

文章编号: 1000-8055(2010)09-2041-09

一种经济型测量传声器的改装、校准及应用

王 利, 王同庆

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 基于一种消费电子类的麦克风设计改装了一种经济型测量传声器, 并设计了校准实验装置对其进行校准. 对校准实验装置的可靠性进行了验证, 利用该装置对自制传声器的幅值、相位进行了校准, 将校准后的传声器安装在实验室的流管实验装置上进行测量, 并和 B & K (Bruel & Kjaer) 公司的 4938 型传声器同样条件下的测量结果进行比较, 对比结果显示自制传声器经过校准以后可以作为测量传声器应用.

关 键 词: 测量传声器; 噪声测量; 幅值校准; 相位校准; 流管实验装置

中图分类号: V211.1

文献标识码: A

Encapsulation, calibration and application of an economical measurement microphone

WANG Li, WANG Tong-qing

(School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: An economical measurement microphone was encapsulated using a consumptive microphone in this paper, and a calibration rig was designed and validated firstly, and then the amplitude and phase of the microphone was calibrated on this rig. The calibrated microphone was used as measurement microphone on the flow impedance test rig (FITR) in our laboratory, and the measured data were compared with data measured by Bruel & Kjaer (B & K) 4938 microphone. The comparison result shows that the microphone can be used as a measurement microphone when it is calibrated.

Key words: measurement microphone; noise measurement; amplitude calibration; phase calibration; flow impedance test rig

传声器是一种将声信号转换为声频电信号的换能器, 在航空声学、建筑声学、环境声学等诸多领域中广泛使用, 但由于销量小, 价格比较昂贵. 随着噪声控制工程的发展和测量技术的进步, 需要的传声器数量越来越多, 比如进行空间声场变换^[1], 进行声源定位^[2]等都需要数量较多、精度较高的传声器, 因此寻求一种既能够满足测量要求, 同时又成本低廉的测量传声器成为声学研究领域的迫切需求. 在航空声学中的流管实验研究领域, 需要大量的测量传声器组成的传声器阵列进行高

精度的测量^[3-6], 目前美国 National Aeronautics and Space Administration (NASA) 等国外研究机构使用最多的是 Bruel & Kjaer (B & K) 公司的测量传声器, 但该传声器的单通道测量成本达到人民币数十万元, 成本异常高昂; 即便使用相对便宜的国产传声器, 单通道测量成本也接近万元, 这大大限制了流管实验研究的进一步开展. Knowles 公司生产的 FG 系列麦克风^[7]具有成本低、体积小等优点, 目前主要应用于消费电子类产品中, 其频率响应线性度一般, 价格较低, 但具有稳定的性

收稿日期: 2009-08-22; 修订日期: 2009-11-17

作者简介: 王利(1982-), 男, 吉林白山人, 博士生, 主要从事气动声学实验研究.

能,如果能够进行精确计量,完全有可能应用于噪声测量. 本文介绍了将 Knowles 公司低成本的 FG23629-P16 型麦克风应用于声学测试领域开展的工作, 包括封装, 开发校准方法等, 使得低成本传声器大规模应用于噪声测量成为可能.

1 传声器封装设计

Knowles 公司生产的 FG 系列麦克风作为消费类电子产品, 不适于测量应用, 必须通过封装及增加供电电源以便于测量使用, 对 Knowles 公司的 FG23629-P16 型麦克风采用的供电电源如图 1, FG 系列麦克风及其封装外壳见图 2.

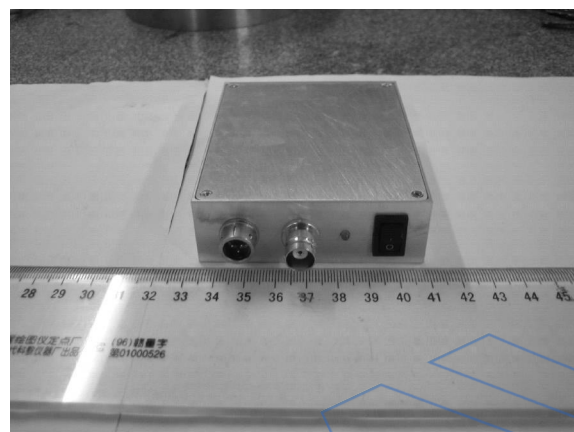


图 1 便携式传声器供电设备
Fig. 1 Portable power supply for microphone

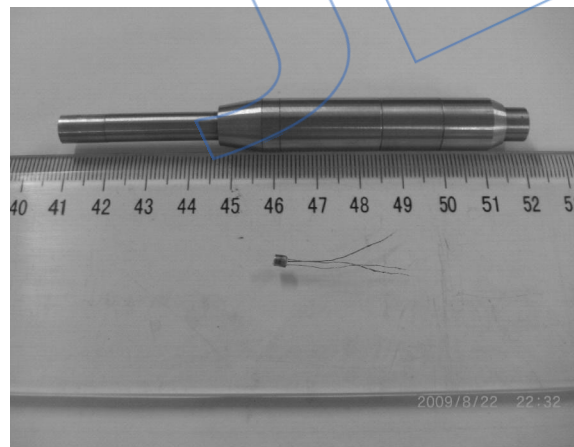


图 2 传声器外壳
Fig. 2 Shell of microphone

2 传声器的校准

厂家提供的传声器灵敏度为 (-33.0 ± 3) dB $(1\text{V}/\text{Pa}, 1\text{kHz})$, 对该传声器使用两种便携式标准声源(B&K 公司声压级校准器 4230 和 B&K

公司活塞式声源 4228) 进行了初步声计量, 得到的电信号见图 3 和图 4, 由图 3(B&K4230 产生 94dB, 1000Hz 标准声压) 计算得到的 1000Hz 频率的灵敏度为 -32dB , 与厂家提供灵敏度范围相符, 由图 4 看出, 使用 B&K4228(124dB, 250Hz) 校准时, 测得的信号严重削波失真, 说明该传声器的量程在 124dB 以下.

