

基于唯一数据源的航空发动机设计制造协同方案研究

Collaborative Solution for Aero Engine Design and Manufacture Based on Single Source of Truth

常宇博 蔡祥 王晶 / 中国航发涡轮院 赵爽耀 / 合肥工业大学

航空发动机产品数字化定义涵盖了客户需求、方案设计、三维数字化模型、工艺设计、工装设计、装配数据、仿真数据、检验数据等信息，是多领域、多类别、多模态工程特征语义信息的综合集成^[1]。通过前序型号的探索和初步实践，对这些数据进行规范管理，实现基于唯一数据源驱动的航空发动机协同研制，已成为我国航空发动机自主研发体系建设的重要支撑。

近年来，随着国家技术进步、外部竞争与客户需求的发展，在航空发动机研发中，通过采用基于模型(MBD)的产品定义^[2]统一设计与制造的数据，实现了设计制造过程的数据集成和分阶段发放数据的协同模式^[3]（见图1），初步实现了设计和制造准备工作的并行协同，提升了研发效率。

然而，在多厂所、跨区域、多主体的研制和生产模式下，存在着诸如设计过程与工艺过程数据信息接口耦合关系复杂、并行工作流程

显性化和标准化不足、预研型号和多品种小批量定型产品跨地域混线生产、厂所过程信息不互通、模型标准及版本控制难等一系列问题。本文从数据集成关系管理（数据维）、流程管理（业务维）、过程运作管理（空间维）三个维度，基于航空发动机行业的探索实践，提出基于唯一数据源的设计制造协同方案（见图2）并进行分析。其中，数据维是基于航空发动机模型设计成熟度，在于考察随时间推移，数据从设计端到工艺、工装、检验等领域的延伸和

演化；业务维是基于航空发动机研制进程，按照过程中的任务划分逐阶段、逐级、逐类进行；空间维是基于航空发动机研制协同合作的能力建设，分层级实现对各类资源的合理配置与优化。

