

# 低轨道卫星表面电位探测器探测数据分析

田天<sup>1,2</sup>, 常峥<sup>3</sup>, 孙凌峰<sup>2</sup>, 张根生<sup>2</sup>, 杨晓华<sup>4</sup>, 高泽<sup>2</sup>

(1.国防科技大学 气象海洋学院,长沙 410073; 2.61741 部队,北京 100094;  
3.中国科学院国家空间科学中心,北京 100190; 4.31010 部队,北京 100081)

**摘要:** 目的 了解太阳活动低年低轨道卫星表面充电的特征规律,为今后低轨道卫星表面充电的防护设计提供参考。方法 利用我国一颗低轨道卫星搭载的表面电位探测器数据,对探测到的2017—2019年的78次表面充电事件进行统计分析。重点研究78次事件的充电时长、电位峰值、时空分布等特征以及事件与地磁活动的关系。结果 在太阳活动低年,83.3%表面充电事件持续时间不超过1 min,80.7%表面充电事件的充电峰值绝对值不超过100 V;97.4%的事件出现在南半球高纬度地区;88.5%的事件发生在磁地方时的18至02时之间;当表面充电事件发生率不为0时,事件发生率和 $K_p$ 指数的相关系数为0.97。结论 在太阳活动低年,表面充电事件的持续时间较短,并且强度不大。表面充电事件发生位置具有明显的南北不对称性,呈现南多北少的趋势。表面充电事件多发生于高纬度地区,在磁地方时的傍晚至午夜发生概率高。表面充电事件发生率和地磁活动具有较好的相关性。

**关键词:** 低轨道卫星; 太阳活动低年; 表面充电; 峰值强度; 充电位置; 磁地方时效应; 地磁活动

**中图分类号:** V524 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2021)04-0115-07

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2021.04.017

## Analysis of Data from Surfacing Charging Detector on Board a LEO Satellite

TIAN Tian<sup>1,2</sup>, CHANG Zheng<sup>3</sup>, SUN Ling-feng<sup>2</sup>, ZHANG Gen-sheng<sup>2</sup>, YANG Xiao-hua<sup>4</sup>, GAO Ze<sup>2</sup>

(1. College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;  
2. Unit 61741, Beijing 100094, China; 3. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100190, China; 4. Unit 31010, Beijing 100081, China)

**ABSTRACT:** In order to understand the characteristics of the surface charging of LEO satellites in solar minimum years, and provide reference for the protection and design of the surface charging of LEO satellites in the future. Based on the data of the surface charge detection carried by a LEO satellite in China, this paper studied 78 surface charge events from 2017 to 2019. The characteristics of charging duration, voltage peak, temporal and spatial distribution of 78 events, and the relationship between events and geomagnetic index were studied. The study found that 83.3% of the surface charging events lasted less than 1 min, and 80.7% of the surface charging events had an absolute peak charging value less than 100 V; 97.4% of the events occurred in the high latitudes of the southern hemisphere; 88.5% of the events occurred between 18–02 MLT; When the incidence rate of

收稿日期: 2020-03-02; 修订日期: 2020-04-23

Received: 2020-03-02; Revised: 2020-04-23

作者简介: 田天(1982—),女,博士,工程师,主要研究方向为空间环境预报。

**Biography:** TIAN Tian (1982—), Female, Ph. D. Engineer, Research focus: space environment forecast.

通讯作者: 常峥(1979—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为空间环境效应。

**Corresponding author:** CHANG Zheng (1979—), Male, Ph. D. Senior engineer, Research focus: space environmental effects.

引文格式: 田天,常峥,孙凌峰,等.低轨道卫星表面电位探测器探测数据分析[J].装备环境工程,2021,18(4):115-121.

IAN Tian, CHANG Zheng, SUN Ling-fen, et al. Analysis of data from surfacing charging detector on board a LEO satellite[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(4): 115-121.

surface charging events is not 0, the correlation coefficient between the event incidence rate and the K<sub>p</sub> index is 0.97. The results showed that in solar minimum years, the duration of surface charging events is short and the intensity is low. The location of the surface charging event has obvious north-south asymmetry, showing a trend of more in the south and less in the north. Surface charging events occur frequently in high latitudes, and the probability of occurrence is high from dusk to midnight in magnetic local time. The incidence of surface charging events has a good correlation with geomagnetic activity (as measured by the K<sub>p</sub> index).

