

DOI:10.16356/j.1005-2615.2021.S.023

国际空间站标准化研究进展综述

李晓丹, 张程煜, 梁迎彬, 阚纯磊, 崔广志

(北京机械设备研究所, 北京 100854)

摘要: 国际空间站是载人航天系统工程的典型范例,其标准化工作为国际空间站的研制、建造和实施过程提供了重要准则和依据,对我国载人空间站工程具有重要借鉴意义。本文针对国际空间站标准化研究进展进行了综述,总结了国际空间站标准体系的特点和分类架构,梳理了国际空间站标准化管理的流程。基于国际空间站标准体系的剖析,提出了对我国载人空间站标准化体系建设的启示和思考,进一步明确了标准体系架构、环境控制与生命保障要求以及多边关系协调是载人空间站标准化体系建设的重要内容。

关键词: 国际空间站; 标准化; 载人航天工程; 研究进展

中图分类号: V11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2021)S-0143-05

Review on Research Progress in Standardization of International Space Stations

LI Xiaodan, ZHANG Chengyu, LIANG Yingbin, KAN Chunlei, CUI Guangzhi

(Beijing Institute of Mechanical Equipment, Beijing 100854, China)

Abstract: International space stations are typical examples of manned space programs. The related standardization has provided an important basis and rules for the development, assembly and operations of space stations, and is of practical significance for the construction of China space stations. This paper reviews the research progress in the standardization of international space stations. The characteristics and structures of international space stations are summarized, and the management procedures of the standards are organized. Based on the analysis of space station programs, this paper puts forward certain suggestions on the standardization construction of China space stations. It also points out the importance of standard structures, environmental control and life support, and multilateral relations.

Key words: international space station; standardization; manned space program; research progress

中国已全面开启载人空间站在轨建造,未来两年将陆续实施核心舱发射、货运飞船补给、无人在轨验证和载人飞行验证等任务,随后将正式投入在轨运营,并作为空间应用与科学研究的国际合作平台^[1]。载人航天工程作为典型的复杂系统工程,其标准化工作是保障研制任务科学有序、规范协调推进的重要手段。2018年我国成立载人航天标准化技术委员会,并提出要面向空间站应用与服务形成具有自主知识产权的中国载人空间站标准^[2-3]。

载人空间站可实现航天员长期在轨驻留,并解决较大规模且长期有人照料的空间应用问题。故其构成要素和包络对象与载人飞船、空间实验室等中短期飞行器存在明显差异^[4]。一方面,载人空间站规模更庞大、结构组成更复杂,同时涉及具有载人航天特色的物化再生式环控生保技术等多项关键技术的在轨工程化实践。另一方面,载人空间站的驻轨乘组及其开展的应用载荷和科学研究,通常涉及来自全球不同地区的人员和单位。

收稿日期: 2021-05-10; **修订日期:** 2021-06-25

通信作者: 李晓丹,女,博士,工程师, E-mail: lixd1112@163.com。

引用格式: 李晓丹,张程煜,梁迎彬,等. 国际空间站标准化研究进展综述[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(S): 143-147. LI Xiaodan, ZHANG Chengyu, LIANG Yingbin, et al. Review on research progress in standardization of international space stations[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(S): 143-147.

针对载人空间站技术起点高、关键技术多、协调范围宽、参与单位复杂等特点,本文以国际空间站标准体系作为典型范例进行剖析。重点从工程管理、产品保证和工程技术方面进行分类梳理,并总结标准化管理的特点。明确共性内容作为标准化工作的借鉴和夯基对象,识别个性内容作为标准化工作的深化和细化对象,为我国载人空间站标准建立提供一定的参考。

