

質能均衡

(化工計算)

D. M. 希梅尔布劳 著

曉園出版社
世界图书出版公司

質能均衡

(化 工 計 算)

(1982 年 第 四 版)

原著者

譯著者 ~~查尔斯·H·福勒~~

曉 園 出 版 社

世界图书出版公司

北京 · 广州 · 上海 · 西安

1992

计算机组成原理(第二版)

D.M. 希维尔布劳 著

田福勋 译

晓园出版社出版

北京中关村大街137号

北京中西印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1993年1月第一版 开本: 850×1168 1/32

1993年1月第一次印刷 印张: 19

印数: 0001—850 字数: 45 万字

ISBN: 7-5062-1472-5/Z·57

定价: 13.20 元 (W_{9206/15})

世界图书出版公司通过中华版权代理公司向晓园出版社购得重印权
限国内发行

譯 序

本書第四版作了一些重大的革新，使它比第三版更充實、更適合當作教材或作自修用的參考書。正如原序所說的在每章節開始列出學習該章節所欲達到的目標，並在該章節末列出一些不太難的“自我（評估）測驗”以了解是否已達到了該節所欲達到的目標，這是一個很大的特色！另一個特色是原序未提到的，即其習題之順序是按課文章節的順序由淺入深而排列，可使讀者不必等待整章學習完了再作習題，而可在學完每章節後立即挑選一些附有答案之習題自我練習，更可收到學習效果。而未附有答案之習題，讀者可參考晚園出版社所出版的“習題詳解”，它是由多位台大化工研究生所解出的。

譯者教學多年，深感科學名詞統一的重要，故譯此書時不辭辛勞而翻閱教育部所公布之「化學工程名詞」、「化學名詞」、「化學命名原則」、「機械工程名詞」及「數學名詞」等並附原文，目的是使讀者熟悉正確的標準名詞，而不致因各科目不同譯者使用不同名詞而感到困擾，希望譯者的辛勞對讀者有助益。另外為了使此譯本能早日呈現在讀者手中，習題的翻譯直接採用由台大化工研究生所編譯的習題詳解，但其名詞譯者均按教育公布之名詞，予以統一。

本書之翻譯及校對係譯者利用教學餘暇而完成的，或有疏漏欠妥之處，尚祈讀者及諸先進不吝賜正，期能改進，不勝感激！

譯 者 謹識

原 著 序

本書目的是做為應用於化學工程，石油工程及環境工程等方面之原理與技術的介紹，書中之主題包含(1)學習如何列出式子並解(a)物質平衡(b)能量平衡及(c)物質能量同時平衡；(2)增進解題之技巧；及(3)熟悉單位，物理性質之使用以及氣體與液體之行為。每章的前面有一資料流程圖，乃顯示該章之論題與成功地解出質能平衡問題的目標如何相關。對於此第四版，我已增添一些下述的新的特點，可使教學及學習二者均較容易。

一本介紹化學工程原理及計算的好書必須(1)以簡要的文字解釋基本觀念，並充分利用適當的方程式及圖形；(2)提供充足且詳細解答的例題以清楚地說明(1)；(3)提示易被認知為大結構一部份的小概念；(4)包含小測驗及解答，可使讀者估計其學習成績；及(5)提供教師廣泛問題的選擇，以評估學生的能力。所有這些特點均已編入此第四版中。

皮加特(Piaget)曾說人類的智慧乃由具體而至抽象循序演進，而教學上的重大問題之一是教師為正式的理性者(利用抽象者)，但許多學生却仍是具體的思考者，或至多為轉移至正式有用的思考。我相信這是正確的。因此，大多數的論題均以說明基本概念的簡單例題開始。本書申論題之一乃以易理解之順序編排而非嚴格地依邏輯順序編排。其結構為簡單之教材配合較深之教材，以使讀者於經過每一困難的問題後有一“喘息”的機會。例如，不穩定狀態平衡的討論就被置放於最後一章，因為由經驗顯示，大多數的學生由於缺乏數學及工程知識的熟練，因此很難與穩定狀態平衡同時吸收這些問題。

一個教育心理學的原理為解說每個新原理後須提供詳細指導的練習以增加其學習之經驗。我們由經驗中均可發覺在使一個學生了

解一原理與建立其應用此原理之能力間有很大之差距。藉著書中每一小節後許多詳盡的例題，希望利用直接而有次序的步驟方法深入了解原理的意義。更進一步，每章之後的各類問題中，約有 $\frac{1}{4}$ 附有答案，提供了該章中所解釋原理的應用之練習。

