

THE RECORDING ENGINEER'S HANDBOOK

# 录音工程师手册

(第二版)

周小东 编著

中国广播影视出版社

THE RECORDING ENGINEER'S HANDBOOK

# 录音工程师手册

(第二版)

周小东 编著

中国广播影视出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

录音工程师手册/周小东编著. —2 版. —北京:  
中国广播影视出版社, 2015. 3

ISBN 978-7-5043-7308-3

I. ①录… II. ①周… III. ①录音—技术手册 IV.  
①TN912.12-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 286860 号

## 录音工程师手册 (第 2 版)

周小东 编著

---

责任编辑 任逸超

装帧设计 丁琳

责任校对 谭霞

---

出版发行 中国广播影视出版社

电 话 010-86093580 010-86093583

社 址 北京市西城区真武庙二条 9 号

邮 编 100045

网 址 www.crtp.com.cn

电子信箱 crtp8@sina.com

---

经 销 全国各地新华书店

印 刷 高碑店市德裕顺印刷有限责任公司

---

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16

字 数 296(千)字

印 张 16.5

版 次 2015 年 4 月第 1 版 2015 年 4 月第 1 次印刷

---

书 号 ISBN 978-7-5043-7308-3

定 价 40.00 元

---

(版权所有 翻印必究·印装有误 负责调换)

## 再版序

因为有对录音艺术和技术的再思考，所以再版此书。尽管再版的章节顺序仍然是从声学基础到乐器拾音和后期制作以便符合录音的工作流程，即对室内声场的评估直到对信号的拾取和处理。因为考虑到该书的受众为一线的录音工作人员以及刚刚开始在该领域学习的学生，而并非设备设计及信号处理领域中的科研人员，所以多数章节相对于第一版来说对理论的阐述略有删减，同时增加了一些实操内容，以便使得整体内容更直接，更实用。

如果声音以艺术为终点，那么通往艺术终点过程中的若干技术参数则具有多变性的特点，因为任何参数的设置都是录音师根据作品的不同所产生的短暂的火花。有关录音艺术的书亦是如此。谨以一家之言，和大家交流。

感谢中国广播影视出版社的任逸超主任和编辑赫铁龙对该书的大力支持和帮助。

谨以此书献给我的家人和所有在声音艺术领域里孜孜不倦的朋友以及在后面支持他们的家人。

周小东  
2014年11月16日

# CONTENTS 目录

|                        |
|------------------------|
| 第一章 录音声学基础 / 1         |
| 1.1 分贝 / 2             |
| 1.2 谐波和倍频程 / 4         |
| 1.3 VU 表、峰值表及相位表 / 5   |
| 1.4 声波的传输 / 7          |
| 1.5 相位关系和梳状滤波效应 / 8    |
| 1.6 声强级、声功率级和声压级 / 9   |
| 1.7 人耳构成及各部分功能 / 10    |
| 1.8 临界带宽 / 12          |
| 1.9 响度 / 13            |
| 1.10 录音室监听音量标准的确定 / 15 |
| 1.11 哈斯效应 / 16         |
| 1.12 声反射 / 16          |
| 1.13 平方反比定律 / 17       |
| 1.14 吸声及吸声材料 / 18      |
| 1.15 混响 / 22           |
| 1.16 房间共振 / 23         |
| 1.17 声波扩散及扩散体 / 26     |
| 1.18 初始延时空隙 / 28       |
| 第二章 麦克风设计原理 / 31       |
| 2.1 麦克风特性 / 32         |

- 2.2 麦克风换能原理 / 43
- 2.3 其他类型的麦克风 / 47
- 2.4 麦克风前置放大器 / 53
- 2.5 麦克风接头和电缆 / 54
- 2.6 DI 盒 / 56

### 第三章 扬声器设计原理 / 59

- 3.1 扬声器主要部件及功能 / 60
- 3.2 扬声器特性 / 64
- 3.3 扬声器箱体设计 / 67
- 3.4 号筒式扬声器 / 69
- 3.5 扬声器分频系统 / 71
- 3.8 扬声器的摆放 / 73

