

# 美国数字工程战略发展分析

## Analysis to the Development of U.S. Digital Engineering Strategy

■ 王巍巍 王乐 / 中国航发涡轮院

美国国防部在2018年颁布了数字工程发展战略，并将该战略定义为美国军工产业的“工业4.0”。美国新安全中心在数字研发策略中明确提出数字工程的发展是确保国防安全的重要策略，已经上升到“国防安全”战略的高度，被视为实现“第三次抵消”战略，以及空军实现“更好购买力”构想的坚实基础。

美国国防部认为，数字工程是在当今复杂多变国际环境下确保国防安全的重要工程，它将以全新的认知和数字化的技术手段保障国防安全装备的发展。数字工程中以真实有效数据为支撑的全生命周期模型的创建，使决策者能够比对手更快地做出准确决策，从而赢得战争主导权。

### 数字工程的源起

美国国防采办系统的改革是实施数字工程的最大推动力。传统研发模式的周期长和费用高一直是装备采办最大的痛点。传统制造业在研发过程中存在着大量设计更改，这些更改大部分都是在设计的中晚期，特别是转入生产后的更改数量明显增加，这是造成费用大幅增长的主要因素。而先进的制造业通过引入数字化新技术，在早期通过需求捕获和权衡分析，在设计初期进行大量设计迭代，但转入生产后的更改数量明显降低，如图1所示。

在产品研发后期的大量更改势必会造成周期拖延和费用上涨。例如，美国现役战斗机F-35的研发依然没有摆脱传统制造业的影响，“拖、降、涨”成为该飞机研制中的诟病。

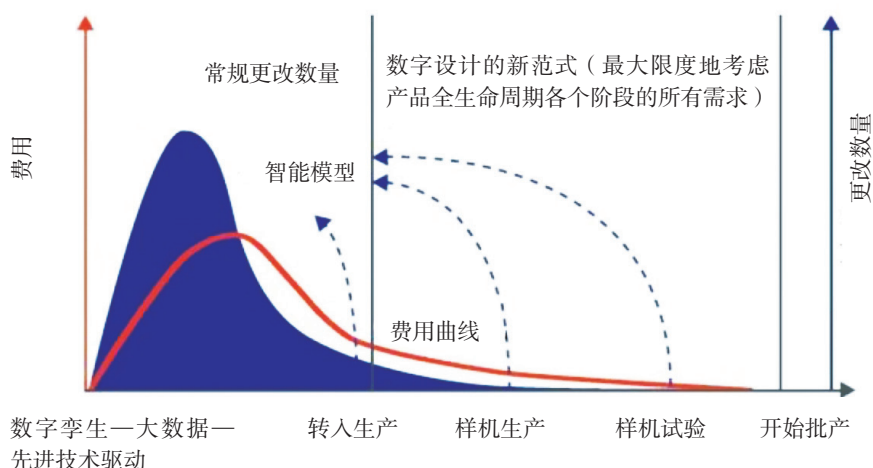
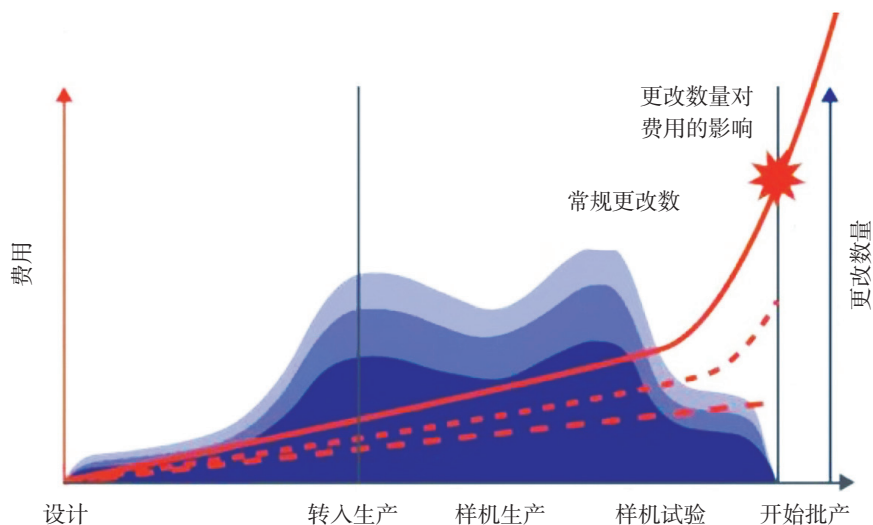


