

最新世界名著

工廠設計與化工經濟

(上 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

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一學期

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	I
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

第一章

緒 論

在這工業競爭的現代，一個成功的化學工程師需要有基本科學及其有關的工程項目例如熱力學，反應工程與運用電子計算機等的各種學識。他亦必須有能力應用這些學識於實際的問題來完成有益於社會的某一目的，然而在做此種應用時，化學工程師必須認清所涉及的與適當進行的經濟之含意。

新化學工廠的設計，現有工廠的擴充或改良均需要融合工程原理及理論與了解實際上由工業所限制之諸條件。新工廠或程序由概念評估開始發展至實在可收益的規模經常是一個很大而複雜的問題，一個工廠設計計劃要達到完成須經過如下所述的各階段（參照 R. Frumerman, Chem. Eng., 69(8): 133 (1962).）：

1. 起始
2. 經濟及市場的初步評估
3. 為最終設計所需數據的蒐集
4. 最終經濟的評估
5. 完整的工程設計
6. 採購

7. 安裝

8. 試傳

9. 生產

以上所述之大綱顯示工廠設計所包含廣大而不同的各種技術。包括在其中的有研究、市場分析、各個裝置的設計、費用的估計、電子計算機的程式、以及工廠位置的調查等。事實上，該大綱的每個步驟均需要化學工程師來擔任中心創造的角色，或者是主要的顧問。

化學工程工廠設計

本書中所用的工廠設計 (Plant design) 一詞包含涉及發展一個新的或改善，擴展工廠所需的所有工程技術。在這個發展中，化學工程師將要對新的程序作一經濟評估，設計擬議中新計劃所需各個裝置，發展配合全盤操作所需之工廠佈置，由於多重設計的責任，在很多情形中，化學工程師常被稱為設計工程師 (design engineer)。假如他專做設計方面有關經濟的工作則稱之為成本工程師 (cost engineer)。(參見 J. B. Weaver and H. C. Bauman, Ind Eng. Chem., 52(6); 69A (1960))。在很多情形內，程序工程一詞是指對各製造程序做經濟評估及做一般的經濟分析而言，而程序設計 (Process design) 一詞則用在執行該程序所需之裝置及設施的實際設計。同樣的，「工廠設計」一詞，被某些工程師認為其範圍為只與工廠直接有關的一些項目，例如工廠佈置，一般公用設施及工廠位置等之設計。

這本書的目的為提供工廠設計裏有關全盤計劃的主要項目。雖然一個人不能對涉及工廠設計中所有方面均為專家，但他應當熟悉在每

方面中的一般之問題及其解決步驟。程序工程師可直接參與裝置的詳細設計，而負責裝置設計的設計人員可能對經理部門對該投資的回收是否值得興建一個工廠之決定有很少的影響。無論如何，假如該全盤設計專家要成功，則需要該計劃中不同方面工作的各組工程師的密切協調。最有效的協調工作及合作只當專長不同之每個工程師能瞭解全盤設計計劃中多種任務之後才能獲得。（見 D. F. Rudd 及 C. C. Watson, "The Strategy of Process Engineering," John Wiley and Sons, Inc., New York, 1968）

程序設計的發展

—程序設計的發展，如第二章所述的，涉及很多不同的步驟。當然第一步當是基本構想的起始。這個構想可能來自銷售部門，一個顧客的要求，或者為應付一個競爭的產品。它可能為熟悉一個特定公司的目的及需要的某個人所自然想到的，或者它可能是一個依序的研究計劃的結果或此計劃的副產結果。公司的操作部門可能發展一個新的或改良的化學品，而這新產品常為其最終成品的一個中間產品。公司的技術部門可能創始一個新的程序，或改善現有的程序，以創造新的成品。在所有這些可能中，假如初步分析指出該構想有發展成為一個值得的計劃之可能性，便起始一個初步的研究或查證的計劃。對一個成功程序之可能性做一般性的測查須考慮所涉及的物理的，及化學的操作以及經濟等各方面。其次為程序研究的階段，包括初步的市場調查，實驗室的試驗，以及最終成品研究樣品的試製。當該程序的可能性業已良好的建立，則該計劃便進入可發展階段，在此時，一個實驗工場或一個中規模之試驗工廠可能予以建造。一個實驗工場是最終規

