

先进感知与智能损伤评估的机遇与挑战

何清波^{1,3}, 彭志科^{2,3}

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200030; 2. 宁夏大学 银川 750021;

3. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室 上海 200240)

结构损伤评估 (structural damage assessment, SDA) 是利用现场传感系统和相关分析技术来监测结构的行为和性能, 以识别和评估结构完整性、安全性和耐久性的技术, 其主要包括“传感”、“数据”和“决策”等关键问题。当前, 随着智能材料与结构、微/纳米机电系统、人工智能、大数据、边缘计算、物联网等技术的飞速发展, 结构损伤评估技术也步入了一个全新的发展阶段, 面临了前所未有的发展机遇与挑战。发展先进感知与智能损伤评估技术对航空航天装备、海洋工程装备、交通运输装备、土木建筑工程等领域工程结构完整性与系统安全性保障具有重要意义。

传感是数据之源, 先进感知理论与技术是结构损伤评估的重要基础。根据感知数据的物理量, 结构的感知信息主要包括振动、声音、超声、油液、光纤、电流、漏磁等, 目前的主要发展是利用数据分析方法提高感知信息的质量。随着智能材料与结构的发展, 新的能量转换感知技术不断涌现, 比如摩擦电、电磁能等, 这也进一步促进了自供能感知方式, 同时符合我国的“双碳”战略目标。

多种传感数据或其信息的融合理论与技术, 是结构损伤评估技术发展的必由之路。每种感知信息都具有特定的优势和缺点, 数据融合可以实现优势互补, 呈现出更完整的结构状态信息, 这会给结构状态评估提供更佳的支持。除了多传感器信号融合, 新的发展趋势还包括物理模型与试验数据融合的新技术。数字孪生是数据融合的新高度, 有望将物理模型与多传感器数据进行更好的集成融合。

基于感知数据的智能损伤评估系统, 是结构损伤评估的信息决策中枢。在目前所处的大数据时代, 随着智能机器学习理论与技术的发展, 新的智能损伤评估方法也是层出不穷, 使得结构损伤评估越来越智能、效果越来越

越好。新的深度学习、强化学习、迁移学习方法的浸入与发展, 使得变工况、跨工况、不平衡样本等挑战性问题逐渐有了被解决的可能。

本期专题就先进感知与智能损伤评估主题, 收录了 13 篇优秀学术论文, 包括 1 篇综述性论文和 12 篇研究性论文, 主要涵盖了先进感知理论与技术、数据融合理论与技术、智能损伤评估技术等 3 个方面, 以帮助广大科技工作者快速地了解结构损伤评估技术的发展动态和现状。

本专题在先进感知理论与技术方面收录了 5 篇论文。其中 1 篇综述性论文, 综述了交通环境能量机电转换机制、能量采集方法及交通设施健康状态监测中的应用, 探讨了自供能交通设施健康状态监测面临的挑战并进行了展望, 对于发展自供能感知技术的研究和发展具有重要参考意义。2 篇关于超声检测的研究性论文, 提出了基于超声导波的数据传输与缺陷检测同步实现方法, 实现了超声系统的多功能复用; 发展了一种频域波束形成与符号相干因子加权结合的算法, 形成一种适用于双层介质无损检测的高质量、低复杂度的超声相控阵成像技术。1 篇关于声学检测的研究性论文, 提出了基于多普勒调制时移 Laplace 小波的声信号瞬态成分快速提取方法, 在列车轴承故障旁诊断中具有实用价值。还有 1 篇论文提出了基于变分贝叶斯平行因子分解的传感器缺失信号的恢复方法, 解决了工程信号处理中因传感器失效而引起的信号缺失的问题。

本专题在数据融合理论与技术方面收录了 3 篇论文, 分别针对多传感器信号特征融合、物理模型与数据驱动融合、多尺度信息融合等开展了研究。提出了变转速工况下基于多传感器信号深度特征融合的电机故障诊断方法, 利用同步采集电机的多通道振动、声音和漏磁信号, 开发了能够部署在物联网边缘计算节点上的硬件系

