

教學用史特林引擎之自製

周鑑恒

西元 1816 年史特林 (Robert Stirling) 發明一種外燃引擎 (external combustion engine)，後世稱之為史特林引擎 (註)。這種引擎不拘燃料，甚至可直接利用地熱或太陽能運轉、安靜、效率高、污染少，雖使用起來預熱時間長，馬力較有限，目前主要只用於靜音潛艇 (包括通過嚴格檢驗的瑞典海軍現役潛艇) 和低溫冷凍 (可冷卻至約 10°K)。但因其優點恰能適應油源耗盡、環境污染的未來，至今仍受到工程師們廣泛注意，前景不可限量。

所謂熱機 (heat engine)，包括活塞蒸汽機、蒸汽渦輪機、汽油或柴油引擎、噴射引擎、噴射渦輪引擎、衝壓引擎，無論其結構複雜與否，無論其加熱方式為內燃或外燃，無論其使用之工作流體之種類，也無論是重覆循環使用工作流體或不斷使用用過即拋的工作流體，基本上原理都一樣是：工作流體高溫時膨脹作正功，工作流體較低溫時作負功被壓縮。從能量的角度來看，當工作流體無論經什麼途徑恢復到初始狀態而在 PV 圖上形成封閉曲線時，亦即工作流體把添加入之熱能完全散逸時，部分添加入的熱能將轉換成輸出的巨觀動能。熱力學第二定律則指出，從機率的角度來看，被添加入微觀動能之工作流體，回復到原來狀態而在 PV 圖上形成封閉曲線時，添加入的微觀動能，不可能完全轉換成輸出的巨觀動能，其輸出之淨

功一定小於添入之熱能。

熱機的發明和應用啟動了人類第一次工業革命，深遠而根本改變了全體人類的生活和社會發展的軌跡，熱機甚至在人類歷史上都佔有一席之地。熱機也是熱力學發展的核心出發點，在熱力學乃至統計力學上的重要性更不遑多言。坊間介紹各種蒸汽機和引擎的科普讀物不勝枚舉，各級教科書或多或少也不能遺漏這個有趣而重要的熱學主題。但是，能去蕪存菁，簡潔凸顯上述熱機原理，適宜作為講授熱機原理的範例，則是大一普通物理的卡諾引擎，絕大多數教科書並從卡諾循環推演熵 (entropy) 的概念和熱力學第二定律。史特林引擎之運轉情形和卡諾引擎十分相似，構造簡單，極適宜作為熱機教具。

本文介紹一項史特林引擎的簡易設計和製作方法，不用精密的重型工具機，也不用一般引擎常用的堅韌合金，只利用日常生活所用的物品、學校實驗室裏常見的工具，打造一具屬於老師們的引擎。雖然這具引擎的馬力微不足道，但可帶給學生難以置信的驚奇和對熱機更直接具象的了解。教學的效果和樂趣非筆墨所能形容。

