

数字主线应用于航空发动机的初步探讨

Preliminary Discussion on Application of Digital Thread to Aero Engine

刘婷 张建超 / 中国航发研究院

数字主线 (Digital Thread) 一词起源于航空航天领域, 用于对系统从设计、制造、组装到交付的整个过程进行数字化管理。经过一段时期的发展, 数字主线被认为是一种改变游戏规则的颠覆性技术。

美 国空军于2013年发起了两项并行活动: 一项是空军首席科学家对未来技术趋势进行的研究调查, 得出总结报告《寰球视野》(Global Horizons); 另一项是空军总工程师受命提高空军工程能力, 得到研究报告《空军工程企业战略计划》(The Air Force Engineering Enterprise Strategic Plan)。这两份报告的共同点是建议开发一种分析框架以支持数字工程, 被称为“美国空军数字主线”(USAF Digital Thread), 旨在扩展基于模型的工程(MBE)、行业数字主线和数字孪生的原理, 以涵盖装备的预研、设计、制造和运维的全生命周期。

为了响应上述报告, 美国空军与国防部成立协同工作小组, 以国防部的“计算研究和工程采办工具环境项目”(CREATE)为依托, 探索美国空军数字主线的试点应用, 为飞行器采办项目的工程人员开发和部署一套支持多学科、基于物理的仿真软件产品, 其核心是使用响应面方法(response surface methodology)和现代高性能计算资源, 将武器系统设计研发过程中的专用高保真工具的输出转换为高精度的数字代理模型, 进行快速性能预测, 并结合试验或经验数据以及统计工程来表征系统, 并量化其裕

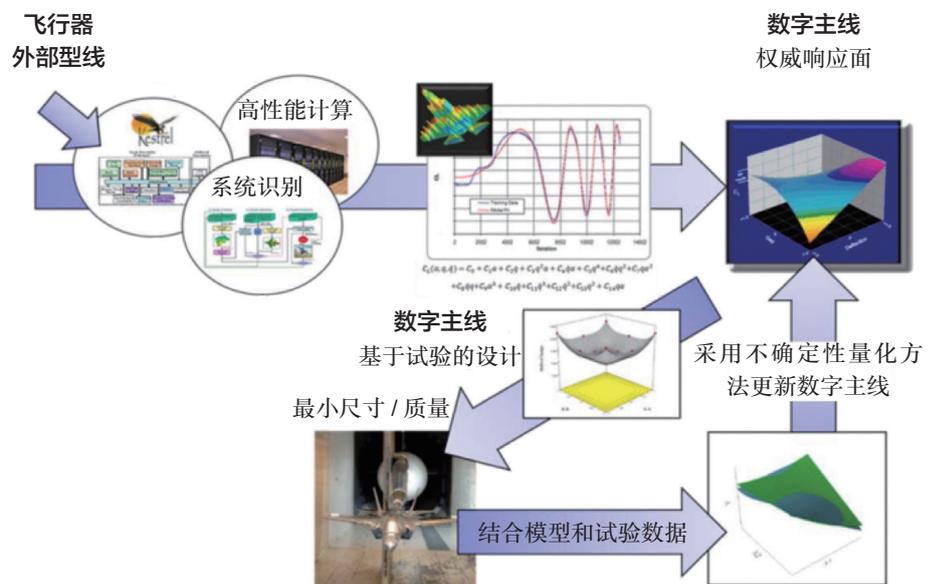


图1 CREATE-AV 试点项目中提出的减少开发测试/评估时间和成本的数字主线方法

度和不确定性, 指导采办人员在关键决策点进行决策部署, 以实现国防采办工程工作流程的重大改进, 进而提高美国空军的敏捷开发和部署能力(如图1所示)。

数字主线的基本概念

美国空军协同工作小组与工业界合作, 为数字主线下了定义, 指出数字主线是一个可扩展、可配置的企业级分析框架, 基于数字系统模型的模板, 无缝地加速企业数据—信息—知识系统中权威数据、信息和

知识的相互作用, 通过提供访问、集成不同数据, 并将其转换为可操作信息的能力, 来为决策者提供产品全生命周期的信息。

值得一提的是, 与数字主线一并被定义的还有数字系统模型和数字孪生两个概念。其中, 数字系统模型指的是由所有利益相关者生成, 集成了权威数据、信息、算法和系统工程过程的设备系统数字表示; 数字孪生是指一种集成的多物理、多尺度、概率性的在建系统数值仿真, 由数字主线实现, 使用最佳可

