

空间站概述

范剑峰

(空间飞行器总体设计部)

自1961年世界上第一名航天员上天以来,载人航天技术有了飞速的发展。载人航天器已由初期的小型载人飞船,发展到大型空间站和航天飞机。

空间站的诞生,特别是永久性空间站的建立,将会引起人类社会的众多方面发生重大而深刻的变化。

本文首先就过去十多年中美国、苏联和欧洲发射的空间站作一简略概括,然后对空间站的构型,用途和未来发展等进行论述。

主题词: 航天站, 概念, 模式, 发展。

一、现代空间站概况

空间站(又称太空站或航天站)是一种可供多名航天员巡访,长期工作和居住的载人航天器。空间站在轨道运行期间,航天员和物资由载人飞船或航天飞机运送,补给物资也可由无人航天器运送。

1971年4月,苏联发射了世界上第一个空间站——“礼炮1号”。1973年5月美国发射了“天空实验室”空间站。1983年11月,欧洲空间局的“空间实验室”空间站随美国的“哥伦比亚号”航天飞机进入近地轨道。1986年2月,苏联继“礼炮号”空间站之后发射了规模更大的“和平”号空间站。

苏联自1971年4月到1983年底共发射了7个“礼炮号”空间站。“礼炮号”空间站由轨道工作舱、服务舱、对接过渡舱和太阳能电池阵等几大部分组成,总重约 18×10^3 千克,长约14米,最大直径4.15米。“礼炮号”空间站在离地面200~300千米左右的近地轨道上运行,轨道倾角 51.6° 左右。“礼炮号”空间站在轨道运行期间受大气阻力,轨道逐渐降低时,可以启动服务舱内的轨道维持系统,使空间站回到原有轨道上。“礼炮号”空间站上的航天员由“联盟号”飞船接送,空间站所需的补给物资由自动驾驶的“进步号”飞船运送。运人和送货分开,是苏联“礼炮号”空间站系统的特色,它既增加了“进步号”的运货能力,又减少了航天员的不必要的飞行次数。

“天空实验室”是美国的第一个试验性空间站。它由轨道工作舱、气闸舱、多用途对接舱、太阳望远镜和太阳能电池阵等组成,最大直径6.7米,包括“阿波罗”飞船在内,总重 82×10^3 千克,长36米。航天员由“阿波罗”飞船接送。“天空实验室”的运行轨道比“礼炮号”高,为离地面435千米的近圆轨道,倾角 50° 。“天空实验室”共接待了三批航天员,每批三人,在空间站内分别工作和生活了28天,59天和84天。

“天空实验室”的主体由“阿波罗”登月计划节余的“土星 5 号”运载火箭的第三级箭体改装而成。它虽比“礼炮号”大，但其性能不如“礼炮号”。轨道工作舱的环境控制系统基本上沿用载人飞船上的技术，没有采用再生或半再生式系统，而是开环系统。此外，“天空实验室”没有轨道维持系统，它在空间运行 6 年后，在大气阻力作用下陨落。

欧洲联合研制的“空间实验室”由轨道工作舱和 U 型货盘两大部分组成。轨道工作舱有长舱和短舱两种。长舱长 7 米，短舱长 4 米，直径均为 4 米。货盘长 3 米，宽 4.5 米。“空间实验室”只能装在美国航天飞机的货舱中，随航天飞机一起飞行，所需的水、电等由航天飞机提供。所以，严格说，“空间实验室”不能称为空间站。欧洲航天局利用“空间实验室”做了大量微重力环境的生命科学和材料科学实验，取得了研制空间压力舱的经验，为下一步研制独立飞行的空间站奠定了基础。

二、空间站系统的组成

空间站是一项技术复杂，涉及领域非常广泛的大型工程。空间站系统包括以下六大系统：1. 空间站。2. 航天运输系统。3. 有效载荷。4. 航天员。5. 发射场。6. 测控网。

过去 15 年上天的空间站都是由各种舱段组成的整体，没有与整体分离的自由飞行的航天器。

但是，在十多年的空间站实践过程中，人们发现有些试验项目，如精确的天文观测和极微小重力下的材料加工等，在空间站上会受到航天员的扰动和环境污染的影响，应该在与空间站的主体分开，但又由空间站主体加以管理的自由飞行的航天器上进行。这类航天器称做飞行平台。飞行平台分为同轨平台和不同轨平台两种，前者在空间站的轨道平面内飞行，后者一般在极地轨道或太阳同步轨道上飞行。

