

最新世界名著

工廠設計與化工經濟

(下 冊)

馬克斯S.比特斯原著
克勞斯D.提摩豪斯
任繼光譯

國家科學委員會補助

國立編譯館出版
臺灣書店印行

最新世界名著

工廠設計與化工經濟

(Plant Design and Economics for Chemical Engineers)

第(下冊)

馬克斯 S. 比特斯

(Max S. Peters)

原著

克勞斯 D. 提摩豪斯

(Klaus D. Timmerhaus)

任繼光譯

國家科學委員會補助

國立編譯館出版
臺灣書店印行

著者原序

對化學工程諸原理之瞭解的增進，加上新工具及新技術的利用，已使可應用到工業上化學操作之設計的複雜程度提高。此第二版是在可盈餘程度的評估，最佳設計方法，連續複利生息，統計分析，成本估計，及使用電子計算機解答問題等方面，增加了相當數量的材料，而擴大了化學工程的知識。在涉及化學工廠及裝置設計方面經濟的及工程技術的原理特別加重。對任何一個成功的化學工程師，不管其最終的職位是直接設計工作或生產、行政、銷售、研究、發展、甚至任何其他有關的領域，對這些原理的瞭解是絕對必要的。

工廠設計的名詞使人立即聯想到工業上的應用；因而，在進行工廠的設計時，在腦中必須永遠存有錢的意識。當然，理論的及實際的情勢很重要；但是在最終的分析裏，回答“我們是否能由此項冒險而得到利潤？”這問題，差不多永遠可訂定該設計的真實價值。所以化學工程師應當將工廠設計及實用經濟，看為一整體來考慮。

這本書的目的是提出應用在化學工程的程序及操作中經濟的及設計的原理。並不想要把讀者訓練成為一個熟練的經濟學家，並且明顯的，亦不可能提出涉及許多不同工廠設計中的所有可能的問題。而是以提供重要原理及一般性方法之清晰觀念為目標。提出的論題及方式

是以該書對在學中的化工系高年級生、研究生及在職之工程師有價值為前提。書中之資料對在化學工業裡的行政人員、操作主管以及研究發展的工作者亦應當頗有益處。

本書的第一部份提出涉及程序設計中主要因素的全盤分析，尤其注重在化學工業裏及設計工作裏的經濟問題。在工業程序中各項費用，資本投資及投資回收，成本估計，成本會計，最適經濟設計方法，以及論及經濟的其他項目之質與量方面都顧到。本書的其他部份為談論在工廠及裝置的設計方法及重要因素。一般性的項目，例如廢物處理，結構設計，及裝置之製作，則在論及各種化工裝置的設計方法時一併討論之。有關各種裝置之重要價格資料及其價格的統計資料也蒐集在本書內以供編製費用估計時之參考。

在書中廣用實例及例題來說明原理之應用於實際的情勢上。在各章的章末列有習題以供讀者試驗彼對書中材料的瞭解。在附錄中列有實習問題以及較長的不同程度的設計問題，並有綫性規劃，動態規劃，及應用在反應器設計的數字與類比電子計算機解法的資料。

在很多章後面列有參考文獻告訴讀者由何處可得到另外的資料。應注意的是這些文獻中的大部份是由化學工程文獻中摘取的，而這些文獻只是作者建議的參考資料而不是概全的清單。

大部份的費用數據是以列表方式及圖示形式提出的。本書的各種列表內列有用各種圖提示的費用數據之簡表，並可在項目索引裏查出對特殊裝置項目或操作因素之額外費用資料的所在。為簡化使用本書內所給的費用數據，所有的費用數字都採用1967年1月1日的。對所有工業之Marshall及Stevens費用指數是用來將所有費用轉換成同一時間基準。因為確實的價錢只有從製造商的直接報價得到，所以對約計費用估計以外的目的而使用此數據時應當小心。

