

基于数字孪生的商用航空发动机构型管理

Configuration Management of Commercial Aero Engine Based on Digital Twin

张艳丽 孙振宇 李琦 郝朝杰 梁晶晶 / 中国航发商发

数字化仿真技术是航空发动机自主研发的必要手段，能够显著降低研发成本、缩短研制周期。通过建立产品全生命周期的数字化管理流程，结合系统工程的构型管理工具和手段，构建基于数字孪生的商用航空发动机构型管理框架成为一种必然。

我国的商用航空发动机自主研发起步晚、时间紧、技术攻坚难度大，构型管理工作面临数据量大、借鉴少、构型多、变更勤，以及取证任务紧迫等困难。构型管理作为产品全生命周期的系统工程，融合数字孪生（digital twin）的管理理念，通过构型管理工具，利用数字化的手段驱动孪生体之间数据的相互流通和不断修正，实现商用航空发动机的开发、设计、仿真测试和运维。

数字孪生的应用发展

数字孪生概念是由美国空军研究实验室（AFRL）于2011年3月明确提出，之后的十余年在航空航天以及相关领域得到了发展和推广，如图1所示。

美国国家航空航天局（NASA）与AFRL合作的F-15战斗机，在合作过程中构建了战斗机的数字孪生体，通过对在役飞机机体结构开展健康评估和损伤预测，提供预警并给出维修、更换的指导意义。美国洛克希德-马丁（洛马）公司生产的F-35“闪电”II通过数字孪生技术，大大提升了军用战斗机制造和装配的自动化程度。法国达索公司通过3D Experience提出了体验平台实现

与产品的数字孪生互动，用飞机雷达示范开展验证工作，并提出了未来推广应用至航空业、矿业、城市规划等各种领域的数字孪生概念^[3]。

数字孪生概念广泛应用于预测性维修服务，通过大量采集飞行数据、环境数据等建立分析模型，通过模型数据来判断磨损情况和预测维修时机，从而实现故障的预测和监控。

构型管理的数字孪生架构

构型管理通常分为五大模块：构型管理策划、构型标识、构型控制、构型纪实和构型审核，如图2所示。通过对构型管理核心模块功能与数

字孪生的耦合分析，可以构建基于数字孪生的构型管理架构，如图3所示。构型管理五大核心模块的数字化架构各自独立又紧密结合，相辅相成、互为输入，最终构建成了构型管理的数字孪生架构。

数字化的构型管理策划

作为龙头和牵引的构型管理策划，在立项后需要搭建数字化的构型管理策划架构，并在后期研制和验证工作中不断修正和优化。

数字孪生的关键在于大量数据的挖掘，利用有效的标识和序列关系，将无序的数据从物理实体映射到数字世界的孪生体，从而实现数

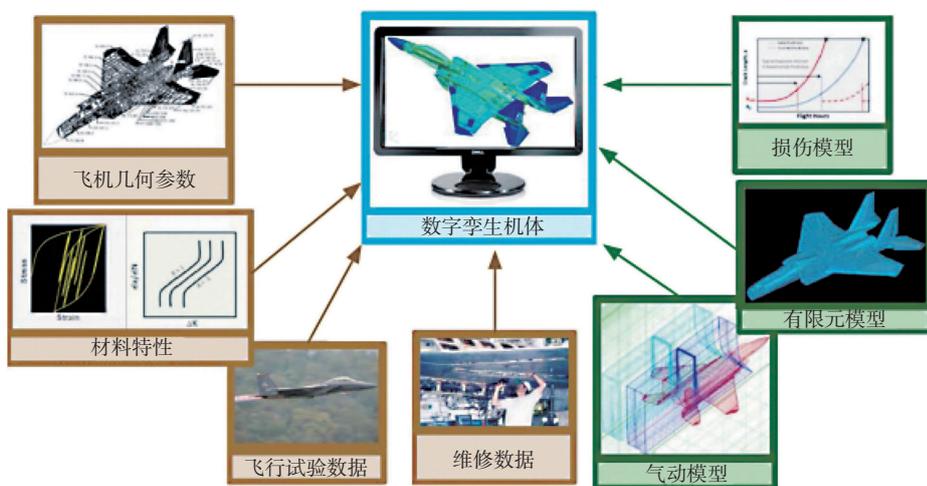


图1 数字孪生飞机概念模型^[1-2]

