

编者按 2003年10月15日,神舟五号飞船发射成功,标志着我国航天技术进入一个崭新的阶段.在“神舟”四号飞船上开展多项空间科学实验取得许多宝贵的资料,为此我们组织了系列文章,介绍在“神舟”四号飞船中进行的空间环境研究、微波遥感、流体物理实验等科研活动.

## “神舟”四号中的空间环境研究\*

叶宗海<sup>†</sup>

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

**摘要** 空间环境,特别是日地空间环境是人类航天活动关系极为密切的环境.文章以“神舟”四号为背景,概要介绍了为“神舟”四号飞船所作的空间环境安全保障服务,包括在“神舟”四号飞船上进行的空间环境探测、空间环境分布及变化规律的研究、空间环境对人类航天活动及“神舟”飞船的影响(空间环境效应),以及为保障“神舟”飞船发射安全、正常运行、顺利返回所作的空间环境预报等.此外,概要评述了国内外上述研究领域的研究现状与进展.

**关键词** “神舟”四号飞船,空间环境探测,空间环境效应,空间环境预报,空间环境保障

### Space environment studies for the SZ-4 spacecraft

YE Zong-Hai<sup>†</sup>

(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** The space environment, especially the solar-terrestrial space environment, has close bearings on mankind's astronomical activities. An overview is presented of the space environment and safeguard services on the "SZ" series of spacecraft, with special reference to the SZ-4 spacecraft. These include monitoring of the space environment on SZ-4, studies on its distribution, variation and effects on astronomical performance, as well as space environment forecasts for safe launching, normal operation and safe return of SZ-4. Current progress both in China and overseas is covered.

**Key words** SZ-4 spacecraft, space environment detection, space environment effects, space environment forecast, space environment safeguard

## 1 引言

空间环境是除陆地、海洋和大气以外人类生存的第四个环境,也是现代战争的“战斗空间”.空间环境中所说的空间通常指地面上几十公里高度以上的广大宇宙区域,它们像人们通常所见到的天空那样,肉眼看起来似乎空无一物,其实空间中充满着各种各样形态的物质,有各种粒子和场,它们既可以是天然的,也可以是人为的:粒子有中性气体、电离气体、等离子体和各种能量的带电粒子,有各种尺度的流星体及空间碎片,场有引力场、电场、磁场和各种波长的电磁辐射,深空中还有小行星、行星及彗星等大尺度“粒子”,这些各种各样形态的物质就构成了

空间环境.它是在人类开展航天活动以及对自己的生存环境不断地深入认识的过程中才认识到的.

当人们扩大自己的活动领域,从陆地走向海洋,走向天空,进入新的活动空间的时候,为了在新的环境中能安全地工作和生活,首要的任务就是了解新的环境,测量海水的深度、绘制海图、掌握各个季节的风向和规律、监测和预报海洋和大气的风暴等,我们的先辈曾经为之付出辛勤的劳动,才使我们今天能够在复杂的大气和海洋环境中自由驰骋.在人们走向空间的时候,这个任务显得更加迫切和重要,这不仅是因

\* 2003-06-23 收到

<sup>†</sup> E-mail: zhye@earth.sepc.ac.cn

为人们对空间环境的了解比对海洋环境和大气环境了解得更少,而且还因为空间环境和人们所熟悉的生活环境之间的差异是如此之大:在空间,没有人们赖以生存的空气,取代它的是难于防护的能量很高的宇宙线和以每秒数十公里的速度袭来的大大小小的流星体,以及只有在空间才能存在的各种能量的等离子体。离开了地球以后,我们失去了大气层的保护,直接曝露在太阳发出的强大的紫外线辐射和X射线之下,于是我们发现一直被我们歌颂着的、作为地球上生命源泉的神圣太阳,也在威胁着我们的生命、破坏各种航天材料。在空间中航天器必须采取必要的防护措施才能保障正常飞行,人必须在特制的人造环境中才能生活。如果我们离开地球再远一些,在我们进一步失去地磁场的保护时,不断从太阳表面吹出来的太阳风和在太阳爆发时发出的高能带电粒子——太阳宇宙线,则更是凶残的杀手。当然,在浩淼无垠的宇宙中我们现今只是涉足了极小极小的一个角落——近地空间,以及为了了解近地空间的变化而需要探索的日地空间。目前与人类尤其是人类航天活动关系密切而又迫切需要了解和掌握的也就是日地空间环境,它是目前空间环境科学研究的主要对象。图1示意的是太阳对地球空间的源作用。



图1 日地空间环境示意图

这里所指的空间环境是近地空间环境,近地空间环境是航天器最多、最活跃的区域。在这一区域,航天器所遭遇的环境有:高层大气、地磁场、地球重力场、高能带电粒子(银河宇宙线、太阳宇宙线、地球辐射带)、空间等离子体(电离层、磁层等离子体、沉降粒子)、太阳电磁辐射、微流星、空间碎片等。这些环境对航天器会产生不同影响,包括航天器的轨道、姿态、温度、辐射损伤、机械损伤、化学损伤、航天器表面充放电、硬软错误、通信和测控的干扰等。

