

电容传声器耦合腔互易校准

章汝威 张柏玲 孔凡永

(中国科学院声学研究所)

1981年12月9日收到

本文对直径为24毫米和12毫米的国产传声器系列,建立起耦合腔互易校准装置。在BK4119型校准仪的基础上,作了若干改进。对读数系统和稳定振荡器输出采取了措施,使建立的校准系统的装置误差不大于 ± 0.05 分贝。达到国际标准IEC327的要求。

一、引言

直径为24 cm和12 cm的国产电容传声器系列已生产多年,在声学测试、噪声测量等方面得到广泛的应用,但至今对这些尺寸系列的传声器未用耦合腔进行互易校准。这里提出两个问题:一是国产系列需要建立相应的耦合腔互易校准设备;二是建立的装置与方法能否达到国际上的IEC要求。对此我们采用丹麦BK公司4119型归式耦合腔校准仪,对耦合腔腔体进行重新计算和设计,在保留它的原来功能外,扩展到能适应国产系列的校准。采用国产数字电压表读数和自制二极管自动控制电路以稳定振荡器输出等措施,使建立起来的校准装置的误差达到IEC 327的要求。

二、原理简述

对于无源、线性、可逆的传声器,

根据互易原理,利用一个耦合腔和三只电容传声器,就可以求出传声器的灵敏度。三只传声器的灵敏度为:

$$M_1^2 = \frac{e_{12}}{e_c} \cdot \frac{e_{31}}{e_{32}} \cdot \frac{V_0 + V_1 + V_2}{rP_0C}$$

$$M_{II}^2 = \frac{e_{12}}{e_c} \cdot \frac{e_{32}}{e_{31}} \cdot \frac{V_0 + V_1 + V_2}{rP_0C}$$

$$M_{III}^2 = \frac{e_{13}}{e_c} \cdot \frac{e_{23}}{e_{21}} \cdot \frac{V_0 + V_1 + V_2}{rP_0C}$$

式中 $M_{I, II, III}$ 分别为传声器I、II、III的灵敏度,单位为伏/帕斯卡, $e_{jk}(j=1, 2, 3; k=1, 2, 3)$ 为传声器 j 发射,传声器 k 接收时的输出电压; V_0 为耦合腔体积; $V_{1,2,3}$ 分别为传声器I、II、III的等效体积, r 为气体比热比,对空气, $r=1.402$; P_0 为腔中气体压力。

三、校准装置

校准装置是由一台声频振荡器,两台传声器放大器,一台直流数字电压表,一台1/3倍频程滤波器和一台互易校准仪组成。如图1所示。稳压线路和检波线路都装在校准仪中。互易校准仪是利用一台丹麦BK4119改装而成,这样做既节省了加工时间,又减少了很多接插元件和连线。

电容C的选择,必须使发射电压与开路电压接近,以使放大器在整个测量过程中,不必换档,从而消除换档误差。

下面讨论几个问题:

1. 振荡器输出电压的稳定方法

在校准过程中,由于振荡器输出电压的变化(一般可达千分之几)将使结果带来误差,采用了稳压方法(见图2),可将电压稳定在千分之一左右。其原理简述如下:

振荡器输出电压经 d_1 检波后在C上得到一

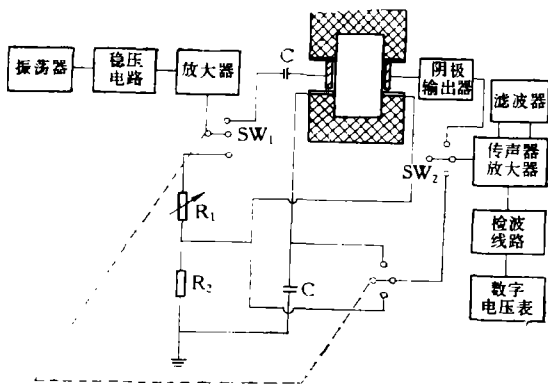


图1 耦合器互易校准装置

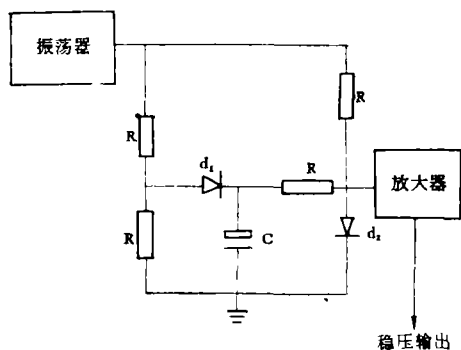


图2 稳压线路

个直流电压，此电压可改变 d_2 的直流工作点，从而控制了 d_2 的交流阻抗。 R 和 d_2 的交流阻抗形成分压电路。当振荡器输出变大时，它的衰减变大，分压比变小；反之，分压比变大，从而使放大器的输出电压比较稳定。经测定，当振荡器输出变化为 10% 时，放大器的输出变化为 2%。

2. 交流电压 e_c 、 e_{ik} 等的测量

为了提高测量精度，这些交流量是用直流数字电压表来测量的，因而必须将其检波成为直流，其线路见图3。这些交流量经放大器放大后，一般在 4 V 至 10 V 之间；DYJ-2A 数字电压表的输入阻抗为 10 M Ω ，精度为 $\pm 0.03\%$ ；电容 C 为钽电容，经测定其直流漏电阻大于 10 M Ω ；两个 10 M Ω 并联成为一个 5 M Ω 的电阻作为二极管的负载。交流经检波后，其峰值电压约 5—14 V。因而经过二极管的电流为 1—3 μA 。从二极管伏-安特性可知，在二极管上将产生 10—30 mV 的管压降，也就是直流值的测量将

产生 $10\text{ mV}/5\text{ V} = 0.2\%$ 的误差，但在互易校准中所测的是电压比 e_{12}/e_c 、 e_{31}/e_{32} 等，这样 0.2% 的误差是分子分母都有并且误差方向相同，因而可以消除，不影响校准的精度。

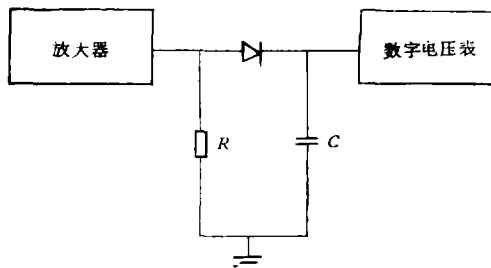


图3 检波线路

3. 开路电压的测量

由于电容传声器的输出阻抗很大，即使采用阴极输出器作其负载，仍有一定的衰减。同一个传声器用不同的阴极输出器，其读数不一样。因此，我们采用了替代法（插入电压法）来测量头子的开路电压，可以计算出传声器的开路灵敏度，与阴极输出器无开。

四、互易校准系统的标准误差

按照误差计算原理，若总的测量结果由各部分测量结果来推算，而各部分测量的结果误差为 a 、 b 、 c ...，则总结果的误差为：

$$R = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + \dots}$$

下面对互易校准中各个量的测量进行讨论，然后给出灵敏度校准系统的标准误差。

1. ($V_0 + V_1 + V_2$) 的测量

i) V_0 的测量，我们采用 20 cm³ 的标准空腔，它由一个大腔和两个小腔组成。有两组耦合腔：

A. 校准 $\phi 24.00$ 传声器用：

大腔：直径 $D = 42.96 \pm 0.02$ mm；

高度 $H = 12.70 \pm 0.02$ mm；

体积 $V_{\text{大}} = 18.41 \text{ cm}^3 \pm 0.031 \text{ cm}^3$

小腔：直径 $d = 18.60 \pm 0.02$ mm；

高度 $h = 2.60 \pm 0.02$ mm；

体积 $2V_{\text{小}} = 1.32 \text{ cm}^3 \pm 0.011 \text{ cm}^3$ 。

$$\begin{aligned} \text{耦合腔总体积 } V_0 &= 19.73 \text{ cm}^3 \pm 0.042 \text{ cm}^3 \\ &= 19.73 \text{ cm}^3 \pm 0.213 \% \end{aligned}$$

