

## 熱機、黎開管與拍頻

周鑑恆

萬能科技大學航空機電系  
e-mail: chou0717@gmail.com

(投稿日期：民國 104 年 08 月 18 日，接受日期：104 年 12 月 26 日)

**摘要：**黎開管事實上是一種演示熱聲效應的教具。但操作黎開管進行實驗時，有若干奇異的現象耐人尋味。本文介紹熱聲效應、黎開管的工作原理，進而說明這些奇異現象發生的原因，並且利用黎開管作為拍頻實驗的儀器，非常明顯地演示出拍頻現象。

**關鍵詞：**熱聲效應、熱機、黎開管

### 壹、前言

有許多工程上的主題，從科學的角度來看，其中的原理是相通的，也會顯得更為簡單。科學教育或演示實驗之真正的目的是：引導人們輕鬆並且清晰了解其中的科學原理。深入了解科學原理，是創新發明的重要基礎之一。

黎開管(Rijke tube)是一種熱聲效應裝置，由於效果相當神奇，在科教活動中每每能吸引不少注意。雖然世界各地許多物理教學機構都有黎開管實驗<sup>[1]</sup>，在台灣也有許多演示的活動，但解釋都太簡略，或太偏重數學公式之表述，非專家難以理解，深入淺出之解

釋仍有待補強，甚至有科教網站甚至公開徵求簡單明瞭的解釋<sup>[2]</sup>。即使中國大陸發表之文章<sup>[3]</sup>，乃至於一般國外談及黎開管的網站，都缺乏簡單明白的解釋。

也許令人匪夷所思，黎開管和其他熱聲效應<sup>[4]</sup>裝置其實是一種特殊的引擎，黎開管的工作原理與引擎（用熱力學的術語來說：熱機）的工作原理居然非常相似<sup>[5-11]</sup>。

本文之目的在於：以一種更容易懂的方式解釋黎開管的工作原理以及黎開管的若干奇異行為，強調熱聲引擎與其他引擎共通之處，以便基於熱機原理了解引擎，說明各種引擎工程技術背後的原理。

## 貳、熱機原理

所有的引擎都稱為熱機，儘管各種引擎大異其趣，各不相同，但是各式各樣的引擎其實都遵守相同的工作原理<sup>[5]</sup>。任何引擎真正的主角都是引擎中的工作流體，以各種工程方法加熱工作流體(也就增加工作流體之內能)，工作流體就能以各種方法對某些東西(例如活塞、渦輪)做功，將先前傳入工作流體之內能部分轉換成機械能。於是工作流體經過一個必然的循環過程，將工作流體獲得的「熱」轉換成「功」。

詳細的過程為：先加熱工作流體(工作流體通常是會相變的液體或者是氣體)，增加工作流體之內能，工作流體再消耗其內能做正功，推動活塞或渦輪機；然後再先冷卻工作流體，低溫的工作流體再被壓縮機或活塞壓縮，做負功。這樣循環過程稱為熱機循環，所有熱機的工作流體都大致進行如此的熱機循環。不同的熱機，此循環過程的開始點也許不盡相同，此循環過程的細節也會有所不同。但是，如果以工作流體的壓力為縱軸，工作流體的體積為橫軸，各種引擎的工作流體變化的 PV 曲線都是順時針進行的封閉曲線。

也就是說：無論各種引擎的構造如何複雜，也不論引擎的工作流體是什麼的種類，也不論是以外燃的方式(燃料燃燒產生高溫，從引擎外部加熱工作流體)或內燃的方式(燃料在工作流體中燃燒直接加熱工作流體)加熱工作流體，也不論使用工作流體的方式是用過即拋、或重複循環使用，所有引擎的工作原理都相當一致，即先加熱工作流體，工作流體膨脹對活塞或渦輪做正功，再先冷卻

工作流體，之後再以壓縮機或活塞壓縮低溫的工作流體(此過程工作流體做負功)。

熱力學第二定律指出，當工作流體必然完成熱機循環而恢復到開始狀態，也就是工作流體在引擎內、外不斷進行回到原來狀態的循環過程，在此循環過程中加進工作流體的熱，因為機率的緣故，不可能經做功完全轉換成機械能。

由此可知，引擎的工作原理其實相當簡單，但應用同樣原理卻可設計出蒸汽引擎、渦輪引擎、柴油引擎、轉子引擎、史特林引擎、噴射引擎等等千奇百怪的引擎。

為便於解釋熱聲效應及黎開管的工作原理，茲舉以下四種引擎作為實例<sup>[12]</sup>，說明此四種引擎運轉的重要細節。

### 一、噴射引擎(jet engine)

噴射引擎是一種內燃引擎。吸入大量的常溫空氣(工作流體)，先用引擎前端的壓縮機壓縮至相當小的體積，再混入燃油到被壓縮的空氣中燃燒，瞬間加熱空氣，空氣於是膨脹做功，先推動其他空氣，使燃燒室中的高溫空氣猛烈向後噴射，驅動渦輪機。噴射引擎使用工作流體的方式是「用過即拋」。噴射引擎中的每一部分工作流體，在每個瞬間，都正在同時進行熱機循環的不同的階段。但每一部分的工作流體都依序經歷相同的熱機循環，只是每一部分的工作流體完成熱機循環的時間不同而已。圖 1 所示為：每一部分的工作流體都完成熱機循環，在 P V 圖上為一順時針變化的封閉曲線。

