

微波等离子推力器同轴谐振腔内的电磁场特性^{*}

唐金兰, 何洪庆, 韩先伟, 黄晓砥, 毛根旺

(西北工业大学 航天工程学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 为了研究同轴谐振腔内导体的头部形状、位置对腔内电磁场分布的影响规律, 用时域有限差分法 (FDTD) 对微波等离子推力器 (MPT) TEM 谐振模式的同轴谐振腔中的电磁场进行了数值模拟, 并结合实验现象对数值模拟的结果进行了分析讨论。结果表明, 内导体头部形状的改变, 改变了同轴腔内电磁场的分布规律和电场强度最大集中区域的位置。内导体位置的改变, 只改变电磁场强度的大小, 且内导体愈接近同轴腔的底面 (即: 放电间隙 δ 愈小), 腔内电场强度愈强。同时, 锥形头部的内导体, 更有利于 MPT 的启动和稳定工作, 为采用同轴谐振腔的 MPT 工程样机的研制提供了依据。

关键词: 微波; 等离子体发动机; 谐振腔; 电磁场; 数值仿真

中图分类号: V439.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2003) 02-0148-04

Characteristics of electromagnetic field within the coaxial resonant cavity of microwave plasma thruster

TANG Jin-lan, HE Hong-qing, HAN Xian-wei, HUANG Xiao-di, MAO Gen-wang

(Coll. of Astronautics, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to research the influence of shape and position of inner conductor on electromagnetic field within coaxial resonant cavity with TEM resonant model, the numerical simulation was conducted by use of FDTD and the results were compared with the experiment phenomena. Results show that the shape of inner conductor not only makes the distribution of electromagnetic field change but also makes the zone position of the maximal electric field change. The position of inner conductor makes the strength of the electromagnetic field change only and the less the aperture between the inner conductor and the bottom of coaxial resonant cavity, the more the strength of electromagnetic field. The cone shape of the inner conductor is propitious to start and work steadily for MPT. These results can be used for design of MPT's project prototype with coaxial resonant cavity.

Key words: Microwave; Plasma engine; Cavity resonator; Electromagnetic field; Numerical Simulation

1 引 言

微波等离子推力器 (MPT) 是一种新型的在研电热推进装置, 微波放电能否在谐振腔内产生高效稳态悬浮的等离子体, 谐振腔的结构形式及谐振模式直接影响着等离子体的稳定^[1]。实验证明, 对小功率 (0 ~ 100W) 的微波等离子推力器采用谐振模式为 TEM 的具有缩短电容的同轴形谐振腔比较有利^[2] (如图 1)。

同轴形谐振腔有半波长型 ($\lambda/2$) 和四分之一波长型 ($\lambda/4$) 两种, 而 $\lambda/4$ 同轴谐振腔没有实际用处, 因为

其开口端并非真正开路, 电磁能量要从开口端辐射出去。为了防止辐射, 可将外导体圆柱延长, 构成截止波导, 这样, $\lambda/4$ 同轴谐振腔已为金属所包围, 没有任何辐射损失, 当截止波导的端盖离内导体很近时, 在端盖和内导体间有很强的电场, 相当于在同轴线的开路端接上一个电容, 成为具有缩短电容的 $\lambda/4$ 同轴谐振腔。即当谐振腔对波长为 λ 的电磁场谐振时, 同轴腔的长度要比 $\lambda/4$ 短。采用探针激励, 将微波能量耦合进入同轴谐振腔, 工质气体沿径向进入谐振腔, 在电场强度的最大集中区域形成微波等离子体区, 而内

* 收稿日期: 2002-05-10; 修订日期: 2002-07-29。基金项目: 国家“八六三”基金资助项目 (863-2-2-5-12) 和国防基础科研计划项目 (J1400D001)。

