

能源之星 -- 史特林引擎

文/ 周鑑恆

一、環保的工業革命



從十八世紀初葉開始，一連串對往復式蒸汽機的改良，確定了動力機械的實用性，促成能源科技的突飛猛進，人類從此掙脫了人力和獸力的限制，生產力一夕暴增，引發了以碳能源為基礎的

第一次工業革命，深遠改變全體人類的文明軌跡。

人類於是發展出一種極度依賴能源的生活方式。然而，人們慣用的化石能源(如煤、石油、天然氧等)蘊藏量有限，不可逆的大量消耗，原本即非長久之計。再加上近年來金磚四國經濟起飛，大量人口也競相使用能源，近日油價於是屢創歷史新高，新一波能源危機隱隱浮現。

值得注意的是，70年代的石油危機，是產油國在以巴衝突中藉高油價杯葛英美之中東政策，人為製造出來的，幾經外交折衝，油價不難復歸平穩。但最近油價居高不下，則是市場上的確存在供不應求的客觀因素所造成，長遠來看，這樣的趨勢只會日益嚴峻，高油價時代實已無可避免。

另一方面，由於大量消耗化石能源，也對環境造

周鑑恆
萬能科技大學光電系 助理教授
e-mail: chou0717@gmail.com

成極大的衝擊，二氧化碳的濃度和排放量都創下了前所未有的記錄，衍生的各種後果不堪設想，於是而有京都議定書的簽署，減少依賴化石能源勢在必行。

平常就以賽球對抗排譏競爭本性的人類，立刻露出爭取珍貴石油的衝動，國際間暗潮洶湧，甚至爆發戰爭。面對能源危機和其連鎖所引發的糧食、環保、氣候變遷、生態威脅、國際關係等難題，憑藉第一次工業革命以降迅速累積的科技實力，賦予與蒸汽機幾乎同時誕生，卻蟄伏近兩世紀的一種外燃引擎——史特林引擎——新的生命，展開著眼於永續非碳能源的下一場工業革命，相信必能和平的為當前困局找到兩全其美的解決方案。

二、從熱機談起

除了早期的蒸氣機之外，各種精巧的內燃引擎也陸續問世。這些能將熱能轉換成機械能的機器統稱「熱機(heat engine)」。從物理學的角度來看，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。打個比方來說，熱機好似公司行號，工作流體好似員工，無論公司之體制，聘僱方式如何，也無論員工領薪水的方式是用支票，還是給現金，總而言之，公司的營運方式都是員工領薪水然後辦公事。

老式火車頭上的往復式活塞蒸汽機，現代核能電廠中的渦輪蒸汽機，不用火星塞的柴油引擎，常見的汽油引擎，戰機或客機搭載的噴射引擎(圖 2-1)，推

動高空偵察機 SR-71 以三倍音速巡戈的衝壓引擎，不用連桿的轉子引擎，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、氫氣、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一樣的：「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 P V 圖上，無論 Rankine 循環、Otto 循環、Diesel 循環，或者圖 2-1 所示的 Brayton 循環，工作流體狀態之變化都必須隨著相似的順時鐘方向。

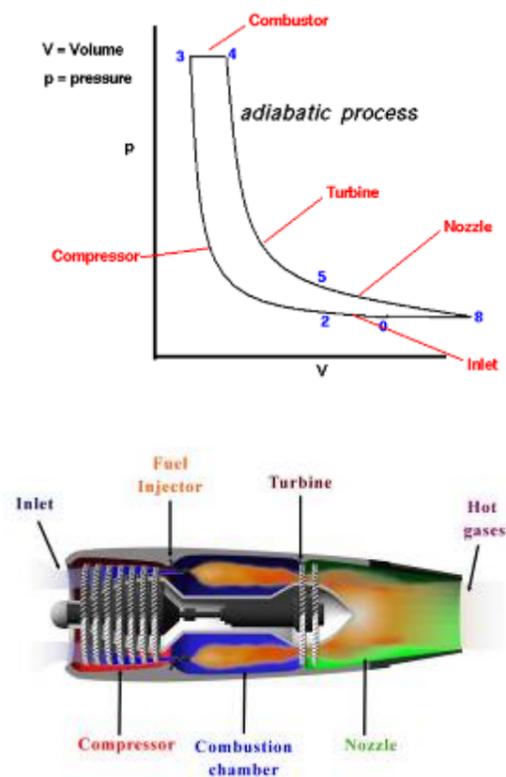


圖 2-1 噴射引擎之工作流體，由外界吸入，PV 狀態經 0--23(壓縮)--34(燃燒升溫)--45(膨脹對渦輪(turbine)作工)--58(回到外界降溫)，順時針

