

徑路搜尋法在高中學生物理學科知識結構測量上的應用

黃泮翔

國立高雄師範大學科學教育研究所博士班

摘要

近代心理學和教育學的理論普遍認為訊息是以組織化和結構的方式記憶，如此以利儲存、提取和操作，因此，如何正確評量學習者所具有的知識結構，以協助學習者改善其認知表現，就顯得相當重要。徑路搜尋法是目前評量知識結構相當客觀的研究工具，使用徑路搜尋法除了可以得到表徵知識結構的網路圖解，亦可以獲得評價知識結構的三種指數。徑路搜尋法提供測驗工具另一有潛力的選擇，此方法不僅相當精確量化，也符合現代的知識表徵理論，因此，研究者決定採用此方法探究高中學生物理學科的知識結構和學習表現的關係。

關鍵字：知識結構、徑路搜尋法、評量

一、緒論

現今認知心理學以及知識重建的理論均主張個體是主動的訊息處理者，因此科學知識的學習歷程可以解釋為，學習是個體建構，及再建構其知識結構或基模的歷程，Koubek & Mountioy(1991)認為知識結構是指在某個特定學科領域中，由該學科的概念和原則所形成相互聯結的知識組織。教育學家與心理學家對於知識結構的重視，乃源自於對於記憶理論的研究，由記憶理論的研究發現，受試者對於有較緊密關連性的訊息，其提取的訊息量會較多(Greene, 1987; Miner & Reder, 1994)，此外，在 De Groot(1965)對於專家棋士與生手棋士的記憶表現研究中，他讓專家棋士和生手棋士觀看真實棋賽棋子的擺放位置，然後請他們回憶棋子原來所擺的位置，結果顯示專家棋士的回憶量顯著優於生手棋士，這個研究引發了後續對於專家與生手不同認知表現的研究，其結果也顯示專家棋士和生手棋士由於知識結構的不同而影響其回憶表現。

在許多專家與生手的研究典範中(Chi, Feltovich & Glaser, 1981; Lakin, 1985; Glaser & Chi, 1988)，我們可以發現專家與生手的差異，除了在特定領域知識的多寡不同外，在知識的組織與結構中，也有相當大的差異，專家的知識結構通常會將相關的概念組合在一起，能將特定領域重要的概念和術語連貫起來，在進行問題解決時，專家由於具有結構化的知識，因此可以整合相關的原理原則順利解題，生手則否；此外，洪振方(1996)認為，從許多解題研究中可以發現，雖然初學者可以使用一般的解題捷思法則，然而他們在解題表現上的限制，主要的原因是無法從問題字義上的理解進而推論出解題所需要的知識，對好的學習者，這些推論可由其知識結構來產生，由此可見知識結構在學習歷程和認知表現的重要性。

知識結構的探討是認知心理學研究的重要主題，探討此主題有助於瞭解個體獲得知識的心理歷程。我國學校的科學教育在教學上，偏重記憶零碎知識的方法，造成學生無法統整科學知識使其成為有系統的知識結構，進而影響其學習成效與興趣；在評量上，使用傳統式的成就測驗的評量方式，無法確實提供教學與學習充分的參考訊息。Goldsmith 等人(1991)指出，目前學校所使用的評量方法中，是非題、選擇題和填充題等考題方式，只能評量到學生所具備的零碎知識，無法有效測量學生整體知識結構；簡答題與申論題隨然較能評量學生對於概念間的整體理解程度，卻仍無法有效呈現學生所具有知識結構類型。現今已有許多研究者採用各種測量知識結構的方法，試圖找出受試者的知識結構類型，例如字詞聯想、卡片分類、構圖法、晤談、集群分析、多向度量尺等等各有其優缺點。研究方法的選擇端賴研究者依據研究目的而定，徑路搜尋法是目前評量知識結構相當客觀的工具，使用徑路搜尋法除了可以得到表徵知識結構的網路圖解，亦可以獲得評價知識結構的三種指數，因此，研究者決定採用此方法測量高中學生物理學科的知識結構。

二、文獻探討

(一)知識結構之理論分析

結構具有廣泛的意義，一般而言，結構是一種關係的組合，其中的成份是相互依賴的，例如原子結構表徵其組成份子電子、質子、中子等粒子的物理性質，以及其間的交互作用。其次，結構也是對世界的一種思維方式(楊文金，1991)，我們以這種思維方式來思考各個領域，例如認知結構、知識結構、課程結構等。長久以來對於知識結構的稱呼，由於不同學者的研究重點、研究動機，和理論觀點的不同而有認知結構、心智模式、記憶結構等不同的稱呼，由結構的意義可

知，知識結構是指個體存在於長期記憶中訊息的組織型態，以及其相互間的關係。

Jonassen, Beissner & Yacci(1993)認為，個體經由表徵歷程所獲得的知識可以區分為描述性知識和程序性知識，而調節和轉換這兩種知識的中介型態知識可以稱為結構性知識(structural knowledge)。換言之，結構性知識是展現某一領域其概念間如何關連的知識(Diekhoff, 1983)。因此，結構性知識的展現即是個體的知識結構，個體如何將經由表徵歷程所獲得的知識，組織成清楚顯示各概念之間聯結關係的知識結構，是知識結構理論探究的重點。

Morton & Bekerian(1986)主張將知識結構的理論分成語意網路理論與基模理論兩種，其中語意網路理論較強調知識在大腦記憶中的組織方式，而基模理論則較重視知識在大腦記憶中的運作歷程。Jonassen, Beissner & Yacci(1993)則認為基模理論(schema theory)、語意網路(semantic networks)，以及擴散促動理論(spreading activation theory)構成了知識結構的理論基礎。本研究認為擴散促動理論基本上是語意網路理論的類型之一，所以採用 Morton & Bekerian 的主張將知識結構的理論分成語意網路理論與基模理論兩種。

1. 語意網路理論(semantic network theory)

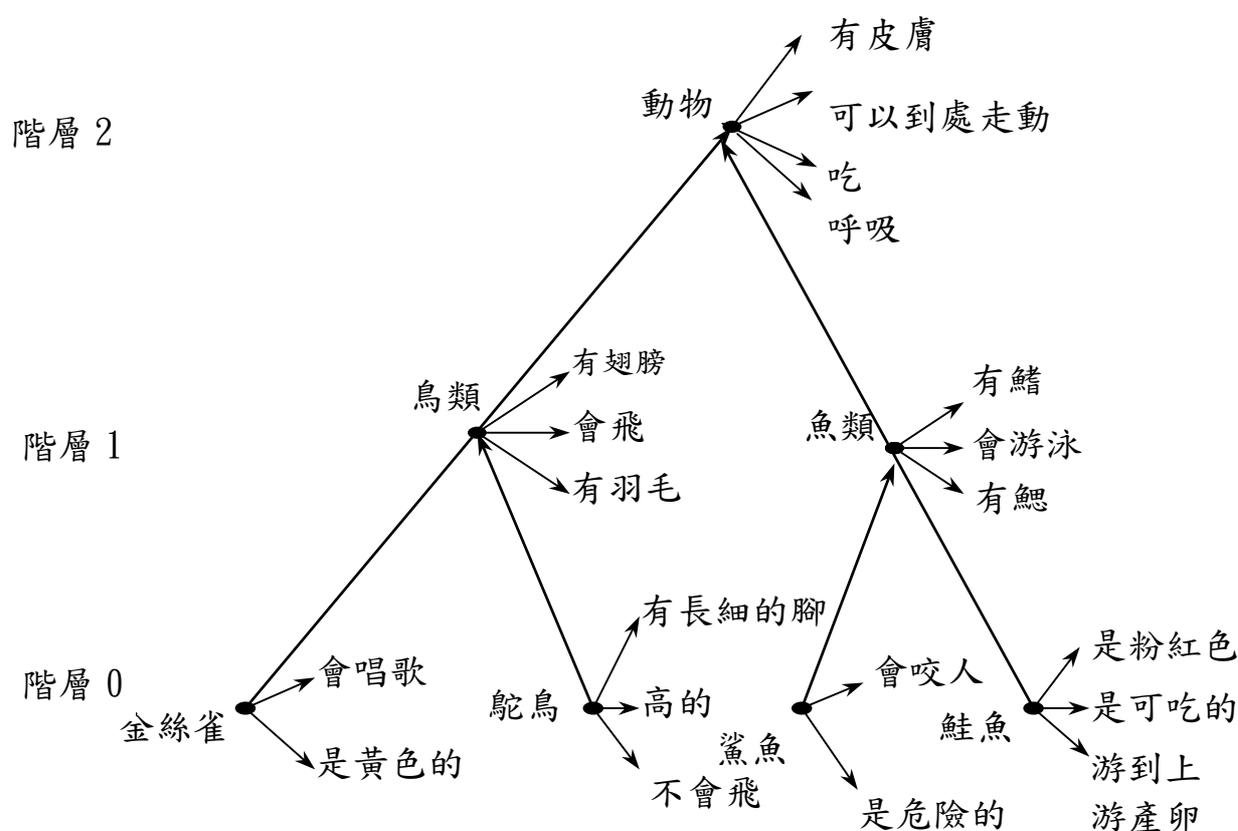
語意網路理論模式最早由 Quillian(1968)所提出，他從探討長期記憶表徵方式的研究中認為，知識可透過有指示性(directed)與標記性(labeled)的圖形結構來表徵，而圖形結構是由相互連結的節點所構成，節點代表所表徵的概念，節點與節點間的聯結線代表概念間的關係。語意網路模式的重要理論模式有 TLC 模式、擴散促動模式以及 ACT 模式等。

