

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.06.02

空气声高声压校准技术现状和趋势

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: 一些传声器需要工作在 160 ~ 190 dB 的高声压下。本文介绍了用于高声压传声器校准的驻波管法、声流调制法、活塞发生器法、脉冲方法和激波管法的工作原理, 比较了上述方法的优点和缺点, 并根据国内外空气声计量发展的现状分析了空气声高声压校准技术的发展趋势, 为高声压传声器的量值溯源和校准提供参考。

关键词: 空气声; 高声压; 校准; 趋势

中图分类号: TB95

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)06-0008-05

Progresses of Airborne High Sound Pressure Calibration

ZHANG Bingyi, FU Qiang, ZHENG Aijian, XU Jia

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Some microphones are working in high sound pressure from 160 dB to 190 dB. This article states the calibration method of these microphones, including the standing wave tube method, airflow modulation method, piston phone method, impulse method, shock tube method, etc. Advantages and disadvantages of these methods are compared, progresses of airborne high sound pressure calibration are analyzed based on progress of airborne high sound pressure calibration nationwide and abroad. These can provide metrology reference to high pressure microphone.

Key words: air sound; high sound pressure; calibration; trend

0 引言

在空气声学计量领域, 采用互易法可以达到很高的准确度。互易法的工作原理是: 将三支具有互易性的电容传声器成对组合, 并用一个耦合腔使两个传声器相互耦合, 其中一个作为声源, 另一个作为声接收器, 然后测量接收传声器的输出开路电压与发射传声器的输入电流之比, 进而获得每个传声器的灵敏度。根据 BIPM(国际计量局)公布的 CMC(计量校准能力), 丹麦国家声学实验室耦合腔互易法在 100 ~ 2000 Hz 时的不确定度最小, 可以达到 0.025 dB^[1]。

虽然互易法可以实现传声器的灵敏度、频响和相位的校准, 但是其存在的主要不足是声压通过电容传声器的振膜在耦合腔中产生, 无法达到较高的声压级, 无法对传声器工作范围内的线性度进行校准。在一些特殊的测量领域, 要测量的声压级往往很高。如一些先进发动机出口噪声可高达 160 ~ 180 dB; 气动结构微小腔体内会产生高声压驻波, 可以达到 160 dB 以上; 在兵器靶场测量武器爆炸噪声时, 噪声也高达 180 ~ 190 dB^[2-3]。

此外, 高声压更容易引起声振耦合, 导致机构产生剧烈振动, 使局部机械结构产生疲劳或者失效, 出现裂纹、折断等严重事故。根据美军标和国军标相应振动-噪声试验标准, 目前对于声振耦合进行的高声压试验主要包括: 行波管高声压试验和混响室高声压试验^[3], 在试验中需要使用高声压传声器进行噪声测量和控制, 以保障试验数据的准确可靠。当对这些噪声和噪声试验进行测量时, 采用的传声器量程上限有时超过 180 dB, 其线性度直接影响了测量结果的准确性。

目前常见的高声压传声器主要有压电式和电容式两种。电容式通常采用 6.4 mm 或 3.2 mm 的极化电容传声器, 对其进行 140 ~ 180 dB 的高声压下的线性度校准还存在一定困难^[4-5]。因此, 对可以达到 180 dB 的高声压校准技术进行研究十分必要。

1 高声压校准的国内外现状

目前, 国内外研究机构对于高声压的校准主要基于以下几种方法:

1) 基于驻波管的高声压发生器法

基于驻波管的高声压发生器法原理如图 1 所示,

国内外在售的商用高声压校准器普遍采用此方法。其通过扬声器在一个长管腔内形成驻波，通过共振腔结构产生共振，获得失真度小于0.5%的声压，通过将 被测传声器和标准传声器进行比较的方式，实现对被测传声器的动态范围上限的校准。基于这种方法的代表性产品为9719型传声器高声压校准系统，在500 Hz下其声压级为94~171 dB_{rms}，在171 dB_{rms}下的失真不大于0.5%，通过与高声压监测传感器比较实现线性校准和二次、三次、总谐波失真的测定^[6-7]。驻波管法高声压发生器实物如图2所示。