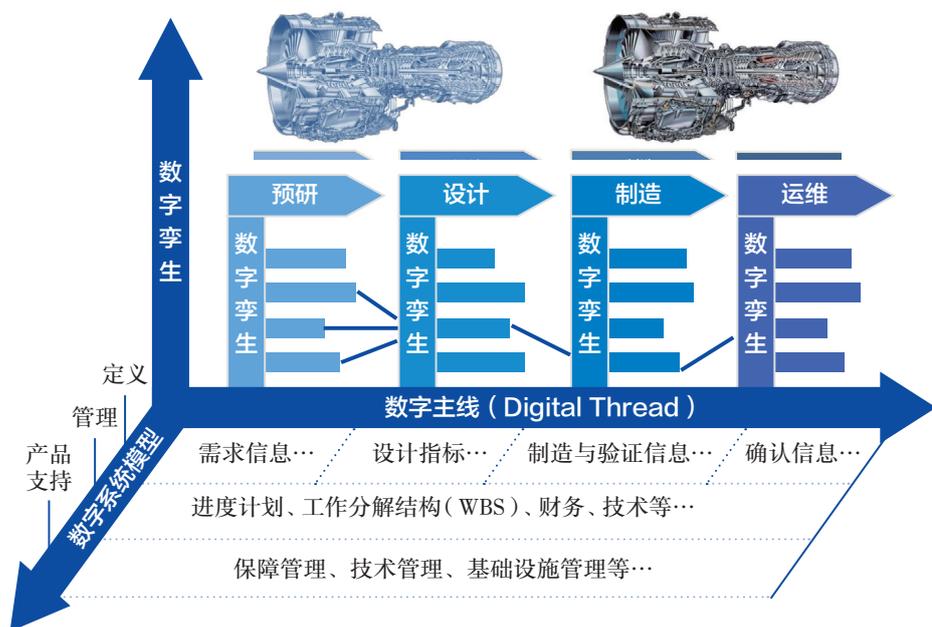


图2 数字系统模型、数字孪生和数字主线关系示意

用模型、传感器信息和输入数据来镜像和预测其相应物理系统全生命周期内的活动和性能。从上述定义可以看出，三者之间既有区别又有联系。

三者区别在于：数字系统模型侧重于实现设备系统数字表示的政策指导和结构，是一种体系化、模板化的指导模型；数字孪生侧重于对物理模型的动态、高保真数字化表达，利用传感器信息不断更新数字模型，实现对物理系统性能、损伤和寿命等的预测；数字主线侧重于对数据流的组织和管理，强调在正确的时间将正确的信息传递到正确的地方，实现数据的可追溯性。

与此同时，数字系统模型、数字孪生和数字主线之间又有着紧密的联系（如图2所示）。数字主线将所有数字孪生功能链接在一起，如设计/性能数据、产品数据以及供应链数据，数字主线与支撑数字孪生的工具相结合，可以将数字孪生扩

展到产品的全生命周期，涵盖了设计、性能、制造、维护等阶段，支持传递设计、性能、可制造性和维修性等所有数据流。举例来说，如果航空航天设备由于系统故障而发生事故，那么数字主线就可以在整个设备生命周期中进行追溯，从而能够快速锁定问题所在。简言之，数字系统模型是基础，数字主线是手段和过程，数字孪生是目标。2018年，美国空军发布数字工程战略，将上述数字系统模型、数字主线、数字孪生作为构建未来美国数字工程生态系统核心纽带之一。

数字主线发展现状

全球知名的咨询服务公司埃森哲（Accenture）在2017年开展了关于数字主线的调研，结果表明，只有7%的航空航天与国防（A & D）公司已经完全集成了数字主线，只有27%的A & D公司在业务和信息技术（IT）部门之间共享了数字主线和数字孪

生的所有权，其侧重点仍然是利用数字孪生提高企业运营效率，这说明当时的行业似乎更关注于成本优化。然而，复杂产品系统虽然能够自主运行，但大规模协作依赖于数字主线所提供的完整且可访问的数据，而如果没有全球范围内的合作，则无法设计制造。随着制造商运营理念从单纯的成本控制向敏捷开发和基于数字化服务获得额外收益的方向发展，当前主流的A & D公司正在积极研究数字主线，旨在建立公司产品的“权威”数据和通信平台，通过数据流推动客户体验背后的数字见解。

