

## 第 10 章 噪音之基本認識

### 學習目標

研讀本章之後，學習者應能夠：

1. 了解噪音的主要物理量度，包括聲音壓力(位準)、聲音功率(位準)、聲音強度(位準)。
2. 了解噪音的傳播特性。
3. 了解噪音的頻譜特性。
4. 了解聲波的反射、折射、干涉、繞射等。
5. 了解噪音對環境的危害。
6. 了解噪音的環境指標。



資料來源：<http://www.empireacoustical.com/>

### 摘要

爲了瞭解噪音 (Noise) 污染的規律，找到改善噪音污染的有效途徑，我們首先學習和討論噪音的發生、噪音的類型、危害、傳播特徵，學好這些基礎知識，對掌握噪音控制(Noise Control)技術的基本原理、防治噪音污染、改善生活條件有很大的幫助。

## 第一節 噪音及其類型

### 一、聲音 (Sound) 的產生

在日常生活中充滿著各種各樣的聲音，有談話聲、廣播聲、各種車輛運動聲、工廠的汽笛聲和各種機器聲...等。人們的一切活動離不開聲音，正因為有了聲音，人們才能進行交談，才能從事生產和活動。如果沒有聲音，整個世界將處於難以想像的寂靜之中。可見聲音對人類是非常重要的。那麼，聲音是怎樣產生的呢？以及聲音是如何通過媒質傳播的呢？

為分析聲波的產生及在空氣中的傳播過程，現以音叉的振動為例(如圖 10-1 所示)：

當外力作用下，使音叉產生動能(振動)，當能量向右方移動時，音叉右方的空氣質點則被壓縮而變得密集，具有一定的位能，同時運動的質點具有一定的動能。接著它就向右膨脹，擠壓鄰近的質點層，使之亦變得密集，由於質點的彈性碰撞，動能也隨之傳遞過去。

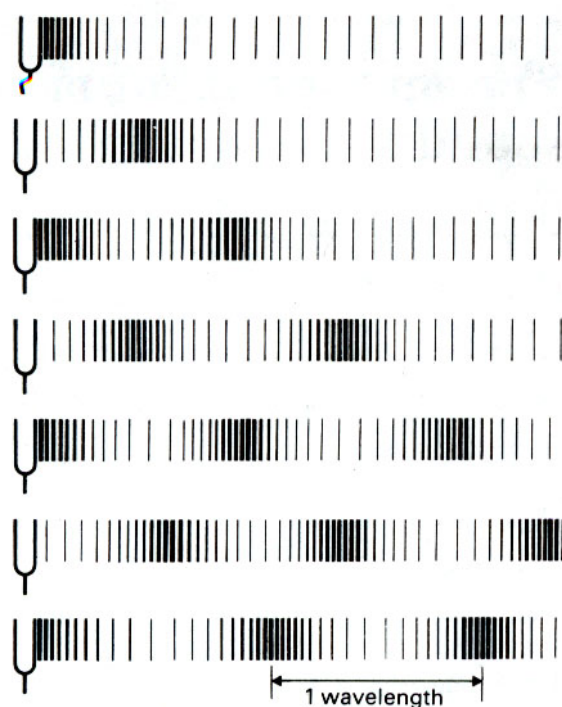


圖 10-1 聲音傳播型式示意圖

這樣，鄰近質點的運動又依次傳向較遠的質點，密集狀態即逐層向右傳播，以致離開音源的質點也相繼運動，相繼形成疏密相間的質點層並逐漸向遠處傳播，此即為「聲波」。

「聲波」屬於一種機械波，其波動的傳播介質是空氣，聲波由振動絃（小提琴、人

之聲帶)，振動空氣柱（風琴、彈簧管）、振板和振膜（木琴、揚聲器、鼓）所產生。所有此等振動體將周圍之空氣輪流壓縮和稀疏，使之向前向後交互運動。

空氣中的各種聲音，不管它們具有何種形式，它們都由於「物體的振動」所引起的。波的傳播過程中，空氣質點的振動方向與波傳遞的方向平行，則稱為縱波（Longitudinal Wave），與波傳遞的方向垂直，則稱為橫波（Transverse Wave；例如水的表面波）。

物體振動產生聲音，如果物體振動的幅度隨時間的變化如正弦曲線，那麼這種振動稱為「簡諧運動」（Simple Harmonic Motion）。聲波在空氣中傳播會造成音壓（Sound Pressure）的變化，如於空間的某點，其量測音壓將隨時間的變化其如圖 10-2 所示。

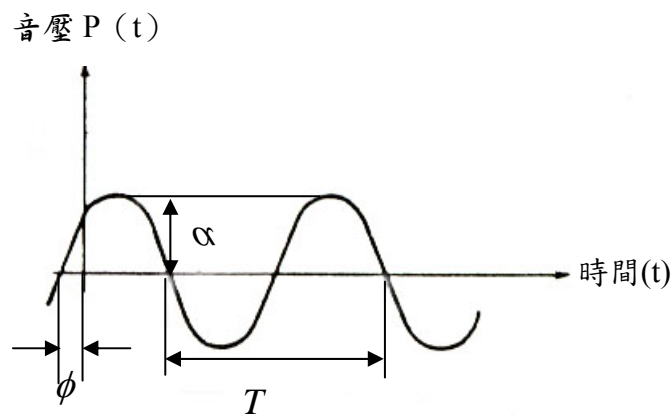


圖 10-2 在空間某點其音壓隨時間之變化圖

上述變化情形如以正弦波表示時，可以下數學式表示：

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

$\alpha$ ：音壓變動之振幅（Amplitude of the Pressure Fluctuation）。

$\omega$ ：角頻率（Circular Frequency；rad/s）， $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$ 。

$\phi$ ：相位角（Phase of the Sound Signal Being Measured Relative to Some Reference）。

$T$ ：振動周期（Period of the Pressure Fluctuation）。

振幅 $\alpha$ 的大小決定了聲音的強弱。物體在 1 秒內振動的次數稱為頻率(Frequency)，單位為赫茲(Hertz；Hz)，簡稱赫。每秒鐘振動的次數愈多，其頻率愈高，人耳聽到的聲音就愈尖，或者說音調愈高。

## 二、頻率、波長與音速

### （一）頻率(Frequency)

音源完成一次振動所經歷的時間稱為周期，記作  $T$ ，單位是秒 (s)。一秒鐘內振動的次數稱為頻率，記作  $f$ ，單位是赫(Hz)，或周/秒它是周期的倒數，即：

$$f=1/T$$

### (二) 波長(Wave Length)

聲波在傳播途徑上，兩相鄰同相位質點之間的距離稱波長，記作  $\lambda$ ，單位是米 (m)，如圖 10-3 所示。

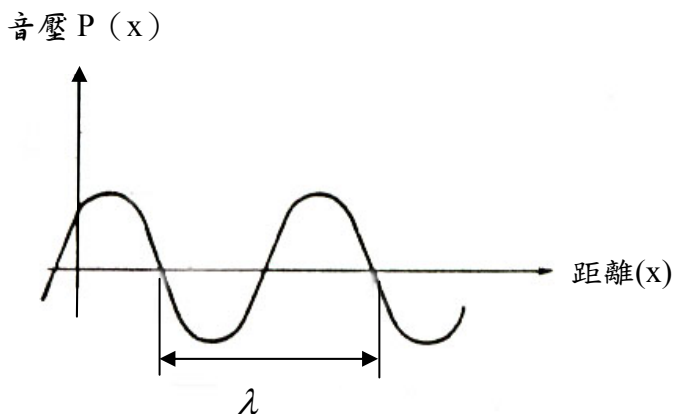


圖 10-3 兩相鄰同相位質點之間的距離(波長)示意圖

### (三) 音速(Sound Velocity)

聲波在彈性介質中傳播速度稱為音速，記作  $c$ ，單位是 m/s。

音速不是質點振動的速度而是振動狀態的傳播的速度。它的大小與振動的特性、介質的彈性、密度以及溫度有關。當溫度為  $0^{\circ}\text{C}$  時，聲波在不同介質中的速度為：