這本書適合於大學部高年級學生及已畢業的化學工程人員—學期

或兩學期課程之用。本書假定讀者在化學工程系內已念過化工計算，熱力學及化工原理。本書中亦涉及各設計方程式及方法演變之詳細解說。本書提供設計及經濟資料的基礎並附有許多定量的詮釋，故可以做為進一步研究程序設計一般策略之基礎。

本書雖然包括各種各樣的圖解，簡化公式，及計算捷徑，但仍儘力說明有關理論根據與假定。對化學工程師來說，工廠設計及經濟的真實價值，並不是只在將數字置入公式而解得最後答案的能力。其真實價值是在瞭解為什麼一個計算方法可得滿意結果之理由。這種瞭解可給與工程師，當他遇到新問題而無預先訂定的解法時，他自己去進行所必需的自信與能力。因此，經由工廠設計及經濟的學習，工程人員應嘗試瞭解涉及各計算步驟中的假定與理論因素，而應避免成為像機器人那樣只能填入數字的習慣。

因為工業經濟學及工廠設計是討論化學工程原理的實際應用，所以研究這些學科可提供融合全部化學工程領域的一個理想方法。工廠設計的最終結果可以用錢表示之，但是這些只能經由各種理論的原理及工業上的與實際的知識之應用才能達成。在此書內理論及實際均予以注重，並且包括化學工程所有各方面的情勢。

著者感謝很多業界的公司及個人提供在此版本內使用的資料及意見。著者亦感謝使用過第一版本的很多讀者提供對此第二版建設性的批評及有助的建議。

馬克斯S. 比特斯
克勞斯D. 提摩豪斯

目次

著者原序	1
第一章 緒論	1
第二章 程序設計的發展	15
第三章 工廠設計的一般考慮	81
第四章 成本估計	137
第五章 利息及投資成本	247
第六章 稅捐及保險	301
第七章 折舊	317
第八章 可盈餘程度，變通投資，及更新	345
第九章 最適設計	421
第十章 成本及資產會計	513
第十一章 材料及工作法之選擇	533
第十二章 設計報告	585
第十三章 材料之輸送，處理，及處理設備之設計與費用	631
第十四章 熱量輸送裝置之設計及費用	785
第十五章 質量輸送裝置之設計及費用	895
第十六章 統計分析在設計之應用	997
附錄A 線性規劃的註釋	1065
附錄B 動態規劃的註釋	1083

附錄C	反應器設計的電子計算機解法.....	1099
附錄D	輔助設施及公用設施的費用數據.....	1121
附錄E	設計習題.....	1143
附錄F	物理性質及常數表.....	1195

第十三章

材料之輸送,處理, 及設備之設計與費用。

對於物料的輸送,處理及其設備的設計與費用估計,實際上是涉及了幾乎所有類型的工廠設計。最普通的物料輸送方法是用泵浦和管路。其他被廣泛使用作為各種物料輸送的設備有:輸送器(Conveyors),斜槽(chutes),閘門(gates),起重機(hoists),風扇(fans),及鼓風機(blowers)。另外還有很多特殊種類的設備可用來處理物料,例如:過濾器(filter),摻合機(blender),混合機(mixer),捏和機(kneader),離心分離器(centrifugal separator),結晶缶(crystallizer),壓碎機(crusher),研磨機(grinder),吸塵器(dust collector),鍋(kettle),反應器(reactor),及篩選器(screen)。設計工程師必須決定何種設備最能達到其目的,並且要能編製設備的規格,而在合理的費用情況下,達到程序操作的需要。故物料的輸送,處理,及其設備的最後選擇要包括:理論上的設計原理,操作上的實際問題,及成本的考慮。

泵浦及管路 所需動力之計算

設計泵浦及管路系統中，最主要的因素即是計算在該特定操作中所需要動力之大小。所需機械能均須由泵浦供應，以克服磨擦的阻力，位能，內能的變化，及在流動系統內所產生的其他阻力。