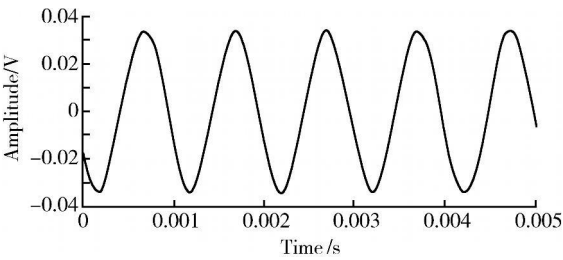


图 3 采用 B&K4230 型声源(94dB, 1000Hz)的校准结果

Fig. 3 Calibration result using B&K4230 (94dB, 1000Hz)

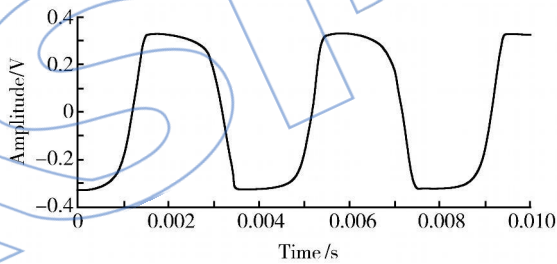


图 4 采用 B&K4228 型声源(124dB, 250Hz)的校准结果

Fig. 4 Calibration result using B&K4228 (124dB, 250Hz)

将该传声器与 B&K 公司 4938 型传声器分别置于同一声源条件下测量, 测得该传声器最高声压级大于 114 dB, 最低可测得的声压级小于 66dB.

2.1 校准原理

校准原理参照文献[8]进行, 将待校准的传声器齐平安装在一个直径较小的管道壁面, 管道一端安装喇叭作为声源, 另一端安装消声端, 当声源频率小于管道截止频率时管道内只有平面波, 此时根据两个齐平安装的标准传声器的测量结果计算端面反射系数及管内声场, 然后用待校准传声器位置处的声压与相应电压测量结果进行比对获得其灵敏度.

2.2 校准装置设计

根据传声器应用的频率范围校准装置需要提

供 10 000 Hz 以内的平面波. 在轴对称声源条件下, $f = 10\,000\text{ Hz}$, $c_0 = 343\text{ m/s}$ 时, 管内声波为平面波的最大管道半径^[9] $a \approx 20.9\text{ mm}$. 因此圆管直径为 40 mm 可以保证当声源频率小于 10 000 Hz 时管内声波为平面波.

使用 2 只 B & K 公司 4938 型传声器作为标准传声器, 用 B & K 公司的 Nexus2690 型放大器供电/放大和输出信号, 为了避开双传声器方法中的奇异点, 在校准装置上设计了 3 个安装标准传声器的孔, 以便满足不同频率要求.

目前使用的声源频率不超过 6 000 Hz. 标定器有 4 个横截面安装待校准的传声器, 每个截面可安装 8 支传声器, 见图 5.

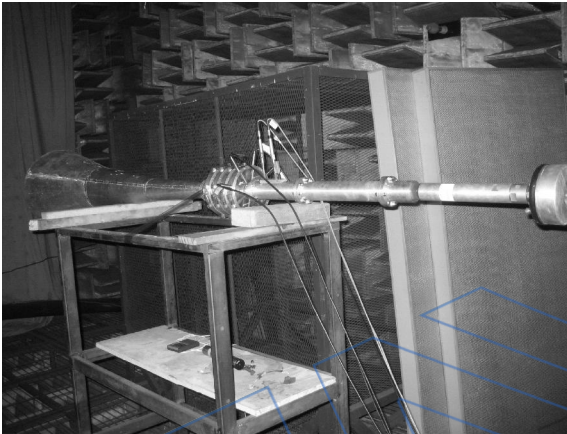


图 5 传声器校准实验装置

Fig. 5 Microphone calibration rig

在校准装置另一侧安装消声端是为了减小管口反射, 以便减小管内由于反射产生的驻波声压

起伏, 该消声端是依据参考文献[10]设计.

2.3 校准装置中的声场

参照文献[3]的公式(6)传感器的灵敏度为

$$\gamma_m = \frac{u_m}{p_m} = \frac{u_m}{p_i(e^{ikz_m} + re^{-ikz_m})} = \frac{u_m(e^{ikz_0} + re^{-ikz_0})}{p_0(e^{ikz_m} + re^{-ikz_m})}$$

其中 u_m 为待校准传感器的电压信号, p_0 为标准传感器的声压信号, 由上式看出灵敏度与 u_m , p_0 的测量值及 x 位置有关, 前者主要表现为不同时间的测量误差, 后者主要表现为空间误差. 为了得到相位, 使用了标准传声器作为参考传声器.

