

# 系統思維在科學探究與學習上的意涵及應用

陳可恭

國立臺灣師範大學 科學教育研究所

## 摘要

系統思維，無論在科學探究或日常作業中都常扮演著重要角色。尤其，當面對著複雜多變的待解問題時，作業者能否適切地藉系統性思考以綜觀全局、沿波討源，常成為能否成功解題的關鍵。然而，有關「系統」的意涵、規劃技巧與運作特性究竟為何？特別是，超越簡單因果關係的複雜情境，究竟應如何理析與掌握？這實在是一個值得探討的問題。

基此，本文謹援引兩則與高級中學《物質科學》課程相關的教學實例，以詮釋系統思維在科學學習與問題解決上之意涵及應用；同時，並揭舉與闡釋科學教育（教學）中所應強調的系統思維 - 亦即，從模型中思考、相互關聯的思維、整體性的思維、動態的思維、系統之控管。

關鍵詞：系統、系統思維、地球系統。

## 壹、緒言

系統剖析與控管，是科學探究及日常作業中都常用到的探索途徑與思維取向。尤其，當面對著複雜多變的待解問題時，作業者常須適切地運用系統性思考以綜觀全局、分層理析，方能沿波討源、成功解題。檢視科學發展史，不難發現，科學探究的進程，雖隨時空遞移而有傳統的機械化約論（牛頓典範）及晚近的整體系統觀之典範變遷（林財庫，1999），但「系統分析」卻始終都是問題解決歷程中的重要環節。其實，除了科學探究上的應用之外，在日常作業及社會人文領域中，許多具系統意涵的語詞也都屢見不鮮；舉凡，空調系統、供電系統與生態系統，及文官體系、經濟體系與教育體系等，這些即是我們耳熟能詳的生活語彙或運作概念。

當然，在科學教育上，系統概念的建立與系統分析能力的培養，就更顯重要了。例

如，就以我國最近所推行的「九年一貫課程」而言，欲對《自然與生活科技》領域中的「自然界的組成與特性」及「自然界的作用」等核心課題進行有效學習，則系統概念的重要性，誠不言可喻。此外，像美國科學促進會（American Association for the Advancement of Science；AAAS），在其所提出的 Project 2061 教改計畫的課程綱領中，更明白舉薦：應將系統（systems）、模型（models）、守恆（constancy）、變化的式樣（patterns of change）、演化（evolution）與尺度（scale）等六個植基於系統典範的主題，訂定為科學教育的共同基調（Common Themes；Science for All Americans, 1989）。系統思維，在科學教育上被重視的程度，可見一斑。

然而，有關「系統」的意涵、規劃技巧、運作原理及相關研究的新趨勢，究竟為何？特別是，超越簡單因果關係的複雜情境，究

竟應如何認識與掌握？這實在是一個值得探討的問題。基此，本文擬援引兩則與中學《物質科學》課程之《物理》及《地球科學》相關的教學實例進行討論，以詮釋系統思維在科學學習與問題解決上之意涵及應用；同時，並對系統理論與系統思維的要義及特性，略作介紹。

## 貳、系統思維與科學解題

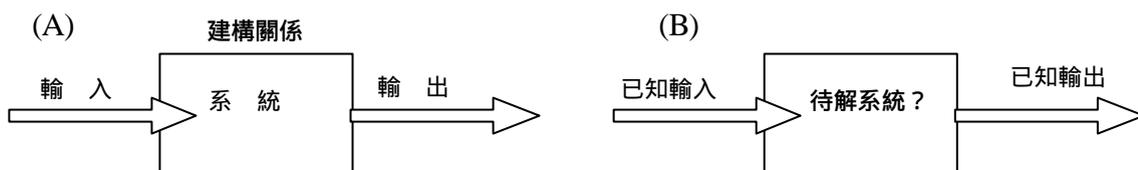
### 一、科學探究的「系統化」進程

人類所處的外在世界，其運作或以簡單的線性因果關係呈現，或以複雜的動態機制進行，型態可謂繽紛多元。然而，當面臨著難易不同、繁簡迥異的待解問題或現象時，人們究竟應如何（或會如何）「從簡易中洞悉其章法，從複雜中理出其體系」、「從有序中預見其變化，從無序中尋找其秩序」，以進行適切地思考與推理呢？

