

俄罗斯航空发动机数字孪生技术发展

Development of Digital Twin Technology for Russian Aero Engine

■ 王乐 李茜 周军 / 中国航发涡轮院

采用数字孪生技术开展产品设计、试验、制造与维护，将能有效解决航空发动机研制过程中存在的“拖、降、涨”的问题。相较于最早、也是最深入研究数字孪生技术的美英两国，俄罗斯航空发动机的数字化工作起步也不晚，并在近些年取得了一定进展。

早 在1983年，苏联航空发动机设计师库兹涅佐夫就提出要在航空发动机研制中引入复杂的全套数学模型，综合考虑主要部件的热力学、气体动力学和强度。虽然当时“数字孪生”的概念尚未出现，但俄罗斯早期开展的多学科数值仿真工作与现在数字孪生技术的内涵有很多相通之处。到21世纪初，随着以数字化转型为核心的第四次工业革命浪潮的席卷以及数字孪生技术的推广和应用，俄罗斯充分意识到了以数字孪生为代表的新兴技术对改变当前国际政治、经济、军事格局的重要作用，尤其是集中了大量最高精尖技术的航空发动机领域。在此背景下，俄罗斯发布了一系列战略规划，通过顶层规划牵引、关键技术攻关和试点应用等方式，加速航空发动机数字孪生技术的成熟和落地，如图1所示。

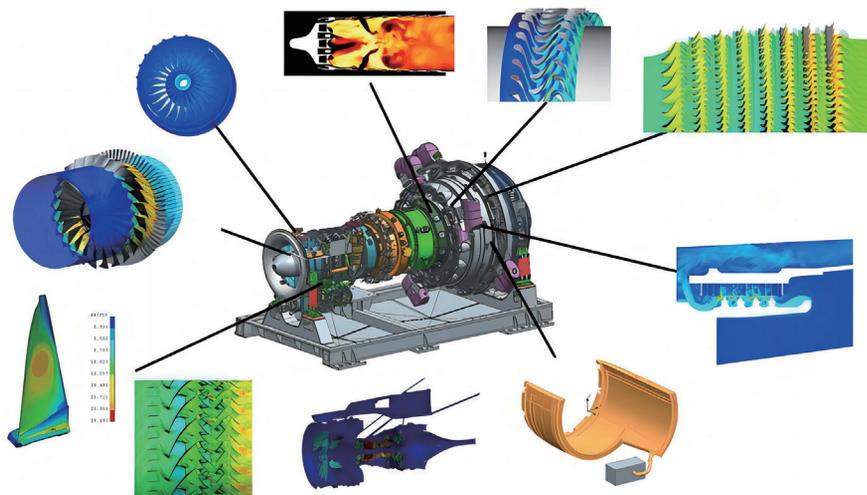


图1 俄罗斯航空发动机数字孪生技术的应用

顶层规划

为了牵引数字孪生技术在工程领域的发展和落地，俄罗斯从国家战略层面对数字孪生技术给予了高度重视，并率先制定了航空发动机和燃气轮机的产品数字孪生标准。

战略牵引

近年来，俄罗斯先后发布了包

括《俄罗斯数字经济》《俄罗斯科技发展战略》和《国家技术创新》等一系列顶层规划，旨在支撑国内生产技术的快速发展，通过数字化设计和模拟技术等先进生产技术快速提高企业的国际竞争力。2017年，俄罗斯在《国家技术创新》战略框架下制定了《先进生产技术》战略，该战略规划的总体目标是实现先进生产技术和商业模型的集成，以及拓宽新一代国家定制产品的技术创新市场和提高高技术工业领域的国际竞争力。《先进生产技术》战略的关键是建立“未来工厂”，而以数字孪生为核心的数字化模拟和设计是

促进产品高速、高效、高质量发展的重要手段。与此同时，该战略给出了数字孪生的实施路线图，见表1，即通过在优先发展工业领域应用和推广数字孪生、统一数字孪生平台开发、实现产品生命周期管理（PLM）系统的国产化和能力扩展、建立高阶数学模型库和工业平台解决方案等，不断提升数字孪生的技术能力，推进该项技术在优先发展领域的应用。

