

航天组织管理的系统思维与系统工程方法

郭宝柱

中国航天科技集团有限公司,北京 100048

摘要 系统思维是基于系统观点和方法的思维方式,系统工程是系统思维在工程领域的应用,是总体技术活动的体现。对系统思维与系统工程在中国航天组织管理等方面的应用进行了分析和总结。面对今天技术和管理复杂性的挑战,在组织管理上必须强调系统思维,在工程研制中必须强调系统工程方法。

关键词 系统思维;整体观点;管理复杂性;系统工程

由伽利略、牛顿、笛卡儿等科学家开创的近代科学奠定了现代科学技术发展的基础,带来了人类社会400多年的文明和繁荣。用分解还原方法揭示出原子、中子、质子、电子以至基本粒子结构的“夸克模型”,帮助人们对物质世界的组成有了较清晰的认识。牛顿力学体系如此完美,以至于人们相信自然科学中的很多问题都能从它那里得到准确、圆满的解释。

近代科学的方法论是还原论(reductionism)。还原论观点认为,事物高层次的行为规律完全决定于低层次的特征,只要把研究对象分解到某个基本层次,就能够认识事物的整体功能,或者说,部分可以决定整体。还原论方法的核心词汇是“分解”,即把高层的事物通过分解为低层的部分来理解和描述。在还原论方法的解析下,世界所展现的内在联系机制是简单的,似乎一切运动都可以描述为机械运动的线性组合,包括诸如生命和社会发展的各种运动形式都可以用机械运动的法则去解释^[1]。

20世纪中期,还原论观点受到了系统学者的质疑。他们认为,对事物微观层次部分的认识不等于对

其组成高层次时所涌现出来的整体特性的认识;生物和人类社会中大量的复杂现象,也不是仅用机械原理就可以解释的。系统学者定义系统是由相互关联的元素组成的整体^[1]。系统功能是由元素、关系和环境共同决定的^[2]。通过各组成部分之间以及与环境之间的相互作用,系统可以涌现出新的品质,从而保持不断的进化。系统科学是通过揭露和克服还原论的片面性和局限性而发展起来的^[2]。系统思想的核心是整体观点,系统科学是关于整体性的科学;演化是系统的普遍特性,系统科学是研究演化的科学;系统复杂性,即涌现、自组织、自适应、演化等系统复杂性特征,特别是宏观演化规律的微观机制是系统科学的核心。因此可以说系统观点是整体的观点、演化的观点和复杂性的观点;系统方法是从整体目标出发,通过分解集成,实现整体能力的方法。系统思维(systems thinking)是基于系统观点和方法的思维方式。

钱学森先生对中国系统科学的发展做出了重大的贡献。钱学森在他的著作《论系统工程》^[3-4]和《创建系统学》^[5]中,首先传递的是系统科学关于整体和发展的

收稿日期:2018-03-23;修回日期:2018-04-11

作者简介:郭宝柱,研究员,研究方向为系统工程管理,电子邮箱:mrguobz@163.com

引用格式:郭宝柱. 航天组织管理的系统思维与系统工程方法[J]. 科技导报, 2018, 36(20): 38-42. doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.20.006

思想。他认为“系统科学就是从整体的观点来看问题。一反从前那种只靠还原论的办法,越分越细的办法”^[3]。

“社会系统都是开放的,和外部环境有物质、能量和信息的交换,是开放的复杂巨系统”^[4]，“这些系统不能用近代科学都习惯于用的还原论方法”“都要从整体上研究和解决问题”^[5]。钱学森以其睿智和高度,明确提出,在国家现代化建设中,各行各业的管理都应当避免还原论的局部和短浅的思维方式,而要采用系统的观点和方法来认识和解决复杂性的问题。钱学森的系统科学思想深刻影响着中国航天的组织管理,系统思维和系统工程方法是中国航天认识论和方法论的核心,是中国航天成功的重要保证。

1 中国航天组织管理的系统思维

还原论的观点一直在影响着人们的学习、工作和生活。管理领域习惯于关注局部和眼前事物,并试图用简单的线性因果关系来理解和处理复杂问题,这样虽然可以使问题变得容易处理,却可能忽略了事物内外的复杂关系,也难以了解所采取的处理对策对于未来的潜在影响。彼得·圣吉在《第五项修炼》中谈到,“自幼我们就被教导把问题分解,把世界拆成片段来理解。这显然能够使复杂的问题容易处理,但是无形中,我们却付出了巨大的代价——全然失掉对‘整体’的连属感,也不了解自身行动所带来的一连串后果”^[6]。局部和细节问题可能产生重大的影响,即“蝴蝶效应”。但是局部问题的根源可能在于相互关联的其他局部或者环境的影响。“只见树木,不见森林”“只看眼前,不顾长远”“见招拆招,就事论事”的局部思维方式,忽略了与元素、关系、环境的复杂关系,既难以发现问题的根本原因,也难以找到解决问题的根本措施。中国航天在组织管理上体现的系统思维帮助管理者从“关注局部和细节”到“后退一步审视大画面”,以整体观点、发展演化观点和复杂性观点的视野去认识和处理问题,避免局部思维方式带来的片面性。

