

國立臺灣師範大學 海洋環境與科技研究所碩士班

碩士論文

指導教授：葉庭光 博士

利用可攜式腦波儀觀察

不同難度下的認知負荷

Monitoring cognitive load utilize portable EEG

during mental arithmetic task

研究生：簡宗信

中華民國 106 年 5 月

誌謝

論文的完成也代表著研究所的時光就要結束，雖然花了比預期還要多的時間，但在這三年學到的東西也讓我成長了許多，終於要畢業啦！

非常感謝一路上許多人的幫忙，首先要感謝葉庭光教授，教授對我來說是師長卻如同朋友一般親切，都很樂意分享自己的想法與意見，在我撰寫論文這段時間，教授也不吝惜的給我寶貴的建議，並反覆的提點以及修正，讓我這篇論文能更加完善，並且讓我學會了做研究的精神，不只提升了學術上的知識，更讓我擁有了面對事情該有的態度。

在實驗中要感謝許多人，沒有他們的幫忙就沒有辦法完成這篇論文，感謝研究室同學，感謝協助施測的地科系學弟妹們，感謝王靖穎同學給我提供了許多論文撰寫上的技巧，以及陪伴我在口試前的練習，也感謝中央大學許顥騰學長，願意空出時間協助我，尤其是在關於腦波儀的程式碼及文獻，給予了許多幫忙及支持，在我有疑問時也都是第一時間就能給我解答，最後要感謝我的家人，不管論文遇到了什麼瓶頸，都是全力的支持我，成為我最安心的後盾，謝謝有這麼多溫暖的夥伴陪著我，讓我能順利而且開心的畢業，為研究生生涯畫下完美的句點！！！！

宗信 2017.05 謹誌

摘要

在學習的歷程中，學習者在對所感知的資訊及內容進行思考或整合時，皆須透過「工作記憶區」來處理，但是，工作記憶有容量的限制，因此，如果教材內容或學習步驟等超過學習者的工作記憶容量，便容易造成工作記憶負荷增加，有損了學習者的理解及學習的能力，影響他們順利解決問題，Sweller 將這種加諸在學習者認知系統上的負荷稱之為「認知負荷」。

在課堂中若教師能隨時了解學生認知負荷的狀況，注意學生是否處於極高的認知負荷，或已經認知超載，便能「立即」調整教學內容與速度，協助學生學習。為了注重「即時性」及價格、方便性等，「可攜式腦波儀」最具有硬體上的優勢。

由於「可攜式腦波儀」主要硬體部件已設計完成，發展相應的「演算法」來有效地預測「難度」為現階段的重要目標。本研究以 20 位大學學生為研究對象，並利用四個難度的數學乘法心算作為試題來進行測驗。為了考量可攜式腦波儀電極貼片的限制，黏貼位置選擇以前額葉及前額葉的左、右側共三點來觀察。另外，參考過去文獻指出額葉區的 θ 波與工作記憶的關係，因此，為評估受試者感受到的認知負荷，本研究初步以「 θ 腦波」為演算基礎來分析其與試題難度間的相關性。

研究結果如下：貼在前額葉及前額葉左、右側的數據皆呈高度相關，表示整體的預測力很高，尤其是前額葉右側的位置，相關性最高，預測力約達 67%，表示某種程度上我們可以利用額葉區的 θ 波來預測學習者在學習歷程中感受到的負荷。

關鍵字：認知負荷、可攜式腦波儀、數學乘法心算、難度、額葉區、 θ 波

目錄

第一章 緒論	1
第一節 研究背景與動機	1
第二節 研究目的	3
第三節 研究範圍	4
第四節 名詞介紹－腦部結構與腦波	4
第二章 文獻探討	7
第一節 工作記憶	7
第二節 認知負荷理論	8
第三節 認知負荷的意義	9
第四節 認知負荷的來源與類型	10
第五節 認知負荷對學習的影響	12
第六節 認知負荷的測量	14
第七節 腦部神經影像測量法	18
第八節 利用腦部神經影像進行與工作記憶相關研究	20
第三章 研究方法	25
第一節 研究流程	25
第二節 研究對象與研究工具	27
第三節 分析方法	29
第四節 資料處理	35
第四章 研究結果	36
第五章 結果討論與研究限制	41
第一節 研究結果討論	41
討論一	41
討論二	44

討論三	46
討論四	49
討論五	50
第二節 研究限制.....	51
參考文獻.....	52
附錄.....	59



圖目錄

圖 1-4-1 國際 10-20 腦電波系統圖.....	6
圖 2-4-1 學習歷程的認知負荷圖.....	11
圖 3-1-1 研究細部流程圖.....	25
圖 3-1-2 實驗進行示意圖.....	26
圖 3-2-1 可攜式腦波儀示意圖.....	27
圖 5-1-1 難度與正確率關係圖.....	46



表目錄

表 2-6-1 認知負荷評估分類表	16
表 2-7-1 腦部影像工具之比較表	18
表 3-2-1 試題難度定義表	28
表 4-1-1 研究結果分析表	36
表 4-1-2 前額葉在不同難度下 θ 波能量平均值	37
表 4-1-3 前額葉左側在不同難度下 θ 波能量平均值表	38
表 4-1-4 前額葉右側在不同難度下 θ 波能量平均值表	39
表 4-1-5 試題難度與 θ 波強度相關性分析表	40
表 5-1-1 腦波跟難度的相關性與正確率表	44
表 5-1-2 正確率與腦波相關性表	45
表 5-1-3 θ 波與正確率相關性分析表	47



第一章 緒論

第一節 研究背景與動機

「工作記憶」是影響認知與學習的重要能力，Baddeley與Logie（1999）提出：工作記憶是將環境訊息進行即時監控、維持與處理的認知能力，在擷取訊息後，維持訊息清晰且同時提取長期記憶中的經驗或知識與其進行比對整合，以利個體進行問題解決、規劃，與執行目標任務，此與複雜的認知作業有關，如：邏輯推理、理解、數學運算與閱讀等。它包含了一個中央執行系統及視覺空間記憶的描繪板(visuospatial sketchpad)、語音迴路(Phonological loop)等子系統，認知心理學者則是將工作記憶分為三個主要部分，聽覺、視覺與注意力，並認為工作記憶的容量是有限制的(A. Baddeley, 1992, 2000; Daneman & Carpenter, 1980; Just & Carpenter, 1992)。

在學習的歷程中，學習者在對所感知的資訊及內容進行思考或整合時，皆須透過「工作記憶區」來處理，但是，工作記憶有容量的限制，也就是說，我們在短時間內能處理和記憶的訊息是有限的，因此，如果教材內容或學習步驟等超過學習者的工作記憶容量，便容易造成工作記憶負荷增加，有損了學習者的理解及學習的能力，影響他們順利解決問題(Chandler & Sweller, 1991; F. Paas, Renkl, & Sweller, 2003; J. Sweller, 1988)，澳洲學者Sweller（1994）將這種加諸在學習者認知系統上的負荷稱之為「認知負荷」。

自「認知負荷」的概念引進教育界後，許多相關的研究指出，學習者感受到的認知負荷與學習成效間確實具有顯著的關聯性，在學習同樣作業時，感受到較低認知負荷學習者的表現往往優於感受到較高認知負荷的學習者(Mayer & Moreno, 2003; van Merriënboer & Sweller, 2005; Yeh et al., 2012)。因此，認知負荷理論已成為研究認知歷程和教學設計的重要理論架構，許多學者嘗試提

出不同的方法來降低學習者的認知負荷，以提昇學習與教學成效，包含運用科技輔助、不同的教材編排或教學方法等。

正因如此，如何有效地測量「認知負荷」成為值得討論的議題，近年來學者也致力於將這樣的概念引用至教學現場：課堂中教師若能隨時了解學生認知負荷的狀況，注意學生是否處於極高的認知負荷，或已經認知超載，便能「立即」調整教學內容與速度，協助學生學習，此時，在認知負荷的測量上則須注重「即時性」，即時的反映才能即時的調整。過去學者提出了許多測量認知負荷的方法，如透過量表、評量或生理訊號等觀察，若期望應用於課堂中，「腦部神經影像測量方法」不但直接、客觀，在測量上還具有即時性，並且隨著醫學技術的提升，利用腦波儀(EEG)、腦磁波儀(MEG)、功能性磁振造影(fMRI)等非侵入式的神經影像技術，測量人類的認知情形已具有相當高的可能性。

