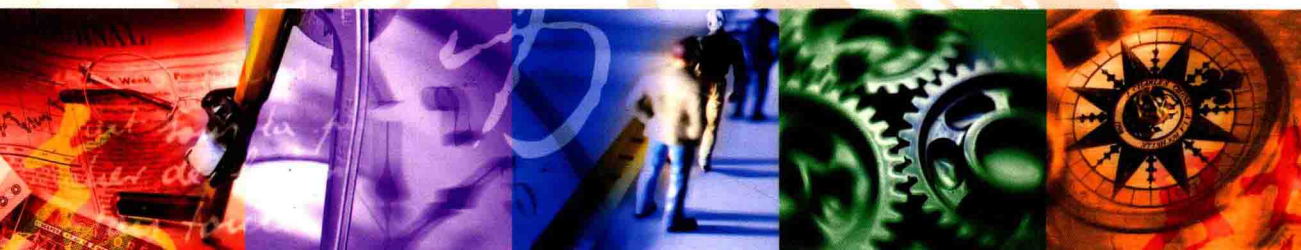


系統動力學

理論與應用

屠益民、張良政 著



*System Dynamics:
Theory & Application*

智勝
BEST-WISE

系統動力學

理論與應用

System

Dynamics

Theory and Application

屠益民、張良臣 著

智勝文化

系統動力學理論與應用

System Dynamics: Theory and Application

國家圖書館出版品預行編目資料

系統動力學：理論與應用 = System dynamics

： theory and application / 屠益民，張良

政作。——初版。——臺北市：智勝文化，

2010. 01

面；公分

參考書目：面

含索引

ISBN 978-957-729-770-9（平裝）。

1. 管理科學

494

98023248

作者/屠益民、張良政

發行人/紀秋鳳

出版/智勝文化事業有限公司

地址/台北市100館前路26號6樓

電話/(02)2388-6368

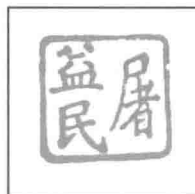
傳真/(02)2388-0877

郵撥/16957009 智勝文化事業有限公司

登記證/局版臺業字第5177號

出版日期/2010年4月初版

定價/350元（平裝）



ISBN 978-957-729-770-9（平裝）

System Dynamics: Theory and Application

by Yi-Min Tu and Liang-Cheng Chang

Copyright 2010 by Yi-Min Tu and Liang-Cheng Chang

Published by BestWise Co., Ltd.

智勝網址：<http://www.bestwise.com.tw>

本書之文字、圖形、設計均係著作權所有，若有抄襲、模仿、冒用情事，依法追究。

如有缺頁、破損、裝訂錯誤，請寄回本公司調換。

推薦序

屠益民教授和他的高足張良政教授終於出書了！真是令人欣喜的一件事。

我是在1986年在台北舉辦的國家建設研究會有幸認識屠教授的，那時他在德國著名的曼漢姆(Mannheim)大學寫博士論文，我在中山大學企管系任教。當我知道他也是學系統動力學的，非常高興，就力邀他學成後回台灣到中山大學任教。在負笈德國十餘年後，1990年屠教授完成學位就依約來中山大學資管系任教。他是個重情誼、重然諾的人。

曼漢姆大學的管理學院在歐洲是首屈一指的，屠教授的學術素養在他的課堂中和他帶研究生的方式中都可見端倪。二十年前我曾去旁聽過屠教授系統動力學的課，他依照德國的學術傳統，從最根本的哲學觀教起，一步一步地帶著同學由社會、經濟、產業、企業、管理各層面來瞭解這些系統的互動關係，然後才開始介紹系統動力學，非常認真而紮實。

屠教授回國時帶回了許多德文的學術文獻。他在指導研究生寫論文時，會教他們一些德文，然後要求他們研讀德文的相關文獻。我曾擔任他指導的研究生的論文口試委員，發現他們吸收德文文獻的能力非常好，完成了品質很好的論文，真是不簡單。這讓我非常佩服屠教授能用循循善誘的方式帶領學生不怕困難，做好學問。

