

基于数字孪生的舰载机发动机健康管理技术

Aero Engine Health Management Technology Based on Digital Twins

■ 吴雄 彭云龙 张波 / 海军研究院 徐鸣 / 海军装备部重大专项装备项目管理中心

航空发动机数字孪生技术与健康管理技术结合，将从技术手段上提高发动机健康管理功能的实现能力和智能化水平，为满足舰载机发动机健康管理系统的用户需求奠定基础。

航空发动机健康管理技术是发动机实际使用维护过程中的重要手段，能够有效管控发动机技术状态，降低故障隐患，提高使用可靠性。特别是在远海条件下，受复杂海洋环境和高强度使用频率等因素影响，舰载机发动机使用环境恶劣、性能衰退显著、各类故障增加，对高水平发动机健康管理技术的需求更为迫切。对此，航空发动机性能数字孪生与健康管理的有机融合，为实现舰载机发动机实时状态监测、故障诊断预警、寿命管理评估与远程维修决策支持等功能需求提供了新的技术路径。



歼-15舰载机在山东舰准备起飞

舰载机发动机健康管理特点

航空发动机健康管理是指利用数学模型或智能算法对航空发动机状态数据信息进行分析处理，从而实现发动机性能趋势预测、故障诊断隔离、寿命评估管理等功能。

航空发动机健康管理系统一般由机载单元和地面支持单元两部分构成。GE公司早在20世纪60年代率先开展了航空发动机状态监测与故障诊断系统的研发并逐步推广应用，取得成功。20世纪70年代后期，军用航空发动机也开始装备状态监测和故障诊断系统，并不断改进升级。目前，F-35飞机配套动力F135

发动机的健康管理系统是在F119发动机健康管理系统的基础上发展而来，除了具备完善的状态监测，还具备通过先进传感器和智能诊断算法实现准确隔离故障的能力，在诊断预测基础上具备维修决策和资源管理等功能。

舰载机发动机除具备陆基发动机的基本要求外，还应满足“舰一机一发”的适配性要求，因此对舰载机发动机健康管理系统也提出了更高要求，主要包括以下三方面。

一是为满足海洋作战适配性，舰载机发动机在随母舰出航远离岸

基保障基地期间，应具备较高的装备完好率和较低的故障率。这要求舰载机发动机健康管理系统应更为精细化，在实时掌握发动机的工作状态的同时能够获取更多的整机/系统/部件性能数据，实现发动机故障发生前的亚健康诊断，满足舰载机高强度的使用需求。

二是为满足海洋环境适配性，舰载机发动机需要在高温、高湿、高盐雾环境下具备良好的抗腐蚀防护能力。远洋长航过程将导致发动机的维修需求大大增加，这要求舰载机发动机健康管理系统能够针对

不同发动机的个性化差异制定保障方案，同时考虑舰上发动机机群保障需求和保障资源，提出合理科学的保障策略。

三是为满足舰载使用适配性，舰载机发动机需具备一定的抗进气畸变和推力/功率保持能力。因此，舰载机发动机健康管理应具备发动机气动稳定裕度评估与性能衰退后状态评估的能力。目前关于舰面起动稳定性和舰载使用性能衰退尚无成熟的评估模型，可行的方式是采用数据驱动模型预测评估算法。

数字孪生应用于发动机健康管理的技术优势

现代航空发动机健康管理系统主要由计算分析模型和状态监测数据驱动。近年，随着发动机状态监测数据呈几何级数增长，以往的计算模型与评估方法难以满足动态多变环境下的实时状态评估与高精度性能预测。因此，在综合建模、智能传感、人工智能等新型数字信息技术取得进步的基础上，航空发动机性能数字孪生技术被提出。

发动机性能数字孪生以人工智能为基础，快速建立发动机工作循环内传感器变量监测值变化与发动

机性能变化之间的数学关联。通过创建气动/热力/机械/控制参数的宏观数学表达关系，建立多层次深度学习网络，实现理想热力学机理模型的自学习与自适应能力，适应不同发动机的个体特征，保证数字孪生的仿真精度，准确反映发动机实体从单个发动机部件到整机的动态信息，同时在发动机状态监测的基础上获取更多的性能参数等信息。