空间站上的航天员为了维修、更换或取回空间平台上的资料，需要有空间站与飞行平台之间的交通工具，称为轨道间飞行器，通常有轨道机动飞行器（OMV）和轨道过渡飞行器（OTV）两种。

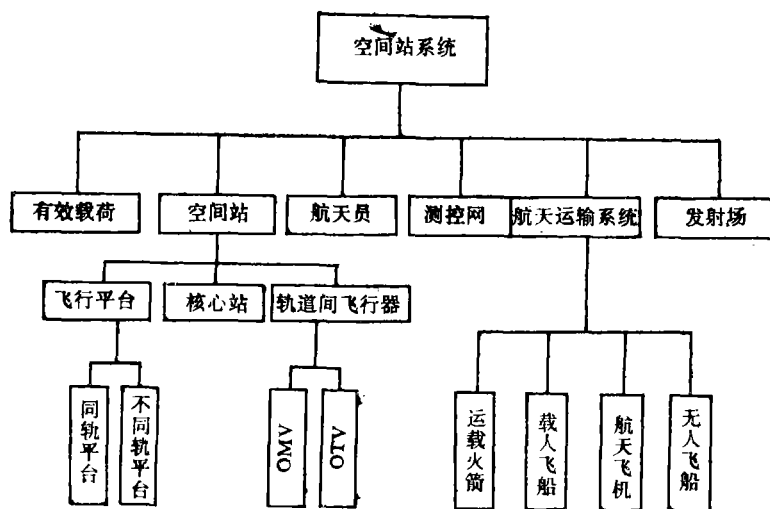


图 1 空间站系统组成

空间飞行平台的产生导致空间站概念的拓广。美国永久性空间站的含义不仅指由几个舱段组成的空间站主体,还包括同轨平台、极轨平台、OMV和OTV在内。

航天运输系统包括运载火箭、载人飞船、无人自动驾驶飞船和航天飞机等。空间站可由消耗性运载火箭或航天飞机发射。

三、空间站的构型

空间站的构型正在沿着舱段式、复合式和桁架挂舱式的方向发展。

“礼炮号”,“天空实验室”和“空间实验室”三种空间站都属于舱段式构型。它们由各种不同形状和尺寸的多个舱段组成,以压力舱作为空间站的结构基础,入轨后太阳能电池阵等部件自行展开,不需航天员出舱组装。

苏联“宇宙号”和“礼炮号”对接组成的轨道复合体,以及最近发射的“和平号”空间站属于复合式构型。它们由多个舱段在空间交会对接后组成。复合式构型是舱段式构型的合理发展。复合式构型可以重复复合,最后组成庞大的空间站体系。

美国计划发展的永久性空间站的构型与前两种不同。它的舱段安装在可展开的三角形桁架结构上,称作桁架挂舱式构型。

在研制经费和总重量约束的条件下,舱段式构型的硬件最少,压力舱的容积最大,可以进行大量舱内实验;空间站主体对地定向,便于对地观测;舱段式构型最主要的优点还在于不需要航天员在轨道上组装。所以,早期空间站都采用舱段式构型。

舱段式构型的特点在于构型太死板,不够灵活,要想改变形状或为了修理而取下压力舱,非常困难;太阳能电池阵的可展开面积最小,输出电力受限制,当用户要求增加电力时,难以实现;从姿态控制系统的观点看,舱段式构型的控制系统设计比较复杂,需要细心建立结构的数学模型和设计控制软件;此外,舱段式构型的太阳能电池阵离控制喷管较近,容易受喷气的污染。

桁架挂舱式的优点,是有很大的灵活性,可以根据用户需要组成各种不同形状的空间站。桁架挂舱式采用三角形桁架结构,可以获得大的刚度,并可利用重力梯度稳定姿态,控制系统比舱段式简单。

桁架挂舱式的结构不象舱段式那样紧凑,有效载荷可以方便地从对接口出入。桁架间的宽阔的空间可以安装各种观测仪器和增设太阳能电池阵。

桁架挂舱式空间站的主要部件都安装在桁架上,需要有多种形式的连接机构,似乎是个缺点。但是,这些连接件比舱段式的通用连接件简单,而且,部件安装在桁架上便于拆卸、修理和更换。

