

基本古典熱力學

上 冊

張 以 忠 譯

Gordon J. Van Wylen
Richard E. Sonntag

Second
Edition

Fundamentals
of Classical
Thermodynamics

東華書局印行

基本古典熱力學

上 冊

著 者

GORDON J. VAN WYLEN

RICHARD E. SONNTAG

譯 者

張 以 忠



版權所有・翻印必究

中華民國六十五年十二月初版

大專
用書

基本古典熱力學

上冊 定價新臺幣七十元整

(外埠酌加運費匯費)

譯者	張	以	忠
發行人	卓	鑫	森
出版者	臺灣東華書局股份有限公司 臺北市博愛路一〇五號		
印刷者	合	興	印 刷 廠
	臺北市大理街130巷2弄1號		

內政部登記證 內版臺業字第一〇三一號
(65042)

原 序

本書第二版仍保持第一版的基本目標：就是介紹古典熱力學（classical thermodynamics）廣泛與精確的看法，而維持工程上的觀點，為達到這目標，讀者在流體力學（fluid mechanics），熱傳學（heat transfer），及統計熱力學（statistical thermodynamics）等方面對熱力學與工程兩者都須有不斷研究的根底；其次為準備讀者在工程實用上能有效應用熱力學。

我們已慎重地將這項獻禮致送讀者。本書首先介述有關的觀念與定義的新說法。最初要確定的熱力性質（第二章）是可被容易量度的性質：如壓力、比容、及溫度。在第三章，介紹熱力性質表，但祇限於可量度的性質。內能與焓與第一定律，熵與第二定律一同介紹，而赫姆荷茲（Helmholtz）及吉勃士（Gibbs）函數在可逆性章次中予以介紹。本書還包含多則例題以助讀者獲致熱力學的深切瞭解，且在各章之末慎列與主題有關的習題，使讀者對疑難問題日有進境。

我們很想廣泛涵蓋古典熱力學的基本主題，但確信本書對研究熱力學應用各專業人員，以及研究有關材料學（materials）、表面現象（surface phenomena）、電漿（plasma）、及冷凍學（cryogenics）等更高等熱力學論題人員，提供適當的準備工作。我們亦知道多數大專院校所有科系均提供熱力學的初淺簡介課程，而我們試圖包涵各科系可能希望在這課程中所包括的那些主題。不過，由於專業課程在預先不可缺少的特定目標、期限、以及學生背景等方面的適當變動，因此在取材上，尤其是最後幾章，我們所編排的教材有相當的伸縮性。

全書均求保持工程上的看法，特別是例題與習題的選題方面。較

第一版主要改進之一就是習題。雖仍保留若干原題，但大多都是新擬或已作重大修訂的。在第一章中就介紹了許多熱力學的應用，而這些都作為求解各種問題的基礎。因為我們發現多數讀者愛好循環這主題，所以我們保留循環這章次（第九章），並可使讀者深切瞭解熱力學第一及第二定律，而引入工程設計及實用的境地。本書亦包括若干有關熱力學對環境方面的意見及問題。

對不再準備深入研究流體流動的學生們，保留了包括簡介可壓縮流動及經葉片通道流動的第十四章。我們知道本章教材在多種情況下將納入其他課程講授。

本書曾作若干重大修訂。主要的改變是廣泛修訂並簡化第一及第二定律的控容（control volume）發展。修訂意見曾在課堂上講授多次，學生們均發覺較易理解。談到熱力關係，混合氣，化學反應與平衡的第十章至十三章，亦有適當的變更。理想及真實氣體行狀及狀態方程式方面的教材，當涉及混合氣的部份性質及一般行狀時，亦作了廣泛的修訂。並加入第三定律，絕對熵，與燃料電池的新資料，以及相平衡的簡介教材。全書多處的解釋及討論都已加以改進。有關定義、應用、及熱力數據本書普遍採用最新資料。包括內能數值的新蒸汽表已經採用並摘錄於附錄。

