

Xiao C J, Pu Z Y, Huang Z Y, et al. Multiple flux rope events at the high-latitude magnetopause on January 26, 2001: Current density calculating. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(4):555 ~ 561

2001 年 1 月 26 日高纬磁层顶通量管事件的观测研究 ——空间电流密度计算及分析

肖池阶¹ 濮祖荫^{1*} 黄宗英¹ 傅绥燕¹ 谢伦¹ 宗秋刚² T Fritz²
K-H Gassmeier³ 刘振兴⁴ 曹晋滨⁴ 史建魁⁴ 沈超⁴ 路立⁴
王~~权~~权⁴ 陈涛⁴

1 北京大学地球与空间科学学院,北京 100871

2 Center for Space Physics, Boston University, USA

3 IGM, Technische University Braunschweig, Germany

4 中国科学院空间科学与应用研究中心,北京 100080

摘要 讨论了三种根据 Cluster 四颗卫星的磁场测量数据计算空间电流的方法及其误差,论证了这几种方法的内在一致性,并得到了完全相同的计算结果. 进而依据 Cluster 磁场探测资料,计算了 2001 年 1 月 26 日多重磁通量管和 FTE 事件中高纬磁层顶边界层和磁鞘区的电流密度. 结果表明,磁通量管内电流密度较大,可达到约 10^{-8} A/m^2 ; 计算精度较高,结果可靠. 本文还应用最小方差分析法(MVA),发现电流方向与通量管的轴向基本一致; 论证了电流 MVA 分析在研究通量管性质时的作用,同时提出了电流管的概念.

关键词 电流密度 通量管 磁层顶 最小方差分析法

文章编号 0001-5733(2004)04-0555-07 中图分类号 P353 收稿日期 2004-02-17,2004-04-12收修定稿

MULTIPLE FLUX ROPE EVENTS AT THE HIGHLATITUDE MAGNETOPAUSE ON JANUARY 26, 2001:CURRENT DENSITY CALCULATING

XIAO Chi-Jie¹ PU Zu-Yin^{1*} HUANG Zong-Ying¹ FU Sui-Yan¹ XIE Lun¹ ZONG Qiu-Gang²
T Fritz² K-H Gassmeier³ LIU Zhen-Xing⁴ CAO Jin-Bin⁴ SHI Jian-Kui⁴ SHEN Chao⁴
LU Li⁴ WANG Nai-Quan⁴ CHEN Tao⁴

1 School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2 Center for Space Physics, Boston University, 725 Commonwealth Avenue, Boston MA 02215, USA

3 IGM, Technische University Braunschweig, Germany

4 Center for Space Science and Application Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

Abstract A systematic comparison is carried out for three Methods of current density calculating based on simultaneous magnetic field measurements of four-spacecraft Cluster mission. Analytically and numerically demonstrated that within the linear approximation, all these methods lead to the exactly the same results. As a case study, the current density of multiple flux rope events at the high-latitude magnetopause on January 26,

基金项目 国家自然科学基金委重点项目(49834040)、重大项目(40390150)和国家重大基础科学项目(G200000784).

作者简介 肖池阶,男,1975年生,2001年于北京大学获空间物理专业博士学位,目前在中国科学院国家天文台工作.主要从事空间物理的观测数据分析和等离子体数值模拟研究. E-mail: cjxiao@pku.edu.cn

***通讯作者** 濮祖荫,男,1937年生,教授,博士生导师.主要从事磁层物理,包括磁重联、磁层亚暴和磁层不稳定性研究.

E-mail: zypu@pku.edu.cn

2001 is investigated. It is showed that an intense current flows inside the ropes with the current density reaching as high as about 10^{-8} A/m^2 . The current inside rope is valuable for the small relative calculating error. It is also found that the directory of current is almost parallel the axis of flux rope gotten by magnetic minimum variance analysis (MVA). It is supposed the current MVA method is useful and simply for the rope axis orientation.

Key words Current density, Flux rope, Magnetopause boundary layer, Maximum/Minimum variation analysis.

1 引言

欧洲空间局 (ESA) Cluster 星座计划由四颗卫星组成,近地点距地心 $4 R_E$ (R_E 为地球半径),远地点距地心 $19.6 R_E$,卫星之间的距离依据轨道位置和研究需要可以在 $100 \sim 3000 \text{ km}$ 之间调整. Cluster 计划首次实现了对空间小尺度结构的多点协同观测,并可以区分时间和空间变化,这是空间探测史上的一个重要里程碑. 根据四颗卫星的探测结果,可以直接观测研究地球磁层和近地太阳风等离子体和磁场的三维小尺度时-空结构^[1]. 依据适当的物理模型,采用时间序列分析方法,可以由 Cluster 的测量结果得到电流密度、波矢量及间断面法向等空间矢量. 这是 Cluster 计划的主要创新点^[1,2].