桁架挂舱式空间站的部件比较分散,特别是当桁架长达百米以上时,航天员的生活舱和试验舱离桁架上的有效载荷的距离较远。这个距离的远近,非常重要。距离太远,航天员在试验舱内观察不到远处的仪器,航天员从试验舱到桁架顶部去维护有效载荷要花费很多时间。

桁架挂舱式空间站最令人担忧的是折叠式桁架能否在空间顺利展开,特别是要在已经展开的桁架区,进一步展开附加的桁架。

此外,桁架挂舱式空间站需要由航天员在轨道上组装,技术复杂,难度很大。

四、空间站的技术关键

空间站的技术关键大致有以下八项：①大型构架的展开；②挠性体的姿态控制；③轨道交会对接；④航天员出舱活动；⑤再生式环境控制和生命维持；⑥大功率电源；⑦长寿命的活动部件；⑧救生。

未来空间站的各种大型构件，如桁架结构、抛物面天线、仪器支架、太阳能电池阵等，都要在轨道上展开。展开过程在高速飞行、伴随姿态运动和在失重环境下进行的。展开机构可能失灵或不同步，展开过程中可能发生碰撞等等。

空间站上的大面积太阳能电池阵是个挠性结构，空间站内的液体和气体在流动，航天员在不停地运动，加上外力的摄动和大型构件展开过程的扰动，使空间站的姿态控制变得十分复杂，存在结构动力学、姿态动力学和轨道动力学之间的强耦合。

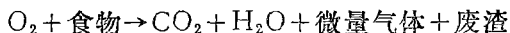
航天飞机（或载人飞船）与空间站交会对接难度很大，涉及到测距测速系统、控制系统和对接机构等。其中控制更困难。空间站的质心运动和姿态运动，共有六个自由度，航天飞机（或载人飞船）也有六个自由度。交会对接系统必须不断地测量和控制12个自由度，使两者准确地会合对接。

航天员出舱活动会受到空间粒子辐射、热辐射、冷背景和超高真空的威胁。航天员需穿上特殊的宇宙服，携带便携式生命维持设备和乘坐机动飞行椅等。

空间站的环境控制和生命维持系统与已往的载人飞船不同。载人飞船在空间的飞行时间不长，座舱环境控制和生命维持系统比较简单，通常都采用非再生式开环系统。

空间站在轨道上的飞行时间比载人飞船长很多，特别是永久性空间站要在轨道上长期工作，非再生式环境控制和生命维持系统已不能满足要求。例如，采用非再生式系统，三名航天员在空间站上生活三个月，需要补给的呼吸用氧，清除二氧化碳的氢氧化锂以及饮用水和洗涤水等总重达三吨左右。这个数量显然太大了。所以，永久性空间站势必要采用再生系统。但是，全部采用再生系统，技术上尚有困难。美国的永久性空间站计划采用部分再生系统，即氧气和水再生复用，食物由运输飞船或航天飞机补给。

人吸进氧气与食物产生新陈代谢，其过程如下：



美国计划用固体氨水吸附装置或电化学去极浓缩器清除和浓缩航天员呼出的二氧化碳。将二氧化碳冷却到室温24℃和加压到 $61 \times 10^5 \text{Pa}$ ，使其液化。借助萨巴蒂尔(Sabatier)过程或鲍斯奇(Bosch)过程使 CO_2 变成 CH_4 和 H_2O 或变成C和 H_2O ，然后将水电解获取氧气。此外，再用蒸汽凝缩蒸馏系统或热膜蒸发系统复用废水和回收航天员小便中的水分。也可能采用最简单的多重过滤法（细粒、离子交换膜和活性炭）回收废水。

随着空间产业的诞生，用户对电源的需求量不断增大。美国永久性空间站初期功率为75千瓦，后期为300千瓦，太阳能电池阵的面积达4000米²。巨大的太阳能电池阵带来很大的气动阻力，空间站的轨道高度会迅速降低。

为了减少空间站的轨道气动阻力，空间站的电源系统必须采用新技术。美国的TRW公司正在研制一种新型电源系统。准备以高效砷化镓太阳能电池代替常规的硅太阳能电池。采用卡塞洛聚光器将入射阳光首先投射到抛物型的凹面镜上，经凹面镜反射后投到双凹型凸面镜

