0254-6124/2019/39(2)-149–09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

CHEN Chen, HUANG Zhaohui, SUN Tianran, TANG Binbin, WANG Chi. Global MHD results of flux transfer events at the dayside magnetopause under high solar wind speed (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2019, **39**(2): 149-157. DOI:10.11728/cjss2019.02.149

高速太阳风条件下日侧磁层顶磁通量传输事件的全球磁流体力学模拟结果 *

陈 琛[1,2] 黄朝晖[1] 孙天然[1] 唐斌斌[1] 王 赤[1,2]

1(中国科学院国家空间科学中心 空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 利用全球磁流体力学模拟, 研究了高速太阳风条件下日侧磁层顶的磁通量传输事件 (FTE) 发生率的空间分布. 从模拟结果中得到了 FTE 信号, 并且这些 FTE 信号的特征与观测结果基本一致. 磁层顶上的 10 个取样点共观测到 39 个 FTE 信号. 统计分析表明, 越靠近翼侧则观测到的 FTE 信号越少. 这一现象可能是磁鞘中太阳风速度分布差异导致的.

关键词 磁通量传输事件, 高速太阳风, MHD 模拟

中图分类号 P 353

Global MHD Results of Flux Transfer Events at the Dayside Magnetopause under High Solar Wind Speed

CHEN Chen[1,2] HUANG Zhaohui[1] SUN Tianran[1]

TANG Binbin[1] WANG Chi[1,2]

1(*State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

Abstract Using Global MHD model, the spatial distribution of Flux Transfer Events (FTE) at the dayside magnetopause under high solar wind speed is investigated. The solar wind conditions of this case are $v_{\rm sw} = 1200\,{\rm km\cdot s^{-1}}$, $n_{\rm sw} = 3\,{\rm cm^{-3}}$, $B_z = -8.3\,{\rm nT}$, $B_y = 8.3\,{\rm nT}$ and $B_x = 0\,{\rm nT}$. The simulation results virtually agree with those expected FTE signatures from observations, and

* 国家自然科学基金项目 (41374172, 41574159, 41731070, 41774173), 中国科学院空间科学战略性先导科技专项 (XDA15052500), 中国科学院前沿重点项目 (QYZDJ-SSW-JSC028), 中国科协青年人才托举工程项目 (2017QNRC001) 和中国科学院青年创新促进会项目 (2016134) 共同资助

2018-04-10 收到原稿, 2018-07-08 收到修定稿

E-mail: cchen@swl.ac.cn

bipolar signatures and related variations of number density, pressure and velocity are found. A total number of 39 FTE are observed by ten virtual probes which are spread over the magnetopause from $y = -5R_e$ to $y = 5R_e$. 14 FTE are found when the probe is near to the noon. However, when the probe is located near $y = -5R_e$ and $y = 5R_e$, the same number, 3, of FTE in both locations is found. Furthermore, 8 FTE are found when the probe is adjacent to $y = -2.5R_e$ and 11 FTE are found near $y = 2.5R_e$. In a nutshell, the number of FTE decreases as the observed probes approach the flank of the magnetopause, which could be caused by the distribution of solar wind velocity in magnetosheath.

Key words Flux transfer events, High solar wind speed, MHD simulation

0 引言

磁通量传输事件 (Flux Transfer Event, FTE) 是从 ISEE 1 和 ISEE 2 在日侧磁层顶获得的数据中首次被识别出来的 [1,2]. 垂直于磁层顶方向的磁场 (B_n) 双极信号从接近于零的值到正 (负) 值之后又变为负 (正) 值是 FTE 事件的主要特征, 可通过观测该信号来识别 FTE. 此外, 也可以通过观测磁场总强度及等离子体参量的变化来识别 FTE. 1984 年 Rijnbeck 等 [3] 根据 FTEs 的 B_n 信号将其分为三类: (1) 标准 FTE, 其 B_n 信号为先正后负; (2) 反向 FTEs, 其 B_n 信号先负后正; (3) 不规则的 FTE, 其 B_n 信号只有一个正或负的单极信号. 1982 年 Paschmann 等 [4] 利用观测数据发现, FTE 发生时, 磁场的总强度通常会得到增强, 热压和磁压总和在 FTE 里外不平衡, 并且在 FTE 里观测到磁鞘与磁层粒子, 即磁鞘与磁层的粒子会混合在一起. 还有一些其他特征仅在特定情况下才能观测到, 例如磁鞘里的 FTE 会有等离子体密度减少并伴随温度增加, 而磁层 FTE 事件的密度与温度呈正相关, 有时还能观测到速度增强 [4]. 1978 年 Russell 和 Elphic[1] 研究了 FTE 的产生机制, 发现 FTE 是由局部突发重联的重联场线产生的肘状通量管. 1987 年 Sonnerup[5] 发现, 在 Russell 和 Elphic 模型下, FTE 和磁层顶内部磁场相互作用产生的感应电流会反过来使得 FTE 内部的场线扭缠. 1985 年 Lee 和 Fu[6] 提出, FTE 可能是由于磁层顶撕裂不稳定性导致的多重 X 线重联产生的. 2009 年 Dorelli 和 Bhattacharjee[7] 提出了流的涡旋产生 FTEs 的机制.

