

由对地全晕状日冕物质抛射诱发的地磁 感应电流统计研究*

王开让^{1,2†} 林 隽¹ 刘连光³ 刘春明³ 高冠男^{1,2}

(1 中国科学院国家天文台 / 云南天文台 昆明 650011)

(2 中国科学院研究生院 北京 100049)

(3 华北电力大学 北京 102206)

摘要 太阳活动会引起输变电系统异常,特别是对超长距离输变电系统的危害尤其明显.根据 SOHO/LASCO (Solar and Heliospheric Observatory/Large Angle and Spectrometric Coronagraph) 的日冕物质抛射 (Coronal Mass Ejection, CME) 数据、华北电力大学和芬兰气象研究所获得的地磁感应电流 (Geomagnetically Induced Current, GIC) 数据以及地磁暴数据,分析研究了与 GIC 事件有关的对地晕状 CME 的重要观测特征和物理性质.按照对称性将晕状 CME 进行分类后,发现造成 GIC 事件的晕状 CME 主要有 3 类:完全对称型、亮度不对称型和外形不对称型.不同类型的全晕状 CME 驱动的 GIC 事件在强度、持续时间等方面特征各不相同.其中,亮度不对称型晕状 CME 很有可能对 GIC 事件影响最为严重.同时注意到 GIC 与地磁场随时间的变化率也具有较好的相关性.

关键词 太阳:日冕物质抛射,日-地关系

中图分类号: P 183; **文献标识码:** A

1 引言

随着科学技术的发展,能源在国民经济中具有特别重要的战略地位,提高能源区域优化配置的技术能力尤为重要.在国家长期科学和技术发展规划纲要中已经提出了重点开发安全可靠的先进电力输配技术,实现大容量、远距离、高效率的电力输配的目标,因此,在西电东输、全国联网战略中,能否为大规模互联电网的安全提供保障是要解决的关键问题.鉴于我国电网已经发现了大量的地磁暴侵袭事件,随着第 24 周太阳活动峰年的到来以及我国未来规模巨大的电网建设,研究太阳活动对长距离输变电系统的影响具有极其重要的现实意义,可为我国电网的规划设计、设备选型和灾害防治方案提供科学依据.

2011-04-13 收到原稿, 2011-05-12 收到修改稿

* 科技部 973 项目 (2011CB811403)、国家自然科学基金项目 (10873030) 和国家国际科技合作计划项目 (2010DFA64680) 资助

† krwang@ynao.ac.cn

太阳作为一个经常发生剧烈活动和爆发的天体和距离我们最近的恒星,与日地空间环境(即空间天气)关系密切。其爆发现象(像耀斑、爆发日珥和 CME)会向整个太阳系释放数目巨大的能量、等离子体和磁通量。其中 CME 是太阳系中尺度最大、最为壮观和最为剧烈的太阳活动现象,是行星际空间强烈扰动的主要驱动源。当其到达地球附近时会对地球磁场产生扰动,将能量传给地球磁场,并在地球磁尾处发生磁重联,能引起较强的地磁暴,对行星际和地球周围的空间环境造成强烈扰动^[1-3],引起较强的地磁暴,并导致严重的灾害性天气。CME 携带的能量、物质和磁通量通过在日冕和行星际空间的传输和转换之后,如果到达地球附近的 CME 携带有南向磁场分量,就会造成较大的地磁暴和其他强扰动。根据电磁感应定律可知:随时间变化的磁场会在周围空间产生感应电场,当周围存在导电性能良好的人工网络时,例如输电网络、输油输气管道等等,就会在其中产生地磁感应电流^[4-7],给这些系统带来额外的负担,从而产生相应的危害。GIC 不仅会引起变压器过热,导致变压器本身故障,而且由其导致的变压器励磁和无功损耗增加还会威胁到电网的安全运行^[8]。例如导致电力变压器振动加剧,甚至产生变压器的熔毁现象,严重损坏电网设备,造成巨大的经济损失。而在输油输气管道中则存在着 GIC 加速管道锈蚀的问题。

GIC 对电力系统的影响最早在 1940 年发现于美国,此后在北美、北欧等高纬度地区曾多次发现电网遭到 GIC 事件影响,甚至还造成了加拿大魁北克和瑞典马尔默等地区的大规模停电。为减轻 GIC 对地面系统的危害,美国、加拿大、芬兰等多个处于较高纬度的国家对电网或输油管道中的 GIC 进行监测^[4],并基于太阳爆发活动对强 GIC 事件进行统计分析^[9-11]。以前人们普遍认为 GIC 干扰电网的问题只存在于高纬度地区,但是随着高电压、远距离、大规模的输电网络的发展,在较低纬度的国家也先后发生了 GIC 影响电网的事件^[6]。我国虽然大部分地区位于中低纬度,但是随着我国西电东送、全国联网战略的实施,近年来已经在我国长距离输电系统中发现了大量的 GIC 侵袭事件^[12-14]。除现有的 500 kV 电网,我国还将大规模开工建设向沿海地区送电的 1 000 kV 特高压电网。新电网输电线的单位电阻最多只是 500 kV 线路的 1/2,并且输电距离更长(2 300 km)、建设规模更大(覆盖全国),变压器采用单相变压器组结构(更容易饱和),太阳活动和爆发的影响无疑会比对现在的电网更大、覆盖范围更广。

最容易引起地磁暴和 GIC 事件的当然是朝向地球而来的 CME,称为对地 CME。当这样的 CME 离开太阳一定距离之后,从地球上看来,它们就像日晕一样环绕在太阳周围。通常将环绕太阳的范围超过 120° 的 CME 称为晕状 CME,当环绕范围达到 360° 时称为全晕状 CME。我们在本工作中分析研究的 CME 都是全晕状 CME。这是因为这类 CME 具有最明显的地球物理效应,比较容易找出它们和 GIC 事件的内在联系。

关于太阳爆发事件对地球空间环境的影响在国际上已经有了一些研究结果,比如 Zhang 等^[15]对于 CME 产生的地磁暴 Dst (Disturbance Storm Time) 指数 <-100 nT 的太阳和行星际源区的研究; Kataoka 等^[16]利用 Stockwell 变换的方法为寻找 GIC 事件源头提供的经验模型,并确定了 CME 和共转相互作用区驱动的 GIC 事件的差异性等等。

在本文中,我们将根据外形和亮度特征对晕状 CME 进行分类。由于速度越快的晕状

CME 的对地效应越明显, 因此我们首先进行各类晕状 CME 的速度与 GIC 的强度的相关性分析. 不同类型的晕状 CME 驱动的 GIC 事件性质各不相同, 为了更好地确定 GIC 事件的性质, 我们利用小波变换对其进行频谱分析, 在这里我们研究分析了不同类型的晕状 CME 所驱动的最强的 GIC 事件. 由于地磁暴与 GIC 事件都是太阳活动对地球环境影响的表现, 为了更进一步确定地磁暴和 GIC 事件之间的关系, 我们还对地磁场随时间的变化率与 GIC 强度之间的关系进行了讨论. 另外 GIC 事件对地面系统的危害还与其强度的大小以及持续时间有关, 所以文中还讨论了不同强度和持续时间的 GIC 事件出现的概率.

2 数据来源及处理方法

本文所分析的 CME 的数据来源于太阳及日球天文台 (SOHO) 的大视角分光日冕仪 (LASCO) C2 和 C3 的白光观测资料, GIC 数据来源于芬兰气象研究所 (FMI) 和华北电力大学. LASCO 以前所未有的分辨率观测到了大量的 CME 事件, 对几乎整个第 23 太阳活动周进行了观测. 我们从 CDAW Data Center 公布的 CME 数据中找到了从 1998 年到 2005 年期间爆发的所有的全晕状 CME, 总共有 329 个. 根据其爆发时间, 确定了其中有 63 个全晕状 CME^[15] 与 35 个 GIC 事件相关.