變化其狀態，完成熱機循環。

資料來源：

www.grc.nasa.gov/

WWW/K-12/airplane/brayton.html

encyclozine.com/Science/Physics/Thermodynamics/

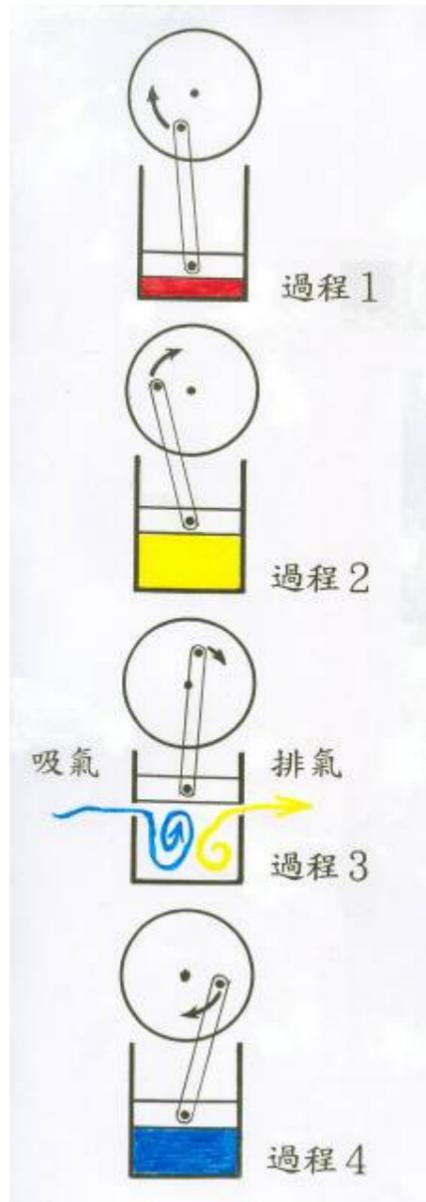


圖 2-2 二行程汽油引擎示意圖。

熱力學第二定律則指出，工作流體被加熱之後，又必然恢復到原來狀態時，被加熱時獲得的熱能，因

為機率的原故，不可能完全經做功轉換成機械能，所以沒有完美的熱機。

就以大家最熟悉的汽油引擎為例，圖 2-2 是理想化的二行程汽油引擎，汽油引擎的主角當然也是工作流體，也就是進出引擎的空氣。

過程 1：混合著少量汽油的空氣（此時溫度較低）被壓縮後，點火爆燃油氣，使空氣溫度升高。

過程 2：加熱後的高溫空氣膨脹作正功，推動活塞，經連桿驅動飛輪轉動。

過程 3：飛輪繼續轉動則將推動活塞壓縮工作流體，所以在此先吸入混著汽油的低溫空氣，並把高溫的空氣（廢氣）排出。排出廢氣，吸入新鮮空氣的過程，其主要效果是冷卻工作流體。

過程 4：較冷的工作流體於是再被活塞壓縮，作負功，並繼續過程 1。

如此週而復始，此二行程汽油引擎即不停運轉。四行程汽油引擎只不過是經由較徹底的先排氣，再吸氣，完成降溫過程而已，工作原理與二行程的汽油引擎完全一樣。

三、史特林引擎的工作原理

1816 年蘇格蘭牧師羅伯特史特林，申請了現今稱為史特林引擎的一種外燃機專利。有別於以水蒸汽作為工作流體的蒸汽機，當時的史特林引擎¹以空氣作為工作流體，所以也稱為熱空氣引擎(hot air engine)。

圖 3-1 顯示一種很容易理解其原理的史特林引擎，右方容器稱之為溫差氣室。溫差氣室的下方為熱區，溫度較高；上方冷區的溫度較低；兩側斜線部分代表熱再生器(regenerator)。引擎運轉時，要持續維持

熱區和冷區的溫差。溫差氣室中的移氣胴體(displacer)可上下移動。移動時顯然不會改變引擎中工作流體的體積，但移氣胴體在上方時，工作流體被移往熱區，移氣胴體在下方時，工作流體被移往冷區。熱再生器的功能是，當工作流體從熱區移到冷區時預先冷卻工作流體，並暫時儲存工作流體釋出的熱能，當工作流體從冷區移到熱區時，利用儲存的熱能預先加熱工作流體。工作流體預冷後停留在冷區繼續冷卻，預熱後停留在熱區繼續加熱。

活塞的往復運動則會改變工作流體的體積，工作流體膨脹時對活塞作正功，工作流體被壓縮時作負功。

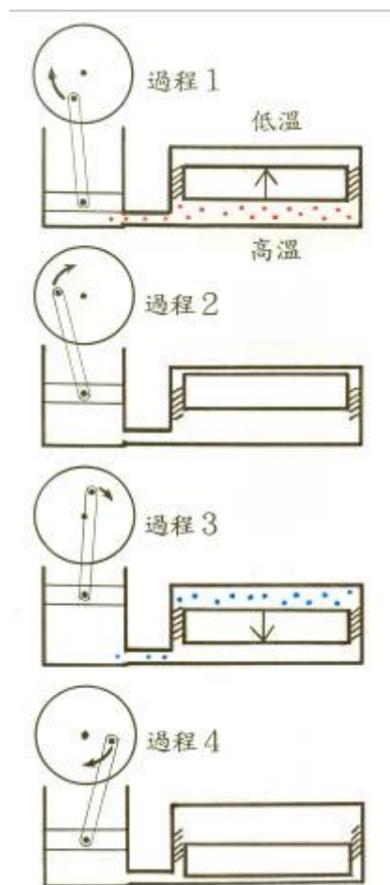


圖 3-1 史特林引擎示意圖，右方溫差氣室兩側斜線部分代表『熱再生器(regenerator)』。

這型史特林引擎的運轉過程，與後來才出現的汽油內燃機類比²，非常容易加以解釋。(比較圖 3-1 和圖 2-2)

過程 1：在此過程中，工作流體已被壓縮，必須先獲得熱能，再膨脹作正功。汽油引擎利用燃燒少量的汽油，加熱汽缸中的工作流體(空氣)；史特林引擎中的工作流體，則是被移氣胴體驅趕，經熱再生器移到下方熱區加熱。

過程 2：高溫的工作流體壓力增加，膨脹對活塞作較大的正功。

過程 3：工作流體將被壓縮，先被移氣胴體驅趕，經熱再生器移到上方冷區冷卻。汽油引擎則在此過程中，排掉高溫廢氣，並吸入混有燃料的低溫空氣，以進行降溫。

過程 4：低溫的工作流體於是被活塞壓縮作負功。

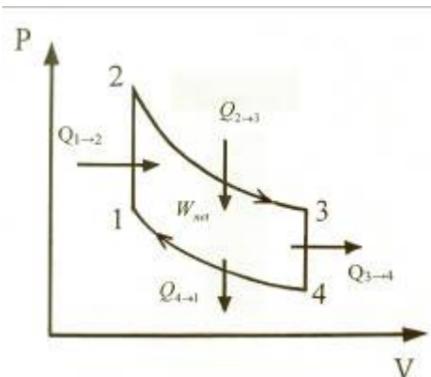


圖 3-2 理想化的史特林引擎工作流體 PV 圖。

對照的汽油引擎和這型史特林引擎，兩者不同之處在於：汽油引擎以混合燃料燃燒的方式直接加熱工作流體，以排氣吸氣的方式冷卻工作流體；史特林引擎則是利用工作流體接觸不同溫度的區域，來升降其溫度。

