

大型复杂技术项目的系统观点与系统工程方法

郭宝柱

(中国航天科技集团公司,北京 100037)

[摘要] 大型复杂技术项目的管理者面对着两个重要的系统,即被研制的工程系统和项目所处的组织机构系统(包括项目团队)。系统工程是成功实现工程系统的方法和技术,它综合多种专业技术,通过分析、综合、试验和评价的反复迭代过程,开发出一个整体性能优化的系统。社会组织系统是开放的复杂巨系统。组织机构的整体能力对大型复杂技术项目管理和系统工程方法的效能具有决定性的影响。必须在组织机构管理中强调系统的观点和方法,核心问题是如何发挥人的积极性、形成强大的群体创造力。这正是系统复杂性研究中揭示系统微观因素对宏观规律的影响机制问题。

[关键词] 大型复杂技术项目;系统工程方法;开放的复杂巨系统;群体创造力

[中图分类号] TB114.2 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2008)03-0025-06

1 高科技工程领域“呼唤系统工程”

系统工程(systems engineering)作为实现和管理“系统”的科学方法已经在世界范围内成为共识。在我国也可以明显地感受到“整个社会都在呼唤系统工程”,特别是在今天蓬勃发展的高科技工程领域。

随着现代化建设和创新型国家的发展,我国的科技水平和自主创新能力正在迅速提高,许多重要领域的研究开发能力已经跻身世界先进行列,一批有技术创新能力和竞争实力的高技术企业和研究机构正在迅速成长。国民经济和社会发展“十一五规划纲要”强调要“按照产业集聚、规模发展和扩大国际合作的要求,加快促进高技术产业从加工装配为主向自主研发制造延伸,推进自主创新成果产业化,引导形成一批具有核心竞争力的先导产业、一批集聚效应突出的产业基地、一批跨国高技术企业和一批具有自主知识产权的知名品牌”;并且明确提出以自主创新为主线、以重大专项为战略突破点,集中力量在电子、信息、能源、资源、环境、制造、交通、材料、医疗、城市发展和国家安全等领域组织实施一批重大专项工程,带动技术创新和社会生产力的发展。

这些关系到国家战略地位、国防建设、经济发展和社会生活的大型复杂技术项目,需要融合当代众多的学科知识和专业技术,其中包括许多处于时代科技发展的前沿技术;需要跨学科、跨地域、为数众多单位的参与;需要一个相当长的研制周期,涉及巨额的经费投入;伴随着巨大的风险;同时,承担这些大型项目的组织机构正处在一个迅速变化的复杂环境之中。全球一体化进程的加快,使得国内的企业和科研机构感受到竞争的日趋激烈;信息和知识时代不断涌现的新技术正在挑战组织机构的适应能力;改革开放的深入不断冲击着传统的体制和机制,暴露出许多新矛盾和新问题。因此,今天的管理者很难认为这些大型复杂技术项目的组织管理是稳定和可预测的,管理科学也开始接受诸如非线性、不确定性和混沌等新概念,提出了复杂性管理的新范式^[5]。高科技工程领域在呼唤系统工程,因为系统观点和系统工程方法是应对系统复杂性、抵御风险的科学观点和方法。

多年以来,宏观经济问题被认为是系统工程“主攻方向”,系统工程是一种决策“咨询活动”。系统基础科学和技术科学的探讨得到广泛关注,系统工程方法的研究却较少重视,以至于“系统工程是

[收稿日期] 2007-11-08

[作者简介] 郭宝柱(1945-),男,北京市人,中国航天科技集团公司研究员,博士生导师,国际宇航科学院通信院士

什么说不清楚”成为常常听到的议论。毫无疑问,国家宏观经济建设需要系统工程,系统工程也必须以广泛的系统科学知识为基础。但是,借助于系统学者的支持和咨询,充分认识系统工程的方法论内涵,不断在实践中应用和发展这个科学、有效的方法和技术,在今天具有更重要的意义。

2 大型复杂技术项目的系统工程方法

系统工程的含义在我国有不同的解读。在系统科学体系中系统工程是处于应用层次上的方法和技术,例如“航天运用系统工程,实施科学管理”;而在更多的场合,系统工程指的是采用系统工程方法的大型计划项目或工作,例如载人航天是系统工程。笔者用“系统工程方法”表示“Systems Engineering”,指的是技术管理的方法和技术。