由于芬兰处于高纬度地区, 受 GIC 的影响比较严重, 芬兰气象研究所于 1998 年就开始在曼查拉的输气管道中监测 GIC, 同时收集有关数据, 并通过网络向外发布. 曼查拉监测点位于北纬 60° , 东经 25° , 监测数据的时间分辨率为 10 s. 我们研究的 GIC 事件覆盖从 1998 年 1 月 1 日到 2005 年 12 月 31 日的时间段. 随着我国西电东输、全国联网战略的提出以及大规模电网建设的展开, 华北电力大学为了研究 GIC 对长距离大规模输变电系统的危害, 也于 2004 年开始在广东岭澳核电站的变压器中进行 GIC 监测, 时间分辨率为 1 s. 广东岭澳位于北纬 22° , 东经 114° . 虽然纬度比较低, 但是已经监测到了很强的 GIC, 最大瞬时值为 75.5 A ^[13].

另外为了研究地磁场与 GIC 事件之间的关系, 我们还分析了地磁暴和位于曼查拉西部 40 km 处努米尔耶尔维监测到的地磁场的的数据. 由于距离曼查拉的 GIC 监测点较近, 因此可以用努米尔耶尔维监测到的地磁场的的数据与曼查拉的 GIC 数据作相关分析, 以得到地磁暴和 GIC 的相关关系.

在处理 GIC 数据时, 我们采用小波变换技术. 因为小波变换介于纯时间域的方波分析和纯频率域的传统傅立叶分析之间, 在时域和频域同时具有良好的局部性质. 它有一个弹性的时频窗, 根据信号频率的不同, 变换程序在时间域自动调节取样的疏密: 对低频成分采用逐渐加宽的时间域采样步长, 对高频成分则采用逐渐精细的时间域步长, 以达到效率高、质量佳的效果. 利用小波变换的这一特性, 我们能够聚焦到研究对象的任意细节并加以分析, 可以发现突变, 并分析出我们感兴趣的 GIC 事件在不同时段的强度大小.

小波变换的具体定义是：对于一个时间序列函数 $f(t)$, 函数^[17]

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \varphi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (1)$$

称为 $f(t)$ 的小波变换. 这里 t 是时间, a 和 b 都是具有时间量纲的常数. 其中 $a > 0$, 是分析变换的伸缩尺度, 大小与频率相关: a 小对应于高频, a 大对应于低频; b 为平移参数, 对应着分析事例的起始时间. 函数 $\varphi(t)$ 通常为一平方可积函数, 即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\varphi(t)|^2 dt < \infty, \quad (2)$$

若 $\varphi(t)$ 的傅立叶变换 $\psi(\omega)$ 满足条件

$$\int \frac{|\psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty, \quad (3)$$

则称 $\varphi(t)$ 为一个基本小波或小波母函数. 这里 ω 是频率. 并称 (3) 式为小波函数的可容性条件. (1) 式中的 $\varphi^*(t)$ 为 $\varphi(t)$ 的复共轭函数.

由 (1) 式定义的小波变换对应的局部功率谱就是 $W_f(a, b)$ 绝对值的平方, $P(a, b) = |W_f(a, b)|^2$, 相应全局功率谱则是 $P(a, b)$ 在时间域上的均值 $P(a) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N P(a, n) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |W_f(a, n)|^2$, 其中 N 是对某次事件的采样总数, 而 $P(a)$ 的最大值处对应的 a 值称为时间序列函数 $f(t)$ 的显著性周期.

针对具体的问题, $\varphi(t)$ 会以 (1) 式中的形式出现, 并赋予参数 a 和 b 相应的值. 这样的 $\varphi(t)$ 称为小波母函数的子小波. 小波母函数的用途在于提供一个可以产生子小波的源函数, 而子小波则是小波母函数平移或缩放 (或两者都有) 过的包含了相应事件具体内容的版本.

在分析信号时, 信号中的高频成分对应时域中的快变成分. 对这一部分信号进行分析时, 要求时域的分辨率要好, 以适应快变成分变化时间间隔短的需要, 而对频域的分辨率则可以适当放宽. 当然, 这时的时频分析窗也应处在高频段的位置. 与此相反, 信号中的低频成分往往是慢变部分, 进行分析时希望频率域的分辨率要高, 而时间域的分辨率则可以适当放宽, 同时分析的中心频率也应移到低频处.

尺度因子 a 的作用是将 $\varphi(t)$ 基本小波作伸缩, a 越大, $\varphi(\frac{t}{a})$ 越宽. 在不同尺度下, 小波的持续时间随 a 加大而增宽, 幅度则与 $\sqrt{a}$ 成反比减小, 但波的形状保持不变. 当 a 变小时, 时域观测范围变窄, 但频域观测范围变宽, 而观测的中心频率向高频处移动; 反之, 当 a 变大时, 时域观测范围变宽, 频域的观测范围变窄, 分析的中心频率范围向低频处移动. 显然, 小波变换的特点可以自动满足这些客观实际的需要.

然而, 并不是任何函数都可以用作小波变换的基本小波 $\varphi(t)$, 任何变换都必须存在反变换才有实际意义, 但反变换不一定都存在. 对小波变换而言, 所采用的小波必须满足所谓的可容性条件 (3) 式, 反变换才存在. 这是因为如果已知 $W_f(a, b)$, 我们可以通过 $W_f(a, b)$ 反演得到原函数 $f(t)$ ^[17]:

$$f(t) = \frac{1}{c_\varphi} \int_0^\infty \frac{da}{a^2} \int_{-\infty}^\infty W_f(a, b) \frac{1}{\sqrt{a}} \varphi \left(\frac{t-b}{a} \right) db, \quad (4)$$

其中 $c_\varphi = \int \frac{|\psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega$. 可见要使此式有意义的条件显然是 $c_\varphi < \infty$. 而 $c_\varphi < \infty$ 便是对 $\varphi(t)$ 提出的可容性条件 (3) 式. 由可容性条件可以推断出, 能用作基本小波 $\varphi(t)$ 的函数, 至少必须满足 $\psi(\omega = 0) = 0$.

至此, 我们已经可以利用小波变换来分析 GIC 数据了. 在利用小波变换法处理具体的 GIC 数据时, 主要分析 GIC 在不同时域的强度大小. 一般采用的是 Morlet 小波^[18-19]. 它是一个复函数, 其时、频两域都具有很好的局域性, 常用于信号的分解及时频分析中. 它和它的傅立叶变换具有如下形式:

$$\varphi(\tau) = e^{-\frac{\tau^2}{2}} e^{i\delta_0 \tau}, \quad (5)$$

$$\psi(\delta) = \sqrt{2\pi} e^{-\frac{(\delta - \delta_0)^2}{2}}, \quad (6)$$

其中 τ 是无量纲的时间, δ 和 δ_0 是无量纲的频率. 但是我们发现 $\psi(\delta = 0) \neq 0$, 而且将 (6) 式代入 (3) 式左边进行计算之后, 我们发现结果是发散的, 即 (3) 式要求的可容性条件并不满足. 用 (5) 式的函数来进行小波变换似乎有些困难. 不过, 由于 $\psi(\delta)$ 本身在 δ 偏离 δ_0 的地方衰减得很快, 当 $\delta_0 \geq 5$ 时, $\psi(\delta = 0) \approx 0$, 可以近似满足 (3) 式规定的可容性条件. 因此在实际工作中一般只要取 $\delta_0 \geq 5$ 就可以了^[17]. 在本工作中, 我们固定取 $\delta_0 = 6$. 在这种情况下, 小波变换尺度 a 与傅立叶周期 T 之间具有这样的关系: $T = 1.03a$ ^[18].

3 数据处理结果

3.1 GIC 事件的主要频率范围

为了了解 GIC 对地面系统造成影响的频率范围, 我们选择了 2004 年 11 月 10 日发生在曼查拉和岭澳的 GIC 事件, 对其数据进行快速傅立叶变换, 得到其频谱分布 (如图 1 所示). 图 1(a) 显示的是在广东岭澳核电站变压器中监测到的 GIC 的傅立叶变换的结果, 图 1(b) 显示的是对芬兰输气管道中监测到的 GIC 进行快速傅立叶变换后的结果, 对比图 1(a) 和图 1(b) 的结果, 可以看出它们的主要频率范围是 1~10 mHz. 这说明 GIC 对地面网络系统, 包括电网和输油输气网系统的影响是类似的, 因此分析在曼查拉监测到的 GIC, 会对我们研究 GIC 在我国电网中可能产生的危害具有重要的参考价值. 在工作频率为 50 Hz 的交流电系统中, GIC 相当于一个准直流, 会在变压器中产生直流偏磁现象, 在变压器中引起振动并损坏变压器.

