

文章编号: 1000-8055(2010)04-0925-05

流管实验装置传声器阵列的校准方法

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: 发展了一种应用于流管实验装置的现场传声器阵列校准方法. 该方法利用两支标准传声器的测量结果计算管内声场, 然后比对待校准传声器的测量信号得到其灵敏度. 与传统校准方法相比, 该方法具有实时快速、能提供相位校准等优点. 在流管装置上进行实验, 用模态匹配方法对校准结果进行校核, 显示该校准方法得到的声压与计算结果吻合得更好. 使用本方法, 利用高精度传声器对低精度传声器进行校准并应用, 可有效降低测量实验成本.

关 键 词: 校准; 传声器; 流管实验装置; 相位匹配; 复灵敏度

中图分类号: V211.71

文献标识码: A

Calibration method for microphone array on flow impedance test rig

WANG Li, WANG Tong qing

(School of Jet Propulsion,

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

Abstract: An in situ calibration method was developed in this paper. The acoustic pressure data from two calibrated microphones were utilized to calculate the sound field in ducts. Then the sensitivity of every microphone was obtained by comparison of the signal measured by every microphone with the sound field calculated above. The advantage of the current method is that all microphones can be calibrated simultaneously and the phase sensitivities of these microphones are also obtained. A calibration experiment has been conducted on flow impedance test rig (FITR), and the calibration results were compared with those calculated by the mode-matching method, showing a good agreement. Additionally, as every microphone's complex sensitivity can be obtained respectively at different frequencies, low-precision microphones can have better precision by being calibrated using high precision microphones. By using these calibrated microphones, the cost of experiment can be reduced obviously.

Key words: calibration; microphone; flow impedance test rig; phase match; complex sensitivity

流管是一种在流动条件下测量声衬材料声学性能的实验装置, 目前国内外的流管实验研究中^[1-4], 均须在管道壁面安装大量传声器对声场进行测量, 以便进行声模态分解^[5-6]和声阻抗的提取^[7-8], 因此传声器的测量精度尤为重要. 目前传

统的传声器校准方法是采用标准活塞式声源对每个传声器进行幅值校准. 对于使用传声器数量较多的流管实验方法有以下缺点: 首先由于消耗时间过长可能致使校准和实验测量时的实验条件(温度、湿度等)变化, 从而导致传声器的灵敏度改

收稿日期: 2009-04-16; 修订日期: 2009-07-03

基金项目: 国家自然科学基金(J0876005)

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.

变;其次无法对相位进行校准,不同传声器在不同频率下的相位响应并不相同,尤其是不同厂家、不同批次或不同型号的传声器之间的相位匹配并不一致,这对于需要相位匹配的测量将会产生较大误差.鉴于目前存在以上不足迫切需要一种可以在流管现场进行幅值和相位校准的方法.本文介绍的方法试图满足这个要求.

1 校准方法原理

图 1 是流管实验装置的示意图,右侧是声源,左侧为管口, $z_1, z_2, \dots, z_n$ 是测量传声器阵列的安装位置, z_0, z_{ref} 是标准传声器的安装位置,其中 z_{ref} 是参考标准传声器的安装位置,对传声器阵列的校准是通过 z_0 处标准传声器的测量结果来计算管内声场,然后利用计算得到的声场结果校准整个传声器阵列.

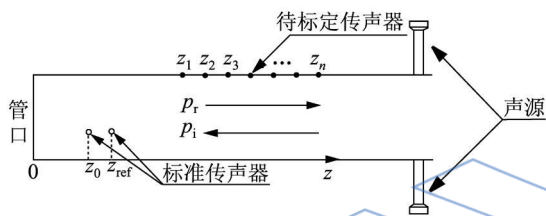


图 1 流管示意图
Fig. 1 Sketch of flow impedance test rig (FITR)

当声源频率小于管道截止频率时管道内只存在平面波,而且由于管道中没有吸声材料,管道中的声传播没有衰减.设 $z_0, z_1, \dots, z_n$ 处的声压为 $p_0, p_1, \dots, p_n$,各个传声器测得的电压信号为 $u_0, u_1, \dots, u_n$ ($p_0, p_1, \dots, p_n$ 和 $u_0, u_1, \dots, u_n$ 都是复数),各个传声器的灵敏度为 $\gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_n$ (也是复数),管内入射声压为 p_i ,反射声压为 p_r ,且管口反射系数为 r ,则

$$p_m = p_i + p_r = p_i e^{ikz_m} + p_r e^{-ikz_m},$$
$$m = 0, 1, 2, \dots, n$$

(1)

$$p_m = \frac{u_m}{\gamma_m}$$

(2)

$$p_r = r p_i$$

(3)

这里 z_0 处安装的传声器是标准传声器,用来校准其他传声器.

