磁层顶涡旋撕裂模不稳定性的数值模拟：涡旋和磁岛的合并增长*

濮祖荫　霍彦涛　严　明

（北京大学地球物理系空间物理专业、理论流体和应用数学中心）

刘　振　兴

（中国科学院空间科学与应用研究中心，北京）

关键词　涡旋撕裂模不稳定性、合并、磁场重联

通量传输事件（FTE）是发生在磁层顶的局地瞬时磁场重联现象，它在太阳风向磁层输运能量和质量的过程中可能起着重要作用[1,2]。Lee-Fu 模式是 FTE 的第一个理论模型[3]。最近刘振兴等提出，涡旋重联也可能形成 FTE 的磁涡旋管[4-6]。涡旋重联是由涡旋撕裂模不稳定性（VITM）引起的，其饱和后准定常渐进状态在二维情况下由大尺度涡旋和同心磁岛组成[7]。这种大尺度涡旋和磁岛是怎样发展起来的？本文用二维磁流体力学数值模拟对此进行了考察。

FTE 发生在行星际磁场具有南向分量时。此时磁层顶同时具有剪切流和反转型剪切磁场。扰动前磁层顶可取下列简单模型：

$$\boldsymbol{V}_0 = V_0 \tanh(z/l_0)\boldsymbol{e}_x + V_{0y}\boldsymbol{e}_y, \tag{1}$$

$$\boldsymbol{B}_0 = -B_0\tanh(z/l_0)\boldsymbol{e}_x + B_{0y}\boldsymbol{e}_y, \tag{2}$$

$$N = (N_1 - N_2)/2 + (N_1 + N_2)\tanh(z/l_0)/2, \tag{3}$$

这里 V_0、B_0、V_{0y}、B_{0y}、N_1 和 N_2 均为无量纲常数，l_0 代表剪切层厚度，B_0、V_0 和 N 的单位数值分别代表 B_{00}，$V_A = B_{00}/(\mu_0\rho_{00})^{\frac{1}{2}}$ 和 ρ_{00}。ρ 为质量密度。下标1(2)代表磁鞘(磁层)。假设扰动前后所有物理量都与 y 无关，不可压磁流体动力学方程组很易改写成下列无量纲形式

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} = -\boldsymbol{V}\cdot\nabla\Omega + \frac{\boldsymbol{B}}{N}\cdot\nabla J - \frac{J}{N^2}(\boldsymbol{B}\cdot\nabla N) + R^{-1}\nabla^2\Omega, \tag{4}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} = -\boldsymbol{V}\cdot\nabla\boldsymbol{B} + \boldsymbol{B}\cdot\nabla\boldsymbol{V} + R_m^{-1}\nabla^2\boldsymbol{B}, \tag{5}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -\boldsymbol{V}\cdot\nabla N, \tag{6}$$

其中 $\boldsymbol{V} = V_x\boldsymbol{e}_x + V_z\boldsymbol{e}_z$，$\boldsymbol{B} = B_x\boldsymbol{e}_x + B_z\boldsymbol{e}_z$，$J$ 和 Ω 分别为电流密度和涡度之 y 分量，$J\boldsymbol{e}_y = \nabla\times\boldsymbol{B}$。$R$ 和 R_m 为雷诺数和磁雷诺数。引进 $\boldsymbol{\phi} = \phi\boldsymbol{e}_y$、$\boldsymbol{V} = -\nabla\times\boldsymbol{\phi}$，可得 $\nabla^2\phi = \Omega$。易知此时 B_y 和 V_y 不随时间变化且与其他物理量退耦。模拟区域取为 $-L/2 \leqslant x \leqslant L/2$，

本文 1988 年 12 月 21 日收到。

* 国家自然科学基金资助项目。

$-L/2 \leqslant z \leqslant L/2$. X 方向取周期性边条件. $\boldsymbol{V}(x, \pm L/2) = \pm V_0 \boldsymbol{e}_x$, $\boldsymbol{B}(x, \pm L/2) = \mp B_0 \boldsymbol{e}_x$, $N(x, \pm L/2) = N_{1,2}$, 格点数为 (32×32). 令 $\Delta x = 5$, $\Delta z = 1$, $l_0 = 15$. 除特殊声明外,计算中令 $V_0 = 2$, $R^{-1} = 0.08$, $R_m^{-1} = 0.19$, $N_1 = 9$, $N_2 = 1$. 相应的反常阻尼系数与现有弱湍流理论的估计值相符[7].

1. 在初始时刻加进微小扰动以后，系统中便发生了 VITM；涡旋比磁岛早出现并决定磁岛的位置和形态[7]. 图 1 给出了初始扰动由等幅的 X 方向的基波和二次谐波组成时涡旋的发展过程. 小尺度涡旋先发展，而后合并成大尺度涡旋. 图 2 给出了相应条件下磁岛的生长情况. 同样,小尺度先发展，然后合并成大磁岛. 磁岛的合并晚于涡旋. 涡管(或等涡度线)的演变历程类似. 小涡管先形成,经过明显的相对旋转后，合并为大涡管. 涡管合并比磁岛迟.

