

《空气声声压计量器具检定系统表》

实验验证报告

《空气声声压计量器具检定系统表》

编制工作组

2024.7.23

目 录

1、激光活塞发声器法次声传感器原级校准的实验报告及不确定度评估（0.001 Hz~20 Hz）	2
1.1 实验装置.....	2
1.2 实验方法及目的.....	3
1.3 实验条件.....	3
1.4 实验结果.....	3
1.5 不确定度评估.....	5
2、自由场互易法 WS3 型传声器原级校准的实验报告及不确定度评估（50 kHz~100 kHz）	12
2.1 实验装置.....	12
2.2 实验方法及目的.....	14
2.3 实验条件.....	14
2.4 实验结果.....	14
2.5 不确定度评估.....	17
3、次声传感器校准装置的实验报告及不确定度评估.....	23
3.1 实验装置.....	23
3.2 实验方法及目的.....	23
3.3 实验条件.....	23
3.4 实验结果.....	24
3.5 不确定度评估.....	26
4、其他验证材料.....	32
4.1 耦合腔互易法校准 LS2 型传声器频率下限拓展的国际比对（CCAUV.A-K6）	32
4.2 高频自由场互易法相关项目验收意见.....	33
4.3 次声传感器校准装置相关项目验收意见.....	34
4.4 激光活塞发声器法声压基准相关项目.....	35
5、结论.....	36

《空气声声压计量器具检定系统表》

实验验证报告

1、激光活塞发声器法次声传感器原级校准的实验报告及不确定度评估（0.001 Hz~20 Hz）

1.1 实验装置

以中国计量科学研究院建立的激光活塞发声器简述装置的工作原理和系统构成，总体方案和系统构成如图 1.1 和图 1.2 所示，采用超低频振动台产生次声频率范围的正弦振动，驱动活塞在密闭绝热腔体内运动产生次声声压信号；采用激光测振仪测量活塞运动的位移，结合活塞在平衡位置时的腔体体积，可复现次声声压；为控制次声声压波形的失真，将位移传感器安装在振动台运动部件上，采用闭环位移反馈技术实时调整振动台驱动信号的幅度。

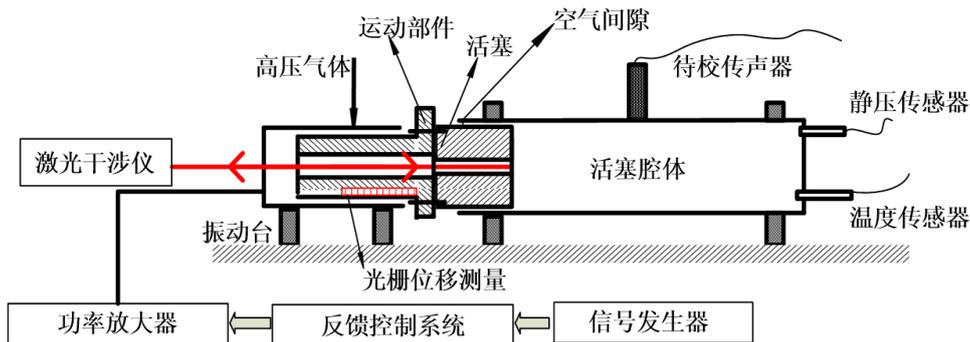


图 1.1 激光活塞发声器法总体设计方案

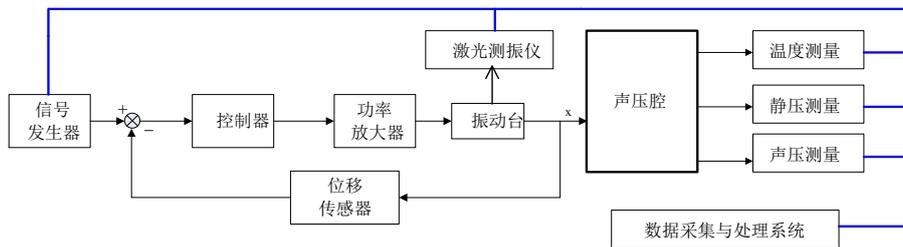


图 1.2 激光活塞发声器的系统构成

活塞发声器最早由 Wente 于 1917 年提出，基本原理是：在尺寸远小于媒质中声波波长的密闭腔中（尺寸至少是波长的 $1/20$ ），通过活塞运动在密闭腔中激励出平面波。1971 年，Rennie 对次声活塞发声器进行了深入的理论分析和实验验证，给出了活塞腔体内声压幅值的计算公式，如式 (1.1) 所示，明确了其中的主要误差来源：活塞与腔体间导向间隙导致的压力泄露；腔体内声压分布的波动；

腔体内气体与腔体壁的热传导，为后续研究建立了基本的理论框架。

$$p = \pi \frac{\gamma P_0 d^2 x}{4V_0} + \Delta p(H, L, W) \quad (1.1)$$

其中， p 为活塞腔体内的声压幅值， γ 是空气的比热比， P_0 为静压， d 为活塞直径， x 为活塞运动位移， V_0 为活塞平衡位置时密闭腔的体积， $\Delta p(H, L, W)$ 是与热传导、腔体泄露和声压波动有关的误差修正。

激光活塞发声器的关键技术包括：活塞运动的激励源和腔体的密封结构决定了活塞发声器的低频截止频率和声压级的动态范围，活塞运动位移的精密测量和声压误差效应的修正分别是声压量值准确复现的基础和关键，而抑制非线性效应导致声波能量的高频迁移则是保证式(1.1)计算结果有效性的前提。

1.2 实验方法及目的

验证《空气声声压计量器具检定系统表》(征求意见稿)中激光活塞发声器法声压基准技术指标的科学合理性。

1.3 实验条件

实验时间：2020年12月10日~2020年12月16日

实验地点：中国计量科学研究院昌平院区17号楼1004

环境参数：空气温度(22~23)°C

相对湿度(30~40)%

静压(99.8~101.2)kPa

1.4 实验结果

B&K 4193-L-004型工作标准传声器单元是常用的标准次声传感器，其灵敏度典型值为2 mV/Pa，灵敏度级的-3 dB频率响应下限约为0.1 Hz，受限于其灵敏度及平坦频率响应范围，该型标准次声传感器的校准频率范围一般为0.01 Hz~20 Hz。本实验报告中，以B&K 4193-L-004型工作标准传声器单元为校准对象，验证激光活塞发声器法声压基准在0.01 Hz~20 Hz范围的技术指标，全频率范围的技术指标将在24年底与法国LNE开展双边比对验证，以Setra 278型微气压计和B&K 4193-L-004型工作标准传声器单元为传递标准。

校准声压 124 dB，校准频率范围 0.01 Hz~20 Hz，B&K 4193-L-004 (No. 3205299) 型工作标准传声器单元的激光活塞法校准结果及其与关联传声器法的部分频段校准结果的验证如表 1.1 和图 1.3 所示。

表 1.1 激光活塞发声器法校准 B&K 4193-L-004 的结果及其与关联传声器法的验证

频率 (Hz)	激光活塞发声器法		关联传声器法	
	声压灵敏度级 (dB)	不确定度 ($k=2$) (dB)	声压灵敏度级 (dB)	不确定度 ($k=2$) (dB)
0.100	-54.13	0.30	-54.41	0.20
0.125	-53.33	0.30	-53.60	0.20
0.160	-52.68	0.30	-52.84	0.20
0.200	-52.28	0.30	-52.49	0.20
0.250	-52.00	0.30	-52.24	0.20
0.315	-51.81	0.30	-52.04	0.20
0.400	-51.68	0.30	-51.85	0.20
0.500	-51.60	0.30	-51.81	0.20
0.630	-51.55	0.30	-51.74	0.20
0.800	-51.52	0.30	-51.64	0.20
1.000	-51.49	0.30	-51.65	0.20
1.250	-51.47	0.30	-51.63	0.20
1.600	-51.49	0.30	-51.57	0.20
2.000	-51.47	0.20	-51.57	0.10
2.500	-51.47	0.20	-51.55	0.10
3.150	-51.46	0.20	-51.54	0.10
4.000	-51.46	0.20	-51.52	0.10
5.000	-51.46	0.20	-51.52	0.10
6.300	-51.46	0.20	-51.51	0.10
8.000	-51.47	0.20	-51.50	0.10
10.000	-51.47	0.20	-51.50	0.10
12.500	-51.48	0.20	-51.50	0.10
16.000	-51.49	0.20	-51.50	0.10
20.000	-51.49	0.20	-51.49	0.10

-----本页以下空白-----

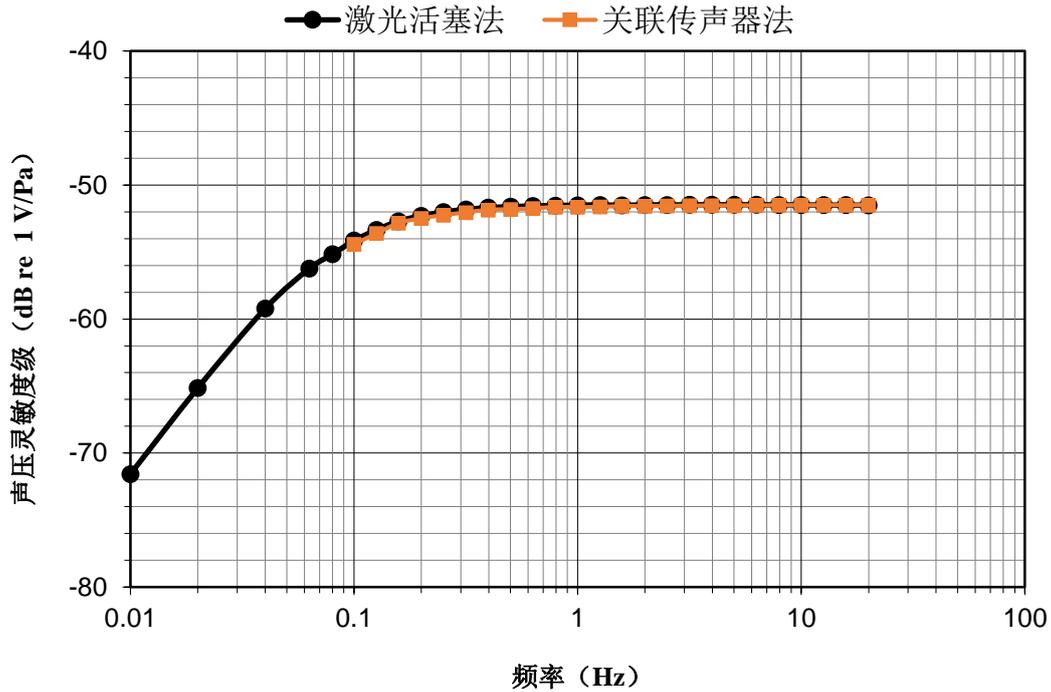


图 1.3 激光活塞发声器法校准 B&K 4193-L-004 的结果及其与关联传声器法的验证

1.5 不确定度评估

1.5.1 激光活塞发声器法复现声压量值的不确定度

激光活塞发声器法复现声压量值的测量模型如式 (1.1) 所示，主要不确定度分量包括：重复性测量、活塞位移测量、比热容比取值、静压测量、活塞直径测量、活塞体积测量、声压误差修正等，测量不确定度评估详述如下。

