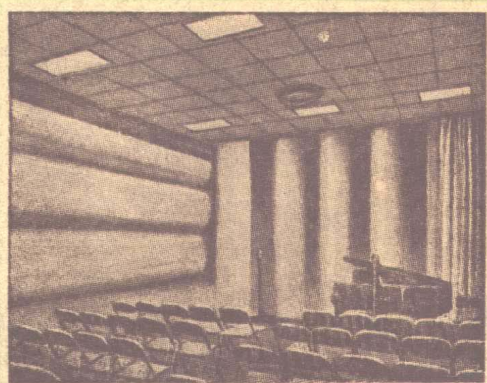


實用建築聲學

Sabine 編
馬大猷 譯



商務印書館

4835



實 用 建 築 聲 學

S a b i n e 編
馬 大 猷 譯

商 務 印 書 館

Sabine
Less Noise • Better Hearing

實 用 建 築 聲 學

馬 大 猷 譯

★版權所有★

商 務 印 書 館 出 版

上海河南中路二一號

中 國 圖 書 發 行 公 司 發 行

商 務 印 書 館 北 京 廠 印 刷

*(63718·2)

1953 年 4 月 初 版 印 數 1—3,000

定 價 洋 11,000

譯 者 序

這本書是根據 Sabine 所編“Less Noise—Better Hearing”翻譯的。原書是美國 Celotex 公司 1950 年出版的，主要目的是在宣傳它的產品。但是因為書的內容還有實用價值，所以我就把它譯了出來，把宣傳性的材料刪去，並且把一些陳舊的東西改寫，增加了一些有用的資料，書內的度量衡制度也都化爲公制了。希望這本書對建築師和工程師的工作能有所幫助，並使學習建築、通訊、聲學、振動學等科的學生得到便利。

在偉大的祖國建設中，建築聲學的重要性將日形增加。在這方面，我們目前的工作做得還比較少。吸聲材料的製造和使用都已開始，但是對這些材料還缺乏有系統的研究和標準化，因此充分利用一般建築材料的吸聲特性和製造，適合於我國情況最經濟的吸聲材料都還待研究。在建築工程中，預先就考慮到音質問題的還比較少，因此適合於我國情況的音質設計也還缺乏標準。此外，進一步提高建築聲學的理論和技術使它更能服務於人民的幸福生活——這一個任務也在等待着我們。因此，我也希望這本書的出版能引起我國各方面對建築聲學更大的注意，對建築聲學的發展有所幫助。

目 錄

譯者序

第一章	聲音的物理性質	1
第二章	吸聲材料	19
第三章	室內聲波	25
第四章	禮堂的音質	31
第五章	各種房間的音質校正	63
第六章	用吸聲處理減低噪聲	95
第七章	隔聲	121
附 錄	平均吸聲係數	139
附表 I	Celotex 類材料的吸聲係數和特性	143
附表 II	普通建築材料的係數	145
附表 III	聽眾和座位的吸收	146
附表 IV	較佳吸聲材料	147
索引		149

實用建築聲學

第一章 聲音的物理性質

聲音就是空氣中的波動。聲波是由振動物體引起的，它在空氣中以固定速度傳播，它的頻率和強度都是在一定範圍內時，就可以引起聽覺。

聲 波

在聽無線電時，如果用手接觸揚聲器紙膜，就可以覺得它的振動。紙膜很快地自其平衡位置向前後振動。膜動時，可把它附近的一層空氣質點帶動。這些質點又把它們的運動傳給底下一層，不過因為空氣是可以壓縮的，並且因為它有慣性（重量），第一層空氣把運動傳給第二層時就需一些時間。再經過一個很短時間，第二層空氣又同樣地使第三層開始運動。每個空氣質點的振動都和揚聲器紙膜的振動完全相同，祇是時間稍微落後而已。所差的時間和到紙膜的距離成正比。這種作用就形成聲波。在水池裏丟進一個小石子所引起的水波是和這個完全相似的。主要區別是：水波祇在水面上傳播，所以是圓形的，而聲波則在空間傳播，是球形的。此外，如果我們把一片木頭放到水裏就可以看到，水中每個質點都是上下地同時又前後地動。在聲波中，每個空氣質點祇是在聲音傳播的方向振動，也就是沿着從這質點向聲源所畫的一條直線振動。