美国空军是数字主线应用的先驱，致力于取得复杂系统设计、交付、维护与快速变化的使用环境、紧缩的预算、有限的开发时间之间的平衡。A-10战斗机是在20世纪70年代使用二维图样设计的，为了延长飞机的服役寿命而开展了A-10机翼更换计划（WRP），即使用数字工程技术对A-10战斗机的机翼进行了升级改造。为了降低成本，提高质量并应用先进的制造技术，A-10 WRP项目办公室选择在A-10机翼零件和组件上使用基于模型的定义（MBD），以统一的Adobe 3D PDF格式生成零件的“绘图”文档。据悉，WRP项目产生了大约10000个不同零件的设计模型报告，这些新的3D PDF零件报告包含制造商、供应商和临时用户执行其支持功能所需的所有信息。此外A-10还采用了新技术NLogn将维修映射到三维模型上，如图3所示。3D MBD和产品生命周期管理（PLM）的采用，使A-10可以构建全生命周期中维护阶段的数字主线，使得A-10飞机的机翼质量减轻了12%，

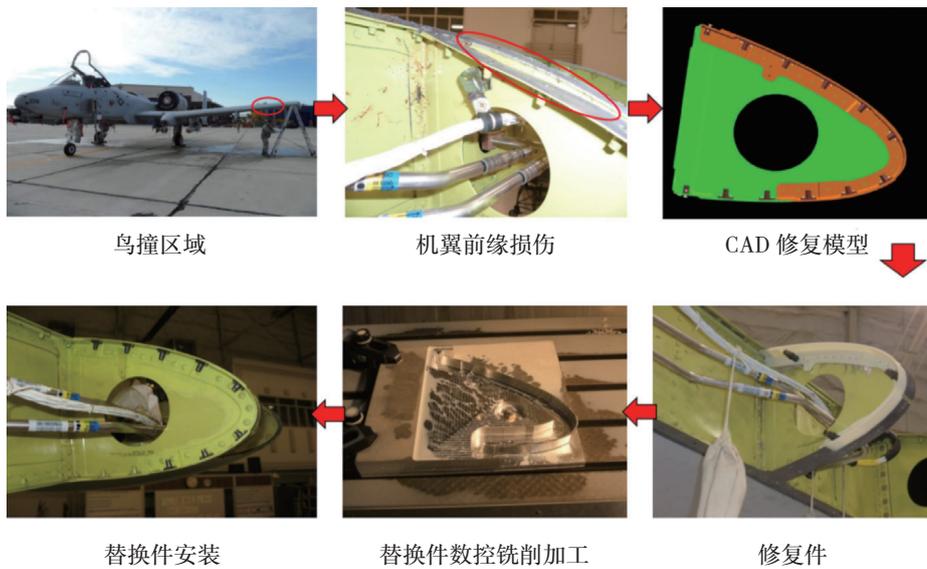


图3 基于Nlign技术的A-10机翼维修映射过程

而寿命则增加了8倍。

洛克希德-马丁（洛马）公司F-35战斗机的开发和早期生产即分阶段采用了数字主线理念。在第一阶段，工程部门生成了精确的三维工程模型和二维图样，包括合作伙伴和供应商等在内的所有分析数据均被发布到通用产品全生命周期管理系统中，以实现可访问性和配置集成，使得工程和工装变更数量大幅减少，提高可生产性和变化管理；在第二阶段，构建了工程数据以支持工厂自动化，如自动钻孔比手工钻孔快4倍左右，质量近乎完美，重复性显著；在第三阶段，数字主线直接向工程师创建工作指令图样等产品，这些图样由三维实体模型提供，可直观地指导工程师或现场维修人员；在第四阶段，使用先进的非接触测量技术（如激光扫描）识别早期制造过程的偏差，并快速纠正这些偏差，阻止缺陷向下游移动以降低成本。据悉，洛马公司正在积极部署下一代数字工程计划，其

数字主线愿景被称为“产品数字宇宙”（Product Digiverse），拟基于达索公司的3D Experience平台提高整个产品全生命周期的可负担性、效率和协作性。

