

声学测量和分析基础

Acoustic Testing and Analysis

编写：刘馥清

声学测量的工程意义

- 环境噪声的检测、分析和治理
 - 交通噪声
 - 工厂噪声
 - 建筑施工噪声
 - 社会噪声
- 机电产品的质量控制与性能评比
- 车辆 NVH 性能评估
- 建筑声学的测量与研究
- 电声仪器设备的设计与改进
- 水声学的测量与试验
- 声测仪器的研制与生产
- 声发射技术的研究和应用

噪声产生原因

1. 空气动力噪声

由气体振动而产生。气体的压力产生突变，会产生涡流扰动，从而引起噪声。空气压缩机、电风扇的噪声属此类。

2. 机械噪声

由固体振动而产生。金属板、金属管、齿轮、轴承等，在设备运行时，受到撞击、摩擦及各种突变机械力的作用，会产生振动，再通过空气传播，形成噪声。

3. 液体流动噪声

液体流动中，由于液体内部的摩擦，液体与管壁的摩擦，或流体的冲击，都会引起流体和管壁的振动，并引起噪声。

4. 电磁噪声

各种电器设备，由于交变电磁力作用，引起铁芯和绕组线圈的振动。引起的噪声通常称交流声。

5. 燃烧噪声

燃料燃烧时，向周围空气介质传递了热量，使它的温度和压力发生变化，形成湍流和振动，产生噪声。

汽车噪声源分类

一 发动机噪声

- 燃烧噪声
- 活塞敲击噪声
- 配气机构噪声
- 喷油泵噪声
- 齿轮噪声
- 进气噪声
- 排气噪声
- 冷却风扇噪声

二 其它噪声

- 传动（变速器、传动轴，…）噪声
- 轮胎噪声
- 车体振动噪声
- 车体空气动力噪声
- 车内其他辅助设备（空调器、刮水器、音响、喇叭…）噪声
- 制动噪声

声波和声速

一 声波

质点或物体在弹性媒质中振动，产生机械波向四周传播，就形成声波。

可听声波的频率为 20~20000 Hz 。

声波在空间传播时，其相位相同的点组成的面称为波阵面。

点声源附近的声波（波阵面）为球面波，离声源足够远处的声波视为平面波，特殊情况（线声源）下可形成柱面波。

二 声频 (f) ,声速 (c) 和声波的波长 (λ)

$$\lambda = c / f$$

声速即声波的传播速度与媒质材料和环境有关。在空气中，声速

$$C = 331.6 + 0.6 t \quad (\text{m/s})$$

其中， t 为摄氏温度

三 波数 (k)

指波传播方向单位长度上的波长数。等于波长的倒数，即 $1/\lambda$ 。更通常的定

义是取 $2\pi/\lambda$ 为波数，以 k 表示。即 $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$ 。

波数也称为波的空间频率。

四 质点速度 (v)

指质点因声音通过而引起的、相对整个媒质的振动速度。它与声速属不同概念，不可混淆。声波传播不是把平衡位置附近的质点传走，而是把它的振动能量传走。

声 场

有声波存在的区域称为声场。声场大致可分为自由场、扩散场和半扩散场三种类型。

一 自由场

在均匀各向同性的媒质中，边界影响可忽略不计的声场称自由场。在自由场中，任何一点，只有直达声，无反射声。

消声室是人为的自由场，是由吸声材料和吸声结构做成的密闭空间。

静谧无风的高空或旷野可近似认为是自由场。

二 扩散场

声能量均匀分布，并在各个传播方向做无规则传播的声场，称扩散场，或混响场。声波在扩散场内呈全反射状态。

人为设计的混响室，就是典型的扩散场。无论声源处于混响室内任何位置，室

内各处的声压接近相等，声能密度处处均匀。

三 半扩散场

如果实验房间很大，以致边界墙面和天花板的反射可以忽略，只剩下地面的反射，这种空间称半扩散场，或半自由场。

精密的声学测量和分析要求在自由场或扩散场进行测试。一些工程要求的测试可以在半自由场进行。

四 近场和远场

在不足两倍机器尺寸，或所发声波最低频率的一个波长距离之内（二者中取大者），称为近（声）场；大于此距离，称为远（声）场。

近场的质点速度与瞬时声压不同相，远场的质点速度与声压同相。

声压与声压级

声压

指由于声波存在而引起的大气压力增值。用符号 P 表示，其单位为 P_a （帕）或 N/m^2 （牛顿/米²）。

一个标准大气压为 $P_s = 1bar = 10^5 P_a$

听阈声压也称为基准声压 $p_0 = 2 \times 10^{-5} P_a \quad (1000H_z)$

声压级— SPL 或 L_p

$$L_p = 10 \lg \frac{P^2}{p_0^2} = 20 \lg \frac{P}{p_0} \quad (dB)$$

P —实际声压

p_0 —基准声压

* 通常， P 和 p_0 均指有效值，而非瞬时值。

** 痛阈声压和声压级分别为

$$P = 20P_a, \quad L_p = 120dB \quad (1000H_z)$$

声阻抗率

声场中，某位置的声压 p 与该位置的质点振动速度 v 的比值 Z 定义为该点的声阻抗率，即

$$Z = \frac{p}{v}$$

在自由场中，对于球面波和平面波而言，有

$$v = \frac{p}{\rho c}$$

其中， ρ —媒质的静密度

c —声速

即媒质的声阻抗率为 $Z = \rho c$

由于 ρc 仅与媒质材料性质有关，又称其为媒质的声特性阻抗，单位为 $Rayl$ （瑞利），量纲为 kg/m^2s 。

部分媒质的声特性阻抗

媒 质	声速 （m/s）	声特性阻抗 （ $Rayl$ ）
空气 （20℃）	343	415
空气 （0℃）	331.6	428
水蒸汽（100℃）	405	242
淡水 （20℃）	1481	1.48×10^6
海水 （15℃）	1500	1.54×10^6
钢	5050	39.0×10^6
玻璃	5200	12.0×10^6
混凝土	3100	8.00×10^6

声强与声强级

声强

指单位时间内，声波通过垂直于声波传播方向单位面积上的声能量。用符号 I 表示，单位为 W/m^2 （瓦/米²）。

严格说，声强是一种向量（声压则是标量），其大小等于声压 p 与质点速度 v 的积，方向与质点速度方向相同，即：

$$\vec{I} = p\vec{v}$$

对于球面波和平面波，因有 $v = p/\rho c$ ，故声强的模与声压的关系为：

$$I = \frac{p^2}{\rho c} \quad (W/m^2)$$

ρ — 空气密度

c — 声速

声强级—SIL 或 L_I

$$\begin{aligned} L_I &= 10 \lg \frac{I}{I_0} = 10 \lg \frac{P^2/\rho c}{p_0^2/\rho c} = 10 \lg \frac{P^2}{p_0^2} \\ &= 20 \lg \frac{P}{p_0} = L_P \quad (dB) \end{aligned}$$

即：对球面波和平面波来说，声强级 SIL 与声压级 SPL 有相同的值

* 基准声强 $I_0 = 10^{-12} W/m^2$ (1000Hz)

** 对于非严格球面波和平面波而言， SIL 的值与 SPL 的值稍有不同。

声功率和声功率级

声功率

指单位时间内，声波通过垂直于传播方向某指定面积的声能量。但一般指的是所谓**声源声功率**，即指某台机器所辐射的总声功率。

将机器视为点声源，则距声源中心为 $r(m)$ 的球面各点的声强

I 与声功率 W 的关系为：

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (W/m^2)$$

或 $W = 4\pi r^2 I \quad (W)$

声功率级— SWL 或 L_w

$$L_w = 10 \lg \frac{W}{W_0} = 10 \lg \frac{I}{I_0} + 10 \lg 4(\pi r^2)$$

* 基准声功率 $W_0 = 10^{-12} \quad (W)$

对球面波 $L_w = L_p + 20 \lg r + 11 \quad (dB)$

对半球面波 $L_w = L_p + 20 \lg r + 8 \quad (dB)$

在混响室 $L_w = \bar{L}_s - 10 \lg T + 10 \lg V - 14 \quad (dB)$

\bar{L}_s 混响场中平均声压级 (dB)

T 混响时间 (s) —指声源断开后，室内声压级从原来声压级降低 $60 dB$ 所需的时间。

V 房间容积 (m^3)

多声源的声压合成

实际声场中，有多个声源同时存在时，计算某一测量点的合成声压的方法如下：

先考虑合成声功率和声强：

$$W = W_1 + W_2 + \cdots + W_n = \sum_{i=1}^n W_i$$

$$I = I_1 + I_2 + \cdots + I_n = \sum_{i=1}^n I_i$$

相应的声功率级和声强级为

$$L_W = 10 \lg \frac{W}{W_0} = 10 \lg \sum_{i=1}^n \frac{W_i}{W_0}$$

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} = 10 \lg \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{I_0}$$

其中， W_i 和 I_i 为各声源单独存在时，该测量点的声功率和声强。

根据声压—声强关系，有

$$I = \frac{p^2}{\rho c} = \frac{p_1^2}{\rho c} + \frac{p_2^2}{\rho c} + \cdots + \frac{p_n^2}{\rho c} = \frac{I}{\rho c} (p_1^2 + p_2^2 + \cdots + p_n^2) = \frac{I}{\rho c} \sum_{i=1}^n p_i^2$$

则合成声压级为

$$L_p = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2} = 10 \lg \frac{\sum p_i^2}{p_0^2}$$

两个声压级相同（ $p_1 = p_2$ ）的声源同时存在时，其合成声压级为

$$L_p = 10 \lg \frac{p_1^2 + p_2^2}{p_0^2} = 10 \lg \frac{2p_1^2}{p_0^2} = 10 \lg 2 + L_{p_1} \approx 3 + L_{p_1} \quad (\text{dB})$$

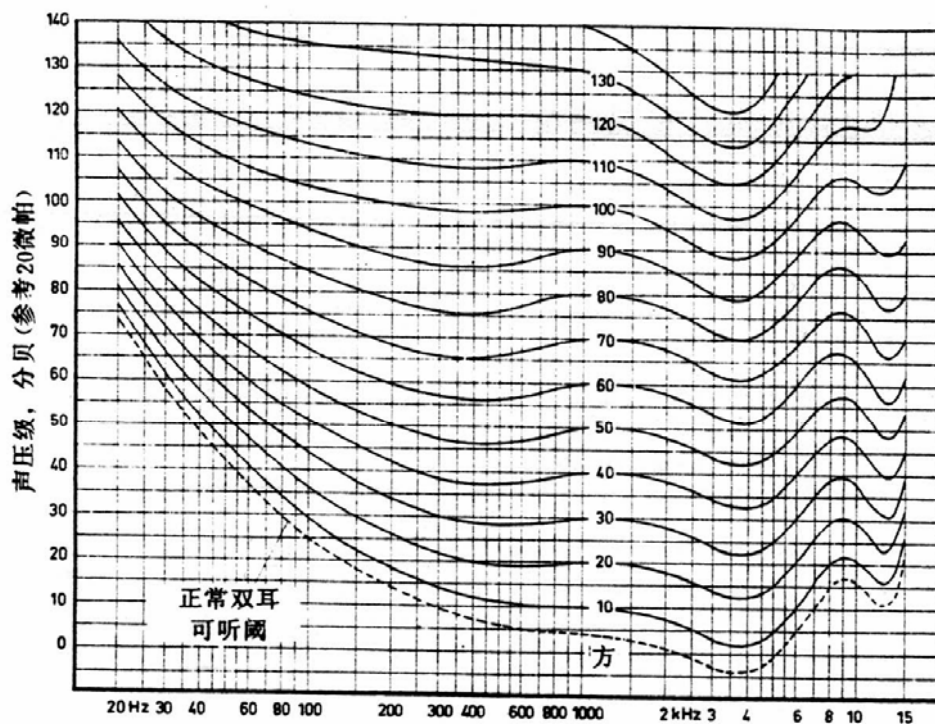
即：声压增加一倍，声压级提高 3 dB。

响度级和等响曲线

人耳对声音强弱的主观感受，不仅与声压级有关，而且与频率和波形有关。

工程上，用单位为 **phon**（方）的响度级来度量这种主观感觉。

根据 ISO 标准规定，对于频率为 1000Hz 的纯音，响度级（phon）和声压级（dB）的值是相同的，只是单位不同而已。对其它频率的纯音，响度级与声压级的关系，由标准的等响曲线给出（见下图）。



