第21卷 第4期 空 间 科 学 学 报 Vol.21, No.4
2001 年 10月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Oct., 2001

空间飞行体与压缩区内等离子体非稳态相互作用的数值模拟*

马善钧 徐学翔
(江西师范大学物理与通信电子学院 南昌 330027)

摘 要

在压缩区内，飞行体天线辐射出的高频调制场影响着等离子体中的电荷分布，而电荷分布的扰动又反过来影响场量. 采用 FTCS 有限差分格式方法，利用二维三分量轴对称，对空间飞行体与压缩区内等离子体非稳态相互作用过程进行数值模拟，得到了电荷密度扰动与电场的变化情况. 计算结果表明，这种非线性相互作用可以引起场的塌缩并出现密度空洞. 通过对密度空洞变化的探测，可对隐身飞行体进行跟踪.

关键词 压缩区—高频调制场—隐身飞行体

1 引言

空间飞行体在外大气层运动时，和周围等离子体之间存在着复杂的非稳态相互作用. 这种相互作用，集中在两个区域内，即前部压缩区和尾部稀化区. 当飞行体运动时，通过飞行体与等离子体的相互作用，使周围等离子体密度产生扰动. 这种密度扰动，在电离层中可以激发起各种等离子体波，研究这种相互作用及各种等离子体波，对探测涂有各种雷达波吸收材料的隐身飞行体有着重要的意义 [1−4]. 近些年来，国内外对空间飞行体与等离子体之间相互作用的研究很多，这些研究主要是从以下两方面进行的：一种是从理论上进行分析和推理 [2−5]，这些工作基本上是从流体方程和离子分布函数满足的玻尔兹曼方程出发，得到了描述场和带电粒子相互作用的一组耦合方程，包括描述飞行体远尾部稀化区的耦合方程 [2,3] 和飞行体前端压缩区的耦合方程 [4,5]；另一种是从实验上利用一个拖曳的带有偏压的探针，去测量飞行体尾部稀化区的电势分布及电流的收集特性 [6−9]，进而研究等离子体在与飞行体相互作用过程中可能给飞行体带来的损害.

由于在飞行体和等离子体相互作用的研究中，得到的耦合方程是非线性的微分方程，无法求出其解析解. 因此，理论分析工作只对得到的耦合方程进行了定性的分析. 当需要详细研究耦合方程的解时，只能进行数值计算. 本文则是根据空间飞行体与其前端压缩区内等离子体非稳态相互作用的控制方程 [5] 直接进行数值计算，更清楚更直观地计算出空间飞行体在电离层中飞行时，飞行体前端压缩区内带电粒子扰动的情况. 计算结果显示，场和粒子的相互作用会引起场的塌缩，并形成密度空洞，这种密度空洞为跟踪探测隐身飞行体提供了一种新的思路.

* 江西省自然科学基金资助 (9912002)
2001-01-10 收到原稿， 2001-08-09 收到修定稿

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

2 数值模拟模型

对于压缩区内处于电磁场中的等离子体，可采用双流体模型，有如下双流体方程组：

$$\frac{\partial n_{\mathrm{e}}}{\partial t}+\nabla\cdot(n_{\mathrm{e}}\boldsymbol{V}_{\mathrm{e}})=0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{V}_{\mathrm{e}}}{\partial t}+(\boldsymbol{V}_{\mathrm{e}}\cdot\nabla)\boldsymbol{V}_{\mathrm{e}}=\frac{\mathrm{e}}{m_{\mathrm{e}}}\left(\boldsymbol{E}+\frac{1}{c}\boldsymbol{V}_{\mathrm{e}}\times\boldsymbol{B}\right)-\frac{\nabla P_{\mathrm{e}}}{m_{\mathrm{e}}n_{\mathrm{e}}}+\gamma_{\mathrm{ie}}(\boldsymbol{V}_{\mathrm{i}}-\boldsymbol{V}_{\mathrm{e}})+\boldsymbol{g}, \tag{2}$$

