0254-6124/2015/35(6)-687–09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Tian Tian, Wu Yaoping, Chang Zheng, Li Ming, Ma Liang, Wei Yali, Zhu Guoyang. Analysis of the Chinese GEO satellite anomaly on 9 March 2012 (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2015, **35**(6): 687-695, doi:10.11728/cjss2015.06.687

2012 年 3 月 9 日中国某地球同步轨道卫星故障原因分析

田 天[1] 吴耀平[1] 常 峥[2] 李 明[3]
马 亮[1] 魏雅利[1] 朱国阳[1]

1(61741 部队 北京 100094)

2(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

3(中国西安卫星测控中心 西安 710043)

摘 要 利用 GOES-15, SDO, SOHO 卫星以及国际地磁台网的地磁活动指数数据, 对中国某颗地球同步轨道卫星 (以 GEO-X 代替) 在 2012 年 3 月 9 日 02:50 UTC 发生的异常原因进行了研究, 分析故障发生期间的空间天气特点, 采用文献 [8] 提出的 SEAES-GEO 空间环境引起地球同步轨道卫星异常的专家系统对卫星故障期间的内部充电危险系数、单粒子效应危险系数以及表面充电危险系数进行定量计算和危险等级划分. 结果表明, 在卫星故障时刻, 其内部充电危险系数小于 3, 表面充电危险系数约为 0.0011, 表面充电和内部充电不是造成 GEO-X 故障的原因; 受故障期间质子事件影响, 单粒子效应危险系数持续维持在 1 以上, GEO-X 卫星故障时刻单粒子效应危险系数 Z_{SEE} 达到 46.3, 正好处于单粒子效应危险等级的红色阶段. 因此研究认为单粒子效应可能是造成本次卫星故障的主要原因.

关键词 卫星异常, 内部充电, 表面充电, 单粒子效应, 危险系数, 卫星异常专家系统

中图分类号 P 353

Analysis of the Chinese GEO Satellite Anomaly on 9 March 2012

TIAN Tian[1] WU Yaoping[1] CHANG Zheng[2] LI Ming[3]
MA Liang[1] WEI Yali[1] ZHU Guoyang[1]

1(*Unit 61741, Beijing* 100094)

2(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

3(*China Xi'an Satellite Control Center, Xi'an* 710043)

Abstract Based on the GOES-15, SDO, SOHO satellites and geomagnetic indices data, the Chinese GEO satellite anomaly on 9 March 2012 was studied. The space weather conditions at the

2014-12-19 收到原稿, 2015-07-04 收到修定稿

E-mail: xiaotiant@126.com

time of the GEO-X satellite anomaly are being analyzed, and SEAES-GEO (Spacecraft Environmental Anomalies Expert System for Geosynchronous Orbit) method is used to calculate the internal charging hazard quotient, the single event effects hazard quotient and the surface charging hazard quotient. The hazard quotient was divided into three types with red-yellow-blue color coding which represents different hazard rating. Results showed that the hazard quotient for internal charging was less than 3 and the surface charging hazard quotient was about 0.0011, safely in the green at the time of the failure. The hazard quotient for single event effects reached 46.3, which was correlated to high energetic protons produced during solar flares, very danger in the red at the time of the failure. The results thus imply that the single event effect is quite probably the reason that caused the GEO-X satellite anomaly on 9 March 2012.

Key words Satellite anomaly, Internal charging, Surface charging, Single event effects, Hazard quotient, Spacecraft Environmental Anomalies Expert System for Geosynchronous Orbit (SEAES-GEO)

0 引言

随着卫星在各领域的广泛应用, 卫星数量不断增加, 星载高性能新型微电子器件的应用使得空间环境诱发故障的可能性增加, 复杂多变的空间天气严重威胁到卫星在轨安全运行 [1]. 美国 JPL 实验室对 GOES-4, 5, 6, 7 卫星在轨的 195 次异常事件统计结果表明, 诱发这些异常的主要因素是单粒子翻转 (30.8%) 和静电放电 (47.7%)[2]. Cluster 卫星在 2000 年 8 月至 2005 年 3 月共发生卫星故障 131 次, 其中有 86 例 (65.6%) 卫星故障与空间环境密切相关, 在这 86 例与空间环境相关的故障中, 表面充电引起的故障占 43% (37 例), 单粒子效应引起的故障占 36% (31 例), 内部充电引起的故障占 21% (18 例)[3]. 单粒子效应、卫星表面充电和内部充电是诱发卫星在轨异常的主要因素 [4−5].

2010−2012 年间, 中国 10 颗地球同步轨道卫星共发生与空间环境相关的故障 46 次, 这些在轨故障均得到有效纠正, 并没有影响卫星的长期任务和使用寿命, 但分析这些故障和空间环境的相关性对于提高和完善卫星设计水平具有重要意义. 46 次卫星故障中, 发生于 2012 年 3 月 9 日 02:50 UTC 的某地球同步轨道卫星 (以下用 GEO-X 代替) 测控应答机故障案例最为典型, 该次卫星故障期间, SkyTerra-1, Venus Express, Spaceway 3 等 [6−7] 卫星均出现不同程度的异常. 在排除工程问题的前提下, 考虑卫星故障时的位置和空间天气状态, 初步诊断空间天气是引起 GEO-X 卫星异常的主要原因.