B. 校准 $\phi 23.77$ 传声器用:

$$\begin{aligned} \text{大腔: 直径 } D &= 42.96 \pm 0.02 \text{ mm;} \\ \text{高度 } H &= 12.54 \pm 0.02 \text{ mm;} \\ \text{体积 } V_{\text{大}} &= 18.18 \text{ cm}^3 \pm 0.031 \text{ cm}^3, \\ \text{小腔: 直径 } d &= 18.64 \pm 0.02 \text{ mm;} \\ \text{高度 } h &= 2.66 \pm 0.02 \text{ mm;} \\ \text{体积 } 2V_{\text{小}} &= 1.45 \text{ cm}^3 \pm 0.011 \text{ cm}^3. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{耦合腔总体积 } V_0 &= 19.63 \text{ cm}^3 \pm 0.042 \text{ cm}^3 \\ &= 19.63 \text{ cm}^3 \pm 0.214 \% \end{aligned}$$

ii) 两个传声器等效体积 ($V_1 + V_2$) 的误差: 传声器的等效体积是各个不同的, 我们没有进行逐个测量. $\phi 23.77$ 和 $\phi 24.00$ 这两种传声器的等效体积, 按统计平均值计算为 0.15 cm^3 , 我们假设等效体积有 10% 的误差, 则 ($V_1 + V_2$) 的误差为 $\pm 0.03 \text{ cm}^3$.

iii) ($V_0 + V_1 + V_2$) 的误差:

$$\begin{aligned} \text{A、} (V_0 + V_1 + V_2) &= 20.03 \text{ cm}^3 \pm 0.072 \text{ cm}^3 \\ &= 20.03 \text{ cm}^3 \pm 0.36 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{B、} (V_0 + V_1 + V_2) &= 19.93 \text{ cm}^3 \pm 0.072 \text{ cm}^3, \\ &= 19.93 \text{ cm}^3 \pm 0.36 \%. \end{aligned}$$

2. 大气压 P_0 的误差, 我们用福挺式气压计测量, 读数可达 4 位有效, 即误差可小于 0.1% 我们按 0.1% 计算.

3. 为测量发射电流所用的电容 C , 我们使用精密电容电桥测量, 误差小于 0.1%, 我们按 0.1% 计算.

4. 电压 e_{jk} 的误差, 我们用数字电压表来测量, 按 DYJ-2A 的精度可达 0.03%, 但在实际测量中, 由于放大器输出的不稳定及噪声的干扰, 使读数不稳定. 最后一个数码在变化, 一般要变化 ± 1 个字, 因此它们的误差为 $\pm 0.2\%$.

5. 极化电压的误差: 用数字电压表测量, 精度可达 0.03%. 在实验过程中, 对极化电压进行过监视, 发现有所变化, 变化小于 0.1%, 所以误差按 $\pm 0.1\%$ 计算.

6. 因推导互易公式时, 假定过程是绝热的, 低频时, 由于热传导将引起误差. 频率高于

100 Hz 时, 热传导的影响小于 $\pm 0.2\%$, 我们按 0.2% 计算.

7. 高频时, 腔内有波动, 不同频率时的波动修正值不同, 根据 IEC, 频率 400 Hz 时, 波动修正小于 $\pm 0.05\%$; 频率 1000 Hz 时, 波动修正为 0.2%.

8. 根据上述分析, 我们这套校准系统的标准误差为 0.446%, 即为 $\pm 0.039 \text{ dB}$, 其精度已达到国际标准 IEC 的要求.

五、实验结果

应用我们这套校准装置, 对 $\phi 24.00$ 、 $\phi 23.77$ 、 $\phi 12.70$ 各类传声器进行多次校准, 校准结果列表 I.