不同形式的能量可用總能量平衡，或總機械能平衡，來找出相互之關係。在穩定的情況下，以一磅流體為基準，其總能量平衡可用如下微分方程式表示為：

$$\frac{g}{g_c} dZ + v dp + \frac{V_1 dV_1}{g_c} + du = \delta Q + \delta W \quad (1)$$

總機械能平衡以微分方程式可寫成：

$$\frac{g}{g_c} dZ + v dp + \frac{V_1 dV_1}{g_c} = \delta W_s - \delta F \quad (2)$$

其中 g = 當地之重力加速度，常用 $32.17 \text{ ft}/(\text{sec})^2$

g_c = 為牛頓運動定律中的換算因數， $32.17 \text{ ft-lb mass}/(\text{sec})^2$
(lb force)。

Z = 高過任意選擇平面上之垂直距離，ft

v = 流體的比容 (specific volume)，cu ft/lb mass

p = 絕對壓力，lb force/sq ft

V_1 = 瞬間的線性速度，fps

u = 內能，ft-lb force/lb mass

Q = 由外界傳至流體系統之熱能，ft-lb force/lb mass

W = 由外界加至流體系統的軸功 (shaft work), 總功 (gross work), ft-lb force/lb mass

W_m = 由外界對流體系統所作的機械功 (mechanical work), ft-lb force/lb mass (註)

F = 因磨擦而損失的機械能 (mechanical energy), ft-lb force/lb mass

由“點 1”流體進入系統之點, 積分至“點 2”流體離開系統之點, 則總能量平衡:

$$Z_1 \frac{g}{g_c} + p_1 v_1 + \frac{V_1^2}{2\alpha g_c} + u_1 + Q + W = Z_2 \frac{g}{g_c} + p_2 v_2 + \frac{V_2^2}{2\alpha g_c} + u_2 \quad (3)$$

總機械能平衡:

$$Z_1 \frac{g}{g_c} - \int_1^2 v dp + \frac{V_1^2}{2\alpha g_c} + W_m = Z_2 \frac{g}{g_c} + \frac{V_2^2}{2\alpha g_c} + \Sigma F \quad (4)$$

其中, V 為平均線性速度, fps; α 是使用平均速度的校正係數, 當湍流時, α 值為 1, 層流時 α 值為 0.5。公式(1)至(4), 對一般的任何流動問題的處理, 幾乎足夠適用, 並且為應用到某一簡化情況之各種設計方程式之根據。

如一可壓縮的流體流經該系統, 則在公式(4)中 $\int_1^2 v dp$ 之計算較為困難。因為其壓縮或膨脹之正確路徑常是未知的。然而, 對不可壓縮的流體, 其比容 v 常保持為常數, 故積分的項可簡化成 $v(p_2 - p_1)$ 。所以, 總機械能平衡是十分的有用, 尤其是當流體可視為不可壓縮時, 更易於應用。