据统计,1971年2月至1986年11月,美国卫星出现的1589次异常事件中,70%与卫星所处的空间环境有关,空间环境直接诱发的异常事件占

16.7%<sup>[1,2]</sup>。1989年3月,太阳上发生了一系列大爆发,曾导致地球上西半球近60次的通讯中断或衰减,其中3月10日发生的一次7.5小时长寿命太阳爆发,伴随有高通量的太阳质子流,产生了长时间的地磁暴。因这一事件导致美国气象卫星一度中断向地面发送云图,导航卫星几天不能正常工作,军事系统跟踪的几千个空间目标近于失踪;由于沉降粒子注入使大气密度增加,低轨卫星受到异常加大的阻力,姿态几乎失去控制,这次事件还破坏了加拿大魁北克的供电网,使其供电中断了9个多小时,造成了近10亿美元的经济损失<sup>[3]</sup>。又如1989年9月29日太阳上发生了X9.8级的大耀斑,产生了高能量的太阳质子事件,使地面上也观测到了宇宙线地面增强事件,即GLE事件。这次事件对空间环境和航天业务造成了极大的影响。由于电离层受到强烈的突然骚扰,使LF、VLF和VHF波段电磁波传播出现较长时间的异常,影响了正常的导航与通讯业务;在巴黎和华盛顿之间飞行的协和式超音速飞机上的辐射监测器,第一次超过了警戒水平;在地球和金星之间飞行的Megellan飞船,在此事件中它的太阳能电池输出降低了5%,许多航天器,包括Megellan飞船在内,都观测到由于大气阻力变化及高能带电粒子引起的单粒子事件等造成的制导、指令和控制功能的极大干扰,有的甚至造成严重的故障<sup>[4]</sup>。

在我国,因受到空间环境影响而导致航天器故障,甚至失效的经验教训也是深刻的。据统计,现已查明我国的通讯卫星(地球同步轨道)由于空间环境引发的故障,占总的卫星故障的40%,这与美国同类卫星的故障发生率相近。出现这些故障的主要原因是由于等离子体对卫星充电和高能带电粒子造成的单粒子事件<sup>[5]</sup>。“风云一号(B)”卫星由于其主控计算机受到高能粒子的辐照影响,多次出现逻辑功能混乱(单粒子事件),使卫星姿态控制系统失去作用,造成卫星失效,从而过早地终结了卫星的应用寿命。根据分析卫星故障,主要是由于内辐射带的高通量质子和重离子、太阳质子事件以及银河宇宙线的重粒子造成的<sup>[6]</sup>。

正因为空间环境是诱发航天器故障的重要因素之一,因此,各航天大国都相应地建立了自己的空间环境研究机构和空间环境安全保障系统,我国在载人航天工程的支持下,建立了空间环境预报与监测分系统,建立了国内初具规模的空间环境预报中心,为“神舟”飞船从方案论证、设计研制、发射与运行,到安全返回等各阶段提供全方位服务,目前我们已

初步具备了对“神舟”飞船的空间环境安全保障的能力。“神舟”四号飞船中的空间环境研究就是直接为“神舟”飞船提供的空间环境安全保障服务的。

## 2 空间环境探测

在人类进入太空之前,对于茫茫宇宙了解得很少,也不可能理解空间发生的许多事情,正是空间探测发现了地球辐射带和磁层,探测了太阳风的特性,可以说空间物理学是在大量空间探测的基础上诞生的。科学的历史清楚地告诉我们,新的探测方法和新颖的探测技术在科学发展的历史中总是带来知识的进步。空间环境科学也不例外,随着航天技术的发展,不但将人和探测器送上了月球,还将探测器送到离地球越来越远的星球,让人们揭开了火星、木星等神秘星球的面纱,使神话、推测变成了科学,通过红外、紫外、可见光和高能电磁辐射波段进行的观测,在人们面前展现了一幅崭新的、壮观的图像。空间科学,包括空间环境科学正是在所有空间探测成果的基础上建立和发展起来的。

在人类的太空活动中,空间环境探测不断向航天技术提出新的要求,是航天技术发展的动力之一。另一方面空间环境探测也为航天活动的安全保障提供了前提。空间环境探测的重要成果是对广阔的空间环境进行了“测绘”,发现了可能影响航天器安全的环境参数,并对它的分布和变化特征进行了测量,预测了各种轨道上航天器将会遇到的空间环境因素。在空间探测的基础上研究了空间环境对航天器可能造成的影响,在航天器发生故障时,空间环境的探测结果可用来推断故障的原因是来自空间环境的干扰,还是技术设计上的原因,进而提出减轻或消除不良影响措施。空间环境是不平静的,航天器在空间还会遇到太阳活动引发的各种“风暴”,这种比平时更加恶劣的环境对航天器和航天员构成严重威胁,监测这种“风暴”并预报它的到来,也是空间环境探测对航天安全可靠保障的重要部分<sup>[7]</sup>。

现代战争已经从陆地、海洋、大气扩展到地球空间,现在空间已经成为兵戎相见的战场,卫星攻击和反攻击、导弹拦截与突防、激光武器、电磁干扰等均已成星球大战中的“矛”与“盾”,空间环境探测已成为军事活动的重要内容。此外,空间环境对通讯、导航、定位以及地面供电系统等都有着重要的影响,需要空间环境探测提供安全可靠的保障依据。