综上所述，性能数字孪生技术应用于舰载机发动机健康管理具有以下潜在技术优势。

一是提升发动机数值模型计算精度，有利于实现个性化自适应模型。利用人工智能大数据算法，充分挖掘发动机试验试飞等数据，可适应性修正因发动机生产、制造和使用等因素造成的个性化差异，提高发动机数值模型精度，实现发动机数值模型的自适应学习，更真实地反映发动机状态。预计性能数字孪生模型计算精度相比热力学机理模型将至少提高2~3个百分点。

二是提高发动机数值模型计算速度，有利于增强健康管理机载诊断评估预测能力。相关研究表明，利用人工智能极速策略等智能算法能够使模型的响应时间降低一个数

量级，实现发动机数字孪生模型的实时响应，保持与发动机实际运行状态高度一致，满足发动机在线健康管理的计算要求，增强实效性，为健康管理系统参与舰载机发动机实时控制寻优奠定基础。

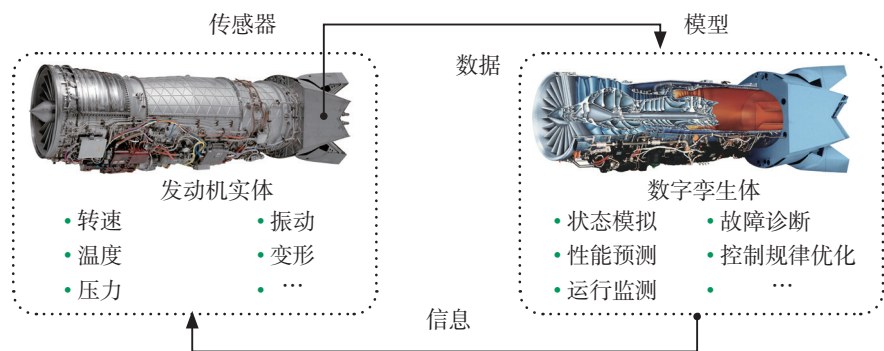
三是扩充发动机故障样本量数据，有利于实现发动机个性化维修保障。发动机性能数字孪生技术可计算得到许多传感器无法直接测量输出的数据，并利用大量虚拟试验模拟丰富新类型故障的学习样本，可为实现发动机早期问题预警，提升发动机个体故障预测能力，提供必要的数据库。

基于数字孪生的舰载机发动机健康管理关键技术

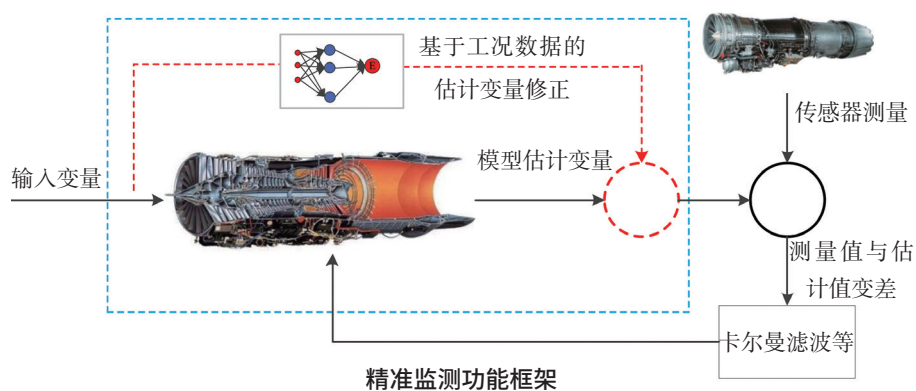
舰载机发动机起降安全性要求高，同时存在使用工况恶劣、系统建模复杂、样本空间量少、故障数据有限等特点。因此，基于数字孪生的舰载机发动机健康管理技术应以数据为基础，采用模型驱动和数据驱动融合的方法，构建舰载机发动机实际使用过程中的环境模型和性能模型，利用实时传感器数据实现模型的动态更新与自适应学习，实现数字孪生在舰载机发动机健康管理上的技术应用，需要突破以下3项关键技术。

多领域复杂系统建模综合技术

航空发动机属于高温高压高热力学旋转机械，其工作过程包含了燃烧、传热、气动等多领域的复杂耦合现象，且发动机不同物理场的时间几何尺度是不同的。因此，精确求解发动机内部的实际物理过程是十分困难的，需要在有限的边界条件下利用流动机理模型、实时性



航空发动机数字孪生概念



精准监测功能框架

能模型和局部线性模型等多种模型搭建发动机性能数字孪生的初始模型。融合实时传感器数据、故障修理数据、历史飞行数据等多源数据，对初始模型进行优化修正，使其具备精准监测、故障诊断、性能预测和控制优化等特征。

