

中国空间站科学实验资源手册

中国载人航天工程办公室

二〇一九年四月

目 录

1	概述.....	1
2	中国空间站研究环境和应用资源条件.....	1
2.1	空间站的独特研究环境.....	1
2.2	中国空间站的应用资源条件.....	3
3	空间站空间应用研究方向.....	4
4	空间站科学与应用研究设施概述.....	7
4.1	密封舱内科学实验柜.....	7
4.2	舱外暴露实验装置.....	10
4.3	舱外独立载荷.....	11
5	密封舱内实验资源.....	12
5.1	学科方向实验柜资源.....	12
5.1.1	航天医学方向.....	13
5.1.1.1	人系统研究机柜.....	13
5.1.1.2	医学样本分析与高微重力科学实验柜(医学样本分析部分).....	16
5.1.2	空间生命科学与生物技术方向.....	17
5.1.2.1	生命生态实验柜.....	17
5.1.2.2	生物技术实验柜.....	20
5.1.3	微重力流体物理与燃烧科学方向.....	23
5.1.3.1	流体物理实验柜.....	24
5.1.3.2	两相系统实验柜.....	26
5.1.3.3	燃烧科学实验柜.....	28
5.1.4	空间材料科学方向.....	31
5.1.4.1	高温材料科学实验柜.....	31
5.1.4.2	无容器材料实验柜.....	34
5.1.5	微重力基础物理方向.....	35
5.1.5.1	超冷原子物理实验柜.....	36
5.1.5.2	高精度时频实验柜.....	38
5.1.6	航天新技术方向.....	40
5.1.6.1	航天基础试验机柜.....	40

5.2 共用支持实验柜资源.....	42
5.2.1 科学手套箱与低温存储柜.....	42
5.2.2 医学样本分析与高微重力科学实验柜（高微重力实验部分）.....	45
5.2.3 变重力科学实验柜.....	47
5.2.4 在轨维修装调支持平台.....	51
5.3 独立载荷资源.....	53
6 密封舱外实验资源.....	55
6.1 舱外实验条件概述.....	55
6.2 核心舱舱外实验资源.....	56
6.2 实验舱 I 舱外实验资源.....	56
6.3 实验舱 II 舱外实验资源.....	57
7 空间站应用在轨信息支持.....	58
7.1 主要功能.....	58
7.2 载荷接口及指标.....	58
8 有效载荷上下行支持.....	59
8.1 科学实验样品/装置上下行.....	59
8.2 载荷数据上下行.....	59
9 载荷研制要求.....	59

1 概述

2022 年前后，中国载人空间站将完成建造，将支持开展大规模多学科的空间科学研究、技术验证和空间应用，具有航天员参与实验操作、实验设备可维护升级、实验样品可返回、天地信息传输等独特优势。中国空间站将在轨运营 10 年以上，实验资源充足，为开展多学科、系列化和长期的空间研究提供了历史性机遇。

为面向我国科学家征集空间站科学项目，我们编辑了这本手册，简要介绍中国空间站的研究环境和应用资源条件，空间站应用研究方向和科学实验资源信息，以及空间站应用信息支持和有效载荷上下行支持等，为科学家申报空间站创新科学研究项目提供参考。

2 中国空间站研究环境和应用资源条件

2.1 空间站的独特研究环境

(1) 微重力环境

空间站可提供长时间的微重力环境，微重力水平（残余微振动加速度）为 $10^{-3} \sim 10^{-4}g$ 。在微重力条件下，地面重力效应导致的流体（气体、液体、熔体）中的浮力对流、重力沉降、液体压力梯度等现象基本消失，地面重力效应所掩盖的一些次级效应凸显，导致流体形态和物理（化学）过程等发生显著变化，影响或改变流动和燃烧机制，也影响到相关的材料（包括生物材料）加工及制备过程；微重力还会对一些基础物理的实验条件产生重要影响，能够以更高的指标和精度开展实验，对重要的基础物理理论进行验证。此外，各种生物包括人类的生存和进化一直是在重力环境下实现的，微重力环境对生物体及其各层次的影响十分显著。因此，微重力环境是开展相关科学研究独特而宝贵的资源。

(2) 轨道位置

中国空间站运行于倾角 $41 \sim 42$ 度、轨道高度 $340 \sim 450$ 千米的近圆低地球轨道，约 90 分钟绕地球一圈，空间站组合体采用近似三轴稳定对地指向，

采用带动量管理的力矩平衡姿态（TEA）控制模式，姿态角控制精度优于 0.1° ，姿态稳定度优于 $0.005^\circ/\text{s}$ 。空间站轨道完全脱离了地球大气，处于地球电离层 F2 层，适于开展巡天类空间天文观测和特定空间物理研究；对地球观测而言，空间站轨道覆盖南北纬 42° 以内、地球人口居住 90% 的区域，与一般地球遥感卫星采用的太阳同步轨道相比，空间站轨道的交点地方时在不断变化，可实现对同一地区可变光照条件下的观测；由于轨道高度较低，相同对地观测仪器的空间分辨率较高。

（3）辐射环境

空间辐射来源于银河宇宙线和太阳宇宙射线（包括太阳质子事件）。宇宙射线的主要成分是质子（约占 90% ）、氦核即 α 粒子（约 9% ）以及电子、各种重离子、伽马射线等（约 1% ）。宇宙射线能量范围很宽，能谱呈幂律下降形式（能量越高流量越低）。在纬度 $\pm 43^\circ$ 范围低地球轨道运行的空间站由于地球磁场的作用，使低能带电粒子向极区偏转，只有较高能量的带电粒子（约 $1\text{GeV}/n$ 以上）才能到达，降低了总辐射剂量；空间站穿过地球内辐射带的南大西洋异常区下部，辐射带捕获的带电粒子对空间站有显著影响，但总的辐射剂量不高；太阳质子事件具有一定随机性，会在短时间内显著增加辐射剂量。由于舱体结构有一定的防护作用，舱内辐射剂量比舱外低 $1-2$ 个数量级，但高能粒子仍能穿透舱壁。空间辐射环境对航天器、航天员和设备具有一定危害，但宇宙射线复杂的成份和能谱形式是地面无法模拟的，是开展辐射生物学等研究的有利条件，也是开展高能天文观测和粒子天体物理研究的必要条件。

（4）舱外极端环境

空间站可利用外太空极端条件在舱外开展实验，包括极热和极冷循环、高真空、原子氧侵蚀、太阳紫外辐射和宇宙高能射线辐射等。暴露于这些极端条件下的空间应用材料、电子器件，生物体及组织的性能将受到外太空环境的显著影响。这些特殊环境（及其复合环境）在地面很难模拟，因此成为开展相应的针对性研究的独特资源。

空间站的独特环境，加上十年以上的连续运行，以及天地往返运输支持和航天员参与等条件，为系统地开展空间生命科学与生物技术、空间基础物理、微重力流体物理与燃烧科学、空间材料科学研究，以及重要的天文观测、地球观测、空间物理研究、新技术试验等提供了十分有利的条件。

2.2 中国空间站的应用资源条件

(1) 科学实验舱段

空间站主体包括核心舱、实验舱 I 和实验舱 II，采用水平对称 T 字构型，见图 2.1 所示。核心舱用于统一控制和管理空间站组合体，提供航天员生活和工作场所，同时支持部分学科的科学实验。两个实验舱主要用于支持开展空间科学与应用研究。

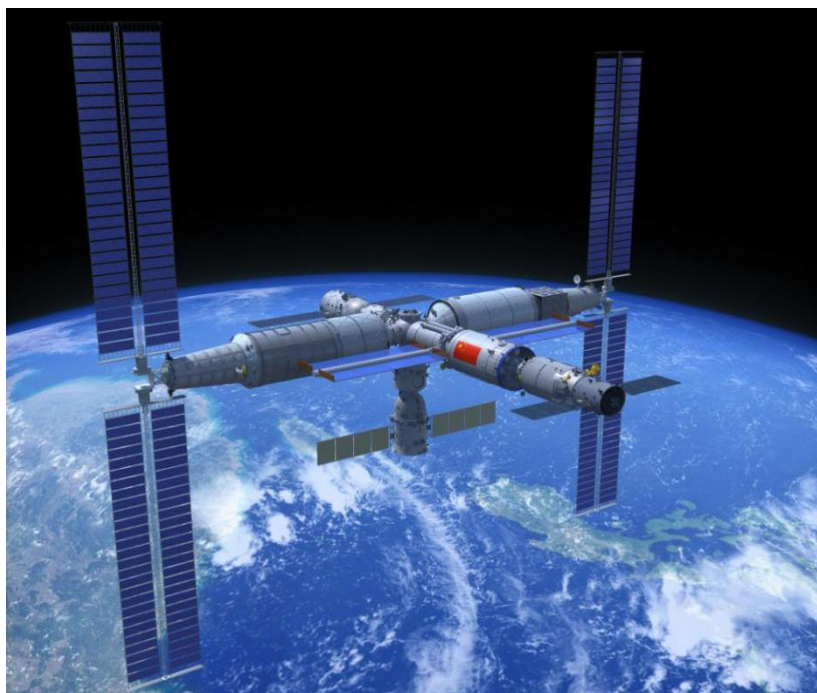


图 2.1 中国空间站示意图

核心舱、实验舱 I 和实验舱 II 的密封舱内均配备了科学实验柜，用于开展航天医学、空间生命科学与生物技术、微重力流体物理与燃烧科学、空间材料科学、微重力基础物理、航天新技术等研究方向的科学实验。

实验舱 I 和实验舱 II 外配备了暴露实验平台，配置了多个标准载荷接口或大型载荷挂点，用于开展天文观测、地球观测、空间材料科学、空间

生物学等多种类型的暴露实验或应用技术试验。

（2）机械臂在轨操作支持

空间站核心舱和实验舱 I 各配置 1 套机械臂，可用于在轨有效载荷安装。标准舱外载荷可由实验舱机械臂单臂通过事先路径规划和载荷适配器机械容差实现安装。大型舱外载荷可以通过两个机械臂级联组合进行安装。

（3）上下行运输支持

有效载荷主要通过货运飞船上行，少量实验样品可由神舟载人飞船下行。载人飞船和货运飞船可在运输过程为有效载荷提供一定的供电、信息和热控支持。

货运飞船有全密封、半密封和全开放三种形式，可满足密封运输物资、舱外大型载荷、实验平台等运输需求。目前货运飞船以全密封为主。

（4）飞行乘组支持

1) 在轨实验支持能力

航天员乘组均具有执行空间实验及其它任务的能力，包括对有效载荷进行在轨操作、状态监视、样品更换、回收处置等，以及按要求完成有效载荷项目的在轨建设和扩展。

2) 在轨载荷维修与更换支持

航天员乘组具有舱内外载荷维修与更换能力。

3 空间站空间应用研究方向

中国载人航天工程利用空间站支持能力、微重力和辐射环境、航天员较长在轨驻留、天地往返等有利条件，共规划安排了 11 个空间科学与应用研究方向，包括航天医学、空间生命科学与生物技术、微重力流体物理与燃烧科学、空间材料科学、微重力基础物理、空间天文与天体物理学、空间物理与空间环境、空间地球科学及应用、航天元器件与部件、航天新技术、空间应用新技术等方向。

在航天医学方向，针对制约人类长期航天飞行的“人系统风险”机制及其

关键科学问题，以提升航天员在轨驻留能力为核心，建立较完整的“人系统风险”评估体系，开展创新性防护技术研究，为长期航天健康飞行进行理论和技术储备，为解决人类重大医学和健康问题探索可能方案与途径。

在空间生命科学与生物技术方向，利用空间站提供的长期微重力、有规律的磁场和昼夜的快速交变，以及特殊辐射等环境条件，以促进对生命现象本质的理解和认识、探索科学规律为目标，开展生命体对重力变化的感应、空间辐射下的损伤，以及生命起源、演化、发育、繁殖等研究，开展利用空间条件的生物技术开发应用研究，促进现代生命科学和生物技术的发展，服务于人类健康和社会进步。

在微重力流体物理与燃烧科学方向，以揭示流动物质在微重力下流体力学和燃烧过程的机理、推动研究成果和应用技术转化为目标，开展相关实验研究，为人类长期空间探索活动和地基生活与生产活动的进步、发展空间和地基的新技术和新工艺提供支持，为解决资源环境问题和可持续发展做出贡献。

在空间材料科学方向，紧密结合应用需求，以揭示微重力环境下材料物理和化学过程规律为目标，完善和发展材料科学理论，指导和推动地面材料加工工艺改进，研究和制备具有重要科学意义的高性能材料，试验验证空间应用材料的性能，为未来空间构件材料的设计和研发提供科学依据，为新材料科学发展的形成做出积极贡献。

在微重力基础物理方向，以检验现有物理理论（如相对论、电动力学、粒子标准模型、核理论等）、发现新的物理现象和物理规律（如引力规范理论、超引力、大统一理论等）为目标，开展微重力环境下的物质结构及其运动规律研究，研究自然界物质之间存在的4种基本相互作用力（引力、电磁力、弱力、强力）的物理性质和规律，争取在相关实现突破。

在空间天文与天体物理学方向，充分发挥空间站覆盖宇宙辐射波段范围宽、覆盖天区面积广、在轨运行时间长等独特优势，瞄准一黑（黑洞）、两暗（暗物质、暗能量）、三起源（宇宙起源演化、天体起源演化、地外

生命起源)等前沿重大基础科学问题,以世界上最大规模、最高性能的高精度测光和光谱巡天为主要方式,开展空间天文实验研究,预期获得重大科技成果和革命性发现。

在空间物理与空间环境方向,以空间站、航天员长期驻留、出舱活动的空间环境保障,以及太阳质子事件的研究与预报、中低纬度太阳-磁层-电离层链接关系等为主要任务,在空间站上开展相关的实验研究。

在空间地球科学及应用方向,以地球系统科学中层圈相互作用,人类活动对全球变化、环境、生态的影响,以及自然灾害等地球科学前沿问题研究为主要任务,结合空间站运行非极轨道与长期监测的特点,发展新一代高精度、定量化空间遥感技术,获取陆地、海洋、大气、地球系统等等多维信息,开展全球变化、自然灾害与环境污染监测、海洋监测、资源勘探、粮食安全等研究。

在航天元器件与部件方向,以提升国产元器件与部件研发能力为目标,充分发挥空间站有人参与、可维护可更换、天地往返运输等优点,开展航天元器件与部件舱外暴露试验,获得空间环境下元器件与部件的功能、性能变化特性,研究空间环境对元器件与部件的影响以及损伤机理,获取在轨试验数据,提高我国航天元器件与部件的功能和性能水平,加快核心元器件与部件国产化步伐,改变我国航天核心元器件与部件主要依赖进口的现状,夯实我国航天基础工业,促进我国航天技术可持续发展。

航天新技术方向以提升航天器总体设计能力、验证航天器平台新技术及瓶颈技术为目标,重点开展航天器热控、能源、推进、控制、导航、防护、在轨服务等技术研究与在轨试验,为未来载人登月、深空探测和其它航天任务进行技术储备。

空间应用新技术方向以提升航天新技术研究水平和自主研发能力为目标,重点开展空间应用急需的、先进、共性新技术研究和关键技术的试验验证,解决制约我国航天发展的瓶颈技术,促进我国航天技术大幅提升。

4 空间站科学与应用研究设施概述

空间站开展科学实验和应用研究可以利用实验舱内的科学实验柜、舱外的暴露装置，也可以设计舱内、舱外专门的独立载荷。

4.1 密封舱内科学实验柜

科学实验柜安装在密封加压舱（包括核心舱、实验舱 I 和实验舱 II）内，在各学科方向的科学实验中起支撑作用。空间站密封舱内压力为 81.3kPa ~ 104.3kPa，温度为 19 ~ 26℃，相对湿度约 30 ~ 70%，气体成分与地面大气相近，工作区的噪音水平不大于 65dB。

科学实验柜以标准实验柜体与专业科学实验系统（其中有些包含若干专用实验模块）结合的方式，针对相关学科方向的需求，整体设计集成，支持相应方向的科学实验项目，如图 4.1 所示。科学实验柜可通过更换实验样品或实验单元，支持多个科学研究项目的滚动实施。还有一种标准实验柜，支持采用标准模块或其组合的独立实验。