在西门子公司的数字化体系中，产品全生命周期的不同阶段对应有3种类型的数字孪生——产品孪生、生产过程孪生和性能孪生，而数字主线将3个数字孪生连接起来使之

同时进化（如图4所示）。换言之，数字主线将设计、生产和运行等全生命周期各阶段的数据汇集在一起，实现全生命周期及整个价值链的反馈，通过数字主线可以追溯到产品设计的早期阶段，并将丰富的数据传播到生产、运行和维护过程中，从而为设计、制造、装配、供应、维护和运营等全生命周期和价值链的各个利益相关者创造一个完整、封闭的决策环境。近期，西门子公司将数字主线理念应用到电气系统设计 and 集成领域，开发了一种基于数字数据连续性原理的电气工具套件Capital。该软件的核心是丰富的数据建模和数据管理能力，通过其详细的组件建模、广泛的设计规则检查（DRC）和数据库稳定性，降低在集成完备性检查、生产准备状态评审、型号认证和投入使用等关键里程碑阶段所面临的风险。

此外，GE航空集团、参数技术公司（PTC）等也探讨了数字主线在企业数字化转型中的应用。GE全球研究中心技术总监弗斯托斯认为，设计师在开展新产品设计并形成零

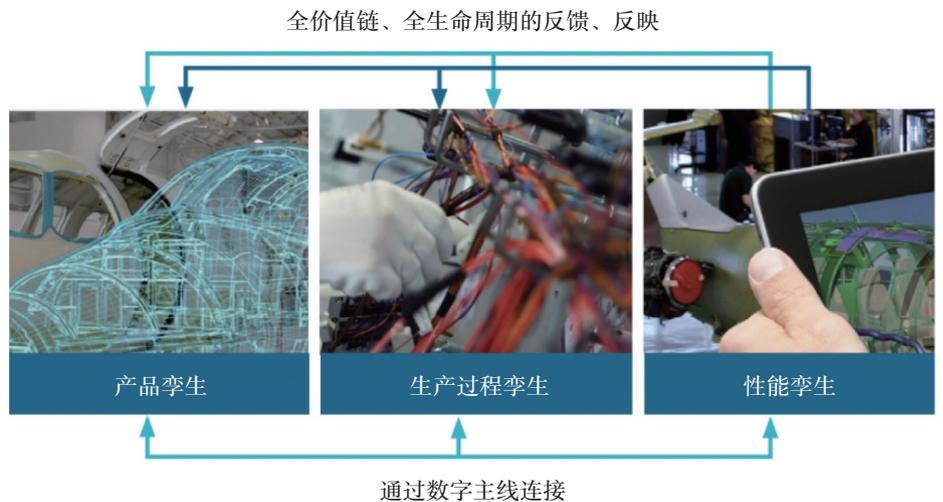


图4 西门子公司数字孪生与数字主线

件或产品的计算机辅助设计（CAD）模型时，数字主线就开始形成了。随后的优化设计将以数字形式传输到制造工厂进行建模和仿真，包括工艺流程、工厂布局、机器人和制造控件等的仿真和优化。一旦对设计和过程进行了虚拟验证，数据便被传输到实际制造工厂，利用智能机器转换数据以制造零件或产品。此外，制造工厂与供应商也通过数字主线实时通信和连接，以实现最佳的生产控制和物流。PTC在其企业数字化转型白皮书中提到，数字主线主要是构建贯通产品设计、制造、运营和服务等各环节的数字化数据流，实现虚拟与物理之间的数据融合以及不同业务流程间的业务融合，为企业各相关方提供实时的数据分析和决策支持。

航空发动机数字主线

当前，航空发动机全生命周期中的每一个阶段通常对应了一种工程实践组织形式，各自拥有自身独有的专业知识和基于模型的工具，由此导致各个阶段之间的信息共享产生障碍，上游数据无法对下游工程活动进行支撑，而下游数据也难以流回上游指导优化，使得设计周期长、运行效率低、维护成本高，亟待探索一种新的、行业级的信息系统运行模式。针对上述现状，基于数字主线的基本定义，同时参考国内外关于数字主线的研究和应用现状，笔者对于数字主线在航空发动机中的应用进行了深入思考，提出了发动机数字主线的基本概念（如图5所示）。