(1) 重复性测量引入的测量不确定度分量 u_1

以活塞发声器声压复现的 10 次测量结果的标准偏差评估重复性测量引入的不确定度分量，详见表 1.4，其中 1 Hz 处声压复现的重复性如表 1.2 所示。

表 1.2 声压复现的重复性测量结果

序号	1	2	3	4	5
声压级 (dB)	125.5088	125.5031	125.5120	125.5262	125.4926
序号	6	7	8	9	10
声压级 (dB)	125.4878	125.4829	125.4792	125.4756	125.4730
标准偏差 (dB)	0.018				

(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 速度解码卡测量活塞往

复运动的速度，除以角频率得到位移，该型速度解码卡在 0.001 Hz~20 Hz 范围的非线性误差为±0.1%，依据 JJF 1219-2009《激光测振仪校准规范》校准的测量不确定度通常为 0.5% ($k=2$)，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：

$$u_2 = 20 \times \log(1 + 0.0025) = 0.022 \text{ dB} \quad (1.2)$$

(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) 下，比热容比取值为 1.4022，根据相关热力学文献，在常温常压条件下，比热容比取值的最大偏差为±0.0002，由此引入的标准不确定度分量为：

$$u_3 = 20 \times \log(1 + 0.0002) = 0.002 \text{ dB} \quad (1.3)$$

(4) 静压测量引入的测量不确定度分量 u_4

将 TCP2 型压力传感器内置于活塞发声腔体内，测量腔体内静压用于声压计算，该型压力传感器测量结果的最大允许误差一般为±0.1%，因此，静压测量引入的标准不确定度分量为：

$$u_4 = 20 \times \log(1 + 0.001) = 0.009 \text{ dB} \quad (1.4)$$

(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 0.02 mm，由此引入的标准不确定度分量为：

$$u_5 = 20 \times \log(1 + 0.002) = 0.002 \text{ dB} \quad (1.5)$$

(6) 活塞体积测量引入的测量不确定度分量 u_6

活塞体积采用 Solidworks 三维建模及质量属性功能，可测量活塞腔体体积，腔体剖面图如图 1.4 所示。

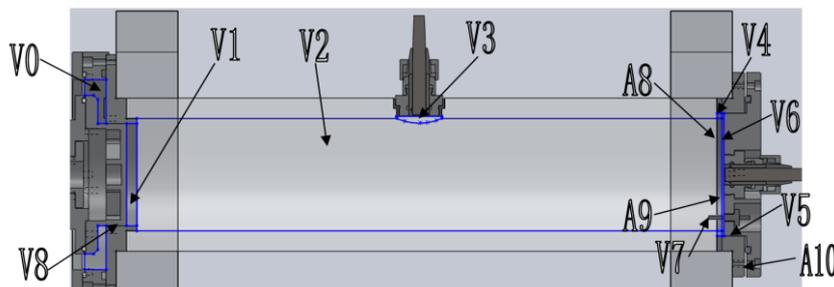


图 1.4 激光活塞发声器法校准 B&K 4193-L-004 的结果及其与关联传声器法的验证

表 1.3 活塞发声腔体积测量结果及不确定度评估

	V1	V2	V3_1	V3_2	V4	V6	V7
体积 (cm ³)	81.7518	5318.2043	5.6004	2.0814	2.5475	7.2370	0.1640
体积不确定度 (cm ³)	0.1701377	4.8935799	0.0118361	0.0239239	0.0400464	0.2261615	0.0016828
相对不确定度 (%)	0.0021	0.0009	0.0021	0.0115	0.0157	0.0313	0.0103
合成标准不确定度 u_5 (dB)	0.0082						

因此，活塞体积测量引入的标准不确定度分量为 0.009 dB。

(7) 声压误差修正引入的测量不确定度分量 u_7

声压误差修正包括热传导、腔体泄漏和声压波动修正，其中，低频时热传导和腔体泄漏的耦合性强，因此采用耦合修正方法，声压波动单独修正。

a) 热传导和腔体泄漏耦合修正

活塞发声腔可抽象为两端密封的圆柱腔体，相关的热传导修正模型主要有两种：一是 Gerber 于 1964 年提出的模型，考虑声源阻抗为零和无穷大的情况下，分别给出了有限圆柱腔体热传导的修正公式及其简化表达；二是基于基尔霍夫理论的两端开口圆柱腔体的热传导模型，考虑了粘滞和腔体内的声压波动，1949 年 Zwikker 和 Kosten 给出了基尔霍夫全解的简化公式，圆柱腔体两端面的热传导修正采用 Morse 和 Ingard 提出的模型。

在 Rennie 的理论框架下，激光活塞发声腔广泛采用 Gerber 提出的声源阻抗无穷大时的修正模型，存在的主要问题有：一是腔体内压力（零阻抗声源）或密度变化（无限阻抗声源）是导致温度变化的原因，并假设腔体压力或流体密度分布均匀，与腔体内温度分布不均匀的结论相矛盾；二是短级数求解结果在低频引入较大误差。

针对上述问题，LNE 的 Vincent 提出了新的建模方法，在此基础上，中国计量科学研究院考虑传声器阻抗及腔体泄漏，建立了热传导与腔体泄漏的耦合修正模型，如式 (1.6) 所示。

$$P_{LHCV} = \frac{1}{\gamma - (\gamma - 1)E_p + \frac{1}{j\omega T_L} + \frac{\rho_0 c^2}{j\omega V_0 \gamma} Y_r} \quad (1.6)$$

$$E_p = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{32}{(2m+1)^2 \pi^2 x_n^2} \frac{j\omega\rho_0 c_p}{j\omega\rho_0 c_p + \kappa \left(x_n^2 + (2m+1)^2 \pi^2 \frac{a^2}{L^2} \right)} \quad (1.7)$$

式中, p_{LHCV} 是热传导与腔体泄漏耦合引入的声压修正量, γ 是气体的比热容比, ρ_0 为活塞发声器静态时的气体密度, κ 为热导率, c 为声速, L 为活塞腔体长度, a 为活塞直径, V_0 为活塞腔体积, E_p 为温度传递函数, Y_r 为待校传感器的导纳, T_L 为活塞腔体的泄漏时间常数, ω 为次声波的角频率, x_n 为零阶贝塞尔函数的第 n 个零点, c_p 为定压比热容。

热传导和腔体泄漏耦合修正值与声频率、活塞腔体积、活塞直径与长度比值、活塞腔体泄漏时间常数的测量结果直接相关, 根据前述各参量的测量偏差, 计算根据式 (1.6) 和式 (1.7) 进行声压修正引入的标准不确定度分量详见表 1.4。

b) 声压波动修正

待校标准次声传感器置于活塞发声器腔体中心点时, 声压波动修正可近似为:

$$\frac{p_w}{p_0} = \frac{\xi}{\sin \xi} \quad (1.8)$$

$$\xi = \frac{\omega L}{c} \quad (1.9)$$

式中, p_w 为活塞发声器腔体内有声压波动时的声压分布, p_0 是未考虑声压误差修正时活塞发声器腔体内的声压, c 为声速, L 为活塞腔体长度, ω 为次声波的角频率。

声压波动修正值可由下式计算:

$$p_{wc} = 20 \cdot \log \left(\frac{p_w}{p_0} \right) \quad (1.10)$$

声压波动修正值与活塞腔体长度、声频率的测量偏差直接相关, 根据式 (1.8) 和式 (1.9) 可估算此项修正引入的标准不确定度分量。

(8) 合成标准不确定度分量及扩展不确定度

激光活塞发声器法声压复现的不确定度分量及由此引入的标准不确定度汇总于表 4, 其中各测量不确定度分量独立无关, 由此计算得到合成标准不确定度。

取包含因子 $k=2$, 激光活塞发声器法声压复现的扩展不确定度如表 4 所示。

表 1.4 激光活塞发声器法声压复现的不确定度

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	0.030	0.030	0.030	0.020	0.020	0.020	0.020	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
活塞位移测量	u_2	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022
比热容比取值	u_3	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
静压测量	u_4	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
活塞直径测量	u_5	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
活塞体积测量	u_6	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
热传导及腔体泄漏耦合修正	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
声压波动修正	u_7'	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
合成标准不确定度	u_c	0.257	0.204	0.204	0.204	0.106	0.106	0.106	0.106	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085
扩展不确定度	U	0.514	0.408	0.408	0.408	0.212	0.212	0.212	0.212	0.170	0.170	0.170	0.170	0.170

1.5.2 激光活塞发声器法校准标准次声传感器的不确定度

激光活塞发声器复现声压量值,直接校准标准次声传感器引入的不确定度分量分析如下,其中,0.1 Hz~20 Hz 范围以 B&K 4193-L-004 型工作标准传声器单元为标准次声传感器,0.001 Hz~0.1 Hz 范围以 Setra 278 型微气压计为标准次声传感器。

(1) 重复性测量引入的测量不确定度分量 u_1

在相同测量条件下对待校传感器的声压灵敏度级重复测量 10 次,以其标准偏差的最大值作为测量重复性引入的测量不确定度分量。通常,随着频率的降低,测量重复性引入的不确定度分量越大,重复性测量引入的不确定度分量详见表 1.5。

(2) 激光活塞发声器复现声压的测量不确定度分量 u_2

激光活塞发声器复现声压引入的标准不确定度详见表 1.4。

(3) 标准次声传感器响应电压测量的不确定度分量 u_3

标准次声传感器响应电压由多通道声分析仪采集,以 B&K 3160 为例,根据出厂参数,考虑多通道声分析仪的绝对幅值精度、频响及幅值线性度,标准次声传感器响应电压测量的标准不确定度如式 (1.11):

$$u_3 = \begin{cases} 0.150/\sqrt{3} = 0.090dB & 0.010Hz \leq f < 0.100Hz \\ 0.100/\sqrt{3} = 0.060dB & 0.100Hz \leq f < 2.000Hz \\ 0.050/\sqrt{3} = 0.030dB & 2.000Hz \leq f \leq 20.000Hz \end{cases} \quad (1.11)$$

