

泄漏声发射传感器的标定研究

焦 阳, 杨庆新

(河北工业大学 电磁场与电器可靠性省部共建重点实验室, 天津 300130)

沈功田, 李光海

(中国特种设备检测研究中心, 北京 100013)

摘 要:介绍了声发射传感器标定原理及几种常用标定方法的模拟声源的特性。提出了将比较法应用于管道泄漏检测的声发射传感器的标定。建立了基于脉冲表面波声场的声发射传感器标定系统, 对商用和自制的几种声发射传感器进行了标定。标定结果和探头使用效果证明, 比较法标定声发射传感器是可行的。

关键词:声发射; 泄漏检测; 传感器; 标定

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2007)03-0139-03

Study on the Calibration of Acoustic Emission Sensor for Pipeline Leakage Testing

JIAO Yang, YANG Qing-xin

(Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province,
Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

SHEN Gong-tian, LI Guang-hai

(China Special Equipment Inspection and Research Center, Beijing 100013, China)

Abstract: The calibration theory of acoustic emission (AE) sensor and the characteristics of several common simulated AE sources were introduced. A simple calibration method (comparative method) was presented to calibrate AE sensor used on pipeline leakage testing. The AE sensor calibration system based on pulsed surface wave sound field was built, several commercial and self-made AE sensors had been calibrated on it. The result of calibration and the effect of probe usage proved that the comparative method is viable on the calibration of AE sensor.

Keywords: Acoustic emission; Leakage testing; Sensor; Calibration

由于声发射(AE)信号的微弱性和所处环境的复杂性,在工程实际中,获取声发射信号的最大困难就是噪声的干扰。对此,有两类方法得到应用和发展,一是在信号处理方面,从已获取的复合信号中准确提取声发射信号,剔除噪声;二是改善 AE 传感器性能,提高传感器的灵敏度和选择合适的频率窗口。目前,在管道泄漏检测领域,多应用谐振频率在几十千赫兹的压电陶瓷传感器。这是因为① 谐振型压电传感器灵敏度高。② 泄漏产生的声发射信号能

量主要集中于 15~60 kHz 频段范围内。③ 要实现管道泄漏的长距离检测,声发射传感器必须对泄漏信号进行专门的设计和标定。可见,AE 传感器的性能在很大程度上决定着整个检测系统的性能,因此在应用中确保使用性能可靠的传感器是正确分析声发射信号的基本要求,所以经常需要对 AE 传感器进行校准。

1 标定原理

AE 传感器标定的目标是获得传感器的响应特性,即确定传感器的传递函数。通常传递函数准确的表达式难以给出,但在工程应用中,会以图表的形

收稿日期:2006-11-08

作者简介:焦 阳(1963—),女,在读博士研究生,副教授。主要从事智能检测与控制领域的研究工作。

式绘出传感器的响应特性,也就是常见的灵敏度曲线。通过传感器的灵敏度曲线可以评估传感器的使用范围。灵敏度曲线通常以频率和给定条件下输出电压的关系曲线给出。

AE 技术中的绝对测量涉及两个基本问题^[1],一是传感器的绝对标定,二是声波从发射源到传感器传播路径的传输特性。可见 AE 传感器的标定技术是声发射技术发展重点研究项目之一,是声发射仪器和测试方法标准化的基础^[2,3]。传感器的输入端作用是力、位移或速度,输出为电压。可以认为力、位移或速度转化为电压的整个系统为线性系统。而对于确定的一种试验条件,传播介质的机械特性决定了速度和力间的函数关系,这样,传感器可看作二端网络(输入为传感器耦合位置处传播介质的位移速度 v ,输出为传感器的输出电压 V)。那么对传感器进行标定,也就是确定该网络的传递函数,和电路理论中确定网络传递函数不同的是该网络输入的是机械信号,输出的是电信号。

当试验条件确定时,传感器的数学模型可为

$$V(\omega) = T(\omega) \cdot v(\omega)$$

其中 T 为传感器的传递函数。对于理想的 AE 传感器,要求能真实反映耦合位置处传播介质的任何振动。事实上,没有能够感应任意输入信号的传感器,传感器总是在一定的输入信号范围内可用。在此定义传感器的输出与输入的比值为传感器的灵敏度。那么,显然 T 也是传感器的灵敏度,其值应越高越好。对于 AE 传感器的标定就是获得它的频率响应。在 AE 技术发展初期,人们对传感器的标定也展开了研究,至今已有多种灵敏度的标定方法得到应用,但由于多数方法用到的声波激励源和声波传播介质不同,而使标定结果不一致。已有的灵敏度标定方法可简单分为互易原理标定和比较方法标定两种,以下介绍比较标定方法。

