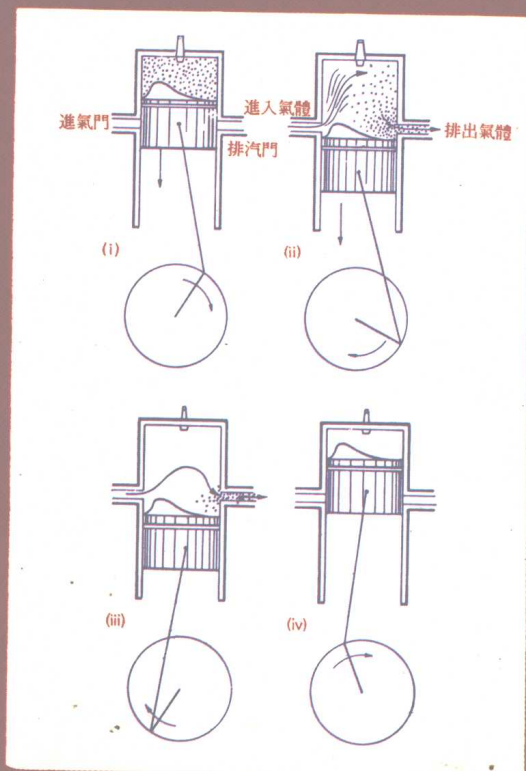


熱 機 學

原著者：F. Metcalfe

譯述者：莊萬春 莊添安

修訂版



科技圖書股份有限公司

行政院新聞局登記證 局版台業字第 1123 號

版權所有 • 翻印必究

熱 機 學

修訂版

原著者：F. Metcalfe

譯述者：莊萬春 莊添安

發行人：趙 國 華

發行者：科技圖書股份有限公司

台北市重慶南路一段 49 號四樓之 1

電 話：3118308 • 3118794

郵政劃撥帳號 0015697-3

80 年 3 月 7 版

特價新台幣 130 元

編輯者言

熱機學 (heat engine) 一課，原為習機械工程者最基本課程之一。在第二次世界大戰結束以後，由於新的熱力學進展極速，對熱與功的觀念改為能量的變化遂產生鉅大改變，例如當年流行世界的往復式蒸汽機早被衝動反作用式輪機所取代。因而新的熱機教科書內容，自應順着潮流而作澈底修訂。本書係根據 1980 年出版的最新改訂版本譯出，全部採用國際制單位，將一些落伍的老調，以及已失時效的舊例題與不合時宜的老習題全部換新，使本課程名稱雖舊，內容實新，全書共分十章，可供機械科系一學期三學分使用。對目前久未修改教科書內容的情況下，對一般學生而言不無少補也。

本書原名為 Heat engines and applied heat. 著作者為 Metcalfe-
為 Ipswich Civil College 校長。譯述者為莊萬春及莊添安碩士

。

科技圖書公司編輯部識

使用符號說明

C	熱含量	w	重量
c	比熱常數	X	相對速度
H	焓	x	乾度，從基線的垂直距離
h	比焓，熱傳遞係數	α	噴嘴傾斜角
k	熱傳導係數	γ	比熱比， c_p/c_v
L	衝程長度	ϵ	總放射率
l	比潛熱	η	效率
M	分子量	θ	實驗溫度，旋轉葉片角度
m	質量	λ	波長
$\dot{m}$	質流	ρ	密度
N	rev/s	σ	史蒂芬 - 波茲曼常數
n	點火衝程/s	ω	角速度
p	壓力		
p_o	錶壓力		
p_{at}	大氣壓力		
p_m	平均有效壓力		
Q	熱量		
$\dot{Q}$	熱流率，亦即，每單位時間的熱量		
R	氣體特性常數，切斷比（蒸汽機）		
r	體積壓縮比		
T	絕對溫度		
t	實驗溫度		
U	內能		
u	比內能，旋轉葉片週速率		
V	體積		
v	比容，速度		
W	功		

縮寫

大氣壓力	atm
直流電流	d.c
克仟莫爾	kmol
制動功率	b.p.
指示功率	i.p.
標準溫度與壓力	s.t.p.
絕對	abs.