舰载机发动机长期在海洋环境中使用，工况恶劣、性能衰退显著，对发动机性能参数精准监测的需求十分迫切。发动机出厂时的性能模型是整机额定性能模型，且不包括各部附件的性能模型。长期工作运转后，由于机械磨损、材料形变、外力作用等原因，发动机整机额定性能模型输出值与真实传感器测量值将出现偏差，整机和部件性能参数将无法精确估计。因此，应针对部件/附件/系统/整机构建对应的性能模型，比较传感器测量值与模型计算输出值的偏差，利用卡尔曼滤波等方法评估性能模型的变化程度，并在包线范围内利用神经网络、支持向量机、相关时间规整等方法对部件/附件/系统/整机初始模型进行修正，弥补部件性能退化所产生的偏差。

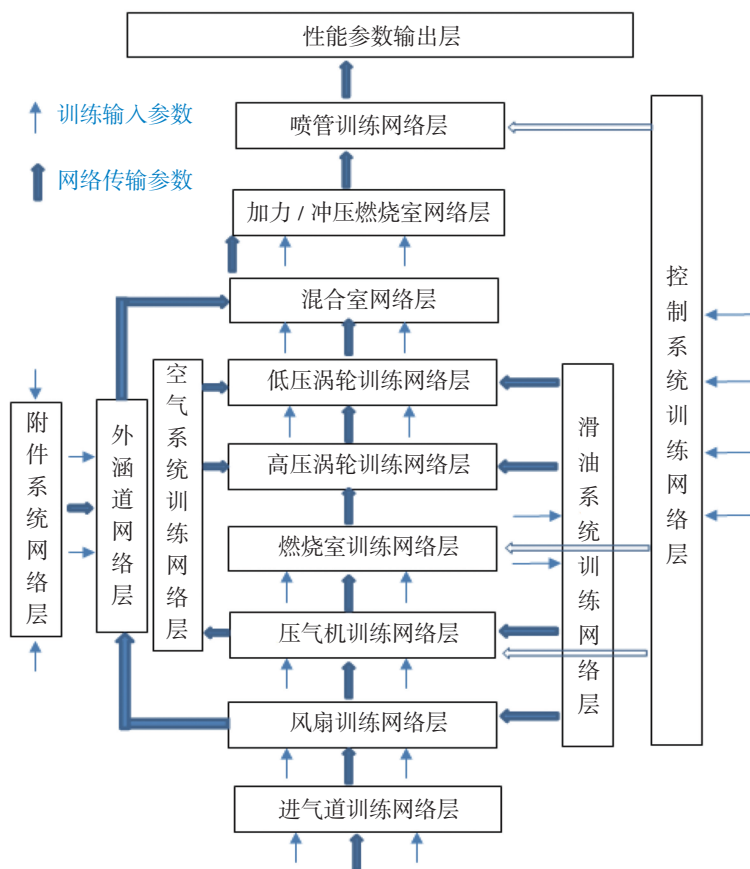
数据驱动的智能学习与分析技术

数字孪生的两个重要特征是动态交互与自适应学习。数字孪生与

寻优，制定维护策略，实现数字孪生健康管理与发动机实际使用的在线同步。

舰载机发动机的起降安全性要求高，而复杂系统模型不能满足基于数字孪生健康管理系统在线参与优化控制的使用需求。因此，应在高精度复杂系统模型的基础上，搭建发动机整机与关键系统的性能表征模型，运用人工智能和大数据分析技术对模型进行降阶，提高其响应速度，利用实测数据动态更新模型，量化不确定输入（载荷、边界、材料参数等），提高其计算精度。同时，采用人工智能算法实现发动机模型的个性化修正与自适应更新，得到每台在役发动机的定制化性能

发动机健康管理技术结合，旨在打通虚拟数字模型与真实物理实体的映射关系，能够利用实测数据动态更新模型，更准确地分析预测发动机状态，量化性能指标的发展趋势。同时，利用人工智能算法和极速运算能力，辅助参与发动机控制



发动机部件/附件/系统/整机模型修正训练网络框架

数字孪生模型。在舰载机起降过程的关键阶段，若判断故障发生，借助数据驱动的智能学习与分析技术可综合发动机状态数据与飞行环境数据，提出控制优化策略，自适应调整控制系统优化发动机的整体性能，如牺牲发动机喘振裕度、增大耗油率以满足推力瞬变和大推力的要求，或适当降低发动机状态确保较大的喘振裕度等。