自製此套設備所需的材料

- (1) 壓克力圓環一個 (內徑約 15~22 cm 均可，高 2~3 cm，厚約 3 mm；本文採用內徑 20 cm，高 3 cm 者)；

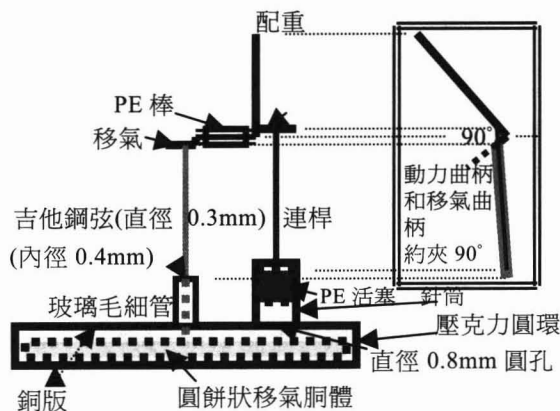
- (2) 25x25 cm² 銅片兩塊 (厚 0.3 mm, 更厚些無妨。台北市太原路有好幾家廠商);
- (3) 美勞用的珍珠板一塊 (厚 7~20 mm, 美術社有售, 作為圓餅狀移氣胴體);
- (4) 粗約 0.3 mm 的吉他鋼弦 (樂器行有售);
- (5) 玻璃毛細管 (外徑 6 mm, 內徑 0.4 mm; 學校實驗室應該找得到);
- (6) 圓木棒一小截 (直徑 2 cm, 長約 1.5 cm, 作為玻璃毛細管之基座);
- (7) 直徑 1.5 mm 玻璃纖維棒 (釣具店可買得到。一般美工刀難以切斷, 須以小型砂輪裁切, 作為轉軸和曲柄);
- (8) 內徑 27.8 mm 的針筒 (藥局有賣, 約 500~800 元);
- (9) 直徑 10 mm 及直徑 30 mm、長約 6~10 cm 的 PE 棒 (車製成活塞和軸承);
- (10) 白楊木條若干 (五金行有售。白楊木硬度恰好, 加工容易);

所需的工具

- (1) 小型車床和鑽床 (大學或專科學校機械類科系必備, 高中工藝教室亦常見); 迷你鑽石圓鋸 (用來切割針筒。此工具不罕見, 亦不昂貴, 機械五金店買得到。有人建議用砂輪加工針筒, 為避免受傷起見, 仍以使用迷你鑽石圓鋸為宜);
- (2) 老虎鉗、美工刀;
- (3) AB 膠、熱熔膠、強力膠。

圖一為本引擎的示意圖。其中 PE 活塞藉由連桿、動力曲柄、移氣曲柄、吉他鋼弦, 連動圓餅狀移氣胴體, 將壓克力圓環和銅片組成的容器中之空氣反覆排移於下方熱庫

(可用任何方式加熱以維持底部約 80°C 高溫) 和上方較冷區域之間, 空氣隨著溫度變化而熱脹冷縮, 推動活塞, 即能運轉。

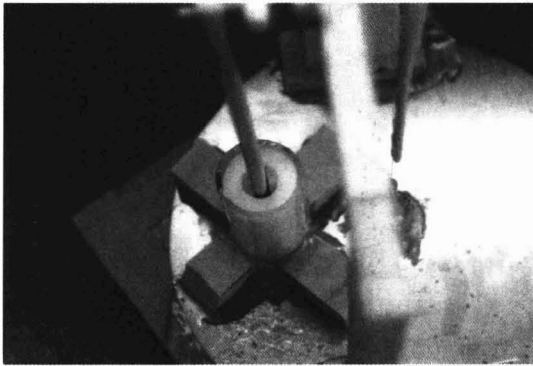


圖一

製程如下

- (一) 在銅片上畫出與壓克力圓環將要膠合的圓形記號, 在圓心鑽出直徑 1mm 的圓孔, 在離圓心約 4cm 處鑽另一直徑 0.8cm 的小孔。
- (二) 再用迷你鑽石圓鋸, 將內徑 27.8mm 的針筒鋸成高 4.5cm 的圓管, 將針筒圓管用 AB 膠密實黏在銅片上, 針筒圓管底部以方形小木塊加強, 並使之垂直銅片, 針筒圓管下方經 0.8 cm 的小孔連通銅片下方之空氣。利用車床將直徑 3cm、長約 6cm 的 PE 棒車成恰可在針筒中滑動之活塞, 活塞上方並製成軸承 (讀者可自行設計活塞上之軸承。本文之軸承設計成 U 型, 製成 U 型的白楊木兩側打孔, 作為連桿轉軸之軸承, 整個 U 型軸承埋入活塞中之圓型凹穴; 見圖二), 以便藉由連桿上的轉軸與連桿絞

