

熱力學

上冊

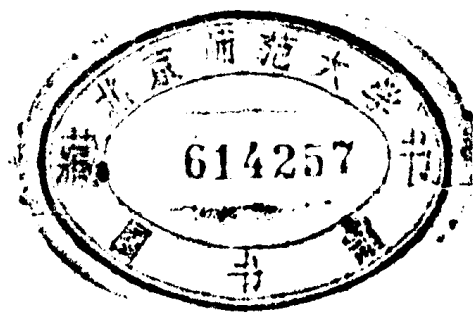
VIRGIL M. FAIRES 著
鍾 毅 章 譯

新興圖書公司

熱 力 學

(上 冊)

VIRGIL M. FAIRES 著
鍾 毅 章 譯



新興圖書公司

熱力學 (上 冊)
鍾 毅 章 譯

出版：新興圖書公司

發行：時代圖書有限公司

香港九龍彌敦道 500 號一樓
3-308884

印刷：慶年柯式印刷公司

版權所有 * 不准翻印 1979年4月版

序

本書為美國海軍研究所機械工程系故教授弗吉爾·費爾思 (Virgil M. Faires) 所著。費爾思教授為科羅拉多大學工程碩士及科學碩士 (M. E., M.S., University of Colorado)，曾任美國海軍研究所機械工程系教授，並曾任教於美國北卡羅林納州立大學 (North Carolina State University)、德州農業機械大學 (Texas A & M University)、佛蒙特大學 (University of Vermont) 及科羅拉多大學。著有機械元件設計 (Design of Machine Elements) 等書，因其著作精湛而獲美國機械工程師協會授予WRW金章 (Worcester Reed Warner Gold Medal)。

本書內容豐富、資料新、圖例多，暢銷將近半個世紀，曾多次再版，尤以最新第五版，作者更將其畢生研究心得及最新資料列入，美國各大學多作為教材使用。書中每章都附有習題詳解，為學習者提供完整的理論與應用之指導，誠為一本完善的教學用書。

譯者以最新第五版為藍本，全書譯文力求接近原義，以流暢淺近之中文表達，盡量做到文意相符，簡明劃一。書內注解，附表等，亦經一一譯述，惟因篇幅過多，特分上、下二冊出版，教學者可酌情取捨，以求適用。

本書譯述，疏漏之處在所難免，誠祈讀者不吝指出，至深感荷。

譯者謹識

1979年4月

熱 力 學 (上 冊)

目 錄

第一章 熱力學之性質·····	1 ~ 20
1-1 導 論·····	1
1-2 工作原質·····	1
1-3 系 統·····	2
1-4 純 質·····	2
1-5 相 ·····	3
1-6 性質及狀態 ·····	3
1-7 單位制·····	4
1-8 重 量·····	5
1-9 質 量·····	5
1-10 比容及密度 ·····	6
1-11 比 重·····	7
1-12 壓力——動力論 ·····	7
1-13 流體壓力·····	10
1-14 壓力計·····	11
1-15 阿基米德原理 ·····	11
1-16 溫度——微觀論點 ·····	12
1-17 溫 標·····	13
1-18 熱力學第零定律 ·····	15
1-19 溫度之測量 ·····	15
1-20 過程及循環 ·····	16
1-21 質量守恒·····	17
1-22 總 論·····	19

第二章 能量及其守恒..... 21 ~ 51

2-1 導 論.....	21
2-2 質量與能量之關係	21
2-3 能量之測量	22
2-4 重力位能.....	22
2-5 機械動能.....	23
2-6 內 能.....	25
2-7 功	26
2-8 對一系統之移動邊界作功	27
2-9 功依路徑而定	29
2-10 例題——不流動過程之功	29
2-11 彈性體之功	29
2-12 表面張力.....	32
2-13 電 功.....	32
2-14 例 題.....	33
2-15 推廣之功方程式	34
2-16 流動功	34
2-17 熱——微觀看法	35
2-18 能量之其他形式	37
2-19 能量守恒.....	38
2-20 封閉系統.....	39
2-21 熱力學第一定律	40
2-22 儲能爲一性質	41
2-23 封閉系統之能量方程式.....	42
2-24 開口系統及穩定流動.....	42
2-25 焓	44
2-26 穩定流動之能量平衡.....	44
2-27 穩定流動方程式之應用.....	46
2-28 系統之邊界	47
2-29 例題——空壓機	49
2-30 第一類之永動	49
2-31 總 論	50