3.2 晕状 CME 对地磁暴和 GIC 事件的影响

我们分析了所收集到的 329 个全晕状 CME, 其中有 63 个全晕状 CME 驱动了 48 个 Dst 指数小于等于 -100 nT 的地磁暴^[16]. 我们根据地磁暴发生的时间, 在 FMI 公布的数据资料中查询 GIC 事件, 与这 48 个地磁暴事件对应的、并且在 GIC 数据库中有记录的共有 35 个 GIC 事件. 由于单个的 GIC 事件有可能是由 2 个或 3 个晕状 CME 共同驱动 (后面速度快的 CME 赶上前面慢的 CME), 对于由多个晕状 CME 驱动的 GIC 事件, 我们取其中速度最快的晕状 CME 作为驱动源进行分析.

有必要引起注意的是, 我们还需要确认这些 CME 都是发生在太阳朝向地球的一面, 而不是背离地球的一面. 由于太阳风磁场和等离子体冲击地球会产生地球磁场的变化,

Zhang 等^[15] 分析了近地定点监测卫星 WIND 和 Advanced Composition Explorer (ACE) 的太阳风等离子体和磁场观测仪器在近地空间监测到的磁场、太阳风风速、离子浓度等参数的变化数据. 根据这些参数发生的突变, 与地球磁场的变化进行比对, 可以确定近地空间监测到的数据与地球磁场之间的关系. 由于 ACE 和 WIND 观测到的数据是 CME 爆发后在行星际空间传播了一定的时间才被接收到的, 可以根据这两个卫星监测到的磁场、太阳风风速、离子浓度等参数发生突变的时间, 去寻找太阳活动的爆发源. 同时, 利用 SOHO/LASCO 对 CME 的观测, 可以得知 CME 爆发的时间和速度, 进而能够推算出其传播到地球的时间. 将 CME 传播到地球的时间与 WIND 和 ACE 两卫星监测到的参数发生突变的时间进行比对, 我们就可以确定此次爆发的 CME 是朝向地球来的, 即对地 CME.

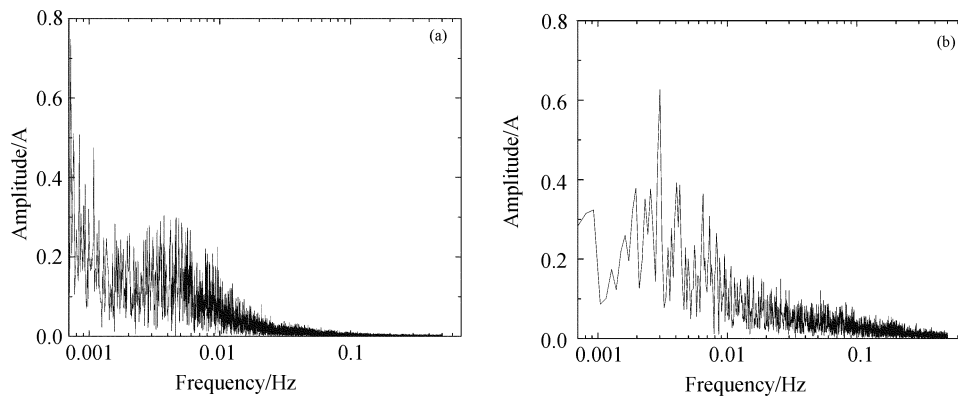


图 1 在岭澳和曼查拉检测到的 GIC 数据的 FFT 谱分析结果. (a) 岭澳, (b) 曼查拉

Fig. 1 The fast Fourier transform of GIC data obtained at Ling'ao (a) and Mantsala (b), respectively

确定了这些 CME 朝向地球运动的特征之后, 我们将所收集到的所有地磁暴事件和 GIC 事件的强度随相关晕状 CME 的速度的变化在图 2 描述出来, 不同的符号代表驱动单个地磁暴和 GIC 事件的 CME 的个数. 图 2(a) 是地磁暴强度与 CME 速度之间的关系, 图 2(b) 是 GIC 强度与 CME 速度之间的关系. 从图中可以看出数据点的分布比较弥散, 基本上看不出地磁暴和 GIC 的强度与 CME 的速度有什么明显的联系. 因此有必要将我们收集到的这些 CME 按照它们的一些观测特征进行分类, 以便我们的研究和结果更明确、更具有针对性.

按照 CME 在 LASCO/C2、C3 视场中的形状, 我们将观测到的全晕状 CME 分为完全对称型 (Symmetric, S 型, 如图 3(a) 所示)、亮度不对称型 (Brightness Asymmetric, BA 型, 如图 3(b) 所示) 以及外形不对称型 (Outline Asymmetric, OA 型, 如图 3(c) 所示)^[20]. 我们将分别对由这 3 类 CME 驱动 GIC 事件的各种性质及其与 CME 速度的关系进行分析和研究.

3.2.1 不同的 CME 的速度与地磁暴和 GIC 强度的关系

我们首先在图 4 中给出地磁暴强度和 GIC 强度随 S 型 CME 速度的变化关系. 从图中

可以看出地磁暴、GIC 的强度与 S 型 CME 的速度具有非常明显的线性关系, 相关系数分别达到 0.85 和 0.88. 可以得到地磁暴的强度与 CME 的速度的关系为 $-Dst=0.099v+130.87$, 而 GIC 强度与 CME 速度的关系可以很好地表述为 $I_{GIC}=0.021v+0.14$, 其中 v 是 CME 的速度, 单位是 km/s (下同), 变量 $-Dst$ 和 I_{GIC} 分别表示地磁暴和 GIC 的强度, 单位分别是 nT 和 A (下同).

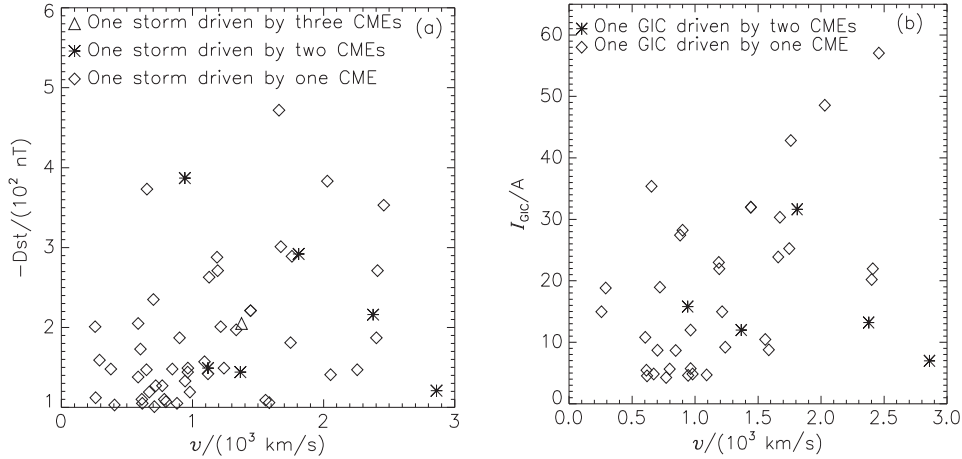


图 2 (a) 本工作收集到的所有地磁暴事件的强度与相关晕状 CME 速度的关系, (b) 本工作收集到的所有的 GIC 强度与相关晕状 CME 速度的关系

Fig. 2 Geomagnetic storm strengths (a) and GIC intensities (b) collected for studies in the present work versus velocities of the associated halo CMEs

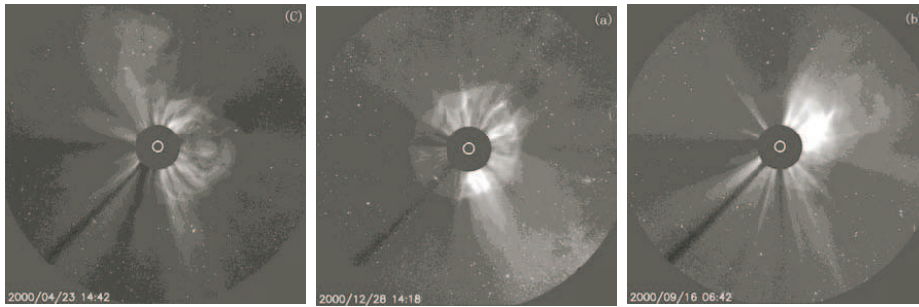


图 3 3 类具有不同观测特征的全晕状日冕物质抛射: (a) 完全对称型, (b) 亮度不对称型, (c) 外形不对称型

Fig. 3 Three kinds of full halo CMEs with different observational characteristics. Symmetric (a), brightness asymmetric (b), outline asymmetric (c)