南向行星际磁场是 FTE 产生的一个重要因素 [3,8], 且当磁鞘磁场为南向时, FTE 的平均发生周期在磁鞘里为 8 min, 磁层顶里为 7 min[3]. 1995 年 Kuo 等 [8] 研究发现, 太阳风条件如热压比磁压 (β) 和动压, 对 FTE 发生的影响很弱, 并且当行星际磁场转北向时, 磁声 Ma 数对 FTE 发生有影响. 2006 年 Wang 等 [9] 利用 Cluster 在日侧磁层顶高纬和翼侧低纬三年的观测数据发现: FTE 的发生分别与行星际磁场三个分量而不是与行星际磁场总强度有很大关系; 行星际磁场的时钟角、倾角、螺旋角和圆锥角对 FTE 发生也有很大的影响, 并且 FTE 的发生与太阳风密度、速度、β、动压以及磁声 Ma 数等都有不同程度的关系; FTE 发生的间隔时间与行星际磁场的 yz 分量, 磁场总强度, 行星际磁场的时钟角、倾角、螺旋角以及圆锥角明显相关, 但与太阳风 y 方向的电场和磁声 Ma 关系较弱. 2016 年 Milan 等 [10] 利用电离层的 FTE 信号发现, 在更高 (低) 的太阳风速下, 总重联率更高 (低), 产生更大 (小) 的 FTE, FTE 事件重复率更慢 (快). 1996 年 Russell 等 [11] 发现在高磁声 Ma 下, FTE 的发生有一定程度的减少. Scurry 和 Russell[12] 认为, 高 Ma 数条件下可能更不利于重联发生.

在 FTE 的三维全球模拟工作中, 2006 年 Raeder[13] 发现, FTE 可以在不变的太阳风条件 (南向行星际磁场) 下形成, 并且其形成与季节有关, 在夏/冬至时 FTE 的发生率更高. Raeder 研究中双极信号的间隔时间为 6~16 min, 与观测得到的平均 8 min 在量级上一致. 但是, 在 Dorelli 和 Bhattacharjee[7] 2009 年的模拟研究中, FTEs 与偶极倾角无明显关系. 模拟时, FTEs 的结构可以由三维磁力线表现为扭缠的通量管, 其中有四种不同的磁力线拓扑结构 [7,14], 与 Pu 等 [15] 2013 年的观测结果一致.

从理论分析和观测结果可以看出, 太阳风条件

对 FTE 发生有一定的影响, 但目前尚未见高速太阳风条件下 FTE 发生情况的模拟研究, 特别是 FTE 发生率的空间分布特征还不清楚. 本文利用全球磁流体力学 (MHD) 模拟, 对高速太阳风条件下的 FTEs 信号进行研究.

1　全球 MHD 模型

这里使用中国自主开发的 PPMLR-MHD 模型 [16,17] 进行太阳风–磁层–电离层系统全球模拟. 该模型将地球位置设为原点, 且 x, y, z 方向分别指向太阳、昏侧和北边, 解域为 $-300\,R_{\rm e} < x < 30\,R_{\rm e}$, $-150\,R_{\rm e} < y,\ z < 150\,R_{\rm e}$. 在 $-10\,R_{\rm e} < x,\ y,\ z < 10\,R_{\rm e}$ 的范围内, 网格点大小为 $0.1\,R_{\rm e}$, 在该范围之外, 网格点大小沿坐标轴等比增加. 为了避免等离子体层及强磁场引入的复杂计算, 在 $3\,R_{\rm e}$ 处设置一个内边界. 该模拟共计算了 7480 s, 但这里只使用和分析 3740 s 之后的数据, 因为 3740 s 后系统达到了相对稳定的状态.

为研究高速太阳风下磁通量传输事件的发生率, 输入的太阳风参数为

$$v_{\rm sw} = 1200\,{\rm km\cdot s^{-1}},\quad n_{\rm sw} = 3\,{\rm cm^{-3}},$$
$$B_z = -8.3\,{\rm nT},\quad B_y = 8.3\,{\rm nT},\quad B_x = 0\,{\rm nT},$$

这些参数在整个模拟过程中保持不变; $v_{\rm sw}$ 为沿 x 轴方向的太阳风速度, $n_{\rm sw}$ 为太阳风数密度, B_x, B_y, 和 B_z 为太阳风磁场的 3 个分量; 行星际磁场时钟角为 135°, 地球偶极倾角为 0; 太阳风速度靠近高极限选取, 通常在强日冕物质抛射事件中太阳风才可能具有这么高的速度, 这里主要是研究在此极端太阳风条件下的 FTE 事件.