上,再由凸面镜使阳光最后聚焦在凹面镜中心底部的砷化镓太阳电池上。采用上述技术以后,不仅能够提高空间站的电力,而且空间站的太阳电池阵的面积可减小三分之一左右。

能否研制出长寿命的活动部件,直接关系到空间站的工作寿命。空间站上的活动部件,例如太阳电池阵的转动轴,集流环、抛物面天线的旋转平台、陀螺、飞轮、泵和马达等等,它们的平均无故障时间比静止部件要短得多。因此,在空间站的设计中要考虑到在轨道上修理或更换活动部件。然而,有些活动部件,例如太阳电池阵的转动轴,在轨道上几乎是无法更换的。所以研制长寿命的活动部件也是建立永久性空间站的一项关键技术。

早期载人飞船上升过程中,航天员的应急救生方法有逃逸塔和弹射座椅两种。但是,在轨道飞行段,没有专门的救生措施。美国航天飞机上升段曾考虑采用小型固体逃逸火箭,但是后来没有安装这种逃逸火箭。航天飞机是以提高各分系统的可靠性来增加航天员的安全性。

空间站在轨道上长期运行期间,在空间冷热交变、辐照、微流星和超高真空等恶劣环境的作用下,空间站的各个分系统都可能出现故障。美国和苏联的早期空间站,在轨道运行期间长期与载人飞船对接在一起,一旦空间站出现严重故障,航天员可以乘飞船返回地面。

美国空间站将由航天飞机接送航天员。航天飞机不宜长期与空间站对接飞行,应该有另外的救生措施。目前设想有两种方法:将空间站建成各舱单独密封式,每个压力舱都可作为航天员的临时避难所。这种方法要求每个压力舱都有独立的应急环境控制系统,增加了空间站的复杂性。另一种方法是设计专门的太空救生舱。太空救生舱通常与空间站对接在一起,在空间站失事后,航天员可以迅速进入太空救生舱,然后飞离空间站。

太空救生舱可分为返回式和非返回式两种。返回式救生舱有再入防热结构和脱轨推进系统,必要时可以运送航天员返回地面。非返回式救生舱只能在轨道上飞行,等待地面发射航天飞机去营救,或者飞往其它邻近的空间站去避难。目前空间站的对接机构逐渐趋向国际化,就是为此目的而考虑的。

空间站的在轨救生涉及轨道交会对接、应急环境控制以及研制新型的太空救生舱等技术,它是空间站系统的又一个关键组成部分。

五、空间站的用途

空间站的发展促进了电子、材料、机械、化工、推进、能源、冶金、遥感、计算机、自动化技术以及空间物理学、航天医学、空间生物工程和天文学的迅速发展。特别是人在空间能充分发挥独有的触觉、主观观察、判断以及对意外情况的处理等特点,在空间维修失效的航天器,组装大型空间结构,进行科学实验和从事空间生产等方面,已经或正在发挥巨大的作用。

早期空间站属试验性质,主要用来进一步发展航天技术,考察人在空间的生活和工作能力,兼顾观天和测地。

经过25年的载人航天实践,人们已经认识到空间站有及其广泛的用途。它们大致可以分为六类:①材料加工和生产;②研究生命科学及其应用;③发展空间科学;④对地观测;⑤用于通信;⑥发展空间技术。各类试验对空间站有不同的要求,例如天文仪器要求高精度的指向和宽广的视野。但是,对轨道倾角没有要求。对地观测和近地环境测量要求大倾角轨

表 1 各类用途的部分具体项目

空间科学	高能宇宙射线探测 伽玛射线爆发观测 x 射线测量 太阳活动监视 电离层异常和非均匀结构观测 空间环境测量 重力波探测	材料科学和商业生产	研制新型合金 单晶制备 提纯金属 制造金属玻璃 珍贵药用微生物酶提取
	对地观测	生命科学	细胞生物学研究 生物节律控制 生物分子结晶 空间植物学实验 空间医学研究
通信		空间技术	大型空间结构 空间平台技术 太阳能热机 高级能源系统 液体推进剂管理 空间机器人