移氣胴體和活塞如何在時序上恰好配合，使得工

作流體先加熱再膨脹，先冷卻再壓縮呢？最常用的是曲軸和連桿等構成的連動機構(drive mechanism)，但許多巧妙的方法也可達到同樣的效果。

圖 3-2 顯示史特林引擎的工作流體理想化的 PV 圖。在過程 1(圖中 1→2 狀態)，活塞假設不動，被壓縮的工作流體經熱再生器由冷區移到熱區，工作流體被加熱，等體積升溫；過程 2(圖中 2→3 狀態)，活塞向外運動，工作流體停留在熱區等溫膨脹；過程 3(圖中 3→4 狀態)，活塞假設不動，工作流體經熱再生器，由熱區回到冷區，等體積降溫；過程 4(圖中 4→1 狀態)，活塞向內運動，工作流體停留在冷區，作等溫壓縮。

如果熱再生器在工作流體等體積降溫時(3 狀態→4 狀態)，熱能完全儲存在熱再生器中，等體積升溫時(1 狀態→2 狀態)，儲存在熱再生器中的熱能又完全釋入工作流體中，即 $Q_{3→4} = -Q_{1→2}$ 。在 2 狀態至 3 狀態的等溫膨脹(溫度較高，以 T_h 表示)，所做的功為：

$$W_{2→3} = \int_2^3 p dv = \int_2^3 \frac{nRT_h}{V} dV$$

$$= nRT_h \ln \frac{V_L}{V_S} \quad (3.1)$$

其中 n 為工作流體莫耳數， R 為氣體常數， V_L 和 V_S 分別是工作流體的膨脹後和壓縮後之體積。

根據熱力學第一定律，等溫膨脹所作的功等於所獲得之熱能

$$Q_{2→3} = W_{2→3} \quad (3.2)$$

同理，低溫(T_c 不變)被壓縮的過程中，工作流體所作的功和獲得之熱能分別為

$$W_{4→1} = nRT_c \ln \frac{V_S}{V_L} < 0 \quad (3.3)$$

$$Q_{4→1} = W_{4→1} \quad (3.4)$$

因此，工作流體每循環一次所作的淨功為：

$$W_{net} = W_{2 \rightarrow 3} + W_{4 \rightarrow 1} \quad (3.5)$$

等於 PV 圖中封閉曲線所包圍的面積。在完美熱再生器的前提之下，史特林引擎的效率為

$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_{2 \rightarrow 3}} = \frac{T_h - T_c}{T_h} = 1 - \frac{T_c}{T_h} \quad (3.6)$$

即等於卡諾循環的效率。

然而，史特林引擎有許多不同的設計，不同構造的史特林引擎，其工作流體的 PV 圖與圖 3-2 中顯示者多少有些出入。

此外，在真實的史特林引擎中，活塞大多以近似時間正弦函數的方式運動，鮮少完全靜止，所以工作流體能經歷一段等體積過程，實為簡化的假設；通常熱再生器的效率亦難達到 100%；而在溫差氣室冷區的工作流體也不容易完全移到熱區加熱，反之亦然，在熱再生器中也會滯留一部分工作流體，這些沒有參與溫度變化的工作流體，形成所謂滯留體積(dead volume)，PV 曲線圖實際上會比圖 3-2 所示的曲線平滑許多。

再加上工作流體在溫差氣室中移動時，各種阻滯力造成動能的損失(flow loss)，以及外燃加熱時，熱傳導過程中的各種損失(heat transfer loss)，而工作流體等溫膨脹或壓縮的等溫假設亦顯有瑕疵，更使得實際史特林引擎的效率與卡諾循環的效率不完全相等。

四·史特林引擎的型式

史特林引擎可以設計成不同的型式，原創性的全新構想和細部改良的專利，至今仍不斷被提出。嚴格而言，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，這樣的機構都稱為史特林引擎。

常見的史特林引擎可以分為以下幾種：

(一) γ 型史特林引擎(見圖 3-1)

這型史特林引擎的溫差氣室和汽缸分開，利用連桿和曲軸等連動機構，使溫差氣室中的移氣胴體和汽缸中的活塞，近似時間正弦函數的往復運動，有大約 90° 的相位差，以確保熱機循環³。

由於溫差氣室的尺寸可以比汽缸的尺寸大很多，極小的溫差即可運轉此型史特林引擎，常用來製作教學用的熱學教具，或針對低溫差之熱源設計所需的機型。圖 4-1 是作者設計的大型 γ 型史特林引擎(高度約 60 公分)，十幾度溫差即可運轉。



圖 4-1 作者設計的史特林引擎之一。

資料來源：

wmc62490000@yahoo.com.tw (德盟工作室)

