

# 航天复杂巨系统工程管理体系及实施初探

李明华

(中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

**摘要:** 当前航天重大工程研制系统呈现出复杂性、巨型性、高风险性、开放性、技术与管理紧耦合等特点, 可视作航天复杂巨系统工程。为保证完成工程研制、实现技术突破并解决科学问题, 需要适应航天复杂巨系统特点构建相适宜的管理体系。基于长征五号等型号研制的管理实践, 构建航天复杂巨系统模型, 提出航天生态的概念; 构建航天复杂巨系统工程的管理体系模型, 阐释其四层管理体系的内涵, 分析由“管”到“理”的动态性特点; 提出流程精细化管理是管理体系构建和落地的关键所在。对丰富航天管理理论, 提升航天重大任务管理能力具有积极意义。

**关键词:** 系统工程; 航天; 复杂巨系统; 管理体系; 创新生态

中图分类号: V57

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2020)02-0155-09

六十余年来, 几代航天人接续奋斗, 探索航天工程研制规律, 实践系统工程理论方法, 实施了具有中国特色的科学管理模式, 有力地保障了航天事业的发展, 积累了宝贵的实践经验和丰富的思想资源。新时期, 国家战略需求及战略目标推进、科学技术进步、创新能力提升及工程能力、管理方法等方面的诸多变迁与发展, 促使以长征五号为代表的重大工程趋向复杂、巨型发展, 逐步呈现出航天复杂巨系统的特点, 赋予了航天系统工程新的内涵, 也对传统的科研生产管理提出了挑战。

## 1 研究基础

航天系统工程是利用现代科学技术的一切成果, 以系统全生命周期的综合效果为目标, 对航天工程项目的全过程进行合理筹划、设计、试验、实施和控制的一门专业工程技术和组织管理技术<sup>[1]</sup>。作为系统工程理论、方法与技术在航天领

域的具体应用, 其成功实践证明系统工程的科学性和有效性<sup>[2]</sup>。随着研究的不断深入, 钱学森等认为科学技术的社会化引发了层出不穷的工程复杂性问题, 将系统工程理论延伸至“开放的复杂巨系统”理论, 他指出, 一个系统如果子系统种类很多并有层次结构, 它们之间关联关系又很复杂, 这就是复杂巨系统<sup>[3,4]</sup>。跟美国主要偏重定量研究和英国偏重定性研究有所不同, 钱学森等学者坚持发展综合定量和定性方法, 而不是偏颇于某个极端, 以解决现实中组织管理或更大的经济社会发展问题<sup>[5]</sup>。

系统研究与组织管理研究很早就有结合。Simon 不仅深入研究了复杂系统还把相关理论引入到管理决策的研究中<sup>[6]</sup>。Burgelman 借助复杂系统理论研究企业的战略变革与组织演化过程, 提出了组织内生态系统理论框架<sup>[7]</sup>。我国学者运用系统理论研究组织管理问题也形成了不少成果<sup>[8,9]</sup>。于景元指出, 在市场经济体制下, 航天型号研制

系统是由不同利益主体构成的, 如何组织管理好这个系统显得更为复杂, 需要行政和市场并重的方式<sup>[10]</sup>。席酉民等提出了解决复杂组织与管理问题的和谐管理理论框架, 开展了组织管理生态系统(包括区域经济社会生态系统、组织群落、组织内生态系统等不同尺度上的生态系统)的演化机制研究<sup>[11]</sup>。

现有研究为航天复杂巨系统工程管理的研究奠定了理论基础, 然而, 无论在理论还是实践上, 仍缺乏对航天复杂巨系统管理体系的具体分析。本文在分析航天复杂巨系统工程特点基础上, 构建了航天复杂巨系统结构模型以及相应的管理体系模型, 并指明了其实践方向。

## 2 航天复杂巨系统主要特征

新时期, 落实建设航天强国的重大战略部署要求航天系统全面提升能力; 大规模空间开发和空间科学探索需要航天系统提升外层空间拓展能力和规模; 技术革命和军事变革对新型新质航天武器装备研制提出新要求; 中国特色社会主义市场经济条件下的新型举国体制, 要求在战略导向方面兼顾国家重大需求和国计民生落脚点, 在资源配置方式上做到计划和市场两种手段并重, 在协同攻关方面加强国内外合作、实现开放创新; 随着社会环境的不断发展, 人的价值理念和诉求呈现多元化特点。这些时代背景的变迁催生了航天复杂巨系统的出现, 并使其呈现出如下特征。

