

# System Dynamics Modeling:

## TOOLS FOR LEARNING IN A COMPLEX WORLD

---

本文主要是介紹如何用system dynamics(中文可翻做:系統動態學或是系統動力學),來解決於動態性複雜(Dynamic Complexity)的系統和我們對此複雜度認知的不協調,所產生的policy resistance(政策抗拒)的問題。作者於文中介紹了許多system dynamics的方法,並介紹了一些可以使用的工具及其限制與陷阱。並在文章的最後提出了一個應用的方法。

在此我要介紹本文中所提出的一些議題,據我所蒐集的相關文獻,以下我將詳述系統動力學(System Dynamics)以及其對本文之貢獻所在,及我個人對系統動力學及本文的一些看法。

### 系統動力學(System Dynamics)

系統動力學(System Dynamics)(又稱系統動態學)是美國麻省理工學院(MIT)的Forrester教授於1956年所提出的一種電腦模擬模型,當時主要是針對企業管理;1970年代初期,因為Forrester教授又出版了一本世界動態學(World Dynamics),宣稱可用其方法探討世界性的議題,從此受到全球的矚目,而歷經了近五十年來的發展,系統動力學漸漸成爲一門體系完備的學問,其主要概念就是以一種宏觀的角度來思考、解決問題,避免因微觀的角度而侷限於片段的思考,並且透過模擬的方式來探討問題,由不同的變數與情境來觀察其結果的變化,藉以達到分析問題的目的。並且它在經營管理的實務應用上,也越來越普遍。例如將它用在學習型組織上(Senge,1990; Avila et al., 1995)

系統動力學與其他分析工具最大的不同點在於系統動力學具備處理**非線性問題(Non-linearity)**、**資訊回饋(Information feedback)**、**時間滯延(Time delay)**、**動態性複雜(Dynamic complexity)**的能力,然而若是因此將系統動力學僅視爲一種處理與分析工具或單純的一種研究方法,甚至只是將系統動力學當成只是一種可以用來處理模擬的套裝軟體,那將無法抓住系統動力學的內涵,更可能在應用時產生偏誤。因此,我們必須了解系統動力學解釋系統行爲的觀點。

### 1.資訊回饋環路(Information Feedback Loop)

資訊回饋環路是系統動力學模式的基塊,從系統性的觀點(systemic view)互動的回饋環路是各種系統動態的本質。並且這種**封閉**的環路是基於資訊的傳遞與處理,它反應了人類基本的行爲特性。在環路的行爲特性上又區分爲,會不斷自我增強的(self-reinforcement)正回饋環路與目標追尋的(goal-seeking)負回饋環路。

### 2.時間滯延(Time Delay)

在現實世界中滯延無所不在,並且是造成非線性動態現象的原因之一,因此,在系統動力學中時間延遲的表示非常重要。系統動力學將時間滯延區分爲兩

種形態，一是發生在實體物質傳遞所需的時間滯延，例如貨物運輸時間；一是發生在人的認知過程，人類對於資訊的處理實際上存有能能力、閾值等的特性，例如資訊發生的大小、快慢及有限理性、處理能力的限制等因素而造成資訊認知上的滯延。

### 3.動態性複雜 (Dynamic complexity)

動態性複雜乃是本文主要探討之議題，所謂的動態性複雜是相對於「細節性複雜 (Detail Complexity)」而言，細節性複雜意指問題所涉及的變項或許相當的多，但各變項間的關係不大；而動態性複雜的意義是指構成問題的變項或許不多，但變項之間存在著複雜因果關係，且其相互間的影響關係存在著時間上的滯延 (Delay)，亦即其影響是人類心智所不能預見或預估的。系統動力學發展出獨特的數學技巧，輔以電腦的強大運算能力，可有效的協助決策者思考動態性複雜的問題。

### 4.處理非線性問題 (Non-linearity)

處理線性思考的修正。線性思考是人類的在思考問題時常用的方法之一，此一思考方式只是單純的將因果關係作一聯結，至於因果間的複雜變化則不加考慮或沒有能力加以考量。在短期或是固定的時間點上，此一思考方式或可解釋問題的成因及結果，但是決策者如果考慮長期的變遷，則因果關係不再是單向的直線，而是具備回饋環路的結構，即各變項間是互為因果，互相影響，而非單純的單向關係。具回饋環路的結構已遠遠超過人類心智模型 (mental model) 所能思考或掌握，必須借助某些理論或工具來輔助人類的思維。系統動力學的模式便是由各種不同的回饋環路組成，對改善直線思考有相當的助益。