2　FTE 的识别

2.1　磁层顶位置的确定

为了得到 FTE 沿着垂直于磁层顶方向的磁场信号, 需要比较精确地获得磁层顶位置. 这里利用磁场的拓扑结构确定磁层顶位置. 如图 1 所示, 黑色为全闭合磁力线所在区域, 蓝色为一端连接北半球的半开放磁力线所在区域, 绿色为一端连接南半球的半开放磁力线所在区域, 红色为全开放磁力线所在区域 [7],

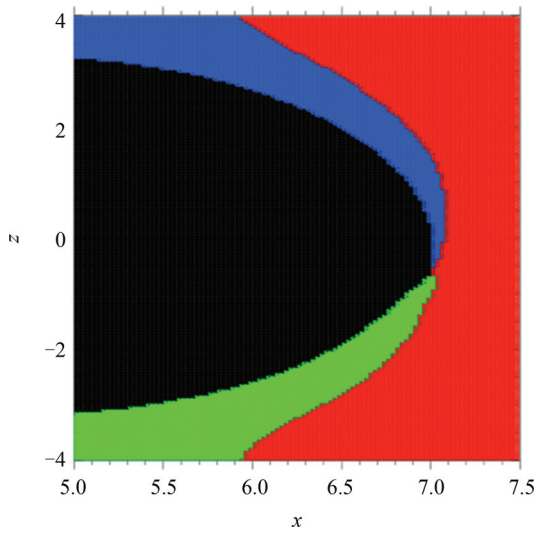


图 1　子午面磁场拓扑结构剖面 (黑色为全闭合磁力线所在区域, 蓝色为一端连接北半球的半开放磁力线所在区域, 绿色为一端连接南半球的半开放磁力线所在区域, 红色为全开放磁力线所在区域)

Fig. 1　Different topological domains in the noon-midnight meridional plane (Black area represents the closed magnetic field line. Blue is the magnetic field line whose one side connects to the north hemisphere and the other side is open to the solar wind. Green means the magnetic field lines that is half-open connecting to the south hemisphere. Red is the open magnetic field line)

磁层顶的位置确定在红色区域与其他颜色区域的分界处. 这里选择一个相对平静时刻下计算出的分界面作为固定的磁层顶位置.

2.2　FTE 判断标准

FTE 信号中有一些扰动, 这给 FTE 识别造成了困难. 本文采用以下标准作为识别 FTE 的依据.

(1) 单点观测所得 B_n 信号有明显的双极或单极变化, 变化幅度至少为 6 nT, 并且与之前的信号间隔至少 1 min.

(2) 因为单点观测具有一定的局限性, 选出满足判断标准 1 的信号之后, 给出这些信号时段附近的参数图, 例如热压、磁场、数密度等在观测点所在地方时附近的等值线剖面. 这些参数需在相应位置有较明显的变化, 且该变化向远离日下点方向传播. 因此, 即使信号满足判断标准 1, 但若等值线图没有任何变化, 则认为该信号是局地磁场扰动而不是 FTE.

(3) 磁力线在热压增强附近有扭缠, 这是 FTE 的辅助判断标准.

3 分析与讨论

3.1 FTE 信号

图 2 和图 3 分别为在磁层顶上的取样点 (6.4, 0, 3.0) R_e 和 (6.3, 0, −3.0) R_e 处获得的数据, 取样点 (6.4, 0, 3.0) R_e 位于北半球, (6.3, 0, −3.0) R_e 位于南半球. B_n 为沿着磁层顶法向 $\boldsymbol{n}$ 的磁场分量; B_l 为与 $\boldsymbol{n}$ 和 z 轴共面且垂直于 $\boldsymbol{n}$ 方向的磁场分量, 方向为 $\boldsymbol{l}$; B_m 为同时垂直 $\boldsymbol{n}$ 与 $\boldsymbol{l}$, 方向为 $\boldsymbol{m}$ 的磁场分量. 图 2 和图 3 中灰色代表根据 2.2 节判断标准最终识别出的 FTE 信号. 图 2 和图 3 的模拟结果基本上囊括了 FTE 的信号特征, 具体如下.

(1) 图 2 和图 3 中都可以看到 B_n 双极信号. 北半球的取样点得到 5 个 FTE 信号, 分别在约 1122 s, 1318 s, 2852 s, 3545 s, 3712 s, 记为 $e_1 \sim e_5$; 南半球的取样点得到 9 个 FTE 信号, 分别在约 926 s, 1057 s, 1169 s, 1384 s, 1561 s, 1702 s, 1805 s, 2702 s, 3357 s, 记为 $a_1 \sim a_9$.

(2) 图 2 中的 B_n 双极信号属于标准类型 (先正后负)[3], 对应北半球的 FTE. 图 3 中的双极信号属于倒转类型 (先负后正)[3], 对应南半球的 FTE. 并且南半球取样点还观测到了单极信号, 例如 a_4 的信号并不是明显的双极, 而是呈现出一个负向的单极信号, 这在观测中也是存在的.

(3) 图 2 中双极信号的振幅范围为 12∼49.2 nT, 图 3 中双极信号的振幅范围为 9.1∼23.1 nT, 这与卫星观测数据相符.