1) 战略规划。

中国航天持续响应环境形势的变化,在各个重大发展阶段都制定了明确的战略规划。这些战略规划制定过程中始终坚持从整体和发展上考虑问题,在充分认识环境形势的基础上,全面分析工作现状和内部结

构关系,改进薄弱环节,提升整体能力,推出重大工程项目。60年代,制订了导弹发展的“八年四弹”规划,1966年成功进行了“两弹结合”试验;70年代成功发射中国了第一颗人造地球卫星,提出了洲际导弹、潜地导弹和地球同步轨道通信卫星的研制任务;80年代为了实现由试验阶段向应用阶段的转变,提出研制长征三号甲运载火箭,东方红三号通信卫星、风云二号气象卫星和资源一号卫星的“一箭三星”计划;90年代制定了卫星导航定位系统、载人航天工程计划;“十五”期间启动了新一代运载火箭计划、月球探测工程计划和系列化的应用卫星计划。这些战略规划的成功实现成为中国航天发展的重大里程碑或重大事件。中国航天遵循客观发展规律,在圆满完成任务的同时不断推陈出新,适应形势变化,保持着持续发展的活力。

2) 科技开发。

航天系统的技术开发过程遵循“预研一代、研制一代、生产一代”的“三步棋”方针。根据形势发展需要的牵引和技术的推动,及时部署预先研究,开展任务论证,突破关键技术,降低技术风险;积极推动经济上可行、技术上成熟项目的立项研制。航天型号管理是项目管理,型号总指挥对项目负责,总设计师在技术上对总指挥负责。航天项目管理强调顶层策划,协调外部关系,凝聚团队的能力,合理分配资源,保持各项管理工作均衡进展,实现性能指标、成本、进度三要素优化的目标。项目技术管理由总设计师负责,采用系统工程方法,充分发挥各级总体设计的作用,保证成功实现满足性能指标要求的系统产品。对于已经研制成功的产品,要稳定生产能力,保证产品质量,满足应用的需求。“三步棋”方针体现了认识论的实践、认识、再实践、再认识的过程,符合循序渐进、实事求是的科技发展规划。

3) 质量管理。

质量是中国航天的生命线,“一次成功”是中国航天质量管理的目标,“单位抓体系,型号抓大纲,设计抓质量可靠性”是中国航天质量管理的基本策略。“单位抓体系”是指组织机构抓质量体系建设,明确质量政策,制定质量法规,建立质量组织,特别是提升全员的质量意识;“型号抓大纲”是指项目团队要根据任务的特点,建立和实施质量/产品保证大纲;“设计抓质量可靠性”是指在要求分析、设计集成、试制生产、试验验证过程中要将质量可靠性技术充分融合到系统之中。对

发现的质量问题,要按照技术和管理两个五条标准归零,既要分析质量体系是否健全,也要分析产品/质量保证过程和质量可靠性技术的影响,特别要关注人的质量意识的影响。

4) 复杂性管理。

国内外政治、经济环境的不断变化,科学技术的迅速发展,组织机构内部的错综关系,常使管理者面临复杂的管理局面。人的复杂心理和不确定的行为是管理复杂性的重要根源,激励和保持群体创造力,是今天管理的核心问题。钱学森指出“凡是现在不能用还原论方法处理的,或不宜用还原论方法处理的问题,而要用新的科学方法处理的问题,都是复杂性的问题,复杂巨系统就是这类问题”。解决管理复杂性问题要靠人或群体激发出的智慧^[7]。