第三章 能量與性質之關係..... 52 ~ 74

	3
3-1 導 論	52
3-2 平 衡	52
3-3 可逆性	53
3-4 定容比熱	56
3-5 定壓比熱	57
3-6 比熱率	58
3-7 理想氣體之比熱	58
3-8 比熱之微觀觀點	58
3-9 比熱變化之計算	62
3-10 熵	62
3-11 例題——熵之變化	65
3-12 平均比熱	65
3-13 從能量方程式所得之性質關係式	65
3-14 經過二種以上邊界之物質	67
3-15 摩擦能	68
3-16 不可壓縮流體流動之能量方程式	69
3-17 經風扇或泵之不可壓縮流動	70
3-18 總 論	72

第四章 理想氣體 75 ~ 92

4-1 導 論	75
4-2 波義耳定律	75
4-3 查理定律	76
4-4 亞佛加德羅定律	76
4-5 狀態方程式	78
4-6 氣體常數	79
4-7 焦耳定律	80
4-8 理想氣體之比熱	81
4-9 例 題	82
4-10 分壓之道爾頓定律	83
4-11 焦耳——湯姆遜實驗	83
4-12 熱力學第三定律	84
4-13 理想氣體之熵	85
4-14 例題——氣體之不可逆混合	87
4-15 液體之近似熵變化	88

4-16	氣體表	88
4-17	例題——氣體表性質	89
4-18	總論	90

第五章 理想氣體之過程及應用 93 ~ 132

5-1	導論	93
5-2	定容過程	93
5-3	例題——不可逆定容	94
5-4	定壓過程	95
5-5	例題——定壓過程	96
5-6	例題——不可逆定壓	97
5-7	以 $\Delta K=0$, $\Delta P=0$, $W=0$ 說明穩定流動	98
5-8	定溫過程	99
5-9	定熵過程	100
5-10	絕熱過程, 可逆及不可逆	102
5-11	發動機及噴口效率以及各種比率	104
5-12	例題——可逆及不可逆絕熱	105
5-13	例題——可變比熱之定熵過程	106
5-14	多變過程	107
5-15	例題, 多變過程——用常數 k 及氣體表之解法	109
5-16	不同之 n 值曲線	110
5-17	例題——能量平衡	111
5-18	氣壓機	112
5-19	自由空氣	114
5-20	容積效率	115
5-21	位移容積	116
5-22	壓縮器效率	117
5-23	例題——空壓機	117
5-24	例題——從效率而得之終態及熵變化	119
5-25	止流性質及馬赫數	119
5-26	例題——止流性質	121
5-27	對具有可變流動開口系統之能量方程式	122
5-28	由定容而得之流動	124
5-29	例題——流出容器之氣體	124
5-30	在控制容積中之熵變化, 在瞬變過程中之純質	126

	5
5-31 例題——熵，不穩流動·····	127
5-32 總 論·····	129
第六章 循 環·····	133 ~ 152
6-1 導 論·····	133
6-2 在熱機中之可膨脹流體·····	133
6-3 循環功，熱效率，及用熱率·····	134
6-4 加諾循環·····	135
6-5 熱力學之溫度·····	137
6-6 用理想氣體之加諾循環·····	139
6-7 由 $\int p dV$ 或 $-\int V dp$ 而得之循環功·····	140
6-8 平均有效壓力·····	140
6-9 各種循環之分析·····	141
6-10 例題——加諾循環·····	141
6-11 斯忒林循環·····	143
6-12 艾立遜循環·····	146
6-13 逆行及可逆循環·····	146
6-14 逆行加諾循環·····	147
6-15 例題——循環分析·····	148
6-16 可逆引擎最有效·····	150
6-17 總 論·····	151
第七章 熵及第二定律之推論·····	153 ~ 188
7-1 導 論·····	153
7-2 熱力學第二定律之說明·····	153
7-3 克勞休士不等律·····	154
7-4 從第二定律而得之熵·····	155
7-5 熵產生·····	155
7-6 例題——在系統內熵之產生·····	157
7-7 可用率，封閉系統·····	158
7-8 可用率，穩定流動系統·····	160
7-9 不可逆率·····	161
7-10 封閉系統之不可逆率·····	161
7-11 穩定流動系統之不可逆率·····	163
7-12 熱之可用部份·····	164

