

JJF

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF ××××—202×

次声传感器校准规范 (激光活塞发声器法)

Calibration Specification of Infrasonic Sensors

(Laser Pistonphone Method)

(征求意见稿)

本稿完成日期: 2025.10

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

国家市场监督管理总局发布

次声传感器校准规范 (激光活塞发声器法)

JJF XXXX—202X

Calibration Specification of Infrasonic Sensors
(Laser Pistonphone Method)

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

航空工业北京长城计量测试技术研究所

中国电子科技集团公司第三研究所

中国测试技术研究院

浙江大学

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：

冯秀娟 （中国计量科学研究院）
何龙标 （中国计量科学研究院）
张炳毅 （航空工业北京长城计量测试技术研究所）
张小丽 （中国计量科学研究院）
马春宇 （中国电子科技集团公司第三研究所）
鄂治群 （中国测试技术研究院）
何 闻 （浙江大学）

目 录

引言.....	II
1 范围	1
2 引用文件	1
3 术语.....	1
4 概述	2
5 计量特性	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	6
8.1 校准记录	6
8.2 校准数据处理	6
8.3 校准证书	6
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 激光活塞发声器的工作原理.....	7
附录B 声压误差修正系数的计算公式.....	10
附录C 校准记录的内容	13
附录D 校准证书的内容	15
附录E 测量不确定度评定示例	18

引 言

JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001—2011《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本规范制定工作的基础性系列规范。

本规范参考了 IEC TR 61094-10: 2022《电声学 测量传声器 第 10 部分：采用可计算活塞发声器对传声器低频绝对声压校准》。

本规范为首次发布。

次声传感器校准规范（激光活塞发声器法）

1 范围

本规范适用于 0.001 Hz~20 Hz 频率范围的标准次声传感器的绝对法校准，其他次声传感器或测量传声器的低频校准也可参照本规范。

2 引用文件

本规范引用下列文件：

JJF 1001—2011 通用计量术语及定义

JJF 1034—2020 声学计量术语及定义

JJF 1059.1—2012 测量不确定度的评定与表示

GB/T 3102.7—1993 声学的量和单位

GB/T 3947—1996 声学名词术语

GB/T 20441.1 电声学 测量传声器 第 1 部分：实验室标准传声器规范

GB/T 20441.4 电声学 测量传声器 第 4 部分：工作标准传声器规范

IEC 61094-2: 2009/AMD 1: 2022 电声学 测量传声器 第 2 部分：采用互易技术对实验室标准传声器的声压校准的原级方法 第 1 号修改单（Amendment 1—Electroacoustics — Measurement microphones — Part 2: Primary method for pressure calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique）

IEC TR 61094-10: 2022 电声学 测量传声器 第 10 部分：采用可计算活塞发声器对传声器低频绝对声压校准（Electroacoustics — Measurement microphones — Part 10: Absolute pressure calibration of microphones at low frequencies using calculable pistonphones）

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

本规范采用 GB/T 3102.7 中规定的量和单位。

JJF 1001—2011、JJF 1034—2020 和 GB/T 3947—1996 中界定的术语和定义适用于本规范。

3.1 次声活塞发声器 infrasonic pistonphone

通过体积速度已知的一个或多个活塞的运动，在固定、密封的空气体积中产生次声频声压的装置。

3.2 标准次声传感器 standard infrasonic sensor

稳定性经考核的压力变送器、符合 GB/T 20441.1 规定的实验室标准传声器或符合 GB/T 20441.4 规定的工作标准传声器。

4 概述

次声传感器是一种能够有效探测次声波的传感器，按工作原理的不同分为电容式、波纹管盒式、光纤式、微机电系统（MEMS）式等，其工作频率一般在 0.01 Hz~20 Hz 范围，特殊应用（如灾害相关的声重力波测量）要求传感器的工作频率下限可低至 0.001 Hz。

激光活塞发声器法是校准次声传感器声压灵敏度的原级方法，在次声活塞发声器中，采用激光干涉仪测量活塞运动位移，根据理论公式计算声压量值，进而实现次声传感器声压灵敏度的绝对法校准。次声频空气声声压通过次声传感器声压灵敏度的校准而实现量值传递，其中，计量基准到计量标准量值传递用标准次声传感器的声压灵敏度采用激光活塞发声器法校准，根据声压灵敏度级平坦频率响应的范围不同，标准次声传感器可选择稳定性经考核的压力变送器、符合 GB/T 20441.1 规定的实验室标准传声器或符合 GB/T 20441.4 规定的工作标准传声器。

5 计量特性

5.1 声压灵敏度级

次声传感器在参考频率 f_0 处的声压灵敏度级，参考值为 1 V/Pa。 f_0 由制造商给出，若无具体规定，则 f_0 取 1 Hz。

次声传感器的声压灵敏度级取决于工作原理和应用场景，电容式次声传感器的声压灵敏度级通常不小于 -54.0 dB。

5.2 声压灵敏度级的频率响应

以参考频率处的声压灵敏度级为参考，次声传声器声压灵敏度级的频率响应在 0.1 Hz~20 Hz 范围通常不超过 ± 3.0 dB。

注：由于校准无需做出合格与否的判定，因此上述技术要求仅供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

