

# “神舟”五号的空间环境保障\*

刘四清<sup>†</sup> 刘静 师立勤 薛炳森

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

**摘要** 空间环境安全保障是载人航天器飞行安全和航天员生命安全保障的一个重要部分. 文章从高层大气、高能辐射环境、流星体空间碎片和重大空间环境扰动事件等四个方面空间环境要素对载人航天的影响, 介绍了空间环境预报中心为“神舟”五号载人飞行任务所作的空间环境保障工作.

**关键词** “神舟”五号飞船, 空间环境保障, 高层大气, 高能辐射环境, 流星体空间碎片, 安全期预报

## Space environment support for the SZ-5 spacecraft

LIU Si-Qing<sup>†</sup> LIU Jing SHI Li-Qin XUE Bin-Sen

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

**Abstract** Space environment support plays a major role in safeguarding manned space flight and saving the lives of the astronauts. An overview is given about the space environment support for the SZ-5 spacecraft which the Space Environment Prediction Center provided. These included forecast and analysis of the space environment effects on SZ-5 in four aspects: upper atmosphere, high-energy particle radiation, meteoroids and debris, and important space weather events.

**Key words** SZ-5 spacecraft, space environment support, upper atmosphere, high-energy particle radiation environment, meteoroids and debris, safe period forecast

## 1 引言

空间环境是人类赖以生存的环境之一, 它包括由自然因素引起的自然空间环境和由人工因素引起的人工空间环境, 是指对人类现在和未来的生产、军事和生活产生影响的各种自然环境和人工环境. 但我们这里所说的空间环境主要指近地空间环境. 近地空间是航天器最多、最活跃的区域. “神舟”五号飞船就运行在该区域. 在这一区域, 航天器所遭遇的空间环境有: 高层大气、地磁场、地球重力场、高能带电粒子、空间等离子体、太阳电池辐射、微流星、空间碎片等. 这些环境对航天器会产生不同的影响, 其中包括航天器的轨道、姿态、温度、辐射损伤、机械损伤、化学损伤、航天器表面充电放电、硬软错误、通信和测控的干扰等. 对于“神舟”五号载人飞行而言, 保障航天器和航天员的安全是空间环境安全保障的首要任务. 针对这一特点, 空间环境预报中心在执行“神舟”五号空间环境安全保障任务中工作重点主要有四个方面: 高层大气环境的预报和效应分析、高

能带电粒子的预报和对航天员影响的分析、碎片碰撞预警和“神舟”五号发射安全期预报及保障飞船在轨运行安全的重大空间环境扰动事件预报警报.

## 2 高层大气对“神舟”轨道的影响

地球大气的分层一般是以温度变化为依据的. 温度控制着大气压力和大气密度的减小率, 平均温度从地面到 10 公里左右稳定减小, 然后保持常数直到约 25 公里高度. 然后温度增加, 到 50 公里高度到达一极大值(因为在这些高度太阳紫外辐射被臭氧吸收了). 在此高度以上, 温度再次减小, 直至 85 公里达到一极小值. 在 90 公里以上, 因为来自太阳的更强烈的紫外辐射被吸收, 大气温度急剧增加, 叫做热层. 在 200 公里以上的热层中, 温度不再依赖于高度, 在 500 公里以上, 温度开始保持常数. 在 100 公里以上的高度, 大气处于扩散平衡状态, 一般我们将 100 公里以上的地球大气称为高层大气.

\* 2004-02-25 收到

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: liusq@earth.sepc.ac.cn

大气密度是一个比大气温度更有实际应用价值的参数,它决定着卫星所受到的阻力.密度可通过探测作用于卫星的阻力来确定. CIRA72( COSPAR 国际参考大气 1972 )就是基于多次这样的测量而得到的.

在 200 公里以上,大气主要受太阳活动影响,太阳活动对大气产生多种不同的效应.一种是热层温度的昼夜变化,温度在约凌晨达最低值,而午后达到最高值.另一种效应是温度的太阳周期变化.太阳对大气的控制主要是通过太阳极紫外辐射,它随太阳黑子活动呈 11 年周期变化,于是在太阳活动最小年大气温度也低,这些都是动力学温度.因为在这些高度上大气接近于真空,因此这么高的大气温度对卫星并没什么影响.对应着温度的高度变化,大气密度也发生着大小变化.另外,高层大气也受地磁活动的影响,地磁活动强烈时,大气密度增大,反之则减小.

对于“神舟”飞船和留轨舱来说,高层大气密度、成分、温度和压力等直接影响着它们的轨道定位、轨道衰变速率和在轨寿命,其中以大气阻力造成的轨道衰变效应最为突出.因此必须在任务前根据飞行高度和飞行时间研究给出大气阻力的可能影响,以确定所携带的燃料量.

运行在高层大气中的飞行器在高层大气作用下,飞行高度不断下降,要维持它在规定高度上正常飞行,就需要不断给予推动,使它抬升高度;大气密度越大,阻力也越大,所需的助推燃料也越多.要想使燃料携带量最佳,必须通过对大气阻力的计算.对于低轨道飞行器而言,由于其飞行高度较低,轨道受大气影响更为严重.尤其是载人飞行器,在一次飞行任务中,往往需要多次变轨,以完成交会、对接、返回等任务,因而对载人飞船轨道预报的要求比一般飞行器轨道预报的要求更高.

