

厦门大学重大装备健康管理研究团队

2022 年度研究工作进展

厦门大学重大装备健康管理研究团队围绕国家重大装备轻质高效设计和安全高效运维的迫切需求，在国防基础科研计划重大项目、军委科技委基础加强计划重点项目、国家自然科学基金项目和国家级企业委托课题的资助下，在先进传感、无损检测、健康监测、智能结构等领域开展了深入研究，主要聚焦于电容传感、柔性压阻传感、电磁涡流、非线性超声导波、损伤定量化诊断等方向的理论方法、关键技术和应用验证研究，2022 年度取得了丰硕的成果。

1 先进传感技术研究

团队针对现有结构健康监测技术在结构 / 传感一体化方面的需求和发动机健康管理中滑油在线监测困难的问题，开展基于新测量原理的传感技术研究，对飞行器气动压力、结构损伤以及发动机滑油磨粒进行在线监测。研究成果发表在 **ACS Applied Nano Materials**、**ACS Applied Polymer Materials**、**IEEE Sensors Journal**、**Sensors** 和 **Tribology International** 等著名期刊上。

1.1 多参数复合传感的宽量程 / 高灵敏新型纳米双电层电容压力传感器

针对新一代飞行器表面气动压力测量对小集成干涉、多测量参数、大量程和高灵敏度的迫切需求，提出了一种制作方便且可工业化扩展的柔性双电层电容式传感器，对压力和温度进行解耦

测量，如图 1 所示。该传感器的优点是：通过静电纺丝在多孔导电织物上直接制备纳米离子纤维膜，压力测量范围宽，在 $0 \sim 800 \text{ kPa}$ 测量范围内灵敏度达 128.1 kPa^{-1} ，在 $0 \sim 10 \text{ kPa}$ 低压测量范围内灵敏度高达 1254.5 kPa^{-1} ；通过在电极上打印集成温度测量层，实现了压力、温度信号的解耦测量。该项研究的初步结果以封面论文的形式发表在 **ACS Applied Nano Materials** 上。

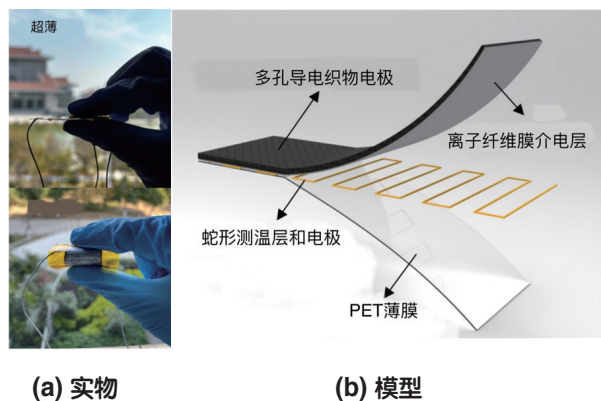


图 1 多参数复合传感的宽量程 / 高灵敏新型纳米双电层电容压力传感器

1.2 神经网络协助的柔性非平行极板电容传感器

针对大面积压力传感时大量电极阵列及导线排布导致的系统运行复杂、电信号传输和分析困难等问题，开展了基于非平行极板电容原理的液态金属柔性压力传感器研究，其结构框图如图 2 所示。设计了具有梯度厚度的电容介电层，并基

于电容与压力 / 施力位置的映射关系建立压力传感模型。通过两个传感单元的叠加设计实现双电容信号与检测信号的耦合映射。在神经网络的协助下，实现了仅需四根电导线即可完成多种面积规模的压力大小及位置测量，解决了大面积传感场景中传感阵列多、线路干扰、信号处理复杂等问题。