磁层顶电流片及磁层顶磁场重联过程中存在较强的电流. 观测和研究这些电流的产生、分布及其变化,对于揭示磁重联和太阳风-磁层相互作用过程,有着非常重要的意义. 2001 年 1 月 26 日世界时 (UT) 11:10~11:33 期间,Cluster 卫星处于向阳面高纬磁层顶北西位置,在穿越磁层顶外的强能粒子层并向磁鞘区运动时,观测到了多次通量管事件和磁通量传输 (FTE) 事件. 在文献[3]和[4]中,详细分析了各通量管和 FTE 管的管轴方向和整体运动速度 V_{HT} ,结合 Rapid/Cluster 强能粒子探测器^[5]的观测数据,发现在通量管和 FTE 管内,太阳风热等离子体和磁层强能粒子分别向磁层内、外运动. 本文在此基础上,进而研究上述多重通量管事件和 FTE 事件中空间电流的大小、方向和分布. 本文首先讨论我们发展的和前人提出的几种以 Cluster 磁场测量为基础的计算电流的方法,分析计算误差,然后计算 2001 年 1 月 26 日 11:10~11:33 UT 期间高纬磁层顶边界层和磁鞘区的电流密度. 由于应用磁场最小方差分析法 (MVA) 确定磁通量管轴线方向时存在着不确定性,本文还探讨电流 MVA 分析在研究通量管结

构时的作用,提出电流管的概念.

2 空间电流密度计算方法

Cluster 的四颗卫星在空间中构成一个四面体,卫星 (S1, S2, S3 和 S4) 位于四面体的 4 个顶点上 (图 1). 当卫星之间的距离比磁场变化的特征尺度小很多时,假设物理量在四面体内是线性变化的,根据 Cluster 的磁场测量结果,可以近似计算出磁场的旋度,再由安培定律得到电流密度矢量的近似值. 具体推导时,从不同的角度出发,可得到不同的计算表达式,可以证明这些表达式具有内在的一致性,其计算结果完全相同.

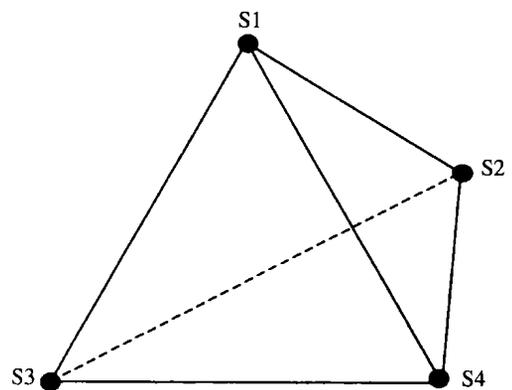


图 1 Cluster 的四颗卫星构成一个四面体
Fig. 1 The tetrahedron consisted by the four spacecraft Cluster mission

文献[3]提出的计算电流密度的方法是将其中一颗卫星 (比如选 S1) 作为参照点,设其位置为 r_1 , 磁场为 B_1 . 其余三颗卫星测得的磁场 B_i 与 B_1 在线性近似下满足下列关系 (保留到一阶小量)

$$\begin{aligned} (B_{i1})_x &= B_{x1} - B_{x1} \frac{\partial B_x}{\partial x} x_{i1} \\ &\quad + \frac{\partial B_x}{\partial y} y_{i1} + \frac{\partial B_x}{\partial z} z_{i1}, \\ (B_{i1})_y &= B_{y1} - B_{y1} \frac{\partial B_y}{\partial x} x_{i1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + \frac{\partial B_y}{\partial y} y_{i1} + \frac{\partial B_z}{\partial z} z_{i1}, \\ (B_{i1})_z = & B_{zi} - B_{z1} \frac{\partial B_x}{\partial x} x_{i1} + \\ & \frac{\partial B_x}{\partial y} y_{i1} + \frac{\partial B_x}{\partial z} z_{i1}, \end{aligned} \quad (1)$$

将(1)式改写成矢量形式为

$$B_{i1} = B \cdot r_{i1},$$

其中 r_i 为其余 3 颗卫星的位置, B 为磁场梯度张量, $B_{i1} = B_i - B_1$, $r_{i1} = r_i - r_1$, $i=2,3,4$. 设在四面体内磁场的变化梯度相同,经过反演运算,得

$$B = B_{i1} \cdot r_{i1}^{-1}, \quad (2)$$

其中 r_{i1}^{-1} 是 r_{i1} 的逆矩阵. 这样就近似地得到张量 B 的九个分量,从而得到 $\nabla \cdot B$ 和 $\nabla \times B$;再根据 $J = (\nabla \times B) / \mu_0$ 可求得电流密度 J ,其中 μ_0 为真空磁导率. Khurana 等^[6]也曾导出了相同的结果.