(4) 数据修约误差引入的测量不确定度分量 u_4

声压灵敏度级校准结果的数据修约间隔为 0.10 dB,考虑均匀分布,由此引入的标准不确定度如式 (1.12):

$$u_4 = 0.10/2/\sqrt{3} \approx 0.030dB \quad (1.12)$$

(5) 合成标准不确定度及扩展不确定度

标准次声传感器声压灵敏度级校准的测量不确定度来源及标准不确定度数值汇总于表 1.5 中,其中各测量不确定度分量独立无关,由此计算得到合成标准不确定度。

取包含因子 $k=2$,则标准次声传感器声压灵敏度级校准结果的扩展不确定度见表 1.5。

表 1.5 激光活塞发声器法校准标准次声传感器的不确定度

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	0.100	0.080	0.080	0.080	0.050	0.050	0.050	0.050	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
声压复现	u_2	0.257	0.204	0.204	0.204	0.106	0.106	0.106	0.106	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085
待校传感器电压测量	u_3	0.090	0.090	0.090	0.090	0.060	0.060	0.060	0.060	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030
数据修约	u_4	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030
合成标准不确定度	u_c	0.30	0.24	0.24	0.24	0.14	0.14	0.14	0.14	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
扩展不确定度	U	0.60	0.48	0.48	0.48	0.28	0.28	0.28	0.28	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20

2、自由场互易法 WS3 型传声器原级校准的实验报告及不确定度评估（50 kHz~100 kHz）

2.1 实验装置

高频自由场互易法传声器校准系统包括六个组成部分：

- (1) B&K 5998 型互易校准仪和 B&K ZE0976 传声器发射单元；
- (2) B&K 2690A 型适调放大器，用于插入电压校准，以及接收传声器声信号的滤波和放大增益，同时为前置放大器提供电源，为传声器提供极化电压，接收传声器所用的 B&K 2673 型前置放大器具有 20 dB 增益和 15 G Ω 的输入阻抗，适调放大器一般设置 40 dB 增益、20 Hz 高通滤波；
- (3) 带宽 100 kHz 的 B&K 3560C 型多通道声分析仪，具备稳态信号响应（SSR）功能；
- (4) 消音箱，提供自由声场，净空间为 2500 mm \times 2500 mm \times 3000 mm；
- (5) 传声器定位系统，用于固定传声器声轴，并能调节两传声器的声中心距离，采用程序控制步进电机的正反转实现距离调节；
- (6) 环境参数测量部分，包括气压、温度和湿度等参数。

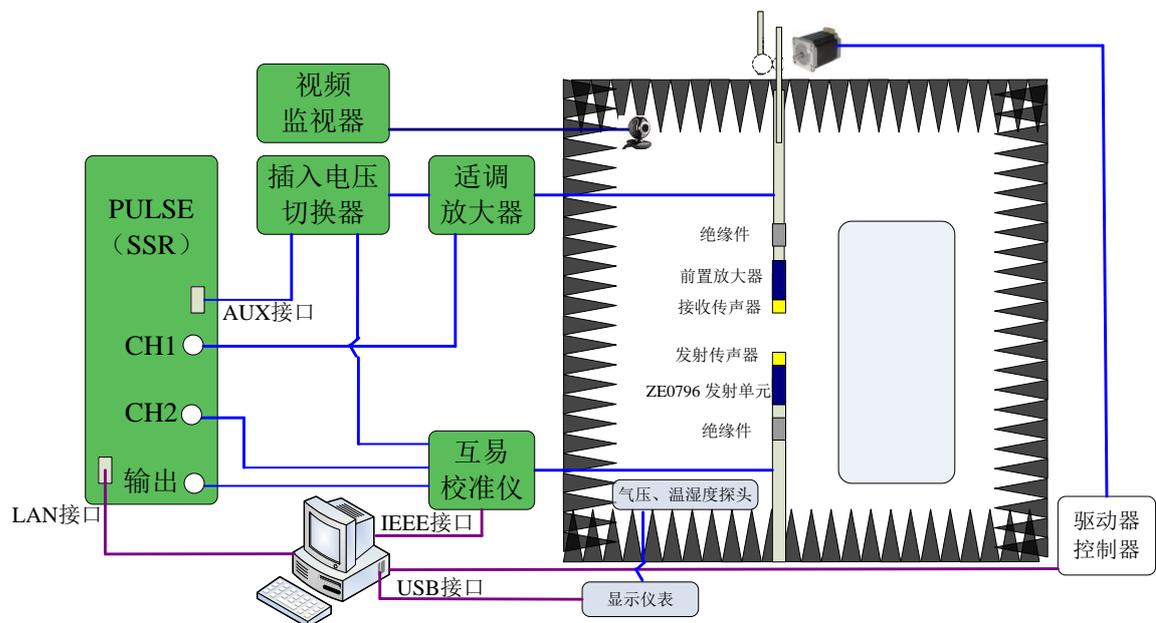


图 2.1 高频自由场互易校准系统框图

高频自由场互易法传声器校准系统框图如图 2.1 所示，实物如图 2.2 所示，

其高频拓展存在的技术困难是：实验室标准传声器高频发射效率低，测试信噪比低，消声室内传声器支撑结构引起的声波反射干扰、电信号串扰及噪声干扰对 μV 级信号提取及电转移阻抗的影响不可忽略。

稳态响应技术用于测量时，反射的声信号对于测量的声信号而言，会作为一个相关量进行线性叠加，只是有一定的时间延迟。若想获得 60 dB 以上的信噪比，如果消声室的吸声构件吸收了 40 dB 的声波，声波的行程需要设置为传声器膜片之间距离的 10 倍，同样，需要考虑传声器支撑构件的影响。支撑杆应当与传声器的外径相同，IEC 61094-3 推荐支撑杆的长度为传声器直径的 10 倍，但支撑杆越长越好，实验中采用了 500 mm 的支撑杆。实际上，不可避免会有不同的构件形成声波的反射。频段增高时，传声器膜片之间将形成驻波。反射的声波将在接收传声器处散射，同时散射的声波传回发射传声器，如此往复。由于反射信号在时域上有延迟，可以选择采用时间选择的方式来避免反射声波的影响。

所谓时间选择技术是对时域信号进行加窗处理，实验中通过多通道声分析仪的 SSR 模块得到电压比值的频率响应，然后利用逆 FFT 技术将测量所得的传递函数转换为时域信号，利用时间选择窗去除不需要的反射信号。最后将处理后的转移函数再转换到频域，计算传声器的灵敏度。



图 2.2 自由场互易校准系统实物图

2.2 实验方法及目的

验证《空气声声压计量器具检定系统表》（征求意见稿）中自由场互易法声压基准高频拓展部分技术指标的科学合理性。

2.3 实验条件

实验时间：2015年6月2日~2015年6月5日

实验地点：中国计量科学研究院昌平院区17号楼1004

环境参数：空气温度（22~23）℃

相对湿度（40~50）%

静压（99.8~101.2）kPa

2.4 实验结果

高频自由场互易法校准实验中，校准对象为三只 B&K 4939 型工作标准传声器，分别是 B&K 4939.2728941、B&K 4939.2728942 和 B&K 4939.2728940。为了兼顾信号的信噪比及平面波条件，WS3 型传声器的测量距离分别设置为：40 mm、50 mm 和 60 mm 三组，共测量 6 大组。

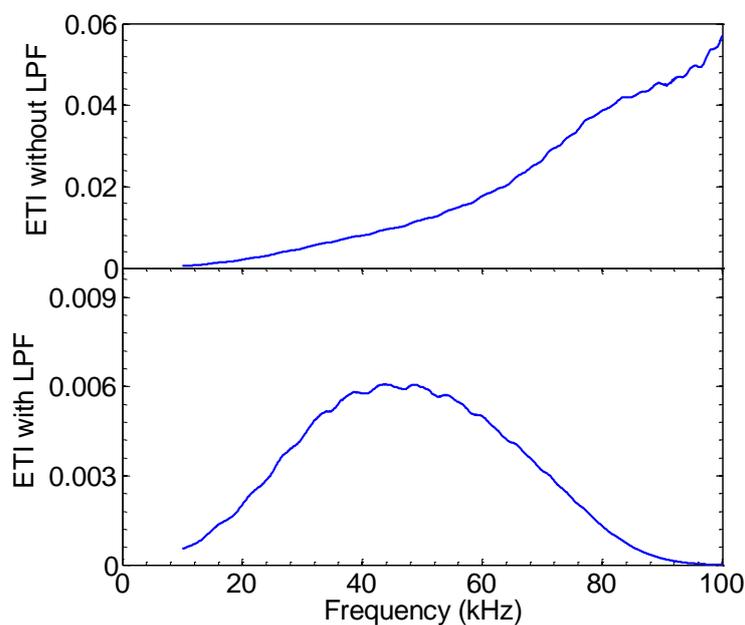


图 2.3 频域电转移阻抗低通滤波前后的波形

校准过程中，频域的电转移阻抗需经过合适的低通滤波后，如图 2.3 所示，逆 FFT 变换得到时域的电转移阻抗才能出现多个明显的反射峰，如图 2.4 所示。低通滤波器的设计原则为：窗函数法设计的低通滤波器，在电转移阻抗测量频率范围内不能出现旁瓣，即选择低阶数的滤波器；低通滤波器的数字截止频率选择

0.5π 左右，即截止频率大约为测量频率的中间段最为合适；选择不同的窗函数设计的低通滤波器只要满足上述原则，结果基本一致，即可采用任意一种窗，仅需调节滤波器的阶数、截止频率，都可达到一致的效果。

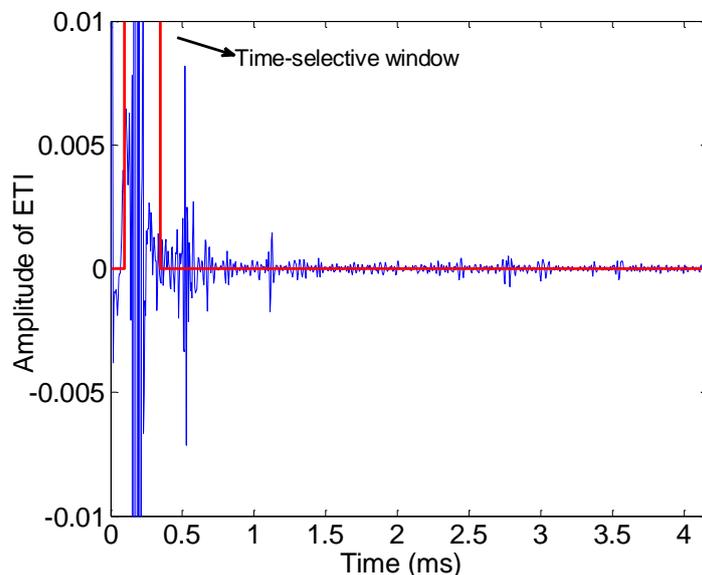


图 2.4 频域电转移阻抗低通滤波并逆 FFT 变换后的时域波形及时间选择窗

用不同的窗函数分别处理时域电转移阻抗的反射峰，窗函数的设计原则是：时间选择前后电转移阻抗的差值最小。仿真分析表明，矩形窗的效果最佳，即处理前后，频域的电转移阻抗差值最小，如图 2.5 所示。