标准先行

2021年，俄罗斯发布了世界上首个产品数字孪生标准——《航空发动机及地面燃气轮机数字孪生通

表1 俄罗斯数字孪生实施路线图

实施手段	时间节点	实施目标
采用新的数字化设计和仿真范式	2021年第四季度	15家企业在产品研制过程中采用数字孪生技术，并有专业维护团队负责技术维护
	2024年第四季度	不低于100家企业在产品研制过程中采用数字孪生技术，并有专业维护团队负责技术维护；高科技优先发展工业行业领域数字孪生实施方案不少于250个
开发数字孪生数字化平台	2021年第四季度	开发出一个数字孪生数字化平台，认证用户达1000个
	2024年第四季度	开发出一个适用于5个优先发展行业（汽车、航空航天、舰船、发动机、机器制造业）的数字孪生数字化平台，在50个高科技企业进行推广，形成由25个工程中心组成的国家级网络中心生态系统，认证用户达2500人
开发国产化的大型PLM系统（集成CAD/CAM/CAE等子系统）	2021年第四季度	开发带保护的中型PLM系统，在5家企业试点应用，形成10个方案，使用用户达500个，用于5个优先发展工业领域的20款产品
	2024年第四季度	开发带保护的大型PLM系统，在25家企业试点应用，形成50个方案，使用用户达1000个，用于5个优先发展工业领域的100款产品
在5个优先发展领域建立高精度的国家级高阶数学模型库	2021年第四季度	各行业10%的试验台采用高阶数学模型库
	2024年第四季度	各行业15%的试验台采用高阶数学模型库
建立工业平台解决方案	2024年第四季度	建立数字化认证平台，50种材料/产品通过虚拟试车台加速认证试验，10家公司使用平台将材料和产品推向市场； 建立数字模型和对象权利管理法律保护平台解决方案，保证数字孪生产品和构件的著作权、专利权、许可权； 基于国产平台开发出产品全生命周期专业应用工程软件维护平台，并使用该平台设计25套解决方案，培养100个工程软件设计人才； 建立“根据指令”（on demand）运行的云计算服务； 确定“开源技术库”和“可用产能库”服务模式平台解决方案，使用数据库的公司达到10家； 形成使用管理平台解决方案；开展产品售后服务和预测性分析，实现5个优先发展工业领域100型典型产品售后服务自动化

用标准》。参与标准编制的单位包括俄罗斯标准技术委员会、圣彼得堡彼得大帝理工大学、联合发动机制造集团公司（UEC）、中央航空发动机研究院（CIAM）、克里莫夫公司和计算及应用力学实验室（CompMechLab）等25个组织机构。该标准在世界范围内首次对“产品数字孪生”进行了统一定义，给出了“产品数字模型”“虚拟试验”和“虚拟试验台”等概念的标准定义，确定了构建数字孪生的基本需

求。该标准还在进一步完善，相关工作已列入俄罗斯2022年国家标准化计划。

企业应用

俄罗斯计划于2024年前在航空领域大规模推广数字孪生技术。应用落地项目由UEC牵头，联合了CIAM和莫斯科航空学院计算机建模中心等俄罗斯航空业内数十家企业、研究机构 and 大学。目前，UEC下属土星科研生产联合体（土星公司）、克里

莫夫公司和礼炮燃气涡轮科研生产中心（礼炮公司）等已将数字孪生技术应用到了航空产品研制过程中，涵盖现役的SaM146和TV7-117系列，在研的PD-14、PD-35和“产品30”发动机，以及舰船用燃气轮机。UEC认为，采用数字孪生技术后，新发动机的研制周期将缩短至5~6年，研发流程将得以大幅优化。

土星公司

土星公司是俄罗斯军用和民用航空发动机、舰船用燃气轮机、地

面能源设备的研制、生产和维修的主要企业，是俄罗斯政府指定的第五代战斗机发动机主要研制单位。目前的主要发动机型号包括AL-31F、AL-31FN、117S、AL-55、SaM146等。土星公司在数字孪生技术的主要探索和应用包括以下方面。

一是建立超算中心。2016年，土星公司建立了土星-100超算中心，用于进行长时间复杂高负荷计算。该超算中心的最大数据处理能力达114.5Tflops/s，总运算存储能力为14.5TB，计算字段的处理器总数为204个、2808核。

二是数字孪生虚拟试验。土星公司在进行试验发动机台架试验时，会同时建立相对应的数字孪生体，用以实时了解发动机整个工作过程，有效查找和排除台架试验阶段发现的问题，建立起实物与数字孪生体的互联互通。

