

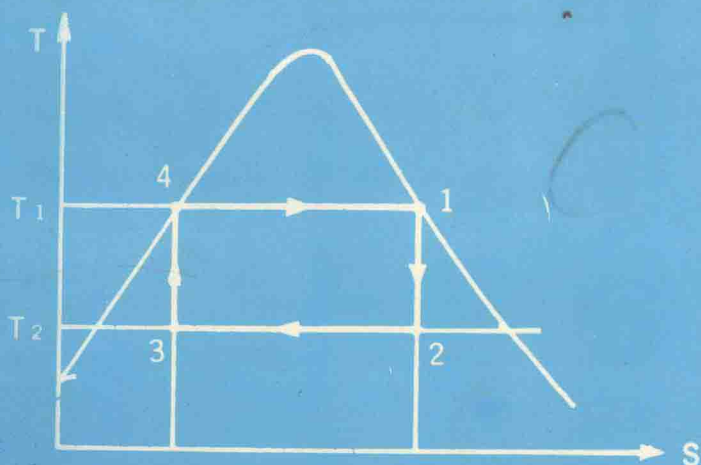
科技用書

應用熱力學

(修訂本)

(下冊)

林晃盛 編著



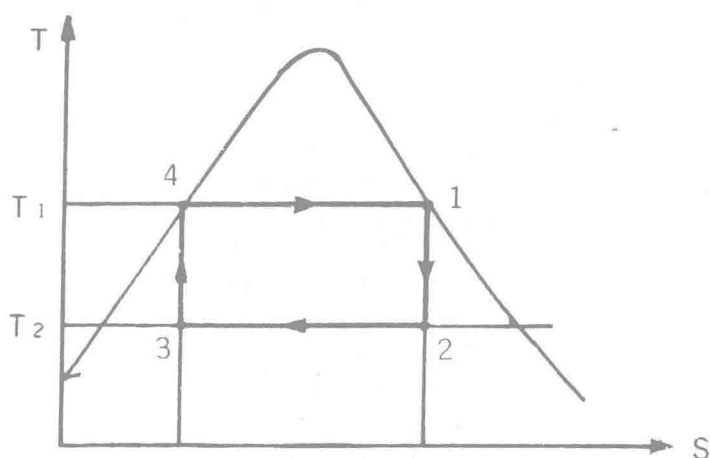
大行出版社印行

科技用書

應用熱力學

(修訂本) (下 冊)

林晃盛 編譯



大行出版社印行



中華民國七十二年八月 日三版 二
中華民國六十七年九月 日二版 二
中華民國六十六年二月 日初版

書名：應用熱力學(下) 修訂本
著作者：林晃盛・韓宏武・陳正興編譯

發行人：裴 振 九

出版者：大 行 出 版 社

社址：台南市體育路41巷26號

電話：613685 號

本社免費郵政劃撥帳號南字第32936號

本社登記證字第：行政院新聞局

局版台業字第0395號

總經銷：成大書局有限公司

台南市體育路41巷26號

電話：651916 號

特 價：平一九〇元精二三〇元

編 號：T00018-00408

同業友好・敬請愛護

應用熱力學 (下)

目 錄

第十一章 汽輪機 (*Steam Turbines*) 1

- 11.1 汽輪機的分類 (*Classification of steam turbines*) 2
- 11.2 衝動式輪機 (*The impulse turbine*) 5
- 11.3 壓力和速度組合式之衝動式輪機 (*Pressure and velocity compounded impulse turbines*) 14
- 11.4 輪機輪葉高度 (*Turbine blade height*) 20
- 11.5 衝動—反動式輪機 (*Impulse-reaction turbine*) 23
- 11.6 汽輪機裏的各項損失 (*Losses in steam turbines*) 33
- 11.7 汽輪機之輪葉輪廓 (*Turbine blade profiles*) ... 36
- 11.8 級效率, 總括效率, 重熱因素和狀態曲線 (*Stage efficiency, overall efficiency, reheat factor, and the condition curve*) 38
- 11.9 輪機之調速法和控制 (*Turbine governing and control*) 43
- 11.10 徑向式汽輪機 (*The radial flow turbine*) 47
- 習 題 48
- 參考資料 51

