

科學圖書大庫

工程熱力學

編著者 喬正寬

徐氏基金會出版
世界圖書出版公司 重印

工程熱力學

編著者 喬正寬

徐氏基金會出版

光

司重印

序

(一) 本書是符合教育部專科學校課程標準的。雖然編寫期間，未曾見到部頒該項標準，但行將付印時，與徐氏基金會所存者核對，完全相符，僅本書取材較多耳。在此特別向馬經理成驥致謝。

(二) 本書因係習熱力學者，必須了解的知識，且敘述平易，說理明確，故大學理工科學生對該課程之疑難，亦可閱讀本書，必迎刃而解。學者以本書為根柢，進而研究熱力學之高深學問，定得事半功倍之效。

(三) 多數理工科課程難處在數學，熱力學難處却在觀念之了解。因此本書對熱力學上各觀念之闡釋，特別加重，以求解決此一困難。釋義如有不清楚，以及任何錯誤，尚請先進君子，不吝指教，使能更改，而嘉惠學子，特先致謝意。

(四) 本書未附習題，學習至一適當段落後，請教師命題給學生習作。

(五) 本書承徐氏基金會協助出版，特此致謝。

喬正寬

1989年7月於台北

符號對照

- A 面積 (area)
- C_v 常積比熱 (specific heat at constant volume)
- C_p 常壓比熱 (specific heat at constant pressure)
- C 固體或液體之比熱, $C = C_v = C_p$
- c 光速 (speed of light)
- c_v 開系 (control volume)
- \bar{C}_p 莫耳常壓比熱 (molal specific heat at constant pressure)
- \bar{C}_v 莫耳常積比熱 (molal specific heat at constant volume)
- E 能量 (energy)
- e 每單位質量含有能量 (energy per unit of mass)
- F 力 (force)
- $f(x)$ x 的函數 (function of x)
- g_c 牛頓定律中之常數 (constant in Newton's law,
$$F = \frac{1}{g_c} ma$$
)

g	地心引力加速 (local acceleration of gravity)
G	萬有引力常數 (gravitational field strength)
H	焓 (enthalpy)
h	比焓 (enthalpy per unit mass)
\bar{h}	莫耳比焓 (enthalpy per mole)
k	波茲曼常數 (Boltzmann constant)
k	常壓比熱與常積比熱之比值 (ratio of specific heats C_p / C_v)
KE	動能 (kinetic energy)
L	長度 (length)
m	質量 (mass)
M	分子量 (molecular weight)
n	莫耳數 (number of moles)
p	位能 (potential energy)
P_r	變形壓力 (reduced pressure)
P	壓力 (pressure)
Q	電荷 (charge)
Q	熱能 (amount of energy transfer as heat)
q	每單位質量傳導的熱能 (heat transfer per unit mass)
r	半徑 (radius) 或兩物間距離
r_v	壓縮比
r_p	壓力比
r_c	斷油比

R	某氣體常數 $R = \frac{R}{M}$ (gas constant for a particular gas)
R	氣體共同常數 (universal gas constant)
S	熵 (entropy)
s	比熵 (entropy per unit of mass)
\bar{s}	莫耳比熵 (entropy per mole)
T	溫度 (temperature)
t	時間 (time)
U	內能 (internal energy)
u	比內能 (internal energy per unit mass)
\bar{u}	莫耳比內能 (internal energy per mole)
v	速度 (velocity)
V	體積 (volume)
v	容度或比容 (volume per unit of mass)
v_r	變形容度 (reduced volume)
\bar{v}	莫耳容度 (volume per mole)
w	功 (an amount of energy transfer as work)
\dot{w}	功率 (rate of work)
x	品質 (quality of a two-phase mixture)
Z	壓縮因數 (compressibility factor) , $Z = Pv/RT$
x, y, z	坐標 (coordinates)

目 錄

序	I
符號對照	II
第一章 緒 論	1
1-1 熱力學	1
1-2 定義與觀念	3
1-3 基礎觀念	4
1-4 綜觀觀點與微觀觀點	5
1-5 次元與單位	7
1-6 容度 (specific volume) 或稱比容	13
1-7 壓力 (pressure)	14
1-8 數學範圍	16
第二章 定義與觀念	23
2-1 系統 (system)	23
2-2 理想系統與實際系統 (ideal and actual system)	25
2-3 性質與狀態 (property and state)	26

