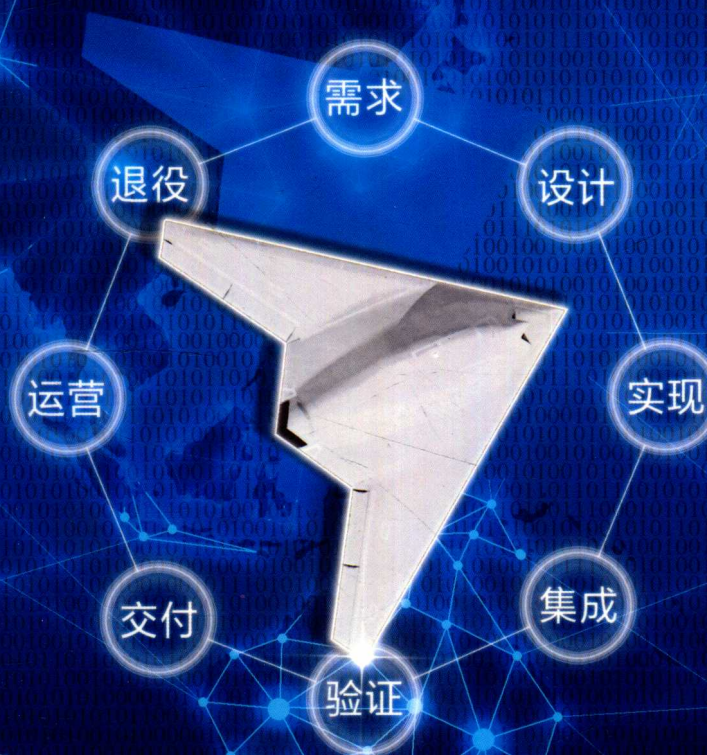


飞行器系统工程 理论与最佳实践

Theories and Best Practices of Systems Engineering for Flight Vehicles

李小光 房峰 黄博 裘旭冬 编著



632
4754
15288
BOEING
AIRBUS
INCOSE
NASA
DOD
EIA



科学出版社

飞行器系统工程理论与最佳实践

李小光 房 峰 黄 博 裘旭冬 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书从飞行器系统工程理论的概念与定义出发,全面阐述了系统工程理论的产生与发展、作用与价值和主要应用领域,并对国际上主流的系统工程标准和手册进行了详细地介绍与研究,通过大量资料的阅读分析和工程实践/型号的归纳与总结,特别是对美国波音(Boeing)公司、欧洲空客(Airbus)公司和中国航空工业集团有限公司等的诸多型号进行具体调研分析,归纳了各主流制造商在应用系统工程方法研制相关飞行器型号的最佳实践。

本书采取理论与实践分析相结合的方法,既对飞行器系统工程理论进行了深入地介绍和研究,并且面向“中国制造 2025”,提出了航空制造业系统工程的发展趋势。将飞行器系统工程理论与国际上主流制造商的飞行器型号的最佳实践相结合是本书的学术价值所在,其成果将对国内相似类型的研究起到积极的参考作用,对航空复杂产品的研发与项目管理具有重要的借鉴意义。

本书可作为从事航空航天领域各类工程与项目管理的技术人员的参考资料,也可供高等院校相关专业师生使用。

图书在版编目(CIP)数据

飞行器系统工程理论与最佳实践 / 李小光等编著.
—北京: 科学出版社, 2019. 7
ISBN 978-7-03-061233-5
I. ①飞… II. ①李… III. ①飞行器—系统工程
IV. ①V47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 090553 号

责任编辑: 许 健 / 责任校对: 谭宏宇
责任印制: 黄晓鸣 / 封面设计: 殷 靓

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

南京展望文化发展有限公司排版

苏州市越洋印刷有限公司印刷
科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 7 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2019 年 7 月第一次印刷 印张: 18 1/4

字数: 411 300

定价: 150.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

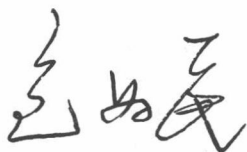
系统工程理论是指导高科技复杂产品高效成功研制的保障,是从整体视角、以跨学科的方式来解决总体优化问题,已经广泛应用于航空航天等领域科研、生产和管理的各个环节。

