

# 中国科学院与 载人航天工程应用系统<sup>\*</sup>

光电研究院

(北京 100080)

**摘要** 飞船应用系统是我国空间任务中规模最大、涉及领域最广的空间科学与应用研究任务。文章系统地总结了中国科学院在载人航天工程应用系统中所承担的任务、研制过程以及在空间对地观测、空间科学实验和探测方面所取得的成果。

**关键词** 中国科学院,载人航天工程应用系统

飞船应用系统是我国空间任务中规模最大、涉及领域最广的空间科学与应用研究任务。在我国载人航天一期工程中,中科院空间科学与应用总体部受中科院委托,具体组织实施应用系统工程并作为工程总体单位。参加应用系统任务的有中科院的 30 余个研究所和航天科工集团、中电集团、国家海洋局、国家气象局等 10 余个单位,上千名研究人员。全新研制空间设备 185 余件,完成科学与应用研究项目 80 余个,取得具有自主知识产权的新技术、新方法 100 余项,发表论文近 500 篇,取得专利 40 余项,建设了有效载荷应用中心和其它必要的研制试验条件。

载人航天工程应用系统分为方案设计、初样研制、正样研制和发射运行三个阶段。在方案阶段,应用系统攻克了 70 余项关键技术,完成了全部有效载荷模拟机的研制,开展了各艘飞船应用有效载荷的系统集成测试,验证并确定了总体和各分系统方案,完成了地面系统的建设方案和施工。

神舟 1 号于 1999 年 11 月 20 日发射,21 日返回,该实验飞船进行了应用系统部分设备

在轨试验考核以及天地数据传输接收试验,有效载荷 64 件。

神舟 2 号飞船 2001 年 1 月 10 日发射,16 日返回,轨道舱留轨运行半年。自主阶段开展空间生命科学和材料科学实验,留轨阶段进行了空间天文探测和空间环境监测,有效载荷 10 项,64 件设备。

神舟 3 号飞船 2002 年 3 月 25 日发射,4 月 1 日返回,轨道舱留轨运行半年。自主阶段开展空间生命科学和材料科学实验,留轨阶段利用中分辨率成像光谱仪和地球环境监测进行试验观测,同时开展了高层大气环境监测研究。有效载荷 9 项,44 件设备。

神舟 4 号飞船 2002 年 12 月 30 日发射,2003 年 1 月 5 日返回,轨道舱留轨运行半年。自主阶段主要开展空间微重力流体和生命科学实验,留轨阶段进行多模态微波遥感器、综合精密定轨试验以及综合性空间环境监测。有效载荷 14 项,52 件设备。

神舟 5 号飞船 2003 年 10 月 15 日发射,16 日返回,轨道舱留轨运行阶段进行了空间环境监测。有效载荷 3 项,19 件设备。

神州 6 号飞船 2005 年 10 月 12 日发射,

<sup>\*</sup> 收稿日期:2005 年 10 月 26 日

17 日返回。有效载荷 16 件,执行对地遥感试验任务。

应用系统取得的科学与应用成果如下:

### 1 空间对地观测

成功地研制出中分辨率成像光谱仪、多模态微波遥感器等一批先进空间遥感仪器,使我国可见光和近红外遥感技术跨入国际先进行列,微波遥感技术取得重大突破。

**(1)中分辨率成像光谱仪。**该光谱仪是新一代“图谱合一”的光学遥感仪器,具有获取地球目标(海洋、大气和陆地)详细光谱景象和快速全球覆盖的能力,在神舟 3 号上进行了试验,利用在轨运行期间获得的大量多光谱图像数据,处理出近千幅图像,图像质量清晰,光谱分辨率好。应用部门利用这些资料对我国江、河、湖、海的滩涂、悬浮泥沙、水质污染,对我国西部地区的地面生态环境、土地沙化、植被分布、地质结构等开展了试验性应用研究。

该光谱仪是继美国 2000 年发射的 MODIS 之后进入空间的第二台中分辨率成像光谱仪。专家组在正式评价意见中写道:“标志着我国可见光和近红外遥感上了一个新的台阶,我国可见光和近红外遥感技术已跨入美国和欧共体等国际上的先进行列”。通过研制和试验,突破了红外焦平面组件、斯特林制冷技术、可见近红外探测器及光栅部件、均匀性校正技术、光谱辐射定标技术等多项关键技术,取得若干项具有自主知识产权的设计专利与关键技术,为开发新一代空间光谱遥感设备,促进卫星应用奠定了基础。

