

数字孪生在航空发动机可靠性领域的应用探索

Digital Twin and Its Potential Application in the Field of Aero Engine Reliability

刘魁 刘婷 / 中国航发研究院 魏杰 郑新前 / 清华大学

数字孪生 (Digital Twin) 已成为未来装备研制的重要发展趋势, 将数字孪生概念与航空发动机可靠性相结合, 探索可靠性数字孪生在航空发动机全生命周期的潜在应用, 将为数字孪生的物理实现打下良好的基础。

航空发动机可靠性是指发动机在规定的飞行包线、环境和使用条件下, 在规定的生命周期内完成规定功能的能力。可以说, 航空发动机的可靠性表征了发动机持续维持高性能运转的能力, 是一项综合性系统工程, 贯穿于发动机的设计、制造、试验、使用、维修及管理各个环节。虽然航空发动机可靠性的研究已有长足进步, 但仍然存在不足之处。作为大量先进数字化技术的有机集成, 数字孪生具有高逼真建模与仿真、虚实映射、全生命周期数据有效管理等典型特征, 与航空发动机可靠性存在的问题具有高度适应性。

数字孪生概念的提出

数字孪生的概念是由美国密歇根大学迈克尔·格里夫斯 (Michael Grieves) 教授与美国国家航空航天局 (NASA) 专家约翰·维克斯 (John Vickers) 共同提出的, 并于2003年在格里夫斯教授的产品生命周期管理 (PLM) 课程上被首次引入。之后, NASA 和美国空军联合开展了面向未来飞行器的数字孪生示范, 并将数字孪生定义为一个集成了多物理场、多尺度、



图1 洛马公司数字孪生示意图

概率性的仿真过程, 基于飞行器的可用高逼真物理模型、历史数据以及传感器实时更新数据, 构建完整映射的虚拟模型, 以刻画和反映物理系统的全生命周期, 实现对飞行器健康状态、剩余使用寿命以及任务可达性的预测。同时, 可预测系统对危及安全事件的响应, 通过比较预测结果与真实响应, 及时发现未知问题, 进而激活自修复机制或任务重规划, 以减缓系统损伤和退化。

数字孪生应用发展现状

在数字孪生概念提出的随后15年里, 与其理论和应用相关的研究层出不穷, 使得数字孪生的概念不断完善, 应用领域也在不断扩展。

在理论方面, 陶飞等从物理融合、模型融合、数据融合和服务融

合4个维度, 充分分析了实现数字孪生车间信息物理融合的基础理论与关键技术, 提出了数字孪生的通用五维模型, 总结了数字孪生驱动的6条应用准则; 巴森 (Basson) 等提出了能够为物理—虚拟世界之间数据/信息交互赋能的6层架构; 此外, 对于数字孪生建模的框架与流程、高逼真/高精度建模、不确定性量化、无损检测技术、人机交互等方面也开展了相应的研究工作。

在应用方面, GE公司和罗罗公司均在采用数字孪生进行预测性维修服务, 采集飞行过程中的大量飞行数据、环境和其他数据建立分析模型, 以判断磨损情况和预测合理的维修时机, 实现故障前预测和监控; 洛克希德-马丁 (洛马) 公司构建了面向军用战斗机制造和装配的数字孪生 (见图1), 提高了装备