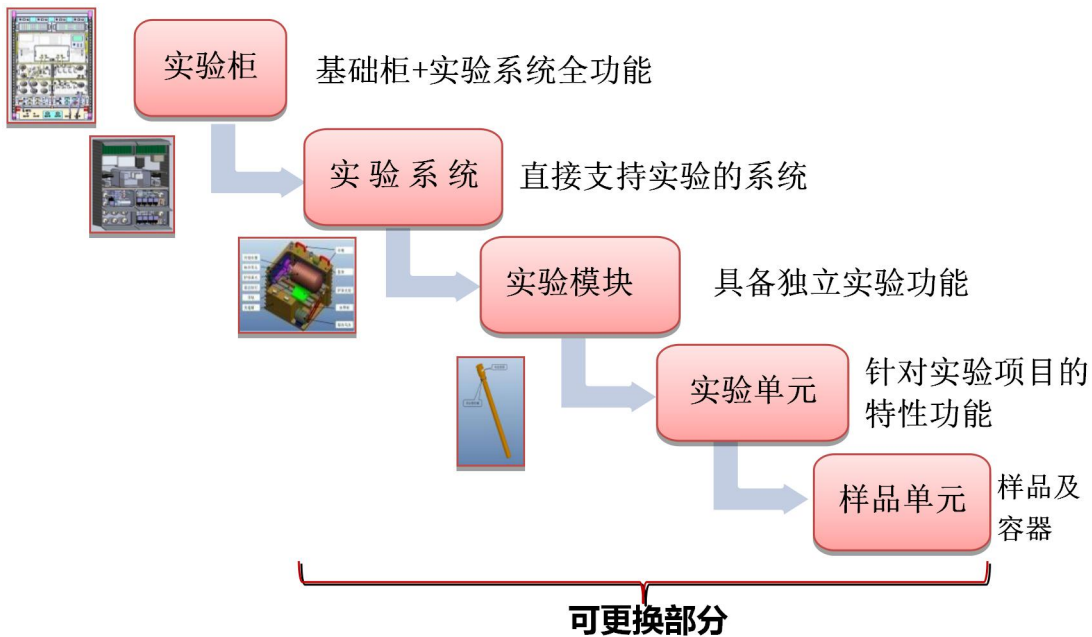


图 4.1 科学实验柜总体构成

科学实验柜根据用途可以分为 12 个学科方向实验柜和 4 个共用支持实验柜。

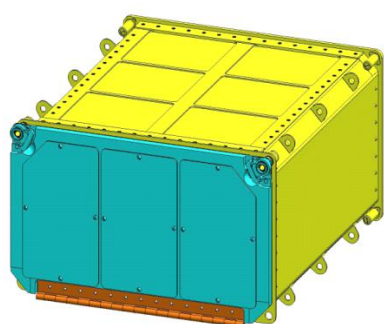
学科方向实验柜为空间科学与应用各学科方向的研究提供专门的研究条件，支持航天医学、空间生命科学与生物技术、微重力流体物理与燃烧科学、空间材料科学、微重力基础物理、航天新技术等学科方向的研究与应用。学科方向实验柜内配置有专门的科学实验系统，其功能、实验条件、实验诊断设备已经设定（或设定一定的调整范围），适用于该学科方向的科学实验，各科学实验柜描述详见第 5 章。利用这些科学实验柜开展实验时，可仅提供实验样品，或根据需要配备必要的实验单元，与实验柜的科学实验系统配合开展实验。

共用支持实验柜可根据空间科学与应用研究的共性应用需求，提供在轨实验精细操作、样品存储、高微重力实验、变重力实验比对、载荷装调与检测等功能，包括科学手套箱、低温存储设备、高微重力实验支持设备、变重力实验支持设备、在轨维修装调支持平台等公用支持实验柜和装置。

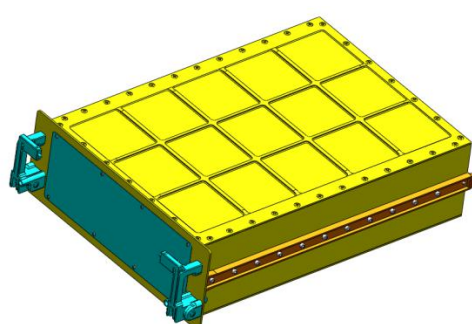
实验柜内标准模块的尺寸重量等见表 4.1 和图 4.2。

表 4.1 柜内标准模块包络尺寸和重量要求

序号	模块名称	模块外包络尺寸（宽×高×深）	总重量（kg）
1	标准载荷单元（SPU）	460.0mm×273.0mm×545.0mm	≥32.5
2	标准抽屉单元（SDU）	482.6mm×173.4mm×684.2mm	≥16



(a) 标准载荷单元 SPU



(b) 标准抽屉单元 SDU

图 4.2 科学实验柜的标准模块

目前空间站上已安排了 10 余个科学实验柜，用于开展相关学科方向的科学实验，见表 4.2。

表 4.2 科学实验柜及其用途概述

学科	序号	实验柜名称	用途
----	----	-------	----

	方向			
学科方向实验柜	航天医学	1	人系统研究机柜	长期空间环境条件下人的生理效应、人的能力研究和以发展新型防护技术为目标的实验
		2	医学样本分析与高微重力科学实验柜(医学样本分析部分)	样品的离心分离, 并提供4摄氏度低温冷藏条件
	空间生命科学和生物技术	3	生命生态实验柜	采用生物个体(植物、昆虫、小型哺乳动物、水生生物、微生物等)和细胞及组织、微生物等的重力生物学、辐射生物学研究; 生物再生生保系统基础和应用研究
		4	生物技术实验柜	微重力下细胞和组织培养、蛋白质结晶、生物分子构建, 生物力学研究及生物技术转化研究
	微重力流体科学与燃烧科学	5	流体物理实验柜	流体动力学研究, 各类透明体系(模型合金、蛋白质结晶、溶液晶体生长、超临界流体)实验; 颗粒物质实验, 胶体等复杂流体(软物质)研究
		6	两相系统实验柜	蒸发、冷凝相变界面现象和相变强化换热, 两相传热和流体管理, 两相回路系统动力学
		7	燃烧科学实验柜	固体、液体和气体的微重力燃烧过程和动力学研究, 空天推进燃烧实验, 载人任务材料防火实验
	空间材料科学	8	高温材料科学实验柜	采用安瓿结构封装的金属合金、半导体、纳米和介孔、无机多功能材料的晶体生长、溶体生长和凝固科学实验
		9	无容器材料实验柜	金属和非金属材料凝固机理, 深过冷研究, 高温熔体热物性精确测量, 高熔点等新材料制备研究
	微重力基础物理	10	超冷原子物理实验柜	超低温、大尺度(mm/cm)、长时间的玻色与费米量子简并气体实验条件下的低温临界点量子性质
		11	高精度时频实验柜	稳定性和不确定度 10^{-18} 量级的空间时间频率下的基础物理研究和应用研究
航天新技术	12	航天基础试验机柜	开展微重力等空间环境下以验证航天基础、关键技术为目标的试验验证	
共用支持实验柜	13	科学手套箱与低温存储柜	航天员直接参与操作的生命科学和其他科学实验, 以及样品和实验准备。可在手套箱内完成完整实验; 生物样品在几种低温下的保存	
	14	变重力科学实验柜	0.01~2g范围内的流体、生命、材料科学方向的常重力、低重力和超重重力实验	
	15	医学样本分析与高微重力科	用于需要较高微重力水平的基础物理实验和其他需要的科学实验	

		学实验柜(高微重力实验部分)	
	16	在线维修装调操作柜	有效载荷模块或单元准备、清洁、焊接、润滑、组装、测试, 故障诊断和维修; 独立载荷在轨实验

在专用科学实验柜之外, 空间站上还留有 7 个具有空置空间的实验机柜, 可采用标准模块组合的形式设计舱内的独立载荷, 插入空置实验机柜开展实验。空置实验机柜内配置了舱内独立载荷支持设施, 可为舱内独立载荷提供机械安装、散热、信息和供电等共用支持。

4.2 舱外暴露实验装置

舱外暴露实验装置是为不同方向的实验设计的, 目前在空间生命科学与生物技术、空间材料科学和航天元器件与部件等 3 个研究方向安排了 3 个暴露实验装置, 支持该学科方向的实验研究。已安排的暴露实验装置如表 4.4 所示。

舱外暴露实验装置安装在舱外, 仅需通过更换实验样品或实验单元, 就可支持多个科学研究项目的滚动实施。具体实施过程是: 安装在舱外的暴露实验装置可由机械臂抓取, 通过气闸舱进入密封舱内, 取回暴露后的实验样品, 并更换新的实验样品, 之后再置于舱外开展实验。利用舱外暴露实验装置, 一般可通过准备和提供实验(试验)样品、样片(测试版)开展实验。

表 4.4 空间站舱外暴露实验装置及用途

序号	装置名称	用途	舱段
1	空间生物学暴露实验装置	用于模式动物(线虫)、植物及植物种子、微生物、生物组织等在舱外宇宙辐射环境下的研究	实验舱 II
2	材料舱外暴露实验装置	空间应用材料(润滑、热控、膜系镀层、形状记忆、功能涂层、聚合物、复合材料等)的空间损伤和使役性能实验; 摩擦学等交叉研究	实验舱 I
3	元器件与组件舱外通用装置	支持开展元器件与组件在轨试验, 获取元器件与组件在轨运行参数和可靠性试验数据, 为研究空间环境下元器件与组件的可靠性物理及失效机理提供支持	

4.3 舱外独立载荷

舱外独立载荷主要用于在空间站密封舱外开展探测和观测类项目（支持空间天文与天体物理、空间物理与空间环境、地球科学及应用等研究方向）、空间应用新技术试验以及其他需要在舱外实施的项目。舱外独立载荷通过机械臂安装于舱外暴露平台或载荷挂点上，采用适配器进行机械连接，并提供机械、电源、信息、热控接口，满足不同功率、不同散热和信息管理的需求，必要时可以通过机械臂收回舱内进行维护，或通过航天员出舱活动（EVA）进行维修和更换。舱外独立载荷有小、中、大三类，小型和中型为标准载荷，大型为非标载荷，相关情况介绍如下：

（1）标准实验载荷

空间站实验舱 I、实验舱 II 的舱外设置了暴露平台，在暴露平台上配置了标准载荷适配器，支持舱外标准载荷开展舱外实验，可安装小型和中型标准载荷。必要时通过多个载荷适配器组合可以支持大型舱外载荷的安装和实验。载荷适配器包括主动端和被动端，被动端布置于暴露平台上，主动端安装在舱外载荷上。

当在轨安装舱外载荷时，首先需要由航天员在密封舱内将机械臂目标适配器安装在载荷上，并将载荷固定在实验舱 II 的货物气闸舱的出舱机构上。出舱后，通过操作机械臂抓取载荷上的目标适配器，从出舱机构上取下后转移到暴露平台预定的载荷适配器被动端位置，进行载荷适配器主动端和被动端的对接、锁紧及电气连接。在操作过程中，机械臂可以通过目标适配器为载荷提供电源（电压 100V、功率 100W）和信息支持（1553B 总线接口）。舱外载荷安装到位后，通过载荷适配器为每个载荷提供 100V 供电接口（供电功率分为 100W、300W、1000W 三个等级）；通过载荷适配器为舱外载荷提供信息接口（包括指令、遥测、数据传输），载荷适配器配置了 1553B 总线接口和 FC-AE-1553 总线接口。

（2）大型非标载荷

为支持实验周期长、具有重大科学和应用价值的舱外专用载荷项目，

在核心舱和实验舱 I 舱体外设置了大型载荷挂点和扩展实验平台挂点，支持在轨安装大型挂接载荷和扩展实验平台。核心舱有 1 个大型载荷挂点，可挂载载荷重量可达 500kg；实验舱 I 有 1 个大型载荷挂点和 1 个扩展实验平台挂点，载荷重量可以达到 2000kg，并且支持挂点的组合使用。大型载荷通过货运飞船上行，由航天员操作机械臂从货运飞船直接转移到载荷挂点。大型载荷/扩展实验平台挂点预留了 100V、1500W 供电接口，以及预留了应用信息系统的 1553B 总线接口和 FC-AE-1553 接口。

（3）舱外载荷尺寸规定

考虑暴露平台资源利用的优化和合理性，兼顾发射和货运飞船运输载荷的特点，可以安装的舱外载荷包络尺寸见表 4.6 所述。

表 4.6 舱外载荷分类尺寸表（含载荷适配器、机械臂抓盘及货包厚度）

	最大包络尺寸（长×宽×高， 单位：mm）	备注
小型标准载荷	≧400×400×500	1、货运飞船运输上行时，高度尺寸可放宽至不超过 1000mm 2、中型标准载荷高度超 600mm，需要倒角（100mm×45°）或倒圆（R150mm）处理，以通过 Φ800mm 舱门
中型标准载荷	≧600×600×500	
大型非标载荷	≧1800×1200×500	1、按照中型标准载荷安装面积倍数关系进行圆整后的尺寸； 2、货运飞船运输上行时，高度尺寸可放宽至不超过 1000mm

5 密封舱内实验资源

空间站密封舱内实验资源包括学科方向实验柜、共用支持实验柜和舱内独立载荷（空置空间实验机柜）等实验资源。

5.1 学科方向实验柜资源

空间站规划安排了航天医学、空间生命科学与生物技术、微重力流体物理与燃烧科学、空间材料科学、微重力基础物理、航天新技术等学科方

向的科学实验柜。用户可利用科学实验柜提供的实验条件，研制实验单元、样品单元或独立研制实验装置，开展实验与研究。

5.1.1 航天医学方向

空间站航天医学方向主要支持的研究主题有：长期失重对航天员健康的影响与防护技术研究、空间辐射对航天员健康的影响与防护技术研究、航天员行为与能力研究、在轨监测与医学处置技术研究以及传统医学航天应用技术研究。

在这个方向安排了人系统研究机柜和医学样本分析机柜来支持航天医学方向的研究。

5.1.1.1 人系统研究机柜

(1) 研究支持条件

人系统研究机柜具备进行生理学检测和行为学检测的能力，支持开展长期空间环境条件下生理效应、人的能力研究和以发展新型防护技术为目标的实验。

人系统研究机柜的系统构成如图 5.1 所示，由医学样本显微观察记录装置、医学样本制备装置等 2 个载荷单元和失重生理效应研究单元 I 和 II、视功能测量单元、运动特性测量单元、太空拉曼光谱分析仪、信息管理主机单元、实验用品单元等 10 个载荷单元组成。

主要功能包括：

- 1) 对人体的心血管、肌肉、骨骼、神经系统等进行生理功能检测，并具有数据同步采集分析能力；
- 2) 对人体的基本能力进行测量和研究；
- 3) 提供适应空间微重力环境的样本培养装置，保障细胞、组织等医学实验样本正常生长、增殖、分化，并对空间实验过程实施动态监测、精细观察和在轨分析检测；
- 4) 具备基于拉曼光谱分析的在轨营养代谢组学研究能力；

5) 具备在轨实验样品和模块更换以及数据的综合分析处理能力。

人系统研究机柜的系统组成如图 5.1 所示,由医学样本显微观察记录装置、医学实验信息综合管理主机、医学样本制备装置、运动特性测量单元、视功能测量单元、失重生理效应研究单元、心血管研究主机、太空拉曼光谱仪、信息管理主机单元、基本认知能力测量单元、操作力测量单元等实验支持模块组成。



图 5.1 人系统研究机柜的系统组成图

其中,医学样本显微观察装置、医学样本制备装置可在空间微重力环境下保障系统、组织等医学实验样本正常生长、增殖、分化,并对空间实验过程实施动态监测、精细观察和在轨分析检测;失重生理效应研究单元、心血管研究主机可对人体的心血管、肌肉、骨骼、神经系统等进行生理功能检测,并具有数据同步采集分析能力;基本认知能力测量单元、操作力测量单元、视功能测量单元、运动特性测量单元可对人体的基本能力、生物节律、作业状态与绩效等进行测量和研究;太空拉曼光谱分析仪具备基

