



中华人民共和国国家标准

GB/T 19800—2005/ISO 12713:1998

无损检测 声发射检测 换能器的一级校准

**Non-destructive testing—Acoustic emission inspection—
Primary calibration of transducers**

(ISO 12713:1998, IDT)

2005-06-08 发布

2005-12-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 发布
中国国家标准化管理委员会

目 次

前言	Ⅲ
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号和缩略语	2
5 一般要求	2
6 装置	3
7 校准数据处理	7
8 误差分析	8
9 典型校准结果	9
参考文献	21

前 言

本标准等同采用 ISO 12713:1998《无损检测 声发射检测 换能器的一级校准》(英文版)。

本标准等同翻译 ISO 12713:1998。

为便于使用,本标准做了下列编辑性修改:

- a) “本国际标准”一词改为“本标准”;
- b) 用小数点“.”代替作为小数点的逗号“,”;
- c) 删除国际标准的前言和引言;
- d) 用 GB/T 1.1 规定的引导语代替国际标准中的引导语。

本标准由中国机械工业联合会提出。

本标准由全国无损检测标准化技术委员会(SAC/TC 56)归口。

本标准起草单位:国家质量监督检验检疫总局锅炉压力容器检测研究中心、清华大学、广州声华科技有限公司、北京科海恒生科技有限公司。

本标准主要起草人:沈功田、刘时风、段庆儒、李光海。

无损检测 声发射检测 换能器的一级校准

1 范围

本标准规定了声发射换能器绝对校准的方法。其目的是为声发射检测建立统一的标准,为实现数据相关建立基础,并且对不同(在不同时间不同地点所获得)的检测结果提供解释。

描述声发射换能器的性能必须规定一种可接受的方法。

本标准为耦合在固体介质表面接受弹性波的声发射换能器建立一套一级校准方法。校准是换能器对在声发射检测中经常接收的声波频率的响应。换能器的电压响应在大约 10 kHz 至 1 MHz 的分立频率间隔中来确定。输入是在耦合表面上已知的动态位移。校准单位是输出电压每机械输入(位移、速度、加速度)。本标准适用于二级标准换能器和用于检测的换能器的校准。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本标准,然而,鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本标准。

GB/T 12604.4 无损检测 术语 声发射检测(GB/T 12604.4—2005,ISO 12716:2001,IDT)¹⁾

ASTM E 114-95 接触式超声脉冲回波直射检测(Ultrasonic Pulse-Echo Stright-Beam Examination by the Contact Method)²⁾

ASTM E 494-95 材料超声速度测量(Meeasuring Ultrasonic Velocity in Materials)³⁾

ASTM E 650-85(1992) 压电式声发射传感器的安装(Mounting Piezoelectric Acoustic Emission Sensors)

BRECKENRIDGE, F. R, GREENSPAN, M. 表面波位移:电容换能器测量. 美国声学学会杂志, 69: 1177—1185 (BRECKENRIDGE, F. R and GREENSPAN, M. Surface-Wave Displacement: Absolute Measurements Using a Capacitive Transducer, Journal Acoustic Sicitry of America, Vol. 69, pp. 1177-1185)

3 术语和定义

GB/T 12604.4 确立的术语和定义适用于本标准。

1) ISO 12716:2001 是以 ASTM E 610 为标准草案而制定的,故 ISO 12716:2001 与 ASTM E 610 是等效的,两者的术语和定义基本一致。

2) 与 ASTM E 114 对应的我国标准为 JB/T 4009—1999(neq ASTM E 114-96)。

3) 与 ASTM E 494 对应的我国标准为 JB/T 7522—1994(neq ASTM E 494-85)。

4 符号和缩略语

4.1 符号

符号	术 语	单 位
a	传感器表面有效半径	m
A	标准换能器的绝对灵敏度	$V \cdot m^{-1}$
c	瑞利波速度	$m \cdot s^{-1}$
$D(f_m)$	被测换能器复值频谱响应	1
f	频率	MHz
f_m	第 m 个频率	MHz
j	下标 $0, 1, 2, \dots, n-1$	1
J_1	一阶贝塞尔函数	1
k	循环波个数	m^{-1}
n	单个通道的采样总数	1
r_m	第 m 个 $D(f_m)$ 的幅度值	1
s_j	标准通道中第 j 个采样值	V
$S(f_m)$	标准信号的复值频谱	1
T	总记录时间(等于 n 倍的 Δt)	μs
u_j	未知通道的第 j 个采样值	V
$U(f_m)$	未知信号的复值频谱	1
Δt	采样时间间隔	μs
Θ_m	第 m 个 $D(f_m)$ 的相位值	1

4.2 缩略语

AE 声发射

5 一般要求

5.1 位移换能器

本校准方法适用于法向位移换能器的绝对校准,而这些换能器作为二级标准可用于无损评价的声发射传感器的校准。因此,传递标准宜是高保真和非常稳定的。这样才能保证直到 1 MHz 频率范围内的校准准确度。

注:校准准确度仅在下面的情况中得到保证,即标准换能器在接收到瞬时输入后,而尚未接收到从校准块边界反射的回波前(100 μs)的全部响应。对低频段的校准结果尚有疑问。

5.2 声发射传感器

本标准也适用于无损评价中声发射传感器的校准,其中部分声发射传感器不如标准传递装置稳定。对于校准装置所说的校准准确度是指频率在 100 kHz 到 1 MHz 之间,而在 100 kHz 以下校准准确度不高。

注:对机械/电子换能装置进行校准的主要困难在于如何确定换能器件的机械运动输入。使用该校准方法,输入的运动参数可以由两种方法确定——理论计算和使用绝对位移换能器进行实际测量。

5.3 理论计算

弹性理论已经被用于计算由法向点力源阶跃函数引起的半无限大介质表面的动态位移。这种方法

确定了表面上任一点的位移-时间的函数关系,产生了位移波形,我们称之为振动表面脉冲。

该校准方法使用了近似理论解的实验方法。参见参考文献[1]和[2]。半无限大介质用一个大的圆柱形金属块近似,点力源阶跃函数由金属块平面上一个毛细玻璃管的破裂来近似。位移时间函数可由检测状态下传感器的安装位置(传感器与瞬时信号的输入在金属块的同一平面)计算得出,位移的计算可以通过阶跃力的测量以及由金属块中的声速确定的弹性模量来实现。

5.4 绝对位移的测量

本校准方法要求对试块表面法线方向的动态位移进行绝对测量。用于动态位移测量的换能器对于待检换能器来说是标准换能器。该标准换能器应符合或者超过 Breckenridge 和 Greenspan(见第 2 章)所描述的电容换能器的性能。标准换能器的重要性能包括:高保真、高灵敏度和经得起理论计算的检验。对于被测表面无可察觉到的微小动态载荷。

校准时,标准换能器和待检换能器放置在试块的同一个表面上,距离瞬时冲击输入点相同的距离,但位于相反的方向上。换能器这样放置可以保证它们经历了同样的位移-时间过程。比较待检传感器和标准换能器的输出,可以对待检传感器进行校准。

这种方法同样也适用于对无损评价中声发射传感器的校准,部分声发射传感器不稳定而不适宜用作参考标准传感器。这种校准装置在 100 kHz 到 1 MHz 可以保证校准准确度,但是在 100 kHz 以下的校准准确度就要差一些。

对于这种力源输入和换能器其他相关的布置方式也是可能的,但是通常只能对这种“同表面”布置方式进行补充。在校准中换能器接收到的 AE 波主要是表面波,因此校准宜建立在换能器对表面波的响应基础上。

5.5 校准单位

声发射传感器对它前表面的运动做出响应。传感器前表面的应力和应变是由传感器和试块的机械阻抗相互作用决定,在该处的应力和应变都不能直接进行测量。然而在没有传感器的情况下,试块表面上的位移可以根据弹性理论计算或在表面的其他地方测量得到。因为声发射传感器是用于监测结构自由表面的运动,而忽略传感器和结构间的相互作用,所以通常将结构表面的自由运动作为传感器的输入变量。因此,校准的单位是电压每自由运动单位,例如:V/m。

5.6 试块材料

由于校准过程由试块的声阻抗和声发射传感器的声阻抗相互作用决定,所以校准方法中必须指定试块的材料。在不同材料的试块上进行校准所得的换能器灵敏度-频率曲线在形状和平均幅度上是不同的。结果可能相差悬殊。比如,在一块钢质试块上进行校准过的换能器,如果在玻璃试块或者是铝质试块上进行校准,其平均灵敏度只有钢质试块的 50% 至 100%;如果在有机玻璃试块上进行校准,得到的值将只有钢质试块上的 3%。通常来说,如果试块的刚性和密度越小,那么校准的灵敏度也越低。

