

中国航天系统工程

郭宝柱

中国航天科技集团公司科技委 北京 100037

中国航天科技工业创建以来，管理体制历经调整变化，航天产品不断更新换代，而系统工程方法却是中国航天几十年管理实践不变的主旋律。

中国航天在运载火箭、人造卫星、宇宙飞船和导弹武器的研制实践中成功地发展形成了一套有效的系统工程方法，包括总体设计部、研制程序、工作分解结构、技术状态控制和阶段评审等。中国航天业经历了一个起伏跌宕的发展过程，面对新形势的挑战和跨越式发展的要求，必须运用钱学森提出的从定性到定量综合集成的方法。中国航天科技工业，在改进和完善工程系统工程方法的同时，也在社会系统工程方法研究上跨出实质性的一步。

一、航天系统工程方法

中国航天系统产品是指运载火箭，人造卫星，载人飞船和导弹武器系统，也称为航天型号。系统工程从需求出发，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，开发出一个总体性能优化的系统产品。一个航天型号的研究、设计、试验、生产是一个复杂的组织管理过程，必须考虑到从概念研究到部署使用全寿命周期活动的要求；必须综合集成多种学科和专业技术，包括一些必须事先攻关的前沿技术；必须组织成千上万科技人员和管理人员在十几年的研制过程中协同工作；同时，必须保持在整个研制过程中技术、经费和进度的协调进展。系统工程方法是组织管理这些航天型号系统研制工作的唯一选择。

在国外对系统工程讨论和实践的同时，中国航天科技工业通过研制管理实践同样获得了对这种系统方法的认识。从早期自行设计的型号开始，中国航天的科技和管理人员就在进行着系统工程方法的探索，并总结了一套具有中国特色、符合科学规律的工作规范，为中国航天系统工程方法的发展奠定了基础。1978 年钱学森在文汇报上发表的文章《组织管理的技术-系统工程》，是对中国航天创建和发展时期系统工程实践的总结和理论上的升华。今天在中国航天科技工业，重视系统总体作用，按研制程序开展工作，充分进行地面试验，严格控制技术状态，强调阶段评审，无论对于科技人员和管理人员都已经是一种自觉的行动。

总体设计部的设置强调了系统分解与集成的思想，是中国航天系统工程方法的重要体现。总体

设计的基本任务是从用户任务的需求和上层的系统要求出发，在预算、进度和其他限制条件下，设计一个整体性能优化的系统。总体首先确定系统在更大的系统环境下的位置和环境关系，再从整体优化的角度权衡分析和确定系统的功能及性能；然后将它们分解到各个分系统，又从整体优化的角度协调分系统与总体，分系统与分系统之间的接口关系，设计并组织系统试验和验证，最终完成系统的整体集成。总体工作面对高水平的使用或技术要求，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，利用原有的经验，发挥聪明才智，最终实现的是整体功能的涌现和优化。按照系统论的观点，即在整体上实现了“1+1>2”。

严格按研制程序办事来自历史的经验和教训。复杂系统从任务需求到系统验证交付是一个很长的研制过程。研制程序的划定使得系统研制从需求出发，设计逐步细化，最终演化形成一个整体性能优化的系统，是一个有序的逐步递进的研制过程。它保证了一个复杂系统的设计从一开始就考虑到了所有的专业和使用环境的要求，不会最后出现方案性的失败，它也保证了一个长周期的研制过程能够分阶段来实施对目标的跟踪和控制。

工作分解结构描述了产品研制所要开展的全部工作，是一个按产品层次分解的树状结构，在内容上包括系统产品和保障两个部分。产品部分的各层次分别代表系统、分系统、部件等产品的研制工作；保障部分包括集成与实验，工程项目管理，保证性设施与设备等。工作分解结构的每个子项都是一个工作包，都有确定的技术要求，都是一个独立的成本核算单元，一个独立的责任单元。

技术状态管理，或称配置管理保持技术开发活动有序进行，控制重大的更改。基线概念是技术状态控制的基础。基线是在一个技术开发层次完成以后对系统状态的描述。后一个开发层次的重要研制活动，应当在上一级基线建立，稳定和受控之后才能开始进行。在系统级要求确定以后，形成了系统级规范文件，同时系统级的基线（功能基线）也随之而建立。系统级要求传递到低层次子项，形成子项的初步设计要求，子项的性能规范确定以后，就构成了系统的分配基线。然后，系统向详细设计进展，生产基线也开始随之开始建立。技术状态控制是对更改过程的管理，是在基线建立以后对系统或子项目更改时，所履行的申请、评估、批准等一系列工作程序。这个程序审定更改的必要性，保证更改对所有相关环节的影响都得到认识。

航天系统从概念到产品要经历一个很长的开发过程。在每一个研制层次完成之后，必须评价是否已经满足了预期的技术经济目标，为是否可以进行下一个层次的研制提供决策依据。对于采办方和承制方，阶段评审都是至关重要的控制手段。系统工程方法中常见的几个重要阶段评审的例子是系统定义评审(SDR)、初步设计评审(PDR)和关键设计评审(CDR)。