道。生命科学实验要在压力舱内进行,保证有生存的环境。材料加工和制药要求极小的微重力环境和超高真空,详见表 2^[12]。

材料加工和制药是空间站的一项重大应用。在地面重力影响下,流体中密度不同的成分会产生沉淀和对流,阻碍精确的分离和充分地混合,无法制造出高纯度的材料、药品和无缺陷的晶体。在地面上人们采用一系列的分离方法,例如电泳和电渗透技术等等。但是,在地面上无论是生产的速度还是产品质量都远不如空间。在空间站的微重力环境中,没有沉淀和对流,电泳产量比地面提高 700 倍,产品纯度提高 4 倍。

在空间为卫星服务,是空间站的又一项重大的应用。它包括维护、修理、更换或补给各种必需物资。

空间站为卫星服务,可分为直接操作和遥控两类。直接操作包括在舱外和站内安装连接有效载荷、系绳和组装大型结构件等等。遥控指对飞行平台的各种服务和支持工作,包括无人航天器与平台对接服务,以及由空间站上的航天员控制操作等。

同轨平台始终在空间站的视线范围内(可通信和控制)飞行。一般在空间站附近几千米到几十千米左右,由空间站飞往这类平台只需要少量增速,飞往空间站轨道面两侧 15° 范围内的平台大约需要 2.3 千米/秒的增速,由空间站飞往任意倾角的近地轨道大约需要 4.5 千米/秒增速,飞往地球同步轨道只需要 4.3 千米/秒增速。

由空间站飞往各种平台,可以利用气动力刹车的办法来节省大量推进剂。气动力刹车是一项崭露头角的新技术,在上升或返回转移过程中都可以应用。在低能量轨道转移中,霍曼双冲量轨道是最小能量转移,这时,气动力刹车可用于下降段。当轨道能量增大,三冲量转移变得更为经济时(通常,轨道平面改变超过 25° 时),这时气动力刹车在上升和返回过程中都可以采用。图 2 给出了在 407 千米高的圆轨道上运行的空间站与空间站附近的平台之间来回飞行时所需要的最小速度增量^[13]。从图中可以明显看出气动力刹车的效益。

表 2 各类试验对空间站的要求

参 数	科 目	天 文 物 理 学				地球和行星探测				环 境 观 测	材料加工	生命科学
		高 能				地球资源	行 星		星 移			
		天文学	宇宙射线	伽玛射线	x 射线		太阳物理	观 测				
轨道倾角		/	57°	28.5°	28.5°	/	≥57°	/	28.5°	≥57°, 太阳同步	/	/
指 向		天 体	逆地球	逆地球	天 体	太 阳	天底, 速度矢量	行 星	/	天底, 速度矢 量, 太阳, 磁 力线, 边缘	/	/
指向精度		(秒)	/	(分)	(秒)	(秒)	(分~度)	(秒)	/	(秒~分)	/	/
数传速率 (千比特/秒)		1000~ 100000	100	≤20	50~150	2000~ 50000	100000~ 220000	≤10000	/	8~40000	≤10	≤20, 或 声音/电视
功 耗 (千瓦)		≤1.5	≤1	≤1	≤3	4~7	3~6	4~8	/	1~10	4~10	3~7
质 量 (千克)		1000~ 8000	3000~ 8000	≤7700	2000~ 10000	≤8000	2000~ 3000	3000~ 7000	待 定	1000~3000	4000~10000	7500
重复间隔 (年)		0.5~	0.5~	0.5~2.0	0.5~3.0	/	/	待 定	/	0.5~	0.25~0.5	0.1~0.5
实时工作		是	非	非	非	是	非	非	非	非	非	是
易受影响 的 因 素		细粒和蒸 汽, 排出 物, 指向 扰动	/	来自大型 结构的二 次能量	指 向 扰 动, 背景 辐射	排出物, 指向扰动	排出物, 射频频干扰	排出物及 射 频 干 扰, 指向 扰动	待 定	排出物及射 频干扰, 指 向扰动	≤10 ⁻³ g~ 10 ⁻⁵ g	≤10 ⁻³ g

