

# 航天产业数字化转型发展战略研究

孙璞<sup>1</sup>, 袁维佳<sup>2</sup>, 孙凤丽<sup>1</sup>, 石倩<sup>2</sup>, 石胜友<sup>2</sup>, 王国庆<sup>3\*</sup>

(1. 中国航天系统科学与工程研究院, 北京 100037; 2. 中国航天科技集团有限公司信息中心, 北京 100048;  
3. 中国航天科技集团有限公司, 北京 100048)

**摘要:** 数字化转型将促进制造业新质生产力发展, 航天产业作为高端制造业的重要代表, 在新质生产力发展中发挥着不可替代的作用; 在重大工程更为复杂、新技术快速迭代的形势下, 航天产业发展模式面临挑战, 亟需推进数字化转型以赋能高质量发展、支撑航天强国建设。本文提出了航天产业数字化转型的概念, 研判了发展需求并分析了面临的挑战; 阐述了航天产业数字化转型的基本思路, 论证了面向2040年的各阶段发展目标; 提出了航天产业数字化转型的发展路径, 明确了以数智协同的研发创新体系、航天产品智能生产新模式、基于工业互联网的数字化供应链体系、新型基础设施及网络安全、数字化转型基础保障体系为主要内容。建议加快推进航天产业“一张网”工程建设、开展航天人工智能大模型技术研究与应用试点、建设航天数据流通交易试验区、构建安全可控的自主工业软件生态、培育航天产业数字化人才队伍, 据此构建航天产业新发展模式, 全面推进航天产业高质量发展。

**关键词:** 航天产业; 数字化转型; 新质生产力; 数字航天

**中图分类号:** V11 **文献标识码:** A

## Digital Transformation Strategy of Aerospace Industry

Sun Pu<sup>1</sup>, Yuan Weijia<sup>2</sup>, Sun Fengli<sup>1</sup>, Shi Qian<sup>2</sup>, Shi Shengyou<sup>2</sup>, Wang Guoqing<sup>3\*</sup>

(1. China Aerospace Academy of Systems Science and Engineering, Beijing 100037, China; 2. Information Center of China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100048, China; 3. China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100048, China)

**Abstract:** Digital transformation will promote the development of new-quality productivity in manufacturing enterprises. The aerospace industry, as an important representative of high-end manufacturing, plays an irreplaceable role in the development of new-quality productivity. In the context of increasingly complex projects and rapid iteration of new technologies, the development model of the aerospace industry is facing significant challenges and urgently requires digital transformation to promote high-quality development of the industry. This study proposes the concept of digital transformation in the aerospace industry and identifies the challenges currently faced. It elaborates on the basic ideas of digital transformation in the aerospace industry and demonstrates the development goals for each stage toward 2040. Moreover, a development path for the digital transformation of the aerospace industry is proposed, including the construction of a research and innovation system for digital intelligence collaboration, a new model for intelligent production of aerospace products, a digital supply chain system based on industrial interconnection, new infrastructure and network

**收稿日期:** 2025-01-20; **修回日期:** 2025-04-03

**通讯作者:** \*王国庆, 中国航天科技集团有限公司研究员, 中国工程院院士, 研究方向为航天器智能制造、航天装备系统工程、制造业数字化转型等; E-mail: wanggq2020@163.com

**资助项目:** 中国工程院咨询项目“航天产业数字化转型发展战略研究”(2023-XY-06)

**本刊网址:** [sscae.engineering.org.cn](http://sscae.engineering.org.cn)

security, and a basic guarantee system. Suggestions are further proposed to construct an integrated network within the aerospace industry, conduct research and application pilot on artificial intelligence big model technologies in the aerospace industry, establish a pilot zone for aerospace data circulation and trading, build a safe and controllable ecosystem for independent industrial software, and cultivate a digital talent team for the aerospace industry, thereby constructing a new development model and promoting the high-quality development of the aerospace industry.

**Keywords:** aerospace industry; digital transformation; new-quality productivity; digital aerospace

## 一、前言

随着航天领域科学技术的快速发展,人类进入、利用、探索太空的能力进一步增强。当前,经济社会发展对太空资产的依赖性加大,国家利益全面拓展至太空领域,太空成为世界各国竞相布局的战略高地。国际卫星产业龙头企业均在积极投资空间互联网业务,力求抢占卫星空间网络高地,争夺空间宝贵资源,以星链、一网等为代表的低轨巨型星座工程已经进入工程部署阶段<sup>[1]</sup>。同时,全球正经历广泛而深刻的数字化革命,人工智能、大数据、云计算等数字技术加速创新,更深入地融入经济社会各领域和发展全过程,数字化已成为重组全球要素资源、改变国际竞争格局、构筑新质生产力的关键力量。例如,美国发布《数字工程战略》,全面推行数字工程转型,旨在革新装备发展模式、对他国形成代差优势;以洛克希德·马丁公司、雷神技术公司为代表,积极开展数字化转型,推动航空航天复杂产品的协同设计与智能制造,提高重点产品的工程设计水平及效率,显著增强企业的核心竞争力<sup>[2]</sup>。

制造业数字化转型对企业新质生产力具有显著的促进作用<sup>[3]</sup>,新质生产力有助于企业数字化转型并促进企业高质量发展<sup>[4]</sup>,也能够增强企业供应链韧性<sup>[5]</sup>。我国制造业企业把握数字化转型趋势,已有较好进展:航空制造企业推行基于信息化的精益管理,整体规划企业数字化建设,筑牢业务数字化管理基础,驱动精益生产数字化转型,支撑航空产业链高质量发展<sup>[6]</sup>;汽车制造企业加强数字基础设施建设、优化生产流程与管理模式,成功转变传统的制造业经营模式<sup>[7]</sup>;信息产品制造企业以数字技术扩散、价值共创、商业模式创新、可持续发展等维度的协同为依托,阐明数字化转型能力的形成过程与演进机理<sup>[8]</sup>。后续,制造业将迈向全面数字化转型,人工智能大模型等新一代信息技术有望深度融入工业领域,场景化、图谱

化成为企业转型的新支点<sup>[9]</sup>;网络信息技术飞速发展、国际竞争加剧,将加快推动国防系统的数字化转型<sup>[10]</sup>。

近年来,我国航天领域业务主体紧紧抓住数字时代机遇,推进数字技术在航天产品研制过程中的持续深化应用,初步形成了基于模型的数字化协同研制体系,为顺利实施航天重大任务提供了有力支撑。同时,航天任务具有高强密度、高难度、高复杂、高标准、短周期、波动性等特征,质量与数量、成本与周期要求同步提高,新的发展态势对传统的产业模式带来极大挑战,亟需推进数字化转型以赋能航天产业高质量发展,在航天领域各环节广泛应用数字技术,拓展各类产业主体之间的协作层次及规模,提升产业的全要素生产率。

本文立足我国航天产业发展实际并面向中长期能力演进,就航天产业数字化转型开展概念界定、需求研判、问题凝练,深入论证总体思路、发展路径,以系统性构建航天产业新发展模式、支撑航天产业高质量发展。相关成果兼有理论前瞻性和工程可行性,是新发展阶段航天强国建设研究的有益参考。

## 二、航天产业数字化转型的概念和需求

### (一) 航天产业数字化转型的概念

对于数字化转型,不同组织结合自身的理解与实践给出了各种定义。美国高德纳咨询公司认为,数字化转型能够利用数字技术改变商业模式,提供增加营收和价值的新机会<sup>[11]</sup>。国务院发展研究中心将数字化转型定义为:利用新一代信息技术,构建数据的采集、传输、存储、处理、反馈的闭环,打通不同层级、各类行业之间的数据壁垒,提高相关行业的整体运行效率,构建新型的数字经济体系。华为技术有限公司则认为,数字化转型的本质是新技术驱动下业务、管理、商业模式的深度变革重构,以技术为支点、业务为内核。

本研究结合航天产业发展特点，提出了航天产业数字化转型的概念。深入应用新一代信息技术，覆盖航天产品全要素、产品研制全周期、组织管理全领域、产业协作全链条；以数据和模型为载体、网络算力为资源、网络安全为保障、数字技术融合应用和全要素数字定义为推动力、数字化产业为支撑，构建航天领域新质生产力；促进航天产业全要素互联互通、各类资源要素快捷流动、各类经营主体深度合作，打破组织、专业、地域限制，推动航天产业全方位数字化变革、重构、升级，最终实现航天产业核心竞争力、核心功能的跃升。