由于 GEO-X 卫星没有搭载空间环境探测器, 无法获得该卫星轨道高度的高能电子通量实况, 因此这里选取与该卫星位置接近的 GOES-15 卫星 (位于 135°W) 数据来作为卫星故障分析的数据源. 利用 GEO-X 卫星故障记录, GOES-15 卫星探测的粒子数据和 X 射线数据, SDO, SOHO, STEREO卫星影像数据以及国际地磁台网提供的地磁数据, 对 GEO-X 卫星在 2012 年 3 月 9 日故障期间的空间天气特点进行分析, 采用 O'Brien[8] 提出的空间环境引起地球同步轨道卫星异常专家系统 (Spacecraft Environmental Anomalies Expert System for Geosynchronous Orbit, SEAES-GEO) 对本次卫星故障期间的内部充电危险系数 Z_{IC}、单粒子效应危险系数 Z_{SEE} 以及表面充电危险系数 Z_{SC} 进行计算, 并给出了 GEO-X 卫星故障原因.

1 GEO-X 卫星故障期间空间天气特点

GEO-X 卫星故障前, 11429 活动区于 2012 年 3 月 5 日 02:30 UTC 爆发了一次 X1.1 级耀斑, 同时伴随一全晕日冕物质抛射事件 (CME), 该全晕 CME 两天后到达地球空间, 引发 2012 年 3 月 7 日的一次中等强度地磁暴. 2012 年 3 月 7 日 00:02 UTC 时活动区 11429 再次产生一次 X5.4 级耀斑, 并伴随一朝向地球的 CME. 太阳风暴在短短数十分钟后影响地球

空间, 造成地球同步轨道能量大于 10 MeV 的高能质子通量达到强质子事件水平; 2012 年 3 月 8—9 日, 受 7 日的 CME 影响, 地球空间出现一次大磁暴事件. 上述系列空间天气事件引起中国 MEO 和 GEO 两颗卫星以及国外 SkyTerra-1, Venus Express 和 Spaceway 3 等卫星出现异常.

1.1　太阳活动情况

引发本次过程的活动区编号为 11429, 在第一次太阳活动爆发时 (见图 1a), 活动区正接近日面中央偏东北侧边缘 (17°N, 52°E), 第二次太阳活动爆发时 (见图 1b), 活动区已经处于日面东北侧 (17°N, 27°E); 两次活动爆发时活动区磁类型比较复杂, 分别为 β-γ 和 β-γ-δ 型; 黑子面积比较大, 且第二次爆发的黑子面积较第一次增长迅速, 表 1 给出了活动区 11429 在 2012 年 3 月 5 日和 7 日两次太阳爆发当日的一些特征参量对比. 从美国空间环境预报中心 (SWPC) 提供的活动区记录来看, 11429 区表现特别活跃, 先后爆发了 14 次 M 级耀斑和 2 次 X 级耀斑, 2 次 X 级耀斑分别为 5 日的 X1.1 级耀斑和 7 日的 X5.4 级耀斑.

如图 2 和图 3 所示, 两次太阳爆发活动均伴随日面强烈的 CME 喷发. 2012 年 3 月 5 日爆发的全

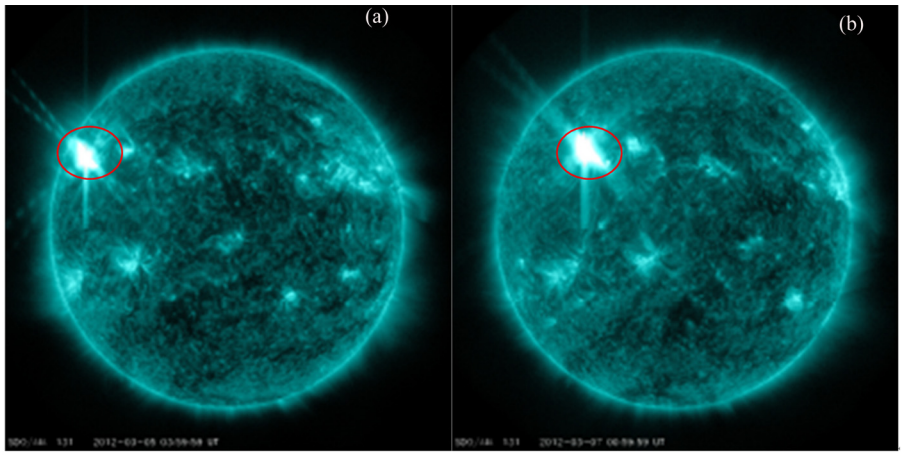


图 1　SDO 卫星观测的两次太阳爆发当日极紫外成像

Fig. 1　Solar observations from the SDO satellite on 5 and 7 March 2012

表 1　活动区 11429 在 2 次太阳爆发当日的特征

Table 1　Characteristics of Region 11429 on 5 and 7 March 2012

时间 (UTC)	位置	黑子面积	群分类	黑子数	磁类型
5 日 02:30	17°N, 52°E	770	Dkc	20	β-γ
7 日 00:02	17°N, 27°E	1270	Dkc	28	β-γ-δ

