

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.02.18

空气声高声压的激光活塞法溯源技术研究

张炳毅, 付强, 郑爱建, 徐佳

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 目前空气声高声压的溯源存在空白, 基于激光-活塞发声器法, 采用激光直接测量高声压下活塞振速的方法进行研究, 实现了 180 dB 下高声压的溯源, 并通过试验验证了理论公式和结果的一致性, 为高声压的绝对溯源提供了技术方法, 保障了高声压量值的准确可靠。

关键词: 计量学; 空气声; 高声压; 溯源; 绝对法

中图分类号: TB95

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)02-0130-05

Research of Air Borne High Sound Pressure Calibration by Laser Piston Method

ZHANG Bingyi, FU Qiang, ZHENG Aijian, XU Jia

(Changcheng institute of Measurement and Metrology, Beijing 100095)

Abstract: There is no research on the traceability of airborne high sound pressure calibration currently. Based on laser piston-phone method, this paper studies the method of using laser to directly measure the vibration velocity of the piston under high sound pressure, and realizes the traceability of airborne high sound pressure up to 180 dB. Experiment results show the good coherence to theoretic formulas. It can support the traceability of airborne high sound pressure calibration and provides accurate value to high sound pressure metrology.

Key words: metrology; airborne acoustic; high sound pressure; traceability; absolute method

0 引言

在声疲劳实验、爆炸噪声测量等领域, 有时需要使用传声器测量高达 180 dB 的声压^[1-4], 且国内用于传声器动态范围上限校准的高声压谐振比较法装置中的参考传声器也需要量程上限超过 174 dB。

国内使用气流调制的方式产生高声压, 对高声压传感器进行校准的研究, 但是其附加了很高的静态压力分量^[5-9]。国际上, 英国国家物理实验室(NPL)在激光-活塞发声器法方面最早进行了研究, 激光-活塞发声器法在低声压溯源方面具备一定的优势, 可以将声压溯源到质量、时间、长度等基本量^[10]。NPL 实现了高声压的绝对法校准, 并建立了相应的声压标准, 而且还利用该装置参加了空气声国际比对。该装置采用激光干涉条纹计数法测量活塞位移, 频率范围为 0.1 ~ 250 Hz, 1 ~ 250 Hz 下的声压不确定度为 0.06 ~ 0.25 dB, 其最大声压级可以达到 170 dB。

目前, 高声压传感器的溯源还存在一些不足。例如, 高声压谐振比较法装置中使用的参考传声器以膜片刚度为基础, 只是在理论上说明其具有很高的量程上限。本文基于激光-活塞发声器法, 研究了采用激

光直接测量高声压下活塞振速的方式, 实现了 180 dB 下高声压的溯源, 并通过实验验证了理论公式和结果的一致性, 保障了量值的准确可靠, 为高声压的绝对溯源提供了技术保障。

1 高声压溯源的理论基础

马大猷先生通过理论研究, 获得了如式(1)所示的封闭管内活塞辐射高声压模型^[11]。

$$p = \rho c u \frac{\cos(L-x)}{\sin kL} \cos \omega t + \frac{3(\gamma+1)}{16} \frac{\rho^2 c^2 u^2}{\gamma P_0} \frac{\cos k_2(L-x)}{2 \sin^2 kL \sin k_2 L} \cos(2\omega t + \theta_2) + \dots$$

$$k_2 = 2k(1 + (1-j)\frac{1}{\sqrt{2}}\delta)$$

$$\delta = \frac{1}{r} \frac{1}{\sqrt{2\omega}} (\sqrt{\mu} + (\gamma-1)\sqrt{\frac{\mu'}{\gamma}})$$

$$\theta_2 = k_2 L - \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

式中: p 为声压; ρ 为空气密度, $\rho = \rho_0 \left(\frac{273.15}{T} \right) \times \frac{P_0}{101325}$, ρ_0 为 1.293 kg/m³; c 为声速, $c \approx 331.45 \times$

$\sqrt{\frac{T}{273.15}}$; u 为质点速度; L 为腔体长度; x 为安装位置;

ω 为角频率; t 为时间; k 为波数, $k = \frac{\omega}{c}$; γ 为空气比热比, 约 1.40; P_0 为大气压力; μ 为运动粘滞系数, 空气约为 $1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$; μ' 为热扩散率, 空气约 $2.7 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$; r 为管的半径。