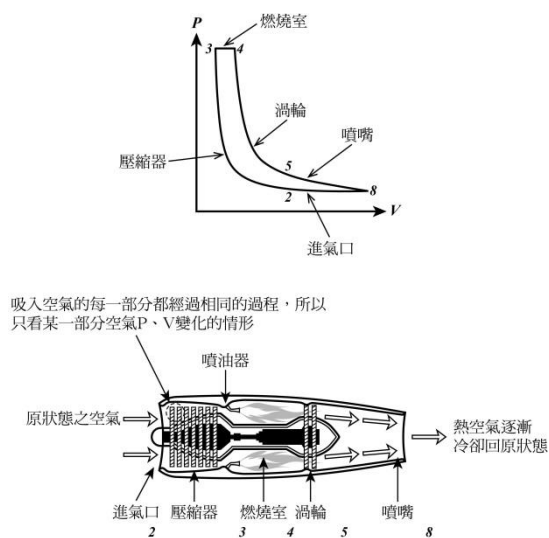


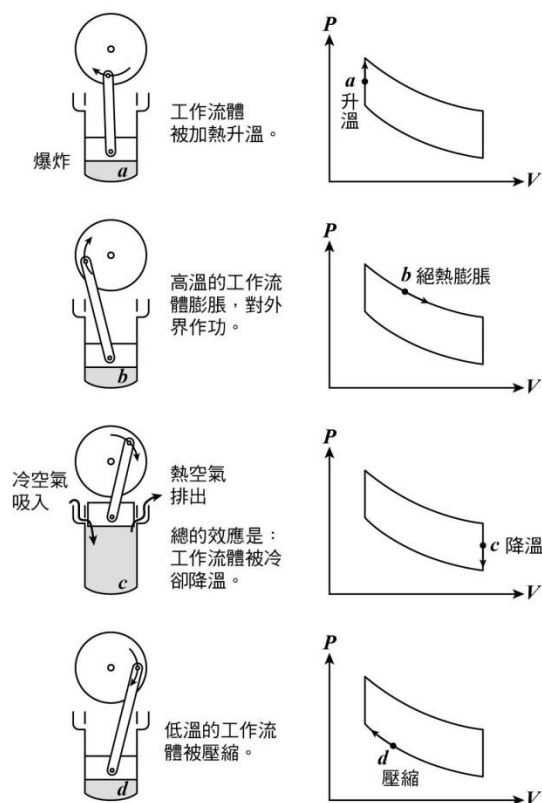
圖 1：每一部分的工作流體的變化曲線，在 P V 圖上均為一順時針變化的封閉曲線。

## 二、行程的汽油引擎(gasline engine)

二行程汽油引擎的吸氣和排氣過程同時進行，與四行程相比，只是換氣不夠完全而已。排氣之後，排出的空氣最終會冷卻到與周遭空氣一樣，也就是又回到工作流體被吸入引擎前的狀態；吸氣則吸入周遭新鮮空氣。忽略極少量汽油燃燒改變的化學成分，汽油在工作流體燃燒只是加熱工作流體；吸氣、排氣的過程效果等同只是冷卻工作流體。見圖 2。

冷的工作流體被活塞先壓縮。工作流體體積變成最小之後，先爆燃油氣，釋放大量熱能到工作流體中，工作流體於是膨脹作正功，推動飛輪轉動。工作流體體積達到極大值之後，經吸氣排氣的掃氣過程迅速下降工作流體的溫度。

汽缸中工作流體之工作過程順序為，冷卻、壓縮、加熱、膨脹，此引擎就會虎虎生風地不斷轉動，源源不斷地把油料的化學能轉換成機械能。



汽油引擎運轉的 (a)、(b)、(c)、(d) 四個步驟，亦即汽油引擎中工作流體四種狀況。

圖 2：二行程汽油引擎運轉的情形。注意汽缸中的空氣加熱、膨脹、冷卻、壓縮的時序。

## 三、卡諾引擎(carnot engine)

眾所周知的卡諾引擎(見圖 3)為一理想的外燃引擎，其加熱的方式是利用可以變換性質的底座，其汽缸和活塞均為絕熱物體。其底座依序為高溫熱庫(heat reservoir)、絕熱物體、低溫熱庫(heat reservoir)、絕熱物體。底座為高溫熱庫時，其中的工作流體就被加熱，此方法有些像加熱鍋中的水，只不過卡諾引擎的高溫底座是加熱其中的空氣(工作流體)；底座為低溫熱庫時，其中的工作流

