

12-16-2020

## Establishment and Development of Simulation-based Aero Engine Acquisition on

Caiyun Liang

1. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China; ;3. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

Hongxin Li

2. Aero Engine Corporation of China, Beijing 100097, China; ;

Yanfeng Sui

1. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China; ;

Luan Xu

1. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China; ;

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Establishment and Development of Simulation-based Aero Engine Acquisition on

## Abstract

**Abstract:** Follow the increasing demand of aircraft for aero engine's capabilities and because of the increase of engine's own technical difficulty, the risks, cycles and costs of the engine development is rising, and the high demand of traditional acquisition model is urgently needed. The idea of digitalized aero engine acquisition is presented, which starts from joint analysis, applies *multi-dimensional scaling technology*, carries out *integrated simulation* based on the models of each dimension of virtual prototype, and realizes the evaluation of technical scheme. The mapping relationship among technical solutions, schedules and costs etc. are established, and a basic framework for simulation based acquisition of engines is constructed by using the work breakdown structure as the link, to realize the effective integration of physical domain models and acquisition process models, which can quickly predict progress and costs, improve scientific nature of acquisitive evaluation.

## Keywords

aero engine, simulation based acquisition, modeling and simulation, integration simulation

## Authors

Caiyun Liang, Hongxin Li, Yanfeng Sui, Luan Xu, and Shi Feng

## Recommended Citation

Liang Caiyun, Li Hongxin, Sui Yanfeng, Luan Xu, Shi Feng. Establishment and Development of Simulation-based Aero Engine Acquisition on[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(12): 2485-2493.

## 航空发动机虚拟采办的构建和发展设想

梁彩云<sup>1,3</sup>, 李宏新<sup>2</sup>, 隋岩峰<sup>1</sup>, 栾旭<sup>1</sup>, 石峰<sup>1</sup>(1. 中国航发沈阳发动机研究所, 辽宁 沈阳 110015; 2. 中国航空发动机集团, 北京 100097;  
3. 西北工业大学, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 随着飞行器对航空发动机的能力需求和发动机自身技术难度的提高, 其研制的风险、周期、成本不断上升, 对采办模式也提出了更高的要求。提出将发动机采办过程数字化的思路, 从联合需求分析入手, 运用多维缩放技术, 以虚拟样机各维度的仿真模型为基础, 开展一体化仿真, 实现对技术方案的评估; 以工作分解结构为纽带, 建立技术方案、进度和费用等的映射关系, 构建发动机虚拟采办的基本框架, 实现物理域模型与业务域模型的有效集成, 可快速预测进度和费用, 提升采办评估的科学性。

**关键词:** 航空发动机; 虚拟采办; 建模与仿真; 一体化仿真

中图分类号: TP391.9, V23      文献标识码: A      文章编号: 1004-731X (2020) 12-2485-09  
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-FZ0426

## Establishment and Development of Simulation-based Aero Engine Acquisition on

Liang Caiyun<sup>1,3</sup>, Li Hongxin<sup>2</sup>, Sui Yanfeng<sup>1</sup>, Luan Xu<sup>1</sup>, Shi Feng<sup>1</sup>(1. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China; 2. Aero Engine Corporation of China, Beijing 100097, China;  
3. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Follow the increasing demand of aircraft for aero engine's capabilities and because of the increase of engine's own technical difficulty, the risks, cycles and costs of the engine development is rising, and the high demand of traditional acquisition model is urgently needed. The idea of digitalized aero engine acquisition is presented, which starts from joint analysis, applies *multi-dimensional scaling technology*, carries out *integrated simulation* based on the models of each dimension of virtual prototype, and realizes the evaluation of technical scheme. The mapping relationship among technical solutions, schedules and costs etc. are established, and a basic framework for simulation based acquisition of engines is constructed by using the work breakdown structure as the link, to realize the effective integration of physical domain models and acquisition process models, which can quickly predict progress and costs, improve scientific nature of acquisitive evaluation.

**Keywords:** aero engine; simulation based acquisition; modeling and simulation; integration simulation,

## 引言

航空发动机的研制过程是一项跨地域、跨学科



收稿日期: 2020-05-30      修回日期: 2020-08-13;  
基金项目: 总装备部仿真技术预研项目(41401030302);  
作者简介: 梁彩云(1971-), 女, 辽宁, 博士生, 研究员, 研究方向为航空发动机总体、系统仿真; 李宏新(1969-), 男, 辽宁, 博士, 研究员, 研究方向为航空发动机研制体系及仿真; 隋岩峰(1976-), 男, 山东, 博士, 研究员, 研究方向为系统工程、建模与仿真。

且高度协同的复杂系统工程, 具有技术难度高、研制周期长, 投入经费多的特点。随着飞行器对航空发动机的研制提出了更高的要求, 以及发动机自身技术难度的提高, 其研制的风险、周期和成本也不断上升, 这就需要在研制中对技术、进度和经费进行更有效的把握和预测, 采用虚拟的方式对航空发动机的采办过程进行快速评估。

