

国际空间站俄罗斯舱段的利用：成果及前景

摘要：国际空间站是人类目前唯一拥有的在近地轨道长期运行的空间平台，为一些关键技术提供了史无前例的开发和验证的可能性，推动着载人航天领域持续向前发展。到目前为止，美国舱段的建造已经完成，NASA联合其他合作伙伴对美国舱段正在开展全面和有效的利用。与美国舱段相比，在开展科学研究的强度方面，俄罗斯舱段还有充实和发展的潜力。俄罗斯舱段仍然在建造过程中，未来还有4个新的舱发射入轨与俄罗斯舱段对接：“科学”号多功能实验舱、节点舱和两个科研动力舱，新的舱段将科学家和工程人员的研究工作提供新设备和更多资源。本文介绍分析了国际空间站俄罗斯舱段上取得的有价值的科学技术发现，并对俄罗斯舱段未来的应用前景进行了展望。

一、国际空间站俄罗斯舱段的有效载荷整合

载人航天器上科学应用研究计划的执行效率在很大程度上取决于舱内配备的技术设备是否充足、航天器分配给科学研究的资源是否充足，以及有效载荷整合的可实现程度。最后一个因素是起决定性作用的，因为有效载荷的整合是否科学能够决定载人航天器资源能否被最佳利用。

截至目前，国际空间站俄罗斯舱段共含5个舱：

- (1)“曙光”号功能货舱(自 1998 年 11 月);
- (2)“星辰”号服务舱(自 2000 年 7 月);
- (3)“码头”号对接舱(自 2001 年 8 月);
- (4)“探索”号小型研究舱(自 2009 年 11 月);
- (5)“黎明”号小型研究舱(自 2010 年 5 月)。

其中,“曙光”号功能货舱的质量约 67 吨,内部密封空间容积大于 200 立方米。未来,俄罗斯舱段全部安装到位后将有 9 个舱,总质量大于 132 吨,密封空间总容积约 470 立方米。所有的舱作为空间站的一部分都可以成为开展研究的科学实验室和用于未来航天系统和先进技术实验开发研究的监控测试站,科学实验室和监控测试站根据计划开展工作,该计划必须考虑到空间站内资源分配的均衡,同时也要考虑到俄罗斯舱段的设备潜力。

国际空间站俄罗斯舱段的科学应用研究工作于 1995 年开始启动。有 80 多家工业企业、科研机构和大院校参与,递交了涉及各个研究方向的申请 406 份。在俄罗斯航天局和俄罗斯科学院联合建议下,成立了科技协调委员会,对这些申请进行筛选和审议。1996 年,在上述工作基础上确定了俄罗斯舱段的研究领域。1999 年“能源”火箭航天公司专家对初步筛选出的实验和研究的技术可行性进行评估,并制定了《国际空间站俄罗斯舱段长期科学应用研究计划》。目前执行的是 2008 年修订的版本,2012 年的版本已完成修订。

《国际空间站俄罗斯舱段长期科学应用研究计划》(2008 年版本)中确定了以下 10 个研究方向:(1)微重力条件下物理化学及材料研究;(2)地球物理学及近地空间研究;(3)生物医学研究;(4)地球远程探测;(5)太阳系研究;(6)空间生物技术;(7)工艺技术研究及实验;(8)国际空间站轨道空间物理条件研究;(9)天体物理学及基础物理学课题研究;(10)航天研究的普及和教育。

2000年和2001年服务舱和对接舱加入了国际空间站在轨组合体，从那时起直至今日，专项载荷的一些元素(部件)的在轨资源保障不是通过专用的机柜来实现的，而是通过通用的电、热、真空及其他接口直接保障的(换言之，将有效载荷进行整合，有时需要向空间站运送专用的电缆、电源、适配器及其他保障设备；专项载荷单元可以安装在舱壁上，或者安装在壁板的后面)。

