

实践五号卫星 两层流体 Marangoni 对流和热毛细对流研究

胡良 刘秋生 刘方 张璞 姚永龙 胡文瑞

中国科学院力学所国家微重力实验室 北京 100080

胡行毅 孟新 李保和 苏健

中国科学院空间科学与应用中心 北京 100080

摘要

两层流体空间实验以遥现、遥操作为主, 结合程控实验模式, 完成了 8 天 34 圈次的遥科学实验。实验实时获得了热毛细对流和 Marangoni 对流两种物理模型在 $10^{-5}g$ 和 $10^{-2}g$ 两种微重力水平下的流动图像和温度数据, 及实验装置状态的工程参数。实现了天地交互式实验流程控制。表明在我国采用遥操作与程控相结合的方式, 进行空间遥科学实验是可行的。

关键词 微重力流体物理 两层流 遥科学 空间实验 热毛细对流 Marangoni 对流

I 概述

遥科学可对远离实验现场的科学家遥现实验现象, 同时将对实验的修正, 反馈给实验装置, 做出相应的调整。这种交互式的工作模式使科学家可以灵活的控制空间实验, 且在故障模式下, 采用遥科学工作方式将系统的软、硬件单元进行功能重组, 完成实验, 减少损失。航天员干预的空间实验机会很少且耗资巨大, 所以遥科学的空间实验十分重要。

流体物理空间实验是进行遥科学实验的良好载体。在微重力研究的领域内, 流体科学可以不要求返回实验样品; 流体科学实验诊断方法成熟; 可测控的数据种类众多(包括温度、压力、速度、浓度等的场数据和点数据); 实验的特征时间范围大, 有利于筛选出适合空间搭载的实验[1]。

实践五号(SJ-5)科学实验卫星微重力两层流体空间实验于1999年5月12日至5月19日进行了8天。其科学目的是研究垂直于二层流体界面外加温差的 Marangoni 对流, 分析对流形成以后的流动涡的结构及其随温差加大的发展规律; 平行于流体界面外加温差的热毛细的对流转换过程, 由定常转变到非定常的过程[2,3]。

SJ-5号卫星是搭载FY-1C主卫星发射。研制SJ-5号空间流体实验装置的约束条件是必须符合所提供的卫星平台及其分系统的要求。实践五号科学实验卫星是轨道倾角为 98.8° , 轨道高度为870Km的近圆准太阳同步极轨卫星。为研究不同重力水平的影响, 卫星前4天工作在三轴稳定状态提供 $10^{-5}g$ 的微重力水平, 第5天卫星切换到自旋稳定状态提供 $10^{-2}g$ 的微重力水平。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。实验遥现的主要数据流场图象由中国科学院S波段高速数传发射机和有效载荷地面应用中心密云地面站负责发送接收。研究人员(PI)和载荷专家(PS)在用户终端(国家微重力实验室)、有效载荷地面应用中心(密云地面站)、西安卫星测控中心共同协调实现实验进程的管理、流程的操作[4]。

II 实验原理、要求

为满足实验观测由界面张力梯度引起的对流现象, 对二层流体实验体系的选取在物性和化学特性方面要求很高。要求二种液体之间不相混溶(混合), 二液体之间无化学反应:

形成的液/液分界面清晰可辨；液/液界面上随温度的不同可形成较大的表面张力的线性变化率，并且这种变化不易受外界环境的影响，比如界面上的污染影响；在微重力环境中易形成平整的液/液界面。根据上述要求实验的地面预研选取了液态石蜡和氟化液不相混合的液体体系，具体的流体物性参数值由表 1 给出。

表 1. 石蜡（液态+40%固态）— 氟化液（FC-70）二层流体物性参数表

		40%石蜡 (30°C)	氟化液(25°C)	石蜡/氟化液
密度 (Kg/m ³)	ρ	8.324×10^3	1.93×10^3	0.4313
比热 (KJ/Kg°K)	C	2.2008	1047	2.102
热传导系数 (W/m°K)	k	1.523×10^{-1}	6.9×10^{-2}	2.2072
热扩散系数 (m ² /s)	α	8.3698×10^{-8}	3.48×10^{-8}	2.405
膨胀系数 (°K ⁻¹)	β	7.4743×10^{-4}	1.0×10^{-4}	0.7474
动力粘性系数 (kg/ms)	μ	1.117×10^{-2}	2.702×10^{-2}	0.4134
运动粘性系数 (m ² /s)	ν	1.3418×10^{-5}	1.4×10^{-5}	0.9584
界面张力 (N/m)	σ	2.8574×10^{-2}	1.8×10^{-2}	
熔点(°C)		28	-25	
普朗特数		160.2	402.3	0.3977

