



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 19801—2005/ISO 12714:1999

---

## 无损检测 声发射检测 声发射传感器的二级校准

Non-destructive testing—Acoustic emission inspection—  
Secondary calibration of acoustic emission sensors

(ISO 12714:1999, 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

## 前 言

本标准等同采用 ISO 12714:1999《无损检测 声发射检测 声发射传感器的二级校准》(英文版)。  
本标准等同翻译 ISO 12714:1999。

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;
- e) 删除国际标准的“参考文献”。

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

## 声发射传感器的二级校准

### 1 范围

本标准规定了接收固体介质表面弹性波的声发射传感器的一种二级校准方法。本标准适用于实验室的三级标准传感器和用于检测的传感器的校准。

本校准给出了传感器对声发射工作中常见的瑞利波产生的频率响应。校准用信号源和待检传感器(SUT)安装在试块的同一个表面上。传感器的灵敏度是由 100 kHz 到 1 MHz 范围内的激励所确定。频率分辨率约为 10 kHz。校准单位是伏特每机械输入(位移、速度或加速度)。

### 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。凡是注明日期的引用文件,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。凡是不注明日期的引用文件,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)

GB/T 19800 无损检测 声发射检测 传感器的一级校准(GB/T 19800—2005,ISO 12713:1998,IDT)

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)<sup>1)</sup>

ASTM E 1106-86(1992)el 声发射传感器的一级校准方法(Standard Method for Primary Calibration of Acoustic Emission Sensors)<sup>2)</sup>

ASTM E 1316-97b 无损检测术语(Standard terminology for Nondestructive Examinations)<sup>3)</sup>

### 3 术语和定义

GB/T 12604.4 和 ASTM E 1316 确立的以及下列术语和定义适用于本标准。

#### 3.1

**参考传感器(RS) reference sensor(RS)**

经一级校准中测定的传感器,见 GB/T 19800 或 ASTM E 1106。

注:也称作二级标准传感器。

#### 3.2

**二级校准 secondary calibration**

通过与参考传感器进行比较测量声发射传感器的瞬态频率响应的方法。

#### 3.3

**试块 test block**

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

2) ISO 12713:1998 是以 ASTM E 1106-86(1992)el 为标准草案而制定成的,故 ASTM E 1106-86(1992)el 与 ISO 12713:1998 是等效的。

3) 本标准引用 ASTM E 1316-97b 中的声发射检测术语,与 GB/T 12604.4—2005/ISO 12716:2001 中的术语是相同的。

具有各向同性、均质的弹性材料试块,在二级校准中用以放置激励源、RS(参考传感器)和 SUT(待检传感器)。

#### 4 缩略语

AE	声发射
ASTM	美国材料试验学会
FFT	快速傅立叶变换
ISO	国际标准化组织
RS	参考传感器
SUT	待检传感器

#### 5 一般要求

##### 5.1 待检传感器

本方法适用于三级标准法向位移传感器和在 AE 检测中使用的声发射传感器的绝对校准。为了达到作为三级标准的目的,待检传感器宜具有小孔径、高保真的特点(如美国国家标准局的锥形换能器)。一般来说,所有传感器的校准结果都会由于大孔径和频率响应的不一致性而降低其级别。

所指准确度只针对具有高衰减性的待检传感器。传感器接收到由瞬时冲击产生的信号在允许采集的窗口时间内(对于原型二级校准系统是  $3\ \mu\text{s}$ )宜衰减到一个较小的水平(峰值信号的 20%),并考虑试块边界回波限制。如果不满足此条件,校准的准确度就不可靠(见 8.1)。

##### 5.2 校准单位

二级校准和一级校准一样都能获得传感器同类型的信息。声发射传感器对它前表面的运动产生响应。安装在试块上的传感器前表面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,试块表面传感器安装位置的自由位移可以在试块表面的其他位置测量获得。因为声发射传感器是用来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,自由运动是输入变量的近似。因此,校准的单位是伏特每自由位移或自由速度,例如伏特每米或伏特秒每米。

校准的结果可以是,在频域内为传感器对稳定正弦激励在稳定状态的幅值和相位响应,或在时域内对位移阶跃函数的瞬态响应。

##### 5.3 试块材料的重要性

试块的声阻抗( $Z_{ac}$ )是一个重要的参数,它影响着校准的结果。在不同材料的试块上校准所得到的传感器灵敏度结果不同,例如,一个在钢质试块上校准过的传感器如果再在玻璃或者铝质试块上校准,所得到的传感器平均灵敏度只有在钢质试块上的 50%,如果在有机玻璃上进行校准得到的结果将只有钢质试块上的 3%。

对于耦合面是圆形且表面灵敏度一致的传感器来说,存在着一些没有响应的频率。这个现象发生在一阶贝塞尔函数的零值点  $J_1(ka)$ ,其中: $k=2\pi f/c$ , $f$  是频率, $c$  是试块中的瑞利波速, $a$  是传感器放置面的半径。因此,校准结果与试块材中的瑞利波速相关。

根据前面所述,二级校准的结果都对应着特定的试块材料;所以二级校准中必须明确试块的材料。尽管本标准声称二级校准可以在不同材料的试块上进行,但由于涉及到的一级校准只是在钢质试块上进行,所以如果要在其他材料上进行二级校准也必须在同样材料上进行一级校准。

#### 6 二级校准装置的要求

##### 6.1 基本框图

二级校准装置如图 1 所示。一个玻璃毛细管断裂装置或其他合适的声源装置(A)放置在钢质试块

(B)的上表面。RS(C)和 SUT(D)放置在距离声源距离相等但方向相反的位置上。由于传感器位置的对称性,试块上表面在 RS(C)和 SUT(D)位置上的自由位移是相同的。两个传感器输出的瞬时电压被数字波形记录仪(E)同时记录并送入计算机进行数据处理。

试块表面上 RS 和 SUT 处的动态位移实际上可能有所不同,因为 RS 和 SUT 对试块的负载阻抗不同。为了一级校准和二级校准中定义的一致性,两个传感器的负载影响被认为是传感器本身的特性,校准的结果是以试块表面的自由位移形式表述的。