有些非常優秀的中山大學資管系學生畢業後會進入中山資管研究所就讀，這些都是讓老師們很想指導的優秀學生，我知道其中有一些同學只選擇屠教授做為指導教授，其他教授雖極力爭取也不為所動。我想一方面是因為屠教授的學問，另一方面則是因為屠教授對學生那種猶如慈父般的關懷，以及認真教導許多做人處事的道理，深受學生們的敬愛。屠教授也因此獲選全校優良導師。

屠教授不只是專精系統動力學，在其他管理領域學的也非常紮實。我在中山企研所指導過一位碩士生，她是中山資管系畢業的。有一次我好奇地問她在中山資管系的老師中，她覺得那位老師教得最好？她想了一下，然後說屠益民教授。我問為什麼？她說她在資管系修過屠教授為資管系的學生開的行銷學，屠教授利用非常生活化的方式設計課程與作業，讓她對於行銷的理論與實務有了非常深刻的瞭解與體會。進入企研所後，她修了行銷方面專長的一些教授的課，教得都沒

有屠教授好。聽到這樣的評價，我這個老朋友真是感到非常高興與敬佩。

這本《系統動力學：理論與應用》從彼得·杜拉克的管理思想談起，由如何做正確的事這樣的觀念開始，一直到碰到動態的、非線性的、複雜的現象的時候，到底應該要怎麼處理？把系統動力學清楚地定位，彰顯了系統動力學的價值。本書從最簡單的什麼是系統，怎麼樣去分辨一個系統，然後以非常淺顯的例子：水缸、水龍頭、銀行、存款，一步一步地帶同學進入系統動力學的堂奧。每一章前面都會告訴讀者預期在這一章會學到什麼，後面會配合實用的習題。書裡面還有共同作者張良政教授把他在實踐大學學生實際面臨的問題、應用的例子都融合進去。書中也介紹了金木水火土五行學說中相生相剋的系統，並和系統動力學回饋調控的觀念相呼應，同時也說明了系統動力學建模時常用的各種函數、以及時間滯延的重要觀念，再透過一些應用的模型、系統基模的建模模擬來做一個全面的驗收與回顧。

這本書總結了屠益民教授鑽研系統動力學數十年的心血結晶，在他退休之前把它呈現出來，我覺得對我們這個領域的人都是非常欣喜的事情。這本書能幫助同學們一步一步地進入系統動力學博大精深的殿堂，在此能推介這本非常實用的好書，並為之寫序，真是我的榮幸。

楊碩英

2010.02.06

於中山大學系統思考與組織學習研究室

作者序

筆者自 1989 年由德國曼漢姆大學(University of Mannheim)學成歸國後，於國立中山大學資管系任教，所教授的科目與研究方向均以系統動力學為主。系統動力學是 1960 年代由美國 MIT 的 Forrester 教授所提出，隨後為歐美相關研究機構與企業採用，國內則是企管系楊碩英教授將彼得·聖吉所著《第五項修練》帶進台灣之後，才較為企業界所知。在筆者多年任教的過程中發現，系統動力學的相關教科書幾全以英文為主，中文除了《第五項修練》這類通俗性的書籍之外，中文相關的教科書非常缺乏。中國大陸方面有一些相關教科書，但是內容又過於偏重在數學模式的建立上，因此，筆者決定與筆者之前博士班學生張良政將多年的教學研究經驗彙整，編寫出一本從管理的角度出發、結合理論與實務的系統動力學教科書。

系統動力學目前並不是國內各大專院校主要的教學科目，但是，Forrester 曾說：「系統動力學是一種思考的習慣。」目前社會科學所採用的理論模型大多是從線性思考的角度出發的，然而，現實生活中很多的問題卻是一種非線性的結果。因此，人類社會相關的行為若重新由系統動力學的角度思考，都可得到一些新的啟發。系統動力學雖然是從系統工程的方法加以修改的，但與系統工程現有方法相比，系統動力學的主要元件卻只有積量、率量、輔助變數與關係，加上軟體的普及，建立系統動力學模型並不是件太困難的工作，但是如何將現實生活中的問題利用系統動力學加以解決卻又是件複雜的工作。筆者一直將系統動力學視為一個值得一生投入研究的學問。學習系統動力學不僅是建立模型解決問題，而是將系統思考的精神融入生活中，成為個人決策的一種習慣，這才是學習系統動力學最大的收穫。

