

Zuo P B, Liu S L, Jin S P, et al. A study of the characteristics for the magnetic flux transfer events occurred on March 2, 2001. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(3):376~384

2001 年 3 月 2 日磁通量传输事件特性的研究

左平兵^{1,2} 刘绍亮¹ 金曙平¹ 刘振兴² 史建魁²

1 中国科学技术大学地球和空间科学学院,合肥 230026

2 中国科学院空间科学与应用研究中心,北京 100081

摘 要 2001 年 3 月 2 日 11:00 至 11:15 UT 期间,Cluster 在南半球极尖区晨侧附近磁鞘内探测到 3 个通量传输事件(简称 FTEs)。本文利用 Cluster 星簇 4 颗卫星观测到的磁场和等离子体资料研究了这些通量传输事件的磁场形态和粒子特征。并利用它们探测到的空间磁场梯度资料由安培定律直接求出星簇所在区域的电流分布。结果指出:(1) B_y 占优势的行星际磁场结构在磁层顶的重联可以在极尖区附近发生;(2) FTEs 通量管形成初期内外总压差和磁箍缩应力不一定平衡,达到平衡有一发展过程;(3) FTEs 通量管截面在 $L-M$ 平面内的线度约为 $1.89 R_E$;(4) FTEs 通量管中等离子体主要沿轴向场方向流动,整个通量管以慢于背景等离子体的速度沿磁层顶向南向尾运动;(5) FTEs 通量管中不仅有轴向电流,也存在环向电流。轴向电流基本沿轴向磁场方向流动。轴向和环向电流在管内均呈体分布,因而轴向电流产生的环向磁场接近管心时不断减小到零,而环向电流生成的轴向场则不断增大到极值;(6) 在通量管的磁鞘部分观测到磁层能量粒子流量的增强,这表明通量管通过磁层顶将磁鞘和磁层内部连通起来了。

关键词 通量传输事件 Cluster 观测 磁场重联 磁层亚暴

文章编号 0001-5733(2004)03-0376-09 **中图分类号** P353 **收稿日期** 2003-07-24,2004-01-05收修定稿

A STUDY OF THE CHARACTERISTICS FOR THE MAGNETIC FLUX TRANSFER EVENTS OCCURRED ON MARCH 2, 2001

ZUO Ping-Bing^{1,2} LIU Shao-Liang¹ JIN Shu-Ping¹ LIU Zhen-Xing² SHI Jian-Kui²

1 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

2 Center for Space Science and Applied Research of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

Abstract Three flux transfer events (FTEs) were detected in magnetosheath near the south cusp of the dawn side by Cluster during the interval from 11:00 to 11:15 UT on March 2, 2001. In this paper, we analyze the magnetic morphology and the plasma characteristics of these events using the magnetic field and plasma data observed by the four spacecrafts of Cluster. And the electric current density in the region Cluster passed is estimated from the Ampere's law in terms of measured spatial gradients of the magnetic field observed simultaneously by four spacecrafts of Cluster at different places. The results are as follows: (1) The magnetic reconnection at the magnetopause can occur near the cusp when the IMF B_y component is dominant; (2) The difference of $p + B^2/8$ (the sum of magnetic and plasma pressure, measured inside and outside the events) may not be balanced with the tension of the helical magnetic field at the initial stage when a flux tube is forming, it needs a growing time to reach an equilibrium; (3) The size of the section in the $L-M$ plane of

基金项目 国家自然科学基金(40174042)和国家基金委重大项目(40390150),部分受中国科学技术大学创新工程项目的资助。

作者简介 左平兵,男,2003年毕业于中国科学技术大学地球和空间科学学院,现就读于中国科学院研究生院,主要研究方向为磁云边界层。E-mail: lsl@ustc.edu.cn

the FTEs flux tubes is about $1.89 R_E$; (4) The plasma inside the flux tubes flows dominantly along the axis-aligned field, at the same time the flux tubes move southward to the tail and its velocity is slower than the background plasma; (5) There is not only the axis-aligned current in the FTEs flux tubes, but also the annular current. The axis-aligned current flows basically along the axis-aligned magnetic field. Because both the axis-aligned and annular currents distribute in the whole flux tubes, thus the annular magnetic field produced by the axis-aligned current will decrease to zero gradually near the center of the flux tube, and the axis-aligned magnetic field produced by the annular current will increase to its maximum by degrees; (6) An enhancement of magnetospheric energetic particle flux was observed inside the magnetosheath portion of the flux tubes. This implies that the flux tubes connect the magnetosheath with the magnetosphere through the magnetopause.

Key words Flux transfer events, Cluster detection, Magnetic reconnection, Magnetic substorm.

1 引言

通量传输事件(简称 FTEs)最早是 Russell 和 Elphic^[1]从 ISEE 1/2 飞船在磁层顶向阳侧探测资料中确认的,这些事件类似于 Haerendel^[2]等利用 HEOS 2 飞船在较高纬度观测到的所谓通量剥蚀事件.事件的主要特征是:磁场的边界层法向分量(B_N)呈双极变化,在北半球观测到的 FTEs 大多是先正后负(正变化),南半球变化相反;以及在事件中心处场强增大. Russell 和 Elphic 认为这是一种瞬态重联过程,不同于早期 Dungey^[3]提出的稳态重联模型.根据 Russell 和 Elphic 提出的模型(以下简称 R-E 模型),FTEs 是在磁层顶向阳侧磁鞘磁场和磁层磁场发生补缀瞬态重联(patchy impulsive reconnection)形成的肘形弯曲磁通量管,由于通量管的隆起使与之相邻的磁鞘磁场弯曲披覆(drape)在管外.当该磁通量管在背景等离子体流带动下扫过卫星时就会记录到 B_N 分量的双极变化.