**KEY WORDS:** LEO satellites; solar minimum year; surface charging; peak strength; charging location; magnetic local time effect; geomagnetic activity

低地球轨道 (Low Earth Orbit, LEO) 是气象卫星、载人飞船、航天飞机、空间站等航天器的主要运行轨道, 近年来低地球轨道环境对航天器的影响成为研究热点。低地球轨道航天器运行在距地面 70~3000 km 高度的电离层内, 在该区域内, 受太阳辐射、宇宙射线等作用, 部分气体分子电离成电子、正离子和负离子。当航天器在这些稠密的带电粒子中飞行时, 空间中的低能带电粒子沉积在航天器表面, 导致航天器表面具有充电效应<sup>[1-3]</sup>。航天器表面充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, 能量为千电子伏量级的电子停留在航天器表面, 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, 将出现不等量带电, 使航天器各部位之间出现电位差的现象<sup>[4]</sup>。低地球轨道 (LEO) 航天器在飞行过程中容易在表面积累带电粒子, 使表面电位升高, 产生放电现象, 对航天器造成危害。

近 10 年来, 我国卫星设计单位和卫星在轨运控部门逐渐认识到了空间环境扰动会影响卫星在轨安全, 因此越来越多的卫星开始搭载空间环境探测仪器, 并开始了国内卫星异常与空间环境间的深入研究<sup>[5-7]</sup>。在我国发射的一颗运行于太阳同步晨昏轨道的卫星上, 搭载了表面电位探测器, 能够实时获取低轨道卫星表面的电位数据, 为航天器故障分析和运行安全保障提供监测信息。

目前, 卫星运行了一段时间, 积累了完整的 2017—2019 年第 24 太阳活动周低年表面电位数据。文中将对这些数据进行研究, 深入了解低轨道卫星表面充放电事件发生的充电时长、充电峰值、磁地方时分布、位置分布以及与地磁指数的关系, 为今后同类卫星进行表面充电的防护提供参考。

## 1 表面充电事件选取

卫星表面充电电位的高低与众多空间天气因素有关。运行在电离层中的低轨卫星, 遇到的电离层等离子体能量较低, 通常只有几电子伏, 在没有其

他高温等离子体出现时, 卫星表面充电电位在负几伏以下。在极区, 常有能量在几千电子伏左右的带电粒子沿磁力线沉降到低地球轨道, 并对卫星充电, 然而电离层大量低能电子对卫星的充电, 足以平衡沉降粒子的充电过程, 从而抑制卫星表面电位上升。在地磁场扰动时, 沉降粒子的出现, 可使卫星充到高电位<sup>[8]</sup>。

O'Brien 等人<sup>[9]</sup>认为当探测到的电位小于 -100 V 时, 就有可能引起表面充电。由于 2017—2019 年为第 24 太阳活动周极低年, 太阳活动水平极低, 缺少日地空间爆发性活动的驱动, 表面充电发生概率相对较低。为了选取足够的充电事件样本, 认为探测到的电位小于 -50 V 时, 即可定义为一个充电事件, 以此来研究太阳活动低年时卫星表面充电事件的特征规律。具体来说, 文中选取的充电事件需要满足以下 3 个条件: 连续 3 个探测点的数据 < 0 V, 表示表面充电事件开始; 连续 3 个探测点的数据 > 0 V, 表示表面充电事件结束; 充电峰值电位 < -50 V。

按照确定的上述规则, 在 2017 年 1 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日逾 3 年的探测期间, 表面电位探测器共监测到 78 次较强的充电事件。

在所有的 78 次充电事件中, 发生在世界时 2017 年 8 月 20 日 03 时 29 分 55 秒 (峰值时间) 的充电事件, 是监测到的持续时间最长, 并且充电强度最大的一次事件, 具体充电过程如图 1a 所示。该事件持续了 190.048 s, 充电峰值达到了 -235.74 V, 充电峰值时刻卫星位于地理西经 16.94°, 南纬 78.39°, 星下点时间为 2 时 22 分 10 秒, 磁地方时为 0 时 42 分 44 秒, 卫星运行在磁地方时的傍晚至午夜扇区, 该时间段最易发生表面充电事件<sup>[10]</sup>。该事件发生前后对应的地磁活动情况如图 1b 所示, 实线为 AE 指数的变化曲线, 垂直虚线为充电事件峰值对应时刻。事件发生期间, 地球空间爆发了较长时间的小磁暴, 代表全球地磁活动水平的 K<sub>p</sub> 指数最大值为 5。该磁暴过程包含多个磁亚暴, 极光电激流指数 AE 最大值为 1109。当卫星位于背日面的时候, 强的磁亚暴会导致能量粒子的注入, 提高卫星周围的高能粒子通量, 易引起卫星表面充电事件。