2-4	平衡 (equilibrium)	29
2-5	過程 (process)	32
2-6	溫度 (temperature)	34
2-7	熱力學零號定理 (the zeroth law of thermodynamics)	35
2-8	溫度的量度	36
第三章 能 量		
3-1	算量與能量	40
3-2	能量不減 (the conservation of energy)	41
3-3	系統的能量	43
3-4	系統之儲存能	44
3-5	系統的轉換能	46
3-6	功的方式 (work modes)	48
3-7	功之一般式	53
3-8	熱 (heat)	54
3-9	功與熱之比較	55
第四章 熱力學第一定理		
4-1	能量守恒定理 (law of conservation of energy)	58
4-2	留量守恒定理 (law of conservation of energy)	59

4-3	閉系能量方程式	60
4-4	周期能量方程式	61
4-5	關於閉系的幾個例題	63
4-6	焓 (enthalpy)	67
4-7	比熱 (specific heat)	69
第五章 簡單物質的性質		72
5-1	簡單物質 (a simple substance or a pure substance)	72
5-2	狀態律 (state postulate)	73
5-3	狀態方程式 (equation of state)	74
5-4	簡單物質三相因、液與汽之平衡狀態	76
5-5	簡單可壓物質的氣體狀態方程式	81
5-6	熱力性質表	87
第六章 閉系能量分析		92
6-1	閉系	92
6-2	閉系的質量恒守定理	93
6-3	閉系的熱力學第一定理	95
6-4	穩流過程 (the steady-flow process)	99
6-5	有關閉系的例題	100
第七章 熵與第二定理		108

7-1	緒論	108
7-2	熵與熱力學第二定理	110
7-3	熱效率	111
7-4	雷諾循環 (carnot cycle)	113
7-5	雷諾定則	113
7-6	雷諾引擎的熱效率	114
7-7	熵的計算	116
7-8	理想氣體熵的改變	119
7-9	理想氣體的可逆多種過程 (reversible polytropic process)	126
7-10	氣體其他 P - V - T 方程式	133
7-11	開系第二定理	133
第八章 動力循環		134
8-1	鄂圖循環 (the Otto cycle)	134
8-2	笛塞爾循環 (the air-standard Diesel cycle)	139
8-3	卜惠登循環 (the air-standard Brayton cycle)	141
8-4	朗肯循環 (the Rankine cycle)	146
8-5	汽法壓縮冷凍循環	149 ~ 151
附 錄		152 ~ 201

1-1 熱力學

熱力學 (thermodynamics) 是一門最重要的工程科學。其實用不祇是在工程範圍，也是物理學、化學以及與生活有關的學科的重要部份。發電廠、汽車引擎、火箭、空調、雷射、太陽能的利用等等之設計應用，最需要了解的知識就是熱力學。

什麼是熱力學？似以熱力學是討論能量 (energy) 與熵 (entropy) 的科學回答較為適當。能量不生不滅為其論述的起點，名曰熱力學第一定理。熵決定過程 (process) 之能否，產生熵的過程可以發生，破壞熵的過程則不可能發生，這就是熱力學第二定理的基礎。由是可以計算在某一定能源 (source) 下能產生最大的機械功。或完成某一任務所需的最少機械功。因此我們又可以比較通俗的話來說：熱力學是討論熱能與機械能以及有關物質性質 (property) 的科學。

熱力學之由來，要追溯到十八世紀湯姆遜 (Benjamin Thom-

2 工程熱力學

pson) 以槍炮管鑽鑿實驗研究熱能與機械功之變換。亦如其他學科，其後經過甚多科學家的實驗與論文的補充，始有熱力學一科。如雷諾 (Sadi Carnot) 之可逆 (reversible) 引擎原理，焦耳 (James Prescott Joule) 之熱功當量，寇爾芬 (Lord Kelvin) 之絕對溫度，柯西斯 (Clausius) 之第一與第二定理的敘述。時至今日，熱力學不祇是工程技術人員應了解之知識，也是物理學家、化學家必須研究的課程。

汽車引擎是將化學能轉變為熱能，再將熱能變為機械功的設備。未變為機械功的熱能由排出的廢氣與冷却水帶走。由熱力學的分析可以預知熱能帶走了多少。多少功需要若干燃料與空氣。如何使熱能轉變為更多的功是熱力學已求得的成果。

