



上海未来工程师大赛 航天科普知识手册

(2026年更新版)

上海未来工程师大赛组委会

航天科普知识手册（2026 版）

第一章 航天历史与人物

一、中国航天发展

1. 中国航天日

- 日期：每年 4 月 24 日。
- 设立背景：2016 年 3 月 8 日国务院正式批复设立，纪念 1970 年 4 月 24 日中国第一颗人造卫星“东方红一号”发射成功。
- 纪念意义：弘扬航天精神，普及航天知识，激发全民探索创新热情。
- 东方红一号关键细节：
 - 卫星重 173 公斤，设计寿命 20 天，实际工作 28 天，轨道倾角 68.44 度；
 - 使用银锌电池供电，搭载无线电发射机，向全球播放《东方红》乐曲；
 - 中国成为继苏联、美国、法国、日本后第五个独立发射卫星的国家。

2. 栾恩杰与“大航天”战略

- 背景：21 世纪初，中国航天事业虽在部分领域取得突破，但面临“碎片化”发展瓶颈。探月工程、载人航天、北斗导航等重大项目各自为战，技术标准不统一，研发资源重复投入。时任国家航天局局长的栾恩杰敏锐意识到：若不能打破部门壁垒，中国航天将难以突破“大而不强”的困境。彼时国际航天竞争日趋激烈，美国“重返月球”计划加速推进，欧洲伽利略系统抢占轨道资源，中国亟需一场系统性变革。
- 核心内容：
 - 技术整合：将北斗导航、探月工程、载人航天纳入统一规划，避免重复建设；
 - 跨领域协作：推动航天技术向海洋、气象、通信等领域延伸，形成“海陆空天”一体化发展。
- 成果：促成嫦娥探月工程、北斗全球组网等国家级项目，提升中国航天国际竞争力。

3. 中国首位进入太空的女航天员

- 知识点：刘洋于 2012 年 6 月 16 日搭乘神舟九号进入太空，与景海鹏、刘旺共同完成中国首次载人交会对接任务，驻留天宫一号空间实验室。
- 此次任务标志着中国成为全球第三个独立掌握载人航天技术的国家，并实现女性航天员零的突破。
- 后续发展：王亚平于 2013 年执行神舟十号任务，成为第二位中国女航天员，并开展太空授课活动。

4. 中国 2024 年预计实施 100 次航天发射

- 规划背景:据《中国航天科技活动蓝皮书（2023 年）》，2024 年计划执行约 100 次发射，涵盖空间站建设、探月工程、商业卫星等多领域。
- 重点任务包括巡天空间望远镜发射（与空间站共轨）、嫦娥六号月球采样返回等。
- 行业意义：若目标达成，将刷新中国年度发射纪录（2023 年为 67 次），彰显火箭复用技术成熟与商业航天发展提速。

二、苏联/俄罗斯航天里程碑

1. 人类首次太空行走任务

- 任务名称：苏联“上升 2 号”载人飞船任务。
- 时间与人物：1965 年 3 月 18 日，宇航员阿列克谢·列昂诺夫完成人类首次舱外活动（太空行走）。
- 指令长帕维尔·别利亚耶夫负责舱内操控。
- 技术挑战：太空行走持续 12 分钟，因航天服在真空下膨胀，列昂诺夫被迫手动释放氧气降低压力才得以返回舱内；
返航时自动导航系统故障，手动降落在西伯利亚偏远森林，两日后获救。

2. 人类首位完成太空行走的宇航员

- 人物：苏联宇航员阿列克谢·列昂诺夫。
- 任务关联：1965 年“上升 2 号”任务中完成历史性出舱。
- 任务风险：
出舱后航天服膨胀导致行动受限，返舱时卡在舱门处，紧急手动放气后脱险；
返程中舱内氧气浓度异常升高，存在爆炸风险，最终安全着陆。

3. 首位进入太空的女性

- 人物：苏联宇航员瓦伦蒂娜·捷列什科娃。
- 任务细节：1963 年 6 月 16 日，乘坐“东方 6 号”飞船进入太空，与早两天发射的“东方 5 号”飞船（由瓦列里·贝科夫斯基驾驶）实现编队飞行；
绕地球飞行 48 圈，总时长 70 小时 50 分钟，早于美国首位女宇航员 20 年。
- 社会影响：苏联借此宣传社会主义制度下性别平等成就。

4. 人类首颗人造卫星

- 卫星名称：苏联“斯普特尼克 1 号”（Sputnik 1）。
- 发射时间：1957 年 10 月 4 日。

- 技术参数：直径 58 厘米，重 83.6 公斤，轨道高度 215-939 公里，倾角 65.1 度；搭载两部无线电发射机，以 20.005MHz 和 40.002MHz 频率发送信号，持续 21 天。
- 历史影响：触发美苏太空竞赛，直接推动美国成立 NASA（1958 年）。

5. 世界首艘载人飞船

- 飞船名称：苏联“东方 1 号”（Vostok 1）。
- 任务意义：1961 年 4 月 12 日搭载加加林进入太空，开启人类载人航天时代。
- 设计特点：飞船重 4.73 吨，仅能容纳 1 名宇航员，生命维持系统支持 10 天；返回时宇航员需弹射跳伞，飞船无着陆缓冲装置（为避免国际航空联合会认证争议）。

6. 人类首位进入太空的宇航员

- 人物：苏联宇航员尤里·加加林。
- 任务名称：1961 年 4 月 12 日“东方 1 号”载人飞行。
- 任务细节：
 - 绕地球飞行 1 圈，历时 108 分钟，轨道高度 181-327 公里；
 - 返回时距地面 7 公里高度弹射出舱，通过降落伞着陆（因飞船无软着陆系统）。
- 全球反响：加加林成为国际航天英雄，苏联将其宣传为“社会主义制度优越性”的象征。

7. 第一颗月球轨道卫星

- 历史背景：月球 10 号于 1966 年 4 月 3 日进入月球轨道，成为首颗绕月运行的“孙卫星”，开展引力场与辐射环境探测。任务持续 56 天，传回月球磁场及宇宙射线数据，为后续载人登月提供支持。

8. 礼炮 1 号空间站

- 背景：1971 年美苏空间站竞赛中，苏联为抢占先机，快速推出首个载人空间站。
- 设计特点：单舱结构，长 15.8 米，重 18.4 吨，可支持 3 人驻留，配备科研设备与生命维持系统。
- 任务结果：首批宇航员返航时因返回舱压力阀故障牺牲，空间站运行 175 天后坠毁，暴露早期载人航天的高风险性。

9. 和平号空间站

- 设计与运行：1986 年发射，由核心舱与 5 个实验舱组成，总重 129.7 吨，支持 6 人长期驻留。完成 2.2 万项实验，涉及材料科学、生物医学等领域。
- 退役原因：2001 年因俄罗斯财政困难受控坠毁，碎片落入南太平洋，标志苏联航天遗产的终结。

三、美国航天重大突破

1. 探险者 1 号卫星

- 背景：1957 年苏联发射“斯普特尼克 1 号”后，美国急于证明技术实力。原计划“先锋号”火箭多次失败，最终由冯·布劳恩团队开发的朱诺 I 型火箭成功发射。
- 科学贡献：
发现范艾伦辐射带：卫星搭载的盖革计数器探测到地球周围的高能粒子带，揭示地球磁场对宇宙射线的捕获作用。
- 技术参数：重 13.97 公斤，轨道高度 358-2550 公里，设计寿命 110 天，实际运行至 1970 年。
- 影响：奠定美国在太空科学探测领域的地位，推动后续“探险者”系列卫星计划。

2. 子午仪号导航卫星

背景：1960 年冷战期间，美国海军亟需为核潜艇提供精准定位，以应对苏联的军事威胁。传统导航手段（如天文观测）在潜艇潜航时无法使用，卫星导航成为关键技术突破方向。

技术实现：

多普勒频移原理：通过卫星发送固定频率信号，地面接收器根据频率变化计算位置，精度约 200 米；

首颗实验卫星：1960 年 4 月 13 日发射的“子午仪 1B”验证了技术可行性，后续共部署 30 余颗卫星，系统运行至 1996 年退役。

影响：为现代 GPS 奠定基础，推动全球卫星导航系统的军事与民用化。

3. 首个成功飞掠金星的探测器

- 探测器名称：美国“水手 2 号”（Mariner 2）。
- 任务时间：1962 年 8 月 27 日发射，12 月 14 日飞掠金星。
- 科学发现：首次确认金星表面温度高达 425℃，推翻此前“金星可能存在海洋”的猜想；
探测到金星大气层主要由二氧化碳构成，且存在持续高速环流。
- 技术对比：苏联“金星 1 号”（1961 年）因通信中断失败，美国率先完成探测。

4. 人类首次在轨交会试验

- 任务与时间：1965 年 12 月 15 日，美国“双子座 6 号”与“双子座 7 号”在轨道上实现近距离交会，最近距离仅 0.3 米。
- 技术意义：验证了航天器轨道交会的可行性，为阿波罗计划中登月舱与指令舱的对接奠定基础。
- 双子座系列任务共完成 10 次载人飞行，突破出舱活动、长期驻留等关键技术。

5. 首次航天器空间交会对接

- 任务背景：1966 年，美国为验证登月所需的轨道对接技术，开展“双子座 8 号”任务。
- 过程与挑战：宇航员尼尔·阿姆斯特朗手动操控飞船与“阿金纳”目标飞行器对接，但因推进器故障导致失控，紧急分离后返航。
- 意义：首次证明载人航天器对接可行性，为阿波罗登月计划中指令舱与登月舱的对接奠定基础。

6. 人类首位登月者

- 人物：美国宇航员尼尔·阿姆斯特朗。
- 任务背景：1969 年 7 月 20 日，“阿波罗 11 号”登月舱“鹰”降落在月球静海基地。
- 历史瞬间：阿姆斯特朗踏上月面时说出名言：“这是个人的一小步，却是人类的一大步。”
- 与同伴巴兹·奥尔德林在月面停留 2 小时 31 分钟，采集 21.55 公斤月壤样本。

7. 阿波罗 15 号与首辆月球车

- 设计细节：折叠式结构，占地 0.5 平方米，重 181.4 公斤，配备四轮独立电机与镀锌钢丝网轮胎，适应月球低重力环境；
最高时速 14 公里，续航 90 公里，搭载导航系统与科学仪器。
- 任务成果：1971 年 7 月 31 日，宇航员驾驶月球车行驶 28 公里，采集 77 公斤月岩，包括月球原始地壳样本“创世岩”；
扩展了宇航员活动范围，推动后续月球车在阿波罗 16 号、17 号任务中的应用。

8. 旅行者 1 号探测器

- 任务目标：1977 年发射，借助“行星连珠”引力弹弓效应，探测木星（1979 年）、土星（1980 年）。
- 里程碑：2012 年突破太阳风层顶，成为首个进入星际空间的人造探测器。
- 携带镀金唱片，收录地球声音、音乐及图像，向地外文明传递信息。

9. 哈勃太空望远镜

- 科学贡献：哈勃望远镜于 1990 年 4 月 24 日由“发现号”航天飞机发射至 610 公里轨道，是首个大型空间望远镜，摆脱大气干扰，提供高精度宇宙图像；
其观测数据修正了宇宙膨胀速率（哈勃常数），并为暗能量存在提供了关键证据（通过超新星红移研究）；
拍摄了“创生之柱”、引力透镜效应等经典图像，推动星系演化、黑洞研究等领域突破。
- 技术特点与维护：主镜直径 2.4 米，覆盖紫外至近红外波段，配备宽视场相机、摄谱仪等仪器；
因镜面球差问题，1993 年通过航天飞机任务加装矫正设备，后续历经 5 次维修升级，寿命延长至 30 年以上。

10. 帕克号太阳探测器

- 技术挑战：2018 年发射，使用碳复合材料防热罩，耐受 1400℃ 高温，计划 2025 年抵达距太阳表面 616 万公里的近日点。
- 科学目标：研究太阳风加速机制与日冕高温（约 100 万℃）之谜，已多次穿越日冕获取数据。

四、其他国家及国际贡献

1. V2 火箭：现代弹道导弹先驱

- 研发背景：纳粹德国为扭转二战劣势，1942 年研制 V2 火箭，1944 年首次实战攻击伦敦。
- 技术突破：
 - 液体燃料发动机：使用乙醇与液氧，射程 320 公里，最大速度 4.8 马赫；
 - 惯性制导系统：通过陀螺仪实现自主导航，精度远超同期武器。
- 战后影响：技术被美苏瓜分，直接催生苏联 R-7 火箭（发射首颗卫星）与美国红石火箭（首枚载人亚轨道飞行）。

2. 首位进入太空的华人科学家（1985 年挑战者号任务）

- 任务背景：王赣骏于 1985 年 4 月 29 日搭乘“挑战者号”执行 STS-51-B 任务，负责流体物理实验设计，成为首位在太空开展自主实验的华人科学家。其研究涉及微重力环境下液滴行为，为空间材料科学奠定基础。

第二章 人造卫星

一、卫星轨道与分类

1. 极轨道与静止轨道

极轨道气象卫星：

轨道特性：运行高度为 800 至 1000 公里，轨道倾角接近 90°，形成南北极跨越的太阳同步轨道。每 100 分钟绕地球一圈，每日 14 至 15 次过境，实现全球覆盖。例如中国风云三号卫星，搭载微波温湿度探测仪，可穿透云层获取大气垂直温湿度数据，精度达 0.5℃。

应用实例：监测北极海冰面积变化，2012 年至 2022 年间，卫星数据显示夏季海冰最小面积从 341 万平方公里缩减至 268 万平方公里，年均减少率约 4.3%。

静止轨道气象卫星：

轨道特性：定位于赤道上空 35,786 公里的地球同步轨道，与地球自转同步，固定观测地球表面约 1/3 的区域（东西跨度 150°，南北跨度 55°）。例如日本向日葵 9 号卫星，每 10 分钟生成一次全景云图，可追踪台风眼直径变化（精度达 1 公里）。

灾害预警：2023 年台风“杜苏芮”路径预测中，风云四号卫星通过云顶温度骤降（从 -60℃ 降至 -80℃）提前 6 小时预警其强度升级为超强台风。

2. 气象卫星有效载荷功能

气象卫星发展背景：

中国自 1988 年风云一号 A 星（极轨）和 1997 年风云二号 A 星（静止轨道）起步，现已形成极轨（风云三号系列）与静止轨道（风云四号系列）协同观测体系，数据同化精度达国际先进水平。

典型遥感载荷技术细节：

（1）多光谱成像仪（以风云四号 AGRI 为例）：

光谱通道：14 个波段（覆盖 $0.45\sim 13.8\mu\text{m}$ ），包括：

①可见光通道（ $0.45\sim 0.49\mu\text{m}$ ）：监测气溶胶、植被（空间分辨率 500m）。

②水汽通道（ $6.2\sim 7.3\mu\text{m}$ ）：反演大气湿度垂直分布（分辨率 2km）。

③长波红外通道（ $10.3\sim 12.5\mu\text{m}$ ）：获取云顶温度（精度 1K）。

扫描机制：二维扫描镜+线阵探测器，15 分钟完成全圆盘观测（覆盖 1/3 地球）。

（2）大气垂直探测仪（以风云三号 HIRAS 为例）：

光谱分光：采用傅里叶变换干涉仪，光谱分辨率 0.625cm^{-1} 。

探测能力：

①温度反演：50 层（地表~50km），精度 $1\sim 2\text{K}$ 。

②湿度反演：30 层（地表~30km），精度 $15\sim 20\%$ 。

定标技术：黑体辐射源（精度 0.1K）+深空冷空间观测联合校准。

（3）微波辐射计（以风云三号 MWRI 为例）：

频段配置：10.65GHz（水平/垂直极化）至 89GHz（双极化），穿透云层能力：

①低频（ $<20\text{GHz}$ ）：探测海面温度（精度 0.5°C ）、土壤湿度（精度 5%）。

②高频（ $>50\text{GHz}$ ）：反演降水强度（分辨率 5mm/h）。

技术突破：机械扫描抛物面天线（直径 1.2m），扫描幅宽 1400km。

遥感数据应用场景：

台风监测：通过静止卫星 10 分钟高频观测（风云四号），定位误差 $<10\text{km}$ 。

数值天气预报：同化微波湿度计数据，使 72 小时降水预报准确率提升 15%。

气候变化研究：利用 30 年极轨卫星数据，监测全球温度变化趋势（精度 $0.1^\circ\text{C}/\text{十年}$ ）。

3. 地球轨道卫星设计寿命

寿命限制机制：

燃料消耗：地球同步轨道卫星每年需消耗 15 公斤燃料用于姿态控制，若携带 1000 公斤燃料，理论寿命约 15 年。

辐射损伤：电子器件在轨 10 年累计辐射剂量可达 300 krad（千拉德），导致太阳能电池效率下降 30%，计算机内存单粒子翻转率上升至每月 10 次。

延寿案例：美国 MEV-1 服务卫星于 2020 年对接国际通信卫星 IS-901，通过提供轨道维持服务延长其寿命 5 年，燃料转移速率每秒 2 克。

4. 地球同步轨道卫星相对月球移动

知识点：

轨道动力学分析：

地球同步卫星轨道周期为 23 小时 56 分 4 秒（与地球自转同步），而月球公转周期为 27.3 天。

月球每日相对地球东移约 13.2° ，导致地球同步卫星每日相对月球西移相同角度（约 4.4 万公里位移）。

实际影响：

卫星与月球引力摄动：每年轨道倾角变化 0.85° ，需消耗 15 公斤燃料进行倾角保持。

月食期间：每年 2-4 次，卫星进入地球阴影，太阳能供电中断最长 72 分钟，依赖蓄电池维持。

5. 地球静止轨道卫星入轨方式为转移轨道

发射流程：

近地停泊轨道：火箭将卫星送入 200 - 400 公里高度的初始轨道。

霍曼转移轨道：上面级发动机点火，将轨道远地点提升至 35,786 公里，形成大椭圆轨道。

定点变轨：卫星在远地点启动星载发动机，调整轨道倾角至 0° ，实现地球静止定位。

技术难点：轨道控制精度需达 $\pm 0.01^\circ$ ，燃料消耗占总发射质量的 60% 以上。

二、中国卫星系列

1. 遥感卫星系列

技术分类与典型卫星

（1）光学成像卫星

- 发展历程：

- 第一代：遥感二号（2007 年发射，分辨率 2 米）；
- 第二代：遥感五号（推测分辨率 0.65 米）、高分二号（0.8 米，民用版）；
- 第三代：遥感十四号（分辨率 0.45 米，跻身全球第二梯队）。

- 应用**：土地利用监测、城市规划、灾害应急等。

（2）合成孔径雷达（SAR）卫星

- 代表型号：遥感一号、三号、十号等，具备全天候成像能力，穿透云层监测地表形变或海洋动态。
- 技术突破：高分三号（2016 年发射）为首颗民用 C 波段 SAR 卫星，支持防灾减灾。

（2）信号情报卫星

- 遥感三十号组：由中国科学院微小卫星创新研究院研制，2017 年起多组发射，用于电磁环境探测与信号情报收集。

（4）高分专项（“天眼工程”）的里程碑作用

高分系列卫星作为国家重大科技专项，显著提升了中国遥感数据的自给率（达 80%），并推动多领域应用：

- 高分一号：大幅宽成像（800 公里幅宽），4 天全球覆盖；
- 高分二号：亚米级分辨率（1 米），推动城市精细管理；
- 高分四号：全球首颗地球同步轨道高分辨率卫星（50 米分辨率），可分钟级连续监测灾害（如森林火灾、洪涝）；
- 高分七号：立体测绘卫星，支持三维地图制作与智慧城市建设。

