

系统工程不是工程系统本身，而是工程系统的建造过程

航天 系统工程运行

System Engineering

栾恩杰 著



中国宇航出版社

航天系统工程运行

栾恩杰 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

航天系统工程运行 / 栾恩杰著. —北京:
中国宇航出版社, 2010. 1
ISBN 978-7-80218-699-6
I. ①航… II. ①栾… III. ①航天系统工程—运行
IV. ①V57
中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第013723号

责任编辑 舒承东 张铁钧 朱 毅 装帧设计 

出版 中国宇航出版社

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 北京画中国画印刷有限公司

版次 2010年1月第1版
2010年9月第2次印刷

规格 787 × 1092

开本 1/16

印张 20.25

字数 328千字

书号 ISBN 978-7-80218-699-6

定价 58.00元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

前 言

我写《航天系统工程运行》这本书有两个背景，一是美国国家航空航天局（NASA）的《系统工程手册》，这本手册的内容丰富、条理清晰，对航空航天活动具有很强的指导性，使我受到很大的启发；二是中国航天事业五十余年的实践，为系统工程的发展积累了大量的素材。我认为，我们应当有一本既与国际接轨、又有中国航天实践特点的系统工程教科书。为此，我从1998年动笔写这本书，前后历时十余年，其间从2004年到2007年主要精力放在了嫦娥工程上，嫦娥一号任务完成后，我又继续进行这项工作，从草稿、初稿到样书，反复修改了九次，正式出版的已是第十稿了。

系统工程运行与具体的工程系统建造是密切相关的，它们既有共性要求，也有各自不同的特性差异，所以，系统工程是一门实践性很强的学问。中国航天的发展具有与中国特定环境和特定文化相适应的特殊性，与其他国家的系统工程运行并不完全一致。出于这一原因，我把这本书的主线确定在“运行”上，即强调系统工程的完成。我从系统工程的基本概念、系统工程运行的基本知识、系统工程运行、系统工程管理及方法和工程文化这五个方面着手，构建“系统工程运行”这一概念的基本框架，建立一个理论和实践相结合的体系。

在科学研究的过程中，一个正确概念的形成和确立往往会推动

学科的跃升发展。在系统工程运行的基本概念中，首先将系统工程与工程系统分开，形成一对孪生的概念，这为系统工程运行的理论体系的构建奠定了基石，并由此衍生出一系列逻辑推论。这本书的所有论述，都是沿着系统工程与工程系统是相异而统一的这一基本理念的脉络进行的。

在我从事中国航天活动的四十余年间，经历了诸多事件。其间有重大工程、重点型号的成功；也有刻骨铭心的失利。特别是失利、失败的教训，始终深深地印在我的记忆中。在科学实验的过程中，失利、失败是难以避免的，对于新的型号、新的任务、新的要求、新的技术，往往有一个从知之较少到知之较多的过程，对这些新的挑战，没有失败、只有成功几乎是不可能的。然而，有些失利和失败则是可以避免的，对这样的失利和失败，我们在痛惜之余，应当汲取深刻的教训。在这本书中，每当写到与这些教训有关的内容时，我往往会强调“这点很重要”、“这点千万不要忘掉”、“这是系统工程师的基本功”等，这是我心底的话，是经历过失败的人的深切感悟。书中论述的系统工程运行的内容与其说是理念的表述，不如说是经验的总结。书中把这些经验性总结的内容提炼出来，将其单独列在了边栏处。

绪论简要地介绍了系统工程的产生和发展历程，指出系统工程运行是理解系统工程的关键，即系统工程的关键是其运行。如果我们把系统工程说得头头是道，但不了解其在工程系统建造中的实际运行，那么系统工程就只是一句毫无价值的空话。

第二章系统工程的基本概念，主要介绍系统工程和工程系统这两个不同的概念，它们是支撑工程目标实现的两个支柱。这一章还对工程系统的整体性、层次性、统一性、协调性、目标一致性和匹配性等六个特性作了分析，这是所有工程系统共有的特性。此外，第二章还介绍了系统工程的任务，系统工程师的任务和系统工程师