發電廠的功能，就是將熱能變為電能。利用水蒸汽轉動渦輪，渦輪帶動發電機發生電力。裝備簡單的化石燃料電廠僅能將 25 % 的能量變為電能。應用熱力學原理將各部加以研究後，現可將 40 % 的熱能變為電能。目前研究的電廠，如果能照熱力學上分析履行，可將 55 % 熱能變為電能。

一九七三年所謂能源危機發生後，熱力學在工業學校格外受到重視。因石油價格提高，其他能源價格相對地低落而被採用；更引起開發新能源；太陽能、風力、地熱、融合反應 (fusion reaction) 等的積極研究，冀能謀得能源問題之永久解決，這些能源工程無一不需用熱力學。抑有進者，發展一些法則，如何使用最少能源完成某一任務，應是迫切需要的任務；此項工作惟有對熱力學有深刻研究與了解者始能勝任。

1-2 定義與觀念

研究任何科學必須了解一些有關定義 (definition) 以及一些常規 (convention)。這些定義與常規之充分了解，學習上才不至於發生誤解。正確的定義繫於正確之觀念 (concept)。對一新問題的細節不能作有效分析時，就是由於基本觀念未能充分明瞭，定義的意思因之含糊不清了。

定義可分為運算的 (operational) 與非運算的 (Nonoperational)。運算定義是指示量度所規定量的方法，或對指定事物的如何試驗；非運算定義是為運算定義的意義說明而已。如動能 (Kinetic energy) 就非運算定義而言：僅謂一物體因運動而發生的能量；就運算定義而言：一物體之動能由 $mv^2/2$ 式計算，式中 m 表物體之質量， v 表物體移動之速度。能量、質量、及速度等名詞應單獨另予說明，在此必須接受為熟悉字彙。

物質界是複雜的，理論的分析上，若包括每一細節是無法做到，所以科學研究，不得不建立所謂模式 (model)；模式者是將實際東西簡化，將影響不大者省去，成為可以數學方法處理的東西，不過所得的結論自然也只會實用在構成模式條件內。譬如多數日常機械變化，僅用牛頓力學 (Newtonian mechanics) 解之即可，考慮相對性影響 (relativistic effect) 是不必要的，所以牛頓定理解牛頓式時，有相對性因素時則需用愛因斯坦 (Einstein) 力學了。

4 工程熱力學

有些模式可以表之於定義，有些模式必須表之為數學方程式或定理，所以模式是探討物理理論的初步階段。當有新知識或新見解發現時，為有使用方便，已建立之基本定理往往有變更的必要。例如力學是由德國天文學家克卜勒（Kepler）觀察天體運行發展而來的。牛頓歸納所有觀察，提出更基本的定理，於是克卜勒的規則便成為牛頓定理中一種情形。近來牛頓力學又成為愛因斯坦力學的特例了。在熱力學範圍內也是同樣如此發展而來的。

甚多科學課程，其中所用觀念與日常生活經驗者相近似，研習時困難處在於數學。熱力學恰恰相反，所用數學尚屬簡要，觀念有時不易抓住，因此分析熱力學問題時，錯誤往往起自觀念未能清晰，所用方法隨之不當了。

1-3 基礎觀念

要了解一個新觀念或定義，自然要從已熟悉的有關觀念開始。牛頓力學是所有力學的基礎。在學習熱力學以前，一定讀過普通物理學，所以牛頓第二定理我們視為是熟悉的關係。事實上絕大多數熱力學問題都能以牛頓力學討論，不必考慮相對性影響。

$$F = \frac{1}{g_c} \frac{d}{dt} (mv) \dots\dots\dots (1-1)$$

式中作用於物體的力（force） F ，次元常數（dimensional constant） g_c ，時間（time） t ，質量（mass） m ，及速度（velocity） v ，雖然在此熟悉關係中，應為熟悉名詞，現仍略加說明如