(4) 图 2 和图 3 中的 FTE 信号发生时, B_l 均为负值. 因此, 这两个观测点的位置在磁鞘里. 以观测北半球的取样点为例, FTE 信号出现时, B_l 的值均有北向偏移, 磁场强度都有一定的增强, 但只有 e_3, e_4 和 e_5 的 B_m 出现了较明显的变化. 除了 e_2 的速

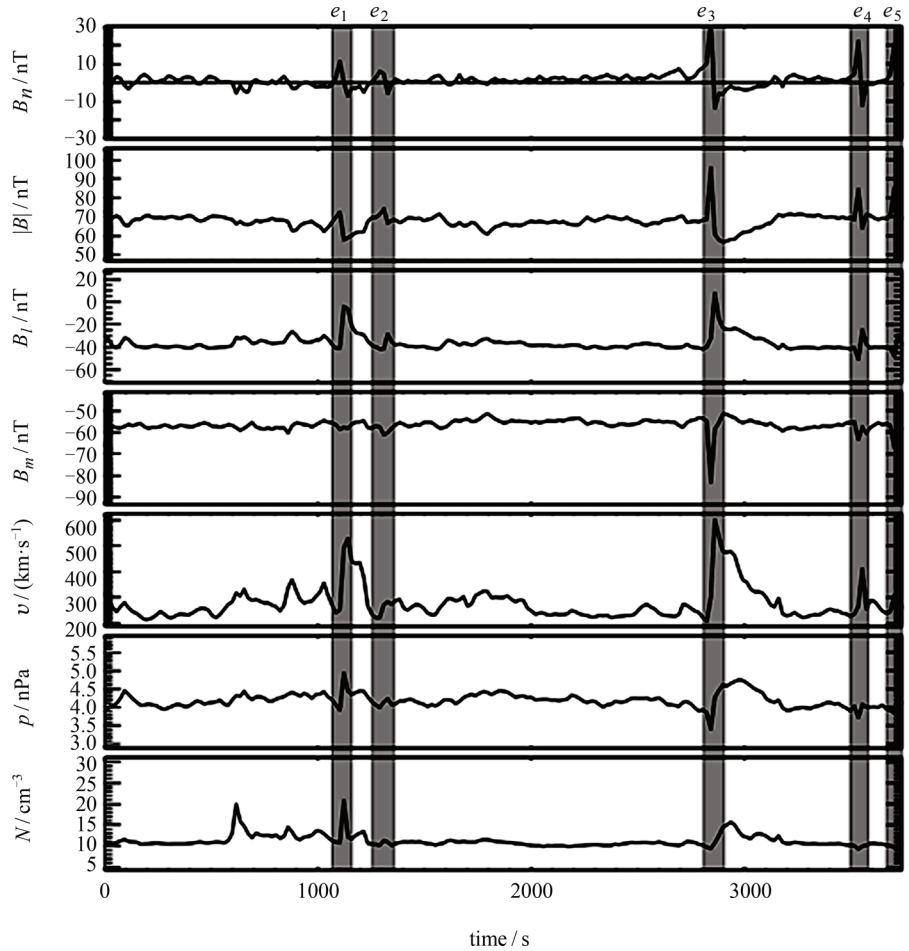


图 2 北半球取样点得到的磁场及等离子体参数

Fig. 2 Parameters of magnetic field and plasma from the sampling point of north semisphere

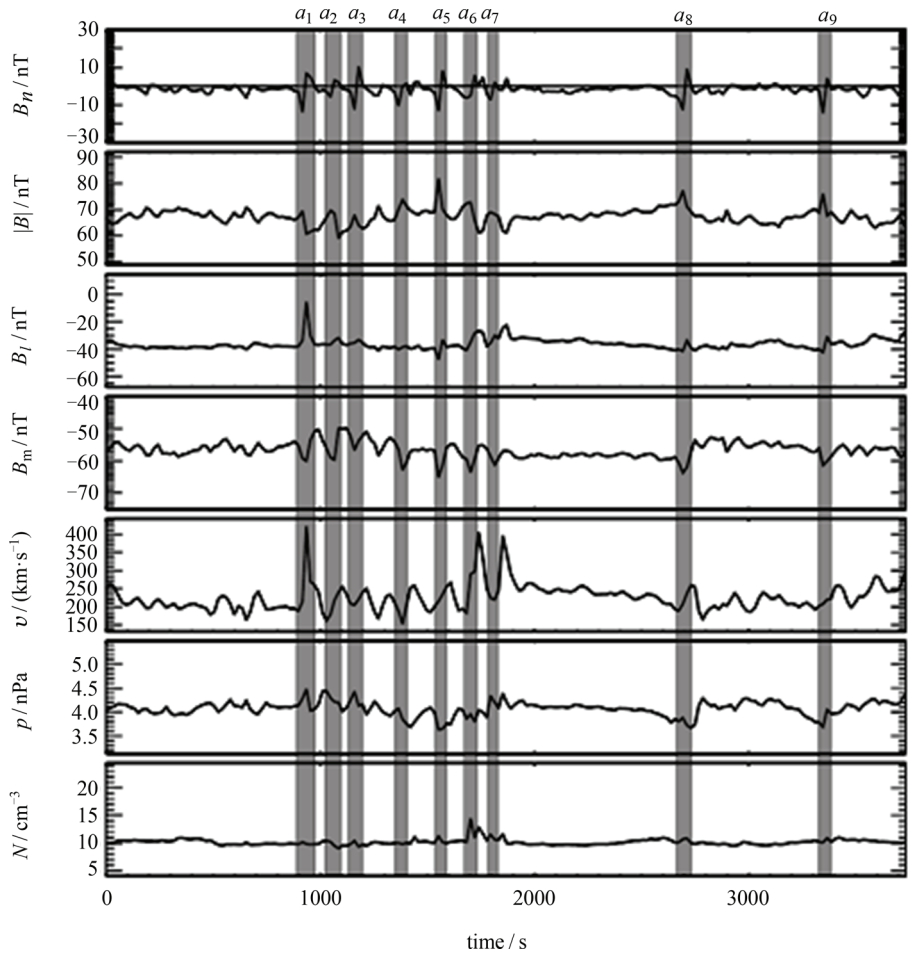


图 3　南半球取样点得到的磁场及等离子体参数

Fig. 3　Parameters of magnetic field and plasma from the sampling point of south semisphere

度没有明显的变化外, 其他几个信号的速度均有增强. e_1, e_2 和 e_5 的热压及数密度都有一定的增强, e_3 和 e_4 的热压及数密度减小. 还有一些信号特征在 1995 年 Elphic[18] 给出的 FTEs 分类中有对应.

