

高速载运设施的无损检测技术应用和发展趋势

王平^{1,2}, 盛宏威¹, 冀凯伦¹, 杨元¹, 李开宇^{1,2}, 姚恩涛^{1,2}, 贾银亮^{1,2}, 石玉^{1,2}

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京, 211106; 2. 工业和信息化部“高速载运设施的无损检测和监控技术”重点实验室, 南京, 211106)

摘要: 高速载运设施事关国家命脉, 在其生产、布设、使用和维护各个环节, 都需无损检测技术保驾护航。本文就高速载运设施无损检测的必要性, 检测现状、检测技术的发展趋势(包括基于多物理原理的新型无损检测技术, 材料应力、微观结构、机械性能等状态检测, 以及无损检测和结构健康监控及人工智能的结合)进行综述, 旨在为高速载运设施的无损检测打下基础。

关键词: 高速载运设置; 无损检测; 状态检测

中图分类号: TH878 **文献标志码:** A

Application and Development Trend of Non-destructive Testing Technology for High-Speed Transportation Facilities

WANG Ping^{1,2}, SHENG Hongwei¹, JI Kailun¹, YANG Yuan¹, LI Kaiyu^{1,2}, YAO Entao^{1,2}, JIA Yinliang^{1,2}, SHI Yu^{1,2}

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 211106, China; 2. Key Laboratory of Non-destructive Testing and Monitoring Technology of High-Speed Transportation Facilities of the Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing, 211106, China)

Abstract: Given the critical role of high-speed transportation facilities, non-destructive testing technology is required in all aspects of their production, deployment, use and maintenance. We discuss the necessity of non-destructive testing of high-speed transportation facilities, the status of testing, the development trend of testing technology, including new detection technology based on multi-physics principle, material stress, microstructure, mechanical properties and other status testing, as well as non-destructive testing and structural health that integrate artificial intelligence. Our research will lay the foundation for non-destructive testing of high-speed transportation facilities.

Key words: high-speed transport settings; non-destructive testing; status testing

引 言

高速载运设施指空天飞行器、高速列车等高速载运工具及其相关设备和基础设施。高速载运设施是实现高速交通的关键性设施, 影响着国家的经济发展形态, 也是国家安全的重大战略点, 对国家的经

济发展、社会稳定起到至关重要的作用^[1]。在高速载运设施的生产、布设、使用和维护的各个环节,都离不开无损检测技术的保驾护航。

无损检测技术是在不损伤被检测对象的条件下,利用材料内部结构变化或缺陷所引起的对热、声、光、电、磁等反应的变化,来探测各种工程材料、零部件、结构件等内部状态和缺陷,并对状态和缺陷类型、性质、数量、形状、位置、尺寸、分布及其变化作出在线判断和评价,最终对被测对象的设计、加工质量控制、故障预防和诊断维护起指导性作用^[2]。无损检测及状态监控技术的应用对象包括大型飞机和新型飞机重点产品或部件的材料结构、先进制造的加工质量控制和产品寿命评估、大型基础建设结构、高速铁路线路和车辆结构的生命周期维护等,是国家重点发展的刚性需求。

由于高速载运设施往往具有工作环境恶劣、对安全性要求高、自身结构复杂,距离长、人工检测难度大、探伤时间受限制等特点,需要使用智能化、高效率、高精度的无损检测技术^[3]。到2025年,我国将基本建立交通运输及智能制造的支撑体系,重点产业将初步实现智能转型^[4],目前急需突破先进感知与测量等瓶颈问题^[5]。与制造质量控制、产品状态寿命和故障相关的无损检测技术显得尤为重要。

本文就高速载运设施无损检测的必要性、检测现状、检测技术的发展趋势等进行综述。

1 高速载运设施无损检测的必要性

1.1 全生命周期的检测需求

无损检测技术的应用普及率是一个国家工业自动化水平的重要标志之一。特别在制造领域,无损检测技术的应用使得制造业的产品检测由随机抽样产品的离线检测升级为遍历所有产品的在线检测,是质量控制的关键技术,也是高端装备、智能制造产业的关键支撑技术以及构建工业物联网和工业大数据的关键核心技术^[6]。对于装备制造业,无损检测技术的应用普及将为整个产业带来10%~20%的附加值提升(《中国无损检测技术发展路线图(2016—2025)》)。其技术应用的时机涵盖材料或设施的全生命周期,比如高速铁路及航空航天设施的原材料、部件和设施在设计环节的质检考虑、生产时的无损检测、制造过程中的无损检测、使用过程(在役)中的无损检测,如图1所示。例如:

(1)各种材料(金属、非金属、复合材料等)的无损检测,如特种钢材、航空材料的设计、制造工艺检测,应用于各类材料生产厂家,提供设计、质量控制和工艺在线反馈。

(2)各种结构或工件(激光增材制造部件,焊接件、锻件、铸件、管道、齿轮、列车及汽车车体及部件等)的无损检测,应用于各类机械加工生产制造厂家的设计、加工质量控制、工艺在线反馈和故障预防、在役维护指导^[7]。

(3)各类设施(飞机等航空航天装备、轨道等钢结构工程、道路建设等)的无损检测,应用于各类设施承建、使用和检验单位的设计、质量在线控制和在役的故障预防、维护指导。



图1 无损检测技术在材料制造行业的应用

Fig.1 Application of non-destructive testing technology in material manufacturing industry

1.2 典型的行业应用

在高速运载设施领域,无损检测及状态监控技术典型的行业应用包括:

(1)材料、机械加工、增材制造行业。在铁路、航空航天等制造行业中,在传统机械加工产业升级,以及激光增材制造、激光强化等新型加工手段中,对加工对象的控形控性非常重要。除了尺寸精度达到要求之外,加工对象(如高速齿轮、航空发动机)的机械性能,包括屈服强度、疲劳性能的要求非常关键,必须采取先进的无损检测技术手段加以在线测量。

(2)关键设备的制造、维护使用。动车组车辆轮对、轴承等走行部、航空发动机等关键部件的事故可能造成难以估量的灾难性损失。对于关键的设计要求、生产质量控制、使用损伤及状态的检验是国家强制性要求。全国相关检测仪器、耗材及服务市场整体容量很大。

(3)轨道等基础设施的产品制造、使用维护。对钢轨的生产质量控制和使用安全保障是目前铁路设施的普遍重大需求^[8]。我国钢轨延展里程超过24万千米;2015年发现重伤4.6万处,断轨110处;这些工作目前主要靠人工检测完成。非常需要能够解决高铁钢轨检测的核心技术,包括:顶面、内部多缺陷、薄弱部位(道岔/焊接位置)的检测;伤损的定量、自动识别;缺陷的生成和扩展全过程监控,联合分析和预警预报;能够满足巡检时间窗口小,快速巡检的技术^[9]。