空间环境探测是指对地球高层大气和它以外的宇宙空间各种参数进行的测量,它的空间领域包括

太阳活动、日地空间(包括地球高层大气、电离层、磁层、行星际)、太阳系,以及太阳系以外的宇宙空间。当前所要讨论的空间环境领域只涉及与目前人类活动关系最为密切的日地空间范围。

空间环境探测的内容应包括空间磁场、电场、重力场、电磁辐射、高能带电粒子、空间等离子体、地球高层大气、微流星体等自然空间环境,以及人为造成的空间环境,如空间碎片、航天器诱发的各种污染、核爆炸造成的空间辐射等等。本文主要涉及与航天活动关系较密切、影响较大的空间环境的探测,主要有空间磁场、电磁辐射、高能带电粒子、空间等离子体、高层大气、微流星体和空间碎片等。

为了监视“神舟”飞船的空间环境变化,为“神舟”飞船的空间环境安全保障提供实时数据,在“神舟”飞船上进行了一系列的空间环境探测。在“神舟”二、三号上主要进行了大气密度和大气成分的探测,探测器搭载在飞船轨道舱上,轨道舱以倾角 $42^\circ$ 、高度330—360km左右的准圆轨道上运行。图2是“神舟”飞船绕地球运行的示意图。

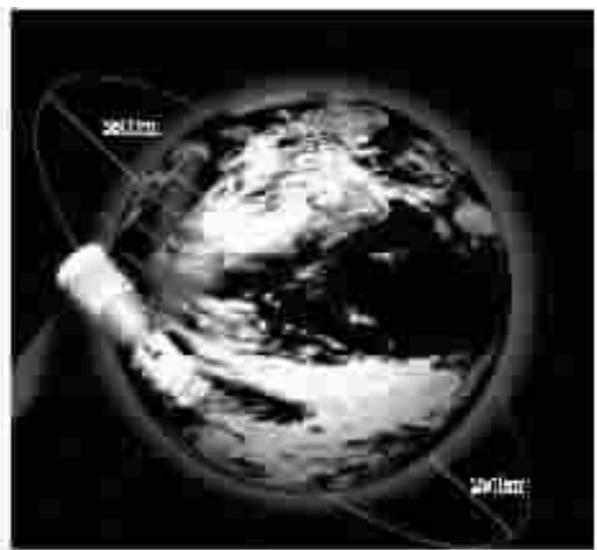


图2 “神舟”飞船运行示意图

“神舟”二、三号在运行期间获得了大量的有关大气密度和大气成分的探测数据,包括大气密度的昼夜变化、随高度的变化、随太阳活动和地磁活动的变化,以及在太阳耀斑和地磁暴等扰动事件期间的变化,为飞船的轨道寿命、轨道衰变和姿态变化等提供了重要的观测数据;大气成分探测数据( $O$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ 等)特别是原子氧的探测数据,为航天器表面材料受原子氧剥蚀效应提供了重要的参考数据。图3是神舟二4号在2001年4月地磁活动事件期间

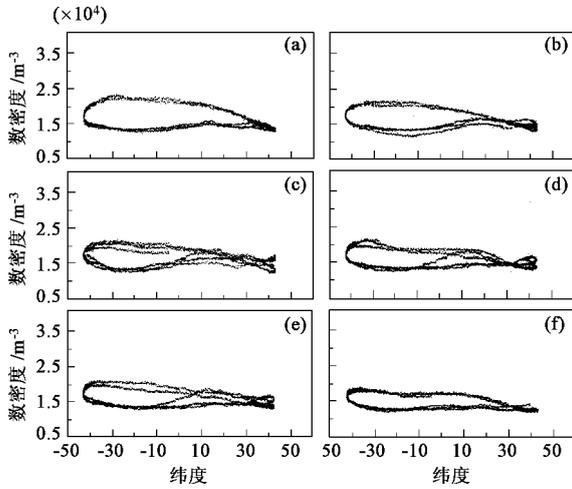


图3 “神舟”二号在2001年4月地磁活动事件期间观测的大气密度变化  
(a)地磁活动事件前;(b)(c)(d)(e)地磁活动事件中;(f)地磁活动事件结束

探测到的大气密度变化<sup>[8]</sup>。

在“神舟”四号飞船上,对可能影响飞船的空间环境及其效应进行了较全面的探测,在轨道舱上,有高能质子重离子(4—300MeV,重离子4—25MeV/n)、高能电子(150keV—5MeV)、热等离子体(1.7—60keV)、大气密度( $5 \times 10^{-5}$ — $1 \times 10^{-8}$ Torr)、大气成分(2—34aum)的探测,以及由于等离子体对飞船表面充电可能引起的电位的探测,高能带电粒子对微电子器件产生的单粒子效应的探测。在飞船轨道舱运行期间,获得了上述环境及其效应的大量数据,为飞船正常运行、安全返回起到了重要的空间环境安全保障作用,为类似轨道卫星的寿命和轨道衰变设计、卫星及相关设备的抗辐射加固防护设计,采取相应的防护措施提供了重要依据。

在“神舟”三、四号飞船返回舱内,利用CR-39固体径迹探测器测量了高能带电粒子的强度和能谱,获得了舱内线性能量传输(LET)分布、吸收剂量及其在物质中的衰减情况,为飞船中的生物组织特别是宇航员的辐射损伤、微电子器件的单粒子效应提供了重要参考数据。

