

熱聲效應史特林引擎

周鑑恆

萬能科技大學 光電工程系

(投稿日期：民國 101 年 01 月 29 日，修訂日期：101 年 06 月 11 日，接受日期：101 年 06 月 28 日)

摘要：熱聲效應史特林引擎可分為行波型和駐波型兩種，駐波型的熱聲效應史特林引擎格外簡單。本文提出駐波型史特林引擎的工作原理、構造與製作方法，並偵測自製駐波型熱聲效應引擎的發聲頻率，並分析熱片堆的位置和發聲強度的關係；發現駐波型熱聲效應史特林引擎發出的聲音，主要是由管狀共振腔內之氣柱基頻振動模式所造成，設置熱片堆的位置，須使得氣柱中某一部分的氣體在振動時滿足熱機循環，而能將熱能轉換成聲能。

關鍵詞：熱聲效應、史特林引擎

壹、前言

能將熱能轉換成機械能的機器統稱熱機，亦即俗稱的引擎，儘管各種引擎的構造大異其趣，但所有熱機的主角都是工作流體(working fluid)。熱能進入工作流體之後，透過工作流體之運作，轉換成動能。

往復式活塞蒸汽機，渦輪蒸汽機，柴油引擎，汽油引擎，噴射引擎(jet engine)，衝壓引擎(Ramjet engine)，轉子引擎(Wankel engine)，無論這些熱機的構造複雜與否；也不論它們加熱工作流體的方式，是直接在工作流體中燃燒燃料(內燃)，還是經由鍋爐或汽缸來加熱工作流體(外燃)；也不論他們的工作流體是氦氣、氬氣、空氣、水蒸氣或其

他物質；也不論他們是重複循環使用工作流體，或不斷使用用過即拋的工作流體，他們的工作原理都是：「工作流體被加熱或高溫狀態時，膨脹作正功，工作流體降溫或較低溫的狀態時，被壓縮作負功。」把工作流體的壓力和體積關係的封閉曲線畫在 PV 圖上，無論 Rankine 循環、Otto 循環、Diesel 循環，或者 Brayton 循環，工作流體狀態變化的 PV 圖曲線，都必須向著順時鐘方向的相似封閉曲線。

空氣振動形成聲音，聲音發生時，為方便討論，可將傳播聲音的空氣區分成無數小塊空氣(parcel)，應用牛頓力學來分析空氣振動的情形，會得出聲音的波動方程式，波動方程式的解清楚顯示：聲音傳播時，各個小

塊空氣都會發生膨脹收縮和位移。如果小塊空氣被壓縮後，被加熱，再膨脹，對周圍空氣作較大的正功；之後這小塊空氣又先被冷卻，再被壓縮，作較小的負功(周圍空氣對這小塊空氣作較小的功)。雖然這小塊空氣並非對活塞或渦輪作功，而是對周圍空氣作功，事實上也完成了工作流體加熱後膨脹，冷卻後被壓縮的熱機循環，而把熱能轉換成聲音振動的能量，增加聲音的強度。此即所謂的熱聲效應(thermo-acoustics)¹⁻⁸。

凡是利用工作流體在冷、熱區之間移動，遂行壓縮的工作流體經加熱而膨脹作正功，膨脹後先冷卻再壓縮作負功的熱機循環，這樣的機構都被歸類為史特林引擎。所以利用熱聲效應把熱能轉換成聲能的裝置，也就稱為熱聲效應史特林引擎，熱聲效應史特林引擎大致可分為駐波(standing wave)和行波(traveling wave)兩種⁹。

本研究研製、測試和解釋一種廉價的熱聲效應引擎，這種引擎的運轉原理和史特林引擎的原理一致。其構造非常簡單，沒有任何活動的零件。

貳、駐波型熱聲效應史特林引擎

一、構造與製作

駐波型熱聲效應史特林引擎^{10,11}，基本上是一端閉口，一端開口的管狀共振腔，在共振腔內近閉口端裝有熱片堆(stack)，熱片堆中有許多平行共振腔軸向的密集穿孔。熱片堆在靠近共振腔閉口的那一端溫度較高，另一端溫度較低，於是延軸向的溫度梯度(temperature gradient)相當大。