一是复杂性。包括客户需求复杂、技术复杂、研制过程复杂、试验验证复杂、管理复杂、跨部门跨领域跨学科协同复杂、工作环境复杂、涉及科学问题复杂或未知等多个方面。二是巨型性。其不仅子系统数量巨大, 且型号研制跨领域、跨系统, 工作链条长, 参与人员多, 研制周期长, 航天内外部多学科、多专业协作广泛。三是高风险性。包含对系统可靠性和安全性要求高所带来的高技术风险, 以及由于研制周期长、涉及单位多带来的管理风险。四是科学研究、技术攻关、

工程实施、协同创新、试验验证、管理保障高动态紧耦合。五是开放性。与环境互动互应, 是系统产生复杂性的必要条件。从最初局限于国有军工系统的全国大协作, 到如今立足国内、国际两个市场, 与政府、用户、高校科研院所密切互动, 与民营企业优势互补, 呈现出开放融合的态势。

例如, 长征五号火箭涉及力、热、电磁、机械、流体、控制等多个学科和上百种专业, 全箭飞行达 2204 个动作, 配套单机 1349 项、2350 台套, 1700 余台套为新研产品, 仅 1 次外协外包就涉及零部件产品 22423 种, 涉及配套单位 1215 家, 民营企业、外企占比达到 44.7%, 使其研制和管理呈现出与以往不同的特性。

## 3 航天复杂巨系统结构模型

### 3.1 一般航天系统工程方法

航天系统工程方法是从需求出发, 综合多种专业技术, 通过分析、综合、试验的反复迭代过程, 开发出一个满足使用要求、整体性能优化的系统。在 20 世纪下半叶, 已形成许多经典系统工程方法, 如霍尔三维结构。在航天实际应用中也出现了一些延伸, 整体理念可用图 1 所示的三维结构图来表征。坐标系每一点都对应着某一研制阶段、认识阶段和某项技术专业, 代表一种工作

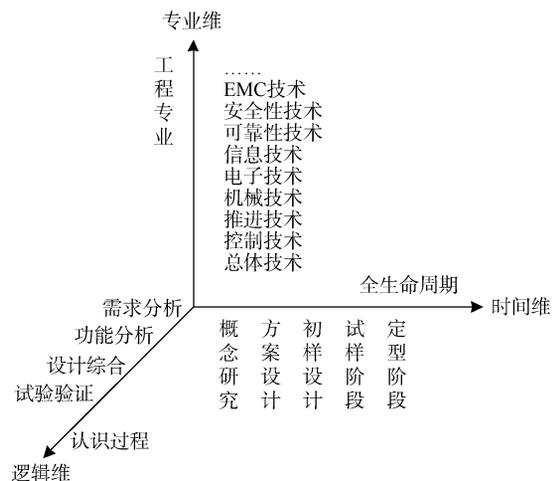


图 1 航天系统工程方法的三维结构<sup>[12]</sup>

状态。每一点（即每一个工作状态）都无法脱离管理，因此，管理可视为航天系统工程的第四维度。

### 3.2 航天复杂巨系统结构

相较于一般航天系统工程而言，航天复杂巨系统呈现出的高风险性、巨型性及复杂性等显著

特点，带来技术、进度、认知维度的大量不确定性，相应地，三维认知的结构被延长。围绕核心而延长的三维结构与管理维度紧密耦合，从而包拢形成了航天生态的概念。航天生态是航天复杂巨系统的灵魂，在生态的包拢下，航天复杂巨系统呈现出同心状圈层构造（如图2所示）。