图1 传统制造业与先进制造业的对比

有鉴于此，美国国防部在过去的几十年对采办模式进行了持续改进，如图2所示，但落后的采办模式、复杂的采购系统、成本过高的采购方案并未得到明显改善。为了从根本上解决复杂系统研

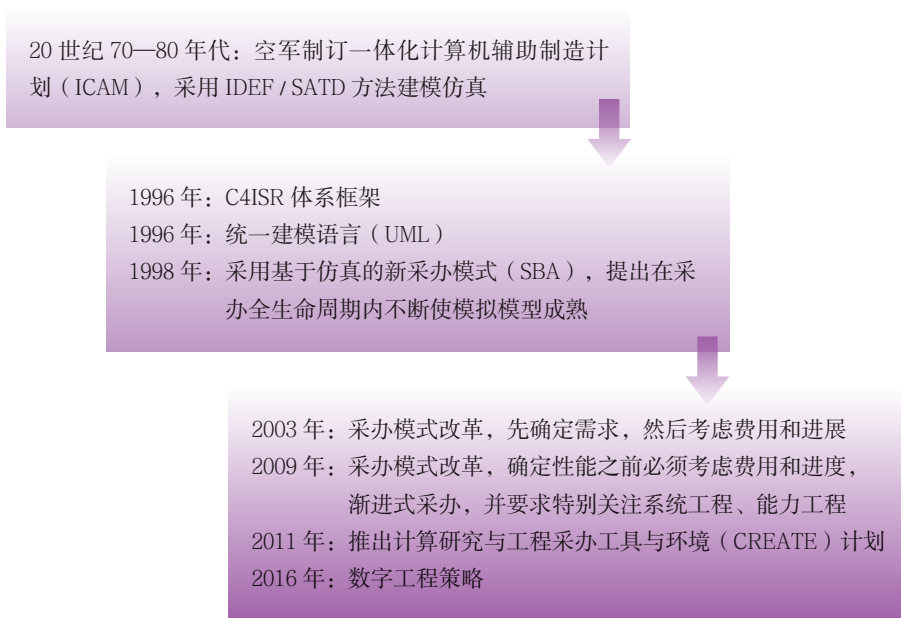


图2 美国国防采办系统改革

制中的周期和费用问题，美国国防部推出了“更好的购买力”和“拥有技术基线”等顶层战略目标。在这些目标的牵引下，数字工程的概念和内核开始逐步成形，而数字工程也反过来成为了实现这些目标的关键。

国防研究与工程网将这些地理位置分散的高性能计算（HPC）用户站点、HPC中心以及其他网络中心连接起来，实现高性能计算资源的共享，有力地支持了美军重大武器系统的研发、试验与评价工作。

2006年启动的计算研究与工程采办工具和环境（CREATE）计划是美国高性能计算现代化计划（HPCMP）的核心方向之一。其目标是开发和部署基于物理特性的高性能计算软件，通过高逼真度虚拟样机的构建和改进支撑飞行器、舰船等国防平台的设计。CREATE在航空领域的实施计划代号为CREATE-AV，于2008年启动，旨在开发、部署和支持一套多学科、基于物理的模拟软件产品。这些产品的设计目的是利用新一代计算机资源和新开发的专业化软件，在产品开发早期预测可能出现的问题和性能异常，尽量减少返工。该项目的实施为数字工程的数字系统模型、数字线索和数字孪生等关键技术的推广引用提供了专业化的软件支撑。