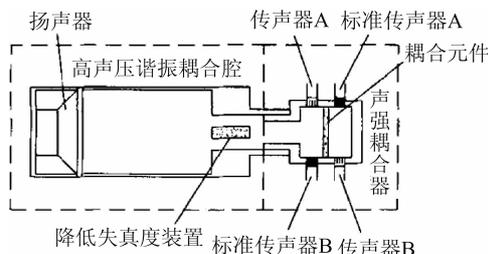


图1 驻波管法高声压发生器原理



图2 商用驻波管法高声压发生器实物图

驻波管法高声压发生器的优点是通过谐振原理可以获得失真度非常小的高声压级，并且易于操作，可以很方便地对低量程的电容传声器进行线性度校准。其缺点是：①最大有效声压级仅能够达到171 dB_{rms}；②作为标准传声器，其溯源性无法说明；③工作频率比较单一，目前常见的工作频率为500 Hz。

还有一种采用气压调制的方法在驻波管中产生高声压的方式，如图3所示。高压气通过喷嘴产生调制的正弦声波，然后进入到谐振管腔中，产生高声压。这种方式的优点在于通过活塞移动可以在传感器处产生不同幅值的声压。其不足之处是：①谐振管中会产生静态流动，影响声场；②参考传感器的溯源问题难以解决。

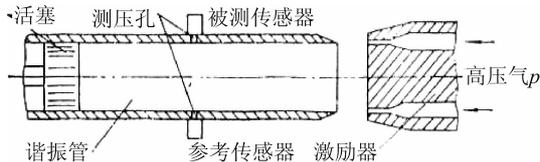


图3 驻波式气流调制高声压发生器

中科院声学所在驻波管法高声压发生器原理和数学模型、试验验证方面开展了大量工作。其中马大猷以流体力学为基础，在考虑了损耗等影响的基础上，获得了如公式(1)所示的封闭管内活塞辐射高声压模型，该模型为有限长驻波管内声场的分布提供了理论依据。

$$\frac{p}{\gamma\rho_0} = \frac{p_0}{\gamma\rho_0} \frac{1}{\sin kL} \cos\omega t \cos k(L-x) + \frac{3(\gamma+1)}{16} \frac{p_0^2}{(\gamma\rho_0)^2} \frac{1}{2 \sin^2 kL \sin k_2 L} \cos(2\omega t + \theta_2) \cdot \cos k_2(L-x) + \frac{p_0^3}{(\gamma\rho_0)^3} \frac{1}{4 \sin^3 kL \sin k_2 L \sin k_3 L} \times \left[\frac{6\gamma^2 + 13\gamma + 7}{64} \cos(3\omega t + \theta_2 + \theta_3) \cos k_3(L-x) - \frac{6\gamma^2 - 7\gamma + 19}{192} \cos(\omega t + \theta_2 + \theta_3) \cos k(L-x) - \frac{2\gamma^2 - 5\gamma - 23}{64} \cos(\omega t + \theta_2 + \theta_3) \cos k_2(L-x) - \frac{6\gamma^2 - 11\gamma - 1}{64} \cos(3\omega t + \theta_2 + \theta_3) \cos k(L-x) + \dots \right] \quad (1)$$

式中： p 为声压； p_0 为大气压力； ρ_0 为空气密度； ω 为角频率； k 为波数， c 为声速， $k = \omega/c$ ； k_2 为二次谐波波数， $k_2 = 2\omega/c$ ； k_3 为三次谐波波数， $k_3 = 3\omega/c$ ； L 为腔体长度； x 为安装位置； θ 为初始相位； θ_2 ， θ_3 分别为二次，三次谐波初始相位； γ 为空气比热比。

刘克等人对公式(1)进行了试验验证^[8-10]，证明了二次谐波的声压级和基波声压的平方成正比，且在驻波管内存在谐波饱和现象，饱和声压级和驻波管的长度有关。

2) 气流调制高声压发生器法

气流调制高声压发生器法的原理是通过圆孔和方孔之间的相互运动，实现对高速气流的调制，在压力腔中实现压力的正弦变化，可分为入口调制型和出口调制型两种。目前国内利用该方法有报道的最高频率可以达到20 kHz，其上限频率主要取决于电机带动的带有多个圆孔的转盘的转速^[11-12]。

