

# 基于系统仿真方法的航空发动机虚拟样机构建

## Establish Aero Engine Virtual Prototype Based on System Simulation Method

■ 刘魁 张建超/中国航发研究院

以系统仿真为手段，航空发动机虚拟样机为载体，可使设计人员从重复性建模和繁杂的计算工作中解脱出来，专注于航空发动机领域的研究，提高研发效率。

**仿**真是研制现代航空发动机不可或缺的技术手段，在航空发动机的设计、试验、制造、维修保障等环节占有重要地位。

航空发动机研制领域应用到的仿真手段主要有两大类。

一类是计算机辅助工程(Computer Aided Engineering, CAE)仿真，主要以计算流体力学、计算结构力学、计算燃烧学等学科及多种技术的组合为代表，以计算机科学和高性能计算能力为支撑，致力于获取设计结果的细节，侧重对场的描述，可以获得丰富的信息。现代航空发动机涉及到机、电、液、控、热等多个学科，是多物理域对象经高度集成与融合而形成的复杂系统，采用场的形式进行多学科仿真的难度高、计算量大。

另一类则是以描述系统的运行、演化及其发展过程为目的，采用数学方法宏观地描述研究对象，建立能表达其结构或行为过程的数学模型进行分析决策，即系统仿真方法。系统仿真由于仿真效率高、计算结果直观，可以快速形成对设计效果的评估，是实施航空发动机整机级虚拟集成验证的有效可行手段。

### 虚拟样机建设思路

早期的虚拟样机(Virtual Prototype)技术主要用于数字样机(DMU)。DMU是指在计算机上表达的机械产品整机或子系统的数字化模型，侧重与真实物理产品之间的精确尺寸表达，用来分析结构和机构运动，对功能和性能关注得不多。

目前，虚拟样机主要用系统仿真方法来验证物理样机的功能和性能，主要是指在需求分析、方案论证、系统设计、演示验证等阶段使用的、代替实物样机的数字模拟产品。虚拟样机将建模与仿真技术扩展到产品研制的全过程，以计算机

支持的协同工作为基础，完成需求定义、运行分析、初步设计、详细设计、制造性分析、性能评估等工作。

在研制过程中，随着认识的不断加深，虚拟样机的构建开发是一个不断进化、不断完善的过程。经过迭代，逐步完善，可使虚拟样机逐渐逼近最终的实际物理样机。从虚拟样机运行中可获得指定任务剖面下各部件/系统的稳态、过渡态功能及性能参数，为各部件/系统的功能、性能设计提供整机级验证环境。

如图1所示，开展虚拟样机构建技术的研究，可以成熟型号为验证平台，明确设计需求、应用问题、

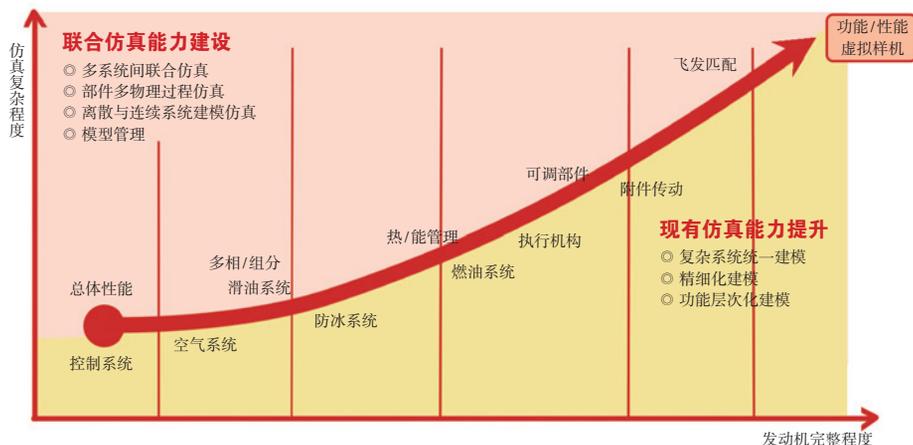


图1 虚拟样机构建思路

仿真技术和科学原理，结合发动机研制过程的专业分工和行业惯例，经过分析运行环境和整机功能逻辑，构建整机仿真架构，建立子系统架构，自顶向下分类分层构建模型。在完成各类各层模型的校核验证与确认（VV&A）后，再自底向上开展整机集成，利用成熟型号的存量数据和实物平台开展虚拟样机构建技术的验证。

