

# 透明蒸汽機

周鑑恆

萬能科技大學 光電工程系

(投稿日期：民國 99 年 08 月 30 日，修訂日期：99 年 11 月 14 日，接受日期：99 年 11 月 22 日)

**摘要：**作者創作一種蒸汽機教具，以厚紙製作活塞，以壓克力管或玻璃管作為汽缸，用玻璃片或壓克力板以及木材組成分流裝置，並以木材和紙製作其餘零件。完成這具透明蒸汽機教具，僅須使用中、小學或家庭常備的簡易木工工具，組裝過程可容忍相當大的公差。利用吸入功率約 150~250W 之家用吸塵器，便可順利驅動這具透明蒸汽機教具，清楚顯示往復式蒸汽機的工作原理，引發學生學習熱學的興趣。

**關鍵詞：**熱力學、熱機、蒸汽機

## 壹、前言

至今為止，即使新的綠色能源技術如雨後春筍，相關的研發工作如火如荼，但人們使用的各種能源（例如電力、交通動力等），大多仍是經由熱機將初級能源（例如煤、石油、生質能源等）轉換而來。

事實上，深遠改變全體人類文明和生活的工業革命，主要的基礎之一，就是古老的蒸汽機。

相傳詹姆士·瓦特(James Watt)發明了蒸汽機，但這不是史實。蒸汽機的研發和應用，是一群科學家接力完成的壯舉，而瓦特確曾對蒸汽機作出最重要的改良。

近代蒸汽機的濫觴，應屬 17 世紀晚期湯

姆士·塞維利(Thomas Savery)設計的蒸汽機。起初的這具蒸汽機，加熱封閉容器中的水蒸汽，進而擠壓出封閉容器中的積水，接著冷卻該封閉容器形成低壓，於是再度使礦坑積水進入該容器中，重複這樣的過程，就不斷抽出礦坑中的積水。

1712 年湯姆士·紐科門(Thomas Newcomen)改進了塞維利的設計，利用壓力較大的蒸汽推動汽缸中的活塞，接著冷卻汽缸，形成低壓而推回活塞，這活塞再經過連桿裝置驅動抽水裝置，抽水的深度因此可以較深。

1763 年，身為實驗員的瓦特，在格拉斯古大學(Glasgow University)與同事一起負責修理紐科門蒸汽機，發現了紐科門蒸汽機的

浪費燃料的缺點。瓦特首先將冷卻蒸汽的過程改在另外的冷凝器中進行，有效提高了使用熱能的效率，並在往後幾十年間不斷改良蒸汽機，發展出有曲柄、飛輪的往復式蒸汽機。<sup>(1)</sup>

在普通物理學各分支中，熱學是學生比較陌生的部分，一方面因為初學者不易掌握熱學要點，另一方面也因為熱學的實驗較少，學生比較不容易留下深刻印象。熱機是熱學的核心主題，涉及熱力學第一定律及熱力學第二定律，往復式蒸汽機是熱機的一種，也是工業革命的濫觴，在熱學教學中兼具物理學史和人類文明史的重要性，因此蒸汽機教具在熱學教學中意義非凡。

往復式蒸汽機構造精巧，運轉時各部零件一起連動，力與美的結合常令人嘆為觀止。在安靜的課堂上，演示一具主要活動零件(包括活塞、氣閥等)均可透視的蒸汽機(見圖 1a)，在思古之幽情中，講述熱力學，師生想必都能陶醉其中吧。

## 貳、創新蒸汽機教具的設計

作者創作此蒸汽機教具的目的是：提供中小學教師自製教學所需蒸汽機教具的創意和藍圖，希望引起中小學教師仿製和在教學

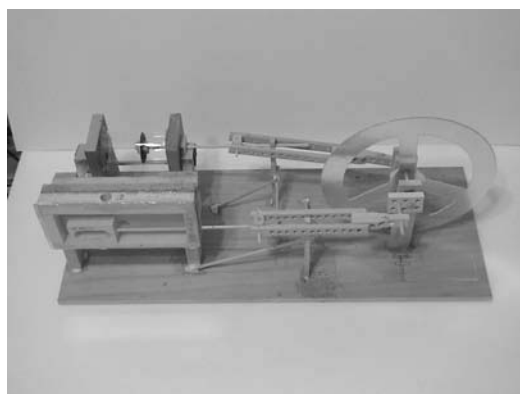


圖 1a：蒸汽機的實物攝影。汽缸在圖的左上方，透明玻璃製作的，其中的紙活塞清晰可見。圖的左下方為分流盒，分流盒靠近汽缸的這面夾層中有三個空腔，左右兩空腔分別利用矽膠管，引導氣流到汽缸的左或右側。