由 Cluster 四颗卫星构成的四面体的体积 V_{1234} 和四个表面的面积分别为

$$\begin{aligned} V_{1234} &= (r_{12} \cdot r_{13} \times r_{14}) / 2, \\ S_{123} &= (r_{12} \times r_{13}) / 2, S_{134} = (r_{13} \times r_{14}) / 2, \\ S_{142} &= (r_{14} \times r_{12}) / 2, \\ S_{234} &= (r_{23} \times r_{24}) / 2 = - (r_{12} \times r_{13} + r_{13} \times r_{14} \\ &+ r_{14} \times r_{12}) / 2, \end{aligned}$$

其中 $r = r_i - r_1$, 且有 $r_i = -r_j$, 其中 $i, j = 1, 2, 3, 4$.

基于线性假设,根据 $dS \cdot (\nabla \times B) = dl \cdot B$,

$$dV \cdot (\nabla \cdot B) = dS \cdot B, \text{ 式中 } V_{1234}, S_{1234} \text{ 分别}$$

为第 1, 2, 3, 4 等四面体顶点中的任意 3 个顶点的组合, S 表示由三个顶点构成的三角形面积, l 为三角形的边矢量, S_{1234} 为四面体的闭合表面. 结合上述面积和体积公式、中值定理和安培定律, Dunlop 等^[7]和 Robert 等^[8]得到了第二组计算磁场旋度和散度的表达式:

$$(\nabla \times B) \cdot (r_{12} \times r_{13}) = B_{12} \cdot r_{13} - B_{13} \cdot r_{12}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} (\nabla \cdot B) \cdot (r_{12} \cdot r_{13} \times r_{14}) &= B_{41} \cdot (r_{12} - r_{13}) \\ &+ B_{21} \cdot (r_{13} - r_{14}) + B_{31} \cdot (r_{14} - r_{12}), \end{aligned} \quad (4)$$

此外, Chanteur 等^[9,10]根据四面体的线性插值方法,得到在四面体的重心上,任一矢量 V 的散度和旋度计算公式

$$\nabla \cdot V = \sum_{i=1}^4 K_i \cdot V, \quad (5)$$

$$\nabla \times V = \sum_{i=1}^4 K_i \times V. \quad (6)$$

其中

$$K_i = \frac{r_i \times r_j}{r_i \cdot (r_j \times r_k)}, \quad (7)$$

式中 i, j, k 依次轮流,如果以其中一颗星作为计算点并记为 i ,其余三颗星相应记为 j, k, l ,由(5)~(7)式可得到第三种计算磁场散度和旋度的方法.

以上三种计算电流密度的方法都是基于线性假设,具有内在一致性. 不难看出,将(7)式代入(5)、(6)式,展开后即可得到(3)、(4)式,其表达式可以相互推出,且根据这三组表达式得到的计算结果完全相同^[3](具体计算此处从略). 因此,通过分析和实际计算证明了这三种计算方法完全等价.

3 电流计算的误差分析

依据四颗卫星的磁场测量计算电流时,结果的可靠性是首先要考虑的问题. 误差主要来源于三个方面:(1)磁场的测量误差及卫星四面体位形的影响;(2)四颗卫星磁场测量时间的同步性引起的误差;(3)对磁场进行空间线性插值引起的误差^[7].