目前,国际上关于系统工程的著作多是以通用方法研究、理论描述和学术探讨等形式介绍系统工程。即使有部分系统工程出版物涉及系统工程在航空航天项目的介绍,但是不够系统,也不够全面,与具体工程项目中运用系统工程开展项目管理和工程实践相比还有较大差距。《飞行器系统工程理论与最佳实践》一书是李小光教授对其 30 多年来在中美前沿航空项目和系统工程及集成实践经验的总结。

李小光教授是航空领域资深专家、国家特聘专家,拥有“美国航空航天之母”——普渡大学航空与机械工程博士学位,具有 30 多年的航空航天科研项目与产品研制的成功经历,多次获得中美科技成果与贡献奖励;曾在美国通用电气公司飞机引擎公司、波音公司等多家国际知名航空航天制造公司就任高级工程师、资深专家和项目及团队负责人;作为中国商飞公司特聘高级专家,从事 C919 和 ARJ21 国家重大型号商用飞机的研发工作;2015 年受聘为南京航空航天大学教授,创建了全国高校第一个“飞行器系统工程与集成研究中心”;2018 年出任国际 500 强京东集团副总裁和无人机首席科学家,2019 年创办北京无人科技研究院。

全书从飞行器高效成功研制的角度,深入浅出地把系统工程背景知识、系统工程标准、手册和指南,以及国内外知名航空航天制造公司的系统工程与集成的最佳实践等进行了逐一介绍和分析,结合成功项目最佳案例,阐述系统工程理论在实际工程中的应用,具有很强的系统性和指导性,是一本学习系统工程思想方法非常好的参考书,对于从事飞行器特别是工业级无人机和商用飞机研制的工程技术人员具有很大的帮助。

《飞行器系统工程理论与最佳实践》一书,文字简明流畅,内容全面完整,向读者传递了作者的系统工程思维和其多年的研究与实践成果。本书将会受到飞行器系统工程初学者,从事复杂航空航天系统工程与实际工程项目的科研工作者,以及所有希望了解或运用系统工程理论与最佳实践人士的欢迎,特此予以推荐!



2019 年 6 月 18 日

前言

系统工程在“曼哈顿”计划、“阿波罗”登月计划等实践中充分显示出重要性和优越性,目前已经广泛应用于航空航天等领域的科研、生产和管理中。

美国航空航天局在其航天项目中大力推行系统工程流程与方法,并于1995年6月出版了《NASA系统工程手册》,2007年对其进行了更新。系统工程国际委员会成立于1990年,由美国波音、洛克希德等公司倡导创立,是一个致力于开发系统工程学科和流程的全球性非营利会员组织,其于2011年出版了它最新版的《系统工程手册》。2013年6月,系统工程国际委员会正式批准中国航空工业集团有限公司获得其公司顾问委员会的会员资格,意味着中国航空工业集团有限公司所属的工程技术和管理人员具有共享系统工程国际委员会在系统工程领域的知识体系和技术文献的权益。2008年,通过18个国家40多位顶级专家的努力,国际标准化组织联合几个国际化协会组织(包括系统工程国际委员会,电气和电子工程师协会和电子工业协会)颁布了ISO/IEC 15288,即系统工程标准。

由于近年来信息化、数字化、智能化的科学技术发展,基于模型的系统工程成为系统工程学科和航空航天工程应用领域的最新发展方向。与此相对应,基于模型的工程和基于模型的制造开始得到发展与应用。而随着基于模型的技术在国内外航空企业的深入应用,应运而生的基于模型的企业不但是一种新的航空产品研制模式,也是企业发展的必然趋势与必经阶段,它从根本上减少产品创新、开发、制造和支持的时间和成本。基于模型的企业是建立在3D产品数据定义和数据共享重用的全集成和协同的工作环境。

中国系统工程发展的三个重要支柱是运筹学、管理科学、控制论。系统工程在中国作为一门交叉学科,也日益向多种学科渗透和交叉的方向发展。系统工程的传统“三论”,即一般系统论、控制论和信息论,与“新三论”,即耗散论、突变论和协同论,与国际上的系统工程着重标准、着重流程和最佳工程实践应用存在一定的差距。学习和掌握国际主流的系统工程标准、方法、工具是中国航空尤其是民用航空工业进一步发展的必经之路。

