

化工原理與計算

Basic Principles and
Calculations in
Chemical Engineering

原著者：David M. Himmelblau

譯述者：翁 國 璫

科技圖書股份有限公司

化工原理與計算

Basic Principles and
Calculations in
Chemical Engineering

原著者：David M. Himmelblau

譯述者：翁

國

江苏工业学院图书馆
藏书章

科技圖書股份有限公司

本公司經新聞局核准登記
登記證局版台業字第1123號

書名：化工原理與計算
原著者：David M. Himmelblau
譯述者：翁國璣
發行人：趙國華
發行者：科技圖書股份有限公司
台北市復興南路一段360號7樓之三
電話：7056781・7073230
郵政劃撥帳號 15697

七十一年五月初版
七十二年十月二版

特價新台幣150元

序 言

寫本書的目的，在於介紹化學、石油及環境工程等方面所用的一些原理與技巧。讀者將會發現本書各章可大略分成基本名詞的複習、如何作質能平衡的說明，與應用物理化學的簡要複習等三部份。各章均附有流程圖，顯示該章各節次，與解答有關質能平衡問題間的關係。

化學工程師一向以其適應性與廣泛的基礎知識而自豪。本書的目標就是要幫助學生發展解決各式各樣涉及質能平衡的實際問題的能力。同時作更進一步，可引導讀者建立解題的一般模式。此種模式可用以解決不甚熟悉的問題。本書的設計，在讓學生熟悉足夠的基本概念，使學生能(1)繼續其它的訓練，及(2)開始解決自己所遇到的新問題。本書有許多例題及習題，使讀者有許多機會去學習如何找出問題、定義問題、收集資料、分析問題以及組織基本概念等。

最近，在準備教材時，大家都漸漸注意到教育心理學。教育心理學的一個基本原則，先讓學生熟悉各別的概念與原理，然後再讓他們來解答複雜的問題。如果本書一開始就講述一般化的例子，然後再簡化成特別例子，使讀者在基本觀念的吸收上可能有困難。故本書各章節並不按照邏輯順序排列，而是按照容易吸收的順序排列。同時，本書將較難與較易的章節交互排列，使讀者讀完較難的章節後有鬆一口氣的感覺。舉例來說，不穩定態平衡一章，須用較多數學與工程基礎，大部份學生不能像穩定態那樣容易接受，因此這一章留到最後才講。

教育心理學的另一個原理是，在介紹一新的原理後，用詳細的範例加強學習的效果。由經驗得知，要使學生瞭解一個原理與使學生有能力應用此原理之間，仍有一段距離。本書有許多例題，希望讀者經由這些例題，除加深對原理的瞭解外，尚能學到如何井然有序地解決問題。再者，各章後均附有許多習題，其中大約四分之一附有解答。這些問題可提供各位練習應用各章原理的機會。

本書特別強調一些基本原理，並將這些原理用文字及數學符號來表示，而非死記公式。本書並未詳述化學工業程序，僅在一些例題或習題中稍

爲提到。此外液 - 氣相平衡、化學平衡、及化學動力各節亦被略去。因篇幅有限且這些題目須要較多的基本知識超出本書的能力範圍。另一方面，本書介紹了真實氣體，因爲過於強調理想氣體會使學生產生錯誤的印象。對這一節不感興趣的同學可以略去而不影響以後的閱讀。本書的內容甚多，要在一個學期內教完，不太可能。因此教師們可照自己的意思作些選擇。在各章後均附有許多參考文獻，有興趣的同學可作進一步的研究。

在寫一本新教科書時，則有兩個困擾的問題：第一個問題是公制應該用到什麼程度。鑑於目前的公制化運動，本書約有百分之十到二十的例題及習題是使用 SI 單位。這些題目固足使學生熟悉此種單位，但仍不足以使學生將各量大小與日常經驗聯接起來。因爲現在的工程師多年來已習慣用英制單位設計，所以雖然某些期刊已逐漸改用 SI 單位，對大學部教科書而言，全面改用仍嫌早。