### 第四章 调音台应用 / 75

- 4.1 调音台总述 / 76
- 4.2 调音台功能简介 / 78
- 4.3 数字音频工作站简介 / 88

### 第五章 调音台信号周边处理设备 / 93

- 5.1 周边设备对信号在时间范畴上的处理 / 94
- 5.2 周边设备对信号在频率范畴上的处理 / 97
- 5.3 周边设备对信号在动态范畴上的处理 / 101
- 5.4 跳线盘设计 / 107
- 5.5 耳机放大器 / 109

### 第六章 模拟音频信号存储系统 / 113

- 6.1 磁带 / 114
- 6.2 模拟录音流程 / 116
- 6.3 磁带录音机传动系统 / 119
- 6.4 模拟磁带录音机校正 / 121
- 6.5 模拟信号降噪系统 / 125

## 第七章 数字信号记录系统 / 133

- 7.1 采样频率 / 134
- 7.2 量化 / 135
- 7.3 模拟-数字信号转换 / 137
- 7.4 数字-模拟信号转换 / 142
- 7.5 数字信号存储系统 / 144
- 7.6 数字信号传输与连接 / 166
- 7.7 计算机音频文件格式 / 173

## 第八章 二声道及多声道立体声原理及拾音技术 / 177

- 8.1 二声道幻像声源的形成 / 178
- 8.2 二声道麦克风拾音技术 / 179
- 8.3 三声道 (3-0) 立体声格式 / 190
- 8.4 四声道 (3-1) 立体声格式 / 191
- 8.5 5.1 声道 (3-2) 立体声格式 / 192
- 8.6 其他多声道音频格式 / 193
- 8.7 环绕立体声系统 / 195
- 8.8 环绕立体声拾音技术 / 201
- 8.9 环绕声麦克风 / 204

## 第九章 乐器声学及乐器拾音 / 207

- 9.1 弦乐器的拾音 / 208
- 9.2 木管乐器拾音 / 219
- 9.3 铜管乐器的拾音 / 224
- 9.4 膜质打击乐器的拾音 / 226
- 9.5 非膜质打击乐器的拾音 / 233
- 9.6 钢琴的拾音 / 234
- 9.7 手风琴的拾音 / 238
- 9.8 人声的拾音 / 239
- 9.9 乐团的拾音 / 240
- 9.10 音乐节目的混音制作 / 248

# 第一章



## 录音声学基础



## 1.1 分贝

分贝通常被简称为 dB, 其中小写 d 代表英文 decibel 即分贝, 而大写 B 代表 Bel 即贝尔, 采用小写 d 和 大写 B 主要说明分贝和贝尔之间的关系为 1 : 10, 即 1 分贝等于十分之一贝尔。根据测量, 火箭推进器的声压级可以达到 180dB, 而一个较为安静的音乐厅的本底噪声值则在 30dB 左右。这里值得强调的是 0dB 并不是代表一个完全静寂的状态, 而是代表人耳的听阈点, 也就是一个听力正常的人所能听到的最低的音量。0dB 可以用声压表示为  $2 \times 10^{-5}$  帕斯卡/平方米或用声强表示为  $1 \times 10^{-12}$  瓦/平方米, 并通常作为参考值出现在 dB 计算公式中。dB 是使用对数来表示的实际测量值和参考值的比值。当使用 dB 表示声功率及声强时使用 10 倍的对数公式, 通常被称为 10log 法则 (见公式 1), 又根据欧姆定律  $p = \frac{E^2}{R}$ , 在使用 dB 表示声压、电压、振幅时则使用 20 倍的对数公式, 通常被称为 20log 法则 (见公式 2)。

$$\text{dB} = 10 \log \frac{P}{P_r} \quad (\text{公式 1})$$

其中:  $P$  = 实际测量功率值 (瓦),  $P_r$  = 参考功率值  $1 \times 10^{-12}$  瓦/平方米。

$$\text{dB} = 20 \log \frac{E}{E_r} \quad (\text{公式 2})$$

其中:  $E$  = 实际测量值 (伏特),  $E_r$  = 参考声压值  $2 \times 10^{-5}$  帕斯卡/平方米。

在声学的测量和计算中, 通常会遇见达因/平方厘米 ( $\text{dynes/cm}^2$ ), 瓦/平方米 ( $\text{watts/m}^2$ ) 和 0dB, 微巴 (microbars) 以及牛顿/平方米 ( $\text{newtons/m}^2$ )。它们之间的关系总结如下:

1. 0dB = 0.0002 微巴 = 0.0002 达因/平方厘米 = 0.00002 牛顿/平方米 = 0.000000000001 瓦/平方米

2. 1 微巴 = 1 达因/平方厘米 = 0.1 牛顿/平方米

根据公式 1, 如果一个声源的声功率为 10 瓦的话, 那么其所代表的 dB 值应为:

$$\text{dB} = 10 \log \frac{P}{P_r} = 10 \log \frac{10}{10^{-12}} = 10 \log 10^{(1+12)} = 10 \log 10^{13} = 130 \text{dB}$$

如果此时所测得的声功率提升一倍为 20 瓦的话, 根据公式 1, 其所代表的 dB 值应为:

$$\text{dB} = 10 \log \frac{2 \times 10^1}{10^{-12}} = 10 \log (2 \times 10^{13}) = 10 \times 13.301 = 133.01 \text{dB}$$

根据上面的计算可以看出声功率增加一倍, 代表其增益提高 3dB。而并非想象中的  $130 \text{dB} + 130 \text{dB} = 260 \text{dB}$ 。

根据公式 2, 如果一个穿过指定电阻的电压从 6V 提升到 12V 的话, 那么其所代

表的 dB 值的变化应为:

$$NdB = 20 \log \frac{12}{6} = 20 \log 2 = 20 \times 0.31 = 6.02 \text{ dB}$$

在计算中, 6V 为参考值, 并且可以看出, 电压增加一倍代表其增益提升 6dB。

因为 dB 代表一个比值, 所以在实际工作中通常要在 dB 的后面加后缀, 来赋予该 dB 值特定的意义。目前在录音室内常用的 dB 单位有 dBm、dBu、dBV。

**dBm:** dBm 代表功率 dB 值, 或者说是用 dB 表示的功率值。其中小写 m 表示其参考功率值为 1 毫瓦。又因为对于 dBm 来说, 其设备阻抗规定为 600 欧姆, 因此 dBm 通常也被写为 dBm<sub>600</sub>。概括来说, dBm 可以表示为在标准功率 1 毫瓦的情况下, 电压通过 600 欧姆电阻所产生的 0 参考值。根据公式  $p = E^2/R$ , 该参考值为 0.775 伏, 也就是说 0dBm = 0.775 伏。在实际工作中, 如果电阻不是 600 欧姆时, 可以通过公式 3 得出相应的 dBm 值, 例如当电阻为 1200 欧姆时:

$$NdBm = 10 \log \frac{\frac{E^2}{R}}{\frac{E_r^2}{R_r}} \quad (\text{公式 3})$$

推出

$$NdBm = 20 \log \frac{E}{E_r} - 10 \log \frac{R}{R_r}$$

其中  $E_r$  和  $R_r$  分别代表电压及电阻的 0 参考标准值, 即 0.775 伏和 600 欧姆。因此根据公式 3, 可以得出当电压 0.775 伏经过电阻 1200 欧姆时, 所代表的 dBm 值为:

$$\begin{aligned} NdBm &= 20 \log \frac{E}{E_r} - 10 \log \frac{R}{R_r} = 20 \log \frac{0.775}{0.775} - 10 \log \frac{1200}{600} = 20 \log 1 - 10 \log 2 \\ &= 20 \times 0 - 10 \times 0.301 = -3.01 \text{ dBm} \end{aligned}$$

**dBu:** dBu 代表以 0.775V 为参考值的伏特 dB 值。u 在这里代表英文 unit 即单位的第一个字母。根据下面公式 4 可以得出: 0dBu = 0.775V。和 dBm 不同, dBu 在概念上并没有对设备的阻抗值有硬性规定。

$$dBu = 20 \log \frac{V}{0.775} \quad (\text{公式 4})$$

**dBV:** 相对于 dBu 的 0.775V 参考值来说, dBV 代表以 1V 为参考值的伏特 dB 值, 根据下面公式 5 可以得出: 0dBV = 1V。

$$dBV = 20 \log \frac{V}{1} \quad (\text{公式 5})$$

在实际工作中, 通常专业音频设备的标准操作电平被定义为 +4dBu, 而非专业音频设备的标准操作电平被定义为 -10dBV。目前在很多专业录音设备上都有设计有

+4dBu和-10dBv的选择开关,以便扩大设备的应用范围。dBu、dBV和伏特电压之间的对照关系如表1-1所示。根据计算,+4dBu和-10dBV之间的电平差为11.78dB。