由于声源和管道声传播的频响不同, 因此相同激励电压不同频率条件下得到的声压不同, 利用标准传声器的测量结果计算待校准传声器位置处的声压级随频率的分布见图 6. 可以看到在 500 Hz 和 1 100 Hz 附近声压级明显大于其他频率, 均超过 115 dB, 为了不超过传声器的量程在这些频率需减小激励电压.

该校准装置的工作频率能够达到 10 000 Hz 的前提是该装置的声源为轴对称声源, 为此需要验证该实验装置内声场的对称性(包括幅值和相位), 为此在声源不变的条件下用同一支传声器分别在同一横截面的 8 个位置进行测量, 得到的结果见表 1 所示.

从表 1 中数据可以看到, 在声源不变的情况下, 管道壁面声压沿周向分布比较均匀, 说明满足声源轴对称的要求. 为了说明不同轴向位置校准结果的一致性, 下面列出了不同截面校准的结果.

表 1 同一横截面 8 个位置的声压测量结果

Table 1 Sound pressure at 8 positions in a plane

位置	1 000 Hz		2 000 Hz		3 000 Hz	
	幅值/ dB	相位/ rad	幅值/ dB	相位/ rad	幅值/ dB	相位/ rad
1	102.48	- 2.20	108.73	- 1.92	103.29	- 0.67
2	102.46	- 2.20	108.71	- 1.92	103.25	- 0.67
3	102.46	- 2.19	108.71	- 1.92	103.29	- 0.66
4	102.46	- 2.19	108.70	- 1.91	103.21	- 0.66
5	102.47	- 2.20	108.68	- 1.92	103.40	- 0.65
6	102.45	- 2.19	108.67	- 1.92	103.36	- 0.65
7	102.50	- 2.19	108.67	- 1.91	103.34	- 0.64
8	102.47	- 2.19	108.65	- 1.92	103.24	- 0.66
标准偏差	0.014 524	0.003 192	0.025 000	0.002 86	0.060 776	0.009 348

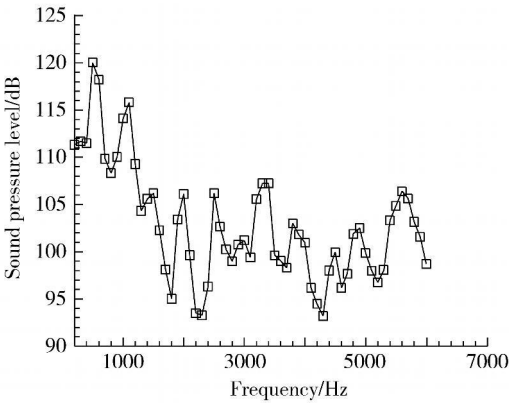


图 6 待校准传声器处声压级

Fig. 6 Sound pressure level of the position where microphone mounted

2.4 典型校准结果

在 200~ 3800Hz 频率范围内进行校准, 频率间隔为 100 Hz. 两样只标准传声器的间距为 15 mm, 4 只待校准的传声器分别安装在不同截面的校准装置上进行校准. 4 次校准实验的结果列于相同的图中进行比较, 见图 7~ 图 10.

图 11~ 图 14 是 4 只传声器分别在同一横截面的 4 个不同位置进行校准实验的结果.

从图中可以看到, 同一个传声器校准结果得到了满意的符合. 轴向位置校准的最大幅值偏差小于 0.3 dB, 相位偏差小于 0.02 rad. 周向位置校准的偏差更小, 幅值偏差小于 0.2 dB, 相位偏差小于 0.015 rad, 因为前者空间偏差较大, 后者很小.

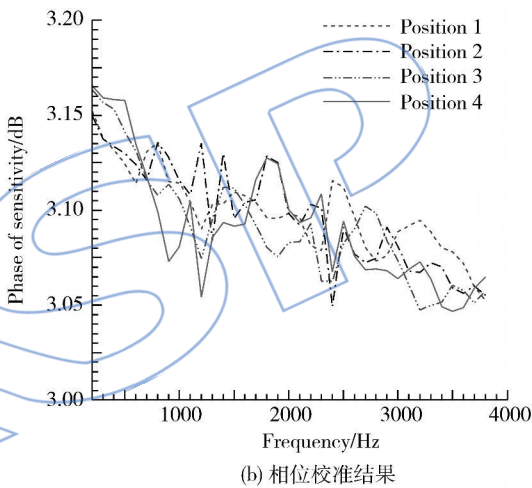
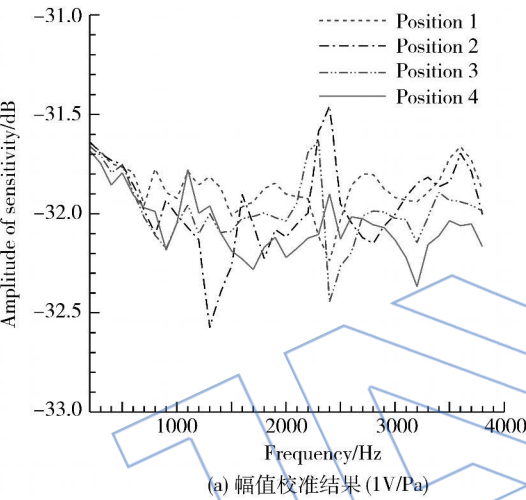