系统工程是一门综合的、整体的、用于系统设计、实现、技术管理、运行使用和退役的全生命周期的方法论。系统是由人员、硬件、软件、设施、环境等相互作用的元素组成,系统工程是以跨学科的方法来解决总体优化问题。

系统工程也是组织管理的技术,是为了更好地达到系统目的,对该系统组织实施的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学方法。系统工程是纵观“全局”、合理决策,最大满足利益攸关者需求的逻辑思维方法。

系统工程提供了获得完整解决方案和实现产品及其系统架构所需的方法论和工具,并

以权衡的方式充分地识别、定义和管理所有的相关需求,以确保所获得的产品或系统满足在指定约束下可行的所有要求,从而达到总体及全生命周期最优的目的。

本书首先从飞行器系统工程理论的概念与定义出发,全面叙述了系统工程理论的产生与发展、系统工程理论的作用与价值和系统工程理论的主要应用领域,然后对国际上主流的系统工程标准和手册进行了详细地介绍与研究,最后分别对美国波音公司、欧洲空客公司和中国航空工业集团有限公司进行逐一介绍与分析,归纳总结国内外著名航空企业在应用系统工程方法研制相关飞行器型号的最佳实践。将飞行器系统工程理论与国际上主流制造商的飞行器型号的最佳实践相结合是本书的学术价值及航空工程中应用价值所在。

本书由李小光负责编写大纲和统稿,房峰、黄博、裘旭冬共同参与编写完成。全书分两个部分,共计13章。第一部分“系统工程基础”详细阐述和介绍了几个国际主流的系统工程的理论、标准、方法和工具及其关系,提供了一个比较全面的系统工程体系全貌;第二部分“飞行器系统工程最佳实践”总结了美国波音公司、欧洲空客公司以及中国航空工业集团有限公司应用系统工程的最佳实践,对系统工程在航空领域的典型应用与实践进行了总结,并对未来系统工程的发展进行了展望。

本书可作为从事航空航天领域尤其是系统工程研发人员与项目管理人员的参考资料,以便比较全面、系统地学习和掌握系统工程的理论与应用方法,也可以作为高等工科院校航空航天、机电、自动化、高端装备设计与制造等工程专业和相关管理学科的专业课程教材,以及理工科其他专业系统工程理论及应用方向本科与研究生公共课程与通用课程的学习材料。

最后,感谢为本书顺利出版给予关心和帮助的所有人。由于编写时间仓促,书中难免存在不足,恳请读者批评指正。

作者

2019年6月20日

目 录

序

前言

第一篇 系统工程基础

第 1 章 系统工程概述 3

- 1.1 系统的概念与定义 / 3
- 1.2 系统的产生与发展 / 4
- 1.3 系统的作用与价值 / 6
- 1.4 系统在航空领域的应用 / 8
- 1.5 系统标准及手册 / 10
- 1.6 小结 / 17

第 2 章 EIA-632 系统设计过程 18

- 2.1 标准背景和简介 / 18
 - 2.1.1 标准背景和发展 / 18
 - 2.1.2 标准简介 / 18
 - 2.1.3 关键概念 / 20
- 2.2 系统工程流程需求 / 27
- 2.3 小结 / 33

第 3 章 ISO/IEC/IEEE 15288《系统和软件工程——系统生命周期过程》 34

- 3.1 标准的范围和应用领域 / 34
 - 3.1.1 标准的范围和目标 / 34

- 3.1.2 预期应用 / 35
- 3.2 标准的关键概念和应用 / 35
 - 3.2.1 组织和项目概念 / 35
 - 3.2.2 生命周期概念 / 36
 - 3.2.3 流程概念 / 36
 - 3.2.4 标准中的流程 / 37
 - 3.2.5 流程应用 / 37
- 3.3 系统生命周期过程 / 39
 - 3.3.1 协议流程 / 39
 - 3.3.2 组织项目—使能流程 / 41
 - 3.3.3 项目管理流程 / 47
 - 3.3.4 项目技术流程 / 56
- 3.4 小结 / 80

