

## 2011 年国际空间站科学研究与应用发展综述

2011 年,国际空间站已完成和正在进行的长期考察团任务(Expedition)共 6 期,美国国家航空航天局(NASA)发布了长期考察团任务在人体研究、生物学与生物技术、物理科学、技术开发与验证、地球与空间科学及教育活动和推广等 6 个研究领域开展的共计 225 项实验,其中 107 项为首次在国际空间站进行的新实验。在这些新实验中技术开发与验证领域最多,其次为生物学与生物技术领域和物理科学领域;教育活动和推广领域的新实验比例最高,其次为生物学与生物技术领域,物理科学和技术开发与验证领域的新实验比例也达到了 50%。这体现出国际空间站 2011 年在以上几个领域的科学研究活动非常活跃。

### 一、人体研究实验

#### (一) 重点研究方向

2011 年国际空间站共开展了 43 项人体研究实验,其中 5 项为新实验,研究方向包括心血管和呼吸系统、神经和前庭系统、人类行为和绩效、综合生理学及营养、骨骼与肌肉生理学、免疫系统、辐射对人体影响以及乘员生命保障系统等。

#### (二) 实验开展情况和新变化

2011 年继续开展的实验中,少数实验所属的研究领域或具体研究方向重新进行了调整。如“辐射对航天员的长期异常影响——辐射量测定”实验原属于“对国际空间站运行的研究”领域中的“国际空间站环境监测”研究方向,2011 年改为归属于“人体研究”领域中

的“辐射对人体影响”研究方向。

5 项新实验包括:NASA 开展的“综合阻抗和有氧训练研究”和“国际空间站上跑步机锻炼的生物力学分析”是两项心血管和呼吸系统研究方向的新实验,旨在研究如何在微重力下通过更有效的运动锻炼来增强体质。“综合阻抗和有氧训练研究”实验将评估利用高强度低运动量的训练来降低在空间站长期工作的乘员在肌肉、骨骼和心血管功能上的损耗。“国际空间站上跑步机锻炼的生物力学分析”实验将量化在空间站长期飞行中跑步机练习条件的生物力学,理解微重力和正常重力下运动的运动学和动力学的不同,从而开发更适宜的太空锻炼方式。欧洲航天局(ESA)开展的“空间头痛”实验研究在轨头痛问题的发病率和流行程度;“微重力对人体脐静脉内皮影响的研究”实验有助于更好地了解血管内皮功能,并对临床应用有益。日本航空航天探索局(JAXA)开展的“在轨诊断工具箱”新实验用于开发一种可测量、存储和分析航天员医学数据的在轨健康监测系统,并能实时传输给地面医生用于诊断航天员的在轨健康状况。

2011 年继续进行的人体研究实验有:心血管和呼吸系统方向的“长期太空飞行期间/飞行后的心脏萎缩和心脏舒张功能失调:直立供血不足、运动机能和心律不齐风险的功能性影响”、“航天员在长期国际空间站任务之前、期间和之后的最大摄氧量估算和最大摄氧量次极大评估”、“体育训练中心律动力学与气体交换耐力评估”、“利用对 24 小时心电图的分析研究长期微重力暴露对心脏自主神经功能的影响”、“长期太空飞行导致的心血管健康问题”、“长期太空飞行中人体体温调节”、“血管超声回波描记术”、“长期失重状态下心血管系统的变化”、“长期太空飞行中,太空飞行因素对血液循环、呼吸和心脏收缩功能的营养调控的影响”和“长期太空飞行中睡眠时间生理功能的综合性研究”实验;神经和前庭系统研究方向的“离心法应对耳石生理功能失调有效性的验证”、“太空飞行后的不

明确倾斜和平移运动”、“失重对视觉信息心理表征的影响”、“太空飞行后再适应期的耳石评估”和“国际空间站内操作人员长期太空飞行中的活动形态特征研究”实验；人类行为和绩效研究方向的“对持续太空飞行中航天员互动的监测”、“国际空间站精神运动警觉症自我测试”、“太空飞行期间睡—醒活动变化记录仪——短期”、“太空飞行期间睡—醒活动变化记录仪——长期”、“长期太空飞行中心理生理调节和航天员专业性活动的个人特征研究”和“与隔离和受限有关的行为问题：对航天员日志的评论和分析”实验；综合生理学及营养研究方向的“降低饮食中动物蛋白质与钾的比例以减少飞行期间的骨质流失研究”、“人类头发在长期太空飞行中的生物医学分析”、“营养状况评估”、“NASA 生物标本库”和“太空中人体的钠储留以及相关的人类生理反应”实验；骨骼与肌肉生理学方向的“微重力环境下脊髓延伸率及其对坐高的影响”、“生理学因素导致飞行后功能特性变化”、“骨质疏松的早期发现”和“利用双膦酸盐对抗太空飞行诱导的骨损耗”实验；免疫系统研究方向的“长期太空飞行期间及结束后人类神经内分泌和免疫反应”、“监测航天员免疫功能的验证程序”和“监测航天员免疫功能的验证程序——短期的生物学研究”实验；和辐射对人体影响研究方向研究沿空间站俄罗斯部分的飞行路径和站内隔间的辐射环境动态，以及空间站内外人体模型的辐射剂量累积的 Matryeshka - R 实验和“辐射对航天员的长期异常影响——辐射量测定”实验。