大型复杂技术项目的管理者面对着两个重要的系统,即被研制的工程系统和大型项目所处的组织机构系统(其中包括项目团队),如图1所示。

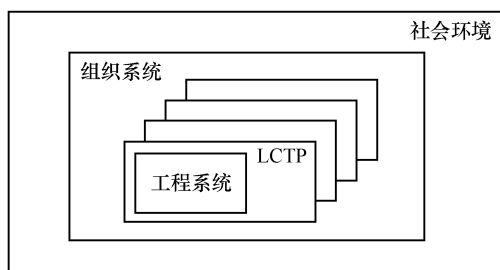


图1 大型复杂技术项目与工程系统和组织系统

Fig.1 Engineering system, organization system and large complex technical project

工程系统的实现需要采用系统工程方法。系统工程方法是一种跨学科的方法,它从需求出发,综合多种专业技术,通过分析、综合、试验和评价的反复迭代过程,开发出一个整体性能优化的系统。

作为大型复杂技术项目管理中的技术管理方法,系统工程方法既应用于技术开发过程,也应用于技术管理过程。技术开发过程包括要求分析、系统设计与实现、系统集成、验证与评价,以及系统运行和维护等。系统工程管理保证系统的分析、定义、集成和验证等工作有序进行,必要的工程专业并行展开。为了实现一个成本效果好的系统,系统工程管理保证性能指标、进度和成本三要素的均衡进展。系统工程管理的手段包括系统工程管理计划与控制、工作分解结构、技术状态管理、技术评审与审

查等^[8]。

系统工程的方法论基础是系统科学。系统工程方法论强调还原论与整体论方法结合,全寿命周期统筹控制,分析—设计—验证反复进行,定性描述与定量描述结合,最终实现系统整体性能优化的目标^[1-3]。

2.1 还原论方法逐次分解,整体论方法综合集成

系统科学关于还原论和整体论辩证统一,在精细了解局部的基础上,把握整体特性的核心思想,是系统工程分解—集成方法的基础。还原论强调对事物微观结构和机制的深入认识和理解,作为一种方法论,还原论几百年来在科学研究中取得了巨大的成功,但是微观层次上的原理不可能完全解释事物的宏观规律。整体论强调对事物整体特性的把握,却容易忽略微观分析的作用。系统工程方法论是自下而上的还原论方法与自上而下的整体论方法的结合。它既强调对系统内部各组分微观机制的认识,更强调对系统组分、层次之间相互联系的分析,特别是整体目标的实现。

系统总体首先从使用需求(或技术发展要求)以及上层更大系统的约束条件出发,经过分析综合得到一个初步的系统体系结构和性能参数。然后根据研制对象的特点,把系统逐级分解到易于掌控的层次,并使它们成为不同参与单位和人员的具体工作。根据系统总体要求和约束条件,从部件、分系统到系统逐级进行分析、设计、协调、集成和验证,最后得到满足使用要求的系统产品。面对高水平的使用要求、各种限制条件甚至苛刻的使用环境、参差不齐的技术基础、复杂的界面关系,系统工程师借助原有的经验,发挥聪明才智,精心设计系统各组分在信息、能量和物质交流界面上的协调关系,以开发出满足要求、整体性能优化的系统为目标,最终实现系统整体功能和性能的“1+1>2”。

对系统工程方法讨论经常用 Forsberg 和 Mooz 的 V 图来描述系统工程的分解—集成过程,如图2所示^[8]。

2.1.1 全寿命统筹策划

分阶段循序展开新建系统有一个发生、发展、相变和衰落的演化过程,即系统的寿命周期。工程系统的寿命周期由研究、实现和运行等子过程组成,体现了工程系统演化发展的客观规律。系统的整体观点应用于系统寿命周期,就是全过程观点以及全过程统筹策划、子过程循序展开的方法^[3]。