中普遍使用。因此，此項教具的設計儘量避免動用精密儀器或工具，材料儘可能取自於文具或常見物品，製程力求簡易，可以容忍較大的誤差。

備好最簡單的木工工具，就讓我們立刻動手研製這具玻璃汽缸，厚紙活塞，透明分流盒，可見所有活動零件(見圖 1b)，和協動感十足的蒸汽機。

所需的材料如下：

- (1)內直徑 6 cm，長 12 cm 的玻璃管一支，
- (2)厚約 2 mm、面積  $7 \times 12 \text{ cm}^2$  的玻璃兩片。

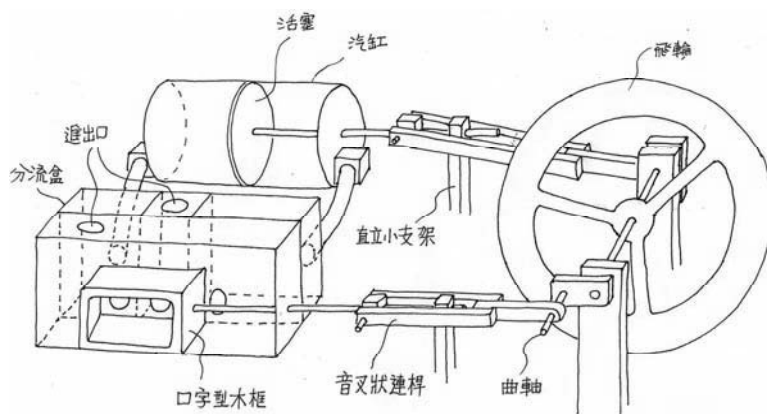


圖 1b：蒸汽機的簡化示意。



圖 2：玻璃汽缸中的紙活塞與連桿連接在一起，汽缸一端用木板封住，木板中間有直徑 4.5mm 的小孔，下方有一通氣的大孔；汽缸另一端用也木板封住，木板中間有一通氣的大孔。兩大孔分別用矽膠管與分流盒連通。



圖 3：直徑 4 mm 的連桿從木板支架上的孔穿出後，再穿過直立底座小支架上端直徑約 4.5 mm 的孔。

- (3)矽膠管(軟的管子即可)。
- (4)軸承(培林)兩個，內徑 4 mm。
- (5)小木板二塊、小木板一塊（作為底座），木條若干支
- (6)直徑 4 mm、2 mm 的木桿若干支。
- (7)厚紙一片。

製程：

甲、汽缸的部份：

將厚紙剪成直徑恰略小於玻璃管內徑的圓片，此圓片即作為活塞。可想而知，此圓

片不可能完全密封玻璃管，但只要大致能與玻璃管內徑一致，且可於玻璃管中輕易滑動即可。圓片中心鑽一個直徑 4 mm 的小孔。在另一小片木板上鑽一直徑 4 mm 的小孔，藉由此小片木板，將圓厚紙活塞與直徑 4 mm 木桿製成的連桿(見圖 2) 結合在一起。

再用兩片小木板製作此玻璃管汽缸的支架，其中之一鑽一個直徑 4.5 mm 的小孔，並在下邊鑽一個直徑 13 mm 的小孔；另一片則鑽一個直徑 13 mm 的孔即可，先將紙活塞和木連桿放在玻璃汽缸中，讓木連桿從木板支架上 4.5 mm 直徑的孔伸出，再用 AB 膠，將玻璃管與木材支架密接，於是把紙活塞密封在玻璃管汽缸中。

將木板支架用 AB 膠黏在木板底座上，直徑 4 mm 的連桿從木支架上的孔穿出後，要再立一個直立於底座的小支架，此小支架上端有一個直徑約 4.5 mm 的孔，可容納連桿的另一端(見圖 3)。

乙、分流盒的部分：

分流盒的構造如圖 4 所示的透視圖，其主要的功能是：利用口形木框的往復移動，改變空氣的通道，使空氣改變流動的路徑，而能往復推動玻璃汽缸中的紙活塞。

為了避免壓克力上留下摩擦的刮痕，所以採用玻璃板，但玻璃板上鑽孔相當費事，因此才如下製作分流盒。

見圖 4，分流盒分為兩夾層，中間用木板隔開，中間木板下緣有等間隔，直徑 13 mm 的三孔，外側兩面分別是玻璃板，夾層四周以 AB 膠黏妥木條密封。其中一個夾層容納口字型的木框，此夾層並以其上方直徑 13 mm 的孔連通外界；另一夾層隔成互不連通的三個空腔，三個空腔分別連通中間木板的三個孔(直徑 13 mm)。中間的空腔再以上方直徑 13 mm 的孔連通外界，兩側的空腔則以矽膠管連通汽缸左右側。