(1) Collins 和 Quillian 的 TLC 模式

Collins 和 Quillian(1969)根據語意驗證(semantic verification)的研究而提出可教的語言理解者(teachable

language comprehender，簡稱 TLC)，這個模式是透過有規則的電腦程式，掌握語意結構，產生可實證的語意記憶模式。語意確認的作業主要是讓受試者盡快的判斷一句簡單的陳述是否正確，例如「駝鳥是屬於鳥類嗎？」或「鯊魚是一種動物嗎？」。研究結果發現受試者在確認「金絲雀是黃色的嗎？」所需的時間，少於確認「金絲雀有羽毛嗎？」所花的時間，而確認「金絲雀有羽毛嗎？」的時間也少於確認「金絲雀要吃食物？」的時間。對於研究的結果他們認為屬於金絲雀獨有的特徵會被儲存在金絲雀的概念中，屬於鳥類獨有的特徵會被儲存在鳥類的概念中，屬於動物獨有的特徵會被儲存在動物的概念中，由此他們歸結出訊息是以階層組織的方式（如圖一所示）被儲存起來，因為階層組織的關係，所以搜尋的路線越長，受試者回答問題所需的時間就越長(Ellis & Hunt, 1993)。

圖一、TLC 模式的階層網路(引自岳修平譯，1998)

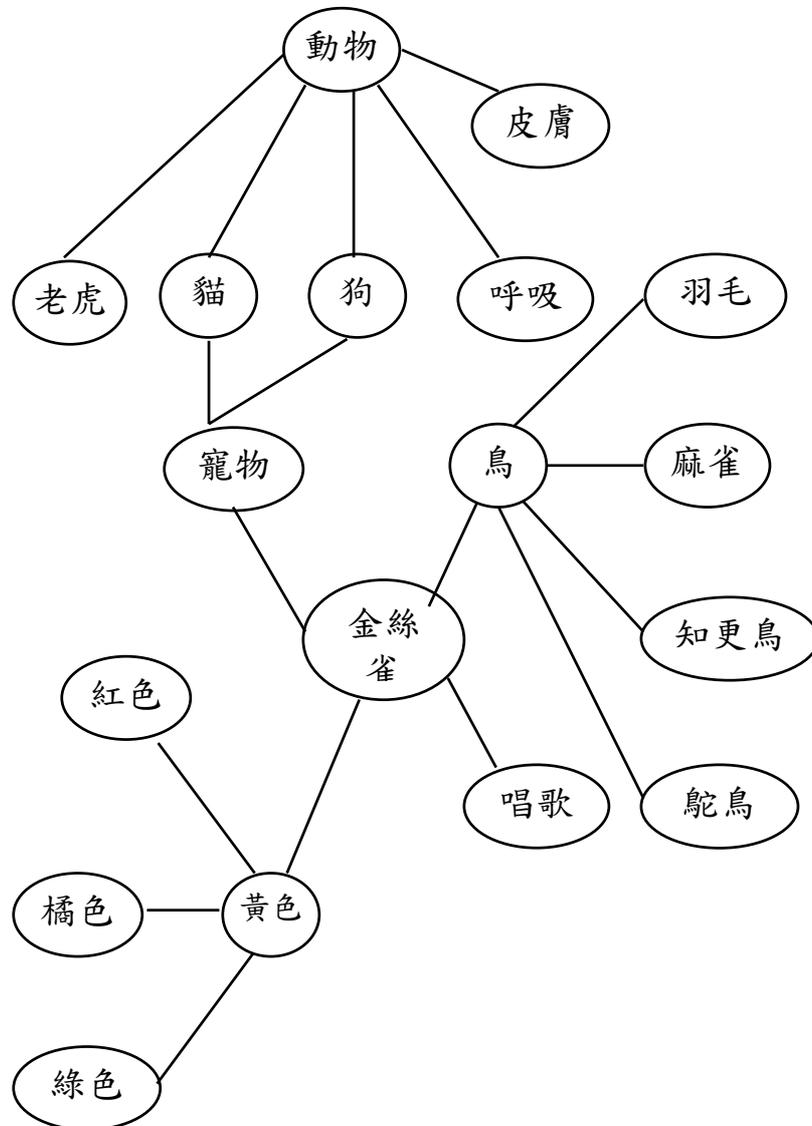


TLC 模式的特色是能明確地解釋提取訊息的方式和知識結構的關係，但在解釋某些實驗結果卻遭遇了一些困難，其某些論點也受到質疑，首先，此模式無法預測典型性效果 (typicality effect)，例如「金絲雀」比「鴛鴦」更像是一隻典型的鳥。根據 TLC 的理論，「金絲雀」與「鴛鴦」同屬於一個階層的，故訊息提取的時間是相同的，但實際的結果是，「金絲雀是鳥？」提取的時間，少於「鴛鴦是鳥？」的提取時間 (Smith, Shoben & Rips, 1974)；再者，其無法詮釋某些語意距離的逆轉效果 (reversal effect)，例如「動物」是「哺乳動物」的高層類別名稱。根據 TLC 模式提取「貓是一種哺乳動物？」的時間，應該少於「貓是一種動物？」的時間，但實驗結果卻相反 (Rips, Shoben & Smith, 1973)。

(2)Collins 和 Loftus 的擴散促動模式

爲了克服 TLC 模式的困難，Collins 和 Loftus(1975)針對 TLC 模式作了某些修正，發展出另一個語意記憶模式，稱爲擴散促動模式(spreading activation model)。擴散促動模式不以階層組織呈現概念的結構關係，而改以非階層的語意距離或語意相關程度，來呈現概念間的網狀結構關係，並改變原來的鍊結型態(如圖二所示)。

圖二、擴散促動模式的網路圖(Ellis & Hunt, 1993)



擴散促動模式主張概念的結構方式，猶如腦神經細胞的

分佈情形，一旦促動(activation)某概念節點後，便沿著強烈聯結線段擴散到其他可及的節點，越近的聯結促動的速度會越快，促動的節點會處於活化的狀態。如圖 2 中，「黃色」與「橘色」的聯結線段比「黃色」與「綠色」的聯結線段短，所以，由黃色促動橘色的速度會比較快。而促動強度的大小、促動時間的長短、概念之間的距離長度、被促動的概念是否為核心概念等因素，都會影響概念是否被促動。例如最初被促動的是不尋常、冷僻的概念，便不會擴散到很多概念；如果被促動的是錯綜交織的網路核心概念，那麼就會有許多相連的概念被促動（黃秀瑄、林瑞欽譯，1991）。語意歷程中的擴散促動模式以複雜的網路形式來表達知識結構的理念，可以說是神經認知模式中的重要觀念，此模式也可以解釋 TLC 所無法解釋的實驗結果，例如典型性效果和逆轉性效果等。擴散促動模式認為訊息一旦被促動，便會順著聯結的網路向四面八方擴散開來，如此的訊息提取可以較快速，並且可避免因單一階層網路所可能導致的錯誤解釋。由於擴散促動模式以長度來表徵概念與概念間的關係，較無法掌握概念間聯結的語意關係，因此兩個概念間即使有關連，但所蘊含的意義卻不容易掌握（宋德忠、林世華、陳淑芬、張國恩，1998）。

