

基礎食品程序工程

Fundamentals of Food Process Engineering

原著者：RT. Toledo.

譯述者：張森發

科技圖書股份有限公司

序 言

食品工程是食品科學課程中較不普及的一門課其原因主要是大部分主修食品科學之學生的數學基礎較差、學生無法銜接此課程的內容與經驗而且無法預見其與未來工作需要之關係，食品工程之教學因之在學生之學習動機及老師之教學動機仍存有一些問題；學生常覺得對這門課所費的時間、精神與獲益不成比例，老師則對學生之不會解題與分析感到困擾。食品工程之教學若因此而只著重於加工系統及設備之敘述性說明，則食品工程之教學無異於食品加工教學，也即學生不能從食品工程所學中對食品加工再獲得新的深入看法。

創意，以異於傳統方法解決問題之能力，為各種工作領域成功之關鍵因素。在食品科學領域裡，程序、設備及新產品開發之創意來自對基礎科學原理之認識與應用，食品工程之訓練即在要求學生經由此類問題之分析而認識基礎原理並應用基礎原理以推演分析性之問題解決，學生有了這種訓練則在遇到問題時使會鑽研適用之基礎科學原理、尋求類似問題之解法方法，此食品工程領域之問題解決觀念亦可適用於食品工業中之各種程序，亦即只有透過分析方能了解各種操作變數對程序功能之影響、學得程序操作之最適條件及其問題之研判，因此在食品工程之教學中解題不可視為一最終目標，解題乃為分析的一種工具、解題的主要目的乃在於從解題之探討中了解食品加工應有之觀念。

筆者為了上述之教學目標而編寫本書——基礎食品程序工程 (*Fundamentals of Food Process Engineering*)，本書根據喬治亞大學食品工程教材之部分內容而編寫，主要供主修食品科

2 基礎食品程序工程

學之學生使用，但書中之部分主題工程師亦可隨時參考：非牛頓性流體流動、非牛頓性流體傳熱、低溫保藏、環境控制貯藏、濃縮時之蒸氣再壓縮、保存及脫水食品之水分活性、微生物惰化之加熱處理時間計算。

第一章為解答書中例題及了解導數所必要之數學複習，本章儘量寫得詳細以便學生能自習，教師之課堂授課可自微積分部分開始。

本書採用英制及國際制單位 (SI)，在目前之 SI 採用過渡時期各技術人員應同時熟悉兩種單位制，教師可據實際需要選擇任一種單位。在第 8 章加熱處理之計算則採用英制單位：Z 值之單位若同時以 $^{\circ}\text{C}$ 及 $^{\circ}\text{F}$ 表示則極易混亂、 $f_0/U-g$ 之關係表若採 SI 之單位則就本書之目的來講並不一定得宜，工業界採用 SI 單位之時機一旦成熟這些關係表就會以相當之 SI 單位表示。

筆者謹向大學行政當局表示謝意，尤其食品科學系主任 Dr. J. B. Smit 在本書手稿準備期間之支持與鼓勵。並感謝打字之 Miss Beth Knight、製作圖表之 Miss Kathy Hamdy，又 Mr. Jeff Schweid 細心閱讀初稿、修正數學錯誤並演算習題以確認習題是否適合於修讀本課之學生。

筆者也謝謝 AVI 出版公司 Dr. D. K. Tressler Dr. N. W. Desrosier 及 Ms. Lisa E. Melilli 之鼓勵及協助，使得此書能以目前之面目出版。

最後謝謝 1968 至 1975 年間修讀食品科學系課號 411~611 及 612 及 612~612 之學生；當時我在實驗教材的時候，他們忍受很多教材實驗時之麻煩，願未來修讀食品工程之學生能從他們學長之犧牲中獲益。

Romeo T. Toledo Ph.D.