统,实现了高精度的 10 类状态识别。在物理模型与数据驱动融合方面,针对燃油泵快速退化阶段建立失效物理与数据驱动融合的退化模型,然后基于无迹卡尔曼滤波器利用试验数据对建立的退化模型不断进行模型参数更新,并使用更新后的模型对失效寿命进行了预测。在多层次信息融合方面,提出了一种基于变步长多尺度 LempeLziv 复杂度融合的旋转设备损伤程度评估指标,用以全面挖掘振动信号的特征,实现了对旋转设备的定量损伤评估。

本专题在智能损伤评估技术方面收录了 5 篇论文。其中 1 篇关于油液溶解气体分析的研究性论文,基于溶解气体成分特征的 9 维故障数据,提出了一种多策略改进麻雀算法与双向长短时记忆网络的变压器故障诊断模型,提高了变压器的故障诊断性能。1 篇关于管道泄露孔径识别的研究性论文中,提出了一种优化卷积改进稠密块的轻量化神经网络模型,改善了实时响应能力。其他 3 篇关于旋转部件损伤诊断的研究性论文,提出了基于深度宽卷积 Q 网络的行星齿轮箱故障智能诊断方法,在多个工况下均实现高精度的诊断;提出了基于对称式对比学习策略的齿轮箱无监督故障诊断方法,解决了跨工况下无监督故障诊断特征提取难、模型泛化性弱的问题;提出了一种变工况下轴承故障特征迁移学习方法,解决了工况变化带来的故障特征的畸变问题。

本期专题的 13 篇论文,均是面向先进感知与智能损伤评估领域的实际需求问题,选题广泛、思想活跃、新颖性强,涵盖了先进感知、数据融合、智能评估等代表性前沿研究方向,反映了当前该领域的基本发展现状。本专题的文章是从大量来稿中通过严格的同行评议和筛选获得,具有较高学术水平和实际应用价值。但由于先进感知与智能损伤评估涉及的面很广,本专题的 13 篇论文只

能从一个侧面反映了我国该领域的发展现状和动态趋势。希望本期专题的出版能够增强结构损伤评估领域同行间的技术交流,在未来智能感知、数字孪生、人工智能等前沿方向能够产出更多的优秀成果,推动先进感知与智能损伤评估研究的更大发展。



何清波,上海交通大学机械与动力工程学院教授、博士生导师,机械系统与振动国家重点实验室固定成员,国家万人计划青年拔尖人才。从事机械装备动态监测、故障诊断与智能运维等领域研究,

发表 Nature Communications 等国际期刊 SCI 论文 100 余篇,入选 2020~2021 爱思唯尔“中国高被引学者”榜单,获教育部新世纪优秀人才支持计划、安徽省自然科学二等奖(排名 1),担任《集成技术》编委、《振动工程学报》和《动力学与控制学报》青年编委、IEEE 仪器与测量学会南京/上海/武汉联合分会主席、中国振动工程学会动态测试专业委员会常务委员、全国高校机械工程测试技术研究会在线检测技术分会副理事长等。



彭志科,宁夏大学校长,上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室副主任,国家杰青,长江学者特聘教授,国际声学与振动学会(IIAV)杰出会士,2014~

2021 年连续入选爱思唯尔“中国高被引学者榜单”,获上海青年科技英才提名奖、教育部新世纪优秀人才支持计划、上海市浦江人才支持计划、教育部自然科学一等奖、福建省科学技术进步一等奖、教育部科学技术进步二等奖、中国振动工程学会青年科技奖、英国无损检测学会 2019 年度 CM Innovation Award,担任上海力学学会动力学与控制专业委员会主任委员、中国振动工程学会非线性振动专业委员会副主任委员、中国振动工程学会设备故障诊断专业委员会副主任委员等。