

NASA系统工程手册

NASA Systems Engineering Handbook

朱一凡 李群 杨峰 雷永林 侯洪涛 译



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

NASA 系统工程手册

NASA Systems Engineering Handbook

朱一凡 李群 杨峰 雷永林 侯洪涛 译

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

系统工程是分析解决复杂系统的论证、设计、生产和使用中的评价决策和权衡优化问题的有效方法和手段。系统工程不仅有完整的理论方法和技术手段构成的科学体系，而且在像航天系统这样经费预算多、研制周期长、运行使用风险高的复杂系统中的具体应用又体现出多样性和复杂性。如何有效地利用系统工程理论和方法针对复杂系统进行组织管理并达到预期的目的，需要对系统工程思想有深刻的理解和丰富的工程实践经验。本手册是美国国家航空航天局（NASA）对多年系统工程实践经验的总结，主要有三个部分的内容：第一部分（第1~3章）是结合航天产品的寿命周期介绍由多个系统工程流程构成的航天产品开发和控制管理的系统工程引擎，第二部分（第4~5章）针对系统工程引擎中的每个流程详细介绍流程实施的过程和指南，第三部分（第6~7章）介绍在开展系统工程工作时应当把握的关键技术和相关标准。

本手册内容翔实、图文并茂，许多问题的阐述结合实例，部分具体操作还在附录中给出了参考样板。NASA系统工程手册不仅可以作为工业工程领域产品开发和系统工程组织管理实践的有益借鉴，也可以作为从事产品研发与项目管理的科技人员和高等院校系统工程专业或相近专业研究生和高年级本科生的学习参考。

本手册部分章节的阅读需参考“NASA项目寿命周期系统工程视图——飞行与地面系统系统工程流程”大图，读者可登录 www.hxedu.com.cn（华信教育资源网）搜索本书免费下载，或发送邮件到 chenwk@phei.com.cn 索取。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

NASA 系统工程手册/朱一凡等译. —北京：电子工业出版社，2012.11

ISBN 978-7-121-18081-1

I. ①N… II. ①朱… III. ①航空工程—技术手册②航天工程—技术手册 IV. ①V2-62②V4-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 202165 号

策划编辑：陈韦凯 特约编辑：刘丽丽

责任编辑：陈韦凯

印 刷：三河市鑫金马印装有限公司

装 订：三河市鑫金马印装有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1 092 1/16 印张：21 字数：533 千字

印 次：2012 年 11 月第 1 次印刷

印 数：3 000 册 定价：65.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：（010）88258888。

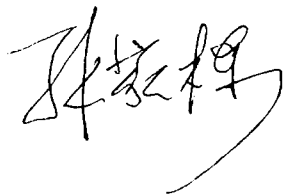
序

我国航天事业经过 50 多年的发展，取得了举世瞩目的成就。在钱学森等老一辈科学家的带领下，我国航天系统工程伴随着中国航天事业的发展而逐步成长、成熟。航天系统工程是运用系统工程的理论和方法对航天工程从需求论证到设计研制、生产制造，以及运行维护等全寿命过程所进行的技术和管理活动的统称，主要关注并解决复杂工程系统总体权衡与优化问题，在“两弹一星”、“载人航天”、“北斗”等大型复杂工程的建设实践中得到充分运用，对保障我国航天工程的顺利实施、增强我国综合实力、带动科技进步、促进经济发展发挥了重大作用。

我国正处于由航天大国向航天强国迈进的关键时期，航天工程的使命任务更加多样化，系统功能越来越复杂，需要进一步探索航天系统工程规律，提升现代宇航能力，积极推动航天事业科学发展。中国卫星导航系统管理办公室一直致力于促进航天系统工程理论和方法在北斗卫星导航系统建设和应用实践中的运用。2012 年底北斗卫星导航系统将完成区域系统建设，提供覆盖亚太地区的导航服务，2020 年将建成全球卫星导航系统。面对前所未有的系统规模、高可靠高质量的应用服务要求、日趋激烈的国际竞争，迫切需要进一步研究航天系统工程理论和方法，有力保障北斗卫星导航系统建设和应用的顺利实施。

在中国卫星导航系统管理办公室的支持下，由国防科技大学系统工程系组织开展了《NASA 系统工程手册》的翻译、出版工作。该书是 NASA 对航天系统工程管理方法、技术和经验的最新概括和总结，反映了 NASA 在航天系统工程领域积累的成功经验。书中介绍的航天系统工程技术和管理方法，对我国航天工程组织实施具有积极的借鉴意义。

中国科学院院士



译者序

自 20 世纪后半叶，在钱学森先生创导下，系统工程如雨后春笋蓬勃发展，在我国的社会发展和经济建设中得到广泛应用并发挥了积极作用。而随着系统工程理论和方法的日渐丰富，以及系统工程技术在社会、经济和军事领域应用的不断深入，对于如何利用系统工程有效解决复杂系统问题，还存在不少认识误区和实践偏差。甚至某些时候复杂的系统工程成为了某些部门回避困难的借口。实际上，在系统的设计研发过程中，系统工程不仅仅是对于系统预测、评价和优化等技术的应用，更多情况下是从宏观上和整体上分析系统，在系统集成设计框架下采用专门技术解决具体问题，寻求系统整体最优的理念和过程。系统工程的实践过程是长期和复杂的，其核心作用在于将所涉及的人员、技术和资源有机地结合在一起，以最有效的方式达到系统目标，而这一点恰恰就是系统工程实践中的困难所在。