纯音的等响曲线

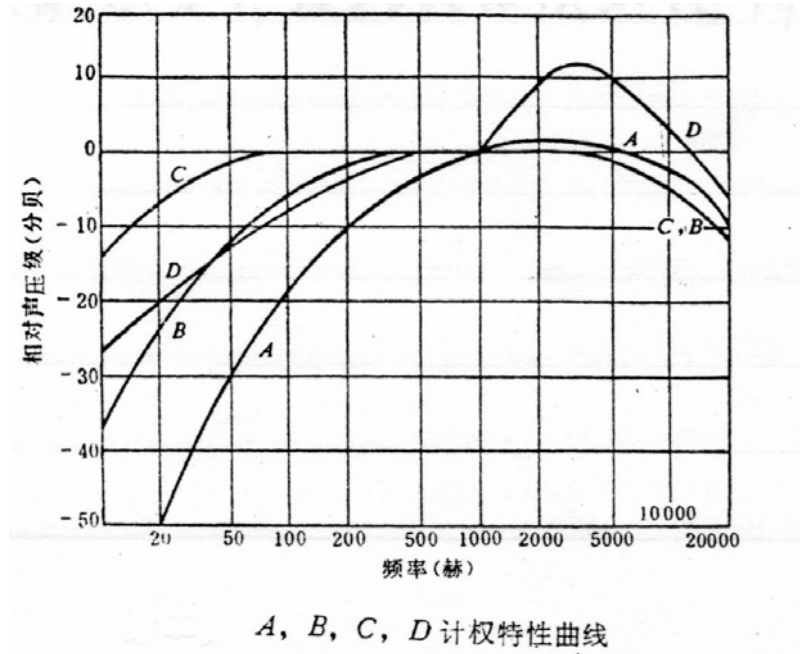
计权声级

考虑到人耳听觉在不同的频率有不同的灵敏度，在一般噪声测量仪器中，常配置一些特定的滤波电路，叫**计权网络**。通过计权网络测得的声压级，称为**计权声级**，简称**声级**。

IEC651-79标准规定A、B、C 三种计权网络特性，它们分别对应于倒置的 40、70、100 phon 等响曲线，其作用是分别反映人耳对低声压、中声压和高

声压的响度感觉。近年来，B 计权、C 计权已很少采用，一般声级测量均采用 A 计权。由 A 计权测量的声级称为 A 声级，记作 L_{PA} 或 $dB(A)$ 。

D 计权专用于飞机噪声的测量。(Stevens 公式)



等效连续声级

在评定间断的、脉冲的或随时间变化的不稳定噪声时，采用一段时间内能量平均的方法表示噪声大小，称之为**等效连续声级**，用符号 L_{eq} 表示，即

$$L_{eq} = 10 \lg \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{P_A(t)}{p_0} \right)^2 dt \quad (dB)$$

$$= 10 \lg \frac{1}{T} \int_0^T 10^{L_{PA}/10} dt \quad (dB)$$

式中： T — 总测量时间

$P_A(t)$ — A 计权瞬时声压

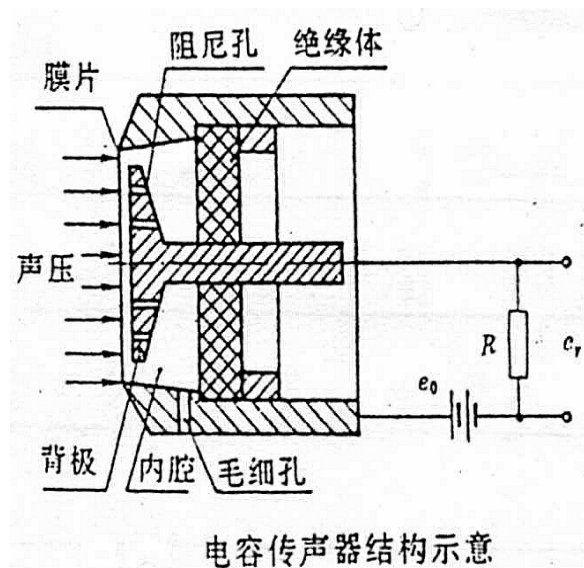
p_0 — 基准声压 ($20 \mu Pa$)

L_{PA} — A 声级瞬时值

传声器

传声器也称话筒或麦克风 (Microphone), 其作用是将声能转换为电能。声学测量常用电容传声器, 而晶体传声器和电动传声器则较多地应用于音响设备。

电容传声器结构如图示。金属膜片感受声压变化发生振动, 膜片与背极板之间电容随之变化。在极化电压 e_0 (通常用 DC 200V 电源) 作用下, 负载电阻 R 上产生与声压大小成比例的交变电压。



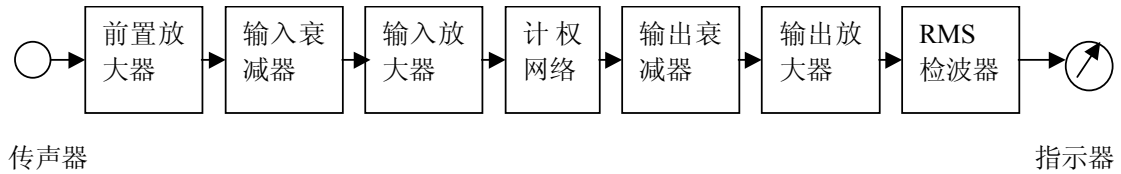
驻极体传声器: 用驻极体材料做成的电容传声器, 有两种结构: 一是用驻极体高分子薄膜材料做振膜; 二是用驻极体材料做背极板。驻极体经预极化, 成为一种类似永久磁铁的“永久荷电体”, 本身带静电, 不需要极化电压。市售 ICP 传声器即是内置有前置放大 IC 电路的驻极体传声器。它可与 ICP 压电式加速度计用相同电源 (如 DC 24 V) 供电。

传声器的核心 (敏感件) 部分, 称极头 (Catridge)。极头的尺寸有 1"、1/2"、1/4" 和 1/8" 几种。一般说, 尺寸大的, 灵敏度 (mV/Pa) 高, 但工作频率上限偏低, 常用之测量低声级; 反之, 尺寸小的, 灵敏度低, 工作频率上限高, 常用之测量高声级。

在室外特殊条件 (有风、雨、雪等) 下使用传声器, 应配置防风罩、防雨罩、鼻锥等附件。

声级计

声级计是最基本的噪声测量仪器，其主要构成如下图示。



根据国际电工委员会 IEC 651 标准规定，声级计分为四种类型：0 型、1 型、2 型和 3 型。0 型为标准声级计，1 型为实验室用精密声级计，2 型为一般用途普通声级计，3 型为用作噪声监测的普查型声级计。

各类型声级计的固有误差限值如下：

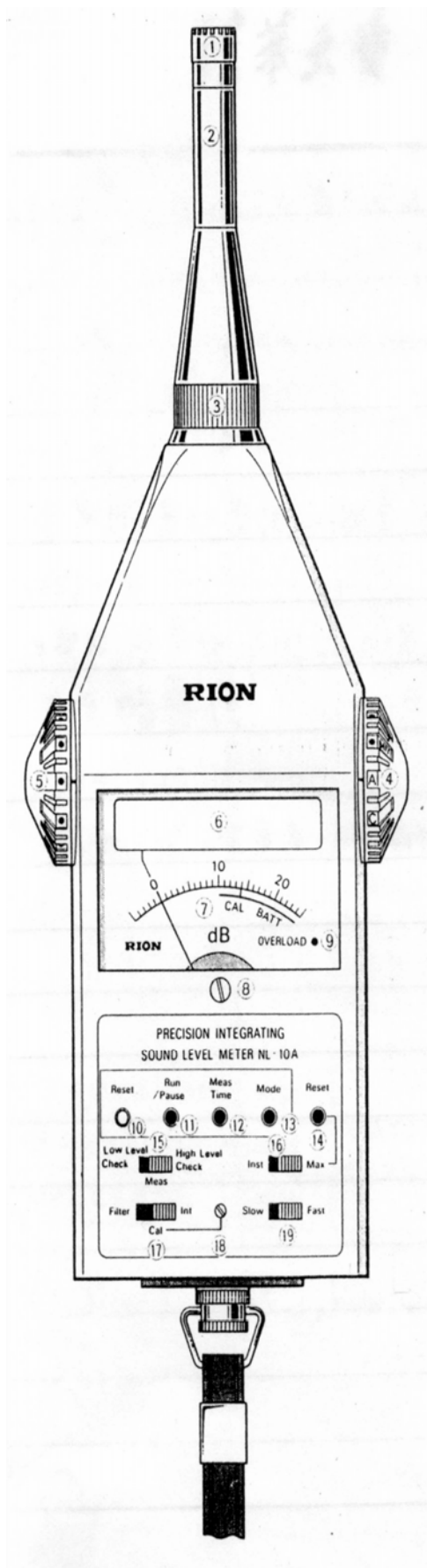
声级计类型	0	1	2	3
固有误差限值 dB	± 0.4	± 0.7	± 1.0	± 1.5

积分平均声级计允许测量等效连续声级。时间平均（或称时间计权）特性取决于 RMS 检波器的时间常数 τ 。 τ 的取值依赖于信号的类型，常用（非法定）值为：

$\tau = 35\text{ ms}$ 用于脉冲（尖峰）信号

$\tau = 125\text{ ms}$ 用于快变信号

$\tau = 1000\text{ ms}$ 用于慢变信号



某声级计的外观图



1. 电容传声器
2. 前置放大器
3. 安装环
4. 功能选择器
5. 声级量程选择器
6. 数字显示
7. 模拟表
8. 零点调节
9. 过载指示器
10. 复位按钮
11. Run/Pause 按钮
12. 平均时间选择器
13. 类型选择器
14. 表复位钮
15. 表量程选择器
16. 表功能选择器
- 17.. Int-Cal-Filter 选择器
18. 校准控制
19. 表速选择器

有关噪声测量方法和限值的若干国家标准

GB/T 14367-1993 噪声源声功率级的测定 使用基础标准与制订噪声测试规范的
准则

GB/T 16538-1996 声学 声压法测定噪声源声功率级 使用标准声源简易法

GB/T 6882-1986 声学 噪声源声功率级的测定 消声室和半消声室精密法

GB/T 6881.1-2002 声学 声压法测定噪声源声功率级 混响室精密法

GB/T 6881.2-2002 声学 声压法测定噪声源声功率级 混响场中小型可移动声源工
程法 第 1 部分：硬壁测试室比较法

GB/T 6881.3-2002 声学 声压法测定噪声源声功率级 混响场中小型可移动声源工
程法 第 2 部分：专用混响测试室法

GB/T 16404.1-1996 声学 声强法测定噪声源声功率级 第 1 部分：离散点上的测量

GB/T 16404.2-1999 声学 声强法测定噪声源声功率级 第 2 部分：扫描测量

GB/T 16404.3-2003 声学 声强法测定噪声源声功率级 第 3 部分：…

GB 1495-1997 机动车辆允许噪声标准

GB 16170-1996 汽车定置噪声限值

GB 16169-1996 摩托车和轻便摩托车噪声限值

GB 14097-1999 中小功率柴油机噪声限值

GB 15739-1995 小型汽油机噪声限值

GB 1495-2002 汽车加速行驶车外噪声限值及测量方法

GB/T 18697-2002 汽车车内噪声测量方法

GB 16710.1-1996 工程机械噪声限值与测定

GB/T 12534-1990 汽车道路试验方法通则

GB/T 17692-1999 汽车用发动机净功率测试方法

声源声功率测量的 ISO 标准

ISO3741—75 宽频带声源声功率级混响室精密测定法

ISO3742—75 离散频率与窄频率带声源声功率混响室精密测定法

ISO3743—76 声源声功率的专用混响室工程法

ISO3744—75 声源声功率在有一个反射面上的自由场工程法

ISO 3745—75 声源声功率的消声室及半消声室精密法

ISO 3746—76 声源声功率简测法

ISO 9614—1 (GB/T 16404.1—1996)

Acoustics-Determination of sound power levels of noise sources using
sound intensity—part 1: Measurement at discrete points.(1993)

ISO 9614—2 (GB/T 16404.2—1999)

Acoustics-Determination of sound power levels of noise sources using
sound intensity—part 2: Measurement by scanning.(1996)

ISO 9614—3 (GB/T 16404.3—2003)

Acoustics-Determination of sound power levels of noise
Sources using sound intensity—part 3: Precision method
for measurement by scanning. (2000)