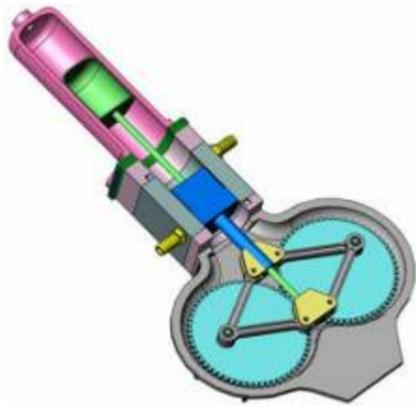


圖 4-2 β 型史特林引擎之菱形連動機構(淺藍)、活塞(藍)和移氣胴體(綠)。

資料來源：

www.answers.com/topic/reciprocating-engine

(二) β 型史特林引擎

汽缸和溫差氣室合二為一，其中移氣胴體和活塞運動的相位差，由連桿和曲軸等構成的連動機構完成，但控制移氣胴體的連桿須穿過活塞，製程精度要求較高。

著名的連動機構，是 1953 年梅傑(R.J.Meijer)發明的菱形連動機構(Rhombic Drive Mechanism)，這型史特林引擎的連動機構可以減少活塞所受的應力。(見圖 4-2)⁴。

(三) α 型史特林引擎

圖 4-3 為 α 型史特林引擎之設計之一。相較於 γ 型和 β 型，這型史特林引擎捨棄了移氣胴體。工作流體藉著兩個活塞密封在高溫和低溫的兩個汽缸之內。兩個活塞利用適當的連動機構，作相位差 90° 的時間正弦函數往復運動。使工作流體在高溫和低溫汽缸中移動而改變溫度，兩個活塞又共同決定工作流體

的體積，運轉時一樣能達成加熱膨脹，冷卻壓縮的熱機循環。

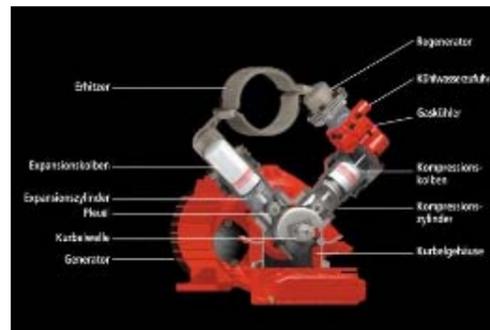
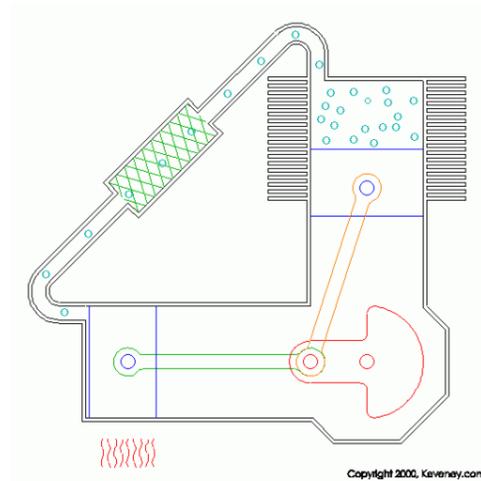


圖 4-3 α 型史特林引擎，示意圖顯示工作流體藉著兩個活塞密封在高溫(左下方火焰處)和低溫的兩個汽缸之內，兩個活塞作相位差 90° 的往復運動。透視圖顯示實際引擎的造型。

資料來源：

blogs.ibibo.com/discovermiracle/Two-Cylinder-...

利用最初級的分析模式⁵，即所謂的 Schmidt model，假設工作流體在高溫汽缸中即與高溫汽缸等溫，設為 T_h ，在低溫汽缸中即與低溫汽缸等溫，設為 T_c ，在熱再生器中的工作流體的溫度即與熱再生器的平均溫度相等。

如果熱再生器中容納工作流體的空間體積為

V_R ，活塞在高溫汽缸中掃過(swept)的體積為 V_{sh} ，高
溫汽缸中的滯留體積為 V_{Dh} (活塞未掃到的體積)。活
塞在低溫汽缸中掃過的體積為 V_{sc} ，低溫汽缸的滯留
體積為 V_{Dc} ，工作流體在高溫汽缸中的體積為

$$V_h = \frac{V_{sh}}{2}(1 - \cos \theta) + V_{Dh} \quad (4-1)$$

在低溫汽缸中的體積為

$$V_c = \frac{V_{sc}}{2}(1 - \cos(\theta - \Delta\theta)) + V_{Dc} \quad (4-2)$$

其中 θ 為轉動的角度， $\Delta\theta$ 為相位差，約 90° 。

在熱再生器中的體積為 V_R ，則工作流體的總體
積為

$$V = V_c + V_R + V_h \quad (4-3)$$

因為密封在引擎中各處的工作流體壓力一致，設
為 P 。根據氣體方程式，工作流體的總莫耳數為

$$n = \frac{PV_c}{RT_c} + \frac{PV_h}{RT_h} + \frac{PV_R}{RT_R} \quad (4-4)$$

為簡化起見，令 $t = \frac{T_c}{T_h}$ ， $r = \frac{V_{sc}}{V_{sh}}$ ， $X_{Dh} = \frac{V_{Dh}}{V_{sh}}$ ，

$$X_{Dc} = \frac{V_{Dc}}{V_{sh}}，X_R = \frac{V_R}{V_{sh}}，$$

$$T_R = \frac{T_h + T_c}{2} = \frac{t+1}{2}T_c，n \text{ 於是可簡化為}$$

$$n = \frac{PV_{sh}}{2RT_c}[S - B \cos(\theta - a)] \quad (4-5)$$

則

$$P(\theta) = \frac{2nRT_c}{V_{sh}[S - B \cos(\theta - a)]} = \frac{P_{\min}(1 - c)}{1 - C \cos(\theta - a)} \quad (4-6)$$

