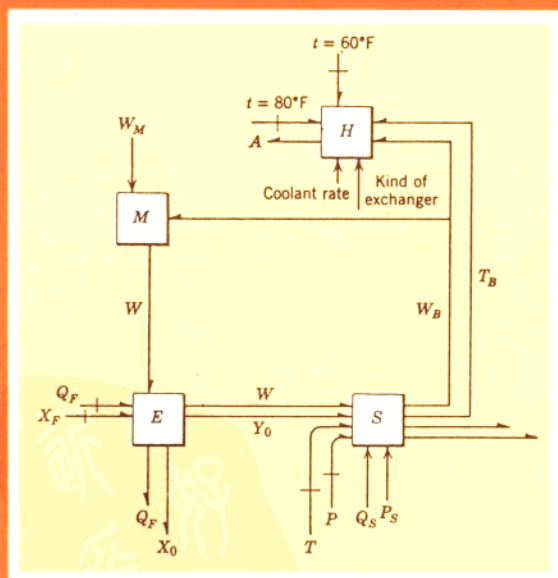


程序工程策略

STRATEGY OF PROCESS ENGINEERING

原著者：Rudd / Watson

譯述者：張 榮 真



科技圖書股份有限公司

序

在最近十數年來，某些工業部門的程序設計與操作發展出極大的改進。吾們展望將來，將令更為興奮不已。程序工程中問題，以往認為不能解決的，現在經過重大改進已成為日常操作事務的一部分。幾乎每種程序工程的活動，均經深入推展，將程序工程策略繼續發展不絕。

由於理論與實際的結合成功，使煉油操作的最適化決策大有收獲。這種以往尚未解決的問題現已全獲解決。由於線性規劃的運用成功因而順利獲得解決，使全球的煉油廠都能採用線性規劃求得其最適化解答。吾們為了澄清這類思想，與如何使用此有效理論，編寫本書。這是一個極重要的程序工程方法，值得介紹。

在本書中，企圖將程序工程的策略作一平衡的導引。將工業的實務與其發展所需的改進途徑加以說明。因此，本書不但對工程學生可作日後進入工業界的基礎，亦可作為實務工程師的日常參考。

本書對程序工程主要問題共分三篇。第一篇為不同方案的創造與評價，說明如何將不確切的程序問題改成可程序計畫的，將其修改成有效的商業化系統。第二篇為最適化，說明如何校正某類系統的設計，使其成為有用的操作模式。第三篇為工程中具有不定性的處理方法，將缺少的必需資料，獲得最適的設計。

筆者先後花去五年心血所寫成。先用講義形式試教，再經過下列各大學教授們在課堂中試用，最後認為適宜，始予付印。

McMaster 大學 D.R. Woods 教授

Brooklyn 多藝學院 P.B. Lederman

Pennsylvania 大學 M.C. Molstad

N.Y. 州立大學 J.A. Bergantz

Wisconsin 大學 G.A. Geiger

2 程序工程策略

本書亦曾被下列各大公司作為訓練程序工程師高級班的課程教本。

The Union Carbide Corporation

The Humble Oil and Refining Company

Esso Research and Engineering

Mobile research and development corporation

再經過多方有關人士的接觸（人名過長不錄），分別獲得到豐富的建議與批評，使本書生色不少。在此一併感謝。

DF. Rudd

CC. Watson

程序工程策略

目錄

序

第一章 導 論

1.1 本書的範圍.....	1
1.2 突飛猛進的科技.....	2
1.3 由混沌到明確.....	4
1.4 因循此法的困難.....	6
1.5 結 論.....	7

第一篇 不同方案的創造與評核

第二章 合理方案的合成

2.1 不同方案的創造.....	11
2.2 定義混沌問題.....	13
2.3 明確問題.....	14
2.4 方案的初步審查.....	17
2.5 背景知識的一般來源.....	26
2.6 結 論.....	28
2.7 參考資料.....	30
2.8 習 題.....	30

