

航空发动机研发体系信息化平台建设思路

Aero Engine R & D System Information Platform Construction Based on MBSE

■ 张鑫 黄晨雨 那岚 王晓东 / 中国航发动力所

航空发动机是一个涉及流体、传热、力学、燃烧、控制和材料等多学科及工程领域的综合复杂产品，具有研发周期长、耗资大、风险高的特点，开展基于模型的系统工程（MBSE）的研发系统信息化平台的建设，可以加速设计与试验的迭代进程，有效地缩短研发周期、降低研发成本、提高产品质量。

按照“十四五”信息化规划及中长期发展思路的要求，中国航发动力所在对研发体系集成平台及仿真能力建设进行调研和分析的基础上，开展了基于模型的系统工程（MBSE）研发系统信息化平台建设方案研究。按照将标准规范转化为结构化知识，将工程方法固化于软件工具，将试验和仿真数据存储于工程数据库，将知识、工具和数据嵌入符合系统工程和多专业协同的研究、设计、制造、试验和维修服务流程的指导思想，中国航发动力所构建了以模型为定义方式、仿真为关键手段、知识为应用核心的正向研发信息化环境。

能力规划

首先，研发体系平台需要以模型为核心进行研发活动。现有平台更多的是数据层面的集成，对于专业软件本身并不提供开发和改造的能力和环 境，对于模型没有过多的关注，没有提供需求、仿真模型的设计开发及仿真试验的环境。对于模型的更改还是基于专业内软件工具的输入或输出文件，没有形成专业间模型统一的改造或仿真能力。新平台从原来的“基于文档”转向为“基

于模型”，并由此带来整个工作模式、设计流程的变革。平台将提供良好的可视化建模工具，并根据需要集成各类商用建模工具，为模型提供良好的编辑、编译和仿真环境，为发动机的正向研发提供完备的解决方案。

其次，研发体系平台应具备可扩展的、基于模型的联合仿真能力。现有的体系平台集成了什么仿真软件就有什么样的仿真能力，仿真过程完全取决于所调用的仿真软件。新平台具有开放式的模型开发环境，要求支持多种语言的工程模块自定义开发、编程，并通过调用相应的解释器进行编译和仿真，对于现有的模型（已经形成软件的）通过统一建模标准、定制接口关系等，支持通过“搭积木”的方式，将各类工程模块在仿真环境中予以“串联与拼接”，实现多部件、核心机、整机的不同维度、单学科/多学科的数值仿真。

第三，研发体系平台应具备设计仿真与试验结合的能力。现有平台按照专业系统建设，没有与试验体系进行集成和对接。新平台根据MBSE的思想，设计产生的输出除了仿真试验外，还需进行相应的物理试验，需要将仿真结果与物理试验

结果进行比对分析，用于指导模型的修改完善。因此，新平台将与试验数据管理（TDM）系统以及数据分析系统无缝集成，给研发人员提供完整的仿真和物理试验比对环境。

第四，研发体系平台应具备研发数据管理能力。现有平台没有对研发数据进行有效的管理，用户也并不知道应该管理哪些数据，应该如何利用研发数据。新平台将专注于正向研发过程的各个层面的模型数据管理，解决模型以及仿真过程中“有用”的数据的保存以及展现，最终为数据挖掘以及知识推送提供大量的样本。

第五，研发体系平台应支撑系统工程正向设计模式。充分发挥系统工程思想方法，并在平台中进行系统集成，改善研发思路和研发模式，对于走上正向设计的道路至关重要。

建设内容

新平台的初级阶段的建设内容包括：项目管理；需求管理；流程管理；基于模型的系统工程设计；基于模型的发动机整机、零部件和子系统设计；基于模型的设计仿真与虚拟验证；构型管理；研发数据管理体系；协同研发环境。平台的基本功能框

