

針對完整主題的系列教具和新的論述

A Series of Teaching Aids and New Discourse on the Complete Topic

周鑑恒^{1*}，曾瑞蓮²

^{1*}萬能科技大學航空光機電系

²高雄科學工藝博物館

*chou0717@gmail.com

【摘要】 針對在教科書中或在常見科教活動中有瑕疵的某些重要主題，例如：光學成像、發電、熱機、風力發電、海浪發電、熱力學、流體力學等等主題(甚至微積分)，重新建構更完整、更實用的理論架構，開發一系列教具，以實驗闡釋此完整主題的各關鍵要點，並撰寫專書組織此完整主題並重實驗和理論的教材和教法，形成所謂「教學資源」。利用這些教學資源，使學習者能輕鬆但清晰地掌握整個主題，而能將所學到的知識應用於解決實際問題、或作進一步研究。本文僅以跨領域的「熱機教學資源」為例，說明教學資源的特點和內容。

【關鍵字】 教學資源；系列教具；實用知識；完整主題

***Abstract:** Reconstructing a more complete and practical theoretical framework for certain important topics that are flawed in textbooks or common science education activities—such as optical imaging, power generation, heat engines, wind power, wave power, thermodynamics, fluid mechanics, and even calculus—developing a series of teaching aids to illustrate key points of each topic through experiments, and writing a specialized book that organizes the complete subject with an emphasis on both experiments and theory, to form what is called "teaching resources." By using these teaching resources, learners can easily yet clearly grasp the entire subject and apply the knowledge they have acquired to solve real-world problems or conduct further research. This article uses the interdisciplinary "teaching resources for heat engines" as an example to illustrate the features and content of such teaching resources.*

Keywords: Teaching resources, A series of teaching aids, Practical knowledge, Comprehensive topic

1.前言

大家都不太相信：教科書有不小的改進空間！教科書的瑕疵，常造成學習者難以了解某項主題。例如：在諸多教科書中發電只是法拉第定律的一個例題，這使得學習者誤以為只有法拉第定律涉及發電，而其他原理與發電的關係則可以忽略。又例如：在談到卡諾循環時，教科書並未強調所有的熱機(引擎或發動機)的原理都是一樣的。又例如：談到流體力學時，教科書常忽略了流體力學也是牛頓力學的一部分，絕對要完全遵守牛頓力學；並且還濫用伯努利方程式(Bernoulli's Equation)，台灣翻成伯努力「定律」，更容易誤導學習者。至於許多科教活動中，依循教科書的內容，也有不正確的迷思。

相較於單獨零星的科學內容，了解完整主題的所有科學原理，才方便應用此完整主題的科學原理，來解決實際問題。也有利於進一步學習更深入的科學。

我們創作的「系列教具」之功用在於，將整個完整主題的各個關鍵要點，用實驗加以闡釋，使學習者以眼見為憑的直觀方式，了解整個完整主題。即使一時倉促，來不及清楚了解所有內容，也能先將關鍵點演示出來，作為進一步學習的基礎。

更重要的是，創作直接了當、不多不少的完整主題概念圖和論述方式，這些新的概念圖如同更好的導覽圖，讓學生先了解全盤大概，再胸有成竹地探究細節，以達到深入淺出、以簡御繁的學習成效。

而統整的書籍則畫龍點睛、有系統地將系列教具和更新的理論架構組織起來，形成非常有用的教學資源。

限於篇幅，顯然無法分享上述各主題之所有教學資源，在本文中僅以「熱機」主題為例，說明教學資源的內容和特點。

2.熱機的教學資源

在許多教科書中熱力學章節中，都會談到卡諾引擎(Carnot Engine)，有關卡諾引擎的計算，最終推導出熵的概念($dS = dQ / T$)但教科書大多沒有強調「所有熱機的原理基本上是一致的」，使得學習者失去完整掌握熱機原理的機會，十分可惜。