1 国际空间站标准特点分析

国际空间站(International space station, ISS)由美国国家航天局(NASA)联合俄罗斯联邦航天局、欧空局、加拿大航天局以及日本国家航天开发局等合作方共同开发,是世界迄今为止规模最大且仍在运营的载人飞行器。根据任务和职责可将空间站划分为美国段、俄罗斯段、欧洲段和日本段4个舱段,每个舱段均由不同国家和承包商负责研制与应用维护。如何兼顾并约束各合作方的任务特点和需求,有效协调双边或者多边的关系,实现空间站所有舱段的对接匹配并达到集成统一尤为重要。为此,NASA牵头组织各相关方共同建立了国际空间站标准体系,并作为空间站研制、建造和运营过程中应遵循的准则和依据^[5]。国际空间站项目(Space station program, SSP)标准的标准化文件通常采用代号SSP与数字序号结合方式进行统一编号^[5-6]。国际空间站标准主要具有以下特点:

(1) 标准分布层次鲜明、适用对象清晰。首先,针对空间站整体编制了系统规范,作为空间站设计开发活动的顶层技术准则和依据,还包括通用的规范性文件,旨在为一般性流程和问题处置作出约束和说明。其次,针对不同舱段之间的接口进行标准定义,实现相关方承制产品的协调统一。最后,针对舱内试验和人员以及软硬件设置的公共部分或者通用准则作出说明。

(2) 具有国际标准属性且体系开放包容。一方面,国际空间站标准化文件通常由多国参与编制和签署,并由各相关方共同遵守和使用,是事实上的国际标准。另一方面,SSP标准大量采用了外部标准^[5, 7-8],如表1所示。此外,根据关键技术和研究项目的发展,不断制定并纳入了新标准,并且根据任务需求调整和标准实际使用情况对现有文件采取动态管理,持续进行修改和完善。

(3) 注重多边关系协调和基础性、共性问题。一方面,国际空间站标准化文件包含大量的多边文件和双边文件,前者是指由三个及以上关联航天局共同批准的文件,后者是指由两个关联航天局共同

表1 国际空间站采用的外部标准^[5]

Table 1 External standards accepted by ISS^[5]

序号	外部标准
1	ANSI美国国家标准学会标准
2	CCSDS空间数据系统咨询委员会标准
3	EIA电子工业协会标准
4	ISO/IEC国际标准化组织/国际电工委员会标准
5	JSC约翰逊空间中心标准
6	MIL美国军用标准
7	MSFC马歇尔中心标准

批准的文件。标准化工作管理机构设置方面,国际空间站分为多边有效载荷和单边有效载荷分别设置了控制委员会,旨在有效协调多方关系、实现接口匹配。另一方面,针对基础性、共性问题制定了相关文件并作出统一说明和解释,包括坐标系、元器件选用、原材料选用和空间环境条件等,便于相关方基于一致的约束条件开展设计和研制工作。

(4) 标准形式多样且项目特征显著。国际空间站标准有明显的工程指向性,特别是运营阶段的应用项目和有效载荷,对于实验和操作的多个方面给出了明确界定。因此,根据项目需求和适用对象的特点,灵活采用不同形式完成了标准的制定。如表2所示,除综合要求和执行方案外,还包括技术规范、控制文档和手册。

表2 空间站项目标准形式^[9]

Table 2 Standard form of SSP^[9]

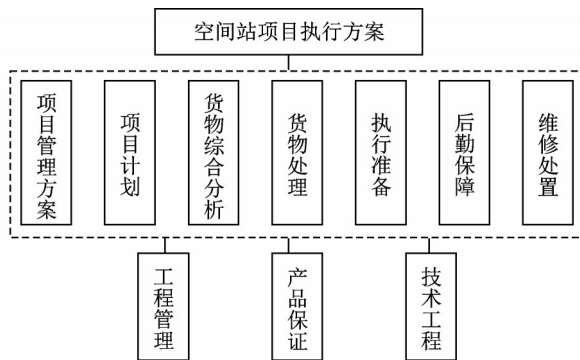
序号	标准形式	适用特点
1	综合要求	对产品保证和工程技术提出总体要求
2	执行方案	项目推进或管理的具体操作执行计划
3	技术规范	项目研制过程的具体工程设计或技术
4	控制文档	包括接口定义文档和接口控制文档
5	手册	指南和索引等提供辅助性信息的标准