在航天历史上曾多次发生过由于轨道预报不准确而造成严重后果的事例.例如 1979 年天空实验室的提前坠落,就是由于实际太阳活动水平比预计的高,造成大气密度增加,于是大气阻力也增加,以致增加了轨道衰变速率而引起的.再如 1981 年 4 月 12 日磁暴的发生导致大气密度增加,因此哥伦比亚号航天飞机轨道急剧衰变.幸而提前预知了这种轨道变化,宇航员及早采取了措施,才免于事故的发生.1989 年 3 月 13—14 日发生的特大磁暴,使高层大气密度突然增大了约一个量级,由此而导致的飞行器定位高度不确定度高达 100 米,致使美国监测网对多颗卫星的跟踪丢失.

大气阻力对于飞行器的寿命及其轨道的自然衰减具有决定性作用.由于大气密度随高度增加迅速减少,一颗在椭圆轨道中运行的飞行器基本上是在轨道的近地点及其附近一小段距离受到大气阻力影响最大,即当飞行器通过近地点时大气阻力阻碍它运动.其结果是飞行器的远地点高度逐渐减小,而近地点高度几乎不变.这样,轨道不断收缩,越来越接近于圆形,最终陨落,称为寿命结束.研究大气阻力效应的目的是更准确地作出衰减率和寿命预测,为飞行器设计及确保其运行安全服务.预报飞行器衰减率和寿命的关键在于大气阻力的预报,即大气密度的精确预报.对于低轨道飞行器,飞行器的飞行截面与其质量的比值也影响轨道衰减率.飞行器的轨道衰减率越大,寿命越短.

飞行器寿命可由当前轨道衰变率表达出来,轨道衰变率可直接用观测值,但有时观测值无法得到,而飞行器的尺寸、形状和质量以及近地处的阻力系数和大气密度却可得到,这时,就可以用这些量来计算轨道衰减率,从而得到飞行器的寿命.但在这种情况下飞行器寿命很少能够精确预报,因为由太阳活动或地磁指数变化引起的大气密度变化很难精确给出而造成大气密度预报有误差.不过从理论上讲,寿命的精确预测是可以实现的.实践中,我们可以通过观测不断校正,以得到尽可能接近实际的情况的结果.

“神舟”五号飞船的面积质量比并不大,而且又是在太阳活动低年发射的,因此一般其轨道衰变率是不大的.相对于飞船,留轨舱的面积质量比要大,因此留轨舱的轨道衰变率也大.

在“神舟”五号发射前的不同阶段,我们分别预测和分析了在可能的太阳活动水平和地磁活动水平飞船和留轨舱的轨道衰变情况,并对留轨舱的轨道寿命进行了预测分析.在留轨舱运行期间,太阳活动有一段时间变化剧烈,而且频繁发生地磁暴,因此留轨舱的轨道衰变特别剧烈,我们根据对太阳活动和地磁活动的预报及时对留轨舱受大气阻力造成的轨道衰变进行了预报,并提前给出了抬轨建议.

### 3 高能辐射环境对航天员的影响

空间高能辐射环境是对航天员生命安全威胁最大的空间环境成份.航天员辐射效应是由空间环境中的高能粒子穿过屏蔽层作用于人体,造成人体细胞、组织、乃至器官的辐射损伤,辐射损伤的严重程度与辐射剂量的大小有关.为了保证航天员的安全,在空间工作的航天员有严格的辐射剂量限值.

为了确保我国首次载人航天飞行的顺利成功,我们在已有高能辐射环境和辐射效应研究成果的基础上,研制了“神舟”五号航天员辐射剂量分析计算软件,并利用该软件系统,开展了“神舟”五号航天员高能辐射环境分析评估工作,为“神舟”五号航天员的生命安全保障提供了服务。

计算航天员在舱内吸收的辐射剂量,首先要计算的就是舱外的空间辐射环境。“神舟”飞船轨道上高能粒子辐射环境主要来自三个源,它们分别是:来自太阳系以外的银河宇宙线、偶发的高通量太阳宇宙线和分布在固定空间范围的辐射带高能粒子。

在近地轨道上常年存在着一个高能粒子辐射背景,它来自太阳系以外,一般认为起源于银河系以内的超新星爆发,因而,又称为银河宇宙线。作为背景辐射,银河宇宙线的通量不高,在地球磁层外,其通量约为  $1 \text{ 粒子}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 。

太阳宇宙线又称为太阳宇宙线事件,是伴随某些太阳耀斑发生的高能带电粒子增强现象,其成分以质子为主,所以又称为质子事件。质子事件通常持续时间很短一般为数小时至数日,而且多分布在  $100\text{MeV}$  以下的低能区,但其通量可超过银河宇宙线几个数量级,其影响是相当严重的。例如发生在 2003 年 10 月 28 日的特大质子事件,其通量超过了当年的银河宇宙线总通量的 300 倍,所造成的危害是相当严重的。