作者简介: 唐金兰 (1966—), 女, 博士生, 高级工程师, 研究领域为火箭发动机设计。

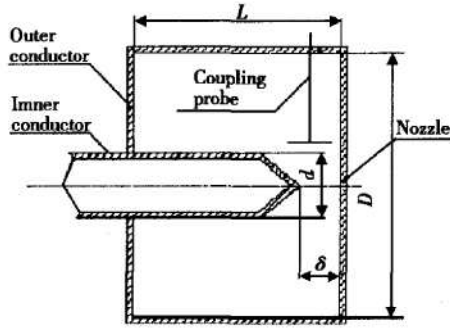


Fig.1 Coaxial resonant cavity
structure of 100W MPT

导体的形状、位置将直接影响着同轴形谐振腔内的电磁场分布,进而影响等离子体的形成位置及推力器的效率。文献[3]分析了1kW微波等离子推力器 TM_{011} 谐振模式的圆柱形谐振腔内隔板对腔内电磁场及谐振频率的影响,本文对100W微波等离子推力器TEM谐振模式的同轴谐振腔内的电磁场进行数值研究,分析内导体的头部形状、内导体的位置对腔内电磁场分布的影响。

2 计算方法

电磁特性的基本方程为麦克斯韦方程组

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J}_c + \partial \mathbf{D} / \partial t \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\partial \mathbf{B} / \partial t \\ \nabla \times \mathbf{B} &= 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

由式(1)可推具有缩短电容的同轴谐振腔内TEM场分量的表达式为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{E}_r}{\partial t} &= \frac{1}{\epsilon} \left[-\frac{\partial \mathbf{H}_\theta}{\partial z} - \sigma(\mathbf{E}_r) \right] \\ \frac{\partial \mathbf{E}_z}{\partial t} &= \frac{1}{\epsilon} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \mathbf{H}_\theta) - \sigma \mathbf{E}_z \right] \\ \frac{\partial \mathbf{H}_\theta}{\partial t} &= \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial \mathbf{E}_z}{\partial r} - \frac{\partial \mathbf{E}_r}{\partial z} - s \mathbf{H}_\theta \right] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 $\mathbf{E}$ 是电场强度, $\mathbf{H}$ 是磁场强度, ϵ 是腔体内媒质

的介电常数 $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$,其中 ϵ_0 为真空介电常数, ϵ_r 为相对介电常数, σ 和 μ , s 分别是腔体内媒质的电导率、磁导率和磁电阻率, s 对应磁场的损耗。具有缩短电容的 $\lambda/4$ 同轴谐振腔内的电磁场结构矢量图见图2。右端内外导体轴向间隙之间为电场(用“ $\rightarrow$ ”表示),内外导体环腔之间为磁场(用“ $\cdot$ 和 $\times$ ”表示),电力线和磁力线的疏密表示电磁场的强度。

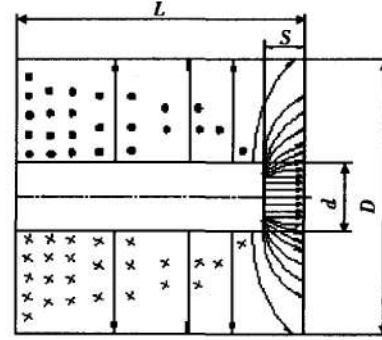


Fig.2 Sketch map of electromagnetic field within
 $\lambda/4$ coaxial resonant cavity

根据同轴线中电磁场和电压、电流的关系,同轴谐振腔中TEM谐振模式的电磁场分布解析解为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{E}_r(z, r, t) &= \frac{U_m}{r \ln(D/d)} \sin kz \sin \omega t \\ \mathbf{H}_\theta(z, r, t) &= \frac{U_m}{\eta r \ln(D/d)} \cos kz \cos \omega t \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 U_m 是内导体表面电位, D 是外导体内径, d 是内导体外径。

由式(3)只能求出 $\lambda/4$ 开路同轴线谐振腔内电磁场的解析解,而不能给出具有缩短电容的同轴谐振腔内电磁场分布的全部信息。因此,采用时域有限差分法(FDTD)^[4],同时考虑到微波电磁场在空间相互正交和铰链的关系及在时间上 $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{H}$ 有半个时间步的变化,在图3所示的圆柱坐标系中FDTD基本网格单元上,用有限差分式代替具有缩短电容的同轴谐振腔内TEM场分量式中的微分得