信息融合与处理技术

发动机性能数字孪生模型是一组不断迭代更新的动态模型，需要借助大量的发动机数据信息才能实现。航空发动机数据信息包括制造装配的生产数据、使用维护的运维数据以及报废回收的全生命周期数据，其中运维数据又包含了传感器采集的实时数据、控制系统的故障代码、维修历史记录和环境载荷信息等。大量数据的不断产生对信息的融合与处理提出了需求，利用大数据分析技术充分挖掘这些多源异构数据信息之间存在的关系，可有效支撑性能数字孪生模型的故障诊断与预测，辅助指导决策。考虑舰载机发动机样本空间量少、故障数据有限的固有特点，更要依托发动机全生命周期内的各类试验、试飞、使用数据来支撑性能数字孪生模型的构建，利用信息融合与处理技术为模型的自适应学习提供样本。

未来发展分析

数字孪生是航空发动机数字化发展的一个重要方面，数字化工程更是涉及到装备产品的全生命周期。在推进基于数字孪生的健康管理技术研发过程中，需要统筹满足各方的成本、进度和预期性能要求，运用

全生命周期系统管理的原则，明确不同阶段的能力需求，促使技术运用的落地生根。例如，前期试验数据的采样频率与存储格式等问题将影响后续数字孪生模型的建立。

与此同时，应坚持体系化发展，夯实技术根基，增加基础技术领域的研发投入，如传感监测技术、远程数据加密传输技术、数据样本筛选策略、发动机性能衰退预测评估技术以及数字孪生实现平台等。目前国内已开发出多款航空发动机性能模型和健康管理系统，但未能推广应用的一个重要因素就是部分关键技术缺乏自主支撑能力，如机载硬件的存储计算能力和传感器的采样精度等。

此外，行业领域的持续发展离不开标准规范的建立。自20世纪70年代以来，美国国防部发布的各版航空发动机通用规范/指南均对发动机状态监控、诊断或健康管理系统提出了要求。相比之下，我国仅在GJB 241A—2010《航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范》中提出了“测试系统”和“状态监视”的顶层要求。数字孪生在航空发动机健康管理领域的发展运用建议借鉴国际先进经验，补足完善数字孪生健康管理领域的标准要求，确立基础共性标准、数据技术标准、工具/平台标准、测评考核标准、行业应用标准等，从标准规范层面统一构架组成。

结束语

数字孪生是航空发动机健康管理的重要发展方向，性能数字孪生结合健康管理技术有助于实现舰载机发动机舰面维护保障水平质量的提高。

以信息化为引擎的数字化、智能化模式必将成为航空发动机未来发展的重要趋势，未来数字孪生发动机的构建也将推动航空发动机智能化制造和使用维护的颠覆性创新。

航空动力

(吴雄，海军研究院，高级工程师，主要从事航空发动机发展论证研究工作)

参考文献

- [1] 魏永超,罗城仔,邓岚. 发动机健康管理技术的研究进展[J]. 中国民航飞行学院学报, 2019, 30(3).
- [2] 姜彩虹,孙志岩,王曦. 航空发动机预测健康管理系统设计的关键技术[J]. 航空动力学报, 2009(11).
- [3] 李军,杨旭. 航空发动机健康管理系统的功能架构[J]. 航空动力, 2019(1): 71-74.
- [4] 王乐,周军,崔艳林. 数字孪生在航空发动机领域的应用分析[J]. 航空动力, 2020(5): 63-66.
- [5] 王伟生,肖金彪. 航空发动机健康管理系统的标准分析[J]. 航空动力, 2019(1): 68-70.
- [6] 彭云龙,吴雄,丁婷,等. 舰载高级教练机动力发展途径与未来趋势[J]. 航空动力学报, 2020, 35(10).
- [7] 刘永泉,黎旭,任文成,等. 数字孪生助力航空发动机跨越发展[J]. 航空动力, 2021(2): 24-29.
- [8] 孟松鹤,叶雨玫,杨强,等. 数字孪生及其在航空航天中的应用[J]. 航空学报, 2020, 41(9).
- [9] 刘婷,张建超,刘魁. 基于数字孪生的航空发动机全生命周期管理[J]. 航空动力, 2018(1): 52-56.
- [10] 刘魁,王潘,刘婷. 数字孪生在航空发动机运行维护中的应用[J]. 航空发动机, 2019(4): 70-74.