不過，為了便於在教室中即時偵測學習者感受到的認知負荷，在選擇腦部造影儀器時，除了高時間解析度外，還需考量價格、方便性等，「可攜式腦波儀」因為輕巧、價格較低，因此最具有硬體上的優勢。

第二節 研究目的

本研究旨在「幫助老師在課堂中即時了解學生感受到的『難度』」，因此，為了便於在教室裡使用，發展「個人化可攜式腦波儀」尤為重要，目前主要硬體部件已設計完成，為了確認可攜式腦波儀可以用來診斷受試者在學習不同難度的單元所感受到的「即時負荷」，發展相應的「演算法」即為現階段的重要目標。過去相關研究中大多使用「事件相關電位(ERP)」來分析受試者面臨不同工作記憶或認知負荷作業時的腦波差異，而本研究的目標為希望用於課堂中，分析學習者在「學習歷程」中感受的認知負荷，而學習歷程是屬於連續的過程，很難定義「事件」的定位點，因此，在腦波的分析上，有別於以往是觀察「某個時間點的腦波」，我們則是擷取「一段時間內的平均腦波」。

不過，考量課堂中的教材較為複雜，過去的腦波研究多以如N-back等簡單的視覺測驗作為主題來測量，而本研究雖以分析學習者課堂中學習的歷程為最終目標，我們在選擇主題時，仍需先在簡單的N-back視覺測驗與複雜的課程材料間選擇：

如「數學乘法心算」就是一個需要用到工作記憶的例子，因為「數學心算」時會牽涉到複雜的心理運作過程，尤其遇到乘法需「進位」的運算時（如：44乘32），學習者則需分別先把兩個數字記在工作記憶中，在開始計算，算出個別相乘的結果後，還須先把它保留在工作記憶中再繼續進行運算，最後提取保留在工作記憶中的結果並加總起來，才能算出正確答案，整個運算過程中，我們必須記憶一些訊息，同時進行其他訊息的處理(Miyake & Shah, 1999)，沒有工作記憶，我們便無法完成如此複雜的心智運作；且過去的研究結果顯示，數學心算中各步驟並非彼此獨立，而是一種連續歷程(Glass & Holyoak, 1986; Schoenfeld, 1985)，解題過程中會耗費解題者的認知資源。因此，我們便選擇比N-back視覺測驗稍微高階的「數學心算」作為測量認知負荷的主題。

若本研究發展的演算法確實可用於偵測不同難度的數學學習，未來便可再更進一步使用課堂中其它複雜的材料(如：語文、科學等)測量，並加以分析。

第三節 研究範圍

為發展可攜式腦波儀測量認知情形的演算法，我們將實驗設計為數學直式乘法心算，依照數字的大小與進位的難易度區分為四個難度，研究對象為隨機選擇約 20 位大學學生，並且皆無心算背景，以確保數學心算時進位的方法一致，進而觀察受試者在乘法歷程中大腦活動的情形。

受試者在閱讀試題之後，必須於腦中進行心算解答，再按鈕回答出結果。而受試者的學習歷程我們將擷取心算階段的腦波進行分析。

若可攜式腦波儀確實可以反映受試者在學習不同難度的單元所感受到的認知負荷，我們將能推斷可攜式腦波儀確實可以運用在教學現場。

第四節 名詞介紹—腦部結構與腦波

(一) 大腦各部的功能

人類的資訊處理都必須由大腦來進行，所有資訊從眼睛傳送至大腦，由大腦來解讀後，再將訊息及指令傳至手腳來動作。而腦功能分區分為額葉、頂葉、顳葉及枕葉，其功能為（示意圖如下圖1-3-1）：

(1) 額葉 (Frontal Lobe)：掌管人類最高級且最複雜的精神及思維功能。包含意志力、創造力、想像力、推理能力等，可以利用左右額葉不對稱的特性作為一種研究中的觀察依據，例如感受愉快時會造成左右額葉不同的腦波差異等。

(2) 顳葉 (Temporal Lobe)：位於大腦兩側，主要是主管聽覺，對語意及視覺，對名稱、語言記憶及其他語言功能與嗅覺之理解的部位，此部分還包含涉及記憶

功能之海馬回。

(3) 頂葉(Parietal Lobe)：所掌管的功能是肢體的動感覺、皮膚的觸感及一部分的數理邏輯能力，如肢體的運動、操作及學習等運協調複雜、技巧性的運動，或是有關數理邏輯的符號記憶等。

(4) 枕葉(Occipital Lobe)：枕葉區掌理視覺功能，舉凡圖像的辨識、暫留及對環境或大自然的觀察力，皆屬之。

(二) 腦波

英國生理學大師 (Richard Carton) 在1875年就發現腦波，從動物的大腦皮質上記錄到一種電波，此電波與呼吸或心跳無關，是一種腦部的生理變化，隨著動物受麻醉或缺氧而破壞，且動物在死亡後消失；1929年，漢斯柏格 (Berger, Hans) 首次在人類的頭蓋骨上記錄到類似的電波活動，也是人類史上第一次發表腦波記錄，命名為「腦波圖」(Electroencephalography, EEG)，腦波圖是從儀器將腦部表面細胞活動時，所產生的電流活動紀錄下來而得到的圖譜，同時他也描述了各種形態不同的腦波圖，如癲癇、創傷等。

腦波的測量

腦波的測量中，侵入式的量測法，需透過外科手術打開頭蓋骨，在大腦皮質層放置電極進行測量，雖然可以排除頭蓋骨及毛髮的阻隔，獲得精準的數據資料，不過測量過程複雜且危險性高，近年來，非侵入性的測量方法更常被用於相關的研究中。

非侵入式的測量方法，不但較簡單也顯得更安全，測量方法為在頭皮上不同位置放置電極，測量神經元的電位變化。腦波的強度在100uV以下，通常只會到幾十uV，頻率則是大部分在0.1Hz~40Hz。一般在量測時還須考量測量儀器的精確

度、雜訊濾除、避免外來訊號的干擾、電極放置位置及受測者的個體差異等。因為非侵入式的測量方法，會受到頭蓋骨高電阻的影響，造成所量測的腦波訊號較微弱，且容易摻雜許多雜訊，量測後還須消除不必要的雜訊，才能得到較準確的腦波訊號。

本研究即是使用非侵入式的腦波儀(EEG)進行測量，並且，由於大腦的區域很大，須使用很多的電極才能涵蓋整個頭顱，為了使電極能均勻分佈在頭皮上，本研究的貼片黏貼位置是參考Jasper(1958)提出的「國際10-20腦電波系統」(international 10-20 system)，它以用英文字母與數字組合而成電極位置的代碼(如下圖1-4-1)。

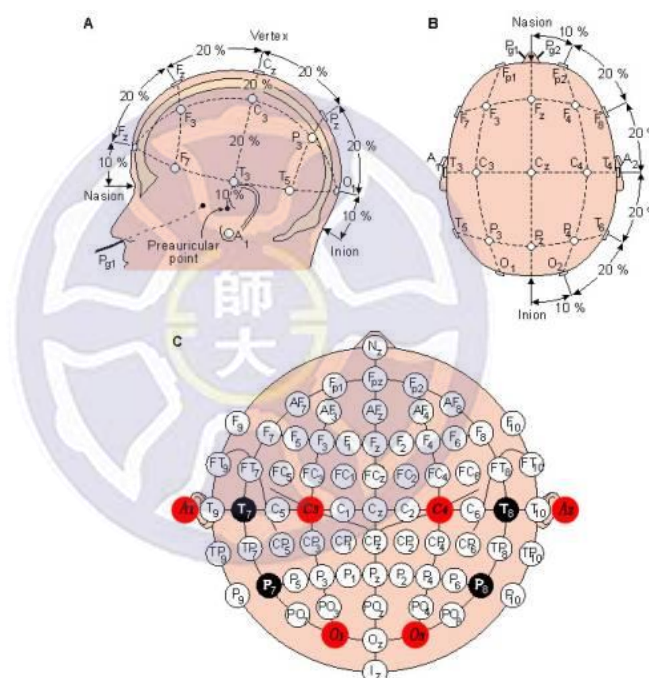


圖 1-4-1 國際 10-20 腦電波系統圖

(圖片來源：Malmivuo and Plonsey, 1995)