与服务舱相比，小型研究舱1和小型研究舱2上应用了更加完善的设备研制和整合原则，能够保障俄罗斯舱段应用效率得到提高：

(1)通过采用可替换(更换)的有效载荷和通用工位来实现各个舱设备的整合；

(2)飞行过程中，科研设备可以在通用工位上直接安装和接通使用；

(3)通用工位上配备用标准的机械、电、数据及其他接口，可保障有效载荷的正常使用；

(4)有效载荷的替换是根据科研实验计划实施过程中的轮换原则进行的，或者是随着设备损坏而进行替换。

在解决服务舱外表面有效载荷整合中出现的问题时应用了上述原则：2009—2011年建造了两个新一代的通用工位并投入使用。

在多功能实验舱和后续的舱上将在更大范围内应用可替换的有效载荷方法，以保障舱内已安装科学设备能被高效利用。完善的通用工位和机器人技术系统，双轴可旋转平台、自动化气闸舱，以及可拉伸的设备架和支架相结合，在开展长期科学应用研究计划过程中，在这些舱的外表面安装和应用各种有效载荷就成为可能。

二、俄罗斯舱段最有学术价值的研究成果

在当前国际合作背景下，在轨的科学研究通常分为两大类：基础性和应用性研究，前者一般是在微重力条件及其他宇宙空间因素综合作用下开展的，而应用性研究主要是为了保障未来的航天任务。在国际空间站上开展的科学研究中，由工业公司实施、且和商业实验相结合的科研设计测试工作占有很重要的一席之地，因为其主要目标是开发某种产品（通常是在地球上利用在轨研究的成果），并改善产品的应用性能。包括 NASA 在内，各国的航天机构首先致力于通过降低科学家、商业公司、非盈利机构和科学院所使用太空实验室这一研究平台的门槛，来扩大国际空间站的利用效率。国际空间站俄罗斯舱段主要研究成果包括：

（一）生物医学研究

生物医学研究的开展是为了揭示长期飞行（其中包括星际飞行）中乘员受到的健康威胁及找到相关的防护方法。生物医学问题研究所专家设计并在轨开展了多项医学实验，如，“章鱼”、“章鱼-2”、“心电-下体负压”、“预防”、“脉搏”、“睡眠心脏”、“呼吸”、“类型”、“呼吸心脏”、“BIMS”、“制药”等。得益于这些研究中获取的新知识，科学家们已成功地完成了以下工作：

（1）将太空中应用测试过的医学诊断方法和设备用于遥测医学和灾难医学的临床实践；

（2）实验研究了长期卧床病人的康复方法；

（3）研究并制定了运动系统疾病患者的恢复治疗方法。

研制出的医学检测和治疗的方法及设备已经在临床上得到了应用：“伽马-1M”系统、Reflotron-4 血液分析仪、超声探测仪、遥测医学设备 ТБК-1 及其他设备。针对受运动系统疾病困扰的病人的康复方法，还在其他医疗机构得到了广泛应用：支撑负荷

代偿器，肌肉刺激仪，轴向负荷服，足底支撑负荷模拟器。

(二) 生物学和生物技术

生物学研究最重要的成就是在 20 世纪末至 21 世纪初期获得的。迄今为止国际空间站俄罗斯舱段上共开展了几十项目生物学研究，其中包括一些和其他国家联合开展的研究。研究工作的范围非常广泛，包括培育蛋白质晶体、细胞生物学、植物生理学、疫苗的研制等。以下列举几个实例。

1. “生物风险”实验

“生物风险”实验主要目的是研究宇宙空间因素对“微生物-培养基”系统状态的影响，这关系到星际免疫和航天生态安全问题。实验证明，一些隐生和休眠状态的生物(病毒、真菌、动物和植物)能躲过开放太空致命性的打击，即使在外太空暴露 2 年 7 个月仍能保存生命力。这是一个重大的新发现，更新了人类关于各级生物系统的生命能力的界限及浩瀚的宇宙中生命形式扩散的可能性的知识。同时还发现，在外太空极限环境中能够存活下来的不仅有微生物的孢子，还有其他休眠的生物(高等植物的种子、蚊子幼虫、低等甲壳类动物的卵)，这对于星际飞行中行星保护概念的形成具有重要意义。