空气温度：(20~26) °C；

相对湿度：(35~75) %；

静压：(86~106) kPa。

6.2 测量标准及其他设备

6.2.1 次声活塞发声器系统

校准频率范围内，声压级不小于 94 dB，至少包含 114 dB、124 dB、134 dB，总谐波失真不大于 1.0%。

6.2.2 激光测振仪

校准频率范围内，位移测量的最大允许误差应不超过 $\pm 0.5\%$ 。

6.2.3 多通道声分析仪

- 至少具有两个输入通道；
- 具备 FFT 分析功能；
- 具备 200V 极化供电和 CCLD 恒流源供电功能；
- 校准频率范围内，交流电压级测量的最大允许误差不超过 ± 0.1 dB。

6.2.4 信号发生器

校准频率范围内，输出正弦信号的频率误差不超过 $\pm 0.05\%$ 或 0.0001 Hz（取其大者），总谐波失真不大于 0.1%。

6.2.5 气压计

校准环境条件内，静压测量的最大允许误差不超过 ± 0.1 kPa。

6.2.6 温湿度表

校准环境条件内，温度测量的最大允许误差应不超过 ± 0.2 °C，相对湿度测量的最大允许误差不超过 $\pm 4\%$ 。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

次声传感器的校准项目见表 1。

表 1 次声传感器校准项目一览表

序号	项目名称	技术要求的条号	校准方法的条号
1	声压灵敏度级	5.1	7.2.2
2	声压灵敏度级的频率响应	5.2	7.2.3

7.2 校准方法

7.2.1 校准前检查

次声传感器应具有制造商的名称或商标、产品的型号和序列号等标识。

次声传感器应附有单独的出厂资料，出厂资料包括正常工作的供电方式、声压灵敏度级、静压均衡方式（若有），如需做静压、温度、相对湿度及其他修正，则应给出相应的修正系数或方法。

7.2.2 声压灵敏度级

声压灵敏度级校准装置的框图见图 1，校准步骤如下：

- a) 被校次声传感器经由适配器耦合到次声活塞发声器的声输出接口，次声活

塞发声系统激励电压输入接口连接信号发生器的输出通道，被校次声传感器的电信号输出连接多通道声分析仪的输入通道 1。

b) 调整激光测振仪的测量光束，使其垂直入射到活塞表面，激光测振仪速度或位移通道的电信号输出连接多通道声分析仪的输入通道 2。

c) 设置多通道声分析仪的输入通道参数：通道灵敏度设置为 1 V/V，根据被校次声传感器的供电方式设置相应的输入方式，耦合方式或高通滤波器设置选择 DC。

d) 信号发生器的输出通道产生正弦信号驱动次声活塞发声系统工作，正弦信号的频率设置为参考频率，调节正弦信号的幅值和次声活塞发声系统的增益，使得次声活塞发声系统产生声压级满足校准要求的次声波，根据活塞运动位移的幅值，设置激光测振仪速度或位移通道的灵敏度。

e) 被校次声传感器上电预热至少 0.5 h，待其输出稳定后，采用多通道声分析仪的 FFT 分析模块采集被校次声传感器和激光测振仪的输出电压，根据校准频率设置 FFT 分析的频率分辨率，分别得到输出电压的有效值 U_1 和 U_2 。

f) 若 U_2 是激光测振仪速度通道的输出电压，则按公式 (1) 计算活塞运动的位移：

$$x = \frac{S_v \cdot U_2}{2\pi f} \quad (1)$$

式中：

x ——活塞运动的位移，m；

U_2 ——激光测振仪的输出电压，V；

S_v ——激光测振仪速度通道的灵敏度，m/s/V；

f ——校准频率。

若 U_2 是激光测振仪位移通道的输出电压，则按公式 (2) 计算活塞运动的位移：

$$x = S_s \cdot U_2 \quad (2)$$

式中：

S_s ——激光测振仪位移通道的灵敏度，m/V。

根据公式 (1) 或公式 (2) 计算的活塞运动位移，按公式 (3) 计算次声活塞发声系统产生次声波的声压即校准声压：

$$p = \gamma p_0 \frac{\pi r_c^2 x}{V_0} \cdot \Delta p(H, L, W) \quad (3)$$

式中：

p ——活塞发声系统产生的校准声压，Pa；

$\Delta p(H, L, W)$ ——与热传导、腔体泄露和声压波动有关的声压误差修正系数（计算方法见附录 B）；

γ ——空气的比热比（计算公式见 IEC 61094-2: 2009/AMD 1: 2022 附录 F）；

p_0 ——静压，Pa；

V_0 ——活塞位于平衡位置处的腔体积， m^3 ；

r_c ——活塞半径，m。

g) 按公式（4）计算被校次声传感器的声压灵敏度：

$$l_f = \frac{U_1}{p} \quad (4)$$

式中：

l_f ——被校次声传感器的声压灵敏度，V/Pa；

U_1 ——被校次声传感器的输出电压，V。

以上步骤重复测量 3 次，求出 l_f 的算术平均值 $\overline{l_f}$ ，按公式（5）计算被校次声传感器的声压灵敏度级：

$$L_f = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\overline{l_f}}{l_0} \right) \quad (5)$$