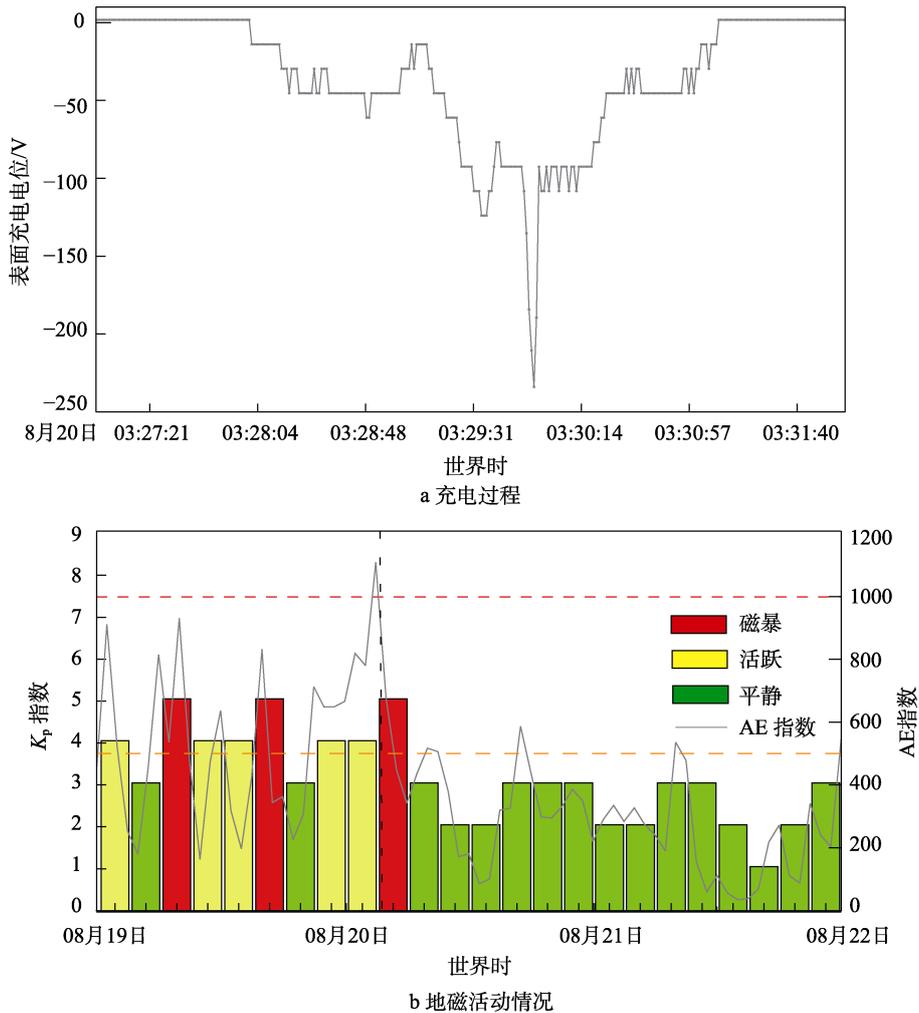


图 1 一次典型的表面充电事件和事件期间的地磁活动情况

Fig.1 A typical surface charge event and geomagnetic activity during the event: a) charging process; b) geomagnetic activity

表面充电事件的持续时间分布结果如图 2 所示。结果表明，在太阳活动低年，卫星表面充电持续时间不长，仅有 13 次事件（16.7%）充放电持续时间超过了 1 min，剩下 65 次事件（83.3%）持续时间都在 1 min 以内，平均充电时间为 38.6 s，最长充电时间为 190.048 s，最短充电时间为 7 s。

