



航天科技图书出版基金资助出版

航天产品工程

袁家军 编著



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

航天产品工程

袁家军 编著



中国宇航出版社

· 北京 ·

版权所有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

航天产品工程/袁家军编著. —北京:中国宇航出版社,2011.2

ISBN 978-7-80218-921-8

I. ①航… II. ①袁… III. ①航空航天工业—工业产品
IV. ①V1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 021077 号

责任编辑 张铁钧 阎 列 曹晓勇

封面设计 宇航数码 责任校对 祝延萍

出版 中国宇航出版社
发行
社址 北京市阜成路8号 邮编 100830
(010)68768548
网址 www.caphbook.com / www.caphbook.com.cn
经销 新华书店
发行部 (010)68371900 (010)88530478(传真)
(010)68768541 (010)68767294(传真)
零售店 读者服务部 北京宇航文苑
(010)68371105 (010)62529336
承印 北京国中画印刷有限公司
版次 2011年2月第1版 2011年2月第1次印刷
规格 787×1092 开本 1/16
印张 20.25 字数 350千字
书号 ISBN 978-7-80218-921-8
定价 98.00元

本书如有印装质量问题,可与发行部联系调换

前 言

航天产品工程以航天产品成熟度理论为核心，聚焦航天产品快速成熟的技术与管理过程，实现小子样航天产品的快速成熟，满足复杂航天系统对产品高可靠、高质量、高一致性要求。近年来，航天产品工程在航天科研发生产体系建设、产品型谱建设、产品定型、生产线建设与认证等工作中得到实践应用，为航天型号缩短研制周期、改善研制效益、提高质量与可靠性、加速技术创新等发挥了重要作用。

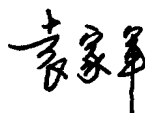
为了更好地总结航天产品工程已有的成果经验，系统推广航天产品工程的理论和方法，加强对航天产品工程理论的研究和交流，撰写了这本《航天产品工程》。本书共分为8章，其中：第1章总论，主要介绍了国内外产品工程的发展、航天产品工程的理论基础，提出了航天产品工程的核心理论、技术体系和主要内容等；第2章航天产品成熟度，主要阐述了航天产品成熟度的概念、航天产品快速成熟方法、成熟度模型以及成熟度定级条件、程序等；第3章航天产品数据包，主要阐述了产品数据包的概念，产品数据包的范围、形成过程、内容以及数据包与成熟度的关系等；第4章航天产品型谱，主要阐述了产品型谱的内涵与作用、航天产品型谱编制的内容和方法，以及航天产品型谱的应用与管理等；第5章航天产品开发，主要介绍了航天产品开发的基本理论和方法，给出了航天产品开发的详细过程和具体案例等；第6章航天产品定型，主要阐述了航天产品定型的内容和方法、定型的步骤和管理等；第7章航天产品生产线建设，主要介绍了产品生产线的组成与建设要求，给出了生产线建设的步骤与认证、运行评估的标准与方法等；第8章航天产品工程信息化，主要介绍了国内外产品工程信息化的情况和实施的基础，阐述了产品研制过程信息化和产品管理信息化的主要内容，给出了产品工程信息化系统的建设方案等。

在本书编写过程中，杨孟飞、王卫东、张敬铭、原民辉、卿寿松等参加了全书策划，李志阳、周海京参加了第1章撰写，周海京、王卫东、李宇峰参加了第2章撰写，石晓然、王涛、程晓、杨孟飞、冯小琼、郭立、王大雷、宋晓慧、施帆参加了第3章撰写，杜刚、何洋、李琦、周思卓负责第4章撰写，冯靖皓、刘闯斌、于森负责第5章撰写，王喜奎、张书庭、

周凯、郑驰、张杰参加了第6章撰写，王至尧、牛庆锋、赵晨露、李富军、韩天龙负责第7章撰写，曹学先、周凯、柯伦、王栩、庞娅莉负责第8章撰写。张敬铭、朱毅麟、张照炎、郑松辉、余孝昌、王卫东、李志阳、周思卓、杨孟飞、原民辉、卿寿松、葛榜军等参加了全书统稿和审校。