第二個問題更令人困擾的，對於需用電算機的問題。我們應如何介紹以及介紹到何等程度？若要使學生對電算機使用技術有整體的概念，則能越早介紹越好。但必須使學生在讀本書以前或同時，能初步了解電算機程式。選擇適當的習題，指出何者適合用電算機求解而何者則否，是很重要的。再次，我們做了某些讓步，每一章最後都有幾道要求學生完全用電算機程式求解的習題，其他習題，若用電算機比用計算器或計算尺爲方便，都會在題號後用星號（※）來表示。我發現，用電算機程式可減少許多冗長的嘗試錯誤步驟而增加學習興趣。

本書的完成，我首先得感謝數以百計參與準備本書原版及修訂版的學生。過去十一年來，本書各版本相繼在德州大學二年級作爲化學工程的入門課本，也由教學的經驗中做了某些修訂。D.R.Paul 博士和 J.Stice 博士提供了很多新習題，其他的教師則提出建議及改正錯誤。他們人數衆多我無法一一例舉，但阻止不了我對他們善意的幫助而表示無盡的感激。

德州，奧斯丁

台維 M. 希米爾勃勞

化工原理與計算

目 錄

序 言

第一章 緒 論

1.1 單位與因次	3
1.2 莫耳單位	13
1.3 分析與量度的慣用方法	15
1.3.1 密 度	15
1.3.2 比 重	16
1.3.3 比 容	18
1.3.4 莫耳分率與重量分率	18
1.3.5 分 析	18
1.3.6 基 量	20
1.3.7 濃 度	22
1.4 溫 度	23
1.5 壓 力	28
1.6 化合物及混合物的物理與化學性質	37
1.7 解題技巧	40
1.8 化學方程式與化學計量	42
1.9 用於解題的數位電算機	50
在本章中應能學到的知識	52
參考書目	52
習 題	53

第二章 物質平衡

2.1 物質平衡	73
2.2 物質平衡問題的分析程序	81

2.3 直接求解的問題	86
2.4 利用代數法求解物質平衡問題	95
2.5 包含結質的問題	102
2.6 回流、分流與沖洗的計算法	114
本章中應能學到的知識	124
參考書目	124
習題	125

第三章 氣體、蒸氣、固體與液體

3.1 理想氣體定律	148
3.1.1 完全氣體定律	149
3.1.2 氣體的密度與比重	155
3.1.3 理想氣體混合物	158
3.2 真實氣體關係式	162
3.2.1 狀態方程式	163
3.2.2 壓縮因素	168
3.2.3 氣體混合物	183
3.3 蒸氣壓	191
3.3.1 蒸氣壓對溫度的變化	195
3.3.2 蒸氣壓對壓力的變化	196
3.3.3 估計蒸氣壓	198
3.3.4 液體性質	198
3.4 飽和	199
3.5 部份飽和與濕度	206
3.5.1 相對飽和度	207
3.5.2 莫耳飽和度	208
3.5.3 絕對飽和度、百分飽和度	209
3.6 凝結程序與氣化程序的物質平衡	211
3.7 相的現象	217
3.7.1 相律	217
3.7.2 純成份的相現象	219
3.7.3 混合物的相現象	222
本章中應能學到的知識	228
參考書目	228

習題	229
----------	-----

第四章 能量平衡

4.1 概念與單位	255
4.2 熱容量	264
4.2.1 熱容量的估計法	270
4.3 無相變化時焓值變化的計算	272
4.4 相轉移的焓值變化	282
4.4.1 熔解熱	283
4.4.2 氣化熱	283
4.5 一般能量平衡	288
4.6 可逆程序與機械能量平衡	303
4.7 反應熱	308
4.7.1 標準生成熱	310
4.7.2 標準燃燒熱	313
4.7.3 恆壓與恆容下的反應熱	319
4.7.4 不完全反應	321
4.7.5 生成物或反應物不在 25°C 狀況時的能量平衡	322
4.7.6 反應的溫度	329
4.8 溶解熱與混合熱	331
本章應能學到的知識	337
參考書目	338
習題	339