气流调制高声压发生器的优点在于可以通过调制的方式产生频率范围很宽的脉动压力信号, 并且脉动压力较大, 其实物图如图 4 所示。气流调制高声压发声器的不足是有气流流动, 即产生的声压是在一定的静态压力条件下叠加的脉动压力。目前气流调制高声压发生装置主要用于动态压力传感器的校准, 所产生的脉动压力幅值都比较高, 通常为 0.05 ~ 10 MPa, 用于作为标准传感器的动态压力传感器可以通过激波管溯源, 或者通过光学测量方法溯源^[13]。



图 4 气流调制高声压发生器

航空工业计量所和北京理工大学在调制型动态压力发生装置方面开展了深入研究并已经具有较为成熟的技术。航空工业计量所专注于标准装置建立、溯源和不确定度评定等方面的研究; 北京理工大学专注于发生器的研制, 拓展可用于动态压力传感器校准的发生器的压力和频率范围。航空工业计量所已经建立了多项动态压力最高标准装置, 其中正弦压力标准装置的主要技术指标为: 频率范围: 1 ~ 6 kHz, 压力范围: 0.2 ~ 8 MPa, 动态压力幅值不确定度: 2% ~ 4% ($k = 2$), 相位不确定度: $1^\circ \sim 2^\circ$ ($k = 2$); 在此基础上研究了基于激光绝对法的量值溯源方法。北京理工大学研制的调制型动态压力发生器, 频率范围可以覆盖 1 ~ 20 kHz, 最大压力可达 5 MPa, 幅值最大允许误差为 $\pm 5\%$ 。

3) 基于活塞发生器的高声压发生器法

活塞发生器的原理是运动的活塞在封闭腔体内产生声压, 通过测量获得活塞的运动参数, 并对气压、温度等进行监测, 获得产生的声压大小。

常见的活塞发生器通常为手持便携式, 采用电机通过凸轮驱动两个小活塞的方式在耦合腔内产生声压, 如图 5 所示。其可作为实验室标准级的校准器, 使用时需要对气压和温度进行修正。声压通常为 124 dB,

频率为 251.2 Hz^[14]。



图 5 活塞发生器

基于活塞发生器的高声压发生器法的优点在于通过激光测量可以实现将声压溯源至长度、时间、质量等基本量, 其缺点是虽然可以产生声压级有效值大于 180 dB 的声压, 但是由于高声压下的气体非线性压缩, 产生的谐波失真比较大, 如图 6 所示。

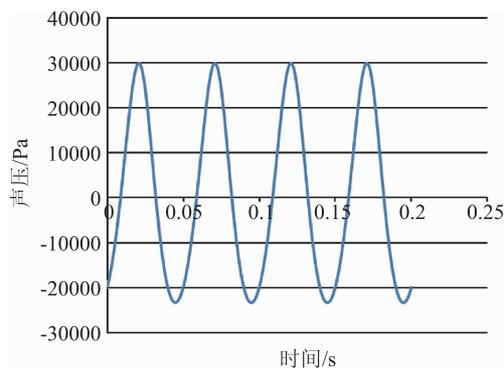


图 6 有效值 180 dB 下的声压波形图

英国的国家物理实验室 (NPL) 开展了基于激光干涉的活塞发生器的研究, 其声压级大于 170 dB 的声压可以溯源到长度、时间等基本量上, 并和互易法在低频下进行了比对^[15]。激光活塞发生器如图 7 所示。

美国的兰利研究中心和航天医学研究中心在 5 ~ 200 Hz 范围内, 研制的活塞发生器的声压级可以达到 185 dB^[16]。

航空工业计量所和中国计量科学研究院、浙江大学等研究机构在基于活塞发生器的高声压发生器研究方面具有一定的研究基础并建立了相关装置^[17-19]。航空工业计量所研制的高声压校准装置可用于如 2510 型压电传声器和 4941 型电容高声压传声器的校准, 如图 8 所示, 目前高声压校准装置达到的技术指标为: 频率范围: 1 ~ 1000 Hz, 声压级: 94 ~ 180 dB_{ms}, 声压校准不确定度: 0.3 dB ($k = 2$)。中国计量科学研究院和浙