<http://www.china-simulation.com>

• 2485 •

美国国防部于 1994 年提出虚拟采办 (Simulation Based Acquisition, SBA, 又称基于仿真的采办) 的概念, 1999 年, 美国国防部在武器及自动化信息采办管理策略中确定了建模与仿真 (Modeling and Simulation, M&S) 在项目决策中的关键地位, 国防采办的顶层政策文件 DoD 5000.1 修订版将虚拟采办视为基本策略和原则, 要求项目管理者在采办过程中有效利用建模与仿真。美国在许多重大项目中进行了虚拟采办研究与应用, 如联合歼击机 (Joint Strike Fighter, JSF)、F22“猛禽”战斗机、波音 777 飞机、X32 等项目, 获得了巨大的成功<sup>[1]</sup>。欧洲各国也提出了建模与仿真应用计划, 用于支持武器装备的研制和采办过程的多学科优化, 以适应未来多变复杂多变的战场环境, 有效提升综合作战能力<sup>[2]</sup>。

国内航天企业和部分高等院校从“十五”期间开展虚拟采办技术和应用技术研究, 取得了一定的成果。航天二院等单位以航天武器装备采办为背景, 开展虚拟采办研究, 开发了自主知识产权的虚拟采办支撑环境原型系统, 成功开发并应用了复杂产品虚拟样机工程支撑平台, 建立了多学科虚拟样机协同平台, 并且应用该平台初步实现了航天复杂产品的多学科优化, 以及虚拟采办费用、进度、风险等管理决策的建模与仿真<sup>[3-4]</sup>; 华中科技大学以导弹武器装备采办为背景, 开展了基于工作分解结构的虚拟采办系统分析和协同建模研究, 开展了多维建模和仿真研究, 研究了面向虚拟采办的综合决策方法研究<sup>[5-6]</sup>。

航空发动机作为“航空工业皇冠上的明珠”, 由于技术难度大, 并且涉及学科及领域众多, 导致研制周期长、研制费用和采购费用昂贵。为有效避免采办过程中的“拖、降、涨”现象, 在实施过程中, 对采办评估精度、效率和过程控制都提出了高精度、高效的要求, 因此亟需开展航空发动机虚拟采办应用技术研究, 将采办过程数字化, 充分利用建模与仿真的手段实现定量评估, 辅助开展有效的研

制决策。

本文针对航空发动机研制特点, 开展航空发动机虚拟采办应用技术研究, 探索虚拟采办的建模思路和方法, 构建航空发动机虚拟采办的顶层框架, 建立技术方案、进度和费用等的映射关系, 量化评估和预测项目的费用和周期, 提升评估过程的科学性和可行性; 并提出航空发动机虚拟采办未来的重点发展方向。

## 1 综述

### 1.1 航空发动机采办过程

采办 (Acquisition) 的概念来源于美国军方, 是指为满足国防需求, 完成或保障某项军事任务, 对武器和其他系统、供应品或服务开展方案探索、立项、设计、开发、试验、签订合同、生产、部署、后勤保障、改进改型和报废的整个过程<sup>[7]</sup>, 航空发动机作为武器系统之一, 其采办是指, 为满足国防需求, 发展、获取和使用高新技术航空发动机的全过程。

在航空发动机采办过程中, 为实现战技性能, 并利用有限的资源实现国家的安全战略和军事战略的重要保障, 需要通过利用新技术, 提高发动机技术水平和作战能力, 系统规划, 减少周期, 节省费用。航空发动机采办采用全寿命管理、分阶段评估的模式, 全寿命管理划分为若干相互独立的子阶段, 在子阶段设置里程碑决策点。开展采办项目审查时, 根据当前阶段的研制要点, 针对该阶段的研制进展、性能、进度和费用的风险进行评估, 决策项目是否能够通过里程碑审查, 保证航空发动机项目能够以低风险的状态从一个阶段进入下一个阶段。

采办方对于航空发动机采办项目实施宏观决策和调控, 工业部门负责项目的具体计划、研发活动的实施和协调, 并接受采办方的监督、控制和指导。

### 1.2 虚拟采办

航空发动机虚拟采办以建模与仿真为工具, 进行虚拟模型的开发和集成, 对采办性能、进度、费用、风险进行综合分析、评估, 快速地展示采办过程, 图 1 诠释了航空发动机虚拟采办的过程。

图 1 可以看出, 发动机虚拟采办是从需求分析开始, 立项论证、方案论证、工程研制、生产部署、使用保障直至退役报废的整个生命周期全过程。在需求分析阶段, 虚拟采办可以从国家战略层面到联合作战任务的联合需求分析; 在发动机立项、方案论证阶段, 虚拟采办可以快速的进行多方案虚拟仿真验证、迭代, 预测不同的技术方案与费用和进度的对应关系, 辅助方案优选; 在进入工程研制阶段