## 二、生物学与生物技术实验

### (一) 重点研究方向

2011 年开展的生物学与生物技术实验共计 41 项，其中 27 项为新实验，研究方向包括细胞生物学、微生物学、植物生物学、大分子晶体生长、动物生物学（动物生物学又分为脊椎动物生物学和无脊椎动物生物学两类）和疫苗开发。

## (二) 实验开展情况和新变化

与 2010 年相比,2011 年研究方向发生变化:一是“动物生物学”研究方向进一步细分为“脊椎动物生物学”和“无脊椎动物生物学”两类;二是“细胞生物学与生物技术”变为“细胞生物学”;三是增加了“疫苗开发”和“微胶囊”两个新的研究方向。

“疫苗开发”研究方向目前共包括 5 项实验,其中 4 项为“国家实验室探路者——疫苗”系列实验,另 1 项为今年新开展的“重组减毒沙门氏菌疫苗”实验。“微胶囊”研究方向只有 1 项实验,是在 2002 年第 5 期长期考察团任务中开始的“微胶囊静电处理系统”研究,该系统用于生产尺寸相当于血细胞、充满药液的微胶囊,通过注射方式将抗癌药物送至受感染的器官。

生物学与生物技术新实验共计 27 项,占今年生物实验总项数的 66%。

细胞生物学方面的新实验包括:由意大利航天局资助的“空间中的 BIOKon - 系列生物”实验,旨在评估不同的生物学样本,以确定短期太空飞行后的遗传差异性;同时 BIODIS 实验将利用多种放射量测定器监测辐射情况。“太空组织缺损”项目开展了 3 项新实验:“微重力对皮肤内皮细胞对创伤反应的影响”、“微重力对基于干细胞的组织再生的影响:伤口愈合中的角质细胞分化”和“微重力对人体脂肪干细胞血管基质部分细胞的营养能力的影响”。“国家实验室探路者”系列实验开展了“国家实验室探路者——细胞 - 7”实验,“细胞 - 7”包含几个研究细胞复制和分化的不同实验,探索利用太空飞行来提高或改善地基研究中的细胞生长过程。“从固定在有机基质上的藻类生物中提取眼点和黄斑色素,用于保护航天员视网膜”实验研究微藻(包含类似于人视网膜的眼点)对空间辐射的反应,以期得到有助于航天员未来营养计划的结果。另一项新实验“ROALD”-2 研究暴露在微重力下,人体淋巴细胞内源性大麻素系统的作用。ESA 资助的“失重条件下的白血球”计划通过研究微重

力下 T 细胞的活性增进对免疫系统的认识。2011 年继续进行的实验有 NASA 资助的“国家实验室探路者——细胞——麻风树生物燃料”实验。

微生物学方面的新实验包括：“国际空间站内的微生物膜评估和监测”研究多种空间材料上微生物膜的生长，旨在确定产生抗生物膜产物的微生物菌株，评估抗生物膜产物的化学性质，研究经过了化学物理处理的新型材料，并解决与微生物生物膜有关的生物安全问题。“航天员暴露于空间站空气中的真菌估算”(Myco)系列研究在 2011 年开展了“Myco”-2 和“Myco”-3 实验，通过识别哪类真菌在空间站上繁殖较快，并评估吸入和粘附在航天员皮肤上的微生物的风险，确定哪些真菌是国际空间站上的变应原。“太空中着色真菌的生长和生存”实验研究微重力和宇宙辐射对着色真菌生长和生存的影响。“太空飞行中微生物膜的形成”研究重力如何改变微生物膜的形成，目标是开发在空间和地球上，可降低微生物膜对人体健康和材料的不良影响的方法。“微重力环境中与生长压力选择相关的酵母基因型和混合型变化”实验旨在了解酵母细胞对微重力的不同反应和物理效应。2011 年继续开展的实验有“太空飞行因素对 Lactolen 菌株生产的影响”、“摇瓶发酵对生产超氧化物歧化酶菌株的影响”、“国际空间站上的微生物动态-II”和“太空飞行对与空间技术生态安全和行星检疫问题有关的微生物培养基系统状态的影响”实验。