松木	3,320m/s	軟木	500m/s
鋼	5,000m/s	水	1,450m/s

在空氣中，音速在室溫、大氣壓力下約 340m/s，音速與溫度的關係如下：

$$c = 331.4\sqrt{1+(t/273)} \cong 20.05\sqrt{T} \cong 331.5 + 0.61t \quad (\text{單位：m/s})$$

式中：

$T$ ：絕對溫度， $(273+^{\circ}\text{C})$ 。

$t$ ：攝氏溫度， $^{\circ}\text{C}$ 。

音速、波長和頻率有如下關係：

$$c=\lambda \cdot f \quad \text{或} \quad c=\lambda/T$$

在一定的介質中聲速是固定的，因此頻率越高，波長就越短。通常室溫下空氣中的聲速度為 340m/s ( $T$  空氣溫度= $15^{\circ}\text{C}$ )，100~4,000 赫(Hz)的聲音波長範圍大約在

3.4m 至 8.5cm 之間。

#### (四) 振動頻率區分

低頻音：頻率 1,000 赫(Hz)以下之聲音。

高頻音：頻率 1,000 赫(Hz)以上之聲音。

超低頻 (Infrasonic Frequency) 音：頻率低於 20 赫(Hz)之聲音。

超高頻(Ultrasonic Frequency)音：頻率高於 20,000 赫(Hz)之聲音。

人耳可聽頻音：頻率在 20~20,000 赫(Hz)之聲音。

人耳較敏感頻音：頻率在 1,000~4,000 赫(Hz)之聲音。

### 三、噪音的類型

何謂「噪音」？噪音的定義：

- a. 一般正常耳朵覺得聽不慣的強大音響。
- b. 使人覺得不愉快的聲音。
- c. 妨害聽取會話的音響。
- d. 妨害思考能力的音響。
- e. 妨害休息或睡眠的音響。
- f. 會引起生理上各種障礙的音響。

簡單的說他是一種不喜歡聽到的聲音 (Unwanted Sound or Undesirable Sound)，或是一種令人不愉快的聲音 (Unpleasant Sound or Disagreeable Sound)，它具有相當的主觀性，常隨著不同的人、時間、地點在感受上有相當程度的差別，所以並沒有一定的說法，因人而異。

### 四、噪音的危害

噪音的危害是多方面的，噪音不僅對人們正常生活和工作造成極大干擾 (Interference)，影響人們交談、思考，影響人的睡眠，使人產生煩躁、反應遲鈍，工作效率降低，分散人的注意力，引起工作事故，更嚴重的情況是噪音可使人的聽力和健康受到損害，如圖 10-4 及圖 10-5 所示，以下分別說明。

#### (一) 對生理的影響

處在高噪音的環境下，噪音作用於人的中樞神經系統，使人們大腦皮層的興奮與抑制平衡失調，導致條件反射 (Reflection) 異常，使腦血管張力遭到損害。這些生理上的變化，在早期能夠恢復原狀，但時間一久，就會導致病理上的變化，使人產生頭痛、腦脹、耳鳴、失眠、心慌、記憶力衰退和全身疲乏無力等症狀。噪音作用於中樞神經系統還會影響胎兒發育，造成胎兒畸形，並且妨礙兒童智力發育。

噪音對消化系統、心血管系統也有嚴重不良影響，會造成消化不良，食欲不振，噁心嘔吐，從而導致胃病及胃潰瘍病的發病率提高，使高血壓、動脈硬化和冠心病的發病

率比正常情況高出 2~3 倍。噪音對視覺器官也會造成不良影響。據調查，在高噪音環境下工作的人常有眼痛、視力減退、眼花等症狀。

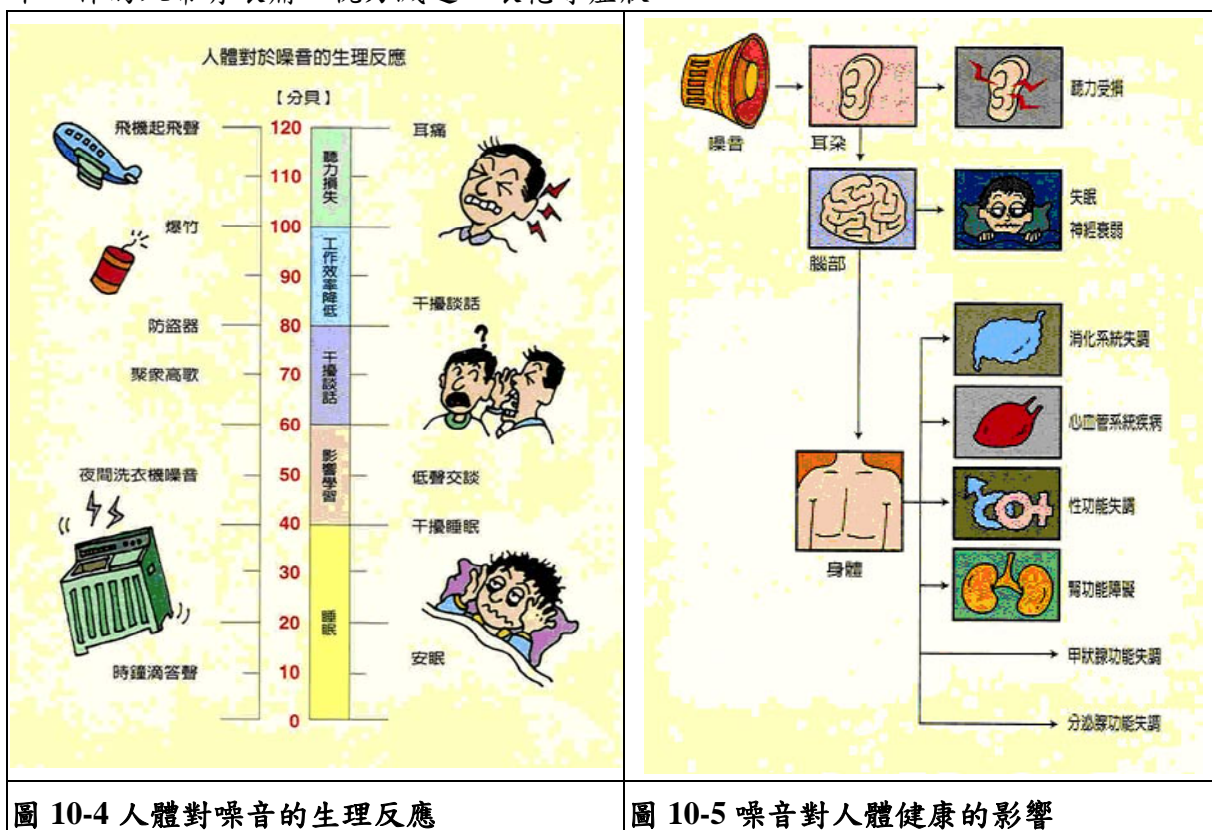


圖 10-4 人體對噪音的生理反應

圖 10-5 噪音對人體健康的影響

資料來源：www.env.com.tw。

## (二) 聽力影響

當周圍環境音量超過 65 分貝時，雙方談話距離必須在一公尺以內或以不自然的方式提高音量；超過 70 分貝時，30%的談話內容聽不清楚，使人與人之間溝通困難；持續處在 85 分貝以上的噪音環境，會使聽力造成傷害；巨大音響或爆破性聲音，可能造成耳膜破裂，耳室內聽小骨相關性質破壞，甚至內耳柯蒂氏和基底膜被分離。

## (三) 心理的影響

噪音會影響睡眠、妨礙交談、工作效率低落、厭惡、生氣等心理作用，久而久之，因心理反應、失眠而導致生理功能失調的現象，如頭痛、頭暈、精神無法集中等均為噪音直接與間接的影響。兒童如長時期暴露在高噪音的環境下，會採用一種使自己聽不見噪音環境的調適方法來對抗『噪音』，這將造成兒童在吵雜的環境下變得不注意聲音訊號的不良作用，尤其是兒童不易區分聲音的重要性，將對兒童學習及認知的發展有相當的影響。