第五章 質能平衡綜合問題

5.1 穩定狀態下質能平衡的併用	363
5.2 焓 - 濃度圖	374
5.2.1 焓 - 濃度圖的作法	375
5.2.2 焓 - 濃度圖的圖解法	383
5.3 濕度圖及其應用	392
5.4 複雜問題	404
本章應能學到的知識	412
參考書目	413
習題	415

第六章 非穩定態的質能平衡

本章應能學到的知識	461
參考書目	461
習題	461

附 錄

A. 轉換因子	469
B. 原子量與原子序	471
C. 蒸汽表	472
D. 各種有機與無機物質的物理性質	482
E. 熱容量資料	493
F. 生成熱與燃燒熱	499
G. 蒸氣壓	505
H. 溶解熱與稀釋熱	506
I. 焓 - 濃度數據	508
J. 熱力學圖	514
K. 石油分餾物的物理性質	517
L. 方程組的求解	523
M. 部份習題答案	528
N. 符號說明	531

第五單元 實用平衡問題

1.1 平衡的實用意義	531
1.2 平衡的實用意義	531
1.3 平衡的實用意義	531
1.4 平衡的實用意義	531
1.5 平衡的實用意義	531
1.6 平衡的實用意義	531
1.7 平衡的實用意義	531
1.8 平衡的實用意義	531
1.9 平衡的實用意義	531
1.10 平衡的實用意義	531

第六單元 非常平衡的實用問題

：而後的不以而為其然，千因其與與大因，立事緒緒式章本

。(noiposil elom) 率公其業其 (elom) 其真 (a)

。重出與與密 (d)

。安斷與與 (c)

。重斷 (b)

。代種 (e)

皆為對策。也需的大部亦會非工師的以而安提提，“照照何何”諸介等諸
在照照情情而照章本示示0.1圖，改其照照的照又全字不其，照照量情不一

第一章 緒 論



在美國及其他地方，人們對於資源運用的觀念已經開始轉變。過去經濟學家們最喜歡拿來當“免費品”的水和空氣，今日已逐漸增高了身價，絕非可以任意取之不盡用之不竭的自然資源。為了應付現代工業及未來工業發展的問題，我們必須要學習一些基本原理及其實際的應用。本書將詳述質能平衡的原理，及這些原理在各方面的運用。

首先我們要先複習一些已在基本化學、物理課程學過的大部分觀念。為什麼要複習呢？第一、從經驗上說要將這些熟悉的基本觀念，重新用統一而清楚的方式加以描述；第二，用以增進吾人對於工程問題的瞭解、分析及解答能力。本章所討論的觀念和原理很容易瞭解，但要熟悉地應用於各種不同的情況則非易事。一位成功的工程師非但要能承先，還要能啓後。

。

2 化工原理與計算

本章先討論單位、因次與換算因子，然後再複習以下的術語：

- (a) 莫耳 (mole) 及 莫耳分率 (mole fraction)。
- (b) 密度與比重。
- (c) 濃度測定。
- (d) 溫度。
- (e) 壓力。