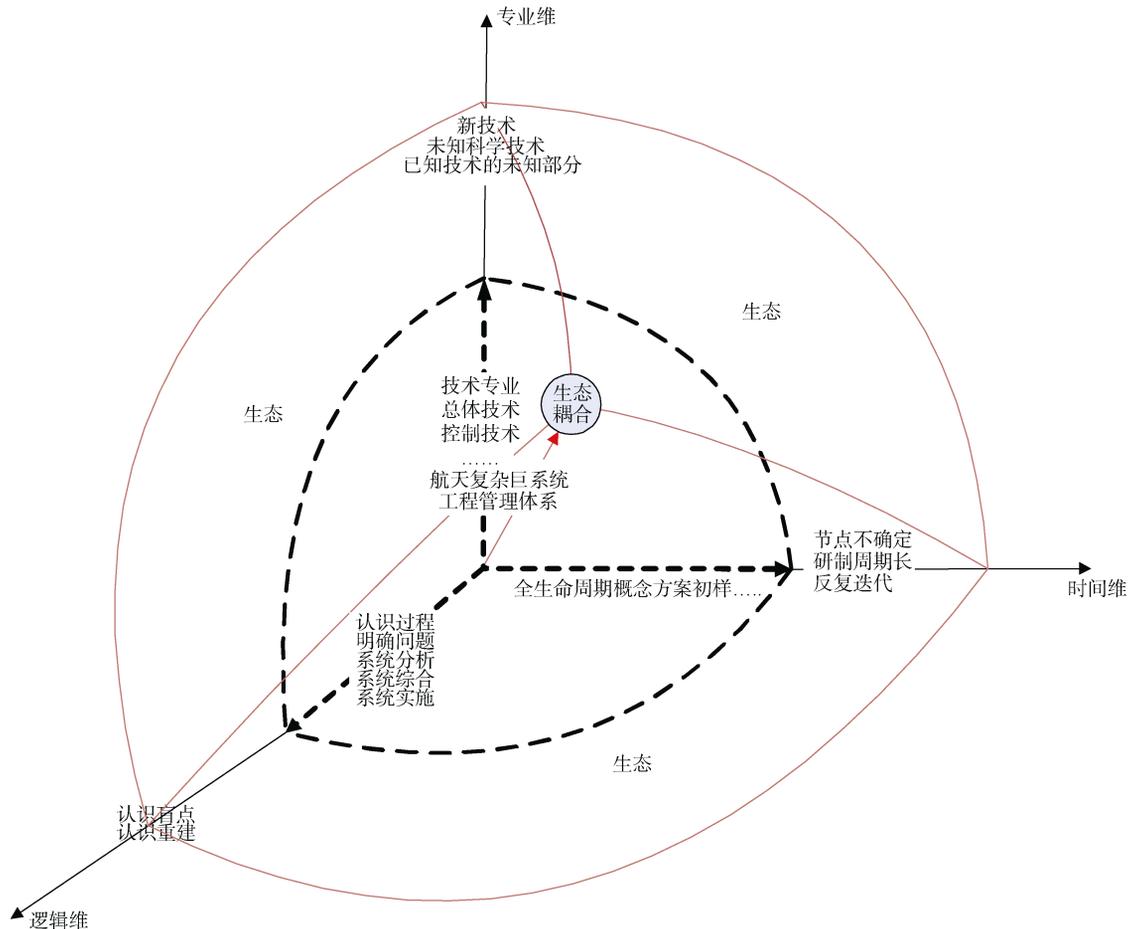


图2 航天复杂巨系统结构示意图

### 3.3 航天生态结构

航天管理体系在航天生态的自组织、共同进化、涌现性的驱动下，不断适应航天重大工程成功的需求而演变、运行。

航天生态是指在一定时空内，由生态主体和外部环境构成，以航天精神为价值导向，以解决科学问题、激发技术创新、完成工程研制为目的，以合作共生为基础，通过物质、能量和信息流动的方式，实现资源共享、优势互补、风险共担的

相互依赖、相互作用的动态平衡系统。航天生态包含四类要素：生态主体、协同平台、协同环境和交互关系。生态主体又分为航天企业（核心主体）、生态协同单元和用户（如图3所示）。

航天企业在整个生态中起主导作用，保障能量（这里指资源和资本）循环，整理和传递信息，形成物质（这里指最终产品）；协同单元把接收到的能量、信息转化成配套产品和成果，消耗能量；用户获取最终产品，产生新的能量，形成新的循

环激励；协同环境直接或间接影响着生态的每一项活动，良好的环境促进生态的有序演化；协同平台是生态中的桥梁，由航天企业搭建和主导，是生态各类异质性组织开展互动合作的平台，主要包括技术标准、信息共享机制和合作渠道等；交互关系包

括物质、能量、信息的交互，以及行为、方法、效果的交互，前者是交互的基础，后者是交互的作用。在无重大型号任务时各主体自我完善，紧密联系，无序发展；在重大型号任务牵引下涌现出协同效应，任务结束后返回常态，以此循环发展。

