



作者：徐業良(2007-04-13)；推薦：徐業良(2007-04-13)。

附註：本文發表於汽車購買指南雜誌，2007年五月號，史丹福專欄。

## 淺談史特林引擎

您聽過「史特林引擎(Stirling engine)」嗎？

根據我的非正式觀察，史特林引擎每半年一年就會在新聞媒體上露臉一次，而且還多半出現在我每天職業習慣上必讀的文教新聞版。史特林引擎經常被用來作為中學生科學營或創意實作課程之類的教材，史特林引擎構造簡單、容易觀察，可以教導中學生熱力學基本概念，而史特林引擎迷人之處，在於其可以使用任何熱源驅動引擎動作，垃圾、牛糞、農業廢棄物、沼氣、地熱、太陽能都能當作讓引擎轉動的燃料，甚至小到一支蠟燭、或是您手掌的溫度便能驅動史特林引擎，也因此新聞報導中提到史特林引擎，常將其和老電影「回到未來」中那部吃香蕉皮當燃料的時光車相提並論。

國內有一位周鑑恆教授，可以說是國內推廣史特林引擎最熱心的第一人，最近一次史特林引擎上了新聞，就是報導周鑑恆教授利用史特林引擎驅動，製作了一部重40公斤重的「婆婆號」原型車，能載著70公斤重的人搖搖晃晃「婆婆」地往前走，時速在5公里左右。這條新聞當然還是出現在文教版。

不知道這些新聞報導有沒有觸發您的好奇心，想知道史特林引擎到底是什麼？

史特林引擎早在1816年由Robert Stirling先生所發明，當時史特林引擎曾經被認為有潛力成為很有效率的引擎，但是近兩百年來史特林引擎始終沒有成為引擎的主流派，內燃機引擎出現後史特林引擎便被打入冷宮，直到今天史特林引擎仍然只有在一些很特殊的應用場合中被使用，像是潛水艇或者是遊艇的輔助發動機。目前雖然還沒有看到史特林引擎成功的大量市場應用，但是對史特林引擎的研究始終興趣不減，特

別是最近幾年能源及環境問題越來越嚴重，史特林引擎再度浮上檯面，被認為是解決能源問題可能的方案之一。

基本上史特林引擎也是一個將熱能轉換成動能的熱機(heat engine)，然而史特林引擎的原理和您汽車中的內燃機引擎卻大大的不同。所謂「內燃」機是指燃料在引擎內部燃燒、產生動力，而史特林引擎卻是一部「外燃」機，也就是熱源在引擎的外部。內燃機引擎有一連串進氣—壓縮—燃燒—排氣的循環，史特林引擎中的氣體卻是完全密封在引擎中，作為熱轉換成機械功的媒介，引擎動作過程中汽缸內沒有爆炸或燃燒發生，也不需要進氣排氣閥來排放燃燒後的高壓廢氣，也因為如此，史特林引擎的構造相對比較簡單，運轉也非常安靜。

Mmmm，要談史特林引擎的動作原理，得先讓讀友們知道氣體兩個很關鍵的性質：

- (1) 一定量氣體存放在一固定體積的空間內，當提升氣體溫度時，氣體壓力會隨著增加。
- (2) 壓縮一定量氣體，減少其所在空間之體積，氣體的溫度也會提高。

密閉容器內氣體的溫度和壓力都是氣體蘊藏能量的外在表現，兩者之間其實是有密切關連的。史特林引擎中有一定量氣體被密封在引擎內，所謂「史特林循環(Stirling Cycle)」中的各個階段，便在改變引擎內氣體的溫度和壓力，將外界熱源的能量轉換成機械功。

想像一具簡化的史特林引擎，只有左右兩個汽缸，一邊是「加熱汽缸」、另一邊是「冷卻汽缸」，左邊的加熱汽缸由一個外部熱源加熱，右邊的冷卻汽缸則是由一個外部冷凍源降溫（或者說把熱量移走）。史特林引擎構造上比較有趣的地方是，這兩個汽缸的氣體是相通的，藉由兩汽缸活塞的運動，推動氣體在兩個汽缸之間流動。

前面提到內燃機引擎有進氣—壓縮—燃燒—排氣四個衝程，史特林循環也有四個階段，加熱汽缸和冷卻汽缸的兩個活塞之間以連桿、曲柄、飛輪之類的機構連接，控制兩個活塞在每個階段上升下降的順序。第一個階段中外部熱源對加熱汽缸中的氣體加熱，造成氣體壓力增加，這個增加的壓力推動活塞向下移動，對外輸出機械功，此時右側冷卻汽缸的活塞大約保持靜止不動。左側加熱汽缸活塞移動至下死點之後，接下來第二階段中加熱汽缸活塞回頭上升，同時右側冷卻汽缸活塞開始向下移動，熱空氣從左側加熱汽缸被推送至右側冷卻汽缸中，冷凍源快速將氣體冷卻，壓力也隨著降低。

右側冷卻汽缸活塞移動至下死點之後，史特林循環第三個階段右側冷卻汽缸活塞又回頭上升，開始對氣體加壓，此時左側加熱汽缸活塞大約保持靜止不動，這個加壓過程中會產生一些熱，也同時被冷凍源給移除。最後第四階段右側冷卻汽缸活塞繼續上升，同時左側加熱汽缸活塞開始下移，推送氣體從冷卻汽缸流回加熱汽缸，此時又回到了史特林循環的第一階段，氣體在加熱汽缸中迅速加熱，增加壓力對外作功，整個循環再次重複。