下標

f	飽和液的性質
g	飽和蒸氣的性質
fg	在常壓下從飽和液到飽和蒸氣的相改變
sup	過熱蒸氣的性質

國際制 (SI) 單位簡介

SI 單位基於下列六個基本單位：

量	單 位	符號
長 度	公 尺	m
質 量	公 斤	kg
時 間	秒	s
電 流	安 培	A
溫 度	凱氏溫度	K
光 度	燭 光	cd

其他的導出單位間的關係如下：

牛頓 (newton, N) 為力的單位。1N 為 1 kg 的質量以 1m/s^2 的加速度運動。

亦即，
$$1\text{N} = 1\text{kg} \times 1\text{m/s}^2 = 1\text{kgm/s}^2$$

(1 kg 的質量，自由落下的加速度為 9.81m/s^2 。故由 1 kg 質量所產生的重力，為 9.81 N)。

力的單位，可用來定義功的單位。因功為力乘以在力作用線上所移動的距離。1N × 1m，稱為一焦耳 (joule, J)，作為功的單位。

亦即，
$$1\text{J} = 1\text{N} \times 1\text{m}$$

熱力學第一定律可寫成：系統做的功，加上系統所增加的內能，等於對系統所加的熱。故功、能量及熱，均需有適當的單位。

功率，被定義為作功的率，在 SI 中以每秒焦耳 (J/s)，稱為瓦特 (watt, W)。

$$1\text{W} = 1\text{J/S} = 1\text{Nm/s}.$$

電流的基本單位為安培，與所導出的功率單位、瓦特，可導出電位 (electric potential) 的定義；伏特 (Volt) 為一定電流 1 安培的導線，在其兩點間驅散功率 1 瓦特時的電位。

亦即， $1\text{ W} = 1\text{ A} \times 1\text{ V}$

基本與導出單位的倍數關係為：

$$1\text{ kilometer (km)} = 1000\text{ meters (m)}$$

$$1\text{ kilonewton (kN)} = 1000\text{ newtons (N)}$$

$$1\text{ kilowatt (kW)} = 1000\text{ watts (W)}$$

一般選擇時應注意的三點為：

- (1) 基本單位的倍數與約數，限於 10^3 間隔。
- (2) 避免重複字首。
- (3) 在基本或導出單位，其分母應使用複合單位。（如 MN/m^2 宜用 N/mm^2 。）

單位倍數的因數	字 首	符 號
十億 = 10^9	giga	G
百萬 = 10^6	mega	M
仟 = 10^3	kilo	k
毫 = 10^{-3}	milli	m
微 = 10^{-6}	micro	μ
奈 = 10^{-9}	nano	n

注意：很不幸，對 kg 的倍數，並無新名稱。很自然，對 1 kg 的 1000 倍為百萬 g ，亦即 megagramme。

目 錄

編輯者言

目 錄

使用符號說明

國際制 (SI) 單位簡介

第一章 單位與定義

1.1	能量	1
1.2	系統	2
1.3	能量、熱與功	2
1.4	系統的性質	3
1.5	溫度	4
1.6	壓力	5
1.7	標準狀態與正常狀態	7
1.8	比容	8
1.9	流動與非流動過程	8
1.10	運轉的循環	9
1.11	比熱容量	10
1.12	引擎機制	11
1.13	燃料的卡路里值	12
1.14	引擎的油消耗量	12
1.15	制動功率、指示功率與機械效率	12
1.16	熱效率	13
1.17	分子量	14
1.18	能量不滅：熱力學第一定律	15
1.19	熱的傳遞	18

1.20 習題	19
---------------	----

第二章 氣體定律

2.1 波義耳定律	20
2.2 查理定律	20
2.3 氣體特性方程式	21
2.4 氣體特性常數	21
2.5 亞佛加德羅假說	23
2.6 仟克莫耳體積	25
2.7 氣體的內能	26
2.8 氣體定壓比熱 C_p 與定容比熱 C_v 的關係	28
2.9 習題	29