构建虚拟样机需要在目前航空发动机仿真工作基础上，以总体性能仿真为主线，通过提升现有仿真技术水平和建设联合仿真能力，将各分系统按需求逐次接入，使虚拟样机逐步具备系统级的整机、全要素仿真功能。在此过程中，需结合总体性能和控制系统专业，完善现有发动机稳态、过渡态仿真，将与性能评估密切相关的空气系统、防

冰系统等总体类专业连入，充实总体的内涵；完善滑油系统、燃油系统等系统现有仿真能力后，通过多物理域联合仿真技术的应用，使其具备与其他专业耦合仿真的能力，并接入虚拟样机仿真系统；通过软件联合仿真或模型交换等方式与虚拟样机连接，打通执行机构、附件传动、可调部件等涉及到机构动力学、运动学专业之间的性能与结构的关联，最终完成整机级的虚拟样机构建。

虚拟样机与真实发动机的结构与功能相对应，如图2所示。实际发动机的各个专业或系统被离散成具备相应功能的数学模型，通过多种接口建立起专业/系统间的数据和信息联系。其中，控制系统给出调节规律和控制算法，空气系统则从风扇/压气机引气，气体经冷却

密封后排入涡轮或进行间隙控制，二者直接作用于发动机的总体性能。经控制规律调节，执行机构通过燃油工质驱动导叶调节机构或喷管调节机构，作用于发动机结构，改变大部件的特性。传动系统与发动机运行状态关联后，同步计算两者的功率和各部位发热量，由滑油系统进行冷却，与燃油系统一起完成热管理。这些涉及到机械、运动、电气、信号、流体、热等类型的仿真数据接口类型和燃油、滑油、空气、燃气等多种介质类型的建模与仿真，是典型的多物理系统联合仿真问题。