感谢中国航天科技集团公司宇航部、中国空间技术研究院组织了本书的策划，北京空间科技信息研究所、中国航天标准化研究所组织了本书的撰写。此外，对于中国运载火箭技术研究院、航天动力技术研究院、航天推进技术研究院、四川航天技术研究院、上海航天技术研究院、中国航天电子技术研究院，以及中国宇航出版社等单位在本书撰写和出版过程中给予的大力支持一并表示感谢。

本书在撰写过程中力求做到结构完整、概念准确、阐述清楚，但因为航天产品工程是一项创新性和探索性的工作，本书的内容难免有错误和疏漏之处，恳请关心和关注我国航天事业的各界专家、学者们和广大读者给予批评指正。



2011年1月15日

目 录

第 1 章 总 论	1
1.1 航天产品工程的发展及作用	1
1.1.1 航天产品与航天产品工程	1
1.1.2 国外航天产品工程相关研究情况	3
1.1.3 中国航天产品工程的发展情况	8
1.1.4 航天产品工程的作用	12
1.2 航天产品工程的理论基础	13
1.2.1 航天产品工程的研究范畴与重点	13
1.2.2 系统工程方法论	14
1.2.3 航天产品开发技术过程	17
1.2.4 航天产品分析方法	19
1.2.5 航天质量管理与产品保证	20
1.3 航天产品工程的核心理论和主要内容	22
1.3.1 航天产品工程内涵	22
1.3.2 航天产品成熟度理论	23
1.3.3 航天产品工程技术体系	24
1.3.4 航天产品工程管理	25
参考文献	27
第 2 章 航天产品成熟度	30
2.1 国外技术成熟度、制造成熟度发展简述	30
2.1.1 技术成熟度发展概况	30
2.1.2 制造成熟度发展概况	32
2.1.3 技术成熟度与制造成熟度的分析	33
2.2 航天产品成熟度概念及主要内容	35
2.2.1 基本概念与主要内容	35
2.2.2 产品成熟阶段的划分	39
2.2.3 产品成熟度的度量依据	40

2.2.4	产品成熟度的表征形式	42
2.2.5	产品成熟度框架模型	43
2.3	航天产品成熟度定级条件及要点	46
2.3.1	原理样机产品(产品成熟度1级)	46
2.3.2	工程样机产品(产品成熟度2级)	49
2.3.3	飞行产品(产品成熟度3级)	52
2.3.4	一次飞行考核产品(产品成熟度4级)	57
2.3.5	多次飞行考核产品(产品成熟度5级)	60
2.3.6	三级定型产品(产品成熟度6级)	64
2.3.7	二级定型产品(产品成熟度7级)	67
2.3.8	一级定型产品(产品成熟度8级)	70
2.4	航天产品成熟度定级管理	73
2.4.1	产品成熟度定级的意义	73
2.4.2	产品成熟度定级的组织与基本职责	74
2.4.3	产品成熟度定级的程序	74
	参考文献	77
第3章	航天产品数据包	78
3.1	概述	78
3.1.1	航天产品数据包的定义	78
3.1.2	国内外产品数据包情况介绍	78
3.1.3	建立航天产品数据包的目的和意义	83
3.2	航天产品数据包的内容	84
3.2.1	航天产品数据的分类	84
3.2.2	航天产品数据包的形成过程	86
3.2.3	航天产品各阶段典型数据包内容	88
3.3	产品关键特性数据	99
3.3.1	产品关键特性的分类	99
3.3.2	关键特性的识别	99
3.3.3	产品关键特性表的建立	101
3.3.4	产品关键特性表的技术管理	104
3.4	成功数据包络分析	109
3.4.1	分析要求	109