之后直至退役报废, 基于数字化设计和制造、虚拟的装配和维护、虚拟试验和虚拟报废等人机交互仿真, 对发动机虚拟样机的性能及其进度和费用等进行有效的预测和评估。

航空发动机虚拟采办是现实世界中传统的实物采办在数字世界中的映射。在虚拟环境中, 针对采办过程开展建模与仿真分析, 通过仿真工具和技术的集成, 实现采办过程中不同角色用户的协同, 使得采办方和工业部门在航空发动机研发的各个阶段能够更为密切合作, 更好地支持航空发动机采办过程。其中, 性能、费用、进度等作为采办的主要决策要素, 彼此之间相互联系、相互影响, 需要在虚拟采办过程中综合集成。

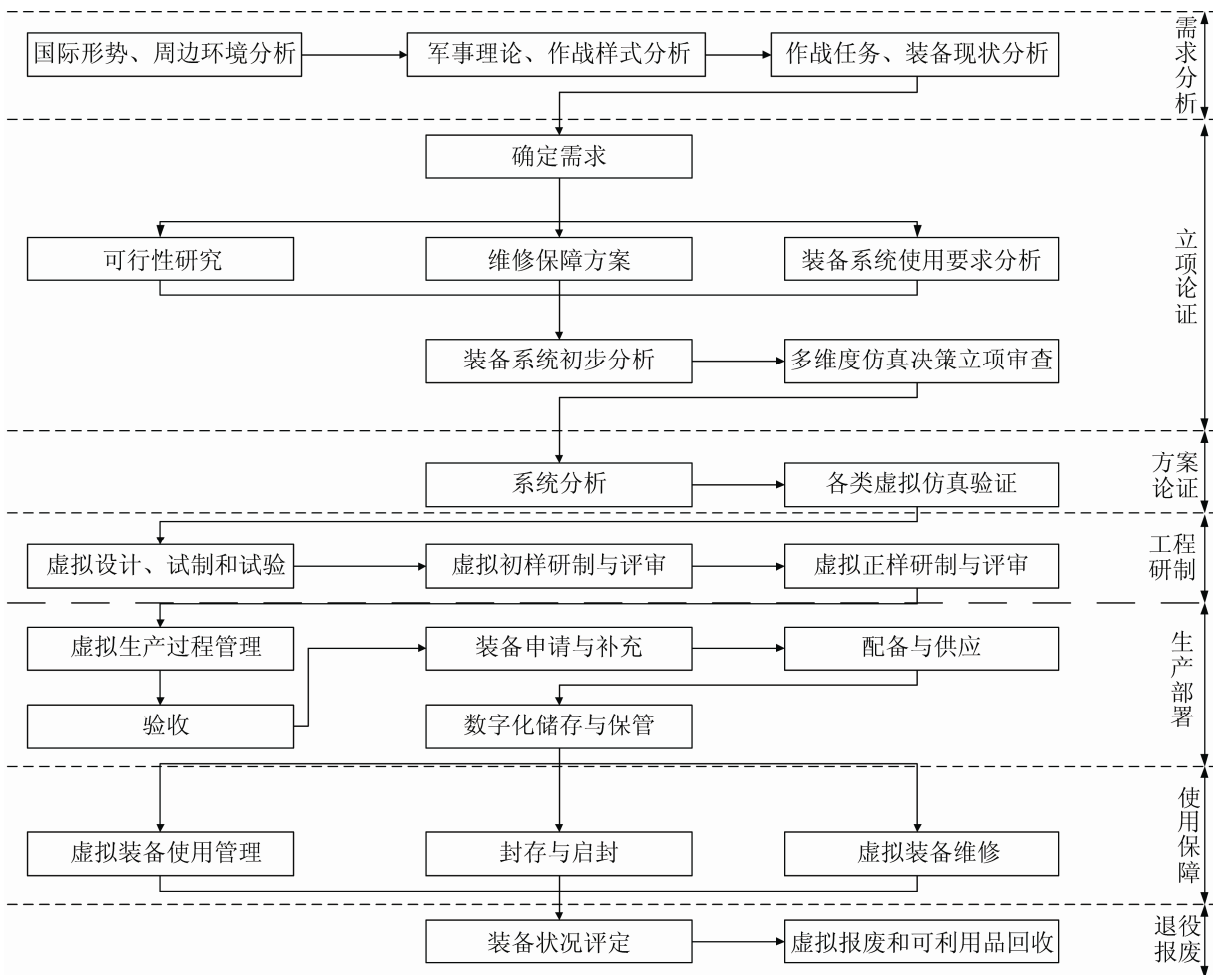


图 1 航空发动机虚拟采办过程  
Fig. 1 Process of aero engine SBA

## 2 构建思路

### 2.1 虚拟采办的组成与作用

航空发动机虚拟采办构建的是基于需求牵引, 模型驱动的采办模型。模型主要评估采办的项目性能指标、费用指标和进度指标。由于性能指标和费

用指标、进度指标有着本质上的区别, 前者是技术研发视角, 后者是项目管理视角, 因此按照工作域不同, 分成物理域模型和业务域模型。对图 1 航空发动机虚拟采办过程的相关活动进行分解, 得出虚拟采办主要由需求域、物理域和业务域 3 部分模型组成, 其组成如图 2 所示。

