

# 复合材料结构损伤识别与健康监测展望<sup>\*</sup>

陈雪峰， 杨志勃， 田绍华， 孙 瑜， 孙若斌， 左 浩， 许才彬  
(西安交通大学机械工程学院 西安,710049)

**摘要** 复合材料构件是航空发动机、飞机机翼、机身和风力发电机等结构的重要组成部分,在包括航空、机械和土木工程等领域有极其重要的应用,然而受到其内部结构复杂性和制造缺陷的影响,复合材料的服役性能一直是制约结构安全性和经济性的一大瓶颈,因此针对复合材料结构的损伤识别和健康监测是领域内的研究热点及难点。笔者在论述了目前国内外技术发展和应用的基础上,系统地比较了复合材料结构损伤识别和健康监测的关键技术,讨论了该类技术的发展方向并进行了总结和展望。

**关键词** 复合材料; 损伤识别; 结构健康监测; 损伤监测  
**中图分类号** TH17

## 引 言

复合材料是指由两种或两种以上物理或化学性能各异的单一材料,经过物理或者化学的方法组合而成的一种新型材料,具有重量轻、比强度及比模量大、低蠕变和强耐腐蚀性等优点。复合材料可根据使用条件进行设计和制造,已逐步取代金属合金,广泛应用于航空、机械和土木工程等领域。随着航空和风电等高尖端技术领域的飞速发展,对于结构轻量化的需求愈加明显,复合材料继铝、钢和钛之后,迅速发展成 4 大结构材料之一。

科技水平的提升导致了复合材料应用的广泛化和结构的大型化,逐渐由非承力部件材料变为主要承力部件材料。例如,对于飞机制造业而言,复合材料的用量在一定程度上表示了该种机型的先进水平,波音 787 和空客 350 等一些大型飞机中复合材料用量已超过 50%。与此同时,作为风力发电机叶片的主要材料,复合材料在新能源开发利用的驱动下呈现出越来越高的使用要求。仅以某型 1.5 MW 级风机叶片为例,其长度可达 37.5 m,相当于 A380 飞机翼展长度,受力状况复杂,因此对其开展损伤识别及健康监测意义重大。

传感技术的发展为复合材料结构的损伤识别与

健康监测提供了多种监测对象,并依此发展出众多的损伤识别与健康监测方法。笔者在目前国内外技术发展和应用综述的基础上,系统地比较了复合材料结构损伤识别和健康监测的关键技术,讨论了该类技术的发展方向,并进行了总结和展望。

## 1 复合材料缺陷/损伤模式及模型

在制造过程中,复合材料极有可能存在初始缺陷,而在使用过程中,由各类原因导致的损伤也是难以避免的<sup>[1]</sup>,针对不同损伤形式加以甄别对复合材料结构的健康管理及监测意义重大。在众多复合材料中,纤维增强复合材料在工程中的使用最为广泛。笔者以此为对象,对复合材料常见损伤/缺陷模式进行阐述分析。

从细观角度,可以将复合材料的缺陷/损伤形式分为纤维断裂、基体与界面损伤。纤维是复合材料的主要承力组分,由于复合材料中纤维强度的分散性,在拉伸作用下部分强度较低的纤维会先于其他纤维发生断裂,因此即使载荷低于复合材料构件的设计承载载荷,复合材料构件也有可能发生损伤。相对于性能离散性引起的纤维断裂问题,基体与界面由于材料属性更容易发生损伤。常见的损伤失效形式包括基体屈服、纤维拔出和纤维基体间脱粘等。

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(51405369,51605365);陕西省重点研发计划资助项目(2017ZDCXL-GY-02-01);陕西省自然科学基金资助项目(2016JQ5049);陕西省青年人才托举计划资助项目(20170502)  
收稿日期:2017-05-19

从细观角度出发进行多尺度建模,利于实现复合材料损伤发展的预测。对于复合材料的损伤检测问题,工程中往往更关心其宏观损伤模式。

复合材料的宏观缺陷/损伤形式有多种,典型的包括塑性断裂、疲劳裂纹、分层和孔隙等。由于这些损伤的结构特点不同,在损伤检测中也表现出不同的特征。塑性断裂断口一般较大,断口的产生会直接导致结构模态参数的明显变化,若使用导波等监测方式,会出现明显的线性损伤回波。因此,不会对损伤检测引入太多的复杂因素。疲劳裂纹断口较小,在结构运行过程中断口两侧易发生接触,其模态特性和导波特性的存在非线性特点。与之类似,分层的模态和导波特征存在一定的非线性特点。但与疲劳裂纹不同,分层损伤作用面积大,且分层的特征信号与分层所处的位置有关,因此对于分层的损伤检测具有一定难度。除此以外,复合材料在制造过程中层间可能夹杂一定气体,形成孔隙,降低复合材料的力学性能,因此孔隙检测也是复合材料结构健康监测与损伤检测中亟待解决的问题之一。

复合材料力学行为复杂、损伤形式多样,使用数值方法对其进行建模是提高损伤识别和健康监测精度的有效方法,也是预测其损伤发展的必由之路。目前,主流的建模方法分为周期性模型和有限元模型两类。从细观角度,借助复合材料的周期性建立其多尺度模型是领域内常用的建模方法之一。例如,Bouchart 等<sup>[2]</sup>利用细观非线性模型代入到模拟单胞中,将二阶均匀化方法与有限元融合,开展了超弹性聚合物复合材料的力学性能分析。Yang 等<sup>[3]</sup>用类似的多尺度框架预测了纳米复合材料等效模量随纳米颗粒体积分数变化,并进一步分析材料宏观塑性响应。Buchanan 等<sup>[4]</sup>利用代表体积分元方法模拟了连续纤维增强复合材料纤维排列对宏观应变状态的影响。此外,有限元方法和传统的力学模型也是一类重要的复合材料建模方法,通过对材料细观结构建立准确的三维模型,可以实现较为精确的性能预报。在此方面,我国哈尔滨工业大学的杜善义院士课题组有着较为深入的研究。文献<sup>[5-6]</sup>使用有限元技术建立了三维多向编织复合材料单胞几何模型,研究了含多相介质单元的有限元分析方法,对编织复合材料的强度进行了有效预报。梁军等<sup>[7]</sup>采用细观力学方法实现了含夹杂和微裂纹复合材料的损伤演化和分析。通过准确的模型预测复合材料的宏观力学行为,为损伤识别提供有效依据,但是跨