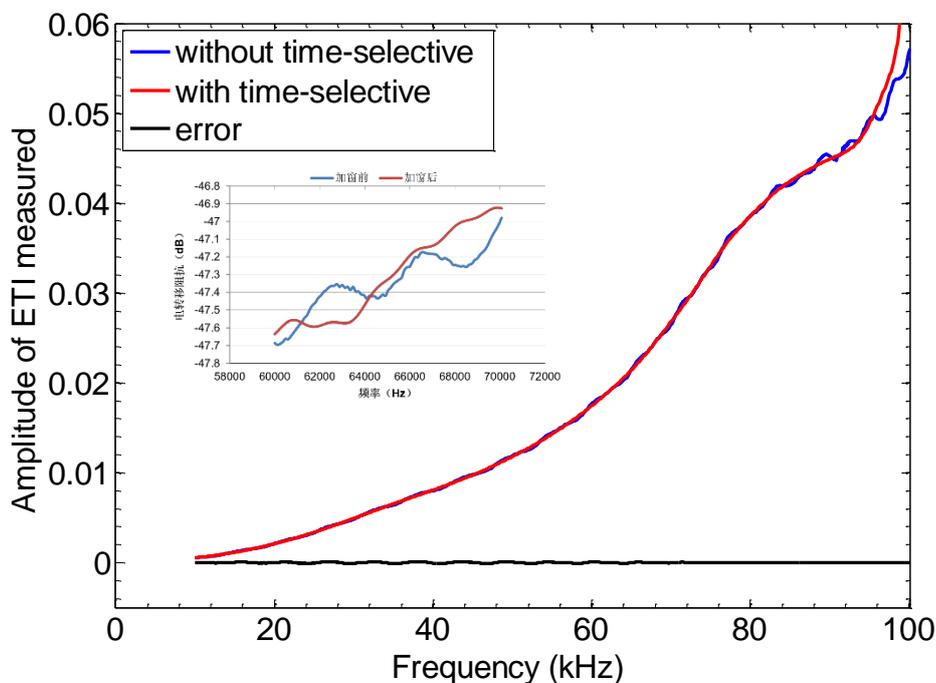


图 2.5 时域加窗前后频域电转移阻抗的波形及差值

获得电转移阻抗、计算声转移阻抗，即可计算得到三只 WS3 型传声器的自

由场灵敏度级。

B&K 4939.2728941 的自由场灵敏度级校准结果如图 2.6 所示，不同传声器间距时，该传声器的自由场灵敏度级校准结果的偏差如图 2.7 所示。

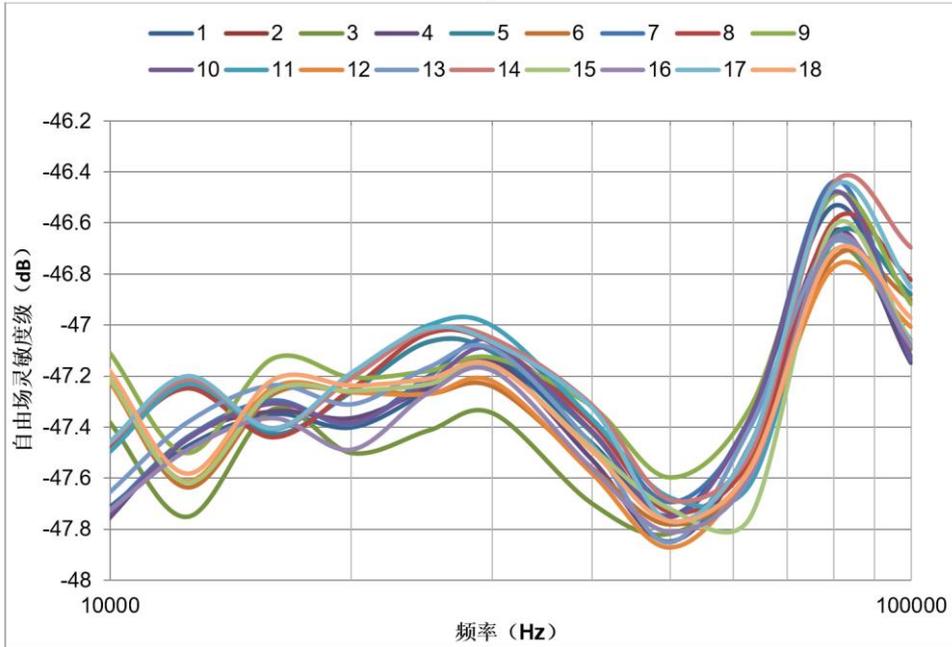


图 2.6 自由场互易法校准结果及重复性

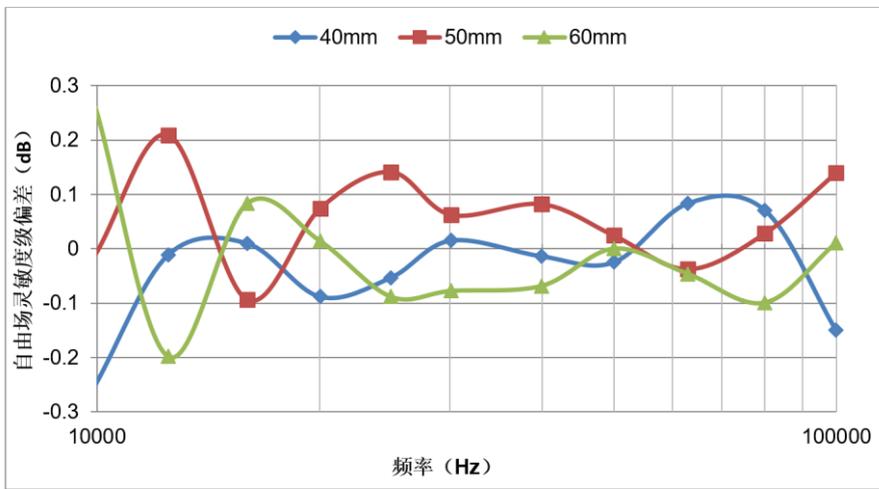


图 2.7 不同传声器间距时自由场灵敏度级校准结果的偏差

图 2.8 给出了中国计量科学研究院、丹麦 B&K 公司和德国 PTB 对 WS3 型传声器自由场互易法校准结果的初步验证，其中，中国计量科学研究院和 B&K 公司为同一只 WS3 型传声器，德国 PTB 的校准对象同为 WS3 型传声器但非同一只传声器。

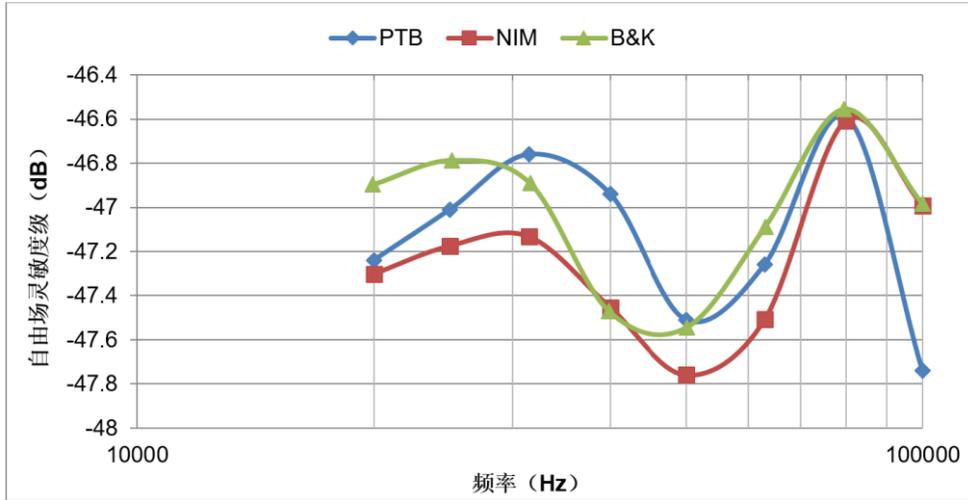


图 2.8 高频自由场互易法校准结果的比对验证（初步）

2.5 不确定度评估

自由场互易法校准中传声器的灵敏度级通过测量电转移阻抗、计算声转移阻抗得到，计算公式如下：

$$L_{f,1} = 10\lg \frac{2d}{\rho f} + 10\lg R_{12} + 10\lg R_{13} - 10\lg R_{23} + \frac{1}{2}\Delta_A d \quad (2.1)$$

式 (2.1) 可变为：

$$L_{f,1} = 10\lg 2d - 10\lg \rho f + 10\lg R_{12} + 10\lg R_{13} - 10\lg R_{23} + \frac{1}{2}\Delta_A d \quad (2.2)$$

根据以上测量模型，其合成标准不确定度公式及灵敏度系数计算如下：

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) = \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{\partial F}{\partial d} = \frac{10}{d \ln 10} + \frac{1}{2}\Delta_A \\ c_2 &= \frac{\partial F}{\partial \rho} = \frac{10}{\rho \ln 10} \\ c_3 &= \frac{\partial F}{\partial R_{12}} = \frac{10}{R_{12} \ln 10} \\ c_4 &= \frac{\partial F}{\partial R_{13}} = \frac{10}{R_{13} \ln 10} \\ c_5 &= \frac{\partial F}{\partial R_{23}} = \frac{10}{R_{23} \ln 10} \\ c_6 &= \frac{\partial F}{\partial \Delta_A} = \frac{1}{2}d \end{aligned} \quad (2.4)$$

式中， d 为两传声器声中心间距， ρ 为相应条件下空气密度， R_{12} 、 R_{31} 、 R_{23} 分别为传声器两两之间的电转移阻抗， Δ_A 为空气衰减系数， f 为校准频率。

根据以上测量模型，自由场互易法校准 WS3 型工作标准传声器的测量不确定度分析如下。

(1) 重复性测量 u_1

自由场互易法校准 WS3 型工作标准传声器的重复性测量结果如图 2.6 所示，其标准偏差作为重复性测量引入的不确定度分量，详见表 2.3。

(2) 传声器声中心的间距 u_2

传声器声中心的距离由几部分组成：传声器外环面之间的距离、传声器的前腔深度、传声器的声中心位置。传声器外环面之间的距离通过尺子测量，测量误差优于 1.0 mm；WS3 传声器去掉保护栅后可认为传声器的前腔深度为 0，传声器的声中心值采样测量值，声中心的不确定度按照 0.5 mm 计算，按照平均分布估计， d 取 50mm，由此合成传声器声中心距离的不确定度为：

$$u_2 = c_1 \times \sqrt{\left(\frac{1.0}{\sqrt{3}}\right)^2 + 0.5^2} = \left(\frac{10}{d \ln 10} + \frac{1}{2} \Delta_A\right) \times \sqrt{\left(\frac{1.0}{\sqrt{3}}\right)^2 + 0.5^2} \quad (2.5)$$