在植物生物学方面的新实验包括：“环境控制箱内的生物学研究”系列实验中的“低重力环境下的共生结瘤”实验，利用植物—细菌模型系统研究与微生物—宿主相互作用和细胞间信息传递相关的微重力效应。“对黄瓜受重力调节的生长和发育产生影响的植物生长素外排协调的动力机制”实验研究植物如何将重力感应为一种环境信号并利用它控制其形态和生长定向。“植物信号”实验研究微重力对植物生长的影响，并将图像传送回地球，收获的植物样本

也将返回地球进行科学分析。实验结果可获得对未来长期太空任务中粮食生产有帮助的信息,同时为提高地球上的作物生产提供数据。“纳米机架——立方体实验室模块 10”是 Valley Christian 高中参与的一项利用纳米机架——立方体实验室开展的植物生长实验,模块内部的照相机将把植物生长各个阶段拍摄下来。该研究方向 2011 年继续开展的实验包括“根部趋光性的新型感知机制分析”、“微重力条件下根系生长的向水性和生长素诱导的基因表达”、“增加人参生物活性的可能性的研究实验”和“高等植物多代生长发育”。

大分子晶体生长研究方面的新实验包括:NASA 开展的“纳米机架——立方体实验室模块 8”实验,它是用于晶体生长和生物实验的材料扩散装置(MDA)的再次飞行实验,占据了纳米机架——立方体实验室的 4 个立方体单元。该实验同时也是一项飞行与教育项目,得到了美国国家地球与空间科学教育中心的资助。JAXA 开展的“原位观测微重力下蛋白质晶体的生长机理和完整性”实验将从晶体生长机理的角度解释在微重力下蛋白质结晶的完整性好于地球这一现象。分别由 JAXA 和俄罗斯主持的“高品质蛋白质晶体培养”实验和“生物大分子结晶与获得微重力环境下生物晶体膜”实验在 2011 年继续开展。

脊椎动物生物学研究方面的新实验包括:“商业生物医学测试模块”系列实验利用小鼠来研究微重力下如何维护骨质和骨骼肌肉等问题,2011 年进行的 2 项新实验分别是“评估 sclerostin 抗体作为一种新型骨形成剂用于预防太空飞行诱导小鼠骨骼脆弱研究”和“第 STS-135 次太空飞行对小鼠后肢血管萎缩的影响研究”。“太空飞行对呼吸道病毒感染固有免疫的影响”实验研究微重力对免疫功能抵抗呼吸道合胞病毒的影响,将帮助科学家确定太空飞行诱导免疫反应变化的生物学意义。

俄罗斯开展的无脊椎动物学实验“揭示遗传特征,明确在长期

太空飞行中不同生物组织的耐受能力”在 2011 年继续进行。

疫苗开发方面的“重组减毒沙门氏菌疫苗”新实验有 1 项,实验将评估空间飞行平台加速重组减毒沙门氏菌疫苗开发的能力。分别针对沙门氏菌和耐甲氧西林金黄色葡萄球菌开展研究的“国家实验室探路者——疫苗”系列实验在 2011 年继续进行。

此外,3 项新实验的研究方向细节尚未在 NASA 网站上公布:“纳米机架——Fischer 航空航天战略研究所——生命产生和起源的脚步”实验研究微重力下 18S 核糖体 RNA 的行为;“纳米机架——Fischer 航空航天战略研究所——骨研究”实验研究微重力下 MC3T3 小鼠骨细胞系;“纳米机架——微重力下的萜烯提取”实验旨在能通过微重力下从木材中提取萜烯找到用于产品的新的基础化学砌块。

### 三、物理科学实验

#### (一) 重点研究方向

2011 年开展的物理科学实验共 42 项,其中 21 项为新实验,涉及复杂流体、流体物理、材料科学、燃烧科学、等离子物理等研究方向。重要的研究主题包括:先进微重力光量子设备,所雷特流体扩散系数,二元胶体聚合,沸水边缘的临界流体,马兰哥尼对流,毛细管流,剪切拉伸流变性质,地幔中热量和流体的流动规律,合金半导体晶体生长,硅锗均相晶体生长,微重力环境对自激振荡生长的影响,泡沫记忆特性,微重力条件下的火焰燃烧与熄灭特性,等离子体-尘埃结构等。