7-13	例題——絕熱過程之不可逆率	165
7-14	例題——與溢交換熱之不可逆率	166
7-15	例題——因熱交換而得之不可逆率	167
7-16	有關熵可用率，及不可逆率之一般論述	169
7-17	熵變化，開口系統	170
7-18	例題——機械損失	171
7-19	例題——管路流動之不可逆率	171
7-20	例題——瞬變之熵產生	172
7-21	第二定律分析	173
7-22	赫姆荷茲及吉勃士函數	173
7-23	反應熱	175
7-24	例題——化學反應中之熵變化	176
7-25	例題——化學反應中之熱，熵，及功	177
7-26	平衡之數量考慮	178
7-27	燃料電池	179
7-28	第二定律及或然率	181
7-29	第二類之永動	184
7-30	溢	184
7-31	總 論	185
第八章 純質之二相系統		189 ~ 214
8-1	導 論	189
8-2	定壓之相變	189
8-3	汽 表	191
8-4	例題——過熱蒸汽之內能	193
8-5	壓縮液	193
8-6	例題——受壓縮水焓變之比較	195
8-7	例題——水之絕對熵	195
8-8	液及汽曲線之比較	197
8-9	熱力學面	197
8-10	相 圖	199
8-11	相 律	199
8-12	汽之過程	200
8-13	定壓過程	200
8-14	定容過程	201

8-15	絕熱過程，純質	202
8-16	例題——定熵過程	204
8-17	例題——不可逆絕熱	205
8-18	定溫過程	206
8-19	多變過程	206
8-20	莫里爾圖	207
8-21	例題——管路之損失	209
8-22	例題——管路之損失（續）	210
8-23	例題——瞬變流動	211
8-24	例題——瞬變流動	212
8-25	總 論	214
第九章	氣體與汽之混合氣	217 ~ 239
9-1	導 論	217
9-2	混合氣之描述	217
9-3	例 題	219
9-4	混合氣之性質	220
9-5	氣體與受相變原質之混合氣	222
9-6	露 點	222
9-7	相對濕度	223
9-8	濕度比	223
9-9	絕熱飽和過程	224
9-10	濕球溫度	225
9-11	濕度圖	226
9-12	低壓時過熱汽之焓與熵	226
9-13	例題——大氣空氣之性質	227
9-14	氣汽混合氣之焓，內能，及總熱	229
9-15	例 題	230
9-16	空氣流注以外之混合氣	230
9-17	例題——燃料·空氣混合氣	230
9-18	例題——空氣調節過程	232
9-19	例題——定容過程	234
9-20	混合流注	236
9-21	總 論	237

第十章 不完全氣體	240 ~ 257
10-1 導 論	240
10-2 狀態方程式	240
10-3 范德瓦方程式	241
10-4 性質之狀態方程式及能量變化之利用	243
10-5 對比座標及壓縮性因數	244
10-6 通用之壓縮性圖	245
10-7 例題——已知容積	247
10-8 通用之狀態方程式	247
10-9 例 題	248
10-10 焓 差	249
10-11 熵 差	250
10-12 例題——等溫過程	251
10-13 例題——節流過程	252
10-14 例題——等熵過程	253
10-15 總 論	254
參考資料	258
附錄 B 原質之性質	265
附表 B1 —— B38	267 ~ 312
符 號	313
公認之國際字首	317
縮 寫	318

第一章 熱力學之性質

1-1 導 論

熱力學乃物理科學之支脈，討論能量之各種現象以及物質之相關性質，尤以熱與其他形式之能量相互間之轉變之各種定律為要。此種日常所見之轉變實例有：熱轉變為功，電轉變為熱（由於電阻）功轉變為動能，等過程，熱力學涵蓋過廣，致無法將所有主題之現行學理包括於一書中。

