

关于空间实验室(站)发展技术途径的思考*

庞之浩

(北京空间科技信息研究所 北京 100086)

摘要 苏联/俄罗斯、美国、欧洲和日本等国已先后发展了载人航天器。虽然他们采用了不同的战略和途径,但总的技术路线都是先研制技术较为简单、载人时间较短的空间实验室,然后研制技术较为复杂、载人时间较长、用途更为广泛的空间站。由于各国在发展空间实验室(站)的模式上有很大差异,因此所获得的成果也有天壤之别。通过分析、归纳和比较国外空间实验室(站)的发展技术途径,可以发现不少值得借鉴的经验与教训,对我国空间实验室(站)的发展战略和技术途径有一定启示。

关键词 空间实验室,空间站,发展模式,技术途径,经验教训启示

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2011.02.002



庞之浩编审

1 前言

苏联/俄罗斯载人航天器的发展采用循序渐进的方式,重视继承性,其路线图是:卫星式载人飞船→空间实验室(也叫试验性空间

站)→实用性空间站→积木式长久性空间站→桁架挂舱式永久性空间站(国际合作)。

美国载人航天器的发展采用争先跳跃的方式,重视先进性,其路线图是:卫星式载人飞船→登月式载人飞船→空间实验室→航天飞机→桁架挂舱式永久性空间站(国际

合作)。

欧洲和日本载人航天器的发展采用国际合作的方式。

由上可见,不论采用哪种途径,研制卫星式载人飞船、空间实验室和空间站都是载人航天器发展的必由之路。

在空间实验室方面,苏联先后发射了“礼炮”-1—5(Salyut-1—5)(图1)共5个空间实验室;美国只发射了1个“天空实验室”(Skylab);欧洲航天局(ESA)研制的机载型“空间实验室”(Spacelab)随美国航天飞机进行了22次飞行。

在空间站方面,苏联/俄罗斯先后发射了“礼炮”-6、7实用性空间站与“和平号”(Mir)长久性空间站;2011年建成的“国际空间站”(ISS)由美国、俄罗斯、欧洲航天局、日本、加拿大和巴西等16国联合研制。

理论研究和实践经验都表明,研制空间实验室是建造空间站的重要前提和技术保障,可对空间站的关键技术进行试验,获取经验,降低风险,为建造空间站打基础。

* 本文由中国发展战略学研究会推荐
修改稿收到日期:2011年2月28日

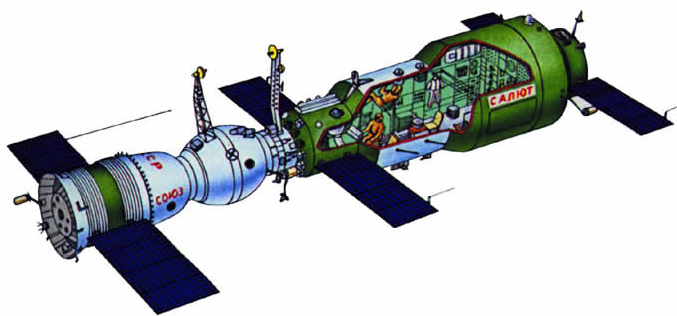


图1 世界第1座空间实验室“礼炮”-1 结构图

空间实验室和空间站既有联系,又有明显区别,在任务目标、功能规模、技术指标、资金投入和研制周期等方面都存在一些不同。对此,要有明确的界定,否则会走弯路。

关于空间实验室,目前还没有明确的定义,其基本概念是:空间实验室是为发展空间站,从载人飞船过渡到载人航天基础设施的试验性航天器。

空间站的概念是:可供多名航天员巡访、长期工作和居住生活的载人航天器。

从国外空间实验室和空间站的发展看,它们的主要区别是:①空间实验室在轨寿命通常低于5年,而空间站则为5—10年或更长;②空间实验室的规模较小,对接口也少,没有扩展能力,而空间站至少有2个对接口,它能同时对接载人运输器和货物运输器或专用实验舱;③空间实验室上的航天员一次在轨时间一般较短,多为几十天,而空间站上的航天员一次在轨时间大多为上百天;④空间实验室上的燃料和消耗品原则上要一次带足,而空间站则是用货运飞船定期进行多次补给;⑤空间实验室上的有效载荷设备很少更换,但空间站可多次更换和增加实验仪器;⑥空间实验室上的航天员一般不进行航天器的维修工作,只进行试验、训练等,而空间站上的航天员要经常进行维修工作。