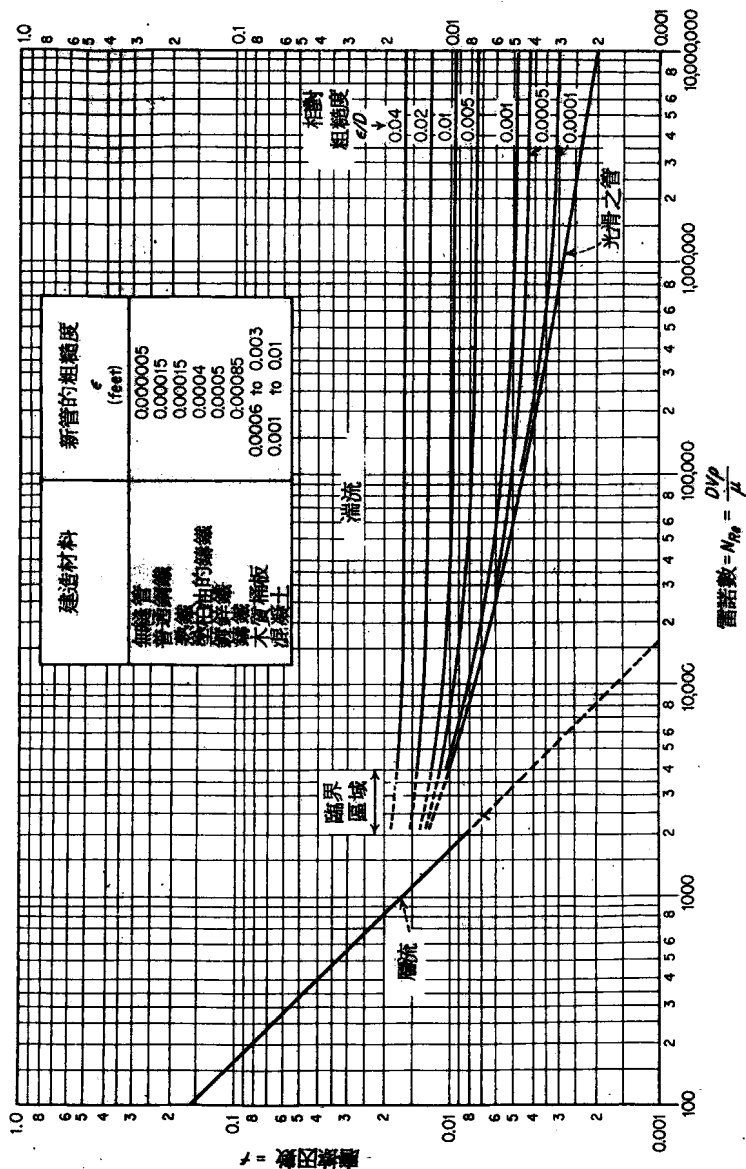
(註: 機械功 W_m 等於總軸功 W 減去由於 pump 磨擦損耗而傳至流體上能量之數額, W_m 用在總機械能平衡式中時, 泵浦的磨擦是不包括在由於磨擦而損失的機械能的項內。)

磨擦 (friction) 磨擦的效果在流動程序內極為重要。在很多情形中，流體流經一已知系統時所生之阻力的主要原因是磨擦。今考慮水流經管子之普通例子，如無磨擦之效果，則直徑很小的管子可用於所有的流速。在這種情況下，每小時推動 100,000 加侖之水通過 $\frac{1}{8}$ 吋直徑的管子和通過 2 呎直徑的同長度管子，其泵送動力費用將是相同。但是，在實際的流動程序中，磨擦之效果是存在的，而且必須加以考慮。

當流體流經一導管，其因磨擦而損失之能量，將依流體之性質和導管之長度而異。在穩定情況下，流體流經一均一直徑且長而直之導管時，其影響磨擦損失量之變數有：該流體流速 (V)，流體的密度 (ρ)，流體之黏度 (μ)，管徑 (D)，管長 (L)，及管之粗糙度 (equivalent roughness) (ϵ)。對這些變數使用因次分析法 (method of dimensional analysis)，可以得到系統中磨擦效果的公式，稱為 Fanning equation：

$$dF = \frac{-dp_f}{\rho} = \frac{2fV^2 dL}{g_c D} \quad (5)$$

其中磨擦因數 f ，是依據於實驗的數據，且經證明知其為雷諾數 (Reynolds number) 和管子相對粗糙度 (relative roughness) (ϵ/D) 的函數。圖 13-1 為直管內之磨擦因數 f 和雷諾數的關係。在層流區域內，磨擦因數不受管子相對粗糙度的影響；故在圖 13-1 中，當雷諾數低於 2100 時只有一條線。在湍流區域內，管子相對粗糙度對磨擦因數有不小的影響。對於超過 2100 的雷諾數，圖 13-1 中列有 ϵ/D 之各參數曲線。圖中，有一表指出對各種不同管製造材料 ϵ 的數值。由於決定 f 的方法並無很高的準確度 ($\pm 10\%$)，故磨擦因數之數值不宜採用兩位以上的有效數字。圖 13-1 對磨擦因數之