液态石蜡和氟化液两组不相混合的液体体系可形成清晰界面，界面张力温度系数在 30°C—80°C 之间线性度好和对界面污染不很敏感，其值为 $\partial\sigma/\partial T = -3.63 \times 10^{-5}$ ，比液态石蜡和水体系的值略小，实测值的线性拟合方程为： $\sigma = -0.0363116 \times T - 11.7097$ 。

通过空间实验，可以提供：二层流体 Marangoni 对流起始临界参数确定（临界温度差、加温方向）；二层流体 Marangoni 对流流动结构的数值模拟（速度场和温度场）；二层流体热毛细对流流动结构的数值模拟（速度场和温度场）；二层流体热毛细对流振荡流动临界参数确定（临界温度差）。

空间实验液池如图 1 所示。为实现流动显示，在流体中掺杂了一定浓度的示踪粒子。流体介质体系采用不混溶的氟液（FC-70）和石蜡，为了在微重力环境中实现清晰的两层流体界面，在入轨前氟液为流体石蜡为固体，入轨后由地面遥操作将石蜡熔化，熔化过程中采集的图像如图 2 所示。

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：在入北京站前 4 小时温控测温部分开始工作，入境前 5 分钟图象部分开始工作，出境后 2 分钟全部关闭。

III 系统构成

1 天基用户系统

- (1) 能源分系统的接口：空间流体实验装置功耗 40 瓦；
- (2) 通信接口：遥测模拟量 10 路，开关量 4 路，数字量 12 路；指令开关指令 9 条，数据注入 1 条（16 比特/条）。
- (3) 温控分系统的接口：-10—30℃；
- (4) 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，频段 S 波段，功率 7W，通信体制采用 DQPSK。

2 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，如图 3 所示。用 2 个半导体激光器产生片光照明，并用两个 CCD 摄像头进行二维成像。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测和遥操作的主要天基用户系统。现分别讨论它们的主要功能。

温控测温单元

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，温控测温单元的作用是完成对空间流体实验过程的空间操作。

(1) 温度数据采集传输单元

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；采用热电偶作为流体温度敏感器。测温精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ，温控稳定度为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，温度采样率为 10Hz，液池两端温差为 20—40℃。数据打包下行，传输帧长 520 字节，包括同步字、包头、液池标志、包计数和测温数据。输出的测温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。

(2) 图象采集传输单元

每个液池分别安装了 1 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。将模拟图象数字化以适应星上下行数据系统。图象的灰度等级为 256 级，解象度为 512×512，图象帧采样时间为 2—3 秒。经过计算，图象帧数字化的行采样率为 10MHz，样点的量化为 8bit。为了地面图象恢复较简便，传输方式为按行传输。图象采集与传输系统的主要指标为：图象帧的解象度 512×512，灰度等级 256，行采样率 10MHz，图象帧采样时间 2-3 Sec，下行数据率：1024 Kbps，传输帧长 520 字节，包括行间步字、液池标志、场标志、行计数、填充和图象数据。在传输中加扰码以避免传输中的长‘0’长‘1’。视频基带送下行传输信道进行调制。

3 地基用户系统

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遥科学概念[5]，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。

(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。服务于 SJ-5 号的信道主要指标为 S 波段,天线口径 11.28 米, G/T: 24.5 dB,极化 RHC/LHC,跟踪能力与范围为多频点和全半球跟踪,通信体制为 DQPSK 码速率为 1024Kbps。

(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、实验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。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 4 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行,优化实验的结果。

(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现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。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。

(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。

(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。测控站分布如图 6 所示。

(2.4) 数据记录器,信道输出的原始粗数据记录在数据磁带上,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 主要实验结果讨论

空间流体实验获得了可喜的成果,实现了清晰的两层界面,证明固/液熔化方案可行,分析了熔化过程的实验结果[6],获得了清晰的流动图像和温度数据。由于出现气泡,新的系统已进行了初步理论分析[7]。我国微重力流体科学家首次采用可交互的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。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,一次实验的时延可以减少到卫星轨道周期。这是在我国开展初步的遥科学实验的一次有益尝试和探索。实现了基本的遥科学功能,达到了 SJ-5 号空间流体科学实验的目的。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空间技术研究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。

