

声发射技术的过去、现在与未来

(许凤旌)

美国物理声学公司 (PAC) 北京代表处 北京 100029

摘要: 本文根据从事声发射技术应用近 30 年的经历, 在回顾总结声发射技术几十年来的发展及现状的基础上, 提出声发射技术未来的发展趋势及应用方向; 尤其在未来工业 2025 战略中, 声发射技术如何迎接物联网、大数据及人工智能时代的机遇和挑战, 并在未来智能工厂下工业设备的智能监测与智慧维护发挥其更大的作用等诸多设想和展望。

关键词: 声发射 SHM 智能化 物联网

声发射技术过去及发展回顾

众所周知, 声发射技术作为一种新兴的无损检测技术, 自上个世纪 50 年代德国人 Kaiser 发现 Kaiser 现象从而产生了声发射技术, 从上世纪 60-70 年代开始声发射的工程应用到现在已经有了半个多世纪时间了。在这半个世纪的时间里声发射设备的发展经历了如下几个阶段的历程。

第 I 代, 模拟声发射系统: 第 I 代声发射系统是最早期的声发射仪, 是在大规模数字电路诞生和应用之前, 像其他电子仪器设备一样, 基本上是分离元件和模拟电路为主的模拟声发射系统。设备结构庞大; 功能简单; 性能及稳定性都比较初级。虽然也有些工程应用, 也解决了一些工程问题, 但相对比较简单, 一般只有撞击、振铃计数、幅度、能量等一些简单参数和功能。

第 II 代, 数字声发射系统: 随着数字电路技术的出现, 伴随 A/D 转换芯片的诞生和发展, 从上世纪 80-90 年代开始出现基于数字波形采集和分析的数字声发射系统。从早期的 12 位 A/D 到后来的 16 位 A/D, 以及后来大规模数字信号处理器 DSP 技术的广泛应用。数字声发射系统的出现大大改进了系统的稳定性、准确性和声发射信号原始波形的采集处理能力。

第 III 代, 数字智能型声发射系统: 从上个世纪 90 年代中后期开始, 随着全球范围内的个人计算机 PC 机的出现和发展、A/D 技术的发展与提高, 以及 FPGA-DSP 数字信号处理集成技术的发展, 声发射设备进入全数字化、计算机一体化的时代。类似于智能手机、智能电视等智能式设备的产生和发展, 声发射设备进入智能型声发射系统的时代。其主要特点是, 数字化的声发射采集处理卡为并行处理 PC 总线结构, 从早期的 ISA 总线, 到后来的 PCI 总线以及 PCIe 总线结构。声发射信号采集与信号处理计算机之间不再采用通讯线联接的传输方式, 而是计算机一体化总线结构, 亦即声发射信号采集/分析一体化, 并行处理, 包括并行 FPGA-DSP 结构, 同步处理。其代表设备主要有美国 Mistras/PAC 公司的 PCI-2、SAMOS、PCIe 系列等。

智能声发射系统的出现和快速发展, 大大提高多通道声发射系统的采集、处理和分析能力以及与现代计算机软硬件技术的高度融合。使大量复杂结构、复杂问题的声发射工程应用成为可能, 大大拓展了声发射技术应用的广度和深度。

智能声发射系统亦称之为现代声发射系统。

第 IV 代, 嵌入式、IOT 分布式声发射系统: 随着声发射技术应用从传统的声发射检测到当今的声发射监测, 从单一的声发射监测到结构健康监测 SHM 的广泛应用和快速发展的需

要，在第三代声发射设备的基础上，计算机部分从 PC 总线发展到嵌入式总线结构，使计算机与声发射采集系统高度融合；信号采集从单一的声发射采集与集成振动、位移、应力/应变以及光栅光纤等多种参数集成一体，同步处理的 SHM 监测；远程监测及数据传输；低功耗、全天候、长周期运行；统称为在线监测声发射系统。