第4章 SAE ARP 4754A《民用飞机与系统的开发指南》

81

- 4.1 背景概述 / 81
- 4.2 演进历史 / 82
 - 4.2.1 SAE ARP 4754A 及其相关标准的发展历程 / 82
 - 4.2.2 ARP 4754A 与 ARP 4754 的差别 / 83
- 4.3 内容介绍 / 85
 - 4.3.1 4754A 的内容概述 / 85
 - 4.3.2 4754A 的内容架构 / 85
- 4.4 4754A 与系统工程的关系 / 86
- 4.5 应用考虑 / 88
 - 4.5.1 适航审定对 4754A 的应用要求 / 88
 - 4.5.2 4754A 应用中的其他支持性文档 / 88
- 4.6 小结 / 89

第5章 美国国防部系统工程基础

90

- 5.1 美国国防部系统工程背景 / 90
- 5.2 美国国防部系统工程的发展和演变过程 / 90
- 5.3 美国国防部系统工程的作用 / 92
- 5.4 美国国防部系统工程基础的内容 / 92
 - 5.4.1 概述 / 92
 - 5.4.2 系统工程过程 / 96

- 5.4.3 系统分析与控制 / 98
- 5.4.4 规划、组织和管理 / 103
- 5.5 小结 / 104

第 6 章 《NASA 系统工程手册》及应用

106

- 6.1 NASA 系统工程的流程和引擎 / 106
- 6.2 不同项目阶段对系统工程引擎的应用 / 110
- 6.3 NASA 系统工程项目群及项目的全生命周期 / 112
- 6.4 NASA 系统工程技术流程 / 121
 - 6.4.1 系统设计流程 / 121
 - 6.4.2 系统实现流程 / 135
- 6.5 NASA 系统工程技术管理 / 142
- 6.6 小结 / 156

第 7 章 INCOSE 的《系统工程手册》及应用

157

- 7.1 INCOSE 的《系统工程手册》概述 / 157
- 7.2 INCOSE 系统工程概述与生命周期阶段 / 160
 - 7.2.1 系统的定义和概念 / 160
 - 7.2.2 系统内部的层级结构 / 160
 - 7.2.3 系统之系统的定义 / 160
 - 7.2.4 使能系统 / 161
 - 7.2.5 系统科学与系统思考 / 162
 - 7.2.6 通用生命周期阶段 / 163
- 7.3 INCOSE 技术流程 / 168
- 7.4 INCOSE 技术管理过程 / 169
- 7.5 INCOSE 协议过程 / 170
- 7.6 INCOSE 组织的项目使能过程 / 170
- 7.7 INCOSE 系统工程的剪裁流程和应用 / 171
- 7.8 INCOSE 跨领域/学科系统工程方法 / 173
 - 7.8.1 建模与仿真 / 173
 - 7.8.2 基于功能的系统工程方法 / 175
 - 7.8.3 原型构建 / 176
 - 7.8.4 接口管理 / 176
 - 7.8.5 精益系统工程 / 176
 - 7.8.6 敏捷系统工程 / 176

- 7.9 INCOSE 专业工程活动 / 177
- 7.10 小结 / 177

第 8 章 FAA 的《国家的空域系统——系统工程手册》 179

- 8.1 FAA 系统工程概述 / 180
- 8.2 FAA 生命管理过程中的系统工程 / 183
- 8.3 FAA 系统工程的要素 / 187
- 8.4 小结 / 192

第 9 章 基于模型的系统工程 193

- 9.1 基于模型的系统工程概述 / 193
- 9.2 主要的 MBSE 方法论介绍 / 198
 - 9.2.1 IBM Harmony - SE 方法 / 199
 - 9.2.2 Harmony - SE 的后续发展 / 204
 - 9.2.3 其他重要的 MBSE 方法论 / 204
- 9.3 小结 / 212

第二篇 飞行器系统工程最佳实践

第 10 章 美国波音公司项目分析 217

- 10.1 波音公司重大型号系统工程实践介绍 / 217
- 10.2 小结 / 228

第 11 章 欧洲空客公司项目分析 229

- 11.1 空客系统工程理念 / 229
- 11.2 A400M 案例介绍 / 238
 - 11.2.1 A400M 的系统工程方法目标 / 239
 - 11.2.2 A400M 系统工程流程 / 242
- 11.3 小结 / 253

第 12 章 中国航空领域系统工程实践 254

- 12.1 中国航空工业集团有限公司推进系统工程战略 / 254

- 12.2 基于模型系统工程推进计划与进展 / 255
- 12.3 构建系统工程信息化平台及企业标准 / 255
- 12.4 “航空工业”系统工程流程体系建设 / 258
- 12.5 小结 / 265