其中

$$S = t + 2tX_{Dh} + \frac{4tX_R}{t+1} + r + 2X_{Dc}；$$

$$B = \sqrt{t^2 + r^2 + 2tr \cos \Delta\theta}；$$

$$a = \tan^{-1}\left(\frac{r \sin \Delta\theta}{r \cos \Delta\theta + t}\right)；c = \frac{B}{S}；$$

$$P_{\min} = \frac{2nRT_c}{V_{sh}(S + B)}$$

而工作流體的體積可以化簡為

$$V(\theta) = \frac{V_{sh}}{2}[\mu - A \cos(\theta - b)] \quad (4-7)$$

其中

$$\mu = 1 + 2X_{Dh} + 2X_R + 2X_{Dc} + r；$$

$$A = \sqrt{1 + r^2 + 2r \cos(\Delta\theta)}；$$

$$b = \tan^{-1}\left(\frac{r \sin \Delta\theta}{1 + r \cos \Delta\theta}\right)$$

計算 $P(\theta)$ 和 $V(\theta)$ ，可見在 α 型史特林引擎中
的工作流體，大致符合熱機循環，其 PV 曲線包圍出
的一塊面積代表每次循環(轉動一圈)所作的功，寫成
W，則引擎功率 P 即等於 W 乘以轉速 f，即

$$P = W \times f \quad (4-8)$$

除了用一般的曲軸及連桿構成的連動機構，維持
兩活塞往復運動時的相位差 ($\approx 90^\circ$) 之外，羅斯
(Ross) 等人還發明兩種連動機構(Ross-Yoke drive
mechanism)和 Rocker-V mechanism)，可以發揮同樣的
效果⁶。

α 型史特林引擎另外有個更實用的變型，稱為瑞
尼那組合(Rinia arrangement) (圖 4-4)，將四個汽缸和
活塞組合起來⁷，利用「斜盤」(swash plate)或齒輪裝
置維持相鄰活塞往復運動時的相位差 ($\approx 90^\circ$)

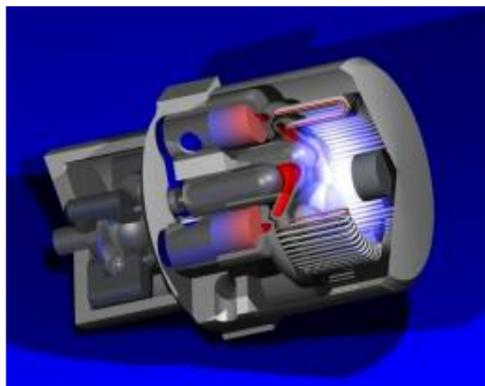
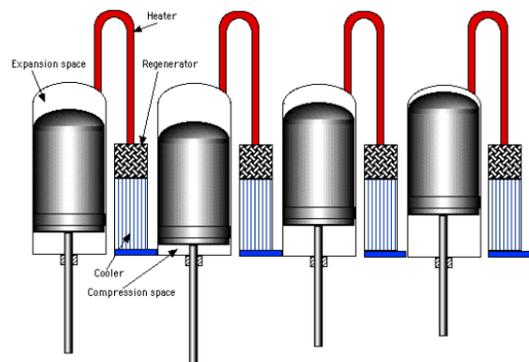


圖 4-4 瑞尼那組合(示意圖)；實際運用時將四個汽缸和活塞組成環形，利用斜盤(透視圖的左方)維持相鄰活塞運動的相位差。

資料來源：

www.sesusa.org/DrIz/engines/engines.html
pepei.pennnet.com/articles/article_display.cf...

(四) 自由活塞型(free-piston) 史特林引擎⁸

其實活塞和移氣胴體之間，未必要用機械式的連動機構來保持運動時適當的相位差，西元 1974 年貝爾(W.Beale)利用共振現象(resonance)以及巧妙的氣壓差和機械彈簧，使得活塞和移氣胴體往復運動時具有必要的相位差。自由活塞型的史特林引擎也有許多不同的設計，其中美國太空總署葛林實驗室研發的自由活塞型史特林引擎，在極有限之尺寸之內，簡潔處理這型引擎的諸多難點，堪稱傑作(圖 4-5)。

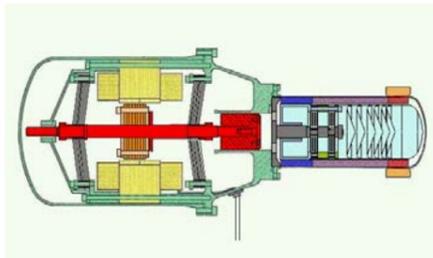


圖 4-5 美國太空總署研發的自由活塞型史特林引擎，無機械式的連動機構，活塞(紅色)和移氣胴體(右方淡藍色)之運動仍具有必要的相位差。

資料來源：

www.grc.nasa.gov/WWW/tmsb/stirling.html

(五) 熱聲效應(thermo acoustic)史特林引擎⁹

十九世紀的吹玻璃工人，偶爾會聽到被加熱的玻璃管自然發出神祕的單音，這聲音其實是熱機的另一總輸出形式。空氣振動形成聲音，聲音發生時，各「局部空氣」(parcel)會發生膨脹和位移。如果「局部空氣」被壓縮後，被加熱，再膨脹，對周圍空氣作較大的正功；這「局部空氣」又先被冷卻，再被壓縮，作較小的負功(周圍空氣對其作較小的功)。雖然這「局部空氣」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。

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。

圖 4-6 所示為駐波型史特林引擎，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。熱片堆近共振腔閉口端溫度較高，另一端溫度較低，於是延軸向的溫度梯度(temperature

gradient)相當大。當駐波發生時，熱堆片中的「局部空氣」(工作流體)向閉口端位移，而被壓縮，同時移向熱片堆高溫處，該局部空氣在熱穿透深度(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，駐波之能量加大，「局部空氣」隨即膨脹，同時移至熱片堆之冷端，當能量增加的駐波再度壓縮這「局部空氣」時，此「局部空氣」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。這聲波的機械能可用來推動熱聲致冷機(見圖 4-6)或用來發電。