總之，擴散促動模式以類似神經網路的方式表徵知識結構，強調鍊結的長度，可以表示語意之間的相關性，而且會影響搜尋的範圍(江淑卿，1997)，這種論點相當具體，且較容易測試，因而影響著往後知識結構評量的發展，例如徑路搜尋法即是深受擴散促動模式的影響。

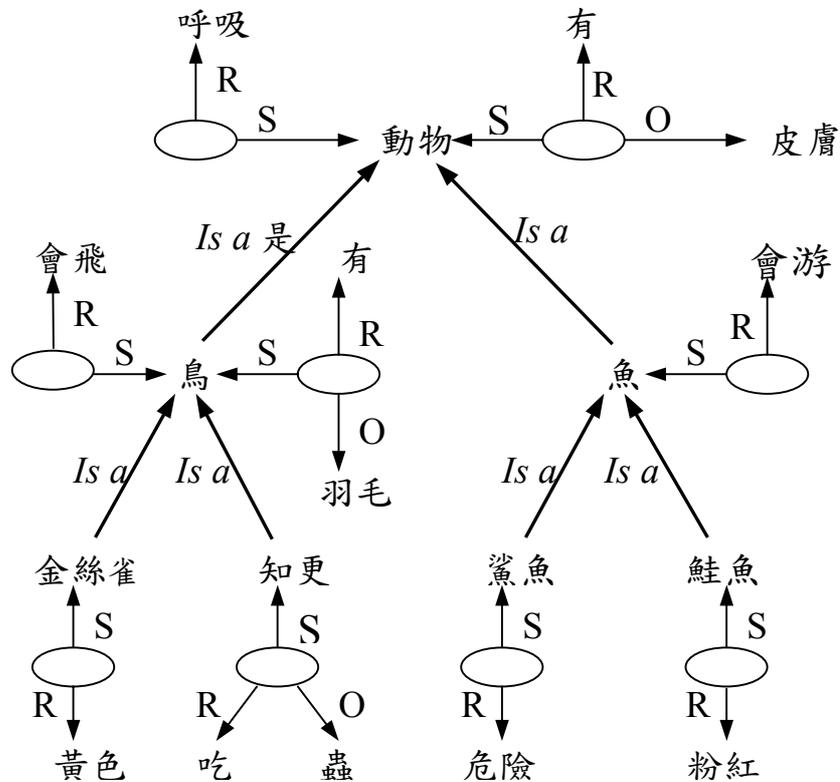
(3)Anderson 的 ACT 模式

思考的適應性控制(adaptive control of thought，簡稱 ACT)為 Anderson 於 1983 年所提出，早在 1972 年 Anderson 就提出自由回想聯結網路模式(free recall in an associative network，簡稱 FRAN)，由於此模式在應用上限制頗大，所

以在 1973 年 Anderson 與其指導教授 Bower 共同發展適用性更大的人類聯結記憶模式(human associative memory, 簡稱 HAM), 此為 ACT 模式的前身。在早期的 ACT 模式中, 陳述性知識只包含命題網路, Anderson 又將 ACT 修正為 ACT*, 在此網路模式中, 包含了物件圖像、次序關係, 以及暫時性資訊(Anderson 稱之為 temporal strings)(Sternberg, 1999)。ACT 模式主要是探討知識結構的結構特性, 用以理解個體在進行認知活動時, 其知識結構內部的運作過程, Sternberg(1999)認為 ACT 模式可以詮釋陳述性知識、程序性知識、以及兩者間的交互作用, 是一種整合式的模式。

ACT 模式主張命題網路的形式來表徵知識結構, 命題網路中的節點代表命題, 而聯結線則代表命題之間的關係, 圖三的網路結構呈現 Collins 和 Quillian(1969)的 LCT 模式之「動物」知識結構表徵, 其中概念的階層性和聯結關係亦可看出(Anderson, 1990)。

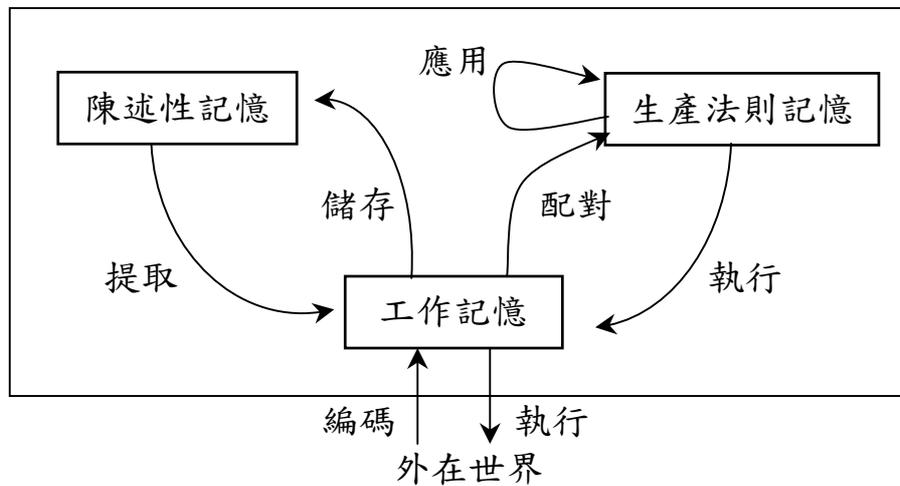
圖三、Collins 和 Quillian 動物階層網路之命題網路形式



註：其中 *R* 代表關係，*S* 代表主體，*O* 代表客體，圓圈則代表一個命題(改寫自 Anderson, 1990)

ACT*的理論架構如圖 4 所示，在此模式中個體的永久記憶是以命題的形式進行儲存，運作的架構則包含陳述性記憶 (declarative memory)、生產法則記憶 (production memory) 與工作記憶 (working memory) 三個主要部分(如圖 4 所示)。

圖四、ACT*模式架構圖



註：包含陳述性知識(陳述性記憶)、程序性知識(生產法則記憶)，以及工作記憶(有限容量的，可供認知處理的主動知識)(改寫自 Sternberg, 1999)

陳述性記憶是屬於儲存知識結構的長期記憶；工作記憶是認知處理的記憶區，處理包括對外在世界訊息的編碼輸入、提取陳述性記憶的知識、以及來自生產法則記憶的適當指示，這些訊息處於促動的狀態，然後透過表現歷程反應在行為上；生產法則記憶則進行生產法則的比對與執行的工作，同時生產法則記憶本身會進行應用的歷程。

儲存歷程是指將工作記憶形成的暫時性知識結構，儲存回陳述性記憶，可以強化知識結構的表徵強度；配對歷程是將工作記憶中有關條件語句中的條件(condition)傳回生產法則記憶系統；執行歷程是配合生產法則記憶系統中的條件之行動傳到工作記憶；應用歷程是一種學習機制，透過條件語句的應用，影響生產法則記憶系統，亦即根據先前的條件語句，學習新的條件語句，透過配對和執行的歷程，傳回工作記憶(江淑卿，1997)。

以命題網路來表徵知識結構的 ACT 模式，對於知識結構

的構成、擴散促動的效果，以及運作歷程皆有周延的假設和驗證。對於知識結構的理論模式而言，其特點有二，其一為 ACT 模式可以詮釋陳述性知識、程序性知識，以及二者的交互作用，是一種整合式的知識結構理論模式；其二為 ACT 模式結合了學習理論，雖然未深入探討具體的策略，但在知識結構理論中亦是一項突破。

