

等离子体合成射流的能效特性实验研究

雷鸣^{1,2,3} 刘汝兵¹ 郝明¹ 林麒¹ 王晓光¹ 刘亚辉^{2,3}

(厦门大学航空航天学院,福建省等离子体与核磁共振重点实验室¹,厦门 361005;

中国飞行试验研究院²;飞行仿真航空科技重点实验室³,西安 710089)

摘要 针对两电极火花放电等离子体合成射流发生器,提出以发生器出口射流动能与所耗电能之比的无量纲参数——能效因子 η ,用以表征合成射流发生器的能效特性;分别采用皮托管测量射流出口流速,采用功率计测量合成射流发生器耗用的电能。经过实验考察加载电参数、电极间距对射流发生器功率与射流速度的影响,从而得出能效因子 η 的变化规律。研究成果可为火花放电等离子体合成射流的应用提供参考。

关键词 火花放电 等离子体 合成射流 能效分析 实验研究

中图分类号 TM835.4; **文献标志码** B

等离子体射流作为主动流动控制方法,具有响应迅速,无机械部件,工作频带宽等特点^[1]。目前主要的用于流动控制的等离子体发生器包括介质阻挡放电(DBD)等离子体发生器、直流/准直流电弧放电等离子体发生器和等离子体合成射流发生器等^[2-5]。等离子体合成射流运用于流动控制是一种新的基于等离子体气动激励的主动流动控制技术,这种射流发生器无需其他气源、附加增压等措施即可通过放电产生等离子体获得速度较高的射流^[6]。

等离子体合成射流发生器由一个带有出气孔或缝的绝缘腔体和一对电极组成,在腔内进行的放电过程产生等离子体并释放大量热量,使腔内气体温度和压力急剧升高,急速膨胀,从出气孔高速喷出,从而形成等离子体射流^[7]。

飞机所能提供的能源和载重能力有限,若要将等离子体发生器应用于飞机,提高发生器的能效至关重要。因此,不仅需要研究它的性能,还必须对它进行能效分析。目前国外对于等离子体发生器消耗功率的研究主要集中在数值模拟方面^[8]。国内对于等离子体发生器的能效研究主要集中在速度和功率方面^[9],鲜见能量转化方面的相关研究。

本文以典型的两电极火花放电等离子体合成射流发生器作为研究对象,引入无量纲参数能效因子作为发生器的能效衡量指标,通过实验测量等离子体合成射流速度与相应的电能消耗研究其能效特性。

1 实验系统

实验系统见图1,包括自行研制的高压脉冲电源子系统、等离子体合成射流发生器、皮托管和功率表。实验时通过改变电源输入端频率和占空比来改变火花放电等离子体合成射流的工作状态,采用皮托管测速计测量射流出口平均速度 v ,在电路中接入功率计测量发生器的功耗 P ;从而分析电参数对发生器能效的影响。

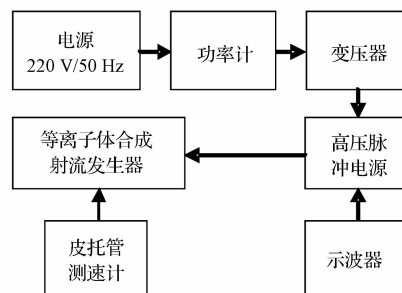


图1 实验系统

Fig. 1 The experimental power supply system

1.1 火花放电电源子系统

在图1中,火花放电等离子体合成射流实验系统中的电源子系统包括AC/AC调压器、高压脉冲电源、功率计。AC/AC调压器对高压脉冲信号幅值进行调节。示波器(型号为泰克DPO2012)用于监测等离子体激励电源的频率和占空比;功率计用于检测放电回路的耗能功率 P 。高压脉冲电源电压调节范围为0~50 kV,频率调节范围为50 Hz~5 kHz,占空比调节范围为5%~50%。