图 7 1 号传声器在不同轴向位置的校准结果

Fig. 7 Calibration result of No.1 microphone at different axial positions

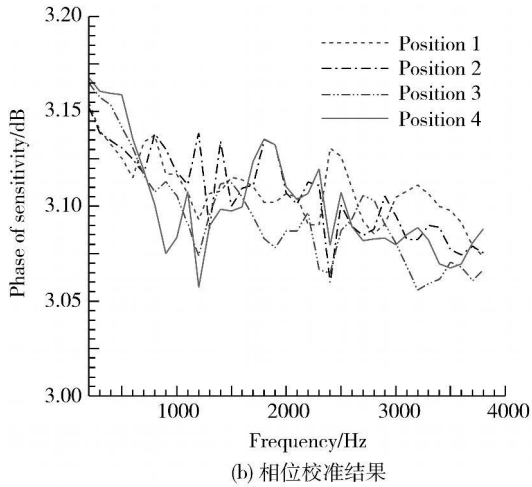
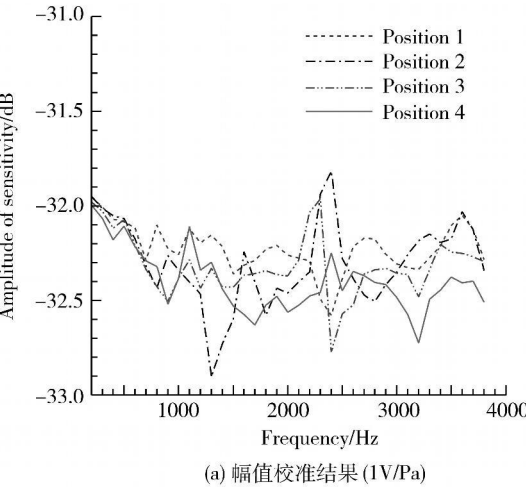