中科院声学所刘克等人在驻波管内进行了实验验证^[12], 验证了在驻波管内最高声压达到 159 dB 时该公式的适用性; 蒋建在文献[13]中采用 400 W 扬声器, 在驻波管中最高声压做到 167.2 dB, 证明在此声压下式(1)的有效性。

本研究中以式(1)为理论基础, 进行高声压发生器的设计。在高声压发生器设计时, 需要在 1 ~ 1000 Hz 内根据声波波长和振动台的位移限制, 分别设计不同长度的耦合腔。以频率 20 Hz 为例, 设计耦合腔长度 $L = 0.015 \text{ m}$, 则

$$\cos(L - x) \approx 0.9999$$

$$\cos k_2(L - x) \approx 0.9999$$

频率为 20 Hz 时, 活塞发生器中 $kL = 0.005544$, 为一个微量

$$\sin kL \approx kL$$

$$\sin k_2L \approx k_2L$$

频率为 20 Hz 时, 实际的高声压发生器尺寸(半径 0.05 m, 长度 0.015 m)确定, 安装位置确定(顶端齐平安装 $x = L$), 实验条件确定(24.3℃, 99.453 kPa)后, 公式(1)可以简化为

$$p_1 \approx 1.400 P_0 \frac{u}{\omega} \cos \omega t \quad (2)$$

$$p_2 \approx 6.46 \times 10^{-6} p_1^2 \cos \left(2\omega t + 0.011 - \frac{\pi}{2} \right) \quad (3)$$

式中: p_1 为基波声压; p_2 为二次谐波声压。

2 高声压校准装置

为了实现声压溯源并验证式(1)~(3)的有效性, 建立了高声压校准装置, 其原理如图 1 所示。

控制系统控制振动台产生振动, 带动活塞在发生器腔体内运动, 活塞运动在密闭腔体内压缩空气产生相应的声压, 腔体内空气质点的振动速度通过激光干涉仪进行精密测量。激光干涉仪输出信号, 通过数据采集系统采集量化后进入计算机进行后续处理, 获得空气质点振动速度后, 同时测量温度、气压、腔体尺寸等量值, 即可根据式(1)计算得到声压值。

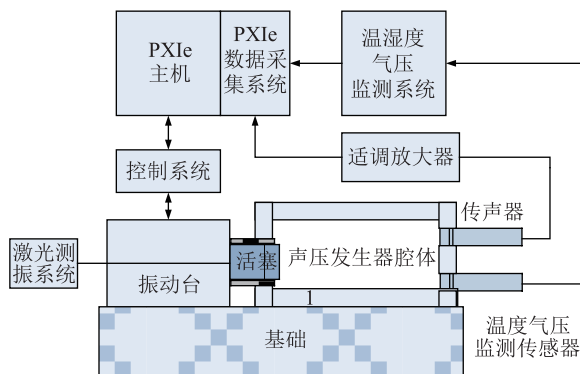


图1 高声压校准装置原理图

文献[15]中指出, 影响活塞发生器声压的主要因素是静态压力和温度问题。因此高声压校准装置中, 温度采用和腔体内壁齐平安装的铂电阻温度计监测腔内温度, 采用美国派若斯 745 气压计监测腔体内静态压力。

频率 1 Hz 下的实际校准装置总体图如图 2 所示。频率 20 Hz 下的高声压发声器和局部安装如图 3 所示。1000 Hz 时采用压电振动台, 如图 4 所示。

装置中采用激光测振仪进行速度测量, 其溯源到航空工业计量所已经建立的国家中频振动标准装置, 其测量速度的不确定度为 1.0%; 温度计和气压计溯源到相应的温度和压力标准; 活塞和腔体几何尺寸溯源到长度标准。

