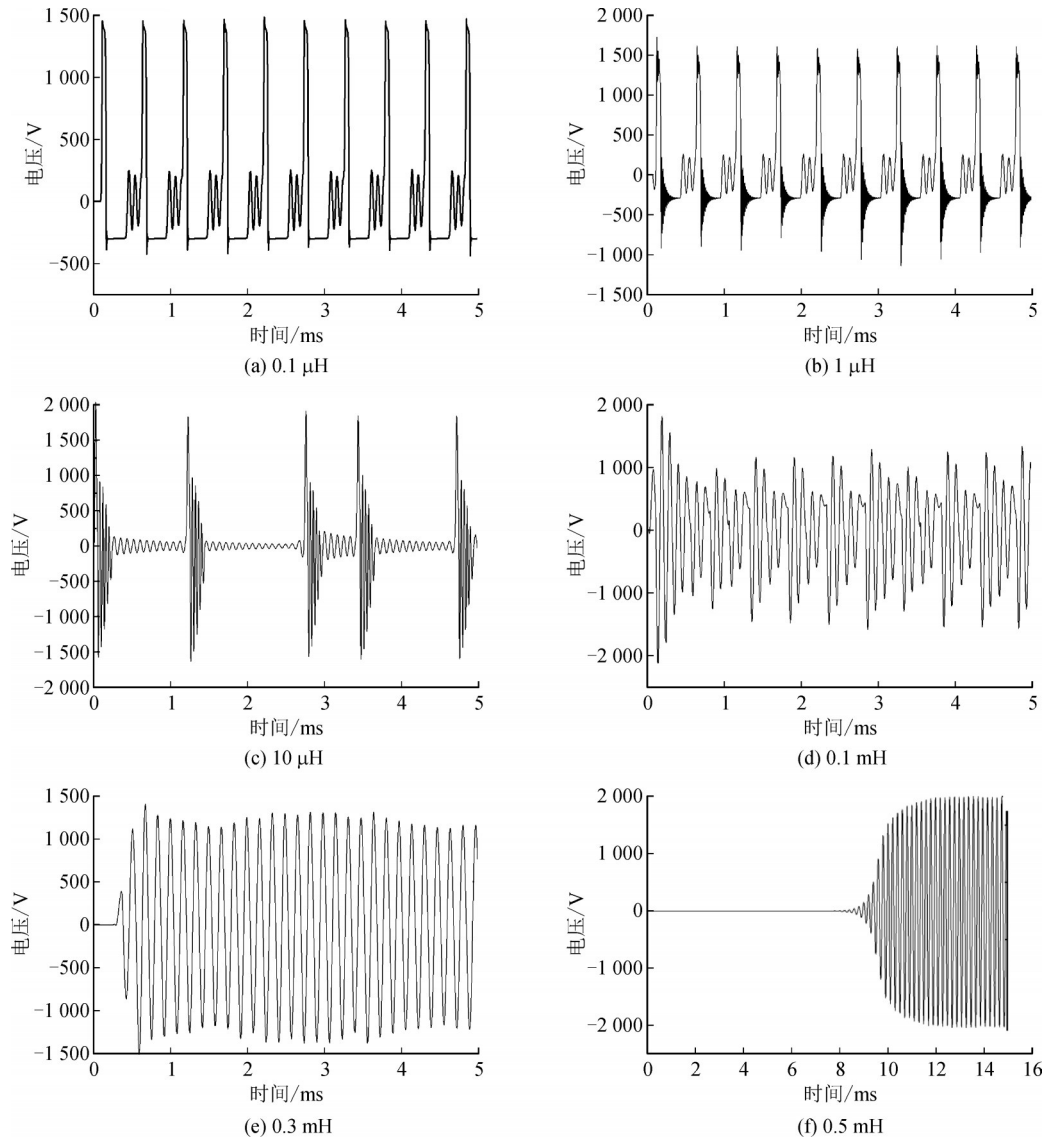


图8 漏感对逆变升压电路的影响

Fig. 8 Influence of leakage inductance on inverter boost circuit

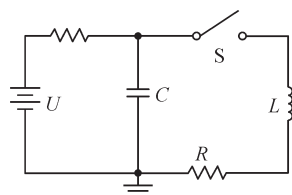


图9 电容放电式等效电路图

Fig. 9 Diagram of capacitance discharge equivalent circuit

实验过程中, 等离子体点火电源开关接通, 产生脉冲高压, 脉冲高压通过击穿等离子体发生器阴极与阳极之间的空气间隙, 产生放电通道, 储能电路通过放电通道进行放电, 形成等离子体热射流。在实验测量过程中, 通过示波器将高压衰减棒和霍尔电流传感器获取电源产生的脉冲电压和电流信号进行记录。

