

面向复杂系统工程的多学科统一建模与联合仿真技术研究与应用实践

航空工业信息技术中心（金航数码） 郅永军

多学科联合仿真技术应用工程背景

航空产品是涉及机械、电子、电气、控制、液压及软件等多学科，可靠性、维修性和保障性等多专业工程要求的复杂系统，其开发模式正经历从基于文档向基于模型的范式转移。建立以基于模型的系统工程方法论为指导、以功能/性能样机为载体，贯穿需求、功能、逻辑与物理构建模型在环、软件在环、硬件在环及人员在环的数字化综合仿真环境，开展多学科统一建模与联合仿真，实现功能/性能需求在开发早期阶段的验证与确认，基于数学模型（虚拟样机）开展复杂系统架构与方案的设计、权衡与分析优化，缩短设计迭代周期，提升开发质量，已成为国际航空航天和防务领域复杂系统开发的主流趋势。当前，基于 Modelica 语言的系统仿真技术已在达索航空、德宇航和空客得以工程应用，通过构建由功能样机、性能样机和几何样机组成的数字样机，可实现在虚拟空间下开展虚拟试验/试飞，极大的降低物理试验/试飞的周期与成本。

多学科联合仿真技术演进历程

系统级多学科联合仿真主要应用于系统架构与方案权衡、功能分配、接口定义、子系统参数优化、功能/性能早期验证和确认等领域，涉及多学科的系统仿真技术主要经历了如下发展历程。

(1) 基于接口的多学科建模与仿真技术：该方法是由

各学科相应的商用仿真软件提供或开发相应的接口。其完全依赖商用软件之间的一对一接口，这些接口往往为某些商业公司所私有，不具有标准性和开放性。

(2) 基于高层体系结构（HLA）：该方法克服了基于接口的诸多缺陷，较好地实现了多学科建模与仿真，但要求建模人员必须先熟悉 HLA/RTI 的各种服务协议，再编制相应的程序代码，并且需要人为的割裂不同学科子系统之间的耦合关系，实质上是一种子系统层次上的集成方法。

(3) 基于统一建模语言的多学科系统仿真技术：该方法具有与学科无关的通用模型描述能力，任何学科均可实现统一建模。由于采用相同的模型描述形式，因此基于统一建模语言的方法能够实现不同学科子系统模型之间的无缝集成。

Modelica 语言与 FMI 标准介绍

2000 年成立非盈利性的国际开放组织——Modelica 协会，定期召开 Modelica 学会会议，交流研讨 Modelica 语言相关标准、工程实践等方面的研究进展。从 1997 年 Modelica 语言 1.0 版本开始，目前已到 3.3 版本，其模型库已覆盖了机械、液压、动力学、电子、电气等不同物理领域 1340 个元模型和 1000 项功能。Modelica 语言在复杂系统多学科联合仿真领域具有如下特点与技术优势。