數值，可提供適切的準確度。

圖 13-1 所示管粗糙度之數值僅為約計值，即使對新管亦如此，而且，在使用後，由於管表面之坑蝕和侵蝕，可能會導致該數值之增加。所以，設計工程師必須認清在估計管粗糙度效果時，具有天生的不準確，並且，當進行最終設計時，此事應列入考慮。

有時在文獻上可看到和圖 13-1 類似之曲線，但對於 f 卻給予不同的定義。例如，機械工程師常採用的磨擦因數為公式(5)中所列者的四倍。

雷諾數在 2100 至 4000 間的範圍內，一般稱之為臨界區域 (critical region)。在此界限內，該流動是層流或是湍流有不少的懷疑。爲了設計的目的，最安全的實務需要假設所有雷諾數大於 2100 的都是湍流。

由圖 13-1 中層流區域的直線，可得一磨擦因數之數學公式表示法。如此，在雷諾數低於 2100 時，

$$f = \frac{16}{N_R} = \frac{16\mu}{DV\rho} \quad (6) \text{註}$$

在湍流區域內，曾經發展出許多約計的公式，指出磨擦因數和雷諾數的關係。這些公式中的兩個寫於後：

對光滑的管，

(註：將此公式代入公式(5)中，則成為衆所熟知層流的 Hagen-Poiseuille
aw)

$$f = \frac{0.046}{(N_{Re})^{0.2}} \quad (7)$$

對新的鐵或鋼管,

$$f = \frac{0.04}{(N_{Re})^{0.16}} \quad (8)$$

Fanning 公式之積分形式。假如流體之線速度、密度、及黏度保持不變, 管直徑在總管長 L 中是均一的, 則公式(5)可積分之得下列結果:

$$F = \frac{-\Delta p_f}{\rho} = \frac{2fV^2L}{g \cdot D} \quad (9)$$

嚴格說來, 公式(9)只限用於不可壓縮的流體, 而且流體的溫度是不變的。當論及可壓縮之流體時, 如空氣、蒸汽、或任何氣體, 公式(9)仍不失為一良好之方法, 只要全系統的壓力降落少於最初壓力之 10%。如流體溫度發生改變, 則公式(9)就不能以該形式使用, 除非流體黏度的總變化額少於最大黏度的 50%。(註 1, 2)

(註 1: 溫度對應摩擦因數的總效果, 在層流範圍內比在湍流範圍內更重要。前者 f 和黏度成正比, 後者 f 則與 $\mu^{0.8}$ 成正比。)

(註 2: 對於流體之加熱或冷卻, 則由管壁到流體必有一溫溫度的差額。E.N. Sieder 及 G.E. Tate, *Ind. Eng. Chem.* 28:1429(1936)曾對此情形指出一簡化的設計步驟如下: 當必須考慮溫度及黏度的改變時, 公式(9)中的摩擦因數必須採用依據流體算數平均溫度所得等溫摩擦因數 (isothermal friction factor) (圖 F3-1) 除以校正因數 ϕ , 其 $\phi = 1.1(\mu_a/\mu_w)^{0.25}$ 當 DG/μ_a 小於 2100, 及 $\phi = 1.02(\mu_a/\mu_w)^{0.14}$ 當 DG/μ_a 大於 2100。[其中 G 為質量速度, lb/(hr) (斷面積 sq ft); μ_a 為在平均溫度之流體黏度, lb/(sec) (ft); μ_w 為在管壁溫度之流體黏度, lb/(sec) (ft).]