模工廠的一個小型的複製品，而一中規模試驗工廠常是由已有的各型設備拼湊的，然並不意謂在大規模工廠中要完全按照同樣的複製。

在發展階段可得到設計數據及其他有關程序之資料，這種資料用來做為進行本計劃中其他方面的依據。做一個完全的市場分析，且將最終成品的樣品送給未來的顧客，以決定該成品是否滿意，以及是否有一個合理的銷售潛力。為該擬議的工廠之資本費用做估計。決定所要投資額的可能回收率，並對該程序做好完整的成本與利潤的分析。

假如經濟方面的透視尚為滿意，則其最終程序設計階段也就可開始。在程序設計階段做好所有的設計細節，包括儀表，公用，管路佈置，報價單，各個裝置的規格及設計，以及為最終工廠建設所需要的所有其他設計資料。而後使用工廠佈置圖，及其他為實際工廠的建設所需要的資料而作成一個完全建廠設計。最終階段包括設備的採購，工廠的建造，試車，在操作中做全盤的改進，以及訂定標準操作步驟以得到最佳可能的結果。

要一個設計計劃在一合理的有組織的次序下發展，每由一階段進入次一階段均需要更多的時間，力量與費用。故在進行至每個次一階段之前要停下來並小心的分析其局勢。很多的計劃當按原始構想在初步的調查或研究完成後即予以丟棄。參與計劃的工程師在經由該計劃中不同階段進展時，必須時時面對現實與保持踏實的態度。當他要決定在某一計劃中是否值得再作些進一步之工程時，必須不要被他個人的興趣與慾望所左右。要記住，假如工程師的工作繼續地經過設計計劃之各不同方面進行時，則必然的達到一個建議即將金錢投資在該程序上。假如由該投資得不到實際有形的收益時，則該提議將不為人所接受，所以一工程師應有能力在設計計劃尚未接近最終提議階段之前取消該項無利潤的冒險。

一般的全盤設計考慮

全盤設計計劃的發展涉及很多不同的設計考慮。在全盤設計計劃中如未包括這些考慮，在很多情形下，可能大大地改變了整個經濟的局勢，而使該專案變為無利可圖。在一個完善的工廠設計的發展中必須考慮的因素為工廠的地點、工廠佈置、建造材料、結構設計、公用設施、房屋建築、倉儲、物料搬運、安全、廢物處置、聯邦、州以及當地的有關法律或規章、以及專利等。由於它們的重要，這些全盤設計所需考慮諸點將在第三章內詳細討論之。

成本估計

最終程序設計階段一旦完成，由於已有詳細的設備規格及確定的工廠設施資料，便可能做出準確的成本估計。依據詳細規格的確實價格報價，可由不同的製造廠家得到。然而如早先所提，沒有一設計工作在經濟方面被認為有利之前進行至最終階段，而成本的估計，在完全的規格尚未具有時，應當在所有設計的早期階段內做之。在初步設計方面內成本的評估，有時叫做“賭猜法”，但其適當的名稱為設計前成本估計法。

該化學工程師（或成本工程師）當做一個成本分析時，必須確定考慮所有可能的因素。固定費用及原料、人工、保養、電力及公用設施的直接製造費用，必須與工廠及行政部門的管理費，最終成品的運銷費用，及其他雜項費用包括在一起。

第四章提供很多業經發展出來做設計前費用估計的特殊方法。人工及物料的指數，標準費用比率、及特殊乘倍因數為做設計前成本估計所用資料的例子。其試驗任何費用估計的有效程度，只能當完全工廠業已進入操作時才能做之。然而，假如設計工程師對各不同估計方法及其準確度相當熟悉時，則即使在最終程序設計給與詳細的規格之前，可能做出顯著的接近成本的估計。

影響投資可盈餘程度的因素

一製造公司主管們的主要任務是極大化所有人或股東們長期的利潤。一個投資在固定設施的決定，附帶着的是繼續的利息、保險、稅捐、折舊、製造費用等的負擔，而亦減低了公司的未來行動的流動性。所以資本投資的決定必須特別小心。第五章及第八章提供做這些資本投資決定的指示。

金錢，或任何其他可轉讓資本的形式，都具有時間價值。當一製造公司投資了金錢，在使用金錢的期間，它希望能收到一些利潤，所需求的回收數額經常是隨假設風險的程度而變化的。該風險則依據使用的程序，是否為已成熟的，或者是一個完全新創的；亦可依據於要做的成品，是否是一個重要產品，或者是一個完全新的成品；亦可依據於銷售的預測，是否所有的銷售都在公司以外，或者是有一個顯著的部份為內部的等等，由於將不同程度的風險歸併入可盈餘程度預測之方法尚未良好的建立，所以最普遍的方法為提高較冒險計劃之最低可接受的收回率。

