

耦合腔声压基准简介

肖 鉴

(上海市计量技术研究所)

一、引言

声压基准对于从事声学研究，计量及测试工作十分重要，因为所有的声学测量都是建立在基准声压的基础上的(参看图1)。为了获得高精度的声压基准及相应的基准器、标准器，可以采用多种方法进行校准，如经典的瑞利盘法，活塞发声器法，驻波管的烟点法，重力法，静电激发器法以及互易校准

法等。根据近十几年来各国所建立的声压基准的准确度来看，以互易法，活塞发声器法和瑞利盘法所标定的换能器精度比较高，而其它方法则逐渐趋于淘汰。本文将对利用互易校准方法在空气介质中所建立起的声学耦合腔声压基准作一简单的介绍。

二、耦合腔互易校准装置及其误差分析

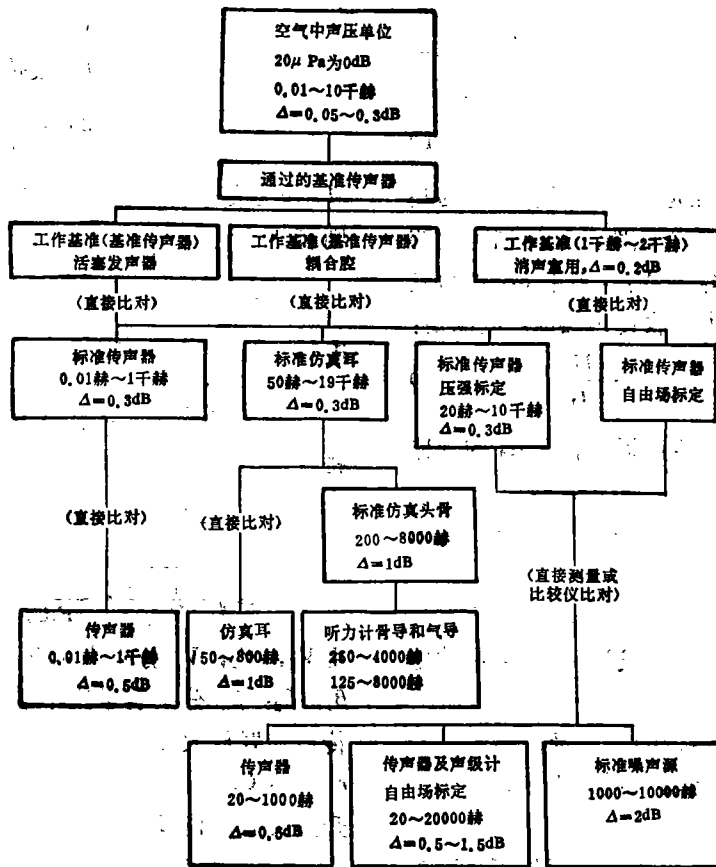


图1 声压基准传递示意方块图

目前所建立起的耦合腔互易校准声压基准装置，基本上都采用丹麦 B/K 公司的 4143 型互易校准仪及 1023 正弦信号发生器(或其它同样精度的信号发生器，如 1027 型)所组成，利用三个压强型电容传声器(例如丹麦 4160 型)，经过反复比对和考核，成为一组基准传声器。其测试装置方块图如图 2 所示。它仅仅适用于 1 英寸电容传声器耦合腔互易校准，对于 $\frac{1}{2}$ 英寸电容传声器的互易校准，目前还处于研究阶段。