第 13 章 “中国制造 2025”背景下的系统工程发展趋势

266

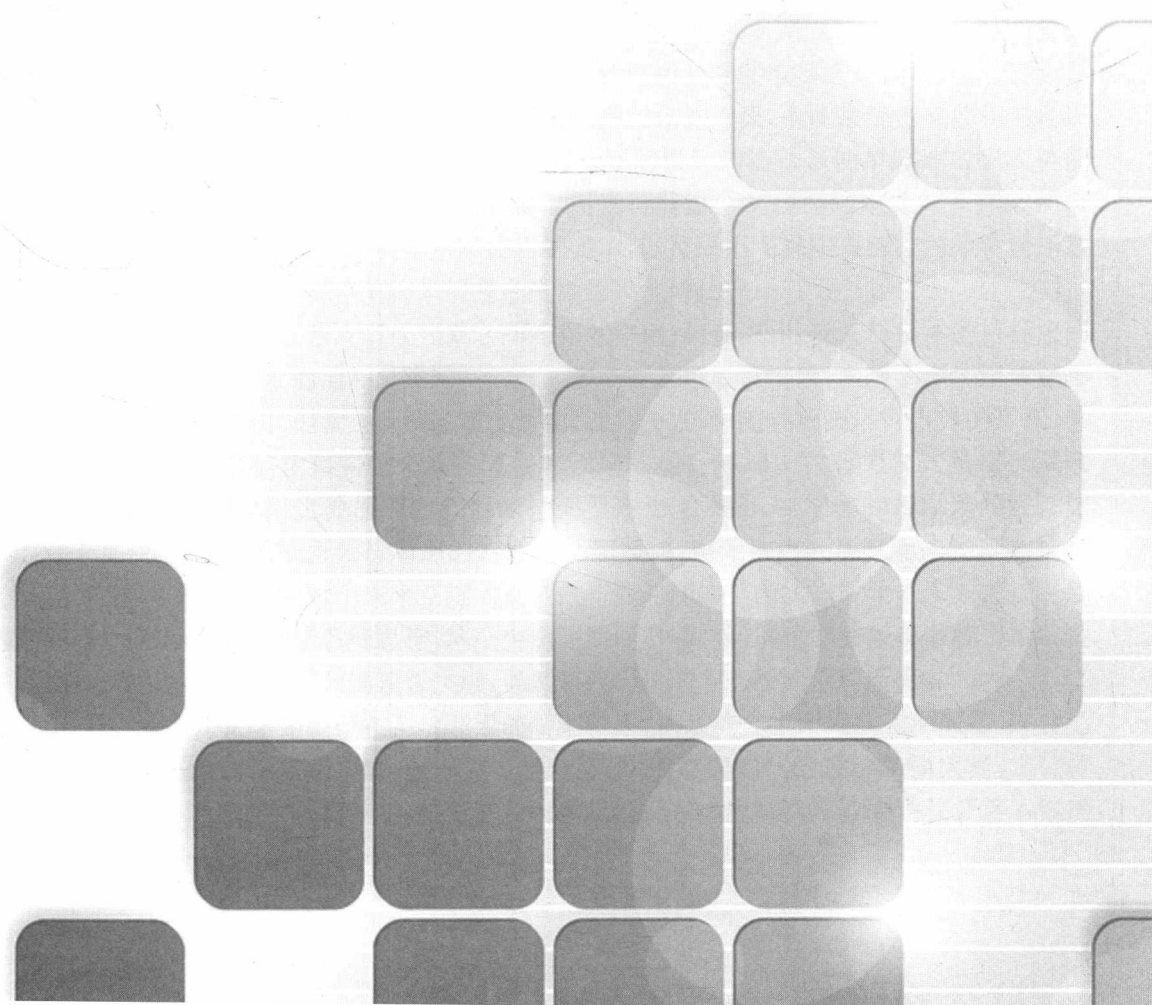
- 13.1 制造业的发展趋势与传统系统工程面临的挑战 / 266
- 13.2 新一代信息技术与系统工程的融合 / 267
- 13.3 中国航空制造业研发模式的演进方向 / 272
- 13.4 小结 / 274