架如图1所示。

项目管理

项目问题解决的是项目各种资源分配以及项目计划的管理问题，项目管理要将WBS按要求分解到位，分解颗粒度的原则是该任务能够由个人或团队通过一个或若干个步骤按照指定的工作流程完成该任务，并且可操作可运行，任务的完成过程由需求管理工具、模型开发工具和仿真工具等系统工具包配合完成，完成结果即交付物随即入库。

研发项目管理一定要实现闭环，按照PMBOK的要求，通过项目的启动、计划的制订、执行、监控和收尾确保项目管理的全流程贯通。通

过WBS的分解，制定项目的GANTT图和PERT图，直观地展现项目的计划和逻辑关系，并实现可视化跟踪。通过项目中的里程碑的设定，监控各阶段的交付。

研发项目的核心是通过结构化的流程体系的构建形成统一的打法和套路，从而复制其他产品成功的经验。

为了保证项目的成功交付需要实时跟踪和监控项目任务的完成情况，通过预警体系确保项目任务能够按时完成，同时增强整个团队的紧迫感。

需求管理

航空发动机需求管理的目的，

是在产品全生命周期内保证“用户和其他利益攸关者”的需求被充分的理解和执行，保证需求变更可控，同时支持航空发动机及部件/系统的验证和确认工作。

新平台可实现对整个产品的全生命周期需求管理，覆盖从需求到设计以及测试阶段。将项目开发过程中产生的各级需求和需求相关的文件进行链接管理，同时能够对需求进行影像分析。具备的功能如下：项目需求的条目化管理；需求的协作开发；需求的链接、追溯管理；需求变更影响分析；需求的历史信息记录；需求的属性定义；需求访问的权限管理；数据的备份和恢复；