本書的內容適合作為一學期的系統動力學課程，重點可分為三大項：

1. 動力學基本觀念

第 1~3 章是分析現實生活中遇到的動態性複雜的問題並介紹系統與系統思考的觀念，也包括建立系統動力學模型的元件與軟體。

2. 建模

第4~7章是建立模型的基本功，包括時間滯延的觀念和基本函數，還有一些前人建立的系統動力學模型。筆者建議讀者應透過實際依本書的模型內容自己演練。

3. 應用

第8章則是將系統基模與各種社會問題加以結合並模擬，希望讀者最後能熟練地應用基模與系統動力學模型解決生活中遇到的問題。最後是建立模型後，如何進行模型的信效度檢驗，以確定模型的可用性。

最後，本書的完成得感謝中山大學「系統思考與組織學習研究室」(STOLL)的楊碩英教授，以及STOLL歷屆畢業的博士畢業生：陳加屏博士、楊仁壽博士、蕭乃沂博士、王怡舜博士、羅世輝博士、汪維揚博士、曾雅彩博士、王思峰博士、黃麗蓮博士、杜強國博士，以及許多碩士畢業生，他們均對於筆者在教學研究及撰寫本書過程中提供相當多建議，特別感謝之。筆者的同事：中山資管系的鄭炳強所長、侯君溥教授、劉賓陽教授，公共事務所汪明生教授、海洋與環境工程系張揚祺教授，已故的企管系胡國強教授，對於協助筆者推廣系統動力學在不同的領域應用均有相當大的貢獻。

最後，感謝恩師 G. v. Kortzfleisch（前曼漢姆大學校長）、學長 P. Milling（前國際系統動力學會會長）、E. Zahn（前國際系統動力學會會長）帶領我進入這個領域中。

筆者與張良政博士雖盡力將本書完成，但我們二人才疏學淺，若書中有任何疏漏之處，還有望各學術先進，不吝指教。

屠益民

2010.02

於中山大學

目錄

Chapter 1 企業問題與解決方案 1

1.1 管理學的發展演進 2

1.2 企業存在的問題 4

1.3 系統動力學概論 14

Chapter 2 系統思考、因果回饋與環路 23

2.1 系統思考 24

2.2 因果回饋關係 27

2.3 繪製因果關係圖應注意的事項 37

Chapter 3 系統動力學基礎模型的元件與軟體 41

3.1 積量、率量、輔助變數 42

3.2 系統動力學模擬軟體 47

3.3 積量與率量模型 49

Chapter 4 系統動力學基本模型 59

4.1 複利累積（正環路） 60

4.2 現值計算（負環路） 63

4.3 存到 1,000 萬元 65

4.4 二階薪資模型 67

- 4.5 養雞模型 70
- 4.6 香蕉產銷模型 79
- 4.7 繪製線流圖注意事項 83
- 4.8 因果回饋圖與線流圖轉換原則 85

Chapter 5 內建函數 89

- 5.1 輸入函數 90
- 5.2 數學函數 94
- 5.3 邏輯函數 98
- 5.4 統計函數 100
- 5.5 其他函數 101

Chapter 6 時間滯延 (延遲) 107

- 6.1 滯延的觀念 108
- 6.2 調整水溫的模型 109
- 6.3 多階滯延的概念 115
- 6.4 *DELAY* 函數的滯延 120

Chapter 7 系統動力學應用模型 133

- 7.1 鼠群模型 134
- 7.2 凱巴布高原生態模型 137
- 7.3 市場成長上限 143
- 7.4 零售商店模型 147
- 7.5 蝴蝶效應 152
- 7.6 系統結構與系統行為 155

Chapter 8 系統基模介紹與模擬 159

- 8.1 反應遲緩的調節環路(*balancing loop with time delay*)
160

- 8.2 成長上限(*limits to growth*) 166
- 8.3 捨本逐末(*shifting the burden*) 171
- 8.4 目標侵蝕(*eroding goals*) 178
- 8.5 惡性競爭(*escalation*) 184
- 8.6 富者愈富(*success to the successful*) 188
- 8.7 共同的悲劇(*tragedy of the commons*) 194
- 8.8 飲鴆止渴(*fixes and fail*) 201
- 8.9 成長與投資不足(*growth and underinvestment*) 208
- 8.10 系統基模總整理 213

