

空间天气事件对航天器的影响

呼延奇 蔡震波

(中国空间技术研究院总体部, 北京 100094)

摘要: 航天器在太空中运行, 将不可避免地受到空间天气的影响, 而太阳爆发性活动是引发空间天气变化的源头。从2008年10月起, 太阳开始进入第24太阳活动周, 预计于2013—2014年到达太阳活动峰年, 伴随着太阳活动水平会明显加强, 存在发生强空间天气事件的可能性。从航天器工程的角度, 介绍了太阳活动的基本规律, 分析了太阳活动峰年期间的空间环境基本特征, 并阐述了空间天气事件对航天器产生影响的机理与过程, 以期对即将到来的第24太阳活动周峰年对航天器可能产生的影响有一个较为全面和客观的认识。

关键词: 空间天气, 太阳活动峰年, 航天器

Influences of Space Weather Events on the Spacecraft

Hu Yanqi, Cai Zhenbo

(Institute of Spacecraft System Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100094)

Abstract: The spacecraft orbiting in space will be affected by space weather inevitably, while the solar explosive event is the source of space weather variations. From October 2008 on, the sun enters solar cycle 24. It is predicted that the solar maximum will arrive in 2013—2014, while the solar activity will be enhanced significantly and severe space weather events may occur. In view of spacecraft engineering, this paper introduces the common principle of the solar activity and the basic characteristics of space environment during the solar maximum, and then describes the mechanism and process of space weather events having an effect on the spacecraft, in order to comprehensively and objectively understand the possible influence of the upcoming 24th solar maximum on the spacecraft.

Key words: space weather, solar maximum, spacecraft

航天器在太空中运行, 将不可避免地受到空间天气的影响, 而太阳爆发性活动是引发空间天气变化的源头。从2008年10月起, 太阳开始进入第24太阳活动周。目前国内外空间物理学界的预测表明, 太阳将于2013—2014年到达第24太阳活动周峰年, 期间太阳活动水平会明显增强, 存在发生大规模太阳爆发性活动的可能性, 其引发的近地空间环境扰动事件称为空间天气事件。自从1957年首颗人造航天器升空以来, 航天活动已经经历了第19周至第23周共五个太阳活动周, 在每个太阳活动周尤其在太阳活动峰年期间, 均不同程度地出现过强空间天气事件引发航天器异常甚至失效的事例。

本文从航天器工程的角度, 介绍了太阳活动的基本规律, 分析了太阳活动峰年期间地球空间环境的基本特征, 阐述了空间天气事件对航天器产生影响的机理与过程, 以期对即将到来的太阳活动峰年对航天器可能产生的影响有一个客观和全面的认识。

1 太阳活动峰年地球空间环境基本特征

1.1 太阳活动周

太阳活动是指太阳外观和输出能量的各种变化过

程。太阳爆发性活动的发生频率取决于太阳活动水平, 长期的科学观测表明, 太阳活动水平存在被称为“太阳活动周”的周期性变化。太阳活动周通常以太阳表面黑子数量的周期性变化为标志, 其平均周期为11.2年, 具体每个太阳活动周的长度可能为9~13年不等。太阳活动周期从太阳活动水平较低时开始计算, 一般分为上升期、极大期、下降期和极小期。开始的4年左右为上升期, 黑子不断在太阳表面产生, 数量越来越多, 太阳表面发生的爆发性活动加剧, 平均黑子数达到极大值的一年, 称为太阳活动峰年或太阳活动极大年; 在随后的7年左右时间里, 日面爆发性活动逐渐减弱, 黑子数量也越来越少, 平均黑子数极小的一年, 称为太阳活动谷年或太阳活动极小年。国际上规定, 第一个太阳活动周从1755年开始, 然后顺序排列。

1957年首颗人造地球卫星上天时, 正处于第19太阳活动周, 而现在第23太阳活动周已经结束, 太阳于2008年10月开始进入第24太阳活动周。空间物理学界预测, 2013—2014年将达到第24太阳活动周的峰年。图1为实际观测记录的第1~23太阳活动周的年均黑子数, 黑子数最大值对应的年份是太阳活动峰年, 黑子数最小值对应的年份为太阳活动谷年。