Paschmann^[4]利用 ISEE 1/2 飞船的磁场和等离子体资料分析了在北半球观测到的 15 个 FTEs,发现除已知的磁场特征外,在通量管中可同时观测到磁鞘和磁层特性的粒子,这表明通量管将磁鞘和磁层连通在一起了;还发现管内外总压(磁压+热压)不平衡,内部压力较大,认为它们是靠箍缩磁应力达到平衡的.之后 Southwood 等^[5]利用 UKS 飞船的探测资料对 FTEs 作了进一步的研究,发现 FTEs 的发生与 IMF 南向磁场相关,且当磁层顶外侧晨昏向磁场较强时 FTEs 的发生率较高. Elphic 等^[6]采用 ISEE1/2 双星和 AMPTE UKS/IRM 双星同时记录的资料对 FTEs 作了分析,当时它们相距大于 10,000km,分别处于南北半球,发现记录到的磁场法向分量变化相反,且低纬处磁场的螺旋性较小. Lockwood 和

Hapgood^[7]用 UKS/IRM 飞船资料详细研究了磁层 FTEs,指出 FTEs 核的边界可能是一对流结构.尽管通量传输事件的研究有了许多新的进展,但 R-E 模型仍是描述 FTEs 的基本图像,因而本文仍以 R-E 模型为基础进行分析.

2000 年 7 月欧洲空间局(ESA)发射了 Cluster 星簇飞船,它是由处于四面体 4 个顶点上相同的 4 颗卫星组成,每颗卫星上都安装有相同的仪器.它们的发射使人类可以首次对磁层向阳侧小到中等尺度(100~1000km)磁场的三维结构进行直接探测,这有助于对 FTEs 的空间特性作进一步的深入研究.还可利用它们同时在空间不同点的测量值分析所测参数的微分量,比如利用磁场测量值的空间梯度直接估算星簇附近的电流密度等.2001 年 2~5 月期间 Cluster 多次穿越向阳侧磁层顶,观测到多个 FTEs,本文仅对 2001 年 3 月 2 日 11:00~11:15 UT 期间观测到的 3 个 FTEs 作初步分析.

2 事件的观测

2.1 边界法向坐标系—LMN

边界法向坐标系起初是 Russell 和 Elphic^[1]为研究 FTEs 引入的.其中 N 轴沿磁层顶法线向外, M 轴垂直于 N 轴和 GSM 坐标系 Z 轴构成的平面,指向清晨方向, L 轴完成右螺旋系. LMN 是一局地坐标系,在磁层顶不同点各坐标轴的指向不同,在日下点处 L 指向北, M 与 GSM 系 Y 轴方向相反.确定 LMN 坐标系的关键是找出磁层顶某点的法线方向.一种方法是由卫星穿越磁层顶的磁场记录,用最小方差分析法得到;另一种方法是由选定的磁层顶模型用解析方法求出该点的法向.本文采用磁层顶模型求法线的办法.为此首先分析一下事件期间磁层的状态.处在日地引力平衡点(距地球约 $1.5 \times$

10^6 km) 的 ACE 飞船不断监测着未受地球磁层影响的太阳风状况. 太阳风从该处传至地球大约 1h 左右. 考虑到太阳风的这一滞后效应, 对于 11:00 ~ 11:15 UT 磁层的状况需检测 10:00 ~ 10:15 UT ACE 的太阳风记录. 资料分析看出这一期间太阳风动压较小且变化不大 (1.312 ~ 1.546 nPa), 行星际磁场 (IMF) 南向分量 B_z 也较小 (-1.437 ~ 1.253 nT), B_y 分量相对较大 (4.249 ~ 5.033 nT) 可见在此期间磁层顶应是比较稳定的. 本文采用 Shue 等^[8] 的磁层顶模型, 其解析式为

$$r = r_0 \left[\frac{2}{1 + \cos \theta} \right],$$

式中 r 和 θ 分别代表地心矢径, 以及矢径与 GSM 系 X 轴的夹角, r_0 和 θ 与太阳风的动压和 IMF 的南北分量有关. 在此模型的基础上引入 LMN 边界法向坐标系, 作为分析 FTEs 的基本框架.

2.2 事件期间 Cluster 所处位置

2001 年 3 月 2 日 11:00 至 11:15 UT 期间 Cluster 飞船运行到南半球极尖区附近, 在 GSM 坐标系中大致在 (6.71, -1.61, -7.88) R_E , 地心距 $r = 10.5 R_E$, 磁地方时 11:00 MLT 左右. 图 1 给出 Cluster-3 10:00 ~ 14:00 UT 的磁场记录 (GSM 分量), B_T 是磁场总强度. 由图可见 10:00 ~ 11:00 UT 磁场波

动幅度较小, 11:00 UT 后不断增强, 大约 12:00 UT 处 B_y 突然由正变负, B_z 和磁场总强度都迅速变大. 由上述磁场变化特征可知 10:00 ~ 11:00 UT 期间 Cluster 飞船处于磁鞘中, 12:00 UT 后飞船进入磁层, 11:00 ~ 12:00 UT 是磁鞘向磁层逐步过渡的区域, 可见 Cluster 观测到 FTEs 时应在磁层顶外侧磁鞘区中. 从图中还可看出 12:00 UT 以前 B_y 基本上大于零, B_z 较小, 这和 ACE 飞船在行星际观测到的特征一致, 只是经弓激波后 B_y 变大. 以下可见这是一种 B_y 分量占优势情况下的磁重联. B_y 由正变负、 B_z 负向增强正是磁层南半球极尖区靠近晨侧处磁层磁场的特征. 图 2 (引自 Crooker^[9] 图 1) 示意给出面向磁层顶看到的磁层磁场结构, 图中虚线表示磁层顶外侧磁鞘磁场在 GSM 系 $Y-Z$ 平面内的分量. 取 10:55 ~ 11:05 UT 期间 B_y 和 B_z 的平均值 (分别为 22.7 nT 和 -5.4 nT), 由此推出磁力线与 Y 轴有约 13.4° 的夹角. Marcucci 等^[10] 指出重联位置受 IMF B_y 方向控制, 当 $B_y > 0$ 时重联发生在南半球晨侧和北半球的昏侧, 若 $B_y < 0$ 则重联的位置也反过来. 从本文情况看南半球的重联应发生在靠近晨侧, 这正是 Cluster 记录到 FTEs 时所在位置.