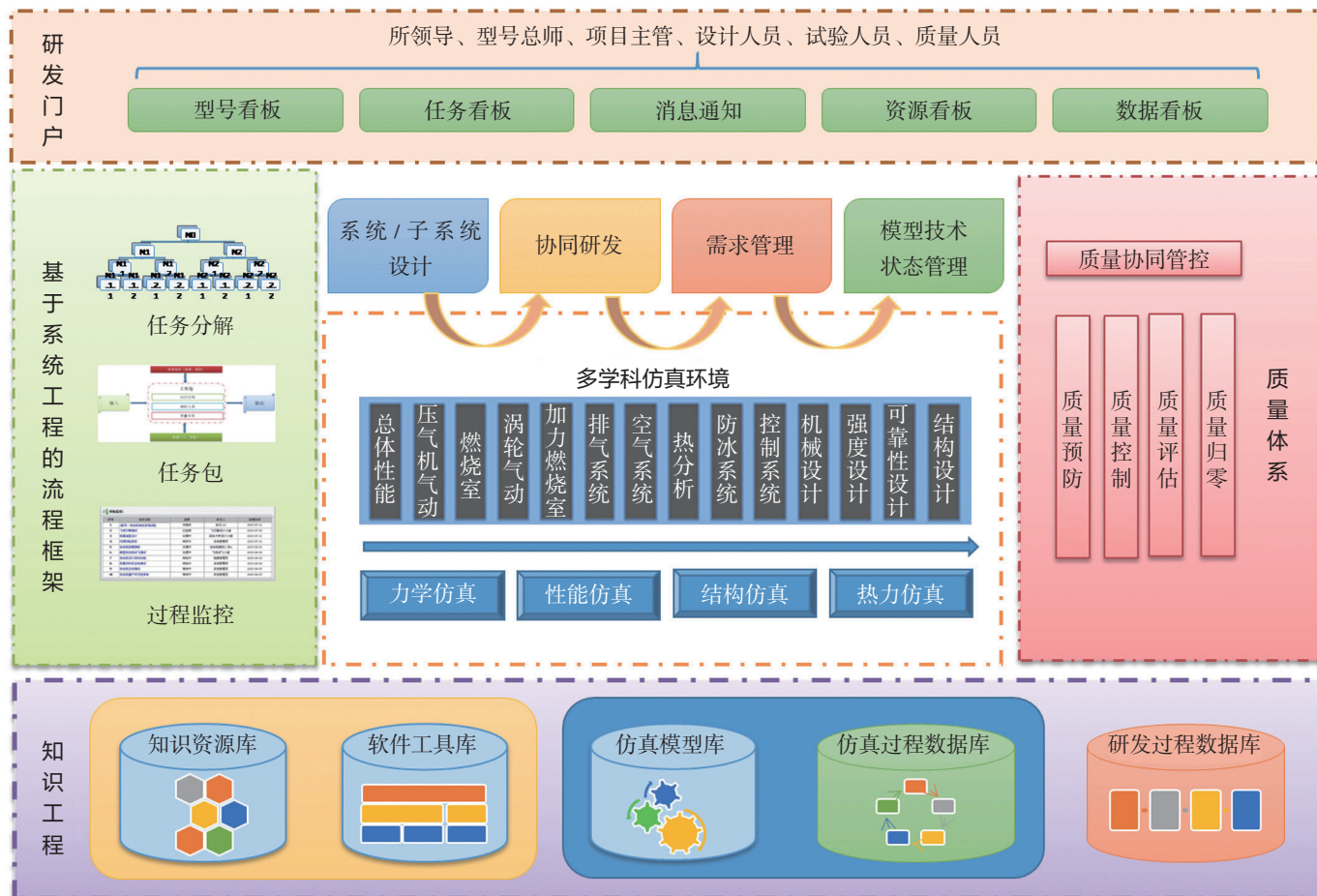


图1 研发体系信息化平台总体框架

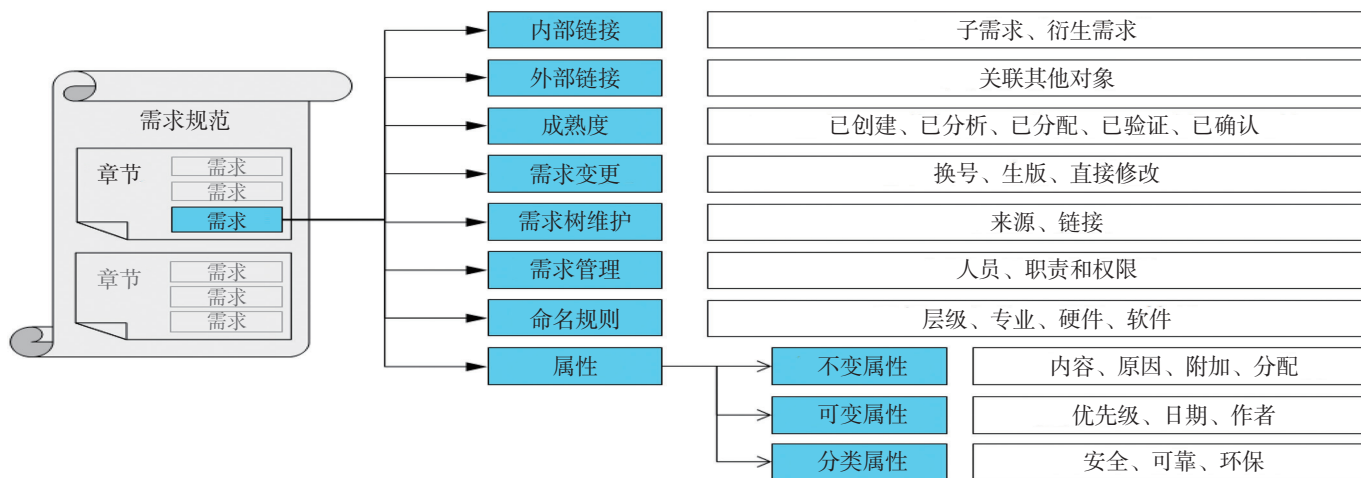


图2 需求模型、需求文件组织的全息模型架构

需求报告的导出等。

流程管理

WBS底层的任务包需要一个或多个活动和步骤来完成，这里的流程指的是用来完成任务的各个活动和步骤及其关联的集合。完成任务可能需要审签流程，可能需要触发问题处理流程，变更管理流程，申请报批流程，以及各种业务过程流程等，这种流程在任务的指派过程中可以是要素的形式存在，也可以触发一些公共的流程，也可以从流程模板库中选取相应的流程，流程是完成任务过程或者触发事件过程的一种形式，而整个项目的过程计划都在WBS分解的过程中被百分百覆盖，具体流程如图3所示。

模型开发及仿真环境

基于模型的系统设计和软件开发是复杂系统设计开发的趋势。基于模型的系统工程方法，可以将设计人员的设计经验显性规范地展示出来，并基于模型的交流将更方便和无二意性。同时，通过模型的运行，将对系统进行仿真和验证，来确定系统的设计和开发正确性、完

备性等。

当上游的输入准备完毕后，进入真正的设计环节，重要的就是建立发动机的数字化模型。每个阶段和每个系统层级都有不同的数学模型的表示，每种专业也都有不同的方法对发动机产品进行数学化的定义和表达。