表 1-1

| dBu   | 电压 (伏特) | dBV   | dBu  | 电压 (伏特) | dBV   |
|-------|---------|-------|------|---------|-------|
| +4    | 1.228   | +1.78 | 0    | 0.775   | -2.22 |
| +2.22 | 1       | 0     | 7.78 | 0.316   | -10   |

## 1.2 谐波和倍频程

谐波和倍频程是录音中常见的两个概念。谐波频率之间的关系为线性关系,代表每个谐波频率值是该频率前一个谐波频率值的整数倍。例如,一个基频频率为100Hz,那么该频率的第一谐波频率为基频本身,第二谐波频率应为200Hz,第三谐波频率为300Hz,第四谐波频率值为400Hz。而对于倍频程来说,第一倍频程的频率等于第二谐波的频率,也就是说,当基频为100Hz的话,其第一倍频程的频率等于200Hz,第二倍频程的频率为400Hz,第三倍频程为800Hz。在人的听觉范围20Hz~20kHz之间共有10个倍频程。一个倍频程与其上限频率和下限频率的关系可用公式6表示为:

$$\frac{f_2}{f_1} = 2^n \quad (\text{公式6})$$

其中: $f_2$  = 倍频程的上限频率。 $f_1$  = 倍频程的下限频率。 $n$  = 倍频程值。

例如:

1. 如果一个频带带宽为10个倍频程,其下限频率为20Hz,求该带宽的上限频率值。计算如下:

$$\frac{f_2}{20\text{Hz}} = 2^{10}$$

$$f_2 = 20 \times 2^{10} = 20 \times 1024 = 20480\text{Hz}$$

2. 如果一个频带带宽为三分之一倍频程,其下限频率为446Hz,求该带宽的上限频率值。计算如下:

$$\frac{f_2}{446} = 2^{1/3} = 446 \times 1.2599 = 561.9\text{Hz}$$

3. 如果一个具有1/3倍频程带宽的频带,其中心频率为1kHz,求该倍频程的下限频率。在该处,可以将1kHz看做1/6倍频程的上限频率,所以计算如下:

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{1000}{f_1} = 2^{1/6}$$

$$f_1 = \frac{1000}{2^{1/6}} = \frac{1000}{1.12246} = 890.9\text{Hz}$$

### 1.3 VU 表、峰值表及相位表

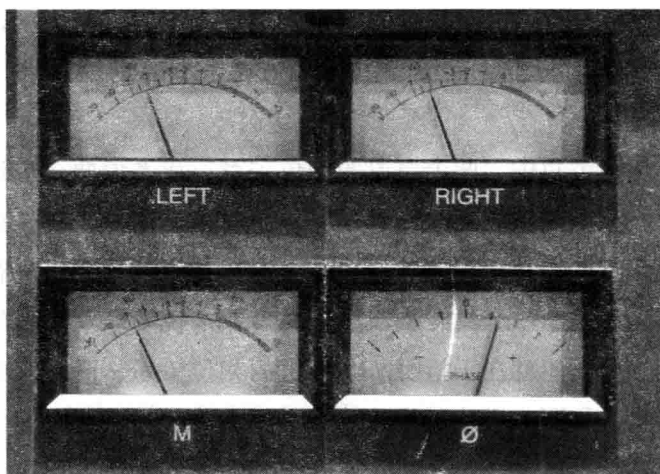


图 1-1 VU 表及相位

VU 代表英文“Volume Unit”，即音量单位的缩写。VU 表的跨度设计为从 -20VU 到 +3VU，其中 0VU 处于 VU 表中心偏右，即满刻度 +3VU 的 71% 的位置上。0VU 的信号值等于 +4dBm，1.23 伏特。因为 VU 表主要读取信号输入或输出的平均电平值，所以又被称为音量表或平均响度表，说明其指针仅代表一个信号平均电平和峰值电平之间的数值。美国标准协会（ASA）规定了 VU 表在处于稳态时，输入 1kHz 信号，其指针到达满刻度值的 99% 所用的时间应为 300 毫秒，并且指针过量指示余度应低于 1%，最大不能超过 1.5%。图 1-1 展示了目前在调音台上常用的 VU 表头。在实际工作中，如果用 3% 的第三谐波失真作为失真的衡量点的话，作为参考值的 0VU 被规定为 1% 第三谐波失真，距离代表 3% 第三谐波失真点的 +3VU 处还有 8dB 的峰值储备。