新的論述如下：所有熱機的原理都是一樣的。主角都是工作流體，工作流體作為能量轉換的媒介，將人們所擁有的能源轉換成人們所需要之動力。在所有的引擎中工作流體都必須完成熱機循環，才能完成上述的任務。

所謂熱機循環就是工作流體低溫時被壓縮，壓縮之後被加熱，增加工作流體之內能，再之後工作流體消耗它的內能膨脹，對“某些物體”做功，最後工作流體降溫被壓縮，回到原始的狀態，於是就能將“熱”轉換成“功”。

所謂不同之引擎是指：使用不同的工作流體、工作流體被使用的方式不同，用不同的設備和裝置，使工作流體完成熱機循環，並對不同的物體做功。

工作流體的PV圖是一封閉的曲線，中間的區域，代表工作流體膨脹並消耗內能所做的功，但並未說明工作流體在何處、對什麼東西做功?這是有趣之處!

系列教具的闡釋策略是：因為熱機教學資源的目的在於強調：所有的熱機基於相同的原理，熱機中的工作流體，會經過相同的熱機循環，將能源轉換成我們所須的動力。所以熱機教學資源的系列教具的設計策略是：研製各異其趣的熱機，並且引導學習者了解：各種熱機中的工作流體為何?工作流體又是如何被壓縮、被加熱?所使用的能源為何?.....等等。在欣賞各個熱機設計的巧妙各有不同，別出心裁之餘，同時會發現所有熱機中的工作流體都經過非常相似的熱機循環。藉此達到跨物理、航空與機械等領域的教學目的。

首先創作一項透明的希侖蒸汽機，利用磁鐵吸住希侖蒸汽機上方尖錐狀的轉軸，利用重力與磁力相互抵銷，以致於尖錐狀的轉軸所受到的摩擦力矩極小，所以可以使透明玻璃球中的工作流體(也就是水，用過即拋)在沸騰時的蒸氣壓力並不大的狀況下，就足以產生能夠推動希侖蒸汽機轉動的蒸氣(見圖1)。如此一來，學習者就可以完全了解：在透明的希侖蒸汽機中，工作流體被加熱並產生大量蒸氣，進而同時對工作流體本身以及透明的球狀玻璃容器做功，使得玻璃容器旋轉。



圖1 加熱透明希侖蒸汽機中的工作流體，使工作流體沸騰，並且(產生蒸氣)而劇烈膨脹，驅動希侖蒸汽機轉動，使得學習者可以完全了解：希侖蒸汽機中工作流體到底如何做功。

緊接著藉用吸塵器或鼓風機所造成的氣流，驅動各種古老的往復式蒸汽機(見圖 2)。因為通體透明，所以學習者可以看到設計蒸汽機各種巧思，從而了解蒸汽機的運轉原理。雖然是以吸塵器或者是鼓風機產生氣流來推動各種古老的往復式蒸汽機，但可以讓學習者了解，真實的蒸汽機中沸騰的水是如何推動活塞，使蒸汽機運轉。仔細推敲會發現作為工作流體的水(水蒸氣)也完成熱機循環。



圖 2 完全透明的古老蒸汽機模型(a 與 b)。晚期較為先進的往復式蒸汽機(c)，這種蒸汽機最後裝設在蒸汽火車頭上，引領鐵路交通運輸近一百年(d)。

接著設計兩種用真的蒸氣驅動的蒸汽機模型(見圖 3)，這兩種蒸汽機模型也都是通體透明，所以學習者可以完全看到整個蒸汽機內部構造以及所有運動的零件。進而理解：的確是以透明三角錐瓶中的工作流體(水)作為工作流體，加熱使工作流體沸騰，變成蒸氣、體積膨脹，而對活塞做功。這樣就可以充分說明工作流體是各種引擎中的主角，用來進行能量轉換。