于拉曼光谱分析的在轨营养代谢组学研究能力；信息管理主机单元、实验用品单元可为实验载荷提供供电、信息支持，并具备在轨实验样品更换以及数据的综合分析处理能力。

人系统研究机柜提供的实验支持条件如表 5.1 所示。

表 5.1 人系统研究机柜实验支持条件

序号	项目内容		实验支持条件
1	生理学功能检测	心血管功能检测	检测人体心血管自主神经调节功能、心脏结构功能、血管结构功能等 3 类心血管功能指标，包括心电、逐搏连续血压、医用超声、皮肤血流灌注量、血氧、脉搏波、下肢容积变化率等
		脑功能检测	检测人体脑电活动、前庭眼动、脑高级功能、脑血氧含量等 4 类功能指标
		肌肉结构功能测试	动态检测肌力、肌肉活动度、主要关节活动角度、加速度、足底压力分布等 5 类人体运动能力和特性指标
		代谢组学检测	检测人体尿液中的代谢产物水平 太空拉曼光谱仪增敏倍数（与比色皿相比）： ≥ 40 倍
		医学样本制备与分析	培养和观测细胞、微生物及组织等 3 类医学样本的形态和活性，具有重力对照功能。 1. 样本数量：细胞/组织样本 ≥ 12 个（微重力样本 ≥ 6 个；重力对照样本 ≥ 6 个）； 2. 重力水平：0g~2g，精度： $\pm 5\%$ 3. 可实现荧光和白光观察，光学放大倍数： ≥ 40 倍
2	行为与认知功能测试	人体运动生物力学测试	测量人体形态、运动特性、操作力、表面肌电等 4 类运动生物力学指标
		基本认知测试	记录人体脑力负荷、认知能力、人机协同绩效、情绪状态等 4 类认知能力测试数据
		生物节律测试	记录人体活动度、心率、核心体温等 3 类人体生物节律相关指标
		视功能测试	测量视敏度、立体视觉、色觉、对比敏感度、隐斜视、闪光融合频率等 6 类视功能指标

(2) 技术接口

利用人系统研究机柜开展实验的载荷单元需要满足下面接口要求。

1) 机械接口

人系统研究机柜可提供三种不同规格载荷单元，详见表 5.2；图 5.2 给出载荷单元的外形图。

表 5.2 人系统研究机柜提供的三种载荷单元规格尺寸

序号	规格	尺寸 (mm) (长×高×深)	备注
1	基础型载荷单元	440×160×600	基础型
2	2 倍型载荷单元	440×331×600	相当于 2 倍基础型载荷单元
3	3 倍型载荷单元	440×502×600	相当于 3 倍基础型载荷单元

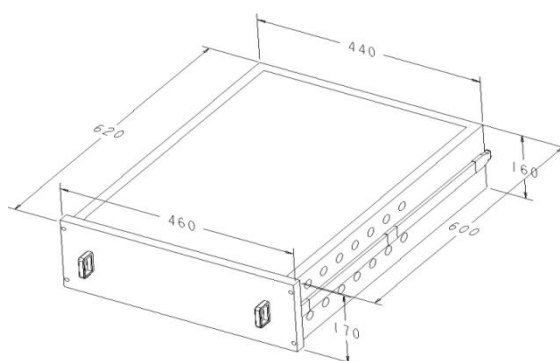


图 5.2 人系统研究机柜基础型载荷单元外形

2) 供电接口: 机柜后面板可为载荷单元提供 1 路 100VDC 供电接口, 供电峰值功率 300W; 机柜前面板可为载荷单元提供 1 路 28VDC 供电接口, 供电峰值功率 100W。

3) 信息接口

机柜可为每个载荷单元提供的信息接口如下:

- a. 以太网接口: 1 路, 传输速率 100Mbps;
- b. USB 总线接口: 1 路。

4) 热接口: 机柜为每个载荷单元提供通风散热接口, 通风散热能力约为 40W。机柜可为载荷单元提供最大 450W 的液冷散热能力, 载荷单元自带冷板通过快速断接器与机柜热控管路连接。

5.1.1.2 医学样本分析与高微重力科学实验柜 (医学样本分析部分)

(1) 研究支持条件

医学样本分析与高微重力科学实验柜 (医学样本分析部分) 的航天医学实验装置主要包括太空离心机和太空医学样本冷藏箱, 主要功能包括:

- 1) 提供体液样品的离心分离功能;
- 2) 提供 4 摄氏度低温冷藏功能;
- 3) 提供基于芯片实验室技术的人体体液样本中病毒核酸等生化指标在轨检测分析功能。

(2) 技术接口

1) 样本冷藏

温度控制范围: $4^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$;

有效存储容积: 不小于 40L。

2) 样本离心处理

离心力: 0~2000g;

样品数量: 不少于 6 个。

5.1.2 空间生命科学与生物技术方向

空间站的空间生命科学与生物技术方向主要支持的研究内容有空间重力生物学, 空间辐射生物学, 空间生物技术, 空间生物再生生命支持系统研究, 综合、交叉与前沿探索研究以及创新的生物学分析和检测技术等。

在这个研究方向安排的研究支持设施有生命生态实验柜和生物技术实验柜等。

5.1.2.1 生命生态实验柜

(1) 研究支持条件

生命生态实验柜支持的研究主题有: 开展以生物个体(包括植、动物等)为对象的微重力效应和空间辐射效应研究, 以及空间生态生命支持系统基础研究, 揭示微重力对生物个体生长、发育与衰老的影响, 探索空间辐射生物学和生命起源机理, 研究受控生命生态支持系统的基础问题, 发展小型模式生物个体为对象的复杂空间培养实验和技术。

生命生态实验柜的系统组成如图 5.3 所示, 主要由通用生物培养模块、小型受控生命生态实验模块、小型离心机实验模块、小型通用生物培养模

块和专用实验装置（如亚磁果蝇培养模块、小型哺乳动物培养模块），以及微生物检测模块，舱内辐射环境测量模块等公共检测类模块组成。

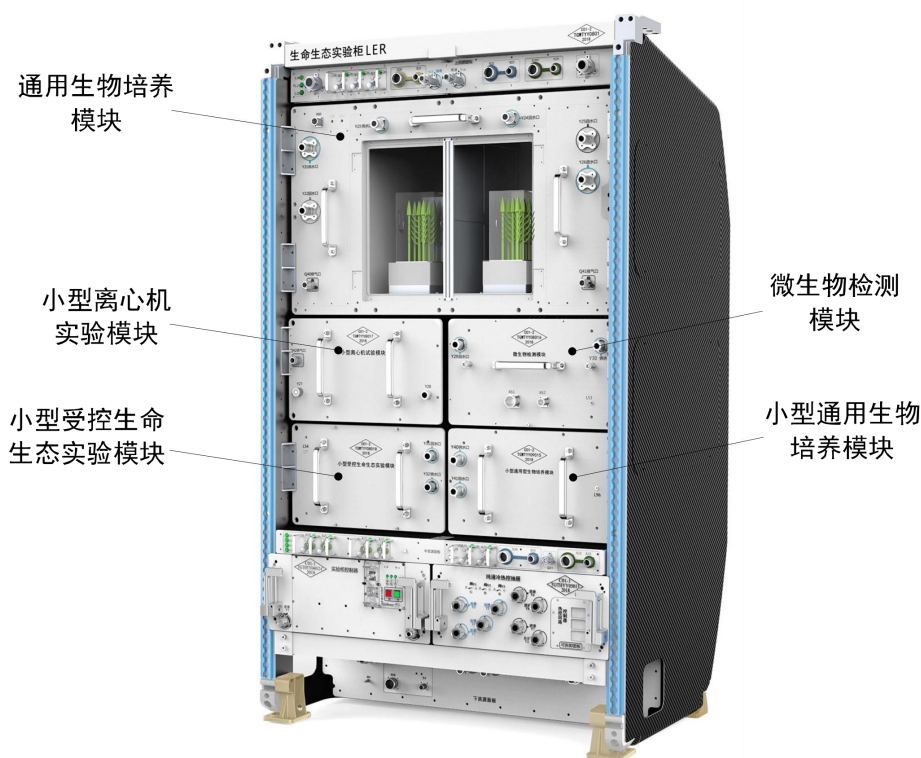


图 5.3 生命生态实验柜的系统组成图

其中，通用生物培养模块和小型通用生物培养模块，适合开展高等植物种子、幼苗或植株、果蝇、线虫、蚕等微小型动物培养等多类型生物的空间培养实验；小型受控生命生态实验模块用于水生生态系统研究以及水生生物研究；小型离心机实验模块可以在微重力环境下实现 $1 \sim 2g$ 的重力模拟，能够支持开展变重力生物学研究和微重力比对实验研究；亚磁果蝇培养模块用于昆虫实验和以昆虫为对象的亚磁生物学等实验；小型哺乳动物培养模块用于小型啮齿类动物（如小鼠）的饲养和实验。微生物检测模块可通过培养观察法和核酸扩增检测法进行微生物有无和微生物种类的甄别；舱内辐射环境测量模块测量空间站舱内的高能带电粒子的种类、能谱及剂量率和中子的能谱及剂量率。

生命生态实验柜提供的实验支持条件如下表 5.3 所示：

表 5.3 生命生态实验柜主要支持条件

参数类型		支持条件	
植物类 实验	实验区空间	≦400mm (生长方向)×550mm×400mm, 支持多个培养单元的组合使用	
	可见光成像	图像分辨率	≦1024×1024 像素
		图像帧频	≦25 帧/s, 可调
	荧光成像	图像分辨率	≦1024×1024 像素
		成像波段范围 (非连续)	激发光波长 340nm~590nm/荧光波长 483nm~654nm, 可根据典型实验需求选配
	温度控制		17℃~28℃, 可调
	光照条件	照明强度	模拟太阳光, 到达目标样品表面的强度: ≦120μmol/(m ² ·s), 光照强度可调节, 昼夜时间可调
		光谱范围	400nm~700nm
	相对湿度		30%~100%, 可调
	水分收集与控制		蒸腾水分收集与循环利用
	CO ₂ 气体供给		对培养环境中的 CO ₂ 浓度进行调节, 浓度指标根据科学实验需求确定
气体成分检测		CO ₂ 和 O ₂ 气体浓度检测	
密闭生态系统 实验	培养空间	≦1250ml, 培养空间内可组合多个培养单元	
	温度控制		17~35℃, 可调
	光照条件	照明强度蒸腾水分收集与循环利用	模拟太阳光, 到达目标样品表面的强度: ≦120μmol/(m ² ·s), 光照强度可调节, 昼夜时间可调
		光谱范围	400nm~700nm
	相对湿度		30%~100%
成像观察		图像分辨率≦1024×1024 像素, 图像帧率≦25 帧/s, 可调	
专用实验模块尺寸 (可支持亚磁、小型哺乳动物、小型模式生物实验等)		不小于 460mm×545mm×273mm	
离心比对实验 模拟重力环境	环境温度控制	17~28℃, 可调	
	模拟重力环境	1g~2g, 可调	
舱内辐射环境 测量	累计剂量	0.1μGy~1000mGy	
	剂量率	0.1μGy/h~10mGy/h	
	质子测量能谱范围	5MeV~300MeV	
	粒子分辨能量范围 (Z=3~26)	10MeV/n~300MeV/n	
	带电粒子能量分辨率	≧20%	

	LET (传能线密度) 测量范围	0.2keV/ μm ~1000keV/ μm
	测量中子能量范围	0.025eV~20MeV
微生物检测	检测对象	可对空气、液体或物体表面的真菌、曲霉菌等微生物进行检测。
	微生物检测方法	培养观察法和核酸扩增法

(2) 技术接口

利用生命生态实验柜开展实验的载荷单元 (或样品单元) 需要满足以下接口要求。

1) 植物、微小动物类

可支持实验单元尺寸 1: $\geq 400\text{mm}$ (生长方向) $\times 550\text{mm} \times 400\text{mm}$, 培养空间内可组合使用;

可支持实验单元尺寸 2: $\geq 350\text{mm} \times 360\text{mm} \times 210\text{mm}$ 。

2) 小型离心机实验

可支持的实验单元尺寸: 约 90mm (高) $\times 38\text{mm}$ (宽) $\times 55\text{mm}$ (深);

可支持实验单元数量: 12 个静置, 12 个离心;

可提供供电、信息接口。

3) 密闭生态系统类

可支持的实验单元尺寸: $\geq 216\text{mm} \times 133\text{mm} \times 124\text{mm}$

可支持样品单元空间: 约 1250ml , 可组合使用。

4) 哺乳动物类: 特指小鼠, 可提出在轨实验要求, 或回收后利用其中部分器官或样品的需求。

5.1.2.2 生物技术实验柜

(1) 研究支持条件

生物技术实验柜支持的研究主题有: 开展以生物组织、细胞和生化分子等不同层次多类别生物样品为对象的细胞培养和组织构建, 以及分子生物制造技术、空间蛋白质结晶和分析等空间生物技术及应用研究, 并给蛋白与核酸共起源、空间生物力学等提供接口, 在创新的生物材料、药物和医

疗技术等方面取得突破性发现、获取全新的认知，对指导和促进地面农业、医药、环境生物技术研究和发发展发挥积极作用。

生物技术实验柜的系统构成如图 5.4 所示，主要由细胞组织培养模块、蛋白质结晶模块、专用实验装置（如核酸与蛋白模块、生物力学实验模块），以及可提供实验支持和光学检测的细胞组织检测与调控模块组成。

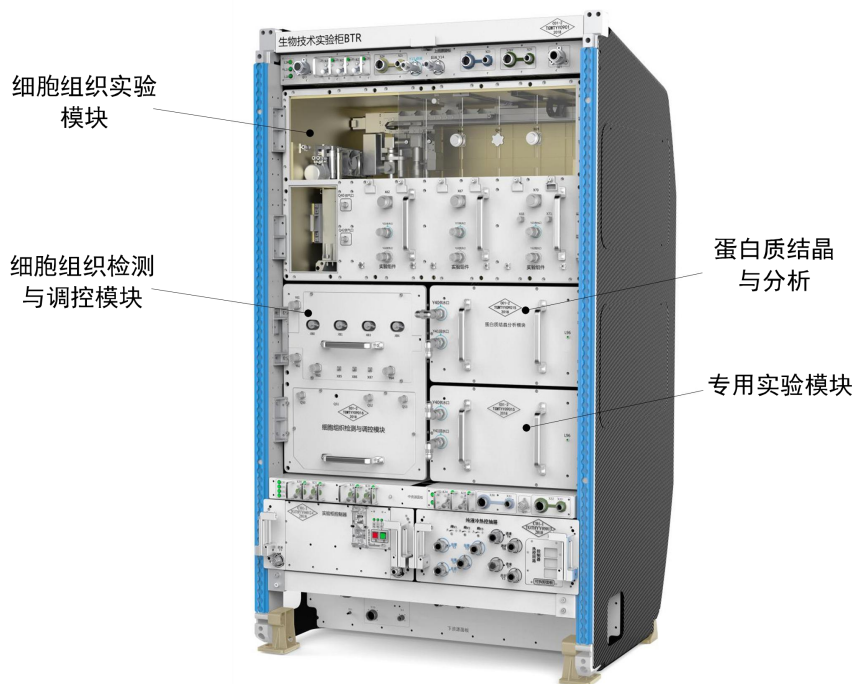


图 5.4 生物技术实验柜的系统组成图

其中，组织与细胞培养模块适用于在空间开展以细胞、组织为生物样品的多种类型的生物技术实验和研究；蛋白质结晶分析模块利用空间的微重力环境，为实施蛋白质组装等生物技术提供特殊优越的环境；完成空间蛋白质分子组装与应用研究，并可使用该平台组装高质量的蛋白质三维晶体和纳米晶蛋白质/多肽药物；核酸与蛋白模块支持运用色谱、质谱及电化学原位检测等手段开展“核酸与蛋白共起源”交叉研究实验；生物力学实验模块用于开展空间细胞、组织和系统的生物力学规律研究实验；还可以研制其他专用实验装置，用于开展其他生物技术实验研究。细胞组织检测与调控模块可为实验提供激光共聚显微观察、分光光度计检测等光学观测手段，并可为实验提供气体供给。