数字主线的目的是使用现代数据通信技术，在实物空间内部（实—

实互联）、虚拟空间内部（虚—虚互联）以及实物空间和虚拟空间之间（虚—实互联）建立联系，使得发动机研发全生命周期各个阶段产生的数据和模型可通过数据接口协议在适当的决策点插入到数字主线中。值得注意的是，数字主线必须保证其中的数据和模型在任何时刻是唯一且权威的，才能实现某一阶段的利益相关方（政府、行业或用户）在对模型进行完善或者修正时，其余利益相关方能同步获得更新，且模型和数据的历史版本需要完整可查，从而保证数据的可回溯性，以支持关键决策。

在实—实互联方面，数字主线提供的数据接口协议支撑发动机企业实现横向和纵向整合，通过横向整合流程可在生产现场、跨多个生产设备以及整个供应链中紧密集成

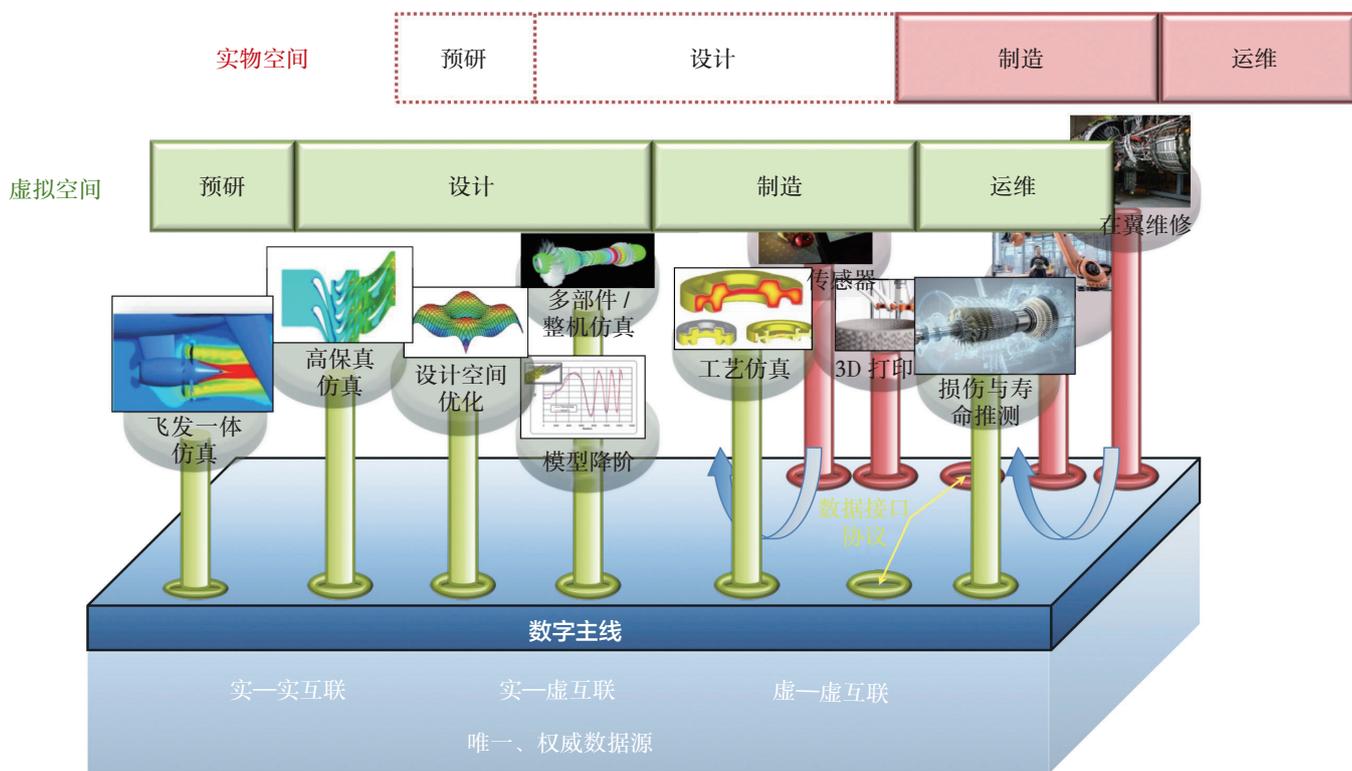


图5 面向航空发动机的数字主线概念示意

在一起；通过纵向集成，数据可自由地从车间回流到企业各个部门，即生产与研发以及其他部门的业务流程紧密集成在一起，从而打破数据和知识孤岛。此外，借助先进的传感器技术、边缘计算、大数据、人工智能（AI）分析、增材制造等技术，未来可实现发动机产品和生产过程的智能化，从而提高生产力，创新服务模式。