的思路。

第三章系统工程运行的基本知识，主要介绍系统工程运行的连续性、目标的量化、指标的均衡性、方案的集优性、可信度的逐深性、指标的流动性、最佳概念的相对性、系统工程要求的全息性这八个基本特点。这八个特点的提炼为系统工程运行给出了基础性要求，它是一个理性的认识，需要诸多具体的方法和步骤去实现。

关于工程系统的目标函数问题，本书首次进行了量化研究，设定了性能、经费、进度和风险这四个子项，并对各子项的内容进行了分析。为加深理解，对其进行了简单的模型化处理。关于这部分的内容，今后还可逐步深入地进行研究、补充和完善。

关于“定义”和“说明”，本书也首次进行了定义和说明。在航天工程实践中，特别是复杂工程系统的研制，各环节的研制受到上、下相关环节的约束，它不是独立存在的，必须接受上环节的委托并与下环节匹配。为了使整个工程系统达到协调与统一，将“定义”和“说明”这两个概念分而建之，对工程系统建造和系统工程运行是有益的。

第四章系统工程运行，这是本书分量最重的一章，其重点在工程系统研制和质量管理。这里提出了质量理念、质量管理要津、质量工程化等概念，这也是需要在实践中不断深化的地方。本章有两处理论性较强的内容，即扩展的可靠性增长、 χ^2 分布下对 MTBF 的估算，对这两部分内容，一定要懂得其基本概念和分析思路，记住其结论，推导过程可以从略。

第五章系统工程管理及方法，主要集中在经费管理、技术管理、计划管理和风险管理上。为了国际间的交流，所介绍的方法与 NASA《系统工程手册》上的叫法是一致的，并结合我国的实际加以说明。

关于导弹的精确性效能，这是讲精度的功能性指标与导弹效能之间关系的一个例子，可以从这个例子更好地理解性能和效能的关

系。精确性指标是导弹武器系统重要的技术参数，是验收试验的重要依据，所以我特别对 CEP 的概念作了较详细的说明。对任何一个工程系统而言，都有类似的关键重要的验证性参数，相关的系统工程师对此要十分重视。

第六章工程文化，重点是提炼一些文化层面的理念。做任何一件事情，都要有文化层面的支持，并为文化发展提供素材。

NASA 的一位负责人说过，“当我们对系统工程如何定义还没有取得共识的时候，你们怎么能够举办系统工程讲座呢？”我希望本书的读者，能以怀疑的眼光、研究的态度、追求真知的精神，提出书中的错误和缺欠。

感谢支持、关怀我的老首长、老专家，是他们为我的成长提供了工作的平台和奋斗的机遇，是他们的智慧和精神，使我逐渐成熟；感谢航空航天界的科学家和工程技术人员，是他们的实践为本书提供了丰富的素材。



2010 年 1 月

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 系统工程的起源与普及	1
1.1.1 系统工程产生于航天工程实践	1
1.1.2 系统工程在其他领域得到普及	2
1.2 中国航天工程的实践及系统工程的发展	3
1.3 系统工程运行是理解系统工程的关键	4
1.4 系统工程在实践中不断完善发展	5
1.5 系统工程概念的完整性	6
第2章 系统工程的基本概念	7
2.1 系统工程的定义	7
2.2 系统工程与工程系统	8
2.2.1 系统工程和工程系统是两个不同的概念	8
2.2.2 系统工程是为实现工程系统目标而进行的整体研究	10
2.2.3 工程系统是实现工程目标要求的所有组成	11
2.2.4 工程系统侧重于技术保障, 系统工程侧重于管理保障	11
2.2.5 工程系统和系统工程是实现工程目标的两个支柱	12
2.3 工程系统的特征	12
2.3.1 整体性和层次性是工程系统的第一特性	13
2.3.2 统一性和协同性是工程系统的第一要求	13