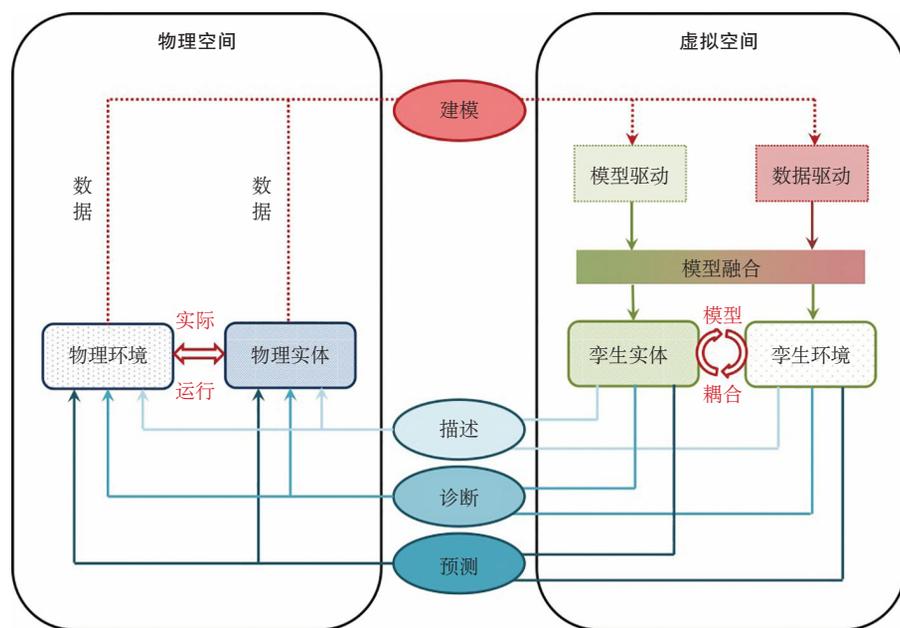


图2 数字孪生虚实映射模型

可靠性。近年来，人们对数字孪生在远程监控、性能预测、决策支持、差异化定制等方面开展了进一步的研究，旨在通过数字孪生创建新的服务模式，进而创造新的价值机遇。

可靠性数字孪生应用构想

可靠性数字孪生虚实映射机制

笔者在航空发动机全生命周期的数字孪生应用框架的基础上，提出了可靠性数字孪生的虚实映射模型（见图2），来表征可靠性数字孪生的映射机制。

在可靠性理论中，认为产品失效（即丧失规定功能的现象）是由外部环境、工作条件以及产品内部的失效机理共同作用的结果。换言之，要实现对航空发动机可靠性的精确预测，需要同时考虑发动机本体和环境因素的影响。因此模型中的可靠性数字孪生对象包含实体和环境两部分。

在将虚实映射模型应用到航空

发动机全生命周期可靠性领域时，考虑到设计阶段没有发动机实体和实际运行环境存在，因此将物理—虚拟之间映射关系的建立分为设计阶段和制造/试验/运行/回收阶段，且两个阶段的虚实映射机制都包含4个环节——建模、描述、诊断和预测。其中，由实向虚的映射是建模，包括通过从物理空间提取数据用于虚拟空间的建模，以及持续的模型完善；而由虚向实的映射是通过模型仿真，是先实现对物理空间的精准描述，在此基础上诊断可能出现的状况，进而预测未来发展趋势。由于生命周期不同阶段具有不同的特点，因此建模、描述、诊断和预测这4个环节的具体含义和作用也有很大区别，详述如下。

第一阶段：在发动机设计过程中，因为物理空间没有发动机实体和环境存在，所以在由实向虚的映射过程中，从物理空间提取的是一系列设计需求，根据需求可以构建

相对应的几何模型与物理机理模型，同时基于历史数据构建数据驱动模型，通过模型融合初步形成航空发动机实体的可靠性数字孪生体与环境数字孪生体，在两者的耦合作用下，可实现由虚向实的映射，即在发动机实际运行前描述其可能的运行状态（总体性能、气动性能、结构强度等），诊断可能发生的故障以及故障产生的机理，并预测使用的可靠性，作为优化发动机的设计与制造工艺的参考，从而加速发动机的研制进程。

第二阶段：在发动机生产/试验/运行/回收过程中，由于有物理发动机和物理环境存在，因此由实向虚的映射是通过采集发动机运行相关数据（温度、压力、应力、变形、振动等内部运行数据、任务数据、维修保障数据等）和外部环境数据（环境温度、湿度、压力、杂质等），不断修正发动机可靠性数字孪生和环境数字孪生模型，提高数字孪生的模型精度。在此基础上，实现由虚向实的映射，即高保真地描述发动机运行情况，实现与物理发动机的动态对应，提前诊断发动机可能出现的故障及原因，评估发动机的可靠性并给出解决方案，实现定制化的维修和保障，优化使用、维护与运营过程，同时也可作为发动机设计与制造工艺的优化提供支撑。不同阶段可靠性数字孪生展现形式，如图3所示。

