

《次声传感器校准规范（激光活塞发声器法）》

（征求意见稿）

实验验证报告

《次声传感器校准规范（激光活塞发声器法）》

编制工作组

2025.11.04

目 录

1、基本情况	1
1.1 实验条件	1
1.2 实验方法	1
1.3 实验用标准器和配套设备	1
1.4 实验用样机	1
2、实验数据及分析	2
2.1 278 型微气压计	2
2.2 4193-L-004 型工作标准传声器单元	3
2.3 4160/2673 型实验室标准传声器单元	4
2.3 激光活塞发声器法与耦合腔互易法的比较验证	5
2.4 激光活塞发声器法与耦合腔比较法的比较验证	6
3 结论	7

《次声传感器校准规范（激光活塞法）》

实验验证报告

1、基本情况

1.1 实验条件

实验时间：2025 年 8 月 10 日~2025 年 9 月 15 日

实验地点：中国计量科学研究院昌平院区 17 号楼

环境参数：空气温度（22~25）℃

相对湿度（30~65）%

静压（99.0~100.9）kPa

1.2 实验方法

本实验采用《次声传感器校准规范（激光活塞发声器法）》（征求意见稿）中描述的方法。

1.3 实验用标准器和配套设备

本实验使用的标准器和配套设备如下：

- a) 振动台激励、间隙密封式次声活塞发声器系统（浙江大学）
- b) 动圈扬声器激励、薄膜密封式次声活塞发声器系统（自研）
- c) OFV-552/OFV-5000 型激光测振仪（Polytec）
- d) 3160-A-042 型多通道声分析仪（B&K）
- e) 33220A 型信号发生器（Agilent）
- f) 370 型气压计（Setra）
- g) HM40/HMP113 型温湿度表（VAISALA）
- h) MT300 型数字压力计（YOKOGAWA）

1.4 实验用样机

选择如下三个不同型号、不同频率范围的次声传感器作为校准对象：

- a) 278 型微气压计（美国 Setra Systems，出厂编号 12266781）
- b) 4193-L-004 型工作标准传声器单元（丹麦 B&K 公司，出厂编号 3032657）
- c) 4160/2673 型实验室传声器/前置放大器（丹麦 B&K 公司，出厂编号 2652765/2621566）

2、实验数据及分析

本实验采用两套次声活塞发声器系统覆盖 $0.001\text{ Hz}\sim 20\text{ Hz}$ 的校准频率范围，如图 2.1 所示，其中 $0.01\text{ Hz}\sim 20\text{ Hz}$ 范围的实验数据由振动台激励、间隙密封式次声活塞发声器系统测得， $0.001\text{ Hz}\sim 0.01\text{ Hz}$ 范围的实验数据由动圈扬声器激励、薄膜密封式次声活塞发声器系统测得。

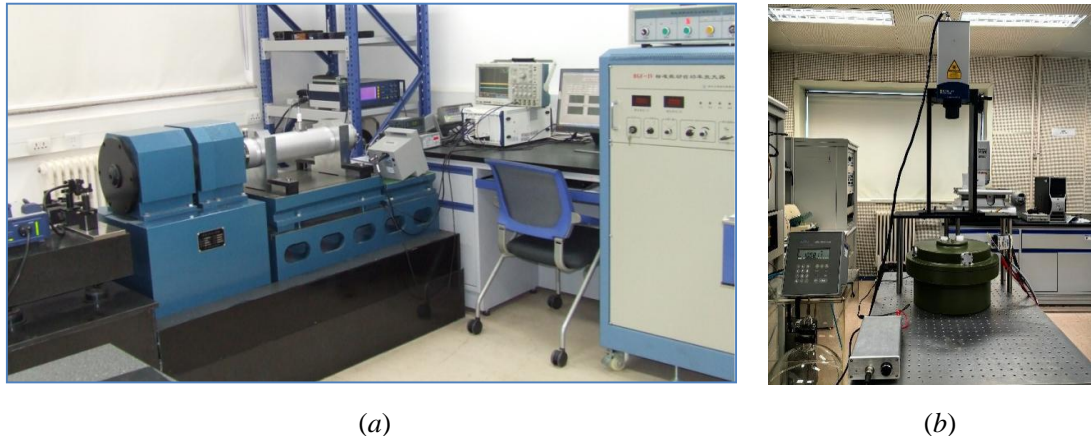


图 2.1 实验装置

(a) 振动台激励、间隙密封式活塞发声器 (b) 动圈扬声器激励、薄膜密封式活塞发声器

采用《次声传感器校准规范（激光活塞发声器法）》（征求意见稿）中描述的方法，在校准频率范围内，基于图 2.1 所示的实验装置开展次声传感器声压灵敏度级及其频率响应的校准实验，实验数据及结果分析如下。