随着物联网、5G 等技术的告诉发展以及人工智能时代的需要，声发射设备正在进入嵌入式、IOT 分布式的时代。

从声发射应用领域方面，传统的声发射应用主要在：

压力容器等特种设备检测；

大型储油罐罐底腐蚀程度检测；

航空航天、船舶、兵器领域等结构、产品无损检测与质量控制；

核电装置的检测与监测；

电力领域设备的检测；

岩石/隧道/矿山等结构检测与研究等。

研究型声发射应用与工程型声发射应用：研究型声发射与工程型声发射亦即学院派与工程派。基于材料行为等机理研究，专注于声发射信号机理研究的学院派更热衷于原始声发射信号尤其波形信号频谱分析、小波变换等从原始信号的原始特征方面，研究不同材料的声发射特征结构破坏/损伤机理等；专注于工程应用的工程派则更关心工程结构声发射信号的发生、发展过程的趋势特征以及统计规律，重点在有没有声发射信号、在什么位置、严重程度评价及预测预警等。

学院派的研究试图揭示声发射信号特征与机构损伤/破坏关系的机理研究指导或应用于工程应用，但往往忽略工程现场的复杂环境因素以及声发射信号传播路径及距离等对信号的衰减特征以及模式变化的影响，而忽略这些因素和情况的实验室结论对实际工程问题的指导价值有时有一定的差异性；工程应用派的声发射应用则通过大量的实际工程工况和时间积累发现和总结结构损伤及破坏的声发射规律并试图对工程缺陷进行识别、评价以及跟踪报警。但如果缺少必要的声发射机理方面认知和研究也有时会造成指鹿为马、滥竽充数的工程误判。

声发射领域长期存在学院派与工程派的争议甚至有时水火难容的状态，二者的如何合理兼顾以及如何有效相互融合将是声发射人值得思考的地方。

经典声发射与广义声发射：自本人于大约 10 年左右提出经典声发射与广义声发射的分类概念以来，已得到业内的广泛认可并推动声发射工程应用的更广泛化和经典声发射尤其广义声发射的推广。

经典声发射顾名思义，源自于基于传统 Kaiser 效应的经典声发射应用，主要是针对材料或构件裂纹现象产生的声发射信号，像压力容器等特种设备检测，航空航天、桥梁等各种结构的检测与监测等，这是声发射最普遍、典型的应用，这里不再赘述。

广义声发射是除了典型裂纹型声发射之外诸多具有声发射信号特征并且可以采用声发射技术和设备进行故障检测、监测以及过程监控的研究和应用。近年来，随着工业化的不断发展，声发射设备的水平和处理能力的不断提高，广义声发射的研究和应用越来越广泛和深入，比如——

气体、液体泄漏问题：气体液体泄漏时，包括阀门故障的微小泄漏，泄漏的介质在通过泄漏位置时由于流动路径的不规则形成湍流流动进而产生声发射信号，高灵敏度的声发射传感器可以接收到这种声发射信号进而检测到泄漏的发生。

大型油品储罐罐底腐蚀问题：油中的金属材料在与油中的腐蚀介质发生电化学反应的腐蚀现象时也产生具有突发特征的声发射信号，通过这种腐蚀信号的采集分析与一定时间内的统计，不但可以发现腐蚀问题，更能对罐底腐蚀状况进行整体评估。

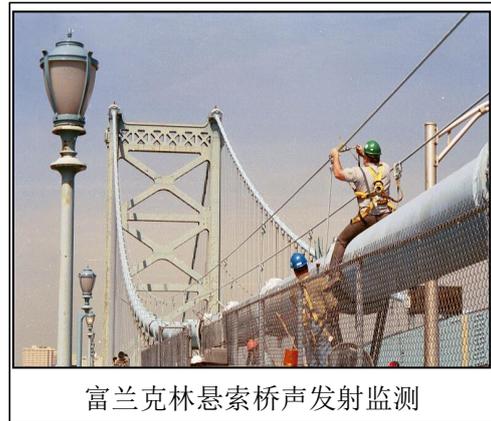
摩擦磨损问题:通过对摩擦磨损所产生的“噪声”声发射信号的分析、判断,对摩擦磨损的过程实施监控和评价。

