膨胀磁场和太阳风粒子相互作用三维数值模拟

姚 杰 汤海滨 王海兴 刘 宇

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083)

摘 要: 采用三维模型, 使用混合网格质点法 HPIC(Hybrid Particle-in-Cell)对膨胀的磁场和太阳风相互作用过程进行数值模拟. 研究了线圈产生的偶极子磁场在注入等离子体后和太阳风粒子的相互作用过程, 并对以不同速度入射的等离子体引起的太阳风粒子的变化和磁场变化进行了比较. 研究结果表明, 偶极子磁场和太阳风作用时会产生弓形激波, 此时磁压等于太阳风粒子的动压, 当向线圈产生的偶极子磁场中注入高能等离子体时引起磁场膨胀, 膨胀的磁场将会排斥太阳风粒子向外运动, 从而引起弓形激波的变化, 增大与太阳风相互作用的面积, 并且粒子入射速度越大, 磁场膨胀越明显, 与太阳风相互作用愈强.

关 键 词: 网格质点法; 磁顶层; 磁泡; 磁等离子体帆

中图分类号: V 439.4

文献标识码: A 文章编号: 1001-5965(2008)05-0584-03

Three-dimension numerical simulation of working process of space plasma sail

Yao Jie Tang Haibin Wang Haixing Liu Yu

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract Using three-dimension model, the hybrid particle in cell method was used to simulate the interaction between the inflated magnetic field and solar wind. The interaction between solar wind particles and dipole magnetic field produced by coil was studied after the plasma injecting into the dipole magnetic field. The changing of solar wind and magnetic field was compared when the plasma was injected with different velocity. It is shown that the bow shock like-structure caused by the interaction between solar wind and dipole magnetic field appears at the area where the magnetic pressure and the dynamic solar wind pressure balance each other. The magnetic field inflates when high-energy density plasma was injected into the dipole magnetic field, then the magnetic field expels the solar wind particles outward. The bow shock like-structure changes and it increases the cross area with the solar wind. It is shown that the bigger the velocity of injected plasma, the more clear the magnetic field inflation and the stronger the interaction with solar wind.

Key words particle in cell method; magneto pause; magneto bubble; magneto plasma sail

当高能等离子体注入偶极子磁场且等离子体动压超过磁压时, 注入的等离子体能够拖动磁场向外膨胀, 如日冕和地磁尾的形成[1-3]. 最近, 通过研究这种现象华盛顿大学的 Winglee 教授[2,4]提出了等离子体帆推进技术, 认为可以在飞行器上安装一个小的线圈和等离子源来产生充满等离子体的磁场膨胀区域, 称为磁泡, 利用太阳风粒子和磁泡相互作用使飞行器获得动力. 因为在真空中偶极子磁场以 R^{-3} 衰减, 且太阳风粒子数密度比较低, 从而导致线圈产生的磁场太小, 不能和太阳风粒子产生足够大的相互作用面积, 当高能等离子体注入线圈后形成膨胀磁场, 使磁场衰减速度小于 R^{-3}, 并且能在一个很大的范围内达到 R^{-1}, 从而能够增大磁泡和太阳风的作用面积. 通

收稿日期: 2007-05-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10675016); 航天创新基金资助项目

作者简介: 姚 杰(1983-), 男, 山东泰安人, 硕士生, yaojie@sa.buaa.edu.cn.

过实验已经能够证明磁场衰减速度降低. 经过计算, 向线圈磁场中注入等离子体后, 只需要 1m 的线圈就能产生足够强的磁场, 通过和太阳风粒子相互作用, 使飞行器获得 1N 的推力, 而且飞行速度可达到 80 km /s[5].

使用混合网格质点法, Saha[6] 已经证明高能热等离子体注入螺线管磁场时, 当等离子体能量密度超过磁能密度时扩张的等离子体将会拖动磁场线膨胀, 并且磁场膨胀的程度主要取决于热等离子体的入射速度. 在文献 [1, 7－8]中主要是用二维模型对等离子体注入有固定背景磁场的偶极子线圈进行了系统的模拟.

本文主要使用三维网格质点法 PIC(Particle-in-Cell)研究在入射粒子扩张阶段太阳风粒子和膨胀磁场的相互作用, 尤其是入射等离子体速度对磁场和太阳风粒子的影响. 本文主要参考了 Saha建立的模型.

1　数学模型

本文采用混合网格质点法对等离子体帆的磁场和太阳风相互作用过程进行数值模拟, 在模拟过程中采用如下基本假设: ①离子作为有一定质量的粒子, 电子作为无质量流体; ②对离子采用大粒子模型, 即一个大粒子代表许多个真实的离子.