收稿日期: 2011年10月10日; 修回日期: 2011年11月12日
第一作者: 呼延奇(1982—), Email: yqhu@spaceweather.ac.cn

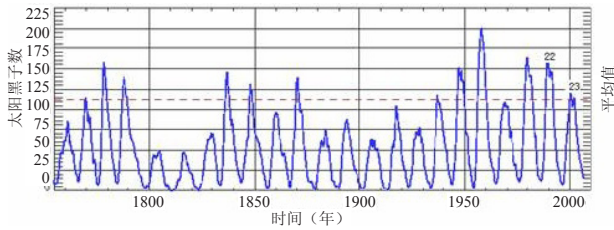


图1 第1~23太阳活动周黑子数实际观测结果

1.2 第24太阳活动周强度预测

据美国国家大气海洋局(NOAA)预测,新的太阳活动峰年将在2013年下半年至2014年上半年出现,NASA马歇尔飞行中心最新发布的预测结果显示(图2),第24太阳活动周年均黑子数峰值为70左右,是近五个太阳活动周中最低的。

虽然从目前的预测结果看,第24太阳活动周太阳活动水平不会太强,但也不能掉以轻心。这是因为,从历史观测记录看,具体某一次空间天气事件的强度与其所处太阳活动周的强度(用太阳黑子数表征)关联性不大。例如,历史上有记录的最强空间天气事件——1859年9月“卡林顿”事件,发生于第10太阳活动周峰年附近,第10太阳活动周年均黑子数峰值为100左右;而有记录以来的最强太阳活动周是第19太阳活动周,年均黑子数峰值(1959年前后)达到200。具体某一次空间天气事件的强度主要取决于太阳爆发源区(即太阳表面的活动区,通常就是黑子群出现的位置)的局部磁场结构和能量释放机制。

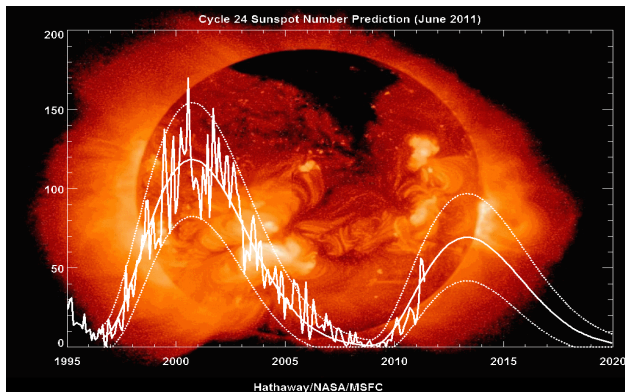


图2 NASA于2011年6月发布的24太阳活动周黑子数预测(图片来自http://www.nasa.gov)

1.3 太阳峰年期间地球空间环境基本特征

1.3.1 空间天气事件规模和频率增加

图3给出了航天活动经历过的第19~23太阳活动周期间发生的太阳质子事件质子积分通量与月均黑子数的关系。可以看出,规模较大的太阳质子事件(质子通量高)多出现在太阳活动水平较高的时期(太阳黑子数较多),太阳质子事件的强度和出现的次数与太阳活动周期存在明显的相关性。

不过,需要指出的是,太阳爆发具有突发性的特点,其引发的大规模空间天气事件并非只在太阳活动

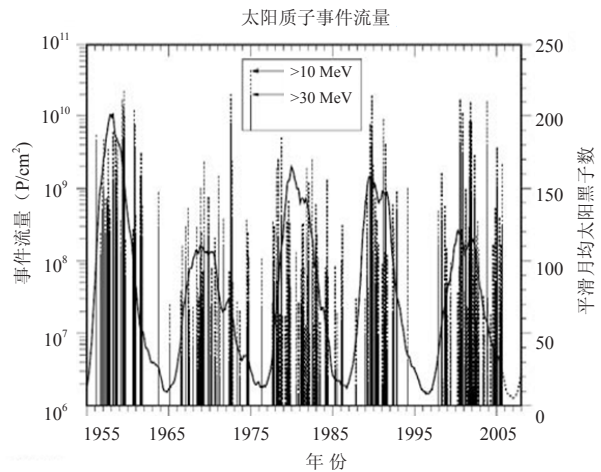


图3 第19~23太阳活动周发生的太阳质子事件与太阳黑子数关系^[1]

