

“实践四号”及空间带电粒子探测

都 亨

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

1 空间带电粒子及其效应

在空间环境诸因素中,带电粒子的影响最为突出。其中高能带电粒子的剂量效应曾是50年代、60年代空间环境研究的主要问题,为此有数十颗卫星进行了探测,在70年代编制和公布了辐射带的分布模式,初步满足了要求。但是到70年代末,在卫星上大量采用了大规模和超大规模积成芯片以后,又发现一个高能的质子或重离子就可能导致卫星控制系统发生逻辑紊乱,或存储的信息被破坏,造成严重的后果,被称为“单粒子事件”。于是在80年代重又掀起高能粒子研究的高潮。以等离子体形式存在的低能带电粒子的研究也有一个曲折的过程。在60年代,一般认为它的能量很低,对航天器不会造成破坏。60年代末美国在对地同步轨道上运行的通讯卫星接连出现故障,有的甚至遭到彻底损坏,从工程上连故障的原因都找不出来,更无法解决。在分析故障发生的时间、地点以及卫星当时、当地所处的环境,才发现高温等离子体是故障的原因,它可以使卫星充电到数万伏的高电压,高压放电即可产生干扰,严重的会使卫星彻底损坏。

近地空间的带电粒子中的高能带电粒子可分为两类。一类是来自宇宙空间,称为宇宙线,包括来自太阳的太阳宇宙线和来自银河的银河宇宙线。它的主要成分是质子和重元素的离子,能量很高,每个核子的能量为数兆电子伏到数百兆电子伏甚至更高。另一类是被地球磁场捕获,长期在地球周围运动,构成带电粒子强度特别大的区域,称为辐射带。主要由电子和质子组成,电子能量在100千电子伏到数兆电子伏之间,质子能量在1兆电子伏到数百兆电子伏以上。辐射带的下边缘高度约数百公里,质子最大强度在赤道面上的高度约6000—7000公里,电子最大的强度在一万多公里。

近地空间中的低能带电粒子又称空间等离子体,它们的能量从几个电子伏到几十千电子伏。作为背景的等离子体能量都只有几个或几十个电子伏,构成宁静时的等离子体层。在地球磁场发生扰动时,从磁尾将注入能量高达数十千电子伏的高能等离子体,它们即是使航天器充电的主角。

2 “实践四号”及有效载荷

“实践四号”即是以探测近地空间带电粒子的能谱和空间分布,以及它们的充电效应和单粒子事件效应的专门卫星。

收稿日期:1994年4月22日。

发射日期: 1994 年 2 月 8 日

轨道: 近地点高度 210 公里, 远地点高度 36125 公里, 平面倾角 28.6° , 周期 10.5 小时。

重量: 400 公斤

外形: 直径 1.6 米圆柱, 高 2.176 米

运载火箭: 长征三号甲

大扁度的卫星轨道最适宜于带电粒子研究, 卫星每天多次穿过辐射带, 从辐射带的下边缘(近地点附近)开始, 经过辐射带强度最大的核心地带, 一直到达辐射带以外的区域, 可以得到辐射带完整的分布数据。卫星在热等离子体充电问题最严重的对地同步轨道附近将停留比较长的时间, 有机会充分了解等离子体状况和卫星充电的状况。

有效载荷共有 6 台。

2.1 半导体高能电子谱仪

测量能量范围: 0.5—4.0 兆电子伏共分 5 档

功耗: 1.0 瓦

重量: 2500 克

外形尺寸: $214 \times 125 \times 160$ 毫米³

几何因子: 0.0274 厘米²·单位立体角

传感器由 3 块直径 8 毫米的半导体探测器组成一望远镜, 第一块是厚度 300 微米的金硅面垒探测器, 第二、三块是厚度 3500 微米的锂漂移硅探测器。利用电子在探测器中的能量损失, 通过能量分析、符合与反符合原理, 测量电子能谱并去掉质子和重离子的信号。电子学部分包括电荷灵敏前置放大器、成型电路、主放、微分和积分电路、高压电源、噪声监测等部分组成。