$$\frac{\partial n_{\mathrm{i}}}{\partial t}+\nabla\cdot(n_{\mathrm{i}}\boldsymbol{V}_{\mathrm{i}})=0, \tag{3}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{V}_{\mathrm{i}}}{\partial t}+(\boldsymbol{V}_{\mathrm{i}}\cdot\nabla)\boldsymbol{V}_{\mathrm{i}}=\frac{\mathrm{e}}{m_{\mathrm{i}}}\left(\boldsymbol{E}+\frac{1}{c}\boldsymbol{V}_{\mathrm{i}}\times\boldsymbol{B}\right)-\frac{\nabla P_{\mathrm{i}}}{m_{\mathrm{i}}n_{\mathrm{i}}}-\gamma_{\mathrm{ie}}(\boldsymbol{V}_{\mathrm{i}}-\boldsymbol{V}_{\mathrm{e}})+\boldsymbol{g}, \tag{4}$$

$$\nabla\times\boldsymbol{E}=-\frac{1}{c}\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}, \tag{5}$$

$$\nabla\times\boldsymbol{B}=\frac{1}{c}\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t}+\frac{4\pi\mathrm{e}}{c}(n_{\mathrm{e}}\boldsymbol{V}_{\mathrm{e}}-n_{\mathrm{i}}\boldsymbol{V}_{\mathrm{i}}). \tag{6}$$

式中 γ_{ie} 为电子和离子的碰撞频率，$\boldsymbol{g}$ 为引力加速度，其他符号具有通常的意义. 采用双时标近似，从方程 (1)—(6)，可以得到无量纲化的飞行体前端压缩区内场和带电粒子密度扰动的耦合方程为 [5]

$$\mathrm{i}\frac{\partial}{\partial\hat{t}}\hat{\boldsymbol{E}}+\alpha\nabla\times\nabla\times\hat{\boldsymbol{E}}-\nabla(\nabla\cdot\hat{\boldsymbol{E}})+\hat{n}\hat{\boldsymbol{E}}=0, \tag{7}$$

$$\hat{n}=-|\hat{\boldsymbol{E}}|^2-\frac{1}{\gamma_{\mathrm{e}}}\frac{\hat{R}_0^2}{\hat{\rho}^2}\frac{\sin^2\theta\cos^2\theta}{1-\dfrac{\hat{R}_0}{\hat{\rho}}\sin^3\theta}. \tag{8}$$

方程中 $\hat{\boldsymbol{E}}$ 和 $\hat{n}$ 分别为高频电场的包络和电荷密度扰动，γ_{e} 为电子的比热比，$\hat{R}_0$ 为球形飞行体半径，θ 为研究点至球心连线与飞行方向轴之间的夹角，$\hat{\rho}$ 为垂直于飞行轴方向的坐标，$\hat{t}$ 为时间. 上述各量均为无量纲量，它们与实际各量之间的关系为

$$\hat{\boldsymbol{E}}=\frac{\sqrt{3}\boldsymbol{E}}{8(\pi n_{\mathrm{e}}^0\mu\gamma_{\mathrm{e}}T_{\mathrm{e}})^{1/2}},\quad \hat{\boldsymbol{r}}=\frac{2}{3}\frac{\omega_{\mathrm{pe}}}{c_{\mathrm{s}}}\mu\boldsymbol{r},\quad \hat{t}=\frac{2}{3}\mu\omega_{\mathrm{pe}}t,\quad \hat{n}=\frac{3}{4\mu}\frac{\delta n_{\mathrm{e}}}{n_{\mathrm{e}}^0},$$

$$\alpha=\frac{c^2}{3v_{T_{\mathrm{e}}}^2},\quad \mu=\frac{m_{\mathrm{e}}}{m_{\mathrm{i}}},\quad \omega_{\mathrm{pe}}^2=\frac{4\pi n_{\mathrm{e}}^0e^2}{m_{\mathrm{e}}},\quad c_{\mathrm{s}}^2=\frac{T_{\mathrm{e}}}{m_{\mathrm{i}}},\quad v_{T_{\mathrm{e}}}=\left(\frac{2T_{\mathrm{e}}}{m_{\mathrm{e}}}\right)^{1/2}.$$