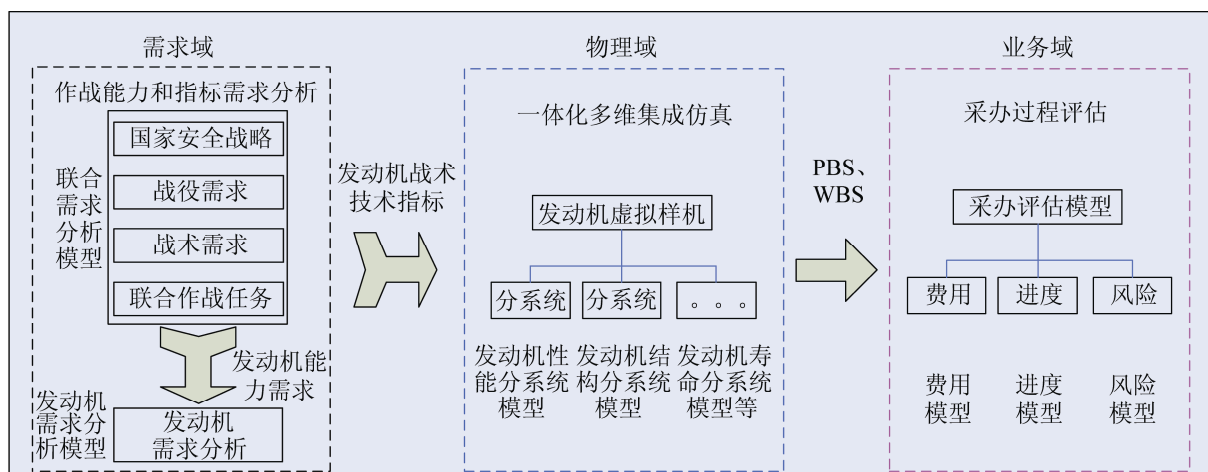


图 2 航空发动机虚拟采办框架  
Fig. 2 Framework of aero engine SBA

需求域由联合需求分析模型和发动机需求分析模型<sup>[8]</sup>组成, 确认航空发动机的产品需求可以满足利益相关者(采办方、飞机方等)的需求, 确保驱动采办活动的所有需求是完整、正确的, 需求域是开展虚拟采办的源头, 经过需求域分析获得的发动机能力需求和发动机战术技术指标是物理域模型的重要输入。

物理域主要由发动机虚拟样机(模型)组成, 通过虚拟样机的仿真验证, 确保发动机的技术方案满足利益相关者的能力指标要求, 技术方案合理可行。虚拟样机从工业部门专业技术角度(包括设计、生产、装配、试验、维护等)满足航空发动机全生命周期各个阶段对模型的使用需求, 物理域明确和定义每个阶段虚拟样机需要解决的问题及其目标要求。物理域模型形成的发动机产品分解结构(Product Breakdown Structure, PBS)、工作分解结构<sup>[9-10]</sup>(Work Breakdown Structure, WBS)。PBS 与 WBS 共同作为业务域模型的重要输入。

业务域主要由费用模型<sup>[11]</sup>、进度模型和风险模型等组成。基于 PBS、WBS 和技术成熟度, 进一步开展性能、费用、进度和风险等多维结构分解, 形成费用分解和进度分解, 对采办过程的费用指标和进度指标的合理性和可行性进行评估和预测, 估算出各阶段采办风险发生的概率和可能造成的损失, 辅助采办决策。

### 2.2 各组成部分的内涵

航空发动机虚拟采办框架建立了从需求到技术方案与费用、进度的映射关系, 保证数据的一致性和完整性, 从而使航空发动机的采办过程更加显性化。航空发动机虚拟采办过程, 是通过联合需求分析, 确认形成发动机的研制需求, 以研制需求为依据, 开展仿真设计验证活动, 形成航空发动机技术方案, 从而确定发动机 PBS、WBS, 通过多维结构分解, 实现费用和进度的预测。图 3 展示了需求域、物理域和业务域 3 部分模型的关系, 整个模型由 3 个维度组成。

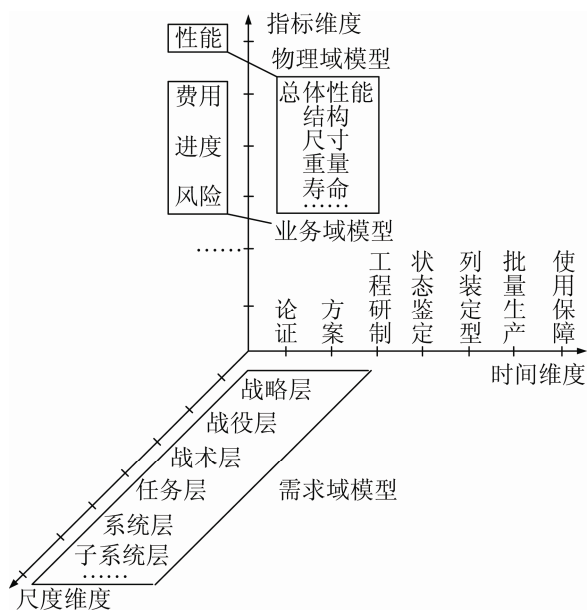


图 3 3 部分模型的关系

Fig. 3 Relationship of three models

### (1) 需求域模型

需求域模型对应虚拟采办的尺度维度, 主要开展联合需求分析和航空发动机产品的需求分析和论证, 将国家战略需求、战役需求、战术需求, 到飞机任务需求逐级分解, 获得发动机能力需求, 并进一步转换为发动机的战术技术指标。