“神舟”飞船空间环境的观测结果表明,轨道舱(360km)处的大气密度比自主段(334km)大气密度值下降了约40%,扰动(太阳耀斑、地磁暴等)时期与宁静时期大气密度变化可相差数倍;原子氧的含量占大气中各种成分总量的80%以上,尤其是阴影区中可高达90%以上。高能质子在飞船舱轨道附近通量较小,主要分布在南大西洋上空,在宁静时期能

量大于3MeV的质子每秒钟只有几个质子;该轨道上的电子比质子多,也主要分布在南大西洋上空。能量在0.4—0.5MeV的电子计数约400个/s,随能量增高通量逐渐减小;飞船轨道空间的等离子体(1.7—60keV)通量极小,很难观测到。可以看出,在这种低轨道上,空间中的高能带电粒子、热等离子体等通量不高,对飞船造成的影响并不严重。

### 3 空间环境效应研究

自1957年10月4日第一颗人造地球卫星进入太空开始,空间环境对航天器影响的问题就倍受空间界的关注。随着人类空间活动的日益增强,高度集成化器件和芯片的更广泛的使用,空间环境对飞行器的影响的重要性也日益突出。四十余年的航天历史表明,地球和太阳周围的空间环境对航天器的要求是苛刻的、不可忽视的,空间环境对航天器有着极为重要的影响,它是诱发航天器异常和故障的重要原因。同时,航天器的发射与运行也影响了环境,不仅仅有局域性的暂态环境改变(如航天器及姿控火箭点火诱发的中性气体,电离环境,航天器运行引起的运行轨道周围等离子体的改变——冲压与尾流,等等),而且还有大范围、长时间的环境改变(如空间碎片,预期中的太阳发电卫星工作可造成的电离环境的改变,等等)。

空间环境直接关系到人类的生产活动与生活,特别是对日益发展的航天活动、军事活动、通讯与导航系统,以及地面技术系统等都有着重要影响。高层大气会影响航天器的轨道、姿态和温度改变;原子氧会引起航天器表面材料的剥蚀;高能带电粒子环境会使航天器的材料、器件、太阳电池、航天员等产生辐射损伤,使微电子器件和设备产生单粒子效应(SEU),使其出现软硬错误;空间等离子体会使航天器表面和深层介质充放电(ESD),导致航天器内产生电磁干扰引发航天器故障;空间碎片和微流星环境会使航天器及其设备产生机械损伤等等。

航天器除受天然环境影响外,还受各种污染环境的影响。它们能受到航天器上的电子部件之间的和来自太阳辐射的电磁干扰影响,或遭遇静电充电建立和释放所引起的电子波动和短路。空间环境效应造成的航天器损失,在研究和通讯产业中每年要花费上亿美元。为了确保航天器的正常运行及最佳设计,必须充分认识空间环境对航天器的各种重要影响。为此,国际上各空间大国,都制定了有关空间环境效应(SEE)的全面研究计划。

表1 不同环境对飞行器的主要影响示意表

环境 影响方面	地球引力场	地球高层大气	原子氧	地磁场	银河宇宙线	太阳宇宙线	地球辐射带	地球电离层	高温等离子体	流星体	空间碎片	宇宙电磁辐射	地球反射	地气辐射	造成的 飞行器后果
轨道	√	√					√					√			影响寿命
姿态	√	√		√	√	√	√					√			SEU 失控
温度		√										√	√	√	热应变使部分系统失效
软硬错误					√	√	√	√							SEU ,ESD 异常 ,故障
通信测控								√							闪烁 ,距离误差
辐射损伤					√	√	√					√			部分系统失效
化学损伤			√									√			表面剥蚀异常 ,故障
机械损伤										√	√				碰击危害 ,异常 ,故障
充电					√	√	√	√							ESD 异常 ,故障
目标识别				√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	错误

表2 四种主要应用卫星轨道遭遇到的主要环境对它的影响

	低地球轨道 ( 100—1000 km )	中轨道 ( 1000—10000km )	地球同步轨道 ( 36000km )	行星际飞行轨道
中性大气	阻力影响轨道衰变 原子氧对表面剥蚀严重	几乎无影响	无影响	无影响
等离子体	影响通信和测控 ,产生冲压和尾流 ,高电压系统电流泄漏及离子曳力 ,有高充电可能	影响微弱 ,有高充电可能	充电问题严重	影响微弱
高能带电粒子	高纬区及南大西洋异常区发生单粒子事件	辐射带和宇宙线的剂量效应和单粒子事件效应严重	宇宙线的剂量效应和单粒子事件效应严重	宇宙线的剂量效应和单粒子事件效应严重
磁场	磁力矩影响姿态严重 ,磁场可做姿态测量的参考系	磁力矩影响姿态	影响微弱	无影响
太阳电磁辐射	影响表面材料性质	影响表面材料性质	影响表面材料性质	影响表面材料性质
地球大气辐射	影响航天器的辐射收支	影响微弱	无影响	无影响
流星体	低碰撞概率 ,产生机械损伤	低碰撞概率 ,产生机械损伤	低碰撞概率但是相对最大 ,机械损伤	低碰撞概率 ,产生机械损伤
空间碎片	为碰撞概率最大区 ,产生机械损伤较严重	低碰撞概率 ,产生机械损伤	碰撞概率较大 ,产生机械损伤较严重	无影响