回顧科學史可見，許多科學探究機制，正如系統論創始人維納(N. Wiener)所言「科學問題的開始，都像是一個『閉盒』(黑箱)」(引自張瓊、于祺明和劉文均，1994；例如，地球內部構造，對人們言，起初就是個隱晦不彰的黑箱)。而科學探究的歷程，就在於將這起初所知有限的待解系統，經由給予刺激(輸入)及檢視其反應(輸出)，來探求其內部結構。例如，地球物理學家經由給予

地球(黑箱)能量(如震動能)，再分析其所傳出的信號(震波)來揭開地內之謎，這便是其中一例。倘若能再反覆操作，則原本的黑箱便可逐漸變為「灰箱」，乃至近乎完全明瞭的「白箱」。甚至，更可藉此白箱及其運作法則，以「解釋過去、說明現在和預測未來」。

一般而言，系統思維在問題解決上之應用，主要約包含兩個進程的交互為用：其一在於，尋找系統「輸入」、「結構」與「輸出」之間的基礎關係(例如物理方程式)，此又稱為順向演算〔圖一(A)〕；另一則為，由已知的「輸入」配合順向演算的背景理論，以逆演可以擬合「輸出理論值」與「輸出觀測值」的「系統結構解」，又稱為反向演算〔圖一(B)〕。然後，結合此二進程反覆操作，便可不斷地進行科學解謎活動。然而，晚近由於系統分析能力的提昇及系統觀的改變，人們已逐漸意識到：有許多現實世界的系統運作(像全球變遷、經濟改革……等)，其因果並非單純的線性關係，而是以複雜、渾沌、非線性的動態機制呈現；因此，欲窮其理蘊、逼真模擬，常非單向片斷的操作所能竟其功。所幸，近來資訊處理能力進步神速，故只要能釐清問題本質，並適切地應用系統理論，則對於複雜問題的控管，已非完全不可能。



圖一 (A) 順向演算；(B) 逆推系統結構

## 二、系統思維應用之實例二則

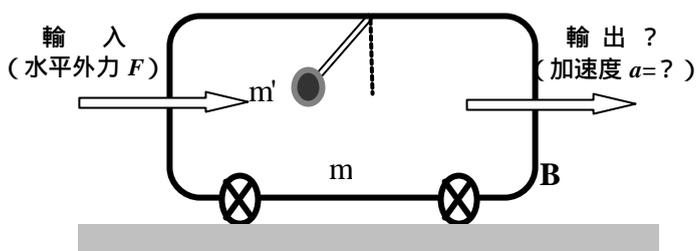
如前所述，在人們的生活經驗中，可謂處處需要系統思維。即便，像菜市場中一個有經驗的瓜販「藉著輕敲（輸入）西瓜（待解系統），再細聽其回音（輸出），以判斷瓜質（系統結構）」，這也是系統化操作的具體實例。當然，在正式的學習活動中，系統概念的應用，就更隨處可見了。於是，在此謹引用與高級中學《物質科學》相關並分別能代表簡易及複雜系統的實例二則進行討論，俾便作為詮釋「系統思維於科學解題之應用」的基礎：

### 1. [實例一] - 水平運動系統之力學分析

狀況：質量  $m$  的火車廂內，以細繩將質量  $m'$  之圓球懸吊於天花板上，並向前運動(如圖二所示)。

問題：

- (1) 火車若受到水平淨力  $F$  (含推進力、摩擦力.....等) 作用時，則可產生加速度  $a$  若干？ ( $F$ 、 $a$ ：向量；本文以粗黑斜體字母表向量)
- (2) 若球在車內達平衡時，則懸球細繩與鉛直方向的夾角為何？又繩之張力  $T$  為何？