2 我国高速载运等重大设施领域无损检测技术的发展现状

我国是全球高速载运设施领域工业无损检测技术需求增长最快的市场,但许多核心技术被国外大公司垄断。我国航空航天、高速铁路等高速载运设施领域无损检测监控技术正从传统的无损探伤,过渡到无损评估以及损伤全过程的状态检测,并与结构健康监控技术融合。“十二五”“十三五”期间,我国启动了高速载运设施无损检测新技术、材料及结构状态监控的部分部件关键技术的研究,取得了一定的研究成果,但在研究的广度和深度上,以及研究机构的能力方面同国外先进技术和先进机构相比尚有很大差距,具体表现如表1所示。

表1 我国无损检测技术与先进国家对比情况

Table 1 Comparison of nondestructive testing technology between China and developed countries

序号	技术	国外情况	国内情况	中国与先进国家相比
1	理论研究	(1)工业发达国家重视、投入大 (2)基础好,原创性多 (3)一流大学和科研机构研究历史长、团队强、积淀多、内容深入	(1)国家重视不够、投入少 (2)基础薄弱、原创少 (3)一流大学和科研机构的深入参与少	跟跑
2	先进传感技术	(1)材料制造工艺水平高、性能好 (2)加工工艺先进 (3)可靠性高	(1)材料制造工艺水平低、性能差 (2)加工工艺落后 (3)可靠性较低	跟跑
3	先进设备系统	(1)种类多 (2)集成度和可靠性高 (3)自动化、系统化较高 (4)附加值高	(1)种类少 (2)集成度和可靠性较低 (3)自动化、系统化较低 (4)附加值低	跟跑
4	传统无损检测技术	(1)涡流检测技术 (2)多频涡流检测技术	我国企业已经实现工程化	并跑

续表

序号	技术	国外情况	国内情况	中国与先进国家相比
		(3)射线检测 (4)超声波检测技术 (5)磁粉探伤 (6)渗透检测 (7)视觉检测 (8)泄漏检测	我国科研机构正在跟随技术领域发展的热点,并逐步进入工程化	跟跑
		(1)脉冲涡流红外热成像 (2)大设备的射线检测技术	我国科研机构比国外更早取得了技术突破	领跑
		(1)漏磁检测 (2)磁致伸缩超声导波 (3)阵列涡流检测 (4)磁记忆 (5)高能量工业CT (6)同步加速射线检测	我国企业已经实现工程化	并跑
5	多物理原理检测	(7)数字射线成像(DR)检测技术 (8)计算机照相(CR)射线检测技术 (9)常规计算机层析(CT)成像检测技术 (10)相控阵超声检测技术 (11) TOFD 检测技术 (12)红外热成像检测技术(IRT) (13)压电超声导波检测技术 (14)电磁超声检测技术 (15)激光散斑检测技术 (16)氦质谱泄漏检测技术	我国科研机构正在跟随技术领域发展的热点,并逐步进入工程化	跟跑
6	标准化	(1)ASME、ASTM、EN、ISO 标准体系完善 (2)世界广泛认可和采用	相对完善 自主化、国际化趋势增大	跟跑,部分并跑
7	人才层次	(1)高端研究型、国际化人才多、经验丰富 (2)高级技能型人才比例高	(1)国际化人才严重缺乏 (2)高级技能型人才比例低	跟跑
8	实验室建设	(1)投入大,有国家级或大型综合性实验室 (2)专业实验室水平高	(1)政府投入少、分散,无国家级或大型综合性实验室 (2)专业实验室水平参差不齐	跟跑

国内无损检测单位机构统计如表2所示。我国目前虽有多家研发生产单位企业开展高速运载设施领域无损检测监控技术的研发和产品开发工作,但存在技术储备不足、工程实践积累较少的问题,基本上是跟踪国际厂商的现有技术,很难保证技术系统整体先进性,同时也严重影响了自主知识产权的开发。目前主要技术还无法打破依赖进口的局面^[10]。

对于无损检测及状态监控,国际上先进国家发展迅猛,技术已在包括大型飞机和新型飞机重点产品或部件的材料结构、先进制造的加工质量控制和产品寿命评估、大型基础建设结构、高速铁路线路和车辆结构等领域成功应用,而国内虽然有中国商用飞机有限公司、中国特种设备检验研究院、中国铁道

表2 我国无损检测行业发展情况
Table 2 Development of nondestructive testing industry in China

统计项目	具体数量
应用无损检测技术的企业单位估计	超过3万家,且不断增长
从事无损检测的专业机构和服务单位(公司、检验所、检验站、检验中心等)	超过2000家
涉及相关无损检测设备器材制造的厂家单位	达800多家
开展无损检测技术方面的研究与相关应用的各种科研院所	超过200家
无损检测设备器材经销贸易、维修服务和技术服务企业单位	超过600家
目前在我国从事与无损检测技术相关工作的人员估计	35万人以上
每年无损检测仪器设备器材销售总额	约80亿元人民币 (2013年),且快速增长
每年无损检测人员技术资格等级培训与资格鉴定、认证费用,第三方无损检测业务	约100亿元人民币 (2013年),且快速增长
国内预计总市场	500亿美元以上

科学研究院等众多科研院所开展了一些基本概念和技术的跟踪,但是普遍缺乏系统性、前瞻性的知识创新和技术创新。特别是,需要目标明确的无损检测及状态监控技术研发依托实体,以及建立具有赶超国际先进水平的无损检测及状态监控技术研究队伍^[11]。目前国内还没有真正出现能够与Olympus、Zetec、Eddyfi、Sonatest和GE公司等国际巨头抗衡的无损检测技术领军机构,以及世界领先的重点实验室和研发机构^[12]。

突破目前现状,缩小与先进国家差距,除了充分发挥现有能力和利用现有条件外,有必要建设专门的研究机构和人才培养基地,加强无损检测和状态监控技术相关研究的人才培养,强化基础性、系统性和前瞻性研究。

3 高速载运等重大设施领域无损检测技术的发展趋势

目前,在高速载运设施领域无损检测技术的发展趋势按照3个阶段,从无损探伤逐渐进化到无损评价:第一阶段是无损探伤(Nondestructive inspection, NDI),即探测和发现缺陷;第二阶段是无损检测(Nondestructive testing, NDT),即探测和发现试件的缺陷、结构、性质、状态;第三阶段是无损评价(Non-destructive evaluation, NDE),即不仅要求发现缺陷,探测试件的结构、状态、性质,还要获取更全面、准确和综合的信息,辅以成像技术、自动化技术、计算数据分析和处理技术等,与材料力学、断裂力学等学科综合应用,以期对试件的设计、质量、性能和寿命做出全面、准确的在线评价^[13]。

在高速载运设施领域无损检测和状态监控领域技术面临的挑战包括:

(1)全寿命状态检测。除了传统的针对缺陷的检测之外,要求针对缺陷发生前、萌发期和断裂全过程的材料微观结构变化、塑性形变、疲劳状态进行测量,由测缺陷转变为测状态。

(2)全覆盖适应。覆盖检测对象不同深度,以及存在管道防护层、埋地、伴水、高温高压等多种状态。

(3)高效率检测。实现快速的、尽可能的非接触检测、在线检测,例如高铁钢轨巡检要求80 km以上的巡检速度。

(4)多交叉技术,与材料、力学、工艺、应用载荷等因素具有多交叉的关系,与声学、光学、电磁学、热学、核技术等多种物理原理具有耦合关系。

3.1 基于多物理原理的新型损伤检测技术研究

对于不同的无损检测技术,其都有各自的优点和缺点,不同技术之间可以相互补偿各自在检测中存在的缺陷。因此,将不同的检测技术相结合,可以提高检测的可靠性和检测效果。

3.1.1 高速电磁检测技术

在高速及重载铁路损伤巡检的难题主要有:检测的多深度,包括表面接触疲劳裂纹以及内部的伤损,要求覆盖轮轨等承载作用的整个部分的检测,能够捕捉从表面小缺陷到宏观缺陷的发展过程;对应力和疲劳状态的测量要求,由于无缝钢轨的大量采用,钢轨温度应力、疲劳状态造成的损伤将导致严重后果,需要对应力和疲劳的状态进行检测。检测的高速度:由于检修时间的缩短,希望检测速度达到80 km/h以上,满足维修天窗时间^[14]。超声波技术由于存在表面盲区或杂波效应,难以对表面小缺陷进行测量。而电磁检测技术不受原理限制,具有实现高速检测的可能性,同时对表面缺陷敏感,能够很好地弥补超声检测的缺点^[15]。

高速电磁检测技术解决了钢轨顶表面伤损检测的难题,克服检测装置高速运动条件下对钢轨铁磁性材料动态磁化、涡流影响等速度瓶颈,实现在高速及重载铁路应用条件下,服役钢轨表面、亚表面的裂纹缺陷损伤进行快速巡检的方法,满足80~350 km/h的巡检速度需求。工信部“高速载运设施的无损检测和监控技术”重点实验室科研团队承担科技部重大科学仪器设备开发专项“在役钢轨缺陷综合检测监测设备开发与应用”子课题与国家自然科学基金委员会重大科学仪器开发专项“钢轨接触疲劳及裂纹多物理高速巡检监测技术攻关”子课题。针对钢轨顶面不同类型伤损产生和发展机理进行深入探究,对不同深度、长度、宽度、角度的缺陷进行电磁仿真研究,并分析了不同励磁条件对检测效果的影响。在实验室条件下,采用阵列式传感器对人工标准样例、人工埋藏伤损样例、自然鱼鳞伤损(图2)进行地面实验,并通过高速转台模拟在350 km/h速度条件下的检测效果。在轨检测采用自主研发的双轨中速电动探伤车,使用滑靴式探头结构,对钢轨轨头顶面和轨距角处表面裂纹进行检测。双轨电动探伤车也可搭载超声、涡流等多种检测系统,对轨腰和轨底内部缺陷以及焊缝处核伤等伤损进行检测。目前,高速电磁检测系统已搭载到铁道科学研究院新一代自主化大型钢轨综合探伤车GTC-80进行实际巡检速度80 km/h的测试试验。如图3所示为电磁检测系统与应用。



(a) 表面鱼鳞疲劳裂纹 (b) 内部核伤
(a) Surface fish scale fatigue crack (b) Internal nuclear injury

图2 钢轨伤损实物图

Fig.2 Actual damage to the rail

3.1.2 脉冲涡流激励热成像

脉冲涡流激励热成像技术作为电磁学和光学的物理原理的结合,在裂纹检测和定量描述上的优势引起了广泛的关注。田贵云教授与巴斯大学、劳斯莱斯、阿尔斯通等合作,对脉冲涡流及热成像原理、检测系统设计、红外图像分析处理以及特征提取等进行了研究,并成功研制出描述金属和复合材料缺陷的ECPT热成像系统^[16]。脉冲涡流激励热成像系统可以描述金属和复合材料缺陷,再现缺陷周围热扩散的过程和磁场分布,实现了对缺陷的快速准确定位,并通过对材料在应力作用、疲劳下的热学特性的分析,检测材料的疲劳等微观结构变化。脉冲涡流激励热成像技术主要由电子科技大学田贵云团队研究的ECPT热成像系统,能快速有效地在线测量金属构件的电导率、磁导率和热导率分布^[17],南京航空航天大学田裕鹏团队针对导电材料面内方向性热扩散率的测量,提出脉冲涡流热成像的新方法^[18]。

3.1.3 激光超声技术

无损检测技术研究者将激光技术的优点应用于超声检测中^[19]。其优势在于激光超声可以实现与

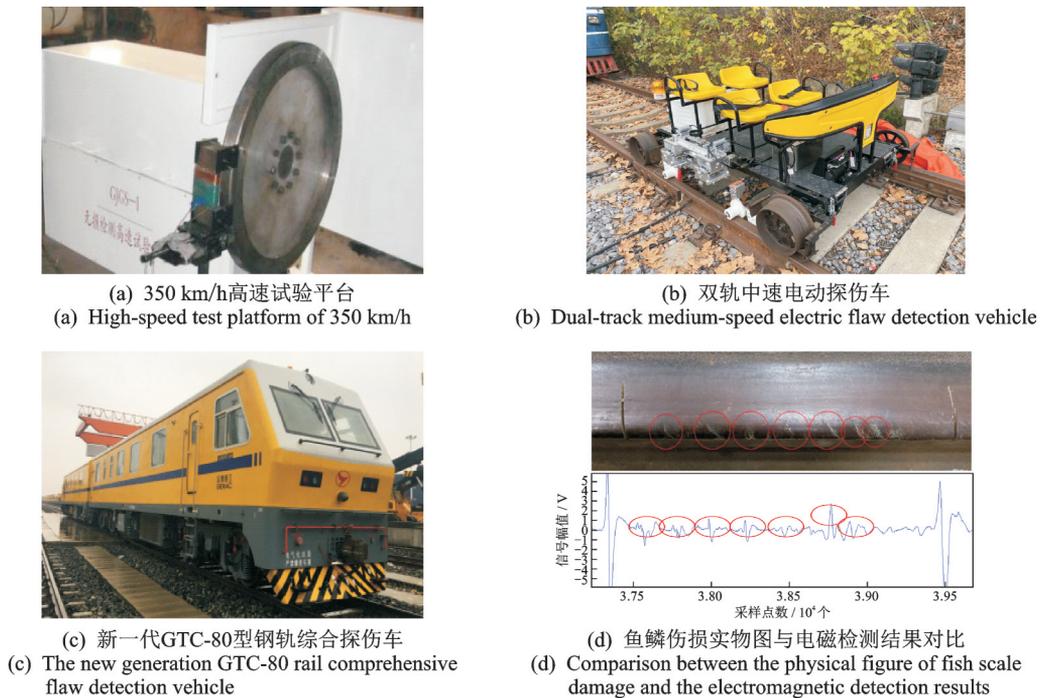


图3 电磁检测系统与应用

Fig.3 Electromagnetic detection system and application

被测物体非接触式产生超声,检测过程不需要耦合剂,可以降低检测误差,减少对被测物体表面的污染;激光超声检测换能器余震产生较小的检测盲区,可检测厚度较薄的材料^[20];激光超声可实现大面积、快速扫查,对被检测物表面光滑度要求较低;激光超声不需要使用不同类型的探头产生横波、纵波和表面波,一次激发可产生这3种类型的超声波^[21]。