评审是在各层次上进行的一个过程而不是一个单独的事件。为了真正达到评审的预期目标，必须明确评审的准则，全面准备数据资料；选择相关方面合适的人选；评审会前，评审委员应当提前分析研究资料，准备意见和建议；会上，各种观点和建议在评审会上充分讨论，最后由评委会做出

书面评审结论；会后，评审意见要周知有关方面。

信息是系统工程工作的对象，也是系统工程管理的基础。计划与控制过程中所使用的许多工具和方法，例如计划流程、技术流程、进展报告、调度会议、以及甘特图、PERT/CPM 进度网络图、成本曲线图、资源分配表和资源负荷图等软件工具，目的都是保证经费、进度和技术目标按预定的方向均衡进展，而适当的信息在适当的时间到达适当的位置是这些工具和方法发挥作用的前提。

二、航天科技工业的系统分析

系统工程方法是世界航天的共识，也是中国航天通过研制实践得到的宝贵财富。依靠广大科技人员的创造性劳动和系统工程方法，一个又一个新的概念演化成为满足使用要求或者技术发展需要的航天系统。中国航天从创立到发展五十年以来，在导弹、火箭、卫星、载人飞船等历次大型首飞试验中，绝大部分在总体方案上一次成功，正是中国航天系统工程方法成功运用的最好证明。

中国的航天科技工业依靠“自力更生、艰苦奋斗、大力协同、无私奉献、严谨务实、勇于攀登”的航天精神，在全国各条战线的大力支持和协同下，经历了二十世纪六十年代的艰苦创业，到八十年代仍然平稳发展，大型试验计划陆续取得成功，航天技术取得了突破性进展。然而，从九十年代初期开始，航天型号飞行试验连续失利，甚至发生箭毁人亡，到了没有退路的地步。严峻的形势，巨大的压力，使中国航天人再次激发起强烈的事业心和责任感；从高层领导、资深专家到基层科技、管理和生产人员呕心沥血，各尽其责，制定了“28 条”、“72 条”、“双五条”等一系列有效的技术和管理措施，终于扭转了局面，走出了低谷。从 96 年最后一次失败到现在，大型飞行试验已经几十次连续成功，再次呈现稳定发展的局面。

中国航天科技工业起伏跌宕的发展历程所反映的复杂演化规律，单从某一个角度是很难深刻认识的。因为在这里我们面对的航天科技工业是一个复杂的社会系统，或者一个开放的复杂巨系统。

在特定历史条件和计划经济环境下发展起来中国航天科技工业，最初注重的是航天技术的突破，并逐步发展形成一整套重点针对技术成果的组织管理方法，这对于我国航天事业在起步和初步发展阶段获得巨大的成功起了决定性作用。随着外部社会经济体制、国家的需求以及科学技术水平的变化，系统内部的组成要素，包括任务、设施、物资、技术、信息和管理方法，特别是作为系统复杂性重要根源的人都会表现出新的不适应，从而影响到系统的宏观演化规律。为了深入理解和认识航天科技工业不断发展、不断追求新的平衡的历程，必须以系统科学的观点，运用钱学森提出的从定性到定量综合集成的方法来分析这种复杂的发展规律。在试图描述系统复杂性的本质特征及其产生机理的时候，当前首先要重视对系统全面深入的定性认识和分析，充分认识国内外政治、经济、技术大环境的发展变化，分析航天科技工业的系统特点和它的演化过程，研究系统内部要素，特别是

人的复杂心理现象、不确定的行为方式和非线性的相互关系与环境的相互作用所产生的宏观影响，从而得出一些系统性、指导性的意见。在改进和完善工程系统工程方法的同时，也在社会系统工程方法研究上跨出实质性的一步。

今天中国的航天技术已经从试验阶段走向应用阶段，国民经济建设、科技进步和国家安全对航天型号在技术水平上、质量上、数量上也提出了更高的要求。为了保持航天的持续发展，有必要重新认识航天科技工业整体发展目标，进一步完善和改进管理方法，以提高工作效率，缩短研制周期、合理利用资源，降低研制成本、满足性能指标，确保产品质量，进而实现中国航天的跨越式发展。

参考文献：

- [1]. Blanchard B S, System engineering management[M], New York, John Wiley, 1998
- [2]. Kossiakoff A, Sweet W N, Systems Engineering :Principles and practice[M], New York , John Wiley, 2003
- [3]. 王希季, 卫星设计学[M], 上海科学技术出版社, 1997
- [4]. 许国志, 系统科学[M], 上海科技教育出版社, 2000
- [5]. 于景元, 周晓纪, 综合集成方法与总体设计部[J], 复杂系统与复杂性科学, 2004. 1, 1 (1) , 20-26