

SJ-5号卫星空间流体实验系统

—开展遥科学实践

胡行毅 孟新 苏建 李保和 姚永龙 刘秋生 刘方 胡良
(中科院空间中心 北京 100080) (中科院力学研究所 北京 100080)

摘要

本文详细介绍了 SJ-5 号科学卫星微重力流体实验的用户系统的体系与配置及其对空间科学实验的支持。该系统在 SJ-5 号空间流体 8 天的实验过程中，取得约 12000 幅流场图象和 30 余小时全程多路温控温测数据，实现了两层流体在两个液池内的不同物理模型的实验，并通过姿控模式的改变实现在两种微重力水平下的对比实验。这是我国科学家首次以实验图象为判据的天地可交互方式完成的空间微重力流体科学实验研究。

关键词

遥科学 空间实验 微重力 空间流体

1 概述

SJ-5 号科学卫星以搭载方式发射升空，轨道倾角为 98.9° ，轨道高度为 870KM 的太阳同步极轨圆轨道卫星，星上剩余加速度为 $10^{-4}g$ ，星上主要的有效载荷为空间流体实验装置和空间环境探测仪器。进行空间流体实验是该卫星的主科学实验任务之一。

SJ-5 号空间流体实验项目属于我国飞船应用系统的前期研究工作。它研究两层流体在微重力温度场下的热毛细对流和浮力对流以及它们的偶合现象，研究的成果将促进微重力科学的发展，为空间加工提供理论依据；并计划通过此次实验在我国取得基本的遥科学的实践经验提高空间实验的质量与效率。

要实现 SJ-5 号空间流体实验，除需要空间段任务支持系统外，升空后实验的操作与管理主要依靠有科学实验用户参与实验交互的地面任务支持系统——地面用户系统。图 1 为地面用户系统的体系结构原理图。

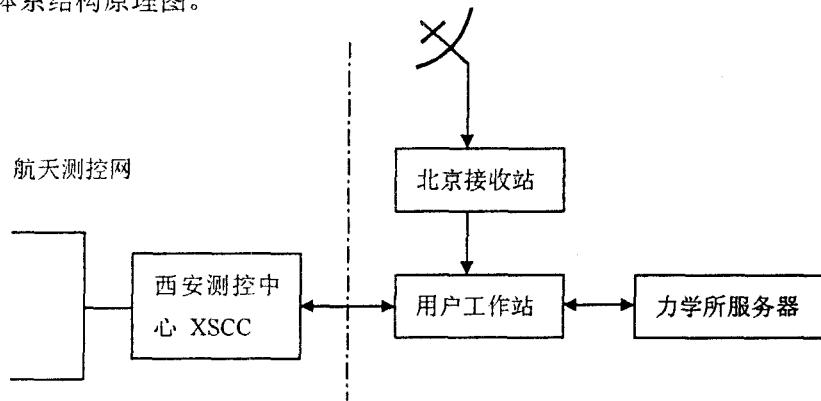


图 1 地面用户系统的体系结构原理图

本次实验在中国科学院空间有效载荷应用中心的北京密云科学数据接收站内进行。其中

的空间实验用户工作站提供了表现遥现特征的图象信息为主以及实验过程的分析与操作决策的天地交互能力。由于北京密云站的覆盖有限，整个空间流体实验过程只在卫星过北京站境内时进行。一般，每天可以进行 4 次(升降轨)实验，每次实验平均约 10 分钟，连续进行了 8 天不同工况下的空间实验。取得实验数据约 3.2GB，数字流场图象约 12000 幅和 30 余小时全过程测控的多路实验温度数据。实现了两层流体在两个液池内的不同物理模型的实验，以及通过姿控模式的改变实现在两种微重力水平下的对比实验。这是我国首次完成的空间微重力流体科学实验研究。此次实验是我国在现有的技术条件下进行初步的遥科学实验的有益尝试，为进一步在我国开展遥科学实验积累了经验。

空间科学实验的实现需要天/地基多方面的技术支持。SJ-5 号空间流体实验需要星上平台的测控、温控、姿控、能源等分系统和地面卫星测控中心的支持。它们基本上都是成熟的现成系统，空间流体实验与之主要是接口关系。因而不在本文讨论之列。

本文只讨论支持空间流体实验的用户系统的体系与配置，其有关的单元部件已有另文阐述。而且，本文只从工程实现的技术方面进行讨论。

2 SJ-5 号空间流体实验的技术需求

在空间科学实验中，空间流体实验的周期可以相对较短，可以安排重复性的实验，实验的实时性的要求不很苛刻以及不需要在地面回收实验样品。这些对测控，通信和轨道覆盖等的要求相对易于实现，即对空间实验的时延需求较为宽松。因而，它是比较适合于在我国现有的航天技术与工程技术条件下，相对比较易于实现的空间科学实验选题。