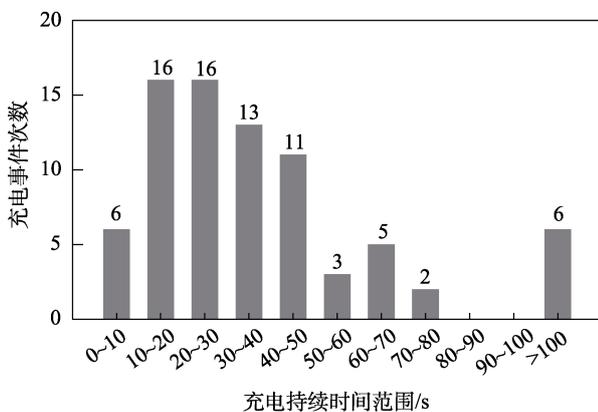


图 2 表面充电事件持续时间分布特征

Fig.2 Distribution characteristics of the duration of surface charging events

78 次表面充电事件的电位峰值分布统计结果如图 3 所示。可以看出，在太阳活动低年，充电事件强度不大，仅有 15 次事件的充电峰值绝对值超过了 100 V，剩余 63 次事件充电峰值绝对值在 100 V 以下。有 40 次事件（51.3%）峰值范围集中在 -60~-70 V。峰值最大的事件发生在 2017 年 8 月 20 日 03 时 29 分 55 秒（峰值时间），最大值绝对值达 235.74 V。

## 2 表面充电事件分析

### 2.1 时空分布特征

2017—2019 年为第 24 太阳活动周极低年，太阳活动水平极低，日地空间处于相对平静状态。为掌握卫星表面充电事件在太阳活动低年的总体特征，对挑选出来的 78 次充电事件的发生时空、季节分布以及与地磁活动的相关性等特征进行了统计分析。78 次表面充电事件随磁地方时（Magnetic Local Time, MLT）和磁纬度（Magnetic Latitude, MLAT）的分布情况如图 4 所示，圆点标注了 78 次充电事件发生的

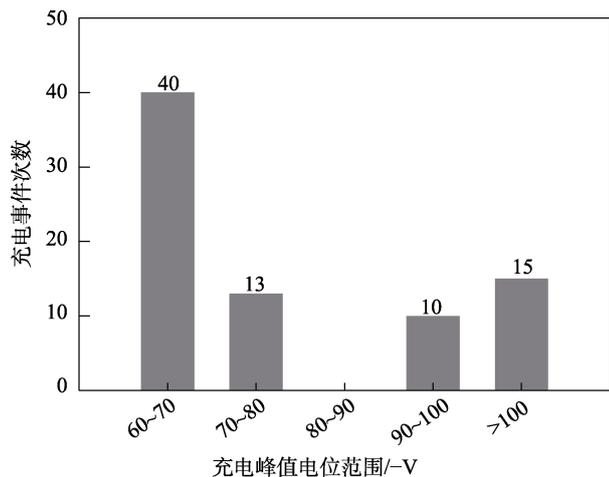


图3 表面充电事件电位峰值分布特征

Fig.3 Distribution characteristics of voltage peak of surface charging events

具体时间和位置。图 4a 是事件在北半球的分布情况，图 4b 是事件在南半球的分布情况，图 4c 是事件在各时间段的发生频次。

由图 4 可以看出，表面充电事件具有明显的磁地方时效应，事件多发生于 18—02 MLT，在该时间段共发生了 69 次充电事件，占比达到 88.5%，在 6—10 MLT 以及 11—17 MLT 之间，没有充电事件发生。表面充电事件还具有明显的南北半球不对称性，呈现南多北少的趋势，其中 76 次事件（97.4%）出现在南半球，仅有 2 次事件出现在北半球，该结果与低轨道 DMSP 卫星监测到的充电事件的分布非常一致<sup>[11]</sup>。除此以外，表面充电事件多发生在高纬度地区，发生在磁纬-65°~80°之间的表面充电事件共计 67 次，占比达到 85.9%。卫星探测到的表面充电事件随磁地方时和磁纬度的分布情况，与 Eriksson 等人<sup>[12]</sup>利用低轨道 DMSP 卫星数据得到表面充电事件的时空分布特征一致。

