

文章编号: 1000-8055(2007)12-2073-05

平板附面层等离子体流动控制的数值模拟

李 钢¹, 黄卫兵², 朱俊强¹, 聂超群¹

(1. 中国科学院 工程热物理研究所, 北京, 100080;
2. 驻沈阳黎明发动机制造公司军事代表室, 沈阳 110043)

摘 要: 通过求解电场中的拉普拉斯方程和赫姆霍兹方程的变形形式, 成功地将等离子体激励对平板附面层流动的影响, 以体积力向量的形式引入到 NS 方程之中。借助求解的电荷密度, 通过将计算结果与实验数据的对比, 可确定德拜长度、最大电荷密度、形状因子等可调参数的取值原则, 建立起平板附面层等离子体流动控制的数值模拟方法, 为将等离子体流动控制方法应用于外流及内流场中的强剪切流动控制, 奠定关键性的技术支撑。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 等离子体; 数值模拟; 流动控制; 边界层

中图分类号: V231

文献标识码: A

Numerical simulation of flat plate plasma flow control

LI Gang¹, HUANG Wei-bing², ZHU Jun-Qiang¹, NIE Chao-Qun¹

(1. Institute of Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;
2. The Customer Representative of Liming Engine Manufacturing Corporation, Shenyang 110043, China)

Abstract: Through Laplace equation and transformed Helmholtz equation in the electric field, this paper simulated successfully the plasma flow control in the flat plate. A body force vector was introduced to the Navier Stokes equations to simulate the effect of plasma actuation on the flow. Debye length, maximum charge density and scale parameter, etc, could be determined by comparing the calculated result with experimental data. This helps to establish a numerical simulation method for flat plate plasma flow control, thus providing a crucial technical support for applying plasma flow control into external and internal sharp shear flow.

Key words: aerospace propulsion system; plasma; numerical simulation; flow control; boundary layer

1 等离子体物理模型

利用等离子体技术进行流动控制, 是目前气动力学领域研究的一个热点问题^[1-4]。等离子体激励器构成如图 1 所示。在绝缘材料两侧非对称地布置两块金属电极, 一块电极裸露在周围的空气中, 另一块电极嵌在绝缘材料里, 在高压高频交流电的作用下, 可在嵌入绝缘材料内的电极上方生成弱电离的低温等离子体, 通过离子与中性气体分子的碰撞向边界层输送能量, 诱导出空气射

流, 加速附面层内的气流流动。本文的计算模型出自参考文献[5]。

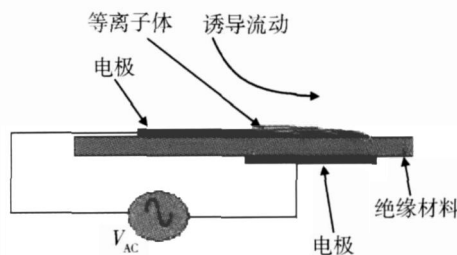


图 1 等离子体激励器简图

Fig. 1 Plasma actuator

收稿日期: 2006-12-11; 修订日期: 2007-03-20

作者简介: 李钢(1974-), 男, 辽宁锦州人, 博士生, 主要从事等离子体流动控制的实验和数值模拟研究

1.1 体积力的求法

为了数值模拟等离子体的作用效果,关键在于得到等离子体作用下的体积力.在忽略电磁场力的假设下,单位体积的体积力可表示为

$$f_B = \rho E \quad (1)$$

其中 ρ 是净电荷密度, E 是电场强度.在等离子体作用下的流场计算中,磁场变化的非定常性通常是可以忽略的,这样麦克斯韦方程可表示为

$\nabla \times E \approx 0$, 这表明电场强度可由标量电势的梯度求出

$$E = - \nabla \Phi \quad (2)$$

由高斯定律得

$$\nabla \cdot (\epsilon E) = \rho \quad (3)$$

也可表示为

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \Phi) = - \rho \quad (4)$$

式中 ϵ 为介电常数,可表示为

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (5)$$

式中 ϵ_r 是介质的相对介电常数, ϵ_0 是自由空间的介电常数.