图 5 给出了地磁暴和 GIC 强度与 OA 型 CME 速度的关系. 从中可以看出地磁暴、GIC 的强度与 OA 型 CME 的速度仍然具有较好的相关性, 其相关系数分别达到 0.65 和 0.68, 地磁暴的强度与 CME 的速度的关系为 $-Dst=0.072v+67.25$, 而 GIC 强度与这种晕

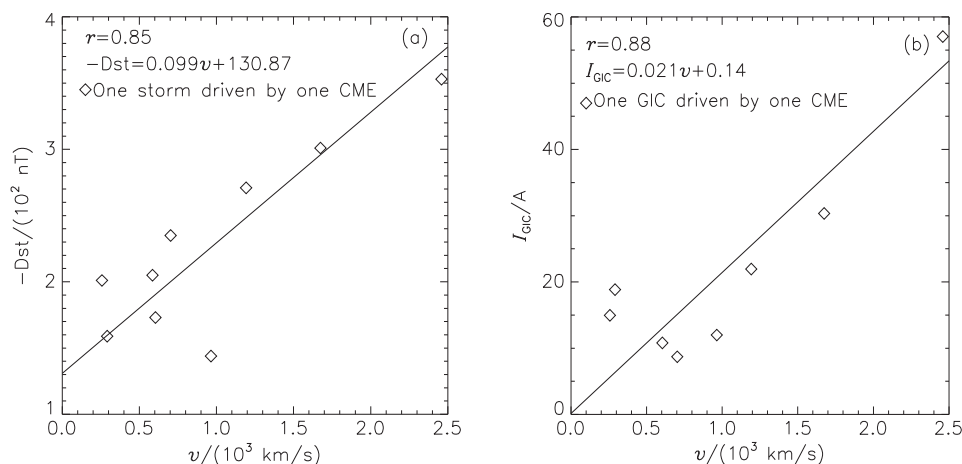


图 4 (a) 地磁暴强度与 S 型 CME 速度的关系, (b) GIC 强度与 S 型 CME 速度的关系

Fig. 4 Variations of geomagnetic storm strengths (a) and GIC intensities (b) versus speeds of the associated S-CMEs

状 CME 速度的关系为 $I_{\text{GIC}}=0.018v-11.02$.

地磁暴、GIC 的强度与 BA 型 CME 速度的相关性如图 6 所示. 可以看出相关性不是太明显, 弥散度有些大, 相关系数分别为 0.33 和 0.47. 其中地磁暴的强度与 CME 的速度关系为 $-Dst=0.354v-157.31$, GIC 强度与 CME 速度的关系可由公式 $I_{\text{GIC}}=0.035v-19.38$ 来描述.

上述相关性分析所得到的参数也在表 1 当中列出, 供参考比较. 由以上各图中的图 (a) 可以看出地磁暴的强度与 BA 型 CME 的关系最为密切. 尽管二者的相关关系有些弥散, 但是有超过半数的地磁暴是由 BA 型 CME 驱动的, 而且地磁暴对 BA 型 CME 最为敏感, 在相同的速度下, 由 BA 型晕状 CME 驱动的地磁暴的强度最大. 但是由于 BA 型 CME 的速度与地磁暴强度的相关关系有些弥散, 因此利用分析所得的线性关系, 由 CME 的速度来推算地磁暴的强度, 得到的结果的可信度可能偏低. 另一方面, 我们也发现由 S 型和 OA 型 CME 驱动的地磁暴事件虽然在数量上不如 BA 型 CME 驱动的地磁暴事件多, 但是它们的速度与地磁暴的强度具有较好的相关性, 所以利用上述线性关系, 由这两种类型 CME 的速度来推算和预测地磁暴强度应该具有较高的可信度.

分析图 4、5、6 中的图 (b), 我们可以看出随 CME 的速度增长最快的 GIC 强度同样也是发生在由 BA 型 CME 驱动的 GIC 事件中. 由 BA 型晕状 CME 驱动的 GIC 事件的强度分布范围比较广, 并且有一部分低速的 BA 型 CME 甚至驱动了较强的 GIC 事件. 但是单纯地由 BA 型 CME 的速度来推测 GIC 的强度的话, 又存在较大的不确定性. 因此对这类 CME 诱发的 GIC 的研究对我们构成了较大的挑战!

在我们分析研究的 35 个 GIC 事件中, 最强 GIC 事件的电流为 57 A, 是由 S 型 CME 驱动的. 相对而言, 由 OA 型 CME 驱动的 GIC 事件的强度较弱, 大部分事件的强度分布在 5~30 A 之间, 而由 BA 型和 S 型驱动的 GIC 事件强度则分别在 5~50 A 和 5~60 A

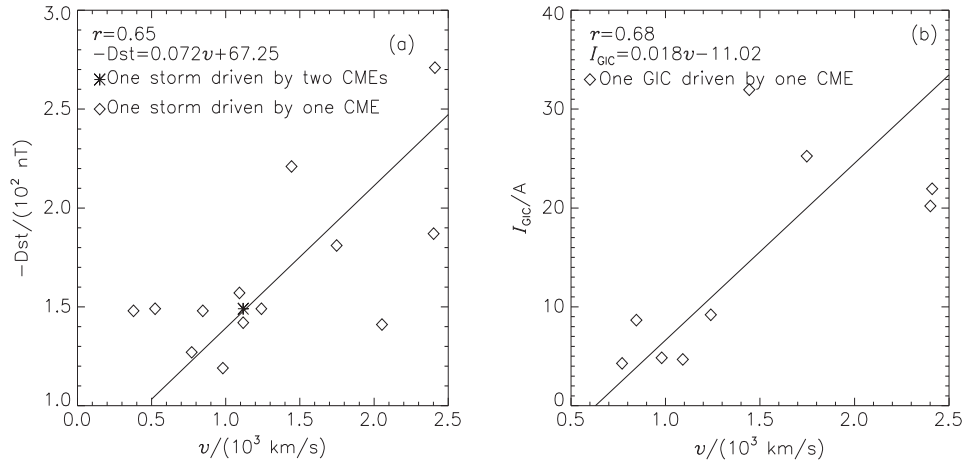


图 5 (a) 地磁暴强度与 OA 型 CME 速度的关系, (b) GIC 强度与 OA 型 CME 速度的关系

Fig. 5 Variations of geomagnetic storm strengths (a) and GIC intensities (b) versus speeds of the associated OA-CMEs

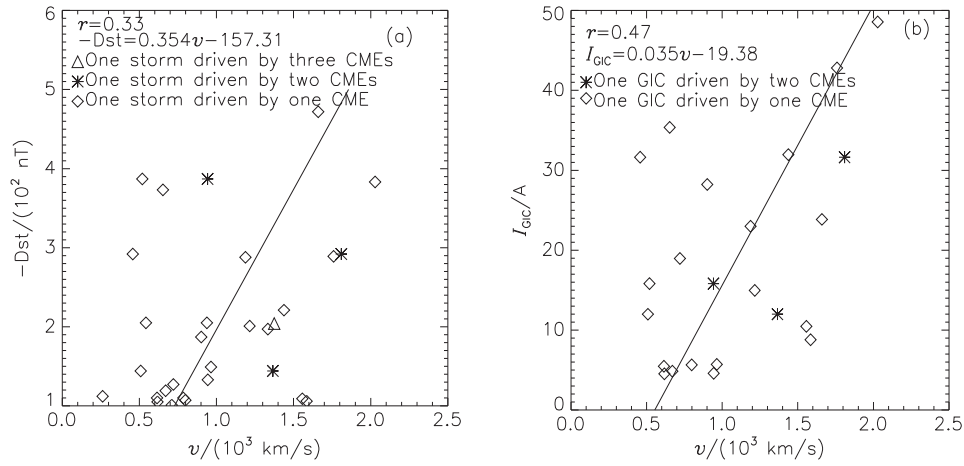


图 6 (a) 地磁暴强度与 BA 型 CME 速度的关系, (b) GIC 强度与 BA 型 CME 速度的关系

Fig. 6 Variations of geomagnetic storm strengths (a) and GIC intensities (b) versus speeds of the associated BA-CMEs

之间.