本研究研製三種不同尺寸的駐波型熱聲效應史特林引擎。管狀共振腔分別由內徑 5.8 cm，長 0.9m、內徑 4.0 cm，長 0.4m、內徑

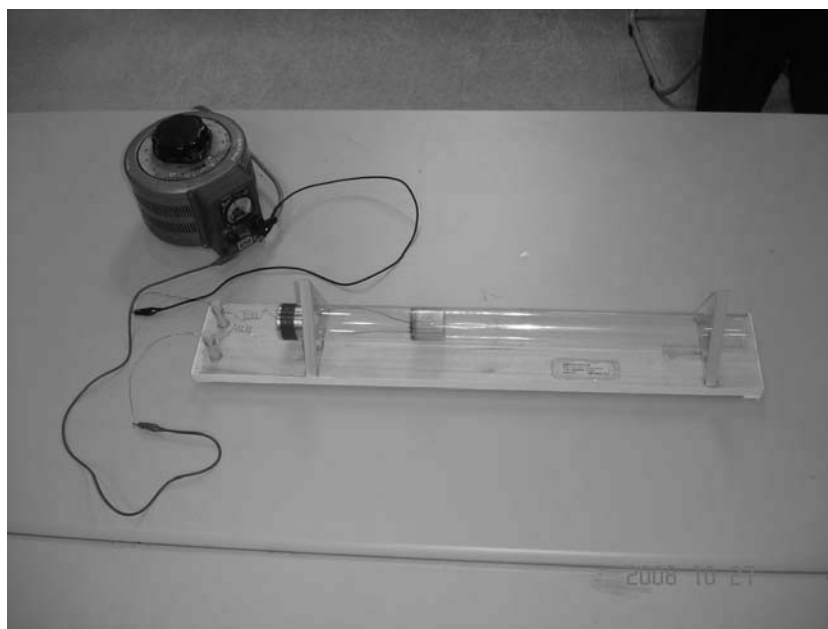


圖 1：內徑 5.8 cm，長 0.9 m 的管狀共振腔構成的駐波型熱聲效應史特林引擎。圖中玻璃管共振腔左側以鋁蓋密封，玻璃管靠左側有熱片堆，熱片堆左側以鎳鉻線加熱，鎳鉻線兩端導線經鋁蓋上之穿孔伸出，玻璃管右側開口。作者曾將此型熱聲效應史特林引擎贈予高雄科學工藝博物館及廣西師範大學科學教育研究所。

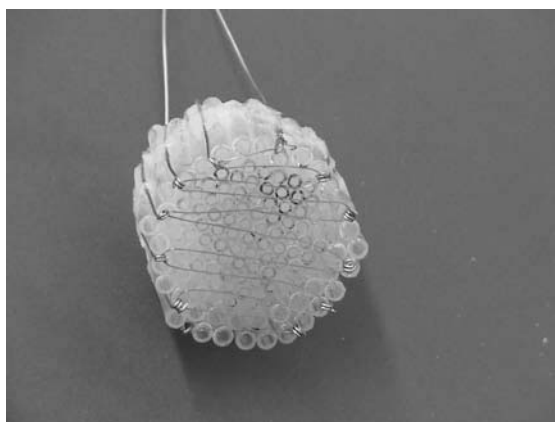


圖 2：(a) 內徑 0.8 mm~2 mm 的小玻璃管長約 3.5 cm，用 AB 膠黏合冷端，並黏上拉撐鎳鉻線的鐵絲支架（最外圈），鎳鉻線穿在鐵絲支架上，鎳鉻線兩端經導線接電源，通電即可使鎳鉻線溫度升高。

