

电子信息工程技术专业校企合作特色教材

音箱设计与制造

崔春雷 许焕明编写

徐超 陈维文主审

广东交通职业技术学院

合作企业：国光电器股份有限公司

电子信息工程技术专业校企合作特色教材

音箱设计与制造

崔春雷 许焕明编写

徐超 陈维文主审

广东交通职业技术学院

合作企业：国光电器股份有限公司

目 录

第一章 音频声学的基础.....	7
1.1 波动和声波.....	7
1.1.1 波动的数学描述.....	7
1.1.2 声波的形成.....	8
1.2 描述声波的物理量.....	8
1.2.1 声压 Sound Pressure.....	8
1.2.2 频率 f	9
1.2.3 声速.....	9
1.2.4 波长.....	9
1.2.5 声强.....	9
1.2.6 声功率.....	10
1.3 声级、分贝及运算.....	10
1.3.1 分贝.....	11
1.3.2 声压级. Sound pressure level. (SPL).....	12
1.3.3 声强级.....	12
1.3.4 声功率级.....	13
1.3.5 声压级的叠加和平均.....	13
1.4 声波的传播特性.....	14
1.4.1 声波在自由空间的传播.....	14
1.4.2 声音在管中的传播.....	15
1.4.3 声音在房间内传播.....	15
1.4.4 高低音的效果.....	15
1.4.5 男女对音频的反应.....	16
1.4.6 声波的反射、透射、折射与互相干涉.....	16
第二章 人耳听觉特性.....	18
2.1 响度与等响曲线.....	18
2.2 音调与倍频音程.....	19
2.2.1 音调.....	19
2.2.2 音程.....	19
2.2.3 分数倍音程.....	19
2.2.4 粉红噪声.....	20
2.3 音色.....	21
2.3.1 激励.....	21
2.3.2 谐振.....	21
2.3.3 共鸣.....	21
2.5 失真的觉察.....	24
2.6 哈斯效应 Hass.....	24
2.7 掩蔽效应.....	25
第三章 电, 磁, 机械震动基本知识.....	26
3.1 电学基础知识.....	26
3.1.1 欧姆定律. Ohm's law.....	26
3.1.2 电功率.....	26

3.1.3 电压的有效值和峰值系数(波峰因子 Crest factor)	26
3.1.4 导体的串连与并联	27
3.2 有关磁场, 电磁的基本知识	27
3.2.1 磁感应强度. B	27
3.2.2 磁通量 Magnetic Flux	28
3.2.3 法拉第定律(左, 右手法则)	28
3.3 交流电路	29
3.3.1 交流电路的性质	29
3.3.2 交流电中的电容	29
3.3.3 交流电路中的电感	30
3.4 复阻抗	32
3.4.2 用复数表示正弦量	33
3.5 谐振电路	35
3.5.1 串联谐振电路(串联谐振电路)	35
3.5.2 并联谐振电路. 并联谐振电路	36
3.6 机械振动基本知识	37
3.6.1 自由振动方程	37
3.7 机械振动与电磁振荡的类比	39
3.7.1 RLC 串连电路的电机类比	40
3.7.2 并联电路, 电机类比	43
第四章 喇叭参数测试	46
4.1.1 喇叭结构名称	46
4.1.2 磁场	46
4.1.3 间隙和动力因子 BI (机电转换因子)	47
4.1.4 短路环(法拉第圈)	47
4.1.5 音圈材料和绕法(winding)	48
4.1.6 纸盆结构和共振模式	48
4.1.7 纸盆	49
4.1.8 锥盆的指向性和形状	50
4.1.9 防尘帽	50
4.1.10 悬架系统——边和弹波, surround and spider	51
4.1.11 磁流液. Magnetic fluids 又称磁液	52
4.1.12 (Compression driver)	52
4.2 基于 PC 的扬声器电声特性测试	52
4.2.1 测试线路原理	52
4.2.2 测试信号	53
4.3 扬声器频率响应曲线和阻抗曲线	54
4.3.1 测试的条件	54
4.3.2 参考点和参考轴	55
4.3.3 扬声器阻抗曲线, 响应曲线和灵敏度	56
4.4 阻抗的测试	59
4.5 质量的测试	60
4.5.1 附加重物法. 喇叭的机械质量或活动质量包括两部分	60
4.6 品质因子(QTS QMS QES)的计算	61