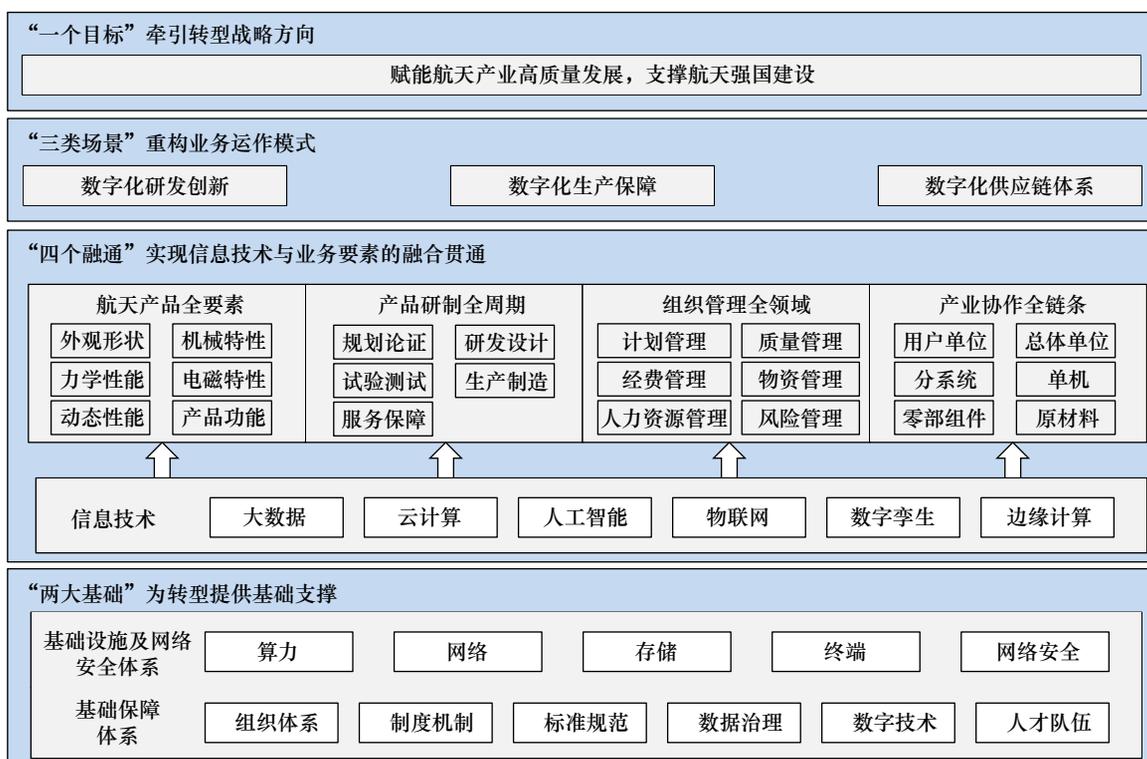
具体地，可将航天产业数字化转型的内涵概括为“两大基础、四个融通、三类场景、一个目标”（见图1），以引导数字化航天产业新模式建设。  
 ①“两大基础”包括基础保障体系、基础设施及网络安全体系：前者对组织体系、制度机制、标准规范、数字技术、人才队伍等进行重塑与构建，满足转型过程对各类基础保障条件的需求；后者涉及算力、网络、存储、终端等基础设施以及自主可控、安全可靠的网络安全体系，为转型过程提供安全的基础设施底座能力。  
 ②“四个融通”指将大数据、

云计算、人工智能等信息技术深度应用于航天产品全要素、产品研制全周期、组织管理全领域、产业协作全链条，实现信息技术与业务要素的融合贯通。  
 ③“三类场景”指构建数字化研发创新、生产保障、供应链体系能力，推动航天产业的系统重构与能力重塑，支撑航天产品的快速可靠研发、高效率低成本的生产保障、产业主体间高效协作。  
 ④“一个目标”指赋能航天产业高质量发展，支撑航天强国建设。

## （二）航天产业数字化转型的需求

1. 赋能航天产业自主创新、保持竞争优势的必要举措

近年来，国际航天强国发布了重返月球、移民火星等重大任务计划<sup>[12]</sup>，以美国太空探索技术公司为代表的国外航天企业加速技术创新并取得较大的竞争优势；充分运用各类数字技术，采用“渐进迭代”的现代系统工程理念以及“可纠错反馈环”的演进方式，融入软件工程的思维并依托工业化的基础保障能力，将运载火箭、卫星等发展为可快速迭代的工业化产品<sup>[13]</sup>。事实证明，航天事业的核心竞争力在于技术创新。我国航天领域正在论证和攻关



新一代载人运载火箭、重型运载火箭、新一代北斗卫星导航系统等重大项目，对高质量发展需求迫切<sup>[14]</sup>。针对航天重大任务实施、重大专项研制攻关中的高质量、短周期、低成本以及风险控制能力不断提升的新要求，应推进航天产业数字化转型，变革科研创新模式，采用快速迭代的数字化开发范式，不断提升自主创新能力并加快赶超国际先进水平。

2. 提升航天产品研制批产、增强敏捷供给能力的重要依托

当前，一系列重大航天工程全面启动实施，低轨卫星互联网建设进入快速发展期。我国发布了 10 余个低轨卫星星座计划<sup>[1]</sup>，千帆星座、星网星座、鸿鹄星座等低轨卫星互联网星座进入密集组网阶段，对卫星、运载火箭规模化制造能力提出了急切需求。未来 10 年，全球太空经济规模年均增长率接近 10%，推动研制和批产的规模化、低成本、高效率，实现航天产品的经济可承受和敏捷供给已成为航天产业高质量发展的必然要求。为此，通过数字、工业、管理等技术的深度融合，推进航天产业数字化转型，加速航天产品研制和批产，提升敏捷供给能力，已成为推进航天强国建设的重要依托。

3. 优化航天产业资源配置、提升产业协作能力的有效手段

提升太空探索和应用能力，既依赖航天产品的研制生产能力，也需要强韧产业体系的高效支撑。我国已是全球产业体系最完整的工业大国，而数字经济作为新一轮产业革命的驱动力正在重塑传统产业的生产与组织模式，推动现代化产业体系发展壮大<sup>[15]</sup>。航天产业同样需要在理念、方法、技术、工具等层面进行数字化变革，形成与数字化发展相适应的新型生产关系，推动系统重构和能力重塑。利用数字化技术能力，链接国内数量众多的优势单位，进行产业高效协作，追求资源要素优化配置、产业生态转型升级，充分发挥国内产业链和新型举国体制的优势，为航天产业高质量发展提供坚实支撑。

### 三、航天产业数字化转型面临的挑战

#### (一) 更为复杂的任务形势需要优化组织管理模式

航天型号研制任务已由早期的单一型号转变为多型号、多项目、多任务并举，型号研制与连续的

运行保障并行交织，对优化组织管理能力提出了直接要求。研制组织架构层级多，涵盖工程总体、各系统总体、分系统、子系统、单机等层级，组织管理模式趋于复杂。航天产业覆盖的单位数量众多，业务类型复杂、管理链条长，且不同单位、不同业务之间的差异度明显，有关标准也不尽统一，导致单位内不同业务之间、各单位之间的流程再造与系统集成难度偏大，不利于发挥协同管理效能；科研生产管理数据覆盖不全，以数据为基础的决策支持可靠性不高，基于大数据的科学精准管控模式尚未形成和落地应用，不适应新形势下航天工程系统的组织管理需求。我国信息化水平与国际航天强国相比还存在不小的差距，如信息共享机制不完善、信息共享与业务协同水平有待提升<sup>[16]</sup>。