第三章 內燃機引擎的運轉與試驗

3.1 四衝程循環	32
3.2 二衝程循環	35
3.3 二衝程與四衝程循環引擎比較	36
3.4 引擎指示器	37
3.5 汽油引擎	38
3.6 狄賽爾引擎	42
3.7 制動功率的量測	45
3.8 指示功率的測定	50
3.9 平均有效壓力	51
3.10 泵環	53
3.11 習題	59

第四章 氣體的膨脹與壓縮

4.1 氣體的等溫膨脹式壓縮	68
4.2 氣體的絕熱膨脹式壓縮	68
4.3 氣體的多變膨脹式壓縮	69

4.4	膨脹式壓縮間所作的功－非流動過程	70
4.5	氣體在一閉式系統內的膨脹式壓縮的熱流	72
4.6	流動過程	77
4.7	一般能量方程式	78
4.8	焓	79
4.9	習題	82

第五章 操作的循環

5.1	可逆的操作	90
5.2	卡諾循環的操作	91
5.3	等容式鄂圖循環	95
5.4	爆震	98
5.5	低速率狄賽爾循環	100
5.6	高速率狄賽爾循環	101
5.7	相對效率	102
5.8	習題	107

第六章 燃料與燃燒

6.1	燃料	116
6.2	固體燃料	116
6.3	煤的燃料	117
6.4	固體燃料的分析	117
6.5	固體燃料的卡路里值	118
6.6	液體燃料	121
6.7	液體燃料的性質	123
6.8	氣體燃料	124
6.9	燃料的燃燒	129
6.10	理論供給的空氣	132
6.11	燃燒的產物	132
6.12	燃燒物所帶走的能量	134

6.13	分析燃燒後的乾產物－轉換體積分析為重量分析...	135
6.14	轉換重量分析為體積分析	137
6.15	燃燒氣體燃料所需的空氣體積與其燃燒產物	138
6.16	燃燒的卡路里值的計算	142
6.17	習題	143

第七章 水蒸汽的性質

7.1	水蒸汽的形成	153
7.2	水蒸汽的焓	154
7.3	水蒸汽的體積	155
7.4	使用水蒸汽表例題	156
7.5	水蒸汽的內能	161
7.6	水 - 水蒸汽物質的 pV 圖	161
7.7	非流動過程的水蒸汽膨脹	162
7.8	節流	165
7.9	節流測熱計	166
7.10	分離與節流測熱計的組合	168
7.11	習題	170

第八章 蒸汽動力廠

8.1	水蒸汽迴路	178
8.2	空氣 / 氣體的迴路	178
8.3	冷凝器的冷却水迴路	180
8.4	水蒸汽鍋爐	180
8.5	蘭卡夏型鍋爐	180
8.6	鍋爐效率	181
8.7	等效蒸發“F 與 A 100°C”	184
8.8	節熱器	185
8.9	空氣加熱器	186
8.10	冷凝器	186

8.11 蒸汽的達爾頓定律	189
8.12 習題	193

第九章 蒸汽機與蒸汽輪機

9.1 指示功率	199
9.2 熱效率	200
9.3 能量平衡單	200
9.4 蒸汽輪機	203
9.5 簡單衝動式輪機	205
9.6 衝動 - 反作用式輪機	213
9.7 習題	219

第十章 熱傳遞簡介

10.1 熱傳導	224
10.2 熱對流	227
10.3 輻射	229
10.4 習題	233

附錄 蒸汽表

1. 飽和水及水蒸汽性質表：溫度表	237
2. 飽和水及水蒸汽性質表：壓力表	240
3. 過熱及過臨臨界水蒸汽性質表	243

第一章 單位與定義

一位工程師，除他有動力的來源以起動機器或工具外，否則他的工作必受到限制。本書係處理引擎從其存儲的燃料能量以產生動力的能力。在研究之前，必需確實了解其定義與單位。大部分均為我們日常所熟悉的，但因科技上的需求，必需正確了解。