尺度问题以及实际分析中的不确定性问题依然是困扰复合材料建模的因素。

## 2 常用损伤识别、健康监测方法

### 2.1 固有频率

复合材料结构的固有频率是最易获得的模态参数,且测量精度容易保证,通过固有频率变化识别复合材料结构损伤,是一种简单有效的方法。采用固有频率这一损伤指标主要是基于在不考虑质量变化的情况下,损伤发生后将导致结构的刚度降低,从而降低了结构的频率,因此通过测量或计算结构在不同情况下的频率即可判断结构健康状况<sup>[8]</sup>。将频率指标应用于结构动力无损检测是由 Cawley 和 Adams<sup>[9]</sup>提出的。随着复合材料被广泛应用,学者们对通过固有频率来监测复合材料结构损伤进行了大量的研究。Pardoen<sup>[10]</sup>研究了层合板发生分层损伤时固有频率的变化,通过理论分析得出,当试件中间发生分层时,偶数阶固有频率比奇数阶固有频率下降更明显。Paolozzi 等<sup>[11]</sup>研究指出,分层损伤造成复合材料固有频率改变,当波长和分层区域近似相等时,固有频率的变化量最大。Wang 等<sup>[12]</sup>采用模式识别的方法,通过改变复合材料叶片固有频率来检测风力发电机叶片的结构损伤。

利用频率在损伤前后的变化量识别损伤,要求频率具有确定的空间特性。一些研究者认为,频率不能反映结构的空间特性,而多阶频率变化的组合才可以提供结构损伤的空间特性<sup>[13]</sup>。据此,学者们便开始将研究重心转入使用多阶频率信息融合的方式进行损伤监测。在此方面,早期文献<sup>[14-15]</sup>提出使用裂纹频率三线相交法,采用传统 8 节点等参元结合裂纹诊断算法实现了梁结构单裂纹、多裂纹识别问题,由于裂纹奇异性的影响,使用传统有限元单元的诊断精度有限。为了提高系统固有频率的求解精度,Zuo 等<sup>[16]</sup>利用小波有限元法构造复合材料板小波单元,使用弹性模量缩减法进行结构损伤建模,提出了适用于复合材料板结构损伤识别的改进频率三线相交法。然而,仅采用固有频率进行复合材料损伤识别存在一定局限。由于固有频率是结构集总参数,而损伤是一种典型的局部现象,因此系统固有频率对结构损伤并不敏感,难以用这种方法对复合材料结构中的某些早期损伤进行识别。文献<sup>[17-18]</sup>指出现有复合材料的频率监测方法受限于频域

和监测范围,缺乏同时监测大范围损伤和细小损伤的适应性,因此学者们开始发展基于结构振型的损伤识别方法。

2.2 模态振型

模态振型可从在线监测中获得,称为运行模态位移,具有很好的在线监测性。当复合材料结构发生损伤后,损伤会在模态振型中表现为不同程度的奇异性。根据奇异性的强弱及分布,可在线判断出损伤程度及所在位置。更重要的是,基于模态振型的损伤识别方法对于复合材料各向异性及复合材料结构的复杂特性引起的结构特征变化并不敏感,因此得到了广泛研究。

损伤检测和结构健康监测中对结构模态振型的直接利用始于 Allemang 和 Brown 对模态信度准则(modal assurance criterion,简称 MAC)的研究<sup>[19]</sup>。随着复合材料的广泛应用和发展,以 MAC 为基础,发展出了诸多适合复合材料损伤检测/监测的技术与方法,根据其动力学指纹不同<sup>[20]</sup>,可细分为曲率模态、小波分解及其他动力学指纹方法。

曲率模态是动力学指纹方法中最经典的方法,结构的曲率模态可表示为振型对于位置坐标的二阶导数,也可由应变的一阶导数近似得到。由于传感技术的发展尚无法产生一种曲率模态的直接测量手段,因此实际中往往使用模态振型的数值微分进行近似。文献[21]将该技术应用于复合材料梁、板结构及压力罐的损伤识别中,对比了扫描式激光测振仪(速度信号)及压电陶瓷晶体传感器(应变信号)对监测结果的影响。实验结果表明,曲率模态虽然由位移模态定义,但对于速度模态和应变模态同样适用。使用数值微分对曲率模态进行近似并非最佳选择,Katunin 等<sup>[22]</sup>指出,单纯使用数值微分估计模态曲率在现实环境中难以产生有效的损伤识别结果。由于数值微分的不稳定性,即使微小噪声也可能被放大,并最终影响损伤识别。针对此类问题,文献[23-24]根据傅里叶变换的微分性质,提出了适用于复合材料结构损伤识别的傅里叶谱模态曲率,使用积分变换实现复合材料结构曲率模态的准确计算,提出了波数域自适应滤波方法<sup>[25]</sup>,有效抑制了曲率模态中的背景噪声,提升了监测准确性。文献[26]提出利用微分算子的线性特性,通过复小波变换将曲率模态中模态振型的二阶微分转换为对小波函数的二阶微分,提出了模态曲率的弱形式,使用该方法