(5) 北半球取样点中 62 min 内出现了 5 个 FTE, 信号之间的间隔时间范围为 2.8~25.6 min, 南半球取样点 62 min 内出现了 9 个 FTE, 信号之间的间隔时间范围为 1.7~15 min, 这与观测数据统计结果基本相符 [3].

(6) 由图 2 和图 3 可以看出, 这里的 FTE 信号是自发产生的, 与观测数据 [19] 以及之前的模拟 [13] 是一致的.

因为单点观测具有局限性, 在得到满足 2.2 节中判断标准 1 的信号后, 对所得信号时段以及观测点位置附近画相关参数等值线并进行分析, 进一步确定得到的信号是否为 FTE, 同时观察等离子体以及磁场等变化. 以北半球取样点上观测到的 e_3 信号为例, 图 4 给出了子午面附近的热压等值线, x 轴沿日地连线方向, 原点为地球, 纵轴为指向北向的 z 轴. 由图 4 可以看到, 2748.9 s 时日下点处有一小团热压增强, 2786.3 s 时该增强稍微膨胀, 并向 z 轴正向移动了一点距离, 2823.7 s 时该增强似乎减弱了一些并继续向北部传播, 接下来的两个时刻, 之前的热压增强变为热压减小并继续向北传播.

图 5 给出了图 4 对应时刻和位置的磁场强度等值线. 由图 5 可以看出, 磁场强度从日下点附近逐渐增强膨胀向北传播, 在最开始的两个时刻, 磁场强度与热压增强, 从 2823.7 s 开始热压下降, 但热压下降区域附近磁场强度仍然处于增强状态, 这可能是由于 2823.7 s 之后热压与磁压达到平衡所致.