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{H}_\theta^{n+1/2}(i, j) &= C'_\theta(i, j) \left\{ -D'_\theta(i, j) \mathbf{H}_\theta^{n-1/2}(i, j) - \frac{1}{\Delta z} [\mathbf{E}_r^n(i+1, j) - \mathbf{E}_r^n(i, j)] + \frac{1}{\Delta r} [\mathbf{E}_z^n(i, j+1) - \mathbf{E}_z^n(i, j)] \right\} \\ \mathbf{E}_r^{n+1}(i, j) &= C_r(i, j) \left\{ -D_r(i, j) \mathbf{E}_r^n(i, j) - \frac{1}{\Delta z} [\mathbf{H}_\theta^{n+1/2}(i, j) - \mathbf{H}_\theta^{n-1/2}(i-1, j)] \right\} \\ \mathbf{E}_z^{n+1}(i, j) &= C_z(i, j) \left\{ -D_z(i, j) \mathbf{E}_z^n(i, j) + \left(\frac{1}{2r(i)} + \frac{1}{\Delta r} \right) \mathbf{H}_\theta^{n+1/2}(i, j) + \left(\frac{1}{2r(i)} - \frac{1}{\Delta r} \right) \mathbf{H}_\theta^{n-1/2}(i, j-1) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 \text{式中: } C_{\eta}(i, j) &= \left[\frac{\sigma_{\eta}(i, j)}{2} + \frac{\varepsilon_{\eta}(i, j)}{\Delta t} \right]^{-1} \\
 D_{\eta}(i, j) &= \left[\frac{\sigma_{\eta}(i, j)}{2} - \frac{\varepsilon_{\eta}(i, j)}{\Delta t} \right] \\
 C'_{\eta}(i, j) &= \left[\frac{S_{\eta}(i, j)}{2} + \frac{\mu_{\eta}(i, j)}{\Delta t} \right]^{-1} \\
 D'_{\eta}(i, j) &= \left[\frac{S_{\eta}(i, j)}{2} - \frac{\mu_{\eta}(i, j)}{\Delta t} \right]
 \end{aligned}$$

η 表示 r, θ, z 中某一个。

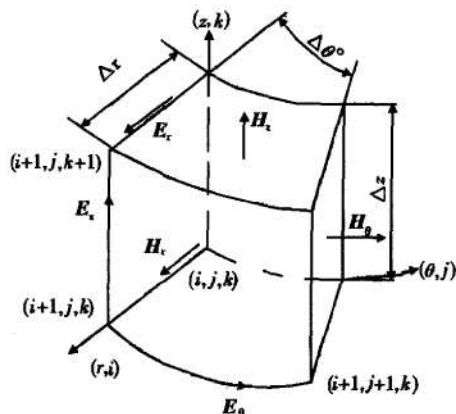


Fig.3 Basal grid of FDTD in cylindrical coordinate

3 计算条件

地面实验系统用的微波发生器考虑到波导的衰减系数最小及易于制造,微波频率选取工业常用的 2.45GHz,由此确定的同轴谐振腔的长度为 31mm。为保证同轴腔内微波能量的最小衰减,确定内导体直径为 10mm,外导体内径为 40mm,微波输入功率 100W。由于喷管喉径很小 ($< 0.5\text{mm}$, 对于 100W MPT 原理样机,设计值为 0.2mm,喷管面积比 A_e/A_i 为 181,以氮

气为工质、腔内压强为 0.4MPa,喷管出口压强为 50Pa 时,计算推力为 20mN^[5]),因此计算中忽略因喷管存在而引起的微波泄漏,且内外导体壁面按理想导体处理。为了使同轴腔内的电磁场分布尽快达到稳定,场的初值选取为 $\lambda/4$ 型同轴线谐振腔中 TEM 模电磁场分布的解析解。计算中采用矩形网格,以阶梯网格模拟内导体的锥形头部。