参考文献

275

第一篇

系统工程基础



第1章

系统工程概述

1.1 系统的概念与定义

系统广泛地存在于自然环境、人类社会以及人造的各类产品中。广义的系统包含自然系统、人工系统和复合系统。我国著名学者钱学森认为,系统是由相互作用、相互依赖的若干组成部分结合而成的,具有特定功能的有机整体,而且这个有机整体又是它从属的更大系统的组成部分^[1]。

本书所研究的系统对象以及系统工程研究的系统对象一般是指人造系统,这些系统是为了在预期的运行环境中实现自身特点和目的,服务于人类的人工系统。

随着人类社会的不断发展,人们对于能够在多种应用场景下完成特定任务目标的复杂系统的需求不断提升,导致系统中所包含元素的多样性和差异性也随之急剧增长。当前,复杂系统的任务目标、运行方案和应用场景正呈现出多元化的特征,由此系统构成的相关性以及与外部环境的依存性的复杂度跃升。例如,飞行器的设计制造从最初单纯地实现人类能够离开地面进行飞行的简单需求已经衍生到军用飞行器需要实现海陆空天体系作战的需求,航天飞行器实现穿越大气层甚至星际旅行的需求,以及民用飞机实现跨洋的超音速运载的需求。这些需求的变化都将使得系统复杂度爆炸式地增长^[2]。

系统的复杂性反映在系统组成元素之间的相互作用、相互依赖,及其与整体的目标之间的非线性关系(而非简单的加和关系)。一方面,多个要素组成系统后,出现了系统组成前单个要素所不具有的性质,也就是所谓的系统涌现性;另一方面,随着系统运行边界的扩展,其所运行的外界环境多样性和变化导致系统在非预期的运行环境中的行为模式呈现出混沌性,系统的失效模式也因这种涌现性和混沌性而呈现出无周期、非规律和难以预知性。因此,对于复杂系统,既不能由分析局部的特性来认识整体,也无法由环境变化来预判系统行为模式的转换能力。正是对于未来系统的复杂性与混沌性的不断认知以及未来系统演进趋势的理解,提出了需要基于系统思维,从全生命周期以严谨的结构化方法理解系统带给我们的问题域,并以科学化的流程构建解决域,通过迭代寻优的方式找到全局最优解^[3]。

系统工程方法论正是强调在系统开发的早期阶段,从系统全生命周期考虑问题,综合所有利益攸关者的业务和技术要求,全面定义系统需求,通过架构化的系统工程流程、文件体系、规范和结构化的需求层层传递,指导和控制系统的开发过程(设计、综合和验证等),以确保复杂系统的研制成功。

钱学森作为我国系统工程领域的奠基人和早期推动者,对系统工程给出了精辟的定义:如果把极其复杂的研制对象称为系统,系统工程则是组织管理这种系统的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学方法,是一种对所有系统都具有普遍意义的科学方法。

基于目前全球通用的系统工程标准 ISO/IEC 15288,以及《国际系统工程手册》,对于系统工程从 3 个不同的视角做出了如下定义。

1) 系统工程是一门关于整体(系统)而不是各个部分的设计和实现的学科。它将问题作为一个整体,分析与其相关的所有因素与变量,并将技术与管理相结合。

2) 系统工程是一种自上而下的综合、开发和运行真实系统的迭代过程,以接近于最优方式满足系统的全部需求。

3) 系统工程是一种使系统能成功实现的跨学科的方法和手段。系统工程专注于:在开发阶段的早期阶段,就定义客户需求与所要求的功能,将需求文档化;然后进行面向系统实现中所有问题(如运行、成本与进度、系统性能、培训与支持、测试、制造和退役)的综合设计和系统确认。系统工程以提供满足用户需求的高质量产品为目的,同时考虑了所有用户的业务和技术需求。

系统工程有别于气动、结构、机械、电子等工程学科的地方在于:

1) 系统工程特别注重解决系统的整体问题。即不仅关注系统本身,也关注系统与其他系统和环境的相互作用;不仅关注系统本身的工程设计和实现,也关注那些制约设计和实现的外部因素。