2. 基模理論(schema theory)

基模理論是探討知識結構相當普遍的理論。Piaget(1952)以基模的概念來說明個體的認知發展，Piaget 認為基模是有組織的思考模式，用來解釋人類如何透過經驗適應生活環境，例如嬰兒會採用動作基模來探索外在的世界。

Rumelhart & Norman(1988)綜合對於基模的相關研究，認為基模具有五點特徵：

- (1) 基模具有變數：基模是含有變數訊息的「包裹」，此為基模最重要的特性。換言之，任何基模都包含有固定的部分與可變的部分，固定的部分包含基模的特性與範例，例如「人」的基模，固定的部分為「一個人有雙手和雙腳」；而可變的部分為「人有黑種人、白種人、黃種人等膚色的不同」或「高矮的不同」等。基模固定部分使個體在進行理解時，得以啟動基模；而可變的部分則使基模具有可類化不同現象的性質(楊文金，1991)。
- (2) 基模可以嵌入其他子基模：一般而言，基模包含次基模的組態，而次基模又可以包含其他更基本基模的組態，而某些基模被假定為原型基模，不可再分解。我們可以想像手的基模，包含手指、手臂、關節等次基模，而手指的基模又可以包含大拇指、食指、中指、無名指、小指等子基模。
- (3) 基模可以表示任何層次的知識：基模可以表示較大範疇或較抽象的知識，例如文化；也可以表示較基本或較具

體的知識，例如知更鳥。

- (4) 基模表徵知識，而不是定義知識：基模代表的是個人對於外在世界所產生的經驗，而不是對於這些經驗給予定義。以「鳥」這個單字為例，我們可能要表達兩種不同的訊息，其一為單字的精義(essential aspect)，非常像是從字典找到字的意義一樣；其二為對鳥這個主題的闡述，就像百科全書中對於某一主題的闡述。除此以外，我們還要表達的第三種訊息是個體對於鳥的經驗，前二者為鳥的知識的「語意記憶(semantic memory)」，第三種知識稱為「單元記憶(episode memory)」。一般相信存在語意和單元記憶基模，而語意記憶基模較像以百科全書的方式來闡述主題，而非以字典方式來定義主題的意義（楊文金，1991）。
- (5) 基模會主動的進行認知的工作：基模會主動的對新的訊息進行評鑑或辨識，以適合的基模來處理新的訊息。楊文金(1991)認為基模具有主動性的認知設置，因此可以進行由上而下與由下而上的訊息處理，以獲得對訊息最合適處理結果。

Gagne'等（岳修平譯，1998）則認為基模是整合性單位，可以結合陳述性知識所有的三種命題：命題、心像、及線性規則。此外，基模更可進一步抽取範疇內事例之命題式與知覺式的規律，因此可以保存關於範疇事例，哪些事通常為真，和它們通常看來如何，以及其事件的一般次序。

綜合上述探討可知，基模可以包括具體或抽象的概念，是陳述性知識和程序性知識的綜合體，因此，基模可以幫助個體認知概念和事件，使個體能從事問題解決和推理的作業。由於基模屬於概念性的建構，僅能對知識結構的組成和建構做概念性的解釋，至於對個體心理機制和表徵的運作，則較難有具體的說明(Anderson, 1983)，因此，本研究決定採

用根據語意網路理論所發展的徑路搜尋法作為評量知識結構的分析工具。

(二) 徑路搜尋網路法 (pathfinder network)

徑路搜尋網路係美國新墨西哥州立大學計算研究實驗室的領導人 Schvaneveldt 率領研究小組，根據網路模式和圖形理論，研究發展出徑路搜尋量尺化算則 (pathfinder scaling algorithm)，用來建構和分析知識結構，並設計知識網路組織工具 (KNOT) 程式，以輔助建構、分析和評量徑路搜尋網路。

徑路搜尋法評量知識結構的過程大致可分為三個步驟，包括知識結構的引出、知識結構的表徵、以及知識結構的評價。茲以此三個評量步驟來說明徑路搜尋法的評量歷程。

1. 知識結構的引出

知識結構的引出有字詞聯想、分類法、相似性評定…等方法，一般而言徑路搜尋法通常採用相似性評定法，透過判斷各概念配對間的相似性、相關性或心理距離可獲得受試者作答的接近性矩陣資料，此接近性數值 (proximities) 可轉換為資料網路 (Datnet)，在圖形理論上是一完全網路，資料網路每一條聯結鍊的權重等於接近性矩陣元素的值，如圖 5 右半部所示，如果網路中有 n 個節點，每一對節點之間都有聯結，則有 $C_2^n = \frac{n^2 - n}{2}$ 聯結鍊

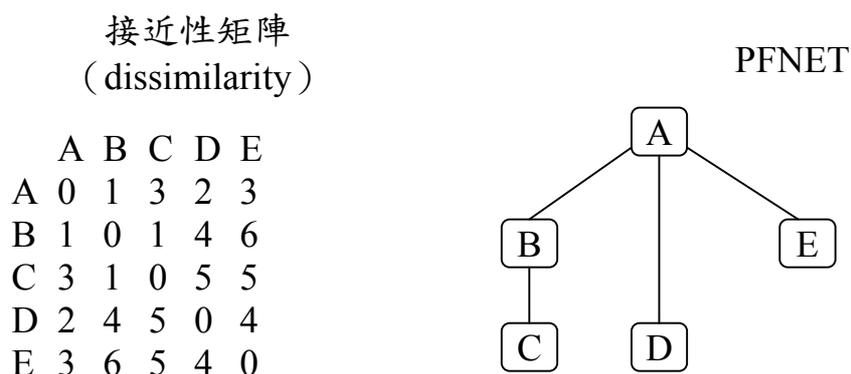
2. 知識結構的表徵

徑路搜尋法透過量尺化算則，將資料網路轉變成徑路搜尋網路 (PFNET)，並產生圖解理論距離 (graph-theoretic distance, GTD) 和徑路搜尋網路圖解 (Pathfinder graph)。徑路搜尋量尺算則是將接近性矩陣轉換成一個以節點表徵概念結構的網路，如下圖五所示，此網路的聯結鍊包括直接鍊 (direct link) 和非直接鍊 (indirect link) 兩種，透過算則，徑路

搜尋網路將只會保留接近值總和最小的聯結鍊，也就是保留「最短長度的徑路」。例如在圖五中，A 到 B 到 C(徑路 ABC)之間的接近值為 2，而 A 到 C(徑路 AC)的接近值為 3，因為非直接鍊接近值總和較小，所以保留 A 到 B 到 C 的非直接鍊。

圖解理論距離是指在最小聯結或最短的徑路搜尋網路中之節點距離，這是以特定網路中節點之間的距離，代表網路結構的特性；而徑路搜尋網路圖解則是結合徑路搜尋網路的鍊值和節點位置，呈現徑路搜尋網路的圖解，如圖五之 PFNET 部分所示。

圖五、接近性矩陣與徑路搜尋網路(Goldsmith et al., 1991)

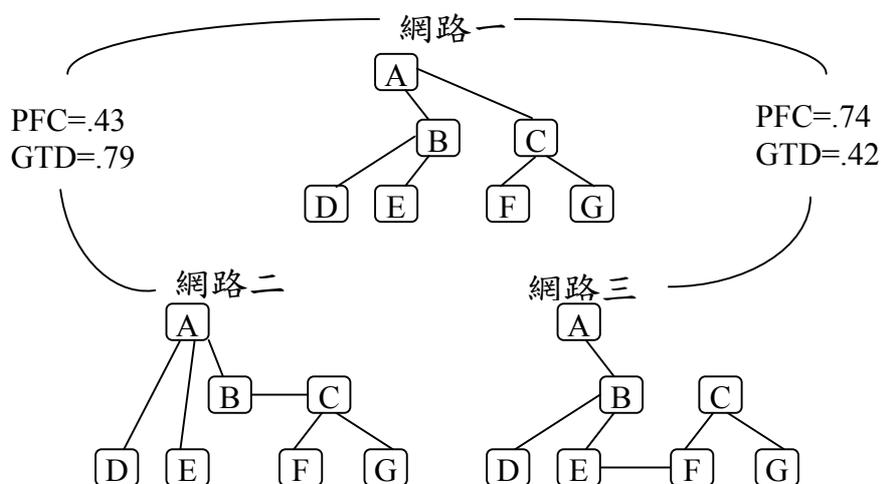


徑路搜尋量尺算則的結果主要由 r 和 q 兩個參數所決定，參數 r 用來決定徑路長度的計算， r 值的範圍從 1 至 ∞ ，對於次序量數而言 r 值通常設為 ∞ ；參數 q 能限制網路聯結鍊的數目，其範圍是 2 到 $n-1$ 之間，當 $r = \infty$ ， $q = n-1$ 時可以產生最少徑路的網路圖。設定不同的 r 值和 q 值將影響 PFNET 網路的聯結鍊數目，並產生異種同形(isomorphic)的網路圖。