Chapter 9 系統效度檢驗與建模流程 217

- 9.1 模型效度(*validity*)的檢驗 218
- 9.2 效度檢驗流程 225
- 9.3 整體建模流程 227
- 9.4 企業問題的動態解決方案 228
- 9.5 系統動力學與其他研究方法之結合 230

參考文獻 235

中英文索引 237



Chapter

企業問題與解決方案

It is more important to do the right thing than to do things right.

做正確的事比把事情做對更重要

——Peter Drucker

本章學習重點

學習完本章之後，你可以了解：

1. 管理觀念演進的過程
2. 企業管理問題的複雜性與解決工具
3. 非線性與動態性複雜的觀念
4. 系統和系統動力學的基本概念與在管理上可能的應用

1.1 管理學的發展演進

管理大師杜拉克(Drucker)在《管理的使命、責任與實務》一書中指出，管理學的興起可以說是我們這個時代的樞紐事件，也促成了管理的挑戰，創造出新的任務與問題。關於近代管理學發展的淵源，一般認為是從泰勒(Taylor)開始的。黑手出身的泰勒觀察到在同一工廠中，不同工人工作的效率(efficiency)有極大的不同，並於實地瞭解後，將這些效率高的工人的工作內容加以標準化(standardization)，例如：以前鐵工廠的鎚子都是工人自備的，但泰勒在經過觀察之後，選出最有效率的鎚子，然後規定所有工人統一都用標準的鎚子來工作。而泰勒的做法就是現在 ISO 的品管精神的前身，亦即所有的工作流程都標準化和文件化，所有的工人都必須照著文件的標準工作流程，按部就班地工作。

之後，美國統計學家戴明(Deming)進一步將品質與統計的觀念相結合，認為品質不是透過檢查員檢驗出來的，而是在整個生產製造的過程中決定的，如果整個生產線的管理有問題，品質當然就不可能會好，因此並不是只要加強檢驗就能有好品質，公司所有的員工都有責任去確保公司產品的品質。這就是全面品質管理(Total Quality Management)的精神所在。然而，戴明的主張一開始並未在美國受到重視，一直到 1980 年代，日本製造的汽車和家電用品席捲全球市場，美國這才開始意識到全面品質管理的重要性。

從泰勒到戴明，管理學的發展似乎仍偏重在注重提昇效率與標準化上。但彼得杜拉克則認為，除了效率之外，我們還應該重視到效能(effectiveness)。杜拉克明確地定義了效率與效能：效率是把事情做對(Do the thing right)，效能則是做對的事(Do the right thing)。而要做對的事，就必須透過很多的資訊分析來形成策略，因此管理的議題也就從原本提昇效率的作業層級(operation)擴展到決策(decision)與策略(strategy)層級。

此外，過分注重效率與標準化也意味著將生產線的工人視同生產機器一般，每個人只是不斷地重複做著類似的工作，這樣的管理方式缺乏人性，雖是追求效率卻也缺乏彈性，一旦面對激烈改變的環境時，便無法快速地調整適應。因此，開始有學者對於這樣的管理方式進行批判。例如：阿吉里斯(Argyris)就提出學習型組織(learning organization)的概念，主張員工不應該只是像生產線上的裝配員一樣，每天做著例行性的工作，應該要彼此學習成長。學習型組織比起傳統管理的組織，

