

LIU Yang, PU Zuyin, XIE Lun, GUO Ruilong, WANG Xiaogang, XIAO Chijie, SHI Quanqi, DUNLOP M, BOGDANOVA Y V, MOORE T E, RUSSELL C T, LINDQVIST P A, TORBERT R B, POLLOCK C, ZHAO Cong. Ion-scale structures in flux ropes observed by MMS at the magnetopause (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2018, **38**(2): 147-168. DOI:10.11728/cjss2018.02.147

MMS 星座对磁层顶磁通量绳内离子 惯性尺度结构的观测^{*}

刘 杨¹ 濮祖荫¹ 谢 伦¹ 郭瑞龙² 王晓钢³ 肖池阶⁴
史全岐⁵ DUNLOP M⁶ BOGDANOVA Y V⁶ MOORE T E⁷
RUSSELL C T⁸ LINDQVIST P A⁹ TORBERT R B¹⁰
POLLOCK C⁷ ZHAO Cong⁸

1(北京大学地球与空间科学学院 北京 100871)

2(中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

3(哈尔滨工业大学物理系 哈尔滨 150001)

4(北京大学物理学院 北京 100871)

5(山东大学空间科学与物理学院 威海 264209)

6(RAL Space, Rutherford Appleton Laboratory, STFC, Didcot, OX11 0QX, UK)

7(Goddard Space Flight Center, NASA, Greenbelt, MD, USA)

8(University of California, Los Angeles, CA, USA)

9(Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden)

10(University of New Hampshire, Durham, NH, USA)

摘 要 利用 MMS 观测数据, 对磁层顶通量绳内离子惯性尺度 (d_i) 的结构进行分析研究. 结果发现, 许多不同尺度 (约 $1 d_i$ 至数十 d_i) 的通量绳内都存在具有 d_i 尺度的电流 $\mathbf{j}_m$, 其方向在磁层顶局地坐标系的 $-M$ 方向, 即与磁层顶查普曼-费拉罗电流同向, 由电子在 $+M$ 方向的运动 ($\mathbf{v}_{em}$) 携带. 这些电流结构具有以下特征: 磁鞘与磁层成分混合, 磁场为开放形态; 离子去磁化, 电子与磁场冻结; N 方向 (即垂直于磁层顶电流片方向) 的电场 $\mathbf{E}_n$ 显著增大, 幅度达到约 $20 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1}$, 并伴有明显的尖峰状起伏, 该增强和尖峰状起伏的电场对应于霍尔电场. 分析表明, 电流、电子与离子运动的偏离以及霍尔电场之间遵从广义欧姆定律, 三者密切相关. 进一步对磁层顶磁重联的探测数据进行分析发现, 在很多重联区内也存在与通量绳内相似的结构, 其尺度约为 d_i 量级, 其中霍尔电场 $\mathbf{E}_n$ 、电流 $\mathbf{j}_m$ 和电子速度 $\mathbf{v}_{em}$ 均与通量绳内对应物理量的方向相同且幅度相近. 基于上述观测事实, 采用经典 FTE 通量绳模型, 对通量绳内电流、电子运动和霍尔电场的起源进行了初步探讨, 认为其来源于磁层顶无碰撞磁重联区内的相应结构, 并且后者在离子尺度通量绳的形成过程中起到重要作用.

关键词 磁通量绳, 离子尺度电流, 霍尔电场, 磁层顶, 磁重联

中图分类号 P 353

* 国家自然科学基金项目资助 (41274167, 41674164)

2017-11-03 收到原稿, 2017-11-24 收到修定稿

E-mail: xijubear@163.com

Ion-scale Structures in Flux Ropes Observed by MMS at the Magnetopause

LIU Yang¹ PU Zuyin¹ XIE Lun¹ GUO Ruilong² WANG Xiaogang³

XIAO Chijie⁴ SHI Quanqi⁵ DUNLOP M⁶ BOGDANOVA Y V⁶

MOORE T E⁷ RUSSELL C T⁸ LINDQVIST P A⁹

TORBERT R B¹⁰ POLLOCK C⁷ ZHAO Cong⁸

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

²(Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

³(Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Haerbin 150001)

⁴(Institute of Plasma Physics and Fusion Studies, Peking University, Beijing 100871)

⁵(School of Space Science and Physics, Shandong University, Weihai 264209)

⁶(RAL Space, Rutherford Appleton Laboratory, STFC, Didcot, OX11 0QX, UK)

⁷(Goddard Space Flight Center, NASA, Greenbelt, MD, USA)

⁸(University of California, Los Angeles, CA, USA)

⁹(Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden)

¹⁰(University of New Hampshire, Durham, NH, USA)

Abstract In this paper the structures with scale of ion inertial length (d_i) in flux ropes at the magnetopause are studied based on MMS measurements. The results show that currents ($\mathbf{j}_m$) of d_i scale are found to exist in many flux ropes with different scales, which flow in the $-M$ direction in magnetopause local coordinates (*i.e.*, in the same direction of the Chapman-Ferraro current at the magnetopause) and are carried by electrons' motion in the $+M$ direction ($\mathbf{v}_{em}$). Within the current structures, magnetosheath and magnetospheric plasma populations are mixed; the magnetic field has open topology; ions are non-magnetized, while electrons are frozen-in with the magnetic field lines; the N -component of electric field ($\mathbf{E}_n$), which is Hall electric field in nature, substantially enhances (up to about $20 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1}$), accompanying with notable fluctuations. Detailed analysis shows that the current, separation of electrons' motion from ions and the Hall electric field are closely related to each other, and obey the general Ohm's Law. In addition, we have also analyzed the MMS measurements of magnetic reconnection events at the magnetopause. It is found that structures similar to those in flux ropes are also present inside the reconnection region in many cases. Their scales are of d_i length. The directions (magnitudes) of the Hall electric field $\mathbf{E}_N$, current filament $\mathbf{j}_M$ and electron velocity $\mathbf{v}_{eM}$ are as same as (close to) those in flux ropes. On the bases of above observations and making use of the classical flux rope models, how the d_i -scale structures in flux ropes are formed is studied. It is suggested that they are likely to originate from the corresponding structures in the reconnection region at the magnetopause which play an essential role in the formation process of d_i -scale flux ropes.

Key words Magnetic flux ropes, Ion-scale current, Hall electric field, Magnetopause, Magnetic reconnection

0 引言

磁通量绳 (flux ropes) 是指磁力线发生扭转和缠绕的磁通量管 (flux tubes), 是日地空间中常见的一种磁场结构. 当行星际磁场有南向分量时, 卫星经常在地球磁层顶探测到通量绳, 其主要观测特征是垂直于磁层顶的磁场法线分量 B_n 出现双极 (bi-polar) 结构, 以及磁场与磁鞘等离子体成分相混合^[1]. Haerendel 等^[2] 和 Russell 等^[3] 分别通过 HEOS 2 和 ISEE-1/2 卫星最先观测到磁层顶 MHD 尺度的通量绳, 并称其为通量传输事件 (Flux Transfer Events, FTEs)^[3]. Rijnbeek 等^[4] 发现 FTEs 持续时间平均为几分钟, 在垂直于轴线方向上的空间尺度为 $1\sim 2 R_e$. FTEs 提供了向磁层传输太阳风能量和等离子体的通道, 自其被发现以来, 一直受到广泛关注^[5-8], 对 FTEs 的研究工作集中在卫星观测和数值模拟两个方面, 主要探讨 FTEs 的特性和物理机制. 迄今已经提出了 4 种经典模型来解释 FTEs 的性质和起源: ① 肘状通量绳模型^[3], ② 多 X 线重联模型^[9,10], ③ 爆发性单 X 线重联模型^[10-12], ④ 涡旋诱发重联模型^[13,14]. 但是对 FTEs 的形成机制至今尚未形成共识. 欧空局 Cluster 星座成功发射以后, 除 FTEs 外, 在地球磁尾也观测到离子惯性尺度 ($d_i = c/\omega_{pi}$ 这里 ω_{pi} 为离子等离子体频率, 以下将 d_i 简称为离子尺度) 的小通量绳结构, 发现其中能量电子通量增强, 电子可能受到了有效的加速^[15-18]. 另一方面, 粒子模拟研究显示, 在三维无碰撞磁重联过程中, 次级撕裂模不稳定性能够产生大量的小尺度通量绳^[19]; 此外, 在大尺度初级通量绳旁边的薄电流片中也会出现小尺度的次级通量绳^[20,21]. 这些数值模拟工作推进了对小尺度通量绳的研究工作.

美国 NASA 磁层多尺度星座 (Magnetospheric Multiscale, MMS) 于 2015 年 3 月发射成功, 其 4 颗卫星在磁层顶附近的间距小于数十千米, 仪器的精度很高, 为探测无碰撞磁重联和不同尺度 (特别是小尺度) 通量绳提供了极好的条件. 迄今对小尺度通量绳的观测已获得一些新成果. 例如, Eastwood 等^[22] 发

现两个尺度分别约为 $14.1 d_i$ 和 $13.9 d_i$ 的通量绳, 其内部均存在丝状电流 (filamentary current), 电流结构内离子磁冻结条件被破坏. Hwang 等^[23] 观测到一个尺度约为 $78 d_i$ 的通量绳, 其核心区域内磁场拓扑形态是开放的. Teh 等^[24] 发现了几个连续出现的小尺度通量绳 ($3\sim 11 d_i$), 其轴线方向均与导向场之间有一定的夹角 ($53^\circ\sim 66^\circ$). Teh 等^[25] 在相隔 14 s 的两个时刻观测到两个分别约为 $5 d_i$ 和 $11 d_i$ 的通量绳, 前者为无力型 (Force-free), 后者是弹坑型 (crater-like, 即磁压减小, 等离子体热压增大).

这些新成果, 特别是 Eastwood 等的观测^[22] 受到广泛关注. 他们在磁层顶小通量绳中看到的丝状电流与 Cluster 在磁尾 d_i 尺度通量绳中观测到的能量电子通量增强^[15-17] 有相似之处. Eastwood 等只列举了两个观测事例, 物理分析也比较简略. 本文针对通量绳中存在丝状电流是否为普遍现象, 这些丝状电流的产生机制以及其与通量绳的形成及磁重联电子加速的关系等问题, 利用 MMS 探测数据, 对磁层顶通量绳离子尺度的丝状结构进行较为全面的观测分析.

1 数据与分析方法

1.1 数据

MMS 卫星搭载有高精度的仪器. 这里的磁场数据来自于 MMS 上的磁通门磁强计 (Flux Gate Magnetometer, FGM) 的 burst-mode 数据, 时间精度为 10 ms^[26]. 电场数据来自于 MMS 卫星上的电子双探针 (Electric Double Probe^[27,28]) 的 burst-mode 数据, 数据点精度为 $8192 s^{-1}$. 离子和电子数据来自于 MMS 上的快速等离子体设备 (Fast Plasma Instrument^[29]) 的 burst-mode 数据, 离子数据精度为 150 ms, 电子数据精度为 30 ms. 电流计算时采用与 Eastwood 等^[22] 相同的方法, 将离子数据内插到电子数据点上, 以确保最高的时间精确度. 此外, 为方便将实测电场与根据电子速度和实测磁场获得的电子对流电场以及霍尔电场进行对比, 对电场数据进行 30 ms 平滑处理. 磁层顶区域离子 (H^+) 的惯

性尺度 d_i 约为 50 km, 通量绳和丝状结构的特征速率 $\leq 100 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, 采样精度 $\leq 3 \text{ km}$, 这样可对 d_i 尺度的结构进行有效分析. 尺度 $\leq 3 \text{ km}$ 的结构 (例如电子惯性尺度 $d_e = c/\omega_{pe} \approx 2 \text{ km}$, ω_{pe} 为电子等离子体频率) 对离子尺度结构无影响, 这里不作分析.

1.2 分析方法

1.2.1 通量绳的轴向、截面尺度和运动速度

通量绳的轴向、截面尺度和运动速度是其基本物理参数, 也是研究其动力学特性的基础. 已有研究提出了多种方法来确定通量绳的轴线方向. 对于单卫星观测, 应用最广泛的是磁场数据时间序列的最小方差分析法 (Minimum Variance Analysis, MVA)^[30]. Xiao 等^[31] 的研究表明, MVA 仅适用于卫星轨道远离通量绳轴线的情形 (此时最小方差特征向量 $\mathbf{N}$ 接近通量绳的轴向) 和无力场类型的通量绳 (此时中间方差的特征向量 $\mathbf{M}$ 可代表通量绳的轴向), 其余情况下 MVA 通常无法确定通量绳的轴向. 对于多卫星观测, 最常采用的是不同卫星的计时方法^[32,33]. 该方法对二维轴对称的通量绳比较有效^[22]. Zhou 等^[34,35] 采用多重三角分析法 (Multiple Triangulation Analysis, MTA) 将计时技术推广到普遍的二维近似, 发现其误差比 MVA 小. Shi 等^[36] 提出最小方向导数分析法 (Minimum Directional Derivative, MDD), 用来确定多卫星探测到的磁结构空间维数和不变方向. 利用 MDD 方法估算通量绳的轴线方向时不依赖于长时间的数据序列, 且能通过多点 (≥ 4 点) 观测计算瞬时轴向, 并可针对具有二维特征的核心区确定轴线方向. 这样获取通量绳的轴向符合物理意义, 且比其他方法更适合小尺度通量绳. 本文以 MDD 方法为主, 辅以 MTA 方法, 估算和确定 MMS 探测的不同尺度通量绳的轴线方向.