3.知識結構的評價

徑路搜尋法對於知識結構的評價主要是將受試者的知識結構和參照結構(referent structure)進行比較，參照結構可以根據研究需要選擇個人或團體平均的知識結構。Goldsmith & Davenport(1990)認為比較兩個徑路搜尋網路的相似程度的兩種方法，其一是以圖形理論為基礎，計算節點之間距離的相關程度；另一種則以集合理論(set theory)為基礎，計算相鄰節點的交集與聯集關係。採用圖形理論為基礎的演算方式可以得到圖形理論距離指數(graph-theoretic distance, 簡稱 GTD)和接近性指數(proximity index, 簡稱 PRX)；採用集合理論演算方式則可得到相似性指數(closeness index, 簡稱 PFC 或 C 指數)，由這三種指數可以判斷受試者知識結構和參照結構的相似程度。茲以 Goldsmith, Johnson, & Acton(1991)所舉的例子圖六，分別說明這三種相似指數。值得注意的是，在圖六中，若以 PFC 指數判斷網路的相似程度，則網路一、三較相似；而以 GTD 指數來判斷網路相似程度，則網路一、二較近似，因此，在判斷兩個徑路搜尋網路的相似程度時，應該參酌多種的指標，才能得出較正確的判定。

圖六、網路一和變形網路二、網路三之 PFC 和 GTD 指數



(改寫自 Goldsmith et al., 1991)

(1)圖形理論距離指數（GTD 指數）

GTD 指數係根據圖形理論算則，計算兩個徑路搜尋網路中圖形理論距離的相關程度，GTD 指數的範圍由 0 至 1，數值愈大表示兩個網路越相近。圖形理論距離是以徑路聯結鍊的數目量來當作計算單位如表一所示，表一所呈現的是圖六中的 PFNET 網路一、網路二和網路三部分節點距離值的計算方式，例如網路一中徑路 A—F 共有 2 個聯結鍊(A—C—F)，故距離值為 2；而網路二徑路 A—F 共有三個聯結鍊(A—B—C—F)，故距離值為 3。

表一、取自圖 6 的三個網路中部分節點的圖形理論距離值

徑路	網路一	網路二	網路三
A—B	1	1	1
A—E	2	1	2
A—F	2	3	3

表二為取自圖六中的 PFNET 網路一和網路二各節點的距離值，將兩個網路各節點的距離值計算相關係數，就可以得到 GTD 指數值，其大小為 0.79。

表二、取自圖 6 網路一和網路二各節點的距離值

節點							
節點	A	B	C	D	E	F	G
網路一							
A	—	1	1	2	2	2	2
B		—	2	1	1	3	3
C			—	3	3	1	1
D				—	2	4	4
E					—	4	4
F						—	2
G							—
網路二							
A	—	1	2	1	1	3	3
B		—	1	2	2	2	2
C			—	3	3	1	1
D				—	2	4	4
E					—	4	4
F						—	2
G							—

GTD 指數為 .79 (Goldsmith et al., 1991)

(2) 接近性指數 (PRX 指數)

PRX 指數係直接計算兩個網路相鄰矩陣(接近性矩陣)的相關程度，以相關係數表示兩個網路的相似程度。例如將受試者的接近性矩陣與專家的接近性矩陣進行比較，求兩個接近性矩陣相互對應元素的積差相關係數，即可得到 PRX 指數，其值的範圍在 0 至 1 之間，指數值愈大表示兩個網路愈相似。

(3) 相似性指數 (PFC 指數；C 指數)

PFC 指數係根據集合理論，以兩個 PFNET 網路共有節點的鄰近節點為集合組，再比較兩個網路集合組的交集與聯

集關係，以此表示個網路的相似性，PFC 指數的範圍在 0 至 1 之間，指數值愈大表示兩個網路愈相似。PFC 指數的計算要先求出兩個網路各節點的鄰近節點，將鄰近節點的交集除以聯集，總和其商數加以平均即可得 PFC 指數，其計算公式為 $PFC(A,B) = \frac{1}{n} \sum_{i \in I} \frac{|A_i \cap B_i|}{|A_i \cup B_i|}$ ，其中 A、B 表示徑路搜尋網路，n 為共有節點數，I 代表網路所有節點的集合，i 為網路節點。表 3 為圖 6 中的 PFNET 網路一和 PFNET 網路二，所有節點與其鄰近節點的交集與聯集，茲以此說明 PFC 的計算方式。

- a. 確認網路一和網路二中，共有節點的鄰近節點。例如，網路一的節點 A，其鄰近節點為 B，C；網路二的節點 A，其鄰近節點為 B，D，E。
- b. 計算兩個網路中鄰近節點之交集和聯集之商數。例如，以節點 A 為例，商數為 $\{B\}/\{B,C,D,E\}$ 等於 0.2。
- c. 依此計算每個共有節點的商數，然後將所有共有節點的商數加以平均即可獲得 PFC 指數，以表 3 為例，共有節點商數總和為 3，PFC 指數值為 0.43。

綜合上述討論可知，徑路搜尋法主要以圖形理論為基礎，以量化的方式評量受試者的知識結構。在進行分析時，須先取得受試者評定概念相似性的接近性矩陣，然後透過 KNOT 軟體將其轉換成徑路搜尋網路，徑路搜尋網路可大致看出受試者知識結構的組織情形；而對於不同知識結構圖的評價所用的 GTD 指數、PRX 指數、PFC 指數等三種相似性指數，則可以客觀的找出受試者與專家參照結構的相似程度（涂金堂，2000），如此可以分析知識結構與學習表現的關係、比較不同能力學習者的知識結構，甚至可以找出學習者概念組織的特徵，進而提供教學者參考，並提供補救教學。

表三、由圖六計算網路一與網路二的 PFC 指數

節點	鄰近節點		交集		聯集		商數
	網路一	網路二	集合	大小	集合	大小	
A	{B,C}	{B,D,E}	{B}	1	{B,C,D,E}	4	1÷4
B	{A,D,E}	{A,C}	{A}	1	{A,C,D,E}	4	1÷4
C	{A,F,G}	{B,F,G}	{F,G}	2	{A,B,F,G}	4	2÷4
D	{B}	{A}	U	0	{A,B}	2	0÷2
E	{B}	{A}	U	0	{A,B}	2	0÷2
F	{C}	{C}	{C}	1	{C}	1	1÷1
G	{C}	{C}	{C}	1	{C}	1	1÷1

商數總和為 3.0，C 值 = $3.0/7 = .43$ ，U 表示空集合

(改寫自 Goldsmith et al., 1991)

(三) 相關研究分析

最初知識結構理論主要是透過實驗室的研究，驗證知識結構對認知表現的重要性，例如研究知識結構和記憶表現、反應時間等的關係（江淑卿，1997），其中的 TLC(teachable language comprehender)模式和擴散促動模式均致力於研究知識結構和記憶表現的關係，而 ACT(adaptive control of thought)模式則研究知識結構和理解、思考表現的關係。教育心理學的研究則進一步在教育情境中進行知識結構的實徵研究，這些研究主要可以區分為三個方向，分別是：探究知識結構與認知表現的關係、不同程度認知表現者之知識結構的差異性、以及教學對知識結構的影響效果等，以下將就較重要的研究結果進行分析，以作為本研究的參考。