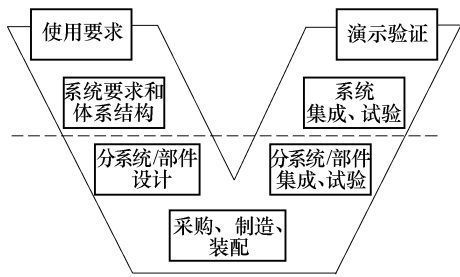


图2 系统开发 V 图

Fig. 2 The "Vee" developmental model

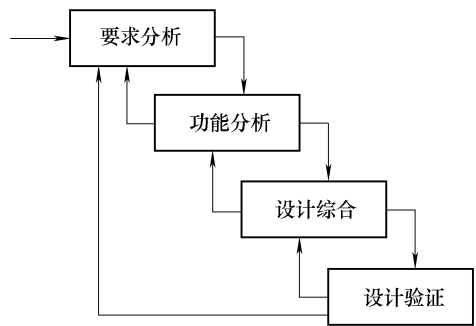


图3 系统工程过程

Fig. 3 System engineering process

工程系统的研制程序是系统寿命周期的组成部分。研制程序体现了工程系统开发的过程结构特点;每一个子过程既要保证阶段任务目标的实现,又要充分考虑本阶段工作对系统全寿命周期所有活动的影响,包括研制、试验、制造、部署、培训、使用、维护以及弃置等活动。依据项目的特点,研制程序一般分为概念研究、系统定义、初步设计、详细设计、生产和部署、运行和处置等阶段^[7,9,10]。

通过并行工程方法,系统工程方法保证了科学合理集成各种必需的工程专业技术,特别是诸如可靠性、安全性、可维护性、可生产性、人素工程、电磁兼容性、后勤保障等特殊工程专业技术。这些工程专业通常是跨学科的,它们应用特殊的专业知识和方法支持被开发的系统在未来真实、复杂的环境下能正确发挥使用效能。

2.1.2 分析—设计—验证反复进行,结构化的要求—体系转化过程

系统开发是认识不断深化,系统逐步满足使用要求的递归逼近过程。人们不可能一开始就对系统所涉及的各种专业技术,各部分之间的信息、能量、物质沟通关系,以及使用环境中的行为特点有清晰的认识,必须遵循认识论的分析—实践—再分析—再实践反复的认识过程。这里的实践包括对分析、设计结论的验证试验。开发过程中的思维和活动可以概括为要求分析、功能分析与分配、设计综合和设计验证,常称为系统工程过程(systems engineering process)(如图3所示)。

在系统研制过程中始终保持对要求的跟踪。要求分析活动澄清和确认需求和目标,明确限制条件;然后依此提出对系统的功能和性能要求,并通过功能分析和分配活动进一步分解成为低层次功能,结果得到一个对系统功能的全面描述,即系统的功能结构。设计综合是在综合考虑各种相关工程技术

影响的基础上,发挥工程创造力,设计出一个能够满足要求的、优化的系统物理结构。验证活动的目的是确认所设计的各个层次的系统结构满足系统要求,保证能够按预定的性能指标实现所要求的功能^[8]。

2.1.3 定性与定量方法相结合,以定量模型为基础的科学分析方法

在对系统定性认识的基础上,对系统进行科学的定量描述,也是工程领域系统工程的基本方法论。定性描述是定量描述的基础,定量描述为进一步深入的定性分析服务。计算机仿真是工程系统分析与设计不可或缺的手段。计算机仿真首先利用已知的基本科学定律,结合设计工作的经验,经过分析和演绎建立系统的数学模型,然后把系统的数学模型转化为仿真模型。计算机仿真使设计人员可以用数学模型在计算机上对设想的或者真实的系统进行数学仿真、半实物仿真或实物仿真试验,定量地预测系统可能发生的行为,从而对选定的方案给出总体评价,优化和确定参数,避免设计失误。在早期阶段,数学模型可能相对简化,以便初步确定和分析系统的结构以及性能指标。随着研制进展和认识的深入,系统的数学模型应不断完善。

3 系统工程方法是高科技工程项目领域的成功实践

基于系统理论、控制理论、信息理论以及运筹学,系统工程几十年来在重大工程项目的推动下,在国外军用和民用工程领域迅速发展。从军用 MIL-STD-499 系列标准演化为商用的 ANSI/EIA 632 标准和 IEEE 1220 标准,再到 ISO 标准,系统工程方法自始至终有明确的内涵和清晰的发展历程(如图