第十二章 氣輪機 (*Gas Turbines*) 52

- 12.1 氣輪機循環 (*The practical gas turbine cycle*) 52
- 12.2 變更基本循環 (*Modifications to the basic cycle*)

	)	63
12.3	離心式和軸流式壓縮機 (Centrifugal and axial flow compressors)	74
12.4	燃 燒 (Combustion)	78
12.5	噴射推進 (Jet propulsion)	81
	習 題	99
	參考資料	100
第十三章 混合物 (<i>Mixtures</i>)		101
13.1	Dalton 氏定律和 Gibbs-Dalton 定律 (Dalton's law and the Gibbs-Dalton law)	101
13.2	混合氣體之體積分析 (Volumetric analysis of a gas mixture)	105
13.3	虛表的分子重量和氣體常數 (The apparent molecular weight and gas constant)	107
13.4	混合氣體的比熱 (Specific heats of a gas mixture)	115
13.5	理想氣體的絕熱混合 (Adiabatic mixing of perfect gases)	122
13.6	氣體和水蒸汽混合 (Gas and vapour mixtures)	128
13.7	水蒸氣凝結器 (The steam condenser)	132
	習 題	137
第十四章 濕度測定法 (<i>Psychrometry</i>)		142
14.1	大氣濕空氣 (Psychrometric mixtures)	142
14.2	比溼度 (Specific humidity) 和相對溼度 (relative humidity)	144

14.3	相對溼度的測定 (Measurement of relative humidity)	148
14.4	空氣調節 (Air conditioning)	151
14.5	冷却塔 (Cooling towers)	161
14.6	氣體和不同於水蒸汽之蒸汽混合 (Mixtures of gases and a vapour other than water vapour)	165
	習 題	166
	參考資料	169
第十五章 燃 燒 (Combustion)		170
15.1	基礎化學 (Basic chemistry)	171
15.2	燃 料 (Fuels)	173
15.3	燃燒反應式 (Combustion equations)	175
15.4	完全燃燒所需的空氣與燃料混合比或稱為化學量論的 (Stoichiometric) 空氣與燃料混合比 (Stoichiometric, or chemically correct, air fuel ratio)	179
15.5	排氣分析 (Exhaust and flue gas analysis)	180
15.6	燃燒生成物的實際分析 (Practical analysis of combustion products)	192
15.7	分析燃燒生成物的其他方法 (Further methods for the analysis of combustion products)	201
15.8	分 解 (Dissociation)	205
15.9	燃燒內能和焓 (Internal energy and enthalpy of combustion)	218
15.10	組合焓 ΔH_{fo} (Enthalpy of formation ΔH_{fo})	236
15.11	燃料的卡值 (Calorific value)	238

4 目 錄

15.12	原動力廠的熱效率 (Power plant thermal efficiency)	240
15.13	卡值的測試 (Practical determination of calorific values)	242
15.14	空氣與燃料的混合汽體 (Air and fuel-vapour mixtures)	249
	習 題	252
	參考資料	259

第十六章 冷 凍 (*Refrigeration*)260

16.1	反熱機循環 (Reversed heat engine cycles) ...	261
16.2	蒸汽壓縮冷凍循環 (Vapour-compression refrigeration cycles)	267
16.3	冷凍負荷與冷凍的單位 (Refrigerating load and the unit of refrigeration)	276
16.4	壓力—焓圖 (The pressure-enthalpy diagram)	277
16.5	壓縮機排量與型式 (Compressor displacement and type)	280
16.6	閃變室 (Flash chamber) 的使用 (The use of the flash chamber)	283
16.7	吸收式冷凍機 (Absorption refrigerators)	289
16.8	氣體冷凍循環 (Gas refrigeration cycles)	291
16.9	氣體的液化 (Liquefaction of gases)	296
16.10	噴汽冷凍法 (Steam jet refrigeration)	297
16.11	冷凍劑的性質 (Properties of refrigerants) ...	298
16.12	雙冷凍循環 (Dual refrigeration cycles)	301
16.13	冷凍能量 (Refrigerating capacity) 的控制	