表 1 线性拟合参数的比较

Table 1 Comparison of linear fitting parameters

Relation	Slope	Intercept	Correlation coefficient
S-GIC	0.021	0.14	0.88
BA-GIC	0.035	-19.38	0.47
OA-GIC	0.018	-11.02	0.68
S-Dst	0.099	130.87	0.85
BA-Dst	0.354	-157.31	0.33
OA-Dst	0.072	67.25	0.65

3.2.2 利用小波变换对 GIC 事件进行频谱分析

为了进一步研究由不同类型的晕状 CME 驱动的 GIC 事件的性质,我们对所有在曼查拉和岭澳核电站监测到的 GIC 事件做了小波变换分析.在利用小波变换处理有穷时间序列时,会在小波功率谱的起始端和结束端出现较大误差,即所谓的影响锥效应.处在这个区域内的最终结果是不可靠的,因此有关信息一般不被采纳^[18-19].为了减小影响锥效应对频谱分析结果的影响,我们将 GIC 事件的起始时间设为 GIC 开始出现波动前 2 h,终止时间为 GIC 波动结束后的 2 h.

在图 7 的 (1)、(2)、(3) 3 幅图中展示的是从我们分析过的 GIC 事件中选出的对 3 个比较典型、强度较大的 GIC 事件的分析结果.图 7(1) 展示的是对 2003 年 10 月 29 日爆发的 S 型 CME 驱动的 GIC 事件的分析结果,这个事件是迄今为止在芬兰的输气管道当中检测到的最强的 GIC 事件.图 7(2) 展示的是对 2001 年 3 月 31 日爆发的 BA 型 CME 驱动的 GIC 事件的分析结果.而图 7(3) 展示的则是对 2001 年 9 月 25 日爆发的 OA 型 CME 驱动的 GIC 事件的分析结果.

在这 3 幅图中又各包含了 (a)、(b)、(c) 3 个部份.其中,图 (a) 表示的是原始的 GIC 事件的强度随时间变化的曲线,横坐标为时间,单位是 h,纵坐标为 GIC 的强度,单位是 A;图 (b) 表示的是对相应的 GIC 事件的原始数据进行小波变换得到的局域功率谱,其中横坐标为时间,纵坐标为对应周期,单位均为 h,颜色由蓝到红表示强度的不断增大;图 (c) 表示的是相应全局功率谱, $P(a)$ 随 a 的变化.

图 (1) 展示的最强的 GIC 事件的主要特征在小波功率谱上主要出现在两个时间段上,这两部分的强度都差不多,但后面部分的持续时间要长一些;事件的显著性周期在 1.47 h 左右;图 (2) 展示的 GIC 事件的强度同样集中在两个时间段上,但是两段的强度明显不一样,持续时间也有明显差别:初始强度比较弱,并且持续时间较短,第 2 部分强度较大,持续时间相也比初始部分长;事件的显著性周期在 1.82 h 左右;从图 (3) 所显示的小波功率谱中可看出此次 GIC 事件的整体强度较弱,仅有一个部分,并且持续时间比较短;事件的显著性周期在 1.03 h 左右.对比这 3 个利用小波变换分析的 GIC 事件,可以看出不同的 GIC 事件其强度分布和持续时间各不相同,但是它们的显著性周期却非常接近.这应该与作为驱动源的晕状 CME 的性质相关,当然也与地磁暴的 3 个相阶段相关.地磁暴发生过程可分为 3 个阶段:初相阶段,主相阶段,恢复相阶段.初相阶段和恢复相阶段地磁变化较为剧烈,故在与地磁暴这两个阶段对应的时间内, GIC 会产生较

强的波动. 这个问题超出了本工作的研究范围, 我们将在今后的工作中作进一步研究.

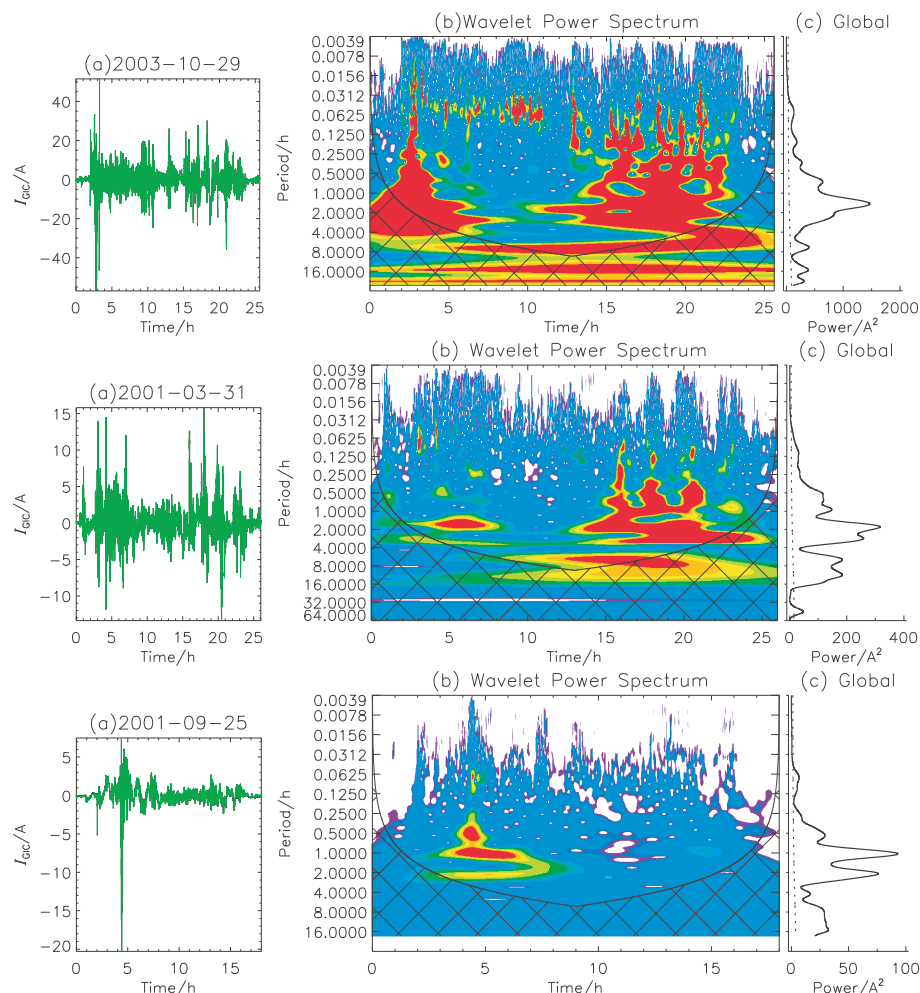


图 7 对 3 个典型 GIC 事件的原始数据 [(a) 列中的曲线] 进行 Morlet 小波变换后得到的结果 [分别列在第 (1)、(2) 和 (3) 行当中]: (b) 局域功率谱, (c) 全局功率谱, 其中全局功率谱的最大值决定了该事件的显著性周期

Fig. 7 Results of applying the transform of the Morlet wavelet to the original data [see the curves in column (a)] of three typical GIC events [displayed in rows (1), (2) and (3)]: (b) the wavelet power spectrum, (c) the global power spectrum. Here, the maximum of each curve in (c) determines the significant period of the relevant event

对上述 35 个 GIC 事件的分析还可以给出它们的显著性周期. 根据小波变换得到的全局功率谱, 其最大全局功率谱对应的周期处于 95% 置信度之上 (注意图 7 每一行图 (c) 中的虚线. 它给出了具有 95% 置信度的数据位置, 在它右边的曲线给出的信息都是可靠的), 则该周期是具有统计性意义的显著性周期. 通过对显著性周期的分析, 我们得到了对 GIC 事件有意义的统计分析时间段. 如图 8 所示, 我们用不同的颜色代表不同的显著性周期时间段. 从图中可以看出, 在我们分析的 35 个 GIC 事件中, 有超过一半的事件的

显著性周期处于 1~2 h 的区间内. 由于对太阳活动的统计属于长时间序列的统计事件, 而 GIC 事件均为 1 d 左右的持续时间, 根据 Morlet 小波的周期与傅立叶周期的关系, 我们注意到在这里得到的 GIC 事件的显著性周期的范围与傅立叶变换得到的 GIC 事件的频率范围 (见图 1(a) 和图 1(b)) 是一致的. 这既说明两种方法在功率谱分析方面的一致性, 也说明 GIC 事件的频率特征 (或功率分布) 与单个的 GIC 事件无关, 主要由 CME 的性质和周围的地磁环境所决定.