宇宙线带电粒子要到达近地轨道必须穿越地磁场,要到达指定点所要穿越的磁力线数量大致决定了粒子所必须具备的能量,穿越的磁力线越多,所要求的能量就越大。“神舟”轨道高度低,倾角小,地磁场对高能粒子的屏蔽很强,绝大部分银河宇宙线和太阳宇宙线不能到达这里,相比之下,辐射带高能粒子的影响更为突出。

在地球附近的空问,地磁场近似于一个偶极子场,具有特定能量的高能带电粒子将会被磁力线约束在一定的区域内,沿磁力线在南北两极间往复回旋运动,带电粒子如同被地磁场捕获一样,形成一个近似以地球磁轴为对称轴的“面包圈状”的高能粒子的高通量区,称为辐射带。在辐射带中,又有两个高能粒子通量峰值区域,其中心在赤道区的高度为 0.5 和 2.5 个地球半径的位置,被称为内辐射带和外辐射带。辐射带中分布的主要是高能质子和电子,重粒子成分很少。在偶极子场中,带电粒子在高纬度地区可以到达较低的高度,地磁场越弱,粒子到达的高度就越低。位于南大西洋上空,存在一个地磁场较

低的区域,带电粒子可以到达较低的高度,称为南大西洋异常区。该区域中心,高能质子的通量是宇宙线背景的数百倍,因此,南大西洋异常区是“神舟”轨道上最重要的辐射源。

在“神舟”五号飞船航天员辐射剂量的计算中,我们主要考虑南大西洋异常区上空地球辐射带对航天员造成的影响。

确定飞船轨道上高能粒子的通量后,就需掌握这些粒子经过与航天器屏蔽材料作用(实际计算中包含航天服的屏蔽作用)之后怎样进入舱内及计算进入舱内高能粒子的辐射大小。由于航天器本身的结构比较复杂,带电粒子在屏蔽材料中的传输及屏蔽过程也是相当复杂,涉及屏蔽材料的几何布局、成分组成及粒子同材料相互作用机制,尤其是电子同物质相互作用,不仅有电离作用还有韧致辐射作用,更是加剧了问题的复杂性。为了计算方便,我们将屏蔽层等效为一定厚度的球壳,而将粒子同屏蔽材料的作用过程简化为实心球模型。通过采用实心球模型可以计算出各种粒子在材料中引起的吸收剂量随材料深度的分布数据,从而得到所有粒子在材料中引起的总的吸收剂量随材料深度的分布数据,也就是剂量-深度曲线。根据剂量-深度曲线和飞船对航天员的等效屏蔽厚度就可以确定飞船舱内的高能粒子辐射剂量。

为了确定飞船对航天员的等效屏蔽厚度,我们根据“神舟”五号的结构,对飞船舱壁的三维辐射屏蔽效果进行了分析计算。在具体分析中,鉴于返回舱内部空间不大,我们近似地将该舱的几何中心受到的屏蔽分布定义为航天员受到的屏蔽。在计算得到的飞船中央三维屏蔽分布的基础上,我们确定了飞船中央即航天员遭受的舱壁屏蔽等效实心铝球的厚度。

不同器官对辐射的敏感程度不一样,不同的辐射对相同器官的生物辐射效应不一样,并且相同器官处于人体内部不同深处获得的人体屏蔽程度不一样,为了进一步计算人体器官吸收的高能粒子辐射剂量,需要建立人体辐射屏蔽模型。这是航天员辐射剂量计算的核心问题。为此,我们研究了人体各种器官的辐射生物效应,并在对人体器官进行简化的情况下,根据已有人体高能辐射剂量的实验结果,建立了包含骨髓、睾丸、晶状体、皮肤等人体主要器官的经验预估模型。模型中,引入了器官系数,并以它表征器官对辐射的敏感程度和响应能力。

根据器官系数和舱内的高能粒子辐射剂量,可

以确定人体器官的辐射吸收剂量.但是,辐射引起的致死癌症、非致死癌症、严重遗传效应等辐射效应不仅与吸收剂量有关,而且与辐射品质有关.如电离辐射引起的生物效应不仅与生物体接受的辐射吸收剂量大小有关,而且与辐射的类型和能量有关.因此,需将吸收剂量与一个和辐射的“质”有关的系数加权,该系数称为辐射品质系数,加权后的吸收剂量称为剂量当量,它可以对一切辐射在统一的尺度上表示暴露于辐射的人员所受到的辐射程度.剂量当量的提出,取代了过去所用的“相对生物效应剂量”,“品质因数”取代了“相对生物效应系数”.国际放射防护委员会在1990年建议书(ICRP-60)中定义的剂量当量是:某一组织或器官的平均吸收剂量和一个称做辐射权重因子的乘积.美国、俄罗斯等国家先后多次测量得出了一系列辐射品质系数,在计算中,我们采用了美国的实验结果.