基于方程的非因果建模：Modelica 语言基于方程而不是赋值语句，非因果建模可更好重用类。

多学科统一建模: Modelica 语言可有效支持机械、电子、电气、电磁、液压、控制、流体和软件等多学科物理模型的建模与仿真。

面向对象建模: Modelica 语言提供了面向对象建模的完整语义支持, 可通过类和对象表示各种模型、组件、变量及其类型, 组件重用及模型扩展更容易。

连续离散混合建模: Modelica 语言同时支持基于微分代数方程描述连续系统和基于离散事件驱动机制描述离散系统。

统一标准、开放源码: 基于 Modelica 语言可统一多学科建模标准, 开展自主模型开发, 形成具有自主知识产权的模型库。

欧洲发展信息技术计划 (ITEA2) 为制定通用仿真模型的封装接口标准, 提出了 Modelis 项目, 该项目将模型封装接口标准称为功能样机接口 (Functional Mockup Interface, FMI)。FMI 标准定义了模型描述格式和数据存储格式, 解决了异构仿真软件由于接口技术的不统一带来的诸多联合仿真问题。基于 FMI 标准封装的仿真模型称之为功能样机单元 (Functional Mockup Unit, FMU), 可实现模型知识产权保护。基于 Modelica 语言构建跨多学科的仿真平台, 通过 FMI/FMU 技术实现系统仿真平台与各类型工程仿真软件的有机集成, 进而形成复杂系统涵盖模型在环、软件在环、人员在环的综合仿真环境。以达索航空为例, 其依托 TOICA (Thermal Overall Integrated Conception of Aircraft) 项目, 与利勃海尔共同合作, 在飞机设计的早期引入基于 Modelica 语言和 FMI 标准对异构和相关联的子系统进行架构与方案权衡。

基于 Modelica 语言的多学科联合仿真应用实践

航空工业从 2015 年开始导入基于 Modelica 语言的系统仿真技术, 已在航空运载器、航空系统多家单位开展了基于 Modelica 语言的系统仿真试点工作, 包括洪都起落架系统、环控循环制冷子系统、靶机发射车系统和导弹舵机伺服作动系统、南京机电空气涡轮起动机、电源高压直流电机系统、青云电动油门刹车系统等多项工程应用。

在南京机电空气涡轮起动机项目实践过程中, 开展了基于 Modelica 语言的多学科系统仿真技术应用, 南京机电与信息技术中心 (金航数码) 团队一起开发了具有自主知识

产权的调节阀、空气涡轮、减速装置、气动管路、离合器以及离心开关等组件模型库。通过仿真结果与试验数据的比对分析, 仿真模型准确地预估了空气涡轮起动机在不同任务剖面下的动态特性, 为空气涡轮起动机方案权衡提供了有力支撑。空气涡轮起动机仿真对象与实验结果对比如图所示。

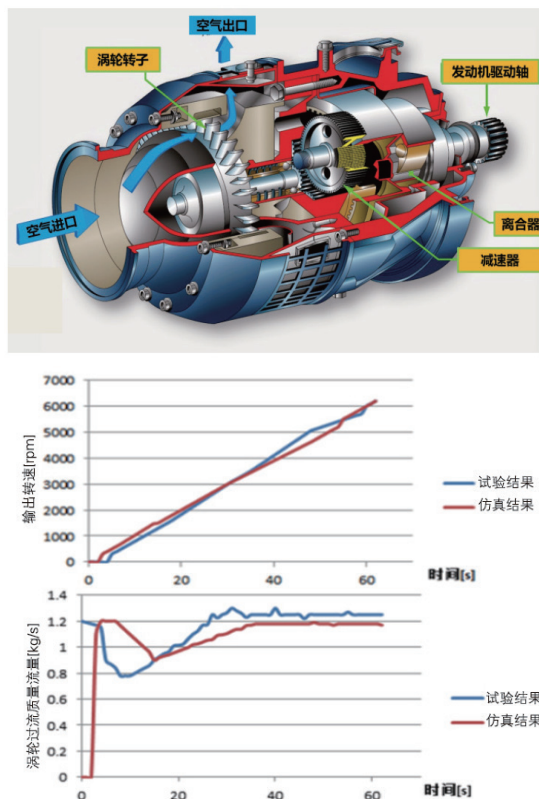


图 空气涡轮起动机仿真对象与实验结果对比

结语

在航空工业基于模型的系统工程方法深入应用背景下, 建模与仿真技术有效支撑了复杂系统在概念阶段需求分析、功能分析、架构设计及功能 / 性能的验证与确认, 权衡分析最优解决方案。航空工业信息技术中心 (金航数码) 在充分消化吸收国际系统仿真领域先进方法与最佳实践基础上, 结合航空产品特征, 形成基于 Modelica 语言的系统仿真解决方案, 助力复杂产品功能 / 性能样机开发及虚拟试验 / 试飞技术应用, 实现“建造前飞行”。IM