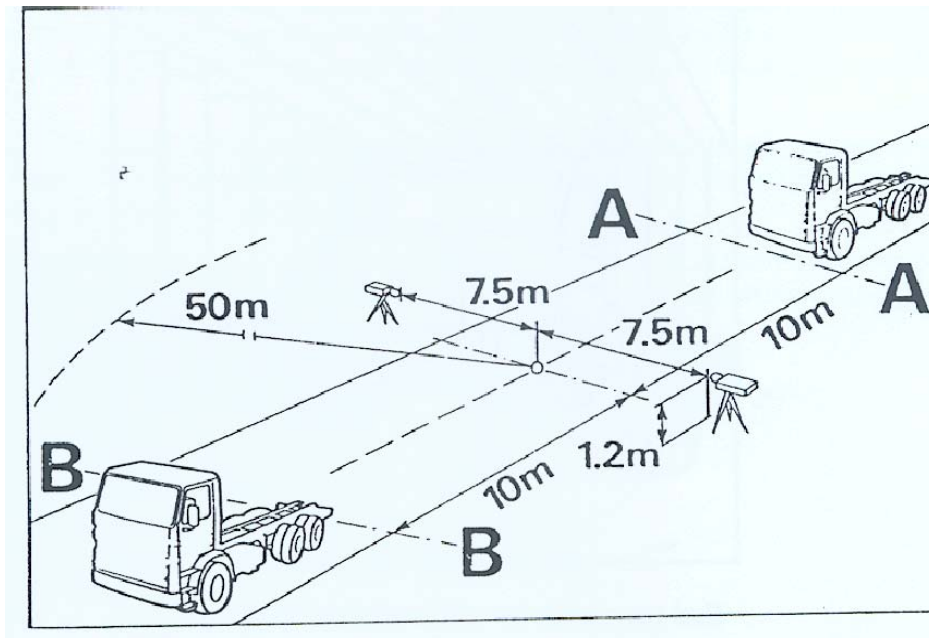
几种家用电器的噪声标准

名称		噪声标准, dB(A)	测量条件
家用电冰箱		≤45	根据 SG215-80 标准, 测量点距正面 1m, 高出地面 1m
家用洗衣机		≤65	根据 SG186-80 标准, 测量点距洗衣机前、后、左、右四个侧面的中心 1m
家用吸尘器		≤65	根据 SG211-80 标准, 吸尘器置于 50mm 厚的弹性垫层上, 距吸尘器圆周表面 1m, 取 4 个测点; 正上方取 1 个测点, 5 个点噪声的算术平均值为吸尘器的噪声
手提式 电吹风	感应式单相交流电动机	≤50	根据 SG197-80 标准, 测点距吹风口 200mm
	串激式交直流电动机	≤85	
	永磁式直流电动机	≤70	
空调器	名义制冷量 kcal/h	室内 室外	根据 SG328-83 标准, 测点在出风口中心 线方向 1m 处, 与地面 垂直距离不小于 1m。
	≤2240	54 62	
	2500~3550	58 65	
	≥4000	60 68	

加速行驶车辆车外噪声（通过噪声）

测量方法

（ISO 362-2002 汽车加速行驶车外噪声测量方法）



车辆前端到达 AA 线时，油门全开，加速驶过测量区域，车辆后端到达 BB 线时，立即关闭油门。两侧同时检测 A 计权声级。

至少重复两次测量。

车辆噪声标准范围

GB1495—1979 《机动车辆允许噪声标准》

车辆种类		车外最大允许噪声级 dB(A)	
		1985 年 1 月 1 日前 产品	1985 年 1 月 1 日后 产品
载重 汽车	载重量 8~15t	92	89
	载重量 3.5~8t	90	86
	载重量<3.5t	89	84
轻型越野车		89	84
公共 汽车	总重量 4~11t	89	86
	总重量≤4t	88	83
轿 车		84	82
摩托车		90	84
轮式拖拉机 (60 马力以下)		91	86

GB1495—2002 汽车加速行驶车外噪声限值 dB(A)

汽车分类	02. 10. 1~04. 12. 30 生产的汽车	05. 1. 1 后生产的汽车
M1	77	74
M2 (GVM ≤ 3. 5t), 或 N1 (GVM ≤ 3. 5t) GVM ≤ 2t	78	76
2t ≤ GVM ≤ 3. 5t	79	77
M2 (3. 5t < GVM ≤ 5t), 或 M3 (GVM > 5t) P < 150kw	82	80
P ≥ 150kw	85	83
N ₂ (3. 5t < GVM ≤ 12t), 或 N ₃ (GVM > 12t) P < 75kw	83	81
75kw ≤ P < 150kw	86	83
P ≥ 150kw	88	84

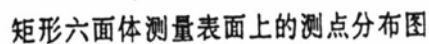
其中, GVM 最大总质量 (t).

P 发动机额定功率 kw.

M₁,N 汽车分类, 按 GB/T15089-1994 (机动车分类) 规定.

GB16170—1996 《汽车定置噪声限值》

车辆种类	燃料种类	定置噪声限值 dB(A)	
		1998 年 1 月 1 日前出厂	1998 年 1 月 1 日后出厂
轿 车	汽油	87	85
微型客、货车	汽油	90	88
轻型客车、货车、 越野车	汽 油 nr ≤ 4300r/min	94	92
	汽油 nr > 4300r/min	97	95
	柴油	100	98
中型客、货车、 大型客车	汽油	97	95
	柴油	103	101
重型货车	N ≤ 147kw	101	99
	N > 147kw	105	103


$$\overline{Lp}=10 \lg \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0.1(L_{pi}-K_{li})} \right) \quad dB$$
 L_{pi} 第 i 测点的声压级 dB(A)
$$LW = (\overline{Lp} - K_2 - K_3) + 10 \lg \frac{s}{s_0} \quad (dB)$$

S — 测量表面总表面积 m^2

22

声强法测量声功率

一 理由

声压法对测量环境要求高，必须在消声室，半消声室或混响室进行。声强法对测量环境要求不高，受背景噪声影响小，可在半自由场甚至设备现场进行。

二 声功率 (W) 与声强 (I) 的关系

$$W = \iint I(s) \, ds$$

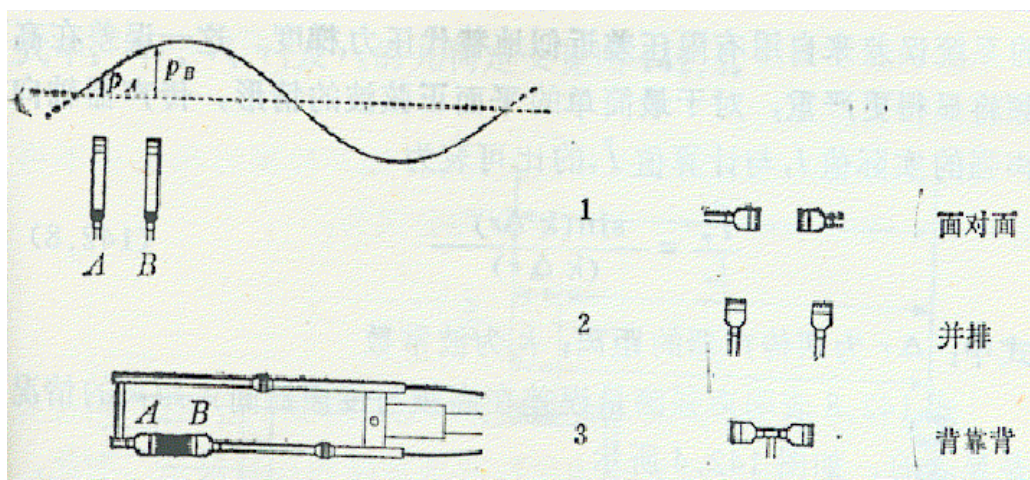
$$\text{或 } W = \sum_{i=1}^N I_i S_i$$

$i = 1, \dots, N$ 为测量包络面（半球、长方体、圆柱体或半圆柱体表面）分块序号。

ISO 9614-1 规定，包络面离被测声源的距离应不小于 0.5m, N 至少应大于 10 个，每个 S_i 应不大于 1m^2

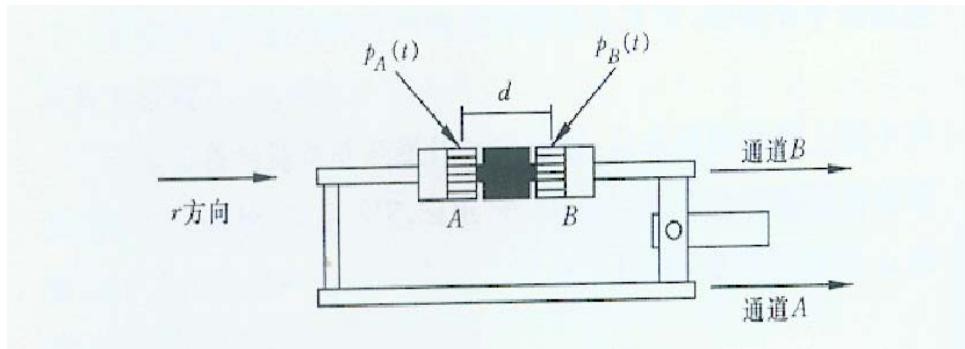
双传声器声强

声强探头的传声器排列方式：



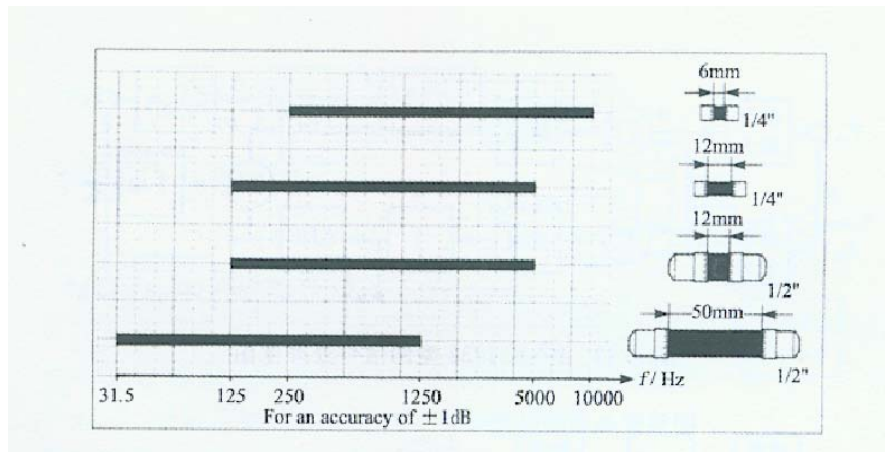
声强探头的传声器排列方式

传声器的声学间距与声强探头的工作频率范围：



d —传声器 A、B 的声学间距

r 方向—声强正方向



传声器间距离及频率范围

声强测量的基本原理（时域分析）

瞬时声强，也称声能流密度，是一个向量，用 $\vec{I}(t)$ 表示：

$$\vec{I}(t) = p(t) \cdot \vec{v}$$

其中， $p(t)$ —瞬时声压， \vec{v} —质点瞬时速度

考虑某 r 方向，有

$$I_r = p \cdot v_r$$

v_r —速度 \vec{v} 在 r 方向的分量

按牛顿第二定律，有（ ρ 为空气密度）

$$\rho \frac{\partial v_r}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial r}, \quad v_r = -\frac{1}{\rho} \int \frac{\partial p}{\partial r} dt$$

$\frac{\partial p}{\partial r}$ 称为压力梯度，当 $d \ll \lambda$ (波长) 时，(例： $d=12\text{mm}$, $f \leq 8000\text{Hz}$, $\lambda \geq 43\text{mm}$)

$$\frac{\partial p}{\partial r} \approx \frac{\Delta p}{\Delta r} = \frac{p_B - p_A}{d}$$

故
$$v_r = -\frac{1}{\rho d} \int (p_B - p_A) dt$$

令
$$p = \frac{p_A + p_B}{2}$$

则
$$I_r = p \bullet v_r = \frac{1}{2\rho d} (p_A + p_B) \int (p_A - p_B) dt$$

声强测量（频域分析）

声压 p 和质点速度 v 之间的互相关函数

$$R_{pv}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T p(t) v(t + \tau) d\tau$$

则平均声强

$$I = R_{pv}(0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T p(t) v(t) d\tau$$

而
$$R_{pv}(\tau) \xLeftrightarrow[IFT]{FT} S_{pv}(\omega)$$

即
$$R_{pv}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{pv}(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega$$

故
$$I = R_{pv}(0) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{pv}(\omega) d\omega$$

考虑到
$$S_{pv}(-\omega) = S_{pv}^*(\omega)$$

有
$$\begin{aligned} I(\omega) &= S_{pv}(\omega) + S_{pv}(-\omega) \\ &= 2R_e[S_{pv}(\omega)] = R_e[G_{pv}(\omega)] \end{aligned}$$

其中 $S_{pv}(\omega)$ 为双边互功率谱, $G_{pv}(\omega)$ 为单边互功率谱

$$G_{pv}(\omega) = \overline{p^*(\omega) \bullet V(\omega)}$$

$$p(\omega) = \frac{p_A(\omega) + p_B(\omega)}{2}$$

$$V(\omega) = \frac{1}{j\omega\rho d} [p_A(\omega) - p_B(\omega)]$$

$$G_{pv}(\omega) = -\frac{j}{2\omega\rho d} (G_{AA} - G_{BB} + G_{BA} - G_{AB})$$

因
$$\begin{aligned} -j(G_{AB} - G_{BA}) &= -j(G_{AB} - G_{AB}^*) \\ &= -j(j2I_m G_{AB}) = 2I_m G_{AB} \end{aligned}$$

于是有

$$I(\omega) = R_e G_{pv}(\omega) = -\frac{I_m [G_{AB}]}{\omega\rho d}$$

而总的平均声强为

$$I = \int I(\omega) d\omega = -\int_0^\infty \frac{I_m [G_{AB}]}{\omega\rho d} d\omega$$

影响声强测量精度的主要因素有:

- 有限差分误差, 即 $\frac{\Delta p}{\Delta r} \neq \frac{\partial p}{\partial r}$
- 传声器 A、B 的相位失配误差
- 背景噪声的影响

噪声的频谱

(窄带谱和倍频程谱)

以频率为横坐标, 以声音的强弱 (声压级、声强级或声功率级) 为纵坐标, 绘出声音的强弱随频率分布的线图称为声音的频谱, 简称为声谱。

由 FFT 分析得到的频谱, 具有等带宽性质, 其频率分辨率等于谱线间隔 Δf , 且 $\Delta f = 1/T$, T 为一次 FFT 分析所取时间记录长度。这种分析方法谱线较多 (通常