體則被冷卻。卡諾引擎這種冷卻方法和汽油引擎排氣吸氣的冷卻方式大不相同，但兩者的作用完全一致。卡諾引擎這種外燃的加熱方式，也不像汽油引擎把工作流體當成助燃

劑，不會絲毫改變工作流體的成份，更有助於突顯熱機之運轉原理。顯然，卡諾引擎中的工作流體也是進行熱機循環，其變化之  $p-v$  變化的曲線也是順時針方向。

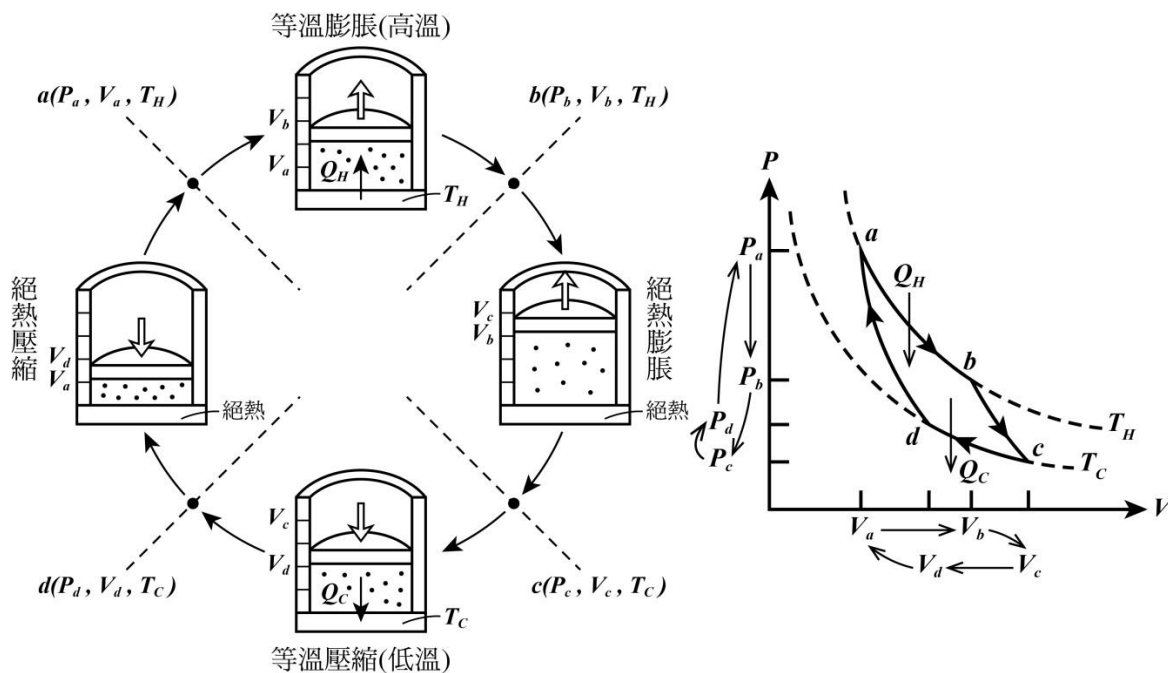
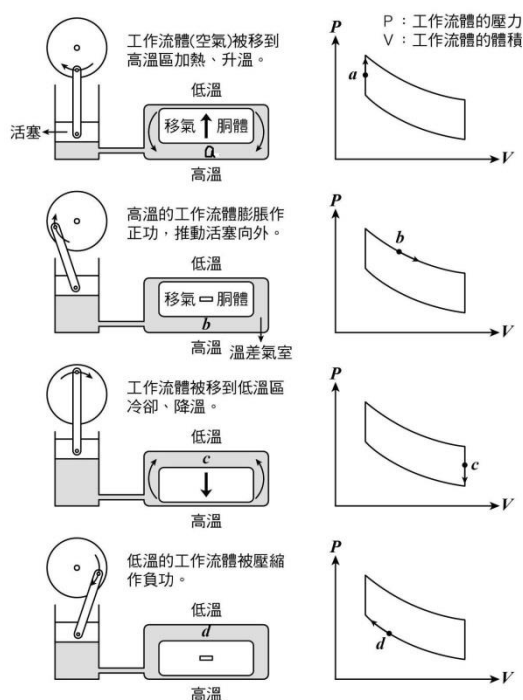


圖 3：卡諾引擎的工作流體，以外燃的方式加熱及冷卻，其工作流體加熱和膨脹在等高溫階段同時進行。冷卻與被壓縮也在等低溫階段同時進行。

#### 四、史特林引擎(stirling engine)

見圖 4，史特林引擎為一種外燃引擎，其工作流體可以是高壓的空氣、氦氣或氫氣，最基本的工作過程是，空氣在維持一定「溫差」的氣室（氣室的一端為高溫區，另一端為低溫區）中，受到移氣胴體（Displacer）之適時地驅趕，流到高溫區而被加熱，又被趕到低溫區而降溫。在史特林引擎中，低溫工作流體一樣先被壓縮，再以被驅趕到高溫區而加熱的外燃方式加熱，升溫之後工作流

