EJ51-1998-63

科學教育學刊
1998, 第六卷第一期， 63-80

類比的檢索與對應

高淑芬[1]　邱美虹[2]

[1] 高雄縣立岡山國中

[2] 國立臺灣師範大學 科學教育研究所

（投稿日期： 86 年 4 月 9 日，接受日期： 87 年 2 月 16 日）

摘要：類比是科學三大思考技巧（演譯、歸納、類比）中最具創造力，同時也是最無跡可尋，最難以捉摸的技巧（李靜、宋立軍和張大松， 1994 ）。類比不似演譯或歸納有既定的步驟或程序，因此在日常生活中雖然我們常使用類比，但卻不了解類比是如何被（檢索）(retrieved) 的，又是如何產生對應 (mapping) 。在目前科學教育領域對類比的研究亦是如此，很少論及檢索和對應這兩步驟。本文的目的即在介紹三套有關於檢索和對應步驟的理論，希望藉由對檢索和對應機制的了解，幫助科學教師和學習者更能有效率地使用類比。

關鍵詞：類比、對應、檢索。

前　言

人們在日常生活中常不知不覺地使用類比來學習新事物或解釋抽象的概念；在科學上，類比也常被來發明新事物或產生新的解釋。儘管類比使用如此普遍，但我們對類比的過程卻不甚了解。德國數學家高斯曾這樣談到他的體會：「像閃電一樣，謎一下子解開了；我自己也說不清楚是什麼導線把我原先的知識和使我成功的東西連接起來。」，也就是說，類比具有速斷性（李靜、宋立軍和張大松， 1994 ）。這種速斷性使我們很難理解類比是「如何來的」及又是「如何產生對應」，只知道人們在做類比時是很快的。

實際上，類比的心智運作歷程是非常複雜的。 Sternberg 和 Nigro （ 1980 ，引自黃幸美， 1995 ）等人根據訊息處理理論，將類比推理思考分析爲下列六個成分：編碼 (encoding) 、推論 (inferring) 、對應 (mapping) 、應用 (applied) 、證明 (justified) 及反應 (response) 。 Gentner (1989) 則認爲自發性類比學習需歷經 5 個階段：接觸來源領域 (accessing the base system) 、來源領域和目標領域間的對應 (performing the mapping between base and target) 、評量配對 (evaluating the match) 、儲存對目標領域所得的推論 (storing inferences in the target) 、抽取共同性 (extracting the commonalities) 。 Holyoak 和 Thagard (1989a); Thagard, Holyoak, Nelson 和

Gochfeld (1990) 則將類比過程分爲：檢索或選擇可能有用的來源類比物 (the retrieval or selection of a plausibly useful source analog) 、對應 (mapping) 、類比的推論或遷移 (analogical inference or transfer) 及隨後的學習 (subsequent learning) 四個步驟。Keane, Ledgeway 和 Duff (1994) 則認爲類比思考的階段包括表徵 (representation) 、檢索 (retrieval) 、對應 (mapping) 、調適 (adaptation) 和歸納 (induction)5 個階段。雖然各研究對類比過程的區分不盡相同；歸納之，人們使用類比的歷程應包含了如何從長期記憶中找出適合的類比物－檢索階段、將兩領域相似部分配對 (match) －對應階段、及應用對應的結果學習目標領域的知識－學習階段；而對應 (mapping) 則是整個是類比思考的核心過程。

近來借助人工智慧的發展，一些研究者開始嘗試打破類比思考的黑盒子，並根據實證研究的結果，提出理論來解釋類比過程的機制 (Hall, 1989; Thagard, 1988) 。最初有關研究主要集中在對應階段，然而近來研究者進一步探討檢索可能產生的機制。在這些研究者所提出衆多的理論或工具當中，以 Gentner 、Holyoak 和 Thagard 、 Keane 爲主的三派理論具有較完整的系統，他們分別提出各自的類比理論，並以理論爲基礎發展出對應和檢索工具，企圖統合整個類比過程。以下則分別介紹和比較這三派的理論，以使我們對類比的歷程能有更進一步的理解。

以 Gentner 爲主的類比理論

談到類比，最爲人所熟知的莫過於 Gentner 的結構對應理論 (Structure Mapping Theory, SMT) 。 1983 年， Gentner 首先指出兩領域的對應是透過結構上的關係而非屬性；這可謂是創時代之舉，因爲在她之前，我們並不清楚類比對應時到底是什麼在對應。隨後， Falkenhainer, Forbus 和 Gentner (1989) 則爲 SMT 建立一套可執行的程式：結構對應工具 (Structure Mapping Engine ，簡稱 SME) 明確規範類比對應的過程。只考慮結構因素 (structural factor) 的 SME 雖可說明對應的過程但卻無法解釋爲何在檢索過程中表面相似性會優於結構相似性；於是在 90 年代， Gentner, Rattermann 和 Forbus (1993) 與 Forbus, Gentner 和 Law (1994) 又提出其檢索工具：在許多檢示到的資訊中，只有少數被選取出來 (Many Are Called but Few Are Chosen ， MAC/FAC) 來說明此矛盾現象。以下針對 Gentner 的類比相關理論分述之。

一、類比理論－結構對應理論 (SMT)

Gentner (1983) 基於對心智模式的研究，她認爲人們對某個領域的知識可以表徵爲節點 (nodes) 和述詞 (predicates) 的命題 (proposition) 網路，並做了這樣的假設：述詞 (predicate) 可區分爲屬性 (attribution) 和關係 (relation) ，屬性是指只包含一個論証 (argument) 的述詞，關係則是包含兩個或兩個以上的論証。所以領域 (domain) 和情境 (situation) 就可視爲物件 (object) 、物件屬性和物件間關係所組成的系統。在此前提下， Gentner 提出了結構對應理論。

結構對應理論指出類比的規則是取決知識表徵的語法 (syntax) 結構與其內容無關，因此在對應時，應該捨棄物件屬性的對應而尋求物件間的關係，而且一組互有關連的關係結構（即較高階的關係）會比單獨的關係容易產生對應（系統性原則）。

以原子與太陽系之間的對應爲例， Gentner (1983) 認爲我們對太陽系領域的知識可以表徵如圖 1 。基本上兩個領域的對應是透過結構上的關係而非屬性，因此在對應時，我們捨棄太陽的一些屬性，如“太陽的顏色是黃的”這個特質不會用以對應到原子上；但它卻保留了關係中的“吸引”、“質量比…大”、

"繞著…旋轉"這三個特性用來做爲兩領域間的對應。所謂一組互有關連的關係是指當組內某關係改變時，組內其他的關係亦會隨之改變；例如當"行星的質量比太陽大"時，那麼就應該是太陽會繞著行星旋轉，但若是行星比太陽熱時，卻不會影響到其他的三個關係。因此根據系統性原則，"吸引"、"質量比…大"、"繞著…旋轉"這三個互有關連的關係就會比單獨"比…熱"的關係要易於對應到目標領域－原子去。藉由這樣的規則，我們可以建立出兩領域間的對應。

Gentner (1983, 1989); Gentner 和 Toupin (1986); Falkenhainer 等 (1989) 也在心理學上的研究發現了一些支持 SMT 的證據。他們發現當要求受試者詮釋類比時，受試者會比較注重物件間的關係而忽略物件的屬性。在跨年齡的研究中，也發現大人在類比對應過程中偏好系統性原則，而且當來源領域和目標領域所共享的系統性關係結構愈多時，他們在類比的判斷上就愈趨於完整和合適；相較之下，孩童卻沒有這個方面的傾向，但隨著年齡增長，會愈來愈偏向系統性，所以如果來源領域的結構是比較系統性時，8 歲的小孩在較難的對應上的表現就比 5 歲的小孩來得好。Holyoak 和 Koh (1987) 亦指出當兩者結構間的相似性愈大，則愈容易作對應。這些證據在在說明了系統性原則在類比對應的過程中是相當重要的因素。