**备选方案权衡分析和虚拟化**

工程弹性系统（ERS）计划，旨在创建一个现代化计算工程工具的集成架构，包括模型、仿真和相

**数字工程的基础**

数字工程的推行不是一蹴而就的，美国国防部自20世纪90年代开始，相继开展了一系列科技计划为实施数字工程奠定了基础，如图3所示。

**超算能力建设与专业化平台和软件开发**

数字工程的实施离不开超级计算能力，美国国防部在1992年推出的高性能计算现代化计划（HPCMP）为实现世界级超级计算能力提供了基础。该计划由硬件、软件和网络三部分构成。其中，硬件方面包括4家重大资源共享中心（MSPC）和17家分布式中心（DC）。HPCMP通过

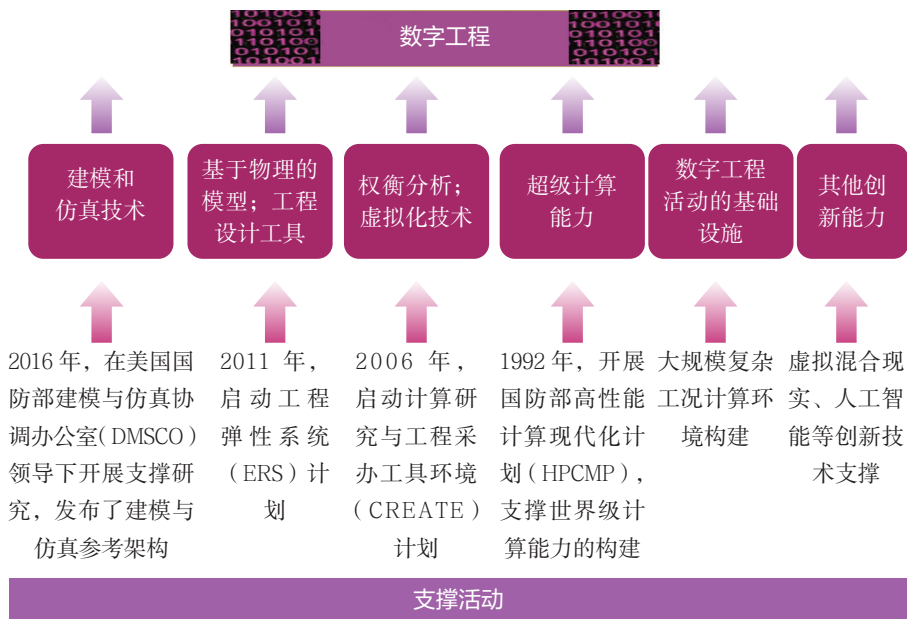


图3 开展数字工程的基础支撑

关能力，以及折中权衡评价与可视化方面的工具，支持采办所有阶段的集成计算环境，实现数据驱动决策。ERS强化需求的生成和备选方案的分析流程，并在权衡过程中提供全生命周期所需要的“情报”，通过权衡分析实现有充分依据的决策，在更短时间内“可视化”更多设计权衡，从而达到量化并降低采办风险。利用ERS平台，可以全面探索并识别关键性能参数（KPP），快速分析诸多备选方案，减少原型机制造时间和成本。目前，美国军队正在ERS的早期概念权衡中引入生命周期成本的分析能力，通过接入成本模型，实现效能、研制周期和经济可承受性三方面的权衡。

### 其他基础支撑

美国国防部建模与仿真协调办公室长期以来不断推进建模与仿真技术的改进升级，在2016年发布了国防建模与仿真参考架构，为数字工程开展跨领域的仿真提供了最佳途径。世界级高性能计算能力的形成、大规模复杂工况计算环境的建设、混合现实和人工智能等新兴技术的发展也成为了发展数字工程的重要支撑。

## 数字工程的关键

数字工程的实施有三大关键技术要素，分别是数字系统模型、数字线索和数字孪生。

数字系统模型是系统、数据、模型、流程等的数字化表现方式，该模型是由系统所有利益相关方生成，集成了权威的技术数据和和相关工件，贯穿了整个系统全生命周期的具体活动，对系统的各个方面进行了定义。数字系统模型的建立是