依据航天员辐射剂量当量的计算方法和计算流程,我们采用C++语言和OpenGL类库,并利用了大量已有的高能辐射环境和辐射效应方面的研究成果,包括轨道计算、辐射环境计算和屏蔽计算等比较成熟的计算模型和方法,编制了“神舟”五号航天员辐射剂量分析计算软件,该软件能够根据飞船轨道参数,计算给出轨道上的辐射环境、飞船内部辐射剂量及人体辐射剂量当量情况.在具体表现形式上,该软件能够以动态方式显示飞船运行期间的位置和人体辐射分析计算结果,能够以二维、三维动画的方式,直观、形象地模拟飞船的飞行状况,同时用友好的用户界面展示轨道上空间环境的辐射状况和飞船内部的人体辐射剂量情况.

利用“神舟”五号航天员辐射剂量分析计算软件,在飞船发射前,我们分别针对“神舟”五号飞船的正常飞行轨道(A轨道),即为高度大约为343公里的圆轨道,以及飞船故障预案中的异常轨道(B轨道),即近地点约为200公里,远地点约为734.18公里的椭圆轨道,进行了分析计算,给出了两种轨道下空间辐射环境、舱内辐射剂量、航天员遭遇的剂量当量等情况.在A轨道上一天的舱内辐射剂量是 $0.0099 \times 10^{-2} \text{Gy}$ ,B轨道是 $0.173 \times 10^{-2} \text{Gy}$ .根据这一计算结果,我们得出两种轨道下航天员遭遇的空间辐射剂量均不构成危害的结论,为“神舟”五号航天员的安全防护和决策提供了重要参考.

2003年10月15日,“神舟”五号载人在轨运行期间,我们根据实测得到的飞船轨道根数,利用“神舟”五号飞船航天员辐射剂量分析计算软件对航天

员遭遇的辐射剂量当量进行了全程实时跟踪计算.使地面人员随时得到了飞船载人舱内的瞬时辐射剂量率和积分辐射剂量,以及舱内人体四种器官的瞬时辐射剂量当量率和积分辐射剂量当量.图1是软件的实时运行情况.该软件计算得到在飞船近一天的载人飞行中,航天员晶状体、皮肤、骨髓、睾丸等器官遭遇的辐射剂量当量分别约为0.05、0.06、0.05、0.05mSv,飞船载人舱内的积分辐射剂量约为 $8 \times 10^{-5} \text{Gy}$ .

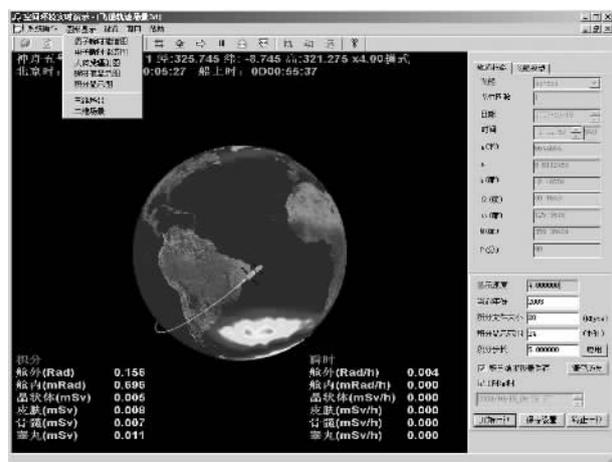


图1 “神舟”五号航天员辐射剂量分析软件

如果实时剂量率过高或累积剂量超过警戒值时,地面指挥人员可以指挥航天员采取一定的规避措施.由于“神舟”五号飞船的轨道高度和倾角较低,载人运行时间短,辐射环境对人体器官造成的辐射剂量低,软件系统运行中没有出现报警现象.但对于今后长时间载人飞行或航天员出舱活动,航天员辐射剂量分析计算软件将会发挥更为重要的作用.

#### 4 空间碎片和流星体对飞船安全的影响

流星体来源于宇宙各星系,它们是在星际空间高速运转着的固体颗粒.大多由小行星和彗星演变而来,它们具有各种不规则的外型,并在太阳引力场的作用下沿着各种椭圆轨道运动,相对于地球的速度为每秒11—72公里.其平均密度为 $0.5 \text{g/cm}^3$ ,平均速度约20km/s.

流星体按运动轨道状态分为偶现流星体和流星雨两种.前者独自出现,无一定规律,后者成群出现,并有一定的时间规律.流星体在空间的分布也是不均匀的.由于地球重力的汇聚作用,地球附近的流星体通量要大于远离地球的空间中的流星体通量,航天器在运行过程中碰到的流星体也会受到一些空间

中存在的大物体的遮蔽作用,使得该物体附近的通量小于空间中的流星体通量。

许多流星体密集在产生它们的母体轨道的附近,成为“流星体群”,当地球绕太阳公转穿过这些区域时,会接近或穿越这些轨道,就会发生流星雨。这时地球及围绕地球运行的空间航天器就会遇到较多的流星体撞击。有时,当流星体的母体彗星回归近日点附近时,流星雨的强度会大大增加,增加到一定程度,就会发生所谓“流星暴”。