电器部件局部放电问题:油浸变压器和 GIS 设备的局放故障是这类设备的主要故障,其局放发生时会产生典型的声发射信号,这在电力行业近年来已有越来越多的实际应用,并解决了许多重大问题。

核电关键结构松动部件监测:核导蒸汽发生器由于长期工作会产生部件松动的故障,影响核电的安全运行,部件松动故障发生时也会产生声发射信号。声发射松动部件监测已在许多核电站都有应用,并写进西方的一些核电运行的相关标准。

切削加工刀具断裂监测:切削加工切削过程的声信号作为一种连续型的声发射信号通过其特征识别、分析,可以评价切削质量和质量控制。其刀具的磨损程度也可以用这种声发射进行跟踪监测。

斜拉桥、悬索桥断丝问题:斜拉桥、悬索桥的长期运行由于腐蚀现象以及交变的交通载荷的复合作用,会造成承力缆索的断丝行为,而断丝行为,尤其多根断丝往往会危害桥梁的安全甚至造成大桥的坍塌事故。经过多年的工程探索和应用,美国物理声学公司(PAC)已经在包括美国著名的富兰克林大桥、曼哈顿大桥、英国翰波大桥、英国萨文悬索桥、美国威内纳恩斜拉桥、英国伦敦汉姆史密斯高架桥、美国华盛顿特区伍卓威尔逊大桥等多座著名的在役大桥上都成功实施了声发射断丝监测。



水轮机流体空穴汽蚀问题:大型水轮机组在运行过程中流体的空穴汽蚀现象而损伤水轮机结构,空穴汽蚀现象的产生会伴随声发射信号的产生。通过对这种声发射信号的监测来监测水轮机结构的气蚀损伤。

转动机械轴承故障诊断问题:传统的轴承故障诊断与监测一直是振动加速度的方法,声发射方法从灵敏度和故障的早期发现都比传统的振动方法有一定的技术优势,但转动轴承的机械噪声问题,轴承故障类型的识别以及量化评价等问题一直困扰声发射技术的工程应用。PAC 中国团队这几年与中车集团合作在高铁轴承的典型故障监测、缺陷识别和量化评价方面取得重大进展和成功应用。

可以说,一切工业设备、结构和工业对象在故障产生、发展过程中如伴随声信号的产生都可以用声发射技术进行检测和监测;一切物理过程如有声信号的产生都有可能采用声发射技术进行过程描述与监控;声发射技术可以应用和解决众多可以伴随声信号产生的工业问题。

广义声发射应用的广泛未来不可估量。

声发射技术的未来与展望

●声发射检测与监测:

众所周知,到目前为止的声发射应用主要在声发射检测和研究方面,随着未来工业化发展的要求及声发射技术的进步,声发射技术一定会越来越多地应用在声发射现场监测方面,包括短期 7 天和连续 365 天和超过 365 天,24 小时/每天的连续监测,监测故障的发生、发展以及失稳破坏的报警,避免灾难事故的发生。声发射应用的未来一定在监测方面,未来声发射监测将面临如下两方面的问题和挑战:

(1) 声发射设备的低功耗运行和长期工作的可靠性与稳定性。

(2) 有害故障信号的有效识别、评价和跟踪、预测预警。

●声发射的定量性

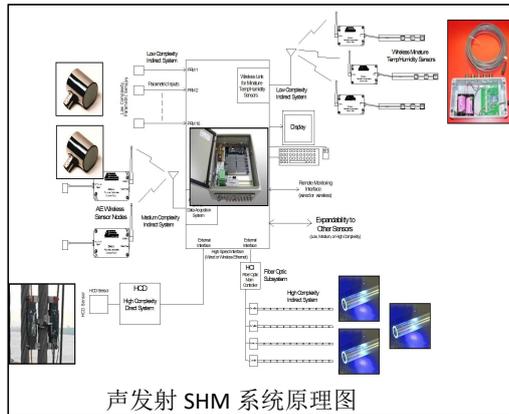
作为无损检测的一种手段，声发射本来不具备像超声当量缺陷定量评级或者射线检测的透射密度定量评级那样的能力。但声发射定量评价不在于缺陷大小尺寸上，而是缺陷发生、发展的动态过程尤其严重程度的 A, B, C, D, E 严重等级的定量评价以及在线监测方面破坏预警和剩余寿命的定量预测方面。这既是声发射工业应用的技术优势，也是这项技术所服务的工业设备业主所更需要的评价结论。