（5）应用场景与社会价值

① 灾害应急

- 高分四号在南方洪涝、四川凉山火灾中实现实时监测，提供关键数据支持；

- SAR 卫星（如高分三号）用于地震后地表形变分析。

②农业与生态

- 宁夏利用高分数据规划移民搬迁与耕地优化，新疆通过卫星监测草场长势，节省人力成本 90% 以上。

③国防与资源管理

- 遥感系列卫星被西方推测用于军事侦察（如“JianBing”项目）；
- 海洋卫星（如 HY-2 系列）监测海面风场与浪高，支持海洋权益维护。

（6）技术突破与国际地位

- 分辨率提升：从早期的 2 米（遥感二号）到 0.45 米（遥感十四号），逐步缩小与美、法等国的差距，但仍落后于美国 KH-11 卫星（0.1 米）。
- 轨道创新：高分四号采用地球同步轨道（3.6 万公里），实现持续凝视观测，技术全球唯一。
- 商业航天发展：如“吉林一号”“烟台一号”等商业卫星加入，推动遥感数据服务市场化与实时化。

我国第一颗遥感卫星总设计师为孙家栋

知识点：

返回式卫星 FSW-1：1975 年 11 月 26 日发射，轨道高度 177-494 公里，胶片相机分辨率 10 米，带回 2800 张地表影像。

意义：实现中国首次航天器回收，再入过载峰值 8g，着陆点偏差仅 16 公里。

其他贡献：

东方红一号（1970 年）：设计寿命 20 天，实际工作 28 天，播送《东方红》乐曲信号。

北斗导航系统：提出“三步走”战略（区域有源→区域无源→全球覆盖），主导研制北斗二号首星（2007 年发射）。

2. 返回式遥感卫星系列

（1）中国返回式卫星工程周期为 1975-2006 年

任务历程：

FSW-0 系列（1975 - 1987）：共发射 10 颗，回收成功率 80%，带回首张青藏高原冰川卫星影像（分辨率 10 米）。

FSW-1 系列（1987 - 1993）：实现“一箭三星”技术，单次任务最多搭载 300 项材料实验，包括太空合金（铝锂合金强度提升 18%）。

FSW-2/3 系列（1992 - 2006）：完成 22 次成功回收，累计培育 87 个航天作物新品种，如“太空茄子”单果重达 1.2 公斤。

技术遗产：返回舱再入热防护技术（碳-碳复合材料）应用于高超音速飞行器，耐温能力超过 2000℃。

（2）中国返回式卫星传统着陆场位于四川盆地

地理优势：

盆地内人口密度低于 50 人/平方公里，回收作业对居民影响极小。

地质结构以红色砂岩为主，着陆冲击过载可控制在 8g 以内（载人飞船返回舱标准为 10g）。

历史任务：

1994 年 FSW-1 返回舱在遂宁地区着陆，携带的砷化镓半导体材料经太空辐射后载流子迁移率提升 15%。

2004 年 FSW-3 任务中，返回舱搭载的“太空蚕”在微重力环境下完成完整生命周期实验。

3. 东方红通信广播系列卫星

(1) 我国第一颗人造卫星“东方红一号”

发射参数：

时间：1970 年 4 月 24 日，由长征一号运载火箭从酒泉发射。

轨道：近地点 439 公里，远地点 2384 公里，倾角 68.4° ，周期 114 分钟。

技术突破：

采用银锌电池供电，设计寿命 20 天，实际工作 28 天。

搭载无线电发射机，持续播送《东方红》乐曲信号，全球可接收。

历史意义：标志中国成为全球第五个独立发射卫星的国家。

(2) 中国首颗静止轨道通信卫星“东方红二号”

任务历程：

1984 年 4 月 8 日发射，定点于东经 125° 赤道上空，设计寿命 3 年，实际服役 4.5 年。

搭载 2 个 C 波段转发器，通信容量 240 路电话或 1 路彩色电视信号。

技术贡献：

突破姿态控制（三轴稳定精度 $\pm 0.1^{\circ}$ ）和远地点发动机点火技术。

为后续“东方红三号”（1997 年）提供技术验证基础。

4. 风云气象卫星系列

(1) 我国首颗静止轨道气象卫星“风云二号”

技术参数：

1997 年 6 月 10 日发射，轨道高度 35,786 公里，扫描辐射计分辨率 1.25 公里（可见光）。

每 30 分钟生成一次全景云图，监测台风路径误差从 200 公里降至 50 公里。

应用案例：

1998 年长江洪水期间，提供连续气象数据支持抗灾决策。

2006 年台风“桑美”路径预测中，提前 48 小时预警登陆点。

(2) 风云二号 H 星定位调整

背景与核心知识点：

风云系列气象卫星分为极轨（风云一号/三号）和静止轨道（风云二号/四号）。2018 年，风云二号 H 星从 86.5° E 调整至 79° E，填补印度洋、中亚等地区气象监测空白。

战略意义：

①覆盖范围扩展至“一带一路”沿线国家（东经 40° ~ 160° ），增强对沙尘暴、热带气旋等灾害的监测能力。

②命名体现中国通过卫星技术支援沿线国家发展的合作理念。

技术背景：

地球静止轨道卫星通过轨道漂移实现定点调整，需精准控制燃料消耗以延长服役寿命。

(3) 风云四号 B 星属于地球静止轨道气象卫星

风云四号系列：

轨道参数：定位于东经 105° 赤道上空 35,786 公里，扫描辐射计时间分辨率 15 分钟（区域观测可达 1 分钟）。

载荷配置：

多通道扫描成像辐射计（14 个光谱波段），监测云顶温度（精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ）。

闪电成像仪（每秒拍摄 500 帧），2021 年捕捉到青藏高原单次超级闪电（能量达 350 GJ）。

应用案例：2022 年台风“梅花”路径预测中，风云四号 B 星提供逐分钟云图，路径预报误差缩小至 30 公里。

5. 资源地球资源卫星系列

资源一号系列：

起步于“资源一号”01 和 02 卫星（代号 CBERS - 01 和 CBERS - 02），这两颗卫星是中巴合作成果，于 1999 年和 2003 年相继发射。后续不断演进，如 CBERS - 02B 卫星在 2007 年首次搭载 2.36m 高分辨率相机，实现全色多光谱同时成像；ZY1 - 02C 卫星成为中国第一颗国土资源普查的业务卫星；CBERS - 04 卫星于 2014 年发射，由中巴合作完成，搭载多种先进相机，提供中分辨率遥感数据；ZY1 - 02D 卫星于 2019 年发射，是中国首颗民用高光谱业务卫星 4。

资源二号和资源三号系列：

ZY - 2 卫星以及 ZY - 3 卫星的推出，进一步丰富了中国资源卫星体系，服务于国土资源调查与监测、防灾减灾、农林水利、生态环境等多个领域 4。

中国首颗传输型民用遥感卫星为资源系列

资源一号（CBERS）技术细节：

多光谱相机：包含 5 个可见光与近红外波段（ $0.45 - 0.89\ \mu\text{m}$ ），空间分辨率 20 米，幅宽 120 公里。1999 年首次拍摄的北京地区影像中，可清晰识别四环路建设进展（精度达 95%）。

国际合作：数据分发给巴西、南非等国家，用于监测亚马逊雨林砍伐（年监测面积误差 $<2\%$ ）。

后续发展：资源一号 04A 星（2019 年发射）新增热红外波段（ $10.5 - 12.5\ \mu\text{m}$ ），可夜间监测森林火点，温度分辨率达 0.5°C 。

6. 北斗导航定位卫星系列

（1）北斗全球服务类型

背景与核心知识点：

北斗系统是中国自主研发的全球卫星导航系统，采用“三步走”发展战略：2000 年建成试验系统（北斗一号），2012 年覆盖亚太（北斗二号），2020 年实现全球覆盖（北斗三号）。

全球三大基础服务：

①RNSS（定位导航授时）：通过 30 颗卫星提供全球米级定位精度，授时精度优于 20 纳秒，广泛应用于交通、农业等领域。

②GSMC（全球短报文通信）：支持用户发送短文本信息（如 40 汉字/次），无需地面网络，尤其适用于应急通信。

③SAR（国际搜救）：搭载搜救载荷，参与国际 COSPAS-SARSAT 系统，定位精度达千米级，用于海上、航空遇险救援。

④PPP（精密单点定位）：

区域增强服务：需地面基准站提供差分修正数据，实现厘米级定位，主要覆盖亚太地区。

技术原理：通过解算卫星轨道和钟差误差，结合双频观测值消除电离层延迟，提升定位精度。

（2）北斗导航系统中 RNSS 服务面向全球

RNSS 服务特性：

全球覆盖：北斗三号系统 24 颗 MEO 卫星构成星座，提供水平定位精度 3.6 米（亚太地区 1.2 米）。

授时精度：20 纳秒（全球）、10 纳秒（区域），支撑 5G 通信基站同步（误差 $<\pm 1.5\mu s$ ）。

区域增强服务：

SBAS（星基增强）：通过 3 颗 GEO 卫星播发差分校正信息，定位精度提升至 1.5 米。

GAS（地基增强）：全国建设 2000+基准站，实现厘米级实时定位（如测绘、自动驾驶）。

PPP（精密单点定位）：需后处理解算，静态精度毫米级，动态精度厘米级。

（3）北斗全球服务核心技术：星间链路

技术原理：卫星间通过 Ka 波段通信（速率 2Mbps），自主完成时间同步与轨道修正，减少对地面站依赖。

实现全球服务精度提升：无地面支持时，定位误差从 10 米降至 2 米。

应用场景：

2020 年珠峰高程测量中，北斗星间链路支持实时厘米级定位。

为海外用户（如巴基斯坦）提供独立于 GPS 的高精度服务。

（4）北斗三号组网卫星总数 30 颗

混合星座设计：

GEO 卫星：提供区域增强服务（如短报文通信）。

IGSO 卫星：优化低纬度地区覆盖，仰角 $\geq 40^\circ$ 。

MEO 卫星：全球覆盖，轨道周期 12 小时，单星服务范围 $\pm 55^\circ$ 纬度。

备份策略：2023 年发射第 56 颗卫星作为在轨备份，提升系统可靠性。

（5）北斗全球组网完成标志：第 55 颗卫星发射

组网进程：

2020 年 6 月 23 日，长征三号乙运载火箭发射第 55 颗北斗三号卫星（GEO-3），完成 30 颗组网星座部署。

星座构成：3 颗 GEO（定点赤道）、3 颗 IGSO（倾角 55° ）、24 颗 MEO（高度 21,500 公里）。

服务能力：

全球定位精度 2.5 米（公开信号），亚太地区 1.2 米；授时精度 10 纳秒。

（6）北斗导航系统共发射 59 颗卫星

知识点：

卫星构成：

北斗一号（4 颗）：2000 - 2007 年发射，采用 GEO 轨道，提供区域性有源定位（精度 20 米）。

北斗二号（20 颗）：2007 - 2019 年发射，包含 14 颗 MEO+6 颗 GEO，实现亚太无源定位（精度 10 米）。

北斗三号（35 颗）：2017 - 2023 年发射，全球组网，MEO 卫星设计寿命 12 年，原子钟精度达 300 万年误差 1 秒。

星座特性：55 度倾角 MEO 星座（Walker 24/3/1 构型），保证全球任意地点可见 4 颗以上卫星。

（7）卫星导航频率申请有效期为 7 年

国际规则：

根据国际电信联盟（ITU）《无线电规则》，导航频段（如 L 波段 1559 - 1610 MHz）需在申请后 7 年内启用。

北斗与伽利略系统曾竞争 1176.45 MHz 频段，中国于 2009 年完成频率申报。

技术影响：倒逼中国加速卫星研制，北斗三号从立项到组网仅用 5 年。

（8）卫星导航频段竞争

背景与核心知识点：

2000 年，中国北斗与欧洲伽利略（Galileo）系统向国际电信联盟（ITU）申请相近频段（1561-1587MHz），引发国际协调。

频段争夺结果：

北斗通过提前发射试验卫星（2007 年）获得优先权，最终使用 B1 频段（1561.098MHz）。

伽利略调整至 1575.42MHz，与 GPS L1 频段部分重叠。

技术妥协：双方通过信号调制方式（BOC vs. MBOC）实现共存，避免干扰。

7. 中继卫星

（1）中国中继卫星研究始于 20 世纪 80 年代

技术发展历程：

1986 年完成中继卫星概念设计，提出“双星组网+地面站补充”方案，目标覆盖率达 85%。

1998 年突破星间高精度捕获与跟踪技术，天线指向精度达 0.01° ，相当于在 100 米外锁定一枚硬币。

2008 年天链一号 01 星发射，首次实现神舟七号飞船出舱活动全程直播，信号中断时间小于 2 秒。

国际地位：截至 2023 年，中国天链系统全球覆盖率超过 80%，仅次于美国 TDRSS 系统（覆盖率 95%）。

（2）中继卫星核心功能为通信服务

天链卫星系统：

天链一号 01 星（2008 年发射）：覆盖东经 77° ，为神舟七号航天员出舱活动提供实时视频传输，码率 1.5 Mbps，时延 1.2 秒。

天链二号 01 星（2019 年发射）：采用激光通信技术，速率 5 Gbps，可在 38 万公里地月距离下实现数据中继，误码率低于 10^{-9} 。

军事应用：2021 年某型高超音速武器试验中，天链卫星提供全程弹道数据中继，定位精度优于 10 米。

（3）2018 年 5 月鹊桥卫星升空：实现人类探月工程零突破

轨道设计：部署于地月拉格朗日 L2 点晕轨道，距月球约 6.5 万公里，利用三体引力平衡实现长期稳定运行。轨道维持燃料消耗极低，年均仅需 4 米/秒的速度增量。

通信技术：

采用 X 波段中继，上行速率 256 kbps，下行速率 2 Mbps。在嫦娥四号任务中，传输玉兔二号月球车拍摄的月背高清图像（分辨率 0.5 米），单张图像传输耗时不超过 3 分钟。

搭载低频射电频谱仪，在 1.1 - 40 MHz 频段探测宇宙黑暗时代信号，避开地球电离层干扰，灵敏度比地面观测提升 100 倍。

科学突破：2020 年通过鹊桥数据发现月球背面南极-艾特肯盆地存在大量橄榄石，证实该区域曾遭小行星撞击并暴露月幔物质。

8. 科学实验卫星

羲和号

首颗太阳探测科学技术实验卫星——羲和号

科学载荷：

H α 成像光谱仪：光谱分辨率 0.025 埃 (Å)，可捕捉太阳色球层耀斑爆发初期的氢原子巴尔末线发射 (波长 656.3 nm)，时间分辨率 1 秒。

太阳磁场望远镜：采用塞曼效应测量磁场强度，灵敏度 5 高斯，2022 年观测到黑子群 AR 12975 磁场强度达 3500 高斯。

轨道控制：使用离子电推进器 (比冲 3000 秒)，每年仅消耗 3 公斤氙气维持轨道，定位精度 ± 50 米。

夸父一号

我国综合性太阳探测专用卫星“夸父一号”

任务背景：夸父一号 (ASO-S) 于 2022 年 10 月 9 日发射，是我国首颗综合性太阳探测专用卫星，旨在研究太阳磁场、耀斑和日冕物质抛射的关联性。

科学载荷：

全日面矢量磁像仪：测量太阳光球层磁场，空间分辨率达 0.1 角秒，磁场灵敏度 1 高斯。

硬 X 射线成像仪：捕捉太阳耀斑的高能辐射，能量覆盖 30 - 200 keV，时间分辨率 0.1 秒。

莱曼阿尔法太阳望远镜：观测日冕物质抛射的紫外辐射，波长 121.6 nm，填补国际空白。

成果：2022 年 12 月发布的首批图像中，日珥爆发三维速度场重建精度达 ± 5 km/s，验证了载荷的先进性。

墨子号

(1) 墨子号承担星地量子纠缠分发实验

实验细节：

2017 年实现青海德令哈站与墨子号间量子纠缠分发，距离 1200 公里，链路损耗 -52 dB。

光子对纠缠效率达 80%，贝尔不等式检验结果 $S=2.37 \pm 0.09$ (经典极限 $S \leq 2$)，验证量子非定域性。

其他任务：

星地量子密钥分发：北京-乌鲁木齐间实现 7600 公里量子密钥传输，成码率 1.1 kbps。

量子隐形传态：将青藏高原地面站的光子量子态传至卫星，保真度达 80%。

(2) 墨子号有效载荷构成

背景与核心知识点：墨子号是全球首颗量子科学实验卫星。

核心载荷包括：

①量子纠缠源：每秒产生 600 万对纠缠光子 (波长 850nm)，保真度 >99%。

②纠缠发射机：采用 19.5cm 口径望远镜，星地链路损耗 35dB。

③量子密钥通信机：实现星地量子密钥分发 (QKD)，成码率 1.1kbps，用于无条件安全通信。

④控制处理机：协调卫星姿态 (精度 0.1 微弧度) 与实验时序。

(3) 墨子号未采用技术

背景与核心知识点：墨子号关键技术聚焦于量子通信实验。

实际应用技术：

①APT 系统 (捕获-瞄准-跟踪)：激光信标跟踪精度 $0.5 \mu\text{rad}$ ，建立 1.2Mbps 跟瞄链路。

②偏振补偿技术：通过反馈系统补偿大气扰动导致的偏振态漂移 (误差 <3%)。

③对撞技术差异：环形量子对撞需超大型装置 (如欧洲 LEP 对撞机周长 27km)，与卫星平台不兼容。

（4）墨子号地面站分工

背景与核心知识点：阿里站是墨子号核心地面站，海拔 5100 米，大气稀薄且光污染极低。

技术优势：

- ①唯一量子信号发射站：采用 1.2m 口径望远镜，光子发射效率>10%。
- ②隐形传态实验：2017 年实现星地量子态传输（距离 1200km），保真度 80%。
- ③地理意义：与青海德令哈站（接收站）配合，完成全球首个洲际量子密钥分发实验。

海洋二号系列

中国海洋动力环境卫星为“海洋二号”系列

海洋二号系列功能：

搭载微波散射计（测量海面风速精度 ± 2 m/s）、雷达高度计（测浪高精度 ± 0.3 米）、辐射计（海温分辨率 0.5°C ）。

全球观测周期缩短至 6 小时，台风路径预测误差从 100 公里降至 50 公里以内。

组网运行：

HY-2B（2018 年发射）：轨道高度 971 公里，倾角 99.3° ，覆盖全球海洋动力环境监测。

HY-2C（2020 年发射）：与 HY-2B 形成相位差轨道，提升数据更新频率至 3 小时。

HY-2D（2021 年发射）：实现三星编队，监测中尺度涡旋（直径 50-200 公里）的传播速度（ $0.1-0.5$ m/s）。

退役卫星：HY-2A（2011 - 2019 年服役）累计获取超过 800 万组海洋动力数据。

卫星互联网低轨星座——国网星座与千帆星座

知识背景：2025 年，中国低轨互联网星座部署迈入规模化组网阶段。两大低轨互联网星座——将拥有上千万颗卫星的国网星座与千帆星座（G60 星座）加速发射，成为推动中国 2025 年发射次数大幅增长的重要驱动力。这是中国对美国 SpaceX“星链”星座的积极回应，旨在抢占低轨卫星通信的战略资源与市场空间。

典型任务：2025 年全年，中国航天科技集团五院共成功发射 9 组卫星互联网低轨卫星。12 月 9 日，长征六号甲运载火箭成功将卫星互联网低轨 15 组卫星发射升空。预计 2026 年相关项目的发射次数将进一步提升。

星座规模与战略意义：中国已向国际电信联盟（ITU）申报约 20 万颗低轨卫星的频率和轨道资源，此举旨在抢占日益稀缺的低轨空间和通信频段资源。低轨互联网星座的规模化建设，将服务于全球宽带覆盖、应急通信、物联网等应用场景，有力支撑国家数字经济建设与航天强国战略。

实践二十九号卫星

任务概况：2025 年 12 月 31 日，在我国文昌航天发射场，长征七号改运载火箭成功将实践二十九号卫星 A 星、B 星发射升空，卫星顺利进入预定轨道。此次发射标志着 2025 年中国航天发射圆满收官。全年累计轨道级火箭发射 92 次，成功 90 次，失败 2 次（以入轨计成败）。