为研究问题方便，本文只对横场进行讨论，即满足 $\nabla\cdot\hat{\boldsymbol{E}}=0$ 条件的场，且采用二维三分量轴对称模式. 计算所采用的模型如图 1 所示. 空间飞行体球在电离层中向前飞行，这里我们选定飞行体球为参照系. z 方向为飞行体运动的方向，y 方向为垂直于 z 的方向 (即方程中 $\hat{\rho}$ 的方向)，原点在飞行体球心. 在前部压缩区内存在着飞行体与周围等离子体之间的非稳态作用，引起了粒子密度扰动，并进而影响其中的场量. 模拟研究的区域为飞行体球前部压缩区关于飞行方向轴对称的空间范围. 做此选择，是基于如下考虑，由

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

于整个模拟研究的空间范围绕 z 轴旋转对称，所以我们只需计算场量在过 z 轴的一个截面内的变化情况，其他各个旋转截面上的值与此截面上的值相同. 因此，可以考虑一切物理量与 x 轴无关. 如图计算区域为 yz 平面，范围为 $-\dfrac{L}{2} \leqslant y \leqslant \dfrac{L}{2}$ 和 $R_0 + D \leqslant z \leqslant R_0 + D + L$ 的正方形区域.

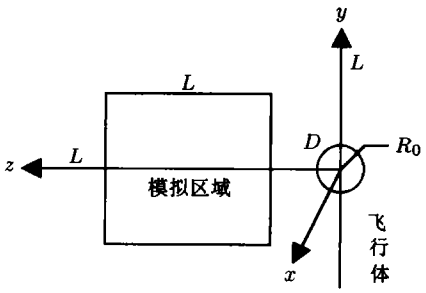


图 1　模拟示意图
Fig.1　Diagram of simulation

在数值计算中，电离层参数取为 [10] $T_e = 3 \times 10^3\,\mathrm{K}$, $n_e^0 = 1 \times 10^5\,\mathrm{cm}^{-3}$, 模型选定参数 $\gamma_e = 3$, $R_0 = 1\,\mathrm{m}$, 换算到无量纲量 $\hat{R}_0 \approx 1.3$, 其他参数具有通常的物理意义.

取初态电场为

$$\hat{\boldsymbol{E}}(\hat{\boldsymbol{r}}, \hat{t} = 0) = \hat{E}_0 \left[\sin\left(\frac{2\pi\hat{z}}{\hat{z}_0}\right) \cos\left(\frac{2\pi\hat{y}}{\hat{y}_0}\right) + \mathrm{i}\cos\left(\frac{2\pi\hat{z}}{\hat{z}_0}\right) \sin\left(\frac{2\pi\hat{y}}{\hat{y}_0}\right) \right] \boldsymbol{e}_x -$$

$$\hat{E}_0 \frac{\hat{y}_0}{2\pi\hat{z}_0} \left[\cos\left(\frac{2\pi\hat{y}}{\hat{y}_0}\right) - \mathrm{i}\sin\left(\frac{2\pi\hat{y}}{\hat{y}_0}\right) \right] \mathrm{sech}\left(\frac{\hat{z}}{\hat{z}_0}\right) \tanh\left(\frac{\hat{z}}{\hat{z}_0}\right) \boldsymbol{e}_y +$$

$$\hat{E}_0 \left[\sin\left(\frac{2\pi\hat{y}}{\hat{y}_0}\right) + \mathrm{i}\cos\left(\frac{2\pi\hat{y}}{\hat{y}_0}\right) \right] \mathrm{sech}\left(\frac{\hat{z}}{\hat{z}_0}\right) \boldsymbol{e}_z$$

