

# 实践五号卫星科学试验的初步成果

孙辉先 蔡金荣 王世金 林云龙 都 亨 朱光武

叶宗海 于沛玲 常德章 叶文学 廖方宇

(中国科学院空间科学与应用研究中心)

姚永龙

(中国科学院力学研究所)

## 摘要

实践五号卫星 1999 年 5 月 10 日在太原卫星发射中心成功发射后经过 90 天的在轨运行，其主要科学实验任务已经顺利完成。本文就实践五号卫星科学试验的初步成果和意义作一简介。

## 关键词 科学试验 初步成果

### 1. 实践五号卫星的主要任务

实践五号卫星的主要任务是：进行空间单粒子事件测量及对策研究试验，并进行空间高能带电粒子环境和剂量测量；对新型航天器中 S 波段高速数传发射机、大容量固态存储器及其与地面 S 波段接收站联试等进行试验；进行空间流体科学试验。

### 2. 实践五号卫星有效载荷

星上 11 台有效载荷设备是由中国科学院空间科学与应用研究中心及中国科学院力学研究所自行设计和研制完成的，11 台有效载荷设备完成了卫星的主要任务，这 11 台设备是：

(1) 空间单粒子事件测量及对策研究试验、空间高能带电粒子环境和剂量测量的设备有 8 台：单粒子事件检测器、单粒子事件屏蔽效应试验仪、单粒子事件翻转试验仪、单粒子事件综合试验仪、单粒子锁定试验仪、高能质子重离子探测器、高能电子探测器、辐射剂量仪。

(2) 新型航天器中新技术实验的设备有 2 台：S 波段高速数传发射机、大容量固态存储器。

(3) 空间流体科学试验的设备是：流体两相流液池。

### 3. 有效载荷的主要实验研究结果

#### 3.1 流体科学实验

5 月 12 日至 5 月 19 日是空间流体科学实验阶段，共进行了 33 次实验。获得了大量有学术价值的科学数据，其中包括流体运动图象 12000 余幅，温度记录曲线近三十小时。完成了流体科学实验任务。初步分析得到流谱图和液池内的速度场分布，以及微重力条件下定常流和非定常流的对比图象。大量科学数据有待于进一步分析。预计将获得国际微重力流体力学领域的重要成果。

此次实验首次在我国应用了遥科学的手段，即地面载荷专家通过对空间实验实时下行的图象及温度场分布等实验数据的分析、研究，实时或延时修改空间实验进程、变更实验参数，以期发现、揭示未知的现象和规律。实验中实时变更控温参数，改变温度场边界条件，延时控制实验对象的选择，以及温控模式和执行时间的变更等一系列参数状态的调整，验证了遥科学的可行性，为我国遥科学的发展积累了经验。

本次实验采用固-液相发射，入轨后熔化为液-液相研究多层流体对流的实验方法，并取得了成功，大大简化了实验方案。这方案在国际上是首创的。

作为技术验证，实验的成功表明了我国自行研制开发的空间实验硬件是可靠的，且费效

比是国外同类实验的 10 倍。同时为今后的空间流体实验装置的研制，积累了大量宝贵经验。

### 3.2 新型航天器技术实验

#### 3.2.1 S 波段高速数传发射机和地面接收站

从 5 月 11 日至 8 月 10 日，S 波段高速数传发射机工作正常，中国科学院空间中心密云地面接收站工作正常，空-地数传信道正常，设备工作匹配良好，圆完了成天-地对接试验和数据的传输、接收任务。主要表现在以下三个方面：

##### ① 成功传输大量科学实验数据

作为 SJ-5 卫星的 S 波段高速数传通道，在 5 月 12 日至 5 月 19 日进行的空间流体科学实验中，S 波段高速数传发射机共为流体科学试验下传了流体图象 12000 余幅、温度数据和工程参数，累计工作近 30 个小时。完成了流体科学实验数据的传输任务。从 5 月 20 日至 8 月 10 日，又完成了大容量固态存储器科学试验数据的传输任务。

##### ② 传输质量

在对日定向三轴稳定阶段，S 波段数传系统传输误码率优于  $1 \times 10^{-7}$ （在接收仰角 5° 以上时）。

在对日定向自旋稳定（自旋速率约为 4 转/分）阶段，由于星上数传天线存在覆盖盲区，传输误码率略有下降，达  $3.5 \times 10^{-6}$ （在接收仰角 5° 以上时）。