关于等离子体激励对流场影响的机理,目前仍在探索之中.由方程(1)可以看出,该体积力对流场的影响是很大的,至于局部放电造成的温升以及由此造成的气流粘性系数的变化是否需要考虑呢?一致的看法是,虽然等离子体的区域较小,却对周围的流动有较大的影响,因而应该在等离子体作用区域的气流运动控制方程中,增加描述等离子体作用效果的源项.

1.2 电势 Φ 的处理

由于气体粒子是被弱电离的,可以认为电势 Φ 由二部分组成,一部分由于外部电场产生, ϕ , 另一部分由于等离子体中静电荷密度产生, ϕ , 即

$$\Phi = \phi + \phi \quad (6)$$

假定德拜厚度很小,而且壁面上的电荷密度不大,这样计算域中的电荷分布可由壁面上的电荷分布求出,而受外加电场的影响很小,因此由电势 ϕ 和 ϕ 可写出二个独立的方程,一个是由于电极上所加电压产生的外部电场

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \nabla \phi) = 0 \quad (7)$$

另一个是由于带电粒子产生的电势

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \nabla \phi) = - (\rho / \epsilon_0) \quad (8)$$

由这两个方程即可求出 ϕ 和 ρ .

1.3 外部电场电势 ϕ 的求法

解方程(7)可求出电势 ϕ .图2给出了方程(7)的边界条件和计算域.

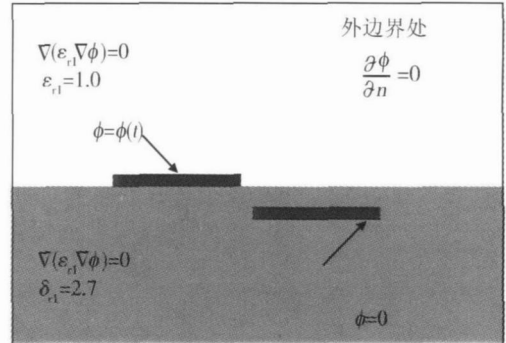


图2 方程(7)的计算域和边界条件

Fig. 2 Computational domain and boundary conditions for equation (7)

嵌入绝缘材料的电极接地,裸露的电极所加的交流电压为

$$\phi(t) = \phi^{\max} f(t) \quad (9)$$

波形函数 $f(t)$ 可为正弦波

$$f(t) = \sin(2\pi\omega t) \quad (10a)$$

也可以是方波

$$f(t) = 1 \quad \text{当 } \sin(2\pi\omega t) \geq 0 \\ f(t) = -1 \quad \text{当 } \sin(2\pi\omega t) \leq 0 \quad (10b)$$

式中 ω 为频率, $\phi^{\max}$ 是最大电压.将嵌入绝缘材料的电极接地,其上的电压为零.在外边界可认为 $\phi \partial n = 0$

1.4 电荷密度 ρ 的求法

下面考虑方程(8)中电荷密度的求解方法.等离子体场中任一点的净电荷密度为

$$\rho / \epsilon_0 = e(n_i - n_e) / \epsilon_0 \approx - \frac{en_0}{\epsilon_0} [\exp(\phi / kT_i) + \exp(\phi / kT_e)] \quad (11)$$

式中 e 为基本电荷; n_i 和 n_e 分别是等离子体中离子和电子的密度; n_0 是 background 等离子体密度; k 为波尔兹曼常数; T 为样本温度; ϕ 为当地电势.将这个指数方程按泰勒级数展开,取一阶项可得

$$\rho / \epsilon_0 = - (e^2 n_0 / \epsilon_0) [(1 / kT_i) + (1 / kT_e)] \phi \quad (12)$$

引入德拜长度 λ_d ,

$$(1 / \lambda_d^2) = (e^2 n_0 / \epsilon_0) [(1 / kT_i) + (1 / kT_e)] \quad (13)$$

方程(12)可写为

$$\rho = (-1 / \lambda_d^2) \epsilon_0 \phi \quad (14)$$

由此可将电势表示为

$$\phi = (-\rho\lambda_0/\epsilon_0) \tag{15}$$

将上式带入方程(8),即可得到由等离子体中任意一点净电荷密度表示的方程

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \nabla \phi) = \rho/\lambda_0 \tag{16}$$