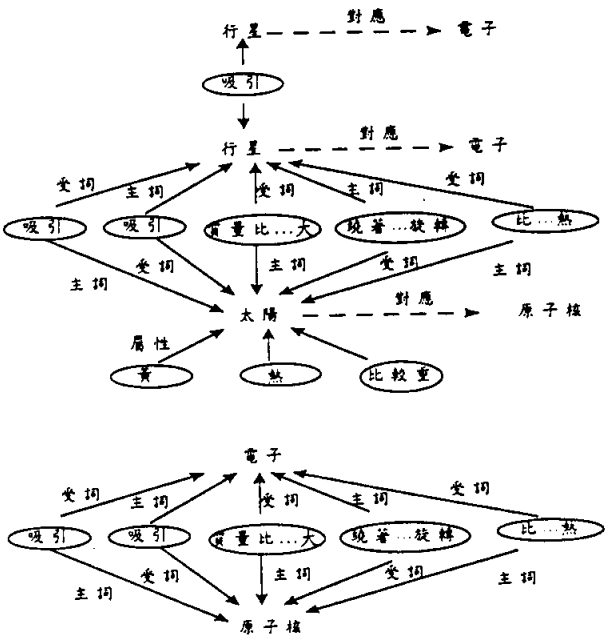


圖 1：太陽系和原子結構間的對應（譯自 Gentner, 1983）

SMT 的最大貢獻就是以少數幾個規則就解釋出類比的複雜問題，除此之外它的另一貢獻就是利用兩領域間屬性與關係對應程度的多寡區分出類比與字面相似性 (literal similarity)、抽象 (abstraction) 及異例 (anomaly) 之不同 (Gentner, 1983; 1989)。唯此部份的差異性並非本文重點，故不擬對其加以評論之。雖然 SMT 排除其他因素而只注重結構因素，頗受其他學者（如 Holyoak、Thagard、Keane 等）的批評，但它仍具有不可憾動的地位，Holyoak 和 Thagard (1989a) 指出在人工智慧和心理學領域中，許多的理論仍採用結構一致性 (structural consistency) 的觀點。

二、對應工具：結構對應工具 (SME)

繼 SMT 提出之後，Falkenhainer *et al* (1989) 以 SMT 理論爲基礎，提出類比對應的工具－SME。簡言之，SME 就是一套工具箱 (tool kit)，結合人工智慧的理論爲 SMT 建立一可執行的程式。

基本上，SME 將類比對應的過程分爲下列四個步驟：

1. 建構局部配對 (local match construction, Lmap[註])：找出在目標領域和來源領域的項目間所有可能的配對。（註：原作者並未用 Lmap，本文作者自行補入。）
2. 建構整體配對 (globe match construction, Gmap)：計算每個局部配對的相關性，並合併相關的局部配對以形成相關性 (correspondence) 最一致

(consistent) 的整體配對 (Gmap)，這個步驟可能會產生數個整體配對 (Gmap)，而不同的 Gmap 就代表了對對應的不同詮釋。

3.計算候選推論 (candidate inference)：導出每個 Gmap 所建議的候選推論，但並不是所有的詮釋都可以遷移到目標領域去，必須做進一步的評量。

4.計算結構性評量分數 (structural evaluation scores, SES)：找出每個局部配對 (Lmap) 假設的證據 (evident)，並利用此證據來計算每個結構性評量分數。SES 最高的 Gmap，即是最佳的類比詮釋。在此，配對間的結構性（系統性）是評量的唯一判準。

Falkenhainer 等 (1989) 及 Gentner 等 (1993) 依舊使用太陽系－原子的類比來說明這個過程。根據 SME 之演算法則 (algorithm)，此類比有三種可能的詮釋（三組 Gmap），如表 1。

這三種詮釋需分別計算出它們的 SES，SES 最高者才能遷移到目標領域-原子結構去。由下表 1 中，第三個詮釋的對應缺乏高階結構，第二個詮釋將太陽和行星溫度差的關係對應到原子核和電子質量差的關係，因爲兩者關係功能不同，而且缺乏系統性，因此這兩個詮釋的 SES 較低。第一個詮釋則是根據質量不相等此一關係產生對應，並且引出“由於質量的差異和原子核與電子互相吸引，導致電子繞著原子核旋轉”這個推論，具有最高階層的關係，所以 SES 得分最高，爲此類比的最佳詮釋。圖 2 爲對此類比的詮釋表徵。

表 1：SME 對太陽系-原子類比三種可能的詮釋

	物件對應	關係對應
1	太陽－原子核，行星－電子	比、、重（太陽，行星）＝比、、重（原子核，行星）
2	太陽－原子核，行星－電子	溫度差（太陽，行星）＝比、、重（原子核，行星）
3	太陽－電子，行星－原子核	缺乏高階結構

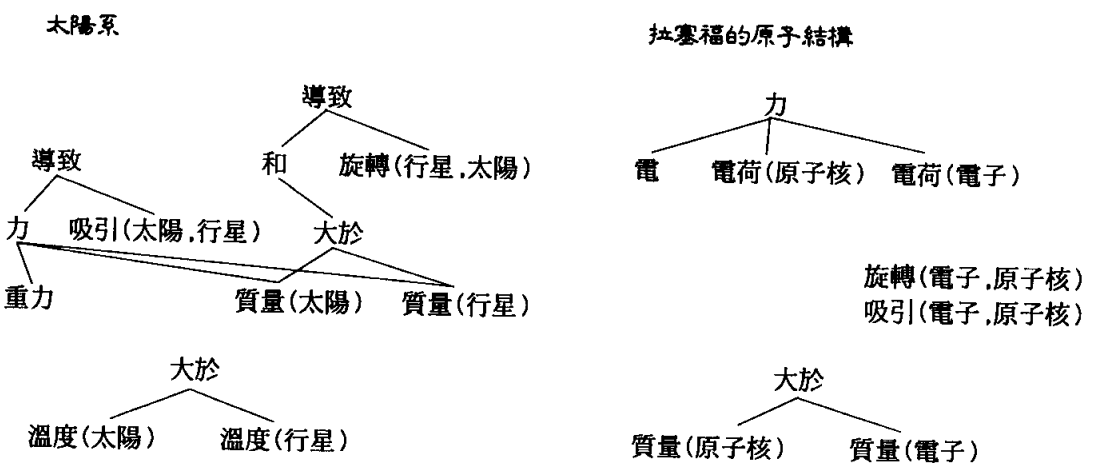


圖 2：太陽系-原子類比（譯自 Falkenhainer et al., 1989）

換句話說，SME 嘗試找出類比所有可能的詮釋，以一種序列處理的方式，先從局部配對開始，再合併這些局部配對成爲數個整體結構配對，最後以結構性爲唯一判準，找出最佳的類比詮釋。除了上述的原子結構類比之外，SME 亦成功地描述了約 40 個範例；不過基本上，它只注重對應的過程，而把接觸 (access) 和應用 (application) 方面留待後來的研究去討論。

三、檢索工具：MAC/FAC

心理學上研究發現，人們在長期記憶中尋找類比物時，其類比物的可檢索性 (retrievability) 取決於表面相似性 (surface similarity)；但在工作記憶中，對於類比物相似性的判斷卻取決於結構而非表面的性質。Gentner *et al.* (1993); Forbus et al. (1994) 認爲這個矛盾現象是源於主宰對長期記憶的接觸 (access) 與評估類比物的配對 (match) 適切性這兩者所依據的相似性不同的結果，因此提出一使用兩階段相似性檢索過程的檢索工具－MAC/FAC 解釋之。

