



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1863—2020

声发射传感器校准规范（互易法）

Calibration Specification for Acoustic Emission Sensors (Reciprocity Method)

2020-09-11 发布

2021-03-11 实施

国家市场监督管理总局 发布

声发射传感器校准规范

(互易法)

Calibration Specification for Acoustic
Emission Sensors (Reciprocity Method)

JJF 1863—2020

归口单位：全国声学计量技术委员会

起草单位：中国计量科学研究院

福建省计量科学研究院

吉林省计量科学研究院

本规范委托全国声学计量技术委员会负责解释

本规范起草人：

王 敏（中国计量科学研究院）

何龙标（中国计量科学研究院）

李 群（福建省计量科学研究院）

王子乔（吉林省计量科学研究院）

目 录

引言	(II)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语和计量单位	(1)
3.1 声发射	(1)
3.2 试块	(1)
3.3 电声互易原理	(1)
3.4 声发射传感器灵敏度	(1)
3.5 声发射传感器灵敏度级	(2)
4 概述	(2)
5 计量特性	(2)
5.1 频率响应	(2)
5.2 灵敏度级最大值	(2)
6 校准条件	(2)
6.1 环境条件	(2)
6.2 测量标准及其他设备	(2)
7 校准项目和校准方法	(3)
7.1 校准项目	(3)
7.2 校准方法	(3)
8 校准结果表达	(5)
8.1 校准记录	(5)
8.2 校准数据处理	(5)
8.3 校准证书	(5)
8.4 校准结果的测量不确定度	(6)
9 复校时间间隔	(6)
附录 A 校准证书的内页格式	(7)
附录 B 互易常数的计算	(8)
附录 C 测量不确定度评定示例	(10)

引 言

本规范依据 JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》和 JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》的要求进行编制。

本规范基于互易法，参照 GB/T 19800—2005《无损检测 声发射检测 换能器的一级校准》和日本无损检测行业标准 NDIS 2109—2004《采用互易技术对声发射传感器的绝对校准》（Method for absolute calibration of acoustic emission transducers by reciprocity technique）制定。

本规范为首次发布。

声发射传感器校准规范（互易法）

1 范围

本规范适用于频率范围为 100 kHz ~ 1 MHz 的压电型声发射传感器互易法校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1001 通用计量术语及定义

JJF 1034 声学计量名词术语及定义

GB/T 3102.7 声学的量和单位

GB/T 12604.4—2005 无损检测 术语 声发射检测

GB/T 19800—2005 无损检测 声发射检测 换能器的一级校准

NDIS 2109—2004 采用互易技术对声发射传感器的绝对校准 (Method for absolute calibration of acoustic emission transducers by reciprocity technique)

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 术语和计量单位

本规范采用 GB/T 3102.7 中规定的量和单位。

JJF 1001、JJF 1034、GB/T 19800—2005 和 GB/T 12604.4—2005 中界定的及以下术语和定义适用于本规范。

3.1 声发射 acoustic emission

材料内部迅速释放能量所产生的瞬态弹性波的现象。

3.2 试块 test block

具有各向同性和均质的弹性材料块。

3.3 电声互易原理 electroacoustical reciprocity principle

一个线性、无源和可逆的电声换能器，其用作接收器时的电压灵敏度与用作发射器时的发送电流响应之比与换能器结构无关的原理。

3.4 声发射传感器灵敏度 sensitivity of acoustic emission sensor

每单位机械输入（位移、速度、加速度）的输出电压。

注：当机械输入以速度衡量时，速度灵敏度的计算公式为：

$$M = \frac{U}{v} \quad (1)$$

式中：

M ——传感器的速度灵敏度， $V/(m \cdot s^{-1})$ ；

U ——传感器的输出电压， V ；

v ——传感器耦合位置处垂直于试块表面的振动速度， $m \cdot s^{-1}$ 。

3.5 声发射传感器灵敏度级 sensitivity level of acoustic emission sensor

声发射传感器通常采用灵敏度级，速度灵敏度级的参考值为 $1 \text{ V}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 。

4 概述

声发射传感器通常采用压电效应在 $100 \text{ kHz} \sim 1 \text{ MHz}$ 频率范围接收材料或结构内部的声发射信号，可用于监测压力容器、管道、核电设备等诸多类型的结构件的服役状态。