### 虚拟样机的构建

为了建立整机级航空发动机虚拟样机，除完成原有的CAE仿真工作之外，整机多物理系统联合仿真也对

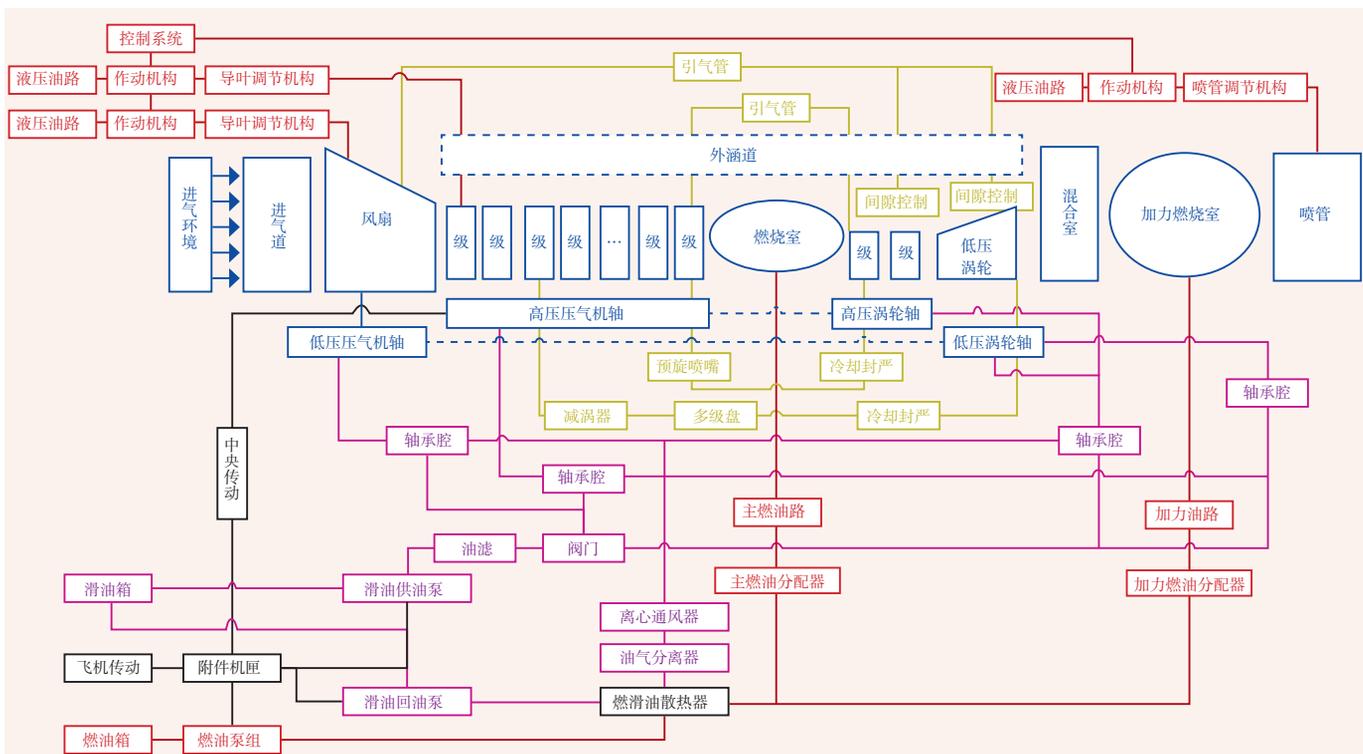


图2 虚拟样机框架

各部件/系统提出了要求，以下以总体性能、燃油系统、热管理系统和飞发一体化等专业的实施为例作出说明。

### 总体性能的实施

在原有基础上建立具备模型交换和联合仿真功能的模型。为满足整机集成验证的需求，建立部件与系统的关联接口，如控制系统、空气系统、传动系统等，计算考虑多系统耦合因素的部件特性图，如大引气量状态、大提取功率状态的压气机特性；为准确描述动态过程，需要对部件在实际运行过程中存在的离散/连续过程建模并充分验证，过程如图3所示。