美国国家航空航天局（NASA）曾经组织过多个大型复杂航天系统项目，有着丰富的经验积累和理论沉淀；“阿波罗”载人登月工程和天地往返运输系统（“航天飞机”）就是系统工程应用的成功典范。《NASA 系统工程手册》是对系统工程应用实践经验的总结，该手册结合系统全寿命周期，对系统寿命周期各个阶段对应的系统工程流程，以及各个系统工程流程中的系统工程管理技术进行了详细说明。可以说，这本手册对于系统前期论证和产品设计开发过程中系统工程方法运用和实践具有极高的借鉴和参考价值。

复杂的航天系统各项工程都有各自具体的问题，解决问题的手段和途径也不尽相同，但利用系统工程方法解决系统问题的思路是相通的。《NASA 系统工程手册》一公布，就引起了“北斗”卫星导航专项管理办公室的极大关注。在“北斗”卫星导航专项管理办公室的鼓励和支持下，我们组织力量对《NASA 系统工程手册》进行了翻译，希望这项工作能够对像“北斗”卫星导航工程这样的复杂系统工程项目中的产品设计和项目管理起到辅助作用。由于手册中涉及的学科专业知识广泛、工程历史背景繁杂，翻译中难免有不准确和不精致之处，敬请读者批评指正。

在本手册的翻译过程中，得到了许多同行和专家的指导和帮助，在此表示感谢！感谢“北斗”卫星导航专项管理办公室的领导对本手册的翻译给予的支持和协作；感谢电子工业出版社工业技术出版分社的徐静分社长和陈韦凯编辑为本手册的顺利翻译出版在版权联系和文稿编辑方面付出的努力和给予的指导；感谢王维平教授、郭波教授对于本手册翻译的理解和鼓励，以及总体上的把关和具体事务上的支持。

译者
2012 年 5 月

前 言

自从 1995 年编写 NASA/SP-6105 之后，在美国和国际标准的框架下，作为一门学科，美国国家航空航天局（NASA）的系统工程已经有了迅猛的发展。其主要进步包括实现了国际标准组织的 ISO9000 标准，采用了卡内基梅隆大学软件工程研究所的一体化能力成熟度模型（CMMI）来提升产品的开发和发布，以及减少任务失败的影响。在系统工程方面的经验教训已经写入 NASA 一体化行动小组（NIAT）报告、哥伦比亚号事故调查委员会报告，以及随后的迪亚兹报告。由此产生了 NASA 总工程师办公室（OCE）提高 NASA 系统工程基础和能力的倡议，以获得更有效的 NASA 工程系统，生产更高质量的产品，以实现使命任务的成功。此外，NASA 的系统工程政策和要求已经建立，这本更新后的手册是 OCE 发起的全 NASA 范围的系统工程倡议的一部分。

1995 年 SP-6105 的出版是为了将系统工程的基本概念和技术带给 NASA 的技术人员，以此使他们认识 NASA 系统和 NASA 环境的性质。SP-6105 的修订本保留了这个最初的理念，并更新了 NASA 系统工程知识结构，提供了对了解当前 NASA 最佳实践的指导，并根据新的 NASA 系统工程政策修订了手册。

本手册的更新体现在两个方面：自顶向下兼容 NASA 的高层政策和自底向上汇集 NASA 在本领域从业者的智慧。这种方法建立了科技情报与 NASA 系统工程过程之间的桥梁，便于在 NASA 内部更好地开展系统工程实践。本手册试图说明良好实践及方案的原则，而不是强调完成某个使命任务的特定方法。本手册集成的是 NASA 系统工程实践独特的顶层实现方法。本手册的更新过程中采用的材料有多种来源，包括 NASA 工程上的要求、外场系统工程手册和流程，以及非 NASA 的系统工程教材和指导书。

本手册包括 6 个核心章节：（1）系统工程基础讨论；（2）NASA 工程/项目寿命周期；（3）从概念到设计的系统工程流程；（4）从设计到最终产品的系统工程流程；（5）系统工程流程的交互关联技术管理；（6）与系统工程相关的特别专题。用于充实这些核心章节的附录提供各章主题的要点、案例及其他附加信息。本手册还使用注记和图形用于核心章节中的概念定义、理论深化、具体说明和概念拓展，而不会使读者的兴趣偏离各章节中的主要内容。