三是建立数字化车间。2018年7月，土星公司建立了采用数字孪生技术的生产车间，来开展燃气涡轮发动机及组件制造生产链的数字化

工作，并应用物联网技术，将数据感应、采集与生产控制系统及车间数字孪生关联在一起，以实现实物和孪生体的共联共生。

克里莫夫公司

克里莫夫公司主要从事中小型军民飞机和直升机的发动机、辅助动力装置（APU）和航改地面燃气轮机的设计和试制生产，目前主要的发动机型号有RD-33、RD-93、TV7-117V、TV3-117和VK-800V、VK2500等。

2019年12月，克里莫夫公司完成了TV7-117ST-01发动机数字孪生项目的第一阶段工作。实施过程中，克里莫夫公司进行了发动机数字化处理，并对设计依据、设计文档、测试结果进行了分析。公司研发中心使用CML-Bench™数字平台为新的设计范例生成数据阵列，开发了一系列虚拟测试台（VIS）和虚拟测试站点（VIP），并将VIS集成到专家系统中。设计师共设计了800多种不同类型的发动机并基于数字平台开展测试，实现对发动机全天候自动

化测试验证，并在此基础上，分析自动化测试结果，支撑研究中心专家决策。

礼炮公司

礼炮公司是战斗机发动机AL-31F的批生产工厂，主要制造和销售战斗机、运输机和教练机用涡扇、涡喷发动机以及工业燃气轮机。

礼炮公司从2019年年底开始应用数字孪生技术进行产品设计，旨在打造统一数字平台，整合所有数据和专业化软件程序，提供产品计算数据和文件流转管控平台，如图2所示。礼炮公司使用了多种数值模拟方法，每种方法对应特定发动机研发阶段。2020年，公司制定了新一代舰船用燃气轮机全生命周期数字孪生发展路线图，接着在2021年年初启动了创建舰船燃气轮机和减速器数字孪生项目。该技术后续将运用到雅克-130飞机的发动机改进设计部件调试和验证试验，以及在研的PD-8发动机设计过程中。据称，基于数字孪生技术开发的燃气涡轮发动机有望一次就通过验证试验和

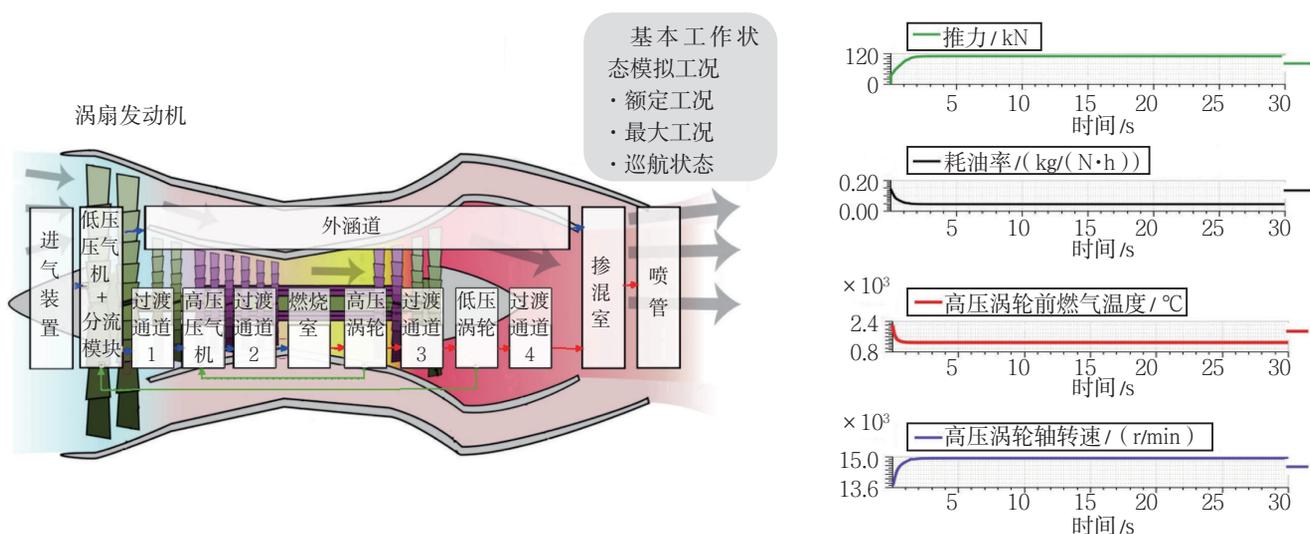


图2 礼炮公司开发的航空发动机数字孪生工作平台

国家鉴定试验，缩短15%~20%的产品研制周期，提高数值模拟精度，降低研制产品设计费用。

关键技术攻关

UEC在领导俄罗斯航空发动机数字孪生技术应用实践时，重点从需求管理、多学科优化、构型管理、数学模型的修正与校验、虚拟试验和统一的数字环境6个方面开展了技术攻关，并提出了集成验证的方案。