測量後的腦波圖因為各種不同的波混雜在一起較難進行分析，因此通常還會透過數學方法—快速傅立葉轉換，依據不同的頻率區分開來，再藉由各式各樣波形來判斷大腦的功能。近年來，非侵入性的測量方法在臨床上對於腦波的疾病診斷很有幫助，包含精神、心理狀態檢測等，近年來應用的範圍愈來愈廣，更引至教育界進行認知科學的相關研究。

第二章 文獻探討

第一節 工作記憶

工作記憶區是指個體對訊息性質的深一層認識與理解，亦代表了訊息儲存及處理的認知架構(John Sweller, Van Merriënboer, & Paas, 1998)。工作記憶區有容量上的限制，Miller指出工作記憶區可以保留 7 ± 2 單位的訊息(Miller, 1956)；而Simon則認為工作記憶區只能保存5個單位的訊息(Simon, 1975)。工作記憶區的功用主要為組織、建構、比較及處理資訊，當資訊間的交互關係越複雜時，所能處理的量將越少(John Sweller et al., 1998)。

Baddeley & Hitch 於 1974 年提出空間記憶模式，認為工作記憶主要包含中央執行器(Central executive)，視覺空間模板(Visual-spatial sketchpad)，以及與語音迴路(Phonological loop)。因此，視覺訊息的處理、視覺心像(頂葉與顳葉)、空間位置關係(額葉、枕葉、與頂葉)等屬視覺部件，而儲存/處理語音訊息(頂葉)與提取(Broca)則屬聽覺部件，兩部件受中央執行器整合(額葉)控制。這些部件共同負責處理工作記憶，同時對產生或是提取長期記憶具有密切關聯。(A. D. Baddeley & Hitch, 1974)

我們在學習歷程中，常透過認知作業及不同的核心能力在面對學習的內容，這些過程都必須占用到工作記憶的容量，一旦我們在解決問題時，面臨的心智負荷超過我們所能承受的負荷量，將會造成認知負荷的超載，影響我們順利解決問題(Chandler & Sweller, 1991; F. Paas et al., 2003; J. Sweller, 1988)。

第二節 認知負荷理論

認知負荷理論最早源自於歐美國家對人體工學與人因科學的研究，被稱為「心智工作負荷 (mental workload)」，從生心理與認知的角度探討工作對執行者相互的影響與作用。後來澳洲新南威爾斯大學教授 John Sweller (1988) 將這個理論應用到教育上，他提出「認知負荷理論」(J. Sweller, 1988)，說明學習的內容或方法等在認知架構上所產生的記憶負荷，如何影響學生的學習表現。他所提出的認知負荷理論對人類認知架構有四項基本假設(Mousavi, Low, & Sweller, 1995; John Sweller et al., 1998)：

(一) 工作記憶 (Working Memory) 的容量是有限的。對於新資訊的接收，必須依賴工作記憶對資訊作更深入的認識與理解，理解之後刻意予以保留，使之轉換為長期記憶。

(二) 長期記憶 (Long-Term Memory) 指保持訊息長期不忘的永久記憶 (permanent memory)。而長期記憶的容量是無限的。

(三) 長期記憶中之內容主要以基模 (Schema) 的型態儲存。基模除了在長期記憶中具有儲存及組織資訊的功能外，亦可降低工作記憶區的負荷。

(四) 基模運作自動化 (Schema Automation) 是基模建構的重要過程。藉由充分的練習可以將基模之運作自動化，進而降低工作記憶區之負荷。

由於工作記憶容量對訊息的貯存與處理上是有所限制 (capacity limitation) 的，因此，若同一時間內過多的訊息被放入工作記憶時，就容易造成學習者工作記憶上過度的負荷，而阻礙學習的效果，Sweller 便將這種加諸在學習者認知架構上的負荷稱之為「認知負荷」。

第三節 認知負荷的意義

國內外不同領域的學者對「認知負荷」的定義眾說紛紜，在教育的範疇中，有以下之定義：

Jex (1988) 認為認知負荷是學習者面對學習內容時，感受到「任務要求」與「自身能力」之間，心智負荷差異的評估(Jex, 1988)。

Paas (1992) 認為認知負荷是學習者的心智努力程度與知覺的內容困難度，是一種「多向度」的構念，也就是在執行一個的任務時，加諸於學習者認知系統上的負荷(Fred G Paas, 1992)。

黃克文 (1996) 則認為學習者接收訊息、處理及運用的過程中，會因為訊息內容、學習環境、傳輸環境與互動方式等因素，超越了學習者所知覺的認知能力，可能造成「心理」或「生理」的負擔、苦惱與憂慮，甚至失敗、挫折感。(黃克文, 1996)

黃柏勳 (2003) 認為認知負荷是個體在工作 (學習) 情境下處理訊息時，所感受到心智負荷與心智努力的負荷總量。若此負荷量超出個體所能接受的範圍，將導致個體的認知系統無法負載，進而在心理或生理產生負面知感，並影響工作 (學習) 表現(黃柏勳, 2003)。

綜合上述所言，認知負荷可視為：在執行工作或任務的過程中，個體所感受到認知系統的負載狀態；以訊息處理理論而言，「認知負荷」即為工作記憶的負荷 (working memory load) (陳蜜桃 & 陳埜淑, 2003)。PavloAntonenko 等人 (2010) 的研究中也將認知負荷視為加諸在認知過程上的「工作記憶負荷」(Antonenko, Paas, Grabner, & Van Gog, 2010)。

第四節 認知負荷的來源與類型

Marcus 等人 (1996) 指出，在教學過程中，影響認知負荷的三個因素，分別為 (1) 「學習者的先備經驗」 (Prior experience)：若學習者能將新的訊息與自動化的基模 (先備經驗) 作整合，便能降低工作記憶的負荷。因此，先備經驗的有無可以說是認知負荷的首要來源、(2) 「教材的本質」 (Nature of the Material)：也可以說是教材的難易度，低元件關連的教材可以獨立的被處理，較易於瞭解；反之，高元件關連的教材時，學習者須將較多的元件同時置入工作記憶區中來思考，如此易造成較高的認知負荷而阻礙學習、(3) 「教材的組織」 (Organization)：因應不同資訊的特性時，選用適當的方式來呈現，以避免造成學習者無謂的認知負荷 (Marcus, Cooper, & Sweller, 1996)。

如上述所言，認知負荷的來源是多重的，Sweller 等人 (1998) 以教材設計的觀點，認為影響工作記憶中的認知大致可分為三大類，包含內在認知負荷、外在認知負荷與有效認知負荷，這三種認知負荷在有限的工作記憶中相互作用，影響工作處理的效能，並反應在學習效果，以下說明這三種認知負荷的特性 (John Sweller et al., 1998)：

(1) 內在認知負荷 (intrinsic cognitive Load)：內在認知負荷主要是受到教學內容中元件間相關連的程度而影響，也就是教材內容本身的難易程度。當學習者在面對低元件關連的教材，不需將大量的元件同時置入工作記憶區中，即可瞭解個別的元件，內在認知負荷較低；而在面對高元件關連的教材時，學習者需將大量的元件同時置入工作記憶區中，意即當教材本質較複雜，內容的難度高時，將會造成較高的內在認知負荷。除了教材本身的特性外，學習者的先備經驗亦是一個重要的因子。雖內在認知負荷無法靠教學設計來改變，但仍可考量學習者的認知能力，進而調整教材的難易度。

(2) 外在認知負荷 (extraneous cognitive load)：主要因教材呈現方式、教材設計及教學活動等不同，對資訊接收者造成不同程度的負荷，這樣的負荷稱為

「外在認知負荷」。此種負荷是外加的，可藉由資料呈現、資訊組織等方面的設計來控制，因此如何以不同的教學設計，降低學習者的認知負荷，成為學界致力研究的核心。

(3) 有效認知負荷(Germane cognitive load)：是類似外在認知負荷的一種，無論是訊息提供給學習者的方式或學習活動對學習者的要求，皆是影響有效認知負荷的相關因素，教師藉由教學設計，對學習者增進能力或基模有助益的學習活動所提高的認知負荷，稱之為有效認知負荷，其雖然會增加學習者的負荷感，但卻也能夠促進學習(F. Paas et al., 2003)。