式中：

L_f ——被校次声传感器的声压灵敏度级，dB；

l_0 ——声压灵敏度级的参考值，1 V/Pa。

注：如无特别说明，被校次声传感器是指包含解调器、前置放大器等信号调理模块在内的次声传感器单元或整机。

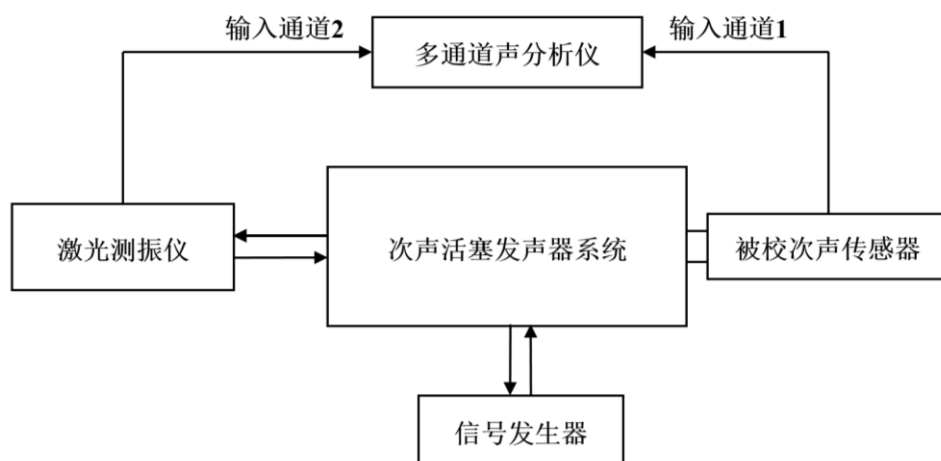


图1 声压灵敏度级校准装置的框图

7.2.3 声压灵敏度级的频率响应

校准频率范围内， $0.001 \text{ Hz} \leq f < 0.1 \text{ Hz}$ 时校准频率点选取 0.001 Hz、0.005 Hz、0.01 Hz、0.02 Hz、0.04 Hz 和 0.08 Hz， $0.1 \text{ Hz} \leq f \leq 20 \text{ Hz}$ 时校准频率点按 1/3 倍频程中心频

率选取。按 7.2.2 的方法测出每个校准频率上的声压灵敏度级，减去参考频率处的声压灵敏度级，得到声压灵敏度级的频率响应。

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。

推荐的校准记录格式见附录 C。

8.2 校准数据处理

所有的数据应先计算，后修约。出具校准数据按如下方法修约：

以下项目的校准数据的修约间隔为 0.01 dB：

- 声压灵敏度级；
- 声压灵敏度级的频率响应。

8.3 校准证书

经校准的次声传感器应出具校准证书。校准证书应包括的信息及推荐的校准证书内页格式见附录 D。

8.4 校准结果的不确定度评定

次声传感器校准结果的测量不确定度应按 JJF 1059.1—2012 的要求评定，不确定度评定的示例见附录 E。

9 复校时间间隔

次声传感器的复校时间间隔建议为一年。然而，复校时间间隔的长短取决于传感器的使用情况（使用部位的重要性、环境条件、使用频率）、使用者、仪器本身质量等诸多因素，因此，客户可根据实际使用情况自主决定复校的时间间隔。

附录 A

次声活塞发声器的的工作原理

次声活塞发声器的基本结构如图 A.1 所示，其工作原理为：采用低频振动台、动圈扬声器或直流电机等运动部件驱动活塞在密闭腔体内往复运动产生次声波，通过激光干涉仪测量活塞运动位移，根据理论公式计算所产生次声波的声压，进而实现次声传感器声压灵敏度级的校准。其中，活塞与其导向结构间的密封方式通常有薄膜密封和间隙密封两种。

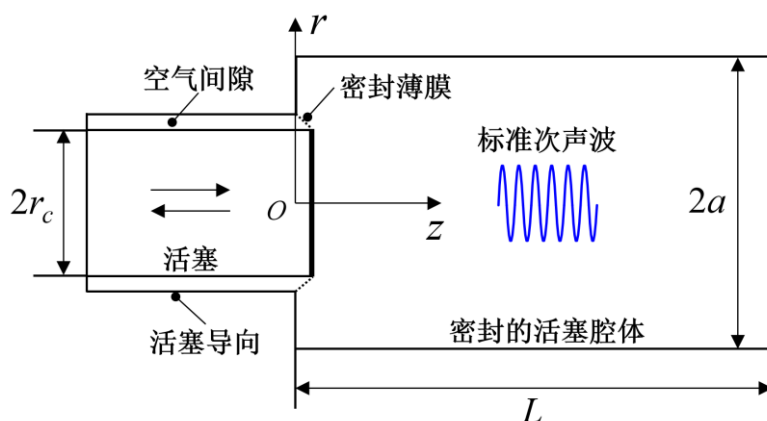


图 A.1 次声活塞发声器的基本结构

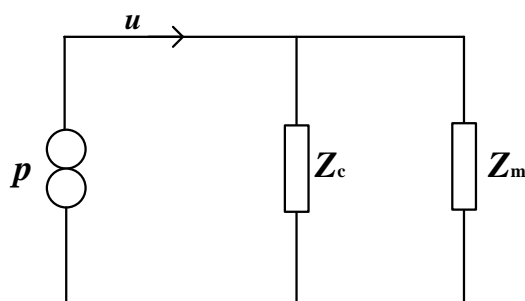


图 A.2 次声活塞发声器的电声类比模型

活塞发声器的电声类比模型如图 A.2 所示，在刚性活塞正弦运动时，活塞发声产生次声波的声压等于活塞运动所产生体积速度与活塞腔体的声转移阻抗的乘积，按公式 (A.1) 计算：

