

# 耳声阻抗的数值校测及其与频率的关系

饶宇安 梁之安

(中国科学院上海生理研究所)

本工作用耳声阻抗测定探头，在接口的长短和直径不同的条件下对等效声顺校正腔进行了实测和比较。当频率低于 500 赫时阻抗探头电输出与声顺等效容积间的变化呈单调函数关系，800 赫以上则呈“V”形。接口长短在 0—5 毫米和直径在 1—2 毫米范围内变化时，低频的校正误差最大可达 0.4 毫升，高频的误差更大。校正腔接口的长短和直径都以选用 2 毫米较为适宜。此外还对国内外五种不同的校正腔进行了比较。

近十年来，阻抗测听术在国外已发展成为耳科临床检查的一种常规方法。这一新方法在我国也已在一些医院使用，关于中国人正常耳的声顺值及声顺图的特性已有报导<sup>[1]</sup>。耳声阻抗是声阻、质量声抗(大致相当于感抗)和弹性声抗(大致相当于容抗)三者非常复杂的组合，要作简单的描述和准确的测量很不容易。正是由于这种复杂性，它的临床应用曾长期地处于停滞状态<sup>[2~4]</sup>。直到近年由于抓住了在低频声耳声阻抗的相对变化中弹性声抗(容抗)是主要的因素这一特点，把耳声阻抗的关系作了很大程度但相对合理的简化，才使它得到实际的应用和较快的发展<sup>[5~7]</sup>。简化的要点是取耳声阻抗  $Z_A$  的近似表达式为  $Z_A \doteq 1/j\omega C_A$  ( $C_A$  为声顺)，并用一个可以计算其声阻抗值的容腔作为测定声顺等效容积数值的校正和比较标准。这一校正腔在声阻抗测量中甚为重要，但目前对它尚未见有系统的研究和计量上的统一规定。由于各个厂家所生产的阻抗测听器其校准条件不统一，因此，由不同仪器测得的结果有时难于严格进行互比较。另外，近年来耳声阻抗的实验资料表明，仅选用单一低频来测定耳的声阻抗或声顺作为判断中耳功能的指

标是不够的<sup>[8]</sup>。用多个频率测试比用单个低频可能会提供较多的有用信息。这样一来，对不同频率的耳声阻抗与等效容积校正之间的数值变化关系加以系统对比研究，便更有它的必要性。本工作分析了 220 赫—1250 赫频率范围内校正腔接口部分的半径和长短与国产中耳功能测定仪的声阻抗探头电输出之间的变化特性，并对在声阻抗或声顺的标定和校准工作中应该加以注意的条件进行了讨论。

## 校准原理和装置

校准腔通常为容积可变的、一端开口的圆筒形金属容器，考虑到接口形状的影响，在其开口端所测试的声阻抗可用下式表示：

$$\begin{aligned} Z_A &= -j\rho_0 C \operatorname{ctg} kl / \pi R^2 - j\rho_0 C \operatorname{tg} kh / \pi a^2 \\ &\doteq -j/\omega (V/\rho_0 C^2) + j\omega l \rho_0 / 3\pi R^2 - \dots\dots \\ &\quad + j\omega \rho_0 h / \pi a^2 + j\omega^3 \rho h^3 / 3\pi a^2 C^2 + \dots\dots \end{aligned} \quad (1)$$

式中： $k$  为波数， $l$  为校正腔的容积深度； $R$  为校正腔截面半径； $\rho_0 C$  为空气密度及声速； $\omega$  为测试声角频率； $a$  为校正腔开口端与待校耳塞接口端颈部的半径； $h$  为接口颈长。

当校正腔管长  $l < \lambda/8$  时 ( $\lambda$  为测试信号的波长), 我们可以近似取上式  $\text{ctg}$  和  $\text{tg}$  级数展开中的第一项, 即式(1), 它以 5% 的误差近似表示  $Z_A$ 。校正腔体积增加时,  $l$  随之加长; 频率升高时, 则  $k$  和  $\omega$  增加。校正腔直径  $D=20.59$  毫米, 螺距 2.5 毫米, 最小容积读数刻度为 0.04 毫升, 接口部分的半径  $a$  及颈长  $h$  可以变化。在本工作中,  $a$  选用 1—2 毫米,  $h$  选用 0—5 毫米。测试时, 以 1023 型正弦发生器作为测试信号源, 电压恒定。强度适当的正弦波系送至测试探头中发射声音的耳机。测试探头由相应的耳塞与校正腔联接, 耳塞和耦合接口的直径都是 8 毫米。测试探头中传声器部分的电输出接到 2112 型音频频谱仪上, 信号经放大和滤波后, 从表头直接读出其电压的输出值。测试声选择 220, 300, 500, 800, 1000, 1250 赫共六个频率, 对  $a$  和  $h$  的每一个组合的等效容积与输出电压之间的变化规律进行了测定。