2 国际空间站标准分类架构

国际空间站标准体系的顶层文件是空间站项目执行方案(Station program implementation plans, SPIP)标准,主要从管理、策划、设置和执行等各方面作出综合叙述。国际空间站标准体系架构如图1所示,根据适用对象和侧重点不同,SSP标准可分为工程管理类、产品保证类和工程技术类,占比分别约15%、30%和65%^[9]。

工程管理类标准的制定目标是解决国际空间站相关方之间的资源分配与组织协调问题,以明确管理技术和管理方法为主要内容,具体涉及项目集成、适用范围、项目进度、物资管理、信息管理、过程控制和风险控制等^[10]。

产品保证类标准的制定目标是为产品保证活

图1 空间站项目标准体系^[5]Fig.1 Standard SSP system^[5]

动的管理与实施提供准则和依据,使产品满足质量和任务要求。该类标准主要包括两方面,一是原材料、元器件和工艺选用标准,另一个是研制生产过程中对关键重要项目和关键重要产品的控制要求。特别值得注意的是,由于国际空间站运营过程中存在多人乘组长期在轨驻留的工作模式,因此对舱内环境控制与生命保障条件提出了更为苛刻的要求。例如,舱内氧气和二氧化碳浓度、微量有害气体含量、再生水水质、微生物控制的标准阈值会因任务周期和暴露时间增加而改变;舱内设备的维修性、可靠性、可测试性以及人机工效学会因在轨操作频率、难易度和补给周期等因素而变化^[11]。相关方在产品研制阶段便需要将产品保证要素纳入考虑,甚至对技术路线选择产生影响。

工程技术类标准的制定目标主要是针对总体或者具体型号的技术基础、总体设计、结构与机构设计、热控设计、电气设计、数据与信息管理及测试与试验等内容提供准则和依据。如图2所示,工程技术类标准主要包括空间站本体标准、舱段标准、有效载荷标准、乘员标准、接口标准和地面保障标准6部分内容^[5]。其中,空间站本体标准主要是针对总体设计、工程研制初期所需的坐标系和空间环境条件等技术基础以及环境控制与试验所需的环境条件和分析技术等作出了普适性或基础性说明。有效载荷标准的数量种类繁多,重点是对载荷的安全性、运输、集成协议、接口和操作等提出要求。乘员标准主要是针对乘员活动、在轨工作环境和医监医保等内容提出要求。

3 国际空间站标准化管理

空间站标准项目的归口管理机构是美国约翰逊空间中心(JSC),并由下属的各技术委员会或者分技术委员会负责对应类型标准的制定和管理^[12]。委员会根据国际空间站建造和运营的实际需求进行设置,主要包括负责产品保证类和工程类通用标

准管理的空间站项目控制委员会、负责多方执行标准管理的联合项目要求控制委员会、负责多边有效载荷标准管理的ISS多边有效载荷控制委员会、负责单一有效载荷标准管理的ISS有效载荷控制委员会、负责风险管理类标准的项目风险管理综合产品保证组、负责接口类标准管理的接口控制工作组以及负责可靠性和安全性标准的国际空间站安全性和任务保证工作组^[13]。