除 VU 表之外，在录音室内所使用的峰值表以 2.5 毫秒的反应速度显示输入信号的有效峰值。峰值表对于峰值信号的迅速反应可使得录音师在实际工作中及时跟踪峰值信号在表头的位置，并可以有效避免信号记录载体的失真。当 VU 表和峰值表共同使用时，他们之间有以下几种校对关系：

1. EBU 标准，EBU 为英文 European Broadcasting Union，欧洲广播联盟的缩写。0VU = -18dBFS。

2. SMPTE 标准, SMPTE 为英文 Society of Motion Picture and Television Expert, 国际电影电视专家协会的缩写, 即  $0\text{VU} = -20\text{dBFS}$ 。

3. 有时上述中的  $0\text{VU}$  也可以在峰值表上校正为  $-12\text{dBFS}$ 。

其中 FS 为英文 Full Scale 即满刻度的缩写,  $\text{dBFS}$  代表满刻度分贝值, 即数字设备对于输入信号进行记录编码的最大容许电平量, 该电平量表示为  $0\text{dBFS}$ 。上述  $-18\text{dBFS}$  代表该信号的有效峰值距离  $0\text{dBFS}$  仍有  $18\text{dB}$  的峰值储备。在实际工作中, 不同的录音节目使用不同的校对标准, 其中古典音乐因为有较大的动态范围, 所以一般使用  $-20\text{dBFS}$  校对标准, 而流行歌曲因为有较小的动态需求, 所以可以使用  $-12\text{dBFS}$  标准进行校对。

在双声道立体声节目中, 两个声道的相位关系, 或者说两个声道信号的近似度将在很大程度上影响其与单声道的兼容度。对于正弦波信号来说, 在两个信号相同而相位相反的情况下, 尤其在相位角为  $180$  度时, 如果按单声道进行合成, 将引起信号的彼此抵消, 而对于一个具有复杂波形的乐音来说则表现为信号增益的大幅度衰减。相位表的主要功能就在于指明两个声道的相位关系, 同时对录音节目的单声道兼容度进行测量。如图 1-1 中标注有  $\phi$  的表头所示, 当相位表所读取的数值在  $0$  以上或在 “+” 刻度一面的话, 代表信号的单声道兼容性较为理想, 而在  $0$  以下或在 “-” 刻度一面的话则表示为信号的单声道兼容度较差。如图 1-2 所示, 目前除了上述相位表之外, 在一些大型调音台上还使用音频矢量显示器来显示总输出各声道, 包括环绕立体声格式中的各声道之间的相位关系。由于音频矢量显示器在显示信号振幅方面并不十分理想, 因此通常要和附加的峰值电平表共同使用来显示信号的输出电平情况。

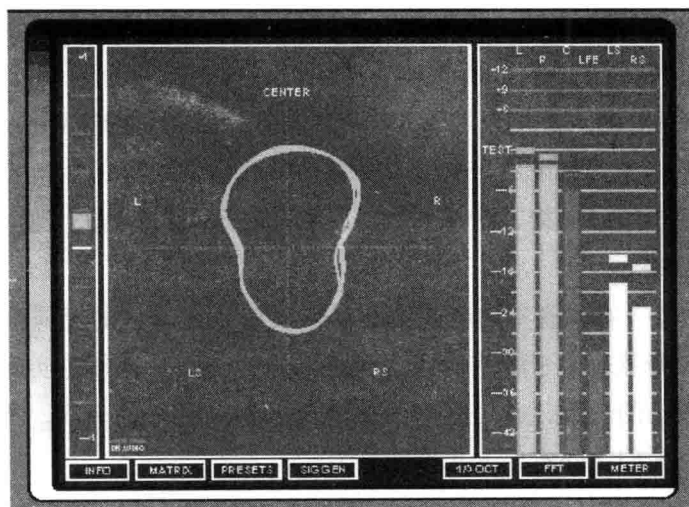


图 1-2 相位表

## 1.4 声波的传输

声波所包含的概念主要有频率、振幅、波长以及周期。其中，频率 ( $f$ ) 代表声波在单位时间内的振动次数，单位为赫兹；波长 ( $\lambda$ ) 代表在一个波形上具有相同相位两点之间的距离，单位为米；振幅 ( $A$ ) 代表声波振动的级数，单位为 dB；而周期 ( $T$ ) 则代表一个完整波形在传输中所需要的时间，单位为秒。如果用  $v$  表示声速的话，他们之间的关系可用公式 7 表示为：