1.1 能 量

首先認識什麼稱為“能量”(energy)。當我們說某人充滿能量，意指他準備從事工作或作運動等等。科學家認為能量可以許多形式存在着。例如，存於具高水位的水，擁有能夠轉動水輪機(water turbine)的能量，此種型式，就稱為位能 (potential energy)。任何移動的東西，均擁有能量，此種型式的能量，稱為動能 (Kinetic energy)。具高速率的氣體噴射流，可用作噴射飛機的推力。

我們需要了解所有物體所擁有的一種能量型式，稱為內能(internal energy)。所有的物質，包含許多獨立單體，稱為分子 (molecules)，而分子間互相吸引而形成一質量。每一分子在一特別路徑上移動，故擁有動能，而物體中所有分子動能的總和，就是物體的內能。溫度較高的物體，其分子運動較快，故其內能較高。當一固體被連續加熱，則分子的速率最後達到破壞其正常路徑，因此固體熔化而變成液體，若再繼續加熱，則在液體狀態中分子的運動增加，並達到離開液體表面時，此物質變成了氣體。

最後，再提出另外兩種能量的型式，熱能 (heat energy) 與功 (work)。當從一系統的能量轉換到另一系統時，以上兩種能量的型式，為其特殊的型式。熱，為兩系統間溫度差的流動能量的一種型式，而功是，當一力量作用於一移動距離所發生的能量，其能量係用一機

械設備以傳動某一系統到另一系統。

1.2 系統 (Systems)

系統 (systems) 被定義為物質的量，被一邊界環繞着，其邊界僅可通過熱或功形式的能量。例如，在一引擎汽缸內的氣體或蒸汽的質量為一系統，其邊界是沿汽缸壁、汽缸頭以及活塞頂所畫的虛線（假設閥在關閉着）。此種系統，稱為閉式系統 (closed system)，因其邊界為連續的，而且沒有物質可以進入或放出。但其能量却可橫過這系統的邊界。此時發生的能量，總是熱或功的形式。例如，汽缸頭可在閥關閉時加熱，而所加的熱，流過汽缸頭而進入汽缸內的氣體，由氣體所產生的壓力，可能在某些阻力下作相對移動活塞，故此系統對外作了功。注意，此系統在活塞移動時仍保持閉式系統，因沒有物質在活塞移動中橫過邊界。

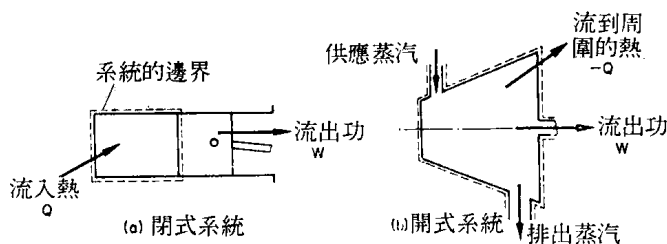


圖 1-1

若一系統其邊界包含了某些物質的進入與離開。則此系統稱為開式系統 (open system)。蒸汽輪機 (steam turbine) 為一開式系統的例子。因所供應的高壓蒸汽，從進入口進入而從低壓蒸汽排出口排出。其中的壓力降，用來輸出輪機的動力，此開式系統邊界由輪機蓋形成。若又有能量橫過此邊界，其必為熱或功的形式。故熱可以流到周圍（雖每一階段均要防止它外流）且功的外流，可沿着轉子軸 (rotor shaft) 而帶動了發電機 (generator)。

1.3 能量、熱與功

能量，可存於各種形式中。兩類能量，是比較重要的。

(a)內儲能量 (stored energy)：此形式的能量，可儲存在系統中，如內能、位能與動能。此系統可能包含位在一基準線上，其高為 z ，移動速度為 v ，並在某一溫度 T 的流體。此系統所擁有的內儲能量，等於其由高度的位能和，由速度的動能和，與由溫度的內能和。其他形式的能量如化學能 (chemical energy)、電能 (electrical energy) 與核能 (nuclear energy) 等均不在本書內陳述。

