

工业相控阵超声检测与监测系统的发展与挑战*

纪轩荣, 邓樵, 宋永锋, 袁懋诞

(广东工业大学省部共建精密电子制造技术与装备国家重点实验室 广州, 510006)

摘要 工业相控阵超声检测(phased array ultrasonic testing, 简称PAUT)系统能有效遏制潜在的安全风险,在航空航天、特种设备制造及石油化工等关键行业发挥重要的作用。首先,阐述了PAUT系统的信号采集与成像原理,介绍了通用的相控阵检测工艺优化和数据分析方法;其次,分析了近年来PAUT系统的前沿研究进展,涵盖其在非线性超声成像、超声导波、空耦超声、电磁超声和激光超声中的应用;然后,结合PAUT技术与结构健康监测(structural health monitoring, 简称SHM),探讨了其在增材制造实时监测、低成本监测及云监测等方面的应用,并将植入式相控阵探头应用在智能材料监测中;最后,讨论了工业相控阵超声检测与监测系统面临的挑战及其向高性能化、智能化、多功能化和柔性化发展的趋势。

关键词 超声无损检测;相控阵成像;波束成形;全矩阵采集;结构健康监测

中图分类号 TH878;G353.11;TB559

引言

在21世纪初,相控阵超声技术从医疗成像领域拓展到工业无损检测领域,并确立了其重要地位^[1]。PAUT系统是利用多个可独立控制的阵元或通道发射和接收超声波信号的系统^[2]。相较于传统单通道系统,PAUT能更准确地检出缺陷,覆盖范围更广,效率更高,可有效识别安全隐患,降低事故风险^[3],已在航空航天^[4]、特种设备、石油化工^[5]、海洋平台^[6]、铁路^[7]、电力、核工业^[8]、军工^[9]、冶金和建筑^[10]等行业得到广泛应用。工业PAUT产品的基本功能是采用线性的波束成形(beamforming, 简称BF)技术,制定发射延时法则控制各阵元的激发时机,操控超声波在被测件中的干涉行为,实现波束偏转和聚焦,通过延时接收合成波束和电子扫描得到相控阵成像图^[11]。随着检测标准不断提升,传统基于线性BF的成像方法已无法满足对更高灵敏度和分辨率的需求,故衍生出全聚焦(total focusing method, 简称TFM)^[12]、平面波成像(plane wave imaging, 简称PWI)^[13]和相位相干成像(phase coherence imaging, 简称PCI)^[14]等新的成像技术。

为克服传统PAUT方法的局限性,学者们研究出了非线性、超声导波、空耦超声、电磁声换能器和激光超声等形态各异的、非典型的PAUT系统。这

些系统拓展了PAUT的内涵,成为当前相控阵超声检测领域的研究热点。近年来,PAUT技术也开始与SHM技术相互融合^[15]。不同于传统的无损检测,SHM技术重在结构健康状态进行长期的连续监测和评估,而PAUT技术的引入提升了监测系统的灵敏度,能够有效监控设备状态,及时提供预警和报警信息,为预防性维护提供数据支持^[16-17]。

笔者概述了工业相控阵超声测量的通用技术,探讨了非典型PAUT系统和相控阵监测系统的最新进展,分析了工业相控阵超声检测与监测系统的机遇与挑战,旨在深化对工业相控阵超声检测与监测系统的认识,促进相关技术的发展。

1 典型相控阵系统的基础研究

1.1 相控阵信号采集与成像方法

典型的工业PAUT技术主要采用接触式或水浸式的线性体波检测方式,探头的各阵元主要由压电材料制成,其产品形态一般有便携式^[18]、板卡和台式高级相控阵探伤仪,以满足不同场合的需求。主流商售产品的对比见表1。在信号采集方面,基于线性BF原理的延时叠加方法是最常用的手段。尽管这种方法能够实现高效的物理聚焦或偏转,但其通常只能聚焦于被测对象内部的一个特定部位,导

* 国家自然科学基金资助项目(52405583,U2133213);中国博士后科学基金资助项目(2023M740755);广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2022A1515240040)

收稿日期:2024-06-18;修回日期:2024-10-02

致其他非聚焦部位的信噪比(signal to noise ratio, 简称SNR)明显下降。因此提出了全矩阵采集(full matrix capture, 简称FMC)技术。FMC通过让每个阵元依次单独发射并使所有阵元同时接收信号,从

而获得一个包含 N^2 条超声A扫信号的信号集(N 为阵元数量)^[19-20]。这种方法有助于在后处理阶段实现被测对象的TFM成像。TFM是一种通过延时叠加,使不同发射-接收阵元组合的时域回波信号聚

表1 国内外商售相控阵超声系统的对比分析

Tab.1 Comparison analysis of domestic and overseas phased array ultrasonic systems for sale

| 相控阵产品形态 | 厂商 | 型号 | 技术参数 | 主要功能 | 备注 |
|----------------|-------------|---|--|---------------------------------------|----------------------|
| 便携式探伤仪 | 多浦乐 | Phascan II | 通道数 32/128; 100 V 脉冲; 重复频率 20 kHz; 带宽 0.5~20 MHz | BF; 常规; TOFD; C 扫 | 325 mm×230 mm×130 mm |
| | 汕头超声 | CTS-PA32 | 通道数 32/128; 110 V 脉冲; 重复频率 20 kHz; 带宽 0.5~20 MHz | BF; TFM; 常规; TOFD; C 扫 | 346 mm×246 mm×133 mm |
| | 中科创新/汉威 | HS PA30-X | 通道数 64/128; 100 V 脉冲; 重复频率 20 kHz; 带宽 0.5~20 MHz | BF; FMC; TFM; PWI; PCI; 常规; TOFD; C 扫 | 390 mm×245 mm×110 mm |
| | Eddyfi/M2M | GEKKO | 通道数 64/128; 120 V 脉冲; 重复频率 40 kHz; 带宽 0.4~20 MHz | BF; TFM; 常规; TOFD; C 扫 | 410 mm×284 mm×126 mm |
| | OLYMPUS | OmniScanX3 64 | 通道数 64/128; 160 V 脉冲; 重复频率 20 kHz; 带宽 0.2~26.5 MHz | BF; 多模 TFM; TFM-AIM; 常规; TOFD; C 扫 | 335 mm×221 mm×151 mm |
| | ZETEC | TOPAZ64 | 通道数 64/128; 150 V 脉冲; 重复频率 40 kHz; 带宽 0.5~18 MHz | BF; FMC; TFM; PWI; 常规; TOFD; C 扫 | 278 mm×343 mm×158 mm |
| 板卡(可二次开发) | 多浦乐 | Novascan | 通道数 64/128; 采样 200 MHz; 160 V 脉冲; 带宽 0.4~25 MHz; 1k Mbps 网口; WIFI 接口 | BF; FMC; TFM; PWI; 常规; TOFD; C 扫 | 可作便携式仪器用 |
| | 汕头超声 | CTS-PA22M | 通道数 16/16; 采样 100 MHz; 110 V 脉冲; 带宽 0.5~20 MHz; 250 Mbps 网口; WIFI 接口 | BF; FMC; TFM; 常规; TOFD; C 扫 | 164 mm×95 mm×30 mm |
| | OLYMPUS | FOCUS PX | 通道数 32/128; 采样 30 MHz; 115 V 脉冲; 带宽 0.6~17.8 MHz; 1k Mbps 网口 | BF; 常规; TOFD; C 扫 | 276 mm×231 mm×92 mm |
| 台式高级探伤仪(可二次开发) | Eddyfi/M2M | MULTI2000Pocket | 通道数 8/32; 采样 100 MHz; 80 V 脉冲; 重带宽 0.8~16 MHz; 30 Mbps USB 口 | BF; FMC; TFM; 常规; TOFD; C 扫 | 212 mm×145 mm×70 mm |
| | 多浦乐 | Robust Pro | 通道数 256/256; 采样 80 MHz; 200 V 脉冲; 带宽 0.5~25 MHz; 10 Gbps 光口 | BF; FMC; TFM; PWI; 常规; TOFD; C 扫 | 选配高压脉冲发生模块 |
| | 汕头超声 | CTS-PA22T1 | 通道数 64/64; 采样 125 MHz; 100 V 脉冲; 带宽 0.5~20.8 MHz; 1k Mbps 网口 | BF; FMC; TFM; 常规; TOFD; C 扫 | — |
| | AOS/TPAC | Pioneer | 通道数 64/256; 采样 100 MHz; 100 V 脉冲; 带宽 0.1~20 MHz; 10 Gbps 网口; | BF; FMC; TFM; PWI; 常规; TOFD; C 扫 | 选配任意波型发生模块 |
| | Eddyfi/M2M | MULTIX++ | 通道数 256/256; 采样 100 MHz; 200 V 脉冲; 带宽 0.8~20 MHz; 30 Mbps USB 口 | BF; FMC; TFM; 常规; TOFD; C 扫 | 选配柔性探头校正、声波契合法 |
| | PeakNDT | MicroPulse LTPA 64/128 - 10Gb | 通道数 64/128; 采样 100 MHz; 200 V 脉冲; 带宽 0.75~20 MHz; 10 Gbps 网口 | BF; FMC; TFM; 常规; TOFD; C 扫 | 具备行业权威第三方工具箱 |
| Verasonics | Vantage 256 | 通道数 256/256; 采样 62.5 MHz; 190 V 脉冲; 带宽可选; 帧率 100k FPS | BF; FMC; TFM; 常规; TOFD; C 扫; 导波 | 选配任意波型发生模块、HIFU | |