SJ-5 号卫星是搭载 FY-1C 卫星发射，其有效载荷的飞行器平台是卫星。因而，研制 SJ-5 号空间流体实验装置的约束条件就是必须符合所提供的卫星平台及其分系统的要求。例如：轨道，结构，体积，重量，功耗，姿控，温控，测控与通信，业务运行与管理等。

SJ-5 号的空间流体实验是研究在玻璃液池内封装有含示踪粒子的两相流体在微重力环境下的热毛细对流现象，为避免地面振动对实验的影响，要求在入轨前一相为流体一相为固体，入轨后操作使两种物相成为不混合的两层流体。

实验及实验过程的具体功能要求为：

- 实验现场的流场图象与液池温度数据下行
- 示踪粒子表示的流场的实时显示
- 图象能用于通过流场反演流速分布图
- 液池内温度的实时显示
- 液池壁温差的实时显示
- 加热与制冷端温度实时显示
- 实验过程的操作，实验周期约 12 小时。实验过程可以是预定的程序也可以用户进行干预，需要有程控指令和数据注入。它们可以受用户控制。
- 图象后处理具有基本的图象处理功能与连续按帧播放能力
- 后处理图象与温度显示有时间相关关系
- 记录原始粗数据
- 部分现场测温数据在卫星测控系统中后备
- 为改变实验的微重力水平，前 4 天卫星三轴稳定，后 3 天自旋

实验过程决定了 SJ-5 号空间流体实验装置的工作模式。要求运行的业务管理为：在北京站前 4 小时温控温测部分开始工作，入境前 5 分钟图象部分开始工作，出境后 2 分钟全部关闭。

根据 SJ-5 号空间流体实验的遥技术需求进行其用户系统的配置。

3 SJ-5 号空间流体实验的天基用户系统

天基用户系统主要用于实验的天基任务支持。如前述，空间流体实验装置的研制受卫星分系统的约束，这里不涉及卫星平台各分系统，仅给出其主要接口关系。

3.1 空间流体实验装置与卫星平台主要分系统的接口

3.1.1 能源分系统的接口

空间流体实验装置功耗：40 瓦

3.1.2 卫星测控分系统的接口

USB 遥测：

模拟量：10 路 开关量：4 路 数字量：12 路

USB 指令：

开关指令：9 条 数据注入：1 条(16 比特/条)

3.1.3 温控分系统的接口

-10—30 °C

3.2 SJ-5 号空间流体实验装置

SJ-5 号空间流体实验装置分为流体实验液池及其电控箱。液池部分是一个具有上下、左右互为正交的可控温度场的两层流体密封透明玻璃液池。用 4 个半导体激光器产生片光照明，并用两个 CCD 摄像头进行二维成象。其电控箱(电子学部分)由温控测温单元和图象采集传输单元组成。电控箱是实现实验需求的遥现和遥操作的主要天基用户系统。

3.1.1 温控温测单元

主要功能为温控、科学(测温)数据与工程遥测参数的采集和传输以及遥控程控指令与数据注入的接收。通过指令可设定温度值、切换加温模式、切换液池、操纵加温过程以及实现液池上下左右冷热端的组合等；此外还完成温控计算，热电偶冷端温补和遥测。所以，温控温测单元的作用是完成对空间流体实验过程的空间操作。

温控算法为增量式 PID 算法；控制电路为脉冲调宽控制半导体加热致冷器；为了减少测温元件对于流场的影响，采用热电偶作为流体温度敏感器。

主要技术指标为：

测温精度：± 0.1 °C

温控稳定度：± 0.5 °C

温度采样率：10Hz

液池两端温差：20—40 °C

数据打包下行，传输帧长 520 字节(同步字、包头、液池标志、包计数和测温数据)。

3.1.2 图像采集传输单元

为了在地面能观察空间流体实验的流场，液池安装了两个 CCD 摄像头，在片光照明下输出 1V_{p-p} PAL 制模拟黑白全电视信号。

主要指标为：

图象帧的解象度：512*512

灰度等级：256

行采样率：10MHz

按行传输的下行数据率：1024 Kb/s

传输帧长：520 字节(行同步字、液池标志、场标志、行计数、填充和图象数据)。

地面复现的图象帧间隔：2.1 秒

传输中加扰码。输出的温测数据和图象数据复接后下行。每 100 幅图象复接 8 秒温度数据送下行传输信道进行调制。

3.3 下行通信链路

星上通信链路用于空间流体实验数据的下行，其主要指标：

频段：S 波段

功率：7W

通信体制：DQPSK

4 SJ-5 号空间流体实验的地基用户系统

SJ-5号空间流体实验的业务运行在中科院有效载荷应用中心的密云科学数据接收站内完成，工作方式采取集中式的空间科学实验概念，即在实验的全部过程中，主要研究人员(PI)、实验操作人员在站内进行实验过程的监控、数据分析、异常情况处理和查故与排故。