下面讨论几个问题:

1. 确定了装置误差和实验误差后, 经校准的传声器其灵敏度的准确度(离真值的程度)怎样确定呢? 如果测量是非常多次, 那么通过大量的测量, 灵敏度的准确度可由测量系统的装置误差来确定. 若测量只进行有限 n 次, 例如 n 次, 灵敏度取为 n 次的算术平均值, 其准确度 D 即为:

$$D = \sqrt{(\Delta A)^2 + (\Delta B)^2}$$

式中 ΔA 为测量系统的装置误差; ΔB 为测量过程中的实验方均根误差. 由表 I 可知, 我们在实验中得到的方均根误差(即标准误差)一般不大于 $\pm 0.05 \text{ dB}$.

2. 众所周知, 互易校准的基础是要有一个互易性好的传声器, 即其发射灵敏度等于接收灵敏度, 而实际产品这方面出入较大. 为此, 我们取两组传声器做验证实验.

第一组传声器为 4144 (439178) 和 4145 (435691):

4144 作互易时得:

4144 (439178) 的灵敏度为 -27.644 dB ;

4145 (435691) 的灵敏度为 -26.220 dB .

4145 作互易时得:

4144 (439178) 的灵敏度为 -27.539 dB ;

表 I. 实验结果

传声器型号		实验次数	耦合腔体积 cm^3	实验频率 Hz	开路灵敏度		实验方均根误差($\pm \text{dB}$)	备注
					mV/Pa	dB $0\text{dB} = 1\text{V/Pa}$		
国产 $\phi 24$ (2714)		20	19.73	250	42.7321	-27.385	0.041	
				400	42.2657	-27.480	0.046	
				1000	41.6292	-27.612	0.044	
国产 $\phi 24$ (2711)		20	19.73	250	42.6705	-27.397	0.064	
				400	42.2657	-27.480	0.060	
				1000	41.7367	-27.590	0.031	
BK4144 (439178)	1*	10	19.63	400	41.4789	-27.644	0.023	
	2*	12			41.9802	-27.539	0.032	
BK4145 (435691)	1	10	19.63	400	48.8654	-26.220	0.033	
	2	12			49.6592	-26.081	0.044	
BK4165 (816269)		18	19.63	400	44.4515	-27.042	0.047	等效体积为 0.04 cm^3
BK4165 (843448)		18	19.63	400	44.8362	-26.967	0.037	等效体积为 0.04 cm^3
BK4133 (102838)	3*	12	0.284	400	9.3083	-40.623	0.021	等效体积为 0.008 cm^3
	4*				9.3029	-40.628	0.015	
BK4133 (172973)	3	12	0.284	400	9.2172	-40.708	0.038	等效体积为 0.008 cm^3
	4				9.2155	-40.712	0.042	

* 表中 1 是以 4144 (439178) 作互易时测得的灵敏度。
3 是以 4133 (102838) 作互易时测得的灵敏度。

2 是以 4145 (435691) 作互易时测得的灵敏度。
4 是以 4133 (172973) 作互易时测得的灵敏度。

4145 (435691) 的灵敏度为 -26.081 dB 。

dB 。

两种情况测得的灵敏度差值为: 4144 (439178) 差 0.105 dB ; 4145 (435691) 差 0.139 dB 。

第二组传声器都为 4133, M_1 (102838) 和 M_2 (172973):

M_1 作互易时得: M_1 (102838) 的灵敏度为 -40.623 dB ;

M_2 (172973) 的灵敏度为 -40.708 dB ;

M_2 作互易时得: M_1 (102838) 的灵敏度为 -40.628 dB ;

M_2 (172973) 的灵敏度为 -40.712 dB ;

两种情况下测得的灵敏度差值为: M_1 (102838) 差 0.005 dB ; M_2 (172973) 差 0.004

由实验结果可看出, 第二组传声器的互易性较第一组好, 这样校准的灵敏度的准确性就高。第一组传声器互易性差, 对同一传声器, 用自身作互易和用其他传声器作互易时, 校准得到的灵敏度是有差别的, 其差值有时可以超过校准的精度。这点在校准过程中是看不出的, 所以, 在作互易校准时, 为了保证被校准的灵敏度的准确性高, 一定要选择互易性好的传声器作互易。