焦到目标区域内的每一个虚拟聚焦点的成像方法, FMC和TFM的结合可使成像区域的每个部位都有较高的SNR。但是, FMC与TFM之间没有必然的联系。例如, 当全矩阵采集变成三角矩阵采集, 即此时只采集阵元 i 发、阵元 j 收的信号($i \neq j$), 不采集阵元 j 发、阵元 i 收的信号, 仍能进行TFM成像。同样, 当全矩阵采集变成对角矩阵采集时, 即此时只采集自发自收的信号, 仍能按照TFM的理论进行成像, 其结果等效于合成孔径聚焦成像。此外, 稀疏矩阵采集也是一种有效的策略, 其禁止使用部分阵元来实现稀疏阵列的TFM成像。研究表明, 通过群智能算法优选阵元可以显著减少数据量, 而成像质量仅轻微下降。

另一方面, 基于FMC的相位相干成像PCI和符号相干成像(sign coherence imaging, 简称SCI)^[21-22]成为近年来商售相控阵产品的主要研究重点。PCI以虚拟聚焦点处瞬时相位的标准差进行成像, SCI以虚拟聚焦点处信号符号的叠加进行成像。与FMC-TFM相比, FMC-SCI有利于提高小缺陷检测能力及粗晶材料检测的SNR, 但对超声波垂直入射至大尺寸的面积型缺陷则更容易产生漏检, 且无法使用传统-6 dB法进行缺陷定量。基于FMC信号还能进行多模态TFM成像、矢量TFM成像、虚拟源TFM成像、声源定位(multiple signal classification, 简称MUSIC)成像、相位迁移成像、散射矩阵成像以及Omega-K成像等^[23]。

在FMC中每次只有一个阵元发射, 能量较低, 且采集时间长, 成像效率低。平面波复合(plane wave compounding, 简称PWC)采集技术采用了每次所有阵元同时发射和接收的方式, 每次发射形成不同角度的平面波。例如, 一个具有 N 个阵元的相控阵探头, 选取 Q 个角度发射平面波, 则可获得一个具有 $Q \times N$ 条超声A扫信号的信号集。文献[24]研究了PWC和TFM成像结合的PWI方法, 证明了相比于FMC-TFM, PWI可通过更少的数据量获得伪影更少和SNR更高的图像。

1.2 相控阵测量工艺优化方法

为了实现高效的相控阵检测与监测, 需要对测量实验中的工艺参数进行精细优化。当前, 用于实现这一目标的主要方法包括声场模拟与仿真、缺陷检测灵敏度分布图以及相控阵检测可靠性计算。首先, 根据相控阵扇扫的延时法则, 可对偏转、聚焦后的声场进行模拟和仿真。声场的计算又分为解析解法、半解析解法及数值解法^[25]。解析解法主要有角

谱法、多元高斯声束叠加法、射线追踪法和几何绕射理论, 计算效率高, 但需要符合一定的理论假设, 与实际有一定的误差。半解析解法主要有瑞利积分法、CIVA软件的铅笔法、K-wave的K-space伪谱法、离散点源方法和导波的半解析有限元法, 能更好地抑制离轴声场和非均匀介质声场的误差, 耗时适中。数值解法主要有边界元法、有限元法、有限差分法和弹性动力学有限积分法, 虽然耗时最长且精度受求解器和网格影响大, 但适用于复杂工况。通过有效的声场模拟与仿真, 可优化中心频率、阵元数量、阵元间距、楔块尺寸及楔块角度等参数, 最后优化声场的覆盖范围或焦斑尺寸, 改善相控阵测量的SNR和分辨率。

因为TFM成像不存在物理上的声束偏转和聚焦, 因此直接计算声场对优化TFM成像的意义有限。Kwan等^[26]利用声学影响图(acoustic influence map, 简称AIM)量化TFM成像的缺陷检测灵敏度空间分布, 以优化检测工艺, 其使虚拟缺陷遍历TFM-AIM图上所有位置, 并通过虚拟缺陷和瑞利积分法计算声场及延时叠加的缺陷波理论幅值。实验显示, 平底孔的TFM-AIM图与理论基本一致。李天骥等^[27]把TFM-AIM改进为与缺陷尺寸相关的TFM-DAC图谱, 能分析不同大小缺陷的灵敏度并实现定量, 精度优于6%, 优于传统方法的13%。

此外, 检出率(probability of detection, 简称POD)或SNR也是优化相控阵检测工艺的重要手段, 一般SNR越高则POD越高。Bajgholi等^[28]针对水轮机转轮焊接接头的无损检测, 对比了传统超声单探头检测、射线检测、相控阵扇扫检测及相控阵TFM成像的POD, 发现TFM成像的POD最高, 能稳定检出直径为2.5 mm的夹杂缺陷。Xu等^[29]提出了一种基于压缩感知(compressed sensing, 简称CS)技术^[30]的相控阵TFM成像方法。为平衡压缩率和SNR, 优选了60%压缩率和62.5 MHz采样率, 实现了SNR优于31 dB的TFM成像。

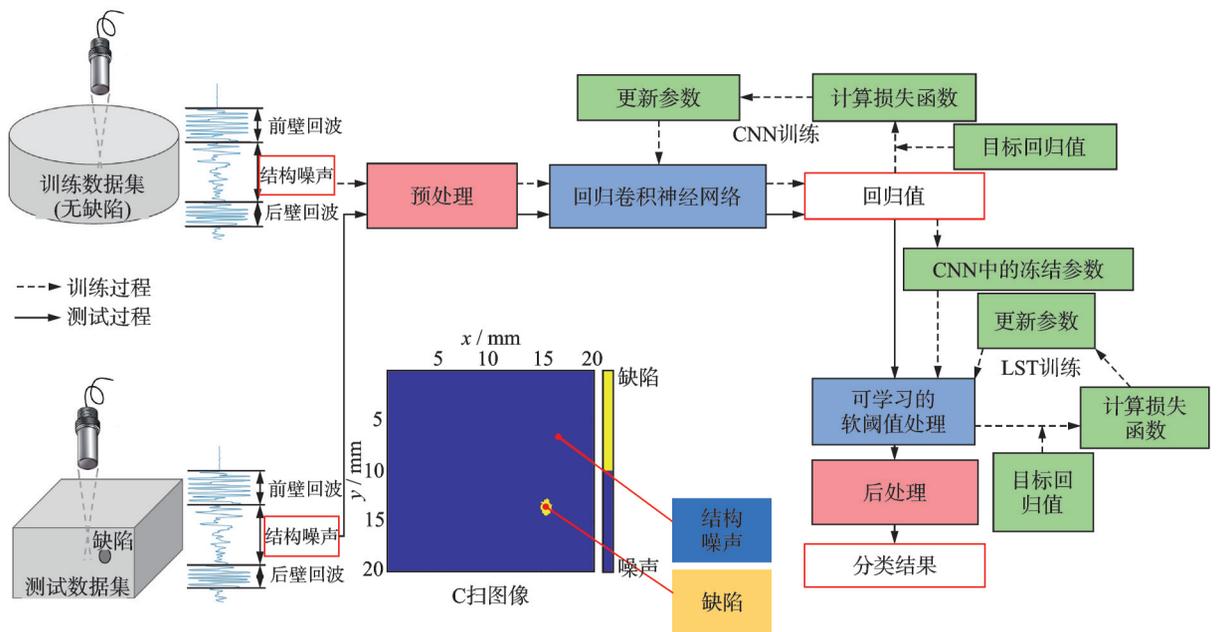
1.3 相控阵测量的数据分析方法

通过相控阵测量数据的分析可以进行全生命周期管理、材料表征及智能检测/监测。Guan等^[31]对接近30年寿命的蒸汽轮机转子进行相控阵的C扫描成像, 发现一个2.1 mm长的缺陷, 采用基于疲劳裂纹损伤风险约束的方法估算零件设计寿命外可安全运行的剩余寿命, 实验表明, 按相控阵测量的数据可延长9.4年的使用寿命。

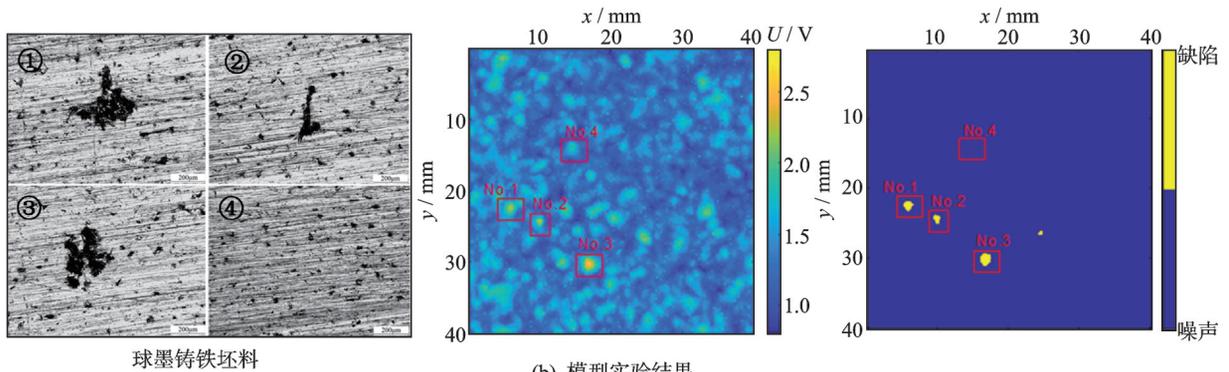
材料表征也是相控阵数据后处理分析中的研究重点。Cao等^[32]利用32阵元线阵自发自收在两个正交方向上测量了碳纤维增强复合材料单向承压板的多次底面回波的渡越时间(time of flight, 简称TOF),通过多模态的TOF理论模型和粒子群算法,不断调整模型中的厚度值和代表弹性常数的声速值,使TOF和测量结果吻合。结果表明,该方法可从测量数据中同时反演出厚度和5个弹性常数,误差优于5%。文献[33-35]利用相控阵超声声束偏转和聚焦特性,建立了适用于晶粒形状和尺寸评价的相控阵超声背散射模型,通过线阵探头测量不同入射方向的背散射信号均方根频谱,提取出与晶粒特性相关的背散射系数,实现了晶粒尺寸和形状的准确反演,并通过铝合金、GH4742验证了最小相对误差约为-3.7%。