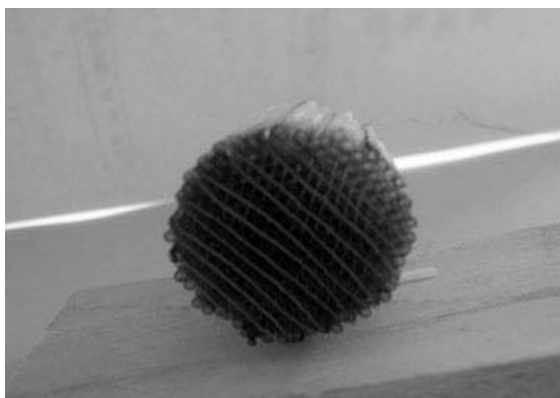


圖 2：(b) 熱片堆鎳鉻線加熱端的特寫鏡頭。

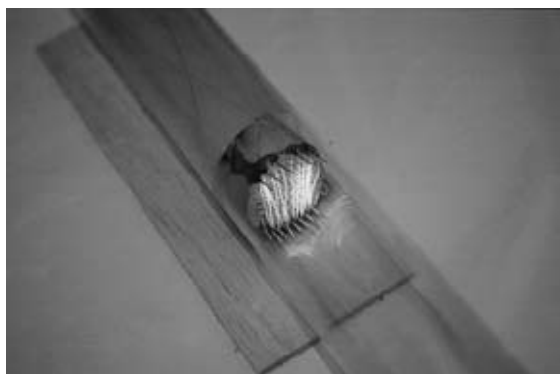


圖 2：(c) 陶土製作的熱片堆，鐵絲支架插在陶土中，鎳鉻線穿在鐵絲支架上。

1.8 cm，長 0.2 m 的玻璃管構成，每支玻璃管的一端均封閉（參見圖 1）。

內徑 5.8 cm，長 0.9 m 管狀共振腔之熱片堆，由內徑 0.8 mm~2 mm，厚 0.3mm~0.5 mm 的小玻璃管集成束所構成，長度約 3.5 cm，熱片堆一端交織直徑 0.4mm 的鎳鉻線（參見圖 2），鎳鉻線接通 10~20 伏特的電壓源，以鎳鉻線加熱熱片堆的熱端，熱片堆的另一端則以自然氣冷的方式保持較低的溫度，以便在熱片堆軸向形成明顯的溫度梯度。內徑 0.8mm~2 mm，厚 0.3 mm~0.5 mm 的小玻璃管約需 140 支，用鑽石圓鋸切割成 3.5 cm 長，再用 60 分鐘型的 AB 膠黏合氣冷端，並黏上拉撐鎳鉻線的鐵絲支架，帶 AB 膠硬化，將鎳鉻線穿在鐵絲支架上，鎳鉻線兩端接導線，導線再接電源。

此熱片堆也可以用陶土製作，捏成圓柱狀的陶土，直徑約 5.8 cm，長約 3.5 cm，沿軸向鑽穿 100 個以上直徑 1.5 mm 的穿孔，鐵絲支架插在陶土中，待陶土全乾，也將鎳鉻線穿在鐵絲支架上，鎳鉻線兩端接導線，導線再接電源。

二、原理

當駐波發生時，熱片堆穿孔中的各小塊空氣(工作流體)向共振腔的閉口端位移，而被壓縮，同時移向熱片堆較高溫處，該小塊空氣在熱穿透深度(thermal penetration depth)以內的部分，會被熱片堆加熱，使溫度升高，隨即膨脹對周圍空氣做較大的正功，駐波之能量於是加大；小塊空氣膨脹，同時移至熱片堆之冷端，當能量增加的駐波再度壓縮這小塊空氣時，此小塊空氣已先被較低溫的熱片堆冷卻，只消耗較少的聲波能量即可被壓縮。熱能於是不斷變成駐波的能量。

熱片堆之設計要點在於，只有在約 4 倍

熱穿透深度之內的空氣才來得及被加熱，且又不致於因空氣的黏滯性而消耗太多振動的能量。熱穿透深度(δ_R)與空氣的導熱率 κ 、空氣密度 ρ 、以及空氣的等壓比熱 C_p 有關，可以表示為：

$$\delta_R = \sqrt{\frac{\kappa}{\pi f \rho C_p}} \dots\dots\dots (1)$$

其中 f 為空氣振動的頻率。

本研究之熱聲效應史特林引擎所發出聲音的頻率 f ，分別為 449Hz、222Hz、98Hz，代入公式(1)，分別得出熱穿透深度分別為 0.123 mm、0.175 mm、0.264 mm，因此本研究中構成熱片堆的細玻璃管之內徑分別為 0.8~1 mm 及 2 mm，大致能滿足熱交換的條件。

參、實驗結果

實驗在背景噪音 50 分貝以下的環境進行。首先測量熱聲效應史特林引擎所發聲音的頻率，並以示波器顯示喇叭受聲音震動而產生的電壓變化，以便確認共振腔中空氣振動的情形。其次，在了解共振腔中空氣振動的模式之後，即知共振腔中各部份空氣振動的方式，測量熱片堆在何處能使振動模式獲得最大的增益，即可了解那些部份的空氣，以該振動模式振動時，在熱片堆中能最有效的進行熱機循環。