#### (二) 实验开展情况和新变化

2011 年 NASA 对物理科学实验的学科体系进行了重大调整,由原来的晶体生长(非生物学)、流体物理、基础物理、材料科学、燃烧科学、等离子物理 6 个分支变为目前的复杂流体、流体物理、基础物理、材料科学、燃烧科学、等离子物理 6 大子领域,学科体系更为优

化明确。同时,42 项实验安排中有 21 项属新实验,实验研究主题不断推陈出新的特征愈发突出。

复杂流体实验共计 15 项。ESA 先后开展了“可选光学诊断仪器”实验中的“胶体悬浮体的聚合”实验、“先进微重力光量子设备”实验及“扩散和所雷特系数”实验,后面两项为新实验,分别研究微重力条件下先进光子材料的生长过程和特性,以及不同流体随时间的扩散变化情况,以便对与储油评估相关的模型进行优化。NASA 开展 10 项“二元胶体聚合”系列实验:系列实验 3 到 5 中的“临界点”实验、“多分散性”实验、“三维熔体”实验、“悬浮胶体微粒从液体中结晶和相分析两者之间的竞争时序研究”等持续开展;同时,新系列实验 6 正式启动:“胶体板”实验以微粒(胶体)为模型研究理论预测存在、但是迄今为止尚未发现的液晶态的基础物理学问题;“聚苯乙烯脱氧核糖核酸”实验目的是在微重力环境下制造晶体,依靠脱氧核糖核酸来维持这些晶体的成分,实验结果已被用于新型革命性纳米材料的设计之中;“相位分离”实验主要研究在微重力环境下气液两相是如何实现相位分离和均相化的;“籽晶生长”实验旨在研究物质自组织的物理规律,实验 5 的结果可用于新型智能材料的开发,在实验 6 中研究了晶体的生长规律和晶体结构。法国继续开展“临界流体与结晶化研究设备”系列实验。“胶体乳液顺磁聚合结构”新实验研究旨在获得椭圆形颗粒流体在磁场作用下的物理性质改变数据。

流体物理方面新实验共 13 项。“马兰哥尼对流”实验继续开展,主要通过观察流体的运动模式(包括实验中的混沌、湍流及其过渡过程)研究微重力环境下的热量传递规律。JAXA 开展了一项新实验——“Dynamic - Surf”,对流体从高普朗克数流体的液桥中向振荡热毛细对流过渡的动态表面变形效应进行实验评估。NASA 开展了两项“毛细管流”新实验:“毛细管”实验将有助于制定微重力环境下燃料、液氮和水等液体运输的新方案,可用于无需移动即可将液体从



一个储库泵送到另一个储库的硬件的开发;“毛细管流”实验-2包括一系列流体物理学实验,主要研究流体在微重力环境条件下的表面运动规律,目的是改进现有的微重力流体系统设计计算模型,并可能用于改良未来航天器用水的液体运输系统。作为美国国家实验室行动空间站计划的一部分,“纳米机架-立方体实验室”模块在自动执行封闭实验方面取得了引人关注的进展,实验模块9主要负责对材料科学样品进行加工,实验模块7主要对2至3种流体进行混合。NASA还开展了另外两项流体科学新实验:“微型加热器阵列沸腾”实验将确定微重力环境下沸腾过程中的临界热通量,可用于为未来的空间探索工具设计最佳的冷却系统;“剪切拉伸流变”实验目的是对聚物流体在拉伸变形过程中的流动行为进行预测。ESA开展的“微重力条件下地球物理流体流动的模拟实验”-2将对热量和流体在地幔中的流动进行研究,目的是改进科学家和工程师所采用的地幔研究计算方法。此外,“微重力条件下的混合流体”实验、“约束气泡”实验以及“临界流体与结晶化研究设备”系列任务中的“定向固化插件”实验和“高温插件”实验继续进行。

材料科学实验共计6项。“材料科学实验室”系列研究中的“固化过程中柱状到等轴的过渡过程和扩散及磁控对流条件下合金铸造技术的微结构形成”实验和“空间动态响应超声矩阵系统”实验继续进行。同时,材料科学还开展了4项新实验:JAXA的“微重力环境条件下合金半导体的晶体生长”实验目标是研究微重力条件下可用于制造热电转换器件的半导体材料的结晶过程,同时还可推动利用其他材料研制高品质晶体,并用于太阳能电池等其他器件;“硅锗均相晶体的生长”实验目的是利用移动液相区方法改变晶体的生长,并借助日本实验舱的梯度加热熔炉研制出高性能硅锗半导体结晶,如果方法建立成功则有望用于研制效率更高的太阳能电池和半导体电子元件;与在生长界面被吸附的高分子相关的晶体生长规律研究方面开启了一项新的研究——“微重力环境对自激振荡生长的

