

# 北京工业大学无损检测与评价研究所

## 2020 年度研究进展

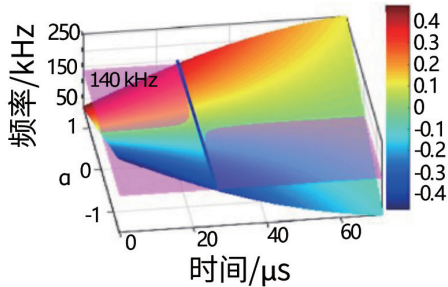
北京工业大学无损检测与评价研究所成立于 1998 年，隶属于学校机械工程与应用电子学院，重点招收机械工程、仪器科学与技术等两个一级学科的硕士生和博士生，主要研究方向为如何利用声、光、电的波动特性对机械结构、功能材料等进行无损检测与结构健康监测。

研究所现有教授 7 名，副教授 1 名，讲师 6 名，博、硕士研究生 100 余名，其中，北京市拔尖创新人才 3 人，北京市创新团队 1 个，北京市科技新星 3 人，校“京华人才”2 人。自成立以来，研究所承担各类科研项目 70 余项，包括国家重点研发计划项目、国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目、国家自然科学基金重点项目、科技部 863 计划项目和国家科技支撑计划项目等，科研经费累计达 6 000 余万元。研究所在无损检测和结构健康监测新技术、新型传感器测试技术、高端检测设备及仪器开发等方面取得了丰硕的成果，针对企业需求，提供了多种定制化的解决方案，其中“防撞护栏钢立柱埋置深度无损检测技术研究及设备研制”项目获得浙江省科学技术奖二等奖。研究所已培养博士研究生 40 余人，硕士研究生 200 余人，出版专（译）著 5 部，在国内外学术期刊及会议上发表论文 700 余篇，其中 SCI 和 EI 检索 500 余篇，多篇获得国际会议最佳论文奖，申请专利 100 余项，授权发明专利 70 余项。

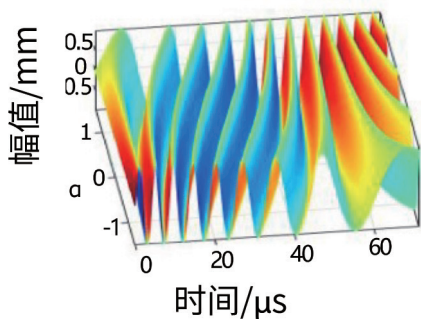
2020 年，北京工业大学无损检测与评价研究所针对国家重大工程中的关键构件健康问题开展了一系列的监测检测技术研究。在基础理论、方法研究、仪器开发、工程应用等方面均取得了一定进展，发表学术论文 40 余篇，申请和获批专利及软件著作权 10 余项；获批国家、省部级自然科学基金项目 3 项；横向课题若干项。

### 1 科学成果概述

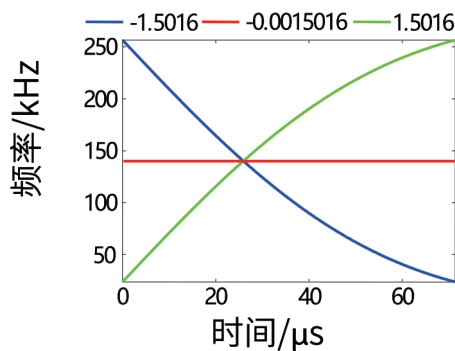
(1) 超声导波信号参数化表征方法的研究。基于 Chirplet 模型的参数化信号表征技术已经在超声导波的材料性能识别和结构完整性评估中引起了广泛地关注。使用高斯窗或线性调频函数建立的模型与实际情况不一致。在实际情况中，常采用汉宁窗调制的正弦信号作为激励信号，由于波的色散，接收到的信号具有非线性相位和不对称包络等特性。为了消除上述矛盾，提出了一种非线性汉宁窗线性调频模型，设计了一个非线性相位调制项来调制经典的汉宁窗和正弦函数。用双曲正切函数建立相位调制项，对非线性调制项和 NHWC（非线性汉宁窗线性调频）模型的性质进行了数学分析，包括时间的可变性、奇偶性和凹凸性。这些性质用于指导信号表征中的参数设置。NHWC 模型可以表征导波信号的各种特性，包括对称或不对称的汉宁包络以及相位非线性。最后，采用自适应遗传算法来验证 NHWC 模型在试验测量的超声信号参数表征中的有效性。非线性 Chirp 的 IF（瞬时频率）曲线和波形如图 1 所示。