## (四) 經濟的影響

由於噪音會直接影響人體生理及心理的健康，進而間接造成社會及經濟負面的一定影響及房地產價格下跌。

## 第二節噪音的聲學特性

爲了對噪音進行控制和改善，必須對噪音的聲學特徵、噪音的頻譜(Spectrum)進行分析。本節主要學習噪音的物理度量 and 噪音的主觀評價量，包括：

1. 聲音壓力(音壓；；Sound Pressure；P)、
2. 聲音功率（音功率；Sound Power；W）、
3. 分貝（Decibel；dB）、
4. 響度(Loudness；L)、
5. 響度位準(Loudness Level；LL)、
6. 聲音壓力位準(音壓級；Sound Pressure Level；SPL)、
7. 聲音強度位準(音強級；Sound Intensity Level；SIL)、
8. 聲音功率位準(音功率級；Sound Power Level；PWL) 等基本概念。

噪音的單位為分貝。分貝是二個數值之比值的對數值，基本它可以是任二個相同單位的數值比值之對數值。

$$\text{分貝 (dB)} = 10 \log \frac{\text{物理量}}{\text{基準物理量}}$$

由此我們可以看到，分貝是一個相對比較的對數單位。其實任何一個變化範圍很大的噪音物理量都可以用分貝這個單位來描述它的相對變化。噪音的分貝值即以與聲音相關之參數計算而得，這些參數代表的意義如下：

### 一、聲音壓力(音壓)與聲音壓力位準(音壓級)

#### (一) 聲音壓力(音壓) (Sound Pressure；P)

當有聲波存在時，局部空氣產生壓縮或膨脹，在壓縮的地方壓強增加，在膨脹的地方壓強減少，這樣就在原來的大氣壓上又增加了一個壓強的變化。因聲音所引之大氣壓變化值，亦即空氣分子被振動後所引起的大氣壓力之微差變化，稱爲聲音壓力(音壓)，用 P 表示。

一般情況下，聲音壓力(音壓)與大氣壓（一大氣壓為  $1013 Pa$ ）相比是極弱的。聲音壓力的大小與物體的振動有關，物體振動的振幅愈大，則壓強的變化也愈大，因而聲音壓力也愈大，我們聽起來就愈響，因此聲音壓力的大小表示了聲波的強弱。

聲音壓力(音壓)大小的單位：帕斯卡(Pascal)，簡稱「帕」，符號是  $Pa$ ，或牛頓/米<sup>2</sup>( $N/m^2$ )。

日常生活中所遇到的各種聲音，其聲音壓力數據舉例如下：

- |                 |                       |
|-----------------|-----------------------|
| 1. 正常人耳能聽到的最弱聲音 | $2 \times 10^{-5} Pa$ |
| 2. 普通說話聲(1m 遠處) | $2 \times 10^{-2} Pa$ |
| 3. 公共汽車內        | $0.2 Pa$              |
| 4. 織布間          | $2 Pa$                |
| 5. 柴油發動機、球磨機    | $20 Pa$               |
| 6. 噴氣飛機起飛       | $200 Pa$              |

從以上列舉的數據可以看到，人耳所能查覺得最小音壓(Sound Pressure)為  $2 \times 10^{-5} N/m^2$  或  $20 \times 10^{-6} N/m^2 (pa)$  (即正常人耳能聽到的最弱聲音壓力)，稱為人耳的“聽域”。當聲音壓力(音壓)達到  $20 Pa$  時，人耳就會產生疼痛的感覺， $20 Pa$  為人耳的“痛域”。“聽域”與“痛域”的聲音壓力之比為一百萬倍。

## (二) 聲音壓力(音壓、音量)位準 (Sound Pressure Level; $L_p$ ; SPL)

由於正常人耳能聽到的最弱聲音的聲音壓力和能使人耳感到疼痛的聲音的聲音壓力大小之間相差一百萬倍，表達和應用起來很不便。同時，實際上人耳對聲音大小的感受也不是線性的，它不是正比於聲音壓力絕對值的大小，而是同它的對數近似成正比。

因此如果將兩個聲音的聲音壓力之比用「對數」來表示，那麼不僅應用簡單，而且也接近於人耳的聽覺特性。這種用對數來表示的聲音壓力稱為聲音壓力位準(音壓級)，它用分貝(dB)來表示。

某一聲音的聲音壓力位準(音壓級)定義是：該聲音的聲音壓力均方根值  $P$  的平方與一某參考聲音壓力  $P_0^2$  的比值取以 10 為底的對數再乘 10，即：

$$SPL = L_p = 10 \log_{10} \left( \frac{P^2}{P_0^2} \right) = 20 \log_{10} \frac{P}{P_0}$$

$$P_0 = 2 \times 10^{-5} N/m^2$$

$L_p$  為聲音壓力位準(音壓級)(Sound Pressure Level)SPL，單位分貝，記作 dB， $P_0$  是參考聲音壓力，『國際上規定  $P_0 = 2 \times 10^{-5} P_a$ 』，這就是人耳剛能聽到的最弱聲音的聲音壓力值。

當音壓強度增加一倍時 ( $P^2$  增加一倍)，音量大小會增加 3 分貝，當音壓強度增加 10 倍時，音量大小增加 10 分貝。



## 二、聲音強度與聲音強度位準(音強級)

### (一) 聲音強度 (Sound Intensity; $I$ )

任何運動的物體包括振動物體在內都能夠作功，通常說他們具有能量，這個能量來自振動的物體，因此聲波的傳播也必須伴隨著聲振動能量的傳遞。當振動向前傳播時，振動的能量也跟著轉移。在聲傳播方向上單位時間內垂直通過單位面積的聲能量，具有方向性，稱為聲音的強度或簡稱聲音強度，用  $I$  表示，單位是  $W/m^2$ 。人耳所能查覺得最小聲音強度為  $10^{-12}W/m^2$ 。

聲音強度的大小可用來衡量聲音的強弱，聲音強度愈大，我們聽到的聲音愈響；聲音強度愈小，我們感覺的聲音愈輕。聲音強度與離開音源的距離有關，距離越遠，聲音強度就愈小。例如火車開出月臺後，愈走愈遠，傳來的聲音也愈來愈輕。

### (二) 聲音強度位準(音強級) (Sound Intensity Level; $L_I$ ; SIL)

與聲音壓力(音壓)一樣，聲音強度也可用“位準”來表示，即聲音強度位準(音強級) $L_I$ ，它的單位也是分貝(dB)，定義為：

$$SIL = L_I = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0}, dB$$

$$I_0 = 10^{-12}W/m^2$$

## 三、聲音功率與聲音功率位準

### (一) 聲音功率 (Sound Power; $W$ )

聲音功率為音源在單位時間內幅射的總能量，用符號  $W$  表示，通常採用瓦(Watt)作為聲音功率的單位。 $1Watt = 1N \times m/s$  or  $joules/s$ ；聲音功率有如電功率。人耳所能查覺之最小聲音功率為  $10^{-12} Watt$ 。聲音強度和音源幅射的聲音功率有關，聲音功率愈大，在音源周圍的聲音強度也大，兩者成正比，由聲音功率與聲音強度之定義，可以推導出聲音功率與聲音強度之關係如下：

- 點音源 (Point Source) (球狀傳播) 的聲音功率  $W$ ，在自由音場 (Free Field) 中，則距音源  $r$  公尺處之聲音強度  $I$ ：

$$I = \frac{W}{A} = \frac{W}{4\pi r^2}, \quad I \propto \frac{1}{r^2}, \quad A \text{ 表球形(Spherical)面積}$$