在虚—虚互联方面，通过数字主线将发动机研制全生命周期的各个阶段打通，具有访问权限的部门可随时从数字主线系统中提取发动机的相关模型和数据，开展相应的研究活动，并随着其研究活动的进程而同步更新数字主线中的模型和数据，始终保持其内部数据的唯一性和权威性。对于工业部门而言，通过数字主线可以实现设计制造一体化，加速产品研发过程和优化改进；对于用户来说，通过数字主线可以获得发动机各类性能数据，了解其设计过程的细节，从而支撑运行性能优化、快速维修决策和问题溯源。

在实—虚互联方面，通过使用统计工程方法，可以在发动机研制过程的每一步量化原始物理模型中的不确定性。发动机在进入生产、试验和使用时会产生大量的实际数据，可将其与仿真数据合并从而修正数字主线中的模型，并细化不确定度预测，从而确保数字主线中的模型和数据是在实际数据本身精度范围内的最佳可用信息。例如，压气机气动特性的预测模型可以在初步设计阶段开发，通过详细设计过程得到增强，并在试验中达到成熟。

此外，在航空发动机的数字化体系中，数字主线和数字孪生仍然遵循着前者为手段和过程，后者为目标的相互关系，即在发动机型号研制的不同阶段，相关部门利用数字主线抓取当前发动机的模型和数据，并基于内部开发的设计、仿真工具进行研发活动，结合当前能够获得的实际试验或使用数据，构建出该型号的发动机数字孪生体。因此，随着研发过程的进行，在数字主线的支撑下，发动机数字孪生的形态越来越完整、功能越来越复杂，最终伴随着实际发动机交付到用户手中，支撑实际的使用和运行维护。

数字主线实现所面临的挑战分析

当前，数字主线正处于起步阶段，其业务价值正在快速增长，但未来在实现数字主线方面仍面临着相当多的挑战。

一是信息安全保障。数字主线中承载的是行业高价值的数据和信息，涉及企业价值链的方方面面，需要制定并执行合理的安全保障策略，从技术、管理、工程和人员等方面提出安全保障要求，确保信息系统的保密性、完整性和可用性，降低安全风险。

二是数据管理能力。在数据组织方面，数字主线的第一步是识别数据源，提供访问数据的能力并以各种功能可以利用该数据的方式组织数据。在数据存储和使用方面，由于数字主线依赖于跨区域和功能的协作，因此必须建立关于大数据存储及按需提供数据的关键策略。在数据维护方面，为了保证数字主线的准确性和唯一性，需要根据每

一次设计变化的最新情况进行模型更新，如一个机队需要500台发动机，每次飞行后安装在特定发动机上的20个部件相关的模型需要根据飞行产生的应力和应变更新，以反映其组成部件的当前状况，那么数字主线需要同时维护超过10000个各类型模型的更新。

三是良好的合作环境。航空发动机研发流程复杂，须在大量工业软件的支持下完成。例如，现有三维CAD设计软件主要侧重于几何建模，而高精度的仿真分析需要借助专用的仿真软件，不同软件之间需要解决兼容性才能更好地支持发动机的设计研发乃至后续的使用维护。因此需要建立统一的数据标准、模型格式、框架和/或接口，使得这些模型能够同时或迭代运行。此外，在航空航天领域，每个核心参与方都拥有知识产权，如独特的设计工具、开发过程、制造技术等，将数字主线推向实际应用时需要在对设计方法、制造过程、物理特性和更多系统的全面认识与保护知识产权之间取得最佳平衡。

结束语

数字主线提供了一种通信框架，以帮助促进产品数据在其全生命周期中的集成和连接数据流，并支持产品全生命周期中访问、转换、集成和分析来自各种不同系统的数据。将数字主线概念应用于航空发动机等复杂系统的研发和应用领域，提供实—实、虚—虚和虚—实互联的通道，有望推动设计、制造、运行和维护模式的巨大革新。 **航空动力**

（刘婷，中国航发研究院，工程师，从事航空发动机数值仿真研究）