利用图 3 给出的边界条件解方程(16),即可求出净电荷密度.假设外边界处电荷密度为 0,壁面处除嵌入绝缘材料的电极上方外电荷密度的法向梯度也为 0,则嵌入绝缘材料的电极上方壁面处的电荷密度为

$$\rho_{c,w}(x,t) = \rho^{\max} G(x) f(t) \tag{17}$$

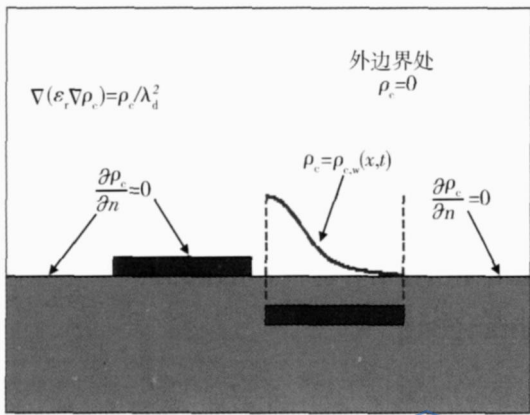


图 3 方程(16)的计算域和边界条件

Fig. 3 Computational domain and boundary conditions for equation (7)

式中 $\rho^{\max}$ 是电荷密度的最大值, $\rho_{c,w}$ 沿壁面的变化由函数 $G(x)$ 给出,并由等离子体的分布来确定 $G(x)$. 实验结果表明等离子体的分布可由高斯函数描述

$$G(x) = \exp[-(x - \mu)^2 / (2\sigma^2)] \tag{18}$$

方程(18)中 μ 是位置参数,由其确定最大值的位置; σ 是尺度参数,由此确定衰减率. σ 取很大值时, $\rho_{c,w}$ 近似为恒定值; σ 取值很小时, $\rho_{c,w}$ 衰减很快. σ 取 0.3 时得到的等离子体分布比较符合试验测量结果.

通过解方程(7)和(16)求出 ϕ 和 ρ 后,体积力向量可由方程(1)求出

$$\mathbf{f}_B = \rho \mathbf{E} = \rho (-\nabla \phi) \tag{19}$$

2 结果与讨论

2.1 计算模型的校验

首先,我们拟通过一个基本实验的数据,来校正模型中的参数 λ_0 和 $\rho^{\max}$,这里采用参考文献[1]中,等离子体激励器在静止空气中诱导流场的实验数据.实验中等离子体激励器的布置如图 4 所示.

实验时绝缘材料中的电极接地,等离子体在高压高频的方波型电源作用下产生,方波的频率

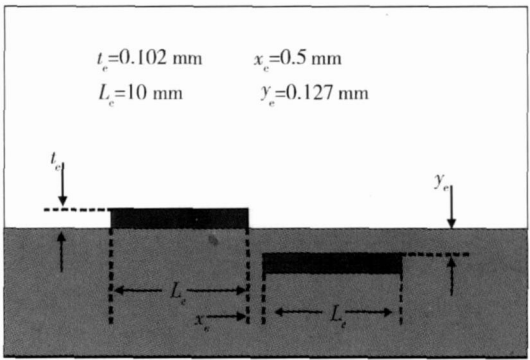
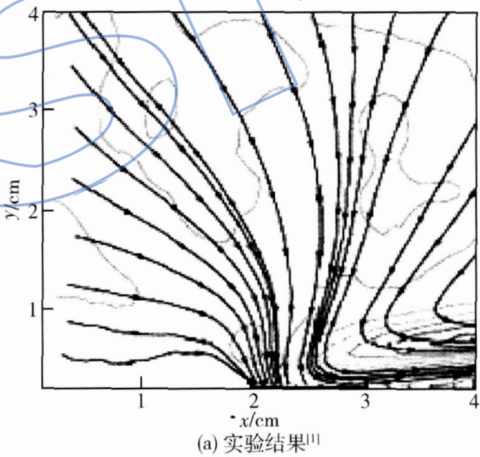


图 4 等离子体激励器布置

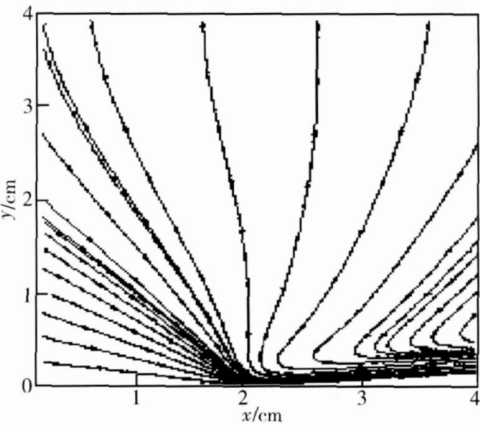
Fig. 4 Layout of plasma actuator

为 $\omega = 4.5$ kHz、振幅为 $\phi^{\max} = 5$ kV.

通过选取合适的参数值,使计算得到的最大速度值与实验测得的最大速度值相符,而且要保证两者的流型大体一致.计算表明取 $\lambda_0 = 0.001$ m, $\rho^{\max} = 0.008$ C/m² 时,计算结果与实验得到的数据^[5]符合得比较好,实验测得的最大速度与计算的结果都为 1 m/s 左右.流型见图 5.



(a) 实验结果^[1]



(b) 计算结果

图 5 等离子体激励器在静止空气中诱导出的流场,实验所得流线图与计算所得流线图比较

Fig. 5 Flow field induced by plasma actuator in quiescent air, comparison of experimental and computed streamlines

2.2 不同来流速度时的数值模拟

计算所用的计算域及其网格分布如图 6 所示。

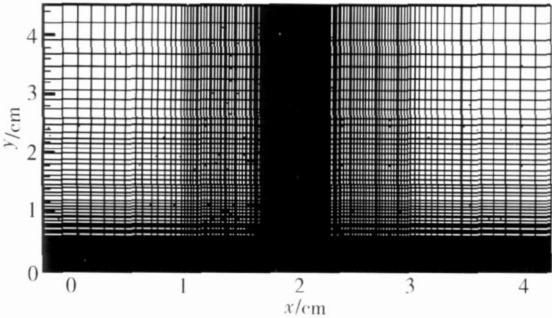
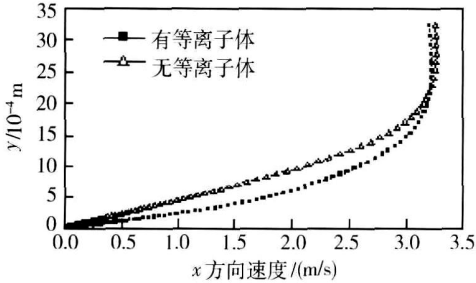
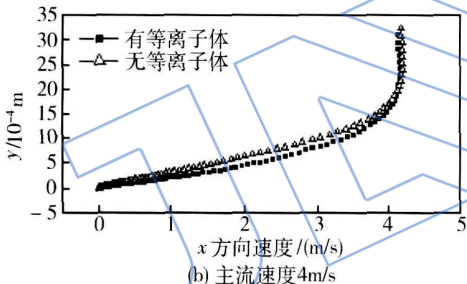


图 6 网格的划分

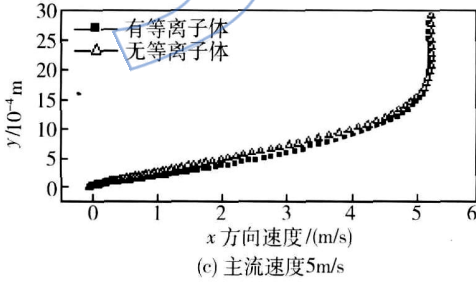
Fig. 6 Grids meshing



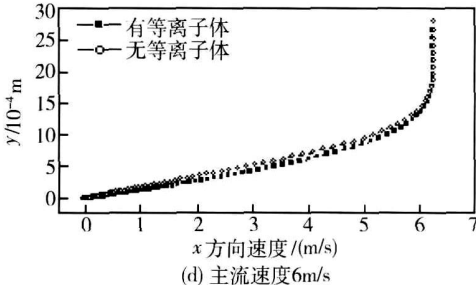
(a) 主流速度 3m/s



(b) 主流速度 4m/s



(c) 主流速度 5m/s



(d) 主流速度 6m/s

图 7 有等离子体激励器作用和无等离子体激励器作用时边界层速度分布

Fig. 7 Comparison of no-excited velocity and excited velocity in the boundary layer

边界条件设置如下:入口设为速度入口、出口设为压力出口、上边界设为压力出口。

图 7 给出了主流速度分别为 3,4,5,6 m/s 时,0.025 m 处边界层内 x 方向速度分布情况。

根据上述计算结果,可以看出平板附面层内速度分布的两个显著特点:(1)在等离子体的作用下,附面层内速度分布变得饱满,即在距物面相同的距离内气流速度增大一点,这体现着等离子体激励的加速作用;(2)随着来流速度的增加,等离子体激励的作用变得越来越弱,这体现着等离子体激励的强度较弱。

3 等离子体激励器对平板边界层特性的影响

边界层的定量描述可由边界层厚度、位移厚度、动量厚度、形状因子给出。图 8,图 9 给出了在不同来流速度时等离子体激励器的作用对这些参数的影响。

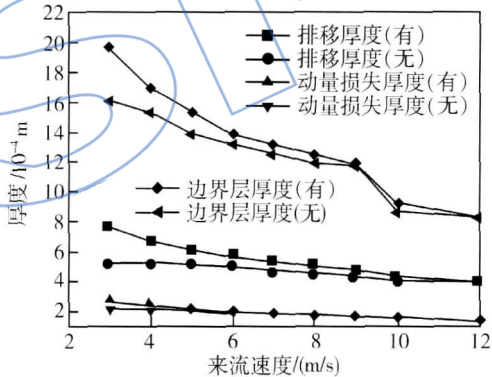


图 8 厚度的变化

Fig. 8 Variation of thickness

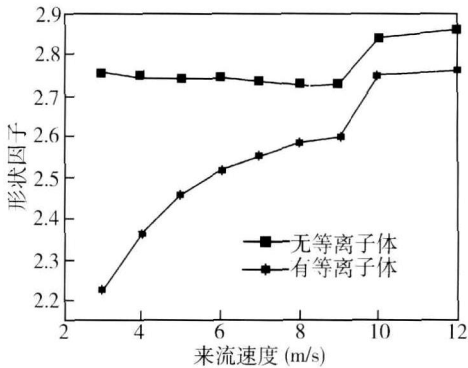


图 9 形状因子的改变

Fig. 9 Variation of form factor

4 结论和展望

综合上述分析,可以得出如下结论:

结合公开文献中的实验结果,通过对比给出了若干参数的取值范围,初步建立了等离子体激

励下平板附面层内流动的数值模拟方法;借助不同来流速度下的计算结果,分析了等离子体激励前后附面层内的速度变化趋势及附面层特性参数的变化,初步判明了等离子体的作用效果,能为后续的实验研究提供方向性的指导.

在此基础上,我们拟进一步开展下列工作:

开展等离子体电荷密度分布的测量工作,促进数值模拟工作的深入进行;应用本文模型对压气机叶栅、透平叶栅的等离子体流动控制进行数值模拟,并开展相关实验研究,进一步修正本文的计算模型.

参考文献:

[1] Huang J H,Corke T C,Thomas F O. Plasma actuators for

separation control of low-pressure turbine blades [J]. AIAA J ,2006 ,44(1) :51-57.

[2] Van Ness II D K,Corke T C, Morris S C. Turbine tip clearance flow control using plasma actuators [R]. AIAA 2006-21.

[3] Vorobiev A N ,Rennie R M ,Jumper E J. An experimental investigation of lift enhancement and roll control using plasma actuators [R]. AIAA 2006-3383 ,2006.

[4] Patel M P ,Ng T T ,Vasuclevan S. Plasma actuators for hingeless aerodynamic control of an unmanned air vehicle [R]. AIAA 2006-3496 ,2006.

[5] Suzen Y B ,Huang P G ,Jacob J D. Numerical simulations of plasma based flow control applications [R]. AIAA 2005-4633 ,2005.

JAS