基于唯一数据源的协同研制数据集成关系管理

基于MBD唯一数据源的数据集成

在航空发动机的设计—制造协同探索与实践中，初步形成了以

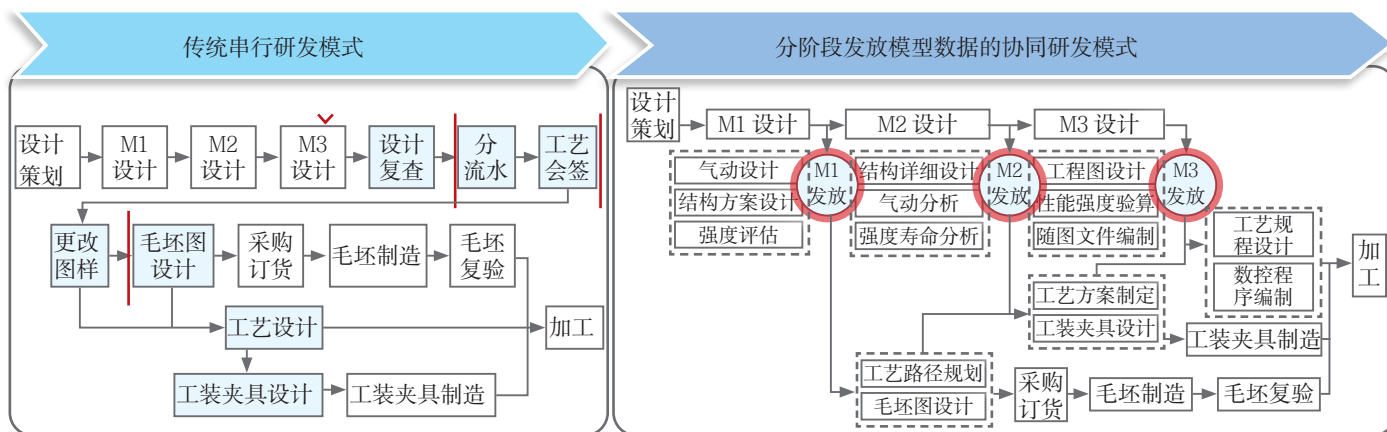


图1 设计制造协同研制模式的发展

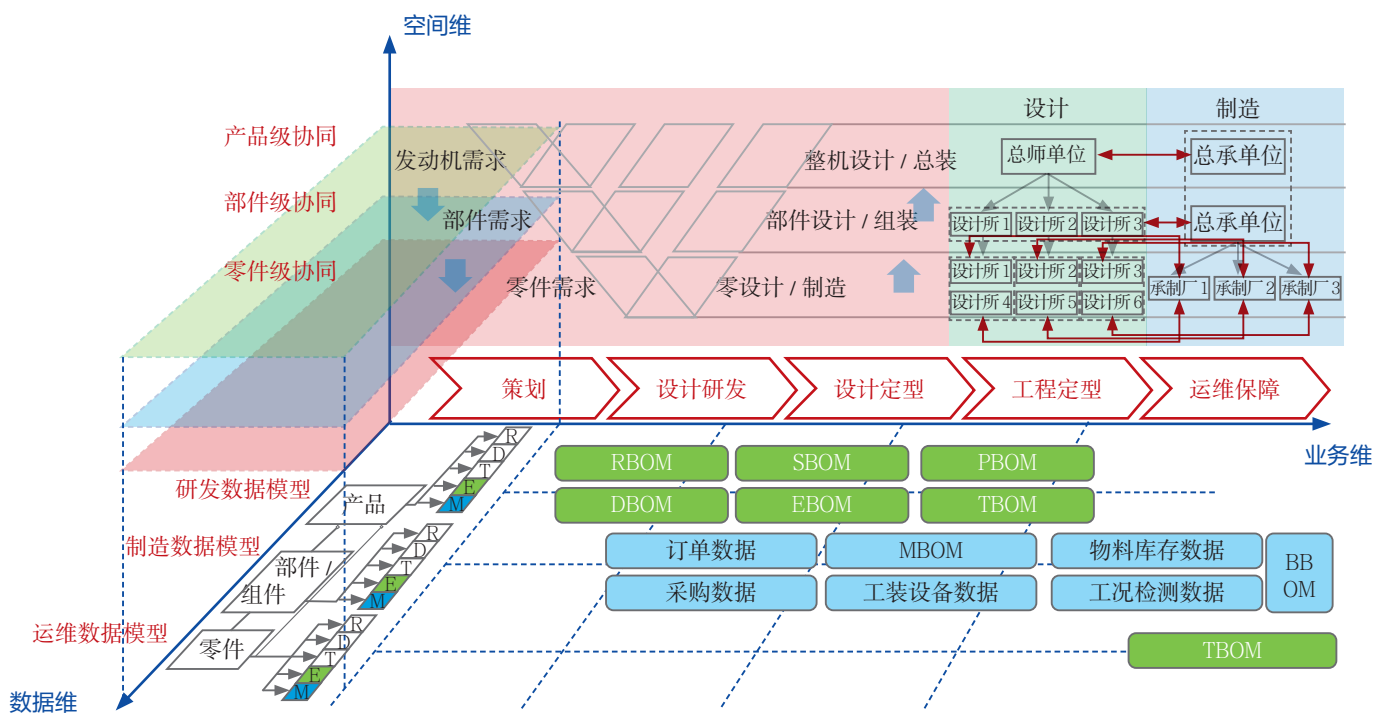


图2 基于唯一数据源的设计制造协同方案整体框架

MBD的产品定义作为设计—制造过程唯一依据的技术路径，初步解决了研制过程中的数据源多类分散、准确性难以保证等问题。

MBD通过采用集成的三维模型，表征从产品设计到装配过程中特征语义的全部定义，即用一个集成化的三维数字化实体模型表达了完整的产品定义信息^[24]，主要分为几何模型和标注信息两类。几何信息的管理通常以UG、CAD系统进行储存与管理，标注信息则附着在模型上，三维模型通过产品数据管理（PDM）系统进行管理，以此形成相互的关联与集成。