2) 系统工程是沟通各工程学科的桥梁。即在设计和实现复杂系统时,不仅优化各专业工程专家提供的系统各特定特性部件,更要获得最好的系统行为能力。

3) 系统工程与项目管理紧密联系,是项目管理的固有部分。即在寻求系统解决方案的同时,必须充分考虑时间、成本和进度,与资源之间寻求正确或适当的平衡。

1.2 系统工程的产生与发展

现代系统工程的起源可以追溯至 20 世纪 40 年代初,在美国等国家的电信工业部门中,为完成巨大规模的复杂工程和科学研究任务,开始运用系统观点和方法处理问题。贝尔电话公司在发展微波通信网络时,首先应用一套系统的方法,并提出“系统工程”这个名词,而早在 1829 年,“火箭”机车的研发就已经使用这一概念。第二次世界大战中,英国运用运筹学建立雷达警报系统,美国实施曼哈顿计划、申农的信息论、维纳的控制论,都为系统工程的发展提供了一定的理论基础^[4]。

第二次世界大战以后,为适应社会化大生产和复杂的科学技术体系的需要,逐步把自然科学与社会学中的某些理论和策略、方法联系起来,应用现代数学和电子计算机等工具解决复杂系统的组织、管理和控制问题,以达到最优设计、最优控制和最优管理的目标。全球掀起了系统工程实践的热潮,特别是欧美防务部门在空天、导弹、装备等前沿领域率先进行了系统工程探索和积累,逐步形成和确立了系统工程的一系列理念和方法。

20世纪50年代开始,核武器和洲际导弹的出现标志系统工程方法的应用达到了更高的水平。60年代初,美国国防部长麦克纳马拉运用系统分析方法提出了美国国防新战略,取得了成绩,改变了空间技术落后于苏联的局面。北极星导弹、核潜艇计划和阿波罗登月计划都是系统工程在国防科研中取得成功的著名范例,创造的“计划评审技术(program/plan evaluation and review technique, PERT)”和“图形评审技术(graphic evaluation and review technique, GERT)”,以及把电子计算机用于计划工作,促进了整个系统研制工作进展^[5]。

20世纪70年代以来,系统工程已广泛地应用于交通运输、通信、企业生产经营等部门,在体育领域亦有应用价值和广阔前景。它的基本特点是:把研究对象作为整体看待,要求对任一对象的研究都必须从它的组成、结构、功能、相互联系方式、历史的发展和外部环境等方面进行综合的考察,做到分析与综合的统一。

20世纪80年代,美国筹备并开展“星球大战计划”(反弹道导弹防御系统的战略防御计划),美苏两大阵营的冷战达到了高潮。这使得美国国防军工企业空前繁荣,急需大批需要系统工程思维、技能和经验的工程和管理人员。然而,这些军工企业发现美国各大高校培养的学生并不具备这样的素养。在这样的背景之下,1989年通用动力公司在加利福尼亚大学圣迭戈分校主办了一场会议,这次会议的议题是讨论一个合格工程师在进行系统考虑而不仅仅是侧重于某个具体学科时的明显缺陷。1990年夏天,波音公司在华盛顿西雅图的巴特尔会议中心举行了另一次会议,也探讨了同样的议题。该小组通过了一个章程,并成立专责委员会,以解决系统的工程问题,并建立了美国国家系统工程协会(National Council on System Engineering, NCOSE)^[6]。1995年,美国国家系统工程协会正式更名为国际系统工程协会(International Council on System Engineering, INCOSE),致力于在全球范围推广系统工程知识和工程实践。如今,系统工程作为一门独立的学科,已经得到了工业界的广泛认同和应用^[7]。

进入21世纪,航空航天等领域的复杂系统得到了飞跃式发展。一方面,基于文本的系统工程方法已经无法满足复杂系统的研发;另一方面,大型复杂系统的研发过程越来越依赖模型和仿真技术,而且这些技术的应用和实践也遵循系统工程的思想予以规范化,这些建模流程成为基于模型的系统工程(Model Based System Engineering, MBSE)的基础^[8]。如今,MBSE的三大支柱——流程、方法和工具已经日趋成熟。在航空航天领域,空客、波音等在开始探索基于模型的系统工程方法在型号研制上的应用,例如,空客A350WBX的起落架系统研制过程和波音B787的系统研制过程都应用了MBSE的方法。国际系统工程协会在2007年发布的《国际系统工程愿景2020》中明确将基于模型的系统工程方法列为未来系统工程的发展方向。2008年ISO、IEC、IEEE、INCOSE、PSM以及其他机构全面协调ISO/IEC/IEEE 15288:2008的系统工程概念。2016年,INCOSE发布《系统工程2025愿景》,将发展基于模型系统工程作为其重要目标和方向。由国际系统工程协会发布的《系统工程愿景2025》(SE Vision 2025),表明了系统工程的发展趋势——基于模型的系统工程。

