

飞行器系统工程

主编 高存厚 荣明宗



宇航出版社

V57
1001-3

飞行器系统工程

主 编 高存厚 荣明宗

审 阅 何庆芝 张锡纯

作 者 (以在本书内出现的先后为序)
荣明宗 高存厚 黄延年 余梦伦
茹家欣 张传基 周正伐

责任编辑 李明观



30764565

中航出版社

764565

图书在版编目(CIP)数据

飞行器系统工程/高存厚,荣明宗主编.-北京:宇航出版社,
1996

ISBN 7-80034-887-3

I. 飞… II. ①高…②荣… III. 飞行器-航天系统工程 IV. V
57

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 07432 号

宇航出版社出版

(内部发行)

北京市和平里滨河路 1 号(100013)

发行部地址:北京阜成路 8 号(100830)

电话:68371105 68371057

北京星月印刷厂印刷

1996 年 12 月第 1 版 1996 年 12 月第 1 次印刷

开本:850×1168 1/32 印张:26.375 字数:724 千字

印数:1—1000 册

定价:48.00 元

内 容 简 介

《飞行器系统工程》是一部按照系统工程的原理和方法来阐述当代导弹和航天飞行器系统管理和总体设计的著作。汇集了作者们在导弹和航天技术领域几十年工作的经验,反映了我国导弹、航天事业跨进世界先进行列的历程。同时,本书也融汇了国外系统工程管理方面的先进思想、方法和经验,目的是做到“洋为中用”。

本书共三篇二十三章。第一篇阐述系统工程和飞行器系统工程的定义、基本概念、基本特征、方法论和发展史。第二篇比较系统地阐述了系统工程的核心——系统分析,详细地介绍了工作分解结构、功能分析、战术技术指标的论证和确定、系统方案开发、系统效能分析、全寿命费用分析、风险分析、综合后勤保障、可靠性、可维修性、可生产性等一系列系统分析中的重要概念和方法,通过优化比较和权衡分析,最后选取有约束条件下的满意解的过程。同时,兼及系统工程的组织管理方法和程序。第三篇主要介绍战略导弹和航天运载火箭系统的总体设计。根据系统工程原理阐述了大型复杂系统的系统规划和效能评定、总体设计准则和设计程序、系统的可行性论证、方案开发和方案设计、总体参数的确定和调整、初样研制、技术设计、飞行试验、设计定型、生产定型、环境条件设计及可靠性工程等重要内容。

本书可供航天工业部门的总体设计人员、管理人员阅读、参考;可作为航空航天系统工程院校、专业大学生、研究生的参考教材;也可供与导弹、航天有关的部队和研究所的领导和研究人员阅读参考。

序

我国的导弹、航天事业始于 50 年代后期,经过几十年的艰苦创业,现在已经跻身于世界四大空间大国的行列。我国在战略导弹、运载火箭和人造卫星的研制、生产和应用方面已拥有较强的技术实力,并形成了相当的规模,从而已经成为我综合国力的重要组成部分。

在导弹、航天事业发展过程中,我国借鉴了国外的先进技术和管理经验,结合我国国情,在导弹和航天技术的发展战略、规划、计划、组织管理、技术途径诸方面进行了一系列可贵的探索,有所发现、有所发明、有所创造、有所前进。

多年来,我们曾期望对过去的工作,特别是大型复杂系统中最具特色的导弹航天系统的总体设计和组织管理工作,即系统工程工作进行系统的总结,从而把我们的科研、实践经验上升为理论,更好地指导我们的工作。但是由于这件工作涉及面广、难度很大,要把成千上万人的创造和劳动,提炼归纳成具有普遍性、规律性的总结,真是千佛一面、仁者见仁、智者见智、莫衷一是。在艰难的酝酿过程中,经过 10 年筹备,《飞行器系统工程》终于同大家见面了,作者们为此所付出的艰辛是可以想见的。

《飞行器系统工程》一书,从系统工程的基本原理和方法出发,根据作者们多年的工程实践和国外航天系统工程的探索,总结和提炼了我国战略导弹和运载火箭研制工作中积累的经验、资料和数据,详尽地阐述了战略弹道导弹和运载火箭总体设计中的系统规划、效能评定、设计准则和程序、权衡研究、可行性论证以及总体方案的选择,主要技术参数的确定等问题。强调了多方案比较、技术协调和进度协调、优化设计、综合后勤保障、可靠性设计、全寿命费用分析和控制及质量保证等在总体设计和系统工程管理中的重要作用。这些观念不仅对我们的总师系统,而且对我们的行政指挥