## 结果和讨论

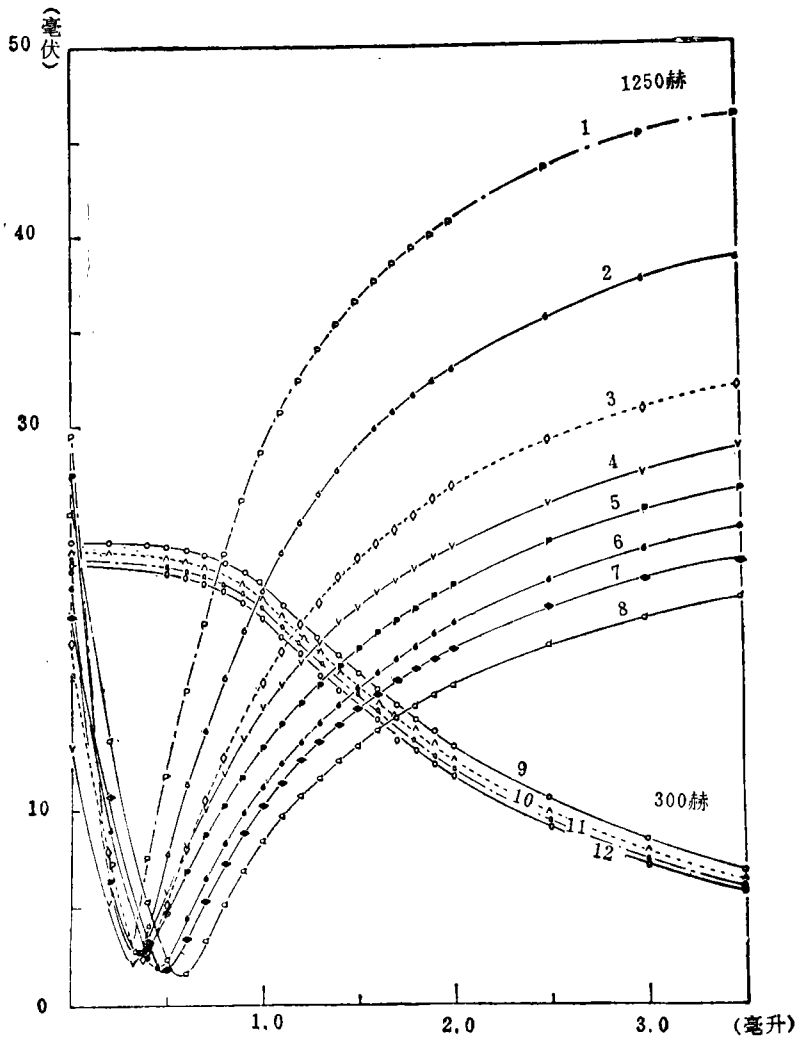
实验所得的声阻抗探头输出电压与相应校正腔等效容积间的变化曲线见图 1、2、3。图中纵坐标为探头输出电压(毫伏), 它代表探头开口处声阻抗  $Z$  的相对变化; 横坐标为校正腔对应的容积数(毫升), 它代表声顺  $C_A$  的等效值。由图可见, 在测试信号为 500 赫以下时, 所得曲线呈单调性变化, 等效容积声顺值愈大, 输出电压愈小, 也即相应的声阻抗愈小, 但对 800 赫以上信号频率, 曲线则呈现非单调性的“V”变化规律, 而且频率越高, “V”形曲线的下降臂和上升臂越陡, 曲线上‘谷点’所相应的等效声顺容积数也越小。由于在耳阻抗值的校测中, 声阻抗的数值是用式(1)计算而得, 我们可以通过式(1), 对实验所得曲线的变化规律从理论上进行定性分析。式(1)用电路类比的方法就相当于电容和电感的串联电路, 频率低于 500