本手册为良好的系统工程实践提供自顶向下的指导，而不是以任何方式提出指令。

NASA/SP-2007-6105 修订版就此取代 1995 年 6 月颁布的 SP-6105。

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 本手册的目的.....	1
1.2 本手册的范围和深度.....	1
1.3 关于 NASA.....	1
第 2 章 系统工程基础	4
2.1 通用技术流程与系统工程引擎.....	5
2.2 按照项目阶段概述系统工程引擎.....	6
2.3 使用系统工程引擎的示例.....	7
2.3.1 示例导言.....	9
2.3.2 详细示例.....	9
2.4 产品验证和产品确认的区别.....	16
2.5 系统工程的费用.....	16
第 3 章 NASA 工程/项目寿命周期	19
3.1 工程规划论证.....	20
3.2 工程实施执行.....	21
3.3 项目 A 前阶段：概念探索.....	22
3.4 项目阶段 A：概念研究和技术开发.....	23
3.5 项目阶段 B：初步设计和技术完善.....	24
3.6 项目阶段 C：详细设计和制造.....	25
3.7 项目阶段 D：系统组装、集成、试验和投产.....	27
3.8 项目阶段 E：运行使用与维护.....	28
3.9 项目阶段 F：退役处置.....	28
3.10 经费：预算周期.....	29
第 4 章 系统设计	31
4.1 明确利益相关者的期望.....	32
4.1.1 流程描述.....	32
4.1.2 明确利益相关者期望流程指南.....	35
4.2 技术需求定义.....	39
4.2.1 流程描述.....	39
4.2.2 技术需求定义指南.....	41
4.3 逻辑分解.....	48
4.3.1 流程描述.....	48

4.3.2	逻辑分解指南	51
4.4	设计方案定义	54
4.4.1	流程描述	54
4.4.2	设计方案定义指南	61
第 5 章	产品实现	69
5.1	产品实施执行	69
5.1.1	流程描述	70
5.1.2	产品实施执行指南	73
5.2	产品集成	74
5.2.1	流程描述	75
5.2.2	产品集成指南	77
5.3	产品验证	80
5.3.1	流程描述	80
5.3.2	产品验证指南	86
5.4	产品确认	94
5.4.1	流程描述	95
5.4.2	产品确认指南	101
5.5	产品交付	102
5.5.1	流程描述	102
5.5.2	产品交付指南	106
第 6 章	技术管理	108
6.1	技术规划	108
6.1.1	流程描述	109
6.1.2	技术规划指南	120
6.2	需求管理	129
6.2.1	流程描述	129
6.2.2	需求管理指南	133
6.3	接口管理	134
6.3.1	流程描述	134
6.3.2	接口管理指南	135
6.4	技术风险管理	136
6.4.1	流程描述	137
6.4.2	技术风险管理指南	139
6.5	技术状态管理	149
6.5.1	流程描述	149
6.5.2	技术状态管理指南	155
6.6	技术数据管理	156
6.6.1	流程描述	157

6.6.2	技术数据管理指南	163
6.7	技术评估	164
6.7.1	流程描述	164
6.7.2	技术评估指南	166
6.8	决策分析	193
6.8.1	流程描述	194
6.8.2	决策分析指南	199
第 7 章	相关专题	212
7.1	与合同相关的工程技术	212
7.1.1	引言、目的和范围	212
7.1.2	采办策略	212
7.1.3	签订合同前的工作	216
7.1.4	履行合同期间	222
7.1.5	合同完成	224
7.2	一体化设计平台	227
7.2.1	引言	227
7.2.2	CACE 概述及其重要性	228
7.2.3	CACE 目标和益处	228
7.2.4	CACE 人员组织	229
7.2.5	CACE 流程	229
7.2.6	CACE 工程的工具和技巧	231
7.2.7	CACE 设施、信息架构和人员组织	231
7.2.8	CACE 产品	232
7.2.9	CACE 最佳实践	233
7.3	选择工程设计工具	234
7.3.1	工程和项目考虑的事项	234
7.3.2	政策和流程	235
7.3.3	协同	235
7.3.4	设计标准	235
7.3.5	现有的信息体系结构	236
7.3.6	工具接口	236
7.3.7	互操作性和数据格式	236
7.3.8	向后兼容性	236
7.3.9	平台	237
7.3.10	工具技术状态控制	237
7.3.11	保密性/访问控制	237
7.3.12	培训	237
7.3.13	许可证	237
7.3.14	供应商和用户保障的稳定性	238

7.4	人因工程.....	238
7.4.1	基础人因模型.....	239
7.4.2	人因分析和评估技术.....	240
7.5	环境、核安全、行星保护和资产保护政策约束.....	245
7.5.1	美国国家环境政策法令和行政法令.....	245
7.5.2	关于放射性物质的环境影响.....	247
7.5.3	行星保护.....	248
7.5.4	空间资产设施保护.....	249
7.6	公制度量单位的使用.....	250
附录 A	缩略词.....	253
附录 B	专用词汇表.....	258
附录 C	如何撰写一个好的需求.....	271
附录 D	需求验证矩阵.....	274
附录 E	创建确认计划（包括需求确认矩阵）.....	275
附录 F	功能、时序和状态分析.....	276
附录 G	技术评估/技术引入.....	283
附录 H	集成计划概要.....	290
附录 I	验证和确认范例概要.....	292
附录 J	系统工程管理计划内容概要.....	294
附录 K	计划.....	299
附录 L	接口需求文档概要.....	301
附录 M	技术状态管理（CM）计划概要.....	303
附录 N	技术同行评审/检查.....	304
附录 O	权衡示例.....	308
附录 P	任务书（SOW）评审清单.....	309
附录 Q	项目防护规划概要.....	312
	分章节参考文献.....	314
	按作者参考文献.....	319