不同的空间区域有着不同的环境 ,不同的环境对运行其中的飞行器有着不同的影响 ,表1 给出了不同环境对飞行器的主要影响 ,表2 则给出了四种主要应用卫星轨道遭遇到的主要环境对它的影响。

在“神舟”四号上进行的空间环境效应研究主要是高能带电粒子对微电子器件产生的单粒子效应 ,空间热等离子体对飞船表面产生的充电效应。

### 3.1 单粒子效应研究

高能带电粒子对航天器的影响主要表现在两个方面 :一是对航天器的材料、电子器件、生物及宇航员的辐射损伤效应 ;二是对大规模集成电路的微电子器件产生的单粒子事件效应 ,此外 ,太阳质子事件和沉降粒子的注入 ,使电离层电子浓度增加 ,造成通讯、测控和导航的严重干扰。由于飞船轨道属于低轨

道,高能粒子通量较小,对于飞行寿命不长的飞船而言,辐射损伤效应(总剂量效应)不严重,在“神舟”飞船中重点研究了单粒子事件效应。

所谓单粒子事件是空间高能粒子(质子、重离子或中子)轰击微电子器件,导致微电子器件逻辑功能翻转或器件损坏的事件,主要有单粒子翻转事件(SEU)、单粒子锁定事件(SEL)和单粒子烧毁事件(SEB)。由于单粒子事件的发生,常常给卫星带来故障,甚至造成灾难性的后果。因此,研究这些效应的机理、在地面进行理论和实验模拟研究,并在空间进行飞行实验验证是非常重要的;提出相应的防护对策措施,为卫星工程抗辐射加固的设计,保障卫星安全运行、延长工作寿命都是十分有意义的。这些问题的研究结果对于相关空间军事应用系统、航空电子系统都有广泛的应用前景<sup>[7,9,10]</sup>。

当空间高能带电粒子穿入航天器或者这些高能粒子与航天器的舱壁发生核相互作用产生的重离子通过微电子器件时,在粒子通过的路径上将产生电离,沉积在器件中的电荷部分被电极收集,这有可能产生两个重要的效应:一是软错误的单粒子翻转效应,另一个是锁定效应。当收集的电荷超过电路状态的临界电荷时,电路就会出现不期望的翻转,出现逻辑功能混乱。但这种效应不会使逻辑电路损坏,它还可以被重新写入另外一个状态,因此,常把这种效应叫做软错误。

单粒子翻转事件虽然并不产生硬件损伤,但它会导致航天器控制系统的逻辑状态紊乱,从而可能产生灾难性的后果。单粒子翻转效应早在20世纪70年代初就已经在卫星上观测到了,在以后的各种卫星中,这种效应已屡见不鲜了。例如,美国的TDRS-1卫星在1983年4月4日发射进入地球同步轨道以后,到1993年3月27日之间已确诊的单粒子事件就有4468次,在1989年10月19日的一次太阳质子事件期间,该卫星上的RAM存储器中就记录到239个单粒子翻转事件。

在CMOS电路中,其固有的P-N-P-N结构,以及其内部存在的寄生晶体管,在空间高能带电粒子(尤其是重离子)穿越芯片时,会在P阱衬底结中沉积大量电荷,这瞬时电荷的流动所形成的电流,在P阱电阻上产生压降,会使寄生NPN晶体管的基极和发射极导通,从而导致锁定事件。如果锁定时通过器件的电流过大,即可将器件烧毁。当出现锁定现象时,器件不会自动退出此状态,除非采取断电措施,然后重新启动方可恢复。我国“实践四号”卫星上的

动态单粒子事件监测仪,在半年时间内,CMOS电路发生6次锁定事件,差不多每月发生一次,均通过外加指令切断电源措施,然后重新启动来恢复的。欧洲空间局的ERS-1卫星于1991年7月进入高度为784km的太阳同步轨道,数天后在经过南大西洋上空时,因发生单粒子事件而将卫星上的精密测距测速仪中的芯片烧毁,导致该项试验失败<sup>[7]</sup>。

随着航天事业的发展和微电子器件水平的提高,如具有小体积、低功耗、快运行速度、大存储量的大规模集成器件的使用,而这些器件每一次状态的改变所需的能量和电荷变小,其抗单粒子事件的能力下降。因此,在航天器上使用的微电子器件如何提高抗单粒子事件的能力,已是众所关注的热点问题。目前广泛采用的措施与对策包括:研制和生产抗辐射加固的器件,加强屏蔽保护措施,以尽量减少单粒子事件的发生;在软件设计上采用抗干扰技术、容错技术、简编技术等保护措施,以及硬件和软件的数据检错与纠错等措施,把单粒子事件的效应降到最小,以保证航天器的正常运行。

在“神舟”四号飞船上搭载有单粒子事件监测器,专门用来测量该轨道上可能发生的单粒子翻转事件,其中容量为128kB的10片中小规模的静态存储器(SRAM)在轨道运行的半年时间内只记录到一次单粒子翻转事件,单粒子翻转事件的几率小于0.025次/day·Mb,512kB抗辐照的SRAM未出现单粒子翻转事件。由于在宁静时期高能质子和重离子在该轨道上的通量较小,所以产生的单粒子翻转事件的几率较低。