赫以下时, 相应于电感的质量声抗可忽略不计, 校正腔开口端的声阻抗与等效容积声顺值之间呈单调的反变化关系; 但当信号频率升高时, 则校正腔接口部分的质量声抗和校正腔的形状的影响就不能再予忽略, 相应测得的 V 形曲线, 即相当于电路类比中电容与电感的串联共振谐振曲线\*。决定谐振曲线形状宽度的 Q 值系与质量声抗成正比——当信号频率愈高, 校正腔愈深(即  $l$  长), 接口端颈长  $h$  愈长或颈径  $a$  愈细, 质量声抗就愈大, Q 值也随之增高, 所测得的曲线形状也愈尖狭, 曲线上的‘谷点’即相应于串联共振时阻抗的最低值。信号频率愈高, 则相应的谐振等效声顺容积值也愈小, 对比实验曲线图 1, 2, 3 的结果, 与这样的分析是一致的。

此外, 在声学上当容腔的长度小于测试信号波长的  $1/16$  或  $1/20$  时, 一般可以不考虑容腔形状的影响, 而只计算其容积所相当的声容抗<sup>[9]</sup>。我们按  $1/20$  波长去估算 1400 赫, 可知校正腔长度只要不超过 11 毫米即可, 对于低于 1400 赫的信号则应都以声容抗为主, 此时探头输出电压与等效容积的关系曲线应呈单调变化。但在我们的测量中, 虽然校正腔容积在小于 5 毫升时相应的长度  $l$  不超过 10 毫米, 但在 800 赫的测量曲线上即已出现‘谷点’, 亦即在 800 赫时, 校正腔已显示声容抗与质量声抗的联合作用(图 2)。

为了观测校正腔接口部分颈部耦合形状的影响, 我们用改变接口孔半径  $a$  和颈长  $h$  的办法进行实测, 从实测曲线族上还可以看到: 探头与校正腔接口部的口径愈小, 颈部愈长, 则曲线的陡度愈大, 信号频率愈高时曲线也愈陡。这可以看成是当接口部的质量声抗增大时, 整个谐振曲线的 Q 值随之变大的结果。

\* 本测量中, 因校正腔接口端的声阻抗与该处声压成正比, 亦即与测试耳声阻抗的耳塞探头中接收器部分的输出电压成正比, 而与该处声体积速度成反比。在阻抗型电声类比中, 声体积速度类比于电路中的电流, 故此处可看成电流串联共振型类比。