低轨道卫星表面充电发生频率随时空变化是由太阳光照和环境等离子体密度等共同驱动的，表面电位探测器探测数据显示，在光照区卫星表面受光电子发射影响，表现为带数伏的少量正电，而发生较强的表面充电事件卫星应保持在地球阴影区。文中卫星轨道和 DMSP F13 轨道相似，因此，观测到的表面充电事件发生频率的南北半球不对称性有可能与 DMSP 卫星表面充电事件多发生于南半球的原因相似，是由地球自转轴和卫星轨道面倾角引起的。在北半球冬至，卫星轨道面向太阳倾斜，在南半球冬至，卫星轨道面偏离太阳，致使北半球冬至时电离层受光照程度强于南半球冬至，等离子体密度较高。已有研究表明，较低的环境等离子体密度更有利于表面充电事件的发生<sup>[11]</sup>，因而表面充电事件更易发生在南半球，这就导致了事件发生频率的南北不对称性。

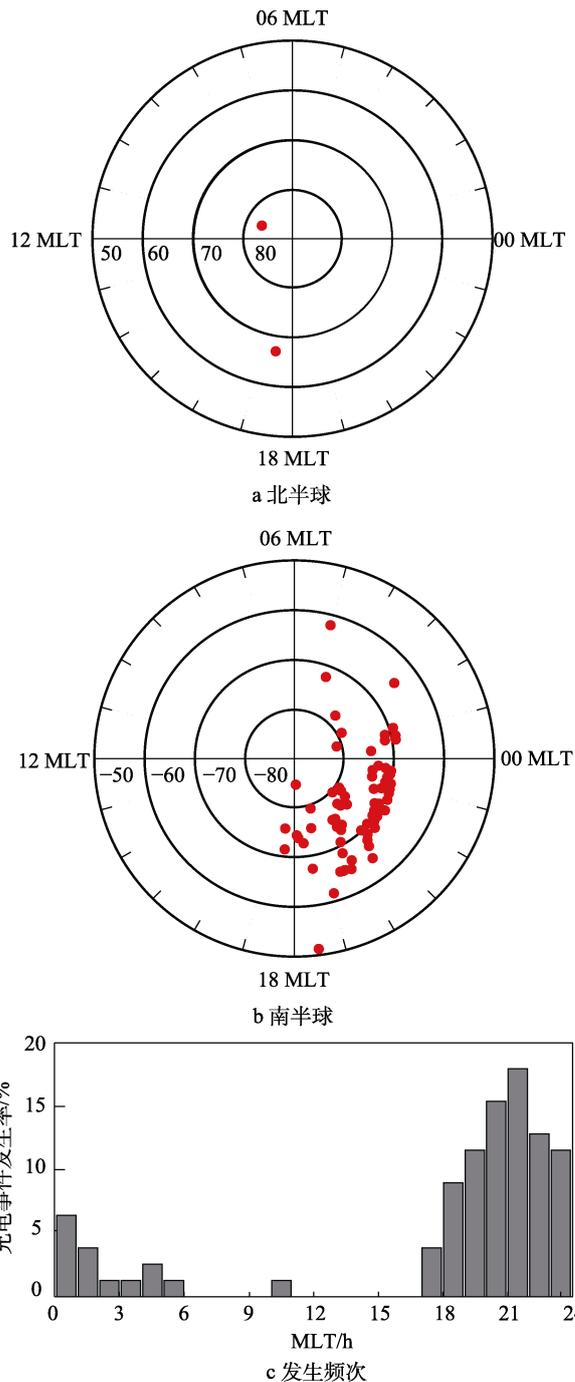


图4 表面充电事件磁地方时和磁纬分布特征

Fig.4 MLT and MLAT distribution characteristics of surface charging events

结合 Newell 等人<sup>[13]</sup>的研究，笔者认为表面充电事件集中在磁纬-65°~80°之间和 18—02 MLT 之间的原因和极光弧的分布有关。极光粒子加速事件的加速能量相对于纬度尺度大小的分布在傍晚/下午区域非常依赖于 MLT，在行星际磁场南向条件下，最大事件的能量范围从 14—16 MLT 时的~600 eV 到 21 MLT 时的>3 keV。下午到午夜之间观测到极光粒子加速事件的可能性最大，午夜之后迅速下降，因此表面充电事件更容易发生在磁高纬地区和磁地方时的