更能適應環境的變化。

表 1-1 列示出管理思想發展與演進的過程。其中，第一階段就是以泰勒的思想為主流，企業思考問題的導向均是如何更有效率地生產產品，所以屬於生產導向。而且由於當時的生產設備還未發展到非常完備的狀態，因此大多數的工廠生產仍以人力為主，只能生產少量的產品。此時，企業所面對的是地區性的經營環境，企業間的競爭較為單純，環境的變化也較為緩慢。到了第二階段，因為大型生產設備逐漸普及了，企業可以透過設備開始大量生產產品，也開始重視產品的品質，因此第二階段係以產品為導向。之後，行銷觀念逐漸興起，在第二階段屬於生產後銷售(build to order)的產品導向，也就是產品製造出來之後再透過銷售管道想辦法將產品賣掉的做法，到了第三階段開始引用接單式生產(order to build)，亦即透過行銷來分析顧客的喜好，並針對顧客的需求來生產產品；換言之，很多工廠是接到訂單之後才開始製造產品的，如此一來，便可有效地降低產品的庫存與賣不掉的風險。到了第四階段，由於人們經濟商業的活動不斷地消耗地球資源，而且還造成環境與生態污染，企業開始注重到社會環保的議題，加以資訊科技(information technology)不斷地進步，企業可透過資訊系統的協助來進行規劃與決策，因此，企業電子化也是第四階段企業重視的議題之一。

TABLE 1-1 管理思想發展與演進的過程

時間 功能	第一階段	第二階段	第三階段	第四階段
企業導向	生產導向	產品導向	行銷導向	社會環保、 企業電子化
生產	少量 產品少量化	規模經濟 生產	多樣產品 少量化 彈性製造	生產自動化
組織	古典學派	行為學派	權變學派	學習型組織
環境	局部、靜態 簡單、緩慢	整體、動態、複雜、快速		

除了第一階段之外，第二階段至第四階段，乃至於以後的發展，企業所面臨的環境都將會是整體、動態、複雜及快速的。因為全球化的影響，諸如 Microsoft、

IBM、CitiBank、HP 等大企業幾乎在全世界各地都設有分部，而台灣的宏碁(acer)在 2004 年 9 月任命歐洲部門的蘭奇(Gianfranco Lanci)為總經理，打破了以往核心幹部為本國籍的思維模式，也顯示出台灣企業已無法自外於全球化的潮流。在實務上，很多美國矽谷的軟體公司都與印度的工程師一起合作，白天是由美國矽谷的工程師負責寫程式，到了晚上，則交由在半個地球外仍是白天的印度工程師接手，也就是說，整個專案的工作是繞著地球跑的，整個工作處於動態，而且競爭對手所採取的工作型態也類似。因此，一旦有新的技術發展出來，所有業界的公司可能都必須考慮引進，否則就有可能會落後給競爭者，整個商業環境的改變是非常快速進行的。

1.2 企業存在的問題

面對如此複雜的環境，企業現行的管理工具甚或經理人的思維都必須修正，方能解決企業的問題，通過一波波的競爭考驗。

1.2.1 企業營運示意圖

現在企業經營面臨的問題可說是千頭萬緒，從國際局勢、產業競爭，到公司內部的財務、人事、行銷、研發、製造等問題，都會影響企業整體的營運。圖 1-1 試圖將所有企業營運所面臨到的問題加以整合。

對此，策略管理學派有兩種不同的主張，一種是主張企業的策略應該從外部的整體環境先加以評估，然後再考慮產業的現狀，最後才是企業內部資源的分配；另一種主張則認為，企業應該先從內部所擁有的資源考慮起，接著衡量研究產業的競爭，最後才考慮外部總體環境的影響。兩種主張都有其優缺點，應根據企業的問題來做考慮。

舉例來說，當一間跨國企業決定到某一國家設廠時，應該先從外部整體環境開始考慮，包括：考量當地的人口經濟環境如何？當地政府的政治及相關的法規如何？當地的硬體基礎建設如何？工廠會對自然環境造成怎樣的傷害？以及當地的社會文化民情風俗等因素。當整體環境評估完之後，再考慮產業內的競爭對手是否也有計劃到該地投資？一旦到該地設廠，該如何從供應商進貨？如何出貨給