### 热管理的实施方案

热管理系统涉及面广，工作时

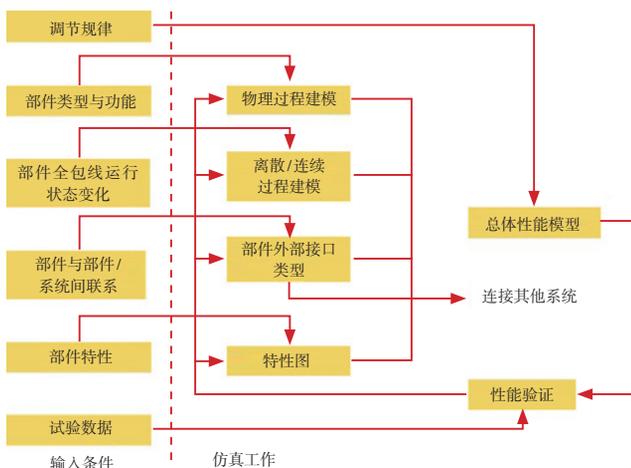


图3 总体性能的实施

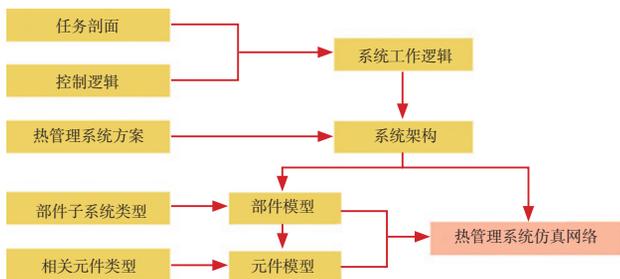


图4 热管理系统的实施

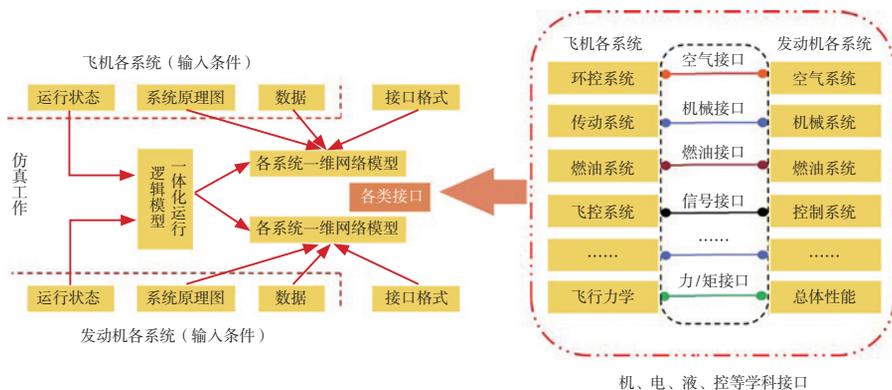


图5 飞发一体化的实施

与发动机工况直接相关。梳理发动机任务剖面 and 热管理系统的控制逻辑，按照运行过程形成仿真模型的运行时序，是热管理系统仿真的重要组成部分。因此，需要根据热管

理系统方案搭建热管理系统仿真架构，并将部件模型填充进仿真框架进行仿真，实施过程如图4所示。

### 飞发一体化的实施方案

根据仿真需求，利用分层级建模方法建立不同分辨率的模型，进而搭建发动机虚拟样机。在构建虚拟样机时需预留与流体、电气、液压、机械等接口，通过这些接口将虚拟样机与飞行器的相关系统连接，开展飞发一体化集成验证和应用研究，实施过程如图5所示。

### 虚拟样机的技术流程

系统模型由预先建立的下层模型按照一定规则搭建配置而成，在完成仿真条件设置后进行系统仿真，最终得到系统的稳态或动态特性，如图6所示。在该过程中，通过数据建模或按物理原理建模得到底层一维通用仿真模型，按照联合仿真需求配置该模型的接口，再调用特性，得到完整的一维模型。由于建模环境不一致，采用功能模块界面（Functional Mock-up Interface, FMI）协议，将航空发动机领域不同仿真环境下建立的模型导出为功能模块单元（Functional Mock-up Unit, FMU），而后再导入同一仿真环境下进行集成。

完备的模型特性是精确仿真的基础，但是仿真过程中经常遇到特性参数不全的情况，此时可以借助变维度仿真解决。利用二维/三维CAE数值模拟方法，通过CFD、CSD等途径获得元件的未知特性，并变维度接口返回给系统仿真模型，使虚拟样机的运行顺利进行。