生物技术实验柜提供的实验支持条件如下表 5.4 所示：

表 5.4 生物技术实验柜主要支持条件

参数类型		支持条件
细胞组织实验	典型培养室空间	分别满足不同类型生物样品对培养空间的要求，一般情况下 $\leq 3\text{ml}$ /单元；可为同类型生物样品提供较大培养空间的组合
	营养供给方式	间断式换液，换液周期可根据典型实验需求选配
	培养温度	37℃
	营养液低温存储温度	0~10℃
	温度检测	实时检测
	成像方式	具有明场、荧光、相差、激光共聚焦的显微观察能力
	视场	$\leq 100\mu\text{m}^2$ 观察能力
	空间分辨率	1 μm （光学放大倍数 40 倍时）
	视频图像（宏观）	图像分辨率 $\leq 1024\times 1024$ 像素 图像帧频 ≤ 25 帧/s，可调
	显微成像	图像分辨率： $\leq 1024\times 1024$ 像素
	荧光显微成像	物镜放大倍数（非连续）：1~40 分档，可根据典型实验需求选配
	气体供给	
	二氧化碳浓度控制	图像分辨率： $\leq 1024\times 1024$ 像素
	CO ₂ 浓度检测	成像波段范围（非连续）：激发光波长 340nm~590nm/荧光波长 483nm~654nm，可根据典型实验需求选配
	蛋白质等生化分子类实验	氧气浓度控制
相对湿度		
样品室容量		1 μl ~100 μl 可选
温度控制		4~95℃，可调
温度检测		提供环境温度的检测
显微成像		图像分辨率： $\leq 1024\times 1024$ 像素
		成像波段：白光、紫光两种可选 物镜放大倍数（非连续）：1~40 分档，可根据典型实验需求选配
荧光显微成像		图像分辨率： $\leq 1024\times 1024$ 像素
	成像波段范围（非连续）：激发光波长 340nm~590nm/荧光波长 483nm~654nm，可根据典型实验需求选配	
光谱检测与分析	光谱范围：200nm~700nm，光谱分辨率优于 2nm	

微生物类实验	视频的图像分辨率	≥1024×1024 像素
	显微成像	图像分辨率：≪1024×1024 像素
		物镜放大倍数（非连续）：1~40 分档，可根据典型实验需求选配
	荧光显微成像	图像分辨率：≪1024×1024 像素
		成像波段范围（非连续）：激发光波长 340nm~590nm/荧光波长 483nm~654nm，可根据典型实验需求选配
		物镜放大倍数（非连续）：1~40 分档，可根据典型实验需求选配
	温度控制	23℃~30℃，可调
相对湿度	30%~100%，可调	

(2) 技术接口

利用通用生物技术实验机柜开展实验的载荷单元（或样品单元）需要满足下面接口要求。

1) 细胞组织、微生物类实验

- a. 可支持细胞组织培养实验单元尺寸：≧75mm×70mm×190mm,可组合使用；
- b. 可支持实验单元数量：≧32 个；
- c. 可为细胞培养载荷单元提供电、信息接口。

2) 蛋白质和其它生化分子类实验

- a. 样品单元容量：1μL~100μL，可选；有特殊要求的可自行定义，提供包含样品的样品室单元；
- b. 可支持晶体生长实验单元尺寸 1：≧240mm×130mm×187mm；
- c. 可支持晶体生长实验单元尺寸 2：≧240mm×74mm×187mm。

5.1.3 微重力流体物理与燃烧科学方向

空间站微重力流体物理与燃烧科学方向主要支持的研究内容有：微重力流体动力学，两相流、相变传热及其应用研究，复杂流体研究，微重力燃烧基础和应用研究，载人航天防火安全应用基础研究以及其他适于在空间站上开展的微重力流体物理和燃烧科学实验。

在这个方向安排了流体物理实验柜、两相系统实验柜和燃烧科学实验

柜来支持相关研究。

5.1.3.1 流体物理实验柜

(1) 研究支持条件

流体物理实验柜支持的研究主题有：微重力流体动力学及其应用研究、晶体生长动力学和蛋白质结晶研究、微重力环境下材料制备过程机理研究、微重力复杂流体研究、重要应用背景材料制备研究及空间生命技术相关的流体输运过程研究。

流体物理实验柜系统组成如图 5.5 所示，主要由流体动力学模块和复杂流体模块等组成，可支持单相、多相（气/液或液/固等）以及复杂流体的流场特征、流动特性以及聚集行为的空间研究。同时也可扩展到各类透明体系的研究，包括模型合金、蛋白质和溶液晶体生长、超临界流体、颗粒物质（等离子体）等研究。在复杂流体研究方向还支持胶体科学研究。

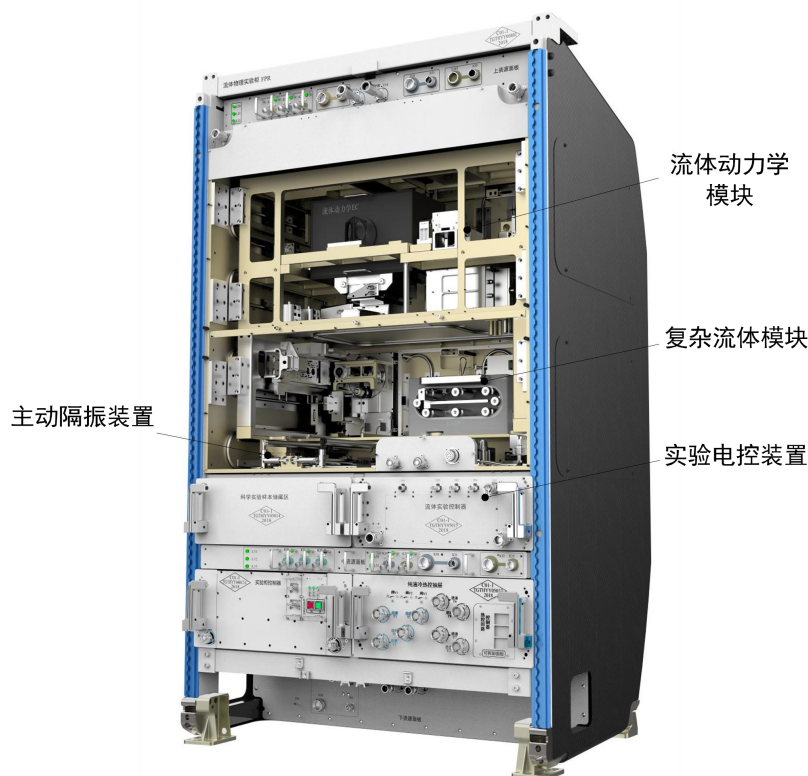


图 5.5 流体物理实验柜系统组成图

其中，流体动力学模块为通用流体动力学实验提供综合检测支持，包括流体动态速度、流体温度、流体表面形变、浓度场的测量。复杂流体模

块为复杂流体相变动力学实验提供检测支持，包括粒径、显微放大观测、成核及生长速度、浊度、散热光强、流变特性的测试。主动隔振装置可为通用流体动力学实验和复杂流体相变动力学实验提供比空间站本体更优的微重力水平。

流体物理实验柜提供的实验支持条件如下表 5.5 所示：

表 5.5 流体物理实验柜提供的实验支持条件

模块名称	参数类型	技术指标
流体动力学模块	测量视场范围	$\phi 10\text{mm} \sim \phi 50\text{mm}$ ，可调
	高速图像	帧频： $\geq 500\text{fps}$ ，图像分辨率： $\leq 1024 \times 1024$ 像素
	高分辨率图像	帧频： $\geq 15\text{fps}$ ，图像分辨率： $\leq 2048 \times 2048$ 像素
	流体速度场测量	速度范围： $0.05 \sim 100\text{mm/s}$ ，分辨率：优于 4%FS（量程： 1mm/s ； 10mm/s ； 100mm/s ）
	流体速度脉动测量	速度范围： $10\text{mm/s} \sim 2\text{m/s}$ ，分辨率： $\leq 0.4\% \text{FS}$ （量程： 50mm/s ； 200mm/s ； 2m/s ），测量误差： $\leq 2\% \text{FS}$ （量程： 50mm/s ； 200mm/s ； 2m/s ）
	流体温度场测量范围	表面温度测量： $-20^\circ\text{C} \sim +300^\circ\text{C}$ ，热灵敏度： $\leq 0.05^\circ\text{C}$ （ $-20^\circ\text{C} \sim +100^\circ\text{C}$ ）， $\leq 0.2^\circ\text{C}$ （ $+100^\circ\text{C} \sim +300^\circ\text{C}$ ）；内部温度测量：温度范围： $-20^\circ\text{C} \sim 300^\circ\text{C}$ ，热灵敏度： $\leq 0.1^\circ\text{C}$ （ $-20^\circ\text{C} \sim +100^\circ\text{C}$ ）， $\leq 0.3^\circ\text{C}$ （ $+100^\circ\text{C} \sim +300^\circ\text{C}$ ）；
	流体界面形变测量	形变范围： $0.002\text{mm} \sim 10\text{mm}$ ，分辨率：优于 0.002mm 测量精度： $\leq 4\mu\text{m}$ ，最大采样频率： $\leq 100\text{Hz}$
	流体浓度场测量	位相变化横向分辨率： $< 100\mu\text{m}$ 位相变化纵向分辨率： $\leq \lambda/10$ （ λ 为测量用激光波长）
复杂流体模块	粒径测量范围（半径）	$\phi 1\text{nm} \sim \phi 1000\text{nm}$
	显微观测	视场范围（放大倍数 $10\times$ ）： $\geq \phi 1\text{mm}$ 放大倍数： $4\times$ ， $10\times$ ， $20\times$ ， $40\times$ 最大采集速率： $\geq 100\text{fps}$ 图像分辨率： $\leq 1024 \times 1024$ 像素
	成核、生长速度和浊度测量	波长范围： $400\text{nm} \sim 800\text{nm}$ ；波长分辨率：优于 2nm ；信噪比：优于 $300:1$ ；支持反射和透射测量
	多角度散射光	测量角度： ≥ 5 个

	测量	角度范围：30°~135° 粒径测量范围：1nm~500nm 分子量范围：1000~10000000 Daltons
	流变仪	剪切速率范围：0.01rpm~1000rpm；最大剪切扭矩：≪200mN·m

(2) 技术接口

1) 利用流体力学实验支持开展的载荷实验单元接口如下：

尺寸（长×宽×高）：约 320mm×200mm×220mm；

质量：不大于 20 kg；

二次电源：12VDC，24VDC，5VDC；

功率：不大于 70 W（隔振模式），不大于 150W（锁定模式）；

信息接口：RS422、以太网；

热控：传导散热与辐射散热。

2) 利用复杂流体实验支持开展的实验单元接口要求如下：

尺寸（长×宽×高）：约 220mm×290mm×320mm；

质量：不大于 12 kg；

二次电源：12V，24V，5VDC；

功率：不大于 70 W；

信息接口：RS422、以太网；

热控：传导散热与辐射散热。

5.1.3.2 两相系统实验柜

(1) 研究支持条件

两相系统实验柜支持的研究主题有：支持空间蒸发与冷凝相变、沸腾传热、两相流动与回路系统、空间流体控制等科学问题与技术应用研究。

两相系统实验柜如图 5.6 所示，主要由光学观测平台、实验项目模块、气体管理模块、主电控单元、小流量供液模块、大流量供液模块等组成。



图 5.6 两相系统实验柜的系统组成图

其中，光学观测平台具有多种监测和诊断功能；大流量供液模块、小流量供液模块和气体管理模块为科学实验提供大流量液体工质、小流量液体工质和气体实验工质供给，其中小流量模块通过小流量液体工质温度调控具有热控功能，气体管理模块具有气液分离功能。根据项目实验需求研制相应实验项目模块，如相变传热实验模块、沸腾换热实验模块等。当实验项目模块内部的中心实验单元可以更换时，也可根据实验需要仅更换此中心实验单元。

两相系统实验柜提供的实验支持条件如下表 5.6 所示：

表 5.6 两相系统实验柜提供的实验支持条件

参数类型	技术指标
循环实验工质供给	液体实验工质：FC-72、HFE-7x00、R134a 等 气体实验工质：Air, N2 等
表面温度场观测	测温范围：-20℃ ~ +100℃，温度分辨率优于 0.05℃，温度精度≤1.5℃，采集速率≥30fps 宏观视场≥80mm×60mm，最高空间分辨率≤100μm 细观观测最小视场≥29mm×22mm，最高空间分辨率≤35μm

两相流体流动显示测量	宏观视场: $\geq 100\text{mm} \times 70\text{mm}$, 最高空间分辨率 $\leq 90\mu\text{m}$ (暂定), 采集速率 $\geq 500\text{fps}$ 微观观测最小视场: $\geq 15\text{mm} \times 10\text{mm}$, 最高空间分辨率 $\leq 15\mu\text{m}$, 采集速率 $\geq 60\text{fps}$
流体界面形貌观测	观测范围: $\geq \phi 20\text{mm}$ 横向空间最高分辨率: 优于 $150\mu\text{m}$ 纵向空间最高分辨率: 优于 30nm 图像采集频率: 1~15 帧/秒
流体密度场观测	观测范围: $\geq \phi 20\text{mm}$ 横向空间最高分辨率: 优于 $150\mu\text{m}$ 密度测量可分辨最小光程差: 优于 100nm 图像采集频率: 1~15 帧/秒 密度测量精度: $5 \times 10^{-4} \text{kg/m}^3$ (典型工质——水蒸气)
循环液体工质供给调控能力	工质流量调控范围: $0.1 \sim 10\text{g/s}$, 流量测量精度优于 $0.5\% \text{FS}$, 出口温度调控范围: $5 \sim 65^\circ\text{C}$, 蓄冷量: 0.36MJ , 加热量: 300W , 压头调控范围: $0.02 \sim 0.2\text{MPa}$ 工质流量调控范围: $20 \sim 200\text{g/s}$, 流量测量精度优于 $0.2\% \text{FS}$, 温度范围: 液体工质温度 (无温控模式), 压头调控范围: $0.02 \sim 0.07\text{MPa}$
循环气体工质调控能力	工质流量调控范围: $0.5 \sim 9\text{L/min}$, 流量测量精度优于 $0.2\% \text{FS}$ 压头调控范围: $0.1 \sim 0.5\text{MPa}$, 压头测量精度优于 $0.2\% \text{FS}$

(2) 技术接口

技术接口包括两类: 两相实验项目模块、中心实验单元 (CEM)。

1) 两相实验项目模块

体积: 约 444.6mm (宽) $\times 257.6\text{mm}$ (高) $\times 545\text{mm}$ (深);

质量: 不大于 29kg (随柜发射, 后续上行的载荷不受此限制);

供电: 1 路 100V , 1 路 28V , 总功率不大于 300W ;

信息接口: 1 路 RS422、1 路千兆以太网;

热控条件: 1 路水冷散热、1 路风冷散热, 可选。

2) 中心实验单元 (CEM): 基于具体的两相实验项目模块确定。

5.1.3.3 燃烧科学实验柜

(1) 研究支持条件

燃烧科学实验柜支持的研究主题是微重力环境下的燃烧科学及应用研究, 包括微重力环境下的燃烧科学基础问题和技术, 空间推进和载人航天中的微重力燃烧问题等方面研究。

燃烧科学实验柜的系统组成如图 5.7 所示，主要由燃烧室与实验插件、燃烧诊断子系统、氧化剂与稀释剂子系统、排气净化与收集子系统，以及实验控制、环境控制、多功能光学平板等实验支持模块等组成。