#### (二) 技术跨度更大的重大工程任务亟需研发模式变革

对于航天重大工程任务、航天重点型号而言，客户需求、关键技术、研制过程、试验验证、单位/地域/专业协同、基础科学问题等均具有较高的复杂度，研发过程中的多个环节动态且紧密耦合。例如，长征五号运载火箭涉及力、热、电磁、机械、流体、控制等学科以及百余种专业，全箭飞行过程中动作有 2204 个，配套单机 1349 项、2350 台（套），其中 1700 余台（套）为新研制产品<sup>[17]</sup>，间接体现出航天型号研制的潜在风险与技术难度。此外，航天产业中的研发设计工具种类繁多，跨单位、跨地域的协同研制流程尚未完全打通，面向装备全生命周期的协同研制平台未能延伸到产品研制全环节、产业协作全链条，带来模型无法全周期、跨单位、跨地域高效流转以及模型复用程度偏低的问题。此外，机器学习、人工智能大模型等智能技术应用不足，在一定程度上制约了研发设计效率的提升，难以应对航天型号的快速迭代研发需求。

#### (三) 可持续发展对规模化、低成本生产能力需求迫切

空间互联网飞速发展，空间互联网星座系统建设将促进我国航天产业转型升级，催生卫星模块化、标准化、国际化设计理念转变，带动卫星、运载火箭的批产能力与生产线建设<sup>[1]</sup>。航天产品面临需求激增、质量要求高、成本控制愈加严格等挑战。沿用传统的基于研制和小批量生产建立的生产模式，存

在效率低下，质量一致性不佳，生产成本偏高，数字化、智能化水平不高等问题，难以应对更高水平的航天产业可持续发展要求。当前，航天产品生产的数字化、智能化水平有待提升，计划、质量、物资等层面的生产管理系统尚未完全贯通，产品质量信息无法进行准确跟踪和回溯，数字化、智能化技术与装备在航天生产现场应用不足。

### （四）开放融合态势下供应链协同水平有待提升

航天产品研制生产逐步从局限于航天领域企业的自我配套、自成体系，发展到立足全球科技和工业体系，与管理部门、装备用户、高校、科研院所等密切互动，与民营企业优势互补的开放融合态势。例如，长征五号运载火箭研制过程中仅1次外协外包即涉及零部件产品22 423种，参与配套单位达1215家，（民营企业占比为44.7%）<sup>[7]</sup>；中国航天科技集团有限公司的协作配套单位和零部件供应商超过7000家，数量仍将持续增长。一些航天领域龙头企业结合自身需求构建了供应链管理平台，但各单位的供应链管理模式及水平差异较大，供应链系统亦互不联通，导致跨单位协同效率低、沟通成本高。行业级的供应链协同和管理缺乏统一的工作平台与网络通路，对航天产品的均衡生产与及时交付支持不足。

### （五）信息基础设施能力有待升级

航天领域的信息基础设施架构尚未及时更新，云计算、物联网等新兴技术应用明显滞后，算力系统因布局分散而未能形成合力，跨网的互联互通存在障碍。此外，航天领域的企业之间，企业与用户、供应商之间的网络存在物理和逻辑阻断，各类网络并未实现有效连接和贯通应用。航天领域各产业主体的信息基础设施资源条件差异大、布局分散，不利于产业主体间开展基于数据的高效协同。顾及保密安全等因素，云、环网等新技术应用受限。网络互不联通事实上成为制约大协作、大配套航天产业新模式构建的瓶颈环节。

## 四、航天产业数字化转型的基本思路与发展目标

### （一）航天产业数字化转型的基本思路

以云计算、物联网、人工智能等技术为支撑的

新型信息基础设施，为航天产业数字化转型提供了综合性、集成性的基础环境，是实现航天产品研制和生产高效协同的重要支撑。新型信息基础设施提供充足的存算能力、网络连接力以及高品质的运维服务能力，构建坚实的数字底座，支撑形成互联、协同、高效、智能的数字航天。在航天产业数字化转型过程中，实施信息技术、航天科技工业的深度融合，聚焦航天产品研发创新、先进制造、产业协作，增强快速迭代、敏捷智能、开放融通、安全集约、基础强固的数字化航天产业新能力。

按照“打根基、通经络、建平台、塑能力”基本思路（见图2），筑牢组织、制度、标准、数据、技术、人才方面的基础保障能力，推进装备用户、航天企业、高校、科研院所等产业主体之间网络互通，终端、算力等基础设施资源共享，进而构建协同研发、智能制造等方面的数字化平台；形成互联互通、开放协作的数字化环境，驱动数字技术的全周期、全层级、全链条贯通并深入应用至航天产业的价值创造、运营管理等活动，支撑航天产业协作模式加快转向数字技术支撑下各类产业主体的“大协作、大配套”；逐步建成数字航天产业生态，显著提升航天产品研发创新、生产保障、产业协作等能力，以航天产业高质量发展支撑航天强国建设。

航天产业数字化转型过程具有如下特征。①快速迭代。基于可信工具平台和模型体系，形成基于数字模型的正向研发模式，实现海量方案设计寻优、创成式快速设计、制造前虚拟试验验证等能力，保障快速研发创新需求。②敏捷智能。基于智能生产设备和自主软件平台，形成数据驱动的智能生产保障模式，保障高效率、低成本、柔性化、敏捷化的航天制造及服务。③开放融通。基于统一的数字化协作环境和数据标准，形成产业主体高效协同、“小核心、大协作、专业化、开放型”的数字化协作模式，支撑构建跨地域、跨行业、跨单位的航天产品研制生产新型举国体制。④安全集约。基于先进的软/硬件资源、完备强韧的网络安全体系，构建连接装备用户、航天企业、高校、科研院所等产业主体的新型基础设施，提高网络的互联互通、基础设施资源的集约共享水平。⑤基础强固。围绕组织体系、制度机制、标准规范、数据治理、数字技术、人才队伍等构建转型基础保障体系，开展数字化变革和能力重构，形成数字化制度机制和文化

