

等离子体气动激励系统电特性的实验研究

苏长兵, 李应红, 安治永, 宋慧敏, 武卫

(空军工程大学工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要: 为了研究大尺度等离子体激励器和调整电源电感、电容的情况, 笔者对等离子体气动激励系统的电特性进行了实验研究, 得出等离子体气动激励系统的电感和电容是影响电特性的关键因素。实验结果表明, 一定的电源输入电压下, 减小电源电感或串联电容分压器, 等离子体气动激励系统的谐振频率、电源输入电流和放电电流增大, 等离子体气动激励器的放电电压基本保持不变; 随着电源频率的增大, 等离子体气动激励系统放电有 3 个典型的方式, 电源频率小于谐振频率时, 放电电流波形有突变; 随着电源频率增大, 激励系统的感性不断增大, 放电电流增大, 电流突变消失; 电源频率大于谐振频率后, 电容将电压的高次谐波滤掉, 放电电流减小。

关键词: 大气压等离子体; 等离子体气动激励系统; 电特性; 实验

中图分类号: TM83;O53

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)01-0068-04

Experimental Investigation on Electric Characteristics of Plasma Aerodynamic Actuation System

SU Chang-bing, LI Ying-hong, AN Zhi-yong, SONG Hui-min, WU Wei

(Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Experimental investigation of the electric characteristics of plasma aerodynamic actuation system is conducted. The inductance and capacitance of plasma aerodynamic actuation system are key factors which affect the electric characteristics plasma aerodynamic actuation system. When inductance of a power supply is decreased or a capacitance is connected in series to the power supply under a certain input voltage, the resonance frequency of plasma aerodynamic actuation system, input current of power supply and discharge current increase, while the discharge voltage of plasma aerodynamic actuator remains stable. With frequency ascending under a certain input voltage of power supply, there exist three typical discharge ways in the plasma aerodynamic actuation system: when frequency of power supply is less than the resonance frequency of the actuation system, there is a break in the discharge current waveform; when the frequency increases, the actuation system's inductance and discharge current arise continually without a discharge current break; when the power supply frequency is higher than the resonance frequency of the actuation system, the capacitance filters higher-order voltage wave to reduce the discharge current.

Key words: atmospheric plasma; plasma aerodynamic actuation system; electric characteristic; experiment

0 引言

等离子体流动控制是基于等离子体气动激励的新概念主动流动控制技术, 是利用等离子体改善空气动力特性的主要手段之一^[1-4]。等离子体气动激励产生和控制的基本规律是等离子体流动控制的重要研究内容。

目前国外对等离子体气动激励进行了大量的仿真和实验研究, 文[5, 6]建立了等离子体气动激励器的电路模型, 仿真结果和实验数据吻合较好; 文

[7, 8]研究了等离子体气动激励器放电产生的等离子体特性, 以及频率等对等离子体气动激励的影响。国内对等离子体气动激励的研究尚处于起步阶段, 主要是空军工程大学宋慧敏等对等离子体气动激励器的电特性进行了仿真研究^[9], 以及激励参数对等离子体 EHD 加速效果影响的实验研究^[10]。

已有的研究都是针对等离子体气动激励系统中的气动激励器进行仿真和实验, 没有涉及大尺度等离子体激励器和调整电源电感、电容的情况, 而笔者立足于等离子体气动激励系统的这一整体, 研究接通大尺度等离子体气动激励器时, 等离子体电源电感调整前后、串联电容分压器前后, 以及不同频率阶

收稿日期: 2008-03-05; 修回日期: 2008-09-13

作者简介: 苏长兵(1981-), 男, 安徽省蚌埠市人, 博士研究生, 研究方向为航空发动机稳定性与等离子体动力学。

段等离子体气动激励系统的电特性。笔者的研究以大尺度等离子体气动激励器为对象,为等离子体气动激励进行流动控制的工程应用提供了依据。

1 实验装置

1.1 高压高频等离子体电源

研制了一套输出电压 $0\sim 40\text{ kV}$ 连续可调、频率 $6\sim 30\text{ kHz}$ 连续可调的高压高频等离子体电源,输出电压波形为正弦波,设计谐振频率为 15 kHz 。电源升压部分是一个D类功率放大器,功率器件采用IGBT。