重点研究激光超声等非接触超声检测技术的相控阵激励、接收和数据分析、可视化,以及在材料缺陷检测和材料性能检测方面的典型应用。在仿真分析、探头的指向性能和超声波的检测效率、灵敏度等指标优化等方面占据国际前沿水平。南京航空航天大学裘进浩团队采用了局部波数的算法,实现空间逐点局部波数的估计成像,可清晰地识别出损伤区域的大小和形状^[22]。王海涛团队发现激光激发表面波经过缺陷表面时产生一种振荡效应,振荡信号中心频率与近表面缺陷深度在一定范围内呈近似线性关系,为近表面缺陷的定量检测提供了一种理论基础^[23]。

3.1.4 正电子等射线检测技术

研究利用 γ 光子穿透性强的特点,将低辐照的核素标记在工作媒介上,通过对分布在设备内部的气态或者液态工作媒介发出的正电子湮没所产生的 γ 光子分布态的探测,采用减少散射算法和正电子正弦图超分辨率图像恢复技术,利用计算机PET成像技术,实现对恶劣状态下高端复杂设备部件内部状态场的无损检测。例如在不拆解的前提下检测航空发动机腔体内部表面的细微孔洞、喷油嘴阻塞状态,以及在高温高压工作状态下对发动机运行中气流场的分布、变化情况进行监测的重大科学和工程问题。目前,本学科正在搭建国内第一台用于工业无损检测的PET成像测试系统。南京航空航天大学赵敏团队设计了一种变结构 γ 光子探测器,可根据工业件大小调节探测孔径,并实现晶体探测模块与机架分离^[24]。

3.2 材料应力、微观结构、机械特性等状态检测

目前对于在役材料而言,无损检测及评估的方法主要是进行缺陷检测和特征分析。但由于原理和工艺的局限性,现场使用的传统方法基本上基于检测已发展成形的缺陷,而不能发现和预测将要发生缺陷的部位,对于在役金属设备及构件的早期损伤,特别是尚未成形的隐性不连续性变化,难以实施有效的评价。特别关键部件的应用场合,例如某些存贮设备部件,工作在载荷大、环境恶劣的场合,其失效将导致严重的后果,仅仅依赖已发生的宏观缺陷进行寿命判别已不能满足应用要求。而材料的失效模型,与材料微观结构、载荷变化、应力状态、缺损状态及如上种种因素的历史情况具有严密的复杂的关系。因此,对于材料的状态评估,不能仅仅依靠当前的宏观缺损状况,而应该更多获得材料微观结构、应力和缺损的变化历史情况。

在缺陷形成的各个阶段,对于材料的微观结构、应力状态的观察都是必要的。而在事实上,设备的零部件和金属构件发生早期损伤的主要原因和本征表现通常是各种微观的应力集中导致的微观结构组织的变化,这种在应力集中区域,疲劳、腐蚀和蠕变过程的发展尤为剧烈。而基于电磁原理的磁记忆、巴克豪森、漏磁,脉冲涡流等无损检测手段,由于电磁信号耦合的机理上与材料的微观特性相关,因此能够在一定程度上从各个方面反应被测材料的状态。但是,由于材料的磁化机理和微观结构具有相当的复杂性,基于电磁的无损检测方法在材料状态评估的应用领域一直存在关键性的困难,主要在于如下方面:

(1)对于材料在温度、微观结构变化、应力、作用深度等多种因素综合作用下的工作机理,其宏观表现与微观磁化过程之间相互作用的关系的认识解释和验证仍然有限。

(2)缺乏对于应力、疲劳、环境温度、材质、检测深度以及交变激励等诸多参数状态下的材料在电磁检测作用下的作用的相关性分析、因素分离和定量分析的方法,因此在工程应用中的复杂条件下,仍然缺乏对应力、疲劳、材质微观结构变化等问题的精确评估手段。

在这个领域,目前国内外进行的工作包括如下方面:

(1)基于MBN技术的铁磁材料机械性能和应力检测

巴克豪森噪声法(MBN):对由磁畴组成的铁磁性材料施加交变的磁场,磁畴会沿外磁场作用方向发生 90° 或 180° 翻转或使磁畴壁发生不可逆移动,这种变化过程使得材料内部产生一系列突变的、阶跃式的脉冲信号。

加拿大 Atherton 教授等^[25-28]用成型设备分析应力对 MBN 信号的影响,验证了 MBN 技术在线检测的可行性。日本 Tomoaki^[29]通过实验研究为利用 MBN 信号测量应力提供了相应的理论基础。国内北京化工大学祈欣等^[30]研制了 MBN 技术的焊缝残余应力测试仪。

“高速载运设施的无损检测和监控技术”重点实验室科研团队完成动态巴克豪森实验及验证,研制出巴克豪森应力检测仪(图4);搭建巴克豪森效应与铁磁性材料组织结构之间的关系,对材料组织结构检测有十分重要的意义^[31](图5)。

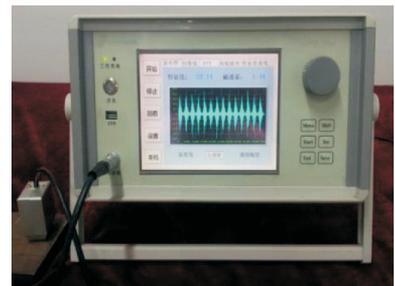


图4 巴克豪森应力检测仪

Fig.4 Barkhausen stress detector

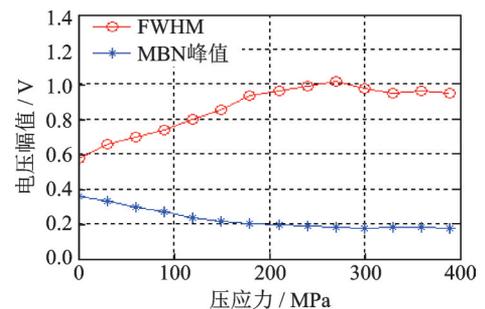


图5 巴克豪森信号峰值和半高全宽随压应力的关系

Fig.5 Barkhausen signal peak and full width at half maximum versus compressive stress

(2)基于MIP技术的铁磁材料机械性能和应力检测

相对于MBN,增量磁导率(MIP)技术记录了临时磁化变化的可逆部分。材料磁化的动态磁场由频率为 f_M ,磁场强度为 H_M 的低频动态磁场和频率为 $f_D(f_D \gg f_M)$ 和强度为 $H_D(H_D \ll H_M)$ 的高频动态磁场叠加,其中叠加场造成了较小的内部磁滞曲线,其斜率表示磁滞回线上每个点的增量磁导率。

国外,Boller等^[32]发现增量磁导率的峰值对应力的影响较为敏感;Grimberg等^[33]设计增量磁导率无损检测的系统,发现其测定的矫顽力随疲劳次数的增大而增大;Ryu等^[34]发现可逆磁导率峰峰距(PIRMP)随着材料使用寿命的延长而下降。国内西安交通大学的陈振茂等^[35-36]将增量磁导率法用于碳素钢材料塑性变形的定量无损评价。