1979 年 5 月

李 序

本譯述基礎食品程序工程之原著者 Romeo, T. Toledo 為美國食品工程科學教育之著名學者，他致力於食品工程教學之研究與推廣多年，1977 年曾被美國食品科技學會 (Institute of Food Technologists) 聘為十年一次之食品工程學科檢討之主持人，1985 年成為該學會之資深會員，其原著 Fundamentals of Food Process Engineering 在美國為廣泛使用之食品程序工程教科書，國內也因該書之採用而使食品工程之教學逐漸統一與落實。

台灣目前正值食品工業之轉型期，此轉型期中食品工程在食品工業擔負極重要的角色，舉凡加工設備操作之評估、傳統食品之工業化生產、設備投資之分析均需仰賴食品工程之知識。食品工程中之程序工程強調物理原理在食品加工保藏技術之應用，探討食品加工、貯運設備與基礎科學原理之關係，其為食品科學與工程科學之媒介學科，不但是當前食品科技人員必備之基礎工程科學知識，也是有志食品機械、食品控制工程等其他食品工程領域之工程師必備之食品科技知識。

譯者張森發君先後畢業於國立中興大學及美國夏威夷大學，曾任職瑞洲冷凍食品公司等工廠數年，現任教於國立屏東農專食品工業科，他的工作、教學與研究經驗使他能在本譯述中將工程學之原理及工程科技術語融入書中，等者深信此書必能達成其譯

2 基礎食品程序工程

述之初衷—幫助學生解決學習之困難與困擾，又此書之文字淺明，食品科技從業人員亦可做為極佳之參考書籍。

中 華 民 國 食 品 科 技 學 會 理 事 長



識於行政院農業委員會農糧處食品加工科

中華民國七十五年二月

譯述者序

早期食品工程方面之課程大都安排在研究所之階段實施，即食品科系或工程科系學生在進入研究所後才選讀，這種課程安排方式常使傳統食品科系學生在大學中未能得到適當之工程課程訓練，近年由於食品工業之劇烈變遷及食品工程內容之逐漸成熟，食品工程已逐漸列入大學課程中，食品工程中之食品程序工程更為各級食品科系必修之課程。

食品程序工程為食品工程之基礎課程，也為有志食品工程學生繼續修讀其他食品工程課程之先修課程，食品程序工程與化學工程中之單元操作、反應動力學（分別研究各種共通、基本化學工業程序之物理原理及化學反應速率）相當，但食品程序工程受食品工業發展之背景及特性影響，其在傳統食品加工與保藏技術中並未如在化學工業上之發展。因此食品程序工程教材之單元操作大都沿襲化學工程單元操作之分類傳授，反應動力則形成一些特有之分類法，諸如：食品加熱處理時之微生物熱惰化及營養素分解評估，果蔬環境控制貯藏、運輸時之呼吸速率及氣體組成控制，食品脫水條件影響產品品質之評估。

筆者授食品程序工程兩年，在曾使用之參考書中一直認為 Dr. Romeo. T. Toledo 所著之 *Fundamentals of Food Process Engineering* 最考慮食品科系學生之學習因素，此書之演繹、分析編寫方式可使學生獲得最高之學習效果，其他相關書籍則大都為工程科系學生修讀此課程而編寫，對初習工程課程之食品科系學生並不很恰當。但儘管如此筆者在教學中仍發現學生對此譯述之原著有不少學習上的困擾與困難，譬如學生不熟悉工程

2 基礎食品程序工程

學之學習方法，對基礎科學：數學、物理、物理化學在應用上之銜接有困難，也不熟悉基礎科學之原文專有名詞。筆者譯述此書之動機可說是爲了減輕學生之學習負擔而起。最後也希望此書能給在學期間未有適當工程訓練而目前仍於食品工業界服務之科技人員參考。

張 森 發

國立屏東農專食品工業科

基礎食品程序工程

目 錄

序 言

李 序

譯述者序

1. 數學複習

1.1 方程式之作圖及方程式之圖形求法.....	1
1.2 微分學.....	22
1.3 積分學.....	35
習 題.....	46
參考書目.....	51