體膨脹並推動活塞做功，之後又把工作流體先驅趕到冷區降溫，再壓縮。工作流體重復循環使用，工作流體所完成循環過程的  $p-v$  曲線也是順時針變化的封閉曲線。



史特林引擎運轉的 (a)、(b)、(c)、(d) 四個步驟，亦即史特林引擎中工作流體的四種狀況。

圖 4：史特林引擎運作的過程與二行程引擎幾乎相同，但史特林引擎以外燃的方式加熱及冷卻工作流體。

其實上述四種完全不同的引擎，它們的原理都是一樣的，其中，二行程引擎運轉的過程與原理，一般人憑直覺即可理解；卡諾引擎則特別簡單。

假設二行程引擎或史特林引擎，沒有加熱的過程，則當飛輪轉動時，活塞會絕熱壓縮工作流體，工作流體又會絕熱膨脹彈回活塞，如果工作流體反覆被壓縮又膨脹的過程絲毫不會散失能量、活塞絲毫沒有摩擦力、連桿飛輪等機械部件都絲毫不會發出振動與噪音，理論上引擎可以持續運轉下去。但只要負載消耗掉飛輪的動能，引擎隨即停止轉動。

具有彈性的工作流體被壓縮又膨脹的過程中，事實上必有機械能消耗，不久飛輪就停止轉動了。只有在工作流體膨脹之時或之前適時加熱，使工作流體更有力的推動活塞與飛輪，飛輪才能持續轉動，並可提供輸出功率。

## 參、熱聲效應

早年吹製玻璃的工人發現：燒燙的玻璃管有時會無緣無故地發出令人匪夷所思的詭異聲音。其實這聲音並不古怪，它是熱聲效應造成的。

簡單地說，熱聲效應與一般引擎運轉的原理相同，只是它的工作流體(空氣)，並不是對活塞或渦輪做功，而是對其附近的其他空氣做功，因此一般引擎輸出的是轉軸的動力，而熱聲效應輸出的是空氣的振動。

最簡單的熱聲效應演示儀具，應為駐波型熱聲管(另一種是行波型的熱聲引擎)<sup>[4]</sup>。駐波型熱聲管其實就是一端封閉式的管子，靠近封口端有一熱聲堆，此熱聲堆由許多細管構成，所有的細管平行熱聲管，細管的內直徑由熱傳深度<sup>[11]</sup>決定。越高頻的氣柱振動，細管的內直徑要越小。熱聲堆一端維持高溫，另一端維持低溫，高溫的那端靠近封口端。也就是說：每根細管一端高溫、另一端低溫，以便及時充分加熱或冷卻空氣。

當管中氣柱振動時，通常是基頻的振動模式(normal mode)會被啟動。(這現象很常見，在管中適當位置放入小型麥克風即可聽到)。圖 5 為一端封閉的管中氣柱的基頻振動模式，其中(A)(B)(C)(D)(E)為時序，周而復始，管中各部分空氣體積變化與位移量，均被誇張地放大。氣柱以基頻的振動模式振

動時，整個氣柱的每一部分都會受到影響。例如：空氣柱在管口附近的一小部分空氣，體積和壓力變化不大，但位置來回移動得厲害(圖 5 中以 O 標示的那部分空氣)；在氣柱封口端附近的那一小部分空氣，則完全不能移動，體積卻週期性地劇烈變大又變小(圖 5 中以 I 標示的那部分空氣)。空氣柱在其他位置的空氣，則既發生位移，同時也被壓縮或膨脹(圖 5 中以 M 標示的那部分空氣)。

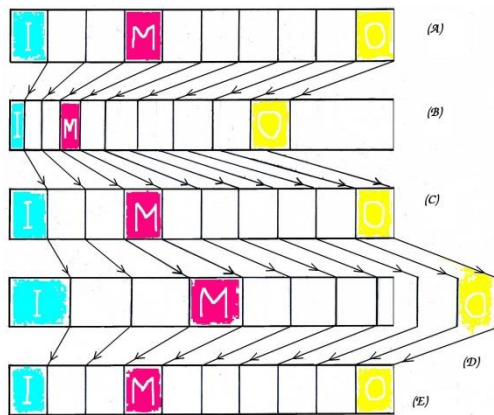


圖 5：一端封口的管中氣柱基頻振動模式(normal mode) 的振動情形。標示為 M 的那部份空氣既能來回移動，其體積又會明顯變化。

熱聲引擎的關鍵組件為熱聲堆<sup>[11]</sup>。熱聲堆電由一群軸向的小通管構成，見圖 6，圖中橫線代表小通管之管壁，熱聲堆高溫端靠近熱聲管的封口端。熱聲堆一端持續加熱以維持高溫，另一端不斷冷卻以維持低溫。

約距封口端約 1/4~1/3 處的一小部分空氣(例如：圖 6 中用草綠色的線框起來的這部份空氣)，既向著管子兩端的方向來回移動，又同時被壓縮和膨脹。熱聲堆即放置在距封口端約 1/4~1/3 處，熱端靠近封口端。注意：此小部分的空氣，先在熱聲堆的冷端冷卻，接著一邊向封口端移動，一邊被壓縮(就像汽缸中的冷空氣被壓縮)，壓縮到較小體積