实验过程中, 通过衰减比为 10:1 的电压探针, 对逆变升压电路空载时的电压输出进行测量, 对示波

器输出结果进行处理得到, 测量结果见图 15。

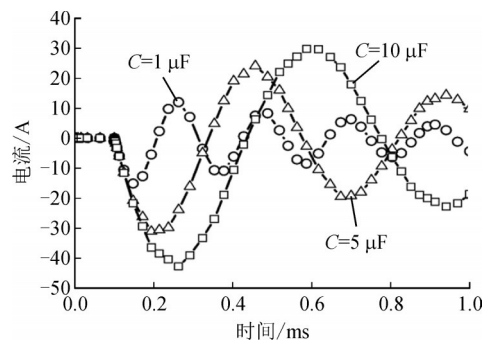


图10 电容对点火线圈初级电流的影响

Fig. 10 Effect of capacitance on primary current of ignition coil

对实际的逆变升压电路空载测量可以发现, 逆变升压电路的电压呈现周期性变化, 通过三极管的开关与闭合实现振荡电路的振荡过程, 三极管工作的开关频率大约在 30 kHz, 通过振荡电路形成的振

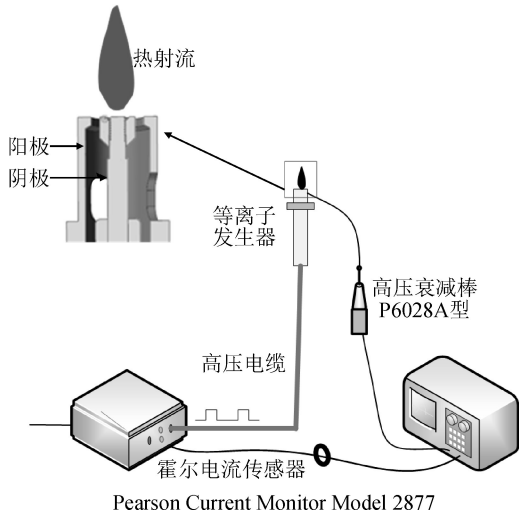


图 11 等离子体非线性电源实验平台示意图

Fig. 11 Schematic diagram of experimental platform for plasma nonlinear power supply



图 12 高压衰减棒

Fig. 12 High pressure damping rod



图 13 霍尔电流传感器

Fig. 13 Hall current sensor



图 14 示波器

Fig. 14 The oscilloscope

荡电压频率为 4 kHz, 峰峰值约为 1 500 V。

加入点火电路后, 通过衰减比为 100:1 的霍尔线圈和衰减比为 1 000:1 的高压探棒对点火电嘴的输出端进行测量, 得到电流与电压的波形变化见图 16。

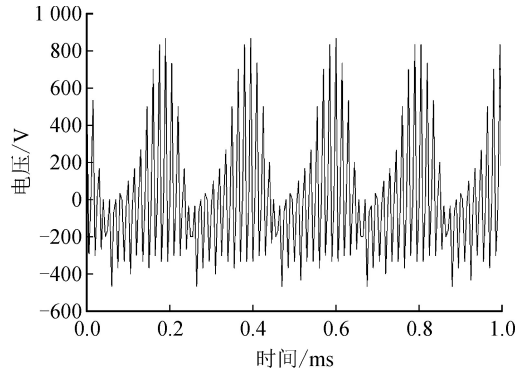
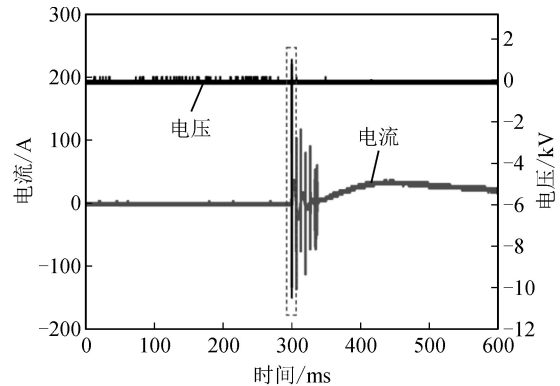
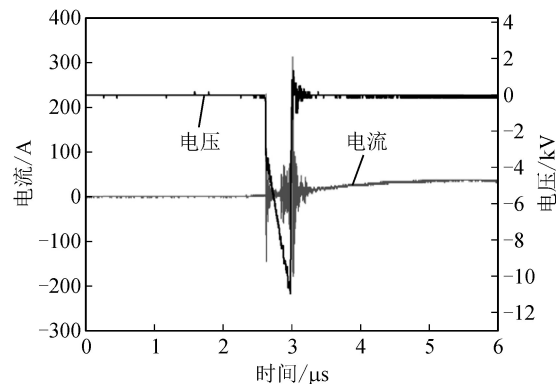