在 2001 年 1 月 26 日 11 10~11 33 UT 期间,卫星四面体的棱边最短为 507.5km,最长为 729.7km,四面体的平面度 $P = (0.63, 0.63, 0.46)$,拉伸度 $E = (0.54, 0.77, 0.33)$,没有一个分量在 0.9 以上,所以四面体位形对结果的影响很小^[7]. 在此事件中我们采用的磁场测量结果全部是同一时刻的取值,所以不存在时间同步性误差. 在这种情况下,电流的计算误差主要由对磁场的测量值进行线性插值引起的,一般用 J/J 来表示,其中 J 和 J 分别表示电流密度及其计算误差. 理论上 $\nabla \cdot B$ 应等于 0,对磁场测量的线性插值则会导致 $\nabla \cdot B \neq 0$. 由于电流 J 和磁场散度 $\nabla \cdot B$ 都是磁场的一阶微商量,线性插值引起的误差都来自于磁场的二阶及更高阶的变化,所以 J 与 $\nabla \cdot B$ 的计算误差其特征类似^[8]. 实验数据分析表明,把 $|\nabla \cdot B|$ 用 $|\nabla \times B|$ 归一化后,当四面体的平面度 P 和拉伸度 E 小于 1 时, J/J 与 $|\nabla \cdot B|/|\nabla \times B|$ 变化规律基本一致^[7,8],特别是在电流管中, J/J 与 $|\nabla \cdot B|/|\nabla \times B|$ 表现基本相同^[7],所以类似文献[8],用 $|\nabla \cdot B|/|\nabla \times B|$ 表示电流密度计算结果的相对误差 J/J ;当 $|\nabla \cdot B|/|\nabla \times B|$ 或 $J/J < 0.1 \sim 0.2$ 时,认为所得结果可靠,当 $J/J > 1$ 时,计算失效.

4 电流计算结果与分析

4.1 电流计算结果概述

2001 年 1 月 26 日 11:10~11:33 期间电流密度的计算结果见图 2. 图 2(a~c) 为电流密度在 GSE 坐标系中的 x 、 y 、 z 三分量. 在文献[4]中提到, 每一个通量管事件和 FTE 事件都对应一次强能质子通量的突增, 所以在图 2 中我们用强能质子通量的突增(尖峰)来代表通量管事件或 FTE 事件. 由图 2 可

见: (1) 整个时间段中 J/J 的起伏非常大, 所以不能认为所有的电流计算结果都可靠; (2) 电流密度 J 一般很小, J 突然增加时都对应通量管事件或 FTE 事件, 其最大值可达到约 10^{-8} A/m^2 ; (3) 有的通量管事件没发现有电流密度突增相对应; (4) 每一个对应电流密度增大的通量管事件, 在卫星穿越通量管中间时段 J/J 多在 10% 以下, 而卫星经过通量管壁及其外面时则 J/J 数值增大并剧烈变化, 这说明通量管内部的电流密度计算结果比较可信.

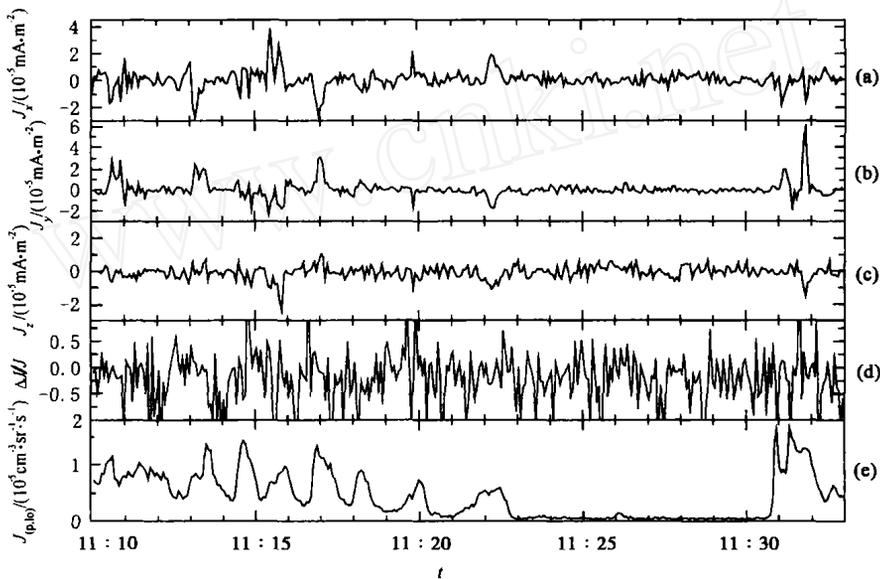


图 2 2001 年 1 月 26 日的电流计算值(a, b, c)、电流误差(d)及 Rapid/Cluster 强能质子通量 $J_{p(keV)}$ (e)

Fig. 2 The overview of the current density (a, b, c) and the relative error (d) of the current evaluation compared with the energetic proton flux (e)