上述统计结果验证了信道设计和计算的正确性。

##### ③ 发射机性能的检验

从 5 月 11 日至 8 月 10 日，抽取 10 次发射机过境开机工作的遥测数据统计，功率输出遥测值的变化范围：3.37V~3.47V，本振锁定遥测值变化范围：1.14V~1.22V。这表明，发射机主要工作性能的工程参数功率输出和本振频率几乎没有变化，表明发射频率和功率稳定，发射机的工作状态良好。

##### ④ 地面接收设备正常

用户地面站的全部引进设备和自制配套设备在整个任务期间工作状态良好。接收的图象清晰、数据完整。完成高速数据的接收任务。

#### 3.2.2 大容量固态存储器

5 月 20 日至 8 月 10 日进行大容量固态存储器在轨试验和考核。由于该设备中许多新技术是在国内航天器上首次使用，因此获得了许多重要的飞行试验数据。根据下行数据分析，设备工作正常，达到了预期的结果。

##### ① 数据综合传输

在轨试验中，卫星过北京站时，高速多路复接器按照 CCSDS “高级在轨系统网络与数据链路”建议书的数据格式，将来自 1553B 总线的低速数据和大容量固态存储器存储回放的高速数据复接为一路，以 1.024Mbps 的速率下行，下行数据正确，高速多路复接器性能稳定、传输可靠。验证了高速多路复接器的功能和系统传输的准确性和可靠性。

##### ② 大容量数据存储

在轨试验中，进行了大容量数据存储和 R-S 编码检错纠错，验证了大容量固态存储器的功能和高密度的存储器件在空间环境下的适应性及 R-S 编码检错纠错的有效性。

由于大容量固态存储器下行数据量大，数据处理时间长，目前只进行了部分数据的分析。从已分析的数据来看，数据存储正确。通过对纪录的单粒子事件内容和经 R-S 纠错编码后下行的数据进行比较，R-S 纠错编码有效。

##### ③ 1553B 总线通讯

在轨试验中，进行设备内置的总线控制器和远程终端的 1553B 总线通讯。

整个设备在轨运行期间，1553B 总线控制器软件组织了总线通讯，并且将全部的 1553B 总线通讯过程记录存储在大容量存储器中，在过北京站时下行。通过对 1553B 总线下行数据

进行处理分析，表明 1553B 总线接口电路和 CPU 主板工作正常，软件组织总线通讯正常。特别是通过对于星上 1553B 总线通讯过程的进一步分析，得到了 1553B 总线网络性能的重要参数，如总线负载率，总线周期，总线发送遥测源包统计，总线广播消息和各类消息统计，长包环测试统计，A/B 总线通讯统计，错误统计等大量参数，同时也得到了设备许多重要的运行参数。这些重要参数准确、充分地验证了 1553B 总线工作的稳定性。

#### ④ 单粒子事件监测

大容量固态存储器软件在轨运行期间，对高密度的存储器件进行了单粒子事件监测。单粒子事件监测数据是通过卫星遥测下行的，根据获得的数据分析，该存储器件在 SJ-5 卫星轨道下产生单粒子事件的翻转概率约是 0.2 次/Mbits·天，略低于其它同类产品。到 8 月 10 日为止没有发现存储器件的任何永久性失效现象。

### 3.3 空间单粒子事件测量及对策研究试验

#### 3.3.1 单粒子事件检测器

5 月 20 日—8 月 10 日，在该设备的双 80C31CPU 互检中，128 KB 的 SRAM 中发生了 71 次单粒子翻转事件；对 SRAM 中由单粒子翻转引起的 71 个错误数据，用 R-S 编码纠错法进行纠正，经 R-S 纠错编码后的数据和翻转前的数据进行比较，由下行的科学数据判断，R-S 纠错编码有效。5 月 20 日至 6 月 10 日，在 PC/104-486DX 中，2MB 的 DRAM 中发生了 85 次单粒子翻转事件，对这 85 个由单粒子翻转引起的错误数据，经 R-S 纠错编码后，数据全部正确。