“高速载运设施的无损检测和监控技术”重点实验室科研团队设计增量磁导率系统,初步试验获得了不同应力等条件下增量磁导率实部信号 $I(a)$ (图6)与虚部信号 $Q(b)$ (图7)随应力变化的关系;根据不同铁磁性材料微观结构对MIP信号响应不同,提取MIP特征值(图8),对铁磁性材料机械性能进行预估。

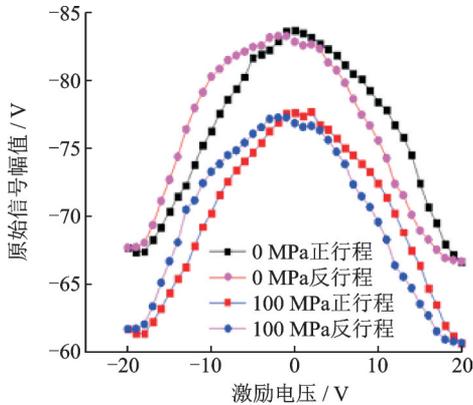


图6 增量磁导率 $I(a)$ 分量随应力变化

Fig.6 Change of component of incremental permeability $I(a)$ with stress

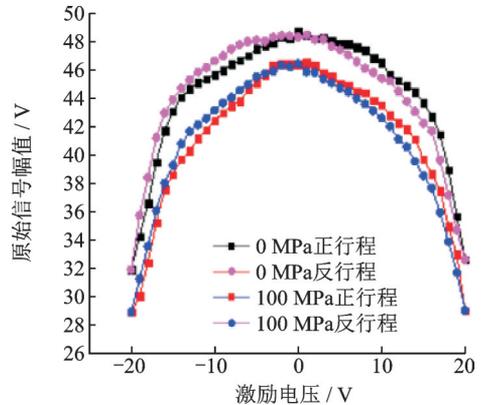


图7 增量磁导率 $Q(b)$ 分量随应力变化

Fig.7 Change of component of incremental permeability $Q(b)$ with stress

(3)基于磁致伸缩效应EMAT技术的铁磁材料机械性能和应力检测

当铁磁性材料受外磁场作用时,磁畴转动使得材料长度或体积发生微小变化,这种现象就称为磁致伸缩效应。而与磁致伸缩特性相反,当铁磁性材料的尺寸发生变化时,会引起磁畴的转动或移动,进而会在材料内部产生磁致效应,这种现象称为逆磁致伸缩效应。

“高速载运设施的无损检测和监控技术”重点实验室科研团队搭建EMAT检测系统,完成悬臂梁应力加载试验,发现EMAT信号受到应力影响,并绘制关于发射端磁感应强度-接收端超声信号幅值关系曲线(图9);同时根据静态磁感应强度接收信号包络峰值蝶形曲线提取相关特征参数,建立磁滞回环下的电磁超声特征量与下屈服强度的关系(图10)。

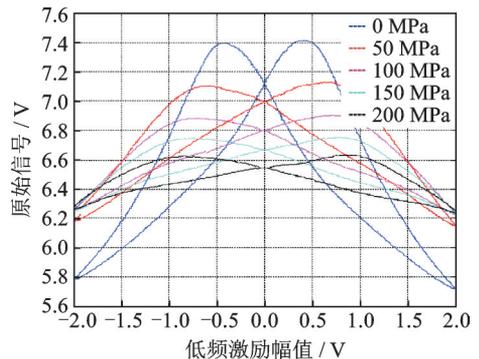


图8 Q235钢不同应力下MIP蝶形图

Fig.8 MIP butterfly diagram of Q235 steel under different stresses

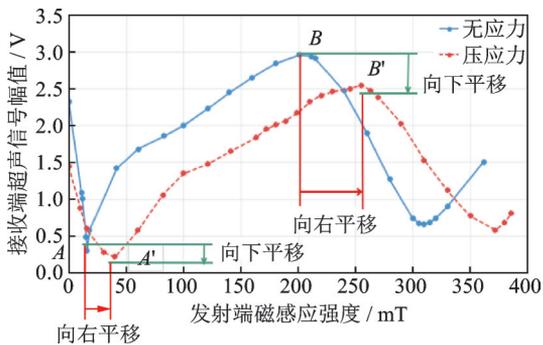


图9 应力对EMAT信号影响

Fig.9 Effect of stress on EMAT signal

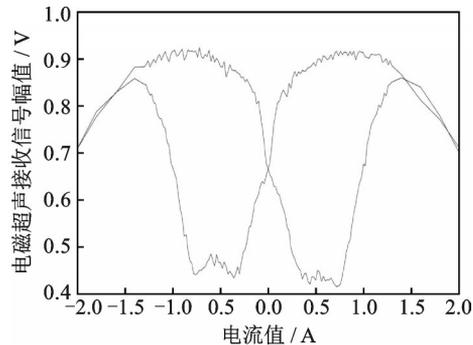


图10 EMAT包络峰值蝶形图

Fig.10 Butterfly diagram of EMAT envelope peak value

(4) 基于多方法多磁参数测量技术的铁磁性材料机械性能和应力检测

从本质上说,是需要多种不同物理原理和效应产生的相互独立的信息来源,来反映材料的应力、微观结构等多种参数,并在这些信息来源的基础上,采用信号处理手段进行融合处理,从而从理论上有可能分离得到针对应力、疲劳状态、机械性能、微观结构方面的单一指标的信息。

德国 Fraunhofer 研究院 IZFP 研究所,综合了4种不同的微磁测量方法,亦即巴克豪森噪声(Magnetic Barkhausen noise, MBN)、增量导磁率、切线磁场谐波分析和多频率涡流(Multi-frequency eddy current, MFEC),构建微磁多参数微观结构及应力分析(Micromagnetic, multi-parameter, microstructure and stress analysis, 3MA)^[37]

(图11)。

“高速载运设施的无损检测和监控技术”重点实验室科研团队在某冷轧车间安装3M设备,综合运用了巴克豪森、增量磁导率、多频率涡流、切线磁场谐波分析等多项电磁无损检测技术,对钢板的屈服强度(R_p),抗拉强度(R_m),屈服延伸率(A)等进行检测^[38](图12)。



图11 3MA仪器

Fig.11 3MA instrument



图12 检测现场

Fig.12 Test site

3.3 无损检测和结构健康监控及人工智能的结合

智能结构健康监测技术(Smart structure health monitoring, SSHM)是利用固定式智能装置探测到的响应信号,结合被测系统本身特性进行分析,进而实现对结构服役状态、损伤程度的监测以及对损伤位置的判定。其主要思想是通过测量结构在不同服役期的荷载作用下的响应信号来推断结构本身特性的变化情况,进而探测和评价结构的损伤状态,或通过实时在线的方法来实现对结构长期退化过程的监测。无损检测技术可以为结构健康监控提供监控的传感手段,结构健康监控所采用的基于人工智能和服务器的信号处理,可以作为无损检测技术的延伸。