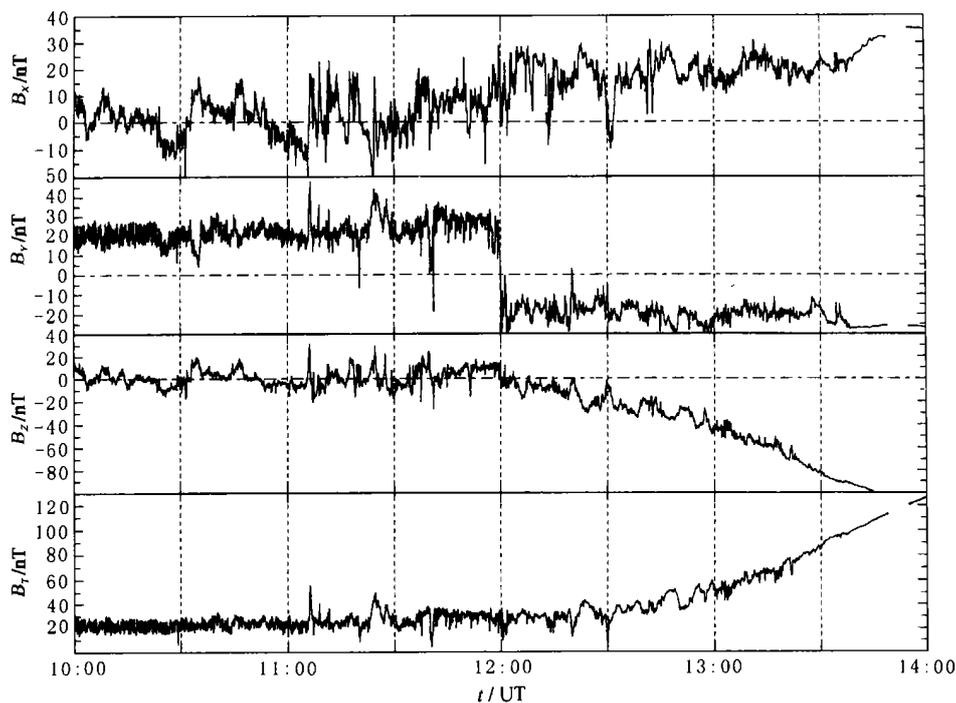


图 1 Cluster-3 在 2001 - 03 - 02 - 10:00 ~ 14:00 UT 探测到的磁场分量和总强度 (在 GSM 坐标系中)

Fig. 1 Time series of magnetic field detected by Cluster-3 in GSM system During 2001 - 03 - 02 - 10:00 ~ 14:00 UT

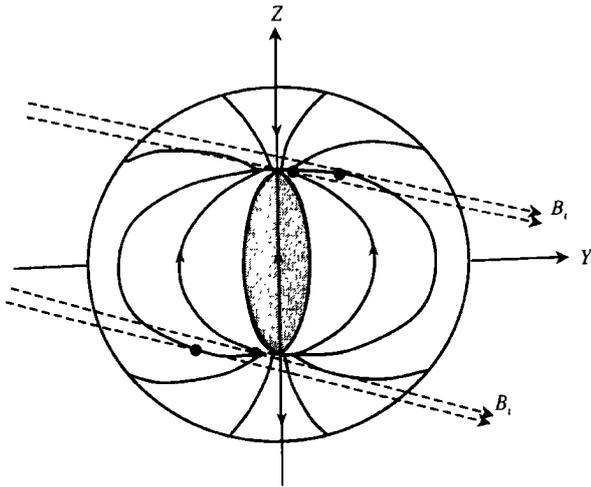


图2 面向向阳面磁层顶的磁力线结构示意图
Fig. 2 Schematic view from the sun of the dayside magnetopause

2.3 FTEs 的特征

图3给出 Cluster 星簇4颗卫星在相同时间不同空间点记录到的3个FTEs(以下按时间顺序分别称为FTE1, FTE2和FTE3). 图中磁场 B_L 、 B_M 、 B_N 为 LMN 坐标系分量, B_T 是磁场总强度. 为了限制数据带宽, 突出感兴趣的特征, 图中数据采用 12s 平均. 在此期间4颗卫星中 Cluster-1 和 Cluster-3 相距最远为 668.4km, 星簇基本保持匀速运动, $V_N = -2.17\text{km/s}$, $V_M = 0.26\text{km/s}$, $V_L = -1.35\text{km/s}$, 各卫星间的相对位置基本不变. 图中虚线为 B_N 过零点时刻, 由图可见各 FTEs 的 B_N 分量均有双极变化, 先负后正, 这正是南半球 FTEs 的特征. 事件中间场强增大, B_L 、 B_M 分量在 B_N 过零点时出现峰值, B_L 正向增强、 B_M 负向增强, 根据 R-E 模型可见 FTEs 在