2 不同研制模式比较

2.1 苏联的模式

苏联/俄罗斯把发展空间实验室(站)

作为国策,采取了慎重稳妥的方式,最大限度地利用成熟技术。其采用三步走发展战略:先是陆续发射5个“礼炮”系列空间实验室用来试验空间站的有关技术;取得一定经验后进一步发射单模块舱段式“礼炮”系列实用性空间站;在此基础上再建造多模块积木

式长久性空间站“和平号”。苏联解体后,俄罗斯参与了“国际空间站”工程。

“礼炮”系列空间实验室(站)的设计原则是:①简单性:可大大缩短研制时间;②通用性:尽可能采用已有的且比较成熟的技术,以减小风险较小;③渐改性:力求使空间实验室(站)具有较大的发展潜力。它们大量应用了联盟号飞船的技术和成果,因此不需要重新发展高难度的技术。为了缩短研制时间,采用了比较简单的舱段式构型,因而具有外形简单、硬件数少、容易实现和造价较低等优点,体积也能适应已有运载火箭运载能力一次发射的限制,尤其是由于不需要在轨道上对接组合或装配大型系统的复杂过程,所以风险和难度都较小,安全性较高。

2.2 美国的模式

美国采取跨越的发展方式,但至今只发射过1个空间实验室——“天空实验室”。其在设计思想上强调尽可能利用已有的硬件和技术。它利用“阿波罗”载人登月工程的剩余材料和部件研制,于1973年发射入轨。它带有试验性质,加之为了简化设计,所以没有安装轨道机动系统,这一点与苏联截然不同。因此,其本身不能进行轨道调整,只有当“阿波罗号”飞船同它对接后,才能利用飞船的发动机改变其轨道。另外,其专用气闸过渡舱多次供航天员出舱活动。

此后,美国曾与欧洲、日本联合研制“自由号”(freedom) 桁架挂舱式永久性空间



中国科学院

站,但中途下马,改为吸收俄罗斯参加,联合研制与“自由号”不同的“国际空间站”。

2.3 欧日的模式

由于多种原因,欧洲采取了国际合作的方式,即多次利用美国航天飞机搭载欧洲研制的“空间实验室”,它包括:天体物理实验室、大气应用和科学实验室、生命科学实验室、国际微重力实验室、微重力科学实验室、美国微重力实验室和神经科学实验室。此后,欧洲和日本均参与了“国际空间站”工程。

3 值得借鉴的经验与教训

从苏联/俄罗斯、美国、欧日发展空间实验室(站)的最终结果看,苏联/俄罗斯的模式最成功,美国次之,欧日也有收获,但需要依赖美国。

3.1 苏联/俄罗斯的经验与教训

实践证明,苏联/俄罗斯的模式较好;要针对空间站的要求来设计空间实验室,但不能要求太高;对接技术、对接口数量和货运飞船是关键;航天员的居住时间需逐渐增加;适当提高轨道高度可减少补给。

(1)成功的循序渐进方式。从1971年4月—1977年8月,苏联发射和运行了5个空间实验室,即“礼炮”-1—5。它们建立了以空间实验室为主体,用“联盟号”飞船作为运输工具的体系,目的是为后来的空间站取得经验,并试验载人飞船作为往返运输系统的能力。

1976年6月—1986年5月,苏联发射和运行了实用性空间站,即“礼炮”-6、7,建成了以空间站为主体,载人飞船和无人货船为运输系统的载人系统航天体系,大大提高了工作效率和工作寿命,创造了航天员在轨连续工作237天的记录。

从1986年2月—2001年,苏联/俄罗斯发射和运行了世界首座可在轨扩展的长久性载人空间站“和平号”。它不仅在轨寿命

长(5505天),航天员驻站时间长(累计4951天),驻站率高,而且实现了分批发射部件,然后在轨组装成大型载人航天器的全新建造方式,还掌握了利用航天员出舱维修和货运飞船补充物资等延长航天器寿命的技术。

从苏联/俄罗斯空间站的发展过程可以看出,先发展空间实验室是必要的。因为当时世界上没有空间站运行的经验可供借鉴,需要通过发展空间实验室来探索和掌握空间站的运行经验和技术。