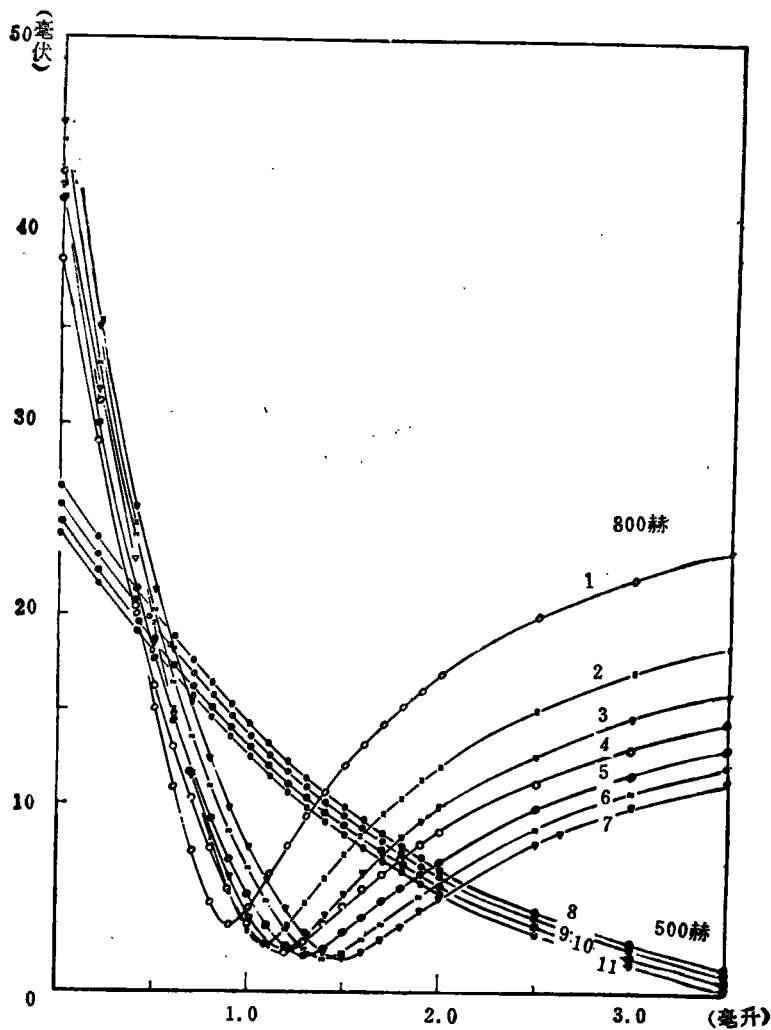


1. 1250 赫	a 1 毫米, h 5 毫米	2. 1250 赫	a 1 毫米, h 3 毫米
3. 1250 赫	a 1 毫米, h 2 毫米	4. 1250 赫	a 1 毫米, h 1 毫米
5. 1250 赫	a 2 毫米, h 5 毫米	6. 1250 赫	a 2 毫米, h 3 毫米
7. 1250 赫	a 2 毫米, h 2 毫米	8. 1250 赫	a 1.5 毫米, h 1 毫米
9. 300 赫	a 1.5 毫米, h 0 毫米	10. 300 赫	a 2 毫米, h 2 毫米
11. 300 赫	a 2 毫米, h 1 毫米	12. 300 赫	a 2 毫米, h 5 毫米

图1 校正腔等效声顺容腔值(横坐标, 毫升)  
与它的声阻抗探头电输出 (纵坐标, 毫伏)间实测曲线(300 赫及 1250 赫)

在计算与低频测试信号的声顺等效容积相应的阻抗时, 是取  $h$  等于零的情况。当颈口有一定长度, 且  $ka < 0.5$  时, 按一般的经验修正, 取  $h = 0.85a$ 。不过低频时这部分声阻抗的数值较小(从 250 到 1200 赫相应的这部分声阻抗值在 5.7 到 27.6 声欧姆之间), 因此在图 1 和图 3 的 300—500 赫低频曲线组

上, 接口处孔径和颈长对曲线形状的影响也很小。但在中高频时, 孔径  $a$  和颈长  $h$  的不同对声阻抗探头输出-等效容积曲线形状的影响是明显的, 从式(1)第二项可见, 随测试信号的频率的升高, 接口端颈长  $h$  对附加声质量的比重也增大, 而孔径  $a$  的作用则相反。 $h$  加长和  $a$  变小, 将使曲线的“V”形谷变得



1. 800 赫	a 1 毫米, h 5 毫米	2. 800 赫	a 1 毫米, h 3 毫米
3. 800 赫	a 1 毫米, h 2 毫米	4. 800 赫	a 1 毫米, h 1 毫米
5. 800 赫	a 2 毫米, h 5 毫米	6. 800 赫	a 2 毫米, h 3 毫米
7. 800 赫	a 2 毫米, h 2 毫米	8. 500 赫	a 2 毫米, h 2 毫米
9. 500 赫	a 2 毫米, h 3 毫米	10. 500 赫	a 2 毫米, h 5 毫米
11. 500 赫	a 2 毫米, h 1 毫米		