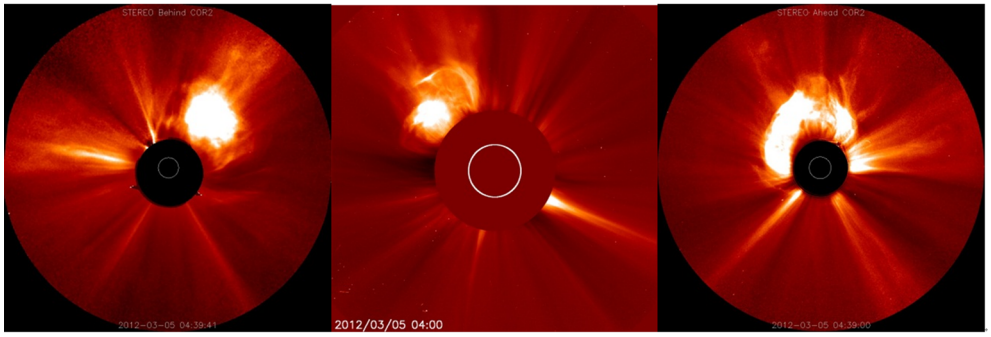


图 2　2012 年 3 月 5 日 STEREO 和 SOHO 卫星观测到的 CME 爆发

Fig. 2　CME observed by the STEREO and SOHO satellites on 5 March 2012

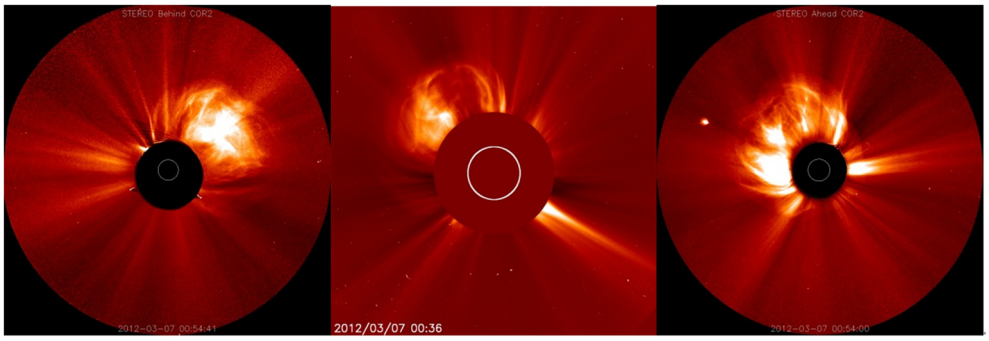


图 3 2012 年 3 月 7 日 STEREO 和 SOHO 卫星观测到的 CME 爆发

Fig. 3 CME observed by the STEREO and SOHO satellites on 7 March 2012

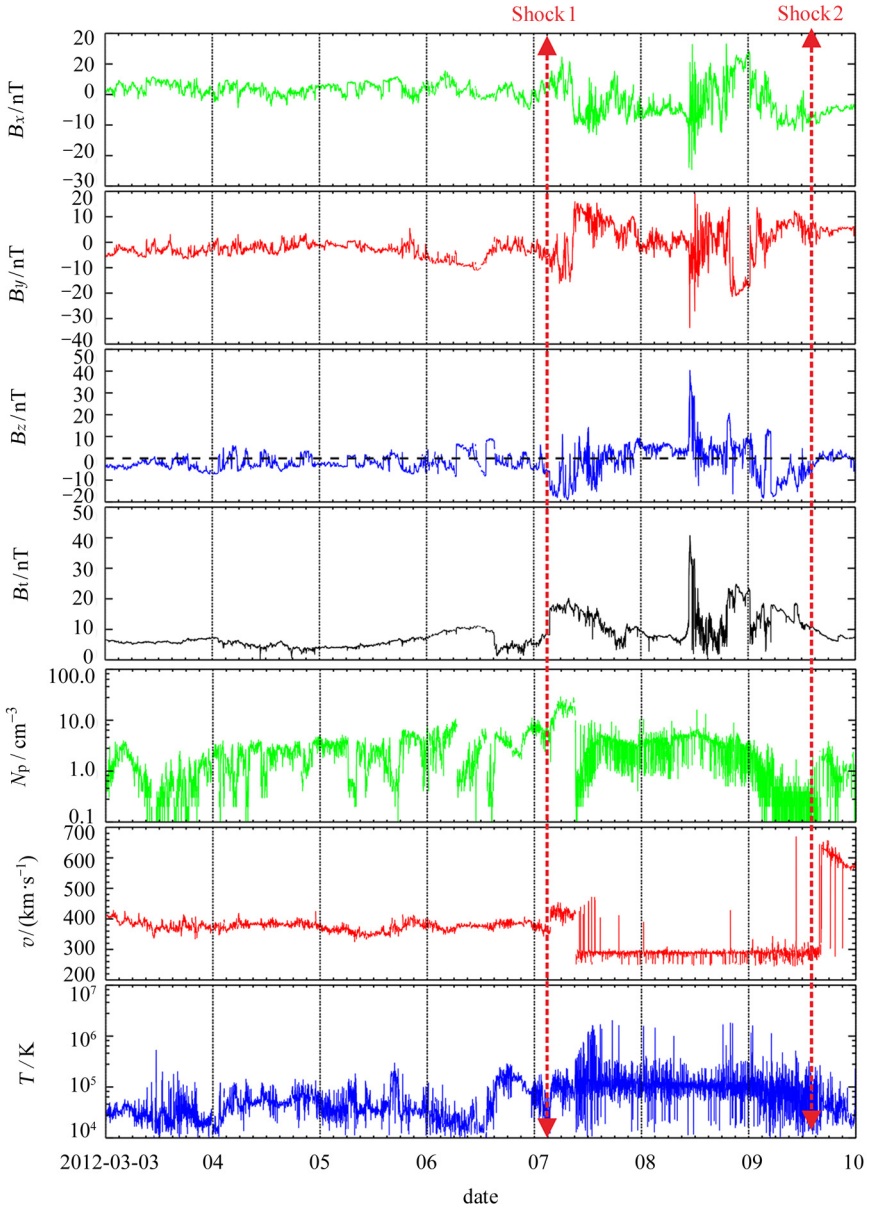


图 4 ACE 卫星行星际参量变化情况

Fig. 4 Solar wind and interplanetary magnetic field observed by ACE from 3 to 10 in March 2012

晕 CME 以约 1531 km·s^{-1} (SWPC 提供) 的速度朝向地球空间传播, 7 日爆发的 CME 速度约为 2684 km·s^{-1}, SWPC 预测这两次 CME 事件分别于 7 日和 9 日影响到地球空间, 并发布了地磁暴警报.

1.2 行星际空间情况

上述两次 CME 影响行星际空间的过程如图 4 所示, 2012 年 3 月 5 日爆发的 CME 经行星际空间传播后, 于 7 日 03:34 UTC 到达地球空间, 并形成较明显的激波结构 (见图 4 中 Shock 1). 从图 4 可以明显看出, 行星际总磁场强度 B_t 由 8.1 nT 跃升至 15.6 nT; 磁场分量 B_z 由 −5.9 nT 下降至 −11.8 nT, 并维持在 −10 nT 以下长达两个多小时, 最小值达到 −18.1 nT; 太阳风速度由 380 km·s^{-1} 跃升至 450 km·s^{-1}. 7 日爆发的 CME 经行星际空间传播后, 于 9 日 16:19 UTC 到达地球空间, 如图 4 中 Shock 2 所示, 行星际磁场分量 B_z 继续维持南向, 太阳风速度出现了一个较明显的急始, 速度由 300 km·s^{-1} 上升至 619 km·s^{-1}. 按照磁重联理论, 行星际南向磁场与地球磁场发生相互作用, 将 CME 能量注入地球空间, 将产生一定的地磁效应.