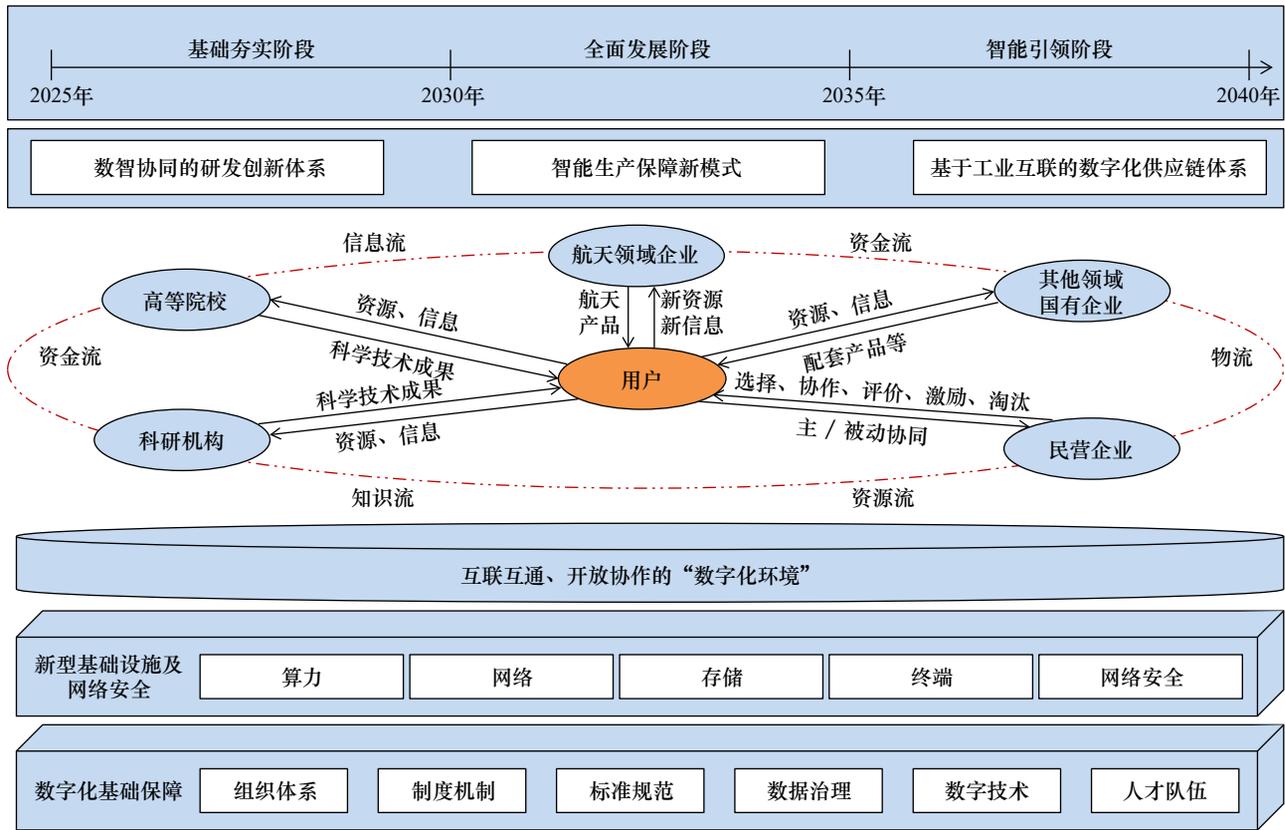


图2 航天产业数字化转型的总体思路

体系，为航天产业数字化转型提供坚实的基础保障。

## (二) 航天产业数字化转型的发展目标

### 1. 航天产业数字化转型基础夯实阶段（2030年前）

初步建成组织高效、制度顺畅、标准统一、数据共享、技术先进、人才架构合理的数字化基础保障体系，产业数字化基础平台，完备强韧的网络安全体系，实现各产业主体内部骨干网络升级扩容、云数据中心建成应用。各产业主体内部明确业务对象即活动的数字定义，基本完成企业数字化转型，形成模型数据贯通复用的正向研发模式、生产现场敏捷柔性的智能生产模式、产业主体网络协同的数字化协作模式。该阶段发展以产业主体基本完成企业数字化转型、建成产业数字化基础平台为主要标志。

### 2. 航天产业数字化转型全面发展阶段（2030—2035年）

基本建成数字化基础保障体系并推广应用，实现各产业主体之间的网络高效联通。全面建设并应用云数据中心、产业数字化基础平台、完备强韧的

网络安全体系，在全产业链上应用模型数据贯通复用的正向研发模式、生产现场敏捷柔性的智能生产模式、产业主体网络协同的智能协作模式。基本建成覆盖全产业链的数字化协同体系，确保人工智能技术在产品全生命周期、生产全流程、协作全链条中的有效应用。该阶段发展以基本完成航天产业数字化转型、建成全产业链数字化协同体系为主要标志。

### 3. 航天产业数字化转型智能引领阶段（2035—2040年）

全面建成智能化基础设施和网络安全体系，极大丰富航天产业数据资源，基于全产业数据的共享、开发、利用，实现产业主体之间资源、业务、能力等要素的开放共享和智能协作。全面建成智能技术驱动的航天产业新模式，人工智能技术在产品全生命周期、生产全流程、协作全链条得到深入应用，充分赋能航天产品研发创新、智能制造、产业协作。该阶段发展以基本形成全球化产业智能协作模式、全面建成智能技术驱动的航天产业新模式为主要标志。

## 五、航天产业数字化转型的发展路径

### (一) 数智协同的研发创新体系建设

在创新应用基于模型的系统工程、人工智能等技术的基础上，构建基于云架构的协同研发平台，按照“设计验证左移”构想，在航天型号需求论证、系统设计、分系统设计等环节，深化仿真验证活动（如性能仿真、工艺仿真），推动研发模式从以文档为中心、线下协同转向以模型为中心、跨专业 / 跨组织 / 跨地域的在线协同，验证模式由实物验证为主转向虚实结合的试验验证，服务保障模式从基于实物、经验、现场转向基于数字孪生、大数据的远程智能服务保障。建设航天产品数智协同研发体系（见图3），支持实现“数字空间多次迭代、物理空间一次成功”，面向航天产品提供敏捷服务与精准保障，促进快速、低成本的正向研发；通过模型体系、平台工具等方面的建设应用，全面实现航天产品研发体系的数字化变革。

#### 1. 构建知识和数据驱动的智能设计模式

以航天产品三维数字化模型为基础，集成知识工程、人工智能、数字孪生等技术，在虚拟环境下开展设计知识的主动推送、设计方案的探索权衡，

支持设计的快速创新迭代<sup>[18,19]</sup>。持续开展数据治理、标注、训练，构建航天工业大模型，探索基于自然语言交互的新型智能设计模式，为高效探索设计空间并降低设计风险提供技术支撑。

#### 2. 构建虚实结合的试验验证新模式

综合运用数字孪生、数字化仿真等技术，构建包含几何、物理、行为、规则等信息在内的高置信度产品和试验环境数字模型。按照“设计验证左移”构想，实时采集试验现场数据，推进现场数据与数字模型之间的相互校核、验证与确认，显著降低实物验证频次，控制验证风险及成本，提升验证综合效率，形成虚实结合的试验验证新模式。

#### 3. 构建数据及模型驱动的敏捷服务与精准保障模式

运用大数据、人工智能、数字孪生等技术，构建涵盖航天产品外形、内部结构、力学性能、电磁特性、功能性能、操作使用、维修保障等信息的数字模型。面向航天产品的维修、使用等活动，基于数字孪生技术开展物理实体、虚拟模型的双向动态映射及交互，持续获取产品运行数据；全面应用远程发射支持、在轨可靠保障、故障协同诊断、故障快速维修、预测性维护、健康状态检测，显著提升

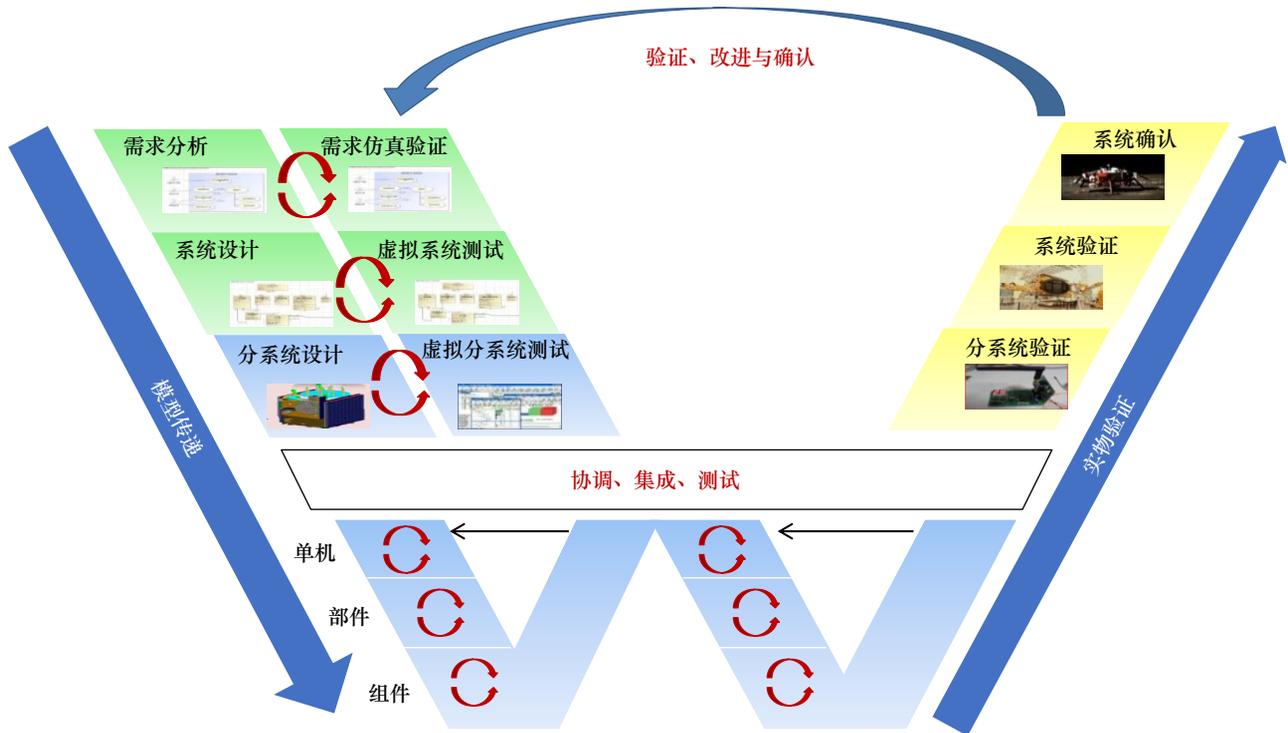


图3 航天产品数智协同研发体系过程模型

航天产品的敏捷服务与精准保障能力。

4. 构建航天产品全周期模型体系

基于物理定律、功能原理等知识，按照统一标准，构建机械、电气、控制等专业的层次化模型库；统一各专业模型接口规范，确定系统、分系统等层次的模型接口形态，形成可集成、可复用、可扩展的专业模型体系，支持基于模型的快速设计验证。面向航天产品全生命周期内的需求论证、研发设计、生产制造、试验测试、服务保障等，对所需关键信息进行模型化处理，构建多状态的航天产品数字样机体系，为各阶段数字模型的传递、演进、重用提供基础支撑。