400~800 谱线), Δf 小, 称为窄带谱分析, 这种频谱称为**窄带谱**。

用一组模拟滤波器或数字滤波器进行频率分析时, 这些滤波器的带宽和中心频率常按分数**倍频程** (Octave) 规律排列, 中心频率越高, 滤波器带宽越宽。常见的有 1/1、1/2、1/3、1/12、和 1/24 倍频程分析。其中以 1/3 倍频程分析最为常用。

对整数 (1/1) 倍频程带, 顺序地后一频带的中心频率大致 (按标准化规定) 等于前一频带中心频率的二倍, 即

$$f_{c,i+1} = 2f_{c,i}$$

一般地, 一 $1/N$ 倍频程带, 其相邻频带的中心频率大致 (按标准化规定) 按下式规定:

$$f_{c,i+1} = (2^{1/N}) \cdot f_{c,i}$$

而一个 $1/N$ 倍频程带的上、下限 (3dB 带) 频率则分别等于

$$f_c \cdot 2^{-1/2N} \quad \text{和} \quad f_c \cdot 2^{+1/2N}$$

横坐标按 $1/N$ 倍频程带中心频率标度, 纵坐标指示各倍频程带的均方 (或均方根) 声压或声强, 这样的图形统称为**倍频程谱**。前者称声压谱 $p(f)$, 后者称声强谱 $I(f)$ 。任意频率范围的总声压和总声强可通过积分 (求和) 得出:

$$p_e = \left[2 \int_{f_1}^{f_2} \|p(f)\|^2 df \right]^{1/2} \quad \text{或} \quad \left[\int_{f_1}^{f_2} G_{pp}(f) df \right]^{1/2}$$

$$I = \int_{f_1}^{f_2} I(f) df$$

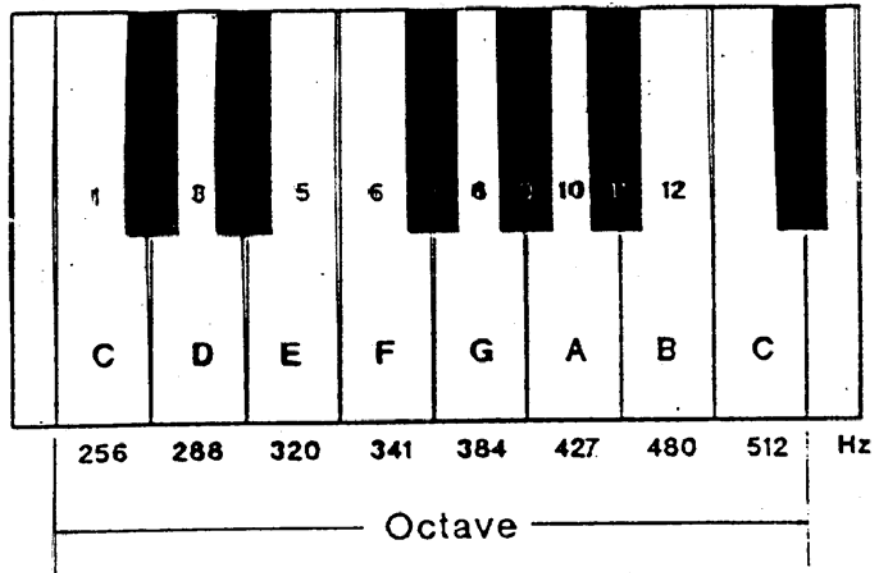
注意, $p(f)$ 指声压信号的双边线性谱, 而声强谱 $I(f)$ 自然属性即是单边谱。 $G_{pp}(f)$ 为声压信号的单边功率谱。

倍频程谱可通过模拟滤波器或数字滤波器得出, 也可以由 FFT 的线性谱或功率谱通过一定的综合运算得出。但实时倍频程分析多采用数字滤波方式。

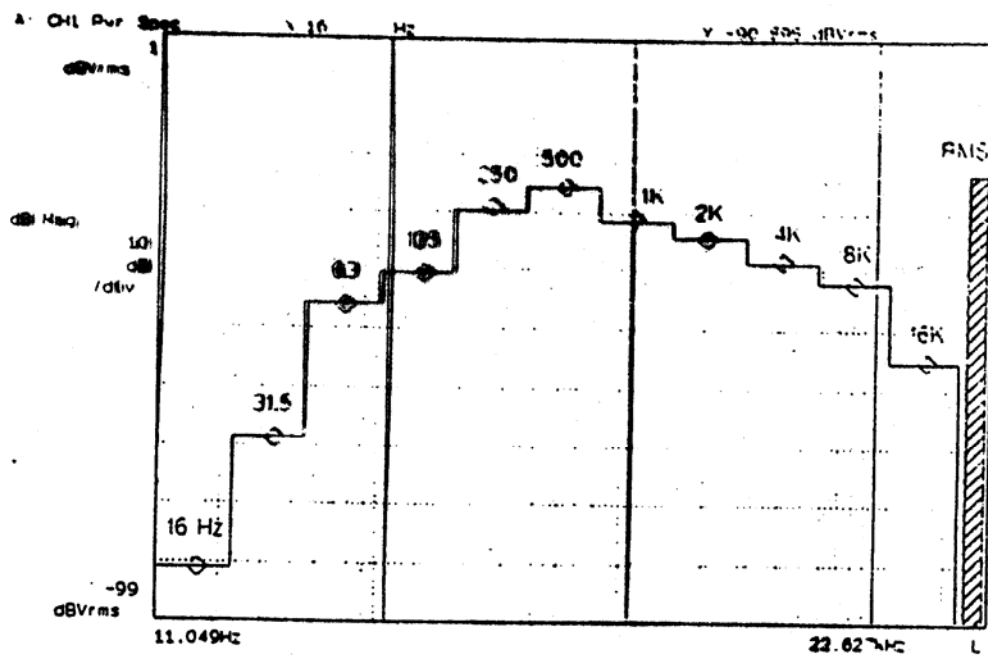
进行窄带谱分析或倍频程谱分析时, 可分别采取时域计权或频域计权两种不同方式。

全音阶和倍频程

- Piano keyboard acts like a 1/12 octave signal generator

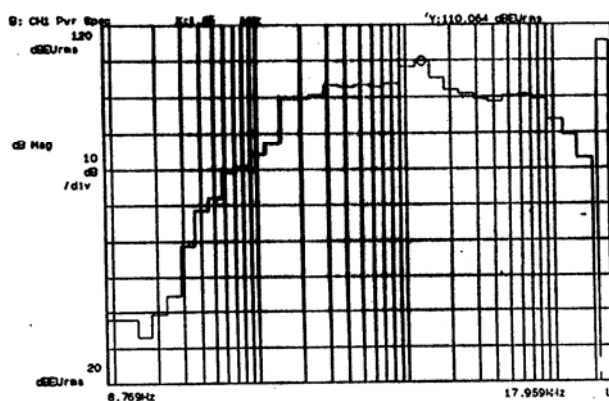


1/1 倍频程测量



1/3 倍频程测量举例

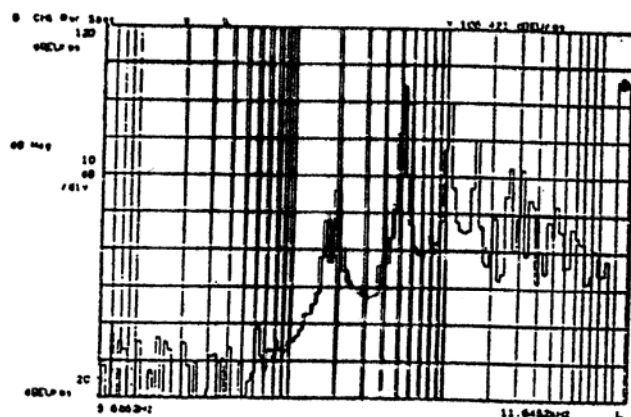
直升机试验



Real Time
 Third Octave Measurement
 Input Weighting: A-weighting
 Free Run Trigger
 Automatic Arm
 Stable Averaging
 Averaging Time: 31.5 msec

1/12 倍频程测量举例

哈利路亚合唱团



Twelfth Octave Measurement
 Input Weighting: A-weighting
 Free Run Trigger
 Automatic Arm
 Exponential Averaging
 Time Constant: 250 msec

1/1、1/2、1/3 倍频程带 标准化中心频率（Hz）

标准化 中心频率	1/ 1 oct	1/ 2 oct	1/ 3 oct		1/ 1 oct	1/ 2 oct	1/ 3 oct		1/ 1 oct	1/ 2 oct	1/ 3 oct
16	x	x	x	160			x	1600			x
18				180		x		1800			
20			x	200			x	2000	x	x	x
22.4		x		224				2240			
25			x	250	x	x	x	2250			x
28				280				2800		x	
31.5	x	x	x	315			x	3150			x
35.5				355		x		3550			
40			x	400			x	4000	x	x	x
45		x		450				4500			
50			x	500	x	x	x	5000			x
56				560				5600		x	
63	x	x	x	630			x	6300			x
71				710		x		7100			
80			x	800			x	8000	x	x	x
90		x		900				9000			
100			x	1000	x	x	x	10000			x
112				1120				11200		x	
125	x	x	x	1250			x	12500			x
140				1400		x		14000			
160			x	1600			x	16000	x	x	x

Table 4.1 Normalized frequencies (Hz)

ANSI 标准的 1/3 倍频程中心频率

Bin #	fc 10	fc 2	Rec'd
10	10.00	9.64	10.00
11	12.59	12.40	12.50
12	15.85	15.63	16.00
13	19.95	19.69	20.00
14	25.12	24.80	25.00
15	31.62	31.25	31.50
16	39.81	39.37	40.00
17	50.12	49.51	50.00
18	63.10	62.50	63.00
19	79.43	78.78	80.00
20	100.00	99.21	100.00
21	125.89	124.00	125.00
22	158.49	157.49	160.00
23	199.53	198.43	200.00
24	251.19	250.00	250.00
25	316.23	312.84	315.00
26	398.11	395.37	400.00
27	501.19	512.00	500.00
28	630.96	645.08	630.00
29	794.33	812.78	800.00
30	1,000.00	1,000.00	1,000.00
31	1,258.93	1,258.94	1,250.00
32	1,584.89	1,584.89	1,600.00
33	1,995.26	2,048.00	2,000.00
34	2,511.89	2,599.32	2,500.00
35	3,162.28	3,281.68	3,150.00
36	3,981.07	4,096.00	4,000.00
37	5,011.87	5,196.84	5,000.00
38	6,309.57	6,801.99	6,300.00
39	7,943.28	8,182.00	8,000.00
40	10,000.00	10,321.87	10,000.00
41	12,589.25	13,003.98	12,600.00
42	15,848.93	16,384.00	16,000.00
43	19,952.62	20,948.65	20,000.00

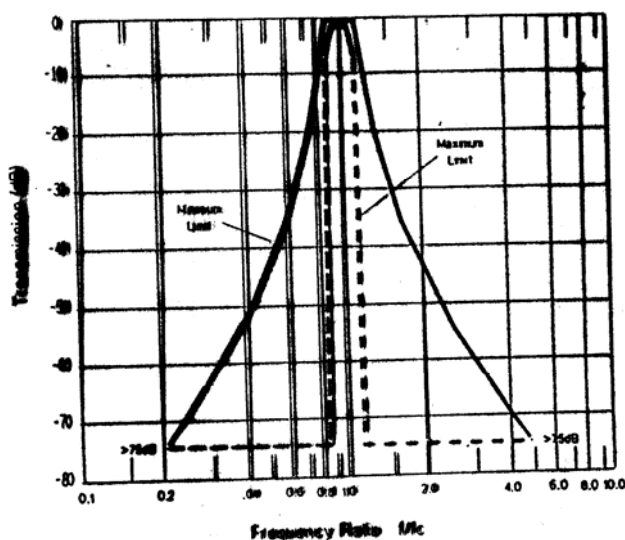
$$f_{c10} = 10^{\frac{3n}{30}}$$

$$f_{c2} = 1000 * \left[\frac{(n - 30)}{2^3} \right]$$

n: Bin number

* ANSI S1.11 -1975

1/3 倍频程滤波器的频率特性 (IEC 旧规程)



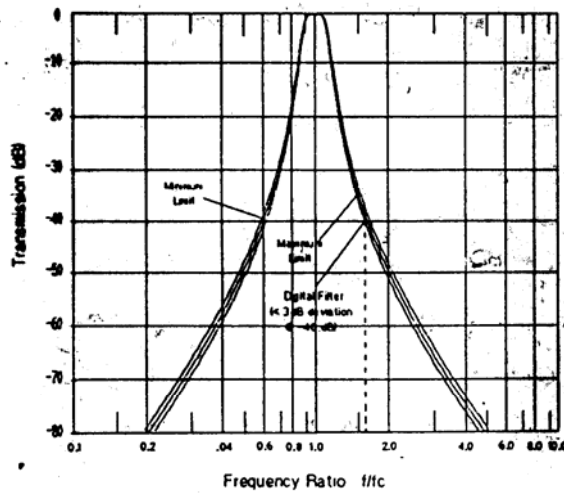
• Effective Bandwidth
= 2316 f_c

• Max ripple
= 0.5 dB

• Min Limit (skirt)
= $10 \log \left[\frac{8}{13} + 2500 \left(\frac{f}{f_c} - \frac{f_c}{f} \right)^6 \right]$