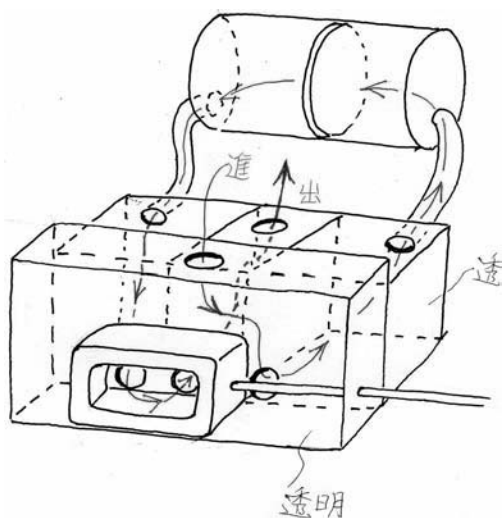


圖 4：分流盒的構造。分流盒由兩夾層構成。其中一夾層中要恰好容納一個口字型的木框在其中滑動。口字型的木框現在左方，氣流即從中間木板的右側孔，經右側矽膠管，推動活塞，再經左側矽膠管，經中間木板的左側孔，導入口字型的木框，再從中間木板的中間孔中排出；口字型的木框在右方時，過程即相反。



圖 5：分流盒的實物攝影（其透視圖參見圖 4）：透過玻璃可見木盒中之口字形木框。引導氣流的矽膠管在背面兩側，將空氣導入汽缸兩端。

參見圖 5，分流盒夾層中的口字型木框可在其中滑動，此口字型木框與另一個直徑 4mm 的連桿連結，此直徑 4 mm 的連桿從夾層前方木條上直徑 4.5 mm 的小孔穿出，穿出去之後也由另一根上方鑽有直徑 4.5 mm 小孔

的直立支架容納其另一端（參見圖 6）。

此口字型木框即為分流氣閥，口字型木框在左方時，即可引導氣流，從三個直徑 13 mm 的孔之右側孔，經右側矽膠管，推動活塞，再將空氣經左側矽膠管，經左側孔，導入分流盒夾層中的口字型木框，再從中間的孔中排出；口字型木框在右方時，過程即相反。

丙、音叉狀連桿：

緊接著，須製作兩音叉狀連桿，如圖 7 所示。為減輕重量，此兩支音叉狀連桿上可多鑽些孔。這兩支音叉狀連桿，藉著圖 8 所示的木質簡易軸承以及直徑 2mm 的木質插鞘，分別連接活塞的連桿和口字形木框的連桿。

丁、飛輪的部份：

見圖 9，用厚紙即可製作飛輪，飛輪兩側分別用一小塊木片將飛輪固定在直徑 4mm 的木質轉軸上，此木質轉軸藉兩個滾珠軸承安裝在支架上，轉軸兩側黏牢兩個曲柄和曲軸，此兩曲柄互相夾 90°角。將兩叉狀連桿再連接此兩曲柄上的曲軸，這具蒸汽機及大功告成。

## 參、此項實驗教具內涵的物理概念、定律及原理

### 一、熱學<sup>(2)</sup>

熱學的主角是必須考慮其內部原子、分子行為的物體，此物體可以是氣體、固體或是液體、甚至是液晶。這些物體學術上稱為系統，有的簡單，有的非常複雜。

力學中所討論的物體，包括剛體（碰撞）；彈性體（振動、聲音）；流體（浮力、白努利定律等），從未考慮該物體組成分子、原子的行為。但熱學中討論的問題，卻涉及



圖 6：口字形木框的連桿特寫。此直徑 4 mm 的連桿，從分流盒夾層側邊木條下方的小孔（直徑約 4.5mm）穿出。



圖 7：音叉狀連桿的實物攝影。兩側小孔可減輕重量。



圖 8：特寫音叉狀連桿與直徑 4mm 木質連桿之連接方式。以上方書寫“上”字的小木塊作為簡易軸承，小木塊直接黏在直徑 4mm 的木質連桿上。

組成物體的原子分子的行為，以及組成物體的原子分子的行為所造成的現象。

因物體與外界溫度差而進入物體的能量稱為熱，有三種方式(輻射、傳導、對流)能夠傳遞熱。

物體對外界作功，則物體內部的能量就減少。 $-\Delta E_{\text{int}}=W$ 。如此定義的原因有二：

(1) 外界對物體作功，就會等於物體動能變化量，但此時的物體是熱學的物體，並非力學的物體，所以無法如此定義；此外，外界對熱學物體所作的功，熱學物體的位移量不明確，所以無法定義外界對物體作功。