第 1 章 引 言

1.1 本手册的目的

本手册意图在系统工程方面为 NASA（美国国家航空航天局）全体人员提供有用的总体指导和相关信息。它提供系统工程应用于 NASA 时的一般描述。本手册的目的是提升全 NASA 对系统工程认知的一致性，并促进系统工程实践。本手册提供与 NASA 相关的观点和特定用于 NASA 的数据。

本手册应当与 NPR 7123.1《系统工程流程和需求》及 NASA 中心制定的在 NASA 内实行系统工程的手册和指令共同使用。

1.2 本手册的范围和深度

本手册的覆盖范围限于流程、工具和技巧的一般概念和描述。它提供系统工程最佳实践的信息和需要避免的易犯错误。更深入的学习可参考 NASA 中心制定的专用手册和指令，以及相关的教科书。

本手册应用于大型或小型 NASA 工程和项目的开发和实施过程中的系统工程。NASA 针对主要的项目类别和产品系列定义了不同的寿命周期，如飞行系统和地面保障，理论研究与技术开发，试验基地建设，环境合规与恢复。本手册提供的系统工程最佳实践的技术内容应当成为 NASA 所有产品系列的组成部分（请查询 NASA 在线指导信息系统 NODIS 电子文档数据库，获取与产品系列等相关的 NASA 指导）。为了简便，本手册使用飞行系统和地面保障作为相关产品的例子。飞行系统和地面保障的具体内容可以参见其寿命周期描述和里程碑评审的详细内容。在这两个领域中产品系列是不同的，因此，读者应当参考 NASA 技术规程需求的适当部分来获取其寿命周期和评审的特殊要求。NASA 的系统工程是一个有条不紊的过程，该过程在 NASA 计划和项目的全寿命周期中循环反复地用于系统的设计、研发、运行、维护和退役阶段。

本手册适当地覆盖了系统的功能范围，不管它是由管理人员负责还是由工程师负责，也不管它是在 NASA 内部实施，还是由承包商实施。

1.3 关于 NASA

关于 NASA 的情况介绍如下：

(1) NASA 总部（NASA Headquarters）位于美国华盛顿哥伦比亚特区，NASA 的组织结构及 NASA 总部的作用如图 1.3-1 所示。

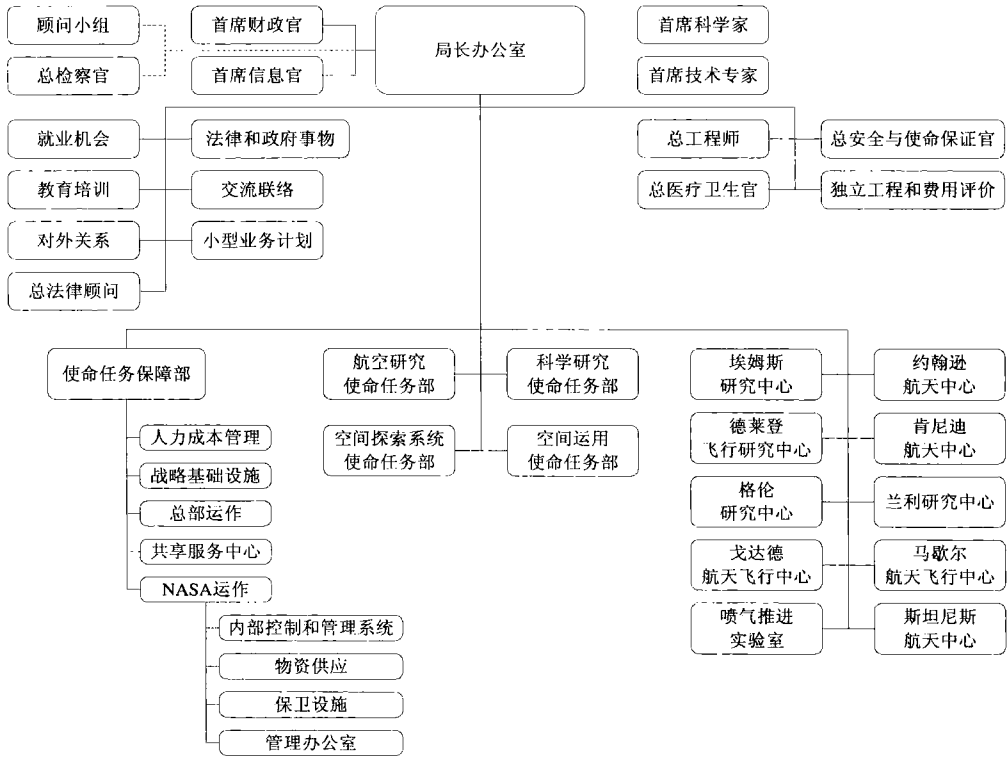


图 1.3-1 NASA 组织结构及 NASA 总部的作用

(2) NASA 埃姆斯研究中心 (NASA Ames Research Center) 位于美国加利福尼亚州硅谷的莫菲特军事管理区。该中心的主要研究对象集中在信息技术领域，包括超级计算、计算机网络和智能系统等。约瑟夫·埃姆斯 (Joseph S. Ames, 1864—1943) 是美国国家航空咨询委员会 (National Advisory Committee for Aeronautics, NACA, NASA 的前身) 的缔造者之一，于 1919—1939 年长期担任 NACA 的主席。