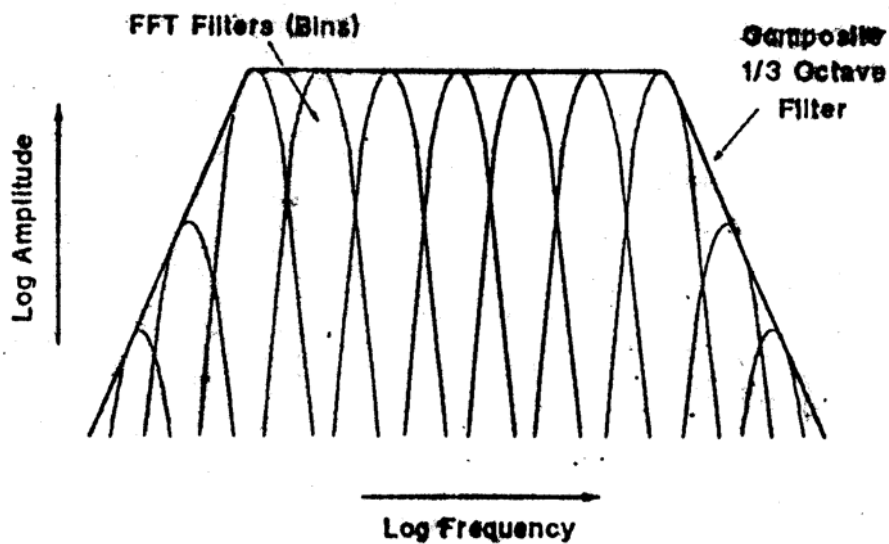
• Max Limit ($9f_c/10 < f < 10f_c/9$)
= $10 \log \frac{5}{4} \left[1 + 1040 \left(\frac{f}{f_c} - \frac{f_c}{f} \right)^4 \right]$

1/3 倍频程滤波器的频率特性 (ANSI 新规程)

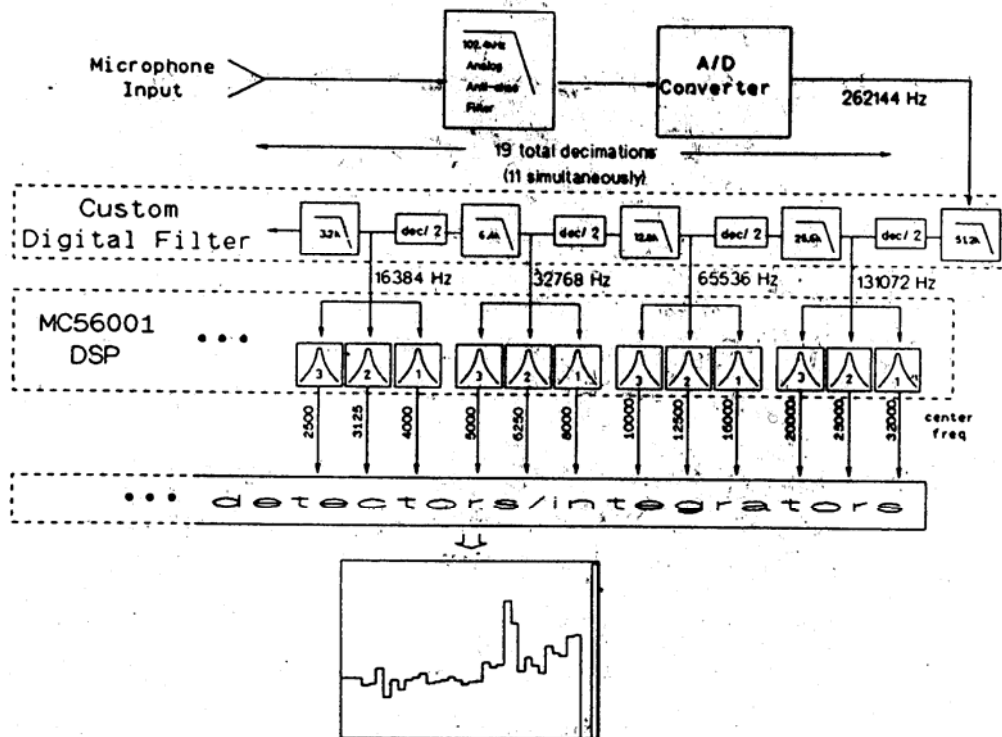


- Effective Bandwidth
= .2316 f_c
- Max allowable passband ripple
= 25 mdB
- Attenuation for 1/3rd Octave
= $10 \log \left[1 + Q_d^6 \cdot \left(\frac{f}{f_c} - \frac{f_c}{f} \right)^6 \right]$
- Limits for Type 1X
Max $Q_d = 4.78911$
Nom $Q_d = 4.52229$
Min $Q_d = 4.26904$

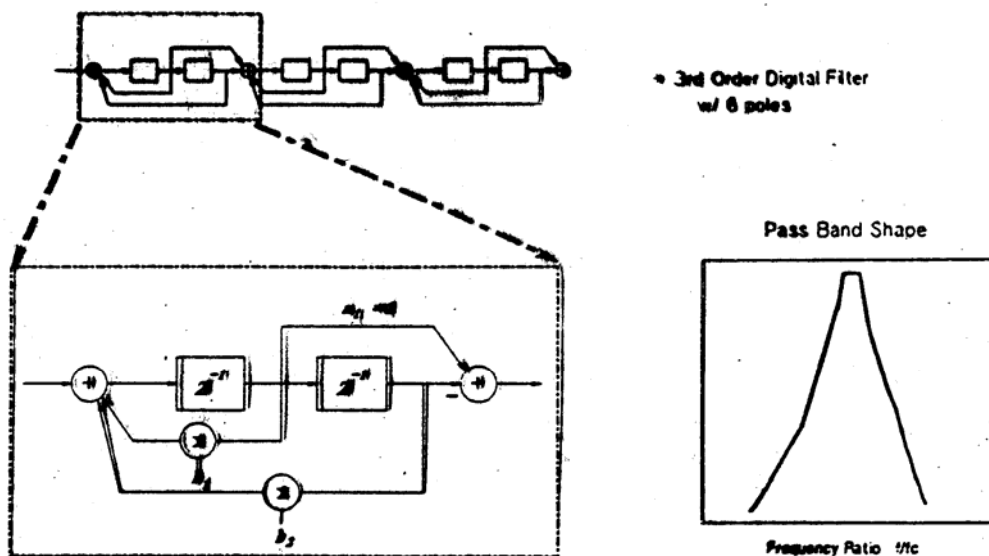
由 FFT 综合得到 1/3 倍频程滤波器



数字式实时 1/3 倍频程滤波器



1/N 倍频程带通数字滤波器



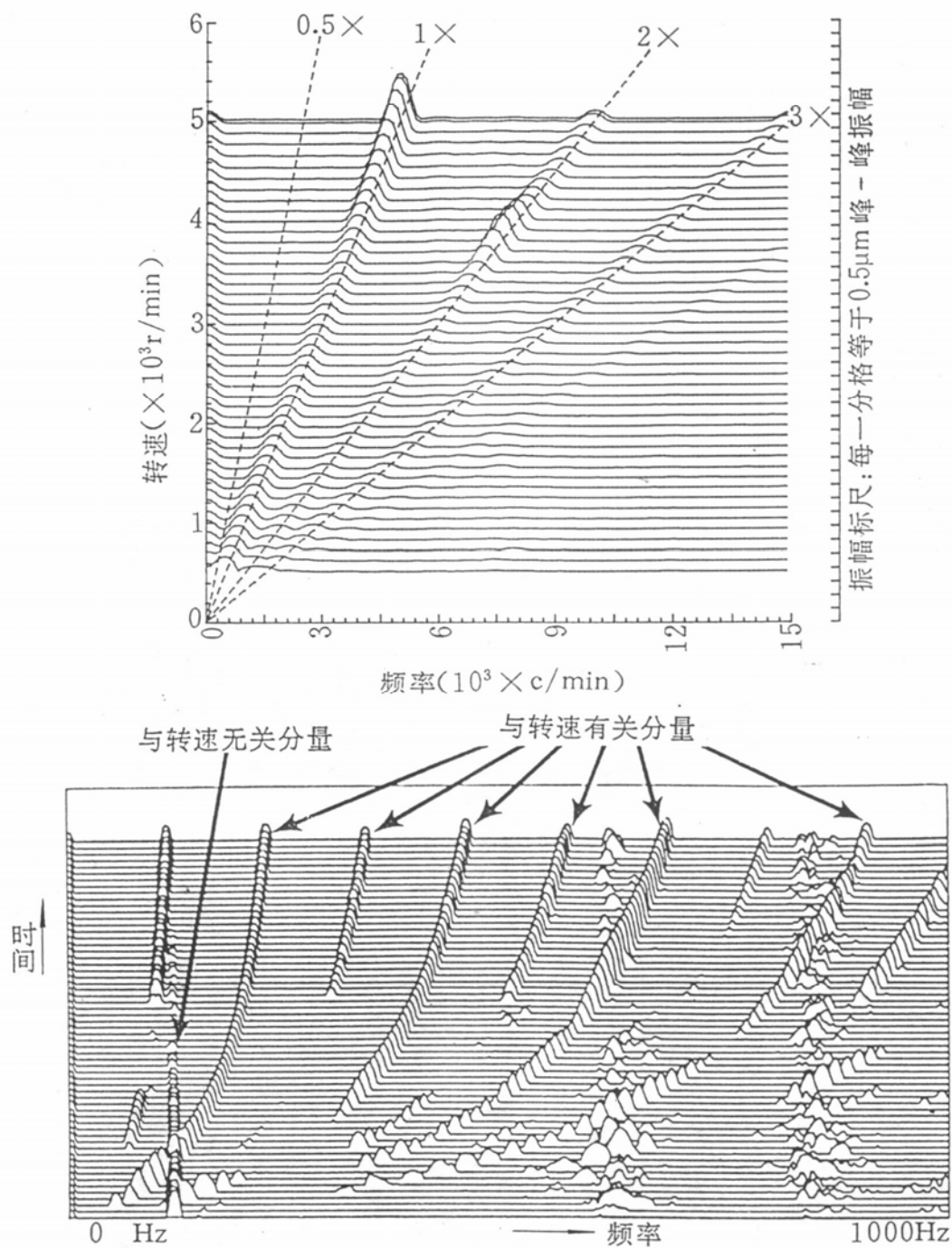
三维频谱图

Three Dementional Spectral

不同名称:

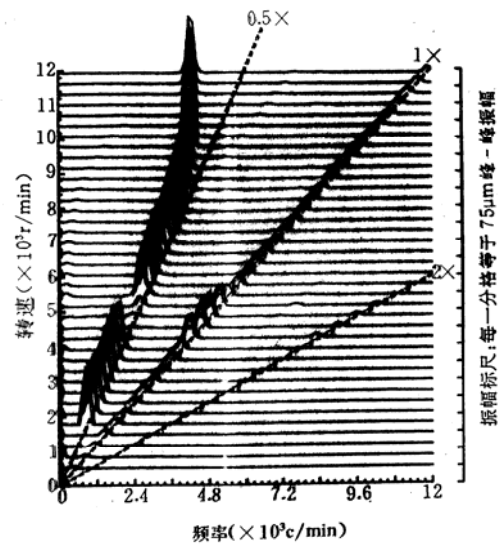
- 频谱“瀑布”(Waterfalls)图
- 频谱“地形”(Maps)图
- 级联(Cascade)图
- 坎贝尔(Campbell)图 ——彩图表示