基于机器学习/深度学习对相控阵检测进行数

据挖掘和数据分析^[36-38]也是当前的研究热点。文献[36]基于卷积神经网络实现了超声信号权重自适应调节的超声成像。文献[37]基于EfficientDet目标检测网络实现了工业缺陷检测自动化定量及定位。文献[38]基于半监督循环生成对抗网络实现了超声图像超分辨率重建。笔者提出了一种基于卷积神经网络(convolutional neural network, 简称CNN)的亚波长缺陷超声成像方法^[39],并设计了可学习软阈值分类器对信号的回归值进行分类。CNN检测模型示意图如图1所示。实验证明,该方法可在SNR低至2 dB的条件下清晰地成像出强散射的球墨铸铁试块中1/5波长且不同埋深的缺陷。虽然深度学习在相控阵检测数据分析的一些应用中取得了成功,但仍存在以下不足:训练所需的数据量大;人为标注的影响大;网络泛化能力差;训练结果的物理意义不明;缺乏物理、逻辑或因果的可解析性等。



(a) 总体方法概述
(a) Overview of overall method



(b) 模型实验结果
(b) Results of model experiments

图1 CNN检测模型示意图^[39]

Fig.1 Schematic diagram of CNN detection model

2 非典型相控阵系统的发展前沿

2.1 非线性相控阵超声检测系统

使用工业相控阵设备进行非线性成像的主要方法有直接滤波法、次谐波法、基线相减法和扩散场法等。高鹏等^[40]用宽带相控阵探头检测碳钢试块,通过相位反转法增强相控阵二次谐波,并用高通滤波器直接获得二次谐波,结果显示其具有比线性BF方法更高的横向和轴向空间分辨率。Yu等^[41]基于延时乘叠加(delay multiply and sum,简称DMAS)技术对聚合物粘结炸药进行非线性BF成像,并通过伪彩色技术融合了高、中、低频,实现了强散射、强衰减材料内部缺陷的高精度成像。在次谐波法方面,Sugawara等^[42]提出了一种共聚焦的次谐波相控阵成像方法,通过低通滤波器获取次谐波,再利用延时法则控制物理聚焦到每一个成像点多次成像并融合,实现了不锈钢焊缝闭合裂纹缺陷成像。Park等^[43]为了解决次谐波成像分辨率较低的问题,引入了MUSIC算法,并基于一个A7075铝紧凑型拉伸试块实现了闭合裂纹裂尖的高分辨成像。

在基线相减法方面,Ohara等^[44]通过热调制对粗晶316L不锈钢试块的疲劳裂纹进行非线性相控阵成像,主要是将有/无热应力的BF成像图相减得到裂尖的成像图,并扣除基线图像以抑制晶粒噪声的影响。Hauptert等^[45]使用线阵探头进行全阵元的BF成像作为基线,再分别选取奇数阵元、偶数阵元进行两次BF成像并求和,最终扣除基线图像得到非线性散射成像图,实验表明,该方法能有效检出304不锈钢材料中的热疲劳裂纹。Ohara等^[46]成功将该方法应用于表面裂纹的非线性瑞利波成像。基线相减法可能会保留一些线性特征,但其在软硬件方面都较容易实现,实用性较强。

另外,Potter等^[47]提出了一种基于超声扩散场的非线性相控阵超声成像方法,通过对比并行物理聚焦(BF)与串行合成聚焦(FMC)下的声能差异,实现材料内部的非经典非线性特征成像。实验表明,该方法可呈现出疲劳裂纹等非线性特征,而线性TFM不能显示裂纹尖端,且难以抑制上下表面、定位孔的影响。Cheng等^[48]研究得出,非线性相控阵超声成像对疲劳裂纹扩展的检测有较高的灵敏度。文献[49-50]分别验证了上述方法的有效性,并优化了检测工艺参数。

Ebrahim-Saib等^[51]将基线相减法和扩散场法统称为基波幅值差(fundamental wave amplitude differ-

ence,简称FAD)技术,并归纳为变激励电压型FAD、奇偶阵元型FAD和串并型FAD(扩散场法),再通过研究证实了三者内在等价性。尽管非线性相控阵超声FAD成像性能强、功能多,但还存在以下问题:缺少物理建模和机理分析以指导FAD技术的进一步发展;对复杂型面构件和薄壁构件的技术适用性还有待验证;目前尚缺少特殊相控阵探头(如柔性探头)的FAD成像研究;FAD成像的智能化研究也较少。

2.2 超声导波的相控阵检测系统

研究表明,利用工业相控阵设备激励超声导波可对波导结构进行大范围的检测。文献[52]基于两个128阵元线阵在20 MHz·mm的频厚积下,测量了10 mm厚铝板中单一模态的高阶Lamb波,探讨了切趾的相控梳状激励问题,建立了Lamb声场模型,并通过优选线性延时增量、阵元数及阵元间距来控制截断、波数、栅瓣,成功激发单一的 S_0 模态,对于检测大尺寸的中厚板缺陷有重要的参考意义。Yuan等^[53]根据薄壁管周向Lamb模态(circumferential Lamb type,简称CLT)的频散曲线,在0.4 MHz·mm和100 kHz中心频率下测量导波,用7个阵元的PZT阵列控制CLT偏转和聚焦。实验对不同曲率的4 mm厚6061铝合金薄壁管进行测量,用基线相减法消除了 CLT_1 的影响后,定位误差约为5%。Li等^[54]使用9个阵元的PZT阵列采集了2 mm厚铝板和钢板的 S_0 模态全矩阵回波,通过对位相乘融合TFM和相位相干因子的成像。结果表明,与符号相干因子相比,该方法提高了分辨率,抑制了伪影,不会出现“波纹”效应,比TFM成像的背景噪声低25%~50%。

近年来,频控阵(frequency diverse array,简称FDA)技术成为超声导波相控阵检测研究的热点。Lang等^[55]将FDA技术引入到Lamb波相控阵检测中,通过对不同通道设置微小的频率偏差,以实现波束偏转和聚焦,从而获得高分辨率的多频BF成像图。FDA成像示意图如图2所示。研究中推导了波前的加权叠加模型,对比了频率固定(即等价于单频相控阵)、递增及递减时的波前模型,确定了可通过频率来控制Lamb波的偏转和聚焦,再使波前聚焦在同一个位置,提出了一种频率递增/递减融合的频控阵BF成像方法。实验用9个阵元的PZT阵列,用25~100 kHz的 A_0 模态波对2 mm铝板通孔进行检测,先后递增、递减6 kHz单独进行BF成像,再相乘得到融合成像结果,验证了比单频率BF有更

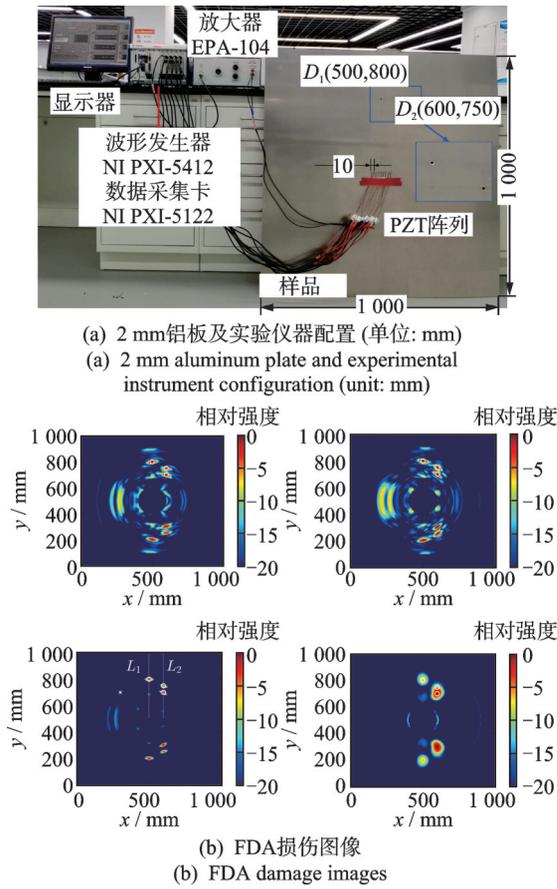


图2 FDA成像示意图^[55]

Fig.2 Schematic diagram of FDA imaging

强的缺陷识别能力和抗干扰能力。

尽管超声导波相控阵检测系统已得到发展,但仍存在以下问题:在复杂介质、复杂型面及复杂缺陷的远距离检测能力上仍需提升;对变厚度、变波纹度、变粗糙度薄壁构件,其实用性还需要验证;用工业相控阵设备开展导波非线性调制、非线性混频、非线性成像的研究也较少。

2.3 空耦超声的相控阵检测系统

空耦超声与相控阵技术结合,可在非接触条件下进行无损检测,可控制偏转和聚焦以克服超声波在空气中衰减大、透射能量低的问题。Hinrichs等^[56]通过现场可编程门阵列(field programmable gate array,简称FPGA),搭建了基于微机电系统(micro-electro-mechanical system,简称MEMS)麦克风阵列的空耦相控阵系统,通过自制的楔块^[57-58]增强声能并保护探头。该系统可激发40 kHz的 A_0 模态、 S_0 模态Lamb波,使用激光多普勒测振仪(laser Doppler vibrometer,简称LDV)采集信号,对1 mm厚钢板的表面凹槽缺陷进行检测。结果表明,在最大800 mm的距离上,测得凹槽缺陷平均定位