科学卫星星座——“科学特工队”

“悟空”“慧眼”“天关”等 8 颗科学卫星：2025 年，以“悟空”暗物质粒子探测卫星、“慧眼”硬 X 射线调制望远镜卫星、“天关”爱因斯坦探针卫星等为代表的 8 颗科学卫星组成“科学特工队”，在暂现天体、宇宙线传播、太阳爆发等领域取得系列重大科学突破，持续拓展人类认知边界。

太空探源科学卫星计划

计划概况：2025年，中国首次公布太空探源科学卫星计划，“鸿蒙”“夸父二号”等多项卫星任务将带领我们追溯宇宙起源、揭秘太阳活动，并寻找人类的第二家园。其中，“夸父二号”作为我国综合性太阳探测专用卫星“夸父一号”的后续任务，将进一步深化对太阳磁场、耀斑与日冕物质抛射关联性的研究。

空间站小型哺乳动物实验

任务背景与科学载荷：2025年10月，伴随神舟二十一号飞船升空，“小鼠航天员”进入中国空间站，成功执行中国首次空间站小型哺乳动物（小鼠）实验任务，为人类深空生存研究迈出关键一步。实验聚焦微重力环境下哺乳动物的行为学变化、骨骼肌肉萎缩机制及生殖发育适应性，为未来深空长期驻留和载人火星任务提供关键的动物模型数据支撑。

第三章 火箭

一、运载火箭的分类标准

1. 运载火箭分类标准

（1）国际分类体系

– LEO 运力分级：

- 小型（<2 吨）：如中国长征十一号（1 吨）、美国 Electron（0.3 吨）。
- 中型（2-20 吨）：覆盖 90% 商业发射需求，如长征七号（14 吨）、猎鹰 9（22.8 吨）。
- 大型（20-50 吨）：用于空间站舱段发射（长征五号 25 吨）。
- 重型（>50 吨）：如 SpaceX 星舰（150 吨）。

（2）中国实践特点

– 中型火箭技术：

- 模块化设计：长征六号改（固液捆绑）与长征七号（液氧煤油）共享通用芯级技术。
- 任务适配性：中型火箭可兼顾近地轨道（LEO）、太阳同步轨道（SSO）、地球同步转移轨道（GTO）任务。

2. 运载火箭分类误区

（1）技术现状分析

– 部分重复使用：

- 猎鹰 9 一级回收复用 15 次，但二级仍为一次性（成本占比 70%）。
- 中国朱雀二号完成垂直回收试验，复用周期目标 30 天。

– 完全复用瓶颈：

- 热防护系统寿命（如 SpaceX 星舰不锈钢蒙皮需耐受 20 次再入）。
- 发动机复用极限（YF-100 设计复用 10 次，实际验证中）。

（2）其他分类标准

– 推进剂类型：

- 固液混合火箭（长征六号改）比冲介于固体（250 秒）与液体（350 秒）之间。
- 轨道能力：
 - 亚轨道火箭（如中国“鲲鹏-1B”）最大飞行高度 180 公里，用于临近空间实验。

3. 载人火箭的可靠性设计

（1）可靠性标准与设计逻辑

- 载人火箭的严苛要求：
 - 国际标准：载人火箭可靠性需 $\geq 99.7\%$ ，即每 1000 次发射允许 ≤ 3 次失败。
 - 对比：非载人火箭（如长征五号）可靠性通常 $\geq 98\%$ ，允许更高风险以换取运载能力提升。
- 冗余系统设计：
 - 三重冗余：导航、控制、供电系统均配备三套独立模块，任意单点故障不影响整体功能。
 - 故障检测与隔离：实时监测系统状态，0.1 秒内切换备用设备（如神舟飞船的 GNC 系统）。

（2）逃逸系统的工程细节：

- 逃逸塔工作原理：
 - 逃逸塔配备固体火箭发动机，可在 2 秒内产生 70 吨推力，将飞船带离危险区（如发射台爆炸）。
 - 分离时序：火箭正常飞行 120 秒后逃逸塔自动分离，避免无效负重。

-历史验证：

- 2018 年俄罗斯“联盟 MS-10”发射失败，逃逸系统成功救出宇航员，证明冗余设计的必要性。

（3）可靠性 vs 成本平衡

- 载人火箭成本约为非载人火箭的 2-3 倍（如长征二号 F 造价约 2 亿美元），主要源于冗余系统和测试流程。

4. 长征火箭级数设计逻辑

（1）级数定义与典型型号

- 一级半构型：
 - 长征十一号：1 个固体芯级+1 个液体上面级，实现快速机动发射（海上平台适用）。
- 四级构型：
 - 长征二号 F：芯级三级+逃逸塔（传统分类为四级），总质量 480 吨，载荷 8 吨。

（2）级数优化的权衡

- 级数减少：结构简单、可靠性高，但比冲较低（固体燃料效率为液体燃料的 70%）。
- 级数增加：提升运力（如长征五号二级半构型实现 LEO 25 吨），但分离环节增多导致故障率上升。

二、中国长征系列火箭

长征二号 F：载人航天专用火箭（可靠性 99.7%）

1. 长征二号 F 运载火箭（CZ-2F）的技术细节

（1）基础参数与研制背景

- 起飞重量：

- 实际数据：长征二号 F 起飞重量为 494 吨（芯级+助推器），选项 D 的“600 吨”严重夸大（接近长征五号的 878 吨）。
 - 对比：长征二号 E（基础型号）起飞重量约 460 吨，改进后增重 34 吨以增强可靠性。
 - 研制路径：
 - 从长征二号 E 到 F：
 - 增加逃逸塔（重约 4 吨）和故障检测系统。
 - 冗余设计：控制系统从单通道升级为三冗余，单点故障率 $<0.1\%$ 。
- (2) 任务定位与功能扩展
- 唯一载人火箭：
 - 长征二号 F 是中国唯一通过载人航天安全认证的火箭，可靠性 $\geq 99.7\%$ （非载人火箭通常 $\geq 98\%$ ）。
 - 应用案例：神舟系列飞船（1999 年首飞）及天宫一号/二号空间实验室。
 - 多任务适配性：
 - 通过更换整流罩和载荷支架，可发射 8 吨级空间站舱段或大型卫星。

长征二号丁火箭第 100 次发射

里程碑意义：2025 年 9 月 29 日，长征二号丁运载火箭成功发射试验三十号卫星 01、02 星。此次任务是长二丁火箭自 1992 年首飞以来的第 100 次发射，成为继长征三号甲系列之后我国第二型突破百发的单一型号运载火箭，实现了“百发百胜”的完胜纪录，成功发射 300 余颗卫星。发射的卫星包括“悟空号”“墨子号”等科学卫星，还多次承担国际发射服务，是中国“金牌火箭”的杰出代表。

长征三号甲系列：高轨发射的“劳模”

长征三号甲系列发动机技术核心

- 氢氧第三级：YF-75 发动机（膨胀循环）可二次点火，实现地球同步轨道精准入轨（轨道半长轴误差 <10 公里）。
- 适应性改进：长征三号乙增强型（GTO 运力 5.5 吨）专为大型通信卫星设计，占据国际商业发射市场 30% 份额。

百次发射的可靠性验证

- 故障统计：截至 2023 年，长征三号甲系列成功率 97.3%，优于国际同类火箭（如阿里安 5 的 95%）。
- 快速发射能力：西昌发射工位实现年均 15 次高密度发射，支撑北斗全球组网（2020 年完成 30 颗卫星发射）。

长征四号系列：太阳同步轨道的“百发王者”

长征四号系列任务定位与技术特点

- 太阳同步轨道（SSO）专精：
 - 长征四号乙/丙型 SSO 运力 2.5 吨（500 公里），满足遥感卫星高频次发射需求。
 - 轨道倾角 $97^{\circ}\sim 98^{\circ}$ ，保证卫星每日同一时间过境，适用于环境监测、农业普查。
- 低成本改进：
 - 采用常温燃料（四氧化二氮/偏二甲肼），虽毒性高但维护简单，适合太原发射场（干旱少雨，减少燃

料泄漏风险)。

百发历程

- 阶段里程碑：
 - 1988 年首飞（风云一号气象卫星），至 2023 年达成 100 发，年均发射 3.3 次。
- 失败教训：
 - 2013 年长征四号乙因三级发动机涡轮泵故障失败，推动全箭振动监测系统升级。

长征五号：重型火箭（LEO 25 吨，GTO 14 吨）

1. 长征五号标志性数据的误区

(1) 长征五号真实运力

- 轨道能力：
 - GTO 运力：14 吨（地球同步转移轨道），22 吨为 LEO（近地轨道）运力。
 - 对比：猎鹰 9 GTO 运力 8.3 吨，长征五号是中国现役 GTO 运力最强火箭。
- 结构设计：
 - 5 米直径芯级：采用铝合金内胆+碳纤维缠绕技术，减重 10%并提升结构强度。

(2) 低温燃料与试验验证

- 液氢液氧技术：
 - 液氢温度-253℃（接近绝对零度），贮箱采用多层绝热材料（蒸发率<0.1%/天）。
- 地面试验：
 - 超过 20000 次试验涵盖振动、热真空、点火等，其中发动机试车累计超 10 万秒。

长征六号改：首型固液捆绑火箭（4 枚固体助推器）

1. 首型固液捆绑火箭——长征六号改

背景与核心知识点：

长征六号改的固液混合技术开创中国航天新纪元：

-推力曲线优化：

- 固体助推器在 0~60 秒提供 480 吨推力（占总量 70%），液体芯级在 60~600 秒持续输出 200 吨推力。
- 通过推力调节阀（流量调节范围 50%~105%）实现平滑过渡，加速度波动<±0.2g。

- 成本对比：

- 固体发动机单发成本 800 万元（液体发动机 YF-100 单台成本 2000 万元），全箭成本降低 25%。
- 贮存周期达 10 年（液体发动机需每 2 年检修燃料阀）。

2. 长征六号改首飞卫星数量

背景与核心知识点：

长征六号改作为中国首型固液捆绑火箭，2022 年 3 月 29 日首飞搭载：

- 浦江二号卫星：

- 技术参数：质量 180kg，轨道高度 500km SS0，搭载高光谱成像仪（光谱范围 400~2500nm，细分 128 个波段）。

- 应用成果：监测长三角 PM2.5 分布，空间分辨率达 10m，数据用于环保部污染源溯源。

- 天鲲二号卫星：

- 激光通信：采用 1550nm 波段，通信速率 10Gbps（地-星距离 1000km），误码率<1e-12。

- 材料实验：测试新型碳化硅复合材料在轨热变形（ $\Delta L/L < 5e-6$ ），为空间望远镜镜面制造提供数据。
- 固液协同控制技术：
 - 时序匹配：固体助推器点火后 60 秒分离，液体芯级 YF-100 发动机（推力 1220kN）接力工作，推力波动 $\pm 1.5\%$ 。
 - 振动抑制：采用主动阻尼系统，将固体发动机引起的箭体振动（峰值 20g）降至 5g 以下。

3. 长征六号改固体助推器数量

背景与核心知识点：

4 枚固体助推器是长六改的核心动力模块，技术细节如下：

- 推进剂技术：
 - HTPB 配方：由 68%高氯酸铵（氧化剂）、20%铝粉（燃料）、12%粘结剂组成，比冲 250s（海平面）。
 - 药柱成型：分段浇注工艺，单段药柱长 2.5 米，直径 2 米，固化温度 $65 \pm 1^\circ\text{C}$ （精度 0.5°C ）。
- 结构力学：
 - 捆绑接头：采用 TC4 钛合金（抗拉强度 895MPa），通过 12 组径向销钉连接，承受 2000 吨轴向载荷和 500 吨侧向载荷。
 - 热防护：外覆碳纤维-酚醛复合材料（厚度 15mm），耐受 3000°C 燃气冲刷 120 秒。
- 飞行数据：
 - 助推器工作 60 秒，提供 480 吨推力，助推段平均加速度 $4.5g$ ，分离时速度达 1.8km/s 。

4. 长征六号改健康诊断系统尺寸

背景与核心知识点：

B5 尺寸（ $176 \times 250\text{mm}$ ）集成系统的技术突破：

- 硬件架构：
 - FPGA 芯片：Xilinx Ultrascale+系列，处理速度 1.5Tbps，并行处理 128 路传感器信号。
 - 多核 DSP：TI TMS320C6678，8 核 1.25GHz ，运行故障诊断算法（响应延迟 $< 1\text{ms}$ ）。
- 算法创新：
 - 深度神经网络模型：基于 10 万组历史发动机数据训练，可识别 30 类故障模式（如涡轮泵裂纹、燃烧不稳定）。
 - 实时诊断：振动频谱分析（分辨率 0.1Hz ）结合温度梯度监测（精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ），故障检出率 $> 99.9\%$ 。

长征七号：货运飞船专属火箭（LEO 14 吨）

1. 长征七号运载火箭类型

背景与核心知识点：

中型运载火箭的典型代表，技术特征如下：

- 动力系统：
 - YF-100 发动机：液氧煤油闭式循环，室压 18MPa（高于俄罗斯 RD-180 的 16.7MPa），比冲 300s。
 - 模块化设计：3.35 米直径芯级+2.25 米助推器，支持快速组装（总装周期从 60 天缩至 20 天）。
- 环境适应性：
 - 雨中发射：箭体表面涂覆疏水材料（接触角 $> 150^\circ$ ），电气系统 IP67 防护等级，可承受 50mm/h 降雨。
 - 防风能力：活动发射平台配备液压锁紧装置，可在 8 级风（风速 20m/s ）下稳定转运。

2. 长征七号甲的技术升级

背景与核心知识点：

长征七号甲（CZ-7A）的技术升级：

– 三级构型优化：

- 氢氧末级：2 台 YF-75 发动机（单台推力 78.5kN，比冲 435s），工作时间 892 秒。
- 轨道精度：GTO 入轨半长轴偏差<5km，倾角误差<0.05°。

– 任务适配性：

- 中星 26 号发射：GTO 运力 7 吨，卫星质量 5.8 吨，搭载 Ka 波段载荷（通信容量 100Gbps）。
- 深空探测：可为嫦娥七号提供地月转移轨道（ ΔV 3.1km/s）发射能力。

长征八号甲首飞成功

任务时间与地点：2025 年 2 月 11 日，长征八号甲运载火箭在海南文昌航天发射场成功完成首飞，也是 2025 年中国新型火箭首飞的重要标志。这是为配合低轨互联网星座大规模组网需求而研制的新一代中型运载火箭，在 2025 年当年就成功实施了 6 次发射，刷新了同类型火箭首发年发射次数纪录。

技术参数：长征八号甲是长征八号的升级版，沿用一级火箭和助推器，二级火箭升级为更粗更强的箭体，运载能力从 5 吨提升至 7 吨。主要针对中低轨巨型星座组网需求研制，实现了可靠的“7 天发射、7 天恢复”高密度发射能力。

技术创新：

全流程自动化：发射流程由手动操作转为“全流程自动化”，只要流程设置正确即可自动执行，大幅减轻了操作者压力和风险。

起飞主动飘移技术：首创发射时平稳向远离塔架方向飘移，避免碰撞风险。

过冷液氧加注技术：让火箭承载更多燃料，增加发动机推力。

锂离子电池替代：用寿命更长的锂离子电池取代传统锌银电池。

战略意义：长征八号甲在海南国际商业航天发射中心拥有专用发射位，无需排队等待，未来将成为商业航天的主力运载工具。其煤油燃料已从石油基转向煤基煤油，在成本上具有显著优势。

里程碑事件：2025 年 10 月 16 日，长征八号甲运载火箭在文昌航天发射场执行飞行任务，成为自 1970 年长征一号将东方红一号卫星送上太空以来的长征系列第 600 次发射。从第一个 100 发到第六个 100 发，“长征”系列火箭的发射速度持续加快，标志着中国航天已进入高密度发射新时代。

长征九号重型运载火箭

我国正在研制的长征九号重型运载火箭，近地轨道运载能力约 140 吨。其中一级重复使用构型计划 2030 年首飞，两级完全重复使用构型计划 2033—2035 年首飞。

长征十二号甲

背景与任务概况：2025 年 12 月 23 日，长征十二号甲遥一运载火箭在酒泉卫星发射中心的东风商业航天创新试验区发射升空。火箭由上海航天技术研究院研制，采用两级设计，以液态甲烷与液态氧为推进剂，全长约 70

米、直径 3.8 米。具备将 5-6 吨级有效载荷送入太阳同步轨道或近地轨道的能力，是中国新世代中型运载火箭的重要代表。

回收验证与挑战： 发射任务中，二级进入预定轨道，但一级回收验证过程中发生异常燃烧，未实现预期软着陆。尽管回收试验受挫，业内对此表现出理性宽容。专家指出，“我们在回收方面的能力有待进一步突破”，回收过程积累的丰富数据为后续试验提供了良好基础。12 月 3 日朱雀三号遥一首飞试验同样未能完成一级回收。全球范围内，成功实施轨道级火箭回收的仅“猎鹰 9 号”和“新格伦”等少数型号。

三、发射场与发射技术

1. 文昌发射场（低纬度优势）

长征七号首次发射场——文昌航天发射场

背景与核心知识点：

文昌航天发射场是中国首个低纬度（北纬 $19^{\circ} 37'$ ）滨海发射基地，于 2014 年建成，其战略意义远超传统内陆发射场：

- 低纬度优势：
 - 地球自转线速度：文昌线速度达 463m/s（酒泉为 408m/s），节省燃料提升运力。例如，长征七号 LEO 运力达 14 吨，比同等火箭在酒泉发射提升约 1.5 吨。
 - 轨道倾角适配：向东发射可覆盖 $0^{\circ} \sim 19^{\circ}$ 倾角轨道，特别适合发射空间站舱段（如天和核心舱需 51.6° 倾角，通过文昌发射更高效）。
- 海运技术突破：
 - 运输限制：长征七号芯级直径 3.35 米，陆运受铁路隧道直径（3.5 米）限制，而海运采用专用滚装船（如“远望 21 号”），舱内净高 16 米，可运输直径 5 米箭体。
 - 防腐设计：箭体表面喷涂纳米级防盐雾涂层，抵御南海高湿度（年均湿度 85%）和盐雾腐蚀。
- 环保与安全系统：
 - 导流槽技术：双层钢板混凝土结构，内置水冷系统，可承受 3000°C 高温燃气（流量 2000 吨/秒），降温速率达 $500^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ 。
 - 降噪系统：30 秒内喷射 2000 吨水，声压级从 190dB 降至 140dB 以下，保护周边生态环境。
- 任务案例：2021 年天舟三号货运飞船发射，运载 6.6 吨物资至空间站，轨道精度偏差仅 0.001° 。

2. 酒泉发射中心

（1）酒泉：载人航天的“绝对堡垒”

- 内陆发射优势：
 - 火箭残骸落区为巴丹吉林沙漠，人烟密度 <0.1 人/平方公里，保障民众安全。
- 垂直总装测试厂房（VAB）：
 - 高 93 米，可同时组装 2 枚长征二号 F 火箭，支撑神舟系列每年 1-2 次的密集发射。

（2）载人任务全流程

- 航天员应急救援：
 - 发射场周边部署 6 个应急着陆区，配备直升机、医疗队实现 15 分钟快速响应。
- 历史地位：

- 2003 年杨利伟搭乘神舟五号升空，使中国成为全球第三个独立掌握载人航天技术的国家。

3. 太原卫星发射中心（太阳同步轨道专精）

1. 太原卫星发射中心定位

背景与核心知识点：

太原发射场（北纬 $38^{\circ} 50'$ ）专精太阳同步轨道（SSO）发射：

- 轨道力学优势：
 - 倾角自然形成：向东北发射（方位角 $95^{\circ} \sim 110^{\circ}$ ），利用地球自转补偿倾角需求，节省 ΔV 约 50m/s。
 - 重访周期：高度 500km SSO 轨道重访周期 7 天，适合高频次对地观测（如吉林一号每日覆盖全球两次）。
- 典型任务案例：
 - 2022 年一箭 16 星：采用“多星适配器”分层布局（4 层 $\times$ 4 星），分离时序误差 < 0.05 秒，卫星间距 > 50 km 避免碰撞。
 - 环境监测：风云三号 E 星（2021 年发射）搭载微波温度计（53.6GHz $\sim$ 57.3GHz），反演大气温度廓线精度 1K。