图 6 给出了 2767.6 s 时刻在子午面的热压增强附近追踪到的磁力线形态. x, y, z 轴的方向如图所

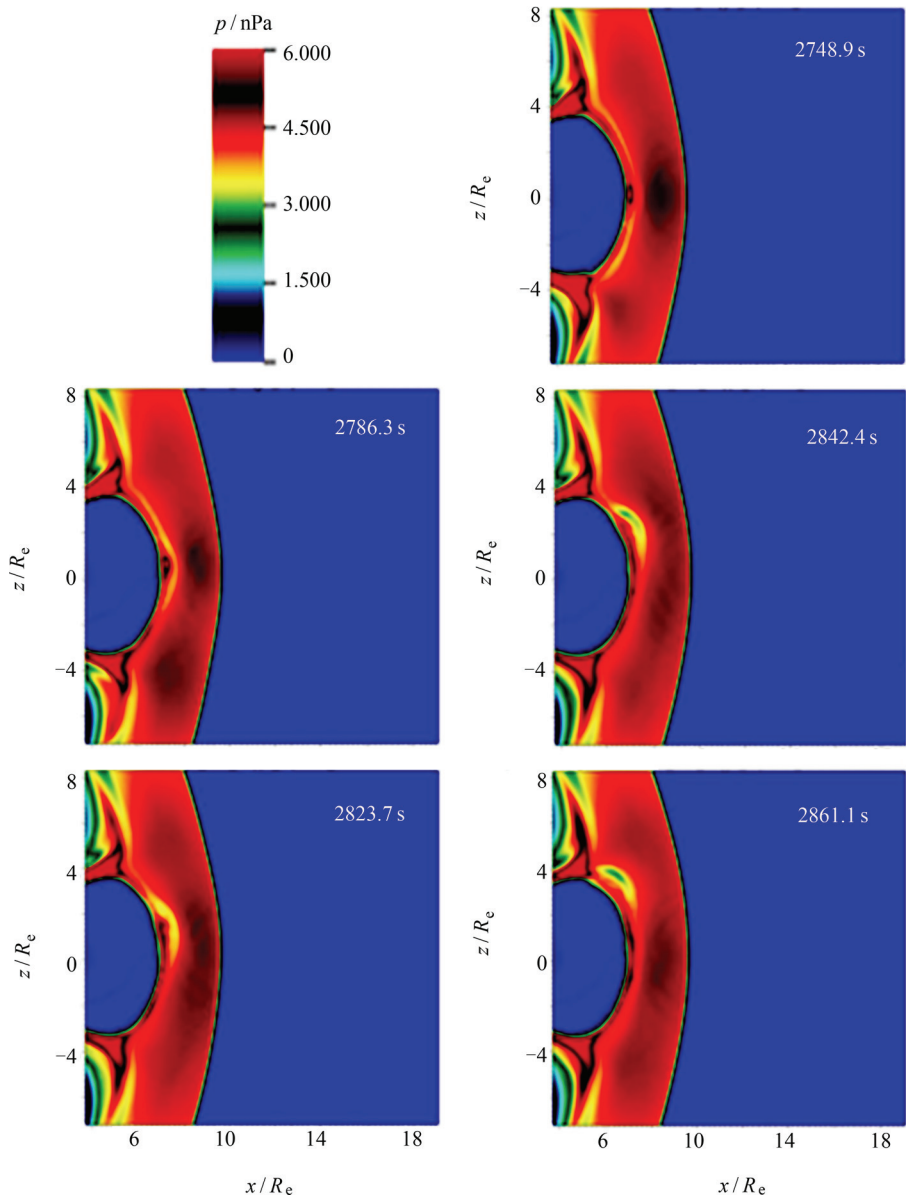


图 4 子午面处的热压等值线

Fig. 4 Contours of thermal pressure in the noon-midnight meridional plane

示, 单位为 R_e, 中间彩色区域为热压的等值线图. 由图 6 可以清楚地看到, 磁力线在该热压增强附近有扭缠的形态. 综上可知, 在本模拟中基本可以得到 FTE 具有的特征, 并且通过双极信号、等离子体参数等值线图 (热压增强) 以及追踪磁力线, 可以更加全面分析并判断 FTE.

3.2 FTE 发生率

为了更全面地分析研究 FTE 在日侧磁层顶上的发生情况, 增加 8 个取样点并对应 y 轴的不同位置, 如图 7 所示. 图 7 中 10 个取样点分别标记为 A~J, 位置分别为 $(6.3, 0, -3)\,R_e$, $(5.8, 4.8, -2)\,R_e$, $(5.7, -2.5, -3)\,R_e$, $(5.8, 2.5, 3)\,R_e$, $(6.4, 0, 3)\,R_e$, $(5.7, -5, 2)\,R_e$, $(5.2, -5, -2.1)\,R_e$, $(6.3, -2.5, 3)\,R_e$, $(6.2, 2.5, -3.1)\,R_e$, $(5.2, 5, 2)\,R_e$.

表 1 为各取样点识别出的 FTEs 个数和事件之间的平均间隔时间. 这 10 个点共观测到 39 个 FTE 信号, A 点和 I 点上观测到的 FTE 信号最多, 为 11 个, G 点和 J 点没有观测到. 这几个点得到的 FTE 事件平均时间间隔范围为 5~28.5 min. 由表 1 可以发现, 观测位置不同, 所得信号间隔时间也不同.

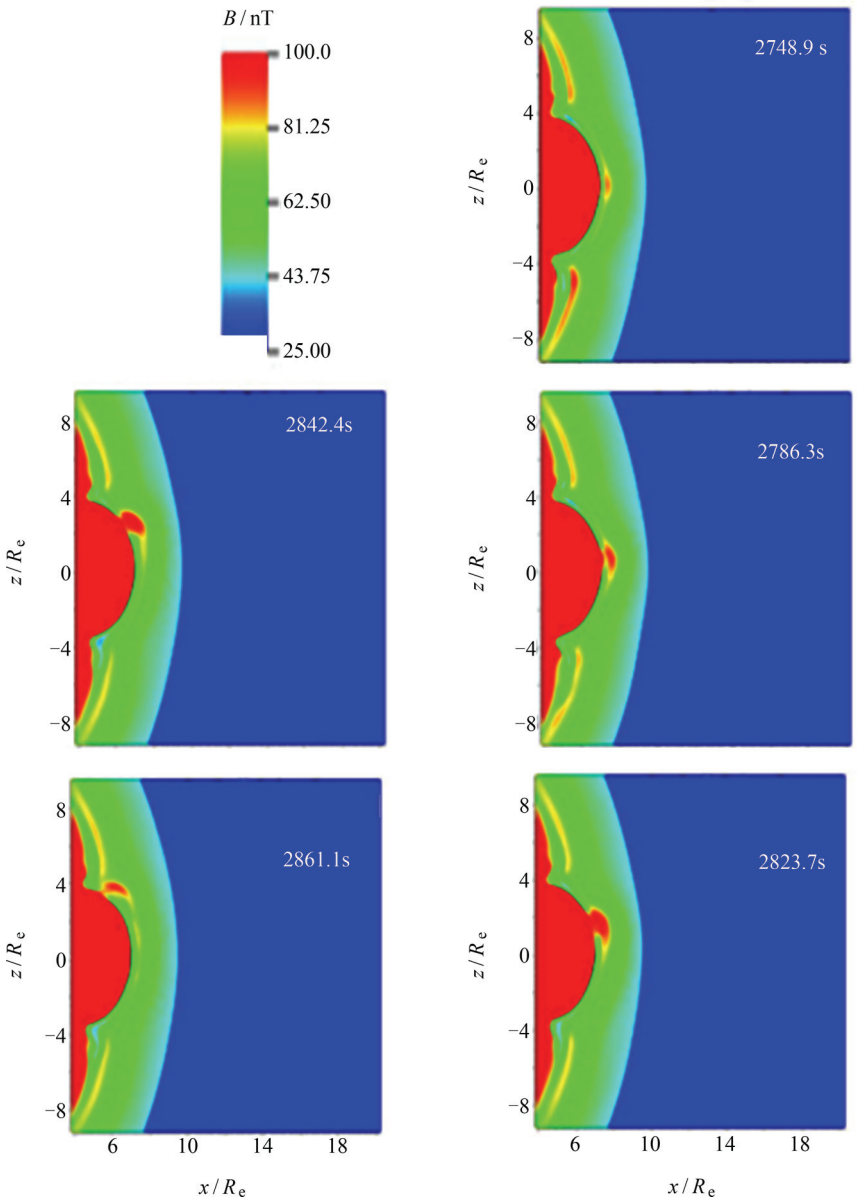


图 5　子午面处的磁场强度等值线

Fig. 5　Contours of magnetic field magnitude in the noon-midnight meridional plane

