

面向飞行器结构健康管理的数字孪生及应用研究综述

刘亚威

(中国航空工业发展研究中心,北京 100029)

摘要: 数字孪生一词起源于美国国防部对飞行器机体数字孪生的研究,目前已经成为全球制造业的前沿热点领域。解析了数字孪生的概念及其中的结构健康管理元素,提出了包含生命周期维、仿真精度维、智能程度维的数字孪生成熟度模型;梳理了面向结构健康管理的数字孪生关键技术,特别是4项关键的数字工程技术能力,包括多尺度建模、多物理特性建模、模型与实验的集成和概率性/不确定性分析;分析了数字孪生支撑的结构完整性预测的功能流程,总结了美国空军研究实验室和国家航空航天局支持的研究,探索了基于数字孪生的生命周期管理范式。随着更高价值飞行器的不断研发和使用,以及实验的深入、机理的突破、数据的积累和算力的提升,集成了数字孪生功能的自知晓飞行器将会成为一个趋势。

关键词: 物理特性模型; 概率性分析; 寿命预测; 机器学习; 高超声速

中图分类号: TTP391; V271 文献标识码: A

doi: 10.19708/j.ckjs.2021.03.220

Review on Digital Twin and Its Application Research for Aircraft Structure Health Management

LIU Ya-wei

(Aviation Development Research Center of China, Beijing 100029, China)

Abstract: The term digital twin originated from the research of the U. S. Department of Defense on airframe digital twin, and has now become a hotspot in the global manufacturing industry. The concept of digital twin and its structural health management elements are analyzed. The maturity model of digital twin including dimensions of lifecycle, fidelity of simulation and degree of intelligence are presented. The key technologies of digital twins for structural health management are sorted out, especially the four key digital engineering technical capabilities, including multi-scale modeling, multi-physics modeling, integration of models and experiments, and probabilistic/uncertainty analysis. The full functional process of structural integrity prediction enabled by the digital twin is analyzed. The research projects that supported by AFRL and NASA are summarized. The paradigm of aircraft lifecycle management based on digital twins is explored. With the continuous development and use of higher-value aircraft, as well as the deepening of experiments, breakthroughs in mechanism, accumulation of data, and improvement in computing power, self-aware aircraft with integrating digital twin function will become a trend.

Key words: physics based model; probabilistic analysis; life prediction; machine learning; hypersonic

收稿日期: 2020-07-06

作者简介: 刘亚威(1982—)男,硕士,高级工程师,主要研究方向为数字工程、智能制造、创新生态。

引用格式: 刘亚威. 面向飞行器结构健康管理的数字孪生及应用研究综述[J/OL]. 测控技术: 1-10. <https://doi.org/10.19708/j.ckjs.2021.03.220>.

LIU Y W. Review on Digital Twin and Its Application Research for Aircraft Structure Health Management[J/OL]. Measurement & Control Technology: 1-10. <https://doi.org/10.19708/j.ckjs.2021.03.220>.

当前,各国军方和民航企业对于价格昂贵的飞行器的维修保障方式,绝大部分仍然是定期检修——在作战飞机或客机完成一定时间的飞行小时或在一个固定的周期性间隔之后进行,这与汽车保养并无不同。然而,这样的方式一方面可能造成过度检修,让飞行器的维修保障成本居高不下;另一方面可能造成失效隐患,导致更严重的机毁人亡事故。美军运营着世界上最庞大的飞行器机队,拆解结构状态良好战机带来的高昂的维修保障成本,以及因结构完整性问题导致的低下的装备完好性一直困扰着美军。

随着建模仿真、物联网和大数据技术的发展,美军为了实现增强型视情维修(CBM+),一方面开发了结

构健康监测(SHM)和预测与健康管理(PHM)技术,推动数据驱动的决策;另一方面不断建立、完善各类机理模型,找寻裂纹产生的原因和方式,希望在数字空间消灭一切问题,推动模型贯穿的决策。2018年,美国国防部发布《数字工程战略》^[1],将数字系统模型、数字线索和数字孪生作为支撑建立装备全生命周期数字工程生态系统的核心纽带^[2],推动美军以模型和数据为核心谋事、做事的数字工程转型。其中,数字孪生被美军寄予重托,如图1所示,利用制造、使用和维修数据,基于数字孪生仿实现机体结构寿命预测,将成为解决困扰飞行器维修保障难题的一大利器^[3]。

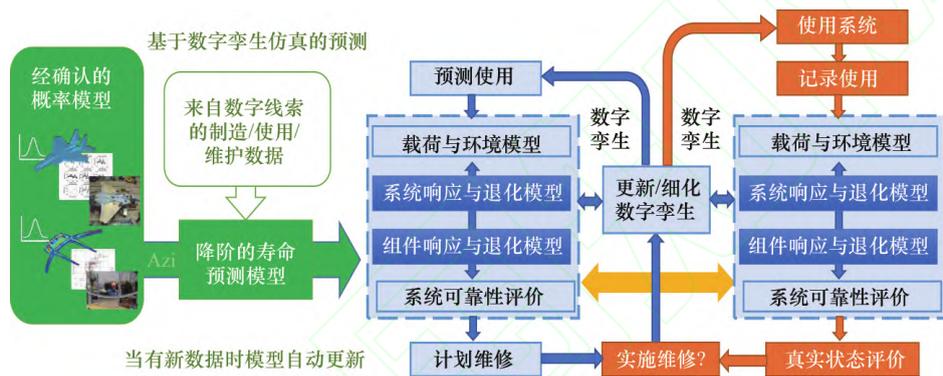


图1 空军面向预测性维修的数字孪生流程

“数字孪生”一词起源于美国国防高级研究计划局(DARPA)、空军研究实验室(AFRL)以及国家航空航天局(NASA)对于飞行器机体结构完整性预测与生命周期管理的研究工作^[4-10]。根据美国国防部的定义^[11],数字孪生是由数字线索使能,使用最佳的可用模型、传感器信息更新以及输入数据,对已建造系统的一个多物理、多尺度和概率性的集成仿真,以镜像和预测相对应的物理孪生生命周期的活动/性能。自称在2002年就提出数字孪生概念的迈克尔·葛瑞夫斯教授^[12],在2014年发表了阐述数字孪生概念的白皮书^[13],认为数字孪生是一组虚拟的信息结构,用于描述一个潜在的或实际存在的制造产品,描述了从微观原子层到宏观几何层的、能够从物理产品中探测到的所有信息。笔者也提出了自己的定义^[14]:从本质上来看,数字孪生是一个对物理实体或流程的数字化镜像,创建数字孪生的过程,集成了物理特性模型、人工智能/机器学习和传感器数据,以建立一个可以实时更新的、现场感极强的“真实”模型,用来支撑物理产品生命周期各项活动的决策。

