

声发射技术在结构健康监测领域的应用

(许凤旌)

美国物理声学公司 (PAC) 北京代表处 北京 100029;

摘要: 本文在介绍结构健康监测技术基本原理、方法及应用状况的基础上, 介绍声发射技术近年来在结构健康监测领域的国外最新应用及成果; 讨论声发射技术在这一领域应用的主要特点和面临的问题; 展望声发射技术在这一领域应用的未来发展方向和应用前景。

Based on introducing the basic principle and method about Structure Health Monitoring, this paper introduces the recent application about Acoustic Emission technology on Structure Health Monitoring in the world. Discussion the key features and problem regarding this application, Promoting the development and future for this application.

关键词: 声发射 (AE), 结构健康监测 (SHM)。

1. 结构健康监测技术回顾

结构健康监测 (Structure Health Monitoring, 简称 SHM) 技术是近年来迅速发展及广泛应用的一种综合性应用新技术, 主要思想是通过安装于结构上的各种检测、监测、测量等手段对在役结构或工业设备进行长时间健康监测, 以保证设备长周期健康、安全运行。一般所采用的监测、测量手段主要有: 变形 (沉降、位移、倾斜) 测量、应力/应变测量; 动力特性、温度、外观等检测内容。

变形监测采取适宜的测量手段, 对结构关键部位的沉降、位移、倾斜、挠度量等进行监测。常用监测变形的的方法有: 导线测量法、几何水准测量法、GPS 测定三维位移量法、自动极坐标实时差分测量法和自动全站仪三维坐标非接触量测等。

应力/应变监测: 设备运营状态中主体结构的应力变化是由于主体结构的外部条件和内部状态变化引起的。外部条件主要有动荷载、气候、侵蚀、撞击和其他突发事件的作用等, 而内部状态有混凝土的收缩徐变、温度变化及预应力损失等。应力监测数据可以定量性地反映出结构的内应力变化和性能变化情况。

动力特性监测: 对于桥梁结构, 其动力特性与结构的刚度、质量、阻尼值及其分布有关, 动力监测是在无任何交通荷载以及桥址附近无规则振源的条件下进行, 主要对桥梁结构由桥址处风荷载、水流等随机荷载激振引起的微小振动响应进行测定。检测项目主要为主体结构的自振频率、振型等振动特性及其变化。

温度、湿度等天气监测: 通过对结构温度场、湿度等天气、环境等参数的监测, 了解环境变换下对主体结构健康/安全的影响。

此外, 光栅/光纤传感技术近年来在结构健康监测领域中越来越受到广泛应用, 包括用光栅/光纤传感技术进行应力应变测量; 位移变形测量、温度测量等。而且, 光纤通讯在信号传输方面抗电磁干扰、灵敏度高、安全可靠、耐腐蚀等诸多独特优点使其在 SHM 领域监测领域有着重要应用。

结构健康监测的研究是一个多学科综合交叉的前沿研究领域, 内容涉及材料、测控、力学、机械、信息通信、人工智能等多个学科领域。其中先进智能传感技术、信号与信息处理技术、损伤识别技术、结构状态特征参数提取技术等是目前的研究热点。

目前结构健康监测技术在土木工程领域的应用早已是一个研究的热点,应用的对象包括桥梁、水坝、高层建筑、公路等。美国 20 世纪 80 年代中后期就开始在多座桥梁上布设监测传感器,监测环境荷载、结构振动和局部应力状态。

图 1 为香港昂船州大桥结构健康监测方案。由于桥梁较大,总共用了 1505 个各类监测传感器,包括 678 个动态应变片和 158 个静态应变片。这是个典型的结构健康监测的案例,通过安装如此众多的各类传感器以及各自实时监测到的测量信号来对这座大桥进行长期、在线状态下的健康安全监测。

一般认为健康监测应包括下列几部分:

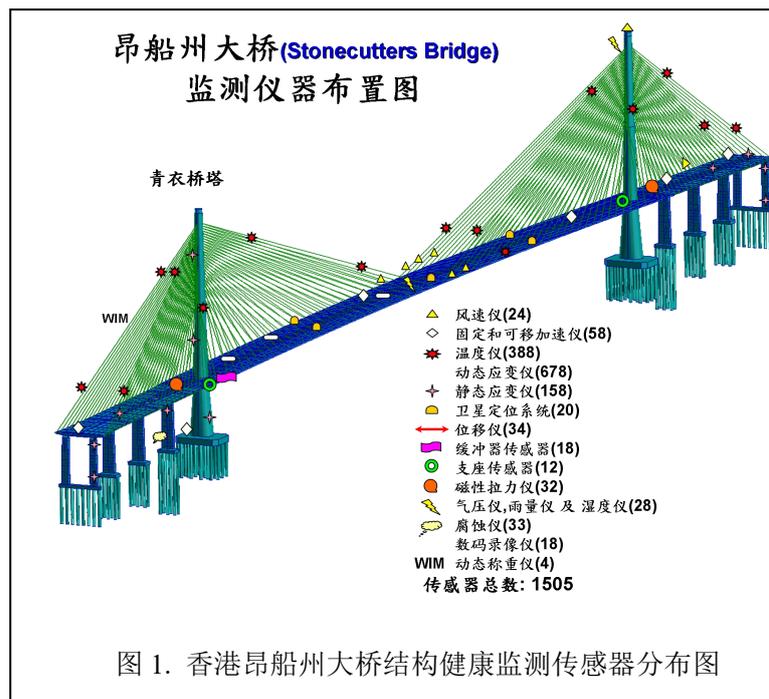
- (1)传感器分布系统,包括各种机、光/电、磁等感知、测量元件以及位置布局。
- (2)数据采集和传输系统,高速、稳定可靠的数据采集和传输对于保证监测系统的长期运行有着重要意义,同时是获取有效、可靠的监测数据的前提。
- (3)监控中心及分析系统,一般由强大的计算机及相应的分析、诊断、报警软件系统组成。实现远程诊断功能,包括结构中缺陷位置,程度类型识别的最佳判据能够及时预警结构的异常行为,由监控中心发出预警信号,并由故障诊断模块分析查明异常原因,以便系统安全可靠的运行。

目前这个领域已经安装运行的结构健康监测系统大部分都由这几部分构成,其中的关键部分是传感器系统,这相当于系统的“眼睛、耳朵、鼻子”等感知和了解结构健康状态的“感官”系统。不同的“感官”设备感知不同的缺陷和问题,如果这些传感系统不能采集有效、合适的结构健康信号,后面的数据传输系统合分析监控系统再先进也会徒劳。如前所述,目前结构健康监测系统所采用的传感和监测手段主要包括变形、挠度测量;应力/应变监测;振动测量以及温度/环境的监测等。存在的问题是,有的缺乏整体性,只能监测各个传感器位置的信号,比如应力/应变测量;有的只能整体结构变化,而对局部及早期损伤缺陷和发展不敏感,比如整体挠度、振动测量等方法。而且这些手段基本上都是对于结构的各种参量、状态的测量手段。即便挠度、振动等测量手段也主要与结构失稳破坏有关,而对于工程结构中大量存在的裂纹、裂缝、悬索/主缆的断丝等结构损伤缺陷的发生、发展不很敏感,因而对这些问题引发的结构破坏以及结构健康问题都有一定的局限性。

众所周知,作为来自于结构裂纹、断丝等损伤缺陷,声发射技术为这些问题的有效解决提供了很好的补充。

2. 声发射技术的原理与回顾

声发射技术(以下简称 AE)作为一种无损检测新技术和动态监测手段自上个世纪问世以来已经经历了近半个世纪的发展历程,尤其从上个世纪末至本世纪初这段时间内发展非常迅速;被