峰年才会出现,在太阳活动周的上升期和下降期甚至太阳活动谷年,也存在发生大规模空间天气事件的可能,典型的如1994年1月导致加拿大通信卫星Anik E1/E2等多颗卫星在轨异常的空间天气事件,就发生在第22太阳活动周谷年附近。但一般地,太阳活动谷年出现大的空间天气事件的可能性很低,在刚刚过去的第23太阳活动周的太阳活动谷年(1995—1996年)的两年期间,没有出现过一次大的空间天气事件。

1.3.2 地球空间辐射环境强度有升有降

太阳活动水平除了决定太阳爆发性活动的频次以外,还对地球空间辐射环境存在显著的调制作用,太阳活动峰年和谷年期间地球空间辐射环境具体差异见表1。

太阳活动峰年期间,并非所有环境要素都增强,某些空间辐射环境要素(如银河宇宙线和捕获质子通量)在太阳活动峰年反而减弱,与太阳活动水平呈负相关的关系。

表1 太阳活动峰年与谷年地球空间辐射环境差异

	捕获质子 通量	捕获电子 通量	太阳耀斑质 子通量	银河宇宙线 通量
峰年	↓	↑	↑	↓
谷年	↑	↓	↓	↑

1.3.3 太阳爆发喷射的物质在日地空间传播存在方向性

带电粒子在行星际空间中传播时受太阳磁场的调制作用,太阳磁场在黄道面内基本呈阿基米德螺线状。太阳爆发喷射的物质在行星际空间传播时存在方向性,并非所有太阳爆发性活动产生的高能粒子及等离子体云(日冕物质抛射,CME)均能到达近地空间。事实上,许多朝太阳背面喷发的CME在地球空间是观测不到的,而卫星监测数据也显示位于太阳西半球的太阳爆发性活动产生的粒子更容易到达地球空

间, 进而对地球空间航天器造成影响。

2 空间天气事件影响航天器的机理和过程

空间天气事件的源头是日面发生的剧烈爆发活动, 它主要以光和粒子的形式释放能量, 具体可分为三种, 一是太阳电磁辐射突然增强, 即“光”的增强; 二是喷射大量的高能带电粒子流; 三是抛射高速等离子体云, 即CME。这三类物质和能量形式到达地球附近时, 会引起近地空间中的粒子环境和电磁辐射环境发生剧烈变化, 它们与航天器上的元器件及材料发生多种复杂的相互作用, 通过引发电离总剂量效应、位移效应、单粒子效应、表面充放电效应、内带电效应、大气阻力、电离层扰动等方式, 对航天器产生影响与危害。图4为空间天气事件影响近地空间环境的示意图。

2.1 空间天气事件产生的典型危害

2.1.1 电离总剂量效应

空间带电粒子与航天器上采用的元器件和材料发生撞击时, 可通过电离作用将部分甚至全部能量传递给元器件和材料, 使其性能发生变化, 这就是所谓的“电离总剂量效应”。

随着接受剂量的增加, 电子元器件、材料和电路的性能将会发生漂移, 功能出现衰退。当累积剂量超过元器件或材料所能承受的最大剂量时, 其性能就会被损坏或完全失效, 从而对在轨航天器造成严重威胁。

2.1.2 位移效应

高能粒子与材料的相互作用过程中除了通过电离相互作用交换能量外, 还可以通过非电离相互作用交换能量, 即产生非电离能量损失, 简称非电离能损。非电离能量损失是高能粒子与原子核的相互作用, 产生原子的移位, 通常称为位移效应。