(2) 配合「必須有某種能量變化 ( $-\Delta E_{\text{other}}$ ) 才能引起做功」，亦即「某種能量變化 ( $-\Delta E_{\text{other}}$ ) 引起能量轉移或轉換」之思路，也就是  $-\Delta U=W$ 、 $-\Delta E_{\text{other}}=W$  的寫法，所以  $\Delta E_{\text{int}}=-W$ 。

根據能量守恆原理，傳進物體的熱，扣掉物體對外界作的功，會等於物體內部原子分子能量的變化。此即為熱力學第一定律：

$$\Delta E_{\text{int}} = Q - W \quad \dots\dots(1)$$

其實，外界進入物體的能量，還可以利用其他方式，例如：微波加熱，摩擦（把動能直接變成熱能，摩擦焊接），雷射（雷射並非熱輻射，雷射切割合金鋼板時，雷射本身溫度並沒有高到會熔化鋼材），燈絲、電線、電阻通電，都會升溫，通電當然也是一種把能量傳入物體的方法。此外，渦電流常用來熱處理齒輪，冶金，融化導體、矽晶等。但這些方式都只能使能量進入物體而不能離開物體，這點與熱學常討論可進可出物體的能量（亦即功和熱）不同。

高中以下的教科書只討論加熱使能量進入物體；在大一普物中，才同時討論加熱和作功使能量進出物體的現象。

能量進入物體後會變成原子分子含有的內能：若單純變成原子分子的動能，則物體的溫度升高。若單純變成原子分子的鍵結能

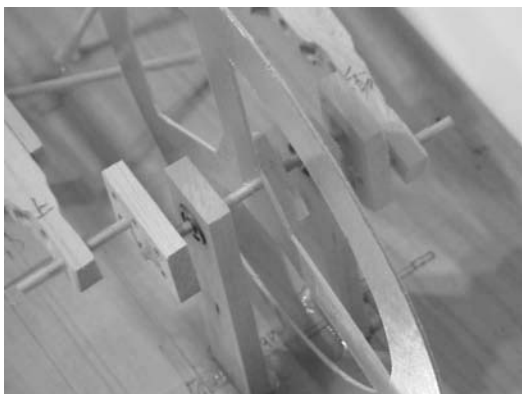


圖 9：紙作的飛輪，轉軸兩端有兩個曲柄，兩曲柄相互垂直（照片中右側曲柄垂直地面，左側曲柄平行地面），兩曲柄上各有一個曲軸，曲軸分別連接音叉狀連桿。

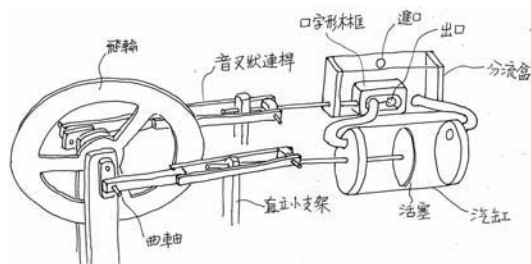


圖 10：分流盒更精簡透明的設計。

量，則物體發生相變化。一般的情形可能非常複雜，但教科書通常限縮討論，只談單純變成原子分子的動能、或單純變成原子分子的鍵結能量的情形。

把熱學的主角---通常是流體---放入熱機中，就成了工作流體(working fluid)。從熱機的研究開始，科學家發現，由無數原子分子的行為所造成的現象，其變化必須考慮機率問題。

熱力學第二定律指出，熱機中的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。

其他熱學現象，同樣也因為機率的原故，其變化有一定的方向(例如：擴散、自由

膨脹、熱平衡等等)

原子分子的鍵結較為複雜，須用較深的量子力學處理，但氣體的原子、分子基於量子力學的推論，像完全彈性體，則非常容易應用基本的力學加以研討。因此氣體（忽略原子分子間的鍵結）比固體（原子分子鍵結的情形千奇百怪）簡單得多。

所謂氣體動力論，乃是在大一程度時選定某一特別簡單的物體---氣體，利用已知的力學計算其內能（只有原子、分子的動能），並求出諸多重要結論，例如：比熱、溫度與平均動能的關係等。