2 比较法标定

比较法标定是将待测传感器与标准传感器或标准声源比较的一种标定方法。比较法标定时测量的参量少,测量工作量小,但是以提供标准传感器和标准声源为代价的。事实上如果能够保证提供一个稳定的标准声源,标准传感器是可以省去不用。在此主要对采用标准声源的比较标定法进行研究。

2.1 标准声源

在 AE 传感器结构中,如果能准确测量输入的机械参量和对应的输出电参量,那么就很容易知道

传感器的灵敏度。测量电参量比较容易,精度也有很好的保证,但测量输入的机械参量(压强、位移、速度和加速度)就有困难,目前声发射传感器的标定中难以解决的问题就是声源。

在比较标定方法中,声源应满足两个要求,即稳定和频谱宽。

稳定的声源可以用复杂但准确的方法作一次测量,其后即可相信其声场特性保持不变。事实上,受多种因素(作用力大小、方向和作用时间)影响的声源很难做到保持不变。已发展的标定方法中落球法是用一个钢球撞击传感器表面或试样表面来产生声源^[1],电火花法是通过在试样上的高压放电来产生声源^[1],断铅法是在试样表面断裂铅芯来产生声源,断裂玻璃毛细管是在试样表面断裂玻璃毛细管来产生声源^[4],气体喷射法是用一定压力的气体冲击试样表面来产生声源^[2],激光法是用激光直接或间接冲击试样表面来产生声源^[6],对接法是用换能器的逆压电效应来产生声源^[6]。以上声源产生方法中,受技术和工艺条件限制都不能保证声源的稳定一致,只能保证在允许的误差范围内是稳定的,因此很多情况下需要用标准传感器来对标定结果进行修正。

2.2 标定系统组成

标定系统由表面波标定平台和数据采集及处理两部分组成。其中表面波声场标定是为接收表面波的声发射传感器进行标定提供表面波声场环境。由表面波传播介质、声源模拟装置和传感器固定装置三部分组成(图 1)。数据采集和处理部分由计算机软硬件构成,其硬件部分使用的是 ADlink 公司 PCI-9812 卡(最高 20 MHz 采样频率,12 位 A/D 采样精度,可选 ± 1 V 或 ± 5 V 满量程输入,输入阻抗高/低可选)。



图 1 表面波声场标定平台

2.3 表面波声场标定分析

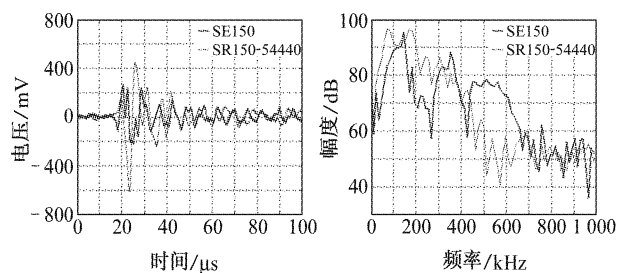
2.3.1 试验条件

试验条件为表面波声场标定平台、五个待测传

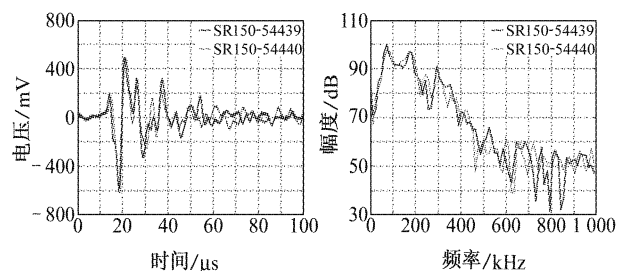
感器(商用 Dunegan 公司 SE150, 自制 SR150-54439, SR50-1, SR50-2 和 SR50-4), 一个对比传感器(自制 SR150-54440)和 TDS1002 示波器。