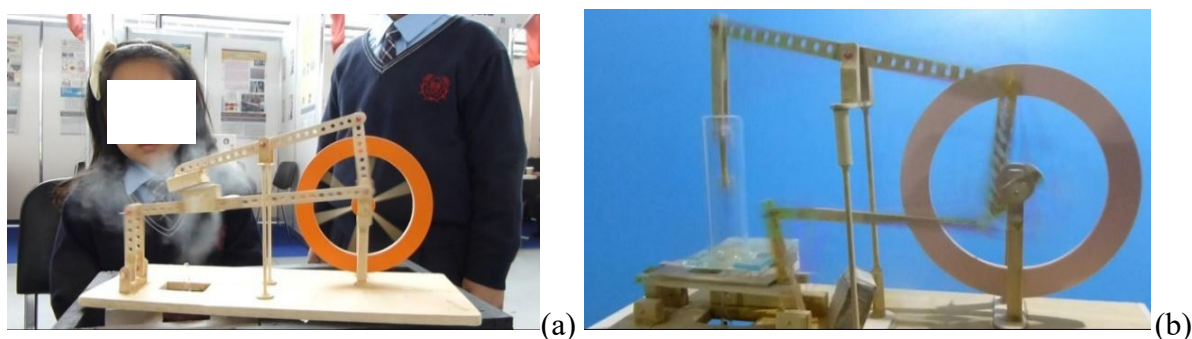


圖 3 兩具用真的蒸氣驅動的透明蒸汽機模型。

史特林引擎是一種奇特的外燃引擎(見圖 4)，可以使用多元的能源來驅動，所以也稱得上是一種綠色能源科技。史特林引擎中的工作流體，被壓縮、被加熱、膨脹、做功的過程，與其他發動機中的工作流體所經過的過程非常相似。但是，使工作流體進行熱機循環的方法各

有巧妙。所以演示史特林引擎可以強調，在不同的引擎中使用不同的方法和裝置，使工作流體經過類似的熱機循環。



圖 4 作者早期製作許多不同的史特林引擎(a)，有些組裝式史特林引擎甚至流行到國外(b)。

熱機主要是利用其工作流體進行能量轉換，將我們所擁有的能源，轉換成我們所需要的動力。太陽能加熱的史特林引擎，就可以用來特別強調這一點。圖 5a 跟圖 5b 所示，即為太陽能史特林引擎發電機。用反光碟反射陽光，加熱使特林引擎的溫差氣室，以維持溫差氣室上下兩面的溫度差即可運轉史特林引擎。