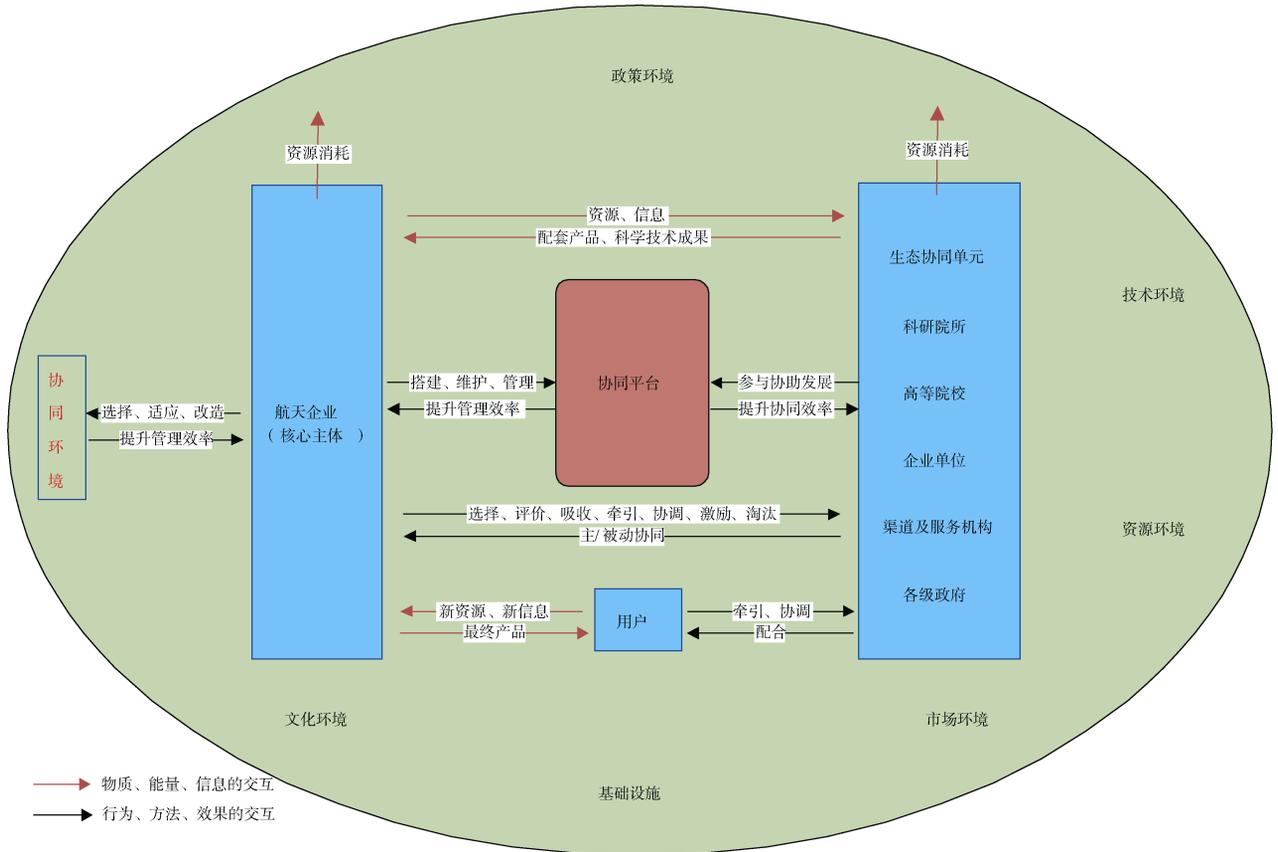


图3 航天生态结构图

构建企业生态系统是现代企业保持蓬勃发展、持续创新和基业长青的重要手段<sup>[13]</sup>。航天生态是航天事业历经六十余年的丰富积淀而构建、形成并逐步发展起来的，是航天复杂巨系统区别于早期航天系统的根本所在，它促进了型号完成工程上、技术上、科学上和基础能力建设上的重要使命。我国航天企业在生态构建上积累了一定的实践经验，并且已经有效促进了相关航天重大工程的完成。

面对某水下重大工程带来的航天技术和管理的机遇和挑战，中国运载火箭技术研究院立足国家顶层需求，作为联结国家意志和市场机制的桥

梁，以其为核心组织，构建多元主体参与的、具有多层次协作关系的产业协同生态网络，打造保证知识共享的开放环境，践行系统工程思维和集智协同攻关理念，引入市场机制，构建水下发射大型固体火箭的新型组织平台，有力支撑了项目成功研制目标的圆满实现。

#### 4 航天复杂巨系统工程管理体系

毫无疑问，包含生态的航天复杂巨系统工程对传统航天管理体系提出了新要求。航天复杂巨系统工程的管理体系不仅包含了一般系统工程管理的不确定性管控，更加强调不确定性和生态系统

的管理。同时，通过构建生态、引导生态和控制生态，使航天生态高质量运转，进而对管理体系反馈重要资源，提升管理效率，最终达到航天技术全面突破、认知全面到位、航天重大工程研制完成的核心目标。已自组织构建的生态系统也将对后续工程研制产生反哺助推作用。

航天复杂巨系统工程管理体系由四个层次、共十二个管理子体系组成。需要强调的是，这些管理子体系发挥的作用不只是局限于复杂巨系统的核心企业如航天企业内，而是延伸到围绕复杂巨系统实施而构建的整个航天生态中。航天复杂巨系统管理体系构成如图 4 所示。