利用多卫星观测也可以得到通量绳的运动速度和截面尺度. 使用计时方法^[32,33] 时, 除轴向外还可以得到结构的运动速度, 而运动速度垂直于通量绳轴向的分量乘以通量绳持续时间即可近似为截面尺度. Zhou 等^[34,35] 利用 MTA 也可以得到通量绳垂直于轴向的运动速度. Shi 等^[37] 在 MDD 方法的基础上提出了时空差分方法 (Spatio-temporal Difference, STD), 在得到垂直于轴线方向的运动速度后, 乘以持续时间即可近似为通量绳截面尺度.

通常利用 de Hoffmann-Teller (HT) 分析方法^[38]

来描述目标运动体系的特征. 如果通量绳是准稳态的, 则存在一个参照系, 其中电场近似为零, 即该参照系随等离子体一起运动^[38]. 求得 H-T 参照系的运动速度 $\mathbf{V}_{HT}$ 及其在通量绳轴线垂直方向上的分量 $V_{HT\perp}$ 后, 即可估算通量绳截面的尺度. 如果磁结构为非准稳态, 则可将每个时刻测得的磁力线运动速度 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}/B^2$ 投影到通量绳轴线的垂直方向上, 将获得的垂直分量对时间积分, 可以近似得到通量绳的截面尺度^[39]. 此方法可以用来作为估算通量绳截面尺度的辅助方法. 检验后发现其结果与 MDD 和 STD 方法得到的数值差在 10% 以内. 本文在计算通量绳的轴向、运动速度和截面尺度时, 综合采用以上几种方法, 计算结果与文献中的结果^[22,24,25] 略有差异.

在估算电流丝状结构尺度时, 需要知道丝状电流区域在垂直于电流方向上的截面. 这里电流丝状结构尺度为电子速度垂直于电流密度方向上的分量乘以丝状电流结构持续的观测时间.

1.2.2 通量绳磁场拓扑形态

采用已有的常用方法判断磁力线拓扑形态, 对于磁层能量电子 ($> 1 \text{ keV}$): 若电子投掷角小于 90° , 说明磁力线是从南半球连接到磁鞘的开放形态; 若电子投掷角接近 180° , 说明磁力线是从磁鞘连接到北半球的开放形态; 若电子投掷角为 90° 、各向同性或双向流 (bi-streaming) 分布, 说明磁力线是闭合的拓扑形态^[40-42].

1.2.3 物理分析

分析通量绳离子尺度的结构时, 需考虑不同尺度的等离子体动力学. 此时欧姆定律为^[43]

$$\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \frac{\mathbf{j}}{\sigma} + \frac{\mathbf{j} \times \mathbf{B}}{ne} - \frac{\nabla \cdot \mathbf{P}_e}{ne} \left[\frac{\partial \mathbf{j}}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\mathbf{j} \mathbf{v} + \mathbf{v} \mathbf{j} - \frac{\mathbf{j} \mathbf{j}}{ne} \right) \right]. \quad (1)$$

其中, $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{B}$ 为电场强度和磁感应强度, $\mathbf{v}$ 为等离子体元运动速度, n 为数密度, $\mathbf{j}$ 为电流密度. 式 (1) 称为广义欧姆定律, 右侧第一项为电阻项, 第二项为霍尔项 (Hall term), 第三项为电子压强张量散度项, 第四项为电子惯性项, 每一项均可导致带电粒子与磁场冻结的条件被破坏. 对于磁层空间无碰撞等离子体, $\mathbf{j}/\sigma$ 项可以忽略. 假设只有离子一种成分, $\mathbf{j} = ne(\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_e)$, $\mathbf{v}_i$ 和 $\mathbf{v}_e$ 为离子和电子流体元的速

度. 如果 $v_i/v_e \gg m_e/m_i$, $v \approx v_i$, 式 (1) 可改写为

$$\mathbf{E} + \mathbf{v}_i \times \mathbf{B} \approx \frac{\mathbf{j}}{\sigma} + \frac{\mathbf{j} \times \mathbf{B}}{ne} - \frac{\nabla \cdot \mathbf{P}_e}{ne} \left[\frac{\partial \mathbf{j}}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\mathbf{j} \mathbf{v} + \mathbf{v} \mathbf{j} - \frac{\mathbf{j} \mathbf{j}}{ne} \right) \right]. \quad (2)$$

在 MHD 尺度下, 式 (1) 右侧各项均可忽略, 离子和电子都与磁场冻结. 在 d_i 尺度下, 除霍尔项外, 右侧其他两项可以忽略, 式 (2) 可转化为

$$\mathbf{E} + \mathbf{v}_i \times \mathbf{B} \approx \frac{\mathbf{j} \times \mathbf{B}}{ne}, \quad (3)$$

或

$$\mathbf{E} + \mathbf{v}_e \times \mathbf{B} \approx 0. \quad (4)$$

此时电子与离子运动分离, 离子与磁场冻结条件被破坏 (非磁化), 电子仍与磁场冻结. 在电子惯性尺度下 $\mathbf{E} + \mathbf{v}_e \times \mathbf{B} \neq 0$, 电子也与磁场解冻结.

2 典型事件研究

将 MMS 在磁层顶观测到的通量绳按空间尺度划分为三类: 离子尺度 ($0.5 \sim 5 d_i$), Sub-MHD 尺度 ($5 \sim 15 d_i$) 和 MHD 尺度 ($> 15 d_i$). 这里通过对典型事件的分析, 详细研究这三种尺度通量绳中离子尺度结构的观测特征. 观测数据表明, 这几个典型事件中电子压强张量项和电子惯性项的贡献很小, 可以忽略, 本文图表中未提供其结果数据. 这里主要采用太阳磁层坐标系 (GSM) 进行数据分析, 必要时也给出了地心太阳黄道坐标系 (GSE) 的相应数值.

2.1 离子尺度通量绳

(1) 2016-01-10 事件 1

2016 年 1 月 10 日 09:09:10 UT–09:09:54 UT, MMS 卫星在南半球正午前赤道面磁层顶附近连续观测到 5 个小尺度通量绳 [24]. 此时卫星位置在 GSM 坐标系下为 $(8.9, -2.6, -0.8) R_e$ 或 $(8.9, -2.5, -0.9) R_e$, 4 颗卫星最大间距为 56 km. 这 5 个通量绳位于一个磁层顶磁重联事件扩散区的不远处, 观测特征基本相似.

图 1 为根据 MMS1 数据给出的该事件观测结果, 其中图 1(a) (b) 为磁场分量, (c) 为离子和电子密度, (d) 为离子和电子温度, (e) (f) 为离子和电子速度分量, (g) 为电流分量, (h) 为电场分量, (i) 为能量电子 ($1 \sim 10$ keV) 的投掷角分布. 图 1 中下标 l, m 和 n 为对应卫星穿越磁层顶 (09:09:47 UT)

时刻的磁层顶局地坐标系 (L, M, N) 中三个坐标分量, 其中 N 沿磁层顶外法线方向, L 指向地磁北极但与 N 垂直, $M = N \times L$, 三个单位向量组成右手坐标系 [3]. 由 GSM 坐标系到 LMN 坐标系的 MVA 转换矩阵为 $L = (0.08, -0.40, 0.92)$, $M = (-0.69, -0.68, -0.23)$, $N = (0.72, -0.62, -0.33)$. 选择在 09:09:41.9 UT–09:09:43.1 UT 观测到的通量绳进行事件分析, 其磁场 B_n 分量有先负后正的双极结构, 总磁场明显增强. 此外, 由电子的三维速度分布可知, 通量绳内磁层和磁鞘成分混合分布 (见图 2). 图 1 两竖线之间的时间段对应的空间范围可看作是通量绳的核心区域. 利用 MDD 和 STD [36,37] 方法可以得到, 在 GSM 坐标系中该通量绳的轴线方向 $K = (-0.03, -0.43, 0.90)$, 运动速度 $V_{str} = (-32.03, -61.54, -43.99) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 相应的截面尺度约为 98.58 km ($1.85 d_i$), 属于 d_i 尺度, 其磁通量约为 2.25 kWb .

由图 1 可以看出该通量绳核心区显示出如下特征. ①离子速度相对平稳, 电子速度突增, 伴有起伏和尖峰状变化. ②电场较周围区域明显增大, 也伴有起伏和尖峰状变化, N 方向的电场 E_n 约达 $20 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1}$. 进一步分析可知, 该增强与起伏的电场对应于霍尔电场 ($\mathbf{j} \times \mathbf{B}/(ne)$). ③电流显著增强, 存在与电子速度相似的起伏与尖峰状变化. ④在增强的电流结构区内, 磁场主要在 $-L$ 和 $-M$ 方向, 电流以 $-M$ 分量为主, 电场主要为 $-N$ 分量, 即与 $\mathbf{J}$ 和 $\mathbf{B}$ 垂直. 此外, 核心区域内磁层能量电子的投掷角全部小于 90° , 磁层能量电子从南半球磁层向磁鞘输运, 表明该通量绳由开放的磁力线组成 [40–42].

图 3 给出了 MMS1 对该通量绳事件主要特征的详细观测结果. 其中: 图 3(a) 为磁场 B_n 分量; (b) 为电流向量; (c)~(e) 为离子和电子速度向量 LMN 坐标分量; (f)~(h) 为实测电场、离子对流电场 $-(\mathbf{v}_i \times \mathbf{B})$ 和电子对流电场 $-(\mathbf{v}_e \times \mathbf{B})$ 的 LMN 坐标分量; (i)~(k) 为离子对流电场和霍尔电场各分量的对比; (l) 中 E_{tot} 为实测电场的大小, E_{ecpar} 为电子对流电场与实测的平行于磁场的电场分量之合成电场, 即 $E_{ecpar} = \sqrt{(\mathbf{V}_e \times \mathbf{B})^2 + E_{\parallel}^2}$; (m) 为电场平行与垂直磁场分量. 图中两竖线之间的时段对应通量绳的核心区.

对图 3 进行分析. 由图 3(b)~(e) 可以看出, 在

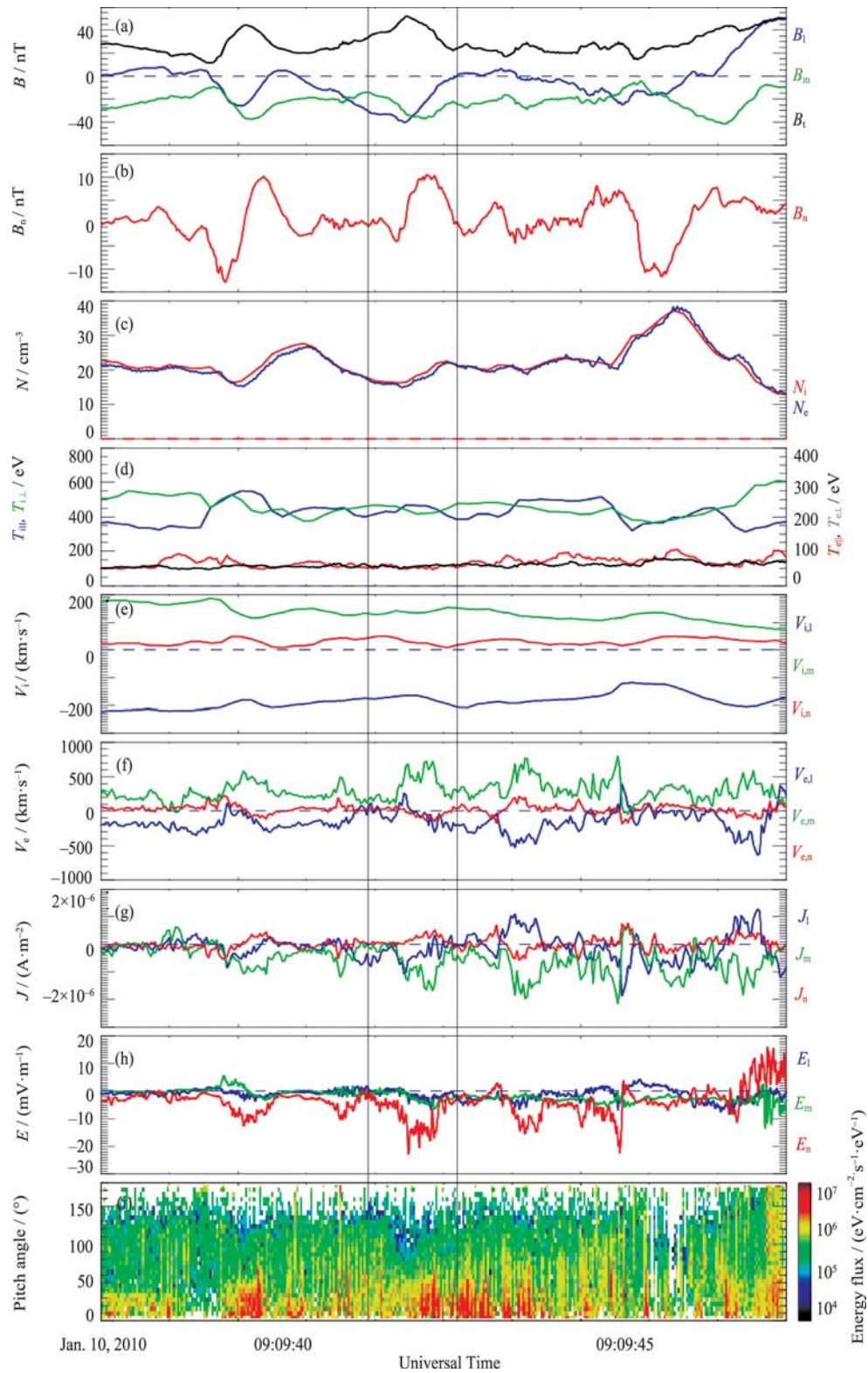


图1 2016年1月10日09:09:38 UT–09:09:48 UT MMS1 卫星观测结果

Fig. 1 MMS1 measurements during 09:09:38 UT–09:09:48 UT on January 10, 2016

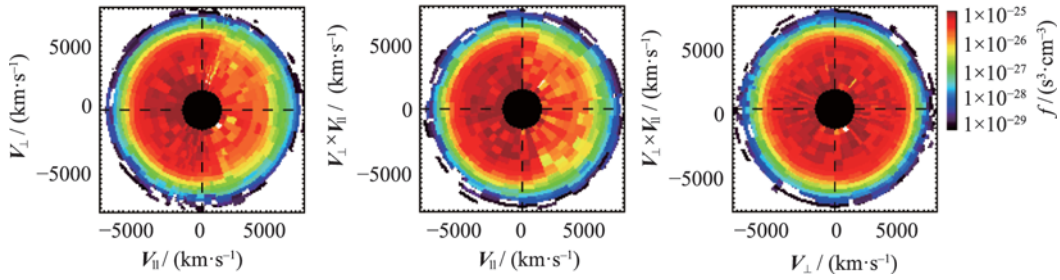


图 2 事件 1 (2016-01-10 09:09:42.810 UT—09:09:42.840 UT) 电子三维速度分布

Fig. 2 Event 1 (2016-01-10 09:09:42.810 UT—09:09:42.840 UT) electron 3D velocity distribution