4. 西昌发射中心

（1）纬度与轨道力学：

- 低纬度红利：
 - 西昌北纬 28° ，地球自转线速度更大（约 410m/s），节省燃料提升运力（同等火箭 LEO 运力增加 5%）。
 - 对比：酒泉（北纬 40° ）更适合极地轨道，文昌（北纬 19° ）更适合地球同步轨道，但西昌在 2007 年是唯一具备地月转移轨道能力的发射场。
- 轨道倾角匹配：
 - 嫦娥一号需进入地月转移轨道（倾角 28.5° ），与西昌纬度匹配，减少轨道调整能耗。

（2）历史任务积累：

- 测控网络布局：
 - 西昌配套喀什、佳木斯深空测控站，形成对月球探测器的连续跟踪覆盖。
- 气候条件：
 - 年均晴天数 320 天，减少发射窗口受天气影响概率。

5. 海上发射技术（热发射 vs 冷发射）

1. 海上发射的经济性误区

（1）海上发射的核心优势

- 赤道发射效益：
 - 地球自转线速度在赤道最大（约 465m/s），可提升 LEO 运力约 15%（如捷龙三号 LEO 运力 1.5 吨增至 1.7 吨）。
- 安全与环保：
 - 残骸落区：火箭助推器、整流罩等溅落公海，无需陆上疏散（如 2022 年捷龙三号发射残骸落入东海）。

（2）热发射 vs 冷发射

- 技术差异：

- 热发射：火箭发动机直接点火（如捷龙三号），需发射平台动态稳定（抗风浪设计）。
- 冷发射：借助外部动力弹射火箭至空中点火（如潜射导弹），依赖发射筒密闭保护。
- 海况影响：热发射时，火箭直接暴露于平台，需通过液压平衡系统抵消海浪颠簸（精度 $\pm 0.5^\circ$ ），而非依赖发射筒。

6. 可重复使用技术

1. 中国可重复使用航天器进展

（1）中国已实现的技术突破

- 空天飞机：- 2020 年可重复使用试验航天器在轨飞行 2 天，验证自主返回、热防护（表面温度 1800℃ 耐受）。
- 2023 年亚轨道重复使用运载器实现“入轨-返回-复用”全流程。
- 火箭垂直回收：朱雀三号完成 10 公里级垂直起降试验，悬停精度 ± 0.05 米。

（2）关键技术方向

- 发动机复用：YF-100K 液氧煤油发动机通过 50 次点火测试，目标复用 20 次。
- 热防护材料：新型碳陶复合材料（C/SiC）可耐受 1600℃ 高温，较传统铝合金减重 60%。

7. 朱雀三号（不锈钢箭体）

1. 朱雀三号火箭材料选择：不锈钢的工程优势

材料特性与成本分析：

- 耐高温性能：
 - 不锈钢（304 型）熔点为 1400℃，显著高于铝合金（660℃），可承受火箭再入大气层时的高温摩擦（约 1200℃）。
 - 热防护简化：高温耐受性降低了对隔热涂层的依赖，例如 SpaceX 星舰采用不锈钢后，仅需少量陶瓷瓦覆盖关键部位。
- 经济性优势：
 - 成本对比：不锈钢材料单价约 2 万元/吨，而碳纤维复合材料单价超 100 万元/吨（碳纤维需复杂编织工艺及高温固化）。
 - 全生命周期成本：可重复使用火箭需材料具备高耐久性，不锈钢在多次回收后仍能保持结构强度，降低维护成本。

工程实践案例

- SpaceX 星舰的验证：
 - 2019 年 SpaceX 放弃碳纤维方案，改用 304L 不锈钢（添加钼元素增强耐腐蚀性），箭体强度提升且制造周期缩短 60%。
 - 星舰采用不锈钢后，可承受液氧甲烷发动机的高频次点火（不锈钢导热系数低，减少燃料预冷需求）。

第四章 深空探测

一、探月工程（嫦娥系列）

1. 探月工程阶段划分

四期工程技术演进

- 一期（2007-2010）：
 - 嫦娥一号（CCD 立体相机分辨率 120 米）、嫦娥二号（7 米分辨率，拓展至日地 L2 点）。
- 二期（2013-2018）：
 - 嫦娥三号（虹湾着陆，玉兔号巡视器）、嫦娥四号（艾特肯盆地着陆，首探月球背面）。
- 三期（2020-2024）：
 - 嫦娥五号（风暴洋采样）、嫦娥六号（极区采样）。
- 四期（2024-2030）：
 - 嫦娥七号（飞跃探测）、嫦娥八号（资源利用验证），支撑 ILRS 建设。

2. 嫦娥工程四期任务规划

（1）探月四期工程目标

- 嫦娥六号：
 - 月球极区采样返回：瞄准月球南极-艾特肯盆地（SPA 盆地），该区域可能存在古老月壤与水冰混合物，采样量目标 2 公斤，较嫦娥五号（1.731 公斤）提升 15%。
 - 国际合作：搭载法国氦气探测器、意大利激光角反射器等 4 项国际载荷。
- 嫦娥七号：
 - 阴影坑飞跃探测：配备可跳跃巡视器，利用月面低重力（地球 1/6）实现单次跳跃距离 100 米，探测永久阴影区（PSR）水冰分布。
 - 高精度着陆：激光三维成像避障系统将着陆精度从百米级提升至米级。
- 嫦娥八号：
 - 原位资源利用（ISRU）：验证月壤 3D 打印建造技术，利用月壤制备太阳能电池板（光电转化效率目标 10%）。
 - 国际月球科研站（ILRS）：计划 2030 年前与俄罗斯、阿联酋等国共建，具备长期驻留能力（支持 3 人/180 天）。

3. 绕（嫦娥一号）、落（嫦娥三号、四号）、回（嫦娥五号、六号）

（1）“绕”阶段的定义与工程定位

①阶段划分

- 嫦娥工程“三步走”战略中的第一步，是探月工程的基础性任务，目标是通过环绕探测获取月球全局性科学数据，为后续“落”和“回”阶段提供支持。
- 核心任务：发射绕月探测器，实现月球全球遥感探测，建立月球三维影像与资源分布图谱。

②时间跨度与代表性任务

- 主要任务：嫦娥一号（2007 年）、嫦娥二号（2010 年）。
- 里程碑意义：
 - 嫦娥一号：中国首颗月球探测卫星，使中国成为全球第五个独立发射探月卫星的国家。
 - 嫦娥二号：分辨率更高的全球成像，并拓展至深空探测任务。

(2) “绕”阶段的核心工程目标

①技术突破

- 轨道设计与控制：
 - 地月转移轨道：精确计算地球至月球的转移轨道，确保探测器被月球引力捕获。
 - 环月轨道维持：通过发动机点火调整轨道，保持探测器在 200 公里高度的极轨圆轨道（嫦娥一号）。
 - 低轨探测：嫦娥二号曾降至 100 公里×15 公里的椭圆轨道，实现局部高分辨率成像。
- 有效载荷集成：
 - 搭载 CCD 立体相机、激光高度计、微波探测仪等科学仪器，实现多波段、多维度探测。
- 深空测控能力：
 - 建立中国首个深空测控网（喀什、佳木斯站），突破远距离通信、高精度定轨等技术。

③科学任务

- 全月面地形测绘：
 - 利用 CCD 相机与激光高度计，绘制全球分辨率 120 米的月面三维影像（嫦娥一号）。
 - 嫦娥二号分辨率提升至 7 米，局部区域达 1 米，完成虹湾预选着陆区高清测绘。
- 月球物质成分分析：
 - 通过 γ/X 射线谱仪探测月表元素（如铀、钍、钾、钛等）分布。
 - 微波探测仪首次获取月球土壤厚度与氦-3 资源分布数据。
- 空间环境探测：
 - 监测月球轨道的高能粒子、太阳风离子等环境参数，研究月表辐射特性。

④工程验证

- 验证长征三号甲运载火箭的可靠性（嫦娥一号）、长征三号丙运载火箭的精准入轨能力（嫦娥二号）。
- 测试探测器热控、电源（太阳能帆板+蓄电池）等系统在月球极端环境下的稳定性。

(3) “绕”阶段任务实例与成果

①嫦娥一号任务（2007 年）

- 运行时间：2007 年 10 月 24 日发射，2009 年 3 月受控撞月结束任务。
- 科学成果：
 - 发布全球首幅全月球影像图与三维数字高程模型。
 - 探测月球土壤平均厚度为 5-6 米，估算氦-3 储量约 100 万吨。
 - 发现月球正面与背面的元素分布差异，揭示月亮演化线索。

②嫦娥二号任务（2010 年）

- 任务拓展：
 - 完成月球探测后，飞往日地拉格朗日 L2 点（2011 年），成为世界首个从月球轨道飞向深空的探测器。

- 2012 年对图塔蒂斯小行星进行近距离（3.2 公里）飞越探测，获取高分辨率影像。
- 技术突破：
 - 验证 X 波段深空测控技术，通信距离突破 1000 万公里。
 - 实现小行星探测轨道设计与高精度导航控制。

(4) “绕”阶段的意义与影响

①技术奠基：

- 突破地月转移轨道设计、深空测控、多载荷集成等关键技术，为后续“落”阶段（嫦娥三号、四号）提供轨道数据与着陆区地形支持。
- 验证中国自主研发的探月卫星平台，形成标准化深空探测器设计体系。

②科学贡献：

- 填补月球全球性基础数据的空白，为国际月球科学研究提供重要资料（如氦-3 资源评估）。
- 揭示月球表面撞击坑分布、月海与高地的物质差异，深化对月球形成与演化机制的理解。

③工程体系完善：

- 构建覆盖探测器研制、发射、测控、数据处理的全链条探月工程能力。
- 推动中国航天从近地空间迈向深空探测，为后续火星探测（天问系列）奠定技术基础。

“绕”阶段是嫦娥工程的起点，通过全球遥感探测，中国首次系统掌握了月球环境与资源分布，并突破深空探测核心技术，标志着中国航天正式进入深空探测时代。其成果不仅为后续任务提供数据支撑，更为人类月球科学研究作出了重要贡献。

嫦娥一号

(1) 嫦娥一号：中国探月的起点

①技术突破与科学载荷

- 立体成像系统：
 - 搭载 CCD 相机与激光高度计，通过绕月 200 圈完成全月面三维测绘。
 - 分辨率 120 米，虽低于后期任务，但首次实现全月覆盖。
- 数据传回技术：
 - 使用 X 波段测控系统，传输速率 3Mbps，耗时 13 天完成全月数据回传。

②任务遗产

- 轨道设计创新：
 - 采用“调相轨道”策略，通过 3 次近地点变轨进入地月转移轨道，节省燃料 20%。
- 国际合作：
 - 数据共享给 ESA 及 NASA，推动全球月球地质研究。

(2) 嫦娥一号任务性质

- 任务特点：

- 绕月探测：嫦娥一号（2007 年）是中国首颗绕月卫星，未执行软着陆。
- 撞击月面：2009 年 3 月 1 日按计划撞击月球丰富海区域（东经 52.36°，南纬 1.50°），属硬着陆（速度

1.68km/s)，非科学意义的“触及”。

– 技术突破：

- 首次实现月球三维影像测绘（分辨率 120 米），探测月壤厚度（5-15 米）及氦-3 分布。

(5) “落”阶段的定义与工程定位

①阶段划分

- 嫦娥工程“三步走”战略中的第二步，位于“绕”（环绕探测）之后、“回”（采样返回）之前。
- 核心任务：实现月面软着陆与巡视勘察，为后续采样返回任务奠定技术基础。

②时间跨度与代表性任务

- 主要任务：嫦娥三号（2013 年）、嫦娥四号（2019 年）。
- 里程碑意义：中国成为全球第三个实现月面软着陆的国家（嫦娥三号），并首次实现月球背面着陆（嫦娥四号）。

(6) “落”阶段的核心工程目标

①技术突破

- 软着陆技术：
 - 挑战：月球无大气层，无法通过空气阻力减速，需依赖反推发动机与着陆缓冲机构精准控制。
 - 关键技术：
 - 7500N 变推力发动机：实现着陆过程的动力减速与悬停避障。
 - 自主导航与避障系统：通过激光三维成像、光学相机等实时分析地形，避开障碍物（如陨石坑、岩石）。
 - 着陆缓冲机构：采用四条着陆腿与吸能材料，吸收冲击力，确保探测器安全触月。
- 巡视勘察技术：
 - 月球车（玉兔号）研制：突破月面移动、能源供给（太阳能+核电池）、极端温控（月昼约 127℃、月夜-183℃）等技术。
 - 月面通信：通过着陆器与地球建立直接通信链路（嫦娥三号），或借助中继星“鹊桥”实现月球背面通信（嫦娥四号）。

②科学任务

- 月表环境探测：
 - 分析月壤成分、月岩分布、月表辐射等（如嫦娥三号的 α 粒子 X 射线谱仪）。
- 地质结构研究：
 - 通过测月雷达探测月壳浅层结构（如嫦娥四号对月球背面艾特肯盆地的探测）。
- 天文观测：
 - 利用月面低噪声环境开展低频射电天文实验（嫦娥四号搭载的荷兰低频射电探测仪）。

③工程体系建设

- 测控通信系统：构建深空测控网（佳木斯、喀什等地面站），支持远距离精确控制。
- 运载能力提升：长征三号乙运载火箭的可靠性验证。
- 国际合作：嫦娥四号搭载德国中子辐射计、瑞典中性原子探测仪等国际载荷，推动科学数据共享。

(7) “落”阶段任务实例与成果

①嫦娥三号任务（2013 年）

- 着陆地点：月球正面虹湾地区。
- 成果：
 - 实现中国首次地外天体软着陆与巡视探测。
 - 发现月球玄武岩区域的新型月壤类型。
 - 玉兔号月球车累计行驶 114.8 米，传回大量高分辨率影像与科学数据。

②嫦娥四号任务（2019 年）

- 着陆地点：月球背面南极-艾特肯盆地（冯·卡门撞击坑）。
- 突破性技术：
 - 首颗地月 L2 点中继星“鹊桥”实现月球背面与地球通信。
 - 采用新型同位素热源（钷-238）保障月夜生存能力。
- 科学发现：
 - 揭示月球背面月幔物质组成，为月球演化历史提供新证据。
 - 首次获得月球背面低频射电天文观测数据。

(8) “落”阶段的意义与影响

①技术跨越：

- 突破地外天体着陆与巡视技术，跻身世界航天强国前列。
- 为后续“回”阶段（嫦娥五号、六号）的月面采样、起飞上升等任务提供技术验证。

②科学贡献：

- 填补月球背面探测空白，推动月球地质演化、宇宙早期环境等研究。
- 验证月面原位资源利用（如太阳能、月壤）的可行性，为未来月球基地建设提供参考。

③工程体系完善：

- 形成覆盖探测器设计、发射、测控、科学载荷研制的完整探月工程能力。
- 推动中国深空探测技术标准与国际合作机制的建立。

嫦娥三号

（1）中国首颗落月探测器——嫦娥三号

- 技术里程碑：

- 变推力发动机：7500N 至 1500N 连续调节，悬停避障阶段耗时 30 秒，着陆精度±100 米。
- 着陆缓冲机构：四条腿式设计，吸收冲击能量（触月速度≤4m/s），适配月壤承重（0.5kg/cm²）。
- 月基观测：
 - 月基光学望远镜（口径 150mm）累计观测超 7000 小时，发现暂现源（如伽马暴）12 例。

- 玉兔号月球车：

- 设计寿命 3 个月，实际运行 31 个月，行驶轨迹揭示虹湾地区月壤厚度（5-15 米）与成分。

（2）月球首次地球空间环境观测——嫦娥三号

- 月基极紫外相机（PEUV）：
 - 观测目标：地球等离子体层（3 万~7 万公里高度），监测太阳风与磁层相互作用。
 - 数据成果：发现等离子体层膨胀收缩周期与太阳活动强度相关，为空间天气预报提供模型参数。
- 延伸应用：
 - 数据共享全球 30 余家科研机构，支撑《地球空间天气白皮书》编制。

（3）嫦娥三号着陆技术

- 着陆流程：
 - （1）动力下降：7500N 变推力发动机点火，速度从 1.7km/s 降至悬停。
 - （2）悬停避障：激光三维成像系统扫描月面，选择平坦着陆点。
 - （3）缓速下降：发动机推力降至 1500N，垂直速度<3m/s。
 - （4）着陆缓冲：“四腿式”机构吸收冲击，触月速度 $\leq 4\text{m/s}$ 。
- 技术难点：
 - 月球无大气，全程依赖反推发动机，燃料消耗占总质量 70%。

（4）嫦娥三号发射时间

- 任务节点：
 - 2013 年 12 月 2 日由长征三号乙运载火箭发射，12 月 14 日着陆月球虹湾（北纬 44.12°，西经 19.51°）。
 - 着陆精度：距预定目标点仅 100 米，创国际最高精度。
- 科学载荷：
 - 月基光学望远镜（首次月球天文观测）、极紫外相机（地球等离子体层监测）。

（5）嫦娥三号月壤探测

- 探测技术：
 - 测月雷达（LPR）分低频（40-80MHz）与高频（500-750MHz）通道，低频穿透深度达 330 米，揭示月壤分层及次表层岩石结构。
 - 绘制着陆区地质剖面图，发现月海玄武岩层厚度差异，为月球火山活动史研究提供数据。
- 科学成果：
 - 首次证实月球雨海区域存在多层月壤结构，推测由陨石撞击和火山喷发交替形成。

（6）嫦娥三号奖项误区

- 实际奖项：
 - 2017 年获国家科学技术进步奖一等奖（编号 J-23101-1-01）。
 - 自然科学奖定位：侧重基础理论（如数学、物理），科技进步奖表彰工程应用。
- 任务成就：
 - 着陆器仍在工作，月基望远镜累计观测超 7000 小时，发现宇宙暂现源（如伽马暴）12 例。

（7）嫦娥三号着陆区的新型岩石发现

- 月海地质背景：
 - ①月海形成：
 - 月球正面“月海”是 30-40 亿年前火山喷发形成的玄武岩平原，覆盖约 17%月表。
 - 雨海（Mare Imbrium）直径约 1145 公里，由多次火山熔岩流填充形成，厚度达 1.2 公里。
 - ②玄武岩特性：
 - 成分：富含铁、钛、镁，含钛铁矿（ FeTiO_3 ）和橄榄石（ $(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$ ）。

- 差异：嫦娥三号玄武岩的钛含量（ TiO_2 约 5%）显著高于阿波罗样本（1-3%），属“高钛玄武岩”。

玉兔号月球车

1. 任务概况与关键节点：

发射与着陆：

2013 年 12 月 2 日，玉兔号搭载嫦娥三号探测器，由长征三号乙运载火箭从西昌卫星发射中心发射升空。

2013 年 12 月 14 日，嫦娥三号成功在月球正面雨海东北部的虹湾地区实现软着陆。这是自 1976 年以来人类探测器首次实现月面软着陆。

2013 年 12 月 15 日，玉兔号月球车与着陆器分离，通过转移机构平稳驶抵月球表面，正式开始巡视探测。

任务寿命：

玉兔号的设计寿命仅为 3 个月（约 90 个地球日）。

实际运行时间远超预期，从 2013 年 12 月 15 日驶上月面开始工作，到 2016 年 7 月 31 日正式停止工作并进入永久休眠状态，累计工作了 972 天（约 31 个月），超期服役 19 个月之久。