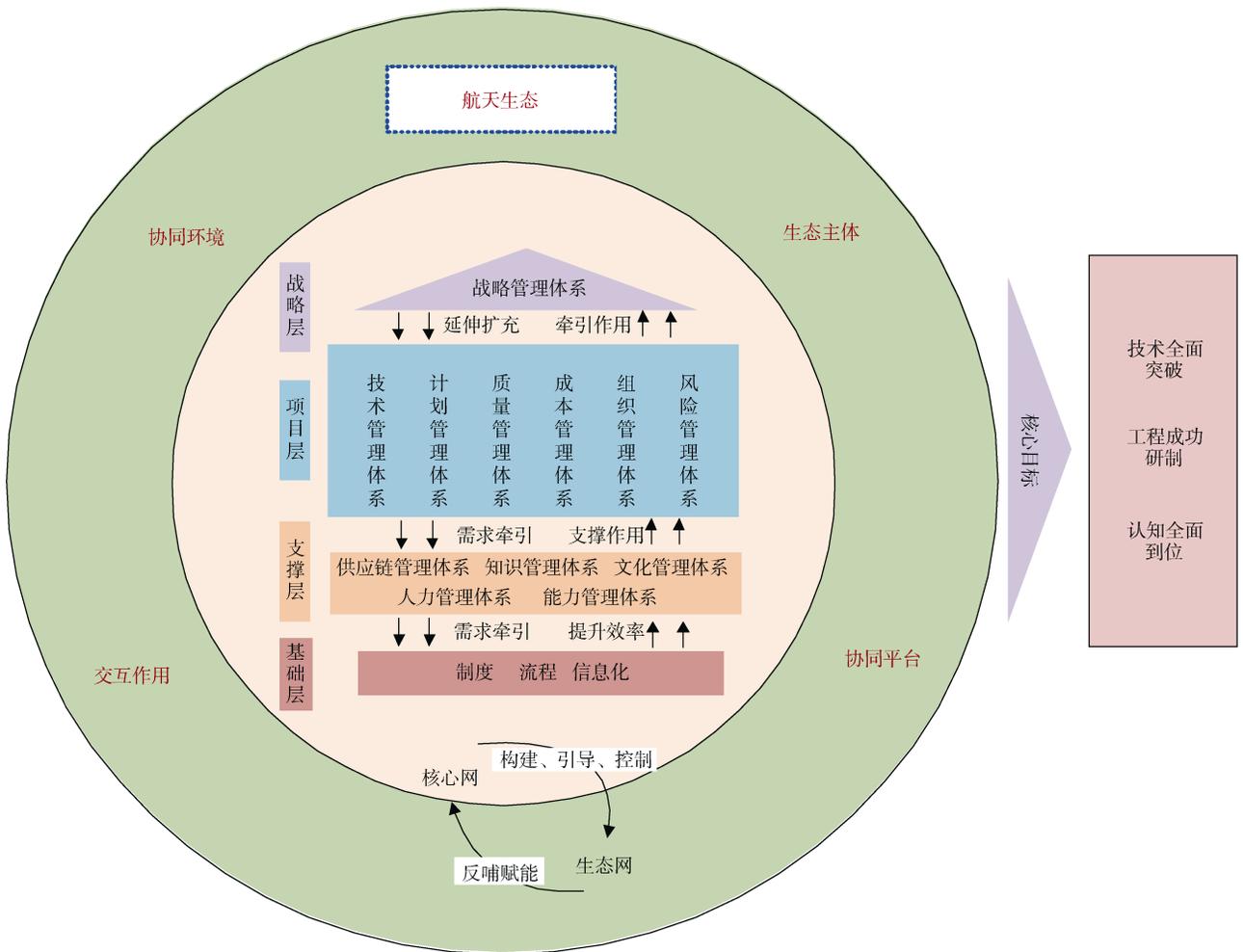


图 4 航天复杂巨系统管理体系结构和运行机理图

#### 4.1 战略层管理体系

战略层统筹谋划、指导，实现全局目标，主要包括战略管理子体系。

战略管理子体系是航天企业或组织在一定时期为确保战略目标实现，规划重大任务，制定重大举措，调配组织资源，实施评价考核的管理行为及其逻辑。

中国运载火箭技术研究院自制定第一本组织级战略（2006~2020 年）以来，不断探索战略管理的理论与方法，初步建立了基于“5-3-1”（五年规划、三年滚动计划及年度综合经营计划）规划计划体系为内核的战略闭环管理体系。中国运载火箭技术研究院战略闭环管理体系始于战略，并通过体系运转，集合力量、配置资源，最终确保战略目标实现。

