Chapter 1

噪音控制基本知識

隨著社會現代化的發展，噪音已成爲繼水污染、空氣污染、固體廢物污染的第四大環境公害。噪音對人類健康的危害一直存在，要合理控制噪音污染，就必須瞭解噪音的基本特性。本章從聲音的基本特性、聲音的度量、聲音的傳播等方面來介紹噪音控制的基本知識。

1.1 聲音的基本特性

1.1.1 噪音的定義與危害

一、噪音的定義

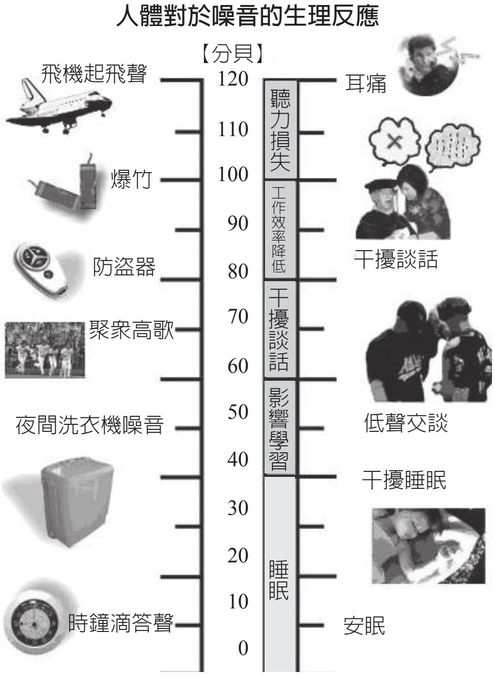
什麼是噪音呢？噪音是如何造成的呢？這是一個簡單而又複雜的問題。在兩千多年前的中國古代《說文》和《玉篇》中就有相關噪音的解釋:「擾也」,「群呼煩擾也」。也就是說，那時只有人聲喧嘩成爲煩擾人的噪音，也可以說，這是人類最早關於噪音的定義。現在如一定要給噪音下個定義：可稱之一般正常耳朵覺得「不喜歡聽到的聲音 (unwanted sound or undesirable sound)」、令人覺得不愉快的聲音、妨害彼此交談的聲音、妨害思考能力的聲音、妨害休息或睡眠的聲音、會引起生理上各種障礙的聲音。美國勞工部職業安全及健康管理局 (occupational safety & health administration, OSHA) 將噪音定義爲「會傷害聽力的聲音」，而我國噪音管制法中第三條中亦有明確之定義 :「本法所稱噪音，指超過管制標準之聲音」。

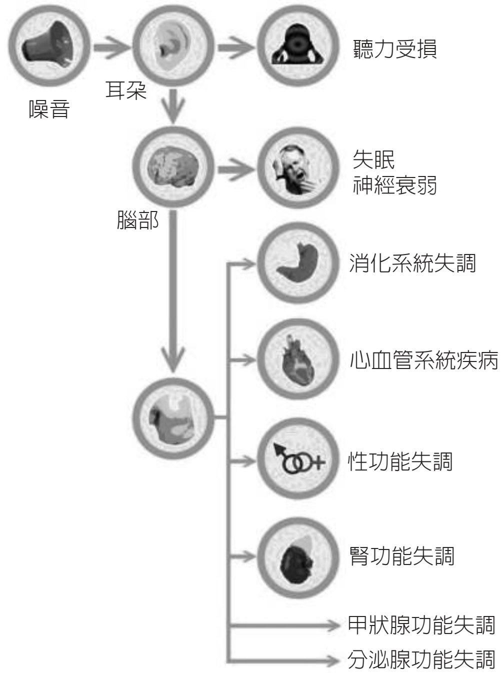
二、噪音的危害

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 1.1-1 及圖 1.1-2 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





資料來源：行政院環境保護署

圖 1.1-1　人體對噪音的生理反應　　圖 1.1-2　噪音對人體健康的影響

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，食慾不振，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。

(二) 對聽力的影響

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，甚至內耳人類聽覺機構的「中心」柯蒂氏(organ of Corti)和基底膜被分離。

(三) 對心理的影響

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、

精神無法集中等均爲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) 對經濟的影響

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影響及房地產價格的下跌。

1.1.2 音波的產生

一、音源

各式各樣的聲音都是由於物體的振動而產生的，凡能產生聲音的振動物體我們就可以稱之爲音源。從形態來分，音源可以分成固體音源、液體音源和氣體音源等。所謂音源的振動，就是物體 (或質點) 在其平衡點之位置附近進行的往返且重覆運動。

二、音波的形成

當音源振動時，就會引起音源周圍空氣分子的振動 (太空中沒有空氣，是眞空狀態，不存在能夠產生振動的介質，所以太空是個極靜的世界。但人類在太空中可以通過無線電波的方式接收到聲音，因爲無線電信號 (波) 並不是機械波，而是電磁波，所以電磁波可以在眞空裡傳遞)。這些振動的分子又會引起周圍的空氣分子產生振動，這樣音源產生的振動就以音波的形式向外傳播。音波不僅可以在空氣中傳播，也可以在液體和固體中傳播。而在噪音的控制工程中主要涉及空氣介質中的空氣音。在空氣中，音波是一種縱波 (longitudinal wave)，這時介質質點的振動方向是跟音波的傳播方向相一致的。反之，質點振動方向跟音波方向垂直的波稱爲橫波 (transverse wave；例如水的表面波)。在固體和液體中既可能存在音波的縱波，也可能存在橫波。橫波與縱波說明如圖 1.1-3。

需要注意的是，縱波或是橫波都是通過相鄰質點間的動量傳遞來傳播能量的，而不是由物質的送移來傳播能量的。例如，若向水池中投擲小石塊，就會引起水面的起伏變化，一圈一圈地向外傳播，但水質點 (或水中的漂浮物) 只是在原位置處上下運動，並不向外移動。

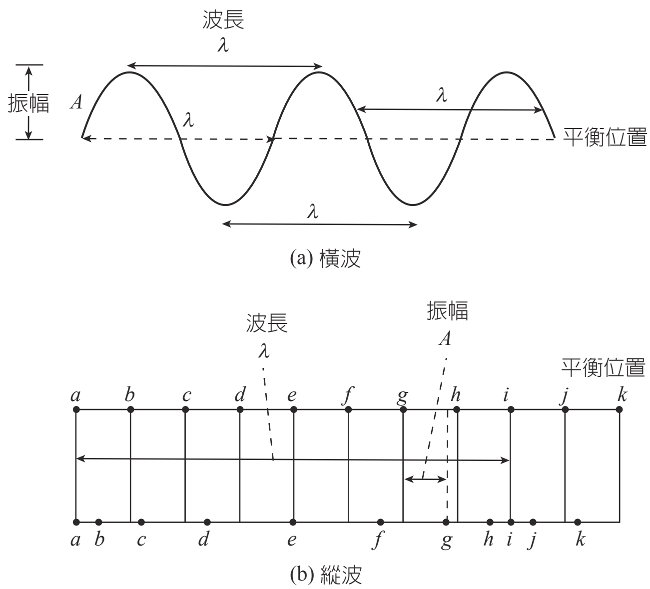


圖 *1.1-3* 橫波與縱波示意圖

三 音波的傳播過程

「音波」屬於一種機械波，其波動的傳播介質是空氣，音波由振動弦(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，而「聲學」就是研究機械波的產生、傳播、接收及應用之學科。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。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，正因爲有了聲音，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介質傳播的呢？

爲分析聲波的產生及在空氣中的傳播過程，現以音叉的振動爲例(如圖 1.1-4 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。

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，此即爲「聲波」。在我們的日常生活中充滿著各種各樣的聲音，有

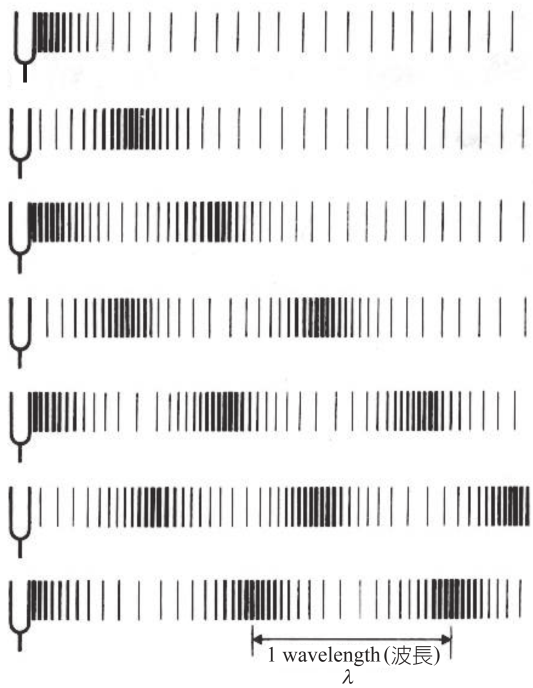


圖 1.1-4 聲音傳播形式示意圖

用於人際交流的言語聲，有樂器發出的悅耳音樂聲，有揚聲器發出的廣播音，有工廠機器發出的轟鳴音等等。同時，環境中還存在著人們聽不見的超音和次音。從物理學上來講，音波是一種機械波，音傳播(即音波)是介質質點的機械振動由近及遠的傳播。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，那麼這種振動稱爲「簡諧運動」(simple harmonic motion, SHM)。

綜上所述，機械振動是音波產生的根源，而彈性介質的存在是聲音傳播的必要條件。音波可在氣體、液體和固體中傳播。理想流體介質(理想氣體、理想液體)的彈性主要表現在體積改變時出現的恢復力，不會出現切向恢復力，因此音波在其中傳播時，傳播介質的質點振動方向和音波傳播方向相同，稱這類波爲縱波。

1.1.3 頻率、波長與音速

本書主要討論噪音的控制，只涉及到音波的宏觀性質，不涉及介質的微觀特性，因此本書中討論的介質均認爲是「連續介質」，即認爲它是由無限多

連續分佈的質點(這裡質點是指宏觀上足夠小以至各部分物理特性均勻的小體積元 dV，其在微觀上包含許多的分子)所組成的。在小體積元 dV 內的介質可以當作集中在一點，質量爲 ρdV 的質點來處理，ρ 爲介質的密度。在平衡態時，介質系統可用體積 V_0(或密度 ρ_0)、壓強 P_0 及溫度 T_0 等狀態參數來描述。在這種狀態下，任意時間內流入體積元的質量等於流出體積元的質量，因此體積元 dV 的質量是不隨時間變化的。當有音波在介質中傳播時，由於介質質點的雜亂運動加入了一個有規律的運動，使得體積元內有時流入的質量多於流出的質量，有時流出的質量又多於流入的質量，因此體積元內的介質便一會兒稠密，一會兒稀疏。於是，體積元內的狀態參量便在不停地變化著。因此，音波的傳播過程可以用介質體積元內壓強、密度、溫度以及質點振動速度等的變化量來描述。

在討論音波時，我們有興趣的主要是在穩定的簡諧(harmonic)音源作用下產生的穩態音場，這是因爲根據傅利葉(Fourier)分析理論，任意時間函數的振動原則上都可以分解爲許多不同頻率的簡諧函數振動的相加，如圖 1.1-5 說明。

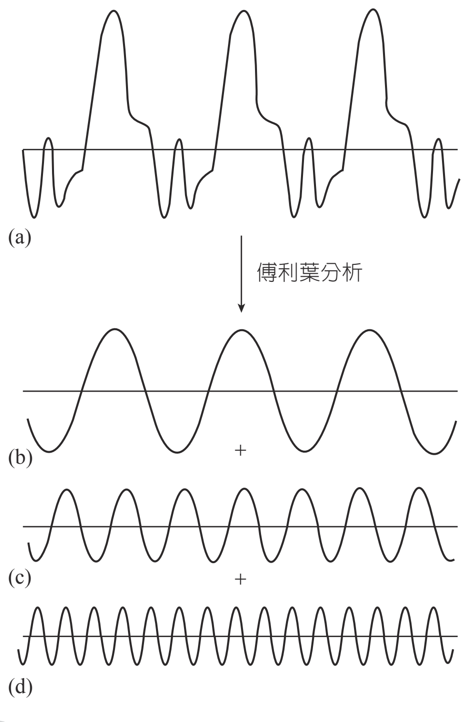


圖 1.1-5 傅利葉(Fourier)分析理論示意圖

一 頻率 (frequency)

音源完成一次振動所經歷的時間稱爲週期，記作 T，單位是秒 (s)。一秒鐘內振動的次數稱爲頻率，記作 f，單位是赫茲 (Hz)，或週 / 秒它是週期的倒數，即：$f=1/T$。頻率 (f) 和週期 (T) 互爲倒數，在一定的介質中音速是固定的，因此頻率越高，波長就越短。頻率 (f) 與振動角頻率 (ω , circular frequency; rad/s，它代表每秒相位的改變量) 有關係式：

$$\omega = 2\pi f \tag{1-1}$$

二 波長 (wave length)

音波在傳播途徑上，兩相鄰同相位質點之間的距離稱波長，記作 λ，單位是公尺 (m)，如圖 1.1-6 所示。

三 音速 (sound velocity)

音波在介質中的傳播速度稱爲音速 (c)，單位是公尺 / 秒 (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。頻率、波長和音速之間的關係如下：

$$\lambda = \frac{c}{f} = cT = \frac{2\pi c}{\omega} \tag{1-2}$$

理想氣體中的音速爲：

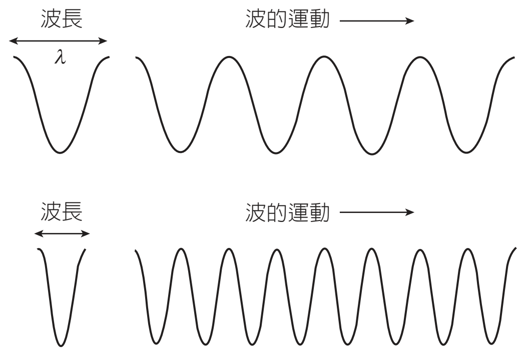


圖 1.1-6　兩相鄰同相位質點之間的距離 (波長λ) 示意圖

$$c_0 = \sqrt{\frac{\gamma}{M} RT} = \sqrt{\gamma \frac{p_0}{\rho_0}} \qquad \textbf{(1-3)}$$

式中：

c_0：該理想氣體中的音速 (m/s)，
ρ_0：介質的靜態密度 (kg/m^3)，
p_0：介質中的靜態壓強 (Pa)，
γ：比熱比 (γ = 定壓比熱 / 定容比熱)，
M：氣體介質的摩爾質量 (kg/mol)，
T：絕對溫度 (K)，
R：摩爾氣體常數，8.314 J/mol·K。