2.1 278 型微气压计

根据《次声传感器校准规范（激光活塞发声器法）》（征求意见稿）中描述的方法 7.2.2 和 7.2.3，以 Setra 278 型微气压计为实验样机，在 $0.001\text{ Hz}\sim 20\text{ Hz}$ 范围校准其声压灵敏度级，实验结果如表 2.1 和图 2.2 所示。

表 2.1 Setra 278 型微气压计的声压灵敏度级校准结果

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

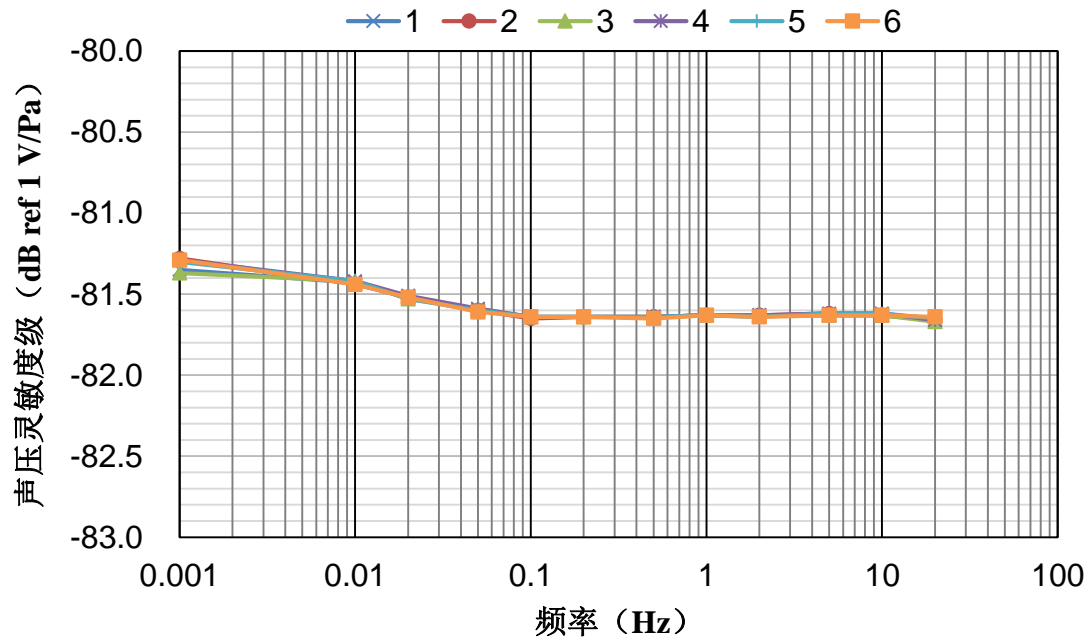


图 2.2 Setra 278 型微气压计的声压灵敏度级及其频率响应

2.2 4193-L-004 型工作标准传声器单元

根据《次声传感器校准规范（激光活塞发声器法）》（征求意见稿）中描述的方法 7.2.2 和 7.2.3，以 B&K 4193-L-004 型工作标准传声器单元为实验样机，在 0.1 Hz~20 Hz 范围校准其声压灵敏度级，实验结果如表 2.2 和图 2.3 所示。