(b)轉換能量 (transitional energy)：此種形式的能量，為系統與其周圍的轉換能量。在一個系統中，能橫過其邊界的轉換能量，僅為熱與功的形式。熱與功，均不存於內儲能量中，故說物體“包含熱”或“包含功”均屬不正確的。一個系統，可包含內能，與擁有位能及動能，但熱與功的能量，僅能進入或離開某一系統。

考慮一種類似的情形：一雨點落入水槽。當水滴下落，就稱為“下雨”，但只要它進入水槽，它便變成加入的水，而不再存於雨中。熱與功，與雨水相類似 - 只要它們橫過邊界進入系統，它們就停止存放熱或功，而加入系統的內儲能量形式，如位能動能或內能。若熱與功進入一個系統，則內儲能量的和會增加。若熱與功離開一個系統，則內儲能量的和會減少。

因熱與功均為轉換能量的形式，我們必需了解它們間的關係。功，為量測所施平均力量，與沿作用線距離的乘積；其單位為牛頓 - 米 (newton-meters) = 焦耳 (joules)。熱的量測單位，亦為焦耳 (joules)。

Dr. James Joule (1818-1889)，曾作了一系列的實驗，在充滿水的熱量計用落錘來帶動旋轉蹼 (rotating paddles)，使所產生的功流入水中。結果增加了水的溫度與水的內能。與在熱量計中的水加熱，會得到相同的結果。焦耳 (Joule) 發現此機械等效熱 (mechanical equivalent of heat)。在國際制 (SI 的單位) 中熱與功的等效單位，定為焦耳 (= 1 牛頓 $\times$ 1 米)。

1.4 系統的性質

一個系統，必擁有一些性質 (property)。這些性質是用來描述該系統的狀態 (state)。性質，是系統的特性，依系統的狀態，而不依此狀態如何達成。例如，一種氣體的壓力，形成一個系統的性質，而此壓力的量測，可幫助描述氣體的狀態；但不論此壓力的如何達成。

一個系統的狀態，由其獨立性質來定義。若這兩個性質是互相獨立的，故必需小心地選擇互相獨立的性質。例如，壓力與溫度，是氣體的兩個獨立的性質，可完全定義氣體的狀態。另一方面，這些壓力與溫度的性質，在蒸汽中（氣體與液體的混合時），並不互相獨立。在蒸汽的情形，其狀態由壓力與比容 (specific volume) 兩個獨立的性質所定義。我們將依次檢查溫度、壓力與比容的性質、意義、與量測。在本書的後面，將觀察它們在熱機工作上的重要性。

1.5 溫 度

當熱或功的能量流入一閉式系統，該系統的內能會增加，通常（並不總是）顯然地增加其溫度。溫度的量測，用各種型式的溫度計。國際制溫度的基本單位為 $^{\circ}\text{K}$ (degree Kelvin)，導來的單位是攝氏度或百分度 ($^{\circ}\text{C}$)。

(a) 攝式或百分度溫標 (the Celsius or centigrade scale)：溫標上的 1°C ，為水在常壓 101.325kN/m^2 下，從冰點 (0°C) 加熱上升到沸點 (100°C) 所升溫度的百分之一。

攝氏溫標選 0°C 為冰的熔點。但在某一冷卻溫度可能沒有其他比它還低的溫度，這溫度發生在 -273°C ，稱為絕對零度 (absolute zero degree)。

保持常壓的空氣體積，當溫度下降 1°C 時，由實驗顯示其體積減少在 0°C 時的 273 分之 1。如 273m^3 的氣體，從 0°C 減少到 -1°C 時，其體積變成 272m^3 ；在 -2°C 時則變成 271m^3 等等。

溫度 0°C - 體積 273m^3

-1°C - 體積 272m^3

-2°C - 體積 271m^3

理論上，在 -273°C - 體積 0m^3

事實上，空氣或其他氣體，在達到絕對零度之前，早被液化而後變成固體。

(b)凱式(絕對)溫標〔the Kelvin (absolute) scale〕：此溫度標係使用絕對零度當作基本溫標開始。現我們必需研究氣體的行為，因在許多引擎中擔任重要的角色，要依真的或絕對的溫度，而不依任何尺度的人造溫度計。所有基本的公式，均用絕對溫度(T)來表示。學生必需學會如何換算溫度。