關於本書所使用的符號，力求全書始終一貫。但少數情況，曾使用一種用途以上的擬定符號。可是，我們相信文意將澄清這種情況時符號的意義。

為了強調力與質量間的分別，英制單位中的力與質量用力磅（lbf）與質量磅（lbm）來表示。因此如以質量磅/吋²表壓力（不是磅/吋²）及呎³/質量磅表比容（不用立方呎/磅）藉以着重各種參數中牽涉到的基本單位。至於外延性質（extensive properties），

II

小寫字母 (u, h, s) 表每單位質量的性質；大寫字母 (U, H, S) 表全系統的性質；小寫字母上加短劃 ($\bar{u}, \bar{h}, \bar{s}$)，表每單位摩爾的性質；而大寫字母上加短劃 ($\bar{U}, \bar{H}, \bar{S}$)，表部份摩爾的性質。依照這些型式，我們不難知道以 Q 表總傳遞熱， q 表系統每單位質量的傳遞熱， W 表總功， w 表系統每單位質量的功。

再者，我們以在所給量上加點代表通過系統邊界或控制面的流率。因此， $\dot{Q}$ 代表通過系統邊界的傳熱率； $\dot{W}$ ，代表通過系統邊界的功率（即功率 power），而 $\dot{m}$ ，表通過控制面的質量流率（ $\dot{n}$ 是用在質量流率以每單位時間的摩爾表示時）。通過控制面的傳熱率表作 $\dot{Q}_{c.v.}$ 。我們明知這與數學上使用加點符號的習慣不同，因在數學上，加點符號一般是指依時間求得的導數。可是，我們所用的加點符號僅表示通過系統邊界熱與功的流動率，及通過控制面的熱、功、與質量而已。我們相信本書對符號的使用已臻簡明一致了。

我們對密歇根大學及其他各校院的同仁們，給予我們的建議、卓見、及鼓勵深致謝意。高誼隆情實有助於第一及第二版的編撰。其間並承幾位秘書小姐不辭辛勞多方協助，益感銘謝萬千。而學生們的睿智發問亦促使本書一再修訂或更弦易張。最後，由於我們的賢內助及家人們不斷的鼓舞與忍耐，使在編寫期間，得以心不旁騖一氣呵成。

深望本書對面臨職業前途極重大考驗及機緣的學生們，在熱力學的有效教學上，能略盡棉薄。並竭誠歡迎提供高見、批評、及指教。

GORDON J. VAN WYLEN
RICHARD E. SONNTAG

Ann Arbor, January 1972

譯者序

際此能源危機日益嚴重，世界各科學先進國家莫不以如何節省能源為研究發展之主題。而熱力學一科為製造各種利用能源機械之基本學科，亦為近代工程人員必須研習之主要課題。世界各國及我國各大專院校工程科系均將熱力學列為必修課程。因此，歐美各國對該項課程用書之編著日新月異，年有改進。唯我國大專院校所用教本，取材失之陳舊，雖原理方面尚能符合，但應用時輒有今昔不同之感，必須採用歐美最新教材，方能迎頭趕上。

本書係美國密西根大學 (University of Michigan) 機械工程系 Gordon J. Van Wylen 與 Richard E. Sonntag 二位教授所合編，內容豐富，取材新穎，且例題及習題多方兼顧，足為修習熱力學讀者們之寶典。本書以古典熱力學為主，但亦涉及普通熱力學之一般問題，故適用為我國大專院校工程科系熱力學或熱工學課程之教本，且可作研究院所深入研究熱力學讀者們之用書。原書文筆細膩，深入淺出，實為不可多得之佳構。全書譯文，力求通暢達意，名詞術語，悉依教育部頒訂之機械工程名詞；間有字義變更，或新用名詞，亦按其意義，另行擬訂，務使文意相符，適合原意。惟本書篇幅過多，特分列上下二冊，以便閱讀。又我國與美國學制不盡相同，教學者可酌情取捨，以應需要。本書作者另有基本統計熱力學 (Fundamentals of Statistical Thermodynamics) 之專著，如有機會，當另行逐譯，以饗讀者。