	(Control of refrigerating capacity)	301
16.14	冷凍的絕熱材料(Insulating materials in refrigeration)	302
	習 題	303
	參考資料	307
第十七章 熱傳遞 (<i>Heat Transfer</i>)		308
17.1	Fourier 的傳導定律 (Fourier's law of conduction)	310
17.2	牛頓的冷却定律 (Newton's law of cooling)	313
17.3	複合壁 (Composite wall) 與電的類比 (Electrical analogy) (The composite wall and the electrical analogy)	316
17.4	圓筒和球體的熱傳遞 (Heat flow through a cylinder and a sphere)	321
17.5	熱交換器 (Heat exchanger)	328
17.6	強制對流 (Forced convection)	339
17.7	自然對流 (Natural convection)	359
17.8	黑體輻射 (Black body radiation)	363
17.9	灰體 (Grey body)	365
17.10	Stefan-Boltzmann 定律 (The Stefan-Boltzmann law)	369
17.11	交換因素 (Interchange factor)	372
17.12	Lambert 定律與幾何因素 (Lambert's law and the geometric factor)	377
17.13	輻射的熱傳係數 (Heat transfer coefficient for radiation)	383

17.14	氣體輻射 (Gas radiation)	385
	習 題	385
	參考資料	394

第十八章 往復式內燃機 (*Reciprocating Internal-Combustion Engines*)

18.1	四衝程循環 (Four-stroke cycle)	397
18.2	二衝程循環 (Two-stroke cycle)	401
18.3	引擎的其他型式 (Other types of engines)	403
18.4	性能的標準 (Criteria of performance)	404
18.5	引擎輸出與效率 (Engine output and efficiencies)	418
18.6	性能特性 (Performance characteristics)	420
18.7	影響性能的因素 (Factors influencing performance)	426
18.8	實際循環與空氣標準循環的比較 (Comparison of real cycles with the air standard cycle)	431
18.9	用於內燃機之燃料的性質 (Properties of fuels for I.C. engines)	431
18.10	燃料系統 (Fuel systems)	434
18.11	空氣/ 燃料比的測量與容積效率 (Measurement of air/fuel ratio and volumetric efficiency)	448
18.12	增 壓 (Supercharging)	451
18.13	動力單位現代的發展與用途 (Modern developments and applications of power units)	457
	習 題	460
	參考資料	465

第十一章 汽輪機

汽輪機是一個動力單元，它由連續供給的水蒸汽裏產生動力，水蒸汽以高壓輸入汽輪機，經輪機以低壓排出，入凝結器。

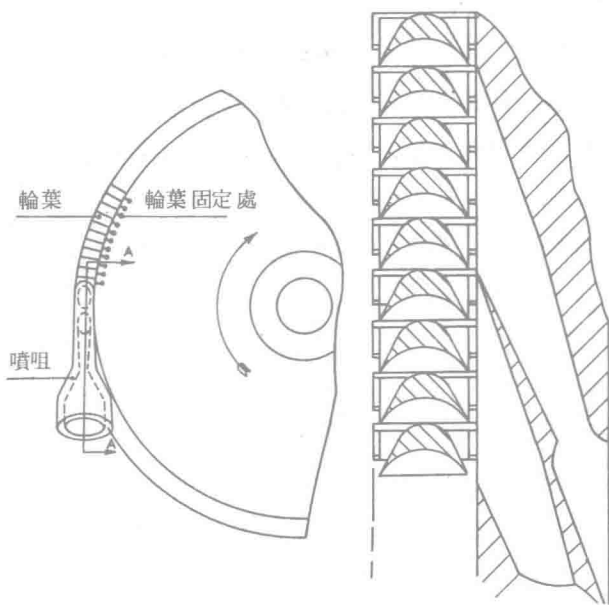


圖 11.1a 葉輪部份圖

圖 11.1b

在汽輪機全部過程裏，水蒸汽壓連續或分段遞降是汽輪機設計

上的一個特性。水蒸汽壓的每次遞降，令水蒸汽的動能增大。

噴注的水蒸汽，具有動量（質量×速度），它是向量。不論改變質量或速度的大小，或是改變速度的方向，均會產生動量的改變。依牛頓第二定律，造成此項改變所需作用力的大小與動量改變率成比例。

衝射噴注的水蒸汽經附着於機輪的輪葉，改變了水蒸汽的速度方向，其反作用力拖於輪葉，造成機輪得以隱定的扭力輸出。圖 11.1a 所示，為簡單衝動式輪機；圖 11.1b 為圖 11.1a 之 A—A 剖面放大圖。