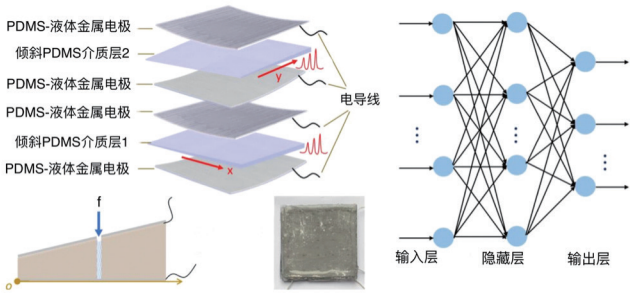
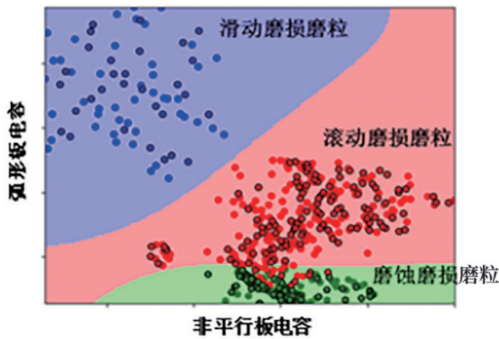


图 2 神经网络协助的柔性非平行极板电容传感器结构框图

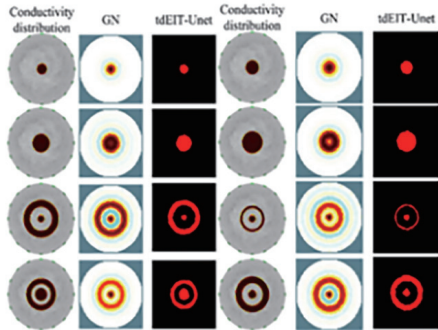
1.3 基于电容传感和阻抗成像的发动机滑油磨粒监测与诊断技术

飞机发动机的滑油系统是磨损磨粒的运输介质，滑油磨粒在线监测与诊断是发动机健康管理的重要需求。利用所发展同轴电容传感网络所获取的磨粒电容信号，提出了一种基于支持向量机（SVM）的磨粒形态分类方法。首先利用同轴电容传感网络仿真模型，计算不同形态磨粒进入不同极板探测空间的电容信号并进行归一化处理，建立基于 SVM 的磨粒分类模型，并通过多种智能优化算法优化 SVM 模型相关参数，提高了模型分类精度，最后通过不同大小真实磨粒验证了该分类模型的有效性。

提出了一种新的基于颗粒振动原理的在线式滑油磨粒收集与分析方法，利用振动场 - 重力场 - 流场综合作用使滑油中的各种磨粒按尺寸大小依次分布在振动薄膜表面，并对形成的磨粒聚类带进行成像从而得到磨粒大小和数量。建立了多物理场情况下滑油磨粒运动模型，分析磨粒的受力情况和在薄膜表面的分布规律。建立了基于 CMOSOL 软件的数值仿真模型，模拟磨粒的沉积过程，验证理论推导的正确性并优化磨粒收集和分析装置。提出了基于 tdEIT-UNet 的电阻抗层析成像算法，构建了用于滑油磨粒聚类带监测的电阻抗层析成像系统，试验结果表明，该系统可以准确快速地对滑油磨粒聚类带进行成像。基于电容传感和电阻抗成像的滑油磨粒诊断试验结果如图 3 所示。



(a) 基于支持向量机的磨粒特征分类

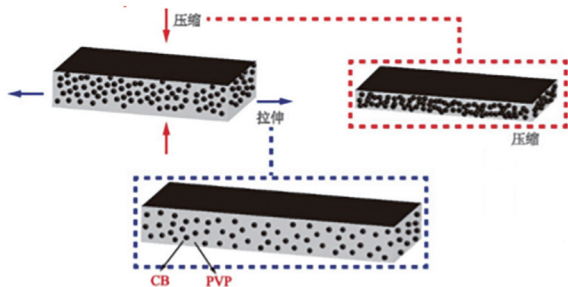


(b) 基于电阻抗成像的磨损磨粒聚类成像

图 3 基于电容传感和电阻抗成像的滑油磨粒诊断实验结果

1.4 基于纳米压阻传感器的复合材料螺栓连接结构健康监测技术

提出了一种基于纳米压阻传感器的复合材料螺栓连接结构接头预紧状态变化监测技术，如图 4 所示。传感器以炭黑颗粒（CB）为导电填料，聚乙烯吡咯烷酮（PVP）为基体。测试得到传感器的渗流曲线，研究了不同导电填料配比条件下传感器电阻与压力的关联关系，多个拉伸循环载荷下的耐久性能，以及传感器的响应时间和恢复时间。设计了监测螺栓松动的传感器布局 and 电极布设方案，采用喷涂成型工艺将传感器集成在连接结构表面，研究并分析了信号随接头预紧状态变化的规律，实现了对复合材料螺栓连接结构接头松动的定量表征。