金錢的時間價值業經使用複利的關係而納入投資評估系統內。在不同的時間，增加或減少預先選定的複利率，而給予“元”不同的重

要程度。對金錢任何假設利息的價值，在任何時期一個已知數額，可以轉換為另一時期一個相當的但不同的數額。當時間逝去，可以投資的金錢便以利率而增加。假如需要金錢投資的時間是在未來，則該投資的現在價值，便可以按假設的利率由投資的時期算回現在而打個折扣。

如第六章內所示，不同形式稅捐與保險的支出，可實質上影響任何工業程序的經濟局勢。因為現在的稅捐可高到公司淨利的大部份，所以化學工程師首先當熟悉一些基本稅捐。例如對某一專案所得稅的課稅法，或隨着固定與週轉資金的不同，而其稅率亦異，所以利潤應當依據稅後所得。另方面保險費用正常只是一個工業公司的總操作花費之一小部份；然而，任何操作在良好經濟情形進行之前，需要決定保險的條件，以能確切包括未能預知的緊急或突發事項。

由於工業設施所有的物質資產隨時間而減低，故正常的辦法為在盈利中做週期的負擔，以將該設施的最初費用分攤在其預期的服務壽命。這種折舊費用，在第七章中詳述之。折舊與大多數的其他費用不同，沒有現金的支付。如是在一會計的期間，一個公司可以得到，在淨利以外相當於折舊費用的額外基金。這種現金叫資本回收（capital recovery），為物質資產的最初費用之部份再生。

所得稅法允許兩種加速折舊法及平均法（straight-line methods）以達到基金的回收。由於影響了現金流動的時間表，折舊法的選擇便顯著的影響可盈餘程度。依據於所涉及資產的可折舊與不可折舊的比例，兩個計劃在稅前看來相等，或在同樣的等級，在稅後可能完全不同。雖然兩個計劃的現金費用及銷售價值可能相等，而它們為納稅目的所報告的淨所得可能不同，其中之一將指出比另一個有較大的淨利。

最適設計

化學工程師所遭遇到的每個情形，都有幾個變通方法可以使用在任何程序或操作中。例如，甲醛可以用甲醇觸媒去氫法製造，也可以用天然氣的控制氧化法製造，或者在觸媒溫度及壓力的特殊情況下由CO及H₂的直接反應製造。這些製法都含有很多可能變通的變數，例如氣體混合的成份，溫度，壓力及觸媒的選擇。在此情形中，化學工程師的責任是選擇最好的程序並納入他的設備與方法的設計中，而能得到最好的結果，為達此需要，在第九章內描述化學工程的工廠設計各種最適化的情勢。

說來容易，我們要“最好的程序”或“最好的結果”，但是需要分析這些所代表的意義。工程師通常將“最好”字樣換為“最適”，而後加以性質的名稱，如最適經濟設計或最適操作設計。

最適經濟設計 要得到完全相當的最終結果，假如有二個或更多的方法，最好的方法將是花最少總費用的那個方法。這是最適經濟設計的基礎。最適經濟設計的示範例子是當由一地點輸送一已知數量的流體至另一地點時所用管路直徑的決定。此處其相同的最終結果（就是一個固定數量的流體在兩個已知點間泵送），可以使用無限多的不同管路直徑以達成之。然而一個經濟的平衡將可指出只有一個特定的管路直徑給予最低總費用。該總費用包括泵送該液體的費用及安裝管路系統的費用（就是固定費用）。

圖1-1指出一個最適經濟管路直徑的意思。如圖中所指示的，由於磨擦的效果，該泵送費用隨着管路直徑尺寸的降低而增加，但是由

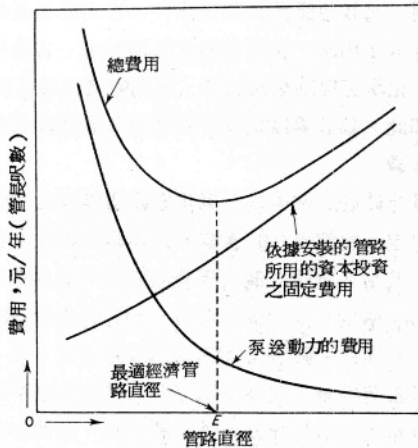


圖 1-1 有關固定物質通過速率之最適經濟
管徑直徑的決定

於資本投資的降低，管路的固定費用隨着管路直徑尺寸的降低而降低。該最適直徑，在管路的固定費用與泵送費用之和變為極小時可以得到，因為這代表最低總費用之點。在圖 1-1 中這個點是 E 點。