11-1 汽輪機的分類

按水蒸汽經過輪葉的方向分類為，軸向（水蒸汽流方向與輪機軸平行）或徑向（即水蒸汽流方向與輪機軸垂直）。

絕大多數的汽輪機是軸向式，而且它將是本章討論的主題。徑向式汽輪機，將在 11.10 節做簡略的敘述。

軸向汽輪機又可分類為(a)衝動式輪機，或(b)衝動—反動式輪機。

它們的基本原理，將在本節裏討論。

(a) 衝動式輪機

圖 11.2 所示，為一簡單而靜止不動的輪葉，噴注的水蒸汽以速度 C 衝注。如同圖示，噴注的水蒸汽流經輪葉後，僅改變了速度的方向，其速度大小不變。

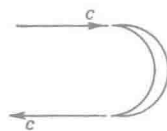


圖 11.2

由牛頓第二定律：

力 $\propto$ 動量的變化率；

$\propto$ (質量 × 速度) 的變化率；

即 力 $\propto$ 流體的質量流量 $\times$ 速度的變化
統一前後的單位，可得

$$\text{力} = \dot{m} \times \text{速度的變化} \quad (11.1)$$

($\dot{m}$ 為流體的質量流率)

在圖 11.2 的簡單例子裏，水蒸汽進入輪葉的速度為 $+C$ (假設，水蒸汽速度由左向右取正)，離開時為 $-C$ 。所以它的速度變化為 $-C - C = -2C$ ，按 11.1 式得知，作用於水蒸汽的力為

$$F = -\dot{m} 2C$$

負號表示力的方向由右向左。施於輪葉的反作用力，其與施於水蒸汽的作用力，大小相同，方向相反，亦即 $F = \dot{m} 2C$ 。正號表示施於輪葉的力，驅動它由左向右轉動，與噴注的水蒸汽入射方向相同。若輪葉固定在自由轉動的葉輪上，參看圖 11.3a，若葉輪的切線速度 C_b ，噴注的水蒸汽入射速度 C_a 。

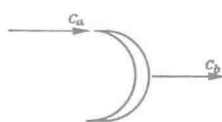


圖 11.3a

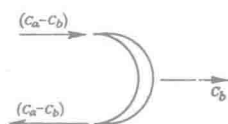


圖 11.3b

若 $C_a > C_b$ ，噴注的水蒸汽趕不上輪葉，對輪葉的轉動沒有影響。反之，若 $C_a < C_b$ ，則水蒸汽衝射輪葉的相對速度為 $(C_a - C_b)$ ，如圖 11.3b 所示。若汽流與輪葉間無摩擦存在，則水蒸汽離開輪葉的相對速度為 $-(C_a - C_b)$ 。所以噴注水蒸汽流的動量變化為 $-(C_a - C_b) - (C_a - C_b) = -2(C_a - C_b)$ ，應由 11.1 式，作用於水蒸汽的力為，

$$F = -2 \dot{m} (C_a - C_b)$$

施於輪葉的力，其方向為輪葉運動的方向，為

$$F = 2 \dot{m} (C_a - C_b)$$

實際上，一個汽輪機具有數個或十幾個“級”(stage)，每級具有一行固定輪葉或固定噴咀和另一行動輪葉。噴注的水蒸汽必需穿越這一系列的“級”，那麼如圖 11.3 所示，水蒸汽流將無法進入次一級裏。因此噴咀必需和動輪葉運動的切線方向，傾斜個角度，稱為噴咀角 α_i (nozzle angle α_i ， i 表示入口處)，如圖 11.4 所示。具 α_i 角度的噴注水蒸汽，離開輪葉的絕對速度與輪葉切線速度的方成 α_e 角 (e 表示出口處)。對於噴咀角 α_i 的選擇，必需考慮幾個有關因素。例如增加 α_i 角度，相對的減少了 $C_{a_i} \cos \alpha_i$ ，和增大軸向流速 $C_{a_i} \sin \alpha_i$ 。軸向流速與葉輪周邊環帶尺寸有關，因為需符合流體流量的連續性，水蒸汽的體積流率等於有效的輪葉環帶面積乘流速，參看 11.4 節。