Goldsmith, Johnson, & Acton(1991)採用徑路搜尋法與多向度量尺法測量受試者的知識結構，以探討在班級教學中，學生知識結構與學習成效的關係，以及比較不同能力者知識結構的差異。他們以 40 位大學二年級學生為研究對象，分別在學期初和接受 16 週心理學研究方法課程的學期末，讓

受試者評定 30 個關於實驗設計與統計的概念相似程度，該量表為 7 點量表。另外，以一位教學者的接近性矩陣資料為參照的知識結構，做為評價知識結構的標準。

Goldsmith 等人的研究結果發現：1.學期末的知識結構指數與學期末的學業表現之簡單相關皆達顯著性，其中，以徑路搜尋法計算所得的 PFC 指數比 GTD 指數、PRX 指數、多向度量尺計算指數，有較佳的預測力。另外，在淨相關的研究中發現，當 PFC 指數維持固定時，其他知識結構指數和學業表現都沒有顯著相關，此結果顯示 PFC 指數對學習表現有較佳的預測力。2.學期初的 PFC 指數對學業表現的預測力，雖然低於學期末 PFC 指數對學業表現的預測力，但也能有效預測學業表現。綜合上述的研究結果發現，徑路搜尋法與多向度量尺法皆能有效預測學期末的學習表現，顯示知識結構與學習表現有相關，而且知識結構指數確實能夠預測學習表現，其中以徑路搜尋法的 PFC 指數對學習表現的預測力最高。

上述 Goldsmith 等人(1991)的研究結果顯示 PFC 指數頗能預測學習表現，然其研究採用一位教學者的參照結構計算 PFC 指數，因此，Acton、Johnson 和 Goldsmith 等人(1994)的研究進一步採用不同參照結構計算 PFC 指數，探究對學業表現的預測力。這個研究以 61 位修習電腦課程的大學生為受試者，以七點量表評定 24 個電腦程式概念間的相關程度，並建立九種參照結構，其中 EX1~EX6 分別為六位專家個別結構，AVEX 則為專家團體平均結構，AVB1 和 AVB2 則分別為兩組各六位優秀學生(6 top students)的團體平均結構。研究結果發現，採用不同參照結構所計算的不同 PFC 指數，對於學習表現均有不錯的預測力，其中採用專家團體平均參照結構計算所得的 PFC 指數，預測學習表現的效果最佳。

另外，Gomez 和 Housner 研究一系列有關準教師知識結構的主題，例如 Gomez & Housner(1992)以 28 位(17 位女性，

11 位男性) 修習物理教育的準老師為研究對象，並以一位對師資培育教學經驗相當豐富的教授為參照結構，採用徑路搜尋法探討受試者的物理教學知識結構與其學期成績表現的關係。該研究分別在學期初與學期末讓受試者對 36 個物理教學概念所形成的配對，進行相似性評定，研究結果顯示，學期末所測量的知識結構三種指數 PFC、GTD 與 PRX 皆與學期成績有顯著的相關，對於學期成績的預測，預測力最高的為 PRX 指數，其次為 PFC 指數，最低的是 GTD 指數。

Chen(1996)的研究採用相似性評定法配合徑路搜尋法，探討高中學生在物理學科中，學生的牛頓運動定律的知識結構與力學概念理解能力兩者間的關係，該研究以高二學生為研究對象，並以三位高中物理教師為參照結構。研究結果顯示，參照者的知識結構比學生的知識結構，其概念聯結更為組織化；此外，若以物理學業成績將學生區分為高、中與低三組進行比較，結果顯示高分組學生的知識結構比低分組學生的知識結構，更相似於參照者的知識結構。

在國內研究方面，江淑卿(1997)以 266 位國小六年級學生與 12 位國小自然科教師為研究對象，以自然科學為特定領域，採用徑路搜尋法分析國小學生知識結構與文章理解能力的關係。該研究讓受試者先閱讀一篇「地球的多重屏障」文章，並評定包含 55 題概念相關性的 5 點評定量表，此概念相關性題目，為抽取自所閱讀文章中 11 個有關地球科學的概念配對而成。研究結果顯示，知識結構與科學文章的理解能力有顯著的相關，而且知識結構指數對科學性文章理解能力大都能有效預測；此外，由淨相關的分析結果發現，當分別排除兩個知識結構指數的影響後，GTD 指數和 PFC 指數分別與科學文章理解能力有顯著的淨相關，PRX 指數與理解能力則沒有顯著的淨相關，顯示三種知識結構指數中，以 PFC 指數和 GTD 指數與科學文章理解能力有較密切的關係。

宋德忠、林世華、陳淑芬、張國恩(1998)以 153 名大學

生為研究對象，以教育心理學的「學習理論」為材料，選取 31 個相關概念，採用相似性評定法配合徑路搜尋法，讓受試者評定概念配對的相關性程度。該研究探討了 PFC 指數與 PRX 指數對學習成就的預測效果，以及對不同成就學生的區別效果，研究結果發現，採用徑路搜尋法所獲得的 PFC 指數與 PRX 指數對學習成就的解釋量，PFC 指數為 36%，PRX 指數為 16%，顯見 PFC 指數對學習成效有不錯的預測力。另外，PFC 指數可以有效的區別不同學習成就的學生，而 PRX 指數則沒有顯著的區別力。

由上述知識結構相關研究分析可知，在研究方法方面，這些研究大都採用相似性評定法作為知識結構的引出，透過評量配對概念的相似性，而獲得接近性矩陣，再由接近性矩陣進行分析，並以徑路搜尋法計算的 PRX 指數、GTD 指數與 PFC 指數等三種知識結構的指數，或是多向度量尺的指數，來探究這些知識結構的相似性指數與認知表現的關係。

在研究結果方面，發現在不同的特定領域中，知識結構與學習表現大致有顯著的相關，而且知識結構能有效預測學習表現。進一步分析這些研究結果可以發現，徑路搜尋法的預測力大多優於多向度量尺法，而且在三種徑路搜尋指數中，以 PFC 指數有最佳的預測力。因此，本研究將以相似性評定法引發學生物理知識結構，再以徑路搜尋法探究學生知識結構指數與學業成績的關係。

三、研究方法

(一)研究問題

本研究的目的是在探究以徑路搜尋法評量高中學生物理知識結構的情形，透過知識結構評量和傳統總分評量之比較，探討知識結構評量的應用潛力；此外，透過比較不同學習成就組別學生的知識結構，以探討知識結構與學習表現間