誉为 21 世纪最有发展前景的无损检测技术之一。其工程应用也越来越广泛，尤其最近这几年已经开始在工程结构健康监测领域展露头脚并开始取得令人可喜的工程效果。

在 ASTM E1316 标准中，AE 过程是这样定义的，在应力/载荷作用下，材料或结构内部应力超过材料的屈服极限进入塑性或产生缺陷时多数材料或结构会以应力波的形式释放应变能。把这种现象称之为声发射，声发射检测/就是通过安装与结构表面的声发射（压电陶瓷）传感器接收这种应力波信号来实现对材料/结构的检测与监测。所以不同于

上面提到的应力/应变、变形、振动等各种传统的结构健康监测手段，AE 型号通常与裂纹的产生、塑性变形等现象有关，或来自于这种结构损伤引起的信号。AE 的传播过程是从 AE 源开始，通过整个结构进行传播的。AE 检测/监测技术不但具有整体性、快速及时性、经济性等特性，还对缺陷的类型作出危害等级评估。

AE 源定位：与其他无损检测方法相比，AE 的突出优点是对对缺陷源进行时差定位。通过缺陷源周围若干 AE 传感器接收信号的时间差将传感器阵列覆盖范围内的所有缺陷源位置定位出来。

声发射检测/监测技术的优点

- 1) 可获得关于缺陷的动态信息，并据以评价缺陷的实际危害程度，以及结构的整体性和预期使用寿命。
- 2) 对大型构件，不需要移动传感器做繁杂的扫查操作，只要布置好足够数量的传感器，经一次加载或试验过程，即可大面积检测确定缺陷的位置和监视缺陷的活动情况，操作简便，省工、省时。
- 3) 可提供随载荷、时间、温度等处施变量而变化的实时瞬态或连续信息，因而适用于过程监控，以及早期或临近破坏的预报。
- 4) 对被检工件的接近要求不高，因而适用于其它无损检测方法难以或不能接近的，如高低温、核辐射、易燃、易爆和极毒等环境下的检测。
- 5) 对构件的几何形状不敏感，适于检测其他方法所不能检测的形状复杂的构件。
- 6) 几乎所有材料在变形和断裂时均产生声发射，适用范围广。

此外，在动态损伤及安全监测方面，它能比常规的应力/应变测量方法更直接、更有效，这主要表现在：

其一，应力/应变测量及相应的应力分析方法只能反映构件某些位置的应力水平，而不能真正反映裂纹的出现和发展。尤其对于应力集中部位和塑性变形区域，这种方法更是无能为力；而声发射方法直接表征的是缺陷、裂纹的萌生及发展情况，这往往是工程问题的关键。尤其对于容易出现损伤缺陷的应力集中部位和塑性变形区域，它更直接、有效。

其二，应力/应变测量只能测到应变片所在位置的表面应力应变水平，对于内部应力或未贴应变片的位置的应力应变水平及损伤状况是无法得知的；而 AE 技术是全局、整体技术，它能测出传感器阵列所覆盖区域内表面及内部任何位置的损伤情况；更可以进行在线监测。

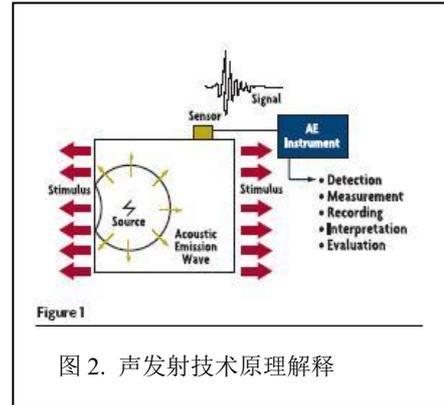


图 2. 声发射技术原理解释

其三，应力/应变测量和应力分析技术无法直接揭示材料强度、剩余强度、损伤状况、断裂及疲劳性能和寿命等这些更值得人们关注的工程问题；而现代 AE 技术在一些情况下已经可以直接揭示上述这些问题的规律和特征，并越来越在工程断裂力学、损伤力学等研究和应用方面大显身手。