## 6.2 试块的要求

设计的二级校准装置专门用于钢制品检测用的传感器。因此试块是钢质的(热轧钢 A36)。对于钢质试块来说,推荐在 566℃或更高的温度消除应力,应力释放需在火焰切割后进行。

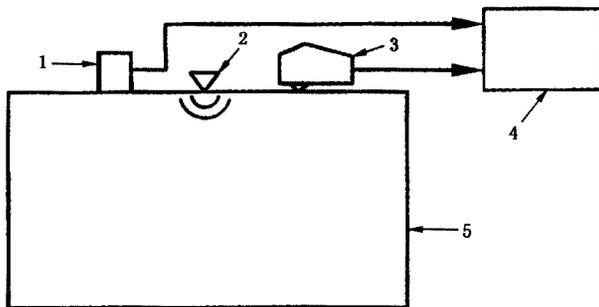
钢质试块应至少包括直径为 400 mm、长度为 180 mm 的圆柱,试块的两个端面应平整且平行度不超过 0.12 mm( $\pm 0.06$  mm)。

钢质试块的上表面(工作面)的 RMS 粗糙度应不超过  $1\ \mu\text{m}$ ,这要求至少用表面粗糙度仪在试块表面的中心区域测量三点来保证。试块底面的 RMS 粗糙度值应不大于  $4\ \mu\text{m}$ 。对试块底面的粗糙度值要求是为了保证对试块进行声速测量的有效性。

对于其他材料的试块,其最小规格、尺寸准确度、粗糙度的要求应根据所用材料的纵波波速与钢中纵波波速的比值进行调整。

试块的上表面应是工作面,工作面上放置声源、RS 和 SUT。这些位置应在试块表面的中心区域以保证声源和传感器到边缘的距离最大。对于任何材料的试块,声源到 RS 的距离和声源到 SUT 的距离应为  $100\ \text{mm} \pm 2\ \text{mm}$ (与在一级校准中的要求相同)。

试块应按 ASTM E 114 的要求进行 2 MHz 到 5 MHz 的超声纵波缺陷检测。试块中应不含回波高度大于第一次底波 12% 的缺陷。



- 1——待检传感器;
- 2——毛细管断裂源;
- 3——参考传感器;
- 4——双通道波形记录系统;
- 5——41 cm×41 cm×19 cm 钢质试块。

图 1 二级校准装置示意图

试块的材料应有很高的均匀性,这由脉冲回波以及纵波和横波传播时间的测量确定。应至少在试块表面合理分布的 7 个位置上进行测量。每次测量的声波传播时间差应不大于 0.1%。脉冲回波测量的换能器的共振频率推荐在 2 MHz 至 5 MHz 范围内。对于纵波声速的 7 次(或更多次)测量,其各次测量的偏差不应超过平均值的 0.3%。横波测量也应满足同样的要求。

## 6.3 声源

在二级校准系统中使用的声源是玻璃毛细管的断裂。毛细管是由 6 mm 的耐热玻璃管拉成直径为 0.1 mm 到 0.25 mm 的玻璃管。声源的激发是由拿在手中直径 4 mm 的玻璃棒挤压位于试块上的玻璃毛细管而产生。

通常,二级校准的声源可以是任何小孔径的装置,只要能够提供足够能量用于 100 kHz 到 1 MHz 的频率范围内的校准测量。校准技术要求声源是一个瞬态装置,比如玻璃破裂装置、火花装置、脉冲驱动换能器或连续波形装置,例如一个由声脉冲发生器驱动的美国国家标准局锥形换能器。如果 RS 和 SUT 在试块上是依次检测,而不是同时检测,那么声源的重复性要保证在 2% 准确度以内。

6.4 参考传感器

在二级校准系统中使用的 RS 是一个 NBS 锥形换能器。通常 RS 的频率响应由一级校准确定。无论作为速度传感器或位移传感器,它在 100 kHz 到 1 MHz 频率范围内的频率响应是平坦的,总的变化在 20 dB 以内。要求 RS 是小孔径类型的传感器、频率响应尽可能平滑。见 5.3 和图 8 有关孔径效应的部分。

6.5 待检传感器

SUT 的检测条件应与实际使用的条件相同。耦合剂、SUT 输出端的电气负载和压紧力应与实际使用时相同。耦合剂最好是黏度小的机油,任何合理的电气负载均可,压紧力最好是 9.8N。这些条件都与一级校准相同。

6.6 数据记录和处理设备

对于使用瞬态声源的校准方法来说,整个系统将包括一台计算机和双通道同步瞬态记录仪,一个通道记录 RS 的输出信号,另一个通道记录 SUT 的输出信号。瞬态记录仪至少是 8 位的准确度和 20 MHz 的采样速率,或至少是 10 位准确度和 10 MHz 的采样速率,而且最少能存贮 55 μs 的数据。数据传送至计算机进行处理,也可以存到如软盘等永久储存介质上。

7 校准数据的处理

7.1 原始数据

在二级校准系统中,双通道中的每一个通道采集记录的原始波形数据是由 2048 个 10 bit 的数据组成,采样间隔 Δt=0.05 μs。因此数据记录的总长度 T=102.4 μs。从试块底部的反射波在两个通道开始记录数据后 60 μs 左右到达传感器(见图 3 和图 4)。在采集记录的波形中不希望出现反射波,因为到达传感器的反射波来自不同方向,而这些方向的反射波不一定是校准所期望方向的反射波。记录的数据都作如下方式的截短和填补:即对应时间大于 55 μs 的数据被第 55 μs 前的最后十个数据的平均值所代替。

7.2 复值频谱

经通过快速傅立叶变换(FFT),RS 和 SUT 输出数据的复值频谱 S(fm)和 U(fm)可按下列公式计算:

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

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

式中:

n——2048;

j——0,1,2,⋯,n-1;

s<sub>j</sub>——RS 通道中第 j 个采样值;

u<sub>j</sub>——SUT 通道中第 j 个采样值;

m——0,1,2,⋯,(n/2)-1;

f<sub>m</sub>——m/T 第 m 个频率,单位是 MHz。

频率间隔是 1/T=9.76 kHz。通常 s<sub>j</sub> 和 u<sub>j</sub> 经过波形记录仪的增益和前置放大器的放大后被转换成电压值。SUT 的复值响应是:

$$D(f_m) = \frac{U(f_m)S_0(f_m)}{S(f_m)} \quad \dots\dots\dots(3)$$

这里  $S_0(f_m)$  表示频率为  $f_m$  时 RS 的(复值)响应,单位是伏特每米。 $S_0(f_m)$  的值来自于对 RS 的一级校准结果。

### 7.3 幅值和相位

$D(f_m)$  的幅值  $r_m$  和相位  $\omega_m$  由下式计算得到:

$$r_m = |D(f_m)| \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\omega_m = \arctan \frac{I_z[D(f_m)]}{R_z[D(f_m)]} \quad \dots\dots\dots(5)$$

这里  $I_z$  和  $R_z$  分别表示复数  $z$  的虚部和实部,校准幅值  $\omega_m$  通常以 dB 的形式表示:

$$W_m = 20 \log_{10}(r_m) \quad \dots\dots\dots(6)$$

$W_m$  和  $\omega_m$  对应频率曲线如图 5 和图 6 所示。

### 7.4 特殊事项

FFT 把函数当作周期函数,周期等于数据记录时间的长度。如果数据初值和终值不相等,那么初值和终值间就存在跃变,FFT 就会因跃变而产生不可靠的结果。

对校准系统的修正是给数据加上如下的线性函数:

$$s'_j = s_j + (j/n)(s_0 - s_{n-1}) \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$u'_j = u_j + (j/n)(u_0 - u_{n-1}) \quad \dots\dots\dots(8)$$

修正函数  $s'_j$  和  $u'_j$ , 它们的初值和终值间没有跃变。已经证明这种处理方法和其他两种常用的处理阶跃函数的方法的效果是相同的。此线性函数的应用是已经过填补处理的数据。

复数的相位不是唯一的。在校准系统中,规定  $\omega_m$  的取值范围是  $-\pi \sim \pi$ 。在此规定下,当  $\omega_m$  取边界值  $-\pi$  或  $\pi$  时,  $\omega_m$  就会跃变。为了消除这种跃变,用  $2k\pi + \omega_m$  来计算相位( $k$  为正整数,且随频率的增加而变大),这样  $\omega_m$  就会连续,而不会跃变。对大部分传感器,这样计算的相频曲线,除  $D(f_m) \approx 0$  外都是平滑的。当  $D(f_m) \approx 0$  时,相位有时会跃变  $2\pi$  的整数倍。对于频率响应相对平坦的传感器,上面所述计算相位的方法很好。但是,如果相频响应剧烈的振荡,或幅频响应约等于 0 时,就会有  $2n\pi$  的相位不确定度。

## 8 不确定度的评定

### 8.1 不确定度来源

有几种不确定度因素影响到二级校准的准确度和重复性。不确定度因素包括对 RS 的一级校准和 SUT 放置位置的变化,以及波形记录和数字处理中的不确定度形成了二级校准结果的不确定度。

传感器重新安装进行校准的重复性不及传感器固定不变进行校准的重复性。把传感器再次固定在试块表面不可避免会产生偏差。在二级校准过程中,应特别注意并尽可能减小下列因素:

- 传感器表面的不平整;
- 试块表面的小毛刺;
- 耦合层中的灰尘;耦合剂过黏;
- 传感器压紧力的大小和作用位置的偏差。

由于采集的波形只有  $55 \mu\text{s}$ , 这样会产生截断不确定度。SUT 主要对瑞利脉冲很敏感,波形大约持续  $30 \mu\text{s}$ 。如果瑞利脉冲在  $55 \mu\text{s}$  后产生,就不会记录到传感器输出的信号中。对于一个响应时间小于  $30 \mu\text{s}$  的传感器来说,不确定度可以忽略不计,但在  $55 \mu\text{s}$  后传感器仍然有信号输出时,截断的波形就不能正确的表示实际的传感器响应。估计截断不确定度比较困难。更大的试块可以采集较长时间的波形,但这并不实用。唯一合理的解决方法是限于校准高衰减的传感器。

傅立叶变换产生离散的频率成分,频率间隔约为  $10 \text{ kHz}$ 。频率小于  $100 \text{ kHz}$  的时候,  $10 \text{ kHz}$  的频

率间隔相对太大。对于具有平滑频率响应的传感器,在 10 kHz 到 100 kHz 的频段内存在有用的信息,但是很难在这个频段内保证准确度。

在高频段,电子噪声和量化噪声的影响增加。在大于 1 MHz 时,这些影响导致对同一传感器的校准结果会产生若干 dB 的偏差。因此,合理的频谱范围是 100 kHz 到 1 MHz。

### 8.2 不确定度的定量评定

幅频响应数据的不确定度可分以下两类:

- A 型:对多种不同换能器幅频响应的数据进行统计分析得到;
- B 型:由数据采集和处理设备的个体特性差异所引起。

对于二级校准系统。认为 A 型来自于传感器耦合和放大增益的偏差,以及传感器的温度和老化效应。这些效应使传感器幅频响应的所有数据在 95% 的置信度下产生约 16% 的偏差。

B 型由电子噪声、数据采集、混叠不确定度和其他与瞬态采集过程有关的不确定度组成。其影响的大小可以通过选择设备来确定。这些影响使传感器幅频响应的所有数据增加同样大小的不确定度。全部增加的不确定度可以表示成设备满量程的一个系数。数字波形记录仪器的提供商应保证仪器在 95% 的置信度下不确定度不超过满量程的 3%。当仪器设置到最佳动态范围时,产生的不确定度可简单表示为仪器采集到的数据最大值的百分比。因此,任何一次测试产生的幅频响应的不确定度就是这次测试的幅频响应数据最大值的 3%。