- 點音源 (Point Source) 的聲音功率  $W$ ，在半自由音場 (Semi-anechoic Field) 中：

$$I = \frac{W}{A} = \frac{W}{2\pi r^2}$$

- 線音源 (Linear Noise) (柱狀傳播) 的聲音功率  $W$ ，在自由音場中：

$$I = \frac{W}{2\pi r \times 1} \quad \text{注意：單位長度 1 公尺}$$

- 線音源 (Linear Noise) 的聲音功率  $W$ ，在半自由音場中：

$$I = \frac{W}{\pi r \times 1}$$

聲音功率是衡量噪音源聲能輸出大小的基本量。聲音壓力(音壓)常依賴於很多外在因素，如接收者的距離、方向、音源周圍的音場條件等，而聲音功率不受上述因素影響，可廣泛用於鑒定和比較各種音源。但是在聲學測量技術中，到目前為止，可以直接測量聲音強度和聲音功率的儀器比較複雜和昂貴，它們可以在某種條件下利用聲音壓力(音壓)測量的資料進行計算得到。當聲音以平面波或球面波傳播時聲音強度與聲音壓力(音壓)間的關係為：

- 音源之聲音強度 ( $I$ ) 與聲音壓力(音壓) ( $P$ ) 之關係簡化如下：

$$I = \frac{P_{rms}^2}{\rho c}$$

$$\rho c \cong 400(0^\circ C, 1atm \text{時}), \rho \text{ 為空氣密度}(Kg/m^3), c \text{ 為聲速}(m/s)$$

$P_{rms}$  : 音壓均方根值(Root Mean Square)

$$I = \frac{P_{rms}^2}{\rho c} \rightarrow I_o = \frac{P_o^2}{\rho_o c_o} = \frac{(20 \times 10^{-6})^2}{400} = 10^{-12} W/m^2$$

$I_o$  : 基準物理量

$$I = \frac{W}{A} = \frac{P_{rms}^2}{\rho c} \rightarrow W = A \times I = \frac{P_{rms}^2}{\rho c} \times A$$

因此，利用公式根據聲音壓力(音壓)的測量值就可以計算聲音強度和聲音功率。

## (二) 聲音功率位準(音功率級) (Sound Power Level; PWL)

聲音功率用位準來表示時稱為聲音功率位準  $L_w$ ，單位也是分貝，功率為  $W$  的音源，其聲音功率位準

$$PWL = L_w = 10 \log_{10} \frac{W}{W_o}, dB$$

$$W_o = 10^{-12} Watt$$

學習思考：

由聲音功率與聲音強度之關係，導出聲音功率位準 ( $L_W$ ) 與聲音強度位準(音強級) ( $L_I$ ) 之關係？

說明：

聲音功率位準 ( $L_W$ ) 與聲音強度位準(音強級) ( $L_I$ ) 之關係如下：

$$I = \frac{W}{A}$$

- 點音源，自由音場時，距音源  $r$  公尺處之聲音強度

$$I = \frac{W}{A} = \frac{W}{4\pi r^2} \quad \text{將兩邊同時除 } 10^{-12} \text{，取 } \log \text{ 值，乘以 } 10 \text{，則}$$

$$10 \log \frac{I}{10^{-12}} = 10 \log \frac{W}{10^{-12}} - 20 \log r - 10 \log(4\pi)$$

$$\Rightarrow 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{W}{W_0} - 20 \log r - 10 \log(4\pi)$$

$$\Rightarrow L_I = L_W - 20 \log r - 11$$

- 點音源，半自由音場時（如音源位於地面上），則

$$I = \frac{W}{A} = \frac{W}{2\pi r^2}$$

$$\Rightarrow L_I = L_W - 20 \log r - 8$$

- 線音源，自由音場時，距音源  $r$  公尺處， $I = \frac{W}{2\pi r}$

$$L_I = L_W - 10 \log r - 8$$

- 線音源，半自由音場時，距音源  $r$  公尺處， $I = \frac{W}{\pi r}$

$$L_I = L_W - 10 \log r - 5$$

因此，距音源距離由  $r_1 \rightarrow r_2$  時

$$\text{點音源 } \Delta L_I = 10 \log \frac{r_2^2}{r_1^2} (dB) = 20 \log \frac{r_2}{r_1} (dB) ; \text{ 距離加倍 } \Delta L_I = 6dB$$

$$\text{線音源 } \Delta L_I = 10 \log \frac{r_2}{r_1} (dB) ; \text{ 距離加倍 } \Delta L_I = 3dB$$

#### 四、噪音的頻譜與頻率

從噪音與樂音的概念分析可知，它們的區別除了主觀感覺上有悅耳和不悅耳之分外，在物理測量上可對它進行頻率分析，並根據其頻率組成及強度分佈的特點來區分。對複雜的聲音進行頻率分析並用橫軸代表頻率、縱軸代表各頻率成分的強度(聲音壓力(音壓)位準或聲音強度位準(音強級))，這樣畫出的圖形叫頻譜圖。圖 10-6 是樂音與噪音的波形及其頻譜圖。

樂音的頻譜圖是由不連續的離散頻譜線構成，見圖 10-6(a)。在噪音的頻譜圖上各頻率成分的譜線排列得非常密集，具有連續的頻譜特性。在這樣的頻譜中聲能連續地分佈在整個音頻範圍內，見圖 10-6(b)。

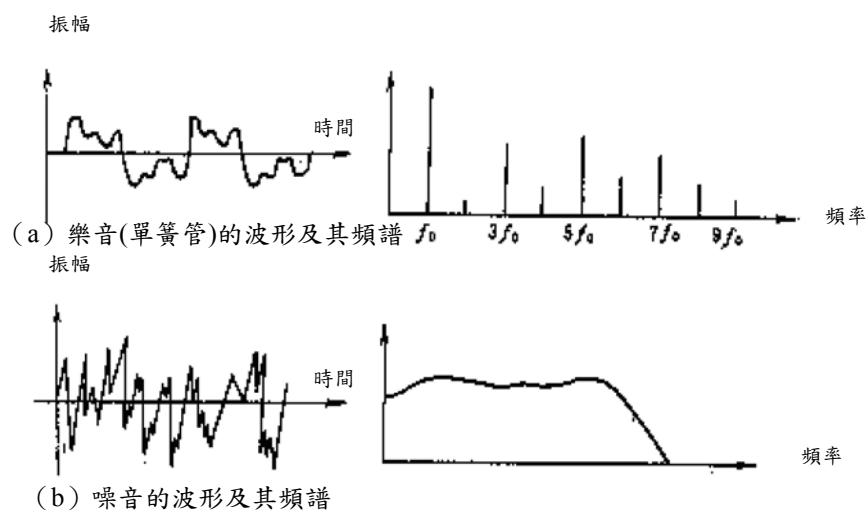
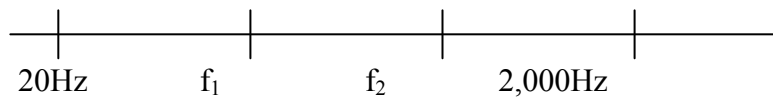


圖 10-6 樂音與噪音的波形及其頻譜

大多數機器具有連續的噪音頻譜，也稱無調噪音。有些機器如鼓風機、感應電動機、變電所變壓器等所發聲音的頻譜中，既具有連續的噪音頻譜，也具有非常明顯的離散頻率成份，這種成分一般是由電動機轉子或減速齒輪等旋轉結構的轉數決定，它使噪音具有明顯的音調，但總的說來它仍具有噪音的性質，稱為有調噪音。

噪音的頻率從 20~20,000Hz，高音和低音的頻率相差 1,000 倍。為實際應用方便起見，一般把這一寬廣的頻率變化範圍劃分為一些較小的段落，這就是頻帶。

一般只需測出各頻帶的噪音強度就可畫出噪音頻譜圖。那麼，頻帶是怎樣劃分的呢？用於分析噪音的濾波器可把某一頻帶的低於截止頻率  $f_1$  以下和高於截止頻率  $f_2$  以上的訊號濾掉，只讓  $f_2 \sim f_1$  之間的訊號通過。因此這一中間區域稱為頻帶， $\Delta f = f_2 - f_1$  就是頻帶寬度，簡稱帶寬。為測量噪音而設計的濾波器有倍頻帶、1/2 倍頻帶和 1/3 倍頻帶濾波器。一般對  $n$  倍頻帶作如下定義：



(1)八音階頻譜(八度音, Octave)之定義:

符合  $f_2 = 2^n f_1$ ,  $n=1/1, 1/2, 1/3$

若  $n=1/1$ , 則  $f_2 = 2f_1$ , 稱為 1/1 八音階頻譜(1/1Octave)