Xie和Salvendy於2000年依據學習的歷程，提出了另一種架構以利於認知負荷的估算，分別為：即時認知負荷(instantaneous load)、最高認知負荷(peak load)、平均認知負荷(average load)、累積認知負荷(accumulated load)、以及一般認知負荷(overall load)(Xie & Salvendy, 2000)。(如下圖2-4-1)

1. 即時認知負荷是學習者依據心智活動難易程度感受到的即時動態變化，也就是說，它能反映出心智在某個時間點，感受到學習活動的難易程度。
2. 最高認知負荷則是反映出學習歷程中，心智負荷的最大值。
3. 一般認知負荷，是針對受試者自我經驗整個學習歷程中，感受的整體認知負荷。

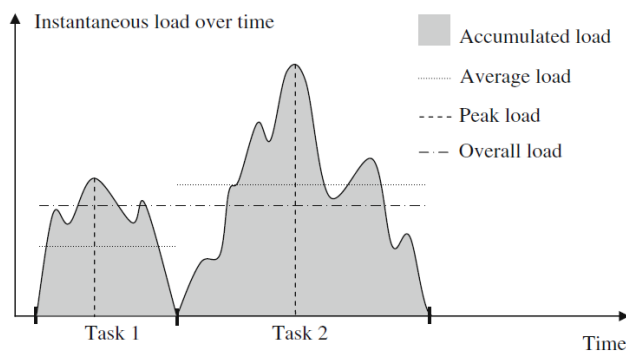


圖 2-4-1 學習歷程的認知負荷圖(摘自 Xie and Salvendy, 2000)

第五節 認知負荷對學習的影響

近年來關於認知負荷的研究顯示：學習者感受到的認知負荷與學習成效間具有顯著相關性，在學習同樣作業時，感受到較低認知負荷學習者的表現往往優於感受到較高認知負荷的學習者(Mayer & Moreno, 2003; van Merriënboer & Sweller, 2005; Yeh et al., 2012)。

認知負荷在數學領域的相關研究中，Ayres 和Sweller(1990)的研究指出：當解題時含有次目標，需要將步驟分為許多階段加以計算時，學習者會產生很大的認知負荷，錯誤率也相對提高(P. Ayres & Sweller, 1990)。

Ayres (2001) 進一步研究數學代數解題，其問題類型都是需多階段解題，研究結果顯示第2步驟的解題錯誤率比第1步驟高，且發現學習者錯誤率並不是來自於不清楚解題方法，而是因為其工作記憶不佳所造成(P. L. Ayres, 2001)。

曹寶龍、劉慧娟和林崇德(2005)研究關於不同程度的認知負荷對小學生工作記憶資源分配的影響，其中，以解題步驟的差異作為不同的認知負荷的指標，研究結果顯示：認知負荷的不同確實會影響小學生解題的策略與結果(曹寶龍, 劉慧娟, & 林崇德, 2005)。

李曉東、聶尤彥、龐愛蓮和林崇德(2003)研究工作記憶對小學三年級學生解決數學「比較問題」的影響，其研究結果顯示：數學問題的類型會影響小學生的工作記憶負荷與解題結果，當學生的工作記憶負荷大時，解題成績便會比較差，表示「工作記憶的負荷」對小學生解題有重要的影響(李曉東, 聶尤彥, 龐愛蓮, & 林崇德, 2003)。

黃克文(1996)的研究中探討了小學生的認知負荷與數學解題成就的關聯，他以自編的量表，測量學習者感受到题目的困難度作為認知負荷量，並與解題時間及解題成績加以分析，其研究結果顯示：解題時間愈長，認知負荷愈高，答對比率愈低；並且認知負荷與數學能力及認知能力呈顯著負相關(黃克文, 1996)。

郭秀緞(2005)以小學生為研究對象，探討認知負荷觀點探討數學問題設計

的適切性，其研究結果顯示：不同的教材設計會影響學生的認知負荷以及學習成績，當學生的認知負荷較低時，解題表現也較佳(郭秀緞, 2005)。

從上述研究中可發現，由於人類的工作記憶容量有限，無論是受到教材難度或是設計編排等影響，當學習者的認知/工作記憶負荷量過大時，便會對學習產生影響。因此，如何有效降低學習者在學習過程感受到的認知負荷，提升學習成效，成為近年來教育範疇中重要的研究議題之一，如 Sweller (2008) 根據認知負荷理論提出了九種可能因教學設計導致的效應，教師便可在教材編排和設計上參考、遵循，來降低負荷量，協助學習者學習(John Sweller, 2008)。



第六節 認知負荷的測量

由於許多研究致力於透過不同的方法降低學習者的認知負荷，因此，如何有效的測量認知負荷便顯得格外重要。不過，過去的研究中，仍沒有一套標準可用來作為認知負荷的測量。Sweller等人(Das, Naglieri, & Kirby, 1994; John Sweller et al., 1998)將認知負荷的分為兩方面：一是個體為了因應任務（工作）需求而產生的負荷感，與任務（工作）的難易程度及教材設計等均有關聯，稱為「心智負荷」；二是個體執行任務（工作）時所付出的認知能量與資源，稱為「心智努力」。Wierwille 和 Eggemeier (1993) 對此提出了三種測量方法 (Wierwille & Eggemeier, 1993)：

(1) **主觀測量方法** (subjective techniques)：主觀測量方法是基於受試者有能力回顧學習認知的過程，並且能明確指出心智努力耗費的程度，通常以評等量表 (rating scale) 方式測量學習者的心智努力。

(2) **生理測量方法** (physiological techniques)：生理測量方法假設認知負荷的改變會反映在生理的變化上，包含心跳、腦中活動、眼睛活動等生理活動的測量 (Sweller, 1998)。

(3) **任務和效能基礎測量方法** (task- and performance-based techniques)：此是藉由客觀的任務（工作）困難度及學習成效來推論學習者的心智努力程度，例如，學習成績，學習速度，錯誤率等。

Rubio, Diaz, Martin & Puente (2004) 提出了評估認知負荷的工具，應具備的幾點特性：除了需具有一定的信度 (reliability) 外，還需考量施測及分析上需耗費的時間、軟體 (implementation requirements) 等，以及受試者的接受度 (subject acceptability)，另外，測量的工具不能干擾所進行的任務 (intrusiveness)、還要能夠偵測任務的困難度 (sensitivity)、能夠分辨工

作記憶負荷的程度差異 (diagnosticity) 、並且能夠只對認知過程的不同產生敏感，而不會對其他變項敏感(selectivity/validity)等(Rubio, Diaz, Martin, & Puente, 2004)。

Gopher & Braune (1984) 發現使用主觀測量方法學習者可以反省自己的認知過程，並藉量表將心智負荷或心智努力程度評量出來(Gopher & Braune, 1984)。Hendy 等人 (1993) 發現，認知負荷量尺本身的特性，如單一或多維度量尺、量尺的大小、或文字說明呈現方式等因素，並不會影響評定的效果(Hendy, Hamilton, & Landry, 1993)。O' Donnell & Eggemeier認為主觀的測量很容易得到，不受干擾且易於分析，並有很高的效度(O' Donnell & Eggemeier, 1986)，因此，主觀量表常被普遍的使用，特別是在教育上的研究(黃克文, 1996)。

Paas等人針對上述三種方法也進一步的探討(Fred G Paas, 1992; Fred GWC Paas, Van Merriënboer, & Adam, 1994)，他們認為利用量尺進行主觀測量來作為認知負荷的測量方法，雖然衡量時可能受到個人差異而有所不同，不過因為施行方便、非侵入性、費用低，且具有較好的信度及效度，在測量上較為可行。

Paas於1992年發展出九點李克特量表，讓學習者可以直接透過九點量尺上評估他們付出的努力（1代表非常低，9代表非常高）； Marcus, Cooper和 Sweller等人則是利用七點量表讓受試者進行「心智努力」的自我評定。結果皆顯示出具有高敏感度與較高的信度，因而愈來愈被廣泛地使用(Marcus et al., 1996; Fred Paas, Tuovinen, Tabbers, & Van Gerven, 2003)。