(2)对接口数量和货运飞船作用大。苏联5个空间实验室运行寿命都不长,主要原因是每个空间实验室仅有1个对接口,所以每次只能对接1艘人货两用飞船,因而室内的科研仪器和物品均是在发射前就装入,很难补给,这就限制了载人航天的时间和空间实验室的寿命,而室内无人时是不工作的,因而利用率低。

而质量、构型与“礼炮”-1—5空间实验室很相似的“礼炮”-6、7实用性空间站,仅增加了1个对接口和使用货运飞船,就大大延长了空间站的运行寿命和航天员的工作时间(“礼炮”-6、7分别运行了约5年和9年),扩展了用途。这一经验极为重要。

“礼炮号”系列空间实验室主要用于技术试验,“礼炮号”系列空间站则进行了大量对地观测、空间材料加工、生命科学、天文和地球物理学等研究。

(3)复杂的对接技术。1962—1969年,苏联发射了10多艘飞船进行交会对接试验,并已掌握了交会对接技术,但对接失败的情况仍时有发生。在苏联空间实验室运行期间,苏联共发射了11艘飞船准备与“礼炮号”系列空间实验室对接,而发生重大故障的飞船达5艘,故障率高达45.5%,其中交会对接的故障较多。因此,应对交会对接技术的复杂性和难度引起足够的重视。

(4)逐渐提高航天员的入住时间。“礼炮”-1 只接待过 1 批共 3 名航天员,他们居住了 24 天。“礼炮”-4 则接待过 2 批共 4 名航天员,他们共居住了 90 天。从“礼炮”-6 开始,航天员在空间站上的居住时间进一步增加,最长达上百天。

美国“天空实验室”共接待过 3 批共 9 名航天员,他们分别居住了 28、59 和 84 天。

以上数据说明,航天员在空间实验室的驻留时间是逐渐延长的,这与航天技术的不断发展和任务的日益扩大密切相关。

(5)适当提高轨道高度。“礼炮号”系列空间实验室的轨道高度在 200km—300km 之间。它们在大气阻力作用下,轨道高度每天下降 3km 左右,为了维持轨道高度,每天需要花费 15kg 燃料,2 个月需要 900kg。后来的“礼炮”-6、7 分别进入了 349km 和 475km 高的轨道,使用寿命大大延长。研究表明:若将轨道高度提高到 500km 左右,则每天只需消耗 0.35kg 的燃料,就可以维持轨道高度。所以,空间站的轨道高度不宜太低。

(6)要研究再生式或部分再生式生保系统。航天员在空间站上每人每天需要氧气 0.8kg,食物(干)0.7kg,水 8.5kg,共计 10kg。如果空间站上的洗涤水能重复回收使用,那么每人每天只需 5kg。

通过分析和推算可知,“礼炮”系列空间站的补给量大部分用于轨道维持。此外,其洗涤水也没有很好回收复用,从而加重了后勤补给任务。如果空间站采用提升轨道高度和废水复用技术,且 3 名航天员在空间站内长期生活,后勤补给飞船只需每隔 3 个月发射 1 次,每次运输 2t 左右的补给物资即能满足需要。

(7)“和平号”的启示。“和平号”的主要缺点是:总体构型设计有问题,电力供应严重短缺,天地往返运输能力低,站上仪器设

备的可靠性差,这些直接影响了空间站的正常运转、有效使用和航天员的生活。

3.2 美国的经验与教训

作为经济和技术强国,美国在空间实验室(站)领域落后于苏联/俄罗斯,主要原因是采取了错误的发展战略。

(1)失败的争先跳跃方式。实践证明,美国过于注重先进性而缺乏连续性和继承性的做法是不成功的,导致美国至今只独立发射过 1 个空间实验室。其领衔研制的“自由号”空间站也因为技术跨度太大而中途夭折,最终演变成大量采用俄罗斯技术的“国际空间站”。

(2)应有变轨机动能力。尽管美国“天空实验室”的轨道高度约 435km,但由于没有变轨机动能力,所以它在大气阻力作用下轨道不断衰减,于 1979 年 7 月 11 日进入大气层烧毁,否则其寿命可以更长一些。

(3)设有气闸舱用途多。由于美国“天空实验室”设有专用气闸舱,大大方便了航天员出舱维修,使“天空实验室”在出现故障时转危为安。

3.3 欧洲和日本的经验与教训

(1)必须发展运输器。苏联和美国都是以载人飞船工程起步的,然后带动整个载人航天科学技术和工程系统的发展。而欧洲和日本由于没有发展运输器,所以只能依附美俄,难有创新和大的作为。现在,欧日已发展货运飞船。