随着飞行器、新型桥梁、大跨度钢架、轨道交通等工程结构的不断发展,大型化、复杂化、功能化逐渐成为了现代工程结构发展的必然趋势,这使得结构自身的服役环境不断复杂,结构自身的损伤形式不断多样,由于冲击、振动、极端环境等因素引起的结构损伤问题也不断凸显。对于大型工程结构,结

构内部裂纹、复合材料内部断裂、金属结构锈蚀等主要损伤类型具有其损伤存在的隐蔽性较强、损伤引起的结构失效机理较复杂、损伤导致的结构破坏程度难以判断等特点。因此研究智能化结构健康监测技术对确保大型结构能够长期、高可靠性服役具有重要意义。

目前,国外关于结构健康监测方面的研究已从基础理论验证、实验验证阶段过渡到了针对具体型号的工程验证阶段,但其具体验证内容、验证效果仍属于军事保密范畴。因此,不管对于国防还是民用工程领域来讲,利用先进的传感技术对大型结构健康状态实现有效、实时监测在结构健康监测技术的发展方面具有十分重要的科学意义。在航空领域,作为保障复合材料可靠性、降低维护费用和提高飞机安全性的关键技术,结构健康监测技术都被各国极为重视。美国军方多项研究计划中都采用了结构健康监测技术,如:美国国防部的直升机健康监测项目VMEP(Vibration management enhancement program)中将结构振动监测方法与结构状态评估技术相结合,针对AH-64、UH-60、OH-58D等机型实现了整机或局部结构的振动健康状态监测与评估^[39];澳大利亚国防科学技术组织(DSTO)也将自主研发的智能补丁“Smart Patch”在F-18机翼前缘结构上进行了健康监测试验^[40]。目前,光纤传感监测技术在典型航空结构上的发展应用主要集中于传感器元件的多功能化、传感网络的集成化以及数据处理的多元化,利用应力响应信号在结构内部分层、微裂纹和断裂等产生的应变特征,寻找结构损伤与监测特征信号之间的关系。

国内对于结构健康监测方面的研究始于1991年,即:国家自然科学基金委员会将智能材料与结构技术正式归于国家高技术研究发展计划纲要中,并将其作为新概念构想探索专项课题进行深入研究。时至今日,我国的一些高等院校在这方面已开展了近20年的研究,哈尔滨工业大学、西安交通大学、重庆大学等高校都开展了智能复合材料结构健康监测方面的研究,取得了大量成果。南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室对智能材料与结构进行了深入研究,先后在航空智能结构健康监测领域的研究方面取得了一批有代表性的学术成果,如袁慎芳教授团队将导波技术用于监测飞机结构腐蚀损伤^[41];南京航空航天大学高速载运设施的无损检测监控技术工信部重点实验室,在国家重点研发计划“城市地下基础设施运行监测关键技术研究及示范”项目中,针对地下基础设施(地铁、综合管廊和地下综合体)可能发生6种灾害情境(如土建结构功能失效致灾、关键设备及管线系统故障致灾、水灾及火灾等灾害情境),20种可能灾害(如结构开裂、结构渗漏水、接触网/轨故障、轨道系统故障、轨旁设备脱落侵界、火灾、水灾、城市大范围停电等灾害)进行综合监测。通过以光纤传感为主的静态结构健康监控,和钢轨探伤车等动态无损检测巡检相结合,获得PB级别的数据,基于人工智能技术研发基于海量大数据分析的多源数据关联深度解析、集成BIM实景模型可视化虚实联动、地下基础设施运行状态监测的物联网大数据分析平台。通过该平台可以获得整个基础结构的健康状态,进而通过人工智能的模型进行判别,并根据模型判别结果进行应急决策,最终实现在时间、位置、设备、故障等多维度的全方位智能监控。其结构健康智能状态模型如图13所示,通过该模型可以实时准确地反映整个轨道基础设施的结构状态。以结构渗漏水为例,地下基础设施结构损伤监控和数据处理模型如图14所示。该综合监测系统平台在深圳地铁的车公庙段五站三区间进行示范应用。

4 结束语

本文分析了高速载运设施的无损检测技术的应用现状、面临的挑战以及未来的发展趋势。在分析超声检测、涡流检测、电磁检测、射线检测等常规检测技术基础上,对比了各类无损检测技术的特点,并对检测设备及探伤仪器系统进行了介绍。国内无损检测新技术发展,以更多新的物理原理和效应为基础,研究从传统的宏观损伤检测,向前推进到早期伤损和疲劳、弹塑性形变、应力集中和机械性能等材料状态的检测。随着检测技术的不断进步,无损检测领域未来也将由检测转型为预测,提高安全性并可以带来巨大的经济效益。且与人工智能、多模态多物理集成传感、可视化成像检测等技术相结合,进