1.2 等离子体气动激励器

采用不对称布局等离子体气动激励器,见图1。实验采用的等离子体气动激励器绝缘材料为聚四氟乙烯,厚 $h=0.5\text{ mm}$,电极为铜箔,宽 $d=2\text{ mm}$,上下表面电极间距 $\Delta d=1\text{ mm}$,相邻电极组间距 $D=13\text{ mm}$,电极长 750 mm 。

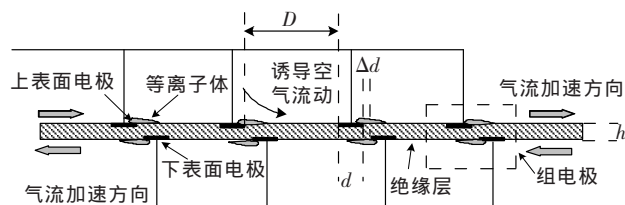


图1 不对称布局等离子体气动激励器示意图

1.3 测试系统

采用电压和电流表测量等离子体电源的输入电压和输入电流,采用TDS3012B型示波器和P6015高压探针和P6022电流探针测量等离子体气动激励器的放电电压、放电电流和放电频率(即激励系统的频率)。等离子体电源输出电压测量的示意图见图2。电压调节和频率调节可以控制整个激励系统的放电电压和放电频率,高压探针按 $1000:1$ 的比例将放电电压输出到示波器上。

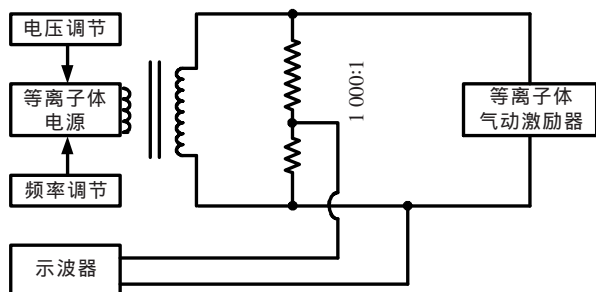


图2 等离子体电源输出电压、输出电流测量的示意图

2 实验结果

2.1 等离子体气动激励系统的基准电特性

高压高频电源的频率是激励系统谐振特性研究中可以调整的输入参数,激励系统的频率与高压高

频电源的频率一致,谐振频率是同一个输入电压下进行频率调节、使输出电压最大的对应频率。

接通等离子体气动激励器的全部五组电极,输入电压为 $140\sim 190\text{ V}$ 时,等离子体电源的输入电压、等离子体气动激励器的放电电压和频率之间的相互关系见图3。在输入电压为 140 V 时,电源的输出电压随着频率的增大而减小,由 6 kHz 对应的 10 kV 降到 11 kHz 对应的 5 kV 。可见,等离子体气动激励系统的谐振频率小于 6 kHz ,远远偏离设计谐振频率 15 kHz 。

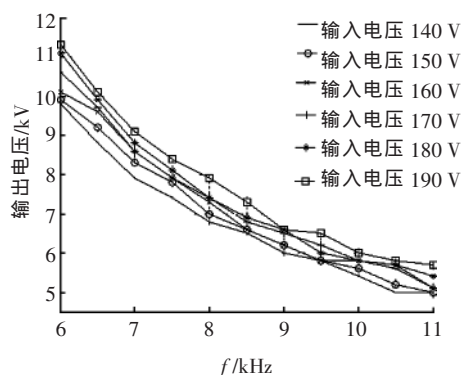


图3 等离子体气动激励系统的电特性(基准)

2.2 减小电源电感后激励系统的电特性

将等离子体电源的电感减小为原来的 $1/4$,等离子体电源的输入电压、等离子体气动激励器的放电电压和频率之间的相互关系见图4。与基准情况相比,激励系统的谐振频率增大,输入电压为 $50, 75, 100, 120, 150\text{ V}$ 时,谐振频率分别为 $13, 12, 10, 9, 8\text{ kHz}$ 。随着输入电压的增大,谐振频率减小,输出电压随频率的变化率增大。