2. 科学目标与探测任务：

玉兔号的核心使命是对月球表面进行综合科学探测，主要科学目标包括：

月表形貌与地质构造调查：利用搭载的全景相机，拍摄着陆区周围的高分辨率立体图像，绘制详细的地形地貌图，研究月面撞击坑、岩石分布、玄武岩流等地质特征。

月壤成分与资源勘察：使用粒子激发 X 射线谱仪（APXS）和红外成像光谱仪分析月壤和岩石的化学成分、矿物组成。任务中发现了新型富橄榄石玄武岩，并对月球上氦-3 等潜在战略资源的分布进行了探测。

月壤物理特性与地下结构探测：这是玉兔号最具开创性的工作之一。它携带的测月雷达（探地雷达）首次在月球表面实现了月壤层下百米深度的穿透探测，绘制了月球浅层地质剖面图，揭示了月壤的厚度、分层结构（如细颗粒土壤层、碎石层、下伏的玄武岩层）以及潜在的月壳结构信息。

月表环境监测：监测月球表面的极端温度变化（记录到从 -180°C 到 $+150^{\circ}\text{C}$ 的巨大温差）、空间辐射强度以及月球微弱的磁场环境，为未来载人登月任务提供重要的环境数据和防护依据。

3. 技术突破与生存设计：

玉兔号在严酷的月球环境下工作，其设计体现了多项关键技术突破：

极端环境耐受能力：

热控系统：这是确保玉兔号能在长达 14 天、温度低至 -180°C 的月夜中存活的关键。系统采用了放射性同位素热源（钷-238）提供基础热量，并结合先进的两相流体回路技术，将热量高效地传导到关键部件，保证月夜期间舱内核心温度不低于 -50°C 。月昼高温时则通过散热面散热。

防护设计：车体覆盖特殊的“黄金甲”涂层，有效反射太阳强辐射。采用六轮独立驱动和摇臂悬架结构，赋予其强大的地形适应能力，能够爬越 20° 的斜坡、跨越 20 厘米高的障碍物。

能源与休眠唤醒机制：

要依靠太阳能驱动，配备锂离子蓄电池储存能量。

在月夜来临前，会收拢太阳翼覆盖在车体上方，起到保温作用，同时进入休眠模式以最大限度节省能源。当月昼再次来临时，太阳翼展开接收光照，设备自主唤醒并恢复工作。

自主导航与避障：

结合地面遥控指令和车载自主系统进行导航。利用导航相机获取周围环境图像，避障相机识别前方障碍物（如大于 20 厘米的岩石或大于 2 米的陨石坑），然后由自主系统规划出安全的移动路径。

4. 运行历程与故障应对：

重大故障： 在 2014 年 1 月（即首次月夜休眠唤醒后），玉兔号遭遇了严重的机构控制异常，导致其移动系统失效，无法继续行驶。地面控制团队进行了持续的努力和修复尝试。

顽强工作： 尽管失去了移动能力，玉兔号的科学载荷大部分仍能正常工作。地面团队将其状态调整为定点探测平台。玉兔号以顽强的毅力，在原位置继续坚持进行了长达两年多的科学探测任务。

数据成果： 在整个任务期间（包括移动期和定点期），玉兔号累计向地球传回了约 7TB 的宝贵科学探测数据。

5. 重大科学发现：

揭示月球地质演化多样性： 在虹湾着陆区发现了**新型富橄榄石玄武岩，其矿物组成与以往阿波罗计划和月球号计划采集的样品有所不同，表明月球历史上的火山活动具有更丰富的区域多样性。

探寻月球水冰与外源物质： 虽然玉兔号及其着陆器的探测结果当时为月球该区域“无水”提供了直接证据，但也在一些陨石坑中发现了可能来自碳质球粒陨石的“外来”物质痕迹，这些物质可能含有含水矿物，为研究地外水源向月球的输送机制提供了线索。

建立月壤特性基准： 玉兔号对月壤物理性质（如密度、粒度）和化学成分的原位精确测量，为校准全球月球遥感探测数据提供了关键的地面真值参考，极大提高了利用遥感数据解译月球资源分布的精度。

— 玉兔号科学载荷：

（1）粒子激发 X 射线谱仪（APXS）：

- 通过 α 粒子轰击月壤，检测激发出的特征 X 射线，分析元素丰度（如 Fe、Ti、Al、Si）。
- 发现雨海玄武岩钛铁矿含量高达 15%（阿波罗任务最高仅 12%）。

（2）红外成像光谱仪（VNIS）：

- 波长范围 0.45–2.4 μm ，识别橄榄石（吸收峰 1.05 μm ）、辉石（吸收峰 1.8 μm ）等矿物。
- 数据表明雨海玄武岩橄榄石占比约 20%，形成于慢速冷却的岩浆环境。

嫦娥四号

嫦娥四号探测器组成

系统功能分工

- 着陆器：
 - 搭载地形地貌相机（分辨率 0.3 米）、低频射电频谱仪（探测 0.1–40MHz 射电信号）。
 - 提供月面定位基准，为巡视器导航。
- 玉兔二号巡视器：
 - 配备探月雷达（探测深度 100 米）、红外成像光谱仪（矿物分析精度 0.1mm）。
 - 采用六轮摇臂式移动系统，越障高度 200mm，爬坡角度 20°。
- 鹊桥中继星：
 - 首次实现地月 L2 点中继通信，设计寿命 5 年，已超期服役 3 年。

（9）“回”阶段的定义与工程定位

①阶段划分

- 嫦娥工程“三步走”战略的最终阶段，目标是实现月球样品自动采集并安全返回地球，完成“绕、落、回”闭环。
- 核心任务：突破月面采样封装、月面起飞、月球轨道交会对接、高速再入返回等关键技术，为载人登月和

深空探测积累经验。

②时间跨度与代表性任务

- 主要任务：嫦娥五号（2020 年）、嫦娥六号（预计 2025 年）。
- 里程碑意义：
 - 嫦娥五号：中国首次实现地外天体无人采样返回，成为全球第三个完成此任务的国家（继美、苏之后）。
 - 嫦娥六号：计划从月球背面采样返回，进一步挑战复杂环境下的技术极限。

（10）“回”阶段的核心工程目标

①技术突破

- 月面采样与封装：
 - 采样方式：钻取（深达 2 米）与表取（表层土壤）结合，应对不同地质条件。
 - 封装技术：真空密封容器防止样品污染，确保地球环境与月壤样本隔绝。
- 月面起飞技术：上升器设计：在无发射塔的月面环境下，上升器需自主定位、点火升空，精确进入环月轨道。

动力系统：7500N 发动机实现月面垂直起飞与轨道调整。

- 月球轨道交会对接：无人自主对接：上升器与轨道器在环月轨道实现高精度对接（误差不超过 5 厘米），转移样品容器。
- 高速再入返回：半弹道跳跃式再入：采用“太空水漂”技术（见前序解析），以第二宇宙速度（约 11.2 公里/秒）再入大气层，通过两次减速降低热载荷。

热防护技术：新型烧蚀材料（碳-碳复合材料）抵御 3000℃ 高温。

②科学任务

- 样品采集与分析：获取不同区域（如月球正面风暴洋北部）的月壤与月岩样本，研究月球火山活动年龄、内部演化历史。
嫦娥五号带回 1731 克样品，发现“嫦娥石”等新矿物，揭示月球晚期岩浆活动证据。
- 月面环境研究：通过原位探测分析月壤物理特性（如黏度、颗粒度），为未来月球基地建设提供数据支持。

③工程验证

- 验证多器协同工作模式（轨道器、着陆器、上升器、返回器四器联动）。
- 构建地月往返运输系统原型，包括运载火箭（长征五号）、深空测控网（天链中继卫星+地面站）的全程保障能力。

（11）“回”阶段任务实例与成果

①嫦娥五号任务（2020 年）

- 着陆地点：月球正面风暴洋北部的吕姆克山（约 13 亿年前形成的年轻玄武岩区域）。
- 任务流程：
 1. 轨道器与返回器组合体进入环月轨道。

2. 着陆器携带上升器月面软着陆，完成钻取（1.5 米深）与表取（表面铲取）采样。
 3. 上升器携带样品从月面起飞，与轨道器对接并转移样品至返回器。
 4. 轨道器携带返回器返回地球，返回器以“太空水漂”方式再入着陆于内蒙古四子王旗。
- 科学发现：
 - 确认月球火山活动持续至约 20 亿年前（比此前认知晚 10 亿年）。
 - 发现月壤中富含太阳风注入的氦-3 和氢元素，为未来核聚变能源开发提供参考。

②嫦娥六号任务（规划中）

- 目标区域：月球背面南极-艾特肯盆地（太阳系最大撞击坑之一，可能暴露月幔物质）。
- 技术升级：
 - 增强采样装置的复杂地形适应能力（如陡坡、岩石区）。
 - 优化中继通信（鹊桥二号）与自主避障系统。

（12）“回”阶段的意义与影响

①技术跨越：

- 突破地外天体采样返回全链条技术，涵盖“发射、着陆、起飞、对接、返回”五大环节，为载人登月奠定基础。
- 验证深空探测工程体系的成熟度（如长征五号大推力火箭、海南文昌发射场适应性）。

②科学贡献：

- 提供最年轻的月球样本，刷新人类对月球地质历史的认知。
- 推动行星科学、空间资源利用等领域研究，例如月壤 3D 打印技术、氦-3 提取实验。

③国际合作与未来应用：

- 中国向国际科学界开放部分月壤样本，促进全球月球研究合作。
- 积累的月面起飞、轨道对接技术可直接应用于未来月球科研站建设与小行星采样任务（如天问三号）。

“回”阶段是嫦娥工程的收官之战，通过无人采样返回任务，中国完整掌握了地月往返能力，并获取了珍贵的月球科学样本。其技术复杂度和科学价值标志着中国深空探测能力跻身世界前列，为后续载人登月、月球基地建设及更远的深空探索铺平道路。

嫦娥五号

（1）嫦娥五号探测器组成

- 探测器结构：
 - 轨道器：负责地月转移及返回舱与地球对接。
 - 着陆器：搭载钻取（2 米深）和表取机械臂，采集月壤样本 1.731 公斤。
 - 上升器：从月面起飞与轨道器交会对接，转移样本。
 - 返回器：携带样本再入地球大气层，着陆于内蒙古四子王旗。
- 技术亮点：

首次实现月球轨道无人交会对接，样本容器设计可耐受 12,000℃ 高温。

(2) 嫦娥五号采样量——1731 克

- 采样技术：
 - 表取机械臂：采集表面月壤（1.5kg），覆盖面积 12 m²。
 - 钻取设备：钻深 2 米，获取层状月壤（231g）。
- 样本研究：
 - 发现新型矿物“嫦娥石”（Ca₈Y□Fe(P₀₄)₇），揭示月球晚期火山活动（20 亿年前）。

(3) 嫦娥五号着陆点命名

- 命名依据：
 - “天船”为中国古代星官名（属二十八宿斗宿），象征航天器跨越星际的愿景。
 - 地理坐标：北纬 43.06°，西经 51.92°，位于风暴洋北部吕姆克山脉附近。
- 科学意义：
 - 该区域月壤年龄仅 20 亿年，较阿波罗样本年轻 10 亿年，揭示月球晚期火山活动。

(4) 嫦娥五号着陆点附近山脉命名

- 命名逻辑：
 - 华山（Mons Hua）：象征险峻探索，对应任务技术挑战。
 - 衡山（Mons Heng）：代表科学观测的平衡与精确。
- 文化延伸：
 - 中国已为月球命名 22 个地理实体（如“天河”“织女”），推动传统文化与航天融合。

“太空水漂”—— 半弹道跳跃式再入技术

1. 技术定义与原理

- 名称：半弹道跳跃式再入技术。
- 核心机制：航天器首次进入大气层时，利用气动升力实现“跃起”，短暂脱离大气层后二次进入。这一过程通过两次气动减速，显著降低再入速度与热载荷（相比传统弹道式再入），同时扩展着陆区域的选择范围。
- 关键特点：通过“进入-跃出-再进入”的轨迹设计，实现高效减速与热防护。

2. 实际应用与验证

- 嫦娥五号 T1 试验器任务：2014 年 10 月，中国发射再入返回试验器（即嫦娥五号 T1），成功验证半弹道跳跃式再入技术。该任务为后续嫦娥五号月球采样返回任务提供了关键技术保障。
- 技术意义：解决了高速再入返回地球时的热控与精度控制难题，确保返回舱安全着陆。

3. “太空水漂”的比喻来源

- 类比逻辑：航天器的再入轨迹与“打水漂”运动高度相似。石头在水面弹跳时接触水面后短暂跃起，与试验器“进入大气层-跃出-二次进入”的轨迹形成直观对应。
- 形象描述：该技术通过气动升力实现“跳跃”，如同水漂的弹跳过程，故被命名为“太空水漂”。

嫦娥六号

（1）嫦娥六号任务技术突破

- 任务特点：

- ①月背采样：需解决鹊桥二号中继通信（时延 1.3 秒）、自主导航（无地球直接测控）问题。
- ②逆行轨道：与嫦娥五号顺行轨道相反，节省燃料并延长发射窗口（每月 1 次）。
- ③智能采样：AI 视觉识别月背地形（撞击坑密度>50 个/平方公里），优化机械臂路径。

- 对比分析：

- 嫦娥五号已掌握正面采样技术（风暴洋区域），六号聚焦月背（南极-艾特肯盆地）。

（2）嫦娥六号发射场——文昌

- 发射场适配性：

- 长征五号火箭直径 5 米，仅文昌发射场具备发射能力（低纬度+海运运输）。
- 轨道设计：地月转移轨道（LTO）运力 8.2 吨，满足月球背面采样返回需求。

- 任务目标：

- 着陆南极-艾特肯盆地，采集 2kg 月壤，首次实现月球背面样本返回。

鹊桥中继星

（1）鹊桥中继星的技术突破

中继通信系统设计：

- 轨道特性：运行于地月 L2 点 Halo 轨道，距离月球 6.5 万公里，周期 14 天，保持对月球背面连续覆盖。
- 通信能力：
 - X 波段上行速率 2kbps，下行速率 500kbps，时延约 1.28 秒。
 - 搭载荷兰低频射电探测仪（NCLE），开展宇宙黑暗时代氢信号观测。
- 任务扩展：2024 年计划发射鹊桥二号，支持嫦娥六号、七号、八号任务，增加激光通信载荷（速率 1Gbps）。

（2）鹊桥中继星任务范围

- 核心功能：

- 建立地月 L2 点中继通信链路，支持嫦娥四号数据传输（速率 500kbps）。
- 低频射电观测：探测 0.1-40MHz 宇宙信号，研究太阳爆发与星际介质。
- 激光测距：与地面站进行距离测量，精度达厘米级。

- 未涉及领域：

- 量子通信由“墨子号”卫星专责，鹊桥未搭载相关设备。

（3）嫦娥七号中继星发射任务——鹊桥二号

- 技术升级：

- 轨道设计：地月 L2 点晕轨道（振幅 1.5 万公里），覆盖月球南极至背面通信。
- 通信能力：X 波段+激光通信，速率 1Gbps，支持 4K 视频传输。

- 任务扩展：

- 设计寿命 8 年，后续服务嫦娥八号（2030 年）及国际月球科研站（ILRS）。

月球基地

（1）月球基地的战略定位

科学价值与功能

- 深空探测跳板：月球重力加速度 1.62m/s^2 （地球 16.5%），可降低火星任务燃料消耗 50%。
- 资源开发：
 - 氦-3 开采：月壤中氦-3 浓度约 0.01ppm，预计全球储量 100 万吨，满足地球万年能源需求（按核聚变效率计算）。
 - 水冰提取：南极永久阴影区水冰储量估约 6 亿吨，可分解为液氧液氢推进剂。
- 辐射防护研究：月表辐射剂量 200mSv/年 （地球的 200 倍），地下基地可屏蔽 90% 辐射。

（2）月球基地选址的科学依据

环境威胁与防护方案

- 微陨石撞击：月表每年承受约 100 吨陨石撞击，速度范围 $10\text{--}72\text{km/s}$ ，地下 10 米结构可抵御直径 1 米陨石冲击。
- 极端温度：月表昼夜温差 -173°C 至 $+127^\circ\text{C}$ ，地下 1 米处温度稳定在 -35°C ~ -20°C 。
- 宇宙辐射：月表年辐射剂量 380mSv （国际空间站为 200mSv ），地下基地可降至 38mSv （接近地球水平）。
- 案例参考：美国“Artemis 计划”拟在月球熔岩管（直径 100 米，长数公里）内建造基地。

（3）月球战略资源——氦-3

- 资源对比：
 - 地球氦-3 储量 < 500 公斤，月球估测 100 万~500 万吨。
 - 1 吨氦-3 发电量相当于 1.5 亿吨石油，满足全球能源需求 1 年。
- 提取技术：加热月壤至 700°C 释放氦-3，需处理 100 吨月壤/克氦-3，当前效率待提升。

（4）月球背面探测里程碑

- 任务背景：

2019 年 1 月 3 日，嫦娥四号着陆于月球背面南极-艾特肯盆地（太阳系最大撞击坑），玉兔二号成为人类首个在月球背面工作的巡视器。
- 技术挑战：
 - 通过鹊桥中继星实现地月背面通信，信号延迟约 1.3 秒。
 - 月背地形复杂，玉兔二号采用自主避障系统，累计行驶里程超 1.5 公里。
- 科学发现：

探测到月幔物质（橄榄石、辉石），验证月球早期岩浆洋理论。

（5）月球地名命名

- 命名背景：

2010 年，国际天文学联合会（IAU）批准嫦娥一号数据命名的“泰山”位于月球正面（东经 5.2° ，北纬 24.8° ），直径约 100 公里。
- 命名规则：

月球山脉多以地球山脉命名，如阿尔卑斯山（月球）、高加索山（月球），需 IAU 审核通过。

(6) 月球采矿挑战

- 陨石威胁：
 - 月球无大气层，陨石撞击速度范围 10-72km/s（平均 20km/s），能量密度是地球陨石的 100 倍。
 - 防护需求：采矿设备需抵御直径 1cm 陨石（速度 20km/s）穿透 10cm 铝板的能力。
- 其他环境参数：
 - 重力：1.622m/s²（地球 16.5%）。
 - 温度：昼夜温差-173℃~+127℃。
 - 辐射：月表辐射剂量 200mSv/年（地球的 80 倍）。

(7) 月幔物质成分

- 科学意义：
 - 橄榄石（(Mg,Fe)₂SiO₄）与低钙辉石（(Ca,Mg,Fe)SiO₃）是月幔主要矿物，证实月球早期岩浆洋分异模型。
 - 探测手段：可见-近红外成像光谱仪（VNIS）在艾特肯盆地获取光谱数据（波长 450-950nm）。
- 理论验证：
 - 月幔密度 3.3g/cm³，与地球地幔（3.4g/cm³）接近，支持“大碰撞”形成假说。

(8) 载人登月新装备命名

- 载人飞船“梦舟”：
 - 可搭载 4-6 人，地月转移轨道运力 27 吨，复用设计（目标 10 次）。
 - 技术升级：新型耐热材料（可耐受 2500℃再入温度）、群伞减速系统（着陆精度±5 公里）。
- 着陆器“揽月”：
 - 两级构型（上升级+下降级），月面驻留 48 小时，支持 2 人出舱活动。
 - 动力系统：3 台 7500N 变推力发动机（液氧甲烷燃料），着陆精度±100 米。

(9) 月球资源开采优先级——水冰资源

- 战略价值：
 - 原位利用：1 吨水可电解产生 620kg 液氧+140kg 液氢，满足火箭燃料需求（如登月任务燃料成本降低 60%）。
 - 分布区域：月球两极永久阴影区（温度-230℃），储量估测 6 亿吨（雷达与中子谱仪数据）。
- 技术路径：
 - 嫦娥七号（2026 年）将搭载“月壤水分子分析仪”，精确测定水冰分布与丰度。