3. 我们没有考虑频率变化的影响, 根据 IEC 规定: 若频率这个量直接进入互易公式的话, 要求其精度为 0.1% 或 $\pm 1 \text{ Hz}$, 我们用的振荡器是 XFS-9A 型, 频率 400 Hz 时在 1 小时内变化小于 10 Hz , 我们做一次互易校准需 15 分钟左右, 经实验, 频率变化不大于 $\pm 2 \text{ Hz}$ 。由

于在我们这儿频率是隐函数，且校准频率是在传声器频响的平直部分，所以没考虑其影响。当然有条件时，还应挑选频率性能更稳定的振荡器。

4. 4133(ϕ 12.7) 传声器的灵敏度低，只能用 0.3 cm^3 的耦合腔。因此，腔体积计量精度低而使装置误差增大。现在已有高灵敏度的 ϕ 12.7 传声器（我们所也在试制高灵敏度的 ϕ 12.0 传声器），可用它作互易传声器，仍用 20 cm^3 耦合腔，这样对低灵敏度的 ϕ 12 或 ϕ 12.7 传声器可进行互易校准。且保持系统准确度不变。

5. 本校准系统已经过二年多时间的考验，实验结果证明它性能稳定，见表 II

表 II

校准时间	传声器开路灵敏度 (dB)	4144(439128)		4145(435691)	
		1*	2*	1	2
1979 年 10 月—11 月		-27.644	-27.539	-26.220	-26.081
1981 年 10 月		-27.687	-27.524	-26.079	-26.028

* 表中 1, 2 的含意与表 I 同。

六、结 论

本校准系统以采用国产仪器为主，在原有

(上接 38 页)

力 100 个大气压，时间 4 小时，取出后外观无变化，结构无损坏，无漏水，绝缘电阻无变化。

五、讨 论

1. 由主要指标的估算和实际测量基本一致表明：GE-1 型换能器具有耐 100 个大气压、在半空间具有单向辐射能力和尖锐指向性的特点。

2. 通过实验室高压水密实验和实际使用证明：用聚氨酯橡胶作为换能器的高压水密包敷材料是可行的，从而较好地解决了高压透声水

应用声学

丹麦耦合腔校准仪 4119 基础上改进而成的。它有下列几个特点：

1. 配置了校准 ϕ 24 和 ϕ 12 两种传声器的耦合腔，同时可校准多种尺寸的传声器。

2. 采用了插入电压法，可测量传声器开路电压灵敏度，同时能很方便地测出阴极输出器的衰减值。

3. 原来电信号读数由 BK 2604 表头给出，表头读数的精密度小于 1%，现在电信号经检波后，由数字电压表给出读数，精密度可达 0.2%。

4. 原来振荡器输出电压幅度不够稳定，现在采用二极管自动控制电路，可使幅度变化稳定在千分之一左右。

5. 本校准系统的装置误差不大于 $\pm 0.05 \text{ dB}$ ，已达到 IEC 327 的要求。

本工作是在马大猷教授指导下进行的。实验中得到陶中达、宋燕君、李秀珍等同志的协助，特此致谢。

参 考 文 献

IEC 327 "Precision method for pressure calibration of one-inch standard condenser microphones by the reciprocity technique", 1971 年。

密问题。

3. 由于采用了新型高强泡沫材料，较好地解决了换能器在高压下的单向辐射问题，减少了杂波干扰。

4. 本换能器使用在“井径仪”中，通过实际测井证明，能较好地满足总体方案和电路配合的要求。

参 考 文 献

- [1] B. H 秋林主编，“水声学的理论基础”中国科学院电子学研究所译，科学出版社出版，1959 年，81—85。
- [2] R. S. Woollett, IRE Conv. Record pt 6, 1962, 90—94.
- [3] R. S. Woollett, IEEE Transactions on Ultrasonics Engineering UE-10, 3 (1963), 116—124.