



空间在轨制造标准体系建设初探

王敏^{1,2}

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所 机器人学国家重点实验室, 沈阳 110016;

2. 中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 沈阳 110169)



摘要: 针对空间在轨制造技术, 分析了国内外航天制造标准现状, 阐述了空间在轨制造技术标准体系建设的必要性, 初步设计了我国在轨制造标准体系的总体框架, 对在轨 3D 打印、焊接、组装、检测等专业方向的在轨制造标准的构成进行了初步分析。研究结果可为我国空间站及深空探测在轨制造技术发展提供参考。

关键词: 空间制造; 在轨制造; 标准体系

中图分类号: TG115.28 **文献标识码:** A

Requirement Analysis and Architecture Design of Space On-orbit Manufacturing Standard System

Wang Min^{1, 2}

(1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016; 2. Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169)

Abstract: In the light of the space on-orbit manufacturing technology, this paper analyzes the present situation of the domestic and foreign space manufacturing standards, expounds the necessity of the construction of the space on-orbit manufacturing technical standard system, and preliminarily designs the general frame of the on-orbit manufacturing standard system of our country, the composition of on-orbit manufacturing standards for on-orbit 3d printing, welding, assembly and testing is analyzed. The research results can provide reference for the development of on-orbit manufacturing technology of space station and deep space exploration in our country.

Key words: space manufacturing; on-orbit manufacturing; standard system

1 引言

国内外空间在轨制造技术的探索和实践表明, 在轨制造技术对提升航天器在轨建造、维护及应急维修能力, 保障空间探测任务的安全和可持续发展意义重大。在轨制造技术标准体系建设是在轨制造技术可持续发展的重要保障。

随着我国深空探测技术的发展, 国内将会有多家科研院所、大专院校、央企、民企等加入到空间在轨

制造研究队伍, 如不建立一套在轨制造标准体系, 通过标准和规范等对在轨制造技术的各个环节、组成部分加以统一, 相关技术的研发及在轨应用将会遇到很大困难, 不利于我国空间在轨制造技术的可持续发展。

建立在轨制造标准体系的目的: a. 促使我国在轨制造技术的研究与设备开发规范化、科学化、系统化; b. 使我国在轨制造技术目标透明化, 使参研单位目标统一; c. 有助于不同研究机构、企业之间相关技术的研发合作、技术衔接; d. 规范在轨制造操作, 方便不同航天

资助项目: 中央军委装备科技信息项目 (JZX7J202104QB010900)。

作者简介: 王敏 (1963), 博士, 材料加工工程专业; 研究方向: 空间在轨制造技术。

收稿日期: 2022-06-28

员乘组执行在轨制造任务；e.明确统一在轨制造的技术要求，确保产品质量的一致性；f.维护在轨制造作业人员安全及空间站运行的安全。

2 国内外航天制造标准现状

2.1 国外航天制造标准现状

表1 NASA 航天标准系统^[1]

类别—标准名称
1000—系统工程与集成，航空航天环境，天体力学
2000—计算机系统、软件、信息系统
3000—人为因素与健康
4000—电气和电子系统，航空电子/控制系统，光学
5000—结构/机械系统，流体动力学、热力、推进力、空气动力学
6000—材料和工艺、零部件
7000—系统和子系统测试、分析、建模、评价
8000—安全、质量、可靠性、可维护性
10000—建设和机构支持

美国宇航局(NASA)在航天制造方面拥有一套完整的标准体系(如表1所示)，该标准体系涉及了航天制造的各个方面，其中也包括空间在轨制造技术所需的相关标准^[1~3]。

欧洲方面，欧洲航空航天局、欧洲各国航天局和欧洲工业协会于1993年成立了欧洲空间标准化合作组织(ECSS)，欧洲航空航天局作为牵头单位。该组织成立的主要宗旨是为了解决其成员内部在开展空间项目合作时，由于存在各国空间标准不一致的问题，增加了合作项目的研制成本、降低了工作效率、致使其竞争力下降等问题。为此，ECSS希望建立一套统一的标准体系，尽可能消除各国之间的合作障碍，以便提高欧洲空间项目的国际竞争力。