联合需求分析模型首先根据国家战略需求分析, 确定由国家安全局势、未来的国家安全挑战以及潜在的安全假设所决定的国家未来战役需求; 根据国家潜在的战役需求, 开展作战场景分析, 确定作战能力需求, 进一步分析空军、海军的战术特征对发动机的战术需求, 确定发动机的典型任务, 以及战斗机、远程轰炸机、大型运输机等发动机的种类需求、数量需求; 最后, 根据飞机对发动机需求以及市场对发动机的能力需求, 确定发动机整机的功能、性能等能力需求。

发动机需求分析模型是将发动机的能力需求转换为发动机整机的实体要求, 如: 飞行包线、功率提取、推力/耗油率、构型、流量、尺寸、重量、寿命、隐身等战术技术指标。战术技术指标逐级分解, 并进一步转换为部件/系统技术指标, 如压气机的流量、温度、压力、效率、喘振裕度、材料与

工艺等。

每个阶段对需求分析的结果定位不同, 随着采办过程在时间维度上的推移, 需求分析不断深入, 对发动机需求描述的详细程度也逐渐细化。

### (2) 物理域模型

物理域模型对应虚拟采办指标维度中的项目性能指标, 验证航空发动机技术方案与已分配设计需求的一致性, 物理域模型主要开展项目性能指标的仿真, 性能指标通过项目的技术成熟度和技术贡献度做出评判和预估, 技术成熟度是关键技术满足项目性能目标程度的度量, 技术贡献度是指某项技术能够使得其所在分系统获得特定功能的重要程度, 以及该技术对于其他分系统的重要程度的综合度量。两者是业务域项目风险的主要参考因素。

项目性能指标的仿真即发动机技术方案仿真, 对各项技术指标进行仿真验证, 以立项论证和方案论证阶段的虚拟样机为例, 需求域模型获得的战术技术指标为输入, 对发动机总体性能、结构、尺寸、重量、寿命等分系统开展建模分析、仿真: 性能分系统可以以积木的形式, 构建任意构型的发动机性能模型; 结构分系统可以参数化建模, 形成较为真实的发动机结构模型, 为重量分系统提供输入参数; 通过重量分系统, 实现对发动机各部件重量及发动机整机重量的快速估算; 寿命分系统, 能够快速评估轮盘、轴、机匣和叶片等关键件寿命; 在各分系统模型基础上, 将不同维度的模型集成, 根据采办不同研制阶段的需求, 实现航空发动机一体化模型(发动机虚拟样机), 形成 PBS、WBS。通过技术分解结构(Technology Breakdown Structure, TBS), 利用技术成熟度和技术贡献度的评价分析方法, 将各技术的成熟度和贡献度量化排序, 为采办项目性能指标的决策提供帮助, 同时为业务域的费用效能分析提供参考依据。

每个阶段对虚拟样机的需求是不同的, 随着研制工作的深入而不断细化。在立项论证、方案论证阶段, 主要是多方案筛选, 确定每个部件/系统的构型, 在工程研制阶段之后, 主要是虚拟制造、虚

拟装配、虚拟验证、虚拟维护以及虚拟销毁, 预测实际使用过程中的功能、性能、维护保障性等。

### (3) 业务域模型

业务域模型对应虚拟采办指标维度中的项目费用指标和进度指标, 是验证航空发动机技术方案与已分配采办项目需求(费用、进度等)的一致性, 主要是采办方综合衡量发动机研制的性能与费用、进度等指标, 预测费用和进度, 确保项目的整体把控, 业务域是虚拟采办过程评估的具体实现。

业务域模型根据物理域生成的 PBS 和 WBS, 将费用指标和进度指标分解, 并与 PBS、WBS 工作梳理出的材料、设计、加工(含工艺)、工具、方法等的成熟度和技术贡献度等建立映射关系, 形成多维分解结构, 对发动机整机、部件/系统层、零组件层的材料费、设计费、试制费、试验费、专用费、外协费以及后期维护保障费用、工时、周期等费用和进度指标进行评估, 随着虚拟采办时间维度上的推移, PBS 和 WBS 逐渐细化, 技术成熟度不断提升, 对费用、进度的评估和预测也逐渐细化、客观和合理。

业务域模型常用的方法有参数估算法、工程估算法、类比分析法和专家判断法等。本文采用基于参数法的集成化成本估算及经济性分析工具, 通过对历史项目数据的回归分析, 结合项目成本估算最佳实践经验, 开发的费用估算关系式。根据 PBS、WBS 和 TBS 属性信息的支持, 建立工时与费用之间的函数关系, 可以反映航空发动机的技术规格参数、项目特征及组织经济环境与费用和进度的定量关系, 开展项目费用和进度不确定性分析, 通过建立航空发动机估算模型, 得出准确、量化的估算结果。