1.3 地球空间情况

如图 5(a) (b) 所示, 2012 年 3 月 5 日 02:30 UTC

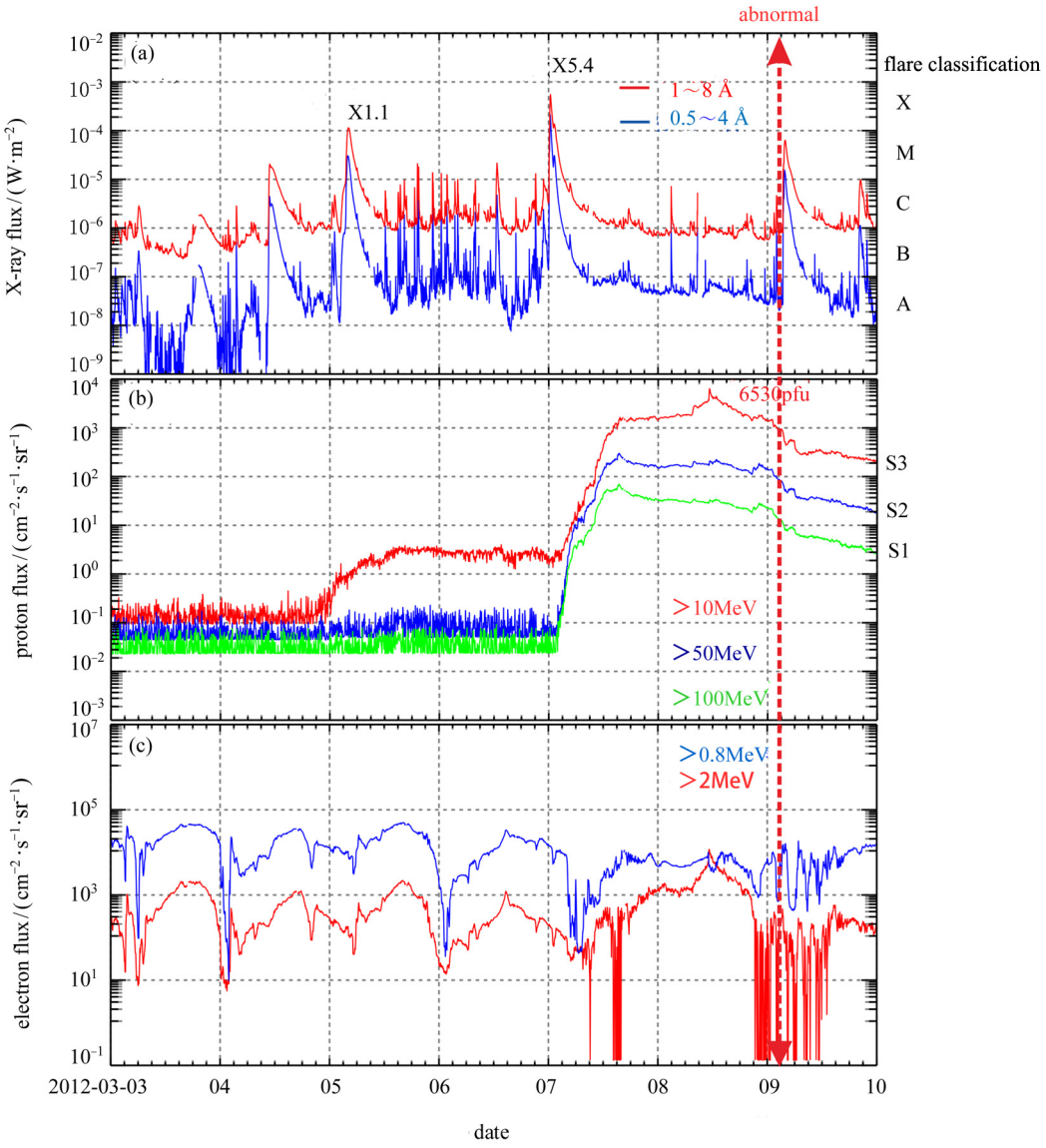


图 5 GEO-X 卫星故障期间 GOES-15 卫星测量的 X 射线流量 (a) 以及高能质子 (b) 和高能电子 (c) 通量

Fig. 5 Solar X-ray flux (a), proton flux (b) and electron flux (c) observed by GOES-15 near the time interval of GEO-X failure

爆发的 X1.1 级耀斑在短短数十分钟内影响到地球空间, 地球同步轨道能量大于 10 MeV 的高能质子通量开始上升, 但此次上升没有达到质子事件级别. 7 日 00:02 UTC 爆发的 X5.4 级耀斑加速了地球同步轨道能量大于 10 MeV 的高能质子通量的跃升, 04:30 UTC 达到小质子事件水平 (S1 级), 10:10 UTC 达到中等质子事件水平 (S2 级), 14:05 UTC 达到强质子事件水平 (S3 级), 8 日 11:15 UTC 达到峰值 6530 pfu, 质子事件持续期间, 大于 50 MeV 和大于 100 MeV 的高能质子通量水平也有明显增加, 本次事件是第 24 太阳活动周开始以来的最强太阳质子事件 *. 13 日受新一轮太阳风暴影响, 高能质子通量再次上升, 这次上升对 GEO-X 卫星两次故障没有影响, 这里不进行分析. 如图 5(c) 所示, GOES 卫星电子通量数据表明, 地球同步轨道能量大于 2 MeV 的高能电子通量基本维持在 $10^3\,\mathrm{cm^{-2}\cdot s^{-1}\cdot sr^{-1}}$ 以下, 未达到高能电子暴水平.