流星群和流星体的不规则的空间分布,造成了在地球附近的流星体通量的时间变化。流星体的通量可以用流星体模式来计算。“流星体环境模式”是根据地面观测(照相和雷达探测)和在轨道上直接探测得到的流星数据得出的流星体通量随质量(或直径)的分布模式。现在一般使用的流星体模式是NASA的1969年发布的流星体环境标准模式。

一般的流星体环境模式考虑的是正常情况下的偶现流星体及流星体群,并不包括不频繁发生的流星暴。对于流星暴,一般用其历史记录来计算它的发生概率,并综合流星体环境模式,计算出流星暴峰值期间流星体与航天器的碰撞数。“神舟”一号发射前,我们根据这样的方法进行了狮子座流星暴的通量和影响预测,结果得到总体部门的重视,并因此根据我们的建议将发射时间推迟了48小时。

碎片是指宇宙空间中除正在工作着的飞行器以外的人造物体,又称轨道碎片或空间碎片,是人类空间活动的产物,近年来随着人类发射空间飞行器的增多以及废弃的助推火箭和航天器及其爆炸后产生碎片的累积,空间碎片的数量越来越多,某些空间区域已经变得很拥挤。

碎片的分布虽不像流星体那样有一定的时间性和固定的轨道,但也呈现出一定的规律性。据估计,在距地球表面2000km的高度内(LEO轨道),约有近4000吨重的人造在轨物体,这些物体大多在高倾角轨道,平均相对速度约10km/s,它们中除了很少一部分是还在工作的航天器外,其余都可认为是空间碎片。

轨道碎片按尺寸大小可分为:直径大于10cm的大碎片,它们基本上可由地面光学望远镜和雷达等常规性仪器探测、追踪并予以编目;直径介于1至10cm之间的中尺度碎片,它们一般很难追踪和分类,但这类碎片有可能引起灾难性的事件,人们称之为危险碎片;直径小于1cm的碎片,称为微碎片或小碎片。碎片越小,数量越多。

低高度地球轨道(LEO)(2000km以下)是碎片密集区域。多起航天器爆炸事件都发生在低轨道区域,它是这一区域碎片的重要来源。这一区域由于高层大气的阻力作用会使碎片轨道不断衰变,直至再入大气层陨落,因此大气对碎片存在自然消除效应。但在轨碎片间相互碰撞而解体又使这一区域碎片数目增加,因此这一区域内的空间碎片分布是动态变化着的,其分布随时间将会有较大的变化。由于这一区域中碎片尺寸较大(大部分大于10cm),而且由于轨道差异而导致物体间相对碰撞速度可达10km/s,尤其在600km以上的LEO轨道中,由于大气阻力对碎片的自然消除效应极小,碎片的密度显得很大,所以在低轨道运行的航天器存在较大的碰撞风险。

由于空间碎片的数量众多,它们的轨道又受到各种摄动力的影响,因此无法通过逐一计算来预测何时将发生碰撞,而且空间碎片的增加也是无法逐个预测的。人们根据飞行体的轨道运动理论,综合碎片的探测数据,可以得出碎片的计算模式。用这种模式可以计算和预报碎片的寿命和碎片与航天器碰撞的概率以及碎片分布的轨道、倾角、高度等参数。如被广泛使用的NASA的轨道碎片环境模式,就是综合了理论和直接探测数据的半经验模式。

一般来说,流星体的主要危害是对表面的沙蚀作用使得光学表面、太阳电池、辐射表面和映象装置等受到损害。稍大一些的流星体,有可能对飞行器造成机械损伤(如飞行器表面部分的穿透和剥落、飞行器壳体外表面和内表面的裂痕等),甚至有可能穿透壳壁,严重时甚至使飞行器及其子系统产生各种故障,但质量在1克以上的流星体在近地球空间内与空间飞行器相遇的机会极少。因此,流星体对飞行器的危害一般来讲是可以屏蔽防护的。但当发生“流星暴”时,流星体对航天器的危害就不容忽视了。如1993年当英仙座流星群爆发时,欧空局的奥林巴斯卫星被流星体撞击,形成的等离子体流引起回旋稳定器的电子元件短路,航天器一度失去控制,飞行任务不得不提前终止。另外,在1986年哈雷彗星回归期间,有航天器被一很大的流星体击中,以致引起航天器开始绕其自旋轴翻转,造成与地球的联系一度中断。

在低轨道,碎片数量远远超过流星体,因此碎片危害更大。国外已有多次实验证明了碎片的危害性。据统计,美国航天飞机在40次飞行中,共留下50次轨道物体的碰撞记录,导致有25块舷窗因撞击需要更换。据分析,航天器舷窗平均每五天可受到一次碎

片撞击.前苏联 COSMOS-1275 飞船 1981 年 7 月的爆炸事件,据推测也是由碎片引起的.再如在挑战者号航天飞机的一次飞行中,双层舷窗中的一层被小碎片冲撞后打穿了一个小洞.美国的长期暴露装置(LDEF)的返回材料表面许多被砂蚀的小坑和穿孔,也是碎片所为.具有足够动能的碎片能打穿太阳能电池防护层,造成电池阵短路或损坏电池阵.