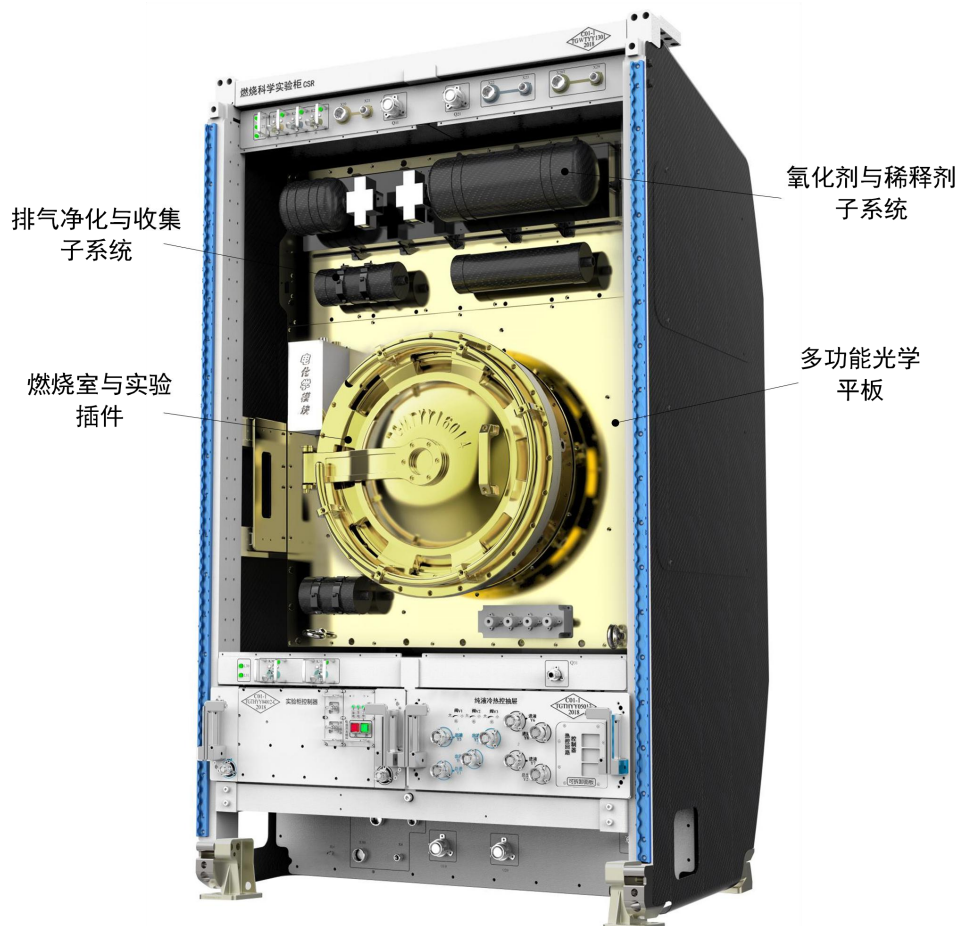


图 5.7 燃烧科学实验柜的系统组成图

实验插件位于燃烧室内部，实验插件具备多种类型，分别支持气体、液体和固体燃料类型实验，满足对应类型实验项目的共性需求，并且实验插件内部的用户单元可更换，以满足具体实验项目的个性需求；燃烧室为燃烧实验提供密闭环境；燃烧诊断子系统用于实现综合可视化燃烧诊断；氧化剂与稀释剂子系统用于提供氧化剂和稀释剂的储备与传输；排气净化与收集子系统用于燃烧排气管理。

燃烧科学实验柜提供的实验支持条件如下表 5.7 所示：

表 5.7 燃烧科学实验柜提供的实验支持条件

参数类型	技术指标
温度测量	

	测温范围 300K ~ 2400K, 精度优于±20K
流场速度测量	测量区域不低于 50mm×50mm; 最大范围不低于 3m/s; 测量频率不低于 10Hz
材料表面火焰传播速度测量	最大范围不低于 1m/s; 分辨率优于 0.1mm
火焰结构测量	分辨率优于 0.1mm;
排气气相组分分析	最大范围≥1000ppm, 分辨率优于 1ppm
中间组分光谱测量	窄带光谱成像, 至少包括(307nm)OH 图像、(432nm)CH 图像等
碳烟浓度测量	测量范围 0 ~ 20%obs/m; 分辨率优于 0.01%obs/m
氧化剂和稀释剂	氧氮混合气 容量不低于 4L (30MPa); 惰性气体容量不低于 1L (30MPa)

(2) 技术接口

实验项目实验插件的通用技术接口如下:

- 1) 外部尺寸包络: 约 Φ 396mm×520mm;
- 2) 燃烧平均放热率: 不大于 100W;
- 3) 平均电功耗: 约 150W;
- 4) 质量: 不大于 40kg;

5) 实验插件支持通过更换内部的实验样品单元开展不同实验项目; 实验样品单元技术接口基于不同类型实验插件确定。

当前规划有三种实验插件: 气体燃料、液体燃料和固体燃料实验插件, 分别满足气体预混及扩散燃烧实验、液滴或喷雾(液滴群)燃烧实验、气体(氧化剂)氛围中固体材料燃烧实验的需求。其对实验项目的支持如下:

- 1) 燃料、氧化剂和稀释剂的混合及吹送, 样品单元可自行选择携带气体、液体或固体燃料;
- 2) 电热丝点火;
- 3) 热电偶测温, 温度点测量范围: 250K~1800K;
- 4) 实验进程控制和监控温度压强等信号采集;

- 5) 实验气体产物的采样收集;
- 6) 实验项目可自主设计实验控制和信号收集处理芯片。

5.1.4 空间材料科学方向

空间站的空间材料科学方向主要支持的研究内容有：生长（凝固）界面稳定性与缺陷控制，过冷、形核与晶体生长过程，相分离与聚集行为，高性能材料空间制备及工艺研究，熔体物理性质测量与研究，材料在空间环境下的行为特性研究以及其他适于在空间站上开展的空间材料科学实验。

在这个方向安排了高温材料科学实验柜和无容器材料实验柜来支持空间材料科学研究。

5.1.4.1 高温材料科学实验柜

(1) 研究支持条件

高温材料科学实验柜支持的研究主题有：微重力下材料制备过程机理研究、重要应用背景材料制备与研究，及其它相关材料实验研究。

高温材料科学实验柜支持开展金属合金、半导体光电子材料、纳米和介孔材料、无机功能材料等多种类别材料的熔体生长和凝固科学实验。高温材料科学实验柜的系统组成如图 5.8 所示，主要由高温炉模块、批量样品管理模块、X 射线实时观察模块和实验电控模块等组成。

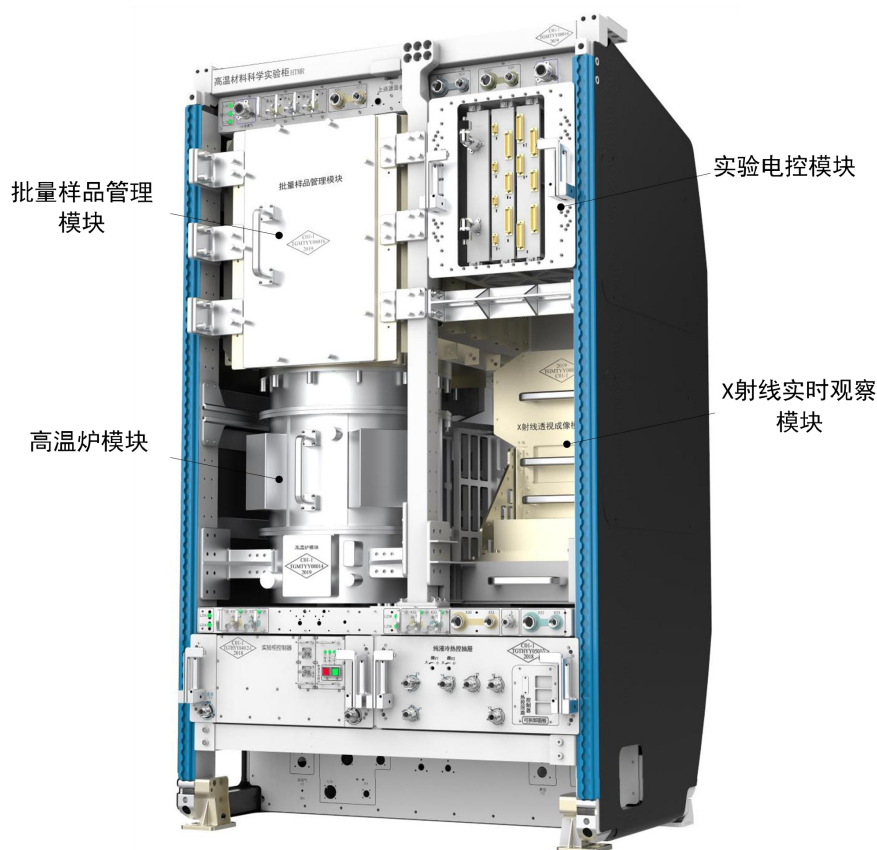


图 5.8 高温材料科学实验柜系统组成图

其中，高温炉模块通过更换不同熔炉分别提供高温 I 型、高温 II 型不同的实验条件，支持以安瓿结构封装的样品盒开展熔体生长、凝固科学实验和制备研究。安瓿样品盒结构如图 5.9 所示，该安瓿样品盒承载和密封材料实验样品及其坩埚，可设置实时在线实验数据测量与采集，在高温炉炉膛内进行材料科学实验。批量样品管理模块支持安瓿样品盒在批量样品管理模块和高温炉模块中自动更换。X 射线实时观察模块具有 X 射线透射成像功能，通过实时可视化观测手段，获得样品制备过程中的固/液界面形态、界面输运效应等实时图像信息和数据。

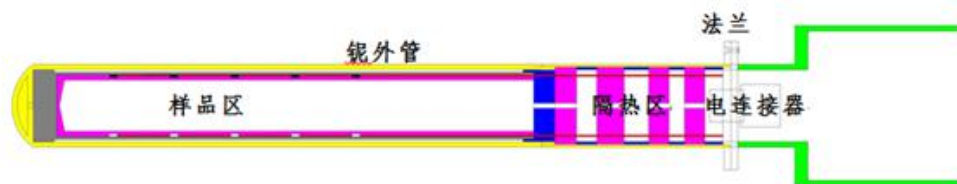


图 5.9 安瓿样品盒结构示意图

高温材料科学实验柜提供的主要实验支持条件如下表 5.8 所示：

表 5.8 高温材料科学实验柜主要支持条件

参数		指标要求	
高温炉材料制备实验	实验类别	高温 I 型模块	高温 II 型模块
	最高温度	1200°C	1600°C
	温场模式	等温、梯度或区熔	等温、梯度或区熔
	最大温度梯度	50°C/cm	150°C/cm
	旋转磁场	场强 0 ~ 5 mT, 频率 5 ~ 400 Hz	无
	安瓿测温点	5 个	3 个
	安瓿数量/批	16 个	16 个
材料实验过程	最大分辨率	5 μ m (9mm \times 15mm 视场)	
X 射线实时观察	最高温度	\leq 1000°C	
	样品厚度	\leq 6mm	

(2) 技术接口

利用本实验柜的实验项目技术接口包括两类：高温炉实验的安瓿样品盒技术接口、X 射线实时观察实验的样品单元技术接口。

1) 高温炉实验的安瓿样品盒技术接口

a. 高温 I 型实验样品盒：

- 样品尺寸约 \varnothing 25mm \times 160mm；
- 安瓿尺寸约 \varnothing 31mm \times 380mm。

b. 高温 II 型实验样品盒：

- 样品尺寸约 \varnothing 20mm \times 160mm；
- 安瓿尺寸约 \varnothing 26mm \times 380mm。

2) X 射线成像实时观察实验的样品单元技术接口

- a. 为样品单元提供供电、信息、测控接口；
- b. 该样品单元利用外部提供的供电、测控接口实现样品加热、温场控制；
- c. 样品类型和观测区内样品封装结构应适应 X 射线透射成像；
- d. 样品尺寸： \leq 6mm。

5.1.4.2 无容器材料实验柜

(1) 研究支持条件

无容器材料实验柜支持的研究主题有：微重力下材料制备过程机理研究、重要应用背景材料制备与研究，及其它相关材料实验研究。

无容器材料实验柜通过静电悬浮技术实现无容器加工，支持开展微重力下金属、非金属等材料无容器加工研究和材料深过冷研究、材料熔体的热物性测量等。无容器材料实验柜的系统组成如图 5.10 所示，主要由无容器实验平台、真空/加压模块、实验电控模块等组成。

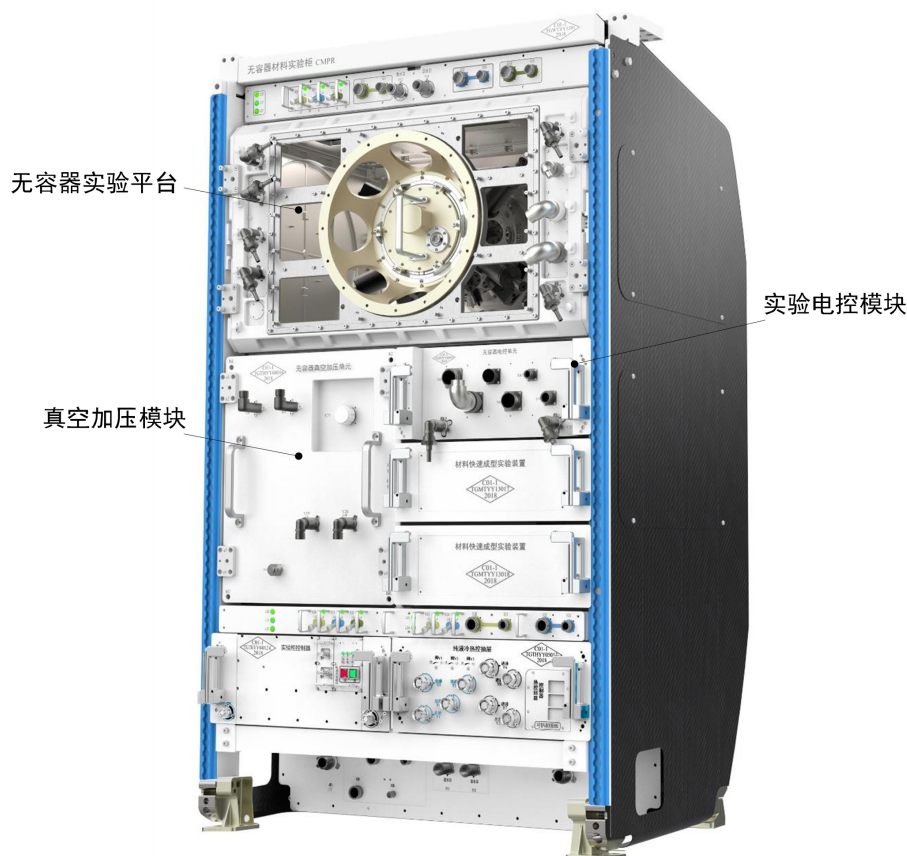


图 5.10 无容器材料实验柜系统组成图

其中，无容器实验平台上集中布局了科学实验腔以及半导体激光器、CO₂激光器、脉冲激光器、单波长测温仪、全景相机、高速相机等多种观察与物性测量设备，支持空间材料样品无容器加工实验和热物性测量。真空/加压模块为科学实验腔提供实验开展需要的真空实验环境或惰性气体

压力保护环境。

无容器材料实验柜主要技术指标如下表 5.9 所示：

表 5.9 无容器材料实验柜主要技术指标

参数	参数范围或功能
最高加热温度	$\geq 2500^{\circ}\text{C}$
位置控制精度	$\pm 0.1\text{mm}$
高速成像速度	不低于 20000fps
形核触发	有
加工环境	真空环境；氩气压力环境
样品数量/批	29 个
冷却控制	提供自然冷却、控制加热功率冷却两种方式
热物性测量	密度测量范围：0.3 g/cm ³ ~20g/cm ³ 粘度系数测量范围：1 mPa·s ~500mPa·s 比热测量范围：20 J/(mol·K)~50J/(mol·K) 表面张力测量范围：0.1 N/m ~2.5N/m 光谱辐射率范围：0.1~1.0