2009年,AFRL启动了飞行器“机体数字孪生”(ADT)研究^[15-17]。2013年,空军《全球地平线》顶层科技规划将数字线索及数字孪生列为“改变游戏规则”的颠覆性机遇^[18]。同年,AFRL在前期ADT以及

DARPA项目的基础上,启动了概率性和预测的单个飞行器跟踪(P2IAT)项目^[19],分别由诺·格公司^[20-22]、GE/洛·马^[23-25]领衔,从2013年持续到2017年,旨在进一步探索数字孪生支撑的结构完整性预测。DARPA通过项目孵化了专门进行结构完整性预测的虚拟孪生软件^[26],并用于飞行器的虚拟寿命管理^[27]。NASA则进一步研究如何通过数字孪生实现面向载荷控制的损伤预测^[28],甚至希望开发一种集成基于数字孪生的结构健康管理功能的自知晓飞行器^[29]。

工业界方面,GE通过其工业互联网平台^[30]探索数字孪生在航空发动机等涡轮机产品中的应用。波音提出一个基于模型的系统工程(MBSE)宝石模型^[31],数字孪生全生命周期贯穿,强调利用“已交付”之后的数据更新数字孪生进行虚拟运行和状态预测,并且正在探索以低逼真度数字孪生完成高速分析^[32]。洛·马将数字孪生列为2018年的六大技术趋势之首^[33],并且提出了名为“产品数字世界”的数字工程生态系统概念^[34],旨在建立一个集成了人员、流程、工具、物料、环境和数据的框架,将跨产品全生命周期和所有学科的物理域与数字域连接起来,构建镜像物理世界万物的数字孪生,以更好地完成持续保障和服务。中国飞机强度所提出构建强度数字孪生^[35],正在攻克高逼真度模型构建和仿真、数字化设计与验证、健康监测与

检测、寿命管理四大技术群。中国空间技术研究院提出了数字孪生在可重复使用飞船的地面伴飞系统中的初步应用框架^[36],用于全生命跟踪并预示飞行器的行为状态,以实现更好的管理与决策。

通过数字孪生,可基于单个飞行器的使用记录,预测结构组件何时到达寿命期限,调整结构检查、修改、大修和替换的时间。NASA 预计到 2035 年^[37],数字孪生的应用将可使飞行器维修保障成本实现减半,而服役寿命总体延长 10 倍。美国空军下一代高教机 T-7A 项目中明确要求建立数字孪生^[38],波音在其方案中应用数字孪生,仅用 3 年时间完成从概念到首飞的过程,击败了两个基于提供现有机型改进型的竞争对手,数字孪生将伴随每架飞机的生命周期。美国有空军人士对此提出了担忧^[39],认为数字孪生的相关软件开发和维护成本可能在 1~2 万亿美元,并需要上百年的时间才能完成。不过,美国空军已经在 2020 年 6 月宣布启动“数字战役”^[40],全面建设包括数字孪生在内的数字工程生态系统,而且,利用数字孪生已经写入“下一代空中主宰”等项目的采办策略草案中。

目前,数字孪生得到了国内外各界的广泛重视,概念内涵愈发丰富,应用场景也极大扩展,但是,也存在着概念繁多的问题和片面强调资产互联和数据分析而忽视建模仿真的应用倾向,这对于依赖基于机理模型和工业知识实现精准的结构健康管理而言,显然是不合适的。本文将回归概念本源,分析面向结构健康管理的数字孪生以及基于数字孪生的飞行器结构健康管理,探讨其在数字工程领域的关键技术,以及未来基于数字孪生的飞行器生命周期管理范式。

1 数字孪生概念中的结构健康管理元素

美国国防部对于数字孪生的定义就来源于 NASA 和 AFRL 针对飞行器结构健康管理的 ADT 研究。构建 ADT,气动模型、有限元模型、损伤增长模型等是最佳的可用模型,飞行数据、材料性能状态等是实时的传感器信息,特定已建造装备的尺寸、检查与维修数据是历史的输入数据。ADT 基于不断演进的物理特性模型,能够进行不同尺度下的结构分析仿真,一方面可以再现和跟踪特定装备的飞行条件与结构响应,另一方面还可以预测未来使用环境中的损伤涌现,输出一个基于概率的计算结果。

美国空军一直在推动 CBM+ 计划^[41],以期实现精准保障,大幅提升装备的经济可承受性。笔者认为,数字孪生概念中带有丰富的结构健康管理元素,使其能够很好地满足 CBM+ 需求,这也是 ADT 研究的初衷。如图 2 所示,与 CAX 模型反映了装备的理想状态不同,每一个数字孪生都是针对特定的已建造装备(即

其所对应的物理孪生),反映了装备个体的结构、性能、健康状态以及特定使命任务的特性,诸如已飞行的距离、已经历的失效、维修和修理历史。数字孪生通过将来自真实世界的飞行和维修等数据融入模型和仿真系统,能够跟踪特定装备的历史,帮助理解单个装备在真实世界的性能。数字孪生基于维修历史和已观测到的结构行为等数据,联合其他信息源共同进行特定装备未来性能的预测性分析,得到精细的概率性假设,即在及时调整参数或得到维修的情况下的预期性能,从而帮助决策者实施建议的飞行控制参数调整,或者安排何时进行预防性的维修。