误差为1.39 mm。

Hinrichs等^[59]研究了空耦Lamb波相控阵的有限元仿真方法,以及优化检测的工艺参数。通过不同的延时法则激励平面波,模拟模态转换、Lamb波泄漏以及凹槽缺陷反射行为,模拟得出的最优指向角为 37.5° ,与LDV的实测值 34.3° 接近,验证了模拟的准确性。Laub等^[60]完善了上述系统,用 8×8 的麦克风面阵发射40 kHz的偏转Lamb波到1 mm厚的钢板,用 16×4 的麦克风阵列代替LDV接收缺陷回波,再用MUSIC算法成像。实验表明,考虑阵元不一致性时,MUSIC算法仍有较好表现。

Towson等^[61]采用40 kHz的MEMS麦克风阵列实现了管道内的空耦检测,并将其搭载在履带式爬行机器人上,用于排查管道堵塞、孔洞、接头失效、腐蚀和变形等问题。基于空耦超声相控阵的管道检测机器人如图3所示。其中,用蒙特卡洛优化算法得到64个阵元的随机阵探头,用树莓派4、迷你型双通道示波器/任意波形发生器、多路复用模块控制探头,获取FMC信号集进行三维TFM成像,最终可低成本地实现对管道内部堵塞或表面状况的高效、精确检测与定位。

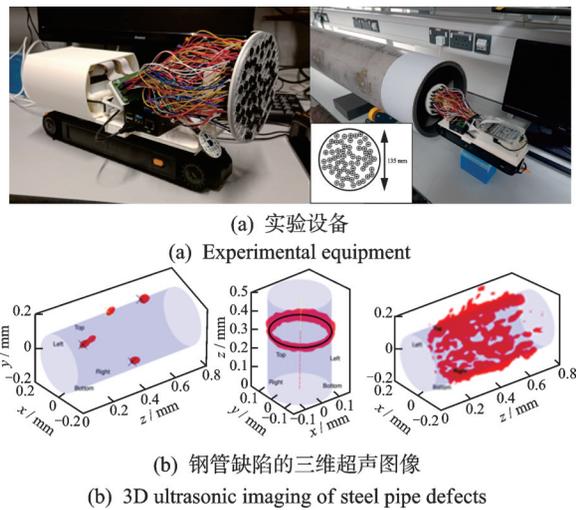


图3 基于空耦超声相控阵的管道检测机器人^[61]

Fig.3 Pipeline inspection robot based on air-coupled ultrasonic phased array

压电式微机械超声探头(piezoelectric micromachined ultrasonic transducer,简称PMUT)^[62]和电容式微机械超声探头(capacitive micro machined ultrasonic transducer,简称CMUT)^[63]阵列也是空耦相控阵检测的重要方向之一。Xu等^[62]提出用多频PMUT阵列结合CS技术实现三维稀疏成像。Zhang等^[63]制造了16阵元的CMUT相控阵探头,通过FPGA实现了非接触式Lamb波的激发和接收,

可识别、定位缺陷并预测缺陷的大小。但是,空耦相控阵超声系统仍普遍受阻抗匹配困难、检测频率较低、衰减大及透射能力弱等问题的限制,其智能化、小型化程度也还有待加强。

2.4 电磁超声的相控阵检测系统

电磁超声检测系统通过电磁声换能器(electromagnetic acoustic transducer,简称EMAT)非接触地在材料内部产生超声波进行无损检测。Thon等^[64]利用两个弯曲的20个阵元的EMAT线阵(带宽为175~475 kHz,阵元间距为4.3 mm)对钢管进行测厚,该线阵形成9°的自聚焦弯曲,相邻阵元磁化方向相反。实验中,首先通过控制阵元间的线性延时增量在钢管中分别激励出SH₁和SH₂模态导波;其次,对回波信号进行二维傅里叶变换,利用频散曲线最大幅度下降20 dB处确定截止频率,换算出厚度值;最后,制备了剩余厚度为6~7.2 mm的人工腐蚀缺陷,两种模态测得的最大厚度误差分别为0.4 mm和0.2 mm。

Zhang等^[65]发明了一种相控全柔性瑞利波EMAT(phased array fully flexible Rayleigh-wave EMAT,简称PAFR-EMAT),用于检测外径为80 mm、内径为120 mm的铝管。相控全柔性瑞利波EMAT检测示意图如图4所示。实验中使用能自聚焦的柔性跑道线圈搭配长脉冲产生偏置磁场取代永磁铁,用两个柔性曲折线圈按延时法则激励1 MHz的瑞利波。实验表明,采用PAFR-EMAT技术检测钢管上2 mm深的刻槽缺陷时,其缺陷波幅值较传统永磁铁式EMAT提升了4.52倍,相较于单阵元FR-EMAT也有68.1%的显著增强。

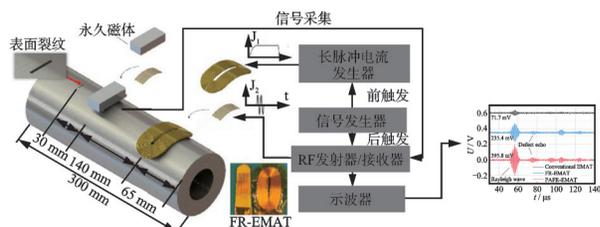


图4 相控全柔性瑞利波EMAT检测示意图^[65]

Fig.4 Schematic diagram of phased array fully flexible rayleigh-wave EMAT detection

除了缺陷检测,非接触的材料特性表征也是EMAT相控阵测量研究的热点之一。Pei等^[66]提出用基于双重折线线圈的相控EMAT测量临界折射纵波(critically refracted longitudinal,简称L_{CR}),通过仿真发现优选延时量后,可使扩散角最小为18°,并减小栅瓣。实验结果与仿真一致,表明该方法能有效激

励出高指向性的L_{CR}波,对声时和应力测量有较高的灵敏度。Liu等^[67]使用圆形EMAT相控阵测量轧制铝合金板搅拌摩擦焊区域的瑞利波声速以表征应力,其中对圆形永磁铁表面六等分地刻槽,并制备了6个曲折线圈形成阵列,频率为1.79 MHz,通过仿真说明了刻槽能够增强磁感应强度且抑制串扰。另外,考虑基体的各向异性,根据有/无应力状态下3个方向的瑞利波声速差异,推导了声弹性模型,并通过拉伸标定了声弹性系数。最后,用RITEC snap 5000和多路复用模块,在焊接横截方向实现了应力测量。结果表明,在剔除弱各向异性对应力测量的影响后,声弹法与激光盲孔法的结果基本一致。

EMAT相控阵还存在以下不足:多场耦合的机理研究较少;针对材料不均匀、温度较高、高频检测、有复杂型面等场景的EMAT相控阵研究较少;提高距离或近场盲区的影响仍然较大。

2.5 激光超声的相控阵检测系统

激光超声检测通过热弹效应或热蚀效应在材料内部产生超声波以实现非接触测量。Bruder等^[68]针对锂电池极耳焊接结构形状复杂、尺寸小的问题,提出了一种激光诱导的导波TFM成像方法,通过Nd:YAG脉冲激光器(1 064 nm)和激光干涉仪(532 nm)采集了FMC信息集。根据频散曲线分析0.4 mm厚铝板检测中各个波包的模态,选择了2.5~3.5 MHz的S₀模态导波进行FMC-TFM成像。结果显示,该方法能有效识别φ2 mm的缺陷,并讨论了边缘反射的影响。

He等^[69]针对激光超声相控阵成像中的伪影问题,研究了TFM成像的指向性修正方法,通过假设在均匀介质中存在虚拟的点状缺陷,推导出理论孔径数据分布,当实测与理论数据不相关时,认为该点无缺陷。实验使用了1 064 nm激光器和532 nm干涉仪,相比于传统的激光超声TFM成像,考虑孔径数据相关性后可有效抑制多类伪影。Cantero等^[70]提出了一种激光超声相控阵TFM成像检测的工艺参数优化方法,结合激光超声的射线追踪模型、POD和误报率,建立了激光超声相控阵横波检测的SNR模型。通过调整物理孔径和阵元间距,最大化检测能力并最小化检测时间。实验使用1 064 nm激光器和532 nm干涉仪,通过5 MHz的横波检测铝块中1 mm的横孔缺陷,结果显示,理论SNR模型和实验测量值吻合良好,最优和最差工艺条件下TFM成像的SNR分别为22.6 dB和8.7 dB,且裂纹为0°

时物理孔径可大于40 mm,有助于降低检测时间。

Mei等^[71]提出了一种基于深度学习对复杂形状缺陷进行激光超声相控阵TFM成像的智能重构方法。首先,通过COMSOL计算不同种类缺陷,生成204幅TFM仿真图;其次,构建基于视觉几何组(visual geometry group,简称VGG)改进语义分割的Unet网络,采用VGG16代替UNet的左侧编码器层,增加卷积层数;最后,以TFM仿真图为输入、以缺陷设计图作为标签训练网络。结果显示,VGG-UNet网络能有效再现M型、T型、S型缺陷的大小和位置特征。然而,当前激光超声相控阵TFM成像的指向性修正主要针对各向同性材料,缺乏对各向异性材料的研究,且主要集中在二维TFM成像。另外,激光超声相控阵检测系统的价格昂贵,未来使用空耦系统^[72]或EMAT系统^[73]接收信号,可降低系统的成本。