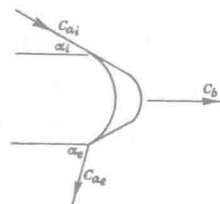


圖 11.4

(b) 衝動—反動式輪機

在討論衝動—反動式輪機前，必需先瞭解純反動式輪機，如圖 11.5 所示。該輪機，在公元 1883 年，由一位汽輪機的先驅 Gustaf de Laval 所建。純反動式輪機，它的轉軸兼垂向水蒸汽供應管，連接徑向管。徑向管兩端各反扭 90° ，縮口各成為一具噴咀，水蒸汽經徑向管至噴咀，膨脹加速射入大氣，得反作用力使徑向管以轉軸為中心旋轉。這種 de Laval 式輪機，轉速為 42000 rev/min，最大切線速度為 180 m/s。由於它的效率低，無商業用途，但却顯示了，這類高速輪機的發展潛力。

軸流式，衝動—反動式輪機，它所獲得的驅動力，部份來自衝動力，另部份來自水蒸汽經輪葉間通道，膨脹加速的反動力。而且衝動—反動式輪機，一般簡稱反動式輪機。衝動式輪機，和反動式輪機均將在本章下述幾節裏，進一步的探討。

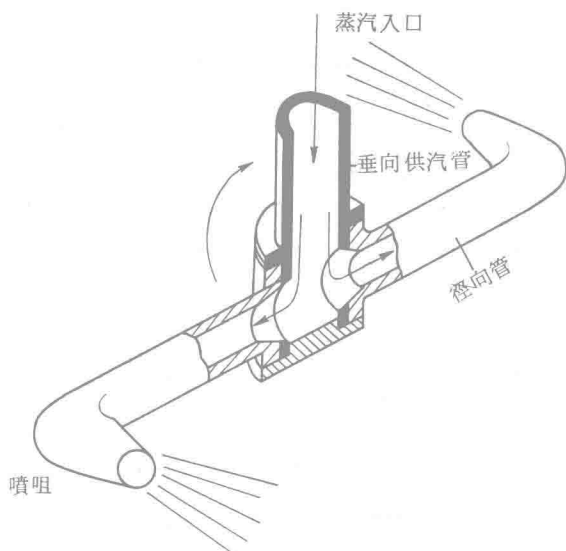


圖 11.5

11-2 衝動式輪機

一具單一葉輪的衝動式輪機，水蒸汽經噴咀完全膨脹，得以相當高的絕對速度 C_{a_i} ，噴注入動輪葉，它的噴咀角 α_i ，如圖11.6 a 所示，輪葉的切線速度 C_b 。 C_{a_i} 可分成兩個分量，一輪葉速度 C_b ，二水蒸汽與輪葉的相對速度， C_r 。 C_r 的方向與輪葉的葉形相切。 C_{r_i} 為輪葉入口處，水蒸汽與輪葉的相對速度， C_{a_i} 與 C_b 的夾角稱為輪葉入口角 β_i 。 C_{r_e} 為輪葉出口處之相對速度，輪葉出口角為 β_e ，如圖11.6 b 所示。

爲了簡化水蒸汽流的速度符號，取得分析上的方便，速度符號

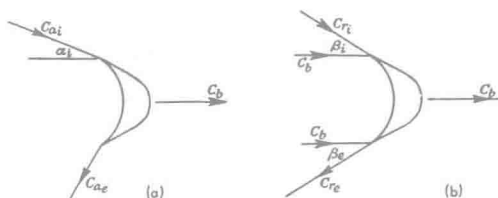


圖 11.6

採用圖 11.6 的下角符號， a_i ， r_i 表示（ a_i 即入口處之絕對速度， r_i 即入口處之相對速度）。引用圖 11.6 的定義，將入口處之速度三角圖，繪於圖 11.7a。

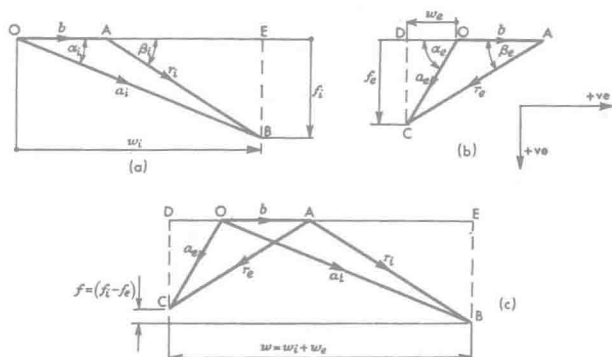


圖 11.7

輪葉出口處之相對速度 r_e ，輪葉出口角 β_e ，由速度三角圖，圖 11.7b 得知出口處之水蒸汽絕對速度 a_e ，角度 α_e 。因為圖 11.7a 與圖 11.7b 具有相同的邊， $OA = b$ ，可將它合併成單一圖，圖 11.7c。