由于空气衰减系数是频率的函数，表 2.1 给出了参考环境条件下的空气声衰减系数及传声器声中心距离测量偏差引入的标准不确定度分量，参考环境条件：23 °C、101.325 kPa、50%RH。

表 2.1 传声器声中心间距引入的不确定度分量

频率 (kHz)	衰减系数 (dB/m)	u_2 (dB)
10	0.1411	0.0664
12.5	0.2131	0.0664
16	0.3327	0.0665
20	0.4901	0.0665
25	0.7061	0.0666
31.5	0.9998	0.0667
40	1.3795	0.0669
50	1.8007	0.0670
63	2.3079	0.0672
80	2.9380	0.0675
100	3.6921	0.0677

(3) 空气密度 u_3

空气密度采用 CIPM-2007 公式法计算得到，公式如下：

$$\rho = \frac{pM_a}{ZRT} \left[1 - x_v \left(1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right] \quad (2.6)$$

$$T = 273.15 + t \quad (2.7)$$

$$M_a = 0.02896546 + 0.012011(x_{\text{CO}_2} - 0.0004) \quad (2.8)$$

$$1 - \frac{M_v}{M_a} = 0.3780 \quad (2.9)$$

式中： p ——大气压力，Pa；

M_a ——干燥空气的摩尔质量， $\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$ ；

x_{CO_2} —— CO_2 的含量， $\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ；

Z ——压缩系数；

R ——摩尔气体常数， $8.31447215 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$ ；

T ——采用 ITS-90 的热力学温度，K；

t ——空气温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

x_v ——水蒸气的摩尔分数；

M_v ——水的摩尔质量， $\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。

其中，水蒸气的摩尔分数和压缩因子的计算公式如下：

$$x_v = h \cdot f(p, t) \frac{p_{s_v}(t)}{p} \quad (2.10)$$

$$p_{s_v}(t) = 1 \text{ Pa} \times e^{(AT^2 + BT + C + D/T)} \quad (2.11)$$

$$f(p, t) = \alpha + \beta p + \gamma t^2 \quad (2.12)$$

$$Z = 1 - \frac{p}{T} \cdot [a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + (b_0 + b_1 t)x_v + (c_0 + c_1 t)x_v^2] + \frac{p^2}{T^2} \cdot (d + ex_v^2) \quad (2.13)$$

式中： h ——相对湿度，%；

f ——增强因子；

p_{s_v} ——饱和空气压力，Pa；

A 、 B 、 C 、 D 、 α 、 β 、 γ 、 a_0 、 a_1 、 a_2 、 b_0 、 b_1 、 c_0 、 c_1 、 d 、 e ——常数。

空气密度计算公式中的常数取值如表 2.2 所示。

表 2.2 空气密度计算公式中的常数对照表

符号	单位	CIPM-2007 取值
<i>A</i>	10^{-5} K^{-2}	1.2378847
<i>B</i>	10^{-2} K^{-1}	-1.9121316
<i>C</i>		33.93711047
<i>D</i>	10^3 K	-6.3431645
<i>a</i>		1.00062
<i>β</i>	10^{-8} Pa^{-1}	3.14
<i>γ</i>	10^{-7} K^{-2}	5.6
<i>a</i> ₀	$10^{-6} \text{ K} \cdot \text{Pa}^{-1}$	1.58123
<i>a</i> ₁	10^{-8} Pa^{-1}	-2.9331
<i>a</i> ₂	$10^{-10} \text{ K}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$	1.1043
<i>b</i> ₀	$10^{-6} \text{ K} \cdot \text{Pa}^{-1}$	5.707
<i>b</i> ₁	10^{-8} Pa^{-1}	-2.051
<i>c</i> ₀	$10^{-4} \text{ K} \cdot \text{Pa}^{-1}$	1.9898
<i>c</i> ₁	10^{-6} Pa^{-1}	-2.376
<i>d</i>	$10^{-11} \text{ K}^2 \cdot \text{Pa}^{-2}$	1.83
<i>e</i>	$10^{-8} \text{ K}^2 \cdot \text{Pa}^{-2}$	-0.765
<i>R</i>	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	8.31447215

根据 CIPM-2007 计算公式，空气密度相对测量不确定度的计算公式为：

$$u_{\text{rel}}(\rho) = \sqrt{\left(\frac{u_{\text{F}}}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial p} \cdot u_{\text{p}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial t} \cdot u_{\text{t}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial h} \cdot u_{\text{h}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x_{\text{CO}_2}} \cdot u_{x_{\text{CO}_2}}\right)^2} \quad (2.14)$$

式中： $\frac{u_{\text{F}}}{\rho} = 22 \times 10^{-6}$ ；

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial p} = 1 \times 10^{-5}, \text{ Pa}^{-1};$$

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial t} = -4 \times 10^{-3}, \text{ K}^{-1};$$

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial h} = -9 \times 10^{-3};$$

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x_{\text{CO}_2}} = 0.4。$$

由此可知，空气密度计算的主要不确定度来源是气压和温度测量误差，通常，数字气压计的最大允许误差 $\pm 0.2 \text{ kPa}$ ，温湿度计的最大允许误差 $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ，则空气密度计算引入的相对标准不确定度为 1.7×10^{-3} 。则：

$$u_3 = \frac{10}{\ln(10)} \frac{u(\rho)}{\rho} = \frac{10}{\ln(10)} \times 1.7 \times 10^{-3} \approx 0.008 \text{ dB} \quad (2.15)$$

(4) 电转移阻抗测量 u_4

电转移阻抗测量引入的不确定度分量包括测量系统、串音、信噪比、发射单元的阻抗偏差等。

SSR 测量过程的最大标准偏差为 0.020 dB，前置放大器插入损失的测量不确定度为 0.010 dB，由于发射传感器单元与接收传感器单元之间采取有效的防串扰手段，同时采用 B&K 5998 互易校准仪作为发射驱动，B&K 2690 适调放大器作为接收信号装置，两台仪器之间的串音小于 0.010 dB，接收传感器的前置放大器内置了 40 dB 增益，信噪比的不确定度分量估计为 0.020 dB，此外，发射单元中串联电容的不确定度为 0.001 nF，参考值为 4.764 nF，其引入的不确定度分量为 0.002 dB。三次独立的电转移阻抗测量，引入的标准测量不确定度为 0.032 dB。

(5) 空气衰减系数 u_5

根据 IEC 61094-3 公布的空气衰减系数，考虑高频段空气衰减系数较大，估计其误差优于 0.10 dB/m， d 取 0.05 m，以平均分布计算，空气衰减系数引入的标准不确定度分量计算结果为 0.01 dB。

(6) 自由场偏离 u_6

传声器工作区域的自由场偏离要求是优于 0.1 dB，按照均匀分布计算自由场偏离引入的不确定度分量为 0.058 dB，所建立的自由场互易校准装置采用时间选择技术，从时域上剔除了反射信号的影响。自由场偏离引入的不确定分量估计为 0.040 dB。

(7) 自由场偏离

根据经验估计、实验和公式推导可知：

支架偏离 5° 引入的不确定分量 u_7 为 0.050 dB；

平面波偏离引入的标准不确定度 u_8 为 0.050 dB；

极化电压测量引入的标准不确定度 u_9 为 0.010 dB；

极化电压在测量期间变化量不超过 0.02 V，与 200 V 偏差不超过 0.1 V，因此，极化电压测量及波动引入的不确定度分量不超过 0.010 dB；

环境敏感系数修正：WS3 型传声器的气压修正系数和温度修正系数是参照 LS2 型传声器的结果进行计算的，一般 WS3 的气压修正系数取 -0.016 dB/kPa，温度修正系数取 -0.002 dB/°C，气压修正系数和温度修正系数的不确定度分别取

为 0.002 dB/kPa 和 0.0002 dB/°C。在昌平实验室进行试验时，一般测试条件下气压值与参考大气压 101.13 kPa 相差 3 kPa 以内，温度偏差在 3 °C 以内，考虑按照平均分布计算，环境敏感系数修正引入的不确定分量为：

$$u_{10} = \sqrt{(0.002 \times 3)^2 + (0.0002 \times 3)^2} / \sqrt{3} = 0.004 \text{ dB} \quad (2.16)$$

(8) 合成标准不确定度及扩展不确定度

自由场互易法校准 WS3 型工作标准传声器灵敏度级的测量不确定度来源及标准不确定度数值汇总于表 2.3 中，其中各测量不确定度分量独立无关，由此计算得到合成标准不确定度。

取包含因子 $k=2$ ，则自由场互易法校准 WS3 型工作标准传声器灵敏度级的扩展不确定度见表 2.3。

表 2.3 WS3 型工作标准传声器自由场互易法校准结果的不确定度评估

不确定度 (dB)	符号	频率 (kHz)			
		50	63	80	100
重复性测量	u_1	0.100	0.150	0.150	0.200
声中心距离	u_2	0.067	0.067	0.068	0.068
空气密度	u_3	0.009	0.009	0.009	0.009
电转移阻抗	u_4	0.032	0.032	0.032	0.032
衰减系数	u_5	0.010	0.010	0.010	0.010
自由场偏离	u_6	0.040	0.040	0.040	0.040
支架偏离	u_7	0.050	0.050	0.050	0.050
平面波偏离	u_8	0.050	0.050	0.050	0.050
极化电压	u_9	0.010	0.010	0.010	0.010
环境修正	u_{10}	0.004	0.004	0.004	0.004
合成标准不确定度	u_c	0.150	0.187	0.188	0.230
扩展不确定度	U	0.30	0.40	0.40	0.50

3、次声传感器校准装置的实验报告及不确定度评估

3.1 实验装置

次声传感器校准装置采用耦合腔比较法,开展次声传感器声压灵敏度级及其频响、总谐波失真等计量特性的校准工作,主要由参考传感器、标准次声源、多通道声分析仪、功率放大器构成,装置连接如图 3.1 所示。

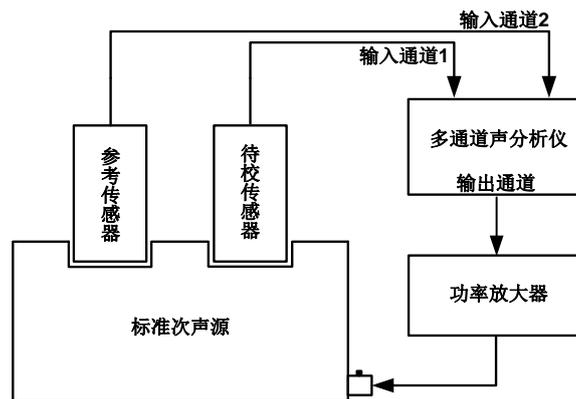


图 3.1 声压灵敏度级校准装置的示意图



图 3.2 耦合腔比较法次声传感器校准装置

3.2 实验方法及目的

验证《空气声声压计量器具检定系统表》(征求意见稿)中次声传感器校准装置技术指标的科学合理性。

3.3 实验条件

实验时间: 2024 年 6 月 17 日~2024 年 6 月 21 日

实验地点: 中国计量科学研究院昌平院区 17 号楼 2002

环境参数: 空气温度 (22~23) °C

相对湿度 (40~50) %

静压 (99.8~101.2) kPa

3.4 实验结果

以 Seismowave 公司的 MB3a 型次声传感器为校准对象，0.01 Hz~25 Hz 范围，耦合腔比较法校准结果与 MB3a 的出厂校准结果进行了比对验证，如表 3.1 和图 3.3 所示。测试结果表明，除 0.5 Hz 处存在明显的谐振外，其他频点处两种方法的校准结果取得了良好的一致性。