图 2 数字孪生中的结构健康管理元素

数字孪生对于结构健康管理有 3 个意义:① 加深理解。通过将影响应力集中的制造尺寸差异、影响裂纹扩展的飞行数据和消除失效隐患的维修信息融合到每架飞行器的模型中,更好地掌握单机的历史和当前状态。② 加强预测。在个性化的制造瑕疵、性能缺陷、运行历史之下,通过高逼真度的物理特性模型,分析单机独特的外形特征、结构特性、使用性能约束,从而预知通过传统几何模型无法预测的飞行器在不同飞行条件和环境中的表现。③ 深度优化。数字孪生以数字化形式记录了每一架飞行器的制造瑕疵、结构损伤、维护修理等历史,可以通过群体学习更好地掌握问题所在,从而更深层次地改进结构设计。而且,增强预测性维护功能本身就可以让数字孪生更好地优化机群的运行,减少昂贵的停飞时间。

2 面向结构健康管理的数字孪生

2.1 3 个维度的数字孪生成熟度模型

当前数字孪生存在着概念混乱的问题,很多应用实际上将传统的 CAX 模型简单等同于数字孪生。数字孪生伴随装备的生命周期,面向不同的应用可以利用不同逼真度的模型,而且应用的自动化和智能化程度也有区别,不适宜统称作数字孪生。智能系统技术公司按复杂度将数字孪生分为了 4 个成熟度等级^[42]:孪生之前、初始孪生、自适孪生和智能孪生;安世亚太按能力成熟度模型提出了 5 级成熟度^[43]:数字化、互动、先知、先觉和共智。两者的前 4 级概念基本相

同。结合这两种等级,面向结构健康管理,作者提出3个维度的数字孪生成熟度模型——生命周期维、仿真精度维和智能程度维,每个维度都分为5级成熟度,每一种数字孪生的特性和能力,都由这3个维度共同确定。

(1) 生命周期维。考虑装备全寿命周期数字孪生的演进。

一级:设计级,在装备设计过程中,理想的模型中没有融入真实世界中特定装备的任何数据,主要是来理解和降低结构失效风险,以辅助设计决策。

二级:制造级,在装备开始制造到总装下线之前,可融入实际的尺寸数据,随时消除设计或制造缺陷。

三级:试验级,装备下线但未交付之前,模型中融入了已建造和已试飞数据,主要是获知装备的交付性能,建立孪生基线。

四级:服役级,装备服役之后到退役之前,模型中不断融入并更新健康状态、维修历史等数据,主要是实现性能跟踪和预测性维修,每次大修后更新孪生基线,并用于分析可能未发觉的设计缺陷。

五级:退役级,装备退役处置之后,孪生不再更新,可整体交回设计部门形成知识库用于未来的优化设计。

(2) 仿真精度维。考虑多尺度和多物理特性建模的水平,不过面向结构健康管理的数字孪生从三级开始。

一级:关系式级,定量的关系抽象分析,如工厂资产的可视化应用。

二级:常微分级,单变量常微分方程分析,如数字孪生城市中的一些简单应用。

三级:偏微分级,面向单物理场的非线性偏微分方程的仿真,如单一的结构应力有限元分析应用。

四级:多物理级,面向多物理场的耦合仿真,如复杂的热气动弹性分析应用。

五级:分子学级,深入到分子动力学甚至原子动力学的微观尺度仿真,从机理层面复现多物理场过程。

(3) 智能程度维。考虑数字孪生应用的自动化智能化水平,从实际的功能来看,该维仅需覆盖生命周期维的二到四级。

一级:被动级,数据是分批次更新到模型并被动实施分析,比如飞行器落地后由人工采集,然后预测应用需要由人来操作。

二级:主动级,数据可以做到实时更新,而且预测应用拥有自适应的用户界面,具备简单的AI机器学习功能,可根据操作人员的设定和偏好进行有监督学习,比如通过实时的传感数据识别结构失效模式,支撑实时的维修规划和决策。

三级:自主级,数字孪生能够进行无监督学习,使

之能在使用环境中辨识遇到的对象和样式,甚至强化学习,即在不稳定、部分可观测环境中知悉环境和装备状态,具有高度的自主性,也许能够管中窥豹,从一些局部端倪中主动预知到全局的问题。

四级:融合级,数字孪生作为核心功能融合到飞行器任务系统中,实时分析并全自主地调整飞行参数,以规避结构失效隐患。

五级:集群级,每架飞行器的数字孪生随时可通过云完成群体优化,让机器智能在整个机队之间发挥作用。

2.2 面向结构健康管理的数字孪生关键技术

从完整系统(包含物理装备、数字孪生及其交互)的角度,面向结构健康管理的数字孪生,涉及材料工程、损伤力学、状态监测、数据融合、寿命预测和设计认证等几个领域的知识和技术。其中,材料工程和损伤力学是基础,掌握裂纹增长的机理知识,将提升集成材料计算工程、抗疲劳微结构设计以及微尺度装置设计的水平,使数字孪生更精准;状态监测、数据融合和寿命预测与PHM技术有很高的重合度,合理和经济地利用传感器数据,使数字孪生更高效;面向数字孪生更新的设计认证手段和流程,则使数字孪生更可靠。

对数字孪生建立和运行过程本身而言,有三类关键技术:一是高精建模仿真技术,数字孪生能不能精准记录、镜像和预测物理装备的过去、现在和未来,取决于原始数字模型的精度,也取决于投入的资源;二是泛在采集传输技术,应用目标不同,采集的密度、精度、速度也就不同,需要的技术就大不相同,这需要合理设计;三是高效融合分析,这需要高实时性的数据交互、高置信度的集成仿真、高稳定性的密集计算、高显示度的趋势展示。笔者在此主要讨论高精建模仿真技术中,必备的4项数字工程技术能力。

(1) 多尺度建模。裂纹增长由自由表面形成、塑性耗散及其交互作用控制,可以利用几何方法进行顺序损伤的多尺度建模,将微观和宏观应力与应变场相关联,实现从局部损伤到全局结构失效的预测。具体过程是:建立宏观结构的三维有限元模型,施加三维应力分析以定位疲劳“热点”,之后在这些点建立统计表征的数字化微结构体积元,完成高逼真度的多晶建模,然后施加三维应力分析晶体塑性模型,仿真损伤的演进过程,从颗粒、元、组件到群体预测疲劳损伤。波音建立了从分子到全尺寸飞行器的多尺度建模能力^[44],为结构设计和损伤预测提供了更高逼真度的手段。多尺度建模为断裂的离散仿真和连续统一仿真提供了桥梁^[8-9,15],可以分析裂纹增长时纳米尺度下内聚区体积元中少量原子的受力及位移过程。