譯者才疏學淺，本書譯述，難免疏漏舛誤之處，尚祈學界先進及

讀者諸君不吝指正。本書之完成，承東華書局卓董事長及徐副總編輯全力支持，併此致謝。

張以忠 謹識

六十五年秋亡妻國新逝世三週年

基本古典熱力學

上冊 目次

第一章	引 言	1
1.1	簡單蒸汽動力廠	1
1.2	燃料電池	7
1.3	汽壓縮冷凍循環	10
1.4	熱電式冷凍機	12
1.5	空氣分離裝置	14
1.6	化學火箭引擎	16
第二章	觀念與定義	18
2.1	熱力系統與控容	18
2.2	巨觀及微觀觀點	20
2.3	物質的性質與狀態	21
2.4	過程與循環	23
2.5	質量、長度、時間、及力的單位	24
2.6	比 容	32
2.7	壓 力	33
2.8	溫度的對等性	35
2.9	熱力學第零定律	36

2.10	溫 標	37
2.11	國際實用溫標	38
第三章	純質的性質	43
3.1	純 質	43
3.2	在純質內的汽相-液相-固相平衡	44
3.3	純質的獨立性質	50
3.4	單純可壓縮物質的汽相狀態方程式	52
3.5	熱力性質表	57
3.6	熱力面	61
第四章	功與熱	72
4.1	功的定義	72
4.2	功的單位	74
4.3	似平衡過程中一單純可壓縮系統在移動邊界處所作 的功	76
4.4	牽涉在移動邊界上作功的一些其他系統	82
4.5	涉及其他模式系統的功	84
4.6	關於功的一些結論摘要	86
4.7	熱的定義	89
4.8	熱的單位	90
4.9	熱與功的比較	91
第五章	熱力學第一定律	100
5.1	經歷一循環系統的熱力學第一定律	100
5.2	一系統狀態變化時與熱力學第一定律的關係	102

5.3	內能——一種熱力性質	108
5.4	熱力性質烓	112
5.5	定容及定壓比熱	116
5.6	理想氣體的內能、烓、及比熱	118
5.7	第一定律用作時率方程式	126
5.8	質量守恒	127
5.9	質量守恒與控容	129
5.10	控容的熱力學第一定律	135
5.11	穩定狀態、穩流過程	141
5.12	<u>焦耳-湯姆遜</u> 係數及節流過程	155
5.13	勻態、勻流過程	157
第六章	熱力學第二定律	194
6.1	熱機與冷凍機	194
6.2	熱力學第二定律	200
6.3	可逆過程	203
6.4	使過程不可逆的因素	204
6.5	<u>卡諾</u> 循環	208
6.6	有關 <u>卡諾</u> 循環效率的兩項定理	211
6.7	熱力溫標	213
第七章	熵	224
7.1	<u>克勞休士</u> 不等律	224
7.2	熵-系統的一種性質	230
7.3	純質的熵	232
7.4	可逆過程時的熵變化	235

7.5	兩項重要的熱力關係	239
7.6	在不可逆過程時-系統的熵變化	241
7.7	虛耗功	243
7.8	熵增加原理	246
7.9	理想氣體的熵變化	250
7.10	理想氣體的可逆多變過程	257
7.11	用於控容的熱力學第二定律	261
7.12	穩定狀態、穩流過程與均勻狀態、勻流過程	266
7.13	可逆穩定狀態、穩流過程	271
7.14	控容的熵增加原理	275
7.15	效 率	276
7.16	關於熵的一般說法	279
第八章	不可逆率及可用率	309
8.1	可逆功	309
8.2	不可逆率	314
8.3	可用率	320
8.4	大氣以外涉及與物體熱傳遞過程的研究	327
8.5	涉及化學反應的過程	333

第一章 引言

Some Introductory Comments

在研讀熱力學課程中，多數例題和習題，都是指發生在蒸汽動力廠、燃料電池、汽壓縮冷凍器、電熱冷却器、火箭引擎、及空氣調節器等裝備的各過程。本章對上述裝置僅概略描述。其理由有二，第一，大多學生對此類裝置緣慳一面，而當對此類裝置及其有關實際過程有所認識時，則習題必能迎刃而解且切合題意。第二，本章提供熱力學的簡介，包括：某些專用名詞的用處（其後各章再詳加闡釋），有關熱力學的若干問題，及因應用熱力學，或至少部份，而得的若干成就。