Gentner 一派認爲檢索的過程應區分爲兩階段：MAC 和 FAC，每個階段使用不同的判準：

㈠ MAC

使用一種計算簡單、非結構性的配對器 (matcher) － Cvector (content vector) 來過濾在長期記憶中候選的項目 (item)，以刪減出較少量的配對，做進一步較費力的 FAC 過程。所謂的 CVector 是一種簡化結構表徵的編碼，用來表示對一給定的描述 (description)，它使用那些關係、屬性和這些關係、屬物出現的次數。在記憶體中每一個項目都有自己的 CVector，當刺激物 (probe) 進來時，這個配對器就會計算刺激物和項目間內積的總和，總和愈高，就表示愈容易被輸出。CVector 的內積 (cross) 可以用來檢驗相關結構表徵配對的程度。

㈡ FAC

此階段則使用 SME 來計算由第一階段過濾所得項目的結構配對，以找出最佳的類比物。

在記憶體中，我們要如何從衆多訊息，挑選出最恰當的類比物呢？圖 3 描述了 MAC/FAC 的模型 (Forbus *et al.*, 1994)。輸入的部分（記憶）是一個資料庫，包含了長期記憶中所有可能的項目 (items) 和一個刺激物 (probe)，刺激物是指配對所欲尋求的描述。輸出的部分（想起）則包含一個項目和這個項目與刺激物比較，中間則經歷 MAC 和 FAC 這兩個過程。當刺激物進入時，首先經歷

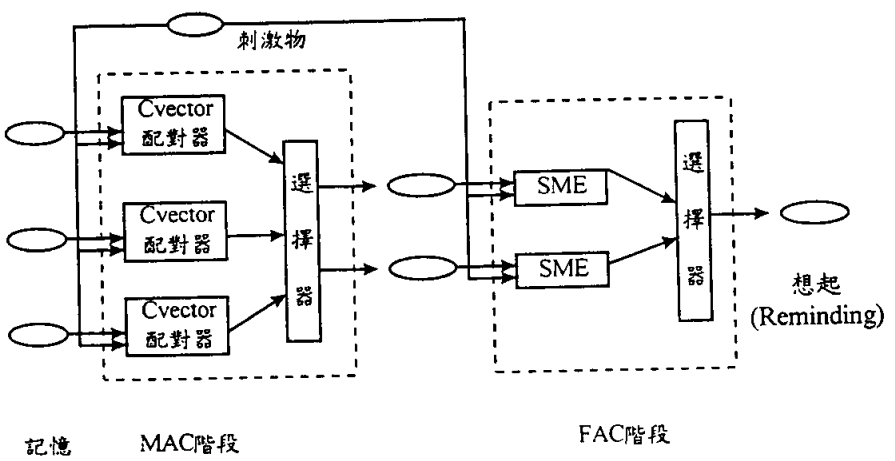


圖 3：MAC/FAC 的模型（譯自 Forbus, *et al.*, 1994）

MAC 階段， MAC 使用 Cvector 配對器從衆多訊息中篩選出數個可能的配對，接著再進入 FAC 階段， FAC 則是使用較昂貴但精確的 SME 當配對器，以結構相似性爲評量的考慮，從 MAC 所輸出的結果中挑出最相似的項目。這樣就解釋了爲何當我們從廣大的記憶庫想到某一個類比物或項目時，這個檢索過程是以表面相似性爲主（ MAC 階段），但在判斷所產生的項目是否適當時，卻是以結構相似性爲主 (FAC) 。這是此理論解釋類比檢索過程的最大貢獻。

從理論的提出到對應、檢索工具， Gentner 、 Falkenhainer 、 Forbus 、 Law 和 Rattermann 建立了一套完整的類比系統，結構相似性是這個系統的核心，這個系統明確指出無論在對應或在檢索的過程中，結構相似性是主要影響的因素。雖然在實証研究上確有其支持的証據，但只重結構相似性而忽略其他的相似性對類比的影響，卻有失偏頗，也是這個系統最受人批判之處。

以 Holyoak 和 Thagard 爲主的類比理論

Holyoak 一開始是從事類比解題研究，提出實用性原則取代以 Gentner 爲主所謂的系統性原則，後來他採用了連結論者 (connectionist) 的平行限制滿足理論 (parallel constraint satisfaction) ，並加入了結構及表面相似性，認爲對應的過程可視爲是一種限制滿足 (constraint satisfaction) 的過程，依此發展出對應-ACME(Analogical Constraint Mapping Engine) 和檢索-ARCS (Analog Retrieval by Constraint Satisfaction) 的訊息工具 (Holyoak & Thagard, 1990; Thagard *et al.*, 1990) 。以下分別就限制滿足理論 (constraint-satisfaction theory) 、 ACME 和 ARCS 逐一討論。

一、類比理論：限制滿足理論

這個理論的核心就是說類比是由三種基本型態的限制所決定，這三個限制分別是同構性 (isomorphism) 、語義相似性 (semantic similarity) 及實用性 (pragmatic centrality) (Holyoak & Thagard, 1989a, 1990; Thagard *et al.*, 1990) 。

㈠同構性

如果兩者的對應具有結構性及一對一的特性，我們就說這兩者是同構物 (Palmer, 1989) 。

㈡語義相似性

在此語義相似性只是單獨指意義上的重疊而已，其定義與 Gentner (1983) 或 Holyoak 和 Koh (1987) 不同。 Gentner (1983) 的表面相似性 (superficial similarity) 是指只有一階述語或屬性相似而已， Holyoak 和 Koh (1987) 的表面相似性則指與達成目標無關的類比物特徵。

㈢實用性

類比者的目的會影響類比的使用。一般來說人們會爲了達成某一個目的來發展兩類比領域間的對應 (Thagard, 1988) 。

這個理論與 SMT 最大的不同點是除了結構的限制外，它還考慮到語義相似性和實用性的限制。實驗結果發現物件和述語的語義相似性亦會影響對應過程，尤其在檢索中過程的影響遠較在對應中爲大 (Holyoak & Koh, 1987; Gentner & Toupin, 1986) ，一些人工智慧的研究者認爲類比者會在有意無意之間使用關於類比目的的知識來指導類比對應的過程 (Thagard *et al.*, 1990; Thagard, 1988) 。因此 Holyoak 和 Thagard 一派認爲應該將語義相似性和實用性列入類比對應時的考慮。

除此之外，不似以 Gentner 爲主的結構對應理論，這三種限制並不是絕對的，而只是提供一種壓力 (pressure) ，一個指導方向以便從無數局部成分對應中找出最佳整體對應 (Palmer, 1989; Holyoak & Thagard,

1989a; 1990)。

二、對應工具：ACME

ACME 是根據限制滿足理論的三個限制所發展出的對應工具，在對應的過程中，同構性會優於語義相似性 (Holyoak 和 Thagard, 1989a; Thagard, 1988)。至於 ACME 的類比對應過程源於平行限制滿足理論 (parallel constraint satisfaction) 資訊處理過程，下面即以一簡單的例子來說明之。

如圖 4，當我們看到左半部的三個字母時，會認爲這是什麼字呢？我們可能認爲是 RED，但這個答案是很不確定的，因爲 R 可能是 P，E 和 D 也可能被看成是 F 和 B，而且對某一字母的知覺都會受到其他兩個字母的影響，對這個問題，平行限制理論提供一簡化的過程。平行限制理論是以節點 (node) 或單位 (unit) 來表徵字母或單字，兩節點的連線則代表彼此間的互動，實線表示正向的支持－激發 (excitatory)，虛線則表示負向的反証－抑制 (inhibitory)。當我們知覺到這三個字母時，字母節點就會開始活化，並蔓延到相關的節點，例如第一個字母可能被視爲 P 或 R，接著活化開始蔓延，R 節點就支持 RED，P 節點就會支持 PAR；相對的，P 和 R，RED 和 PAR 節點間就會產生抑制，其他的字母也是類似這樣的情形，這樣就構成了一活化蔓延的網路，值得注意的是這個激發與抑制的過程是雙向的，也就是單字的激發與抑制也會影響字母的活化程度。由圖 4 中可以看出在 RED、PAR、OFF 和 MOB 這四個可能字中，RED 是唯一同時受到三個字母支持的字。因此成爲最活化的節點，也就是這個問題最可能的詮釋 (Holyoak & Thagard, 1990)。