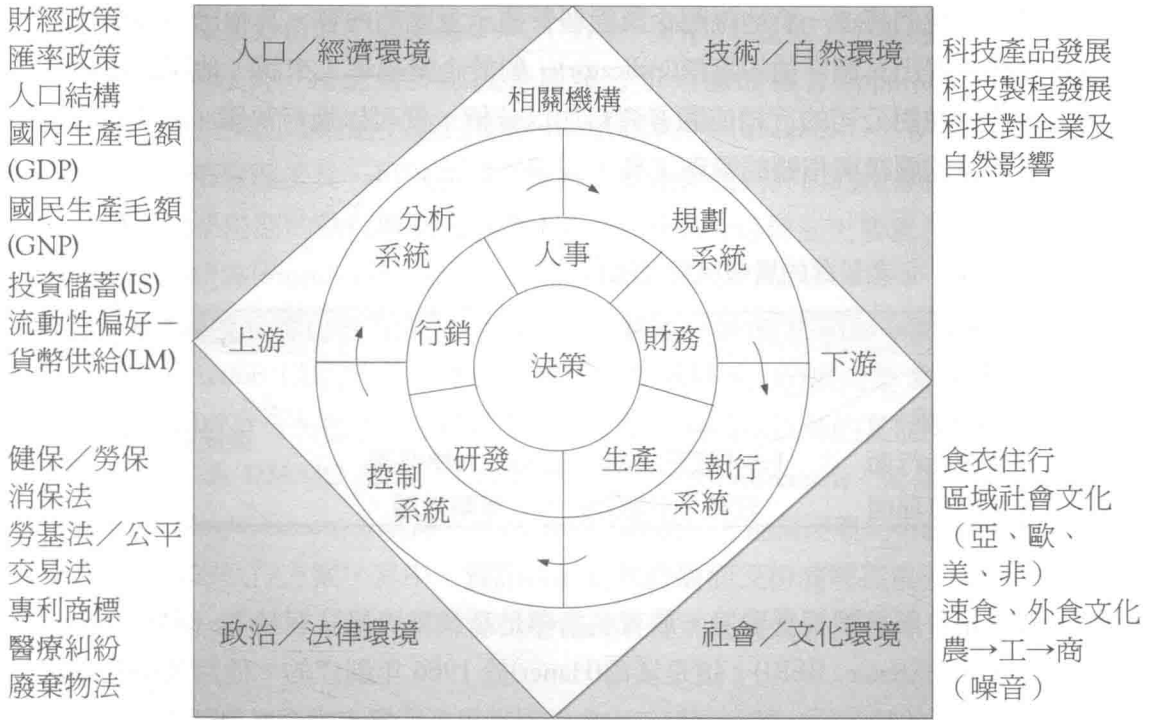


FIGURE 1-1 企業管理營運示意圖

客戶？當決定設廠後，再考慮公司內部的管理該如何配合，例如：2005 年明基 (BenQ) 購併德國西門子 (SIEMENS) 手機部門時，就需考慮到台灣與德國企業文化的差異、西門子公司在通訊產業中的地位，以及購併西門子之後，新公司在產業的競爭能力，接著才是明基公司內部如何因應調整。

如果是決定是否擴大公司某種商品的產能，則可從企業內部往外思考，例如：該商品佔公司多少的營收？公司對於該商品熟悉的研發、行銷人才是否足夠？目前有多少條生產線生產該產品？再考慮到產業與競爭者的市場佔有率相比之結果如何？供應此商品原料的供應商有多少？購買此商品的顧客有哪些？最後才是此商品在外部總體環境該如何定位？因此，圖 1-1 已試圖將所有企業營運的問題加以整合，此圖可以從企業內部決策和管理開始往外分析，也可從外部總體環境往內分析。

接著，我們將進一步地說明企業管理營運示意圖的內容，其中已有許多經濟或管理學界提出具體評估的指標(indicator)。對於企業經理人來說，他可以藉由參考這些指標並對公司的行銷或顧客資料加以分析，就可以進行決策，表 1-2 列出了企業營運的層級與相關的管理工具。

表 1-2 企業營運的層級與管理指標

層級	管理工具或指標	整合工具
外部環境	BERI 指標、PEST 分析	系統動力學
產業環境	五力分析、SWOT 分析	
企業內部執行面	Fayol 管理要素、TQM、六標準差	
企業內部管理面	五管、平衡計分卡、策略地圖	