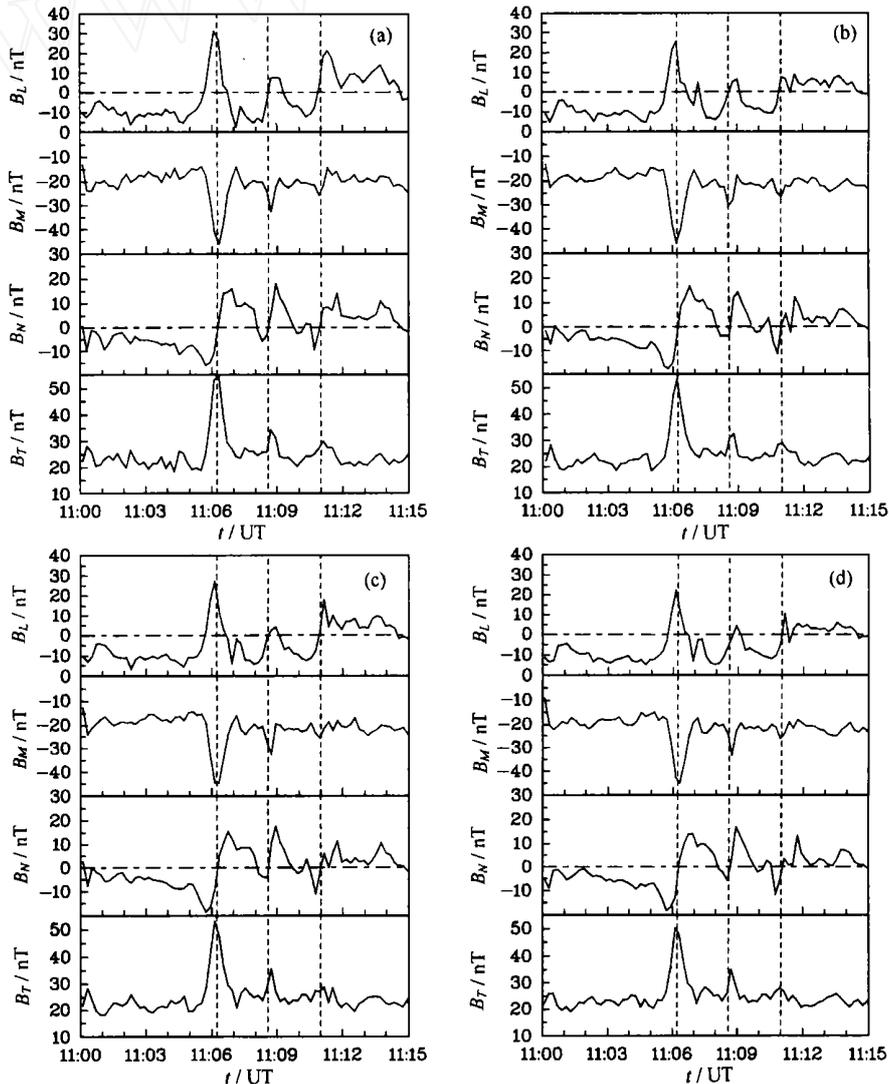


图3 2001-03-02-11:00~11:15UT Cluster 记录到的3个FTEs
(a) Cluster-1; (b) Cluster-2; (c) Cluster-3; (d) Cluster-4

Fig. 3 The FTEs detected by Cluster at 2001-03-02-11:00~11:15UT

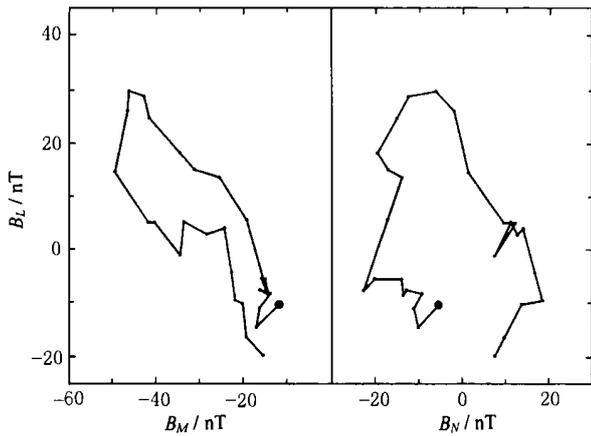


图 4 FTE1 事件的磁场矢端图

Fig. 4 Hodogram showing the measured fields for the FTE1

L - M 平面内有一较强的轴向磁场,由 B_L 和 B_M 分量的极值推测轴向磁场的指向和 M 轴负向间的夹角大约为 30.6° (用磁场的最小方差法得到的相应夹角为 29.0°). 图中还可看出 FTE2 和 FTE3 磁场峰值强

度比 FTE1 的小很多,可能是因 FTE2 和 FTE3 只是通量管的边缘部分扫过星簇. 为此以下我们着重讨论 FTE1,而将 FTE2 和 FTE3 做为参考. 图 4 是 FTE1 的磁场矢端图,图中大圆点表示事件起始点,可见在 L - N 平面内磁场矢端沿顺时针方向回转,回转曲线是螺旋磁场在 L - N 平面上的投影. 表明通量管除具有大致和 L - M 平面平行的轴向磁场外还存在环向磁场. 表 1 给出上述 FTEs 的 B_M 、 B_L 分量和总磁场强度 B_T 的极值,以及轴向磁场与 M 轴负向夹角 θ 和事件的持续时间 t .

表 1 3 个 FTEs 事件的参数

Table 1 Parameters of three FTEs events

事件	B_M (nT)	B_L (nT)	B_T (nT)	θ	t (s)
FTE1	- 45.4	26.8	53.0	30.6	81
FTE2	- 32.1	5.7	34.4	10.1	42
FTE3	- 26.0	14.4	29.0	29.0	51

注:表中 B_M 、 B_L 和 B_T 是星簇 4 颗卫星观测值的平均.