2.2 半导体高能质子重离子探测器

测量能量范围: 质子, 4—300 兆电子伏; 重离子, 每核子 4—25 兆电子伏

功耗: 1.2 瓦

重量 2070 克

外形尺寸: $214 \times 125 \times 160$ 毫米³

几何因子: 0.1105 厘米²·单位立体角

传感器同样是由 3 块半导体探测器组成的望远镜, 直径 12 毫米, 第一块是 100 微米厚的金硅面垒探测器, 第二、三块为厚度是 3500 微米和 3000 微米的锂漂移硅探测器。质子能量根据它在探测器中损失的能量来确定。重离子的分析则是根据它在第一块探测器中损失的能量 ΔE , 和粒子总能量 E 的乘积正比于入射粒子的质量和电荷数平方的乘积来进行。

2.3 静电分析器

测量能量范围: 电子, 100 电子伏—40 千电子伏; 质子, 100 电子伏—40 千电子伏

功耗: 1.4 瓦

重量: 6000 克

外形尺寸: $(150 \times 150 \times 140 + 300 \times 152 \times 158)$ 毫米³

带电粒子能量分析部分是 1/4 球形静电分析器,外壳直径 120 毫米,内壳直径 116 毫米,内表面刻有锯齿状条纹。所加最高电压为 3700 伏,分 16 阶梯逐级变化,并交替改变内外壳的极性,相应得到 16 个电子和质子的能谱。出口处用 7 个道倍增器分别测量来自 7 个方向的带电粒子,以获得带电粒子的角分布。

2.4 电位差计

测量范围: 顶部和底部, -6.4 千伏—+1 千伏;腰带, -700 伏—+300 伏

功耗: 1.4 瓦

重量: 1000 克

外形尺寸: $150 \times 128 \times 120$ 毫米³

为测量卫星不同部位的电位状况,共设置了 3 个传感器,一个在卫星顶部、一个在底部、一个在腰带上。采用电容分压原理探测高电位。传感器为直径 28 毫米,厚 0.4 毫米的光学石英玻璃片组成,内层镀金连接芯线引出。电路部分包括电压跟随、采样保持、反相放大、电平移动、钳位等。

2.5 静态单粒子事件监测器

功耗: 4 瓦

重量: 4500 克

外形尺寸: $170 \times 210 \times 110$ 毫米³

测量芯片容量: 2 兆字节

传感器是 13 块芯片组成的 SRAM 存储器,总容量为 1 兆字节,由 MSC-51 单片机进行控制每 5 分钟一次,检测存储器内容,记录下内容发生变化的地址及变化后的状态。为考查屏蔽效应,传感器分为不同屏蔽厚度的两个区域。为提高程序抗干扰能力,硬件上增加了程序监视定时器,在软件设计上也增加了指令冗余、软件陷阱等措施。

2.6 动态单粒子事件监测器

功耗: 2.8 瓦

质量: 4900 克

外形尺寸: $268 \times 230 \times 214$ 毫米³

主要监测高能粒子在随机访问存储器中引发的软错误和硬错误。并进行星载计算机环境适应性研究包括硬件和软件的抗辐射技术、加固对策及其有效性验证以及软件容错性考验。试验的随机存储器容量为 1 兆字节,由 80C86 作中央控制器。检测程序有自检,时间分辨率高,地址分辨率到字节物理地址。输出程序可实现准打包传输,采用纠一查二码和连续重发等功能。有地面遥控重新起机和调用备份程序功能。

可以看出,在探测项目的安排上有以下 3 个特点:

第一,探测的能量范围宽,几乎覆盖了对航天器有影响的全部能量范围;

- 第二,探测成分全,包括电子、质子和重离子;
- 第三,同时测量环境参数和效应,能为环境研究提供完整的对比数据。

3 运行情况和初步结果

“实践四号”卫星于2月8日升空以后,各项探测仪器工作正常,西安卫星测控中心和空间中心北京小牛房接收站已收到大量的遥测数据,初步分析表明所有的有效载荷工作是正常的,近地空间的带电粒子对卫星的影响是十分严重的。