一、振動頻率

共振腔內空氣第 n 階振動模式(normal modes)的頻率 f_n ，可表示為：

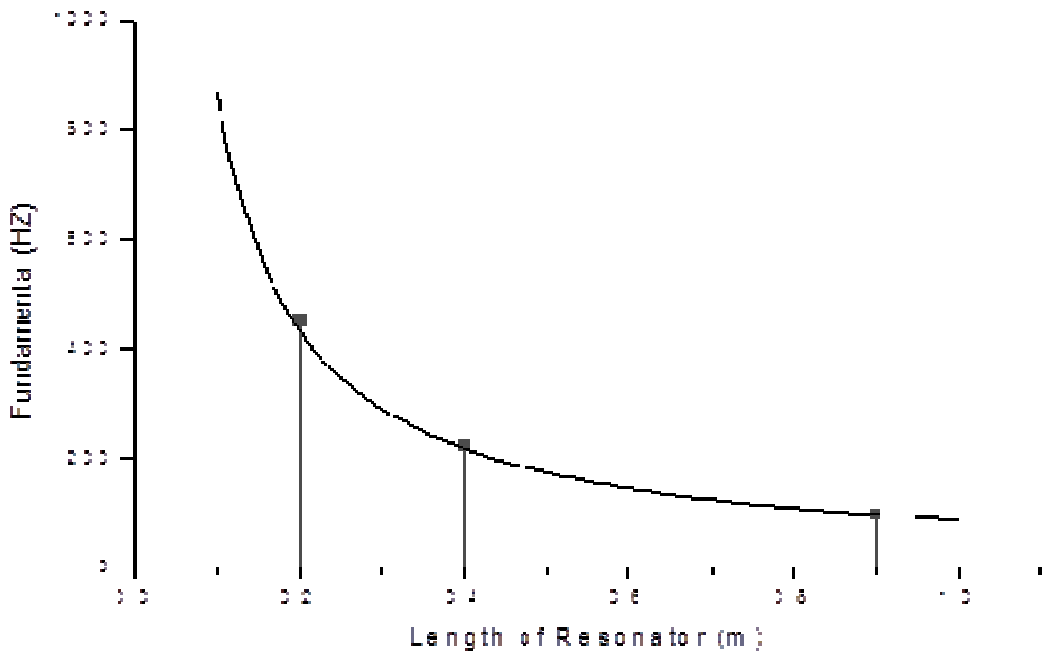


圖 3： 26°C時基頻駐波頻率的理論值和共振腔長度 L 的關係（實線）。
 長度 0.2 m、0.4 m、0.9 m 的共振腔基頻駐波頻率的理論值分別為：433.25 Hz、216.27 Hz、96.28 Hz，實驗值分別為：449 Hz、222 Hz、98 Hz（小方塊）。

$$f_n = \frac{V_s(2n-1)}{4L} \dots\dots\dots (2)$$

其中， $V_s = 331 + 0.6 \times (t^\circ C)$ ，為溫度為 $t^\circ C$ 時聲音的速度； L 為一端閉口，一端開口的共振腔長度； $n=1、2、3、\dots\dots\dots$ 。 $n=1$ 時， f_1 為基頻，共振腔中之空氣柱的基頻振動模式，只有一個壓力波(或位移波)的波腹(antinodes)，亦只有一個壓力波(或位移波)的波節(nodes)。

圖 3 中的實線表示 $26^\circ C$ 時，理論計算基頻駐波頻率 f_1 和共振腔長度 L 的關係，共振腔長度 L 和基頻 f_1 成反比，共振腔長度 L 越長，基頻頻率越低。

在本研究中，研製了三支不同長度的共振腔，長度分別為 0.2m、0.4m、0.9m，利用阻抗 8Ω 之喇叭作為偵測器，並以示波器量測熱聲效應史特林引擎之聲音振動喇叭所產

生的電壓，進而測出熱聲效應史特林引擎之聲音的頻率。長度 0.2 m、0.4 m、0.9 m 的共振腔所發聲音的頻率的理論值分別為 433.25 Hz、216.265 Hz、96.278 Hz，實驗測得長度 0.2 m、0.4 m、0.9 m 的共振腔所發聲音的頻率分別為 449 Hz、222Hz、98 Hz，與以理論計算的基頻頻率之誤差均小於 5%。從此結果可知熱聲效應史特林引擎共振腔中的空氣，均主要以基頻振動模式的方式振動。