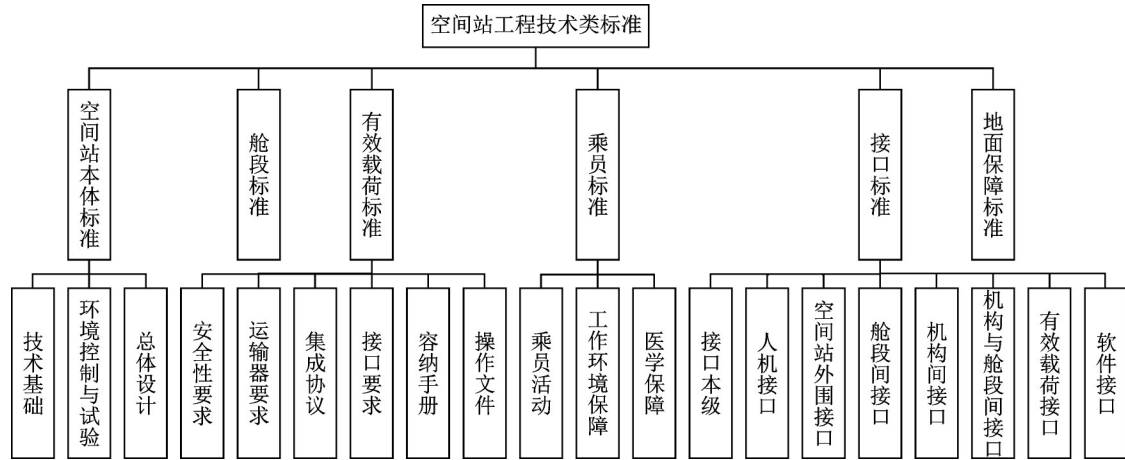
当国际空间站提出新的要求或者开展新项目时均需要相应的标准进行约束和规范。SSP标准管理和修订的流程如下:(1)判断标准是否涉及双边或者多边关系协调,不涉及的情况还需进一步判断是否对其他参与方产生影响;(2)判断标准是否为针对空间站提出的新标准,如果是新标准还应当考察各参与方是否有自身执行的独立标准,考察标准使用方现有标准是否适用;(3)根据判断结果采取标准管理措施,包括对现有SSP标准进行修订、基于所有参与方现行标准统一化制定相应的SSP标准、制定全新的SSP标准,以及直接采用参与方自身制定的标准(仅适用于单边关系且对其他参与方无影响的情况)。通常情况下,为有效提升标准制定的效率,国际空间站会优先选择修订或者借鉴已有的标准,当无法适用时才会制定全新标准,这是因为新标准制定周期通常较长且涉及单位较多。

4 对我国空间站标准化工作的启示

俄罗斯和欧美等国通过“和平号”空间站和国际空间站的建造实施,在载人航天标准化工作方面积累了丰富的经验。实践证明,标准体系的建立、管理和使用对于有序维护空间站运营具有至关重要的作用。我国载人空间站建造尚属首次,特别是后续开展应用项目和科学研究将面临国际合作,如何利用标准化协调统一多方要求和资源值得思考。基于上述思考,国际空间站范例对于我国载人空间站标准化工作有如下启示。

一是合理区分工程技术类标准层次和梯度,以实际应用过程为导向进行类别划分。通常情况下技术标准会按照专业方向进行分类,但空间站规模庞大、组成复杂,既有各部分之间的关联共性,也有各部分自身的特性。为提高标准的实用性,可按照空间站总体、舱段、分系统、子系统实行自上而下的划分。对于纲领性的标准不必过于细化,而要给出明确的普适性说明,对于重要组成产品可进行适当细化,例如提出研制输入与输出文件的建设要求。

二是关注长期有人在轨条件下环境控制与生

图2 工程技术标准架构^[4-5]Fig.2 Standard architecture of engineering technology^[4-5]

命保障相关标准的制定工作。我国前期通过载人飞船和空间实验室等研制和飞行经历,在环境控制与生命保障标准化工作方面具有一定经验。但是载人空间站的人员驻留周期更长,使环控生保技术路线由非再生式转化为再生式,特别是空间尿液处理再生技术和电解制氧技术等关键技术尚属首次在轨实践,相关标准的制定应注意技术指标阈值的设置以及维修性、可靠性、安全性和人机工效学等内容。此外,产品保证方面由于涉及较多种类的新型再生式功能材料和传感器类元器件,还需考虑相关原材料、元器件和工艺采选的控制。

三是重视国际合作关系协调,加强接口标准制定。载人飞船等短期飞行任务通常只涉及任务方自身,故而对于通用化、标准化接口的要求相对简单。但是载人空间站作为开展国际合作和太空探索的大型系统平台,会涉及来自不同国家和地区的合作方。因此,明确接口要求对于顺利实现合作对接,有效协调各方资源具有重要意义。接口标准制定可以参考现有国际空间站的接口标准进行制定,一方面可以借鉴现有成熟经验,另一方面可以减少合作方的管理和技术更改幅度,在确保任务顺利实施的前提下促进合作进度。