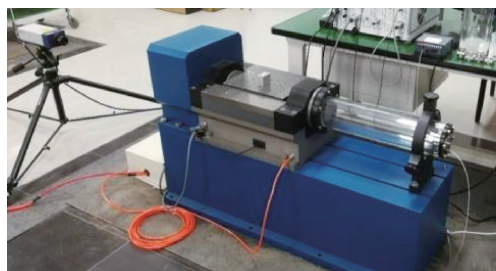


图2 高声压激光绝对法校准装置

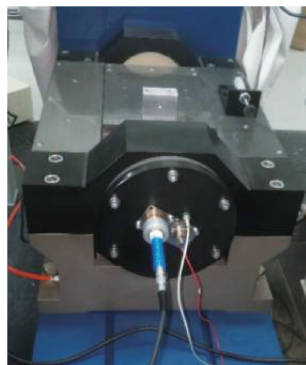


图3 20 Hz 时的高声压发声器和局部安装



图4 1000 Hz时的高声压发声器和安装的传声器

3 实验验证

实验使用校准装置分别在频率1, 20, 1000, 2000 Hz下进行。实验采用的传声器为4941传声器和2510压电传声器。实验前后, 4941传声器采用LS级活塞发声器^[16]进行250 Hz, 124 dB下的校准, 校准结果和出厂结果一致, 为84.2 $\mu\text{V}/\text{Pa}$ 。2510压电传声器和4941传声器进行比较校准, 以保障测量结果的准确可靠。实验中激光测振仪的设置100 mm/s/V, 2690放大器灵敏度挡设置采用4941自动读取的结果, 为84.189 $\mu\text{V}/\text{Pa}$, 放大器挡为100 $\mu\text{V}/\text{Pa}$ 。

图5和图6分别为声压有效值为180 dB时的振动速度和声压实际采样波形。如图7所示, 有效值180 dB时声压2次谐波的幅值为基波的13.4%, 激光测振仪测

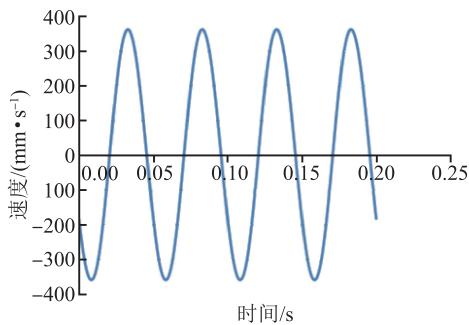


图5 20 Hz时激光测振仪波形

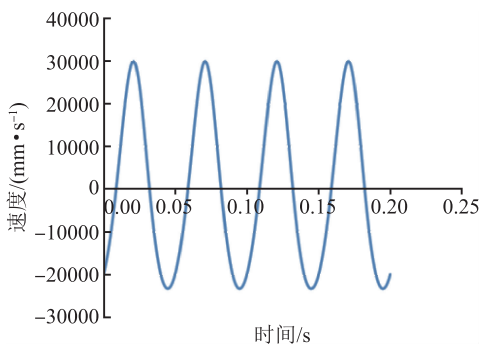


图6 20 Hz时180 dB声压波形

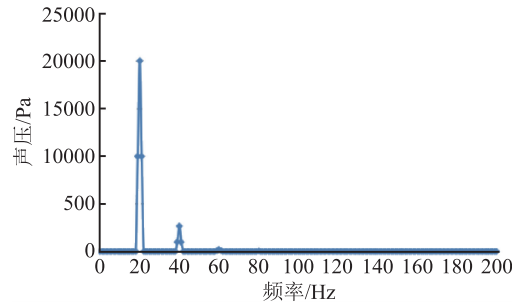


图7 20 Hz时声压有效值频谱

量的速度失真不大于1%。声压波形开始变得上面窄下面宽, 其主要原因是二次谐波引起波形失真。

图8为20 Hz时声压和质点速度对应关系, 图9为20 Hz时基波声压和二次谐波的对应关系。根据公式(2)和公式(3), 可以得到质点振动速度和高声压的基波幅值成正比, 二次谐波的幅值和基波幅值的平方成正比^[12]。实验结果验证了以上结论, 并且理论声压和实际测量声压的最大偏差不超过3.0%。而且通过对实际采样波形的不同谐波分析, 可以得到基波与二次谐波的相位差约为90°。根据式(3)可知, 二次谐波和基波相差 $\frac{\pi}{2} - 0.011$, 实验结果和式(3)基本吻合。

刘克等人的研究表明在长度为1.95 m的驻波管中, 声压150 dB以上已经逐渐出现谐波饱和现象, 并且基波饱和与频率有关^[12]。本文研究的活塞发生器中在声压180 dB时并没有出现了饱和趋势。根据文献[14], 驻波管中的声压饱和与断裂距离成反比, 断