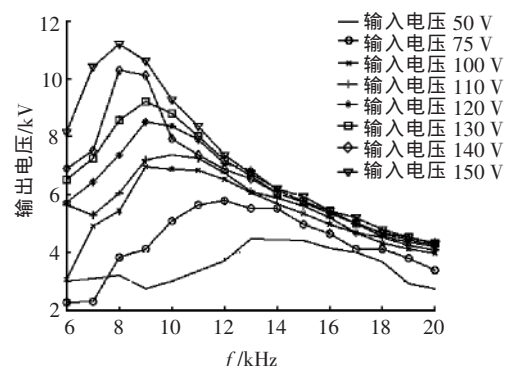
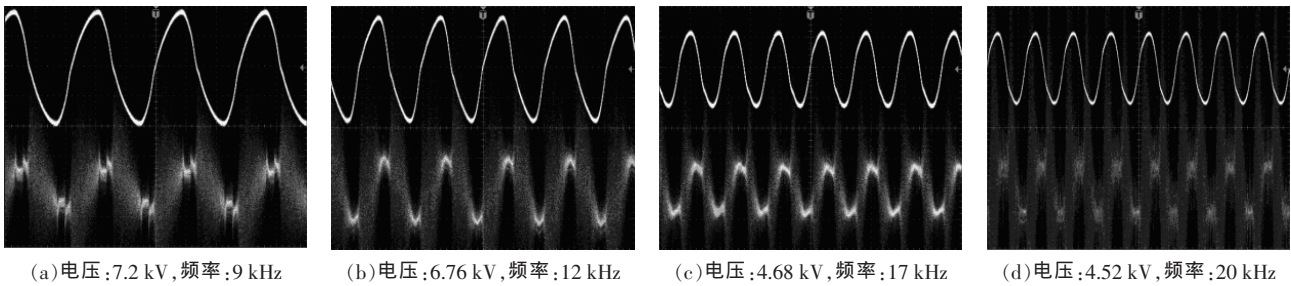


图4 等离子体气动激励系统的电特性(减小电感)

随着频率的增大,等离子体气动激励系统放电有3个典型的方式。输入电压为 110 V 时,等离子体气动激励系统的放电电压-电流波形见图5。频率为 9 kHz 时,放电电压是幅值为 7.2 kV 的非标准正弦波,放电电流波形的峰值附近存在明显的突变,此时激励系统的输入电流为 1.14 A ;频率为 12 kHz 时,放电电压是幅值为 6.76 kV 的非标准正弦波,放电电流波形峰值附近的突变消失,放电强度显著增大,

此时激励系统的输入电流为 1.32 A，激励系统消耗的功率显著增大；频率为 17 kHz 时，放电电压是幅值为 4.68 kV 的正弦波，放电强度显著减小，此时激

励系统的输入电流为 0.53 A；频率为 20 kHz 时，放电电压是幅值为 4.52 kV 的正弦波，放电强度进一步减小，此时激励系统的输入电流为 0.35 A。



(a)电压:7.2 kV, 频率:9 kHz (b)电压:6.76 kV, 频率:12 kHz (c)电压:4.68 kV, 频率:17 kHz (d)电压:4.52 kV, 频率:20 kHz

图5 不同频率时等离子体气动激励系统的放电电压、电流波形

2.3 串联电容分压器后激励系统的电特性

在减小等离子体电源电感的基础上，在电源和等离子体气动激励器之间串联一个电容分压器（由 6 个 3 900 pF 的电容串联组成），等离子体电源的输入电压、等离子体气动激励器的放电电压和频率之间的相互关系见图 6。与只减小电源电感相比，激励系统的谐振频率增大，输入电压为 50、75、100、120、140 V 时，谐振频率分别为 17、16、14.5、14.5、14 kHz，与设计谐振频率 15 kHz 较为接近。

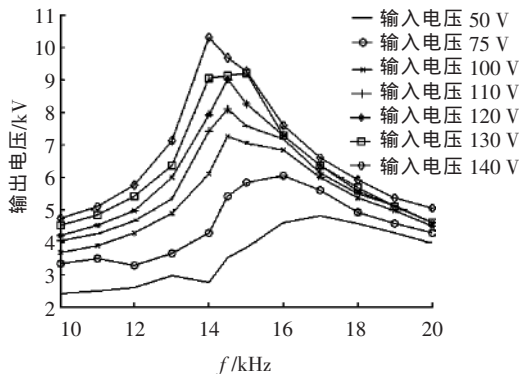


图6 等离子体气动激励系统的电特性(串联电容)