图 8 为识别出的 FTE 信号个数与 y 轴位置的关系, 条形图代表在对应 y 轴位置上观测到的 FTEs 数量. 其中接近 $y = -5\,R_e$ 处有 3 个 FTE 信号, 接近 $y = -2.5\,R_e$ 处有 8 个, 子午线附近有 14 个, $y = 2.5\,R_e$ 处有 11 个, $y = 5\,R_e$ 附近有 3 个. 由图 8 可以看出, 靠近子午线位置的 FTEs 信号最多, 而越向翼侧靠近 FTEs 信号越少, 这可能与磁鞘里的速度分布情况有关. 如图 9 所示, 接近翼侧时磁鞘的速度相对较高, 磁力线可能来不及重联就被相对较高速度的磁鞘流带走了; 而子午线附近磁鞘速度相对较低, 磁力线有充分的时间重联并形成 FTE. 此外, 该结果也可能与 FTE 在 y 方向的尺度有关.

4　结论

通过全球 MHD 模拟, 研究了在高速太阳风条件下的 FTE 信号. 在高速太阳风条件下, 本模拟中有 FTEs 产生, 对其进行单点观测得到 FTEs 信号特征如 B_n 双极信号、信号峰值范围、磁场、速度变化等与观测结果基本一致. 利用磁场强度、热压等参数