若葉形前後對稱，則 $\beta_i = \beta_e$ ，若水蒸汽與輪葉無摩擦效應，則 $r_e = r_i$ 。實際水蒸汽流與輪葉的相對速度，因磨擦存在而減低，可表示為

$$r_e = k r_i \quad (11.2)$$

(k 稱爲輪葉速度係數)

在輪葉進出口處，水蒸汽流速的軸向分量分別爲 f_i 和 f_e (即 EB 和 DC)。進出口處之 f_i 和 f_e ，其值可能會有差異，這表示其差異在軸方向存在個軸向推力。水蒸汽進出輪葉處之絕對速度的水平分量，稱爲“漩速”(whirl velocities)，分別爲 w_i 和 w_e ，如圖 11.7c 所示。

應用 11.1 式，作用於水蒸汽之切線力爲 $F = \dot{m} \times$ (切線方向的流速變化)。

在入口處，水蒸汽與輪葉相對速度的切線分量爲

$$AE = r_i \cos \beta_i$$

在出口處，水蒸汽相對速度的切線分量爲

$$AD = -r_e \cos \beta_e$$

所以，

切線方向的流速變化

$$\begin{aligned} &= -r_e \cos \beta_e - r_i \cos \beta_i \\ &= -(r_e \cos \beta_e + r_i \cos \beta_i) \end{aligned}$$

$$\therefore \text{切線力} = -\dot{m} (r_e \cos \beta_e + r_i \cos \beta_i)$$

它的反作用力，即是驅動葉輪的力量，

$$\text{即 葉輪的驅動力} = \dot{m} (r_e \cos \beta_e + r_i \cos \beta_i)$$

參看圖 11.7c 的速度組合圖，得

$$(r_e \cos \beta_e + r_i \cos \beta_i) = AD + AE = DE = w$$

(w 是流速的變化量)

$$\therefore \quad \text{施於葉輪的驅動力} = \dot{m}w \quad (11.3)$$

施於葉輪的功率，為驅動力乘輪葉速度。所以由 11.3 式可得

$$\text{施於葉輪的功率} = \dot{m}wb \quad (11.4)$$

亦即輪葉的輸出功率(假設機械損失不計)

$$\text{輸出功率} = \dot{m}wb \quad (11.5)$$

一般輪葉速度圖，均按比例繪製，這樣由速度圖可直接量出 w 值乘以該圖比例，即實際值。參看圖 11.7c，由該圖可獲得，在進出口處水蒸汽絕對速度的變化。為了便於說明，將該圖部份繪於圖 11.8a，OB 與 OC 分別為 a_i 和 a_e (均為向量)。水蒸汽絕對速度的變化即 BC，亦即施於水蒸汽的作用力為 $\dot{m} \times BC$ ，施於葉輪的反作用力為 $\dot{m} \times CB$ 。將它分成切線分量 $\dot{m} \times FB$ 和軸向分量 $\dot{m} \times CF$ 。 $\dot{m} \times CB$ 即前述之切線方向葉輪的驅動力，參看圖 11.8b。

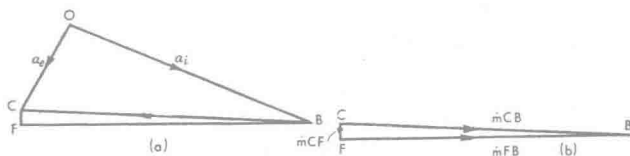


圖 11.8

反作用的軸向分力， $\dot{m} \times CF$ ，為施於葉輪的軸向推力，它由葉輪軸承承受。由圖 11.7c，得知 $CF = EB - DC = f_i - f_e = f$

$$\text{即} \quad \text{軸向推力} = \dot{m}f \quad (11.6)$$

假若進噴咀的水蒸汽流的熵為 h_0 ，噴咀出口處為 h_i ，按 10.4 式