在著名科学家钱学森的大力倡导之下,我国现代系统工程于20世纪50~60年代渐渐萌芽和发展,我国国防研究部门开始了尖端技术科学管理的研究,以及系统工程理论的探讨

和实践。这些重要理论和研究成果在洲际导弹工程、远洋测量船研制工程、地球同步卫星工程上取得了空前的成功,为我国国防工程不断迈向现代化做出了重要贡献。20世纪80~90年代,中国科学与哲学界翻译出版了一系列国外系统科学、系统哲学与系统工程名著^[9],举办了系列科学、科学史与经济系统管理等相关学术探讨。1983年到1993年,在生物物理学和心理生物学等领域的系统论探讨中产生了系统生物工程等概念与原理。90年代以后,系统工程在与企业发展结合、与现代信息技术结合、与实施可持续发展战略结合、与思维科学结合等方面已具有初步结果和强劲势头。我国近几年来,在航空工业集团的倡导下,基于模型的系统工程的理论研究和工程实践活动得到了空前的发展,并进一步加强了国际合作与交流^[10]。

1.3 系统工程的作用与价值

系统的出现很大程度上是为了有效管理和控制系统或项目的复杂性和各种变化带来的风险,提升大型项目的开发效率。由系统工程的发展历史和当前的科技发展趋势来看,随着产品、服务和社会的复杂性不断上升,降低新系统开发或复杂系统改进的相关风险仍然是系统工程的主要目标^[11]。

第二次世界大战以后,系统的复杂度的不断增长导致开发时间及开发成本急剧增加。图1.1描述了20世纪60年代以来集成电路、汽车和航空系统复杂度增长导致了开发成本的增长。可以看出,自60年代到90年代,汽车系统的复杂度提高了3个数量级,而开发成本以每年4%的速度增长;航空系统复杂度在此时期增长了2个数量级,而开发成本增长速度高达每年8%~12%。

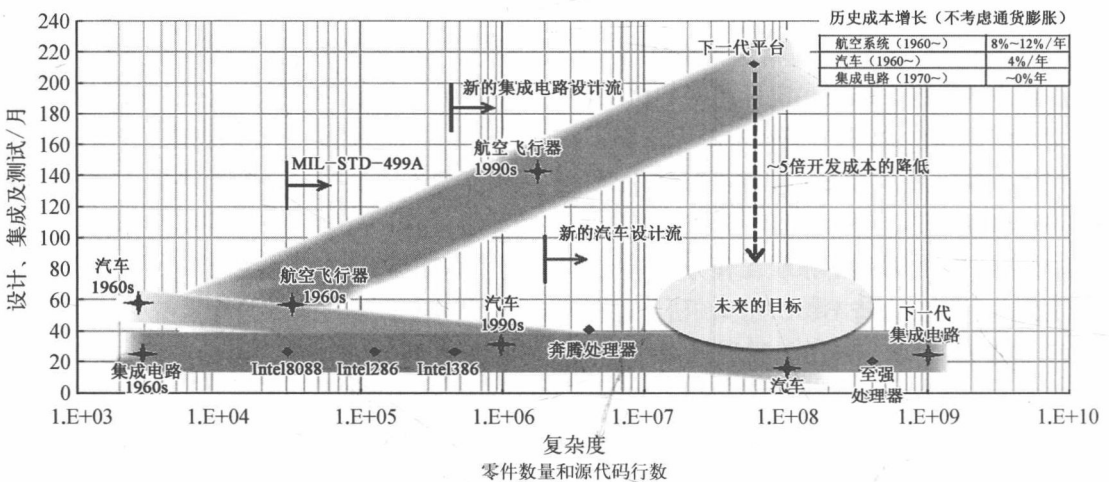


图 1.1 系统复杂度与开发成本增长关系示意图

复杂系统的关键特征是涌现性,也就是说当系统中各要素聚合在一起,它们之间的交互将会导致功能、行为、性能及其他特性的涌现。系统不是其组成部件的加和,而是这些组成