時，也移動到了熱聲堆的熱端，因為熱聲堆熱端的集束小管溫度高，集束小管與空氣接觸的面積又相當大，被壓縮的空氣瞬間被加熱(就像汽缸中的冷空氣被混在其中燃燒的汽油加熱)。此部分空氣在氣柱振動模式中原本就會彈回原位置並且膨脹，但此時此部分空氣溫度升高，內能增加，會更有力彈回原位置，並且更有力的膨脹，補充氣柱振動時耗損的能量，而使氣柱振動得更為激烈。此部份空氣緊接著移到集束管冷端先冷卻，再繼續下一次被”氣柱振動”壓縮與位移的過程。雖然此過程中熱聲堆附近的空氣完成的熱機循環並非十分完美，但已經能夠像引擎一樣把熱能轉換成機械能，於是發出很響的聲音。

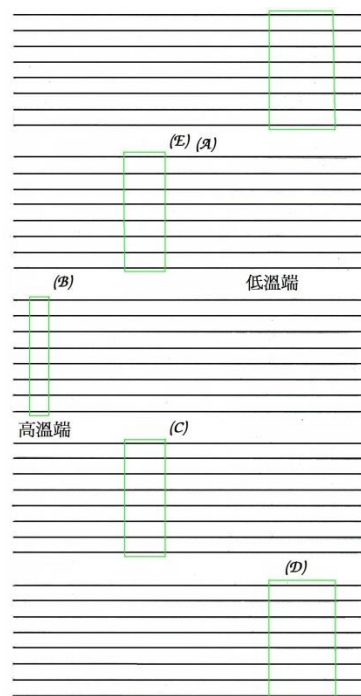


圖 6：熱聲堆由小通管集結而成，橫線代表小通管之管壁；框起來的這部份空氣與引擎中的工作流體變化的情形一致。(D)膨脹後的空氣先移到低溫端冷卻，(E)(A)冷卻後的氣體再被壓縮；(B)壓縮後又移動到高溫端加熱；(C)加熱後很有力地膨脹。

因為氣柱振動模式，使得空氣柱中每一塊空氣之位移和壓縮、膨脹的情形都不盡相同。只有當熱聲堆放在適當位置時，才能使空氣柱中某些部分的空氣經歷熱機循環。也只有在熱聲堆附近的某部分空氣能夠經歷這樣的熱機循環，供給氣柱持續振動的機械能。

即使沒有熱聲堆，氣柱仍可振動，但因壓縮、膨脹之間的能量損失，很快氣柱就不振動了。就像史特林引擎氣室之溫差消失而不再能適時加熱工作流體，史特林引擎不久即不轉了。也像不再內燃汽油的二行程汽油引擎，無法在汽缸中的空氣膨脹之前，加熱該空氣，使該空氣能大力做功，二行程汽油引擎也不能持續轉動。

#### 肆、黎開管的構造、製作與操作

黎開管是一種特別的熱聲效應裝置，其構造簡直簡單得可以<sup>[2]</sup>，一個兩端開口的管子，在近開口端約  $1/4 \sim 1/6$  管長處有一鋼製紗網。

黎開管的製程非常簡單，材料包括長 60 ~ 80 cm、直徑大於 6cm 的 P V C 管（厚度較厚者較佳）；一鋼製的紗網（五金店有賣）。用較堅固的剪刀或者專門用來剪鐵片的剪刀，將鋼製紗網剪成比 P V C 管內徑略寬 1 公分的長條狀，再將此長條狀的鋼製紗網折疊起來，這幾層鋼製紗網疊在一起，形成正方形的形狀，稍壓實後，把正方形的多層紗網的邊邊角角折起來，形成近似圓形的蓋狀紗網，剪掉四角特別多餘的部分，將此近似圓形的多層紗網塞入 P V C 管中，紗網的平面垂直管子的軸向，大約卡在距開口端四分之一管子總長的位置。

用噴燈火焰、酒精燈火焰或本生燈火焰

直接加熱鋼製紗網數秒鐘（P V C 管在此短短約十秒內足可忍受火焰溫度），紗網溫度升高之後（中間部分發紅即可），有鋼紗網的那端朝下，豎立 P V C 管，立即就會發出巨大的單音聲響，相當令人好奇。

#### 伍、黎開管奇妙的行為

第一個要問的問題是：黎開管就靠此數層（約 3-5 層）鋼紗網為何就會發聲。

第二個要問的問題是：黎開管如果平放，管中因此沒有由於熱對流而造成的氣流，黎開管就不響了。為什麼？

第三個要問的問題是：如果垂直豎立黎開管，但有紗網的那一端在上方，黎開管也不能發出聲音。為什麼？

第四個要問的問題是：黎開管即使平放，用一小電扇，或手持此管跑動，讓空氣從有鋼製紗網的這端流入，再從另外流出，黎開管就能響。相反的，如果讓空氣從管子遠離紗網的那端流入管中，黎開管又不響了。為什麼？