接着介紹“如何解題”，這對我們以後的工作會有很大的幫助。最後複習一下計量原理，及不完全反應的處理技巧。圖 1.0 表示本章所研討課題的

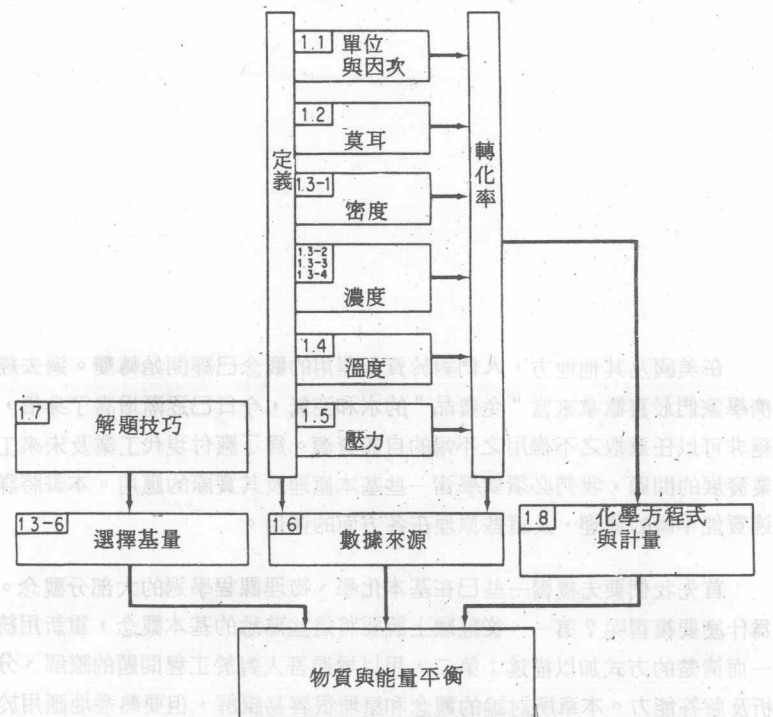


圖 1.0. 本章研討主題的關係圖（節次數目在方格的左上角）

關連性，及如何經由質量及能量的平衡去解決問題。在本章末節，你可查證一下，自己在讀完這章後，應該學會些什麼技巧。

1.1 單位與因次

每位學生一定都有過解題的煩惱。有時候計算或答案不能如想像得到。這些煩惱大致都出自於單位運用的不純熟。在作化工計算時，應較以前更加注意附在數字後面的單位 (units) 或因次 (dimensions)。如此即可免除許多這類惱人的經驗。正確地使用因次和單位，不僅可以免掉不必要的錯誤，而且可以幫助分析與問題的求解。

因次 (dimensions)，是量度的基本觀念，諸如長度、時間、質量、溫度等；單位 (units) 則是用以表達因次的方法，如長度用 ft、cm 表示；時間用小時、秒表示。有人可能誤將一些單位看成是無因次的，例如“分子量” (molecular weight)，其實它是表示某種物質一莫耳 (mole) 的質量。所以對一切有因次的量度，將單位緊附在數字後，可以得到下列幾項非常實用的好處：

- (a) 可減少計算中某些部份因疏忽而倒置的可能性。
- (b) 可將計算化為簡單的比值，便於計算尺的使用。
- (c) 可減少中間計算步驟，節省解題時間。
- (d) 可正確地瞭解題目，而不需死記公式。
- (e) 可表示出所用各數字的物理意義。

單位的處理很簡單，和處理代數符號一樣。比如說，不同的單位不能相加減或乘除而消去單位，只能在單位相同時，纔可將磅和磅，卡和卡相加、相減或相乘、相除，但却不可以 5 卡除 10 磅而得 2。單位，帶有不

4 化工原理與計算

例題 1.1 因次與單位

求：

- (a) 1 呎 + 3 秒
(b) 1 馬力 + 300 瓦特

解

對(a)而言，呎與秒代表不同的因次。1 呎為長度的因次，3 秒為時間的因次，故毫無意義。

1 hp + 300 瓦特

對(b)而言，雖然因次相同（單位時間的能量），但單位却不同。故需將其化為相同的單位如馬力、瓦特或其他單位，才可相加。因 1 馬力 = 746 瓦特。所以

$$746 \text{ 瓦特} + 300 \text{ 瓦特} = 1046 \text{ 瓦特}$$

例題 1.2 單位的換算

若有一飛機其速度為兩倍音速（設音速約為 1100 ft/sec），問其飛行速度折合每小時幾哩？

解：

$$2 \left| \frac{1100 \text{ ft}}{\text{sec}} \right| \frac{1 \text{ mi}}{5280 \text{ ft}} \frac{60 \text{ sec}}{1 \text{ min}} \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}} = 1500 \frac{\text{mi}}{\text{hr}}$$