(2) 多物理特性建模。进行损伤预测时,需要将

基于几何的多尺度有限元模型与基于机理的损伤模型集成,通过多物理特性和多学科科学对损伤进行整体考虑。考虑大裂纹阶段利用 FASTRAN/AFGROW 软件^[7-20];加上小裂纹阶段利用 FASTRAN 和裂纹汇合软件,建立小裂纹增长与连接的模型;再加上成核阶段可以利用多阶段疲劳/虚拟孪生软件,建立成核与小裂纹增长的模型,进行多物理的顺序损伤仿真;最后加上萌生阶段可以利用几何方法,建立萌生、成核与小裂纹增长的模型,进行裂纹增长的多尺度力学的显式仿真,这将增进对损伤的整体理解。

对于更为复杂的飞行条件,如针对马赫数 5~7 的可重复使用高超声速飞行器^[45-46],利用其机体数字孪生在使用环境中进行全航迹仿真,则其中的结构响应预测环节更加离不开多物理特性模型,如图 3 中红框所示。对于在高超飞行中耦合的空气热弹性力学,可以将其分为气动热和气动弹性领域,其中气动压力的边界层边缘特征影响气动热,结构热传导的温度分布影响结构动力学。这种划分考虑到了所需时间步长的不同,以及不同求解器的不同时间推进机制,比如气动弹性模型需要更少的时间步长,而气动热模型需要更多的时间步长来更新结构的温度分布。实际的耦合分析可能更复杂,除了结构、热和流体流动,还要包括声学等学科,这对高性能计算也提出了挑战。美国国防部通过计算研究与工程采办工具和计划开发了面向固定翼飞行器的虚拟仿真工具^[47-48],能够支持高超声速飞行条件下的多物理特性建模,包括仿真复杂机动、推进装置影响、移动控制面、气弹影响、多体相对运动以及引入真实内循环和外循环控制率的能力,这极大地提升了飞行器机体数字孪生的计算能力。

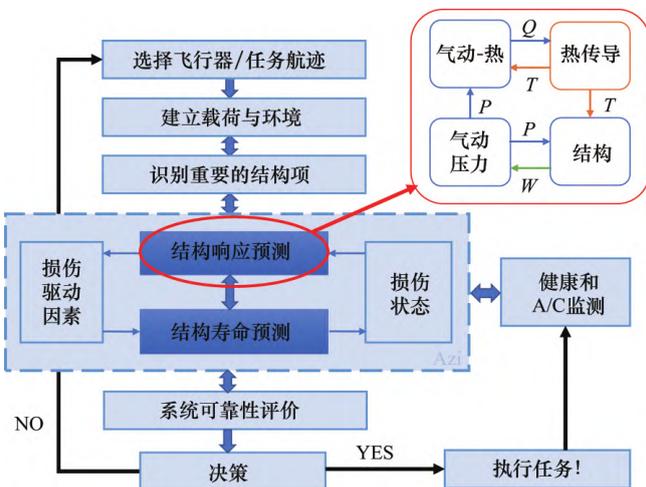


图3 高超飞行条件下的结构损伤预测

(3) 模型与实验的集成。越靠近微尺度,越要求基于机理的损伤模型能够达到高逼真度,这就要求实验损伤力学必须给计算损伤力学提供足够高解析度的

结果。因此,需要开发表征损伤演进的先进实验手段,比如利用环境扫描电镜进行间断疲劳试验,通过加载循环经历萌生、成核直到微观小裂纹传播,测量每次中断的裂纹长度与取向,并利用电子背散射衍射测量裂纹路径上的晶粒取向,然后再在不同长度尺度/损伤机理下校准疲劳模型。还需要与无损检测和材料开发人员协作,优化获取数据的方法以及分析数据的方式,并且面向基于物理特性的计算方法,更好地对诸如裂尖损伤区等损伤机理进行实验表征。

(4) 概率性/不确定性分析。不确定性量化将概率性分析与物理特性建模相结合,预测并量化复杂系统仿真中的不确定性,已经成为美国国防部最重要的应用数学研究方向之一。美国空军考察了主成分分析、贝叶斯网络、极值理论、概率分布更新、自回归滑动平均、克里金插值、全局灵敏度分析、自适应重要性采样、高斯过程模拟、置信边界估算、粒子滤波、拔靴法、马尔科夫链蒙特卡罗方法、代理建模等一系列手段^[19-49]。比如,在空军高超声速结构响应与寿命预测能力研究中^[50],针对裕量与不确定性量化问题,开发了基于对仿真与试验数据进行主成分分析分解的确认度量标准。通过使用覆盖多个输入条件下的三维响应以及所需时间/频率信息的全场仿真和试验数据,可以将不确定性加以量化。再比如,针对建立机翼健康监测的数字孪生^[23],使用动态贝叶斯网络集成了物理特性模型,以及裂纹增长预测中的许多随机和缺乏知识的不确定性源,从而构建了一个多功能概率模型用于诊断与预测。图4展示了 DARPA“实现物理系统中不确定性的量化”项目的研究框架^[51],该项目开展了可缩放的方法、物理特性模型的生成以及基于不确定性的设计和决策三项研究,重点关注概率性的预测手段,其成果也将支撑机体数字孪生的构建和运行。

2.3 应用面临的技术挑战

美国空军和 NASA 希望面向结构健康管理的数字孪生能够用于作战飞机、超声速战略轰炸机、长航时侦察无人机、自主航天飞行器这些传统与未来的能力。数字孪生 in 应用时,需要建立初始条件,选择并集成各学科子模型,施加正确的飞行载荷,同时管理并减少数字孪生中的各种不确定性。由于这一过程涉及了气动力学、结构、材料和制造、计算科学、信息管理等学科,因此仅仅是面对前述的几项关键技术,也会存在一系列技术挑战。这包括:面向全尺寸飞行器开发具备适当逼真度(降阶)的参数化多学科计算模型,在适当的长度和时间尺度上开发结构性能相关的各种控制现象的高逼真度计算模型,在不同逼真度水平跨长度/时间尺度连接这些计算模型,理解所有不确定性和波动的影响源并且在每个长度/时间尺度上将之融入模型,面

向飞行器性能和可靠性评估与优化开发分析技术,将材料和制造上的各种现象集成到飞行器层级的数字孪生

生框架中,开发可跟踪和更新真实飞行器及其数字孪生的状态与行为的技术与手段。

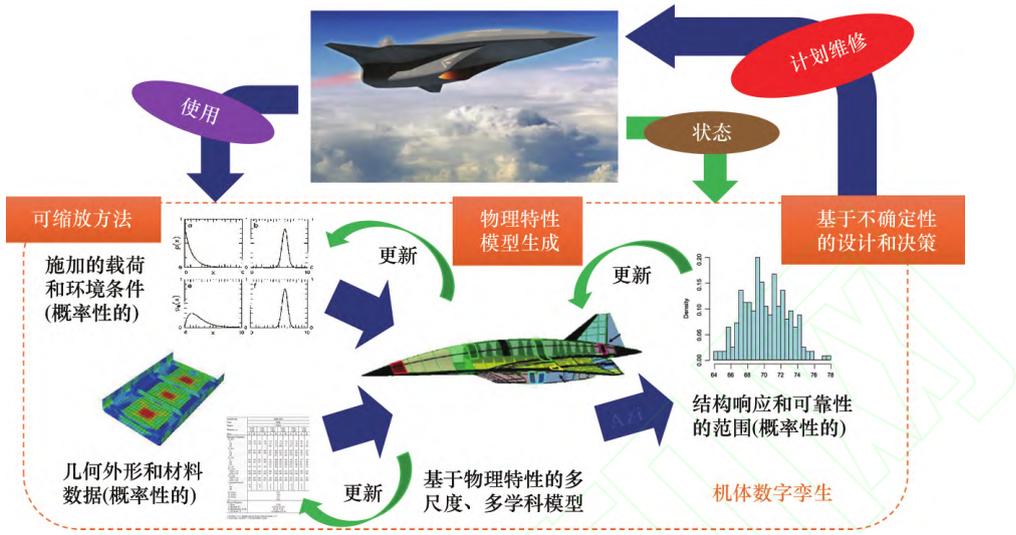


图4 通过数字孪生实现不确定性量化

3 基于数字孪生的结构健康管理应用

3.1 数字孪生支撑的结构完整性预测流程设计

基于数字孪生的结构健康管理应用的核心是数字孪生支撑的结构完整性预测流程,如图5所示,诺·格实施的P2IAT项目中^[21],单个飞行器跟踪的概念也以该流程为核心。进行结构完整性预测时,要将多种模型集成到单个飞行器的数字孪生中,并且综合历史数

据库、构型控制、虚拟损伤传感器等功能,通过高逼真度的材料建模(内含原材料数据、材料工艺数据等)交互材料的历史数据,通过高逼真度的结构分析(内含结构模型和载荷历史)交互材料状态演进信息。基础仍然是更加集成的结构模型和材料状态演进模型,前者包括压力有限元、结构动力学、气动弹性、声学、热传导等,后者包括刚度、强度、疲劳、腐蚀、氧化等。

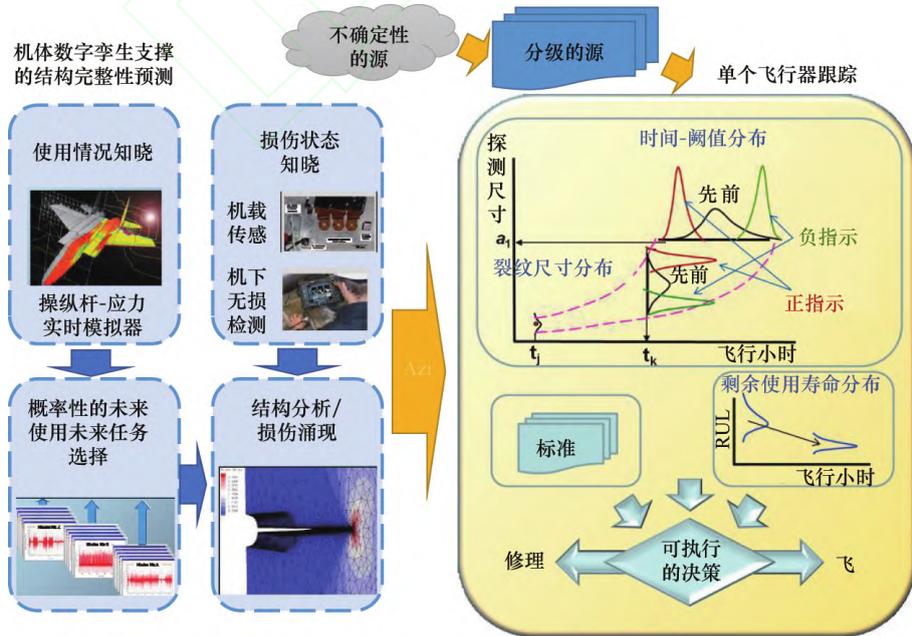


图5 单个飞行器跟踪的概念

数字孪生支撑的结构完整性预测的具体功能流程总结如下:

境条件作为输入。收集来自无损检测、SHM 以及结构拆卸评估的损伤状态感知数据,和来自 SHM、载荷与环境表征以及结构表征、建模与试验的使用情况信息,

- ① 将几何外形和材料数据以及施加的载荷和环

这可包括模型信息、任务历史、预测历史、健康历史、失效历史、维修历史和备件资产等内容。

② 构建基于物理特性的多尺度、多学科数字孪生模型作为预测模型进行结构分析。

③ 输出结构响应和可靠性的范围以实现基于不确定性/概率性的决策。获知结构健康状态、剩余使用寿命、已识别问题、受影响组件、结果置信度、后续措施建议、措施行动时间、更改率、任务就绪度等一系列结果,以计划寿命增强、修理和替换等维修工作。