该通量绳内, 电子运动与离子运动显著偏离, 离子速度基本保持不变, 电流和电子速度显著增大 (尤其是 M 分量), 起伏明显, 且电流变化的起伏趋势与电子速度变化的起伏趋势相互对应, 因此电流主要由电子携带. 根据 1.2.1 中电流结构尺度计算方法可得, 增强的电流结构尺度约为 $1.6 d_i$ (对应的时间段为 09:09:42.5 UT—09:09:42.9 UT). 通常将离子尺度和小于离子尺度的电流称为丝状电流^[22]. 图 3(b)~(e) 还显示, 增大的电子速度具有与电流一样的空间尺度, 两者丝状结构一一对应, 占据了通量绳的大部分空间, 且电子运动与离子运动显著分离发生在丝状结构区域内. 图 3(f)~(h) 表明, 离子不与磁场冻结, 电子整体上与磁场冻结, 只在某些时刻有微小偏离. 但图 3(i) 表明, 考虑微弱的平行电场后, 这种偏离大致得到克服. 这一观测特征说明, 通量绳丝状电流结构内 >15 km 尺度范围里电子压强张量散度和电子惯性效应可忽略. 由图 3(i)~(k) 可知, 离子对流电场变化平缓, 霍尔电场 ($\mathbf{j} \times \mathbf{B}/(ne)$) 的增强与起伏明显, 而实测电场的增强和起伏与霍尔电场的相应变化一一对应, 即实测电场的增强和起伏与霍尔电场直接相关. 离子尺度的电流结构、电子速度结构与霍尔电场相互间的对应关系说明电子与离子运动解耦、电流及霍尔电场三者间存在密切关联.

从图 1 和图 3 可以看出, 在离子尺度的电流、电子速度和电场结构中, 都存在小于 d_i 尺度的起伏和变化, 这与 Eastwood 等^[22] 的研究结果一致. 比离子尺度更小的结构这里不做研究. 由图 1 和图 3 以及以下分析的各个事件中都可以看到, 离子尺度的电流、电子速度和电场虽然包含有更小尺度的变化, 但其自成体系, 具有与小尺度变化相关但独立的起源机制和效应. 这里主要研究离子尺度的结构.

(2) 2016-01-10 事件 2

在探测到以上提到的 5 个连续通量绳之前, MMS 在 2016 年 1 月 10 日 09:00:58 UT 左右穿越磁层顶, 从磁层进入磁鞘. 随后在 09:01:00 UT—09:01:25 UT 连续观测到两个小尺度的通量绳^[25]. 此时 MMS 卫星的位置为 $(8.9, -2.7, -0.8) R_e$ 或 $(8.9, -2.6, -0.9) R_e$, 卫星之间最大间距为 55 km. 由 GSM 坐标系到 LMN 坐标系的 MVA 转换矩阵为 $\mathbf{L} = (0.22, -0.07, 0.97)$, $\mathbf{M} = (-0.28, -0.96, -0.01)$, $\mathbf{N} = (0.94, -0.27, -0.23)$.

图 4 所示为基于 MMS 1 数据给出的这两个事件的观测结果. 这里先分析 09:00:50 UT—09:00:53 UT 观测到的通量绳, 其磁场 B_n 分量有先负后正的双极结构, 总磁场明显增强; 由电子的三维速度分布可知, 磁层和磁鞘成分混合分布 (见图 5). 将竖线区域时间段对应的空间范围视为该通量绳的核心区域, 利用 MDD 和 STD 方法可以得到 GSM 坐标系中通量绳轴线方向 $\mathbf{K} = (0.32, 0.36, 0.87)$, 运动速度 $\mathbf{V}_{\text{str}} = (-12.23, 13.62, -60.36) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 相应的截面尺度约为 109.12 km ($1.93 d_i$), 即该能量绳属于 d_i 尺度, 其磁通量约为 5.11 kWb.

由图 4 可以看出, 该通量绳核心区显示出与事件 1 相似的如下特征. ①离子速度变化相对平稳, 电子速度显著增强, 起伏频繁. ②电场较周围区域显著增大, 也伴随有明显的起伏变化, N 方向电场 E_n 约达 $20 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1}$. 由后面的分析可知, 该增强和起伏电场对应于霍尔电场. ③电流存在增强结构, 与电子速度的增强与起伏相对应. ④在增强的电流结构区内, 磁场主要在 L 方向, 电流以 $-M$ 分量为主, 电场主要为 N 分量, 即与 $\mathbf{J}$ 和 $\mathbf{B}$ 垂直. 此外, 核心区域内磁层能量电子投掷角全部小于 90° , 磁层电子从南半

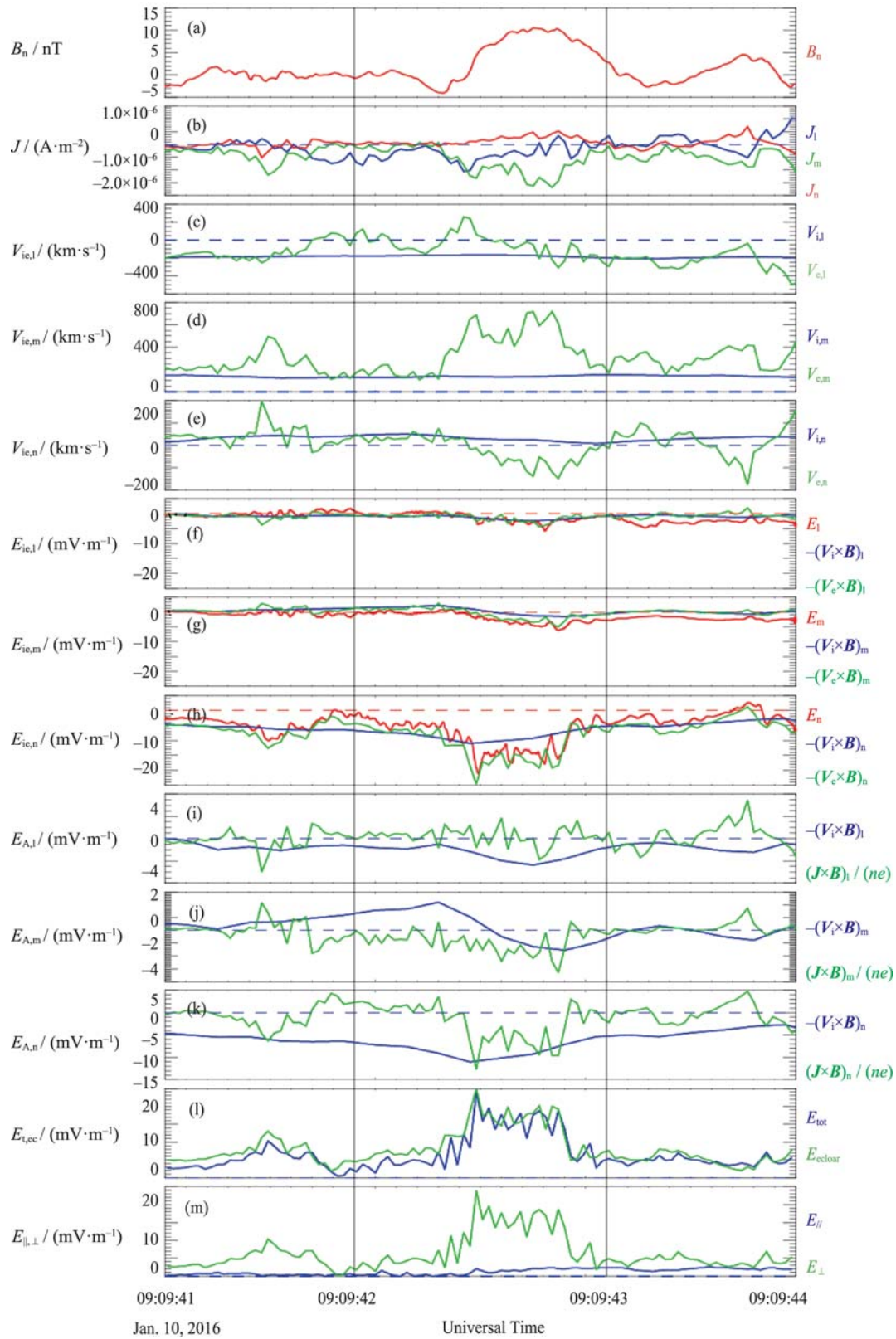


图3 2016年1月10日09:09:41 UT–09:09:44 UT的MMS1卫星观测结果

Fig. 3 MMS1 measurements during 09:09:41 UT–09:09:44 UT on January 10, 2016

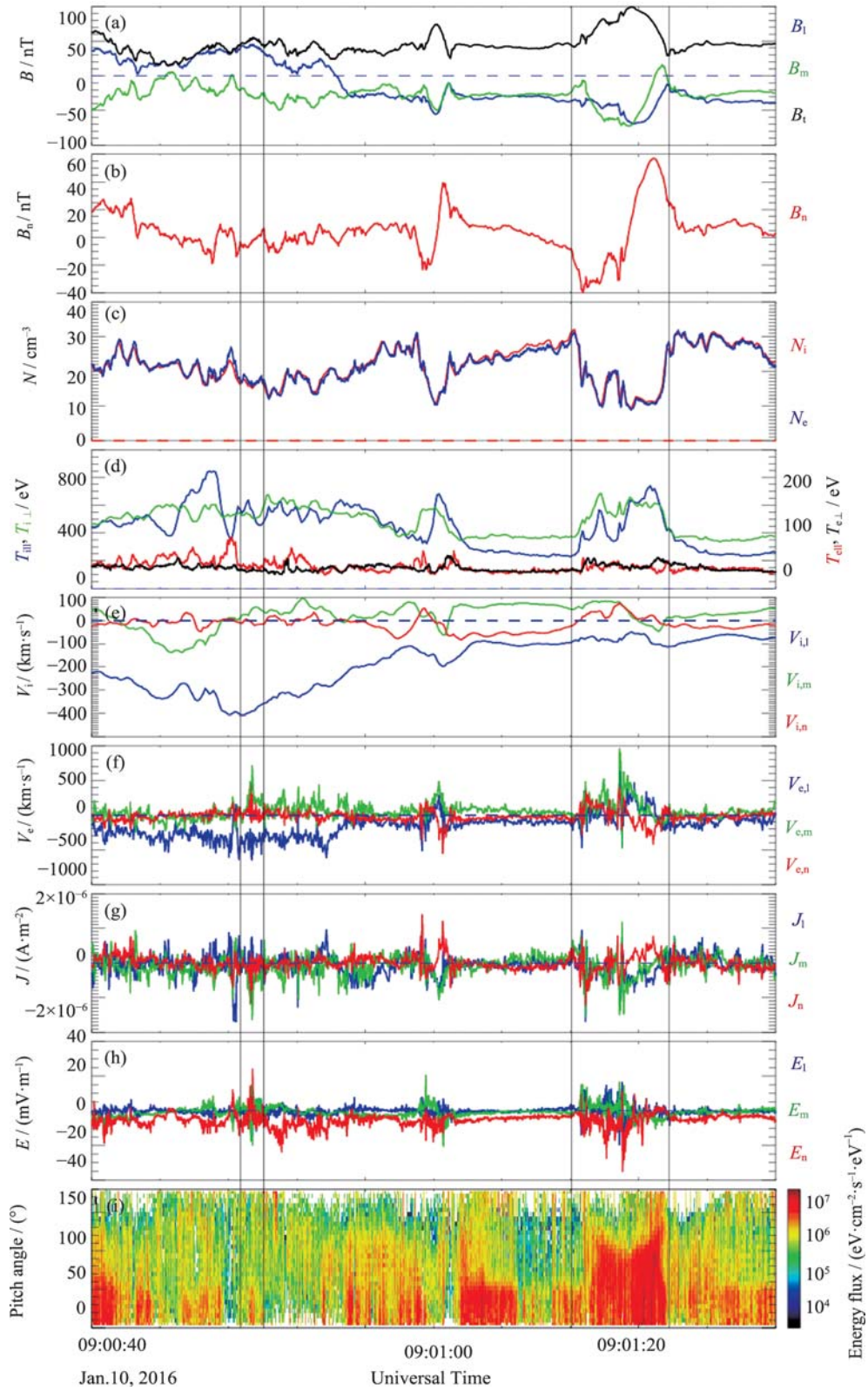


图4 2016年1月10日09:00:40 UT–09:01:30 UT的MMS1卫星观测结果

Fig. 4 MMS1 measurements during 09:00:40 UT–09:01:30 UT on 10 January, 2016

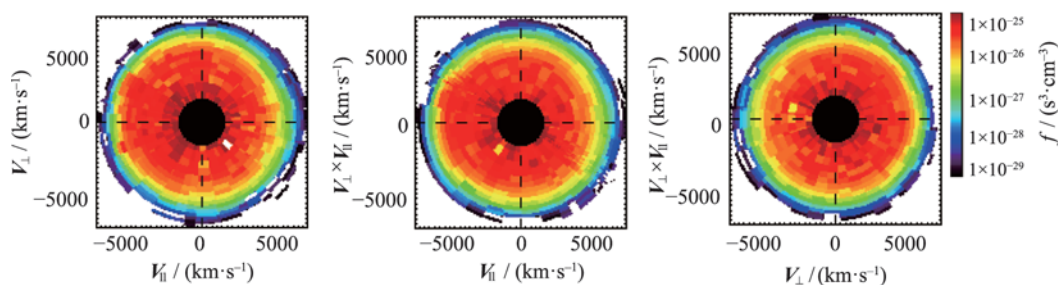


图 5 事件 2 (2016-01-10 09:00:51.626 UT—09:00:51.656 UT) 电子三维速度分布

Fig. 5 Event 2 (2016-01-10 09:00:51.626 UT—09:00:51.656 UT) electron 3D velocity distribution

球磁层向磁鞘输运. 这表明该通量绳由开放的磁力线组成, 以上特征均与 2016-01-10 事件 1 相同.