若  $n=1/3$ , 則  $f_2 = \sqrt[3]{2}f_1$ , 稱為 1/3 八音階頻譜(1/3Octave)

(2)中心頻率  $f_c$ ;  $f_c = \sqrt{f_1 \times f_2}$

1/1 八音階中心頻率

$f_c$ : 31.5, 63, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k

1/3 八音階中心頻率

$f_c$ : 31.5, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200...4K

(3)頻譜寬度 =  $f_2 - f_1$

(4)若已知  $f_c$ , 求  $f_1$  及  $f_2$

1/1 時,  $f_2 = 2f_1 \therefore f_c = \sqrt{2}f_1 = 1.41f_1 \therefore f_1 = \frac{f_c}{1.41}, f_2 = 2f_1$ , 這樣的頻率

比值所確定的頻程稱為倍頻程, 這種頻帶稱倍頻帶。當  $n=1/2$  時,  $f_2 / f_1=1/2$ , 稱為 1/2 倍頻帶。

1/3 時, 目前各種測量中經常使用 1/3 倍頻帶, 即  $n=1/3$ ,

$f_2 = \sqrt[3]{2}f_1 = 1.25f_1 \therefore f_c = \sqrt{1.25}f_1 = 1.11f_1 \therefore f_1 = \frac{f_c}{1.11}, f_2 = 1.25f_1$

頻帶的高低截止頻率  $f_2$  和  $f_1$  與中心頻率  $f_c$  間有下列關係:

$$f_c = \sqrt{f_1 f_2}$$

從上式可得到倍頻帶和 1/3 倍頻帶的帶寬  $\Delta f$  分別為

$n = 1$ 時,  $\Delta f = f_2 - f_1 = 0.707f_c$

$n = 1/3$ 時,  $\Delta f = f_2 - f_1 = 0.23f_c$

在噪音測量中經常使用的頻帶是倍頻帶和 1/3 頻帶。圖 10-7(a)、(b)、(c)分別為空壓機、電鋸和柴油機噪音源的 1/1 八音階噪音頻譜圖。

由頻譜圖可知，有的機器噪音低頻成分多些，如圖 10-7(a)所示空壓機噪音都在低頻段，稱為低頻噪音；有的機器像電鋸、鉚槍等幅射的噪音以高頻成分為主，如圖 10-7(b)所示，稱為高頻噪音；而像圖 10-7(c)所示的是寬帶噪音，它均勻地輻附從低頻到高頻的噪音。

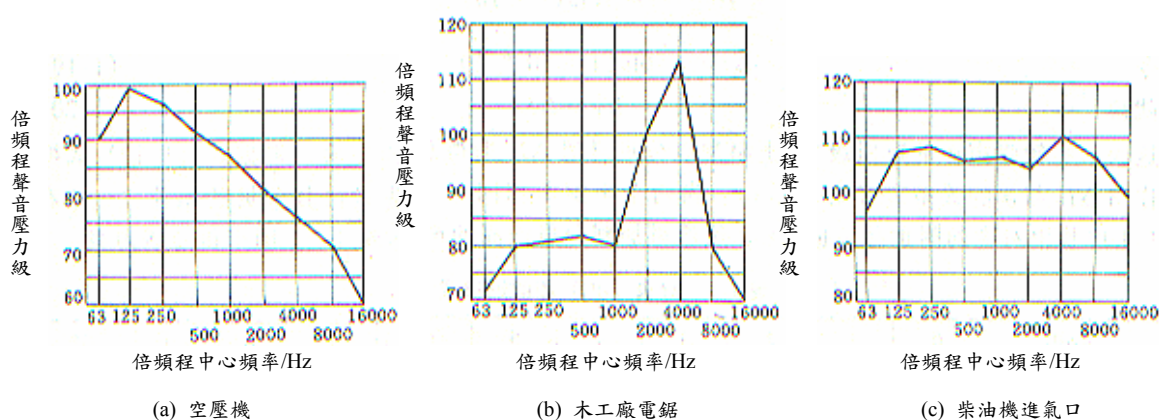


圖 10-7 噪音源頻譜

### 五、噪音相加的分貝計算

如果有兩個互相獨立且具有不同頻率的音源，在離兩音源相同距離的某一點上所產生的振動時而互相加強，時而互相減弱，隨時間平均後的結果與相互間沒有發生作用時的情形一樣，這樣的聲波叫不相干波。我們日常遇到的噪音一般是不相干波。

聲強級、聲壓級疊加時，不能進行簡單的算術相加，而要求按對數運算規律進行。例如， $n$  個聲壓相等的聲音，每個聲壓級為  $20\log P/P_0$ ，它的總聲壓級並不是  $n \times 20\log P/P_0$

$$L_p = 20\log P/P_0 = 10\log P^2/P_0^2$$

$$\therefore L_{p1} = 10\log P_1^2/P_0^2 \therefore P_1^2/P_0^2 = 10^{0.1L_{p1}}$$

$$\therefore L_{p2} = 10\log P_2^2/P_0^2 \therefore P_2^2/P_0^2 = 10^{0.1L_{p2}}$$

$$\text{而 } P_{total}^2/P_0^2 = P_1^2/P_0^2 + P_2^2/P_0^2 = 10^{0.1L_{p1}} + 10^{0.1L_{p2}}$$

$$\therefore L_{ptotal} = 10 \log \frac{P_{total}^2}{P_0^2} = 10 \log(10^{0.1L_{p1}} + 10^{0.1L_{p2}})$$

同理可推

$$\therefore L_{ptotal} = 10 \log(10^{0.1L_{p1}} + 10^{0.1L_{p2}} + \dots + 10^{0.1L_{pn}})$$

從上式可以看出：兩個數值相等的聲壓級疊加時，只比原來增加 3dB，而不是增加了一倍，如 100dB 加 100dB 只是 103dB，而不是 200dB。這一結論同樣適用於聲強級與聲功率級的疊加。

### 第三節 噪音的傳播特性

噪音源位於一定的空間中（在開闊空間或室內空間），因此必須研究聲音在空間中傳播的特性，包括聲波傳播過程中的衰減(Attenuation)、反射 (Reflection)、折射 (Refraction)、繞射 (Diffraction) 和干涉(Interference)等現象。

#### 一、音場

傳播聲波的空間稱為音場，音場分自由音場、擴散音場和半自由(Semi-anechoic)音場。聲波的傳播方向稱為聲線或波線。某一時刻聲波到達各點所達成的曲面稱為波面，按照波面的形狀，聲波可分為平面波、球面波和柱面波等。

平面波：線音源在自由音場中傳播，音波之波前在同一平面方式傳播者。

球面波：點音源在半自由音場中傳播，音波之波前依同心球體方式傳播者。

柱面波：線音源在自由音場中傳播，音波之波前依同心圓柱體方式傳播者。

#### (一) 自由音場 (Free Field)

聲波在介質中傳播時，在各個方向上都沒有反射，介質中任何一點接受的聲音，都只是來自音源的直達聲，這種可以忽略邊界影響，由各向同性均勻介質形成的音場稱為自由音場。自由音場是一種理想化的音場，嚴格地說在自然界中不存在這種音場，但是我們可以近似地將空曠的野外看成是自由音場。

#### (二) 擴散音場 (Diffused Field)

擴散音場與自由音場完全相反。在擴散音場中，聲波接近全反射的狀態。例如，在室內，人聽到的聲音除來自音源的直達聲外，還有來自室內各表面的反射聲。如果室內各表面非常光滑，聲波傳到壁面上會完全反射回來。如果室內各處的聲壓幾乎相等，聲能密度也處處均勻相等，那麼這樣的音場就叫做擴散音場，亦稱為混響音場。

#### (三) 半自由音場(Semi-anechoic Field)

在實際工程中，遇到最多的情況，既不是完全的自由音場，也不是完全的混

響音場，而是介於二者之間，這就是半自由音場。在工廠的車間廠房裏，壁面和吊頂是用普通磚石土木結構建造的，有部份吸聲能力，但不是完全吸收，這就是半自由音場的情況。根據環境吸聲能力的不同，有些半自由音場接近自由音場一些，有的更接近擴散音場。