④ 通过预测和风险分析,如果可靠性足够,则在收集到新的损伤状态和使用情况信息时更新历史;否则进行结构修改并更新构型,未来基于下一个数字孪生版本进行分析。

3.2 基于数字孪生的结构健康管理应用研究

(1) GE/洛·马 P2IAT 项目。

GE 牵头开发了可扩展、精确、灵活、高效、牢靠 (SAFER) 的 P2IAT 框架,将各种不确定性源纳入预测,并将使用和检测数据融合在一起以利用贝叶斯网络更新和减少预测的不确定性。该框架使用统计学方法整合了若干种工程分析方法以及模型,包括利用飞行记录和飞行模拟器建立概率性的使用和载荷配置的方法,基于有限元和疲劳裂纹扩展模型的概率性结构可靠性分析,在可探测概率支持下利用检测数据更新概率模型的方法,通过计算失效概率并估算未来检测对其影响的检测决策分析等。框架的输出结果包括估算的裂纹长度分布、预测的检测计划、随着时间变化的

可靠性以及输出对输入参数分布的敏感性。

项目利用 F-15 机翼的工程数据以及实物进行了全尺寸地面测试实验,选择了框架跟踪的 10 个控制点,创建了载荷谱并转化为模拟的飞行数据,设计了加载设备和测试夹具;数据采集的重点在于测试的安全性,以及在不停止测试的情况下快速确定机翼的状态;制定了在实验过程中控制点疲劳裂纹扩展的检测计划,包括数据、校准程序、传感器的位置和方向等信息;最后为每个控制点建立了概率性的应力模型,以及概率性的应力强度因子模型,输入到框架中执行初始的基线裂纹扩展预测。机翼全尺寸实验演示了该框架可以提高结构诊断和预测的准确性,针对满足用户指定的单次飞行失效概率 (SFPOF) 阈值要求,相比定期检测的计划,可做出更好的维护决策。

(2) 诺·格 P2IAT 项目。

诺·格开发了与 GE 类似的 P2IAT 框架和预测流程:开发了利用 AFRL 的“操纵杆-应力实时模拟器”软件,基于统计数据自动生成飞行谱系、分布式载荷以及相应应力序列的方法,图 6 为生成所选控制点应力历史主要流程;开发了贝叶斯更新程序,融合了由可生成裂纹长度和深度联合分布的模型产生的当前状态健康评估结果,以及来自无损检测和 SHM 的传感器数据,同时考虑了模型和传感器数据的不确定性;开发了基于风险和成本的定量综合评估(而不是对数据不确定性进行确定性处理)的决策流程。

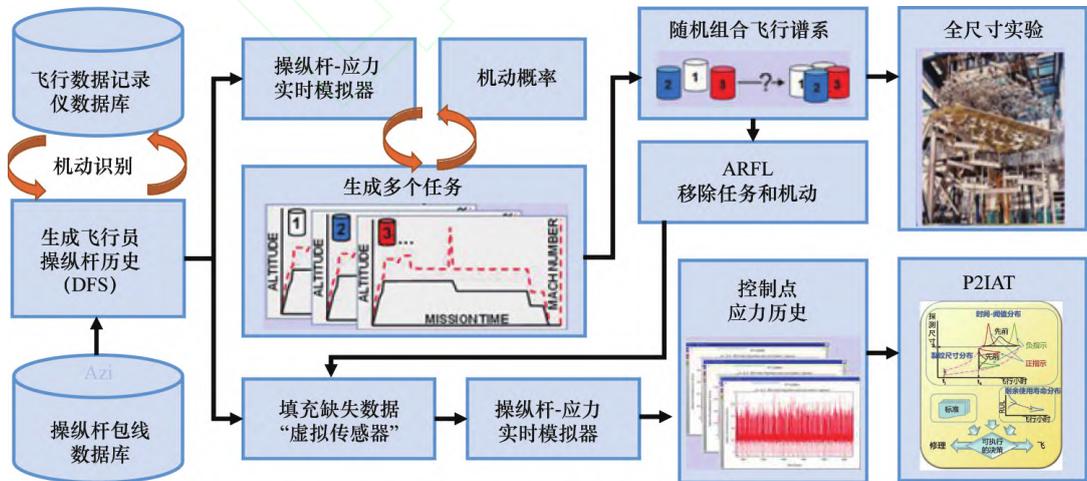


图 6 飞行器概率性的使用和载荷配置流程

端到端的 P2IAT 流程包括从统计数据到应力序列,然后通过裂纹增长代码处理应力历史记录,以生成更新周期开始和结束以及下一次预期检测时的裂纹尺寸分布,之后预测了下一个 1000 次飞行的 SFPOF。结果表明,发现裂纹所需的检测数量极大减少,同时可将 SFPOF 保持在用户指定的阈值以下,并且减少了用于

非安全关键控制点的裂纹修复的检测数量。该流程使用“模型中心”商业软件集成,可以将带有不确定性的输入和输出,从一个步骤传播到下一步骤。

全尺寸地面测试实验与 GE 实施的类似,选取了 10 个控制点,自动计算了执行机构的载荷、执行机构区域垫片的布置及其载荷。数据采集时,为机翼内部

控制点选择了 Jentek 绕线磁强计传感器系统以避免需要拆卸测试件执行无损检测,还选择了 Luna 光纤传感器系统来对结构的关键区域进行应变监测。此外,由于与 GE 共同使用一对机翼,两者还商讨了一个解决方案,避免安装、仪器操作和数据采集受到影响。

(3) 美国国家航空航天研究院/NASA 项目。

预防疲劳和低速异物撞击导致的未检测到的损伤/裂纹的增长,在飞行过程中可能达到临界尺寸,从而导致飞行器失控。该项目针对具有复杂损伤构型的结构,开发准确实时预测损伤大小和安全承载能力的功能,以避免飞行过程中损伤的不稳定和灾难性传播,保持载荷水平低于已降低的承载能力,使飞行器可在上述条件下继续安全运行。其团队开发了一种使用导波响应来询问损伤的程序,当导波与损伤相互作用时,信号在某些方向上衰减,而在其他方向上反射,也就是说,信号幅值以及信号响应之间的相位移动对于受损和未受损的结构是不同的。

其团队研究了基于遗传算法的优化程序,通过评估各种预先选择的传感器位置处的累积信号响应,可以准确估算损伤的大小、位置和方向,在损伤构型范围的 10% 以内。再针对不同典型裂纹、几何形状和尺寸的波传播的有限元分析获得的响应,尽量缩小其与参考响应之间的差别,可以获得损伤的大小、位置和方向。研究表明,基于波传播的 SHM 方法可通过数字孪生来诊断受损的飞行器。