4.2 磁场 MVA 分析的局限和电流 MVA 分析的提出

在文献[4]中提到, 目前在用磁场的 MVA 方法分析通量管管轴方向时, 根据卫星穿越通量管的路径, 有两个模型: (1) 当卫星穿过通量管内部时, 管轴方向为磁场 MVA 分析得到的中间变化方向, 即 M 方向^[11]; (2) 当卫星与通量管擦边而过时, 管轴方向为磁场 MVA 分析得到的最小变化方向, 即 N 方向^[12]. 由于从探测数据很难确定卫星是通过通量管内部还是擦边而过, 所以不能轻易确定管轴方向在 M 还是在 N 方向. 此外, 在电流密度 J 增大的通量管事件中, J 在通量管中如何分布, J 与管轴有何关系等, 都是有待探讨的问题. 结合这些问题, 对于对应有电流密度增大的通量管事件, 我们对 J 和 B 都作了 MVA 分析, 发现电流 MVA 分析与磁场 MVA 分

析在物理上有很好的 consistency, 且对确定管轴方向能起到有效的辅助作用. 下面以 11 16 30~11 17 30 对应的事件(下称为 11 17 事件)和 11 30~11 33 时间段对应的 FTE1、FTE2 事件作为代表加以分析说明.

对电流作 MVA 分析得到的坐标系 (lmn) 中电流的三个分量(图 3c)、以及电流在磁场 MVA 坐标系 (LMN) 中的投影(图 3d), 其中下标 L 和 l 、 M 和 m 、 N 和 n 分别表示最大、中间和最小变化方向. 对 11 17 事件用磁场和电流分别作 MVA 分析所得的结果见表 1, 表中 $\theta_{\text{轴}}$ 、 $\phi_{\text{轴}}$ 分别表示管轴方向单位矢量的方位角和极角, M/N 和 N/L 是 MVA 分析结果的可靠性参数^[9,10], M/N 至少应大于 1.5, 越大越好; N/L 则越小越好. 由图 3 可知 $J_l \gg J_m \sim J_n$, 即电流最大的方向与电流变化最大的方向相符, 而

且 J_l 与 J_N 的大小和变化都非常相似. 由表 1 可知, J_l 与 J_N 或 B_N 的方向近似一致. 因此, 不难判断在

11 17 事件中通量管轴向为 B_N 方向, 电流方向基本上与管轴一致.

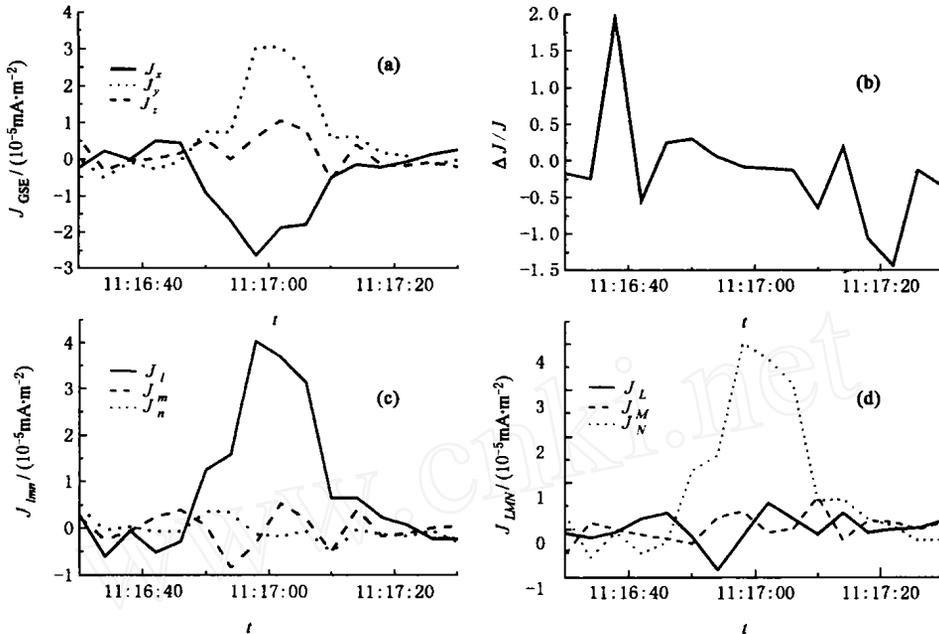


图 3 11 17 事件中 GSE 坐标下的 J_{GSE} (a)、 J/J (b)、以及 J 在 lmn 坐标系中投影 J_{lmn} (c) 和在 LMN 坐标系中的投影 J_{LMN} (d)

Fig. 3 The current density J_{GSE} (a), J/J (b), J of event 11 17 projecting in "lmn" (c) and "LMN" (d) coordinate