但長度 0.9 m 共振腔發出的聲音從示波器上的電壓波形可知有較明顯的泛頻成分。

二、增益位置

在共振腔中熱片堆延軸向穿孔之方向須具有相當大的溫度梯度，熱片堆的位置，必須使得共振腔中的空氣柱振動時，某一部份的空氣能夠滿足低溫時被壓縮，加熱後膨脹

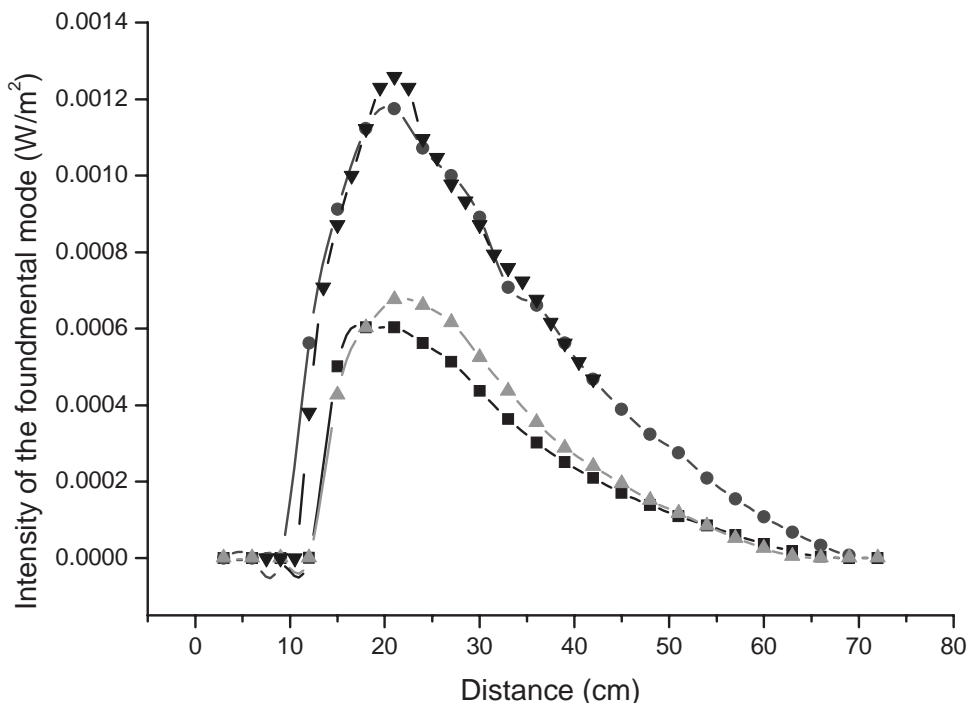


圖 4：熱片堆的高溫端與閉口端 (x=0) 之間的距離(橫軸)，與共振腔所發聲音強度(縱軸)的關係。

的熱機循環。由這一小部分的空氣作為熱聲效應史特林引擎之工作流體，與熱片堆交換熱能，將熱能轉換成聲能。

圖 4 所示為熱片堆的高溫端與閉口端之間的距離相對共振腔所發聲音強度的關係。為求數據之可重覆性，將熱片堆置入長度 0.9 m 的共振管中，接通 18V 電源，使熱片堆的加熱鎳絡絲發出暗紅色的光（約 500°C），見圖 2(c)，將熱片堆反覆在共振腔中移動，並以分貝計(Sound Level meter, 型號 SL-4010)測聲音強度。測出之分貝值，再根據公式換算出聲音的強度。實驗結果顯示：雖然由於分貝計的距離、背景噪音、和鎳絡線的溫度，在每次實驗時略有不同，以致於聲音強度/距閉口端距離的曲線差未完全重疊，但每條曲線都顯示：當熱片堆的高溫端距閉口端大約 22 cm 時，聲音最響。

三、聲音引起的氣流

聲波是一種縱波，聲音傳遞時，空氣振動的方向平行聲音傳遞的方向，聲音要朝著傳遞的方向傳遞能量，也就必須朝著傳遞的方向作功。聲音要朝著傳遞方向作功，則某一小塊空氣向前運動時，施加前方空氣的壓力較大，該一小塊空氣向後運動時，施加前方空氣的壓力較小，前方空氣因此會流動而形成風。在共振腔發出的聲音於是在管口會引起氣流，在管口放置點燃的蠟燭，明顯可見風吹歪火焰的現象。也可以用木柴或鋁片製作小型螺旋槳，管口之風足以吹動小型螺旋槳。(見圖 5)

其中積分符號的圈圈代表理想氣體進行循環過程(即回到原始狀態的過程)， dQ 是循環過程中任意微小變化時理想氣體所吸收的熱， T 是該小段過程時理想氣體的溫度。積分的意思是全部加總起來。



