

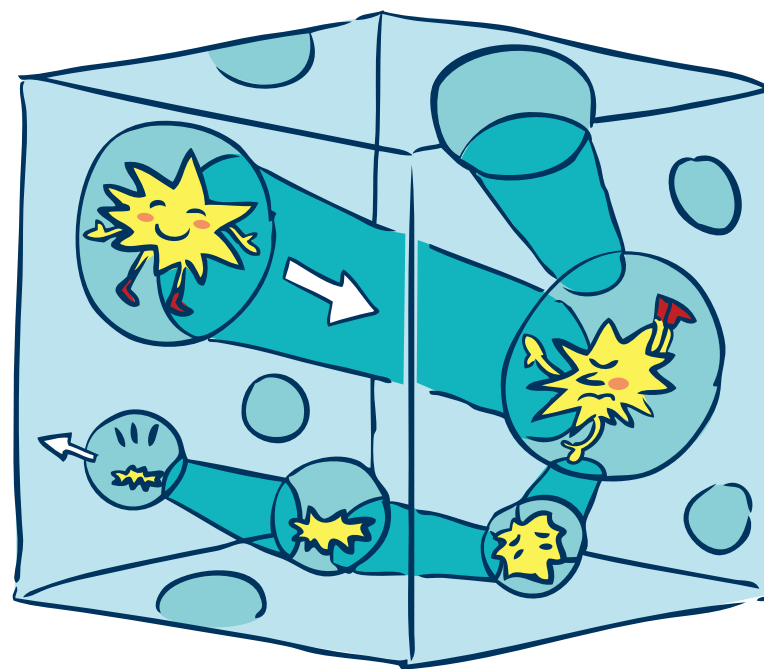
噪音原理 防制材料



簡介手冊



行政院環境保護署
Environmental Protection Administration
Executive Yuan, R.O.C. (Taiwan)



行政院環境保護署
Environmental Protection Administration
Executive Yuan, R.O.C. (Taiwan)

目錄

01、聲波是空氣振波.....	01	17、吸音材料表面處理.....	33
02、什麼是音速和頻率.....	03	18、吸音材料使用時注意事項.....	35
03、聽覺的產生.....	05	19、隔音材料如何隔音.....	37
04、人耳聽力的範圍.....	07	20、隔音材料的性能表示.....	39
05、年紀大了重聽.....	09	21、什麼是面密度.....	41
06、噪音音量的大小—分貝.....	11	22、隔音性能和聲音的頻率關係.....	43
07、分貝的加減法.....	13	23、隔音材料的耦合效應.....	45
08、等響度曲線及頻率A加權.....	15	24、隔音輕隔間牆構造的優點.....	47
09、聲音的傳遞方法—空氣音、固體音.....	17	25、隔音輕隔間牆構造施工注意事項.....	49
10、聲場特性—直接音和反射音.....	19	26、牆壁隔音量計算.....	51
11、直接音的距離衰減—點音源、線音源、面音源.....	21	27、固體音的防制.....	53
12、吸音和隔音.....	23	28、什麼是共振.....	55
13、吸音材料如何吸音.....	25	29、隔振器的效果.....	57
14、常見的吸音材料.....	27	30、隔振設計.....	59
15、吸音材料的性能定義—吸音係數.....	29	31、隔振器的種類.....	61
16、影響吸音係數的要素.....	31		

01

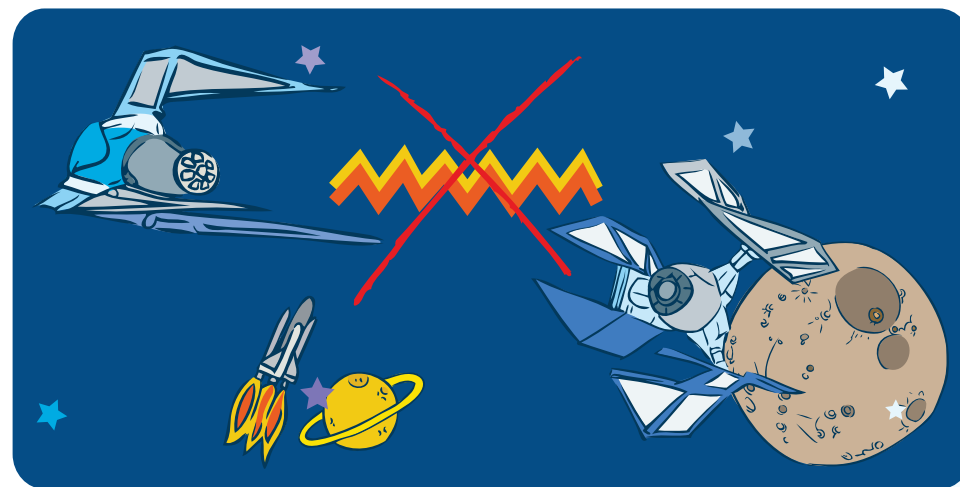
聲波是空氣振波

我們常常說的聲波，其實指的就是空氣的振動波。那麼空氣的振動波又是怎麼產生的？大多數狀況空氣的振動波都是來自於固體振動，怎麼說呢？我們敲擊一支音叉，音叉以固定的頻率振動，同時撞擊周圍的空氣，空氣的粒子受撞擊也產生相同頻率的振動，並且撞擊周圍其它粒子，產生連鎖反應，連串的撞擊形成振動波向四面八方傳遞，傳到我們耳朵就聽到音叉「嗡嗡」特定頻率的聲音。

空氣傳遞的聲波一般我們又稱之為「疏密波」，想像打鼓時鼓面振動產生鼓聲，由於鼓面來回往覆的運動，會擠壓、放鬆鼓面周圍的空氣，形成部份緊實、部份鬆弛的振動波，所以叫做「疏密波」。

振波要有介質才可以傳遞，振波可以在固體、液體以及空氣中傳遞，以前電影西部牛仔片中，可以常常看見牛仔或印地安人耳朵貼在地面，聽聽聽是否有遠方傳來的馬蹄聲，這就是固體傳音；聲納則是很典型的以液體為傳播介質的聲音發射及接收系統，廣泛地應用在國防、漁業(魚群探測)以及海洋生態研究。

在太空沒有空氣的真空狀態，所以即使太空人敲著音叉也產生不了聲音。你可知道，「星際大戰」的鈦戰機（TIE fighter）在太空中呼嘯而過的獨特聲響，不符合物理現象被國外網友踢爆做假，太空中是真空狀態，鈦戰機在太空飛行的聲音是無法傳播的！電影中為了增加視聽效果，鈦戰機的聲音事實上是用水象的吼叫聲和汽車疾馳過濕滑路面的聲音在錄音室混合而成的，再在電影院中播放，配合影片產生讓觀眾震撼的效果。



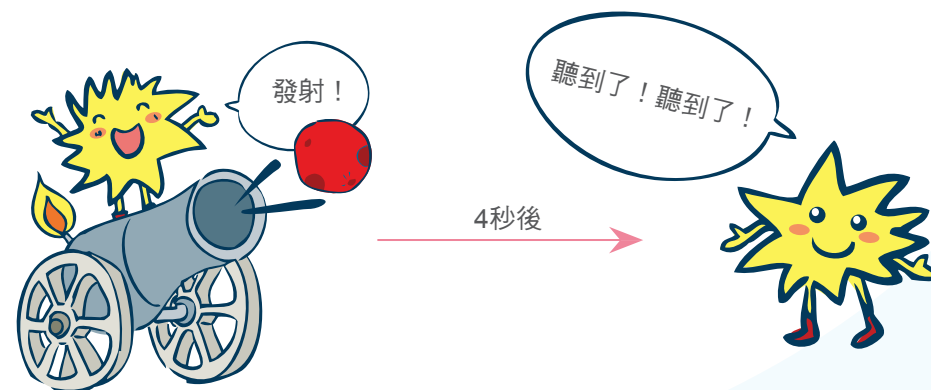
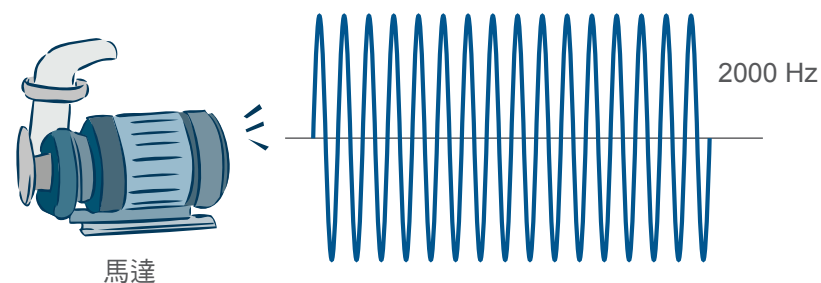
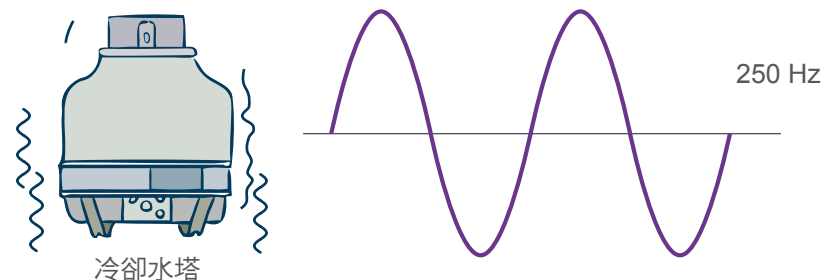
02 什麼是音速和頻率

上節我們提到除了空氣可以傳遞聲振波外，其它如液態、固體介質都可以傳遞振波，而這個振波傳遞的速度我們一般稱之為「音速」，音速並不是一個固定的數值，它和傳遞的介質以及溫度有關，尤其傳遞的介質類型對音速影響最大。由於液態、固體的介質較空氣粒子緊密，因此振波傳遞速度也較快，所以音速在固體介質最快、液態次之、空氣又更小。例如在常溫環境下，音速在空氣中為343m/s、在水中為1,485m/s、在玻璃中為5,170m/s。在空氣中 音速=約 $330+0.6\times T$ (攝氏溫度)。

19世紀歐洲的科學家為了要找出聲音傳播的速度，利用觀測火炮的方法，在數公里外的山丘上，計算觀看火炮發射時的濃煙以及稍後聽到火炮聲的時間差，運用距離(km)/時間差(sec)=速度的算式，概略地計算出聲音的速度，也就是後來我們常稱的音速。

至於我們常說的頻率在物理學界廣義定義是指單位時間內重覆發生的次數，國際通用的單位-赫茲(Hz)，赫茲(Hz)這個單位是紀念德國物理學家海因里希·魯道夫·赫茲，而以它的名字做為命名。1Hz表示事件每一秒發生一次。在我們的前述中，聲波是周期性重覆產生的「疏密波」，1秒鐘產生的振動次數就是該聲音的頻率(赫茲，Hz)，聲音頻率也和產生聲音的振動源振動頻率是相同一致的，所以常常有人說振動、噪音是對難兄難弟。

頻率是構成聲音特色的三要素之一，其他兩者分別為響度、音色，其中響度代表音量的大小；音色為聲音的特性，如用鋼琴和小提琴彈(拉)出相同頻率的聲音，但我們還是會聽出這兩種聲音是不一樣的，那是因為雖然頻率一樣，但兩種樂器弦的振動波形不一樣，導致音色明顯不同的緣故。



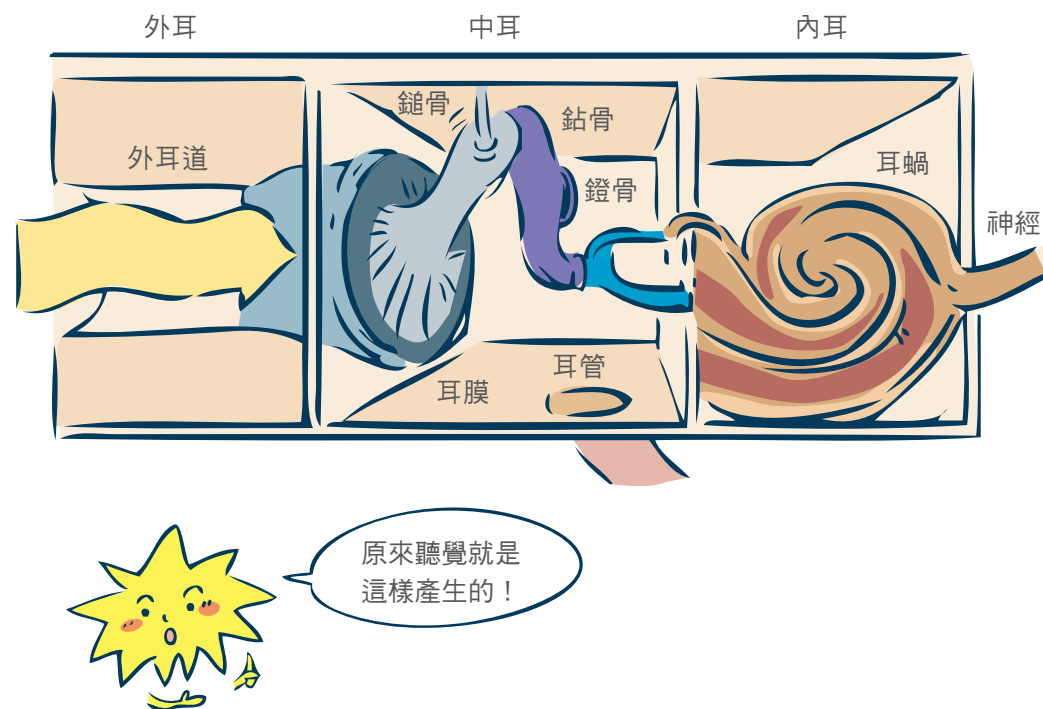
03 聽覺的產生

人體負責聲音接收的器官為耳朵，耳朵共分為外耳、中耳、內耳三大部份，各司不同的工作。聽覺器官的作用是將聲波的振動(機械能)轉變為聽覺神經上可傳遞的訊號(電氣信號)，經由神經系統將訊號送到大腦皮層聽覺中樞，聽覺中樞受到神經系統傳來訊號的刺激而讓人產生的主觀的聽覺感受。外耳、中耳、內耳三大部份的功能簡述如下：

外耳包含了耳殼(一般我們俗稱的耳朵)、耳道和耳膜等三部份，耳殼主要功能為收集聲波及辨別聲音的方向，聲波由耳殼傳入，再經耳道傳到耳膜後，激發耳膜產生振動。耳膜是人體對聲波振動最敏感的器官，它的形狀為約1 cm直徑的淺漏斗狀薄膜，厚度約 0.1 mm，1,000 Hz 最小可聽音值之耳膜位移振幅約 10^{-8} mm，也就是耳膜只要有這麼小的振動量，就可以讓人產生聽覺。

中耳的主要構成部位：三聽小骨(鎚骨、鉗骨、鐮骨)、耳咽管等，三聽小骨是由鎚骨、鉗骨、鐮骨三塊小骨頭所組成，這三塊小骨頭是人體中最小塊的三塊骨頭，三聽小塊一端和耳膜相連，一端和內耳相連，負責把耳膜的振動放大傳遞到內耳，耳咽管連接中耳腔與咽喉部，它的功能是維持耳膜兩邊氣壓平衡，如此耳膜接受到聲波才振得起來。

中耳和聽覺相關的部份為耳蝸和聽覺神經，耳蝸形似蝸牛殼，裡面充滿淋巴液和基底膜(上面有數以千計的纖毛細胞)，基底膜有不同頻率的共振區域，三聽小骨傳來的振動進入耳蝸，依不同的振動頻率激發基底膜不同區域的共振，於是該區域上的纖毛細胞受到刺激產生電氣信號，聽覺神經將這樣的電氣信號傳遞到大腦聽覺皮質而讓人產生的主觀的聽覺感受。

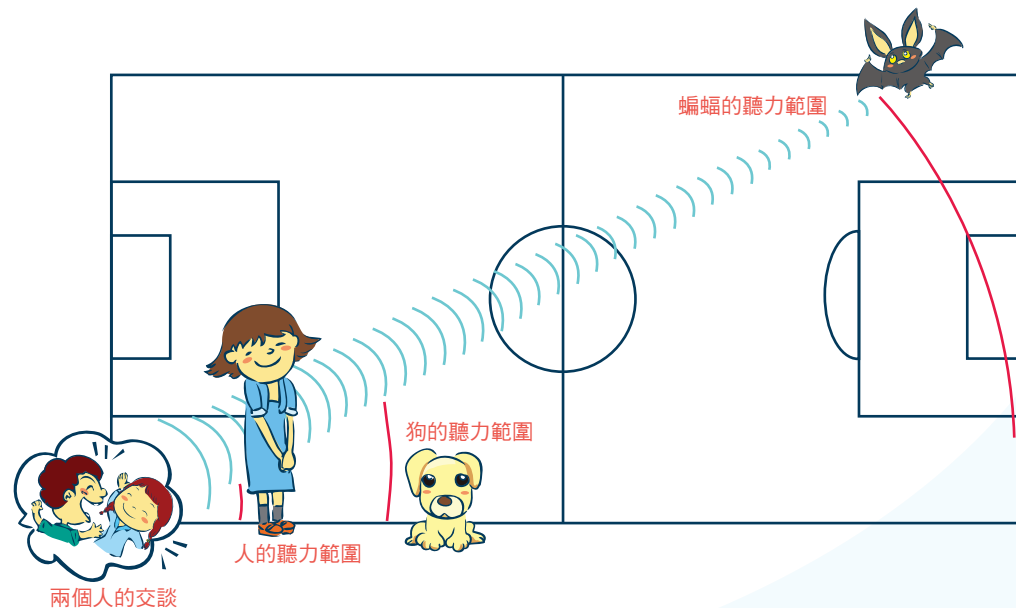
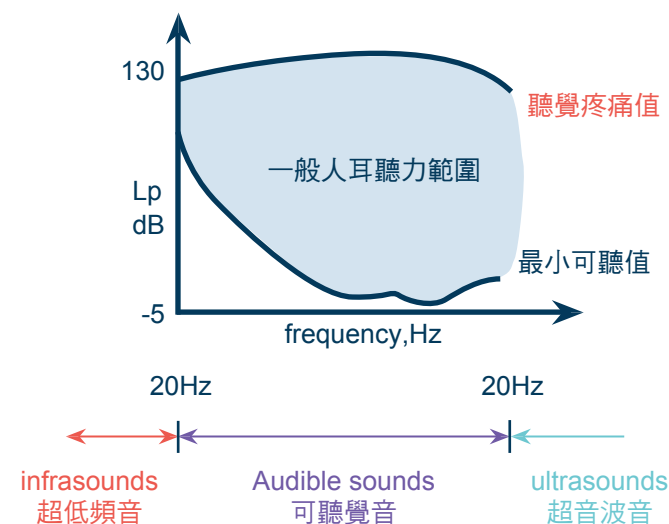


04 人耳聽力的範圍

人類的聽力範圍和音量大小及聲音的頻率有關，在右圖(人耳聽力範圍圖)呈現人類的聽力範圍，圖中橫軸為聲音的頻率，縱軸為音量大小。圖中兩條曲線分別代表人類聽力的上、下限，下方曲線是人最小聽力值線，意即當聲音音量低於該線值時，我們是聽不到的，在2k-3k Hz 該值是最低的，表示人耳對這個頻率的聲音最敏感，那是因為人耳耳道長約2.5-3公分，類似一條短管，它的共振頻率約在2k-3k Hz左右，會將這個頻率範圍的聲音放大。上方的曲線是聽力的上限，由於音量大我們的耳膜振動也著變大，當振動大到某個程度時，我們會有疼痛感，甚至耳膜會振裂造成傷害，所以儘量不要讓耳膜長時間的曝露在高噪音的環境中。

人類的聽覺頻率範圍約在20-20k Hz，低於20 Hz (稱為超低頻音，infrasound)和高於20k Hz(稱為超音波音，ultrasound)的聲音人類是聽不到的。此外人類的聽力在剛出生時是最好的(20-20k Hz)，所以小baby的聽力最好，對周圍的聲音也很有反應，但隨著年紀的增加，聽覺頻率範圍越來越窄，實驗顯示一些20來歲的年輕人已經聽不到16k Hz頻率的聲音。

聽覺功能對人類來說主要還是以語音辨識及音樂欣賞用途為主，但是以動物而言聽覺對捕獵覓食或逃避危險等生命的維持是很重要的器官，因此很多動物都進化擁有優於人類的聽覺系統，例如相狗的最小聽力值比人類低，蝙蝠更是遠遠優於其他動物。又以聽覺頻率範圍為例：狗的聽覺頻率範圍為15 – 50k Hz；貓 60 – 65k Hz；大象 1 – 20k Hz；老鼠 1k – 10k Hz；蝙蝠 3k – 120k Hz。自然界有很多動物聽覺頻率範圍涵蓋了地震的低頻振波，因此當地震發生前的一些低頻振波即讓牠們驚嚇而四處逃竄。



05 年紀大了重聽

我們常說老人家重聽實際上是聽力損失的一種。內耳的纖毛細胞是無法再生的，當人耳曝曬在高噪音的環境下，纖毛細胞承受相對大的振動，容易產生疲勞而發生暫時性聽力變差的情形，這種暫時聽力變差的現象稱之為暫時性的聽力損失，一般只要給予纖毛細胞適當的休息，聽力是可以恢復的，然而要是長期暴露在高音量環境下，使纖毛細胞受到永久性的傷害，會造成聽力無法恢復的損傷，稱之為永久性聽力損失。此外隨著年紀越來越大，纖毛細胞不可避免的老化死去，或是聽覺器官的病變，聽力慢慢變差，造成無法恢復的聽力損失，這些永久性的聽力損失即是我們一般所謂的「重聽」。

聽力測試主要內容是讓測試者坐在一間隔音良好的測試間內，戴耳機，聽力測試人員會操作儀器，讓耳機發出不同頻率的聲音，通常測試頻率分別為250,500,1k,2k,4k,8k Hz等6個，音量由小到大，直到受測者感覺聽到該頻率聲音而按下控制開關為止，左右耳分別依序測試不同頻率之最小聽音音量，即可描繪出受測者之聽力圖，通常都是對高頻的聲音聽力損失比較大。

重聽者需要較一般聲音更大的音量才聽得清楚，對於他(她)們的生活會有不少的妨礙，例如看電視要較大的音量、聽不清楚對方談話要求再重覆說一次等等，間接的影響重聽者的人際關係、情諸，會逐漸的退縮、封閉自己。其實重聽者若接受檢查、醫生治療或配戴適合的助聽器，對於聽力的恢復以及生活的改善都會有很大的幫助。



噪音源



06 噪音音量的大小

很多人抱怨噪音很吵，然而吵或不吵、大聲或小声都是一個相對的形容詞，就像是高或矮、胖或瘦形容身高和體重一般。所以把它們量化，才能易於分析、計算以及管制。既然聲音是一種空氣傳遞的振動波(疏密波)，疏的區域壓力小於大氣壓；密的區域壓力大於大氣壓，因此可以把大氣壓視為一個平衡點，空氣氣壓在平衡點的兩側來回變化(疏-密)，氣壓變化的量越大聲音越大聲，氣壓變化量越小，聲音就越小聲，所以聲音大小聲可以用氣壓變化量(或稱為聲壓)來表示，它的單位為巴斯卡Pa (N/m²，牛頓/平方米)。

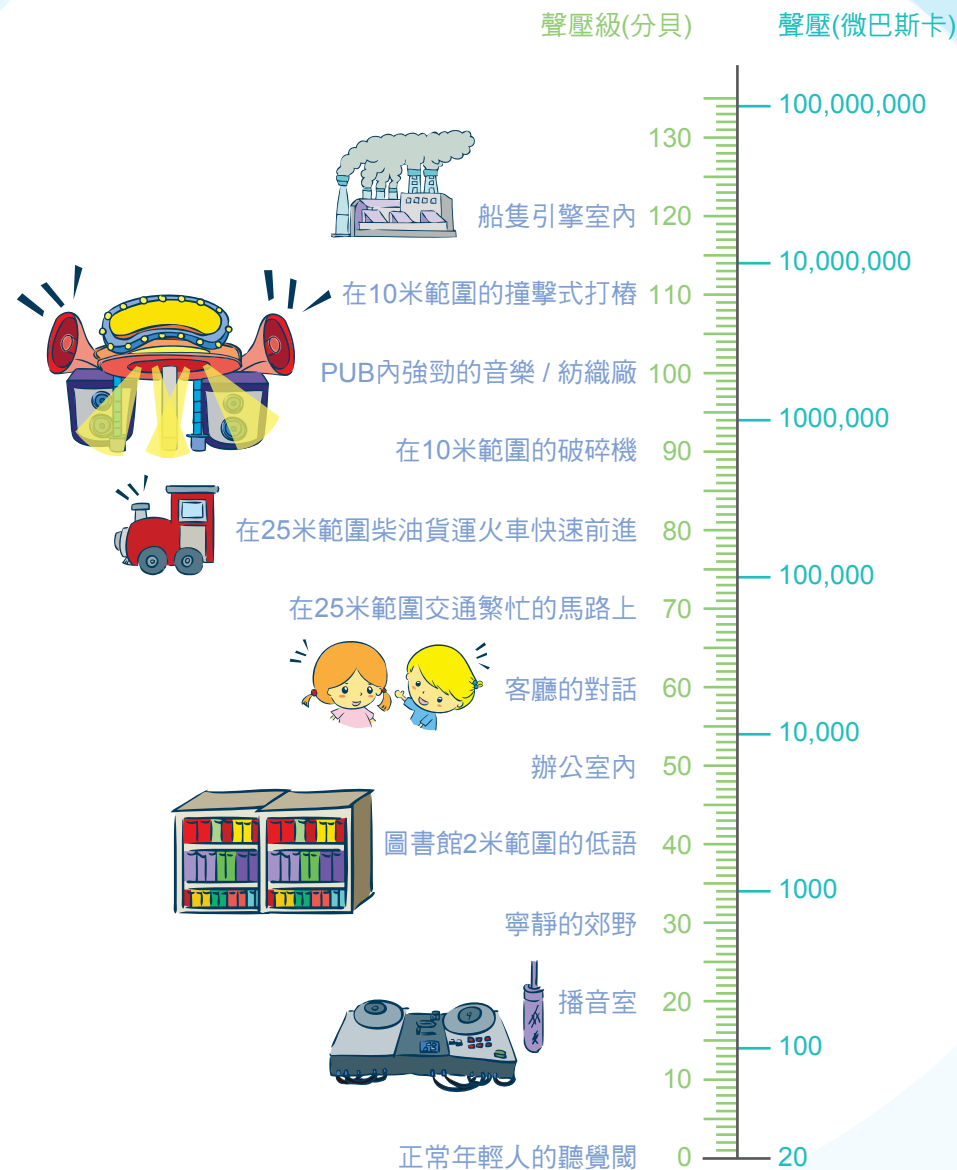
人類的聽覺系統能感覺到的聲壓範圍很大，一般人可以聽到的最小聲壓為20x10⁻⁶ Pa或縮寫成20 μPa；對於很吵的聲音例如波音747巨無霸客機在你頭頂上飛過去時，音壓可以高達2,000 Pa。

由於可聽到的聲壓範圍很大，紀錄和判讀都不很方便，對此全球一致將氣壓變化量的單位Pa進一步轉換為dB做為音量大小的單位，兩者間關係：

$$dB=10 \times \log\left(\frac{P^2}{P_0^2}\right) \quad P_0=20 \times 10^{-6} \text{ Pa}$$

P：噪音計(量測音量的儀器)所測得到的氣壓的變化量

當P值大於P₀，dB數為正值；當P值小於P₀，dB數為負值；當聲音音量和相等時，此時為0dB，所以0dB又稱為人耳聽覺閾值(班室最小可聽音量)。事實上每個人的聽力不近相同，就像是視力一樣，一些聽力比較敏銳的人，他的最小可聽音量可能小於0dB；而聽力比較遲鈍的人其最小可聽音量會高於0dB。



聲壓級(分貝)和聲壓(微巴斯卡)的比對表

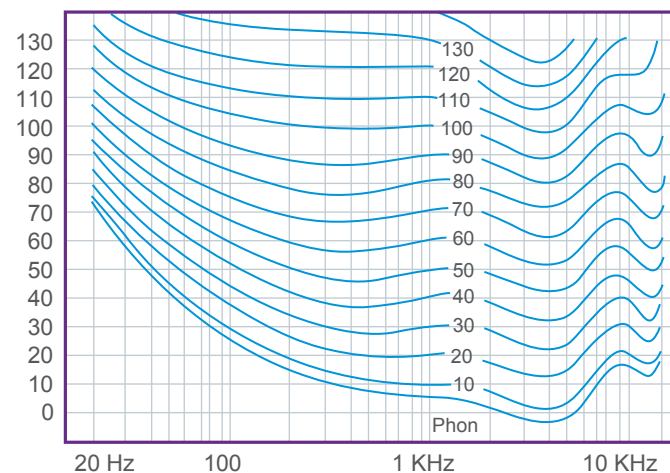
07

等響度曲線 及頻率A加權

在前面的章節我們提到，人耳的聽覺器官是將接受到的疏密波，轉換為機械性的振動，激發纖毛細胞產生電氣信號刺激大腦形成聽覺，整個這程可以視為能量的轉換和傳遞，問題在於在整個過程中，聽覺器官對於不同頻率的聲音它的轉換和傳遞效果並不是都一樣的，就像音響一樣，好的擴大機對於各個頻率的放大倍數比較有一致性，同時可作用放大的頻率也比較寬，所以我們聽到的聲音一定和真實的聲音有所差距。

不同頻率的聲音即使其dB數相同，我們聽起來還是覺得音量不相同，那麼針對不同頻率的聲音音量分別要多大才會聽起來一樣大聲，經過無數的研究，國際標準組織公佈了ISO 226標準等響度曲線圖(如右圖)，圖中橫軸是聲音的頻率(Hz)；縱軸為聲音的音量(dB)，圖中橫列了不少的曲線，不同頻率的聲音，只要它的音量落在同一條曲線，那麼它們聽起來是一樣的大聲。

一般真實的聲音都包含許多不同頻率的聲音，既然人類的聽器官對於不同頻率的聲音有不同的音量感覺，因此噪音計所量測噪音的dB值不能完全反應我們的聽覺感受，必需對不同頻率的聲音的量測結果做修正，這樣的過程稱為「頻率加權」，頻率加權的種類有好幾種，世界各國環保法規對於噪音管制都是採用「A加權」或又稱為「A計權」，經過A加權過程所測得的音量單位為dB(A)，(A)的意思是表示該dB數是經過A加權過後測得的。相同的音量其dB的測值和dB(A)的測值是不一樣的，所以音量大小不能僅看測值大小，也要看看音量的單位。通常dB用於隔音材料性能測試用途上，而dB(A)則是用於評估音量對人的感受，如環保法規、管制標準，在我國法規中文「分貝」指的是dB(A)，而不是dB。



08 分貝的加減法

車子發出80分貝的聲音很吵，想辦法改善車子的噪音，把音量減少一半變成40分貝，看起來很合理，但這是錯誤的分貝計算方式。我們假設原先音量dB數為 $10 \times \log(P^2/P_0^2)$ ，然後音量增加為原先音量的兩倍，原先音量 P^2 變為 $2 \times P^2$ ，兩倍音量dB數為：

$$10 \times \log\left(\frac{2 \times P^2}{P_0^2}\right) = 10 \times \log 2 + 10 \times \log\left(\frac{P^2}{P_0^2}\right) = \text{原先音量} + 3\text{dB}$$

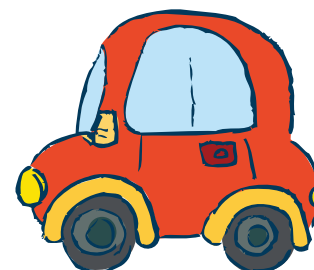
很驚訝！音量增加為原來的兩倍時，dB數僅增加3dB，是的！結果就是這樣！如果音量增加為原先音量的十倍時，則十倍音量dB數為：

$$10 \times \log\left(\frac{10 \times P^2}{P_0^2}\right) = 10 \times \log 10 + 10 \times \log\left(\frac{P^2}{P_0^2}\right) = \text{原先音量} + 10\text{dB}$$

也就是10輛車子的音量會較一輛車子的音量增加10dB，當然需假設每一輛車子的音量都是一樣大。從噪音改善的角度來來看，兩台音量一樣大的機械，關掉一台，音量會減少3分貝，若是希望噪音能減少10分貝，那相當於把10台音量一樣大的機器關掉9台，只保留一台運轉時的噪音量。

從dB的定義上來看，它是一個先取比值 P^2/P_0^2 再取對數log的計算，事實上人類對於一些物理量的感覺比較傾向比值的關係，例如我們先拿1公斤的沙包再拿2公斤的沙包，可以明顯的說出後者比前者重，如果先扛著30公斤的沙袋，再扛31公斤的沙袋，雖然同樣相差1公斤，但我們確不容易感受到兩個沙袋孰重孰輕， $10 \times \log(31\text{kg}/30\text{kg})=0.14$ ，而 $10 \times \log(2\text{kg}/1\text{kg})=3$ 。通常兩個音源音量相差在3分貝以內時(比值在2以下)，聽者不易說出那個音源音量較大；音量相差達5分貝時，聽者可以明顯指出那個音源音量較大；音量相差在10分貝以上，聽者會說出這個音源音量較那個音源大多了。

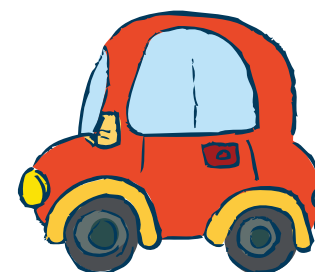
80 dB(A)



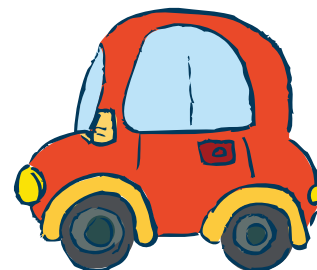
~~$80 \times 2 = 160 \text{ dB(A)}$~~ ----> **83 dB(A)**



+



~~$80 \times 10 = 800 \text{ dB(A)}$~~ ----> **90 dB(A)**



+10輛
+.....+



09

空氣音 固體音

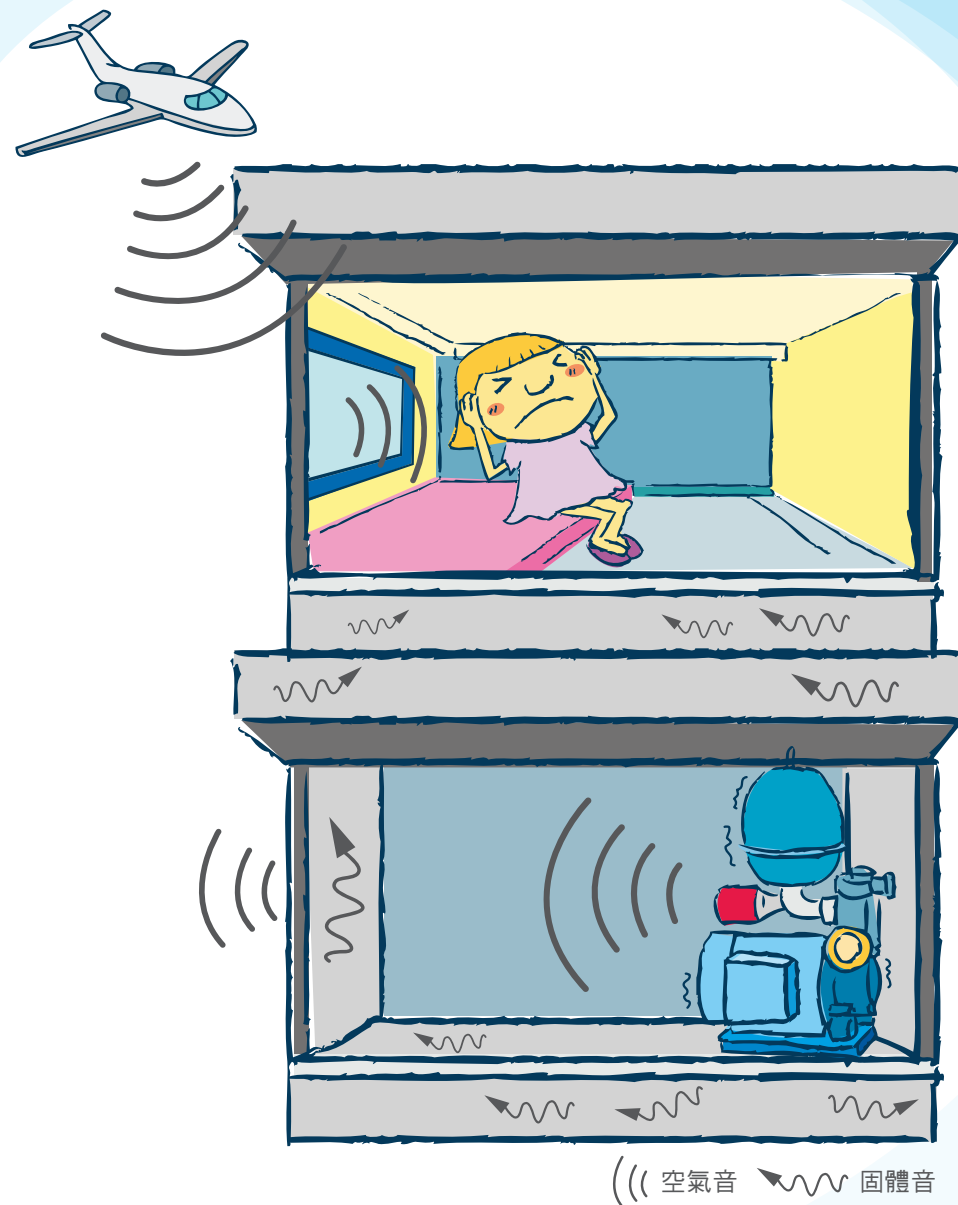
聲音的傳遞方法

聲音主要來自於物體的振動激發空氣產生疏密波，所以物體振動的傳遞方式對於噪音改善方法是很重要的。就聲音的傳遞方式，我們一般概分為空氣音及固體音，例如放在室外防火巷內的抽水馬達，住戶打開窗戶就可以聽見馬達運轉的吵雜聲音，那是馬達噪音直接從窗外傳入室內，這類直接以空氣為主要傳播介質的聲音，稱為「空氣音Air borne」；相對於空氣音，也有以固體做為振動傳播介質的噪音，我們稱為「固體音Structure borne」。

很多人都有這樣的經驗，把原先放在客廳地面上的小電扇放到桌上，噪音馬上變大許多，這是因為電扇的振動傳到桌面，而桌面會產生較大的振動，激發桌面周圍的空氣產生相同頻率的疏密波(噪音)，嚴重時電扇振動傳到桌面產生的噪音(固體音)會較電扇本身運轉時的噪音還要大。

以固體傳遞振動造成的噪音困擾，而導致噪音糾紛、陳情事件屢見不鮮，像是樓下住戶聽到樓上小孩的跑跳聲、傢俱拖動的聲音；或是例如晚上睡覺時，床頭牆壁卻傳下地下室抽水馬達運轉時嗡嗡做響的噪音，擾人清作夢，都是典型固體音造成的，尤其大樓馬達振動沿著柱、樓板、牆面等結構四處傳遞，住戶臥室床頭牆壁的振動即使輕微，但由於牆面面積大，會產生較大的音量，尤其睡覺時段環境較為安靜，馬達噪音變得更清晰，更容易被查覺，對於聽覺較敏銳的人，它足以影響到睡眠，倘若夜間長期無法安然入睡，會造成當事人日間精神衰弱、憂鬱，嚴重時需就醫，並借助藥物治療。

相對於減少空氣音屬性的噪音我們可以採用隔音、吸音的方法來處理；而對於固體音屬性噪音的改善我們就必需採用隔振(彈簧等隔振器)或減振(阻尼性的吸振材料)方式來處理。



10

聲場特性

直接音

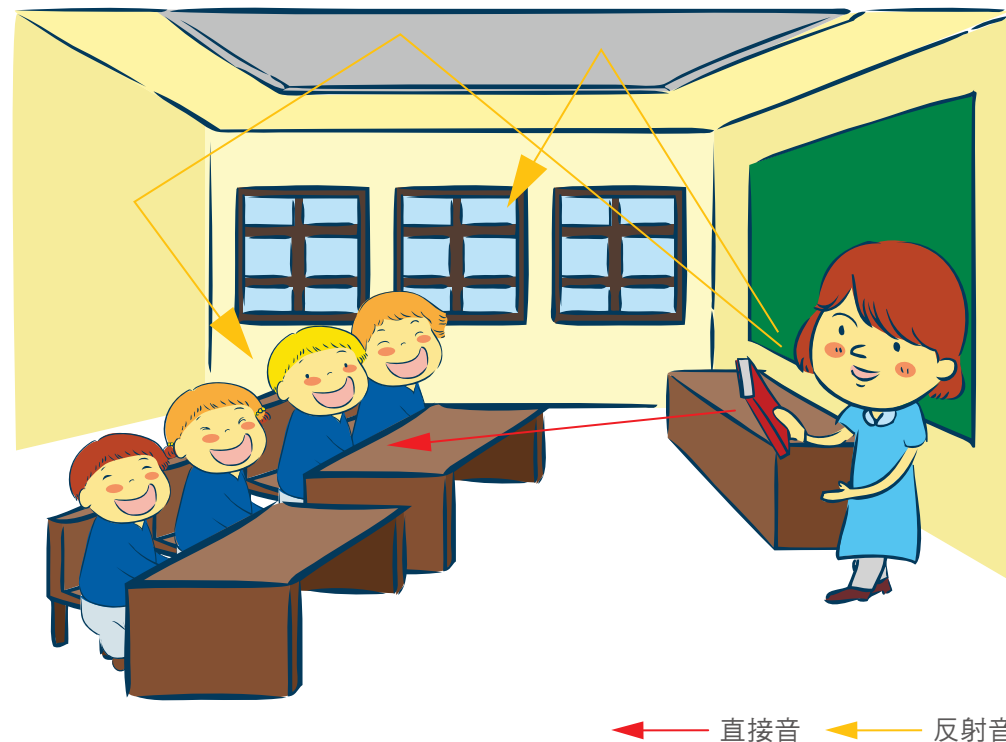
反射音

聲音(空氣疏密波)在空間中傳到我們的耳朵產生聽覺，這樣的一個空間我們稱為「聲場Sound Field」，聲場又可以概分為直接音聲場及反射音聲場。聲音從音源處發出，沒有經過任何障礙直接傳到我們的耳朵，這樣的傳遞行徑我們稱之為「直接音」，例如我們在戶外聽到天空飛機的噪音，就是直接音的傳遞模式；相反的學生在室內上課，講台老師講話的聲音除了直接傳到學生位置外，也會經由天花板、四周牆壁把聲音反射到學生位置，這種經過反射傳遞到聽眾的聲音傳遞行徑，稱之為「反射音」。

反射音有增強聲音強度的優點，倘若老師在戶外講課，後排位置的聲音強度小、不清楚，學生會聽得很吃力，但在室內相同的後排位置，由於天花板、壁面會反射聲音，相對的學生就聽得比較清楚，這就是反射音的好處。然而在工廠廠房內的作業空間，廠房內的反射音會讓原有機器的噪音變得更大聲，反而是個困擾。

所謂聲音的強度指的是單位面積上聲音的能量，隨著聲音自音源中心發出向四方傳播、擴散，聲音傳得越遠，強度就越小，音量也變小，這種隨著距離變大、音量變小是直接音的特性，我們又稱為「距離衰減」，它是聲學工程師檢驗直接音聲場的依據。反射音的特性就和直接音截然不同，反射音聲場通常指的是聲音在室內傳播，聲波碰到壁面然後反射回室內，再碰撞壁面反射回室內，越是窄小的空間或越是質地堅硬的壁面，都會讓室內有較大的反射音量，造成室內音量不但變大，同時分佈也比較均勻，既在室內不同位置測得的噪音量彼此音量差異小。

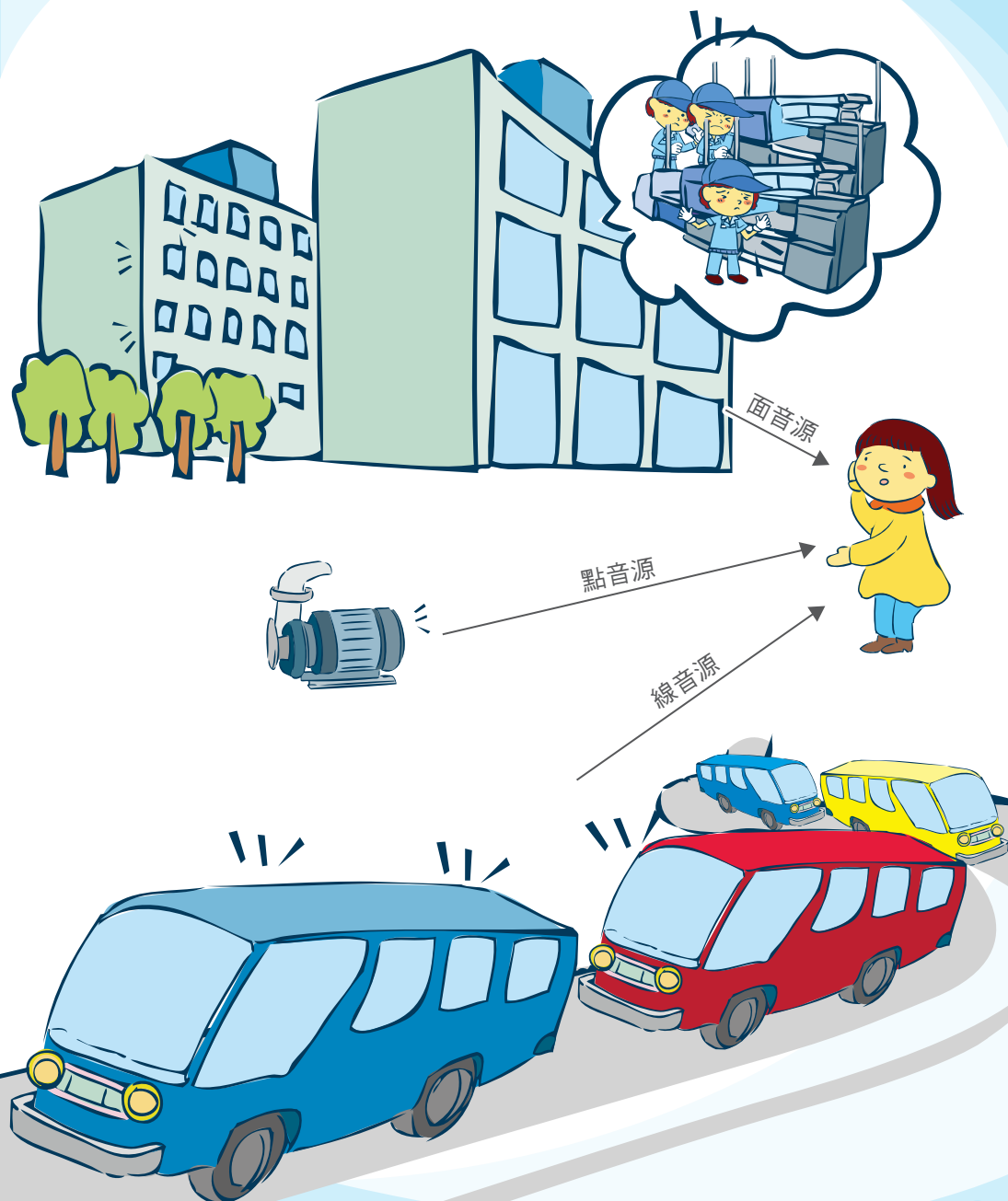
對於直接音聲場噪音改善可以採用隔音的方式，而反射音則必需採用反射面(壁面)安裝吸音材料的吸音方法來處理。



直接音的距離衰減

通常我們把噪音源概分為點音源、線音源、面音源三種來計算分析噪音在戶外的傳遞，像是馬達或是天上飛行的飛機等音源都可以視為點音源、高速公路接連不斷車流則可視為線音源、站在捷運通風換氣出口前，出風口的噪音就形成一個面音源。到底音源屬於點、線、面三種中的那一種？由以上例子可以初窺音源的類別和音源的長寬尺寸和距離音源的距離有關，即飛機引擎體積龐大，但對地面的受音者而言不過是一體積小小的點音源。

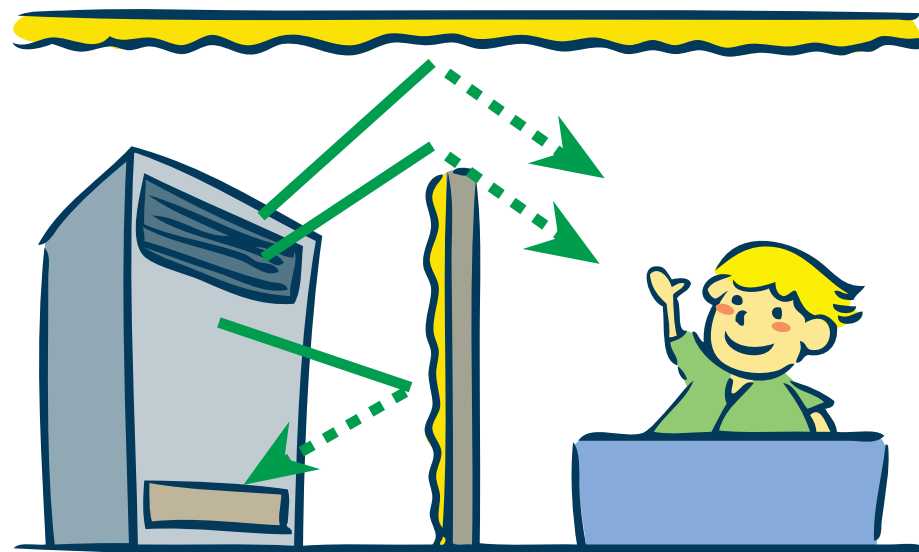
為何會把音源分成這三種類型？我們都知道在戶外直接音聲場，距離音源越遠聲音越小(又稱為直接音的距離衰減)，而聲音的衰減程度和音源的類型有關，以點音源為例，距離每增加一倍，聲音衰減6分貝(-6dB/DD，DD=double distance)、線音源則是為-3dB/DD，即距離每增加一倍，聲音衰減3分貝、面音源為-0dB/DD，也就是受音者處的音量不會因為距離改變而有所衰減。這的分類只是概略性質的把聲音的距離衰減特性予以量化，然而在實際的分析上比上述的方法再複雜一些，當受音者位置距離音源非常近時，音源可以視為一個面音源，當距離逐漸拉遠時，距離衰減變為線音源的特性，當距離再進一步增加時，距離的尺度遠大於音源尺寸時，此時距離衰減變為點音源的特性。這種距離衰減的特性可以做為當我們需要選擇設置機械設備位置時，藉以計算設備噪音傳遞到周圍敏感點處的音量，是否會造成對環境的衝擊。



12 吸音和隔音

大多數的人提到要降低噪音量自然的都會想到採用吸音或隔音的方法來做，但是什麼狀況下採用吸音；什麼情形要用隔音？吸音和隔音有什麼不同？那些是吸音材料、那些是隔音材料？保麗龍是隔音材？還是吸音材？紙張或布片可以吸音嗎？還是同時具有吸、隔音兩種性能？一般流傳的噪音改善方法，有時似是而非讓人無從分辨，五花八門的噪音善材料更是令人眼花撩亂！每個廠商都說自己的方法(或材料)有效，然而消費者花了錢做改善，減音效果卻不如預期的事情卻時有所聞。其實噪音防制的技術，並不是一門生澀難懂的學問，只要能明白基本的原理，即使是一般人也能掌握或選擇正確的作法。

隔音作法是將隔音材料擋在受音者的前面，以降低聽到的音量；或是用隔音材料把噪音源包起來，以減少噪音源傳出來的音量。通常隔音材料都具備質地堅硬的性質，以利阻隔噪音，但卻很容易將聲音反射回去，造成別處噪音量增加，例如用隔音材料把噪音源包(如隔音罩)起來，大量的反射音會讓隔音罩內的音量增加，相當於音源的音量較沒有隔音罩時更大，間接的減少了隔音罩該有的減音效果，這時就必需輔助以吸音材料，來減少反射音的產生，降低隔音罩內的音量。所以正確的防音方法是要隔音、吸音搭配使用，必需在隔音材料的音源側加上吸音材料(如隔音罩的內側)，就可以解決隔音材料所造成反射音的問題。



13 吸音材料如何吸音

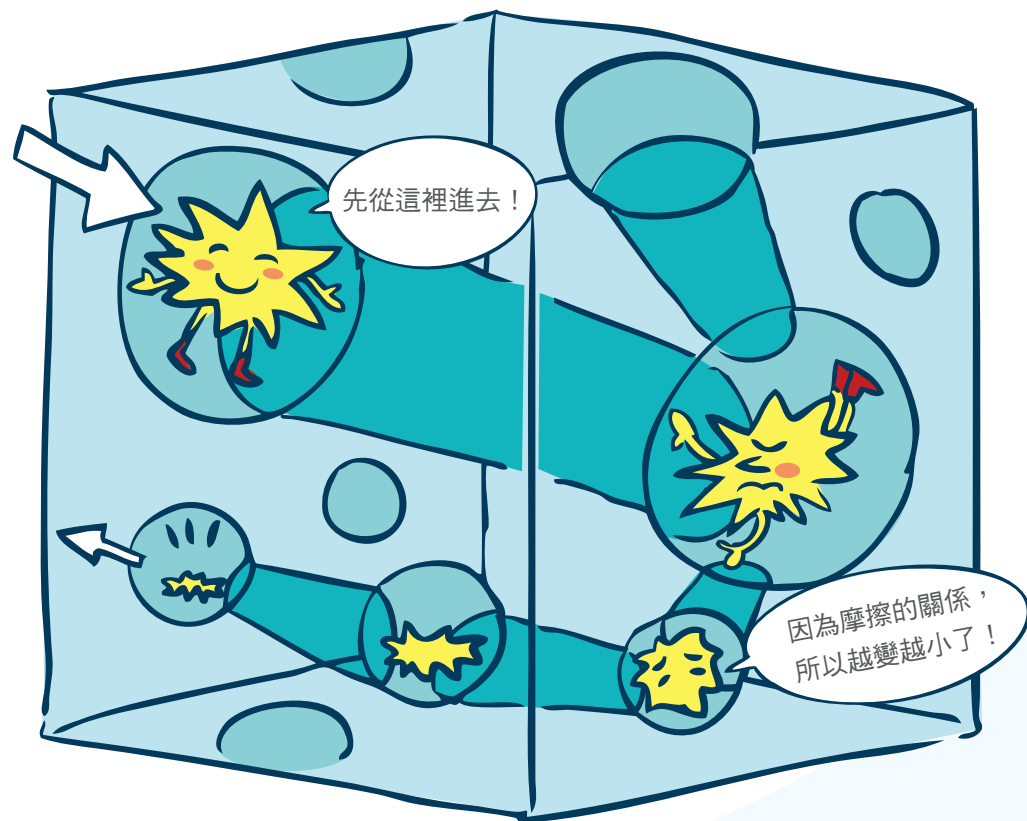
吸音材料是一般人最常談論的材料，目前較常使用的吸音材料多為多孔隙結構材料，如發泡類或纖維類的吸音材料，前者代表為吸音泡棉，常常在一般橡膠材料行可以買得到；而後者代表則是玻璃棉及岩棉(或稱礦棉)，這類材料是一般空調風管師傅常用的保溫、隔熱材料。這兩種吸音材料的構造雖然不盡相同，但其吸音的原理都是一樣的。

如同前述，聲(噪)音原是以空氣為傳遞介質的疏密波，當聲音傳入發泡類或纖維類的吸音材料內時，這些材料內的枝狀或纖維結構會增加空氣振動的阻力，當振動和枝狀或纖維結構磨擦時，會將空氣振動能量變成熱能而減少振動的強度，振動強度小了，聲音音量自然就變小了。我們可以想像一下稻田旁的灌溉水溝，把收割後的稻桿抓一大把丟到水溝裡以阻塞水道，雖然溝內的水仍然可以由稻桿間的間隙繼續流出，但水流的速度明顯的降低了，那是因為稻桿和水流間的摩擦力(阻力)，導致流速變小，多孔隙吸音材料的作用也是類似原理。

利用摩擦降低空氣疏密波振動強度達到吸音效果，是最常被採用的方式，但不是唯一方法，採用共振方法也能有降低聲波振動的效果，這類材料多半具有空腔構造或是以薄板、薄膜類材料以及背後空腔構成的吸音牆面。



大家好，我是聲音！
你知道吸音材料是如何吸音的嗎？
請跟我進去瞧一瞧吧！



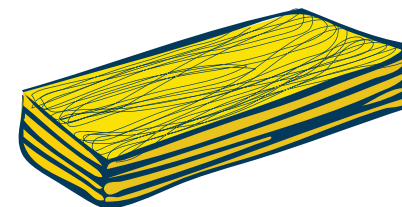
14 常見的吸音材料

泡棉類吸音材料有明顯的孔隙讓聲波進入→摩擦→聲波強度減小→音量變小，越多的摩擦會有越好的減音效果。有機會到賣橡膠、橡皮墊的店鋪，常會看到掛著「吸音泡棉」的海報，拿來一看，軟軟黑黑的，構造很像我們洗澡用的海棉(洗澡用的顏色鮮豔，比較漂亮)或是卡拉OK麥克風的海棉罩。吸音用的泡棉和上述洗澡或是麥克風罩有些不一樣，洗澡或是麥克風用的海棉在製作時會除去裡面不連續的泡棉薄膜，而專門做為吸音用途的泡(海)棉則會保留裡面不連續薄膜結構，因為它們會增加吸音材料和空氣摩擦的面積，相對的吸音效果會更好。

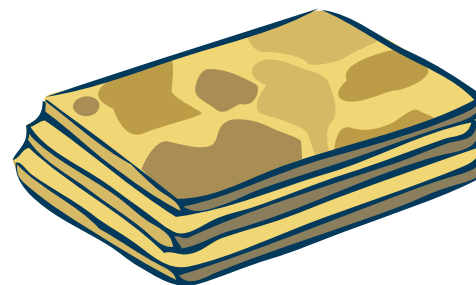
泡棉類的吸音材料材質非常多樣化，一般多為為PU材質發泡，價格較低，其次有PE發泡，此外尚有一些較為特殊的發泡吸音材，例如鋁發泡、水泥混合添加物發泡等，後兩種由於價格高，除了特殊場合外(例如鐵路車廂夾層吸音使用)，一般較為少見。

纖維性吸音材料如玻璃棉、岩棉等則是空調業者常用的隔熱、保溫材料，它們的結構特徵主要為許多纖維狀細絲，除了提供隔熱的空氣層外，細絲纖維也提供了對聲波振動絕佳的摩擦阻力。

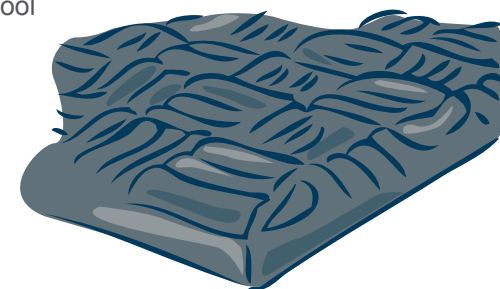
在中世紀的教堂，有人把口小肚大的空甕橫向排列，變成一道吸音牆面，以現代聲學的角度來看，空甕的容積和甕口比例會形成固定頻率(通常是低頻)的共振系統，對這個頻率的入射音會產生吸音的效果。



玻璃棉板 Glass Wool



岩棉板 Rock Wool



吸音泡棉(foam)

15

吸音係數

吸音材料性能定義

吸音性能好或不好總需要一個可量化的指標來參考，此外也可做為防音工程師在計算減音量時之應用。吸音材料的性能指標為吸音係數(Absorption Coefficient, α)，當聲音(E_i)傳向吸音材料內，一部份聲音被反射(E_r)、一部份被吸收(E_a)和穿透(E_t)，如圖。由於是吸音用途，我們會關心當聲音傳入材料時有多少音量沒有被反射？所吸音係數 α 被定義為：

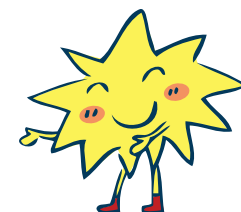
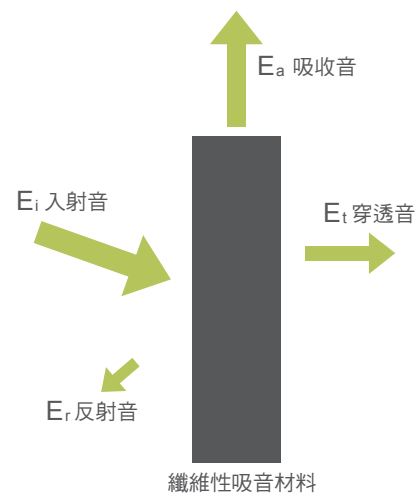
$$\alpha = \frac{E_i - E_r}{E_i} = \frac{E_a}{E_i}$$

由於一般常用多孔隙吸音材料結構鬆散，聲音很容易穿透。而且吸音材料通常會安裝牆面、金屬板等厚重結構材料上，這些材料聲音不容易穿透，但容易反射)，因此 E_t 值很小可以忽略不計，所以吸音係數定義又可以簡化為： $\alpha = E_a / E_i$ 。

吸音係數 α 的範圍在0.0-1.0之間， α 值越高表示材料吸音效果越好，反之表示材料吸音效果差，屬於反射性的材料， $\alpha = 1.0$ 表示全吸收， $\alpha = 0.0$ 則是全反射，一般材料的吸音係數則是介於兩者之間。左表列了一些常見吸音材料的吸音係數值，多孔及纖維性吸音材料(如海棉、玻璃棉)對中、高頻的聲音有較好的吸音效果，而共振類吸音材料如有槽縫空心吸音磚、薄木板，則是在共振頻率區(一般都是在低頻)吸音係數較高；而質地堅實會反射聲音的建材如混凝土等，吸音係數都非常的低，僅有0.01-0.02。

吸音係數表

材料名稱	頻率Hz					
	125	250	500	1 k	2 k	4 k
32k, 50mm 厚玻璃棉	0.24	0.63	0.99	0.97	0.98	0.99
240k, 60mm 厚礦棉	0.25	0.55	0.78	0.75	0.87	0.91
2" 厚山型吸音泡棉	0.15	0.17	0.49	0.73	0.66	0.68
3" 厚 CSI 水泥發泡吸音板	0.23	0.60	0.99	0.97	0.95	0.96
6" 槽縫空心吸音磚	0.62	0.84	0.36	0.43	0.27	0.50
普通玻璃	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
1.3mm 木板, 背後25mm空氣層	0.30	0.30	0.16	0.10	0.10	0.10
混凝土牆、磨石子地面等	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02



吸收係數

$$\alpha = \frac{E_i - E_r}{E_i} = \frac{E_a}{E_i}$$

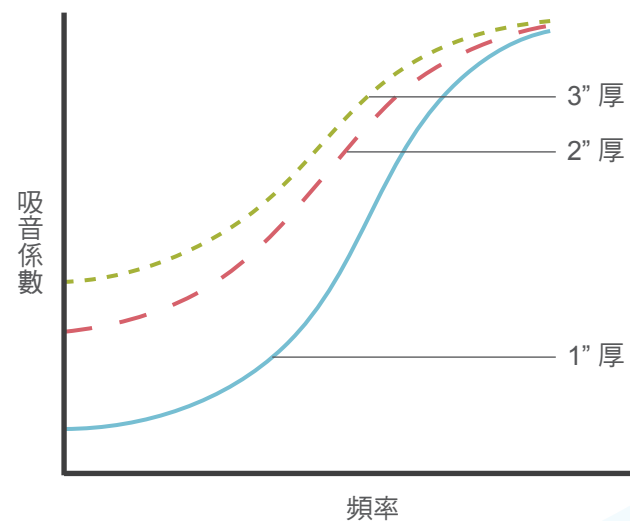
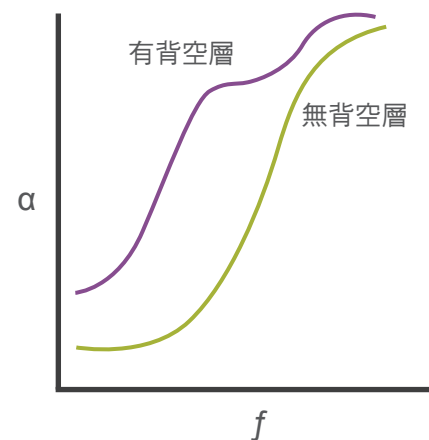
16 影響吸音材料要素

多孔隙構造的吸音材料是利用摩擦(阻力)的方式來減少聲波的振動強度，而達到音量降低的目的。孔隙越多(孔隙越細微)能增加摩擦的面積，自然吸音的效果會比較好。

對於泡棉類吸音材料，選擇孔隙較小或泡棉有不連續的薄膜都有比較好的吸音性能。孔隙小表示結構細密，摩擦面積較大，想像一塊煤球和同體積的煤粉，後者燃燒會較旺，甚至於引起爆炸，這是因為煤粉和空氣有較大的接觸面積；同樣的道理若泡棉內部若有不連續的薄膜，也會增加和空氣接觸的面積，吸音的效果自然比較好。

纖維類吸音材料規格都是以密度「K」來表示，例如道路隔音牆常用的32K玻璃棉板，32K指的是密度為 32kg/m^3 。K數越高(密度增加)表示纖維數量越多，吸音效果比較好，但價格自然也比較貴。

此外厚度增加，相對的提供更多的摩擦面積，自然吸音係數也會增加。由於一般5cm厚如泡棉、玻璃棉等吸音材料，對於中、高頻率噪音的吸音都有不錯的效果(吸音係數較高)，而對低頻噪音的吸音係數還是不如中高頻的來得好，倘若厚度再增加的話，中高頻率的吸音係數增加有限，而低頻吸音效果增加較多。所以如果要防制中、高頻率噪音(如一般抽水馬達)，常用的泡棉或纖維類吸音材料5cm厚就可以了，但對於低頻率的聲音(如冷卻水塔)吸音材料的厚度就要用到10cm或10cm以上的厚度。



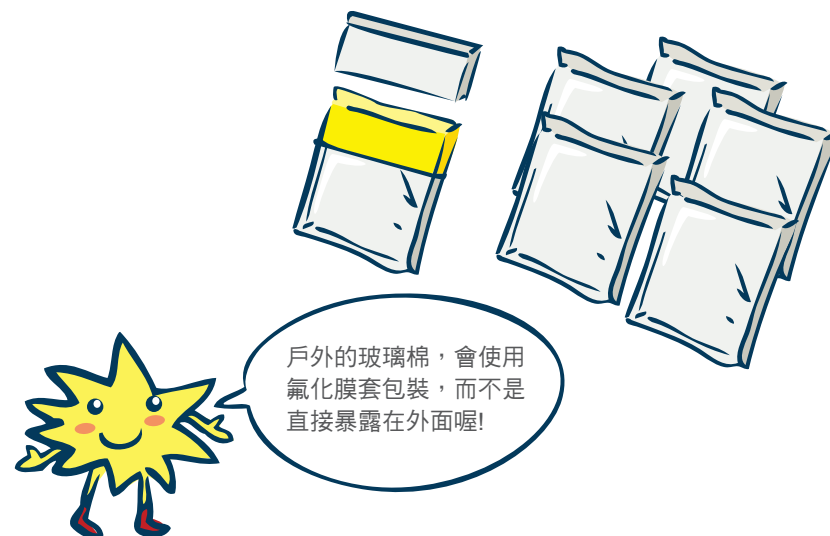
17

吸音材料表面處理

多孔隙類吸音材料雖然具有良好吸音性能，但卻有吸水性強、表面不美觀、容易被破壞等缺點，因此在使用上表面需要做些處理以克服以上缺點。

吸水性強，則不適合在戶外有雨或室內潮濕等環境下使用，針對戶外會淋濕的使用環境，就必需對吸音材料做進一步的防護處理，例如高架道路兩側隔音牆它內襯的吸音玻璃棉是包覆在氟化膜套內(杜邦公司生產)，氟化膜套除了防水作用外，同時可以隔離紫外線，延長吸音玻璃棉的使用壽命。然而採用薄膜外套來做為防水保護，太厚會降低高頻音的吸音效果，影響防制效果，故厚度越薄越好；此外薄的膜套對低頻音聲波有較佳的減振效果，反而會提高吸音材料的對低頻噪音的吸音效果，。

在建築室內例如會議室、音響室做為吸音壁面用途，如採用泡棉及玻璃棉等多孔隙類吸音材料，外表必需要經過其它修飾材料處理才會美觀，一般設計師會用藝術壁布包覆，不讓它們直接裸露在外。藝術壁布另外一個好處是由於它是織布，聲波容易穿透進入吸音材料內，對吸音材料原有的吸音特性不會有太大的影響。



18 吸音材料使用注意

吸音泡棉、玻璃棉及岩棉類等材料都是性能不錯的吸音材料，價格也不昂貴，很適合小量或DIY使用。然而若需要大面積使用時，則一些使用的限制及事項必需注意。

泡棉類的製品非常容易著火，一旦燒起來火勢蔓延得很快，而且會產生化學濃煙，如果在建築物室內壁面大量採用易燃的吸音泡棉，萬一發生火災時，非常危險，所以使用吸音泡棉時要選購製造時添加防火劑的防火吸音泡棉，防火劑的作用在於它會阻斷火燄，以減緩火燄蔓延維護安全。雖然防火吸音泡棉價格高，但基於安全，室內大面積使用以及有著火顧慮的場合一定要使用防火型的吸音材。另外也可以選擇由不燃或耐燃材質所發泡製成的多孔隙吸音材料，一樣具有防火效能。

玻璃棉及岩棉吸音材由於本身材質即具不燃性，所以防火性能極佳，沒有吸音泡棉的缺點，然而這類纖維性吸音材料其纖維細小，在現場安裝、切割的過程會產生細短的纖維在空中飄浮，沾在衣服或皮膚上會有刺痛感，倘若跑到眼睛內，部份的人會產生紅腫不適的情形，需要到眼科求診清洗，因此這類吸音材料在加工時作業人員最好戴上安全眼，設計師在設計吸音壁面時，表面一定要加一層披覆材，如不織布、玻璃布、裝飾布等等做為表面披覆，除了美觀外也可以防止纖維溢出，避免纖維直接和人接觸的機會。



19 隔音材料如何隔音

早期房子隔間為了結省成本，用簡單的夾板做為房間隔間材，住在這種薄夾板隔間的房間裡很容易聽到隔壁房間一舉一動的聲音，我們都認為這樣的房間隔音很差，倘若隔間牆壁改為磚牆甚至是水泥牆隔間，隔音效果就好上許多。

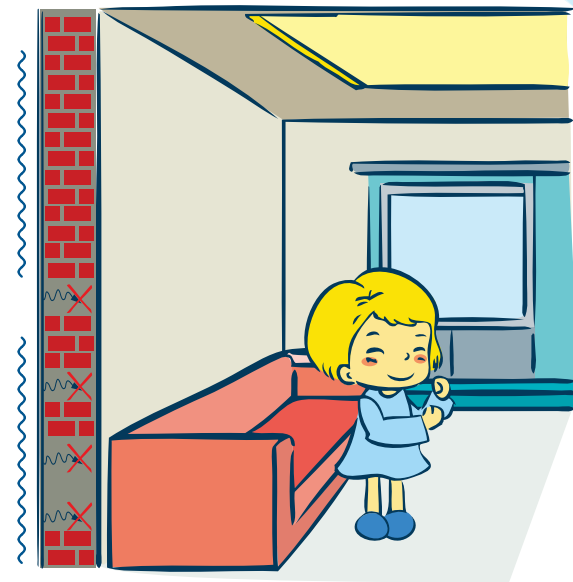
基本上聲音是靠空氣傳遞的疏密波，隔壁房間的聲音是如何傳過來？如果我們把房間門、窗關緊；門隙填起來，不讓房間有一絲絲的縫隙讓外面的空氣進來，這樣是不是隔壁房間的噪音就傳不進來？結果不然，我們依然可以清楚地聽見隔壁房間一舉一動的聲音，那麼聲音是如何傳進房間裡？

前面我們提到，聲音通常是因為固體振動所造成的，振動使得和固體相鄰的空氣產生疏密波，向四面擴散形成聲音。同樣的隔壁房間的聲音(聲波)撞擊在房間的隔間牆壁上，會讓牆壁產生振動，導致我們所在房間的空氣產生振動(疏密波)，於是在隔壁房間形成了新的聲音，由於在傳遞的過程中(聲波-隔間牆振動-新的聲波)振動的頻率並沒有改變，因此新形成的聲波它頻率和原先的聲音一致，變成原音重現。

薄夾板構造的隔音牆受聲波衝擊產生振動強度會比磚牆、水泥牆大，所以很容易讓人聽到隔壁房間的聲音，這就是隔音材料的隔音機制。了解了隔音的原理後，我們明顯地知道，倘若材料越結實則產生的振動越小，隔音效果就越好，這就是隔音材料的本質。



磚牆



木板



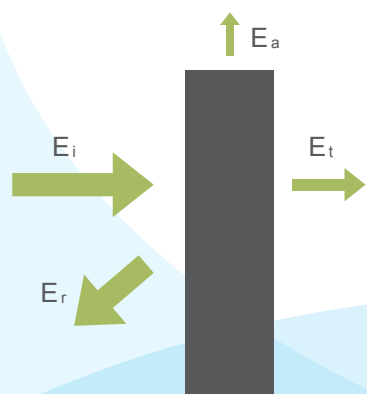
20 隔音材料性能表示

和吸音材料的吸音係數類似，隔音材料也必需有相對應可量化的指標來表示，而隔音材料的性能指標為透過損失TL (Transmission Loss)，透過損失TL的單位為分貝。

當入射聲音(E_i)傳向衝擊隔音材料時，導致隔音材料振動，隔音材料另外一側會產生新的聲波向四方傳播，入射聲音的聲音能量(E_i)和另一側所產生聲音能量(E_t)的比值 $\tau = E_t / E_i$ ， τ 一般稱為透過比，而透過損失TL的定義為：

$$TL = 10 \log \left(\frac{1}{\tau} \right) = 10 \log \left(\frac{E_i}{E_t} \right) \quad \text{單位：dB}$$

為什麼隔音材料的性能指標不採用透過比 τ ，而要採用透過損失TL這種取對數、單位為dB的定義方式？那是因為 E_t / E_i 的比值可以從0.1(TL= 10dB，如木板) – 0.000001(TL= 60dB，如水泥牆)甚至更低，這麼大的範圍不論在表示以及計算上都不是很方便，進一步把 E_t / E_i 的倒數取對數以dB為單位，不論在閱讀及計算都比較簡潔、便利。



TL = 隔音材料之穿透損失 dB

$$TL = 10 \log \left(\frac{E_a}{E_t} \right) \text{ dB}$$

$$TL = 10 \log \left(\frac{1}{\tau} \right) \text{ dB}$$

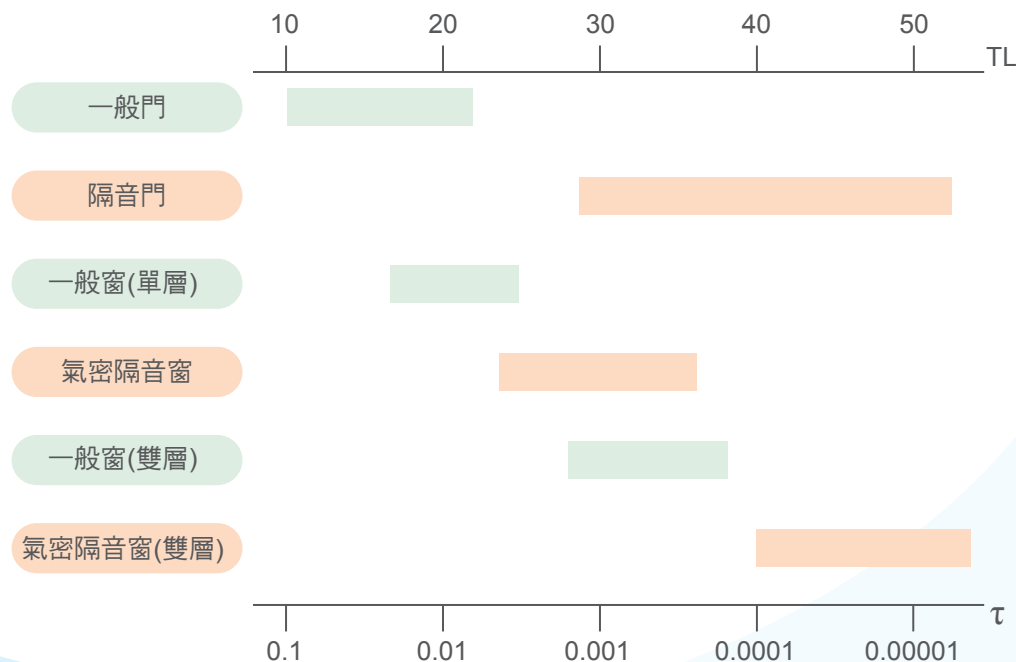
$$\tau = \frac{E_t}{E_i}$$

E_a = 入射音強度

E_a = 透過音強度

TL- τ 對照表

TL	τ	TL	τ	TL	τ	TL	τ
12	0.0631	22	0.00631	32	0.000631	42	0.000063
14	0.0398	24	0.00398	34	0.000398	44	0.0000398
16	0.0251	26	0.00251	36	0.000251	46	0.0000251
18	0.0158	28	0.00158	38	0.000158	48	0.0000158
20	0.01	30	0.001	40	0.0001	50	0.00001



21 什麼是面密度

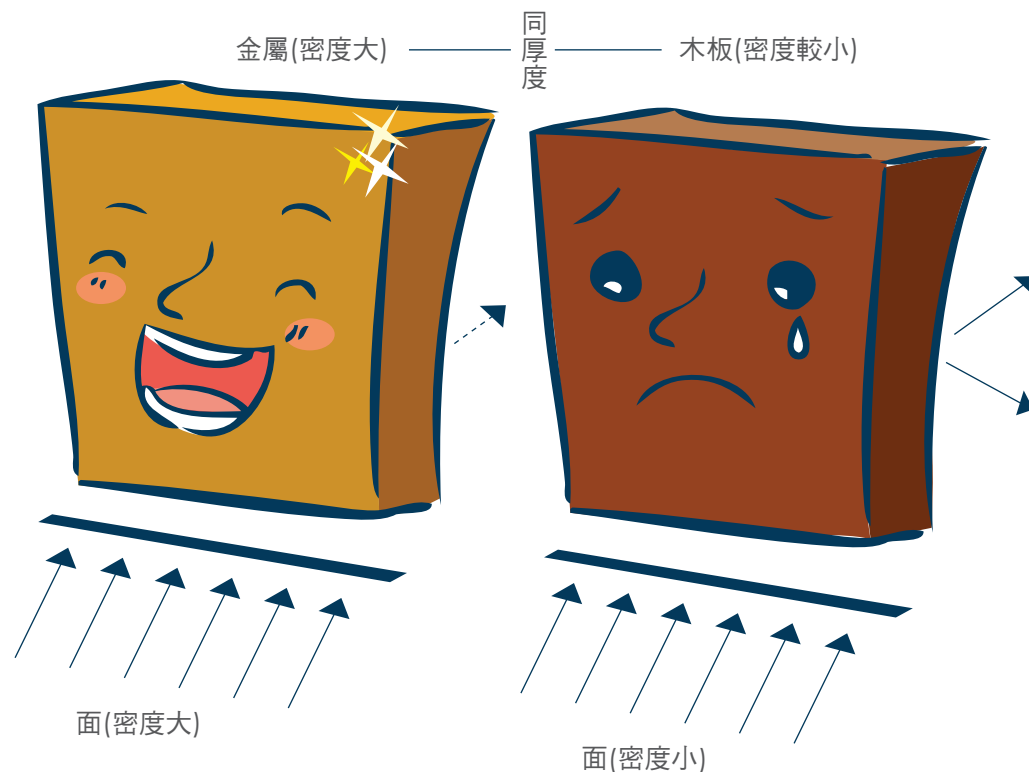
既然越結實的材料受聲波衝擊時振動量較小，適合做為隔音材料使用，但怎麼樣的材料才叫結實不容易振動？在噪音防制的專業領域通常會以面密度做為參考性的指標，面密度較高的材料往往透過損失TL值較高，亦即隔音性能較好。面密度的單位為 kg/m^2 ，指的是單位面積材料的重量，和我們一般常用的密度(kg/m^3)略有不同，我們可以用密度較低的材料厚度厚一點(如磚牆)，或是密度高一點的材料薄一點(如鋼板)。

面密度可以做為評估材料隔音性能的簡易方法，從面密度的角度來看，像一些具備輕、薄特性的材料(面密度低)，例如紙張、保麗龍等都應視為不具隔音性能的材料，也就是不要把它當做隔音材料來使用。事實上在我們生活周圍就有不少具備高密度特性的材料，例如道路隔音牆用的隔音材料為1.6mm厚的鍍鋅鋼板，它也極適合做為機器隔音罩的隔音用途(需再搭配吸音材料使用)。

一些不具備噪音知識的廠商，會將貼有鋁箔的玻璃棉，稱為「隔音棉」向客戶推銷，做為隔音牆增加隔音性能的材料，這是錯誤的做法，基本上玻璃棉是吸音材料而非隔音材料，而所貼的鋁箔它面密度不高，也不足以視為優良的隔音材料，消費者購買或使用了這樣的材料，實際的減音結果往往和期望有明顯的落差。



紙張、保麗龍、鋁箔、玻璃棉皆不是隔音材料喔！



22

隔音性能和聲音頻率關係

很多學者做了許多的研究和測試，試圖以簡單的關係式來表示影響隔音性能的因素，其中一個最常介紹和使用的就是質量定律：

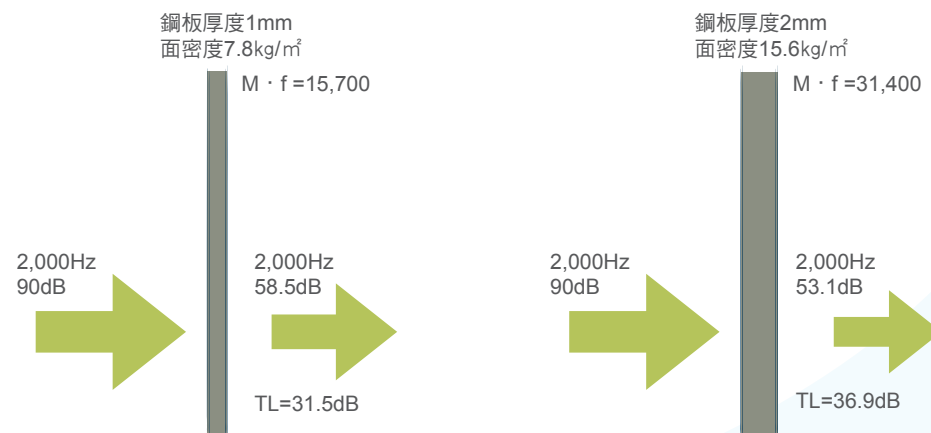
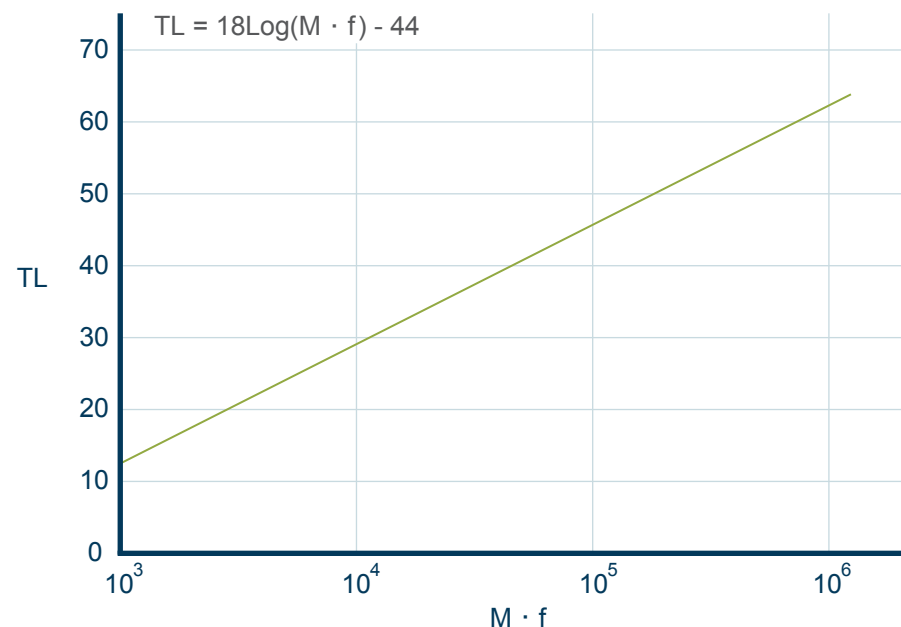
$$TL = 18 \log(m \cdot f) - 44 \quad \text{單位：dB}$$

m ：的面密度(kg/m²)

f ：入射音的頻率(Hz)

理論上來說面密度增加一倍，透過損失TL值會增加約6dB；入射音頻率增加一倍，透過損失TL值同樣會增加6dB，意即同一塊材料對於高頻率入射音的隔音效果比低頻率入射音來得好。6dB的增減為理論值，而實際測試值略小於理論值。

倘若有數種不同的材料可做為隔音用途選擇時，挑面密度較高的材料比較好。相同的材料，厚度較厚的，隔音性能會比較好，但是別忘記厚度較厚另外一個意義材料費也會增加，像同樣大小2mm鍍鋅鋼板價格差不多為1mm厚鍍鋅鋼板的兩倍。



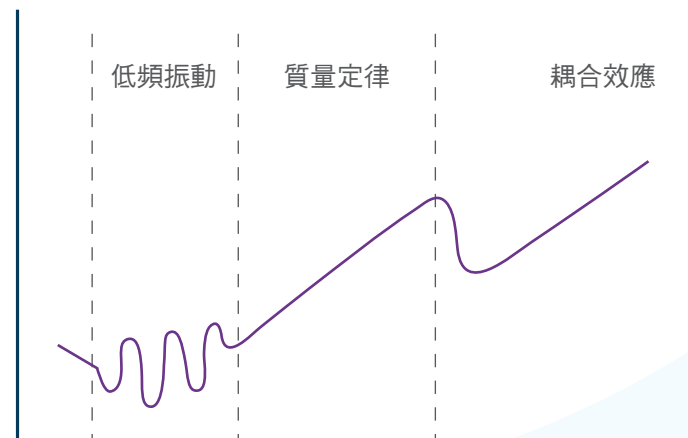
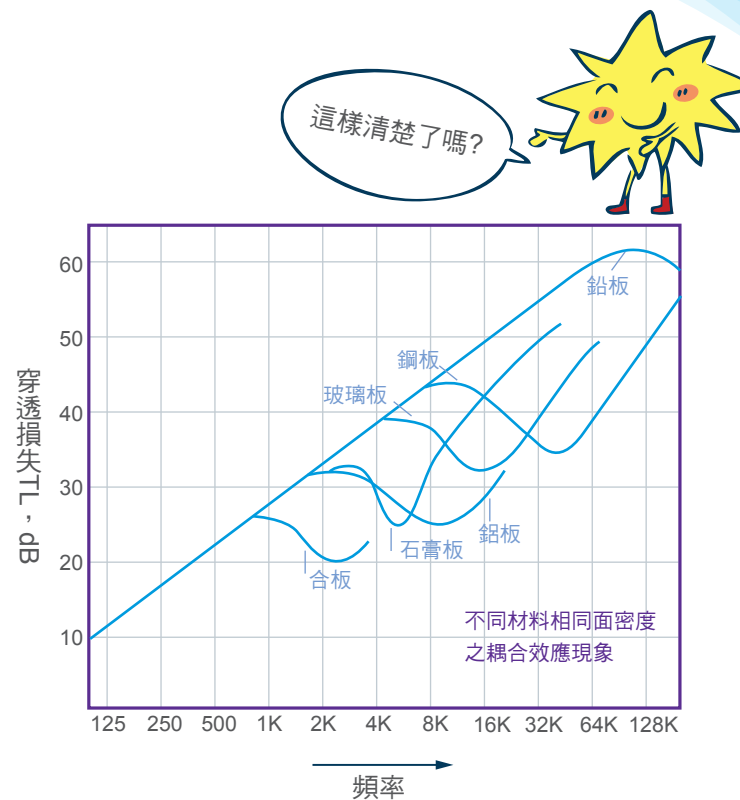
面密度增加一倍，
透過損失會增加6dB

23 隔音材料耦合效應

隔音材料形狀多半為面狀、板狀構件，這類面狀或板狀構件都會有彎曲振動的共振現象，所謂彎曲振動是指板面有波浪狀的振動產生，彎曲振動有其特定的頻率，當入射音以不同角度入射到隔音板(或牆)上時，若是入射音在板上投影的波長和隔音板材其彎曲振動波長一致時便會產生共振，板子振動變大隔音量自然下降，這個現象我們稱之為「耦合效應」。

彎曲振動的頻率和隔音材料的材質、厚度、密度等參數都有關係，故每種隔音板材其彎曲振動頻率都不相同。右圖為相同面密度下不同材料的透過損失相對於入射音頻率趨勢圖，圖中的斜線段符合前面所述質量定律的特性，即頻率增加一倍，透過損失增加6dB，然而斜線到達某一個區域時，透過損失值大幅下降再上昇，這一段區域的透過損失值減少就是隔音板(或牆)彎曲振動所造，像圖中合板的「耦合效應」頻率約在1k-4k Hz範圍；而石膏板略高，約在2k-8k Hz，而我們一般講話的頻率範圍約落在250-4k Hz間，因此有時候我們會覺得這類材料(合板、石膏板)隔音量比較差的原因，並不是因為它們的面密度不，而是它們的「耦合效應」頻率範圍較低的關係。又圖上顯示在6k Hz時，石膏板透過損失值比鋼板低達15dB，但在32k Hz時(鋼板耦合效應區)石膏板反而比鋼板高出約15dB，只是32kHz頻率的聲音已經超出一般人耳的正常聽力範圍(20-20k Hz)。

趨勢圖中另一個現象為相同的面密度材料，密度越高的材料如鋼板、板其耦合效應的頻率區域越高，甚至超過人耳聽力範圍，此時耦合效應所造成的透過損失值降低的現象對隔音應用來說並沒有影響。

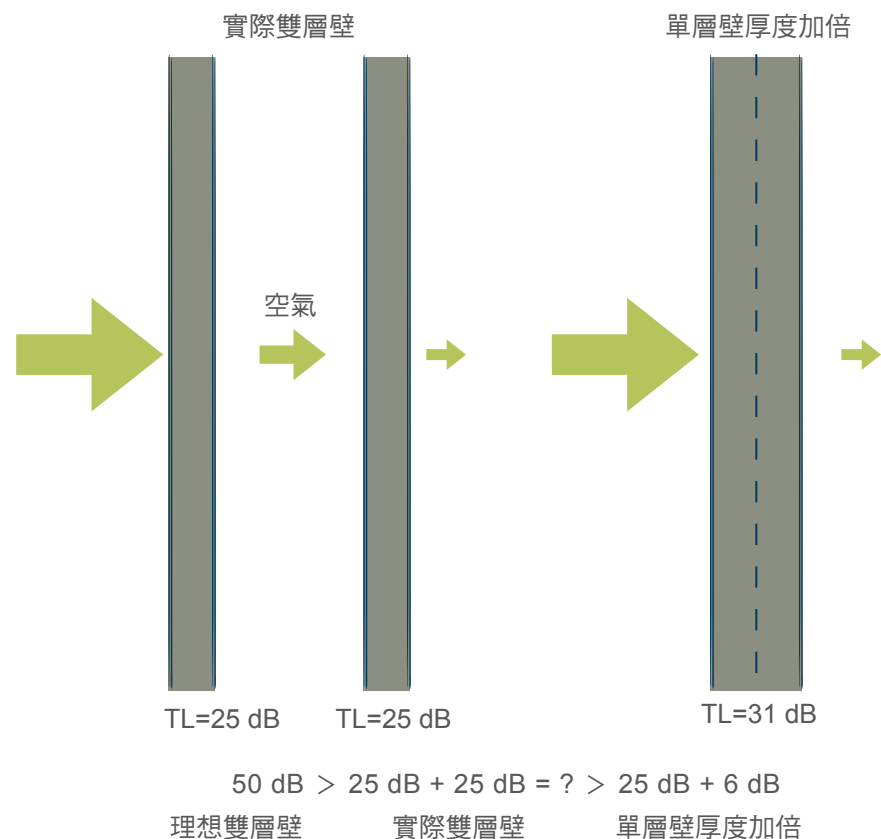


24 隔音輕隔間牆構造優點

隔音材料面密度高，隔音的效果就好，所以提高材料面密度最簡單的方法就是增加材料厚度，例如一片12mm厚石膏板透過損失約25dB，那麼厚度加倍把兩片石膏板釘合在一起，依據質量定律理論上隔音量可以增加6dB而達31dB，因為是兩片釘合成一片使用，材料費自然加倍。可是有人會想到，兩片釘合成一片使用隔量只增加6dB，如果把兩片石膏板分別使用，即當做兩道隔音材(牆)，那麼隔音量應該是25dB+25dB=50dB？是不是比只單純厚度加倍增加6dB來得好？這就是一般隔音輕隔間牆方法，隔音輕隔間牆的作法就以木龍骨或輕鋼架做為結構材，在結構材兩面安裝上石膏板或其它隔音板材，表面整平、粉刷或貼壁紙後而完成。

隔音輕隔間牆(多層牆)構造的優點在於沒有使用水泥，無需等待材料乾透，所以施工迅速。同時就隔音觀點來看，隔音量較單純增加材料厚度來得好外，一種工法可以搭配各種隔音板做為面材外，也可以把雙層牆擴充為三層牆、四層牆，以進一步提高隔音量。

由於不同隔音板都具有各自的耦合效應的頻率區域，造成該頻率區域隔音效果降低，倘若多層牆的面材選擇不同的材質或者不同厚度，讓它們的耦合效應頻率不要相近，如此可以改善耦合效應所造成的隔音量降低的缺點。



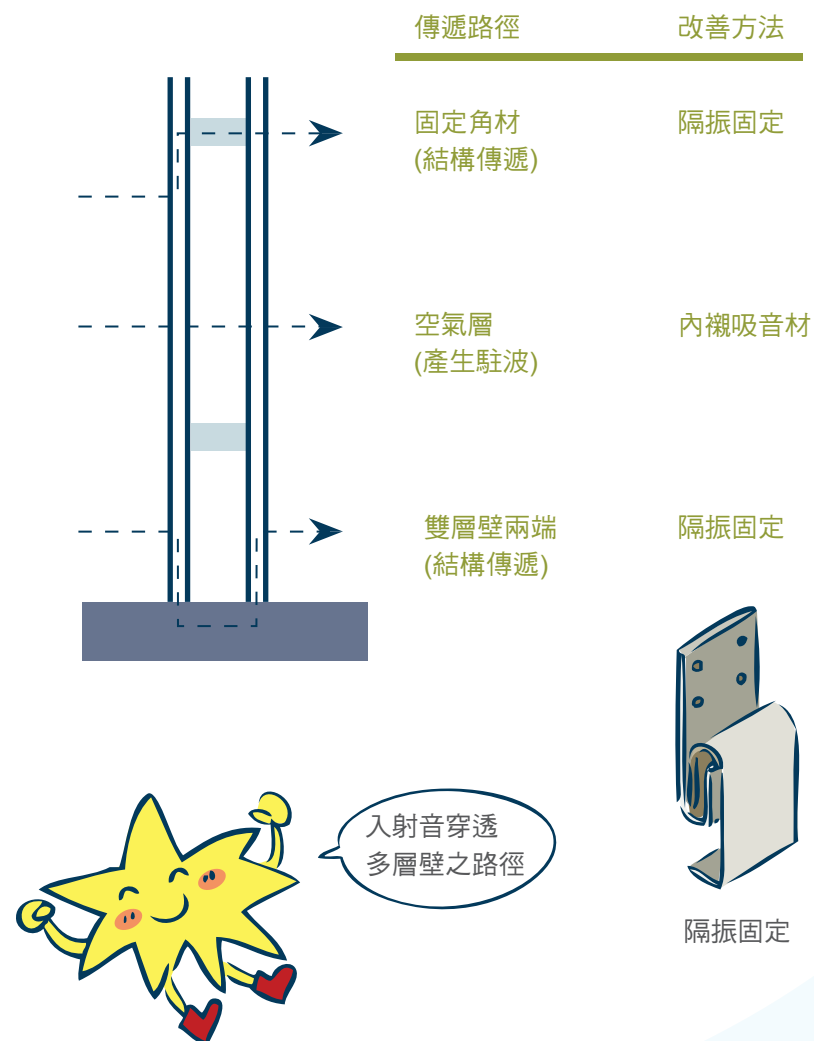
25

隔音輕隔間牆施工注意

理論上隔音多層牆的理想隔音量應該是兩片隔音材料的隔音量總和(如 $25\text{dB}+25\text{dB}=50\text{dB}$)，但實際上由於兩片隔音材料的安裝並非完全獨立的，是安裝在共同的骨架上，所以隔音量是無法以總和計算。造成理想隔音量無法達成的原因有二：1.第一片隔音板的振動會沿著骨架或上、下端的樓、地板傳遞到第二塊隔音板；2.兩塊隔音板的間隔空腔形成駐波共振，而導致對駐波頻率入射音的隔音量會降低。

振動傳遞問題的改善，施工時採取適當隔振措施，可以有效降低第二片面材振動。隔音面材不要直接固定(釘)在骨架上，可以在骨架和面材間加上彈性座(如圖)，這種彈性座是國外石膏板製造廠專為提高輕隔間牆隔音量所設計的。此外輕隔間牆上、下端會和樓板及地板相接，也會造成了振動傳遞路徑，對於下端的地板振動傳遞，施作時可以先墊上一層隔振橡膠，以阻隔振動傳遞；上端不要與樓板相接，以角鋼內貼隔振橡膠做為上端固定方式。

兩塊隔音板的間隔空腔所形成駐波共振，僅會降低駐注共振頻率一致入射音的減音量，對於非駐波頻率範圍內入射音的隔音量並不會有影響。改善的方式很簡單，只要在空腔內填充吸音材料，即可吸收駐波，消除駐波共振，坊間一般輕隔間會填充如玻璃棉等吸音材的原因在此。然而坊間常有一些似是而非說法，輕隔間的隔音是靠裡面的吸音棉，甚至宣稱填充「隔音棉」誤導消費者，隔音輕隔間牆的隔音效果重點在於隔音面材的選擇、隔音層數(2、3、4層等)、振動傳遞的處理等等，內襯吸音棉則為消除駐波目的，並不是關鍵性重點。



26 牆壁隔音量計算

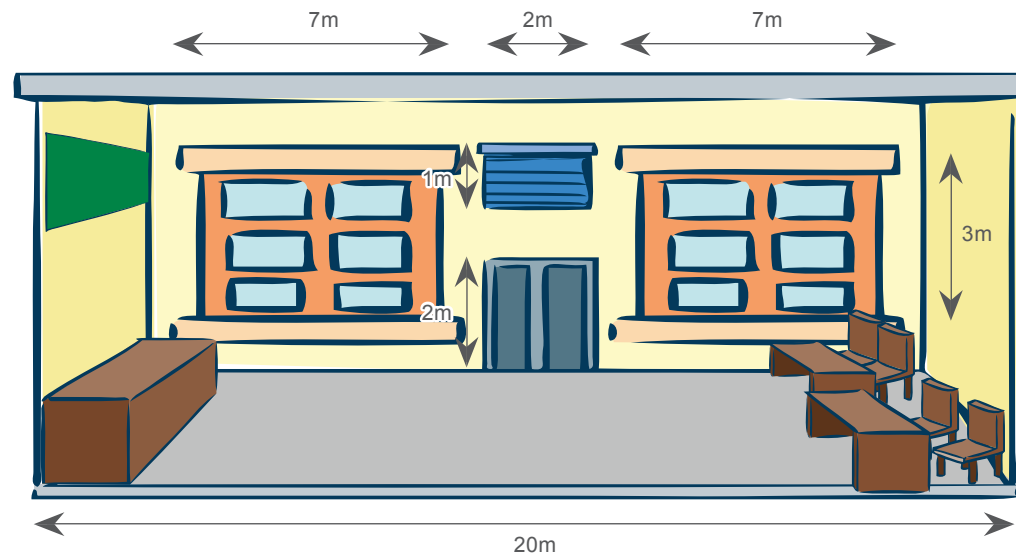
位在道路旁或是飛機場航道下方的住家、學校，都希望增加外牆隔音性能以降低室內噪音量。一般建築物外牆除了牆面壁材外，尚有門、窗、甚至有換氣通風口等部位，外牆牆面的壁材、門、窗等部位各有各的隔音透過損失值，整面牆的隔音量該如何計算？這種具有多種部位(或材料)外牆的整體透過損失TL計算公式如下：

$$TL = 10 \log \left(\frac{S_1 + S_2 + \dots + S_n}{\tau_1 S_1 + \tau_2 S_2 + \dots + \tau_n S_n} \right)$$

其中S為該部位(材料)的面積， τ 為該部位(材料)之透過比。以緊鄰道路邊的學校活動中心(如右圖)為例來計算整體的透過損失，活動中心牆面尺寸為20m寬、5m高，總面積100m²，牆上有採光的窗戶、進出走廊的出入門、調節室內新鮮空氣的換氣口，各部位的面積以及透過損失值、透過比如右表、將右表資料代入上述公式計算，得到整體牆面的透過損失為14dB。

進一步分析，牆面以水泥部位(TL為-40dB)占了一半以上的面積，但整體透過損失卻僅有14dB，從公式中我們可以看出，要得到較高的隔音量，公式中的分母值要越小越好，本例分母值為4.0852主要來自於換氣口(2.0)及窗戶(1.68)，因此改善牆面隔音量應以換氣口及窗戶為主。尤其換氣口面積雖然僅占全體的1/50，但對分母值的影響卻占了近1/2。

將換氣口裝上TL為18dB的消音箱($\tau S=0.0316$)，窗戶換成TL為28dB的隔音窗($\tau S=0.0664$)，分母則自4.0852減為0.5032，整體透過損失增加為23dB，如再把門換成TL為30dB的隔音門($\tau S=0.004$)，整體透過損失則進一步提昇為30dB。



	S	TL	τ	τS
門	4	10	0.1	0.4
換氣	2	10	1	2.0
窗	42	14	.0398	1.68
RC牆	52	40	.0001	.0052

$$\begin{aligned}
 TL &= 10 \log \frac{S_1 + S_2 + \dots + S_n}{\tau_1 S_1 + \tau_2 S_2 + \dots + \tau_n S_n} \\
 &= 10 \log \frac{5 \times 20}{0.4 + 2.0 + 1.68 + 0.0052} \\
 &= 14 \text{ dB (整體隔音量)}
 \end{aligned}$$

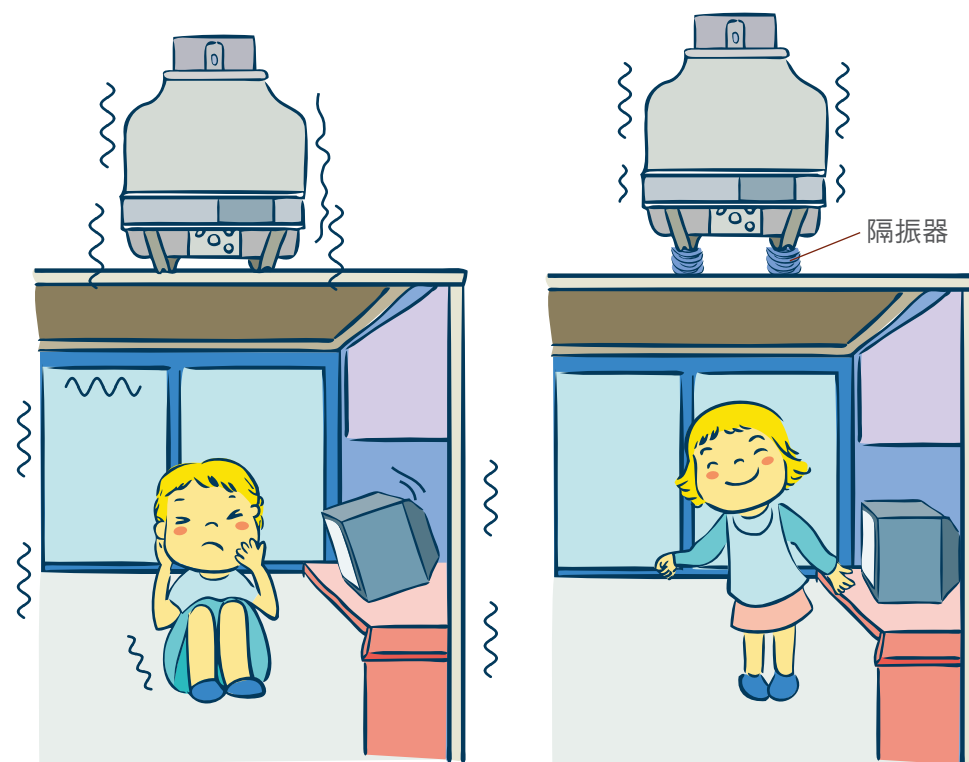
27

固體音的防制

前面我們提到噪音的傳遞可分為空氣音和固體音(第9節)，針對空氣音我們可以採用隔音和吸音並用的方法來降低噪音音量；而固體音由於多半是振動源將振動傳遞到受音者處的壁面而產生的噪音，所以如果能隔斷振動的傳遞，降低受音者處的壁面的振動量，噪音(固體音)音量自然也跟著減少。

固體音的防制必需先找出振動源及所在位置及分析振動傳遞的路徑才能選擇隔振的處理方式，一般建築物內的振動源通常為轉動性機器，例如抽水機、電梯機房馬達、空調風扇及馬達等等；而振動傳遞途徑不外乎為機器機(底)座或管線等部位，經由大樓結構傳到住戶房間。了解振動源及傳遞路徑，才能正確、有效的施做隔振處理。

隔斷振動的傳遞可以針對振動源或受體處著手：1.在振動源處做隔振處理，減小振動傳出量；2.在受體處做隔振處理，以降低受體處的振動量。固體音的改善除了隔振方法外，增加牆面的抗(吸)振能力(例如在振動的鐵板上貼上吸振橡膠片)都能明顯減少固體音的音量。一般來說隔斷振動的傳遞比抗(吸)振處理技術上比較容易施作，同時改善的效果也比較好。