表 1 事件 Rope17、FTE1 及 FTE2 的 MVA 分析结果

Table 1 MVA results for event Rope 17, FTE1 and FTE2

事件及分析方法	轴向/(°)	轴向/(°)	M/N	N/L
磁场 MVA 分析 11 17 事件(B_N)	130.1	75.5	7.7	0.03
FTE1(B_M)	115.2	-73.7	14.63	0.03
FTE2(B_M)	94.4	-78.1	1.11	0.02
电流 MVA 分析 11 17 事件(J_l)	129.5	78.2	3.4	0.02
FTE1(J_l)	112.4	-84.0	5.02	0.01
FTE2(J_l)	101.4	-79.3	9.22	0.01

由磁场及其他物理量可知, 11 30~11 33 时间内有 FTE 事件^[3,4]. Bosqued 等^[13] 在分析这一事件时, 认为它是一个不很规则的 FTE 事件. 由图 4 可知, 磁场、温度等都有 2 个相对分开的峰值, 这期间对应 2 段可信度很高的强电流 ($|J/J| < 0.10$), 但在两段强电流之间, J/J 的数值很大并剧烈变化, 可见此时卫星经过通量管壁. 所以我们认为这是两个相邻的 FTE 事件, 其时间段分别为 11 30 10~11 31 22 (FTE1) 和 11 31 26~11 32 06 (FTE2). 对这 2 个 FTE 事件我们用磁场和电流分别作 MVA 分析, 结果见图 5 和表 1. 在 FTE1 事件中, 磁场和电流的 MVA 分析方法都有效, 得到的管轴方

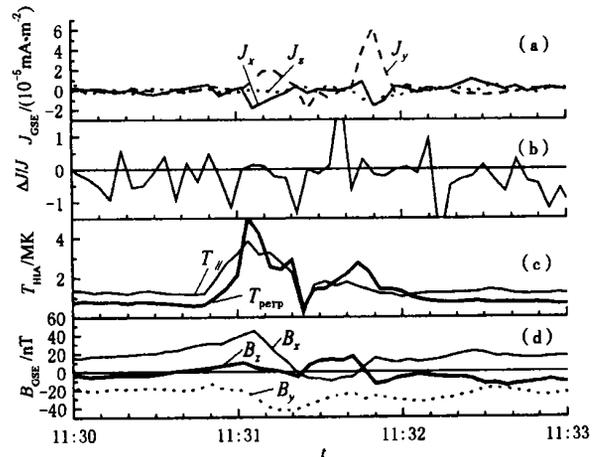


图 4 2001 年 1 月 26 日 11 30~11 33 期间的 J_{GSE} (a)、 J/J (b)、质子温度 T_{HIA} (c) 及磁场 B_{GSE} (d)

Fig. 4 J_{GSE} (a), J/J (b), proton temperature T_{HIA} (c) and magnetic field B_{GSE} (d) between 11 30 and 11 33, on Jan. 26, 2001

向也非常接近; 图 5a 和图 5b 为电流在对其作 MVA 分析得到的坐标系 (lmn) 中的三个分量和电流在磁场 MVA 坐标系 (LMN) 中的投影. 由图可知, 与

11:17 事件不同的是,在 FTE1 事件中,电流主要在 M 方向,即通量管轴向为 M 方向. 对 FTE2 事件,因为 $M/N = 1.11$,此时磁场的 MVA 分析失效,而电流 MVA 分析的结果则依然很好. 图 5c 和 5d 为在对电流作 MVA 分析得到的坐标系 (lmn) 中电流的三个分量和电流在磁场 MVA 坐标系 (LMN) 中的投影,由图可见,在 FTE2 事件中,电流主要在 M 方向,即通

量管轴向为 M 方向. 我们将 GSE 坐标下 FTE1, FTE2 的磁场投影到由电流确定的 lmn 坐标系中,得到的沿磁场轴向电流分量很大 ($-26nT$),且变化很小,而垂直轴向的两个分量数值小,且皆有正负变化. 这表明电流与磁场基本平行,符合无力场结构模型,垂直轴向的两个磁场分量可以看成是轴向电流产生的.