图 15 逆变升压电路的空载电压

Fig. 15 No-load voltage of inverter boost circuit



(a) 电容放电完全放电



(b) 点火瞬间电压电流变化

图 16 点火电路输出电流和电压变化

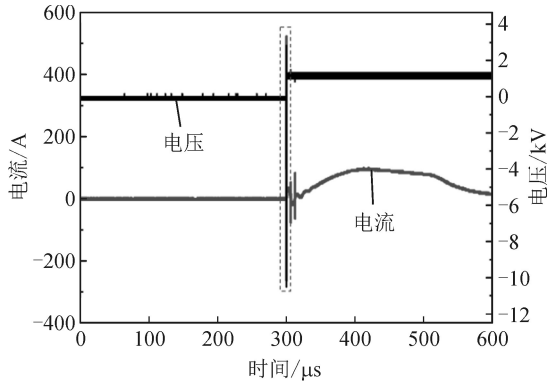
Fig. 16 Ignition circuit output current and voltage variation

通过对点火电路的输出电流和电压测量, 可以得到, 击穿电极之间的空气间隙电压可达 8 kV 的高压, 击穿瞬间电流可达 350 A, 当电压击穿空气间隙后, 电流呈现衰减的周期性振荡变化, 电压呈现电容放电的变化过程。

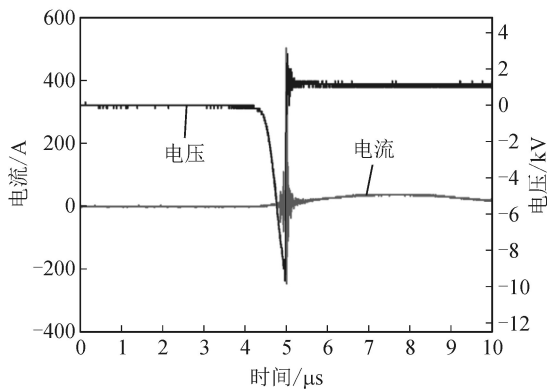
在加入提供等离子体电流的储能电路后, 点火器输出电压与电流变化见图 17。

加入提供等离子体电流的储能电路后, 击穿电极之间空气的瞬时电压被抬升至 10 kV 左右, 击穿间隙的瞬时电流可达 600 A。通过图 16、17 对比可以看出, 加入储能电路的等离子体点火电源装置电

极之间击穿空气间隙的电压得到明显增加,产生的瞬时电流更大,提供点火的火花有效能量增加,有效地提高点火可靠的稳定性。点火效果图见图18。



(a) 振荡放电过程



(b) 等离子点火瞬间特性变化

图17 等离子体点火电路输出电流和电压变化

Fig. 17 Plasma ignition circuit output current and voltage changes



图18 点火图片

Fig. 18 Ignition picture

### 3 结语

文中设计的逆变式等离子体点火系统电源系统包括逆变升压模块和点火模块。实验中获得逆变升压电路输出最大电压800 V,振荡周期约为0.2 ms。通过实验获得等离子体点火电源输出电压大于10 kV,输出电流最大值约500 A,放电时间约52.89 ms。

使用自激式开关电源作为逆变升压电路,能够

实现简化电路的作用,减少了控制电路,能够有效减轻等离子体点火电源的重量。

通过仿真分析逆变升压电路的漏感对变压器输出的影响及储能电容对点火线圈初级电流的影响,实现逆变升压电路与点火电路的关键参数匹配。逆变升压电路的变压器漏感能够增大变换器的传递能量,但漏感过大对电路的电磁兼容性要求更高,通过仿真确定变压器漏感在0.3 mH;根据实际电路的工作过程,确定点火电路的电容为4.7 μF,形成等离子体电流的储能电容选取10 μF。