由式(1)和(3)得

$$p_0 = p_i e^{ikz_0} + p_r e^{-ikz_0} = p_i \left(e^{ikz_0} + r e^{-ikz_0} \right) = \frac{u_0}{\gamma_0}$$

(4)

$$p_m = p_i e^{ikz_m} + p_r e^{-ikz_m} = p_i \left(e^{ikz_m} + r e^{-ikz_m} \right) = \frac{u_m}{\gamma_m}$$
$$m = 1, 2, \dots, n$$

(5)

由式(2),(4)和(5)得

$$\gamma_m = \frac{u_m}{p_m} = \frac{u_m \left(e^{ikz_0} + r e^{-ikz_0} \right)}{p_0 \left(e^{ikz_m} + r e^{-ikz_m} \right)}$$

(6)

式中 p_0 由标准传声器测量得到, u_m 由待校准传声器测得,这样只要 z_m 确定,该传声器的灵敏度 γ_m 即可确定, m 个传声器的灵敏度可以一次全部得到.即使标准传声器测量得到的 p_0 有误差,但是由于校准得到的灵敏度的比值相同,因此不会对以后的流管实验测量结果产生影响.

2 校准结果分析

在北京航空航天大学流管实验装置上进行了校准验证实验,标准传声器采用 Brüel & Kjær (B&K) 公司的 4935 型,待校准的传声器采用北京第七九七音响股份有限公司生产的 CH16 型传声器.流管实验装置为矩形管,管道出口安装了消声端,以减小管口反射,降低管内驻波比,减小计算误差.管道横截面尺寸为 $120\text{ mm} \times 50\text{ mm}$,当声源频率小于 1400 Hz ($c = 336\text{ m/s}$) 时,管内声波为平面波.每个测量通道的采样率为 50 kS/s ,以 z_{ref} 处传声器的信号为参考,用测量互谱的方法计算管道内各处的声压 $p = p \cdot p_{\text{ref}}^* / |p_{\text{ref}}|$ (p_{ref}^* 为 p_{ref} 的共轭),这样可以测量得到相对于参考传声器相位的声压^[9].依据双传声器传递函数法^[10],利用 z_0 和 z_{ref} 处标准传声器的测量结果可以计算管口反射系数 r ,然后由式(6)计算待校准传声器的灵敏度,标准传声器和参考传声器的轴向坐标 z_0 和 z_{ref} 分别为 0.195 m 和 0.265 m ,待校准的 12 支传声器的轴向坐标见表 1.详细的幅值和相位校准结果分别见图 2、图 3.

表 1 待校准传声器的轴向坐标
Table 1 Axial position of microphones

传声器序号	轴向坐标/ m	传声器序号	轴向坐标/ m
1	0. 655	7	0. 835
2	0. 685	8	0. 865
3	0. 715	9	0. 895
4	0. 745	10	0. 925
5	0. 775	11	0. 955
6	0. 805	12	0. 985