针对一般变截面复合材料结构开展了实验验证。

小波分解可以有效地将模态振型中的噪声成分流入其低尺度分量当中,而以奇异性为代表的损伤信息则在高尺度中得以保留,使用小波分解,亦可以对复合材料模态振型中由于各向异性引起的不同程度起伏进行自适应滤除,因此得到了广泛的应用。Katunin 等<sup>[27-30]</sup>提出了一系列针对复合材料叶片等异型件小波分解方法,包括连续小波、离散小波和分数阶小波变换等,有效解决了检测/监测中的噪声滤除和边界效应问题。文献[31-32]重点研究了离散小波变换在各类复合材料结构裂纹监测中的应用,提出使用两步法将振型信息与频率信息进行融合的损伤识别方法。针对噪声滤除问题,文献[25]在小波波数滤波的基础上,提出了波数-尺度域联合滤波方法,将复合材料损伤检测中的各类噪声在信息融合的角度下进行研究。Hu 等<sup>[33]</sup>使用应变能方法与小波方法相结合,开展了复合材料飞机机翼的实验模态分析,所提出方法对空心机翼实验结构的各处位置损伤均能进行良好的识别

除曲率模态和小波方法以外,一些其他技术如间隙平滑方法<sup>[34]</sup>、广义局部熵方法<sup>[35-36]</sup>和多变量分析方法<sup>[37]</sup>等均被证明对复合材料损伤检测/监测是有效的。然而,模态振型方法也存在不足,在损伤呈像过程中只能对损伤边界进行呈像,如针对大面积分层损伤的识别仅能够揭示其边界位置,对于如孔隙率问题等产生的渐变损伤则显得无能为力。

2.3 频响函数

频响函数是结构输出信号和输入信号的傅里叶变换之比,从定义可知其包含了结构物理参数的所有信息,故结构频响函数的变化与结构中损伤的类型、位置和程度等信息存在唯一对应的关系,适用于复合材料结构的损伤识别<sup>[38]</sup>。

揭示损伤对结构频响函数的作用机理是使用频响函数进行复合材料损伤识别需要解决的首要问题。为识别石墨环氧树脂复合材料中的分层损伤,Kesser 等<sup>[39]</sup>分析了分层损伤对结构固有频率、模态振型和频响函数的影响。Sampaio 等<sup>[40]</sup>参考模态振型曲率比模态振型对结构损伤更加敏感的结论,提出了结构频响函数曲率的概念,通过对复合材料夹层梁结构中损伤识别结果的分析,得出频响函数曲率法可以很好地识别损伤位置,但对损伤程度的识别精度不佳。为更好地挖掘频响函数包含的信

息,学者们开始关注不同类型的频响函数。针对复合材料层合结构和蜂窝夹层结构, Kim<sup>[41]</sup>研究了疲劳循环载荷作用下结构残余频响函数的变化。针对复合材料呼吸裂纹的非线性效应, Peng 等<sup>[42]</sup>提出了非线性频响函数的概念。Chatterjee<sup>[43]</sup>通过非线性动态模型求取高阶频率响应函数,并以此为基础识别复合材料夹层梁中的损伤程度。此外,使用信号处理方法对频响函数信息进行进一步提取也是一个重要的研究方向。Bandara 等<sup>[44]</sup>将频响函数作为人工神经网络的训练样本,实现了纤维增强复合材料的损伤识别。Li 等<sup>[45]</sup>采用功率密度的概念处理频响函数信息,依据不同单元间的功率密度传递率识别损伤。

虽然基于频响函数的损伤识别方法具有大量优点,但其缺点也是不可避免的。测量点数和位置直接影响到获取结构频响函数的精确度,进而影响结构损伤识别精度。对于在线结构健康监测系统而言,由于激励源位置通常难以确定,因此频响函数的求取与高精度估计也十分困难,这些都给基于频响函数的复合材料损伤识别造成了障碍。

## 2.4 机械电阻抗

机械电阻抗方法 (electromechanical impedance, 简称 EMI) 与前述的基于模态参数的方法不同,是一种基于压电智能材料、利用全局振动理论检测结构局部损伤的复合材料结构健康监测新方法。该方法在复合材料结构表面粘贴或内部埋入压电陶瓷 (piezoelectric transducer, 简称 PZT), 一旦结构发生损伤, 其局部刚度将减小, 必然会引起该结构机械阻抗的变化, 通过 PZT 的正、逆压电效应分析结构机械阻抗的变化情况, 就可以实现损伤识别与健康监测。与传统损伤检测方法相比, EMI 不仅能够实现复合材料结构在线实时监测, 而且具有对结构的微小损伤敏感等优点, 因此该方法受到国内外学者的广泛关注。

Liang 等<sup>[46-47]</sup>最早开展 EMI 损伤识别研究, 于 1994 年首次提出 EMI 模型, 从理论上推导出了 PZT 机械阻抗与被监测结构机械阻抗的解析关系。Chaudhry 等<sup>[48]</sup>将 EMI 的高频激励特性用于航空复合材料结构的健康监测。结果表明, EMI 对结构局部微小损伤非常敏感, 而对远场损伤及边界条件不敏感。直接使用 EMI 仅能对损伤进行定性判别, 难以实现定位或定量。Xu 等<sup>[49]</sup>利用遗

传算法分析含损伤航天复合材料信息参数的 EMI 信号谱, 有效识别了损伤的物理参数。文献 [50-52] 在 EMI 研究中引入人工神经网络, 通过实验验证了该算法能够准确识别损伤位置和损伤程度。采用遗传算法、人工神经网络等智能算法虽然可以实现损伤的定位和定量识别, 但复合材料形式多样, 损伤类别复杂, 对其进行损伤辨识需要大量训练样本, 这也限制了该方法在复合材料结构健康监测领域的广泛应用<sup>[53]</sup>。