- 构型管理策划
组织、文件、工具、
培训、评价等
- 供应商构型管理要求

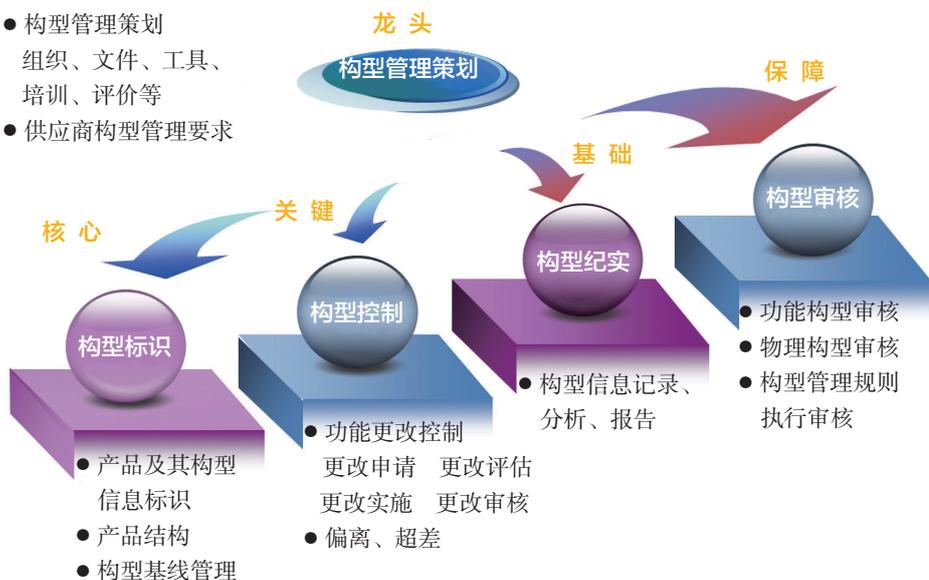


图2 构型管理五大模块

字孪生的高保真建模，以及后续全生命周期数据在数字孪生体中的高效流动、数字管理以及健康管理等环节。数字主线为产品数字孪生提供访问、整合和转换的能力，其目标是贯通产品全生命周期和价值链，实现全面追溯、双向交互、价值链协同。

在产品全生命周期内，构型管理策划对于取得有效的、可预测的、可重复的构型管理流程十分重要。商用航空发动机具有零件多、设计复杂、材料跨领域大的特点，构型策划越早融合数字孪生，越能够有效地对大量数据进行分层和分类，越有利于形成高保真数字模型，为

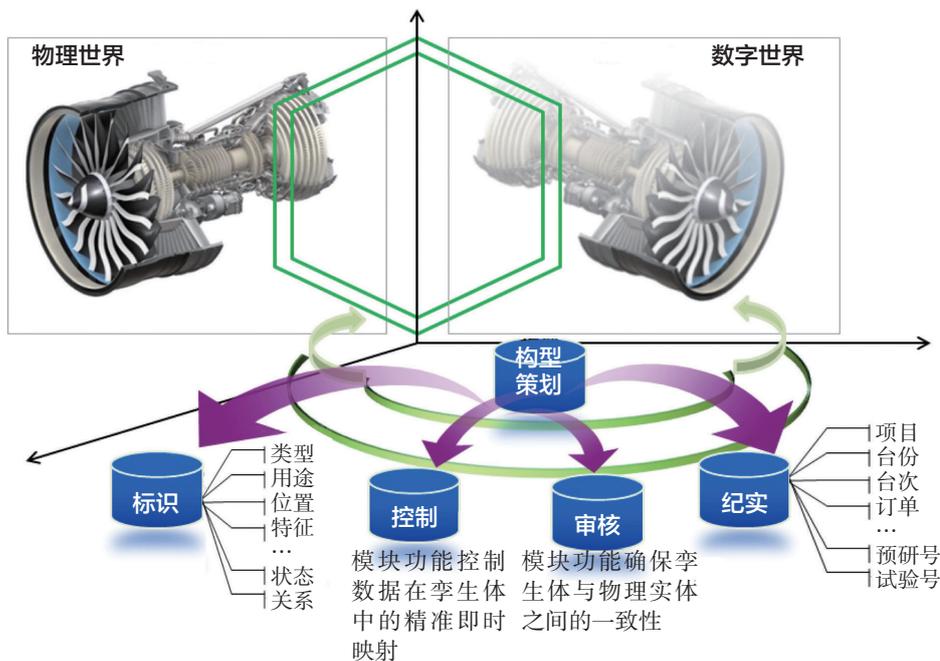


图3 基于数字孪生的构型管理架构

数字孪生奠定工具和方法论基础。

数字化的构型标识

构型标识是对构型项定义的过程，是构型管理活动的基础。标识管理确保了对产品以及与产品相关的构型文件进行唯一的、清晰的标识。明确构型项管理要求，包括构型项的划分原则、划分层级等管理要求^[4]。作为标识的最小要素构型项，可以是独立数据，也可以是一组数据的集合。

构型标识模块的数字化架构需要结合大数据的特性，合理选取构型项，颗粒度太大不能充分抓取构型特性，颗粒度太小会导致数据量庞大和冗余，在后期数字孪生的映射中出现数据虚点和映射漂移。

数字化的构型控制

基于数字孪生的构型控制要摆脱传统方式的束缚，不仅要控制变更，而且要把控制方式数字化、自动化和实时化，否则无法跟随数字孪生的演绎，数字孪生也不能精准投射和进入仿真阶段。