第三章 系統的結構

3.1 系統及其次系統.....	34
3.2 系統的交互作用.....	35
3.3 系統的自由度.....	36

2 程序工程策略

3.4	在單一熱交換器中的自由度	41
3.5	資訊流的逆轉	43
3.6	設計變數選擇之規約	46
3.7	單一平衡蒸餾塔	50
3.8	通過次系統之資訊流動	52
3.9	系統資訊之逆流	55
3.10	設計變數選擇之結構效應	57
3.11	永恒的循環迴路	60
3.12	循環計算	66
3.13	結 論	68
3.14	參考資料	70
3.15	習 題	72

第四章 經濟設計準則

4.1	導 論	85
4.2	在收益性研究用名辭之定義	86
4.3	未來金錢的現在價值	91
4.4	資本之選擇	93
4.5	設計準則之發展	95
4.6	投資風險之推算	98
4.7	熱交換系統之設計	100
4.8	有限制性資金之影響	104
4.9	一煉油廠之絕熱材料分配	106
4.10	工業設計準則的摘要	109
4.11	程序的經濟壽命估計	112
4.12	結 論	114
4.13	參考資料	115
4.14	習 題	116

第五章 成本估計

5.1	導 論	124
5.2	主要裝置之投資估計	126
5.3	分解式估計法	135
5.4	輔助設施之投資	141
5.5	製造費用估計	142
5.6	最適化之成本方程式	148
5.7	結 論	152
5.8	參考資料	153
5.9	習 題	154

第二篇 最適化

第六章 最適條件的搜尋

6.1	微積分	165
6.2	搜尋方法之需要	168
6.3	單一變數之搜尋法	168
6.4	區間捨去法	172
6.5	黃金分割搜尋法	174
6.6	最佳分批操作時間之決定	176
6.7	非單模函數	178
6.8	含許多設計變數之搜尋	179
6.9	冷凍系統之最適化	186
6.10	結 論	192
6.11	參考資料	193
6.12	習 題	194

第七章 線性規劃

7.1	導 論	204
7.2	運輸問題	205
7.3	極點之特性	210

4 程序工程策略

7.4	簡捷法規約	213
7.5	煉油廠計畫表之編製	218
7.6	結 論	223
7.7	參考資料	224
7.8	習 題	224

第八章 非循環式結構系統的次最適化

8.1	最適性原理	230
8.2	動態規劃——序列的次最適化	234
8.3	溶劑分配到交錯流萃取器 ¹	238
8.4	更複雜系統之最適化 ²	246
8.5	直接搜尋與動態規劃之比較	260
8.6	結 論	262
8.7	參考資料	263
8.8	習 題	263

第九章 巨觀系統的最適化策略

9.1	一巨觀系統策略的探索	272
9.2	靈敏度與關鍵問題	272
9.3	更複雜的非循環式結構之處理	278
9.4	步驟聯合之策略	282
9.5	狀態變數切斷之觀念	286
9.6	簡單而實用規則摘要	290
9.7	巨觀系統方法之應用	291
9.8	一硫酸程序之最適化 ⁵	295
9.9	結 論	300
9.10	參考資料	301
9.11	習 題	301

第十章 巨大問題的多層次處理法

10.1	大系統之困境	304
10.2	系統與其次系統	306
10.3	次最適化與強制合作	307
10.4	雙層次法之應用	311
10.5	移動床催化裂解程序之最適化 ³	314
10.6	SYMROS，多元煉油廠之操作規劃系統	320
10.7	結 論	327
10.8	參考資料	328

第三篇 呈現未定度的工程

第十一章 因應未來的發展

11.1	未來的預測	331
11.2	線性需求預測的適應性	335
11.3	非零的最初需求	339
11.4	冰島的肥料需求的因應(1950) ³	340
11.5	在動態經濟環境中新化學工廠規模的決定	343
11.6	參數之靈敏度	347
11.7	人性的奇妙效應	348
11.8	結 論	349
11.9	參考資料	349
11.10	習 題	350