为了确保“神舟”飞船的安全,还开展了空间环境参数与单粒子事件相关的研究,进行了空间单粒子事件机理和发生概率的计算机仿真,建立了单粒子效应计算机仿真软件系统,该系统是一个集轨道空间高能带电粒子模式、考虑与航天器及器件灵敏区相互作用和单粒子效应的基本物理过程后的数值模拟软件于一体的集成模拟软件系统。利用该软件系统估算了在“神舟”飞船轨道上多种微电子器件的单粒子翻转事件概率,与实验结果基本相符,如SRAM器件IDT6116V在2.5mm铝屏蔽条件下的单粒子翻转事件概率为 $4.22 \times 10^{-8}$ 次/day·bit<sup>[10]</sup>。

### 3.2 航天器充放电效应研究

在近地空间存在着大量的等离子体,除了磁层外的太阳风等离子体外,在磁层中还有电离层、等离子体层和等离子体片等集中分布的等离子体区域。当航天器在这些区域运行时,由于航天器与等离子

体的相互作用,会导致航天器的充放电效应.当航天器被充电到一定高度时,所产生的强电场可造成材料或器件的击穿,放电所发生的电磁辐射会干扰航天器上各种电器设备的正常工作,甚至造成航天器失效.

空间等离子体导致的航天器充电大致可以分为两种形式:一是由能量不能穿透航天器表面的等离子体(数十千电子伏以下)与航天器相互作用而导致的充电现象,称为表面充电.由于电子热运动速度远高于离子,所以航天器表面将有大量的电子沉积而带负电.由于航天器不同表面部分可处于不同的环境条件(如有无光照)及相对运动方向的不同方位(如冲压-尾流)下,加之表面材料可不同(光电发射、二次发射系数等),使其可带有不同电位,从而形成不均匀充电,出现电位差.另一种充电形式是内部充电(或叫深层充电),它是能量高于几十千电子伏的电子入射到航天器上,其能量可穿透表面,其穿透深度随入射电子能量增加而增加,在表面下数十微米处聚集入射电子与表面同能量的离子形成的充电现象.当航天器表面材料绝缘时,它们在空间等离子体中将被充电至不同电位,从而可能引起放电,造成航天器异常的故障.美国利用 P78-2 卫星专门研究了卫星充电的条件和静电放电的过程,证实了卫星充电和航天器故障的原因.故障分析表明,由于空间等离子体使航天器充电而引起的故障占有空间环境故障的 1/3.据统计,在我国地球同步轨道通讯卫星的故障中,空间环境诱发的故障占总故障的 40% 左右,与国际上的故障率大致相近,而其中相当一部分的故障则是由于卫星充电引起的.在 1991 年 3 月 22 日至 31 日的太阳大事件中,损失了国际通讯卫星 MARCS-1,不得不将部分通讯卫星业务切换到其他通讯卫星上;在地球同步轨道上运行的另一静止卫星 L 波段放大器被破坏,查明是由于卫星静电放电造成的.1994 年,加拿大的 ANIK E1 和 ANIK E2 两颗卫星出现了严重的故障,后经仔细查找原因,认为 ANIK E2 丢失的原因是由于卫星内部充电造成的.据了解,国际通讯卫星 511 于 1995 年 10 月 7 日出现大的故障,卫星一度中断工作.现已查明,这颗卫星失去锁定地球的准确原因是静电放电引起的.这次静电放电事件点燃了手动助推器,引起了一次大的姿态扰动.

在我国的“实践四号”卫星上分别在顶部、底部和腰带上安装有三个电位差计,用来测量卫星在等离子体环境中运行时表面充电的状态.在“实践

四号”卫星运行的大椭圆轨道上,半年时间内已观测到 27 次卫星表面充电到  $-500\text{V}$  以上,其中卫星表面最高充电到  $-2000\text{V}$  以上<sup>[7]</sup>.

此外,当低轨道大型航天器在电离层中运行时,高电压太阳电池阵与等离子体相互作用时,会产生重要的有害效应:一是高电压太阳电池阵的电流泄漏.等离子体的高导电性使高电压太阳阵的裸露导体部分(如电池间金属互连片)与之构成并联回路,从而造成电源电流无功丢失的现象.其二是高电压太阳电池阵的弧光放电.所谓弧光放电是指相对于环境等离子体为负电位的太阳电池阵部分与空间等离子体相互作用而发生的现象.它既增加了电源的无功损耗、材料损耗,也因产生电磁干扰而影响系统的正常工作<sup>[11,12]</sup>.

“神舟”四号飞船上搭载有两台电位监测器,分别测量两个不同方向上飞船的表面电位.探测结果表明,空间环境处于宁静时期时飞船表面电位并不高,约为  $-15\text{V}$ — $+25\text{V}$ .太阳光照时,打出光电子,飞船表面带正电,阴影区带负电.飞船从阴影区飞入光照区瞬间,电位有突变,此时正电位最高,最后逐步降低.这个观测结果是与该飞船轨道上的热等离子体环境相符合的,与我们的理论模拟计算也基本一致.

#### 4 空间环境预报

自从 1957 年前苏联成功发射第一颗人造地球卫星以来,太空已成为人类开发利用的重要场所,数以千计的航天器飞向太空.然而 40 年来,已经有许多航天器在空间环境的作用下被损坏,人们为此付出了极高的代价.