的關係。因此，本研究所欲探討的問題如下：

1. 高中學生物理知識結構指數與學業成績是否有顯著相關？
2. 不同學習表現組別的學生，其知識結構指數是否有顯著差異？

(二) 研究對象

本研究的受試者為 38 位高雄某公立高中二年級普通班學生，他們已經上過一年級的基礎物理，以及二年級物理的運動學和力學單元。

(三) 研究工具

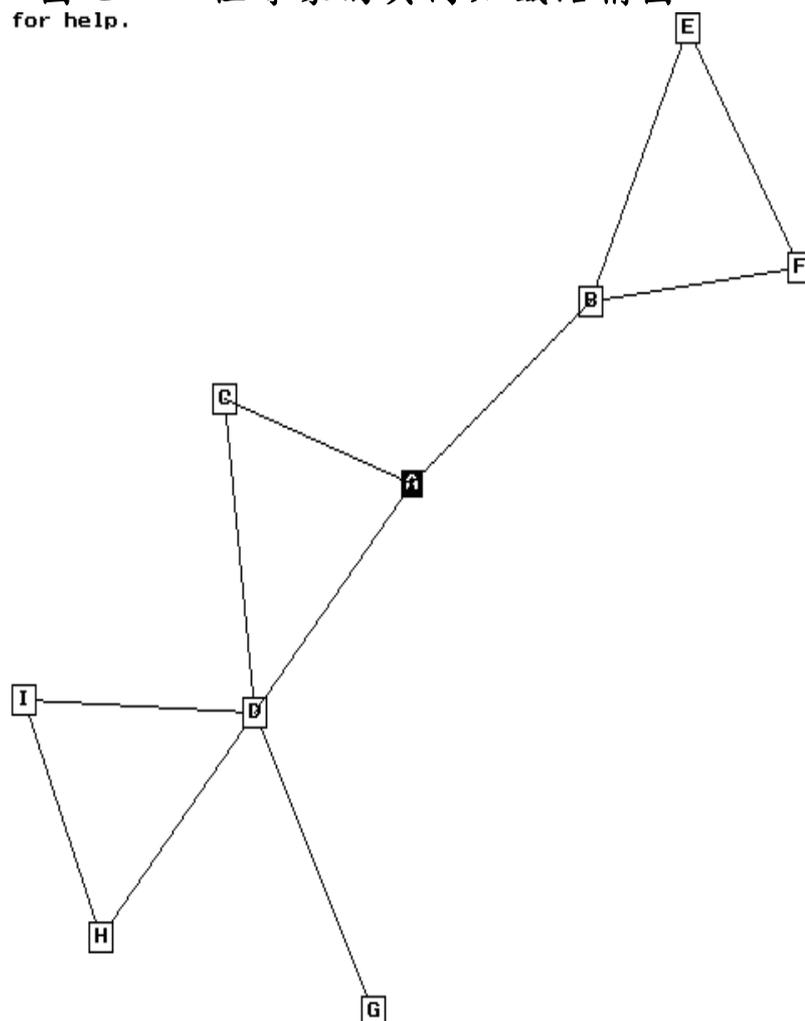
本研究採用徑路搜尋法來測量受試者得知識結構，使用工具為 Schvanevaldt(1994)所發展的知識網路組織工具(knowledge network organizing tool, 簡稱 KNOT)軟體 4.2 版。

研究者與另一位高中物理教師參考高中物理教材，從「運動學」和「力學」單元選取 9 個合適的概念（如表四所示），編成「運動學與力學學習問卷」以取得學生物理概念的相關性資料矩陣，以供 KNOT 軟體分析之用。此相關性概念評定問卷共有 36 個概念配對題目，以 5 點來評定概念的相關性，其中，5 代表兩個概念的內涵非常相關或接近，1 代表兩個概念的內涵不相關或非常不接近，在施測時間大約 20 分鐘，施測前給予學生解說和舉例。此外，由研究者和高中物理教師分別進行相關性的評定，經由 KNOT 加以轉換成共同的專家知識結構圖（如圖七所示），以做為評價學生知識結構的參照結構。

表四、本研究所使用的 9 個物理運動學和力學概念

A 力	B 變加速度	C 等加速度
D 重力加速度	E 水平彈簧振子運動	F 等速率圓周運動
G 重量	H 自由落體運動	I 拋體運動

圖七、二位專家的共同知識結構圖
Press F10 for help.



(四)研究程序

本研究程序主要分為知識結構測量和後續的統計分析兩個部分。在知識結構測量部分，研究者參考 Goldsmith, Johnson & Acton(1991)所提出測量知識結構的步驟，將測量程序分成三個主要步驟：

- 1.引出知識(knowledge elicitation)，透過「運動學與力學學習問卷」可獲得接近性矩陣，可供後續分析之用。
- 2.表徵知識結構(knowledge representation)，徑路搜尋法透過量尺化算則，將接近性矩陣資料轉變成徑路搜尋網路(PFNET)，並產生圖解理論距離(graph-theoretic distance, GTD)和徑路搜尋網路圖解(Pathfinder graph)。

3. 評價知識結構 (evaluation of knowledge representation)，將接近性矩陣、圖解理論距離、徑路搜尋網路等量數與參照結構相互比較，即可得出 PRX 指數、GTD 指數、和 PCF 指數。

在後續統計分析方面，則以 SPSS 統計軟體進行積差相關和 U 考驗。

四、研究結果與討論

本研究主要目的在於探討以徑路搜尋法評量高中學生物理知識結構的應用情形，本節將討論研究所得結果，茲分述如下。

(一)知識結構指數和學業成績的相關性

本研究的主要目的之一，在於比較不同知識結構指數和物理學習成就的相關性，以明瞭知識結構指數是否可以預測學生物理學習成就。表五顯示 PRX、GTD、PFC 均與物理學業成績達顯著的相關，顯示知識結構指數可以預測學生物理學習成就，若進一步比較三種指數的預測力(r^2)，可以發現以 PFC 指數(預測力為.265)最具預測力，此結果與 Goldsmith 等人(1991)對於心理學研究、宋德忠等人(1998)對於教育心理學研究，和江淑卿(1997)對於科學文章理解能力的研究結果相似。

PFC 和 GTD 指數為評量參照知識結構圖和學生知識結構圖所包含節點的相似程度，屬於較偏重深層的知識結構評量，而 PRX 則較偏重表層知識結構的評量，教師可以根據每一位學生的知識結構指數，來進行補救教學。

表五、知識結構指數與學業成績的相關

	個數	相關係數(r)	決定係數(r ²)
PRX	38	.466**	.217
GTD	38	.342*	.117
PFC	38	.515**	.265

*.P<.05, **.P<.01

(二)不同學習表現學生的知識結構差異情形

本研究另一目的在探究不同物理學習表現的學生，其知識結構是否有顯著的差異情形。研究者以受試學生物理學業成績的平均數(74.0)，將高於平均數者區分為中高分組(19位受試者)，低於平均數者區分為中低分組(19位受試者)，以Mann-Whitney U 考驗來檢定中高和中低分組的知識結構三種指數是否有顯著的差異。由於本研究各組樣本人數不夠大，可能違反 t 考驗的變異數同質和常態性假定，在無法滿足 t 考驗基本假定時，Mann-Whitney U 考驗是最常用來替代 t 考驗的無母數檢定統計方法。

由表六可知，中低分組和中高分組在 PRX 指數和 PFC 指數上的表現達到.05 的顯著水準，表示 PRX 指數和 PFC 指數確實能在指數分數上，區別不同學習成就水準的學生，此研究結果和蔡佳燕(2000)對於數學知識結構評量的研究，以及江淑卿(1997)的研究相似。

表六、Mann-Whitney U 考驗結果
中低分組和中高分組平均數差異檢定^b

	GTD指數	PRX指數	PFC指數
Mann-Whitney U 統計量	135.500	101.000	104.000
Wilcoxon W 統計量	325.500	291.000	294.000
Z 檢定	-1.314	-2.321	-2.249
漸近顯著性 (雙尾)	.189	.020	.024
精確顯著性 [2*(單尾顯著性)]	.191 ^a	.020 ^a	.025 ^a

a. 未對等值結做修正。

b. 分組變數：分組

五、結論與建議

(一) 結論

學習者的知識結構與其認知表現之間密切的關連性，引發教育和心理學家對「知識結構」探究的興趣，進而發展不同的評量方法，諸如分類法、晤談法、構圖法等(郭重吉，1990)，試圖找出學習者的知識結構型態，進而提供學習診斷的參考。本研究採用徑路搜尋法探討高中二年級學生物理學科，其知識結構與學業成就的關連性。研究結果為：

1. 以徑路搜尋法求得的知識結構指數對於學業成績的預測力，研究結果發現知識結構評量的三種指數(PRX、GTD、PFC)與學生物理學業成績的相關均達顯著水準，顯示知識結構測驗確實能有效預測學生物理學業成績，其中，以PFC指數(r^2 為.265)最具預測力。
2. 以Mann-Whitney U考驗來檢定不同學業成績組別的受試者，其三種知識結構指數是否有顯著的差異，結果發現中高分組的PRX與PFC兩種指數數值，明顯的高於中低分組。

綜合上述研究結果，本研究的結論為：

1. 以徑路搜尋法測量學生知識結構確實能有效測量學生學業成就，也符合當今對知識表徵的看法，是多元評量的另一選擇。
2. 不同學習成就學生的物理知識結構確實具有差異，其中，PRX 指數和 PFC 指數確實能在指數分數上，顯現出不同的差異水準。