$$p = u \cdot Z_T \quad (\text{A.1})$$

$$u = j\omega S_p x \quad (\text{A.2})$$

式中：

p ——活塞发声器所产生的施加于传感器上的声压，Pa；

u ——活塞运动所产生的体积速度， m^3/s ；

Z_T ——活塞腔体的声转移阻抗, Pa s/m³;

ω ——活塞发声器所产生次声波的角频率, rad/s;

S_p ——活塞面积, m²;

x ——活塞位移, m。

当活塞腔体的腔长远小于声波长 (通常认为 $\sqrt[3]{V_0} \ll \lambda$ 时, 其中, V_0 为腔体积, λ 为声波长), 则能假定活塞腔体内的声压是均匀分布的。假定活塞腔体内空气压缩和扩张过程绝热且无气体泄露, 按公式 (A.3) 计算活塞腔体的声转移阻抗:

$$\frac{1}{Z_T} = \frac{1}{Z_c} + \frac{1}{Z_m} = j\omega \left(\frac{V_0}{\gamma p_0} + \frac{V_{e,m}}{\gamma_r p_{0,r}} \right) \quad (\text{A.3})$$

式中:

V_0 ——活塞位于平衡位置处的腔体积, m³;

γ ——测量环境条件下空气的比热容比 (计算公式见 IEC 61094-2: 2009/AMD 1: 2022 附录 F);

p_0 ——测量环境条件下活塞腔体内的静压, Pa;

$V_{e,m}$ ——被校次声传感器的等效体积, m³;

γ_r ——参考环境条件下空气的比热容比 (计算公式见 IEC 61094-2: 2009/AMD 1: 2022 附录 F);

$p_{0,r}$ ——参考环境条件下活塞腔体内的静压, Pa。

Z_c ——活塞腔体的声阻抗, Pa s/m³;

Z_m ——被校次声传感器的声阻抗, Pa s/m³。

当被校次声传感器的声阻抗近似为无穷大时, 公式 (A.3) 简化为:

$$\frac{1}{Z_T} = \frac{1}{Z_c} = j\omega \cdot \frac{V_0}{\gamma p_0} \quad (\text{A.4})$$

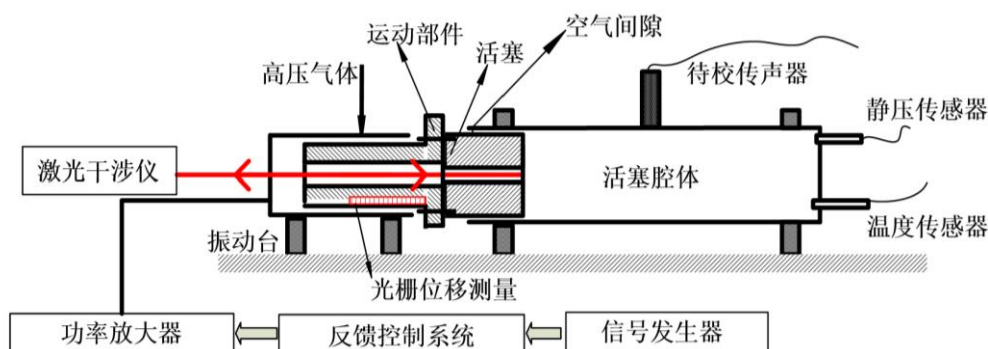


图 A.3 基于间隙密封型次声活塞发声器的校准装置示意图

采用低频振动台激励、间隙密封结构的次声活塞发声器及基于此实现的次声传感器

校准系统构成如图 A.3 所示，主要包含次声活塞发声器系统、信号发生器、激光干涉仪、气压传感器和温度传感器等功能模块，其中，次声活塞发声器系统由低频振动台、活塞及腔体、功率放大器和位移反馈控制系统构成。为减小活塞腔体泄露、拓展次声活塞发声器系统的工作频率下限，活塞及其导向结构间采用了微米级的空气间隙密封；为控制次声活塞发声器系统所产生次声波的波形失真，将位移传感器安装在振动台运动部件上，采用位移反馈控制技术实时调整运动部件的驱动信号达到谐波失真抑制的目的；采用激光干涉仪测量活塞运动的位移，按公式（A.1）计算绝热、密封条件下次声活塞发声器所产生的施加于被校次声传感器上的声压，在实际测量条件下，还需考虑活塞腔体的热传导、腔体泄露和声压波动等误差效应的声压修正。

附录 B

声压误差修正系数的计算公式

次声活塞发声器的主要误差效应包括热传导、腔体泄露和声压波动，误差效应及其声压修正建模的准确性是决定激光活塞发声器法次声传感器原级校准低频适用性的关键。针对图 A.1 所示的次声活塞发声器，声压误差修正系数的计算公式总结如下。