这种计算总体不确定度的方法必须考虑加法和乘法分量。对于所有幅频响应的乘法不确定度值  $r_m$  可以简化为  $0.16 r_m$ 。加法不确定度为  $0.03 r_{max}$ ,此处,  $r_{max}$  是给定数据  $r$  的最大值。 $U(r_m)$  的总不确定度等于这两个分量的平方和的开方。

$$\begin{aligned}
 U(r_m) &= [(0.16r_m)^2 + (0.03r_{max})^2]^{1/2} \\
 &= (0.026 r_m^2 + 0.001r_{max}^2)^{1/2} \\
 &= r_m [0.026 + 0.001(r_{max}/r_m)^2]^{1/2} \dots\dots\dots (9)
 \end{aligned}$$

$U(r_m)$  的最小值是 16.3%,对于  $r_m$  的最大值。 $U(r_m)$  的上限取决于  $r_m$  最低可信值的选择。如果  $r_m$  最低可信值是  $r_{min}$ ,比  $r_{max}$  低 20 dB,那么  $U(r_m)$  的最大值是 35.5%。 $U(r_m)$  的最大值会因截断大于  $r_{min}$  的值而减小。

### 8.3 以 dB 形式表示的不确定度

$U$  的值可以用 dB 的形式表示:

$$U_{dB} = 20 \log_{10}[1 \pm U(r_m)] \dots\dots\dots (10)$$

对每次不同的校准和求和可使用常数: $U(r_{max}) = 1.5$  dB, $U(r_{min}) = 3.8$  dB。

## 9 二级校准系统的验证性检测

至少使用 3 个传感器进行校准以使二级校准系统产生重复性的校准结果。对每一个传感器,95% 的频率响应数据必须落在由  $\pm U$  所确定的不确定度范围内。

至少应有一个传感器的二级校准结果与一级校准结果相一致。此传感器 95% 的频率响应数据,应与一级校准数据在  $\pm (U + 1.5)$  不确定度内相一致。

## 10 典型的校准结果

图 2 和图 3 表示在二级校准系统中从 SUT 和 RS 中采集到的典型的波形。图 4 和图 5 表示从图 2 和图 3 中数据所获得的校准频率范围。图 6、图 7 和图 8 表示 3 个传感器的一级校准和二级校准的结果比较。在各个图中,两个曲线的每一条都表示单个的校准结果。