## 二、噪音在傳播中的衰減(Attenuation)

音源發出的噪音在媒介中傳播時，其聲音壓力或聲音強度將隨著傳播距離的增加而逐漸衰減。造成這種衰減的原因有二個：一是距離衰減，二是空氣對聲波的吸收。

### (一) 距離衰減

聲波在傳播過程中波降面要擴展，波面面積 ( $S$ ) 隨離音源的距離 ( $r$ ) 增加而不斷擴大，這樣通過單位面積的能量就相應減小。由於波降面擴展而引起的聲音強度隨距離而減弱的現象稱為距離衰減。

#### 1. 平面波

對於平面波，其聲音強度  $I=W/S$ 。由於平面波的波面  $S$  為常數，所以聲音強度  $I$  也是常數，即聲波傳播幾乎無衰減。

#### 2. 球面波

球面波可看作是點音源向四周幅射的聲波，當音源的大小與到接收者的距離  $r$  相比小得多時(一般為 3~5 倍)，可將此音源看做點音源，很多噪音源諸如飛機、單個車輛等都可近似地看做點音源。球面波的波降面面積 ( $S$ ) 與離音源的距離平方 ( $r^2$ ) 成正比，聲音強度與距離平方成反比。如果在距離音源為  $r_1$  處的聲音強度位準(音強級)為  $L_1$  dB，則在距離  $r_2$  處的聲音強度位準就應為：

$$L_2 = L_1 - 20 \log \frac{r_2}{r_1} \rightarrow \Delta L = 20 \log \frac{r_2}{r_1}$$

#### 3. 柱面波

柱面波可以看做是”線音源”向四周幅射的聲波。線音源是由大量分佈在直線上且十分靠近的點音源組成。常見的線音源如工廠中互相靠近的機器、傳送帶、公路上車輛及火車鐵路噪音等。

$$L_2 = L_1 - 10 \log \frac{r_2}{r_1} \rightarrow \Delta L = 10 \log \frac{r_2}{r_1}$$

### (二) 空氣的吸聲

噪音的聲波在傳播過程中除了距離衰減外，還有因為空氣對聲波能量的吸收而引起的聲音強度的減小，距離愈遠，空氣的聲吸收也愈大。因聲吸收而引起的聲音強度隨距離的指數衰減關係為(以沿  $x$  方向的平面波為例)

$$I = I_0 e^{-2\alpha x}$$

其中  $I_0$  為  $X = 0$  處的聲音強度， $\alpha$  為空氣的吸聲係數。吸聲係數  $\alpha$  與介質的溫度和濕度有關，還與聲波的頻率有關。一般與頻率的平方成正比。聲波的頻率愈高，空氣的吸收也愈大；頻率愈低，吸收愈小。

由上式可知，高頻聲波比低頻聲波衰減得快，當傳播距離較大時其衰減值是很大的，因此高頻聲波是傳不遠的。從遠距離傳來的強噪音如飛機聲、炮聲等都是比較低沈的，這就是在長距離的傳播過程中高頻成份衰減得較快的緣故。除了空氣能吸收聲波外，一些材料例如玻璃、毛毯、泡沫塑料等也會吸收聲音，稱為吸音材料。

當聲波通過這些多孔性吸音材料時，由於材料本身的內摩擦和材料小孔中的空氣與孔壁間的摩擦，使聲波能量受到很大的吸收並衰減，這種吸音材料能有效地吸收入射到它上面的聲能。

### (三) 聲波的反射 (Reflection)

當聲波在傳播過程中遇到一塊尺寸比波長大得多的障板 (Acoustic Hard Surface) 時，聲波將被反射。如音源發出的是球面波，經反射後仍是球面波，見圖 10-8。

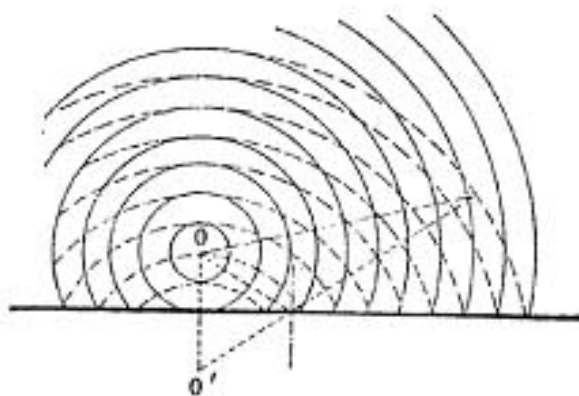


圖 10-8 聲波的反射

圖中用虛線表示反射波，就像是從音源  $O$  的映像虛音源  $O'$  發出似的， $O$  和  $O'$  點是對於反射平面的對稱點。同一時刻反射波與入射波的波陣面半徑相等。如用聲線表示前進的方向，反射聲線可以看作是從虛音源發出的。所以利用音源與虛音源的對稱關係，以幾何聲學作圖法就能很容易地確定反射波的方向。

聲音射至凹面 (Concave Surface) 時聲波將會反射彙集於凹面焦點上。當聲音射至凸面 (Convex Surface) 時聲波將不匯集而成分散狀。而當聲音撞擊直角牆壁時，則聲波經兩次折，反向平行射回。

根據音源與虛音源的對稱關係，可以說明反射定律，它的基本內容是：1.入射線、反射線和反射面的法線在同一平面內。

2.入射線和反射線分別在法線的兩側。

3.入射角等於反射角。

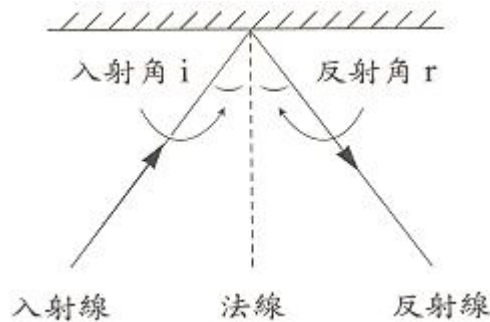


圖 10-9 反射定律

根據以上原理，利用介質不同的特性阻抗，可以達到減噪目的。例如，在室外測量噪音時，堅硬的地面、公路和建築物表面都是反射面，如果在反射面上鋪以吸聲材，那麼反射的聲能將減少。由於聲波的反射特性，在室內安裝的機器所發出的噪音就會從牆面、地面、天花板上及室內各種不同物體上多次反射，這種反射聲的存在，所量測出之噪音源在室內的聲音壓力位準比在露天中相同距離上的聲音壓力位準要提高10~15dB。為了降低室內反射聲的影響，在房間的內表面覆蓋一層吸聲性能良好的材料，就可以大大降低反射聲，從而使整個房間的噪音得到減弱，這也是經常採用的降低廠房噪音的一種方法。

#### (四) 聲波的干涉(Interference)

兩列或數列聲波同時在一媒質中傳播並在某處相遇，在相遇區內任一點上的振動將是兩個或數個波所引起振動的合成。一般地說，振幅、頻率和位相都不同的波在某點相加時比較複雜。但如果兩個波的頻率相同、振動方向相同、位相相同或位相差固定，那麼這二列波相加時在空間某些點上振動加強，而在另一些點上振動減弱或相互抵消，這種現象稱為波的干涉現象，聲波的這種干涉現象在噪音控制(Noise Control)技術中被用來抑止噪音。如果兩個波在同一地方相會時，將會形成怎樣的情況呢？就微觀而言，若要振動同一分子時，此分子會同時受到兩波的力量總合作用而振動。當兩波的振幅是同一大小且同方向時，會產生重疊而振幅加倍。