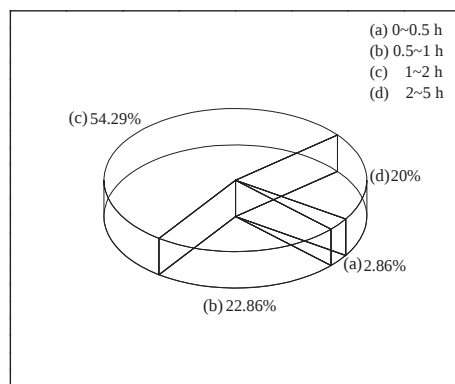


图 8 不同显著性周期出现的概率

Fig. 8 Probabilities of various significant periods

3.2.3 不同地区监测到的 GIC 事件的对比分析

华北电力大学在我国岭澳核电站监测到的 GIC 事件的起止时间、峰值以及对应的地磁暴的 Dst 指数见表 2. 我国对 GIC 的监测从 2004 年开始, 其中监测到的最大瞬时峰值达到 75.5 A, 而在无 GIC 事件时实测所得的直流输电单极运行所引起的变压器中性点直流电流为 12~13 A^[13]. 但是在现阶段国内监测所得的数据量比较少, 不利于我们进行统计分析, 所以我们使用芬兰的数据来帮助研究国内观测到的 GIC 事件. 但是由于芬兰的数据是针对输气管道得到的, 而我国的数据则是在电网内监测到的, 再加上两个地方使用的测量仪器也不同, 因此不能简单地将芬兰的监测结果直接拿来为我所用, 而必须首先对两个地方已知的数据和结果进行比对和校准.

如表 2 所示, 从 2004 年 11 月 7 日到 2005 年 8 月 31 日, 在岭澳一共监测到 7 次 GIC 事件. 由于曼查拉的监测设备出了故障, 在同样的时间段, 只获得了其中 4 次的相应数据. 我们将两地监测到的发生在同一时段的 GIC 的峰值一一对应, 可以得到如图 9 所示的函数关系 $y=1.46x-3.58$, x 是在曼查拉监测到的 GIC 强度, y 是在岭澳监测到的 GIC 强度, 单位均为 A. 从图中可以看出虽然数据点较少, 但大致可以看出这个线性关系. 对其进行线性拟合后, 利用拟合公式及在岭澳监测到的 GIC 强度, 可以推算出在曼查拉漏测的 GIC 事件的电流值, 反之亦然. 作为现阶段的初步分析和研究, 我们可以根据这个关系利用在芬兰曼查拉监测点得到的数据来分析研究太阳活动对我国 GIC 的影响, 为我国 GIC 预警提供有价值的参考信息.

表 2 岭澳与曼查拉 GIC 事件峰值比较

Table 2 Comparison of GIC peak data at Ling'ao and Mantsala

Time	Dst(nT)	Ling'ao Peak GIC(A)	Mantsala Peak GIC(A)
2004-11-07T10:30~11-08T12:30	-373	47.2	35.36
2004-11-09T18:30~11-10T22:30	-289	75.5	42.82
2005-01-21T17:00~01-23T0030	-105	17.9	27.44
2005-05-15T02:30~05-16T19:30	-263	27.9	37.15(Estimated value)
2005-05-29T20:30~05-31T00:30	-138	5.6	4.6(Estimated value)
2005-08-24T06:00~08-25T21:30	-216	19.1	13.2
2005-08-31T06:30~09-01T18:30	-131	5.7	4.7(Estimated value)

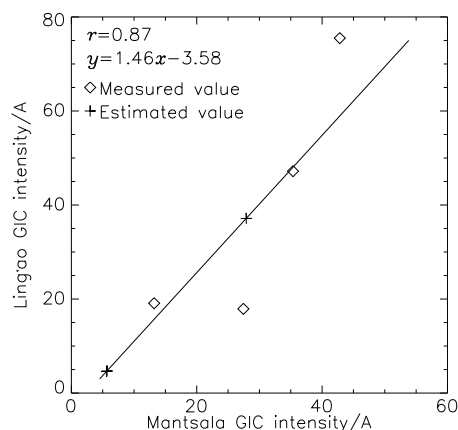


图 9 同一地磁感应电流事件在两地监测所得数据的对应关系

Fig.9 Correlation of GIC data obtained at Ling'ao to those at Mantsala

3.2.4 驱动地磁暴和 GIC 事件的晕状 CME 源区在日面上的分布

为了确定从日面哪一部分爆发的 CME 对 GIC 的影响更为明显, 我们考察了驱动地磁暴和 GIC 事件的晕状 CME 在日面上的分布. 我们仍然以芬兰的 GIC 记录为主. 我们的数据库当中总共有 48 个地磁暴事件以及芬兰曼查拉监测点有记录的 35 个 GIC 事件. 我们用不同颜色的星号(*)表示不同强度的 GIC 事件, 用不同的标志表示不同等级的地磁暴, 将这些地磁暴和 GIC 事件的太阳爆发源在日面上的位置在图 10 中标注出来. 从图上可以看出, 62.7% 的 $Dst < -100$ nT 的地磁暴是由在日面西部爆发的晕状 CME 驱动的, 这些事件的日面源分布的重心位于 W9.6S0.6 处. 在大于 20 A 的 GIC 事件中有 61% 也是由在日面西部爆发的晕状 CME 引起的, 这些事件的日面源分布的重心位于 W17.1N0.8 处. 这也说明在日面西部爆发的晕状 CME 对 GIC 事件的影响比较大, 而且引起强 GIC 事件的 CME 的源区比引起强地磁暴的 CME 源区还要更靠西边一些. 另外, 图 10 也表明无论是强磁暴还是强 GIC 事件, 驱动它们的 CME 的源区都位于赤道两侧 $\pm 20^\circ$ 的纬度带当中.

对于这种 CME 源区在日面分布的东西不对称性, Wang 等^[21]认为是由于行星际

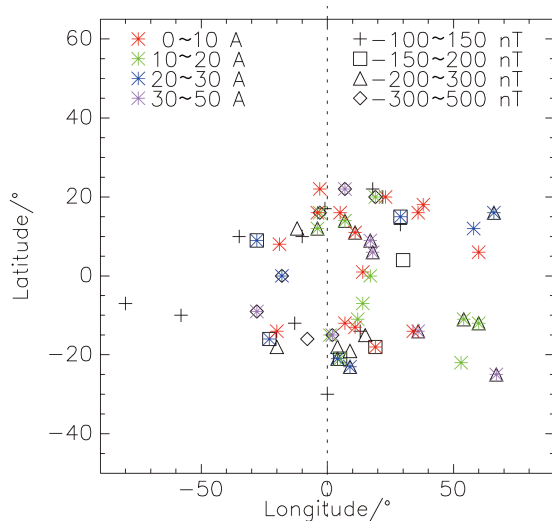


图 10 地磁暴和 GIC 事件驱动源的日面分布. 不同颜色的星号代表不同强度的 GIC 事件, 其它各种符号代表不同强度的地磁暴事件

Fig. 10 The heliographic distribution of driven sources on the solar disk. Various colors of each asterisk are for the intensity of the corresponding GIC event, and other different symbols are for the strength of the storm

磁场螺旋状结构引起的, 并且与 CME 在行星际空间中的运行速度有关. 如图 11 所示, 当 CME 在行星际空间传播的速度快于背景太阳风的速度时, CME 就会向东偏转, 这就使对地晕状 CME 的日面源区分布偏向于西部; 而 CME 在行星际空间传播的速度慢于背景太阳风速度时, CME 则会向西偏转, 使对地晕状 CME 的源区分布向东移动. 由于我们分析的事件中的 CME 都属于快 CME (否则也不会产生明显的地磁暴和 GIC 事件), 因此它们的源区在日面上的位置都偏西.