首先研究一下，兩端開口的管中氣柱如何振動？見圖 7。大家都知道，兩端開口的管中氣柱的邊界條件是：兩端接近開口處空氣位移的振幅最大，空氣壓力變化的振幅最小。就基頻的振動模式而言，兩端近開口處的空氣均同步運動，但運動方向始終相反，體積和密度幾乎不變（圖 7 中標示 E 的那部份空氣）。近管子中段處的空氣（圖 7 中標示 C 的那部份空氣）則始終不動，但壓力、密度與體積劇烈變化。將管口至中間段之間的空氣分成許多段，觀察管口至中間段之間的這幾段空氣，會發現：此部分空氣，例如：圖 7 中標誌 R 的那塊空氣，向管子中點運動時，逐漸被壓縮；向管子下端運動時，逐漸



膨脹。

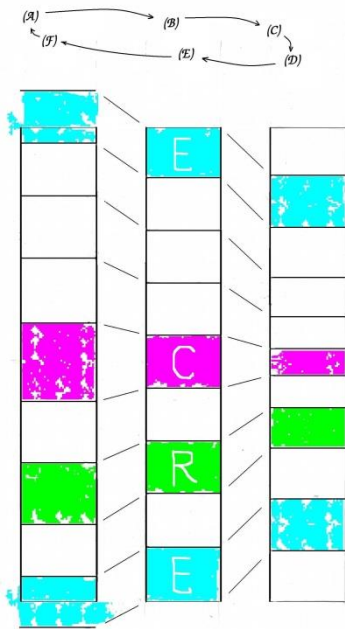


圖 7：兩端開口管中氣柱基頻振動的情形。上方迴圈表示振動週而復始。

黎開管發聲的原理，與前述的熱聲效應相同。但駐波型熱聲效應管中有一個一端高溫、另一端低溫的熱聲堆；黎開管卻只有一疊高溫鋼紗網。

當高溫的紗網靠近管子下端時，兩端開口的管中氣柱一樣會以特定的振動模式振動(例如:基頻振動)。振動時，紗網下方的某團片狀冷空氣(圖 7 標誌 R 附近的空氣)，先因振動而一邊移動，一邊壓縮，移動到高溫紗網的位置而被高溫紗網加熱，加熱後此部分的空氣膨脹，即對氣柱中其他空氣更有力地做正功，從而加強了振動模式的振動。膨脹後的空氣隨即再次移動到紗網下方，因為黎開管中就只有高溫的紗網，所以無法充分冷卻，見圖 8。

如果尚未充分冷卻的工作流體又再被壓縮，隨著振動再次來到高溫鋼紗網處再加熱，

即不符合熱機原理了。原因是：一、工作流體尚未冷卻即被壓縮，反而消耗機械能；二、加熱尚未冷卻的工作流體，因其溫度較高不易被加熱，效率很差。因此，如果黎開管中所有空氣都不流動，只有振動，熱機循環不能發生，就不能增益氣柱的振動。

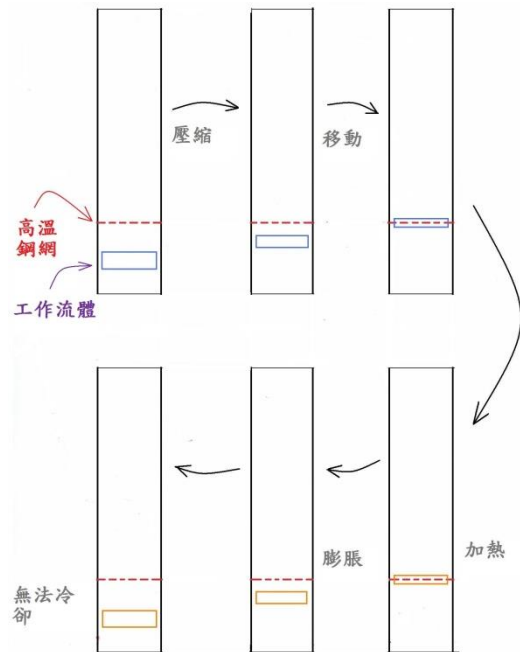


圖 8：黎開管如果沒有氣流，被加熱後膨脹的那部份空氣(工作流體)要再被壓縮之前，無法有效降溫。

當黎開管豎起來時，因為熱對流，會引起氣流流動。當有氣流時，因為空氣流動，總有較冷的空氣流上來，遞補膨脹後尚未冷卻的空氣，與膨脹後尚未冷卻的空氣混合而降低其溫度，見圖 9，膨脹後的較高溫空氣，也會部分流走。

當黎開管豎起來時，因為熱對流，會引起氣流流動。當有氣流時，因為空氣流動，總有較冷的空氣流上來，遞補膨脹後尚未冷卻的空氣，與膨脹後尚未冷卻的空氣混合而降低其溫度，見圖 9，膨脹後的較高溫空氣，也會部分流走。