## 3 建模关键技术

### 3.1 多维缩放技术

航空发动机具有结构复杂、多专业、多系统耦合的特点, 航空发动机虚拟采办必须实现对多学科

多系统的不同维度的模型的数据交换, 多维度缩放是实现模型数据交换的关键技术之一。多维缩放技术在物理域模型和业务域模型的缩放示意如图 4 所示。

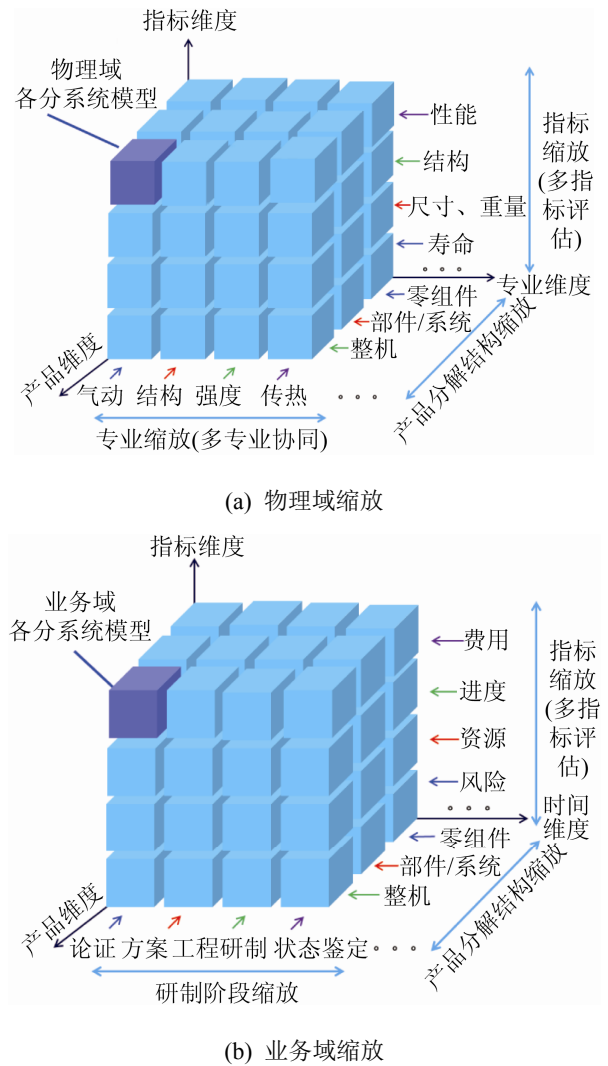


图 4 航空发动机多维缩放技术

Fig. 4 Scaling Technology of aero engine multi-dimensional models

#### (1) 物理域模型缩放

物理域模型的多维缩放为一个或数个高保真度的仿真模型与其它低维度仿真模型的自动无缝集成, 目的是可以使各分系统在虚拟样机中得到全面、快速的评价, 同时分系统对整个系统的影响可以被快速和准确的评价, 高精度的模型只用作特别的分析手段用于感兴趣的子分系统, 使得虚拟样机的



精度可以灵活调整以适应分析要求, 大大降低了对计算资源的要求。当虚拟样机某一分系统的设计有了改动之后, 只需要对该系统进行高维度的分析, 而其余分系统依然采用低维度分析, 从而提高仿真效率。

图 4(a)中专业维度代表发动机涉及的多学科, 如: 气动、结构、强度、传热、材料等专业, 产品维度指发动机产品分解结构可分为整机级、部件/系统级、零组件级, 指标维度是虚拟采办关注的航空发动机的各项指标, 3 个维度共同组成了物理域模型, 在不同研制阶段, 根据研制任务的需求可将产品分解结构缩放为不同维度, 如论证阶段, 需要满足顶层技术指标, 分析论证工作主要集中在整机层, 可将产品分解结构缩放在整机层, 通过专业维度的各专业协同设计, 仿真分析整机层的性能、结构、重量、寿命等是否满足要求; 方案设计阶段, 需要各部件系统提供具体的方案, 但尚未涉及到具体零件结构的细节, 因此可将产品分解结构缩放在整机层和部件/系统层, 各部件、系统根据专业分工, 开展整机和部件/系统层的仿真分析; 在工程研制阶段以后, 需要出详细的设计图纸, 因此将产品分解结构缩放在整机层、部件/系统层以及零组件层, 需要开展全层级、各专业详细的仿真分析, 确保满足所有需求。

多维度缩放技术为发动机设计和开发提供了更多的优势, 使部件设计可以更完整快速的在发动机系统中得到评估, 系统级仿真和优化更加高效, 发动机模型的精度和分辨率更满足分析需求, 同时只针对重点关注的部件做高分辨率仿真, 降低了计算资源消耗, 设计的效率也得到了提升。