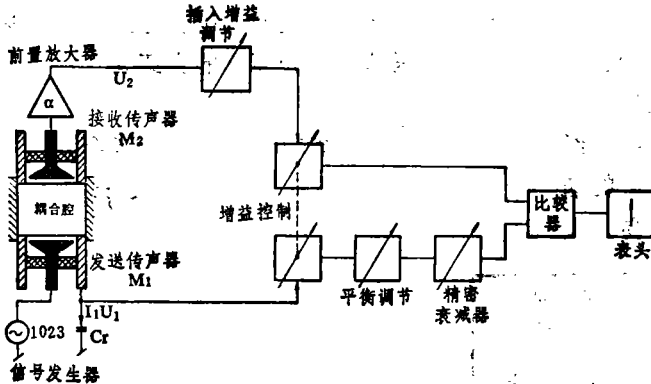


图 2 耦合腔声压基准测量装置方块图

耦合腔互易校准是建立在互易原理的基础上的，它要求有三个线性，无源和可逆的电容传声器 M_1 、 M_2 和 M_3 。当用 M_1 作为发送传声器而 M_2 作为接收传声器时，应满足：

$$M_{P_1} \cdot M_{P_2} = \frac{1}{Z_{12}} \cdot \frac{U_2}{I_1} \quad (1)$$

这里 $M_{P_1} \cdot M_{P_2}$ ——传声器 M_1 及 M_2 的开路灵敏度；

Z_{12} ——系统传递声阻抗(包括传声器的声阻抗)；

U_2 ——接收传声器 M_2 的开路电压；

$I_1 = j\omega C_r U_1$ ——通过发送传声器 M_1 的电流；

C_r ——基准电容器的电容量；

U_1 ——基准电容器两端的电压；

ω ——角频率。

当频率不很高时，系统传递声阻抗 Z_{12} 可表示为：

$$Z_{12} = \frac{r \cdot P_r}{j \cdot \omega \cdot V_{12}} \quad (2)$$

这里

r ——气体比热系数(空气为 1.402, 氢气为 1.406)；

P_r ——大气压力；

ω ——角频率；

V_{12} ——包括传声器前部和等效体积的耦合腔总体积。

将(2)式代入(1)式，得到：

$$M_{P_1} \cdot M_{P_2} = \frac{j\omega V_{12}}{r P_r} \cdot \frac{U_2}{I_1} \quad (3)$$

设 $A_{12} = \frac{U_2}{I_1}$ ，并把 $I_1 = j\omega C_r U_1$ 代

入(3)式，可得：

$$M_{P_1} \cdot M_{P_2} = \frac{V_{12}}{r P_r C_r} \cdot A_{12} \quad (4)$$

同样， M_1 作为发送传声器， M_3 作为接收传声器，则有

$$M_{P_1} \cdot M_{P_3} = \frac{V_{13}}{r P_r C_r} \cdot A_{13} \quad (5)$$

M_2 作为发送传声器， M_3 作为接收传声器，则有

$$M_{P_2} \cdot M_{P_3} = \frac{V_{23}}{r \cdot P_r \cdot C_r} \cdot A_{23} \quad (6)$$

由(5)或及(6)，可求得：

$$M_{P_1} = \left(\frac{V_{23} \cdot A_{23}}{V_{13} \cdot A_{13}} \right) \cdot M_{P_3} \quad (7)$$

将(7)式代入(3)式，即得：

$$M_{P_1} = \sqrt{\frac{V_{12} \cdot V_{13}}{V_{23}} \cdot \frac{1}{r P_r C_r} \cdot \frac{A_{12} A_{13}}{A_{23}}} \\ = \sqrt{\frac{V_{12} V_{13}}{V_{23}} \cdot \frac{1}{r P_r C_r} \cdot \frac{U_2}{U_1}} \quad (8)$$

用 V_1, V_2, V_3 分别表示 V_{12}, V_{13}, V_{23} ；用 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 分别表示比率变压器的读数，将传声前置放大器增益记为 a_1 ，并令 $K_0 = (a \cdot r \cdot P_r \cdot C_r)^{-1}$ ，则由互易法测得的电容传声器开路灵敏度值 M_P 为：

$$M_P = \left[\frac{V_1 V_2}{V_3} \cdot \frac{\beta_3}{\beta_2 \cdot \beta_2} \cdot K_0 \right]^{\frac{1}{2}} \cdot a_K \quad (9)$$