以时间及转速作为第三维的 三维频谱图



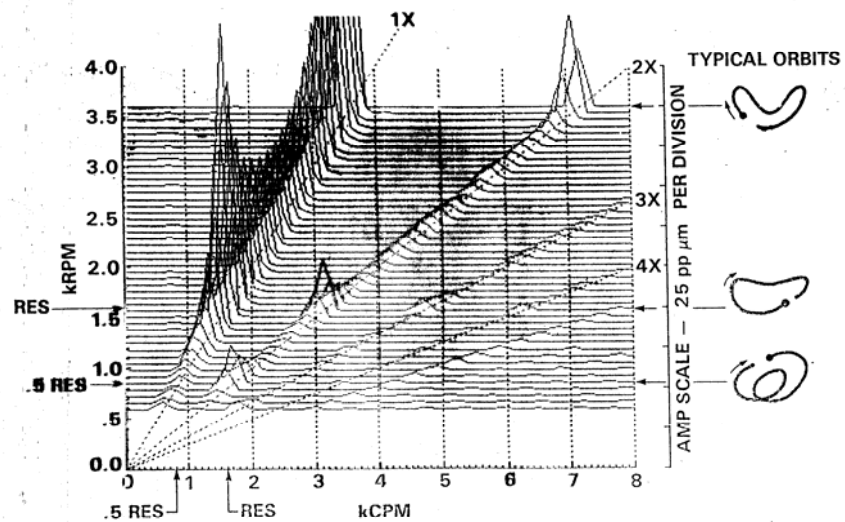
升速过程中出现

油膜振荡的三维频谱图



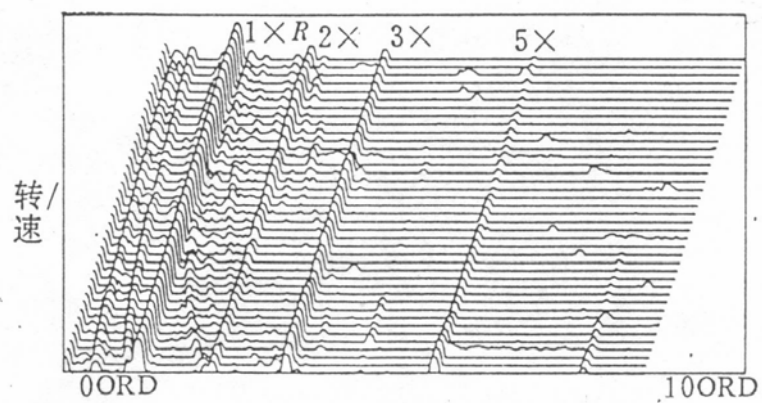
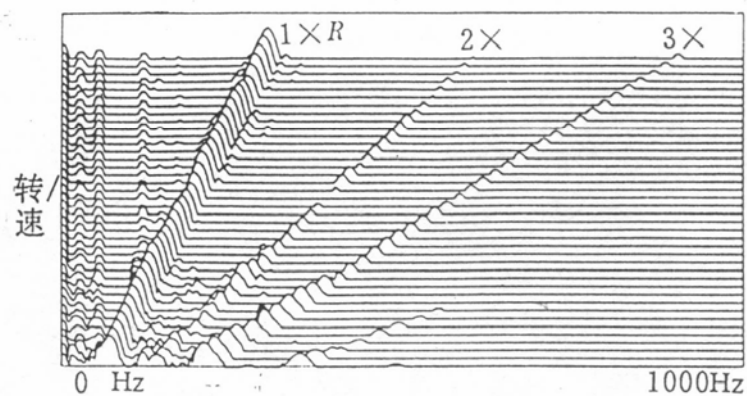
41-0

裂纹转子的轴振动三维频谱图

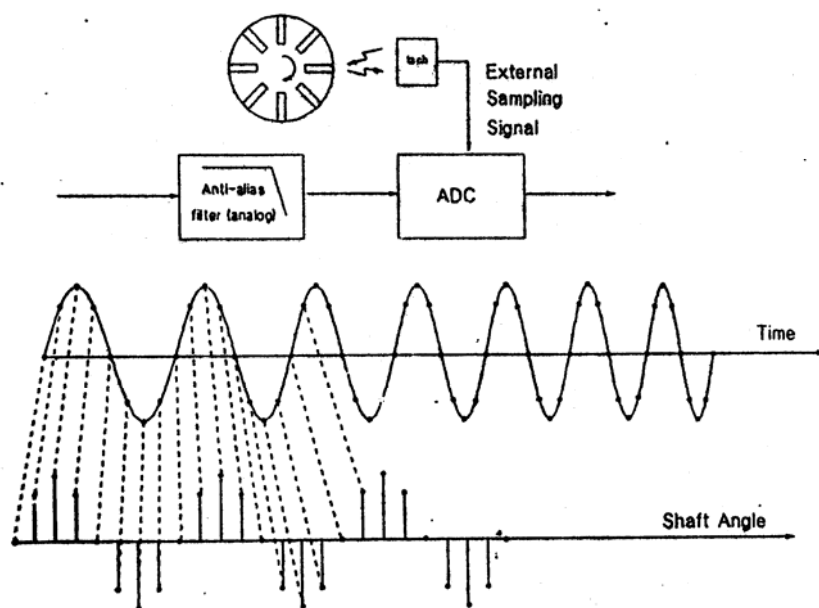


51-0

内采样方式和跟踪阶次的外采样方式下的 三维频谱图



转子系统的同步采样



频率域与阶次域的抽样对比

	频率域(Freq.)	阶次域(Order)
分析上限:	f_H (Hz)	E_H (ord)
抽样率:	$f_s = 2.56 f_H$ (samp/s)	$E_S = 2.56 E_H$ (samp/rev)
抽样间隔:	$\Delta t = 1 / f_s$ (s)	$\Delta r = 1 / E_S$ (rev)
样本大小:	N	N
记录长度:	$T = N \times \Delta t$ (s)	$R = N \times \Delta r$ (rev)
分辨率:	$\Delta f = f_s / N$ (Hz)	$\Delta e = E_S / N$ (ord)

阶次域的实际抽样频率:

$$f_s' = E_S \times n = 2.56 E_H \times n$$

n — 转速 (rev / s)

$$E_H = 10 \text{ (ord)}, \quad E_S = 25.6 \text{ (samp/rev)},$$

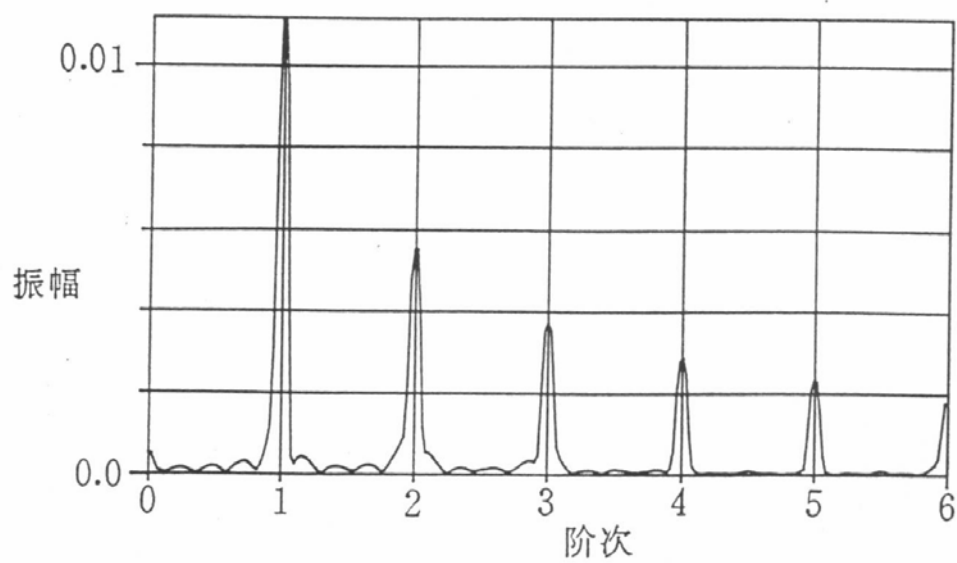
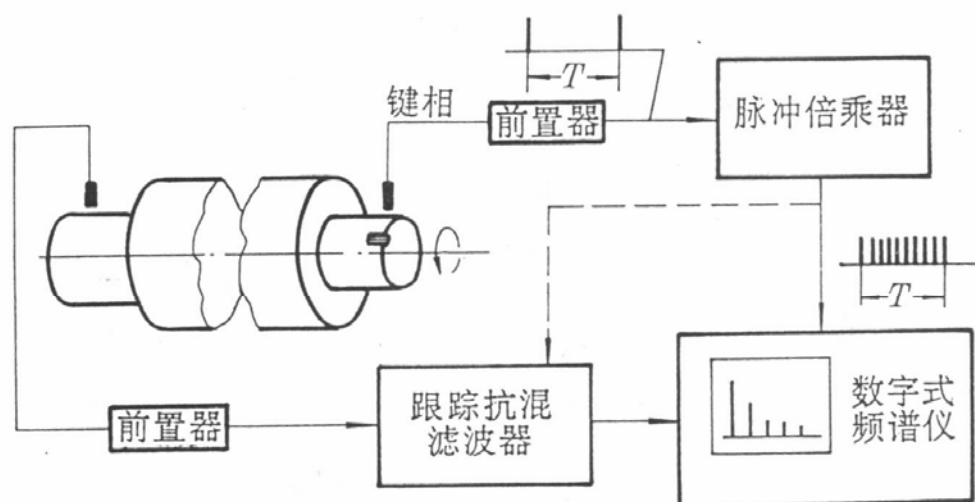
$$N = 1024, \quad R = 40 \text{ (rev)}$$

$$n = 50 \quad f_s' = 1280 \text{ (samp/s)}$$

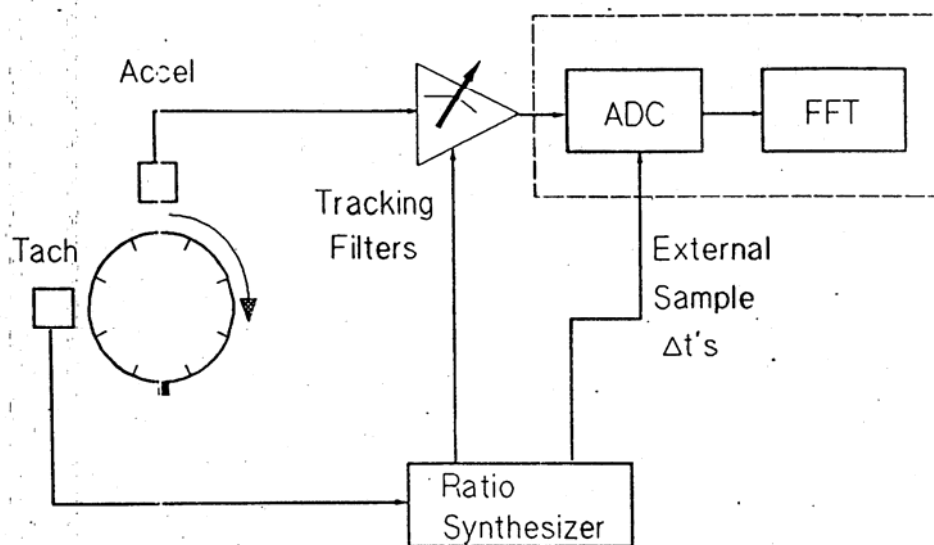
$$n = 100 \quad f_s' = 2560 \text{ (samp/s)}$$