影响”；“意大利泡沫”实验计划对环氧树脂泡沫在微重力环境中的形状记忆复原能力进行评估,进而围绕制造可以把能量转换为其他能量形式的新概念作动器所必需的形状记忆性能进行相关研究。

燃烧科学实验共 4 项,全部由 NASA 主导。除“火焰熄灭”系列实验继续进行外,两项新实验也相继启动:“固体的燃烧和熄灭”实验旨在研究微重力环境下多种燃料样品的燃烧和熄灭特征,将有助于制定微重力环境中意外火灾的灭火策略,实验结果将用于构建燃烧计算模型,设计用于微重力和地球环境的火情检测和灭火系统;“燃烧实验中的火焰结构和火焰抬升”实验结果有助于技术改进,减少工厂的污染物排放并提高燃烧效率。

等离子物理实验共 4 项:俄罗斯开展的“光化学反应和大气光现象研究”、“脉冲等离子源探测电离层”和“微重力条件下的等离子——尘埃结构”实验继续进行。此外,“微重力条件下二维纳米模板的生产”实验继续开展。

根据目前 NASA 的实验学科分类,自 2006 年—2007 年间进行的“等离子晶体研究”实验完成之后,迄今为止在国际空间站尚未安排其他基础物理实验。

## 四、技术开发与验证实验

### (一) 重点研究方向

技术开发与验证是 2011 年国际空间站开展科学实验最多的研究领域,实验共计 57 项,其中 29 项为新实验,涉及通信与导航、辐射测量与放射量测定、空气、水与地表监测、实验硬件特征描述、皮卫星与控制技术、机器人技术、航天器材料、生命支撑系统与居住、航空电子设备与软件、成像技术以及国际空间站微重力环境等研究方向。

### (二) 实验开展情况和新变化

2011 年进行的实验中,少数之前曾经开展过的实验所属研究领

域发生了变化:原属于“地球与空间科学”研究领域的“空间环境数据采集设备——附加载荷”实验和原属于“物理与材料科学”领域的“国际空间站材料-7”实验现在归属到“技术开发与验证”领域的“航天器材料”研究方向(“国际空间站材料”系列实验现在均变为属于该研究方向),原属于“人体研究”领域的“航天员中枢神经系统的反常长期影响——防护”实验现在归属到“技术开发与验证”领域的“辐射测量与放射量测定”研究方向。

2011年进行的实验中,还有部分曾经开展过的实验研究领域没有变化,但研究方向发生了调整:原属于“国际空间站环境监测”的实验改为属于“空气、水与表面环境监测”、“技术验证”改为“实验硬件性能描述”、“通信”改为“通信与导航”,而原属于“航天器系统”、“国际空间站内部微重力环境特征研究”和“航天器与轨道环境”这三个研究方向的实验被重新划分,表1展示了这部分实验变化的情况。

表1 2011年“技术开发与验证”领域研究方向被重新划分的实验

实验名称	研究方向	
	原属研究方向	现属研究方向
容错延迟网络	航天器系统	航空电子设备和软件
串行网络流量监视器	航天器系统	航空电子设备和软件
高精度空间站运动状态预测系统	航天器系统	通信与导航
空间站内系统工作模式与空间站飞行状况的关系研究	航天器系统	国际空间站上的微重力环境
数字高分辨率立体摄像机-2	国际空间站内部微重力环境特征研究	成像技术
空间站内部剂量分布—太空环境下辐射对生物样本的作用	国际空间站内部微重力环境特征研究	辐射测量与放射量测定
空间站增压舱泄露位置探测	航天器与轨道环境	生命支撑系统与居住
空间站作为科学研究环境的特征研究	航天器与轨道环境	国际空间站的微重力环境

通信与导航方向,美国国防部高级研究计划局开展了“同步定位、保持、轨道预定与再定向实验卫星——芯片级原子钟”实验,演示超小型、低功率原子钟在持续的微重力环境下的性能;NASA 开展了“空间通信与导航实验台”设施研究实验,主要研究在执行空间任务期间的可重新编程软件无线电(SDR)技术。

俄罗斯继续开展了“航天器和用于个人通信的最新技术”、“利用全球业余无线网络研究国际空间站俄罗斯舱段无线电信号的发送/接收条件”、“高精度空间站运动状态预测系统”三项实验。ESA 开展的“船舶认证系统”实验继续进行。