3. 声发射技术在现代结构健康监测中的应用

正是由于声发射技术的上述独特技术优势，使其不但在传统的无损检测（NDT）领域扮演重要角色，而且近几年来开始进入结构健康领域，并逐渐起着很重要的作用。同时也正是由于声发射技术的介入，才使传统结构健康监测领域的许多难题，诸如，更准确的健康评价和安全预报，损伤缺陷的更早期发现，全面性结构健康监测，以及斜拉 / 悬索桥断丝问题的实时准确检测与预报等诸多技术难点得以解决。使声发射技术成为现代结构健康监测方案的重要补充。而且现代声发射设备由于硬件技术的先进性、实时信号处理能力大大提高，除处理分析声发射信号外，还同时兼用和处理传统结构健康监测方案中的应力 / 应变、变形、振动、环境参量以及来自于光栅光纤等参数和信号。图 3 为美国 PAC 公司基于声发射技术的现代 SHM 系统工作结构图。

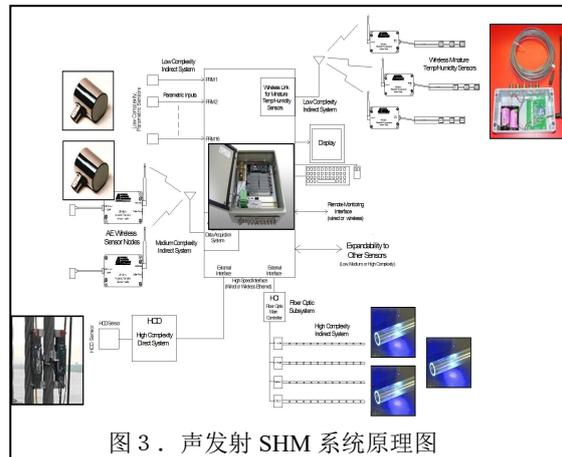


图 3. 声发射 SHM 系统原理图

基于 AE 技术的现代 SHM 方案近几年的成功应用之一就是桥梁整体结构方面的 SHM 解决方案。包括混凝土桥梁、钢结构桥梁以及斜拉/悬索类桥梁等。其中在斜拉桥/悬索桥断丝检测方面这几年有了迅速发展并取得非常可喜的进步。

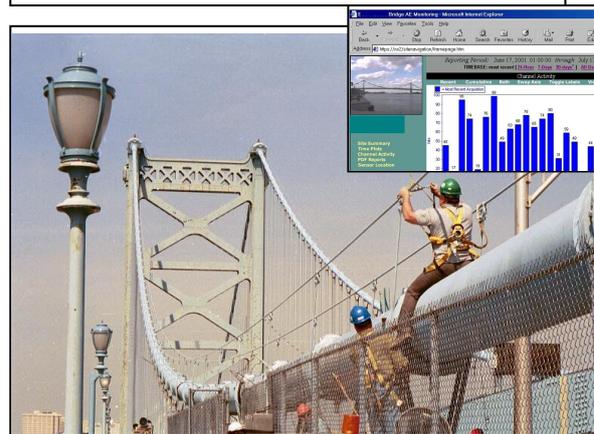


图 4. 悬索桥 SHM 现场及信号监测界面

声发射桥梁结构健康监测的应用主要有如下特点：——

其一是对声发射设备本身的长期可靠性要求，即要求设备的全天候、长周期连续工作并且最小维护或免维护的能力。传统的声发射设备一般用于实验室研究或阶段性的现场检测，从硬件设计制造及系统主要原理等方面都不适于长期结构健康监测的要求。

其二是系统的综合能力，现代结构健康监测技术要求设备需集中若干不同的测试/监测手段于一身，主要包括传统的应力/应变测试；载荷信号；位移测试；振动测量；甚至天气参数、光栅光纤传感器信号以及核心的声发射信号于一体，而且将声发射信号数据与其他传统