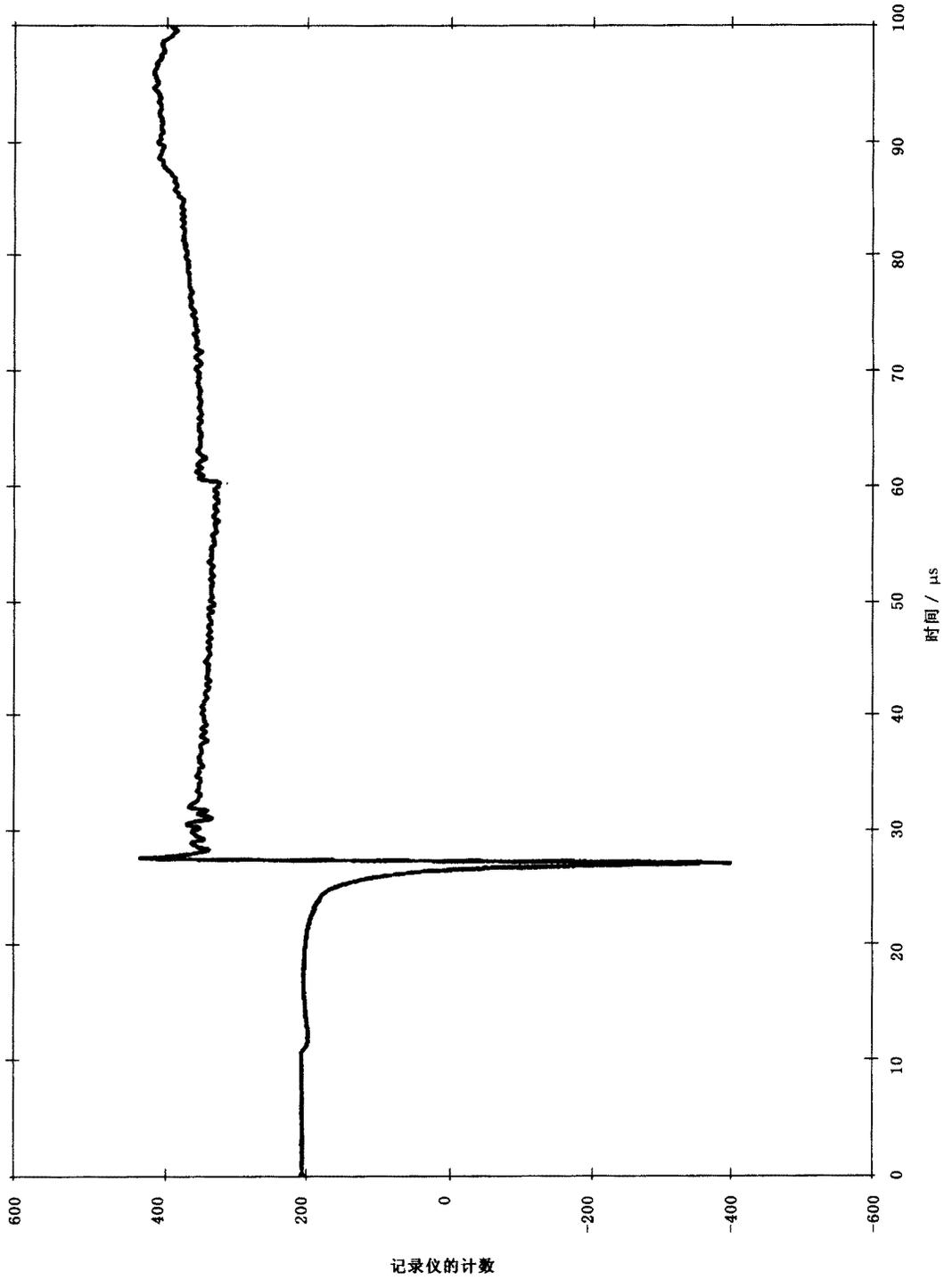


图2 二级校准系统中参考传感器的波形

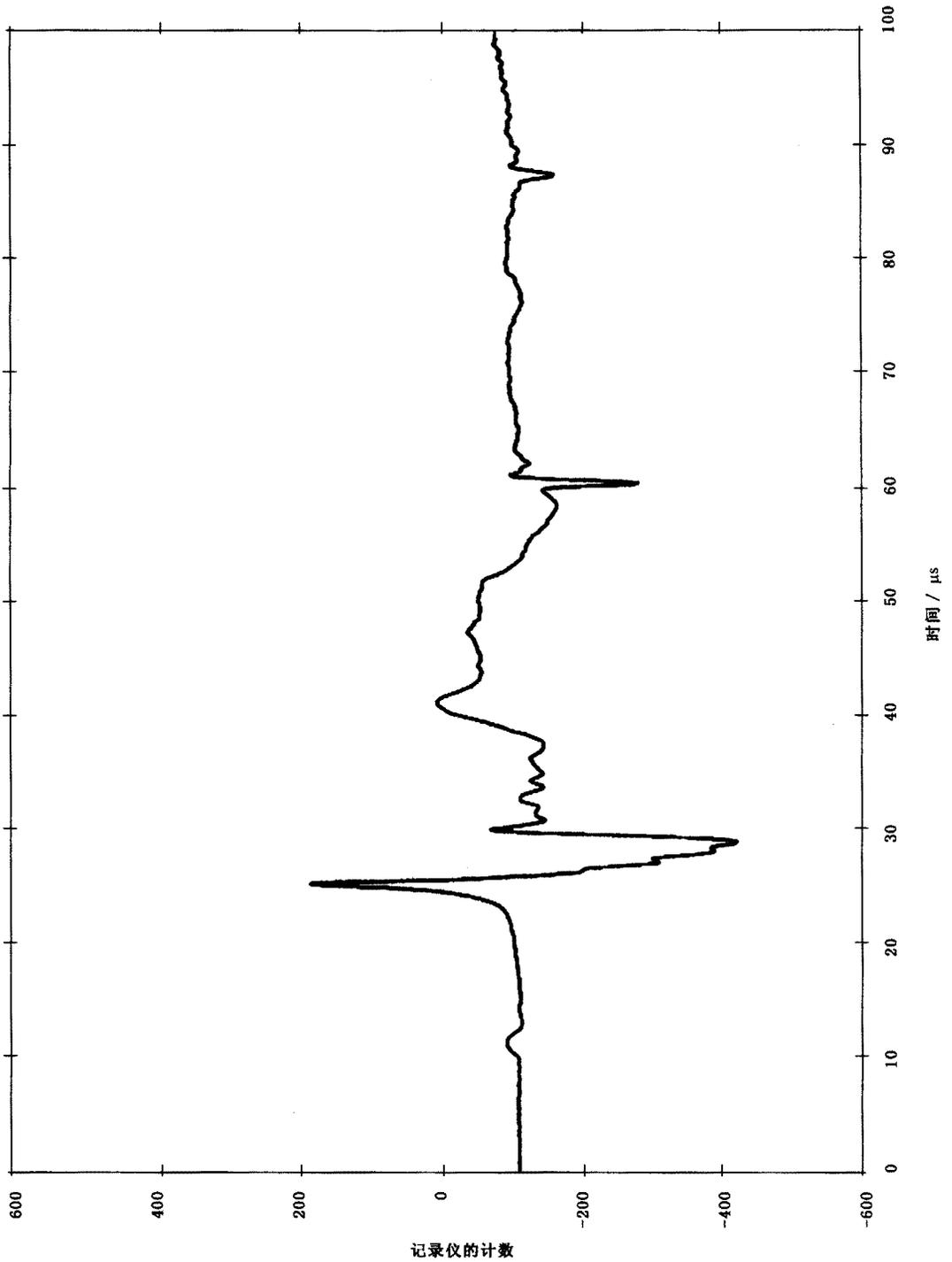