第十二章 數據不定性的計算

12.1	慎重將事的工程學	355
12.2	由設計所引起的不定性之傳播	358
12.3	決策問題，一平凡的實例	366
12.4	期望值準則	371
12.5	一催化床規模之決定	372
12.6	一蒸餾塔之過量設計	375

6 程序工程策略

12.7	完全混合反應器之設計 ⁹	379
12.8	風險因素之分析	383
12.9	結 論	386
12.10	參考資料	387
12.11	習 題	388

第十三章 故障的容忍度

13.1	導 論	393
13.2	由小事件引發的大災變	394
13.3	初步流程圖之回顧	397
13.4	在極端情況下的可信賴度	402
13.5	由適當的地面規劃獲得安全	408
13.6	可信賴度的原理	410
13.7	一中間物反應器之最適複製個數	412
13.8	一贅餘的預置實例	414
13.9	災害擴展的理論研究	416
13.10	結 論	420
13.11	參考資料	420
13.12	習 題	422

第十四章 含變動情況的工程

14.1	變動性，一永恒的敵手	428
14.2	儲存對脈動式供應之影響	430
14.3	排隊原理分析法	435
14.4	系統內之變動 ²	441
14.5	經濟上的最適利用率	447
14.6	變動的電力供應之應用	448
14.7	程序的參變泵送	450
14.8	隨機變動的品質之摻合	451
14.9	週期性梯級變動之平穩	457

14.10	平衡槽	459
14.11	結 論	461
14.12	參考資料	461
14.13	習 題	461

第十五章 模 擬

15.1	方便與真實間的平衡	469
15.2	消防水分配的模擬裝置 ¹	470
15.3	ESSO煉油廠的停泊問題	473
15.4	摻合問題 ³	475
15.5	工業上的模擬器	480
15.6	Monte Carlo模擬原理	486
15.7	模擬語言	488
15.8	參考資料	490
15.9	習 題	491

第一章 導 論

第一章是程序工程學 (process engineering) 的簡介。作為本書的序幕。程序工程師，有責任創造出一有經濟利益的程序系統 (processing systems)，將原料、能量與專門知識 (know-how) 轉換成有用的產品。我們將概略地述及，在設計商業上的程序作業系統時，可能會遭遇到的問題，並探討在解決這些問題時，所需的思考方法。

典型問題

用來作為止痛鎮靜劑的苯巴比妥 (phenobarbital, $C_{12}H_{12}O_4N_2$) 每月需要量高達數十萬磅，一個設計小組如何發展出一套最有利於此一藥品的製造程序規範書 (specification)？這一類問題正是最能吸引程序工程師的注意力。

1.1 本書的範圍

我們企圖探討創造商業化程序作業系統的思考方法。在工業上，此一工作是最具責任性及挑戰性的，而且，對社會經濟體系的健全而言，有很重要的一部分是要依賴程序設計師的技巧。

所謂程序作業系統，是指一些能使物質經由諸如化學反應、相變化、加熱與冷卻、附聚 (agglomeration)、碎解 (size reduction)、分離 (separation)、萃取 (extraction)、燃燒等手續而產生轉化的儀器設施的組合。例如，經由適當的程序作業系統：