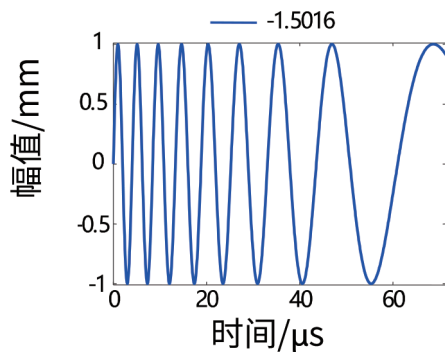
(a) 非线性 Chirp 的 IF



(b) 带有 IF 的非线性 Chirp 的波形映射



(c)  $\alpha$  分别为  $-1.5016$ ,  $-0.0015016$  和  $1.5016$  时的 IF 曲线



(d)  $\alpha = -1.5016$  时的非线性 Chirp 的波形

图 1 非线性 Chirp 的 IF 曲线和波形

在 *Journal of Nondestructive Evaluation* 期刊上发表了题为 *A nonlinear Hanning-windowed chirplet model for ultrasonic guided waves signal parameter representation* 的论文。

(2) 声发射源定位方法的研究。时差映射 (TDM) 方法是一种检测复杂结构缺陷的有效方法。该方法的核心

是在时差数据库中搜索距验证点最近的点。在传统的时差映射 (T-TDM) 方法和改进的时差映射 (I-TDM) 方法中, 更大的数据集和更密集的网格可以实现更高的定位精度。如果数据集中不包含定位点, 则 T-TDM 和 I-TDM 方法的定位精度将受到很大影响。针对上述问题, 提出了一种新的声源定位方法, 即基于时差映射的广义回归神经网络 (GRNN-TDM) 方法, 以实现更高的定位精度。该方法将时差映射中所有节点上传感器路径的时差数据作为训练输入数据, 并将网格节点的坐标作为训练输出数据。经过多次训练后, 神经网络模型会使用从验证点收集到的时差数据来预测其可能的源位置。为了研究 GRNN-TDM 方法对声发射源的定位效果, 对 4 种纤维层不同的复合板和带孔的铝板进行了研究。定位结果表明, GRNN-TDM 方法的定位精度高于 T-TDM 和 I-TDM 方法的, GRNN-TDM 方法的声发射源定位示意如图 2 所示。

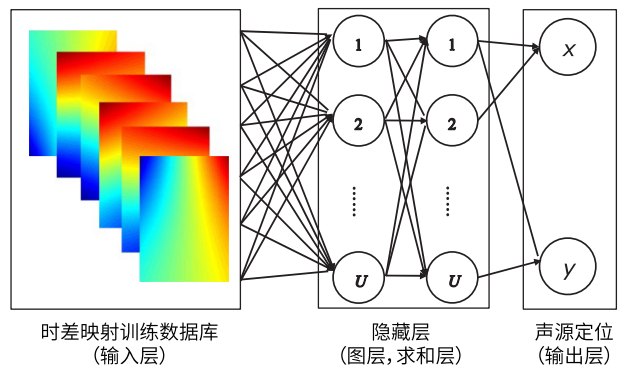


图 2 GRNN-TDM 方法的声发射源定位示意

在 *Experimental Mechanics* 期刊上发表了题为 *Acoustic emission source localization using generalized regression neural network based on time difference mapping method* 的论文。

(3) 超声导电磁声传感器结构设计的研究。为了提高电磁声换能器 (EMAT) 激发超声导波模态的单一性, 研制了一种先进的指向型磁集中器式电磁声传感器 (D-MC-EMAT), 用于在平板中激发出单一的  $S_0$  模态信号。磁集中器被添加到传统的 EMAT 中, 以引导和聚集由永磁体提供的偏置静磁场, 改变磁通密度的分布, 消除了不需要的  $A_0$  模态。有限元仿真和试验结果表明, 所提出的 D-MC-EMAT 通过添加磁集中器改善了传统 EMAT 的模式选择性和缺陷检测能力, 同时 D-MC-EMAT 具有较好的频率响应特性和声场指向性。指向型磁集中器式电磁声换能器结构如图 3 所示。