圖 5 (a)：共振腔發出的聲音在管口引起氣流。

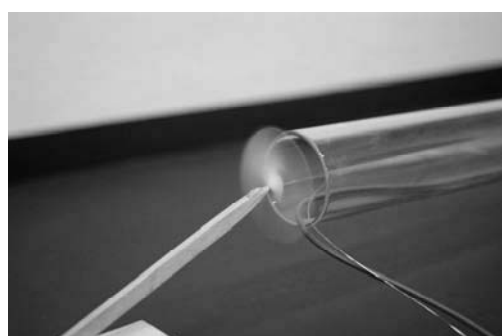
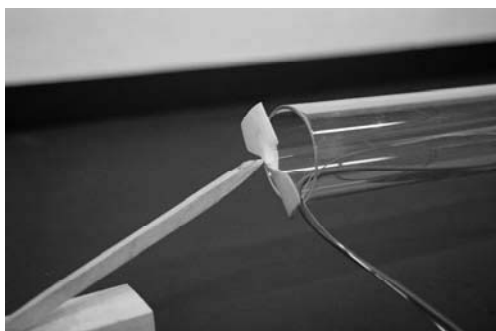


圖 5 (b)：在管口引起的氣流足以推動木材削成的小螺旋槳。



圖 5 (C)：在管口引起的氣流也能推動鋁片製成的小螺旋槳。

肆、理論分析

一、氣柱振動

根據牛頓第二定律和空氣的力學特性，計算管狀共振腔中空氣運動的情形，可得到聲音的波動方程式，如下：

$$\frac{\partial^2 S(x,t)}{\partial t^2} = \frac{B}{\rho} \frac{\partial^2 S(x,t)}{\partial x^2} \dots\dots\dots (3)$$

其中 $B \equiv -\frac{\Delta P}{\Delta V/V}$ ，稱為容積係數 (bulk modulus)，是空氣壓力變化和單位體積之體積變化的比值。x 代表某一小塊空氣的編號，在此是以無聲時該小塊空氣平衡位置的座標加以編號。S(x,t)為某一小塊(編號 x)空氣於 t 時的位移量。從式(3)可知，聲音的速度 v 寫成：

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \dots\dots\dots (4)$$

考慮邊界條件：在共振腔封閉端附近的空氣(x=0)無論如何不能移動，亦即 S(0,t) = 0，而在共振腔開口端附近的空氣(x=L)有最大的位移，亦即 S(L,t) = S_{max}，則方程式(3)的基頻解可寫成：

$$S(x,t) = S_{\max} (\sin kx)(\cos \omega t) \dots\dots (5)$$

其中波數 $k \equiv \frac{2\pi}{\lambda}$ ， $\lambda = 4L$ ，角速度 $\omega = \frac{2\pi}{T}$ ，而 $v = \frac{\omega}{k} = \frac{2\pi f}{k}$ ，其中 f 為聲音的頻率，S_{max} 為常數。再利用(5)式，求出該塊空氣(以 x 標記)之壓力變化和體積變化：

$$\Delta P(x,t) = -B \frac{\Delta V(x,t)}{V} = -B \left[\frac{S(x+\frac{dx}{2},t) - S(x-\frac{dx}{2},t)}{dx} \right] = -B \frac{\partial S(x,t)}{\partial x}$$
$$= -BkS_{\max} (\cos kx) \cos \omega t \dots (6)$$

若熱片堆置於某處，此處的一塊空氣(標記為 x₀)，這塊空氣就會延軸向隨時間進行位移，可表示為：

$$S(x_0,t) = S_{\max} (\sin kx_0) \cos \omega t \dots\dots (7)$$

當然，如果 x₀ = 0，即在封閉端附近，S(0,t) = 0，此處空氣幾乎不動。當 sin kx₀ 不等於零時，在 x₀ 的某塊空氣，以餘弦函數的方式隨時間而位移。因為熱片堆沿軸向有溫度梯度，這塊空氣因為位移到熱片堆不同溫度的地方，而發生熱交換，而改變其溫度。

這塊空氣(x₀)因為其相鄰空氣之位移不一致，於是會被壓縮或膨脹，其單位體積的膨脹量即為：

$$\frac{\Delta V(x_0,t)}{V} = -kS_{\max} \cos(kx_0) \cos \omega t \dots\dots (8)$$

換言之，空氣單位體積的變化量，在此振動模式振動時，其壓縮和膨脹的振幅與此塊空氣所在位置以餘弦函數相關。

二、熱機

在熱聲效應史特林引擎中，作為工作流體的部分空氣必須經歷昇溫和降溫的過程，這過程必須透過在熱片堆的熱端和冷端之間移動來達成。因此在基頻振動模式中，各塊(不同 x) 空氣位移的情形由(5)式決定，靠近閉口端的空氣，sin(k0) ≈ 0，不能移動，即不能作為工作流體。