(2) 技术接口

利用本实验柜开展的实验样品接口要求如下：

- 1) 样品应为圆球状；
- 2) 样品直径： $\phi 2\text{ mm} \sim \phi 5\text{mm}$ ；
- 3) 样品挥发性符合要求。

5.1.5 微重力基础物理方向

空间站的微重力基础物理方向主要支持的研究内容有：空间超冷原子物理研究、高精度空间时频系统及应用、相对论和引力物理研究、空间量子科学研究及应用、低温凝聚态物理研究以及其他适于在空间站上开展的空间基础物理实验。

在这个方向安排了超冷原子物理实验柜和高精度时频实验柜来支持微重力基础物理方向的研究。

5.1.5.1 超冷原子物理实验柜

(1) 研究支持能力

超冷原子物理实验柜支持研究主题有：量子新物态研究、天体物理的量子模拟研究、量子拓扑与量子计算研究、以及量子力学基本原理检验研究等。

超冷原子物理实验柜在空间微重力环境中，利用深度冷却技术实现百 μK 以下的超低温、大尺度($\text{mm}\sim\text{cm}$)、高质量、长寿命的玻色与费米量子简并气体的开放实验条件，支持开展量子模拟、量子计算和量子精密测量等前沿方向研究。该实验柜还提供一维、二维和三维正交光晶格和平面斜交 (Kagome) 光晶格用于将量子简并气体囚禁在周期性势阱中，开展新奇量子相和相变研究。

超冷原子物理实验柜的系统组成如图 5.11 所示，主要由物理子系统、铷钾激光器、光阱激光器、补磁光塞激光器、科学电控模块、光晶格激光器、极化分子激光器等构成。

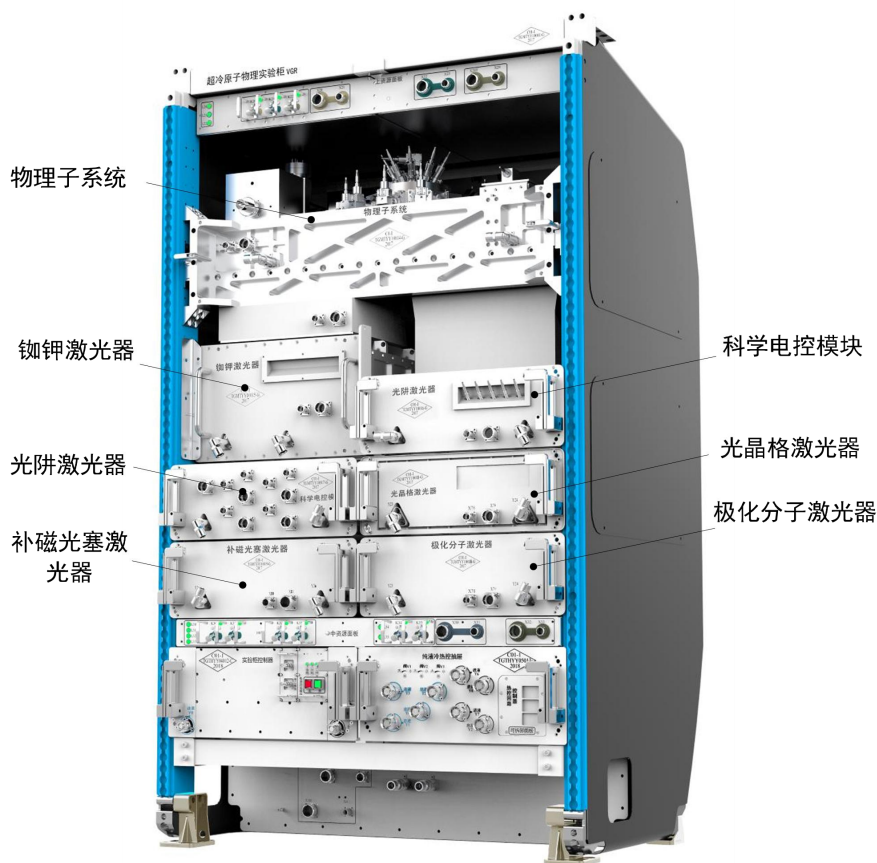


图 5.11 超冷原子物理实验柜系统组成

其中，物理子系统为超冷原子物理实验提供原子、真空、磁场环境，对激光单元提供的光源进行控制，对实验进行探测和成像。铷钾激光器产生铷原子及钾原子的冷却、探测、重泵等实验过程所需的激光。光阱冷却激光器产生铷原子及钾原子的冷却过程所需的光阱激光。光晶格激光器产生科学实验过程中所需的光晶格的激光。极化分子激光器产生科学实验过程中所需的极化分子的激光。补磁光塞激光器产生铷原子及钾原子的深度冷却过程所需的激光。科学电控模块接收主控指令，进行实验时序控制。

1) 实验柜的支持功能

- a. 物理系统：3D-MOT+蒸发冷却
- b. 独立及混合的铷、钾原子源
- c. 观测记录超冷原子图像
- d. 高稳频\窄线宽\高性能激光器实验，具备激光器实验模块更换功能
- e. 磁屏蔽+磁场控制功能

2) 主要技术指标

超冷原子物理实验柜的主要技术指标如下表 5.10 所示:

表 5.10 超冷原子物理实验柜主要技术指标

参数	参数范围或功能
量子气体	87Rb、40K
BEC 温度	pK 量级~nK 量级
费米简并气体温度	$\leq 0.5TF$
BEC 原子数	$\geq 1.0 \times 10^5$ (87Rb)
费米简并气体原子数	$\geq 1.0 \times 10^4$
BEC 寿命	$\geq 20s$
开发光学通道数	≥ 13
成像分辨率	$\leq 3\mu m$
Feshbach 磁场线圈场最大磁场	≥ 600 高斯

(2) 技术接口

尽可能在已有超冷原子实验柜功能和指标的基础上提出科学目标和创新的实验方法,通过地面注入控制时序等实验参数,或通过在地面已有设备的方式开展空间实验。

根据新的科学实验需求,也可对极化分子激光器、光晶格激光器两个实验激光器模块进行整体更换以适应新的实验要求,每个模块功率不大于 130W。

5.1.5.2 高精度时频实验柜

(1) 研究支持条件

高精度时频实验柜支持的研究主题有:利用极高稳定度的时间频率开展原子跃迁光频对比、基本物理常数精密测量和引力红移测量的相对论验证等基础物理研究和应用。

空间站高精度时频实验柜的系统构成如图 5.12 所示,主要由主动氢原子钟、冷原子铷微波钟和冷原子铯光钟等组成,日稳定度和不确定度约 10^{-18} 量级,还配备了高精度激光和微波时间频率传输和比对链路,大幅提高了原子时精度。

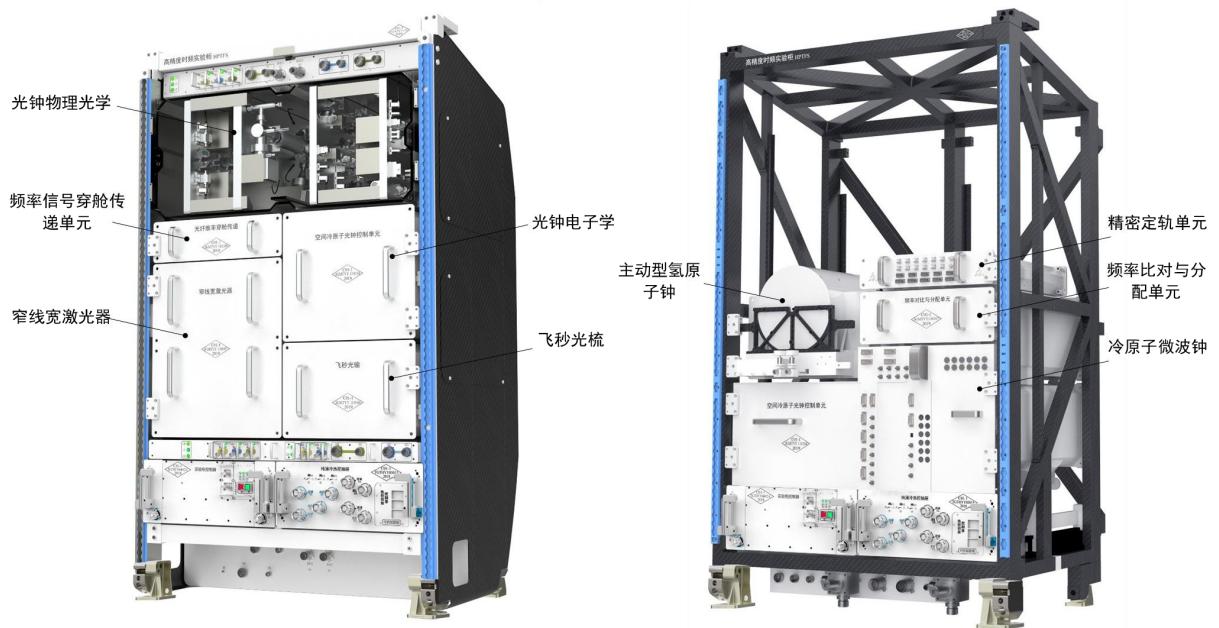


图 5.12 高精度时频实验柜的系统组成图（密封舱内）

1) 实验柜的支持功能

- a. 通过主动氢原子钟输出中短期稳定度较好的频率信号和秒脉冲信号，为相关载荷提供频率参考；
- b. 通过冷原子微波钟输出中长期稳定度较好的频率信号，可为冷原子光钟提供频率参考；
- c. 通过冷原子锶光钟可输出稳定度及准确度更高的频率信号，实现较地面精度高一个数量级以上的冷原子钟系统；
- d. 通过微波和激光链路实现空间站-地面站原子钟组间的时频信号比对，评估空间站时频系统稳定度

2) 主要技术指标

高精度时频实验柜提供的主要技术指标如下表 5.11 所示：

表 5.11 高精度时频实验柜主要技术指标

参数	技术指标或功能
实验柜总体指标	产生秒稳优于 2×10^{-15} 、日稳和不确定度 10^{-18} 量级的高精度时间频率信号 实现精度优于 $0.3\text{ps}@300\text{s}$ 和 $1\text{ps}@1\text{day}$ 空地时间频率传递与比对
主动氢原子钟	秒稳优于 2×10^{-13} 、日稳优于 2×10^{-15} ，连续运行
冷原子微波钟	秒稳优于 5×10^{-14} 、日稳和不确定度优于 2×10^{-16} ，连续运行
冷原子锶光钟	秒稳优于 2×10^{-15} 、日稳和不确定度 10^{-18} 量级
微波时间频率传递	稳定度 $0.3\text{ps}@300\text{s}$ ， $6\text{ps}@1\text{day}$

(2) 技术接口

高精度时频实验柜主要利用该柜内科学实验系统载荷单元（含舱外部分）开展技术验证与基础实验研究，部分载荷单元支持在轨更换升级。

该实验柜在空间站运营期间可以通过地面注入控制时序并配置冷原子光钟、主动氢原子钟、空间冷原子微波钟的实验参数的方式进行不同工作模式和不同实验项目的实施。

该实验柜还可以通过配置频率比对与分配单元、GNSS 等的输出参数，为不同实验项目提供不同等级的时间和频率信号、UTC 时间、定位数据和轨道预报数据等，为其他独立载荷项目提供信息输入源。

5.1.6 航天新技术方向

空间站的航天新技术方向主要支持以下研究：航天基础技术在轨试验验证、航天先进装备及子系统在轨试验验证、航天先进任务系统轨演示验证、及其他适于在空间站上开展的航天技术试验等。

在这个方向安排了航天基础试验机柜来支持航天新技术在轨试验验证。

5.1.6.1 航天基础试验机柜

(1) 研究支持条件

利用航天基础试验机柜可开展舱内技术试验，航天基础试验机柜支持开展微重力等空间环境下以验证航天基础技术、关键技术为目标的试验验证项目，主要功能包括：

- 1) 为试验项目提供微重力等舱内在轨试验环境；
- 2) 为试验项目提供机械、供电、信息、热控等标准接口支持；
- 3) 为试验项目提供无线通信、数据存储、照明、低压充电等扩展功能；
- 4) 支持试验项目在轨更换及试验样品的在轨更换。

航天基础试验机柜的系统组成如图 5.14 所示。



图 5.13 航天基础试验机柜组成图

(2) 技术接口

利用航天基础试验机柜开展试验的载荷单元需要满足以下接口要求。

1) 机械接口

载荷单元可具有三种不同的规格，详见表 5.12。

表 5.12 航天基础试验机柜支持的三种载荷单元规格尺寸

序号	规格	尺寸 (mm) (长×高×深)	最大重量 (kg)	备注
1	基础型载荷单元	440×160×600	24.5	基础型
2	2倍型载荷单元	440×331×600	49	相当于 2 倍基础型载荷单元
3	3倍型载荷单元	440×502×600	73.5	相当于 3 倍基础型载荷单元

2) 供电接口：航天基础试验机柜后面板可为载荷单元提供 1 路 100VDC 供电接口，供电峰值功率 500W；航天基础试验机柜前面板可为载荷单元提供 1 路 28VDC 供电接口，供电峰值功率 100W。

3) 信息接口

航天基础试验机柜可为每个载荷单元提供的信息接口如下：

- a. 以太网接口：1 路，传输数率 100Mbps；
- b. 1553B 总线接口：1 路，传输数率 1Mbps。

4) 热接口

载荷单元通过通风散热接口和冷板散热接口进行热量排散。基础型载荷通风散热能力为 40W，2 倍型载荷单元通风散热能力为 80W，3 倍型载荷单元散热能力为 120W。通过冷板散热的载荷单元散热能力为 450W。

5.2 共用支持实验柜资源

中国空间站根据各研究方向的共性应用需求，安排了科学手套箱、低温存储设备、高微重力实验支持设备、变重力实验支持设备、在轨维修装调支持平台等共用支持实验柜和装置，用户可利用其开展实验或研究。

5.2.1 科学手套箱与低温存储柜

科学手套箱与低温存储柜为空间生命科学与生物技术、空间材料科学等方向实验提供样品装载、精细操作、样品低温存储等支持。

科学手套箱与低温储存柜系统组成如图 5.14 所示，由科学手套箱和低温存储装置组成。科学手套箱（位于实验柜上部）可以提供温湿度可控的密闭洁净环境，内置支持精细操作的机械臂和显微装置，可以支持生命、材料科学等需要用到密闭洁净环境的科学实（试）验。低温存储装置（位于实验柜下部）能够提供 4℃、-20℃、-80℃的低温存储能力，可以满足生物、试剂、材料等样品不同低温存储条件，为开展长期空间实验提供保障。



图 5.14 科学手套箱和低温存储柜系统组成图

（一）主要功能

科学手套箱的主要功能为：

- （1）航天员能通过手套箱门转移或更换实验装置、样品、诊断仪器等物品；
- （2）航天员能通过手套箱的手套口安装和调试科学实验装置，并直接或遥操作科学实验；
- （3）航天员能直接、用内置仪器、或通过外接笔记本电脑观察到手套箱中被操作物和操作过程；
- （4）航天员可操作手套箱内配置的仪器对实验结果进行检测和筛选；
- （5）手套箱内的环境（光、湿、温、气等）可控可调，具有环境消毒能力；
- （6）具有进行实验精细或显微操作（如注入、提取、分离等）的支持

功能;

(7) 具有为手套箱内实验装置或科学仪器提供机、电、热和信息等支持能力;

(8) 具有功能扩展能力, 通过组件或模块更换, 支持提供新功能或开展新实验研究。

低温存储设备的主要功能为:

- (1) 具有三种典型温度 (-80℃、-20℃、+4℃) 低温存储能力;
- (2) 三个低温存储区域的样品可独立存取, 并具有样品限位措施;
- (3) 各低温存储区域具备温度检测、显示和超温报警功能;
- (4) 各低温存储区域在开门状态具备自动辅助照明功能;
- (5) +4℃存储区域具有透明观察窗。

(二) 性能指标

科学手套箱与低温存储柜的主要性能指标如下表 5.13 所示:

表 5.13 科学手套箱与低温存储柜主要技术指标

设备	参数类型	技术指标
科学手套箱	精细和显微操作系统	精细操作精度: $\leq \pm 0.5\text{mm}$; 精细操作力: $\geq 5\text{N}$; 显微操作精度: $\leq \pm 0.005\text{mm}$; 显微操作力: $\geq 0.2\text{N}$ 。
	箱内环境控制参数	温控: 范围 17℃~36℃, 可调; 相对湿度: 35RH%~80RH%, 可调; 光照: 白光或等效白光, 可调; 平均风速: 0.5m/s ~3m/s, 可调。
	监控	2 路监视相机 (可摄像), 航天员可观察和诊断手套箱的运行状况;
	清洁和消毒	具备对手套箱内操作区、内置设备和载荷表面进行自动消毒、清洗的能力。
低温存储设备	可控温度	具有 -80℃, -20℃, +4℃ 三种温度
	存储体积	-80℃存储区: 约 25L -20℃存储区: 约 15 L +4℃存储区: 约 15L
	断电升温速率 (4hr)	不大于 2℃/hr

（三）技术接口

科学手套箱技术接口为：

- （1）手套箱内工作空间：不小于 240L；
- （2）箱入口可通过最大实验模块尺寸：260mm×280 mm×580mm；
- （3）可为箱内实验模块提供的电和信息接口

- 1) 供配电接口：2 路 28VDC，每路最大功耗 140W，两路最大总功耗 150W；

- 2) 信息接口：2 路千兆以太网接口和 2 路 RS422 接口。

5.2.2 医学样本分析与高微重力科学实验柜（高微重力实验部分）

医学样本分析与高微重力科学实验柜包括高微重力科学实验装置，高微重力实验装置支持开展需要高微重力水平的实验，包括相对论物理与引力物理研究（等效原理空间实验检验）、微重力流体动力学及材料科学研究、惯性和加速度传感器研究等。

高微重力科学实验装置（占实验柜下部位置）如图 5.15 所示，提供微重力环境的悬浮实验台采用主动电磁悬浮和喷气悬浮隔离技术，能够抑制空间站舱体和实验柜体等多种类型振动的干扰，在 0.01Hz 到 300Hz 的振动频率内提供较高水平的隔振能力，提供比空间站本体高 2~3 个数量级的微重力水平，满足特殊科学实验对高微重力水平的要求。



图 5.15 医学样本分析与高微重力科学实验柜组成图

(一) 主要功能

(1) 该实验装置通过悬浮实验台提供 $10^{-5}\text{m/s}^2 \sim 10^{-4}\text{m/s}^2$ 量级的高微重力环境；

a. 悬浮实验台采用双层悬浮隔振技术，外层喷气悬浮，内层磁悬浮，满足不同微重力环境要求；

b. 悬浮实验台支持实验柜内和实验柜外两种悬浮隔振工作环境，在实验柜外具有位姿相机监视控制的自主悬浮功能，限定工作区域，避免碰撞；

c. 悬浮实验台采用 WIFI 通讯和无线传能技术，无物理接触，有效隔离微振动，最高实现 10^{-6}m/s^2 微重力环境；

d. 悬浮实验台自带锂电池组和储气瓶，可自动充电与充气，反复使用。

(2) 提供载荷机械安装、供电、测控、信息、热控接口；

(3) 具有通过更换实验载荷开展不同实验的功能；

- (4) 具有笔记本接口，能对实验柜进行检测与管理；
- (5) 具有航天员参与实验管理、样品回收的功能；
- (6) 具有支持遥科学的功能。

(二) 性能指标

高微重力科学实验装置的主要技术指标见表 5.14。

表 5.14 高微重力科学实验装置主要技术指标

参数类型	技术指标
柜内隔振	0.01Hz≤f≤0.3Hz, 微重力加速度: ≤5.4×10 ⁻⁶ g _{RMS} ; 0.3Hz < f≤100Hz, 微重力加速度: ≤1.8×10 ⁻⁵ g _{RMS} ; 100Hz < f≤300Hz, 微重力加速度: ≤1.8×10 ⁻³ g _{RMS} 。
柜外隔振	f≤0.1Hz, 微重力加速度: 10 ⁻⁶ ~10 ⁻⁷ g _{RMS} 量级; 0.1Hz < f≤100Hz, 微重力加速度: ≤1×10 ⁻⁵ g _{RMS} 量级; 100Hz < f, 微重力加速度: ≤2×10 ⁻⁴ g _{RMS} 量级。

(三) 技术接口

利用高微重力科学实验装置在轨开展实验的项目，需要自行研制并提供实验载荷，入轨后由航天员操作安装，实验载荷的基本接口要求如下：

- (1) 体积（长×宽×高）：不大于 460mm×300mm×260mm；
- (2) 重量：不大于 30kg；
- (3) 机械接口：4×M5 防脱落螺钉固定；
- (4) 供电接口：28±0.5V，1 路；
- (5) 平均功耗：不大于 30W；
- (6) 最大功耗：不大于 65W；
- (7) 通讯接口：RS422 接口、以太网接口；
- (8) 工作时间：不大于 1 小时（柜外），不大于 4 小时（柜内）

5.2.3 变重力科学实验柜

变重力科学实验柜支持的研究主题有：支持与重力相关的多类科学实验，包括空间生命科学与生物技术、微重力流体和燃烧科学等实验的不同重力效应和响应机制研究。

变重力科学实验柜系统组成如图 5.16 所示，主要由两个转子离心机、

监控系统、照明系统和定子控制器等组成，主要功能是提供在轨变重力，即在轨微重力环境基础上，实现 0.01g 到 2g 的重力范围，模拟出不同的可控重力环境。

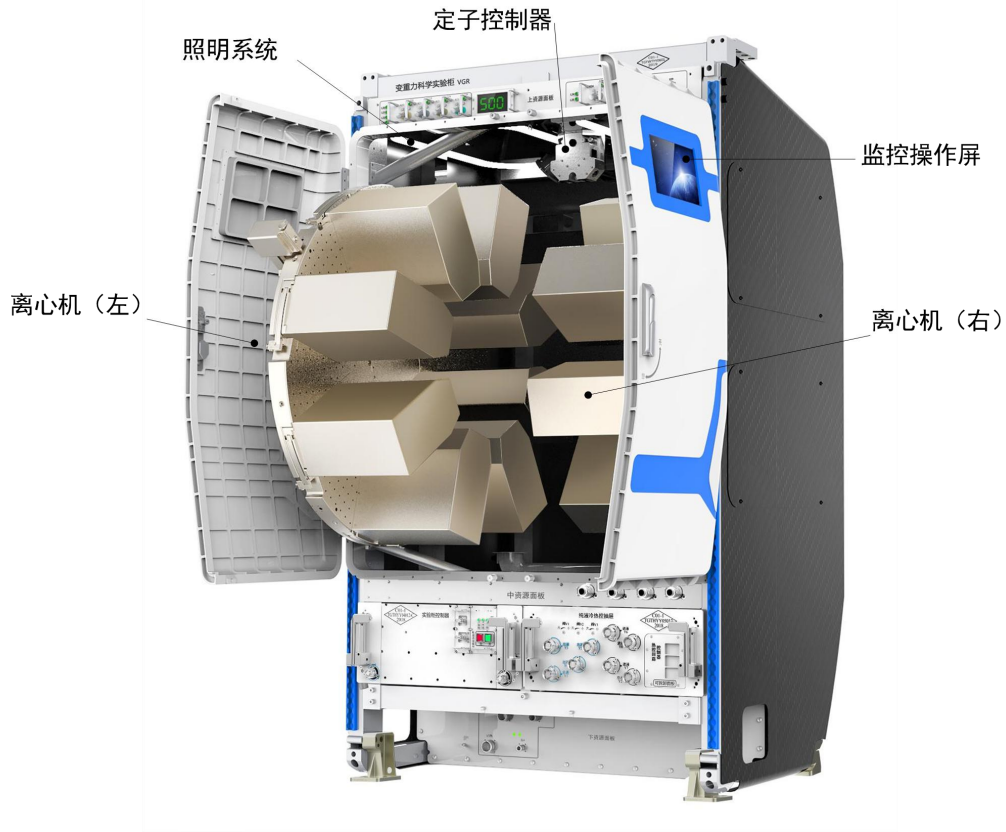


图 5.16 变重力科学实验柜系统组成图

其中，左右两个离心机是科学实验核心设备，是变重力实验开展的场所，其转盘上安装科学实验载荷模块进行变重力实验。定子控制器为离心机模块、监控系统、照明系统提供供电、通讯、数据管理等接口；监控系统配合定子控制器提供在轨航天员参与空间实验进程管理和干预的接口界面以及实时监测界面，具体包含监控相机、监控液晶屏和监控操作屏；照明系统为柜内科学实验区提供合适的光源支持。

(一) 主要功能

(1) 变重力科学实验支持功能

- 1) 通过离心机提供 0.01g~2g 模拟重力环境；
- 2) 支持多种标准实验模块，并可组合使用；

3) 为实验模块提供机械、供配电、测控与信息、热控等接口，支持实验模块在轨便捷更换；

4) 具有在轨自动平衡调节能力，适应模块更换等状态变化引起的变化；

5) 具有加速度测量功能，能够准确测量变重力实验区的模拟重力水平。

(2) 具有笔记本接口，能对实验柜进行检测与管理；

(3) 具有航天员参与实验管理、样品更换与回收的功能；

(4) 具有支持遥科学的功能。

(二) 性能指标

变重力科学实验柜的主要技术指标见表 5.15。

表 5.15 变重力科学实验柜主要技术指标

参数类型	技术指标
模拟重力加速度	范围：0.01g ~ 2g
离心机	转子数量：2 个 转子直径：900 mm
支持实验模块的能力	每个转子支持 8 个标准实验模块，标准模块可组合使用 实验模块在轨总质量：≤80kg/转子；单个标准模块质量：≤10kg（在轨安装）、≤5kg（随舱发射） 实验模块总供电：≤300W/转子 标准模块供电：28V，50W； 信息接口：RS422、以太网
转子实验区空气温度波动范围	20℃ ~ 35.5℃

(三) 技术接口

利用本实验柜开展实验，可采用标准载荷和非标准载荷两种类型，接口要求如下：

(1) 标准载荷单元：

1) 体积（长×宽×高）：260mm(径向)×144mm(切向)×280mm(轴向) (Max)，局部倒角 60mm×25mm；重量：≤10kg，随该实验柜发射重量≤5kg；

2) 安装接口：安装托板为科学载荷提供的机械安装接口为间距 25mm×25mm 的 M5 安装孔，电接口为 J30J-31 连接器，布局在如图靠近转盘中心方向，距边 42.5mm 居中的位置。安装托板尺寸如 5.17 所示

3) 能源：1 路 28VDC，≤50W；

4) 信息接口：RS422 和以太网；

5) 热控条件：安装面传导散热；与环境空气热交换。

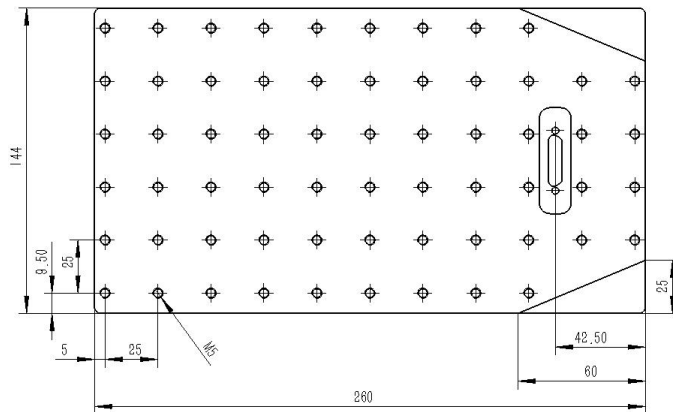


图 5.17 标准科学载荷安装托板接口

(2) 非标准载荷

1) 体积（长×宽×高）：可在直径 360mm~900mm 之间的环面内任意组合布局，可用盘面上间距 25mm×25mm 的 M5 安装孔，高度不超过 280mm，电接口借用标准载荷的接口，J30J-31 连接器，最大印迹见下图 5.18。

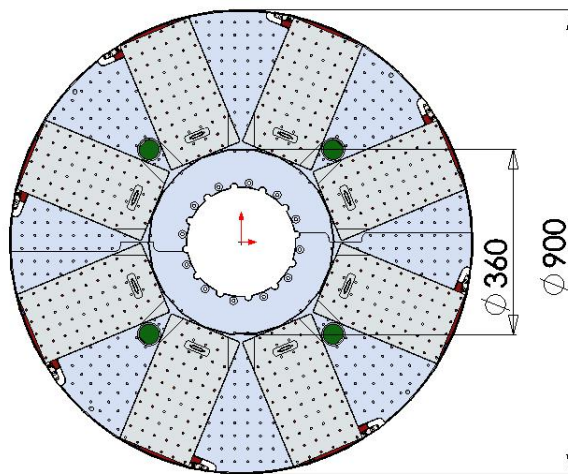


图 5.18 变重力实验柜非标准载荷尺寸

- 2) 重量：根据所占体积，最大不超过 80 kg，尽量沿转盘均布；
- 3) 能源：28VDC，约不超过 300W；
- 4) 信息接口：RS422 和以太网；
- 5) 热控条件：安装面传导散热和与环境空气热交换。

5.2.4 在轨维修装调支持平台

在轨维修装调支持平台可支持载荷的准备、装调、清洁、焊接、组装、测试，维护、故障诊断和维修等舱内精细操作，可进行特殊科学实验，空间机器人和遥科学技术试验。其系统组成如图 5.19 所示。

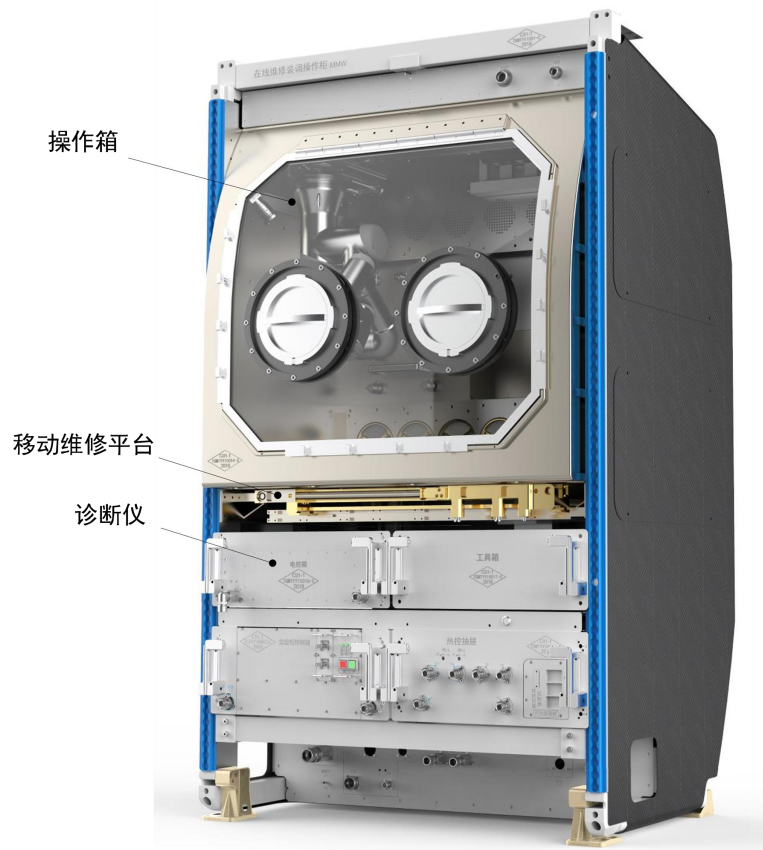


图 5.19 在线维修装调操作柜系统组成图

在线维修装调操作柜由操作箱、诊断仪及移动维修平台组成，具备在轨辅助维修装调操作技术，能够支持在轨精细维修操作、在轨维修检测和载荷在轨拆装，同时，可以实现通用实（试）验及辅助支持功能、环境保护与三废处理功能。操作箱提供大容积操作空间、精细维修机械臂、监测相机、环境照明、气体和电子学接口、散热装置、三废处理装置。诊断仪