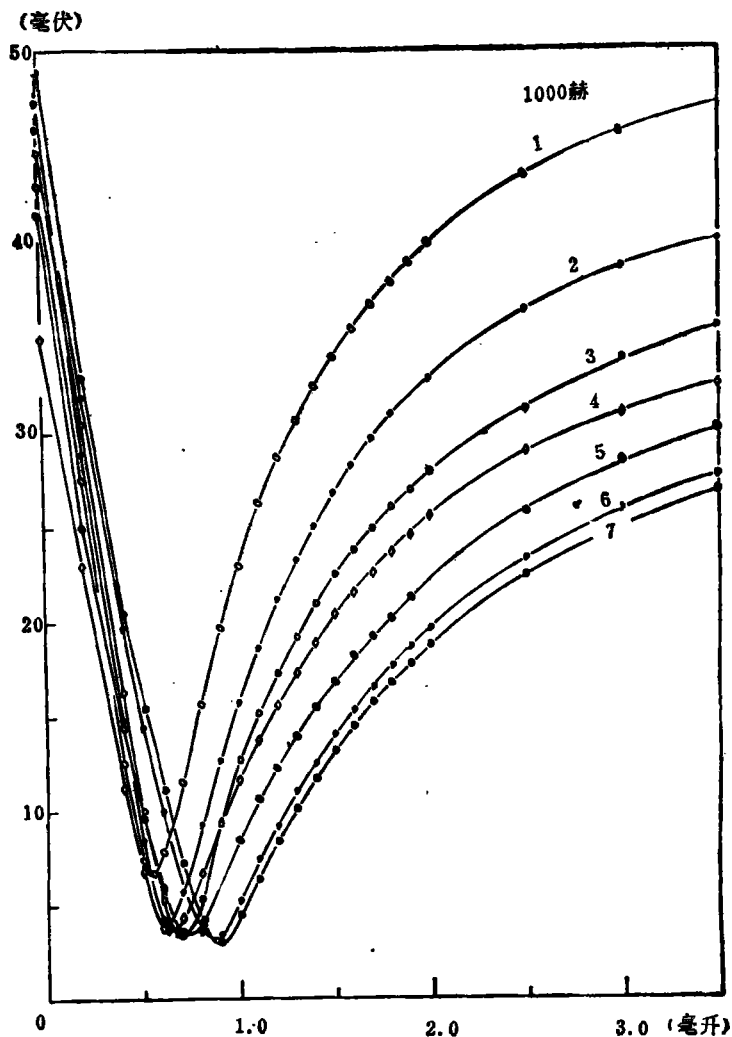
图2 校正腔等效声顺容腔值与声阻抗  
探头电输出间实测曲线(500 赫及 800 赫)

更狭而尖，这在图 1、2、3 上可以清楚看出。

从 300 及 500 赫低频的测量曲线组上可以看到，由于接口端的颈长  $h$  和孔径  $a$  的不同，校正值可以有 0.2 到 0.4 毫升的差值(图中在同一水平线上曲线族散开的程度)，在用不同结构的等效容腔来校正耳声阻抗，以及

在比较从不同仪器上测得的结果时，是必须加以注意的。对于高频， $h$  和  $a$  的不同造成的误差就更大。

显然，为中耳声顺校准及计算阻抗的方便，应该选择单调性变化曲线，并从结构上对测试系统进行适当的调整，使校准时的读数范围尽量相应于曲线较直的部分。在低频



- |           |                |           |                |
|-----------|----------------|-----------|----------------|
| 1. 1000 赫 | a 1 毫米, h 5 毫米 | 2. 1000 赫 | a 1 毫米, h 3 毫米 |
| 3. 1000 赫 | a 1 毫米, h 2 毫米 | 4. 1000 赫 | a 1 毫米, h 1 毫米 |
| 5. 1000 赫 | a 2 毫米, h 5 毫米 | 6. 1000 赫 | a 2 毫米, h 3 毫米 |
| 7. 1000 赫 | a 2 毫米, h 2 毫米 |           |                |

图3 校正腔等效声顺容腔值与声阻抗  
探头电输出间实测曲线(1000赫)

时, 校准曲线的特点近似为  $\Delta C/C$  与  $C$  成反比 ( $C$  为声顺), 亦即同样的  $\Delta C$  值, 在  $C$  的不同值上引起的变化陡度也不同, 等效容积声顺值越小时, 所能测到的  $C$  的变化  $\Delta C$  的精度越高。我们在 300 赫上的校正灵敏度, 在 0.5 毫升时为  $\pm 0.05$  毫升, 4.0 毫升时为  $\pm 0.1$  毫升, 与加拿大 Madsen Z702 耳阻

抗仪所报导的指标相近。校测中工作环境的温度、气压、湿度是有影响的<sup>[6]</sup>。我们所用测试系统在温度从  $11^{\circ}$  至  $15^{\circ}\text{C}$  时, 声顺绝对值的变化小于 0.05 毫升。对 300 赫计算的声阻抗, 等效容积从 0.5 至 1.5 毫升之间的变化, 相当于从 1500 至 500 声欧姆之间的变化。