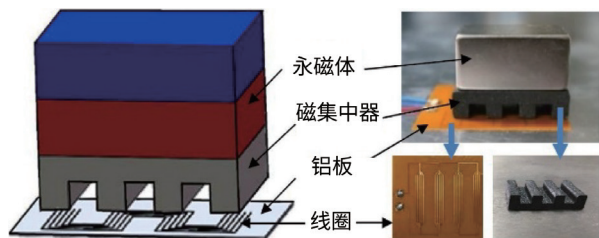
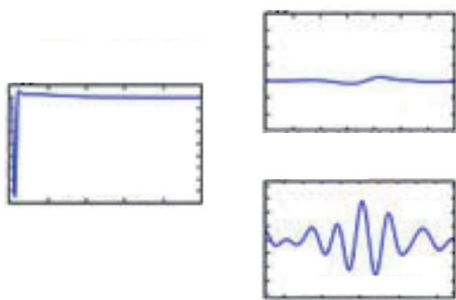


图3 指向型磁集中器式电磁声换能器结构示意图

在 *Sensors and Actuators A: Physical* 期刊上发表了题为 **Development of a directional magnetic-concentrator-type electromagnetic acoustic transducer for ultrasonic guided wave inspection** 的论文。

(4) 电磁声传感器的磁声复合检测研究。为了提高电磁超声测试的效率和鲁棒性，提出了针对铁磁性材料的磁声复合检测方法。通过电磁声换能器的一次检测可同时获得超声和脉冲涡流（PEC）信号。EMAT 利用磁致伸缩效应和洛伦兹力机制的耦合所产生的超声波来检测铁磁性材料。在保持模型几何形状和 EMAT 其他参数不变的条件下，通过耦合不同的物理场，建立了 3 个 EMAT 仿真模型。其中，横波可以由磁致伸缩力产生，纵波可以由洛伦兹力产生。对仿真结果进行时频分析发现，超声波和 PEC 的信号能量分布在不同的频率范围内。利用滤波器和时域信号分离方法，可以从 EMAT 信号中分离出磁致伸缩力超声波（MFUW）、洛伦兹力超声波（LFUW）和 PEC 对应的信号等成分。所提方法实现了一次 EMAT 检测即可提取多个参数，提高了电磁超声传感器的检测能力。铁磁性材料 EMAT 检测信号分离示意如图 4 所示。



(a) 分离前 (b) 分离后

图4 铁磁性材料 EMAT 检测信号分离示意

在 *IEEE Sensors Journal* 期刊上发表了题为 **Numerical decoupling study of EMAT testing signal for ferromagnetic materials** 的论文。

(5) 基于超声衍射波的风机主轴表面裂纹量化方法的研究。对风力发电机主轴表面开口横向裂纹量化表征的

问题进行了研究。利用中心孔内壁作为超声信号的接收面，提出了一种利用衍射纵波确定的双椭圆轨迹计算裂纹位置和扩展深度的新方法。该方法通过在主轴端面 and 中心孔位置处设置多个“传感器组合”来采集裂纹衍射波的渡越时间，并形成包含衍射点的椭圆曲线，从而达到测量裂纹尖端位置的目的。利用有限元方法建立了一激多收式检测模型，对 30 个不同位置、深度的裂纹进行了仿真研究。基于仿真结果，分析了影响裂纹量化精度的因素，并提出了提高裂纹评价精度的时间校准方法。为验证新方法实际的应用效果，在主轴试样上开展了试验研究。结果表明，在长距离检测小裂纹时，裂纹量化的最大误差小于 5 mm。该研究为风机主轴表面开口横向裂纹的量化表征提供了一种有效的检测方法。主轴表面横向裂纹尖端衍射声波传播路径如图 5 所示，主轴试样中的裂纹检测结果如图 6 所示。