由此可算出空氣音速爲：

$$c_0(t) \approx 331.6 + 0.6t \quad \text{(m/s)} \qquad \textbf{(1-4)}$$

t 爲攝氏溫度 (°C)。例如，當溫度爲 20°C 時空氣中的音速爲 344 m/s。從表 1.1-1 和表 1.1-2 中可以查到常見流體中的音速。

表 1.1-1 常見液體聲學常數表

液體	溫度 (ºC)	密度 (kg/m^3)	音速 (m/s)
水	20	998	1,483
重水	20	1,105	1,388
甲醇	20	791	1,121
氯仿	20	1,487	1,001
四氯化碳	20	1,594	937.8
甘油	20	1,261	1,923
丙酮	20	791	1,190
水銀	20	13,600	1,451
桐油	20	933	1,450
橄欖油	32.5	904	1,381

表 1.1-2 常見氣體聲學常數表

氣體	溫度 (ºC)	密度 (kg/m^3)	音速 (m/s)
空氣	20	1.210	344
氧氣	0	1.430	317
二氧化碳	0	1.980	258
氫氣	0	0.090	127
甲烷	25	0.657	448
乙烯	25	1.160	330

音源的振動是通過介質質點的振動向外傳播的，介質質點本身的振動速度常用 u 表示。介質質點的振動速度 u 與音波傳播速度 c 是不同的，當有音擾動時，質點以振速 u 進行振動，而這種振動形式以音速 c 傳播。

四 振動頻率區分

低頻音：頻率 1,000 赫茲 (Hz) 以下之聲音。
高頻音：頻率 1,000 赫茲 (Hz) 以上之聲音。
超低頻 (infrasonic frequency) 音：頻率低於 20 赫茲 (Hz) 之聲音。
超高頻 (ultrasonic frequency) 音：頻率高於 20 k 赫茲 (Hz) 之聲音。
人耳可聽頻音：頻率在 20 ～ 20 k 赫茲 (Hz) 之聲音。
人耳較敏感頻音：頻率在 1 ～ 4 k 赫茲 (Hz) 之聲音。
一般樂器所發出的聲音：頻率約爲 20 ～ 4 kHz 之間。
人類發出的聲音：頻率約爲 80 ～ 1 kHz 之間。

1.1.4 音波方程式

爲了研究音場的變化規律，就需要建立音壓關於空間和時間的方程式，即音波方程式。爲使問題進一步簡化，在推導音波方程式時做出如下一些必要的理想情況的假設：

1. 傳播介質是理想的流體介質，即介質中不存在黏滯性，音波在介質中傳播時沒有能量損耗。
2. 傳播介質是連續的流體介質，即在討論音場中流體介質運動時，只考慮介質分子運動的平均特性，而不考慮分子的單獨運動。
3. 傳播介質在宏觀上是靜態的，即介質本身的流動速度遠小於音波傳播速度，可忽略不計。

4. 傳播介質是均勻的，即介質中的靜態壓強 P_0、靜態密度 ρ_0 都是常數。
5. 傳播介質中的音波過程是絕熱的，即介質中稠密和稀疏的過程是絕熱的，介質與毗鄰部分不會由於音波過程引起的溫度差而產生熱交換。
6. 介質中傳播的都是小振幅音波，其聲學參量都是一級微量。即音壓 p 遠小於介質的靜態壓強 P_0，$p \ll P_0$；介質質點的振動速度 u 遠小於音波傳播速度 c_0，$u \ll c_0$；介質質點的位移 ξ 遠小於音波波長 λ，$\xi \ll \lambda$；介質密度的增量 ρ' 遠小於介質的靜態密度 ρ_0，$\rho' \ll \rho_0$。

由以上這些假設而得到的結果，在很大程度上與實際情況相符，即仍可表現出音傳播的基本特性，解釋音傳播過程中的一些基本現象和一些聲學基本問題。

在研究音波的宏觀物理性質時，其運動規律必須滿足質量守恆定律、牛頓第二定律，以及描述壓強、溫度、體積等狀態參數的狀態方程式三個基本的物理定律。由此，便可以得到描述音傳播過程的三個基本方程式：

一 連續性方程式

根據質量守恆定律，在連續流體介質中，如果流進與流出某一體積元的流體質量不等，則必將引起該體積元中介質密度的變化。因此，在音波作用引起介質壓縮或伸張時，介質中任一體積元中密度變化所引起的質量增量，必等於流進與流出體積元的流體質量之差。連續性方程式的數學表示如下：

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} = -\rho_0\left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z}\right) \quad 或 \quad \frac{\partial \rho'}{\partial t} = -\rho_0 \nabla \cdot \boldsymbol{u} \tag{1-5}$$

式中：

$\boldsymbol{u}$：介質質點振動速度，

u_x、u_y、u_z：分別爲 $\boldsymbol{u}$ 在 x、y、z 三個方向的分量，

$\nabla = \frac{\partial}{\partial x}\boldsymbol{i} + \frac{\partial}{\partial y}\boldsymbol{j} + \frac{\partial}{\partial z}\boldsymbol{k}$，

$\boldsymbol{i}$、$\boldsymbol{j}$ 及 $\boldsymbol{k}$：分別爲 x、y、z 軸上的單位向量。

連續性方程式描述了介質質點的振動速度與流體密度之間的關係。

二 運動方程式

當音波在連續介質中傳播時，各處壓強不同。因此對於任一介質質點而言，其各面受力不均衡。根據牛頓第二定律便可建立運動方程式如：

$$\rho_0 \frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} = -\left(\frac{\partial p}{\partial x}\boldsymbol{i} + \frac{\partial p}{\partial y}\boldsymbol{j} + \frac{\partial p}{\partial z}\boldsymbol{k}\right) \quad \text{或} \quad \rho_0 \frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} = -\nabla p \qquad \textbf{(1-6)}$$

它描述了音場中音壓與介質質點振動速度之間的關係。

三 物態方程式

當存在音擾動時，傳播介質會出現稠密、稀疏的交替變化。理想氣體的絕熱物態方程式如：

$$\frac{\partial p}{\partial t} = c_0^2 \frac{\partial \rho'}{\partial t} \quad \text{或} \quad p = c_0^2 \rho' \qquad \textbf{(1-7)}$$

它描述了音場中音壓隨時間變化與密度隨時間變化的關係，c_0 爲該理想氣體中的音速。

將連續性方程式 (1-5)、運動方程式 (1-6)、物態方程式 (1-7) 經線性化 (保留低階項)，並聯立化簡，便得到理想流體介質中小振幅波傳播的三維線性音壓波動方程式：

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \qquad \textbf{(1-8)}$$

式中：

∇^2：拉普拉斯算符。

在直角座標系中：

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \qquad \textbf{(1-9)}$$

在球座標系中：

$$\nabla^2 = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2 \frac{\partial}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2 \sin\theta}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(\sin\theta \frac{\partial}{\partial \theta}\right) + \frac{1}{r^2 \sin^2\theta}\frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \qquad \textbf{(1-10)}$$

式中：

r：球半徑，

θ：極角，

φ：方向角。

在柱座標系中：

$$\nabla^2 = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad \textbf{(1-11)}$$

式中：

r：圓柱半徑，

θ：方向角，

z：軸向座標。

爲了描述音波的傳播情況，常用音射線和音的波陣面來繪出音波的傳播。音射線是指自音源畫出的一些表示音波傳播方向和傳播途徑的帶有箭頭的線，簡稱「音線」。

而波陣面是指音波在傳播過程中，所有相位相同的介質質點形成的面。波陣面總是與傳播方向垂直的，即音線與波陣面處處垂直。根據音波傳播時波陣面的形狀不同可以將音波分爲平面音波、球面音波和柱面音波等類型。

1.1.5 平面波

平面音波的傳播方向總保持一個恆定方向，音線爲相互平行的一系列直線，它的波陣面爲與其音線相垂直的一系列平行平面，如圖 1.1-7 所示。

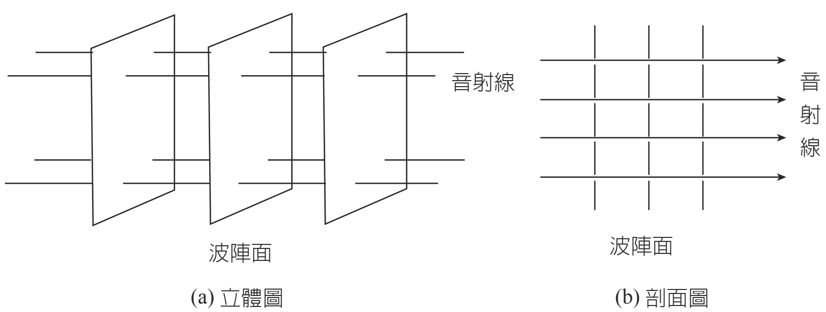


圖 1.1-7　平面音波的音線和波陣面截面圖

平面音波的音壓 p 只隨 x 座標而變化，在垂直 x 軸的平面上不論 y、z 如何變化，p 都不變。這時，三維問題變成了一維問題，即音壓波動方程式 (1-8) 變成：

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}=\frac{1}{c_0^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \tag{1-12}$$

上式單一頻率的一般解為：

$$p(x,t)=Ae^{j(\omega t-kx)}+Be^{j(\omega t+kx)} \tag{1-13}$$

式中：

$j=\sqrt{-1}$，

$k=\omega/c_0$ 稱 k 爲波數。

上式的第一項表示沿 x 正方向行進的波 (前向波)，第二項表示沿 x 負方向行進的波 (反射波)。若討論無限介質中平面波的傳播，則可假設在波的傳播途徑上沒有反射體，即不會出現反射波 ($B=0$)，於是上式簡化為：

$$p(x,t)=Ae^{j(\omega t-kx)} \tag{1-14}$$

再假設音源在原點 ($x=0$) 振動時，在毗鄰介質中產生了 $p_a e^{j\omega t}$ 的音壓，這樣就求得 $A=p_a$，從而求得音場中的音壓為：

$$p(x,t)=p_a e^{j(\omega t-kx)} \tag{1-15}$$

再利用運動方程式 (1-6)，可求得質點速度：

$$u(x,t)=u_a e^{j(\omega t-kx)} \tag{1-16}$$

式中：

$u_a=p_a/\rho_0 c_0$。

在由音壓求得質點速度的運算中，積分常數取為0，因為介質起初是靜止的，即 $t=0$ 時的質點速度 $u(x,0)=0$。(1-15) 式和 (1-16) 式就是均勻的理想介質中一維小振幅音波的音壓和質點速度。當然取複數形式只是為了運算的方便，有物理意義的應該是它們的實部。

(1-15) 式和 (1-16) 式描述的音場是一個波陣面為平面、沿 x 正方向以速度 c_0 傳播的平面行波。平面音波在均勻的理想介質中傳播時，音壓幅值 p_a、質

點速度幅值 u_a 都是不隨距離改變的常數，也就是說音波在傳播過程中不會有任何衰減。這是因爲前面曾假設介質是理想的，沒有黏滯存在，保證了音傳播過程中不會發生能量的損耗；同時平面音波傳播時波陣面又不會擴大，因而能量也不會隨距離增加而分散。

爲了更方便地研究空間音場，引入音阻抗率這一概念，其定義爲音場中某位置的音壓與該位置的質點速度的比值，即：

$$Z_s = \frac{p}{u} \tag{1-17}$$

音阻抗率的單位是 $\mathrm{N \cdot s/m^3}$ 或 $\mathrm{Pa \cdot s/m}$。音場中某位置處的音阻抗率 Z_s 一般是複數，像電阻抗一樣，其實數部分反映了能量的損耗，虛數部分反映了能量的儲存。在理想介質中，實數的音阻抗率也具有「損耗」的意思，不過它代表的不是能量轉化成熱能，而是表示能量從一處向另一處的轉移，即「傳播損耗」。

根據音阻抗率的定義 (1-17) 式，則由 (1-15) 式和 (1-16) 式描述的平面音波的音阻抗率爲：

$$Z_s = \rho_0 c_0 \tag{1-18}$$

同理可得，沿 x 負方向傳播的平面反射波的音阻抗率爲：

$$Z_s = -\rho_0 c_0 \tag{1-19}$$

由此可知，在平面的音場中，各處的音阻抗率數值上都是相等，且爲一個實數。這反映了在平面音場中各位置上都無能量的儲存，在前一個位置上的能量可以完全地傳播到後一個位置上去，此乃因爲 $\rho_0 c_0$ 值是介質固有的一個常數，文章後面在討論音波的反射時，可以瞭解它的數值對音傳播的影響比起 ρ_0 或 c_0 單獨的作用還要大，所以這個量在聲學中具有重要的地位，稱之爲介質的特性阻抗。

1.1.6 球面波

在自由空間中，當音源很小，其尺寸大小比輻射音波波長小得多時，則其大小和形狀可被忽略而視爲一點，稱這種音源爲點音源。點音源在各向同性的均勻介質中輻射音波時，音波向各個方向傳播，在離音源同一半徑的球面上各處音波的相位均相同，所以它的波陣面是一系列同心球面，即音波是球面波。

一 單極音源

當一個均勻小球表面各點做同相位的振動時，它就向周圍介質中輻射球對稱的音波，即音壓的大小只與離球心的距離 r 有關。於是可用 $p(r,t)$ 來描述球面波，單極音源的波動方程式可表示爲：

$$\frac{\partial^2(rp)}{\partial r^2}-\frac{1}{c_0^2}\frac{\partial^2(rp)}{\partial t^2}=0 \tag{1-20}$$

若該小球表面做簡諧振動，則向外輻射的球面波爲：

$$P=\frac{A}{r}e^{j(\omega t-kr)} \tag{1-21}$$

式中：

A：一般來講可能是複數，

A/r 的絕對值：即爲音壓振幅。

由此式可知，與平面音波相比，球面波的音壓幅值不再保持恆定，而是隨 r 的增大而減小。

利用描述質點速度與音壓關係的運動方程式，可以由 (1-21) 式求得徑向質點速度爲：

$$u_r=-\frac{1}{j\omega\rho_0}\frac{\partial p}{\partial r}=\frac{A}{r\rho_0c_0}\left(1+\frac{1}{jkr}\right)e^{j(\omega t-kr)} \tag{1-22}$$

式中：

$\frac{A}{r\rho_0c_0}\left(1+\frac{1}{jkr}\right)$ 的絕對值即爲介質質點速度的振幅。

二 偶極音源

偶極音源是由兩個相距很近，並以相同的振幅而相位相反 (即相差 180°) 的小脈動球源 (即點音源) 所組成的音源。例如，沒有安裝在障板上的揚聲器，在低頻時就可以近似看作是這種音源。

設兩個小脈動球源，相距爲 l，它們振動的振幅相等而相位相反，如圖 1.1-8。已知每個小球在空間產生的音壓爲 (1-21) 式，故將兩個小脈動球源在空間輻射的音壓相加起來就得到音偶極子的輻射音壓，即：

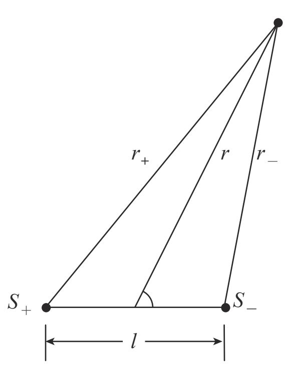


圖 1.1-8 偶極音源

$$p=\frac{A}{r_+}e^{j(\omega t-kr_+)}-\frac{A}{r_-}e^{j(\omega t-kr_-)} \tag{1-23}$$

如果僅考慮離音源較遠處的音場，即假設 $r \gg l$，則由兩個小球源輻射的音波到達觀察點 P 時，振幅的差別甚小，因此可把 (1-23) 式中振幅部分的 r_+ 及 r_- 都近似地用 r 來代替，但它們的相位差不能忽略，由圖 1.1-8 可知有如下近似關係：

$$\begin{cases} r_+ \approx r+\dfrac{l}{2}\cos\theta \\ r_- \approx r-\dfrac{l}{2}\cos\theta \end{cases} \tag{1-24}$$

將 (1-24) 式代入 (1-23) 式中的相位部分並化簡就可得到：

$$p\approx\frac{A}{r}\left(-2j\sin\frac{kl\cos\theta}{2}\right)e^{j(\omega t-kr)} \tag{1-25}$$

由於兩個小球源相距很近，當頻率不是很高時有 $kl<1$，於是 (1-25) 式可進一步化簡爲：

$$p\approx -j\frac{kAl}{r}\cos\theta e^{j(\omega t-kr)} \tag{1-26}$$

由此可知，偶極音源的輻射音場在離音源較近處的音壓也隨距離的增加而減小。但偶極音源的輻射音場與單極音源的輻射音場有一個很重要的區別是，偶極音源輻射與 θ 角有關，即在音場中同一距離、不同方向的位置上音壓不一樣。

利用描述質點速度與音壓關係的運動方程式，可以由 (1-26) 式求得徑向質點速度爲：

$$u_r \approx j\frac{kAl}{r\rho_0 c_0}\left(1+\frac{1}{jkr}\right)\cos\theta e^{j(\omega t-kr)} \tag{1-27}$$

1.1.7 柱面波

波陣面是一系列同軸圓柱面的音波稱爲柱面音波，其音源一般可視爲「線音源」。考慮最簡單的柱面音波，音場與座標系的角度和軸向長度均無關，僅與徑向半徑 r 有關，因此波動方程式可表示爲：

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial p}{\partial r}\right)=\frac{1}{c_0^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \tag{1-28}$$

於是，遠場的柱面音波音壓爲：

$$p \approx p_0\sqrt{\frac{2}{kr\pi}}e^{j(\omega t-kr)} \tag{1-29}$$

因此，柱面音波的音壓幅值也隨徑向距離的增加而減小。

平面音波、球面音波和柱面音波都是理想的傳播類型。例如火車或高速公路一長串汽車視爲線音源，飛機在高空視爲點音源。而在考慮遠離音源的某個方向上的傳播時，又可以認爲是球面波情況，當距離足夠遠時，就可將球面波近似看成爲平面波。在考慮遠小於傳播距離的某個小區域內的傳播問題時，又可以認爲是平面波情況，如工廠發出的低頻音波情況。

1.1.8 音波的相加

一、相干波

通常音源只有在發出純音 (單頻) 時，才有可能產生干涉現象。例如有二相同頻率、固定相位差的音波相相加，這二列音波會產生干涉現象，我們稱這二列音波爲「相干波」。假設音場中同時存在 n 個同頻率的音源，且各個音源在音場中某點處輻射的音壓有固定的相位差並分別爲 $p_1, p_2, p_3, \cdots, p_n$，那麼合成音場的音壓爲：

$$p = p_1 + p_2 + \cdots + p_n = \sum_{i=1}^{n} p_i \tag{1-30}$$

下面討論一種特殊情況，即由兩列相同頻率但以相反方向行進的平面波相加的合成音場。設這兩列沿相反方向行進的同頻率平面波分別爲

$$\begin{cases} p_1 = p_{1a} e^{j(\omega t - kx)} \\ p_2 = p_{2a} e^{j(\omega t + kx)} \end{cases} \tag{1-31}$$

則由相加原理，合成音場的音壓爲：

$$p = p_1 + p_2 = 2 p_{2a} \cos(kx) e^{j\omega t} + (p_{1a} - p_{2a}) e^{j(\omega t - kx)} \tag{1-32}$$

由上式可知，合成音場由兩部分組成，第一項代表一種駐波場，各位置的質點都做同相位振動，但振幅大小卻隨位置而異：當 $kx = n\pi$，即 $x = n\lambda/2$ $(n=1, 2\cdots)$ 時，音壓振幅最大，稱爲音壓波谷；當 $kx = (2n-1)\pi/2$，即 $x = (2n-1)\lambda/4 (n=1, 2\cdots)$ 時，音壓振幅爲零，稱爲音壓波結。第二項代表向 x 方向行進的平面行波，其振幅爲兩列波的振幅之差。

如果存在同頻率且沿相反方向行進的波，如在房間中入射波與由牆壁產生的反射波相相加，則空間中合成音壓的振幅將隨位置出現極大和極小的變化，這樣就破壞了平面自由音場的性質，如果反射波越強，則 (1-32) 式中第一項比第二項的作用更大。特別是如果反射波的振幅等於入射波的振幅 (全反射)，則 (1-32) 式第二項爲零，這時的合成音場就是一個純粹的「駐波」，駐波是干涉現象的特例。

二 不相干波

所謂不相干波是指不同頻率的音波，或是同頻率但相位差不恆定 (無規則變化) 的音波，即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，這樣的音波叫不相干波。我們日常遇到的噪音一般是不相干波，例如各種獨立運轉的機器，或者各自獨立在講話的人群，它們發出的音波是互不相干的音波。不相干波在相加時，其「能量」可以直接相加，即合成音場的有效音壓可表示爲：

$$p_e^2 = p_{1e}^2 + p_{2e}^2 + \cdots + p_{ne}^2 = \sum_{i=1}^{n} p_{ie}^2 \tag{1-33}$$

1.1.9 音波的反射、透射及折射

音波在空間傳播時會遇到各種障礙物，或遇到兩種介面，這時會產生音波的反射、透射或折射，這些特性與光波十分相近。音波的反射、折射和透射都是在兩種介質的分介面處發生的，而介質分介面處的聲學邊界條件一般有兩個：音壓連續及法向速度連續。

一、平面音波垂直入射時的反射和透射

如圖 1.1-9 所示，介質 I 和介質 II 的特性阻抗分別為 $\rho_1 c_1$ 和 $\rho_2 c_2$，它們分介面的座標為 $x=0$。現在有一列音壓為 $p_i = p_{ia}e^{j(\omega t-kx)}$ 的平面音波從介質 I 垂直入射到分介面上，由於分介面兩邊的介質的特性阻抗不一樣，一般來講就會有一部分音波反射回來，另一部分透入到介質 II 中。由音波方程式及邊界條件即可解得在分介面上反射波音壓與入射波音壓之比 r_p，反射波質點速度與入射波質點速度之比 r_u，透射波音壓與入射波音壓之比 t_p 及透射波質點速度與入射波質點速度之比 t_u 分別為：

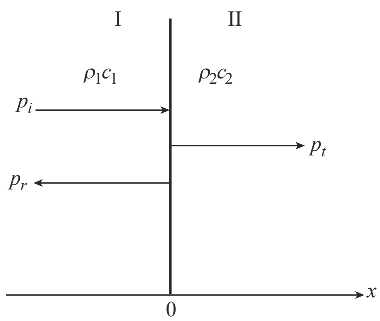


圖 1.1-9 平面音波正入射

$$\begin{cases} r_p = \dfrac{p_{ra}}{p_{ia}} = \dfrac{R_2 - R_1}{R_1 + R_2} = \dfrac{R_{12} - 1}{R_{12} + 1} \\ r_u = \dfrac{u_{ra}}{u_{ia}} = \dfrac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} = \dfrac{1 - R_{12}}{1 + R_{12}} \\ t_p = \dfrac{p_{ta}}{p_{ia}} = \dfrac{2R_2}{R_1 + R_2} = \dfrac{2R_{12}}{1 + R_{12}} \\ t_u = \dfrac{u_{ta}}{u_{ia}} = \dfrac{2R_1}{R_1 + R_2} = \dfrac{2}{1 + R_{12}} \end{cases} \tag{1-34}$$

上式中：

$$R_1=\rho_1 c_1\ ,\ \ R_2=\rho_2 c_2\ ,\ \ R_{12}=\frac{R_2}{R_1}$$

下面分幾種情況討論：

(一) $R_1=R_2(R_{12}=1)$

此時有 $r_p=r_u=0$，$t_p=t_u=1$。這表明音波沒有反射，即全部透射，也就是說即使存在著兩種不同介質的分介面，但只要兩種介質的特性阻抗相等，那麼對音的傳播來講，分介面就好像不存在一樣。

(二) $R_1<R_2(R_{12}>1)$

此時有 $r_p>0$，$r_u<0$；$t_p>0$，$t_u>0$。介質 II 比介質 I 在聲學性質上較硬，這種邊界稱爲硬邊界。在硬邊界面上，反射波質點速度與入射波質點速度相位改變 180°，反射波音壓與入射波音壓同相位。

(三) $R_1>R_2(R_{12}<1)$

此時有 $r_p<0$，$r_u>0$；$t_p>0$，$t_u>0$。介質 II 比介質 I 在聲學性質上較軟，這種邊界稱爲軟邊界。在硬邊界面上，反射波質點速度與入射波質點速度同相位，反射波音壓與入射波音壓的相位改變 180°。

(四) $R_1\ll R_2(R_{12}\gg 1)$

此時有 $r_p\approx 1$，$r_u\approx -1$；$t_p\approx 2$，$t_u\approx 0$。介質 II 比介質 I 說來十分「堅硬」。在分介面上，反射波質點速度與入射波質點速度大小相等，相位相反，合成質點速度爲零；反射波音壓與入射波音壓大小相等，相位相同，合成音壓爲入射音壓的兩倍。此時發生全反射，在介質 I 中入射波和反射波相加形成了駐波，分介面處恰好是速度波結和音壓波谷。而介質 II 中並沒有音波傳播，因爲介質 II 中的質點並沒有因爲介質 I 中質點的衝擊而運動 ($t_u=0$)，介質 II 中存在的壓強也只是分介面處的壓強 ($p_t=2p_i$) 的靜態傳遞，並不是疏密交替的音壓。音波從空氣入射到空氣 - 水的分介面上的情況就近於這種「十分堅硬」的分介面。

(五) $R_1\gg R_2(R_{12}\ll 1)$

此時有 $r_p\approx -1$，$r_u\approx 1$；$t_p\approx 0$，$t_u\approx 2$。介質 II 比介質 I 說來十分「柔軟」。在分介面上，反射波音壓與入射波音壓大小相等，相位相反，合成音壓爲零；

反射波質點速度與入射波質點速度大小相等，相位相同，合成質點速度爲入射波質點速度的兩倍。此時也發生全反射，在介質 I 中入射波和反射波相加形成了駐波，分介面處恰好是速度波谷和音壓波結。音波從水中入射到空氣 - 水的分介面上的情況就近於這種「十分柔軟」的分介面。

二 平面音波斜入射時的反射和折射

如圖 1.1-10 所示，入射平面音波 p_i 與法向成 θ_i 角入射到介面上，這時將有一部分音波 p_r 以與法向成 θ_r 角反射回介質 I，另一部分音波則將透入到介質 II。同時透射音波 p_t 與法向成 θ_t 角，不再與入射波保持同一傳播方向，形成了音波的折射。

同樣利用介面上的邊界條件 (音壓連續及法向質點振動速度連續) 及波動方程式，可以得到：

$$\theta_i = \theta_r$$

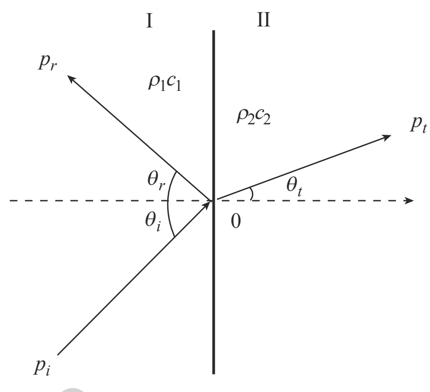


圖 1.1-10　平面音波斜入射

$$\frac{\sin\theta_i}{\sin\theta_t} = \frac{c_1}{c_2} \tag{1-35}$$

這就是著名的斯涅爾 (Snell) 音波反射與折射定律。它說明音波遇到分介面時，反射角等於入射角，而折射角的大小與兩種介質中音速之比有關，介質 II 的音速越大，則折射波偏離分介面法線的角度越大。

1.2 聲音的物理量

1.2.1 音能量與音能量密度

當有音波在介質中傳播時，一方面使介質質點在平衡位置附近做往覆振動，產生動能；同時，又使介質產生了疏密交替的壓縮和膨脹過程，使介質具有了形變的位能。這兩部分能量之和就是由於音擾動而使介質得到的音能量。

假設介質中一小體積元在平衡態時體積爲 V_0，壓強爲 P_0，密度爲 ρ_0。由於音擾動使得該體積元獲得的動能爲：

$$\Delta E_k = \frac{1}{2}(\rho_0 V_0)u^2 \tag{1-36}$$

同時，由於音擾動使得該體積元的壓強從 P_0 升高到 $P_0 + p$，體積從 V_0 升高到 $V_0 + \Delta V$，於是該體積元具有的位能爲：

$$\Delta E_p = -\int_0^{\Delta V} p dV \tag{1-37}$$

式中：

負號表示體積元內壓強和體積的變化方向相反。

例如，壓強增加時體積將變小，此時外力對體積元做功，使得該體積元的位能增加；反之，當壓強減小時體積將變大，此時體積元對外做功，使得該體積元的位能減小。

體積元內總的音能量爲動能與位能之和，即：

$$\Delta E = \frac{1}{2}(\rho_0 V_0)u^2 - \int_0^{\Delta V} p dV = \frac{V_0}{2}\rho_0\left(u^2 + \frac{1}{\rho_0^2 c_0^2} p^2\right) \tag{1-38}$$

音場中單位體積內的音能量則稱爲音能量密度，即：

$$\varepsilon = \frac{\Delta E}{V_0} = \frac{1}{2}\rho_0\left(u^2 + \frac{1}{\rho_0^2 c_0^2} p^2\right) \tag{1-39}$$

以平面簡諧音波爲例，音場中平均音能量密度爲：

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\overline{\Delta E}}{V_0} = \frac{\frac{1}{T}\int_0^T \Delta E dt}{V_0} = \frac{p_a^2}{2\rho_0 c_0^2} = \frac{p_e^2}{\rho_0 c_0^2} \tag{1-40}$$

式中：

$p_e = \frac{p_a}{\sqrt{2}}$，為有效音壓。由於理想介質平面音場中，音壓幅值是不隨距離改變的常數，因此理想介質平面音場的平均音能量密度處處相等。

1.2.2 音功率與音強

音功率是指音源在單位時間內輻射的總音能量，用 W 表示，單位是瓦 (W)。表 1.2-1 中列出了一些典型音源的音功率及音功率級。

表 1.2-1 典型音源的音功率及音功率級

音源	火箭	噴射飛機	大型鼓風機	空氣壓縮錘	織布機	汽車	輕聲細語
音功率 (W)	4.00E+07	10,000	100	1	0.1	0.1	1.00E−09
音功率級 (dB)	196	160	140	120	110	110	30

單位時間內通過垂直於音傳播方向上面積 S 的平均音能量就稱為平均音能量流或稱為平均音功率，即：

$$\overline{W} = \overline{I}S = \bar{\varepsilon} c_0 S \tag{1-41}$$

平均音功率的單位是瓦 (Watt)，$1W = 1\,\mathrm{N \cdot m/s}$。

通過垂直於音傳播方向的單位面積上的平均音能量流就稱為平均音能量流密度或稱為音強，即：

$$I = \frac{\overline{W}}{S} = \bar{\varepsilon} c_0 \tag{1-42}$$

根據音強的定義，它還可用單位時間內、單位面積的音波向前進方向毗鄰介質所做的功來表示，即：

$$I = \frac{1}{T}\int_0^T \mathrm{Re}(p)\mathrm{Re}(u)dt \tag{1-43}$$

式中：

Re 表示取實部，音強的單位是 W/m^2。

以平面音波爲例，對於沿 x 正方向傳播的平面音波，其音強爲：

$$I = \frac{p_A^2}{2\rho_0 c_0} = \frac{p_e^2}{\rho_0 c_0} = \frac{1}{2}\rho_0 c_0 u_A^2 = \rho_0 c_0 v_e^2 = \frac{1}{2} p_A u_A = p_e u_e \tag{1-44}$$

式中：

u_e 表示有效質點速度，$u_e = \frac{u_A}{\sqrt{2}}$。

對於沿 x 負方向傳播的平面音波，其音強爲：

$$I = -\frac{p_A^2}{2\rho_0 c_0} = -\frac{p_e^2}{\rho_0 c_0} = -\frac{1}{2}\rho_0 c_0 u_A^2 = -\rho_0 c_0 u_e^2 = -\frac{1}{2} p_A u_A = -p_e u_e \tag{1-45}$$

這時音強是負值，這表明音能量向 x 負方向傳播。由此可見，音強是具有方向性的量，它的指向就是音波的傳播方向。可以預料，當同時存在前進波和反射波時，總音強應爲 $I = I_+ + I_-$，I_+ 表示正向音強，I_- 表示負向音強。如果前進波與反射波相等，則 $I = 0$。因而，在有反射波存在的音場中，音強這一量往往不能反映其能量關係，這時必須用平均音能量密度 來描述。由 (1-44) 式及 (1-45) 式可知，音強與音壓幅值或質點速度幅值的平方成正比；此外在相同質點速度幅值的情況下，音強還與介質的特性阻抗成正比。例如在空氣和水中有兩列相同頻率、相同速度幅值的平面音波，這時水中的音強要比空氣中的音強約大 3,600 倍。可見在特性阻抗較大的介質中，音源只需用較小的振動速度就可以發射出較大的能量，從音輻射的角度來看這是很有利的。

1.2.3 聲級與分貝

介質體積元在平衡態時壓強爲 P_0，受音擾動後壓強變爲 P_1，則由音擾動所產生的逾量壓強 (逾壓)：

$$p = P_1 - P_0 \tag{1-46}$$

就稱爲音壓 (sound pressure)，音壓的單位是牛頓 / 平方公尺 (N/m^2) 或帕 (Pa)，有時也用巴 (bar) 作單位，其中 1 Pa = 1 N/m^2，1 bar = 100 kPa。

存在音壓的空間 (音波波及的空間) 稱爲音場。音場中某一暫態的音壓值稱爲暫態音壓；在一定時間內最大的暫態音壓值稱爲峰值音壓 (或巔值音壓)；

如果音壓隨時間是按簡諧規律變化的，則峰值音壓 (或巔值音壓) 也就是音壓的振幅；在一定時間內暫態音壓對時間的均方根值：

$$p_e = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T p^2 dt} \qquad \textbf{(1-47)}$$

稱爲有效音壓，式中，右下角符號“e”代表有效值。一般用噪音計所測得的音壓就是有效音壓。

下面列出一些典型的有效音壓大小：人耳對 1 kHz 聲音的可聽閾 (即剛剛能察覺到它存在時的音壓) 約爲 2×10^{-5} Pa；微風輕輕吹動樹葉的聲音約爲 2×10^{-4} Pa；在房間中的高聲談話音 (相距 1 m 處) 約爲 0.05 Pa ～ 0.1 Pa；交響樂演奏音 (相距 5 m ～ 10 m 處) 約爲 0.3 Pa；飛機的強力發動機發出的聲音 (相距 5 m 處) 約爲 200 Pa；長程飛彈發射發出的聲音約爲 2×10^{3} Pa；核子試爆發出的聲音約爲 2×10^{4} Pa。

從以上列舉的數據可以看到，人耳所能察覺得最小音壓爲 2×10^{-5} N/m^2 (Pa)(即正常人耳能聽到的最弱聲音壓力)，稱爲人耳的「聽域」。當聲音壓力 (音壓) 達到 20 Pa 時，人耳就會生生疼痛的感覺，20 Pa 爲人耳的「痛域」。「痛域」與「聽域」的聲音壓力之比爲 100 萬倍，因此直接用音壓或音強的絕對值來度量音波的強弱是十分不方便的。此外，人耳對聲音強弱的主觀感覺並不是正比於音壓的絕對值，而更接近於它們的對數關係，基於這些原因，因此聲學中常普遍選用對數標度來作爲聲音強弱的度量，用這種對數表示來度量音壓，音強和音功率分別稱爲噪音量，音強級和音功率級，它們國際上通用的符號分別爲 L_p, L_I 和 L_W，單位都用 dB (分貝) 表示。噪音的單位爲分貝。分貝是二個數值之比值的對數值，基本上它可以是任二個相同單位的數值比值之 (常用對數) 對數值：

分貝 (dB) = $10\log_{10}$ (物理量 / 基準物理量)。

這個對數值稱爲被量度量的「級」，如果所取對數是以 10 爲底，則級的單位爲貝爾 (Bell)。由於貝爾的單位過大，故常將 1 貝爾分爲 10 檔，每一檔的單位稱爲分貝 (dB)，以 10 爲底所取對數。

聲級亦稱之爲噪音量，由於音振動的能量範圍極其廣闊，同時人耳產生的「響度感覺」近似正比於聲音強度的對數，因此在聲學中普遍使用對數標度來度量音壓、音強和音功率，稱爲音量、音強級和音功率級，單位爲分貝 (dB)。當有音波存在時，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)。一般情況下，聲音壓力(音壓)與大氣壓(一大氣壓爲1,013 Pa)相比是極弱的。聲音壓力的大小與物體的振動有關，物體振動的振幅越大，則壓強的變化也越大，因而聲音壓力也越大，我們聽起來就越響，因此聲音壓力的大小表示了音波的強弱。

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 / 公尺 ^{2}(N/m^2)。噪音量的符號用 L_p 表示，聲音壓力(音壓、音量)位準(sound pressure level, L_p, SPL)，其定義爲將待測音壓有效值 p_e 與基準音壓 p_{ref} 的比值取常用對數，再乘以20，其定義爲：

$$SPL = 20\log_{10}\frac{p_e}{p_{ref}} \tag{1-48}$$

音量單位爲分貝(dB)。式中，p_e 爲待測音壓的有效值；p_{ref} 爲參考音壓。在空氣中，參考音壓 p_{ref} 一般取爲 2×10^{-5} Pa 或 2×10^{-5} N/m^2 或 20 μPa，這個數值是正常人耳對 1 kHz 聲音剛剛能覺察其存在的音壓值，也就是 1 kHz 聲音的可聽閾音壓。下面列出一些典型的音量大小：人耳對 1 kHz 聲音的可聽閾(即剛剛能覺察到它存在時的音壓)約爲 0 dB；微風輕輕吹動樹葉的聲音約爲 14 dB；在房間中的高聲談話聲(相距 1 m 處)約爲 68 dB ～ 74 dB；交響樂演奏音(相距 5 m 處)約爲 84 dB；飛機的強力發動機發出的聲音(相距 5 m 處)約爲 140 dB。一個聲音比另一個聲音的音壓大一倍時，音量大 6 dB，一般人耳對於聲音強弱的分辨能力約爲 0.5 dB。

音強級以符號 SIL (sound intensity level) 表示，其定義爲：

$$SIL = 10\log_{10}\frac{I}{I_{ref}} \tag{1-49}$$

式中：

I：待測音強，

I_{ref}：參考音強。

在空氣中，參考音強 I_{ref} 一般取 10^{-12} W/m^2。這一數值是與參考音壓 2×10^{-5} Pa 相對應的音強，這也是 1 kHz 聲音的可聽閾音強。

音量與音強級數值上近似相等，因爲由 (1-44) 式可知：

$$SIL = 10\log_{10}\frac{I}{I_{ref}} = 10\log_{10}\left(\frac{p_e^2}{\rho_0 c_0}\frac{400}{p_{ref}^2}\right)$$

$$= SPL + 10\log_{10}\frac{400}{\rho_0 c_0} \quad \textbf{(1-50)}$$

可見，在一般情況下，音強級與音量將相差一個修正值 $10\log_{10}\frac{400}{\rho_0 c_0}$，它通常是比較小的。如果在測量時剛好 $\rho_0 c_0 = 400\ \text{Pa}\cdot\text{s/m}$，則音強級與音量相等。常聽聲音分貝數及強度如表 1.2-2 所示。

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。另聲音功率位準 (音功率級)(sound power level, SWL)，聲音功率用位準來表示時稱爲聲音功率位準 L_W，單位也是分貝，音功率級一般用於計量音源的輻射音功率．音源的音功率級用 L_W 符號表示，它的定義爲凡一音源的輻射音功率與基準音功率的比值常取用對數後乘以 10，定義爲：

$$SWL = 10\log_{10}\frac{W}{W_{ref}} \quad \textbf{(1-51)}$$

表 1.2-2　常聽聲音分貝數及強度

聲音來源	聲音強度（分貝）	聲音強度 $\times 10^{-12}$焦耳/(秒．公尺^2)	聽者感受
火箭升空	180	10^{18}	極巨大聲響
飛機引擎	140	10^{14}	大聲感到痛楚
搖滾樂團演奏(前)	120	10^{12}	大聲令人難受
鑽孔機聲	100	10^{10}	頗大聲
大卡車通過、喇叭聲	90	10^{9}	頗大聲
繁忙的街道、市場	80	10^{8}	吵雜
大聲說話、唱歌	70	10^{7}	大聲
平常交談聲(1 公尺)	60	10^{6}	普通
辦公室交談	50	10^{5}	普通
耳邊蚊子嗡嗡聲	40	10^{4}	普通
圖書館、清晨街道	30	10^{3}	安靜
耳語	20	10^{2}	很安靜
樹葉晃動沙沙聲	10	10	幾乎聽不見
小樹葉晃動沙沙聲	0	1	聽覺下限

式中：

W：待測音功率，

W_{ref}：參考音功率。

在空氣中，參考音功率 $W_{ref}=10^{-12}W$，聲音功率有如電功率，人耳所能察覺之最小聲音功率爲 10^{-12} Watt。聲音強度和音源幅射的聲音功率有關，聲音功率越大，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：

$$I=\frac{W}{A}=\frac{W}{4\pi r^2}\text{，}I\propto\frac{1}{r^2}\text{，A 表球形 (spherical) 面積} \quad \textbf{(1-52)}$$

- 點音源 (point source) 的聲音功率 W，在半自由音場 (semi-anechoic field) 中：

$$I=\frac{W}{A}=\frac{W}{2\pi r^2} \quad \textbf{(1-53)}$$

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

$$I=\frac{W}{2\pi r\times 1} \quad \textbf{(1-54)}$$

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：

$$I=\frac{W}{\pi r\times 1} \quad \textbf{(1-55)}$$

聲音功率是衡量噪音源音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，到目前爲止，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) 間的關係爲:

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°C, 1 atm 時)，ρ 爲空氣密度 (kg/m^3)，c 爲音速 (m/s)，P_{rms} 音壓均方根值 (root mean square)

$$I = \frac{P_{rms}^2}{\rho c} \to I_0 = \frac{P_0^2}{\rho_0 c_0} = \frac{(20\times10^{-6})^2}{400} = 10^{-12}\ \mathrm{W/m^2}\ (I_0\text{：基準物理量}) \quad \textbf{(1-56)}$$

$$I = \frac{W}{A} = \frac{{P_{rms}}^2}{\rho c} \to W = A \times I = \frac{P_{rms}^2}{\rho c} \times A \quad \textbf{(1-57)}$$

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：

$I = W/A$，點音源，自由音場時，距音源 r 公尺處之聲音強度 $I = W/A = W/4\pi r^2$ 將兩邊同時除 10^{-12}，取 $\log_{10}$ 值，乘以 10，則：

$$\begin{aligned}
&10\log_{10}\frac{I}{10^{-12}} = 10\log_{10}\frac{W}{10^{-12}} - 20\log_{10} r - 10\log_{10}(4\pi)\\
&\Rightarrow 10\log_{10}\frac{I}{I_0} = 10\log_{10}\frac{W}{W_0} - 20\log_{10} r - 10\log_{10}(4\pi)\\
&\Rightarrow L_I = L_W - 20\log_{10} r - 11
\end{aligned} \quad \textbf{(1-58)}$$

這就是說，對於恆定音功率的點音源發出的球面波，在離開音源不同距離 r 處音強級是不同的。在自由音場中，距離 r 增加1倍，音強級減小 6 dB。當距離足夠遠時，就可將球面波近似看成爲平面波，有 $L_p \approx L_I$。

點音源，半自由音場時 (如音源位於地面上)，則 $I = W/A = W/2\pi r^2 \Rightarrow L_I = L_W - 20\log_{10} r - 8$；線音源，自由音場時，距音源 r 公尺處，$I = W/2\pi r$，$L_I = L_W - 10\log_{10} r - 8$；線音源，半自由音場時，距音源 r 公尺處，$I = W/\pi r$，$L_I = L_W - 10\log_{10} r - 5$。因此，距音源距離由 $r_1 \to r_2$ 時，點音源 $\Delta L_I = 10\log_{10}(r_2^2/r_1^2)(\mathrm{dB}) = 20\log_{10}(r_2/r_1)(\mathrm{dB})$；距離加倍 $\Delta L_I = 6$ dB，線音源 $\Delta L_I = 10\log_{10}(r_2/r_1)(\mathrm{dB})$；距離加倍 $\Delta L_I = 3$ dB。

在噪音控制中，經常需要對音量、音功率級等進行和、差與平均的計算。噪音的計算不能按算術法則進行，而應按對數運算的法則進行。對於像噪音這種不相干涉的波，按照相加原理，其應按照能量的相加來進行。對含有 n 個噪音源的噪音場中某一點的總音量爲：

$$L_{pt} = 10\log_{10}\left(\sum_{t=1}^{n} 10^{0.1L_{Pi}}\right)\ (\mathrm{dB}) \quad \textbf{(1-59)}$$

式中：

L_{pi}：表示第 i 個噪音源在該點產生的音量。

由上式可知，兩個分貝數相同的音量相加時，合成的總音量等於該分貝數加上3分貝。即分貝值增加3分貝時，音能量增加一倍。若兩個聲音的音量相差在10分貝以上時，則它們的合成音量只比其中較強的聲音的音量大不到0.5分貝。即一個弱的聲音與一個強的聲音相加時，弱的聲音可以忽略。音量相加還可以利用各頻帶的音量，求出總的音量，即音量的相加不僅僅局限於兩個音源或多個音源發出的聲音，對同一個音源發出的不同頻率的聲音之間也存在相加問題。在噪音測量過程中，對測量產生干擾的其他外界噪音稱爲背景噪音。要消除背景噪對音源測定結果的影響，就要利用音量的相減。設測量所得的總音量爲 L_{pt}，背景噪音的音量爲 L_{pb}，則待量測音量 L_{ps} 爲：

$$L_{ps} = 10\log_{10}[10^{0.1L_{pt}} - 10^{0.1L_{pb}}] \text{ (dB)} \qquad \textbf{(1-60)}$$

實際的環境噪音往往較爲複雜，並常常是非穩態的，因此爲了減小測量之誤差，常經多次測量然後求平均值，包括多次測量的平均值、空間各點測量值的平均值及平均頻帶音量。平均音量可由下式求得：

$$\overline{L}_p = 10\log_{10}\left[\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}10^{0.1L_{pi}}\right] \text{ (dB)} \qquad \textbf{(1-61)}$$

式中：

L_{pi}：表示第 i 次測量所得的音量，或第 i 個點所測得的音量，或第 i 個頻率所測得的音量。

例如測量到5個音量分別爲 $L_{P_1} = 93$ dB，$L_{P_2} = 90$ dB，$L_{P_3} = 90$ dB，$L_{P_4} = 98$ dB 和 $L_{P_5} = 96$ dB，它的平均音量：

$$\overline{L}_P = 10\log_{10}[(10^{9.3} + 10^{9.0} + 10^{9.0} + 10^{9.8} + 10^{9.6})/5] = 96.5 \text{ dB}$$

在一般測量中，測量的各音量差值往往在10 dB範圍內，簡化用算術平均法誤差也不大。當多個音量中最大與最小音量的差值小於或等於5 dB時，其音量的平均可採用各音量直接的算術平均，例如，有四個音，分別爲 $L_{P_1} = 70$ dB，$L_{P_2} = 75$ dB，$L_{P_3} = 73$ dB，$L_{P_4} = 72$ dB，其分貝的算術平均值：

$$\overline{L}_P = 1/4(70 + 75 + 73 + 72) = 72.5 \text{ dB}$$

而應用(1-61)式的能量平均法計算，音能平均的音量：

$$\overline{L}_P = 10\log_{10}[(10^{7.0} + 10^{7.5} + 10^{7.3} + 10^{7.2})/4] = 72.9 \text{ dB}$$

分貝值的算術平均法比能量平均法值少 0.4 dB，兩者結果非常接近，而前者比較簡便。

1.2.4 頻譜

聲音的頻率不同，一般表現在聽起來音調高低的不同。例如，在聲樂中有男低音，有女高音；在噪音中有尖嘯的煞車音，有低沉的轟鳴音等等。一般正常人耳的可聽音範圍爲 20 Hz ～ 20 kHz。高於 20 kHz 的聲音稱爲超音；低於 20 Hz 的聲音稱爲次音。

通常的聲音信號都是由多種頻率組成的，把該聲音信號中所包含的頻率成分，按其幅值 (或分貝值) 或相位作爲頻率的函數做出的分佈圖，稱爲該聲音信號的頻譜圖，時域與頻域轉變圖詳圖 1.2-1 所示。

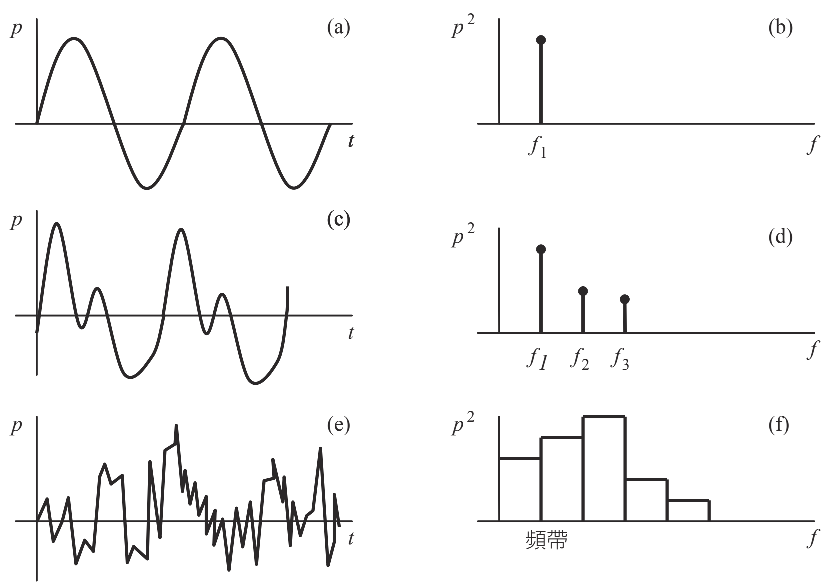


圖 1.2-1　時域與頻域轉變圖

如果聲信號包含的頻率成分是不連續的 (離散的)，則這樣的頻譜稱爲離散譜，如圖 1.2-2(a)；如果聲信號包含的頻率成分在一定範圍內是連續的，則這樣的頻譜稱爲連續譜，如圖 1.2-2(b)；還存在著如圖 1.2-2(c) 所示的複合譜，它同時包含有連續頻率成分和離散頻率成分。

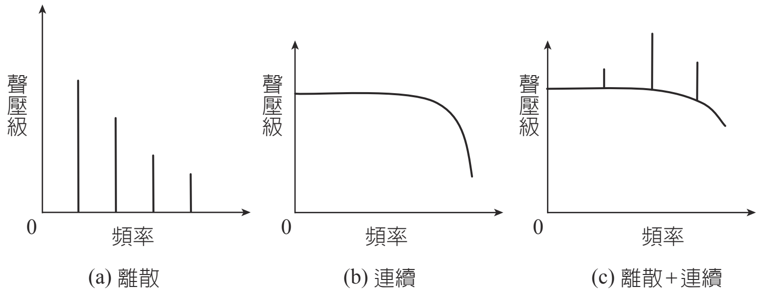


圖 1.2-2 三種不同類型聲音信號的頻譜圖

頻率與音調 (pitch) 有關。聲音的高低稱爲「音調」，如鋼琴 (或電子琴) 上不同的按鍵可彈出不同音調的聲音。聲音的音調由發音體的振動頻率決定，頻率越高則音調越高，如圖 1.2-3 所示。

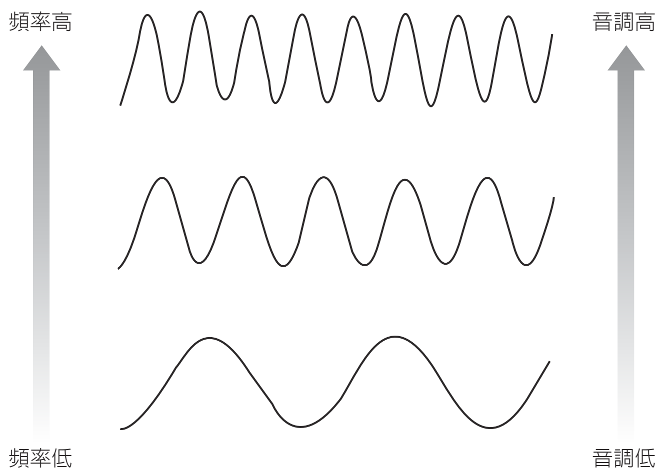


圖 1.2-3 頻率與音調 (pitch) 關係示意圖

對於連續譜聲音信號，在實際操作中通常把某一範圍內的頻率劃分成若干小的頻率段，每一段以它的中心頻率 (central frequency) 爲代表，將這樣劃分出來的頻率段叫頻程或音程，簡寫 Oct(octave，頻程)，1 個頻程 (八度音)。

人耳聽覺頻率範圍 20 ～ 20,000Hz 中，要對每一頻率量測，數量太多無法實施，只能將該範圍區分成若干頻帶來測定，頻帶之區分符合下列關係，稱之爲八音幅頻帶，八字乃是取其「多」的意思，並非實際只有八個。八音頻再細分之程度常用者有 1/1，1/2 及 1/3 八音頻，其中 1/1 及 1/3 八音頻較爲普遍應用。

例如 20 Hz 到 40 Hz 就是一個頻程，20 Hz 到 80 Hz 就有兩個頻程，就用

大家常用的1/3 Oct 來說明。1/3 Oct，1/3 之意就是把一個頻程分成3等份，例如 20 Hz 與 40 Hz 之間等於必須有兩段頻率來區分這3等份，20 ～ 25Hz、25 ～ 31.5Hz、31.5 ～ 40Hz。

在劃分頻程時，使每一個頻率段的下限頻率 f_1 與上限頻率 f_2 的比值爲確定的常數：

$$\frac{f_2}{f_1} = 2^n \tag{1-62}$$

式中：

n：正實數。

這樣劃分出來的頻率段稱之爲 n 倍頻程，較爲常用的是取 $n=1$ (倍頻程) 及 $n=1/3$ (1/3 倍頻程)。

各倍頻程的中心頻率是指上、下限頻率的幾何平均值，即：

$$f_c = \sqrt{f_1 f_2} \tag{1-63}$$

由 (1-62) 式及 (1-63) 式可以得到上、下限頻率與中心頻率的關係，即：

$$f_2 = 2^{n/2} f_c \tag{1-64}$$

$$f_1 = 2^{-n/2} f_c \tag{1-65}$$

倍頻程和1/3 倍頻程的上、下限頻率值和中心頻率值列於表 1.2-3。

1.2.5 聲像

當音波頻率較高，傳播途徑中遇到的物體的幾何尺寸相對音波波長大很多時，常可暫時拋開音波的波動特性，直接用音線來討論音傳播問題，這與幾何光學中用光線來處理問題十分相似。如圖 1.2-4 所示，一個點音源 S' 位於一個相當大的牆面附近，在空間 R 點的總音壓爲兩者的相加。若將牆面看成無限大的剛性壁面，對入射音波做完全的剛性反射。反射波就可看成從一個虛音源 S' 發出的。剛性壁面的作用等效於產生一個虛音源，好像光線在鏡面的反射一樣，稱爲鏡像原理。虛音源 S' 稱爲音源 S 的聲像。在 R 點接收到的音波可由點音源 S 發出的球面波和虛音源 S' 發出的球面波之和求得。

表 1.2-3 倍頻程和 1/3 倍頻程

頻率 (Hz)					
倍頻程			1/3 倍頻程		
下限頻率	中心頻率	上限頻率	下限頻率	中心頻率	上限頻率
11	16	22	14.1	16	17.8
			17.8	20	22.4
			22.4	25	28.2
22	31.5	44	28.2	31.5	35.5
			35.5	40	44.7
			44.7	50	56.2
44	63	88	56.2	63	70.8
			70.8	80	89.1
			89.1	100	112
88	125	177	112	125	141
			141	160	178
			178	200	224
177	250	355	224	250	282
			282	315	355
			355	400	447
355	500	710	447	500	562
			562	630	708
			708	800	891
710	1,000	1,420	891	1,000	1,122
			1,122	1,250	1,413
			1,413	1,600	1,778
1,420	2,000	2,840	1,778	2,000	2,239
			2,239	2,500	2,818
			2,818	3,150	3,548
2,840	4,000	5,680	3,548	4,000	4,467
			4,467	5,000	5,623
			5,623	6,300	7,079
5,680	8,000	11,360	7,079	8,000	8,913
			8,913	10,000	11,220
			11,220	12,600	14,130
11,360	16,000	22,720	14,130	16,000	17,780
			17,780	20,000	22,390

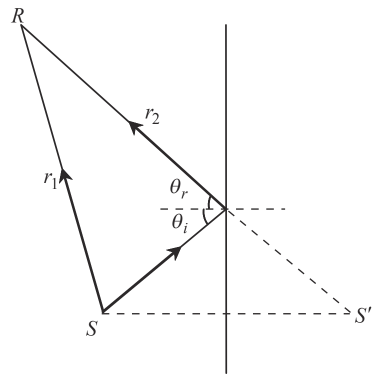


圖 1.2-4 聲像

1.2.6 響度

聲音的強弱稱爲「響度」，通常以「方」(phon) 來表示響度的大小，圖 1.2-5 爲等響曲線 (acoustics-normal equal-loudness-level contours ISO 226:2003)。

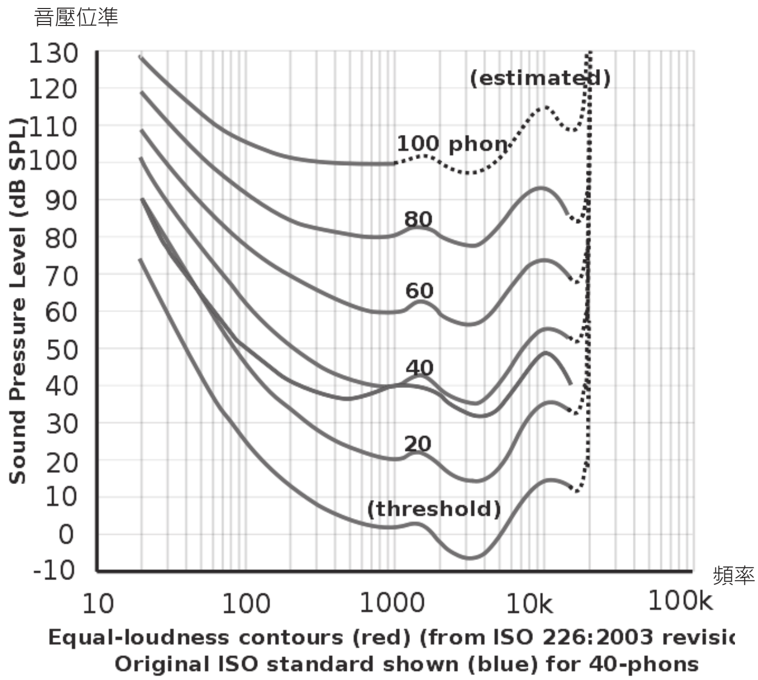


圖 1.2-5 ISO 226 等響曲線

我們從圖 1.2-5 等響曲線中可以看出，相同噪音量的聲音，因頻率不同，人們在聽覺上會感到不同響度，噪音量較低的不同頻率的聲音，它們的響度級相差較大，而較高噪音量的不同頻率的聲音的響度相差會小些，因此人們就需要既能客觀地測量，如噪音量的測量，而又能反映主觀響度感覺的方法來度量和評估實際的聲音強弱，這種方法的探索最初是對電話通訊系統有關響度評估的研究中進行的，音強時，各種頻率的感受性相近，但音弱時，最高或最低頻音都不易聽見。等響曲線中橫座標爲各純音的頻率，縱座標爲達到各響度水準所需的音壓 (分貝)，每一條曲線代表一個響度位準，如標有 40 方 (phon) 的曲線上各點所代表的聲音響度是相同的，它們的響度位準都是 40 方 (phon)，在頻率 1,000 Hz 時，方 (phon) 值等於分貝 (dB) 值。人類的聽音特性曲線，是反映人們對聲音振幅範圍心理因素的曲線，每條曲線上對應於不同頻率的音量是不相同的，但人耳感覺到的回應卻是一樣，因此稱爲等響曲線，人對 1,000 Hz ～ 4,000 Hz 之間聲音最爲敏感。聲波振幅越大則響度越大，響度 (loudness) 隨聲音強度呈線性增加 (圖 1.2-6)，用力敲打音叉，音叉兩股振動幅度越大，便可產生較大振幅的聲波。反之小力敲打則聲波振幅小。響度大小可用「噪音計」測得分貝值。振幅大小之比較可由「示波器」之螢幕直接觀察。表 1.2-4 列出環境中振幅與分貝關係表。

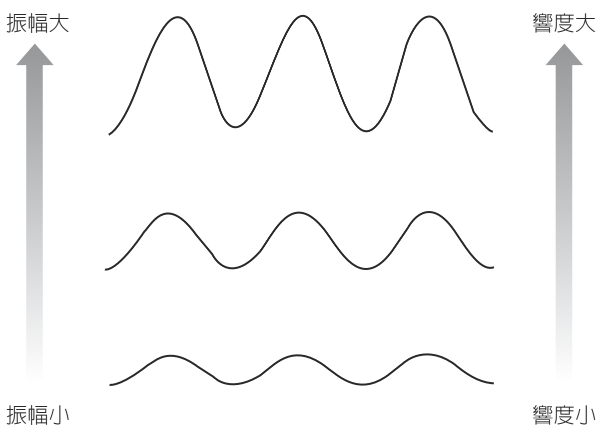


圖 *1.2-6* 振幅與響度關係示意圖

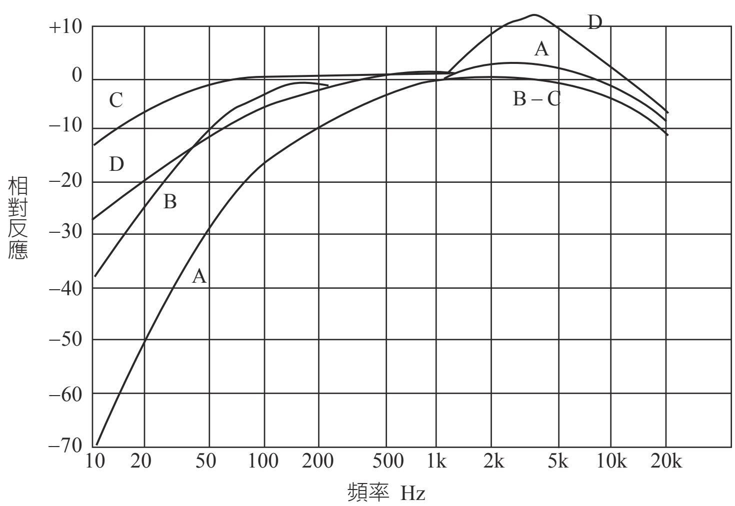
表 1.2-4　環境中振幅與分貝關係表

聲音類型	相對振幅	分貝 (dB)
最小聽力 (Threshold)	1	0
樹葉擾動聲	10	20
安靜住宅區	100	40
一般說話聲	1,000	60
高速鐵路	100,000	100
螺旋槳飛機起飛	1,000,000	120
噴射機飛機起飛 (Pain Threshold)	10,000,000	140
太空梭 (火箭) 起飛	100,000,000	160

1.2.7　加權與修正

一 加權

研究指出，按照等響曲線的特點，把高、中、低不同響度級的聲音，分別予以不同的頻率加權 (weighting)，使測得的噪音量分貝值與人們響度級感覺上有一定的關聯。研究提出了三種頻率加權方式，即 A、B 與 C 加權曲線，如圖 1.2-7 所示，對於較輕聲音，以 40 方 (phon) 等響曲線為基礎，經規整後倒置成為圖 1.2-7 中的 A 加權曲線。



A：A特性曲線　　C：C特性曲線
B：B特性曲線　　D：D特性曲線

圖 1.2-7　幾種頻率加權特性

經過 A 加權後測得的分貝數稱爲 A 加權噪音量，符號用 ，單位也爲分貝，也可記爲 dB(A)。對於中等響度級的聲音，以70 方等響曲線爲基礎，爲 B 加權曲線；對於較高響度的聲音，以100 方爲基礎，爲 C 加權曲線。D 加 權曲線主要用於航空噪音的評估與測量。當然，如果不用頻率加權測得的分貝值，或者說用線性響應測得的分貝值，直接就是通常的噪音量。

然而，由於對於不同響度的聲音使用不同的加權，在實際中使用的很不方便，甚至還會引起矛盾與爭議。經長期使用表明，對於時間上連續，頻譜比較均勻，無顯著純音成分的寬帶噪音用 A 加權曲線得到 A 加權音量能夠比較好地反映響度感覺。因此爲了簡化度量方法，目前 A 加權曲線已爲國際普遍接受作爲各種噪音評估量的基礎，即對絕大部分情況對噪音強度的評估都以採用 A 加權音量來進行。

二 加權修正

爲了與噪音響度感覺評估接近，國際上曾提出各種校正曲線，而目前已經普遍採用了 A 加權曲線。使用了 A 加權曲線後的噪音噪音量稱爲 A 加權噪音值 (加權音量)。那麼現在就要來討論，如果我們已知某一種噪音的頻譜，如何來計算其對應的 A 加權噪音值頻譜以及如何算出其他的加權噪音值呢？表 1.2-5 列出了頻率加權修正換算表。

1.2.8　白色及粉紅色噪音

一 白色噪音

具連續性頻譜之噪音，每單位頻寬有相同之功率。八音頻中下一頻帶寬度爲上一頻帶寬度的兩倍，噪音測定顯示八音頻中各頻帶之音壓位準有3 dB 漸增之情形者，可判斷該噪音爲白色噪音。

二 粉紅色噪音

具連續性頻譜之噪音，八音頻中各頻帶有相同之功率，亦即顯示各頻帶每單位頻寬之音壓位準有3 dB 漸減之情形者，可判斷該噪音爲粉紅色噪音。

表 1.2-5 頻率加權修正換算表

中心頻率 (Hz)	A 加權	B 加權	C 加權	D 加權	中心頻率 (Hz)	A 加權	B 加權	C 加權	D 加權
0.5	−172.6	−114.4	−64.5	−52.6	250	−8.6	−1.3	0	−1.6
0.63	−164.6	−108.4	−60.5	−50.6	315	−6.6	−0.8	0	−0.8
08	−156.6	−102.4	−56.5	−48.6	400	−4.8	−0.5	0	−0.4
1	−148.6	−96.4	−52.5	−46.6	500	−3.2	−0.3	0	−0.3
1.25	−140.6	−90.4	−48.5	−44.6	630	−1.9	−0.1	0	−0.5
1.6	−132.6	−84.4	−44.5	−42.6	800	−0.8	0	0	−0.6
2	−124.6	−78.5	−40.6	−40.0	1,000	0	0	0	0
2.5	−118.7	−72.5	−36.6	−38.6	1,250	0.6	0	0	2.0
3.15	−108.8	−66.6	−32.7	−36.6	1,600	1.0	0	−0.1	4.9
4	−100.9	−60.7	−28.8	−34.6	2,000	1.2	−0.1	−0.2	7.9
5	−93.1	−54.9	−25.0	−32.6	2,500	1.3	−0.2	−0.3	10.4
6.3	−85.4	−49.2	−21.3	−30.6	3,150	1.2	−0.4	−0.5	11.6
8	−77.8	−43.6	−17.7	−28.6	4,000	1.0	−0.7	−0.8	11.1
10	−70.4	−38.2	−14.3	−26.6	5,000	0.5	−1.2	−1.3	9.6
12.5	−63.4	−33.2	−11.2	−24.6	6,300	−0.1	−1.9	−2.0	7.6
16	−56.7	−28.5	−8.5	−22.6	8,000	−1.1	−2.9	−3.0	5.5
20	−50.5	−24.2	−6.2	−20.6	10,000	−2.5	−4.3	−4.4	3.4
25	−44.7	−20.4	−4.4	−18.7	12,500	−4.3	−6.1	−6.2	1.4
31.5	−39.4	−17.1	−3.0	−16.7	16,000	−6.6	−8.4	−8.5	−0.7
40	−34.6	−14.2	−2.0	−14.7	20,000	−9.3	−11.1	−11.2	−2.7
50	−30.2	−11.6	−1.3	−12.8	25,000	−12.4	−14.2	−14.3	−4.7
63	−26.2	−9.3	−0.8	−10.9	31,500	−15.8	−17.6	−17.7	−6.7
80	−22.5	−7.4	−0.5	−9.0	40,000	−19.3	−21.2	−21.3	−8.8
100	−19.1	−5.6	−0.3	−7.2	50,000	−23.0	−24.9	−25.0	−10.8
125	−16.1	−4.2	−0.2	−5.5	63,000	−28.9	−28.7	−28.8	−12.8
160	−13.4	−3.0	−0.1	−4.0	80,000	−30.7	−32.6	−32.7	−14.8
200	−10.9	−2.0	0	−2.6	100,000	−34.7	−36.5	−36.6	−16.8

1.3 室內音傳播

1.3.1 室內統計聲學

假設把封閉空間中音源發出的音波分成無限多條平面音束，各音束向四周傳播開去。音束在碰到壁面以前是沿直線行進的可用音線來表示，當它碰

到壁面後就反射(並有部分音能被壁面吸收)，反射角等於入射角。然後在新的方向繼續前進，直至碰到另一壁面再進行反射，如此地繼續下去，如圖 1.3-1 所示。由於音線以音速前進，在一秒鐘內每一條音線就可能遇到很多次的反射。而音線又有無限多條，並且它們的出射方向各不相同，再假設壁面也呈不規則狀，那麼音線就在室內到處亂竄，並不斷地迅速地改變其行進方向。結果使室內音的傳播完全處於無規律狀態，以致於從統計觀點來說可以認爲音通過任何位置的幾率是相同的，並且通過的方向也是各方向幾率相同的，在同一位置各音線相遇的相位是無規律的，由此而造成室內音場的平均能量密度分佈是均勻的。

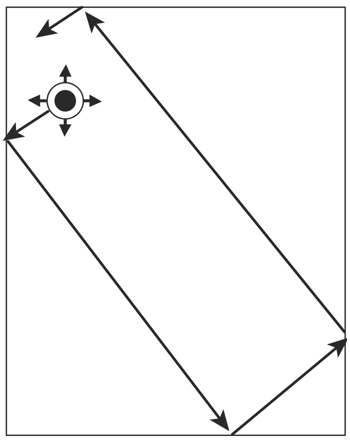


圖 1.3-1　室內音傳播示意圖

這一種統計平均的均勻音場稱爲擴散音場，其定義爲：

1. 聲以音線方式以音速直線傳播，音線所攜帶的音能向各方向傳遞的幾率相等；
2. 各音線是互不相干的，音線在相加時，它們的相位變化是無規律的；
3. 室內平均音能密度處處相等。

爲便於分析研究，通常把室內的聲音分成兩部分：從音源直接到達受音點的聲音叫直達音(或直接音)；而經過室內壁面一次或多次反射後到達受音點的反射音，聽起來好像是直達音的延續叫做餘響音 (reverberant sound)。這裡要注意，如果到達聽者的直達音與第一次反射音之間，或者相繼到達的兩個反射音之間在時間上相差 50 毫秒以上，而反射音的強度又足夠大，使聽者能明顯分辨出兩個聲音的存在，那麼這種延遲的反射音叫做回音。回音與餘響

是不同的概念，回音的存在將嚴重破壞室內的聽音效果，一般應力求排除，而一定的餘響音卻是有益的。

一、直達音場

設室內存在音功率爲 W（相應的音功率級爲 L_w）的點音源，則在距離點音源 r 遠處，直達音的音強 I_d、音壓 p_d、音能密度 D_d 及音量 L_{pd} 分別爲：

$$I_d = \frac{QW}{4\pi r^2} \tag{1-66}$$

$$p_d = \sqrt{\frac{\rho_0 c_0 QW}{4\pi r^2}} \tag{1-67}$$

$$D_d = \frac{QW}{4\pi r^2 c_0} \tag{1-68}$$

$$L_{pd} = L_w + 10\log_{10}\left(\frac{Q}{4\pi r^2}\right) \tag{1-69}$$

式中：

Q：指向性因素。

當點音源置於自由場空間時，Q 爲1。

當點音源置於無窮大剛性平面上時，點音源發出的全部能量只向半自由場空間輻射，因此同樣距離處的音強將爲無限自由空間情況的兩倍，Q 爲2。

當音源放置在兩個剛性平面的交線上時，全部音能只能向四分之一空間輻射，Q 爲4。

當點音源置於三個剛性反射面的交角上時，Q 爲8。

二、餘響音場

假設討論的餘響音場爲理想的擴散音場。用統計的方法可算出音線在壁面上兩次反射之間的平均距離，即平均自由程爲：

$$\bar{L} = \frac{4V}{S} \tag{1-70}$$

式中：

V：表示房間的體積，

S：表示房間內的表面積。

當音波入射到壁面上時，若壁面非剛性，則一部分入射音能將被壁面吸收，被壁面所吸收的能量與入射能量的比值稱爲壁面的吸音係數 α_i。設對應於某吸音表面 S_i 的吸音係數爲 α_i，則室內平均吸音係數爲：

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_i \alpha_i S_i + \sum_j \alpha_j S}{S} \tag{1-71}$$

式中：

$S = \sum_i S_i$ 爲室內壁面總面積，

$\alpha_j S$：室內其他物體的吸音量，即吸音能力。

當單位時間內音源貢獻的餘響音能與被吸收掉的餘響音能相等時，達到穩態，此時室內的餘響音能密度爲：

$$D_r = \frac{4W}{c_0 R} \tag{1-72}$$

式中：

$R = \dfrac{S\bar{\alpha}}{(1-\bar{\alpha})}$ 爲房間常數。

於是餘響音場的音壓及音量分別爲：

$$p_r = \sqrt{\frac{4\rho_0 c_0 W}{R}} \tag{1-73}$$

$$L_{pr} = L_w + 10\log_{10}\left(\frac{4}{R}\right) \tag{1-74}$$

三 總音場

總音場即爲直達音場與餘響音場的相加，因此總音場的音量爲：

$$L_p = L_w + 10\log_{10}\left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R}\right) \tag{1-75}$$

由此式可知，當音源的音功率級確定之後，房間內的音量跟受音點與音源的距離 r 及房間常數 R 有關。當受音點離音源很遠時，$\dfrac{Q}{4\pi r^2} \ll \dfrac{4}{R}$，室內音場以餘響音爲主，直達音可忽略，且此時音量與距離幾乎無關；當受音點離音

源很近時，$\frac{Q}{4\pi r^2} \gg \frac{4}{R}$，室內音場以直達音爲主，餘響音可忽略；當 $\frac{Q}{4\pi r^2} = \frac{4}{R}$ 時，餘響音與直達音相等，這時候的距離稱爲臨界半徑 r_c，即：

$$r_c = \frac{1}{4}\sqrt{\frac{QR}{\pi}} \tag{1-76}$$

由此式可以看出，當房間的壁面爲全反射時 (即 $\bar{\alpha}=0$)，房間常數 R 也爲 0，房間內音場主要爲餘響音場；當 $\bar{\alpha}=1$ 時，房間常數 R 爲無窮大，房間內只有直達音，爲自由音場。對於一般的房間，總是介於上述兩種情況之間，房間常數大致在幾十到幾千平方公尺之間。

(一) 室內音場以直接音爲主，$\bar{\alpha}\to 1$，$R=\frac{s\bar{\alpha}}{1-\bar{\alpha}}$，$R\to\infty$

$$R=\frac{s\bar{\alpha}}{1-\bar{\alpha}}=\infty\,,\quad \frac{4}{R}\to 0$$

$$\Rightarrow\ L_p = L_w + 10\log\frac{Q}{4\pi r^2}$$

(二) 室內音場以反射音爲主，$\bar{\alpha}\to 0$

$$\Rightarrow\ L_p = L_w + 10\log\frac{4}{R}\,,\quad R=\frac{s\bar{\alpha}}{1-\bar{\alpha}} \doteqdot s\bar{\alpha} \simeq A$$

又

$$T = 0.161(v/s\bar{\alpha}) = 0.161(V/R),\quad R = 0.161(V/T)$$

$$\Rightarrow\ L_p = L_w + 10\log\left(\frac{4T}{0.161V}\right)$$

$$\Rightarrow\ L_p = L_w + 10\log T - 10\log V + 14$$

室內體積增加 1 倍時，L_p 下降 3dB，
殘響時間減半時，L_p 下降 3dB。

四 餘響時間

當音源開啓約 1 ～ 2 秒後，室內音場便接近於穩態。之後，若在某一瞬間音源突然停止，室內的音能並不立即消失。首先是直達音消失，餘響音將繼續。每反射一次，音能被吸收一部分，如此反覆，直到音能完全消失。在聲學中常用餘響時間 T_{60} 來描述室內聲音衰減快慢的程度，其定義爲：在擴散音場中，當音源停止後從初始的音量降低 60 dB (相當於平均音能密度降爲 $1/10^6$)

所需的時間。美國聲學家 Sabine 通過許多的實驗，首先得出餘響時間 T_{60} 的計算公式 (即 Sabine 公式)：

$$T_{60} \approx \frac{0.161V}{S\overline{\alpha}} \quad \textbf{(1-77)}$$

Sabine 公式僅當平均吸音係數 $\overline{\alpha} < 0.2$ 時，計算結果才較為準確。如果考慮到空氣對音能的吸收後，可以導出餘響時間 T_{60} 的理論公式為：

$$T_{60} = 55.2\frac{V}{-Sc_0 \ln(1-\overline{\alpha}) + 4mVc_0} \quad \textbf{(1-78)}$$

式中：

m：表示空氣的音強吸收係數。

當 $\overline{\alpha} < 0.2$ 時，並取 $c_0 = 344$ m/s，則 T_{60} 可近似取為：

$$T_{60} \approx 0.161\frac{V}{S\overline{\alpha} + 4mV} \quad \textbf{(1-79)}$$

這就是修正後的 Sabine 公式。上式中的音強吸收係數 m 不僅與介質的性質及狀態有關，而且還是音波頻率的函數。一般頻率越高則音強吸收係數增加得越快，它在修正 Sabine 公式中的貢獻越大。

1.3.2 室內波動聲學

對於室內聲學問題，從理論上來講我們可以從音波方程式出發，配合一定的邊界條件及初始條件來處理。但實際上當室內空間不規則時，求解波動方程式變得很困難。因此用波動聲學的方法僅限於討論形狀比較規則的有界空間，如長方體、球體、圓柱體等。

波動聲學將房間看成複雜的多自由度振動系統，而任一振動狀態都可看成是由許多獨立的單頻振動組合相加而成。每一個這樣的獨立單頻振動叫簡正振動 (normal vibration)，每個簡正振動的頻率叫做簡正頻率 (normal frequencies)。在連續介質中，簡正振動實際上就是一種駐波，稱之為簡正波。

在用波動方法討論室內聲學問題時，需要知道邊界條件和初始條件。常見的有三類邊界條件：

1. 第一類邊界條件是理想的絕對軟邊界，即在介面上音壓為 0，如水面和大氣的邊界。

2. 第二類邊界條件是理想的絕對硬邊界，即在介面上質點法向振速或位移為0，如堅硬的牆及地面。

3. 阻抗邊界條件，即在介面上滿足一定的阻抗率值：

$$\left.\frac{p}{u_n}\right|_S = Z_s \tag{1-80}$$

這稱為第三類邊界條件。

一 室內駐波

為了討論的方便，僅以長方體房間為例。以房間的一個角作為座標原點，建立直角座標系，如圖 1.3-2 所示。

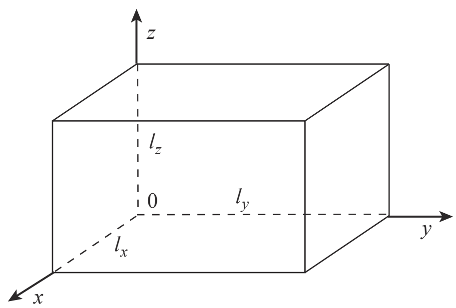


圖 1.3-2 長方體房間示意圖

設房間的長、寬、高分別為 l_x、l_y、l_z，並假定房間的內壁是剛性的，即滿足第二類邊界條件。則波動方程式及邊界條件分別為：

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 p}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 p}{\partial z^2}=\frac{1}{c_0^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \tag{1-81}$$

$$\begin{cases} u_x\big|_{x=0,\ x=lx}=0 \\ u_y\big|_{y=0,\ y=ly}=0 \\ u_z\big|_{z=0,\ z=lz}=0 \end{cases} \tag{1-82}$$

式中：

u_x、u_y、u_z 分別表示介質質點速度在 x、y、z 方向的分量。

滿足上述邊界條件的解為：

$$p_n = A_{n_x n_y n_z} \cos k_x x \cos k_y y \cos k_z z e^{j\omega_n t} \tag{1-83}$$

式中：

$k_x = \dfrac{\omega_x}{c_0} = \dfrac{n_x \pi}{l_x}$，

$k_y = \dfrac{\omega_y}{c_0} = \dfrac{n_y \pi}{l_y}$，

$k_z = \dfrac{\omega_z}{c_0} = \dfrac{n_z \pi}{l_z}$，

$k_n^2 = \left(\dfrac{\omega_n}{c_0}\right) = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$，

$\omega_n^2 = \omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2$ 。

或表示成：

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \sqrt{f_x^2 + f_y^2 + f_z^2} = \frac{c_0}{2}\sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \tag{1-84}$$

再設 $k_x = k_n \cos\alpha$，$k_y = k_n \cos\beta$，$k_z = k_n \cos\gamma$，則 (1-83) 式對應的每一組 (n_x, n_y, n_z) 數值的特解就是傳播方向由方向餘弦 $(\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma)$ 決定的一種平面駐波。方程式 1-81 的一般解應是所有特解的線性相加，因而室內總音壓可表示爲：

$$p = \sum_{n_z=0}^{\infty}\sum_{n_y=0}^{\infty}\sum_{n_x=0}^{\infty} A_{n_x n_y n_z} \cos\frac{n_x\pi}{l_x} x \cos\frac{n_y\pi}{l_y} y \cos\frac{n_z\pi}{l_z} z\, e^{j\omega_n t} \tag{1-85}$$

此式表明，長方體房間內可存在許多的簡正波模式。

由 (1-83) 式及 (1-84) 式可知，室內可能存在的簡正波有三大類：軸向波，兩個 n 等於零對應的駐波模式；切向波，一個 n 等於零對應的駐波模式；斜向波，三個 n 都不等於零對應的駐波模式。在長方體房間內頻率低於 f 的各類簡正波的平均總數爲：

$$N = \frac{4\pi f^3 V}{3c_0^3} + \frac{\pi f^2 S}{4c_0^2} + \frac{fL}{8c_0} \tag{1-86}$$

式中：

$V = l_x l_y l_z$ 表示長方體房間的體積，

$S=2(l_xl_y+l_yl_z+l_xl_z)$ 表示房間的內壁面總面積，

$L=4(l_x+l_y+l_z)$ 表示房間的各邊總長。

(1-86) 式表示各類簡正波的平均數，它同準確數之間自然有偏差。但除非房間的尺寸非常對稱，這種偏差是不大的。例如，有一個 $l_x=3$ m，$l_y=4.5$ m，$l_z=6$ m 的長方體房間(注意此時有 $l_z=2l_x$)，若用 (1-84) 式來算低於 100 Hz 以下的簡正頻率數，可得 $N=18$，這些簡正頻率依次列於表 1.3-1 中。利用 (1-86) 式則可算得 N 也等於 18。但在這 18 個簡正波中 (1, 0, 0) 與 (0, 0, 2) 次的簡正頻率都是 57.2 Hz，(0, 1, 2) 與 (1, 1, 0) 次都是 68.6 Hz，(0, 2, 2) 與 (1, 2, 0) 次都是 95.1 Hz，因此實際上簡正頻率總共只有 16 個，這是因爲 $l_z=2l_x$ 的對稱性引起的簡正頻率「簡並化」，即不同的簡正波具有相同的簡正頻率。

表 1.3-1　長方體房間內的簡正頻率數

簡正波 (n_x, n_y, n_z)	頻率 (Hz)	簡正波 (n_x, n_y, n_z)	頻率 (Hz)
0, 0, 1	28.6	0, 2, 0	76.1
0, 1, 0	38.0	1, 0, 2	80.5
0, 1, 1	47.7	0, 2, 1	81.6
1, 0, 0	57.2	0, 0, 3	85.8
0, 0, 2	57.2	1, 1, 2	89.4
1, 0,1	63.9	0, 1, 3	93.7
0, 1, 2	68.6	0, 2, 2	95.1
1, 1, 0	68.6	1, 2, 0	95.1
1, 1, 1	74.3	1, 2, 1	99.2

當房間非常對稱時，例如 l_x、l_y、l_z 都成整數比，那麼簡並化情況更爲嚴重，這樣由 (1-86) 式算出的簡正頻率數與實際的結果就有很大的出入。由於簡並化現象，很可能在某一頻帶範圍內沒有簡正頻率，而在另一頻帶範圍內卻有較多的簡正頻率，造成簡正頻率分佈的不均勻。這裡的簡正頻率就是房間做自由振動的固有頻率，因此當房間中音源的激發頻率與房間中某一固有頻率一致時，房間就產生共振。因此簡正頻率分佈密集均勻就表示房間的傳輸頻率特性均勻，否則就表示頻率特性的不均勻。

將 (1-86) 式對頻率進行微分，從而可得到在 df 頻率範圍內的簡正頻率總數爲：

$$dN=\left(\frac{4\pi f^2 V}{c_0^3}+\frac{\pi fS}{2c_0^2}+\frac{L}{8c_0}\right)df \tag{1-87}$$

此式表明，在頻率 f 附近的 df 頻帶內的簡正頻率數基本上與頻率的平方成正比。如在前面的例子中，當 $f=100$ Hz、$df=10$ Hz 時，可得 $dN=4$；而當 $f=1{,}000$ Hz、$df=10$ Hz 時，可得 $dN=268$。大量駐波模式的相加，反而可以把駐波效應「平均」掉，從而使得室內音場趨向均勻。這一結果說明，從波動聲學觀點來看，在一定條件下，可將室內音場看成是擴散音場。

由 (1-87) 式可看出，如果音源發出具有一定頻帶寬度的音波，並且其中心頻率比較高，房間的體積比較大，或者說與中心頻率對應的音波波長比房間的平均線度小很多 (即該頻帶內包含的房間固有頻率較多)，那麼房間內激起的簡正波數就較多，室內音場就較均勻，擴散音場條件就更易滿足。更進一步的分析表明，音源放在端角上將比放在其他地方能激起更多的駐波方式，因此把音源放在端角上也有利於產生擴散音場，特別在低頻時，另統計聲學中的擴散音場實際上就是波動聲學中大房間駐波音場的高頻近似。

二 室內駐波的衰減

在前面的討論中曾假設壁面都是剛性的，因而室內音波是不衰減的，這相當於房間的無阻尼自由振動情況。然而壁面不可能完全剛性，它多少具有阻尼性質，其法向音阻抗率 (音場中某位置處的法向音阻抗率定義為該位置處的音壓與質點振速法向分量之比) 一般為複數。這時音波入射到壁面上時，除了產生反射波以外，還有部分入射音波被壁面所吸收，轉化為內能。以 x 軸向波為例，當僅 x 方向兩壁面存在阻尼時，其音壓可表示為：

$$p=A\cosh\left[(\delta-j\omega)\frac{x}{c_0}+\varphi_x\right]e^{(j\omega-\delta)t} \tag{1-88}$$

式中：

δ：表示衰減係數。

當 $x_n \gg y_n$ 及 $x_n \gg 1$ (即壁面吸音較小) 時，音壓衰減係數與壁面的法向音阻抗率成反比，即：

$$\delta \approx \frac{2c_0}{x_n l_x} \tag{1-89}$$

式中：

$x_n = \dfrac{R_n}{\rho_0 c_0}$ 及 $y_n = \dfrac{X_n}{\rho_0 c_0}$：表示法向音阻率比與法向音抗率比，

$Z_n = R_n + jX_n$：表示壁面的法向音阻抗率。

當 $x_n \gg y_n$ 及 $x_n \gg 1$ (即壁面吸音較小) 時，擴散音場吸音係數與壁面法向音阻抗率之間有如下關係：

$$\alpha_i \approx \frac{8}{x_n} \tag{1-90}$$

室內各類音波的餘響時間爲：

$$T_{60} = \frac{0.161V}{\alpha_x S_x + \alpha_y S_y + \alpha_z S_z} = \frac{0.161V}{\sum_i \alpha_i S_i} \tag{1-91}$$

式中：

V：表示房間的體積，

S_i 及 α_i：分別爲 i 方向壁面的面積及擴散音場吸音係數，

$\alpha_i S_i$：表示該壁面的總吸音量。

由此式可知，不同類型的駐波餘響時間是各不相同的。如假設各壁面的吸音量 $\alpha_i S_i$ 都相同，那麼斜向波的餘響時間最短，其次是切向波，軸向波最長。由於不同類型的駐波衰減時間不同，從室內記錄下來的餘響時間就不會是一條平滑的曲線，而呈三折狀：第一段與斜向波對應，衰減速度最快；中間一段與切向波對應，衰減速率次之；最後一段與軸向波對應，衰減速率最慢，室內音場衰減的不均勻性，從統計聲學看來是室內音場擴散程度不夠的表現，要使室內音場擴散得好，那應該盡量使房間呈不規則狀，並且在室內放置各種散射體，同時使用寬頻帶音源並放置在角落裡以激發更多的駐波方式，這樣各種類型的波在衰減過程中的無規律性增加，從而使室內音場在衰減過程中趨向均勻，餘響曲線趨於平滑。

1.4 室外音傳播

音波的戶外傳播中，幾乎所有的音波傳播情形都能碰得到，例如反射 (reflection)、折射 (refraction) 和繞射 (diffraction) 等現象。

所謂的「繞射」是波的一種特性，若在波 (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。

音波在戶外傳播時，聲音強度會隨傳播距離的增加而衰減 (attenuation)，其主要原因有音波波陣面的擴大而導致的能量的擴散，大氣對音波的吸收，傳播途徑中地面或綠化帶對音波產生的衰減，以及風速、溫度等氣象條件，都會對音傳播造成影響。

在室外隨著傳播距離的增加，由於能量分散開來，音量不斷下降，理論上，對於點音源，離音源距離增加每兩倍，音量下降 6 dB。另一方面，大氣對聲音也有吸收作用，尤其對超過 2,000 Hz 的高頻聲音，吸收效應更加明顯，使音量隨與音源距離的增加衰減量變得更大。

常溫常壓下，100 m 距離對 125 Hz、500 Hz、2,000 Hz 的聲音衰減量分別約爲 0.05 dB、0.25 dB、2.5 dB。閃電產生時的聲音是含有大量高頻成分的霹靂聲，由於距離很遠，大多高頻成分被大氣吸收了，因此傳到我們耳朵裡往往是隆隆的低頻聲。在室外，聲音有繞過障礙物的本領，被稱爲聲音的繞射或衍射，這是聲音波動現象的表現。草地、灌木林等對聲音的傳播也有衰減作用，但對高頻的作用較明顯，對低頻的作用有限，100 m 的草地、灌木林對 1,000 Hz 的聲音約有 20 dB 的衰減，而對 100 Hz 的聲音約僅有 5 dB 的衰減。100 m 以上的長綠闊葉草地或灌木林在實際降噪中才有效果，但也等於距離減掉了。

在戶外音傳播中，單個噪音源 (音功率級爲 L_w) 通過某個路徑在音接受點產生的音量 爲：

$$L_p = L_w - K + DI_M - A_E \tag{1-92}$$

式中：

K：幾何衰減，

DI_M：指向性因數，

A_E：其他附加衰減。

將此音源通過各條路徑在音接受點產生的音壓按相加原理 (噪音合成) 進行相加便得到該音源在此音接受點產生的總音壓 (噪音值)，再將周圍環境中各個噪音源在音接受點處產生的總音壓進行相加就得到該音接受點處的總噪音值。

1.4.1 幾何衰減

當音源很小，其尺寸比輻射音波的波長小很多時，可以看成是點音源。點音源在各向同性介質中輻射音波時，音波向各個方向傳播，其波陣面是球面，並隨著距離的增加而不斷擴散。球面波的音強與到音源的距離 r 成反比，因此點音源的幾何發射衰減 K 爲：

$$K = 20\log_{10} r + 10\log_{10} 4\pi \tag{1-93}$$

例如公路上一長串的汽車，或火車、高速鐵路、捷運系統等可以看成是線音源，有限長之線音源的幾何發射衰減 K 爲：

$$K = 10\log_{10}\frac{4\pi rD}{\alpha} \tag{1-94}$$

式中：

D：音源的長度，

α：線音源對音接受點的夾角。

1.4.2 指向性因數

指向性因數 DI_M 描述音傳播的指向性。它包括音源自身的指向性，周圍環境中的各種反射物引起的指向性等，但是不包括由地面效應引起的指向性。以反射物引起的指向性爲例，當音源離反射面的距離小於十分之一波長，且音源輻射的音功率恆定時，對於遠場的受音點而言：無反射面時，$DI_M = 0$ dB；有 1 個反射面時，$DI_M = 3$ dB；有 2 個反射面時，$DI_M = 6$ dB；有 3 個反射面時，$DI_M = 9$ dB。

1.4.3 隔音牆衰減

當音源與接收點之間存在有隔音牆時會產生顯著的附加衰減，隔音牆可以是「牆」或「板」，也可以是道路兩旁的建築物或低凹路面兩側的路堤等。音波遇到隔音牆時會產生反射、透射和繞射三種傳播現象。主要作用就是阻止直達音的傳播，隔絕透射音，並使繞射音有足夠的衰減。隔音牆的附加衰減與音源及接收點相對隔音牆的位置、隔音牆的高度及結構，以及音波的頻率密切相關。一般而言，隔音牆越高、音源及接收點離隔音牆越近、音波頻率越高，衰減越大。

1.4.4 氣象條件的影響

雨、雪、霧等對音波的散射會引起音能的衰減。但這種因素引起的衰減量很小，大約每 1,000 m 衰減不到 0.5 dB，因此可以忽略不計。氣象因素 (主要是風速及溫度的垂直梯度) 引起的音速梯度，將導致音波發生折射效應，從而對空氣中的音傳播產生影響。根據音波的折射原理，音波從音速大的介質進入音速小的介質時傳播方向要發生變化，與入射音波的傳播方向相比較，折射音波的傳播方向將更靠攏法線方向；反之，音波從音速小的介質進入音速大的介質時，折射音波的傳播方向將更背離法線方向。

由於地面對空氣運動的摩擦阻尼，風速隨著離開地面高度的增加而增大。因此當音波順風傳播時，相對於地面的音速應相加上風速，使得音速隨高度而增大，從而將使音傳播方向向下彎曲；反之，當音波逆風傳播時，相對於地面的音速應扣除掉風速，使得音速隨高度而減小，從而將使音傳播方向向上彎曲，如圖 1.4-1 所示。

大氣中的音速與絕對溫度的平方根成正比，因此當大氣溫度隨高度增加時 (溫度梯度為正) 音速隨高度增大，從而使音傳播方向向下彎曲。這時，

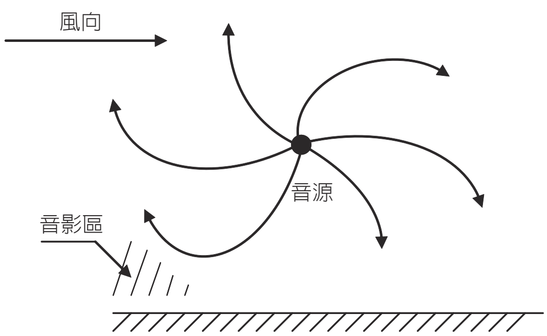


圖 1.4-1 風速對音傳播的影響

地面上音源所發射的聲音，由於集中在地面附近區域，可以傳播到較遠的地方。當大氣溫度隨高度減小時 (溫度梯度為負) 音速隨高度減小，從而使音傳播方向向上彎曲。這時，地面上音源所發射的聲音，將在一定距離外掠過地面從而形成音影區域。

例如在晴天的夜晚，地面由於熱輻射和熱傳導而迅速冷卻，靠近地面的空氣溫度下降，而離地面較高處仍保持較高的溫度，即形成正溫度梯度；而在

晴朗的白天，大氣溫度則隨高度增加而下降，即形成負溫度梯度。因此，地面上音源所輻射的音波在夜晚傳播較遠，而在白天傳播較近。

1.4.5 其他附加衰減

其他的附加衰減 A_E 主要包括由空氣吸收 (air absorption) 引起的衰減 A_a、隔音牆及其他障礙物引起的衰減 A_b、樹林引起的衰減 A_f、地面效應 (包括反射和吸收) 引起的衰減 A_g 及由氣象條件 (風及溫度梯度等) 引起的衰減 A_m，即：

$$A_E = A_a + A_b + A_f + A_g + A_m \tag{1-95}$$

空氣吸收附加衰減 A_a 由兩部分組成：

第一部分爲經典吸收，是由空氣的黏滯性 (viscosity)、熱傳導 (thermal conductivity) 和以及空氣分子鬆弛 (relaxation) 等因素所產生的音能損耗而引起的，它與音波頻率的平方成正比，並且與空氣的氣壓、溫度有關，但與空氣濕度關係不大，除非音波的頻率很高，這種經典吸收一般可以忽略不計。

第二部分叫做分子吸收，主要是由空氣中氧分子 (O_2) 和氮分子 (N_2) 振動所產生的音能損耗而引起的，它與空氣的濕度和溫度有密切關係，也與音波頻率有關，但隨頻率變化的規律較複雜。在噪音控制工程中，可以採用以下的經驗公式來估算空氣吸收衰減。當空氣溫度爲 20°C 時：

$$A_a = 7.4\frac{f^2 d}{\phi}\times 10^{-8}\ (\text{dB}) \tag{1-96}$$

式中：

f：音波的頻率，
d：傳播距離，
ϕ：相對濕度。

對於其他不同的溫度，可用下式估算：

$$A_a(T,\phi) = \frac{A_a(20^\circ\text{C},\phi)}{1+\beta\Delta T f}\ (\text{dB}) \tag{1-97}$$

式中：

A_a：空氣吸收衰減值，
ΔT：表示與 20°C 的溫度差，

$\beta = 4 \times 10^{-6}$，

f：音波的頻率，

ϕ：相對濕度。

表 1.4-1 爲在一個標準大氣壓下，以 dB/1,000m 爲單位時，空氣吸收衰減 A_a 的實驗值。

表 1.4-1　空氣吸收衰減實驗值　　單位：dB/km

相對濕度 %	溫度°C	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
25	15	0.2	0.6	1.3	2.4	5.9	19.3	66.9
	20	0.2	0.6	1.5	2.6	5.4	15.5	53.7
	25	0.2	0.6	1.6	3.1	5.6	13.5	43.6
	30	0.1	0.5	1.7	3.7	6.5	13.0	37.0
50	15	0.1	0.4	1.2	2.4	4.3	10.3	33.2
	20	0.1	0.4	1.2	2.8	5.0	10.0	28.1
	25	0.1	0.3	1.2	3.2	6.2	10.8	25.6
	30	0.1	0.3	1.1	3.4	7.4	12.8	25.4
75	15	0.1	0.3	1.0	2.4	4.5	8.7	23.7
	20	0.1	0.3	0.9	2.7	5.5	9.6	22.0
	25	0.1	0.2	0.9	2.8	6.5	11.5	22.4
	30	0.1	0.2	0.8	2.7	7.4	14.2	24.0

由此表可以看出，當音波頻率不太高 (例如低於 1 kHz)，並且傳播距離也不太大 (例如小於 1 km) 時，空氣吸收引起的衰減一般是可以忽略不計的。同時，由於空氣吸收衰減與頻率的關係很大，頻率越高衰減越快，因此噪音在空氣中傳播較遠距離後，頻譜中的高頻成分衰減較快，而低頻成分衰減不太明顯。樹林引起的附加衰減 A_f 與樹木的種類及樹林的規模有關，如濃密的常綠樹林對 1 kHz 的音波約有 20 dB/100 m 的衰減量，而稀疏的樹林約只有 2、3 dB/100 m，甚至更小的附加衰減。

地面引起的衰減量 A_g 由地面吸收和地面反射效應產生的，如果地面是寬闊平坦的硬地面 (如水泥地面等)，可以把它看成是剛性的反射面，則 $A_g = -3$ dB；如果地面是軟面 (如雪地等)，則 $A_g = 0$ dB。

習 題

一、問答題

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？
9. 唱歌時 Do 音的頻率為 262 Hz，則在溫度 20°C 時，其波長為多少？
10. 若聲波在海水中傳播速度大小為 1,500 公尺 / 秒，當船在海面上用聲納探測海底深度時，聲納自發射到接收聲波共花 3 秒，則此處海底深度為多少公尺？
11. 真空中能否傳播音波？為什麼？
12. 可聽音的頻率範圍為 20 ～ 20,000 Hz，試求出 500 Hz、5,000 Hz、10,000 Hz 的音波波長。

二、計算題

1. 在 25°C 時，頻率為 2,000 Hz 之噪音，其音速及波長為何？
2. 有一音源長 31 m，離其中心點垂直方向 1 m 處之音壓位準為 100 dB，則離中心 2 m、8 m 及 16 m 處分別為若干？
3. 有一面音源其大小為 6.2 m × 25.1 m，假設以其中心點為原點，經過其中心點與面垂直方向距離 1 m 為 100 dB，則距離分別為 5 m 及 40 m 處為多少 dB ？
4. 在距汽車（音源）10 m 處量測聲音壓力位準為 90 dB，試求下列不同音源情況，距下列音源 100 m 處之聲音壓力位準為多少分貝？
   (1) 單一車輛。

(2) 連續不停相同型式之車輛。

5. 在距音源 15 m 處測得音強位準 100 dB，請問在距離音源 30 m 處可測得的音強位準為多少？

6. 工機具距離為 15 m 之噪音位準如下表所示，其施工時間為早上 6 時開始至晚上 10 時停工，試求施工噪音對最近民宅的影響，並提出改善方法。

附表：

機具名稱：	堆土機	挖土機	傾卸卡車	混凝土拌合車	空氣壓縮機	打樁機
數量：	4	3	2	2	1	1
音量 (dBA)： (距 15 m)	75	75	80	80	80	90
距離最近民宅 距離 (m)	30	30	30	35	35	30

7. 試求二十分鐘延時之 100 dBA 噪音，其 30 小時之 L_{eq} 值為若干？

8. 試說明為何聲強度計在迴響室內很難用來量測音源的聲功率，尤其在距音源某些距離做量測時。