

·成果简介·

涡旋诱发重联理论及其应用

刘振兴*

(中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100080)

濮祖荫

(北京大学地球物理系, 北京 100871)

[关键词] 涡旋诱发重联, 磁层顶边界层, 通量传输事件, 涡旋撕裂模不稳定性

磁场重联是空间物理和空间等离子体物理中的重要基本问题之一。近年来的观测结果表明, 地球磁层、太阳大气、其他行星磁层、彗星尾以及受控聚变等都存在磁场重联现象。在磁层等离子体系统中, 磁场重联对能量的突然释放、能量的转化、粒子的加热和加速, 以及在太阳风能量、动量和质量向磁层的传输中起着关键作用。

本项目系统地研究了磁层顶边界层区的瞬时重联过程, 重要创新结果可归结为^[2-4]:

1. 冲破磁场重联的传统观念, 首次提出流体涡旋诱发磁场重联的新机制, 建立了涡旋诱发重联(VIR)理论。

VIR理论的主要论点是: 在同时存在速度剪切和磁场剪切的等离子体区, 由于 Kelvin-Helmholtz (K-H) 不稳定性的发展, 首先形成大尺度的流体涡旋。由于流体涡旋对磁场的扭曲作用, 导致磁力线变形, 产生局部的磁场重联, 结果在流体涡旋区形成同心的磁涡旋(磁岛)和 X 中性线^[1]。

2. 发现 K-H 不稳定性和撕裂模不稳定性的相互作用可产生新的不稳定性。根据 K-H 不稳定和撕裂模不稳定性增长率之比, 我们提出一个 VIR 发展的判据 R ($R = Ma_A Re_M^{1/2}$), Ma_A 是 Alfvén 马赫数, Re_M 是磁雷诺数。根据这一判据, 从理论上可预期 K-H 不稳定性与撕裂模相互作用存在以下三种情况:

(1) 当 R 小于某一临界值 R_{c1} 时, 撕裂模不稳定性占主导, 产生类似于传统的撕裂模重联, 先形成磁涡旋(磁岛), 磁岛与其诱变形成的流体涡旋的位置和形态很不相同。

(2) 当 $R_{c1} < R < R_{c2}$ 时, 两种不稳定性所起的作用相当, 流体涡旋与磁涡旋几乎同时出现。这两种不稳定性相互作用, 出现一种新的不稳定性, 我们称其为 K-H 撕裂模不稳定性(K-H-T 不稳定性)。在这种情况下, 流场和磁场的位形与传统的撕裂模重联不同。

(3) 当 $R > R_{c2}$ 时, K-H 不稳定性占主导, 流体涡旋先形成。流体涡旋与磁涡旋同心且位

* 中国科学院院士。

本文于 1997 年 2 月 18 日收到。

形十分相似。这种 K-H 占主导的不稳定性，我们称其为涡旋诱发撕裂模不稳定性。

数值模拟证实了上述的理论分析结果。在向阳面磁层顶区， $R \gg 1$ ，表明在向阳面磁层顶区主要是流体涡旋诱发磁场重联。

3. 揭示了一种新的磁流体结构——磁流体涡旋和磁流体涡旋管。

VIR 形成的同心的流体涡旋和磁涡旋是一种新的磁流体力学结构，我们称其为磁流体 (MF) 涡旋，三维情况下是磁流体涡旋管 (MFT)。MFT 既不是通常的流体涡旋管，也不同于通常的磁通量管。在 MFT 中存在着场向电流和 Alfvén 波，并沿磁力线传播。在 MFT 中磁力线是螺旋式的，说明 VIR 是局部区域产生场向电流和 Alfvén 波的一种重要机制。

4. 涡旋诱发重联过程中不同尺度涡旋的相互作用和能量转化过程。

理论和模拟研究结果表明，小尺度的涡旋发展较快。假如系统中出现两个或两个以上的涡旋，由于涡旋的不稳定性，它会偏离原来的位置，与另外的涡旋靠近，同时绕着另外的涡旋转动；当靠近到一定程度时，在反方向流场区发生流线重联，最后合并成一个大的涡旋。数值模拟结果清楚地表现出这一过程。磁岛也表现出与涡旋相类似的合并过程。上述的涡旋合并过程说明，大尺度的涡旋和磁岛可能是由小尺度涡旋和磁岛合并而成的。

流体涡旋诱发磁场重联是动能向磁能的转化过程。平均动能通过 K-H 不稳定性先转化为涡旋能量。流体涡旋尺度的增长率对应于平均动能转化为涡旋能量的速率。由于 K-H 不稳定性，先产生小尺度的涡旋，小尺度涡旋合并为大尺度涡旋。流体涡旋在诱发磁场重联的过程中，逐渐将能量向磁能转化，磁涡旋的能量不断增加，最后达到饱和的准稳态。数值模拟结果表明，涡旋诱发重联过程达到准稳态时，流场、磁场、等涡度线和等数密度线，均表现为同心的涡旋形态。动能向磁能转化的条件是系统的动能大于磁能，即 $Ma_A > 1$ ；当 $Ma_A < 1$ 时，是磁能向动能转化。磁涡旋的磁能最终是通过电阻耗散为流体的动能和热能。