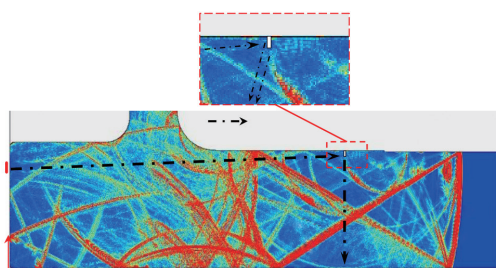


图5 主轴表面横向裂纹尖端衍射声波传播路径示意

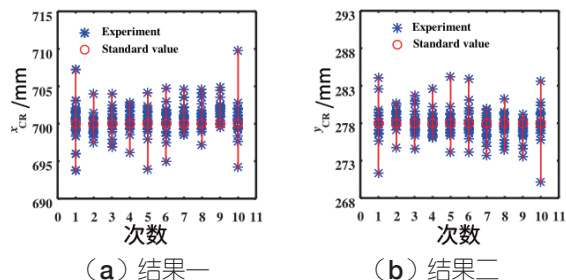


图6 主轴试样中的裂纹检测结果

在 *Smart Materials and Structures* 期刊上发表了题为 **Method for evaluation of surface crack size of wind turbine main shaft by using ultrasonic diffracted waves** 的论文。

(6) 基于圆形贴片天线的应变全向检测技术。根据应变花测量原理，确立贴片天线应变传感器对结构应变的全向检测方法，即只需获取贴片天线 3 个角度上频率的变化值，便可确定结构的主应变大小及方向。建立了应变全向检测系统（见图 7），并结合试验条件设计制作了拉伸试件。在拉伸试件上表面的受力均匀区域黏贴微带贴片天线，同时，在试件下表面的相同区域黏贴电阻应变片。在加载



不同主应力的情况下，分别利用圆形微带贴片天线应变传感器和电阻应变片测量了不同平面夹角方向的应变变化曲线。由测量结果可知，2种检测方法测量结构应变的数值一致，表明利用圆形贴片天线可表征结构应变的大小及方向，并且试验中最小可分辨的平面夹角为  $15^\circ$ 。应变随角度变化关系如图 8 所示。此外，相较于电阻应变片，圆形贴片天线应变传感器只需 1 组即可实现结构应变大小及方向的无源无线测量。

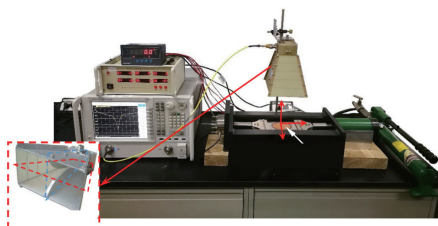
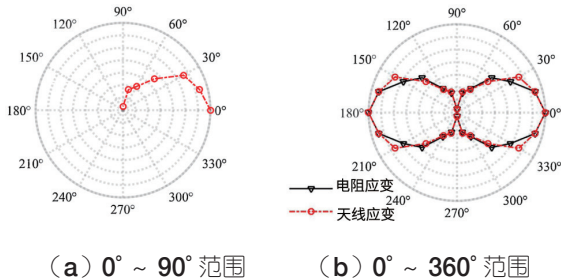


图 7 应变全向性检测系统外观



(a)  $0^\circ \sim 90^\circ$  范围 (b)  $0^\circ \sim 360^\circ$  范围

图 8 应变随角度变化关系示意

在 *Sensors and Actuators A: Physical* 期刊上发表了题为 *Strain omnidirectional detection based on circular patch antenna* 的论文。

(7) 基于勒让德正交多项式方法的锂离子电池超声反射特性研究。锂离子电池的内部信息，如材料性能和电化学状态，可以通过电池的充电状态 (SOC) 反映出来。超声无损检测方法可以用来表征电池的 SOC，获取超声波传播信息与 SOC 之间的关系。在电池充电过程中，正极的锂离子会脱出，并穿过隔膜，嵌入到负极中，使得内部电极材料的杨氏模量和密度发生变化，这将影响超声波在电池中的传播。锂离子电池充电过程如图 9 所示，负极石墨和正极钴酸锂的电极材料密度与杨氏模量随 SOC 的变化如图 10, 11 所示。

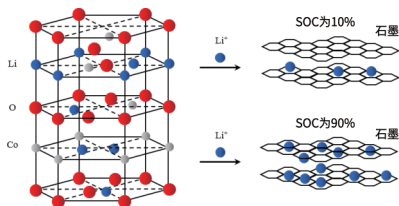
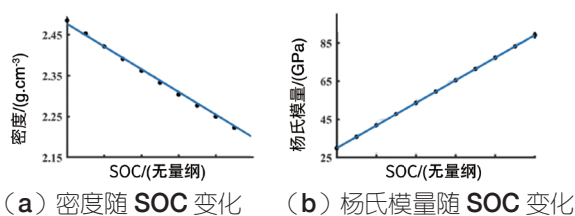
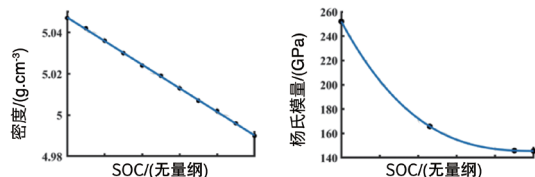