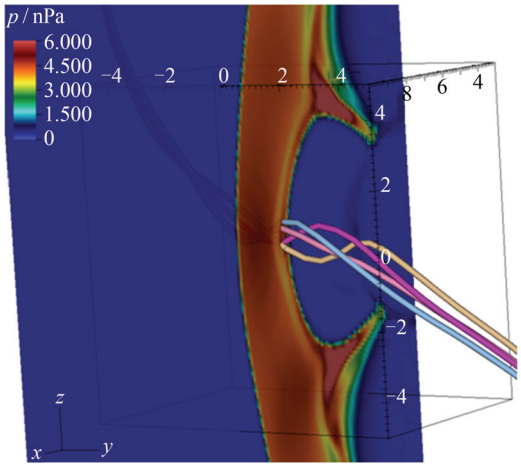


图 6 2767.6 s 时刻的扭缠磁力线

Fig. 6 Twisted magnetic field lines at 2767.6 s

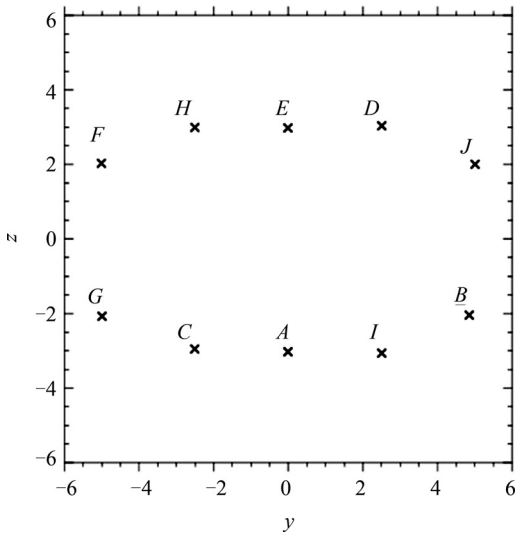


图 7 取样点在 yz 平面上的位置

Fig. 7 Locations of the sampling points in the yz plane

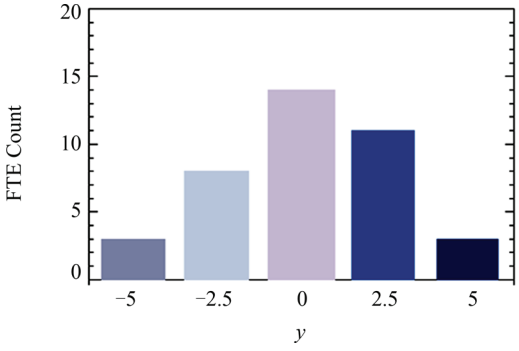


图 8 取样点在 yz 平面上的位置

Fig. 8 Locations of the sampling points in the yz plane

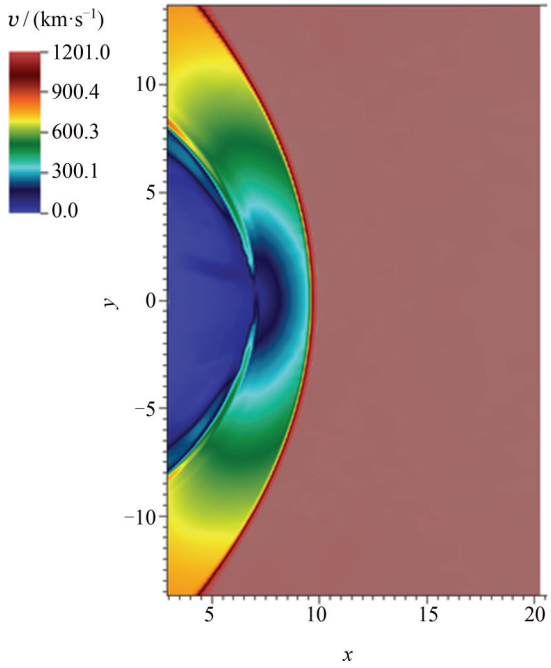


图 9 速度在赤道面上的等值线

Fig. 9 Contours of velocity in the equatorial plane

表 1 各观测点识别出的 FTE 个数及间隔时间

Table 1 Number of FTE and their time intervals from each observational point

观测点	识别 FTE 个数	平均时间间隔/min
A	9	5.1
B	3	24
C	4	16
D	2	28.5
E	5	10.8
F	3	24.5
G	0	—
H	4	13.3
I	9	5
J	0	—

的等值线图, 全面观察 FTE 的发生与传播. 同时, 通过追踪磁力线, 发现了以三维扭缠磁绳形式体现的 FTE. 通过在磁层顶上选取 10 个点进行单点观测发现, 本次模拟中 FTE 信号的个数在子午线位置最多, 越靠近翼侧越少. 该现象可能是由磁鞘里的速

度分布差异导致的. 太阳风速度及其他行星际磁场条件对 FTE 是否有影响需要计算更多的实例进行对比研究.

致谢 国家重大科技基础设施子午工程和空间天气学国家重点实验室的高性能计算设施对本文研究工作提供了支持.

参考文献

[1] RUSSELL C T, ELPHIC R C. Initial ISEE magnetometer results: magnetopause observations [J]. *Space Sci. Rev.*, 1978, **22**(5): 681-715

[2] RUSSELL C T, ELPHIC R C. ISEE observations of flux transfer events at the dayside magnetopause [J]. *Geophys. Res. Lett*, 1979, **6**(1): 33-36

[3] RIJNBEEK R P, COWLEY S W H, SOUTHWOOD D J, *et al.* A survey of dayside flux transfer events observed by ISEE 1 and 2 magnetometers [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Physics*, 1984, **89**(A2): 786-800

[4] PASCHMANN G, HAERENDEL G, PAPAMASTORAKIS I, *et al.* Plasma and magnetic field characteristics of magnetic flux transfer events [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 1982, **87**(A4): 2159-2168

[5] SONNERUP B U O. On the stress balance in flux transfer events [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 1987, **92**(A8): 8613-8620

[6] LEE L C, FU Z F. A theory of magnetic flux transfer at the Earth's magnetopause [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1985, **12**(2): 105-108

[7] DORELLI J C, BHATTACHARJEE A. On the generation and topology of flux transfer events [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 2009, **114**(A6): A06213. DOI:org/10.1029/2008JA013410

[8] KUO H, RUSSELL C T, LE G. Statistical studies of flux transfer events [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 1995, **100**(A3): 3513-3519

[9] WANG Y L, ELPHIC R C, LAVRAUD B, *et al.* Dependence of flux transfer events on solar wind conditions from 3 years of Cluster observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**(A4): A04224. DOI:org/10.1029/2005JA011342

[10] MILAN S E, IMBER S M, CARTER J A, *et al.* What controls the local time extent of flux transfer events [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 2016, **121**(2): 1391-1401

[11] RUSSELL C T, LE G, KUO H. The occurrence rate of flux transfer events [J]. *Adv. Space Res.*, 1996, **18**(8): 197-205

[12] SCURRY L, RUSSELL C T. Proxy studies of energy transfer to the magnetosphere [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 1991, **96**(A6): 9541-9548

[13] RAEDER J. Flux transfer events: 1. Generation mechanism for strong southward IMF [J]. *Ann. Geophys.*, 2006, **24**: 381-392

[14] FEDDER J A, SLINKER S P, LYON J G, *et al.* Flux transfer events in global numerical simulations of the magnetosphere [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 2002, **107**(A5): SMP 1-1-SMP 1-10

[15] PU Z Y, RAEDER J, ZHONG J, *et al.* Magnetic topologies of an in vivo FTE observed by Double Star/TC-1 at Earth's magnetopause [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2013, **40**(14): 3502-3506

[16] HU Y Q, GUO X C, WANG C. On the ionospheric and reconnection potentials of the Earth: Results from global MHD simulations [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 2007, **112**(A7): A07215. DOI:org/10.1029/2006JA010342

[17] HUANG Z H, WANG C, HU Y Q, *et al.* Parallel Implementation of 3D global MHD simulations for Earth's magnetosphere [J]. *Comp. Math. Appl.*, 2008, **55**(6): 1094-1101

[18] ELPHIC R C. Observations of flux transfer events: A review [J]. *Phys. Magnetop.*, 1995, **90**: 225-233

[19] LE G, RUSSELL C T, KUO H. Flux transfer events: spontaneous or driven [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1993, **20**(9): 791-794