实验的地基支持系统由科学数据接收站与用户工作站组成。

4.1 密云科学数据接收站

密云科学数据接收站原服务于飞船应用系统，经立项改造可兼服务于SJ-5号，作为SJ-5号实验的天/地信息传输链路。主要指标为：

频段:S波段

天线口径：11.28米

G/T：24.5 dB

极化：RHC/LHC

跟踪能力与范围：多频点和全半球跟踪

通信体制：DQPSK

码速率：1024Kbps

4.2 用户工作站

从接收信道的基带以后部分为SJ-5号的用户工作站。主要用于实验期间，流体科学用户能密切监视实验过程中各种因素的变化、实现流体用户和实验之间在天地之间的交互联络、快速联机数据处理与评价等。其功能为联机、操作、实时处理与显示以及后处理与显示。用户工作站的配置如图2示。包括：实时显示工作站、后处理工作站、Internet工作站和数据记录器。流体科学用户可以在用户工作站的图象与温度显示屏及字符操作屏的界面上进行流体实验过程的分析、检查实验是否按预定程序进行、实现用户天/地的交互联络等。使天上的实验能接受地面实验者的实验程序，以便地面可改变实验的进程，优化实验的结果。

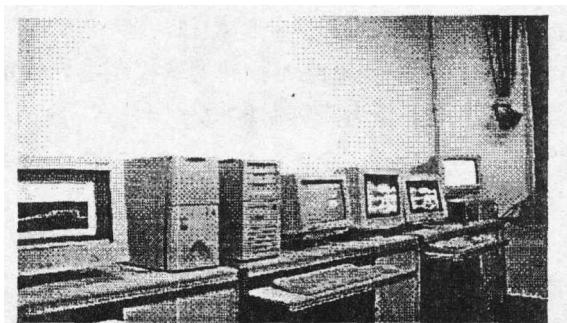
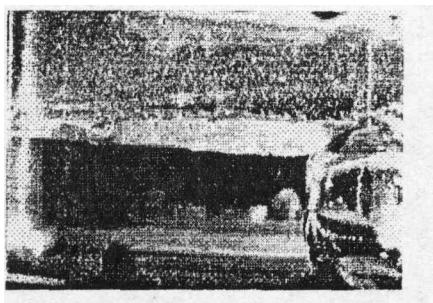


图2 用户工作站

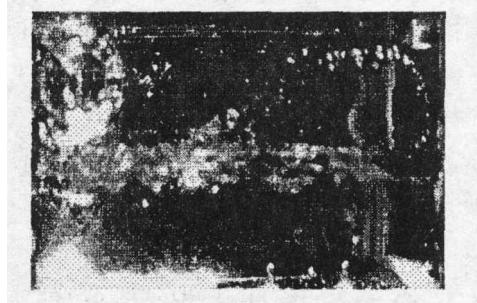
4.2.1 实时显示工作站

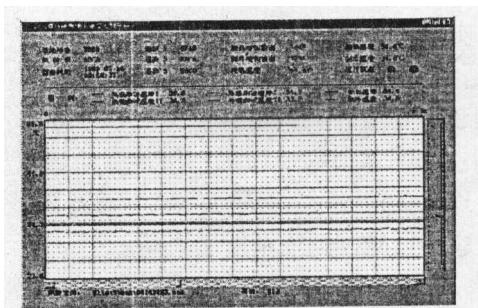
根据实验要求，实时显示工作站由图象快视工作站和温度实时显示工作站组成。实时显示工作站主要用于实时显示实验的流场图象与液池温度数据图表曲线。图3为地面实时复现的空间流场图象与快速显示的多路控温测温曲线。它们均以自动操作为主，人工干预与操作为辅。

液池 A



液池 B





多路控温测温曲线

图3 地面复现的空间流场图象与快速显示的多路控温测温曲线

图象快视工作站由硬件完成格式化同步，帧保持，抗位滑动，解扰与解帧等。软件实现图象帧恢复与显示等功能。图象按帧显示，每秒2帧刷新。

温度实时显示工作站自动采集，处理和显示下行的液池内实验温度与液池温控数据。

4.2.2 后处理工作站

支持实验的流场图象与温度数据的快速存取，处理和显示。除具备一些基本的图象处理功能外，可以用不同的帧速率快速按帧连续动画播放。并可以将图象和温度曲线按相对时间对应显示。图4为经地面预处理后复现的图象与温度的相关对应。