本書中並未敘述化學程序工業，雖然其中某些方面被引用於問題中。並且，由於篇幅有限有關蒸汽——液體平衡，化學平衡，及動力學方面之論題均予省略，並因為這些論題必須要求學生具備較多的基本資料及熟練使用它。另一方面，真實氣體之論題亦包含於本書中，此乃因科學課程中過分重視理想氣體而使人們產生誤解。可跳過此章節而不影響其後的教材。本書中包含的論題多於一學期所能涵蓋的份量，因此教師可依教授進度及論題做一取捨。每章之後有許多參考資料，乃是希望需要補充資料者可深入探求而提高其興趣。藉著一系列的學習指引及教師的提示，此書亦甚適合於自修之用。

我現在提一下第四版一些新的特色，此乃前幾版中未有的特色。

每一節的開始為供讀者達成之目標表，由此表可衡量自己的學習成果。此目標須列於一節的開始或結尾雖有爭議，但此書應有目標却是無庸置疑的。然而我們却常將目標寫成廣泛而含糊的敘述，為了不使學生甚至老師無法確定是否已達到目標。（不幸地，此情況似乎並未阻止學生的自我測試。）每一組的目標均相當具體並且在該節的末尾有相關的自我評估之問題。

自我（評估）測驗納入書中以提供讀者問題及解答，以幫助他們評定及增進對一特定論題的知識。自我評估乃是對學生的一項教育經驗。自我評估問題的解答與供深入研究之補充讀物的引用乃是自我評估的固有特色。為幫助讀者思考觀念問題並決定是否深入研究為本書有評估問題的原因之一。此一方式乃與一般設計測試項目以區別受測者之優劣及供主試者對就試參與者下一結論的測試成一對比。因此自我評估並非專為滿足其他人對學生知識了解的一種測試。

身為讀者的你應如何利用此自我評估的問題呢？某些讀者將先

由問答著手，其他人將先看問題，還有些人將先看解答，此種方式及其它方式均可接受，若在此過程的最後你能說：“是的，這確是一值得的經驗”或“我已學到了某樣東西”。此自我評估材料並無時限，因此可依你的學習進度來做。我建議你先看完問題，然後寫下你認為對你較為容易的問題之最適合的回答。將你的回答與附錄A中的答案比較。當你的回答與附錄答案不同時，再閱讀該節，研究例題，試作章末的一些習題，或必要時查閱參閱資料。當你的回答與附錄答案相同時，但仍對書中內容未甚熟悉，且此內容又對你甚為重要時，則務必解一些章末附有解答的習題。做完簡單的習題後，再處理較困難的習題。

文字問題的解答長久以來均為令學生與教師氣餒的一項工作。為何學生對於文字的問題有如此多的困擾呢？教育家說是因為學生未看清問題而將此資料吸收所致。但我似乎認為主要的困難在於一旦問題被吸收後，而未推導出解題策略的學生仍無法進行求解。問題結構的困難性，複雜性，以及其他因素使一個新的問題似乎與已往見過的問題截然不同。學生不知如何開始，注意力集中何處，或如何促進其在解題方面的進步。

在本版中特別將注意力專注於提供求解物質平衡及能量平衡問題的完善對策，此對策可重複使用為解文字問題的架構。表示如何求解物質及能量平衡的所有例題均已依照此對策改變形式（見表2-1）。在教學中我要求學生記住此對策並將其應用於所有的作業問題及考題中。我擔心此自創的啓發式數字法，或“食譜”法將指示學生成功地解某類問題而對其他的問題却遭挫折。故學生將被引導建立求解問題的通則，此通則可成功地用於不熟悉類型的問題上。本書設計成使學生能充分的了解基本觀念，以便能夠(1)繼續其訓練，且(2)自行開始求解新類型的問題。書中提供尋找問題，定義問題，收集數據，分析及處理資料，歸納基本觀念的類型，以實際驗算解答之外的一切事之練習。