像這種兩波會互相影響的情形，就叫作干涉 (Interference，如下圖)。

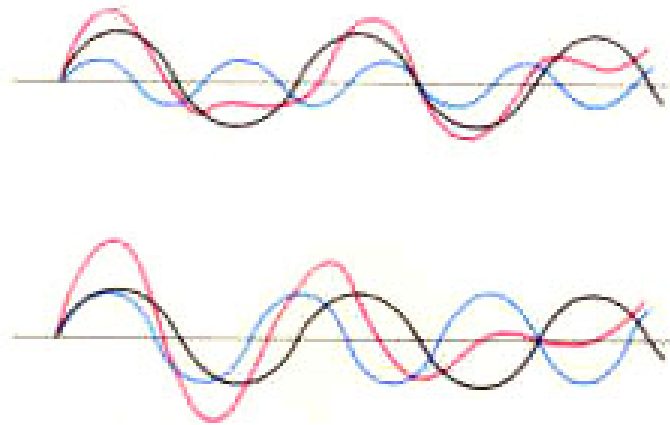


圖 10-10 聲波的干涉示意圖

#### (五) 聲波的折射(Refraction)

聲波在傳播途中遇到不同介質的分界面時，除了發生反射外，還會發生折射，聲波折射時傳播方向將改變，聲波從聲速大的介質折射入聲速小的介質時，聲波傳播方向折向分界面的法線；反之，聲波從速度小介質折射入聲速大的介質時，聲波傳播方向折離法線。

關於這一點，我們可以藉著海更斯原理(Huggen's Principle)來加以說明。在圖 10-11 中，我們假設介質 I 中的水波 A、B、C、D、E 要傳入介質 II 中。在介質 I 中，水波是以每秒  $a$  距離的速度前進；而在介質 II 中，水波則以每秒  $a'$  距離前進 ( $a > a'$ )。現在假設水波 A 正進入介質 II 中，經過五秒鐘後，如果我們將各點所形成小波各個波前連接起來，就會形成圖中的 A''B''C''D''E''。由圖中的說明我們可以知道，當在介質 I 中往 E E' 方向前進的波進入介質 II 中時，會彎向 E''E'' 的方向前進，這種現象就稱為波的折射 (refraction)。

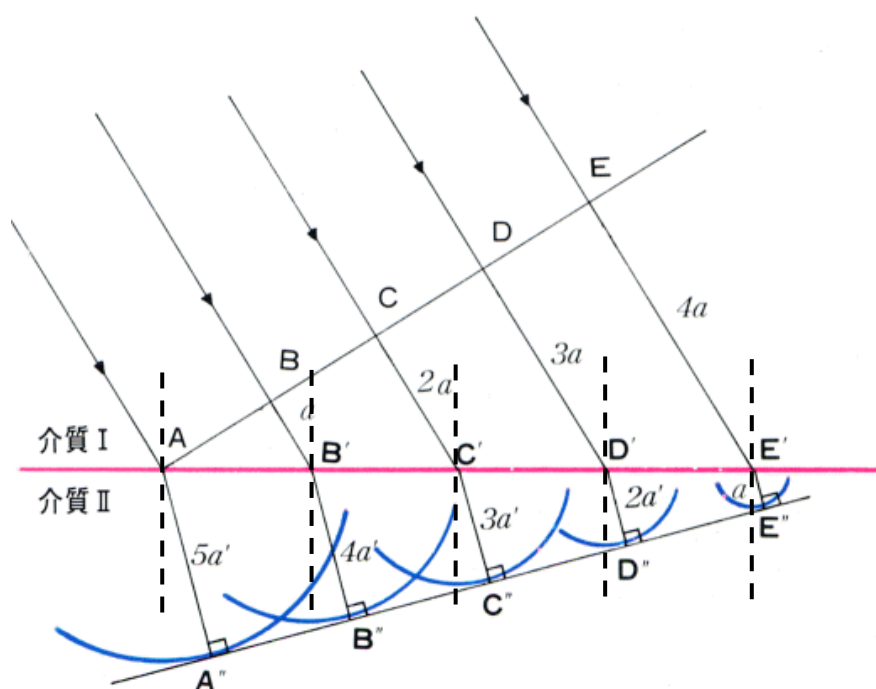
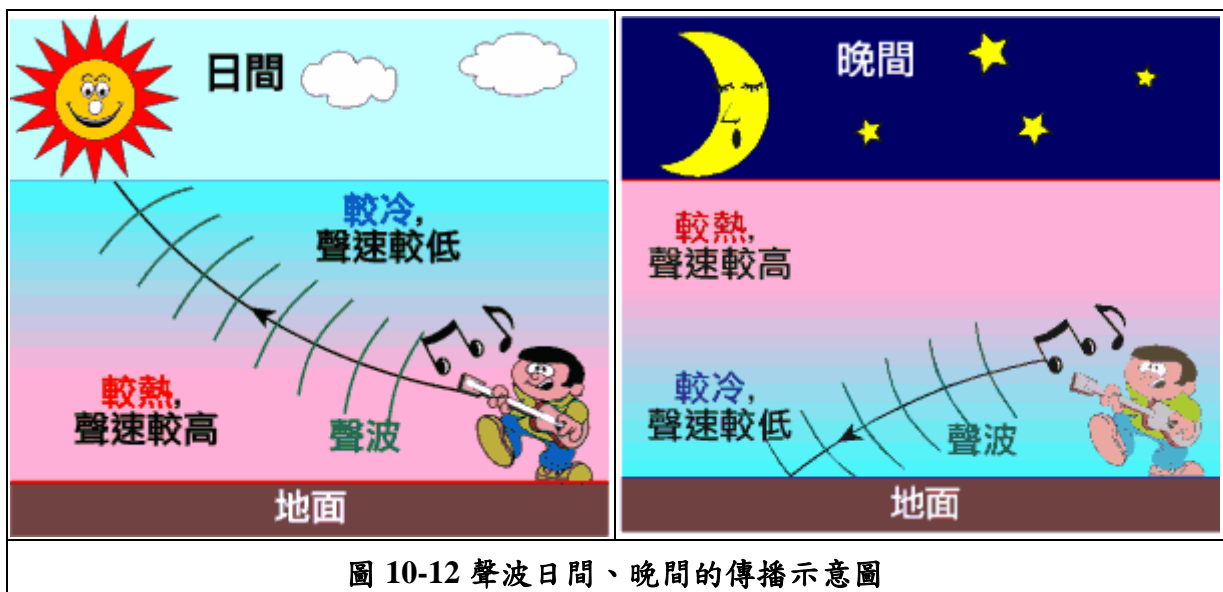


圖 10-11 聲波的折射示意圖

(資料來源: <http://www.cjjh.tc.edu.tw/st002/phy/refraction&reflection/refraction.htm>)

聲波在部份波前的行進速率與其餘部份不同時，也會發生折射，像是在風速不穩定時，或聲波在溫度不均勻的空氣中傳播時，折射現象就會發生。例如在夏天時，靠近地面的空氣比上空的空氣熱得多，且因為聲音在熱空氣中行進得較快，因此靠近地面的聲波速率增加，此時產生的折射是逐步的，而非突然的。因此，聲波比較容易偏離熱空氣，造成聲音較難傳播的感覺。

反之，在晚上或是冷天，接近地面的空氣比上空冷，此時，靠近地面的聲速較慢，於是上層速率較快的波前會使聲音向地面彎折。在這種情形下，聲音可以傳送得比較遠些，如圖 10-12 所示。



資料來源:[http://www.phy.cuhk.edu.hk/phyworld/iq/sound\\_night/sound\\_night.html](http://www.phy.cuhk.edu.hk/phyworld/iq/sound_night/sound_night.html)

#### (六) 聲波的繞射(Diffraction)

所謂的「繞射」是波的一種特性，若在波 (Wave，無論是水波、聲波、光波、電磁波) 的前行過程路徑中放置一障礙物，當障礙物的大小與波長相近時，則波形在此障礙物附近產生畸變，而容易觀察到波的「繞射」現象。