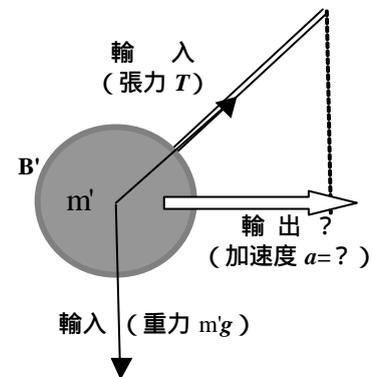


圖二 水平運動系統之力學分析

系統解析：

- (1) 第一個問題，因所欲探討的是「火車的平加速度  $a$ 」 - 故「系統」應包含車廂、細繩及圓球等「元素」，車體表面則可視為其「邊界」(如圖二左圖所繪之 B 部分)，其外則為所處之「環境」；當外來刺激(輸入)  $F$  加諸系統時，則產生效應(輸出)  $a$ ；而牛頓第二運動定律  $F=MA$  ( $F$  表外力， $M$  表質量， $A$  表加速度) 則為聯繫其關係的一般性方程式，在此即  $F=(m+m')a$ 。至於，車廂、細繩及圓球之間的作用力(如張力  $T$  等)，則屬系統內力；且此時有關車體的各部(例如，座椅、車輪.....等)，僅須統括於  $m$  之中即可。

- (2) 第二個問題，因所欲探討的是「平衡時其內懸球細繩的角度與張力」 - 故系統的「邊界」應變成如圖二右圖所圈定之  $B'$  的範圍(亦即小球之表面)，此時張力  $T$  (與鉛垂線夾角) 與重力  $m'g$  對小球言則均可視為「輸入」，而「系統」質量則為  $m'$ ，「輸出」應為水平加速  $a$ ；此時，張力  $T$  則應被視為系統所受之外力。



系統思維在科學探究與學習上的意涵及應用

## 2. [實例二] - 地球系統 (Earth system) 的變遷

狀況：地球大氣圈中之氣體成分，因人為干擾而發生變化（如，CO<sub>2</sub> 含量因人類活動而增加）。

問題：

若發生如上干擾，則對地球系統可能產生的影響為何？

系統分析：

「地球系統」，顧名思義，其所關注者是地球的整體運作。由於，地球係由許多「次系統」（可能是物質的或生物的；例如，水圈、岩石圈、生物圈或人類團體）所組成的整體，而其間之交互作用，經常會「牽一髮而動全身」。因此，以「全球變遷」（global change）的觀點來著眼，乃研究「地球系統科學」的一個重要取向。

地球系統的運作，就如同人體之被生理學家視為一個「自我平衡系統」（homeostatic system）一般。人體的生理機能擁有維持平衡的「回饋機制」（feedback mechanisms），例如，過熱時可由排汗降低體溫，過冷時則可藉顫抖生熱禦寒（Ernst, 2000）；很類似地，當地球被視為一個系統來探討其變遷時，其中的「動力氣候系統」，也存在許多回饋作用，有些會使之呈現失穩，有些則又能使之趨於回穩。

例如，就以地球的能量進出言，原本殆由圖三所示者即可簡單表徵；亦即，地表熱量的主要來源是太陽能的輸入，而其中又以短波輻射為主，經由地球系統的一系列利用及轉換後，會變成以長波輻射為主的形式對

外輸出能量，因此地球便得以因熱能收支平衡而維持溫度恆定。然而，隨著科技不斷發展和系統觀的不斷演進，晚近人們發現，大氣成分的改變對於地球所造成的衝擊及其能量轉換的問題，必須以更複雜的觀點視之：倘若，大氣中之 CO<sub>2</sub> 含量因人類活動而增加，則會因產生所謂的「溫室效應」（在此暫且視為引發變遷的「起因」），而使地表溫度上升；然則，一旦氣候變暖而冰雪融化，則原本色淺、明亮、反照率較大的雪地，會被顏色較深的地形地物及海洋所取代，並且促使更多的陽光被吸收，如此，也就更加速了暖化作用之進行；亦即，當 CO<sub>2</sub> 的異常量倍增時，經交互循環的結果，溫度的異常量可能不只倍增，甚至不只呈現簡單的線性變化；此即所謂的「正回饋」（positive feedback）。反之，與此相異的效應之一是，溫度上升水汽蒸發量增加，而使天空被低層雲遮蔽的範圍擴大，導致有較多的太陽能被折返太空，如此一來，溫度便不致無限上升；此即所謂的「負回饋」（negative feedback）（Ernst, 2000）。於是，此繁複糾結的動態機制，便必須由圖四所示者方得以描述其中之要；事實上，諸多現象，孰因孰果，已難以釐清。〔按：雲與輻射之間的關係十分複雜；大體而言，「高雲吸收地球輻射的能力較強，低雲則反射太陽輻射的能力較強。因此高雲較多將使地表增溫，低雲較多則使地表降溫。如果 CO<sub>2</sub> 加倍，那麼大氣中的水汽含量及雲的分布會有何種變化及影響呢？倘若是低雲量明顯增加且冷卻效應大於高雲的暖化效應，則將產生負回饋作用，地球氣候可