國內也有許多學者參考國外的做法，如宋曜廷（2000）則是參考van Merriënboer 與 Paas 等人來發展七點量表，由受試者進行閱讀任務後，對自身「所投入的心智努力」和「感受到的閱讀材料困難度」兩向度進行自我的評定，以作為評估閱讀時感受的認知負荷(宋曜廷, 2000)。具體的文字敘述如下：

- 心智負荷量的測量：我覺得自己在學習這份教材時：1. 非常容易 2. 容易 3. 還算容易 4. 難易適中 5. 有點困難 6. 困難 7. 非常困難
- 心智努力的測量：我覺得我花了很大的心力才看懂這份教材：1. 非常不同意 2. 不同意 3. 有點不同意 4. 難以判斷 5. 有點同意 6. 同意 7. 非常同意

雖然主觀測量方法常用於教育領域，不過，因量表僅包含1~2個題目，主要是評估一般認知負荷(overall load)，除了受限於無法測量出「即時的」認知負荷(instantaneous load)外，試題是否能完整反映出學習者認知負荷也深受懷疑。為求測量「即時的」認知負荷(instantaneous load)，學者嘗試透過生理測量方法：如眼動、心電圖等生理訊號來量測，不過，成效不彰且所需花費的機器設備等研究成本較高，成為認知負荷測量上的一大挑戰。

Brunken, Plass 和 Leutner (2003) 提出可以由兩個向度來評估認知負荷：(1) 主觀或客觀 (subjective or objective)、(2) 直接或間接 (direct or indirect) (Brunken, Plass, & Leutner, 2003)。(如下表 2-6-1)

	間接的	直接的
主觀的	受試者自評其投入的心智努力	受試者自評壓力的程度或教材困難度
客觀的	1. 生理測量法 2. 任務和效能基礎測量方法	腦部神經影像測量法 (例如：腦波儀 (EEG)、腦磁波儀 (MEG)、功能性磁振造影 (fMRI) 等)

表 2-6-1 認知負荷評估分類表 (摘自 Brunken, Plass&Leutner, 2003)

依照此分類方法，大致可將認知負荷的測量劃分成四類：

- (1) 間接的、主觀的測量法：如受試者自行利用量表或問卷反映出在學習教材時投入的心智努力程度。
- (2) 直接的、主觀的測量法：如受試者自行評估對於任務(教材)的困難度或感受到的壓力程度等。
- (3) 間接的、客觀的測量法：如測量任務表現結果、分析行為類型及生理條件等。
- (4) 直接的、客觀的測量法：如透過腦部神經影像測量法觀察受試者腦部活動的情形，並與任務表現結果加以比較分析。

由上述分類可知，透過「腦部神經影像」不但直接、客觀，在測量上還具有即時性。同時，隨著醫學技術的提升，各種高科技的腦部顯像工具日新月異，近年來，利用腦波儀(EEG)、腦磁波儀(MEG)、功能性磁振造影(fMRI)等非侵入式的神經影像技術，客觀且同步的測量人類的認知情形已具有相當高的可能性。

第七節腦部神經影像測量法

(一) 腦部影像工具之比較

腦電波(EEG)是腦部電生理活動的訊號，而且大小或頻率會隨著個體所處不同狀態而變化，自然是聯結腦部活動與認知功能極佳的工具。不過，由於各種造影儀器的特性不同(如下表2-7-1)，配合研究課題選擇適合的儀器來觀察是很重要的。今若強調測量時的「即時性」，選擇具有高時間解析度的腦波儀(EEG)與腦磁波儀(MEG)較為適當。

腦磁波儀(Magnetoencephalography, MEG)是觀察腦部皮質的電位變化時的磁場變化，找出細胞放出得極為量的磁波，雖然掃描方法很快，並能提供即時、精確且連續的腦部運作立體影像，不過困難在於收集訊號較弱，易被干擾而看不見，且造價較昂貴，施測時受測者也只能採坐姿或躺姿，限制了施測動作。相較之下，腦波儀(Electroencephalography, EEG)是觀察腦部皮質的電位變化，施測時在頭皮貼上電極，收集頭殼下細胞活動的情形，不但價格較為親民且較不受場地限制，在測量上更具有優勢。並且，由於腦波儀(EEG)擅長在時序上分析認知活動的變化，十幾毫秒內瞬間的腦波都能被記錄下來，因此，我們在測量上便能利用受試者反應的時間快慢的不同加以分析。

儀器名稱	空間解析度 (mm)	時間解析度 (sec)	放射性	價格 (美元)
EEG	>15	≤ 0.001	無	0.1~10 萬
MEG	5	≤ 0.001	無	300~500 萬
MRI	1~3	300~1000	無	100~150 萬
fMRI	3~4	0.05~6	無	200~300 萬
PET	3.5~5	40~1000	有	200~260 萬
SPECT	8~10	600~8000	有	66~110 萬

表2-7-1 腦部影像工具之比較表

註：空間與時間解析度的值愈小代表解析度愈高

資料來源：整理自” High resolution EEG: 124-channel recording, spatial deblurring and MRI integration methods,” by Gevin, A., Le, J., Martin, N. K., Brickett, P., Desmond, J., & Reutter, B., 1994, *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 90, 337-358. 與 ” EEG: - fMRI: Physiological basis, technique, and applications,” by Mulert, C., & Lemieux, L., 2009, Berlin, German: Springer Press.

目前已有學者使用神經影像測量認知負荷，不過皆是從「工作記憶」著手，本研究亦是如此。因為Sweller提出的「認知負荷理論」中，對人類認知架構的基本假設提及了工作記憶容量對訊息的貯存與處理上是有所限制的，若同一時間內過多的訊息被放入工作記憶時，就容易造成學習者工作記憶上過度的負荷，而阻礙學習的效果，這種加諸在學習者認知架構上的負荷稱之為「認知負荷」。

這表示「認知負荷」某種程度上也可以說是工作記憶的負荷(working memory load) (陳蜜桃 & 陳埤淑, 2003)。因此，在探討學習者的認知負荷時，我們便能利用量測的工作記憶負荷來評估。

第八節 利用腦部神經影像進行與工作記憶相關研究

(一)頂葉(Parietal Lobe)

Roland 和Friberg(1985)的研究是第一個探索人類處數學能力相關神經區域的實驗，它利用「正子斷層造影(Positron emission tomography, PET)」作為研究工具，研究結果顯示，頂葉及額葉的新陳代謝在複雜計算過程中會增加。這研究的結果和之前從腦傷病人的研究結果發現一致，證實「頂葉」在處理數字上扮演關鍵角色(Roland & Friberg, 1985)。

Dehaene 等人(2003)的研究回顧相關的神經生理證據，並利用「功能性磁共振造影(functional magnetic resonance imaging, fMRI)」觀察在不同數字作業時腦區的活化表現，區分出大腦頂葉區域在與數相關處理時的活動情形。他們提出三個頂葉區域在數相關作業中運作的部位及其處理機制：

bilateralposterior parietal lobes (PSPL)、left angular gyrus (AG) 和 bilateral horizontalsegment of the intraparietal sulcus (HIPS)。PSPL 與視覺空間處理有關；AG 與數的語言處理(verbal processing)相關；而HIPS 則與表徵數量有關，無論呈現方式是用阿拉伯數字、數字文字或點數(dots)，當受試者注意到數量時，HIPS 皆會活化。(Dehaene, Piazza, Pinel, & Cohen, 2003)

Lee (2000) 的「fMRI」實驗中觀察兩種不同運算方式的大腦活動，發現在做精算時，特別是相對於數學減法作業，數學乘法作業有比較多由長期記憶中提取數值，頂葉區域left angulargyrus的活化程度較高。(Lee, 2000)

顏乃欣、郭文瑞等人(2014)的研究以「額葉」與「頂葉」為主要觀察的腦區，並利用「fMRI」實驗探討數學乘法運算上題型變化上的所造成的認知負荷與大腦活動之關係，研究結果中顯示：不同的數字負荷對心算者的認知負荷會造成影響，主要表現的區域在左右腦之medial frontal gyrus、superiorparietal lobule 以及inferior parietal lobule 區域，並且在認知負荷量大的情況下，

「左腦」有較大的活化。

(二) 內側顳葉 (medial temporal lobe)