表 2.2 B&K 4193-L-004 型工作标准传声器单元的声压灵敏度级校准结果

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		
0.100	-54.72	-54.72	-54.72	-54.72	-54.73	-54.72	-54.72	0.003
0.200	-53.52	-53.52	-53.52	-53.52	-53.52	-53.52	-53.52	0.003
0.400	-53.14	-53.14	-53.14	-53.14	-53.14	-53.13	-53.14	0.004
0.500	-53.13	-53.11	-53.10	-53.10	-53.10	-53.09	-53.10	0.013
0.800	-53.00	-53.00	-53.01	-53.00	-53.01	-53.00	-53.00	0.001
1.000	-52.99	-52.99	-52.99	-52.99	-52.99	-52.99	-52.99	0.001
1.250	-52.98	-52.98	-52.98	-52.98	-52.98	-52.98	-52.98	0.001
1.600	-52.97	-52.98	-52.97	-52.97	-52.97	-52.97	-52.97	0.002
2.000	-52.97	-52.97	-52.97	-52.97	-52.97	-52.97	-52.97	0.002
2.500	-52.97	-52.97	-52.97	-52.97	-52.97	-52.97	-52.97	0.001

3.150	-52.97	-52.97	-52.97	-52.97	-52.97	-52.97	-52.97	0.001
4.000	-52.98	-52.98	-52.98	-52.98	-52.98	-52.98	-52.98	0.000
5.000	-52.98	-52.98	-52.98	-52.98	-52.98	-52.98	-52.98	0.001
6.300	-52.99	-52.99	-52.99	-52.99	-52.99	-52.99	-52.99	0.001
8.000	-53.02	-53.01	-53.01	-53.00	-53.00	-53.00	-53.01	0.008
10.000	-53.00	-53.00	-53.00	-53.00	-53.00	-53.00	-53.00	0.002
12.500	-53.01	-53.01	-53.01	-53.01	-53.01	-53.01	-53.01	0.001
16.000	-53.02	-53.02	-53.02	-53.02	-53.02	-53.02	-53.02	0.002
20.000	-53.00	-53.00	-53.00	-53.01	-53.01	-53.01	-53.00	0.003

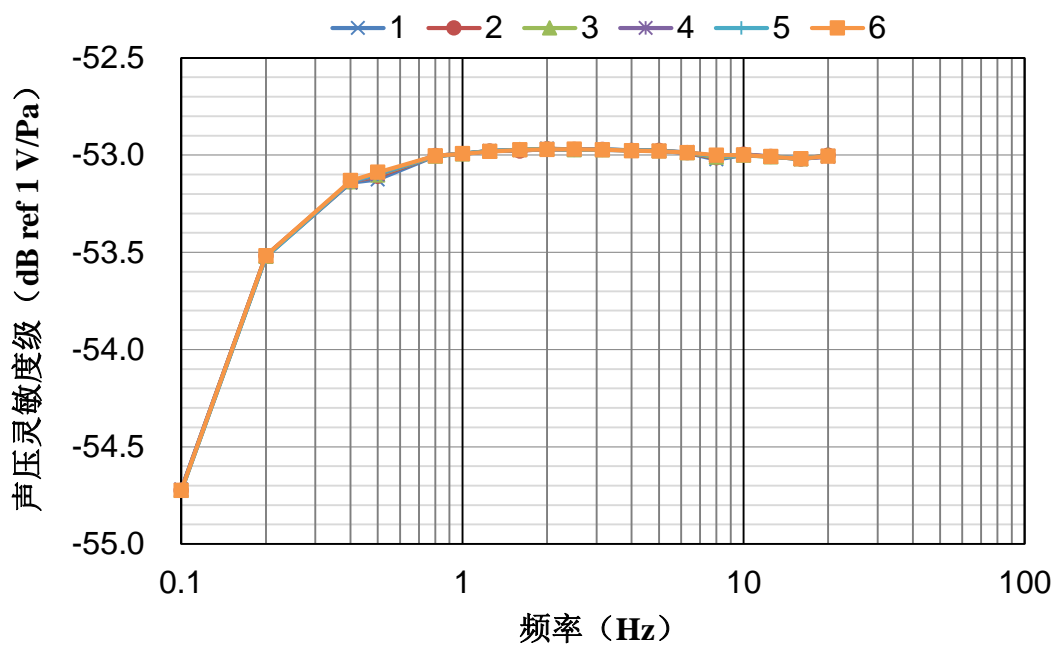


图 2.3 B&K 4193-L-004 型工作标准传声器单元的声压灵敏度级及其频率响应

2.3 4160/2673 型实验室标准传声器单元

根据《次声传感器校准规范（激光活塞发声器法）》（征求意见稿）中描述的方法 7.2.2 和 7.2.3，以 B&K 4160/2673 型工作标准传声器单元为实验样机，在 2 Hz～20 Hz 范围校准其声压灵敏度级，实验结果如表 2.3 和图 2.4 所示。