图 3 待检传感器的波形,与图 2 中参考传感器的波形记录同步

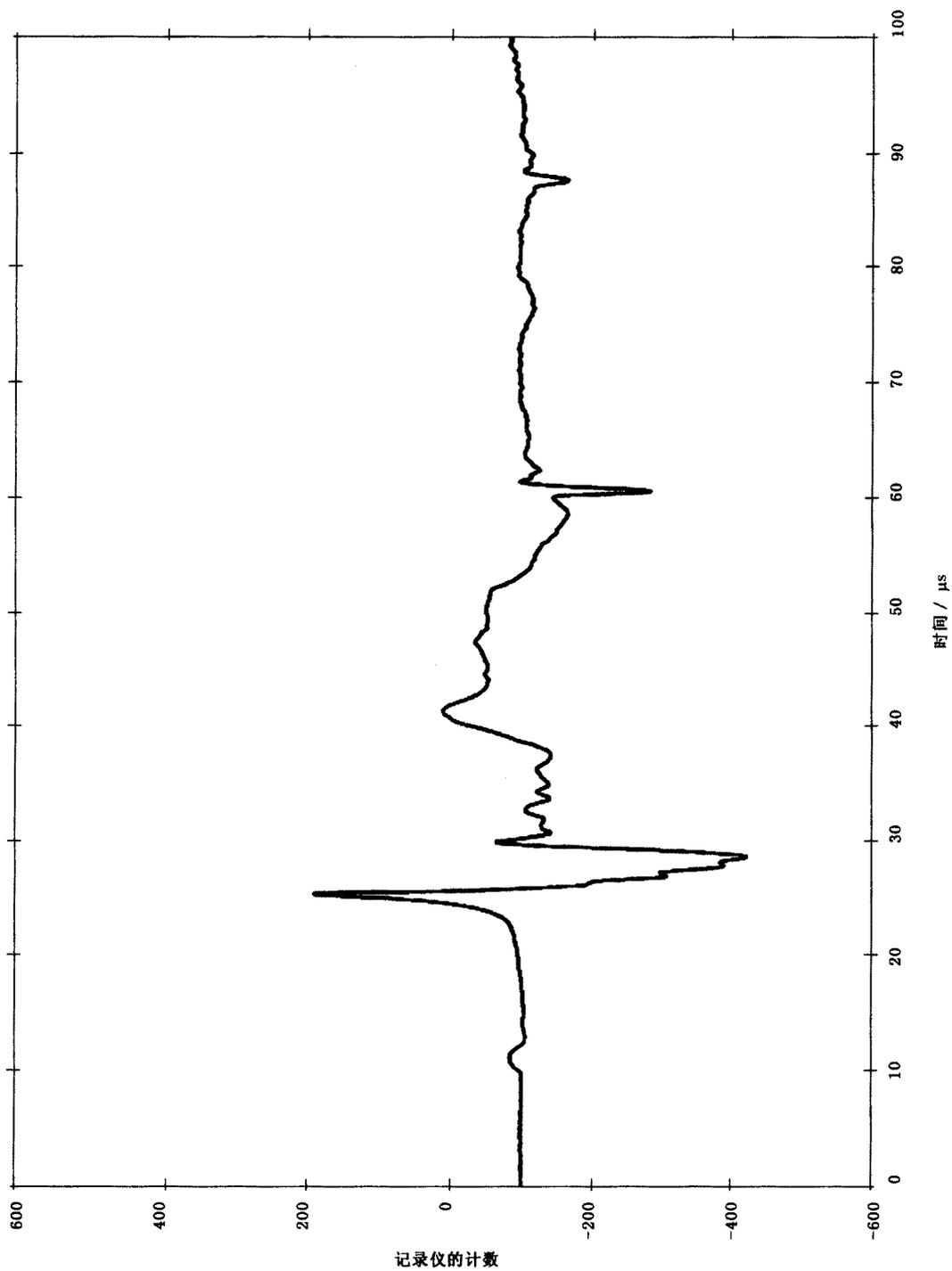


图 4 待检传感器的幅频响应曲线,由图 2 和图 3 中得出