水、空氣與電力可轉化成肥料。

硫磺、空氣與水可生產硫酸，以提供工業界的需求。

原油可精煉成許多現代社會所需的石化製品。

海水可提煉出有利用價值的鎂 (magnesium)。

小兒麻痺疫苗 (polio vaccine) 可大量生產。

廢鐵及其他原料能製造不銹鋼。

生產程序系統構成了現代工業社會的中堅。美國境內五百家最大公司中，過半數的公司均涉及某些種類的生產程序。最大的化學製造廠之一的杜邦公司 (du Pont Company)，提供略低於 8 % 的化學市場。每年的銷售量已經是用億元計了。由美國人民平均每人每年消耗的食物、藥品、纖維、肥料以及其他日用品中，大約要用 60 磅的氨、60 lb 的苛性蘇打 (caustic soda)、80 lb 氯與 200 lb 硫酸，我們可明顯的看出，現代社會對程序作業程序因應的事實。據報告指出，全美國總產量的 20 %，均可追溯到使用觸媒的程序工程。

在我們的經濟結構中，維持此一程序系統部門的創造者與經營者，通常是一些化學或冶金工程師。當察覺某一種生產程序的需要時，工程師的才能立刻受到挑戰，因他的責任是為此生產系統準備一份最能滿足經濟目的的程序規範書，對一小程序生產系統，一個有經驗的設計工程師，可能花一星期時間。對一大程序生產系統的設計，例如一種新塑膠的製造，可能要花掉一工程小組一年的時間。但，不論所涉及的設計工作大小如何，所要使用的心智程序都是相同的。

1.2 突飛猛進的科技

程序工程師，可發現自己是處於科技的突飛猛進 (onrushing) 與經濟老化衰退 (economic obsolescence) 的界面位置。因為，一種生產程序觀念是極易老化腐敗的；要決定是否成功，只有時間才能證明。假使，一個程序在規劃階段花費太長時間，可能在達到生產階段就已老化，而他所設計供應的需求可能已由其他競爭者用他種方法領先達到。反之，一個輕率設計的程序，可能無法滿足需求，或者無法有效地克服經濟的競爭。由此特殊職責，程序設計師可發覺自己的才

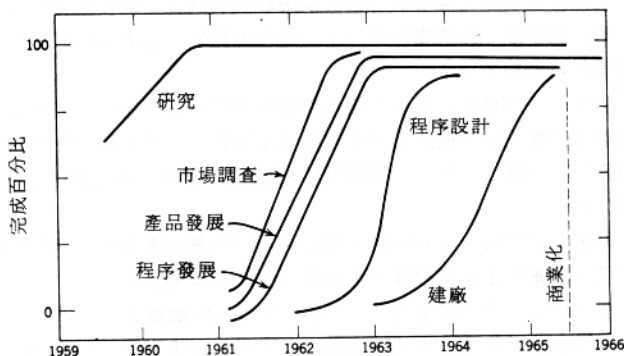


圖 1.2-1 發展製造“KAPTON”聚合醯亞胺薄膜程序的時間縮短圖

能是非常有價值的。

用新技術、新產品的形式，將科學進步的利益變成真實，形成一種壓力，迫使工程師的工作遠超過支持他們的科學。例如，由海水中提煉鎂，遠在此一現象的詳情被明白以前，便已被設計出來，並有利地操作了。此一環境，迫使工程師冒着所根據的資料不適當的危險去進行計算。

縮短由研究發現到商業化所需的時間是極其必要的，每節省一年的時間，所能獲得的利益，將以百萬元計。圖 1.2-1 為製造“Kapton”程序商業化的時間表。Kapton 亦即聚合醯亞胺薄膜（polyimide film），可用作電器絕緣、防火衣、印刷電路（printed circuits），電磁感應帶以及其他特殊產品。由實驗室發展出 Kapton 不到五年時間，第一個商業程序已在操作。要達到這種快速進度，必需在完成市場調查之前，甚至在產品完全發展出來之前，即行發展程序並進行設計。程序本身，在生產程序觀念完全發展以前，已將部分設計完竣。建廠工程，則在程序部分設計完成即行開始。如果每一步驟都要等到所有資料都已獲得才行開始，則上述的時間表中，可能由低於五年而