图 6 给出了 MMS 1 对 2016-01-10 事件 2 主要特征的观测结果. 由图 6(b)~(e) 可知, 电流变化趋势与电子速度变化趋势一一对应, 而离子速度基本保持不变, 因此电流主要由电子携带; 与电流一样, 电子速度的变化也存在丝状结构, 两者结构一一对应, 尺度相同. 计算可得该电流和电子速度结构为离子惯性尺度 (约 $1.48 d_i$). 由图 6(c)~(e) 可以看出, 电子运动与离子运动显著偏离. 图 6(f)~(h) 表明, 离子不与磁场冻结, 电子整体上与磁场冻结, 但某些时刻有微小偏离. 由图 6(i)~(k) 可知, 离子对流电场变化平缓, 霍尔电场增强显著, 起伏明显, 而实测电场峰值与霍尔电场的峰值一一对应, 即实测电场的增强和起伏与霍尔电场相关. 这些观测特征显示, 事件 2 与事件 1 一样, 电子与离子运动解耦、电流和霍尔电场三者间也存在密切关联.

上述两事件的分析表明, 在离子尺度通量绳中, 可观测到显著增强的霍尔电场和电流及电子运动结构, 其占据了整个通量绳的核心区或者大部分区域. 在这种结构中, 通量绳完全由开放的磁力线组成, 电子与离子运动显著偏离, 电流主要由电子携带; 离子与磁场解冻结, 电子基本满足磁冻结条件; 离子对流电场变化平稳, 仅提供背景电场, 电子压强张量和电子惯性效应可忽略, 霍尔电场起主要作用. 电子速度、电流与霍尔电场三者紧密关联, 构成了离子尺度通量绳独有的特征. 在 MMS 之前没有卫星对这种结构进行细致探测. 深入研究这种新观测到的离子尺度结构特性、起源及其动力学效应, 对了解磁通量绳的形成和无碰撞磁重联的物理过程具有推进作用.

2.2 Sub-MHD 尺度通量绳

分析 MMS 在 2016 年 1 月 10 日 09:01:14 UT—

09:01:25 UT 观测到的事件 (2016-01-10 事件 3). 由图 4 可以看出, 该通量绳中磁场 B_n 分量也先负后正, 总磁场明显增强; 由电子的三维速度分布还可以看到, 磁层与磁鞘成分混合分布 (见图 7). 竖线区域时间段对应的空间范围可视为该通量绳的核心区域. 由图 4(i) 可以看出, 磁层能量电子的投掷角大部分小于 100° , 少数电子为各向同性分布, 这表明该事件中磁力线多数由南半球磁层连到磁鞘; 少部分闭合, 由南半球连到北半球磁层^[40–42]. 利用 MDD 和 STD 方法可以得到, 该 Sub-MHD 尺度磁绳在 GSM 坐标系中轴线方向 $\mathbf{K} = (-0.24, -0.83, 0.51)$, 运动速度 $\mathbf{V}_{\text{str}} = (-25.15, -21.34, -57.38) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 相应的截面尺度约为 469.91 km ($7.77 d_i$), 属于 Sub-MHD 尺度, 其磁通量为 97.54 kWb .

由图 4 还可以看到, 该 Sub-MHD 尺度通量绳中有三个电流和电子运动的丝状结构. 在这三个结构中, 电流的增强和起伏、电子及离子的运动特征都与前述离子尺度事件 1 和 2 相似. 结构内磁场主要在 $-L$ 和 $-M$ 方向, 电流以 $-M$ 分量为主, 电场主要为 $-N$ 分量, 其峰值达到约 $30 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1}$. 后两者均有明显起伏.

图 8 给出了 MMS1 对 2016-01-10 事件 3 主要特征的观测结果. 由图 8(b)~(e) 可知, 电流变化趋势与电子速度变化趋势一一对应, 而离子速度基本保持不变, 因此电流主要由电子携带; 电子运动和电流存在相互对应的三个主要丝状结构, 其尺度均小于离子惯性尺度. 用计算电流结构尺度的方法可以得到三个观测尺度, 分别为

$$0.48 d_i (09:01:15.90 \text{ UT} - 09:01:16.15 \text{ UT}),$$

$$0.61 d_i (09:01:18.50 \text{ UT} - 09:01:18.80 \text{ UT}),$$

$$0.54 d_i (09:01:18.80 \text{ UT} - 09:01:19.20 \text{ UT}).$$

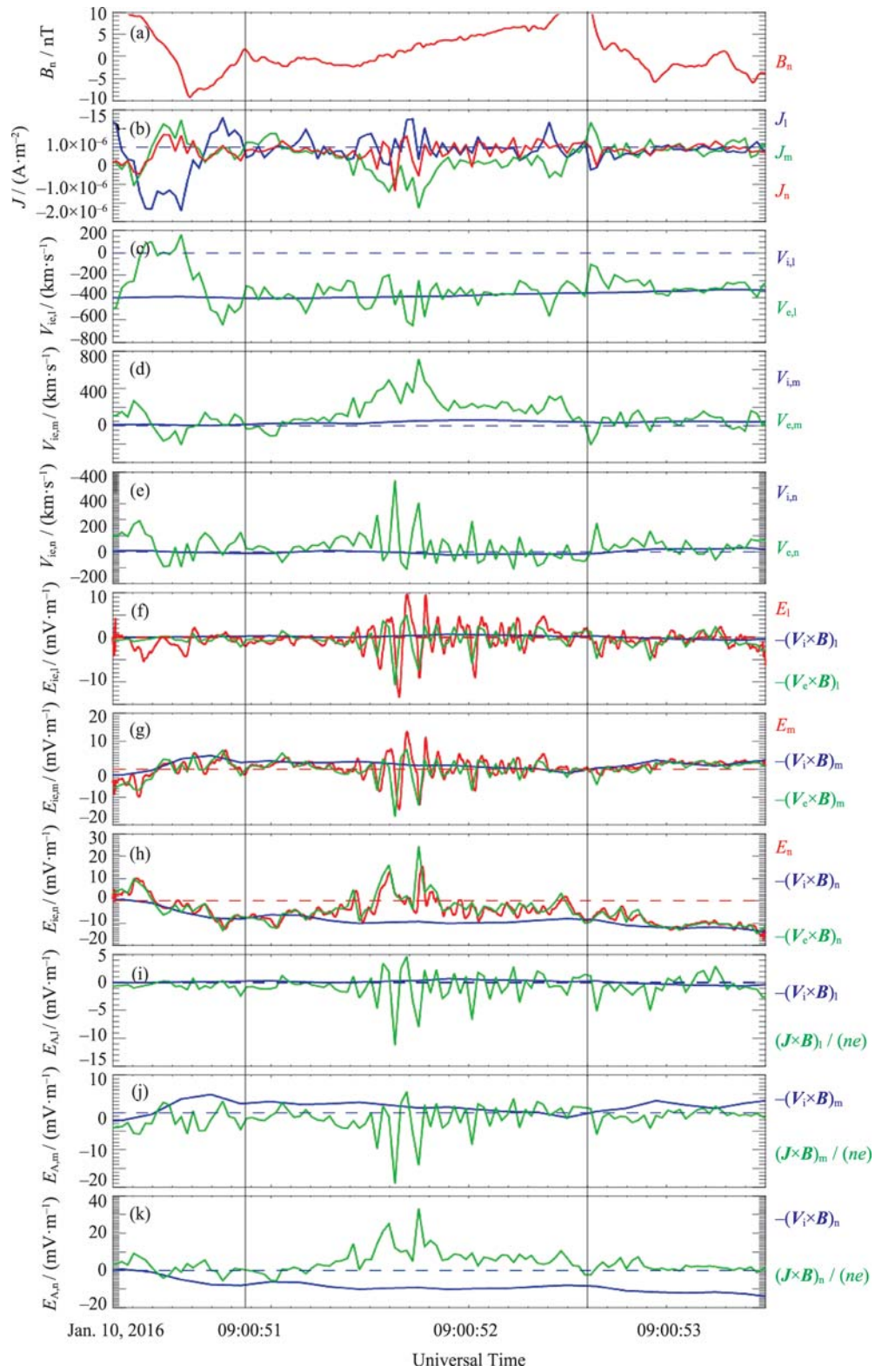


图 6 2016 年 1 月 10 日 09:00:50.2 UT–09:00:53.5 UT 事件的 MMS 1 卫星观测结果

Fig. 6 MMS 1 measurements during 09:00:50.2 UT–09:00:53.5 UT on January 10, 2016

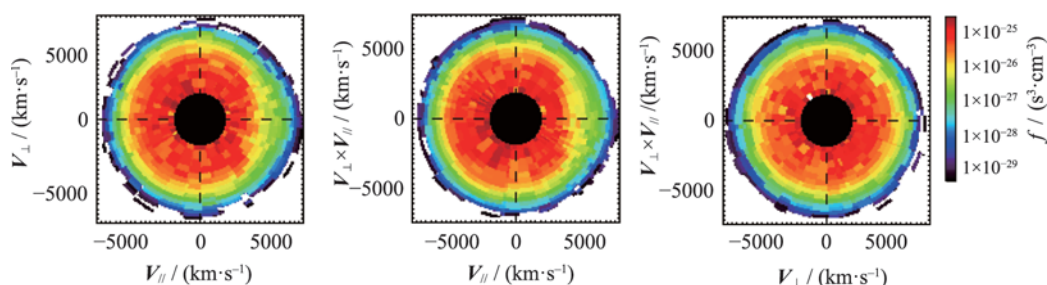


图 7 事件 3 (2016-01-10 09:01:20.816 UT—09:01:20.846 UT) 电子三维速度分布

Fig. 7 Event 3 (2016-01-10 09:01:20.816 UT—09:01:20.846 UT) electron 3D velocity distribution

在这三个结构中, 电流的增强和起伏、电子及离子的运动特征都与事件 1 和事件 2 相似. 由图 8(c)~(e) 可以看出, 在通量绳内, 电子与离子大致上整体一起运动, 但在丝状结构内, 电子速度剧烈起伏, 电子运动与离子运动显著偏离. 图 8(f)~(h) 表明, 该 Sub-MHD 尺度通量绳内的电子较好地满足了磁冻结条件, 离子在丝状结构外也大体和磁场冻结, 但在丝状结构内离子运动明显与磁场解耦. 由图 8(i)~(k) 可知, 离子对流电场变化平缓, 霍尔电场起伏明显, 而实测电场峰值与霍尔电场的峰值一一对应. 以上观测结果表明, 与离子尺度通量绳内的结构一样, 在 Sub-MHD 尺度通量绳内的丝状结构中, 电子运动与离子解耦、电流和霍尔电场三者之间也存在紧密关联.

Sub-MHD 尺度通量绳内普遍存在离子尺度的电流、电场和电子与离子运动解耦的结构. 例如, Eastwood 等^[22]报道的两个通量绳 (尺度分别约为 $14.1 d_i$ 和 $13.9 d_i$) 内部也都观测到若干丝状结构, 其特征与 2016-01-10 的事件 3 相同. 此处不再赘述.

2.3 MHD 尺度通量绳

2015 年 10 月 12 日 06:25:18 UT 左右, MMS 在南半球午后赤道面附近穿越磁层顶, 从磁层边界层进入磁鞘, 随后观测到一个 FTE. 此时卫星位置为 $(8.7, 4.1, -2.3) R_e$ 或 $(8.7, 4.7, -0.2) R_e$. 卫星之间最大间距为 41 km. 由 GSM 坐标系到 LMN 坐标系的 MVA 转换矩阵为 $\mathbf{L} = (0.34, 0.19, 0.92)$, $\mathbf{M} = (0.38, -0.93, 0.05)$, $\mathbf{N} = (0.86, 0.33, -0.39)$. 图 9 给出的是基于 MMS1 卫星数据的该事件观测结果, 其格式与图 1 相同. 从图 9 中可以清晰看到在 06:25:25 UT—06:25:40.5 UT 时间段内, 磁场 B_n 分量有先负后正的双极变化, 总磁场明显增强; 此外, 由电子三维速度分布可知, 磁层与磁鞘

成分混合分布 (见图 10), 因而该事件是一个典型的 FTE. 可以将竖线区域对应的空间范围看作通量绳的核心区域. 进一步利用 MDD 和 STD 方法可以得到 GSM 坐标系中该 FTE 通量绳的轴线方向 $\mathbf{K} = (0.41, -0.80, 0.44)$, 运动速度 $\mathbf{V}_{\text{str}} = (-17.00, -31.34, -118.90) \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, 相应的通量绳核心区截面尺度约为 918.57 km ($19.61 d_i$), 属于 MHD 尺度. 相应的磁通量约为 206.86 kWb .