由于流星体和空间碎片的动能巨大,对航天器造成的损伤甚至是致命的,因此流星体和碎片成为设计和发射飞行器以及飞行器在轨运行必须考虑的因素.

从“神舟”一号开始,我们就多次根据模式进行了空间碎片的环境分析和碰撞概率分析.在“神舟”五号发射前不同阶段,我们对流星体和不可编目的小碎片对飞船和留轨舱各个部位的撞击概率和击穿概率进行了分析和计算,并进行了大空间碎片环境分析和碰撞预警计算,对预定的发射窗口进行了碎片安全检测分析,结果表明原定发射时间是安全的,充分的分析、详实的数据和结论为“神舟”五号的顺利按时发射的决策提供了重要依据.

## 5 “神舟”五号发射安全期预报和在轨运行的空间环境安全保障

所谓发射安全期预报,就是在发射前对可能影响飞船发射和运行安全的各种空间环境因素作全面的分析和预测,对暂定的发射窗口和在轨运行期的空间环境状况进行预报和评估,为发射窗口的选择提供参考意见.

影响载人飞船发射运行安全的主要空间环境因素包括:高层大气环境、地磁场环境、电离层环境、高能带电粒子环境、空间等离子体环境、太阳电磁辐射、微流星和空间碎片环境等.有时候空间环境各种要素变化是很剧烈的,为保障飞船的发射和运行安全,应尽量选择空间环境条件较好的时期,即太阳活动相对比较平静的日子.对于载人飞船而言安全期的选择就更为重要.太阳活动是近地空间环境的扰动源,太阳表面大的突发事件直接影响到近地空间环境,对人类的通讯、航天等活动产生重要影响.如太阳质子事件可以引起飞船故障,威胁航天员安全;太阳耀斑使电离层产生扰动从而对通讯产生影响;日冕物质抛射引起地磁暴进而影响飞船的轨道和姿控等.可见,太阳活动预报是安全期预报的重要方面.地磁活动水平是反映空间环境扰动的另一个十分重要的指标.地磁暴期间,某些卫星轨道高度上的

大气密度会迅速上升,导致这些高度上的飞船阻力增加,使飞船运行高度下降;有时地磁暴还会伴有电离层暴,严重干扰通讯的正常进行.对于“神舟”五号飞船发射安全期的预测,除了要考虑太阳活动和地磁活动影响外,还要综合考虑流星暴和空间碎片的影响.

太阳上不断发生着的各种活动和现象统称为太阳活动.对地球空间环境影响最大的太阳活动是耀斑和日冕物质抛射(我们常听到的太阳风暴通常是指大的太阳耀斑爆发和日冕物质抛射事件).耀斑是太阳上一种强烈的、短暂的能量释放过程.从地面光学观测来看,耀斑是太阳表面亮度增强的区域.从 X 射线和射电辐射观测来看,耀斑是一种噪声爆发.它们一般持续几分钟到几个小时.耀斑是太阳系能量最大的爆发事件,相当于投放在日本广岛原子弹的 400 亿倍.日冕物质抛射(CME)是指被限制的太阳外层大气突然剧烈爆发,释放出来的泡状或舌头状的气体和磁场.太阳的最外层大气就是日冕区,在这个区域里,物质结构由强磁场控制着,闭合磁力线的上方通常对应的是黑子群.一个大的日冕物质抛射能够包含 10 亿吨被加速到每小时几百万公里速度的物质.被抛射出来的太阳物质在行星际空间中迅速传播,撞击途经的每一个行星或飞行器.日冕物质抛射有时与耀斑相伴随出现,有时独立出现(见图 2).

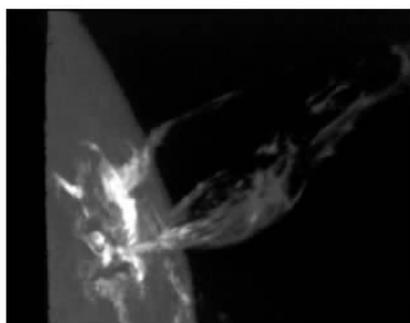


图 2 太阳爆发(耀斑和日冕物质抛射)

引起地磁暴的太阳源有两类:一类是太阳爆发活动;另一类是太阳冕洞.冕洞是太阳上可以持续几个月甚至几年的变化特征.它们在 X 射线照片上看起来就像一个大的黑洞.这些洞的根部就在太阳表面的单极磁场区.它们的磁力线直接伸向太阳系.这些开放的磁力线允许高速太阳风不断向外流出.冕洞具有一定的周期性,但是它并不与太阳黑子周期完全吻合.在黑子数达到极大的年份,冕洞数量要多一些.太阳爆发活动和冕洞都可以发出高速太阳风

流,这种高速的太阳物质和磁场到达地球,撞击地球磁层,从而引发地磁暴。地磁暴是地球表面磁场的一种特殊的变化。地磁暴期间,太阳风的一部分能量被传送到地球磁层内部,从而引起地球磁场在方向和强度上的快速变化。