20世纪90年代中期,大型飞行试验连续失利,航天科研生产和质量形势严峻。统计表明,地面测试和飞行试验中的质量问题大部分是低层次、重复性质量问题和人为责任事故。为了扭转严峻形势,航天工业总公司拨开表面现象,开展了广泛深入的调查、分析和研究,揭示导致严峻质量形势的环境影响和深层次原因,采取系统性的改革措施。经过几年的不懈努力,终于在1996年走出了低谷,迎来了连续成功的局面。20世纪90年代发布的一系列文件是经历拼搏和实践检验的总结和必然产物,凝聚着航天人的汗水、泪水和鲜血。这些措施全面考虑了新经济环境的影响,理顺了各种管理要素之间的关系。特别是关注人的因素,在继续提倡航天精神的同时,制定激励措施满足员工多元化价值观的需求,提高了人的责任心和质量意识。20世纪90年代,中国航天运用系统思维,发挥群体智慧,扭转严峻质量形势是复杂性管理的一次成功实践。

5) 人力资源。

中国航天重视人的因素,认为人是航天发展的决定性因素。中国航天在创业初期既缺少技术,也缺少资源,但是由热爱祖国的专家、忠于事业的干部、又红又专的青年人组成的创业队伍,克服了重重困难,在很短的时间内用自行研制的导弹武器装备了部队。在质量形势严峻的20世纪90年代,航天队伍重新振奋事业心和责任意识,很快走出了低谷。中国航天组织管理重视人的因素,根据任务目标和不同时期环境的特点,从整体能力要求出发,对人才进行系统性的培养和选拔。采取积极措施激励人的积极性,通过实践培养人

的作风和能力,造就了几代优秀的领导班子,勤奋敬业的管理人员,专业覆盖全面、技术精湛的科技和技能队伍,保证了中国航天对人才的需求。

2 中国航天系统工程

钱学森认为,在系统科学体系里,基础科学是系统学,技术科学是运筹学、控制论、信息论,工程技术是系统工程、自动控制等。系统科学到马克思主义哲学的桥梁是系统论^[4]。中国航天系统工程的内涵与国际系统工程的概念接轨,并保持同步的发展。中国航天始终认为系统工程是总体技术实践的体现。系统工程从需求出发,集成多种专业技术,以全寿命周期的视野反复迭代应用分析-设计-试验过程,开发出整体性能优化的系统。

2.1 国外系统工程实践

基于系统论、控制论、信息论和运筹学的发展,20世纪中期,国外重大国防和航天项目推动了系统工程概念的研究。1969年7月,美国空军颁布了第一个系统工程管理标准 MIL-STD-499(USAF)。几十年来系统工程方法在工程技术领域迅速发展,在军用和民用方面都取得了很大的成功,并从军用标准演化为商用标准,直到今天的国际系统工程协会(INCOSE)和国际标准化组织(ISO)^[8]标准。无论是权威性的标准、学校的教科书^[9],还是工业部门的手册^[10-11],对系统工程的内涵都有一致的定义:系统工程是成功实现系统的方法^[12],是系统工程师的总体集成活动。

2.2 中国航天创业阶段奠定的系统工程基础

创业初期第一枚自行设计研制的中近程导弹进行方案考核时,发生了控制系统失稳、发动机管道破裂等问题,导致飞行试验失败。在认真总结经验教训基础上提出的重视总体设计、充分进行地面试验、严格执行研制程序的分析结论,是对自行研制导弹的科学规律认识的深化。此后,中国航天管理体制从专业研究院调整为型号研究院。每个型号研究院都设立了总体设计部。钱学森在1978年总结说“总体设计部的实践,体现了一种科学方法,这种科学方法就是‘系统工程’(systems engineering)”^[13]。这表明在国外对系统工程技术热烈讨论的同时,中国航天也在研制实践中同样形成了系统的概念。以总体设计为龙头的航天系统工程方法,保证了从整体目标出发,充分发挥各专业技

术优势,相互之间有效协调,实现整体目标,表现出强大的大型复杂技术系统研制能力。

1) 系统寿命周期和研制程序。

航天系统寿命周期包括概念研究、可行性论证、初步设计、详细设计以及生产、部署与使用等阶段。概念研究阶段从应用需求或者技术发展机遇出发,探索新原理、新技术、新概念,提出新项目。可行性论证阶段对符合战略发展方向的项目进行任务分析,提出大系统方案,开展关键技术攻关,进而进行经济、技术可行性论证,提出使用要求和技术指标。初步设计阶段(方案阶段)根据使用要求确定系统级的功能、性能要求,建立功能基线;将系统级要求分解到分系统,完成系统方案设计,建立研制基线。详细设计阶段研制工程样机,进行功能、性能测试以及各种环境试验(初样阶段);完成系统详细设计,建立生产基线,进行正样产品的生产和验收试验(正样/试样阶段)。生产、部署与使用阶段进行航天系统的生产,经过真实环境下的演示验证试验,航天系统部署使用。研制程序是研制循序渐进、管理分阶段进行决策和控制的过程。