按照声发射弹性波的传播模式，弹性波通常分为表面波和纵波。

5 计量特性

5.1 频率响应

声发射传感器的频率响应在其工作频率范围内测定，灵敏度级的年变化量一般不超过 $\pm 6 \text{ dB}$ [参考值 $1 \text{ V}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$]。

5.2 灵敏度级最大值

声发射传感器灵敏度级最大值一般大于 20 dB [参考值 $1 \text{ V}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$]，通常也给出其对应的频率点。

注：本规范计量特性中提出的技术指标不作为合格性判定，仅提供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

温度： $(18 \sim 28) ^\circ\text{C}$ ；

相对湿度： $30\% \sim 90\%$ 。

6.2 测量标准及其他设备

6.2.1 试块

采用碳钢材质试块，用 2.25 MHz 的纵波进行检测，试块应不存在回波大于第一次底面波 10% 的缺陷。

对于声发射传感器的表面波灵敏度的校准，钢质试块应至少包括直径为 400 mm 、高度为 180 mm 的圆柱体，钢质试块工作面的粗糙度不应超过 $1 \mu\text{m}$ 。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。

对于声发射传感器的纵波灵敏度校准，建议选择直径不小于 400 mm 、厚度不小于 250 mm 的试块。

6.2.2 函数信号发生器

在校准频率范围内，最大输出幅度不小于 1 V ，在校准期间内输出幅度变化不应超过 $\pm 0.1\%$ ，频率示值误差不应超过 $\pm 0.1\%$ 。

6.2.3 功率放大器

在校准频率范围内，最大输出电压幅度峰峰值不小于 100 V ，电流峰峰值不小于 100 mA 。

6.2.4 电流探头

电流探头的测量带宽高于 1 MHz，电流幅度测量误差不超过 $\pm 2\%$ 。

6.2.5 前置放大器

在 100 kHz ~ 1 MHz 内的频率响应起伏一般不超过 ± 0.1 dB，前置放大器的增益偏差不得超过 ± 0.3 dB，输入阻抗不低于 50 M Ω 。

6.2.6 信号采集装置

信号采集装置通常由双通道数据采集器和数据处理器组成，应保证对两个通道的信号进行同步采集。数据采集器的模数转换器应至少为 8 位，采样频率不低于 20 MHz。

6.2.7 游标卡尺

游标卡尺的测量误差不超过 ± 0.02 mm。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

声发射传感器的校准项目见表 1。

表 1 声发射传感器校准项目

序号	项目名称	计量特性章条号	校准方法章条号
1	频率响应	5.1	7.3.2
2	灵敏度级最大值	5.2	7.3.3

7.2 校准方法

7.2.1 校准前检查

目视检查声发射传感器的外观，应符合以下要求：

- 1) 声发射传感器的字符、标志应清晰可辨；
- 2) 声发射传感器的匹配层应无明显损伤。

7.2.2 频率响应

表面波互易校准的实验装置示意图如图 1 所示。

1) 去除传感器表面的附着物，将传感器 1 作为发射换能器，传感器 2 作为接收传感器，放置在试块中间区域，两者中心距离约 100 mm，并使用油脂类耦合剂进行耦合，对传感器施加足够的压紧力，一般不小于 9.8 N，记录与声发射传感器相连接的电缆长度。

2) 设置合适的激励波形，建议使用包络为指数上升和指数下降形状的包含若干正弦波形的猝发音信号，如图 2 所示。猝发音信号内正弦波的频率为激励信号的频率，一般包括至少 5 个周期的波形，通常从 100 kHz 开始校准。