$$n = 200 \quad f_s' = 5120 \text{ (samp/s)}$$

实现阶次跟踪的装置框图

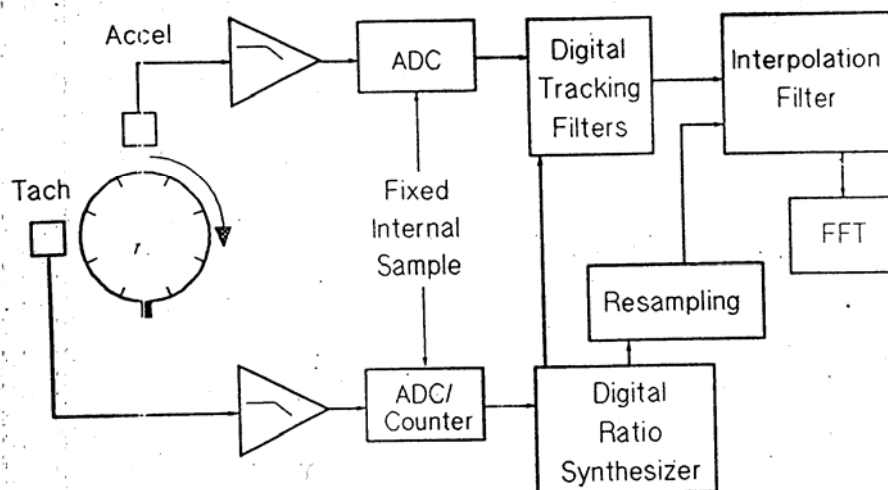


传统的阶次跟踪

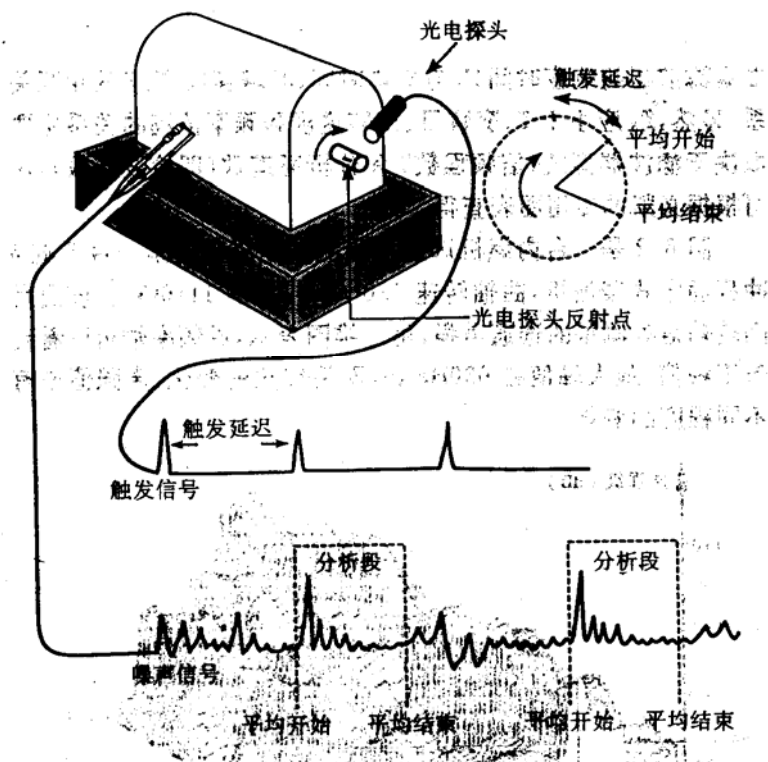


计算式阶次跟踪

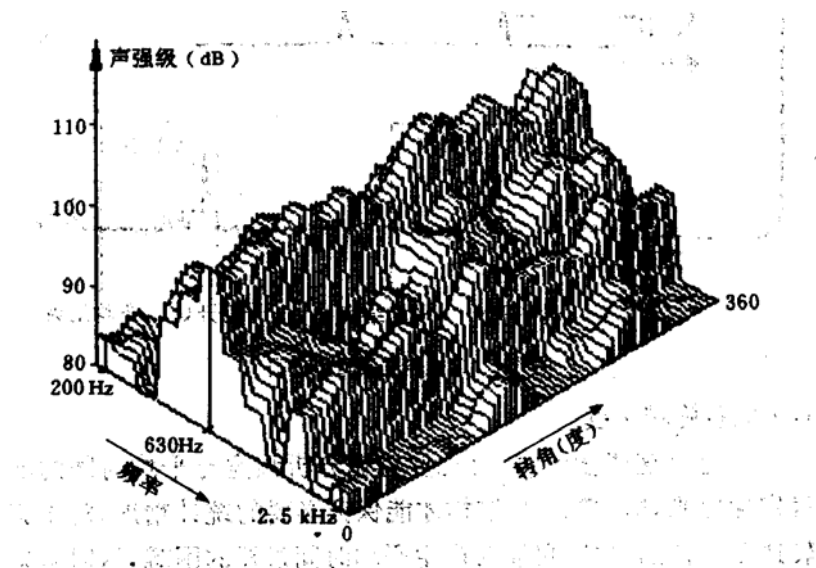
New Method



选通声强



选通声强测量原理图



固定式柴油机选通声强图（凸轮轴盖处）

三维谱的“切片”分析

无论是固定采样频率的三维谱，或是变采样频率的三维谱（阶次谱），或是倍频程分析的三维谱，都可以在测量的后处理阶段进行所谓“切片”分析。切片方式分为：

- 频率切片

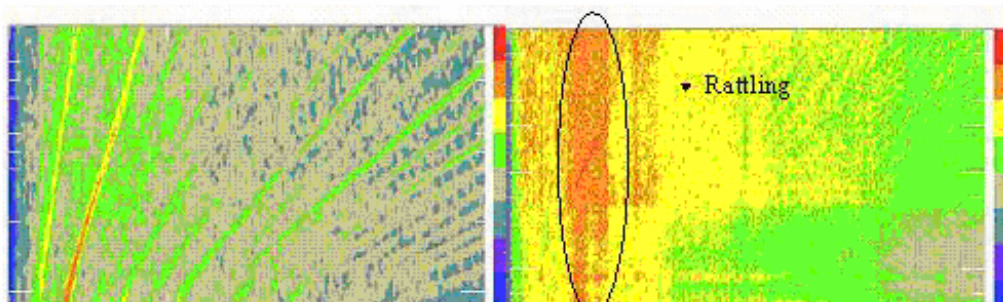
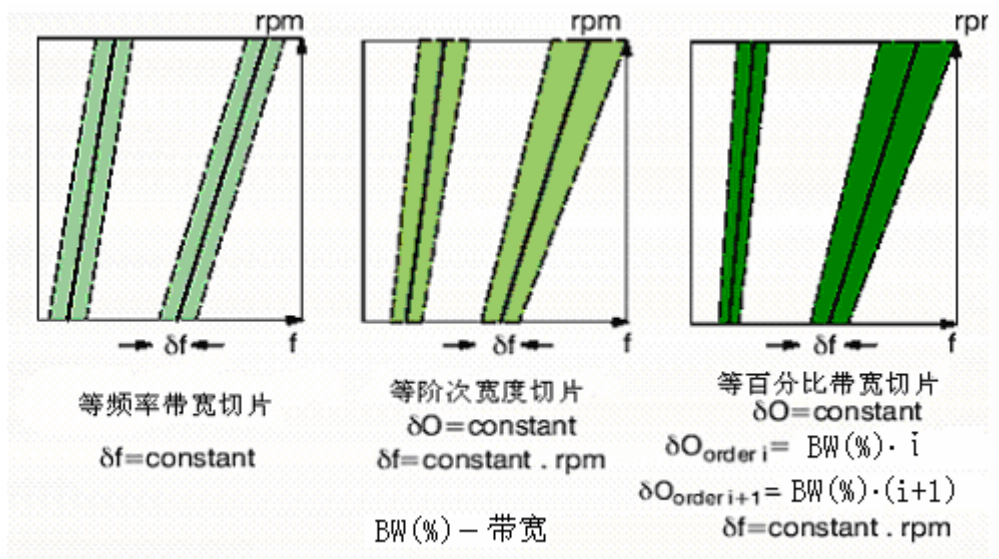
该功能表述在指定的频带内，测量信号的能量随转速（或时间）的变化。

- 阶次切片

该功能表述在指定的阶次（或阶次带）内，测量信号的能量随转速（或时间）的变化。

- 倍频程切片

表述在指定的某一分数倍频程带内，测量信号的能量总和随转速（或时间）的变化。



某齿轮箱 whine（左图）和 rattle（右图）的三维谱彩图。横坐标为频率轴，纵坐标为 rpm 轴

声品质评价

Sound Quality

心理声学研究声音的主观感觉和声学物理量之间的关系。这种主观感觉与人的听觉器官构造和生理特性有关。声品质评价即是对声音“好”“坏”做主观评价。

这种评价十分复杂，甚至因人而异。通常需要用人工头一躯干仿真器和双耳记录—回放系统将现实声音准确记录下来，再经一定处理或直接回放，由专家或听众评判打分。

近年来，对车辆和家电产品的噪声控制逐渐由噪声级的控制转向声品质控制。

目前，关于声品质的客观度量主要有：

- 响度
- 尖锐度
- 波动强度
- 粗糙度
- 语言干扰级
- 清晰度指数

响度计算—Stevens 法

Loudness ISO532A(1975)

人耳对声音强弱的主观感受，用响度(S)或响度级(L_L)度量。响度级单位为方(Phon)，响度单位为宋(sone)。对于纯音，二者的转换关系式为：

$$S=2^{(L_L-40)/10} \quad (\text{宋})$$

$$L_L=33.3\lg S+40 \quad (\text{方})$$

由此可得：

$$L_L=40 \text{ 方} \quad S=1 \text{ 宋}$$

$$50 \text{ 方} \quad 2 \text{ 宋}$$

$$60 \text{ 方} \quad 4 \text{ 宋}$$

对非纯音即复杂噪声的响度计算，Stevens 和 Zwicker 等人提出几种不同的方法。其中，Stevens 法是：对噪声做 1/1、1/2 或 1/3 倍频程分析，对应每一个倍频

程带的中心频率及其声压级，确定一个响度指数 S_i 。 S_i 的值由下图所示 Stevens Mark VI 等响度指数曲线查出，然后由下式计算总响度：

$$S_t = S_m + k \left(\sum_{i=1}^n S_i - S_m \right)$$

$$= S_m (1-k) + k \sum_{i=1}^n S_i \quad (\text{宋})$$

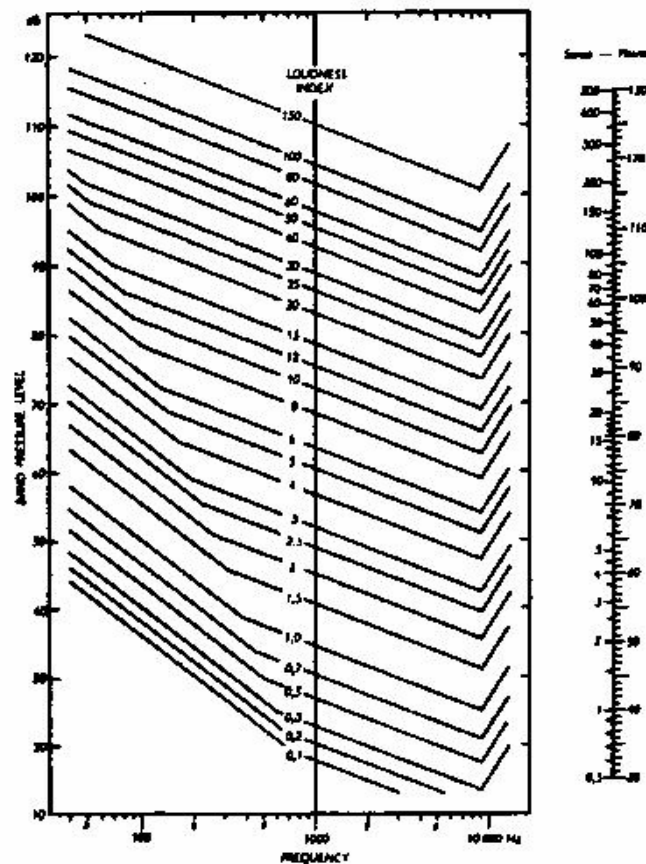
其中， S_m —最大响度指数

S_i —包括 S_m 在内的各响度指数

k —加权因子。对 1/1 Octave 分析， $k=0.3$ ；对 1/2 Octave 分析， $k=0.2$ ；对 1/3 Octave 分析， $k=0.15$ 。

求出总响度 S_t 后，可利用下图右边列线图换算成响度级。

Stevens 法适用于扩散场中平稳宽带噪声的响度计算。



Loudness (Mark VI)

人耳听觉的掩蔽效应

Masking effect

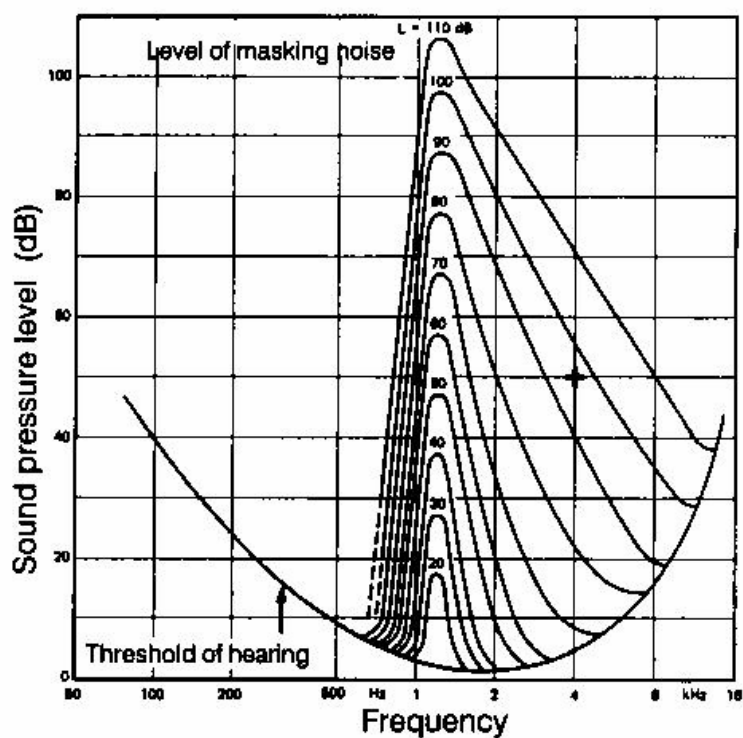
一个声音的听阈因另一个声音的存在而上升的现象称为掩蔽。当一个复合声信号作用于人耳时，如果其中有响度较高的频率分量，则人不容易觉察到那些低响度的频率分量。掩蔽效应有如下规律：

- (1) 在中心频率和声强弱相同条件下，窄带噪声比纯音有更强的掩蔽效应。
- (2) 掩蔽效应在噪声中心频率两侧呈不对称分布，高频区域比低频区域要宽得多。
- (3) 随噪声声压的提高，掩蔽区域和掩蔽量随之扩大。

在一个临界带频率范围内，响度级主要取决于声压的有效值，不同临界带的声音并存时，响度计算需采取不同的方案。

人耳掩蔽效应的临界（频率）带								
临界带(Bark)	1	2	3	4	5	6	7	8
中心频率(Hz)	50	150	250	350	450	570	700	840
带 宽(Hz)	100	100	100	100	110	120	140	150
临界带(Bark)	9	10	11	12	13	14	15	16
中心频率(Hz)	1000	1170	1370	1600	1850	2150	2550	2900
带 宽(Hz)	160	190	210	240	280	320	380	450
临界带(Bark)	17	18	19	20	21	22	23	24
中心频率(Hz)	3400	4000	4800	5800	7000	8500	10500	13500
带 宽(Hz)	550	700	900	1100	1300	1800	2500	3500