能不但不變暖反而變冷；如果，增加的主要是高雲，則將產生正回饋作用，那麼全球暖化現象可能因此而更加嚴重。」（引自魏國彥和許晃雄，1997）。

### 三、二實例之比較

#### 1. 共同特性：

無論〔實例一〕或〔實例二〕，基本上都有一些形成問題情境的「組成要素」，而一旦受到擾動或刺激（起因）時，則系統就會產生一些變化（效應）。至於，「系統」與「邊界」，事實上常是人們針對「所欲探討的問題」所進行的「有目的」的規劃之產物。

此外，系統問題的探討，係由於研究者之介入，而能湧現重點、彰顯目的，並能使系統因而被意義化 - 因此，在整個問題解決的歷程中，研究主體 - 人，是不可能「置身度外」的！尤其是，複雜系統之「初始模型」，更需人為引出，而不可能無中生有。

#### 2. 相異性質：

所舉二實例，其相異處，殆可引用系統論者所提的「簡單性與複雜性」、「線性與非線性」及「基元性與組織性」等三個維度，進行對比分析（魏宏森和曾國屏，1995）：

〔實例一〕的特性是 - 組成要素較單純；「起因」（即外力）與「效應」（即加速度）之間呈簡單線性關係（即由方程式  $F=MA$  所支配）；在解題過程中，並可依題意所需，化約為若干基本單元，亦即，將整體化約為部分，將高層次的特性化約為低層次特性的簡單組合，甚至可將整個研究對象

化簡為以「質點」（particle）的觀點來討論（例如，將運動體視為質點，或分割為質點的組合）。

〔實例二〕的特性是 - 討論全球變遷，如前所述，所涉因素繁眾且環環相扣，欲作有效模擬絕非等閒工程。事實上，除了已述及的大氣成分、陽光反照率及冰期消長的問題之外，像物種競爭、土地利用、化學物質釋放，及人為的森林砍伐、空氣污染，甚或其間的連鎖效應所可能造成的衝擊等，在在都可成為影響深遠的研究課題。此外，地球內的所有組成要素（或次系統）間的交互作用，也都必須考量；即使像「板塊運動」、「火山活動」等大時空尺度的作用，也都是不容忽略的 - 所謂「物物相關」！因此，欲有效探討全球變遷，除了傳統的地質學、大氣科學、生物學、化學和經濟學.....等學科的整合是核心要務之外；其它如，此系統的運作機制、次系統間的聯繫關係及人類擾動的影響等，也都是必須思考的面向（Ernst, 2000）。總之，不同於前面〔實例一〕的，這是一個因素眾多，涉及面廣；聯繫緊密，結構複雜；動態多變，隨機性強；非線性，非加成性；因果關係反直觀且具滯後效應的問題（魏宏森和曾國屏，1995）。



## 二、系統運作原理與分類

### 1. 系統運作的重要名詞

(1) 起因（輸入）與效應（輸出） - 足以引起系統發生改變的任何干擾或驅力稱為「起因」，而系統所生的反應則稱為「效應」；例如，〔實例一〕之「水平外力  $F$ 」及「加速度  $a$ 」即是；在許多情況中，起因與效應，常可分別對應於輸入與輸出。

(2) 系統的外界環境(external environment) - 不在系統邊界內的其它因素稱之；系統與其環境間的溝通及交互作用，僅靠系統邊界的輸出或輸入(圖五)；例如，〔實例一〕中懸球細繩施力於小球邊界。