驱动以数据为中心的基础。

数字线索是数字工程实施最重要的关键技术，数字工程的核心要素是模型，而模型建立所需要的权威数据源则来自数字线索。数字线索技术的应用主要是为了快速生成降阶模型，作为最初的单一权威数据源贯彻到系统全生命周期各个阶段，后面各个时期都以其为基础不断改进。通过采用数字线索，将为复杂产品的研发提供访问数据、整合数据和关联数据等重要能力。

数字孪生体是真实物理实体的虚拟拷贝，用数据的形式映射了一个真实产品从生到死全过程，即真实产品全生命周期的所有行为的真实记录，是真实产品的数据拷贝。数字孪生技术是一种数字技术，通过传感器实时收集物理实体的数据，构建起沟通物理实体和虚拟世界的桥梁，以这些数据为基础构建数字孪生体。数字孪生体是充分利用物理模型、传感器更新、运行历史数据，集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程，在虚拟空间完成映射，从而反映相对应的实体全生命周期过程。

上述三大支撑技术是数字工程能够改写国防采办流程、保障国防安全优势的重要支撑，真正实现以数据为中心的决策。

## 数字工程的实施

为确保数字工程实施，为系统研发决策提供支撑，实现产品快速交付，需要打造适应数字工程的环境，美国数字工程战略实施的主要思路是从五个方向着手推动。

### 模型建设

数字工程的语言是模型，模型

是产品全生命周期的神经系统，在产品全生命周期各个阶段的活动都是通过模型表征。数字工程战略的实施将彻底改变产品研发理念，将通过模型打通产品全生命周期的各个环节，通过模型把产品从生到死的历史全部记录和展示，改变过去以文件为中心的范式，过渡到以模型为中心的范式。

### 数据建设

数据是数字工程的实施基础。要想实施数字工程，首先要对真实权威的数据源进行定义，即什么样的数据是真实的、权威的；其次要对真实的权威数据源进行管理，即对该数据源的访问进行设置和控制；最后要在全生命周期内使用真实的权威数据源，即利用真实的权威数据源作为技术基线，利用真实的权威数据源来创造数字化工件，采用真实的权威数据源来建立协作与沟通。

### 创新技术引进

创新技术的引入是数字工程实施的驱动力，虚拟现实、人工智能、人机交互、数字孪生、增材制造、云计算、大数据等前沿技术将不断融入到数字工程应用实践中，为数字工程的实施提供支撑。

### 基础条件建设

数字工程落地必须要有其实施的基础条件，首先要开发能够实施数字工程的信息技术基础设施，并不断完善和持续应用；其次要开发、完善应用数字工程的方法论；最后要能够确保信息基础设施的安全，其中包含知识产权保护等。

### 文化建设

数字工程是创新的工程，需要有相应的文化来支撑。首先是认知

能力的提升，要更新与完善原有的知识体系，重新构建适用于数字工程的知识库。其次是认同，要大力引导企业、产品和项目等向数字化转型；最后就是要创建数字工程团队，培养数字工程实施所需要的后备人才。

## 数字工程的应用

数字工程在美国已经得到了广泛的推广，政府、军队、工业企业和科研机构等都在试点应用数字工程的关键技术，其中包括波音公司、洛克希德-马丁（洛马）公司和普惠公司等。

### 波音公司的eT-7A项目

波音公司是数字工程的重要推动者和践行者，一直以来积极推动数字工程关键技术的研发，初步实现了从基于文档的二维图样模式向基于模型的数字企业转变。2018年波音公司通过竞标拿到了eT-7A项目，该项目在开展过程中贯穿了数字工程的理念，采用了数字工程的流程，应用了数字工程的关键技术，最终在36个月内完成了从工程设计到首架样机制造，首轮产品设计质量提升75%，装配时间减少80%，软件开发时间减少50%。