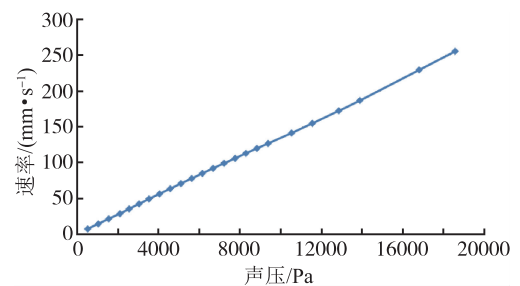


图8 20 Hz基波声压和质点速度

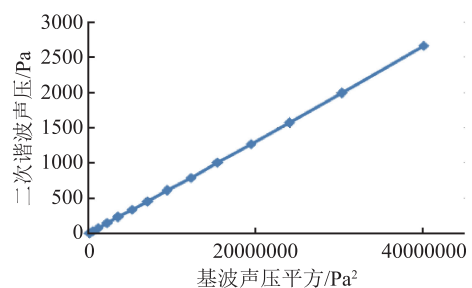


图9 20 Hz基波声压平方和二次谐波声压

裂距离又与驻波管长度 L 成正比, 因此声压饱和与长度成反比, L 越小, 饱和声压约高。具体公式见文献[14]中的公式 8。因此, 本研究在声压 180 dB 时也未出现谐波饱和的主要原因是腔体尺寸很小, 使得饱和声压大于 180 dB。

频率为 1, 1000, 2000 Hz 时的声压和质点速度之间的实验结果如图 10 所示, 结果表明声压和质点速度呈良好的线性关系, 但由于受到腔体结构尺寸设计和驱动能力的限制, 各个频率下曲线的斜率有所不同。通过重复性试验并根据贝塞尔函数计算速度和声压比值的相对标准偏差, 结果显示在 20 Hz, 180 dB 下的重复测量结果的相对标准偏差为 1.2%。

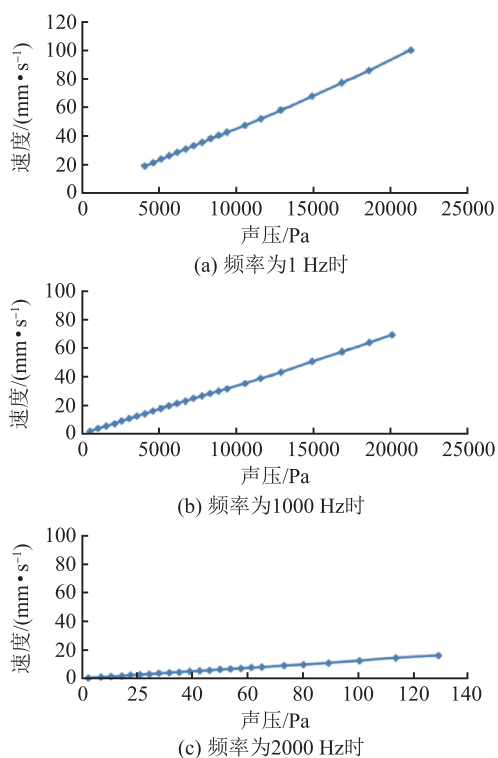


图 10 不同频率下基波声压和质点速度

4 结论和展望

通过以上的研究和实验结果可以看出:

1) 本研究中采用激光-活塞发生器法, 通过温度、压力、速度、长度的溯源性, 实现 1~1000 Hz 下, 最高 180 dB 高声压的激光绝对溯源。

2) 通过建立的高声压校准装置, 实现的有效声压级最高达到了 180 dB, 相比于国外 NPL (170 dB) 的激光-活塞发声器具有更高的声压级。

3) 实验结果证明了马大猷先生关于大振幅声波的理论在 180 dB 时的活塞发声器上也是基本适用的。并

且在 180 dB 以内, 实验结果和马大猷先生的理论结果的偏差不超过 3%, 装置稳定性考核和不确定度的评定有待于进一步完善。

4) 目前在实验室已经基本实现最低 1 Hz 的高声压激光-活塞发生器法溯源, 与理论偏差不大于 5%。但是对于频率低于 1 Hz 的高声压研究, 由于受到压力泄漏和热传导等因素的影响, 影响量会变大。这时的理论模型有待于进一步完善, 以减小实验结果和理论分析之间的偏差。

