

基于数字孪生技术的民航发动机适航维修预测性维护模型研究

胡军 周磊鑫

长龙（杭州）维修工程有限公司，浙江杭州，311200；

摘要：民航发动机的运行安全与持续适航乃是航空安全的基石，为了克服传统定期检修模式的不足之处，本篇文章想要探寻出一种以数字孪生技术为基础的民航发动机适航维修预知修理体系，其重点所在乃是塑造一个集成了诸多物理场与资料引领模型的发动机数字孪生体，从而精准反映且即时仿真实际发动机关于全生命周期范围内的各个情况，在探究期间将会考察如何整合运用各类由发动机运作过程中所产生的 QAR，ACARS 等等多种来源并且结构存在差别的数据去调整和推动这个孪生成模型发展。根据孪生体的仿真结果，建立以剩余使用寿命（RUL）预测为核心的健康评估与故障预测算法。最终目的是形成一套可以动态响应发动机真实健康状况、符合适航要求的预测性维护决策机制。从而实现提高维修决策的科学性、前瞻性，推动维修模式由“计划维修”向“状态维修”转变，在保证持续适航的前提下，提升航空公司的运营效率和经济效益。

关键词：数字孪生；民航发动机；适航维修；预测性维护；剩余使用寿命

DOI：10.64216/3080-1508.25.08.016

引言

民用航空运输业对飞行安全的要求非常高，航空发动机的可靠性是关键，发动机结构复杂且工作环境恶劣，其维护、修理和大修（MRO）成本占航空公司维修总费用的 40%，目前，基于固定时间间隔的定期维修方式存在弊端，要么过度维修导致经济浪费，要么不能及时发现早期故障留下隐患，要解决这一问题，探索更智能、更准确的维修模式已成为行业共识，预测性维护是一种基于状态监测和数据分析的新模式，它试图通过预测故障来实现“按需维修”，从而最大限度地减少非计划性停机。但准确预测发动机的健康状况非常困难，数字孪生技术的出现为这一难题提供了解决方案。数字孪生技术构建了与物理实体同步演化的高保真虚拟模型，为发动机全生命周期的状态监测、性能预测及故障诊断开辟了新途径。本文意在结合民航业最核心的“适航性”要求，提出一种基于数字孪生技术的民航发动机适航维修预测性维护模型，希望对提升我国民航发动机维修智能化水平和安全裕度有所裨益。

1 数字孪生与发动机预测性维护的理论基础研究

1.1 数字孪生技术内涵及体系结构

数字孪生不是一种独立的技术，而是由物联网、大数据、人工智能、云计算以及多物理场仿真等前沿技术组成的融合体，其实质是指在一个物理实体对象上，在

数字空间建立一个动态的、实时的、高保真度的“双胞胎”（数字孪生体），这个孪生体不仅拥有着与物理对象相同的几何形状、材料属性等静态信息，而且还能实时接受来自物理对象上的传感器发送的运行数据，并且能够对它在实际工作中的行为、表现以及状态演化进行模仿，一个典型数字孪生系统主要包括物理实体、虚拟模型、数据交互、服务应用这四个部分组成，物理实体充当的是产生数据之源的角色，通过部署在设备表面不同位置的各种传感器可以获取到设备运行时所需要的诸如温度、压力、振动、转速这类重要的参数信息；虚拟模型是数字孪生的核心，它依靠高精度的几何模型、物理模型、行为模型和规则模型来模仿物理实体的内部机理和外部表现，数据交互是联系物理世界和虚拟世界的纽带，保证二者之间数据的高速、双向、可靠传递，做到状态的同步反映和模型的动态修正，服务应用是数字孪生价值的最终体现，凭借虚拟模型的仿真分析、趋势预测和优化决策，给用户赋予视情维修、性能改良、寿命预估等智能化服务，在民航发动机领域，塑造它的数字孪生体，就等于可以前所未有地深入探究发动机的内部运作情况，为从被动响应式维修转变为积极预测式保养构筑稳固根基。

1.2 预测性维护与适航性要求

预测性维护（PdM），这是种先进维修方法，就是对设备的运行状况做持续观察，经过数据处理，预知将来会发生的故障，所以要在毛病真正出现以前就把毛病

修掉,关键在于“预测”,也就是准确地掌握机器或者零件健康情况的发展趋势,算出来它还能活多久,这就是它的 RUL。这种办法比传统的预先维持要高明很多,预先维持的目的不过是要做到“按需求维持”,也就是不维持过了头,也不维持不够,这样能让设备的利用效率大大改善,维持费用降到最低,并且维持的时候也安全了很多,在民航业里,所有的维持事务都一定要依照严格的合适的规则做才行,合适的规则指的其实就是航空器啊,发动机啊,螺旋桨之类的航空器的部件处于安全的可以使用状态并且符合其型号的设计要求以及相关的规则要求。中国民用航空规章(CCAR)对发动机的持续适航责任、维修方案、记录保存等都有明确的要求。将预测性维护应用于民航发动机,不仅是一个技术问题,也是一个需要满足法规要求的管理问题。任何新的维修模型和方法,都需要能够证明其在保证安全方面是等效的或者更好的,其预测结果的准确性、稳定性和可靠性需要经过严格的验证和确认(V&V),最终得到适航当局的认可。本文研究的模型,就是希望建立一个数据驱动、模型支撑、满足适航要求的预测性维护决策系统。

2 数字孪生驱动的发动机适航维修预测模型构建

2.1 多源数据采集与融合处理

想要创建高保真的发动机数字孪生模型,首先要全面而且精确地得到物理发动机全生命周期的数据,这些数据来自很多地方,结构也不相同,这就是所谓的多源异构大数据,主要的数据源有两大类,第一类是设计和制造数据,比如三维几何模型,材料属性,有限元分析模型,制造公差,装配记录等等,这些都是孪生体的静态基座,第二类是实时运行数据,这类数据大多靠机载传感器网络来搜集,发动机电子控制单元(EEC)记录的各种参数,飞机通信寻址与报告系统(ACARS),快速存取记录器(QAR)所得到的飞行参数,包含发动机的转速(N1, N2),排气温度(EGT),燃油流量(FF),振动值等等,这些高频数据是推动孪生模型随时改变的关键。第三,维修历史数据,部件更换记录、故障报告、检查发现、修理方案等非结构化文本数据,这些数据记载着发动机的“病史”,对于故障模式识别和寿命预测非常重要。要有效利用这些数据,必须构建起一套完善的数据融合处理流程,这一流程先经过数据清洗、去噪、标准化,以解决数据质量不一的问题,之后,依靠时间序列对齐技术,把不同采样频率的传感器数据同步起来,再用特征工程办法,从原始数据中提炼出可以较好地体

现发动机健康状况的关键特征,而且还要用数据融合算法,把多维度的特征信息整合成一个全面的状态向量,从而给后面的模型输入和分析给予优质的资料根基。

2.2 物理-数据混合驱动的数字孪生模型

单一的物理模型或者纯数据驱动模型在发动机健康预测中都有各自的局限性。物理模型(热力学模型、流体动力学模型、结构动力学模型等)有着明确的工程理论基础,具有很好的解释性以及外推性,但是其对复杂的非线性退化过程以及未知故障模式的模拟精确度有限。而纯数据驱动模型(深度学习网络)则可以很好地从大量的数据中学习复杂的模式,但是往往缺乏物理解释性,在训练数据稀疏的工况下容易发生谬误。因此本模型采用了物理-数据混合驱动的建模范式,将两者的优势结合起来。首先建立发动机的基线物理模型,此模型可根据输入的飞行参数(高度、马赫数、外界温度)及控制指令,仿真计算出发动机处于健康状态时的性能参数基准值。采用深度神经网络(比如长短期记忆网络LSTM或者卷积神经网络CNN),来创建数据驱动的偏差模型,这个偏差模型把传感器实际测量值和物理模型基准值的残差当作输入,学习发动机因为性能退化或者早期故障产生的动态行为偏移,物理模型给予理论边界和可解释性,数据驱动模型则捕捉到复杂的,很难用物理方程精确描述的随机退化信息,当新的实时数据流进来的时候,混合模型可以马上算出发发动机的健康指数,性能衰减程度这些关键指标,并且借助数据同化技术(像卡尔曼滤波),不断在线修正和更新孪生模型,保证它和物理发动机的状态非常同步。

2.3 剩余使用寿命预测与维护决策研究

剩余使用寿命(RUL)预测是预测性维护的核心,直接影响到何时实施维修,在此模型中,RUL预测是通过数字孪生体对未来发动机状态的推演来实现的。先用历史数据和混合驱动的孪生模型找出涡轮叶片、压气机盘这类重要部件也许会出什么问题,健康状况怎么变化,然后把孪生模型算出来的当前健康状况当作起点,再按照预期的飞行任务路线,在孪生空间里做几万次蒙特卡洛仿真,每次模拟一种可能的性能退化路子,一直等到关键参数碰上依照适航要求、历史经验和安全余量设定的失效门槛。统计所有仿真路径的寿命终点,模型能够得出发动机RUL的概率分布,而不是单一值,这给决策者供应了丰厚的风险资讯,搭建一个依靠风险和成本的动态维护决策模型,这个模型会考虑到RUL概率分布,各种维修活动的成本,备件库存以及非计划停机的损失,

再经过优化算法给出一个最佳的维修窗口建议,这个建议不是固定的时刻安排,而是依照发动机的实际健康状况和预估危险来动态调整,而且契合适航标准的智能选择,以此做到维修资源的最佳化配置。

3 模型验证与应用展望

3.1 模型的验证方法

所提出的预测性维护模型是否有效、可靠,这是它能否被适航当局所接纳并应用于实际维修的关键所在,模型的验证是一项系统工程,需从多方面展开,首先就是数据层的验证,要保证用以模型训练及测试的数据集完整无缺,精准无误且具有代表性,覆盖发动机各种运行工况以及典型故障模式,其次为算法层的验证,必须借助标准数据集(如NASA的C-MAPSS数据集)对核心的RUL预测算法实施基准测试,考察其预测精确度,鲁棒性及计算效率,并同其他主流算法开展横向对比,再次是模型层的验证,把数字孪生模型的仿真输出同物理发动机的实际运行数据不断进行比较,定量评价孪生体在状态跟踪及性能预测方面的保真程度。最后也最重要的是应用层的验证,在获得了必要的授权之后,就可以开始进行“影子模式”的运行,也就是把该模型放到真实的航空公司运营环境中去使用,但不直接指导具体的维修决策,而是把模型预测出来的结果和实际发生过的故障以及维修活动进行回溯分析和比对,靠长时间累积起来的证据不断迭代优化模型,并写出详细的验证报告,来证明这个预测性维护方案在确保安全的同时还能带来可观的收益增长,从而为最终通过适航审定奠定坚实的证据基础。

3.2 应用前景与挑战

基于数字孪生技术的民航发动机预测性维护模型有着广阔的运用前景,对于航空公司来说,它可以明显削减非计划停机次数,改良机队的可用率和运营的灵活度,而且还能凭借准确的视情维修来延长部件的使用寿命,缩减备件费用以及维修总花费,针对发动机制造商来讲,通过剖析孪生模型所汇集起来的机队数据,能够较为透彻地知晓发动机的性能衰退规律和故障成因,进而指引新产品设计方面的改良工作,对于监管机构而言,数字孪生给予了全面且透明的发动机状态观测手段,有益于更新监管形式,改善行业的总体安全水平。但推广该模型依然存在不少困难,从技术上讲,高保真孪生模型搭建繁杂且耗费大量计算资源,多学科建模与高性能

计算能力要求很高,数据安全传输及管理也是一大难题,从管理方面来说,预测性维护模式促使航空公司必须在组织架构、维修流程和人员技能方面做出改变,法规层面,现有适航规章体系要对数据驱动的预测性维护模式加以补充完善,形成一套明确的审定标准和程序,要冲破这些难关,才有可能让民航维修领域迈入更高层次的智能化阶段。

4 结束语

本文就民航发动机的适航维修需求,探寻数字孪生技术在预测性维护中的应用,创建起一个包含数据融合,孪生建模,RUL预测以及智能决策的综合模型架构,这个模型的关键观念是借助数字孪生技术,准确地映射并预估发动机的健康状况改变趋向,用数据来推动维修决策,在严格符合适航标准的前提下,做到维修活动的精准化,主动化和最优化,虽然模型的实际部署和适航认证存在很长的路要走,不过,随着数字化,智能化技术日渐成熟,民航业对安全效率的要求不断加强,依靠数字孪生的预测性维护必定会变成未来的主流形式,以后的研究会着重于改良算法,开发软件平台,并且深入融合到现有的适航法规体系当中,希望尽快把这种先进的想法变成保证飞行安全,增进产业效益的现实力量。

参考文献

- [1]陶飞,刘蔚然,张萌,等.数字孪生及其应用探索[J].计算机集成制造系统,2018,24(1):1-18.
- [2]廉晓洁,丁水汀,吴斌.民用航空发动机持续适航管理体系研究[J].航空维修与工程,2017(6):32-35.
- [3]李浩,敬忠良,肖秦,等.基于数据驱动的航空发动机剩余寿命预测方法综述[J].航空学报,2020,41(1):023257.
- [4]庄存波,刘占生,汤海龙.航空发动机数字孪生技术发展与应用[J].航空发动机,2019,45(3):1-9.
- [5]张亮,李少华,贺尔铭.基于机器学习的飞机系统预测与健康管理工作综述[J].航空工程进展,2021,12(4):43-56.

第一作者简介:胡军(1988-),男,汉族,安徽安庆人,大学本科,中级工程师,研究方向:A320飞机航线维修、定检维修及未来智能创新维修研究。

第二作者简介:周磊鑫(1996-),男,汉族,浙江杭州人,学士,助理工程师,研究方向:A320发动机维修。