4 计算结果及分析

为了验证 FDTD 差分计算的准确性,首先计算了 $\lambda/4$ 开路同轴线谐振腔内电磁场的解析解(图 4 中的 PE_r 和 PH_{θ})及其 FDTD 的数值解(图 4 中的 E_r 和 H_{θ}),二者十分接近。据此,计算了具有平面头部和锥形头部的内导体两种形状、不同放电间隙 δ (参照图 1)的具有缩短电容的同轴谐振腔内电磁场的分布,并对计算结果进行了对比。图 5 和图 6 分别是平面头部和锥形头部内导体情况下,腔内电磁场的等值线图(电磁场的方向见图 2),由图可见,腔内电场的能量很集中且比磁场的能量大很多;图 7 是平面头部内导体和锥形头部内导体情况下,腔内轴向和径向电场强度最大值与放电间隙 δ 的关系。

由图 5~7 的计算结果可知,内导体头部形状的改变,不但改变了同轴腔内电场强度最大集中区域的位置,也改变了电场数值的大小,且随着放电间隙 δ 的减小,腔内的轴向电场与径向电场增大。在内导体形状不变的情况下,内导体位置的改变(即放电间隙 δ 的变化),仅改变电磁场的大小,而对场分布的规律影响不大。从腔内电场强度最大集中区域的位置及电场值的大小来看,锥形内导体更有利于 100W MPT

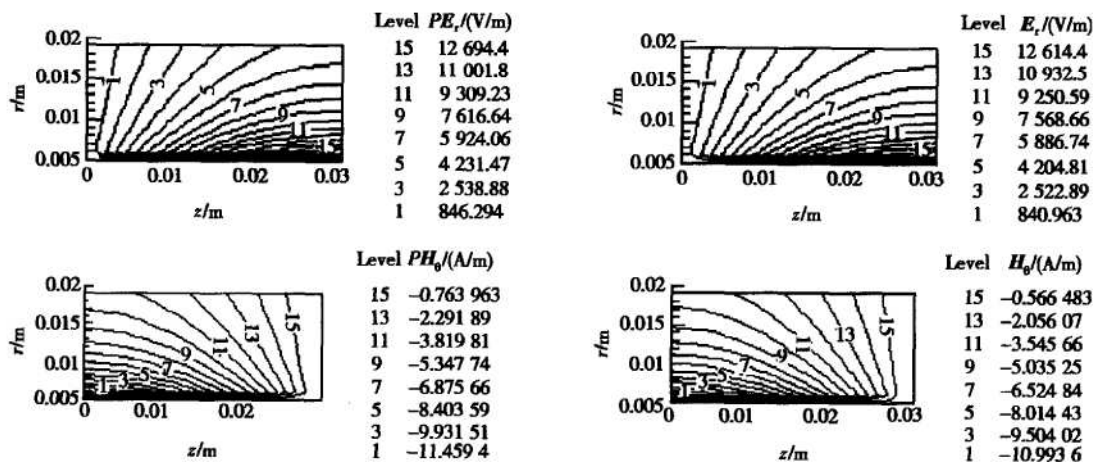
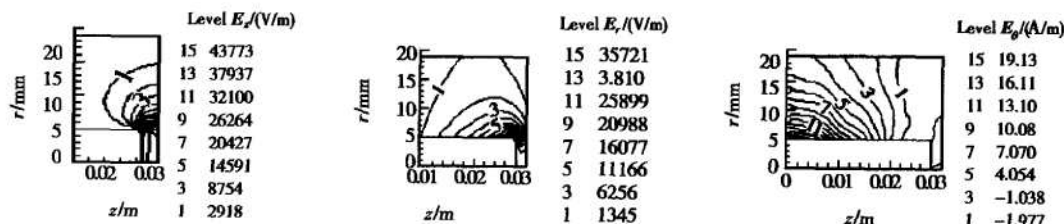
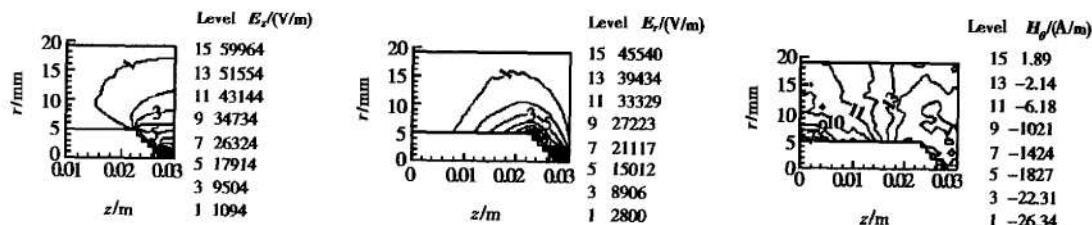
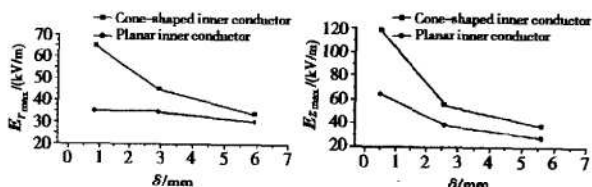