聲 速

聲波的速度是一定的¹，大約是每秒鐘 340 米或每小時 1224 公里。速度是不因音調或響度而變的。聲音傳播需要時間就是為什麼我們先看見電閃後聽到雷聲的原因。光差不多立刻就可以傳到，但聲音自落雷處傳來時每經一公里的距離就需要 3 秒鐘左右。以後將要談到，聲音不能立刻傳到也常常是廳堂裏音質不好的一個原因。

頻 率

再看揚聲器紙膜，我們注意到它自平衡位置或中立位置往返振動。每一趟往返，自中心位置動至一邊，又回至中心，動至另一邊，再回到中心，稱爲一週。每一秒鐘振動的週數稱爲頻率。因爲聲波中每一質點的運動都完全和紙膜的一樣，每一質點的頻率也必然的和聲源一樣。例如，揚聲器發出頻率 1000 週的聲音時，意思是說揚聲器紙膜以及聲波傳過處每一質點都是每秒鐘往返振動 1000 次。

波 長

聲波的波長是聲源振動一週的時間中，聲波所傳出的距離。換一個說法，從字面上也可以看出，波長就是每一個波的長度。很容易的可以證明，波長是等於聲速(每秒 340 米)被頻率除。例如，頻率 100 週的聲波所有的波長是 340 用 100 除，就是 3.4 米。1000 週聲音的波長則是 0.34 米。

從上面的討論裏，我們就可以獲得聲波如何行動的一個具體觀念，

¹ 事實上，聲速因溫度不同而稍有變動。在 15°C 時，聲速是每秒 340.31 米，0°C 時是每秒 331.36 米。

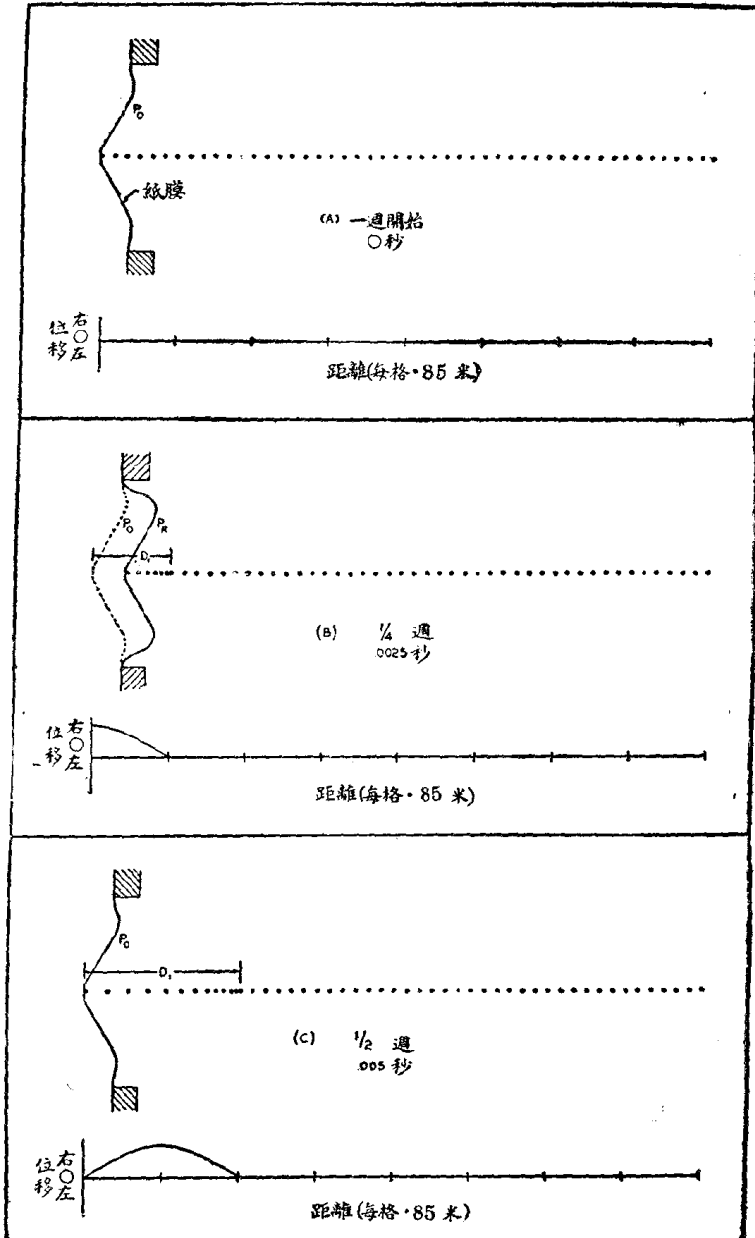


圖 1.1 紙膜振動所引起的聲波

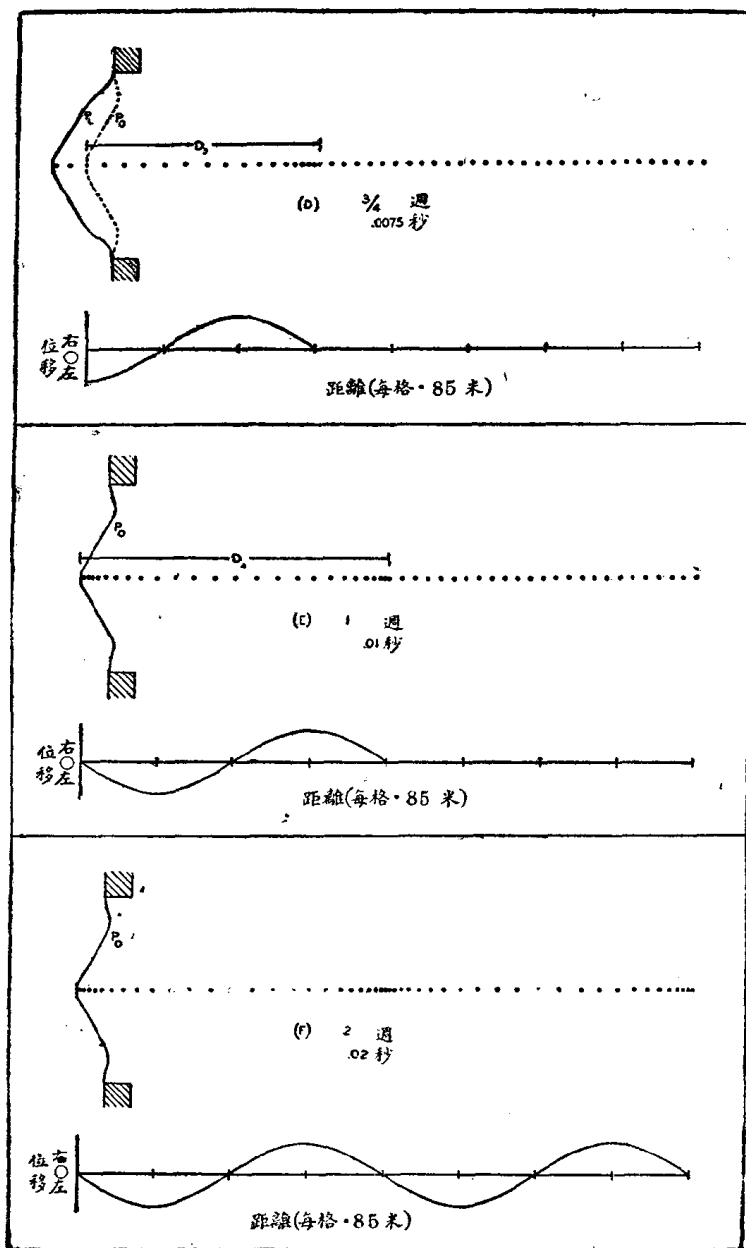


圖 1.1 紙膜振動所引起的聲波

如圖 1.1 所示。揚聲器紙膜自它的中立位置 P_0 向左右振動，最遠可到達左邊的 P_L 及右邊的 P_R （為清楚起見，圖中所繪振動範圍較實際者為大）。圖中黑點代表自紙膜中心畫出一條直線上的若干空氣質點。圖 1.1 A 代表紙膜剛開始振動的時刻所有情形。此時還沒有聲音發出，紙膜和空氣質點都還在它們的中立位置。

假設紙膜振動頻率是每秒 100 週。振動一週需要 .01 秒。振動四分之一週（例如自 P_0 動到 P_R ）就需要 .0025 秒。圖 1.1 B 是已完成四分之一週的情形，聲波的前面（傳播速度是每秒 340 米）在這時間內已傳到 D_1 ，從紙膜的距離是 $340 \times .0025$ 或是 .85 米。振動半週後，紙膜又回到 P_0 ，波則傳到 D_2 ，自紙膜距離是 1.7 米，如圖 1.1 C 所示。圖 1.1 D 是再過四分之三週後的情形，圖 1.1 E 則是一週完了時的情形。下面一週就發生一個完全相似的波跟着第一個，如圖 1.1 F 所示，紙膜連續振動一秒，就有一百個波傳出去。自聲源到 D_4 的距離就是波長，3.4 米。

圖 1.1 中每個小圖下面的曲線是代表在每一時刻各距離不同的空氣質點自它中立位置所移動的距離，我們常用這種圖解的方法表明波動。

強 度

聲波的強度²代表振動着的空氣質點所有能量的多少。能量的大小又和質點在其中立位置兩邊所移距離（或振幅）有關。振幅愈大，強度愈高。

² 在本書中“強度”一詞是表示聲場的強弱，或者僅是性質上描寫或者是相對價值，一般地是指聽者耳邊的情形。這樣用法在科學上是不嚴格的，但是對一般讀者則比較簡單明瞭。嚴格地說，有些地方用“聲能密度”、“聲壓”、“聲壓平方”等名詞更為妥當些。

設想把一個同樣的向各方向發射聲能的聲源放在一個假想的圓球中心，設圓球半徑為一米。每秒鐘整個圓球表面上傳出聲能(以瓦特計)必然地和紙膜所供給的能量相等。在圓球表面上(或是任何和聲能傳播方向垂直的表面)，每單位面積上在一秒鐘內所傳出的能量就是強度，單位是每方米上的瓦特數。

假設把假想的圓球半徑加倍。圓球表面是和半徑平方成比例的，就要加到四倍。流過大球表面的能量還是和剛才一樣多，可是要分散到四倍大的面積上了。所以在每一方米上所流過的能量，也就是強度，祇有小球上的四分之一。這就是說，把距離加倍，強度就減至四分之一。同樣道理，把距離加至三倍，強度就要減到九分之一。這個關係稱為反平方律：聲強和至聲源的距離平方成反比。同樣的定律也適用到光強與至光源的距離所有的關係上。強度當然也和聲源的功率成正比。我們聽無線電時，轉動音量控制鈕把供給揚聲器的電功率加倍，各處的聲強也就跟着加倍。

距一個沒有方向性的聲源 d 米遠所有強度的實際價值等於聲源的功率用 $4\pi d^2$ (半徑為 d 的圓球面積)來除。

我們必須指出反平方律祇能決定自聲源沿一直線傳到聽者的聲強。在房間裏，或者任何附近有反射面或物體的地方，反射波就要和直達波加起產生一個總聲強，它的價值要看許多別的因素來定。這種情形在以後幾章中還要詳細討論。

頻率計量

在聲學工作中和鋼琴鍵上相似，頻率常常按“八度音”排列。“八度音”一詞是從音樂名詞中借來的，它表示兩個頻率比為 2:1 的聲音間的音程。在聲學分析和測量中最常用的一串頻率是 128、256、512、1024、

2048 和 4096 週。256 週的聲音差不多是鋼琴上的中間 *C* 音，128 比它低一個八度音，4096 週（鋼琴上的最高音）比它高四個八度音。這一串的頻率差不多包括了語言和音樂中所用的全部頻率範圍。

強度計量——分表

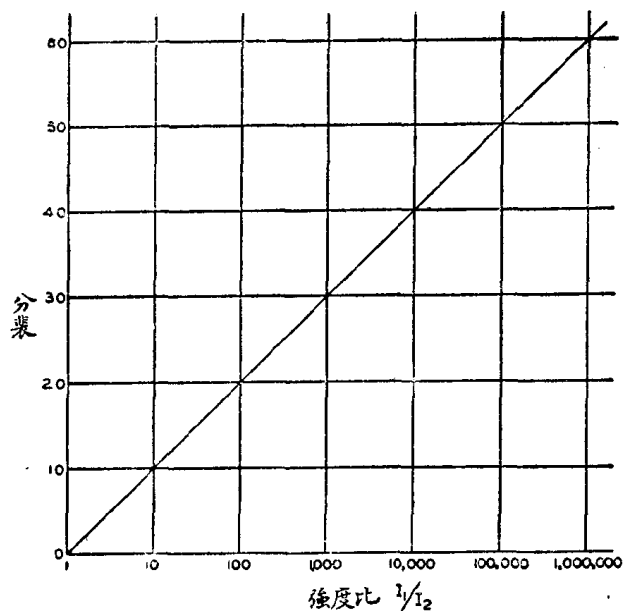
由聽覺的測驗，我們知道正常的耳朵所能聽到的聲音強度範圍幾乎大到不可思議。人耳所能聽到的最響聲音（還不至於震耳難受的）為最弱可聽聲音的 1,000,000,000,000 倍。為應付這樣大的強度範圍起見，我們常採用一個名詞分表（符號是 *db*），作量兩個電功率或聲功率的比值所用的單位。聲強實際是聲功率，所以也可以用這個單位表示。代表兩個聲強比的分表數等於比值的常用對數^{*}乘以 10。假設兩個聲強是 I_1 和 I_2 ，相當於兩數比值的分表數應是：

$$N = 10 \log_{10} \frac{I_1}{I_2} \text{ 分表}$$

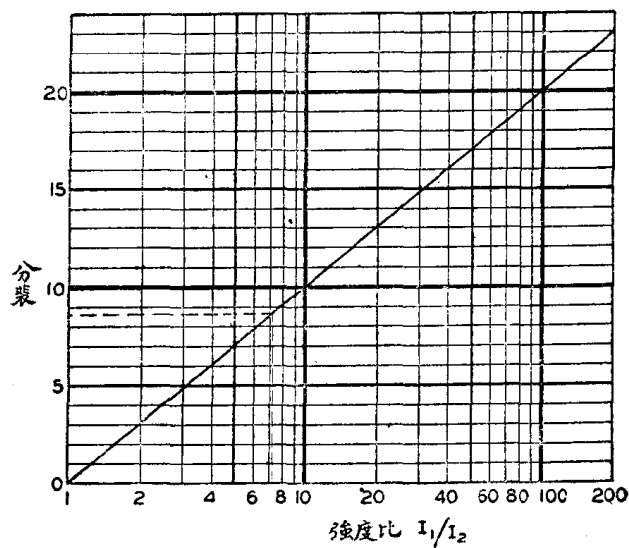
例如， I_1 等於 I_2 的 1000 倍時，二者比值，1000，的對數是 3，分表數就是 $3 \times 10 = 30$ ；我們說強度 I_1 比強度 I_2 高 30 *db*。

分表和強度比的關係如圖 1.2 所示。圖 1.2 *A* 祇畫到強度比是 1,000,000 倍，必要時可以無限制地延長，強度每高十倍，分表數就加十。圖 1.2 *B* 是把上面的一段放大，用它可以得到更精確的結果。例如比值是 7.2 比 1 時，我們要求分表數，圖 1.2 *B* 中的虛線告訴我們，答案是 8.6 *db*。比值是 72 比 1 時，從圖 1.2 *B* 中可以求出 18.6 *db* 來。再用圖 1.2 *A* 幫助，我們就可以求出 720, 7,200, 72,000 等比值相當於

* 一個數目的常用對數代表要得到那個數目須要用 10 自乘的次數。例如 $100 = 10 \times 10 = 10^2$ ，所以 100 的常用對數是 2，或者寫做 $\log_{10} 100 = 2$ 。同理， $\log_{10} 1000 = 3$ ， $\log_{10} 10000 = 4$ ，其他數目的對數可用計算尺求出或從對數表查出。



A



B

圖 1.2 分貝制與強度比的關係。圖 B 係圖 A 左下部分的放大。

28.6, 38.6, 48.6 等分表數。由這個圖表中也可以看出，強度加倍，強級大約增加 3 分表，每增加一個分表大約相當於強度增加百分之 26。

在音質工程內現在已經普遍地把用分表表示的強度稱為強級了（噪聲級代表噪聲強度的分表數）。例如，我們說辦公室中的噪聲級是 80 db，或說擴音器在禮堂中所產生的聲級是 70 db。這些說法的實際意義是說所量到的強度比某一標準強度高 80 或 70 分表。如果祇說某一聲強是 70db 而不說明標準強度是什麼，這是毫無意義的。這就好像是說某城的人口是百分之 30，而不說明到底是哪省，哪行政區還是另一城市的百分之 30 一樣。所以我們必須選擇一個標準強度來作參考，把它叫做 0 db。

近年的標準化工作已經公認把每方米 10^{-12} 瓦特的強度當做標準，在分表制裏使用。這個功率傳播，每方米一萬萬萬分之一瓦特，雖然是非常小，但是聽覺稍好的人已經可以聽到它了。這個聲強就相當於 0 分表，有了標準強度，以後再用分表來表示任何聲音的強度時，就有了確定的意義。例如，我們說某山峯的高度是 2000 米，祇有當我們知道 0 米代表海平面高度時，我們才能確實瞭解這山峯的高度。同理，當我們說某聲音的強級是 60 db 時，我們知道它的強度是比每方米 10^{-12} 瓦特的強度高 60 db，或說它的強度是每方米 10^{-6} 瓦特。

圖 1-3 表明常遇聲強的分表數⁴。表中頂低的聽覺低限代表人耳所能聽到的最低聲強。這個數量的準確價值各人略有出入，不過正常聽覺的平均值大約是在零上幾個分表。感覺低限代表開始使正常的人耳感覺痛苦的強聲。這強級的平均值是 120 db，或是說比零分表的聲音強一萬萬萬倍（1 後面加十二個零）。

* 取自美國吸聲材料協會所發表的 "Theory and Use of Architectural Materials"。

	分數	感覺低限
震耳	120	
	110	雷、炮 鉚釘氣錘 高架電車 鍋爐工廠
	100	
極響	90	市聲(鬧時) 工廠(較響) 卡車(未用減音器) 警笛
	80	
	70	辦公室(亂時) 市聲(平均) 無線電(平均) 工廠(平均)
響	60	
	50	住家(鬧時) 辦公室(平均) 交談(平均) 無線電(較輕)
	40	
輕	30	住家(較靜) 辦公室(較靜) 禮堂(平均) 交談(輕聲)
	20	
	10	樹葉微動 微語 隔壁房間 聽覺低限
極輕	0	

圖 1.3 常遇聲音的分數數

聽 覺

聲音的物理性質是頻率和強度，它所發生的心理印象是相當的音

調和響度。音調高的聲音，例如哨子、尖聲等，頻率是高的。音調低的聲音，例如吼聲、唱歌的低音等，頻率都是低的。聲音的響度則和強度有關，強度愈大，響度也愈大。

耳朵如何把頻率、強度都不同的聲音反映成功聽覺是非常複雜的。兩個強度相同但是頻率不同的聲音可能不一樣響，強度加倍的聲音也不一定是加倍的響。耳朵的特性可以部分地用圖 1.4 中的等響曲線⁵表示。這些線是在條件良好的情形下根據很多聽覺正常的聽者對於響度的判斷得來的。

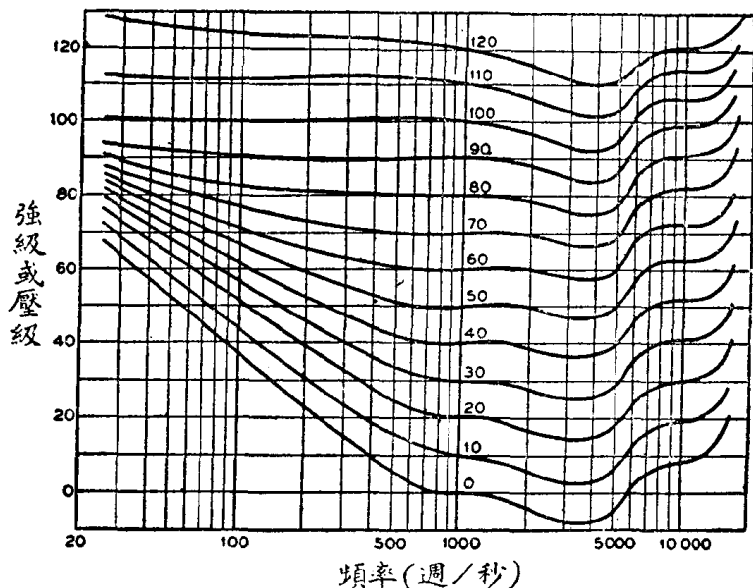


圖 1.4 等響曲線。

圖 1.4 中橫座標代表頻率，縱座標代表強級(分婁數)。在圖中一條水平線上各點代表強度相同但是頻率不同的情形，在一條垂直線上各點則代表頻率相同而強度不同的情形。不規則的曲線稱為“等響曲

⁵ 參考 Fletcher and Munson, J. Acous. Soc. Am. V, 82 (1933)。

線”。在這樣一條曲線上各點所代表的聲音對人耳聽起來是一樣響的。在 1000 週處的垂直線旁所寫的數字叫做響級，是用來區別各等響曲線的。任何聲音的響級就等於一樣響的一個 1000 週聲音的強級。響級的單位叫做封。按照定義，一個 1000 週聲音的響級(用封做單位)是等於它的強級(用分貝做單位)的。

現在可以舉幾個例說明這圖的用法。假設一個 1000 週的聲音所有的強級是 40 db ，如果把它們的頻率減低到 100 週，它的強級必須增加到 62 db ，我們才覺得它是和以前一樣的響(40 封的等響曲線和 100 週處的垂直線在 62 db 處相交)。如果強級不變，當我們把頻率從 1000 減低到 100 週時，響級就要從 40 封減低到 4 封左右(40 db 強級的線和 100 週的直線相交處是在 0 到 10 封之間，大約是 4 封的樣子)。如果強級不變，頻率再繼續減低，到一個程度(大約 88 週的樣子)聲音就完全聽不見了。

如果 1000 週聲音的強級原來是 100 db 而不是 40 db 的話，把它們的頻率自 1000 週減少到 100 週時，我們就聽不出響度有什麼變化了(100 封的等響曲線在 1000 週以下差不多是與 100 db 的水平線重合)。

再舉一個例，在 1000 週時，20 封與 60 封兩個等響曲線間強級相差 40 db ，但是在 100 週時，兩者祇相差 20 db 。換一句話說，要想發生一樣大的響級變化時，在 1000 週所需要的強級變化比 100 週時的所需要加倍。

由上面的例子中，我們可以得到以下的結論：

- (1) 強級低時，強度相同的高頻聲音較低頻聲音顯得更響些。
- (2) 強級高時，強度相同的聲音顯得一樣的響，與頻率無關。
- (3) 強級低時，同樣大的強級變化在低頻率所引起的響級變化比在高頻率的大。