B.1 声压波动

随着频率的增加，当活塞腔体的腔长不满足远小于声波长的条件时，活塞腔体的声压分布不再均匀，即出现声压波动。对于固定腔长的活塞腔体，声压波动效应限制了活塞发声器的工作频率上限。根据次声活塞发声器要求的工作频率范围，通过活塞腔体结构参数的优化，可忽略声压波动的影响。

B.2 热传导

热传导修正采用 IEC 61094-2: 2009/AMD 1: 2022 附录 A 给出的计算模型：

$$\Delta p_{\text{HC}} = \frac{1}{\gamma - (\gamma - 1) E_p} \quad (\text{B.1})$$

$$E_p = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{32}{(2n+1)^2 \pi^2 x_m^2} \frac{1}{1 + \left[\frac{x_m^2}{a^2} + \frac{(2n+1)^2}{L^2} \pi^2 \right] \left(\frac{\alpha_t}{j\omega} \right)} \quad (\text{B.2})$$

式中：

Δp_{HC} ——针对热传导效应的声压误差修正系数；

γ ——测量环境条件下空气的比热容比；

x_m —— $J_0(x_m) = 0$ 的第 m 个根；

a ——活塞腔体半径，m；

L ——活塞腔体长度，m；

α_t ——空气的热扩散系数， m^2/s ；

ω ——活塞发声器所产生次声波的角频率， rad/s 。

B.3 腔体泄露

腔体泄露修正采用公式 (B.3) 给出的计算模型：

$$\Delta p_{\text{LC}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega T_L}} \quad (\text{B.3})$$

式中：

Δp_{LC} ——针对腔体泄露效应的声压误差修正系数；

T_L ——绝热过程的泄露时间常数，s。

绝热过程的泄露时间常数采用阶跃压力法测得，具体描述为：绝热条件下，在活塞上施加一阶跃位移，腔体内的动态压力衰减为初始值的 $1/e$ 时对应的渡越时间，称为绝热过程的泄露时间常数。由于热传导效应的存在，实际测量无法满足绝热条件，多方过程的泄露时间常数通常要小于绝热过程的泄露时间常数，需修正后使用。

根据泄露绝热条件下活塞发声器的压力阶跃响应模型，绝热过程的泄露时间常数按公式 (B.4) 计算：

$$T_L = \frac{6\eta l V_0}{\gamma p_0 (1 + 1.5\varepsilon^2) \pi r_c \delta^3} \quad (\text{B.4})$$

式中：

η ——气体粘度，Pa s；

l ——活塞导向孔长度，m；

V_0 ——活塞处于平衡位置时的腔体积， m^3 ；

r_c ——活塞半径，m；

ε ——活塞与导向孔之间的相对偏心距，m；

δ ——活塞与导向孔同心时的缝隙宽度，m；

p_0 ——测量环境条件下活塞腔体内的静压，Pa。

由于公式 (B.4) 中的参数 ε 和 δ 不易测量，绝热过程的泄露时间常数无法直接计算得到，因此，已知多方过程中实测的压力阶跃响应，通过与理论模型进行数据拟合得到绝热过程的泄露时间常数。其中，泄露非绝热状态下，活塞发声器的压力阶跃响应模型如式 (B.5) 所示：

$$p_{SR} = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left[\left(\rho_0 c_p - \kappa \frac{k_{rm}^2 + k_{zn}^2}{k_{Tmn}} \right) A_{mn} e^{-k_{Tmn} t} + \left(\rho_0 c_p - \kappa \frac{k_{rm}^2 + k_{zn}^2}{k_{Pmn}} \right) B_{mn} e^{-k_{Pmn} t} \right] \frac{4J_1(k_{rm} a)}{k_{rm} a k_{zn} L} \quad (\text{B.5})$$

$$k_{rm} = \frac{x_m}{a}, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{B.6})$$

$$k_{zn} = \frac{n\pi}{L}, \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad (\text{B.7})$$

式中：

p_{SR} ——活塞发声器的压力阶跃响应，Pa；

ρ_0 ——活塞处于平衡位置时的空气密度， kg/m^3 ；

c_p ——空气的定压比热比， $\text{J}/(\text{kg K})$ ；

κ ——空气的热导率， $\text{W}/(\text{m K})$ 。

式 (B.5) 中的 A_{mn} 和 B_{mn} 的求解矩阵为：

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ \rho_0 c_p - \kappa \frac{k_m^2 + k_z^2}{k_{Tmn}} & \rho_0 c_p - \kappa \frac{k_m^2 + k_z^2}{k_{Pmn}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{mn} \\ B_{mn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{8}{J_1(k_m a) k_m a k_z L} \left(1 - \frac{V_0^{\gamma-1}}{V_1^{\gamma-1}} \right) T_0 \\ \frac{8}{J_1(k_m a) k_m a k_z L} \left(1 - \frac{V_0^\gamma}{V_1^\gamma} \right) p_0 \end{pmatrix} \quad (\text{B.8})$$

式中:

V_1 —— $t=0$ 时刻气体被绝热压缩后的腔体积, m^3 ;