下：

力：力是科學課程裏最基本的觀念。舉凡物體有受推或拉，或感有斥或吸的現象時，就有力的意義存焉，因此以力引起的公式甚多，所以若力成爲一個可量度的量，其他有關觀念亦隨之可量度了，因一個觀念要至可量度的程度，始有其價值。一物體不受外力時，則必保持原狀；一力作用於一物體時，則物體必以相等且相反之力還給之，此係牛頓第一及第三定理，亦爲力觀念的一部份意義。力因有此意義，就能有正確的量度，故力的觀念是完備無疑的。

質量：物體受不平衡力作用時，其速度不會突然改變，而是視力之大小慢慢加速的。欲知加速度之大小，必先知物體質量爲多少，所以質量可視爲對速度改變的受阻特性，即所謂慣性(inertia)。質量自當有其絕對性的實質存在。未具有光速以上速度是不變其大小的(相對影響)。施力於物體，在力方向上產生加速度，其大小與力成正比，與質量成反比，是牛頓第二定理(方程式 1-1)。力既能正確量度，故由是可知質量亦可正確量度。與物質不滅定理也是相符的。

次元常數之值由式中其他次元所選擇之單位而定，速度由長度與時間兩次元組成，均待下面說明。

1-4 綜觀觀點與微觀觀點

研究物質(matter)之變化情形，不外利用兩個觀點：綜觀

觀點 (macroscopic point of view) 或微觀觀點 (microscopic point of view)。譬如今以微觀觀點討論在一大氣壓與常溫下 1 立方公分 (cm^3) 的單原子氣體 (monatomic gas)。若以每個原子的位置與速度定其情形，進而研究其變化，每個原子必須有三位置坐標，及三個沿坐標的分速度，所寫下的位置與分速度表一定很長；還可能無法寫下來，因原子不停的在運動，就是寫下來了，至少有 6×10^{25} 個方程式。方程式之多，再大的電腦也無希望擔任運算；為避免這種煩惱，所以用綜觀觀點減少方程與變數數目，以便於研究。電磁學、固體力學、流體力學、熱傳學等都是以綜觀觀點討論。熱力學以綜觀觀點討論的，稱古典熱力學 (classical thermodynamics)；以微觀觀點，更正確一點說，以細微與統計觀點討論的，稱統計熱力學 (Statistical thermodynamics)。本書屬前者範圍。

綜觀觀點的意義是：所拾取的論據是用感官察覺並以儀器量度的，所以所得數值是欲討論東西所有分子活動的時間平均數。例如壓力是分子碰壁動量改變的結果。從綜觀觀點而言，吾人不管各個分子的作用，僅取其某一單位面積上的平均力，以壓力錶量得，所以這種觀察無須假定所討論的物質本質如何。

古典熱力學是相當簡單的。只要利用很少幾個觀念，就可得出許多定理。這些定理較其他物理學定理，語言上更明白，意義上更能表現人類的智慧，因為從綜觀觀點而來的情形下，可以直覺地了解，所用變數少，數學部份簡要，並且物質本性上有新知識時，定理也不會有所改變。不過有些關係，在此範圍內，無法

解釋，例如簡單物質等壓比熱 (Specific heat at constant pressure) 與等容比熱 (Specific heat at constant volume) 之比值不會小於 1，這事實吾人只有接受與利用，正如不了解磁力、重力一樣，只知道其作用與定理。

微觀觀點是利用統計學 (statistics) 及或然率 (probability) 將需要知道為數巨萬質點情況減少至為工程上應用幾個重要數據。所用數學自然較為複雜。不過這是值得而有代價的。以統計熱力學可以解釋物質的綜合現象。在有些應用上，如高溫電漿 (plasma) 必須用統計熱力學研究，古典熱力學已不再適用。

連續 (continuum) 觀念跟綜觀觀點是不可分的。研討問題時，常將欲論者設想為一質點，所假設之質點，大可指星球，小可僅為分子或原子；使用綜觀觀點時，是假定將所討論者含有許多質點。當設想有許多質點時，並須含有連續意義。所謂連續，是說所討論物體之組成質點，散布在一定空間，不若假定為一質點，僅限於一點，所以許多質點時，除像一質點有質量、能量、動量性質外，尚有體積 (volume)、密度 (density)、溫度 (temperature) 等性質。

1-5 次元與單位

一個觀念要能量度，始有價值，已於上述。量度法則分兩部份，一曰次元 (dimension)，一曰單位 (unit)。分述於下。

次元是指可量度的物理量。最熟悉的次元是：時間、長度、