第一次太阳风暴出现的 CME 经过两天左右的传播, 产生了如图 6 所示的对地效应, 造成 2012 年 3 月 7 日的中磁暴事件 ($Dst_{\min} = -85$ nT, $Kp = 6$). 第二次太阳风暴产生的 CME 同样经过两天左右的传播, 造成 9 日的大地磁暴事件 ($Dst_{\min} = -143$ nT, $Kp = 8$).

2 利用 SEAES-GEO 分析 GEO-X 卫星故障原因

O'Brien[8] 在 2009 年提出一种分析空间环境引起地球同步轨道卫星异常的方法, 并形成了完整的专

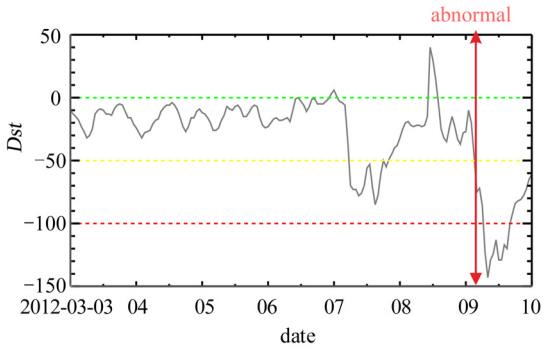


图 6 2012 年 3 月 3 日至 10 日的 *Dst* 指数变化

Fig. 6 *Dst* index from 3 to 10 in March 2012

家系统 SEAES-GEO, 该系统已被美国 NGDC 作为评估地球同步轨道卫星异常的一种常用方法. 利用 SEAES-GEO 专家系统理论可以计算地球同步轨道卫星发生内部充电、单粒子效应及表面充电等的危险系数 (Hazard Quotient, 定义符号 Z). 危险系数定义为当前卫星异常可能率与卫星平均异常率之比. SEAES-GEO 专家系统给出了内部充电危险系数 Z_{IC} 和单粒子效应危险系数 Z_{SEE} 的计算理论. 根据 SEAES-GEO 理论, 内部充电危险系数为

$$Z_{\mathrm{IC}} = \frac{Q_{\mathrm{flux}}(e)^{\gamma}}{a}. \tag{1}$$

其中, $a = 1815$, $\gamma = 0.97$, $Q_{\mathrm{flux}}(e)$ 为 GOES-10 探测的 > 2 MeV 电子通量在某时刻点之前 12 h 的平均值. 单粒子效应危险系数为

$$Z_{\mathrm{SEE}} = \frac{Q_{\mathrm{flux}}(p)^{\gamma}}{a}. \tag{2}$$

其中, $a = 4.67$, $\gamma = 1$, $Q_{\mathrm{flux}}(p)$ 为 GOES 卫星探测的对应时刻点 > 30 MeV 的质子通量.