2. 單位與因次

2.1 名詞定義.....	53
2.2 單位系統.....	54
2.3 國際制單位, SI.....	54
2.4 單位換算.....	57
2.5 因次常數, g_c	62
2.6 使用 g_c 以換算單位.....	63
2.7 物理方程式因次之一致.....	65
習 題.....	66
參考書目.....	68

3. 質量平衡

3.1 基本原理	70
3.2 稀釋、濃縮、脫水程序之質量平衡	77
3.3 調配程序之質量平衡	79
3.4 利用連繫成分及假定條件以解答質量平衡問題	81
習題	89
參考書目	90

4. 氣體與蒸氣

4.1 氣體動力論	91
4.2 理想氣體方程式	92
4.3 理想氣體之壓力 - 體積 - 溫度關係	95
4.4 絕對壓力	99
4.5 分壓及分體積	101
4.6 蒸氣 - 液體平衡及液體之蒸氣壓	105
4.7 氣體混合物含蒸氣之能力	108
4.8 濕度學	113
習題	117
參考書目	119

5. 能量平衡

5.1 熱力學第一及第二定律	121
5.2 能量的形式及單位	122
5.3 熱	123
5.4 飽和蒸氣及過熱蒸氣之性質	130
5.5 熱量平衡	136

習 題	142
參考書目	144

6. 流體之流動

6.1 粘度的觀念	145
6.2 流變學	148
6.3 流體輸送	167
習 題	188
參考書目	192

7. 傳 熱

7.1 傳熱機構	194
7.2 溫度測定設備的操作原理	195
7.3 穩定狀態之傳導傳熱	196
7.4 對流傳熱	207
7.5 傳導 - 對流混合模式傳熱系統之總傳熱係數	208
7.6 自然對流傳熱係數與凝結蒸氣傳熱係數	213
7.7 自由對流傳熱係數在傳熱系統評估上之應用	215
7.8 強制對流傳熱係數及其在傳熱系統評估上之應用	218
7.9 傳熱系統中之傳熱限制熱阻	225
7.10 熱交換設備	225
7.11 熱交換器之傳熱	228
7.12 輻射傳熱	232
7.13 微波加熱	235
習 題	237
參考書目	240

8. 加熱處理

8.1 定溫之微生物熱惰化速率	241
8.2 溫度對微生物惰化速率之影響	247
8.3 流體食品連續加熱處理之計算	251
8.4 折算任何溫度之加熱時間為 250°F (121°C) 之加熱時間以評估加熱處理時之殺菌程度值	255
8.5 罐頭食品加熱處理計算	257
8.6 加熱處理時產品成分分解之評估	275
習題	278
參考書目	281

9. 低溫保藏

9.1 機械製冷系統	283
9.2 製冷系統之熱力學	286
9.3 壓力-焓圖上之製冷循環及循環時焓值之變化	290
9.4 冷媒壓力-焓圖之使用	296
9.5 凝結器及蒸發器	300
9.6 壓縮機	305
9.7 低溫負載/冷藏負載/冷凍負載	306
9.8 冷藏食品貯藏時之溫度要求	313
9.9 環境控制貯藏, CA 貯藏	313
習題	323
參考書目	325

10. 濃 縮

10.1 單效濃縮機	326
10.2 濃縮機能源效益之改善	339

10.3 香氣回收.....	346
習 題.....	347
參考書目.....	348
 11. 脫 水	
11.1 水分活性.....	349
11.2 質量流動.....	358
11.3 脫水時所同時發生之質量流動與能量傳遞.....	363
11.4 脫水期.....	367
11.5 由脫水數據估計脫水時間.....	368
11.6 噴霧乾燥.....	375
11.7 冷凍乾燥.....	382
習 題.....	387
參考書目.....	390
 附 錄	392
習題答案	404
中文索引	411