搭建原理样机进行实验,验证了逆变式等离子体点火电源方案设计的有效性。

### 参考文献:

- [1] 李奕新,谭航,杨水银. 航空发动机点火系统现状与发展趋势[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2015, 28(6): 49-54.  
LI Yixin, TAN Hang, YANG Shuiyin. An initial study on the current development and derivatives of the electric ignition system of aero-engine[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2015, 28(6): 49-54.
- [2] 金如山,索建秦. 先进燃气轮机燃烧室[M]. 北京:航空工业出版社, 2016: 256-257.  
JIN Rushan, SUO Jianqin. Advanced gas turbine combustor [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2016: 256-257.
- [3] 于锦禄,何立明,丁未,等. 丝电弧等离子体强化超声速点火和燃烧[J]. 燃烧科学与技术, 2015, 21(6): 511-515.  
YU Jinlu, HE Liming, DING Wei, et al. Thread arc plasma assisted supersonic ignition and combustion[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2015, 21(6): 511-515.
- [4] 靳宝林,郑永成. 航空发动机等离子流点火技术探讨[J]. 航空发动机, 2002(4): 51-55.  
JIN Baolin, ZHENG Yongcheng. Investigation of plasma jet ignition in aircraft engine[J]. Aeroengine, 2002(4): 51-55.
- [5] 杜宏亮,何立明,兰宇丹,等. 非平衡等离子体对CH<sub>4</sub>/空气混合物燃烧的影响[J]. 空军工程大学学报, 2011, 12(3): 11-14.  
DU Hongliang, HE Liming, LAN Yudan, et al. Influence of non-thermal equilibrium plasma on combustion characteristics of methane/air[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2011, 12(3): 11-14.
- [6] 王峰,何立明,曹闹昌,等. 直流电源驱动的等离子体点火器的点火特性[J]. 高电压技术, 2010, 36(10): 2537-2541.  
WANG Feng, HE Liming, CAO Naochang, et al. Ignition characteristic of direct current source plasma ignitor[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10): 2537-2541.
- [7] 万磊,郝瑞祥,游小杰,等. 新型等离子体点火电源的设

- 计[J]. 电工电能新技术, 2009, 28(4): 71-75.  
WAN Lei, HAO Ruixiang, YOU Xiaojie, et al. Design of new plasma ignition power supply[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2009, 28(4): 71-75.
- [8] 董克亮, 孙岩洲, 刘绪光. 微间距气体放电的实验研究与分析[J]. 高压电器, 2019, 55(5): 29-34.  
DONG Keliang, SUN Yanzhou, LIU Xuguang. Experimental study and analysis of gas discharge with micro-gap[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(5): 29-34.
- [9] 边靖洲, 车延博, 冯宝国. 一种航空发动机稳频高能点火器[J]. 应用科技, 2015, 42(5): 14-18.  
BIAN Jingzhou, CHE Yanbo, FENG Baoguo. A steady - frequency high-energy aero engine ignition unit[J]. Applied Science and Technology, 2015, 42(5): 14-18.
- [10] 周乾宇, 童立青, 刘克富. 大功率高压脉冲电流源研究[J]. 高压电器, 2017, 53(4): 60-64.  
ZHOU Qianyu, TONG Liqing, LIU Kefu. Research of high-power high-voltage pulsed current source[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(4): 60-64.
- [11] 李刚, 姚远, 姚斯立, 等. 等离子点火技术在高压合成试验中的应用[J]. 高压电器, 2018, 54(4): 195-200.  
LI Gang, YAO Yuan, YAO Sili, et al. Application of plasma ignition technology in high voltage synthetic tests[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(4): 195-200.
- [12] TROPINA A A, KUZMENKO A P, MARASOV S V, et al. Ignition system based on the nanosecond pulsed discharge[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(12): 3881-3885.
- [13] TROPINA A A, LENARDUZZI L, MARASOV S V, et al. Comparative analysis of engine ignition systems[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2009, 37(12) 2286-2292.
- [14] HWANG J, KIM W, BAE C, et al. Application of a novel microwave - assisted plasma ignition system in a direct injection gasoline engine[J]. Applied Energy, 2017, 205(1): 562-576.
- [15] MEROLA S S, MARCHITTO L, TORNATORE C, et al. Optical characterization of combustion processes in a DISI engine equipped with plasma - assisted ignition system[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 69(1/2): 177-187.
- [16] 张彦斌, 岳永刚, 张晓萌, 等. 用于激励固体绝缘缺陷的SOS型高压重频纳秒脉冲电源的研制[J]. 高压电器, 2018, 54(11): 165-169.  
ZHANG Yanbin, YUE Yonggang, ZHANG Xiaomeng, et al. Development of SOS - type high - voltage repetitive nanosecond pulse power supply for excitation of solid insulation defect[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(11): 165-169.
- [17] 何映江, 余亮, 马剑豪, 等. 一种升压模式的可调极性高频 Blumlein 脉冲形成线功率调制模块[J]. 电工技术学报, 2021, 36(2): 425-434.  
HE Yingjiang, YU Liang, MA Jianhao, et al. An adjustable polarity high frequency Blumlein pulse forming line power modulation module with boost mode[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(2): 425-434.
- [18] 张铜庆. 实用开关电源技术(连载一)[J]. 电源技术应用, 2007(8): 57-63.  
ZHANG Tongqing. Practical switching power supply technology (serial No. 1)[J]. Power Supply Technology Application, 2007(8): 57-63.
- [19] 唐泉, 童亦斌, 丁庆, 等. 低压直流系统用 LLC 谐振直流变换器参数优化设计方法[J]. 高压电器, 2019, 55(9): 42-49.  
TANG Quan, TONG Yibin, DING Qing, et al. Parameters optimum design method of LLC resonant DC converter for low voltage DC system[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(9): 42-49.
- [20] 马婷, 叶军, 秦海鸿, 等. RCC 电路在航空变压整流直流电源中的应用研究[J]. 电源学报, 2012(6): 27-31.  
MA Ting, YE Jun, QIN Haihong, et al. Application of RCC circuit in the aerospace transformer rectifier DC power systems[J]. Journal of Power Supply, 2012(6): 27-31.
- [21] 岳舟, 刘小荻, 姚绍华, 等. 一种基于开关电容的单电源升压型六电平逆变器[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 119-130.  
YUE Zhou, LIU Xiaodi, YAO Shaohua, et al. A single supply boost six - level inverter based on a switched - capacitor[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 119-130.
- [22] 孙连华, 孙鹁鸿, 严萍, 等. 重复推进系统中脉冲功率源研制及应用[J]. 电工电能新技术, 2010, 29(4): 76-80.  
SUN Lianhua, SUN Yaohong, YAN Ping, et al. Development and applications of pulsed power supply in multi-shot electromagnetic launch[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2010, 29(4): 76-80.
- [23] 张占松, 蔡宣三. 开关电源的原理与设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.  
ZHANG Zhansong, CAI Xuansan. Principle and design of switching power supply[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.
- [24] 王新宝, 葛景, 韩连山, 等. 构网型储能支撑新型电力系统建设的思考与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 172-179.  
WANG Xinbao, GE Jing, HAN Lianshan, et al. Theory and practice of grid-forming BESS supporting the construction of a new type of power system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 172-179.
- [25] 朱博峰, 鲁军勇, 张晓, 等. 大容量脉冲电容器放电起始阶段晶闸管电压高频振荡机理研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(6): 1272-1278.  
ZHU Bofeng, LU Junyong, ZHANG Xiao, et al. Study on the