新平台在方案论证阶段支持SysML系统工程标准建模语言，为系统定义结构模型、行为模型、需求模型和参数模型提供了统一的语言支持。结构模型强调系统的层次

以及对象之间相互连接关系。行为模型强调系统中对象的行为，包括活动、交互和状态历史。需求模型强调需求之间的追溯关系以及设计对需求的满足关系。参数模型强调系统或部件的属性之间的约束关系。新平台提供SysML的图形化建模工具，可以支持结构图、参数图、需求图和行为图等。

针对系统和部件的详细设计阶段，SysML已经满足不了多领域仿真模型的建模需求，因此新平台转向业界主流的Modelica语言，一种开

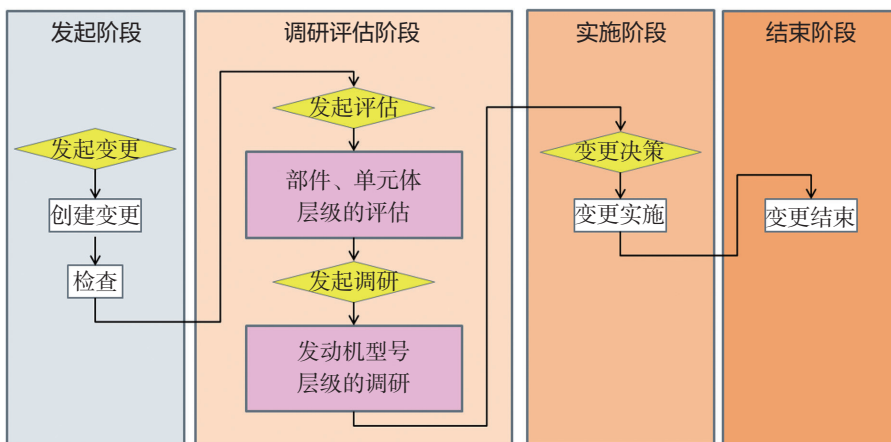


图3 发动机设计阶段变更流程

放、面向对象的以方程为基础的语言，可以跨越不同领域，方便地实现复杂物理系统的建模，包括机械、电子、电力、液压、热、控制，以及面向过程的子系统模型。

基于模型的系统工程设计过程

系统研发一般面临着庞大的系统规模和需求不稳定等多重困难，传统的设计方法已经无法满足对系统的描述，必然要求工程师思维和方法论的变革。与传统的设计方法比较，面向对象的设计方法比面向数据或面向过程的方法更为有效。这是因为数据和过程具有同等的重要性，使用对象可以把数据和操作数据的过程结合起来，从而充分发挥对象自身的主要优点——抽象性和封装性。UML/SysML 语言集中了面向对象设计的优点，同时使用一种构造语言来描述系统。