數學複習

1.1 方程式之作圖及方程式之圖形求法

1.1.1 變數與函數

可假定為任何值之量稱為變數，在代數上變數通常由英語之最末幾個字母表示；物理及工程上之變數則由英語或希臘字母表示。函數用來表示變數間之數學關係，函數通常以字母F表示；譬如表示x與y關係之方程式 $y = 2x + 4$ 可用函數表示為：

$$y = F(x), \quad F(x) = 2x + 4$$

變數可分為自變數與因變數；方程式中自變數與因變數通常分別列於等號之兩側，在數學上兩者不易區分，且地位可以互換，因之若x與y之函數關係表示為 $y = f(x)$ ，則x為自變數，y為因變數；若表示為 $x = f(y)$ 則y為自變數而x為因變數。但物理、化學上變數之地位則據其性質或實驗方式而有不同之地位，譬如在溫度、濃度與反應速率常數之研究裡，溫度、濃度常為設定之定值變數，其為自變數，而反應速率常數為據設定條件所得之實驗值，故其為因變數。但在平衡吸濕數據中，平衡相對濕度與平衡含水率兩者互相影響，地位不易區別，故兩者均可為自變數，亦可為因變數。

1.1.2 垂直座標系統

座標系統通常用來表示函數之圖形關係，垂直座標系統由兩

2 基礎食品程序工程

垂直線組成，水平之直線稱為 x 軸，垂直之直線稱為 y 軸，兩軸之交點稱為原點。圖 1.1 說明垂直座標系統之 x 軸、 y 軸、原點、象限。在垂直座標系統上圖上的一點由一數對 (x, y) 指示其位置，此數對稱為該點之座標，數對中之 x 係由原點沿 x 軸至該點所測之距離，數對中之 y 則為原點沿 y 軸至該點所測之距離，座標上某點所代表之數對通常用來表示函數中的變數，即 x 用來表示函數中之自變數 x ， y 則用來表示因變數 y ，如此則函數中之自變數 - 因變數 $x - y$ 可由座標圖上座標為 (x, y) 之點表示，因此表示函數關係之方程式可由其自變數與因變數的關係在座標圖上得到一相當之軌跡，此軌跡稱為函數之圖形。函數之圖形依方程式之形式而異；一次方程式之函數圖形為直線，非一次方程式之圖形則為曲線，一個或二個變數之方程式可於兩度之空間

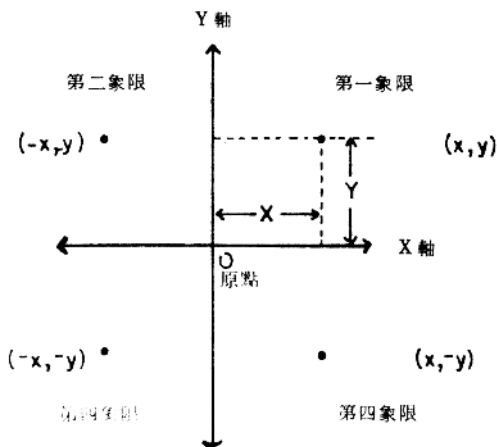


圖 1.1 垂直座標系統

表示；即函數圖形為平面圖，若變數有三個則其圖形需在三度空間表示，即函數圖形為立體圖。垂直座標系統之座標軸通常為算術刻劃；算術刻劃之座標，沿 x 軸或 y 軸兩數對距離之差，分別與 x 或 y 變數值之差成正比，假如一單位變數之差相當於 1 cm ，則兩數據 $(3, 5)$ 、 $(6, 7)$ 沿 x 軸所測之距離為 $3\text{ cm} : (6-3) \times 1$ ，沿 y 軸所測距離為 $2\text{ cm} : (7-5) \times 1$ ；但座標系統兩座標之刻劃標準可以不同，譬如一單位變數之差在 x 軸可以為 1 cm ，而在 y 軸可為 2 cm ，如此則數據 $(3, 5)$ 、 $(6, 7)$ 沿 x 軸所測之距離為 $3\text{ cm} : (6-3) \times 1$ ，沿 y 軸所測距離為 $4\text{ cm} : (7-5) \times 2$ 。