针对以上问题, Na 等<sup>[54]</sup>利用低于 80kHz 的频率段的谐振频率进行了复合材料结构损伤识别, 提高了 EMI 在大面积复合材料结构损伤检测的性能。Schwankl 等<sup>[55]</sup>利用 EMI 对复合材料板结构进行损伤识别, 通过基于统计方法的均方根差值 (root mean square deviation, 简称 RMSD) 参数确定损伤程度。Lim 等<sup>[56]</sup>对比了 EMI 与超声导波方法检测疲劳裂纹损伤的检测性能, 通过实验验证了 EMI 对疲劳裂纹早期萌芽阶段敏感。文献 [57] 运用 EMI-超声导波综合技术, 提出了适用于复合材料机翼结构分层损伤检测方法。该方法利用 EMI 局部灵敏度高和超声导波检测范围大的特点, 可以实现结构的局部和全局监测。刘增华等<sup>[58]</sup>将 EMI 与超声导波技术相结合, 提出了一种综合损伤指数的数据融合算法, 实现了复合材料梁结构的损伤定位研究。

温度对 PZT 的介电常数影响很大, 继而对 EMI 方法中的机械阻抗产生影响, 导致误判。Malinowski 等<sup>[59-60]</sup>利用 EMI 评估复合材料结构胶结状态, 重点研究了化学腐蚀、湿度和不合适的固化温度等 3 种损伤形式, 提出了基于 RMSD 与峰值频率变化的损伤评价指标。文献 [61] 提出将有效频率偏移 (effective frequency shift, 简称 EFS) 方法引入 EMI 进行温度补偿, 达到了良好的监测效果。Wandowski 等<sup>[62]</sup>指出温度变化会引起导纳曲线偏移, 利用 RMSD 分别对导纳曲线进行水平和垂直偏移补偿, 提高了复合材料结构分层损伤的识别精度。

与传统损伤识别方法相比, EMI 不仅能够实现复杂结构在线实时监测, 而且具有对复合材料结构的微小损伤敏感、性价比高等优点, 但 EMI 方法对损伤的监测与频率监测有相似之处, 即需要依赖于模型进行损伤的定位, 难以实现损伤呈像, 受到温度的影响, 需采取额外的温度补偿技术提升精度, 因此仍需深入研究。

2.5 导波

作为一种主动监测方法,基于导波的结构损伤识别、健康监测方法已经发展成为无损检测和结构健康监测领域的主要方法之一。导波的激励方式多种多样,但在在线运行的结构健康监测系统中,通常使用 PZT 进行激励,通过导波对损伤的透射或回波实现结构健康监测或损伤识别。

对复合材料结构而言,材料的各向异性导致了导波传播速度的各向异性,加之受到多模式和频散等因素的影响,实现有效的导波复合材料健康监测与损伤识别并非易事。针对导波的多模式特性,Ratassepp 等<sup>[63]</sup>根据复合材料物理参数,通过数值仿真确定各模态导波的幅值衰减,将信号映射到波数-频率域中,利用理论频散曲线将导波模态进行分离,重构回时域即得到单模态信号。实验证明,该方法可以有效分离出  $A_0$  及  $S_0$  模态导波,但目前只能针对单一纤维方向复合材料,只能分离沿纤维方向或垂直纤维方向的导波。常规的频散补偿方法需要频散曲线先验,而复杂结构的频散曲线往往难以事先精确获得,这限制了其适用范围。时间反转方法<sup>[64]</sup>是一种自适应的频散补偿方法,其无需频散曲线先验,被应用在包括飞机蒙皮在内的多种复合材料结构的损伤检测中。该方法通过在接收元件处将导波接收信号进行时间反转后并在该点激励,在原激励点处再接收信号,得到波包与原激励信号相近的响应信号。袁慎芳课题组根据该原理提出了虚拟时间反转方法<sup>[65]</sup>,研究了如复合材料脱粘<sup>[66]</sup>、分层<sup>[67]</sup>等损伤形式的识别,取得了良好效果。除频散补偿和时间反转等方法外,波数域方法也是一类重要的新型导波监测方法。Kudela 等<sup>[68-69]</sup>依据傅里叶变换,提出了自适应波数滤波的概念,利用激光测振仪提供的全波场信息,通过三维傅里叶变换得到波数域-频率域关系,并依此进行滤波,实现精确的波数变换和反演,从而实现损伤定位。苏众庆课题组在导波损伤监测方面也做出了大量工作<sup>[70-72]</sup>,目前主要围绕非线性导波传播问题展开研究<sup>[73]</sup>。非线性导波问题是一个长期受到学界认识但又难以解决的导波监测难题。早期文献<sup>[74-76]</sup>研究发现,当损伤结构受到低频激励与高频激励共同作用时,导波信号会发生低频调制现象,但却难以将这一现象有效地应用到导波的损

伤定位当中。新的信号处理方法和监测技术发展推动了导波结构健康监测技术的发展。Li 等<sup>[77-80]</sup>提出将传统的导波传感器 PZT 与光纤传感方式进行结合,开发出适用于监测高频导波信号的光纤及信号处理方法。

导波方法内涵广泛,各方法间原理存在较大差异,很难总结其缺点与优势。总体来说:a. 导波的传播机理复杂,特别是异型复合材料频散关系的描述远未达到准确的地步;b. 导波损伤呈像方法多样,鲁棒性均有所不足,如何解决损伤检测准确性与鲁棒性间的矛盾是未来导波监测方法须面对的问题。