或

$$2 \left| \frac{1100 \text{ ft}}{\text{sec}} \right| \frac{60 \frac{\text{mi}}{\text{hr}}}{88 \frac{\text{ft}}{\text{sec}}} = 1500 \frac{\text{mi}}{\text{hr}}$$

在例題 1.2 中，使用了因次方程式（dimensional equation）。其中包含單位與數字。原速度 2200 ft/sec，乘幾個同值的時間或距離的比例（或稱換算因子）而求得答案。當然，我們可在手冊中查得這些換算因子，以期簡化計算過程。如例題 1.2 中，用 60 mi/hr 等於 88 ft/sec。但我們若能熟知此類數值，而不向手冊去查則更可節省時間，在附錄 A 中記載了一般常用的換算因子。

因次方程式中，用豎線將各比值隔開。這些豎線在因子之間，實際上具有相乘的意義。本書中將使用這種型式的因次方程式，使讀者在解題時清晰地記住單位的重要性。因此除了很簡單的計算外，單位與數字永遠是一體的，直到讀者能熟悉且能靈活地運用。

在因次方程式中的任何位置，可先決定淨餘的單位是什麼，再決定尚要作那些換算。下列方式是一種方便的作法，即在因次方程式下另畫斜線，將淨餘的單位列於線下，用目視法就可消去並累計單位。

$$\frac{2 \times 1100 \text{ ft}}{\text{sec}} \left| \frac{1 \text{ mi}}{5280 \text{ ft}} \right| \frac{60 \text{ sec}}{1 \text{ min}} \left| \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}} \right|$$

ft mi mi
 sec sec min

例題 1.3 單位的使用

將 $400 \text{ in}^3/\text{day}$ 換算為 cm^3/min 。

解：

$$\frac{400 \text{ in}^3}{\text{天}} \left| \left(\frac{2.54 \text{ cm}}{1 \text{ in}} \right)^3 \right| \frac{1 \text{ 天}}{24 \text{ hr}} \left| \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}} \right| = 4.56 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$$

在本例中應注意，不僅數字三次方，單位亦隨著三次方。

全英國有一套一致的度量衡標準來量度酒、燕麥、穀子、布寬、重量等等。

當年英國大憲章（1215年6月）中的標準量度條約時就這樣呼籲着。但一直到十九世紀才有一套度量衡標準制定出來。當美國脫離英國統治獨立時，保留了英國的度量衡制度，這可能因為那是當時最完整且使用最廣的度量衡制度。

十九世紀的歐洲，各國，各城鎮，各行貿易都有不同的度量方式。這種不統一的情況使法國國民大會在大革命期間制定一套法令要求法國科學院與英國皇家協會攜手合作來設立一個度量的共同標準。但英國認為他們

6 化工原理與計算

的英制已足夠使用，由法國獨自發展一套為人熟知的公制 (metric system)。

十九世紀的科學家都喜愛公制，一方面因為這是以國際通用的度量單位獨立設定，另一方面十進位的方式有許多便利之處。隨着科學的進步，科學家們發展了許多新單位，而且以公制為基準。但美國却改革他們的英制以符合新進技術與商業上的需要，而遲不理會愈來愈受重視的公制。

由於電與磁單位的規定問題，導致許多國際性會議而提出了 SI 單位 (國際制單位)，直至 1973 年，美國仍未完全採用 SI 單位。

表 1.1 列出了近數十年來最常用的單位制。注意，SI、cgs、fps 及英國工程制中皆含有三個基本量，而第四個單位則從這三個基本量導出。在美國工程制中則含有四個基本量，所以要另外加上一個換算因子 g_c (為一常數，但數值不一定)，以便能得到適當的單位。我們可由牛頓第一定律來看單位的換算情形：

$$F = Cma \quad (1.1)$$

其中¹ F = 力

m = 質量

a = 加速度

C = 常數，隨 F 、 m 、 a 所選的單位而不同

在 cgs 制中，力的單位定義為達因 (dyne)，故若 $C = 1 \text{ dyne} / (g)(\text{cm}) / \text{sec}^2$ ，則當 $1 g$ 物質作 $1 \text{ cm} / \text{sec}^2$ 加速時，

$$F = \frac{1 \text{ dyne}}{(g)(\text{cm}) / \text{sec}^2} \left| \frac{1 g}{1 g} \right| \frac{1 \text{ cm}}{\text{sec}^2} = 1 \text{ dyne}$$