4.6.1 QTS QMS QES 的关系.....	61
4.6.2 通过阻抗曲线计算 Q 的方法(Q 的计算方法).....	61
4.6.3 Qts 重要性质.....	63
4.6 等效空气容积 Vas 的计算.....	63
4.9 扬声器基本参数汇总.....	66
4.13 最大位移, 在 fs 条件下, 各种参数线性度, 不超过 10%的音圈位移.....	73
4.14 失真度.....	74
4.17 标准音质评价术语.....	75
第五章 音箱的结构与分类.....	76
第六章 音箱的设计与制造.....	84
6.1 音 箱 材 料.....	84
6.2 制 作 方 法 简 介.....	85
6.3 音箱的设计.....	87
6.4 在无限平板上的喇叭负载.....	87
6.5 在封闭音箱中的喇叭.....	88
6.6 分 频 器 制 作.....	91
6.6.2 分频器与滤波器.....	91
6.6.3. 滤波器的类型.....	92
6.6.4 分频点和分频斜率和品质因素.....	92
6.6.5 分频点的选择.....	95
6.6.6 分频后喇叭声波的相位.....	95
图 6-3.....	96
6.6.7 分频器电路计算.....	96
6.6.8 分频器.....	97
6.7 音箱箱体的制作.....	97
参考文献.....	104

电子信息工程技术专业校企合作特色教材

音箱设计与制造

崔春雷 许焕明编写

徐超 陈维文主审

广东交通职业技术学院

合作企业：国光电器股份有限公司

内容提要

本书阐述了音箱的基本结构与工作原理，以及音箱各个部件的声/电理论基础，从高职教育出发，内容安排由浅入深，通俗易懂，突出音箱制作各个环节的基本原理。主要内容有音频的声学基础、人耳的听觉特征、电磁机械振动基础、扬声器结构与参数测试、音箱的结构与分类、音箱的设计与制造等。

本书有较强的可读性。可作为高职院校电子信息类、通信类、电气类专业的教材，也可以作为相关工程技术人员的参考。

前 言

本书是根据作者的近几年的教学经验并与国光电器股份有限公司合作的基础上编写而成。在编写过程中,我们注重理论与应用的结合,立足实用,对理论采用够用原则,加强对音箱制作实践的内容。本书论述时强调基本概念、基本原理、制作方法,强调音箱制作的方法和思路。

本书共6章。第一章 音频声学基础,讲述音箱制作所涉及的基本声学基础理论;第二章 人耳听觉特征,介绍了人耳的听觉特性,如掩蔽效应、哈斯效应等;第三章 电、磁、机械振动基础,讲述了扬声器振动的基本声学、电学、机械学基础;第四章 扬声器结构与参数测试,讲述了扬声器的结构以及各参数的物理意义以及测试方法;第五章 音箱的结构与分类,介绍了常见音箱的各种分类类型以及内部结构;第六章 音箱的设计与制造,介绍了音箱的设计方法以及制作方法。

本书层次分明,浅显易懂,内容适量、易懂。适合作为高职院校电子信息类、通信类、电气类等专业的音响类、音箱制作类课程的教材和参考书。

由于时间仓促编者水平有限,书中难免出现缺点和错误,恳切希望读者指正。

编者

2013/6/22

目 录

第一章 音频声学的基础.....	7
1.1 波动和声波.....	7
1.1.1 波动的数学描述.....	7
1.1.2 声波的形成.....	8
1.2 描述声波的物理量.....	8
1.2.1 声压 Sound Pressure.....	8
1.2.2 频率 f	9
1.2.3 声速.....	9
1.2.4 波长.....	9
1.2.5 声强.....	9
1.2.6 声功率.....	10
1.3 声级、分贝及运算.....	10
1.3.1 分贝.....	11
1.3.2 声压级. Sound pressure level. (SPL).....	12
1.3.3 声强级.....	12
1.3.4 声功率级.....	13
1.3.5 声压级的叠加和平均.....	13
1.4 声波的传播特性.....	14
1.4.1 声波在自由空间的传播.....	14
1.4.2 声音在管中的传播.....	15
1.4.3 声音在房间内传播.....	15
1.4.4 高低音的效果.....	15
1.4.5 男女对音频的反应.....	16
1.4.6 声波的反射、透射、折射与互相干涉.....	16
第二章 人耳听觉特性.....	18
2.1 响度与等响曲线.....	18
2.2 音调与倍频音程.....	19
2.2.1 音调.....	19
2.2.2 音程.....	19
2.2.3 分数倍音程.....	19
2.2.4 粉红噪声.....	20
2.3 音色.....	21
2.3.1 激励.....	21
2.3.2 谐振.....	21
2.3.3 共鸣.....	21
2.5 失真的觉察.....	24
2.6 哈斯效应 Hass.....	24
2.7 掩蔽效应.....	25
第三章 电、磁、机械震动基本知识.....	26
3.1 电学基础知识.....	26
3.1.1 欧姆定律. Ohm's law.....	26
3.1.2 电功率.....	26