## 4.2 项目层管理体系

项目层侧重于项目实施过程中的项目全过程全要素管理, 主要包括技术管理子体系、计划管理子体系、质量管理子体系、成本管理子体系、组织管理子体系、风险管理子体系, 这 6 个子体系分别围绕技术、质量、风险等要素进行综合管控, 支撑航天复杂巨系统工程按时、保质、高效实施。

技术管理子体系——是对航天企业的技术开发、产品开发、技术改进、技术合作以及技术成果转化等进行计划、组织、协调和控制等一系列管理活动的总称。

计划管理子体系——是对航天企业在计划期内应达到的产品品种、质量、产量和产值等生产活动指标, 生产进度及相应安排的管理, 它是航天企业计划期生产活动的纲领性方案, 是企业生产管理的主要依据。中国运载火箭技术研究院遵循统筹协调、科学可行、经济高效的原则, 采用“N-P-5-3-1”的计划管理体系。N 是指面向产品全寿命周期的单一型号全过程计划; P 是面向用户需求和合同履约的单一项目全过程计划, 是该项目的目标、工作内容和实施计划; 5-3-1 是面向组织的多项目、阶段性单位计划, 是院及各承研承制单位在多项目、多要素统筹协调的基础上形成的, 保障各项目任务全面完成, 支撑组织综合经营、能力提升和企业发展的计划目标和策划。

质量管理子体系——是以整体绩效提升为目标、一体化运营、开放融合和可持续发展的组织质量管理体系。包括面向发展的质量战略与质量文化, 面向组织的基础质量管理, 面向应用的质量方法与工具以及面向产品的型号产品质量保证。在处理水下发射固体运载火箭等重大复杂巨系统工程问题时, 坚持抓住主要矛盾的原则, 也就是认清和吃透问题机理, 找准问题发生的原因。首先, 全面、准确地搜集故障现象、结果数据等; 其次, 对试验数据进行分析整理, 形成故障的异

常事件表, 明确独立事件和关联事件; 第三, 结合故障树分析(FTA)、飞行时序动作分析与确认、FTA 与 FMEA 结合的方法等, 针对独立事件找出其与系统正确响应结果的差异; 第四, 系统分析造成这种差异的系统内部、系统之间、内外部环境等可能的因素, 其中包括没有认识到的因素, 进而综合形成需要进一步分析研究的问题。

成本管理子体系——是航天企业或组织在成本方面指挥、控制、协调等活动。通常包括制定成本方针和成本目标, 开展成本控制与成本保证, 进行成本分析和成本改进。

组织管理子体系——对相关利益主体所构成的全团队的组织与管理, 包括技术组织机构、管理机构的设立, 运行模式的选择以及评估等。其终极目标是不同部门之间和不同系统之间形成合力, 使各系统成为纵横有序、衔接紧密、运筹科学的有机整体, 达成具有高度适应性、自组织运转、高动态发展的系统。

风险管理子体系——以降低或消除事件的不确定性对科研生产的消极影响, 提升组织应对不确定事件的能力等为目标的相关管理要素集合, 从广义层次上看, 包括全面风险、领域风险、型号风险及组织风险, 还有具有国防科技工业特色的保密风险和法律风险。从狭义上看, 主要包括技术风险、经费风险和进度风险。例如, 飞行时序动作分析与确认是评价与控制目标系统技术风险的重要手段, 以发射准备、点火飞行结束的时序过程为出发点, 以每一个飞行时序动作为牵引, 对每个动作或影响成败的关键环节的输入条件、输出结果、设计指标及满足情况、设计裕量、可靠性措施、环境及相关影响、试验验证及仿真计算等工程分析结果进行系统梳理, 查找需要进一步分析确认的问题, 从而消除可能存在的技术风险和隐患, 最终得出从设计结果到飞行实现能够完整闭合的仿真推演分析结论。目前, 已形成标准并在航天各型号广泛应用。

### 4.3 支撑层管理体系

支撑层强调项目的全方位保障，主要包括知识管理子体系、供应链管理子体系、文化管理子体系、人力管理子体系以及能力管理子体系，这5个管理子体系分别围绕知识、供应链、文化、人力以及能力等管理要素进行指挥和控制，为航天复杂巨系统工程的实施提供一系列基础保障条件。

知识管理子体系——围绕实现“分散的知识集中化，个体的知识组织化，隐形的知识显性化，孤立的知识共享化”这一目标，系统梳理标准规范、专利，开展隐性知识挖掘，强化内外部知识协同，逐步建立支撑型号产品研制和企业管理的航天特色知识体系；以知识的获取、共享、应用为主线，以知识管理信息化系统建设为抓手，构建全面的知识管理体系。