128 KB 的 SRAM IDT71024S2SLB 的翻转率为：1.1SEU/Mbits 天。

2MB 的 DRAM HYB51816QMSJ-50 的翻转率为：0.26SEU/Mbits 天（和大容量固态存储器中 DRAM 的翻转率相当）。

以上结果表明：用 R-S 编码纠错来纠正静态 RAM 和动态 RAM 数据存储器中数据的单粒子翻转事件有效。

#### 3.3.2 单粒子事件屏蔽效应试验仪

5 月 20 日—8 月 10 日，在该仪器中 3 片 27C64 EPROM 不论屏蔽的，还是不屏蔽的，均还未发生擦除现象；2 片 28C64 E<sup>2</sup>PROM，不论屏蔽的，还是不屏蔽的，均未发生单粒子翻转，与地面试验结果相同；在 280Kbytes 的 SRAM 中，共检测到 123 次单粒子翻转事件（这些事件大多发生在南大西洋异常区），其中大多发生在未屏蔽的芯片中。

在 6 月 2 日和 6 月 5 日太阳爆发质子事件期间，记录到单粒子翻转事件的次数比平常增加。

#### 3.3.3 单粒子事件翻转试验仪

5 月 20 日—8 月 10 日的 81 天中，在 448KBytes 的 SRAM 中，共检测到 258 次单粒子翻转事件（这些事件大多发生在南大西洋异常区）。其中在 2 片 128KBytes 的 SRAM 中发生了 133 次单粒子翻转事件；在 4 片 32KBytes 的 SRAM 中发生了 102 次单粒子翻转事件；在 6 片 8KBytes 的 SRAM 中发生了 16 次单粒子翻转事件；在 8 片 2KBytes 的 SRAM 中发生了 7 次单粒子翻转事件。81 天中总平均 0.71 次/Mbits·天。

在 6 月 2 日和 6 月 5 日太阳爆发质子事件期间，记录到单粒子翻转事件的次数比平常增加。

#### 3.3.4 单粒子事件综合试验仪

5 月 20 日—8 月 10 日，遥测工程参数正常，预设置的遥测科学数据正确，仪器工作正常。

8 月 10 日星上时 3881087 秒，仪器时钟的累计时间值为 3016403 秒（34.9 天），8 月 10 日时，仪器时钟为 81 天，说明仪器监视系统自开机以来未出现死机及复位现象。

从 5 月 20 日至 8 月 10 日，工业级的 80C31CPU 和军品级 80C86CPU 都未出现单粒子翻转及锁定；航天科技集团公司 771 研究所研制的抗辐射加固的 SRAM 芯片中，也未发现单粒子翻转事件。

### 3.3.5 单粒子锁定试验仪

5月20日至8月10日，仪器遥测工程参数正常，预设置的遥测科学数据正确，仪器工作正常，但未出现单粒子锁定事件。

从下行的遥测数据分析，本仪器获得了被测器件电流和供电电压的波动的情况，供电电压最低下降到4.68V，这些数据为研究环境对器件的影响提供了一些在轨测量资料。

### 3.4 空间高能带电粒子环境和剂量测量

#### 3.4.1 高能质子重离子探测器

5月20日—8月10日，高能质子重离子探测器工作正常。用我国自行研制的仪器获得了在这一轨道上南大西洋异常区和两极沉降区的高能质子的能谱分布和空间分布。

#### 3.4.2 高能电子探测器

5月20日—8月10日，高能电子探测器工作正常。首次用我国自行研制的仪器获得了在这一轨道上南大西洋异常区和两极沉降区的高能电子的能谱分布、空间分布和投掷角分布。

#### 3.4.3 辐射剂量仪

5月20日—8月10日，首次在卫星上对辐射总剂量进行测量，测量到的辐射剂量累计结果如下：

屏 蔽 厚 度	探 测 结 果
温控包扎层+卫星蒙皮	140 rad
温控包扎层+卫星蒙皮+1.0mm	93 rad
温控包扎层+卫星蒙皮+1.5mm	46 rad

## 4. 成果及意义

SJ-5 卫星有效载荷 90 天的在轨运行获得成功。已经获得的大量科学数据有待于进一步分析，从已经分析处理了的部分数据来看得到了以下成果和结论：

### (一) 空间单粒子事件效应及对策研究和空间高能带电粒子环境研究方面：

通过处理和分析大量探测数据可以得到以下结论：

(1) 在这个轨道上辐射总剂量引起的故障不严重，约为 2rad (Si) /天，而一般器件耐辐射剂量为 5Krad (Si) 以上。

(2) 单粒子引起的锁定是很危险的，但在这一轨道上发生单粒子锁定的概率很小；在这一轨道上 80C86CPU 和 80C31CPU 中的寄存器发生单粒子翻转的概率也是很小的。到 8 月 10 日尚未检测到这两类事件。