ECSS的标准体系主要由四部分组成：空间项目管理分支、产品保证分支、工程分支和可持续分支。目前，该机构发布的标准、技术备忘录和手册已近200项。ECSS标准体系框架如图1所示^[4]。

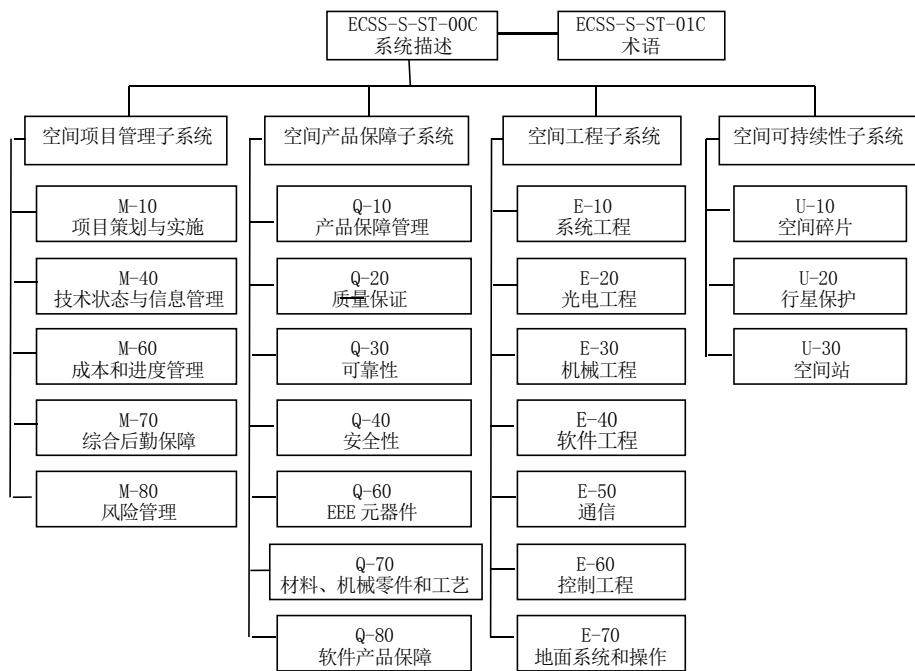


图1 ECSS 标准体系框架

随着近年来在轨制造概念的形成，在轨服务逐渐纳入空间在轨制造范畴。美国交会与服务操作执行联盟(CONFERS)于2019年发布了全球首套无人在轨交会与服务操作的相关技术和安全标准。为广泛征集各方意见，标准的编制成员包括政府、非盈利组织、合资公司，以及行业协会等方面的航天专家。在标准制定形式方面，CONFERS采取了一套有效的管理方

法，通过论坛讨论的方式研究标准的制定。根据参与标准编制机构的不同将讨论会分为四种类型：a.美国标准度量(USG)核心会议：该会议主要讨论USG内部的技术和政策问题，仅限USG成员参加；b.USG组织与私营机构的一对一会议：用于探讨参与标准编制的私营机构的商业计划和具体实施方案，以及相关的知识产权保护问题；c.CONFERS成员大会：该大会是

CONFERS 组织标准编制的主要工作方式, 由 USG 核心成员、秘书处及相关的私营机构以多边会议的形式开展; d. 开放性会议: 任何非 CONFERS 的成员均可以参加该会议, 主要讨论项目进展、探讨新的标准编制问题, 该会议每年举行一次^[5]。这种标准制定的组织管理方式为我国在轨制造标准体系的构建提供了有益的参考。