多专业协同中，设计人员以MBD模型作为唯一数据源。气动、结构、强度、传热等专业设计结果作为参数在PDM系统中开展模型定义，以实现各专业以MBD模型为基础同步开展设计分析；MBD模型作为依

据分别开展各专业仿真验证，各专业根据验证结果进行调整完善。在各设计专业深化协同的同时，基于设计—制造数据共享，制造人员基于MBD模型，在设计的同时，对设计可制造性及工艺可达性进行论证分析和提前验证，同时对长周期件提前生产准备，包括原材料采购、毛坯准备、工装派制等。在生产过程中，基于MBD唯一数据源开展不同工艺、工种间的并行协同。在研制的全过程中，基于MBD唯一数据源保证跨多厂所异地研发平台之间流通数据的统一性。

基于唯一数据源的XBOM视图管理

设计—制造协同中，在对于每个零组件开展结构化定义的同时，还需要基于MBD的协同关联数据，面向使用场景，定义产品构型、工艺构型及工装等模型，保证输出模

型的统一性^[5]。

物料清单（BOM）是以产品结构为核心组织的数据总称，是PDM系统的核心基础数据。在航空发动机研制中，逐步探索形成了采用一组BOM对以MBD模型为核心的产品数据进行管理的模式。为了应对产品研发全过程数据管理，满足设计—制造协同要求，在探索中逐步形成了需求BOM(RBOM)—定义BOM(DBOM)—工程BOM(EBOM)—工艺BOM(PBOM)—制造BOM(MBOM)—实作BOM(BBOM)—试验BOM(TBOM)的数据链条。在研制的每个阶段，针对产品定义，根据PBS，构筑XBOM数据，实现对多专业协同和设计—制造协同数据的集中管理和共享，保证设计—制造协同全过程数据的完整、实时、可追溯。