3.4.2 分析程序和分析方法	109
3.5 产品数据包与产品成熟度的关系	110
3.6 航天产品数据包的管理	112
3.6.1 航天产品数据包组织管理	112
3.6.2 航天产品数据包的验收管理	113
参考文献	116
第4章 航天产品型谱	117
4.1 概述	117
4.1.1 产品型谱的定义及内涵	117
4.1.2 产品型谱的作用	120
4.1.3 国内外航天产品型谱发展简述	120
4.2 航天产品型谱编制的内容和方法	123
4.2.1 航天产品型谱编制对象分析	123
4.2.2 航天产品型谱建设要素	127
4.2.3 航天产品型谱研究及规划	128
4.2.4 航天产品型谱编制原则和要求	130
4.2.5 航天产品型谱编制程序和方法	131
4.2.6 航天产品型谱编制示例	137
4.3 航天产品型谱应用	144
4.3.1 航天产品型谱在产品规划、研发、生产和推广过程中 的应用	144
4.3.2 航天产品型谱在指导型号选用专业产品中的应用	147
4.4 航天产品型谱管理	148
4.4.1 航天产品型谱的策划与编制管理	148
4.4.2 航天产品型谱发布管理	148
4.4.3 航天产品型谱维护与更新管理	149
4.5 航天产品型谱建设与应用案例	150
参考文献	154
第5章 航天产品开发	155
5.1 概述	155
5.1.1 航天产品开发的基本概念	155

5.1.2	国内外航天产品开发管理简述	156
5.2	航天产品开发的基本理论与方法	161
5.2.1	航天产品开发的特点	161
5.2.2	航天产品开发的基本原则	162
5.2.3	航天产品设计方法	163
5.3	航天产品开发详细过程	175
5.3.1	产品立项与方案阶段	175
5.3.2	原理样机阶段	178
5.3.3	工程样机阶段	182
5.3.4	飞行产品阶段	192
5.4	航天产品开发案例	199
5.4.1	项目立项	200
5.4.2	原理样机研制	201
5.4.3	工程样机研制	202
5.4.4	飞行产品研制	205
	参考文献	206
第6章	航天产品定型	207
6.1	概述	207
6.1.1	航天产品定型的基本概念	207
6.1.2	国内外产品定型情况简述	207
6.1.3	航天产品定型的原则、目的与作用	210
6.2	航天产品定型的内容和方法	211
6.2.1	航天产品定型的依据	211
6.2.2	航天产品定型的条件	212
6.2.3	航天产品定型策划	214
6.2.4	航天产品定型的成熟度培育	215
6.2.5	航天产品定型的准备	218
6.3	航天产品定型步骤	219
6.3.1	航天产品定型试验	219
6.3.2	航天产品定型申请	222
6.3.3	航天产品定型审查	223
6.3.4	航天产品定型批准	224

6.4 航天产品定型管理	225
6.4.1 航天产品定型的组织管理	225
6.4.2 航天产品定型的应用管理	225
6.4.3 航天产品定型的标识与归档管理	225
参考文献	228
第7章 航天产品生产线建设	229
7.1 概述	229
7.1.1 生产模式基本概念	229
7.1.2 生产模式发展历程	229
7.1.3 国外典型航空航天产品生产模式简介	230
7.1.4 航天产品生产特点	232
7.1.5 航天产品生产线建设的原则	232
7.1.6 航天产品生产线建设模式的选择	233
7.2 航天产品生产线组成与建设要求	234
7.2.1 生产线的组成	234
7.2.2 生产线建设的主要要求	235
7.2.3 生产线建设的基本流程	237
7.3 航天产品生产线建设策划	238
7.3.1 生产线建设策划内容	238
7.3.2 生产流程优化示例	241
7.4 航天产品生产线建造	246
7.4.1 生产线岗位和人员配置	247
7.4.2 生产线仪器设备配置	249
7.4.3 生产线物流保障建设	250
7.4.4 生产线技术指导文件完善与配置	251
7.4.5 生产线安全与环境设施建设	251
7.4.6 生产线信息化建设	253
7.4.7 生产线管理制度建设	253
7.5 航天产品生产线认证	254
7.5.1 生产线认证的重点内容	255
7.5.2 生产线认证主要工作流程与要求	256
7.6 航天产品生产线运行评估	259