- high frequency voltage oscillation of thyristor during the initial stage of pulse capacitor discharge[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(6):1272-1278.
- [26] 陈鹤冲, 袁佳歆, 许顺凯, 等. 一种快速储能式直流限流器拓扑的电气参数分析[J]. 电工技术学报, 2021, 36(14): 3043-3054.
- CHEN Hechong, YUAN Jiixin, XU Shunkai, et al. Electrical parameter analysis of a fast energy storage DC current limiter topology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(14):3043-3054.
- [27] 刘沅昆, 张维静, 张 艳, 等. 面向新型电力系统的新能源与储能联合规划方法[J]. 智慧电力, 2022, 50(10): 1-8.
- LIU Yuankun, ZHANG Weijing, ZHANG Yan, et al. Joint planning method of renewable energy and energy storage for new-type power system[J]. Smart Power, 2022, 50(10): 1-8.
- [28] 杨 帆, 张 章, 徐 晶, 等. 面向可靠性提升的配电网分布式储能规划[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(1): 188-196.
- YANG Fan, ZHANG Zhang, XU Jing, et al. Distributed energy storage planning of distribution network for reliability improvement[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(1): 188-196.
- [29] 付文杰, 杨 鹏, 谢海鹏, 等. 电力市场环境下分布式电源与储能协同规划[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(6): 101-112.
- FU Wenjie, YANG Peng, XIE Haipeng, et al. Collaborative planning of distributed generation and energy storage systems under power market environment[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(6): 101-112.
- [30] 李建林, 郭兆东, 曾 伟, 等. 面向调频的锂电池储能建模及仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13):33-42.
- LI Jianlin, GUO Zhaodong, ZENG Wei, et al. Modeling and simulation analysis of lithium battery energy storage oriented to frequency modulation[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 33-42.
- [31] 张云明, 刘庆明, 宇 灿, 等. 大能量电点火系统设计与火花放电特性实验研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(4): 1267-1274.
- ZHANG Yunming, LIU Qingming, YU Can, et al. Design of a big energy electric ignition system and experimental study on its spark discharge characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(4): 1267-1274.

俞鸿鹏(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事等离子体点火、脉冲电源方面的研究工作(E-mail: yhongpeng@hrbeu.edu.cn)。