Fig.4 Accurate values of PE_r , PH_{θ} and numerical values of E_r , H_{θ} within $\lambda/4$ coaxial resonant cavity

Fig.5 Contours of E_z , E_r , H_θ of coaxial resonant cavity with planar inner conductor ($\delta = 3\text{mm}$)Fig.6 Contours of E_z , E_r , H_θ of coaxial resonant cavity with cone-shaped inner conductor ($\delta = 3\text{mm}$)Fig.7 Maximal values of E_z and E_r as a function of δ

的启动与稳定工作。这是因为谐振腔内使工质气体放电的关键是腔内电场强度的大小(即 E_z 和 E_r 值),腔内电场强度愈大,愈有利于工质气体的放电、MPT易于启动^[6]。与平面头部的内导体相比,采用锥形头部的内导体,腔内的电场强度增大,有利于工质气体的放电,且电场强度的最大集中区域靠近喷管入口处,使形成的等离子体易于喷出、产生推力。

为将计算结果与实验现象进行对比分析,在100W MPT地面实验系统中,在进气方式、耦合探针等其它条件不变的情况下,采用平面头部的内导体和锥形头部的内导体进行了大量的点火实验。当采用平面头部的内导体时,从观察窗可见,工质气体的电离仅发生在内导体平面头部的的外圆部位,而采用锥形头部的内导体时,工质气体的电离发生在内导体锥形头部的顶点处。两种内导体情况下等离子体区的产生部位均与计算出的腔内电场强度的最大集中区域吻合。观察喷管出口处的火焰,采用锥形头部的内导体时,喷出的火焰长度比平面头部的内导体的火焰长度长,且更为明亮,这是因为锥形头部的内导体的等离子体区位于锥面的头部,在同轴谐振腔的轴线上且

靠近喷管入口,更有利于 MPT 的启动和稳定工作。

5 结 论

(1)内导体头部形状的改变,不但改变了同轴腔内电磁场的分布规律,使电场强度最大集中区域形成的位置发生了变化,也改变了电场强度值的大小;

(2)在内导体头部形状不变的情况下,内导体位置的改变只改变电磁场值的大小,而对腔内电磁场的分布规律影响不大,即:内导体愈接近同轴腔的底面(放电间隙 δ 愈小),腔内电场强度愈强;

(3)理论计算与实验均证明采用锥形头部的内导体,更有利于 MPT 启动和稳定工作。

参考文献:

- [1] 毛根旺,何洪庆,杨 娟.微波等离子推进器(MPT)的应用探索研究[J].推进技术,1998,19(3).
- [2] 黄晓砥.微波等离子推力器的启动与稳定工作探索研究[D].西安:西北工业大学,2001.
- [3] 唐金兰,何洪庆,韩先伟,等.谐振腔隔板对微波等离子推力器特性的影响[J].推进技术,2002,23(4).
- [4] 高本庆.时域有限差分法 FDTD Method[M].北京:国防工业出版社,1995.
- [5] 毛根旺,何洪庆,杨 涓.空间电推进研究——MPT原理样机研制与性能估算[R].西安:西北工业大学,2001.
- [6] 唐金兰,何洪庆,毛根旺,等.微波等离子推力器等离子体形成及其与微波耦合机理分析[J].固体火箭技术,2002,25(2).

(编辑:梅 瑛)