由图 9 可以看出, 该 FTE 通量绳核心区内显示出以往 FTE 研究中未报道过的特征. ①离子速度变化相对平稳, 电子速度出现几次明显的增强及起伏和尖峰状变化; ②电流存在离子尺度结构, 与电子速度相对应, 也出现若干增强及起伏和尖峰形变化; ③电场较周围区域增大, 在电子速度和电流起伏处增强尤为显著, $\mathbf{N}$ 方向电场分量 E_n 达到约 $30 \text{ mV}\cdot\text{m}^{-1}$, 并且也伴有尖峰波动. 分析可知, 该起伏的电场对应于霍尔电场. 此外, 核心区域内磁层能量电子的投掷角大部分小于 90° , 少数为各向同性和双向流分布, 说明该通量绳主要由开放的磁力线组成, 磁层电子沿这些磁力线从南半球磁层向磁鞘运输, 同时也存在闭合的磁场拓扑形态.

图 11 为 MMS1 对该事件主要特征的观测结果, 格式与图 6 和图 8 相同. 由图 11(b)~(e) 可知, 电流变化趋势与电子速度变化趋势一一对应, 而离子速度基本保持不变, 因此电流主要由电子携带; 电子速度的变化也存在离子尺度结构, 与电流结构一一对应. 例如, 06:25:31 UT—06:25:31.4 UT 探测到的结构, 尺度约为 $1.69 d_i$; 06:25:33.8 UT—06:25:34.2 UT 探测到的结构, 尺度约 $1.99 d_i$. 由图 11(c)~(e) 可以看出, 除丝状结构处外, 电子的平均运动速度大体与离子速度一致. 但在离子尺度结构处, 电子速度剧烈起伏, 电子

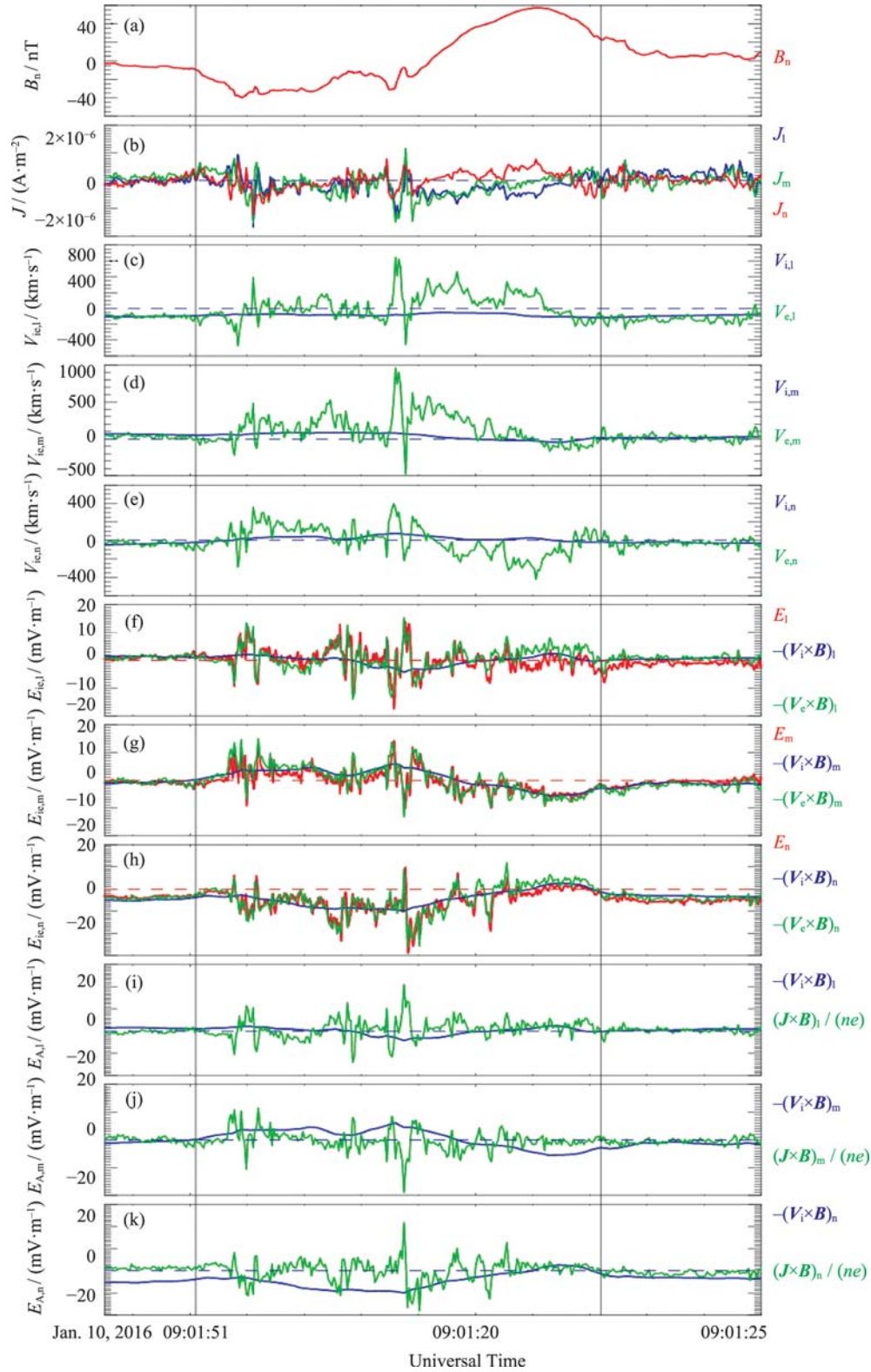


图 8 2016 年 1 月 10 日 09:01:13.5 UT–09:01:25 UT 的 MMS1 卫星观测结果

Fig. 8 MMS1 measurements during 09:01:13.5 UT–09:01:25 UT on January 10, 2016

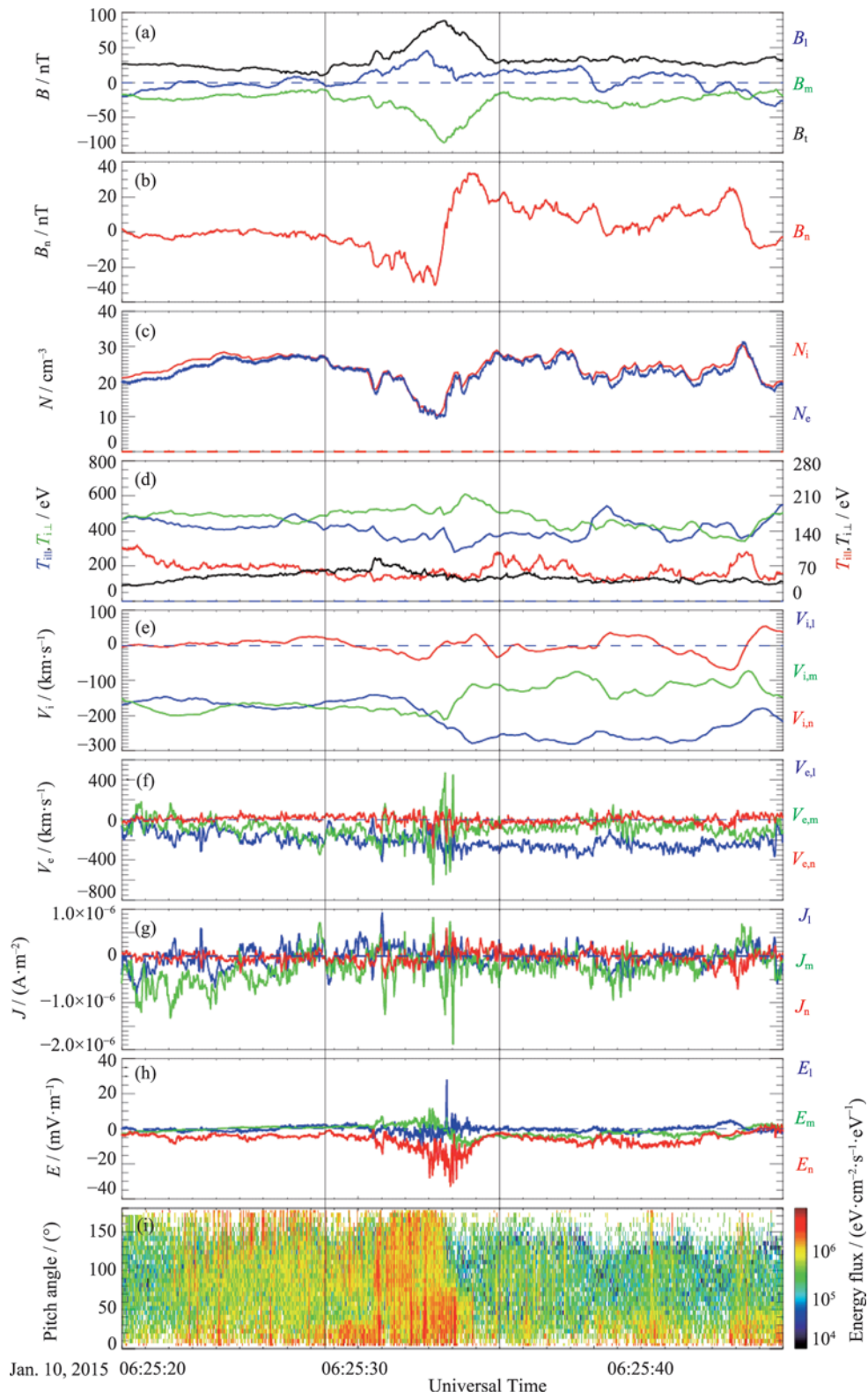


图9 2015年10月12日06:25:20 UT–06:25:48 UT的MMS 1卫星观测结果

Fig. 9 MMS 1 measurements during 06:25:20 UT–06:25:48 UT on 12 October, 2015

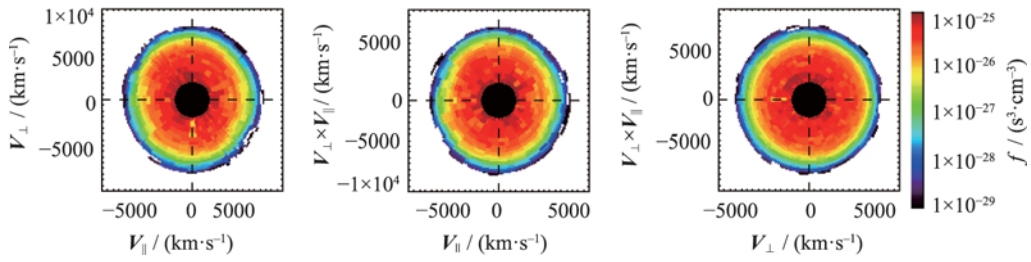


图 10 事件 4 (2015-10-12 06:25:31.025 UT—06:25:31.055 UT) 电子三维速度分布

Fig. 10 Event 4 (2015-10-12 06:25:31.025 UT—06:25:31.055 UT) electron 3D velocity distribution

运动与离子运动显著偏离. 由图 11(f)~(h) 可以看出, 在该 MHD 尺度通量绳中, 除丝状结构处电场剧烈变化时刻外, 离子大体与磁场冻结, 而电子比离子更好地满足磁冻结条件. 由图 11(i)~(k) 可知, 离子对流电场变化平缓, 霍尔电场起伏明显, 而实测电场峰值与霍尔电场的峰值一一对应, 即尖峰状的起伏电场起源于霍尔电场. 这些观测结果表明, MHD 尺度的通量绳中也存在离子尺度的电子束流、电流和电场结构, 其中电子与离子运动解耦、电流和霍尔电场三者之间存在密切关联. 这些结构的基本特征与 2.1 和 2.2 节中分析的 d_i 尺度结构相同. 因此, 从观测上看, 离子尺度、Sub-MHD 尺度和 MHD 尺度通量绳中 d_i 尺度结构应属于同一种类型的物理结构.

3 讨论

典型事件分析结果表明, 在磁层顶不同尺度的磁通量绳中可以观测到 d_i 尺度的丝状结构, 其中电子与离子运动解耦、电流和霍尔电场三者之间存在密切关联. 在离子尺度的通量绳中, 丝状结构占据整个通量绳的核心区或大部分区域; 在 Sub-MHD 和 MHD 尺度的通量绳中, 若干丝状结构可分散存在于其核心区内. 对 MMS 磁层顶观测数据的分析表明, 上述观测事实是磁层顶磁通量绳普遍存在的现象.