(a) 压阻效应原理示意

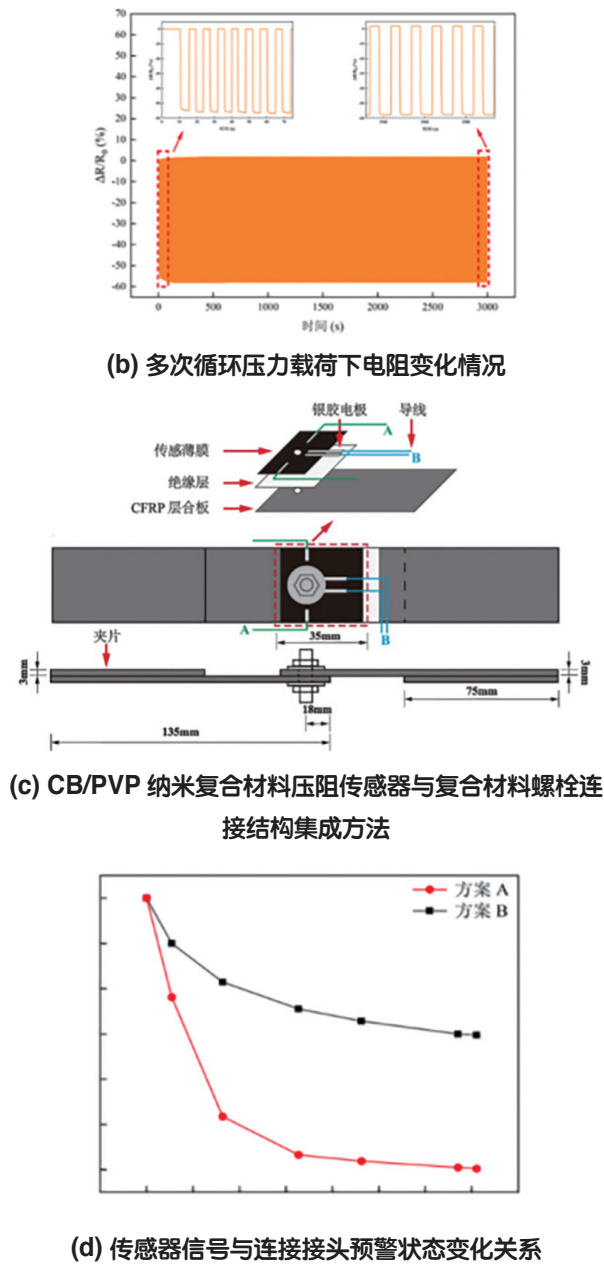


图 4 基于纳米压阻传感器的复合材料螺栓连接结构接头预紧状态变化监测技术

2 无损检测研究

研究团队深入开展了针对复杂异形装备结构、高衰减复合材料的先进无损检测理论和应用研究。在涡流检测趋肤效应理论与应用、微损伤诱发超声非线性效应机理、高衰减复合材料非线性超声方法等关键科学和技术难题上取得了突破。研究成果在 *Journal of Applied Physics*、*Journal of Sound and Vibration*、*Wave Motion*、*Ultrasonics* 和 *3D Printing and Additive Manufacturing* 等著名期刊上发表。

2.1 涡流检测趋肤效应理论与应用

研究了双层金属平板涡流检测趋肤效应及气隙厚度测量。双层金属平板可应用于飞机蒙皮和防护装甲等部件，层间气隙厚度影响平板结构的力学性能。开展了双层金属平板涡流检测趋肤效应研究，发现气隙使得下层板中涡流密度减小，上层板中深度方向涡流衰减变慢，并揭示了其机理。开展了涡流法气隙厚度测量研究，发现随着气隙增大，涡流响应（涡流引起的电压）可增大也可减小，与工作频率有关，其变化曲线如图 5 所示，基于涡流衰减规律解释了涡流响应 - 气隙厚度关系曲线。气隙厚度测量试验中，最大测量误差为 3.45%。