通过构型控制可以保证更改决定是基于全面了解更改产生的所有影响而做出的，更改信息须有序流通且可追溯，对产品的所有构型状态是可控的。通过实现数据的有效收集、反馈以及演变管理，可实现数字孪生数据的实时性和准确性，确保数字模型的高保真度以及动态修正。

数字化的构型审核

构型审核是确保产品技术状态可控的一种方式，通过构型审核可确保产品的技术状态信息在全生命周期内的一致性、完整性和符合性。构型审核工作与产品的研制工作协同开展，可通过验证产品技术状态以及评价构型管理工作的结果满足

要求与否，来识别产品技术状态在研制过程中的潜在风险。

通过对映射结果的审核和控制，确保了物理世界和数字世界的高保真度以及实时性，是实现数字孪生的有力抓手，从构型管理层次监控、审核和校核数据映射的结果以及过程。

数字化的构型纪实

构型纪实活动始于产品及构型文件的初次形成，并贯穿产品的全生命周期，通过对整个构型管理活动进行记录，保证数据的可追溯性。构型纪实的环节，可以对数字孪生在不同维度和视角做切割剖视，并形成用于评估和分析的数据报表，这对于数字孪生的数据管理有重大意义。

商用航空发动机的多试验台份构型并存的特点给构型纪实的数字化提出了更高要求，数字化的构型纪实架构必须按照研制特点做出准确切分，测试机和原型机、台份和台次、试验和拆解以及再上台等构型数据既有不同的纪实又有替代互换的构型部分，纪实的数字孪生架构必须是开放式的，便于后续数据的互换和引用。

构型管理与数字孪生的高度融合

商用航空发动机的客户差异、需求多样和售后定制，决定了其构型的复杂和多变，增加了构型管理的难度。数字孪生的技术核心给构型管理带来了更好的数据呈现和处理方式，主要体现在以下几个方面：多领域、多尺度融合建模；数据驱动与物理模型融合的状态评估；数据采集和传输；全生命周期数据管理；VR呈现；高性能计算^[5]。所以，对

于商用航空发动机的构型管理，必须具备完备的数字化能力，脱离了数字化的构型管理，无法实现商用航空发动机大数据的有效管理。只有建立基于数字孪生理念的构型管理，才能够让数字孪生的映射在全生命周期内更为精确。

而数字孪生技术核心不同方面的等级和优先级的先后关系，必须依托有效的构型管理手段，在商用航空发动机不同的生命阶段进行深度融合。数字化解决了数据的问题，而构型管理作为工具和手段，确保了数据链的完整，实现了数据的映射和高保真传递。构型管理运用的是系统工程思维，把航空发动机看成一个整体，立足于研制的全过程，解决产品的多样性、不确定性和复杂性问題，保障复杂系统所需安全性水平。

构型管理的五大模块系统地数字孪生开展了策划和标识，同时提供了对数据的多维度审核和纪实，从而在需求、功能与物理属性高度一致的基础上，建立高保真的数字孪生模型，真正实现商用航空发动机的加速开发，提高开发和生产等各个环节的有效性和经济性。商用航空发动机的数字孪生的核心是数字构型化和构型数字化，用基于数字孪生的构型管理手段来解决商用航空发动机全生命周期的问题。

结束语

随着存储和计算成本的下降，数字孪生的应用场景越来越多，收益也越来越显著。数字孪生技术是未来降低航空发动机研发周期和成本，实现智能化制造和服务的必然选择^[6]。商用航空发动机开发作为一个复杂的系统工

程，面临技术革新快、现有测量手段局限、预测能力不足以及周期紧迫等问题。数字孪生的先进性为解决这些问题带来了巨大的推动作用，数字技术不只要开发出具备数字化特征的产品，更是要通过数字化手段改变产品全生命周期流程。面对商用航空发动机越来越突出的复杂性，建立合理且行之有效的基于数字孪生的构型管理，规范产品研发秩序从而保障高保真建模和动态修正，符合适航当局的严格要求以保障飞机的安全性水平非常迫切。

航空动力

(张艳丽，中国航发商发，工程师，主要从事商用航空发动机构型管理工作)

参考文献

- [1] Tuegel E J, Ingrassia A R, Eason T G, et al. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2011, 10(23):1-14.
- [2] Kraft E M. The US air force digital thread/digital twin—life cycle integration and use of computational and experimental knowledge[C]//Proceeding of 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting. San Diego, California, USA, 2016.
- [3] 刘魁,刘婷,魏杰,等.数字孪生在航空发动机可靠性领域的应用探索[J].航空动力, 2019(4): 61-64.
- [4] 华明达,李国飞.民用航空发动机构型管理[J].航空动力, 2020(4): 56-58.
- [5] 陈根.数字孪生[M].北京:电子工业出版社, 2020: 43-48.
- [6] 刘婷,张建超,刘魁.基于数字孪生的航空发动机全生命周期管理[J].航空动力, 2018(1): 52-56.