一個著者在準備一新版書時有兩個困擾的問題。一個是SI制應使用至何程度。很明顯的美國大多數的化學工程系均已轉用SI

制，雖然對此制度仍有一些阻力存在。我相信 SI 制為化學工程師必須能夠處理的重要量測系統，但覺得化學工程的學生應熟悉不同的制度以備來年之需。因此，將大學教科書完全改為 SI 制單位是過早的，既使大多數的期刊已完全採用 SI 制。為折衷起見，本書一半稍多的部分，例題，問題及大多數的表採用 SI 制。為求方便，一些重要的表，如蒸汽表，以美國工程制及 SI 制兩者表示。

第二個困擾的問題是書中應介紹以計算機求解的問題之程度及方式為何。若計算機技術能夠成功地在課堂上使用，則早做此種設想是明智的，但另一方面計算機程式的製備必須先假設學生於使用本書之前或同時接受計算機程式的訓練，由適當問題的選擇及良好的計算機習性可知，計算機求解的例子並不同時適合重要的例子。再一次，需做個折衷。在每章的結尾你將發現一些需要計算機求解的問題。其他較適合以計算機程式而非計算器庫存求解的問題，特別是用“庫存”程式，均在題號後加註星號（*）。我發現庫存計算機程式的利用將減少許多試誤求解法的麻煩，並且增加學習過程中的興趣

我誠摯地感激許多參與本書原版及再版工作的學生。Drs. Robert S. Schechter 與 James B. Riggs 曾善意提供許多新問題，以及許多使用本書的教師們提供著者的改正與建議，著者無法一一列舉大名。然而，對他們善意的協助我誠摯地表示感謝之意。

David M. Himmelblau
Austin, Texas

目 錄

第一章 工程計算緒論

1. 單位與因次 3 / 2. 英耳單位 16 / 3. 分析與量測的慣用方法 18 / 4. 基準 26 / 5. 溫度 29 / 6. 壓力 35 / 7. 化合物及混合物之物理及化學性質 46 / 8. 解題技巧 49 / 9. 化學方程式與化學計算法 52 / 10. 數字計算機用於解題 61 / 習題 64 / 應用計算機程式的問題 85

第二章 物質平衡

1. 物質平衡 89 / 2. 物料平衡問題之分析步驟 98 / 3. 含有直接解的物質平衡問題 107 / 4. 利用代數法求解物質平衡 120 / 5. 包含關係成份之問題 145 / 6. 循環、旁路及沖流之計算 145 / 習題 162 / 應用計算機程式的問題 186

第三章 氣體、蒸氣、液體及固體

1. 理想氣體定律 190 / 2. 真實氣體關係式 206 / 3. 蒸氣壓 236 / 4. 飽和 244 / 5. 部分飽和及濕度 252 / 6. 包含冷凝及汽化之物質平衡 258 / 7. 相之現象 267 / 習題 274 / 應用計算機程式的問題 295

第四章 能量平衡

1. 觀念及單位 301 / 2. 熱容量 309 / 3. 焓變化量之計算(無相之變化) 318 / 4. 對相過渡之焓變化 328 / 5. 一般能

量平衡 335 / 6. 可逆程序與機械能平衡 355 / 7. 化學反應之能量平衡 362 / 8. 溶解熱與混合熱 390 / 習題 397 / 應用計算機程式的問題 424

第五章 物質與能量綜合平衡的應用

1. 物質與能量同時的平衡 427 / 2. 焓-濃度圖 442 / 3. 濕度圖及其應用 459 / 4. 複雜問題 475 / 習題 483 / 應用計算機程式的問題 503

第六章 不穩態物質和能量平衡

1. 不穩態物質和能量平衡 505 / 習題 524

附錄A 自我測驗之答案 531

附錄B 原子量及原子序 539

附錄C 蒸汽表 541

附錄D 有機及無機物質之蒸汽的物理性質 547

附錄E 熱容量方程式 557

附錄F 生成熱及燃燒熱 563

附錄G 蒸氣壓 567

附錄H 溶解熱及稀釋熱 569

附錄I 焓-濃度數據 571

附錄J 熱力圖 577

附錄K 石油餾分之物理性質 581

附錄L 方程式組之求解 587 索引 595

第一章

工程計算緒論

- 1-1 單位與因次
- 1-2 莫耳單位
- 1-3 分析與量測的慣用方法
- 1-4 基準
- 1-5 溫度
- 1-6 壓力
- 1-7 化合物及混合物之物理及化學性質
- 1-8 解題技巧
- 1-9 化學方程式與化學計算學
- 1-10 數字計算機用於解題