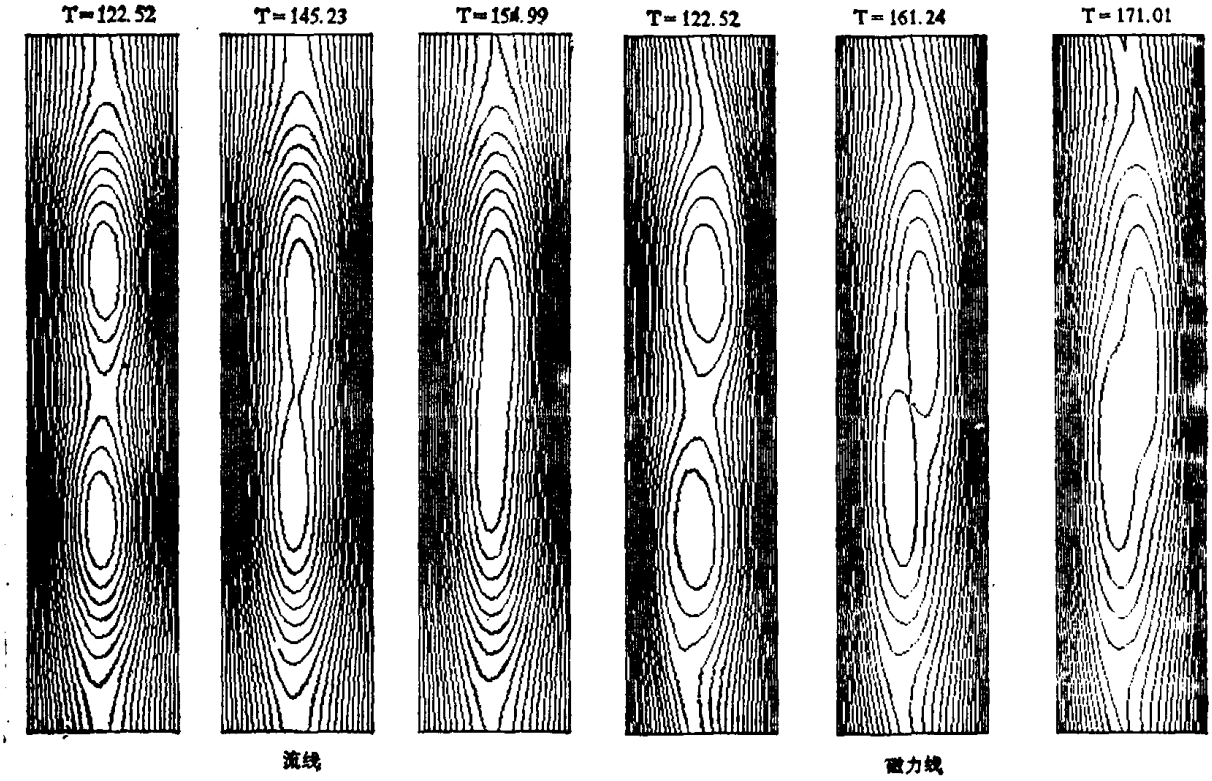

图 1 涡旋合并增长

图 2 磁岛合并增长

2. 图 3a、b 画出了在同样条件下 $V_z(x,0)$ 和 $B_z(x, 0)$ 的 Fourier 分量随时间的变化，其中 k 代表 k 次谐波.由图 3 知,在非线性阶段初期高次 $(k > 2)$ 谐波被激发,小尺度扰动比大尺度扰动增长迅速. 当大尺度扰动也增长起来以后，大小尺度扰动间发生明显的模-模耦合. 此后大尺度扰动幅度的进一步增加，伴随着小尺度幅度的降低. 与图 1(2) 对比可发现，涡旋(磁岛)的合并恰好出现在大尺度扰动幅度已超过小尺度而后者正处于低谷位置的时刻. 因此，VITM 的合并现象是由模-模耦合引起的能量由小尺度扰动向大尺度反向串级传输所产生的. 流体中的大尺度涡旋是这样形成的[8,9]. 图 3a 与 3b 间的类似性表明，VITM 的大尺度涡旋与磁岛也是如此生长的.