### (3) 系統回饋

內部回饋 (intrinsic feedback) - 系統所產生的輸出，在系統邊界內不斷反覆作修改，此訊息並會傳到輸入並影響之〔圖六(A)〕；例如，〔實例二〕的雲在大氣圈內所生之效應。

外部回饋 (extrinsic feedback) - 系統所產生的輸出，在系統邊界外不斷反覆改變，並影響輸入〔圖六(B)〕。

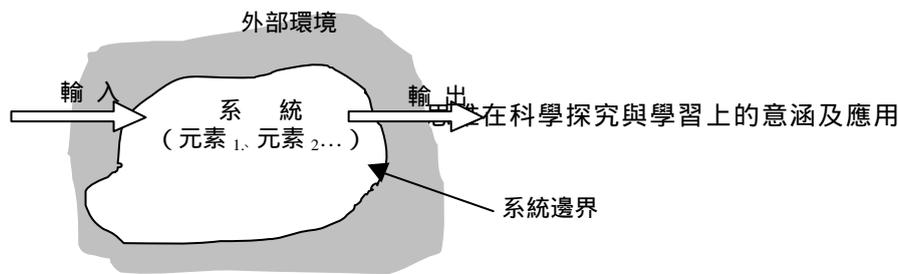
### 2. 系統分類

如前所述，系統定義可謂多元，而其分

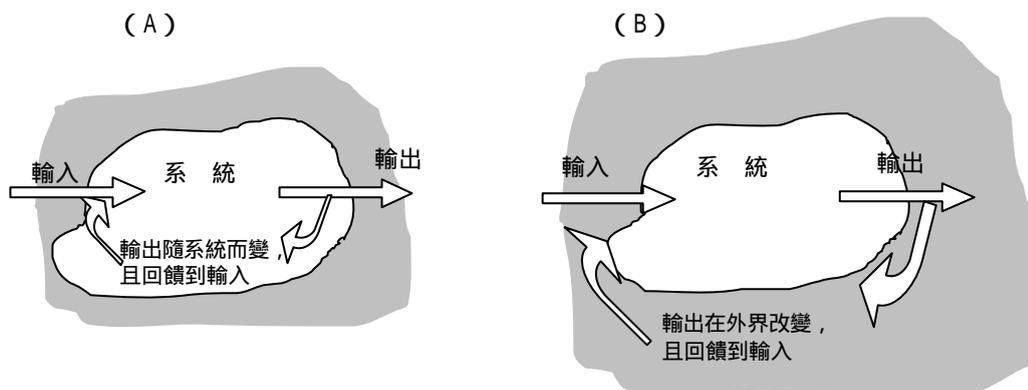
類依據亦非一成不變。通常，它可依其起源被分為「自然系統」及「人為系統」；依狀態變化被分為「靜態系統」(static system)及「動態系統」(dynamic system)；依有無能量之進出被分為「開放性系統」(open system)及「封閉性系統」(closed system) (White et.al., 1992)；依輸入、輸出的數目被分為「單輸入或多輸入」以及「單輸出或多輸出」系統。諸此分類，因大致均可「顧名思義」，故不再贅述。在此，擬稍作解釋的是，下述的特殊分類特性 (林宏澤和林清泉，1991)：

可定系統 (deterministic system) - 輸入與輸出可作直接量測，且可由「均一性」來說明的系統。亦即，只要有相同的輸入，就會有相同的輸出。因此，系統的量測結果是唯一的；例如，〔實例一〕所討論者。

隨機系統 (stochastic system) - 無法精確說明所有影響因素的系統；由於有不確定性存在，因此要模擬時需運用統計學原理。例如，拋擲骰子及在量子物理中的若干現象之計算。



圖五 系統與外界環境的隔離



圖六 回饋系統 (A) 內部回饋系統；(B) 外部回饋系統  
(改繪自 Sandquist, 1988; 戚萬伍 譯)

渾沌系統 (chaotic system) - 即複雜、非線性、動態的，須由渾沌理論來描述的系

統；例如，上舉〔實例二〕全球氣候變遷之類的問題等。

## 肆、系統思維的特性與應用

### 一、系統運作的基本特性

系統科學與思想，發展至今，整體而言，人們所欲探索的系統運作，勢必「進一步突破以往的研究框架，由追求基元性向深究組織性挺進，由嚮往簡單性向探索複雜性發展，由崇拜線性律向探討非線性律而努力」（魏宏森和曾國屏，1995）。