1.2 等离子体射流发生器

图2为研究对象——火花放电等离子体合成射

流发生器^[10]。发生器的腔体为外径 8 mm,壁厚 1 mm,长度 35 mm 的玻璃管,两端插入接高压脉冲电源的放电电极。腔体的射流出口接有一加速射流速度的收缩喷嘴。喷嘴长 36 mm,射流出口口径 1 mm。

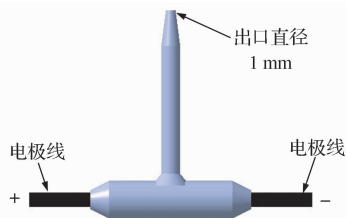


图2 等离子体射流发生器
Fig. 2 Plasma jet generator

进行实验时,电源对射流发生器加载的电压增加到一定数值,电极间的空气被击穿,阴阳两电极之间在玻璃管腔内产生电火花放电,腔内气体受热膨胀向外挤出,经过收缩段加速,在出口处形成高速射流。采用皮托管测速计可测得射流出口的平均压强,据此可计算出射流的速度 v 。

1.3 能耗测量方法

在实验研究中将功率计串联进实验电路中测量等离子体射流发生器的耗电量(见图1)。实验采用型号 UNT230C 的功率计。其额定工作电压为 220 V/50 Hz,额定电流为 10 A,最大量程为 2 200 W;可测量范围的电压为 180 ~ 260 V,电流为 0 ~ 10 A,功率测量范围为 0.1 ~ 2 200 W。

1.4 能效因子

研究等离子体射流发生器的能效,只考虑功耗是不全面的,需要考虑在一定的能耗下从火花放电获得的射流能量。为此,本文引入一个概念能效因子 η ,定义为射流出口的气体动能与电路电能的消耗之比。

对于流动的气体,不考虑密度变化,由伯努利方程有,气体动压为

$$p = \frac{1}{2}\rho v^2 \quad (1)$$

这时气体的动能为

$$E_k = \frac{1}{2}\rho v^2 t \quad (2)$$

而电路消耗的电能是 $E = Pt$ 。由此可以得到能效因子 η 为

$$\eta \frac{E_k}{E} = \frac{\rho v^2}{2P} = \frac{p}{P} \quad (3)$$

2 实验结果与分析

2.1 电参数改变对能效的影响

实验过程中控制加载电压 20 kV 不变,调节电

源频率和占空比,可获得不同的射流速度。占空比调节在 10% ~ 20% 之间,频率变化范围为 50 ~ 350 Hz。图3给出功耗随频率和占空比改变的云图。由图3可以看出,功率是受加载电压的频率和占空比共同影响的。

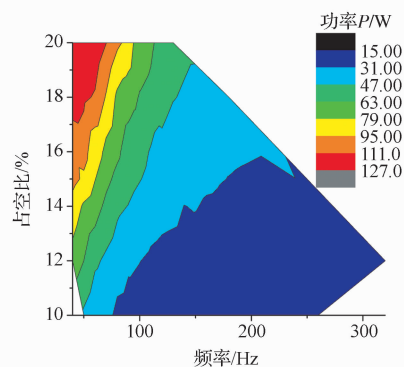


图3 加载电压的频率与占空比对功耗的影响
Fig. 3 The impact of frequency and duty ratio change on power

图3表明,加载电压频率不变,占空比小的时候,功率也低,即射流发生器所耗电量少。这是因为,在每个脉冲里,通电的时间短,火花放电的时间也短,功率自然降下来了。而即使加载频率低,若占空比增大,所耗功率也会随之增大。如图3所示,电压频率较低时,图中左上区域占空比很高,达到 20 左右,射流发生器消耗功率也较高,最高达到 126.5 W。