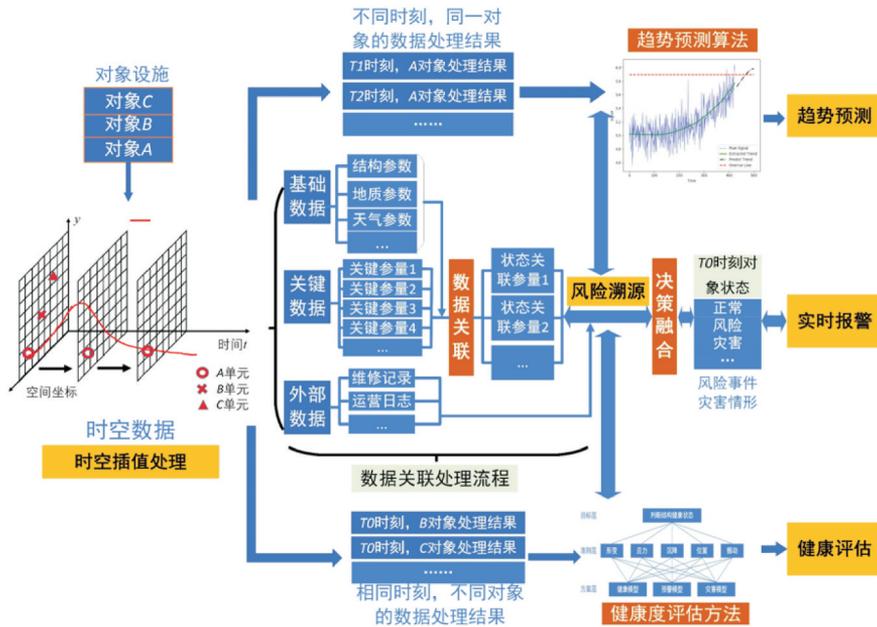


图13 结构健康状态智能监控模型

Fig.13 Intelligent monitoring model of structural health status

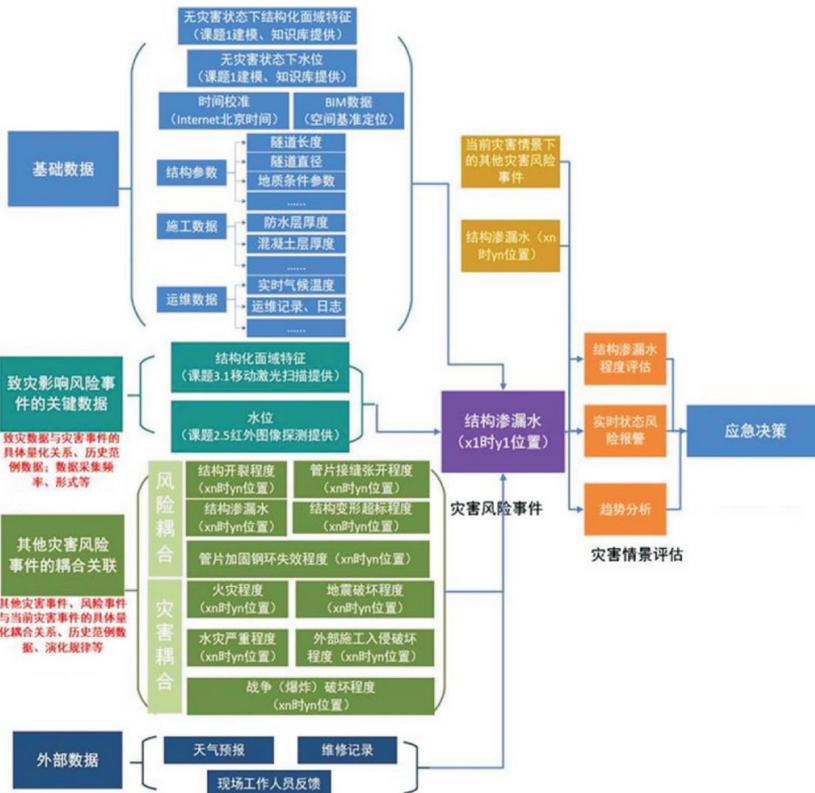


图14 地下基础设施结构损伤监控和数据处理模型

Fig.14 Damage monitoring and data processing model of underground infrastructure structure

而分析了无损检测与评估和智能结构健康监测集成融合等发展趋势,以及实现基于大数据管理、信息挖掘与通信互联的被检测对象的性能管理和状态维护综合决策。对轨道交通、航空航天等高速载运相关产业发展都发挥重要的支撑和服务作用,对全国制造业的转型升级也发挥巨大的推动作用,是值得大家关注的重要领域。

参考文献:

- [1] LI Q, ZHONG Z, LIANG Z, et al. Rail inspection meets big data: Methods and trends[C]// Proceedings of 2015 18th International Conference on Network-Based Information Systems (NBiS). [S.l.]: IEEE, 2015.
- [2] RICK V, GRÄBE P J. Stochastic modelling for the maintenance of life cycle cost of rails using Monte Carlo simulation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2018, 232(4): 1-32.
- [3] 瞿辉, 戴晓娇, 赵金. 超声波无损检测技术的发展与应用[J]. 机电信息, 2020(2): 82-83.
QU Hui, DAI Xiaojiao, ZHAO Jin. Development and application of ultrasonic nondestructive testing technology[J]. Electromechanical Information, 2020(2): 82-83.
- [4] 龚榕, 罗思琦, 叶波, 等. 厚度无损检测仪器的精度长期稳定性研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(21): 161-169.
GONG Rong, LUO Siqi, YE Bo, et al. Long-term stability study of accuracy of thickness non-destructive testing instruments [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55 (21): 161-169.
- [5] ZAREMBSKI A M. Some examples of big data in railroad engineering[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Big Data. [S.l.]: IEEE, 2015.
- [6] 王文峰, 王海涛, 胡洋, 等. 钢轨损伤的无线传感网络监测系统[J]. 无损检测, 2017, 39(11): 12-15, 26.
WANG Wenhao, WANG Haitao, HU Pan, et al. Wireless sensor network monitoring system for rail damage[J]. Nondestructive Testing, 2017, 39(11): 12-15, 26.
- [7] LIU Z, LI W, XUE F, et al. Electromagnetic tomography rail defect inspection[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51 (10): 1-7.
- [8] MA T, SUN Z, CHEN Q. Study on crack features in images of fluorescent magnetic particle inspection for railway wheelsets [J]. Insight Non Destructive Testing & Condition Monitoring, 2018, 60(9): 519.
- [9] ANTIPOV A G, MARKOV A A. Detectability of rail defects by magnetic flux leakage method[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2019, 55(4): 277-285.
- [10] SANTUR Y, KARAKÖSE M, AKIN E. An adaptive fault diagnosis approach using pipeline implementation for railway inspection[J]. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 2018, 26(2): 987-998.
- [11] 张辉, 宋雅男, 王耀南, 等. 钢轨伤损无损检测与评估技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 11-25.
ZHANG Hui, SONG Yanan, WANG Yaonan, et al. Overview of non-destructive testing and evaluation techniques for rail damage[J]. Journal of Chinese Instrumentation, 2019, 40(2): 11-25.
- [12] 无损检测编辑部. 2020年《无损检测》专题报道计划[J]. 无损检测, 2020, 42(3): 6.
Editor Department of Nondestructive Testing. The special report plan of "Nondestructive Testing" in 2020[J]. Nondestructive Testing, 2020, 42(3): 6.
- [13] CLAPHANAND L, ATHERTON D L. Characterization of texture and residual stress in a section of 610 mm pipeline steel[J]. NDT International, 1995, 28(2): 73-82.
- [14] 江晓禹, 李孝滔, 李煦, 等. 轮轨高速滚动接触及钢轨疲劳裂纹扩展研究[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51 (2): 275-281.
JIANG Xiaoyu, LI Xiaotao, LI Xu, et al. Research on high-speed rolling contact of wheel and rail and fatigue crack growth of rail[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(2): 275-281.
- [15] GAO J, YU W, HE C. The research on defect recognition method for rail magnetic flux leakage detecting[C]// Proceedings of International Conference on Measurement. [S.l.]: IEEE, 2012.
- [16] GAO Y, TIAN G Y. Multiple cracks detection and visualization using magnetic flux leakage and eddy current pulsed thermography[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015, 234: 269-281.
- [17] GAO B, YIN A J, TIAN G Y, et al. Thermography spatial-transient-stage mathematical tensor construction and material