受位移效应影响最大的主要是利用少数载流子工作的器件, 例如双极结型晶体管、太阳电池、电荷耦

合器件 (CCD) 和光电耦合器等。位移效应会造成电子器件的信噪比变差, 输出信号衰减等。强空间天气事件期间, 航天器轨道上的高能质子通量显著增加, 将引起星上相机、星敏感器等成像载荷的成像质量严重下降, 甚至出现短时无法成像、卫星姿态数据不可用等问题。高能带电粒子会对太阳电池造成持续的损伤, 导致太阳电池的输出功率下降, 甚至有可能使太阳电池在任务后期不能满足航天器能源需求。

2.1.3 单粒子效应

单个的空间高能质子或重离子轰击航天器上的微电子器件时, 在其运动路径上通过电离作用产生大量的电子空穴对, 这些电子空穴在器件内部重新分布后, 有时会造成数据错误、电路功能混乱甚至计算机系统瘫痪, 引发卫星在轨异常和故障, 这种由单个高能粒子引发的微电子器件突发异常就是所谓的单粒子效应。

2.1.4 表面充放电效应

航天器表面带电是指沉浸在等离子体环境中的航天器不断地受到带电粒子的撞击, 能量在千电子伏特量级的电子停留在航天器表面, 结果导致航天器表面相对于周围空间呈现负的电位, 由于航天器表面各部位的电导率、设计状态和工况不同, 将出现不等量充电, 使得航天器各部位之间出现电位差。当航天器的表面带电超过一定阈值时, 就会产生静电放电, 干扰航天器的正常运行甚至造成损伤。

2.1.5 内带电效应

当出现大的地磁扰动事件时, 大量的高能电子可注入到地球同步轨道甚至高度较低的轨道, 使得地球辐射带中能量大于1兆电子伏特的电子通量大幅增加。这些电子可直接穿透航天器的蒙皮 (包括外层导电表面和绝缘材料等)、航天器结构和仪器设备外壳, 沉积在航天器内部的电路板、导线绝缘层等深层绝缘介质中, 导致绝缘介质如电路板、同轴电缆等深层处的电荷堆积, 造成介质深层带电, 也就是所谓的内带电效应。

2.1.6 大气阻力

空间天气事件期间, 太阳紫外辐射的增强和地磁暴引发的高能粒子沿磁力线注入极区会加热地球大气层, 使得地球大气层外扩, 导致高层大气密度增加。

大气密度随着高度的增加而迅速减小, 几百千米以上的高层大气密度已经非常稀薄, 但对于高速运动 (7~8km/s) 的航天器而言, 大气阻力仍然是不可忽视的。大气阻力导致航天器轨道衰减, 如果没有足够的燃料来维持轨道, 航天器轨道

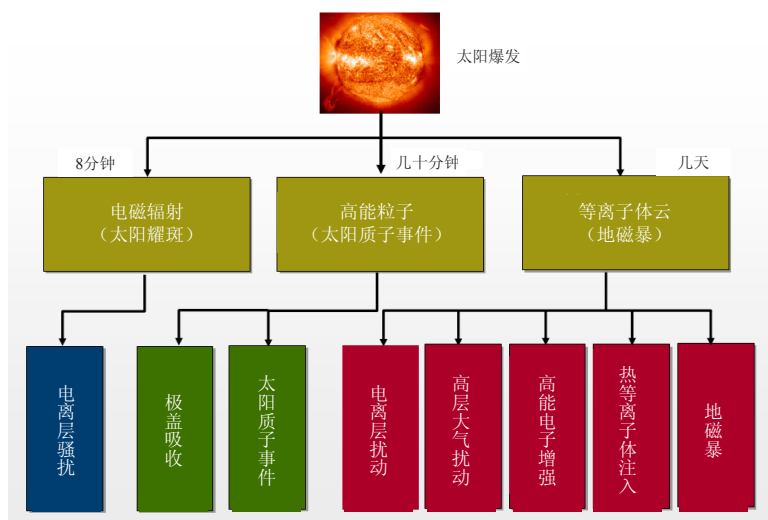


图4 空间天气事件对地球空间环境的影响

高度会大幅衰减，航天器甚至可能提前陨落。

2.1.7 电离层扰动

空间天气事件期间，强紫外辐射将使电离层电子密度突然增加，产生大量电离层不均匀体，诱发电离层闪烁。闪烁发生时，信号起伏的峰值在1dB到20多个dB范围内，持续时间从几分钟到数小时，对通信信号产生干扰，严重时导致信号中断。