图 9 锂离子电池充电过程示意



(a) 密度随 SOC 变化 (b) 杨氏模量随 SOC 变化

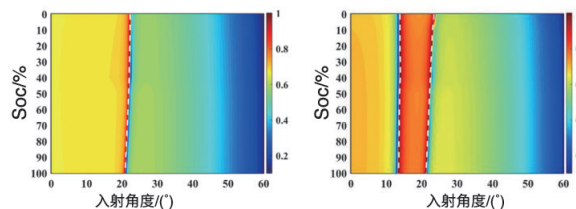
图 10 负极石墨的电极材料密度与杨氏模量随 SOC 的变化



(a) 密度随 SOC 变化 (b) 杨氏模量随 SOC 变化

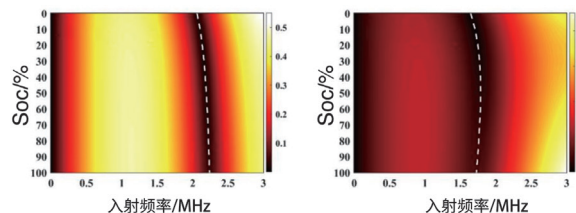
图 11 正极钴酸锂电极材料密度与杨氏模量随 SOC 的变化

该研究对锂离子电池中超声波的反射特性做出了清晰与全面的表述，首次提出了用勒让德正交多项式法求解一单元与多单元锂离子电池的反射系数。理论结果表明，反射系数的角频谱和频谱随 SOC 呈现规律性偏移，因此其可以用来表征 SOC。有限元模拟得到的结果与该方法高度吻合，验证了该方法的可行性 (见图 12 ~ 14)。



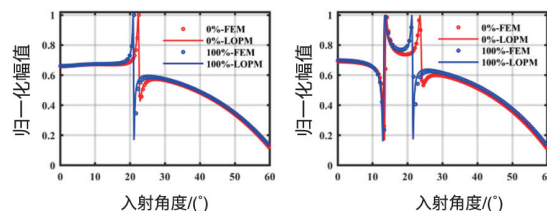
(a) 入射频率  $f = 0.8 \text{ MHz}$  (b) 入射频率  $f = 1 \text{ MHz}$

图 12 单元电池反射系数角度谱



(a) 入射角度  $\theta = 45^\circ$  (b) 入射角度  $\theta = 60^\circ$

图 13 单元电池反射系数频谱



(a) 入射频率  $f = 0.8 \text{ MHz}$  (b) 入射频率  $f = 1 \text{ MHz}$

图 14 电池反射系数角度谱理论、仿真对比

发表论文: Ultrasonic reflection characteristics of lithiumion battery based on Legendre orthogonal polynomial method. Wave motion, 2020(In press).

(8) 声波在厚胶层 (FRP) 黏接结构中的反射 / 透射特性理论分析。理论推导了液体负载下超声波在厚胶层 FRP 黏接结构中传播时的反射 / 透射系数表达式, 并基于此分析了黏接结构发生单黏接界面弱化、双黏接界面弱化时, 超声反射系数频谱、角度谱的偏移特征。研究发现, 黏接界面弱化时, 对应的超声反射系数频谱将向低频方向偏移, 而超声反射系数角度谱将向大角度方向偏移。另外, 当厚胶层 FRP 黏接结构中的两个黏接界面分别发生同等程度弱化、非同等程度弱化时, 超声反射系数频谱曲线中的极小值点将按照不同的偏移规律移动。厚胶层 FRP 黏接结构理论分析模型如图 15 所示, 双黏接界面弱化时的超声反射系数频谱如图 16 所示。