需求管理

UEC认为，需求管理是一个庞大的工程，首先需要从建模着手。因此，UEC以PD-14发动机为试点，开展了基于建模仿真的需求体系建设。PD-14在设计过程中最大程度地利用了数学模型开展方案验证，建立了从技术任务书至单个部件的需求体系，涵盖了几万个参数，实现了海量需求的关联。产品设计过程中，技术方案基于大量参数计算得出，保证了设计的透明度，缩短了首批试验件摸底试验的时间。目前，PD-14已经实现了需求管理的自动化，并实现了方法的规范化。

多学科优化

航空发动机研制中的一大难点就是要解决结构、气动、强度、声学等多学科高度融合问题。UEC在TV7-117设计过程中基于统一的数字化平台建立了发动机单个部件相互关联的数学模型体系，并可进行多参数优化，最终实现在极短的时间内自动得出设计方案，减轻动力装置质量的目标。通过验证可知，新方法可以验证数字孪生体及其物理实体的详细需求。

构型管理

UEC以PD-8发动机为平台开

展了数字孪生构型管理验证。PD-8是PD-14的推力减小型，在研制过程中充分借鉴了PD-14的研制经验，包括采用了经过PD-14验证的数字孪生需求管理技术，并做了进一步完善，为构型管理能力的提升奠定了基础。

数学模型的修正与校验

每台发动机都有自己的特点，不同发动机的加工误差也有所不同。加工误差信息是动力装置加工和装配的基础，数字孪生需要基于产品加工误差信息构建。因此，基于产品特点构建出的数学模型才能真实反映物理实体的状态和特点。与此同时，模型构建时还需要综合考虑需求管理、构型管理，最终才能缩短发动机首批试验件从设计到试验的验证时间。AI-222-25发动机数字孪生是数学模型修正的典型应用案例。该项目基于PD-8数字孪生项目开展，应用过程中实现了加工误差的自动化计算，降低了数字孪生数学模型修正的人力消耗。此外，对于模型的可用性还需要进行校验，只有通过试验验证了可行性，才能将模型用于方案论证。

虚拟试验

UEC在研究中发现，数字孪生可以快速反映出某一台发动机的实际寿命、经济性、实际加工误差和其他一些重要参数。发动机及零部件的改进工作均可在数字环境下开展，只有完成数字孪生虚拟试验，并验证成功后才转入物理试验。根据公开资料显示，TV7-117和AI-222-25都开展了虚拟试验验证。

统一的数字环境

PD-14和TV7-117发动机数字孪生项目经验表明，只有通过统一

的高质量综合软件，才能建立需求系统、数学模型系统、关联生产、试验和产品构型的关系架构。目前，俄罗斯在新型舰船动力设计时大量采用了数字孪生技术，并对统一环境和软件间的关联性给出了详细的技术需求。由于项目研制过程中建立了需求体系，相较PD-14和PD-8项目耗费的研制周期更短，人力消耗更少。此外，UEC还在项目开展过程中基于物理数学模型开发了发动机预测性诊断和技术状态指标预测综合软件，并对开发方法进行了验证。采用上述措施可以在发动机发生故障前就提前预测，并保障及时检修。

结束语

近年来，俄罗斯在航空发动机企业应用层面：通过建立超算中心夯实基础条件；建立数字孪生平台，提升协同设计效率和能力；开展虚拟试验，先行验证，减少研制迭代；建立数字化车间优化资源配置，提升产能；通过型号应用，验证技术能力。与此同时，俄罗斯以建设“未来工厂”为重要发展目标，开展了数字孪生技术攻关以及关键技术集成验证。目前，俄罗斯已经将数字孪生技术应用至航空发动机的需求论证、设计、试验和生产领域，以及TV7-117、PD-14、AI-222-25等多个型号中，并取得了一定的成效。到2024年，俄罗斯所有在役、在研及新研发动机都将逐步使用数字孪生技术，该技术将成为未来俄罗斯航空发动机研制的重要手段。

航空动力

(王乐，中国航发涡轮院，工程师，主要从事航空发动机科技情报工作)