电离层暴将影响卫星通信质量，由于诱发的电子密度剧烈涨落，电离层对电磁信号的折射误差将大大增加，从而降低定位精度。电离层暴对卫星导航系统的影响主要表现在电离层暴造成的较大电离层延迟梯度变化将影响卫星区域增强系统中的差分技术实现，进而影响卫星导航系统的完好性实现。

2.2 空间天气事件影响航天器的过程

太阳爆发期间，其引发的空间天气事件对航天器产生影响的过程与机理，可用图5进行概括。其中，需要强调的是：

不同轨道上的卫星，其影响具有共性，也存在差别。如：对于高轨卫星，可能面临热等离子体引发的表面充放电效应、高能电子引发内带电效应的影响，而对于低轨卫星此类影响可以忽略；对于低轨卫星，可能面临大气加热导致的大气密度增加、原子氧密度增加等效应，而高轨卫星则不会遇到此类效应。

图5中所述的各种影响，只在卫星防护设计有缺陷，或不到位，或环境强度超过卫星防护设计容限之时，才有可能发生。换言之，这些影响一定是在2个

前提条件同时满足时才可能发生，即“环境前提”和“设计前提”，二者缺一不可，抛开防护设计状态到位与否只考虑环境变化，或者抛开环境变化而只考虑防护设计缺陷，以此来讨论卫星是否受到太阳爆发的影响，均不足以客观说明问题。

3 空间天气事件引发航天器异常实例

自1957年人类发射首颗人造航天器以来，航天活动经历了第19~23个完整的太阳活动周，其间尤其在太阳活动峰年附近，发生过数次大的空间天气事件，其中一些事件对在轨卫星产生了严重影响。典型事例有：

3.1 1989年3月空间天气事件

1989年位于第22太阳活动周峰年，1989年3月，太阳表面爆发了较大规模的CME事件，并引发了特大地磁暴，对多颗卫星^[2]产生了严重影响，具体见表2。

3.2 1989年10月特大太阳耀斑事件

1989年10月特大太阳耀斑是第22太阳活动周峰年的代表性极端事件，事件发生后，近20颗卫星发生在轨异常，其中美国GOES-7卫星的太阳电池阵输出电流严重衰减^[3]，相当于7年多的预期电流衰减量（即寿命减少7年），具体结果见图6。

3.3 1994年1月特大CME事件

1994年1月20日太阳表面爆发特大CME事件，该CME到达地球空间后导致加拿大通信卫星Anik-E1陀螺制导系统发生故障，卫星姿态失控，开始自旋，采取启动备份措施8小时后恢复，中断通信服务8小时，