对于表面波校准,试块中的瑞利波速会影响校准结果。对于表面灵敏度一致的圆形传感器,在 $J_1(ka)$ 的零点处不存在孔径效应($k=2\pi f/c$)。

因此,在零点处的频率由瑞利波速决定。

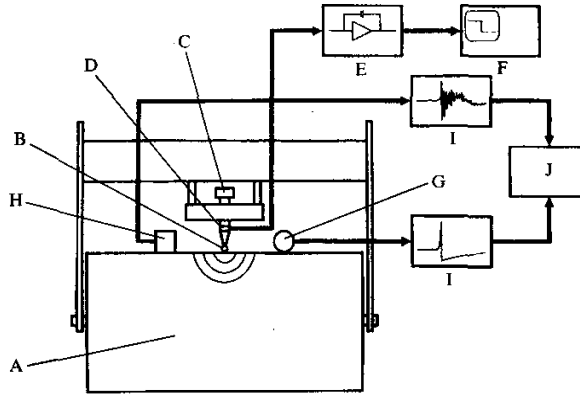
6 装置

6.1 概述

典型的校准装置如图 1 所示。一个直径约 0.2 mm 的玻璃毛细管 B,被压在加载螺杆 C 的尖端和钢质试块 A 上表面之间。当毛细管破裂的时候,突然释放的冲击力是一个阶跃函数,上升的时间大约是 0.1 μ s。冲击力的大小可由装配在加载螺杆上的 PZT 晶片 D 和连接到存储示波器 F 上的电荷放大器 E 测量得出。标准的电容换能器 G 和待检换能器 H 放置在与力源同样距离但方向相反的位置(通常是 0.1 m)。从对称的角度看,很显然如果忽略换能器的加载效应,那么在两个换能器所处位置表面的位移要相同。标准电容换能器的加载效应可以忽略,而待检换能器的加载效应是校准的一部分。

两个换能器输出的电压瞬态变化被数字记录仪 I 同时记录,需要处理的信息由计算机 J 存储。

使用这个装置,就可以比较待检传感器与标准换能器或与弹性理论计算的位移波形。两种比较方法的结果宜相似。



- A——钢质转换试块;
- B——玻璃毛细管;
- C——加载螺杆;
- D——PZT 晶片;
- E——电荷放大器;
- F——存储示波器;
- G——标准换能器;
- H——待检换能器;
- I——瞬态记录器;
- J——计算机。

图 1 装置结构图

6.2 试块

试块应由专门选定的材料制作,应尽量无缺陷,且按 ASTM E 114 或相当标准中要求,用 2.25 MHz 的纵波进行检测。试块缺陷产生的回波不大于第一次底面波的 10%。试块材料还要求很高的均匀性,这可通过对规则分布在试块表面上至少 15 个点进行脉冲回波时间的测量而确定(见 ASTM E 494)。纵波和横波的波速与各自的平均波速相差应大于 $\pm 1\%$ 和 $\pm 3\%$ 。试块和校准仪器如图 2 所示。

6.3 阶跃函数源

阶跃函数力源的产生应通过断裂玻璃毛细管实现(见图 3)。玻璃毛细管是普通的由硼硅酸盐制成的实验玻璃管。毛细管外径为 0.1 mm 到 0.3 mm,典型的毛细管外径为 0.2 mm。当毛细管内径尺寸等于管的厚度时实验效果最好。毛细管断裂产生的力通常在 10 N 到 30 N 之间,通常为 20 N。

毛细管应水平放置在一片显微镜防护用玻璃片(0.08 mm×1.5 mm×1.5 mm)上,玻璃片用水杨酸苯酯或者氰基丙烯酸盐粘合剂粘合在试块表面上。作用力通过一个实芯的玻璃棒(直径 12 mm)加载在毛细管上,玻璃棒与毛细管相互垂直放置。玻璃棒通过加载螺杆向下施加作用力,直到毛细管断裂。加载螺杆上安装有一个已在静载荷下校准过的陶瓷换能器。所以,尽管毛细管破裂产生的冲击力事先不能估计出来,但可以测量得出,并将其用于表面位移的弹性理论计算。

理想状态下,毛细管宜直接放置在试块上而无需中间加防护玻璃片。但是使用防护玻璃罩可以避免对试块表面的损坏。玻璃片对弹性波的影响很微弱;弹性波在其边界的反射会产生轻微的声音信号。此声音信号只包含 2 MHz 以上的频率成分。因此,它对标准换能器和待检传感器的影响相同,对校准结果没有影响。

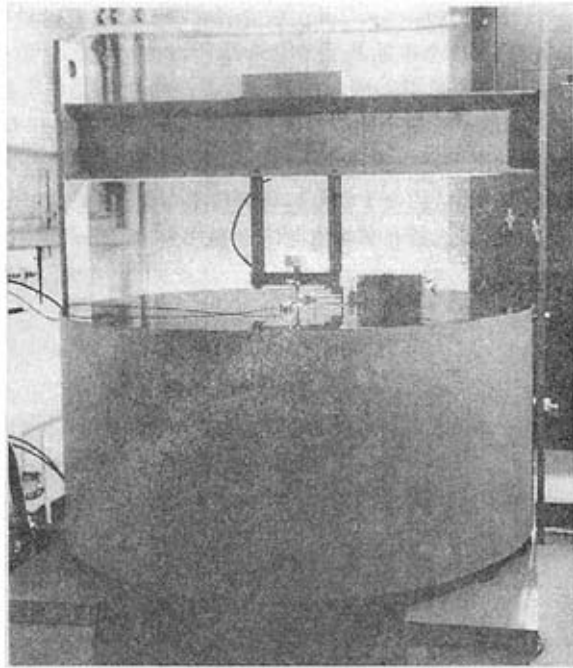
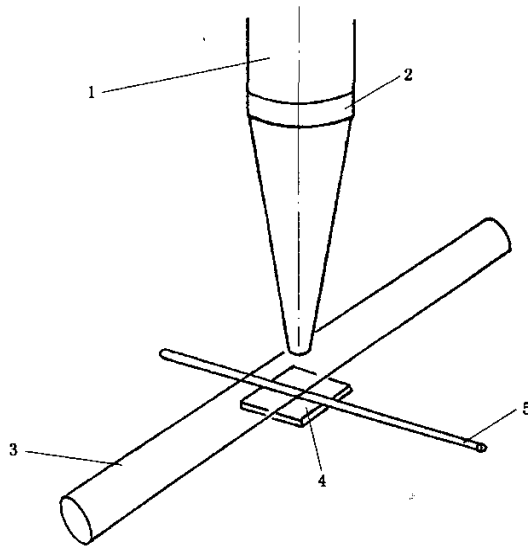