T_0 ——活塞处于平衡位置时的温度, $^\circ\text{C}$ 。

式 (B.5) 中的 k_{Tmn} 和 k_{Pmn} 是式 (B.9) 的两个解:

$$\left(\rho_0 c_p - \frac{p_0}{T_0} \right) k_{mn}^2 - \left[\kappa (k_m^2 + k_z^2) + \frac{\rho_0 c_p}{\gamma T_L} \right] k_{mn} + \frac{\kappa (k_m^2 + k_z^2)}{\gamma T_L} = 0 \quad (\text{B.9})$$

B.4 热传导与腔体泄露的耦合修正

当腔体泄露和声压波动均可忽略, 次声活塞发声器的声压误差修正系数按公式 (B.10) 计算:

$$\Delta p(H, L, W) = \Delta p_{\text{HC}} \quad (\text{B.10})$$

当腔体泄露较小且声压波动可忽略时, 次声活塞发声器的声压误差修正系数按公式 (B.11) 计算:

$$\Delta p(H, L, W) = \Delta p_{\text{HC}} \cdot \Delta p_{\text{LC}} \quad (\text{B.11})$$

随着腔体泄露的增大或频率的降低, 热传导与腔体泄露的耦合作用增强, 次声活塞发声器的声压误差修正采用公式 (B.12) 所示的耦合修正模型:

$$\Delta p(H, L, W) = \frac{1}{\gamma - (\gamma - 1) E_p + \frac{1 + \left(1 - \frac{1}{\gamma} \right) E_p}{j \omega T_L} + \frac{\rho_0 c^2}{j \omega V_0} \cdot \frac{1}{Z_m}} \quad (\text{B.12})$$

式中:

c ——测量环境条件下的声速, m/s ;

Z_m ——被校传感器及其与次声活塞发声器的耦合结构的等效声阻抗, Pa s/m^3 。

本附录中涉及的热扩散系数 α_t 、定压比热比 c_p 、热导率 κ 、密度 ρ_0 、粘度 η 、声速 c 等空气参数均采用 IEC 61094-2: 2009/AMD 1: 2022 附录 F 中给出的计算方法。

附录 C

校准记录的内容

次声传感器校准记录的内容及推荐的格式见图 C.1。

次声传感器校准记录				共 页 第 页
记录编号 _____ 出具证书编号 _____				
送校单位 _____				
仪器名称 _____		型号 _____	序列号 _____	
制造厂 _____				
一、外观检查： _____				
二、声压灵敏度级（参考频率 _____ Hz，参考 1 V/Pa）				
声压灵敏度级/dB				
第一次校准结果	第二次校准结果	第三次校准结果	平均值	
校准结果不确定度： _____				
三、声压灵敏度级的频率响应（参考频率 _____ Hz）				
频率/Hz	频率响应/dB	频率/Hz	频率响应/dB	
0.001		0.800		
0.005		1.000		
0.010		1.250		
0.020		1.600		
0.040		2.000		
0.080		2.500		
0.100		3.150		
0.125		4.000		
0.160		5.000		
0.200		6.300		
0.250		8.000		
0.315		10.000		
0.400		12.500		
0.500		16.000		
0.630		20.000		
校准结果不确定度： _____				

图 C.1 校准记录的格式

校准依据 _____				
校准使用的计量（基）标准装置				
名 称	测量范围	不确定度 /准确度等级 /最大允许误差	计量（基）标准 证书编号	有效期至
校准使用的标准器				
名 称	测量范围	不确定度 /准确度等级 /最大允许误差	标准器 证书编号	有效期至
校准环境条件： 气压_____kPa； 温度_____℃； 相对湿度_____％ 校准员_____ 核验员_____ 校准日期 _____年_____月_____日				

图 C.1 校准记录的格式（续）

附录 D

校准证书的内容

D.1 次声传感器的校准证书至少应包括以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- d) 证书的唯一性标识（如编号）、每页及总页数的标识；
- e) 客户的名称和地址；
- f) 被校次声传感器的型号、规格及序列号；
- g) 进行校准的日期；
- h) 本技术规范的名称及代号；
- i) 本次校准所用测量标准溯源性及有效性的说明；
- j) 校准环境的描述；
- k) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- l) 校准证书签发人的签名、职务或等效标识，以及签发日期；
- m) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- n) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

D.2 推荐的次声传感器校准证书的内页格式见图 D.1。

校 准 结 果		共 页 第 页	
一、外观检查：_____			
二、声压灵敏度级：_____dB (参考频率_____Hz，参考 1 V/Pa)			
校准结果不确定度：_____			
三、声压灵敏度级的频率响应（参考频率_____Hz）			
频率/Hz	频率响应/dB	频率/Hz	频率响应/dB
0.001		0.800	
0.005		1.000	
0.010		1.250	
0.020		1.600	
0.040		2.000	
0.080		2.500	
0.100		3.150	
0.125		4.000	
0.160		5.000	
0.200		6.300	
0.250		8.000	
0.315		10.000	
0.400		12.500	
0.500		16.000	
0.630		20.000	
校准结果不确定度：_____			

图 D.1 校准证书内页的格式

校 准 结 果				
共 页 第 页				
校准依据 _____				
校准使用的计量（基）标准装置				
名 称	测量范围	不确定度 /准确度等级 /最大允许误差	计量（基）标准 证书编号	有效期至
校准使用的标准器				
名 称	测量范围	不确定度 /准确度等级 /最大允许误差	标准器 证书编号	有效期至
校准环境条件： 气压_____kPa； 温度_____℃； 相对湿度_____%				