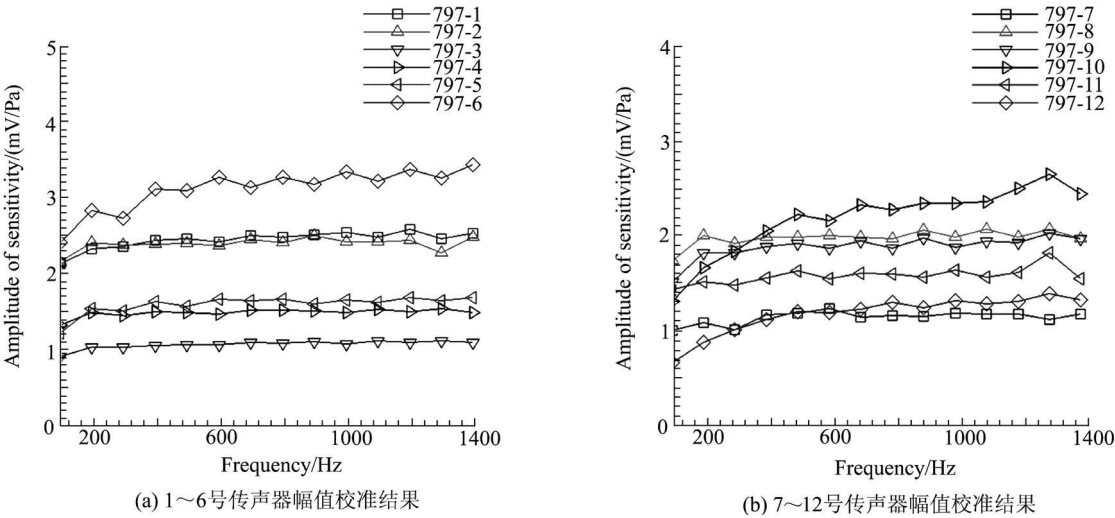


图 2 传声器幅值校准结果

Fig. 2 Amplitude of different microphones' sensitivity

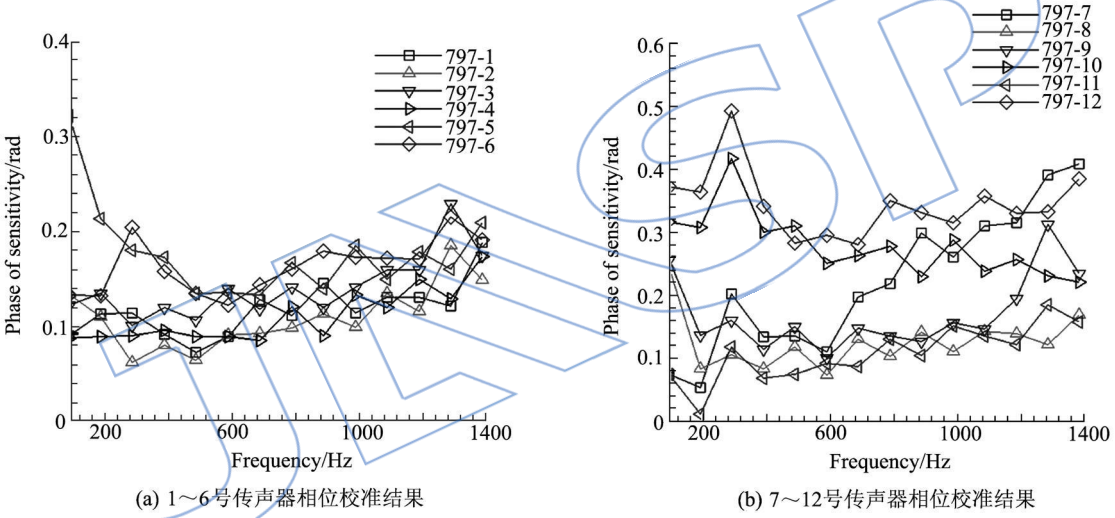


图 3 传声器相位校准结果

Fig. 3 Phase of different microphones' sensitivity

从图 2 (a), (b) 的幅值计量结果来看, 灵敏度幅值计量结果的频响比较稳定, 各个传声器幅值计量结果的标准偏差和 95% 置信区间的不确定度见表 2。

从图 2 的幅值校准结果来看, 不同频率下的幅值灵敏度是有差别的, 每个传声器各频率幅值校准的灵敏度平均值与采用标准声源在 250 Hz 频率下的校准的结果进行比较, 具体结果见表 3。

从表 3 中可以看到, 本文校准结果与利用标准声源得到的校准结果不尽相同, 这是因为本文的校准方法是在传声器安装在流管实验装置上之后进行校准的, 校准结果包含了安装位置等因素的影响, 因此更符合实际情况。由于采用标准声源

进行校准无法得到相位灵敏度, 因此相位灵敏度也无法比对, 从文献[11] 来看传声器的相位会在几十度范围内变化, 因此在测量中对各个传声器进行相位匹配是非常重要的。采用本文的相位校准可以消除相位匹配的误差, 只要在实际使用时采用校准得到的各个频率下的复数灵敏度即可实现。

为了进一步验证本文校准方法, 采用文献[12] 介绍的模态匹配方法计算管内声场, 然后与测量值进行比较, 分别使用本文校准得到的复灵敏度及传统校准的幅值灵敏度计算声压测量结果, 以便比较两种校准方法。