(3) NASA 德莱登飞行研究中心 (NASA Dryden Flight Research Center) 位于美国加利福尼亚州爱德华兹空军基地，是美国航天飞机运输机的大本营，负责将返回着陆后的航天飞机用改装的波音 747 飞机运回肯尼迪航天中心。休·德莱登 (Hugh L. Dryden, 1898—1965) 是美国杰出的航空航天系统工程师，1947—1958 年任 NACA 主席，1958 年起 NACA 编入 NASA 之后任 NASA 副局长。

(4) NASA 格伦研究中心 (NASA Glenn Research Center) 位于美国俄亥俄州克利夫兰市，该中心的主要研究对象集中在空间飞行系统，重点是空气推进、空间推进、动力系统及核能装置。约翰·格伦 (John Glenn, 1921—) 是美国第一位进入太空飞行的宇航员。1962 年 2 月 20 日，约翰·格伦乘坐的“友谊七号”宇宙飞船由美国水星-6 火箭发射升空。

(5) NASA 戈达德航天飞行中心 (NASA Goddard Space Flight Center) 是 NASA 最重要的空间研究实验室之一，位于美国马里兰州格林贝尔特镇，主要负责无人空间飞行器的开发与运用，以及获取太阳系和宇宙的观测数据及知识。罗伯特·戈达德 (Robert H. Goddard, 1882—1945) 是美国火箭工程学的先驱者，液体火箭的发明人。1926 年 3 月 16 日在马萨诸塞州奥本成功发射了世界上第一枚液体火箭。

(6) 喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory) 位于美国加利福尼亚州的帕萨迪纳, 是美国无人飞行器探索太阳系的研究中心, 负责为 NASA 开发和管理无人空间探测任务。

(7) NASA 约翰逊航天中心 (NASA Johnson Space Center) 位于美国德克萨斯州休斯顿市克里尔湖畔, 1964 年建成运转。1973 年为纪念当年去世的前总统林登·约翰逊改用现名。该中心主要负责设计、研制和试验载人飞船系统, 选拔和训练航天员, 以及计划和实施载人飞行任务。林登·约翰逊 (Lyndon B. Johnson, 1908—1973) 是美国第 36 任总统 (1963—1969), 因其在任期间所制定的外交政策, 致使越战不断升级, 美军伤亡惨重。

(8) NASA 肯尼迪航天中心 (NASA Kennedy Space Center) 位于美国佛罗里达州东海岸的梅里特岛卡纳维拉尔角, 是 NASA 进行载人/无人航天器测试、准备和实施发射的最重要的场所。约翰·肯尼迪 (John Kennedy, 1917—1963) 是美国第 35 任总统 (1961—1963), 曾以强硬态度处理古巴导弹危机, 1963 年 11 月在美国德克萨斯州的达拉斯遇刺身亡。

(9) NASA 兰利研究中心 (Langley Research Center) 位于美国弗吉尼亚州的汉普顿, 是 NASA 成立时最早的研究机构之一, 目前是 NASA 结构与材料领域的重点研究中心, 负责研发和测试新型材料和新结构。

(10) NASA 马歇尔航天飞行中心 (NASA Marshall Space Flight Center) 位于美国阿拉巴马州的亨茨维尔, 是 NASA 的原根据地, 是负责航天飞机推进、空间飞行器推进、人员训练、有效载荷、国际空间站及信息管理的中心。乔治·马歇尔 (George Marshall, 1880—1959) 是美国的军事家、政治家和外交家, 陆军五星上将, 1947—1949 年任美国国务卿, 1950—1951 年任美国国防部长, 1953 年获诺贝尔和平奖。

(11) NASA 斯坦尼斯航天中心 (NASA Stennis Space Center) 位于美国密西西比州汉考克 (Hancock) 县, 是 NASA 的火箭推进试验基地。约翰·斯坦尼斯 (John Stennis, 1901—1995) 是来自密西西比州的美国最著名的参议员, 因推动美国海军大型改造计划获得“美国现代海军之父”的美称。以其名字命名的“斯坦尼斯”号核动力航空母舰于 1993 年 11 月正式下水, 1995 年 6 月加入现役。