系统来说,也都是十分重要的。

作者们根据近二三十年来国内外导弹航天技术的新发展和管理概念的发展进步,把结构优化设计理论、可靠性工程的基本理论、全寿命费用和费用设计、风险分析和风险评审及风险控制、系统效能分析和效费比分析、综合后勤保障等新概念、新理论、新方法引进到飞行器总体设计工作中来,对于总体设计工作或系统工程管理工作的科学化、规范化、程序化是一个促进和推动。这里面既有我们自己的摸索和创造,也有国外的先进技术和方法。把这两者揉合起来,形成中国的航天系统工程体系,是一个有重大意义,又需要持续不断长期努力才能臻于完善的艰巨的软件工程。本书正是这项工程的开端性篇章。

运载火箭研究院研制的第一代产品,从无到有、从小到大的发展过程中,都采用了计划评审技术 PERT(Program Evaluation & Review Technique),收到了很好的效果,并获得了多方面的经验。在下一代产品的研制中,按系统工程的概念,要由随机网络评审技术 GERT(Graphical Evaluation & Review Technique)来取代,PERT 和 GERT 有显著的不同:

一、前者用来解决飞行器的有无,后者用于获得质量精良、价格便宜的第二代飞行器。

二、前者以型号带动课题,后者是以课题为基础,综合出型号。型号是否上马,视课题成熟的程度和国内外形势而决定。

三、前者的经费按型号结算而支付;后者不同,在研究发展(Research & Development)费中支付课题费,型号费另拨专款。

GERT 的管理技术高于 PERT。希作者继续努力,收集资料,适时总结。航天志士对此有厚望焉。

谢光选

1992.10.23

前 言

《飞行器系统工程》，自 1980 年由高存厚、荣明宗开始酝酿编著。后来邀请黄延年、余梦伦、茹家欣、张传基、周正伐等同志参加编写部分章节。

《飞行器系统工程》共分三篇。

第一篇 系统工程和飞行器系统工程。由荣明宗、高存厚两同志合写。

第二篇 飞行器系统分析。由荣明宗同志编写。

第三篇 战略弹道导弹和运载火箭系统总体设计。由高存厚、黄延年、余梦伦、茹家欣、张传基、周正伐等同志编写。

在本书编写过程中，曾得到中科院院士谢光选总师的大力支持，多次听取了书稿的进展情况，并给予了許多具体指导和帮助。

北京航空航天大学何庆芝教授、张锡纯教授分别审阅了全书，提出了许多宝贵意见，使书稿得以进一步完善。

中国运载火箭技术研究院王永志院长、于龙淮副院长和院机关的同志对本书的出版给予了大力支持，并资助了出版经费。

一院一部领导和一院政治部保卫处对本书第三篇进行了保密审查，建议先按“内部”文献出版。

1992 年 10 月，中国科学院院士、长征三号运载火箭总设计师谢光选为本书写了序。

在此一并表示感谢，并感谢为本书做过各种贡献的同志们！

我们希望这本书的出版有利于促进飞行器系统工程的进一步开拓，有利于促成我国的导弹、航天技术登上新的台阶。

虽然编著者们已作了最大的努力，但由于水平有限，错误和不妥之处难免，恳请专家和读者批评指正。

高存厚 荣明宗

1992 年 11 月

目 录

第一篇 系统工程和飞行器系统工程 (荣明宗 高存厚)

引言	(2)
----------	-----

第一章 系统工程

1.1 系统概念	(4)
1.1.1 系统的定义	(4)
1.1.2 系统的形态和分类	(5)
1.1.3 系统的特性	(6)
1.1.4 系统思想	(8)
1.2 系统工程	(10)
1.2.1 定义	(10)
1.2.2 系统工程的性质	(11)
1.2.3 系统工程的分类	(12)
1.2.4 系统工程的特征	(13)
1.2.5 系统工程的发展	(16)
1.3 系统科学与系统工程	(18)
1.3.1 信息论	(19)
1.3.2 控制论	(24)
1.3.3 一般系统论、耗散结构理论和协同学 ..	(27)
1.4 系统工程在我国的应用	(32)

第二章 飞行器系统工程

2.1 飞行器系统工程的基本概念	(38)
2.1.1 定义	(38)
2.1.2 限定	(38)
2.1.3 系统方法	(38)
2.1.4 风险性和系统保证	(39)
2.1.5 战略导弹系统和航天飞行器系统	(40)
2.1.6 飞行器系统工程的一般方法	(41)
2.2 飞行器系统工程的发展	(42)