2. “植物”实验

“植物”实验主要研究微重力条件下“拉达”温箱内高等植物的生长和发育。连续种植了 4 代的 131 系豌豆，对种植结果的分析表明，在航天飞行条件下可以长期(相当于火星探测的时间)种植植物，结出可以用来继续种植的种子，不会丧失原有的遗传功能。这一实验最重要的结果是：

(1)首次在太空飞行条件下获得了连续 4 代有遗传标记的豌豆种子；

(2)“拉达”温箱内不同系的豌豆在个体植物生长发育全周期内的生长和发育特性，与地面对照组并没有区别；

(3)首次证明, 航天飞行因素没有影响 1~4 代“太空”植物的遗传器官。

3. “PCG 结晶器”实验

实验的主要目的是在微重力条件下, 国际空间站日本实验舱 Kibo 内, 获得高品质的蛋白结晶, 并在地球上利用高空间分辨率的 X 光结构分析法对其空间结构开展研究。这项实验由俄航局和日本航天局联合开展, 双方科学家分工合作, 共同承担实验经费及享有研究成果。

对于俄罗斯科学院晶体研究所的科学家们, 通过开展该项实验取得了以下成果:

(1)使用日本研制和生产的舱载设备, 首次接触到采用反扩散(встречной диффузии)方法获取高品质蛋白结晶的技术, 并且还获取了蛋白结晶; 研究制定了航天实验飞前准备的新方法。

(2)与俄罗斯之前的设备相比, 日本研制的设备十分高效, 俄罗斯的“模块-1”和“模块-3”设备的一个组合内只能加工 8~12 株蛋白, 俄罗斯的“射线”设备的一个组合内能加工 16 株蛋白, 而日本 JAXA-PCG 设备的一个组合内可同时加工 144 株蛋白。这极大地扩展了科学家们的研究范围, 无论是统计学研究还是命名法研究。

(3)使俄罗斯科学家可以使用更加先进的日本研制的 X 光结构分析设备对国际空间站上培育出来的蛋白晶体进行研究, 保障了研究的高精确性和高清晰度(清晰度即使只提高 0.1, 对于获取科学和有重要实际意义的成果而言都是有原则意义的)。

(三)对地观测

自 2000 年国际空间站首批长期考察组驻站开展工作以来, 国际空间站(包括俄罗斯舱段)就成为了一个对地球进行观测的平台。在过去的 12 年间, 空间站上完成了一系列重要的世界大洋水域和大气变化的观测研究、农作物种植区域的观测研究, 及遭受

自然灾害和技术工程灾害地区的观测研究。

1. “飓风”实验

实验的主要目的是借助不同空间分辨率的数字化摄影摄像和光谱设备，对选定的地球表面区域进行观测和拍照。观测的对象是那些存在潜在危险(自然或人为因素造成的)的地区，这些潜在危险进一步发展有可能导致不可预见的灾难。目前，国际空间站上该实验中用于观测的是光谱拍摄系统“飓风-ΦСС”。2012年7月，克拉斯诺达尔地区克雷姆斯克市发生洪水，从空间站开展了对该地区洪水动态变化情况的拍摄，这些拍摄对于俄罗斯紧急情况部在改地区开展搜索救援行动给予了很大支持，并且对于发生灾难原因的侦查也起到了很大作用。

2. “渔船”实验

实验目的是研究国际空间站俄罗斯舱段乘员和从事捕鱼的轮船之间的合作方法，以在世界各大洋搜寻和开发渔业资源丰富的水域。从国际空间站使用数字摄影摄像设备进行的观测结果，与渔船上对水生生物(初级产品)和光学指标(叶绿素)的测量结果在地点和时间上进行比对与协调，并随后将观测结果及时地传回地球。

全俄渔业和海洋资源研究所对太空中拍摄的数据进行了充分利用，为创建世界各大洋渔业资源丰富区域应具备条件的信息资源库，做了大量准备和分析工作，实现对获取材料的全面综合解码，为科学探索和工业开发计划制定建议。

在国际空间站第29~32考察组在轨工作期间(2011—2012年)，利用俄罗斯舱段乘员拍摄的资料共建立了245个大洋表面温度(ТПО)周图表。为了对“渔船”实验获取的资料进行综合分析，建立了150个大洋表面温度(ТПО)长期图表(月平均图表，非正常图表，趋势表，差异和增减率表)。目前，俄罗斯没有在偏远的、可能有渔业资源的水域开展科学考察活动，这种情况下，