第2章 系统工程基础

系统工程是用于系统设计、实现、技术管理、运行使用和退役的专业学科方法论。系统由不同的元素组成，这些元素相互作用产生单个元素无法产生的效果。系统元素或组成部分包括人员、硬件、软件、设施、政策和文档等为产生系统级结果所需的事物。这些结果包括系统级品质、属性、特征、功能、行为和性能。系统作为整体所产生的价值来自于各组成部分的相互联系和相互作用关系，又远远超过各组成部分的独立贡献。系统工程是技术决策时查看系统“全貌”的途径，是在确定的使用环境下和规划的系统寿命周期中达到利益相关者性能需求的途径。换句话说，系统工程是一种逻辑思维的方法。

系统工程是在通常有相反作用的约束下，开发满足系统需求可行系统的科学和艺术。系统工程是一门综合的、整体的学科，通过相互比较来评价和权衡结构设计师、电子工程师、机械工程师、电力工程师、人因工程师，以及其他学科人员的贡献，形成一致的不被单一学科观点左右的系统整体。

系统工程方法面对不同利益和多样化甚至冲突的约束，寻找安全平衡的设计方案。系统工程师必须提高技能，确定并关注优化系统整体而非单一子系统设计的评估工作。了解何时何地进行探索是一门艺术。有此技能的人员通常称为“系统工程师”，或其他头衔如首席工程师、技术负责人、主任工程师等，本手册使用系统工程师这个术语。

依据项目的规模和复杂度及寿命周期的阶段划分，系统工程师的具体作用和职责随项目不同而发生变化。针对大型项目，可能需要一个或多个系统工程师，而针对小型项目，有时则由项目负责人担任此项工作。但是，无论安排谁承担这些职责，系统工程师的功能必须履行。系统工程师的实际作用和职责是按其头衔变化的。首席系统工程师确保系统开发遵循合适的系统工程方法，系统在技术上能够完成规定的需求。系统工程师监督技术团队开展系统工程活动，对任务进行指导、交流、监督和协调。系统工程师审查和评价项目的技术状况，确保系统/子系统的系统工程流程正常发挥作用，推进系统从概念到产品的演化。技术团队应整体介入到系统工程流程中。

系统工程师在引导系统架构的开发、需求的定义和分配、设计方案的评价与权衡、系统间技术风险均衡、系统接口的定义和评估、验证和确认活动的全面监督，以及许多其他任务中起关键的作用。通常系统工程师的另一个主要任务是开发项目文档，包括系统工程管理计划、需求/规范文档、验证和确认文档、证明材料及其他技术文档。

总的来说，系统工程师擅长平衡复杂系统在组织和技术方面的相互作用。既然整个团队参与系统工程过程，某种意义上说每个成员都是系统工程师。系统工程关注于折中和权衡，需要的是总体人员而不是专业人员。系统工程观察“系统全貌”，不仅确保设计正确的系统（满足需求），还要确保正确的系统设计。

为进一步探讨，将系统工程放在项目管理的背景下。依据 NPR 7120.5 《NASA 空间飞行工程和项目管理需求》，项目管理是在一定的费用、品质及进度约束下，为达到客户和其他利益相关者的需求、目的和目标所要进行的大量活动的规划、监督和指导。项目管理有两个同

样重要的研究领域，即系统工程和项目控制。图 2.0-1 给出这两个领域的关系，可以看出项目管理的这两个研究领域具有重叠的部分。系统工程为重叠部分提供技术层面的输入，而项目控制主要提供规划、费用及进度方面的输入。

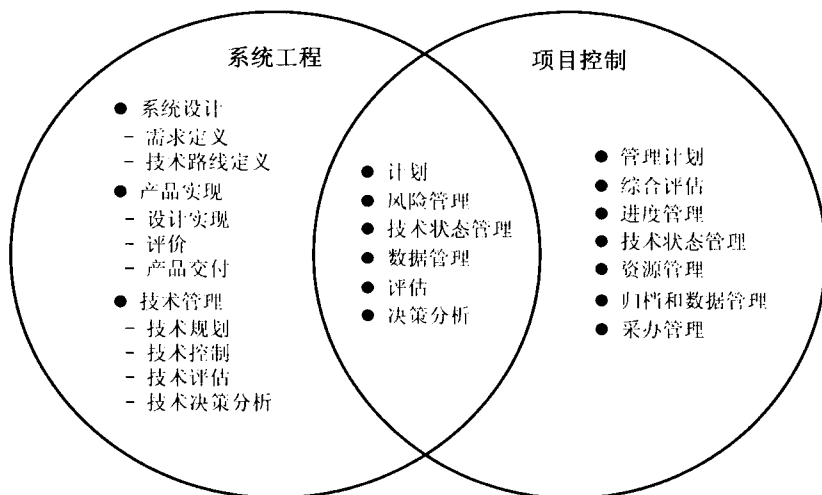


图 2.0-1 系统工程在全面项目管理背景中的总体描述

本手册关注的是图 2.0-1 中的系统工程部分，其中的实践/流程来源于 NPR 7123.1《NASA 系统工程流程和需求》。本书后续各章将对每个流程作详细介绍，本章只作总体介绍。