(3) 在这个轨道上单粒子翻转发生概率：

SRAM 约为 0.5—4 次/Mbits.天，

DRAM 约为 0.2—1 次/ Mbits.天；

(4) 屏蔽可以减少单粒子翻转的概率但不能完全避免单粒子翻转。

(5) 纠错编码对克服单粒子翻转引起的错误有效，星载计算机硬件和软件设计上，必须充分考虑单粒子引起的翻转的影响。采用硬件和软件 EDAC 的容错设计，是避免单粒子翻转效应的有效方法。

(6) 单粒子翻转发生的概率与太阳质子事件有正相关关系，通过空间环境观测与预报，使一些重要航天器避开较强的太阳质子事件是减少空间飞行器故障的有效办法。

(7) 在这个轨道上运行 81 天中，27C64 EPROM (INTEL 公司) 未发生擦除现象；28C64 E<sup>2</sup>PROM (ATMELG 公司) 也未发生单粒子翻转。

(8) 在这个轨道上，单粒子翻转事件主要发生在南大西洋异常区。

(9) 在我国首次获得两极沉降区电子分布；首次获得辐射带质子和电子角分布。

(10) 在我国首次获得极轨卫星辐射总剂量值。

(11) 工业级或商业级器件有可能在空间环境下可靠运行，但必须经过严格而有效地筛选。

这次研究是中国科学院空间科学与应用研究中心继实践四号卫星之后在轨道上进行的一次更大规模、更全面的单粒子效应与对策研究并进行相关空间带电粒子环境及辐射剂量的测量。在国内首次在轨道上进行单粒子对策研究试验，这次研究使用了八台有效载荷，实验的单粒子对策几乎包含了目前国际上已知的所有方法。对高能带电粒子的能谱测量范围也是最全的一次，辐射总剂量测量在我国也是第一次进行。这次实验中首次用我国自行研制的仪器获取了在这一轨道上南大西洋异常区和两极沉降区带电粒子的分布。所取得的大量探测数据和得到的结论对改进我国空间飞行器电子系统的性能、提高系统的可靠性、延长卫星的寿命；对如何在卫星中采用普通市售工业级或商业级器件取代昂贵的航天级专用器件；在卫星特别是小卫星的研制中走出一条“快、好、省”的新路，从而推动我国空间技术的发展有着重要的意义。

**(二) 新型航天器的新技术实验方面：**

验证了分布式数据管理系统、1553B 总线、CCSDS 数据传输标准、高速多路复接技术、现场可编程门阵列（FPGA）技术、DRAM 固态大容量存储器、S 波段数传发射机等新技术能够适应于太阳同步轨道的空间环境。但是无论 SRAM 还是 DRAM 都会因单粒子事件而发生翻转，硬件和软件设计中必须充分考虑到这一问题，采取必要的防范措施，否则将影响电子仪器在空间环境中的正常运行。

这是我国首次成功的在空间飞行器上应用国际上先进的 CCSDS 数据传输标准、1553B 总线、DRAM 固态大容量存储器、S 波段数传发射机等新技术。这些实验结果和取得的大量在轨运行数据对于新型航天器电子与信息系统的应用与设计与改进、对于推动我国星载数据管理与传输技术的发展有重要意义。

**(三) 微重力流体科学实验方面：**

在我国卫星上首次成功地进行了微重力流体科学实验，并在实验中首次成功地应用了遥科学手段。实验中观测到微重力条件和低重力条件下的热毛细对流与浮力对流的耦合现象和大量未知的现象，对这些现象和规律的研究必将推动我国流体物理学的发展。微重力流体力学与空间材料科学（晶体生长）、空间生命科学（细胞培养）等学科有紧密的联系。多层次热毛细对流是近年来国际微重力流体科学研究的前沿课题之一，不仅对发展和改善空间晶体材料生长方法和晶体品质有现实意义，并且对深入认识地面上具有自由面或界面的流体对流运动的特征和机理等流体物理领域的基础问题有重要意义。

这次微重力流体科学实验在我国是第一次，在世界上也是首次在卫星上实现如此复杂的微重力流体力学实验。