下午至午夜扇区。

78 次表面充电事件年分布特征如图 5a 所示，可以看出，表面充电事件具有明显的季节效应，事件发生高度集中于春夏两季，在 4 月和 8 月的发生概率最高。2017—2019 年，有磁暴发生的天数为 91 天（日  $K_p$  最大值  $\geq 5$ ）。图 5b 所显示的是这 91 天的季节分布特征，可以看出，日  $K_p$  最大值  $\geq 5$  的天数在 3 月和 9 月达到最大值。按照以往的研究<sup>[14-15]</sup>，表面充电事件与地磁活动具有相似的年变化规律，亦多发生于 3 月和 9 月的春分、秋分时期。文中的研究结论与过去的研究并不一致，造成这种不一致的原因与样本数量有关。在 2017—2019 年期间，一天内发生多次表面充电事件的情况基本都集中在 4 月和 8 月，这就造成了 4 月和 8 月发生的充电事件个数要多于 3 月和 9 月。随着卫星长时间在轨运行，更多的观测样本将被获取，未来更多样本的利用，可消除偶尔出现的一天多次表面充电事件对于统计结论的影响。

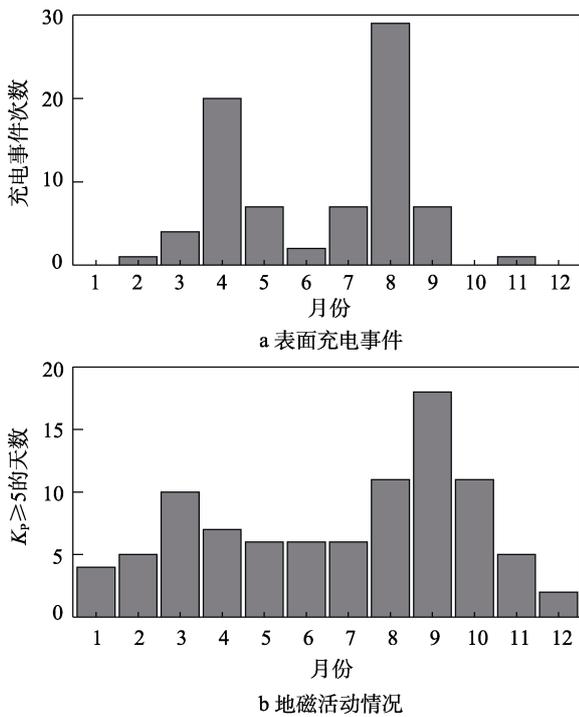


图 5 表面充电事件和地磁活动情况季节分布特征

Fig.5 Seasonal distribution characteristics of surface charge events and geomagnetic activity (a) surface charging events (b) geomagnetic activity

## 2.2 与地磁活动相关性

Spence 等人<sup>[16]</sup>研究了 SCATHA 卫星探测的表面充电特性，发现其与  $K_p$  指数具有很强的相关性。Dorman 等人<sup>[17]</sup>研究了 Kosmos 异常，也发现了类似规律。这些研究结论是否适用于其他卫星，需要进一步利用卫星获取的表面充电事件，研究其与地磁活动的关系，重点研究不同  $K_p$  指数情形下，表面充电事件发生的概率。 $K_p$  指数为 3 h 一个值，文中的日  $K_p$  指数取的是 1 天内 8 个  $K_p$  指数值的最大值，每个  $K_p$  值对应的充电事件发生率为该  $K_p$  指数等级时发生事件数除以该  $K_p$  指数的总天数。

不同  $K_p$  等级发生的充电事件个数和对应的事件发生率见表 1。图 6 中  $K_p$  指数为事件发生当日的最大  $K_p$  值，结果表示了当有事件发生的时候，日最大  $K_p$  值和表面充电事件发生率的关系。由图 6 可以看出，事件发生时，故障发生率随着  $K_p$  指数的增大而增大；当事件发生率不为 0 时，事件发生率和  $K_p$  指数的相关系数为 0.97，二者具有较好的相关性，但充电事件发生率最大值并未超过 0.5。在表 1 中，当  $K_p=8$  时，卫星并没有探测到表面充电事件，这意味着虽然越高的  $K_p$  指数越容易造成更为恶劣的卫星轨道环境，但  $K_p$  指数不是决定卫星是否发生表面充电事件的唯一条件。出现这种情况的原因可以根据 Meng 和 Michael 等人<sup>[18-19]</sup>的研究来解释，他们研究发现，发生较强的表面充电事件需要 3 个条件：卫星应保持在地球阴影区；发生强烈的高能电子沉降事件；局部耗尽的环境等离子体密度  $< 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 。因此，与大磁暴伴随的亚暴虽然能引起高能电子的沉降，但较低的环境等离子体