**(2)多模态微波遥感器。**微波遥感是当今国际上的新型全天候遥感器,具有广阔的应用前景,载人航天工程的多模态微波遥感器把微波辐射计、微波高度计和微波散射三类设备进行集成,实现综合微波遥感探测。研制过程中攻克了行波管放大器、线性调频用声表面波色散延迟线技术、天线设计与加工等若干关键技术。在神舟 4 号上进行了试验和初步应用探

#### 多模态微波遥感器

测,专家组的正式评价意见为:“辐射模态和高度模态功能正常,性能稳定;散射模态验证了系统工作原理,脉冲行波管放大器、极化开关、多普勒跟踪、接收和数据处理通道均正常,散射模态部分海区的数据能反演出海洋风场,表明系统工作原理正确。多模态微波遥感器是我国第一个进行在轨运行的微波遥感器,运行结果表明我国在该领域取得了重要的突破。”

为满足微波高度计精确测量海面拓扑高度和有效波高的要求,专门安排了综合精密定轨专项任务,经反复论证,确定采用激光跟踪测距定位、单频 GPS 定位和 USB 测速的综合精密定轨技术,实测验证精度,达到径向误差为 2 米,使我国精密定轨技术有很大提高,为进一步发展提供了重要依据。

**(3)地球环境监测。**该系统包括太阳常数监测器、太阳紫外光谱监视器、地球辐射收支仪 3 项有效载荷,用于定量监测太阳常数与太阳紫外光谱绝对辐照度、地球对太阳短波辐射的反辐射、地气系统自身的长波热辐射、大气臭氧总浓度分布及其垂直结构变化等,对影响地球环境的重要参数进行绝对量测量。这是我国首次开拓的地球系统科学的重要方向——全球环境及其长期变化的探测研究。3 台探测设备装载在神舟 3 号飞船上,获圆满成功。测量结果与国际探测数据吻合,得到国际认同和一致好评。目前我国研制的太阳常数监测器已被世界辐射中心(WRC)列为比对标准设备。

**(4)遥感应用研究。**配合中分辨率成像光谱仪和多模态微波遥感器研制,开展了两种新

型遥感器在海洋、陆地和大气遥感应用多个领域的研究,设置了“对地观测应用基础研究”、“海洋水色水温遥感探测研究”、“海洋动力环境遥感监测研究”、“生态、水文和固体地球遥感研究”、“云、水汽和气溶胶探测研究”、“神舟3号飞船主载荷中分辨率成像光谱仪的海洋技术研究”6个方面的22项专题研究,建立了8个应用示范系统。在配合对地观测遥感器在轨测试的地面同步测量中,取得了若干项研究成果并直接投入到相关应用领域,效益显著,使我国在这一领域的研究水平有显著提高,如在国际上领先提出了自然综合信噪比的概念,建立了中分辨率成像光谱仪应用效果模拟仿真技术系统。

## 2 空间科学实验和探测

(1)微重力流体物理研究。以空间材料加工为应用背景,对半浮区热毛细对流、Benard-Maragoni 对流、界面现象、多相流体、液滴迁移和动力学、微重力燃烧等微重力流体条件下的基本规律开展了大量地面实验研究、空间搭载实验、短时间微重力实验和数值模拟;研制了飞船上的通用流体实验装置,包括 $20\times 20\times 20\text{mm}^3$ 液池、子液储存和注液系统、等厚干涉仪、液滴轨迹光学成像、示踪粒子测量、温度场测量等光学诊断设备,能完成多种物理量的同步测量,通过CCD摄像获取实时图像数据,实验数据和图像(部分)可实时下传。

在神舟4号上进行的微重力流体物理实验是国际上同类实验最成功的一次,空间实验装置装载在SZ-4飞船返回舱上,进行了微重力条件下的液滴热毛细迁移实验,成功地获取到大量的科学实验数据,获得的实时流场和干涉图像完整、清晰,为微重力流体物理科学研究提供了具有重要研究价值的第一手资料。该实验装置主要创新点是:成功地解决了国外科学家曾经失败过的液滴注入过程中液滴大小控制和液滴分离技术,选取的液体系统新颖巧妙,使得这次实验达到国际先进水平。