2.6 光纤传感

由于光纤光栅传感器具备重量轻、抗电磁干扰强、耐腐蚀和易于埋入结构中等优点,因此自 1978 年被 Hill 等<sup>[81]</sup>利用驻波干涉法制造出来就获得较快发展,成为结构应变和温度测量最具发展前景的传感器之一。其原理为:当结构上待测点位置的应变发生变化时,此位置上粘贴的光纤光栅的光栅栅距会发生变化,造成光纤光栅中输入光源反射波长的改变。由于具备上述众多优点,光纤光栅传感器得到了大量的工程应用,再加上其体积小、复合材料兼容性较好的特性,光纤光栅传感器成为复合材料结构损伤识别和健康监测的首选,尤其对于风机叶片和大飞机等对传感器尺寸要求比较高而且对重量比较敏感的场所,光纤光栅传感器更是表现出了很强的生命力。在复合材料的损伤监测方面,除了用于导波监测的光纤外,Frieden 等<sup>[82]</sup>提出使用埋入复合材料结构中的 FBG 测量其在承受冲击载荷时的动态应变,依据应变变化实现损伤定位。Schizas 等<sup>[83]</sup>基于 FBG 复用技术,建立了低成本的监测系统,有效监测了复合材料结构中的脱粘和分层失效。文献<sup>[84]</sup>通过 FBG 有效测量了夹芯复合材料表面与芯部界面的脱粘损伤,通过有限元技术验证了 FBG 可以有效监测复合材料中由于脱粘损伤引起的应变分布。Choi 等<sup>[85]</sup>通过应变片与 FBG 在测量风机叶片应变分布时的结果比较得出,FBG 能以较高的精度测量风机叶片运行时的应变分布,并对一台 100 kW 风机的风机叶片运行时的应变分布进行监测,防止其与风机塔身相撞造成事故。Takeda 等<sup>[86]</sup>研究了布置在飞机机翼上的光纤光栅传感网络在冲击环境下的疲劳耐久性实验,证明了在恶劣

环境下光纤光栅传感网络可以被用来长期监测结构的应变变化。Tian 等<sup>[87]</sup>采用信息融合处理测得风机叶片应变分布信息,实现风机叶片中分层损伤的识别。

虽然现阶段光纤光栅传感器在复合材料结构的损伤识别和健康监测领域获得了广泛使用,但是距离真正大规模工程应用仍有一段距离。现阶段光纤光栅传感器工程应用的主要阻碍是其相对高昂的价格,虽然光纤本身的价格不高,但是光栅写入光纤的技术费用和相应的信号解调装置代价高昂。未来随着相关技术的发展,必然导致上述两类技术价格的大幅下降,届时光纤光栅传感器会在工程中的应变测量领域大放异彩。

### 3 展 望

在力学建模方面,目前模型主要分为多尺度模型和有限元模型两类。多尺度模型虽然可以准确预测复合材料的微细观力学性能,但对宏观力学性能的预测往往显得不够准确,这主要是由于细观结构的边界条件设置及跨尺度问题导致的。如何有效地模拟弱界面、热残余应力等因素对细观力学行为的影响,直接决定其对应的宏观预测精度。使用有限元模型虽然可以建立准确的复合材料三维结构,然而受实际结构模型、材料参数等不确定性因素的影响,建立的有限元模型精度往往有限,且目前研究主要为纤维编织、纤维增强等复合材料损伤形式建模,对孔隙率等复合材料制造中广泛存在的初始缺陷缺乏有效的建模手段。

在损伤识别方法方面,传统的模态损伤识别方法实施简单,但对于结构的早期损伤敏感性较差,因此使用高频导波开展复合材料结构健康监测是未来的主流方向。然而,导波在复合材料中的传播具有各向异性、多模式混叠且幅值衰减强烈,难以实现大型结构的有效监测。如何有效克服这些问题,是复合材料导波损伤识别和健康监测要面对的首要问题。其次,复合材料的早期损伤往往表现为导波响应的非线性问题,如幅值调制等,但是现有技术仅仅能够依据幅值调制现象做出定性的损伤判断,难以实现损伤的定位和定量。因此,非线性导波技术也是未来的发展方向之一。此外,均匀性的缺陷问题,如孔隙率检测也是导波方法目前难以实现的。因为这些均匀性的缺陷本身并不能造成明显的导波回波

或能量损失,也难以产生明显的非线性特征,因此如何针对此类问题提出有效的导波监测方法或指标也是未来的主要研究方向之一。

值得注意的是,虽然复合材料的各类结构健康监测技术在各类期刊上层出不穷,然而在实际使用过程中却很难找到一种能够兼顾损伤敏感性和鲁棒性的在线监测系统产品,其原因是多样的。因此,实用的在线监测系统研究开发是未来的主要研究方向。

### 参 考 文 献

- [1] 卡恰诺夫 L M, 杜善义, 王殿富. 连续介质损伤力学引论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1989: 1-12.
- [2] Bouchart V, Brieu M, Bhatnagar N, et al. A multi-scale approach of nonlinear composites under finite deformation: experimental characterization and numerical modeling[J]. International Journal of Solids and Structures, 2010, 47(13): 1737-1750.
- [3] Yang B J, Shin H, Lee H K, et al. A combined molecular dynamics/micromechanics/finite element approach for multiscale constitutive modeling of nanocomposites with interface effects[J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(24): 369.
- [4] Buchanan D L, Gosse J H, Wollschlager J A, et al. Micromechanical enhancement of the macroscopic strain state for advanced composite materials[J]. Composites Science and Technology, 2009, 69(11-12): 1974-1978.
- [5] 庞宝君, 曾涛, 杜善义. 三维多向编织复合材料有效弹性模量的细观计算力学分析[J]. 计算力学学报, 2001, 18(2): 231-234.  
Pang Baojun, Zeng Tao, Du Shanyi. Meso-scope computing mechanics analysis of three-dimensional multi-directional braided composites[J]. Journal of Computational Mechanics, 2001, 18(2): 231-234. (in Chinese)
- [6] 梁军, 陈晓峰, 庞宝君, 等. 多向编织复合材料的力学性能研究[J]. 力学进展, 1999, 29(2): 197-210.  
Liang Jun, Chen Xiaofeng, Pang Baojun, et al. Study of mechanical properties of multi-directional braided composites[J]. Advances in Mechanics, 1999, 29(2): 197-210. (in Chinese)
- [7] 梁军, 杜善义, 韩杰才, 等. 含夹杂和微裂纹复合材料的损伤演化和分析[J]. 固体力学学报, 1996, 17(4): 296-302.