●声发射与结构健康监测 SMH

声发射 SHM 是声发射技术工程应用的一个重要发展方向。SHM 是近年来发展起来的一门重要技术。其主要原理是通过长期安装于结构上应力/应变、振动、位移/挠度以及光栅光纤等各种监测、测量手段。对结构整体进行连续长期监测以确保被监测构件整体结构的健康安全运行。SHM 技术近年来在大型桥梁等各种大型结构的结构安全方面应用越来越广泛。声发射结构健康监测技术将传统的 SHM 技术提升到一个更新的层次。主要因为：

■如众所周知，前面提到的传统的 SHM 中的各种监测手段基本上都是静态、局部或区域破坏型缺陷非敏感性技术，只有声发射技术才是真正的动态、全面更能有效反映缺陷发展及破坏的最有效手段。

■以 PAC 公司 Sensor Highway III 为代表的声发射 SHM 技术是以声发射为核心，集成于上面提到的各种传统 SHM 手段于一身的综合 SHM 技术。所以，这种全新的声发射 SHM 技术即体现声发射技术的一个未来发展方向，也预示着结构健康监测的发展方向。



声发射 SHM 系统原理图

声发射结构健康监测技术的主要特征包括：全天候长期可靠工作的硬件设备集成各种监测/测试手段；基于 Intranet、Internet 的远程通讯能力。这里硬件系统的关键技术是全天候、低功耗、高可靠性、免维护以及包括具有防水、防尘而且长周期工作的能力等。

●声发射与物联网 Iot、工业 2025

未来时代将是万物互联的物联网时代，随着 5G 技术的普及，物联网、大数据、人工智能将是未来工业 2025 的重要组成部分。未来的声发射工业应用不但是在线 SHM 监测方向，更应该是基于无线网络 IOT 节点形式，即集成嵌入式计算机、声发射、以及无线通讯网络的声发射节点。在万物互联的未来工业互联网时代，物联网节点形式的声发射设备将安装在许多重要的工业装备或工业装备的重要部件上实施物联网模式下声发射结构健康监测。



lot 时代的声发射

●声发射与智能监测

2025 下的未来工业的重要目标和方向是智能制造和智能工厂，不论是智能制造还是智能工厂无外乎制造、生产过程的智能化和设备、装备管理的智能化，亦即设备的智能监测，尤

其全周期生产、安全、节能降耗以及设备状况及故障的智能监测。作为设备故障以及工作、运行状况重要监测手段之一的声发射技术尤其广义声发射的应用一定会越来越发挥其重要作用。

●声发射与 PHM、智慧运维

如上所述，未来工业设备、工业装置的智能监测会大大改变设备管理与维护的方式和管理，其中的一个重要变化就是从传统的定时检修的计划维修管理升级为基于设备诊断、健康的状态维护，亦即 PHM。PHM 已经是当前设备维护热度很高的关键词了，并已经在许多工业领域开始研究和应用了，并将越来越广泛和普及。而 PHM 的最终发展方向一定是智慧运维。智慧运维听起来很复杂，甚至有些博大精深，但归纳起来无非如下两方面含义：

I 该修的设备必修——勿漏修。

II 不该修的设备不修——勿误修。

这两方面的工作都会大量用到包含声发射手段在内的设备健康监测、故障监测以及在物联网 IOT 下的大数据以及基于大数据的人工智能评价技术。无疑，声发射技术及其大量现场监测所得到的声发射（大）数据将扮演越来越重要的角色。

总结

总之，经过多年应用与发展声发射技术其过去在工业检测尤其在无损检测领域扮演一种“小众”的重要角色，其未来一定在工业监测，包括 SMH、PHM 等方面大放异彩。

声发射技术将会在以物联网、大数据和人工智能的未来工业 2025 下迎来他的辉煌，让我们共同为这辉煌时代的到来而供力。