(10) 探月热潮的核心目标：月球资源开发与国际科研站建设

国际月球科研站（ILRS）战略规划：

①资源开发优先级：

- 水冰资源：
 - 分布：月球两极永久阴影区（如沙克尔顿撞击坑），储量估算约 6 亿吨。
 - 提取技术：微波加热月壤（温度升至-50℃以上）释放水蒸气，冷凝后液态收集。
 - 应用：1 吨水可电解产生 880kg 氧气（供 4 人/年呼吸）和 120kg 氢气（燃料）。
- 氦-3 核聚变：
 - 丰度：月壤中浓度约 0.01ppm，全球储量 100 万-500 万吨。
 - 价值：氦-3 与氘聚变释放能量 18.3MeV，无中子辐射，是清洁核能理想燃料。
 - 开采成本：需处理 150 吨月壤提取 1 克氦-3，当前技术经济性待突破。

②能源与基建技术:

- 太阳能农场: 月球极地环形山边缘可建永昼区太阳能阵列, 功率密度 $1.3\text{kW}/\text{m}^2$ (地球的 1.5 倍)。
- 3D 打印月壤建材:
 - 技术路径: 月壤 (含 40% 二氧化硅) 经激光烧结形成砖块, 抗压强度 $>20\text{MPa}$ 。
 - 案例: 欧洲空间局 (ESA) 已在地面模拟月壤 3D 打印 6 米高建筑结构。

③深空探测枢纽功能:

- 低重力发射: 月球引力 ($1.62\text{m}/\text{s}^2$) 可使火星任务燃料需求降低 50%。
- 燃料补给站: 液氧液氢推进剂月面制备, 支撑深空探测器中途补给。
- 国际竞争态势:
 - 美国 “阿耳忒弥斯计划”: 2028 年前建立 “月球门户” 空间站, 开发南极水冰。
 - 俄罗斯 “月球-资源” 任务: 2030 年前实现月面氦-3 勘探与提取试验。
 - 中国 ILRS 时间表: 2035 年前建成基本型, 2045 年扩展为可持续驻留基地。

(11) 梦舟飞船载员能力

- 设计参数:
 - 登月任务: 3 人乘组, 任务周期 14 天 (环月轨道驻留 48 小时), 辐射防护剂量 $<500\text{mSv}$ 。
 - 近地任务: 7 人载员 (返回舱容积 13m^3), 可对接中国空间站 (接口兼容性设计)。
- 可重复使用:
 - 返回舱防热层 (碳-碳复合材料) 可耐受 10 次再入, 单次任务成本降低 70%。

(12) 探月工程积累的深空探测技术

- 技术细节与火星应用:
 - (1) 自主导航技术:
 - 视觉导航:
 - 嫦娥五号: 激光雷达+光学成像, 着陆点选择精度 ± 10 米。
 - 天问一号: 升级为多光谱融合避障, 识别 0.3 米障碍物。
 - 星敏感器:
 - 精度 0.001° , 定位误差 <100 米 (地火距离 4 亿公里)。
 - (2) 测控通信技术:
 - 深空网布局:
 - 佳木斯 (66 米)、喀什 (35 米)、阿根廷 (35 米), 覆盖 98% 深空弧段。
 - 测速精度 $0.1\text{mm}/\text{s}$, 测距精度 1 米 (地火距离)。
 - 激光通信试验:
 - 嫦娥四号与鹊桥中继星实现 1Gbps 速率, 未来应用于火星中继。
 - (3) 表面软着陆技术:
 - 变推力发动机:
 - 嫦娥三号 7500N 发动机推力调节比 10:1, 天问一号继承并优化至 5:1。
 - 着陆缓冲机构:
 - 铝蜂窝吸能材料, 可吸收冲击能量 500kJ (相当于 20 吨重物 1 米高坠落)。

二、火星探测（天问一号）

天问一号火星探测任务

1. 任务概述与工程定位

（1）任务定义

- 名称：天问一号（Tianwen-1）。
- 目标：中国首次自主火星探测任务，一次性实现“绕、着、巡”三大目标（环绕、着陆、巡视），是全球首个首次任务即完成此目标的探测器。
- 发射时间：2020年7月23日，长征五号遥四运载火箭从海南文昌发射场发射。
- 抵达火星：2021年2月10日进入火星轨道，2021年5月15日着陆器与祝融号火星车成功着陆火星表面。

（2）工程意义

- 技术跨越：突破深空测控、火星制动捕获、火星大气进入（EDL）等核心技术，标志中国成为全球第二个实现火星表面巡视探测的国家（继美国之后）。
- 科学价值：填补中国火星探测空白，推动行星科学、宇宙生命起源等研究。

2. 任务组成与设计特点

（1）探测器构成

- 轨道器：
 - 负责火星全球遥感探测，携带中分辨率相机、高分辨率相机、火星矿物光谱分析仪等7台科学载荷。
 - 同时作为着陆器与地球通信的中继卫星。
- 着陆平台：
 - 搭载祝融号火星车，负责着陆减速与火星车释放。
 - 配备避障相机、气象测量仪等设备。
- 祝融号火星车：
 - 设计寿命：90个火星日（实际超期服役至2022年5月，累计行驶1.9公里）。
 - 科学载荷：多光谱相机、表面成分探测器、雷达、磁场探测器等6台设备。

（2）技术突破

- 火星轨道捕获：
 - 探测器以近火点265公里、远火点11.9万公里的椭圆轨道切入，需一次制动成功（误差容忍度极低）。
- 火星进入-下降-着陆（EDL）：
 - 进入阶段：气动外形设计（钝头锥体）与防热大底（超轻烧蚀材料）抵御2000℃高温。
 - 降落伞减速：超音速降落伞（直径约20米）在火星稀薄大气（地球的1%）中展开。
 - 动力悬停避障：7500N变推力发动机在悬停阶段通过激光三维成像实时选择平坦着陆区（乌托邦平原南部）。
- 火星车自主运行：
 - 自主导航、故障诊断、能源管理（太阳能+同位素热源）适应火星复杂环境（沙尘暴、-100℃低温）。

天问一号发射时间与任务里程碑

- 任务全周期时间线：
 - (1) 2020 年 7 月 23 日：
 - 发射载体：长征五号遥四运载火箭（LEO 运力 25 吨，地火转移轨道运力 5 吨）。
 - 发射场：文昌航天发射场（低纬度 19° N，节省燃料约 15%）。
 - (2) 2021 年 2 月 10 日：
 - 近火制动（MOI）：
 - 发动机参数：3000N 双组元发动机（四氧化二氮/偏二甲肼），点火 15 分钟。
 - 轨道参数：近火点 400 公里，远火点 18 万公里，倾角 10°，周期 10 天。
 - (3) 2021 年 5 月 15 日：
 - 着陆过程：
 - 进入段：气动加热峰值 2000℃，隔热盾烧蚀层（碳-酚醛）厚度 50mm。
 - 降落伞开伞：超音速降落伞（马赫数 2.0）展开，减速至 100m/s。
 - 动力下降：7500N 变推力发动机点火，悬停避障（激光三维成像分辨率 0.1 米）。
 - 着陆点：乌托邦平原（北纬 25.1°，东经 109.9°），古海洋沉积区。
 - (4) 2022 年 5 月：
 - 祝融号休眠：累计行驶 1.9 公里，超设计寿命 3 倍（原计划 90 火星日）。
- 深空测控网支撑：
 - 佳木斯深空站：66 米口径天线，X 波段上行速率 4kbps，下行速率 16kbps。
 - 阿根廷深空站：35 米天线，填补西半球测控盲区，通信误码率 < 10⁻⁶。

天问一号近火制动参数

- 制动过程：
 - 发动机点火：3000N 双组元发动机（四氧化二氮/偏二甲肼）持续 15 分钟，速度降幅 580m/s。
 - 轨道参数：近火点 400 公里，远火点 18 万公里，倾角 10°，周期 10 天（后续调整为科学探测轨道）。
- 技术挑战：
 - 通信延迟 20 分钟，全程自主控制，轨道偏差需 < 1%。

祝融号

- (1) 祝融号火星车科学载荷
 - 载荷功能：
 - 地形相机：拍摄高清全景图像（分辨率 0.7 米），导航与地形重建。
 - 气象测量仪：监测气温（-120℃~20℃）、气压（约 600 帕）、风速（最大 24m/s）。
 - 表面成分探测仪：激光诱导击穿光谱（LIBS）分析岩石元素（铁、硅、铝等）。
 - 其他设备：
 - 次表层雷达（探测地下 100 米结构）、多光谱相机（矿物识别）、磁场探测仪。
- (2) 祝融号设计寿命
 - 运行表现：
 - 原计划 90 火星日（约 92 地球日），实际运行至 2022 年 5 月进入休眠，累计工作 347 个火星日。
 - 能源系统：太阳能电池板功率约 180 瓦，配备锂离子电池应对沙尘覆盖。
 - 环境适应：

火星冬季光照不足（太阳高度角 $<15^{\circ}$ ）及沙尘暴（光学深度 >2 ）导致能源下降，触发自主休眠保护。

1. 科学目标与成果

（1）科学目标

- 火星全球测绘：轨道器绘制火星表面地形图，分析土壤与岩石成分分布。
- 火星地质演化：研究乌托邦平原的水冰分布、古海洋遗迹，探索火星气候变化。
- 火星磁场与电离层：探测火星残余磁场与太阳风相互作用机制。
- 火星生命迹象：分析表层土壤有机物与矿物质，间接搜寻生命存在证据。

（2）主要科学成果

- 地形与地质发现：
 - 祝融号在着陆区发现多边形裂纹、硬壳层等特征，推测为液态水或水冰活动遗迹。
 - 轨道器探测到火星南部大型撞击坑中的含水矿物（如黏土、硫酸盐）。
- 磁场与大气研究：
 - 揭示火星电离层与太阳风相互作用的“磁鞘”结构，为研究火星大气逃逸提供数据。
 - 发现火星表面局部磁场强度异常，可能与古老地壳磁性残留有关。
- 水冰探测：雷达数据显示乌托邦平原浅层（1-10 米）存在分层的富水物质，可能为水冰与土壤混合层。

2. 技术创新与挑战

（1）关键技术

- 深空测控：
 - 中国深空测控网（佳木斯、喀什、阿根廷站）实现 4 亿公里超远距离通信，测控精度达厘米级。
- 自主避障着陆：
 - 融合激光三维成像、光学导航与人工智能算法，实现着陆区 100 米 $\times$ 40 米范围内误差小于 1 米的精确着陆。
- 火星车温控：
 - 采用“蝴蝶形”太阳能翼+集热窗设计，结合正十一烷相变材料储存热能，保障火星车在极低温环境运行。

（2）任务难点

- 火星引力捕获风险：探测器需在近火点一次性减速实现环绕，失败则可能飞离火星。
- EDL“恐怖九分钟”：从进入大气到着陆需完全自主控制，地球与火星通信延迟约 20 分钟，无法实时干预。
- 沙尘环境适应：火星沙尘可能覆盖太阳能板，需设计自清洁涂层与抖动除尘功能。

5. 任务意义与未来影响

（1）技术里程碑

- 标志着中国掌握行星际探测全流程能力（发射、轨道转移、着陆、巡视），为木星、小行星探测奠定基础。
- 验证长征五号运载火箭地火转移轨道发射能力，推动后续重型火箭（长征九号）研发。

(2) 科学贡献

- 提供火星中低纬度地区首套原位探测数据，补充国际火星数据库（如 NASA 毅力号聚焦杰泽罗陨石坑）。
- 推动中国行星科学学科建设，培养深空探测人才。

(3) 国际合作与启示

- 天问一号部分数据与欧空局共享，支持国际火星研究合作。
- 为 2030 年前后实施火星采样返回任务（天问三号）积累经验，目标成为全球首个完成火星取样的国家。

天问一号是中国深空探测的里程碑任务，首次实现火星“绕、着、巡”一步到位，展现了中国航天技术的跨越式发展。其科学成果深化了人类对火星环境与演化的认知，并为未来星际探测、载人登火等长远目标提供了关键技术储备。

火星探测小知识

未实施火星探测的国家：波兰

- 各国火星探测能力分析：

(1) 成功实施国家：

- 美国：26 次任务，成功率 65%（如毅力号、好奇号）。
- 中国：天问一号（首次实现绕落巡）。
- 印度：曼加里安号（2013 年入轨，成本仅 7400 万美元）。
- 阿联酋：希望号轨道器（2021 年入轨，研究火星大气）。

(2) 欧洲合作项目：

- ExoMars：2016 年斯基亚帕雷利号着陆失败，2028 年计划发射罗莎琳德·富兰克林号漫游车。
- 波兰参与：提供光谱仪部件，无独立任务。

- 技术门槛：

- 轨道设计：需精确计算霍曼转移窗口与轨道修正（ Δv 约 2.5km/s）。
- 深空通信：至少需 34 米口径天线支持 X 波段通信（如中国佳木斯站）。

火星与地球的相似性与移居潜力

- 相似性深度解析：

(1) 地质与气候历史：

- 古海洋证据：乌托邦平原沉积层厚度>1 公里，面积相当于地中海。
- 季节变化：极地冰盖（水冰+干冰）冬扩夏缩，与地球极区类似。

(2) 移居技术路径：

- 大气增厚：释放地下 CO₂（25 万亿吨）可将气压提升至地球的 10%（适合植物生长）。
- 磁场生成：在拉格朗日点部署超导环，产生人工磁场屏蔽宇宙射线（理论阶段）。

(3) 封闭生态实验：

- “火星-500”试验：6 名志愿者在密闭舱生活 520 天，验证心理与生态系统稳定性。
- 月面模拟基地：中国青海冷湖火星营地，开展种植试验（土豆、拟南芥）。

火星探测的科学优先级

- (1) 生命探测证据链
- 液态水痕迹：
 - 地下水湖：欧洲火星快车雷达发现南极冰下液态湖（直径 20 公里，深度 1.5 公里）。
 - 季节性斜坡纹线（RSL）：轨道影像显示夏季出现含盐水流痕迹。
 - 甲烷信号：
 - 周期性波动：好奇号探测到甲烷浓度 0.24ppb~21ppb，峰值与火星夏季相关，可能指示地下微生物活动。
 - 非生物来源：蛇纹石化反应或紫外线分解有机物也可能释放甲烷，需同位素分析（如 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比值）进一步验证。

火星大气的关键分子——甲烷

甲烷的探测意义

- 半衰期短：火星大气甲烷半衰期约 300 年，持续存在表明近期释放源。
- 探测技术：
 - 好奇号 TLS 仪器：使用激光光谱检测甲烷，灵敏度达 0.05ppb。
 - 微量气体轨道器（TGO）：未检测到甲烷，可能因地表与高空浓度差异。
- 地质活动关联：奥林匹斯山区域甲烷浓度较高，可能与火山活动或热液反应相关。

天问二号——中国首次小行星探测与采样返回

发射概况： 2025 年 5 月 29 日，我国在西昌卫星发射中心用长征三号乙运载火箭，成功将行星探测工程天问二号探测器发射升空，这是继“探月”“探火”后中国在浩瀚星宇的又一次重要探索。截至 2025 年底，天问二号已飞行约 7 亿公里，预计 2026 年抵达目标小行星 2016H03 并开始伴飞探测。

双目标探测任务： 天问二号是我国首次地外小天体“采样返回+主带彗星探测”的双目标探测任务。通过一次发射，计划执行：

对近地小行星 2016H03 展开全方位探测并采集样本——这颗直径约 40-100 米的小行星是人类 2016 年发现的地球准卫星。

对主带彗星 311P 开展科学探测——在完成小行星探测、取样后，返回舱计划于 2027 年底携样本返回地球，与返回舱分离的主探测器则继续飞行，前往 311P 主带彗星开展后续探测任务。

科学意义： 小行星 2016H03 是研究太阳系早期物质组成和演化历史的“活化石”，其样本分析有望揭示行星形成机制。311P 主带彗星兼具小行星和彗星特征，探测结果将帮助理解小行星、彗星、主带彗星之间的内在联系与演化路径。任务或将持续近 10 年，是中国行星探测工程继天问一号火星探测成功后的又一里程碑。

天问三号——火星采样返回筹备

任务规划： 国家航天局规划在 2028 年前后通过两次发射实施天问三号火星采样返回任务，有望实现人类首次火星取样返回。截至 2025 年底，工程主线正在开展初样研制，计划转入正样研制阶段，各项工作进展顺利。2025 年中国航天日期间，国家航天局发布天问三号国际合作机遇公告，欢迎国际伙伴积极参与天问三号任务。

天问四号——木星系探测

远景规划：国家航天局宣布计划在 2030 年前后发射天问四号，对木星及木星系进行科学探测，进一步拓展中国在深空探测领域的技术和能力。此项任务将是继月球探测、火星探测、小行星探测之后，中国深空探测最远的一次征程。

嫦娥七号——月球南极水冰探测

任务规划：2026 年将发射嫦娥七号探测器，主要任务是在月球南极开展原位科学与资源探测，重点关注月球南极水冰资源的存在与分布。形成月球南极“绕、落、巡、飞跃”四位一体的综合探测体系，为后续国际月球科研站选址和载人登月任务提供关键数据支撑。

嫦娥八号与国际月球科研站

任务规划与建设目标：探月工程四期嫦娥八号任务持续推进，将与俄罗斯、阿联酋等国家共建国际月球科研站（ILRS），计划 2035 年前建成基本型，2045 年扩展为可持续驻留基地。嫦娥八号将重点验证月球原位资源利用（ISRU）技术，包括月壤 3D 打印建造技术、月面太阳能电池板制备技术等，为月球长期驻留与资源开发奠定技术基础。

第五章 中国载人航天工程

中国载人航天工程（China Manned Space Program, CMS）是国家重大科技工程，自 1992 年正式启动（代号“921 工程”），目标是通过自主发展突破载人航天技术，建立长期有人驻留的空间站，开展空间科学实验与应用。

一、战略目标“三步走”

1. 第一步：载人飞船阶段（1992-2005）

- 目标：发射无人/载人飞船，实现航天员天地往返。
- 神舟五号（2003 年）：杨利伟成为中国首位进入太空的航天员，标志着第一步完成。

2. 第二步：空间实验室阶段（2005-2017）

- 目标：突破航天员出舱、交会对接、推进剂在轨补加等关键技术。
- 关键任务：
 - 神舟七号（2008 年）：翟志刚完成中国首次太空行走。
 - 天宫一号（2011 年）：首个目标飞行器，验证交会对接技术。
 - 天宫二号（2016 年）：开展中长期驻留实验（航天员景海鹏、陈冬驻留 30 天）。

3. 第三步：空间站建设阶段（2017 至今）

- 目标：建造天宫空间站，实现长期有人驻留和空间科学应用。
- 天宫空间站（2021-2022 年）：完成“T 字构型**”三舱组合体建造（核心舱“天和”+ 实验舱“问天”“梦天”）。

二、天宫空间站核心组成

天和核心舱（2021 年 4 月发射）

- 全长 16.6 米，重 22.5 吨，提供航天员生活区、空间站控制中枢。
- 配备再生式生命保障系统（水循环、氧气再生）。

问天实验舱（2022 年 7 月发射）

- 配置生命生态、生物技术实验室，兼作备份控制舱。
- 舱外部署小机械臂（与天和核心舱大机械臂协同）。

梦天实验舱（2022 年 10 月发射）

- 聚焦微重力科学研究，支持材料科学、流体物理等实验。
- 设有货物气闸舱，支持舱外载荷自动进出。

1. 天宫空间站机械臂配置

- 核心知识点：

（1）天和核心舱机械臂（大机械臂）：

- 技术参数：
 - 自由度：7 个（3 肩关节+1 肘关节+3 腕关节），运动范围 $\pm 180^\circ$ 。
 - 负载能力：25 吨（可搬运整个实验舱），末端最大速度 0.2m/s。
 - 定位精度： $\pm 5\text{mm}$ （重复定位精度 $\pm 1\text{mm}$ ）。
- 功能应用：
 - 舱段转位：2022 年 7 月完成问天实验舱 90° 转位对接，耗时 4 小时。
 - 航天员辅助：2023 年 2 月辅助神舟十五号乘组完成 6 小时舱外作业。
 - 在轨维护：可更换空间站外部失效设备（如相机、传感器）。