2.6 相控阵超声过程监测系统

对加工或疲劳过程进行在线监测或原位监测,也是工业相控阵超声技术发展的热点之一。Chen等^[74]针对增材制造(additive manufacturing,简称AM)加工过程的在线监测,提出了一种超快速激光超声相控阵表面波成像方法。该方法主要通过德国SCANLAB RTC5激光控制卡控制扫描振镜,用1 064 nm激光器和633 nm激光测振仪绕每一个检测点做快速的圆周扫描,并进行缺陷的聚焦成像。结果表明,当缺陷尺寸大于0.2 mm时,最小可检测缺陷达到0.1 mm,定量误差可降至6.46%,比水浸C扫描效率提高300%,有效检出了AM构件粗糙表面下的表面和亚表面缺陷。文献[75]用导波相控阵方法对带有缺口的1 mm厚铝板的疲劳裂纹扩展进行原位监测,将两个6通道线阵对称布置在缺口两侧,同时反射和透射式地用BF技术激励了300 kHz导波信号,再结合基线法、模式匹配和模糊逻辑推理,定义了健康度(degree of health,简称DOH)矩阵作为损伤指数。结果表明,通过DOH矩阵实现损伤指数的可视化,可以有效监测裂纹扩展过程。

Gauthier等^[76]提出了一种基于单比特数字化的轻量级无幅值数据采集方案,用于解决相控阵超声云监测中的数据传输瓶颈,存储容量比传统TFM降低47倍。通过Pogo仿真软件研究了使用符号相干因子、矢量相干因子(vector coherence factor,简称VCF)及改进VCF的体波成像方法。实验使用Vantage 64 LE系统检测含横孔不锈钢和含凹槽低碳钢试块,验证了改进VCF与传统VCF成像结果

基本一致,比TFM成像的对比度噪声只降低约10 dB,为未来将数据上传到云平台进行实时处理和分析奠定了基础。

Sun等^[77]研发了一种低成本柔性超声波相控阵系统,用于大型结构的多点位长期原位监测。通过简化电路和优化柔性探头设计,所开发的18阵元相控阵系统单套成本约为13 848元。尽管基于多路复用模块进行FMC的耗时较长,但对于长期监测是可接受的。实验显示,该系统可对平面、曲面构件进行高分辨率的TFM成像,经过温度补偿后,在连续监测3个月后发现横孔缺陷直径有0.1 mm的变化。目前,使用相控阵超声进行在线/原位监测时,对于高实时性、高分辨率、低成本的目标,现阶段最多只能同时满足两个目标,且缺乏针对位错弦、位错偶、位错密度及驻留滑移带等早期损伤的相控阵监测方法。

2.7 特殊相控阵探头的应用

2.7.1 横波干耦合相控阵探头

Yang等^[78]针对桥梁和隧道容易出现空洞、裂缝缺陷的问题,使用德国ACS公司MIRA A1040型便携式32阵元相控阵仪器与50 kHz的S1802横波干耦合探头检测混凝土结构。研究中对比了3种TFM的校正方法:扩散衰减校正、固体指向性校正及两者的结合。结果显示,联合使用2种校正法能显著提升对远距离大角度缺陷的检测效果,并实现高分辨率成像。张辉等^[79]使用横波干耦合的相控阵探头,研究了非连续阻抗粘接结构脱粘缺陷的稀疏阵列成像方法,研究指出,横波干耦合探头能用于无人机超声探伤^[80]和钢管导波检测^[81],但表面粗糙度的影响仍需深入探讨。

2.7.2 可拉伸柔性相控阵探头

基于压电陶瓷的柔性相控阵探头由于变形能力有限,通常难以贴合如具有双扭曲面的复杂型面构件。Hu等^[82]设计了一种基于压电陶瓷的10×10阵元二维可拉伸柔性相控阵探头,首先,主要采用“岛-桥”结构,其中“岛”为高性能的1-3压电复合材料换能器,“桥”为多层蛇形电极,通过硅橡胶封装保持局部刚性和整体柔软性,以及高机电耦合系数(0.60),SNR(20.28 dB)、带宽宽(47.11%)及低串扰水平(-70 dB),且可拉伸超过50%;其次,利用DMAS算法对复杂型面试块中不同取向的横通孔实现了三维成像,但仍需降低成本以促进此类探头的应用。

2.7.3 涂层式相控阵探头

涂层式或直写式相控阵探头是当前研究的热点

之一。Haque 等^[83]使用直写式按需喷墨打印技术制备了聚偏氟乙烯-三氟乙烯 (polyvinylidene fluoride-trifluoroethylene, 简称 PVDF-TrFE) 涂层。Shen 等^[84]在 1.27 mm 铝板上用直写式 PVDF-TrFE 涂层制备了 4 阵元的梳状相控阵导波探头,通过 1.3 MHz 的 A_0 模态 Lamb 波实现了缺陷成像。Zhou 等^[85]采用直写式方法制备了具有压阻效应的石墨烯/聚酰胺酸 (graphene/polyamide acid, 简称 G/PPA) 纳米复合材料涂层,结合 MUSIC 算法实现了 8 阵元的导波相控阵成像。Li 等^[86]通过喷墨打印、原位热退火和电晕极化技术制备了 PVDF-TrFE 的涂层式相控阵探头,并印制了电极对铝板进行导波检测和冲击定位。Li 等^[87]在平面、凸面和凹面构件上制备了基于压电聚合物涂层的相控阵探头,对 $\phi 2$ mm 横通孔进行 TFM 成像,并讨论了用两个阵元一发一收测量零群速度模态 Lamb 波的可行性。涂层式相控阵探头及其应用示意图如图 5 所示。尽管这些技术展示了良好的应用前景,但目前微电子电路按需喷墨打印成本较高,降低生产成本成为其应用的关键挑战。

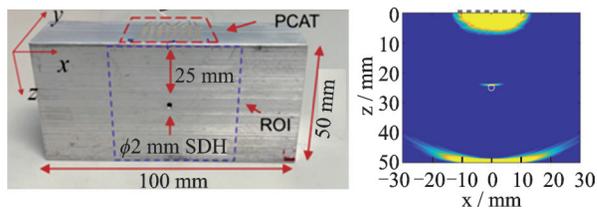
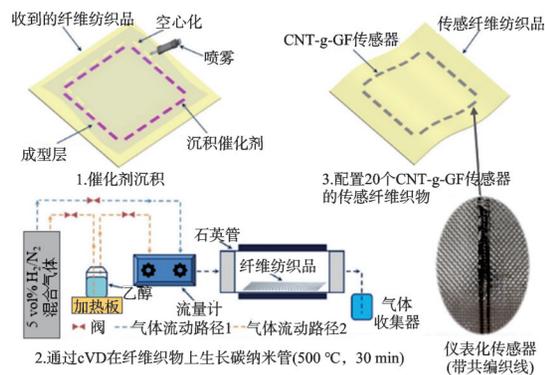


图 5 涂层式相控阵探头及其应用示意图^[87]

Fig.5 Schematic diagram of coating-based phased array transducer and its applications

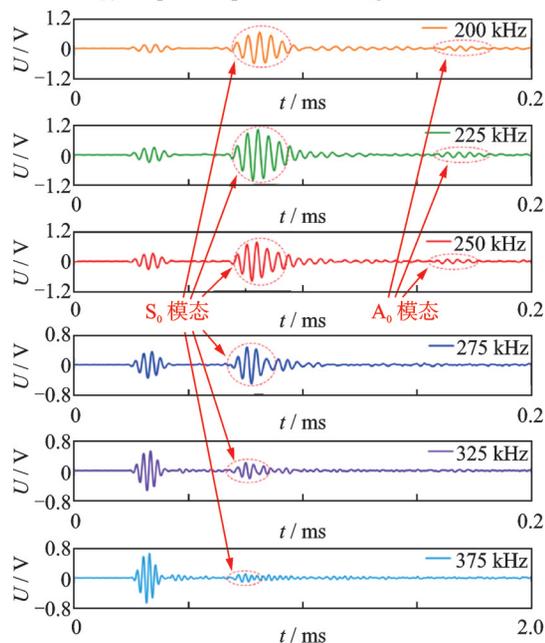
2.7.4 植入式相控阵探头

带有嵌入式传感器的智能材料^[88-89]适用于长期、连续的结构健康监测,且由于不会破坏表面的空气动力学设计,尤其适合于航空、航天领域。同时,因为受到智能材料复合结构的保护,传感器受外部环境的影响更小、SNR 更高。当前,植入式相控阵超声探头^[90-91]是智能材料中主要的嵌入式传感器类型之一。Su 等^[92]在纤维纺织品中用化学气相沉积法,将碳纳米管(carbon nano tube, 简称 CNT)原位嫁接到玻璃纤维(glass fibre, 简称 GF)上,制备了 20 个植入式的 CNT-g-GF 传感器,再将高导电薄膜编织到纺织品中作为导线。植入式相控阵探头及其应用示意图如图 6 所示。结果表明,碳纳米管质量分数越高,阵列激励的导波幅值越大,在 225 kHz 附近 S_0 模态导波响应最大。



(a) CNT-g-GF 传感器制备流程

(a) Preparation process of CNT-g-GF sensor



(b) CNT-g-GF 传感器在 0.85wt% 捕获的 GUV 信号

(b) CNT-g-GF sensor captures GUV signal at 0.85wt%

图 6 植入式相控阵探头及其应用示意图^[92]

Fig.6 Schematic diagram of implantable phased array probes and their applications

3 机遇和挑战

3.1 相控阵通用数据格式与存储方法

工业相控阵的智能检测和云监测是当前研究的热点,但因各供应商或研发团队数据格式和存储方法不统一,容易形成“信息孤岛”。到目前为止,本领域仍缺乏公认的标准数据集,这将限制智能检测及云监测的发展。在超声医学领域中,医学数字成像和通信(digital imaging and communications in medicine, 简称 DICOM)协议是医学成像信息和相关数据的通信和管理标准,对发展远程超声技术和超声智能辅助诊疗技术有重要意义^[93]。无损检测中的数字成像和通信(digital imaging and communication in nondestructive evaluation, 简称 DICONDE)协议是