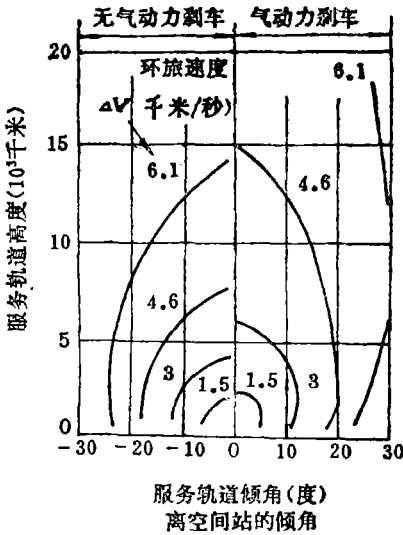


图2 空间站与平台之间来回飞行需要的增速

六、空间站的未来

迄今为止,进入太空的空间站只有“天空实验室”、“礼炮号”、“空间实验室”和“和平号”四种。然而,空间站的发展方兴未艾,目前世界各国正在研制新型空间站。

1984年1月,美国总统里根批准美国航宇局提出的发展永久性空间站的建议。永久性空间站计划于1996年首次发射。它由4个压力舱、2个存贮库、1个修理间、2个大型抛物面天线、4块太阳能电池帆板和桁架结构组成。永久性空间站的航天员和所需的补给物资由航天飞机运送。

在美国研制永久性空间站的同时,联邦德国和意大利提出研制欧洲“哥伦布”空间站的建议。“哥伦布”空间站由4个压力舱、1个资源舱和2块太阳能电池帆板组成。

“哥伦布”空间站的压力舱,初期计划装在美国的永久性空间站上,与美国永久性空间站一起飞行。

日本亦已提出研制太空“试验舱”计划。太空“试验舱”有几种设想方案,其中之一,由1个压力舱、1个后勤舱、货盘和机械手组成。太空“试验舱”只能与美国永久性空间站对接在一起工作。

与此同时,苏联正在“礼炮号”和“和平号”的基础上,加紧研制更大的永久性空间站。

以上各类空间站将在2000年以前上天。它们在离地面几百千米的轨道上运行,都属于近地空间。

地球是人类生活的“摇篮”。但是,人类不能永远生活在“摇篮”里。建立近地空间站,只是人类到太空去生活的第一步。随着航天技术的发展,人类将要在浩瀚的太空中建立起各种各样的大型空间站。在2000年以后,人们将会在地球同步轨道上,甚至地月系统的拉格朗日点建立起巨大无比的永久性空间站,这些空间站将是人们在那里长期生活、生产和飞往月球及其它行星的基地。

参考文献

- [1] J.D.Hodge: The US space station programme, JBIS Vol.38, pp.315—318, 1985.
- [2] Roy Gibson: The space station: The great debate, Spaceflight, Vol.27, February 1985.
- [3] I.V.Frankin: Space station users, JBIS Vol.38, pp.301—304, 1985.
- [4] Craig Covult: Space Station Redesign For Larger Structural Area, Aviation week & space technology, October 14, 1985.
- [5] Carole A.Shifrin: NASA Nears Final Decisions on Station Configuration, Aviation week & Technology, March 10, 1986.

- [6] NASA-TM-87382
- [7] O.P.Harwood, An Evolutionary Space Station Architecture, JBIS Vol.38, pp.305—314, 1985.
- [8] M. N. Tawil, and A.A. Feriara, Space Station Design Concepts, AIAA Paper No.71—431.
- [9] Robert E. Breeding and Harlan F. Brose, Space Station Life Support Systems—Status Report, Earth-Orient. applic. Space Technol. Vol. 5, No. 4, pp.339—344, 1985.
- [10] G.D. Hopson, J.W. Littles and W.C. Patterson, Skylab Environmental Control and Life Support Systems, ASME 71-AV-14.
- [11] Roy Lanier, Jr., Skylab Electrical Power System, N12-22208.
- [12] Daniel H. Herman, Requirement for a Space Station, AAS82-112.
- [13] K. J. Forsberg, H. T. Fisher and J. Thielen, Satellite Servicing From a Space Station, Earth-Orient applic. Space Technol. Vol. 5, No. 4, pp.265-275, 1985.

AN OUTLINE OF SPACE STATION

Fan Jianfeng

Abstract

The space station is unlike any manned spacecraft, it is a permanent facility in space. A space station will permit quantum leaps in our research on science, on space technology, and in metals and lifesaving medicines which can be manufactured only in space. This paper deals with various aspects of space station such as composition of space station system, configurations, key technology, application and future development.

Subject Term: Space station, Concept, Mode, Development.