接。



圖二

(三)另外，用車床將直徑 2cm，長約 1.5cm 圓木棒【第(6)項材料】的中心鑽一恰可容納玻璃毛細管的孔，將玻璃毛細管塞入，也用 AB 膠密實黏妥，密封其間隙，之後以圓木棒為基座將玻璃毛細管黏牢在銅片中心，銅片中心直徑 1 mm 的小孔可容粗約 0.3 mm 的吉他鋼弦，經過毛細管通到銅片下方（見圖三）。

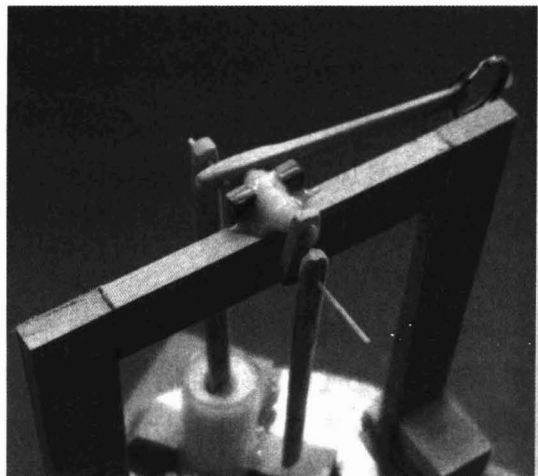
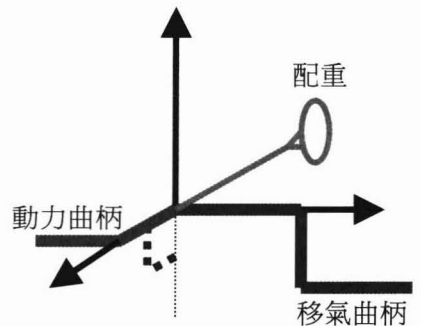


圖三

(四) 將 PE 圓棒用車床鑽一恰容直徑 1.5 mm 玻璃纖維棒在其中自由轉動的小孔，以此 PE 棒為軸承，玻璃纖維棒【第(7)

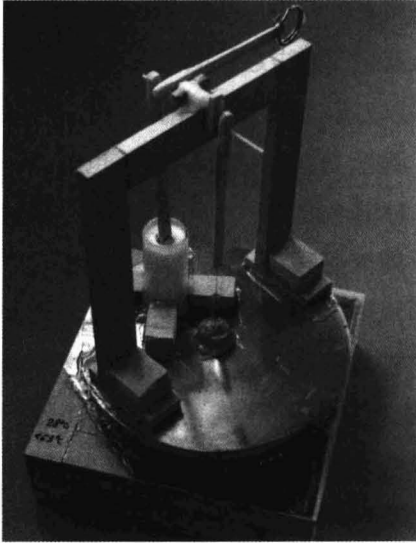
項材料】為轉軸。

(五) 把白楊木條鋸成兩截，一截作為 7 cm 長的動力曲柄，此截動力曲柄須鑽兩相距 8 mm 的平行小孔，小孔能緊緊塞入作為轉軸和曲軸的玻璃纖維棒；另一截作為 1.2 cm 長的移氣曲柄，於此截鑽兩相距 8 mm 的平行小孔，這兩小孔也得能緊緊塞入作為轉軸和曲軸的玻璃纖維棒。依圖四所示，將玻璃纖維轉軸置於 PE 棒軸承中，再組合動力曲柄和移氣曲柄。注意使兩者之夾角為 90° ，同時以 AB 膠固定轉軸和曲柄，使之在運轉時不會變形。