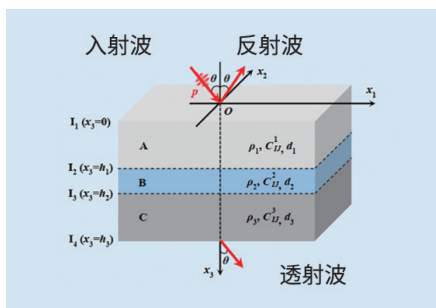


图 15 厚胶层 FRP 黏接结构理论分析模型

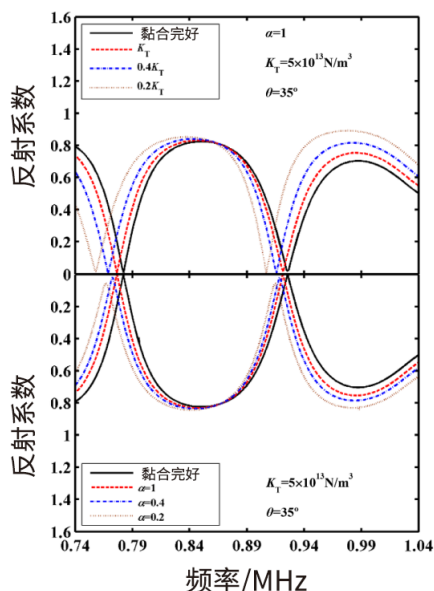


图 16 双黏接界面弱化时的超声反射系数频谱

在 Theoretical analysis. Composite Structures 期刊上发表了 Ultrasonic reflection characteristics of FRP-to-FRP bonded joints with thick adhesive

layers for bonding evaluation 论文。

## 2 仪器研制与平台搭建

(1) 研制了一种制氢炉管内壁蠕变裂纹超声原位自动检测系统。该系统包括计算机、多通道超声系统控制电路、电机驱动板、空心杯电机、旋转电机、爬管机器、多通道压电换能器检测环等 (见图 17)。其中, 多通道压电换能器沿炉管周向布置, 用于检测炉管的内壁裂纹; 计算机通过无线网络向多通道超声系统控制电路发送检测指令; 多通道超声系统控制电路控制多路同时激励压电换能器, 并接收来自压电换能器的回波信号, 然后将回波信号通过无线的方式传回计算机, 同时, 系统控制电路向电机驱动板发送运动指令; 电机驱动板驱动空心杯电机带动爬管机器运动, 并接收电机编码器传回的运动参数, 通过系统控制电路发回至计算机, 实现自动检测。爬管检测机械结构如图 18 所示。该发明解决了制氢炉管内壁蠕变裂纹原位检测的问题, 实现了对炉管内壁蠕变裂纹的无线、远程超声自动检测。

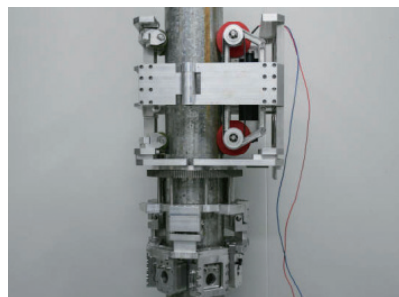


图 17 爬管检测机械结构外观

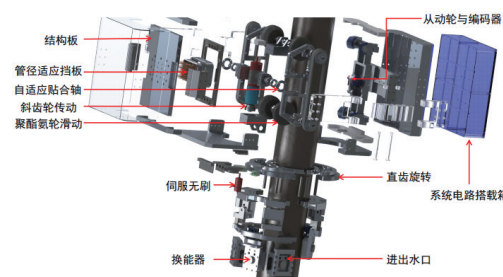


图 18 爬管检测机械结构示意图

笔者同时申请了一篇题为《一种制氢炉管内壁蠕变裂纹超声原位自动检测系统》的专利。

(2) 针对现有颗粒碰撞噪声检测 (PIND) 系统存在的检测精度低、误判漏判率较高、不能实时判断内部多余物材料等问题, 提出了一种基于神经网络的多余物自动检测与识别方法, 研制了密封电子器件多余物自动检测系统 (见图 19)。该系统采用大功率电磁式振动台为多余物检测

提供振动激励，利用多通道融合传感器采集碰撞噪声信号，通过高速数据采集系统将信号传递至上位机。上位机采用短时能量门限检测法提取信号脉冲；提取多种时频域特征，并与小波域特征相结合；通过训练多输出的神经网络预测模型自动判断被测件内部是否存在多余物颗粒，并自动给出多余物材料信息。试验结果表明，该系统判断质量为 **0.1 mg** 以上多余物有无的准确率可达 **99%**，对多余物材料识别的准确率可达 **91%**。