DICOM协议的延伸,是一个可用于射线、CT、涡流及超声检测的通用数据格式。其中,ASTM E2663-23是DICONDE的数字化超声检测部分^[94],替代了旧标准ASTM E1454-02^[95](即现行国标GB/T 25759-2010^[96])。DICONDE继承了DICOM的数据循环利用功能,支持从相控阵检测到数据预处理、数据库存储、数据挖掘/智能判别及再检测的全流程。可见,DICONDE有助于打破“信息孤岛”,成为智能决策的基石。

3.2 混合驱动的相控阵智能检测/监测方法

鉴于DICONDE协议当前不可用,仍有必要通过较小的数据量来实现相控阵智能检测。传统数据驱动方法存在普适性不足、可解释性低等问题,且对数据标注高度依赖。因此,人工智能2.0的关键是将数据驱动与知识驱动方法有机融合,建立混合驱动方法来提高深度学习的可解释性和效率,并降低对数据的要求^[97-98]。如何引入先验知识、逻辑规则、物理定律和因果关系等知识^[99-100],提高泛化能力、可解释性和鲁棒性,是相控阵智能检测领域亟待解决的关键问题之一。混合驱动的方法主要可分为3类:知识驱动为主、数据驱动为主、知识驱动和数据驱动并重的混合方法^[101]。物理信息神经网络(physics-informed neural network,简称PINN)是一种以知识驱动为主的混合方法。Alkhadhr等^[102]使用PINN通过嵌入二维波动方程作为约束条件,并结合边界和初始条件进行训练,计算了3阵元相控阵探头的瞬态声场,经过3万次迭代后,PINN能够计算出不同时间点的声场。但是,使用此类方法时还需考虑物理模型的局限性、数据依赖性和计算效率等因素。

3.3 面向极端服役环境的相控阵测量方法

当前,面向极端环境的相控阵超声检测研究较少,尤其在核聚变领域。核聚变被视为未来清洁能源的关键^[103],但对等离子体材料(plasma facing material,简称PFM)的研究是关键瓶颈之一^[104]。PFM需承受高温、粒子辐射及中子嬗变产生的氢氦影响,这对材料性能提出了极高的要求^[105]。我国的全超导托卡马克装置“EAST东方超环”中,包层、偏滤器都采用纯钨作为PFM,但存在低温脆性、韧脆转变温度高和辐照脆化等问题。在聚变反应时,壁面需要承受14 MeV的高能中子辐照轰击,最高温度可达到1 800 °C,容易形成辐照损伤和

热裂纹^[106-107]。Wang等^[108]使用了机械手带动15 MHz单探头对偏滤器穹顶进行离线的水浸C扫描成像,可检出 ϕ 1.6 mm的平底孔缺陷。当前,仍缺乏针对辐照损伤的相控阵检测机理研究及抗辐射相控阵探头开发,这将影响核聚变堆用材料的缺陷检测技术发展。

4 结束语

近年来,工业相控阵超声检测与监测技术迅速发展,在提高测量效率和质量方面取得了显著成果。笔者综述了该领域的最新进展,包括BF, FMC和PWC数据采集技术以及TFM, PWI和PCI成像技术,并讨论了基于声场、AIM和POD方法优化工艺策略;介绍了利用相控阵进行寿命评估、材料表征及人工智能计算的数据分析方法,探讨了非线性相控阵成像、导波相控阵等多种前沿技术,总结了可拉伸柔性探头、涂层式探头和植入式探头等特殊相控阵探头的研究现状;针对智能检测与监测中的挑战,强调了DICONDE数据格式、存储方法以及知识与数据混合驱动的重要性,提出为适应极端环境需求,开发相应的软硬件系统成为必然趋势。

参 考 文 献

- [1] 董明, 万回回, 孙思雅, 等. 液压支架缸体环焊缝缺陷超声相控阵检测方法研究[J]. 煤炭工程, 2023, 55(11): 154-159.
DONG Ming, WAN Huihui, SUN Siya, et al. Research on phased array ultrasonic testing method for weld defects of cylinder body of hydraulic support[J]. Coal Engineering, 2023, 55(11): 154-159.(in Chinese)
- [2] DRINKWATER B W, WILCOX P D. Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: a review[J]. NDT & E International, 2006, 39(7): 525-541.
- [3] TANT K M M, MULHOLLAND A J, GACHAGAN A. Application of the factorisation method to limited aperture ultrasonic phased array data[J]. Acta Acustica United with Acustica, 2017, 103(6): 954-966.
- [4] 周正干, 李尚凝, 李洋. 相控阵超声检测方案设计关键技术及其在航空航天领域的应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(4): 461-467.
ZHOU Zhenggan, LI Shangning, LI Yang. Key techniques of ultrasonic phased array testing solution design and its application in aerospace[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(4): 461-467.(in Chinese)

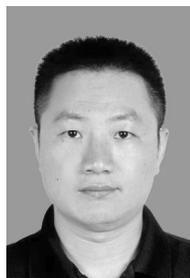
- [5] SI J, WEI D, YANG Y, et al. CIVA simulation and experiment verification for thin-walled small-diameter pipes by using phased array ultrasonic testing[C]//Pressure Vessels and Piping Conference. Virtual: Pressure Vessels and Piping Division, 2020: 21164.
- [6] SHAN B H, WANG H, DUAN Z D, et al. The application of ultrasonic phased array technology to offshore platform structures inspection[C] //Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering. San Diego, California, United States: SPIE, 2007: 65300U.
- [7] KIM G, SEO M K, KIM Y I, et al. Development of phased array ultrasonic system for detecting rail cracks [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 311: 112086.
- [8] KIM Y, YANG S, YOON B. P1H-5 application of phased array ultrasonic technique to straddle mount type low pressure turbine[C]//2006 IEEE Ultrasonics Symposium. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2006: 1413-1416.
- [9] 赵朋, 纪凯鹏, 颀俊, 等. 高性能聚合物注射成型构件超声相控阵高效成像方法研究[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(16): 33-42.
ZHAO Peng, JI Kaipeng, JIE Jun, et al. Research on fast ultrasonic phased array imaging of high-performance polymer injection molded components[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(16): 33-42. (in Chinese)
- [10] LIU H, CHEN Z J, LIU Y J, et al. Interfacial debonding detection for CFST structures using an ultrasonic phased array: application to the Shenzhen SEG building [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 192: 110214.
- [11] ROY O, MAHAUT S, SERRE M, et al. Application of ultrasonic beam-forming and self-focusing techniques to defect characterization[C]//First International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components. Amsterdam, Netherlands: Joint Research Centre of the European Commission, 1999: 480-487.
- [12] SUMAN A, KUMAR A. Parametric study on resolution achieved using FMC-TFM-Based phased array ultrasonic imaging [C] //Advances in Non-destructive Evaluation. Singapore: Springer, 2021: 329-339.
- [13] VOLKER A. Plane wave imaging using phased array [C]//40th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Incorporating the 10th International Conference on Barkhausen Noise and Micro-magnetic Testing. Baltimore, Maryland, USA: AIP, 2014: 124-131.
- [14] CAMACHO J, FRITSCH C. Phase coherence imaging of grained materials[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2011, 58(5): 1006-1015.
- [15] YAN F, ROYER J R L, ROSE J L. Ultrasonic guided wave imaging techniques in structural health monitoring [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2010, 21(3): 377-384.
- [16] HASSANI S, DACKERMANN U. A systematic review of advanced sensor technologies for non-destructive testing and structural health monitoring [J]. *Sensors*, 2023, 23(4): 2204.
- [17] MICHAELS J E, MICHAELS T E, MARTIN R S. Analysis of global ultrasonic sensor data from a full scale wing panel test[C]//Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Proceedings of the 35th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Chicago: AIP, 2009: 950-957.
- [18] MOLES M. Portable phased array applications [C] //3rd Middle East Nondestructive Testing Conference and Exhibition. Toronto, Canada: MENDT, 2005: 1-18.
- [19] HOLMES C, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation [J]. *NDT & E International*, 2005, 38(8): 701-711.
- [20] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 43921—2024 无损检测 超声检测 全矩阵采集/全聚焦技术[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [21] CAMACHO J, PARRILLA M, FRITSCH C. Phase coherence imaging[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2009, 56(5): 958-974.
- [22] 张瑞, 钟德煌, 王晓宁. 相控阵超声相位相干成像(PCI)检测原理及应用[J]. *无损检测*, 2024, 46(1): 6-9.
ZHANG Rui, ZHONG Dehuang, WANG Xiaoning. The inspection theory of phased array ultrasonic PCI technique and its application[J]. *Nondestructive Testing*, 2024, 46(1): 6-9. (in Chinese)
- [23] ZHUANG Z, ZHANG J, LIAN G X, et al. Comparison of time domain and frequency-wavenumber domain ultrasonic array imaging algorithms for non-destructive evaluation[J]. *Sensors*, 2020, 20(17): 4951.
- [24] LE-JEUNE L, ROBERT S, LOPEZ-VILLAVARDE E, et al. Plane wave imaging for ultrasonic non-destructive testing: generalization to multimodal imaging [J]. *Ultrasonics*, 2016, 64: 128-138.
- [25] 丁辉. 计算超声学: 声场分析及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 10-45.
- [26] KWAN C H, PAINCHAUD A G, LEPAGE B. TFM