3.3 基于数字孪生的生命周期管理范式

通过数字孪生,可基于单个飞行器的使用记录,预测结构组件何时到达寿命期限,调整结构检查、修改、大修和替换的时间。未来,基于数字孪生的飞行器生命周期管理将是基于预测的、综合化、个性化和预防性的^[52]: 维修将是基于对结构损伤和损伤先兆的早期识别,每架飞行器的历史数据都对操作人员、维修人员和工程人员开放,可以针对每架飞行器定制预先维修和修理/翻新方案,大部分工作将是生命周期中的结构损伤预测、预防和管理。

结合增强现实(AR)技术,数字孪生还将进一步提升现场实时维护能力^[53],通过实时的数据、检查清单和反馈,维修人员可使用 AR 眼镜在现场访问飞行器维修历史,可以与计划维修活动一同执行的额外行动清单,并且访问技术支持团队以解决可能出现的问题。维护人员的活动被记录并更新到下一个数字孪生版本中,未来的维护人员可以在任何地点及时看到一架飞行器相关的已完成活动流,以优化持续保障活动。

未来,还可能出现一种自知晓飞行器^[29],可获知自身能力、实时调整行为,以完成指派的任务或者修改任务以反映当前能力。数字孪生是系统健康自知晓功

能的重要基础,将动态飞行包线保护技术与由数字孪生生成的结构约束集成,将实时非线性气动力学模型与自适应控制集成,使用前视传感器实施主动式阵风载荷减缓,以实现数据驱动的飞行器能力评价,以及结构系统的自主维修和实时安全维护。比如,发现离散损伤并反馈给自适应任务管理/控制系统,然后设定飞行约束以防止结构超载,这种自主式建构反过来甚至还会影响其设计、制造和认证方式。

4 结束语

(1) 随着更加昂贵的作战飞机、多功能无人机以及可重复使用高超声速飞行器不断研发并使用,对其进行实时、高效结构健康管理的需求越来越强烈,数字孪生将无疑在这一领域发挥巨大作用,并将形成基于数字孪生的生命周期管理范式。

(2) 建立和应用数字孪生需要利用包括飞行数据记录仪、无损检测数据在内的所有信息,使用包括流体力学、结构力学、材料科学与工程模型等在内的物理特性模型,建立概率性的分析手段,并且通过概率性分析的自动更新实现闭环。这就需要突破高精建模仿真、泛在采集传输、高效融合分析这三类关键技术,特别是多尺度建模、多物理特性建模、模型与实验的集成这几项高精建模仿真技术。

(3) 建立和应用数字孪生还将给飞行器结构和系统设计以及使用管理流程带来变革,比如需要开发面向可靠和经济可承受健康监测的设计方法、使用和状态数据的合成及安全保护工具、基于模型降阶的高速概率性仿真及确认手段、基于机器学习的机载智能数字孪生仿真系统、面向高效分析决策的功能定制和信息剪裁规则等。

(4) 未来,随着实验的深入、机理的突破、数据的积累和算力的提升,集成了数字孪生功能的自知晓飞行器将会成为一个趋势,这些数字孪生将在生命周期、仿真精度、智能程度这 3 个维度上同时达到成熟度 4 级,可减少这些高价值装备的结构风险,更好地实现其使命任务目标,降低全生命周期成本。

参考文献:

- [1] GRIFFIN M D. Digital engineering strategy [R]. U. S. Department of Defense, 2018.
- [2] 刘亚威. 管窥美军数字工程战略[J]. 科技中国, 2018(3): 30-33.
- [3] 刘亚威. 美军航空装备采办的数字工程转型[J]. 国际航空, 2019(5): 46-49.
- [4] SHAFTO M, CONROY M, DOYLE R, et al. Modeling, simulation, information technology and processing roadmap [R]. NASA, 2010.
- [5] TUEGEL E J, INGRAFFEA A R, EASON T G, et al. Reengi-