(二)建議

根據上述對研究結果的討論和結論，本研究分別對教師教學和未來研究提出建議，以做為教師教學和未來研究等方面之參考。

對於教師教學方面的建議為：

知識結構評量能提供學生對於學科知識的理解程度，以及其迷思概念之存在情形，採用徑路搜尋法探究學生知識結構，除可得到三種量化的指數數值外，也可以獲得受試者的徑路搜尋網路圖解（PFNET，如圖三所示），此 PFNET 圖解提供各概念聯結情形，以及聯結鍊的權值(weight)，教學者除了可以比較 PRX、GTD、PFC 等三種指數作為評量參考外，更可以深入探究個別或分組學生的知識結構網路圖解，由圖解的聯結情形和各概念間聯結鍊的權值，來診斷學生迷思概念所在，以進行補救教學，或作為教師未來教學設計的參考。

至於未來的研究，可以考慮下列幾個方向：

1. 可以採用徑路搜尋法探究知識結構，除可得到三種量化的指數數值外，也可以獲得受試者的徑路搜尋網路圖(PFNET)，此 PFNET 圖提供各概念聯結情形，以及聯結鍊的權值(weight)，未來研究可以更深入探究此結構網路圖。
2. 可以採用不同測量知識結構的方法，以評估哪一種方法對受試者學業成就較有預測力。

參考文獻

- 江淑卿(1997)知識結構的重要特性之分析暨促進知識結構教學策略之實驗研究。國立台灣師範大學教育心理與輔導研究所博士論文。
- 宋德忠、林世華、陳淑芬、張國恩(1998)「知識結構的測量：徑路搜尋法與概念構圖法的比較」。教育心理學報，30(2):123-142。
- 岳修平譯(1998)教學心理學—學習的認知基礎(Gagne', E. D. et al. 原著，*The Cognitive Psychology of School Learning*)。台北：遠流出版社。
- 洪振方(1996)「科學知識重建的認知取向分析」。國立高雄師範大學學報，7:293-328。
- 涂金堂(2000)「徑路搜尋法在知識結構測量上的應用」。國立台南師範學院初等教育學報，13:275-306。
- 郭重吉(1990)「學生科學知識認知結構的評估與描述」。彰化師範大學學報，1:279-320。
- 黃秀瑄、林瑞欽譯(1991)認知心理學(John. B. Best 原著，*Cognitive Psychology*)。台北：師大書苑。
- 楊文金(1991)形成假說技能試題之結構分析。國立台灣師範大學科學教育研究所博士論文。
- 蔡佳燕(2000)國小學生數學學科知識結構評量之研究。國立政治大學教育研究所碩士論文。
- Acton, W. H., Johnson, P. J., & Goldsmith, T. E. (1994). "Structural Knowledge assessment: Comparison of referent structures," *Journal of Educational Psychology* 86: 303-311.
- Anderson, J. R. (1983). *The architecture of cognition*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Anderson, J. R. (1990). *Cognitive psychology and its implications* (3rd ed.). New York: Freeman and Company.
- Chen, C. C. (1996). *Using similarity ratings and pathfinder algorithm for evaluating student's cognitive structures in Newtonian mechanics*. Doctoral Dissertation Abstracts. The Ohio state University.
- Chi, M. T. H., Feltovich, P. J., & Glaser, R. (1981). "Categorization

- and representation of physics problems by experts and novices,” *Cognitive Psychology* 5: 121-152.
- Collins, A. M. & Loftus, E. F. (1975). “A spreading activation theory of semantic processing,” *Psychological Review* 82: 407-428.
- Collins, A. M. & Quillian, M. R. (1969). “ Retrieval time from semantic memory,” *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior* 8:240-247.
- De Groot, A. D. (1965). *Thought and choice in chess*. The Hague, Netherlands: Mouton.
- Diekhoff, G. M. (1983). “Relationship judgments in the evaluation of structural understanding,” *Journal of Educational Psychology* 75: 227-233.
- Ellis, H. C. & Hunt, R. R. (1993). *Fundamentals of cognitive psychology*. Madison, Wis.: Wm. C. Brown Communications.
- Glaser, R., & Chi, M. T. H. (1988). “Overview.” In M. T. H. Chi, R. Glaser, & M. Farr(eds.), *The nature of expertise*. Pp. xv-xxxvi. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Goldsmith, T. E. & Davenport, D. M. (1990). “ Assessing structural similarity of graph.” In R. W. Schvaneveldt (ed.) *Pathfinder associative networks: Studies in knowledge organization*. Norwood, NJ: Ablex.
- Goldsmith, T. E., Johnson, P. J., & Acton, H. W. (1991). “Assessing structural Knowledge,” *Journal of Educational Psychology* 83: 88-96.
- Gomez, R., & Housner, L. D. (1992). *Pedagogical knowledge structures in prospective teachers*. Paper presented at the annual meeting of the American Educational Research Association. Austin, TX. (ED 351307)
- Greene, R. L. (1987). “Effects of maintenance rehearsal of human memory,” *Psychological Bulletin* 102:403-413.
- Jonassen, D. H., Beissner, K., & Yacci, M. (1993). *Structural knowledge: Techniques for representing conveying, and acquiring structural knowledge*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

- Koubek, R. J., & Moutujoy, D. N. (1991). *Toward a model of knowledge structure and a comparative analysis of knowledge structure measurement techniques*. Wright State University. (ED 339719)
- Lakin, J. H. (1985). "Understanding, problem representation, and skill in physics." In Chipman, S. F., Segal, J. W., & Glaser, R. (eds.) *Thinking and learning skills*. Vol.2: Research and open questions. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Miner, A. C., & Reder, L. M. (1994). "A new look at feeling of knowing: its metacognitive role in regulating questionanswering." In J. Metcalfe & A. P. Shimamura(eds.) *Metacognition: Knowing about knowing*. Pp.47-70. Cambridge, MA: MIT Press.
- Morton, J. & Bekerian, D. (1986). " Three ways of looking at memory".In N. E. Sharkdy (ed.) *Advances in cognitive science 1* . Chichester: Ellis Horwood Ltd.; New York: Halsted Press.
- Piaget, J. (1952). *The origins of intelligence in children*. New York: International University Press.
- Quillian, M. R. (1968). "Semantic memory." In M. Minsky (ed.), *Semantic information processing*. Pp.227-270. Cambridge, MA: MIT Press.
- Rips, L. J., Shoben, E. J., & Smith, E. E. (1973). " Semantic distance and the verification of semantic relation," *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*:12:1-20.
- Rumelhart, D. E. & Norman, D. A. (1988). "Representation in memory." In R. C. Atkinson, R. J. Herrnstein, G. Lindzey, & R. D. Luce (eds.) *Stevens' handbook of experimental psychology: Vol. 2. Learning and cognition* (2nd ed., pp.511-587).New York: Wiley.
- Smith, E. E., Shoben, E. J., & Rips, L. J. (1974). "Structure and process in semantic memory: A feature model for semantic decision," *Psychological Review*81:214-241.
- Sternberg, R. J. (1999). *Cognitive Psychology* (2nd ed.). Orlando, FL: Harcourt Brace College Publishers.

The Application of Pathfinder to Measure Physical Knowledge Structure of Senior High School Students

Pai-Hsiang Huang

Student, Institute of Science Education, National Kaohsiung
Normal University

Abstract

The idea that information in memory is organized or ‘structured’ so as to facilitate storage, retrieval, and manipulation is pervasive in modern psychological and educational theory. Therefore, how to properly evaluate learner's knowledge structure and assist their cognitive performance has become an important research topic.

Many scholars adopt different methods to measure knowledge structure, the pathfinder method is a objective research instrument. We could obtain pathfinder graph and three indexes of evaluating knowledge structure in using pathfinder method. Pathfinder method offers a potential alternative assessment tool that is not only quantitatively rigorous; but is also consistent with modern theories of knowledge representation. Hence, we use pathfinder method to study senior high school students’ physical knowledge structure.

Keyword: knowledge structure, pathfinder method, measurement