2003年7月“神舟”五号飞船发射前三个月,空间环境预报中心对10月份的太阳活动水平、地磁扰动水平进行了预测,并针对空间环境对“神舟”飞船发射运行可能产生的影响作了全面的分析。到“神舟”五号发射前,又先后对飞船发射安全期作了三次预报,根据空间环境的发展情况,提出了修正意见,为发射窗口安全期选定提供了及时、有效的参考意见。

太阳活动具有一定的周期性,平均活动周期为11年,可能有时长些,有时短些。太阳活动周是由太阳黑子数的变化来确立的。一个太阳活动周是指两个黑子数最小值之间的时间,2003年处于第23太阳活动周。在太阳活动高年太阳产生爆发活动的频率高、强度大。从太阳黑子数和太阳10厘米辐射通量的观测结果来看,本次太阳活动周是一个双峰结构,第一个峰值出现时间为2000年的4月,第二个峰值出现时间为2001年的11月。从2002年6月开始,太阳活动整体水平呈现下降趋势。预定发射“神舟”五号的2003年已经处于太阳活动下降时期,大的太阳爆发活动的频次和强度都有了明显的下降。通过具体分析2003年上半年产生几次大事件的两个活动区的现状和发展趋势,最后得出结论,这两个活动区经过4个太阳自转周,10月份仍然存在的可能性不大。即使存在,它的活动性也可能大大衰减。

但是从以往太阳活动的历史资料来看,在太阳活动下降段,偶尔爆发较强太阳活动事件的可能性仍然存在,例如1984年,在太阳活动即将进入到1985—1987年的太阳活动低年之际,太阳表面突然出现了一个巨大的黑子群,并产生了二十几个M级耀斑和三个X级耀斑,最大的一次耀斑级别为X13(图3)。因此,我们在第一次安全期预报中特别指出,从当时到10月份还有三个月的时间,有可能产生新的重要活动区。因此,还将密切关注可能出现的新的重要活动区的产生和发展,并在后续的预报中不断修正预报结果。

在地磁暴方面,前面我们提到过,影响地磁活动水平的主要因素有日冕物质抛射(CME)和周期性的太阳冕洞高速流两类。随着太阳活动水平的下降,影响地磁活动的主要因素逐渐由日冕物质抛射

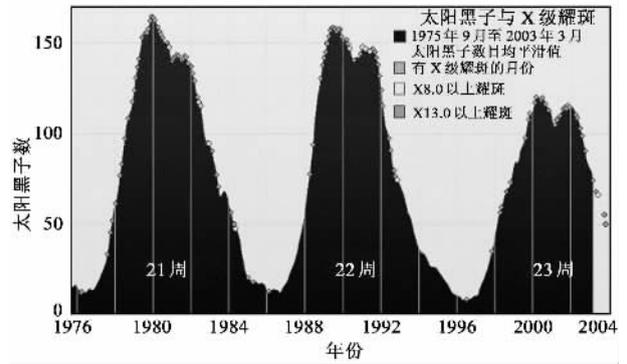


图3 近三个太阳活动周的太阳黑子数和X级耀斑<sup>[4]</sup>

(CME)向周期性的太阳冕洞高速流过渡。2003年两种机制都还存在,但影响地磁活动的主要因素是冕洞高速流,由CME引起的地磁扰动频次大大减小。因此,在安全期预报中主要关注的是2003年以来存在于太阳表面赤道附近的冕洞情况。在全面分析了当时日面上存在的五个冕洞的现状和发展趋势后,发现在10月份最可能地磁影响较大的是当时已经稳定地存在了10个月的一个冕洞,该冕洞对地磁的影响为小磁暴级别。但是由于地磁活动具有明显的季节特性(统计显示,每年的两分点附近,即每年的春秋分,都是地磁活跃的阶段,同样大小的扰动引起的地磁活动往往更剧烈),考虑到10月份正好处在秋分点附近,冕洞对地磁影响可能会有所加强。关于“神舟”五号发射期间地磁扰动预报结论是:10月份地磁活动主要受冕洞发出的高速太阳风影响,其中在10月13—15日地磁活动可能达到中等扰动水平。事后观测结果表明:受冕洞影响,2003年10月14日—16日地磁受到长时间扰动,最大 $K_p$ 指数达到了7,属于小到中等地磁扰动水平。该结果与前面的预报结论基本一致。

在飞船发射、运行和回收以及留轨舱运行阶段,预报中心对空间环境进行实时的监测预报,为飞船的发射、运行和回收提供了全程的空间环境安全保障。保障内容是在飞船的发射和自主运行段,对太阳活动、行星际空间、近地空间环境进行不间断的监测、实时监控空间环境的变化,提供了射前1小时、发射时和在轨运行期间每隔5圈一次的空间环境预报,同时利用中心集成建立的航天员辐射剂量预测软件,根据在轨运行时的高能辐射环境和实际轨道根数,实时计算航天员接受的辐射剂量,利用碎片碰撞预警软件,对真实入轨时刻进行碎片碰撞预警计算评估。在“神舟”五号留轨段,密切监视空间环境