可对符合接口和通信协议要求的整机级、模块级、板级电子学设备进行主要接口测试、功能测试、关键状态检测和初步故障诊断。移动维修平台可扩展操作面积，适用于较大载荷的在轨维修操作并支持开展相关科普教育活动。在线维修装调操作柜在满足现有空间站应用系统的维修和操作需求的基础上，提高应用系统的自主维修性，同时，在为各类实（试）验搭建资源平台的基础上，支持空间站应用系统在后续应用任务中开展在轨新模式的实（试）验验证。

（一）主要功能

- （1）具有在线诊断测试功能；
- （2）具有在轨精细操作保障功能和对内部载荷模块的清洁与消毒功能；
- （3）具有为符合要求的独立实验模块和科学仪器提供机、电、热、控等支持能力；
- （4）具有废气、废液和废渣等处理能力；
- （5）具有笔记本接口，能对实验柜进行检测与管理；
- （6）具有航天员参与实验管理、样品回收的功能。

（二）性能指标

在轨维修装调操作柜的主要技术指标见表 5.16 所示。

表 5.16 在线维修装调操作柜主要技术指标

参数	技术指标或功能
操作区	空间：不小于 315L
精密机械操作	自由度：6 个； 末端最大负载：150N； 末端最大输出力矩：10Nm； 末端定位精度：0.1mm； 末端姿态精度：0.5°
环境控制参数	提供标准氮气、排废气接口； 支持风冷散热，散热能力：≥200W 光照：普照 0~300Lx，可调节；，可调节； UV（紫外线）：波长范围 200~280nm，开关时间可控，可移动； 观测：2 路摄像，图像分辨率 1024×1024；

	清洁与消毒：具备对操作区、内部设备进行表面清洁和消毒的能力。
载荷操作支持	维修操作模块：约 550mm×300mm×300mm； 独立实验装置：约 650mm×450mm×400mm； 提供供电和信息支持。

（三）技术接口

利用在线维修装调操作柜开展实验、测试、维修等操作，需要提出需求和详细要求，由航天员经过训练和演练后进行具体操作。接口要求主要是能通过实验柜门 650mm×550mm；能够在柜内约柜内 360L 的空间内进行操作，或能够在拉出的平台上进行操作。工作空间内的热控接口可为载荷提供风冷、液冷的热控接口。工作空间内可为载荷提供供电、数据，以及运行控制接口。

5.3 舱内独立载荷资源

空间站配有空置实验机柜，当专用科学实验柜不能满足实验要求时或有其他特定的实验需求时，可采用标准模块组合的形式设计舱内的独立载荷，插入空置实验机柜开展实验。独立载荷资源也可以为空间站上开展科普实验项目和科普教育等提供支持条件。

（一）空置实验机柜为独立载荷提供的支持功能

- 1) 为后续布局的独立载荷提供机械安装支持；
- 2) 为后续上行的独立载荷提供供电、测控、信息等接口资源；
- 3) 为实验载荷提供良好的散热环境；
- 4) 为部分后续布局的独立有效载荷提供抽真空、排废气接口及氮气供应支持；
- 5) 空置实验机柜装载空间具有在轨翻转的功能；
- 6) 具有支持航天员在轨参与操作、更换、维修的功能，满足人机工效学要求。

（二）空置实验机柜内独立载荷机械安装

空置实验机柜装载空间基本构型为框架结构，基本结构如图 5.20 所示。



图 5.20 机柜装载空间支撑结构组成

独立载荷可以是标准载荷单元（SPU）、标准抽屉单元（SDU）等标准模块的组合（详见表 4.1），也可以是特殊尺寸的载荷。其安装在空置实验机柜装载空间内，空间可在轨动态分配，独立载荷可在轨安装与重构，如图 5.21 所示。



图 5.21 空置实验机柜可在轨弹性适配

（三）独立载荷供电、测控及信息支持

独立载荷支持设施配置了有效载荷综合管理单元，可统一对内部安装的独立载荷提供信息、测控和供电支持。支持设施可为单个独立载荷提供的信息和供电接口资源见表 5.17。

表 5.17 支持设施可为单个独立载荷提供的信息和供电接口资源

序号	接口项目	功能要求	技术指标
1	信息接口	支持接入 FC-AE-1553 光纤网络的有效载荷接口数	1 路， 接口速率：4Gbps
		支持接入 1553B 总线的有效载荷接口数	1 路， 接口速率：1Mbps
2	测控接口	指令接口	2 条
		遥测接口	2 路
3	供电接口	额定电压	100V
		功率等级和配电路数	单路最大功率 ≤ 500W

（四）热控支持

独立载荷支持设施内配置了热控单元，可将空间站应用流体回路的冷却工质配送给各独立载荷，为载荷提供与电功率相匹配的良好散热环境。

（五）氮气、真空及废气接口支持

独立载荷支持设施设计了氮气、真空、排废气接口，对于有需求独立载荷，可按要求，通过管路与对应的接口连接。

6 密封舱外实验资源

6.1 舱外实验条件概述

在空间站密封舱外设置有暴露实验平台和大型载荷挂点以及扩展实验平台挂点，支持开展空间天文、空间物理与空间环境、地球科学及应用、航天新技术、空间应用新技术等方向的研究。

暴露实验平台通过载荷适配器为舱外独立载荷提供机械安装接口，并为载荷提供电源、信息、热控等接口支持。标准载荷适配器设计为 I 型和 II 型两种适配器类型，I 型载荷适配器不提供散热冷板，由舱外有效载荷自

身解决散热问题，供电功耗有 100W 或 300W 两种；II 型载荷适配器设计有散热冷板，提供一定的舱外流体回路散热能力，供电功耗为 300W 或 1000W 两种。

大型载荷挂点通过对接装置实现载荷与空间站的连接，对接装置由主动端和被动端组成，主动端安装于载荷上，被动端安装于空间站舱外的大型载荷挂点处。主动端与被动端对接后，为大型载荷提供机械安装以及供电和信息传输接口。通过大型载荷挂点安装的载荷必要时可由舱外流体回路提供散热支持。扩展实验平台挂点可挂载大型载荷或安装扩展的载荷平台。

6.2 核心舱舱外实验资源

核心舱外有一个大型载荷挂点，位于大柱段舱外 II 象限（背风面），可用于挂载较大非标载荷开展科学实验，挂点对接装置与舱体隔热安装，大型载荷需通过自身被动散热。

6.3 实验舱 I 舱外实验资源

实验舱 I 由资源舱、气闸舱和工作舱组成，其舱外实验资源布局如图 6.1 所示，独立载荷可安装于资源舱、气闸舱和工作舱外。

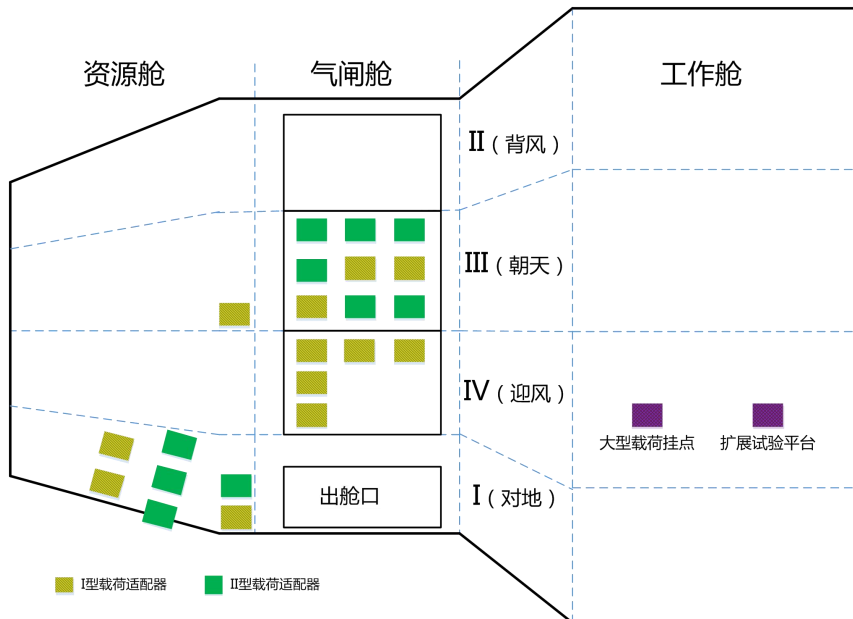


图 6.1 实验舱 I 舱外载荷适配器及挂点布局

气闸舱的第 III（朝天面）、IV（迎风面）象限设置舱外暴露平台，暴露平台为平板结构。III 象限（朝天面）暴露平台和 IV 象限（迎风面）暴露平台可布局共 14 个载荷适配器，这些载荷适配器可安装具有迎风面需求或对天观测的舱外独立载荷，支持开展空间天文与天体物理、空间物理与空间环境等方向的相关研究。

资源舱外的载荷适配器主要布局在 I、III 象限舱壁上，I 象限可布局 7 个载荷适配器，可进行具有迎风面需求的暴露实验及地球观测的相关研究；III 象限布局 1 个载荷适配器，可进行具有迎风面需求的暴露实验及天文观测的相关研究。

工作舱外有一个大型载荷挂点和扩展实验平台，位于 IV 象限（迎风面），可用于挂载较大非标载荷开展具有迎风面需求的暴露实验研究。

6.4 实验舱 II 舱外实验资源

实验舱 II 由工作舱、载荷舱、货物气闸舱和资源舱组成，其舱外实验资源布局如图 6.2 所示，独立载荷可安装于载荷舱和资源舱外。

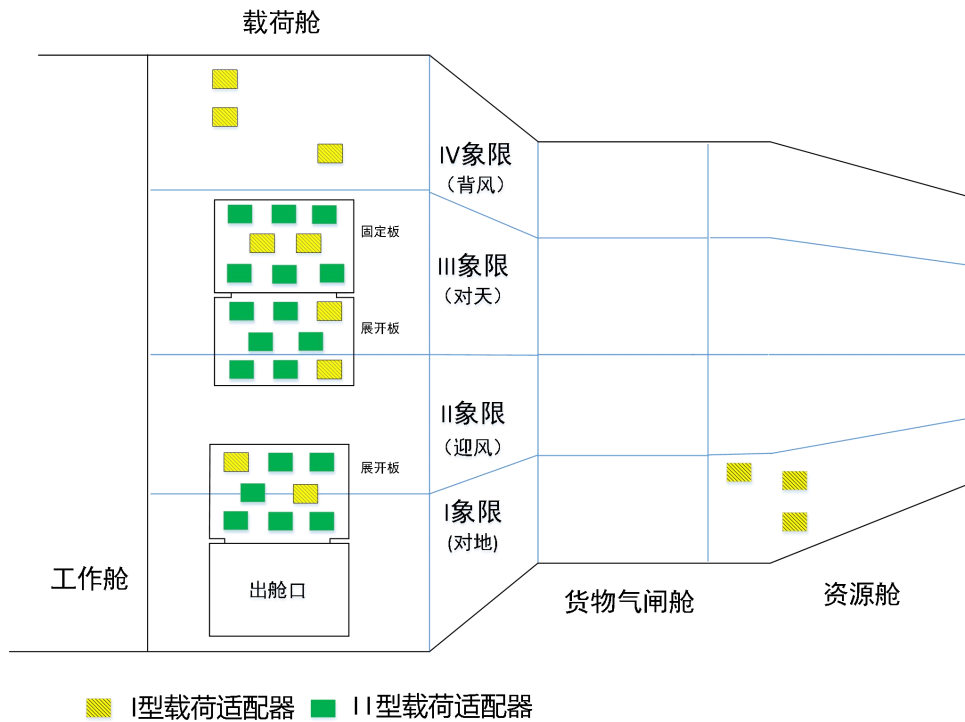


图 6.2 实验舱 II 舱外载荷适配器布局

其中载荷舱的舱外 I 象限设置展开式暴露平台、III 象限设置展开式暴

露平台和固定式暴露平台，另有少量载荷适配器布局在舱壁上。I 象限暴露平台方向为对地面，展开式暴露平台可布局 8 个载荷适配器。III 象限暴露平台方向为朝天面，展开式及固定式暴露平台可分别布局 8 个载荷适配器。此外，IV 象限舱壁上布局了 3 个 I 型载荷适配器。载荷舱外的载荷适配器分布于迎风、背风、对地及朝天面，可满足多种暴露实验需求，支持空间天文与天体物理学、地球科学及应用、空间物理与空间环境等多方向的实验研究。

资源舱外的载荷适配器主要布局在 I 象限（对地）舱壁上，可布局 3 个 I 型载荷适配器，支持独立载荷开展地球科学及应用等方向的相关研究。

7 空间站应用在轨信息支持

空间站各舱通过应用信息系统实现对各舱有效载荷的数管、存储、计算以及数传等管理，应用信息系统主要功能和支持条件如下：

7.1 主要功能

- (1) 具备接受地面有效载荷运控中心的管理和控制功能；
- (2) 具备对舱内外有效载荷数据管理功能，采集有效载荷的数字量遥测、工程数据和应用数据，统一组包并下行；
- (3) 具备有效载荷数据大容量存储和数据计算处理的功能。

7.2 载荷接口及指标

(1) 科学实验机柜内载荷信息接口

1) R422 接口：

- a) 接口类型：RS422，1 路；
- b) 数据类型：传输控制指令、数字量遥测和工程数据。

2) 以太网接口：

- a) 接口类型：千兆以太网，1 路；
- b) 有效速率： $\leq 600\text{Mbps}$ ；

- c) 数据类型: 传输控制指令、数字量遥测、工程数据及应用数据。
- (2) 空置载荷装载空间、舱内独立载荷及舱外载荷信息接口
- 1) MIL-STD-1553B 接口:
 - a) 接口类型: MIL-STD-1553B 协议, 1 路 (1 个 RT);
 - b) 数据类型: 传输控制指令、数字量遥测及部分工程数据和应用数据。
 - 2) FC-AE-1553 接口
 - a) 接口类型: FC-AE-1553, 2 路 (1 个 NT);
 - b) 通信速率: 4.25Gbps;
 - c) 数据类型: 传输控制指令、数字量遥测及部分工程数据和应用数据。

8 有效载荷上下行支持

8.1 科学实验样品/装置上下行

(一) 上行载荷物资支持

- (1) 载人飞船上行支持(载荷物资与平台物资共用): 最大 300kg;
- (2) 货运飞船上行能力(载荷物资与平台物资共用): 最大 5.5t。

(二) 下行载荷物资能力: 50kg, 由于下行资源条件有限, 建议尽量不利用下行资源。

8.2 载荷数据上下行

- (一) 三舱组合后上行数据总速率支持: 3Mbps~9Mbps;
- (二) 三舱组合后下行数据总速率支持: 1.1Gbps。

9 载荷研制要求

(一) 有效载荷的设计、研制和测试试验需满足载人航天工程标准、空间站规范和空间应用系统规范, 能够承受飞行全过程的环境条件。

(二) 有效载荷需进行维修性设计, 科学制定维修策略, 通过航天员

或机械臂操作，进行维护和维修，保障载荷设备可靠安全运行。维修性设计要满足工效学要求并通过工效学评价。

（三）通过货运飞船上行、载人飞船上行/下行的产品应满足各飞船的相关要求。

（四）在正常工作和故障情况下，不得影响其他系统的正常工作，特别不能危及航天员的健康和安全。

（五）有效载荷的电磁兼容性设计和测试应按照载人航天工程标准、空间站规范和空间应用系统规范执行。

（六）有效载荷的软件研制原则上应符合载人航天工程标准、空间应用系统规范。

（七）有效载荷设计、研制和测试中需要考虑和遵循的主要要求如下：

- （1）机、热、电及信息设计要求；
- （2）数据通信设计要求；
- （3）安全性、可靠性和维修性要求；
- （4）环境适应性要求；
- （5）工效学要求；
- （6）医学要求；
- （7）微生物控制要求；
- （8）电磁兼容性和接地设计要求；
- （9）软件研制要求
- （10） 废弃物处理要求；
- （11） 测试试验要求。