图 D.1 校准证书内页的格式（续）

附录 E

测量不确定度评定示例

E.1 引言

不同工作原理和声输入接口的次声传感器在校准过程中的主要不确定度分量及评定方法类似，本附录以某型次声传感器为例，说明声压灵敏度级校准的测量不确定度评定方法。

E.2 声压灵敏度级的不确定度评定

E.2.1 测量模型

次声活塞发声系统产生次声波的声压即校准声压的计算公式为：

$$p = \gamma p_0 \frac{\pi r_c^2 x}{V_0} \cdot \Delta p(H, L, W) \quad (\text{E.1})$$

式中：

p ——次声活塞发声系统产生的校准声压，Pa；

$\Delta p(H, L, W)$ ——与热传导、腔体泄露和声压波动有关的声压误差修正系数（计算方法见附录 B）；

γ ——空气的比热比（计算公式见 IEC 61094-2: 2009/AMD 1: 2022 附录 F）；

p_0 ——静压，Pa；

V_0 ——活塞位于平衡位置处的腔体积， m^3 ；

r_c ——活塞半径，m；

x ——活塞运动的位移，m。

校准频率范围内，次声传感器声压灵敏度的计算公式为：

$$l_f = \frac{U_1}{p} \quad (\text{E.2})$$

式中：

l_f ——被校次声传感器的声压灵敏度，V/Pa；

U_1 ——被校次声传感器的输出电压，V。

以上步骤重复测量 3 次，求出 l_f 的算术平均值 $\overline{l_f}$ 。

被校次声传感器的声压灵敏度级按公式（E.3）计算：

$$L_f = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\overline{l_f}}{l_0} \right) \quad (\text{E.3})$$

式中：

L_f ——被校次声传感器的声压灵敏度级，dB；

l_0 ——声压灵敏度级的参考值, 1 V/Pa。

根据测量模型, 激光活塞发声器法次声传感器声压灵敏度级校准的主要不确定度分量包括: 被校次声传感器的输出电压测量和次声活塞发声器系统所产生的校准声压计算。其中, 次声活塞发声器系统所产生校准声压的计算涉及的主要不确定度分量包括: 活塞位移测量、比热容比取值、静压测量、活塞直径测量、活塞腔体积测量、声压误差修正系数等。

E.2.2 标准不确定度的评定

E.2.2.1 重复性测量引入的测量不确定度分量 u_1

校准频率范围内, 被校传感器声压灵敏度级的校准结果见表 E.1。在相同测量条件下, 被校传感器的声压灵敏度级重复测量 6 次, 以其标准偏差作为测量重复性引入的测量不确定度分量。

表 E.1 声压灵敏度级的重复性测量结果

频率 Hz	声压灵敏度级 dB ref 1 V/Pa						平均值 dB	标准 偏差 dB
	1	2	3	4	5	6		
0.001	-81.35	-81.28	-81.37	-81.29	-81.30	-81.29	-81.31	0.038
0.010	-81.43	-81.44	-81.42	-81.42	-81.42	-81.44	-81.43	0.008
0.020	-81.52	-81.52	-81.53	-81.51	-81.53	-81.52	-81.52	0.007
0.050	-81.60	-81.60	-81.59	-81.59	-81.60	-81.61	-81.60	0.007
0.100	-81.64	-81.65	-81.64	-81.64	-81.64	-81.64	-81.64	0.004
0.200	-81.64	-81.64	-81.64	-81.64	-81.64	-81.64	-81.64	0.003
0.500	-81.64	-81.64	-81.64	-81.64	-81.64	-81.65	-81.64	0.003
1.000	-81.63	-81.63	-81.63	-81.63	-81.63	-81.63	-81.63	0.003
2.000	-81.63	-81.63	-81.63	-81.63	-81.64	-81.64	-81.63	0.004
5.000	-81.63	-81.62	-81.63	-81.62	-81.62	-81.63	-81.62	0.004
10.000	-81.63	-81.63	-81.63	-81.62	-81.62	-81.63	-81.63	0.007
20.000	-81.66	-81.66	-81.67	-81.66	-81.65	-81.64	-81.66	0.009

E.2.2.2 活塞位移测量引入的测量不确定度分量 u_2

采用 Polytec OFV 505/5000 型激光测振仪的 VD-06 或 VD-09 速度解码卡测量活塞往复运动的速度, 进而计算得到位移。根据产品手册, 校准频率范围内 VD-06 和 VD-09 速度解码卡测量结果的最大允许误差分别为 $\pm 0.1\%$ 、 $\pm 0.5\%$, 忽略频率偏差引入的不确定度分量, 活塞位移测量引入的标准不确定度分量计算为:

$$u_2 = 20 \times \log_{10} \left(1 + \frac{0.005}{\sqrt{3}} \right) = 0.026 \text{ dB} \quad (\text{E.4})$$