图 2 校准装置的照片

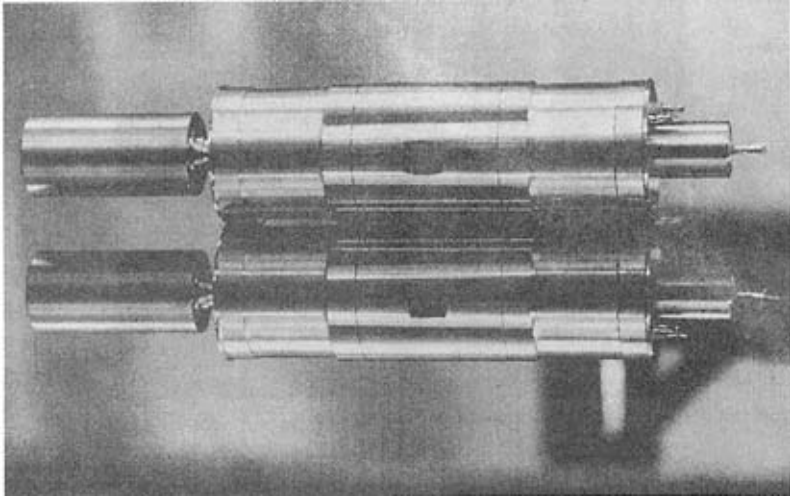


- 1—加载螺杆;
- 2—PZT 盘;
- 3—玻璃棒;
- 4—玻璃片;
- 5—毛细管。

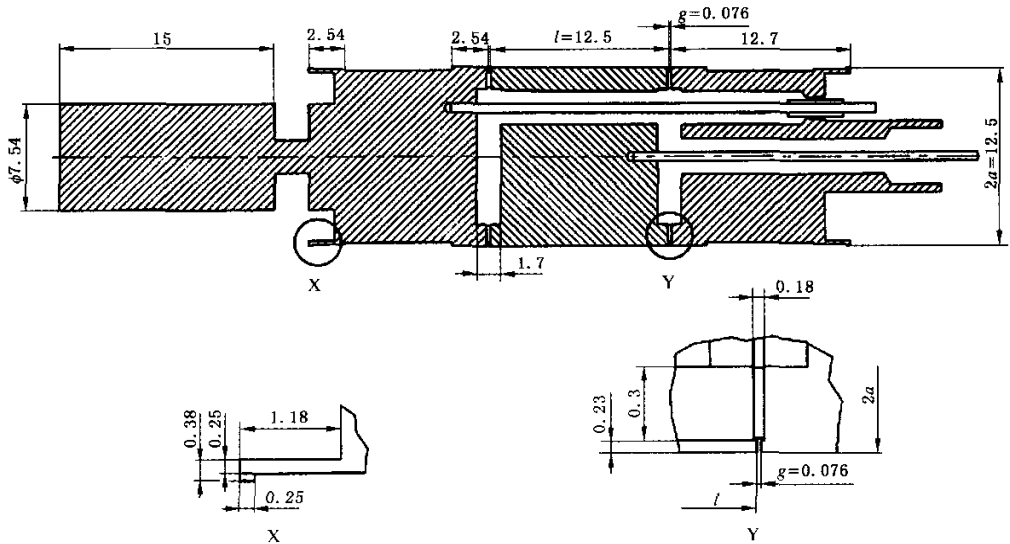
图 3 玻璃毛细管源

6.4 标准换能器

在校准中用来测量绝对位移的标准换能器至少应具有 Breckenridge 和 Greenspan 所描述的电容换能器相同的性能。该装置如图 4a)和图 4b)所示,关键部件是一个装配柔性支撑上的惯性块(约 40 g),它和试块表面具有大约 4 μm 的间隙。这个间隙是通过使用 Breckenridge 和 Greenspan 所描述的电桥来测量换能器和试块之间的电容而确定。惯性块是一个水平放置的黄铜柱。当试块表面振动频率大于处在柔性支撑上惯性块的固有频率时(约为 1 kHz),黄铜柱基本保持稳定。用 100 V 直流电源通过一个大电阻对黄铜柱进行极化,因此换能器和试块之间的电容的变化会引起黄铜柱上电压的变化。



a) 照片(在钢质试块重的反射)



- l ——振动电极的长度;
- $2a$ ——振动电极的直径;
- g ——保护间隙的宽度。

b) 纵截面

图 4 电容换能器

作为一级校准,待检换能器灵敏度是能计算得出的。为了使计算简便,黄铜柱被认为是无限长圆柱的一部分,其两端附有电保护部分以消除边界效应的严重影响。

标准换能器的敏感区为 12.4 mm 长,有效宽度小于 1 mm。这个区域的长轴与毛细管破裂产生的弹性波的波阵面相切。

换能器的灵敏度大约为 12×10^6 V/m,可检测到的最小位移为 4×10^{-12} m。针对换能器有效孔径尺寸计算出的频率响应和它相对于波前曲率的偏移如图 5 所示。在 1 MHz 处振幅下降了不到 10%,相位延迟大约为 8° 。公式(4)和公式(5)可以用于计算在特定频率上的响应。对于位移测量的总体估计误差约为 $\pm 5\%$ 。使用标准换能器得到的位移测量值与通过弹性理论计算得出的位移值误差在 5% 之内。

标准换能器和待检换能器放置在距离冲击力作用点 $0.1 \text{ m} \pm 1 \text{ mm}$ 的位置(见 ASTM E 650),否则在每次校准结果报告中要进行说明。

6.5 数据记录和处理设备

校准中,用于计算的标准换能器和待检换能器的输出信号需要双通道同步的瞬态记录仪来记录。至少要有 8 位的精度和 20 MHz 的采样率或者至少 10 位的精度和 10 MHz 的采样率,并且至少可以连续采样 102.4 μs 。记录的数据再传输到微机上进行数据处理,也可以上永久保存在软盘等的储存介质上。

7 校准数据处理

7.1 符号

在得到校准结果的数据处理中用到下列符号(见 4.1):

- n 单通道采样总数;
- Δt 采样时间间隔(μs);
- T 总记录时间(μs ,等于 n 倍的 Δt);
- s_j 标准通道的第 j 个采样值;
- u_j 待测通道的第 j 个采样值;
- $j = 0, 1, 2, \dots, n-1$ 。

s_j 和 u_j 的单位是伏特乘以一个常数,该常数由所用的电子设备确定。

7.2 复值频谱

数据宜按照以下方法处理:用快速傅立叶变换,分别计算标准换能器输出信号和待检换能器输出信号的(复值)频谱 $S(f_m)$ 和 $U(f_m)$ 。

$$S(f_m) = \Delta t \sum_{j=0}^{n-1} s_j \exp(i2\pi m j / n) \dots\dots\dots (1)$$

$$U(f_m) = \Delta t \sum_{j=0}^{n-1} u_j \exp(i2\pi m j / n) \dots\dots\dots (2)$$

式中:

$f_m = m/T, m=0, 1, 2, \dots, (n/2)-1$, 是第 m 个频率。

待检换能器的响应 $D(f_m)$ 与标准换能器的响应相互关系为

$$D(f_m) = \frac{U(f_m)}{S(f_m)} \dots\dots\dots (3)$$

7.3 幅度和相位

幅度和相位是由 $U(f_m)$ 、 $S(f_m)$ 和 $D(f_m)$ 计算得出:

$$r_m = D(f_m) \text{ 的幅度} = |D(f_m)| \dots\dots\dots (4)$$

$$\Theta_m = D(f_m) \text{ 的幅角} = \arctan \frac{\text{Im}[D(f_m)]}{\text{Re}[D(f_m)]} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

$\text{Im}[D(f_m)]$ ——表示 $D(f_m)$ 的虚部；

$\text{Re}[D(f_m)]$ ——表示 $D(f_m)$ 的实部。

7.4 图形表示

在第 9 章中给出了典型校准中如前述步骤的图解。以绝对单位表示的待检换能器的灵敏度为 Ar_m ，这里 A 是标准换能器的绝对灵敏度。

7.5 特殊事项

计算中有几个方面需要特别注意。从标准换能器获得的频谱宜根据前面所述的孔径效应和波前曲率的影响进行修正(见图 5)。

如果函数的初始值和终值不同，在对有限长数据进行离散傅立叶变换时就会出现一些问题。傅立叶变换认为该函数是周期性的，并且周期等于数据的长度。如果初始值和终值不同，那么就需要在各个周期的接点时间要进行人为处理。得到的结果中产生了在变换中不存在的频率。一种简单的解决方法是给数据加入一个线性函数，如下所示：

$$s'_j = s_j + (j/n)(s_0 - s_{n-1}) \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$u'_j = u_j + (j/n)(u_0 - u_{n-1}) \quad \dots\dots\dots(7)$$

修正函数 s'_j 和 u'_j 中没有引入人为因素。通过分析可看出这种方法和其他两个常用的处理阶跃函数的方法在除零值点外是相同的。

计算相位时，使用四象限坐标系就会发现 $-\arg[D(f_m)]$ 的值在 $-\pi$ 到 π 之间。计算 $S(f_m)$ 和 $U(f_m)$ 的相位时，时间原点的选择最为重要。公式(1)和公式(2)隐含着时间原点在 $k\Delta t=0$ 的假设。这是记录的开始时间，它和试块表面振动的物理现象没有任何实际的联系。如果起始时间是标准换能器中瑞利波峰值到达的时间，那么数据处理会更加简单。可以对 $S(f_m)$ 和 $U(f_m)$ 进行三角变换以移动起始时间。很明显地， $D(f_m)$ 的相位并不受这种变换的影响，因为 $S(f_m)$ 和 $U(f_m)$ 的相位变化量相等。

由于相位是由复数的幅角表示，那么它在 2π 的整数倍内有唯一的对应值。相位就是 $-\arg[D(f_m)]$ 的值，在 $-\pi$ 到 π 之间。这就意味着随着频率增大，若 $D(f_m)$ 经过了负实轴，则相位跳变 2π 。为了消除这种跳变，规定以频率增加的顺序计算相位，这样每个相位值就最接近前一个值。对于具有稳定的相位特性的换能器来说，这种规定很适合。然而有时候，换能器具有比较宽的振荡相位特性或者在某些频率时相位非常接近于零值，那么相位就会存在 $2n\pi$ 的误差。

对于校准的数据有两种表述方式。在上面提到的形式中，幅度的单位是输出电压(V)每表面位移(m)，因为标准换能器是位移传感器。另一种表达方法是把它转换为电压(V)每速度(m/s)。可以通过把从标准换能器中得出的 $S(f_m)$ 乘以 $2\pi f_m$ 实现，这相当于初始时间函数的微分。

把待检换能器的频率响应转换成时域内的波形或者是脉冲响应，可以通过离散傅立叶逆变换实现。待检换能器的脉冲响应也可以直接以待检换能器和标准换能器的时域波形反卷积得出。除了得到频率响应信息外，还得到脉冲响应信息。

8 误差分析

8.1 误差来源

存在着一些误差影响这种校准方法的准确度和重复性，比如采集处理过程和待检传感器安装情况的变化。

8.2 换能器的灵敏度

在 6.4 中描述的电容换能器的绝对灵敏度在 $\pm 5\%$ 之间，因此校准的误差也是 $\pm 5\%$ ，但校准曲线的形状不会受到影响。

8.3 可估计的误差

放大器噪声、信号采集中的量化噪声、信号源的随机变化和对连续傅立叶变换的离散近似等都会产

生可估计的误差。这些误差很难估计,但宜通过实验对安装好的换能器进行多次重复标定来进行估计。

当对数据进行有限时间(102 μ s)的采集,对该时间段之后来自于换能器的信号将被忽略,这样也会产生可估计的误差。对于具有快速响应的换能器来说,此误差可以忽略,但误差大小取决于在数据采集结束时换能器的响应速度。