早期嘗試將記憶系統具體化的研究是從病患及動物的病變研究開始，而結果顯示內側顳葉 (medial temporal lobe, MTL) 與長期記憶的編碼及提取相關 (Penfield & Milner, 1958; Scoville & Milner, 1957)，與短期記憶中工作記憶的維持則沒有相互間的關係 (Cave & Squire, 1992)，而這樣的結果在一些學者研究中提出質疑。

在「fMRI」及臨床的研究中，發現 MTL 在工作記憶實驗中，不管是一個項目或是多個項目的維持，MTL 都有著一定的貢獻 (Aggleton, Shaw, & Gaffan, 1992; Nichols, Kao, Verfaellie, & Gabrieli, 2006; Ranganath & D'Esposito, 2001; Schon, Hasselmo, LoPresti, Tricarico, & Stern, 2004)。

Nichols 等人 (2006) 利用「fMRI」來觀察 MTL 對於工作記憶中的維持是否有密切的關係，作者利用兩種測驗來評量工作記憶與長期記憶，結果顯示在工作記憶維持的期間，顳葉中的海馬迴被活化，這與長期記憶編碼時的活化區域重疊，也就是說不管在工作記憶的維持或是長期記憶的編碼中，所使用的腦區是相同的 (Nichols et al., 2006)。

後來也有研究提出了不同的結果，當大腦在進行對資訊的編碼及處理的過程中，MTL 就有活化的現象 (Cohen & Eichenbaum, 1993; Eichenbaum, 2004; Eichenbaum, Dudchenko, Wood, Shapiro, & Tanila, 1999; Henke, Weber, Kneifel, Wieser, & Buck, 1999; Jensen & Lisman, 2005; Kumaran & Maguire, 2006; Schendan, Searl, Melrose, & Stern, 2003)，進一步確認 MTL 與工作記憶間的關係。

(三)額葉 (Frontal Lobe)

許多相關研究指出：個體執行工作記憶作業時，「額葉區」負責處理工作記憶中的記憶、提取，因此扮演了重要角色(Callicott et al., 1998; Jansma, Ramsey, Coppola, & Kahn, 2000; Owen, 1997; Owen, McMillan, Laird, & Bullmore, 2005)。且「額葉區」的「Theta波」會隨著任務難度的增加而隨之活躍(Jensen & Tesche, 2002; Klimesch et al., 2001; Onton, Delorme, & Makeig, 2005)。

也有研究說明了工作記憶主要活性區域是在「額葉」(Fingelkurts et al., 2003; McEvoy, Smith, & Gevins, 2000; Winterer et al., 2004)。

Dalley, Cardinal, and Robbins (2004)在綜評文章中指出：腦前額葉(prefrontal cortex)與多種認知過程和執行控制過程(executive processes)有關，包含了工作記憶(working memory)、下決策、抑制性反應控制(inhibitory response control)、注意力的轉換心向(attentional set-shifting)以及時間整合(temporal integration)等(Dalley, Cardinal, & Robbins, 2004)。

Jensen, Claudia D. Tesche (2002)的研究中，使用「MEG」來測量工作記憶，並對於「前額葉」的「Theta波」進行觀察，研究結果顯示：(1) Theta波段的能量會隨工作記憶的提升而增加、且(2)當運用工作記憶瀏覽及記憶時，相關的theta值會伴隨著出現，在記憶任務結束後，theta值便隨之下降，也就是說，Theta波段的能量在記憶期間會有持續性的活動(Jensen & Tesche, 2002)。

Gevins (1997)利用「EEG」進行與工作記憶相關的實驗，其研究結果顯示：當實驗難度提高時，「前額 θ 波」的強度也隨之升高，而此時前額 θ 波對於實驗中刺激物所傳遞的資訊形式並不敏感，也就是說前額 θ 波不因刺激物的資訊型態改變而在強度上有顯著變化；而當實驗的操作時間拉長後，受試者即使在之前的實驗已經歷過多次的練習與操作，前額葉 θ 波的強度仍然呈現上升的現象(Gevins, Smith, McEvoy, & Yu, 1997)。

廖宇璉 (2009) 在想像幾何旋轉動作與數學心算的研究中，利用「EEG」進行分析發現，數學题目的難易程度與大腦能量的激發成正比，且大腦在處理數學算術問題時，額葉區及頂葉區的能量較活躍，反觀枕葉區顯得較不活躍，而大腦想像空間旋轉動作時，空間能量特徵與數學認知行為相似，都是在大腦「前額葉」的能量最為顯著(廖宇璉, 2009)。

顏世杰(2007)在探討記憶、概念與心算複雜度在腦波的反應與評估研究中，實驗結果顯示，當受試者在使用大腦前額的功能愈複雜時，大腦 θ 波平均功率就會愈大，反之就愈小。(顏世杰, 2008)

Mizuhara 等人(2005)利用 fMRI 和 EEG 來研究人類處理數學運算時大腦的活動情形，透過 fMRI 量測到大腦中血氧濃度的結果及腦電波的變化發現：大腦在進行數學減法運算時，大腦反應的區域發生在左腦角迴和右腦頂葉較高區域之間，另外右腦「背側前額葉皮質層(DLPFC)」也是能量集中的區域(Mizuhara, Wang, Kobayashi, & Yamaguchi, 2005)。

DLPFC (dorsolateral prefrontal cortex)

當我們針對「背側前額葉皮質」(dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC) 進一步探討時可發現，與工作記憶相關的「語音迴路」可能是由大腦左半邊所控制，包含了顳葉及布氏區 (Broca's area)，「視覺」則受大腦右半邊影響，包含了 fronto-parietal cortex 及頂葉皮層，而「中央執行系統」則是由前額葉皮質所影響，其中，「背側前額葉皮質」在各種執行過程中扮演了關鍵的角色。

Funahashi 等人(1989)利用空間工作記憶的實驗來研究猴子的前額葉皮質，研究結果顯示，DLPFC 負責處理大腦接收資訊後的維持。(Funahashi, Bruce, & Goldman-Rakic, 1989)

D'Esposito 等人(1999)發現 DLPFC 在視覺與聽覺並行的工作記憶任務中，扮演著協調的重要角色，為了進一步確認 DLPFC 在工作記憶中的重要性

(D'Esposito, Postle, Ballard, & Lease, 1999), Barbey 等人 (2013) 研究了患有 DLPFC 損傷的病患，結果顯示，病患有處理聽覺與視覺資訊上的缺陷。這些研究都指出 DLPFC 與工作記憶間的關係(Barbey, Koenigs, & Grafman, 2013)。

另一方面，當學者進一步探索 DLPFC 與工作記憶表現之間的關係時，發現藉由工作記憶的訓練可以改變 DLPFC 的活動。Jansma 等人 (2001) 的研究中顯示在持續練習聽覺的 Sternberg 實驗下，左側 DLPFC 的活化會減少，任務的反應時間變短，準確率提升(Jansma, Ramsey, Slagter, & Kahn, 2001)；Olesen 等人 (2004) 研究結果顯示，藉由視覺空間工作記憶實驗的訓練，會增加右側 DLPFC 的活化，訓練後的反應時間也會跟著減少(Olesen, Westerberg, & Klingberg, 2004)。

小結

根據上述的研究結果，個體在執行工作記憶任務時，頂葉區、顳葉區及額葉區皆可能也有所涉及，不過，因為本研究使用儀器為「可攜式腦波儀」，我們在選擇測量位置時需考量以下兩點：

1. 準確性：可攜式腦波儀在設計上為求輕便、方便測量，因此在硬體設計上的接孔比較少，以減少受試者的不適，但就表示我們只能選擇最可能量測到的點來測量。
2. 電極貼片限制：可攜式腦波儀的貼片無法黏貼於有毛髮的位置。