### (2) 业务域模型缩放

业务域模型的缩放目的与物理域模型相同, 只是维度与物理域维度略有不同, 关注的指标也不同, 主要针对费用、进度、风险等多个维度指标在进行具体分析时, 根据分析对象的 PBS 和 WBS 进行不同维度缩放, 在保证评估精度的同时, 缩短评估周期。理论上, 细化的颗粒度越小,

仿真的精度越高, 但由于研制的早期阶段不能保证提供足够细的层级, 必须开展业务域多维缩放技术研究, 确保相关分析模型可以在基于各个层级分析时均获得较高的精度。根据不同研制阶段的要求确定 PBS 的具体层级, 如论证阶段更多的工作集中在论证分析, 具体的发动机结构细节无法给出, PBS 只分解到整机层, 此时只能根据以往型号经验进行费用和进度的初步估算; 进入方案设计阶段, PBS 可以分解到部件/系统层, 可对项目的费用和进度进行较为粗略的评估; 进入工程研制阶段后, PBS 已分解到零组件层, 确定选用何种材料或加工工艺, 可对项目的费用和进度进行详细的预测; 总之综合考虑项目不同阶段研制涉及到的产品结构层级以及 PBS 不同层级牵引出的设计、采购/试制、装配、试验、保障等不同类型的工作, 最终确定该项目基于 PBS 的 WBS 具体层级, 对项目不同研制阶段、不同产品层级和不同类型工作的费用和进度评估。

业务域模型的多维缩放技术, 可以快速评估费用、进度和风险, 根据不同研制阶段的需求和分析对象的缩放, 在保证评估精度的同时, 缩短评估周期。

## 3.2 一体化集成仿真技术

航空发动机虚拟采办一体化集成仿真是将不同学科领域、不同人员、不同工具及模型之间的数据交互, 即将图 4 中的各个正方体代表的分系统模型集成在一起, 主要解决不同学科间耦合的壁垒, 权衡多个学科之间的相互影响, 包括两个层面, 一个是物理域模型的一体化集成仿真, 将“孤立”的、不同维度的设计仿真模型联接在一起, 使他们相互配合, 协同工作, 实现项目性能指标(发动机技术方案)的综合快速评估; 一个是整个虚拟采办过程的一体化, 将需求域、物理域和业务域 3 部分模型一体化集成起来(如图 2 所示), 使之成为一个有机的整体, 实现项目的性能、费用和进度的综合评估。

虚拟样机是物理域一体化集成仿真的模型, 能

够为不同领域的应用提供相应的设计信息和数据,不同的应用可以从虚拟样机模型描述中抽取针对特定应用的模型数据,进行分析和评估。

虚拟采办一体化模型是将 3 个不同领域的模型进行集成,为不同参与者之间的数据共享和数据交换提供支持,将物理域模型中不同技术成熟度的技术通过与 PBS 和 WBS 建立关联关系,融入到业务域模型,该一体化模型综合考虑各种成熟度不均衡的技术之间对采办费用、周期、资源、风险的影响,利用技术贡献度分析,对不同技术成熟度的技术权衡和排序,在同一层面上量化比较,使得虚拟采办的综合收益最大化。

通过一体化集成仿真技术,建立了各学科的映射关系,理清了数据传递关系,构建了一体化模型,实现航空发动机虚拟采办一体化模型的集成和协同仿真。

## 4 发展方向

航空发动机虚拟采办可以助推采办“更好、更快、更省”的开展,是一项融合不同组织、技术和管理要素的复杂系统工程,国内研究刚刚起步,还有很多方面待发展,未来在以下 5 个方向着重开展。

### (1) 模型间的映射关系建立

模型间的映射关系是各种仿真应用之间的桥梁,是支持建模与仿真工具和资源跨职能部门、跨采办阶段、跨采办项目集成的基础,仿真模型涉及众多学科,并且各个学科之间紧密耦合,相互影响,因此需要着重研究模型间的映射关系,将高保真度的仿真模型与其它低维度仿真模型自动无缝集成,提高仿真效率。

### (2) 虚拟样机的建设

虚拟样机可以对采办对象开展虚拟设计、虚拟制造、虚拟测试与评估、虚拟使用与维护、虚拟报废等活动,对发动机各种功能、性能、结构完整性等运行情况开展预测,并将相关数据提供给分析决策模型,供采办方评估决策。通过虚拟样机的建设,

可以代替制造、装配、试验、测试等环节,缩短研制周期和降低成本,因此后续建立完善各种类型的虚拟样机,不断提高各种机模型的精度,进而可以通过虚拟样机代替各类制造和试验验证,降低研制周期和采办费用。

### (3) 技术成熟度评价体系

航空发动机作为复杂综合系统,集成了大量的技术,技术成熟度是保证航空发动机研制质量、控制技术风险的重要工具之一,不成熟的技术易造成项目费用的超支和进度延迟。研究航空发动机技术成熟度评价标准、准入准则,以技术成熟度方法作为评估手段,能够客观地规范新技术的准入,降低新技术应用所带来的风险,提高项目成功的概率。