5. 构建跨专业、跨组织、跨地域的协同研发环境

基于开放云架构、统一的接口标准，集成多域 / 多场仿真环境、虚实融合验证环境以及结构、控制、电气、声、热、磁等学科的工业软件，统型全产业链的研发设计工具，有机整合流程、工具、数据、模型、知识等资源。基于协同平台打破专业、组织、地域之间的信息壁垒，贯通产品全生命周期中的研发设计、生产制造、试验测试、服务保障等环节，以跨专业、跨组织、跨地域的云端协同显著降低航天产品在设计和制造方面的沟通成本。

(二) 航天产品智能生产新模式构建

通过物理空间、虚拟空间的双向真实映射与实时交互，实现生产和保障现场全要素、全流程、全级次模型数据的集成融合，推动航天产品生产模式从文档和经验驱动、自我配套 / 自成体系、单件小批量制造转向数据和模型驱动、开放融合、网络化协同制造，服务保障模式从基于实物、经验、现场转向基于数字孪生、大数据的远程智能服务保障。逐步形成具备动态感知、实时分析、智能决策、精准执行、敏捷服务特征的航天智能生产与保障模式，建立高效率、低成本、柔性化、规模化的航天制造与服务能力。通过平台工具、模型数据的建设即应用，构建航天智能生产新模式（见图4），支持航天生产模式的数字化转型、网络化协同、智能化变革。

1. 构建数据驱动、总装拉动的航天产品批产模式

覆盖总装总测单位、协作配套企业、物资供应商等供应链主体，部署制造、物流、仓储、检测等方面的数字化装备，上线数据采集监控、制造执行等系统，快速精准地掌握航天产品的生产交付信息，确保针对计划、质量、物资的穿透式管理。推动总装总测单位由面向计划的推动式管理转向面向最终用户的拉动式管理，逐步形成“总装拉动部装、部装拉动部组件、部组件拉动零件、零件拉动

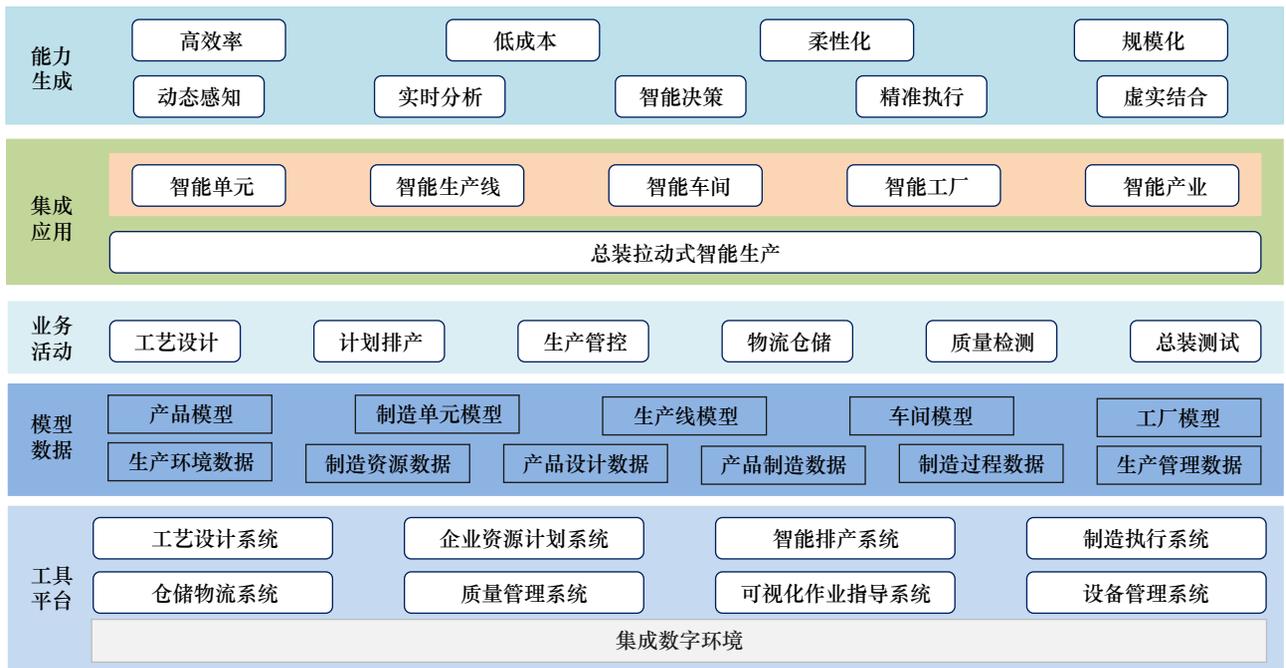


图4 航天智能生产新模式总体架构

原材料”的树状并行拉式生产模式，显著增强各类供应链主体之间的协同能力。

### 2. 建设虚实映射的智能单元 / 生产线 / 车间 / 工厂

面向单元、生产线、车间、工厂等层级，覆盖加工、检测、物流等业务环节，推动设备联网、生产环节数字化连接，强化标准作业、可视管控、精准配送、最优库存。基于生产现场的工业物联网，构建涵盖制造对象、制造资源、制造环境的生产过程数字孪生系统，支持实物制造过程、理论模型计算的交互与融合，批量建设数据互联互通、信息可信交互、生产深度协同、资源柔性配置的智能单元 / 生产线 / 车间 / 工厂。以企业内部跨系统、跨部门、跨层级的纵向集成，企业之间基于供应链、产业链、价值链的横向集成，推进航天产品的高质量、高效率、低成本、规模化生产。

### 3. 构建虚实交互的生产现场智能运营管控

应用建模仿真、多模型融合等技术，以数字孪生设备、生产单元、制造资源为基础，建设用于模拟实际生产运行环境的生产要素模型、生产过程模型、机理分析模型、辅助决策模型。基于虚实交互实现数字空间、物理空间的虚实融合，加强人、设备、物料、环境、过程等生产资源信息的互联互通，面向工艺设计、计划排产、生产管控、物流仓储、质量检测、总装测试等制造活动，在数字空间内开展制造活动的实时监控、动态仿真、实时优化及重构，提升航天产品柔性生产、制造现场精细化管控能力。

### 4. 构建标准统一、动态映射的制造模型数据

针对航天产品生产现场设备种类多样、工况环境复杂多变、多源异构数据并存的特点，按照统一的标准构建生产环境数据、制造资源数据、产品设计数据、产品制造数据、制造过程数据、生产管理数据。对上述数据进行清洗处理，用于构建“实时感知、动态分析、自主决策、动态执行”的制造单元 / 生产线 / 车间 / 工厂数字孪生模型。以物理空间、虚拟空间之间的信息动态映射与实时交互，为航天智能生产新模式提供数据与模型支撑。

### 5. 开发安全可信的生产制造工具平台

鉴于航天产品生产过程高复杂度、业务系统类型繁多，研究并构建面向生产系统全生命周期的自主可控集成数字管理工具集，开发流程、数据、模

型均统一的安全可信集成数字环境。集成工艺设计、企业资源计划、智能排产、制造执行、仓储物流、质量管理、可视化作业指导、设备管理等方面的软件工具以及信息系统、物理系统等要素，贯通生产过程的信息流和数据流，精准映射产品物理生产活动与数字空间。深度挖掘生产全流程数据，促进从业务驱动管理转向数据驱动管理，提升数字化生产管控能力，支持航天产品敏捷化、低成本制造。