表 2.3 B&K 4160/2673 型实验室标准传声器单元的声压灵敏度级校准结果

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		
2.000	-26.19	-26.20	-26.20	-26.20	-26.20	-26.20	-26.20	0.003
2.500	-26.31	-26.31	-26.31	-26.31	-26.31	-26.31	-26.31	0.003
3.150	-26.43	-26.43	-26.42	-26.42	-26.42	-26.42	-26.42	0.002
4.000	-26.51	-26.51	-26.51	-26.51	-26.51	-26.51	-26.51	0.001
5.000	-26.59	-26.59	-26.59	-26.59	-26.59	-26.59	-26.59	0.001
6.300	-26.66	-26.66	-26.66	-26.66	-26.67	-26.66	-26.66	0.002

8.000	-26.74	-26.74	-26.74	-26.74	-26.74	-26.74	-26.74	0.002
10.000	-26.79	-26.78	-26.79	-26.79	-26.79	-26.79	-26.79	0.002
12.500	-26.83	-26.83	-26.83	-26.83	-26.83	-26.83	-26.83	0.001
16.000	-26.85	-26.82	-26.83	-26.85	-26.85	-26.85	-26.84	0.015
20.000	-26.90	-26.89	-26.89	-26.88	-26.87	-26.87	-26.88	0.013