表 2 传声器灵敏度幅值计量结果的误差分析

Table 2 Error of amplitude calibration results of different microphones

传声器序号	标准偏差	不确定度
1	0.037 001	0.022933
2	0.041 801	0.025908
3	0.015 368	0.009525
4	0.018 080	0.011206
5	0.028 113	0.017424
6	0.082 032	0.050843
7	0.023 326	0.014457
8	0.034 425	0.021337
9	0.039 809	0.024673
10	0.100 346	0.062194
11	0.051 421	0.031871
12	0.051 947	0.032196

表 3 传声器灵敏度幅值结果的比较

Table 3 Comparison of sensitivity amplitude from two calibration methods

传声器 序号	灵敏度幅值 (方法 1)/(mV/Pa)	灵敏度幅值 (方法 2)/(mV/Pa)
1	2.639	2.518968
2	2.681	2.448512
3	1.057	1.094123
4	1.460	1.506608
5	1.690	1.654274
6	3.348	3.275454
7	1.151	1.171003
8	2.131	2.058491
9	2.154	1.959044
10	2.242	2.357365
11	1.605	1.618379
12	1.323	1.286501

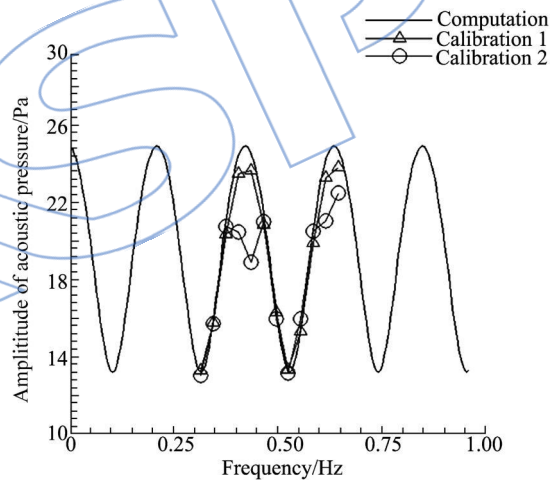
注: 方法 1 表示利用标准声源得到的校准结果,
方法 2 表示本文方法得到的校准结果.

3 与模态匹配方法的校核

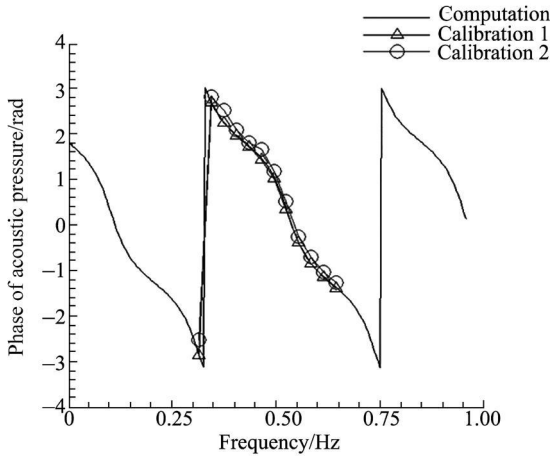
模态匹配方法是一种已得到验证计算管内声场的解析方法. 在管道为刚壁且管内声波为平面波条件下可以通过管道内不在相同相位面上的两

点声压计算管内声场. 这里还是采用两支 B&K 公司的 4935 型传声器分别在管道的进出口附近进行测量, 其轴向坐标分别为 0.335 m 和 1.305 m, 根据测量结果计算管内声场, 并与各支 CH 16 型传声器的测量结果进行比较, CH 16 型传声器的灵敏度通过两种方法得到, 即本文的校准结果和利用标准声源得到的校准结果, 对比结果见图 4、图 5(computation 表示模态匹配方法的计算结果, calibration 1 表示利用本文校准方法灵敏度得到的声压结果, calibration 2 表示采用标准声源校准灵敏度得到的声压结果).

图 4、图 5 列出了两个频率下的对比结果, 从中可以看到, 本文校准方法的灵敏度得到的声压幅值和相位与模态匹配方法的计算结果符合的更好, 其他频率下的对比结果同样如此, 这表明相对于传统的标准声源校准方法, 本文校准方法更适合流管实验测量.