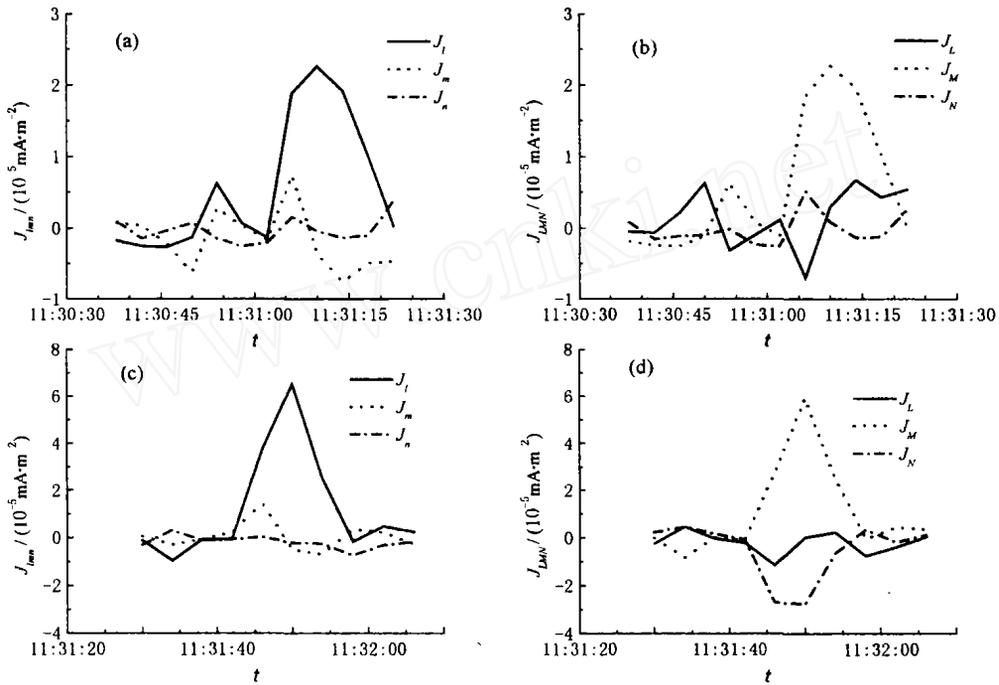


图 5 FTE1、FTE2 事件中 J 在 lmn 和 LMN 坐标系中的投影

(a, b) 分别为 FTE1 事件中 J 在 lmn 和 LMN 坐标系中的投影; (c, d) 分别为 FTE2 事件中 J 在 lmn 和 LMN 坐标系中的投影.

Fig. 5 The current density J of event FTE1 and FTE2 projecting in “ lmn ” and “ LMN ” coordinate

4.3 电流管概念的提出

对上述三个典型事例的分析表明,在磁通量管内的电流基本平行于管轴方向. 本文对所有电流密度增加的事件分析后,都得到同样的结果. 因此我们认为:当一个通量管探测到较大的轴向电流时,可以把通量管看作为电流管. 在电流管中,电流的主要方向,也就是卫星经过通量管及其附近时测量到的电流的最大变化方向,即为电流管的轴向方向. 综合电流和磁场的 MVA 分析结果,可以更好地判断出电流管的轴线方向.

本次事件中有两个通量管中没发现有电流密度突增与之对应,我们认为这有两种可能性:一是在这些通量管中确实没有较大的电流;二是即使通量管中有较大的电流,但由于电流集中在通量管中心附近,而卫星只是擦着管子边沿通过,卫星不能探测到

较强的电流. 事实上,在分析没有与电流密度突增相对应的通量管事件中,磁场 MVA 分析表明,通量管轴方向都是 N 方向,表明后一种可能性较大.

4.4 主要载流子分析

在文献[4]中我们发现,对应于每一个通量管和 FTE 管,起源于磁层并沿通量管轴向磁层外运动的强能离子的通量都有大幅增加,而强能电子则没有明显变化,所以有必要分析强能离子构成电流载流子的可能性:强能质子的最大通量约为 $2 \times 10^5 \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} = 2 \times 10^9 \text{ s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$,强能氦离子的最大通量约为 $6 \times 10^4 \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} = 6 \times 10^8 \text{ s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$;其他强能重离子的最大通量约为 $2 \times 10^4 \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} = 2 \times 10^8 \text{ s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$,假设所有强能离子的投掷角均为各向同性,则它们导致的电流密度约为 $5 \times 10^{-9} \text{ A/m}^2$,比最大电流密度(约 $3 \times 10^{-8} \text{ A/m}^2$)

小很多,所以电流的主要载流子不可能是磁层强能离子,这一问题还有待进一步分析。

5 结 论

本文详细讨论了三种由四颗卫星磁场观测值计算电流的方法,由于这三种方法都是基于在卫星四面体内磁场是线性变化的这一假设,因此具有内在一致性;其表达式可以相互推出,得到的计算结果也完全相同。根据 Cluster 四颗卫星的磁场测量数据,我们计算并分析了2001年1月26日多重通量管和 FTE 事件中三维空间电流密度,结果表明,当卫星之间的距离比磁场变化的特征尺度小很多时,Cluster 测量的磁场可以用来计算空间电流密度矢量。