- Liang Jun, Du Shanyi, Han Jiecai, et al. Damage evolution and analysis of composites with inclusions and matrix microcracks[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 1996,17(4):296-302. (in Chinese)
- [8] 冷劲松,杜善义,王殿富,等. 复合材料结构敲击法无损检测的灵敏度研究[J]. *复合材料学报*, 1995,12(4):99-105.
- Leng Jinsong, Du Shanyi, Wang Dianfu, et al. Sensitivity of the coin-tap method of nondestructive testing for composite structures[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 1995,12(4):99-105. (in Chinese)
- [9] Cawley P, Adams R D. The location of defects in structures from measurements of natural frequencies [J]. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 1979,14(2):49-57.
- [10] Pardoen G C. Effect of delamination on the natural frequencies of composite laminates [J]. *Journal of Composite Materials*, 1989,23(12):1200-1215.
- [11] Paolozzi A, Peroni I. Detection of debonding damage in a composite plate through natural frequency variations[J]. *Journal of Reinforced Plastics & Composites*, 1990, 9(4): 369-389.
- [12] Wang Zhiqiang, Xu Yuxiu, Mei Yuanying. Damage diagnosis for wind turbine blades based on the shifting distance of characteristic frequency[C]// *International Congress on Image & Signal Processing*. Tianjin: IEEE, 2009:1-3.
- [13] Vestroni F, Capocchi D. Damage detection in beam structures based on frequency measurements[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2000,126(7):761-768.
- [14] Lele S P, Maiti S K. Modelling of transverse vibration of short beams for crack detection and measurement of crack extension[J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2002,257(3):559-583.
- [15] Nandwana B P, Maiti S K. Detection of the location and size of a crack in stepped cantilever beams based on measurements of natural frequencies[J]. *Journal of Sound & Vibration*, 1997,203(3):435-446.
- [16] Zuo Hao, Yang Zhibo, Sun Yu, et al. Wave propagation of laminated composite plates via GPU-based wavelet finite element method[J]. *Science in China: Series E*, 2017,6:1-12.
- [17] Sanders D R, Kim Y I, Stubbs N. Nondestructive evaluation of damage in composite structures using modal parameters[J]. *Experimental Mechanics*, 1992,32(3):240-251.
- [18] Balis C L, Mastroddi F. Frequency-domain based approaches for damage detection and localization in aeronautical structures[C]// *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. Amsterdam: SPIE Press, 1995:2460.
- [19] Allemang R J, Brown D L. A correlation coefficient for modal vector analysis[C]// *Proceedings of the 1st International Modal Analysis Conference*. Orlando: Union College Press, 1982:110-116.
- [20] 曹茂森. 基于动力指纹小波分析的结构损伤特征提取与辨识基本问题研究[D]. 南京:河海大学, 2005.
- [21] Qiao P Z, Lu K, Lestari W. A combined static/dynamic technique for damage detection of laminated composite plates[J]. *Experimental Mechanics*, 2008, 48(1):17-35.
- [22] Katunin A, Index L F, Curvature M S, et al. Nondestructive damage assessment of composite structures based on wavelet analysis of modal curvatures: state-of-the-art review and description of wavelet-based damage assessment benchmark[J]. *Shock and Vibration*, 2015,501:735219.
- [23] Yang Zhibo, Radzienski M, Kudela P, et al. Fourier spectral-based modal curvature analysis and its application to damage detection in beams[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 84: 763-781.
- [24] Yang Zhibo, Radzienski M, Kudela P, et al. Two-dimensional modal curvature estimation via Fourier spectral method for damage detection [J]. *Composite Structures*, 2016, 148: 155-167.
- [25] Yang Zhibo, Radzienski M, Kudela P, et al. Scale-wavenumber domain filtering method for curvature modal damage detection[J]. *Composite Structures*, 2016,154:396-409.
- [26] Cao Maosen, Xu Wei, Ren Weixin, et al. A concept of complex-wavelet modal curvature for detecting multiple cracks in beams under noisy conditions[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016,76:555-575.
- [27] Katunin A. Diagnostics of composite structures using wavelets[M]. Gliwice, Poland: Radom, 2015:121-125.
- [28] Katunin A. Vibration-based spatial damage identification in honeycomb-core sandwich composite structures using wavelet analysis [J]. *Composite Structures*, 2014,118:385-391.
- [29] Katunin A. Damage identification in composite plates using two-dimensional B-spline wavelets[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011,25(8):3153-