然而，在大千世界中，系統的類型繽紛眾多。其通則究竟為何？系統論者揭櫫：「整體性、層次性、開放性、目的性、穩定性、突變性、自組性及相似性，是種種系統運作的八個特性，也是八條基本原理」（魏宏森和曾國屏，1995）。就以前述二實例言，若對其作較深層的思考與剖析，則不難見其端倪：舉凡一個系統的形成，固然係由其中諸要素的結合，但若要見其運作，卻非得要以整體視之不可，此「整體性」之謂；系統中諸要素，在地位、結構與功能上表現出等級秩序性，層層節制，此「層次性」之謂；無論物質、生物或社會的系統，均需不斷與外界環境進行或物質、或能量、或信息的交換，才得以向上向前發展，此「開放性」之謂；系統之形成，必有其被視為（或名為）系統之緣由與目的，且所具之階段目標常決定其階段性行為，此「目的性」之謂；系統經由「失穩」從一個狀態進入另一狀態，或為質變，或為量變，而得以持續發展，此「突變性」之謂；在外界作用下，開放系統具有一定的自我穩定力，可以在一定限度內自我調節，從而得以保持其結構、功能及秩序，此「穩定性」之謂；系統自己走向有序結構，

萬事萬物自成組織，此「自組性」之謂；如上所述，凡系統均需具整體、層次……等特性及普適化的思維規律，此即「相似性」之謂。

### 二、科學教育應強調的系統思維

系統思維，係一種聯繫系統之結構與表現的思考進程。換言之，它可由系統結構推求輸入及表現，亦可能由系統的進出以探究結構。Richmond（1992，1993）寫道「良好的系統思維動線應具備七種特徵 - 即動態性、迴路性、總體性、結構性、操作性、連續性及科學性的思維。」；由於 Richmond 是一位系統控制科學家，故其所倡行之系統思維與系統動力模擬的特性較為相近。那麼，從教育（教學）的面向言，系統思維所應強調者究竟為何呢？Ossimitz（2001）認為應是，從模型中思考、相互關聯的思維、動態的思維及系統之操控與管理；筆者則認為，對於科學事件的宏觀能力之培養，整體性思維，亦應是不可或缺的要項。茲將上舉諸重要思維，略作闡釋：

#### 1. 從模型中思考

因為人們所欲探究的現象，其運作常錯綜複雜、難以理析，因此須建構清楚易解的模型，以為表徵。建構主義者認為，對於外在世界的認識，人們僅能依據其所型塑的圖景（pictures）與觀點（views），來進行思索 - 此即模型的必要性。其實，系統思維的重點在於：對由模型所處理的這份「屬於我們的真實」有所知覺，而非「真實本身」。故個人建構心理學（personal construct psychology）的倡始者 Kelly（1969）曾坦言：

「人類面對開放性論題，所應在意的，並非現實是否存在，而是人們如何去理解它（現實）。」（引自吳芝儀，2000）。就以地球系統言，我們永遠無法先窮究其構造之細節再探索其運作；可行的是，從分析問題的本質出發，再對其關鍵參數及其間之關聯性進行似然性的猜想，如此，才得以深入淺出地建構模擬系統，並循序漸進地解開各種作用之謎題。所以，依據激進建構主義者 von Glasersfeld（1995）的觀點 - 「對於客觀世界的認識，朝模型的方向進行思考，是十分必要的！」（Ossimitz, 2001）。對待解系統，倘若常藉此方式進行思考，則模型建構能力也勢必能被提昇。

一個成功的模型，必須被效化與檢驗，而其建構和分析則仰賴於描述的工具。因此，選擇合適的表徵模式，是發展系統思維的關鍵。對學校教育言，以系統動態機制呈現，應是相當有效的表徵方式 - 因果迴圈圖，可協助進行定性模擬；而方程式及「stock-and-flow 圖」等，則常能為定量模擬提供一些脈絡（Ossimitz, 2001）。