## （三）基于工业互联的数字化供应链体系建设

应用数字孪生、物联网、大数据等技术，在工业互联网平台上构建协同高效、精细管控的数字化供应链协作网络，推动供应链体系从线下自成体系为主转向线上大协作、大配套为主，基于统一的平台和标准，实现科研院所、高校、零部件供应商等产业主体之间的高效协作，促成航天产业供应链协作模式的根本性变革（见图5）。

### 1. 建设航天数字化供应链体系

引导航天领域龙头企业部署航天工业互联网平台，向上下游企业开放技术、平台、数据等资源，提供行业经验和标准，带动产业链、供应链上相关企业“上云用云”<sup>[20]</sup>。科学解决产业链上企业的信息系统割裂、数据共享困难、协同效应不佳的问题，逐步构建覆盖航天产业主体的数字化供应链体系，确保计划、外协、采购、物流、生产、交付等业务过程的可视、可管、可追溯，显著提升航天产业的网络化协作水平。

### 2. 建立供应链智能化管理模式

面向航天供应链全流程，增强计划与预测优化、多元化采购、柔性化生产管理、订单精准交付能力，提供数字化用户、供应链风险预测与处置、绩效监测与优化等服务。鉴于航天供应商的多样性和复杂性，开展全级次的供应商管理，对包括物资供应商、外包供应商、外协供应商在内的供应链上企业进行分层分级的集中管控，精准实施全过程数字化管理。开展针对供应商的全数字化质量闭环管理管控、供应商质量全级次穿透，建立以质量为中心的全级次供应商精细管理体系，全面解决供应商质量管理“只知一级、不知多级”的问题，将质量要求快速、准确、有效地传递到全级次供应商。具体地，融合计划、合同、质量、外部事件信息等多源数据，实现面向航天产品及企业的供应风险全面

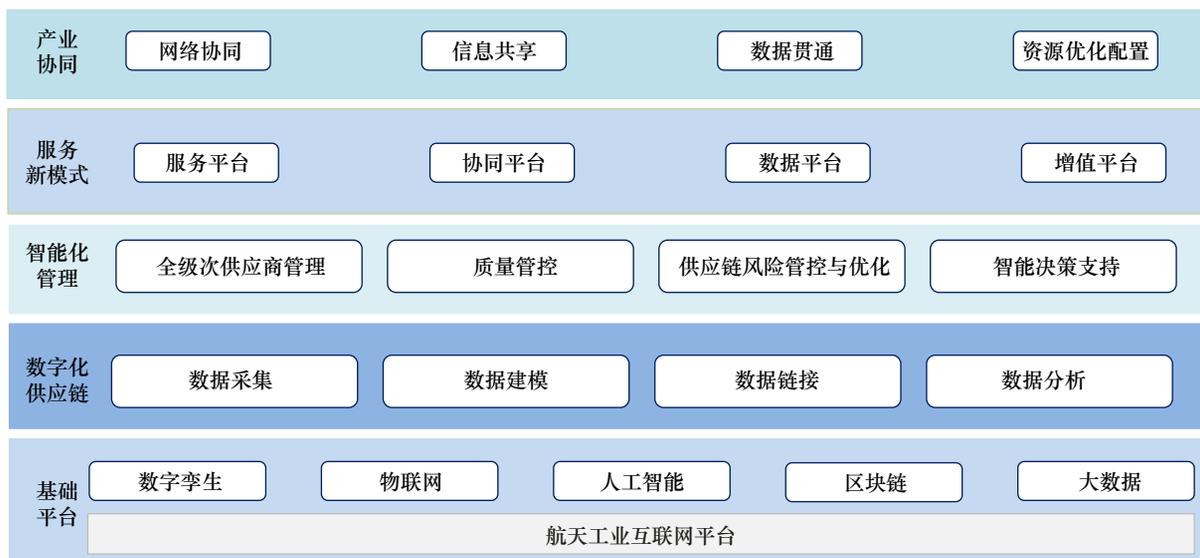


图5 基于工业互联网的数字化供应链体系总体框架

识别与动态感知，供应链的实时监测、评估和控制，确保供应商管理及采购过程的透明化、可视化；应用大数据技术开展数据智能分析，对供应链风险进行动态感知和评估诊断，提供联动处置、超前预警等能力；对供应链绩效指标进行监测、考核和评估，为供应链的重构设计和优化改进筑牢基础；提供供应链智能控制的决策支持能力，提升供应链管理的自动化、智能化水平。

### 3. 构建端到端供应链服务平台新模式

航天领域龙头企业牵头并以主制造商的角色运营航天工业互联网平台，发挥行业领军优势并与典型应用场景结合，开展航天产业应用需求的定制化设计，为数字化供应链建设提供全面的支撑服务，加快构建数字化供应链服务平台新模式。整合相关区域、行业、企业的资源，覆盖航天产业链上中下游，为产业链相关方提供包括融资、结算、物流配送、库存管理、信息技术在内的一体化服务；支持航天供应链上企业在需求、设计、计划、采购、生产、交付、服务等方面的高效协同与优势互补，形成无缝集成的端到端供应链。供应链的各部分均可单独对外开放，成为服务的提供者；各参与方也可在供应链平台上获得专业服务能力，成为基于平台的全链统一服务能力受益者。依托供应链即服务的新模式，激励相关单位充分挖掘数据在供应链价值实现过程中的作用，推动供应链的数字化转型。

### 4. 构建上下游网络协同的航天产业生态

以内部供应链数字化集成，内外部供应商、核心企业、销售商、用户之间网络化协同的方式，构建基于工业互联网平台的一体化、数字化供应链协同体系，形成覆盖供应链需求、计划、采购、生产、交付、服务的数字化、协同化供应网络。向上下游企业开放技术、平台、数据资源，解决内部单位及上下游企业之间信息系统割裂、联通不畅、数据共享困难、协同效益不佳的问题。建立领域型分级分层网络体系，根据安全级别对网络进行分区，在区域之间通过安全技术解决数据交换的需求，支撑工业互联网平台的部署应用。开展内外部单位信息的横向打通、纵向穿透，确保各网络区域、各系统之间的数据贯通，实现相关信息在全产业链上的高水平共享。重构供应链全流程资源配置模式，推动生产和服务资源跨领域、跨单位、跨平台，更大范围、更高效率、更加精准地进行整合配置，以资源优化配置促成降本增效。聚焦数字航天产业生态协同管控，提供面向供应链所有组织实体的扁平化、端到端协同交互和信息共享，改善采购、研制、批产等计划的协调性，保持供应链各环节的无缝协同以及物流、信息流、资金流、商流的高效协同，提升航天产业链的整体效能。

### （四）新型基础设施及网络安全建设

采用“云网边端”建设布局，加快应用云计

算、物联网、边缘计算、人工智能等技术，构建动态感知、生产执行、检测测试、物流仓储等功能于一体的智能协同终端体系。部署包括骨干国密网、商密网、工控网、第五代移动通信（5G）等在内网络体系，形成高速泛在、多网融合、互联互通的网络能力，建设包含边缘计算、云计算在内的集约高效型算力体系。推动网络安全体系由基于边界防护的安全转向基于内生安全的综合防控体系，契合航天产业数字化转型对新型基础设施和网络安全体系的需求（见图6）。

1. 建设集约高效的算力体系

以航天骨干单位为重点，集约化开展数据中心建设。优化数据中心之间的网络连接条件，适应跨地域的数据资源调度及互访需求，形成布局合理、低耗节能、多点联动的航天产业数据中心发展格局。发展集约高效、共享开放、安全可靠的云计算基础设施，规划建设数字航天“一朵云”，深化经营管理、协同研发、智能制造、试验验证、服务保障等业务领域的云平台建设，形成基于云架构的航天产业数字化能力体系。