另一方面熱機運轉時工作流體要能被壓縮和膨脹，從(8)可見，靠近開口端的空氣不會被壓縮和膨脹，cos(kL) ≈ 0，因為不會

被壓縮和膨脹，靠近開口端的空氣無法作功，靠近開口端的空氣也不能作為工作流體。

因此工作流體必須是可以改變體積，又同時能位移的空氣，亦即位於共振腔中段的空氣；又因為工作流體的脹縮對熱機運轉可能較為重要，也可能因為氣柱振動時位能主要儲存在靠近閉口端的空氣中，因加熱進一步增加在靠近閉口端空氣的壓力，才能有效增加氣柱振動的能量，所以實驗結果顯示，熱片堆置於距封閉端約 1/4 總長度處，以該處空氣作為工作流體時，熱聲效應史特林引擎會發出最響的聲音。

此大致符合 (5) 式和 (8) 式之理論計算的結果。

三、管口之風

同樣根據(3)式，管口附近的聲波可大致以一維聲波表示，管口附近的空氣振動可寫成：

$$S(x,t) = S_{amp} \sin(kx - \omega t) \dots\dots (9)$$

其中 x 代表很近管口的某一小塊空氣，則 $S(x,t)$ 即為此塊空氣的位移量，聲波的速度為：

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} = \frac{\omega}{k}$$

這塊空氣 (x) 的振動速度即為：

$$v_{air} = \frac{\partial S(x,t)}{\partial t} = -S_{amp} \omega \cos(kx - \omega t) \dots (9)$$

這塊空氣 (x) 因為其相鄰空氣之位移不一致，於是會被壓縮或膨脹，其造成的壓力變化量即為：

$$\Delta P(x,t) = -B \frac{\Delta V(x,t)}{V} = -BkS_{amp} \cos(kx - \omega t) \dots\dots\dots (10)$$

v_{air} 大於零，即向前振動時， $\Delta P(x,t)$ 也大於零， $(P_0 + \Delta P(x,t))$ 壓力較大； v_{air} 小於零，即向後振動時， $\Delta P(x,t)$ 也小於零， $(P_0 + \Delta P(x,t))$ 壓力較小，這塊空氣 (x) 對前方空氣所做的力學功之功率即為：

$$Power(x,t) = v_{air} \times (P_0 + \Delta P(x,t)) \\ = -S_{amp} \omega \cos(kx - \omega t) \times (P_0 - BkS_{amp} \cos(kx - \omega t)) \dots\dots\dots (11)$$

這塊空氣 (x) 對前方空氣所做的力學功即為：

$$W = \frac{1}{T} \int Power(x,t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T -S_{amp} \omega \cos(kx - \omega t) \times (P_0 - BkS_{amp} \cos(kx - \omega t)) dt \\ = \frac{1}{T} \int_0^T S_{amp} \omega \cos(kx - \omega t) \times (BkS_{amp} \cos(kx - \omega t)) dt \\ = \frac{1}{T} S_{amp}^2 Bk \omega \int_0^T \cos^2(kx - \omega t) dt = \frac{1}{2} S_{amp}^2 Bk \omega > 0 \dots\dots\dots (12)$$

以週期性、短距離的方式來回推動前方空氣，前方空氣可能被壓縮，繼續傳播聲音，也可能速度增加，形成風。

伍、教學應用

很少教科書會注意到，聲音的振動會引起氣流，因為聲波傳遞能量時會對前方的空氣做功，前方的空氣被做功之後，會引起振動，繼續傳遞能量波動，也可能開始流動。這個奇特的現象，有助於深入探討聲波傳遞能量的細節。

熱聲效應本質上是一種熱機運轉的過程。熱聲效應史特林引擎運作時，玻璃管中熱聲堆附近的空氣，因為振動的緣故，冷卻後被壓縮，又被加熱，膨脹後又被冷卻，使得振動能量增加。一方面以此特別的例子凸顯熱機原理，另一方面說明熱機的輸出不一

定是轉動飛輪的動能。

氣柱振動是一般教科書常見的主題，有幾種常見的方法引起氣柱振動，例如：用風或氣體吹開口端的方式，如吹簫、吹笛等，也有利用適當頻率的喇叭直接驅動氣柱振動。利用熱聲效應引起氣柱振動模式振動，完全不用可動的物體，更加突出氣柱振動有其由邊界條件自然決定的模式振動。