参考文献

- [1] 胡文瑞,徐硕昌:微重力流体力学,北京,科学出版社,p.84(1999)
- [2] Legros J C, Dupon O T, Queeckers P, Vaerenbergh S Van, Schwabe D: Thermohydrodynamic Instabilities and Capillary Flows, in: Low-Gravity Fluid Dynamics and Transport Phenomena, Koster J N and Robert L Sani, Volume 130
- [3] Legros J C, Georis Ph, Thermo-capillary Convection in Multilayer System, Overview of the Preliminary Results, August 1997
- [4] Yao Y L, Liu Q S, Zhang P, Hu L, Liu F, Hu W R, Space Experiments on Thermocapillary Convection and Marangoni Convection in Two Immiscible Liquid Layers, J. Jpn.Soc. Microgravity Appl.Vol.15. Supplement II,1998
- [5] Koss M B, LaCombe J C, Glicksman M E, Bushnell L T, Malarik D C, Winsa E A Development of A University Based Remote Teleoperations Site for the Performance of Experiments in Microgravity, 8th International Symposium on Experimental Methods for Microgravity Material Science,1996
- [6] Geng R H, Zhang P, Numerical simulation for the melting process of paraffin in microgravity, Microgravity and space station utilization, 2000(in printing)
- [7] Liu Q H, Hu W R, Instability of convection in multiplayer fluids subjected to a horizontal temperature gradient, 48th International Astronautical Congress, 1997, IAF-97-J.4.06