¹ 一批命名法，分列在本書之末。

表 1.1 常用的單位制度

	長度	時間	質量	力	能量	溫度	附註
絕對 (動態) 制	cm	sec	gram	dyne*	erg, joule, 或 calorie	°K, °C	正式用於科學上的
英國絕對制	ft	sec	lb	poundal*	ft poundal	°R, °F	國際上使用在一般與科學的單位
SI (或 MKS)	meter	sec	kilogram	pound (N)*	joule (J)	K, °C	
重力制	ft	sec	slug*	磅重	Btu (ft)(lb) (ft)(lb _f)	°R, °F	被美國化學與石油工程師使用
英國工程	ft	sec	pound mass (lb _m)	磅力 (lb _f)	Btu 或 (hp)(hr)	°R, °F	
美國工程							

* 由基本單位導出的，所有能量單位均為導出的。

8 化工原理與計算

同樣，在 SI 中，力的單位為牛頓 (newton, N)。若 $C = 1 \text{ N} / (\text{kg})(\text{m}) / \text{sec}^2$ ，則當 1 kg 物質作 $1 \text{ m} / \text{sec}^2$ 加速時

$$F = \frac{1 \text{ N}}{(\text{kg})(\text{m}) / \text{sec}^2} \left| \frac{1 \text{ kg}}{1 \text{ kg}} \right| \left| \frac{1 \text{ m}}{\text{sec}^2} \right| = 1 \text{ N}$$

但在美國工程制中，力與質量的數值，在地球表面是相同的。若 1 lb_m 的物體以 $g \text{ ft} / \text{sec}^2$ 加速，其中 g 為重力加速度（大約為 $32.2 \text{ ft} / \text{sec}^2$ ，依質量所處的位置而定。）我們可由下式求得產生 1 lb_f 力的 C 值。

$$F = C \frac{1 \text{ lb}_m}{1 \text{ lb}_m} \left| \frac{g \text{ ft}}{\text{sec}^2} \right| = 1 \text{ lb}_f \quad (1.2)$$

由 (1.2) 式可知， C 的單位為

$$C \propto \frac{\text{lb}_f}{\text{lb}_m \left(\frac{\text{ft}}{\text{sec}^2} \right)}$$

在緯度 45° 的海平面上，平均重力加速度為 $32.174 \text{ ft} / \text{sec}^2$ 。所以 $C = 1 / 32.174$ 。重力加速度 g 會隨着地球緯度、高度的不同而稍異。除非坐火箭遠離地表，否則偏差是很小而忽略不計的。今可令一特定符號 g_c ，為 C 值的導數，故得

$$g_c = 32.174 \frac{(\text{ft})(\text{lb}_m)}{(\text{sec}^2)(\text{lb}_f)} \quad (1.3)$$

故除以 g_c 與乘以 C 是一樣的。在美國工程制中，若 $g / g_c = 1$ ，則一磅質量與一磅力其數值恰好相等，同樣，一磅質量也等於一磅重量（重量是支持質量在靜止時所需的力）。但要注意， g 與 g_c 兩者是不同的。同樣，使用磅 (pounds) 這個單位代表質量、重量及力。但在美國工程制中，磅（質量）與磅（力）並非相同的單位，如一人造衛星在地球上重一磅（質量亦為一磅），發射至 50 哩外的高空，則其質量雖仍為一磅，但重量已非一磅了。

平常人們並不特別指出 lb 或 kg 是表示質量或重力，但可由上下文之間直接瞭解。關於單位或因次的詳細討論可參閱由 Silberberg 與 Mcke-