在仿真前需要明确各部件、系统的运行逻辑，并形成各个模型运行的时序提供给虚拟样机仿真过程。

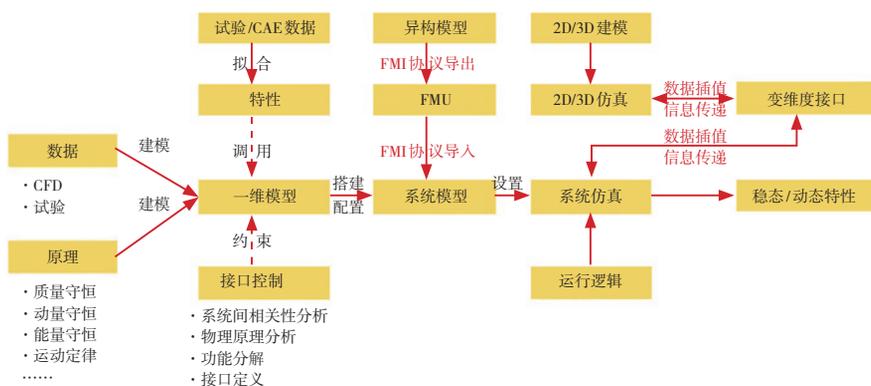


图6 系统级仿真流程

## 支撑虚拟样机构建的关键技术

### 开发航空发动机专业仿真模型库

完备的模型库是构建功能/性能虚拟样机的支撑，自主可控模型库是支持发动机自主研制的必备条件。航空发动机是基于布雷顿循环的流体机械，气动、液压、润滑等系统是其重要的组成部分，这些流体系统建模过程中存在的高度非线性问题给仿真造成很大难度。近年来，虽然国内在求解器方面有一定突破，但航空发动机专用仿真模型库的开发相对滞后，成为航空发动机领域难以广泛应用系统仿真技术的制约因素。

### 连续/离散过程梳理与建模验模

航空发动机在运转过程中存在大量事件，它们的动态特性可以是连续时变的，也可以是离散时变的，即状态只在某些离散时间点上发生

变化（见表1）。对这两种事件过程的建模及仿真求解方法有很大差异。动态连续建模的关键是基于能量守恒、动量守恒、质量守恒等基本物理定律描述系统行为，而离散事件建模的关键是怎样表达与事件相关的行为。在前期研究过程中，航空发动机的大多数传统专业将航空发动机作为连续系统来处理，对离散事件过程的研究积累和处理经验相对不足。需要仔细梳理航空发动机中发生的离散事件，深入开展离散和混合过程的建模仿真验证工作，尤其是存在多物理过程的事件。

### 仿真层次化建模技术

航空发动机虚拟样机涵盖了发动机主要功能和性能的仿真任务，由于整体上模型种类数目繁多，各系统模型执行的仿真时间尺度差异较大，虚拟样机的构建势必面临着不同类型模

型运行速度的匹配、系统间的时空一致性、仿真时间与实际时间的匹配等问题，因此按照模型所处层级，恰当地选用模型或简化模型，使模型既满足各系统间协调运行的要求，又满足工程设计对仿真速度的要求，是重要的工作内容。

## 开发航空发动机虚拟样机仿真平台

航空发动机虚拟样机的构建需要相应的虚拟环境，该环境用于虚拟样机的架构开发、整机各系统的仿真模型管理、整机/系统级模型测试以及任务管理等工作。在整机架构里，通过各类标准接口建立起模型间的数据联通能力，将开发的基础模型填充进整机仿真架构，按模块或系统从小规模逐步扩大到整机规模的测试，最终将调试完成的整机虚拟样机作为型号的一部分管理起来。

## 结束语

虚拟样机可以有力支持航空发动机整机集成验证，利用虚拟样机在设计各个阶段对方案进行确认，降低风险，提高效率。系统仿真方法是构建航空发动机功能/性能虚拟样机的有效手段，经历了从单一学科独立建模到多学科统一建模与联合仿真，从面向过程建模到面向对象建模的过程。通过多物理域系统建模与联合仿真，将机械、控制、电子、液压和气动等不同学科模型集成起来，构建成为包含相对完整信息的虚拟样机并有效运行，为快速设计迭代和部件/零件的功能/性能设计确认提供整机级验证环境，对提高研发效率有重要意义。

（刘魁，中国航发研究院仿真中心主任，高级工程师，从事航空发动机仿真及信息化技术研究。）

表1 航空发动机中的离散时间与连续事件示例

	离散事件	连续事件
总体性能	涡轮基组合动力（TBCC）模态转换	加减速过程
空气系统	主动间隙控制（ACC）系统切换引气位置	引气量持续增加/减少
润滑系统	阀门切换	油泵供油
燃油系统	加力接通/断开	燃油流量连续调节
测试系统	齿轮测速计测速，采样	热电偶测温
起动系统	起动机连接与脱开	起动带转过程