到目前为止, 世界各国还没有一套专门针对空间在轨制造技术的标准体系。

2.2 国内在轨制造标准现状及需求

我国航天领域经过多年发展实践, 现已拥有了 4000 多项国军标、航天行业标准, 以及几万项院(厂所)级企业标准。这些标准涉及航天制造领域的共性标准、技术标准、设计标准、生产标准、试验标准等诸多方面。

文献[6]显示, 2021 年中国航天标准化与产品保证研究院提出的构建我国商业航天标准体系的设想, 标准体系框架如图 2 所示。

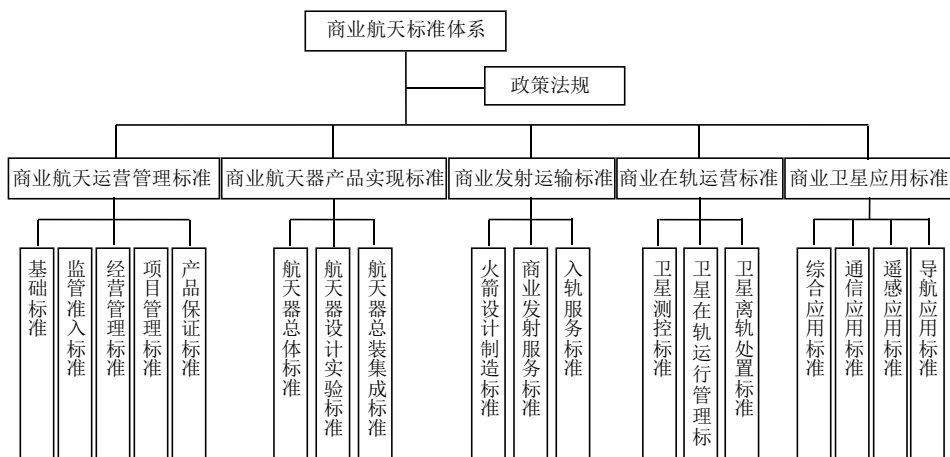


图 2 我国商业航天标准体系设想

尽管如此, 上述标准中针对在轨制造技术的特殊性能尚没有做出明确的规定。

近年来, 随着我国空间站建设的实施, 国内多家研究机构纷纷开展了空间在轨 3D 打印、在轨焊接、在轨组装等技术的研究工作, 并已取得可喜成果。为保证不同研究机构、企业之间相关技术的研发合作、技术衔接, 明确统一的在轨制造技术要求, 亟需构建在轨制造技术标准体系。

3 在轨制造技术标准体系架构

在轨制造技术标准可分为三个层次: 通用标准、分类标准、专用标准。通用标准指通用概念、一般要求和常见应用; 分类标准指材料类别和工艺类别的标准; 专用标准指具体材料、具体工艺和具体应用的标准, 以保证产品设计、技术研究、设备研制、施工作业、试验检测等各个方面工作的具体实施。在轨制造技术标准体系的分层架构如图 3 所示。

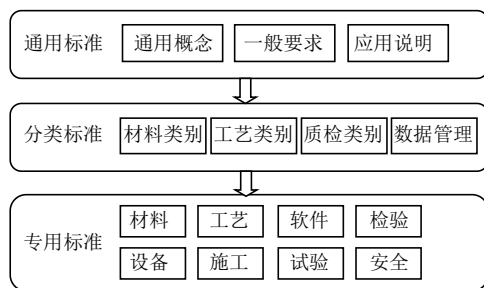


图 3 在轨制造标准体系分层架构

4 在轨制造技术标准构成

4.1 在轨制造技术领域

标准体系构建的基础是标准的制定。空间在轨制造包含大量技术内容, 具有多材料、多学科、受空间特殊环境条件约束、作业人员不确定等特点。

空间在轨制造技术层面主要包括在轨 3D 打印、在轨焊接、在轨组装、在轨原位检测等方面。表 2 给出在轨制造技术标准体系中的专业方向和技术领域。

表2 在轨制造技术标准体系中的专业方向和技术领域

专业方向	技术领域
3D 打印	熔融沉积式打印、高能束打印、电子打印等
焊接	熔化焊、压力焊、钎焊等
组装	组段对接、产品组装、结构组装等
检验	外观检测、内部检测、功效检测等
试验验证	地面试验、在轨试验等