式中 $\hat{E}_0 = 0.01$ 为常数，同时取常数值为 $\hat{y}_0 = 80$, $\hat{z}_0 = 80$. 在计算中，y 和 z 方向各取足 40 个格点，采用 40×40 的均匀网格，即 $\Delta\hat{y} = 2$, $\Delta\hat{z} = 2$, $\hat{L} = 80$. 令 $\hat{t} = \Delta\hat{t}_0 \times \tau_n$, $\Delta\hat{t}_0 = 5 \times 10^{-6}$, τ_n 表示时间层数，$\hat{D} = 5$, 并采用空间上的微分以中心差分代替，时间上的微分以向前差分代替的 FTCS 方法 [11] 作为计算方法. 计算中 $\sin\theta = \hat{\rho}/\sqrt{\hat{z}^2 + \hat{\rho}^2}$, 在计算区域内，$\hat{z}$ 的值始终大于 $\hat{R}_0$, 因此 (8) 式的分母 $1 - (\hat{R}_0/\hat{\rho})\sin^3\theta = 1 - (\hat{R}_0/\hat{\rho})(\hat{\rho}/\sqrt{\hat{z}^2 + \hat{\rho}^2})^3 > 0$, 这样就可以保证计算中不出现分母为零的情况.

3　模拟结果及讨论

经过计算，得到图 2 和图 3 所示的结果. 图 2 和图 3 分别表示电场塌缩和电荷密度扰动随时间的演化.

(1) 从图 2 给出的电场强度的变化情况可以看到，随着时间的推移，原来分布范围较大而强度并不很大的电场逐步向小范围的局域缩小，且强度不断增大. 这是一种典型的场的塌缩现象，见图 2(b) 中的尖峰. 这一点与文献 [2] 提到的具有天线系统的飞行体在电离层中的运动可以激起可探测的电磁孤波的结论相一致.

(2) 从图 3 给出的电荷密度扰动分布的变化情况可以看出，由于粒子和场的相互作用，在飞行体的压缩区内，也形成了类似于电磁孤波的密度空洞. 这种密度空洞的强度，随着时间的变化逐渐加强. 从图 3(b) 中可知，由电场的塌缩产生的密度空洞的半径为 $\hat{R} \approx 10$, 换算为有量纲量 $R \approx 7.5\,\mathrm{m}$. 带电粒子密度分布的不均匀，将导致对电磁波产生不同的反射. 这样，即使是隐身飞行体，当它在电离层中运动时，也会产生这种带电粒子分布上的

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

密度空洞. 随着飞行体向前运动, 这种密度空洞也将随之产生运动. 人们可以通过追踪这种密度空洞的运动, 来探测隐身飞行体的存在, 为跟踪探测隐身飞行体提供了一种新的设计思路.