2. 建设高速泛在的网络体系

完善骨干国密网、商密网建设，构建高速安全、互联互通的科研生产网，汇聚航天产业链上各类企业，兼顾网络互联基础业务和网络安全综

合业务，适应协同研发、智能制造、远程测试、虚拟试验、异地维保等复杂场景下大流量、高并发、高可靠、即时响应的产品研制和生产应用需求。

3. 部署智能协同的终端体系

面向生产制造、检测测试、物流仓储、服务保障、资产管理等业务场景，统筹配置无线射频识别、条形码、传感器等智能感知设备，加工中心、数控机床、工业机器人、增材制造设备等智能生产装置，智能仪表、三维激光扫描、非接触式测量等智能检测测试设备，自动导引车、立体仓库、搬运机器人等智能物流仓储设备。统筹部署国密网、商密网、物联网、5G、工业以太网、移动热点等泛在网络，进行资源连接及数据接入的标准化，支持各类业务场景下设备、设施、人员、物料、环境等要素的广泛互联，形成泛在感知、智能协同、即插即用的快速联通能力。

4. 构建自主可控的安全体系

按照“主动防御、实时监测、快速响应、及时恢复”的思路，采用“管技并重”的安全防护措施，从基础设施安全、网络安全、数据安全等维度出发，全面构建航天产业安全防护体系。应用人工智能+安全、量子加密通信、零信任架构等安全技术，强化安全态势监测预警和风险综合研

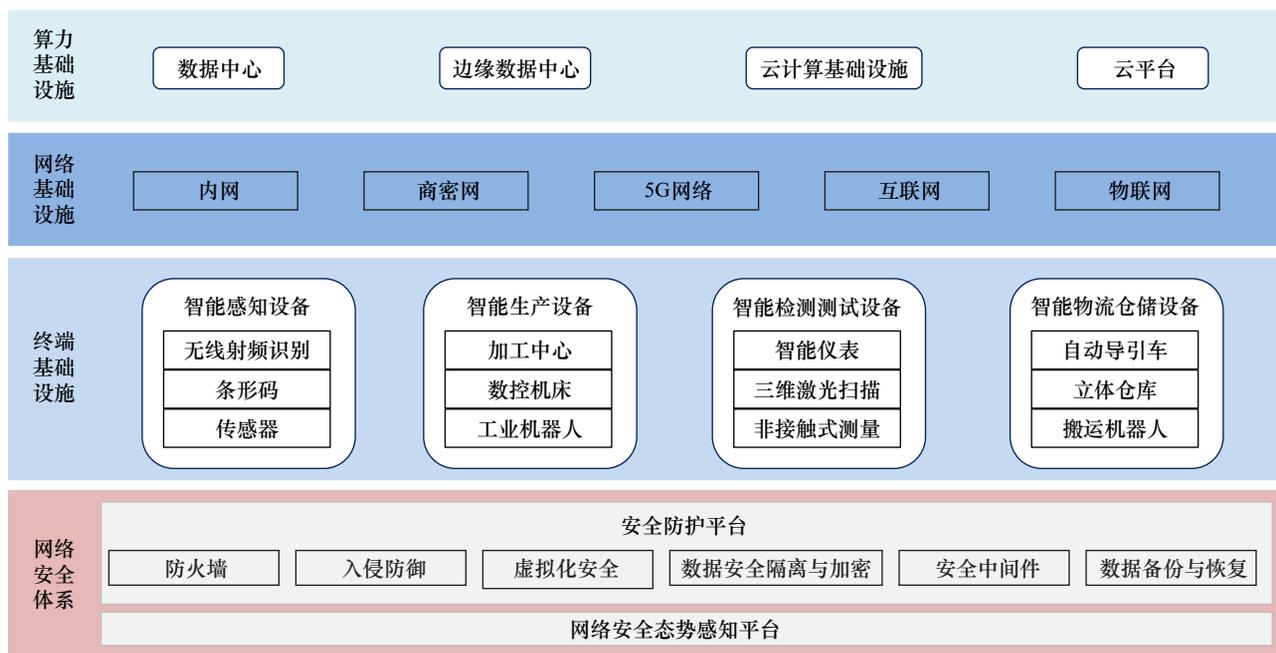


图6 新型基础设施及网络安全建设框架

判能力，为航天产业高质量发展提供可信的安全防护体系。

### （五）数字化转型基础保障体系建设

开展航天产业组织体系、制度机制、标准规范等的数字化改造和重构，通过开放统一的标准规范体系、科学合理的数据要素开发应用体系等基础性举措，为航天产业数字化转型提供各类基础保障条件。

#### 1. 构建规范高效的数字化组织制度

按照航天产业“一盘棋”战略布局，发挥行业主管部门的统筹协调、航天领域龙头企业的牵引带动作用，构建并完善上下联动、横向协同的数字化组织制度体系。破除阻碍协同的组织、部门、层级壁垒，推动航天产业组织制度由多层级、职能型、中心化转向扁平化、流程型、网络化，适应航天产业数字化转型的实际需要。

#### 2. 构建开放统一的数字化标准规范

按照标准统一、集约高效的原则，从基础共性、关键技术、业务应用等方面出发，研究和制定航天产业数字化标准规范体系。采取航天领域龙头企业统筹协调、各专业技术总体单位牵头、有关单位参与的组织方式，凝练业务需求和技术进展，借鉴相关的国际标准和国家标准，开展存量数字化标准的修订完善、增量标准的研究编制等工作；强化航天产业链上标准的一体联动，构建纵向贯通、横向联动、开放协调的航天数字化标准体系。

#### 3. 推进新一代信息技术应用研究

围绕航天产业数字化相关的基础、前沿、难点问题，推进新一代信息技术的研究突破和落地应用。针对多网实时互联、云平台安全、无线互联安全等数字化基础技术，遴选部分单位开展技术攻关，联合有关管理部门开展试点验证，尽快实现相关技术的应用突破。针对人工智能大模型、隐私计算、区块链等信息技术，总结航天产品研制需求并提炼应用场景，建立数字技术敏捷响应、攻关突破、快速转化应用机制。针对基于模型的系统工程、数字孪生等产品研制过程中的堵点和难点技术，在重点产品新研、重大航天工程实施过程中，联合国内优势单位开展技术攻关，加快推动试点应用和集成示范，促成相关技术的推广应用。

## 六、航天产业数字化转型的发展建议

### （一）加快推进航天产业“一张网”工程建设

建议管理部门指导、航天领域龙头企业牵头、航天产业各类主体参与，联合论证航天产业“一张网”工程。研究并突破制约产业主体之间网络互联的制度壁垒和关键技术，加强网络安全技术应用和安全能力体系建设，充分整合各类网络资源，构建标准统一、数据贯通、多网融合、技术先进、全链共享、安全可靠的综合网络，实现航天产业各类主体之间的安全高效互联，保障各类业务对网络的多维度需求。

### （二）开展航天人工智能大模型技术研究与应用试点

建议由航天领域龙头企业牵头，联合国家实验室、大型互联网企业、云计算厂商，以国家设立的专项工程等作为创新载体，构建多方参与的航天人工智能大模型技术协同创新生态。依托国家算力平台、商业性云计算资源，按照“通用大模型-航天专业大模型-场景专用大模型”的技术演进路径，采用“预训练+精调”模式构建航天领域人工智能大模型。面向航天产品研发设计、生产制造、试验测试、服务保障等业务环节，突破自然语言-领域建模语言转换等基础技术，攻关基于人工智能大模型的创成式设计、智能仿真优化、软件代码辅助编程、工艺智能化编排、在线质量监测、智能生产调度、故障智能诊断等关键技术，稳健推动人工智能大模型技术在航天领域各业务场景中的落地应用。

### （三）建设航天数据流通交易试验区

建议管理部门遴选数字化基础良好、具有代表性的航天单位，在航天领域建设数据流通交易试验区并开展先行先试，深入探索公共数据授权运营、数据交易过程监督、数据价值评估、数据价格形成、数据授权使用、数据收益分配等方面的运行机制，为国家建立相关的法律规章提供实践基础。依托航天领域主管部门或授权机构，探索构建航天产业数据资源交易平台，结合数据敏感等级、流通范围、影响程度、潜在风险，建立数据分类分级授权使用规范，为数据合规交易及使用、航天数字经济新模式等提供平台支撑。

#### (四) 构建安全可控的自主工业软件生态

发挥国家战略科技力量的创新引领作用，引导高校、科研院所、工业软件企业等优势单位，构建“产学研用”协同的自主工业软件生态。面向研发设计、生产制造、试验验证等自主工业软件的薄弱环节开展联合攻关，逐步构建安全可控、横向贯通的软件工具链，满足航天产品研制全周期、协作全链条、管理全要素的数字化转型需求。在航天重大工程中开展试点，加快自主工业软件的应用验证、迭代升级、体系化应用，逐步提升国产工业软件的安全可控和可用好用水平。