2.3.3	目标一致性是工程系统的第一原则	14
2.3.4	匹配性是工程系统的第一准则	15
2.4	工程系统的层次	15
2.4.1	工程系统的层次划分	16
2.4.2	工程系统视觉界面的确定	19
2.5	系统工程的作用	19
2.5.1	系统工程的任务	19
2.5.2	系统工程师的任务	20
2.5.3	系统工程师的思路	21
2.6	性本比	22
2.6.1	性本比的概念	22
2.6.2	性本比曲线	23
2.6.3	性本比曲线的分区	25
2.7	工程系统的风险分析	30
第3章	系统工程运行的基本知识	34
3.1	系统工程运行的定义	34
3.1.1	系统工程运行是从工程系统的论证开始的	34
3.1.2	系统工程全面运行的标志是工程系统任务书的形成	35
3.1.3	系统工程运行包括工程系统的运营	36
3.2	系统工程运行的特点	38
3.2.1	系统工程运行的连续性	38
3.2.2	工程目标的量化	39
3.2.3	性能指标的均衡性	40
3.2.4	方案的集优性	43
3.2.5	可信度的逐深性	46

3.2.6	性能指标的流动性	48
3.2.7	最佳概念的相对性	50
3.2.8	系统工程要求的全息性	52
3.3	系统方案设计	53
3.3.1	约束条件的考虑	54
3.3.2	权衡比较形成设计要求	55
3.3.3	形成工程系统的设计要求	56
3.4	承接方能力比较模型	56
3.5	目标函数	60
3.5.1	目标要素	60
3.5.2	目标函数的归一化处理	62
3.5.3	性能子项分析	65
3.5.4	周期子项分析	67
3.5.5	风险子项分析	69
3.5.6	经费子项分析	87
3.5.7	总目标函数	90
3.6	系统工程要津	90
3.6.1	过程跟踪	91
3.6.2	节点控制	93
3.6.3	里程碑考核	94
3.7	“定义”和“说明”	96
3.7.1	“定义”	97
3.7.2	“说明”	97
第4章	系统工程运行	104
4.1	工程系统的研制阶段	104

4.1.1	定义阶段	105
4.1.2	设计阶段	115
4.1.3	建造阶段	118
4.1.4	交付阶段	119
4.2	工程项目周期的三维表示法	122
4.3	系统工程师对评审的关注点	129
4.4	技术状态控制	131
4.5	技术故障处理	135
4.6	质量理念和质量管理	140
4.6.1	质量理念	140
4.6.2	质量管理	144
4.6.3	质量管理要津	151
4.6.4	质量管理原则	152
4.6.5	航天型号研制的质量管理	156
4.6.6	型号研制的质量策略——质量工程化	157
4.6.7	抓好设计验证	159
4.6.8	“三个保证”	160
4.6.9	小概率事件的讨论	163
4.7	可靠性工程运行的几个概念	165
4.7.1	可靠性工程的发展	165
4.7.2	可靠性函数	166
4.7.3	扩展的可靠性增长	169
4.7.4	基于杜安模型的扩展可靠性增长解释	171
4.7.5	基于 AMSAA 模型的扩展可靠性增长解释	173
4.7.6	可靠性模型及冗余抗力	179

4.7.7	χ^2 分布下对 MTBF 的估算	183
4.7.8	软件可靠性	192
4.8	系统工程师必须掌握的 3F 技术	195
4.8.1	FMECA	195
4.8.2	FRACAS	198
4.8.3	FTA	199
4.9	系统工程师应了解的几种方法	207
4.9.1	有限元分析方法 (FEA)	207
4.9.2	潜通分析方法 (SCA)	207
4.9.3	热分析	211
4.9.4	电路最坏情况分析 (WCCA)	212
第 5 章	系统工程管理及方法	221
5.1	经费管理	221
5.1.1	成本及系统分析建模	221
5.1.2	关于成本估算	226
5.1.3	学习曲线	228
5.1.4	成本累计函数	230
5.1.5	成本估算的确切性	232
5.2	技术管理	234
5.2.1	技术性能度量 (TPM)	235
5.2.2	技术状态管理	240
5.3	系统工程管理计划与系统工程过程矩阵	241
5.3.1	SEMP 的内容	242
5.3.2	SMEP 的三个要素	243
5.3.3	系统工程师职责的落实	245