應該強調的是，熱力學比本章所列舉的牽涉到更多有關的過程。尚有賴鑽研材料學、化學反應、及電漿（plasmas）等。讀者應牢記本章僅對熱力學的主題，提供簡明必需但並非完整的介紹。

1.1 簡單蒸汽動力廠 The Simple Steam Power Plant

簡單蒸汽動力廠圖解如圖 1.1 所示。高壓過熱蒸汽流出汽鍋（boiler），亦稱蒸汽鍋（steam generator），流入渦輪（turbine）。蒸汽在渦輪中膨脹作功，而能使渦輪帶動發電機（electric generator）。低壓蒸汽流出渦輪而流入冷凝器（condenser），蒸汽冷凝而傳熱至冷水。因需大量冷水，故動力廠通常靠近河流或湖泊設置。由於這些熱傳送至河流及湖泊的水中，而導致目前廣泛研討的熱污染問題。當我們研讀熱力學時，將瞭解為何必須傳送這種熱，以及用甚麼方法來減少這種熱。當冷水供應受限制的時候，可用冷却塔。

2 基本古典熱力學

在冷卻塔內，若干冷水蒸發而作為降低水溫使水保持液態之用。

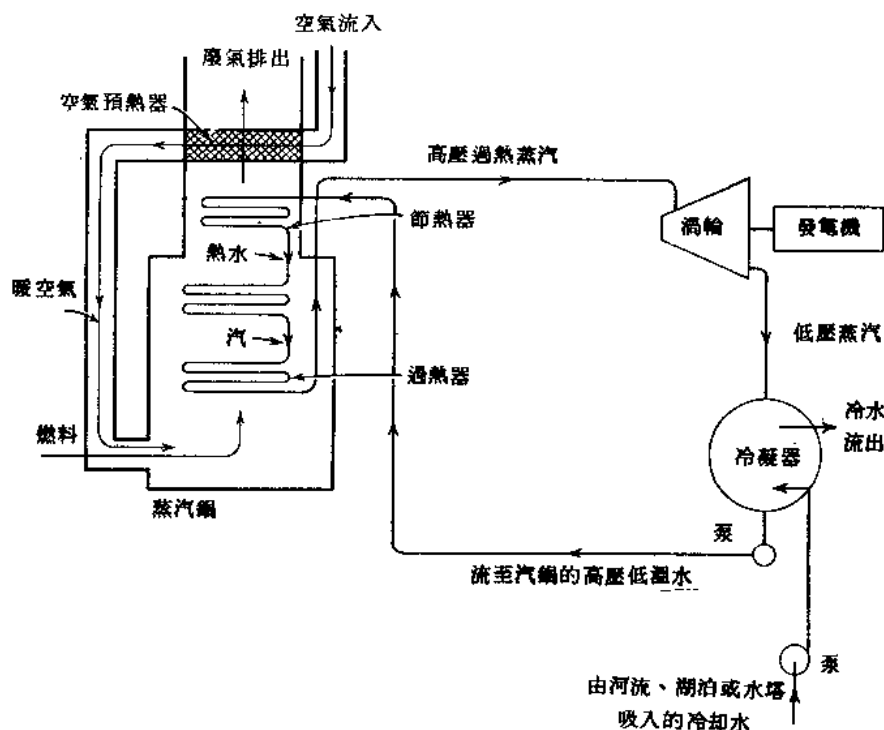


圖 1.1 蒸汽動力廠圖解

流出冷凝器冷凝液的壓力在泵內增加，因而使冷凝液能流進蒸汽鍋。多種蒸汽鍋裏使用一具節熱器 (economizer)。節熱器祇是一種熱交換器 (heat exchanger)，其中熱由燃燒生成物 (正好在流出蒸汽鍋前) 傳到冷凝液，而使冷凝液溫度上升，但不發生蒸發作用。在蒸汽鍋其他部份，熱由燃燒生成物傳到水，而使水蒸發。發生蒸發時的溫度稱為飽和溫度 (saturation temperature)。然後蒸汽流過另一稱為過熱器 (superheater) 的熱交換器，蒸汽溫度在此上升得比飽和溫度高。