## 二、熱機原理

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。也就是說：把熱學的主角放入到熱機中，變成了熱機的主角，成為工作流體；當然工作流體通常選用液態或氣態的物體。

熱進入工作流體之後，透過工作流體之做功，轉換成動能。

往復式蒸汽機、渦輪蒸汽機、柴油引擎、汽油引擎、噴射引擎、衝壓引擎、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氫氣、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。」<sup>(2)</sup>

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 Brayton 循環<sup>(3)</sup>，工

作流體狀態之變化都必須隨著相似的順時鐘方向。

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，不可能完全經由做功，轉換成機械能。

### 三、此蒸汽機教具演示的重點

由於通體透明，這具透明蒸汽機教具，可以演示往復式蒸汽機運轉原理的細節，讓學生對利用連桿、曲軸、分流裝置巧妙改變蒸汽流向的設計嘆為觀止；但蒸汽機的重要性和趣味性，也應涵括工業革命的人文內涵和人類之首具熱機及其發展的傳奇。更重要的是，這具透明蒸汽機教具的工作流體雖然是具有很大壓力的大氣，但講解時，仍應強調前述之熱學和熱機原理，說明真實蒸汽機的工作流體，經由燃煤加熱而獲得熱，沸騰後壓力增加，再經由推動活塞作功而將“熱”轉換成“功”。

### 肆、研究數據

因為一般教師課餘時間有限，實作及實驗時必要的儀器、設備愈少，此教具愈容易普及，利用率愈高。職是之故，這具蒸汽機利用空氣推動。在這具蒸汽機的蒸汽出口處接上吸塵器(吸入功率 150~250W)，則較高壓的大氣從進口灌入蒸汽機中，就像高壓水蒸汽灌入蒸汽機一樣，便能驅動這具用各種材料製成的蒸汽機高速運轉(220 ~ 1000 rpm)；若在這具蒸汽機的蒸汽進口處接上吸塵器，則蒸汽機反轉。如果有實驗室中有氣墊軌用的鼓風機，這具透明蒸汽機的蒸汽進口直接接上鼓風機，也能運轉。鼓風機若接在出口，則反轉。

經多次實作及實驗可知：內徑約 4 ~ 6

cm 的玻璃管或壓克力管，真圓度在正負 0.25 mm 的範圍內(一般的玻璃管或壓克力管均可達到這標準)，用圓規畫圓，用一般剪刀剪出厚紙活塞，如此製作出的透明蒸汽機即能運轉。連桿的質量越輕，轉速越高，可高達 1000rpm。

### 伍、結論與建議

相較於普通物理學其他分支，熱學常令學生頭痛，因為抓不到要點和整體的架構，有趣的熱學實驗又較少，這具蒸汽機，比作者於 2010 年物理教學與演示實驗研討會(中央大學主辦)中展示的蒸汽機又更為改良，性能更好，製程更簡易，有助於熱學核心主題之教學，希望能帶動臺灣中小學教師仿製和推廣。如果能多費功夫，直接在分流裝置的玻璃板或壓克力鑽洞，進一步精緻化分流盒，整具蒸汽機可變得更為透明玲瓏(見圖 10)。幾乎所有的中小學教師都可用現有手邊的工具輕易完成此具透明蒸汽機，製程可以允許相當大的公差，若經允許，可加大此透明蒸汽機的尺寸，教學的效果更好。

### 參考文獻

1. 周鑑恆編撰，高職物理教科書，三民書局，台北 2010 年出版。
2. John B. Fenn 著，熱力學練功寶典：熱的簡史，李乃信譯，天下遠見出版股份有限公司，台北 2009 年出版。
3. Louis A. Bloomfield, How things work—The Physics of Everyday Life 4<sup>th</sup> ed., John Wiley & Sons, Inc., 2010, 歐亞書局有限公司代理，台北。

## **Transparency steam engine**

**Chien-Heng Chou**

Vanung University

### **Abstract**

An innovative steam engine designed by author is proposed. The piston of this engine is made of thick paper. A common acrylic or glass tube is used as the cylinder of this engine. A shunt device of this engine is made of glass or acrylic panels and timber, and the remaining parts are made of timber and paper. School or family standing woodworking tools are needed for building this transparency steam engine and the assembly process can tolerate a considerable tolerance. A vacuum cleaner, of which the sucking power is about 150 W~250 W, can drive this engine easily. This engine is quite useful for demonstrating how the steam engines work and for inspiring students interested in thermodynamics.

**Key words:** Thermodynamics, heat engine, steam engine