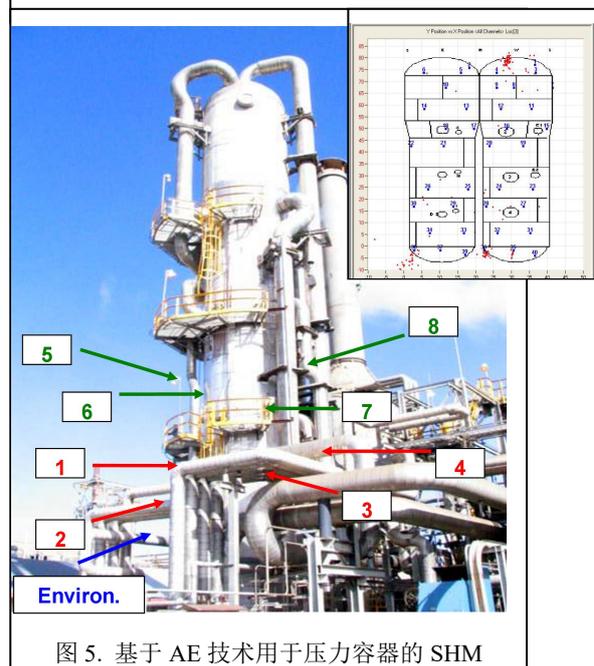


图 5. 基于 AE 技术用于压力容器的 SHM

的测量/监测数据同步处理、关联分析，才能给出设备总体健康状况评价。结构健康监测技术的基本要求就像医生给病人“会诊”一样，通过各种手段综合分析评价才能给病人作出综合健康状况的结论。

其三是要求系统的远程通讯和监控报警能力。即基于现代局域网、互联网的平台并集成网络系统实现设备现场、主控室、中央控制室以及全球任何角落都可以实时登录、浏览数据、修改参数或给现场运行着的监测系统发出控制指令以及远程诊断等等。

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 II 系统为代表的声发射 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。

图 4 为基于 AE 技术的 SHM 解决方案应用于悬索桥的成功应用，这种方案对于这类桥梁的断丝监测非常有效。PAC 公司近 3 年来已经在国外十几座这类桥梁上成功应用，取得非常好的效果，包括美国费城的 BenFranklin 大桥、Waltwithman 大桥、纽约的 Mahannton 大桥。这些大都是几十年到近百年的古老大桥。

图 5 为基于 AE 技术的 SHM 解决方案应用于在役压力容器的监测。

结论与展望

综上所述，声发射技术由于其独特的技术优势和特点正在结构健康监测这个新兴领域扮演重要角色；基于声发射技术的结构健康监测解决方案将是未来结构健康监测的发展方向。象声发射技术在其他领域的应用一样，这一领域中声发射信号所面对各种环境噪声问题以及声发射结果的评价/预报准则等将是需要不断解决和突破的问题。

参考文献

- [1] 《On-Line Testing of Pressure Vessels and Storage Tanks Using Acoustic Emission》
Phillip T Cole Anthony R Korko- Physical Acoustics Limited Cambridge UK
- [2] Acoustic Emission Inspection of Spherical Metallic Pressure Vessels
A. A. Anastasopoulos¹, D. A. Kourousis¹, P.T. Cole²
- [3] 韦志成《香港悬吊体系桥梁的结构健康监测》中国公路学会主辨 2007 年全国桥梁检测及建立安全评估体系研讨会
《金属压力容器声发射检测及结果评价方法》
- [4] 许凤旌，陈积懋《声发射技术在复合材料发展中的应用》《**机械工程材料**》**1997**，**4**。
- [5] T. J. Fowler, J. A. Blessing, P. J. Conlisk and T. L. Swanson, “The MONPAC System”, Journal of Acoustic Emission, Volume 8, Number 3, 1989.
- [6] ASME, Section V, Article 12, “Acoustic Emission Examination of Metallic Vessels During Pressure Testing”, 1988.
- [7] ASTM E569-02, “Standard Practice for Acoustic Emission Monitoring of Structures During Controlled Stimulation”
- [8] EN 15495:2007, “Non Destructive testing - Acoustic emission - Examination of

metallic pressure equipment during proof testing - Zone location of AE sources”
[9] EN 14584:2005, “Non-destructive testing - Acoustic emission - Examination of
metallic pressure equipment during proof testing - Planar location of AE sources”