(2)国际合作要抓机遇。20 世纪 70—80 年代,欧洲曾利用美国把资金集中用于研制航天飞机的时机,发展了机载“空间实验室”,取得了不少载人航天的经验。后来又根据自身资金和技术攻关情况以及国际形势的变化,中途放弃了“哥伦布号”空间站的建造计划,而全身心参加“国际空间站”的建造。

(3)欧洲研制机载“空间实验室”取得的



中国科学院

技术成果,已用于“国际空间站”上的欧洲“哥伦布号”实验舱。虽然欧洲“赫尔墨斯号”(Hermes)小型航天飞机研制中途夭折,但其技术预研为研制目前使用的“自动转移飞行器”(ATV)扫清了主要技术障碍。同时,欧洲、日本航天员参与与美国航天飞机飞行也取得了在轨生活和工作的经验,为参与“国际空间站”项目打下了基础。

3.4 总的经验与教训

通过全面分析国外空间实验室(站)主要过程和主要组成,可得出以下的经验教训:

(1)空间站是一项耗资巨大、技术复杂的大工程,空间站的规模必须与国力相适应,特别是在空间站的应用效益还不大明朗的情况下,规模过大会造成方案的多次反复,这样不仅会拖延进度,浪费资金,而且还导致众多的反对意见,存在下马的危险,因此必须慎重决策。

(2)整个空间站大系统包括空间站、天地往返运输系统、大型运载火箭、应用系统、航天员系统、测控通信网和发射返回场等,而前3项本身就是一个很大的投资项目。因此,在经费投入上必须妥善安排,这些系统同时启动势必造成载人航天经费巨增,使国家难以承受。日本和欧洲的经验与教训值得深思。

(3)载人空间站在轨长期运行可能会遇到各种预想不到的问题,苏联和美国都是先研制和发射空间实验室,所以对于没有载人航天经验的国家,先发展空间实验室,再发展空间站是比较稳妥的。

(4)空间站的规模应与天地往返运输系统的能力相适应。根据苏联的经验,一次性使用的普通飞船可满足20t空间站的运输要求,而规模更大的长久性载人空间站需要航天飞机或大型飞船等更大能力的运输系统。当前,昂贵的航天运输费是制约空间站

发展的一个重要因素,为此,要努力大幅度降低航天运输费用。

(5)核心舱是研制多模块空间站的关键。从苏联的成功和美国的教训可得出以下的启示:如果不掌握能够对接多个舱段和控制多个舱段的核心舱技术,无论是多模块积木式空间站还是多模块桁架挂舱式空间站都没有基础,很难研制出来。不通过实际的试验和演示是难以证明和掌握这项复杂技术的。“和平号”多模块积木式空间站的顺利建成,“自由号”多模块桁架挂舱式空间站计划的取消就说明了这一点,“国际空间站”是模块积木式和多模块桁架挂舱式空间站的“混合体”,它是由俄罗斯提供核心舱功能(即功能货舱)后才得以顺利建设,这说明核心舱是多模块空间站的基础,是其他舱的“发源地”。

4 思考与启示

通过上述对国外载人空间实验室(站)40年发展过程的描述和分析,可以总结出以下几点重要的经验教训。

4.1 坚持“三步走”模式

苏联/俄罗斯和美国发展空间站的成功途径是:先发展载人飞船来突破载人航天的3项基本技术;然后发展能中短期载人的空间实验室来试验、研究空间站的技术和航天员的有关问题,为发展后续的空间站取得经验和创造条件;最后,发展能长期载人的空间站。所以,采用这种成熟的“三步走”模式比较稳妥,风险小。

4.2 合理选择用途

(1)明确空间实验室的用途。发展空间实验室是以进一步巩固和发展载人航天的基本技术为主,还是试验和实现有效载荷的功能为主,需要认真研究加以抉择,这对日后发展空间站影响很大。

航天员空间出舱活动、航天器之间空间交会对接是载人航天的基本技术,虽然非常

复杂和危险,但十分重要,所以必须突破。目前较有效的方式是用多艘载人飞船与空间实验室进行空间交会对接试验和载人驻留试验,并以此突破航天员中期驻留、飞行器长期在轨自主飞行、再生式生保和货运飞船补加等关键技术;验证天地往返运输飞船的性能和功能;进行一定规模的空间应用。还可在空间实验室上开展地球观测和空间地球系统科学、空间应用新技术、空间技术和航天医学等领域的应用、试验和实验。