2.2.1 美国喷气推进实验室(JPL)的贡献	(42)
2.2.2 “北极星”导弹系统的研制	(45)
2.2.3 “阿波罗”登月计划是飞行器系统工程的重大 里程碑	(46)
2.2.4 我国的实践	(50)
2.3 飞行器系统的研制过程	(51)
2.4 飞行器系统研制工作的职责分工	(56)

第二篇 飞行器系统分析 (荣明宗)

引言	(60)
----------	------

第三章 系统工程中的组织管理

3.1 规划、计划、预算一体化体制(PPBS)	(61)
3.1.1 PPBS的性质和特点	(62)
3.1.2 PPBS的主要工作流程	(63)
3.1.3 PPBS的主要调控手段	(68)
3.2 系统层次结构	(80)
3.2.1 系统层次结构概述	(80)
3.2.2 技术规范树	(82)
3.2.3 工作分解结构(WBS)	(86)
3.3 计划控制	(94)
3.4 进度控制	(96)
3.4.1 总进度和工作进度的控制	(96)
3.4.2 计划协调(评审)技术(PERT)	(99)
3.5 接口管理	(100)

第四章 任务要求分析和方案确定

4.1 任务分析	(106)
4.1.1 性能测度参数的定义	(108)
4.1.2 技术要求的相互作用和初步估算	(110)
4.1.3 方案确定	(111)
4.2 参数分析	(112)
4.2.1 参数分析实例	(112)
4.2.2 参数分析与参数选择	(112)
4.3 想定和模拟	(114)

4.3.1	作战或使用想定	(114)
4.3.2	蒙特-卡洛(Monte-Carlo)模拟	(114)
4.4	选择最可行的系统方案	(115)

第五章 功能分析

5.1	功能分解	(117)
5.1.1	顶层(top-down)法	(118)
5.1.2	功能方块图(又称功能框图)	(120)
5.1.3	N^2 图	(121)
5.2	功能流图	(123)
5.2.1	功能流图的目的	(123)
5.2.2	适时性分析	(124)
5.2.3	数据流图(DFD)	(127)
5.3	结构分析	(128)
5.4	其它分析技术	(130)
5.4.1	结构分析和设计技术(SADT)	(131)
5.4.2	软件技术要求工程方法学(SREM)	(131)
5.4.3	层次结构-输入-处理-输出(HIPO)	(131)
5.4.4	问题陈述用语/分析器(PSL/PSA)	(131)

第六章 系统技术要求的分配

6.1	系统技术要求分配的基础	(134)
6.1.1	甲方的工作	(134)
6.1.2	乙方的工作	(134)
6.2	任务要求的分配	(135)
6.3	对已分配的技术要求建立可追踪系统和特征参 量	(140)

第七章 权衡研究

7.1	权衡研究的方法	(143)
7.1.1	建立备选方案	(145)
7.1.2	开发权衡树	(146)
7.1.3	准则的确定和分类	(146)
7.1.4	准则加权	(148)
7.1.5	备选方案的比较和评分	(148)