在计算中采用的方程组为

安培定律方程:

$$\nabla \times \frac{\boldsymbol{B}}{\mu_0} = \boldsymbol{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} \tag{1}$$

电子动量方程:

$$m_e \frac{\partial \boldsymbol{V}_e}{\partial t} = e(\boldsymbol{E} + \boldsymbol{V}_e \times \boldsymbol{B}) - \frac{(\nabla P)}{n_e} \tag{2}$$

法拉第定律方程:

$$\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} = -\nabla \times \boldsymbol{E} \tag{3}$$

运动方程:

$$M_i \frac{\partial \boldsymbol{V}_i}{\partial t} = q_i(\boldsymbol{E} + \boldsymbol{V}_i \times \boldsymbol{B}) \tag{4}$$

$$\frac{\partial r_i}{\partial t} = \boldsymbol{V}_i \tag{5}$$

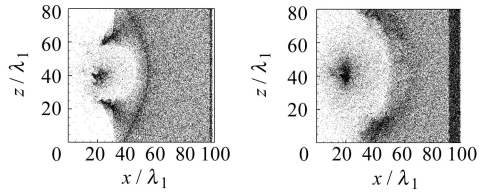
式中, μ_0, ε_0 分别指真空导磁率和真空介电常数; $\boldsymbol{V}$, $\boldsymbol{E}$, $\boldsymbol{B}$, $\boldsymbol{J}$, t 分别表示速度、电场强度、磁场强度、总电流密度和时间; 下标 i和 e分别表示离子和电子. 在运动方程中 $P = n_e k_B T_e$, n_e 是电子数密度, k_B 是玻尔兹曼常量, T_e 是电子温度.

在模拟计算中, 模拟区域为三维的长立方体 $98\lambda_i \times 83\lambda_i \times 83\lambda_i$, λ_i 为由 $\lambda_i = V_A/\Omega_i$ 得到的离子惯性长度. 线圈所在的位置为 $(15\lambda_i, 42.5\lambda_i, 42.5\lambda_i)$, 线圈半径为 $2\lambda_i$, 等离子源位于线圈的右侧, 等离子体从线圈上下两侧随机入射, 太阳风粒子从平面 $x = 98\lambda_i$ 向计算域内注入. 模拟中采用的边界条件: ①对粒子采用开放边界条件, 当入射粒子飞出计算域时, 就不再计算该粒子; ②由于距离线圈较远位置电磁场强度已经非常的小, 因此 6个边界面上自洽电磁场的边界值均设为 0

在本文中线圈产生的偶极子磁场由毕奥-萨伐尔定律计算得到. B_0 为线圈中心的磁场强度, V_A 为阿尔文速度, Ω_i 为由 $\Omega_i = B_0 e/M_i$ 得到的离子回旋频率. 在计算中采用无量纲量, $\bar{r} = r/\lambda_i$, $\bar{B} = B/B_0$, $\lambda_i = 0.25$m, $B_0 = 1$T. 为了简便, 在下文中的量都去掉了横杠.

2　结果和分析

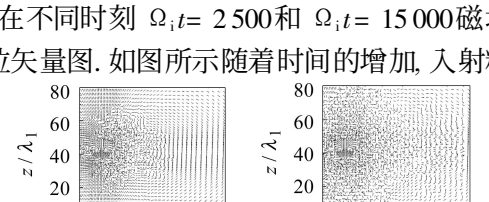
图 1是太阳风粒子和等离子体在进入磁场后不同时刻的粒子分布图. 从图 1a中可以看到太阳风粒子运动到磁场周围时会形成了一个漂亮的弓形激波, 这是由于太阳风粒子的磁压等于动压而形成的. 图 1b表明入射粒子增多后, 产生磁场膨胀的区域增大, 在弓形激波附近太阳风粒子的动压和磁压平衡被打破, 粒子的磁压大于动压, 排斥太阳风粒子向外运动, 磁顶层也随之向外运动. 由于弓形激波的阻碍, 太阳风粒子的能量将会通过弓形激波传递给磁场, 从而产生能量的交换. 当弓形激波向外扩张后, 磁气圈和太阳风作用的面积增大, 从而产生更大的推力.



a　0.025ms(Ωit= 2500)　　b　0.15ms(Ωit= 15000)

图 1　不同时刻相互作用的太阳风粒子和等离子体分布图 (V= 0.02V_A)

图 2显示了当粒子入射速度为 $V = 0.02V_A$ 时, 在不同时刻 $\Omega_i t = 2500$和 $\Omega_i t = 15000$磁场的单位矢量图. 如图所示随着时间的增加, 入射粒子



a　0.025ms(Ωit= 2500)　　b　0.15ms(Ωit= 15000)

图 2　不同时刻磁场强度的单位矢量图 (V = 0.02V_A)

的增多, 磁场变化的范围逐渐向远离线圈的区域扩张, 即真实磁场发生变化的范围增大了, 这是由于粒子被磁场磁化后沿磁力线运动产生的电流对对磁场产生了扰乱.