首先是外部總體經營環境，最有名指標是商業環境風險智慧(business environment risk intelligence, BERI)，這是漢爾(Haner)於 1966 年創立的，他目前也是商業風險評估公司的執行長，該公司每年均會針對世界各國發表投資風險評估的報告。在 2005 年，台灣投資環境列為全球第 5 名，政治風險指標則為全球第 15 名。BERI 這項評估分為營運風險、政治風險、匯兌風險等三大指標，台灣的營運風險指標排名全球第 3、亞洲第 2（次於新加坡，優於日本）；匯兌風險指標也是全球第 3、亞洲第 2（次於日本，優於南韓，與新加坡並列第 2）（行政院研究發展考核委員會，2005）。

除了 BERI 指標之外，另一總體環境指標則是 PEST 分析，其中縮寫 P 代表政治(political)，意即考慮到政府的政治穩定度、財經政策、稅率、法律規定等政治性因素；E 代表經濟(economic)，意即考慮到國民所得、薪資水準、購買能力等經濟因素；S 代表社會(social)，意即考慮到宗教信仰、風俗習慣、對外來事物的態度等社會文化因素；T 代表科技(technological)，意即考慮到新科技對公司的影響、新科技的擴散等科技自然相關因素。為了方便記憶，可以 STEP。

在產業的層級方面，最有名的工具則是波特(Porter, 1985)所提出的產業競爭力分析，又稱為五力分析(five force analysis)，五力分析考慮的是：產業內的競爭程度(rivalry among existing firms)、對供應商的議價能力(bargaining power of suppliers)、對顧客的議價能力(bargaining power of customers)、新進入競爭者的威脅(threat of new entrants)，以及替代品的威脅(threat of substitute products)。

另一種產業分析的工具則為 SWOT 分析，SWOT 包括了企業內部(internal)及外部(external)分析，在企業外部就是產業分析考慮的機會(opportunities)和威脅(threats)，在企業內部則是企業的優勢(strength)與劣勢(weakness)。SWOT 分析是非常普遍的一項管理工具，可以在很多相關的文獻中找到評估的指標與應用。

而在企業內部的執行層面，有費克(Fayol)提出的管理五大要素，包括：規劃(planning)、組織(organizing)、命令(commanding)、協調(coordination)、控制(controlling)。全面品質管理也有所謂的 PDCA 循環：Plan（計劃）、Do（實行）、Check（檢查）、Action（制定）；而全面品質管理更進一步的發展則是六標準差(six sigma)，係利用統計分析的手法，將品質的概念擴充到製造以外的其他部門。六標準差的執行則是 DMAIC 循環：Define（定義）、Measurement（衡量）、Analysis（分析）、Improvement（改善）、Control（管制）。企業經理人可視企業的問題來選擇適合的執行方案，其中，資訊系統在執行層面又扮演著很重要的角色，因為不論是哪一種執行方案，都需要利用資訊系統來蒐集或儲存資料，並協助經理人分析決策。

最內部的則是企業內部的管理層面，傳統企業管理提到的五管包括人事、行銷、財務、生產、研發，這五管其實已經將企業的基本架構含括在內了。除了傳統的五管之外，卡布蘭與諾頓(Kaplan & Norton, 1996)也提出平衡計分卡(balanced scorecard)來做為企業內部運作的績效衡量指標，平衡計分卡包括了四個構面(perspectives)：學習成長(learning and growth)、內部流程(internal process)、顧客(customers)和財務(finance)，企業經理人可以根據平衡計分卡四個構面的績效指標(performance indicators)中的現況值與目標值之間的差距，來衡量企業的營運績效。而平衡計分卡除了可以做為績效衡量的工具之外，卡布蘭與諾頓(2001)又進一步地提出策略地圖(strategy map)的概念，意即，企業可根據自身的使命(mission)與願景(vision)來設定策略目標(strategic target)，並從學習成長的目標開始，將各目標的關係連結到內部流程、顧客，最後反應在財務的表現上；若將策略地圖與平衡計分卡結合，可以成為很好的策略制定與績效衡量的工具。

因此，從外部環境、產業到企業內部，不同層次的企業問題都有相關的解決方案。不過，如果要將各層次的問題做一整體性的考量，目前最好的工具是透過系統動力學(system dynamics)，將各層次的問題建立模型並模擬，在本書後續的內容中，會更進一步地詳細介紹系統動力學。