7.2	灵敏度分析	(151)
-----	-------------	-------

7.3	权衡表	(152)
-----	-----------	-------

第八章 系统综合

8.1	系统综合的任务	(155)
-----	---------------	-------

8.2	系统综合的过程和方法	(156)
-----	------------------	-------

8.2.1	系统的建模	(156)
-------	-------------	-------

8.2.2	原理框图	(158)
-------	------------	-------

8.2.3	物理模型	(158)
-------	------------	-------

8.2.4	数学模型	(160)
-------	------------	-------

8.2.5	仿真	(160)
-------	----------	-------

8.2.6	通用仿真语言	(162)
-------	--------------	-------

8.3	图纸和明细表	(163)
-----	--------------	-------

第九章 技术规范

9.1	国防标准化和技术规范	(165)
-----	------------------	-------

9.1.1	目标	(165)
-------	----------	-------

9.1.2	定义	(166)
-------	----------	-------

9.2	制定技术规范的基础	(168)
-----	-----------------	-------

9.3	标准的应用和改编	(169)
-----	----------------	-------

9.4	系统技术规范	(170)
-----	--------------	-------

9.5	技术规范的拟制与术语	(175)
-----	------------------	-------

第十章 技术状态的控制与构形管理

10.1	构形管理的基本功能	(178)
------	-----------------	-------

10.2	功能基准、构形基准、产品基准	(179)
------	----------------------	-------

10.3	构形的识别和构形状况报告	(182)
------	--------------------	-------

10.3.1	构形识别	(182)
--------	------------	-------

10.3.2	构形状况报告	(183)
--------	--------------	-------

10.4	构形控制	(184)
------	------------	-------

10.5	构形审核	(186)
------	------------	-------

10.5.1	功能构形审核	(187)
--------	--------------	-------

10.5.2	实物构形审核	(187)
--------	--------------	-------

10.6	构形管理文件	(188)
------	--------------	-------

10.6.1	构形管理计划	(188)
--------	--------------	-------

10.6.2	构形控制部备忘录	(189)
10.6.3	更改控制的文件表格	(189)
10.6.4	更改与研究预告(ACSN)	(189)
10.6.5	工程更改建议书(ECP)	(189)
10.6.6	技术规范更改通告(SCN)	(190)
10.6.7	超差暂用或超差代用申请	(190)
10.6.8	接口修改通告(IRN)	(190)

第十一章 风险分析和管理

11.1	引言	(192)
11.2	风险分析	(195)
11.2.1	风险分析的步骤	(195)
11.2.2	风险的分类	(196)
11.2.3	术语	(198)
11.3	风险分析和管理的职责	(200)
11.3.1	政府部门和使用部门的职责	(200)
11.3.2	承包商或研制部门的职责	(201)
11.3.3	风险的识别	(202)
11.3.4	风险评估	(204)
11.3.5	风险的消除	(207)
11.3.6	决策分析	(207)
11.4	风险分析的管理文件	(210)
11.4.1	风险管理计划	(210)
11.4.2	风险降低计划(RAP)	(212)
11.4.3	风险下降报告(RRR)	(213)

第十二章 技术性能测定和性能验证

12.1	技术性能测定(TPM)	(215)
12.1.1	目的	(215)
12.1.2	定义	(215)
12.1.3	技术参数的确定	(216)
12.2	技术性能测定的方法	(218)
12.2.1	TPM 主要参数清单的选择	(218)
12.2.2	预期的参数分布图的生成	(220)

12.2.3	TPM 参数状态跟踪和预测	(222)
12.2.4	TPM 状态报告	(223)
12.2.5	设计评审	(224)
12.2.6	非正式评审和正式评审	(226)
12.3	技术性能测定文件	(229)
12.3.1	技术性能测定报告	(229)
12.3.2	设计评审文件	(230)
12.4	性能验证	(231)
12.4.1	试验与鉴定总计划(TEMP)	(232)
12.4.2	DOD 的试验分类	(232)
12.4.3	验证分类	(234)
12.4.4	系统试验的目标	(235)
12.4.5	试验管理	(236)
12.4.6	仿真验证	(236)
12.4.7	系统试验和评估	(237)
12.4.8	试验文件	(245)
第十三章 生产和使用的可行性分析		
13.1	工程专业的综合	(254)
13.1.1	系统工程部门	(254)
13.1.2	可靠性工程	(257)
13.1.3	维修性工程	(260)
13.1.4	系统安全性	(262)
13.1.5	零件工程	(264)
13.1.6	人素工程	(265)
13.1.7	电磁兼容性(EMC)和电磁干扰(EMI)	(266)
13.1.8	污染和腐蚀的控制	(266)
13.1.9	生存性和易损性	(267)
13.1.10	硬件/软件的综合	(268)
13.1.11	人员与培训	(269)
13.1.12	保障设备	(269)
13.1.13	器材供应	(270)

13.2	系统效能	(270)
13.2.1	RAM 分析	(273)
13.2.2	系统效能模型	(277)
13.3	系统的全寿命费用(LCC)及费用设计(DTC)	(278)
13.3.1	全寿命费用分析	(279)
13.3.2	权衡分析	(285)
13.3.3	全寿命费用文件	(288)
13.4	综合后勤保障	(290)
13.4.1	综合后勤保障诸要素	(291)
13.4.2	后勤保障分析(LSA)	(294)
13.4.3	工程专业的支援	(296)
13.4.4	建立后勤保障模型	(297)
13.4.5	综合后勤保障计划(ILSP)	(299)
13.4.6	系统保障成套资料(SSP)	(300)
13.4.7	部队使用保障	(301)
13.4.8	文件编制	(301)
13.5	可生产性	(302)
13.5.1	各研制阶段的可生产性研究	(303)
13.5.2	生产工程分析	(305)
13.5.3	生产制造的权衡研究	(306)
13.5.4	生产制造的计划保障	(306)
13.5.5	生产制造的文件	(310)
	缩略语及译文	(313)

第三篇 战略弹道导弹和运载火箭系统总体设计

(高存厚 等)