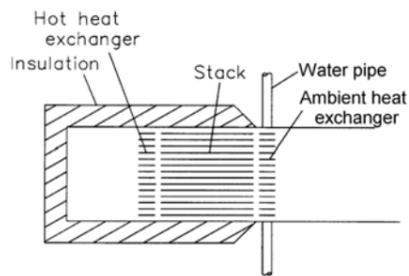


圖 4-6 駐波型熱聲史特林引擎之熱片堆(stack)。實物照片的左方為駐波型熱聲史特林引擎；右方為熱聲史特林致冷機。駐波型熱聲史特林引擎產生的駐波可用來推動熱聲史特林致冷機，液化氣體。

資料來源：

[New varieties of thermo-acoustic engines](#)

駐波型熱聲史特林引擎的工作流體，並未完全符

合熱機循環的過程，所以效率較低。約 1998 年開始 Ceperley、日本 Yazaki、大陸羅二倉、邱利民等人發明、改良了行波型熱聲史特林引擎¹⁰(圖 4-7)，使其工作流體以近似完美 α 型史特林引擎的方式，將熱能轉換成聲音的能量，有效提高了熱聲史特林引擎之效率。

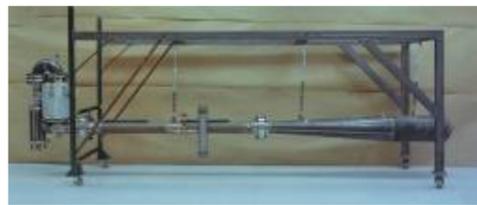
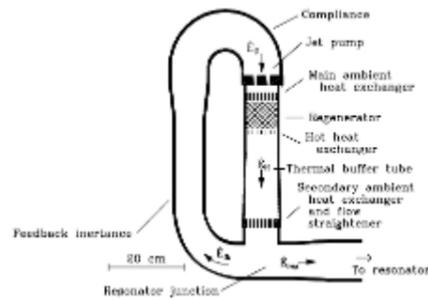


圖 4-7 行波型熱聲史特林引擎及內部構造示意圖。

資料來源：

[New varieties of thermo-acoustic engines](#)

www.nature.com/.../fig_tab/399303a0_F1.html

www.lanl.gov/thermoacoustics/TASHE.html

(六) 旋轉型(rotary)的史特林引擎

雖然此型史特林引擎尚未臻實用，但其設計構想也是頗具價值的研發方向。其中一種設計，利用旋轉的移氣胴體，將工作流體以連續轉動的方式¹¹，交替移到溫差氣室的熱區和冷區。(圖 4-8)

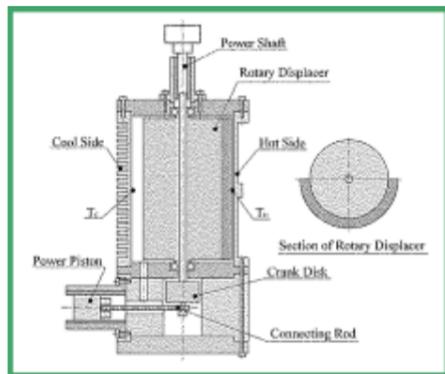


圖 4-8 旋轉型史特林引擎之構造，其移氣胴體之橫截面如右方插圖。

資料來源：

www.bekkoame.ne.jp/~khirata/english/rotarye.htm

(七) 史特林引擎的優點和缺點

具有以下優點的史特林引擎，有助於開發新的、多元的初級能源，因此受到科學家和先進國家的政府的重視：

- (一) 因為史特林引擎是外燃機，可以使用任何足以維持必要溫差的燃料：包括傳統各種燃料、太陽能、地熱、核能、甲烷冰、生質燃料、農業廢棄物、垃圾衍生燃料、工廠廢熱等。
- (二) 如果使用潔淨能源，史特林引擎根本沒有污染；如果燃燒燃料，由於可以連續燃燒，相對容易降低廢氣之污染，燃料的製備成本也相對較低。
- (三) 史特林引擎理論上有很高的效率，隨著研究成果的進步和實際應用的經驗累積，史特林引擎的實際效率也會逐漸逼近理論值。

(四) 史特林引擎的結構相對簡單，沒有氣閥、正時點火和相關的零組件，潤滑和軸承的部份均可避免設計在引擎高溫的部份，因此性能可靠，適於長時間運轉，堅固耐用，維修成本低。

(五) 因為不用爆燃和高速噴流，史特林運轉時，噪音低、安全性高。

然而史特林引擎進一步實用化，若干設計上的難點亦有改良的空間。例如：

- (一) 為了增加熱機的效率或功率，都須要提高工作流體的溫度，內燃機讓燃料在工作流體中燃燒，直接加熱工作流體到相當的高溫，而引擎本身仍能維持低溫。但史特林引擎必須透過引擎本身的高溫來加熱工作流體。耐高溫、剛性大、抗氧化腐蝕，導熱性高，不易老化，又廉價且易加工的材料，目前尚難盡如人意。
- (二) 為提高引擎的功率，常需用到非常高壓的工作流體，有些機型的史特林引擎不容易長時間密封高壓的工作流體。

六·已有實際應用

除了在能源方面的應用之外，史特林引擎在若干特殊領域，例如：國防、低溫致冷等，也扮演著不可取代的角色。

用外力倒轉史特林引擎，史特林引擎就變成致冷機(Stirling Cryocooler)。熱聲史特林致冷機可以用來液化氫氣、氧氣等，特殊設計的史特林致冷機具有 10K 的冷卻效果，微型史特林致冷機¹²已被廣泛用於冷卻夜視系統的紅外線感測晶片。

現役的瑞典海軍哥德級(Gotland Class)潛艇(圖 6-1)，其絕氣推進系統(Air Independent Propulsion)，以燃燒液態氧和柴油的史特林引擎提供輔助動力，可將下潛時間延長至數周之久，具有極佳的靜音匿踪性能。