7.6.1	生产线运行评估内容	259
7.6.2	生产线运行评估过程	260
7.6.3	生产线运行评估要素及评估标准设置示例	260
	参考文献	267
第8章	航天产品工程信息化	268
8.1	产品工程信息化概述	268
8.1.1	产品工程信息化的基本概念	268
8.1.2	国内外产品工程信息化发展	269
8.1.3	产品工程信息化的目的及意义	270
8.1.4	产品工程信息化的工作内容	271
8.2	航天产品工程信息化实施的基础	272
8.2.1	航天产品工程信息化理论基础	272
8.2.2	计算机网络基础	274
8.2.3	数据库管理系统	274
8.2.4	软件基础	276
8.3	航天产品研制过程信息化	281
8.3.1	航天产品研制过程中的软件工具	282
8.3.2	航天产品研制过程	284
8.3.3	航天产品研制过程中的数据	285
8.3.4	航天产品研制信息系统的集成	288
8.3.5	航天产品研制数据包	293
8.4	航天产品管理信息化	295
8.4.1	航天产品数据库	295
8.4.2	航天产品成熟度管理	300
8.4.3	航天产品型谱管理	301
8.4.4	航天产品定型管理	301
8.4.5	航天产品数据包管理	302
8.4.6	航天产品生产线管理	303
8.4.7	航天产品应用信息化	304
8.4.8	航天产品工程文档管理	306
8.4.9	航天新产品入库管理	306
8.5	航天产品工程信息系统	306

8.5.1 航天产品工程信息化平台	306
8.5.2 航天产品工程信息系统	307
参考文献	309

第 1 章 总 论

中国航天事业经过 50 多年的发展，取得了举世瞩目的伟大成就，特别是近年来相继实现了载人航天、月球探测等重大技术跨越，现役运载火箭可靠性稳步提升，各类卫星应用领域得到极大拓展，并逐步发展了具有中国特色的航天系统工程理论和方法。

航天是战略高科技的典型代表，是当今世界国与国之间竞争的重要前沿技术领域，航天产业已经成为各国转变经济发展方式，提高科技实力、产业实力和国家综合实力的新兴先导产业。持续提升航天系统工程能力，推动经济社会发展正在成为一项世界性课题。以美国为首的世界航天强国已经加快了航天系统工程的创新力度，提出并应用了大量新的系统工程理论、技术工具和管理方法。

从 21 世纪初开始，中国航天企业和相关管理部门，充分继承航天事业经过 50 多年探索形成的系统工程基本理论及方法，吸收国外航天产品质量与可靠性管理、航天产品生命周期管理等一般理论和方法，紧密结合中国国情和航天系统研制实践，积极探索新形势下加快中国航天事业发展的新路径、新思路，大力推动航天科研生产转型升级，针对航天产品高可靠、高质量及小子样研制的特点，提出了航天产品成熟度理论，建立了以推进航天产品快速成熟为核心的航天产品工程技术体系，初步形成了具有中国航天特色、反映中国航天事业发展需求的航天产品工程理论、方法和流程。

1.1 航天产品工程的发展及作用

1.1.1 航天产品与航天产品工程

1.1.1.1 航天产品的概念

产品是一项活动或过程的结果，包括硬件、软件、流程性材料、服务或它们的组合。

航天产品是指航天系统开发、研制或生产过程形成的硬件或软件。按其组成的复杂程度分为系统、分系统、单机、模块 4 个层次。

(1) 系统

系统一般是指为执行规定功能以达到规定的目标而由一组有关要素组成的集合。在航天领域系统一词通常指整星、整箭、整船或整器，有时由若干下级要素（分系统或单机）组成的产品也泛称系统。