表2 五种校正腔在相同体积和相同测试系统上不同电输出值的比较

频率 (赫)	校正腔的类别	标称 体积 (毫升)	探头输出 电压 (毫伏)	相当于等效 容积的差值 (毫升)
300	国产 固定腔	1	23.0	0.0
	Madsen 固定腔	1	24.0	-0.17
	Petter 固定腔	1	23.4	-0.05
	自制 可变腔 <sub>1</sub>	1	22.6	+0.12
	自制 可变腔 <sub>2</sub>	1	23.7	-0.08
500	国产 固定腔	1	17.2	0.0
	Madsen 固定腔	1	18.8	-0.18
	Petter 固定腔	1	17.2	0.0
	自制 可变腔 <sub>1</sub>	1	18.2	-0.08
	自制 可变腔 <sub>2</sub>	1	17.7	-0.05

## 几种不同校准腔之间的比较

我们取英国Petters型阻抗听力计上的1毫升圆柱形校正腔,加拿大Madsen Z702型所附的0.5、1.0、2.0、3.0、4.0毫升五种柱形固定容积校正腔,和国产中耳功能测定仪所附的1毫升柱形固定腔,以及两个自制的实验室用可变容积柱形校正腔,分别在国产中耳功能测定仪和Madsen型阻抗听力计上进行声顺等效容积当量的实测比较。

一是比较接上同样体积(标准值1毫升)的几种校正腔时,同一仪器的阻抗探头的输出读数;二是在要探头输出电压固定为某一数值时比较校正腔的容积。结果表明:在标称体积相同,形状(圆柱形)和材料(金属)也相近的各种不同校正腔,在同一阻抗测试仪器上所测得的数值并不相等,个别数值相差还较大。表1列举了用自制的可变腔与加拿大Madsen的固定腔在相同的测试探头和同样的输出电压读数下,300和500赫时所对应的等效容积数。表2为在同样的标称容积体积时,在同一测试系统上,从不同校正腔所测得的电压输出计算出的差值。

表1 两种校正腔在同一测试系统上校准值的比较

阻抗探头输出电压 (毫伏)	Madsen 固定校正 腔(毫升)	自制可变腔 (毫升)	差 值 (差值)
300 赫	24.9	0.5	0.43
	23.3	1.0	0.99
	16.6	2.0	1.89
	10.0	3.0	2.93
	6.5	4.0	3.64
500 赫	20.7	0.5	0.48
	16.5	1.0	0.99
	8.9	2.0	1.91
	4.2	3.0	2.98
	1.64	4.0	3.86

以等效声顺的容积数表示耳的声阻抗是一种实际而方便的方法,但由于这种方法在校准时条件的简化,它本身已包含有一定的误差。实验结果表明,除探头的结构外,校

正腔的几何特性,特别是接口处的半径和长短,对测试结果是有较大影响的。校正腔的接口部分不宜长,接口孔径不宜狭。若把接口部的颈长和直径都统一定为2毫米,也许是较适宜和实际可行的。

### 参 考 文 献

- [1] 梁之安、饶宇安、杨琼华:“人耳正常鼓膜声顺图的频率特性”,声学学报,7卷4期1982.
- [2] Terkildsen K., Nielsen S. S., "An Electroacoustic Impedance Measuring Bridge For Clinical Use" Arch. Otolarygol., 72 (1960): 339—346.
- [3] Ichell, A. H., "The Measurement of the Acoustic Input Impedence of Human Ears", Acustica 13 (1963) 140.
- [4] Zwislocku, J. J., "Some Impedence Measurements on Normal And Pathological Ears", J Acoust. Soc. Am. 29 (1957), 1312—1317.
- [5] Kiessling, J. "Input-Output Function of The Acoustic Reflex And Objective Hearing Aid Evaluation", Audiology 19: 480—490 (1980).
- [6] Keefe, D. H. Benade, A. H. "Impedence Measurement Source And Microphone Proximity Effects", J. Acoust. Soc. Am. 69 (5) May (1981), 1489—1495.
- [7] Barajas, J. J. Olaizola, F. Tapia, M. C. Alarcon J. L. and Alaminos, D. "Audiometric Study of the Neonate: Impedence Audiometry, Behavioural Responses and Brain Stem Audiometry" Audiology 20: (1981) 41—52.
- [8] Katz, Jack etc., "Handbook of Clinical Audiology" ed..press (1963) 463—464.
- [9] Beranek, L. L. "Acoustics" (McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1954), 或声学,章启钲等译, p.145, (科学出版社)。