根据 SEAES-GEO 专家系统理论, 表面充电危险系数 Z_{SC} 和地磁 Kp 指数以及卫星发生故障的地方时 T 具有很好的相关性, SEAES-GEO 专家系统给出了不同 Kp 指数和不同地方时条件下 Z_{SC} 的具体数值, 即 Z_{SC}-Kp-T 的相互关系表 [8].

GEO-X 卫星故障时刻, GOES-10 卫星已停止工作, 因此这里将 GOES-15 卫星探测的 > 30 MeV 的质子和 > 2 MeV 的电子通量作为式 (1) 和式 (2) 的输入, 根据式 (1) 和式 (2) 以及 Z_{SC}-Kp-T 关系表, 可以得到在 GEO-X 卫星故障前后内部充电危险系数 Z_{IC}、单粒子效应危险系数 Z_{SEE} 以及表面充电危险系数 Z_{SC} 随时间的变化情况, 结果如图 7(b) 和图 7(d) 所示. 类似 NOAA/SWPC 将 Kp 指数按照数值大小划分到绿色–黄色–红色三个等级的定义规范 (见图 7c), O'Brien 对危险系数 Z_{IC}, Z_{SEE}, Z_{SC} 也进行了色标划分, 用于表征危害等级, 其中绿色表示危害程度小, 黄色表示有一定危害, 红色表示有极大危害. 具体划分标准为, 绿色, $Z_{\mathrm{IC}} < 2.99$, $Z_{\mathrm{SEE}} < 0.054$, $Z_{\mathrm{SC}} < 2.5$; 黄色, $2.99 < Z_{\mathrm{IC}} < 6.31$, $0.054 < Z_{\mathrm{SEE}} < 0.328$, $2.5 < Z_{\mathrm{SC}} < 3.55$; 红色, $Z_{\mathrm{IC}} > 6.31$, $Z_{\mathrm{SEE}} > 0.328$, $Z_{\mathrm{SC}} > 3.55$, 从而得到如图 7(e) 所示的 2012 年 3 月 3—10 日期间的危险系数颜色分布.