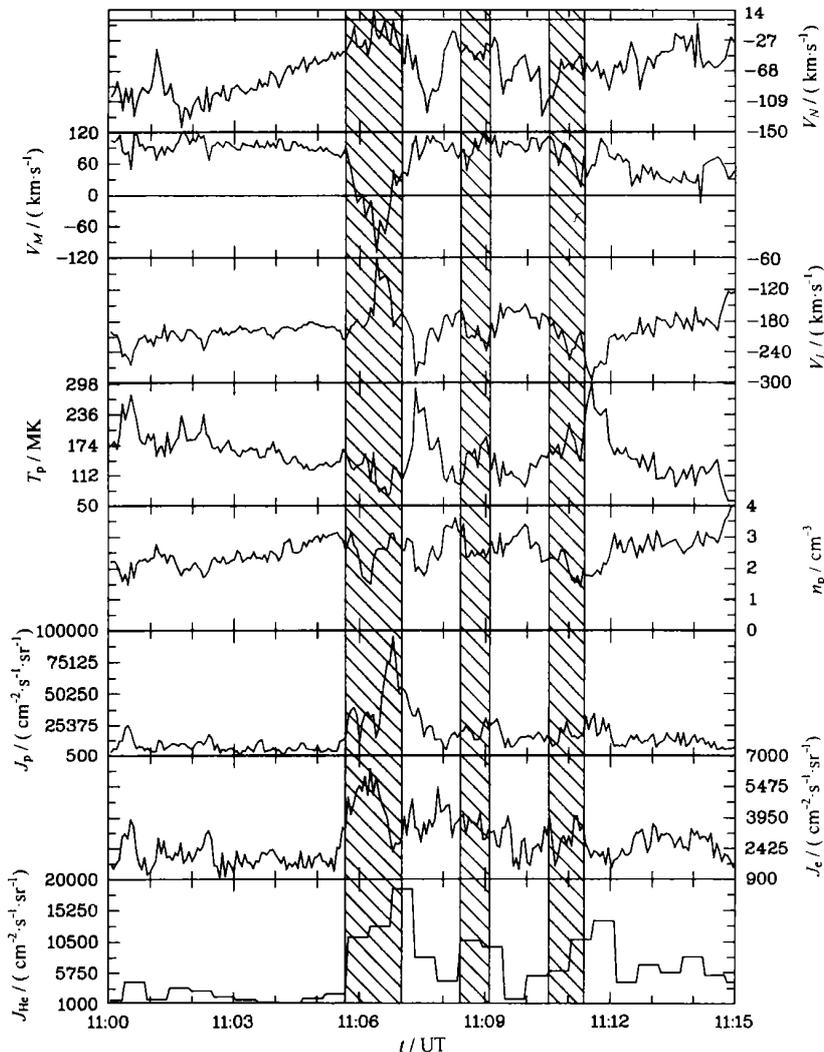


图 5 2001 - 03 - 02 - 11:00 ~ 11:15 期间粒子的速度、温度、密度及通量变化

Fig. 5 Plasma parameters showing for 2001 - 03 - 02 - 11:00 ~ 11:15

图 5 示出相同时段的粒子资料,图中从上向下分别是质子速度 (V_N 、 V_M 、 V_L)、温度 T_p 、数密度 n_p 以及能量质子 ($E_p > 30\text{keV}$)、电子 ($E_e > 30\text{keV}$) 和氦离子 ($E_{He} > 50\text{keV}$) 的通量值 J_p 、 J_e 和 J_{He} . 由图可见在事件期间能量粒子通量有明显增加,从 FTE1 看各粒子通量峰值不一致,电子峰值靠前,质子和氦离子偏后. FTE1 的质子数密度和温度都略有下降,FTE2 和 FTE3 中温度略上升. FTE1 事件内速度 V_M 负向增加, V_L 正向增大,FTE2 和 FTE3 没有明显变化. 由图 5 还可看出 FTE1 的 V_N 、 V_L 绝对值减小,表明通量管以小于背景场的速度携带等离子体沿磁层顶向南向尾运动. 图 6 示出 FTE1 期间各相同时刻等离子体速度和磁场矢量,图中 B_1 、 V_1 是卫星进入通量管前磁鞘中的磁场和速度值,它们的夹角约为 49° . 其他为事件期间的相应矢量,可见通量管中夹角变大,最大将近 80° .

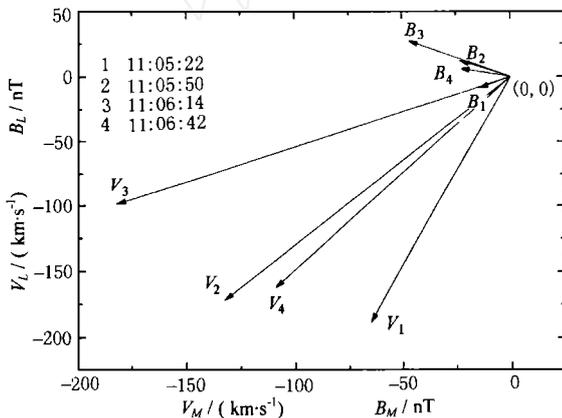


图 6 FTE1 期间等离子体速度 V 和磁场 B 矢量的变化
Fig. 6 Vector graph of proton velocity and magnetic field for the FTE1

进入通量管后 V_M 反向和 V_L 绝对值减小使速度垂直分量增大,而 V_M 的反向表明通量管中等离子体的流动主要是沿轴向磁场方向.

此外本文还根据 Paschmann 等人^[4]采用的公式计算了 FTE1 和 FTE2 通量管内外总压(磁压+热压)差和环向场磁箍缩应力,结果见表 2,表中第一列给出通量管内外总压差,第二列是磁箍缩应力. P 、 B 分别是管中热压和磁场极值, μ_0 是真空磁导率, B_N^+ 和 B_N^- 是观测到事件的 B_N 分量正负峰值, B_T 取背景磁场的总强度. 可见两个事件计算的结果都是磁箍缩应力显著地大于内外压力差. 若采用通量管内的平均磁场计算总压,上述压力的不平衡会更为严重. 这是否表明通量管尚未稳定,还会进一步收缩.

表 2 通量管内外压力差和磁箍缩应力

Table 2 Pressure difference and tension of the helical magnetic field inside and outside the flux tube

事件	$\left(P + \frac{B^2}{2\mu_0} \right)$	$\frac{B_T(B_N^+ - B_N^-)}{\mu_0}$
FTE1	41.8	64.0
FTE2	30.4	56.1

注:表中单位均采用 10^{-2} nPa.

3 磁通量管的线度和管内电流

3.1 磁通量管的线度

许多研究者用不同资料和方法估算过 FTEs 磁通管的线度, Russell 和 Elphic^[11]假定通量管是一圆柱并以背景等离子体的速度运动,估计出通量管截面积为 $12 R_E^2$. Saunders 等^[12]研究得出 FTEs 垂直于磁层顶的典型线度为 $1 R_E$. Farrugia 等^[13]利用 ISEE 1/2 飞船资料,假定通量管在平行于磁层顶的平面内从一颗卫星运动到另一颗卫星,得出通量管速度为 170km/s ,以及通量管沿磁层顶的线度是 $2.5 R_E$.

本文将利用 4 颗卫星同时观测的有利条件更合理地估计通量管的线度. 由图 3 可见相距几百公里的卫星几乎同时观测到 3 个 FTEs,这表明通量管的线度比卫星间距大得多. 从 FTE1 的磁场高分辨率(4s)图(图 7)可以看出,不同卫星 B_N 过零点和 B_L 、 B_M 分量达到极大的时刻并不相同. 由此可以利用已知的卫星间距和 B_N 过零点的时差推算通量管的速度,进而由事件的持续时间求得通量管的线度.