3.3 GIC 事件与地磁暴及地磁场变化的关系

图 12 给出了我们收集到的地磁暴和 GIC 事件的有关参数的相互关系. 图 12(a) 显示的是在曼查拉监测到的 GIC 强度与当天发生的地磁暴强度之间的关系, 图 12(b) 显示的则是在广东岭澳监测到的 GIC 与地磁暴的关系. 正如我们所希望看到的那样, 曼查拉监测到的 GIC 与地磁暴强度有很好的相关性; 岭澳的数据量虽然较少, 但是从图中依然能够看出 GIC 与地磁暴的相关性.

从比较直观的因果关系上来看, 地磁暴和 GIC 都是由地磁场的变化引起的. 因此, GIC 和地磁暴之间、GIC 和地磁场的变化之间应存在明显的联系. 在这部分工作中, 我们对这两种关系做一简要分析和研究. 我们需要指出的是, 在这里使用的地磁暴数据中, 并没有包含那些非 CME 引起的地磁暴事件. 由 CME 以外的原因引起的地磁暴是否会引起 GIC 事件, 值得我们在将来的工作中进一步探索.

为了进一步研究地磁场变化对 GIC 事件的制约, 我们也分析了 GIC 强度与地磁场

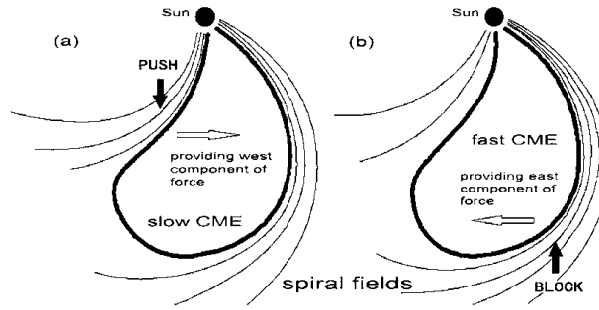


图 11 (a) 慢速和 (b) 快速 CME 在行星际介质中的传播过程中的受力示意图 (原始图版取自文献 [21])

Fig. 11 The schematic description of the force imposed on (a) the slow and (b) the fast CME propagating in the interplanetary medium (the original template is from Wang et al.^[21])

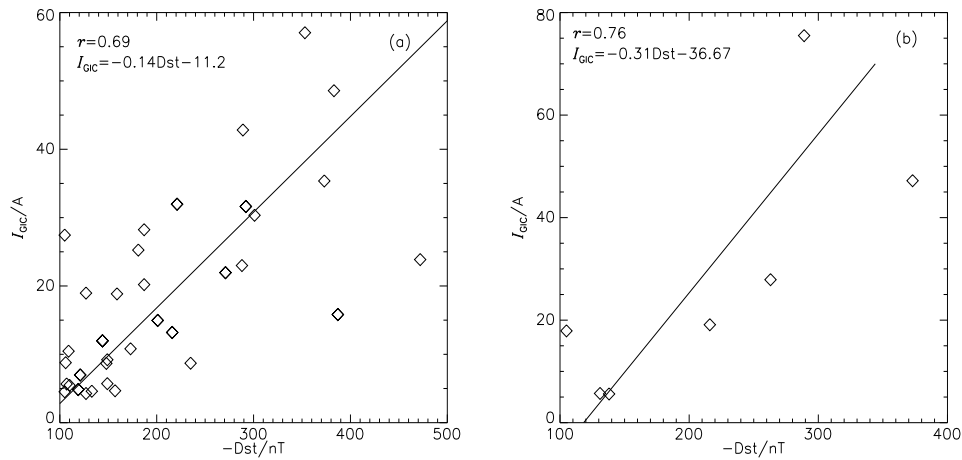


图 12 GIC 强度与地磁暴强度的关系. (a) 曼查拉, (b) 岭澳

Fig. 12 Relation between GIC intensity and geomagnetic storm strength. (a) Mantsala, (b) Ling'ao

强度的时间变化率之间的关系. 利用芬兰西部距曼查拉 40 km 的努尔米耶尔维地磁台站监测到的南北方向和东西方向地磁场数据, 我们综合研究地磁场变化对 GIC 的影响和制约. 在芬兰的输气管线网中, 曼查拉监测点处于一个类似于 T 字型的交叉结构节点处. 我们根据 35 个 GIC 事件爆发的起止时间来确定分析地磁场随时间变化率所需数据的起止时间, 然后将每个事件中的地磁场随时间变化率的峰值点取出, 与对应的 GIC 事件的峰值做相关性分析. 我们分别计算 x 方向 (北向) 和 y 方向 (东向) 的磁场分量随时间的变化 dB_x/dt 和 dB_y/dt , 然后研究 GIC 强度与它们之间的关系, 得到如图 13 所示的结果. 图 13(a) 和图 13(b) 分别表示 GIC 的强度与南北方向和东西方向的地磁场强度的时间变化率之间的关系, 从两图中可以看出, 在曼查拉监测的 GIC 事件与南北方向和东西方向的磁场强度的时间变化率均显示出很好的线性关系. 这应该与芬兰输气管道网的结构有关. 曼查拉监测点处于一个类似于 T 字型交叉结构节点处, 东西方向和南北方向的磁场变化均会在管道中产生明显的 GIC. 这也说明 GIC 不仅仅与地磁场有关, 还与地面系统的网络结构有关系. 因而在分析 GIC 事件过程中, 不仅不同纬度的 GIC 事件其强度存在差异性, 而且在同一纬度的情况下, 地面系统的不同网络结构产生的 GIC 也会各不相同.

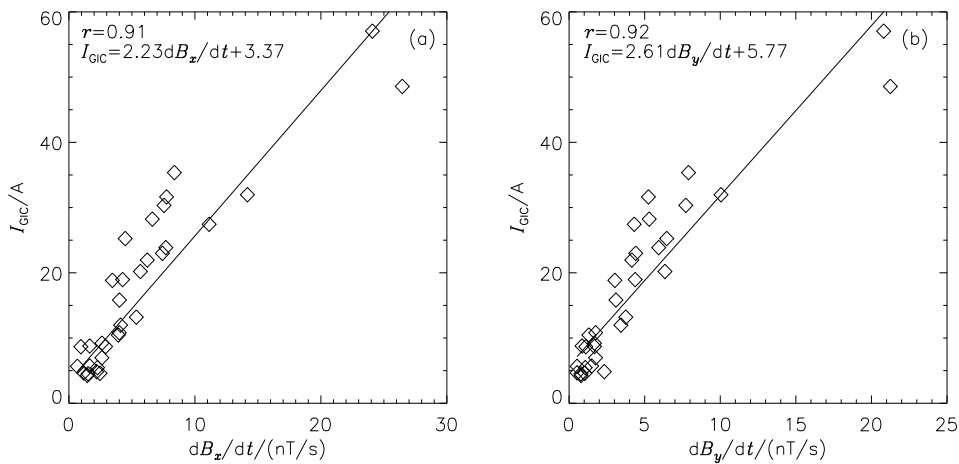


图 13 GIC 强度与地磁场两个分量随时间变化率的关系. (a) x 方向, (b) y 方向
Fig. 13 Correlations of GIC intensities to (a) dB_x/dt and (b) dB_y/dt , respectively

3.4 GIC 事件发生的概率与其强度和持续时间之间的关系

GIC 对地面系统的危害与其强度和持续时间有关. GIC 事件的强度越大, 持续时间越长, 对地面系统的危害越大. 因此我们还进一步分析了在芬兰曼查拉观测到的 35 个不同强度和不同持续时间的 GIC 事件出现的概率. 不同强度的 GIC 事件出现的概率如图 14(a) 所示, 图中不同的颜色表示不同等级的 GIC 事件, 这些等级均为 GIC 事件的强度. 由统计结果我们可以看出, 超过 60% 的 GIC 事件的强度分布在 4~20 A 的范围之中. 随着强度的增大, 发生的概率逐渐变小. 不同持续时间的 GIC 事件出现的概率如图 14(b)

所示. 从中可以看出超过 70% 的 GIC 事件的持续时间处于 0.15~100 min 之间, 只有少数的 GIC 事件持续时间超过了 100 min. 但是由于小概率 GIC 事件的危害性较大, 我们对这些事件更应给予充分的考虑. 而强度较小、持续时间较短、发生较为频繁的 GIC 事件, 由于累积效应也会对面系统造成危害, 因此即使在没有较强 GIC 事件发生的情况下, 也需要定期对地面系统进行检查和维护.