图 3是粒子入射速度为 0.02V_A计算得到的线圈偶极子磁场在赤道线上沿 x 轴在不同时刻 $\Omega_i t$= 2 500和 $\Omega_i t$= 15 000的变化曲线, 并与磁场以 R^{-1}, R^{-2}, R^{-3}衰减时的变化曲线相比较. 图中磁场在一定区域内产生了变化, 以 R^{-a} (a= 1~ 2) 衰减. 这表明粒子的向外扩张使得磁场产生了膨胀. 随着入射时间的增加, 磁场向外膨胀的程度增加了. 图 3还显示了磁场膨胀的速度是非均匀的, 在不同的时刻磁场膨胀的程度是不一样的.

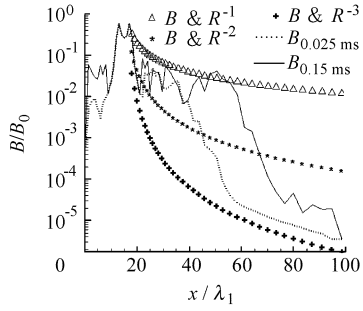
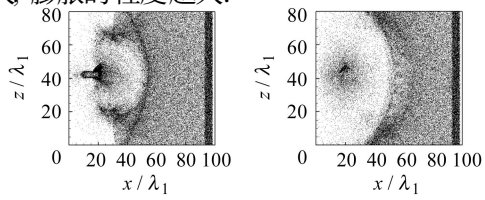


图 3 在赤道面上磁场强度在不同时刻沿 x轴的变化图 (V = 0. 02V_A)

图 4是在同一时刻 $\Omega_i t$= 10 000, 粒子以不同速度 V= 0. 01V_A和 V= 0. 04V_A入射, 太阳风粒子和等离子体相互作用的粒子分布图. 两图对比可知, 弓形激波的变化幅度不一样, 相应的磁顶层的作用力大小也不同, 这表明不同粒子入射速度对磁场膨胀的影响是不同的, 当速度变大时, 磁场膨胀增强, 磁顶层扩张的更明显, 太阳风与磁场的作用力更大, 在相互作用过程中传递的能量更多.

图 5为粒子以不同的速度入射时, 在相同时刻 $\Omega_i t$= 10 000, 磁场强度在赤道面上沿 x 轴的变化曲线图, 并与磁场以 R^{-3}, R^{-2}, R^{-1}的速率衰减的曲线作比较. 通过比较可以看出不同的粒子入射速度对磁场强度变化的影响是不一样的, 当速度增大时, 磁场变化的范围和强度都变大了, 速度越大, 膨胀的程度越大.



a V= 0. 01V_A b V= 0. 04V_A

图 4 在相同时刻 (Ω_i t= 10 000)入射速度不同时的粒子分布图

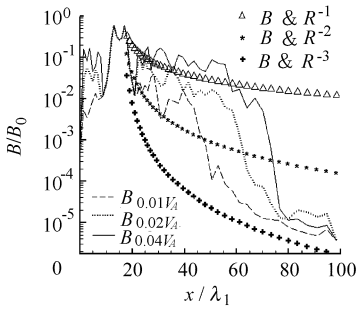


图 5 粒子入射速度不同时在相同时刻 (Ω_i t= 10 000)的磁场强度变化图

3 结 论

本文对太阳风与磁场的相互作用进行了数值模拟. 结果表明, 当太阳风粒子和等离子体粒子相互作用时会在磁场周围产生一个漂亮的弓形激波, 当高能等离子体进入磁场后, 由于粒子的动压大于磁压, 粒子向外扩张, 引起磁场的膨胀, 从而使得磁气圈变大, 磁顶层扩张出去, 增大太阳风和磁场作用的面积, 把更多的能量传递给飞行器. 等离子体入射时间和入射速度的增大, 都会增强磁场膨胀的程度, 增加太阳风粒子和磁场的相互作用, 直到磁场趋于稳定.

参考文献 (**References**)

[1] Winske D, Omidi N. Plasma expansion in the presence of a dipole magnetic field[J]. Physics of Plasmas, 2005, 12(7): 072514

[2] Winglee R M, Slough J, Ziemba T, et al. Mini-magnetospheric plasma propulsion: tapping the energy of the solar wind for spacecraft propulsion[J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105: 21067-21077

[3] Winglee R M. Multi-fluid simulations of the magnetosphere: the identification of the geopause and its variation with IMF[J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25: 4441-4444

[4] Winglee R, Ziemba T, Giersch L, et al. Simulation of mini-magnetospheric plasma propulsion (M2P2) interacting with an external plasma wind[R]. AIAA-2003-5224, 2003

[5] Zubrin R M. The use of magnetic sails to escape from low earth orbit[J]. Journel of the British Interplanetary Society, 1993, 46: 3-10

[6] Saha S. Modeling of plasma propulsion using an inflated magnetic field and its interaction with a fast plasma stream[D]. Huntsville: Department of electrical and computer engineering, University of Alabama, 2003

[7] Huba J D, Hassan A B, Winske D. Stability of sub-Alfvenic plasma expansions[J]. Physics of Fluids B, 1990, 2: 1676-1697

[8] Winske D. Development of flute modes on expanding plasma clouds[J]. Physics of Fluids B, 1989, 1: 1900-1910

(责任编辑: 张 嵘)