3) 利用高频电流探头测量发射传感器的激励电流，接收传感器的输出电压采用信号采集装置进行采集，分别记录该频率下对应的电流和电压特征值。

注：发射传感器受到电信号激励。通常取激励波形的最大幅值作为电流特征值；接收传感器接收到的直达波，其形状与激励信号类似。提取直达波信号的最大值作为电压特征值。

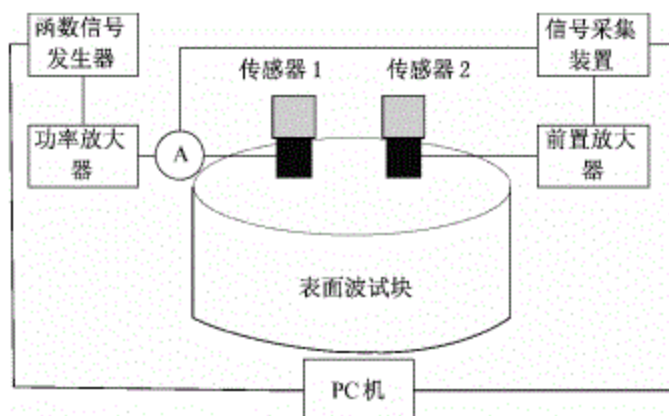


图1 表面波互易校准示意图

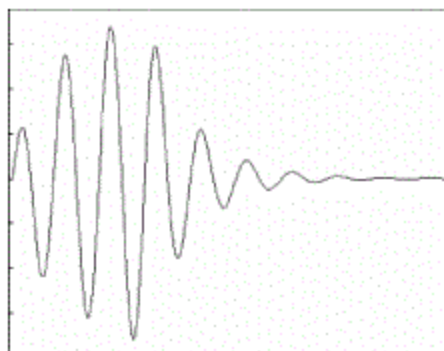


图2 激励波形示意图

4) 调节频率，频率间隔不超过 10 kHz，重复步骤 3)，直至完成整个频率范围的激励和接收信号测量。

5) 将传感器组合更换为 1 发射-3 接收，2 发射-3 接收，依次重复上述步骤 1) ~ 4)，即可得到覆盖整个频率范围的 E_{12} 、 E_{13} 、 E_{23} 和 I_{12} 、 I_{13} 、 I_{23} ，利用公式 (2)、(3)、(4) 可得到传感器 1、传感器 2 和传感器 3 的灵敏度 M_{01} 、 M_{02} 、 M_{03} 和频率响应。

$$M_{01} = \sqrt{\frac{1}{H} \cdot \frac{E_{12}}{I_{12}} \cdot \frac{I_{23}}{E_{23}} \cdot \frac{E_{13}}{I_{13}}} \quad (2)$$

$$M_{02} = \sqrt{\frac{1}{H} \cdot \frac{E_{23}}{I_{23}} \cdot \frac{I_{13}}{E_{13}} \cdot \frac{E_{12}}{I_{12}}} \quad (3)$$

$$M_{03} = \sqrt{\frac{1}{H} \cdot \frac{E_{13}}{I_{13}} \cdot \frac{I_{12}}{E_{12}} \cdot \frac{E_{23}}{I_{23}}} \quad (4)$$

式中：

E_{12} ——传感器 1 发射，传感器 2 接收时的输出电压，V；

E_{13} ——传感器 1 发射，传感器 3 接收时的输出电压，V；

E_{23} ——传感器 2 发射，传感器 3 接收时的输出电压，V；

I_{12} ——传感器 1 发射，传感器 2 接收时的激励电流，A；

I_{13} ——传感器 1 发射，传感器 3 接收时的激励电流，A；

I_{23} ——传感器 2 发射，传感器 3 接收时的激励电流，A；

H ——互易常数, $\text{m}^2\text{S}^{-2}\text{W}^{-1}$ 。

纵波互易校准的示意图如图 3 所示, 发射传感器置于试块一侧的中心位置, 接收传感器置于试块另一侧与发射换能器同轴的位置, 对发射换能器施加激励电压, 记录激励电流和接收电压, 校准过程与表面波互易校准过程相同, 计算灵敏度时需要使用纵波互易常数。

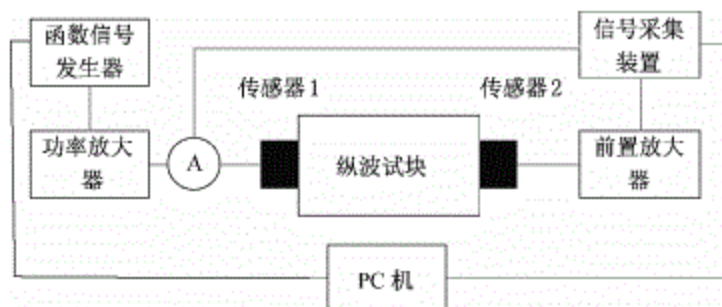


图 3 纵波互易校准示意图

7.2.3 灵敏度级最大值

通过 7.2.2 中获得的待测传感器的频率响应, 可以得到测量频率范围内的灵敏度级最大值及其对应的频率点。

8 校准结果表达

8.1 校准记录

校准记录应尽可能详尽地记载测量数据和计算结果。

8.2 校准数据处理

所有的数据应先计算后修约, 出具的校准结果均保留一位小数。

8.3 校准证书

声发射传感器经校准后出具校准证书, 推荐的声发射传感器校准证书的内页格式见附录 A, 校准证书应至少包括以下信息:

- a) 标题, 如“校准证书”;
- b) 证书的编号、页码及总页数;
- c) 校准实验室的名称和地址;
- d) 进行校准的日期;
- e) 进行校准的地点 (如果不在实验室内进行校准);
- f) 送校单位的名称和地址;
- g) 被校传感器的描述;
- h) 校准所依据的技术规范的名称及代号;
- i) 校准所用计量标准的名称、技术参数及有效期;
- j) 校准时的环境条件;
- k) 校准结果;
- l) 校准结果的测量不确定度;
- m) 复校时间间隔的建议;

- n) 校准人签名、核验人签名、批准人签名；
- o) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- p) 未经校准实验室书面批准，不得部分复制校准证书的声明。

校准项目可根据被校仪器的预期用途选择使用，对校准规范的偏离，应在校准证书中注明。

8.4 校准结果的测量不确定度

声发射传感器比较法校准的测量不确定度按 JJF 1059.1—2012 评定，其不确定度评定示例见附录 C。

9 复校时间间隔

声发射传感器的复校时间间隔建议为 1 年。然而，复校时间间隔的长短取决于其使用情况，如环境条件、使用频率、测量对象等，因此，送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。

附录 A

校准证书的内页格式

推荐的声发射传感器校准证书的内页格式见图 A.1。

证书编号××××××—××××× 校 准 结 果											
一、外观检查：_____											
二、电缆长度：_____ m											
三、频率响应： ☐ 表面波 ☐ 纵波											
表 1 声发射传感器的频率响应											
测试频率/kHz											
灵敏度级/dB											
注： 1 灵敏度级参考值为 $1 \text{ V}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 。 2 若更换不同的电缆，灵敏度值需要进行修正。 频率响应曲线：											
四、灵敏度级最大值：_____ dB，对应的频率：_____ kHz											
校准结果（灵敏度级）的不确定度：_____											
_____ 以 下 空 白											
第×页 共×页											

图 A.1 校准证书内页的格式

附录 B

互易常数的计算

互易校准中需要使用三个声发射传感器,编号为 1, 2, 3。每次使用两个传感器,一个受电信号激励成为发射换能器,另一个作为接收传感器。发射传感器和接收传感器的顺序为 1 发 2 收, 1 发 3 收, 2 发 3 收。记录发射的电流响应和接收器的电压响应。实验结束时将得到六组数据,作为计算三个传感器灵敏度的原始数据。

当换能器作为接收换能器时,其接收电流灵敏度 M_{SR} 定义为:

$$M_{SR} = \frac{I_{0R}}{U_{0R}} = \frac{I_{0R}}{U_R} \cdot \frac{U_R}{U_{0R}} = A_R \cdot \frac{Z_{rR}}{Z_{iR} + Z_{rR}} \quad (B.1)$$

式中:

I_{0R} ——接收换能器的短路输出电流;

U_{0R} ——在不存在接收传感器的条件下,瑞利波在接收传感器所处平面位置的法向位移;

U_R ——存在接收传感器的条件下,瑞利波在接收传感器所处平面位置的法向位移;

Z_{iR} ——接收换能器的机械阻抗;

Z_{rR} ——表面波的辐射阻抗。

当换能器作为发送换能器时,作用到传播介质的驱动力 F_R 为:

$$F_R = F_{0R} \cdot \frac{Z_{rR}}{Z_{iR} + Z_{rR}} = A_R \cdot \frac{Z_{rR}}{Z_{iR} + Z_{rR}} \cdot E_{SR} \cdot e^{j2\pi ft} \quad (B.2)$$

式中:

F_{0R} ——当发送传感器压紧耦合在试块表面上时,发送传感器所受到的驱动力;

E_{SR} ——正弦输入电压的幅值;

f ——正弦输入电压的频率;

t ——时间。

在试块表面上,距离声源 D_R 处的表面波法向位移速度 w_{DR} 为:

$$\begin{aligned} w_{DR} &= F_R \cdot j2\pi f \frac{1+\sigma}{E} k_R X \sqrt{\frac{2}{\pi k_R D_R}} e^{j(-k_R D_R - \pi/4)} \\ &= A_R \cdot \frac{Z_{rR}}{Z_{iR} + Z_{rR}} \cdot E_{SR} \cdot 2\pi f \frac{1+\sigma}{E} k_R X \sqrt{\frac{2}{\pi k_R D_R}} e^{j(2\pi ft - k_R D_R + \pi/4)} \end{aligned} \quad (B.3)$$