图 8 2 号传声器在不同轴向位置的校准结果

Fig. 8 Calibration result of No.2 microphone at different axial positions

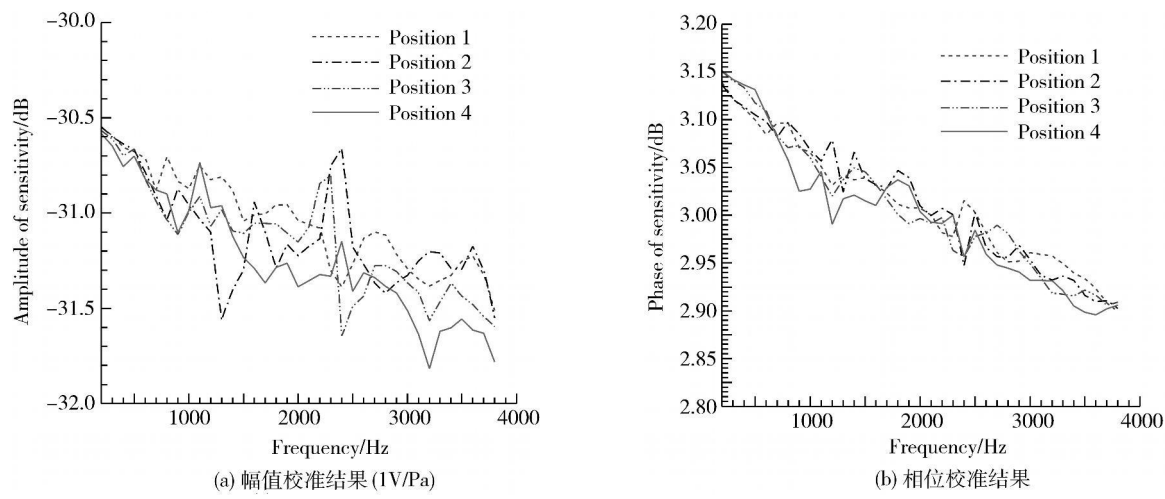


图 9 3 号传声器在不同轴向位置的校准结果

Fig. 9 Calibration result of No.3 microphone at different axial positions

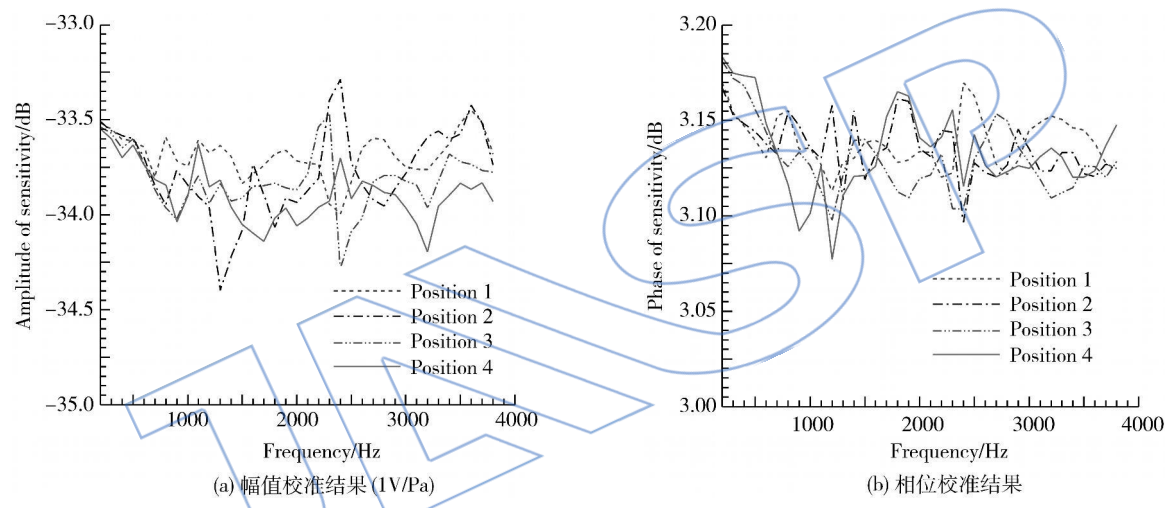


图 10 4 号传声器在不同轴向位置的校准结果

Fig. 10 Calibration result of No.4 microphone at different axial positions

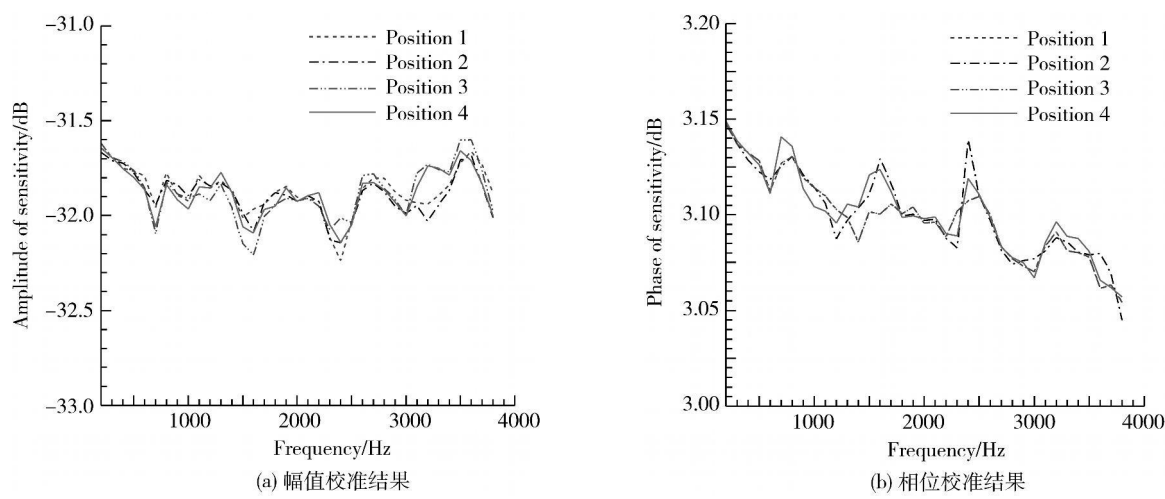


图 11 1 号传声器在不同周向位置的校准结果

Fig. 11 Calibration result of No.1 microphone at different circumferential positions

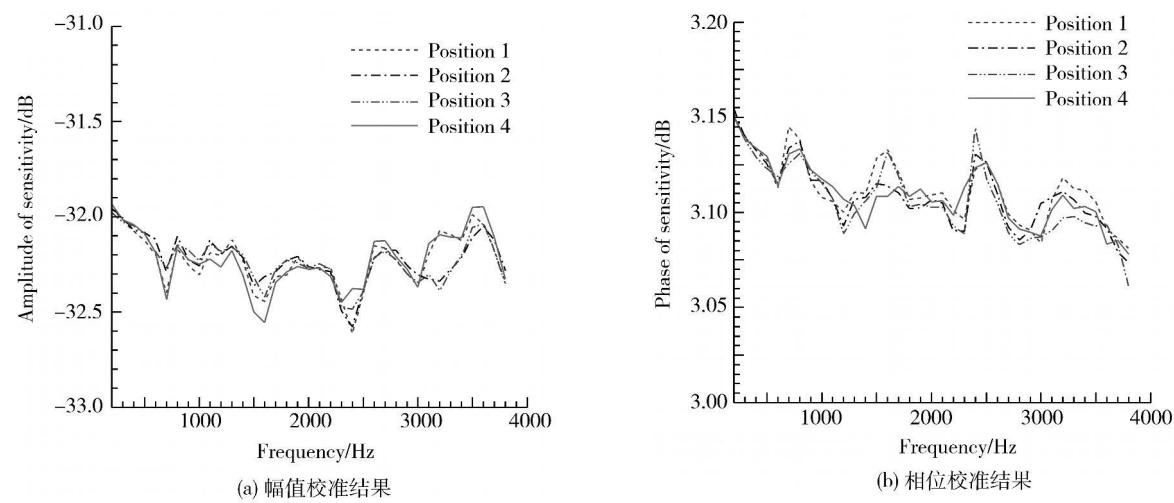


图 12 2 号传声器在不同周向位置的校准结果

Fig. 12 Calibration result of No.2 microphone at different circumferential positions