2.3.2 试验数据

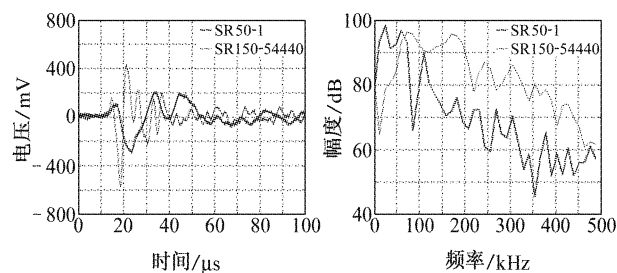
断裂内径为 $\phi 0.3$ mm 的玻璃毛细管为模拟声源, 分别将待测传感器和对比传感器对称放置在距声源 100 mm 处。传感器到示波器用 1 m 长同轴屏蔽电缆连接, 信号直接被示波器记录(图 2~6)。其中幅频曲线是对示波器记录到的离散数据直接进行 FFT 变换的原始数据。



(a) 时域信号 (b) 传感器灵敏度曲线
图 2 SE150 与 SR150-54440 探头所测信号比较



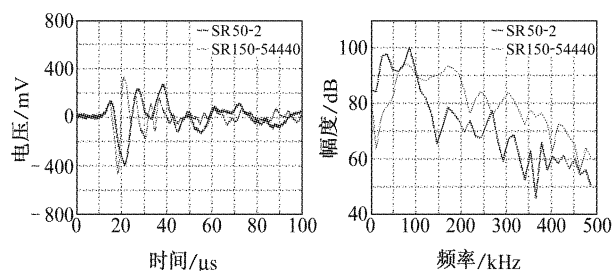
(a) 时域信号 (b) 传感器灵敏度曲线
图 3 SR150-54439 与 SR150-54440 探头所测信号比较



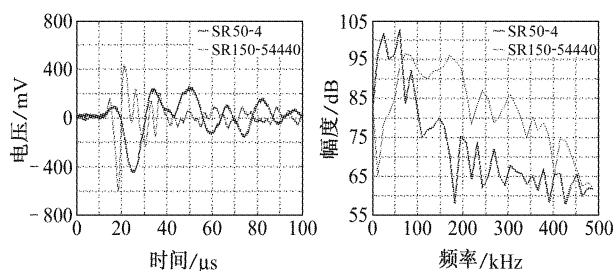
(a) 时域信号 (b) 传感器灵敏度曲线
图 4 SR50-1 与 SR150-54440 探头所测信号比较

3 试验结果分析

由图 2 可知, SE150 传感器高频灵敏度较 SR150-54440 好, 在低频 150 kHz 附近有很好的灵敏度, 但频带窄。SR150-54440 在 50~200 kHz 频段有较好的灵敏度, 但高频灵敏度很低, 在低频段有



(a) 时域信号 (b) 传感器灵敏度曲线
图 5 SR50-2 与 SR150-54440 探头所测信号比较



(a) 时域信号 (b) 传感器灵敏度曲线
图 6 SR50-4 与 SR150-54440 探头所测信号比较

75 和 180 kHz 两个谐振频率。从时域波形比较, SE150 的信号要小一些。由图 3 可知, SR150-54439 和 SR150-54440 在 600 kHz 高频段里灵敏度一样, 在 700~900 kHz 频段灵敏度低。从时域波形比较, 两路信号很接近, 说明两个传感器一致性很好。由图 4 可知, SR50-1 是一个低频传感器, 在 25~60 kHz 频段有较好的灵敏度, 高频灵敏度很低, 在低频段有 25 和 60 kHz 两个谐振频率, 中心频率约为 40 kHz。由图 5 可知, SR50-2 是一个低频传感器, 在 30~100 kHz 频段有较好的灵敏度, 高频灵敏度低, 在低频段有 30 和 90 kHz 两个谐振频率, 中心频率约为 60 kHz。由图 6 可知, SR50-4 是一个低频传感器, 在 25~60 kHz 频段有较好的灵敏度, 高频灵敏度低, 在低频段有 25 和 60 kHz 两个谐振频率, 中心频率约为 40 kHz。

SR50-1 和 SR50-2 所用压电元件尺寸一样, 区别是 SR50-2 有背衬(5 mm 厚钢制薄圆柱)。显然增加背衬, 即背衬阻尼增加, 对拓宽传感器带宽有利。背衬阻尼越大, 带宽越宽, 但灵敏度会降低, 两者需要综合考虑。

SR50-1, SR50-2 和 SR50-4 的中心频率很接近, 但尺寸差别很大。SR50-1 和 SR50-2 直径 $\phi 18$ mm, 高 35.5 mm, SR50-4 直径 $\phi 41$ mm, 高 34 mm。可

(下转第 160 页)

最大速度 $>10\text{ m/min}$ 。

15 在用铁磁性钢管的远场涡流检测对设备有什么特殊要求?