本書係假定讀者已熟知目前大專院校工程科系第一年之物理，微積分，化學及力學等課程，並針對多數工程人員最具實用價值之各種原理撰編而成，當討論過各項基本定律與術語，以及按熱力學處理不同物質之方法之後，我們再進展至應用之各章，在這些章節裡不僅深入研究主題，且對特別應用一一予以介紹，多數讀者將會發現，某些應用對自己更饒興趣。

古典熱力學（classical thermodynamics）擷取巨觀（macroscopic）或大尺度觀點，而非微觀（microscopic）。從微觀觀點之發展，晚近之成就，稱統計熱力學（statistical thermodynamics）或統計力學（statistical mechanics）。此種方法觀察各個分子及其內部結構，一如物理學家們早期所關心者，但一般之某些事物則從質方面來觀察亦無不當。在歷史觀點上，科學基於實驗，而其發展，以數學為輔，與物質之結構無關。我們將專注於古典方法；而我們的發展將涉及對感興趣之一些歷史進步之預測之範圍，正如本書所述。

除各章節當時之需要外，符號及縮寫字均註明於扉頁內。

1-2 工作原質

熱機產生動力必涉及工作原質（working substance），為儲存能量及轉移能量之一種流體，流體指液體，氣體，或汽——受輕微阻力即變形之物質，工作介質之例有：蒸汽輪中之蒸汽，空壓機中之空氣，內燃機中之空氣燃油混合氣，水渦輪中之水，電子發動機中之電子，今後所用原質（substance）一詞，通常即指由分子造成之物；亦可涉及原子（在反應系統中），故除特別註明外，原質一

詞並非意指輻射或電子或其他次原子 (subatomic) 質點。

1-3 系統

系統 (system) 乃某人欲研究之宇宙，原子，銀河系 (galaxy)，物質之一定量，或空間一定容量之一部份^{*}；由固定或活動之假想特定邊界 (boundary) 所包圍之區域。我們在書中分隔一系統區域乃由於便於研究在邊界內，通路中，間或經或從周境通過系統之邊界之能量或物質或兩者所產生之能量轉變。環繞系統之區域稱為周境 (surroundings) 或環境 (environment)。周境包含系統，某些或涉及研究中之特殊系統，如一種熱之來源。在應用力學中之自由物體係基於牛頓運動定律作為分析模式之系統，而熱力學之主要分析模式為能量定律。

系統可以多種方法來解釋；惟為本書之需要，則以兩類區別之，一為封閉系統 (closed system)，係與周境不交換物質者——質量不透過邊界，一為開口系統 (open system)，係有質量之流動透過其邊界者。

1-4 純質

純質 (pure substance) 為保有不變分子結構之單一原質，或為固定成份均勻原質之溶液，每種成份均保有不變之分子結構。^{(1,2)+}因此，純氧之系統為一純質；在氣態之乾燥空氣亦然，惟其多半為固定百分比之氧與氮之溶液。冰 (固態水)，水 (液態)，及水蒸汽之系統可當作一種純質，因所有各部之分子結構皆相同。非純質系統之實例有：油與水之混合物，因彼等不能合成溶液；液化之乾燥空氣與其汽接觸時，因氧及氮之凝結溫度 (沸點) 不同，氧與氮在液態及汽態中之相對百分比不同而將變更液態及氣態中之百分比。又，包含任何化學過程之系統，如燃燒，亦非純質，因在過程前後之分子結構不同。

對所研讀純流體之意義其物態原理寫作：單位質量純流體之任何特殊平衡狀況乃完全由兩種獨立內涵性質 (independent intensive properties) 所定義 (§ 1.6)，設如不受運動，重力，毛細管，電，或磁之影響。換言之，此純質具有

* 科學之日新月異，很自然地會引起涉及新觀念之語義上之困擾——而有時偶與舊觀念相遇。概言之，熱力學之古典科學觀念已有良好之發展，因此多數技術名詞均具公認之意義。我們可能說，恰如愛麗絲奇遇記內矮老頭對愛麗絲所說，“當我使用一個字時，即指我正要選取它——不多也不少。”事實上，我們並不期望故意地再為自己定義任何技術名詞，但如有需要，將提到某些其他現用之定義。我們普遍採取最近似適合我們的用意的現行定義，並給予可追憶之相似觀念及性質之其他技術名詞——亦即，如意義相同之事物具有不同之名詞時，均以現用者為準。