(2)明确空间站的用途。在确定发展空间站之后,就要决策空间站的应用目标。目前,关于空间站的发展目标大致有4种方案:第1种是科学实验型空间站;第2种是技术试验型空间站;第3种是综合服务型空间站;第4种是前3种相互结合型空间站。

究竟选哪一种更符合科学规律和国情,需要十分认真地深入研究,因为它是事关大局的战略问题,且又没有十分成熟的经验和一致的意见,所以搞不好要走很多弯路。

4.3 研制可靠的运输器

发展空间站必须首先发展可靠的运输器。现已牺牲的航天员都是因为载人航天运输器出现故障。美国通过“天空实验室”和航天飞机,完成了为研制空间站而进行的科技和工程准备。但为什么其“自由号”空间站中途夭折呢?主要是将尚未改造成为运输器的美国航天飞机和没有研制出来的欧洲“赫尔斯号”小型航天飞机以及日本“希望号”小型航天飞机作为运输器;另外,美欧在没有掌握可以对接和控制多个舱段的核心舱技

术之前,就决定建造多模块空间站。

4.4 关于运输器的选择

苏美长期载人航天的经验表明,把运人和运货的运输器分开是合理、经济和安全的。所以如果要建造空间站,应尽早考虑研制货运飞船。

普通载人飞船适用于20t左右的单模块空间站,但难以承担百吨级空间站的运输要求,“和平号”空间站就是一个典型,用普通载人飞船提供天地往返运输,使这一能容纳6人长期生活的空间站仅可维持2—3人的载人飞行规模,使站上生活物资供不应求,实验产品严重积压。

“国际空间站”(图2)目前采用航天飞机和飞船混合运输的方法,可满足空间站往返运输的要求。在2012年航天飞机退役后,将主要采用能运送3人的普通载人飞船(俄罗斯“联盟”系列)和能运送6—8t的欧洲自动转移飞行器(ATV)和日本H-2转移飞行器(HTV)等。2013年以后,还将陆续采用能运送6人的新型可重复使用载人飞船和可把“国际空间站”上的货物运回地球的新型货运飞船。

4.5 注意研究降低运输费用的措施

目前正在使用的各种天地往返运输系



图2 和平号空间站全貌



中国科学院

统的费用都较高,这是制约空间站发展的一个重要因素。为了降低空间站的运行费用,可采取的措施有:发展再生式生保系统,发展机器人和遥科学技术,研制可重复使用的天地往返运输系统等。

4.6 建造有特色的空间实验室

在目前建造空间实验室不必完全走苏联、美国的老路,而应进行跨越式发展,建造高水平、有特色的空间实验室,例如:

(1)利用当今先进的计算机技术、自动化技术等,充分利用空间实验室,使它在无人时也能长期自主工作。

(2)设置气闸舱。苏联空间实验室的对接过渡舱虽兼有气闸舱功能,但对接上飞船后就无法使用,所以航天员没有出过舱。而美国“天空实验室”设有专用气闸舱,它对航天员出舱维修实验室起了很大的作用,并使航天员更好地掌握出舱活动技术,延长了其寿命。

(3)增加空间实验室的对接口,使用货运飞船,安装变轨机动系统,适当提高空间实验室的运行轨道高度。这样可以增加空间实验室的寿命,延长航天员在太空的驻留时间,降低运输费用。

4.7 采用多种方法提高空间站的利用率

提高空间站的利用率是衡量载人航天效益的重要指标。其办法有多种,例如:增加空间站的对接口,使用货运飞船;研制长寿命部件,提高可靠性;通过运输器的补给供应足够的燃料;通过航天员的维修排除故障。扩大载人航天器的规模、延长航天器的寿命、增加航天员在太空的驻留时间(或驻留率)的要求是相互关联和相辅相成的。

4.8 积极开展国际合作能走捷径

各国在空间站的建造中都不同程度地采用了国际合作的方式,以节省投资强度,实现技术互补和资源共享。对于中小国家或

载人航天技术基础薄弱的国家来讲,参与国际合作可以取得投资少、收益大、周期短和风险小的效果。在建造大型空间站时,即使对于航天大国来讲,也需要通过国际合作来减轻各种压力。