辐射测量与放射量测定方向,ESA 开展的“对航天员中枢神经系统长期异常影响——防护”实验继续进行;第 29/30 长期考察团任务还新开展了由 NASA 资助的“对航天员中枢神经系统长期异常影响——缝隙”实验,两者主要对美国“命运”号实验舱内的辐射环境进行评估。JAXA 资助的“用于生命科学实验的被动放射量测定器”对日本“希望”号实验舱内的辐射环境进行测量,仪器在空间环境下暴露 6 个月后返回地面进行分析,所测得的数据将用于计划未来的生命科学实验并更新下一代载人飞行辐射评估模型。

此外,2011 年 NASA 开展的“离子通量验证器”实验及由 ESA 开展的“空间站内部剂量分布——太空环境下辐射对生物样本的作用”实验和研究国际空间站上的辐射吸收的“Matroshka - 2”实验继续进行。

空气、水与表面环境监测方向,NASA 开展了 3 项新实验,包括测试一体式三维高清可携摄像机性能并为 CMOS 成像传感器性能测试提供数据的“松下三维可携式摄像机”实验、监视大气质量并探查轨道大气层内可能发生的异常的“意大利太空探索电子鼻”实验,以及旨在大幅提升太空资产遥操作能力的“自主和遥操作卫星的管理”实验,该实验将使单一用户操控多个机动卫星成为可能。

NASA 开展的“舱内空气监测仪”实验和俄罗斯开展的“对各种

设施工作区进行环境监测仪评估使用国际空间站俄罗斯段的可能性”实验继续进行。

实验硬件特征描述方向,NASA 为“高级胶体”实验(ACE)开展了 3 项预备实验:“高级胶体实验预备”实验的目的是测试并确立空间站环境下光镜模块(LMM)性能,以将其用于 ACE 实验的高分辨率图像放大;PACE-2 实验将利用 LMM 测定 ACE 可以分辨的三维粒子最小尺寸,从而表征高放大倍率胶体实验的分辨率;PACE-LMM-Bio 是一项快速转变工程化概念验证实验,航天员拍摄三维生物学样本颗粒、组织样本和活体生物体的图像,以表述显微镜观察生物标本的能力。此外,NASA 开展的“纳米机架——立方体实验模块 1 与模块 3”实验持续进行。

在皮卫星与控制技术方向,由 NASA 出资、意大利航天局支持的“意大利-航天员个人眼”新实验,将开发一种用于支撑航天员舱内和舱外活动操作的自主航天器,微型航天器可通过锂离子电池供电并由微处理器控制,微处理器的输入信号来自惯性测量单元以及陀螺仪测量结果。

NASA 开展的“同步位置保持、轨道预定、再定向实验卫星”实验、“皮卫星太阳能电池”实验,以及俄罗斯开展的“微卫星准备及发射的创新”实验在 2011 年继续进行,其中“同步位置保持、轨道预定、再定向实验卫星”实验预计持续到 2012 年 9 月。

机器人技术是 2011 年 NASA 部署的国际空间站科学实验重点方向之一,共开展 3 项新实验:Robonaut 实验演示微重力环境下灵巧机器人在航天器内启动、控制及操作机械装置,在空间环境下长期工作与任务协作,并最终实现与航天员的交互;“载人探索遥控机器人智能手机”演示和评估使用“同步位置保持、轨道预定、再定向实验卫星”的舱内活动自由飞行遥控机器人的操作,以及由地面和航天员控制的实验卫星的遥操作,目的是提高未来载人探索任务中航天员的工作效率;“遥控补加任务”实验将演示和测试向卫星遥控

补加气体和液体的工具、工艺和技术,该任务预期会降低未来微重力条件下机器人维修任务的风险。这 3 项实验均将持续到 2013 年 3 月。

俄罗斯开展的“通过互联网对国际空间站俄罗斯舱段内的机械臂进行监控的系统开发”实验在 2011 年继续进行。

航天器材料方向,NASA 主导的“国际空间站材料”(MISSE)系列实验继续进行,实验结果将有助于更好地了解各种暴露在空间环境下的材料和计算元件的耐用性,以便应用于未来的飞船设计中。

俄罗斯开展的始于 2003 年的“空间生物降解和生物腐蚀初始阶段”实验到 2011 年 3 月暂时告一段落;JAXA 开展的“空间环境数据采集设备——附加载荷”实验将一直持续到 2013 年。

生命保障系统与居住方向,NASA 开展了可测定小型高效的再生真空胺系统是否能够有效地从国际空间站空气中排除二氧化碳的“Amine\_Swingbed”新实验,以及利用半透膜和浓缩糖溶液将脏水转换为可以安全引用的液体的“正向渗透袋”实验。俄罗斯开展的“空间站增压舱泄漏位置探测”实验于 2011 年 3 月结束。