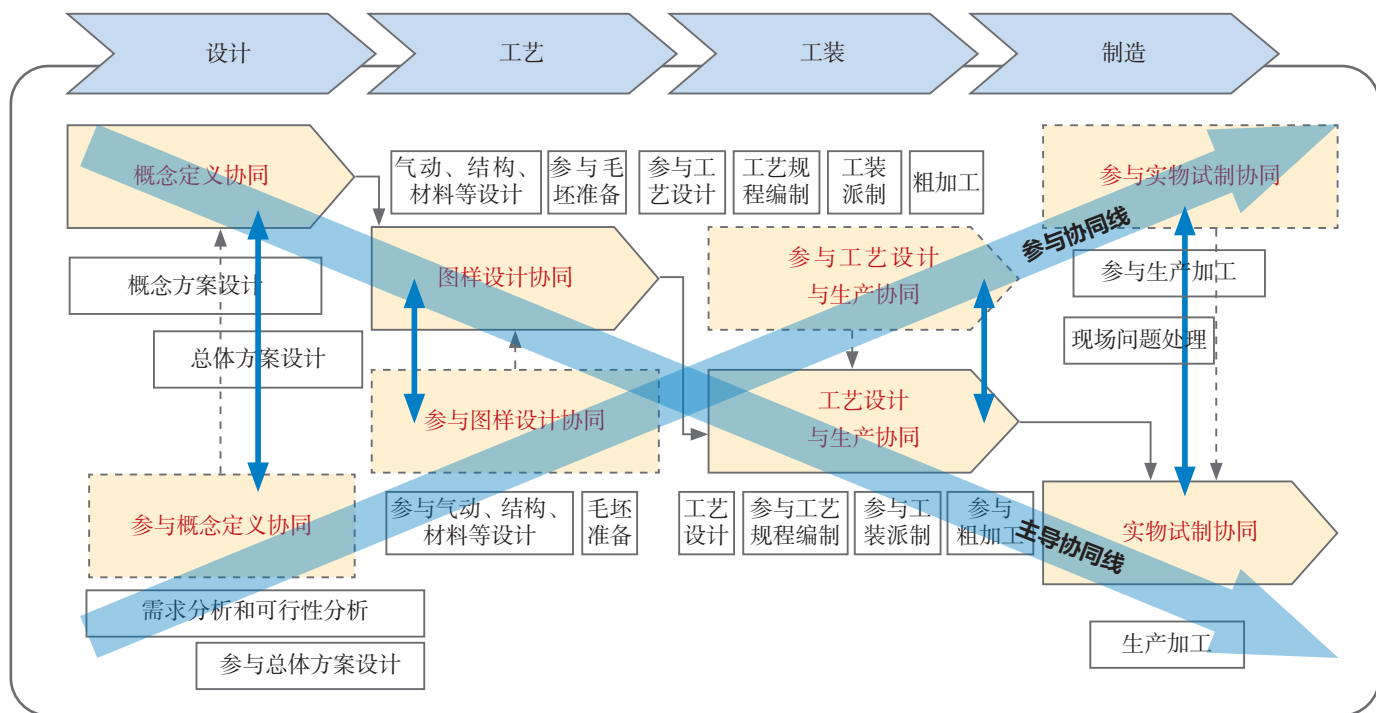


图3 研制过程的“X”型业务协同架构

一体化协同研制流程管理 协同目标管理

流程设计的本质在于分析并找到流程对于客户及公司的价值，即流程的增值性。设计制造协同的价值是通过高效的流程，达到“提高研制质量、降低研制成本、提升研制效率”的业务结果。

为实现这些目标，需要跨厂所、跨区域、跨组织开展并行协同的专业化分工协作，确保按照不同成熟度的研制阶段和工作内容，实现设计与设计、设计与工艺、工艺与工装的并行。在此过程中，存在的多利益和法人主体，为确保实现“利益共享、风险共担”的使命和任务，需要面向BOM中的对象分解目标，面向研制全流程设定各层级零组件的质量、进度和成本目标，作为协同目标，牵引联合团队工作。

协同活动管理

依托于数字主线技术，航空发

动机研制流程需根据所处的阶段状态及模型成熟度、型号项目的层级关系及各专业领域的分工任务，进行场景化的快速自动裁剪，确保各专业间业务的关联协同和流程的高效执行。

在流程中，从形成概念到完成制造，经历了从概念定义到图样设计，再到工艺设计，最终实物试制几个过程。其中，前期主要有设计人员主导，制造人员参与配合；随着研制过程的演进，设计重点由功能到结构再到工艺不断变化。到工艺设计阶段，由制造人员牵引设计人员开展工作，二者全程耦合工作，形成基于研制过程的“X”型业务协同架构（见图3），从产品设计开始，贯穿于设计、制造全过程，实现提高设计可制造性、工艺可达性、产品可装配性以及后续的可维护性等目标。

协同成熟度管理

协同成熟度是在阶段过程中开展相应协同活动之后，产品应该达到的状态，可由产品特征要素来描述。在研制过程中，按照产品定义的完善程度和设计—制造共同验证和确认的程度，将产品定义分为3个成熟度等级：M1阶段由设计人员完成概念方案设计，构建零组件初步模型，制造人员同步开展毛坯/原材料设计，共同确定零组件功能设计；在M2阶段设计人员完成零组件接口和各功能特征设计，制造人员一方面基于前一阶段毛坯/原材料设计结果，开展毛坯/原材料订货和毛坯制造，另一方面开展工装、夹具等的设计，双方共同确认零组件的结构设计；在M3阶段，设计人员面向工艺实现进一步设计结构细节并提出工艺要求，制造人员在组织工装、夹具投产的同时，开展工艺规

程设计，双方共同确认零组件的工艺设计。在各个阶段，设计人员不断更新零组件MBD模型，制造人员匹配修改毛坯MBD模型和工装MBD模型，基于唯一数据源确保各类数据的版本受控。