4 所示)。系统工程方法不但保证了工程系统的成功实现,而且随着系统工程方法工作力度的增加,项目

成本超支和进度拖延显著减少,计划的可预测性则显著增强^[11]。

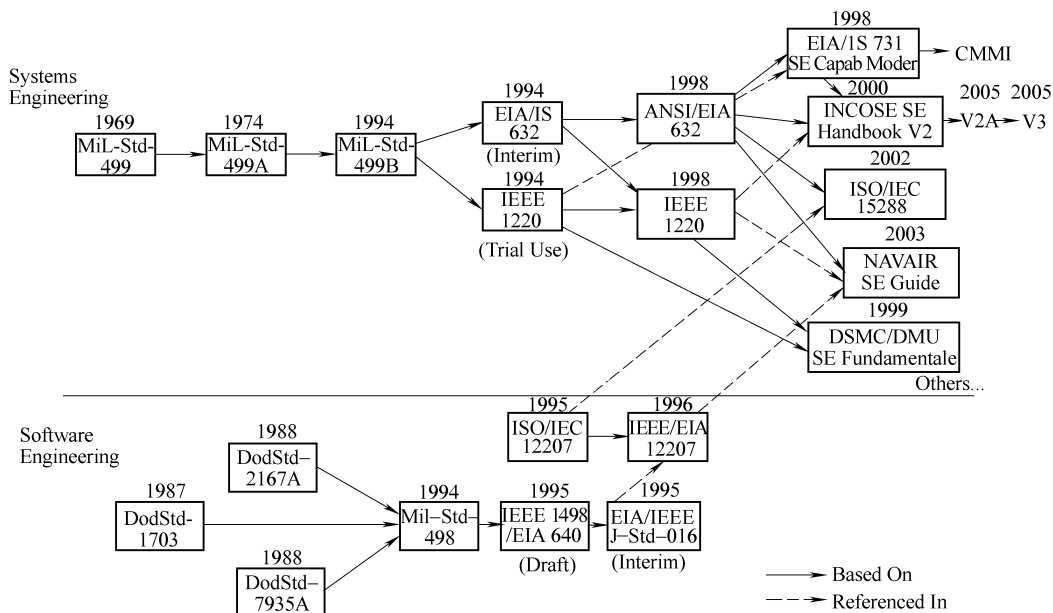


图 4 系统工程方法标准演化过程

Fig. 4 Evolvement process of system engineering standards

中国航天通过型号研制实践同样逐步形成了既符合系统开发的科学规律,又适应中国特定环境的系统工程方法。20 世纪 60 年代初期第一颗自行研制的导弹首飞失败,使中国航天的科技和管理人员认识到必须严格遵循研制程序,前一阶段要成为后一阶段工作的可靠基础;必须加强预先研究,突破关键技术;必须充分进行地面试验,验证设计的正确性。特别是必须重视总体的作用。钱学森认为,总体设计部的实践是系统工程科学方法的体现^[1]。中国航天总体设计的地位在研制实践中不断得到加强,服从总体成为一种不容置疑的观念,从而使得总体与分系统、分系统与分系统相互之间能够有效地协调和配合,表现出强大的大型复杂技术系统研制能力。几十年来管理体制历经调整变化,研制任务不断更新,而不断完善系统工程方法一直是中国航天科研组织管理实践不变的主旋律。

4 组织机构管理的系统观点与方法

大型复杂技术项目面对的另一个系统,是包括项目团队在内的组织系统(见图 1)。组织系统是一个小型社会系统。大型复杂技术项目团队融合在组织机构的文化氛围当中,在组织机构的统筹组织和

指挥下开展工作,并得到组织机构技术、资源等方面的支持。组织机构的整体能力对项目管理和系统工程方法的效能具有决定性的影响。同时组织机构本身则处于外部政治经济环境以至国际大环境之中。