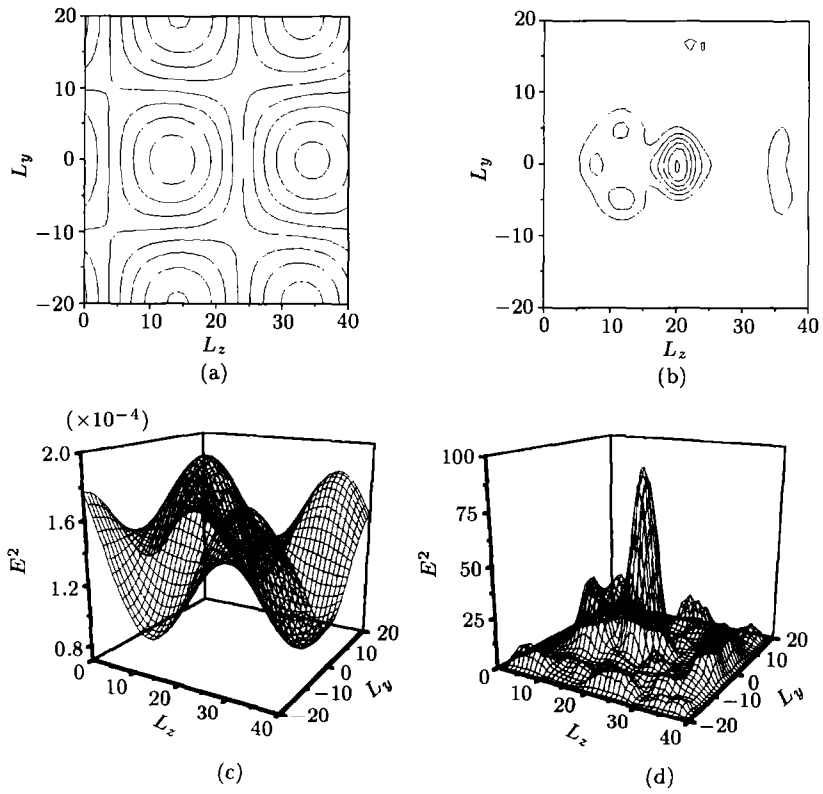


图 2 电场塌缩过程的等强图和三维图

Fig.2 The contours and space graphs of collapse of electric field

(a) $\tau_1 = 0$, $E^2_{max} = 1.94 \times 10^{-4}$, (b) $\tau_2 = 16$, $E^2_{max} = 9.28 \times 10^1$

(3) 本文在计算中, 计算区域是取自过飞行速度方向对称轴的一个平面区域. 事实上, 场和粒子密度分布是一种空间分布. 但从空间分布来看, 场和粒子密度分布具有绕速度方向旋转对称的特性. 因此, 实际的场和粒子密度的空间分布, 只需将求得的平面区域的解绕速度方向对称轴旋转一周即可.

(4) 从计算结果可以看出, 随着时间的增加, 场的塌缩越来越强, 场的强度越来越大. 但实际上, 计算过程是不可能无限进行下去. 这是因为当 $\overline{W} > 1$ 时 (其中 $\overline{W} = E_f^2/(4\pi n_e^0 T_e)$)[3], 我们不能从方程 (1) 至 (6) 得到方程 (7) 和 (8) 式, 所以也就不能用方程 (7) 和 (8) 来描述飞行体和等离子体之间的相互作用. 此外, 当 $\overline{W} > 1$ 时, 场的能量大于粒子的热动能, 场和等离子体之间的相互作用更强, 场的能量将通过相互作用转到粒子上, 从而使场的能量减小. 对于这一过程中相互作用的物理机制, 目前尚不清楚, 本文暂不讨论.

从上面的模拟结果及分析可知, 随着时间的推移, 飞行体天线辐射出的高频调制场与

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

等离子体中的带电粒子之间的相互作用，可以引起场的塌缩现象及密度分布的空洞出现. 通过探测这种密度空洞，就可以为探测空间飞行体，特别是隐身飞行体，提供一种新的有效方法.