- property variation track[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, 85: 112-122.
- [18] 余开科, 田裕鹏, 王平, 等. 基于脉冲涡流热成像的面内方向性热扩散率测量[J]. *计量学报*, 2019, 40(6): 1030-1036.
YU Kaike, TIAN Yupeng, WANG Ping, et al. In-plane directional thermal diffusivity measurement based on pulsed eddy current thermal imaging [J]. *Journal of Metrology*, 2019, 40(6): 1030-1036.
- [19] ZHAO Y, SUN J, MA J, et al. Application of the hybrid laser ultrasonic method in rail inspection[J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2014, 56(7): 360-366.
- [20] NIELSEN S A, BARDENSHTEIN A L, THOMMESEN A M, et al. Automatic laser ultrasonics for rail inspection[C]// *Proceedings of the 16th World Conference on NDT Montreal*. [S.l.]: [s.n], 2004: 1-8.
- [21] 刘洋, 项占琴, 唐志峰. 激光超声技术在钢轨探伤中的应用研究[J]. *机械设计与制造*, 2009(10): 60-61.
LIU Yang, XIANG Zhanqin, TANG Zhifeng. Application research of laser ultrasonic technology in rail flaw detection[J]. *Mechanical Design and Manufacturing*, 2009(10): 60-61.
- [22] 李鹤, 张超, 季宏丽, 等. 基于导波检测的带曲率复合材料板损伤识别技术研究[J]. *国外电子测量技术*, 2019, 38(5): 75-80.
LI He, ZHANG Chao, JI Hongli, et al. Research on damage identification technology of composite plate with curvature based on guided wave detection[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2019, 38(5): 75-80.
- [23] 曾伟, 王海涛, 田贵云, 等. 研究激光激发的声表面波与材料近表面缺陷的振荡效应[J]. *物理学报*, 2015, 64(13): 200-205.
ZENG Wei, WANG Haitao, TIAN Guiyun, et al. Studying the oscillation effect of laser-induced surface acoustic waves and near-surface defects of materials[J]. *Journal of Physics*, 2015, 64(13): 200-205.
- [24] 徐少华, 赵敏, 姚敏, 等. 基于正电子湮灭的变结构 γ 光子探测器设计[J]. *机械制造与自动化*, 2019, 48(5): 105-109.
XU Shaohua, ZHAO Min, YAO Min, et al. Design of variable structure γ photon detector based on positron annihilation[J]. *Mechanical Manufacturing and Automation*, 2019, 48(5): 105-109.
- [25] CLAPHANAND L, ATHERTON D L. Characterization of texture and residual stress in a section of 610 mm pipeline steel[J]. *NDT International*, 1995, 28(2): 73-82.
- [26] JAGADISH C, CLAPHAN L, ATHERTON D L. Effect of bias field and stress on Barkhausen noise in pipeline steel[J]. *NDT International*, 1989, 22(5): 297-301.
- [27] KRAUSE W, ATHERTON D L. High resolution magnetic Barkhausen noise measurements[J]. *NDT International*, 1994, 27(4): 201-206.
- [28] LINDGREN M, LEPISTO T. Application of a novel type Barkhausen noise sensor to continuous fatigue monitoring[J]. *NDT & E International*, 2000, 33: 423-442.
- [29] TOMOAKI U. Effect of stress on the law of approach to saturation magnetization in carbon steels[J]. *Transactions on Magnetism*, 1991, 27(3): 3420-3425.
- [30] 祁欣, 刘明翠. 巴克豪森效应和磁滞曲线的测定[J]. *实验技术与管理*, 2007(6): 25-27.
QI Xin, LIU Mingcui. Measurement of barkhausen effect and hysteresis curve[J]. *Experiment Technology and Management*, 2007(6): 25-27.
- [31] WANG P, ZHU L, ZHU Q J, et al. An application of back propagation neural network for the steel stress detection based on Barkhausen noise theory[J]. *NDT and E International*, 2013, 55: 9-14.
- [32] BOLLER C, ALTPETER I, DOBMANN G, et al. Electromagnetism as a means for understanding materials mechanics phenomena in magnetic materials[J]. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2011, 42(4): 269-278.
- [33] GRIMBERG R, LEITOIU S, BRADU B E, et al. Magnetic sensor used for the determination of fatigue state in ferromagnetic steels[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2000, 81(1/2/3): 371-373.
- [34] RYU K S, NAHM S H, PARK J S, et al. A new non-destructive method for estimating the remanent life of a turbine rotor steel by reversible magnetic permeability[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2002, 251(2): 196-201.
- [35] 陈洪恩, 陈振茂, 李勇, 等. 基于磁噪声和增量磁导率的塑性变形定量无损评价[J]. *无损检测*, 2012, 34(10): 12-15.
CHEN Hong'en, CHEN Zhenmao, LI Yong, et al. Quantitative nondestructive evaluation of plastic deformation based on magnetic noise and incremental permeability[J]. *Nondestructive Testing*, 2012, 34(10): 12-15.
- [36] 李丽娟, 解社娟, 陈洪恩, 等. 碳钢塑性变形对增量磁导率信号的影响[J]. *中国机械工程*, 2018, 29(14): 1653-1660.
LI Lijuan, XIE Shejuan, CHEN Hong'en, et al. Effect of plastic deformation of carbon steel on incremental permeability sig-

- nals [J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(14): 1653-1660.
- [37] 张艳艳. 基于电磁 NDE 的铁磁性材料机械性能参数估计方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
ZHANG Yanyan. Research on the estimation method of mechanical properties of ferromagnetic materials based on electromagnetic NDE[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [38] MASAHIKO T, KAZUYOSHI S, AKIRA M, et al. Development of a new nondestructive inspection technique of suspender ropes of suspension bridges[J]. IABSE Symposium Report, 101(1): 1-8.
- [39] GRABILL P, BROTHERTON T. Rotor smoothing and vibration monitoring results for the US army VMEP[C]// Proceedings of the American Helicopter Society 59th Annual Forum. Phoenix Arizona: the American Helicopter Society. [S.l.]: [s.n.], 2003.
- [40] 陶宝琪. 智能材料结构[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997: 10-14.
TAO Baoqi. Intelligent material structure[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1997: 10-14.
- [41] 郭方宇, 袁慎芳, 鲍峭. 基于导波的飞机结构腐蚀损伤监测研究[J]. 航空制造技术, 2018, 61(7): 70-76.
GUO Fangyu, YUAN Shenfang, BAO Qiao. Research on guided wave based corrosion damage monitoring of aircraft structure [J]. Aviation Manufacturing Technology, 2018, 61(7): 70-76.

作者简介:



王平(1977-),男,教授,博士生导师,研究方向:无损检测技术、计算机测控技术、传感器技术等,E-mail: zeitping@nuaa.edu.cn。



盛宏威(1992-),男,博士研究生,研究方向:无损检测技术、材料分析等,E-mail: zjwx521@sina.com。



冀凯伦(1994-),男,博士研究生,研究方向:无损检测、图像处理等,E-mail: 420214368@qq.com。



杨元(1991-),男,博士研究生,研究方向:无损检测技术、光电检测、大数据分析,E-mail: yuan_yuan0215@163.com。



李开宇(1969-),男,副教授,研究方向:计算机测控技术、无损检测技术、数字图像处理等,E-mail: lky_401@nuaa.edu.cn。



姚恩涛(1965-):男,教授,研究方向:传感器技术、计算机测控技术、动态信号处理、无损检测技术等,E-mail: entaoyao@nuaa.edu.cn。



贾银亮(1979-):男,讲师,研究方向:计算机测控技术、无损检测技术等,E-mail: jyl@nuaa.edu.cn。



石玉(1973-),女,讲师,研究方向:数字信号处理、优化算法,E-mail: shiyunuaa@nuaa.edu.cn。

(编辑:夏道家)