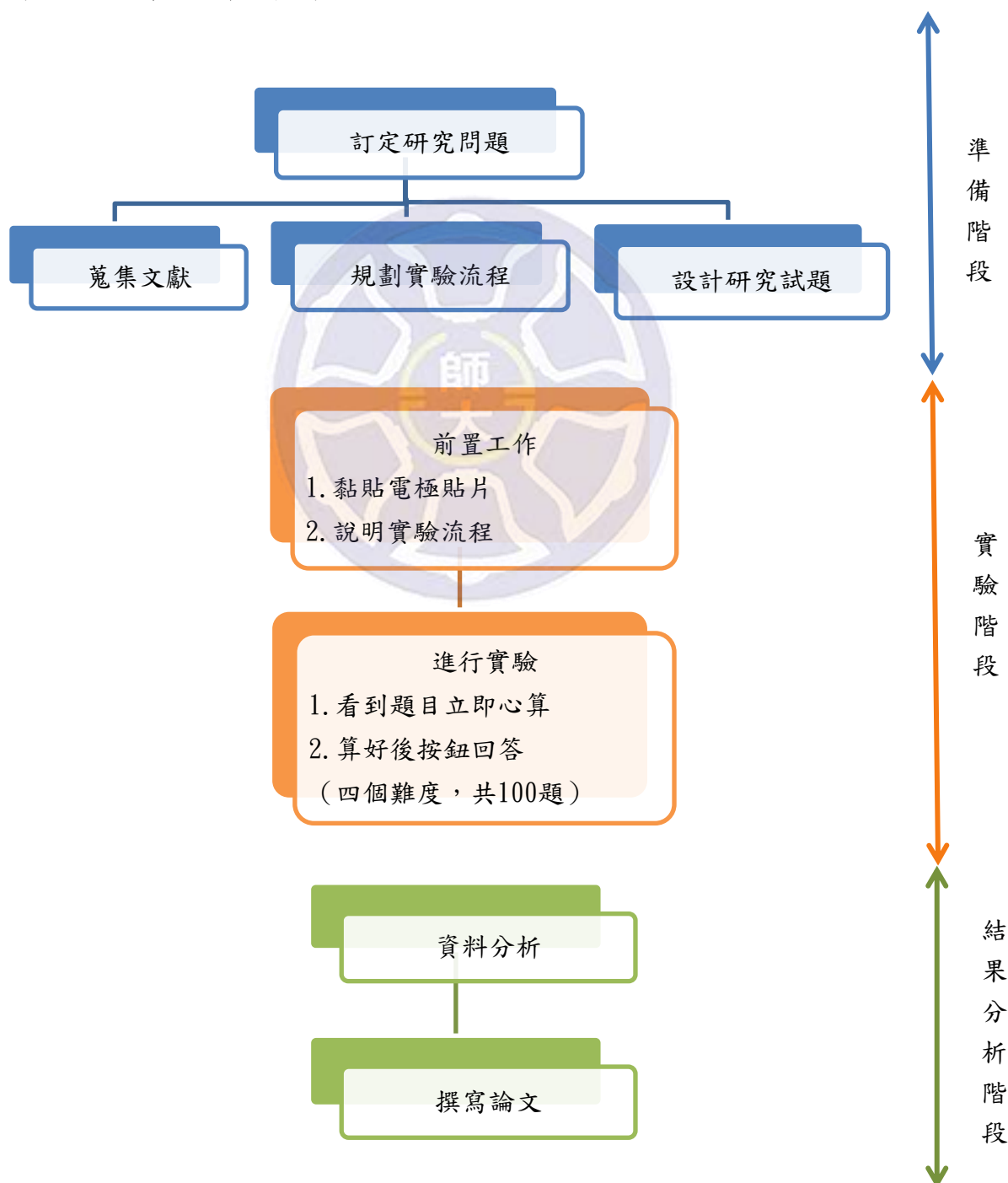
因此，由於許多文獻指出個體執行工作記憶作業時，「額葉區」扮演了重要角色，且額葉區的位置可讓電極貼片直接接觸測量，本研究初步先選擇以「額葉區」來量測，並為了觀察 DLPFC，電極貼片除了黏貼前額葉外，還黏貼前額葉的左、右側共三點來測量。

第三章 研究方法

第一節 研究流程

本研究的目標是期望利用可攜式腦波儀即時偵測學習者的認知情形，因此，將發展相關演算法，確認學習者的腦波隨難度變化的情形。本研究共可分為三個階段如下圖，分別為準備階段、實驗階段及結果分析階段：

圖 3-1-1：研究細部流程圖



一、準備階段

訂下研究主題後，便開始閱讀及蒐集相關文獻，初步規劃實驗流程（包含設計實驗進行步驟、設計研究試題以及選定研究對象、研究地點）。另外，在研究工具上，雖然主要硬體已發展完成，研究者仍需確認量測方法、電極貼片黏貼位置等。

二、實驗階段

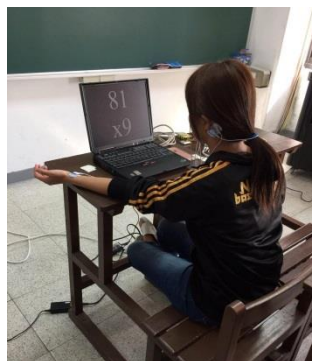
(1) 前置工作：

由於腦波實驗容易受訊號干擾，所以實驗場所是在一個封閉的空間，實驗開始前會為受試者貼上電極貼片，講解流程及提醒受試者在實驗全程都必須使用心算，並且不能用任何可以幫助運算的方式及工具。在受試者了解所有實驗流程後，會先做一個實驗前的試測，以確保受試者熟悉實驗，降低出錯率。

(2) 實驗進行：

正式實驗開始時，我們會讓受試者進行四個難度的數學乘法測驗，各個難度間的休息時間為5分鐘。在實驗中我們會要求受試者在題目出現時開始心算，確認答案後按鈕完直接回答，盡量避免按鈕完還在思考答案，也確保我們所量測到的都是受試者在心算的時間。

圖 3-1-2：實驗進行示意圖



三、結果分析階段

此階段可分為資料分析與論文撰寫兩部分，整理實驗蒐集的數據後進行資料分析，並發展演算法以觀察各個難度間的相關性。最後進行論文撰寫。

第二節 研究對象與研究工具

一、研究對象

本研究對象為隨機選擇約 20 位大學學生，年齡介於 20—25 歲之間的男、女性，身心健康，無任何腦部疾病或精神病史，而且所有受試者皆無心算背景，以確保數學心算時進位的方法一致，進而觀察受試者的答題狀況。

一、研究工具

(一)可攜式腦波儀

本研究的測量工具是「可攜式腦波儀」，主要硬體已發展完成，如圖 3-2-1(左圖：包裝前；中圖：包裝後)，包括晶片、藍芽傳輸、已及電極三個部分。

圖 3-2-1 可攜式腦波儀示意圖



雖然市面上也有出售類似這樣的儀器，不過往往受限於收到的資料無法傳輸出來，因此本研究所使用的可攜式腦波儀，是與中央大學合作開發，其包含的藍芽傳輸系統，便可及時將偵測得數據立即傳輸。

不過，因為可攜式腦波儀的電極並不是像傳統腦波儀利用電極帽，而是鈕釦式的電極貼片，這樣的測量方法會受限於電極貼片無法附著在有毛髮的頭皮上，並且可攜式腦波儀的訴求是希望儀器本身輕便，因此，我們需選擇最可能量測到的點來觀察，因此，本研究便選擇前額葉以及前額葉的左、右側三點來測量如右圖。

(二)實驗試題設計

本研究希望能依受試者運算數學乘法題目時所量測到的腦波，分析並探討腦波是否隨著難度而有規律的變化以及各個難度相關性的比較。

在本次實驗中，數學乘法運算總共有四個難度，以進位個數的不同來區分(如下表 3-2-1)，題型分別是二位數乘以一位數(進位次數一次)、二位數乘以一位數(進位次數兩次)、三位數乘以一位數(進位次數兩次)、三位數乘以一位數(進位次數三次)，而進位次數的定義利用題目範例來做個解釋，題目範例如下表所示，在難度一的中 23 乘以 4，4 乘以 3 為 12，在直式計算中必須在個位數寫 2 並進位 1，接下來 4 乘以 2 等於 8 再加上進位的 1，所以十位數為 9，進位次數為一次；難度二 36 乘以 6，6 乘以 6 為 36，直式計算中在個位數寫 6 並進位 3，接下來 6 乘以 3 等於 18 加上進位 3 所以為 21，進位次數為兩次；難度三與難度四的進位次數判別以此類推。