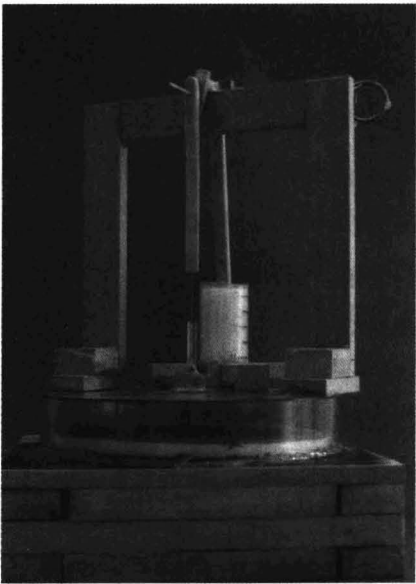
圖四

- (六) 以白楊木製成高約 18 cm 支架，牢牢黏在銅片上，再穩固安裝 PE 棒軸承於支架頂端。將銅片依之前繪上的圓用 AB 膠黏在壓克力圓環上（見圖五）。



圖五

- (七) 如圖一及圖六所示，製作圓餅狀移氣胴體，胴體的直徑約 19 cm，高約 0.8 cm。



圖六

- (八) 粗約 0.3 mm 的吉他鋼弦，藉一白楊木製連桿一端掛在移氣曲柄上，其另一端穿過玻璃毛細管，黏結珍珠板製的移氣胴體，調整吉他鋼絲的長度。當移氣曲柄旋轉而連動移氣胴體，使移氣胴體在壓克力圓環中上下振動時，儘可能接近壓克力圓環上方銅片，卻不致於撞及。也儘可能接近壓克力圓環底部銅片（尚未黏妥），卻亦不致撞及（移氣胴體最高時離上方銅片約 0.3 cm 即可）（見圖六）。
- (九) 接著製作另一白楊木質連桿（長約 12.5 cm），連桿一端，鑽一小孔，連結動力曲柄（見圖一及圖四），另一端連結 PE 棒活塞。
- (十) 最後用強力膠黏合另一片銅片在壓克力圓環底部，並外敷熱融膠補強，密封壓克力圓環。再將配重黏在動力曲柄上，使其平衡，即大功告成（見圖五、六）。

發動引擎的方式很簡單：自製一類似蒸籠的裝置，（見圖六），（此部分讀者亦可自行設計，若用其他輕質物體製成的移氣胴體、底部銅片和壓克力圓環之間的膠、壓克力圓管本身，均不致融化，以火焰直接加熱無妨），以蒸氣或吹風機加熱（見圖七），待下方熱庫和上方較冷區域溫差 40°C 以上，用手撥動動力曲柄，注意轉動方向不可弄錯，若發覺起動不了，換個方向試試，並詳細檢查所有接縫有無漏氣，以膠加以填補後再發動。若一切正常，持續加熱，此引擎即不停轉動。



圖七

註釋

有關史特林引擎之詳細原理，相關文獻不少，本文不再贅述。請參閱台大普通物理實驗講義，1998 年出版，普通物理實驗教學研究委員會編印。

圖說

- 一、史特林引擎之側視示意圖(未全然依尺寸比例繪製，為清楚起見，支架均略去)。
- 二、可在針筒中滑動之 PE 活塞、埋入活塞圓型凹穴中之 U 型木製軸承。
- 三、以方形木塊加強底部，垂直銅片之針筒圓管；以圓木棒為基座，也垂直銅片之玻璃毛細管。
- 四、軸承、動力曲柄和移氣曲柄組件之俯視特寫及示意圖。
- 五、密封壓克力圓環後整具引擎的實物攝影。
- 六、密封壓克力圓環中的圓餅狀移氣胴體，胴體的直徑約 19 cm，高約 0.8 cm。由粗約 0.3 mm 的吉他鋼弦穿過玻璃毛細管，經連桿套掛在移氣曲柄上。
- 七、用吹風機加熱特寫。

(上承第 23 頁)

5.F. E. Lytle, *An Introduction to Diffraction Part II : The Far Field*, Applied Spectroscopy, **53**, 262-276, 1999.

6.M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics* :

Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light, 7th(expanded) ed., London, Cambridge University Press, 1999.