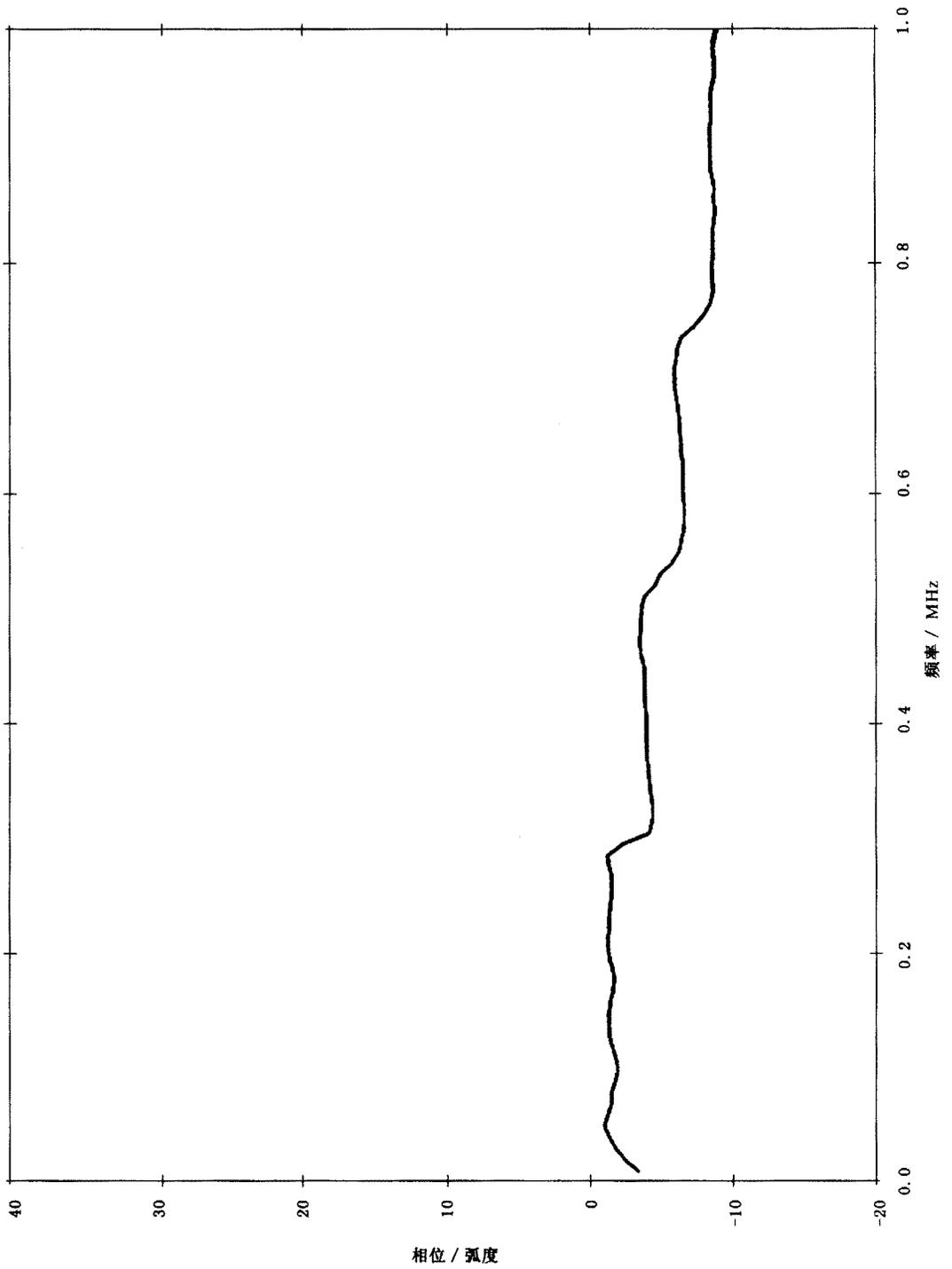
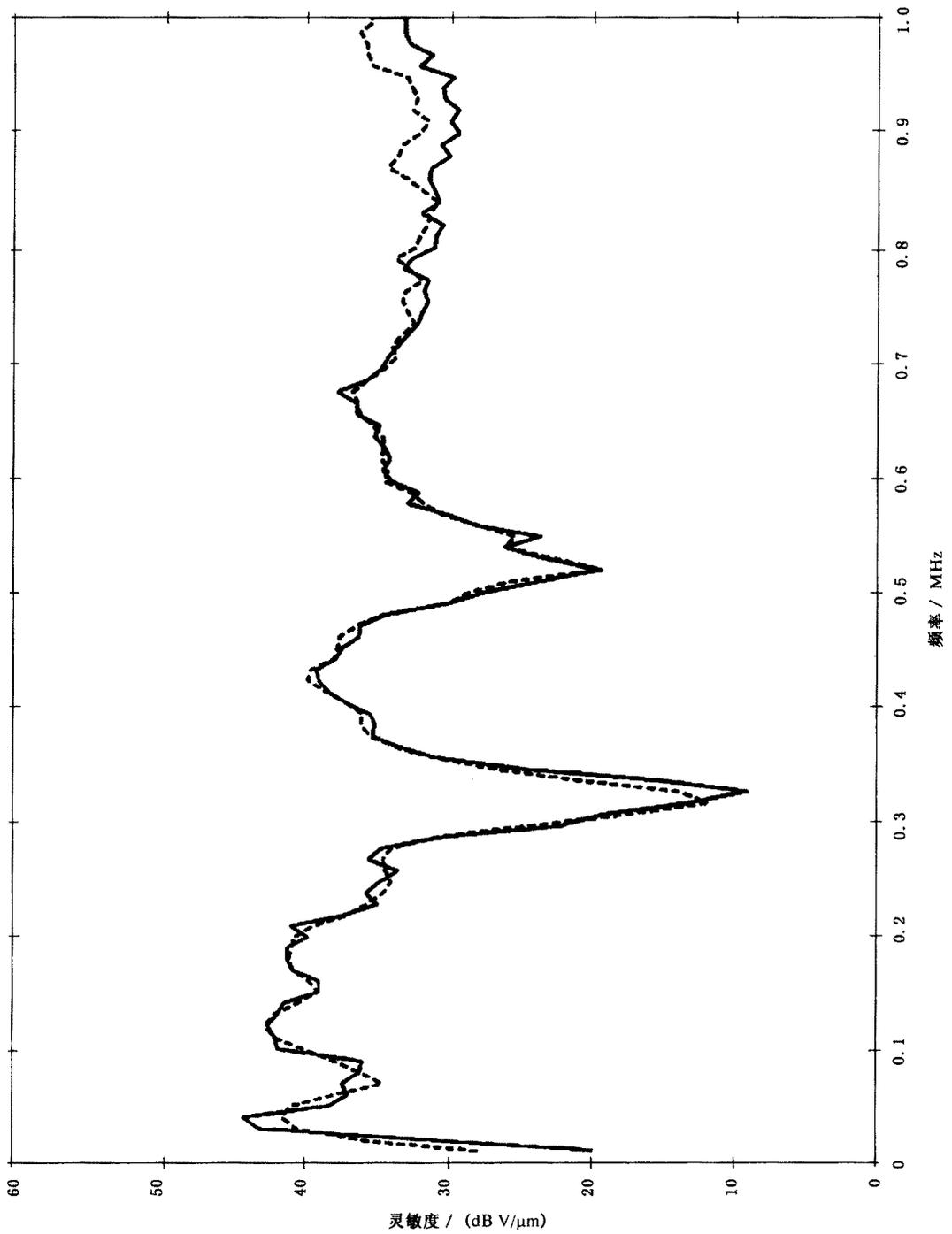
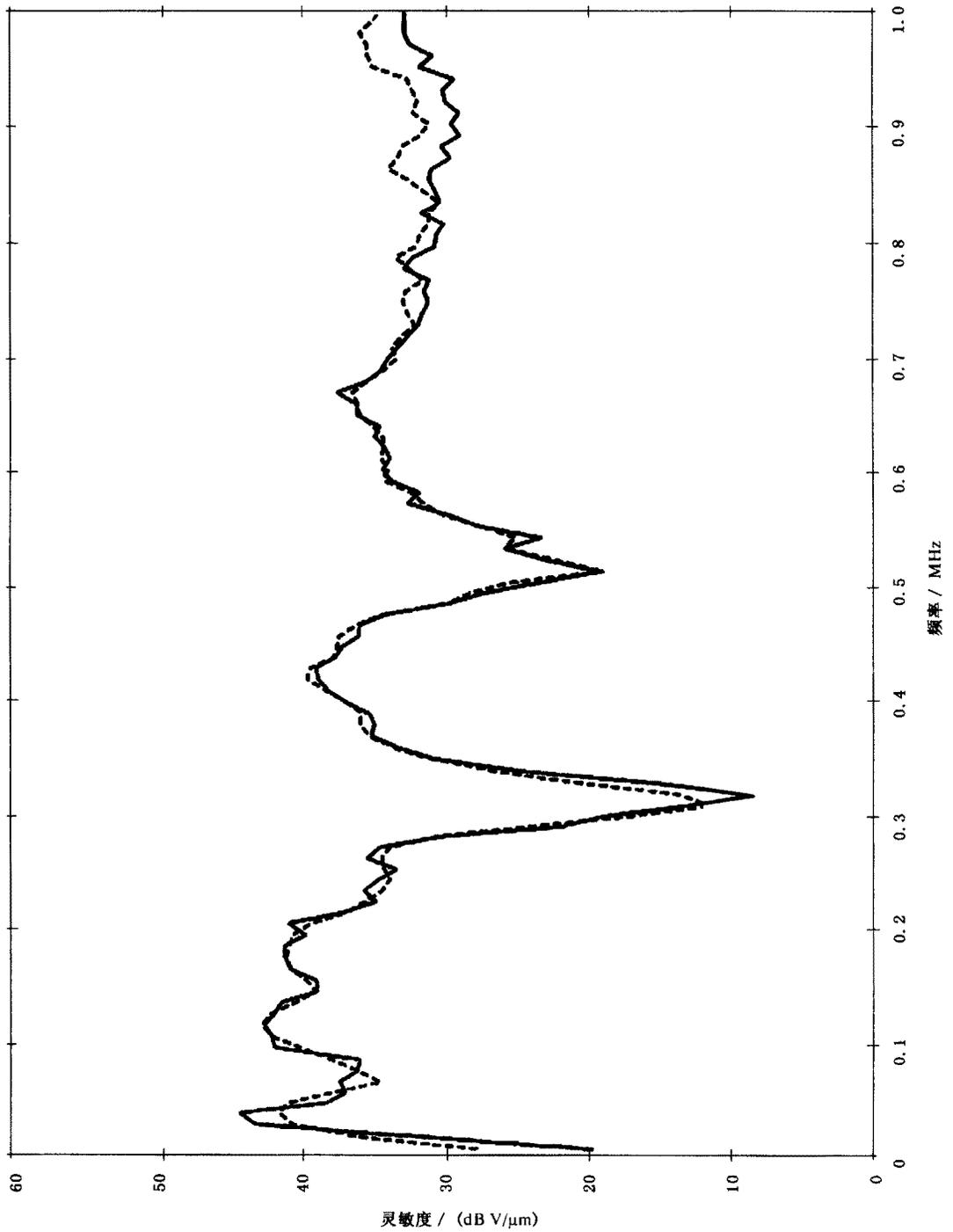