由 $^{\circ}\text{C}$ 換轉成 K ($^{\circ}\text{K}$ 或 $^{\circ}\text{C}$ 絕對)

$$TK = 273 + t^{\circ}\text{C}$$

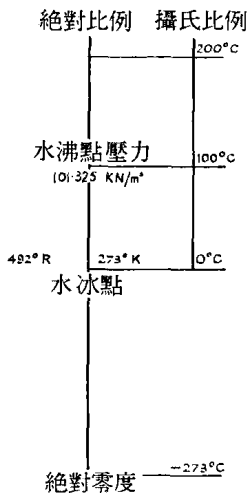


圖 1-2a 溫度標

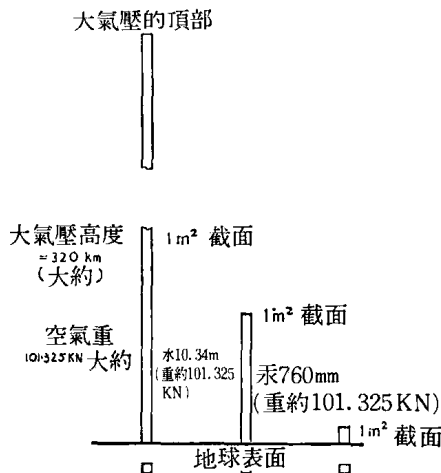


圖 1-2b 壓力標

1.6 壓力

(a)大氣壓力 (atmospheric pressure)：大氣壓力，是由地球表面上的空氣柱重量所形成的。地表面每平方公尺(m^2)的壓力，等於截面為每 m^2 的空氣柱所量得的重量。又可表示為，等截面而重量與空氣柱相同的液柱。每天的大氣壓力變化甚微，它可用大氣壓力計來記錄，但一般值為：

$101.325 \text{ kN/m}^2 = 10.34 \text{ m 水柱} = 760 \text{ mm 水銀 (汞) 柱}$
 必需有一套很簡單的公式用來換算，下列的常數，應該記住。

具質量 1000 kg ， 1 m^3 的水將施力 9.81 kN

$$\therefore 1 \text{ m 水柱} = 9.81 \text{ kN/m}^2$$

水銀的重量，為水的 13.6 倍

$$\begin{aligned}\therefore 1 \text{ m 水銀柱} &= 13.6 \text{ m 水柱} \\ &= 13.6 \times 9.81 \\ &= 133.3 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

$$1 \text{ mm 水銀柱} = 133.3 \text{ N/m}^2$$

壓力錶 (pressure gauge) 用 lbf/in^2 的單位來記錄壓力，由來已久。

它們間的換算關係，為

$$1 \text{ lbf/in}^2 = 6897 \text{ N/m}^2$$

例如：一壓力錶讀數為 110 lbf/in^2 。其壓力在國際制單位中為

$$\begin{aligned}110 \text{ lbf/in}^2 &= 110 \times 6897 \\ &= 759 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

(b) 錶壓力與絕對壓力 (gauge pressure and absolute pressure) :
 在管路或容器中的壓力，一般均用某種壓力計，使其壓力在大氣壓力之上量測。假如，圖 1.3 所示的壓力計是用來量測在管路中的壓力。

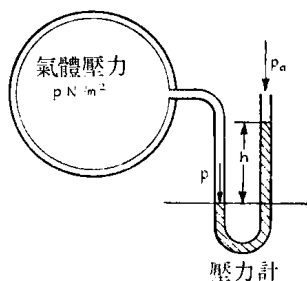


圖 1-3 壓力計

若壓力計的 U 形管兩邊高度的讀數差為 $h \text{ mm}$ 。則氣體的壓力 p ，由大氣壓力 p_{at} 加上水柱 h 的壓力來平衡。故得成立

$$p = p_{at} + h$$

亦即，在管路中氣體的真實或絕對壓力，為大氣壓力與錶讀數的和。