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (\text{公式 7})$$

$$T = \frac{1}{f}$$

从公式 7 可以看出周期是频率的倒数，并且波长和所代表的频率成反比关系，即频率越高，波长越短。人的听觉范围为 20Hz ~ 20kHz，在声速为 340 米/秒的情况下，代表波长为 17 米 ~ 0.017 米，周期为 50 毫秒 ~ 0.05 毫秒。

另外，声波在空气中的传播速度和空气温度有着直接的关系，温度越高声速就越快。声波在摄氏 0 度环境下的传播速度为 331.5 米/秒，在摄氏 20 度环境下的传播速度为 343 米/秒。声速和气温之间的关系可用公式 8 表示为：

$$V = 331 + 0.6t \quad (\text{公式 8})$$

其中  $t$  = 摄氏度表示的空气温度。

波有纵向波和横向波两种。声波属于纵向波，因为在其传输过程中，传播媒质，即空气分子的运动方向和声波传输的方向呈平行状态。而对于横向波来说，其传播媒质的运动方向和波传输的方向呈垂直状态，例如水波，或是琴弦振动产生的波。声波在以纵向波的形式传播时会产生压缩波和扩展波两种。其中压缩波代表空气分子的集中运动，而扩展波则代表空气分子的分散运动。空气分子的集中运动代表声压或声信号振幅的提高。分散运动代表声压或声信号振幅的衰减。空气分子的这种集中、分散运动的速度被称为粒子速度 (Partial Velocity)。图 1-3 为压缩波及扩展波的形成示意图。

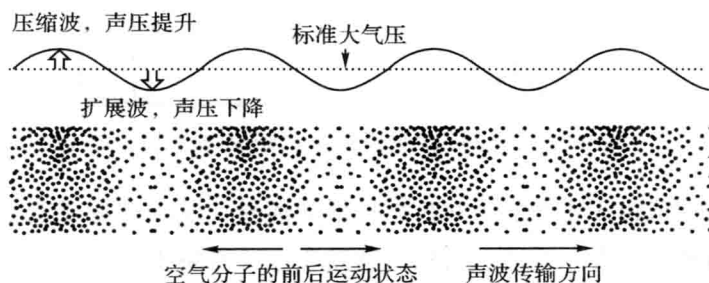


图 1-3 声波在传输中压缩波及扩展波的形成

## 1.5 相位关系和梳状滤波效应

相位关系代表两个频率相同的正弦波之间的时间关系。即如果一个正弦波相对于另一个频率相同的正弦波来说具有一定的延时的时候,当两个正弦波合成之后所形成的彼此干涉的关系。这种干涉关系可形成两种极端的表现,即0度和360度叠加相位所表现出来的频率不变,振幅提升,以及180度反相所表现出来的0输出。这两种干涉如图1-4所示。

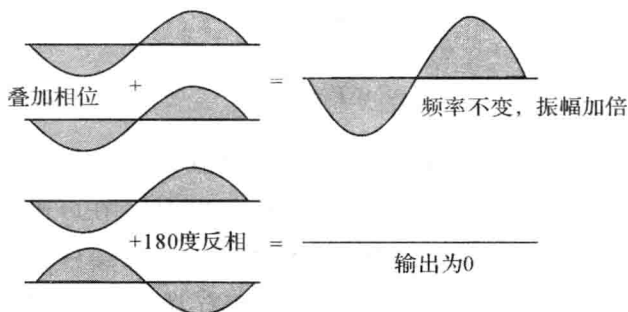


图1-4 相位叠加及相位反相示意图

在实际录音工作中,当上述正弦波之间的干涉关系发生在复杂的乐音上时,即当一个延时的乐音信号与一个没有延时的乐音信号合成后,由于相互干涉所形成的波形在响应曲线上很像一把梳子,所以被称为梳状滤波效应。梳状滤波效应的形成及其频响曲线如图1-5所示。