经过傅立叶变换得到离散的频率成分,频率间隔为 $1/T$,近似为 10 kHz,这是对实际的连续频谱的近似。那么实际低于 100 kHz 频率的信号,经过傅立叶变换其结果就会很粗略。对于高保真和稳定性的换能器来说,在 10 kHz 到 100 kHz 的频率中存在着有用的信息。对于谐振换能器来说,在这个范围内很难得到理想的精度。在高于 1 MHz 的频率,放大器和量化噪声变得很严重,以至于不可能达到预期的精度。在 100 kHz 到 1 MHz 之间,放大器噪声、量化噪声、傅立叶变换的有限性和时窗的有限性,在 90% 的置信度下,宜在 $\pm 5\%$ 以内。对于近似理想化的换能器来说,这样的误差估计可以在 0.01 MHz 到 1 MHz 的频率范围内达到。

8.4 校准的重复性

重新安装比不重新安装换能器而进行的重复校准的重复性差。很明显重新安装换能器会出现新的问题。在校准过程中,要特别注意减小由于以下情况所引起的变化。

- 传感器安装表面的不平整;
- 试块表面的小毛刺;
- 耦合面的污垢;
- 耦合处过大黏度;
- 冲击力作用点及大小的变化(参考值为 9.8 N)。

对这些情况的了解可以通过多次安装换能器进行重复校准实现。在大于 0.1 MHz 频率范围内,对同一个换能器的多次校准结果在 90% 的置信度下, A_{r_m} 最大值的波动范围宜在 $\pm 10\%$ 以内。

8.5 数据验证

宜采集重复校准的数据,整个系统的校准精密度要保证在 $\pm 15\%$ 以内。

9 典型校准结果

图 6 和图 7 是对一个声发射换能器的两次校准结果,在两次校准中对换能器进行了重新安装。图 8 到图 15 表示来自声发射换能器的校准数据的处理过程。至少,类似于图 8、图 9、图 14 和图 15 的图形宜包括在校准报告中,还要包括基本方法提到的文献和与预期过程不同的变化。