5.3.4	系统工程过程矩阵	245
5.4	计划管理	246
5.4.1	工作分解结构 (WBS)	246
5.4.2	产品分解结构 (PBS)	247
5.4.3	工程流程图 (WFD)	248
5.5	系统工程的可控和可测问题	251
5.5.1	由现实的系统状态可以推断系统状态的变化	252
5.5.2	由控制量的作用可以使系统状态平稳地到达预期的目标	252
5.5.3	线性系统的可控制性	253
5.5.4	线性系统的可测性	253
5.5.5	刚性进度	255
5.6	功能分析技术	256
5.6.1	功能流程框图	256
5.6.2	数据接口关系图	257
5.6.3	时间流程分析	260
5.7	性能与效能	261
5.7.1	效能的内容	262
5.7.2	关于在导弹工程中精确性效能的一个说明	267
5.8	风险管理	274
5.8.1	风险识别	275
5.8.2	风险分析	276
5.9	原始资料管理	280
5.10	系統工程的综合规划	281

第6章 工程文化	287
6.1 文化、文明与精神	287
6.2 意志、承诺、诚信	289
6.3 责任、成就与荣誉	291
6.4 规范、习惯与道德	293
6.5 工程理念	294
6.6 管理文化曲线	298
6.7 语言、概念与社团	300
6.8 工程的人文设计	302
6.9 分歧管理与团结同仁	305
参考文献	309
后记	310

第 1 章 绪 论

1.1 系统工程的起源与普及

20 世纪 40 年代，美国贝尔电话实验室在研制电话通信网络时，将研制工作分为规划、研究、开发、应用和通用工程等五个阶段，并首次提出了“系统工程”这一名词。

贝尔电话实验室首次提出了“系统工程”这一名词。

系统工程并不是新事物。在系统的概念尚未建立之前，系统的思想已被广泛采用，只是当时还没有构成完整的体系。人类在改造客观世界的过程中，在不知不觉地采用系统的思想和方法。比如，人们在做一项工作之前，都要有个计划，对采取的方法、方案、措施，要进行论证，并做出选择（或称决策）；在工作进行过程中，需要进行检查；工作结束之后，还要进行验收。这些都是系统的重要内容。著名的都江堰工程表明，在我国古代的工程建设中，已经采用了系统的思想。系统来源于工程实践，这些工程实践不仅指 20 世纪实施的阿波罗计划、曼哈顿计划，而是包括人类自古以来的工程实践。这些离散的、非连续的、不严密的形式，是现代系统的雏形。

系统工程并不是新事物。在系统的概念尚未建立之前，系统的思想已被广泛采用，只是当时还没有构成完整的体系。

1.1.1 系统工程产生于航天工程实践

20 世纪 60 年代至 70 年代初，随着美国阿波罗工程的实施，美国国家航空航天局（NASA, National Aeronautics and Space Administration）提出了最初的系统理念和理论方法体系。阿波罗工程开始于

阿波罗工程

1961 年 5 月，至 1972 年 12 月第 6 次登月成功结束，历时约 11 年，耗资 255 亿美元。在阿波罗工程高峰时期，参加工程的有 2 万多家企业、200 多所大学和 80 多个科研机构，总人数超过 30 万人。为了保证这样一个复杂的、要求非常高的工程能够顺利、成功实施，NASA 将工程的组织与管理也看成是一项工程，提出了系统工程的概念和理论方法体系。可以说，阿波罗工程在技术、管理上的复杂性，以及工程成败对政治、经济、社会影响的深远性，决定了系统工程产生的必然性。

重大工程实践
及科技事业的发展
也在不断推动系统
工程的进步和
完善。

大部分航天工程都具有阿波罗工程的特点，这些工程都必须保证在技术上、管理上不出纰漏，不发生重大失误，避免经济损失和人员伤亡及其对国家声望带来的影响。因此，重大工程实践及科技事业的发展也在不断推动系统工程的进步和完善。