圖 6-1 瑞典海軍哥德級(Gotland Class)潛艇

資料來源：

www.silent.se/labels.php

至於史特林引擎在能源方面的應用，現階段只是剛剛起步，方興未艾，但初期的成果已經十分亮眼。

暖氣機是寒帶地區必要的設備，藉著史特林引擎冷區散發出來的熱能，加熱熱水或供應暖氣，而史特林引擎本身的動力就用來發電，組成同時提供電力和熱源的電熱共生系統(Combined heat and power system)¹³(圖 6-2)。Whisper Gen 公司在 2004 年曾生產 80,000 具住家用微型電熱共生的商業產品。



圖 6-2 微型史特林引擎電熱共生(CHP)的商業產品。

資料來源：

www.micropower.co.uk/about/mchp.html



圖 6-3 總統布希視察史特林能源系統公司的陽光聚焦碟-史特林引擎發電裝置。

資料來源：

www.pureenergysystems.com/news/20...

2005年8月8日，美國總統布希視察史特林能源系統(Stirling Energy System)公司在聖地亞國家實驗室的陽光聚焦碟-史特林引擎發電原型裝置(圖 6-3)，並於當地簽署能源法案。翌日南加州愛迪生(Southern California Edison)與史特林能源系統公司簽約，預定在洛杉磯北方建造一座佔地 45,00 英畝(1.9 km²)的巨型太陽能發電廠，採用陽光聚焦碟-史特林引擎發電技術，藉總和直徑約 39 英尺(11m)的 82 片組合反射鏡聚焦，加熱位於焦點的 4 氣缸 α 型史特林引擎(4-95 Mark II) (圖 6-4)，以 72 支鎳基超合金(Inconel)細管製成的熱區(receiver)，運轉時溫度高達 700° C 以上，高壓氫氣最高壓可達 200 倍大氣壓，轉速約 1800rpm，在每平方公尺 1,000W 的陽光下，能產生 25KW 的電力。從 2007 年底開始為期 4 年，將裝設 20,000 具，總發電量達 500MW，超過全美所有太陽能發電裝置的總和，足可滿足一個小鎮的電力需求。若雙方同意，還再多花兩年，增加陽光聚焦碟-史特林引擎發電機組至 34,000 具，發電量增至 850MW¹⁴。

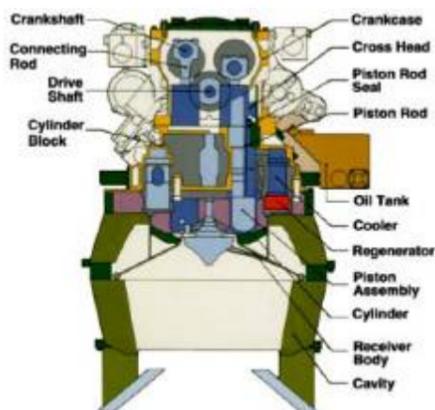


圖 6-4 4 氣缸 α 型史特林引擎(4-95 Mark II)之示意圖，以及實物攝影(鎳基超合金細管製成的熱區(receiver)清晰可見)

資料來源：

www.pureenergysystems.com/news/20...

這座全球最大的太陽能發電廠，發電效率是一般太陽能光電池的兩倍，電價也比其他太陽能發電技術便宜許多，不需加州政府補貼即可商業運轉，為人類大規模利用太陽能立下劃時代的里程碑，也揭開史特林引擎商業化的序幕。

七·璀璨的未來

幾乎沒有其他的引擎，像史特林引擎這樣，在這麼廣的領域中均具有實際應用的可行性，而又可針對工作條件，在尺寸、構造、性能等方面有如此大的設計彈性。

隨著材料科學和加工工藝日新月異，石油價格節節攀高，減碳環保逐漸形成國際社會的共識；再加上大規模量產史特林引擎已經開始，社經條件更臻成熟，除了太陽能發電的前景可期之外，史特林引擎在其他能源領域也深具潛力，在新的能源時代，勢必扮演更全面的角色。

(一) 核能

探測離太陽 1.5 天文單位(大約火星軌道)之外的太空，因陽光強度減弱，一般太陽能電池的發電量就不敷使用。美國太空總署於是成功研發了一系列使用核燃料的自由活塞史特林引擎¹⁵，並驅動線性交流發電機(linear alternator)發電(見圖 4-5)，以提供深太空探

測任務所需的電力。2004年美國布希總統宣布2018年重登月球的計畫，月球表面甚至火星表面的核能史特林引擎發電站又受到矚目¹⁶。事實上，地面的核能電廠，若以史特林引擎取代蒸氣渦輪機，可簡化電廠之設備，提高安全性和降低維修成本，並充分發揮核能技術進步的成果。

(二) 地熱

根據統計，地熱能源的蘊藏量，約為煤能源總量的1.7億倍，地熱發電具有潔淨、佔地面積有限、不受天候及天災影響，24小時全年無休穩定供電等優點。

史特林引擎設計的彈性很大，在不同溫差之下均能運轉，恰能配合壓力、溫度個別差異很大的地熱。一般地熱僅100~200°C，已可直接用來推動史特林引擎(如果採用汽渦輪機，則須採用閃蒸法這類技術和設備)。1970年代Los Alamos Labs提出乾熾熱岩(Hot Dry Rock)地熱發電，使地熱發電更不受地點之限制；未來如果大深度鑽井和熔岩(Molten Rock)地熱的開採技術有所突破，史特林引擎地熱發電將為人類提供長期的潔淨能源¹⁷。

(三) 分散型獨立電力系統¹⁸

未來人類使用能源的方式會更為精緻，現在以大型集中型電廠為主的電力系統勢必有所調整，更為合理的分散型社區電廠將成為主流，廢物利用或就地取材附近的多元能源，以潔淨能源及傳統燃料搭配就近適當處理的垃圾或農業廢棄物，作為燃料，就近提供附近用戶電力，省去長途運輸大量燃料和大規模配電的成本，避免大型電廠故障的風險，史特林引擎恰好可以實現這樣的轉型。