3.1.3 电压的有效值和峰值系数(波峰因子 Crest factor)	26
3.1.4 导体的串连与并联	27
3.2 有关磁场, 电磁的基本知识	27
3.2.1 磁感应强度. B	27
3.2.2 磁通量 Magnetic Flux	28
3.2.3 法拉第定律(左, 右手法则)	28
3.3 交流电路	29
3.3.1 交流电路的性质	29
3.3.2 交流电中的电容	29
3.3.3 交流电路中的电感	30
3.4 复阻抗	32
3.4.2 用复数表示正弦量	33
3.5 谐振电路	35
3.5.1 串联谐振电路(串联谐振电路)	35
3.5.2 并联谐振电路. 并联谐振电路	36
3.6 机械振动基本知识	37
3.6.1 自由振动方程	37
3.7 机械振动与电磁振荡的类比	39
3.7.1 RLC 串连电路的电机类比	40
3.7.2 并联电路, 电机类比	43
第四章 喇叭参数测试	46
4.1.1 喇叭结构名称	46
4.1.2 磁场	46
4.1.3 间隙和动力因子 BI (机电转换因子)	47
4.1.4 短路环(法拉第圈)	47
4.1.5 音圈材料和绕法(winding)	48
4.1.6 纸盆结构和共振模式	48
4.1.7 纸盆	49
4.1.8 锥盆的指向性和形状	50
4.1.9 防尘帽	50
4.1.10 悬架系统——边和弹波, surround and spider	51
4.1.11 磁流液. Magnetic fluids 又称磁液	52
4.1.12 (Compression driver)	52
4.2 基于 PC 的扬声器电声特性测试	52
4.2.1 测试线路原理	52
4.2.2 测试信号	53
4.3 扬声器频率响应曲线和阻抗曲线	54
4.3.1 测试的条件	54
4.3.2 参考点和参考轴	55
4.3.3 扬声器阻抗曲线, 响应曲线和灵敏度	56
4.4 阻抗的测试	59
4.5 质量的测试	60
4.5.1 附加重物法. 喇叭的机械质量或活动质量包括两部分	60
4.6 品质因子(QTS QMS QES)的计算	61

4.6.1 QTS QMS QES 的关系.....	61
4.6.2 通过阻抗曲线计算 Q 的方法(Q 的计算方法).....	61
4.6.3 Qts 重要性质.....	63
4.6 等效空气容积 Vas 的计算.....	63
4.9 扬声器基本参数汇总.....	66
4.13 最大位移, 在 fs 条件下, 各种参数线性度, 不超过 10%的音圈位移.....	73
4.14 失真度.....	74
4.17 标准音质评价术语.....	75
第五章 音箱的结构与分类.....	76
第六章 音箱的设计与制造.....	84
6.1 音 箱 材 料.....	84
6.2 制 作 方 法 简 介.....	85
6.3 音箱的设计.....	87
6.4 在无限平板上的喇叭负载.....	87
6.5 在封闭音箱中的喇叭.....	88
6.6 分 频 器 制 作.....	91
6.6.2 分频器与滤波器.....	91
6.6.3 滤波器的类型.....	92
6.6.4 分频点和分频斜率和品质因素.....	92
6.6.5 分频点的选择.....	95
6.6.6 分频后喇叭声波的相位.....	95
图 6-3.....	96
6.6.7 分频器电路计算.....	96
6.6.8 分频器.....	97
6.7 音箱箱体的制作.....	97
参考文献.....	104

第一章 音频声学的基础

1.1 波动和声波

1.1.1 波动的数学描述

振动产生波，如绳子的振动能量以波的形式传播。常用绳子多点的位移来描述绳子波的传动，一个波动可用正弦函数来表示。

$$\text{正弦函数: } y = A \sin \phi$$

A 为最大振幅 (m)