## 2. 相互關聯的思維

此即，對系統結構及其相互關聯的思考。「若-則」（If-then）關係，是我們心智活動、事物理解及應用程序性知識（procedural knowledge）的基石。「因」與「果」之間的切當表述，係此類思維的基礎之一。為了解釋某一現象，我們必須尋找其因；只要其因有效且確實，則其果必能被觀察到。在日常用語中，像「因為-所以」、「若-則」之類的語句，即此類思維的體現。數學

上類似的形式，則為函數 - 包含「自變數」（= 因）及「應變數」（= 果）的概念。例如，前面所舉【實例一】中，「若系統受外力  $F$ .....，則加速度  $a$  為？」及「 $F = m a$ ，（亦  $a_{(F)} = F/m$ ）」，即為此類思維之描述語句與數學表示。

在相互關聯的思維中，除了如上之線性關係之外，具間接效應常是複雜問題的普遍現象。因而可引入回饋迴路，以表達增強（正回饋）或平衡（負回饋）的效應。例如，過去美、蘇強權的軍備競賽，即回饋作用之一例 - 雙方競相較量、擴張，且相互指責對方是罪魁禍首；直至新的制衡機制出現而後已。又如，前面【實例二】所述「若  $CO_2$  含量增加，則會因產生『溫室效應』，而使地表溫度上升.....。然則，一旦氣候變暖，則會令更多冰雪融化.....」。倘若，以整體性的觀點視之，許多現象，要區別孰是因，孰是果，已非易事。一旦進入反覆循環，則不可能再清楚確認整體過程的單一起因，因為任一效應同時也影響著其起因（已互為因果！）。

此外，回饋迴路的理解，常需具備動態觀點，以便知悉事件是如何在全程中湧現的。所以，像間接效應、因果網絡和結構的發展（史）.....等，都是解題歷程中必須考量的。

## 3. 整體性的思維

著名系統科學家錢學森曾言：「什麼是系統？系統就是由許多部件所組成的整體，所以談系統的概念就要強調整體，強調整體是由相互關聯、相互制約的各部份所組成的」

(魏宏森和曾國屏, 1995)。系統分析、操控、研究和規劃均需以整體做考量。這事實上即如心理學所揭示的, 人類的思維具有「完形特性」(Gestalt), 也就是一種整體性。人的思維能進行聯想, 能夠把零星的知識總合起來, 能夠從整體把握客觀對象, 也能夠體現主觀世界的整體性。「一般系統論」創始人 Bertalanffy (1969) 即寫道: 「亞里士多德的論點『整體不等於它的各部份之總和』, 是最基本的系統問題的表述, 至今仍然正確。」這乃將整體性這本是形而上的哲學思辨, 變成可定性描述、可實證研究的科學概念。其實, 整體究竟大於、等於或小於部分之和? 這端視系統內組成要素間的交互作用而定。像「三個臭皮匠, 勝過一個諸葛亮」及「一個和尚挑水喝, 兩個和尚抬水喝, 三個和尚沒水喝」, 就已清楚說明。

#### 4. 動態的思維

即延宕、回饋、震盪……等具時序特性的思考。系統表現會隨時間變化, 延宕和震盪現象是其中的典型。因此, 欲作系統觀測, 則時間維度是不可或缺的。即使, 像討論一個房間的空調及某地氣溫的日變化、季節變化……等簡單作業, 也是如此。其實, 當我們在運用「If-then」的程序性思考的同時, 也就已經在進行動態思維。動態思維, 除了像汽車的照後鏡, 可檢視後方與過去, 同時也像車前燈, 能探索前方與未來。所以, 對一個實際系統的操控而言, 單靠後視鏡來決定去向, 是不夠, 也不科學的! 為了預視未來, 採用具時間維度的模型來模擬, 是相當必要的! 特別是, 像上舉〔實例二〕全球變遷之