供应链管理子体系——其管理范围聚焦在供应商管理、外协外包、采购管理，包括元器件、原材料的选择评价，是在航天企业一体化体系框架之下，通过成熟的供应链管理方法和理论，采取有针对性的管控措施，确保供应质量、效益、效率的有机平衡，有力支撑航天科研生产任务，打造以供应质量为核心，兼顾效益与效率，快速响应顾客需求的供应链管理体系。

文化管理子体系——在航天科研生产管理运行过程中，通过文化规划、策划和实施，发挥导向、激励、约束、凝聚、融合、辐射作用，形成员工与企业共同发展的利益共同体，缔造共同的价值认同，提高航天企业和员工核心竞争力，实现航天企业的可持续发展，为建设航天强国提供文化引领和支撑。

人力管理子体系——突出“以价值创造者为本”的价值导向，以推动组织能力提升和员工价值增长为核心任务，以提升人力资源效能为目标，以推进人力资源管理工作转型为手段，发挥人力资源政策与规则的导向作用，加强核心人才队伍

建设，优化人才资源配置与培养机制，强化薪酬正向激励，驱动组织创新与发展，为航天企业市场化转型和战略发展提供人才保证和智力支持。

能力管理子体系——围绕航天科研生产开展的基础能力体系形成和能力全面持续提升相关活动、方法、流程及制度，包括综合硬能力统筹发展规划与组织实施、区域统筹建设、实物资产管理与效能评价、先进制造技术推广应用以及信息化共性平台建设等内容。其目标是深入推进体系效能型能力建设，加快构建一体化的能力体系布局，加强能力与战略、任务、效益的充分对接，加强内外、军民资源能力的全面统筹，加强并推动两化深度融合，构建军民共需、高效利用的资源共享融合的能力体系。

### 4.4 基础层管理体系

基础层提升航天复杂巨系统工程管理效率，是确保战略层、项目层及支撑层12个管理子体系落地的重要一环，主要包括制度、流程和信息化三个方面。战略层、项目层及支撑层的12个管理子体系的落地实施，都需要按照问题导向和发展导向，及时将管理子体系中的有效经验固化为流程、制度，并通过信息化手段进一步提高效率，这也是精细化管理的要义所在。

## 5 航天复杂巨系统工程管理体系实施

体系好，贵在落地。构建好的航天复杂巨系统工程管理体系，如果没有真正融入到航天科研生产实际工作中，那么，体系建设和运行的实际质量和效果往往达不到预期。体系构建和体系运行之间存在“两张皮”现象，体系文件与实际科研生产过程脱节，且传统管理体系建设通常由单个专业职能部门负责，高高竖起的职能部门壁垒及其形成的信息孤岛，通常一定程度上割裂了管理体系的统一性。如果在体系建设过程中不注重这些具体问题，那么管理体系落地的有效性就可能大打折扣。毫无疑问，重细节、重过程、重基

础、重具体、重落实、重质量、重效果的精细化流程建设,是航天复杂巨系统工程管理体系实施的重要抓手。就中国运载火箭技术研究院而言,航天复杂巨系统工程管理体系是一个分层分级分类的立体网状管理体系,其实施涵盖对火箭院本身以及与火箭院上下游接口的相关利益主体的管理要求。在这个网络中,串起各层级体系的是柔性化工作管理流程体系,将每个工作流程节点都嵌入相关的精细化制度规范要求,才能支撑管理体系的有效落地<sup>[14]</sup>。

在航天复杂巨系统工程管理体系实施过程中,引入精细化流程管理理念,将“流程管事、制度管人”的理论有效运用于航天科研生产,探索科研生产流程精细化建设的方式方法,将承载着管理思想、管理原则、管理经验和方法的有关规章制度、标准规范,固化到航天复杂巨系统工程研制流程中,用流程的系统工程思维重塑航天科研生产体系,形成一套完整的方法论。

面向航天复杂巨系统科研生产管理体系需求,充分考虑航天科研生产现行组织体系、流程体系和产品体系特征,以针对性、通用性和体系化为原则,构建航天科研生产精细化流程管理体系,提出了包含一个闭环管理体系和三个模型的方法论框架,其中,闭环管理体系是涵盖需求分析、流程梳理、流程再造或优化、流程精细化控制以及流程评价固化5个环节的循环迭代闭环管理工作框架;三个模型分别为面向产品-过程-组织的流程梳理模型、基于岗位与过程两个维度的流程构建和优化模型、与岗位高度耦合的制度规范体系六类规定性模型。