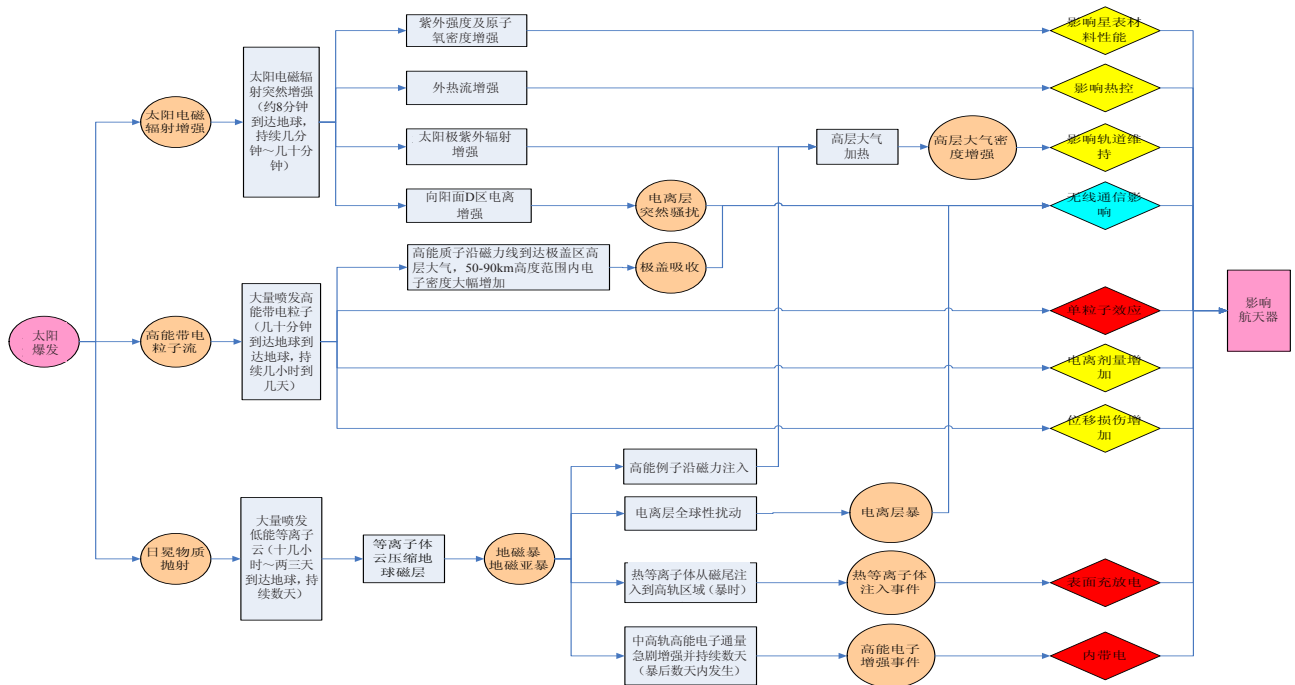


图5 空间天气事件对航天器产生影响的基本过程

表2 1989年3月太阳事件引起的部分卫星故障

卫星名称	影响
GOES-7 (美国地球环境业务卫星)	3月12日通信线路异常, 丢失气象图片。
CS-JB (日本地球同步轨道卫星)	3月17日世界时10:50, 指令系统永久损伤, 启动备份系统。
MARECS-1 (欧空局地球同步轨道卫星)	3月2日、17日、29日多次发生了“开关事件”。
GMS-3B (日本地球同步轨道气象卫星)	3月22日, 世界时12时、14时, 遥测信号出现强烈扰动, 丢失一小时数据。
TDRS-D (跟踪与数据中继卫星)	从“发现号”航天飞机上发射后, 在大椭圆轨道运行和在同步轨道的前几天内, 姿态遭遇严重问题。
DMSP/NOAA (美国极轨气象卫星)	因地球磁场发生了巨大变化, 使磁力矩卸载发生困难。
TIROS (美国极轨气象卫星)	强磁暴期间, 姿控飞轮转速达到设计极限值, 紧急启用备份系统才把姿态控制住, 如强磁暴再持续24小时, 姿态将失控。
1988-24A (中国实用通信卫星)	3月9日, A、B、C、D四台转发器增益同时跳档, 由原4分贝跳变为2分贝, 增益档的遥测值均为“0”。
SMM (美国太阳峰年卫星)	轨道高度下降了3英里。

陀螺制导系统主份永久性损坏。Anik-E1失控2小时后, Anik-E2发生同样异常, 卫星业务全部中断, 启动备份7个月后恢复正常, 陀螺制导系统主份永久性损坏。几乎与Anik-E1和Anik-E2卫星出现在轨异常的同时, 美国Intelsat-K卫星也发生了类似的异常现象。经近两年的研究, 确认此次事件是CME引发的高能电子暴, 导致卫星内部充电进而引发静电放电(内带电效应)造成的。