E.2.2.3 比热容比取值引入的测量不确定度分量 u_3

在参考环境条件 (23 °C、101.325 kPa、50%RH) 下, 比热容比取值为 1.4022, 根据相关热力学文献, 在校准环境条件下, 比热容比取值的最大偏差为 ± 0.0002 , 考虑均匀分布, 由此引入的标准不确定度分量为:

$$u_3 = 20 \times \log_{10} \left(1 + \frac{0.0002}{1.4022} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \right) = 0.001 \text{ dB} \quad (\text{E.5})$$

E.2.2.4 静压测量引入的测量不确定度分量 u_4

校准环境条件下，静压测量的最大允许误差应不超过 $\pm 0.1 \text{ kPa}$ ，考虑均匀分布，静压测量引入的标准不确定度分量为：

$$u_4 = 20 \times \log_{10} \left(1 + \frac{0.1}{100} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \right) = 0.006 \text{ dB} \quad (\text{E.6})$$

E.2.2.5 活塞直径测量引入的测量不确定度分量 u_5

活塞直径测量值为 99.74 mm ，标准不确定度为 0.10 mm ，由此引入的标准不确定度分量为：

$$u_5 = 20 \times \log_{10} \left(1 + \frac{0.10}{99.74} \right) = 0.009 \text{ dB} \quad (\text{E.7})$$

E.2.2.6 活塞体积测量引入的测量不确定度分量 u_6

活塞发声器的计算声压等于绝热状态下的声压与非绝热状态下的声压误差修正系数的乘积：在绝热状态的声压计算部分，活塞腔体积是其中的计算参数之一，需要准确测量；在非绝热状态的声压误差修正部分，活塞腔体作为理想圆柱腔体来考虑，活塞腔体积的测量分为腔体直径和等效腔长，等效腔长通过多腔体校准结果的数据拟合法实现估计。因此，活塞腔体积测量引入的合成标准不确定度分量估算为 0.020 dB 。

E.2.2.7 声压误差修正引入的测量不确定度分量 u_7

如附录 B 所示的声压误差修正系数计算方法，通过活塞腔体积的结构参数优化可忽略声压波动效应的影响，在校准频率范围内，主要考虑热传导和腔体泄露效应的声压误差修正引入的测量不确定度分量，分为两部分考虑：

1) 热传导及腔体泄露效应的声压误差修正系数计算过程中，涉及的参数包括：活塞腔体半径、活塞腔体等效长度、被校次声传感器及其与次声活塞发声器声耦合结构的等效声阻抗、绝热过程的泄露时间常数等，以上参数测量或拟合误差导致声压误差修正系数计算引入的测量不确定度分量。

2) 热传导及腔体泄露效应的声压误差修正系数的模型非理想引入的测量不确定度分量。

根据前述各参数的测量偏差，估算声压误差修正系数计算引入的合成标准不确定度分量见表 E.2。

E.2.2.8 被校次声传感器响应电压测量引入的不确定度分量 u_8

被校次声传感器的响应电压由多通道声分析仪采集，以 B&K 3160 为例，根据产品手册，考虑多通道声分析仪的绝对幅值精度、频响及幅值线性度，被校次声传感器响应电压测量的标准不确定度如式 (E.8)：

$$u_8 = \begin{cases} 0.100 / \sqrt{3} = 0.060dB & 0.001Hz \leq f < 0.010Hz \\ 0.080 / \sqrt{3} = 0.050dB & 0.010Hz \leq f < 0.100Hz \\ 0.050 / \sqrt{3} = 0.030dB & 0.100Hz \leq f < 2.000Hz \\ 0.030 / \sqrt{3} = 0.018dB & 2.000Hz \leq f \leq 20.000Hz \end{cases} \quad (E.8)$$

E.2.2.9 数据修约误差引入的测量不确定度分量 u_9

声压灵敏度级校准结果的数据修约间隔为 0.01 dB，考虑均匀分布，由此引入的标准不确定度如式 (E.9)：

$$u_9 = 0.01 / 2 / \sqrt{3} \approx 0.003dB \quad (E.9)$$

E.2.3 合成标准不确定度

激光活塞发声器法次声传感器声压灵敏度级校准的标准不确定度分量汇总于表 E.2，由于各测量不确定度分量独立无关，故声压灵敏度级校准结果的合成标准不确定度 u_c 见表 E.2。

E.2.4 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，激光活塞发声器法次声传感器声压灵敏度级校准的扩展不确定度见表 E.2。

表 E.2 声压灵敏度级校准的测量不确定度来源及数值

不确定度 (dB)	符号	频率 (Hz)												
		0.001	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10	16	20
测量重复性	u_1	0.050	0.040	0.040	0.040	0.030	0.030	0.030	0.030	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
活塞位移测量	u_2	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026
比热容比取值	u_3	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
静压测量	u_4	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
活塞直径测量	u_5	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
活塞体积测量	u_6	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
声压误差修正	u_7	0.250	0.200	0.200	0.200	0.100	0.100	0.100	0.100	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040
被校传感器电压测量	u_8	0.060	0.050	0.050	0.050	0.030	0.030	0.030	0.030	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018
数据修约	u_9	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
合成标准不确定度	u_c	0.27	0.22	0.22	0.22	0.12	0.12	0.12	0.12	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
扩展不确定度	U	0.54	0.44	0.44	0.44	0.24	0.24	0.24	0.24	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12