而現今許多企業面對複雜、動態的環境所進行之深奧的預測與分析工作，常常無法在企業經營上有真正的突破性的貢獻，歸究其原因在於這些方法只能用來處理「細節性複雜」，而無法用來處理「動態性複雜」。系統動力學正是以一宏觀的角度去看待動態複雜系統之分析工具。而目前已有許多的系統動力學模擬軟體相繼被開發出來，如Stella、Powersim、Vensim、ithink 等等。

本文於系統動力學(System Dynamics)上，除了介紹上述四種能力的處理，亦同時介紹了系統動力學一項相當重要的工具，稱為因果回饋圖 (Causal Feedback Loop Diagram, CLD)。

#### 因果回饋圖

因果回饋圖 (Causal Feedback Loop Diagram, 簡稱CLD) 的表現是系統動力學的一個重要工具。回饋圖是將變數以因果關係的方式描繪，並以箭頭圖來表示(如  $A \rightarrow B$ )，原點表示影響變數 (因)，終點表示被影響變數 (果)。而影響的變化型態可以分成兩類，一類為同向變動的變化關係，以『+』號表示；另一類為反向變動的關係，以『-』號表示。而當變數間的影響關係成爲一個回饋環路時 (亦即某一影響變數，同時也是被影響變數)，則形成「正回饋環」(以+或R表示)或「負回饋環」(以-或B表示)。(見圖1)左圖與右圖均形成回饋環路。左圖形成一個自我增強的環路或正回饋環路，而右圖則形成一個自我調節的

環路或稱作負回饋環路。而當變數很多時，對於因果回饋環路性質的簡易判斷方法，是由環路中影響關係的『+』、『-』號的個數總合來決定，當環路中全為『+』號時，當然為正回饋環，而當『-』號的個數總合為偶數時亦為正回饋環，但是『-』號的個數總合為奇數時則為負回饋環。可以從一個變數中的任何要素，追蹤會影響其他要素的環鍊箭頭，形成因果的環狀，回饋的環路既是因又是果，相互關係會一再重複影響，並讓情勢轉好或轉壞的循環。

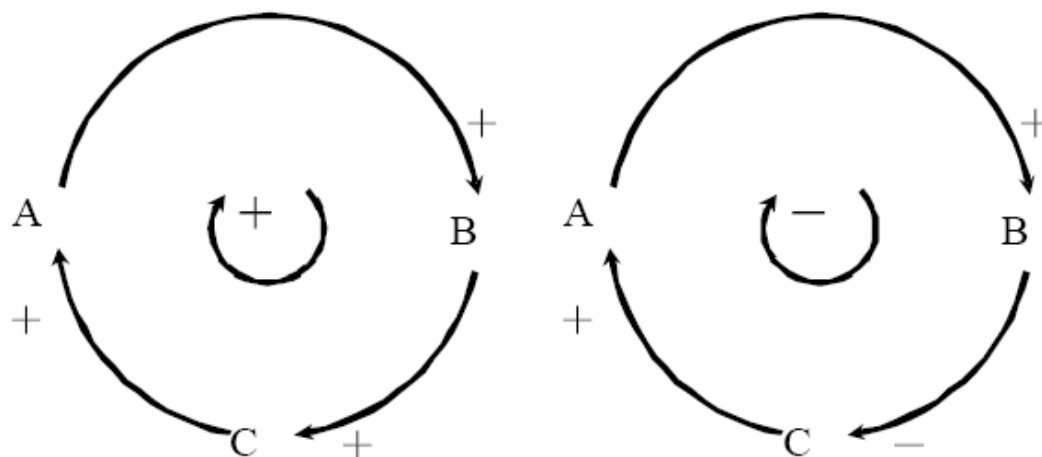


圖1：因果回饋圖

Senge(1994)以動態性複雜(dynamic complexity)一詞描述這類問題系統的特性。強調這類問題系統內的組成分子間具有隨時間改變且高度隱微的非線性關係，整體系統的行為會呈現高度的複雜性與動態性。在缺少適當理論、方法、與工具的輔助下，決策者對問題系統的分析與解釋經常基於錯誤的假設，無法以系統整體觀點動態搭配各政策行動間的運作，而出現許多解決問題的困境，如越用力推，系統的反彈力量越大；昨日的解造成今日的問題、對策比問題更糟、問題的因與果在時空上並不緊密相連。而系統思考主要意指彼得·聖吉(Peter Senge)的系統思考(Senge, 1990)，Senge認為它是一套蘊含極廣的原理，能讓我們看見相互關聯而非單一的事件。