+ 括號內之註數示本書末所列參考資料，這些參考有時用作一種觀念及有時為所用事實資料之認證，或表示較詳細之來源。

二自由度 (degrees of freedom)。

1-5 相

一般而言，純質可存在於三種相之任一種或混合相：固相，液相，及汽或氣相。溶解 (melting) 或熔解 (fusion)，為從固相至液相之相變，反之則為凝固 (freezing)，或固化 (solidifying)。從液相至氣相之相變稱汽化 (vaporization)，而液相說成化汽 (vaporize) (或沸騰)，從汽 (氣相) 至液相為凝結 (condensation)，而在此過程時汽被說成液化 (condensing)。

並非所有原質經過此三種相；有些直接從固相至氣相 (或反之)，此種相變稱昇華 (sublimation)。甚且，多種原質通常在某些情況下當固態加熱可能昇華而經過三種相。例如，一塊冰暴露於溫度在 32°F 以下之大氣即將昇華，如果予以時間，將如水汽 (蒸汽) 般完全地進入大氣，在一個大氣壓下其固態，固體二氧化碳 (乾冰) 因吸熱並冷凍而昇華。

1-6 性質及狀態

欲計算系統或工作介質中所發生之能量變化，必須依稱為性質 (properties) 之描述特性來表明系統之行狀。包括壓力 p ，溫度 T ，密度 ρ ，及比容 v ，之巨觀性質對讀者已耳熟能詳，故而僅作簡短之討論。

性質可分為內涵或外延，內涵性質與大小無關；例如，溫度，壓力，密度，及電壓，外延性質 (extensive properties) 有賴於系統之大小而定，且為總值如總容積及總內能，比性質 (specific properties) 為對單位質量而言；如比容 (specific volume) 及比內能 (specific internal energy)，均定義為內涵。因此，按一般想法舉例而言，應注意到容積乃外延性質而溫度及壓力顯然為內涵。

當論及純質之狀態 (state) 時，乃假定整個系統之內涵性質一致；此狀態由任何兩種獨立性質之某一值所定，原質之所有其他熱力學性質具有某種特定值，不論原質之某種質量是否在此特定巨觀狀態中，除 p ， v ，及 T 外，熱力學性質之實例有：內能，焓 (enthalpy)，及熵 (entropy) (皆於後章討論之)，其他一般之系統性質包括：速度，加速度，慣性力矩，電荷，傳導率 (熱及電)，電動勢 (emf)，應力，黏滯力，反射率，質子數，等等。不論對純質之某一質量發生何事，如加壓，加熱，膨脹，或冷却，如其回復至原定之性質，則其他熱力學性質亦分別回復至與其原值相同之值，參看圖 1-1。

現在考慮一下獨立性質之條件，就我們所知，密度為比容之倒數；則此等性質並非相互無關，當液體沸騰或凍結時，二相混合物之壓力及溫度不獨立；對某一原質其沸騰溫度為某值，係依壓力值而定。

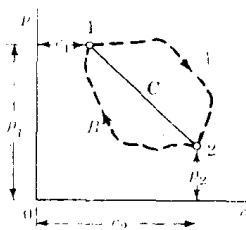


圖 1-1 熱力學 $p-v$ 面，一原質之物態以點 1 表之，溫度為 T_1 。如壓力及容積以路徑 1-A-2-B-1 所示而變，回至其初值，溫度亦回至 T_1 值。

由數學，知二座標圖（ x 及 y 值）標示（或指明）一已知平面（ $x-y$ 面）上一已知點，三座標圖 x, y, z 則可標示空間之一點，我們視性質作為座標圖空間上標示之一點（解作狀態）而可畫出此點，或狀態點之任何數，投影於各面上；例如，在壓力——容積面上，如圖 1-1，在溫度——熵面上，等。任何三種性質即可用作指明某熱力學空間之一點，如手中有足夠資料，可構成任何純質平衡狀態之熱力面，例如用 p, v, T 或 u, T, p ，然後以已知之熱力面，或為 p, v, T 面，三種性質中之任何二者可用來標示狀態點。第三種性質現可沿其軸上之標度讀出（參看圖 8-6 及 8-7）。由於特性之描述，性質公認為點函數（point functions）。因空間數字不易畫出，多以二座標圖標明純質之狀態，使我們容易在適當之熱力平面圖上畫出此種狀態。