1.1.2 系统工程在其他领域得到普及

系统工程在航天领域所取得的成就，促进了系统工程理念和方法在其他工程技术领域，甚至在经济、社会领域的普遍应用。例如，长江三峡水利枢纽工程及南水北调工程均因其复杂性而应用了系统的理念及方法。其中，长江三峡水利枢纽工程作为当时世界上最大的水利枢纽工程，总投资大约 2000 亿元，建成后，三峡大坝坝顶总长 3035 米，坝高 185 米，年发电量可达 1000 亿千瓦时。南水北调工程，规划了东、中、西三条调水线路，仅东线就使长江、淮河、黄河、海河相互连接，沿途经过苏、皖、鲁、冀、津五个省市，而整个工程涉及了中国大部分国土和水系，工程预算更是达到了 4860 亿元。这些工程不仅本身规模宏大，科技水平高，组成复杂，而且社会影响巨大，涉及环境保护、文物保护、移民等诸多问题。因此，这些工程从组织论证、实施到最后运行都采用了系统的理论方法体系。可以说，“系统工程”已经成为复杂工程建设中肯定会出现、也必须出现的一个词汇。

三峡工程

南水北调工程

“系统工程”
已经成为复杂工程
建设中肯定会出现
、也必须出现的
一个词汇。

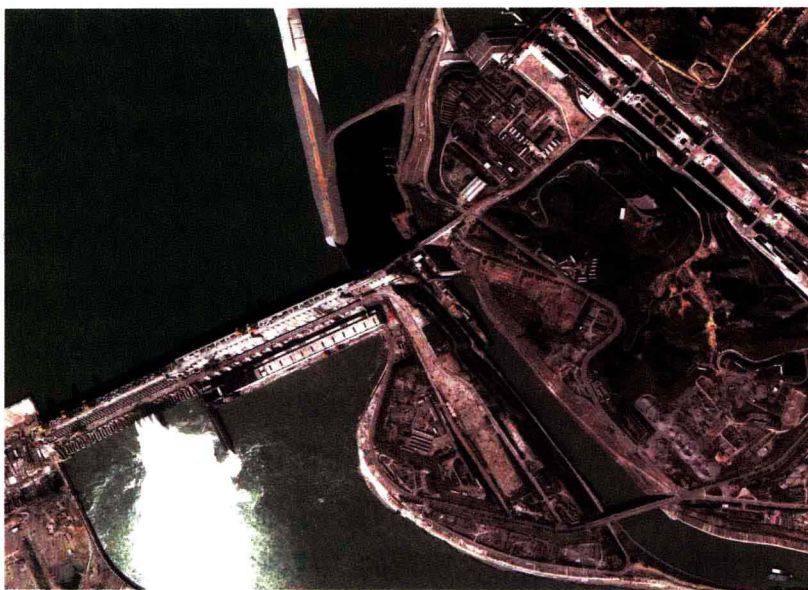


图 1-1 三峡工程鸟瞰

1.2 中国航天工程的实践及系统工程的发展

20 世纪 50 年代末到 60 年代中, 中国航天普遍采用计划进度管理。对工程进行任务分解和工程阶段的划分, 并对其进行控制, 标志着系统工程理念在航天领域已经初步形成。我们可以称这个阶段为中国航天系统工程理论和实践的形成阶段, 其标志为计划管理纳入工程的实施和运行之中。航天工程的实践不断地丰富了计划管理的内容。

初步形成阶段
——计划管理

针对航天活动高投入和高风险的特点, 保证在高质量的前提下实现工程的计划, 既是一个要求, 也是一个目标。这个认识是在实践中强化的。20 世纪 60 年代末到 70 年代, 中国航天开始普及全面质量管理的理念, 开办了各种研讨班, 以宣传贯彻国内外质量管理的方法、技术, 并结合中国航天特点形成行业的标准或规章。我们可以称这个阶段为中国航天系统工程理念和实践的发展阶段, 其标志为质量保证体系纳入系统工程实践和运行之中。

发展阶段
——质量体系