图3的右下区域,功率值都较低,这时的占空比都较低,最低功率值才 15.6 W。

由对图3的分析可知,等离子体合成射流发生器,功率消耗很大程度取决于占空比,加载电压的频率对耗能的影响作用较小。

在保持加载电源电压不变的情况下,调节频率和占空比,可得到不同的射流出口速度。图4是对应加载电压频率和占空比变化的火花放电等离子体射流出口速度云图。

从图4中可以看出,占空比较小时 (< 13%) 提高加载频率或加载频率较低时 (< 80 Hz) 加大占空比都不能获得较高的射流速度,加载频率在 100 ~ 200 Hz 之间,加大占空比,将其控制在 13% 以上,可使射流速度达到最高;射流峰值速度可达 44 ~ 50 m/s。

根据实验得到的发生器射流速度与所耗功率,利用公式(1)可计算得到能效因子 η 的分布云图(见图5)。可以看出能效因子存在双峰区,一个是占空比在 13% ~ 15%,频率 150 ~ 190 Hz 之间,一个是占空比 15% ~ 18%,频率 160 ~ 190 Hz,其中能效

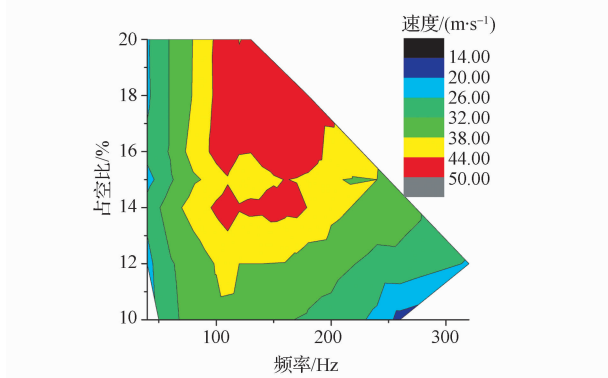


图 4 频率占空比对射流速度的影响
Fig. 4 The impact of frequency and duty ratio change on jet velocity

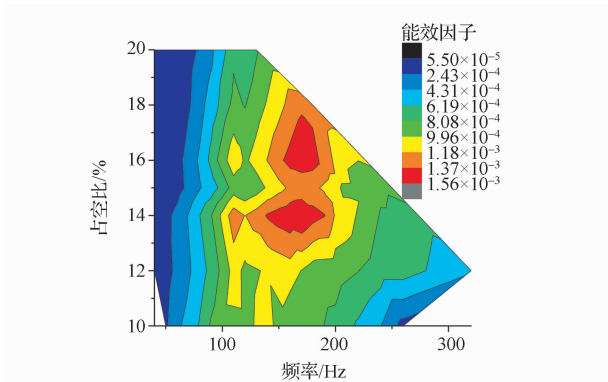


图 5 频率占空比对能效因子的影响
Fig. 5 The impact of frequency and duty ratio change on energy factor

因子峰值范围在 0.137% ~ 0.156%。

2.2 电极间距对能效的影响

实验研究中发现,除了电参数对能效影响很大,电极间距也是影响能效的重要因素。于是参考上述研究结果,在实验中选择能效较高的加载频率 140 Hz,占空比 14% 的电参数进行实验,改变电极间距,考察电极间距对能效等参数的影响,得到电极间距与射流速度,功耗,能效因子的关系如下所述。

从图 6 可以看出,随着电极间距的增大,射流速度逐渐增大,放电逐渐剧烈,声音响度提高,由不连续电弧逐渐变为连续稳定电弧。当电极间距从 5 mm 增加到 7 mm 时,射流速度虽增加较快,但速度不高。电极间距在 7 ~ 10 mm 之间时,射流速度稳步上升,但放慢脚步。当电极间距 > 10 mm 之后,随着电极间距再拉大,射流速度又快速提升,达到 55 m/s 左右。

从图 7 可以看出,电极间距较小时(小于 8 mm),耗能很大,在 100 W 以上。随着电极间距增大,发生器的功率逐渐下降,当电极间距达到 12 mm 以后,所耗功率稳定在 40 W 上下,电极间距对功率