ϕ 为角度 (相位角)。

在 x - y 坐标系里，若 x 代表角度， y 代表振幅，画出的波形图叫正弦曲线。一般在电学、声学里，角度都用弧度表示： $2\pi=360$ 度， $\pi/2=90$ 度。有时， x 轴取为时间， y 轴为振幅，则可表示振幅随时间的变化，这时，正弦函数要写成：

$$y = A \sin(\omega t)$$

ω 叫角频率 $\omega = 2\pi/T$

T 为振动一次所需的时间，又叫周期。

当 $t = T$ ， $\omega t = 2\pi$ ；当 $t = T/2$ ， $\omega t = \pi$ ，当 $t = T/4$ ， $\omega t = \pi/2$ 所以 ωt 就相当角度。 T 的倒数， $1/T = f$ ，叫频率，表示单位时间(1 秒)震动的次数。

有时， x 轴取为距离， y 轴为振幅，则可表示振幅随距离的变化，这时，正弦函数要写成：

$$y = A \sin(\omega x)$$

ω 叫角频率 $\omega = 2\pi/\lambda$

λ 为振动一次所的长度，又叫波长。 ωx 就相当角度。

在使用表达式 $y = A \sin(\omega t)$ 的时候，往往碰到在 $t = 0$ 时振幅不为 0 的情况，这时，要把表达式改写成 $y = A \sin(\omega t + \phi)$ ， ϕ 角可正，可负。也常把它称为相位角。周期 T ，波长 λ 和频率 f ，它们之间的关系是： $f=1/T$ ，

$$(\text{波速}) C = \lambda / T = \lambda f$$

$$\lambda = C / f$$

如： 1Hz 声波 波长为 344m

10Hz 声波 波长为 34.4m

100 Hz 声波 波长为 3.44m

1000Hz 声波 波长为 0.344m

1.1.2 声波的形成

(波的形成和传播)

横波:振动方向与传播方向垂直

纵波:振动方向与传播方向平行

声波是一种纵波。例如,受活塞作用,空气密度增加,压力加大,增大的压力在管内传播,就形成波动,在声波传输的介质里的某固定点,压力随时间的变化可写成:

$$P = P_0 \sin(\omega t + \phi)$$

P_0 代表空气密度增加时,气压的最大增量。

1.2 描述声波的物理量

1.2.1 声压 Sound Pressure

声波的传播就是大气压增压在弹性介质(空气)中的传播。

$$P = P_0 \sin(\omega t + \phi)$$

P_0 为声压振幅,单位是帕斯卡 Pa (N / m^2)

一个大气压为 1.0325×10^5 Pa 即 1000 hPa。

与交流电一样,常用有效值(RMS)(Root-Mean-Square)表示声压。

如果声波

的最大振幅为 P_0

$$, \quad P_{\text{rms}} = 0.707 P_0 \quad \text{即} \quad \sqrt{2}/2 P_0$$

以后我们提到声压如无特殊说明,都是指声压有效值。

人耳能分辨的最低声压为 $20 \mu\text{Pa}$ (当频率为 1000Hz 时)

两人面对面交谈声压为 2×10^{-2} Pa

织布车间噪声声压为 2Pa

> 20Pa 时,人耳有痛觉

最低声压 $20 \mu\text{Pa}$ 是由弗来彻和芒森确定的(1000 Hz), 500 Hz 时,还要低,当频率超过 1000 Hz

时,灵敏度会提高,最灵敏的频率是 3.5K Hz

1.2.2 频率 f

声源每秒振动的次数称频率,单位是 Hz,

声音的频率可听范围是 20Hz - 20kHz

< 20Hz 为次声

> 20000Hz 为超声

1.2.3 声速

声音可在不同介质中传播。固、液、空气,速度在不同介质中不同。

速度: 固体 > 液体 > 气体

在空气中,声速 $c = 331.6 + 0.6t$ (m/s), 此处 t 指环境温度。

可见 15 度时, c 为 340 m/s 左右。

声速与空气质点运动速度是不同的概念,大声说话时,声压为 0.1Pa,质点的运动速度是 $p/(\rho_0 C_0)$ 为 2.5×10^{-4} m/s. 空气的 $\rho_0 C_0$ 为 415 N.S/m³,

1.2.4 波长

声波在传播过程中,相邻的同位相之间的距离为波长。

C, f, λ 的关系为:

$$C = \lambda * f$$

空气中声音是非色散波(不同频率波速相等),因此,频率与波长成反比,频率低的波长长。

1000Hz 波长 0.34 m

100Hz 波长 3.4 m

10Hz 波长 34 m

1Hz 波长 340 m

不同波长传播时会发生不同物理现象.当遇到障碍物时,障碍物线度比波长小,会有绕射发生,声波可自由传播.当障碍物与波长相当时,发生散射,在声波入射方向散射波声强增加.其他方向减弱,出现指向性.当障碍物线度 >> 波长,声音被反射回去,障碍物后出现声影区。