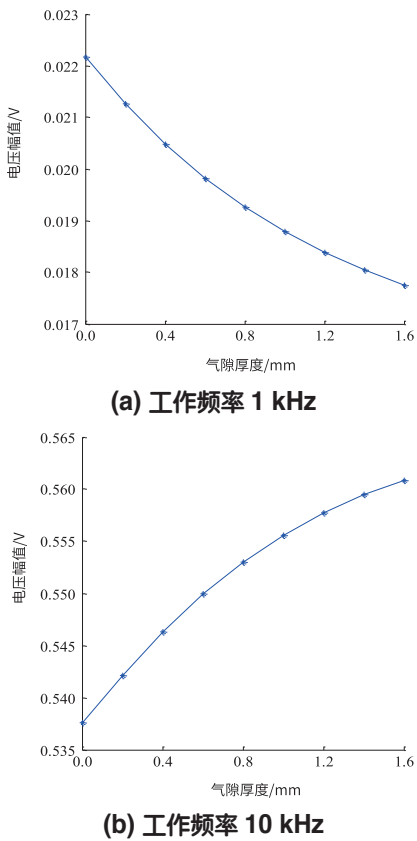


图 5 双层板涡流响应幅值与气隙厚度关系曲线

研究线圈加感与屏蔽对涡流检测趋肤效应的影响。将线圈缠绕在磁芯上或对线圈进行屏蔽可提高涡流检测灵敏度，但同时也改变磁场分布，影响深度方向涡流衰减规律，从而影响内部缺陷的检测和工件厚度的涡流法测量。在前期涡流检测趋肤效应研究基础上，研究了磁芯和屏蔽罩对趋肤深度的影响。数值模拟结果表明，磁芯和屏蔽罩使得涡流衰减变快，趋肤深度减小。基于课题组提出的涡流扩散 - 对消理论，揭示了趋肤深

度变化的机理。比较不同材料磁芯和屏蔽罩对趋肤深度的影响，发现铁磁性磁芯和屏蔽罩对趋肤深度的影响最小，设计试验并验证了上述规律。

2.2 沉积态金属增材制造件质量特征无损评价

增材制造 **AlSi10Mg** 在航空航天领域得到广泛应用。由于增材制造的特点，增材制造件的成型较为复杂。针对 **AlSi10Mg** 材料的沉积态增材制造件进行了涡流法电导率测量，用电导率表征成型质量，基于电导率测量结果评价增材制造件的质量特征。试验结果表明，增材制造成型质量低于传统制造成型质量，且增材制造件成型质量不均匀，打印初期的质量最好，随着打印深度增大，成型质量下降，电导率与打印深度关系曲线如图 6 所示。基于此发现，绘制参考曲线，描述打印质量与打印深度的关系。将参考曲线用于偏移缺陷检测，检测出小至 $37\ \mu\text{m}$ 的偏移。