ACME 的演算法則類似上述平行限制滿足理論，它將對應的過程分爲下列兩個主要步驟 (Holyoak & Thagard, 1989a; Thagard, 1988)：

㈠**建立對應網路** (setting up a mapping network)

1. 建立兩個領域命題 (proposition) 間的對應節點，包括命題下的述詞和論証，並建立單位間的連結。每個節點就代表一可能的配對，這個配對可能是關係或屬性。
2. 以同構性、語義相似性及實用性三個限制，評量兩節點的活化程度，建立激發或抑制的連結。

㈡**執行網路** (running the network)

給節點間的活化程度一個初始值，然後開始執行這個網路；在每次迴圈中都會重新評量更換節點間的活化程度，這個迴圈會一直進行，直至找到最佳的詮釋爲止，迴圈數則視類比的複雜度而定，以我們所熟知的水流-電流

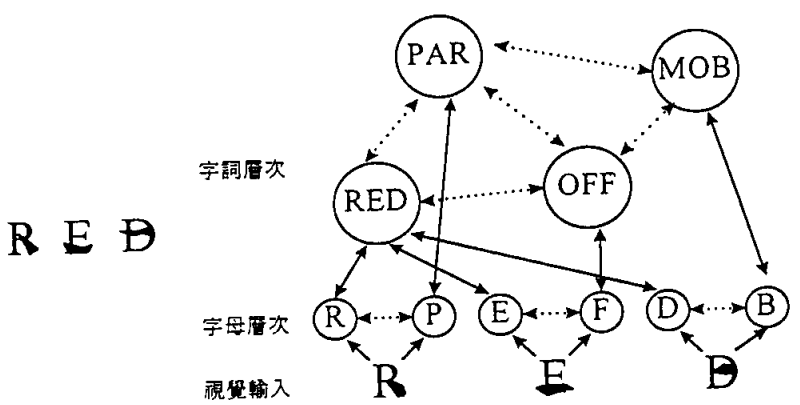


圖 4：以限制滿足理論的網路描述單字辨認問題（譯自 Holyoak 和 Thagard, 1990)

類比來說，就需要進行 78 次才會找到最適合的對應，而太陽系-原子類比比較簡單，則只需要 40 次就找到了 (Holyoak & Thagard, 1989a)。

Holyoak 一派認爲 ACME 的最大特色就是在對應的過程整合了同構性、語義相似性及實用性三種限制。在實證研究上，Holyoak 和 Thagard (1989a) 亦成功地將 ACME 應用於十幾個類比，涵蓋了問題類比、類比論證、解釋類比、故事類比及比喻等數個型態，其中包含了 8 個在化學上的類比，証實 ACME 可應用於廣泛的範圍。

三、檢索工具：ARCS

Holyoak 和 Thagard (1989b) 早期曾發展出一個類比解題的模型-PI(Process of Induction)，ARCS 則是結合了 PI 的理念和 ACME 限制滿足的方法所發展出的檢索模型 (Holyoak & Thagard, 1989a; Thagard *et al.*, 1990)。

ARCS 認爲檢索的過程可粗略分爲下列兩步驟：

步驟 1 、找出在長期記憶中語義相似的結構。

步驟 2 、以三個限制評量在上面步驟 1 找出的候選類比物。

圖 5 描述了 ARCS 的檢索過程。當刺激物進入長期記憶中，刺激物內的每個概念就會在長期記憶中尋找與之語義相似的概念，並建立連結；在圖 5 中，類比物 S2 和類比物 S5 與刺激物有較多的連結 (也就是語義重疊性較大)，因此就成爲

主要的候選類比物，但那一個才是最適當的類比物呢？則需藉助同構性及實用性的限制再做進一步的評量，評量的過程與 ACME 類似。

ARCS 的特色，除了與 ACME 一樣整合了三種限制外，它的另兩個特色就是以平行演算法則在較多的類比物中挑選出最符合這三

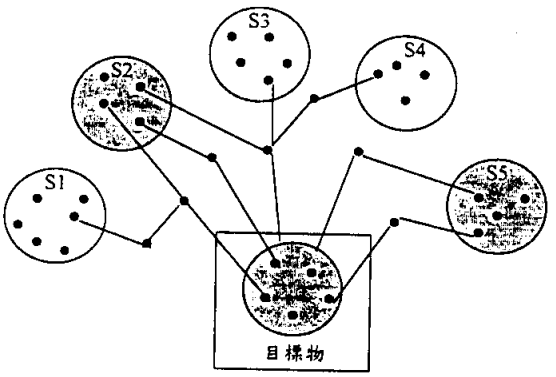


圖 5 ：刺激物透過概念的連結進入長期記憶，大的圓圈表徵在長期記憶中的知識結構，點則代表概念，語義相似的概念則以線段連接 (譯自 Thagard *et al.*, 1990)

種限制的類比物以及藉由這三種限制的互動競爭 (激發與抑制的連結) 來刪掉候選物。早期的 PI 模型則缺乏同構性的限制及此一互動競爭的考慮 (Thagard *et al.*, 1990)。

由上述討論，可以看出以 Holyoak, Thagard 爲主所發展的類比理論與以 Gentner 爲主的類比理論有很大的差異。因爲後者等人自始至終只注重結構相似性，而前者等人則是不斷修正自己的看法和擷取融合他人的理論。

以 Keane 爲主的類比理論

Palmer (1989) 將理論區分爲三種不同層次：訊息限制 (information constraints)、行爲限制 (behavior constraints)、硬體限制 (hardware constraints)，他認爲一個完整的類比理論需能同時處理到這三種不同的層次，但前面所述敘的兩個理論：結構對應理論和限制滿足理論只描述了訊息層次而已 (Palmer, 1989; Keane, 1990; Keane *et al.*, 1994)，因此 Keane 提出了累進理論 (Incremental Theory) 嘗試整合訊息與行爲限制兩個層次。

一、類比理論：累進理論

累進理論描述了訊息層次上的三個限制和行爲層次上的二個限制 (Keane, 1990;

Keane *et al.*, 1994)。

㈠在訊息的層次上需滿足三個限制

1. 結構限制 (structural constraints)
2. 語義相似性 (semantic similarity)
3. 實用性限制 (pragmatic constraints)

基本上，累進理論在訊息層次上的限制與 Holyoak 和 Thagard 等人所提出的限制滿足理論的三個限制是一樣的，不同的是累進理論還考慮到下列兩個行爲上的限制。

㈡在行爲層次上需滿足二個限制

1. 工作記憶的限制 (working memory constraints)：工作記憶的限制會使某些訊息遺失而影響到類比運作的過程，因爲當工作記憶超載時，人們就會使用一些對應的技術以降低工作記憶的負載，這些技術的使用都可能使類比對應產生錯誤。
2. 背景知識的影響 (the influence of background knowledge)：背景知識同樣會影響解題和推理。如果對應部分與背景知識相符合的話，受試者所花的時間會比較少，但當背景知識與對應的結果相衝突時，就有可能會產生錯誤。

Keane *et al.* (1994) 做了兩個實驗，第一個實驗發現當增加兩類比領域相似成分 (element) 的數目時，達到正確類比對應所需的時間會降低。第二個心理學實驗發現在兩個領域中類比成分的呈現順序會影響類比對應的容易程度。累進理論具有行爲的層次，因此可以解釋受試者在類比過程中行爲的表現，這是其他兩派理論無法做到的事。

二、對應的工具：IAM

Incremental Analogy Machine，簡稱 IAM 是根據累進理論所發展出來的類比對應工具 (Keane *et al.*, 1994)，它將類比過程分成下列六個步驟：