考虑到由于波动，温度，湿度，极化电压的变化而引起的灵敏度值 M_P 的误差，(9)式可改写为：

$$M_P = \left[\frac{V_1 V_2}{V_3} \cdot \frac{\beta_3}{\beta_1 \cdot \beta_2} \cdot K_0 \right]^{\frac{1}{2}} \cdot (\alpha_K \cdot W \cdot S_h \cdot S_p \cdot S_t) \quad (10)$$

其中 $\alpha_K = a \cdot \beta_B / \beta_A$ ——灵敏度之比值；

W 为波动修正； S_h 为湿度修正； S_t 为温度修正； S_p 为极化电压偏离 200 伏的修正。对(10)式中各个可能变化的量进行微分，即得：

$$M_P' = \sum_{x=1}^3 \left[\frac{\partial M_P}{\partial V_x} V_x' + \frac{\partial M_P}{\partial \beta_x} \beta_x' \right] + \frac{\partial M_P}{\partial K_0} \cdot K_0' + \frac{\partial M_P}{\partial \alpha_K} \cdot \alpha_K' + \frac{\partial M_P}{\partial W} \cdot W' + \frac{\partial M_P}{\partial S_h} \cdot S_h' + \frac{\partial M_P}{\partial S_p} \cdot S_p' + \frac{\partial M_P}{\partial S_t} \cdot S_t'$$

最大可能误差则为

$$\left[\frac{M_P'}{M_P} \right]_{\max} = \frac{1}{2} \left\{ \sum_{x=1}^3 \left[\frac{V_x'}{V_x} + \frac{\beta_x'}{\beta_x} \right] + \frac{C_r'}{C_r} + \frac{\alpha_1}{a} + \frac{r'}{r} + 2 \left[\frac{\alpha_K'}{\alpha_K} + \frac{W'}{W} + \frac{S_h'}{S_h} + \frac{S_p'}{S_p} + \frac{S_t'}{S_t} \right] \right\} \quad (11)$$

根据厂方所提供的仪器和元件的有关数据，以及由已知实验测得的各种数据，求得上述各项最大可能误差分别为：

- $3 V_x' / V_x$ ——等效体积： 60×10^{-6} ；
- $3 \beta_x' / \beta_x$ ——衰减器读数： 1.5×10^{-6} ；
- C_r' / C_r ——基准电容： 50×10^{-6} ；
- a' / a ——传声前置放大器增益： 1×10^{-6} ；
- r' / r ——比热比： 500×10^{-6} ；
- P_s' / P_s ——大气压力： 50×10^{-6} ；
- $2 \alpha_K' / \alpha_K$ ——灵敏度比： 4×10^{-6} ；
- $2 W' / W$ ——高频波动修正： 100×10^{-6} ；
- $2 S_h' / S_h$ ——湿度修正： 46×10^{-6} ；

$2 S_p' / S_p$ ——极化电压修正： 100×10^{-6} ；

$2 S_t' / S_t$ ——温度修正： 20×10^{-6} 。

除了上述 11 项可能误差外，还可能出现在其它的一些误差。例如：信号发生器幅度的变化，耦合腔内发射与接收信号的相位差异和零位检测仪的共态抑制性质所引入的误差等。但是这些误差比起上述误差数量级，是完全可以忽略的。譬如，当信号发生器幅度改变 10% 时，引入的误差仅为 0.003 分贝。

由方程 (11) 得到的各项误差之和

$$\left[\frac{M_0'}{M_0} \right]_{\max} \text{ 为 } 466 \times 10^{-6}, \text{ 即 } 0.004 \text{ 分贝。}$$

通过上述理论上的误差分析，可知采用耦合腔互易校准装置，所得到的基准传声器的绝对开路灵敏度最大可能误差小于 0.005 分贝，它完全满足 IEC 327R 文件中所规定的 ± 0.05 分贝的精度要求。

耦合腔互易校准所获得的声压基准虽然精度较高，而且操作比较简便，但是校准中由于受到耦合腔频率响应的影响，不可避免地使校准的频率上限受到限制，所以一般采用小尺寸的耦合腔；或者校准时，利用毛细管以便通过它对耦合腔充入氢气或氦气，使耦合腔的谐振频率移向高频，从而扩展校准的频率上限。图 3，图 4，图 5 分别绘制了不同尺寸的 IEC 耦合腔典型的频率响应曲线。从图中可以看出，耦合腔的尺寸越小，腔的谐振频率 f_c 就越高。但是另一方面，耦合腔尺寸越小，就越不能符合耦合腔互易校