4 程序工程策略

延長到高於九年。這將使製造廠商損失好幾百萬元，並使需要此產品的大眾感到不便。爲要贏得此一工程賭注的勝利，激勵我們研究程序工程學策略的興致。

似乎此一不確定因素，合着所發展系統的結果所帶來的社會責任，可說是工程上的一種正常或穩定情況。而且，由於人類的缺乏耐性，與急於下一賭注，看看他的發現早期應用，使此一情況無限期的延續下去。

程序工程策略 (strategy) 的目的，即在幫助運用程序設計的有限時間，並幫助工程師根據有限的資料作一正確的決定。

在一新廠設計及建廠完成後，程序工程仍需繼續進行。程序工程師將與操作部門共事，或借到工程技術部門當顧問，完成一序列的程序調節，確定最佳的操作條件。此種調節，通常包括程序部分的重新設計，以提高產品的品質與產量。因此，許多的程序工程策略不僅可用於設計，尚可用在生產線。

1.3 由混沌到明確

上節已略述工程師必需擔負職務的工作環境，接着將概略描述創造一生產程序系統所經歷的心智程序。在 1.4 節將探討阻礙最適系統創造的障礙。本章其餘各節，將討論克服這些困難、障礙的方法。

每一生產程序系統總是由一混沌式問題 (primitive problem) 開始。所謂混沌式問題是一需求的非良好定義命題，例如：

這裡有局部性的氧氣需求。

Mississippi 河流域上游氮肥短缺。

我們廠裡的氫氣太貴。

加熱場的煙囪跑出的氣體污染了空氣。

對這些硫磺，要怎樣處置？

蘊藏豐富的 Wisconsin 低級鐵礦，在能用於煉鋼前需要那些優遇 (beneficiation) 。

只要能經濟的移動 Athabaska 的油頁岩，就可提供大量的碳氫化合物來源¹。

這些混沌式問題，可想成是介於原料、能量與專門知識與社會需求間代溝的表示。

企圖橫越此一代溝，工程師需尋求一明確定義的問題，使其解答能解決原來的混沌式問題。例如，混沌式問題之一：

Mississippi 河流域上游氮肥短缺。

就可用下列諸明確問題的解答予以解決。

在 Illinois 州北部，設計一生產程序系統，合成顆粒狀的硝酸（ammonium nitrate）與尿素（urea）。

由 Gulf 灣沿岸的化學品生產中心，船運液態氨到 Mississippi 河上游，並將液態氨儲存在特殊設計的槽倉，以備農會的分配。

將 Gulf 灣船運來的氨，轉化成尿素，或硝酸等固態肥料，以取代液態純氨。

由於液氨在常壓下的沸點為 -28°F ，因此，設計一系統，將液態氨轉化成水溶液，直接作液態肥料，以取代儲存的液氨。

以上各明確問題的解答，均能滿足氮肥的地域性需求。因而，工程師必需知道在這些解答中，那一個最能解決原來問題，程序工程學的基本困難，也就發生。如何知道最好的明確問題已經誕生？在程序設計過程中，如何確定所使用的明確問題為適切的？知道如何去想出適切的問題，與有能力解決問題，是同樣重要，在某些情況下，甚至更為重要。

工程師在解決一個混沌問題時，最先，也是最具關鍵性的步驟，便是問題的各種可行性方案的合成。然後，這些方案再經仔細過濾，剩下的最具可行性的明確問題才去進行求解。

¹ See, "Tar Sands Yield to Technology," *Chem. Eng. Progr.*, No. 11, 63, 42-43 (1967).