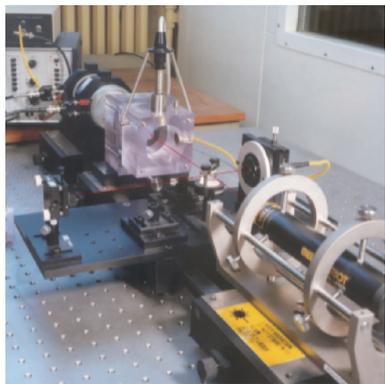


图7 NPL 激光活塞发生器



图8 高声压校准装置

江大学合作研制的高声压装置指标为：频率范围：1 ~ 500 Hz，声压级：94 ~ 170 dB。航空工业计量所和中国计量科学研究院、浙江大学研制的装置原理一致，只是在 500 ~ 1000 Hz 范围内采取了不同的活塞发生器激振方式。

除了以上可以产生周期性的正弦声压的方法外，还可以采用产生脉冲或者阶跃（激波）的方法，对高声压传声器进行校准。主要包括：

1) 落体脉冲方法

落体脉冲法与冲击校准的过程类似，利用落体撞击活塞，使活塞在封闭气体腔内产生脉冲压力，通过激光测振仪可以测量气体密度的变化，进而实现声压的溯源^[20]，如图9所示。该方法可以达到 190 dB 以上的声压级，其校准不确定度为 5% ~ 10%。落体脉冲法的优点是装置结构简单，容易操作，可以实现基于便携式比较法的传声器线性度校准。该方法的不足是由于采用脉冲信号，在脉冲结束后会存在一定振荡，对校准结果的分析引入较大不确定度。

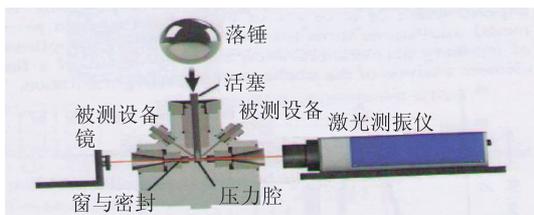


图9 落体脉冲法和激光溯源

2) 激波管高声压传声器校准

激波管由高压段和低压段组成，高压段和低压段之间的膜片在压力作用下破裂产生激波，通过测量激波速度可以获得激波压力的大小。激波管实物图如图10所示。



图10 激波管

目前，航空工业计量所已经建标的激波管压力范围为 0.05 ~ 9.8 MPa，反射波压力不确定度为 2.5% ($k=2$)。激波管的优点在于：①可以产生近似理想的阶跃信号；②通过测量速度可以实现声压量值的溯源；③可以激发起传感器的固有频率，更加近似实际的爆炸噪声。激波管高声压传声器校准方法的缺点是只能对传感器的频响特性进行近似估计，没有采用正弦信号校准频响特性准确。目前也可以采用双腔负压法，产生声压级不大于 170 dB 的声压，对传声器的灵敏度和谐振频率进行计量校准^[21]。

2 高声压校准技术发展趋势

通过以上的现状可以看出，高声压的校准源主要包括：周期式和非周期式两种。周期式包括行波管、驻波管、气流调制等。非周期式包括脉冲式和阶跃式（激波管）。活塞发生器式既可以产生周期式信号也可以产生非周期信号，其具有更好的适用性。

空气声高声压校准技术未来发展趋势表现为以下几个方面：

1) 通过可变频率的活塞发生器可以产生可变频率 (1 ~ 1000 Hz 甚至更高) 的达到 180 dB 以上的高声压，通过激光测量质点振速或者密度变化实现声压量值溯源。

