

《次声传感器校准规范（激光活塞发声器法）》

（征求意见稿）

测量不确定度报告

《次声传感器校准规范（激光活塞发声器法）》

编制工作组

2025.11.07

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。

2 声压灵敏度级的不确定度评定

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：

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

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，m³；

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：

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

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 (3) 计算：

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

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。

2.2 标准不确定度的评定

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 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 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

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：

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

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：

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

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±0.1 kPa，考虑均匀分布，静压测量引入的标准不确定度分量为：

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

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：

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

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。

2.2.7 声压误差修正引入的测量不确定度分量 u_7

如《次声传感器校准规范（激光活塞发声器法）》征求意见稿附录 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 2。

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 (8)：

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

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 (9)：

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

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 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 2。

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 2。

表 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