5) 激光-活塞发生器法可以解决较低频率 1~1000 Hz 下高声压的溯源问题, 但是受到驱动能力的限制, 目前能达到 180 dB 声压的最高频率为 1000 Hz, 频率为 2000 Hz 仅仅能够达到 136 dB, 因此更高频率的高声压产生方式和方法还有待进一步研究。

6) 高声压在 180 dB 以上开始向三角波畸变。根据相关理论, 随着声压的进一步提高, 三角波会发展为激波。高声压传声器实际测量的对象也大多是激波, 因此在更高的声压级下, 可以采用激波管的方式对高声压传声器的灵敏度和频响进行校准, 进而通过模型参数识别的方式确定其特征参数。

参考文献

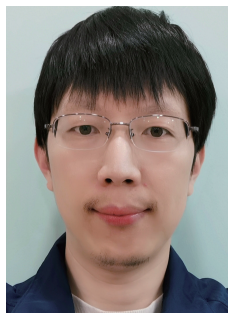
- [1] 国防科工委科技与质量司. 声学计量[M]. 北京: 原子能出版社, 2002.
- [2] 解放军总装备部. GJB150. 25A-2009 军用装备实验室环境实验方法第 25 部分: 振动-噪声-温度实验[S]. 2009.
- [3] 2510M4A 型压电式传声器[EB/OL]. [2019-07-10]. http://www.gp-tm.com/products_detail/productId=619.html.
- [4] 1/4-inch extremely high-level pressure-field microphone, 4 Hz to 20 kHz, 200 V polarization[EB/OL]. [2019-07-10]. <https://www.bksv.com/en/products/transducers/acoustic/microphones/microphone-cartridges/4941>.
- [5] 传声器高声压校准系统[EB/OL]. [2019-07-10]. <https://www.bksv.com/zh-HK/products/calibration-systems/Microphone-calibration-systems/high-pressure-calibration-system-9719>.
- [6] 杨晓伟, 闫磊, 朱刚, 等. 基于双谐振声波幅相控制的高声强级校准[J]. 宇航计测技术 2018, 38(6): 21-24.
- [7] 马大猷, 沈豪. 声学手册[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [8] 方继明, 张训文. 正弦压力发生器的发展及校准技术[C]//中国计量测试学会会议论文集 2003(9): 164-173.
- [9] 方继明, 张训文. 动态压力校准技术的适用性分析和新技术展望[J]. 计测技术 2012, 32(S1): 19-22.
- [10] 张炳毅, 曾吾. 传声器校准用活塞发生器的研究进展[J]. 计测技术. 2007, 27(05): 5-7.
- [11] 马大猷. 闭管中大振幅驻波理论[J]. 声学学报, 1994, 5

- (22): 161 – 166.
- [12] 刘克, 马大猷. 闭管中非线性驻波场问题探讨[J]. 声学技术, 1997, (3): 120 – 122.
- [13] 蒋剑, 刘克. 强非线性驻波管声场研究[J]. 声学技术, 1997, (3): 5 – 8.
- [14] 马大猷. 非线性驻波的饱和函数[J]. 声学学报, 1998 (03): 193 – 196.
- [15] 张炳毅, 曾吾. 传声器校准用活塞发生器的数学模型[J]. 计测技术, 2009, 29(1): 15 – 17.
- [16] Pistonphone. [EB/OL]. [2019 – 07 – 10]. <https://www.bksv.com/en/products/transducers/acoustic/calibrators/4228>.
- [17] Richard Barham, Mike Goldsmith. The application of the NPL laser pistonphone to the international comparison of measurement microphones[J]. Metrologia, 2007, 44(3): 210 – 216.
- [18] 张葭, 何天祥, 赵小亮. 使用“双腔负压法”实现激波管高声压级校准[J]. 航空计测技术, 1998, 18(6): 6 – 8.
- [19] ISO16063. 43 – 2015 Method for the calibration of vibration and shock transducers-Part43: Calibration of accelerometer by modal-based parameter identification[S]. 2015.

收稿日期: 2021 – 03 – 12

基金项目: 国家“十三五”技术基础科研项目(JSJL2016205A011)

作者简介



张炳毅(1984 –), 男, 高级工程师, 主要从事振动声学计量测试研究工作, 主持了国家计量基础科研项目3项, 获得航空科技进步一等奖1项, 三等奖2项, 参与编写了《航空计量技术》空气声学计量部分, 主持2项和参与多项国家计量检定规程起草编写工作。