環境與經濟的問題今日比過去更普遍被關心。可以將其分成二類：環境與生產、利益與費用，討論其對進步的不利影響。事實上在作決定時有很廣範圍的選擇自由存在，在你要作明智決定之前需要一些準備。對你要學習如何去判斷及處理發生於我們現代的工程學問題，尤其發生於將來的工程學問題，故必須學習某些基本原理及其實際的應用。本教科書敘述如何寫出物質及能量平衡的原理，並利用各種不同方法來說明這些原理的應用。

在本章中我們先複習一些基本知識。在基本的化學及物理課程中，你已學到大部分的觀念。那麼為什麼需要複習呢？第一，從經驗中我們發現需要以更一般性且更清晰的方式來重述這些熟悉的基本觀念；第二，你需要練習以發揮你對工程問題分析和處理的能力。要閱讀並了解本章中所討論的原理是相當容易的；但要將這些原理應用於各種不熟悉的情況却不太容易。一個工程師若能精通前人所發展的技術則對其擔任的職務必能勝任，據此可以開拓新的技術。

本章先討論單位、因次、及換算因數，然後繼續複習一些你已經熟悉

2 第一章 工程計算緒論

的項目，譬如：

- (a) 莫耳及莫耳分數
- (b) 密度及比重
- (c) 濃度的量度
- (d) 溫度
- (e) 壓力

然後，提供一些關於“如何解題”的線索，它對你解出其餘部分的問題有實際的幫助。最後，複習化學計算的原理，並說明處理不完全反應的技巧。圖 1-0 說明所要討論各主題的相互關係，主要的目的是能夠解出涉及質量與能量平衡的問題。

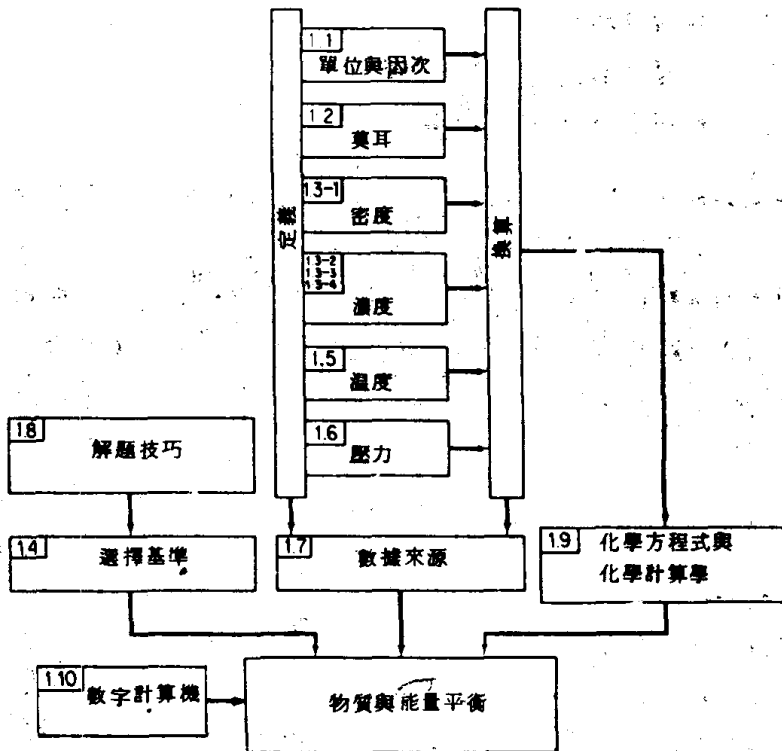


圖 1-0 本章中所研究各主題的關係圖（章節數目列於方塊的左上角）

1-1 單位與因次

在學習此節時你的目標是能夠：

1. 數字和單位在一起的加、減、乘、除運算。
2. 將函數或方程式中的一組單位換算成關於質量、長度、面積、體積、時間、能量、及力等另一組相等的單位。
3. 指定在 SI 制及美工程制中關於質量、長度、體積密度、及時間，並其相等量的基本單位與導出單位。
4. 說明重量與質量間的差別。
5. 定義並知道如何使用重力換算因數 g_c 。
6. 應用因次一致的觀念以決定函數中任一項的單位。