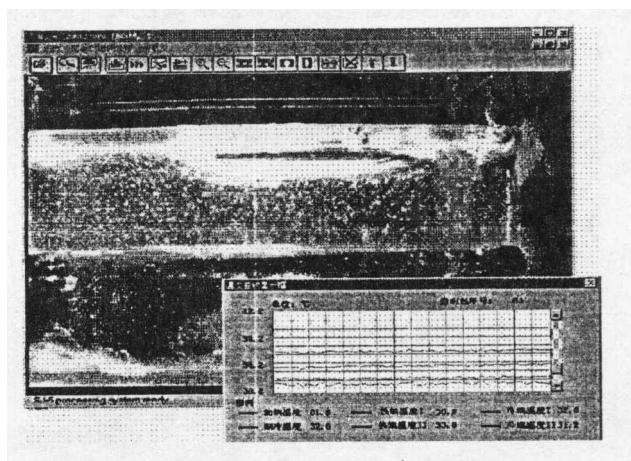


图4 图象与温度的相关对应

4.2.3 Internet 工作站(通信网络)

为了取得西安卫星测控中心(XSCC)的测控支持，用户工作站内设立了 Internet 工作站，通过 56K MODEM 的电话专线连接 XSCC；并作为中科院力学所的远程终端，将用户工作站数据和力学所数据服务器连接进行数据分析。在 XSCC 也有流体科学实验用户参与实验的操作与调度以及和北京实验用户会商。

4.2.4 数据记录器

信道输出的原始粗数据记录在数据磁带机上，可用于事后的回放处理分析。由于实验的重要性，同时将信道输出的原始粗数据记录在光盘上，作为数据的备份。

4.2.5 数据产品

记录的 SJ-5 号流体实验数据，经用户工作站的数据预处理加工后，可以向数据的最终用户提供流场和温度的 CD-R 准 0 级数据产品。

5 结束语

本文介绍了采用遥技术实现的我国 SJ-5 号空间流体实验的有关情况。

SJ-5 号空间流体实验是我国微重力流体科学家首次采用以地面复现的图象为实验判据的可交互操作方式进行的空间科学实验。实验可以按实验预案和临时议案进行。由于覆盖等原因，对空间流体实验装置的空间操作以程控为主，用户会商决策后每 12 小时改变一次实验方案。实验响应的全过程平均约 10 分钟。实际上 XSCC 能支持在北京站相邻两轨之间的用户申请，这样，一次实验的时延可以减少到卫星轨道周期。

可以看出，实现和进行一次空间科学实验比地面科学实验要困难和复杂得多，SJ-5 号空间流体实验是在航天部五院和西安卫星测控中心等有关各方通力合作的情况下才得以比较顺利完成的。

从实验还可看出：如北京密云科学数据接收站具备上行功能，则空间流体实验可以实现秒级的时延。

应该指出，倘若搁置遥科学的定义讨论，SJ-5 号空间流体实验毕竟是在我国首次采用遥技术实现的、以实验现场图象为实验判据，并在地面现场分析决策的空间科学实验。应该说在我国现有的航天技术条件下，为实现这一空间实验的构思是有创意的，在我国不多的空间科学实验机遇中，对此进行了一次有益尝试和探索，实现了一些遥技术功能，达到了 SJ-5 号空间流体科学实验的科学目标。尽管本次实验和国外已实现的遥科学实验相比较，还存在很大的差距。中科院空间有效载荷应用中心决心以 SJ-5 号空间流体科学实验为我国空间科学实验的起步，并在我国载人航天及其后续工程以及其它搭载任务中珍惜每次实验机会，不断实践和总结积累经验，为发展我国空间科学而不懈努力。

SJ-5 号空间流体实验项目与实验方案是由中科院力学所胡文瑞院士提出并在其主持下进行的。

在本实验用户系统的研制过程中得到了中科院遥感地面站周涌涛研究员、辛岩副研究员等，清华大学葛成辉教授等以及中科院力学所韩金虎研究员等的有益建议和大力支持与帮助。深表感谢。

参考文献

- 1 A. Balogh. The Telescience Concept & its Application to manned and unmanned Space Mission. Proc. of a Colloquium on Telescience. AAAF, CNES and ESA, 19-20 Nov. 1991
- 2 C. Ricaud et. al.. Telescience Test Bed First Results. IAF, Matra-ESA-ESTEC, Oct 1989
- 3 姜群星. 遥技术在航天领域中的应用. 遥测遥控, 1993, Vol. 14 No. 5