2) 反复应用的系统工程过程。

系统工程过程(SEP)是一个结构化的分析—设计—验证过程,包括要求分析、功能分析、设计综合和试验验证。反复迭代应用的系统工程过程体现了分解—集成的系统方法,在各阶段的应用都要以全寿命周期的视野,考虑到其他阶段的功能要求。系统工程过程使认识不断深化,将要求逐步转变为满足全寿命周期要求的系统产品。

3) 总体的引领和协调作用。

各级总体从需求/要求和上层系统的约束条件出发,通过任务分析和总体设计,得到系统顶层体系结构和一组功能、性能参数。根据研制对象的特点,把系统分解到分系统、部件、直到可以进行制造或采购的层次。经过从部件、分系统到系统逐级研制、试验和界面协调,系统总体进行系统集成和系统试验,最后得到满足使用要求的系统产品。

各级总体组成的系统工程师体系,对系统工程活动起着技术和技术管理上的引领和协调作用,是系统工程方法的实践者和各层次的技术决策者。面对高水平的指标要求,各种前沿的专业技术,复杂的使用环境,系统工程师借助知识、经验和才智,精细设计和协调系统、分系统及环境在信息、能量和物质交流界面上

的关系,开发出满足要求、整体性能优化的系统,实现整体功能和性能的“1+1>2”。

4) 航天系统工程方法是定量的方法。

系统论证和研制过程利用数学仿真、半实物仿真或实物仿真试验,可以在产品实现之前分析和认识系统的行为特征。随着研制的进展和认识的深入,计算机仿真模型会逐步细化,从而使仿真试验更具有真实性。航天系统是工程系统,它的行为完全符合自然科学的规律,从而为计算机建模与仿真方法奠定了可信的基础。

5) 系统工程管理。

系统工程方法既用于技术过程,又用于技术管理过程。系统工程方法用于技术管理过程,称为系统工程管理。系统工程管理保证分析、设计、试验和生产活动有序进行,是项目管理中的技术管理。系统工程管理的内容主要包括系统工程计划与控制、技术工作分解结构、技术状态控制、技术评审和技术风险管理等。

3 结论

在钱学森先生系统科学思想的引导下,中国航天在战略规划、科技开发、研制生产、质量管理、人才培养等组织管理领域强调从整体和发展的视野考虑并解决问题,在技术领域坚持以总体设计为核心的系统工程方法,体现了组织和技术管理上的系统思维,是中国航天导弹、火箭、卫星及飞船研制成功的保证。

参考文献(References)

- [1] Battlaff L. General system theory[M]. New York: Geoge Braziller Inc., 1969.
- [2] 许国志. 系统科学[M]. 上海: 上海科技出版社, 2000.
- [3] 钱学森. 软科学是定性与定量相结合的系统科学[M]//钱学森. 论系统工程. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1982.
- [4] 钱学森. 我对系统学的认识历程[M]//钱学森. 论系统工程. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1982.
- [5] 钱学森. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论[M]//钱学森. 创建系统学. 太原: 山西科学技术出版社, 2001.
- [6] 彼得·圣吉. 第五项修炼[M]. 郭进隆, 译. 上海: 上海三联书店, 2002.
- [7] 钱学森. 关于大成智慧的谈话[M]//钱学森. 创建系统学. 太原: 山西科学技术出版社, 2001.
- [8] European Space Agency(ESA). System engineering general re-

- quirements: ECSS-E-ST-10C[S]. Paris: ESA, 2009.
- [9] Kossiakoff A, Sweet W N. Systems engineering: Principles and practice[M]. New York: John Wiley, 2003.
- [10] Systems engineering fundamentals[Z]. Fort Belvoir: The Defense Acquisition University Press, 2001: 36.
- [11] National Aeronautics and Space Administration(NASA). NASA systems engineering handbook[Z]. Washington DC: NASA, 2007.
- [12] INCOSE. Systems engineering handbook: A guide for system life cycle processes and activities[M]. 4th ed. Hoboken NJ: Wiley, 2015.
- [13] 钱学森. 组织管理的技术: 系统工程[M]//钱学森, 等. 论系统工程. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1982.

Systems thinking and systems engineering in aerospace

GUO Baozhu

China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100048, China

Abstract Systems thinking is a systematic way of thinking. Systems engineering is an interdisciplinary approach and means to enable the realization of successful systems. Facing the challenge of technology and management complexity, the emphasis must be given to systems thinking in management and systems engineering in technical fields.

Keywords systems thinking; systems perspective; management complexity; systems engineering ●



(编辑 徐丽娇)