每一個學生有些時候會嚐到解題失敗的痛苦。不知何故，其解答或計算不能達到所預期的結果。有時此種結果的產生是由於在處理單位時缺乏經驗。在你的計算中需要比你過去的運算更注意數字和單位或因次一同使用，如此可以避免此種惱人的經驗（失敗的經驗）。在解題中適當的使用因次不僅合乎邏輯的觀點，而且可幫助你由手邊的資料如何循著一適當的分析途徑，引導你如何去解決以求得最後的解答。

因次（dimensions）是量測的基本觀念，像長度、時間、質量、溫度等等，單位（units）是表示因次的方法，譬如長度用呎或厘米表示，時間用小時或秒表示。單位與一些量合併使用，這些量你以前可能當作無因次來使用。物質的分子量是一個很好的例子，它實際上為每莫耳該物質的質量。將不是無因次的所有數附上單位的方法有下列實際的益處：

- (a) 在任一部份計算中可減少不留意而倒置的可能性。
- (d) 在很多情況中它可簡化成簡單的比值而便於用手操作之計算器（如計算尺）的運算。
- (c) 可簡化中間的計算而節省相當多解題的時間。
- (b) 可以使你合理的解出問題而不必死記公式或將數字硬代入公式。
- (e) 可以顯示你所使用數值的物理意義。

每一個新生知道將蘋果加入橘子中而成為水果色拉 (fruit salad)
! 處理單位的規則也是十分簡單：可像代數符號一樣來處理單位。你可將相同的單位 (如磅、瓦特等等) 相加減，但不同的單位則否。因此下列的運算

$$5 \text{ 公斤} + 3 \text{ 卡}$$

是沒有意義的因為二項的因次不同。下列數值的運算

$$10 \text{ 磅} + 5 \text{ 克}$$

是可以完成的 (因為其因次均為質量) 只要將其換算成相同的單位就行，可換成磅、克、或盎司 (ounce) 等等。在乘除運算中，你可將不同單位的量相乘或相除，譬如 (10 厘米 + 4 秒) = 2.5 厘米 / 秒，但你不能將單位消去。包含在有意義之資料中的單位是不能忽略的。它們可作為解題的有效指引，正如下面你將看到的例子。

例1-1 因次與單位

將下列相加

$$(a) 1 \text{ 呎} + 3 \text{ 秒}$$

$$(b) 1 \text{ 馬力} + 300 \text{ 瓦特}$$

解：

此運算可表示為

$$1 \text{ 呎} + 3 \text{ 秒}$$

由於此二項的因次不同故上述運算無意義。一呎的因次為長度，而 3 秒的因次為時間。第二個例子可表示為

$$1 \text{ 馬力} + 300 \text{ 瓦特}$$

其因次相同 (每單位時間的能量) 但單位不同。在相加之前我們必須將二量化成相同單位，譬如馬力、瓦特、或其他單位。由於 1 馬力 = 746 瓦特，故

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

例1-2 單位換算

若某飛機以二倍的音速航行（假定音速為1100呎/秒），則相當於每小時若干哩？

解：

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

或

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

你將注意到在例題 1-2 中所使用的稱為因次方程式（dimensional equation）。它同時含有單位及數值。最初的速度，2200 呎/秒，乘以若干比例值〔稱為換算因數（conversion factors）〕它們是將時間、距離合併的相等值，則可達到最後所希望的答案。所用的比例值是大家所知道的簡單值，因此單位換算本身沒有問題。當然，可能改進換算比例值而使計算長度減少；例如，在例題 1-2 中我們可使用 60 mi/hr 等於 88 呎/秒的換算因數。然而，使用你所知道的值通常比由手冊中查出縮短的換算因數，所花的時間更少。常見的換算因數列於書末的附錄 A。

因次方程式中利用垂線將每一個比值分開，而這些垂線置於各比值間與相乘（×）的符號意義相同。在本教科書中均使用此種形式的因次方程式，使你能清楚記得解題中單位的意義。建議你將單位緊附在該數值之後（除非計算很簡單）直到你十分熟悉單位和因次的使用，而可在腦中運算。