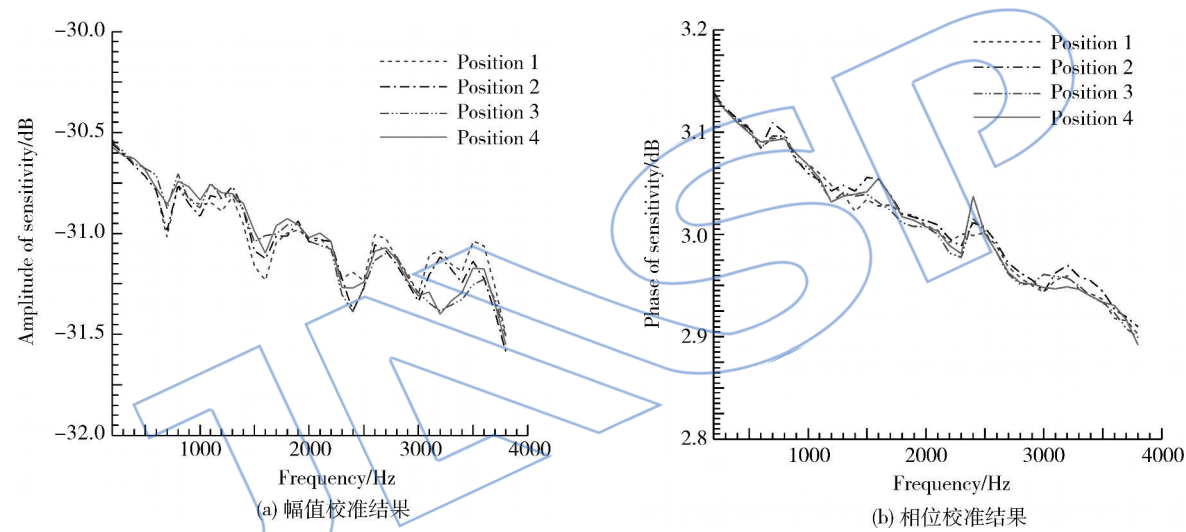


图 13 3 号传声器在不同周向位置的校准结果

Fig. 13 Calibration result of No.3 microphone at different circumferential positions

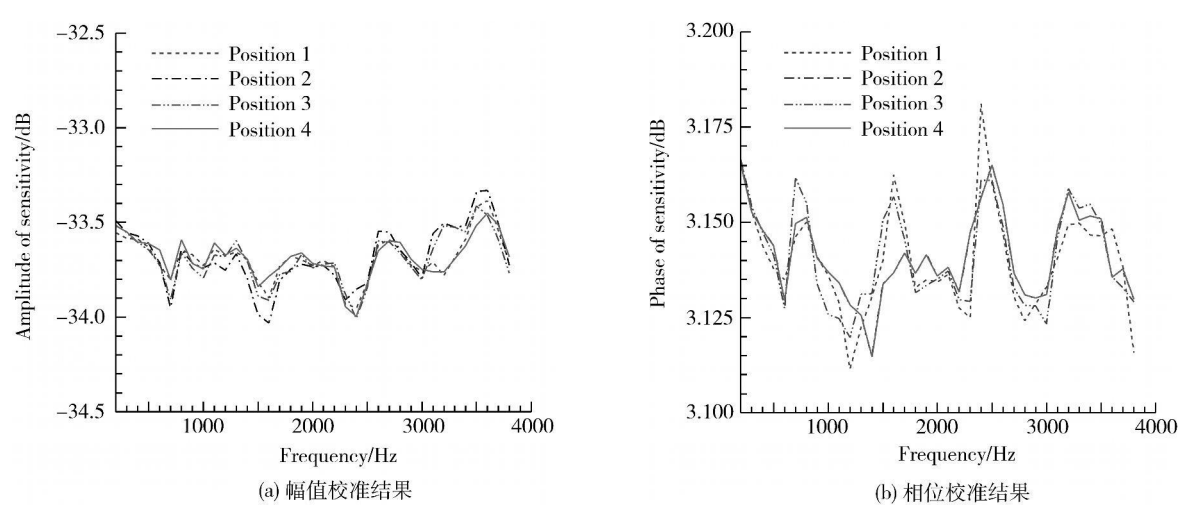


图 14 4 号传声器在不同周向位置的校准结果

Fig. 14 Calibration result of No.4 microphone at different circumferential positions

可以确定校准器的幅值精度不超过 0.3 dB, 相位精度不超过 0.02 rad.

从校准结果看这种传声器的频响并不是完全平直的, 需要修正, 修正后可以在校准精度范围内作为测量传声器使用.

3 测量结果验证

为了说明我们封装的传声器能够代替目前使用的测量传声器, 将经过校准的 4 只传声器安装在本实验室的流管实验装置^[11-12]上进行声测量, 测量完后再用 B & K 公司的 4938 型传声器在

同样位置, 同样声源条件下进行对比测量, 两次测量结果见图 15~ 图 18(图 15~ 图 18 中, Microphone X 为自制传声器测量结果, B & K X 为 B & K 公司 4938 型传声器测量结果).

从图中可以看到, 两者吻合很好, 表 2 给出了 4 只自制传声器的测量结果与 B & K 4938 型传声器测量结果对比得到的平均偏差, 从中可以看到, 4 只传声器中, 测量结果幅值的最大偏差小于 0.5 dB, 相位最大偏差小于 0.06rad, 均在可以接受的误差范围内, 表明该传声器可以作为测量传声器应用.