（2）问天实验舱机械臂（小机械臂）：

- 技术参数：
 - 自由度：7 个（与天和机械臂同构），长度 5 米，负载 3 吨。
 - 精度特性：末端重复定位精度 $\pm 0.1\text{mm}$ ，支持显微级操作。
- 科学支持：
 - 载荷安装：2023 年 8 月完成高能宇宙辐射探测器（HERD）的精密安装。
 - 样本抓取：可操作直径 1cm 的样本容器，用于舱外暴露实验回收。

（3）技术创新：

- 仿生设计：关节采用谐波减速器+力矩电机，传动效率 $>80\%$ ，寿命 10 万次循环。
- 自主爬行：通过末端执行器与适配器对接，实现在空间站表面的“蠕动”移动（移动速度 0.1m/s）。

4. 2010 年中国启动天链二号卫星研制工作：基于东方红四号平台性能提升

（1）东方红四号平台技术特性

- 尺寸与结构：采用大型桁架式结构，卫星平台质量达 5 吨以上，设计寿命 15 年，支持高功率载荷（可达 10kW 以上）。

- 发电能力：配备三结砷化镓太阳能电池翼，发电效率提升 30%，可支持大容量数据中继任务（如高清视频传输）。
- 载荷容量：搭载 S/Ka 双频段天线，通信带宽比天链一号提升 4 倍，单星覆盖范围达地球表面 50%。
- (2) 天链二号的战略意义
 - 为载人航天、探月工程（如嫦娥任务）提供实时数据中继，解决测控盲区问题。
 - 支持北斗导航系统增强信号传输，提升全球定位精度。
- (3) 与其他平台的对比
 - 东方红三号：中型平台（2-3 吨），主要用于通信卫星（如“中星”系列），发电能力约 4kW。
 - 东方红五号：超大型平台（8-10 吨），用于高通量卫星（如实践二十号），发电能力 30kW，代表下一代技术方向。

2. 空间站同时在轨人数

- (1) 生命支持系统设计：
 - 氧气供应：
 - 电解水制氧机单台产能 2.5kg/天，6 人需 4.8kg/天，双机并联确保冗余。
 - 应急氧烛备份系统可维持 6 人 4 小时供氧（0.5kg/h）。
 - 二氧化碳去除：
 - 分子筛吸附罐处理能力 6 人×1.0kg/天，CO₂ 浓度控制<0.5%。
 - 再生式去除系统（Sabatier 反应器）将 CO₂ 转化为水，回收率≥75%。
- (2) 居住与卫生设施：
 - 睡眠区：6 个独立隔间（0.8m×1.8m），配备降噪系统（噪声<55dB）。
 - 卫生区：两套太空马桶，采用气流导向技术，固液分离效率>99%。

背景延伸：

- 医学监测：6 名航天员每日进行生理指标检测（心率、血压、骨密度），数据实时传回地面，建立全球最大长期微重力人体数据库。

3. 太空食品

- (1) 太空食品工程技术：
 - 苹果优选特性：
 - 低呼吸速率：在 4℃ 储存条件下，乙烯释放量<0.1 μL/kg·h，延缓成熟。
 - 果皮致密：减少水分流失（失水率<2%/月），维持脆度 60 天以上。
 - 处理工艺：
 - 辐照杀菌：采用 60Co-γ 射线（剂量 2kGy），杀菌率>99.99%。
 - 真空包装：氧气透过率<5cm³/m²·day，防止氧化变质。
- (2) 其他水果限制：
 - 橙子：汁液含果胶酶，易腐蚀金属包装；果皮碎片可能堵塞空气过滤器。
 - 葡萄：含水量>80%，冷冻干燥后体积膨胀率 120%，占用存储空间。

背景延伸：

- 营养保障：每名航天员每日水果供应量 100g，苹果提供 4.5mg 维生素 C（占日需量 5%），补充膳食纤维 2.4g。

三、天和核心舱

天和核心舱是中国空间站“天宫”的首个舱段，也是整个空间站的管理控制中枢。

1. 基础参数与设计架构

①尺寸与质量

- 全长 16.6 米，最大直径 4.2 米，发射质量 22.5 吨，相当于 6 层楼高度，超越国际空间站任一舱段规模。
- 舱内加压空间 50 立方米（三舱组合后达 110 立方米），航天员活动空间比天宫二号扩大近 3 倍。

②三舱嵌套结构

- 节点舱：设 1 个前向对接口（接载人飞船）、1 个径向对接口（接载人飞船）、2 个侧向停泊口（接问天/梦天实验舱），兼作气闸舱，顶部设出舱口。
- 生活控制舱：含小柱段（睡眠区、卫生区）和大柱段（工作区、就餐区、锻炼区），配置太空跑台、冰箱、微波炉等生活设施。
- 资源舱：配备推进剂贮箱与霍尔电推进发动机（首次应用于航天器），支持轨道维持。

③对接能力

- 总计 5 个对接口，可同时对接 2 艘神舟载人飞船+1 艘天舟货运飞船+2 个实验舱，支持 6 名航天员短期共驻。

2. 核心技术突破

①电推进系统

- 配置 4 台霍尔电推进发动机，结合 22 台姿控发动机，大幅减少化学推进剂消耗，延长在轨寿命。

②大型机械臂

- 10 米七自由度机械臂，承载能力达 25 吨，可实现舱外爬行转位，辅助舱段对接、设备维修及航天员出舱活动。未来可与问天舱小机械臂组合成 15 米超长臂。

③再生式生命保障

- 水回收率 > 95%，氧气 100% 自给，通过物化再生系统实现资源循环利用，奠定长期驻留基础。

④柔性太阳翼

- 单翼翼展 27 米，光电转化效率 > 30%，采用“二次展开技术”降低发射风险，总发电功率超 18 千瓦。

3. 科学实验能力

核心舱部署 3 个实验柜，聚焦航天医学与材料科学：

①人系统研究机柜

- 监测航天员心血管、肌肉、骨骼等生理指标，支持细胞培养与在轨拉曼光谱分析，研究长期太空生存影响。

②医学样本分析与高微重力实验柜

- 提供 $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ m/s}^2$ 微重力环境，开展引力物理实验；集成离心机与4℃冷藏箱，实现体液样本实时检测。

③无容器材料实验柜

- 通过静电悬浮技术熔炼材料（最高2500℃），避免容器污染，研究金属/非金属深过冷特性，助力新材料开发。

④舱外实验平台

- 大柱段背风面设大型载荷挂点，支持空间环境探测与地球观测。

4. 关键运行节点

- 2021-04-29：长征五号B遥二火箭发射升空，中国空间站建造序幕开启。
- 2021-06-17：神舟十二号对接，聂海胜等航天员首次进驻，实现中国人“太空家园”从零到一的突破。
- 2022-2023年：先后对接问天舱、梦天舱，完成“T字构型”建造；神舟十三至十七号乘组轮换，验证长期驻留能力。
- 2024-03-02：神舟十七号航天员成功修复因太空碎片撞击受损的太阳翼，保障能源系统稳定。

5. 战略意义与未来角色

①技术自主里程碑

- 实现100%国产化，突破大型空间结构控制、在轨维修等50余项关键技术，为深空探测积累经验。

②国际协作平台

- 向全球开放科学载荷资源，已接纳日、欧等17国项目，推动构建“外空命运共同体”。

③深空探测跳板

- 作为空间站永久核心，未来将对接巡天光学舱（CSST，视场为哈勃300倍），支撑宇宙起源探索；同时为载人登月任务提供技术验证平台。

6. 天和核心舱大柱段功能解析：

①舱段结构与功能分区：

- 尺寸参数：直径4.2米，长度10.4米（含过渡段总长16.6米），容积约50m³。
- 核心功能区：
 - 工作区：配置12个标准实验机柜（材料科学、流体物理等），实验功率接口单柜最大3kW。
 - 就餐区：折叠式餐桌，配备食品加热器（功率800W）和水循环系统（日供水20L）。
 - 睡眠区：3个固定床位+3个临时床位，采用记忆棉减压设计。

②环境控制技术：

- 温湿度调节：温度22℃±2℃，相对湿度40%-70%，通过热管辐射器（散热面积20m²）实现。
- 空气净化：多层过滤系统（HEPA+活性炭），PM2.5净化效率>99.97%。

③背景延伸：

- 人因工程：舱内照明采用可调色温 LED（3000K-6500K），模拟地球昼夜节律，维持航天员生物钟稳定。

7. “天和”机械臂关节配置

①自由度设计原理

- 关节分布：3 个肩关节（俯仰、偏航、旋转） + 1 个肘关节（俯仰） + 3 个腕关节（俯仰、偏航、旋转），模仿人类手臂的灵活运动。
- 冗余自由度：即使单个关节故障，仍可通过其他关节调整完成操作，提升可靠性。

②关键技术突破

- 末端执行器：采用“主动捕获+被动适配”机制，可抓握舱体表面适配器（精度 $\pm 5\text{mm}$ ），实现“爬行”转移。
- 负载能力：最大承载 25 吨舱段（如实验舱转位任务），运动速度可达 6cm/s 。

③国际对比

- 加拿大臂 2（Canadarm2）：7 自由度，负载 116 吨，但依赖国际空间站导轨系统移动。
- 天和机械臂优势：自主爬行能力使其无需外部轨道即可覆盖空间站全表面，适应中国空间站紧凑构型。

8. 空间站核心舱大机械臂：两臂杆组成，长 10.2 米，重约 0.74 吨，负重 25 吨

（1）机械臂工程设计：

- 负载自重比达 1:33.8（自重 0.74 吨，负载 25 吨），超越国际空间站加拿大臂 2（自重 1.8 吨，负载 116 吨，比例 1:64.4）。
- 驱动技术：采用谐波减速器+无刷直流电机，关节扭矩峰值达 $2200\text{N}\cdot\text{m}$ ，可搬运 25 吨舱段（如问天实验舱）完成 $\pm 5\text{cm}$ 精度的转位对接。

（2）应用场景：

- 2023 年完成梦天实验舱 180° 平面转位，全程耗时 3 小时 42 分，节省燃料消耗约 120kg。
- 支持航天员出舱作业时作为移动平台，末端搭载扶手接口，承载航天员+装备总重 $\leq 500\text{kg}$ 。

背景延伸：

- 高负载能力设计源于空间站模块化建造需求，未来可扩展用于在轨组装大型望远镜（如巡天号后续模块）。

四、航天员转乘：

从神舟飞船到天和核心舱，需开启四道门，节点舱与小柱段之间的双向承压舱门向外开。

（1）舱门工程设计

- 双向承压结构：可承受内外压差（最高 0.1MPa ），门框采用钛合金强化，密封圈使用硅橡胶复合材料，确保气密性。
- 开启方向选择：向外开启可节省节点舱内部空间（直径仅 2.8 米），避免占用航天员活动区域。

（2）安全验证案例

- 在地面通过 1.5 倍极限压力测试（ 0.15MPa ），模拟舱体变形时仍能正常启闭。
- 实际任务中，航天员需先平衡舱内外气压（通过泄压阀）再开门，防止气压突变。

（3）其他舱门设计

- 返回舱舱门：向内开启，利用舱内气压（约 1atm）增强密封性，避免太空真空环境导致门体弹出。

五、天和核心舱太阳翼维修

维修任务细节：

- 2024 年 3 月 2 日，神舟十七号乘组通过舱外机械臂辅助完成天和核心舱太阳翼的局部修复，主要针对微流星体撞击损伤（直径<1mm 的穿孔）。

- 使用太空胶体修补材料（环氧树脂基复合材料），固化时间缩短至 15 分钟，修复后光电转换效率恢复至 99.8%。

太阳翼技术参数：

- 天和核心舱配备柔性三结砷化镓太阳翼，单翼面积 67 m²，输出功率 18kW（寿命末期>15kW）。

- 采用双自由度对日定向机构，确保太阳翼始终正对太阳，年均能量损失率<0.5%。

背景延伸：

- 太阳翼是空间站唯一电力来源，长期暴露于原子氧（浓度 10⁶ atoms/cm³）和辐射环境，需定期维护保障能源安全。

- 中国是全球首个实现在轨精细维修太阳翼的国家，为未来深空探测（如月球基地）提供技术储备。

1. 梦天实验舱

（1）基本概况与核心参数

发射时间：2022 年 10 月 31 日，由长征五号 B 遥四运载火箭从文昌发射场升空。

- 舱段组成：工作舱、货物气闸舱、载荷舱、资源舱（“四舱嵌套”构型）。

- 尺寸与质量：全长 17.88 米，直径 4.2 米，发射质量约 23 吨，密封舱容积 110 立方米（航天员活动空间 32 立方米）。

- 在轨寿命：≥10 年，支持维修延寿。

（2）设计特点与结构布局

①独特的“套娃式”构型

- 载荷舱内部嵌套货物气闸舱，形成“舱中舱”结构，外观更圆润流畅。

- 工作舱：前端对接核心舱，安装科学实验柜，配置抗阻锻炼设备（如划船机）。

- 货物气闸舱：专供货物进出舱，无航天员出舱功能，与问天舱形成“货运港口”与“国际机场”分工。

②能源系统

- 配备 2 套柔性太阳翼，单翼翼展 27 米，面积 138 平方米，发电功率 18 千瓦/套。

- 采用“二次展开”技术：发射时部分展开以降低控制难度，对接后完全展开，确保高效供电。

- 双自由度对日定向系统，始终追踪太阳角度，最大化能量转化效率（光电转化率>30%）。

（3）科学实验能力解析

舱内实验平台：

- 13 个标准载荷机柜工位，实际部署 8 个科学实验柜，专注微重力前沿研究：

- 超冷原子物理柜：制备 pK 级（10⁻¹² K）超低温量子气体，探索量子新物态。

- 高精度时频柜：组合氢原子钟、冷原子光钟，建成世界最精准空间时频系统（精度超地面 10 倍）。

- 高温材料柜：国际首台空间站 X 射线实时观测装置，研究材料凝固机理。

- 燃烧科学/流体物理柜：分析微重力下燃烧与流体行为，助力航天器安全设计。

舱外实验支持

- 37 个载荷安装工位 + 3 个暴露平台（2 展开式+1 固定式），覆盖对天、对地、迎风、背风等多方向。
- 支持空间天文、地球观测、空间环境监测等暴露实验。

（4）核心技术突破

①货物自动进出舱系统

- 载荷转移机构：运送能力 400 公斤，支持 $1.15 \times 1.2 \times 0.9$ 米货物。
- 全自动方形舱门：弧形滑移设计，宽 1.2 米，航天员舱内指令操控，实现“指尖物流”。
- 双门隔离设计：内/外舱门互锁，保障气压安全，泄复压过程优化气体损耗。

②在轨释放微小卫星

- 配置释放机构，单次支持 36U 立方星或百公斤级微卫星。
- 机械臂协同弹射，初速 ≥ 1 m/s，指向精度 $\pm 2^\circ$ ，降低微小卫星入轨成本。

（5）建造历程与任务节点

- 2022-10-31：成功发射，13 小时后与天和核心舱前向端口对接。
- 2022-11-03：平面转位至侧向端口，空间站形成“T 字构型”。
- 2022-11-03 15:12：神舟十四号航天员首次进入梦天舱。

（6）任务意义与未来展望

- 补齐空间站能力：作为“纯科研舱”，梦天将空间站实验机柜总量提升至 25 台，支撑国家太空实验室全面运行。
- 技术辐射效应：货物气闸舱技术为未来深空探测（如月球基地）提供舱外作业范式。
- 国际合作开放：支持国际项目入驻，立方星释放功能吸引全球低成本太空实验需求。
- 扩建潜力：T 字构型预留接口，未来可扩展为“土字构型”或新增舱段。

六、梦天实验舱转位与“T”字构型完成

1. 转位操作技术细节：

- 机械臂参数：
 - 天和机械臂负载 25 吨，展开长度 10.2 米，末端定位精度 ± 5 mm，采用力-位混合控制算法避免碰撞。
 - 转位过程中机械臂承受最大扭矩 $12\text{kN} \cdot \text{m}$ ，关节电机温度控制在 $45^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 。
- 动力学控制：
 - 空间站组合体质量近百吨，转位引发姿态角速度扰动 $\leq 0.005^\circ/\text{s}$ ，通过控制力矩陀螺（CMG）与推进器联合补偿。

（2）“T”字构型优势：

- 能源优化：
 - 问天、梦天实验舱太阳翼呈对称布局，日均发电量提升至 540kWh（较“L”构型增加 18%）。
 - 柔性太阳翼展开面积单侧达 134m^2 ，光电转换效率 30.5%（国际空间站为 28%）。
- 通信覆盖：
 - 中继天线全向覆盖角提升至 160° ，测控覆盖率从 87%增至 99.8%，实现全天候实时通信。

背景延伸：

- 构型扩展性：“T”字构型预留两个对接口，支持未来扩展巡天光学舱（计划 2024 年发射）等模块，总规模可达 180 吨。
- 国际合作接口：梦天实验舱暴露平台兼容国际标准载荷接口（ISSA），已搭载中欧合作“宇宙辐射生物效应”实验装置。

2. 2023 年 6 月 9 日-10 日，梦天实验舱空间辐射生物学暴露实验装置经机械臂操作顺利安装至舱外暴露平台并正常开机

（1）货物气闸舱技术：

- 梦天气闸舱尺寸 1.5m×1.5m×2.2m，支持最大 500kg 载荷出舱，配备双侧舱门+多层密封设计，泄压时间≤30 分钟。
- 机械臂协同操作：采用“抓取-转移-锁紧”三步骤，定位精度±2mm，全程耗时≤2 小时。

（2）暴露实验装置功能：

- 搭载宇宙辐射剂量计（测量质子、重离子通量）和材料腐蚀监测模块，数据回传速率 10Mbps。
- 支持无人化实验更换，通过机械臂每年可更新 3 批次载荷，实验周期覆盖 6-24 个月。

背景延伸：

- 梦天舱外暴露平台已部署 22 个标准接口，2023 年完成中欧合作“太空育种”项目，累计暴露植物种子 1200 份。

3. 问天实验舱

（1）基础概况与设计架构

①基本参数

- 尺寸与质量：舱体总长 17.9 米，直径 4.2 米，发射质量约 23 吨，是当时全球现役最重的单舱主动飞行器，相当于 6 层楼高度。
- 组成结构：由工作舱、气闸舱、资源舱三部分构成，加压空间达 100 立方米（与天和核心舱组合后增至 110 立方米）。
- 生活支持：舱内设 3 个睡眠区和 1 个卫生区，支持 6 名航天员短期共驻（如神舟十四号与十五号乘组轮换期间）。

②独特构型

- 气闸舱“外方内圆”：外部方形结构为舱外暴露实验平台，内部圆柱空间为航天员出舱专用“更衣间”，舱门直径达 1 米（比核心舱大 15 厘米），出舱空间扩大至 12-13 立方米，支持携带大型设备进出。
- 工作舱设计：我国最大单密封舱体，储物空间超 60 立方米，配备可翻转柜门、独立防辐射舷窗，优化航天员长期驻留舒适性。

（2）、三大核心技术突破

①柔性太阳翼：空间站“主发电站”

- 尺寸与性能：单翼翼展 27 米，总面积超 220 平方米，双翼发电功率 18 千瓦，日均发电量 430 度（满足普通家庭 1.5 月用电）。
- 技术创新：
 - 采用双自由度对日定向，无需调整舱体姿态即可追踪太阳。

- 发射时二次展开：先展开 1/5 降低控制难度，对接后完全展开确保稳定供电。
- 能源整合：空间站建成后，核心舱一太阳翼移至问天舱尾部，使其成为组合体核心能源枢纽。

②小机械臂：舱外精细操作“能手”