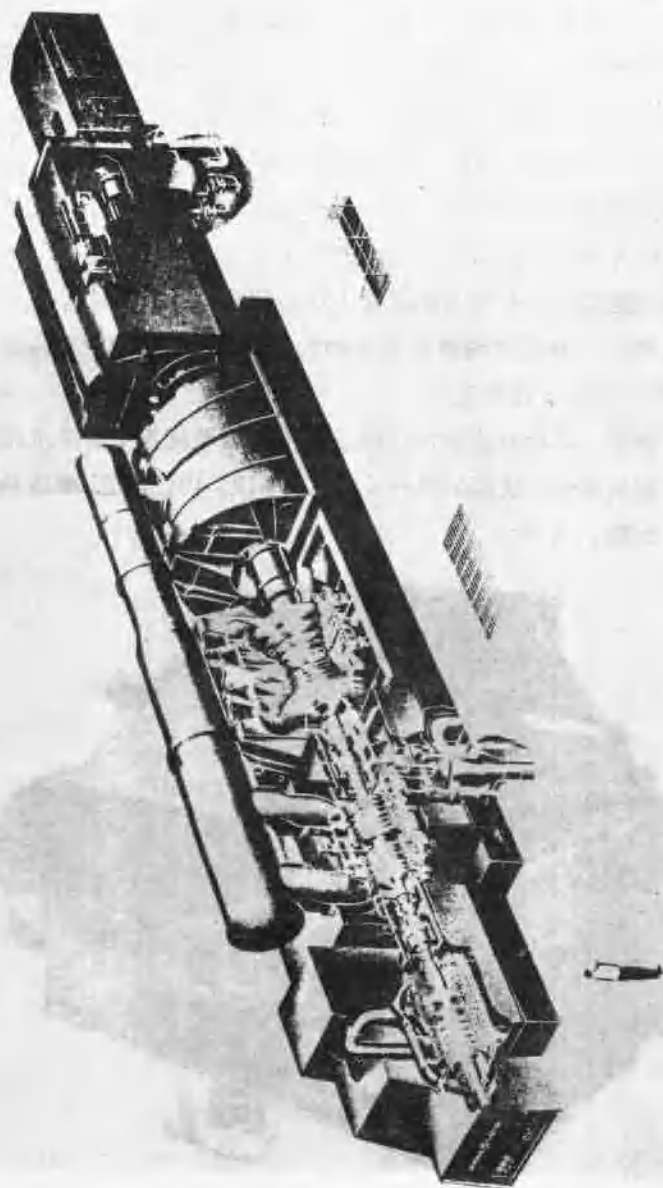


圖 1.2 大型蒸汽輪機（錄自 General Electric Co.）

多數動力廠中用來燃燒的空氣，由流出鍋爐的廢氣（stack gas），傳熱到空氣預熱器（air preheater）內，加以預熱。然後空氣混合燃料——可能是煤、燃油、天然氣、或其他可燃物——使在鍋爐中燃燒。當燃燒生成物通過鍋爐時，熱被傳到過熱器、汽鍋、節熱器的水裏，以及空氣預熱器的空氣裏。從動力廠所得燃燒生成物，排出到大氣，而構成我人目前所面臨的空氣污染問題。