对于社会组织系统的管理目前并没有总结出一套有针对性的、完整的系统工程方法体系。但是为了提高整体能力,必须在组织机构管理中强调系统的观点和方法。任务目标、人力资源、技术、设施、资金、物资、信息、管理方法是高技术企业或者科研机构的基本系统要素。在一定的环境下,科学、有效的组织结构方式对整体功能的实现具有决定性的作用。系统的整体观点认为组织管理的核心问题是要素和部门能否最有效地形成整体能力,实现组织机构的整体目标。系统的开放观点认为组织机构必须在社会环境中发挥应有的作用;同时社会的文化和价值观、相关的政策和法规、技术和物资保障是影响、制约组织机构稳定和发展的重要因素。系统演化观点认为组织机构必须不断分析未来的社会需求、竞争环境和技术发展趋势,制定相应的对策和战略,分阶段实现长远目标,在适应环境中动态发展,才能保持在新的机会领域里的核心竞争能力^[7]。

社会组织系统是开放的复杂巨系统^[2]。系统

要素、结构与环境在微观互动当中所“涌现”出来的宏观规律,是组织系统的复杂性最活跃的表现。系统复杂性研究的核心问题是揭示系统微观因素对宏观规律的影响机制^[4]。管理领域复杂性研究所关注的如何发挥人的积极性、形成群体强大的创造能力的问题,实际上也是实现“1 + 1 > 2”的内在机制问题。

工程系统数学模型方法的高度科学性、逻辑性、严密性和抽象性,权威人士关于一种科学只有运用了数学才达到真正发展的论断,使得量化方法得到了特别推崇,并认为系统工程方法都是量化的方法。就是复杂的社会系统,最后也要用数学模型对整体达到定量的认识。但是当试图以精确的、量化的模型描述具有诸如随机性、模糊性等不确定和不确定因素的组织系统行为特性的时候却遇到了目前难以逾越的困难。高度智能化的人的复杂心理现象,不确定的行为方式以及非线性的相互关系,是组织系统复杂性最重要的根源。如果把复杂性当作简单性来处理,把非线性当作线性来处理,丢掉的可能正是系统最本质的特性。例如,在“人-机”系统的研究中,人的作用可能只是一个延迟环节,是一个完全没有个性和心理过程的机器。在那里,作为组织系统复杂性根源的人的复杂心理和行为完全被忽略了。而在另一些社会系统研究中,对群体效能的分析是基于某种线性化的模型,例如, $E = \sum_{i=1}^n e_i$ 。这里假定群体力量只是个人力量的线性相加,所忽略的是系统理论关于整体大于(或不等于)部分之和的基本思想。因此,“如果用那些看起来理论性很强的数学模型来描述复杂系统本质特征,严格定量地预测社会系统可能发生的行为规律的时候,常常显得牵强附会,脱离实际”^[4]。

实际上,当试图以精确的量化方法描述一个社会组织系统在一定环境下产生的巨大创造力或走入衰落的微观作用机理的时候,或者说面对例如为何在人的群体中发生“三个臭皮匠,顶个诸葛亮”和“三个和尚没水吃”现象的时候,无论确定论或概率论,似乎都很难做出,或者根本就不可能做出准确的、定量的描述。从图5可以看到,基于人的行为方式的不确定性和相互关系的非线性特点,因果关系不是确定的;人与人之间也不是粒子与粒子之间的关系,社会组织系统的规模也未必会大到使大数定律成立,统计学方法在这里常常也只是辅助的手段。因此在规模不大、组分存在不确定性的社会组织系

统区域,人类的认识能力遇到了新的挑战。

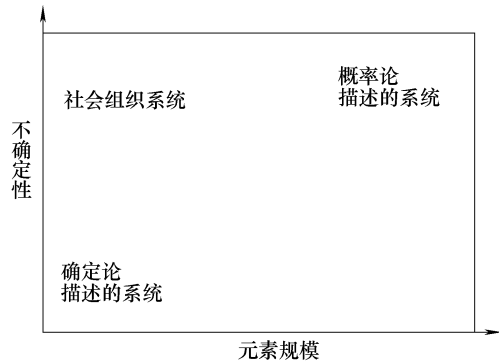


图5 系统描述方法图

Fig. 5 Analytical and statistical descriptions

经典科学成功的同时也逐步揭示了世界的复杂性,但是常常会把复杂性问题简化,以回到经典科学可以精细处理的领域。实际上在现代科学得到新的突破之前,对复杂社会系统的定量研究还需要有一条很长的道路要走。