图 5 待检传感器的相频响应曲线,由图 2 和图 3 中得出



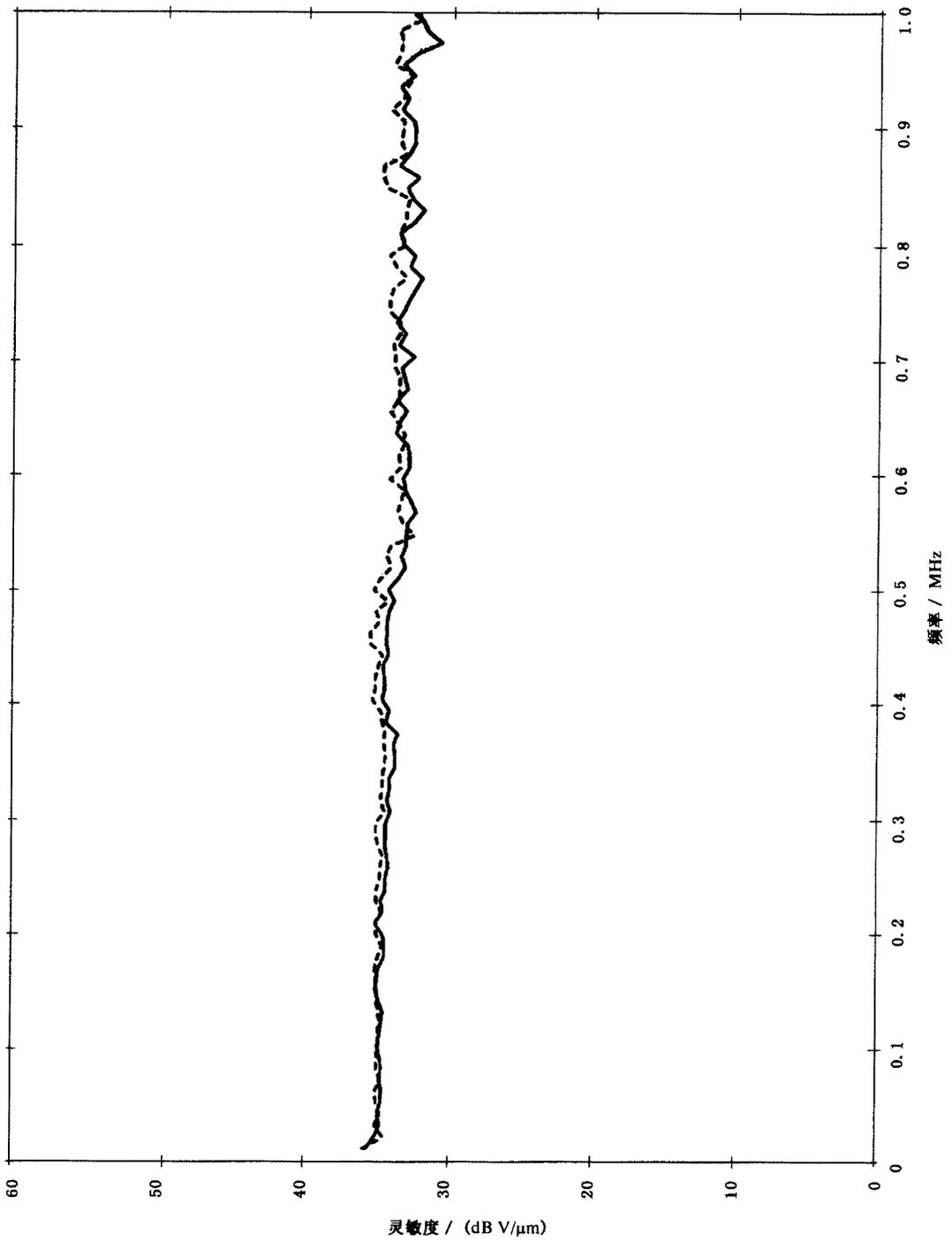
注：最坏的情况下，误差是 3 dB，大多数情况下在 1 dB 之内。

图 6 对一个标称直径为 12.7 mm 的传感器的一级校准和二级校准结果比较



注：曲线上的低点对应于5.4所述的孔径效应。最坏的情况下误差为3.6 dB,大多数情况下在1 dB之内。

图7 对另一个标称直径为12.7 mm的传感器的一级校准和二级校准结果比较



注：在 1 MHz 下曲线上无孔径低点，最坏的情况下误差为 2.7 dB，大多数情况下在 1 dB 之内。

图 8 直径是 1.4 mm 的 NBS 圆锥形换能器的一级校准和二级校准结果比较