在这次多通量管事件和 FTE 事件期间,空间电流密度分布具有以下特点:

5.1 当卫星经过通量管和 FTE 管时,都对应电流突增;其最大值可达到 $\sim 10^{-8} \text{ A/m}^2$,且计算结果可靠;其他情况下电流的计算值很小,且结果的不确定性很大。

5.2 在有电流突增的通量管中,电流方向基本上沿管轴方向,我们可将磁通量管视为电流管;电流管中的电流与核心场基本平行,符合无力场结构模型。有两个通量管事件没有发现电流密度突增,可能是因为卫星在通量管外侧擦边而过,离管轴太远,因而没探测到强电流。

5.3 结合对磁场和电流的 MVA 分析结果,我们可以判断通量管适用的磁场模型并确定管轴方位。

5.4 尽管电流增大时对应强能离子通量的增加,但增加的强能离子不足以构成电流载流子的主要成分。

关于通量管与 FTE 管的产生、演化还有待进一步分析研究。

本文得到美国 Boston 大学空间物理中心的支持;所用数据由中国 Cluster 数据与研究中心、Cluster 计划 RAPID、FGM 和 CIS 项目组提供。在此一并表示衷心感谢。

参考文献

[1] Escoubet C P, Schmidt R, Goldstein M L. Cluster - science and Mission overview. In: Escoubet C P, Russell C T, Schmidt R eds. The

Cluster and Phoenix Missions. Kluwer Acad. Publishers, 1997. 11 ~ 32

[2] Balogh A, Dunlop M W, Cowley S W H, et al. The Cluster magnetic field investigation. In: Escoubet C P, Russell C T, Schmidt R eds. The Cluster and Phoenix Missions, Kluwer Acad. Publishers, 1997. 65 ~ 92

[3] Pu Z Y. Multiple flux rope events at the high-latitude magnetopause: Cluster/Rapid observation on January 26, 2001. *Surveys in Geophys.*, 2004, 24, in press

[4] 黄宗英,濮祖荫,肖池阶等. Cluster 对 2001 年 1 月 26 日高纬磁层顶的观测及初步分析. *地球物理学报*, 2004, 47 (2): 181 ~ 189

Huang Z Y, Pu Z Y, Xiao C J, et al. Multiple flux rope events at the high-latitude magnetopause: Cluster/Rapid observations on January 26, 2001. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47 (2): 181 ~ 189

[5] Wilken B, Axford W I, Daglis I, et al. RAPID - The Imaging Energetic Particle Spectrometer on Cluster. In: Escoubet C P, Russell C T, Schmidt R eds. The Cluster and Phoenix Missions, Kluwer Acad. Publishers, 1997. 399 ~ 473

[6] Khurana K K, Kepko E L, Kivelson M G, et al. Accurate determination of magnetic field gradients from four-point vector measurements: Use of neutral constraints on vector data obtained from four spinning spacecraft. *IEEE Trans. on Magnetics.*, 1996, 32 (5): 5193 ~ 5205

[7] Dunlop M W, Balogh A, et al. Configurational sensitivity of multi-point magnetic field measurements. In: Proceedings of the International Workshop on "Space Plasma Physics Investigations by Cluster and Regatta". Graz, 1990. 23 ~ 28

[8] Robert P, Dunlop M W, Roux A, et al. Accuracy of Current Density Determination. In: Götz Paschmann, Patrick W Daly eds. Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data. Noordwijk: ESA Publications Division, 1998. 395 ~ 418

[9] Chanteur G, Mottet F. Geometrical tools for Cluster data analysis. In: Proc. International Conf. "Spatio-Temporal Analysis for Resolving Plasma Turbulence (START)", ESA WPP-047, Aussois, 1993. 341 ~ 344

[10] Chanteur G. Spatial interpolation for four spacecraft: Theory. In: Götz Paschmann, Patrick W Daly eds. Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data. Noordwijk: ESA Publications Division, 1998. 349 ~ 369

[11] Russell C T, Elphic R C. Observation of magnetic flux ropes in the Venus ionosphere. *Nature*, 1979, 279: 618 ~ 620

[12] Farrugia C J, Elphic R C, Southwood D J, et al. Field and flow perturbations outside the reconnected field region in flux transfer events: Theory. *Planet Space Sci.*, 1987, 35 (2): 227 ~ 240

[13] Bosqued J M, Phan T D. Cluster observation of high-latitude magnetopause and cusp: Initial results from the CIS ion instruments. *Annales Geophysical*, 2001, 19: 1545 ~ 1566