基准情况、减小电源电感、减小电源电感并串联电容这三个状态下，输入电压为 140 V 时，等离子体气动激励器的放电电压与频率、激励系统的输入电流与频率之间的关系见图 7、8。

减小等离子体电源的电感后，等离子体气动激励系统的谐振频率从 6 kHz 增大为 8 kHz，等离子体气动激励器的最大放电电压从基准状态下的 9.8 kV

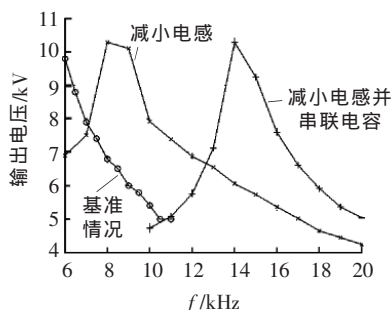


图7 3种典型情况下激励器放电电压和频率的关系

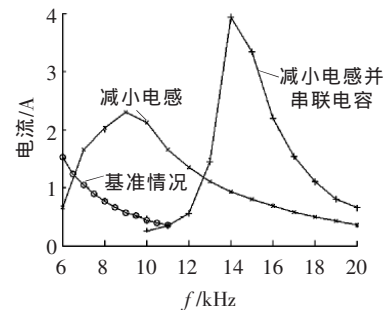


图8 3种典型情况下激励系统输入电流和频率的关系

变为 10.3 kV，激励系统的输入电流从 1.53 A 增大为 2.3 A；减小电源电感并串联电容分压器后，谐振频率增大为 14 kHz，等离子体气动激励器的最大放电电压仍为 10.3 kV，激励系统的输入电流增大为 4.12 A。可以看出，等离子体气动激励器的最大放电电压基本保持不变，而等离子体气动激励系统的输入电流则增加较大，表明激励系统消耗的功率显著增大。

3 讨论

实验用的高压高频等离子体电源输出端为高频变压器，该变压器不是理想变压器，其等效电路见图 9。

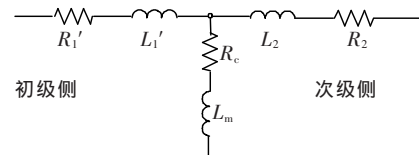


图9 电源变压器的等效电路

图 9 中， R_1' 是原边绕组的电阻换算到副边， L_1' 是原边绕组的漏电感换算到副边， R_2 是副边绕组的电阻， L_2 是副边绕组的漏电感， L_m 是变压器的励磁电感， R_c 是铁损的等值电阻。由于励磁电感 L_m 的阻抗比等离子体气动激励系统中的其它元件要大得多，因此可以忽略 L_m 支路。实验用的等离子体气动激励器可以简化为电阻与电容的并联。图 10 是将非理想变压器用其简化等效电路替代后，等离子体气动激励系统的等效电路图。

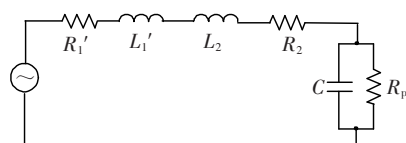


图10 等离子体气动激励系统的等效电路

等离子体气动激励系统的谐振频率为

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_S C_S}} \quad (1)$$

式(1)中, L_S 为激励系统的总电感, C_S 为激励系统的总电容。

由图10和式(1)可知,减小等离子体电源的电感($L_1'+L_2$),或者在电源与激励器之间串联电容分压器 C_F ,均可增大等离子体气动激励系统的谐振频率 f 。

等离子体气动激励未产生时, R_p 为 ∞ , 此时可以简化为

$$Z = R_1' + R_2 + j\omega(L_1' + L_2) + \frac{1}{j\omega C}$$

减小等离子体电源的电感($L_1'+L_2$)后,总阻抗减小,系统的容性增大,因此,等离子体气动激励器的放电强度增大,激励系统的输入电流增大。由于气体放电是负阻性的,在等离子体气动激励器的绝缘介质材料、电极材料和布局确定的情况下,一旦放电状态确定,激励器的放电电压基本保持不变。

串联电容分压器 C_F 后,

$$Z = R_1' + R_2 + j\omega(L_1' + L_2) + \frac{1}{j\omega C} + \frac{1}{j\omega C_F}$$