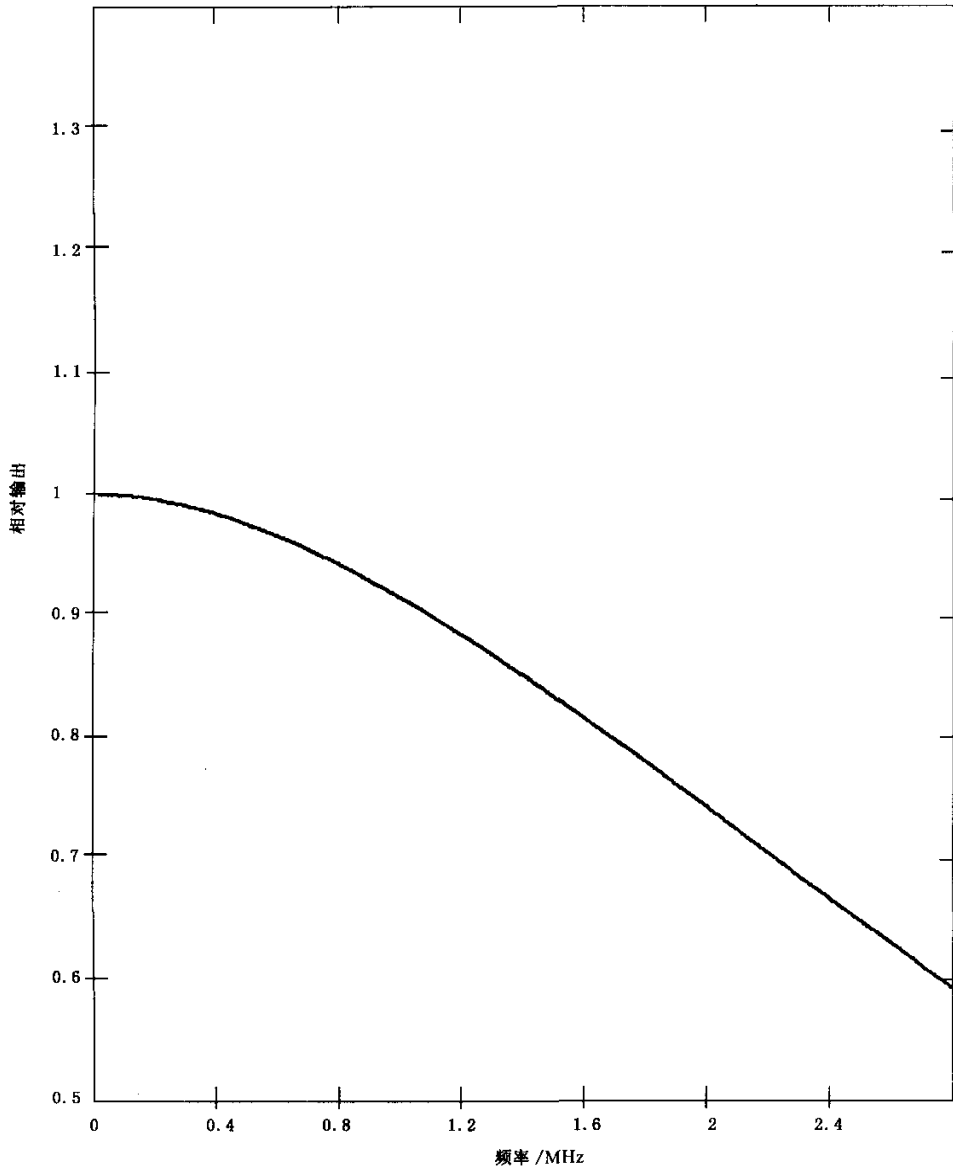


图 5 一定间隙宽度和波前曲率偏移的电容换能器(距离冲击源 0.1 m)的计算频率响应

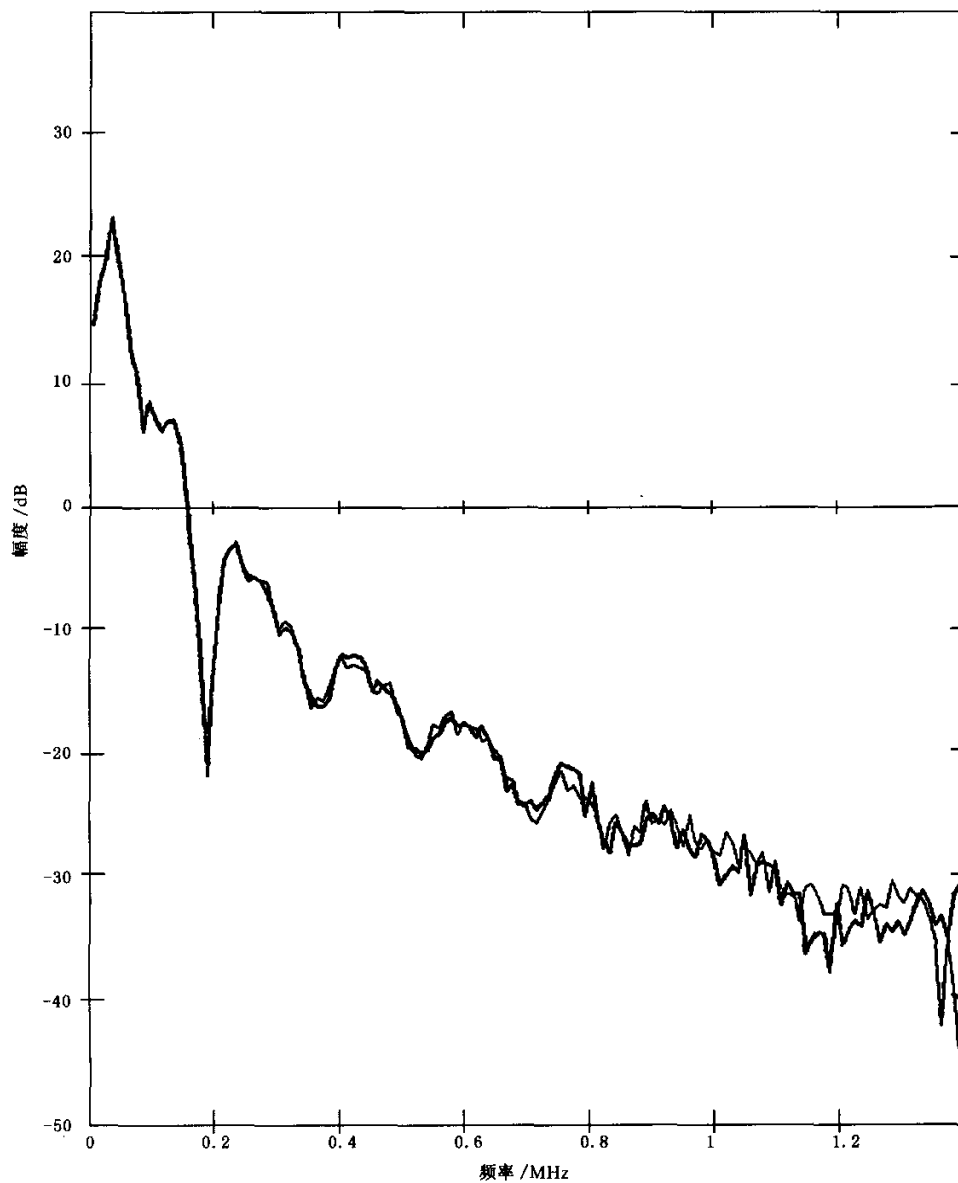


图6 重复安装的声发射换能器两次校准的幅频响应

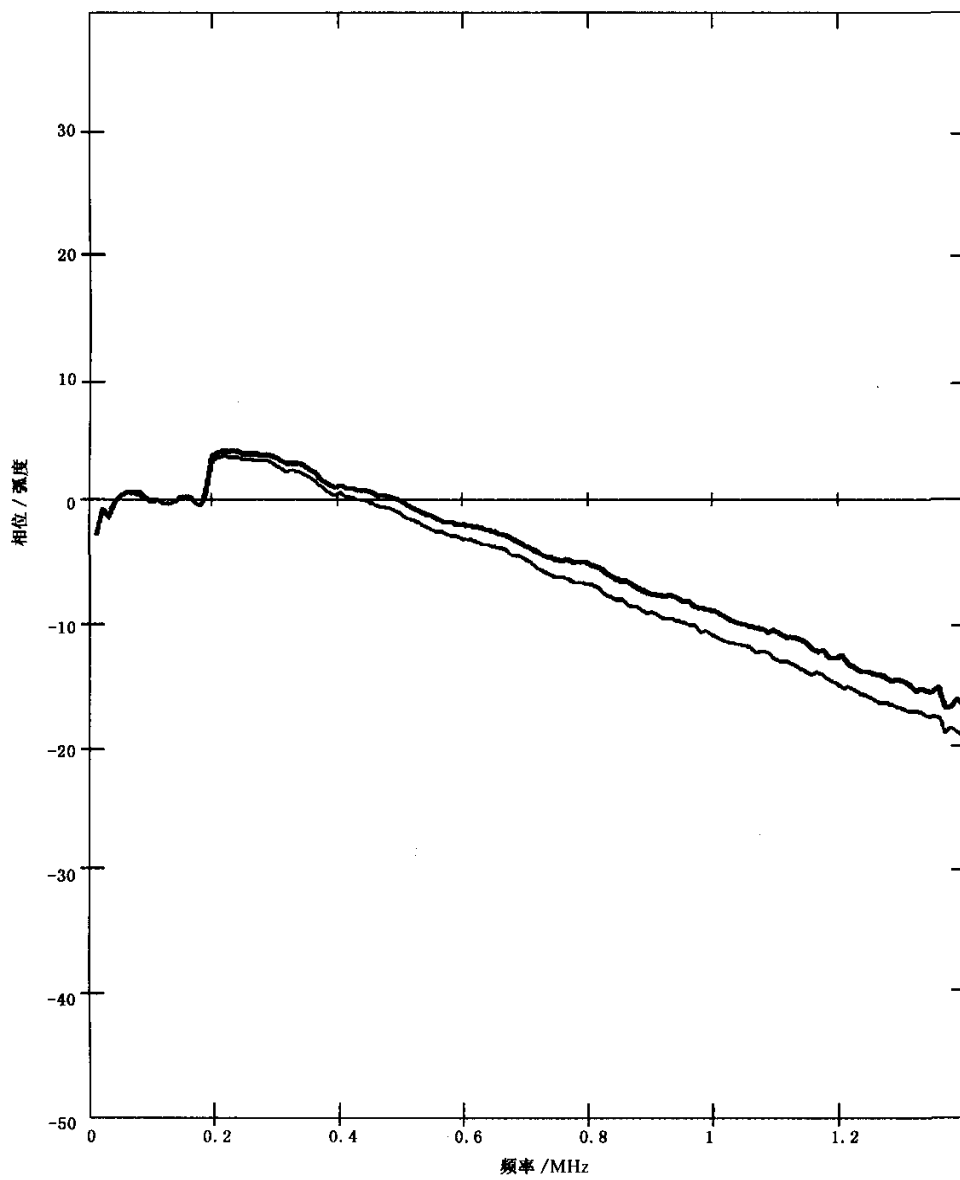


图 7 对应于图 6 幅频响应的应相频响应

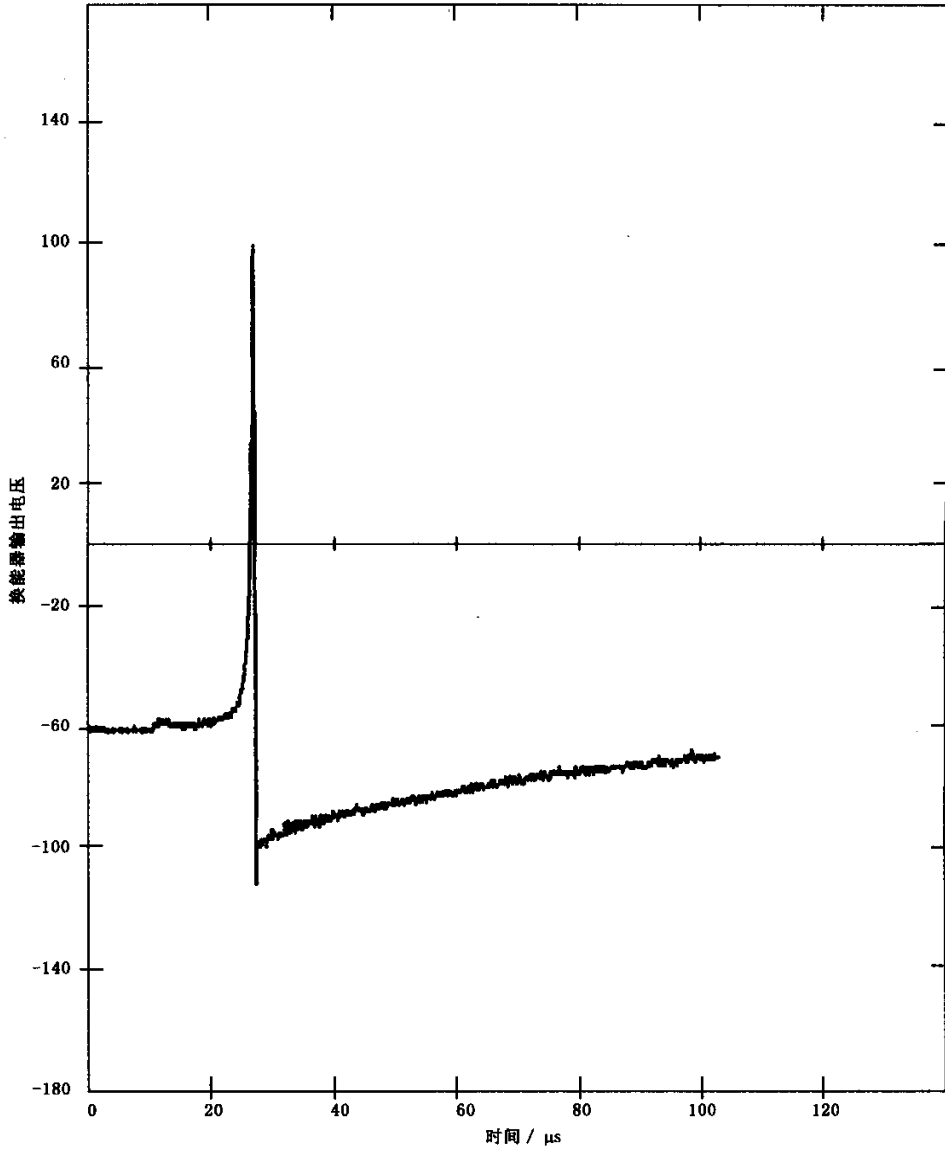


图 8 典型校准中,由瞬态记录仪采集的标准换能器的电压-时间波形

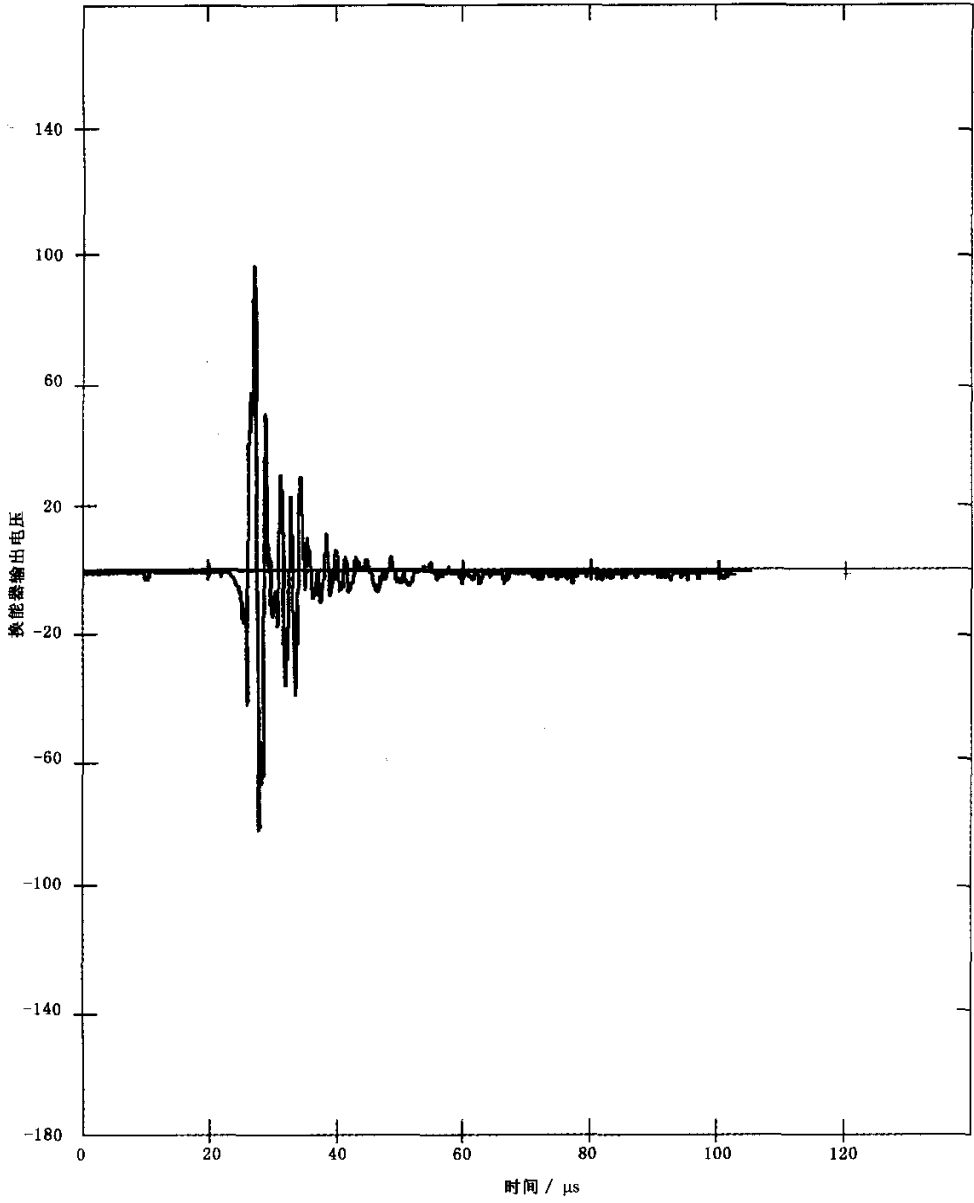