4.2 通用标准

a. 通用概念

在通用概念类标准中，针对在轨制造体系中的各个环节、组成部分的一些通用概念加以规范。

b. 一般要求

该类标准中明确在轨制造的一般要求，方便参研科研院所、大专院校、企业等统一执行。

c. 应用说明

这类标准用于明确空间在轨制造技术的应用场景，方便各参研单位有针对性地开展相关研究。

4.3 分类标准

a. 材料类别：用于说明原材料、工艺辅料、工艺装备等辅助用料的材料类别等。

b. 工艺类别：用于说明空间在轨制造的工艺规范、作业指导书类别等。

c. 质检类别：用于说明外观完整性检验、内部无损检验、功能性及有效性检验类别等。

d. 软件及数据管理类别：用于说明空间在轨制造过程中应用的各类软件及数据类别等。

4.4 专用标准

4.4.1 材料标准

a. 原材料

在轨 3D 打印的原材料中，金属材料有铝合金、钛合金、钢材等；非金属材料有高分子材料、陶瓷材料、黏土材料、光敏树脂等；还有多种类型的金属、非金属复合材料。

在轨焊接原材料包括铝合金、钛合金、钢材、金属复合材料，相应的填充材料，如焊丝、焊料等；

在轨检测原材料包括感光胶片、检验用介质材料等。

b. 工艺辅料

在轨 3D 打印工艺辅助材料包括成型托盘等工艺装备用料、脱模剂等。

在轨焊接工艺辅助材料包括焊接引入/引出材料、工装用料、焊剂等。

在轨检测工艺辅助材料包括射线防护材料、化学

试剂、检验所需工艺装备用料等。

4.4.2 工艺规范

在轨制造工艺规范涉及各种在轨制造工艺的技术要点、工序安排、工艺参数、质量要求、安全要求等方面。

在轨 3D 打印工艺包括：选区熔化成型、激光熔融沉积成型、电子束无模成型、ABS 树脂的熔丝制造、搅拌摩擦增材制造工艺等。

在轨焊接工艺包括：高能束焊接、压力焊、钎焊、固态焊等。

组装工艺包括：大舱段对接组装、结构件组装、零部件组装等。

4.4.3 质量检验

为保证在轨制造产品质量的可靠性、一致性，需要针对在轨制造产品的检验方法、检验技术参数、检验操作规范等制定统一的标准规范。

在轨检验包括外观质量检验、致密性检测、内部质量检验、理化性能检测等。

4.4.4 软件及数据管理

针对在轨制造技术各个阶段的需要，编制软件说明书及数据管理标准。

4.4.5 设备

针对在轨制造涉及的各类设备，编制操作指导书。这些设备包括：3D 制造设备、焊接设备、组装设备、各类试验检测仪器设备等。

4.4.6 施工

由于在轨作业环境的特殊性，为保证在轨制造顺利实施并保证人员及空间设施的安全，需要根据在轨制造技术施工特点及空间实际情况编制作业指导书。

4.4.7 试验

在轨制造试验标准针对在轨制造试验方法以及技术要求对试验条件和试验内容等加以规范。其中：地面模拟实验：在地面建立模拟空间环境条件，对在轨制造技术进行模拟试验；在轨试验：在空间在轨环境开展在轨制造技术试验。