大型動力廠尚具有多項其他裝置，容待以後各章論述之。

圖 1.2 顯示一種蒸汽輪機及所傳動的發電機。蒸汽輪機在容量上從 10 瓩以下，可大至百萬瓩。

圖 1.3 顯示一具冷凝器的剖面圖。蒸汽在頂端流入，當冷水流過管路時，冷凝液凝聚在底部的熱井（hot well）內。大型冷凝器具有許多管路，如圖 1.3 所示。

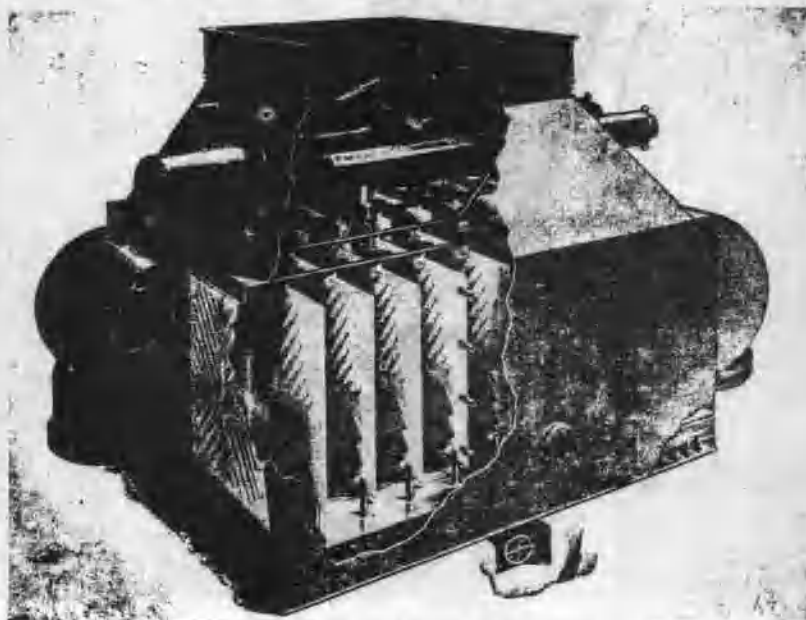


圖 1.3 用於大型動力廠的冷凝器（錄自 Westinghouse Electric Co.）

圖 1.4 顯示一座大型蒸汽鍋。空氣的流動及燃燒生成物均如圖示。冷凝液，亦稱汽鍋進水 (boiler feedwater)，在節熱器進口流入，而過熱蒸汽在過熱器出口流出。

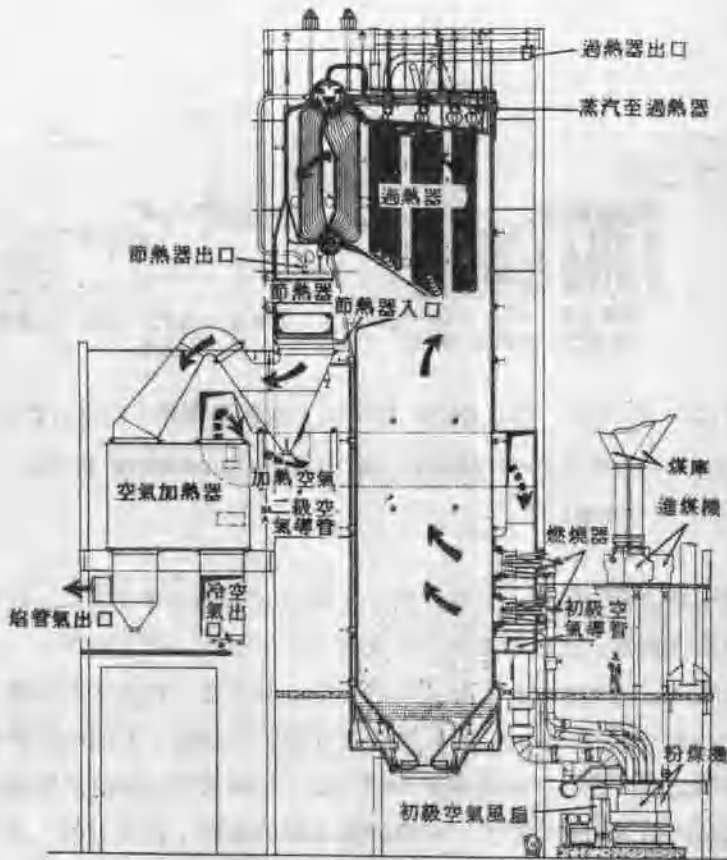


圖 1.4 大型蒸汽鍋 (錄自 Babcock and Wilcox Co.)