- 3167.
- [30] Katunin A. The construction of high-order B-spline wavelets and their decomposition relations for faults detection and localization in composite beams[J]. Scientific Problems of Machines Operation and Maintenance, 2011, 46(3): 43-59.
- [31] Xiang Jiawei, Liang Ming. A two-step approach to multi-damage detection for plate structures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2012, 91: 73-86.
- [32] Xiang Jiawei, Liang Ming. Wavelet-based detection of beam cracks using modal shape and frequency measurements[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2012, 27(6): 439-454.
- [33] Hu Huiwen, Wu Chengbo, Lu Weijun. Damage detection of circular hollow cylinder using modal strain energy and scanning damage index methods[J]. Computers & Structures, 2011, 89(1): 149-160.
- [34] Ratcliffe C P. A frequency and curvature based experimental method for locating damage in structures[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2000, 122(3): 324-329.
- [35] Yang Zhibo, Chen Xuefeng, Xie Yong. Hybrid two - step method of damage detection for plate - like structures[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2016, 23(2): 267-285.
- [36] Yang Zhibo, Chen Xuefeng, Jiang Yongying, et al. Generalised local entropy analysis for crack detection in beam-like structures[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2014, 29(2): 133-153.
- [37] Yang Zhibo, Chen Xuefeng, Xie Yong, et al. The hybrid multivariate analysis method for damage detection [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2016, 23(1): 123-143.
- [38] Lee U, Shin J. A frequency response function-based structural damage identification method[J]. Computers & Structures, 2002, 80(2): 117-132.
- [39] Kessler S S, Spearing S M, Atalla M J, et al. Damage detection in composite materials using frequency response methods[J]. Composites Part B Engineering, 2002, 33(1): 87-95.
- [40] Sampaio R P C, Maia N M M, Silva J M M. Damage detection using the frequency-response-function curvature method[J]. Journal of Sound & Vibration, 1999, 226(226): 1029-1042.
- [41] Kim H Y. Vibration-based damage identification using reconstructed frfs in composite structures[J]. Journal of Sound & Vibration, 2003, 259(5): 1131-1146.
- [42] Peng Z K, Lang Z Q, Billings S A. Crack detection using nonlinear output frequency response functions[J]. Journal of Sound & Vibration, 2007, 301(3-5): 777-788.
- [43] Chatterjee A. Structural damage assessment in a cantilever beam with a breathing crack using higher order frequency response functions[J]. Journal of Sound & Vibration, 2010, 329(16): 3325-3334.
- [44] Bandara R P, Chan T H T, Thambiratnam D P. Structural damage detection method using frequency response functions[J]. Structural Health Monitoring, 2014, 13(4): 418-429.
- [45] Li Jun, Hao Hong. Damage detection of shear connectors based on power spectral density transmissibility [J]. Key Engineering Materials, 2013, 569-570: 1241-1248.
- [46] Liang C, Sun F, Rogers C. An impedance method for dynamic analysis of active material systems[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1994, 116(1): 120-128.
- [47] Liang C, Sun F, Rogers C. Coupled electro-mechanical analysis of adaptive material systems-determination of the actuator power consumption and system energy transfer[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1994, 5(1): 12-20.
- [48] Chaudhry Z A, Joseph T, Sun F P, et al. Local-area health monitoring of aircraft via piezoelectric actuator/sensor patches [J]. Smart Structures & Materials, 1996, 2443: 268-276.
- [49] Xu J, Yang Y, Soh C K. Electromechanical impedance-based structural health monitoring with evolutionary programming[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2004, 17(4): 182-193.
- [50] Lopes V, Park G, Cudney H H, et al. Impedance-based structural health monitoring with artificial neural networks[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2000, 11(3): 206-214.
- [51] Min J, Park S, Yun C B, et al. Impedance-based structural health monitoring incorporating neural network technique for identification of damage type and severity[J]. Engineering Structures, 2012, 39: 210-220.
- [52] 危玉蓉. 基于神经网络的 EMI 结构健康监测及损伤检测研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [53] 张玉祥, 张鑫, 陈家照, 等. 基于压电阻抗法的结构损伤检测技术进展[J]. 无损检测, 2016, 38(1): 69-74.
- Zhang Yuxiang, Zhang Xin, Chen Jiazhao, et al. De-