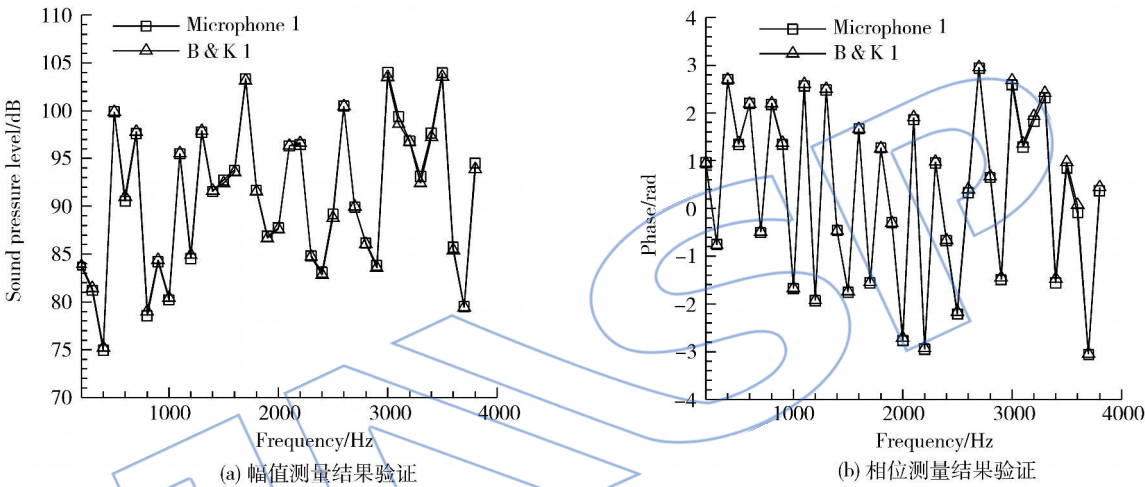


图 15 1 号传声器测量结果验证
Fig. 15 Sound pressure validation of No. 1 microphone

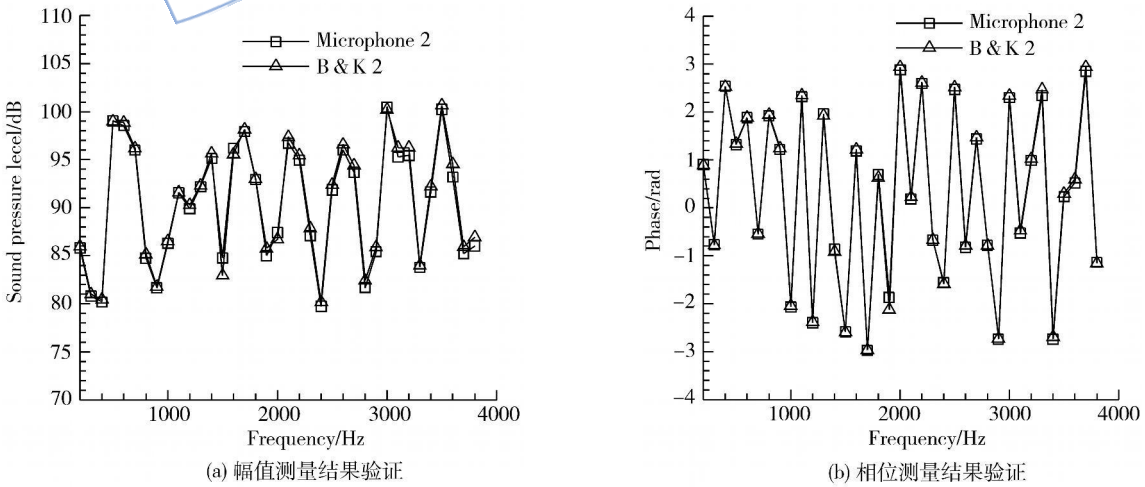


图 16 2 号传声器测量结果验证
Fig. 16 Sound pressure validation of No. 2 microphone

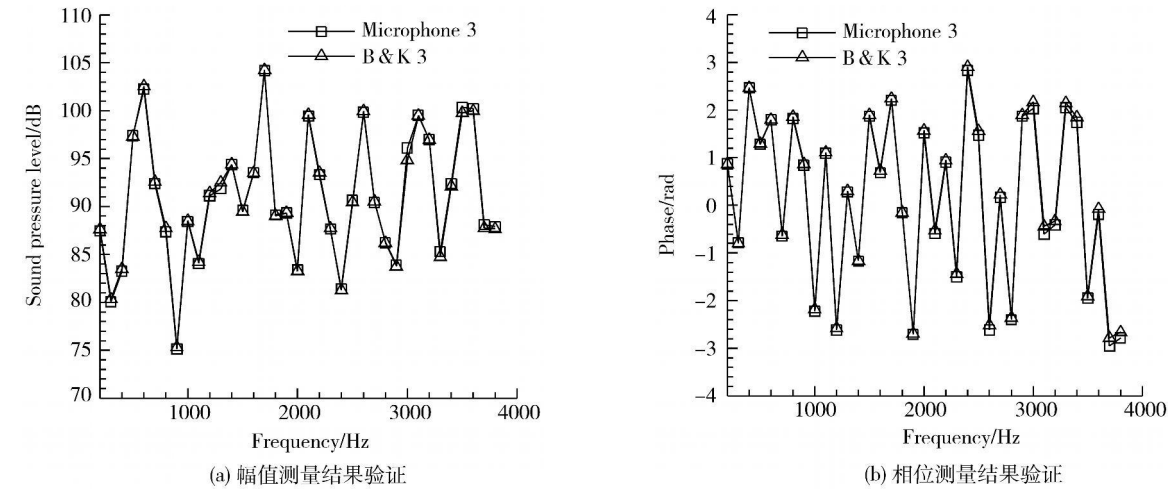


图 17 3 号传声器测量结果验证

Fig. 17 Sound pressure validation of No. 3 microphone

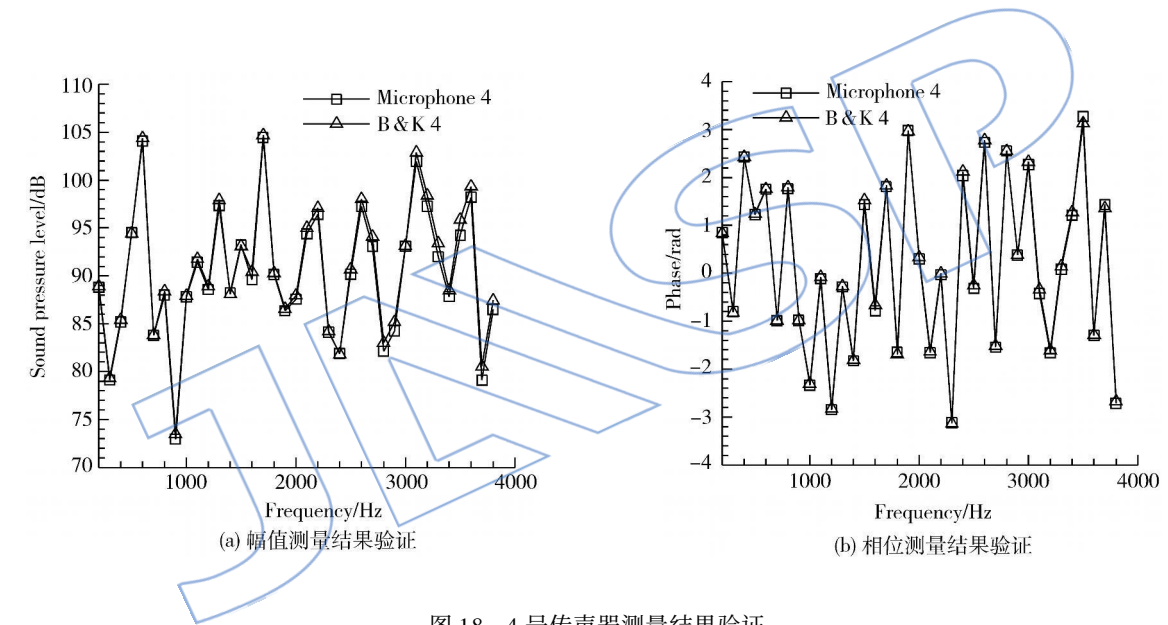


图 18 4 号传声器测量结果验证

Fig. 18 Sound pressure validation of No. 4 microphone

4 结 论

- 1) 校准实验装置性能可靠, 声压周向及轴向均匀性良好, 可以有效地进行校准.
- 2) 目前封装的传声器的最大量程在 114 dB 左右, 校准试验装置声源频率限制在 200~ 3 800 Hz; 校准装置的幅值误差 0. 3 dB, 相位误差 0. 02 rad.
- 3) 封装后的经济型测量传声器经过校准以后可用于测试研究. 尽管频响曲线可能没有传统测量传声器平直, 但是传统测量传感器只进行了单频幅值校准, 不进行多频率幅值和相位校准, 新发展的校准装置包括了不同频率的幅值和相位校

表 2 自制传声器测量结果的平均偏差
Table 2 Averaged error of measurement results from encapsulated microphones

传声器 序号	平均偏差	
	幅值/ dB	相位/ rad
1	0. 332 066	0. 058 271
2	0. 461 221	0. 055 437
3	0. 302 111	0. 054 439
4	0. 450 866	0. 049 063

准,因此经过校准的封装传声器能够得到较精确的测量结果,并已得到了实验验证.开辟了应用消费类电子产品进行测量实验研究的新途径.

参考文献:

- [1] Nam K U, Kim Y H. Visualization of multiple incoherent sources by the backward prediction of nearfield acoustic holography [J]. JASA, 2001, 109(5): 1808-1816.
- [2] Ura H, Yokokawa Y, Takeshi I T O. Phased array measurement of high lift devices in low speed wind tunnel [R]. AIAA 2006-2565, 2006.
- [3] Jones M G, Watson W R, Parrott T L. Design and evaluation of modifications to the NASA Langley flow impedance tube [R]. AIAA 2004-2837, 2004.