减小等离子体电源的电感($L_1'+L_2$)后,总阻抗减小,系统的容性增大,因此,等离子体气动激励器的放电强度增大,激励系统的输入电流增大。由于气体放电是负阻性的,在等离子体气动激励器的绝缘介质材料、电极材料和布局确定的情况下,一旦放电状态确定,激励器的放电电压基本保持不变。串联电容分压器 C_F 后, $Z = R_1' + R_2 + j\omega(L_1' + L_2) + \frac{1}{j\omega C} + \frac{1}{j\omega C_F}$ 。

等离子体气动激励系统的容性减小,等离子体电源输出的电压增大,激励系统的输入电流增大。由于激励器的放电状态已经确定,放电电压基本不变,其余的电压加在电容分压器 C_F 上。

等离子体电源的频率小于谐振频率时,负载呈容性;大于谐振频率时,负载呈感性。由于电压不能突变,电流可以突变,所以小于谐振频率时,放电电流波形会出现突变;增大电源频率后,感性增大,放电电流波形突变消失,放电强度增强,激励系统的输入电流增大;进一步增大电源频率,电容将电压的高次谐波滤掉,所以放电电流显著减小,激励系统的输入电流也相应减小。

没有串联电容分压器时,由于输入电压的变化

导致放电状态变化很大,等离子体气动激励器的电容变化很大,导致激励系统的谐振频率随着输入电压的增大而下降幅度很大;串联电容分压器后,激励系统的电容限制在较小的变化范围内,因此,激励系统的谐振频率随输入电压增大而下降的幅度减小。

4 结论

(1)减小等离子体电源的电感,或在回路中串联电容分压器,由于等离子体气动激励系统的容性增大,系统的谐振频率、放电电流和输入电流增大,等离子体气动激励器两端的电压基本不变。

(2)等离子体电源频率小于激励系统的谐振频率时,放电电流波形有突变;增大电源频率,激励系统的感性增大,放电电流增大,电流突变消失;电源频率大于谐振频率时,增大电源频率,电容将电压的高次谐波滤掉,放电电流减小。

参考文献:

- [1] ROY S, GAITONDE D V. Radio Frequency Induced Ionized Collisional Flow Model for Application at Atmospheric Pressures [J]. Journal of Applied Physics, 2004, 96(5): 2476-2481.
- [2] BOUEF J P, PITCHFORD L C. Electrohydrodynamic Force and Aerodynamic Flow Acceleration in Surface Dielectric Barrier Discharge [J]. Journal of Applied Physics, 2005: 10(3): 307.
- [3] WU Yun, SONG Hui-min, LI Ying-hong, et al. Experimental Investigation of Plasma Assisted Flow Control on NACA 0015 Airfoil [C]// XVI International Conference on Gas Discharges and Their Applications, Xi'an, 2006: 833-836.
- [4] 苏长兵, 宋慧敏, 李应红, 等. 基于等离子体激励的圆柱绕流控制实验研究[J]. 实验流体力学, 2006, 20(4): 45-48.
- [5] ORLOV D M, CORKE T C. Numerical Simulation of Aerodynamic Plasma Actuator Effects, AIAA 2005-1083 [R]. Reno: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005.
- [6] ORLOV D M, CORKE T C, PATEL M P. Electric Circuit Model for Aerodynamic Plasma Actuator, AIAA 2006-1206 [R]. Reno: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [7] ENLOE C, MCLAUGHLIN T, VANDYKEN, et al. Plasma Structure in the Aerodynamic Plasma Actuator, AIAA 2004-0844 [R]. Reno: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.
- [8] ENLOE C, MCLAUGHLIN T, FONT G, et al. Frequency Effects on the Efficiency of the Aerodynamic Plasma Actuator AIAA 2006-0166 [R]. Reno: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [9] 宋慧敏, 李应红, 魏洋亭等. 等离子体流体动力激励器的 PSpice 仿真[J]. 高压电学, 2006, 32(3): 72-74.
- [10] 宋慧敏, 李应红, 苏长兵, 等. 激励参数对等离子体 EHD 加速效果影响的实验研究 [J]. 高压电学, 2006, 42(6): 435-437, 441.