- acoustic influence map [C] // Proceedings of the 2019 ASNT Research Symposium. Garden Grove, CA: The American Society for Nondestructive Testing Inc., 2019: 4-14.
- [27] 李天骥, 石永生, 陈峰, 等. 基于超声相控阵全聚焦DAC图谱的钢轨缺陷定量方法[J]. 机械工程学报, 2021, 57(18): 32-41.
LI Tianji, SHI Yongsheng, CHEN Feng, et al. Quantitative method of rail flaws based on ultrasonic phased array and total focusing DAC mappings[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(18): 32-41.(in Chinese)
- [28] BAJGHOLI M E, ROUSSEAU G, VIENS M, et al. Reliability assessment of non-destructive testing (NDT) for the inspection of weld joints in the hydroelectric turbine industry[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 128(9): 4223-4233.
- [29] XU Q, WANG H T, TIAN G Y, et al. Total focusing method approach of ultrasonic phased array based on compressed sensing[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2022, 58(5): 355-368.
- [30] CANDÈS E J, WAKIN M B. An introduction to compressive sampling [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(2): 21-30.
- [31] GUAN X F, HE J J. Life time extension of turbine rotating components under risk constraints: a state-of-the-art review and case study [J]. International Journal of Fatigue, 2019, 129: 104799.
- [32] CAO H Q, GUO S F, HE Z K, et al. In situ elastic constant determination of unidirectional CFRP composites via backwall reflected multi-mode ultrasonic bulk waves using a linear array probe[J]. Composites Part B Engineering, 2022, 238: 109953.
- [33] LIU Y, TIAN Q, YU P, et al. Shape and size evaluations of elongated grains using phased array ultrasound and directional backscattering method[J]. NDT & E International, 2022, 129: 102634.
- [34] LIU Y, WANG X Y, OLIVEIRA J P, et al. Spatial and directional characterization of wire and arc additive manufactured aluminum alloy using phased array ultrasonic backscattering method [J]. Ultrasonics, 2023, 132: 107024.
- [35] 刘雨, 田强, 王新艳, 等. 基于单向测量超声背散射系数的晶粒尺寸评价高效方法[J]. 物理学报, 2024, 73(7): 209-217.
LIU Yu, TIAN Qiang, WANG Xinyan, et al. Efficient grain size evaluation based on single direction measurement of ultrasonic backscattering coefficient[J]. Acta Physica Sinica, 2024, 73(7): 209-217.(in Chinese)
- [36] VAN S R J G, COHEN R, ELDAR Y C. Deep learning in ultrasound imaging[J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 108(1): 11-29.
- [37] MEDAK D, POSILOVIC L, SUBASIC M, et al. Automated defect detection from ultrasonic images using deep learning [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2021, 68(10): 3126-3134.
- [38] GAO F, LI B, CHEN L, et al. Ultrasound image super-resolution reconstruction based on semi-supervised CycleGAN[J]. Ultrasonics, 2024, 137: 107177.
- [39] CAI Y, SONG Y, NI P, et al. Subwavelength ultrasonic imaging using a deep convolutional neural network trained on structural noise[J]. Ultrasonics, 2021, 117: 106552.
- [40] 高鹏, 李法新. 非线性超声相控阵无损检测系统及实验研究[J]. 实验力学, 2014, 29(1): 1-11.
GAO Peng, LI Faxin. Nonlinear ultrasonic phased array nondestructive testing system and performance study [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(1): 1-11.(in Chinese)
- [41] YU L D, SONG Y F, LI X B. Ultrasonic pseudo-color imaging in strongly attenuating materials with filtered-delay multiply and sum nonlinear beamforming [J]. NDT & E International, 2022, 130: 102660.
- [42] SUGAWARA A, JINNO K, OHARA Y, et al. Closed-crack imaging and scattering behavior analysis using confocal subharmonic phased array [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2015, 54: 07HC08.
- [43] PARK C S, KIM J W, CHO S, et al. A high resolution approach for nonlinear sub-harmonic imaging [J]. NDT & E International, 2016, 79: 114-122.
- [44] OHARA Y, TAKAHASHI K, INO Y, et al. High-selectivity imaging of closed cracks in a coarse-grained stainless steel by nonlinear ultrasonic phased array [J]. NDT & E International, 2017, 91: 139-147.
- [45] HAUPERT S, RENAUD G, SCHUMM A. Ultrasonic imaging of nonlinear scatterers buried in a medium [J]. NDT & E International, 2017, 87: 1-6.
- [46] OHARA Y, NAKAJIMA H, TSUJI T, et al. Nonlinear surface-acoustic-wave phased array with fixed-voltage fundamental wave amplitude difference for imaging closed cracks[J]. NDT & E International, 2019, 108: 102170.
- [47] POTTER J N, CROXFORD A J, WILCOX P D. Nonlinear ultrasonic phased array imaging [J]. Physical Review Letters, 2014, 113(14): 144301.
- [48] CHENG J, POTTER J N, CROXFORD A J, et al. Monitoring fatigue crack growth using nonlinear ultrasonic phased array imaging [J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(5): 055006.

- [49] 焦敬品, 杨素方, 马婷, 等. 基于不同相控聚焦模式的非线性超声阵列成像方法研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(14): 15-24.
- JIAO Jingpin, YANG Sufang, MA Ting, et al. Nonlinear imaging using ultrasonic array under different phased mode [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(14): 15-24.(in Chinese)
- [50] 刘志勇, 滕达, 项延训. 幅度调制的非线性超声相控阵成像方法[J]. 应用声学, 2021, 40(6): 856-864.
- LIU Zhiyong, TENG Da, XIANG Yanxun. Research on nonlinear ultrasonic phased array imaging based on amplitude modulation [J]. Journal of Applied Acoustics, 2021, 40(6): 856-864.(in Chinese)
- [51] EBRAHIM-SAIB Z M, DRINKWATER B W, CROXFORD A J. Characterisation of coherent ultrasonic nonlinear imaging [J]. NDT & E International, 2024, 145: 103107.
- [52] TZAFERIS K, TABATABAEIPOUR M, DOBIE G, et al. Single-mode Lamb wave excitation at high-frequency-thickness products using a conventional linear array transducer[J]. Ultrasonics, 2023, 130: 106917.
- [53] YUAN Q, KATO B, FAN K Q, et al. Phased array guided wave propagation in curved plates[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 185: 109821.
- [54] LI X, LIU L S, XU H M, et al. Lamb wave phased array imaging based on phase-amplitude compounding algorithm [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 205: 110882.
- [55] LANG Y F, YANG Z B, YANG L H, et al. Lamb wave frequency diverse array[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2022, 69(8): 2526-2539.
- [56] HINRICHS J, SACHSENWEGER M, RUTSCH M, et al. Lamb waves excited by an air-coupled ultrasonic phased array for non-contact, non-destructive detection of discontinuities in sheet materials [C] //2021 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). Xi'an, China: IEEE, 2021: 1-4.
- [57] JÄGER A, GROßKURTH D, RUTSCH M, et al. Air-coupled 40 kHz ultrasonic 2D-phased array based on a 3D-printed waveguide structure [C] //2017 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). Washington, DC, USA: IEEE, 2017: 1-4.
- [58] ALLEVATO G, HINRICHS J, RUTSCH M, et al. Real-time 3-D imaging using an air-coupled ultrasonic phased-array [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2021, 68(3): 796-806.
- [59] HINRICHS J, HAUGWITZ C, RUTSCH M, et al. Simulation of lamb waves excited by an air-coupled ultrasonic phased array for non-destructive testing [C] //2022 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). Venice, Italy: IEEE, 2022: 1-4.
- [60] LAUB F, HAUGWITZ C, ALLEVATO G, et al. Non-contact lamb wave defect detection based solely on air-coupled ultrasonic phased arrays [C] //2023 IEEE SENSORS. Vienna, Austria: IEEE, 2023: 1-4.
- [61] TOWLSON A R K, CROXFORD A J, DRINKWATER B W. Air-coupled ultrasonic arrays for assessment of pipe internal geometry and surface condition [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2024, 71(4): 474-484.
- [62] XU T Z, ZHANG Z J, TUMOLIN ROCHA R, et al. Theoretical validation of a single-channel air-coupled PMUT with multi-frequency operation for compressed 3D spatial sensing[J]. IEEE Open Journal of Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2024, 4: 37-51.
- [63] ZHANG H, LI S J, WANG J J, et al. Air-coupled capacitive micromachined transducer array for non-contact Lamb wave detection [J]. Sensors and Actuators, A: Physical, 2023, 355: 114315.
- [64] THON A, PAINCHAUD-APRIL G, LE DUFF A, et al. On the use of a linear array EMAT for remote thickness gauging using the reflected modes on a steel pipe[J]. NDT & E International, 2023, 139: 102917.
- [65] ZHANG Y, PEI C, DENG J, et al. Development of a phased array flexible rayleigh-wave electromagnetic acoustic transducer for pipe inspection[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2023, 71(supp1): S541-S549.
- [66] PEIN, ZHAO B, BOND L J, et al. Analysis of the directivity of longitudinal waves based on double-fold coil phased EMAT[J]. Ultrasonics, 2022, 125: 106788.
- [67] LIU H B, LIU T R, YANG P X, et al. Design and experiment of array rayleigh wave-EMAT for plane stress measurement[J]. Ultrasonics, 2022, 120: 106639.
- [68] BRUDER D D, MCGOVERN M E, JAMES R, et al. Assessment of laser-generated ultrasonic total focusing method for battery cell foil weld inspection [J]. Research in Nondestructive Evaluation, 2023, 34 (2) : 83-100.
- [69] HE H B, SUN K H, SUN C M, et al. Suppressing artifacts in the total focusing method using the directivity of laser ultrasound [J]. Photoacoustics, 2023, 31: 100490.
- [70] CANTERO C S, CROXFORD A J, WILCOX P D. Optimising laser-induced phased-arrays for defect detection in continuous inspections [J]. NDT & E International, 2024, 144: 103091.