“渔船”实验中积累的数据资源就成为了关于当前所研究水域的表层状态及水生生物学参数分布的唯一可信的信息来源，这些数据都会影响捕鱼环境。

(四) 物理实验

在轨道空间有可能将重力因素排除在物理学研究之外，这些研究涉及的范围十分广阔，从流体物理学和燃烧物理学，到基本粒子物理学、材料科学实验。近几年，由于国际空间站两个舱段上都有用于开展研究液体行为、燃烧过程、材料科学等项实验的先进科学研究设备，物理学实验的数量有所增长，这些实验既有俄罗斯独立开展的，也有和伙伴国联合开展的研究。仅以以下两个实验为例。

1. “等离子体晶体”实验

实验的主要目的：在微重力条件下研究等离子体尘埃晶体和液体。该项实验已经开展了 11 个年头了，是多国成果合作的典范，如俄罗斯(俄罗斯科学院高温研究所)、德国和法国。

实验装置：“晶体 3 Plus”，该装置可以使科学家通过直接观察，对微重力条件下尘埃等离子体熔化和结晶的过程开展研究。实验装置包含一个把气体抽出来的泵、两个 TEAC 摄像机，这是人体科学实验的要求。将等离子体晶体形成过程的录像资料、其他物理参数，如气压、高频辐射功率、尘埃微粒的大小等，传输回地球，以供研究和分析。研究成果的潜在应用领域有纳米技术领域(纯化沉淀和分离)、新材料和涂层的制造、热核聚变(从反应区清除尘埃颗粒)以及先进激光器的研制(放射性粒子气溶胶的工质)等。

2. 中子实验

该实验由俄罗斯科学院空间研究所负责实施开展，实验的主要目的是全面综合研究近地宇宙空间的辐射环境，揭示其与太阳活动及与地球磁层、电离层状态的关系。该课题的研究对于空间

技术新样机的研制以及在地球上的推广，特别是在保健领域具有重大的现实意义。

同时还应注意到，2013年俄罗斯舱段还收到等离子波组合装置，该装置由俄罗斯高温研究所与6个国家相关科研机构联合研制，用于国际空间站轨道上的等离子波环境的综合研究。

(五) 技术实验和航天教育

在轨实验室最适用于开发各类未来航天任务中可能用到的新技术。在过去的12年间，国际空间站俄罗斯舱段上先后完成了约50项技术实验，涉及面广，从机器人技术到环境监测新方法和成像新技术的测试。

俄罗斯舱段最为有趣且十分有前景的应用领域是微型卫星、纳米卫星及微微卫星(皮卫星)的研制和释放。这些小型卫星在飞行前通过研制、测试和准备，并使用运输飞船搭载到国际空间站。在俄罗斯舱段上曾成功开展过7项此类实验。最值得关注的是在“进步”号货运飞船上释放的由科学院空间研究所研制的微型科研卫星“奇比斯-M”；以及俄罗斯航天员帕达尔卡出舱期间(ISS-31/32)释放的用于地球物理研究的微型卫星“Sphere”。

国际空间站上的科学和工程研究为教育任务的开展提供了极大的可能。教育类实验的宗旨在于激发各年龄段的中学生和大学生对自然科学、数学、技术、教育项目的热情，这也是国际空间站各航天局和成员国的共同目标。

四、俄罗斯舱段即将增加的舱段

按计划，还将有4个舱加入国际空间站俄罗斯舱段：“科学”号多功能实验舱、节点舱、科学动力舱-1和科学动力舱-2。

(一) “科学”号多功能实验舱

“科学”号多功能实验舱是由赫鲁尼切夫航天中心根据俄航局

的要求在“曙光”号舱的基础上进行研制的，将成为国际空间站的第 17 个舱。俄罗斯科学家期待俄罗斯舱段未来新的舱能够成为科学研究的先进平台。

“科学”号实验舱的各项参数为：长度 13 米，最大直径 4.2 米，封闭舱的通用工位为 16 个，设计寿命为在轨运行 15 年。“科学”号舱上将安装长度为 11.3 米的欧洲机械臂 ERA，该机械臂是专门为俄罗斯舱段研制的，最大起重力为 8 吨，移动物体的精度可达 5 毫米。