图 8 示意给出在 L - M 平面上观测到 FTE1 时 Cluster 4 颗卫星的分布(图中 Cluster-1 至 Cluster-4 分别以 C1、C2、C3 和 C4 表示)以及通量管的方位. 由图可见通量管顺序扫过 C2、C3、C1 和 C4,这和图 7 观测到 B_N 过零点的时间顺序是一致的. 由图 6 还可看出 C2、C4 间有 3s 的最大时差. 此外由卫星坐标数据可以求出 C2 至 C4 间的直线距离为 456.6km ,再通过简单的几何关系可算出它们间垂直于通量管方向的距离 $d = 446.8\text{km}$,从而推得垂直速度 $V_{\text{Per}} = 148.9\text{ km/s}$. 可见通量管运动速度远大于卫星的运动速度,因而在计算中可假定事件期间卫星不动,仅通量管扫过各卫星. 已知 FTE1 持续 $t = 81\text{s}$,由此可估算出通量管平行于磁层方向的线度 l 为

$$l = V_{\text{Per}} \times t = 12061\text{ km} = 1.89 R_E.$$

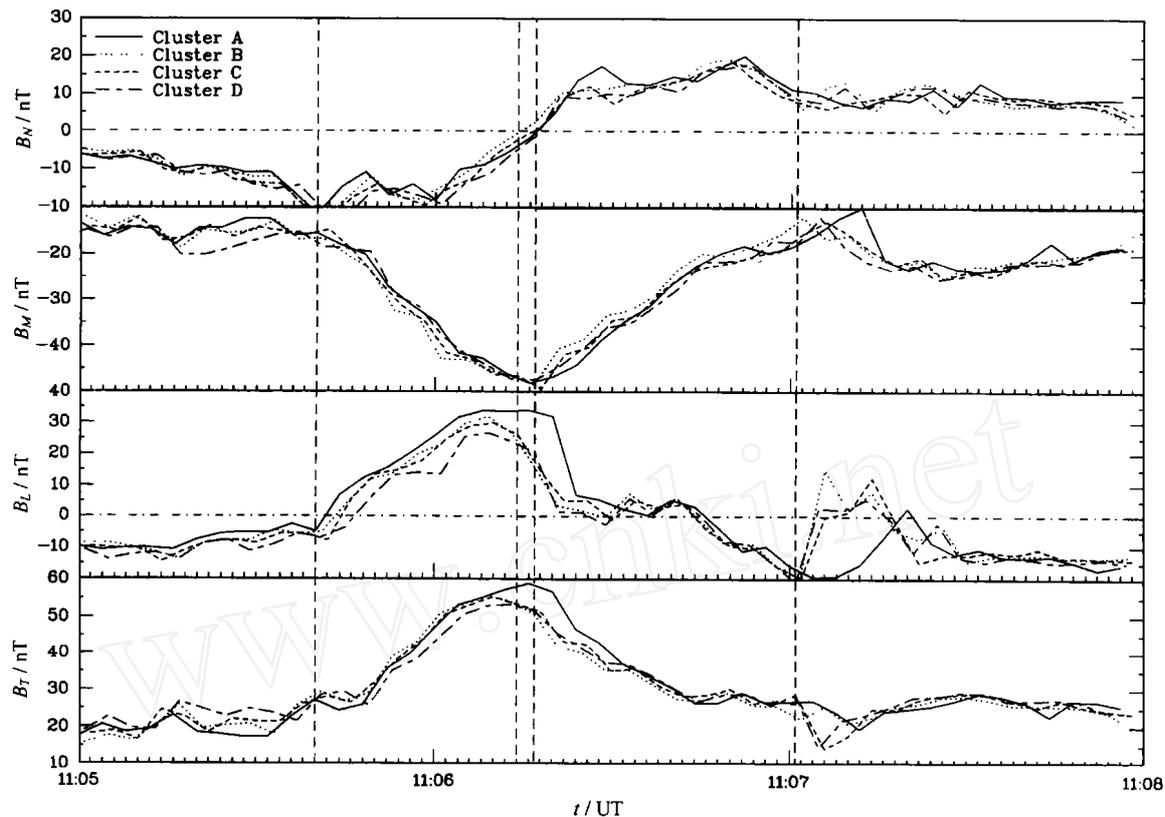


图 7 FTE1 事件的磁场高分辨率(4s)曲线图

Fig. 7 High resolving(4s) curves of magnetic field for the FTE1

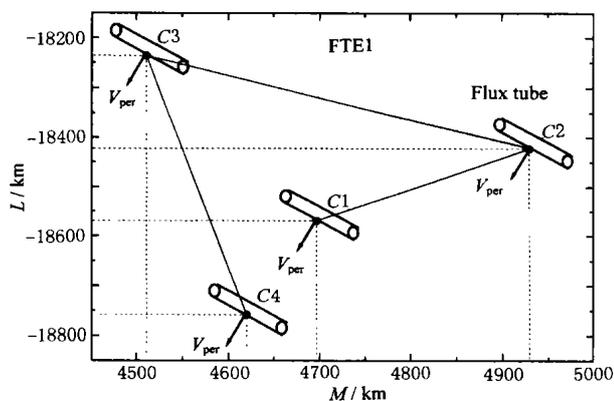


图 8 卫星位置在 $L-M$ 平面分布及通量管方位示意图

Fig. 8 Schematic view for the place of the satellites in the $L-M$ coordinate plane and the azimuth of the flux tube

3.2 磁通量管中的电流

本文采用 Chanteur 和 Mottez^[14] 计算空间物理量梯度的方法, 利用 Cluster 4 颗卫星测量的空间磁场资料以及卫星位置的坐标值, 通过安培定律 $\nabla \times B = \mu_0 J$ 求出星簇所在区域的电流密度 J . 这一方法需假定卫星间磁场为线性变化, 在观测期间卫星间最大距离小于 700km, 因而不妨假定磁场为线性变化. 为了消除小尺度磁场变化对计算的影响, 我们