当然,国际合作也带来一些问题。比如,相互牵扯就是目前最令人头疼的事,只要有一个主要部件不能按时发射入轨,就会影响整个计划进度,“国际空间站”的建造就是一个典型。所以,是否开展国际合作要根据自身经济、技术水平以及空间站工程的大小来决定。例如,如果研制技术上较为简单、成本低一些的空间实验室或中小型空间站时采用独立研制方式较好,如果要打造大型或超大型空间站,则应争取国际合作。但开展国际合作也要有一定实力,并注意抓住有利时机,“国际空间站”就是利用苏联解体的机会才促成合作。国际合作的途径也是多种多样的,要根据自身具体情况慎重而灵活地选择。

4.9 攻克关键技术

根据苏联/俄罗斯的“礼炮号”系列空间实验室和空间站及“和平号”空间站的运行情况,空间站上发生故障的频度较高,航天员在轨工作有相当一部分时间用于站上维护和排除故障。空间实验室上有人的时间极为有限,大部分时间是无人自主工作,故发生各种故障的可能性较大,又不能靠航天员及时排除。所以,要达到5年的工作寿命难度较大,这需要在研制长寿命部件等方面进行攻关,尽量减少航天员的维修时间,而不能走苏联的老路。

4.10 对一些争论的思考和看法

(1)空间实验室能运行多长时间?在苏联空间实验室中,“礼炮”-4运行时间最长,达770天。轨道较高的美国“天空实验室”运行了6年多,如有变轨机动能力寿命还能更

长一些。由此不难看出,如果舱段式空间实验室的轨道高度较高,并具有变轨机动能力和航天员在轨维修能力,它在轨工作5年左右问题不大。

(2)航天员在轨停留多长时间合适?苏联6年内所发射的5个空间实验室先后有6批航天员进入,平均每年1批,每批2—3人。在后来发射的2座实用性空间站上航天员的驻留时间也不长,但在“和平号”长久性空间站上驻留时间较长。“礼炮”-1航天员的驻室率为12.5%，“礼炮”-3为7%，“礼炮”-4为11.7%，“礼炮”-5为15.3%。“礼炮”-6为49%，“礼炮”-7为53.8%，“和平号”为83.4%。

统计表明,航天员可根据空间实验室的大小驻留十几天至几十天。

(3)在空间实验室上要不要设气闸舱?苏联发射过的5个空间实验室都没有专用气闸舱,其空间站则增设了气闸舱。而较大

的美国“天空实验室”设有专用气闸舱(另设了2个对接口),它对航天员出舱维修空间实验室起了很大的作用。由此可见,如有可能,在空间实验室上应设专用气闸舱,或设2个多用途舱,以供航天员进行空间出舱活动。

主要参考文献

- 1 范剑峰.空间站工程概论.哈尔滨工业大学出版社.1990.
- 2 王希季.选择中国载人航天发展目标的讨论.中国空间科学技术.2002,4:1-9.
- 3 Jondan B. ISS Early Operation.23rd ISTS Rpresentation.2002,5.
- 4 程绍驰.“国际空间站”空间科学与应用发展与影响分析.国际太空.2010,12:39-45.
- 5 Bond E. The continuing Story of the International Space Station.2002.
- 6 张蕊.国外新型可重复使用飞船特点分析和未来发展.国际太空.2010,12:31-38.

Considerations on Approaches in Technology Development of Space Laboratory (Station)

Pang Zhihao

(Beijing Institute of Space Science and Technology Information 100086 Beijing)

Abstract The Soviet union/Russia, USA, Europe and Japan have successively developed manned spacecraft. Although they adopted different strategies and approaches, yet the general technological route is first to develop space laboratory which is simple and man-tended on a short-term basis, then to develop space station that is more complex, man-tended on a longer term and with multiple purposes. Since the modes of various countries in developing space laboratory (station) are very different, the achievements also make a big difference. Through analysis, induction and comparison on foreign technology development approaches of space laboratory (station), we can discover many useful experiences and lessons. There would be inspirations for development strategy and technology approaches of our space laboratory (station).

Keywords space laboratory,space station,development pattern technology approaches, experiences and lessons inspiration

庞之浩 北京空间科技信息研究所《国际太空》杂志执行主编,编审。1957年出生。主要专业领域为世界航天科技信息的跟踪、研究和报道以及航天科普。E-mail:gjtk@263.net



中国科学院