基于 Cluster 星座的探测数据对磁尾通量绳中的小尺度结构已有若干研究. Eastwood 等^[44] 在重联扩散区附近一个通量绳中, 观测到尺度约为 $1 d_i$ 的强电场结构, 强度达到约 $100 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1}$. Chen 等^[15-16] 在 2001 年 10 月 1 日的亚暴膨胀相期间, 在磁尾重联区附近及薄电流片内连续观测到一系列尺度为 $1 \sim 2 d_i$ 的通量绳, 发现通量绳内部电子通量和密度显著增强, 相应的丝状电流结构尺度小于 $1 d_i$, 指出通量绳内可能存在持续性的电子加速机制. Huang

等^[17] 在磁尾重联扩散区内观测到小尺度通量绳和邻近的薄电流片, 两者内部都存在 $\mathbf{M}$ 方向的强电流, 电流同时具有显著的平行和垂直于磁场的分量. 薄电流片和小通量绳中能量电子通量显著增大, 且后者的通量峰值比前者高. 受 Cluster 探测数据和精度的局限, 以上工作都未能对丝状结构进行深入研究. Eastwood 等^[22] 首次利用 MMS 的高精度探测数据, 对磁层顶 Sub-MHD 通量绳的丝状电流进行深入研究, 发现其中电子运动和离子解耦, 电子与磁场冻结, 而离子偏离磁冻结条件, 并且观测电场 $\mathbf{E}_{x,y}$ 与 $-(\mathbf{v}_e \times \mathbf{B})_{x,y}$ 非常一致. 这里应用 MMS 数据对磁层顶不同尺度通量绳的离子尺度丝状结构进行全面研究, 进一步分析其中电流、电场和电子与离子运动分离之间的关联, 分析丝状结构的起源及其在离子尺度通量绳形成过程中可能起到的重要作用.

为使计算简单, 假设等离子体中仅有 H^+ 一种离子, 在缓变的大尺度背景磁场 $\mathbf{B}$ 和背景电场 $\mathbf{E}_0$ 下, 电子和离子与磁场冻结, 一起做电场漂移 $\mathbf{V}_0 = \mathbf{E} \times \mathbf{B} / B^2$ 运动. 如果垂直本底磁场的方向上出现了 d_i 尺度的电场 $\mathbf{E}_H$, 在与 $\mathbf{E}_H$ 相同的空间范围内, 电子速度变为 $\mathbf{v}_e = (\mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_H) \times \mathbf{B} / B^2$, 其携带磁场一起运动; 但离子与电子分离, 和磁场不再冻结, 其漂移速度仍保持为 $\mathbf{v}_i = \mathbf{V}_0$. 这样便产生了丝状电流 $\mathbf{j} = ne(\mathbf{v}_e - \mathbf{v}_i) = ne\mathbf{E}_H \times \mathbf{B} / B^2$, 其与 $\mathbf{E}_H$ 和电子运动具有相同的空间尺度. 容易得到 $\mathbf{E}_H = \mathbf{j} \times \mathbf{B} / (ne)$, 由式 (1) 可知, 该离子尺度的局域电场即为霍尔电场, 其作用是使电子与离子分离, 做 $\mathbf{E}_H \times \mathbf{B} / B^2$ 漂移, 产生电流 $ne\mathbf{E}_H \times \mathbf{B} / B^2$. 从另一方面分析, 在缓变的大尺度背景磁场 $\mathbf{B}$ 和背景电场 $\mathbf{E}_0$ 条件下, 如果等离子体中出现垂直于磁场方向尺度为 d_i 的电流 $\mathbf{j} = ne(\mathbf{v}_e - \mathbf{v}_i)$, 此时离子运动与电子分离并与磁场解耦, 而电子仍与磁场冻结, 其空间尺度与 $\mathbf{j}$ 相同. 可得 $\mathbf{E} = -(\mathbf{V}_e \times \mathbf{B}) = -(\mathbf{V}_i \times \mathbf{B}) +$

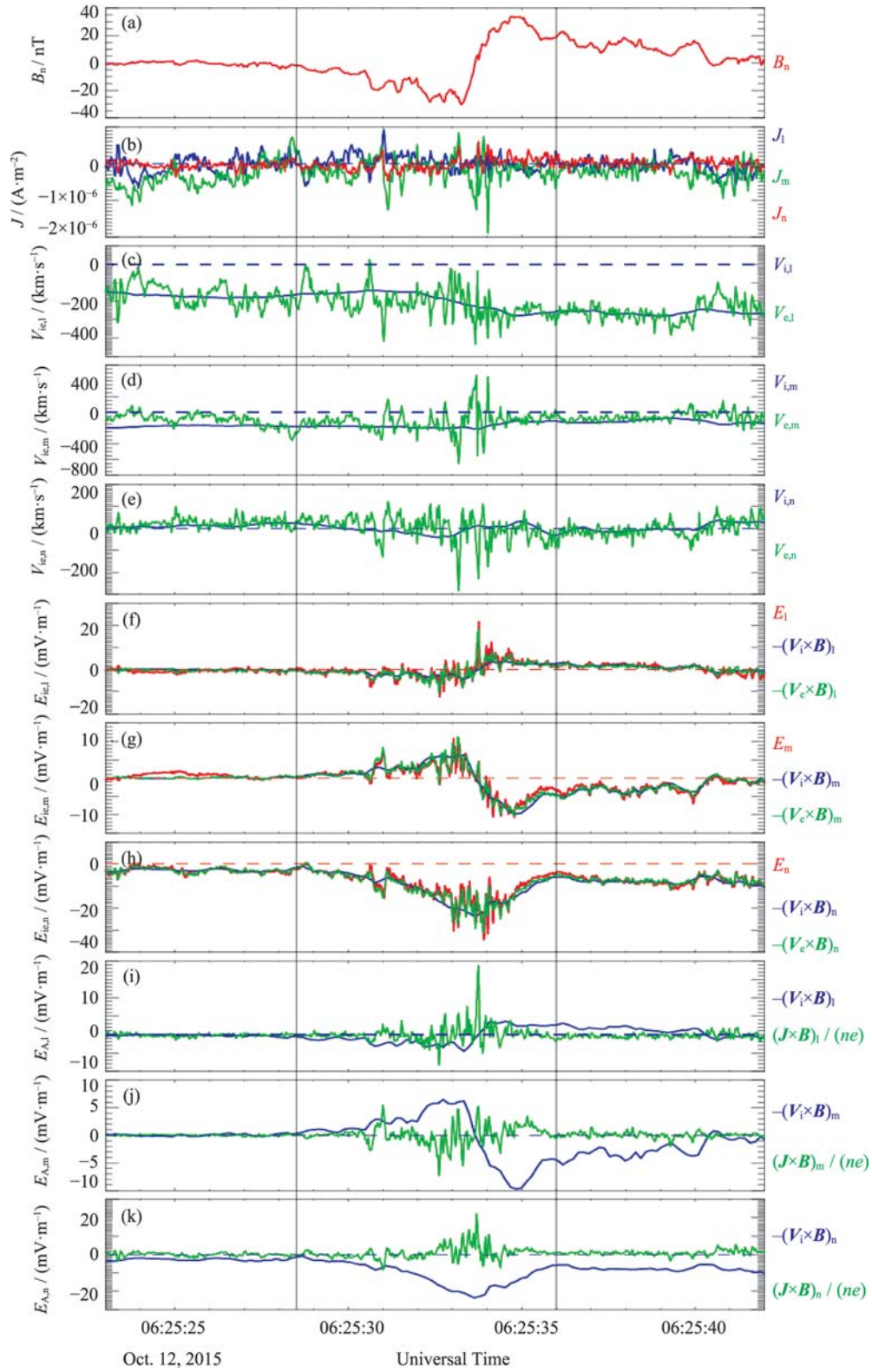


图 11 2015 年 10 月 12 日 06:25:23 UT–06:25:42 UT 的 MMS1 卫星观测结果

Fig. 11 MMS1 measurements during 06:25:23 UT–06:25:42 UT on October 12, 2015

$(\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_e) \times \mathbf{B} = -(\mathbf{V}_i \times \mathbf{B}) + \mathbf{j} \times \mathbf{B} / (ne) = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_H$. 这表明在该电流结构中, 存在 d_i 尺度的霍尔电场. 以上两种分析均可解释第 2 节中给出的观测事实, 并且都与简化的广义欧姆定律式 (3) 和 (4) 相符, 说明在离子尺度结构中, 电子与离子运动的解耦、电流和霍尔电场必然同时存在紧密关联. 但仅根据第 2 节的观测现象还无法揭示其中的因果关系. 上述分析讨论与磁层顶或磁尾的具体条件及位型无关, 应该是离子尺度结构的普遍性质. 显然, 在无力型 (Force-free) 通量绳中, $\mathbf{j} \times \mathbf{B} = 0$, 霍尔电场消失, 不存在本工作研究的丝状结构.

在 d_i 尺度的通量绳中, 丝状电流充满其核心区或者占据大部分区域, 可以推测, 丝状电流的起源与 d_i 尺度通量绳的形成有关, 因而可能与磁重联过程存在密切联系. 如果真实情况如前所述, 磁重联过程中应该产生和存在类似的电子与离子运动解耦、电流和霍尔电场等结构. 按照目前被广为接受的 X-线重联模型, 无碰撞磁重联发生在电子惯性区和离子惯性区内, 前者厚度约为电子惯性尺度 (d_e), 长度约为离子惯性尺度^[45], 其中离子和电子都是非磁化的, 磁力线在这里断裂和重新连接; 在其外侧的离子惯性区内, 离子非磁化, 但电子和磁场冻结. 电子与离子运动分离, 导致霍尔电流和霍尔磁场 $\mathbf{B}_H$, 并产生从电流片中心两侧指向电流片中心的霍尔电场 $\mathbf{E}_H$; 在 $\mathbf{E}_H$ 驱动下, 电子产生附加的电场漂移运动. 在反平行对称重联模型中, $\mathbf{B}_H$ 和 $\mathbf{E}_H$ 分别为四级和双极分布^[46,47]. 在强非对称分量重联中, $\mathbf{B}_H$ 和 $\mathbf{E}_H$ 通常退化为双极和单极结构^[48,49]. MMS 对磁层顶磁重联的观测证实了这一结果^[50,51]. 此外, 在弱非对称和弱导向场条件下, $\mathbf{B}_H$ 和 $\mathbf{E}_H$ 可分别维持四级和双极形态^[52,53]. 2015 年 10 月 08 日 11:20:42 UT–11:20:45 UT MMS 穿越磁层顶期间, Burch 和 Phan^[54] 也观测到类似事件. 图 12 为基于 MMS 1 数据给出的事件物理参数观测结果. 由图 12 可以看出, 卫星从磁鞘经过南侧重联区进入磁层边界层过程中, 观测到霍尔磁场由 $-M$ 方向到 $+M$ 方向的反转 (图中粗虚线为导向场的平均值); 同时霍尔电场 ($\mathbf{E}_n$) 也由 $-N$ 方向转为主要指向 $+N$ 方向, 强度达到约 $20 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1}$. 与霍尔电场相对应, 电子 M 方向的速度 $\mathbf{v}_{eM}$ 达到约 $2000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, $-M$ 方向的电流密度 $\mathbf{j}_M$ 剧增 (主要由电子贡献). 此外, $\mathbf{E}_H$, $\mathbf{v}_{eM}$ 和 $\mathbf{j}_M$ 的空间尺度相同, 约为 $1 d_i$

(91 km). 图 13 为该事件主要特征的详细观测结果. 由图 13 可以看出, 电流、电子和离子速度以及电场的特性都与通量绳事件相似, 实测电场主要由霍尔电场贡献. 图 14 给出该事件中电子三维速度分布, 由图 14 可以看出, 在重联区内磁层和磁鞘成分混合分布, 与理论预测一致^[49]. MMS 对磁层顶重联区多次探测都获得了相似结果^[53,55]. 当非对称性和导向场较强, $\mathbf{B}_H$ 和 $\mathbf{E}_H$ 退化为双极和单极结构时, 在 d_i 尺度上情况也是如此^[51,55]. 这些观测说明在磁层顶重联过程中, 磁鞘流的冲压 (ram) 效应导致磁层与磁鞘成分混合, 并大大加强霍尔电场, 使之成为磁层顶非对称磁重联的显著特征^[56]. 图 15 为依据图 12 和图 13 给出的弱非对称性和弱导向场情况下磁层顶重联区状态. Ergun 等^[56] 指出, $\mathbf{E}_H$ 的一个重要效应是驱动电子沿 M 方向做 $\mathbf{E}_H \times \mathbf{B}$ 漂移, 产生 $-M$ (即 $+Y$ 或称 out of plane) 方向的电流 $\mathbf{j}_M$. 该电流与磁层顶电流片的查普曼–费拉罗 (Chapman-Ferraro) 电流方向一致, 但强度要大得多, 空间范围为离子尺度, 集中在 X-线附近, 但在重联下游区也可观测到^[53,54]. 值得注意的是, MMS 在磁重联区观测到的 $\mathbf{E}_H$, $\mathbf{v}_{eM}$ 和 $\mathbf{j}_M$ 的特性与通量绳中 $\mathbf{E}_H$, $\mathbf{v}_{em}$ 和 $\mathbf{j}_m$ 的观测特征 (包括 $\mathbf{E}_H$ 的大小和方向等) 相同. 由此可以推断, 本文在通量绳中观测到的电流 $\mathbf{j}_m$ 与 M 方向的电子漂移速度 $\mathbf{v}_{em}$ 起源于重联区的 $\mathbf{j}_M$ 与电子的 $\mathbf{E}_H \times \mathbf{B}$ 漂移运动 $\mathbf{v}_{eM}$. 依据这里的观测数据尚不能完全揭示磁层顶小尺度通量绳的形成机理. 然而基于现有经典 FTEs 模型, 可以推测离子尺度通量绳中丝状电流的形成过程. 例如, 对于多 X-线重联^[9,10], 如果在图 15 的上下方邻近处再有 X-线重联发生, 则立即形成小尺度通量绳. 在电子运动的推动下, 通量绳在平行于 X-线方向 (即 M 方向) 上立即获得伸展, 其中霍尔电场、 $\mathbf{v}_{em}$ 和 $\mathbf{j}_m$ 将与本文事件 1 和 2 的观测相同. 再如, 对肘状通量绳模型和爆发性单 X-线重联模型^[3,11,12] 而言, 因为电子的 $\mathbf{E}_H \times \mathbf{B}$ 漂移 ($\mathbf{v}_{eM}$) 携带磁力线一起运动, 而且电子惯性区长度约为 $1 d_i$ ^[45]. 当重联率剧增, 电子流足够强时, 截面尺度为离子惯性长度的重联磁力线束, 将沿着磁层顶表面在 M 方向被拉出重联面 (LN 平面), 并在场向电流影响下形成小尺度通量绳, 其内部的霍尔电场、 $\mathbf{v}_{em}$ 和 $\mathbf{j}_m$ 也具有本文事件 1 和 2 中的观测特征. $\mathbf{B}_H$ 和 $\mathbf{E}_H$ 成双极和单极分布时的结果与 $\mathbf{B}_H$ 成四级和 $\mathbf{E}_H$ 成双极时的结果一样. 在这两种模型中, d_i 尺度通量绳内