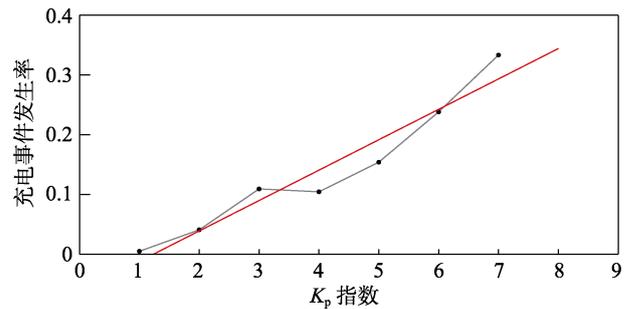


图 6 表面充电事件与  $K_p$  指数的关系

Fig.6 The relationship between surface charging event and  $K_p$  index

表 1 不同  $K_p$  指数等级发生的充电事件个数和对应的事件发生率

Tab.1 Number of charging events and corresponding event rate of different  $K_p$  index levels

	$K_p$ 指数等级									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2017—2019 年日最大 $K_p$ 值对应等级总天数	9	212	345	275	163	65	21	3	2	0
发生事件数	0	1	14	30	17	10	5	1	0	0
事件发生率	0	0.005	0.041	0.109	0.104	0.154	0.238	0.333	0	0

密度和卫星所处的位置对表面充电事件的发生和严重程度也很重要。

### 3 结论

文中利用卫星表面电位探测器数据,对表面充电事件发生的强度、持续时间、时空分布特征以及与地磁活动相关性进行了统计分析,探讨了事件的地磁效应、磁地方时效应、地磁活动效应的可能原因。分析结果表明,在太阳活动低年表面充电事件有以下特征。

1) 表面充电事件的持续时间较短,并且强度不大。83.3%事件持续时间不超过 1 min,最长时间为 190.048 s。80.7%事件充电峰值绝对值不超过 100 V,强度最大的事件其峰值绝对值为 235.74 V。

2) 表面充电事件发生位置具有明显的南北不对称性,呈现南多北少的趋势。其中 76 次事件出现在南半球高纬度地区,仅有 2 次事件出现在北半球高纬度地区。这种不对称性主要是由地球自转轴和卫星轨道面倾角造成的光照效应引起。

3) 表面充电事件多发生于高纬度地区,在磁地方时的傍晚至午夜发生概率高。事件多发生于磁纬  $-65^{\circ}\sim-80^{\circ}$  之间,高度集中于 18—02 MLT 之间。多发生于高纬地区的原因和极光弧的分布有关,而下午到午夜之间极光粒子加速事件的频发则造成了表面充电事件更集中于 18—02 MLT 之间。

4) 表面充电事件发生率和地磁活动具有较好的相关性,当事件发生率不为 0 时,事件发生率和  $K_p$  指数的相关系数为 0.97。但  $K_p$  指数不是决定卫星是否发生表面充电事件的唯一条件。

实际上,表面充电事件的发生是一个很复杂的过程,地磁活动和卫星所处位置仅仅是引起卫星表面充电的众多原因之一。其他空间环境因素诸如等离子体密度、光照条件、低中能电子通量等也是引起表面充电事件的可能原因<sup>[20-21]</sup>。由于星上没有搭载粒子探测器,因此对表面充电和空间环境相关性的进一步研究需要在获取更多空间环境参数的基础上进行。文中的研究结论可为今后低轨道卫星表面充电的防护设计提供参考。