各空间大国很早就从针对单一计划、型号任务的空间环境服务,发展到面向所有的空间计划、型号任务以及技术系统共同的空间环境服务,并成立了专门机构和专业队伍来完成,如美国、俄罗斯等国的空间环境预报中心,其做法借鉴了气象、海洋、地震和水文的观测与预报服务.这种专门的机构和队伍完全不同于基础研究,它强化服务,以航天和军事应用所需的环境要素的预报为主要业务.

为了使我国的空间环境研究成果尽快发挥效益,有效地保障航天工程空间环境安全,1992 年经国家科委和中国科学院批准,我国正式加入国际空间环境服务组织(ISES).成立了北京区域警报中心,中国科学院空间科学与应用中心所属的空间环境预报中心成为北京区域警报中心的分中心之一.

在我国载人航天工程的支持下,1993年开始筹建空间环境预报中心,1998年基本建成并投入试运行,1999年,空间环境预报中心正式运行,并公开向国内外发布空间环境预报.通过几年来的实践证明,空间环境预报中心实现了预报工作的业务化,形成了一支专业的预报队伍,迅速提高了业务水平,预报的准确性、及时性在短期内达到与国外主要业务机构相当的水平.

空间环境预报中心由空间环境数据信息支撑子系统、空间环境预报系统技术支撑子系统、空间环境预报研究子系统、空间环境效应子系统和空间环境业务预报子系统组成.在广泛收集国外各种空间环境模式的基础上,进行对比、优化分析研究,并按照我国载人飞船的具体条件进行归算,制定我国载人飞船设计的空间环境模式与准则,为载人航天工程各系统提供设计时的参考(主要以空间高能带电粒子环境、地球高层大气环境、空间等离子体环境、空间微流星和空间碎片为研究重点);开展空间扰动环境特性与规律的研究,在此基础上进行预报方法研究,建立相应的预报模式和预报专家系统,在空间环境预报中心的管理下,在载人航天工程的各个实施阶段发布远期、中期和短期的太阳活动、地磁活动、空间环境有关参数的预报和警报,并预测相应的空间环境效应;建立空间环境业务预报系统(包括自主的日地空间环境监测子系统、数据收集子系统、数据库子系统、空间环境动态展示子系统、预报实施子系统、预报服务子系统和预报评估子系统),开展空间环境业务预报(每日预报、周报、长期预报、简报、专项预报、警报)与相应的效应预测<sup>[13]</sup>.

为确保“神舟”系列飞船的空间环境安全保障,针对各艘飞船预定的发射日期、运行时间,提前三个月、一个月作出飞船发射的安全期预报,对飞船轨道衰变率、留轨舱寿命、飞船高层大气环境、飞船和留轨舱遭遇的流星体和碎片环境以及碰撞概率等分别进行预报.随着发射日期的临近,对上述空间环境不断进行修正性预报,以尽可能保障预报的准确性.空间环境预报中心对每艘飞船的发射、在轨运行、飞船回收和留轨舱运行各个不同阶段进行了全程的空间环境预报与警报服务.除提供预定的空间环境服务产品外,还根据用户的需求,及时根据空间环境的监测、分析与预报,提供与空间环境相关的服务产品,为保障飞船的安全进行全方位服务.

作为“神舟”飞船空间环境安全保障的一个实例,我们给出了“神舟”一号发射前对1999年11月

狮子座流星暴的预报情况.在1999年狮子座流星暴发生前我们做了大量的分析研究工作(并且给出了狮子座流星暴发生的时间、强度和可能对航天器所产生的效应预报),向“神舟”飞船指挥部提出了有关流星暴的警报和推迟发射日期建议的报告.“神舟”一号飞船原定发射时间是11月18日北京时间7:00(11月17日23:00UT),根据我们的预测正好会遭遇狮子座流星暴最强的时候.而如果推后两天发射,即11月20日北京时间7:00(11月19日23:00UT),流星暴已经结束,这时的流星体通量会回到正常水平.于是我们建议推后两天发射,飞船指挥部接纳了我们的建议,推迟了飞船的发射时间.飞船安全避过了流星暴.图4为流星暴通量的预测值与实际观测值的对比.结果有力地证明了我们的预报和建议都是正确的<sup>[14]</sup>.

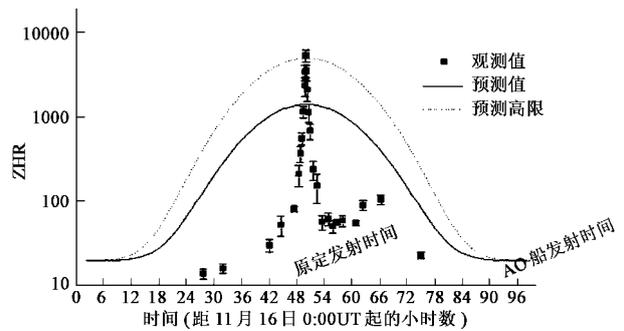


图4 “神舟”一号发射期间狮子座流星暴预测结果与实际观测结果的比较

## 5 结束语

航天发展的历史已令人信服地证明,几乎所有空间环境参数都对航天器的运行有着重要的影响.由于空间环境导致航天器的异常或故障不胜枚举,既有因对环境不够了解而付出惊人代价的事例,也有因对环境的危害有充分的认识,采取相应措施而避免事故的事例.因此,充分认识这些空间环境和它对航天器带来的影响,并在航天器设计、制造和运行中加以充分考虑是十分必要的.特别是载人航天,其安全可靠最为重要,必须排除所有可能威胁飞船安全的因素.因此,空间环境的预报与监测对载人航天来说,则更是必不可少的.