系統思考中回饋是一個廣泛的概念，意指任何影響力的反覆回流，是一種循環不息的動環。每一個影響即是因也是果。回饋環路（或動環）有兩種不同的類型，『不斷增強的回饋』（Reinforcing Feedback）和『反覆調節的回饋』（Balancing Feedback）。當事情越來越好、越來越壞，這表示你可能遇到了增強回饋環路在運作。一開始小小的差異，將自動地不斷擴大，產生更多方向的運作，就像一個小雪球越滾越大，增強回饋環路的過程是成長的引擎也可能是敗壞的原動力，所以，增強環路有急速成長與急速衰敗的特性。可是當你處於一個增強回饋系統中，由於改變是如此的緩慢，以致於無法察覺到周遭小小的改變是如何演變成巨大的結果。像十幾年前，南部十信互助農會，一開始有一點點風聲說銀行有危機，有一些人就開始把錢從銀行領出來，後來就越來越多人湧入十信農會，深恐辛苦一生的存款領不到，後來人多到將十信農會包圍，最後不得不动用警員以維持秩序。但是增強回饋環路不會一直成長下去，將會有碰到極限的限制時，成長也就

停止了。『極限』是調節回饋環路的形式之一，一個反覆調節的系統是一個尋求穩定也是抗拒的系統，如果系統目標正是你所想要的，你將感到高興；若不是，你將因發現所有的改變又回復原狀而感到挫折。不論何時，你只要發現有目標導向的行為，你就有是有調節回饋環路在運作。目標有可能是明確的，但也有可能是晦暗不明情況，（Senge，1994）如在台灣某一知名半導體企業，認為科技日新月異，員工的教育訓練很重要，因此規定員工在一定的年資或工作的領域的需要，要上多少的教育訓練時數，但是員工平日的業務繁忙；員工在時間、精力有限的情況下，將會選擇將工作上的事物做好，而忽略教育訓練，甚至敷衍過去，這就是教育訓練的目標很明確，但在上位者卻忘記組織的文化為責任制，在工作繁忙的情況下，教育訓練的目標將會被深藏在人們心中的責任制所侵蝕。所以有時隱晦不明的目標將有可能將努力的成果侵蝕殆盡而不自知。

此外，許多的回饋環路包含『時間滯延』（Time Delay），將會干擾影響過程，使的行動的結果將使以漸進式的方式進行。時間滯延指的是行動與結果之間的時間差距或一個變數對另一個變數的影響，需要一段時間才看得出結果下發生的，簡單來說就是需要花時間。未被察覺的時間滯延會引起不穩定與運作失調，尤其是滯延的時間特別長，它會使你矯枉過正，不是太過就是不及；但若我們看清他們，並善加利用，也能產生正面的效果。

『不斷增強的回饋』、『反覆調節的回饋』和『時間滯延』是構成系統思考的三個重要的基本元件（Senge, 1994）。Sterman認為因果回饋環路圖是表現回饋關係的重要工具，因果環路圖的優點如下：

- 快速的抓取人們對動態環境的假設。
- 引導出個人或團體的心智模式。
- 討論你深信不移的重要回饋環路。

系統思考是從二十世紀Forrester所開創的系統動力學一直到現在不斷精鍊下結實豐碩之成果。

因此Sterman認為在動態複雜的環境中，決策的制定者應認知回饋在系統結構中的重要性。所以，Paich & Sterman 就發展出一套互動式的電腦遊戲或稱為「管理飛行模擬器」（Sterman, 1988；1992；Senge & Sterman, 1992；Graham et al., 1992）。它將一個公司及其市場與競爭者具體化成為一個模式，可以管理一個新產品從推出上市到成熟，決策者經由十年的模擬時間，可制定每季產品價格、行銷費用及產能大小（Paich, 1993）。以下就針對此模式的三個構面來進行探討：