表3.1 耦合腔比较法校准结果与 MB3a 出厂校准结果的比对验证

频率 (Hz)	灵敏度级出厂值 (dB re 1 V/Pa)	灵敏度级 NIM 校准结果 (dB re 1 V/Pa)	灵敏度级偏差 (dB)
0.006	-39.37	-39.66	-0.30
0.012	-36.03	-36.34	-0.31
0.024	-34.50	-34.52	-0.02
0.05	-34.00	-33.21	0.79
0.10	-33.96	-34.29	-0.33
0.20	-33.91	-34.52	-0.61
0.50	-33.94	-34.43	-0.49
1.00	-33.97	-34.29	-0.32
2.00	-33.99	-34.33	-0.34
5.00	-34.10	-34.39	-0.29
10.00	-34.38	-34.60	-0.22
20.00	-35.20	-35.23	-0.03
25.00	-35.60	-35.47	0.13

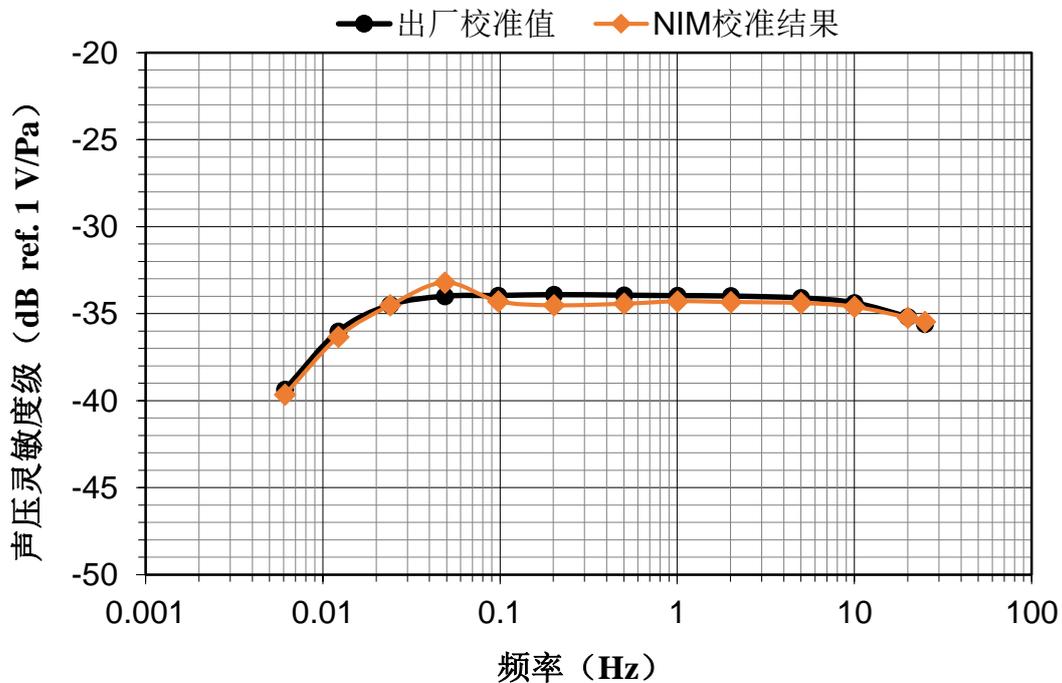


图 3.3 耦合腔比较法校准结果与 MB3a 出厂校准结果的比对验证

以国产 GL-400 型次声传感器为校准对象，0.003 Hz~20 Hz 范围的灵敏度及其频率响应测试结果如表 3.2 和图 3.4 所示。

表3.2 待测次声传感器灵敏度及其频率响应的测试结果（编号：202301001）

频率 (Hz)	灵敏度 (mV/Pa)	灵敏度级 (dB re 1 V/Pa)	灵敏度级频响 (dB re 1 Hz)
0.003	172.17	-15.28	-2.34
0.010	215.99	-13.31	-0.37
0.100	225.96	-12.92	0.02
1.000	225.44	-12.94	0.00
10.00	214.30	-13.38	-0.44
20.00	192.99	-14.29	-1.35

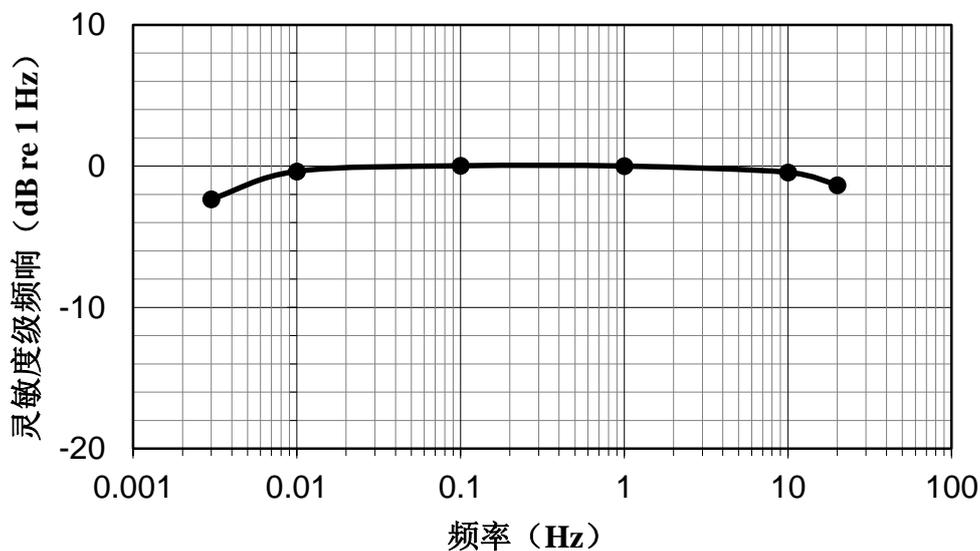


图 3.4 待测次声传感器灵敏度级频率响应的测试结果（编号：202301001）

耦合腔比较法标准次声源可产生 0.001 Hz~100 Hz 的标准次声波，其中，0.001 Hz 的标准次声波形如图 3.5 所示，解决激光活塞发声器法声压基准的低频适用性后，耦合腔互易法次声传感器校准装置的频率下限可拓展至 0.001 Hz。

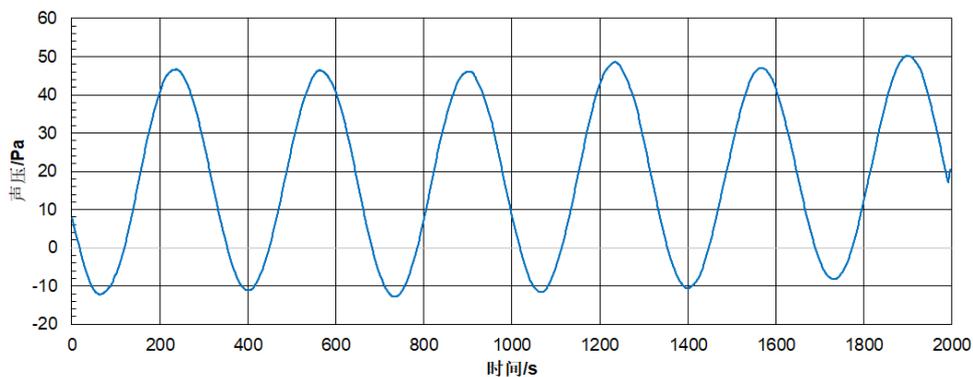


图 3.5 耦合腔比较法标准源产生的 0.001 Hz 的声压波形

3.5 不确定度评估

3.5.1 测量模型

校准频率范围内，次声传感器声压灵敏度级的计算公式为：

$$L_{fx} = L_{f0} + \overline{\Delta L} \quad (3.1)$$

式中： L_{fx} ——被校传感器的声压灵敏度级，dB；

L_{f0} ——参考传感器修正到校准环境条件下的声压灵敏度级，dB；

$\overline{\Delta L}$ ——被校传感器与参考传感器的电压级之差的平均值，dB。

$$\Delta L = 20 \lg \left(\frac{U_2}{U_1} \right) \quad (3.2)$$

式中： ΔL ——被校传感器与参考传感器的电压级之差，dB；

U_1 ——参考传感器的输出电压，V；

U_2 ——被校传感器的输出电压，V。

$$L_{f0} = L_{fr} + \alpha_p (p_0 - p_r) + \alpha_t (t_0 - t_r) \quad (3.3)$$

式中： L_{f0} ——参考传感器在校准环境条件下的声压灵敏度级，dB；

L_{fr} ——参考传感器在校准证书中所列环境条件或参考环境条件下的声压灵敏度级，dB；

α_p ——参考传感器的静压修正系数，dB/kPa；

α_t ——参考传感器的温度修正系数，dB/°C；

p_0 ——校准时的静压，kPa；

p_r ——校准证书中所列环境条件或参考环境条件下的静压，kPa；

t_0 ——校准时的空气温度，°C；

t_r ——校准证书中所列环境条件或参考环境条件下的空气温度，°C。

根据测量模型，次声传感器声压灵敏度级校准的主要不确定度分量包括：参考传感器的声压灵敏度级、参考传感器声压灵敏度级的环境参数修正、参考传感器的供电(如电容传声器的极化电压)、被校传感器和参考传感器的电压级之差、标准次声源内声压分布不均匀、修约误差等。若被校传感器同步进行环境参数修正、被校传感器固有空腔及其与标准次声源的耦合连接引入空腔的影响修正，还需考虑相关修正系数引入的测量不确定度。

3.5.2 测量不确定度评定

(1) 测量重复性引入的测量不确定度分量 u_1

校准频率范围内，在相同测量条件下对被校传感器的声压灵敏度级重复测量

10 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，详见表 3.3。

(2) 参考传感器声压灵敏度级校准引入的测量不确定度分量 u_2

参考传感器的声压灵敏度级由激光活塞式标准次声源校准，校准结果在 0.01 Hz~20 Hz 的标准不确定度如式 (3.4)：

$$u_2 = \begin{cases} 0.30dB & 0.001Hz \leq f < 0.010Hz \\ 0.25dB & 0.010Hz \leq f < 0.100Hz \\ 0.15dB & 0.100Hz \leq f < 2.000Hz \\ 0.10dB & 2.000Hz \leq f \leq 20.000Hz \end{cases} \quad (3.4)$$

(3) 参考传感器声压灵敏度级的温度修正引入的测量不确定度分量 u_3

校准过程中，温度波动通常小于 1 °C，以工作标准传声器为参考传感器，温度敏感系数的估计偏差为 ±0.002 dB/°C，考虑均匀分布，参考传感器声压灵敏度级的温度修正引入的标准不确定度如式 (3.5)：

$$u_3 = 0.002 \times 1 / \sqrt{3} \approx 0.002dB \quad (3.5)$$

(4) 参考传感器声压灵敏度级的气压修正引入的测量不确定度分量 u_4

校准过程中，气压波动通常小于 1 kPa，以工作标准传声器为参考传感器，气压敏感系数的估计偏差为 ±0.010 dB/kPa，考虑均匀分布，参考传感器声压灵敏度级的气压修正引入的标准不确定度如式 (3.6)：

$$u_4 = 0.010 \times 1 / \sqrt{3} \approx 0.006dB \quad (3.6)$$

(5) 参考传感器的供电（如电容传声器的极化电压）引入的测量不确定度分量 u_5

以工作标准传声器为参考传感器，其供电是指极化电压，极化电压引入的测量不确定度包括极化电压测量引入的不确定度和校准过程中极化电压波动引入的不确定度。

极化电压测量用高阻抗直流电压表的最大允许误差不大于 0.05 %，考虑为均匀分布，标准不确定度为 0.003 dB。估计极化电压在次声传感器校准过程中的波动范围不超过 ±0.02 V，由此引入的标准不确定度为 0.0005 dB。因此，极化电压测量及校准过程中的波动引入的合成标准不确定度约为 0.004 dB。

(6) 被校传感器和参考传感器的电压级之差测量引入的测量不确定度分量 u_6

校准过程中，被校传感器和参考传感器的电信号输出由多通道声分析仪采集，

以 B&K 3560C 为例，根据出厂参数，考虑多通道声分析仪的绝对幅值精度、频响及幅值线性度，被校传感器和参考传感器的电压级之差测量的标准不确定度如式 (3.7)：

$$u_6 = \begin{cases} 0.150 / \sqrt{3} = 0.090dB & 0.001Hz \leq f < 0.100Hz \\ 0.100 / \sqrt{3} = 0.060dB & 0.100Hz \leq f < 2.000Hz \\ 0.050 / \sqrt{3} = 0.030dB & 2.000Hz \leq f \leq 20.000Hz \end{cases} \quad (3.7)$$

(7) 标准次声源内声压分布不均匀等其他分量引入的测量不确定度分量 u_7
其他不确定度分量包括标准次声源内声压分布不均匀、被校传感器和参考传感器与标准次声源的声耦合方式存在差异等，上述因素均导致被校传感器和参考传感器处声压有偏差，影响声压灵敏度级的校准结果，估计由此引入的标准不确定度分量 u_7 为 0.010 dB。

(8) 数据修约误差引入的测量不确定度分量 u_8

声压灵敏度级校准结果的数据修约间隔为 0.10 dB，考虑均匀分布，由此引入的标准不确定度如式 (3.8)：

$$u_8 = 0.10 / 2 / \sqrt{3} \approx 0.030dB \quad (3.8)$$

(9) 合成标准不确定度及扩展不确定度

声压灵敏度级的测量不确定度来源及标准不确定度数值汇总于表 3.3 中，各测量不确定度分量独立无关，可计算合成标准不确定度。对于没有提供数据的校准频率点，根据不确定度分量的规律，取相邻频率点的最大值。

取包含因子 $k=2$ ，则耦合腔比较法次声传感器声压灵敏度级校准的扩展不确定度见表 3.3。

表 3.3 耦合腔比较法次声传感器声压灵敏度级校准的测量不确定度

序号	来源	符号	0.001 Hz	0.010 Hz	0.020 Hz	0.040 Hz	0.080 Hz	0.100 Hz	0.125 Hz	0.160 Hz	0.200 Hz	0.250 Hz
1	测量重复性 (dB)	u_1	0.120	0.098	0.073	0.068	0.072	0.058	0.052	0.081	0.101	0.100
2	参考传感器的声压灵敏度级 (dB)	u_2	0.300	0.250	0.250	0.250	0.250	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150
3	参考传感器声压灵敏度级的温度修正 (dB)	u_3	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
4	参考传感器声压灵敏度级的气压修正 (dB)	u_4	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
5	参考传感器的供电 (如电容传感器的极化电压) (dB)	u_5	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
6	待测传感器和参考传感器的电压级之差 (dB)	u_6	0.090	0.090	0.090	0.090	0.090	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060
7	标准次声源内声压分布不均匀等其他分量 (dB)	u_7	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
8	数据修约误差 (dB)	u_8	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030
合成标准不确定度/dB		u_c	0.34	0.28	0.29	0.28	0.28	0.24	0.18	0.18	0.19	0.20
扩展不确定度 ($k=2$) /dB		U	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4

表 3.3 耦合腔比较法次声传感器声压灵敏度级校准的测量不确定度 (续)

序号	来源	符号	0.315 Hz	0.400 Hz	0.500 Hz	0.630 Hz	0.800 Hz	1.000 Hz	1.250 Hz	1.600 Hz	2.000 Hz	2.500 Hz
1	测量重复性 (dB)	u_1	0.061	0.087	0.070	0.057	0.048	0.043	0.041	0.035	0.032	0.028
2	参考传感器的声压灵敏度级 (dB)	u_2	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.100	0.100
3	参考传感器声压灵敏度级的温度修正 (dB)	u_3	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
4	参考传感器声压灵敏度级的气压修正 (dB)	u_4	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
5	参考传感器的供电 (如电容传感器的极化电压) (dB)	u_5	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
6	待测传感器和参考传感器的电压级之差 (dB)	u_6	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.030	0.030
7	标准次声源内声压分布不均匀等其他分量 (dB)	u_7	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
8	数据修约误差 (dB)	u_8	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030
合成标准不确定度/dB		u_c	0.19	0.18	0.19	0.18	0.18	0.18	0.17	0.17	0.13	0.12
扩展不确定度 ($k=2$) /dB		U	0.4	0.3	0.3							

表 3.3 耦合腔比较法次声传感器声压灵敏度级校准的测量不确定度 (续)

序号	来源	符号	3.150 Hz	4.000 Hz	5.000 Hz	6.300 Hz	8.000 Hz	10.000 Hz	12.500 Hz	16.000 Hz	20.00 Hz
1	测量重复性 (dB)	u_1	0.026	0.025	0.023	0.022	0.021	0.019	0.017	0.016	0.015
2	参考传感器的声压灵敏度级 (dB)	u_2	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
3	参考传感器声压灵敏度级的温度修正 (dB)	u_3	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
4	参考传感器声压灵敏度级的气压修正 (dB)	u_4	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
5	参考传感器的供电 (如电容传声器的极化电压) (dB)	u_5	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
6	待测传感器和参考传感器的电压级之差 (dB)	u_6	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030
7	标准次声源内声压分布不均匀等其他分量 (dB)	u_7	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
8	数据修约误差 (dB)	u_8	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030
合成标准不确定度/dB		u_C	0.12	0.11							
扩展不确定度 ($k=2$) /dB		U	0.3								

4、其他验证材料

4.1 耦合腔互易法校准 LS2 型传声器频率下限拓展的国际比对(CCAUV.A-K6)

The CCAUV.A-K6 is a Key comparison realised under the auspices of the CIPM CCAUV.

The standards circulated among the laboratories were two LS2P microphones of the type Brüel & Kjær 4180. The microphones had to be calibrated in the scope given in Table 1 using a primary method under pressure conditions.

Table 1. Scope of key comparison.

Frequency range	Sensitivity level	Sensitivity phase
2 Hz - 20 Hz (1/3-octave)	Optional	Optional
20 Hz – 25 kHz (1/3-octave)	Mandatory	Optional

Thirteen national measurement institutes took part and the LNE (France) piloted the project. The participants are listed in Table 2. The measurements took place between March 2019 and December 2020. Two LS2P microphones were circulated. This report includes the measurement results from the participants, information about their calibration methods, and the analysis leading to the assignment of the Key Comparison Reference Values (KCRV) and Degrees of Equivalence (DoE).

Table 7. Expanded uncertainties in dB using a coverage factor of k=2 for the pressure sensitivity level of the microphone 4180 2124385, as declared by the participant laboratories.