5 在实践中发展系统工程方法

尽管已经在世界范围的工程领域获得了成功,系统工程方法仍然需要不断通过实践完善和创新,特别是在我国蓬勃发展的高科技工程领域。今天,无论是从认识人的创造力,发展管理科学的角度,还是从探索系统复杂性,发展系统科学的角度,都应当鼓励通过管理实践观察和认识宏观演化规律与环境、结构和要素的关系,特别是与人的因素之间的互动关系,充分重视对社会组织系统复杂性问题的定性分析。

系统工程师协助项目经理负责技术方面的工作,是工程领域系统工程方法的直接实践者。系统工程师不但需要具有工程专业方面广博的知识和系统研制的实践经验,而且必须善于应用系统观点和方法分析问题和解决问题。在工程系统研制过程中,系统工程师分析用户的需求,通过设计、试验逐步把需求演化为真实系统,在不同研制阶段,系统工程师根据自己承担的任务范围和责任,分层次经过权衡分析做出技术和管理的决策。中国航天的总体设计在整个研制过程中一直起着主导性和决策性的作用,总设计师是型号研制任务的技术总负责人,是技术方面的组织者、指挥者,重大技术问题的主要决策者。

各级管理人员是组织系统管理的实践者和决策

者。在复杂的环境下,他们必须不断以整体优化为目标协调系统内各种要素之间的关系;特别是要能够清楚地理解人在组织机构发展演化中的作用,积极激励、有效组织他们发挥潜在能力;他们在充分协调现有资源取得当前绩效的同时,还必须预测和考虑组织机构未来的演化趋势,分阶段实现长远的发展目标,在关键节点上做出正确的决策;他们既需要掌握系统的观点和方法实施科学管理,又需要善于有策略地处理各种临时和突发的复杂事件。

在系统基础科学和技术科学研究成果以及系统学者的有力支持下,通过反复的实践和认识过程,使系统工程方法和技术的应用深入发展,使我们对社会组织系统复杂性的认识逐步达到比较高的程度,为科学的新突破积累知识,并逐步总结出以形成整体创造力为目标的社会组织系统工程方法。

参考文献

[1] 钱学森. 论系统工程[M]. 长沙:科学技术出版社,1982

- [2] 钱学森. 创建系统学[M]. 太原:科学技术出版社,2001
- [3] 许国志,顾基发,车宏安. 系统科学[M]. 上海:上海科技出版社,2000
- [4] 许国志. 系统科学与工程研究[M]. 上海:上海科技教育出版社,2000
- [5] 黄本笑,范如国. 管理科学理论与方法[M]. 武汉:武汉大学出版社,2005
- [6] Ludwig von Battlanffy. General System Theory [M]. New York: Geoge Braziller. Inc,1969
- [7] NASA Headquarters. NASA Systems Engineering Handbook[M]. NASA,1995
- [8] Benjamin S B. Systems Engineering Management [M]. Second Edition. New York: John Wiley,1998
- [9] Defense Acquisition University. Systems Engineering Fundamentals[M]. Virginia: Defense Acquisition University Press,2000
- [10] Alexander Kossiakoff , Sweet N William. Systems Engineering : Principles and practice[M]. New York:John Wiley,2003
- [11] Cecilia Haskins. INCOSE-TP-2003-002-03, INCOSE Systems Engineering Handbook [M]. International Council on Systems Engineering,2006

Systems Engineering in Large Complex Technical Projects

Guo Baozhu

(China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100037, China)

[Abstract] Large complex technical programs / projects mainly involve the engineering systems to be developed and the organization systems in which the projects are carried out. It has been a common knowledge that systems engineering is an interdisciplinary approach to enable the realization of successful system. Some commonly used definitions of systems engineering are provided by the best known international technical standards, and they all have a common theme. Nowadays, great needs for systems engineering approach are emerging from major engineering projects in China, but there seems to be a confusion of “what systems engineering is”. The organization system is an open complex giant system. The holistic competence of an organization has an important impact on the success of projects. The systems perspective and approach are essential to organization management. The kernel issue is how to encourage people and how to cultivate an organizational creativity and productivity. In complexity study, this is the issue of the recognition of the micro-mechanism of system macro-emergency property. Neither analytical methods nor statistical methods are able to describe social system complexity quantitatively and accurately.

[Key words] large complex technical projects; systems engineering; open complex giant system; organizational creativity