*http://www.swpc.noaa.gov/ftpdir/indices/SPE.txt

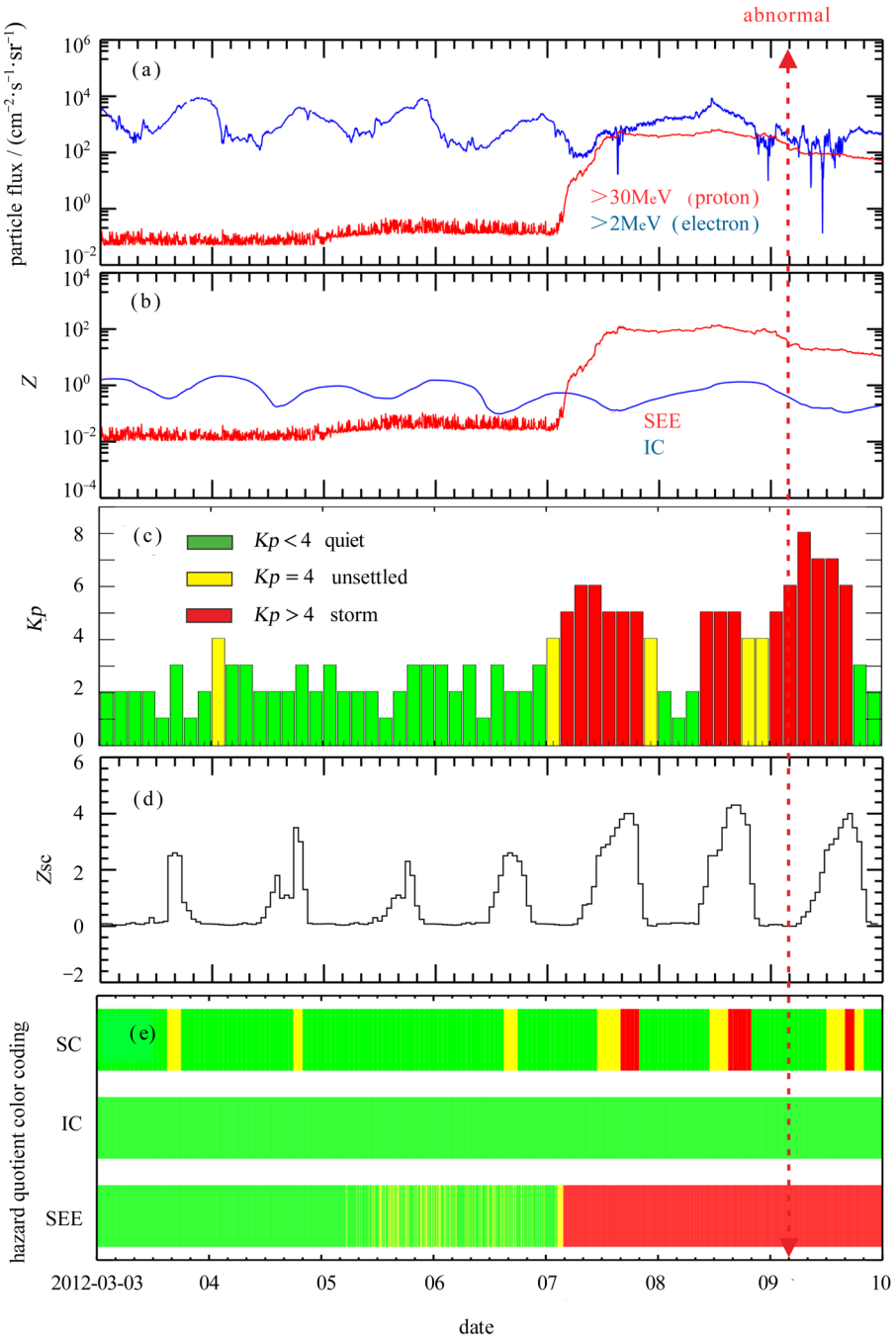


图 7　GEO-X 卫星故障期间的内部充电危险系数 Z_{IC}、单粒子效应危险系数 Z_{SEE}、表面充电危险系数 Z_{SC} 变化曲线和危险等级

Fig. 7　Internal charging hazard quotient (Z_{IC}), the single event effects hazard quotient (Z_{SEE}), the surface charging hazard quotient (Z_{SC})and the red-yellow-blue color coding from 3 to 10 in March 2012

从图 7 可以看出, 2012 年 3 月 3−10 日期间, 地球同步轨道能量 > 2 MeV 的电子通量基本维持在 $10^3\,\mathrm{cm^{-2}\cdot s^{-1}\cdot sr^{-1}}$ 以下, 未达到高能电子暴水平, 计算得到的内部充电危险系数 $Z_{\mathrm{SC}} < 3$, 危险等级属于绿色. 因此认为内部充电不是造成本次卫星故障的主要原因.

2012 年 3 月 7—10 日地球空间爆发地磁暴, Kp 指数最大值达到 8, 在此期间 $Z_{\rm SC}$ 出现如下 3 次峰值.

(1) 7 日 16:00 UTC—19:00 UTC (对应地方时约为 8 日 02:00—05:00), $Kp=5$, $Z_{\rm SC}$ 最大值达到 4.0, 表面充电危险等级第一次进入红色区域并维持 4 h.

(2) 8 日 15:00 UTC—19:00 UTC (对应地方时约为 9 日 01:00—05:00), $Kp=5$, $Z_{\rm SC}$ 最大值达到 4.3, 表面充电危险等级第二次进入红色区域并维持 5 h.

(3) 9 日 16:00 UTC—17:00 UTC (对应地方时约为 10 日 02:00—03:00), $Kp=6$, $Z_{\rm SC}$ 最大值达到 4.0, 表面充电危险等级第三次进入红色区域并维持 3 h.

$Z_{\rm SC}$ 三次峰值均出现在地方时凌晨, 并伴随中等磁暴, 满足 Choi[9] 和 Ferguson[10] 等给出的最易发生表面充电的条件, 本文计算得到的 $Z_{\rm SC}$ 和表面充电危险等级也预示在三个峰值阶段, 卫星易遭受到表面充电危害, 这一结果与多颗卫星的观测结果一致 [11−13]. 在 Kp 指数达到最大值 8 时, 卫星在 3 月 9 日 16:00 LT—18:00 LT 时, 从 $Z_{\rm SC}$-Kp-T 关系表查得该时间段内最大 $Z_{\rm SC}$ 仅为 0.51, 属于危险等级中的绿色区域. 表明当卫星处于地方时的非午夜至凌晨时间段, 即使 Kp 指数较高, 卫星表面充电危险系数依然较小, 造成这种现象的原因是地球同步轨道热等离子体是从等离子体片向夜侧和黎明侧输运的. GEO-X 卫星故障时刻 (见图 7 红色竖线) 为 2012 年 3 月 9 日 11:46 LT), $Kp=5$, 根据 $Z_{\rm SC}$-Kp-T 关系表, 可以查出故障时刻 $Z_{\rm SC}=0.0011$, 表面充电危险系数非常低. 因此认为, 表面充电不是造成本次卫星故障的主要原因.

受 X5.4 级耀斑影响, 卫星故障前的 3 月 7 日 03:35 UTC, 地球同步轨道能量 >30 MeV 的高能质子通量急速上升, $Z_{\rm SEE}$ 从 0.0343 上至 0.0687 后跃升至 120, 并长时间维持在 10^0~10^2 之间. 相应地, 单粒子效应危险等级从绿色转变为短时黄色后迅速进入红色阶段, 本次卫星故障时刻 $Z_{\rm SEE}=46.3$, 正好处于单粒子效应危险等级的红色阶段. 因此, 单粒子效应可能是造成本次卫星故障的主要原因.