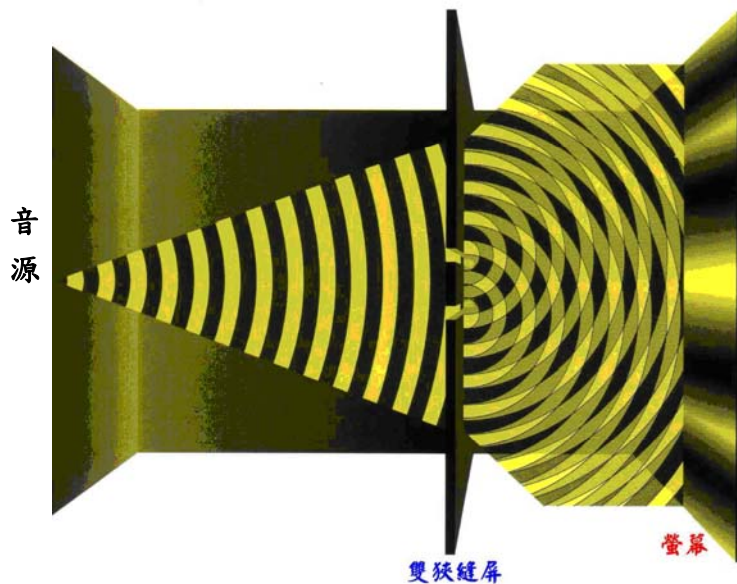


圖 10-13 聲波的繞射示意圖

(資料來源: 陳輝樺, <http://aeea.nmns.edu.tw/2002/0209/ap020905.html>)

當聲波傳播時遇到一寬度為  $p$  之擋板，或寬度為  $p$  之狹縫時，當波長大於  $p$ ，則聲波將依海更斯之波前製造法之原理 (Huygen's Method of Wave Front Construction)，將擋板或狹縫後視為新的波前，再依繞射作用向四面八方射出音波(Sound Wave)而繼續向前傳播。而當高頻聲波傳播時，因其波長小於  $p$ ，此時將造成聲音於障礙物後因受阻絕而產生音影 (Shadow)，或在狹縫後產生音束 (Sound Beam)，而使聲音的能量部分消失(Dissipation)。

故綜合上述可知，聲音頻率較低時，因其波長較大，經繞射作用能量不易消失故聲音不受阻絕，反之高頻聲音因波長較小，其能量較易遭受阻絕。

當聲波遇到障礙物時除了發生反射和折射外還會產生繞射現象。繞射現象與聲波的頻率、波長及障礙物的大小都有關係。如果聲波的頻率比較低、波長較長，而障礙物的大小比波長小得多，這時聲波能繞過障礙物，並在障礙物的後面繼續傳播，圖 10-14(a)上的障礙物是一堵牆。而(b)為一小孔  $p$ ，當小孔比波長小得多時、儘管小孔很小，但聲波仍可以通過小孔繼續傳播。這情況為低頻繞射。如果聲波的頻率比較高，波長較短，而障礙物又比波長大得多，這時繞射現象不明顯。在障礙物的後面聲波到達得就較少，形成一個明顯的”影區”，圖 10-14(a)為障礙物後面的影區，而(b)為小孔二旁出現影區。



圖 10-14 低頻繞射

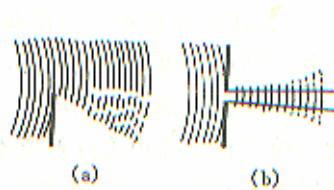


圖 10-14 高頻繞射

繞射現象在噪音控制中是很有用處的。隔聲屏障可以用來隔住大量的高頻噪音，它常被用來減弱高頻噪音的影響。例如可以在幅射噪音的機器和工作人員之間，放置一道用金屬板或膠合板製成的聲屏障，就可減弱高頻噪音。屏障的高度愈高、面積愈大效果就愈好，如果在屏障上再覆蓋一層吸音材料則效果更好。

#### (七) 聲波的透射與吸收 (Absorption)

當聲波入射到建築結構(如牆、天花板)時，如圖 10-15 之說明，聲能的一部分被反射，一部分透過結構，還有一部分由於結構的振動或聲音在其內部傳播時介質的摩擦或熱傳導而被損耗，通常稱之為材料的吸收。

根據能量守恆定律，若單位時間內入射到結構上的總聲能為  $E_0$ ，反射的聲能為  $E_r$ ，結構吸收的聲能為  $E_a$ ，透過結構的聲能為  $E_t$  且，則互相間有如下的關係：

$$E_o = E_r + E_\alpha + E_t$$

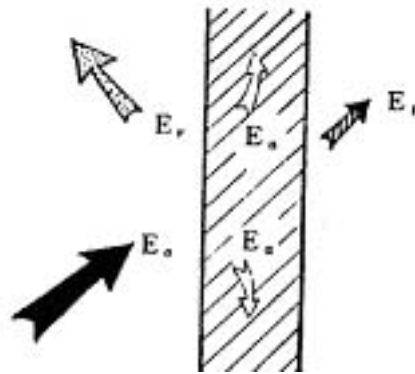


圖 10-15 聲能的反射、穿透與吸收

透射聲能  $E_t$  與入射聲能  $E_o$  之比稱為透射係數，記作  $\tau$ ，即：

$$\tau = E_t / E_o$$

反射聲能  $E_r$  與入射聲能  $E_o$  之比稱為反射係數，記作  $\gamma$ ，即：

$$\gamma = E_r / E_o$$

人們常把  $\tau$  值稱為隔（防）聲（音）材料，把  $\gamma$  值稱為吸聲（音）材料。實際上結構的吸收只是  $E_\alpha$ ，但從入射波與反射波所在的空間考慮問題，常用下式來定義材料的吸聲係數  $\alpha$ ：

$$\begin{aligned} \alpha &= 1 - \gamma \\ &= 1 - (E_r / E_o) \\ &= (E_o / E_o) - (E_r / E_o) \\ &= (E_r + E_\alpha + E_t / E_o) - (E_r / E_o) \\ &= (E_\alpha + E_t / E_o) \end{aligned}$$

在進行室內音質設計與噪聲控制時，必須了解各極材料的隔聲、吸聲特性，從而合理地選用材料。

#### 第四節 噪音的環境指標（Environmental Index）

均能音量（Equivalent Energy Sound Level）（ $L_{eq}$ ）：

$L_{eq}$  均能音量或稱等價聲音位準，為一連續穩定的聲音位準（Continuous Sound Level），與相同時段內真實噪音具有相同的總能量。 $L_{eq}$  可以利用積分型噪音計（Integrating Sound Level Meter）直接量測，或是利用公式計算：

$$L_{eq} = 10 \log \left[ \frac{1}{T} \int_0^T 10^{0.1L_A(t)} dt \right] = 10 \log \left[ \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n 10^{0.1L_{Ai}} \Delta t_i \right]$$

其中：T=總測定時間

$L_A(t)$  = 瞬間噪音量 (dB(A))

$L_{Ai}$  = 第 I 個時段區間之噪音量 (dB(A))

### 關鍵詞彙

噪音	音速	八音階
聲波	聲音壓力(音壓)	均能音量
音場	聲音功率(音功率)	倍頻帶
簡諧運動	響度	自由音場
振幅	響度位準	擴散音場
角頻率	聲音功率位準(音功率級)	半自由音場
相位角	聲音壓力位準(音壓級)	距離衰減
振動周期	聲音強度位準(音強級)	聲波的反射
聲波的繞射	聲波的透射與吸收	聲波的折射
頻譜	波長	聲波的干涉
頻率	分貝	

### 自我評量題目

1. 什麼是音源？聲音是怎麼產生的？什麼叫聲波？什麼叫音場？
2. 什麼是噪音？噪音有什麼危害？
3. 什麼叫聲音的頻率與波長？
4. 什麼是聲音壓力(音壓)？聲音壓力位準(音壓級)？
5. 什麼是聲音強度？聲音強度位準(音強級)？
6. 什麼是聲音功率？聲音功率位準(音功率級)？
7. 什麼叫自由音場？擴散音場？半自由音場？
8. 什麼叫聲波的反射？聲波的干涉？聲波的折射？聲波的繞射？

### 參考文獻

1. 蘇德勝，「噪音原理及控制」，台隆書店，民國 84 年。
2. 李耀中，「噪聲控制技術」，北京化學工業出版社，民國 90 年。

3. 車世光等，「建築聲環境」，清華大學出版社，中國北京，民國 77 年。
4. 劉嘉俊，「城市道路環境噪音控制」，環保月刊第 17 期 P.159，民國 91 年。