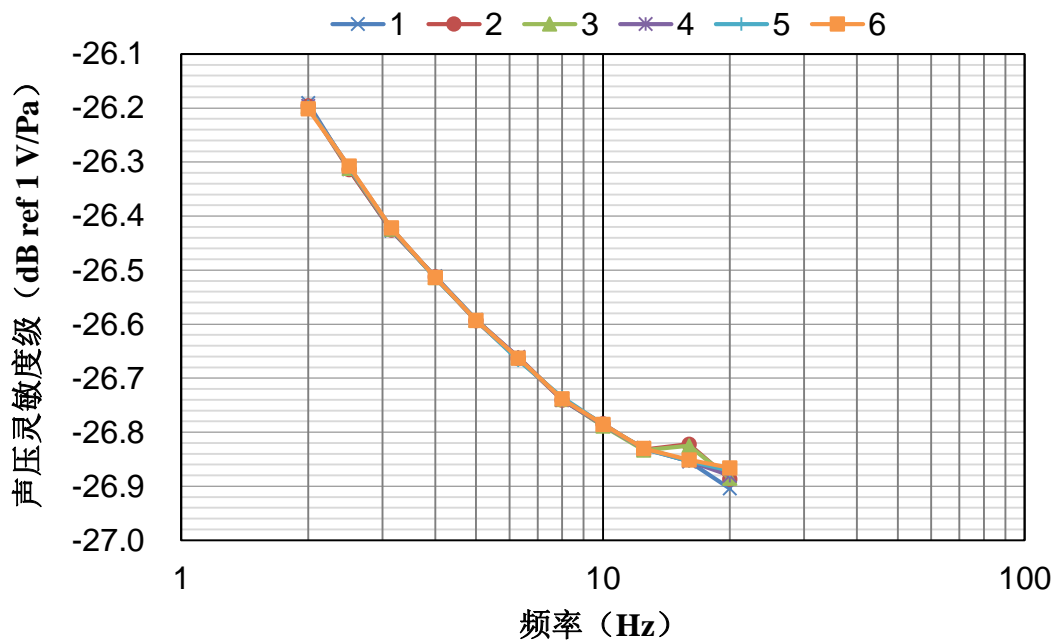


图 2.4 B&K 4160/2673 型实验室标准传声器单元的声压灵敏度级及其频率响应

2.3 激光活塞发声器法与耦合腔互易法的比较验证

以 B&K 4160/2673 型实验室标准传声器单元为实验样机，激光活塞发声器法与耦合腔互易法校准结果的比对验证如表 2.4 和图 2.5 所示。

表 2.4 耦合腔互易法与激光活塞发声器法的比较验证

频率 (Hz)	耦合腔互易法		激光活塞发声器法		$ E_n $ 值
	声压灵敏度级 (dB ref 1 V)	测量不确定度 ($k=2$) (dB)	声压灵敏度级 (dB ref 1 V)	测量不确定度 ($k=2$) (dB)	
2.00	-26.33	0.20	-26.20	0.14	0.52
2.50	-26.41	0.20	-26.31	0.14	0.39
3.15	-26.49	0.20	-26.42	0.14	0.28
4.00	-26.56	0.20	-26.51	0.14	0.22
5.00	-26.63	0.20	-26.59	0.14	0.17
6.30	-26.70	0.20	-26.66	0.14	0.17
8.00	-26.76	0.20	-26.74	0.14	0.09
10.00	-26.81	0.20	-26.79	0.14	0.10
12.50	-26.86	0.05	-26.83	0.14	0.18
16.00	-26.88	0.05	-26.84	0.14	0.29

20.00	-26.92	0.05	-26.88	0.14	0.30
-------	--------	------	--------	------	------

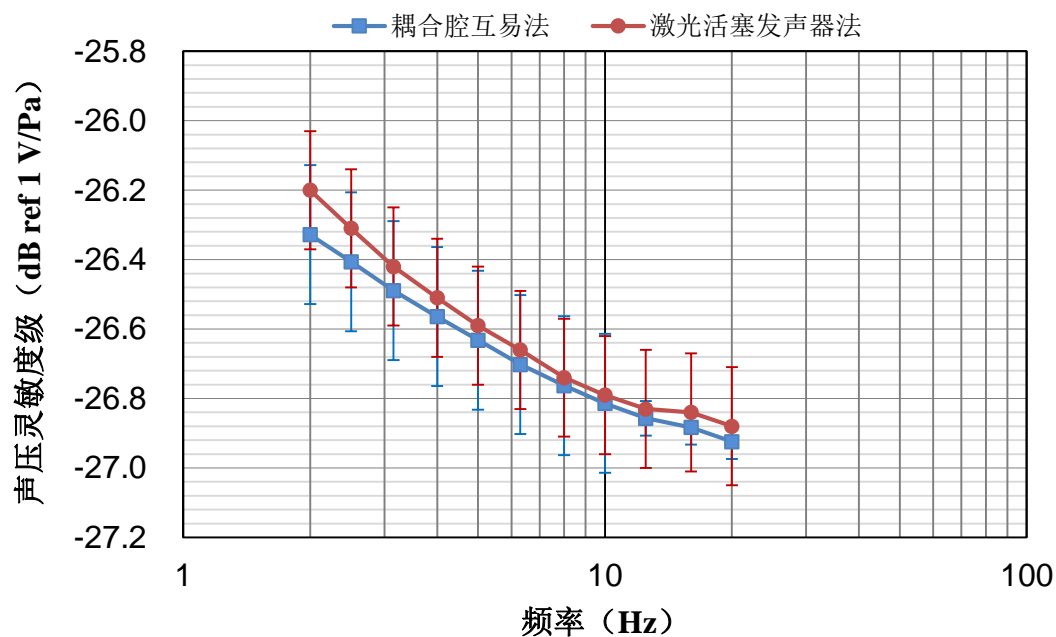


图 2.5 耦合腔互易法与激光活塞发声器法的比较验证

2.4 激光活塞发声器法与耦合腔比较法的比较验证

以 Setra 278 型微气压计为实验样机，采用间隙密封和薄膜密封的激光活塞发声器法与耦合腔比较法的比较验证如表 2.5 和图 2.6 所示，其中，耦合腔比较法以 MT300 型数字压力计为参考，考虑其动态响应特性，校准频率范围为 0.001 Hz~0.025 Hz。

表 2.5 激光活塞发声器法与耦合腔比较法的比较验证

频率 (Hz)	声压灵敏度级 (dB ref 1 V)			声压灵敏度级的测量不确定度 (k=2) (dB)		
	间隙密封 激光活塞	薄膜密封 激光活塞	耦合腔 比较法	间隙密封 激光活塞	薄膜密封 激光活塞	耦合腔 比较法
0.001	/	-81.35	-81.86	/	0.56	0.7
0.002	/	-81.57	-81.46	/	0.56	0.6
0.003	/	-81.68	-81.55	/	0.56	0.6
0.005	/	-81.56	-81.62	/	0.56	0.6
0.010	-81.43	-81.53	-81.56	0.44	0.44	0.6
0.025	-81.52	-81.54	-81.46	0.44	0.44	0.5
0.050	-81.60	-81.55	/	0.44	0.44	/
0.100	-81.64	-81.58	/	0.26	0.26	/
0.125	-81.64	-81.60	/	0.26	0.26	/
0.160	-81.64	-81.58	/	0.26	0.26	/
0.200	-81.64	-81.61	/	0.26	0.26	/