5 结 论

本文以国际空间站标准体系作为典型范例进行了空间站标准体系的剖析,总结了SSP标准的特点和类型,对工程管理、产品保证和工程技术类标准的适用对象及下级分支作了梳理,简要提炼出SSP标准管理的机构设置和标准修订流程。基于上述分析,提出我国载人空间站标准化工作的启示和思考,特别是标准体系架构、环境控制与生命保障要求以及多边关系协调等。标准化是载人空间站研制、建造和运营全寿命周期内实现资源协调、

接口匹配和稳定运行的重要手段,标准化文件是科学有序组织实施各项任务的重要依据和准则。

参 考 文 献:

- [1] 牟帅. 空间站运营在轨任务重规划方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2017.
MU Shuai. Study on space station operation on-orbit mission re-planning method[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017.
- [2] 郭晋媛, 孙晓君, 赵剑霞, 等. 载人航天工程标准化工作实践探索[J]. 中国标准化, 2020(9): 131-135.
GUO Jinyuan, SUN Xiaojun, ZHAO Jianxia, et al. Exploration on standardization practice of manned spaceflight program[J]. China Standardization, 2020(9): 131-135.
- [3] 何洋, 夏亚茜, 周思卓. 关于航天器标准化工作的思考[J]. 中国航天, 2020(6): 45-48.
HE Yang, XIA Yaqian, ZHOU Sizhuo. Thoughts on spacecraft standardized work[J]. Aerospace China, 2020(6): 45-48.
- [4] 汤兰祥, 高峰, 邓一兵, 等. 中国载人航天器环境控制与生命保障技术研究[J]. 航天医学与医学工程, 2008, 21(3): 167-174.
TANG Lanxiang, GAO Feng, DENG Yibing, et al. Research on environmental control and life support system (ECLSS) of China's manned spacecraft[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2008, 21(3): 167-174.
- [5] 孙晓君, 赵晓凌, 尹玉梅, 等. 国际空间站工程标准群布局分析[J]. 航天标准化, 2017(3): 31-34.
SUN Xiaojun, ZHAO Xiaoling, YIN Yumei, et al. Analysis of the International space station standardization group[J]. Aerospace Standardization, 2017(3): 31-34.
- [6] 朱明新, 泉浩芳. 国际空间站标准化文件体系研究[J]. 航天标准化, 2013(3): 1-5.

- ZHU Mingxin, QUAN Haofang. Study on standardization of international space station[J]. Aerospace Standardization, 2013(3): 1-5.
- [7] GILL P S, VAUGHAN W W. NASA technical standards program[C]//Proceedings of the 5th Aerospace Materials, Processes, and Environment Technology Conference. Huntsville, Alabama:[s.n.], 2002.
- [8] GILL P S, BARCIA D, VAUGHAN W W. Lessons learned and technical standards; A logical marriage for future space systems design[C]//Proceedings of the 53rd International Astronautical Congress. Houston, USA:[s.n.], 2002.
- [9] 孙晓君,尹玉梅,张杰.“国际空间站”工程标准分布与特点[J].国际太空,2017(12):49-51.
SUN Xiaojun, YIN Yumei, ZHANG Jie. Structure and characteristics of international space station program standards[J]. Space International, 2017(12): 49-51.
- [10] 邵雪山.航天工程项目组织管理能力的分阶段综合评价方法及应用[D].南京:南京航空航天大学, 2012.
- SHAO Xueshan. Dynamic evaluation method of aerospace engineering project organization and management capacity and its application[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [11] 周抗寒,傅岚,韩永强,等.再生式环控生保技术研究及进展[J].航天医学与医学工程,2003(z1):566-572.
ZHOU Kanghan, FU Lan, HAN Yongqiang, et al. Research and development of technique of regenerative environmental control and life support system[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2003(z1): 566-572.
- [12] KATHLEEN V C. Space station operations management[J]. Aerospace, 1989, 7: 17-19.
- [13] 孙晓君,赵晓凌.由国际空间站标准的管理模式谈标准修订管理[J].航天标准化,2017(1):38-41.
SUN Xiaojun, ZHAO Xiaoling. The management mode of the international space station[J]. Aerospace Standardization, 2017(1): 38-41.

(编辑:王静)