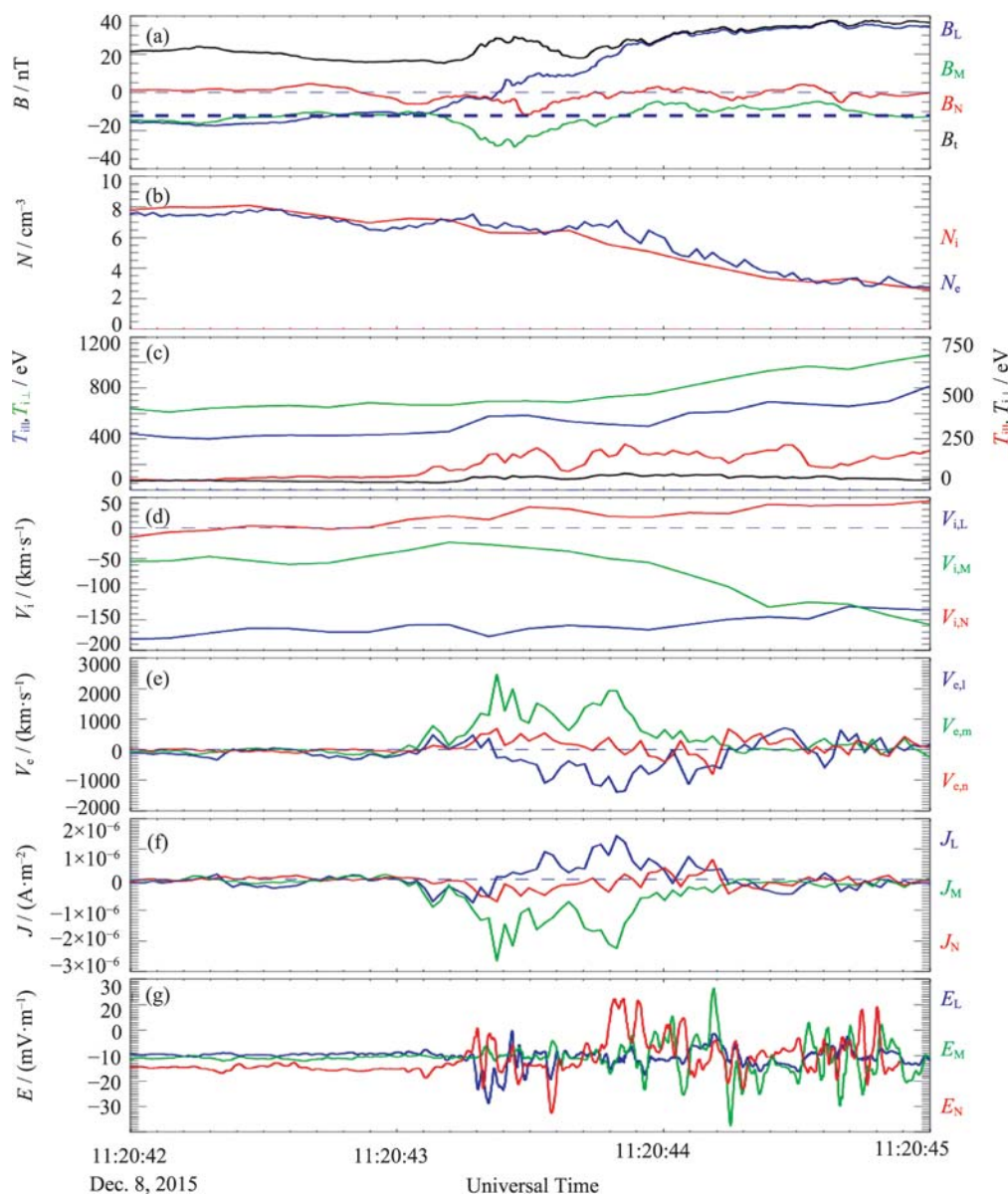


图 12 MMS1 卫星对 2015 年 12 月 8 日 11:20:42 UT—11:20:45 UT 磁重联事件观测结果

Fig. 12 Magnetic reconnection event observed by MMS1 during 11:20:42 UT—11:20:45 UT on December 8, 2015

的霍尔电场, v_{em} 和 j_m 均来自无碰撞磁重联; 磁重联区的 E_H , v_{em} 和 j_M 在 d_i 尺度通量绳形成过程中起着重要作用. 对于 Sub-MHD 和 MHD 尺度通量绳及其内部离子尺度结构的起源这里不做探讨.

由以上分析讨论可知, 本文观测到的通量绳内离子尺度丝状电流和相应的电子流归根结底起源于无碰撞磁重联中的霍尔效应, 是重联霍尔电场的产物, 与磁岛收缩引起的 Fermi 加速^[57] 无关, 也不是重联电场 (E_{rec}) 加速的结果. 这里重联电场 E_{rec} 专指与电子压强张量非对角项 (即电子准粘滞性) 和非线

性电子惯性项相联系的电场, 仅存于电子惯性区内, 即 X-线附近, 那里电子与磁场解耦, 并受到 E_{rec} 加速^[58]. 此外, 这里对二次重联和次级磁岛^[19] 不做分析探讨.

4 结论

利用 MMS 观测数据对磁层顶离子尺度 d_i 结构进行分析研究, 主要结果归纳如下.

(1) 不同尺度通量绳内都能观测到具有 d_i 尺度

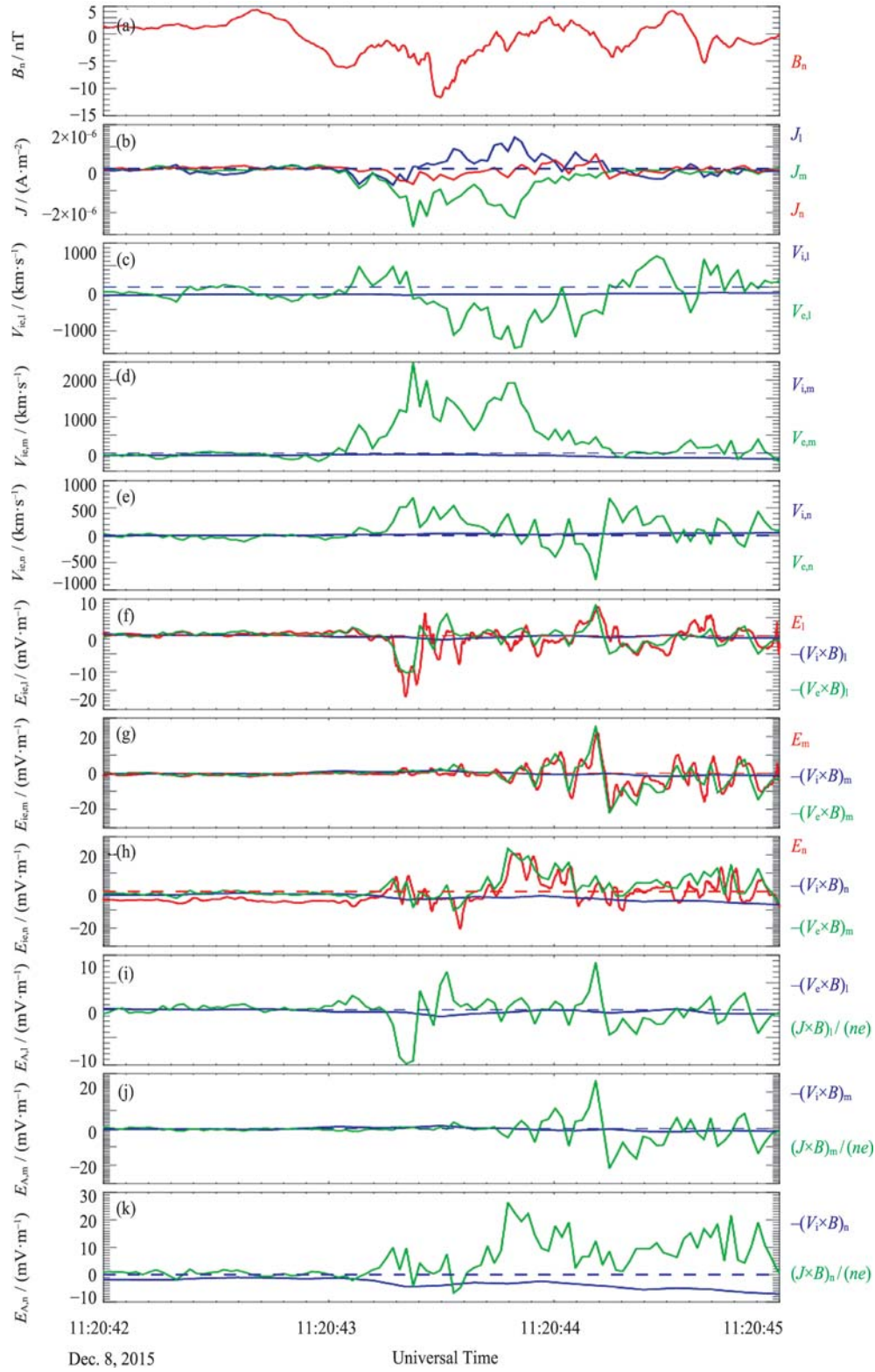


图 13 2015 年 12 月 8 日 11:20:42 UT—11:20:45 UT 重联事件中 MMS1 卫星观测到的具体特征

Fig. 13 Detailed features of the magnetic reconnection event observed by MMS1 during 11:20:42 UT—11:20:45 UT on December 8, 2015

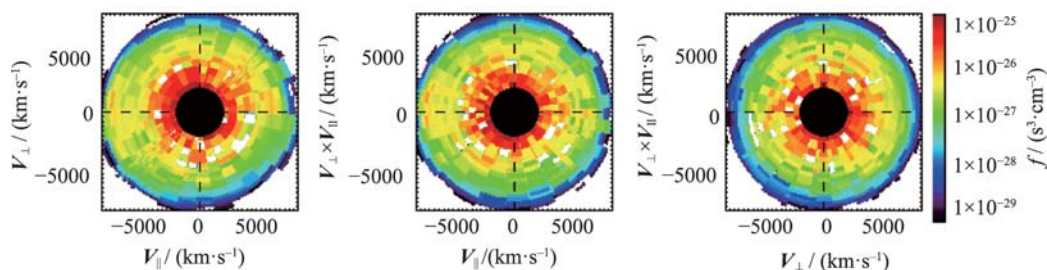


图 14 磁重联事件 (2015-12-08 11:20:43.705 UT—11:20:43.735 UT) 电子三维速度分布

Fig. 14 Magnetic reconnection event (2015-12-08 11:20:43.705 UT—11:20:43.735 UT)
electron 3D velocity distribution

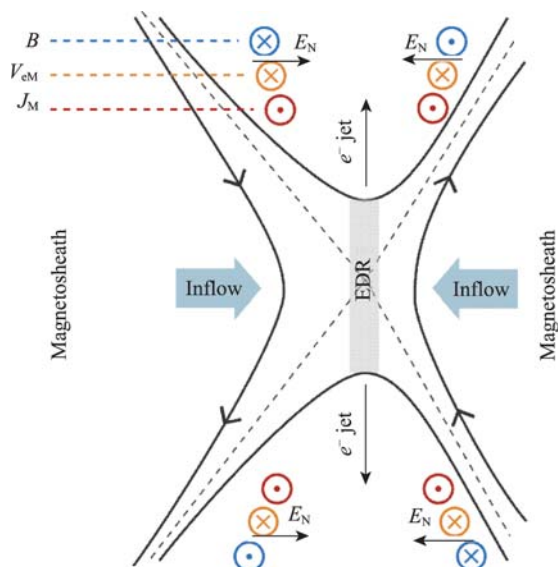


图 15 地球磁层顶弱非对称磁重联

Fig. 15 Weak asymmetric reconnection event at
the Earth's magnetopause

的电流、电子运动和霍尔电场丝状结构. 对于尺度约为 d_i 的通量绳, 丝状结构占据了其整个核心区或者大部分区域; 在 Sub-MHD 和 MHD 尺度通量绳中, 若干个丝状结构可分散地存在于核心区内.

(2) 通量绳中 d_i 尺度电流主要沿磁层顶局地坐标系 $-M$ 方向, 与磁层顶查普曼-费拉罗电流同向, 由电子携带; 其中电子与离子运动显著偏离, 离子与磁场解冻结, 电子基本满足磁冻结条件, 在 $+M$ 方向做电场漂移运动; 电流内部包含有更小尺度的结构, 但离子尺度自成独立体系.