- velopment on detecting technique of structure damage based on EMI[J]. *Nondestructive Testing*, 2016, 38(1):69-74. (in Chinese)
- [54] Na S, Lee H. Resonant frequency range utilized electro-mechanical impedance method for damage detection performance enhancement on composite structures[J]. *Composite Structures*, 2012, 94(8): 2383-2389.
- [55] Schwankl M, Khodaei Z S, Aliabadi M H, et al. Electro-mechanical impedance technique for structural health monitoring of composite panels[J]. *Key Engineering Materials*, 2013, 526:569-572.
- [56] Lim S I, Soh C K. Comparative study of electromechanical impedance and Lamb wave techniques for fatigue crack detection and monitoring in metallic structures[J]. *International Society for Optics and Photonics*, 2012, 8345(2): 304-320.
- [57] An Y K, Sohn H. Integrated impedance and guided wave based damage detection[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, 28(2): 50-62.
- [58] 刘增华, 曹瑾瑾, 张龙, 等. 基于机电阻抗与超声导波技术的复合材料梁损伤定位[J]. *北京工业大学学报*, 2015, 41(11): 1749-1755.
- Liu Zenghua, Cao Jinjin, Zhang Long, et al. Damage location of composite beam based on electromechanical impedance and ultrasonic guided waves technologies [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2015, 41(11): 1749-1755. (in Chinese)
- [59] Malinowski P H, Wandowski T, Ostachowicz W M. Characterisation of CFRP adhesive bonds by electro-mechanical impedance[C] // *Processings SPIE 9064, Health Monitoring of Structural and Biological Systems*. San Diego: SPIE, 2014: 906415-906417.
- [60] Malinowski P H, Wandowski T, Ostachowicz W M. The use of electromechanical impedance conductance signatures for detection of weak adhesive bonds of carbon fibre-reinforced polymer[J]. *Structural Health Monitoring*, 2015, 14(4): 332-344.
- [61] 杨景文. 温度与拉力对 EMI 损伤检测技术的影响及补偿方法[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [62] Wandowski T, Malinowski P H, Ostachowicz W M. Temperature and damage influence on electromechanical impedance method used for carbon fibre-reinforced polymer panels[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2016, 28(6): 782-798.
- [63] Ratsaspepp M, Lowe M J, Cawley P, et al. Scattering of the fundamental shear horizontal mode in a plate when incident at a through crack aligned in the propagation direction of the mode[J]. *Journal of Yanbian University*, 2008, 124(5):2873.
- [64] Qiu Lei, Yuan Shenfang, Zhang Xiaoyue, et al. A time reversal focusing based impact imaging method and its evaluation on complex composite structures[J]. *Smart Materials & Structures*, 2011, 20(10):105014.
- [65] Cai Jian, Shi Lihua, Yuan Shenfang, et al. High spatial resolution imaging for structural health monitoring based on virtual time reversal[J]. *Smart Materials & Structures*, 2011, 20(5):55018-55028.
- [66] 王强, 袁慎芳, 邱磊. 基于时间反转理论的复合材料螺钉连接失效监测研究[J]. *宇航学报*, 2007, 6: 1719-1723.
- Wang Qiang, Yuan Shenfang, Qiu Lei. Study on bolt debonding monitoring of composite joint based on time reversal method[J]. *Journal of Astronautics*, 2007, 6:1719-1723. (in Chinese)
- [67] Wang Qiang, Yuan Shenfang. Time reversal imaging method for composite delamination monitoring [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2009, 26(3): 99-104.
- [68] Kudela P, Radziński M, Ostachowicz W. Identification of cracks in thin-walled structures by means of wavenumber filtering [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, 50: 456-466.
- [69] Kudela P, Radziński M, Ostachowicz W. Damage visualization enhancement by the wave field filtering and processing[J]. *Proceeding SPIE*, 2012, 8347(3):38.
- [70] Su Zhongqing, Ye Lin. Identification of damage using lamb waves[M]. Berlin: Springer, 2009:35-36.
- [71] Su Zhongqing, Cheng Li, Wang Xiaoming, et al. Predicting delamination of composite laminates using an imaging approach[J]. *Smart Materials & Structures*, 2009, 18(7):074002.
- [72] Su Zhongqing, Ye Lin, Lu Ye. Guided lamb waves for identification of damage in composite structures; a review[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 295(3): 753-780.
- [73] Hong Ming, Su Zhongqing, Lu Ye, et al. Locating fatigue damage using temporal signal features of nonlinear lamb waves [J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2015, 60:182-197.
- [74] Paćko P, Bielak T, Spencer A B, et al. Lamb wave propagation modelling and simulation using parallel processing architecture and graphical cards[J]. *Smart Materials & Structures*, 2012, 21(21):75001-75013.
- [75] Staszewski W J, Lee B C, Traynor R. Structural dam-

- age detection using lamb waves and 3-D laser vibrometry[C]// Structural Health Monitoring. Cracow, Poland: [s. n.], 2008;758-765.
- [76] Lee B C, Staszewski W J. Modelling of acousto-ultrasonic wave interaction with defects in metallic structures[C]// International Conference on Noise and Vibration Engineering. Leuven, Belgium: [s. n.], 2002 (1-5): 319-327.
- [77] Li Fucui, Murayama H, Kageyama K, et al. A fiber optic doppler sensor and its application in debonding detection for composite structures[J]. Sensors, 2010, 10(6): 5975-5993.
- [78] Li Fucui, Murayama H, Kageyama K, et al. Doppler effect-based fiber-optic sensor and its application in ultrasonic detection [J]. Optical Fiber Technology, 2009, 15(3): 296-303.
- [79] Li Fucui, Murayama H, Kageyama K, et al. Guided wave and damage detection in composite laminates using different fiber optic sensors[J]. Sensors, 2009, 9 (5):4005.
- [80] Li Fucui, Kageyama K, Murayama H, et al. Delamination detection in CFRP laminates using FOD sensor [J]. Proceeding SPIE, 2009, 7493:1-8.
- [81] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication[J]. Applied Physics Letters, 1978, 32(10): 647-649.
- [82] Frieden J, Cugnoni J, Botsis J, et al. Vibration-based characterization of impact induced delamination in composite plates using embedded FBG sensors and numerical modelling[J]. Composites Part B Engineering, 2011, 42(4):607-613.
- [83] Schizas C, Stutz S, Botsis J, et al. Monitoring of non-homogeneous strains in composites with embedded wavelength multiplexed fiber Bragg gratings: a methodological study[J]. Composite Structures, 2012, 94 (3):987-994.
- [84] Farmand-Ashtiani E, Cugnoni J, Botsis J. Monitoring and characterization of the interfacial fracture in sandwich composites with embedded multiplexed optical sensors[J]. Composite Structures, 2013,96:476-483.
- [85] Choi K S, Huh Y H, Kwon I B, et al. A tip deflection calculation method for a wind turbine blade using temperature compensated FBG sensors[J]. Smart Materials & Structures, 2012, 21(2):025008.
- [86] Takeda S, Aoki Y, Ishikawa T, et al. Structural health monitoring of composite wing structure during durability test [J]. Composite Structures, 2007, 79 (1):133-139.
- [87] Tian Shaohua, Yang Zhibo, Chen Xuefeng, et al. Damage detection based on static strain responses using FBG in a wind turbine blade[J]. Sensors, 2015, 15(8): 19992-20005.



**第一作者简介:**陈雪峰,男,1975年5月生,博士、教授、博士生导师。曾荣获2008年教育部技术发明一等奖,2009年国家技术发明二等奖(第二完成人),2012年霍英东青年教师一等奖,2015年教育部技术发明一等奖。入选教育部2008年新世纪人才计划,2012年获国家杰出青年科学基金资助。主要研究方向为复合材料损伤检测、结构健康监测、大型机械设备运行安全保障与健康监测及机械设备故障诊断等。曾发表《小波有限元理论及其工程应用》(北京:科学出版社,2006)等论著。

E-mail: chenxf@mail. xjtu. edu. cn