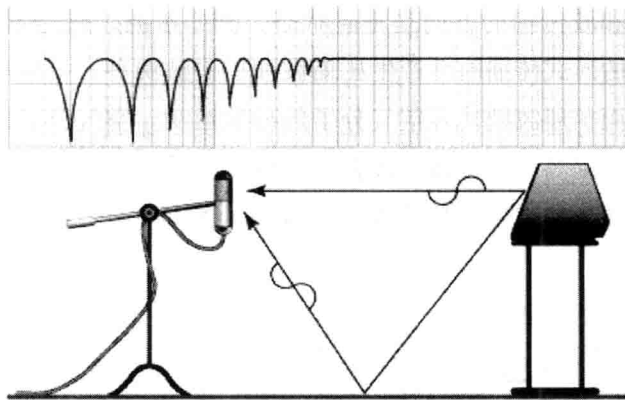


图1-5 直达声和反射声相互干涉形成梳状滤波效应

梳状滤波效应由于主要发生在长波长低频信号,所以在听感上主要表现为低频信号的衰减造成整体音乐变薄。梳状滤波效应在录音室内相当普遍,因为其主要由时间差造成,时间差可以发生在直达信号和它的反射信号之间,也可以发生在同一

个麦克风上首先到达的信号和较晚到达的其他串音信号之间。这也是为什么在实际录音中，录音师通常要在试音过程中检查调音台上每个通路的相位情况，并且在最后合成时检查单声道的兼容度。在录音时，录音师一般通过增加信号间的电平差，降低反射声级，以及减少串音来抑制梳状滤波效应。主要方式有：

1. 通过铺设吸声材料来降低反射声对直达声的干涉。
2. 通过使用指向性麦克风来抑制串音对直达信号的干涉。
3. 通过使用 3 : 1 原则来抑制串音对主信号的干涉。所谓 3 : 1 原则就是指麦克风之间的距离应该至少 3 倍于麦克风到声源之间的距离。

## 1.6 声强级、声功率级和声压级

声强级、声功率级以及声压级就是使用 dB 表示的声强、声功率和声压。其中声功率代表在单位时间内的声能量，单位为焦耳/秒，或使用“瓦”来表示。声强代表在单位面积上的声功率，单位为瓦/平方米。声压是作用于单位面积上的压强，用牛顿/平方米表示。

声强级可用公式 9 得出：

$$\text{SIL} = 10 \log \frac{I}{I_r} \quad (\text{公式 9})$$

其中 SIL 为声强级的英文 Sound Intensity Level 缩写， $I$  = 实际测量声强值（瓦/平方米）， $I_r$  = 参考声强值，即  $10^{-12}$  瓦/平方米。

根据公式 9，可以求出一个纸盆直径为 25 厘米的扬声器在输出 20 毫瓦功率信号时，在扬声器纸盆上所产生的声强级。首先应计算出在扬声器上的辐射面积：

$$A = \pi r^2 = \pi \left( \frac{0.25 \text{ m}}{2} \right)^2 = 0.049 \text{ m}^2$$

根据计算可以求出实际声强为：

$$I = \left( \frac{W}{A} \right) = \left( \frac{20 \times 10^{-3} \text{ W}}{0.049 \text{ m}^2} \right) = 0.41 \text{ W/m}^2$$

然后再根据公式 9 计算出声强级的值：

$$\text{SIL} = 10 \log \left( \frac{0.41 \text{ W/m}^2}{10^{-12} \text{ W/m}^2} \right) = 116 \text{ dB}$$

声功率简称为 SWL，即英文 Sound Power Level 的缩写。其公式为：

$$\text{SWL} = 10 \log \frac{W}{W_r} \quad (\text{公式 10})$$

其中  $W$  代表用瓦来表示的实际测量的声功率值， $W_r$  代表参考功率值即  $10^{-12}$  瓦/平方米。根据公式 10，可以计算出实际声功率 1 瓦所代表的功率级。



$$SWL = 10 \log \frac{W}{W_r} = 10 \log \frac{1 \text{ W/m}^2}{10^{-12} \text{ W/m}^2} = 120 \text{ dB}$$