构型管理

构型管理,也称作技术状态管理,是一门进行产品工程管理、质量控制技术的学科。它需要利用适当的过程和工具来建立和维护产品属性和产品需求之间的一致性。

构型管理与发动机研制系统工程紧密相关,或者说,构型管理是发动机系统工程研制过程中最重要的组成部分。构型管理的目的是控制工程过程以及工程数据的状态,而系统工程的需求工程、验证和确认、多专业系统管理、基于模型的系统工程等过程和数据都需要技术状态管理来对数据和状态进行控制。

在项目规划过程中,对构型管理计划进行裁剪以满足各个项目程序。构型管理过程的主要输出是对系统和系统元素的基线的维护,其中这些项作为决策过程的一部分被

置于正式控制下。建立由参与项目的所有相关的利益攸关者和工程专业学科的代表组成的构型控制委员会(CCB)。在系统初始阶段开展构型管理流程并贯穿于系统的全生命周期。

研发数据管理体系

根据项目研发的各个阶段产生的数据,将研发数据分成若干类别,每个类别具有一定的相似性,将每类数据进行数据格式的规范化和数据模型的统一标准化,通过信息化手段对各个来源的数据进行格式转换以满足研发数据库的标准规范,将有价值的研发数据进行统一管控。

其中最核心的部分是建立设计过程的模型库。模型是设计的结果,仿真是评价模型好坏的手段,仿真过程和结果数据存储起来可以更好地挖掘出模型的隐含规律,然而模型本身必须有友好的开发界面以及数据库存储环境。与PDM存储图模型类似,该平台也会展现给研发人员最新版本的模型,研发人员可以进行签出编辑,在此期间模型处于锁定状态,签入后模型进行了改版,改版后的模型会显示在所有研发人员的工作台,用于协同研发。而研发人员可以查看模型的所有历史版本以及仿真结果,追溯其历史状态。

模型库管理系统将分散在各处的资源模型、项目模型/文档和属性信息集中管理,实现了企业资源的积累和重用;以任务为主线组织项目模型/文档和状态信息,有利于用户清晰、快捷地重构仿真系统,令工作井然有序,提高效率和质量,大幅降低协同设计中人工录入、传递、匹配各种专业模型的工作量;版本管理轻松展现各专业模型之间复杂的版本依赖关系,杜绝人工管

理的低效和错误;符合涉密信息系统分级保护管理规范的设计为军工企业的宝贵信息提供更加安全的管理机制。

协同研发能力

基于模型的协同研发可以参照PDM系统的模型管理方法,模型的编辑需要进行签出,上传到模型库需要进行签入,在此期间模型是锁定状态,其他人不可以对同一模型进行操作,模型的更改和变更有相应的变更流程支撑,可以是WBS任务的一种交付形式。在这样的模式下,所有的研发人员通过WBS接收任务,通过左侧的结构树管理模型的技术状态,通过右侧的编辑区进行模型的编辑以及仿真等操作,最终的模型状态签入版本库中,并结合需求管理的条目进行映射,改变需求状态。模型的编辑需要相应的流程支撑和对应的知识和经验推送,这些都通过研发数据管理系统中的数据进行分析,然后推送给相关的研发活动。协同指的是研发过程的并行、模型的共享、有限资源的利用。

结束语

基于模型的研发系统的信息化平台建设,能够实现业务在系统工程思想指导下开展研发活动;能够在一系列规范和经验的指导下开展研发活动;能够高效地调用各类软件工具、数据资源开展研发活动;能够以一个灵活的平台架构来满足研发人员未来的需求变更,最终实现提高发动机研制效率,支撑发动机正向研发的目标。

航空动力

(张鑫,中国航发沈阳发动机研究所,高级工程师,主要从事航空发动机信息化平台建设)