5. 建立了一个新的通量传输事件模型。

国际太阳地球探测 (ISEE) 卫星的主要发现之一是，在向阳面磁层顶区发现了通量传输事件 (FTES)，它对太阳风、磁层和电离层的耦合有重要影响。这一发现立即引起人们极大兴趣，促进了瞬时重联的研究。目前认为，FTES 是由瞬时重联引起的，根据 VIR 理论，我们建立了一个新的 VIR 通量传输事件模型，FTE 管的三维结构如图 1 所示。从涡旋诱发重联的观点看，可把 FTE 管看作磁流体涡旋管 (MF 管)。根据 MF 管的一些基本特性，可以解释 FTES 的主要观测现象：(1) FTES 的形成区是在日下点两侧的中纬度区，因在此区内由于太阳风绕流产生了较大的速度剪切。(2) 只有当行星际磁场南向时，FTES 才能发生。(3) 只有当太阳风绕流速度大于某一值时，FTES 才能发生。(4) 在 FTE 管中磁力线是螺旋式的，存在着场向电流和 Alfvén 波。(5) 能解释 FTES 磁场和速度信号的各种形态，包括正 FTE (B_N 是先正后负，这里 B_N 是垂直于磁层顶的

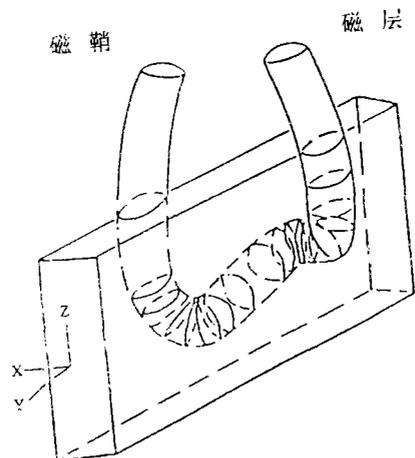


图 1 根据涡旋诱发重联建立的通量传输事件三维结构模型

磁场分量), 反 FTE (B_N 是先负后正) 和不规则的 FTE (B_N 是单极分布)。(6) 从理论上计算了 FTE 从低纬向高纬的运动轨迹不是直线而是摆线。

6. 从理论上预测了背阳面高纬边界层区瞬时重联的某些特性。

由于太阳风的绕流, 除日下点区外, 整个磁层顶边界层区都存在着场向速度剪切。因此, 涡旋诱发重联理论不但可应用于向阳面磁层顶边界层区, 而且可应用于极隙区和高纬边界层区。

在极隙区, 由于太阳风的绕流效应, 会产生流体涡旋, 引起涡旋诱发的局部重联, 极隙区的局部重联现象已被观测到。在背阳面的高纬边界层区, 目前卫星观测数据还很少。根据涡旋诱发重联理论, 我们曾对背阳面高纬边界层区的瞬时重联作过预测, 指出, 当地球处于行星际磁场 (IMF) 正扇形结构时, 北半球高纬边界层区 IMF X 分量与地球磁场方向相反, 在这里, 同时存在着速度和磁场剪切, 符合涡旋诱发重联条件, 会发生涡旋诱发重联, 形成流体涡旋和磁岛; 在南北球, IMF X 分量与地球磁场方向相同, 因此不会发生涡旋诱发重联。当地球处于负的 IMF 扇形结构时, 情况则恰好相反, 即南半球高纬边界层区发生涡旋诱发重联。

根据涡旋诱发重联理论可以预言, 在背阳面高纬边界层区可能会发生类似于向阳面磁层顶区的通量传输事件。

本研究被认为是当前国际上主要的瞬时重联模型之一。涡旋诱发重联理论有广泛的应用前景, 不但可应用于地球磁层, 还可应用于其他行星磁层、行星际和太阳大气的某些区域。

参 考 文 献

- [1] Liu Z X, Hu Y D. Local reconnection caused by vortices in the flow field. *Geophys. Res. Lett.*, 1988, **15** (8): 752 - 755.
- [2] Liu Z X, Pu Z Y. The model of vortex induced reconnection (I) ——Dynamic characters. *Chinese Journal of Geophysics*, 1990, **33** (1): 1 - 12.
- [3] Liu Z X, Hu Y D, Li F, Pu Z Y. The motion of magnetic flux tube at the dayside magnetopause under the influence of solar wind. *J. Geophys. Res.* 1990, **95** (5): 6561 - 6567.
- [4] Liu Z X, Zhu Z W, Li F, Pu Z Y. Topology and signatures of a model for flux transfer events based on vertex induced reconnection. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97** (12).

THE THEORY OF VORTEX INDUCED RECONNECTION AND ITS APPLICATION

Liu Zhengxing

(Center for Space Science and Applied Research, CAS, Beijing 100080)

Pu Zuying

(Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871)

Key words vortex induced reconnection, magnetopause boundary layer, flux transfer events, vortex induced tearing mode instability