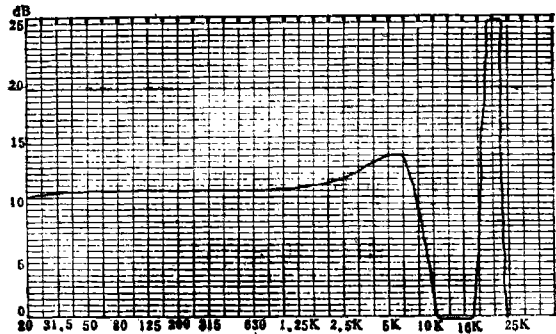


图 3 IEC 1CC 耦合腔典型的频率响应曲线

准中关于热力学绝热过程状态的假设前提，从而使测试的精度变差。目前，通常采用 IEC

所推荐的 3CC, 20CC 两种耦合腔进行校准。

表 1 中列出了一些国家计量机构校准的

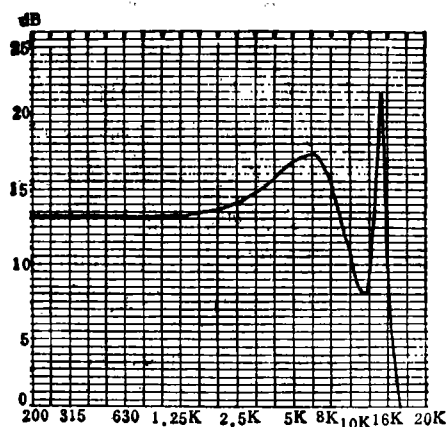


图 4 IEC 3CC 耦合腔典型的频率响应曲线

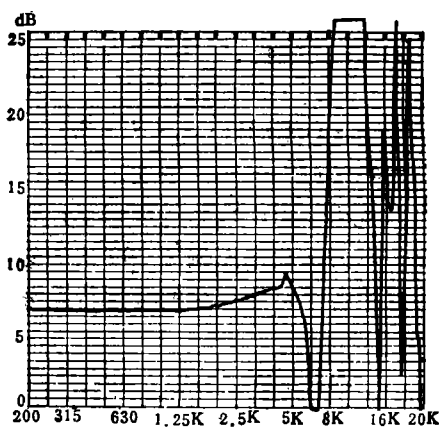


图 5 IEC 20CC 耦合腔典型的频率响应曲线

表 1

机 构	频 率 范 围	不 确 定 度	备 注
美国标准局	500 赫~1000 赫 10 赫~20 千赫	0.06dB 0.10dB	用 20CC 腔 用 3CC 腔
英国物理所	100 赫~1000 赫	0.10dB	
西德物理技术研究所	10000 赫以下	0.1~0.2dB	各种尺寸腔
法国国家计量研究所	中 频 段	大约 0.1~0.3dB	用 20CC, 及 3CC 腔
苏联计量科学院	20 赫~100 千赫	0.1~0.3dB	用 20CC 0.3CC, 3.0CC 及 0.1CC 腔
加拿大研究所	中 频 段	0.005dB	用 3CC 腔
日本电气研究所	100~600 赫	0.15dB	
丹麦 B/K 公司	800 赫	0.07dB	用电容旁路法
新 西 兰	600 赫	系统不确定度 ± 0.013 dB 随机不确定度 ± 0.0027 dB	
IEC327 推荐	10 千赫以下	0.05dB	均用 20CC 腔及 3CC 腔
IEC402 推荐		0.3dB	