3. Richard 等认为[10]地球磁尾中的磁岛合并可能起源于同向电流中心的彼此吸引.VITM 中的合并现象是否也可能起因于此? 我们研究了初始扰动仅包含二次谐波时的情形. 涡旋、磁岛和涡管"对"间既未合并又未因相互吸引而靠拢,模-模耦合也未导致基波产生. 因此，至

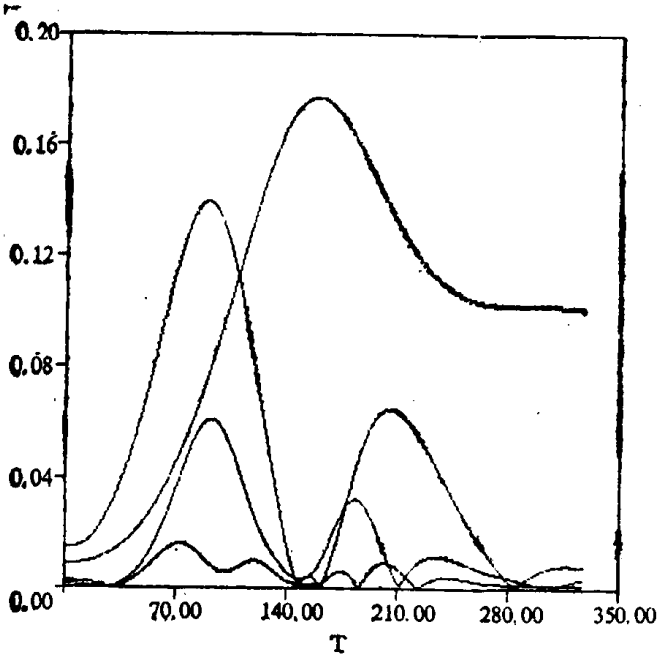

图 3a $V_x(x, z=0)$ 的 Fourier 分量随时间的演化

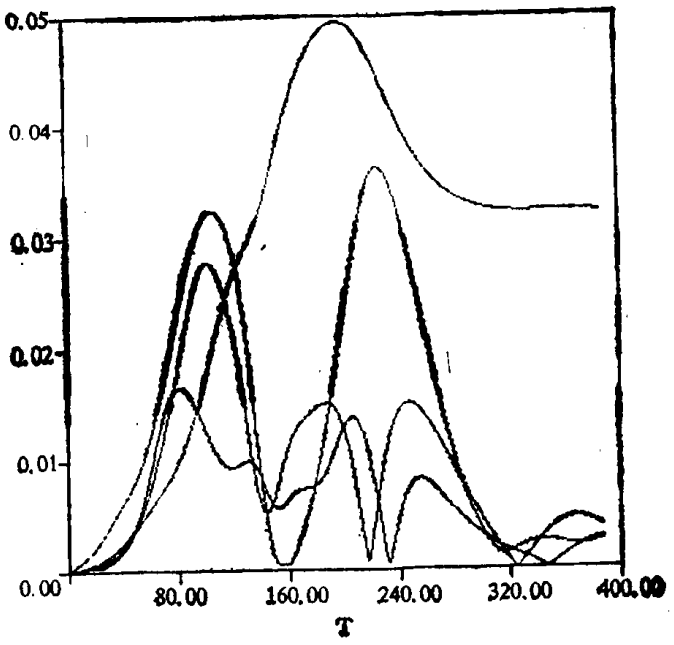

图 3b $B_x(x, z=0)$ 的 Fourier 分量随时间的演化

少在周期边条件下 VITM 的合并现象不象起因于同向电流彼此的吸引,而是来源于大、小尺度扰动非线性作用引起的能量反向串级传输. 这正好反映了 VITM 的特点: 流体涡旋在不稳定性发展中起主导作用[7].

结束语 合并过程可导致大尺度涡旋、磁岛和涡管出现. 向阳面磁层顶经常观测到有大量小尺度结构存在. 直径 1—2R_E 的 FTE 的磁通量管有可能由小尺度结构合并而成. 关于非周期边条件下的合并过程我们将在另文中讨论.

致谢: 感谢傅竹风同志在计算方面的热情帮助.

参 考 文 献

[1] Russell, C. T. and Elphic, R. C., *Space Sci. Rev.*, **22**(1978), 681.
[2] Cowley, S. W. H., *Rev. Geophys. Space Phys.*, **20**(1982), 531.
[3] Lee, L. C. and Fu, Z. F., *Geophs. Res. Lett.*, **12**(1985), 105.
[4] 刘振兴、胡一丁,科学通报, **32**(1987),12: 905.
[5] Liu, Z. X. and Hu, Y.D., *Geophys. Res. Lett.*, **15**(1988), 752.
[6] 胡一丁、刘振兴、濮祖荫,中国科学,A辑, 1988,10: 1100.
[7] 濮祖荫、严明、傅竹风,地球物理学报(待发表).
[8] 单肖文、是勋刚,硕士研究生毕业论文, 1988.
[9] Brown, G. I. and Roshko, *J. Fluid Mech.*, **641**(1974), 775.
[10] Richard, R. L., Walker, R. J., Sydora, R. D. and Ashour-Abdalla, M., PPG-1140, IGPP-3094, 1988.