- [4] Jones M G, Parrott T L, Watson W R, et al. Development of experimental and computational aeroacoustic tools for advanced liner evaluation [C] // Proceedings of Inter-Noise. Honolulu, Hawaii, USA: The International Institute of Noise Control Engineering, 2006.
- [5] Simonich J C, Morin B L, Narayanan S, et al. Development and qualification of an in situ grazing flow impedance measurement facility [R]. AIAA 2006-2640, 2006.
- [6] Gerhold C G, Brown M C, Watson W R, et al. Investigation of liner characteristics in the NASA langley curved duct test rig [R]. AIAA 2007-3532, 2007.
- [7] 美商楼氏电子工业股份有限公司. 声学设计接口指南 [M]. Taiwan: Knowles Acoustics, 2007.
- [8] 王利, 王同庆. 流管实验装置传声器阵列的校准方法 [J]. 航空动力学报, 2010, 25(4): 925-929.
- WANG Li, WANG Tongqing. Calibration method for microphone array used on flow impedance test rig [J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(4): 925-929. (in Chinese)
- [9] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础 [M]. 南京: 南京大学出版社, 2003: 292-293.
- [10] International Organization for Standardization. Acoustics determination of sound power radiated into a duct by fans and other air-moving devices in duct method [R]. Switzerland: ISO 5136, 2003.
- [11] 李晓锋. 声衬测量的流管实验装置设计及调试 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2005.
- LI Xiaofeng. Design and adjustment of flow duct facility for acoustic liner measurement [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics. (in Chinese)
- [12] 王利, 王同庆. 发动机消声短舱声衬声阻抗测量的流管实验研究 [R]. 敦煌: 中国航空学会第十四届叶轮机学术交流会, 2007.