不确定度，以供参考。

三、我国目前耦合腔 声压基准的状况

我国耦合腔声压基准最初建立于 1965 年，主要装置以丹麦 4142 型传声器校准仪为

主，加上交流零位检测仪，精密衰减器，测量放大器以及信号发生器等辅助设备，电容传声器采用 4132 型，当频率在 1 千赫以下时，校准精度优于 0.2~0.3 分贝。最近几年，国内一些计量部门陆续添置了丹麦 B/K 4143 型互易校准仪，并配置三个 4160 型标准电容传声器。1981 年开始成立全国计量系统

耦合腔声压基准比对小组，定期轮番比对。比对中，对各项指标进行严格考核，通过反复的测试和比对，确定各自的基准传声器。比对中，凡是不合格的，即予淘汰，降级使用。1982年2月，我国首次参加亚太地区基准传声器的测试比对，由澳大利亚的两只传声器(4144型)与我国计量院一只4144型传声器组成一组，进行测试。主机由我国计量院提供。比对结果是令人满意的，误差在±0.05分贝范围内。

在1981年和1982年国内耦合腔声压基准比对中，发现丹麦B/K公司原来提出的 $10\lg \frac{1013}{P_s}$ 气压修正公式有一定的局限性。

根据我们所进行的实验来看，这公式仅仅适用于 1013 ± 10 毫巴的气压范围，在这个气压范围内，其测试精度可保证为±0.05分贝，因而原来所给的适用于860~1060毫巴气压范围的前提不能被认为是严密的。有关气压修正问题，另有专门文章介绍，本文不再赘述。

表2 1981年、1982年国内声压基准比对测试数据之一

测试 结果 (dB)			测试地点							
			昆 明	银 川	成 都	哈 尔 滨	北 京		上 海	
传声器			810.3	890.4	956.3	993.7	1013.3		1016.0	
型号	编号	计算					81年8月	82年9月	81年8月	82年7月
4160	873970	未修正	-27.314	-27.042	-26.83	-26.76	-26.715	-26.728	-26.730	-26.746
		已修正	-26.102	-26.272	-26.42	-26.60	-26.662	-26.678	-26.668	-26.69
4160	873973	未修正	-27.276	-27.003	-26.79	-26.771	-26.713	-26.692	-26.735	-26.723
		已修正	-26.062	-26.237	-26.39	-26.610	-26.658	-26.645	-26.668	-26.67
4160	873977	未修正	-26.848	-26.589	-26.41	-26.361	-26.305	-26.306	-26.312	-26.309
		已修正	-25.628	-25.818	-26.00	-26.19	-26.245	-26.267	-26.247	-26.251

表2中给出了上海市标准计量局一组基准传声器比对测试数据。从测试数据中明显地看出，成都地区的气压为956.3毫巴，

如用 $10\lg \frac{1013}{P_s}$ 气压修正公式，计算结果就

远远超出了±0.05分贝的精度要求，气压越接近标准大气压1013毫巴，则计算过程中运用

$10\lg \frac{1013}{P_s}$ 气压修正公式所给出的结果就

越能符合±0.05分贝的精度要求。请参看表2中北京，上海地区的测试数据。

上海市标准计量局的一组4160型电容传声器出厂时的开路灵敏度分别为：

$$4160(873970):M_{P_s} = -26.6 \text{ 分贝}$$

$$4160(873973):M_{P_s} = -26.6 \text{ 分贝}$$

$$4160(873977):M_{P_s} = -26.6 \text{ 分贝}$$

参 考 文 献

- [1] 丹麦 B/K "Reciprocity Calibration Apparatus Type 4143".
- [2] "国外振动计量与声学计量概况", 中国计量院编, 1978年9月.
- [3] 精密互易校准 "Text of oral Paper Presented at the 97th Meeting of the Acoustical Society of America in Cambridge, Mass, 11 th to 15 th June, 1979".
- [4] 丹麦 B/K "Microphone Calibration Apparatus Type 4142".
- [5] 丹麦 B/K "One — inch Condenser Microphone Type 4160".
- [6] IEC 327 "Precision Method for Pressure Calibration of one — inch Standard Condenser Microphones by the Reciprocity Technique".
- [7] "实验误差估计与数据处理". 肖明耀著.