#### 参考文献:

- [1] IUCCI N, LEVITIN A E, BELOV A V, et al. Space weather conditions and spacecraft anomalies in different orbits[J]. *Space weather*, 2005, 3(1): 1-16.
- [2] ANDERSON P C. A survey of surface charging events on the DMSP spacecraft in LEO[J]. *Spacecraft charging technology*, 2001, 476: 331.
- [3] ANDERSON P C, HANSON W B. Spacecraft charging hazards in low earth orbit[C]// *Proceedings of the 9th spacecraft charging technology conference*. Tsukuba: [s. n.], 2005.
- [4] 于登云,蔡震波,卫新国,等. 太阳风暴对航天器的影响与防护[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [5] YU Deng-yun, CAI Zhen-bo, WEI Xin-guo, et al. Influence of solar storm on spacecraft and protection [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [5] TIAN T, ZONG Q G, CHANG Z, et al. Statistical analysis of one chinese sun-synchronous satellite anomalies[J]. *Sci China tech sci*, 2016, 59: 540-546.
- [6] 田天, 吴耀平, 常峥, 等. 2012年3月9日中国某地球同步轨道卫星故障原因分析[J]. *空间科学学报*, 2015, 35(6): 687-695.
- [6] TIAN Tian, WU Yao-ping, CHANG Zheng, et al. Analysis of the Chinese GEO satellite anomaly on 9 March 2012[J]. *China J space sci*, 2015, 35(6): 687-695.
- [7] 常峥, 王咏梅, 田天, 等. 地球同步轨道卫星在轨异常与空间环境相关性分析[J]. *宇航学报*, 2017, 38(4): 435-442.
- [7] CHANG Zheng, WANG Yong-mei, TIAN Tian, et al. Causal analysis between geosynchronous satellite anomalies and space environment[J]. *Journal of astronautics*, 2017, 38(4): 435-442.
- [8] 吴磊, 宋笑婷, 查石祥, 等. 军事空间天气学[M]. 北京: 解放军出版社, 2015.
- [8] WU Lei, SONG Xiao-ting, ZHA Shi-xiang, et al. *Military space weather*[M]. Beijing: PLA Press, 2015.
- [9] O'BRIEN T P. SEAES-GEO: A spacecraft environmental anomalies expert system for geosynchronous orbit[J]. *Space Weather*, 2009(7): 1-14.
- [10] GARRETT H B, WHITTLESEY A C. Spacecraft charging, an update[J]. *IEEE trans plasma sci*, 2000, 28(6): 2017-2028.
- [11] ANDERSON P C. Characteristics of spacecraft charging in low earth orbit[J]. *Journal of geophysical research: space physics*, 2012, 117(A7): 1435-1442.
- [12] ERIKSSON A I, WAHLUND J E. Charging of a conductive spacecraft in the auroral zone[C]// *9th spacecraft charging technology conference*. Tsukuba: Japan Aerospace Exploration Agency, 2005.
- [13] NEWELL P T, LYONS K M, MENG C I. (). A large survey of electron acceleration events[J]. *J geophys res*, 1996, 101(A2): 2599.
- [14] CHOI H S, LEE J, CHO K S, et al. Analysis of GEO spacecraft anomalies: Space weather relationships[J]. *Space weather*, 2011(9): 755-764.
- [15] DORMAN L, TEAM S A. Space weather, cosmic rays, and satellite anomalies[C]// *20th symposium on european rocket and balloon programmes and related research*. Noordwijk: ESA Communications ESTEC, 2011.
- [16] 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 re-

- gion[J]. IEEE transactions on nuclear science, 1993, 40(6): 1521-1524.
- [17] DORMAN L I, BELOV A V, EROSHENKO E A, et al. Different space weather effects in anomalies of the high and low orbital satellites[J]. Advances in space research, 2005, 36(12): 2530-2536.
- [18] MENG Xue-jie, CHEN Dong, SHI Li-qin, et al. Statistical study of surface-charging events in aurora region over one solar cycle[J]. IEEE transactions on plasma science, 2019, 47(8): 3942-3946.
- [19] MICHAEL B. Review of better space weather proxies for spacecraft surface charging[J]. IEEE transactions on plasma science, 2015, 43(9): 3075-3085.
- [20] OZKUL A, LOPATIN A, SHIPP A, et al. Initial correlation results of charge sensor data from six intelsat viii class satellites with other space and ground based measurements[J]. Spacecraft charging technology, 2001, 476: 293-298.
- [21] KOONS H, MAZUR J, LOPATIN A, et al. Spatial and temporal correlation of spacecraft surface charging in geosynchronous orbit[J]. Journal of spacecraft and rockets, 2006, 43(1): 178-185.