可靠性数字孪生的组成及功能

可靠性数字孪生可以认为是伴随着设计过程的进行而逐渐形成的，随着设计的深入，其组成与功能也在不断丰富。当实际设计过程完成时，所构建的可靠性数字孪生

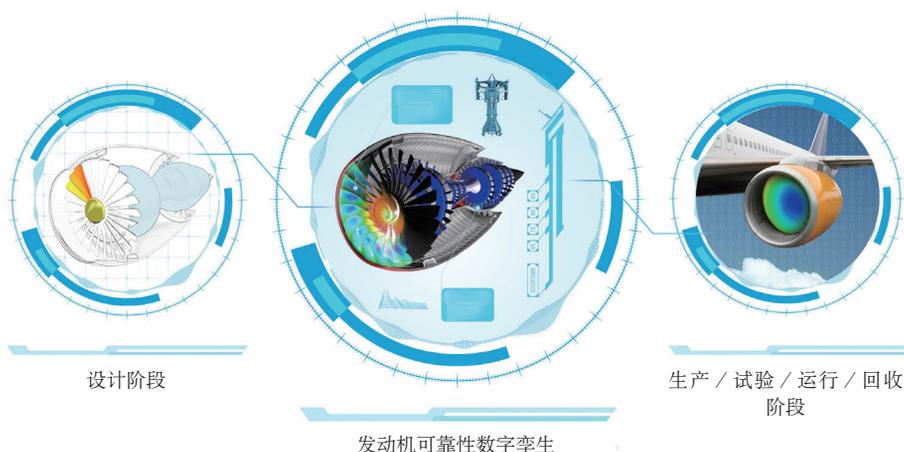


图3 不同阶段可靠性数字孪生展现形式

应包含4层(见图4):第一层是包括尺寸和公差等信息在内的发动机完整几何结构;第二层是在几何的基础上增加了每个零部件的材料特性(微观-介观-宏观尺度下的完整材料数据);第三层是从零部件、系统到整机的发动机性能评估;第四层是对发动机故障的诊断及可靠性预测。在制造、试验和运行阶段,其可靠性数字孪生将是在前序阶段的基础上,通过增加每一层中相应的物理/数据模型构建而成。此外,

上述阶段都有物理的发动机或其零部件存在,根据前面所建立的虚实映射机制,通过将实际制造、试验和运行过程中采集的数据通过边缘计算反馈到数字孪生体中,可以不断修正每一层中的模型,提高可靠性数字孪生的预测精度;与此同时,通过边缘控制、智能机器人辅助等技术,也能够将数字孪生的决策判断反馈到实际运行过程中,提高发动机制造、试验、运行过程的智能化水平。

可靠性数字孪生在发动机全生命周期的应用

设计阶段

设计阶段没有涉及物理发动机和物理环境,此时可以认为物理孪生是设计者对发动机的可靠性期望,可以根据可靠性的总体设计需求,如平均故障间隔时间(MTBF)、平均维修间隔时间(MTTR)、可靠度(R)等,通过可靠性建模将可靠性指标逐层分解,量化为一系列需求条目;数字孪生体是基于几何模型和不同维度仿真模型,利用矩方法、随机抽样法、响应面法等构建的可靠性预测模型,随着设计过程的进行不断扩展其维度和复杂程度,基于历史数据或经验公式给定故障影响因素,通过仿真研究故障或薄弱环节产生的机理,预测和预防各种可能发生的故障和隐患,评估和验证设计的可靠性,并提出相应的改进措施,以提高发动机的可靠性。