2.1 通用技术流程与系统工程引擎

在 NPR 7123.1《NASA 系统工程流程和需求》中包括三类技术流程：系统设计、产品实现及技术管理。三类技术流程及相互间交互和数据流关系如图 2.1-1 所示。系统工程引擎用于目标产品的开发和实现。本章介绍 NPR 7123.1 需要的 17 个通用技术流程的背景知识。系统设计流程、产品实现流程，以及技术管理流程将分别在第 4 章、第 5 章和第 6 章中作详细介绍。图 2.1-1 所示的步骤 1~步骤 9 描述实施一个项目时的任务，步骤 10~步骤 17 是执行这些流程的关联工具。

系统设计流程：图 2.1-1 给出 3 个系统设计流程，主要用于定义利益相关者期望并确定控制基线、生成技术需求并确定控制基线、将技术需求转变为设计方案使之满足控制基线确定的利益相关者期望。这些流程应用于系统结构中每个分支上的产品；系统结构自顶向下分解到可制造、购买或重用的底层产品。系统结构中的其他产品通过底层产品的集成而获得。设计师不仅开发完成系统特定功能的产品设计方案，还需建立产品和服务需求以保证能够获得系统结构中的所有运行使用产品/使命任务产品。

产品实现流程：产品实现流程应用于系统结构中每一个运行使用产品/使命任务产品，自最底层产品到高层的集成产品。这些流程用于生成每个产品的设计方案（如产品实施执行或产品集成），同时用于验证和确认产品，并将相应产品作为寿命周期阶段的一项功能产品交付到更高的产品层次中，从而满足该层次设计方案，同时满足利益相关者的期望。

技术管理流程：技术管理流程用于建立和变更项目的技术规划，管理系统跨界面的交流，

根据计划和需求对系统产品和服务的进展进行评估，控制项目的技术实施，以及辅助决策过程直到项目的完成。

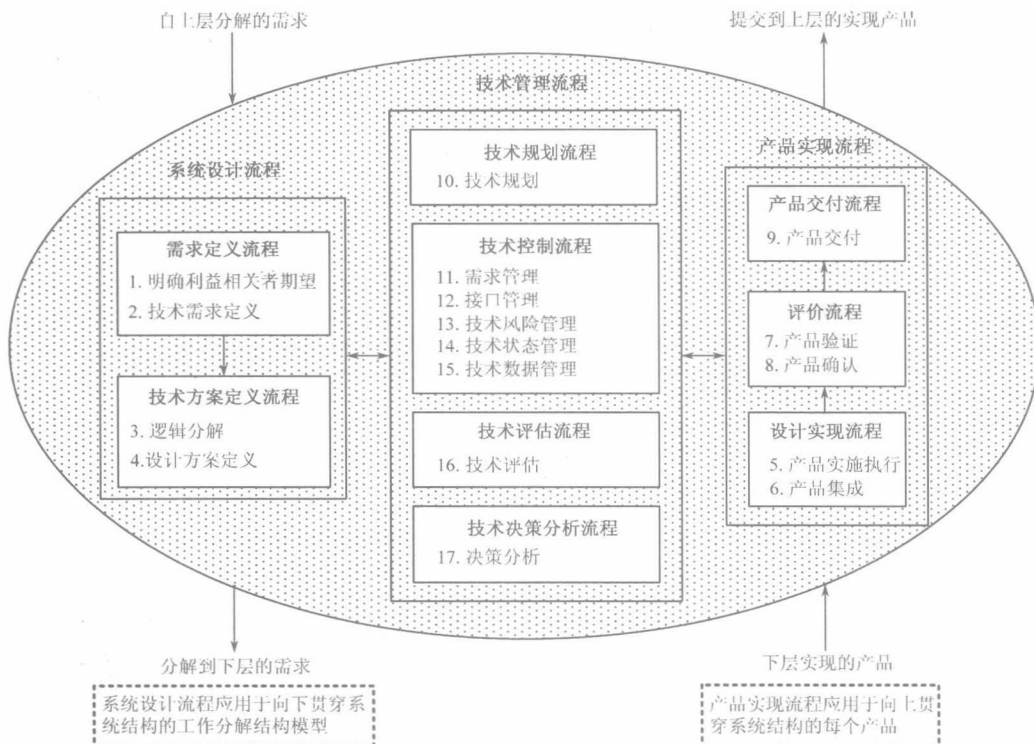


图 2.1-1 系统工程引擎

系统工程引擎中的流程以迭代递归的方式应用。根据 NPR 7123.1 定义，“迭代”是指“应用于同一个（系列）产品，纠正发现的差异或其他需求偏差的过程”，而“递归”是指“流程反复应用于系统结构中较低层次产品的设计或较高层次目标产品的实现”以增加系统的价值。“递归也可以反复应用于寿命周期下一阶段中系统结构的同一流程，以完善系统定义并满足阶段成功准则。”在 2.3 节中给出的示例将进一步解释上述概念。在将系统初始概念分解到足够具体层次的过程中，通用技术流程反复迭代应用，技术团队据此信息可研制产品。随后通用技术流程反复迭代应用于将最小的产品集成到更大的产品中，直到完成系统整体组装、验证、确认和交付。