在一些已高度發展的科技領域中，有的明確生產程序問題的解答，在市場上已能買到。例如製造硫酸、氨、惰氣、蒸氣與去離子水（deionized water）等的標準程序設計，均可由執照排名找到賣主。與程序賣主的協定，可能包括建廠，試車（start-up）與操作期間的服務，通常尚包括操作性能的保證。

在市場上能買到的程序，可視為一些零星的技術，它們與泵、熱交換器、壓縮機、蒸餾塔等的組合，就變成程序工程師用來解決明確程序問題時，組成解答的構成元素。一個系統可能由這些元素所組成，工程師將其整理使問題達到最佳的解決。

當一個系統的觀念被合成出來，要能安全而經濟的生產製造，其細部設計仍是一項富挑戰性的工作。擔負此一工作的工具，即為工程科學、經濟學與數學。質能平衡，能確定程序中原料、能量、冷却水等的需要量。熱力學，能帶來氣-液相與化學反應平衡、壓縮、液化以及其他熱力問題的解答。單元操作原理與輸送現象，可用來確立生產程序的片段。程序控制與動態方法，可確保觀念的可操作性。工程師，要將明確問題變成明確解答，需要涉及很廣泛的知識領域，此時，可能要憑藉本身的才能與有經驗者的諮商。

我們所希望得到的設計結果、細部生產程序方法說明書，是能提供混沌問題一個滿意解答。參加設計的工程師，通常要支援參加監督建廠、試車與操作、得取設計者自己所有的詳細程序知識的利益。

1.4 因循此法的困難

我們已詳細描繪混沌問題解答的發展方法，若利用此法不會有任何困難存在，那就不必認真研習「程序工程策略」。但，事實上，卻存在很大的困難。在生產程序問題上，直接的，盲目的使用科學、經濟學與數學原理，將導致不必要的困難。這些障礙的偵察，有賴工程師高價值的特殊才能的展現，這些才能包括合成、分析、最適化與未定層面作成的決定。這些都是成功工程師才能的一部分。

不同方案的創造與評核（本書第一篇）：要克服沒有明確定義問

題的障礙，就要具備高度的獨創性天才與創造才能。合成新程序，並立刻評估其潛力，在程序工程各層面上均出現其需要。在此領域中的技巧，可由解決問題的經驗獲得，有如打網球技能一樣，可由訓練、調整與練習而得改進。

最適化（本書第二篇）：工程師企圖調節一程序的設計，使成為最經濟型式，此一問題可由一簡單計算證實其嚴重性。假設這位工程師隨意調整在設計中的十個變數，使達到經濟的操作，例如，這些變數可能為蒸餾塔中的塔盤數，熱傳面面積，或反應中的滯留時間等。其次，假設這位工程師希望每一變數選擇十個數值中的一個，則存在着 $(10)^{10}$ 種組合，其最適設計的選擇，幾乎不可能，縱使用高速計算機也是沒用；若使用計算機，設每一方案所需計算時間為一秒鐘，全部可能設計共需 $(10)^{10}$ 秒鐘，或要 300 年時間！一些商業化程序，例如石油精煉廠，可能比本例更為複雜。

呈現未定度的工程（本書第三篇）：最適生產程序觀念雖可合成出來，最適設計的方法亦已建立，但通常尚不可能直接得到最適設計，因最適設計所需的資料，尚存着很寬的代溝。未來的經濟與程序服務要求的改變，會使所擬的設計的有用程度減少。蒸餾塔的設計在塔盤效率（tray efficiency）數據的誤差達 20 % 的情況下，其成分將如何計算？假使碰巧程序的操作不當或壓力槽迸裂，將有什麼事會發生？進料發生問題對程序有何影響？工程師必需使系統對不可預測性，或無法獲得完全資料的因素，具有若干程度的免疫性。

1.5 結 論

在以下各章中，將討論處理在 1.4 節中探討三種型態障礙的思考方法。這些方法中，有些已被良好的組織發展過，例如可溯源到最適化數學理論等。有些領域則較缺乏定義，較不具科學技巧，而仍停留在人智的範疇，例如問題的合成即為一例。有些領域則存在實驗與科學間過渡的形態，例如程序的安全與數據不足情況的設計等。

在解決程序工程問題上迥然不同知識的應用，可證實在此工程實