1. 選擇種子群 (select seed group)：爲來源領域相關的述詞群排序，並且以等級最高的群當作種子群。
2. 找出種子配對 (find seed match)：在種子群中找出選定成分的種子作配對，並且注意這個成分是否有其他的配對。
3. 找出種子群的同構配對 (find isomorphic matches for group)：找出這個種子群和目標領域內成分間所有合理的配對，並使用結構、語義相似性和實用性三種限制以找出具一對一對應的配對組。
4. 遷移 (find transfers for group)：添加或遷移由配對所發現到候選推論。
5. 就群對應的結果進行評量 (evaluate group mapping)：就群對應的結果進行評量，如果結果正確，就進行步驟 6，否則嘗試另一種子配對 (步驟 2)，如果還是不行的話，就另選一組當作種子群 (步驟 1)。
6. 尋找其他的群對應 (find other group mapping)：如果還需要其他的類比群對應，則以其他的群重覆進行步驟 1-5，找出不違反已有對應結果的其餘對應，否則回到種子群的對應上。

圖 6 爲 IAM 對這個太陽系-原子類比的表徵圖。IAM 將太陽系領域區分爲三群；在這三群之中，第一群：導致 {和〔重量差 (太陽，行星)，吸引 (太陽，行星)〕，繞著旋轉 (行星，太陽)}，因爲此群具有多個物件的關係結構，所以被選爲種子群 (步驟一)，重量差 (太陽，行星) 則被視爲種子成分。接著，從種子成分中可以產生下列配對；重量差 = 重量差，太陽 = 原子核，行星 = 電子 (步驟二)，除此之外，它還具有兩個同構的配對：繞著旋轉 (太陽，行星) = 繞著旋轉 (原子核，電子)，吸引 (太陽，行星) = 吸引 (原子核，電子) (步驟三)。配對之後，我們發現“導致”和“和”這兩個關係尚未配對，因此將之遷移到目標領域去 (步驟四)。也就是說我們可以藉由類比推論出由於兩者間

的“重量差”和“吸引力”使得電子繞著原子核轉。最後，評量這個對應（步驟五），如果覺得很合適，整個對應就此結束，否則就重覆步驟 2 ，直到找到最合適的對應爲止。就本類比而言，第一群的對應是最佳詮釋，所以對應到此爲止不會再繼續進行到步驟六。

大體而言， IAM 和 SMT 皆是以命題來表徵知識架構，我們可以發現 SMT （圖 2 ）與 IAM （圖 6 ）對兩領域的表徵是蠻類似的，主要的差異在於過程。 IAM 是採分批、逐次的方式，先選定某一成分，再逐漸增加類比部分以減少類比對應所需的歷程，不似 SMT 嘗試一次就對應出所有的成分，所以 IAM 的表徵就較 SMT 簡化，不那麼強調系統性。由圖 6 ，我們可以看出太陽系和原子兩領域對應的是重量差、吸引及繞著旋轉這三個關係。

繼類比工具-IAM 提出之後， Keane (1996, in press) 這兩年來致力於檢驗影響類比對應的因素。他發現在類比解題的過程，人們並未使用如 Holyoak 所提的實用性因素－高階層的計劃結構 (high-order planing structure) 來幫助解題，相反地，人們會受到來源領域的計劃結構與目標領域間的符合程度－即適應性 (adaptability) 的影響 (Keane, 1996) 。除此之外，來源領域資訊呈現的次序先後（次序效應， order effect) 及所具有因果結構的多寡（因果效應， cause effect ）亦會影響到類比對應的難易程度 (Keane, in press) 。總之，目前仍未有一個工具可以完全說明這些效應（包括 IAM 在內） 。 Keane (1996) 根據這些研究結果建議類比對應的工具應有一組新的限制，如何修正這些限制以說明研究結果，將是所有已提出的類比工具的一大挑戰。

雖然到目前爲止， Keane 只提出累進理論及 IAM ，尚未有檢索的工具 (Keane, 1997) ，但他考慮到類比對應過程中行爲上的限制及來源領域訊息對類比對應難易的影響爲後來的研究者提供了二個新的研究方向；一是除了類比的完整性之外，也應重視受試者的類比表現；二是對來源領域的重視，這些一直是類比研究領域所忽略的。

在實際的應用上， IAM 類比理論也對類

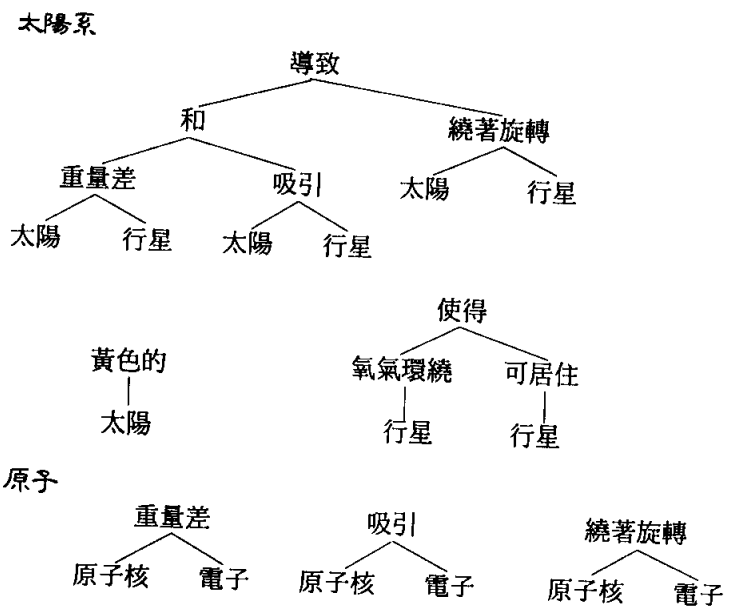


圖 6 ：太陽系和原子領域的簡單觀點（譯自 Keane *et al.*, 1994 ）

比對應的研究提供了一新的分析架構。高淑芬 (1997) 以太陽系－原子類比設計了原子結構類比教材，並根據 IAM 理論架構將這些對應轉換成樹狀的類比表徵圖（圖 7 ）。藉助表徵圖不僅可以指出對應包含那些成分 (element)，更有助於我們釐清這些對應成分的性質及彼此間的關係。例如 A1 僅描述單一物件的性質故爲屬性對應； R3 描述了兩個物件的關係，所以屬於一階關係對應， R5 位於 R3 和 R4 之上，連結了 R3 和 R4 這兩個關係，因此屬於二階關係對應。互有關連的成分還會組成一群對應，由圖 7 可看出這些對應成分共分爲三群；其中第一群是由物件 O2 、 O3 ；限制 L1 、 L2 、 L3 及關係 R3 、 R4 、 R5 組成，這些便是此類比主要的對應。

除了用來設計類比教材外， IAM 亦有助於分析受試者類比對應的情形。研究者要求受試者在閱讀類比教材後，說出太陽系與原子間兩者間相似與相異處，並將受試者的口語資料轉換成類比表徵圖（圖 8 ）。一個非常明顯的現象是圖 7 （教材）與圖 8 （受試者）不盡相同，這也就是說閱讀者所產生的對應不盡然會朝向類比教材意圖的方向。除此，亦發現三點 IAM 所描述的對應現象，這些現象都是其他兩派類比理論所未論及的。一、是受到工作記憶的影響，受試者未能產生教材所有的對應。二、是適應性，受試者對源領域的知識會影響對應的結果，該位受試者對太陽系具有豐富知識因此影響了第二、第三及第四群對應。他認爲太陽並非位於太陽系的正中央，所以修正了教材的第二群對應。而且他從報章雜誌得知太陽系的許多東西是科學家陸續發現地，比如說人們並不是一開始就知道冥王星的存在，是後來發現才知道；所以科學家很可能還會再發現其他的物質，因此太陽系可能充滿了許多物質而不是虛空的，由此推之原子亦可能充滿東西（第三群對應）。第四群對應則是受試者由行星會自轉自行推論出電子亦會自轉，這點正與近代科學對原子的觀點不謀而同。由此可知，類比對應的結果並不見得必然是正向的，正如同 Duit (1991) 所說的類比是“雙刃劍”，人們可藉由類比獲得新知但亦可能產生