对测量的磁场数据进行了 12s 滑动平均. 图 9 给出 FTEs 期间在 LMN 坐标系中电流的计算结果, J_L 、 J_M 、 J_N 是 3 个电流密度分量, J 是总电流密度, 图中虚线大致表示各事件的起止点. 由图可见事件发生前存在一些不规则的微弱电流. 事件发生时 J_L 正向增大, J_M 负向增强, J_N 先负后正呈双极变化. 但 FTE2、FTE3 的 J_M 和 FTE3 的 J_L 也出现双极变化, 其原因尚需进一步研究. 表 3 给出 Cluster-3 记录到的各事件磁场峰值和由 Cluster 4 颗卫星磁场资料计算出的电流峰值, 以及峰值矢量间的夹角. 图 10 示出 FTE1 的这些矢量图. 由表 3 及图 10 可见电流和磁场间夹角很小, 电流基本上沿轴向场方向流动. 在进入通量管后电流是逐渐增大的, 直到靠近管心

表 3 FTE 事件磁场、电流峰值及峰值矢量间夹角

Table 3 FTE event magnetic field, electrical current peaks and the angle between the peak vectors

	B_L (nT)	B_M (nT)	J_L (nA/m ²)	J_M (nA/m ²)	\angle (°)
FTE1	27.4	-44.5	18.6	-41.2	7.3°
FTE2	4.3	-32.5	17.9	-32.7	21.2°
FTE3	17.9	-25.6	15.5	-12.8	15.4°

注: 表中 B_L 和 B_M 采用参考卫星 Cluster-3 的测量值. \angle 表示 J 与 J 间夹角.

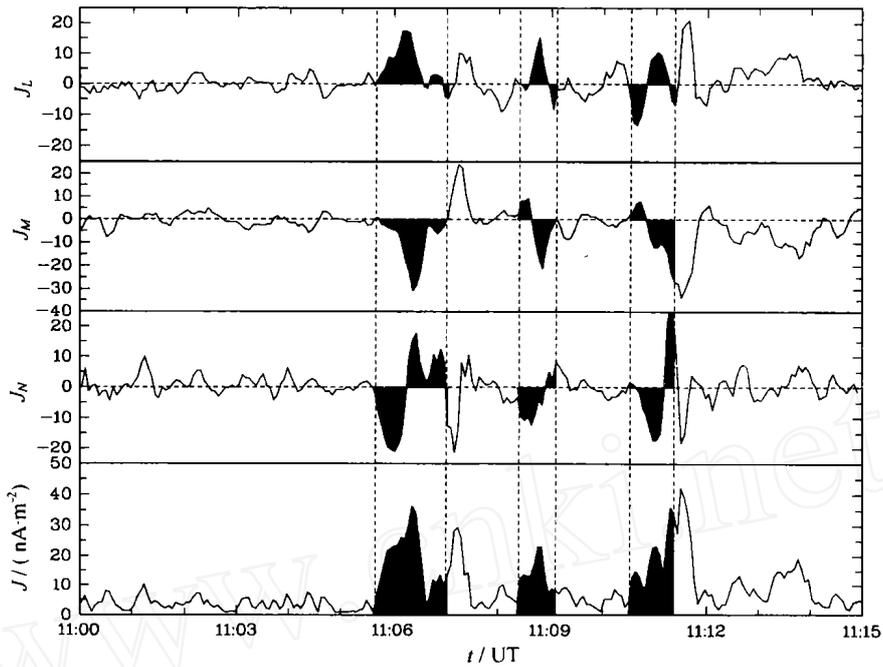


图9 2001 - 03 - 02 - 11:00 ~ 11:15 期间星簇区域电流密度变化曲线

Fig. 9 Current curves in the region of Cluster for 2001 - 03 - 02 - 11:00 ~ 11:15

处达到极大. J_N 电流有双极特征的变化,表明磁通量管中除存在轴向电流外还可能有环向电流存在. 轴向电流和环向电流都呈体分布,导致轴向磁场越近管心越强,而环向磁场则越近管心越弱,这和观测是一致的.

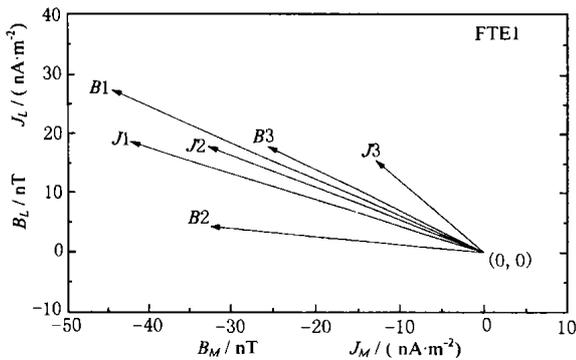


图10 FTE1 事件磁场和电流峰值矢量图

Fig. 10 Vector of the peaks of magnetic field and current for the FTE1

4 讨论和结果

4.1 Cluster 2001年3月2日 11:00 ~ 11:15 UT 记录到的3个FTEs 都有类似的磁场特征,即 B_N 具有双极变化、总强度 B_T 在事件中具有峰值,不过 B_T 峰值从 FTE1 到 FTE3 逐步减小. 其中 FTE1 资料比

较完整, FTE2、FTE3 较差,特别是粒子资料. 造成这一现象的原因可能只是 FTE2、FTE3 的磁通管边缘扫过卫星,也可能这些磁通管尚在形成初期. 后一种想法我们在计算磁通管内外总压差和磁箍缩应力平衡时也曾提到. 由粒子资料看 FTE1 中粒子数密度和温度均有所下降, FTE2 的数密度稍降温度稍升,可见管中热压较背景下降或相差不多. 但磁场强度有较大增加,对 FTE1 和 FTE2 内外场强比分别达到 2.4 和 1.6,可见内外总压差主要由磁压造成,它们的磁箍缩应力都显著大于内外总压差,这会使磁通管不断收缩,最终达到平衡. 因而可能磁通管生成后还会有一发展变化过程.

4.2 产生本文 FTEs 重联的行星际磁场 (IMF) 特征 是 B_z 南向很小,而 B_y 较大. 这种特征的 IMF 结构一般不能在磁层顶向阳侧低纬处和磁顶磁场发生重联,但可以在较高纬度的极尖区发生,表明 IMF 磁场的取向可以在相当大的范围和磁层产生重联. 这一事实可能意味着 IMF 和磁层的重联是经常发生的,只是当 B_z 有较大的负值且持续时间较长时才会对磁层有显著的影响.