您在中學生科學營中看到的史特林引擎，並不是這種雙汽缸的形式，而是所謂「移氣活塞式(displacer type)」的史特林引擎。移氣活塞式史特林引擎將兩個汽缸整合成一個密閉的大汽缸，加熱源在大汽缸底部、冷凍源在大汽缸頂部，大汽缸中間用一個移氣活塞(displacer)隔開，移氣活塞下方就相當於前面提到的加熱汽缸，上方則相當於冷卻汽缸。這個移氣活塞在大汽缸中不是氣密的，移氣活塞上下移動時空氣可以在加熱和冷卻區間之間自由移動。大汽缸冷卻區頂部還有一個較小的動力活塞，這是一個氣密活塞，當引擎內氣體擴張時會往上移動、對外作功。

移氣活塞式史特林引擎運轉過程中，移氣活塞只是很單純地在大汽缸內反覆上升下降。當移氣活塞上升至接近大汽缸頂端時，大汽缸內大部分的空氣流到下方加熱區被熱源加熱擴張，使得大汽缸內壓力提升，驅動動力活塞向上移動、對外作功；當移氣活塞下降至靠近大汽缸底部時，引擎內大部分的空氣流到冷卻區被冷卻且收縮，這使得氣體壓力下降，動力活塞也比較容易下降且壓縮氣體。引擎便是如此反覆加熱和冷卻密閉大汽缸內的氣體，而從空氣的膨脹和收縮之間吸取能量。

移氣活塞式史特林引擎只要大汽缸頂部和底部有一個溫度差便可以開始運轉，頂部的冷卻源可以是周遭空氣，底部加熱源可以是一根蠟燭、甚至是手掌的熱度，便可以驅動引擎運轉。另外一種可能性是，加熱源是周遭室溫空氣，而在冷卻源的位置放一些冰塊或乾冰造成溫度差，也可以驅動史特林引擎運轉。如果搭配透明的材料製作大汽缸壁，現場展示時手掌溫度暖一暖或用小蠟燭燒一燒，便可以看到移氣活塞開始緩緩上下移動起來，用來在科學營中對中學生展示，感覺特別神奇，甚至可以買到套件讓學生自己DIY作一個，Mmmm，確實是非常好的創意實作教材。

內燃機引擎四個衝程中，只有燃燒衝程對外輸出機械功，史特林循環的四個階段也只有第一個階段氣體受熱擴張對外輸出機械功。相對於內燃機引擎燃料在汽缸內燃燒爆炸推動活塞、曲柄，史特林引擎靠著氣體在加熱汽缸內吸熱後膨脹產生動力的方式顯然緩慢、溫和許多。要提升史特林循環的動力輸出，改進的思考重點經常在於密閉汽缸內氣體如何快速吸熱、散熱，例如拉大加熱源和冷卻源之間的溫度差，在冷卻汽缸加裝散熱鰭片來加速冷卻的速度等。

史特林引擎中一個常見的設計，是在加熱汽缸和冷卻汽缸之間加裝一個能暫時儲存氣體熱能的「再生器(regenerator)」，再生器可能就只是一團網狀金屬絲之類的構造，加熱汽缸內的熱空氣先流經再生器，將熱能吸收、暫時儲存於此，再流至冷卻汽缸，如此冷卻汽缸要移去的熱量較少，可以更快速冷卻；而冷卻汽缸中的冷空氣也先流經再生器，吸收前一次循環中儲存在此處的熱能，再流回加熱汽缸，使氣體加熱的速度更快，能量效率也更好。

Well，這裡究竟是汽車購買指南不是小牛頓之類的科學新知雜誌，還是要回歸這個問題，史特林引擎有可能被應用在汽車上嗎？

您問我的意見的話，我覺得史特林引擎有幾項關鍵特性，使得其在車輛上的應用似乎不太實際。基本上史特林引擎是以外部熱源加熱汽缸內氣體膨脹產生動力，熱傳遞、溫度上升下降的過程「慣性」很大，需要一段時間將熱傳導穿越汽缸壁進入引擎內的氣體中，這表示史特林引擎需要一段時間暖機才能產生有用的動力，而且引擎沒有辦法很快的改變其動力輸出，像是突然加速、減速等等。

汽車引擎需要快速動力反應，史特林引擎可能得另找出路。

事實上史特林引擎動力產生和緩、穩定的特性，使得其很適合另一項重要的能源應用—發電！史特林引擎一個很重要的優勢，就是其使用外部熱源，只要是能夠產生熱，皆可用來做為推動的能源，所以並不僅限於可燃燒的燃料，像是太陽能、地熱等自然、潔淨的能源，都可以用來運作史特林引擎，目前史特林引擎研究方向也多半朝向發電的應用。

美國有一家「史特林能源系統公司(Stirling Energy System, Inc.)已經發展出成熟的技術，利用一個 37 英尺直徑的碟型反射鏡，將陽光聚焦在史特林引擎的受熱器上，驅動史特林引擎發電，這個很大的碟型反射鏡還能改變方位角和仰角來追蹤太陽，儘可能聚焦最多的陽光。這家公司相關實驗數據顯示，這項技術的發電效率，較現有其他太陽能發電技術，特別是使用半導體太陽能電極板直接將太陽光變成電力，效率高出約 2 倍，所產生的電力電價也比較可以接受，似乎是非常有前景的史特林引擎應用。您如果有空上一下這家公司的網站(<http://www.stirlingenergy.com>)，可以看到很精彩的史特林—太陽能引擎發電的動畫和影片。除了史特林能源系統公司，世界各國都有許多相關研究和應用專利，兩百年之後，史特林引擎似乎要翻身了。

Mmmm，如果把史特林—太陽能引擎發電的想法應用在汽車上，發展成電動車禍是混合動力車…

也許下一次您在看到史特林引擎的新聞，會是在產業、財經版，而不在文教版了！