你可在因次方程式中任一點決定合併的淨單位，而知道何者還須要換算。下面所示的方式是一個很實用的方法，即在因次方程式的下方另畫若干斜線，而在這些線上寫出合併的單位，或以眼睛觀察合併，用心算消去並累積這些單位。

$$\begin{array}{ccccccc}
 2 \times 1100 \text{ ft} & 1 \text{ mi} & 60 \text{ sec} & 60 \text{ min} \\
 \text{sec} & 5280 \text{ ft} & 1 \text{ min} & 1 \text{ hr} \\
 \hline
 \text{ft} & \text{mi} & \text{mi} & \\
 \text{sec} & \text{sec} & \text{min} &
 \end{array}$$

例1-3 單位的使用

解：

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

注意在此例題中不僅數值要升為三次方，而且單位也要升為三次方。

假若閱讀英國大憲章 (Magna Carta) (1215 年 6 月) 有關標準度量的條款時，發現這些標準直到十九世紀均未作重大修訂。當美國殖民地脫離英國而獨立時，他們仍保留原來使用的度量衡。可能在當時，這些度量衡標準很穩固而廣泛地使用於世界各地。

在歐洲大陸這些度量衡標準並不那麼一致。度量衡標準不僅在各國之間彼此不同，甚至在各城鎮之間以及各商場之間也彼此不同。此種均一性的缺乏，導致法國國民大會 (National Assembly of France) 在法國革命期間頒佈一法令 (1790 年 5 月 8 日) 而要求法國科學院 (French Academy of Sciences) 與倫敦皇家協會 (Royal Society of London) 共同合作以“推導一個對於所有度量衡不變的標準”。由於英國認為已具有適當的度量衡系統，而未參與法國的計劃。由於法國的努力結果，已發展出著名的公制系統 (metric system)。

確實地，在美英系統中有很多混淆的地方。一個老問題：“一磅羽毛與一磅金子，那一個較重？”事實上用手一抓是不太正確的。由於金是用金衡單位 (troy units) 量度的，故一磅羽毛較重；專屬金衡的磅只包含 12 兩而不是 16 兩。但一盎司 (ounce) 羽毛比一盎司金子輕，因為金衡的盎司 (或藥劑的盎司) 比常衡的盎司為重！此例子說明“通俗的”單位其中的一個問題：使用一個名稱有不同的單位。

在十九世紀的科學家比較喜歡公制系統，一部分是由於公制系統打算成為國際的量測系統，一部分是由於公制單位在理論上可假定具有獨立的重現性，一部分是由於其十進位的簡單性。這些科學家對於所觀察到的新物理現象導出新的單位，這些新單位根據物理的基本定律而和公制系統的質量及長度單位相關聯。美國和英國將其量測系統改訂，以配合事業與商業上及科學上新技術的需要，不是因為其他國家相繼地改成公制的趨勢。

爲了使電磁學的單位能明確表示的問題，而召開許多的國際會議以改正其不一致性，此種努力於1960年達到極點，在第十一次度量衡聯合會議中決定採用SI (Systeme International) 單位系統。在此時期美國是最後一個大國不使用SI單位，或不從事於將一些形式轉換成SI單位。

表1-1及1-2所示者係最近數十年工程師所最常見的單位系統。注意：SI, cgs, fps (英絕對制)，及英工程制均具有三個基本定義的單位，而第四個單位是由這三個基本定義的單位導出的。

在SI制中許多導出的單位有特殊的名稱 (參看表1-2) 是爲紀念一些物理學家，並有相對應的符號。例如，力的單位其符號爲 $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ；爲了方便起見，此組合符號被稱爲牛頓 (newton) 而其符號爲N。同理，能量的單位爲牛頓·米，即

$$\text{N} \cdot \text{m} \Leftrightarrow \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$$

其短名爲焦耳 (joule)，而符號爲J。功率的單位瓦特 (watt)，可定義爲每秒一焦耳。

只有美工程制具有四個基本定義的單位。因此，在美工程制中你必須使用換算因數， g_c ，爲一常數其數值不等於1，以使單位一致。我們可利用牛頓定律來判斷什麼情況須要考慮單位的換算：

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

其中 F = 力

m = 質量

a = 加速度

C = 一常數其數值和單位依所使用的 F, m ，及 a 的單位而定

在cgs制中，力的單位被定義爲達因 (dyne)；因此若 C 被選擇爲 $C = 1 \text{ dyne}/(\text{g})(\text{cm})/\text{sec}^2$ ，則當1 g被加速至1 cm/sec²時的力爲

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