假如一座標軸不為算術刻劃則其為變形之垂直座標系統 (Transformed rectangular coordinate)，此系統座標將於本章繼續討論。

1.1.3 直線方程式

直線方程式作圖前，若能將方程式寫成下列標準形式，則可簡化作圖之程序。

(1) 斜截式

$$y = ax + b$$

則 a 為直線之斜率， b 為直線在 y 軸之截距，斜截式直線方程式之作圖參考圖 1.2 之左圖。

(2) 點斜式

$$(y - b) = a(x - c)$$

則 a 為斜率，且直線通過以 (c, b) 為座標之一點，點斜式直線方程式之作圖參考圖 1.2 之右圖。

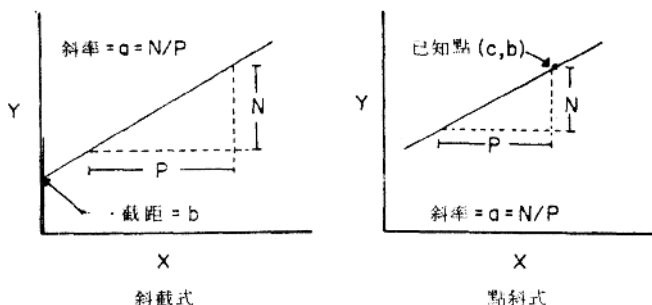


圖 1.2 斜截式及點斜式直線方程式之作圖

因此直線之斜率及截距為已知時，則可根據直線之斜截式繪出直線，並寫出方程式；若知直線之斜率及其所經過之一點，則可根據直線之點斜式繪出直線，並寫出方程式；譬如實驗數據可經直線迴歸分析 (Linear regression analysis) 得到最適直線之斜率及截距或斜率及一點，則可由該斜率及截距或斜率及一點，分別由直線之斜截式或點斜式繪出最適直線並寫出方程式。

例 1：某 1 磅混合物之水量 x ，今加入 y 量的水，以使混合物之含水率提高為 35%，試求 x 與 y 之關係式並繪其圖形。

解：據題意可得 x 與 y 之關係為：

$$\frac{x + y}{y + 1} = 0.35$$

整理方程式為斜截式之形式，則方程式為：

$$y = 0.538 - 1.538x$$

據斜截式可知此方程式斜率為 -1.538 ， y 軸之截距為

0.538 ，則 $(0, 0.538)$ 為直線上之一點，又 x 增加 1 時 y

減少 -1.538 (斜率為 -1.538)，因此當 x 由 0 變為 1 時， y 會由 0.538 減至 -1 ($0.538 - 1.538$)，所以 $(1, -1)$ 為直線上的另一點，方程式之圖形即為通過上兩點 $(0, 0.538)$ ， $(1, -1)$ 之直線，其作圖參考圖 1.3

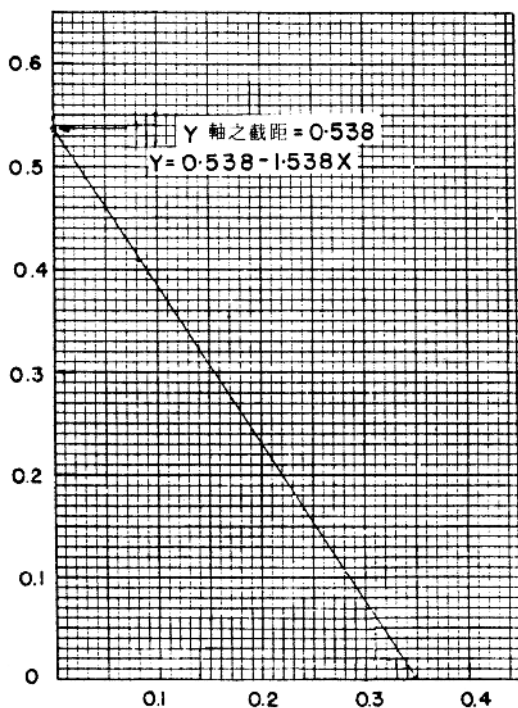


圖 1.3 方程式 $y = 0.538 - 1.538x$ 之作圖