图 9 同样校准中,由瞬态记录仪采集的待检换能器的电压-时间波形

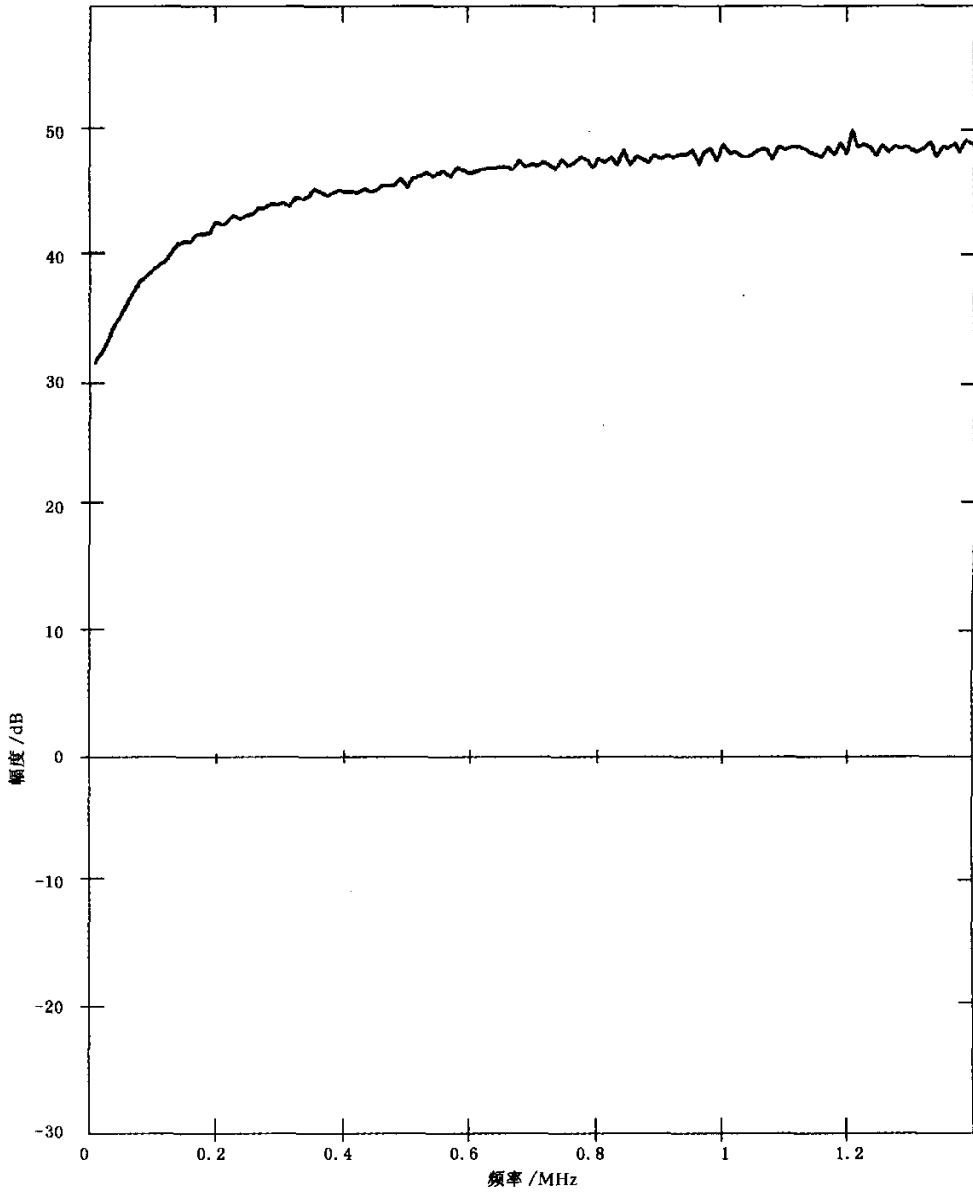


图 10 对图 8 数据进行快速傅立叶变换得到的幅频图

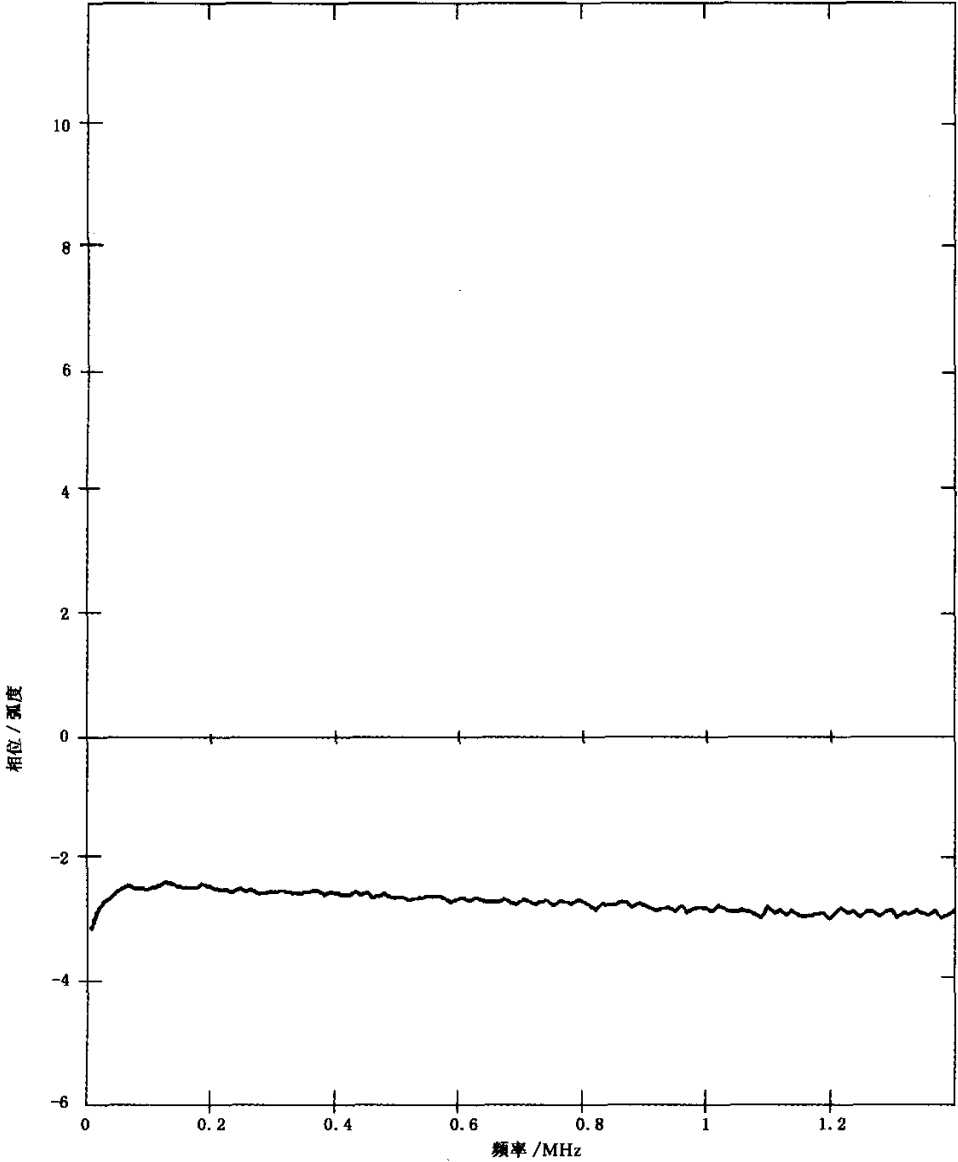


图 11 对应于图 10 的相频图

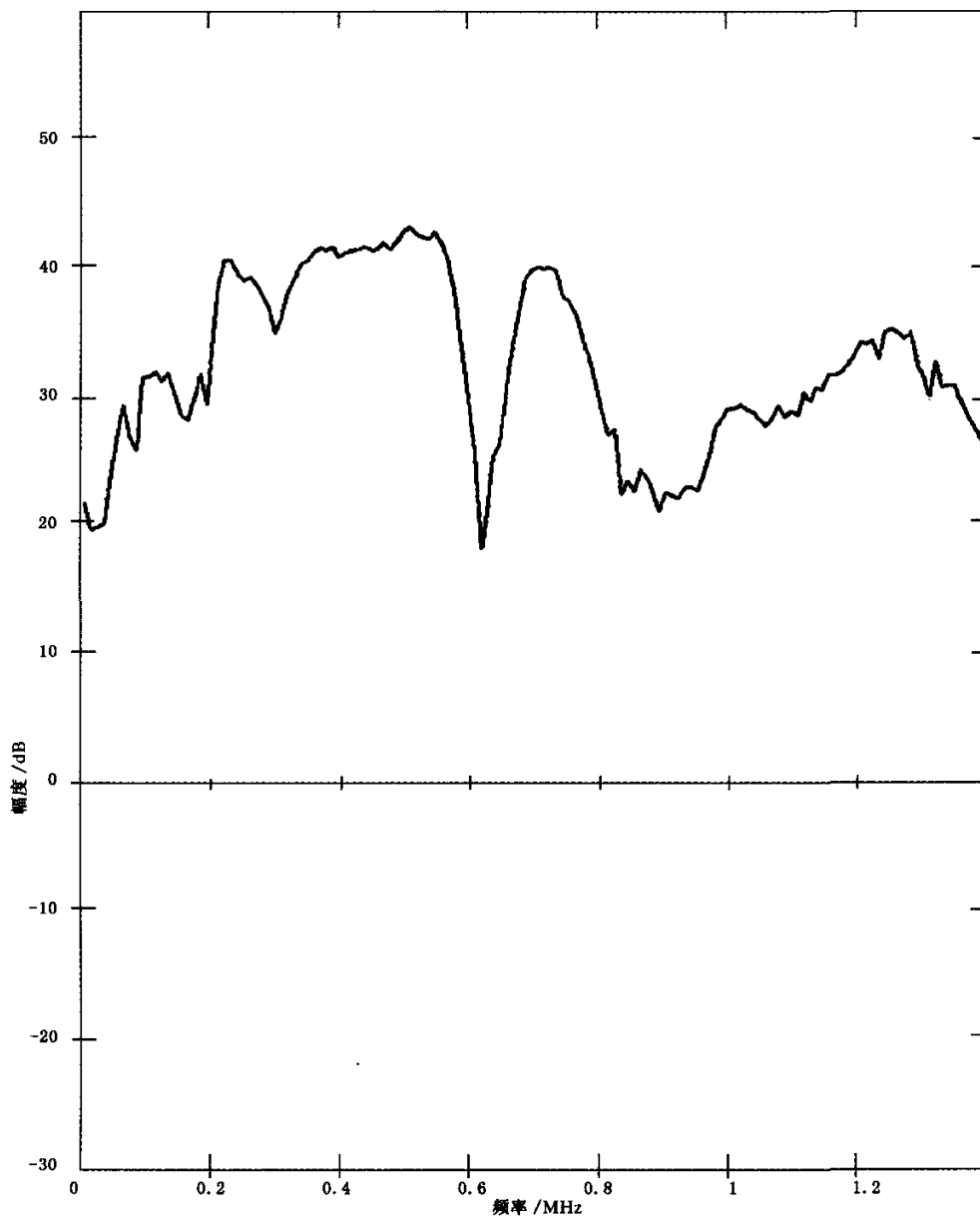


图 12 对图 9 数据进行快速傅立叶变换得到的幅频图

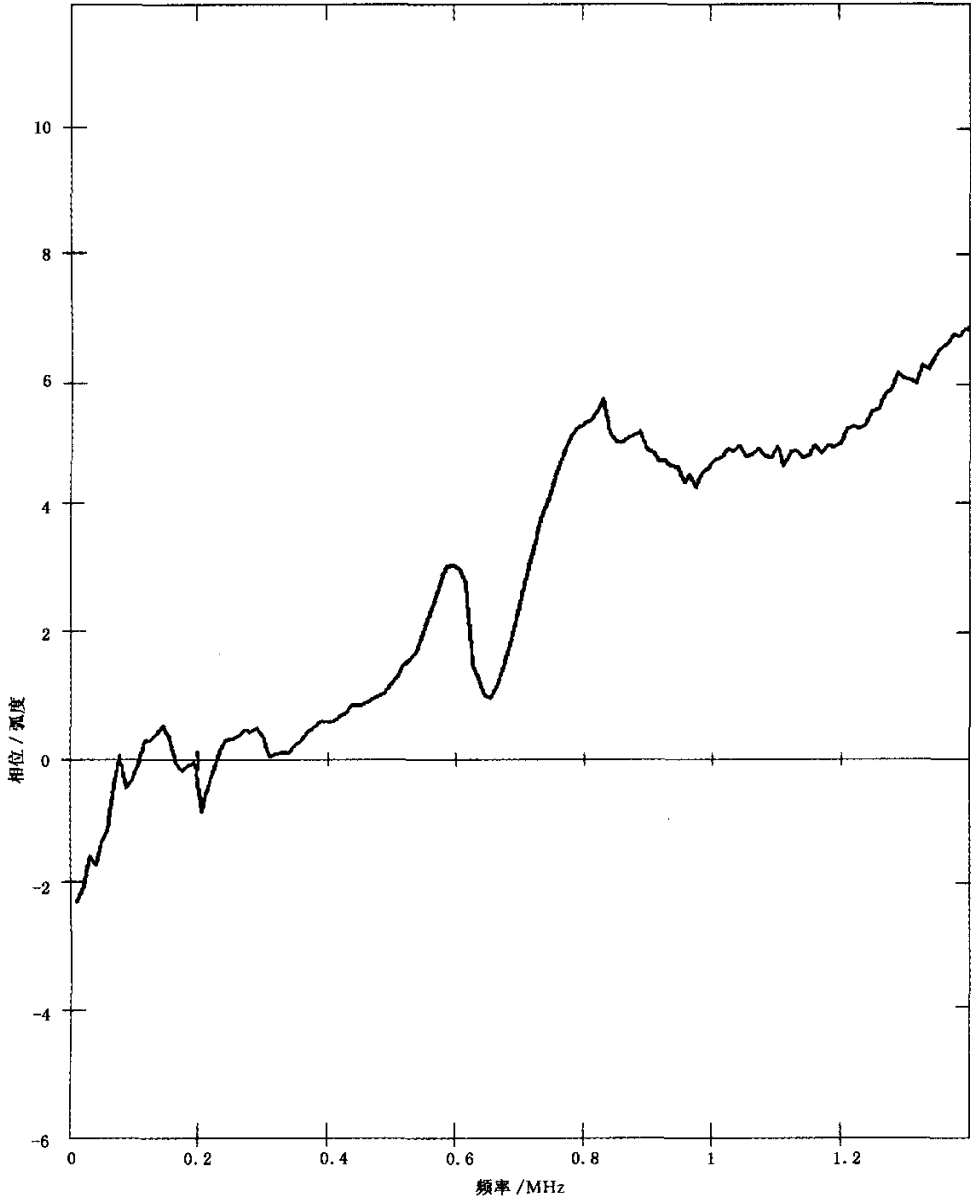


图 13 对应于图 12 的相频图

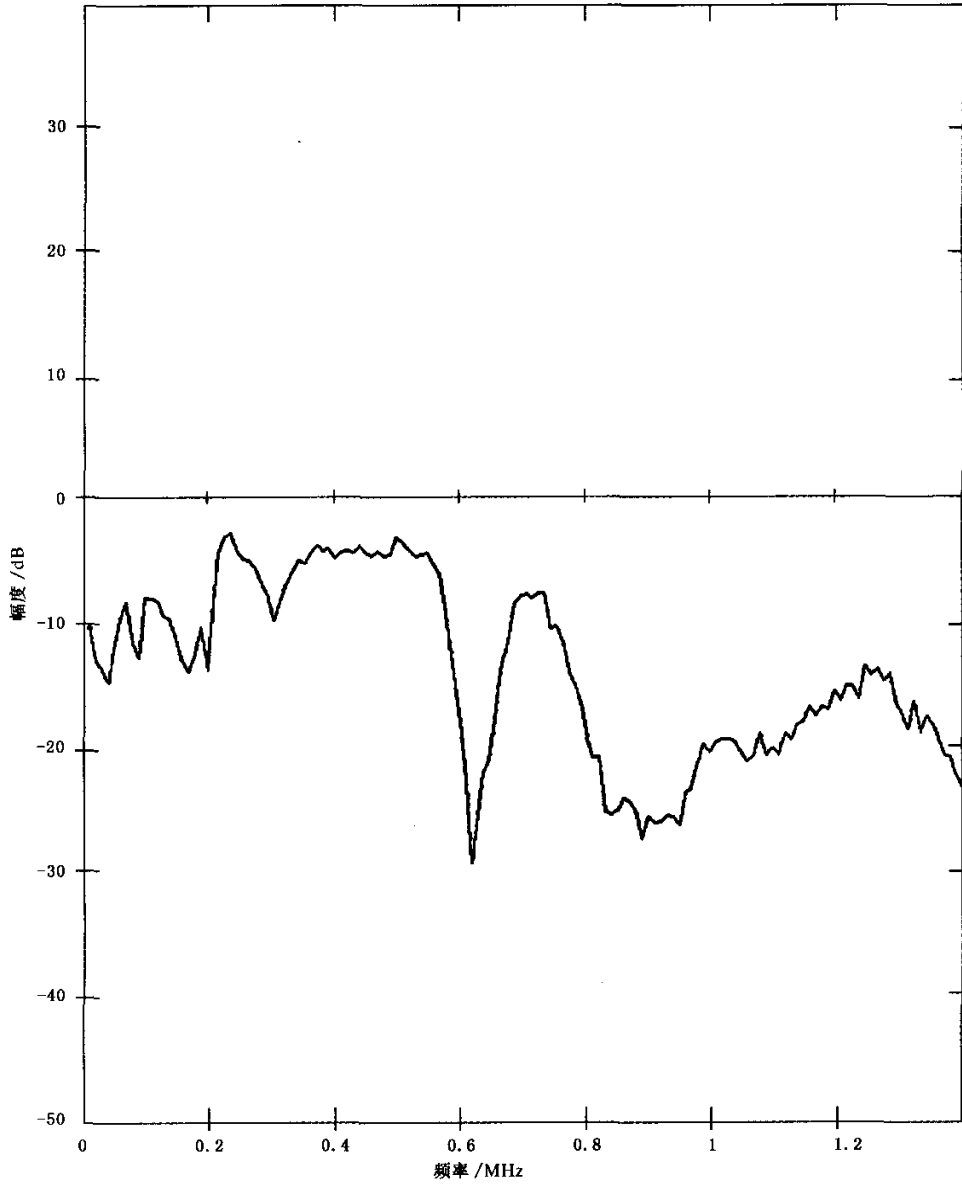