式中:

$$k_R = 2\pi f Y \sqrt{\frac{2(1+\sigma)\rho}{E}};$$

E ——介质的杨氏模量;

σ ——介质的泊松比;

ρ ——介质的密度;

X, Y ——由 σ 决定的一组系数,不同泊松比对应的系数见表 B.1。

表 B.1 不同泊松比对应的系数

σ	X	Y
0.00	0.223 6	1.144 1
0.25	0.125 0	1.087 7
0.26	0.121 7	1.085 7
0.27	0.118 5	1.083 8
0.28	0.118 3	1.082 0
0.29	0.112 2	1.080 1
0.30	0.109 2	1.078 3
0.31	0.106 2	1.076 5
0.32	0.103 2	1.074 7
0.33	0.100 4	1.073 0
0.34	0.097 5	1.071 2
0.35	0.094 7	1.069 5

在这里, $D_R \gg c_R/f$ 。因此, 发送传感器的电压灵敏度 S_{SR} 为:

$$S_{SR} = \frac{U_{DR}}{E_{SR} e^{j2\pi f t}} = A_R \cdot \frac{Z_{rR}}{Z_{iR} + Z_{rR}} \cdot 2\pi f \frac{1+\sigma}{E} k_R X \sqrt{\frac{2}{\pi k_R D_R}} e^{j(-k_R D_R + \pi/4)} \quad (B.4)$$

表面波的互易常数 H_R 为:

$$H_R = \frac{S_{SR}}{M_{SR}} = 2\pi f \frac{1+\sigma}{E} k_R X \sqrt{\frac{2}{\pi k_R D_R}} e^{j(-k_R D_R + \pi/4)} \quad (B.5)$$

进一步可得到各个传感器的计算公式, 以传感器 1 为例:

$$M_{01} = \sqrt{\frac{1}{H_R} \cdot \frac{E_{12}}{I_{12}} \cdot \frac{I_{23}}{E_{23}} \cdot \frac{E_{13}}{I_{13}}} \quad (B.6)$$

传感器 2 和传感器 3 的幅度灵敏度和相位灵敏度公式依此类推。

在纵波声场中, 纵波声场互易常数为:

$$H_L = 2f \frac{(1+\sigma)(1-2\sigma)}{E(1-\sigma)D_L} e^{j(\pi/2 - k_L D_L)} \quad (B.7)$$

式中:

$$k_L = 2\pi f \sqrt{\frac{(1+\sigma)(1-2\sigma)\rho}{E(1-\sigma)}};$$

E ——介质的杨氏模量;

σ ——介质的泊松比;

ρ ——介质的密度;

D_L ——发射和接收传感器之间的距离。

附录 C

测量不确定度评定示例

本附录参照 JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》，对声发射传感器的灵敏度级的测量不确定度进行评定。

C.1 测量模型

传感器 1 的灵敏度为：

$$M_{01} = \sqrt{\frac{1}{H} \cdot \frac{E_{12}}{I_{12}} \cdot \frac{I_{23}}{E_{23}} \cdot \frac{E_{13}}{I_{13}}} \quad (\text{C.1})$$

两边同取对数，可表示为：

$$20 \lg(M_{01}) = 10 \lg\left(\frac{E_{12}}{I_{12}}\right) + 10 \lg\left(\frac{E_{13}}{I_{13}}\right) + 10 \lg\left(\frac{I_{23}}{E_{23}}\right) - 10 \lg H \quad (\text{C.2})$$

灵敏度级可表示为：

$$L(M_{01}) = \frac{1}{2}L(E_{12}) + \frac{1}{2}L(E_{13}) - \frac{1}{2}L(E_{23}) + \frac{1}{2}L(I_{23}) - \frac{1}{2}L(I_{12}) - \frac{1}{2}L(I_{13}) - \frac{1}{2}L(H) \quad (\text{C.3})$$

$$L(M_{01}) = \frac{1}{2}[L(E_{12}) + L(E_{13}) - L(E_{23})] + \frac{1}{2}[L(I_{23}) - \frac{1}{2}L(I_{12}) - \frac{1}{2}L(I_{13})] - \frac{1}{2}L(H) \quad (\text{C.4})$$