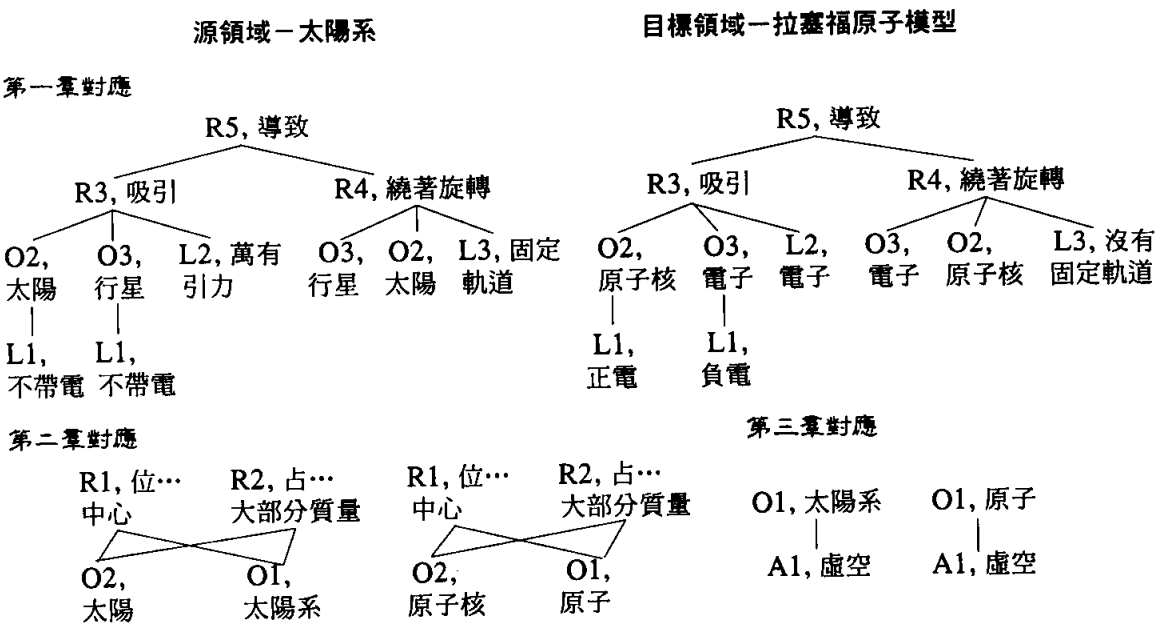


圖 7 ：教材的原子結構類比表徵圖

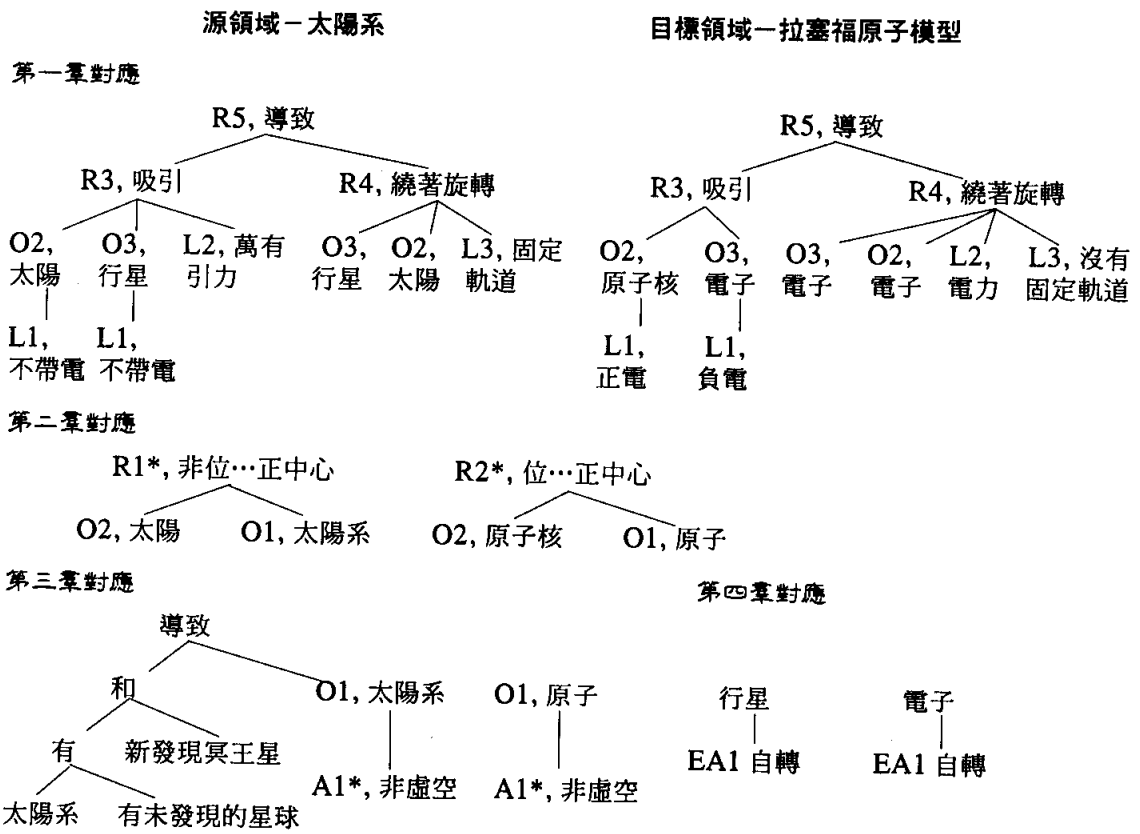


圖 8 ：受試者的原子結構類比表徵圖

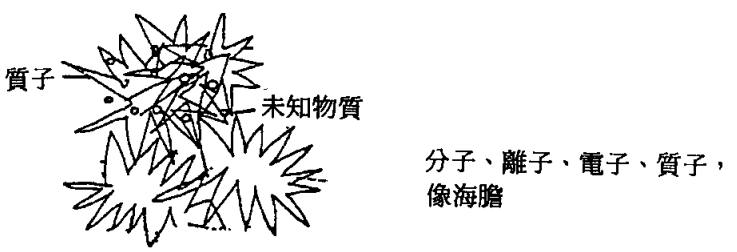


圖 9 ：受試者在前測所繪的原子結構圖

另有概念。三、是背景知識的影響，圖 9 爲受試者在正式閱讀教材前所繪的原子結構圖，此位受試者經由課外書籍對目標領域具有另有概念，他認爲原子內部充滿了分子、離子、電子和質子之類的物質，彼此像海膽一樣連接一起，難怪乎受試者認爲原子並非虛空，反而利用他對太陽系的理解重新詮釋對應。

綜合上述， Keane 的理論提供了一個確實可行、有系統的分析架構，使對類比的研究不再限於對「結果」的分析，而能進一步檢視其過程和對應內部的細節。

三派學者對類比理論看法的比較

由上述的討論中，我們可以看出三派學者對類比過程的看法不盡相同，以下將從類比理論、對應工具及檢索工具三個方面做比較（表2）。

一、類比理論的比較

三派學者認爲在類比過程中所受到的限制(constraint)不同，因而產生同中有異，異中有同的類比理論及對應和檢索的工具。茲將三個理論的比較整理如表3所示：

表2：三派學者所持的理論及在對應和檢索的工具

研究者	理　　論	類比對應工具	類比檢索工具
Gentner派	結構對應理論 (Structure Mapping Theory，簡稱SMT)	結構對應工具 (Structure Mapping Engine，簡稱SME)	在許多檢示到的資訊中，只有少數被選取出來。(Many Are Called but Few Are Chosen，簡稱MAC/FAC)
Holyoak，Thagard派	限制滿足理論 (constraint-satisfaction theory)	類比限制對應工具 (Analogical Constraint Mapping Engine，簡稱ACME)	藉滿足限制進行類比檢索 (Analog Retrieval by Constraint Satisfaction，簡稱ARCS)
Keane派	累進理論 (incremental theory)	累進類比工具 (Incremental Analogy Machine，簡稱IAM)	未提出