航空电子设备和软件方向没有开展新实验,NASA 开展的“容错延迟网络”和“串行网络流量监视器”实验继续进行。

成像技术方面,JAXA 开展的“超灵敏高清电视系统”实验在轨道夜间、地球夜间、闪电、极光、宇宙簇射及其他奇妙事件发生期间,拍摄视频图像并记录在 SD 卡中,通过数据中继卫星下传至地面。ESA 继续进行“数字高分辨率立体摄像机-2”实验,目的是制作国际空间站构型图。

国际空间站上的微重力环境方向没有开展新的实验,由俄罗斯开展的“空间站内系统工作模式与空间站飞行状况的关系研究”和“空间站作为科学研究环境的特征研究”两项实验继续进行。

除上述研究方向外,NASA 还开展了“太空测试计划——休斯顿 3”(STP-H3)系列实验,STP-H3-Cannary 将研究空间站周围

等离子体环境下离子的相互作用;STP-H3-DISC 将捕捉星域图像并由地面算法分析以确定空间站的姿态,其结果将有助于建造出更加强和高性能的卫星用于地面系统通信;STP-H3-MHTEX 是一个毛细管泵浦回路热传输设备,通过连续的液体流动从多个航天器向外部飞行器表面传输热量,促进人们对两相流微重力性能的理解;STP-H3-VADER 将测试使用气凝胶作为隔热保护的多层绝缘新形式,使飞船免受极端恶劣空间环境的影响。“燃烧观测-2”是一项美国国防部实验,利用卫星来观测航天飞机轨道机动系统发动机的燃烧,目的是改进可预测烟羽方向或废弃上升柱的烟羽模型。“再入解体记录器”实验将测试返回地面后的飞行器重新进入太空的成本效益系统,记录重新进入和解体期间的数据并返回地面进行分析;“高屏蔽体积下的飞船单事件环境”实验将使用几种被动跟踪探测器技术测量空间辐射与飞船结构和防护之间的相互作用,以提供更加精确的空间站载荷容纳空间定义。NASA 同时还开展了 2 项商业实验:“纳米机架——电子书”和“纳米机架——智能手机-2”,目的是观察商业产品在微重力下的表现,探索未来航天员使用商业产品和技术的新路径。

安装在空间站 Cupola 观测舱上的 ESA“侧摆机械装置”,可支撑相机对地球上的特定点拍摄高清照片,弥补舱内尼康 3DS 相机拍摄地面昏暗目标及连续图片时飞行速度所产生的影响,还将用于教授儿童和学生如何使用空间站资源进行对地观测。

运输过程中的环境条件对于生命科学实验的生物样本和试剂来说非常重要,JAXA 开展的“运输环境监测包”实验将记录货运飞船内部温度,也计划用于记录 Space-X 演示飞行的在轨温度数据。

## 五、地球与空间科学实验

### (一) 重点研究方向

地球与空间科学实验共计 17 项,其中 7 项为新实验,涉及地球

遥感、太阳物理、天体生物学、天体物理学及科学技术综合验证等研究方向。重要的研究主题包括:地球大气成分在轨探测,农业区、海岸带等光谱成像,灾害监测与预测,国际空间站成员在轨拍摄地球及其现象,太阳光谱辐照监测,有机物辐射暴露,全天 X 射线天文观测,粒子物理探测,多任务综合设备实验等。

## (二) 实验开展情况和新变化

与 2010 年全部实验均延续以往实验的特点截然不同,2011 年在国际空间站上部署的全部 17 项地球与空间科学实验中,有 7 项是首次在国际空间站上开展的新实验。

地球遥感研究方向,有关大气观测方面,俄罗斯开展的“地球大气中二氧化碳和甲烷含量的在轨测定方法研究”实验持续进行;同时 JAXA 在新增的“多任务综合设备”实验中安排了两个小型任务载荷,分别用于开展等离子体和气辉的发光和共振散射大气观测研究;而“超导亚毫米波边缘发射探测器”实验由于仪器故障暂停了对平流层与臭氧化学有关的痕量气体探测。

NASA 开展了 4 项不同功能区环境遥感方面的实验:“沿海海洋超光谱成像仪实验有效载荷”实验和“沿海海洋远程大气和电离层探测系统实验有效载荷”实验持续进行;“国际空间站农业相机”已于 2011 年 3 月被安装在国际空间站的舷窗观测研究设施上;“国际空间站环境研究与可视化系统”实验主要目的是积累空间站上自动化地球表面图像数据获取的经验和技術。