- neering aircraft structural life prediction using a digital twin [J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2011: 1 – 14. doi: 10.155/2011/154798.
- [6] GLAESSGEN E H ,STARGEL D S. The digital twin paradigm for future NASA and U. S. air force vehicles: AIAA 20121 – 1818 [R]//AIAA 2012.
- [7] ANAGNOSTOU E ,ENGEL S ,MADSEN J. Lessons learned from DARPA SIPS program [R]. Northrop Grumman 2012.
- [8] HOCHHALTER J D. DDSIM level 3: damage science [R]. NASA Langley 2012.
- [9] EMERY J M ,INGRAFFEA T. DDSim: a multiscale damage and durability simulation strategy [R]. Sandia National Laboratories 2012.
- [10] CHRISTODOULOU L. Prognosis: a new fleet management strategy [R]. Boeing 2013.
- [11] HAGAN G. Glossary of Defense Acquisition Acronyms and Terms [M]. 13th Ed. Fort Belvoir: Devense Acquisition University Press 2009.
- [12] GRIEVES M ,VICKERS J. Digital twin: mitigating unpredictable ,undesirable emergent behavior in complex systems [M]//KAHLEN F J ,FLUMERFELT S ,ALVES A. Transdisciplinary Perspectives on complex systems. 2017: 85 – 113.
- [13] GRIEVES M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication [Z]. Dassault Systemes , 2014.
- [14] 赵敏 宁振波. 铸魂: 软件定义制造 [M]. 北京: 机械工业出版社 2020.
- [15] STARGEL D. Multi-scale structural mechanics and prognosis [R]. Air Force Office of Scientific Research. 2013.
- [16] TUEGEL E. ADT 101: introduction to the airframe digital twin concept: 88ABW – 2013 – 2396 [R]. AFRL 2013.
- [17] KOBRYN P. Digital Twin: 88 A BW – 2019 – 4446 [R]. AFRL 2019.
- [18] MAYBURY M T. Global horizons final report: AF/ST TR13 – 01 [R]. U. S. Air Force 2013.
- [19] BODEN B L. Air force research laboratory digital thread/digital twin [R]. AFRL 2016. (查不到)
- [20] OCAMPO J D ,CROSBY N E ,MILLWATER H R. Probabilistic damage tolerance for aviation fleets using a kriging surrogate model [C]//19th AIAA Non-Deterministic Approaches Conference. 2017.
- [21] ANAGNOSTOU E ,ENGEL S. Airframe digital twin(ADT) delivery order 0001: prognostic and probabilistic individual aircraft tracking [R]. AFRL 2016.
- [22] ANAGNOSTOU E ,ENGEL S. Airframe digital twin(ADT) delivery order 0002: demonstration of prognostic and probabilistic individual aircraft tracking [R]. AFRL 2017.
- [23] LI C Z ,MAHADEVAN S ,LING Y et al. Dynamic bayesian network for aircraft wing health monitoring digital twin [C]//19th AIAA Non-Deterministic Approaches Conference. 2017.
- [24] WANG L P ,ASHER I ,RYAN K et al. Airframe digital twin (ADT) delivery order 0001: scalable ,accurate ,flexible ,efficient ,robust ,prognostic and probabilistic individual aircraft tracking: AFRL-RQ-WP TR – 2016 – 0140V1 [R]. AFRL 2016.
- [25] WANG L P ,ASHER I ,RYAN K et al. Airframe digital twin spiral 1 task order 0002: scalable accurate flexible efficient robust—prognostic and probabilistic individual aircraft tracking full scale wing experiment plans ,requirements and development [R]. AFRL 2017.
- [26] KULKARNI S ,DEY A ,TRYON R. Computational modeling of complex systems using “digital twin” and “digital thread” frameworks [R]. VEXTEC 2015.
- [27] KULKARNI S ,DEY A ,TRYON R. CM&S and VVUQ of complex systems using digital twin and digital thread frameworks [R]. VEXTEC 2016.
- [28] SESHADRI B R ,KRISHNAMURTHY T. Structural health management of damaged aircraft structures using the digital twin concept: AIAA 2017 – 1675 [R]. AIAA 2017.
- [29] GREGORY I M ,LEONARD C ,SCOTTI S J. Self-aware vehicles: mission and performance adaptation to system health degradation: AIAA 2016 – 3165 [R]. AIAA 2016.
- [30] SCHMIDT M T. Digital exploration delivering a digital twin [R]. ANSYS 2017
- [31] SEAL D. The system engineering “v” – is it still relevant in the digital age? [R]. Boeing 2018. (查不到)
- [32] GLATFELTER J. Using low-fidelity digital twins for high speed analysis [R]. Boeing 2018.
- [33] 刘亚威. 美国洛马公司利用数字孪生提速 F-35 战斗机生产 [EB/OL]. (2017-12-27) [2020-8-16] https://www.sohu.com/a/212980157_613206.
- [34] HENNESSEY T. Lockheed martin’ s digital thread vision [EB/OL]. (2017-6) [2020-4-30]. <https://www.ibaset.com/blog/lockheed-martins-digital-thread-vision>.
- [35] 王彬文. 数字孪生的强度思考与实践 [R]. 中国飞机强度研究所 2018.
- [36] 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) : 1 – 12.
- [37] MORRISON J H ,AMBUR M Y ,BAUER S X. Comprehensive digital transformation nasa langley research center [R]. NASA 2016.
- [38] WARWICK G. USAF selects lead programs for ‘digital twin’ initiative [EB/OL]. (2015-1-26) [2017-4-24]. <http://aviationweek.com/technology/usaf-selects-lead-programs-digital-twin-initiative>.
- [39] WESTA T D ,BLACKBURN M. Is digital thread/digital twin affordable? A systemic assessment of the cost of dod’ s latest manhattan project [J]. *Procedia Computer Science* , 2017 ,114: 47 – 56.
- [40] AFMC digital campaign aims to modernize streamline life

- cycle process [EB/OL]. (2020-6-5) [2020-7-2]. <https://www.afmc.af.mil/News/Article-Display/Article/2209560/afmc-digital-campaign-aims-to-modernize-streamline-life-cycle-process>.
- [41] KOBRYN P A ,TUEGEL E J. Condition-based maintenance plus structural integrity (CBM + SI) & the airframe digital twin [R]. AFRL 2011.
- [42] MADNI A M ,MADNI C C ,LUCERO S D. Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering [J]. Systems 2019 7(1):7.
- [43] 田峰,段海波,杨振亚,等. 数字孪生体技术白皮书 [R]. 2019.
- [44] CHONG D. Design and manufacturing challenges for future aerospace vehicle structures [R]. Boeing 2014.
- [45] ALLEMANG R ,SPOTTSWOOD M ,EASON T. A principal component analysis (PCA) decomposition based validation metric for use with full field measurement situations [C]// Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. 2014 3:249 – 263.
- [46] ZUCHOWSKI B. Air vehicles integration and technology research(aviatr) task order 0015: predictive capability for hypersonic structural response and life prediction phase ii-identification of knowledge gaps [R]. U. S. Department of Defence 2010.
- [47] POST D E ,ATWOOD C A ,NEWMEYER K P ,et al. CRE-ATE program software applications for the design and analysis of air vehicles ,naval vessels ,radio frequency antennas , and ground vehicles [R]. U. S. Department of Defence , 2015.
- [48] KRAFT E M. The air force digital thread/digital twin-life cycle integration and use of computational and experimental knowledge: AIAA 2016 – 0897 [R]. AIAA 2016.
- [49] KROPAS HUGHES C V. USAF digital thread initiative overview [R]. AFLCMC 2014.
- [50] ZUCHOWSKI B. Predictive capability for hypersonic structural response and life prediction: phase ii-detailed design of hypersonic cruise vehicle hot-structure: TR RQ-WP-TR-2012-0280 [R]. AFRL 2012.
- [51] BLINDE L. DARPA shares EQUIPS program progress [EB/OL]. (2017-5-22) [2018-4-17]. <https://intelligencecommunitynews.com/darpa-shares-equips-program-progress>.
- [52] 刘亚威. 数字线索助力美空军装备研制 [J]. 测控技术, 2018 37(9):1 – 4
- [53] 刘亚威. 智能技术助力美军航空装备保障 [J]. 航空工程进展 2018 9(S1):128 – 131.

□