(2) 分系统

分系统主要是指为执行规定功能以达到规定的目标，但本身还不能满足用户需求，由一组相互有关的要素所组成的集合或完成某一主要功能的单机组合。

(3) 单机

单机主要是指设计并生产成能完成规定的功能，同时在被分解和再组装后能保持其功能的设备，或具有独立功能、完整结构和明确机、电、热等接口的构成分系统的产品。

(4) 模块

模块则是完成某项功能并与其他模块共同支持单机的底产品。

本书在中国航天系统工程理论的基础上，重点研究航天单机产品快速成熟的理论、方法和流程。书中所称的航天产品，主要是指航天单机产品，但系统级、分系统级以及模块级产品也可依据本书的理论、方法和流程实施快速成熟。

1.1.1.2 航天产品的特点

航天工程系统及其各级各类工程产品主要运行在大气层外，其研制和应用需要适应硬件不可维护和外层严酷空间环境等特殊要求。

航天工程系统及其产品的研制活动一般具有探索性、先进性、复杂性、高风险性的突出特点和高可靠、高质量、小子样研制及一次成功的特殊要求。

探索性是指在航天工程实践中，科学、技术和工程问题相耦合，给航天工程实施带来众多不确定性。先进性是指航天工程系统和产品研制需要集最新科技成果之大成，即需要综合运用相关专业领域最前沿的研究成果，这使得航天工程成为技术先进性最为突出的复杂工程系统。复杂性是指跨学科集成，跨行业协作，系统庞大，参与人员众多，技术和管理复杂性高。高风险性是指航天产品需要在近乎无维护支持的情况下，以自主运行模式完成任务。航天产品在经过反复综合集成和系统优化之后，其各组成元素之间存在高度的交互关联关系，某个局部的细微问题或异常，均可能导致工程系统整体的功能衰减甚至失效，进而造成严重后果。因而，航

天产品需要满足高可靠、高质量的要求。小子样研制是指航天产品研制过程中投产试验样品少,生产过程中小批量或单件生产。一次成功是指航天工程的研制和试验只能在地面进行,很多关键技术在地面难以真实考核,因而一次成功是系统第一次在真实环境下运行就要取得成功。以上这些特点都对航天系统开发和产品研制工作提出了更为严峻的挑战。此外,随着航天技术快速发展,越来越多的没有航天产品研制经验的新单位也加入到系统开发队伍中来,这也进一步增加了技术集成和工程管理的难度。

1.1.1.3 航天产品工程的定义

为有效实施航天工程管理,确保多型号并举的研制任务一次成功,在吸收国外相关实践和研究成果的基础上,不断进行航天系统工程理论和方法的创新,针对小子样研制情况下快速提升产品成熟程度这一命题,提出了产品成熟度理论。应用该理论,开展航天产品规划、研制、生产、管理的综合技术创新,将产品成熟度提升作为保证航天工程系统研制任务成功的重要基础,系统地提出并实施了航天产品工程。

航天产品工程是对航天产品开发、生产、质量管理、产品定型和应用等过程进行优化,以满足小子样研制条件下产品高性能、高可靠、高质量要求的综合性工程技术。

1.1.2 国外航天产品工程相关研究情况

国外航天领域目前还没有关于航天产品工程的明确提法,但针对航天产品相关的工程技术和成熟度评价方法等的研究已经比较深入,特别是技术成熟度和制造成熟度、成熟平台与现货产品应用、阶梯化研制以及持续改进机制等,对于中国航天产品工程的研究起到了重要的参考借鉴作用。

1.1.2.1 技术成熟度与制造成熟度

从20世纪中后期开始,随着航天技术的发展和应用要求的提高,为了在项目实施过程中有效识别、跟踪和控制风险,确保任务成功,世界航天发达国家纷纷开始探索和应用以技术成熟度和制造成熟度为核心的成熟度评价技术。

(1) 技术成熟度

技术成熟度(Technology Readiness Levels, TRL),又称技术准备等级或技术准备度,是指单项产品或单项技术在研发过程中所达到的一般性可用程度。由美国航空航天局(NASA)在20世纪80年代提出,作为航天研制项目在立项、评审、决策及研制启动之前,评价项目在技术上可用