灾害监测与预测方面,俄罗斯继续开展“飓风灾害及预测”实验及“地震效应监测—低地球空间区域高能粒子爆”实验。

在国际空间站航天员参与的对地观测活动中,除了从第一期长期考察团任务持续至今的“航天员地球观测”实验之外,2011 年在加拿大航天局的支持下,首次实现了地面天文台和空间站同时拍摄北极光。

太阳物理研究方向,新实验为 ESA 资助的两项“哥伦布实验舱



外部载荷设施上的太阳监测”实验：“太阳能自动校准超紫外/紫外分光光度计”实验主要测量 0.5 纳米 ~2 纳米中等光谱分辨率下 17 纳米 ~220 纳米的超紫外/紫外太阳光谱,借助自动校准功能,该实验预计将长期获得具有较高绝对分辨率的光谱数据;“太阳光谱辐照度测量实验”将以较高光谱分辨率对 180 纳米 ~3000 纳米范围内的太阳光谱辐照进行测量,紫外测量的精确度达 2%,可见和红外测量的精确度达 1%。

天体生物学研究方向继续开展 ESA 支持的两项实验,两者均依托“哥伦布”实验舱的暴露机架,Amino 实验重点研究氨基酸及其他有机物在地球轨道上的光化学过程,主要目的是研究在紫外辐射条件下生物活性分子转换为 L 分子和 D 分子混合物的程度;Organic 实验围绕有机物在空间的演变,研究紫外辐射、低压、重离子轰击对有机分子的影响。

天体物理学方向,阿尔法磁谱仪-2 搭乘美国“奋进”号航天飞机发射升空,开始了长期探寻宇宙中的反物质和暗物质的征程;从 2009 年稳定运行至今的“全天 X 射线成像监测仪”任务即将完成其在国际空间站上的使命。

此外,JAXA 开展的“多任务综合设备”实验在第 29/30 期长期考察团任务中开始实施,该实验由 5 个用于科学和技术验证的小型任务载荷组成,除前面介绍的两项大气观测研究之外,还负责对大型气球、机器人系绳运动和高清电视相机空间环境测试 3 项技术进行验证研究。

## 六、教育活动和推广实验

### (一) 重点研究方向

2011 年国际空间站开展的教育活动和推广实验共计 25 项,主要包括文化活动、教育示范、学生开发的实验和教育竞赛等。

### (二) 实验开展情况和新变化

教育活动和推广实验领域是新实验比例最高的研究领域,2011

年共开展了 18 项新实验,其中有 7 项“纳米机架”系列教育实验:Valley Christian 高中参与了“电镀”、“植物生长”和“铁磁流体的电磁效应”三项实验,分别研究微重力对电镀的影响、微重力下万寿菊和百里香种子的生长和生长率以及铁磁流体的电磁效应;Whittier Christian 高中参与“大肠杆菌和卡那霉素抗生素”实验,研究微重力下大肠杆菌的生长和对不同剂量卡那霉素的抗药性;Fremont Christian 高中参与“迷你机器人”实验,研究微重力对远程控制机器人的控制机制和机械设备的影晌;“纳米套件-1”实验主要针对在家学习的学生,让他们和家长获得参与并了解航天研究项目重要价值的机会;“国家地球与空间科学教育中心-2”实验是一项商业计划,旨在让学生通过亲身参与来体验空间科学探索。

6 项新实验分别以相关航天局命名:“ESA——教育载荷活动”,“ESA——教育有效载荷操作——温室”教育项目,“JAXA 教育有效载荷观察”系列 6、7、8 实验,加拿大航天局的“CSA 通信和推广活动”。

其他新实验还有:“YouTube 太空实验室”、“乐高积木”实验、“商业通用生物加工仪器科学插件-5”、“微重力条件下的孩子-2”实验、“国际空间站业余无线电”实验。

“同步位置保持、轨道预定、再定向实验卫星——零——机器人”、同样名为“国际空间站业余无线电”的实验 ARISS、“国际空间站内部和外部 PhotosynthTM 三维模型化”、“向中学生传播地球知识”、“教育有效载荷操作——示范”、“教育有效载荷操作——科学原理——示范”、“西红柿-III 教育”实验在 2011 年继续开展。

## 七、结束语

自 2009 年国际空间站实现 6 人长期驻站以来,空间站作为微重力科学研究大型空间平台的能力日益显现,从近两年空间站科学实验项数稳步增长的情况来看,利用空间站进行科学研究、技术验

证和教育推广的热情还在持续升温。可以预期未来空间站涵盖多个研究领域的科学研究活动还将大规模地持续开展下去,同时作为一个重要的学习和教育平台的功能也将得到更广泛的体现。

(中国科学院国家科学图书馆)