當壓力或溫度改變時，如果使用公式(9)，爲了得到最佳之準確度，則要使用在平均溫度及壓力決定的流體線速度、密度、及黏度。對可壓縮的流體或非等溫流動的正確結果，可由 Fanning 公式，納入一切改變後，積分其微分方程式而得到。

對於非圓形橫斷面導管內之湍流，可用一相當的直徑代替該圓斷面之直徑，然後可使用對圓形導管之公式而不會有大的誤差。此相當的直徑規定爲水力半徑 (hydraulic radius) R_H 的四倍，其水力半徑是截面流動的面積對濕的周邊之比。當流動是層流時，以 $4R_H$ 代替 D ，並不能提供準確之結果，唯有對某種特定的導管形狀，才能得到有關磨擦的壓力降落與速度關係的正確公式。

由於末端損失、管件、銳孔、及其他設備的磨擦效果。如一管之橫斷面積逐漸改變爲一新的橫斷面積，因爲其對流動樣型之擾亂如此之小，以致橫斷面積改變產生之機械能磨擦損失可以忽略不計。但如果是突然的改變，則一可觀的機械能會因磨擦而損失掉。所有這些效果必須列入總機械能平衡式中所出現之磨擦項目內。對於計算各種重要類型的磨擦損失所建議使用之公式，列在表 1。

表 1 計算流體流經導管磨擦損失之公式

對於非圓形，橫斷面積及湍流，以 $4R_H = 4 \times (\text{橫斷流動面積} / \text{濕的周邊})$ 代替 D 。

磨擦起因	對磨擦損失之一般公式	限制的公式及附註
流經一不變橫斷面的長直導管	$dF = \frac{2fV^2 dL}{g_c D}$	此處主要是不可壓縮的流體，且爲恒溫時， $F = \frac{2fV^2 L}{g_c D}$

表 1 計算流體流經導管磨擦損失之公式 (續)

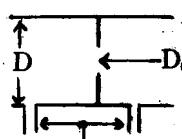
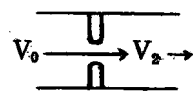
磨擦起因	對磨擦損失之一般公式	限制的公式及附註						
突然的擴大	$F_e = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2\alpha g_c}$	可以使用下列數值：湍流，$\alpha = 1$；層流，$\alpha = 0.5$  跨經銳孔量測的ΔP						
突然的收縮	$F_e = \frac{K_e V_2^2}{2\alpha g_c}$	可以使用下列之α數值於設計計算內：湍流，$\alpha = 1$；層流，$\alpha = 0.5$  當$\frac{A_2}{A_1} < 0.715$，$K_e = 0.4(1.25 - \frac{A_2}{A_1})$ 當$\frac{A_2}{A_1} > 0.715$，$K_e = 0.75(1 - \frac{A_2}{A_1})$ 對錐形或圓形，$K_e = 0.05$						
管件，閥等	$F = \frac{2 f V^2 L_e}{g_c D}$	各管件之L_e/D (無單位) <table><tr><td>45° 肘管 (elbow)</td><td>15</td></tr><tr><td>90° 肘管，標準半徑</td><td>32</td></tr><tr><td>90° 肘管，中度半徑</td><td>26</td></tr></table>	45° 肘管 (elbow)	15	90° 肘管，標準半徑	32	90° 肘管，中度半徑	26
45° 肘管 (elbow)	15							
90° 肘管，標準半徑	32							
90° 肘管，中度半徑	26							

表 1 計算流體流經導管磨擦損失之公式 (續)

磨擦起因	對磨擦損失之一般公式	限制的公式及附註
管件，閥等	$F = \frac{2fV^2L_e}{g.D}$	各管件之 L_e/D (無單位)
		90° 肘管，大彎曲 (long sweep) 20
		90° 方肘管 60
		180° 近轉彎管 75
		180° 中度半徑回轉 彎管 50
		T形管(用做肘管， 由T形底部進入) 60
		T形管(用做肘管， 由T形兩支綫進入) 90
		聯結器(coupling) 不可計
		管套節(union) 不可計
		閘閥，全開 7
		球閥，全開 300
		直角形球閥，全開 170
		水錶，盤形 400
		水錶，活塞形 600
		水錶，衝動輪形 300