图 14 图 12 的纵坐标除以图 10 的纵坐标所得的待检换能器的幅频图

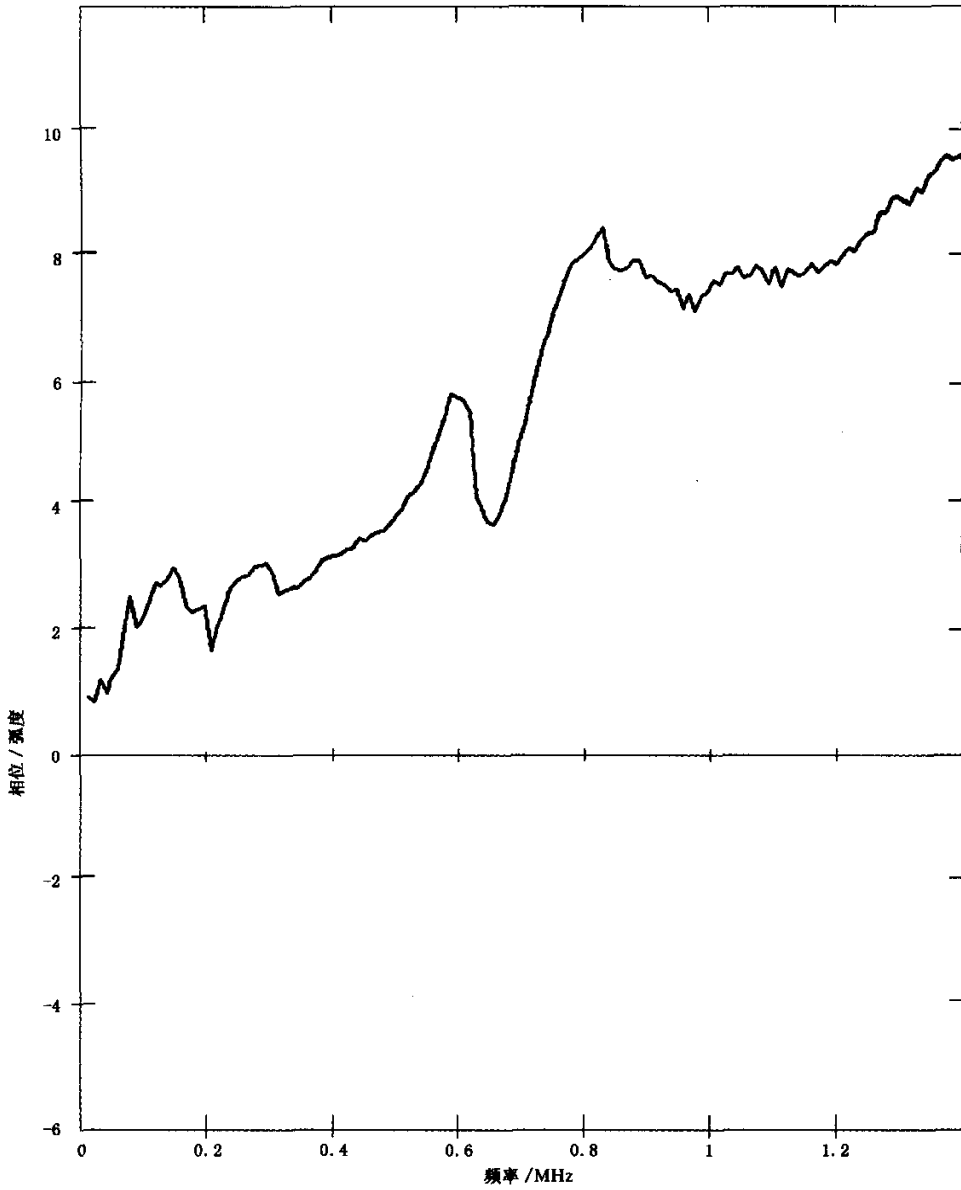


图 15 图 13 的纵坐标减图 11 的纵坐标所得的待检换能器的相频图

参 考 文 献

[1] BRECKENRIDGE, F. R. , Acoustic Emission Transducer Calibration by Means of the Seismic Surface Pulse, Journal of Acoustic Emission, Vol. 1, pp. 87-94, 1982 April.

[2] Hsu, N. N. and BRECKENRIDGE, F. R. , Characterization and Calibration of Acoustic Emission Sensors, Materials Evaluation, Vol. 39, pp. 60-68, 1981 January.

[3] BRECKENRIDGE, F. R. , WATANABE, T. and HATANO, H. , Calibration of Acoustic Emission Transducers; Comparison of Two Methods, Proceedings of the 6th Acoustic Emission Symposium, Tokyo, pp. 448-458, 1982.