根据远场涡流检测的特点和在用铁磁性钢管的现场检测条件,标准规定检测仪器采用电压平面显示方式,实时给出缺陷的相位和幅值等特征信息,可将干扰信号与缺陷信号调整在易于观察及设置报警区域的相位上。采用的检测探头可为绝对检测线圈、差动检测线圈或多点式检测线圈,检测线圈的探头必须具有合适的直径,应能顺利通过被检管子并具有尽可能大的填充系数。

16 在用铁磁性钢管远场涡流检测的对比试样有何特殊要求?

根据在用换热器铁磁性管常见缺陷的特点,对比试样人工缺陷主要应为圆底孔、通孔、周向窄凹槽、周向宽凹槽和单边缺陷(I型和II型对比试样管的单边缺陷)。其中通孔、圆底孔和平底孔用于表征凹陷型缺陷,周向凹槽用于表征大面积均匀减薄,单边缺陷用于表征局部减薄。

17 在用非铁磁性管的涡流检测对设备有什么特殊要求?

根据在用非铁磁性管的现场检测条件和常见缺陷,要求内穿过式探头与涡流探伤仪的组合系统应

能检出裂纹、腐蚀坑和重皮等缺陷,能测量分辨管子壁厚均匀减薄。仪器应包括混频处理等单元,能有效地消除管板、支撑板和噪声等干扰信号影响,具有报警设置、阻抗平面显示以及可靠的记录装置。

18 在用非铁磁性管涡流检测的对比试样有何特殊要求?

根据在用换热器非铁磁性管常见缺陷的特点,参考美国 ASME 规范第 V 卷第 8 章《涡流检测》,设计的对比试样应有贯穿管壁的通孔、不同深度的平底孔和不同深度的周向切槽,分别模拟实际换热管上产生的穿孔、腐蚀坑、磨损和壁厚均匀减薄等缺陷。

19 新标准对检测结果评定有什么变化?

老标准的检测结果评定是刚性的,直接为缺陷评定,检测信号指示超标的管子予以报废,指示不超标的缺陷允许存在。

新标准的检测结果评定是柔性的,采用综合评定。检验结果根据缺陷响应信号的幅值和相位综合考虑,缺陷深度根据响应信号的相位角进行评定。对于制造管材的评定与处理、质量验收等级等规定应满足供需双方合同或有关产品标准要求。对于在用设备的评定与处理、合格等级等应与业主协商,或按有关规程确定。(全文完)

(上接第 141 页)

见,不同尺寸的压电元件可以获得同样的谐振频率。

4 结论

通过建立脉冲表面波标定系统,对商用和专门针对管道泄漏研发的五种传感器进行了标定分析,结果证明该标定系统能给出各种声发射传感器在不同频段内的灵敏度信息,为泄漏声发射传感器的选用和标定提供基础。另外,通过对商用和自行研制的声发射传感器的标定对比,可见专门针对管道泄漏信号开发的传感器在泄漏信号能量集中频带内有更高的灵敏度。

总之,对于声发射传感器的标定,模拟声源是关键,稳定的声源可以简化标定系统。标准传感器的使用是为了修正声源的不稳定性带来的误差,寻找稳定理想的脉冲声源是实现标定标准化和简化标定系统的一个重要目标。

参考文献:

- [1] 北京航空学院物理教研室声发射组. 声发射换能器及其校准[J]. 无损检测, 1979, 1(1): 6—12.
- [2] McBride S L, Hutchison T S. Absolute calibration of the helium gas jet noise source[J]. CAN J PHYS, 1978, (56): 504—507.
- [3] 金周庚. 声发射技术在航天技术中的应用与规范化进展[A]. 第九届声发射学术研讨论文集[C]. 成都: 2001.
- [4] Franklin R, Brackenridge, Martin Greenspan. Surface-wave displacement: absolute measurement using a capacitive transducer[J]. J Acoust Soc Am, 1981, 69 (4): 1171—1185.
- [5] 袁振明, 邓日红. 声发射技术的发展[J]. 无损检测技术, 1981(2): 6—16.
- [6] ASTM E976—1994 Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response[S].