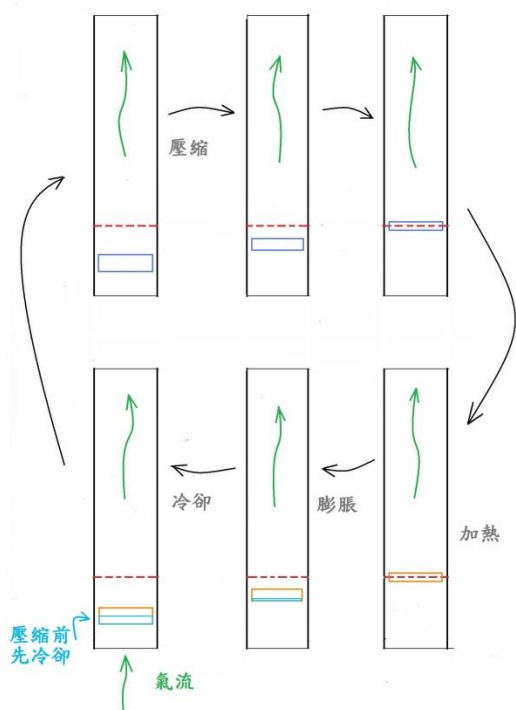


圖 9：微弱氣流不致明顯改變振動模式(normal mode)的振動方式。但因為氣流流動，被加熱而膨脹的空氣，在下次再壓縮之前已經部分流走，而由另外補充上來的常溫空氣(溫度較低)進行下一次的壓縮、加熱、膨脹的熱機循環。

實驗過程中也可以發現：當火焰仍在下方時，下方向上流動的空氣(位於高溫紗網與靠近紗網這端管口之間的空氣)，已經火燄加熱，其溫度已經太高，無法隨著振動模式之振動，進行冷空氣(工作流體)先壓縮再加熱的熱機循環，所以黎開管無法發出巨大的聲音。

當高溫紗網這端轉到上方時，因為對流而流到紗網上方的空氣，因先經過高溫紗網，已經被加熱而溫度太高，因氣柱振動而向紗網移動時，也同樣因為溫度過高，無法進行冷空氣先壓縮再加熱、膨脹的熱機循環。

由此可知黎開管運作時，空氣的熱對流，

並不是重點。空氣的流動，使得在某振動模式之中，不斷有冷的空氣進行先壓縮再被加熱的熱機循環，才是重點。

在此，根據上述的討論，再一一回答本段開頭所提出的幾個問題。

一、黎開管就靠此數層(約 3-5 層)鋼紗網為何就會發聲？因為利用這數層紗網作為加熱的熱源，再搭配管中流動的空氣，使得靠近這數層紗網的一小部分空氣，在振動時能進行熱機循環(先冷卻，再壓縮，再加熱，升溫之後再膨脹而對其餘的空氣作功)，使得因加熱這一小部份空氣，而進入這一小部份空氣的熱，變成管中氣柱振動的機械能。

二、黎開管如果平放，管中因此沒有由於熱對流而造成的氣流，黎開管就不響了。為什麼？重點是管中的空氣必須流動，才能有效冷卻作為工作流體的那一部分空氣，而使得這部分空氣能夠在較低溫的狀態被壓縮，被壓縮之後，才被加熱，再膨脹，對其他空氣作功，而增加氣柱振動的機械能。

三、如果垂直豎立黎開管，但有紗網的那一端在上方，黎開管也不能發出聲音。為什麼？必須配合氣柱振動的情形和氣流的方向，才能使得要被壓縮的那一小部分空氣之溫度先降下來。但有紗網的那一端如果在上方，熱對流確實也會帶動空氣流動。因為整個氣柱振動，是從管口向管子中間運動，同時被壓縮，但此時上端管口附近的空氣(位於高溫紗網與近紗網這端管口之間的空氣)，均是通過高溫紗網而被加熱後的空氣，其溫度已經升高，較高溫的空氣被壓縮，違反熱機原理。

四、黎開管即使平放，用一小電扇，或手持此管跑動，讓空氣從有鋼製紗網的這端流入，再從另外流出，黎開管就能響。相反的，如果讓空氣從管子遠離紗網的那端流入管中，黎開管又不響了。為什麼？其實熱對流並不是使黎開管發出巨大聲音的必要條件。管中

之空氣在正確的方向流動，而使部分較低溫的空氣能先壓縮，再被加熱之後膨脹而加強管中氣體的振動，才是黎開管發出巨大聲音的必要條件。將要被壓縮的那一小部分的空氣(位於高溫紗網與近紗網這端管口之間的空氣)必須較為低溫(僅稍高於室溫)，所以從高溫紗網較近的那端流進空氣，就能使這部分未被加熱的較冷空氣，先壓縮同時振動到高溫紗網的地方被加熱。反之，如果從距紗網較遠的那端吹入空氣，就有如將高溫紗網的那一端朝上時熱對流所造成的效果一樣，將要被壓縮的空氣(位於高溫紗網與近紗網這端管口之間的空氣)，因為已經先經過高溫紗網而被加熱，溫度已經太高。高溫的氣體被壓縮不符熱機原理。