Frequency (Hz)	LNE	HBK-DPLA	METAS	KRISS	NMIJ	GUM	UME	NMIA	CENAM	NRC	VNIFTRI	NMISA	INMETRO
1.995	0.145	0.100	0.116	0.40	0.62	0.20	0.20	0.40	0.23	0.76	0.07	0.200	0.200
2.512	0.115	0.090	0.105	0.30	0.48	0.20	0.19	0.40	0.20	0.54	0.06	0.150	0.170
3.162	0.095	0.090	0.097	0.30	0.38	0.20	0.19	0.35	0.18	0.38	0.06	0.150	0.150
3.981	0.075	0.080	0.090	0.20	0.35	0.14	0.18	0.30	0.16	0.28	0.06	0.150	0.130
5.012	0.060	0.080	0.086	0.15	0.19	0.14	0.11	0.30	0.14	0.22	0.06	0.080	0.130
6.310	0.055	0.080	0.081	0.10	0.15	0.14	0.11	0.30	0.13	0.16	0.06	0.080	0.090
7.943	0.045	0.080	0.077	0.10	0.14	0.11	0.11	0.25	0.12	0.12	0.06	0.080	0.080
10.000	0.040	0.075	0.073	0.10	0.08	0.11	0.11	0.25	0.12	0.08	0.06	0.080	0.060
12.589	0.040	0.070	0.069	0.10	0.08	0.11	0.11	0.20	0.11	0.06	0.06	0.080	0.060
15.849	0.035	0.065	0.065	0.10	0.07	0.08	0.08	0.18	0.09	0.06	0.06	0.050	0.050
19.953	0.035	0.060	0.061	0.08	0.07	0.05	0.07	0.10	0.09	0.05	0.06	0.050	0.050
25.119	0.035	0.055	0.058	0.08	0.06	0.04	0.06	0.10	0.08	0.04	0.06	0.050	0.045
31.623	0.035	0.050	0.055	0.08	0.05	0.04	0.05	0.08	0.07	0.04	0.06	0.050	0.045
39.811	0.035	0.045	0.053	0.06	0.04	0.04	0.04	0.08	0.07	0.03	0.06	0.050	0.045
50.119	0.035	0.040	0.054	0.05	0.04	0.04	0.04	0.08	0.07	0.03	0.06	0.030	0.045
63.096	0.035	0.035	0.049	0.05	0.04	0.03	0.03	0.06	0.05	0.03	0.06	0.030	0.045
79.433	0.035	0.035	0.047	0.05	0.04	0.03	0.03	0.06	0.05	0.03	0.06	0.030	0.045
100.00	0.035	0.030	0.046	0.05	0.04	0.03	0.03	0.06	0.05	0.03	0.06	0.030	0.045
125.89	0.035	0.030	0.045	0.05	0.04	0.03	0.03	0.04	0.05	0.03	0.06	0.030	0.045
158.49	0.035	0.025	0.045	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.05	0.03	0.06	0.030	0.045
199.53	0.035	0.025	0.043	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.05	0.03	0.06	0.030	0.045
251.19	0.035	0.025	0.043	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.05	0.03	0.06	0.030	0.045
316.23	0.035	0.020	0.042	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.05	0.03	0.06	0.030	0.045
398.11	0.035	0.020	0.042	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.05	0.03	0.06	0.030	0.045
501.19	0.035	0.020	0.042	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.05	0.03	0.06	0.030	0.045
630.96	0.035	0.020	0.041	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.05	0.03	0.06	0.030	0.045
794.33	0.035	0.020	0.041	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.05	0.03	0.06	0.030	0.045
1000.0	0.035	0.015	0.041	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.05	0.03	0.06	0.030	0.045
1258.9	0.035	0.015	0.041	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.05	0.03	0.06	0.030	0.045
1584.9	0.035	0.015	0.041	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.05	0.03	0.06	0.030	0.045
1995.3	0.035	0.015	0.040	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.05	0.03	0.06	0.030	0.045
2511.9	0.035	0.015	0.040	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.05	0.03	0.06	0.030	0.045
3162.3	0.035	0.015	0.040	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.05	0.03	0.06	0.030	0.045
3981.1	0.035	0.015	0.039	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.06	0.03	0.06	0.030	0.045
5011.9	0.035	0.015	0.039	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.06	0.03	0.06	0.030	0.045
6309.6	0.035	0.015	0.039	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.06	0.03	0.06	0.030	0.045
7943.3	0.040	0.015	0.041	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04	0.06	0.03	0.06	0.040	0.045*
10000	0.040	0.015	0.047	0.05	0.04	0.06	0.05	0.05	0.09	0.03	0.07	0.040	0.045*
12589	0.045*	0.015	0.060	0.06	0.04	0.08	0.08	0.08	0.10	0.04	0.09	0.040	0.045*
15849	0.055*	0.025	0.090	0.07	0.05	0.08	0.08	0.08	0.13	0.06	0.13	0.060	0.050*
19953	0.080	0.050	0.154	0.12	0.12	0.12	0.12	0.10	0.19	0.10	0.21	0.100	0.090
25119	0.145	0.070	0.414	0.25	0.21	0.24	0.20	0.15	0.40	0.37	0.5	0.150	0.160

4.2 高频自由场互易法相关项目验收意见

验 收 意 见

2015年6月30日受国家质量监督检验检疫总局科技司委托,中国计量科学研究院主持召开了量值传递与质量安全项目“高速气流场及高频率条件下的传声器校准研究(22-ALC1203)”验收会议。验收专家组听取了项目研究总结汇报、测试报告等,审议了项目组提交的技术文件,现场审查了证明材料,并进行了质询。经充分讨论,形成验收意见如下:

- 1、项目组提交的验收材料齐全,符合验收要求。
- 2、本项目建立了低背景噪声、低湍流度、速度不低于80 m/s高速气流场环境,开展了鼻锥传声器灵敏度的校准研究,在500 Hz~4 kHz频率范围内,传声器声场灵敏度级的测量不确定度不超过4.0 dB ($k=2$);
- 3、本项目开展了WS3传声器自由场互易校准研究,在10 kHz~100 kHz频率范围内,传声器声场灵敏度级的测量不确定度不超过0.6 dB ($k=2$);
- 4、本项目开展了基于耦合腔法的传声器相位校准研究,在50 Hz~6.3 kHz频率范围内,相位差测量不确定度不超过 0.8° ($k=2$);
- 5、本项目的完成,使得我国自由场传声器灵敏度级校准的频率扩展到100 kHz,开展的传声器间的相位差的校准和高速气流场下传声器灵敏度级校准的研究,可为国内相关单位提供相应的校准服务,具有显著的社会效益。

该项目完成了任务书中规定的各项任务,实际完成的技术指标优于考核指标要求。项目经费使用规范、合理。

验收专家组一致同意通过该项目验收。

验收组组长:

锦捷

2015年6月30日

4.3 次声传感器校准装置相关项目验收意见

国家市场监督管理总局科技计划项目验收意见

2020年12月17日，市场监管总局科技和财务司在中国计量科学研究院昌平院区17号楼3005会议室组织专家对中国计量科学研究院承担的国家市场监督管理总局科技计划项目“甚低频次声传感器校准方法研究”（项目编号：2019MK109）进行了验收，验收专家组听取了项目组的汇报，查阅了项目组提供的验收材料，并经过质询，提出如下验收意见：

1、项目组提交的验收材料齐全，符合验收要求。

2、项目完成的研究内容和实现的技术指标如下：

(1) 通过优化激光活塞式标准次声源的缸塞结构，工作频率下限拓展至0.01 Hz，实现次声传感器绝对法校准的测量不确定度为0.6 dB ($k=2$)；1 Hz~20 Hz 范围 1/3 倍频程中心频率的最大声压级可达 174 dB，总谐波失真小于 5%；

(2) 采用动圈式换能器、薄膜密封的活塞结构建立了比较法校准用标准次声源，校准频率范围 0.01 Hz~20 Hz，测量不确定度 0.6 dB ($k=2$)；0.1 Hz~20 Hz 范围 1/3 倍频程中心频率的最大声压级可达 140 dB，总谐波失真小于 1%。

3、项目发表文章 1 篇，申请实用新型专利 1 项，完成《次声传感器校准规范（耦合腔比较法）》报批稿 1 项。

项目完成了任务书中规定的各项任务和考核指标，项目成果具有良好的科学性和实用性。项目经费使用规范、合理。

验收专家组组长：

2020年12月17日

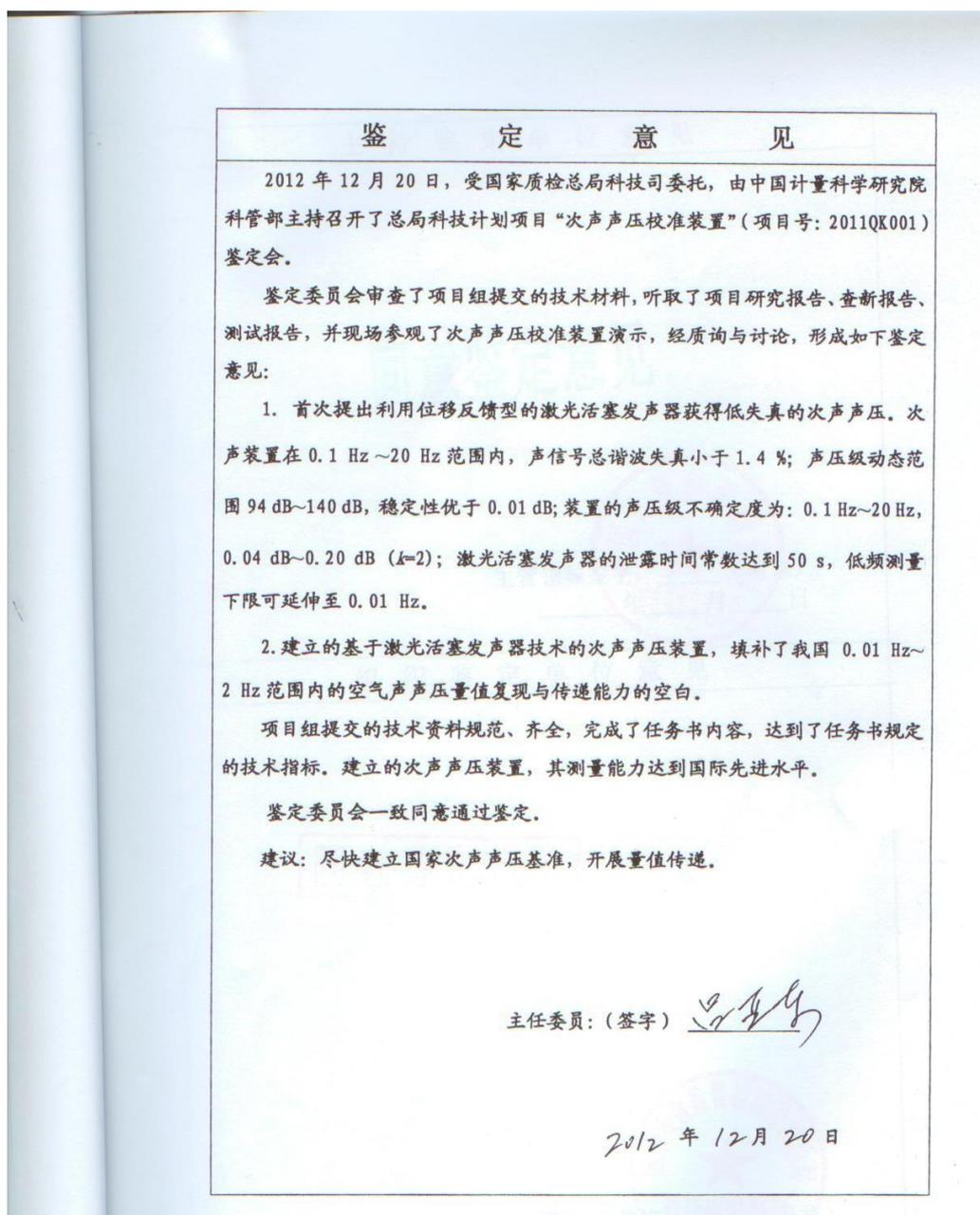
验收结论建议：（请在选定□中打“√”号）

通过验收

不通过验收

注：验收专家组其他专家签字表需要另附。

4.4 激光活塞发声器法声压基准相关项目



中国计量科学研究院在研相关的科研项目如下,旨在完善激光活塞发声器次声传感器校准装置,拓展其校准频率范围下限及校准声压级的动态范围,研究成果可支撑本检定系统表对空气声声压基准低频拓展的修订:

(1) 国家自然科学基金面上项目“甚低频活塞发声器机理及次声传感器校准技术研究”,执行周期:2021.1~2024.12;

(2) 中国计量科学研究院重点领域项目“0.001 Hz~2 Hz 次声传感器原级校准关键技术研究”,执行周期:2023.1~2025.12。

5、结论

本次检定系统表的修订填补了 2 Hz 以下次声频段空气声声压量值传递体系的空白，同步拓展了空气超声频段声压量值传递的频率范围，满足次声监测、空气耦合超声无损检测等新应用需求的量值溯源需求。

结合国际比对及起草单位的已有研究基础，本实验报告给出的实验装置、实验结果及不确定度分析可验证本次检定系统表修订内容的可行性，不确定度指标合理。