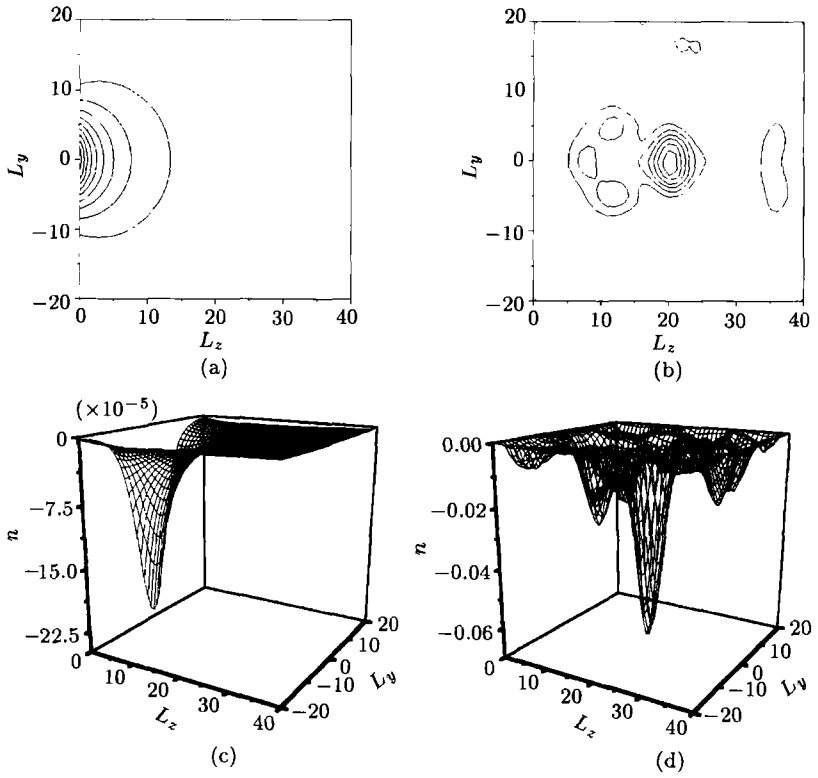


图 3　密度扰动变化的等强图和三维图

Fig.3　The contours and space graphs of the evolution of density disturbance

(a) $\tau_1 = 1$, $n_{\min} = -2.42 \times 10^{-4}$, (b) $\tau_2 = 16$, $n_{\min} = -6.74 \times 10^{-2}$

参　考　文　献

[1] 李晓卿. 湍动等离子体物理. 北京：北京师范大学出版社，1987. 202—289

[2] 李晓卿. 空间飞行体与周围等离子体之间的非稳态问题研究. 宇航学报，1990, **11**(3):76—84

[3] 李晓卿. 等离子体天体物理中的强湍动. 物理学进展，1993, **13**(4):595—639

[4] 马善钧，杨千里，罗开基. 空间飞行体与等离子体在压缩区内的非稳态相互作用研究. 空间科学学报，1996, **16**(3):200—207

[5] 马善钧，杨千里，李晓卿. 空间飞行体与压缩区内等离子体非稳态相互作用的控制方程. 宇航学报，1997, **18**(2):50—55

[6] Hastings D E. A review of plasma interactions with spacecraft in low Earth orbit. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**(A8):14 457—14 516

[7] Enloe C L *et al.* High-voltage interactions in plasma wake: Results from the charging hazards and wake studies (CHAWS) flight experiments. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(A1):425—436

[8] Biasca R, Wang J. Ion current collection in spacecraft wakes. *Phys. Plasmas*, 1995, **2**(2):280—288

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

[9] Cairns I H, Gurnett D A. Plasma waves observed in the near vicinity of the space shuttle. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**(11):13 913—13 927

[10] Al'pert Ya, Gurevich A V, Pitaevskii L P. Space Physics With Artificial Satellites. New York: Plenum Press, 1965. 16—46

[11] 罗奇 P J. 计算流体动力学. 北京: 科学技术出版社, 1983. 22—276

NUMERICAL SIMULATION OF NON-STEADY INTERACTION BETWEEN MOVING BODIES AND PLASMA IN COMPRESSION REGION

MA Shanjun XU Xuexiang

(*Institute of Physics and Communication Engineering, Jiangxi Normal University, Nanchang* 330027)

Abstract

The interaction between a body in space and its plasma environment is one of the basic problems in space plasma physics. In this paper, based on the amplitude transport equation of fast varying field and the low frequency disturbance equation of electron density, the evolutions of the density distribution of charged particles and collapse of electric field have been calculated numerically in two dimensions with three field components under the condition of transverse wave. A numerical result of non-steady interaction between moving bodies and plasma in compression region is presented. In numerical simulation, the FTCS method, i.e. time forward difference and space central difference method, has been used. The results of numerical calculation show that the density cavitons and potential solitons are formed due to the modulational instability if the radiation of the antenna as a pump wave source is sufficiently intense. From the distribution of density caviton, the moving body can be traced out by means of observing the structure and intensity of the density caviton although the body may be a stealthy vehicle.

Key words Compression region, High frequency modulational field, Stealth vehicle

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com