引言	(321)
符号表	(322)
第十四章 系统规划和效能评定 (高存厚)	
14.1 战略弹道导弹武器系统的规划	(327)
14.2 战略弹道导弹武器系统的效能及其评定指标	(331)

14.3 战略弹道导弹武器系统战术技术要求分析	(335)
-------------------------	-------

第十五章 总体设计准则和程序 (高存厚)

15.1 总体设计准则	(340)
15.2 总体设计程序	(340)
15.2.1 战略弹道导弹武器(运载火箭)系统研制程序	(340)
15.2.2 战略弹道导弹武器系统总体设计程序	(348)

第十六章 可行性论证 (高存厚)

16.1 可行性论证目标	(349)
16.1.1 拟定导弹武器系统研制任务书的前提条件	(349)
16.1.2 战略弹道导弹武器系统战术技术指标分析	(351)
16.1.3 战略弹道导弹武器系统战术技术指标	(368)
16.1.4 运载火箭系统技术要求	(372)
16.1.5 系统研制经费和周期分析	(374)
16.1.6 技术经济性分析	(374)
16.2 系统技术规划	(375)
16.3 技术方案可行性论证	(376)
16.3.1 技术方案可行性论证内容	(376)
16.3.2 技术方案可行性论证报告	(376)
16.4 提供研制任务书(草案)	(377)

第十七章 总体方案设计

(高存厚 黄延年 余梦伦 茹家欣)

17.1 系统工程的基本概念与优化方案	(379)
17.2 总体方案设计的依据、任务、步骤和方法	(385)
17.2.1 方案设计的依据	(385)
17.2.2 方案设计的任务	(385)

17.2.3	方案设计步骤	(385)
17.2.4	方案设计的方法	(385)
17.3	战略弹道导弹和运载火箭总体方案设计	(387)
17.3.1	确定级数和组合型式	(388)
17.3.2	推进系统方案分析与选择	(390)
17.3.3	运载火箭质量方程和优化质量分配系数分析	(428)
17.3.4	火箭推重比的选择	(447)
17.3.5	导弹或火箭尺寸的选择	(450)
17.3.6	导弹或火箭结构方案选择和部位安排	(452)
17.3.7	控制(或制导)系统方案选择	(455)
17.3.8	发射方式选择	(456)
17.3.9	弹道(轨道)分析与设计	(456)
17.3.10	总体设计参数选择与优化	(493)
17.3.11	改进型导弹或火箭总体参数的确定	(501)
17.3.12	方案原始数据计算与分配	(501)
17.3.13	预计研制周期和估算成本	(504)
17.3.14	优选和确定总体方案	(505)
17.3.15	方案性试验和模型装配协调	(505)
17.3.16	制定大型地面试验项目和试验要求	(505)
17.3.17	编写总体方案设计文件和初样研制任务书	(506)
17.3.18	方案设计完成标志	(507)
第十八章 运载火箭方案开发分析 (高存厚)		
18.1	两级运载火箭开发的任务要求和条件	(508)
18.1.1	两级运载火箭的任务要求	(508)
18.1.2	两级运载火箭开发条件	(509)

18.1.3.	开发运载火箭技术指标要求	(519)
18.2	方案开发的基本技术途径和措施	(520)
18.2.1	开发方案的基本技术途径	(520)
18.2.2	提高子级和助推器(贮箱和级间段)结构效率 的技术措施	(522)
18.3	一子级、二子级基本发展方案性能数据设计分 析	(530)
18.3.1	子级并联贮箱束型方案设计分析	(530)
18.3.2	芯级捆绑助推器型方案设计分析	(541)
18.3.3	火箭束型方案设计分析	(551)
18.3.4	大直径子级(三种结构类型方案)的设计分析	(557)
18.3.5	推进剂安全余量设计分析	(564)
18.3.6	推进剂加注诸元设计分析	(568)
18.3.7	整流罩设计	(576)
18.3.8	一子级芯级捆绑助推器与并联贮箱束方案的 综合对比分析	(578)
18.4	两级运载火箭开发方案初始数据和运载能力分 析	(579)
18.4.1	运载火箭系列命名	(580)
18.4.2	神龙系列方案数据和运载能力分析	(581)
18.4.3	金龙系列方案数据和运载能力分析	(593)
18.4.4	巨龙系列方案数据和运载能力分析	(603)
18.4.5	运载火箭开发方案综合	(612)
18.4.6	两级运载火箭发射单位有效载荷质量的运载 费用分析	(619)
18.4.7	运载火箭方案开发分析小结	(626)
18.4.8	大型运载火箭方案综合分析	(627)
18.4.9	发展建议	(640)