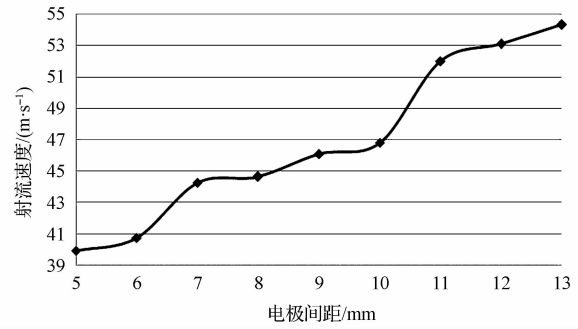


图 6 电极间距对射流速度的影响

Fig. 6 The impact of electrode spacing change on jet velocity

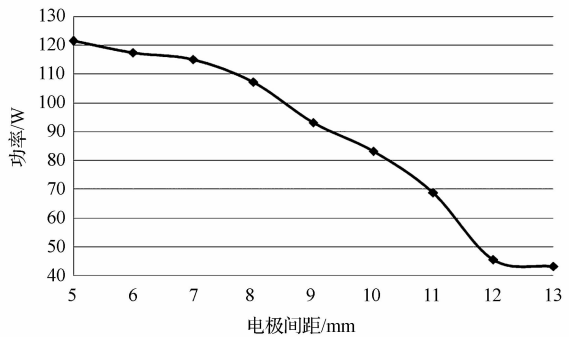


图 7 电极间距对功耗的影响

Fig. 7 The impact of electrode spacing change on power

影响不大。

图 8 给出了能效因子 η 与电极间距之间的关系。从图可以看出随着电极间距的增加使得能效因子 η 逐步提升,但当电极间距 < 10 mm 时, η 值较小,说明这时射流发生器的能效不高;电极间距 > 10 mm 后, η 快速上升,表明发生器的能效特性趋向变好。

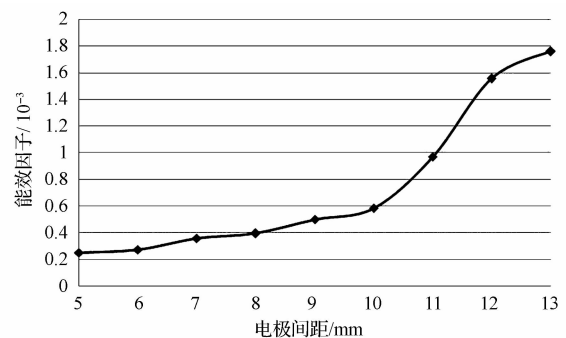


图 8 电极间距对能效因子的影响

Fig. 8 The impact of electrode spacing change on energy factor

下面结合图 6 ~ 图 8 进行分析。当电极间距小于 10 mm 时能效很低。由图 6 知,此时的射流速度不高,而图 7 显示此时发生器的功率较高,显然发生器处于高耗能、低收益阶段,故不做讨论。电极间距

为10~12 mm时,射流速度大幅增加,所耗电能下降明显,因此能效提高效果较好。电极间距大于12 mm后,功率维持低水平不变,而射流速度仍有提升,因此能效因子 η 不断增大,逐步达到最高值 1.8×10^{-3} 的最高值。但当电极间距加大到14 mm以上,必须提高加载电压值,否则难以维持持续放电。

3 结论

基于文中所述的火花放电等离子体合成射流发生器,通过实验研究,得到了能效因子 η 和功耗、射流速度与加载电源频率、占空比及电极间距之间的关系。具体结论如下所述。

(1) 加载电源的频率和占空比共同影响放电功率。降低频率,提高占空比会加大耗能;提高频率的同时降低占空比可以降低放电功率。

(2) 存在最佳频率占空比组合使射流速度达到最高。对本文所研究的发生器,这个范围大约是电源加载频率在100~190 Hz之间,占空比为14%~20%。

(3) 电源加载频率和占空比对发生器的能效特性都有影响,存在峰值对于本文的发生器,能效因子 η 在电源加载频率140~190 Hz,占空比13%~18%之间可以获得较高值。