3.4 2003年10月底“万圣节事件”

2003年10月底至11月初的“万圣节事件”期间, 太阳表面至少发生了6次X级耀斑(属于特大耀斑), 造成GEO轨道高能质子通量突然增加4个数量级并持续约10天, 引发多颗卫星^[4]出现疑似单粒子事件造成的异常。较大规模的太阳质子事件(尤其是极端事件)期间, 对在轨航天器的正常工作可产生较严重的

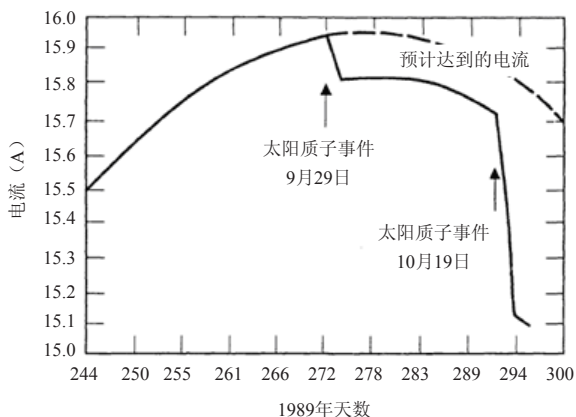


图6 GOES-7卫星太阳电池损伤

影响。一次事件, 可能会同时影响多个卫星。太阳质子事件对卫星的影响, 不局限于某个特定轨道, 而是对各种类型轨道航天器均可造成影响。

3.5 2010年4月5日“清明节事件”

2010年4月5日发生了自2008年10月以来最强烈的地磁暴(“清明节事件”), 地磁Kp指数达到7, Dst指数超过-70nT; 此次事件期间没有观测到太阳质子事件; 之前发生的太阳耀斑为B7.4级, 持续时间1小时54分; 伴随一次CME事件, 太阳风速达到750km/s。

此次事件导致美国Galaxy-15卫星在轨出现异常并失控, 卫星不能接收上行测控信号, 目前该卫星已被宣布为“僵尸卫星”。针对此次卫星故障, 负责该卫星运营的美国轨道公司目前尚未就故障原因给出明确结论, 但初步分析显示Galaxy-15卫星故障可能与“清明节事件”存在关联性。

4 小结

第24太阳活动周峰年预计于2013—2014年到来, 伴随着空间天气事件发生的强度和频率会显著增加, 但总体来看, 第24太阳活动周与航天活动已经经历过的第19~23太阳活动周一样, 是太阳活动规律性的正常表现。

在航天活动经历过的五个太阳活动周内, 尤其是在太阳活动峰年附近, 确实出现过强空间天气事件引发在轨航天器故障甚至失效的事例。随着第24太阳活动周峰年的到来, 空间天气事件的强度和极端事件出现的可能性会显著增加, 其引发的近地空间环境扰动可通过不同的机制与航天器上的元器件和材料、电子系统发生耦合, 进而引发各种空间环境效应, 如果航天器自身的空间环境防护设计不到位或存在设计缺陷, 在遭遇强空间天气事件时, 可能会引发航天器故障甚至造成个别航天器失效。

为增强航天器对恶劣空间天气的适应性, 有必要从元器件及材料选取、系统设计等不同层面采取必要的防护措施, 并严格控制各项设计措施的落实, 同时还亟需提升对空间天气的监测和预警能力。

参考文献

- [1] Reedy R C. Solar-proton event-integrated fluences during the current solar cycle. 37th Annual Lunar and Planetary Science Conference, Abstract NO. 1419, 2006.
- [2] Bedingfield K L, Leach R D, Alexander M B. Spacecraft system failures and anomalies attributed to the natural space environment. NASA Reference Publication 1390, 1994.
- [3] Marvin D C, Gorney D J. Solar proton events of 1989: effects on spacecraft solar arrays. Aerospace Report TR-0091(6945-01)-2, 1992.
- [4] NOAA. Halloween space weather storms of 2003. NOAA Technical Memorandum OAR SEC-88, 2004.