類, 「真相」的湧現極慢的問題, 更是如此。

#### 5. 系統操控與管理

發展系統思維的最後一個核心觀點, 即實作系統之操控與管理。系統思維是有其實用面向的; 其所處理者, 除了結構問題之外, 同時亦應對系統的最佳安置與理想走向感到興趣。而實際系統管理, 最基本的問題之一, 是認清及掌握「直接主宰系統改變的成分什麼? 而間接的影響因素又是什麼?」例如, 在一個社會或教育系統中, 欲導正個體行為, 除了行為個體之外, 常需從其周遭環境著手, 方能見效; 又如, 討論「全球變遷」, 則需先掌握其影響要素(如 CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> ... 含量等), 然後才能進行有效的控管。此外, 設法使工具達成理想組合, 以求取系統的最優效能, 這也是系統控管的重要法則; 像成語故事「下駟對上駟」所描述者, 即為佳例。

#### 伍、結語

系統剖析, 能使我們正確地明辨事件中各成分要素的屬性、功能及地位, 俾使整個系統層次分明、有條不紊; 同時, 系統思維, 也有助於我們將事物視為整體, 以便給予周詳嚴密之管理與控制。《大學》一書即云: 「物有本末, 事有終始, 知所先後, 則近道矣!」此分輕重、別本末的思想, 與系統觀念大致相吻, 可見系統思維早已深入人心。然而, 隨科技之進步及人類思想之進展, 系統模擬, 已必須由簡易操作而邁向複雜情境的掌握。故無論就生活、學習和作業而言, 系統思維能力的培養與提昇, 應該都是極為重要的工作。

## 陸、誌謝

拙著寫作期間，承蒙臺灣師大地科系米泓生教授、科教所楊文金教授與審查委員們的悉心指正並提供寶貴意見，同時受到宜蘭高中李有賢校長與老師同仁們的鼓勵和協助。方使本文得以順利成稿。在此謹致最大謝忱。

## 柒、主要參考文獻

1. 林宏澤和林清泉（1991）：系統模擬。台北 高立圖書。
2. 林財庫（1999）：以牛頓典範和系統典範對比的物理思想史教材來改變在職教師的傳統科學本質觀。1999 科學史哲與科學教育學術研討會論文彙編。國立高雄師範大學。
3. 吳芝儀（2000）：建構論及其在教育研究上的應用。收錄於中正大學教育研究所主編《質的研究方法》。高雄 麗文出版社。
4. 張瓊、于祺明和劉文君（1994）：科學理論模型的建構。台北 淑馨出版社。
5. 魏宏森和曾國屏（1995）：系統論-系統科學哲學。北京 清華大學出版社。
6. 魏國彥和許晃雄（1997）：全球環境變遷導論。第七章 影響氣候的因子。  
<http://gis.geo.ncu.edu.tw/gis/globalc/index.htm>
7. AAAS（1989）. Science for All Americans. American Association for the Advancement of Science. Washington, DC.
8. Bertalanffy, L. V. (1969). General system theory. New York: Braziller.
9. Ernst, W.G. ed., (2000). Earth Systems: Processes and Issues. New York: Cambridge University Press.
10. Forrester, J.W. (1992). System dynamics and learner-centered-learning in kindergarten through 12th grade education. Paper D-4337, Cambridge, Mass.: MIT.
11. von Glasersfeld, E. (1995). Radical Constructivism : A way of knowing and learning. London.
12. Kelly, G. (1969). The Psychology of Personal Constructs. New York: Norton.
13. Klir, G. (1991). Facets of Systems Science. New York: Plenum Press.
14. Ossimitz, G. (2001). The development of systems thinking skills.  
[http://www.uniklu.ac.at/users/gossimitz/dyn/gdm\\_eng.htm](http://www.uniklu.ac.at/users/gossimitz/dyn/gdm_eng.htm)
15. Richmond, B., & Peterson, S. (1992). An Introduction to Systems Thinking. Lyme: High Performance Systems Inc.
16. Richmond, B. (1993). Systems thinking: critical thinking skills for the 1990s and beyond. In: System Dynamics Review, 9,2 (Summer 1993): 113-133.
17. Sandquist, G.M. (1988). Introduction to System Science. (戚萬伍 譯) 系統科學概論。台北 科技圖書。
18. White, D.N., Mottershead, S. J., & Harrison, S. J. (1992). Environmental Systems : An introductory text. 2<sup>nd</sup> edition. London: Chapman & Hall.