## 参考文献

- [1] 王家龙,张桂清.地球物理学进展,1994,9(增刊):1 [Wang J L, Zhang G Q. Progress in Geophysics, 1994, 9 (Supplement): 1 (in Chinese)]

- [ 2 ] Allen J H *et al.* Solar – Terrestrial Predictions – IV Proceedings of a Workshop of NOAA/ERL. Boulder , Colorado , USA. 1993 ,1 :75
- [ 3 ] Speich D. MAX91 Workshop 2 :Developments in Observation and Theory for Cycle 22 Laurel. NASA Goddard Space Flight. Greenbelt , Myryland , 1991.233
- [ 4 ] 叶宗海. 空间科学学报 ,1991 ,11 :258 [ Ye Z H. Chinese Journal of Space Science , 1991 ,11 :258 ( in Chinese ) ]
- [ 5 ] 朱文明. 航天器工程 ,1995 ,4( 3 ) 51 [ Zhu W M. Space Craft Engineering. 1995 ,4( 3 ) 51 ( in Chinese ) ]
- [ 6 ] 叶宗海等. 中国科学( A 辑 ) ,1993 ,23 :538 [ Ye Z H *et al.* Science in China( series A ) ,1993 ,23 :538 ( in Chinese ) ]
- [ 7 ] 姜景山等. 空间科学与应用 ,北京 :科学出版社 ,2001. 599 [ Jiang J S. Space Science and Application. Beijing : Science Press ,2001. 599 ( in Chinese ) ]
- [ 8 ] 秦国泰等. 空间科学学报 ,2003 ,23 :135 [ Qin G T *et al.* Chinese Journal of Space Science , 2003 ,23 :135 ( in Chinese ) ]
- [ 9 ] 叶宗海. 载人航天 ,1997 ,1 :52 [ Ye Z H. Manned Space Flight ,1997 ,1 :52 ( in Chinese ) ]
- [ 10 ] 叶宗海等. 载人航天 ,2002 ,2 :12 [ Ye Z H *et al.* Manned Space Flight ,2002 ,2 :12 ( in Chinese ) ]
- [ 11 ] 古士芬等. 空间科学学报 ,1995 ,15 :42 [ Gu S F *et al.* Chinese Journal of Space Science , 1995 ,15 :42 ( in Chinese ) ]
- [ 12 ] 古士芬等. 空间科学学报 ,1995 ,15 :131 [ Gu S F *et al.* Chinese Journal of Space Science , 1995 ,15 :131 ( in Chinese ) ]
- [ 13 ] 叶宗海. 载人航天 ,2001 ,5 :29 [ Ye Z H *et al.* Manned Space Flight ,2001 ,5 :29 ( in Chinese ) ]
- [ 14 ] 乐贵明. 载人航天 ,2000 ,2 :45 [ Le G M. Manned Space Flight ,2000 ,2 :45 ( in Chinese ) ]

· 物理新闻与动态 ·

### 宇宙中的最高音和最低音

Cornell 纳米吉它是 1977 年制成的 ,只有 10 $\mu$ m 长 ,直到如今才第一次演奏. 弦音的频率为 40MHz ,比普通的吉它要高 17 个八度音( 相当于 130 000 倍 ). Cornell 大学的研究者使用激光来调整纳米吉它精巧的“ 音弦 ”( 实际上是极薄的硅片 ) 的声音. 没有适用的麦克风来拾取这个吉它的声音. 但是将反射的激光通过计算机处理 ,可提供一种频率低得多的等价的声记录. 激光可以激发多条音弦 ,产生兆赫的“ 和音 ”. 这个纳米吉它的演奏将由 Lidija Sekaric 在 AVS 会议上描述( 论文 MM-WeM1 914-945-18902 ). 如果这一纳米吉它的自然音调是宇宙间最高的音调之一 ,那么最低的音调将在英仙座星团中的黑洞附近找到. Chandra X 射线望远镜最近在围绕星团核心的星系间的气云中观察到许多同心的圆形波纹. 一些天文学家将这种波纹解释为声波 ,其音调要比人类听觉低 57 个八度音 ,这可能是宇宙中所探测到的物体发出的最低音 ,这种低音是黑洞向附近物质射出的喷注产生的.

( 树华 编译自 Physics News Update Number 659 #3 ,October 28 2003 )

· 信息服务 ·



# Rensselaer

## 美国伦斯勒理工学院招生信息

Troy , New York , U. S. A.

January , 2004

### JOIN OUR GRADUATE SCHOOL IN PHYSICS

Ph. D. in Department of Physics , Applied Physics , and Astronomy

Areas of research : Terahertz Imaging and spectroscopy , Terascale Electronics and photonics , Nano-Particles Physics , Bio-physics , Origins of Life , Astronomy , Elementary Particles Physics. Teaching , research assistantships , and fellowships are available.

**Application :** <http://www.rpi.edu/dept/grad-services/>

**Information :** <http://www.rpi.edu/dept/phys/>

**E-mail :** [gradphysics@rpi.edu](mailto:gradphysics@rpi.edu)