(2)空间材料科学研究。开展空间材料制备及其与工艺有关的规律性研究;特别是在重力消失后,某些次级效应影响的作用机理研究,如扩散、表面张力对流、浸润、非均匀成核和形核触发、亚稳相的获得、深过冷等;安排了近20个课题的基础性研究,对具有重要应用前景的三元/二元半导体光电子材料、氧化物晶体材料和金属合金/复合材料近20个样品开展了大量的地面研究;攻克多项关键技术,研制成功开展空间材料科学实验的重要设备——多工位晶体生长装置以及空间晶体生长观察装置,在神舟2、3号飞船上进行了实验。两次在轨实验过程均正常,取得了完整的工程参数和科学数据,表明我国自行设计、研制的实验装置性能优良、满足实验要求,达到了国外同类设备的水平,为我国开展空间材料科学实验提供了硬件条件,填补了国内空白。

在神舟2号上实验的碲化镓(GaSb)发现了晶粒间界和枝蔓晶体的弯曲变形,这是过去多次空间生长的碲化镓晶体中没有发现的现象。对硅酸铋(BSO)空间实验样品进行X-射线摇摆曲线测量和晶体的位错比较,发现空间生长晶体的衍射峰强度明显高于地面生长晶体的强度;位错也比地面小,这表明微重力条件下生长晶体的结构完整性明显高于地面;位错分布较地面均匀。

对掺铈(Ce)硅酸铋(BSO)吸收曲线测量发现,少量掺Ce可以提高BSO晶体蓝光段的吸收,空间生长晶体比地面生长晶体提高的更显著;进行高分辨率X-射线衍射测试和利用氦离子激光器观察空间晶体的干涉条纹,均发现空间生长的晶体具有较高的均匀性。

在神舟2号飞船上对空间晶体生长实时观察进行了成功的实验,完整地接收到了4个工位的实验图像。装置采用了在线显微摄像、工位切换、自动调焦、炉丝温控等先进技术,为我国空间科学实验开拓了新方法,设备性能达到国际先进水平。

(3)空间生命科学研究。该领域是至今国

际上开展实验最多的空间科学研究,应用系统含 5 套空间实验装置,进行 6 次空间实验,开展生物学效应和生物技术 15 个课题的研究。

空间蛋白质结晶:研制了我国第三代具有双温度控制、气相扩散和液-液扩散两种结晶方式的蛋白质结晶装置,在神舟 2、3 号飞船任务中均取得在轨飞行试验的圆满成功,从神舟 3 号空间实验所获得的蛋白质晶体说明,实验装置完全满足生物学要求。空间实验生长出了能够提高蛋白质结构测定精度的晶体,结晶率达到 70%、晶体质量是我国自 1989 年开展空间蛋白质结晶实验以来最好的一次,通过国际合作研究已取得精确的分子结构测量结果,其水平达到国际前列,受到国外相关单位和研究人员的高度评价。

#### 蛋白质晶体

空间细胞培养:自行设计和研制的空间细胞培养装置,在神舟 3 号上取得在轨实验的圆满成功。该装置采用了灌流式渗透培养技术和空间实时固化技术,性能指标先进,标志着我国空间细胞实验技术与在轨运行的动态控制技术均取得了突破性进展。对空间细胞培养回收样品开展后续研究的结果表明:空间特殊环境对免疫细胞的杀伤功能有一定影响,这进一步从细胞水平证明了航天员的免疫功能在进入空间后会有所下降;动物细胞对力的作用很敏感,空间微重力条件影响细胞的结构和装

配,使细胞骨架松散;空间细胞能耗减弱,对葡萄糖的利用率下降;运用基因组学分析方法,发现空间条件对涉及细胞功能的所有基因表达有明显影响,并与蛋白质合成有关,从而说明可能对细胞抗体产生有影响,这对空间生物制药等有重要的应用意义。

空间细胞融合:这是一项国际前沿研究课题,研制了空间细胞电融合仪,在神舟 4 号上实验圆满成功,实验装置设计合理,在 1 套装置中同时进行了植物细胞、动物细胞 2 项融合实验:黄花烟草和革新一号烟草两种植物细胞空间实验融合率为 18.8%,比地面实验提高 10 倍以上。植物细胞融合后经过 162 小时在轨存贮及回收转运,获得 53.6%成活率。后续研究已由空间融合细胞培养出组织块,并开始进行杂种苗培育;小鼠 B 淋巴细胞和骨髓瘤 SP2/0 细胞两种动物细胞空间实验融合率约为 11%,比地面提高 2 倍以上。后续研究结果表明在微重力条件下,植物细胞融合、动物细胞融合均可显著提高杂种细胞获得率,具有发展前景。