表3：三理論包含限制之比較

限制比較 ＼ 理論	結構對應理論	限制滿足理論	累進理論
包含的限制	結構性	同構性、語義相似性及實用性共三個限制。	結構限制、語義相似性、實用性限制、工作記憶的限制及背景知識的影響共5個限制。
理論的層次	訊息	訊息	訊息及行爲
限制的絕對性	絕對，不可違反。	只是壓力非絕對。	結構爲絕對的限制，但不若結構對應理論那麼嚴謹。
在對應工具的評量	結構性	三個限制都有，但以同構性爲主。	在訊息層次上，以結構性爲主。
在檢索工具的評量	結構性	三個限制都有，但以語義相似性爲主。	

就結構限制而言，三個理論皆認同結構性對類比的重要性，但彼此間所提的結構性不盡相同；基本上，累進理論與結構對應理論類似，限制滿足理論的同構性則不若結構對應理論那麼嚴謹和強調系統性，所以它可以處理非完全相同關係的對應。就表面相似性而言，結構對應理論在對應時是完全捨棄表面相似性，其他兩個理論則列入考慮。

比較值得注意的是對實用性的考量，Gentner (1983; 1989) 認爲目標和計劃並不會影響類比操作的過程，而是影響起初的類比物選擇和隨後的遷移（圖 10 ）。但 Keane *et al.* (1994) 與 Holyoak 和 Thagard (1989a) 對 Gentner 只重結構性而排除其他限制提出質疑，例如在解題過程中，解題者可能具有目標物的部分表徵，所以在對應的過程中就可能了解那一個關係可行或有效，而並非如 Gentner 認爲對應全由結構決定，而在對應完成之後才進行評量。

此外，累進理論是這三個理論中唯一具有行爲層次的限制，因此它可以說明受試者在類比過程中的行爲，例如錯誤的來源和反應時間，而結構對應理論和限制理論則只處理到訊息的輸入與輸出。

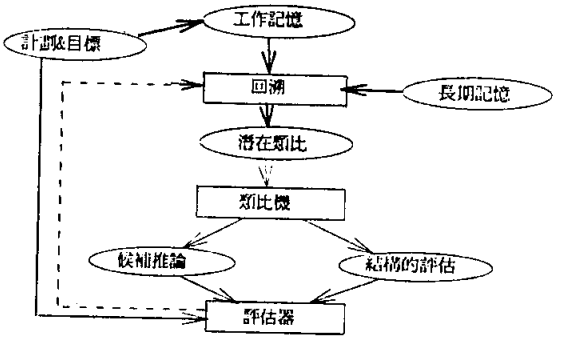


圖 10 ：類比推理的過程
（譯自 Gentner, 1989 ）

二、對應工具的比較

這三種對應工具具有下列共通點：*1.*對應的過程與內容無關。*2.*尋找整體最好的唯一對應。*3.*程式是以類比物的述詞-計算 (predicate-calculus) 表徵來運作。就演算法則來

表 4 ： SMT 、 ACME 和 IAM 在訊息層次上的比較

比較項目 \ 理論	SMT	ACME	IAM
節點的意義	物件或關係	一組可能的配對（物件或關係的配對）	物件或關係
演算法則	局部到整體、序列處理	活化蔓延、平行處理，物件對應亦會影響關係的對應	局部到整體、序列處理
配對處理的數量	所有可能的配對。	所有可能的配對。	除非另有規定，否則只處理種子群。
配對處理的方式	一次找出所有的配對	一次找出所有的配對	分批逐次處理種子群的配對
評量的過程	對所有配對進行評量	對所有配對進行評量	只針對種子群評量
對應結果的評量標準	結構相似性	結構相似性（主要）、語義相似性及實用性	結構相似性（主要）、語義相似性及實用性

看， SME 和 IAM 比較類似都是從局部到整體 (local-to-global) ，最大的不同，就是 SME 嘗試一次找出所有的配對，而 IAM 則注意到工作記憶的限制，分批逐次處理，而且除非有規定，否則 IAM 不會意圖找出所有的配對。此外， SME 需評量每個配對，才能找出最佳詮釋。 IAM 只計算系統中的重要部分，因此 IAM 的過程較 SMT 簡單而且不費力 (Keane *et al.*, 1994) 。

三個對應理論在訊息層次上的比較整理如表 4 所示。

三、檢索工具的比較

從某個角度來說，對應比檢索容易，因爲對應它只牽涉到目標物和一個來源領域，而檢索則是牽涉在記憶中一堆可能的類比物 (Holyoak & Thagard, 1990) 。簡言之，檢索的問題，就是如何從大量的訊息中找出可用的類比物。基於前述的兩個心理學上的矛盾現象， Gentner 派認爲檢索的過程，找出可能的類比物和評量此類比的合適性分別由不同的相似性所決定，因此提出兩階段的檢索工具： MAC/FAC ，也就是以表面相似性來找出可能的類比物，但對類比物的評量的判準仍取決於第二個階段 FAC 的結構性。 ARCS 具有與 ACME 類似的演算法，跟 MAC/FAC 一樣，也是以語義相似性找出可能的類比物，但在判準上，仍考慮到三個限制，但以語義相似性爲主，不似 MAC/FAC 將檢索過程截然分成兩個階段。

結　論

雖然，這三派對類比的看法分歧性很大，但也有一點整合的趨向。 Gentner 一派，由最初只強調結構性，到後來提出 MAC/FAC 時也不得不融入表面相似性； Holyoak 和 Thagard 派原本只強調實用性，但後來改用限制滿足理論並融入同構性與語義相似性。 Keane 派則是重新審視 Gentner 派和 Holyoak 和 Thagard 派兩派的觀點建立了兼顧訊息和理論層次的 IAM 模型。近來， Forbus 和 Obliger (1990 ，引自 Keane, in press) 及 Forbus, Ferguson 和 Gentner (1994 ，引自 Keane, in press) 指出在對應過程中， SME 不再嘗試去找出所有可能的詮譯，同時也嘗試使用漸進的方式來評量類比的良窳。由這種趨勢看來，或許有一天我們將會看到這些理論如何統整起來成爲一個我們稱爲“類比”的複雜過程。

在科學教育對類比的研究中，有些是就學生學習的結果討論類比如何形成概念改變及其影響的因素，如 Flick (1991) 、 Brown (1992) 、 Treagust 和 Harrison (1993) 、 Venville 和 Treagust (1996) 、 Dagher (1994) 、 Wong (1993) 、龐能一 (1995) 、郭人仲 (1994) 、陳恆迪 (1993) 等人的研究；有些是討論類比在教師教學和教科書使用的情形，如 Thiele 和 Treagust (1994a) 、 Thiele 和 Treagust (1994b) 、 Dagher (1995a) 、 Dagher (1995b) 、 Glynn, Britton, Semrud-Clikeman 和 Muth (1989) 等人的研究，上述這些人的研究大都偏重在類比成效方面，鮮少看到從類比檢索與對應的機制來探討。在人工智慧研究領域中，大多數的研究者只著重在對應和開發理論，比較少涉及些輸出的結果 (Thagard, 1988) ；從一個完整的類比過程來看，包括如何從長期記憶檢索出適合的類比物，做兩領域的對應，及將對應結果應用於學習上，這兩個領域對類比的研究各有所偏重，缺乏統整性。