也可以利用菲涅爾透鏡(Fresnel lens)聚焦陽光，同樣能使史特林引擎轉發電機發電。

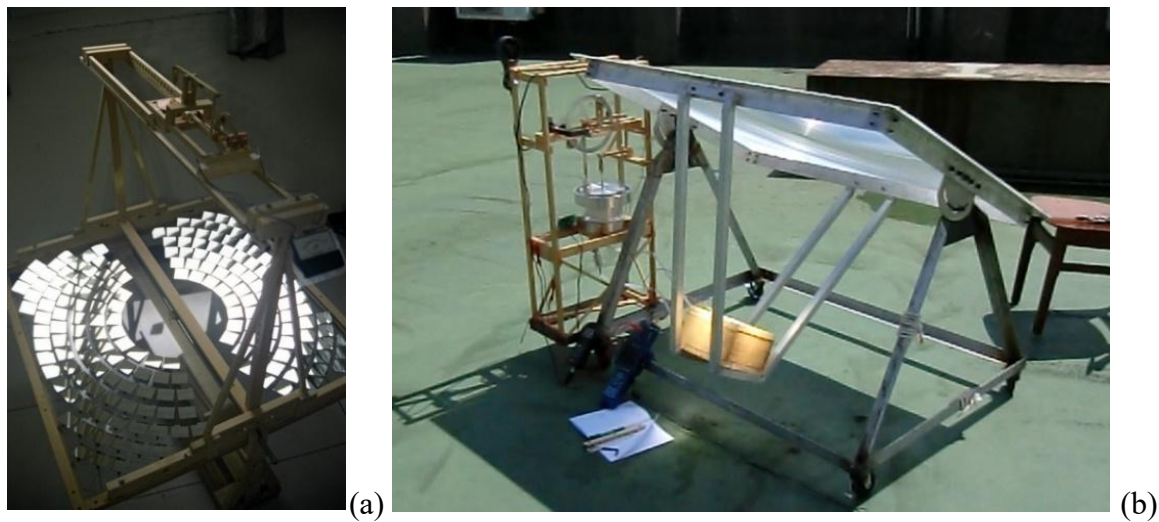


圖 5 簡單設計的太陽熱能史特林引擎，研製太陽能史特林引擎發電的經歷，曾經作為台灣科學月刊的封面故事(a)。用透明加熱的史特林引擎(b)。

史特林引擎也可以利用地熱來加熱，同樣可以產生動力。作者在台灣台北的北投地熱谷，曾經研製全台第一具示範史特林引擎地熱發電機。這說明熱機可以使用不同的能源加熱(見圖 6)。



(a)

(b)

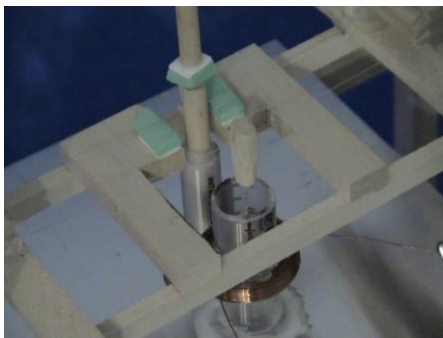
圖 6 在台北北投地熱谷示範的史特林引擎地熱發電機(a)，與環境的景觀融合得非常和諧。這故事曾經在台灣的探索頻道(Discovery Channel)播出(b)。

為了吸引大眾與學習者的學習興趣，強調引擎輸出的動力可以用於發電或驅動車輛，作者特別研製了一輛史特林引擎載人車。用特製史特林引擎所產生的有限動力，驅動一輛木質的車輛，可以載重約 60 公斤以上的人。雖然行進的速度不快，但是，因為構造非常簡單(見圖 7)，頗能引起大眾的注意與好奇。

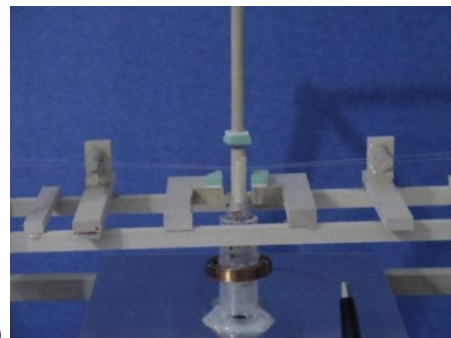


圖 7 史特林引擎載人車的特寫鏡頭，實際行駛的情形(右)。

利用共振的原理，構造已經十分簡單的史特林引擎，甚至可以進一步簡化，設計出所謂的自由活塞型史特林引擎(見圖 8)。美國太空總署，曾經長時間測試這類自由活塞型史特林引擎之可靠性，準備作為深太空探測的發電動力。



(a)



(b)

圖 8 利用共振原理研製出的自由活塞型史特林引擎(a)。其中移氣器(Displacer)以及活塞都利用彈力裝置，使兩者的震動頻率十分接近，而產生共振的效果，使得活塞以及移氣器的震動頻率相同，但又有必要的相位差。