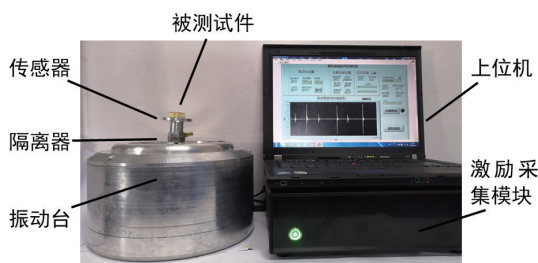


图 19 密封电子器件多余物检测系统外观

申请软件著作权为 **PIND** 系统颗粒碰撞噪声自动检测与材料识别软件。

### 3 科研项目

2020 年无损检测与评价研究所获批国家自然科学基金项目：① 锂离子电池内部全场状态参数的声学无损表征方法研究；② 金属板中疲劳裂纹的兰姆波逆时偏移成像方法研究。

获批北京市教育委员会科技计划重点项目 1 项：新能源电池荷电状态与健康状态无损检测与评价方法研究。

### 4 部分学术论文

[1] CHENG J, HE C, LYU Y, et al. Method for evaluation of surface crack size of wind turbine main shaft by using ultrasonic diffracted waves[J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(7): 075009.

[2] SONG G, ZHANG B, LYU Y, et al. Strain omnidirectional detection based on circular patch antenna[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 315: 112275.

[3] HE C, LI Y, LYU Y, et al. Ultrasonic reflection characteristics of FRP-to-FRP bonded joints with thick adhesive layers for bonding evaluation: Theoretical analysis[J]. Composite Structures, 2020, 246:112402.

[4] CHENG J, HE C, LYU Y, et al. Ultrasonic

inspection of the surface crack for the main shaft of a wind turbine from the end face[J]. NDT&E International, 2020, 114: 102283.

[5] LYU H, ZHANG J, JIAO J, et al. Fatigue crack inspection and characterization using non-collinear shear wave mixing [J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(5):055024.

[6] LIU H, WANG H, LYU Y, et al. A novel triboelectric nanogenerator based on carbon fiber reinforced composite lamina and as a self-powered displacement sensor[J]. Microelectronic Engineering, 2020, 224: 111231.

[7] LIU H, LIU S, CHEN X, et al. Coupled Lamb waves propagation along the direction of non-principal symmetry axes in pre-stressed anisotropic composite lamina[J]. Wave Motion, 2020, 97: 102591.

[8] LIU Z, LI A, WU B, et al. Development of a wholly flexible surface wave electromagnetic acoustic transducer for pipe inspection[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2020, 62(1):13-29.

[9] LIU Z, DENG L, ZHANG Y, et al. Development of an omni-directional magnetic concentrator type electromagnetic acoustic transducer[J]. NDT&E International, 2020, 109:102193.

[10] LIU Z, DENG L, ZHANG Y, et al. Development of a directional magnetic-concentrator-type electromagnetic acoustic transducer for ultrasonic guided wave inspection[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 303: 111859.

[11] LIU Z, ZHAO X, PEI N, et al. Numerical decoupling study of EMAT testing signal for ferromagnetic materials[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(7):3476-3486.

[12] LIU Z, PENG Q, LI X, et al. Acoustic emission source localization using generalized regression neural network based on time difference mapping method[J]. Experimental Mechanics, 2020, 60:679-694.

[13] CHEN H, LIU Z, WU B, et al. A nonlinear



Hanning-windowed chirplet model for ultrasonic guided waves signal parameter representation[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2020, 39(3):1-7.

[14] ZHANG X, LIU X, WU B, et al. An improved analytical model of the magnetostriction-based EMAT of SH0 mode guided wave in a ferromagnetic plate[J]. Ultrasonics, 2020, 108:106213.

[15] LIU X, DONG H, HE C, et al. Quantitative evaluation of residual stress and surface hardness in deep drawn parts based on magnetic Barkhausen noise technology[J]. Measurement, 2020, 168:108473.

[16] WANG H, WU B, LIU X, et al. Influencing factors of the performance of an impact buffering made of the composite granular chain[J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 137:103463.

[17] LI M, WU B, LIU X, et al. Highly non-linear solitary wave imaging method for detecting cylindrical defects in the metal plate of an adhesive composite metal structure[J]. Insight, 2020, 62(6):331 -337.