### 陸、拍頻實驗的絕佳儀器

黎開管能發出巨大的單頻聲音，而此巨大聲音的頻率決定於管子的長度，使用兩個長度稍有不同的管子，就能做出相當突出的拍頻實驗。為了方便起見，取兩支長約 60 公分的 PVC 管，置放好鋼網，再捲起厚紙製成有彈性的套筒，插入其中一個 PVC 管中，調整厚紙圓筒的位置，使兩管子的長度相差約 1 公分，同時加熱兩根管子中的鋼網，讓兩根管子同時發聲，就可聽到非常明顯的拍頻。

### 柒、結論

黎開管、駐波型熱聲引擎以及行波型熱聲引擎，都基於熱聲效應來運作。熱聲效應其實與引擎工作的原理相同，都是藉由工作流體先壓縮再加熱，加熱後再膨脹，再降溫後再壓縮的熱機循環，將熱能轉換成動能。

一般熱聲引擎的熱聲堆，熱端加熱工作

流體，冷端冷卻工作流體。氣柱振動時，以熱聲堆附近的一部分空氣作為工作流體，此部分空氣重複循環使用，持續進行熱機循環，不斷把熱轉換成氣柱振動的機械能。

但黎開管比較特殊，只有加熱的鋼網，而沒有冷卻的裝置，只好利用管中之氣流(可以藉熱對流自然產生，也可以用風扇或其他方法產生)，不斷更新工作流體。才能不斷地藉氣柱振動先壓縮鋼網下方部分的常溫空氣，此部分壓縮的空氣振動到高溫的鋼網，被瞬間加熱，膨脹而對氣柱做功。但膨脹後雖未能充分冷卻，於是隨氣流排掉。再換用隨氣流而來的常溫的空氣(新的工作流體)重複熱機循環，持續不斷，使不斷更新的工作流體始終能遂行熱機循環。

### 捌、參考文獻

1. 在 google 中鍵入 Rijke tube 的關鍵字，可以查到許多國內、外大學演示及大略解釋黎開管的網站。
2. 『請大家幫忙解釋黎開管原理——以國小高年級學生聽得懂的語言，謝謝！』黎開管網頁如下：**科學教育跨縣市創意社群**：<http://ppt.cc/4feV>。召集人：蔡振明  
承辦單位：台東大學科學教育中心、台東大學教育學系、台東大學生命科學系、臺東縣賓茂國中、臺東縣廣原國小。
3. 馬大獻 (2001). 第 26 卷第 4 期，2001 年 7 月，**聲學學報**，黎開管振盪的簡單理論。
4. S. Backhaus and G. W. Swift (1999). A thermo-acoustic Stirling heat engine, *Nature*, 399, 335-338。
5. 周鑑恆 (2008). 能源之星, **物理雙月刊**, (2008 年 8 月), 363-376。
6. 周鑑恆 (2009). 不轉動的熱聲效應史特

- 林引擎，**科學月刊**，(2009 年 9 月)，253-256。
7. 周鑑恆 (2008). 熱聲效應史特林引擎，**國語日報**，民國 97 年 6 月，**科學教室**(第 8 版)。
  8. 周鑑恆 (2008). 土製熱聲效應史特林引擎，**第七屆中日友好科技創新教育研討會**，中國西安，8 月 20 日-8 月 22 日。
  9. 周鑑恆 (2009). Thermo-acoustic Stirling engine，**中華民國物理年會暨研究成果發表會**，2009 年，1 月 19-21 日。
  10. 周鑑恆 (2009). 繩柱風車、熱聲效應史特林引擎教具、縱波海嘯，**中華民國物理教育年會暨學術研討會**，台灣師範大學，3 月 13-14 日。
  11. 周鑑恆 (2012). 熱聲效應史特林引擎 (Thermo-acoustic Stirling heat engine)，**物理教育學刊**，13 卷 2 期，p.103~114。
  12. 周鑑恆 (2012). 熱力學(Thermodynamics)，**附錄**，海峽前鋒文化事業有限公司，2012 年 7 月初版一刷，p.148~156。

## Heat engine, Rijke tube and beat

**Chou, Chien-Heng**

Department of Aeronautical and Opto-Mechatronic Engineering, Vanung University

e-mail: chou0717@gmail.com

### Abstract

The Rijke tube is actually an educational instrument for demonstrating thermo-acoustics. There are several intriguing phenomena that can be found while operating a Rijke tube. In this article we describe the principles of the thermo-acoustics and the Rijke tube and further discuss the reasons why the intriguing phenomena happen. We also use Rijke tubes as experimental apparatus to demonstrate significantly the beat which is the interference phenomenon of two sound waves with slightly different frequencies.

**Key words:** thermo-acoustics, heat engine, Rijke tube