1-7 單位制

牛頓（Isaac Newton）* 對一物體之加速度與施於其上之合力成正比而與其質量成反比之效應曾作了重要的論述， $a = CF/m$ ；多數單位制均以此為基準。我們以比例常數 C 為一作為單位之一貫制（consistent system）；在方程式中， $F = ma$ ，（此符號在附錄 A 中予以詳述，讀者應注意查考）在下式

$$(1-1A) \quad F = ma,$$

力是依質量而定義而質量依力而定義。加速度具有每單位時間平方中之長度之因次， L/τ^2 。回想因次（dimension）乃一種通用術語之基本量；因此，長度 L 亦為容積 L^3 之基本量。單位為依定義量而表示之因次特性。一呎之長度已精確地定出（依國際米 = 由電激動氫 86 之 1,650,763.73 個波長）。定義時間之單位為

* 牛頓爵士（1642-1727）常被認為是列代最偉大之科學家。生於農家，小學時即設計水鐘及日晷而顯示其機械才能，劍橋畢業後二年，曾發明二項定理，並創微積分，做光學實驗，研究重力，其成就之榮榮大者有：反射望遠鏡，日光之混合性，光學，溫度計之發明（此在熱力學第一定律發明之前），及最著名的——名噪一時之引力定律，自認其科學成就歸功於勤奮及深思。

秒，分，時，日，等，在英制單位中，加速度之單位量常取每秒每秒呎（呎/秒²，或 fps^2 ）。

依（1-1A）式我們可以這樣說，一單位力為在單位質量之物體中產生一單位之加速度，依據此定義，可按一組單位必須一貫之符號決定用語之單位，如某人決定以磅來度量質量而以 fps^2 度量 a ，則在一貫制中之力，用（1-1A）依質量來定義，必為磅達（poundals）·（ $= \text{lb}_m \cdot \text{ft}/\text{sec}^2$ ）然而，工程師慣於用磅作為力之單位。在此情形下，一貫地用 fps^2 表 a ，依力來定義質量必為斯勒（slugs）（ $= \text{lb}_f \cdot \text{sec}^2/\text{ft}$ ）。以磅表力及以呎表長度，能量之一貫單位為呎-磅，此乃從力學之功之觀念而得者。

當然，如一方程式中之每一項包含相同單位，並不論所用之單位為何，因對多種用途呎-磅乃能量相當小之量，在英制中傳統上用英熱單位（Btu's），約為 778 呎-磅/英熱單位。因此，在熱力學之應用上，將不斷地考慮轉換常數（附表 B 38）。* 然而，在應用轉換常數之方式已解釋之後，將強調不用這些常數而寫出基本式，實為需要讀者不斷警覺之原則，須對每一答案列明單位。

1-8 重 量

一物體之重量（weight）意指對該物體之重力（force of gravity） F_g ；可依彈簧秤而決定之，重力產生力場（force field）而場內之物體易受物體力（body force）。因月球之力場較地球為小〔參看（1-2）式〕，則物體之重量亦小。依照牛頓定律（1-1A）某一物體之加速度與施於其上之合力成正比，乃寫成 $F_g/g = F/a$ ，此處 g 為由 F_g 單獨產生之加速度（真空中），而 a 為由其他力 F 產生之加速度，如月球之重力場之類似符號為 F_m 及 g_m ，則 $F_g/g = F_m/g_m$ 。

不論在任何地方，我們均設由重力場所產生之加速度以 g 表之，則由牛頓方程式（1-1A）所說之重力為

$$(1-1B) \quad F_g = mg.$$

其中之單位必須一致。因此，如力以磅表之，當 g 以每秒每秒呎表示時質量以斯勒表之。

1-9 質 量

物體之質量（mass）乃其中物質之絕對量，當該質量之速率較光速為小時對某一質量其量不變（無相對效應）。物質之量適用牛頓之萬有引力定律（New-

* 附錄 B 包括若干為解答習題所需之表及圖。此等皆以附表彙列，如附表 B 1，附表 B 2，等，依本書之次序排列及編號。