嚴格來說，令人驚奇的熱聲效應(thermoacoustic)也是一種引擎的現象。乍看之下，令人匪夷所思，但仔細解釋則的確如此。在熱聲效應管中，只有一小部分的空氣能成為工作流體，會進行熱機循環，而能夠增強管中氣柱的基頻震動模式(fundamental normal mode)，所以可以發出很大的聲音，這種聲音甚至可以在管口造成氣流(見圖 9b)。其中熱聲堆的一端維持高溫，另外一端維持低溫(見圖 9a)，當空氣振動時，管中距管口適當距離的處一小段空氣，就可以被先壓縮再加熱，進行熱機循環，而能夠把熱能轉換成氣柱震動的波動能量。

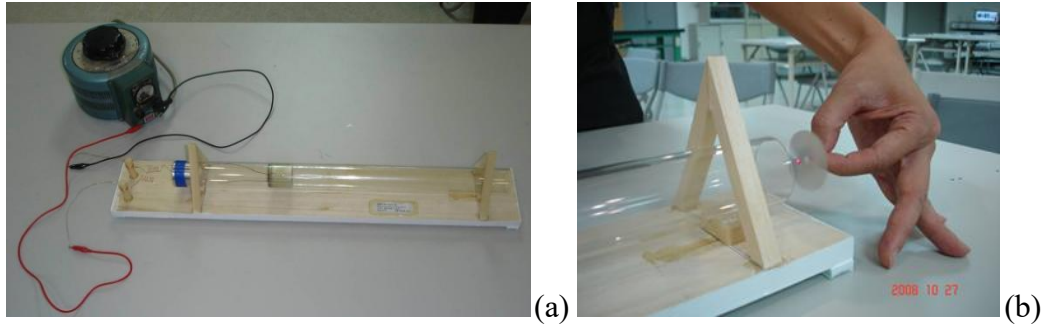


圖 9 整具熱聲管的特寫(a)，劇烈的震動會在管口引起氣流(b)。

有一種更為簡單的熱聲管：黎開管(Rijke tube)，管中只有一片被加熱至高溫的金屬網，金屬網距管口約 $1/6$ 處，如果高溫的金屬網在管子下方，管子又垂直地面而引起微弱的熱對流，黎開管因熱聲效應(也是一種引擎的現象)，就會發出很大的聲音。

兩具長度不一樣的黎開管，甚至可以用來進行拍頻實驗。其實拍頻實驗，因為不容易控制兩具聲源的同調性，並不容易以現有的儀器進行。但是，以黎開管進行，拍頻的干涉現象非常顯著(見圖 10)。

航空引擎是一種引人入勝的熱機，也是航空工程的核心領域，也遵守相同的熱機原理，其中的工作流體也經過熱機循環。雖然要製作渦噴(turbojet)或渦扇(turbofan)發動機並不容易，但作者研製一具渦軸發動機(見圖 11)，已能概略說明航空發動機的基本原理。仔細研究這具渦軸發動機(turboshaft)會發現，航空發動機的工作流體的確也進行所謂的熱機循環；特別是：航空發動機中的工作流體(空氣)，同時會對發動機本身以及工作流體做功。這個就會涉及到所謂的推進效率(Propulsive efficiency)等等問題，十分有趣。在實驗的過程當中，也可以讓學習者確認，發動機的工作流體的工作原理的確都非常相似，但是航空發動機之工作流體做功的對象，則更為複雜、耐人尋味。



圖 10 兩具長度不一樣的熱聲管所發出的聲音，因為干涉而會造成拍頻現象。



圖 11 這具類似渦軸發動機的教具，當空氣被加熱後，先膨脹再因熱對流向上流動，驅動上方之渦輪轉動，與加熱時劇烈膨脹即高速流動的真實渦軸發動機有些差異。

火箭發動機也是熱機的一種，在發動機啟動後，它的工作流體才源源不斷地產生，並同時被加熱。作者為了以簡易的方式操作火箭連續發射，營造熱烈氣氛，將 1500cc 寶特瓶瓶蓋上鑽 7.2mm 的孔作為火箭，特別以酒精或甲醇作為燃料，根據氣溫可以控制裝在寶特瓶中與空氣混合的燃料之較佳比例。再用電極之電弧點火，利用電路之巧妙設計，一次可快速連續發射二、三十個酒精火箭，場面十分有趣(見圖 12)。