的变化,每天提供一次空间环境监测和预报结果,为“神舟”五号留轨舱提供空间环境安全保障.10月22日开始,太阳表面出现多个重要活动区,空间环境预报中心加强了对太阳活动的监视和预报分析工作.并指出,在未来一段时期内太阳将产生剧烈爆发活动,并可能引起强烈的近地空间环境扰动,从而对“神舟”飞船留轨舱造成一定的影响.10月26日开始爆发了一系列大的空间环境扰动事件,预报中心对这些事件及其对“神舟”留轨舱的影响进行了连续的预报和分析.对太阳活动与地磁活动可能导致“神舟”五号留轨舱轨道加速衰减的结果作了充分估计,并先后发出了五次警报.同时,对此期间太阳质子事件对飞船舱内各系统的影响作了仔细的计算分析,得出了太阳质子事件的高能质子不能到达飞船轨道,不会对飞船造成影响的结论.

实际结果表明,我们对事件的预测以及太阳质子事件和地磁暴可能对“神舟”飞船留轨舱影响的分析是正确的.

### 3 结束语

在“神舟”一号到“神舟”四号飞船四次无人飞行试验任务和“神舟”五号首次载人飞行任务中,空间环境预报中心为飞船的发射运行和航天员安全作了充分的准备和大量的保障工作,为上级部门决策提供了重要依据和参考建议,也充分显示了空间环境保障在载人航天工程中发挥的作用.但是,随着我国航天事业的不断发展,对空间环境保障的要求将越来越高,任务越来越艰巨.我国的空间环境保障依

然任重道远.在“神舟”六号以及我国未来的载人航天计划中,飞船在太空的运行时间将不断增加,高能带电粒子对航天器材料、电子器件及航天员的辐射效应也相应增加,高层大气对轨道影响以及轨道维持的问题也将更加突显出来,空间环境的安全保障将要面临更多新的要求、新的挑战.我们必须不断提高对空间环境变化规律的认识水平和预报能力,进一步深化研究空间环境对航天器和航天任务的影响,更好地为我国的航天事业保驾护航.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 涂传诤. 日地空间物理学. 北京: 科学出版社, 1988 [ Tu C Y. Solar-Terrestrial Space Physics. Beijing: Science Press, 1988 ( in Chinese ) ]
- [ 2 ] 都亨, 叶宗海. 低轨道航天器空间环境手册, 北京: 国防工业出版社, 1996 [ Du H, Ye Z H. Handbook of Space Environment at Low Spacecraft Orbit. Beijing: National Defence Industry Press, 1996 ( in Chinese ) ]
- [ 3 ] 叶宗海. 物理, 2004, 33 40 [ Ye Z H. Wuli ( Physics ), 2004, 33 40 ( in Chinese ) ]
- [ 4 ] Francis Reddy. Celestial Delights Online, <http://celestialdelights.info/>
- [ 5 ] Wilson J W, Cucinotta F. Human Exposure in Low Earth Orbit. NASA TP-2344, 1984
- [ 6 ] Billings M P, Yucker W R. NASA CR-134043, 1973
- [ 7 ] Billings M P, Langley R W. MDAC Paper WD 2355, McDonnell Douglas Astronautics Co., July 1974
- [ 8 ] 刘静等. 载人航天, 1998(3) 8 [ Liu J et al. Manned Space Flight, 1998(3) 8 ( in Chinese ) ]
- [ 9 ] 刘静等. 载人航天, 1997(1) 47 [ Liu J et al. Manned Space Flight, 1997(1) 47 ( in Chinese ) ]
- [ 10 ] King-Hele D G. Satellite Orbits in An Atmosphere, Theory and Applications, Blackie and Son Ltd., London, 1987

· 读者和编者 ·

## 2004 年第 6 期《物理》内容预告

#### 特约专稿

物理工作者与产业( 克里夫·沃伦 ).

#### 研究快讯

碳纳米管——一种新的巨电致变形纳米智能材料( 唐淳等 );  
交叉传播相对论强激光脉冲在等离子体中相互作用及其对  
电子加热和加速的作用( 盛政明等 ).

固态量子计算的若干重要物理问题研究( 李树深等 ).

#### 评述

面向产业需求的 21 世纪微电子技术的发展( 王阳元等 );  
稀磁半导体——自旋和电荷的桥梁( 常凯等 ).

#### 前沿进展

组合材料芯片技术及其应用( 徐文兰等 );

超热电子的产生与定向发射( 郑志远等 );  
大气压辉光放电研究现状及应用前景( 张锐等 ).

#### 物理学和高新技术

高压电场浓缩流体物料技术的研究及进展( 丁昌江等 );  
微波加热技术的应用与研究进展( 牟群英等 ).

#### 实验技术

等离子体通道的声学诊断方法( 郝作强等 );  
Thomson 散射诊断技术的新进展( 于全芝等 ).

#### 物理学史和物理学家

威耳逊云室的发明和霍秉权的改进( 牙述刚等 );  
杰出的物理学家阿伯拉罕·派斯和他的物理学史著作( 关洪 ).