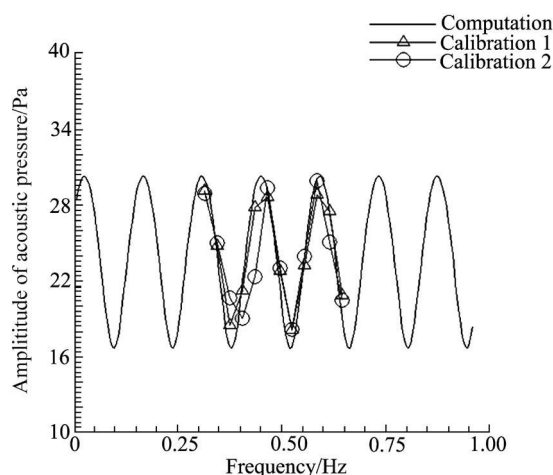
(a) 声压幅值对比



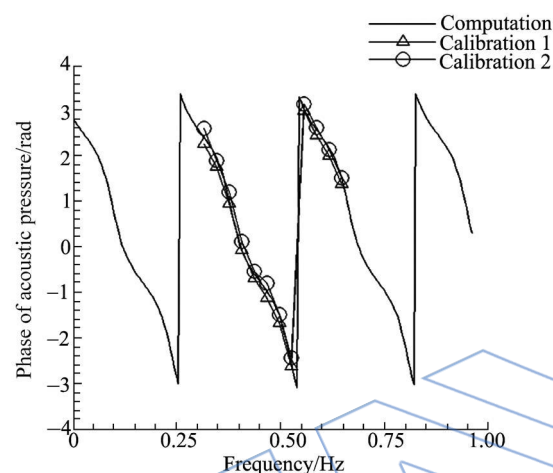
(b) 声压相位对比

图 4 声压计算结果与实验结果的对比($f = 795\text{ Hz}$)

Fig. 4 Comparison of acoustic pressure between computed and experimental data ($f = 795\text{ Hz}$)



(a) 声压幅值对比



(b) 声压相位对比

图 5 声压计算结果与实验结果的对比($f = 1195 \text{ Hz}$)

Fig. 5 Comparison of acoustic pressure between computed and experimental data ($f = 1195 \text{ Hz}$)

4 结 论

1) 与传统的传声器校准方法相比, 本文的传声器校准方法简单快速, 可用于大型传声器阵列的校准, 而且可在实验过程中随时进行校准, 同时校准精度也有保证。

2) 本文的校准方法不仅可以提供传声器幅值的校准, 还能对传声器的相位进行校准, 在应用大量传声器测量, 特别是传声器的批次或型号不同时, 能够保证所有测量传声器的相位匹配。

3) 本文的校准方法可以将传声器安装误差等因素考虑在内, 因而更接近实验测量条件, 这样可以在传声器安装位置精度不高的情况下得到精确的测量结果。

4) 应用本文方法可以采用精度较高的传声器对精度较低的传声器进行校准, 以得到精度较高的测量结果, 为一些大型实验提供低成本的解决方案。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Gerhold C H, 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.
- [5] Gerhold C H, Cabell R H, Brown M C. Development of an experimental rig for investigation of higher order modes in ducts [R]. AIAA 2006-2637, 2006.
- [6] Schultz T, Cattafesta L N III, Sheplak M. Modal decomposition method for acoustic impedance testing in rectangular ducts [R]. AIAA 2006-1014, 2006.
- [7] WANG Li, GUAN Ying, WANG Tongqing. The 3-D modal method for acoustic impedance determination in rectangular duct [R]. AIAA 2008-3015, 2008.
- [8] Watson W R, Jones M G, Parrott T L. A quasi-3-D theory for impedance reduction in uniform grazing flow [R]. AIAA 2005-2848, 2005.
- [9] Liu J M, Holste F, Neise W. On the azimuthal mode structure of rotating blade flow instability in axial turbomachines [R]. AIAA 96-30853, 1996.
- [10] International Organization for Standardization. ISO 10534-2:1998 Acoustics determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes: Part 2—Transfer function method [S]. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 1998.
- [11] Brüel & Kjaer. Condenser microphone and microphone preamplifiers for acoustic measurement [M]. Kongeriget Danmark: Brüel & Kjaer, 1982.
- [12] 管莹, 王同庆, 王利. 流管实验装置中声传播计算的模态方法 [J]. 工程热物理学报, 2006, 27(4): 595-597.
GUAN Ying, WANG Tongqing, WANG Li. A mode matching method for calculating sound propagation in flow duct equipment [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(4): 595-597. (in Chinese)