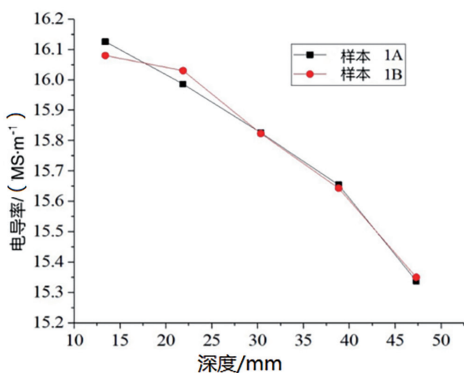


图 6 电导率与打印深度关系曲线

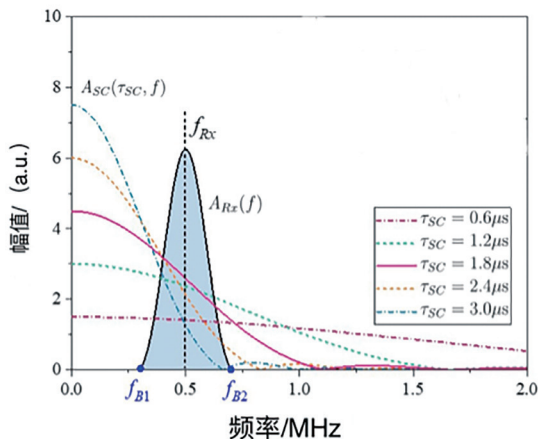
2.3 微损伤诱发超声非线性效应的机理

重大装备核心构件在失效前一般会出现远小于常规超声波长的微损伤（微米级尺寸缺陷），如金属结构中的微孔洞、微腐蚀坑和复合材料中的纤维分层、断裂等。该类微损伤不会引起超声波的反射、散射或幅度衰减等变化，无法利用线性超声进行检测。此外，由于微损伤在介质中的几何不连续性，现有基于接触非线性效应的物理模型，无法解释微米级尺寸的微损伤诱发超声非线性效应的物理机理。基于超声导波的频散特性，考虑微损伤的存在对不同频率的超声导波相位改变差异，进而影响超声非线性效应发生的相匹配程度，给出了微损伤尺寸与非线性谐波幅度之间的函数关系，并通过数值仿真和试验验证了该函数关系的有效性，从而厘清了微损伤诱发超声非线性效应的物理机制。

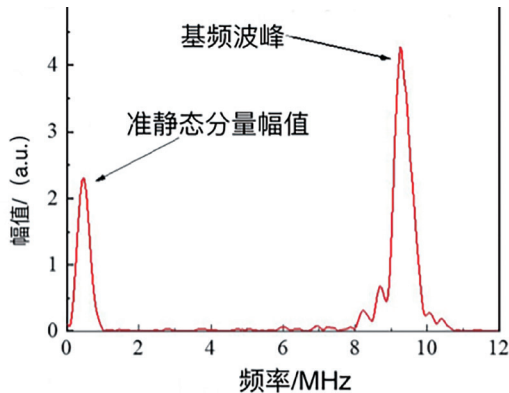
2.4 基于超声静态分量非线性效应的高衰减材料

无损评价方法

超声静态分量（载波频率为零）的声衰减远小于初始基频波以及高次谐波或混频谐波，可以实现对高衰减材料或大型构件的精准高效检测。但是，载波中心频率为零的静态分量无法直接通过测量振动信号的换能器测量。基于超声静态分量时域包络的物理实质，开发了利用低频换能器测量包含在静态分量频带范围内的准静态分量（QSC）脉冲幅值，进而反映超声静态分量（SC）非线性效应的振动测量方法，其测量结果如图 7 所示。明确给出了有效激发和接收 QSC 时，超声脉冲信号周期与频率之间的函数关系，并进一步提出了基于“群速度匹配”加“相位反转”的超声导波静态分量非线性效应的测量方法。首次实现了利用常规低频压电换能器测量低频准静态脉冲信号的幅值。该方法为航空航天等领域大型构件和高衰减材料的非线性超声检测应用提供了有效的解决方案。



(a) 低频换能器接收 QSC 的频谱响应



(b) 测量的 QSC 脉冲幅值和基频波幅值

图 7 基于低频超声换能器测量 QSC 脉冲幅值的超声 QSC 非线性效应激发和测量结果

3 结构健康监测研究

团队围绕螺栓连接结构、齿轮和复合材料结构，聚焦于压电-光纤多源传感、特征提取、信息融合、机器学习、损伤定量诊断等关键技术开展结构健康监测研究，并进行了试验验证。研究成果发表在 **Composite Science and Technology**、**Composite Structures**、**Mechanical Systems and Signal Processing**、**Smart Materials and Structures** 和 **Structural Health Monitoring-An International** 等著名期刊上。

3.1 基于阻抗-导波集成传感与多特征融合的螺栓连接结构新型损伤因子

鉴于现有压电传感技术评估螺栓孔边损伤的损伤因子存在非线性 / 饱和且无法辨识损伤类型的不足，提出了一种集成阻抗-导波传感与多特征融合的损伤评估新策略，如图 8 所示。开发了基于指标正负性快速判别螺栓松动和螺栓孔边裂纹等损伤类型的积分面积差型辨识因子，构建了基于动态基准更新的融合损伤因子，改善了单特征 / 单传感法对多损伤特征提取能力弱、精度差且结构适应性差的不足，并解决了传统静态基准指标有效评估损伤尺寸小的问题，可重复性测试验证了新型损伤因子的有效性。