圖 12 並列在發射架上的多個醇類火箭(a)。多個醇類火箭發射的情形(b)。

因為“所有”熱機中的工作流體，都經過類似的熱機循環，所以工作流體的壓力與體積變化的過程，在壓力與體積圖中，會是一個順時間變化的封閉路徑，作者特別製作一具史特林引擎，能夠演示這項事實。

見圖 13(a)，用乳膠薄膜顯示引擎中工作流體之氣壓，並利用活塞連桿顯示活塞的位置，以便標示出工作流體的體積。再利用兩片被薄膜和活塞位置連動的鏡片，反射雷射光筆之光束，即能以屏幕上的光點顯示工作流體的 PV 圖，從圖上可以看出工作流體的 PV 圖的確為順時針的封閉曲線。

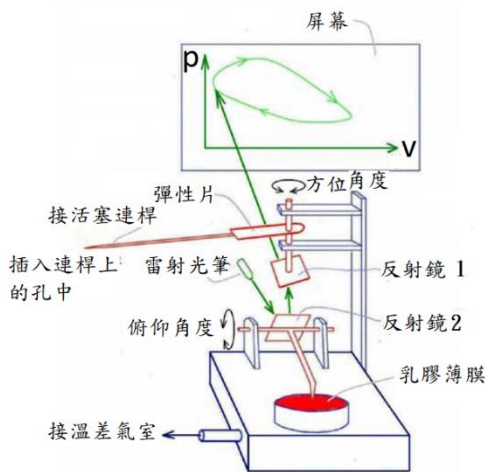


圖 13 可以目視、直觀體會的工作流體 PV 圖演示儀。

3. 討論與推廣

針對值得改進的不同重要主題，進行改進與創新，形成重新整理的理論論述和配合的系列教具，所生成的教學資源，因主題不同，各「教學資源」具有不同的特色(詳見參考資料)。但基本上都是先建立更為簡潔、明晰、直接了當的原理論述體系，再研發針對原理中難點和要點的系列實驗和教具，並且使學習者能更直觀、更具象地了解完整的原理。

熱機教學資源所強調的理論論述，重點在於，所有熱機都基於相同的原理，工作流體是其中的關鍵角色。而系列教具和實驗則包括了各異其趣、甚至匪夷所思的各種熱機。在分析了各自獨特的巧思和創意之後，再歸納出所有發動機的工作流體都經過極其相似的熱機循環，突顯出以下幾項重點：(1)工作流體可能是水、空氣、二氧化碳、氫氣、氦氣或其他會發生相變的液體或氣體。(2)使用工作流體的方式可能是(a)用過即拋或(b)反覆循環使用同一工作流體。(3)加熱工作流體的方法可以是外燃或內燃。(4)壓縮工作流體的方法可能用活塞、高速旋轉的壓縮機葉片、震波(shock wave)等等。(5)工作流體消耗內能而膨脹，可能對不同的物體做功。

在組織此系列教具和理論論述的書籍(見文獻)中，更順便回答了下列有趣的問題：為什麼近代的民航發動機是大涵道比(旁通比)的渦扇發動機?為什麼渦噴發動機燃燒室的火焰不會向前噴射(因為壓力沒有增加)?為什麼壓力沒有增加，卻會受到推力?為什麼極音速飛行器要使用超(音速)燃(燒)衝壓發動機?

4. 參考文獻

- Benson, H. (1996). *University physics: Revised edition*. Wiley.
- Eastop, T. D., & McConkey, A. (1993). *Applied thermodynamics for engineering technologists* (5th ed.). Longman Scientific & Technical.
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2019). *Thermodynamics: An engineering approach* (9th ed.). McGraw-Hill Education.