声压被定义为在某一点上, 声波所表现出的有效压强。人耳听觉范围内的声压可以从小于 20 微帕斯卡 ( $20 \times 10^{-6}$  帕斯卡) 到大于 20 帕斯卡的范围之间变化。这里 20 微帕斯卡和 20 帕斯卡分别代表人耳的听阈点和痛阈点。声压级的公式可表示为:

$$SPL = 20 \log \frac{P}{P_r} \quad (\text{公式 11})$$

其中  $P$  代表实际测量的伏特声压, 而  $P_r$  则代表参考声压 ( $2 \times 10^{-5}$  帕斯卡/平方米)。根据公式 11, 可以计算出 1 帕斯卡所代表的声压级是:

$$SPL_{1\text{Pa}} = 20 \log \frac{P}{P_r} = 20 \log \frac{1 \text{ Pa}}{20 \mu\text{Pa}} = 20 \log (5 \times 10^4) = 94 \text{ dB}$$

## 1.7 人耳的结构及各部分功能

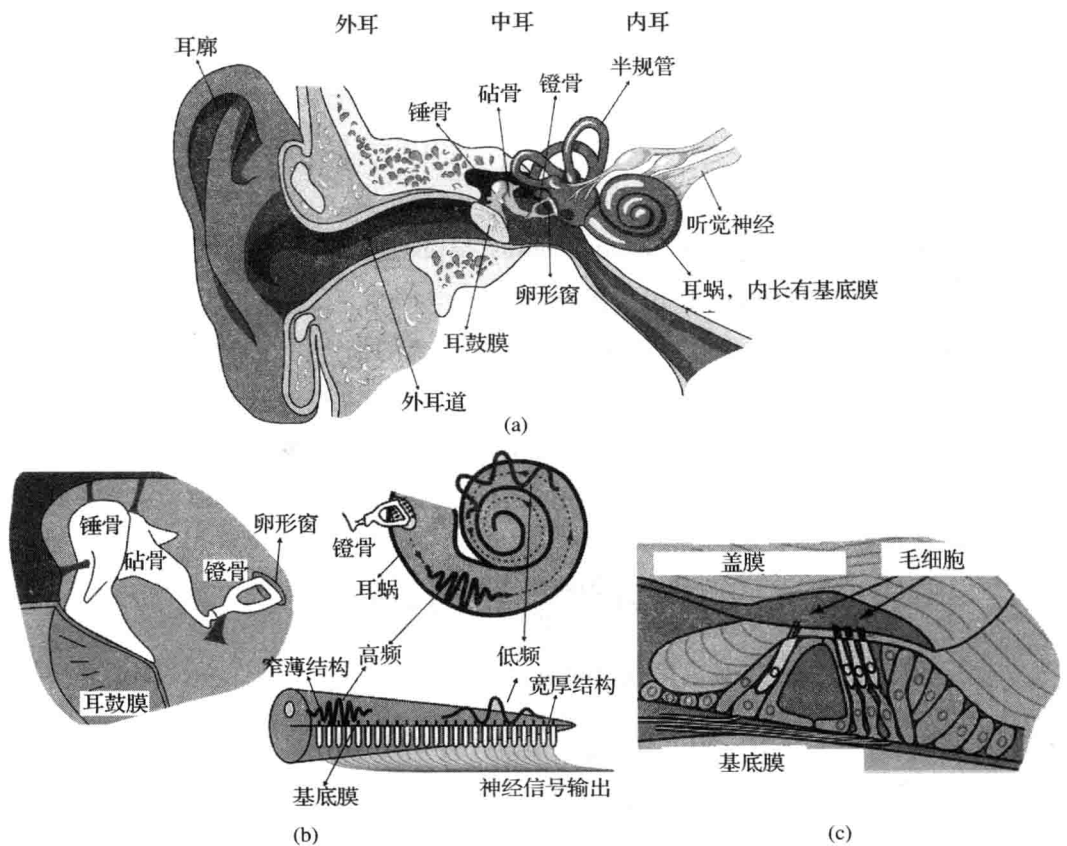


图 1-6 人耳结构示意图

根据图 1-6 (a) 可以看到人耳主要由外耳、中耳和内耳三部分组成。其中外耳代表从耳廓经过耳道到耳鼓之间的部分。其中耳廓的主要作用是: