

3-1 聲波的傳播

3-2 空腔中的聲音

3-3 聲音的共鳴



樸實的聖羅倫斯教堂（St. Laurence Church of Upminster）位於英國倫敦的近郊，它因為擁有一座近八百年歷史的高塔，而和著名的白金漢宮同屬一級古蹟。這座高塔不僅見證了英倫的興衰起伏，尚且聆聽過科學史上一個非常重要有關聲學的實驗。你可知道此中的故事？



The sound of a kiss is not so loud as that of a cannon, but its echo lasts a deal longer.
輕吻一聲雖然無法和槍砲的巨響相比，但其回音卻繞樑不絕。

— 老霍姆斯（美國醫師兼作家）（Oliver Wendell Holmes, Sr., 1809 - 1894）

對於許多人來說，1705 年的 2 月 5 日或許只是另一個平淡的日子，但是對於兩年前才剛當選為皇家學會會士的英國牧師德勒姆（William Derham, 1657 - 1735）來說，這一天卻令人既興奮又緊張，因為就在當天傍晚準六點整，他即將進行一項令他名留青史的科學實驗：精確地測量出聲音在空氣中傳播的速率。

德勒姆測量聲速的想法是這樣的：由於當時人們已經能夠製作準確度比較高的懷錶以及擺鐘（所使用擺鐘的週期通常是半秒），所以他便安排人手攜帶事先對過時的懷錶到數公里遠的地方，請他們於約定的時刻發射槍砲，而他本人則在所工作的聖羅倫斯教堂高塔上以望遠鏡觀察遠方發射槍砲時所產生的火光，然後測量自看到火光直到耳朵聽見槍炮聲所經過的時間，接著將兩地之間的距離除以所經過的時間就可以換算出聲音傳播的速率了。

做完實驗後，德勒姆在寫給他朋友的信件中作了如下生動的描述：

非常感激你答應借我這些槍炮。我可以很清楚地看到它們並且聽見其聲音，從而利用它們進行了很好的實驗。最後那三個槍炮聲都非常精確地於 32 個半秒後抵達。不過當我看到第一道火光那一刻，由於急著想聽槍炮聲，不小心碰了我的擺鐘一下，害它整個停擺，結果就計數錯了…

德勒姆不僅在遠近不同的村落發射槍砲重複了這個實驗，他還透過關係商請派駐在義大利弗羅倫斯的大使幫忙進行類似的實驗，並取得了相關實驗數據。而其測得的聲速為 343 m/s，和今日公認 3 °C（當時倫敦二月分的約略溫度）時之聲音速率值（333 m/s）極為接近！

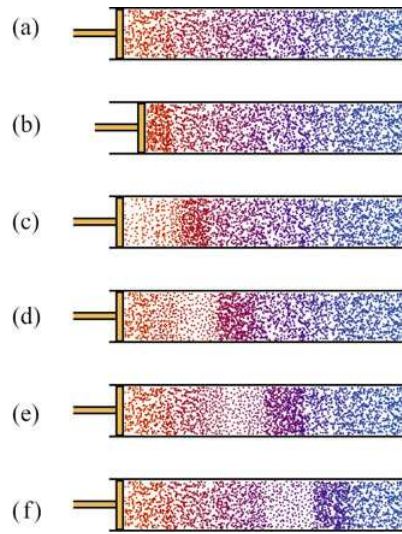
能夠在 300 年前就將聲音傳播的速率測得如此準確，這當然是一個相當大的成就。可是聲音的本質究竟是什麼呢？聲音又是如何傳播的呢？當許多人對此問題都還摸不著頭緒的時候，和德勒姆同時代的另一位科學家卻早在十幾年前便已經了然於胸，而且還提出怎麼利用基本理論去計算出聲音傳播的速率了。那位科學家就是大名鼎鼎的牛頓。

於第一節中，我們用現代的語言來將牛頓思想的精髓重新作詮釋，並對聲波作簡單的介紹。

3-1 聲波的傳播

聲波是一種力學波，它是靠介質受擾動以後所受到的彈性力來傳送。雖然平常我們講話的聲音是依靠空氣來傳播，但傳播聲波的介質不限於氣體，即便在液體以及固體中聲波也是可以傳播的。正因為這個緣故，人們才能利用所謂的「聲納」做海中探測，而伐木業者也才能很方便地利用聲波於木頭中傳播特性的改變，來判定儲存一段時間後原木的乾燥程度。

聲波的產生以及傳播過程可以利用圖 3-1 所示的模型來說明。假設一個兩端開口的長管內充滿空氣，左端開口以一個活塞頂住。同時為了要顯示出介質並不會因為聲波的傳播至別處這個重要的特性，我們繪圖時故意將管內的一些空氣小塊以顏色標示，使得在管子同一截面處的空氣小塊都具有相同的顏色（圖 3-1(a)）。則當我們將活塞從左端往右快速推入一小



▲圖 3-1 聲波的產生以及傳播過程。

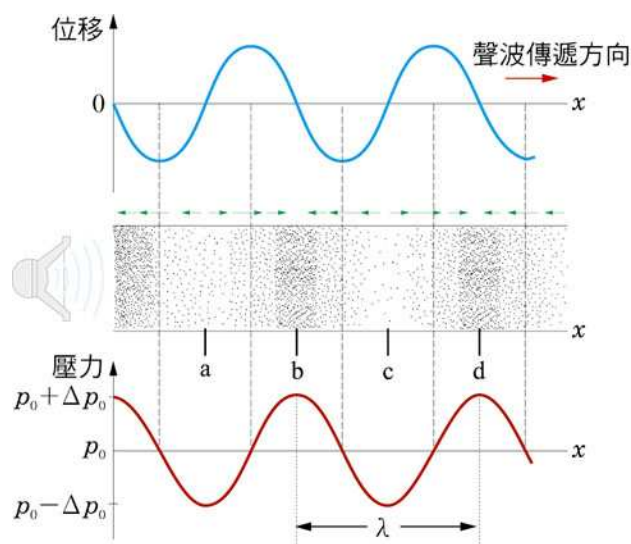
段距離的時候，和活塞緊鄰部分的空氣會被壓縮，這就使得該處的空氣壓力變大（圖 3-1(b)）。當我們將活塞拉回原始位置的時候，和活塞緊鄰部分的空氣密度會變小（圖 3-1(c)）。於是圖 3-1(c)中密度比較大（壓力比較大）的區域會有向左右膨脹推開的趨勢。這會造成兩種效果：其一是，此壓力較高區域的介質會向左膨脹，使得活塞附近的空氣密度回復原始的數值（而且由圖中小粒子的顏色來看，可以發現這些小粒子又回到當初的位置），而向右推則會壓縮其右側的空氣，而且此二因素所合成的效果就是讓此區的空氣密度反而變小了（圖 3-1(d)）。接著這個過程會繼續重複（圖 3-1(e)-(f)），於是我們就製造出一個往右傳播的疏密相間的脈波了。以上的說明同時告訴了我們：**聲波是一種縱波，當**

聲波傳播時，疏部和密部會相伴前進，且聲波只是傳送空氣的擾動（亦即使得一小塊空氣偏離平衡狀態做小小的位移），而波動並不會將空氣帶走。當聲波通過後，所考慮的一小塊空氣便又恢復原始的狀態。

於以上的討論中，你很可能也注意到了另一個很有趣的現象：當聲波通過時，壓力最大的地方因為會有同時向其左右兩側膨脹推擠開來的趨勢，因此該處的一小塊空氣此時是不會有位移的。類似的，在疏部的中心（亦即密度最小的地方）空氣小塊也不會有位移。如果我們

連續不斷地去推拉活塞來造出一個連續的正弦波，則沿著聲波傳遞的方向上，每個位置處之空氣小塊的位移以及壓力之間的關係便如圖 3-2 所示。簡言之，在空氣壓力最大的位置，介質的位移為零，而當一小塊空氣的位移量值為極大時，其對應的空氣壓力變化值為零。空氣壓力變化的極大值和介質位移的極大值不是在同一處發生，對於圖 3-2 所示的正弦波而言，此兩者出現的位置相差 $1/4$ 波長。

在以上的說明中我們都是將空氣當成巨觀的物質，但如果利用分子的觀點來看則又如何呢？當空氣沒有受到擾動時，巨觀上每一小塊空氣都是屬於平衡狀態，而空氣的密度和壓力在各處皆呈均勻。但這並不是說空氣分子是處於靜止狀態。事實上這些分子是以相當高的速率一直在作任意無規則的運動，且彼此之間常有碰撞。但就一般生活上的時間尺度而言，空氣分子的平均位移為零。當聲波傳來時，空氣的每一小部分



▲圖 3-2 當聲波沿 x 軸傳播時，一小塊空氣的縱向位移和壓力隨位置變化的關係圖。圖中 λ 為波長， Δp_0 是空氣壓力與其平衡值 p_0 間之最大偏移量。

皆隨之作週期性的來回振動，其方向平行於聲波的傳播方向。這個有規律的微小振動會疊加在原來空氣分子的無規運動上，使空氣的密度和壓力產生週期性的起伏變化。在噴射客機附近聽震耳欲聾的引擎聲很容易對人耳造成傷害，此聲波所造成的空氣壓力變化幅度約為 10 帕 (Pa)，這相對於大氣壓力的 10^5 帕而言可說是很小，而其對應的空氣位移之振幅則在 0.01 mm 的數量級。故聲波的傳播對空氣所造成的擾動，就好像小漣漪在水面上的傳播，屬於微小振幅的波動。

如前所述，聲波除了在空氣中傳播之外，也可在固體及液體中傳遞，但是在固體中傳播的聲波，除了縱波的形式外，也能以橫波的形式傳播，流體則不然。之所以會有這樣的差別，是因為雖然一小塊流體或固體在承受垂直於其表面的縱向力時，均可以產生一個反抗的彈力來造成縱波的傳遞，但當外界是對一小塊物質施以平行於其表面的作用力時，流體僅能順勢流動、完全無法產生彈力，而固體卻能以橫向的彈力反抗，從而產生橫波。根據進一步的理論計算顯示，固體中橫波之傳播速率恆小於縱波速率，例如在普通玻璃中的縱波速率為 5.2×10^3 m/s，橫波速率為 3.0×10^3 m/s。表 3-1 所列為聲波

(縱波) 在不同介質中的傳播速率。在乾燥無風的空氣中，0 °C 的聲速為 331 m/s，氣溫每升高 1 °C，聲速約增加 0.606 m/s，因此若以 t (°C) 代表氣溫，則空氣中的聲速 v (m/s) 的數值可寫成下式：

表 3-1 聲波 (縱波) 在不同介質中的傳播速率 (20 °C)

介質	聲速 (m/s)
空氣	343
淡水	1483
海水	1520
水銀	1450
橡木	3850
鉛	1190
銅	3810
鋼	5200
鋁	5100
玻璃	約 2000~6000 (與成分有關)

$$v = 331 + 0.606 t$$

3-1 式

但有時為了計算方便，也可能將之近似成 $v = 331 + 0.61 t$ 或 $v = 331 + 0.60 t$ 。

◎範例 3-1

年輕成人耳朵所能聽到的聲音頻率範圍為 20 Hz 到 20 kHz，若在乾燥無風且溫度為 20 °C 的空氣中，則可聽頻率所對應的波長範圍為何？

[解答] 由 (3-1) 式可得氣溫在 20 °C 的聲速為

$$v = 331 + 0.606 t = 331 + 0.606 \times 20 = 343 \text{ m/s}$$

最低頻率 20 Hz 和最高頻率 20 kHz 所對應的波長分別為

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{343 \text{ m/s}}{20/\text{s}} = 17 \text{ m}$$

$$\lambda' = \frac{v}{f'} = \frac{343 \text{ m/s}}{20000/\text{s}} = 0.017 \text{ m} = 17 \text{ mm}$$

故可聽頻率所對應的波長範圍為 17 mm 至 17 m

◎範例 3-2

在乾燥無風且溫度為 20°C 的空氣中，從井口自靜止落石下井，3.0 秒後聽到石頭撞擊水面的聲音，則井內的水面離開井口有多深？

[解答] 利用 (3-1) 式，可得聲速 $v = 331 + 0.606 t = 331 + 0.606 \times 20 = 343 \text{ m/s}$ 。

設石頭落至井內水面的時間為 t 秒，則落水聲由水面傳至井口的時間為 $(3.0 - t)$ 秒。設井內的水面距離井口為 h 公尺，因為石頭落至水面的過程為自由落體運動，可得 $h = \frac{1}{2} g t^2$ 。

落水聲以等速率由水面傳至井口，故

$$h = v (3.0 - t) = 343 (3.0 - t)$$

由上兩式消去 h ，可得 $4.9 t^2 + 343 t - 1029 = 0$ ，解之得 $t = 2.88 \text{ s}$

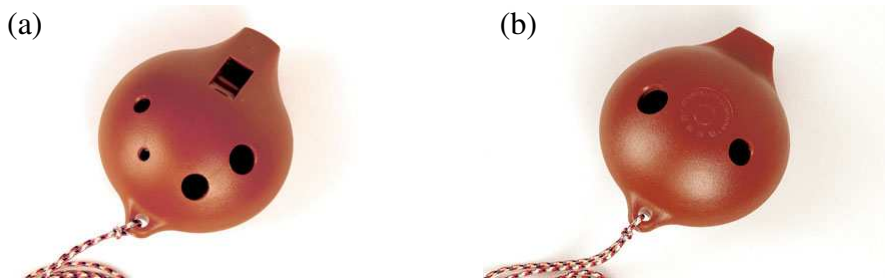
因此井內水面和井口之間的距離為

$$h = 343 \text{ m/s} \times (3.0 - 2.88) \text{ s} = 41 \text{ m}$$

3-2 空腔中的聲音

你是否曾經聽過這麼一個美麗的傳說：取來一只漂亮的螺旋狀貝殼，將它的開口貼近耳朵，結果你將會聽見大海的聲音。在這個美麗傳說的背後，其實有一個很簡單的科學解釋，那就是：我們生活周遭流動的空氣於流經貝殼開口附近時，會促使貝殼空腔內的空氣開始做**全體均勻性**之週期脹縮，這個空氣振動傳到耳朵內，就形成了我們心中所認定的「大海的聲音」。根據這個原理，貝殼就不見得是必需的道具了——把喝完的乳酸飲料空瓶的開口貼近耳朵，你也照樣會聽見類似的聲音。

其實對著空寶特瓶的開口端吹氣使瓶內發出聲音，或者是利用陶笛（圖 3-3）來吹奏出美麗的音樂，所用到的原理都是類似的。這個現象早在 19 世紀就為德國的科學家亥姆霍茲（Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz, 1821 - 1894）所理解，並且據以作出可用來檢測聲音頻率的裝置。



▲圖 3-3 陶笛是透過正面的四個指孔(a)以及背面的兩個指孔(b)來改變音調高低。

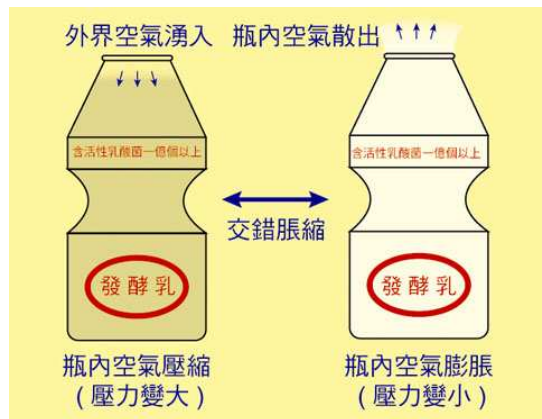
一個空腔內的空氣除了可以透過整體的脹縮來發出聲音外，若空腔本身的造型是窄長的管狀，則聲波也常常可能在此空氣柱內來回傳播、形成駐波。此時管內空氣密度並非均勻，而是沿著管子做週期變化，且發出的聲音之音調比前段所述空氣進行單純均勻脹縮時來得高。許多管樂器，例如直笛、橫笛、單簧管、薩克斯風、雙簧管等等，都是透過這個方式來發音。可是空氣柱中的駐波究竟是如何形成的呢？

於第二章第五節中曾介紹振動的弦如何產生駐波。簡單地說，兩端固定而張緊的弦被撥動時，由於弦上的波動經兩端的反射，產生兩個同頻率同振幅，但朝相反方向行進的波動，此兩波便可透過疊加原理形成駐波。兩固定端為波節（或稱節點），弦上則會產生有一個或多個的波腹（或稱腹點）。形成駐波的弦會以特定的頻率振動，並驅動周圍的空氣使之隨著振動，因而發出聲音。上述有關駐波的說法，同樣地適用於空氣柱的振動。



做一做

1. 取來一個空的乳酸飲料瓶，用手指將瓶口蓋住一半，然後將開口貼近耳朵，試著聆聽從空瓶傳來微小的聲音。
2. 接著將手指移離瓶口，使開口面積增大。比較這時所聽見的聲音與前一步驟所聽見的聲音之高低有何改變。
3. 取來一個空的保溫瓶，用手指將瓶口蓋住一半並對瓶口吹氣，聆聽所發出聲音的音調。接著移開手指再做一次，以比較所發出聲音的音調高低有何改變。
4. 設法取得一個陶笛，試著按住不同的指孔並吹奏陶笛，以比較所聽見的聲音高低與指孔之大小及開啟數目多寡的關係。（你也可以將其中一個指孔打開一半或全開，看這會造成何音調上的何種差異。）

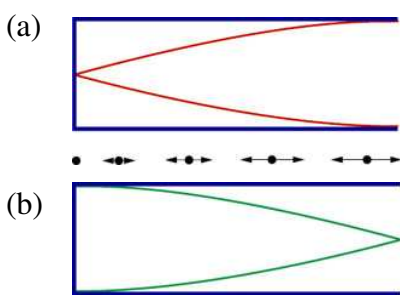


▲圖 3-4 空乳酸飲料瓶內的空氣做整體均勻性週期脹縮示意圖（顏色深代表瓶內空氣比大氣密度大，顏色淺代表瓶內空氣比大氣密度小）。

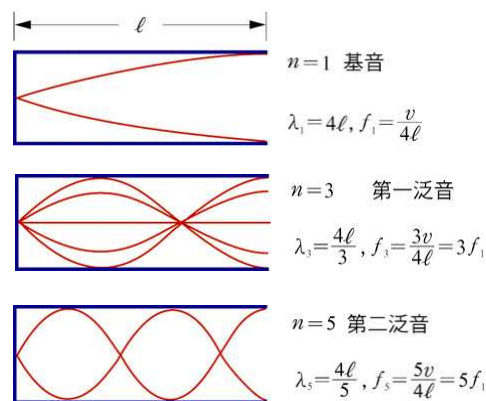
根據亥姆霍茲的研究，若容器發出聲音確實是因為整個容器內的空氣之整體脹縮所致（圖 3-4），則容器的開口愈大時，我們聽見的音調也愈高。這是由於空氣在開口較大的容器內膨脹（收縮）時，可更快地透過開口宣洩至大氣中（回填至容器內）並降低（升高）其內的氣壓。這一增快的趨勢使得氣體脹縮的頻率增大，並導致音調升高。

管樂器的種類繁多，構造各異，因此有關其發聲的研究也是非常複雜的，但一般則約略將之分為**閉管**（closed pipe）和**開管**（open pipe）兩類。**閉管**是指一端封閉，另一端開口的空管（這樣樂音才可以透過外界的空氣傳播出來），例如單簧管；**開管**則是兩端皆開口的空管，例如直笛與橫笛。

要描述管內空氣柱的振動，我們可以藉由檢視管內各位置處的一小塊氣體之位移或壓力的變化，而獲得較深刻的了解。以閉管為例，當聲波自右方傳向左方時，於抵達閉端處即被反射，如同繩波在固定端的反射一樣。反射的聲波和入射的聲波具有相同的頻率和振幅，但行進方向相反，兩者疊加形成駐波。在閉端附近的空氣受阻不能移動，故該處一小塊氣體的振動位移為零，形成位移的波節。由上一節的討論可知，當氣體的位移為零時，其對應的氣體壓力變化為極大。相對應地，在開口端的氣體壓力等於大氣壓力，故該處一小塊氣體的壓力變化為零，但其位移量值則為極大，形成位移的波腹。這個結論可以用圖 3-5(a)來示意。由於在氣體中傳播的聲波為縱波，其氣體的振動位移不易繪圖表達，如以氣體之振幅為縱軸，氣體之位置為橫軸，則可知圖識以類似橫波之圖形來呈現，圖下的黑點和箭矢的長度則代表一小塊氣體在縱波中的實際振動方向和振幅的相對大小。圖 3-5(b)則顯示出不同位置的氣體壓力變化。



▲圖 3-5 閉管內空氣柱振動時可能產生的一種駐波模式。(a)紅色曲線：在不同位置的一小塊氣體的振幅，在閉端處為波節，在開端處為波腹。圖下方的黑點和箭矢長度代表氣體在縱波中的振動方向和振幅的相對大小。(b)綠色曲線：在不同位置的氣體壓力變化，在閉端處的氣體壓力變化為極大值，但在開端處則為零。



▲圖 3-6 閉管內空氣柱振動時可能產生的頻率最低之三種駐波位移模式以及對應的聲音名稱。

圖 3-5 所示為閉管內最簡單的駐波模式，圖 3-6 則列出閉管內三種較基本的駐波振動模式，以供比較。值得強調的是：並不是任意頻率（或波長）的聲波皆可形成駐波。若空管的長度為 ℓ ，聲波的波長為 λ ，則由於閉端須為位移的節點，而開口端須為位移的腹點，故形成駐波的條件為

$$\ell = n \frac{\lambda}{4} \quad (n=1、3、5、\dots)$$
3-2 式

若聲波的速率為 v ，則共振頻率 f 可以下式表之：

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{nv}{4\ell} \quad (n=1、3、5、\dots)$$
3-3 式

由上式可知，一固定長度的閉管所能發出的頻率是其最低頻率的奇數倍，即各頻率的比為 $1:3:5:\dots$ 。

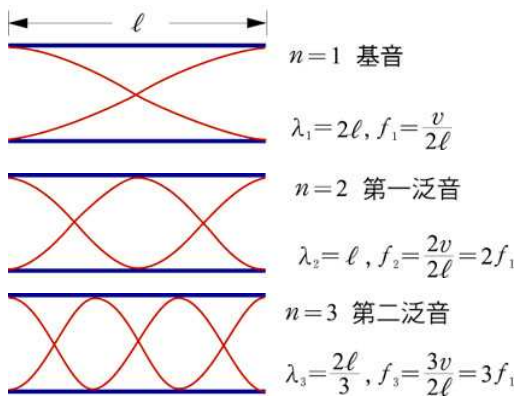
上述有關閉管內駐波的討論，可同樣地應用於開管的情況，但在開管中，由於兩開口端連通大氣，故此兩端為位移的腹點。聲波在開管中形成駐波的條件如下：

$$\ell = n \frac{\lambda}{2} \quad (n=1、2、3、\dots)$$
3-4 式

若聲波的速率為 v ，頻率為 f ，則

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{nv}{2\ell} \quad (n=1、2、3、\dots)$$
3-5 式

由上式可知，一固定長度的開管所能發出的頻率是其最低頻率的整數倍，即各頻率的比為 $1:2:3:\dots$ 。圖 3-7 列出開管內三種最簡單的駐波振動模式。



◀圖 3-7 開管內空氣柱振動時可能產生的頻率最低之三種駐波位移模式以及對應的聲音名稱。



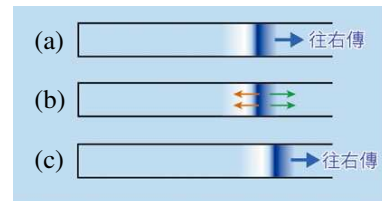
疏密波在開口端的反射

我們在正文中已經敘述過疏密波在閉端的反射情形，但是波在開管端又是如何反射的呢？由於這個問題的解說比較複雜，所以我們利用以下的篇幅作額外的說明。

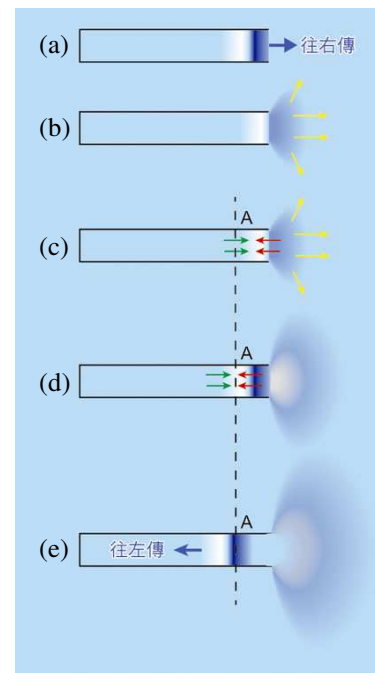
考慮一個疏密波的脈衝在一個管子中往右傳播（如圖 3-8 (a)）。這一個脈衝波之所以能夠持續往右傳播，同時使其左方的空氣壓力回復到正常的大氣壓力值（以淺藍色表示），原因是在於圖 3-8(b)中的密部（深藍色區域）處的壓力最大，因此有一部分空氣會往右方壓縮過去（綠色箭頭），而另有一部分空氣則會往左邊壓縮（紅色箭頭），使得其左方緊鄰的疏部（白色區域）可以回復到正常大氣壓力的大小。於是在下一刻，疏密波便會往右方移動一小段距離而成為圖 3-8(c)所示的情況。

可是當一個脈衝波傳播到開口端的時候（圖 3-9(a)），情形則不然，這是因為當密部衝出管子的時候，原本緊緊壓縮的空氣現在忽然間有了很大的宣洩空間而可以很快的使其壓力降低（如圖 3-9(b)黃色箭頭所示）。此時，緊鄰著開口端的疏部（圖 3-9(b)白色區域處）不再能夠從它右側的空氣中獲得足夠大的壓力，來將其壓回正常的大氣壓力值，因此疏部左端虛線處 A 的空氣只好往右填充（如圖 3-9(c)中綠色箭頭所示），雖然大氣確實仍會有一部分往左回填的趨勢（如圖 3-9(c)中紅色箭頭所示）。

以上的填補動作使得虛線處 A 點於下一刻成為疏部，同時使得其右側成為密部（圖 3-9(d)）。相對應地，開管端周遭的大氣因為曾對開管做了一些回填的動作，因此開口端周遭的大氣反而形成了一個疏部（如圖 3-9(d)所示）。接著，曾經發生在圖 3-9(c)中疏部的運動現象，現在會重複發生在圖 3-9(d)中的疏部（即虛線 A 點處），從而於下一瞬間演變成圖 3-9(e)，於是一個反向的脈衝波就往左方傳播回去了。



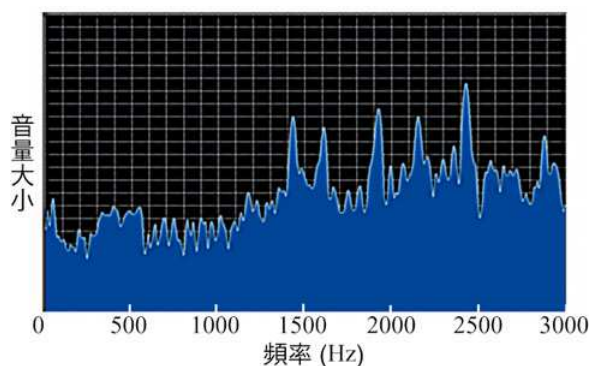
▲圖 3-8



▲圖 3-9

其實不只是一個空腔或空氣柱才可以形成聲音的駐波，任何一塊有彈性的固體也都可以它在上面形成駐波，並有可能驅動周遭的空氣去發出聲音。在物體或樂器所形成的各種駐波模式中，其頻率最低者（例如上述開管或閉管中 $n = 1$ 對應的振動），稱為**基頻**（fundamental frequency）或**基音**（fundamental tone），其餘頻率較高者稱為**泛音**（overtones），按由低而高的次序，分別命名為第一泛音、第二泛音、第三泛音、…等。

一般而言，物體振動時發出的泛音通常都不是基音的整倍數。如家中的風鈴吊飾、寺廟中的古鐘、以及音樂會中的木琴等等均是常見的實例（圖 3-10）。



◀圖 3-10 頻率低於 3000 Hz 之風鈴頻率分布，圖中數個相當突出之峰值即對應於基音與泛音。

如果泛音的頻率恰為基音的整數倍，則泛音特別稱為**諧音**（harmonics）。就前述開管的振動模式而言，（3-5）式的共振頻率可寫為 $f_n = n f_1$ ，式中 $n = 1、2、3、\dots$ ， f_1 為基音的頻率。諧音的命名規則如下： $n = 1$ 所對應的頻率，稱為第一諧音（即基音）； $n = 2$ 為第二諧音（即第一泛音），其頻率為基頻的 2 倍； $n = 3$ 為第三諧音（即第二泛音），其頻率為基頻的 3 倍，其餘類推。而在閉管的振動模式中，（3-3）式的共振頻率同樣可寫為 $f_n = n f_1$ ，但式中 $n = 1、3、5、\dots$ 。各諧音的命名仍如上述，若 $n = 1$ ，則稱為第一諧音（即基音）； $n = 3$ 為第三諧音（即第一泛音）； $n = 5$ 為第五諧音（即第二泛音），……，也就是說在閉管的振動中，僅有奇數諧音，而無偶數諧音。

範例 3-3

在乾燥無風且溫度為 20°C 的空氣中，若將一長度為 1.00 m 的空管的一端封閉，對其另一開口端吹氣，並假設該管所發出的聲音對應於管內空氣柱之駐波，則其基頻為何？若將另一端的管口打開，則其基頻為何？

[解答] 利用第三章第一節 (3-1) 式，

$$\text{可得聲速 } v = 331 + 0.606 t = 331 + 0.606 \times 20 = 343 \text{ m/s}。$$

由 (3-3) 式可得閉管時的基音頻率為

$$f_1 = \frac{v}{4\ell} = \frac{343 \text{ m/s}}{4 \times 1.00 \text{ m}} = 85.8 \text{ Hz}$$

若將另一端的管口打開，則由 (3-5) 式可得開管時的基音頻率為

$$f_2 = \frac{v}{2\ell} = \frac{343 \text{ m/s}}{2 \times 1.00 \text{ m}} = 172 \text{ Hz}$$

雖然本節專注於空氣柱發聲的討論，但是你可不要看到一個空氣柱狀的物體就斷定它發出的聲音必然是由其內的駐波所造成。例如，風鈴雖然是由數根空心長圓柱所組成，但你聽到的清脆聲音卻並不是由這些空氣柱內之駐波所發出來的！關於這一點，我們可以藉由檢視圖 3-10 而得到驗證，因為此圖中基音與泛音的頻率並沒有像空氣柱那樣成簡單整數比，更進一步的研究顯示出，這是圓柱被敲擊後產生形變才驅動周遭的空氣發出聲音。



天才對天才

當人們才剛把彈簧所遵守的虎克定律弄清楚、當比較準確的時鐘才剛發明沒多久，竟然已經有一個人完全想通了聲波究竟是如何產生以及傳播的，甚至還知道如何去計算其傳播的速率，這樣的成就恐怕唯獨牛頓這種天才方可辦到！但就像精彩的小說一樣，科學的發展有時也是波折起伏、令人拍案叫絕。

其實在德勒姆進行他的實驗之前，牛頓早已經根據理論計算出聲音傳播的速率應該是 290 m/s。但由於這個數值比德勒姆的實驗數據低了約百分之二十，這逼著牛頓必須為十多年前提出的理論尋求解套的方法。雖然牛頓終究還是拼湊出一套他認為可以自圓其說的修正，但這倒像是畫蛇添足，也未獲得後來多數學者的認同。原來牛頓的聲速理論和實驗之間無法吻合的這個困擾根本是一個大難題，而這要等到一百年之後才由另外一位天才——法國的知名數學家拉普拉斯（Pierre-Simon, marquis de Laplace 1749 - 1827）——於跌跌撞撞的研究中找到解決之道。

原來牛頓關於聲波傳播的基本想法並沒有錯，只是當聲波抵達某處時，被壓縮的氣體之度會略微升高，從而使其壓力更形增加；而膨脹的氣體之度則會略微下降，從而使其壓力變得更小。既然聲波是一種疏密波，上述現象所造成的結果便是：當疏密波抵達時，兩小塊相鄰的疏密氣體之間互相推拉的力量，會因為這個度效應而比牛頓所算出的值略為增大，而這就使聲波傳播的速率比牛頓計算出來的數值更大了。

在牛頓時代，人們才剛發現等條件下的波以耳定律（參見本書第一章第五節）。至於氣體之體積以及壓力與度關係之定量研究，則要等到一百多年後才廣為科學界所知。牛頓無法利用其真知灼見推導出最正確的聲波傳播速率值，其實是可以理解的。

.....

直笛究竟是如何發出聲音的？

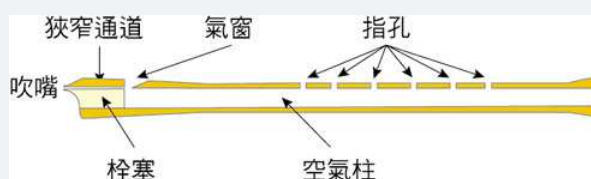
我們在課文中曾經說過管樂器可以約略分為開管以及閉管兩類，但是需要注意的是，**一個樂器究竟應該歸類為開管或者是閉管，必須透過仔細研究該樂器究竟是如何發出聲音，才可以決定出來。**以下便以國小以及國中樂團表演中常見的直笛（圖 3-11）做為示例，做一個簡單的說明。

直笛的構造如圖 3-12，它有一個圓柱形的管身作為空氣柱，吹嘴處則有一個栓塞來將演奏者所吹入的空氣導入一個非常狹窄的通道，使之以高速衝擊在氣窗上一個尖銳的「刀口」上。管身則鑽有若干指孔，以使用來改變吹奏時聲音音調的高低。

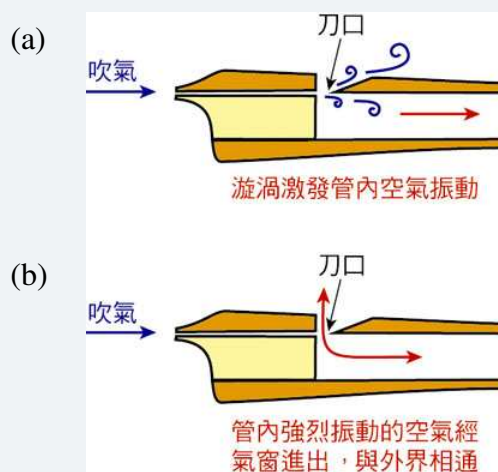
當演奏者經由吹嘴吹氣時，氣流衝擊在氣窗的「刀口」上便會在其上、下側產生漩渦（如圖 3-13(a)所示）。進入管內的空氣漩渦會激發管內空氣使之振動，並以某個特定的自然頻率發出聲音。而管身內空氣柱的強烈振動除了會透過右側開口端發出聲音之外，也會經由氣窗進出、並與外界相通（圖 3-13(a)）。因此，**直笛雖然因為栓塞的存在而看起來像一個左端封閉的管子，但因為有此氣窗的存在，仍然必須將左端視為是一個開口端，故必須把它當成是一種開管樂器才恰當。**



▲圖 3-11 國小以及國中樂團表演中常見的直笛



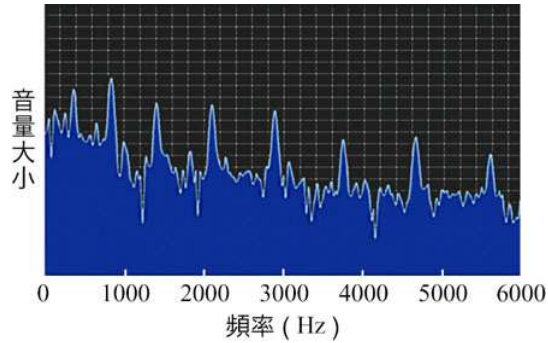
▲圖 3-12 直笛的構造



▲圖 3-13 直笛發聲的方式：(a)自吹嘴噴出的氣流衝擊在氣窗的「刀口」上，便會在其上、下側產生漩渦。進入管內的空氣漩渦便會激發管內空氣振動；(b)管身內空氣柱的強烈振動除了會透過右側開口端發出聲音之外，也會經由氣窗進出、並與外界相通。

3-3 聲音的共鳴

從上節的討論中，我們知道當張緊的弦或是空管中的空氣柱振動時，會形成一系列具有不同波長的駐波，這些駐波各有其特定的頻率，統稱為振動體的**固有頻率**（natural frequency）。其



▲圖 3-14 一個教堂的鐘所發出聲音頻率之分布。

實所有能振動的物體都有其特定的固有頻率，例如圖 3-14 是一個教堂的鐘所發出聲音頻率低於 6000 Hz 之分布，圖中數個相當突出的峰值對應的便是鐘的固有頻率。

在研究弦和空氣柱的振動時，我們曾注意到它們的固有頻率之間有一個很簡單的特性，即這些頻率是成簡單整數比的關係。但是許多物體的固有頻率卻不然，圖 3-14 便是一個例子，而追究其原因，其實都是因為物體的振動方式與單純的一根弦或一個空氣柱不同（如圖 3-15）。事實上，諸如木板、定音鼓的鼓膜、提琴與吉他的音箱等等，其固有頻率都不是成簡單整數比。



▲圖 3-15 於某一瞬間，鐘的數種可能振動方式（藍色箭頭代表鐘面往外凸出，紅色箭頭代表鐘面往內凹入，黃色虛線則為節線）。

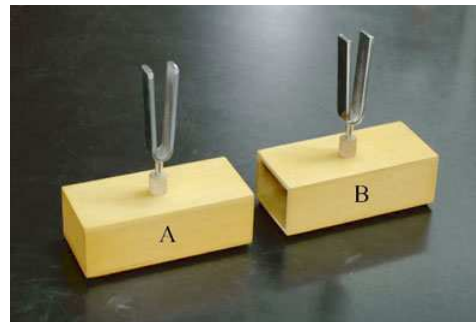
當我們以一個隨時間做週期性改變的力去驅動一個物體，而該物體的某個固有頻率恰好等於此驅動力的頻率時，通常該物體的振動就會明

顯變得比較劇烈，此時我們稱該週期性的力與物體達到了**共鳴**或**共振**（resonance）。在幫小朋友推鞦韆、使他們可以盪得比較高時，一個經常使用的方法是：等小朋友往後擺到最高點時，再用力將他們向前方推送，如此來回數次後，鞦韆就會盪得很高。很明顯地，此時助推的驅動力之週期和鞦韆來回擺動的週期剛好一致，因此這是共振的一個實例。在研究聲音的相關現象時，共振的概念有許多應用，以下我們對之作簡短的探討。

手持音叉的把柄，敲擊音叉使其振動時，我們固然可聽到聲音，但甚為微弱。這是因為耳膜感受聲音的強弱是來自於空氣壓力的變化，但音叉的兩股體積甚小，振動時所能擾動的空氣體積很有限，因此所造成的空氣壓力變化相當小。如果將音叉固定在適當大小的音箱上，如圖 3-16 所示，同樣地敲擊音叉時，則我們可聽到強得多的嗡嗡響聲。這是由於兩個因素造成的：第一、因為音叉振動時會帶動音箱隨之振動，並使箱板周圍的空氣都受到擾動。因為用以擾動空氣的面積較前大得多，故產生較強的空氣壓力變化，使我們聽到較強的響聲；第二、音叉的振動頻率恰等於音箱的某固有頻率，這使得音箱的振動因共振的關係變得比較劇烈，所以更能大幅度增強第一點造成的音量。因此，巧妙利用共鳴的作用可以將物體的振動能量有效地轉換為聲波的能量。



▲圖 3-16 固定於音箱上的音叉，可以發出較大的響聲。



▲圖 3-17 聲音的共鳴實驗。A 和 B 為兩相同的音叉。當 A 被敲擊振動時，B 因共振作用也會隨之振動發出聲音。

圖 3-17 所示的簡單實驗可以更清楚地顯示聲音的共鳴現象。A 和 B 為兩座相同的附有音箱的音叉，於敲擊 A 音叉並等待片刻後，

立即以手握住 A 使其停止振動，結果我們可聽到 B 音叉振動所發出的聲音（若使兩音箱的開口相對，則通常效果會較好，但這並不是必要的）。這是因為 A 音叉振動時透過 A 的音箱將所產生的聲音放大，並傳入 B 音叉的音箱，從而促使 B 音叉產生共振所致。



做一做

音樂盒的共振

1. 準備一個音樂盒，將其上方透明的壓克力罩緊緊罩住音樂盒的底座（如圖 3-18 所示），上緊發條，聆聽音樂盒所發出音樂之音量大小。
2. 重複步驟 1，但將透明的壓克力罩取下來，聆聽音樂盒所發出音樂之音量是否變得很小。
3. 重複步驟 1，使透明的壓克力罩幾乎貼住音樂盒的底座（但不要真的蓋住，如圖 3-19 所示），聆聽音樂盒所發出音樂之音量大小，並與步驟 1 和步驟 2 聽到之音量做比較。
4. 將透明的壓克力罩取下來，然後將一個洗淨的布丁杯（乳酸飲料空瓶亦可）的一部分緊貼音樂盒的底座（如圖 3-20 所示），聆聽音樂盒所發出音樂之音量大小，並與步驟 1 和步驟 2 聽到之音量做比較。
5. 重複步驟 1，計數上緊發條後音樂盒連續演奏時所能反覆演奏樂曲的最大次數。
6. 重複步驟 2，計數上緊發條後音樂盒連續演奏時所能反覆演奏樂曲的最大次數，並與步驟 5 的結果作比較。你能說明造成此中差異的原因嗎？



▲圖 3-18 透明壓克力罩將音樂盒緊緊罩住（這是正常使用方式）。

做完這個實驗之後，你可能會很訝異地發現，單靠音樂盒最精密昂貴的機芯部分所能發出的聲音並不會很大聲，但是配上音樂盒那個外觀並不起眼的壓克力外罩（甚至是布丁杯！），整個音量便可以透過共振的效果來放大許多！



▲圖 3-19 讓壓克力罩保持懸空，但幾乎貼住音樂盒底座。



▲圖 3-20 將一個洗淨的布丁杯（乳酸飲料空瓶亦可）的一部分緊貼音樂盒的底座。

樂器的聲音強度決定於振動體所能擾動的空氣量而定。管樂器利用管腔內空氣柱的共振而發音，但弦樂器因為是利用琴弦的振動而發音，故單憑弦的振動，其所能擾動的空氣量很少，發出的聲音將非常微弱，因此通常都要藉著安裝一個音箱或**共鳴板**

(sounding board, 或 soundboard) 來透過共振的原理將聲音放大。這也就是說，弦樂器音色的好壞和共鳴板的設計有非常密切的關係。小提琴的音箱以及豎琴與鋼琴的共鳴板，如圖 3-21 所示。



▲圖 3-21 幾種弦樂器的共鳴裝置，(a)小提琴的音箱；(b)鋼琴的共鳴板；(c)豎琴的共鳴板。



做一做

橡皮筋與保鮮盒的共振

1. 取來一條橡皮筋，將之圈在拇指與食指之間，並盡量將之撐開。以另一手撥彈橡皮筋使之發聲，聆聽所發出之音量大小。
2. 取來一個塑膠保鮮盒，將蓋子與盒身分離。把橡皮筋套於空的保鮮盒上（如圖 3-22 所示），以手撥彈橡皮筋使之發聲，聆聽所發出之音量大小，並與步驟一的音量相比較。
3. 改將橡皮筋套於保鮮盒蓋上（如圖 3-22 所示），以手撥彈橡皮筋使之發聲，聆聽所發出之音量是否與步驟二的音量差不多。

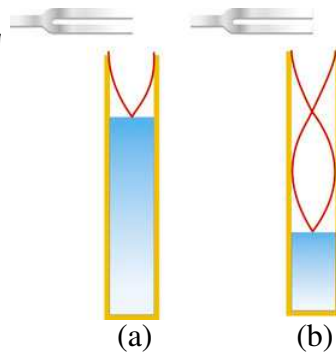


▲圖 3-22 橡皮筋與保鮮盒和保鮮盒蓋的共振

這個實驗顯示出來，保鮮盒蓋與保鮮盒本身均能產生共鳴的效果，將弦（本例中以橡皮筋代替）振動的聲音放大。

範例 3-4

如圖 3-23 所示，將一未知頻率的音叉靠近一鉛直豎立的長管管口，管內裝有水。當音叉振動時，調整管內的水面，使自管口處緩緩下降，直至聽到共振的聲音（即明顯轉強的聲音）為止，量出此時水面至管口的距離為 16.4 cm。之後，再降低水面至距管口為 49.2 cm 的位置時，又聽到共振的聲音。設當時的氣溫為 20 °C，求音叉的頻率為何？



▲圖 3-23 將振動中的音叉靠近管口，調整長管內的水面高度，找出產生共振聲音的水面位置，可藉以求出音叉的頻率。

[解答] 長管內的水面至管口之間相當於一端封閉的空管。由於音叉的頻率固定不變，即其所發出聲波的波長為定值，故第一次管內的空氣柱共振時，所生的駐波波形如圖 3-23(a)所示；第二次共振時，所生駐波的波形如圖 3-23(b)所示。由圖上可知兩次共振的水面高度差等於半波長，即

$$\frac{\lambda}{2} = 49.2 \text{ cm} - 16.4 \text{ cm} = 32.8 \text{ cm} \quad \text{或} \quad \lambda = 65.6 \text{ cm}$$

在 20 °C 時的聲速 $v = 343 \text{ m/s}$ ，可得音叉的頻率為

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{343 \text{ m/s}}{0.656 \text{ m}} = 523 \text{ Hz}$$

都卜勒效應的回顧

前面數節探討了聲波的本質與樂音的一些特性，此處讓我們簡單回顧在基礎物理中曾經敘述過的聲波之都卜勒效應（Doppler effect）。以下僅以兩種較簡單的情況來討論都卜勒效應。

若以 f_s 代表音源所發出聲音的頻率，而以 f_0 代表接聽者所測到聲音的頻率，且假設接聽者相對於大氣是靜止的，則當音源是朝著接聽者接近時，接聽者會測到一個較高的頻率，即 $f_0 > f_s$ ；但若音源是在遠離接聽者，則 $f_0 < f_s$ 。

反過來，若音源相對於大氣是靜止的，但接聽者是朝著音源接近，此時也會有 $f_0 > f_s$ ；但若接聽者正遠離音源，則就會有 $f_0 < f_s$ 。

在基礎物理中曾提過都卜勒效應的一個重要應用便是測速雷達，不過你知道嗎，早在數千萬年前可能便有生物將都卜勒效應利用到極致了！這生物就是蝙蝠。

有些蝙蝠（例如圖 3-24 中的馬鐵菊頭蝠，greater horseshoe bat）對於特定聲音頻率的聽覺非常敏銳。當牠發出特定頻率的聲波去探測周遭環境以及可能的獵物時，反射回來的聲波會因為都卜勒效應而偏移原來的頻率。此時蝙蝠會調整發出的音頻，使得反射回來的聲波剛好是牠聽覺最敏銳的頻率。而從發出頻率以及接收到的（特定）頻率之間的差異，蝙蝠便可推測出獵物的運動狀態！