(4) 随着电极间距的增加,使得能效因子 η 不断升高。但是电极间距较小时,能效特性改善不大;电极间距加大到一定程度后,能效特性发生很大改善,发生器的射流速度快速上升、放电功率急剧下降,能效因子迅速提高;但电极间距大于13 mm后速度增加缓慢,功率基本不变,能效因子增长减缓。

以上所得结论是针对本文所研究的对象得到的,结构不同的火花放电射流发生器,结构形式不同,上

述具体的数值会有差别,但对于同一类型的火花放电等离子体射流发生器的设计与应用可提供参考。

参 考 文 献

- 1 Cattafesta L N, Sheplak M. Actuators for active flow control. *Annu Rev Fluid Mech*, 2011; 43: 247—272
- 2 Kleinman R R, Bodony D J, Freund J B. Shear-flow excitation mechanisms of recessed localized arc-filament plasma actuators. *Phys. Fluids*, 2010; 22: 116103: 1—18
- 3 Lazar E, Elliott G, Glumac N. Energy deposition applied to a transverse jet in a supersonic cross-flow. *AIAA J*, 2010; 48 (8): 1662—1672
- 4 Sinha A, Alkandry H, Kearney-Fischer M, *et al.* The impulse response of a high-speed jet forced with localized arc-filament plasma actuators. *Phys Fluids*, 2012; 24: 1—20
- 5 Webb N, Clifford C, Samimy M. Control of oblique shock wave/boundary layer interactions using plasma actuators. *Exp Fluids*, 2013; 54(6): 1—15
- 6 鲜于斌, 卢新培. 等离子体射流的推进机理. *高电压技术*, 2012; (7): 1667—1676
Xian Y B, Lu X P. The driving mechanism of plasma jet. *High Voltage Technique*, 2012; (7): 1667—1676
- 7 Zong Haohua, Wu Yun, Li Yinghong, *et al.* Analytic model and frequency characteristics of plasma synthetic jet actuator. *Physics of Fluids*, 2015; 27: 1—21
- 8 Knight D, Anderson K, Wilkinson S, *et al.* Spark jet efficiency. *Texas: AIAA*, 2013
- 9 刘海涛, 何伟, 陈志刚, 等. DBD放电产生等离子体的能效影响因素研究. *科学技术与工程*, 2011; 11(16): 3632—3636
Liu Haitao, He Wei, Chen Zhigang, *et al.* Study on the factors influencing efficiency of DBD plasma. *Science Technology and Engineering*, 2011; 11(16): 3632—3636
- 10 林麒, 郝明, 刘汝兵. 一种加速射流发生装置: 中国, CN204014247U. 2014-12-10
Lin Qi, Hao Ming, Liu Rubing. An acceleration jet device: China, CN204014247U. 2014-12-10

Experimental Research on Energy Efficiency of a Plasma Synthetic Jet

LEI Ming^{1,2,3}, LIU Ru-bing¹, HAO Ming¹, LIN Qi¹

(Fujian Key Laboratory of Plasma and Magnetic Resonance, School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University¹, Xiamen 361005, P, R, China;
Chinese Flight Test Establishment²,

Key Laboratory of Aviation Science and Technology of Flight Simulation³, Xi'an 710089, P, R, China)

[Abstract] A non-dimensional parameter η was presented, which is ratio of kinetic energy of actuator jet flow and electric energy, to characterize energy efficiency of synthetic jet actuator for dual-pole spark plasma synthetic jet actuator. Velocity of jet flow is measured by Pitot tube and electric energy is measured by dynamometer during the experiment. The variation rule of energy efficiency factor η can be summarized through observation and study on the impact of electric parameter and electrode spacing on jet velocity and power. This research finding is reviewed as a reference for further study on applies of spark discharge plasma synthetic jet.

[Key words] spark discharge plasma synthetic jet energy efficiency experiment research