该实验舱的内部和外表面安装有先进的通用工位，主要用于在质量及数量上提升俄罗斯舱段开展科学应用研究计划的技术和资源潜力。“科学”号实验舱上配置的机械臂 ERA 和自动化气闸舱为俄罗斯舱段增添了新的实力，并为货物储存提供了新的空间。未来，“科学”号实验舱加入国际空间站将开启俄罗斯舱段第二阶段整合的序幕。

“科学”号多功能实验舱能为长期科学应用研究计划中的绝大多数方向的实验提供科学研究场地。内部的通用工位上有俄罗斯研制的用于专项载荷的支架，可以将所需数量的科研设备加以整合，其中包括国际合作伙伴按照美国舱段标准研制的用于安装到美国舱段 EXPRESS 支架的有效载荷，这些设备在实验完成后可以进行替换(充分实现了可替换的有效载荷的方法)。对于外部的通用工位的设计也是一样。

在“科学”号多功能实验舱的密封部分有 14 个内部通用工位及 6 个利用了舱内隔板后面空间设置的存放专项载荷的空间(必要时通用工位可以重新规划组织)。这些空间一般存放一些专用设备，例如用于生物及生物技术研究的手套箱、高温及低温恒温箱；航天材料领域实验用的多空间真空炉；实验开展过程中保护有效载荷不受振动干扰的可翻转的防震平台。

通用工位上配置了用于专项载荷的机械适配器，可以将专项

载荷安装在可拉伸的支架上，在靠近透明的直径为 426 毫米的舷窗处的工位用于完成对地观测实验和地球物理学实验。

在“科学”号多功能实验舱的外部设置有 13 个通用工位，应用了在服务舱、对接舱和小型实验舱上已应用并检验过的技术设备和方法。其中包括多样的外部机械接口和通用工位，各种类型的支架结构、磁机械锁、用于在舱外扶手上安装设备用的锁和固定装置等。外部有效载荷维护系统中纳入了新的成分气闸舱和机械臂 ERA，将为乘组在出舱活动中提供辅助支持。“科学”号多功能实验舱的科研设备将主要由“进步”号货运飞船运送。

（二）节点舱和两个科学动力舱

国际空间站俄罗斯舱段下一阶段的应用（利用）与未来 3 个俄罗斯模块舱（节点舱、1 号科学动力舱及 2 号科学动力舱）的发射及其与轨道组合体的整合紧密相关。

节点舱有 6 个对接泊位，将对接在多功能实验舱的最低的一个泊位，作为俄罗斯舱段下一阶段的主要对接装置。节点舱的密封舱容积是 19 立方米，最大直径 3.3 米，配置有更加完善的热保障系统及主动和被动的对接结构。

两个科学动力舱将成为俄罗斯舱段中最复杂和最先进的部分。每个舱的发射质量是 21 吨，密封舱容积为 94 立方米，按照当前的计划，两个舱与节点舱对接后，俄罗斯舱段的组装将全部结束。

两个科学动力舱配备有高效的太阳能电池，两个舱的太阳能电池加起来可提供 24 千瓦的电能。科学动力舱拥有超大的密封空间，由“联盟”号和“进步”号飞船带来的任何型号的科研设备和仪器都可以整合到该密封舱内。科学动力舱可以作为未来近地轨道以远的载人飞行组合体的基础成分。

五、俄罗斯舱段的应用潜力

俄罗斯舱段新实验舱的主要任务是研发与未来载人航天飞行

相关的技术。其中具体包括以下系统的开发和研制：

- (1)再生生命保障系统；
- (2)容错计算机；
- (3)更完善的生产和输送电能的系统；
- (4)电动发动机；
- (5)机器人设备及应用机器人设备的系统和各项操作；
- (6)载人飞行的技术支持设备；
- (7)更新升级的通信和导航系统；
- (8)完善的自主交会对接系统；
- (9)新一代乘员医学监督和防护系统；
- (10)新一代航天服；
- (11)性能更好的居住舱；
- (12)其他系统和设备。