### 洛马公司的F-35生产提升改造

洛马公司作为先进战斗机F-35的主承包商，一直以来饱受生产周期长、制造费用高的困扰。为了缩短F-35的生产周期，降低制造成本，洛马公司不断尝试采用新技术，在F-35战机的制造过程中引入数字工程理念，采用了数字线索技术。在F-35战斗机的制造过程中引入三维实体模型，尤其是工装实体模型的建设能够提前避免加工时由于工装

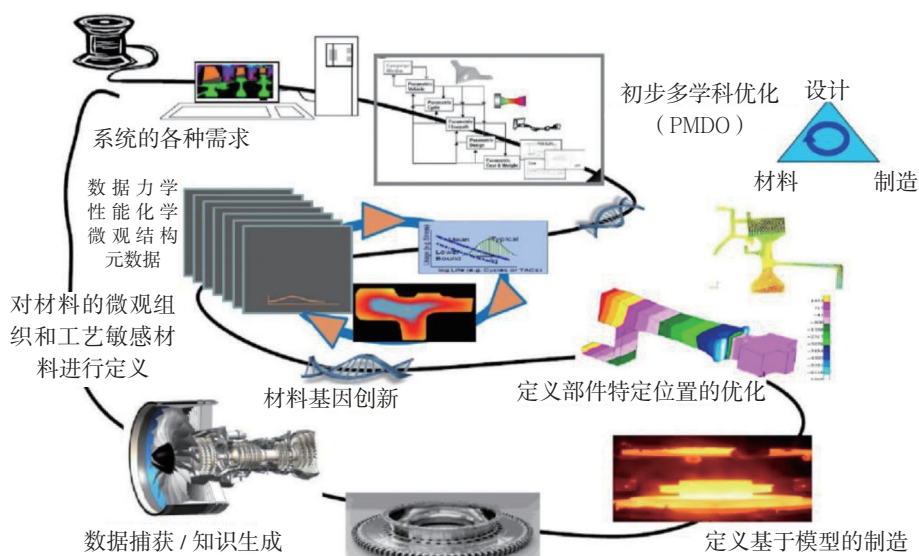


图4 普惠公司在ICME计划中的数字线索应用

干涉造成的工装重新设计，大大提高了工作效率。洛马公司还将数字线索技术应用到了产品加工过程中，如F-35进气道的加工。

引入数字线索技术给F-35战斗机带来了许多益处，使其产量和价格得到了大幅改善，F-35A的价格已经从首批次的每架成本2.44亿美元，降到第11批次的8920万美元，这也说明数字工程的先进理念对降低工程成本方面的成效已经凸显。

### 普惠公司的ICME计划

普惠公司作为F-22、F-35等先进战斗机发动机主要供应商，也一直在尝试应用数字工程的先进技术。材料是发动机研制的最关键要素，传统的材料研发流程通常脱离实际应用，而材料规范也往往基于经验数据。随着数字工程技术的不断引进，航空发动机材料的研发与制造流程和设计紧密联系起来。普惠公司在集成计算材料工程（ICME）计划实施过程中引入了数字线索技术，推动新材料的研发，应用案例如图4

所示。

在ICME计划中，普惠公司采用数字线索技术，基于模型对材料进行定义，够预测特定位置上材料的应用，并在此基础上开展工艺分析和优化。基于模型的材料定义将对材料的研发时间、研发成本等发生重大影响，同时能够使工程上的虚拟制造和部件的虚拟试验成为可能。普惠公司正通过试点项目不断深化应用数字线索等数字工程的关键技术。

## 结束语

数字工程作为研发范式转型的创新，将在国防科技发展中发挥重要作用。美国在全面推进数字工程应用的过程中，形成并坚持了加快推动数字工程、加速关键技术成熟和加强文化认同的经验和共识，并且已经在航空航天领域取得了一定的成效。

航空动力

（王巍巍，中国航发涡轮院，研究员，主要从事航空发动机科技情报研究）