0.250	-81.65	-81.61	/	0.26	0.26	/
0.315	-81.66	-81.63	/	0.26	0.26	/
0.400	-81.64	-81.64	/	0.26	0.26	/
0.500	-81.64	-81.66	/	0.26	0.26	/
0.630	-81.63	-81.64	/	0.26	0.26	/
0.800	-81.64	-81.65	/	0.26	0.26	/
1.000	-81.63	-81.64	/	0.26	0.26	/
1.250	-81.63	-81.64	/	0.26	0.26	/
1.600	-81.63	-81.65	/	0.26	0.26	/
2.000	-81.63	-81.65	/	0.14	0.14	/
2.500	-81.62	-81.63	/	0.14	0.14	/
3.150	-81.63	-81.63	/	0.14	0.14	/
4.000	-81.63	-81.61	/	0.14	0.14	/
5.000	-81.62	-81.62	/	0.14	0.14	/
6.300	-81.62	-81.61	/	0.14	0.14	/
8.000	-81.63	-81.57	/	0.14	0.14	/
10.000	-81.64	-81.59	/	0.14	0.14	/
12.500	-81.64	-81.56	/	0.14	0.14	/
16.000	-81.66	-81.61	/	0.14	0.14	/
20.000	-81.66	-81.53	/	0.14	0.14	/

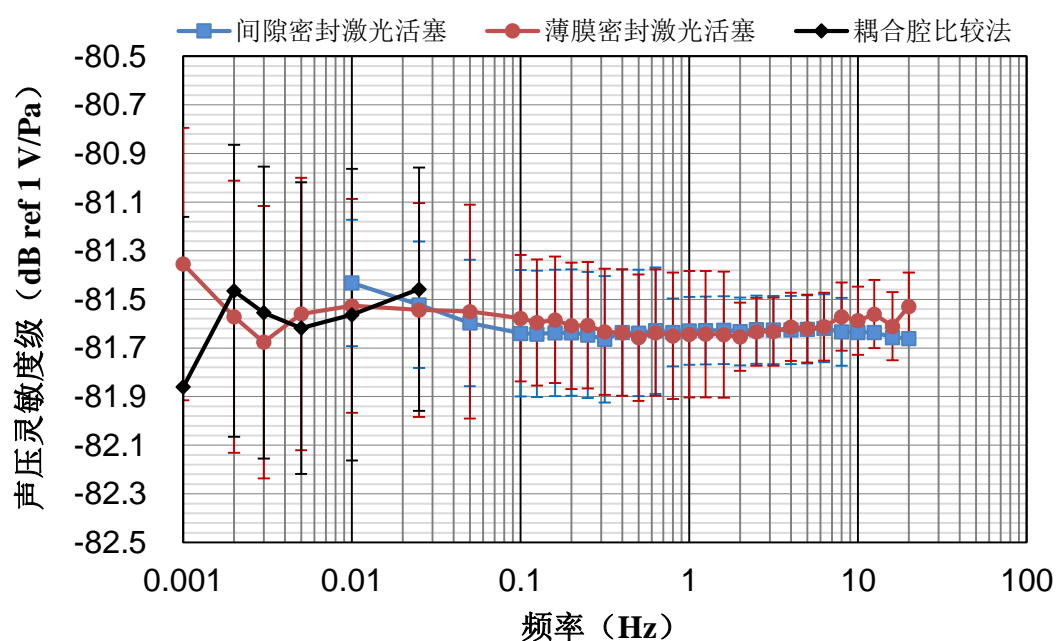


图 2.6 激光活塞发声器法与耦合腔比较法的比较验证

3 结论

根据各图表中的实验数据分析,可验证本规范设计的校准方法和要求的实验条件合理、可行,满足次声传感器计量性能绝对法/原级校准的要求。