化學工程師常依據最低總費用之基準而選擇最終設計。在很多情形內，變通的設計並不能產生完全相等的最終成品或結果。此時必需考慮的是該成品的品質或操作以及總費用。當工程師談到最適的經濟設計時，他通常的意思是由一些相伯仲之設計中選出最便宜的一個。在第十三章至十五章中提供的費用數據是協助做這些決定之用。

在設計工作中可能遭遇到各種形式的最適經濟要求條件。例如，它可能希冀選出一個設計而能產生單位時間內最大的盈利，或者單位生產中最小的總費用。

最適操作設計 假如要得到最佳結果，則很多程序需要溫度、壓力、接觸時間，或其他變數的固定條件。常可能從直接經濟考慮中將這些最適條件分開出來。在這種形式的情形中，其最佳設計被稱為最適操作設計。化學工程師應當記住，經濟的考慮最後決定大部份量方面的決定。如此，該最適操作設計通常只是最適經濟設計發展中的一個工具或者步驟。

最適操作設計最好的例子是二氧化硫經觸媒氧化法變成三氧化硫的操作條件的決定。假設所有的變數，例如轉化器的大小，氣體流速，觸媒的活性，及進入氣體的濃度等是固定的，而其唯一可能的變數是發生氧化作用的溫度。假如溫度太高， SO_3 的產量將降低，因為 SO_3 ， SO_2 及 O_2 間的平衡移向 SO_2 及 O_2 的方向。另一方面，假如溫度太低，則產量將很差，因為 SO_2 及 O_2 間的反應率將降低。如此，必定有一個溫度而三氧化硫產量將是最大的。這個特定的溫度將會

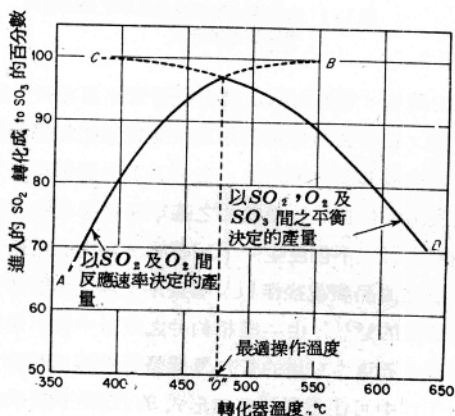


圖 1-2 二氧化硫轉化器中最適操作溫度之決定轉化器溫度

產生最適操作設計。圖 1-2 提供此例中決定二氧化硫轉化器最適操作溫度的圖解法。線 AB 代表當反應速率為主時其最高可得到的產量，而線 CD 指出當平衡條件為主時其最高的產量。點 O 代表可得最高產量的最適操作溫度。

前述的例子是工程師在設計中可能遇到的簡單情形。實際上，經常必需要考慮各種轉化器的大小及使用一連串不同的操作溫度以便達到最適操作設計。在這些情況之下，可以應用幾個相伯仲的設計，而最終的決定，將依據該伯仲的設計的最適經濟條件。

設計中實際的考慮

化學工程師必須永遠不要忽略有關他工作的實際限度。很可能要為最適經濟設計決定一個準確的管路直徑，但這並不意謂這準確尺寸必須使用在最終設計中。假設最適直徑是 3.43 吋，實際上不可能有一個特製的管子其內徑剛好為 3.43 吋。該工程師將會選擇一個標準尺寸的管子替代，而可以按正常市場價格購得。在此種情形中，其建議的管子尺寸，可能是 $3\frac{1}{2}$ 吋直徑的標準管子而其內徑為 3.55 吋。

假如該工程師碰巧對所有投資得到的適切回收非常謹慎，他可能說，“一個 3 吋直徑標準管子需要較少的投資並且可能只稍為增加總費用；所以，我想我們在決定之前，可以比較 3 吋與 $3\frac{1}{2}$ 吋管子的費用”。理論上，該謹慎的工程師在此情形中是正確的，假設安裝 $3\frac{1}{2}$ 吋管子的總費用是 5,000 元，而安裝 3 吋管子的總費用為 4,500 元。假如使用 $3\frac{1}{2}$ 吋管子以替代 3 吋管子的動力及固定費用每年節省的總數為 25 元，則按額外 500 元投資的每年回收將僅為 5%。由於可能將此額外的 500 元投資在任何其他地方，可得到多於 5% 的回