制造阶段

制造阶段的物理孪生包括发动机整机、零部件等产品对象和生产环境。因此,在可靠性数字孪生中

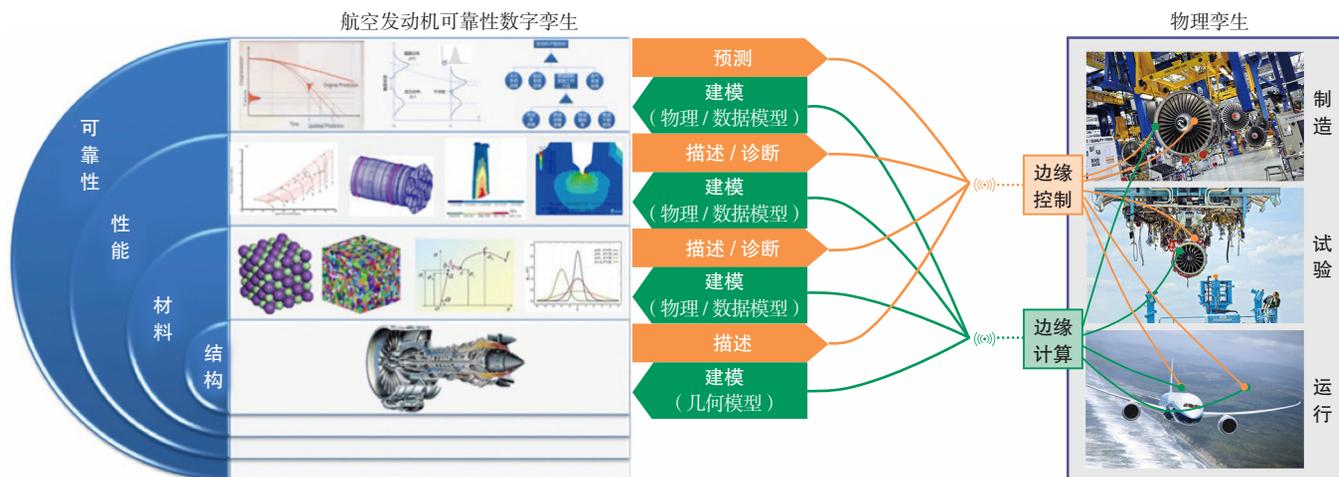


图4 航空发动机可靠性数字孪生应用场景构想

将在设计阶段数字孪生的基础上增加生产环境的模型、对工艺的仿真模型和基于海量生产数据的分析模型。基于上述模型，在实际加工生产之前能够预测生产环境下零件加工完成后的残余应力、组织、成分和超差等，在此基础上利用可靠性模型评估实际生产工艺和生产环境对发动机可靠性的影响，进行质量控制。在实际生产过程中，一方面通过采集生产环境数据（例如环境温度、湿度、压力、气体组分等）、工艺数据（电压、电流、载荷、气体流量等）、实时（振动、噪声等）/非实时（材料微观组织结构、缺陷、宏观性能等）响应数据，修正几何、物理与分析模型，从而提高可靠性的预测精度；另一方面，利用数字孪生可进行决策支持，并通过边缘控制等技术，自主调控生产工艺，优化生产过程。值得一提的是，在制造阶段完成后，可靠性数字孪生将具有个体差异性，即每一台批产的发动机都有一个可靠性数字孪生体与其对应，包含其设计、制造工艺历史，以及从宏观到微观、从低维到高维的发动机全信息。

试验阶段

试验阶段的物理孪生包含试验对象（整机、零部件）和试验环境，数字孪生是虚拟试验对象与环境，在设计/制造阶段孪生体的基础上扩充了试验设备、试验环境等模型，以及基于海量历史试验数据构建的分析模型等。在实际试验之前，一方面通过数字孪生可以进行试验方案的评估与优化，缩短试验台的建设周期、降低建设经费；另一方面，可以进行大量的虚拟地面试验和高空试验，预测发动机的性能、可能

出现的故障，评估发动机的可靠性，如平均故障间隔时间、平均维修间隔时间、可靠度等，为设计与制造工艺的优化提供有价值的信息。在实际试验过程中，通过将采集的试验数据与数字孪生的预测结果比较，修正发动机模型、环境模型和设备模型等仿真模型，不断提高可靠性数字孪生的预测精度；在此基础上，基于数字孪生的高精度预测功能，可实现对发动机的快速排故，同时通过边缘控制等技术，可以实现对试验台的远程控制和试验参数的远程预警。

运维阶段

运维阶段的物理孪生包含发动机本体和其运行环境，数字孪生是虚拟发动机与环境，基于制造/试验阶段的数字孪生，增加了对发动机实际运行过程和实际运行环境的预测模型（包含物理模型和分析模型）。每一台发动机交付时，都将有一个虚拟的孪生体同时交付给用户，在实际发动机投入使用的同时，其数字孪生也相应地在虚拟空间运行，使得制造商能够持续跟踪发动机的运行情况，通过收集实时和离线采集的数据（运行数据、环境数据、故障数据、维修数据等），反馈到孪生发动机和孪生环境中来修正模型，实现对发动机运行状态的高保真模拟、故障的精准预测和可靠性的实时评估。利用云计算、增强现实（AR）/虚拟现实（VR）等先进的数字化手段，用户、工业部门、领域专家等异地人员能够围绕上述数字孪生开展协同工作：一方面可以为用户提供延伸的服务，包括签派放行、故障溯源、视情维修、备件管理等，为降低运行成本提供可能，对航空

发动机运行的经济性和安全性具有重要意义；另一方面也能确定可靠性改进范围，支持工业部门进行设计和制造工艺的改进。

回收阶段

回收阶段实际发动机已经报废消失，但其可靠性数字孪生记录了该台发动机从设计、制造、试验到使用全生命周期的数据，可作为虚拟资产被反复使用。例如，在设计阶段通过调整同种类型数字孪生的部分设计参数，快速进行新机的改进改型与可靠性评估迭代，形成闭环，大大加速发动机的研制周期、降低研制成本。

结束语

航空发动机可靠性数字孪生自设计阶段诞生，并随着物理发动机的制造、试验和使用维护等过程的进行而不断自我丰富、自我修正。从生产力层面，可靠性数字孪生的虚实交互、模型自我修正和高保真仿真等功能支持状态实时监测、可靠性设计、加工工艺控制、故障模式分析预测以及可靠性评估，从而提高发动机设计、制造和使用的可靠性。从生产关系层面，利用可靠性数字孪生可实现发动机生命周期各个阶段之间的数据无障碍流转，保证数据的同源，进而支持设计、试验、生产协同，提高发动机的研发效率和质量。可以预见，随着数字化技术的进一步发展和关键技术的不断攻克，未来可靠性数字孪生必将在发动机领域发挥举足轻重的作用。

航空动力

（刘魁，中国航发研究院，高级工程师，主要从事航空发动机仿真及信息化技术研究）