### 市場面：

市場模式是以傳統的擴散模式為基礎（Bass, 1969；Kalish & Lilien, 1986；Mahajan & Wind, 1986；Homer, 1987；Mahajan et al., 1990）。模式的要素是回饋結構乃透過潛在顧客（potential customers）經由購買採用而成為顧客基礎（customer base），口碑會造成銷售量增加（正回饋），但是也會耗盡潛在顧客人數（負回饋），所以顧客基礎的人數（累積採用者）會形成一個S型曲線圖，而每期銷售量也會呈現如鐘型的曲線圖。

### 公司面：

- 生產的數量多寡由訂單決定，若產能不足時，將會造成交貨期延長，以至於降低公司產品的吸引力及減少可分配到的訂單。
- 目標產能是公司每季所想要達到的產能，故須每季皆設立，但實際產能到達公司所設立的目標產能間，有一段約四季的時間遞延。
- 當累積生產量愈多時，則因學習曲線的效果，單位變動成本將會下降，如一個80%的學習曲線，其累積生產量每增加一倍，則單位變動成本約下降20%。此外，競爭者的學習曲線是與我們自己公司相同的；因此，誰的市場佔有率高，那麼他將取得較低的成本優勢。
- 利潤＝銷貨收益－公司總成本。公司總成本包含固定成本、變動成本、行銷費用以及投資成本；而銷貨收益＝產品價格×生產銷售量。
- 固定成本＝產能×單位固定成本，單位固定成本為一個常數；而變動成本＝生產銷售量×單位變動成本，單位變動成本初始為30，將因學習曲線效果而降低；行銷費用為佔收益的比例。
- 投資成本係指當增加產能時，所花費的管理、安裝、人員訓練等成本；同樣的，減少產能也需花費成本。所以當產能與目標產能有差距時，其投資成本＝每單位差距之投資成本×(產能－目標產能)。

### 競爭者與市場情境：

競爭者的產能、財務結構及任何條件在遊戲開始時都和你完全相同，至於往後如何發展，端視兩家公司經營策略與環境間互動的結果。競爭者的訂價策略有四種，這四種訂價策略主要的差異在於對你的訂價、市場佔有率、供需狀況（產能與待交貨訂單）等因素的反應方式不同；而市場情境共有五種，這五種市場情境主要的差異在於口碑效果強度與產品使用期（或重置購買）的比率上不同。

最後本文以一個組織的例子，成功的利用system dynamics和management flight simulators去克服了複雜變動的環境。而這項成功亦反映出之前妨礙我們無法戰勝policy resistance以達到high performance往往不是因為缺少資源，或是技術的知識等等。而其主要的原因往往來自於我們缺少了有關學習複雜事務及找尋協調性高的政策的系統思考能力，已完成我們真實所需要的。

### 參考資料：

- 張光漢，民90，ERP系統與系統動力學模式結合界面之研究與發展，義守大學管理科學研究所碩士論文。
- 簡菁儀，民91，台灣軟體廠商服務績效之系統動力學研究，中山大學資訊管理所碩士論文。
- 許仲緯，1999，以系統動力學探討某電腦公司部門政策間整體動態結構並建構其管理飛行模擬器，國立中山大學企業管理研究所碩士論文。
- 郭進隆譯，1994，第五項修練－學習型組織的藝術與實務（原著：Senge, Peter M., 1990, The Fifth Disciple），台北：天下文化出版社。

- 陳建龍，2000，網路學習之預測與評估，國立台北科技大學技職教育研究所碩士論文。
- 陶在樸，1999，系統動態學，台北：五南圖書出版社。
- Senge, Peter M., 1990, The Fifth Discipline : The Art and Practice of the Learning Organization, New York : Doubleday.
- Senge, Peter M. and J. D. Sterman, 1992, “System Thinking and Organizational Learning : Acting Locally and Thinking Globally in the Organization of Future, ” In T.Kochan and M. Useem (Eds. ), Transforming Organizations, Oxford University Press, Oxford, pp.353-371.
- Senge, Peter M., et al., 1994, The Fifth Discipline Fieldbook : Strategies and Tools for Building a Learning Organization, New York : Doubleday.