高能电子探测器和高能质子重离子探测器的数据,给出了近地空间各个区域内的高能电子、质子和重离子的能谱,初步描绘了它们的强度随时间变化的过程以及强度的空间分布。与国外模式得到的相应的量作比较,大尺度的平均状态虽然相近,在局部区域的细节上和数值上有较大的出入,需要作进一步的分析和研究。所得数据对我们进一步了解、掌握和运用国外模式有极大帮助,在个别情况下有可能对模式作局部的修正。

我国第一次在空间直接进行单粒子事件测量的两台监测器收获丰硕。静态单粒子事件监测器在2月8日入轨以后10小时53分05秒即测到第一次单粒子事件,发生在随机存储器阵列最外面的一块板上的IDT7164静态存储器中,存储的信息由“FF”变成了“FD”。事件次数与日俱增,在到2月27日的19天内共发生了65次翻转,平均每天3.4次。在此监测器上装有一块作为试验件的EPROM(INTEL公司的MD27C64),在发射前写入的信息除一个地址中是“CC”外,其余全是“5A”,从2月27日开始,存储的信息被大量改写,到3月13日全部被改写成“FF”,或者说全部写入的信息都被“擦除”了。而这种存储器在地面只有用紫外光才能擦除。存储器在星上有1毫米的蒙皮遮挡,紫外线是不能进入的,初步分析为高能电子在蒙皮上产生的韧致辐射(软X射线)造成的(这一推论尚需通过定量的数值模拟和加速器模拟进一步验证)。动态单粒子事件监测器也测到了大量的翻转事件,在2月16日的一个时段(36小时)共发生了16次翻转事件,其中由“0”状态向“1”状态翻转的3次,由“1”状态向“0”状态翻转的13次。

最有意义的是动态单粒子事件监测器本身经历了一次单粒子事件的考验,由于研制单位在设计上作了周密的考虑,通过遥控操作使监测器恢复正常工作。2月27日遥测数据显示星上直流稳压电源供给的5伏电压失常,只有2伏左右,由它供电的动态单粒子事件监测器、静电分析器和装在腰带上的电位差计的遥测数据紊乱,温度监测显示电源温度急剧上升约 5° ,动态单粒子事件监测器温度上升约 2° ,静电分析器温度下降约 4° ,电位差计温度无明显变化。3月24日,根据上述仪器的温度变化过程,判断是由于动态单粒子事件监测器使用的CMOS组件发生锁定,出现“可控硅现象”,这正是高能带电粒子诱发的典型的单粒子事件,由于设计探测器时即考虑到有可能出现类似事件,并预置了挽救措施,在电源处安排了短时中断电源(相当于冷起动)的遥控指令。3月26日8时05分,由西安卫星测控中心发出该项遥控指令,从随后收到的遥测数据分析锁定现象已经排除,电源电压恢复正常,3台探测器也恢复正常工作。

电位差计多次测量到卫星不同部位被充电到不同的较高电位的情形,典型的例子是2月14日卫星被充电的情况,卫星顶部的电位差计出现-2000伏以上的高压,持续时间

达 3000 秒以上,而底部电位差计的输出无明显的变化,其原因是底部在太阳光照射下光电子中和了等离子体的充电效应,继续保持低电位,顶部则相反,高温等离子体使卫星充电到高的负电位。静电分析器同时进行的等离子体测量表明有大通量的 1—10 千电子伏的等离子体。两者间的关系与理论预期的大致吻合,为空间等离子体充电效应的研究提供了第一手资料。

4 结束语

在国内各部门的支持下,我国第一颗大椭圆轨道的空间环境和效应的探测卫星按计划发射升空,取得了大量的宝贵数据,使我国能够有机会在自己的探测数据基础上开展空间环境的研究,这是一个很好的开端。初步的分析已经得到许多有意义的结果。但是,我们还必须清醒地看到空间环境研究的复杂性,一颗卫星的探测结果只是杯水车薪,还远远不能满足需要。与国外数十年来数百颗卫星进行的探测相比,无论在数量上还是在质量上,都还有较大的差距,还需进一步努力。