航天复杂巨系统工程管理体系的落地,还需要借助信息系统的规划、集成来实现。柔性工作流程中的关键控制环节和管理要素,包括输入输出文件、工具软件、工作标准和制度表单等,可通过信息化平台为科研生产人员提供“有效运行的科研生产数据流和信息流”,同时,制度规范及标准体系通过信息化平台嵌入到流程的各个节点

和岗位中,确保工作流程步骤和岗位操作有据可依而且具体便捷,为实现科研生产活动的高度协同和有效管控提供基础性保障。

## 6 结语

经过几代人的探索和总结,我国航天工程实施了具有中国特色的科学管理模式,保障了航天事业的发展。随着时代的变迁和发展,当前航天重大工程研制系统呈现出复杂性、巨型性、高风险性、开放性、技术与管理紧耦合等特点,可视作复杂巨系统工程。对航天生态的构建、引导和控制是复杂巨系统工程有别于传统系统工程的重要特征,需要适应航天复杂巨系统特点构建相适应的管理体系。基于长征5号等型号研制的管理实践,构建了涵盖4层次12个管理子体系的航天复杂巨系统工程管理体系模型,并提出流程精细化管理是管理体系构建和落地的关键所在。站在航天工业发展的新时期,运用系统科学理论和管理理论,结合航天复杂巨系统研制管理实践,总结提炼具有航天特色的复杂巨系统管理成果,将航天系统工程扩展提升到航天复杂巨系统工程,将推动新时代航天管理理论的发展,并进一步为实践提供新的理论指导。鉴于篇幅所限,本文仅提出了航天复杂巨系统工程理论框架,后续将结合航天科研生产中的具体案例再做深入研究,以期为新时期航天复杂巨系统工程管理提供更详实的参考借鉴。

## 参考文献

- [1] 花禄森. 系统工程与航天系统工程管理[M]. 中国宇航出版社, 北京, 2010: 36.
- [2] 王礼恒. 中国航天的科学管理[J]. 中国工程科学, 2006(11): 1-6.
- [3] 于景元. 创建系统学——开创复杂巨系统的科学与技术[J]. 上海理工大学学报, 2011, 33(6): 548-561, 508.
- [4] 钱学森, 于景元, 戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论[J]. 自然杂志, 1990(1): 3-10, 64.
- [5] 顾基发. 物理事理人理系统方法论的实践[J]. 管理学报, 2011, 8(3): 317-322, 355.

- [6] Herbert A S. The architecture of complexity[M]. Proceedings of the American Philosophical Society. 1962.
- [7] Burgelman R. Strategy as vector and the inertia of coevolutionary lock-in[J]. Administrative Science Quarterly, 2002, 47(2): 325-357.
- [8] 王凤彬, 郑腾豪, 刘刚. 企业组织变革的动态演化过程——基于海尔和IBM纵向案例的生克化制机理的探讨[J]. 中国工业经济, 2018(6): 174-192.
- [9] Jing R T, Van de Ven A H. A Yin-Yang Model of Organizational Change: The Case of Chengdu Bus Group.[J]. Management and Organization Review, 2014, 10(1): 29-54.
- [10] 于景元. 系统科学和系统工程的发展与应用[J]. 科学决策, 2017(12): 1-18.
- [11] 席酉民, 刘鹏. 组织管理与系统工程研究回顾与展望[J]. 系统科学与数学, 2019, 39(10): 1514-1520.
- [12] 郭宝柱. “系统工程”辨析[J]. 航天器工程, 2013, 22(4): 1-6.
- [13] 陈劲. 企业创新生态系统论[M]. 科学出版社, 北京, 2017: 3.
- [14] 李明华. 破解复杂巨系统难题[J]. 企业管理, 北京, 2020(2): 88-91.

## Preliminary Exploration of Engineering Management System of Complex Giant Aerospace System and Implementation

Li Minghua

(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Existing aerospace engineering systems are characterized by their complexity, gigantic size, high risk, openness, and tight coupling of technology and management, all of which can be considered as aerospace complex giant system engineering. To ensure the completion of project development, technological breakthroughs, and scientific problem-solving, it is necessary to adapt to the characteristics of aerospace complex giant systems and build a suitable management system. Based on the management practices of the Long March V development, a complex aerospace giant system model is constructed, and the definition of aerospace ecology is proposed. A management system model for a complex aerospace giant system project is developed, the implication of its four-layer management system is explained, and the dynamic characteristics of “management” are analyzed. It is proposed that delicacy management of the process is crucial to the construction and implementation of the management system. It has the advantage of enriching aerospace management theory and improving the management capabilities of major aerospace missions.

**Key Words:** system engineering; aerospace; complex giant system; management system; innovation ecology