2) 声压也是一种动态压力，实际上高达 180 dB 的声压在通常的动态压力测量领域相当于微小的脉动压力。国际计量局声学、超声和振动委员会发展战略提出“聚焦扩展声学计量能力……将其和具有更高压力级的动态压力标准相结合，并进一步通过开展光学方法工作，实现直接溯源”^[22]，可见后续空气声学计量的发展将和动态压力的发展相结合，并且欧盟在动态压力计量方面的研究也逐渐加强。

3) 目前 ISO 振动委员会已经发布了“基于模型参数识别的加速度计校准”标准, 相信在声学计量领域, 未来除了对幅值频响、相位频响、线性度等参数进行计量和溯源外, 也会形成基于模型参数辨识的相关方法^[23]。

4) 由于 180 dB 下存在非线性压缩, 波形会出现畸变, 这和已有理论契合, 并经过了试验证明, 对于溯源起到了理论基础支撑作用。在实际校准时, 可以通过 FFT 实现谐波的分隔, 减小校准的不确定度。

5) 激光测量质点振速或者密度变化的方法验证, 可以通过在一定范围内与已经实现量值溯源并建立标准的动态压力、动态力溯源相比对的方式实现验证。在较低声压下也可以和互易法相比对实现验证。

参 考 文 献

- [1] Calibration and Measurement Capabilities Acoustics, Ultrasound, Vibration [EB/OL]. [2019 - 07 - 10]. https://kcdb.bipm.org/appendixC/country_list_search.asp?page=1&page=1&CountSelected=DK&sservice=AUV/A.1.1.
- [2] 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.
- [3] GJB150. 25A - 2009 军用装备实验室环境试验方法第 25 部分: 振动 - 噪声 - 温度试验[S]. 2009.
- [4] 2510M4A 型压电式传声器 [EB/OL]. [2019 - 07 - 10]. http://www.gp-tm.com/products_detail/productId=619.html.
- [5] 1/4 - inch extremely high-level pressure-field microphone, 4 Hz to 20 kHz, 200V polarization [EB/OL]. [2019 - 07 - 10]. <https://www.bksv.com/en/products/transducers/acoustic/microphones/microphone-cartridges/4941>.
- [6] 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>.
- [7] 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): 25 - 28.
- [8] 马大猷, 沈豪. 声学手册[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [9] 马大猷. 闭管中大振幅驻波理论[J]. 声学学报, 1994, 5(22): 161 - 166.
- [10] 刘克, 马大猷. 闭管中非线性驻波场问题探讨[J]. 声学技术, 1997, 16(3): 120 - 122.
- [11] 方继明, 张训文. 正弦压力发生器的发展及校准技术[C]//压力计量服务和测试技术研讨会论文集. 北京: 中国计量测试学会, 2003: 164 - 173.
- [12] 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.
- [13] 杨军, 史博, 樊尚春, 等. 基于激光干涉测量的液体高脉冲压力校准[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(3): 572 - 578.
- [14] Pistonphone [EB/OL]. [2019 - 07 - 10]. <https://www.bksv.com/en/products/transducers/acoustic/calibrators/4228>.
- [15] Barham R, Goldsmith M. The application of the NPL laser pistonphone to the international comparison of measurement microphones [J]. Journal of Endocrinological Investigation, 2007, 44(3): 210 - 216.
- [16] 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(5): 8 - 10.
- [17] 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.
- [18] 秦俊辉, 祝海江, 何龙标. 基于虚拟仪器的活塞发声腔校准系统的设计与实现[J]. 化工学报, 2012, 63(9): 259 - 263.
- [19] 张帆. 甚低频有限振幅声压校准若干理论及技术问题的研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2016.
- [20] Bartoli C, Beug M F, Bruns T, et al. Traceable dynamic measurement of mechanical quantities: Objectives and first results of this european project[J]. International Journal of Metrology and Quality Engineering, 2013, 3(3).
- [21] 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]. 计测技术, 1998, 18(6): 6 - 8.
- [22] CCAUV strategy document [EB/OL]. [2019 - 07 - 10] <https://www.bipm.org/metrology/auv/>.
- [23] 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: 2019 - 10 - 22; 修回日期: 2019 - 11 - 12

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

作者简介

张炳毅(1984 -), 男, 高级工程师, 主要从事振动及声学计量测试研究工作。