生物大分子及细胞分离纯化:研制了连续自由流电泳仪,在神舟 4 号飞船上我国首次成功地进行了空间生物大分子分离纯化实验,取得了完整的工程参数和科学实验数据。科学实验结果分析表明牛血红蛋白(Hb)和细胞色素 C(Cyt.C)两峰值距离,比地面提高约 38%,说明在微重力条件下比地面分离得好,有明显优势;Hb 条带比地面窄;尖峰高度比地面高 2.65%,表明样品扩散小,分辨率高;30 个收集管都有液体,没有空管。电泳仪实验装置是我国自行设计、研制成功的第一台空间生物分离纯化实验设备,性能良好,满足实验要求,填补了国内空白。

空间生物学效应实验:研制成功空间通用生物培养箱,具有光照、温控、节律控制、1g 离心机重力模拟及多样品实验能力,在轨运行工作正常,技术状态良好。在神舟 2 号飞船上进行了 16 种生物样品的空间实验,促进了动物、植物、微生物、水生生物、细胞和细胞组织等多



种生物体在不同层次上空间效应的研究深度。

**(4)空间天文探测和研究。**空间天文的研究着重于宇宙高能天体  $\gamma$  暴辐射的辐射特性、起源和产生机制研究以及太阳耀斑爆发的  $x$  射线和  $\gamma$  射线瞬变现象和能谱特性。攻克多项关键技术,研制成功由超软  $x$  射线探测器、 $x$  射线探测器和  $\gamma$  射线探测器组成的宽波段、高时间测量精度、较高能量分辨率的高能电磁辐射探测系统。在神舟 3 号上进行的高能天文探测首次获得突破,设备工作完全正常,取得圆满成功。

空间天文探测设备在轨试验期间观测到多组宇宙  $\gamma$  暴事例和太阳耀斑高能辐射事例,包括近年来最大的太阳耀斑事件,为我国在高能天体物理研究方面提供了第一手资料,引起国际同行的关注,这是我国在该前沿领域空间观测的首次突破,也是填补了国内在空间天文探测方面的空白。

**(5)微重力测量。**微重力测量设备在神舟 1—5 号飞船上圆满完成了飞船微重力水平测量任务,为空间材料、生命、流体等科学实验提供了准确可靠的微重力环境参数;准确监测了飞船自主飞行期间的重要事件,如变轨和轨道维持发动机的工作时间和速度增量、轨道舱泄压引起的结构响应、调姿、轨返分离、制动以及通用生物培养箱的 1g 回转器工作、蛋白质结晶室的开启与关闭、电泳仪工作、细胞融合仪工作、材料实验的换位、提拉等以及流体实验过程的微重力状态;表明我国的微重力测量已形成技术先进的成熟产品。

**(6)空间环境预报和监测。**在“921”工程需求的牵引下,建立了空间环境预报中心,为我国载人航天工程的各个实施阶段提供了空间环境预报保障,在研制阶段为飞船设计和有效载荷研制提供了空间环境设计条件和环境适应建议,在各艘飞船发射和在轨运行阶段提供了远、中、近期预报,保障飞行试验的安全。特别神舟 1 号发射期间,空间环境预报中心提供了准确的狮子座流星雨事件预报,工程总指

#### 空间环境预报中心

挥决策推迟发射日期,有效地保障了神舟飞船的顺利发射和成功运行。为了提高空间环境预报的准确性,分系统开展了大量环境预报方法研究,实时监测研究以及开展国内外交流,采用各种探测手段搜集数据,建立了丰富的空间环境数据库。推动了空间环境及相邻学科的基础研究发展,使得空间环境预报中心成为一个国内外关注的重要航天支持系统,使我国在这一领域进入国际先进行列。

研制的各类空间环境探测器,在各艘飞船上试验均获圆满成功。丰富了空间环境数据库,为飞船的轨道调整、安全防护提供了重要依据。

应用系统的工作有力地推动了我国空间科学和应用技术的发展。空间科学方面,应用系统不仅获得了一大批科学成果,有些达到世界先进水平,掌握了关键和重要的实验技术,形成了开展空间科学实验的方法和规范,为后续发展奠定了良好的基础;在对地观测技术方面实现了跨越发展,有些已进入世界先进行列,掌握了许多核心技术,而且大多数应用成果很快转入卫星应用主战场,如中分辨率成像光谱仪、地球辐射收支仪、太阳紫外探测器,太阳常数仪、微波辐射计、微波高度计和散射计的主要技术为我国业务卫星所采用,或成为计划中的业务卫星的重要基础,等等。为国家经济建设、发展先进科学技术,促进社会可持续发展发挥重要作用,产生了重大的社会效益。