1.2.5 声强

声音的传播是空气质量在平衡位置附近来回振动的能量(动能和势能)的传播.常用声强来定量描述声能的传播。

定义:单位时间内通过垂直于传播方向单位面积的平均能量. 用 I 表示, 单位: W/m^2 . ($N \cdot s / m^2$)

I 是矢量, 有大小和方向.

I 与声压的关系: $I = P^2 / (\rho_0 C_0)$

ρ_0 是声传波媒体的密度, 空气密度为: $\rho_0 = 1.21 \text{ kg} / \text{m}^3$ (在 20 度时)

C_0 是声传波的速度, 当温度为 20 度, C_0 为 344m/s.

$\rho_0 C_0$ 在声学里是一个非常重要的概念, 称为媒体的特性阻抗, 当温度为 20 度, C_0 为 344m/s, $\rho_0 = 1.21 \text{ kg} / \text{m}^3$ 空气的 $\rho_0 C_0$ 为 415 $N/s \cdot m^2$

对水来说, 密度为 1000kg/m³, 声速为 1480m/s, $\rho_0 C_0$ 为 $1.48 \times 10^6 \text{ N/s} \cdot m^2$

声波碰到特性阻抗不同的媒体的界面, 会发生反射。

一个球面的震动体(喇叭可近似看成球面一部分)在向外辐射声音时, 会受到声音的反作用力, 称为辐射阻抗, 它可写成: $R = \rho_0 C_0 S$, 此处 S 是辐射面的面积, 这在以后当讨论压缩驱动器 (Compression Driver) 时要涉及到。

1.2.6 声功率

声源在单位时间内辐射的总的声能量叫声源辐射功率 (即声功率), 单位 W 。

声功率很小, 人讲话 20 μW , 扬声器由电功率转换为声功率, 效率仅为千分之几。

若一点声源在自由空间辐射声波, 与点声源距 r 的球面上, 声强 I 都相同。

则 $W = I \cdot 4 \pi r^2$

1.3 声级、分贝及运算

人耳感受到的声压, 从 20 μPa 一直到有痛感的 20Pa, 跨越了 10^6 倍, 即 100 万倍。

人耳的“感觉响度”与强度, 或声压有关。听觉响了一倍, 实际上强度大了十倍, 所以更接近于与强度的对数成正比。因此在声学中, 常用对数坐标来表示声压, 声强和声功率。

复习——对数, 对数是指数的逆运算。

$y = a^x \quad \log_a y = x$ (称为: x 是 y 以 a 为底的对数) 以 10 为底的对数叫常用对数, 以 $e=2.73..$ 为底的叫自然对数。

$$100 = 10^2 \quad \log_{10} 100 = 2$$

对数运算法则:

$$\log(a \cdot b) = \log a + \log b$$

$$\text{例如: } \log 2 \cdot 100 = \log 2 + \log 100 = 0.3010 + 2 = 2.3010$$

$$\log a/b = \log a - \log b$$

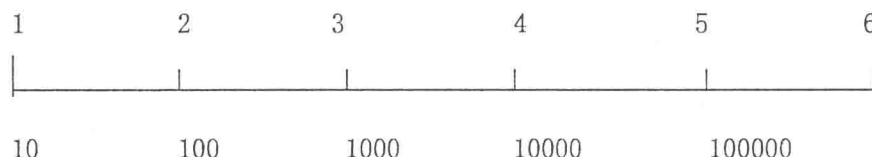
例如: $\log 1000/100 = \log 1000 - \log 100 = 3 - 2 = 1$

$$\log A^x = x \cdot \log A$$

例如: $\log 100^2 = 2 \cdot \log 100 = 4$

$$\log 1 = 0 \text{ 因为 } A^0 = 1 \quad \log 1/100 = \log 1 - \log 100 = 0 - 2 = -2$$

对数尺度: 把某一量取对数以后标在线性尺度上叫对数尺度 logarithmic scale.



1.3.1 分贝

上世纪初, 贝尔 (Bell) 发明电话, 当信号经过放大器, 信号功率增加/减少的对数就是贝尔, Bel.