► 圖 3-24 馬鐵菊頭蝠是應用都卜勒效應的高手



3-1 聲波的傳播

1. 聲波屬於力學波的一種，必須靠介質的擾動來傳送能量。
2. 在流體（如空氣）中傳播的聲波為縱波，但一般彈性體內傳播的聲波可以為縱波或橫波。
3. 聲波在空氣中傳播時，造成空氣的密度和壓力的微幅變化，產生相間的密部和疏部，故聲波也是一種疏密波。
4. 當聲波傳播時，疏部和密部都以相同的速率前進，但是聲波只是傳送空氣的擾動，而不會將空氣帶走。一小塊空氣僅在其原平衡位置前後作來回振動而已。
5. 在空氣壓力變化極大的位置，介質的位移為零。當介質的位移為極大或極小時，其對應的空氣壓力變化為零。
6. 空氣中的聲速 v (m/s) = $331 + 0.606 t$ ($^{\circ}\text{C}$)。但有時為了計算方便，也有設為 v (m/s) = $331 + 0.61 t$ ($^{\circ}\text{C}$) 或 $v = 331 + 0.60 t$ 者。

3-2 空腔中的聲音

7. 一個空腔內的空氣除了可以透過整體均勻的脹縮來發出聲音外，若空腔本身的造型是窄長的管狀，則聲波也常常可能在此空氣柱內來回傳播、形成駐波。此時管內空氣密度並非均勻，而是沿著管子做周期性變化，且發出的聲音之音調比前段所述空氣進行單純均勻脹縮時來得高。
8. 管樂器的發音設計可分為閉管和開管兩類。閉管是指一端封閉，另一端開口的空管，例如單簧管；開管則是兩端皆開口的空管，例如直笛。當管腔內的空氣柱振動時，就能發出聲音。
9. 閉管或開管內的空氣柱振動時，形成駐波，有其特定的振動頻率。
10. 一固定長度的閉管所能發出的共振頻率是其基頻（最低頻率）的奇數倍，即各共振頻率的比為 1 : 3 : 5 等。
11. 一固定長度的開管所能發出的共振頻率是其基頻（最低頻率）的整數倍，即各共振頻率的比為 1 : 2 : 3 等。
12. 在閉管和開管中所形成的各種駐波模式中，其頻率最低者，稱為基頻或基音，其餘稱為泛音。

3-3 聲音的共鳴

13. 物體振動時產生駐波的頻率，稱為該振動體的固有頻率。所有能振動的物體都有其特定的固有頻率。
14. 只要從外界傳入的振動頻率恰等於物體的固有頻率，就能引發共振。對於聲波而言，共振又稱為共鳴。共鳴的作用是将物體的振動能量有效地轉換為聲波的能量。
15. 弦樂器因為是利用琴弦的振動而發音，故單憑弦的振動，其所能擾動的空氣量很少，發出的聲音將非常微弱，因此通常都要藉著安裝一個音箱或共鳴板來透過共振的原理將聲音放大。

一、問答題

1. 為何我們在看到閃電之後，才聽到雷聲？
2. 我們講話的速率愈快，是否聲音的傳播速率就隨之愈快？
3. 若鋼琴弦的 Do 音已經由調音師調成在夏天和冬天時都具有相同的頻率，則分別在這兩季節同樣彈奏鋼琴的 Do 音，其對應的聲波波長是否不同？
4. 當聲波由空氣中傳入水中後，其波速、頻率、及波長會如何改變？
5. 若把水緩緩地倒入空的玻璃瓶內，則所聽到的聲音音調會如何改變？

二、計算題

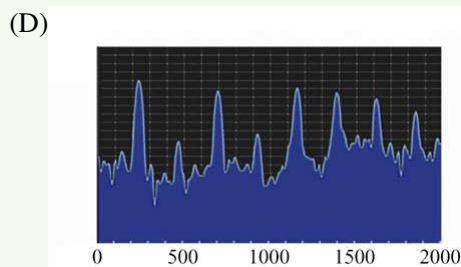
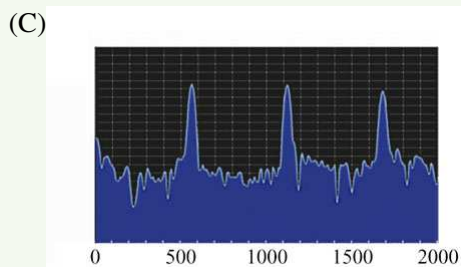
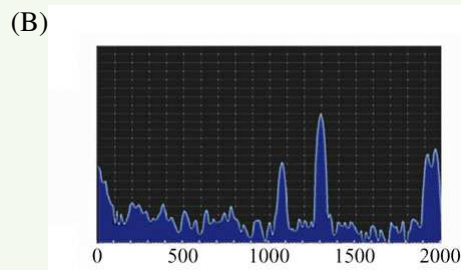
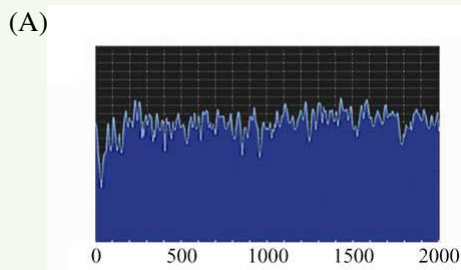
在本章習題中，除非特別聲明，否則均採用：在乾燥且溫度為 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的環境下，聲速為 343 m/s 。

3-1 聲波的傳播

6. 輕敲鋼琴的中央 C 鍵時，所發出的聲音頻率是 262 Hz ，則此音的波長為何？
7. 聲波碰到障礙物反射回來的聲波，稱為回聲。回聲必須與原音相隔大約 0.10 s 以上，人耳才可能辨別。若一聽者站在一光滑牆壁前，則必須相距多遠，才能辨認出反射一次後傳回的聲音？
8. 已知聲波在鐵中傳播的速率為 5130 m/s ，某人一長鐵管的一端重重的敲一下，在另一端的聽者卻聽到二響，一為在管壁內行進的聲波，另一為在管內空氣中行進的聲波。該聽者分辨出這兩個響聲的時間差為 0.500 s ，則鐵管的長度為何？

3-2 空腔中的聲音

- ※9. 圖 3-25 是西洋長笛、單簧管、三角鐵、以及鑼之低於 2000 Hz 的頻譜（但不一定按順序）。已知這些樂器中只有西洋長笛可以視為開管樂器。請問以下何者對應於西洋長笛？



3-3 聲音的共鳴

- 一長度為 1.000 m 的風琴管，當兩端皆開口時，其前三個諧音的頻率為何？若僅一端開口，則前三個諧音頻率為何？
- 將一長度為 100 cm 的長玻璃管鉛直豎立，管內的水面高度可以任意調整。現將一振動中的音叉（頻率為 512 Hz），靠近管口邊，則水面高度在哪些位置時，會有共鳴的聲音？
- ※12. 有一兩端開口的空管，吹氣時可發出 880 Hz 的聲音（不一定為基頻）。若將其一端封閉，發現可發出 220 Hz 的聲音，試問此管的長度至少應為多少公尺？
13. 兩端開口的風琴管 A，其基頻為 300 Hz，另一風琴管 B 僅一端開口，已知 A 管的第二諧音頻率和 B 管的第五諧音的頻率相同，則兩風琴管的長度各為何？