#### (五) 培育航天产业数字化人才队伍

结合国家“卓越工程师教育培养计划”，支持高校与航天单位、大型互联网企业等产业主体共建航天产业数字化人才培养中心，综合通用标准、行业标准开展数字化工程人才培养，为航天产业数字化转型提供坚实的人才保障。优化数字化转型背景下的航天人员队伍设置，围绕数字基础设施建设、平台工具构建、数据资源治理、模型算法训练、数智技术应用等业务场景，配置专业岗位，建立信息技术与核心业务融合的航天复合型人才队伍。

#### 利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

**Received date:** January 20, 2025; **Revised date:** April 3, 2025

**Corresponding author:** Wang Guoqing is a researcher from China Aerospace Science and Technology Corporation, and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research fields included intelligent manufacturing of spacecraft, aerospace equipment system engineering, digital transformation of manufacturing industry. E-mail: wanggq2020@163.com

**Funding project:** Chinese Academy of Engineering project “Research on the Digital Transformation and Development Strategy of the Aerospace Industry” (2023-XY-06)

#### 参考文献

[1] 李峰, 禹航, 丁睿, 等. 我国空间互联网星座系统发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(4): 137–144.  
Li F, Yu H, Ding R, et al. Development strategy of space Internet constellation system in China [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(4): 137–144.

[2] 任璐英, 李铁成, 李胥佳, 等. 美国军工企业数字化转型举措分析 [J]. 军民两用技术与产品, 2024 (10): 19–24, 29.  
Ren L Y, Li T C, Li X J, et al. Digital transformation initiatives of U. S. military industry [J]. Dual Use Technologies & Products,

2024 (10): 19–24, 29.

[3] 杨铭杰, 王钦鹏, 王天慧, 等. 制造业数字化转型对企业新质生产力的影响研究 [J]. 科技与经济, 2025, 38(1): 16–20.  
Yang M J, Wang Q P, Wang T H, et al. Research on the impact of digital transformation of manufacturing industry on new quality productive forces of enterprises [J]. Science & Technology and Economy, 2025, 38(1): 16–20.

[4] 黄茜, 周克明, 姚群, 等. 新质生产力如何驱动企业高质量发展——基于企业数字化转型视角 [J]. 荆楚理工学院学报, 2025, 40(1): 16–22.  
Huang Q, Zhou K M, Yao Q, et al. How new-quality productive forces drive high-quality development of enterprises-based on the perspective of digital transformation of enterprises [J]. Journal of Jingchu University of Technology, 2025, 40(1): 16–22.

[5] 喻春娇, 王凤翼. 数字化转型对制造业企业供应链韧性的影响——来自中国制造业 A 股上市公司的微观证据 [J]. 湖北经济学院学报(人文社会科学版), 2025, 22(2): 55–61.  
Yu C J, Wang F Y. Influence of digital transformation on supply chain resilience of manufacturing enterprises—Micro-evidence from A-share listed companies in China manufacturing industry [J]. Journal of Hubei University of Economics (Humanities and Social Sciences), 2025, 22(2): 55–61.

[6] 数字化转型赋能航空制造企业高质量发展 [EB/OL]. (2024-09-25)[2025-03-15]. <https://www.ddzl.net/news/show-494.html>.  
Digital transformation empowers the high-quality development of aviation manufacturing enterprises [EB/OL]. (2024-09-25)[2025-03-15]. <https://www.ddzl.net/news/show-494.html>.

[7] 孙金山, 赵树婷, 江有为. 数字化转型赋能制造业高质量发展的探究 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2025 (2): 33–35.  
Sun J S, Zhao S T, Jiang Y W. Research on digital transformation enabling the high-quality development of manufacturing industry [J]. Intelligent Building & Smart City, 2025 (2): 33–35.

[8] 温馨, 潘哲, 刘玥. TVBS 协同下制造业数字化转型能力递进式模型研究——海尔集团与华为集团的双案例对比分析 [J/OL]. 科技进步与对策, 2025. [2025-03-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1224.G3.20250217.1515.002.html>.  
Wen X, Pan Z, Liu Y. Research on progressive model of digital transformation capability of manufacturing industry under the cooperation of TVBS—Comparative analysis of two cases of haier group and Huawei Group [J/OL]. Science & Technology Progress and Policy, 2025. [2025-03-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1224.G3.20250217.1515.002.html>.

[9] 牟华伟, 孙刚, 李昀, 等. 2025 年我国制造业数字化转型发展形势展望 [J]. 机器人产业, 2025 (1): 6–11.  
Mu H W, Sun G, Li Y, et al. Prospect of digital transformation and development of China’s manufacturing industry in 2025 [J]. Robot Industry, 2025 (1): 6–11.

[10] 程佳, 毛松, 李振伟, 等. 军工企业数字化转型研究 [J]. 网信军民融合, 2022 (4): 19–22.  
Cheng J, Mao S, Li Z W, et al. Research on digital transformation of military enterprises [J]. Civil-Military Integration on Cyberspace, 2022 (4): 19–22.

[11] 李唤, 崔航, 余从国. 企业数字化转型认识及对运营商的启示 [J]. 通信企业管理, 2021 (4): 25–29.  
Li H, Cui H, She C G. Understanding of digital transformation of

- enterprises and its enlightenment to operators [J]. *C-Enterprise Management*, 2021 (4): 25–29.
- [12] 张文静. 美国登陆火星、重返月球与组建太空军关联分析 [J]. *中国航天*, 2022 (10): 51–55.  
Zhang W J. Interactions among the US Mars landing, returning to moon and establishing space force [J]. *Aerospace China*, 2022 (10): 51–55.
- [13] 刁吉阳, 魏琪. SpaceX 公司发展模式对我国低成本航天发射的启示 [J]. *军民两用技术与产品*, 2024 (4): 28–32.  
Diao J Y, Wei Q. Enlightenment of SpaceX's development model to China's low-cost space launch [J]. *Dual Use Technologies & Products*, 2024 (4): 28–32.
- [14] 王国庆, 熊焕, 侯俊杰. 数字时代的航天系统工程 [J]. *机械工程学报*, 2024, 60(14): 206–214.  
Wang G Q, Xiong H, Hou J J. China aerospace systems engineering method in the digital age [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(14): 206–214.
- [15] 高鹤鹏. 数字经济推动现代化产业体系发展的逻辑与挑战 [J]. *阅江学刊*, 2025, 17(2): 74–85.  
Gao H P. The logic and challenges of the digital economy in promoting the development of a modern industrial system [J]. *Yuejiang Academic Journal*, 2025, 17(2): 74–85.
- [16] 牟华伟, 孙刚, 李昀, 等. 2025 年我国制造业数字化转型发展形势展望 [J]. *机器人产业*, 2025 (1): 6–11.  
Mu H W, Sun G, Li Y, et al. Prospect of digital transformation and development of China's manufacturing industry in 2025 [J]. *Robot Industry*, 2025 (1): 6–11.
- [17] 李明华. 航天复杂巨系统工程管理体系及实施初探 [J]. *工程研究—跨学科视野中的工程*, 2020, 12(2): 155–163.  
Li M H. Preliminary exploration of engineering management system of complex giant aerospace system and implementation [J]. *Journal of Engineering Studies*, 2020, 12(2): 155–163.
- [18] 石小林, 王为. 数字空间站建设及其应用 [J]. *航天器工程*, 2022, 31(6): 76–85.  
Shi X L, Wang W. Digital space station and its application [J]. *Spacecraft Engineering*, 2022, 31(6): 76–85.
- [19] 张柏楠, 戚发轫, 邢涛, 等. 基于模型的载人航天器研制方法研究与实践 [J]. *航空学报*, 2020, 41(7): 023967.  
Zhang B N, Qi F R, Xing T, et al. Model based development method of manned spacecraft: Research and practice [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(7): 023967.
- [20] 鲁春丛. 加快发展工业互联网 [J]. *中国信息化*, 2024 (12): 7–10.  
Lu C C. Accelerate the development of industrial Internet [J]. *China Informatization*, 2024 (12): 7–10.