- [71] MEI Y J, CHEN J, ZENG Y K, et al. Laser ultrasonic imaging of complex defects with full-matrix capture and deep-learning extraction [J]. *Ultrasonics*, 2023, 129: 106915.
- [72] WANG B, CHENG Z, LIAO W, et al. Non-contact detection of the interfacial microdefects in metal/CFRP hybrid composites using air-coupled laser ultrasound [J]. *Structural Health Monitoring*, 2024, 0(0): 1-12.
- [73] CHEN W W, LU C, LI X B, et al. A novel laser-EMAT ultrasonic longitudinal wave resonance method for wall thickness measurement at high temperatures [J]. *Ultrasonics*, 2024, 141: 107340.
- [74] CHEN Y, JIANG L Z, PENG Y C, et al. Ultra-fast laser ultrasonic imaging method for online inspection of metal additive manufacturing [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 160: 107244.
- [75] CANTERO-CHINCHILLA S, ARANGUREN G, ROYO J M, et al. Structural health monitoring using ultrasonic guided-waves and the degree of health index [J]. *Sensors*, 2021, 21(3): 993.
- [76] GAUTHIER B, PAINCHAUD-APRIL G, LEDUFF A, et al. Lightweight and amplitude-free ultrasonic imaging using single-bit digitization and instantaneous phase coherence [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2022, 69(5): 1763-1774.
- [77] SUN X, CROXFORD A J, DRINKWATER B W. Continuous monitoring with a permanently installed high-resolution ultrasonic phased array [J]. *Structural Health Monitoring*, 2023, 22(5): 3451-3464.
- [78] YANG J J, FAN G P, XIANG Y X, et al. Low-frequency ultrasonic array imaging for detecting concrete structural defects in blind zones [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 425: 135948.
- [79] 张辉, 朱文发, 范国鹏, 等. 非连续阻抗粘接结构脱粘缺陷的稀布阵列超声成像 [J]. *物理学报*, 2023, 72(2): 144-152.
ZHANG Hui, ZHU Wenfa, FAN Guopeng, et al. Thinned array ultrasonic imaging of debonding defects in discontinuous impedance bonded structures [J]. *Acta Physica Sinica*, 2023, 72(2): 144-152. (in Chinese)
- [80] THURNHERR C, MULLER A, RÖSSLER L, et al. Uncrewed aerial concrete inspection system [C] // *The International Symposium on Nondestructive Testing in Civil Engineering*. Zurich, Switzerland: NDT, 2022: 1-6.
- [81] SHAN S, PAN Y, XIAO S. An efficient damage quantification method for cylindrical structures enhanced by a dry-point-contact torsional-wave transducer [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(2): 572.
- [82] HU H J, ZHU X, WANG C H, et al. Stretchable ultrasonic transducer arrays for three-dimensional imaging on complex surfaces [J]. *Science Advances*, 2018, 4(3): 3979.
- [83] HAQUE R I, VIÉ R, GERMAIN M, et al. Inkjet printing of high molecular weight PVDF-TrFE for flexible electronics [J]. *Flexible and Printed Electronics*, 2016, 1(1): 015001.
- [84] SHEN Z Y, CHEN S T, ZHANG L, et al. Direct-write piezoelectric ultrasonic transducers for non-destructive testing of metal plates [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(11): 3354-3361.
- [85] ZHOU P Y, YANG X B, SU Y I, et al. Direct-write nanocomposite sensor array for ultrasonic imaging of composites [J]. *Composites Communications*, 2021, 28: 100937.
- [86] LI W K, CAO H L, ZHANG L Y. Impact detection based on in-situ direct writing piezoelectric polymer sensor array [C] // *2023 International Conference on Sensing, Measurement & Data Analytics in the Era of Artificial Intelligence (ICSMD)*. Xi'an, China: IEEE, 2023: 1-6.
- [87] LI Y H, YAO Z J, JIANG C, et al. Investigation on local monitoring paradigms of in-situ conformally fabricated piezopolymer coating-based array transducers: ultrasonic bulk waves and local ultrasonic resonances [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2024, 208: 110999.
- [88] JANELIUKSTIS R, MIRONOV D. Smart composite structures with embedded sensors for load and damage monitoring - a review [J]. *Mechanics of Composite Materials*, 2021, 57(2): 131-152.
- [89] MEYER Y, LACHAT R, AKHRAS G. A review of manufacturing techniques of smart composite structures with embedded bulk piezoelectric transducers [J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(5): 053001.
- [90] SU Y I, YANG J W, LIAO Y Z, et al. An implantable, compatible and networkable nanocomposite piezoresistive sensor for in situ acquisition of dynamic responses of CFRPs [J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 208: 108747.
- [91] SU Y I, XU L, ZHOU P Y, et al. In situ cure monitoring and In-service impact localization of FRPs using pre-implanted nanocomposite sensors [J]. *Composites, Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2022, 154: 106799.
- [92] SU Y I, ZHOU H M, GUO X S, et al. Ultrafast-responsive carbon nanotube-grafted fibre textiles [J]. *Composites Communications*, 2023, 38: 101496.
- [93] SPICHER N, SCHWEINS M, THIELECKE L, et

- al. Feasibility analysis of fifth-generation (5G) mobile networks for transmission of medical imaging data[C]//2021 43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC). [S.l.]: IEEE, 2021: 1791-1795.
- [94] ASTM Committee E07. ASTM E2663—23 Standard practice for digital imaging and communication in nondestructive evaluation (DICONDE) for ultrasonic test methods[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2023.
- [95] ASTM Committee E07. ASTM E1454—02 Standard guide for data fields for computerized transfer of digital ultrasonic examination data[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2002.
- [96] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 25759—2010 无损检测 数字化超声检测数据的计算机传输数据段指南[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [97] LI H Q, ZHANG Z X, LI T M, et al. A review on physics-informed data-driven remaining useful life prediction: challenges and opportunities [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2024, 209: 111120.
- [98] PAN Y H. Heading toward artificial intelligence 2.0[J]. Engineering, 2016, 2(4): 409-413.
- [99] 金哲, 张引, 吴飞, 等. 数据驱动与知识引导下人工智能算法模型[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(7): 2580-2594.
- JIN Zhe, ZHANG Yin, WU Fei, et al. Artificial intelligence algorithms based on data-driven and knowledge-guided models[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2023, 45(7): 2580-2594.(in Chinese)
- [100] 田晟兆, 胡迎茜, 谷成, 等. 知识与数据联合驱动建模技术综述[J]. 电子科技大学学报, 2023, 52(6): 932-943.
- TIAN Shengzhao, HU Yingqian, GU Cheng, et al. A review of modeling techniques jointly driven by knowledge and data [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2023, 52(6): 932-943.(in Chinese)
- [101] 黄旭, 柳嘉润, 张远, 等. 知识与数据混合驱动的高速飞行控制方法综述[J]. 宇航学报, 2023, 44(8): 1113-1126.
- HUANG Xu, LIU Jiarun, ZHANG Yuan, et al. Review on knowledge-based and data-driven cooperating control methods of high-speed vehicle [J]. Journal of Astronautics, 2023, 44(8): 1113-1126.(in Chinese)
- [102] ALKHADHR S, ALMEKKAWY M. Modeling of the wave propagation of a multi-element ultrasound transducer using neural networks [C]//2021 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). Xi'an, China: IEEE, 2021: 1-4.
- [103] YOO Y, ZHANG X, WANG F, et al. Spark plasma sintering of tungsten-based WTaVCr refractory high entropy alloys for nuclear fusion applications [J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2024, 31(1): 146-154.
- [104] RAY T E, TRIPATHI J K, HASSANEIN A. Synergistic effects of W-Ta alloys exposed to various ELM-like fusion events [J]. Nuclear Fusion, 2024, 64: 046001.
- [105] LINSMEIER C, RIETH M, AKTAA J, et al. Development of advanced high heat flux and plasma-facing materials [J]. Nuclear Fusion, 2017, 57(9): 092007.
- [106] 豆艳坤, 靳柯, 贺新福, 等. 高熵合金的抗辐照性能研究进展 [J]. 原子能科学技术, 2019, 53(10): 1868-1884.
- DOU Yankun, JIN Ke, HE Xinfu, et al. Research progress on anti-irradiation property of high-entropy alloy [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, 53(10): 1868-1884.(in Chinese)
- [107] BUDAIEV V P, MARTYNENKO Y V, KARPOV A V, et al. Tungsten recrystallization and cracking under ITER-relevant heat loads [J]. Journal of Nuclear Materials, 2015, 463: 237-240.
- [108] WANG R, LI B, JIANG B Y, et al. Automated immersion ultrasonic testing technology for debonding defects of the brazed joint of DOME in EAST divertor [J]. Fusion Engineering and Design, 2022, 176: 113008.



第一作者简介: 纪轩荣,男,1980年8月生,博士、教授、博士生导师。省部共建精密电子制造技术与装备国家重点实验室副主任,上市企业广州多浦乐联合创始人,广州市杰出产业领军人才,兼任中国医学装备协会超声分会超声换能器与材料专委会主任委员、中国无损检测学会超声专委会副主任委员、国际标准化组织 ISOTC135/SC3 委员。主要研究方向为新型超声无损检测与监测、超声生物效应及生物医学成像等。主持国家重大科学仪器设备开发专项、国家科技支撑计划、珠江人才计划创新团队等课题,获中国仪器仪表学会科技成果奖、中国特种设备检验协会科学技术奖一等奖等。

E-mail: xr.ji@gdut.edu.cn