(四) 交通用的史特林引擎

雖然在某些場合，史特林引擎有預熱時間長，不易立即停機、迅速變換輸出功率的限制，但史特林引擎可用爆炸性較低的燃料、汙染少、振動小、噪音低、效率不因爬升高度而變化、安全可靠，正符合航空引擎的要求，航空用史特林引擎曾被提出。此外除了作為軍事潛艇的推進系統之外，研究人員也評估過史特林引擎作為大型船隻動力的效益¹⁹。即便現代人已習慣了大馬力的汽油引擎車，美國能源部(DOE)早期仍提供經費支持相關研究，美國太空總署、福特汽車公司都曾參與，發展出Mode I，Mode II，P-40等車用史特林引擎²⁰。2007年底，使用固態生質燃料的電力-史特林引擎混合(hybrid)車(原型)在瑞典推出。雖然整個社經條件的慣性偏好汽油引擎車，但史特林引擎在時機成熟時應用在交通動力的可行性，無庸置疑。

八·能源政策和能源教育

史特林引擎作為能源研究的主题，之所以值得投入更多的資源，是因為一方面它是能源多元化的可行技術²¹，實用化和商業價值均可預期；另一方面，即便先進國家已投入龐大的資源全力研發，但仍有極大的原創及改良空間，後起者仍可作出重大成就²²。

史特林引擎作為能源教育的主题，內容可深入淺出、可簡可繁，適合各級學校學生參與，也適合大眾加入，參與者置身製作小引擎的童話世界，享受驚奇和創作樂趣，在印象深刻的寓教於樂中，啟發下一代日後開發新能源的興趣與眼界，厚植研發潛力，培養民眾以科學力量解決能源問題的態度，進而充實國家能源政策。

今日世界的先進國家，多是工業革命起步較早的國家，能源關乎整個國家的盛衰。負責任的能源政

策，除了要有解決燃眉之急的方案之外，更要有前瞻的縱深。能源科技的研發和教育，都應該是能源政策的重要環節，開發潔淨的永續能源是石油能源危機的唯一出路，國際社會全體成員均責無旁貸，我們更應迎頭趕上。

參考資料

- [1] D. G. Thom bare and S. K. Verma, "Technological development in the Stirling cycle engines", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 12 Issue 1, pp1-38, 2008.
- [2] 周鑑恆, "輕鬆學物理的第一本書", 如何出版社, 民國 95 年。
- [3] I. Kolin, "Low temperature difference Stirling engine", Proc., Intersociety energy conversion engineering conference, Vol/Issue: 3, San Francisco, CA, USA, 19 Aug 1984.
- [4] R. J. Meijer, "The Philips Stirling Thermal Engine" Thesis, Technische Hogeschool Delft, November 1960.
- [5] Urieli I, "A general purpose program for Stirling engine simulation", Proc. 15th IECEC, Seattle, Washington, Paper 809336, pp1701-5, 1980.
- [6] Ross, Andrew M., "Compact crank drive mechanism with guided pistons", United States Patent 4738105.
- [7] <http://freenergynews.com/.../StirlingEngine/index.html>.
- [8] W. Beale, W. Homes, S. Lewis, and E. Cheng, "Free-piston Stirling Engine — A progress Report" SAE, Paper No: 730647, 1973 ; 周鑑恆, "自由活塞型史特林引擎之理論分析和實驗驗證", 萬能學報第三十期, 民國九十七年七月。
- [9] S. Backhaus, and G. W. Swift, "A thermoacoustic Stirling heat engine", Nature. Vol. 339, No. 6734, pp 335-338, 1999 ; S. Bockhans and G. W. Swift, "A thermoacoustic-Stirling heat engine", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 107 No. 6, 2000 ;
- 周鑑恆, "熱聲效應史特林引擎動手做", 科學月刊, 2008 年 8 月號。
- [10] Yazaki T, Iwata A, Maekawa T, et al., "Traveling wave thermo-acoustics engine in a looped tube", Physical Review Letters, 1998, 81(15):3128-3131 [DOI].
- [11] <http://www.emachineshop.com/engine/>
- [12] http://ranier.oact.hq.nasa.gov/sensors_page/Cryo/Cryo1Q95report/CryoGSFC/Q95.html/
- [13] <http://enertechreview.com/>
- [14] http://pesn.com/2005/08/11/9600147_Edison-Stirling_largest_solar/
- [15] <http://www.grc.nasa.gov/WWW/tmsb/stirling.html>
- [16] R. Cataldo, "Surface Nuclear Power Systems for Future NASA Missions" Session 73-88-8 3rd International Energy Conversion Engineering Conference, San Francisco, CA, August, 2005.
- [17] 周鑑恆, "史特林引擎與潔淨能源的商業化", 能源報導, 民國 95 年 9 月, 24-28 頁。
- [18] 方明山, "分散型電力發展之內涵與制度課題", 台灣經濟研究月刊, 第 26 卷第 7 期, 29-38 頁, 民國 92 年 7 月。
- [19] Koichi HIRATA and Masakuni KAWADA, "Discussion of Marine Stirling Energy Systems", Proc. 7th International Symposium on Marine Engineering, Tokyo, 2005.
- [20] W. D. Ernst and R. K. Shaltens, "Automotive Stirling Engine Development Project", DOE/NASA/0032-34, NASA CR-190780 MTI Report 91TR15 (1997).
- [21] 周鑑恆, "微型史特林引擎太陽能發電", 論文彙編, 244-250 頁, 第二屆電資科技應用與發展學術研討會(2007 年), 萬能科技大學。
- [22] 高晞均, "非華麗一族的微笑理論", 科學月刊, 2007 年 11 月號, 834-839 頁。