2.2 按照项目阶段概述系统工程引擎

图 2.2-1 给出项目的 7 个阶段及各阶段如何使用系统工程引擎的概念描述。图 2.2-1 所示的是一个概念框图，详细的流程图可登录 www.hxedu.com.cn（华信教育资源网）搜索本书免费下载，或发送邮件到 chenwk@phei.com.cn 索取。

图中最顶层部分描述项目的系统成熟度，反映从可行概念到系统部署的项目进展过程、各阶段的活动、关键决策点及主要的项目评审。

图中中间部分描述每个项目阶段的技术开发流程（步骤 1~步骤 9）。系统工程引擎从 A 前阶段到阶段 D 循环 5 次。需要注意的是，阶段 C 和阶段 D 反映 NASA 管理层将一个技术开发流程分成两部分，这样确保更紧密的管理控制。阶段 C 和阶段 D 的系统工程引擎由短划线框标出。

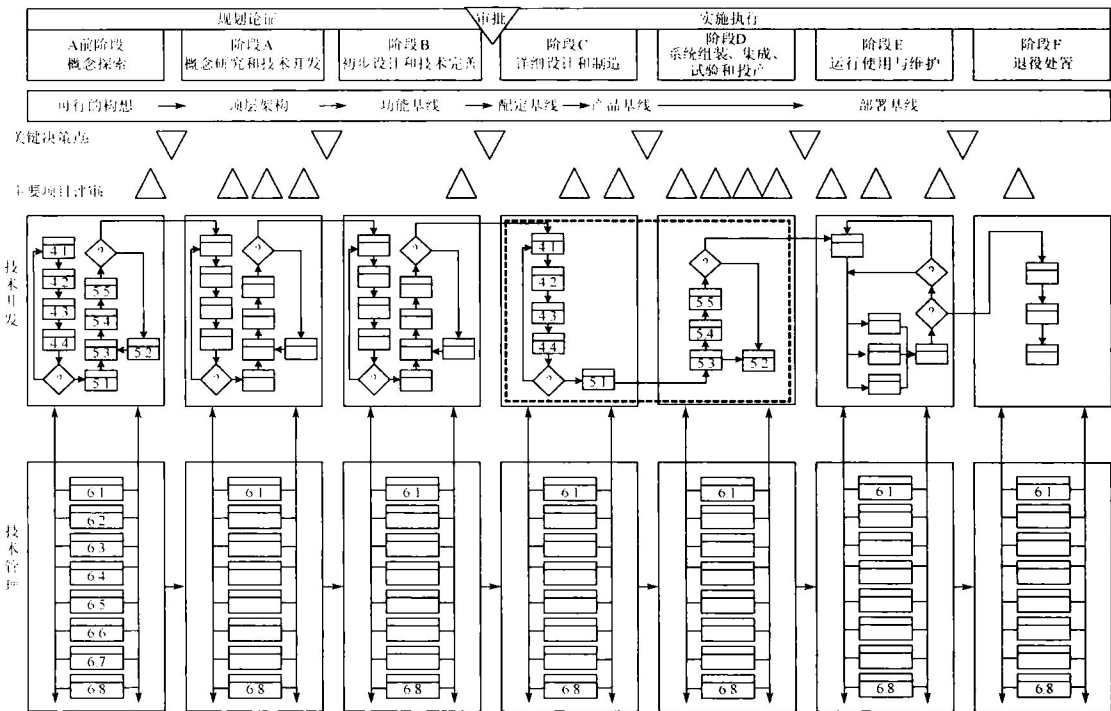


图 2.2-1 本手册中 NASA 飞行和地面系统项目示例寿命周期流程简化概念图

项目一旦进入运行使用阶段（阶段 E）并在退役处置阶段（阶段 F）终止，技术工作也就相应地转移到这最后两个项目阶段的活动中的。

图中下半部分描述每个项目阶段的 8 个技术管理流程（步骤 10~步骤 17）。系统工程引擎从 A 前阶段到阶段 F 将技术管理流程循环 7 次。

图中系统工程引擎的每个模块上有一个段落标识，分别对应本手册第 4 章、第 5 章、第 6 章中的各节。例如，技术开发流程中“获取利益相关者期望”将在 4.1 节详细讨论。

2.3 使用系统工程引擎的示例

为了帮助了解系统工程引擎是如何应用的，这里提供一个实例并运行整个流程。相关讨论围绕工程和项目的寿命周期展开，第 3 章将有更深入的讨论。正如第 3 章所描述的那样，NPR7120.5 为 NASA 工程和项目定义了寿命周期概念。寿命周期的阶段划分见表 2.3-1。

表 2.3-1 项目寿命周期的阶段

阶段		目的	典型输出
规划论证阶段	A 前阶段 概念探索	广泛收集关于使命任务的建议和方案，从中选择新的工程和项目。确定所期望系统的可行性，开发使命任务概念，草拟系统级需求，辨识潜在技术要求	以仿真、分析、研究报告、模型和样机形式表示的可行系统概念