### (4) 技术贡献度评价模型

由于发动机技术存在“牵一发而动全身”的现象,例如某项技术提升了发动机的部件效率,但带来新结构、新材料的成熟度不足、试制、维护费用高和周期的增长,因此需要进行技术贡献度分析,综合评估考虑性能、经济性、进度 3 个主要采办目标,构造一个综合三类目标的优化量化评估模型,通过约束最优化方法进行求解,从而得到最优方案的各项指标取值,提高采办方的投资效益。

### (5) 采办仿真数据的获取

虚拟采办模型的评估精度与以往研制经验数据的累积量(样本数量)息息相关,经验数据量越大,虚拟采办模型的评估精度越精确。采办仿真数据作为虚拟采办的重要要素之一,对于提高仿真模型的准确性,增加建模和仿真结果的可信度都有决定性的作用,未来需要注重采办仿真数据的收集、积累和共享,采用大数据技术,从而更好地服务于虚拟采办模型。

## 5 结论

针对航空发动机虚拟采办,本文对其建模思路和方法进行了深入的研究,提出了航空发动机虚拟采办的构建思路,建立了需求域、物理域和业务域模型及其映射关系,使不同专业、不同部门的人员

能够协同地开展航空发动机系统及分系统的设计和仿真验证, 可实现航空发动机性能、费用和进度的预测, 提升采办评估的科学性。

航空发动机虚拟采办的建立, 可实现航空发动机采办过程的仿真, 用于预测航空发动机研制风险和关键控制点, 支撑航空发动机的全寿命管理的产品验证和评估决策, 未来重点发展模型间的映射关系、虚拟样机、技术成熟度和技术贡献度, 补充和完善采办仿真数据, 为采办的决策和研制提供技术支持。

### 参考文献:

- [1] 赵超阳, 谢冰峰, 王磊. 变革之路-美军装备采办管理重大改革与决策[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.  
Zhao Chaoyang, Xie Bingfeng, Wang Lei. The Road of Revolution: Critical Reforms and Decisions on U.S. Defense Acquisition Management[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- [2] 杨克巍, 赵青松, 姜江, 等. 武器装备采办管理[M]. 北京: 科学出版社, 2015.  
Yang Kewei, Zhao Qingsong, Jiang Jiang, et al. Weapon Defense Acquisition Management[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [3] 曲慧杨, 朱耀琴, 蒲睿英, 等. 复杂装备虚拟采办平台技术研究[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(12): 4677-4692.  
Qu Huiyang, Zhu Yaoqin, Pu Ruiying, et al. Simulation-based Acquisition Platform for Complex Equipment[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(12): 4677-4692.
- [4] 周振浩, 曹建国, 王行仁. 基于仿真的采办(SBA)研究与应用对策[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(9): 1261-1264.  
Zhou Zhenhao, Cao Jianguo, Wang Xingren. Guidance of SBA Research and Application[J]. Journal of System Simulation, 2013, 15(9): 1261-1264.
- [5] 白勇军, 陈阳, 赵勇. 基于 WBS 的虚拟采办系统分析与协同建模研究[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(12): 2768-2776.  
Bai Yongjun, Chen Yang, Zhao Yong. System Analysis and Collaborative Modeling Research on WBS-based SBA[J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(12): 2768-2776.
- [6] 白勇军, 陈阳, 赵勇. 虚拟采办中多维建模与仿真研究[J]. 计算机工程与科学, 2011, 33(3): 119-128.  
Bai Yongjun, Chen Yang, Zhao Yong. Multi-Dimensional Modeling and Simulation in SBA[J]. Computer Engineering & Science, 2011, 33(3): 119-128.
- [7] Cochrane C B, Hagan G J. Glossary of Defense Acquisition Acronyms & Terms[M]. 10th Ed. Fort Belvoir, Virginia: Defense Acquisition University Press, 2001.
- [8] 史妍妍, 王桂华, 刘庆东, 等. 基于需求的航空发动机研制过程分析[J]. 航空科学技术, 2017, 28(1): 48-53.  
Shi Yanyan, Wang Guihua, Liu Qingdong, et al. Aircraft engine development process analysis based on requirements[J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28(1): 48-53.
- [9] 于海顺, 赵娜, 史妍妍, 等. 航空发动机工作分解结构(WBS)构建方法[J]. 航空发动机, 2018, 44(3): 97-102.  
Yu Haishun, Zhao Na, Shi Yanyan, et al. Research on Aeroengine Work Breakdown Structure[J]. Aeroengine, 2018, 44(3): 97-102.
- [10] 李伦未, 王小瑞, 蔡祥, 等. 航空涡喷涡扇发动机研制通用 WBS 构建和应用[J]. 航空标准化与质量, 2015(2): 16-17.  
Li Lunwei, Wang Xiaorui, Cai Xiang, et al. Research and application of general WBS on turbojet and turbofan engine[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2015(2): 16-17.
- [11] 宋明, 刘丽. SBA 中生命周期费用预测算法库的研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(增 2): 23-30.  
Song Ming, Liu Li. Research on Algorithm Library of Prediction in Life Cycle Cost[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(S2): 23-30.