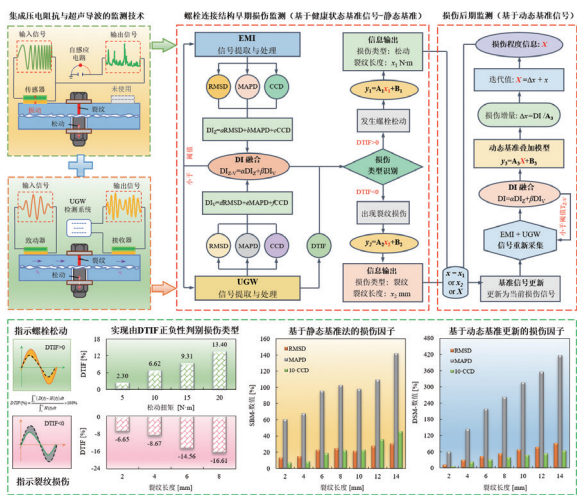


图 8 基于阻抗-导波集成传感与多特征融合的新型损伤因子（用于螺栓连接裂纹与松动监测）

3.2 基于深度迁移学习网络的损伤多级分类方法

针对现有的超声导波定量监测算法由于频散、多模态等特性导致导波中损伤特征发掘程度低、损伤定量化水平低的瓶颈问题，提出了基于

超声导波深度迁移学习的损伤多级分类框架，如图 9 所示。利用一维卷积神经网络（1D-CNN）深入挖掘多模态、多边界反射的复杂 Lamb 波信号的损伤特征。提出了损伤多级分类的工程化应用方法，基于微调迁移学习建立了多任务级联的 1D-CNN 架构，针对不同的检测维护工程师可以快速准确地得到不同结构健康监测级别识别结果，即识别损伤有无、损伤位置和损伤大小。

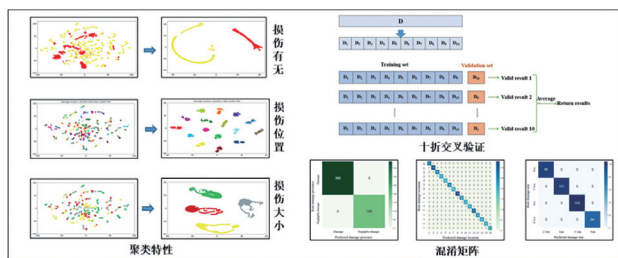
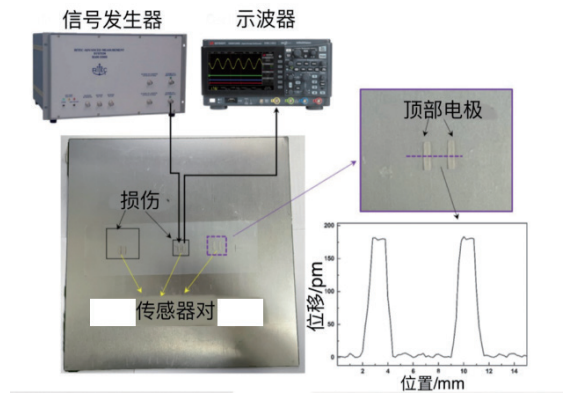