3 结论

基于 GOES-15 卫星探测数据和国际地磁台网地磁活动数据, 结合 SDO, SOHO, STEREO 卫星影像数据以及地磁指数数据, 对发生于 2012 年 3 月 9 日 02:50 UTC 的某地球同步轨道卫星异常原因进行了探讨, 分析故障发生期间的空间天气特点, 采用 O'Brien[8] 提出的 SEAES-GEO 空间环境引起地球同步轨道卫星异常的专家系统对本次卫星故障期间的内部充电危险系数 $Z_{\rm IC}$、单粒子效应危险系数 $Z_{\rm SEE}$ 以及表面充电危险系数 $Z_{\rm SC}$ 进行定量计算和危险等级划分, 给出了 GEO-X 卫星故障的可能原因, 主要结论如下.

(1) GEO-X 卫星故障期间, 地球同步轨道能量 >2 MeV 的电子通量基本维持在 $10^3\,{\rm cm^{-2}\cdot s^{-1}\cdot sr^{-1}}$ 以下, 内部充电危险系数 $Z_{\rm IC}<3$, 内部充电危险等级为绿色. 因此, 内部充电不是造成本次卫星故障的主要原因.

(2) GEO-X 卫星故障期间, 地球空间爆发地磁暴, 在此期间 $Z_{\rm SC}$ 出现 3 次峰值, 且峰值均出现在地方时凌晨时段, 相应表面充电危险等级 3 次进入红色区域, 但 GEO-X 卫星故障并没有发生在这 3 个高危险的时间段. GEO-X 卫星故障时刻, 虽然地磁暴仍在持续 ($Kp=5$), 但由于发生故障时卫星正处于地方时正午时分, $Z_{\rm SC}$ 仅为 0.0011, 表面充电危险等级为绿色, 表面充电造成本次卫星故障的可能性非常低.

(3) GEO-X 卫星故障期间, 地球空间爆发长时间的质子事件, 在 GEO-X 卫星故障时刻甚至达到了 S3 级质子事件水平, 为 24 太阳活动周以来的最强质子事件. 受质子事件影响, 单粒子效应危险系数持续维持在 1 以上, 危险等级从 7 日进入红色阶段, 长时间威胁卫星在轨安全. GEO-X 卫星故障时刻 $Z_{\rm SEE}=46.3$, 正好处于单粒子效应危险等级的红色阶段. 因此, 单粒子效应可能是造成本次卫星故障的主要原因.

致谢 GOES-15, SDO 和和 SOHO 卫星探测资料由美国空间环境预报中心 (SWPC) 提供, 地磁指数数据由世界资料中心日本京都大学地磁中心网站提供.

参考文献

[1] Bedingfield K L, Leach R D, Alexander M B. Spacecraft System Failures and Anomalies Attributed to the Natural Space Environment [M]. Huntsville: National Aeronautics and Space Administration, Marshall Space Flight Center, 1996

[2] Xue Yuxiong, Yang Shengsheng, Ba Dedong, *et al.* Anal-

ysis of spacecraft system failures and anomalies attributed to the natural space radiation environment [J]. *Vacc. Cryog.*, 2012, **18**(2):63-70. In Chinese (薛玉雄, 杨生胜, 把得东, 等. 空间辐射环境诱发航天器故障或异常分析 [J]. 真空与低温, 2012, **18**(2):63-70)

[3] Mike Paniccia. Cluster Space Weather Anomalies [OL] [2014-12-15]. http://lasp.colorado.edu/media/education/reu/2007/docs/slides/paniccia-slides.pdf

[4] Love D P, Toomb D S, Wilkinson D C, *et al*. Penetrating electron fluctuations associated with GEO spacecraft anomalies [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2000, **28**(6): 2075-2084

[5] Reno Harboe-Sørensen. 40 years of radiation single event effects at the European Space Agency, ESTEC [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2013, **60**(3):1816-1823

[6] Ferguson D C. Sources of Satellite Anomalies and Effects and their Mitigation [R]. Boulder: Colo. Satellite Anomaly Mitigation Stakeholders Meeting, 2012

[7] Horne R B, Glauert S A, Meredith N P, *et al*. Space weather impacts on satellites and forecasting the Earth's electron radiation belts with SPACECAST [J]. *Space Weather,* 2013, **11**(4):169-186

[8] O'Brien T P. SEAES-GEO: A spacecraft environmental anomalies expert system for geosynchronous orbit [J]. *Space Weather*, 2009, **7**, 509003, doi10.1029/2009SW-000473

[9] Choi H S, Lee J, Cho K S, *et al*. Analysis of GEO spacecraft anomalies: Space weather relationships [J]. Space Weather, 2011, **9**(6):506001, doi1029/ 2010SW000-597

[10] Ferguson D C, Denig W F, Rodriguez J V. Plasma conditions during the Galaxy 15 anomaly and the possibility of ESD from subsurface charging[C]//Proceedings of the 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Orlando, Florida: AIAA, 2011:4-7

[11] Spence H E, Blake J B, Fennell J F. Surface charging analysis of high-inclination, high-altitude spacecraft: Identification and physics of the plasma source region [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1993, **40**(6):1521-1524

[12] Koons H C, Fennell J F, Hall D F. A summary of the engineering results from the aerospace corp. Experiments on the SCATHA Spacecraft [C]//Proceeding of the 6th Spacecraft Charging Conference. Hanscom AFB, MA, USA: AFRL Science Center, 1998, 243-249

[13] Fennell J F, Roeder J L, Berg G A, *et al*. HEO satellite frame and differential charging and SCATHA low-level frame charging [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2008, **36**(5):2271-2279