4.3 利用 4 颗卫星 B_N 分量记录过零点的时差计算磁通管速度的方法较为合理,但由于 Cluster 在磁层顶向阳侧时 4 颗卫星彼此间距较小,要用本文方法精确确定磁通管扫过星簇的速度需采用比 4s 平均值分辨率更高的磁场资料,但本文所得磁通管的

线度在量级上应是可信的.

4.4 通量传输事件的主要记录标志是磁场的 B_N 分量呈双极变化, Russell 和 Elphic 认为是磁鞘磁场披覆在通量管上造成的. 实际上轴向电流产生的螺旋场也能导致双极变化, 而且还能解释 B_N 进入管中不断减小的事实. 在本文计算的电流曲线还显示, 紧接事件之后也存在显著的电流, 它们出现的原因尚需进一步研究.

4.5 关于通量管管轴方向的确定比较困难, 目前许多研究者采用磁场最小方差分析法 (MVA) 确定管轴方向. 从本文的分析看, 若飞船没有穿过管轴中心, MVA 方法也是不可靠的. 我们在确定 FTE1 的管轴方向时采用了两种方法: 一是 MVA 法, 得出管轴与 M 轴负向夹角为 29.0° ; 另一方法是根据 R-E 模型, Elphic^[6] 从资料分析指出 FTE 的轴向基本在与磁层顶平行的平面上的结论, 用 B_N 反向处 B_L 、 B_M 的极值推测管轴方向, 由此方法得到的相应夹角是 30.6° . 两种方法所得结果十分相近, 我们认为这一结果意味着飞船是在接近管轴处穿过 FTE1 的. 将同样两种方法用于 FTE2 和 FTE3 时则相差很大, 表明飞船并未穿过该事件通量管的轴心.

4.6 关于文中电流的计算精度, 我们用与 Robert 等^[15] 相同的估算方法, 以量 $| \cdot B | / | \times B |$ 表示电流密度计算结果的相对误差 J/J . 计算中发现在有较强电流的事件中相对误差较小, 而在背景场区的计算结果则误差较大. 究其原因常常不是因为磁场的散度大, 而是磁场的旋度 (即电流) 小. 可见所得较大的电流值较为可靠. 也即文中计算的事件电流分布是可信的.

4.7 本文的主要结果有: (1) IMF $| B_Y | / | B_Z |$ 较大时磁重联可以发生在较高纬度的极尖区, 发生的位置与 B_Y 的正负有关; (2) FTEs 形成的通量管有一发展过程, 直到箍缩磁应力和内外总压差达到平衡; (3) 通量管在 L - M 平面内的线度约为 $1.89 R_E$; (4) 通量管中等离子体主要沿轴向场方向流动, 整个通量管以小于背景等离子体的速度向南向尾方向运动; (5) 磁通量管中不仅有轴向电流, 也存在环向电流. 轴向电流与轴向磁场方向基本一致. 轴向和环向电流在管内呈体分布, 因而由它们产生的环向场接近管心时不断减小到零, 轴向磁场则不断增大到极值; (6) 在磁鞘通量管中观测到磁层能量粒子流量的增强, 表明通量管通过磁层顶与磁层内是联通的.

本文所用卫星数据为中国 Cluster 数据和研究中心提供, 在此表示衷心感谢!

参考文献

- [1] Russell C T, Elphic R C. Initial ISEE magnetometer results: magnetopause observations. *Space Sci. Rev.*, 1978, **22**(6): 681 ~ 715
- [2] Haerendel G, Paschmann G, Scokopke N, et al. The frontside boundary layer of the magnetosphere and the problem of reconnection. *J. Geophys. Res.*, 1978, **83**(A7): 3195 ~ 3216
- [3] Dungey J W. Interplanetary magnetic field and the auroral zones. *Phys. Rev. Lett.*, 1961, **6**: 47 ~ 48
- [4] Paschmann G, Haerendel G, Papamastorakis I, et al. Plasma and magnetic field characteristics of magnetic flux transfer events. *J. Geophys. Res.*, 1982, **87**(A4): 2159 ~ 2168
- [5] Southwood D J, Saunders M A, Dunlop M W, et al. A survey of flux transfer events recorded by the UKS spacecraft magnetometer. *Planet. Space Sci.*, 1986, **34**(12): 1349 ~ 1359
- [6] Elphic R C, Southwood D J. Simultaneous measurements of the magnetopause and flux transfer events at widely separated sites by AMPTE UKS and ISEE 1 and 2. *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**(A12): 13666 ~ 13672
- [7] Lockwood M, Hapgood M A. On the cause of a magnetospheric flux transfer event. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(A11): 26453 ~ 26487
- [8] Shue J-H, Chao J K, Fu H C, et al. A new functional form to study the solar wind control of the magnetopause size and shape. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(A5): 9497 ~ 9511
- [9] Crooker N U. Dayside merging and cusp geometry. *J. Geophys. Res.*, 1979, **84**(A3): 951 ~ 959
- [10] Marcucci M F, Bavassano Cattaneo M B, Dilellis A M, et al. Evidence for interplanetary magnetic field B_Y controlled large-scale reconnection at the dayside magnetopause. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**(A12): 27497 ~ 27507
- [11] Russell C T, Elphic R C. ISEE observations of flux transfer events at the dayside magnetopause. *Geophys. Res. Lett.*, 1979, **6**(1): 33 ~ 36
- [12] Saunders M A, Russell C T, Scokopke N. Flux transfer events, scale size and interior structure. *Geophys. Res. Lett.*, 1984, **11**(2): 131 ~ 134
- [13] Farrugia C J, Southwood D J, Cowley S W H, et al. Two-regime flux transfer events. *Planet. Space Sci.*, 1987, **35**(6): 737 ~ 744
- [14] Chanteur G, Mottez F. Geometrical tools for Cluster data analysis. In: Proceedings of the International Conference on Spatio-temporal Analysis for Resolving Plasma Turbulence (START). ESA WPP-07, 1993, 341
- [15] Robert P, Dunlop M W, Roux A, et al. Accuracy of current density determination. In: Gotz Paschmann, et al. eds. Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data. ISSI Scientific Report SR-001, 1998 ISSI/ESA