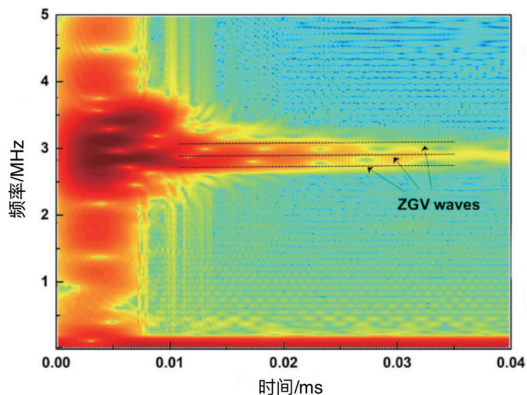
图 9 基于深度迁移学习网络的损伤多级分类方法框架

3.3 基于 PVDF 压电涂层和零群速导波的损伤诊断

复杂几何形状工程结构的损伤诊断是飞行器结构健康监测的重要发展方向。与实验室研究中常用的简单结构不同，工程实际中的结构往往具有复杂的几何特征，这些特征导致了复杂的导波反射、衍射和模态转换等现象，使得基于超声导波的损伤诊断方法在信号分析方面面临严峻挑战，造成了现有方法从实验室研究到实际应用之间的瓶颈。为实现复杂结构的损伤诊断，开发了一种基于零群速兰姆波和极化 PVDF-TrFE 传感器的方法，如图 10 所示。通过 PVDF-TrFE 涂层实现零群速兰姆波的原位激发和测量，并利用零群速导波的模态特征实现局部区域健康状态的评估。通过多层黏接结构脱黏损伤的检测验证了该方法的有效性。



(a) 检测系统结构框架



(b) 检测结果示例

图 10 基于 PVDF 压电涂层和零群速导波的损伤诊断

3.4 Lamb 波损伤定量化监测技术

损伤定量化监测是结构健康监测领域的关键问题,是进行飞机结构剩余寿命预测的重要基础,也是决定结构是否需要维修的主要依据。针对损伤监测的量化精度不高、通用性差等问题,提出了一种基于多特征多路径加权的 **Lamb** 波损伤定量化监测技术,如图 11 所示。首先,利用连续隐马尔科夫模型建立健康信号和损伤信号的不确定性分布,并利用 **KL** 距离量化两者的概率密度函数差异,结合加权平均成像算法得到损伤位置。其次,结合损伤衰减强度、激励器 - 估计的损伤位置 - 接收器三者距离等参数,建立了一个基于多特征多路径加权的损伤定量数学表达式来近似估计圆形损伤的尺寸大小。最后,使用 3 个典型的飞机复合材料结构零组件验证了所提定量化监测技术的有效性。

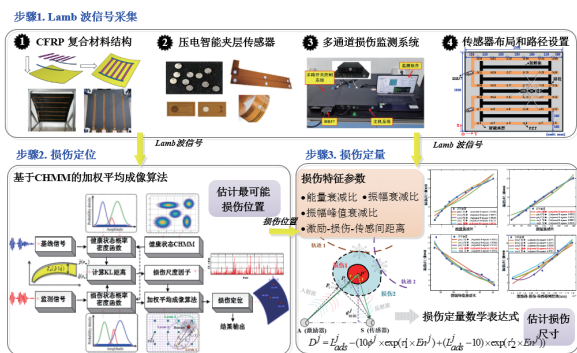


图 11 基于多特征多路径加权的 **Lamb** 波损伤定量化监测技术流程

为研究更具通用性的损伤监测技术,提出一种基于损伤反射点的 **Lamb** 波损伤定量化监测方法,如图 12 所示。首先,通过结合传感资源约

束的 **LM** 算法和量子引力搜索算法求解非线性方程组进行损伤定位。其次,基于已估计的损伤位置,提出一种基于损伤反射点求取损伤轮廓的损伤尺寸定量算法,通过确定不同传感路径的波散射源来评估损伤的形状和大小。针对所捕获信号常受噪声污染的特点,采用基于自动更新边界约束区域和双边正态分布的奇异椭圆轨迹去除方法,对远离损伤估计中心的噪声反射点进行分离。最后,在飞机壁板典型复合材料零组件和某型飞机金属翼盒结构上验证了方法的有效性。该技术无需标定且适用于不同形状的损伤,相比传统技术更具通用性。