[18] HE C, DOU W, LIU X, et al. A sensitivity mapping technique for tensile force and case depth characterization based on magnetic minor hysteresis loops[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020, 33:84-85.

[19] WANG Y, MELIKHOV Y, MEYDAN T, et al. Stress-dependent magnetic flux leakage: Finite element modelling simulations versus experiments[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2020, 39(1):1-9.

[20] 张学聪, 吕炎, 吴斌, 等. 瞬态波位移场计算方法在相控阵声场模拟中的实验验证 [J]. 声学学报, 2020, 45(3):359-366.

[21] 何存富, 任哲文, 吕炎, 等. 基于勒让德正交多项式法的反射 / 透射特性研究 [J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(7):1258-1266.

[22] 宋国荣, 杜晓宇, 吕炎, 等. 预应力薄板材料液固界面声反射 / 透射系数的声弹效应表征新方法 [J]. 机械工程学报, 2020, 56(12):19-25.

[23] 宋国荣, 刘明坤, 吕炎, 等. 正交各向异性板液 / 固界面的声反射与声透射 [J]. 声学学报, 2020, 45(1):77-86.

[24] 刘增华, 彭秋玲, 李欣, 等. 基于时间差映射方法的钢板声发射源定位. 应用基础与工程科学学报. 2020, 48(2):475-485.

[25] 刘增华, 彭秋玲, 何存富, 等. 复合材料板声发射源定位的时间差映射方法. 声学学报. 2020, 45(3):385-393.

[26] 刘增华, 马春雷, 陈洪磊, 等. 密集型矩形阵列参数对激光 Lamb 波成像的影响分析 [J]. 振动与冲击, 2020, 39(14):87-93.

[27] 刘增华, 张婷婷, 苏瑞祥, 等. 基于十字形阵列和 2D-MUSIC 算法的 Lamb 波检测 [J]. 中国机械工程, 2020, 31(17):2038-2044.

[28] 陈洪磊, 刘增华, 李子明, 等. 有限单元法在超声导波检测技术中的应用研究 [J]. 力学进展, 2020, 50(9):310-357.

[29] 何存富, 丁冬冬, 刘秀成, 等. 65Mn 钢板电镀镍层厚度的增量磁导率检测方法 [J]. 北京工业大学学报. 2020, 46(7):727-733.

[30] 吴斌, 杨敬, 焦敬品, 等. 奥氏体不锈钢小径管焊缝缺陷多模式超声复合全聚焦成像研究 [J]. 机械工程师, 2020, 56(14):9-18.

[31] 张传栋, 何存富, 刘秀成, 等. 基于 BP 神经网络的钢轴表面硬度磁巴克豪森噪声定量检测技术 [J]. 实验力学, 2020, 35(1):1-8.

[32] 杨文哲, 刘秀成, 龚裕, 等. 拉应力对 45 钢磁滞与磁致伸缩曲线的影响规律 [J]. 中国测试, 2020, 46(4):136-142.

[33] 何存富, 张秀, 刘秀成, 等. 曲面构件磁巴克豪森噪声检测传感器研制 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(2):486-494.

[34] 刘秀成, 马坤, 王磊, 等. 微磁检测中表面切向磁场强度的线性外推测量方法 [J]. 应用基础与工程科学学报. 2020, 28(1):235-245.

[35] 刘宏业, 刘申, 何存富, 等. 纤维增强复合板中声弹 Lamb 波的波结构分析 [J]. 工程力学, 2020, 37(8):221-229.

[36] 吴斌, 杨挺, 刘秀成, 等. 线圈弯曲角度对柔性涡流传感器缺陷检测能力的影响 [J]. 仪器仪表学报, 2020,

41(4):41-48.

5 部分获批专利与软著

一种基于矩形谐振腔的电磁参数测量方法 (CN201810820305.5); 一种磁屏蔽型的双向激励涡流传感器 (ZL201710125700.7); 基于全波形反演法的起重机异性截面结构起重伸缩臂的检测方法 (ZL201810176499.X); 基于嵌入式系统的兆赫兹阻抗测量计 (ZL201811112787.5); 太赫兹时域光谱厚度测量及

二维扫描控制系统 (软著); 多角度磁巴克豪森噪声检测与分析软件 (软著)。

北京工业大学无损检测与评价研究所

刘增华 供稿

2021 年 1 月