程度的指标。

目前,在美国航空航天局的《系统工程手册》以及一系列程序要求文件中,都明确要求开展技术成熟度评估,并规定了各阶段应达到的技术成熟度等级。美国国防部(DoD)在联邦问责局(GAO)的建议下,也已在航空、航天等重大国防采办项目中实施技术成熟度评估工作,并颁布了相应的管理文件和工作手册。除美国外,英国国防部、欧洲空间局(European Space Agency, ESA)等部门和机构在其项目中也已开始应用技术成熟度评估技术。技术成熟度一般分为9级,目前较为通行的技术成熟度等级(2005年美国国防部发布)的划分见表1-1。

表 1-1 美国国防部发布的技术成熟度等级定义

里程碑	技术成熟度	描 述
里程碑 A	1	基本原理被发现和报告
	2	技术概念和用途被阐明
	3	关键功能和特性的概念验证
里程碑 B	4	实验室环境下的部件和试验模型验证
	5	相关环境下的部件和试验模型验证
	6	相关环境下的系统、分系统模型或原型机验证
里程碑 C	7	模拟作战环境下的原型机验证
大规模生产	8	系统完成技术试验和验证
初始及完全作战能力	9	系统完成使用验证

(2) 制造成熟度

制造成熟度(Manufacturing Readiness Levels, MRL)是对技术成熟度概念的拓展,主要为弥补技术成熟度难以评估装备生产系统的经济性和有效性的不足。用于确定武器装备研制过程中制造技术是否成熟,以及技术向产品转化过程中是否存在风险,从而管理并控制武器系统生产,使其在质量和数量上实现最佳化,即最大限度提高武器系统质量、降低成本和缩短生产周期,满足作战任务需求。

与技术成熟度类似,制造成熟度也具有完整的评定标准和度量方法,用于评定特定阶段制造技术的成熟程度,并允许不同类型技术之间进行一致的成熟度比较。2009年5月,美国国防部颁布了新版《制造成熟度评估手册》,该手册将制造成熟度划分为10级,如表1-2所示。相对于技术成

熟度，制造成熟度的应用目前尚处于起步阶段。

表 1-2 美国国防部发布的制造成熟度等级定义

制造成熟度	描 述
1	生产可行性已评估
2	生产方案已定义
3	生产方案已确定
4	在实验室环境条件下的技术生产能力验证
5	在相关生产条件下部件模型的生产能力验证
6	在相关生产条件下系统、分系统的生产能力验证
7	在有代表性的生产环境条件下系统、分系统、部件的生产能力验证
8	具备小批量的生产能力
9	小批量的生产已验证，具备大批量的生产能力
10	大批量的生产能力验证

技术成熟度是美国航天项目研制过程中采用的研究较为充分、成效比较明显的一种项目评价方法和管理手段，而制造成熟度是美国航天系统研制过程中新近采用的一种管理工具。两者的目标和性质一致，都是以识别和控制项目风险为目的，供项目甲方和项目管理者使用的基本管理工具。技术成熟度和制造成熟度的提出，是航天系统和产品研制技术管理的重要成果，具有重要的参考应用价值。然而，技术成熟度和制造成熟度主要依据产品的外部特性和应用验证情况进行度量和评价，较少考虑产品的内在特性和产品成熟的本质要求，对如何促进航天产品在小子样情况下的快速成熟，缺乏有效的支撑。

1.1.2.2 成熟平台与现货产品应用

从 20 世纪 70 年代开始，世界航天发达国家和国际一流航天企业开始推行航天产品系列化、型谱化工作。国际主要航天系统集成商重点构建了成熟公用平台，确立了航天系统体系结构，建立了开放的标准接口规范，简化了研制生产流程，主导了基于成熟平台的应用卫星制造产业链建设。

公用平台的开发理念和相应接口规范体系的建立，加快了卫星所属单机和部件等的系列化、专业化开发。航天各级产品供应商纷纷建立企业产品系列型谱，开展现货产品研发、研制工作，并逐步形成了以系列型谱为指导、技术相对成熟、质量稳定、可供卫星设计选用的现货产品（OTS），根据用户和市场的不同，现货产品又分为商业现货产品（COTS）、政府现