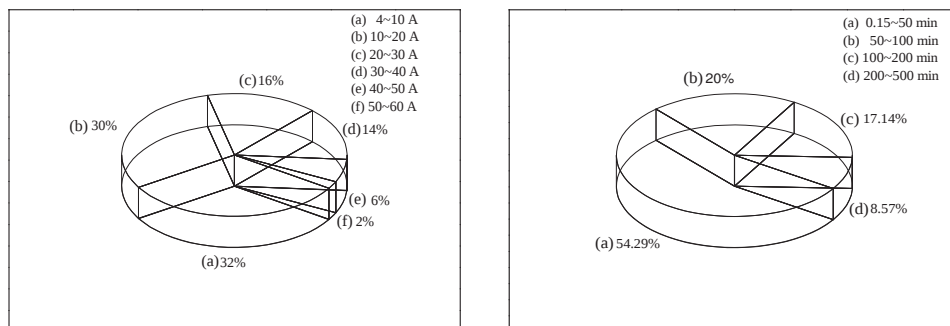


图 14 (a) GIC 事件强度的概率分布, (b) GIC 事件根据持续时间的概率分布

Fig. 14 The probability distributions of GIC events on the basis of (a) the intensity and (b) duration

4 总结与讨论

我们分析了 GIC 事件和地磁暴强度与全晕状 CME 的速度的关系. 本文针对对地全晕状 CME 对 GIC 事件的影响, 利用线性拟合和小波变换进行了分析, 得出了以下结果:

(1) GIC 的频率成分主要在 1~10 mHz 之间. 在工频 50 Hz 的交流电系统中, 其作用相当于准直流;

(2) 不同类型的全晕状 CME 对地磁暴和 GIC 事件的影响不同, 其中 BA 型晕状 CME 对 GIC 事件的影响最为显著;

(3) 利用小波变换对 GIC 事件进行频谱分析, 不同的 GIC 事件的功率谱强度、持续时间和显著性周期各有不同, 但是小波变换得到的频率范围和傅立叶分析得到的范围是相同的. 说明两种方法在功率谱分析方面的一致性, 也说明 GIC 事件的频率特征与单个的事件无关, 只决定于 CME 的速度和周围的地磁环境和网络结构;

(4) 日面西部爆发的晕状 CME 对 GIC 事件的影响比较大. 这种东西不对称性是由于行星际磁场螺旋结构引起的;

(5) 大的地磁暴事件与强的 GIC 事件相关, 东西方向和南北方向的磁场随时间的变化率都会对 GIC 造成影响, 说明 GIC 不仅仅与地磁场有关, 还与地面系统的网络结构有关;

(6) 强度在 4~20 A 的 GIC 事件的发生率较高, 超过 60%, 在 GIC 事件的持续时间方面, 超过 70% 的处于 0.15~100 min 之间. 但是也不能忽视那些小概率但强度更强、持续时间更长的 GIC 事件, 因为这些事件对地面系统更具危害性和破坏性;

(7) 由于我国对 GIC 的研究工作和监测开展较晚, 收集到的 GIC 数据较少, 因此本工作中的 GIC 数据主要来自芬兰. 我们希望通过芬兰的资料分析和研究积累经验, 为我们将来全面分析和研究我国本土发生的 GIC 事件提供有价值的参考和经验.

毫无疑问, GIC 事件是由多种太阳活动共同影响得到的结果, 不仅仅是日冕物质抛射, 还有耀斑、太阳高能粒子事件等等. 但是由于统计 GIC 事件和太阳活动关系这方面的工作才开始不久, 因此有许多因素还没有考虑得非常周全. 现阶段的工作主要是研究晕状 CME 对 GIC 事件的贡献, 我们依靠时间上的一致性来判断某次 GIC 事件是由一个晕状 CME, 还是由几个晕状 CME 共同驱动的. 在以后的工作过程中我们会将太阳活动的具体因素包括进去; 同时, 我们也会考虑大地结构、地面系统的网络结构特征对 GIC 事件的影响. 希望会得到更加系统和全面的结果.

致谢 文中使用的 CME 数据是从 CDAW Data Center 上获得的, SOHO 是一个 ESA 和 NASA 的国际合作项目 Dst 指数数据由世界地磁数据中心提供, GIC 数据由 FMI 提供, 地磁场数据来自于 IMAGE. 同时感谢 Ari Viljanen 博士给予的悉心指导.

参 考 文 献

- [1] Lin J, Cranmer S R, Farrugia C J. JGR, 2008, 113: A11107
- [2] Gosling J. JGR, 1993, 98: 18937
- [3] 林隽, Soon W, Baliunas S. 科学通报, 2002, 47: 1601
- [4] Viljanen A, Pirjola R. SGeo, 1994, 15: 383
- [5] Leshner R L, Porter J W, Byerly R T. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9: 128
- [6] Liu C, Liu L, Pirjola R, et al. SpWea, 2009, 7: S04005
- [7] 张浩, 高乃天, 刘连光. 电力设备, 2005, 6: 27
- [8] Zhang B, Liu Y, Liu L, et al. European Transactions on Electrical Power, 2011, 21: 165
- [9] Pulkkinen A, Pirjola R, Viljanen A. SpWea, 2008, 6: S07001
- [10] Huttunen K E J, Kilpua S P, Pulkkinen A, et al. SpWea, 2008, 6: S10002
- [11] Pulkkinen A, Taktakishvili A, Odstrcil D, et al. SpWea, 2008, 7: S08005
- [12] 刘连光, 刘春明, 张冰, 等. 地球物理学报, 2008, 51: 976
- [13] 刘连光, 刘春明, 张冰. 电网技术, 2009, 33: 1
- [14] 盘学南, 玉小玲. 变压器, 2006, 43: 43
- [15] Zhang J, Richardson I G, Webb D F, et al. JGR, 2007, 112: A10102
- [16] Kataoka R, Pulkkinen A. JGR, 2008, 113: A03S12
- [17] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用. 北京: 科学出版社, 1999: 22-27
- [18] Torrence C, Compo G P. BAMS, 1998, 79: 61
- [19] Grinsted A, Moore J, Jevrejeva S. NPGeo, 2004, 11: 561
- [20] Gopalswamy N, Yashiro S, Michalek G, et al. A Catalog of Halo Coronal Mass Ejections from SOHO. American Geophysical Union, Fall Meeting, 2007
- [21] Wang Y, Shen C, Wang S, et al. SoPh, 2004, 222: 329

Statistical Studies on Geomagnetically Induced Current Events Driven by Earth-directed Full Halo Coronal Mass Ejections

WANG Kai-rang^{1,2} LIN Jun¹ LIU Lian-guang³ LIU Chun-ming³

GAO Guan-nan^{1,2}

(1 *National Astronomical Observatories/Yunnan Astronomical Observatory, Chinese Academy of Science, Kunming 650011*)

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

(3 *North China Electric Power University, Beijing 102206*)

ABSTRACT Solar activities and eruptions can cause the power transmission system to be an abnormal condition, especially for an extra-long distance electric power transmission system. We analyzed the coronal mass ejection (CME) data from SOHO/LASCO (Solar and Heliospheric Observatory/Large Angle and Spectrometric Coronagraph), and the geomagnetically induced current data and the geomagnetic storm data from North China Electric Power University and Finnish Meteorological Institute, respectively. After classifying the observed halo CMEs into three types according to their symmetry: complete symmetric, brightness asymmetric, and outline asymmetric. The geomagnetically induced current events that are driven by three different types of halo CMEs have different characteristics in intensity, duration and period. We found that the brightness asymmetric halo CMEs are most likely to cause the major damage to the transmission system. The geomagnetically induced current also has a good correlation to the time variation of the geomagnetic field.

Key words sun: coronal mass ejections, solar-terrestrial relations