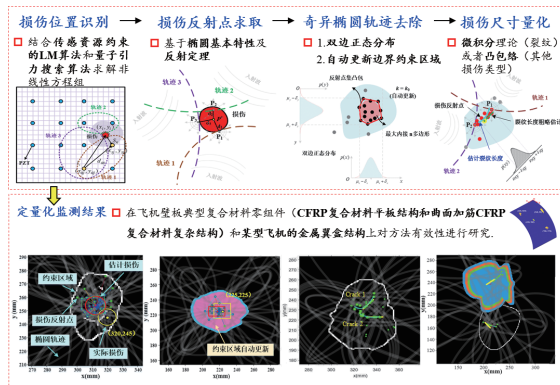


图 12 基于损伤反射点的 **Lamb** 波损伤定量化监测技术流程

3.5 基于压电 - 光纤混杂传感网络的复合材料全生命健康监测

发展原位在线传感技术实时监测结构内部状态变化对精确制造大型复合材料 (**CFRP**) 构件并确保其在役期间的结构完整性具有重要研究意义。在前期复合材料全生命周期健康管理研究基础上进一步提出了一种基于压电 - 光纤混杂传感网络的结构健康监测技术,用于复合材料制造过程中的三维树脂流动前沿在线监测和服役阶段的损伤实时评估,如图 13 所示。基于嵌入式和非嵌入式压电传感网络提出了 3 种方法,在复合材料液体成型过程中监测三维树脂流动前沿。为了精确定位复合材料内部不可见的三维树脂流动前沿的位置,在不同层分别嵌入了多个光纤传感器作为流量传感器。试验结果表明,压电和光纤传感网络的多场耦合传感信号可成功监测并重构变厚度复合材料厚板的三维树脂流动前沿。随后,在复合材料服役阶段损伤评估方面,针对传统延迟叠加成像算法的局限性,提出了一种自动编码器加权的改进延迟叠加成像算法,并在集成了压

电传感网络的大型复杂复合材料构件上进行一系列的试验验证。损伤重构结果表明，无论是在实验室环境还是强噪声条件下，所提出的算法都能精确识别和定位结构损伤，具有良好的工业应用前景。

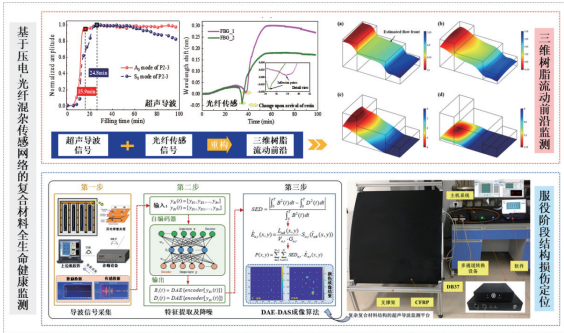


图 13 基于压电 - 光纤混杂传感网络的复合材料全生命健康监测

3.6 齿轮传动结构典型故障监测技术

齿轮作为旋转机械传动结构的核心组件，对其健康状态进行实时监测具有重要意义。针对目前齿轮传动结构监测方法存在监测方式单一、易受干扰等不足，将智能压电传感器层集成在齿轮侧面，在传动结构运行的状态下，采用超声导波对齿轮易出现的典型故障(齿根裂纹与齿面磨损)的扩展过程进行主动监测，如图 14 所示。根据超声导波时域信号的特点，对排列熵(PeEn)特征参数进行改进，提出了多尺度加权平均排列熵(MWF-PeEn)特征参数，实现了齿轮损伤扩展情况的有效表征。

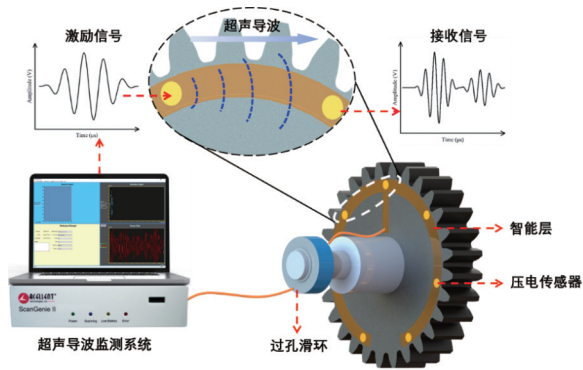


图 14 基于超声导波的齿轮传动结构健康监测流程图

4 结语

厦门大学重大装备健康管理研究团队面向国家重大需求，围绕先进传感、无损检测、结构健康监测开展了既具前沿性、创新性又兼顾工程实用性的理论与实践相结合的研究，相关技术方法可应用于大型民机、火箭贮箱和飞行器复材尾翼等航空航天装备关键结构地面试验验证，为重大装备结构设计和性能验证提供技术支持。

厦门大学航空航天学院
曾志伟，王奕首，李卫彬，孙虎，刘琦罕，王凯，
杨媛媛，卿新林 供稿
2023 年 4 月