由於熱聲效應史特林引擎發出的聲音同調性極高，兩支長度稍有不同的玻璃管製成的熱聲史特林引擎發出的聲音，頻率僅略相差一點，同時發聲，可用來演示拍頻現象。

在熱聲史特林引擎閉口端加裝壓電晶片，利用空氣振動的壓力發電，足以點亮 LED 燈。

陸、結論

實驗結果證明，熱聲效應史特林引擎中，主要發生的振動模式是基頻的振動模式。雖然三具共振腔的長度相差甚大，但只要熱片堆設置在共振腔中距封口端 $1/4$ 總長度的地方，主要被激發的振動模式就是基頻振動模式。

此外從示波器量測偵測喇叭所產生的電壓之訊號，可以發現長度最長的共振腔中有可能出現第一泛頻，特別是當熱片堆位置較靠近共振腔開口端時，第一泛頻的振動更為明顯。

當基頻振動模式振動時，熱片堆所在的位置，必須使熱片堆所在處的部份空氣能進行熱機循環。實驗結果顯示熱片堆必須在距閉口端 $1/4$ 總長的地方，熱片堆太靠近開口端或閉口端，均無法使振動獲得增益，熱片堆在共振腔的中間處，所發出的聲音響度並非最大。

此結論表示，作為工作流體的部分空氣

延熱片堆穿孔振動時，如果位移不大，亦即溫差較小，這項因素對於獲得增益的影響較小；而振動時，空氣體積的變化必須明顯，亦即空氣要有明顯的被壓縮，熱聲效應史特林引擎才能發聲。

駐波型熱聲效應史特林引擎工作時，空氣在被壓縮的同時(或稍延遲一段極短的時間)，空氣被加熱。此過程並未完全符合熱機循環的理想過程，所以效率較低。1998 年 Ceperley 等人於是提出構造更為複雜，但效率較高的行波型熱聲效應史特林引擎。然而駐波型熱聲效應史特林引擎仍具有構造簡單，性能可靠的優點。

熱聲效應史特林引擎是一項新的能源技術，可以使用多元能源作為動力，目前美國和中國大陸在這個領域有較出色的研究成果，所產生的聲波可用來推動熱聲致冷機液化氣體或冷卻電子設備，也用來發電；而較簡單的熱聲效應史特林引擎也可以用來作為物理演示教學之教具。

致謝

感謝國科會經費資助，計畫編號：**99WFDC100127**。

參考文獻

1. 周鑑恆，*熱聲效應史特林引擎之理論分析和實驗驗證*，萬能學報第三十期，中華民國 97 年 7 月。
2. 周鑑恆，*能源之星*，物理雙月刊，第 363-376 頁，2008 年八月。
3. 周鑑恆，*不轉動的熱聲效應史特林引擎*，科學月刊，第 253-256 頁，2008 年 8 月。
4. 周鑑恆，*熱聲效應史特林引擎*，國語日報，科學教室（第 8 版），民國 97 年 6

- 月 23 日。
5. 周鑑恆，*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，2008 年 8 月 20 日- 8 月 22 日(第七屆)，中國西安。
 6. 周鑑恆，*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。
 7. 周鑑恆，*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，中華民國 98 年 3 月 13-14 日，台灣師範大學。
 8. 周鑑恆，*不轉動的史特林引擎*，全國高等學校第九屆物理演示實驗教學研討會，2009 年 8 月 13-17 日，中國大陸西南交通大學。
 9. S. Backhaus and G. W. Swift, “A thermo-acoustic Stirling heat engine,” *Nature*, Vol. 339, 335-338, 27 May 1999.
 10. G. W. Swift, “thermo-acoustic engines and refrigerators,” *Phys. Today* 48, 22-28 (1995).
 11. S. L. Garrett and S. Backhaus, “The power of sound,” *Am. Sci.* 88, 516-525 (2000).

Thermo-acoustic Stirling heat engine

Chien-Heng Chou
Vanung University

Abstract

There are two types of thermo-acoustic Stirling heat engines. Comparing with the traveling wave thermo-acoustic Stirling engine, the standing wave thermo-acoustic Stirling engine is relatively simpler. A study for the structures and working principles of standing wave thermo-acoustic Stirling engines is presented. We build three standing wave thermo-acoustic Stirling engines. Probing the frequency of the acoustic emitted from these engines, we conclude that the fundamental normal mode of the gas in the engines is mainly excited. When the stack is located at a suitable position, the changes of the volume and pressure of a portion of gas in the engine then is similar to that of working fluid in mechanical heat engines. Therefore, the vibrations of the normal modes are excited significantly.

Key words: Thermo-acoustics, Stirling engine