(3) 在离子尺度丝状电流和电子运动结构中, N 方向 (即垂直于磁层顶电流片方向) 的电场分量显著增大, 幅度达到约 $20\text{ mV}\cdot\text{m}^{-1}$, 并伴有明显的尖峰状起伏; 增强和尖峰状起伏的电场对应于霍尔电场. 丝

状电流、电子和离子运动的偏离与霍尔电场之间遵从广义欧姆定律, 密切相关.

(4) 在磁层顶磁重联区也可观测到与通量绳内十分相似的丝状结构, 其尺度为 d_i 量级, 其中 N 方向的霍尔电场从电流片两侧指向中心, 幅度达到约 $10\text{ mV}\cdot\text{m}^{-1}$; 丝状电流沿 $-M$ 方向, 主要由电子携带; 离子非磁化, 电子基本与磁场冻结, 沿 $+M$ 方向做 $E_H \times B$ 漂移. 电流、电子与离子运动的偏离和霍尔电场之间遵从广义欧姆定律, 互相关联.

(5) 从现有通量绳经典模型出发, 可以推测通量绳中电子流动、电流和霍尔电场的离子尺度丝状结构可能来源于无碰撞磁重联区内的相应结构, 这些结构在离子尺度通量绳形成过程中起到重要作用.

(6) 在通量绳离子尺度丝状结构中, 磁层与磁鞘等离子体成分相互混合, 磁场由开放磁力线组成. 离子尺度通量绳内只有开放的磁力线; Sub-MHD 和 MHD 尺度通量绳除开放的磁力线外, 还存在少量闭合磁力线, 说明这些通量绳经历了多次重联 (Multiple-reconnection) 过程 [42]. 不同尺度的通量绳均构成磁层与磁鞘等离子体传输和交换的通道.

本文研究不涉及通量绳和磁重联中具有电子惯性尺度 d_e 的结构和过程. 关于离子尺度结构与电子惯性尺度结构之间的联系以及不同尺度通量绳之间的关联等问题有待进一步研究.

参考文献

- [1] LE G, GOSLING J T, RUSSELL C T, *et al.* The magnetic and plasma structure of flux transfer events [J]. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**(A1): 233-245
- [2] HAERENDEL G, PASCHMANN G, SCKOPKE N, *et al.* The frontside boundary layer of the magnetosphere and the problem of reconnection [J]. *J. Geophys. Res.*, 1978,

- 83**(A7): 3195-3216
- [3] RUSSELL C T, ELPHIC R C. Initial ISEE magnetometer results: magnetopause observations [J]. *Space Sci. Rev.*, 1978, **22**(6): 681-715
- [4] 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.*, 1984, **89**(A2): 786-800
- [5] PASCHMANN G, HAERENDEL G, PAPAMASTORAKIS I, *et al.* Plasma and magnetic field characteristics of magnetic flux transfer events [J]. *J. Geophys. Res.*, 1982, **87**(A4): 2159-2168
- [6] ELPHIC R C. Observations of flux transfer events: A review [M]//Physics of the Magnetopause. Washington, DC: AGU, 1995: 225-233
- [7] EASTWOOD J P, PHAN T D, FEAR R C, *et al.* Survival of Flux Transfer Event (FTE) flux ropes far along the tail magnetopause [J]. *J. Geophys. Res.*, 2012, **117**(A8): A08222
- [8] ZHANG H, KIVELSON M G, ANGELOPOULOS V, *et al.* Generation and properties of in vivo flux transfer events [J]. *J. Geophys. Res.*, 2012, **117**(A5): A05224
- [9] 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
- [10] RAEDER J. Flux transfer events: 1. Generation mechanism for strong southward IMF [J]. *Ann. Geophys.*, 2006, **24**(1): 381-392
- [11] SCHOLER M. Strong core magnetic fields in magnetopause flux transfer events [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1988, **15**(8): 748-751
- [12] SOUTHWOOD D J, FARRUGIA C J, SAUNDERS M A. What are flux transfer events [J]. *Planet. Space Sci.*, 1988, **36**(5): 503-508
- [13] LIU Z X, HU Y D. Local magnetic reconnection caused by vortices in the flow field [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1988, **15**(8): 752-755
- [14] PU Z Y, HOU P T, LIU Z X. Vortex-induced tearing mode instability as a source of flux transfer events [J]. *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**(A11): 18861-18869
- [15] CHEN L J, BHATTACHARJEE A, PUHL-QUINN P A, *et al.* Observation of energetic electrons within magnetic islands [J]. *Nat. Phys.*, 2008, **4**(1): 19-23
- [16] CHEN L J, BESSHO N, LEFEBVRE B, *et al.* Multispacecraft observations of the electron current sheet, neighboring magnetic islands, and electron acceleration during magnetotail reconnection [J]. *Phys. Plasmas*, 2009, **16**(5): 056501. DOI: 10.1063/1.3112744
- [17] HUANG S Y, VAIVADS A, KHOTYANTSEV Y V, *et al.* Electron acceleration in the reconnection diffusion region: Cluster observations [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2012, **39**(11): L11103. DOI: 10.1029/2012GL051946
- [18] HUANG S Y, RETINO A, PHAN T D, *et al.* In situ observations of flux rope at the separatrix region of magnetic reconnection [J]. *J. Geophys. Res.*, 2016, **121**(1): 205-213
- [19] DAUGHTON W, ROYTERSHTEYN V, KARIMABADI H, *et al.* Role of electron physics in the development of turbulent magnetic reconnection in collisionless plasmas [J]. *Nat. Phys.*, 2011, **7**(7): 539-542
- [20] DRAKE J F, SWISDAK M, CHE H, *et al.* Electron acceleration from contracting magnetic islands during reconnection [J]. *Nature*, 2006, **443**(7111): 553-556
- [21] WANG Rongsheng, LU Quanming, LI Xing, *et al.* Observations of energetic electrons up to 200 keV associated with a secondary island near the center of an ion diffusion region: a Cluster case study [J]. *J. Geophys. Res.*, 2010, **115**(A11): A11201. DOI: 10.1029/2010JA015473
- [22] EASTWOOD J P, PHAN T D, CASSAK P A, *et al.* Ion-scale secondary flux ropes generated by magnetopause reconnection as resolved by MMS [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2016, **43**(10): 4716-4724
- [23] HWANG K J, SIBECK D J, GILES B L, *et al.* The substructure of a flux transfer event observed by the MMS spacecraft [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2016, **43**(18): 9434-9443
- [24] TEH W L, DENTON R E, SONNERUP B U Ö, *et al.* MMS observations of oblique small-scale magnetopause flux ropes near the ion diffusion region during weak guide-field reconnection [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2017, **44**(13): 6517-6524
- [25] TEH W L, NAKAMURA T K M, NAKAMURA R, *et al.* Evolution of a typical ion-scale magnetic flux rope caused by thermal pressure enhancement [J]. *J. Geophys. Res.*, 2017, **122**(2): 2040-2050
- [26] RUSSELL C T, ANDERSON B J, BAUMJOHANN W, *et al.* The magnetospheric multiscale magnetometers [J]. *Space Sci. Rev.*, 2016, **199**(1/2/3/4): 189-256
- [27] TORBERT R B, RUSSELL C T, MAGNES W, *et al.* The FIELDS instrument suite on MMS: Scientific objectives, measurements, and data products [J]. *Space Sci. Rev.*, 2016, **199**(1/2/3/4): 105-135
- [28] LINDQVIST P A, OLSSON G, TORBERT R B, *et al.* The spin-plane double probe electric field instrument for MMS [J]. *Space Sci. Rev.*, 2016, **199**(1/2/3/4): 137-165
- [29] POLLOCK C, MOORE T, JACQUES A, *et al.* Fast plasma investigation for magnetospheric multiscale [J]. *Space Sci. Rev.*, 2016, **199**(1/2/3/4): 331-406
- [30] SONNERUP B U Ö, SCHEIBLE M. Minimum and maximum variance analysis [M]//Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data. ISSI Scientific Reports SR-001. Noordwijk, Netherlands: International Space Science Institute, 1998: 185-220
- [31] XIAO C J, PU Z Y, MA Z W, *et al.* Inferring of flux rope orientation with the minimum variance analysis technique [J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**(A11): A11218. DOI: 10.1029/2004JA010594

- [32] RUSSELL C T, MELLOTT M M, SMITH E J, *et al.* Multiple spacecraft observations of interplanetary shocks: four spacecraft determination of shock normals [J]. *J. Geophys. Res.*, 1983, **88**(A6): 4739-4748
- [33] SCHWARTZ S J. Shock and discontinuity normals, mach numbers, and related parameters [R]//Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data. ISSI Scientific Report SR-001. Bern: International Space Science Institute, 1998: 249-270
- [34] ZHOU X Z, ZONG Q G, PU Z Y, *et al.* Multiple triangulation analysis: another approach to determine the orientation of magnetic flux ropes [J]. *Ann. Geophys.*, 2006, **24**(6): 1759-1765
- [35] ZHOU X Z, ZONG Q G, WANG J, *et al.* Multiple triangulation analysis: application to determine the velocity of 2-D structures [J]. *Ann. Geophys.*, 2006, **24**(11): 3173-3177
- [36] SHI Q Q, SHEN C, PU Z Y, *et al.* Dimensional analysis of observed structures using multipoint magnetic field measurements: Application to Cluster [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**(12): L12105. DOI: 10.1029/2005GL022454
- [37] SHI Q Q, SHEN C, DUNLOP M W, *et al.* Motion of observed structures calculated from multi-point magnetic field measurements: Application to Cluster [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, **33**(8): L08109. DOI: 10.1029/2005GL025073
- [38] DE HOFFMANN F, TELLER E. Magneto-hydrodynamic shocks [J]. *Phys. Rev.*, 1950, **80**(4): 692-703.
- [39] MOZER F S. Criteria for and statistics of electron diffusion regions associated with subsolar magnetic field reconnection [J]. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**(A12): A12222. DOI: 10.1029/2005JA011258
- [40] ZHONG J, PU Z Y, DUNLOP M W, *et al.* Three-dimensional magnetic flux rope structure formed by multiple sequential X-line reconnection at the magnetopause [J]. *J. Geophys. Res.*, 2013, **118**(5): 1904-1911
- [41] 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
- [42] LÜ Leiqi, PU Zuyin, XIE Lun. Multiple magnetic topologies in flux transfer events: THEMIS measurements [J]. *Sci. China Technol. Sci.*, 2016, **59**(8): 1283-1293
- [43] ROSSI B OLBERT S. Introduction to the Physics of Space [M]. New York: McGraw-Hill, 1970
- [44] EASTWOOD J P, PHAN T D, MOZER F S, *et al.* Multi-point observations of the Hall electromagnetic field and secondary island formation during magnetic Reconnection [J]. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**(A6): A06235. DOI: 10.1029/2006JA012158
- [45] SHAY M A, DRAKE J F SWISDAK M. Two-scale structure of the electron dissipation region during collisionless magnetic reconnection [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, **99**(15): 155002. DOI: 10.1103/PhysRevLett.99.155002
- [46] MOZER F S, BALE S D, PHAN T D. Evidence of diffusion regions at a subsolar magnetopause crossing [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **89**(1): 015002
- [47] EASTWOOD J P, PHAN T D, ØIEROSET M, *et al.* Average properties of the magnetic reconnection ion diffusion region in the Earth's magnetotail: the 2001–2005 Cluster observations and comparison with simulations [J]. *J. Geophys. Res.*, 2010, **115**(A8): A08215. DOI: 10.1029/2009JA014962
- [48] PRITCHETT P L, MOZER F S. Asymmetric magnetic reconnection in the presence of a guide field [J]. *J. Geophys. Res.*, 2009, **114**(A11): A11210. DOI: 10.1029/2009JA014343
- [49] HESSE M, LIU Y H, CHEN L J, *et al.* On the electron diffusion region in asymmetric reconnection with a guide magnetic field [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2016, **43**(6): 2359-2364
- [50] BURCH J L, TORBERT R B, PHAN T D, *et al.* Electron-scale measurements of magnetic reconnection in space [J]. *Science*, 2016, **352**(6290): aaf2939. DOI: 10.1126/science.aaf2939
- [51] CHEN L J, HESSE M, WANG Shan, *et al.* Electron energization and mixing observed by MMS in the vicinity of an electron diffusion region during magnetopause reconnection [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2016, **43**(12): 6036-6043
- [52] WANG Rongsheng, NAKAMURA R, LU Quanming, *et al.* Electron-scale quadrants of the Hall magnetic field observed by the Magnetospheric Multiscale spacecraft during asymmetric reconnection [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2017, **118**(17): 175101
- [53] PENG F Z, FU H S, CAO J B, *et al.* Quadrupolar pattern of the asymmetric guide-field reconnection [J]. *J. Geophys. Res.*, 2017, **122**(6): 6349-6356
- [54] BURCH J L, PHAN T D. Magnetic reconnection at the dayside magnetopause: Advances with MMS [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2016, **43**(16): 8327-8338
- [55] PHAN T D, EASTWOOD J P, CASSAK P A, *et al.* MMS observations of electron-scale filamentary currents in the reconnection exhaust and near the X line [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2016, **43**(12): 6060-6069
- [56] ERGUN R E, CHEN L J, WILDER F D, *et al.* Drift waves, intense parallel electric fields, and turbulence associated with asymmetric magnetic reconnection at the magnetopause [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2017, **44**(7): 2978-2986
- [57] DRAKE J F, SWISDAK M, SCHOEFFLER K M, *et al.* Formation of secondary islands during magnetic reconnection [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, **33**(13): L13105. DOI: 10.1029/2006GL025957
- [58] TREUMANN R A, BAUMJOHANN W. Collisionless magnetic reconnection in space plasmas [J]. *Front. Phys.*, 2013, **1**: 31