C.2 灵敏系数

$L(M_{01})$ 的合成不确定度如式 (C.5) 所示：

$$u_c^2[L(M_{01})] = c_1^2 u^2[L(E_{12}) + L(E_{13}) - L(E_{23})] + c_2^2 u^2[L(I_{23}) - L(I_{12}) - L(I_{13})] + c_3^2 u^2[L(H)] \quad (\text{C.5})$$

式中灵敏系数：

$$c_1 = 0.5, c_2 = 0.5, c_3 = -0.5。$$

C.3 标准不确定度评定

由上述测量模型可得，声发射传感器灵敏度级的测量不确定度来源主要包括测量重复性、接收电压测量、激励电流测量和互易常数，下面对各项的标准不确定度进行评定。

C.3.1 测量重复性引入的标准不确定度分量 $u(L_1)$

测量重复性引入的不确定度由统计方法获得，采用 A 类方法评定。在 100 kHz ~ 1 MHz 频段对某谐振频率为 150 kHz 的传感器的表面波和纵波频率响应分别进行了 6 次独立重复校准，校准结果表明，在测量频段内频率响应标准偏差的最大值均小于 0.98 dB，通常对上述过程进行 3 次测量并取平均值，因此测量重复性引入的标准不确定度分量为： $u(L_1) = 0.98 \text{ dB} / \sqrt{3} = 0.57 \text{ dB}$ 。

C.3.2 接收电压测量引入的标准不确定度分量 $u(L_2)$

E_{12} 、 E_{13} 、 E_{23} 为同一台数字示波器测量所得, 可视为正相关, 且对于同型号的传感器, 三者数值几乎相等, 因此, $u[L(E_{12})+L(E_{13})-L(E_{23})]=u[L(E_{12})]$ 。采用的是 8 位数字示波器, 电压测量不确定度优于 1.4%, 因此, 接收电压测量引入的不确定度分量采用 B 类方法评定, 为 $u(L_2)=0.12$ dB。

C.3.3 激励电流测量引入的标准不确定度分量 $u(L_3)$

I_{23} 、 I_{13} 、 I_{12} 为同一只电流探头测量的电流值, 可视为正相关, 且对于同型号的传感器, 三者数值相当, 因此, $u[L(I_{23})-L(I_{13})-L(I_{12})]=u[L(I_{12})]$ 。采用 5A 挡位测量交流电流时, TCP0030 的测量不确定度优于 1.5%, 因此激励电流引入的分量采用 B 类方法评定为 $u(L_3)=0.13$ dB。

C.3.4 互易常数引入的标准不确定度分量 $u(L_4)$

采用 B 类方法评定。以纵波互易为例, $H_L=2f \frac{(1+\sigma)(1-2\sigma)}{E(1-\sigma)D_L}$, 锻钢的相关物理常量如表 C.1 所示, 对于某一个频率下, 互易常数引入的不确定度分量不超过 1%, 即 $u(L_4)=0.09$ dB。

表 C.1 相关物理常量的参考量值与不确定度

物理常量	D_L/mm	σ	$E/(10^{11} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2})$
参考量值	300	0.280	2.10
不确定度	0.1	0.005	0.01

C.4 合成标准测量不确定度

对声发射传感器的灵敏度级, 其测量不确定度来源见表 C.2。

表 C.2 测量不确定度来源汇总表

序号	不确定度来源	符号	灵敏系数	标准不确定度/dB
1	测量重复性	$u(L_1)$	1	0.57
2	接收电压测量	$u(L_2)$	0.5	0.12
3	激励电流测量	$u(L_3)$	0.5	0.13
4	互易常数	$u(L_4)$	-0.5	0.09

因此, 合成标准测量不确定度:

$$u_c = \sqrt{0.57^2 + (0.5 \times 0.12)^2 + (0.5 \times 0.13)^2 + (-0.5 \times 0.09)^2} \text{ dB} = 0.58 \text{ dB}$$

C.5 扩展测量不确定度

取包含因子 $k=2$, 其扩展测量不确定度:

$$U = k u_c = 2 \times 0.58 \text{ dB} = 1.16 \text{ dB}$$

取 $U=1.2$ dB ($k=2$)。