4.4.8 安全

在轨制造安全规范针对在轨制造所涉及的人员安全、设备安全、环境安全等进行统一要求。

5 标准构建工作步骤

5.1 建标组织工作

构建空间在轨制造标准体系需要航天主管部门组

织国内在轨制造主要参研单位成立在轨制造标准体系构建工作委员会，其主要工作包括：首先，研究确定在轨制造标准涉及范围，确定在轨制造标准体系研发计划；二是，提出在轨制造标准体系构建专项支持计划；三是，与具体标准设计机构进行讨论，探讨标准编制计划和方法，以及知识产权保护问题；四是，组织开放性研讨会，非委员会成员也可参加，讨论空间在轨制造标准体系进展与新任务。

5.2 建标工作分类

建标工作可分为三类：第一类，现有标准引用：梳理现行涉及航天领域的国军标、航天行业标准、企业标准中直接可用于在轨制造的标准；第二类，现有标准修改完善：针对现行国军标、航天行业标准、企业标准中经过修改完善可用于指导在轨制造的标准，组织开展标准的修改工作；第三类，新标准编制：根据在轨制造特殊需要，组织编制全新标准规范。

5.2.1 现有标准引用

现有标准引用主要包括一些材料标准、检验标准等。

材料标准：空间应用的金属材料绝大部分，以及一些非金属材料，可以按照现行航天材料标准执行。这部分标准可以直接引用。

检验标准：在轨制造的产品质量检验，通常情况下可以执行现行航天产品的质量检验标准，特殊情况需要修改完善。

5.2.2 现有标准修改完善

针对一些材料标准、检验标准中不能直接引用的部分标准，以及一些常规工艺标准，可以借用现行的航天制造标准，通过有针对性地补充修改，用以指导空间在轨作业，比如一些组装工艺、检验方法等。

5.2.3 新标准编制

由于空间在轨制造的特殊性，除去可直接引用、经修改后可引用的航天标准外，还有大量在轨制造标准需要重新编制。这是构建在轨制造标准体系的重点工作。

5.3 标准体系构建路线图

标准构建路线图初步设想如表3所示。

表3 在轨制造标准体系构建路线图初步设想

		2022~2023 起步规划阶段	2024~2025 全面开展阶段	2026~2027 逐步完成阶段
通用标准	通用概念	空间在轨制造通用概念◎		
	一般要求	空间在轨制造一般要求◎		
	应用说明	空间在轨制造技术应用说明◎		
分类标准	材料类别	在轨制造材料类别标准◎		
	工艺类别	在轨制造工艺类别标准◎		
	质检类别	在轨制造质量检验类别标准◎		
	软件和数据	作业软件及数据类别标准◎		
专用标准	材料	常规金属、非金属等原材料√ 常规工艺辅助用料√ 常规质量检验用料√	空间环境用特种原材料◎ 空间环境用特种工艺辅料◎ 空间环境用特种检验用料◎	空间回收再利用材料◎ 新型材料◎
	工艺	空间3D打印工艺规范※ 空间焊接工艺规范※ 手动组装工艺规范※	空间电子3D打印◎ 空间机器人组装◎ 工艺设备空间作业规范◎	工艺废料处理规范◎ 回收材料分解与组装◎ 新型工艺规范◎
	检验	外观完整性检验规范√ 在轨制造产品质量检验要求※	组织性能检验◎ 密封性检验◎	检验废料处理规范◎ 检验设备空间作业规范◎
	试验	地面模拟试验方法※ 地面模拟实验设备操作规范※	空间模拟实验方法◎ 空间模拟实验作业规范◎	
	软件及数据	在轨制造设计软件说明书※ 软件及数据存储与传输说明书※		

注：√——可直接借用 ※——经修改后可用 ◎——需重新编制

起步规划阶段：确定标准涉及的范畴和相关政策问题；设立在轨制造标准体系建设专项支持计划，制定具体标准制定方案；对现行航天标准中与在轨制造相关的标准的梳理、分类、修订；逐步启动新标准编制。

全面开展阶段：完成现行航天标准中与在轨制造相关的标准的梳理以及修订，全面开展新标准编制工作。

完成建设：全面完成在轨制造标准体系建设，并

(下转第67页)