在大陸，王建東、朱梧槚、肖奚安、陳松燦和張東摩 (1996) 提出以類比方法實現數學發現的計算機模擬的基本思考方式，並介紹一個通過類比平面幾何中的定理來發現立體幾何中相關定理的模型。雖然他們只是初步嘗試，模型仍停留在「機幫人，人幫機」的階段，尚未能以電腦完全模擬人的思考歷程，但這不啻爲指出一個新的研究方向；因此在科學教育

上，如何開發類比理論的應用及藉助這些理論幫助我們在教學上更有效率的使用類比，都是有待我們努力的方向。

誌 謝

感謝 Professor M. T. Keane 提供列印中的相關文獻供本研究參考，在此誌謝。

文 獻

1. 王建東、朱梧槓、肖奚安、陳松燦和張東摩（1996）：通過從平面幾何到立體幾何的類比進行數學發現的計算模擬。**數學物理學報**，**16**(4), 377-384。
2. 李靜、宋立軍和張大松（1994）：**科學思維的推理藝術**。臺北：淑馨。
3. 黃幸美（1995）：類比推理思考及其在教學上之應用。**教育研究資訊**，**3**(3) 期，128-142。
4. 高淑芬（1997）：**類比對國二學生科學概念學習之影響**。國立臺灣師範大學碩士論文。
5. 郭人仲（1994）：**國中學生生物概念類比學習之研究**。國立彰化師範大學碩士論文。
6. 陳恆迪（1993）：**國中學生物理概念類比學習之研究**。國立彰化師範大學碩士論文。
7. 龐能一（1995）：**類比對電腦概念學習的影響**。國立臺灣師範大學碩士論文。
8. Brown, D. E. (1992). Using examples and analogies to remediate misconceptions in physics: factors influencing conceptual change. *Journal of Research in Science Teaching*, *29*(1), 17-34.
9. Dagher, Z. R. (1994). Does the use of analogies contribute to conceptual change? *Science Education*, *78*(6), 601-614.
10. Dagher, Z. R. (1995a). Analysis of analogies used by science teachers. *Journal of Research in Science Teaching*, *32*(3), 259-270.
11. Dagher, Z. R. (1995b). Review of studies on the effectiveness of instructional analogies in science education. *Science Education*, *79*(3), 295-312.
12. Duit, R. (1991). On the role of analogies and metaphors in learning science. *Science Education*, *75*(6), 649-672.
13. Falkenhainer, B., Forbus, K, D. & Gentner, D.(1989). The structure-mapping engine: Algorithm and example. *Artificial Intelligence, 41*, 1-63.
14. Flick, L. (1991). Where concepts meet precepts: Stimulating analogical thought in children. *Science Education, 75*(2), 215-230.
15. Forbus, K. D., Gentner, D. & Law, K. (1994). MAC/FAC: A model of similarity -based retrieval. *Cognitive Science, 19*, 141-205.
16. Gentner, D. (1983). Structure-Mapping: A theoretical framework for analogy. *Cognitive Science, 7*, 155-170.
17. Gentner, D. (1989). The mechanisms of analogical learning. In S. Vosniadou. & A. Ortony (Eds.), *Similarity and analogical reasoning*. London: Cambridge University Press.
18. 18.Gentner, D. & Toupin, C. (1986). Systematicity and surface similarity in the development of analogy. *Cognitive Science*, *10*, 277-300.
19. Gentner, D., Rattermann, M. J. & Forbus, K. D., (1993). The roles of similarity in transfer: separating retrievability from inferential soundness. *Cognitive Psychology, 25*, 524-575.

20. Glynn, S., M., Britton, B. K., Semrud-Clikeman, M., & Muth, K. D. (1989). Analogical reasoning and problem solving in the textbooks. In J. A. Glocer, R. R. Ronning, & C. R. Reynolds (Eds.), *Handbook of Creativity: Assessment, Theory, and Research* (pp.383-389). New York: Plenum.
21. Hall, R. (1989). Computational approaches to analogical reasoning: A comparative analysis. *Artificial Intelligence, 39*, 39-120.
22. Holyoak, K. J., & Koh, K. (1987). Surface and structural similarity in analogical transfer. *Memory & Cognition, 15*(4), 332-340.
23. Holyoak, K. J., & Thagard, P. (1989a). Analogical mapping by constrain satisfaction. *Cognitive Science, 13*, 295-355.
24. Holyoak, K. J. & Thagard, (1989b). A computational model of analogical problem solving. In S. Vosniadou & A. Ortony (Eds.), *Similarity and analogical reasoning*. London: Cambridge University Press.
25. Holyoak, K. J. & Thagard, P. (1990). A constraint-satisfaction approach to analogue retrieval and mapping. In K. J. Gilhooly, M. T. Keane, R. Logie, & G. Erdos. (Eds.), *Lines of thinking: Reflections on the psychology of thought* (*Vol. 1*). New York: Wiley.
26. Keane, M. T. (1988). *Analogical problem solving*. Chichester : Ellis Horwood.
27. Keane, M. T. (1990). Incremental analogizing: Theory and model. In K. J. Gilhooly, M. T. Keane, R. Logie, & G. Erdos (Eds.), *Lines of thinking: Reflections on the psychology of thought* (*Vol. 1*). New York: Wiley.
28. Keane, M. T. (1996). On adaptation in analogy: Tests of pragmatic importance and adaptability in analogical problem solving. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 49A* (4), 1062-1085.
29. Keane, M. T. (in press). What makes an analogy difficult? : The effects of order and causal structure on analogical mapping. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*.
30. Keane, M. T., Ledgeway, T., & Duff, S. (1994). Constraints on analogical mapping: A comparison of three models. *Cognitive Science, 18*, 387-438.
31. Keane, M. T. (1997). Personal e-mail communication.
32. Palmer, S. E. (1989). Levels of description in information processing theories of analogy. In S. Vosniadou & A. Ortony (Eds.), *Similarity and analogical reasoning*. London : Cambridge University Press.
33. Venville, G. J., & Treagust, D. F. (1996). The role of analogies in promoting conceptual change in biology. *Instructional Science, 24*, 295-320.
34. Thagard, P. (1988). Dimensions of analogy. In D. H. Helman (Ed.), *Analogical Reasoning*. Dordrecht, Holland: Kluwer.
35. Thagard, P., Holyoak, K. J., Neloson, G., & Gochfeld, D. (1990). Analog

retrieval by constraint satisfaction. *Artificial Intelligence, 46*, 259-310.

36. Thiele, R. B., & Treagust, D. F. (1994a). An interpretive examination of high school chemistry teacher's analogical explanations. *Journal of Research in Science Teaching, 31*(3), 227-242.
37. Thiele, R. B., & Treagust, D. F. (1994b). The nature and extent of analogies in secondary chemistry textbooks. *Instructional Science, 13*, 99-117.
38. Treagust, D. F., & Harrison, A. G. (1993). Teaching with analogies : a case study in grade-10 optics. *Journal of Research in Science Teaching, 30* (10), 1291-1307.
39. Wong, E. D. (1993). Self-generated analogies as a tool for constructing and evaluating explanations of scientific phenomena. *Journal of Research in Science Teaching, 30*(4), 367-380.

The Mapping and Retrieval of Analogy

Su-Fan Gau[1], Mei-Hung Chiu[2]

[1]Kang Shan Junior High School in Kaosching

[2]Nationa Taiwan Normal University Graduate Institute of Science Education

Abstract

Among three scientific thinking techniques (deduction, induction, analogy), analogy is the most creative and intangible. Unlike deduction and induction, an analogical reasoning does not have a definite and clear procedure. Though analogies are used in daily life, but frequently the source is not known. The mapping and retrieval of analogies are rarely mentioned in the science education research literature. Therefore, the purpose of this paper is to introduce three theories about retrieval and mapping. By means of exploring these theories about retrieval and mapping, we hope that this study will help science teachers and students understand analogies and how they can be used more effectively.

Key words: analogy, mapping, retrieval.