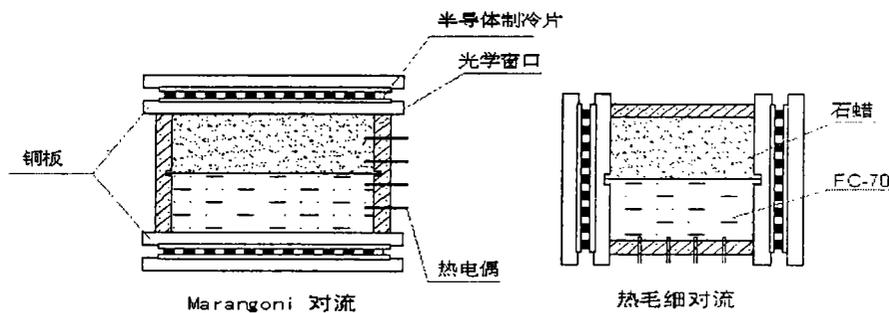


图1 液池示意图

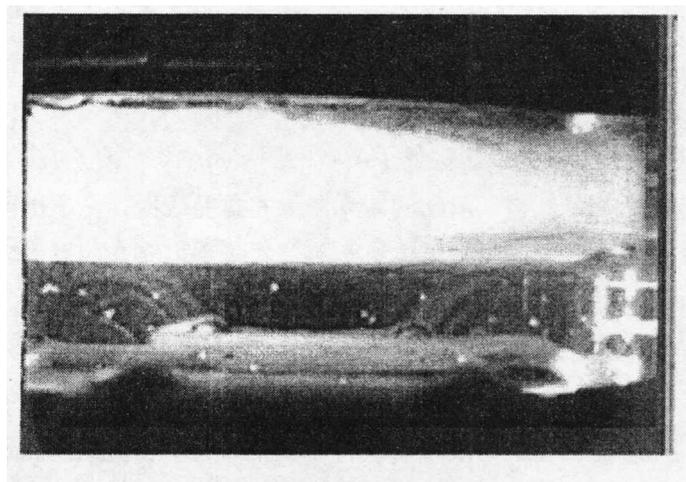


图2 空间实验开始时熔化过程的图像

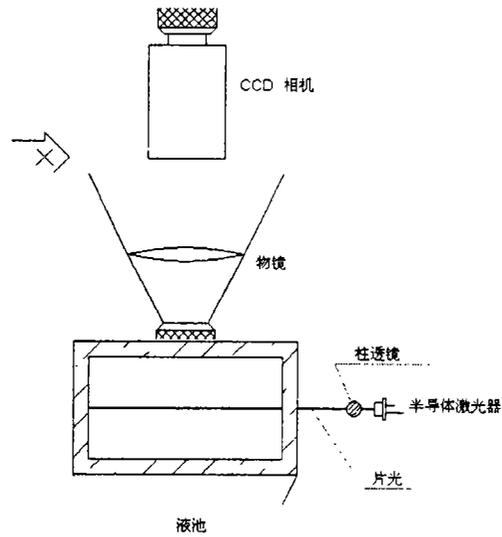


图 3 光学诊断原理图

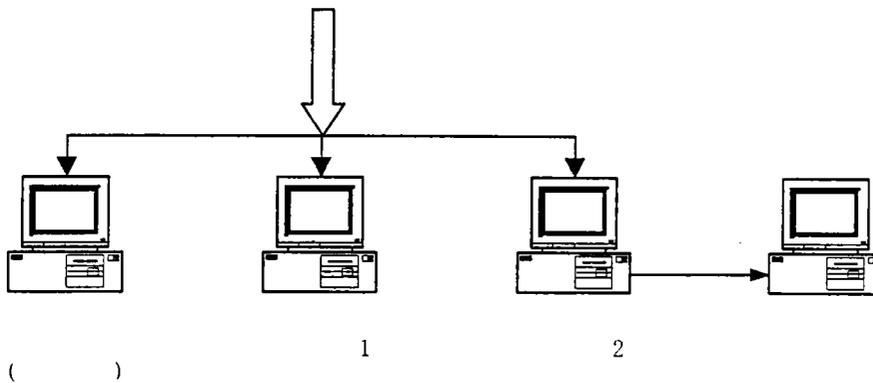


图 4 密云地面站支持系统构成图

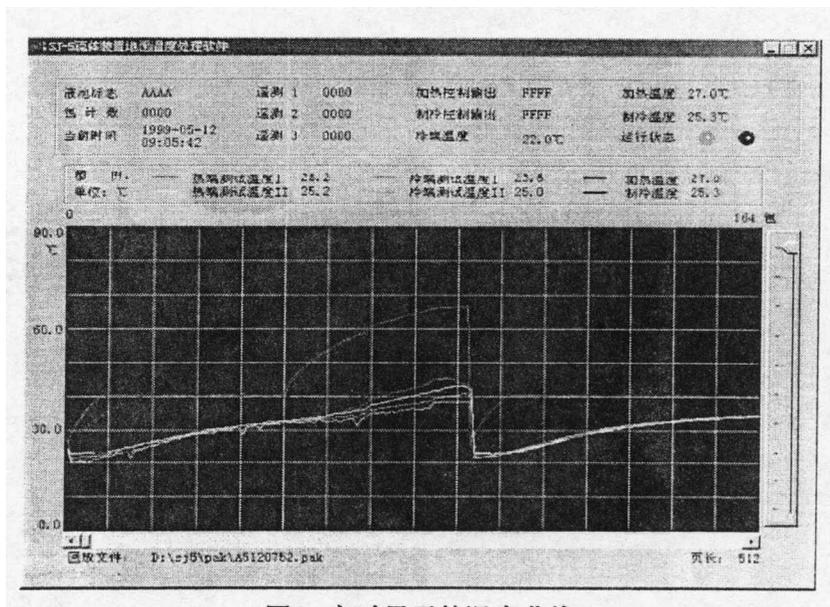


图 5 实时显示的温度曲线

实践五号科学实验卫星

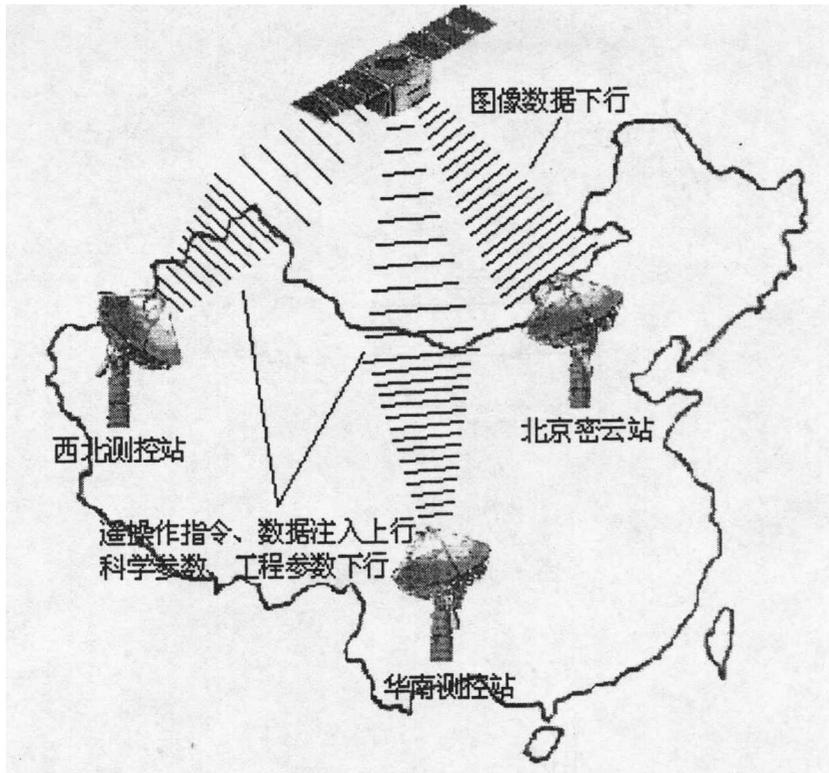


图 6 测站分布