下图所示为 中心频率 1200Hz，不同声压的窄带噪声的掩蔽效应图（E.Zwicker）。一 4kHz、50dB 的纯音（图中标记 ‘+’ 号）在声压级 90dB 的窄带背景噪声中仍可听到，当背景声提高到 100dB 时，该纯音就听不到了。



Masking effects of narrow band noise (5)

响度计算——Zwicker 法

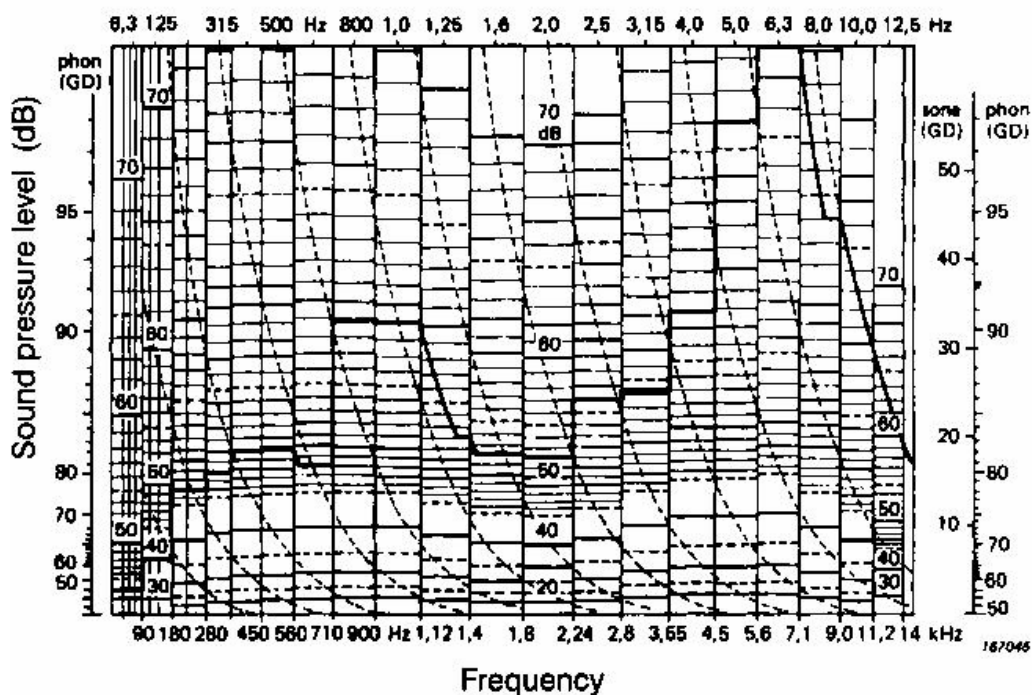
ISO 532B (1975)

Zwicker 法利用 1/3 倍频程 SPL 谱和 Zwicker 响度曲线图进行复合音的响度计算。他的响度曲线图分为两组，一组用于自由场，另一组用于扩散场，每组各有五个图，各对应不同的声压级范围。

计算过程分三步（参看下图）：

- (1) 根据声压级选定一曲线图。将 SPL 1/3 倍频程谱绘在该曲线图上。
- (2) 计算 SPL 1/3 倍频程谱所覆盖的面积，求出平均高度。
- (3) 将平均高度水平线延长至与曲线图右边的列线图相交，从交点即可读出响度（宋）和响度级（方）的值。

Zwicker 法适用于平稳和准平稳噪声计算。



Example loudness calculation according to Zwicker's method {5}

声音的尖锐度 (Sharpness)

尖锐度用于区分声音尖锐(shrill 或 sharp)还是沉闷(dull)。

尖锐度以临界带响度级测量为基础，低频临界带加小的权，越是高频临界带加更大的权。其单位为“acum”(acumen 的缩写)。规定中心频率为 1000Hz，带宽等于相应临界带带宽，声压级为 60dB 的窄带噪声的尖锐度为 1 acum。尖锐度的计算公式为：

$$S = (0.11 \sum_{i=1}^{24} N'(z)g(z)z\Delta z) / N'' \quad (\text{acum})$$

其中，Z—临界带 (Bark) 序号

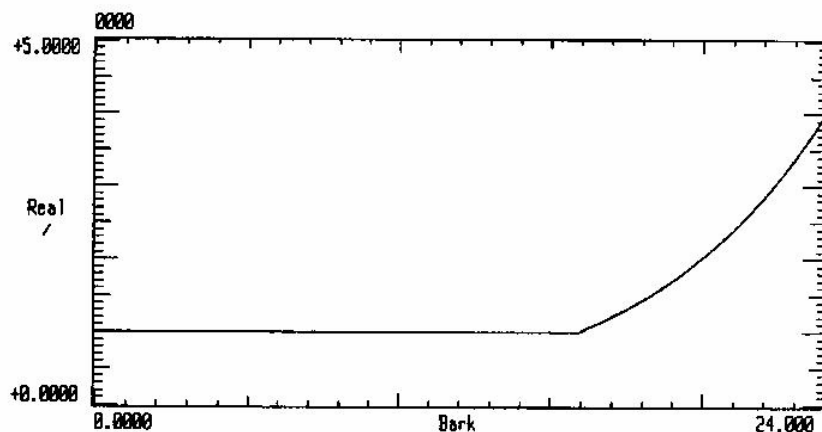
ΔZ —各临界带的带宽

$N'(z)$ —各临界带的局部响度

$$N'' = \sum_{i=1}^{24} N'(z)\Delta z$$

$g(z)$ —加权因子，对 1~16 Bark, $g(z)=1$,

对 16~24 Bark, $g(z)=0.066e^{0.171z}$, 参看下图。



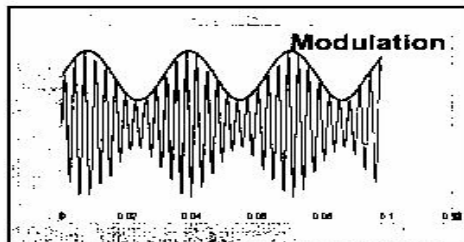
尖锐度计算的加权函数

波动强度 (Fluctuation strength)

粗糙度 (Roughness)

波动强度和粗糙度都与某窄带噪声受到幅值调制程度有关。

设一正弦信号 $A \sin \omega_c t$ 受到调制频率为 ω_m 的信号调制，该调制信号可表示为



$$A(1+B\sin \omega_m t)\sin \omega_c t$$

其中，**B** 称为调制比。

研究表明，如果调制频率低于 15Hz，人耳就能跟踪“调制”，即感受到幅值的变化—波动强度。波动强度的单位为“Vacil”（Vacillate 的缩写）。1 kHz，60dB 的纯音，受到 4 Hz，100%的调制规定为 1 Vacil。

当调制频率为 30Hz 至 150Hz 时，会感受到一种稳定而粗糙的声音，其中调制频率为 70Hz 左右时，感觉最为严重。调制频率高于 150Hz 时，会清楚听到三种不同频带（原频带、和频、差频）的声音。

粗糙度的单位为“asper”（asperity 的缩写）。规定以 1kHz 60dB 的纯音被 70Hz、100%调制时的粗糙度为 1 asper。

语言干扰级（SIL）

Speech Interference Level

语言干扰级是衡量噪声对语言通话的干扰程度的参量。Beranek（美国）于1947年提出的SIL，等于噪声在600~1200Hz，1200~2400Hz，2400~8000Hz三个频带声压级的算术平均值。后来改取中心频率500Hz，1000Hz、2000Hz三个倍频程带声压级的算术平均值，称为优先（Preferred）语言干扰级，记作PSIL，即

$$PSIL = \frac{1}{3} (L_{500} + L_{1000} + L_{2000})$$

美国新标准ANSI的规定稍有不同，取

$$SIL = \frac{1}{4} (L_{500} + L_{1000} + L_{2000} + L_{4000})$$

即增加中心频率4000Hz倍频程带声压级参与平均。另取

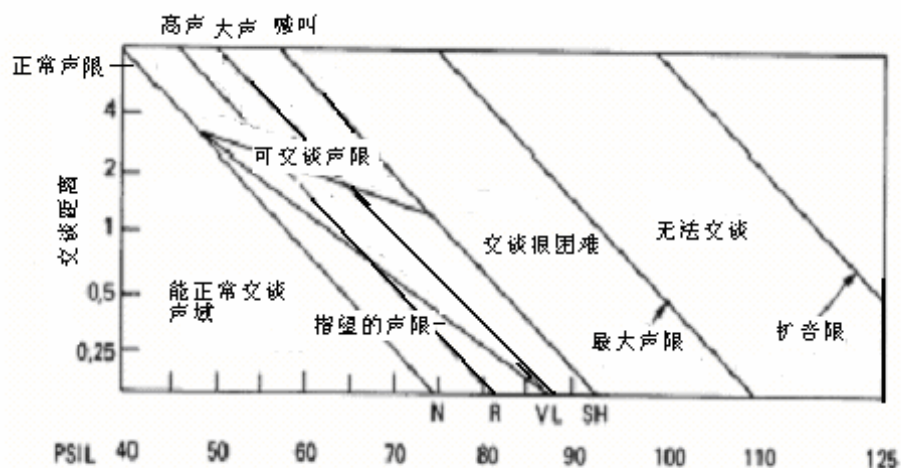
$$PSIL = SIL + 3dB$$

加3dB是考虑到上述频率范围外的高、低频成分对通话也有一定影响。

美国提出的语言干扰级（dB）与通话状态及距离的关系如下表：

对话距离（m）	可正常对话	需提高嗓门	需很响	需高喊
0.15	74	80	86	92
0.30	68	74	80	86
0.60	62	68	74	80
1.20	56	52	68	74
1.80	52	56	64	70
3.70	46	52	56	64

存在背景噪声时通话限制见下图：



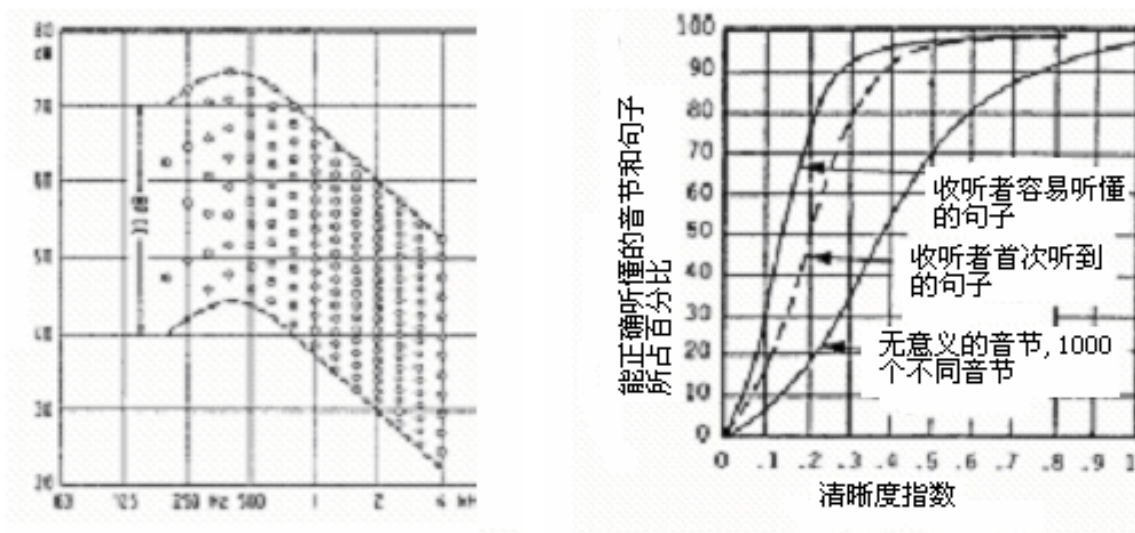
清晰度指数 (AI)

Articulation index

清晰度指数是以保证交谈的私密性观点提出的参数。交谈的私密性可定义为背景声或噪声侵扰正常交谈的“免以”程度，它提供私密性的正面品质评价。

噪声对语言的掩蔽造成的干扰作用，可通过对噪声频谱（1/3 倍频程带）按其对于语言可懂度影响的重要程度适当加权，由经过加权的谱求出清晰度指数 AI 的值。

下左图给出图形算法。与语言相关的倍频程带通过圆点的数目来计权。将声压级的 1/3 倍频程谱绘在图上，谱线以上的点数除以总点数就是要求的 AI 值。实际计算可以表格化。



清晰度指数 AI 与可听懂音节的百分比有关，见上右图。对于完全私密而言，AI 等于 0.05 是其上限；对于商谈非保密性的事情要求的半私密而言，可接受的 AI 值为 0.1。

求 AI 有两种方法可供选用：

● 标准方法

这一算法基于班涅克 (Beranek) 的著作《语音通讯系统的设计》(The design of speech communication system, Proceedings of the IRE, Vol 145, 880-884, 1947)。此方法得到的 AI 值范围为 0~100%。

- 改良方法

其计算基于 AIM，即上页所述方法。测量范围在 20dB 至 100dB 之间 80dB 的固定量程基础上，可上下浮动 30dB。其结果，这一方法得到的 AI 值范围可达到 107% 至约 160%。