Bel. 无单位, 如输入 1W, 放大后为 2W.

$$\text{Bel} = \log(2\text{w}/1\text{w}) = 0.30103$$

1/10 贝尔定义为分贝, decibel (dB)。

所以, 增加了一倍, 即增加了 $10 \cdot \lg(2/1) = 3.0103 \text{ dB}$, 即增加了 3 分贝.

没有增益 $10 \cdot \lg(1/1) = 0 \text{ dB}$. 若不是增加, 而是减少了为原来的一半,

$$10 \lg(0.5/1) = 10 \lg(1/2) = 10 \cdot (0 - 0.3) = 10 \cdot -0.3 = -3 \text{ dB}$$

所以, 若 0 dB ~ 1W 3 dB ~ 2W 6dB ~ 4W

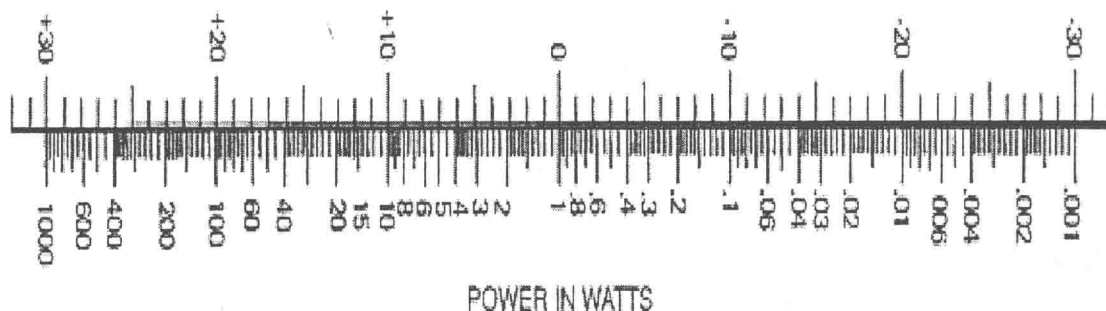
9dB ~ 8W 10dB ~ 10W 12dB ~ 16W

20dB ~ 100W 30dB ~ 1000W 33dB ~ 2000W

-10dB ~ 0.1W, -20dB ~ 0.01W -30 dB ~ 0.001W

(即: 每增加三个 dB, 则输出增加为输入的 2 倍。)

dB ABOVE AND BELOW A ONE WATT REFERENCE POWER



1.3.2 声压级. Sound pressure level. (SPL)

声压级定义：声压的有效值 P 与基准声压 P_0 之比取 10 为底的对数再乘以 20。

即 $L_p = 20 \lg(P/P_0)$ (dB)

$$P_0 = 20 \mu\text{Pa} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$$

例如，喇叭 A 比喇叭 B 声压大了一倍，问声压级提高了多少分贝？

$$L_p = 20 \lg(P_a/P_b) = 20 \lg 2 = 6 \text{ dB.}$$

计算声压级的时候，要乘 20，是因为声功率与声压的平方成正比。即声压增大一倍（为原来的二倍），声功率为原来的四倍（就像电压增大为原来的二倍，电功率为原来的 4 倍）。

例 1：喇叭测试信号电压的峰值因子为 6dB，问峰值时功率为平时的多少倍？

电压的峰值因子为 6dB（相当于电压级为 6dB），说明峰值电压比有效值大一倍，所以电功率为有效值的 4 倍。

例 2：用 Clio 测谐振频率，3 阶谐振频响曲线在提高了 30 分贝以后，在大于 200Hz 以后与总的相应曲线高度接近，问 3 阶谐振的声振动能量与整体比，为整体的多少？

答：-30 dB = 10 * lg(X/1)

$$-3 = \lg X$$

$$X = 0.001 = 0.1\%$$

1.3.3 声强级

某声强与基准声强 I_0 之比取对数乘 10

$$L_I = 10 \lg(I/I_0) \text{ dB}$$

式中 $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ ，又声强与声压的平方成正比。故

在常温常压下，声强级与声压级相等。

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} = 10 \lg \left\{ \frac{\frac{p^2}{\rho_0 c_0}}{\frac{p_0^2}{\rho_0 c_0}} \right\} = 10 \lg \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) = 20 \lg \frac{p}{p_0}$$

声强级与声压级数值上相等，所以，声强级概念不常用。

1.3.4 声功率级

$$L_W = 20 \lg W/W_0 \text{ (dB)} \quad W_0 = 10^{-12} \text{ W (1000Hz)}$$