- 参数：长度 5 米，承载能力 3 吨，7 自由度设计，精度达毫米级。
- 功能创新：
 - 独立完成舱外载荷安装、更换等操作，减少航天员出舱负荷。
 - 与核心舱 10 米大机械臂组合成**15 米级联臂**，实现全空间站表面覆盖爬行与协同作业（如设备转移、舱段巡检）。

③载荷自动对接系统

- 22 个标准舱外接口：支持机械臂将科学载荷精准“投送”至接口，实现“即插即用”，无需航天员出舱操作。
- 暴露实验平台：分朝天面、迎风面等区域，适配空间天文、地球观测等不同方向的实验需求。

（3）科学实验能力

①舱内实验设施

- 8 个实验柜机位，已部署 4 大核心实验系统：
 - 生命生态实验柜：培育拟南芥、斑马鱼等生物，研究微重力对生物生长与衰老的影响。
 - 生物技术实验柜：开展细胞培养、蛋白质结晶分析，助力新药研发。
 - 变重力科学实验柜：提供**0.01G~2G**可调重力环境，模拟月球/火星重力效应。
 - 科学手套箱与低温存储柜：支持-80℃至 4℃样品存储及无菌精细操作。

②舱外探测与保障

- 环境监测：部署能量粒子探测器、等离子体成像仪，实时监测空间辐射与碎片撞击风险。
- 安全防护：舱壁集成结构健康监测系统，可自动定位撞击点并报警。

（4）关键任务节点与运行

- 2022 年 7 月 24 日：长征五号 B 遥三火箭发射升空。
- 2022 年 7 月 25 日：与天和核心舱前向端口对接，形成“一”字构型。
- 2022 年 9 月 30 日：通过平面转位 90°至侧向停泊口，空间站转为“L”构型，为梦天舱对接预留前向接口。
- 在轨功能验证：
 - 神舟十四号航天员首次启用气闸舱出舱。
 - 大小机械臂完成级联测试，实现组合臂爬行。

（5）战略意义与独特价值

①平台可靠性提升

- 作为天和核心舱的功能备份，可接管空间站整体控制权，实现能源、信息、环控系统的“双保险”。
- 气闸舱与节点舱形成出舱双通道，紧急时互为备份保障安全。

②科学应用拓展

- 成为空间生命科学研究核心平台，推动我国在太空农业、生物医药等领域突破。
- 开放 22 个国际载荷接口，支持全球科学家参与实验（如日本、欧洲项目）。

③深空技术验证

- 柔性太阳翼、组合机械臂等技术为后续载人登月、月球科研站建设积累关键经验。

问天实验舱气闸舱：舱外暴露实验平台及 22 载荷接口

(1) 接口技术规格

- 标准化设计：符合国际空间站通用接口标准（ISSA），支持即插即用，可安装欧洲、俄罗斯等国际合作设备。
- 供电与通信：每个接口提供 28V 直流电源（最大 500W）和千兆以太网数据传输能力。

(2) 典型实验案例

- 材料暴露实验：测试航天器涂层在原子氧（LEO 环境主要腐蚀因素）作用下的老化规律。
- 生物实验：研究宇宙射线对水稻种子的基因突变影响，为未来深空农业提供数据。

(3) 扩展应用

- 2023 年首次部署“巡天”望远镜初期试验模块，验证超精密光学设备在轨稳定性。

4. 2012 年我国首次手动交会对接

(1) 技术难点与操作细节

- 手动控制精度：航天员需在高速运动（相对速度 0.2m/s）中操控飞船，位置偏差需控制在 18cm 以内，角度偏差小于 5 度。
- 人机协同设计：神舟九号飞船配备光学成像传感器（敏感器）和手控操纵杆，实时显示对接靶标图像，辅助航天员判断。

(2) 任务流程与突破

- 6 月 18 日：自动对接成功，验证系统可靠性。
- 6 月 24 日：刘旺手动操作耗时约 7 分钟完成对接，精度达厘米级。
- 技术验证：首次实现“从百公里到接触”全流程手动控制，突破地面模拟无法复现的太空动力学环境难题。

(3) 后续影响

- 为天宫二号（2016 年）与神舟十一号的手动对接奠定基础，并应用于空间站核心舱（天和）与货运飞船的对接任务。

三、关键载人飞行任务

- 神舟系列飞船：已执行 16 次任务（截至 2023 年），核心突破：

- 神舟十二号（2021 年）：航天员聂海胜、刘伯明、汤洪波进驻天和核心舱，实现中国航天员首次空间站驻留（3 个月）。
- 神舟十三号（2021 年）：翟志刚、王亚平、叶光富首次在轨驻留 6 个月，王亚平完成中国女性首次太空行走。
- 神舟十四号/十五号（2022 年）：首次实现空间站“在轨轮换”，6 名航天员共驻留 5 天。

1. “神舟”系列飞船：三舱布局（轨道舱、返回舱、推进舱）

(1) 各舱段功能细分：

- 轨道舱：直径 2.5m，配备环控生保系统（支持 3 人 7 天在轨）、科学实验柜（如蛋白质结晶装置）。
- 返回舱：隔热层采用蜂窝结构烧蚀材料，再入时承受 1600℃ 高温，过载峰值 $\leq 3.5g$ 。
- 推进舱：搭载 4 台 2500N 主发动机+16 台姿控发动机，总推力 14kN，可提供 ΔV 350m/s。

(2) 设计演进：

- 神舟十二号起取消轨道舱留轨功能，改为纯载人设计，减轻发射重量 300kg。
- 推进舱燃料装载量从神舟五号的 1.2 吨增至神舟十七号的 1.8 吨，延长在轨待机时间至 6 个月。

背景延伸：

- 三舱构型继承自苏联联盟号飞船，但中国优化了电子系统集成度（减少 40% 电缆长度）和热防护效率（烧蚀层减薄 20%）。

2. 深空探测器的能源系统特点

(1) 能源技术差异：

- 太阳能限制：
 - 深空探测器（如“天问一号”火星探测器、“嫦娥五号”月球探测器）因远离太阳，太阳能电池效率随距离平方衰减。例如：
 - 地球轨道太阳能功率约 $1.4kW/m^2$ ，火星轨道降至约 $0.6kW/m^2$ ，木星轨道仅 $0.04kW/m^2$ 。
 - 实际案例：“旅行者”号探测器在远离太阳后，完全依赖核电源（钚-238 放射性同位素电池）。
- 核电源应用：
 - 中国“嫦娥四号”月球车使用同位素热电机（RTG）保障月夜生存，输出功率约 150W。
 - “天问一号”火星车设计寿命 90 天，实际运行超 1 年，依赖太阳能优化技术（光电转换效率 $\geq 30\%$ ）与休眠模式结合。

(2) 通信与导航挑战：

- 深空通信：
 - 火星探测器与地球通信延迟达 3-22 分钟，需自主故障诊断系统（如“天问一号”曾自主处理太阳能帆板展开异常）。
- 精确控制：
 - “嫦娥五号”月面采样时，7500N 变推力发动机实现悬停避障，着陆精度 $\pm 10m$ 。

3. 可重复使用航天器的经济性

(1) 成本降低机制：

- 一级火箭回收：
 - SpaceX 猎鹰 9 号一级火箭重复使用 10 次以上，单次发射成本从 6200 万美元降至 3000 万美元（降幅 52%）。
 - 中国长征 8R（可回收型）目标将低轨发射成本降至 5000 美元/公斤（现役火箭约 10000 美元/公斤）。
- 维护技术：
 - 可复用火箭需耐高温涂层（如碳碳复合材料）、发动机健康监测系统（传感器超 200 个），翻新周期 ≤ 30 天。

(2) 中国进展：

- 试验里程碑：
 - 2020 年，长征 8 号首飞验证垂直起降技术；2023 年，成功回收“腾云工程”亚轨道飞行器。

- 发动机技术：

- YF-100K 液氧煤油发动机（推力 1200kN）支持 50 次点火复用，为下一代重复使用火箭提供动力。

4. 新一代载人飞船设计革新

(1) 构型优化：

- 两舱设计：

- 返回舱（载人密封舱，直径 4.5 米，容积 13m³，较神舟返回舱扩大 3 倍）+ 服务舱（推进与能源模块）。
- 取消轨道舱，将生命保障系统集成至返回舱，减轻死重 1.2 吨。

- 载员能力：

- 近地任务：6-7 人（座椅可折叠，留出 4m³ 货物空间）；月球任务：3-4 人（含月面着陆装备）。

(2) 关键技术突破：

- 自主变轨：

- 采用 GNSS/天文联合导航，轨道控制精度 ±10 米（神舟飞船为 ±100 米）。

- 热防护升级：

- 新型轻质烧蚀材料（密度 0.7g/cm³），再入热流峰值耐受能力达 5MW/m²（神舟为 3MW/m²）。

背景延伸：

- 该飞船计划用于 2030 年前后载人登月任务，与“长征十号”火箭（地月转移轨道运力 27 吨）组成载人月球探测系统。

5. 航天飞机与载人飞船结构对比

(1) 系统复杂度分析：

- 航天飞机（以美国 STS 为例）：

- 包含轨道器（2,000+子系统）、外贮箱（7.8 万升液氢/液氧）、固体助推器（单台推力 12MN），发射前检测项目超 350 万项。

- 维护成本：每次飞行后需 120 天检修，费用达 4.5 亿美元（单次发射总成本 > 15 亿美元）。

- 载人飞船（以神舟为例）：

- 仅 3 个舱段+逃逸塔，发射前检测项目约 50 万项，单次任务成本 < 3 亿美元。

(2) 运载能力对比：

- 航天飞机：近地轨道运力 24 吨（可运送“哈勃望远镜”11 吨），货舱尺寸 18.3m × 4.6m。

- 载人飞船：神舟飞船载人能力 3 人+300kg 货物；新一代飞船载人能力 6-7 人+500kg 货物。

背景延伸：

- 中国正在研发部分可重复飞船（如新一代试验船），目标复用次数 ≥ 10 次，单次成本降低至 1 亿美元以下，填补航天飞机退役后的能力空白。

6. 2022 年 11 月神舟十五号、十四号乘组会师中国空间站，开启长期有人留驻模式

(1) 任务时间线与人员构成：

- 神舟十四号：2022 年 6 月 5 日发射，乘组为陈冬（指令长）、刘洋（中国首位女航天员二次飞天）、蔡旭哲（首次飞行），在轨 183 天。

- 神舟十五号：2022 年 11 月 29 日发射，乘组为费俊龙（指令长，曾执行神舟六号任务）、邓清明（备战 24 年首次飞天）、张陆（首次飞行），在轨 186 天。

- 会师时间：2022 年 11 月 30 日 7 时 33 分，两乘组于天和核心舱节点舱完成历史性握手，开启中国空间站首次在轨交接。

(2) 技术验证重点：

- 生命保障系统冗余：
 - 两套电解制氧机同时运行，最大产氧量 6 人 $\times$ 0.8kg/天，氧浓度维持 21% $\pm$ 1%。
 - 水循环系统日处理量达 4.2 吨，再生水利用率 $\geq$ 95%。
- 协同工作模式：
 - 采用“老带新”操作模式，神舟十四号乘组向十五号移交空间站操作手册（含 1200 余项操作细则）。
 - 两艘神舟飞船同时停靠，验证对接机构抗干扰能力（间距 $\leq$ 10 米时电磁兼容性）。

背景延伸：

- 空间站构型升级：此时空间站形成“三舱三船”构型（天和核心舱、问天实验舱、梦天实验舱 + 神舟十四号、神舟十五号载人飞船 + 天舟五号货运飞船），总质量达 98 吨，超越国际空间站单个舱段规模。
- 战略意义：标志着中国成为继俄罗斯之后，全球第二个掌握长期在轨驻留技术的国家，为后续载人登月任务积累深空生存数据。

7. 神舟八号首次自动交会对接目标

- 核心知识点：

(1) 任务技术细节：

- 对接时间与轨道：2011 年 11 月 3 日，轨道高度 343 公里，对接速度差 $<0.2\text{m/s}$ ，横向偏差 $\pm 18\text{cm}$ ，角度偏差 $\pm 5^\circ$ 。
- 制导系统：
 - 激光雷达：作用距离 30-200 米，测量精度 $\pm 1\text{cm}$ （用于近距离精确测距）。
 - 微波雷达：作用距离 100 米-100 公里，抗干扰能力强（用于中远距离跟踪）。
 - 光学成像敏感器：分辨率 1280 $\times$ 1024 像素，识别目标标志器（用于最终逼近阶段）。

(2) 天宫一号设计参数：

- 质量与尺寸：长 10.4 米，最大直径 3.35 米，质量 8.5 吨，实验舱加压容积 15 立方米。
- 能源系统：2 组太阳翼，展开后跨度 18 米，发电功率 6kW。
- 在轨寿命：设计寿命 2 年，实际超期服役至 2016 年 3 月（共 1630 天）。

(3) 技术突破意义：

- 自主控制系统：突破“寻的段-接近段-平移靠拢段”全自动控制算法，软件代码量超 50 万行。
- 对接机构：
 - 异体同构设计（兼容未来空间站），捕获锁可承受 10 吨冲击力。
 - 密封性能：对接后漏率 $<1\times 10^{-6}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ ，保障舱间气压稳定。

四、核心技术突破

1. 在轨交会对接：

- 突破“径向对接”技术（神舟十三号垂直对接核心舱），适应复杂对接角度。

2. 空间机械臂：

- 天和核心舱机械臂长 10 米，7 自由度，可自主爬行转移，辅助舱段转位、设备安装。

3. 能源与生命保障:

- 柔性太阳翼（单翼发电功率 9kW），能源转化效率超 30%。
- 水回收率>95%，氧气自给率 100%。

4. 快速返回技术:

- 神舟飞船返回时间从 24 小时缩短至 8.3 小时（神舟十三号起应用）。

五、科学应用与国际合作

1. 空间科学研究:

- 已部署 25 个实验柜，开展：
 - 空间生命科学（细胞培养、植物生长）
 - 微重力流体物理（高温材料无容器悬浮实验）
 - 空间天文（巡天望远镜“CSST”将于 2024 年对接空间站）

2. 国际合作开放:

- 首批入选 9 项国际实验项目（日本、欧洲等 17 国参与）。
- 向全球开放空间站资源，联合国/中国共同遴选国际航天员。

3. 变重力科学实验柜：可模拟 0.01g 至 2g 重力环境

(1) 离心机技术细节

- 双转子设计：主转子直径 1.2 米，通过变频电机实现 0-100rpm 无级调速，对应 0.01g-2g 重力范围。
- 微重力模拟：0.01g 通过“自由落体补偿算法”实现，结合空间站微环境进行动态修正。

(2) 实验场景举例

- 0.38g（火星重力）：培养拟南芥，研究其根系在低重力下的生长方向变化。
- 1.62g（月球重力×2）：测试月壤模拟物的颗粒沉降规律，为月球基地建设提供参考。

(3) 国际地位

- 超越国际空间站“离心机实验室”（仅支持 0.01g-1.5g），成为目前太空重力模拟能力最强的设备。

4. 2024 年 3 月 14 日神舟十七号航天员完成首批舱外暴露实验材料样品取回：非金属材料

总计 407 件

(1) 样品分类与用途

- 非金属材料（258 件）：
 - 航天器隔热材料（如二氧化硅气凝胶）测试长期辐射下的性能衰减。
 - 柔性太阳能电池膜，验证在极端温差（-150℃至+120℃）下的发电效率。

- 金属材料（149 件）：
 - 新型钛铝合金，评估原子氧腐蚀速率，用于下一代载人飞船结构。
 - 形状记忆合金（如镍钛合金），测试太空环境下的形变恢复能力。

（2）实验周期管理

- 样品分批次暴露：首批 407 件（2023 年 9 月部署），计划每 6 个月回收 1/3，分阶段分析数据。
- 最长暴露时间达 2 年，研究材料性能的渐变规律。

（3）战略价值

- 为嫦娥七号（2026）月球南极探测器的材料选型提供依据，特别是抗月尘磨损涂层技术。
- 支撑载人火星任务（2030 年代）中飞船防护系统的设计，应对太阳风与宇宙射线。

5. “高温材料科学实验柜”升空：可开展 1600℃微重力高温材料实验

（1）加热炉技术参数：

- 多温区梯度控制：5 个独立温区（最高温区 1600℃±5℃，低温区 200℃），温控精度±0.5℃。
- 微重力兼容设计：采用电磁悬浮技术防止熔融材料接触容器，污染率<0.01%。

（2）典型实验成果：

- 钛铝合金制备：在微重力下消除成分偏析，拉伸强度提升至 1.2GPa（地面同类材料 0.8GPa）。
- 透明陶瓷烧结：获得 99.99%致密度的氮化铝陶瓷，导热系数达 285W/(m·K)，用于航天器散热系统。

背景延伸：

- 该设备填补国际空间站无同类高温实验装置的空白，2024 年计划开展月壤模拟物熔融实验，为月球原位制造提供数据。

六、未来规划

1. 空间站长期运营（2024-2030 年）

- 每年 2 次载人飞行，每 2 年 1 次货运补给，常态化开展科学实验。
- 巡天空间望远镜（CSST）：2024 年独立发射，与空间站共轨飞行，视场达哈勃望远镜 300 倍。

2. 载人月球探测（2030 年前后）

- 研制新一代载人飞船（可载 7 人）与月面着陆器。
- 目标：实现中国人登月，建立国际月球科研站（与俄罗斯合作）。

七、工程意义

- 技术自主：关键核心部件 100%国产化（如空间机械臂关节、舱外航天服）。
- 科学价值：为人类认知宇宙规律、发展太空经济提供平台。
- 国际地位：成为全球唯二独立拥有空间站的国家，推动构建“外空命运共同体”。

1. 国际空间站首个舱段发射时间

- 核心知识点：

(1) 曙光号 (Zarya) 发射细节:

- 发射时间: 1998 年 11 月 20 日, 由俄罗斯质子-K 火箭从拜科努尔发射场发射。
- 舱段功能:
 - 推进系统: 配备 24 台推力器, 提供姿态控制和轨道维持能力 (燃料为四氧化二氮/偏二甲肼)。
 - 能源系统: 6 块太阳能板, 初期发电功率 3kW, 为早期舱段提供电力。
 - 对接接口: 前端设计为俄罗斯 SSVP-M8000 对接系统, 后端兼容美国 APAS-95 对接机构。
- 质量与尺寸: 长 12.56 米, 直径 4.11 米, 发射质量 19.3 吨, 内部加压容积 71.5 立方米。

(2) 国际合作里程碑:

- 团结号 (Unity) 对接: 1998 年 12 月 4 日, 美国航天飞机 STS-88 任务将团结号节点舱与曙光号对接, 首次实现美俄舱段联合。

- 早期建设阶段:
 - 1999 年: 俄罗斯服务舱 (星辰号) 发射, 提供生命支持系统。
 - 2000 年: 首个常驻乘组 (Expedition 1) 进驻, 开启连续载人时代。

(3) 技术意义:

- 模块化设计: 曙光号采用多功能货舱设计, 支持后续舱段灵活扩展。
- 国际合作模式: 美俄技术标准融合 (如对接机构兼容性), 为多国协作奠定基础。

2025 年载人登月重大进展

工程进展: 2025 年我国载人登月任务各项研制建设工作总体进展顺利。长征十号运载火箭、梦舟载人飞船、揽月着陆器、望宇登月服、探索载人月球车等飞行产品已完成初样阶段主要工作。2025 年内组织完成了长征十号运载火箭系留点火试验 (验证火箭发射前的动力系统稳定性)、梦舟载人飞船零高度逃逸试验 (验证发射段逃逸功能)、揽月着陆器着陆起飞综合验证试验 (验证月面着陆与起飞的关键技术) 等一系列关键技术试验。

整体目标: 中国计划在 2030 年前实现中国人首次登陆月球。发射场、测控通信、着陆场等地面系统研制建设工作正加速推进, 为这一宏伟目标奠定坚实基础。



上海未来工程师大赛组委会