面向多主体的协同过程运营管理

协同团队构建

在团队中，由部件或零件的结构设计负责人牵头，配备相关各设计、工艺等专业技术人员共同组成。负责人需要管理零件所有研发活动，牵头制订零件的设计和制造计划、沟通计划并对计划执行过程跟踪管控，同时，负责人还要向团队明确过程数据要求、数据源、存放位置和更新规则，确保团队都能基于准确、有效数据迭代工作。设计、制造各专业人员需要在负责人的组织协调下共同工作，基于当前结果完成工作后按要求提交数据、完成签发发布，并根据输入数据的变化及时调整工作。

不同层级的团队按照产品PBS，按照“整机级-部件/系统级-零件级”组织，下级团队作为上级的子团队进行管理，从上级团队接收要求，完成设计、制造、验证并向上级团队交付。

运行机制保障

当前厂、所分离的管理现状对跨厂所开发团队的运行和组织的绩效考核带来了挑战^[6]。为适应团队运行，需要在现有条件下探索出一套包括协同计划管理、报告管理与会议管理机制、有效支撑协同团队成员的沟通管理以及协同过程总结管理等的运行机制，并基于信息化系

统上的协同区管理和共享模板，支撑团队的有效运行。

在协同计划管理方面，需要根据零组件特点对最大化的通用流程进行裁剪。流程裁剪主要是根据不同零件所处的研制场景差异，以XBOM中涉及的产品结构为基础，对XBOM中的对象，面向研制全周期各个场景，制订产品零部件级各成熟度节点计划并配备沟通等其他领域的支撑计划。

在协同会议机制方面，形成了会议层次类型及具体要求、会议管理细则和相关模板等。定义了包括不同类型会议的信息收集、会议组织、记录、纪要签发、会后跟踪落实、会议资料归档等的模板，在协同区发布，供团队共享。

在协同汇报机制方面，形成了在协同区可供团队共享的模板，包括周报、月报、阶段总结报告以及重大问题报告管理细则并配套相应的流程及模板，规范各类汇报和协调，管理各方对沟通的预期，降低项目团队沟通成本。

在协同过程总结管理方面，利用模板规范了各领域的过程总结对象、总结主体、总结节点、总结方式等关键要素，规范了项目总结，以高效积累形成组织过程资产，促使厂所协同能力的持续提升。

结束语

在航空发动机产品设计制造协同研制过程中，存在着跨平台的数据管理、并行耦合的流程管理、跨厂所的组织机构管理等诸多协同管理与优化问题。如何以唯一设计数字源模型为载体，整合相关价值主体和制造资源，实现全业务流程的闭环

优化，在信息共享、技术共享和人员协同基础上，实现航空发动机产品研制的快速迭代优化和研制成本的大幅降低，是设计能力、制造技术与信息管理深度融合的体现，也是航空发动机行业一直在探索和实践的重要方向。随着数据互联、信息互通、模型互操作等智能互联技术的发展，必将构建适应于我国航空发动机研制特色的数据模型技术体系和集约化组织管理模式，支撑自主研发能力的不断完善和提升。

航空动力

（常宇博，中国航发涡轮院，高级工程师，主要从事航空发动机系统工程和通用质量特性设计与研究）

参考文献

- [1] 陈冰. 面向智能制造的航空发动机协同设计与制造[J]. 航空制造技术, 2016(05): 16-21.
- [2] 周秋忠, 樊庆春. MBD支持的产品协同设计及协同信息表达[J]. 制造业自动化, 2011(1): 55-59.
- [3] 李伦未, 邓迪, 王晶, 等. 航空发动机设计制造并行协同方案研究[J]. 航空制造技术, 2019(7): 62-67.
- [4] 韩福金, 陆佳圆, 王震, 等. 航空发动机协同研制平台的建设与应用[J]. 航空发动机, 2015, 041(1): 89-93.
- [5] 白永红, 梁可, 周盛, 等. 基于MBD的飞机设计制造协同关键技术探讨[J]. 航空制造技术, 2015(18): 5.
- [6] 蒋敏, 余志强, 王攀. 航空产品设计制造一体化创新研制关键技术[J]. 航空制造技术, 2019(22): 95-101.