如果关注到俄罗斯舱段将补充进来的新的舱段，以及俄罗斯与国际伙伴所开展的高水平的科学技术合作，那么可以充分肯定国际空间站俄罗斯舱段的应用潜力在不断增长，

(1)在国际空间站上继续开展类似“火星-500”试验的长期飞行，并应用新研制的再生生保系统(俄罗斯和NASA联合开展的一年期飞行任务)；

(2)利用国际合作(在国际空间站合作伙伴建立起来的专家工作组框架下)研制未来近地轨道以远的飞行中应用的新技术、系统的研制、试验大纲；

(3)研究并制定利用国际空间站这一组合体以实现深空任务的规划。

目前，对如何利用俄罗斯舱段第二阶段建造的舱作为未来载人综合体单元已经开展讨论和研究。新的舱段可以成为国际空间站的组成部分，同样，并且/或者可作为建设新的空间站的基础。

六、结论

自国际空间站俄罗斯舱段投入使用以来，已经获取了一系列有价值的科学技术成果，并且几乎涵盖了长期科学应用研究计划的所有方向。其中，按照“有益于人类”和“基础科学价值”的标准，可以将上述成果按以下方向划分：

(1) 生物医学研究——开发了医学诊断的方法和手段，这些方法和手段在太空中已经得到了测试和验证，将其应用于遥医学和灾难医学实践；开发了长期卧床病人的康复方法、预防和调整手段；为有运动系统缺陷的病人开发了康复治疗的方法和手段。

(2) 生物学和生物技术研究——获得了关于以下内容的基础性认识：各种水平(层级)的组织的生物系统所具有的生命活力的边界，及生命的生物形式在宇宙中传播的可能性；航天飞行因素不会影响植物的发育过程和遗传器官(至少是第1~4代太空作物)。此外，研制出了微重力条件下培育高质量蛋白晶体的设备并制定了培育方法，在该研究的基础上获取了高效新药物的分子结构。

(3) 对地观测——建立从太空对地球的视觉仪器观测系统，以评价自然灾害对抗措施的效果及人类活动频繁区域的生态监控效果。制定俄罗斯舱段乘组与渔船联合作业期间寻找及发现世界大洋渔业资源丰富水域的方法。

(4) 物理学研究——在微重力条件下的等离子体尘埃晶体和液体的系列研究中，获得了基础性成果；完成了近地宇宙空间辐射环境的综合研究，揭示了地球磁层、电离层和辐射环境的关系，建立了详细的国际空间站轨道上的中子辐射图。

(5) 技术实验——进行新技术的研究和实验，为完善现有的航天设备并为近地轨道以远的飞行做准备；利用国际空间站俄罗斯舱段的技术设施，研究释放微卫星、纳米卫星和皮卫星的方法

和技术，包括飞前的准备工作。

(6) 航天教育——利用空间实验取得的各项成果，研究在中学和大学组织及开展有俄罗斯舱段乘员直接参与的教育活动的原则和方法。

在俄罗斯舱段的利用过程中，逐渐积累起了新的基础性知识，在空间科研中取得的成果不仅应用在完善航天设备和技术方面，还被用于地球上的工业生产。国际空间站上开展实施的教育计划成为了吸引年轻人投身航天研究和航天工业的有力激励因素。俄罗斯舱段的持续建设，使其保持了动态发展和各系统更新的状态。俄罗斯舱段不断整合进新的、拥有更加优化的技术参数和最现代化高科技舱载设备的舱段，通过后续采用可替换有效载荷的方法，以保障任何类型的科研设备能够在俄罗斯舱段正常使用。在这一过程中，实验的主管负责机构会提供越来越多的技术和资源，这样，俄罗斯舱段的利用效率就会不断得到提升。

国际空间站俄罗斯舱段的科研潜力，与使用现代化的可升级的技术和技术设备是分不开的，因此在未来的 10 年也将有稳定的发展前景。

(中国航天员科研训练中心)