改善前

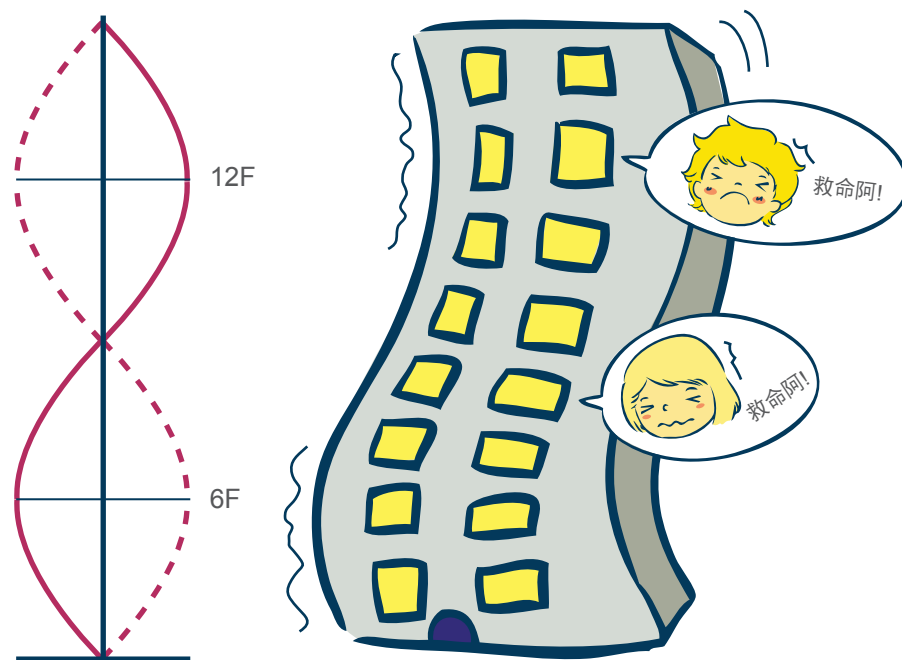
改善後

28 什麼是共振

振動通常是有一個外力刺激物體讓物體產生振動，外力可分為衝擊外力或特定頻率外力，前者例如車輛行經凹凸路面，車體會承受上、下衝擊力而產生振動；後者車輛引擎的振動(力量)傳到車體，引擎振動力量有其特定頻率，該頻率和引擎轉速(油門控制)有關。物體都有其特定的振動頻率及相對的振動形態，當外力頻率與物體的振動頻率一致時，即使較小的外力也會讓物體產生大的振動，這種現象就是所謂的「共振」。在921地震時，有棟大樓第6層和第12層受創最為嚴重，主要是地震的振動頻率和大樓的共振頻率相吻合，而大樓在該頻率的振動形態的最大的位移(變形)產生在第6層和第12層樓處，所以該處結構受損嚴重，而產生災情。

在18世紀末歐洲的物理學家就已經注意到共振現象，當時就發生軍隊通過大橋時，由於步伐整齊，對大橋產生周期性的刺激力，恰巧和橋樑的共振頻率一致，正當指揮官洋洋得意之時，一聲巨響，橋樑突然崩塌，無數人員、馬匹跌落橋下，許多人喪命，一度以為是遭敵人暗中破壞，經過長期追查後，發現是因為共振的關係，自己才是肇事者，從此各國規定行經橋樑時，軍隊不能齊步走，改採自由步伐。

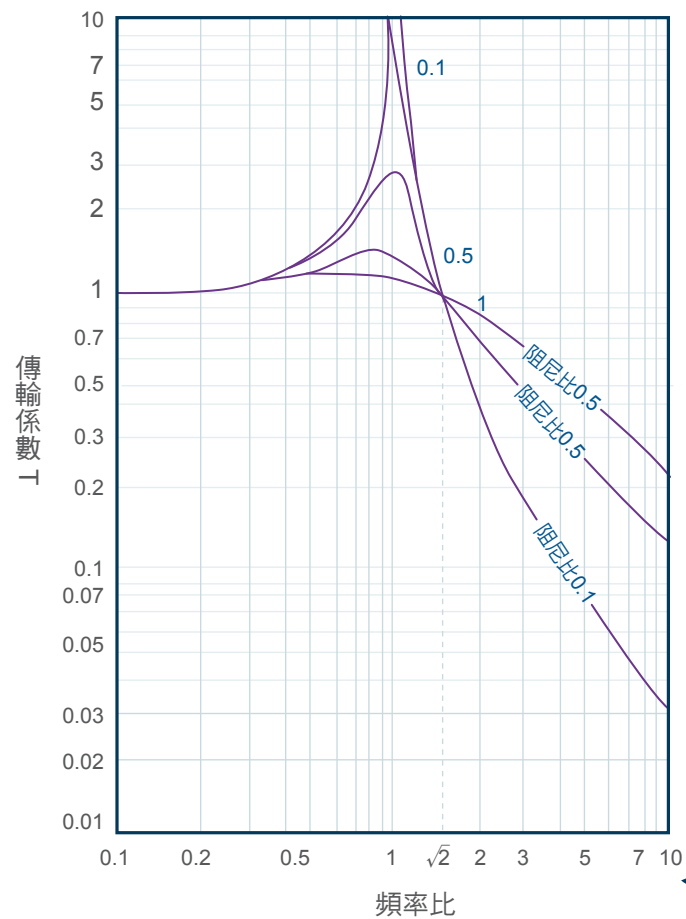
在中國古籍記載，唐朝年間，洛陽有一個和尚，他的房間內掛著一個磬(一種樂器)，常常自行發出聲音，和尚以為是鬼神作怪，嚇出一身病來。他的一位好朋友正巧是樂師，他發現每當和尚廟裡的鐘響起時，房間裡的磬也跟著發出聲音，兩者的聲音有一致性(其實就是兩者共振)，於是樂師把磬磨去幾處，改變了磬的原來聲音(頻率)，從此磬就不再自鳴，和尚的病也隨之痊癒了。



如果我們直接把機器固定在地面，機器的振動會先直接傳到地面，再向四面八方傳遞，於是就有可能會造成振動及噪音問題。通常我們會在機器基座加裝隔振器，以減少地面的振動量，這裡有一個專業的評估指標 $T = \text{地面振動力量} / \text{機器振動力量}$ 或 $T = \text{地面振動量(如位移量)} / \text{機器振動量(如位移量)}$ ， T 通常稱為振動傳輸系數，指的是百分之多少的振動會傳到基座的另外一端(如地面)，機器直接固定在地面狀態時 $T=1$ 表示振動完全傳遞到地面， $T>1$ 表示振動被放大，通常就是我們所說的共振現象產生， $T<1$ 表示振動變小，隔振器產生作用了。

跳過複雜的數學推導過程，振動傳輸系數T可以用右圖表示，圖中 軸為T值，橫軸為頻率比 f/f_0 ， f 為機器的運轉頻率($f = \text{轉速rpm}/60$, Hz)， f_0 為機器隔振基座的共振頻率， $f_0 = 1/2\pi\sqrt{k/m}$ ， m 為機器質量， k 為隔振系統的彈簧剛性系數，而彈簧剛性系數 k 也可以用彈簧壓縮量 X 表示 $X = mg/k$ ， g 為重力加速度。圖中的各條曲線為不同隔振器阻尼比之振動傳輸系數T，阻尼比代表隔振器的吸振特性，阻尼比高的材料(具有黏滯性，同時對振動有較佳的緩衝性)吸振效果較好，一般金屬彈簧阻尼比約 <0.01 ，合成橡膠阻尼比約 >0.2 。

當頻率比 $f/f_0 > \sqrt{2}$ 時， T 開始小於1，表示開始有隔振效果，而且 f/f_0 值越大隔振效果越好(T 值越小)， $f/f_0 = 1$ 時振動變得很大，這就是共振現象。相反的 $f/f_0 < \sqrt{2}$ 時，阻尼比越小的隔振器隔振效果越好，即金屬彈簧比合成橡膠有更好隔振效果，但在 $f/f_0 < \sqrt{2}$ 時，阻尼比大的隔振器反而有較好的減振效果。



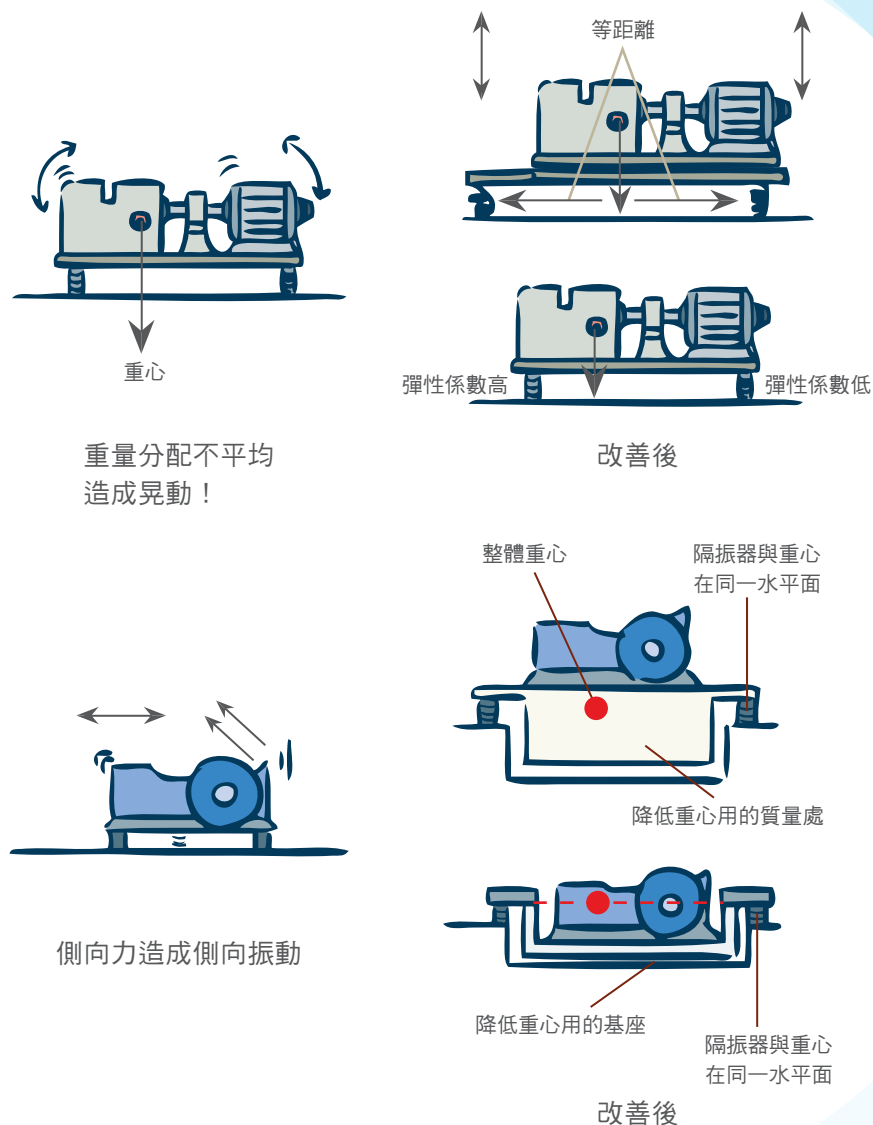
30 隔振設計

一般專業的彈簧隔振器或橡膠隔振塊(墊)廠商所生產的一系列產品規格上，都會詳列各種型號隔振器可以承載重量、彈簧剛性系數 k 值或壓縮量 X 或可承載重量之共振頻率 f_0 供客戶選用。

工程師進行隔振設計計算時，頻率比 f/f_0 通常會取在2.5-5($T=0.3-0.05$)之間， f/f_0 要大於 $\sqrt{2}$ 才有隔振效果(註：受限於隔振器的技術及製造成本，一般隔振器的 f_0 有其一定範圍)， f 取機器的工作轉速，如果機器不只一種工作轉速，則取其最小的工作轉速做為設計 f 值。由於頻率比 f/f_0 和 f 都確定了，可以求得隔振器的共振頻率 $f_0=f/(f/f_0)$ ，機器都有其質量 m ， f_0 和 m 兩項數據是選擇隔振器的重要參考，可以對應到廠商型錄上各型隔振器彈簧剛性系數或壓縮量等規格，選擇其一符合我們需求的隔振器。

計算及選用隔振器時有幾項注意事項，許多設備機器是固定在金屬基座或水泥基座，若隔振器是要放在基座下方，則承載重量 m 除了機器重量外基座重量也要納入；為了機器的平衡，我們一般都會使用4個(或4個以上)的隔振器，若是機器重量為平均分佈在隔振器上，每個隔振器的承載重量為 $1/4m$ 。

雖然隔振設計及隔振器的選用並不困難，但過程中牽涉到機器的工作轉速、重量及重心位置(可能會造成每個隔振器所承載重量不同)等必要數據，故機器所用的隔振器最好交由機器製造商(廠)來計算、選用會比較好。



31

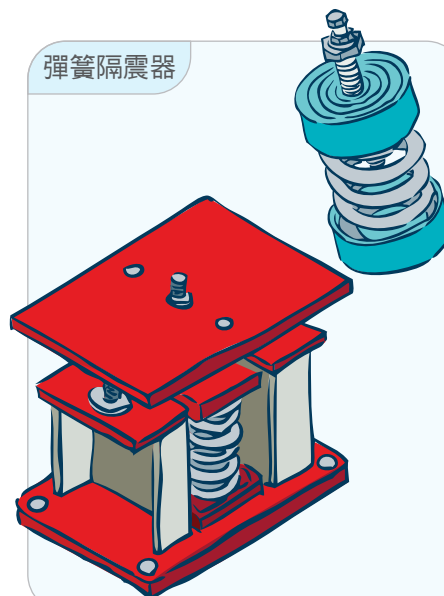
隔振器的種類

常見的隔振器有金屬彈簧及合成橡膠兩大類、其次尚有空氣彈簧、軟木、毛氈塊等等。

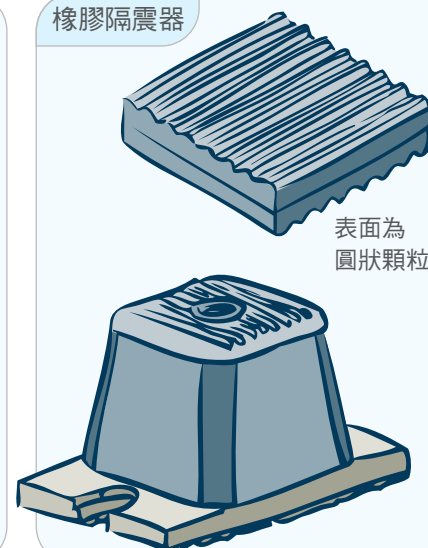
金屬彈簧具有低共振頻率的優點：1. 其 f_0 可以低達5Hz，彈簧的壓縮量 X 可達20mm，壓縮量大 f_0 的值就低，由29節的圖中我們知道 f_0 越低，隔振效果越好。2. 可以承受較大的載重。3. 金屬材質，耐高溫、耐化學、油污腐蝕(相對於合成橡膠)，性能穩定。缺點為：1. 阻尼比太小，於機器啟動、轉速增加通過共振頻率時會產生較大的振動，另外阻尼比小對於衝擊性(非轉動性)外力所造成振動的隔振能力差。2. 金屬彈簧承载力為軸向，若是機器有側向振動位移時，橫向穩定性差。故針對金屬彈簧的缺點，有時為了實際需要，會搭配阻尼器一併使用，例如將彈簧鋼絲外包覆一層合成橡膠，以增加彈簧的阻尼比；或是隔振器同時納入金屬彈簧以及黏滯性阻尼器於一體。

合成橡膠隔振器也常用的隔振裝置之一，優點眾多：1. 容易設計、加工成任意形狀，以符合不同隔振需求使用，如單向(壓縮型)、側向(剪力型)、多向(複合型)。2. 阻尼比高，抗衝擊力及抑制共振性能佳。3. 價格便宜。缺點：1. 壓縮量小，所以 f_0 值較金屬彈簧高。2. 最大可承載重量不如金屬彈簧，適合小型機器。3. 耐有機溶劑腐蝕性能差，且不適合高溫環境下使用。

彈簧隔震器



橡膠隔震器



管線吊掛隔震器

