

非对称等离子体激励器的电场仿真

安治永, 李益文, 李应红, 宋慧敏

(空军工程大学工程学院, 陕西西安 710038)

摘要: 等离子体激励器的非对称结构可以产生不均匀的电场, 使空间电离的等离子体在电场力的作用下产生运动, 从而带动环境空气流动产生顺电加速。本文分析了顺电加速的机理, 用时域有限差分法的电磁场数值计算的理论对非对称等离子体激励器进行了电场仿真, 并得出了和理论分析一致的用于顺电加速的非对称等离子体激励器的电场分布。此工作为以后提高顺电加速速度和激励器的结构优化提供了基础。

关键词: 顺电加速; 等离子体; 时域有限差分; 电场强度

中图分类号: TP601 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2007)02-0049-03

根据等离子体产生方式及特性的不同, 其用于不同的领域, 用激光产生等离子体非常容易, 而且能量大, 广泛用于金属零件的制造^[1], 航空推进技术等, 而用于流动控制的等离子体国内外广泛采用加有高频高压电源激励的电容式激励器。非对称结构的等离子体激励器产生的顺电加速可用于抑制气体的流动分离, 近年来, 大气压等离子体流动控制技术已成为国际上空气动力学领域新兴的重要研究领域。美国、俄罗斯、英国、法国、德国、阿根廷等国家的研究机构在国家或军队专项基金的资助下进行了广泛的研究, 美国凯特灵大学对等离子体-鞘层流体动力学模型、大气压表面等离子体气动流动控制模型进行了研究, 最近又从三流体(电子、离子、和流体)的流体动力学和扩散迁移理论的基础上对非对称结构的等离子体激励器的顺电体力及分离作用进行了研究^[2-7]。国内这方面的研究起步比较晚, 只是进行了放电特性研究和验证性的实验研究。非对称结构产生的不均匀电场对等离子体的流动起着决定性的作用, 但非对称结构等离子体激励器产生的电场分布情况国内外很少有人对其进行研究, 其不均匀电场的分布情况还不是很清楚。本文采用时域有限差分法^[8]对其进行了仿真, 得到了理想的结果。

1 顺电流动加速机制分析

为了加深对顺电加速机制的理解, 下面对顺电效应从微观物理的角度进行分析, 图1所示为2个倾斜平板电极间不稳定的等离子体, 由于存在电场梯度, 等离子体层处于不稳定状态, 等离子体中被极化的电场使电荷、等离子体和中性气体向电力线较短的、电场更强的区域运动(不管RF电源的极性如何), 即在顺电作用下等离子体向电场梯度增加的方向定向运动, 并通过离子-中性气体碰撞作用和电子-中性气体碰撞作用带动周围的气体一起运动^[9]。

静电体力与净电荷密度成正比, 而不是与电离度成正比。

Madhan指出, 大气压辉光放电的净电荷密度足以产生用于空气动力学控制的体力, 并对中性气流产生重要影响。当施加电场作用于等离子体中的离子和电子, 使离子和电子加速, 产生了顺电 EHD (Electrohydrodynam-

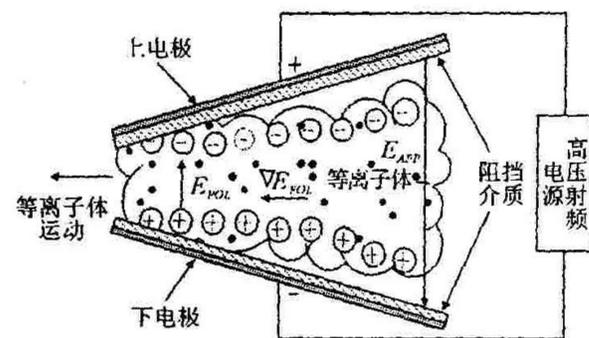


图1 2个倾斜平板电极间不稳定等离子体

收稿日期: 2006-12-18

基金项目: 国家“863”计划资助项目(2003AA753025)

作者简介: 安治永(1973-), 男, 河北定州人, 博士生, 主要从事航空宇航推进系统理论与机械电子工程研究。

ic) 体力。 $F_E = \rho_c E$ 。净电荷密度 ρ_c 可以用每立方米的库仑数来表达, 即 $\rho_c = e(Zn_i - n_e)$

应该注意, 离子数密度和电子数密度有个差额, 这一项在准中性理论公式中通常是被忽略的。由泊松公式可以得出, 净电荷密度与等离子体中电场强度的关系为 $\nabla \cdot E = \rho_c / \epsilon_0$ 。代入式 F_E , 得到静电体力的表达式为

$$F_E = \epsilon_0 E \nabla \cdot E = \frac{1}{2} \epsilon_0 \nabla \cdot E^2 = \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 \right) \quad (1)$$

式(1)的后两项对于目前应用的一维公式而言是等价的。最后一项括号中的部分是静电压力 P_E , 即

$$P_E = \epsilon_0 E^2 / 2 \quad (2)$$

由此可见, 从数值上和维数上看 P_E 都是能量密度, 单位是 N/m^2 , 即压力的单位。在目前的表述中, 由于 P_E 通过洛伦兹碰撞对中性气流产生了影响, 因此最好将 P_E 看成压力。由式(2), 可将式(1)表示为 $F_E = dP_E/dx$ 。通过离子和电子在电场中的加速, 将静电压力传递给离子和电子, 其表示的是静电体力所起的作用。

中性气体的气压为式(3)。如果忽略粘性力和离心力等, 则气动梯度和静电梯度产生的体力将大致平衡, 式(4)

$$P_g = nkT \quad (3) \quad \nabla P_g + \nabla P_E = \frac{d}{dx} (P_g + P_E) = 0 \quad (4)$$

由此, 气动梯度和静电梯度的和约为常数, 即

$$P_g + P_E = \text{const} \quad (5)$$

将式(2)和式(3)代入式(5), 可得到气动参数和电场间的近似关系为

$$nkT + \frac{\epsilon_0}{2} E^2 = \text{const} \quad (6)$$

由式(6)可以预测出, 在电场梯度即 P_E 比较大的区域, 中性气体压力 P_g 比周围没有电场的区域要小, 对应一个中性气体的低压区, 引起周围压力较高的气体流入该低压区, 这种抽吸作用 (pumping action) 即为顺电效应, 使等离子体离子带动中性气体一起向高电场梯度的区域流动。

2 非对称等离子体激励器的电场仿真与分析

前面从微观粒子动力学的角度分析了顺电加速的机理, 下面对非对称结构的等离子体激励器在射频电源激励下所产生的电场梯度分布情况进行仿真分析。顺电流动加速机制示意图如图2。采用的等离子体激励器为介质阻挡电极等离子体激励器, 上、下层均为金属带状电极, 上下层电极间为绝缘材料。通过高压射频电源激励, 在上、下层带状电极之间的间隙中产生介质阻挡放电等离子体。由于电极是不对称布局的, 因此空间电场也是不均匀的, 存在电场梯度, 等离子体中的离子和电子在电场梯度的作用下运动, 从而诱导中性气体的加速。顺电加速机制因仅需要单相高频高压电源和介质阻挡等离子体激励器, 实现起来比较简单。

2.1 建立非对称等离子体激励器模型

时域有限差分法以差分原理为基础, 直接从概括电磁场普遍规律的 Maxwell 旋度方程出发, 将电磁场进行空间离散化, 将其转换为差分方程组, 得到电磁场演化的迭代方程, 来实现电磁问题的数值模拟。建立的非对称等离子体激励器模型见图3, 所加的激励电源为单相高压射频电源, 频率为 30 kHz, 最大幅值为 20 kV, 模型中所示的绝缘材料为相对介电常数为 2.3 的聚四氟乙烯, 厚度为 2 mm, 面积为 80 mm × 100 mm; 上下表面铺设的带状电极铜箔厚度为 0.06 mm, 电极宽度为 1 mm, 电极位移为零, 电极间距为 10 mm。

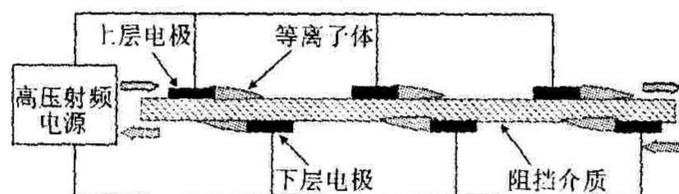


图2 顺电流动加速机制示意图

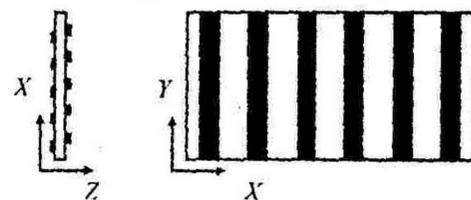


图3 顺电加速激励器剖面图

2.2 仿真结果与分析

对非对称等离子体激励系统进行电场仿真,各个方向的电场分布分别见图4、5、6、7。

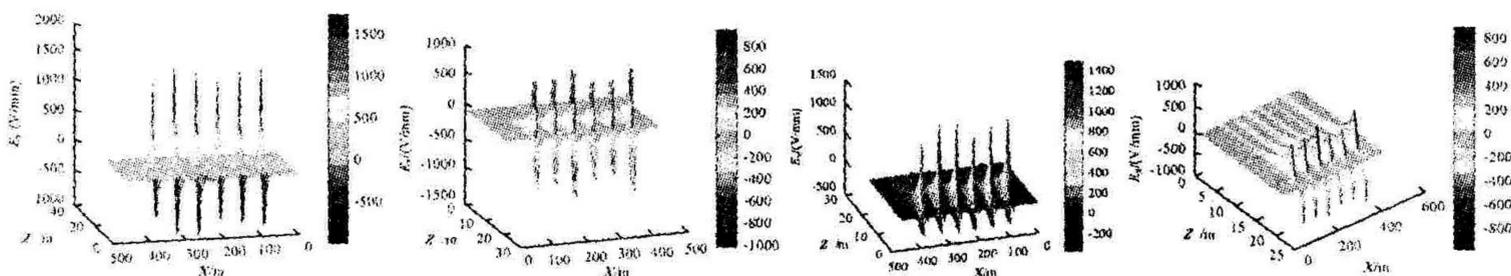


图4 上下非对称6组电极阳极 图5 上下非对称6组电极阴极 图6 上下非对称6组电极阳极 图7 上下非对称6组电极阴极
上方X方向的电场分布 下方X方向的电场分布 上方Z方向的电场分布 下方Z方向的电场分布

从图中可以看出:双面均是带状电极的场强分布基本相同,沿 X 、 Z 轴方向的场强,在电极附近出现两个符号相反的等峰值,在介质表面附近的场强最大值可以超过空气的交流击穿场强临界值 830 V/mm ,因此在介质左右表面均可以形成气体放电。在靠近电极附近的电场强度最大,同时出现与所在空间附近电极对应的电场峰值,在此区域电场强度也最大,沿着 Z 轴正方向空间位置上的电场强度快速下降,而后场强逐渐变化趋缓,各电极对电场的影 响也变小。沿 X 轴方向,在电极附近的电场变化也很快,在相邻同电位电极的中心处 X 轴方向电场几乎为零,总的来说 Z 轴方向的电场要比 X 轴方向在整个空间上的平均电场要大,因此等离子体在 Z 轴方向上的运动受到电场的影 响较大,还可以看出在电极附近的电场强度最大,如果电极不均匀、不平滑有杂疵的话,会使此处电场强度更强从而使介质板更易击穿。

从图中可以看出,电场强度在 Y 方向的分量几乎分布在介质层内,在阴极下方和阳极上方场强值非常小而且变化比较平缓,对加速粒子的流动贡献非常小,因此可以忽略。沿着 Z 轴负方向上电极附近出现的峰值较小,这是由于所有电极表面电荷较为均衡作用的结果。由于正反两方向的场强沿着垂直介质板的方向上等离子体的厚度有限,因为在空气中要存在一定密度的等离子体,必须有足够大的场强来保证,否则由于电子离子的复合使得放电很快就终止,欲增加等离子体厚度,提高电压是最直接有效的方法,但是电压的升高也受到电源技术和介质材料耐击穿性能的限制。

由于在靠近电极附近的电场强度最大,因此上下层带状电极周围的空气会电离产生等离子体。由分析式(6)可知,该区域比较大,因此中性气体压力比周围电场强度较弱的区域要小。由于存在电场梯度,等离子体层处于不稳定状态,在电场梯度的作用下等离子体将带动中性气体向该区域运动(如两个空心箭头所示),气流在该区域相遇后,遭遇到壁面非穿透的边界条件,从而诱发一个水平向右的定向流动。

3 结束语

利用时域有限差分法对用于顺电加速的非对称等离子激励器的暂态电磁场进行了仿真与数值模拟,得到了此结构的激励器的电场分布,分析了此电场分布对等离子体运动的影响,并从顺电加速的粒子动力学角度进行了深入的分析,得到了在电磁场的作用下顺电加速的理论根据,对以后提高顺电加速速度,进行激励器的结构优化提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 钱应平,张海鸥,王桂兰,等. 等离子激光复合成形中角度对弧柱形态和熔积层精度的影响[J]. 机械科学与技术,2006,25(8):883-886.
- [2] 李应红,吴云,宋慧敏,等. 大气等离子体流动控制实验[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2006,7(3):1-3.
- [3] Roth J R. Aerodynamic Flow Acceleration Using Prolonged and Peristaltic Electrohydrodynamic Effects of a One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma[J]. Physics of plasmas,2004,10(5):2116-2126.
- [4] Roth J R. Aerodynamic Flow Acceleration Using Prolonged and Peristaltic Electrohydrodynamic Effects of One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma[J]. Physics of plasmas, 2003. 10(5):2117-2126.
- [5] Roth J R. Industrial Plasma Engineering[M]. Bristol, U. K. :IOP,1995.
- [6] Sherman D M, Roth J R. Modification OF Aerodynamic Boundary Layers Using a One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma[A]. Raleigh, North Carolina:25th IEEE International Conference on Plasma Science,1998.

(下转第56页)