	難度一	難度二	難度三	難度四
範例	$\begin{array}{r} 23 \\ \times 4 \\ \hline 92 \end{array}$	$\begin{array}{r} 36 \\ \times 6 \\ \hline 216 \end{array}$	$\begin{array}{r} 343 \\ \times 3 \\ \hline 1029 \end{array}$	$\begin{array}{r} 278 \\ \times 7 \\ \hline 1946 \end{array}$
進位次數	一次	兩次	兩次	三次

表 3-2-1 試題難度定義表

第三節 分析方法

腦神經認知科學的探討中，大多將腦波的分析方法分為時間域、空間域和頻率域：

(一) 時間域的特徵分析

當感官受到外界刺激時，腦電波會產生相應的電位變化，此類的電位變化往往是很微弱的，而產生的時間點往往是在接受外界刺激前後的數百毫秒，此類時間域上的特徵，稱為事件關聯電位（ERP，Event relative potential）。事件關聯電位指的是當受到外加的刺激，作用於感覺系統或腦的某一部位時，在大腦所引起的電位變化。其優勢是具有很高的時間域分辨率（毫秒），可與傳統的心理學指標相互比較、配合，進而進行關於認知過程的研究。

近年來，許多研究在評估受試者面臨不同工作記憶或認知負荷作業時的腦波差異時，便經常使用大腦神經細胞所產生的事件關聯電位(ERP)搭配與工作記憶相關的標準化測驗來分析，如：n-back實驗、魏氏智力量表或是語文工作測驗(曾世杰，2006)等。

如 Anne-Marie Brouwer 等人 (2012) 透過 EEG 的頻譜及 ERP 分析方法來觀察 n-back 實驗時的工作記憶，他們針對正確率及反應時間進行探討，並發現受試者答題的「正確率」會隨著難度的提升而降低，「錯誤率」隨難度提升而提高；「反應時間」則是隨難度提升而增長，而這三個部分的結果彼此在統計上都達到顯著的差異。因此，這樣的研究結果可反映出：利用 EEG 頻譜能量搭配 ERP 分析方法來評估工作記憶是可行的，因為隨著任務難度提升，工作記憶會增加而且任務績效會降低(Brouwer et al., 2012)。

(二) 空間域的特徵分析

由於大腦認知科學是在研究腦的各部分結構和功能，因此，了解這些部份如何參與腦的整體工作是很重要的，且分析大腦執行各類工作(如：記憶、演講等)時的「能量分布」與負荷的差異性，同樣是認知科學研究的重點。

(三) 頻率域的特徵分析

腦電波是由許多不同頻段的電訊號組成，在不同的精神或工作狀態下，大腦會出現以不同頻帶為主的腦電波，大致上主要探討的頻段可分為 Alpha (α)、Beta (β)、Theta (θ)及 Delta (δ)：

- (1) α 波—俗稱輕鬆腦波，根據腦波儀與臨床生理學會國際聯盟 (International Federation of Societies for Electroencephalography and Clinical Neurophysiology) 的定義：Alpha (α) 波主要和放鬆的心理狀態連結。因此，相關研究幾乎是有相關於睡眠的研究。人在身體放鬆、專注、平靜的狀態下，身心耗能較少，腦部相對地所獲得的能量較高。
- (2) β 波—俗稱緊張腦波。此波頻率為 14Hz 以上，一般很少高於 50Hz。人在備戰狀態，準備隨時因應外在環境時， β 波便會增加。一般人日常生活中，大部分是處在這種狀態，清醒及警覺時尤其明顯，也是邏輯思考、計算、推理時需要的波，屬於「意識層面」的波，在頂葉部及額葉會較明顯。由於大腦能量除了要維持本身系統身體運作外，還要準備防禦，因而消滅的體內的免疫系統能力。在此狀態下，人的身心能量耗費較劇，如果事後沒有充分放鬆、充電回補，非常容易累積壓力。
- (3) θ 波—俗稱打盹腦波，此波頻率介於 4-8 Hz，出現在深睡做夢或深度冥

想時特別明顯，屬於「潛意識層面」的波。這時身體深層放鬆、意識靜止，是一種高層次的精神狀態。這時腦內會分泌大量的荷爾蒙，可修補生理大腦機能。目前 Theta 波的相關研究大多在於探討認知過程及與短期記憶鏈結的機制， θ 波與腦部邊緣系統有非常直接的關係，對於觸發深層記憶、強化長期記憶（LTP）等幫助極大，所以，在科學界稱 θ 波為「通往記憶與學習的開門」。

- (4) δ 波—此波頻率介於 0.5-4 Hz，出現在熟睡中，人是在無意識的狀態，在嬰兒睡眠中及以及有嚴重器官性疾病的患者身上尤其明顯，主要出現在兒童的枕葉部，及成人的額葉部。

小結

以上說明了三種常見的分析方法，而過去認知心理學研究曾嘗試分析受試者面臨不同工作記憶或認知負荷作業時的腦波差異，但多半運用事件關聯電位來分析(ERP)。然而，本研究希望能即時分析學習者在「學習歷程」中感受的認知負荷，運用 ERP 分析是相當困難的。這是因為學習的歷程難以定義「事件」的定位點，因此在腦波的分析上，我們更需要可以擷取「一段時間內的平均腦波」，而非評估「某個時間點的腦波」。

考量上述原因，本研究在發展認知負荷相關的腦波演算法時，參考過去許多學者提出 α 腦波與 θ 腦波與工作記憶的關係：

α 腦波

在 1920 年代晚期，Hans Berger 為人類第一個使用腦電波的學者，而主要的特徵為 alpha 波的振盪活動，雖然 α 波段是 EEG 及 MEG 常見的研究主題，但他在認知過程中的實際作用還不是這麼明確，有學者提出 α 活動是在大腦放鬆的準備階段(Adrian & Matthews, 1934; Pfurtscheller, Stancak, & Neuper, 1996)，而這樣的概念近期也受到工作記憶研究的質疑，學者提出 alpha 活動會在工作記憶需求時增強(Jensen, Gelfand, Kounios, & Lisman, 2002; Klimesch, Doppelmayr, Schwaiger, Auinger, & Winkler, 1999)，Jensen 等人 (2002) 提出在 Sternberg 實驗中，使用的刺激材料為人的臉孔，研究結果顯示 α 活動會隨著記憶負荷而增加。

Krause et al. (1996) 指出， α 波的活動強度隨著聽覺記憶量增加而增強。同樣地，有些實驗結果顯示，隨著在短期記憶系統中的工作記憶量越來越高，後腦與兩測中央處的 α 波強度也有系統地越來越強(Krause, Lang, Laine, Kuusisto, & Pörn, 1996)。 α 波還可以進一步分為 slow- α 波(8~10 Hz)與 faster- α 波(10~12 Hz)，slow- α 波的強度會隨著實驗難度提高而減弱，同時也隨著實驗時間，亦即工作時間的拉長而增強；slow- α 波的強度對實驗的刺激物形式並不敏感，亦即 slow- α 波並不因刺激物型態不同而在強度上有顯著差異；但 faster- α 波則會因實驗難度的提高，發生在空間辨認實驗其強度弱於字義辨認實驗的情況，也就是說，faster- α 波的強度在高難度工作下，會隨著刺激物型態的不同而有所變化(Gevins et al., 1997)。但 Klimesch et al. (1997) 則發現在進行有關語義的記憶過程時，faster- α 波的強度是呈現降低的現象，並認為 faster- α 波是反應大腦從長期記憶系統中提取記憶的情況(Klimesch, Doppelmayr, Pachinger, & Ripper, 1997)。

另外，工作記憶與 α 波的活動有許多不同的解釋，其中一種解釋是 α 波活動反應了後腦區的脫離及抑制(Cooper, Croft, Dominey, Burgess, & Gruzelier, 2003; Jensen et al., 2002; Klimesch, Doppelmayr, Roehm, Pöllhuber, & Stadler, 2000; Vanni, Revonsuo, & Hari, 1997)，當工作記憶的需求增加時，不需要用到的腦區就被解除，所以工作記憶負荷越大時，需要脫離的力量就越強， α 波的能量也就隨之增強；另一個解釋則說明 α 波活動與工作記憶維持間的關係，所需維持的項目越多， α 波的能量就越強。

Anil M. Tuladhar 等人(2007)利用 MEG 來記錄大腦的活動，搭配 Sternberg 實驗，並使用人臉作為刺激材料，結果顯示後腦區 α 波活動伴隨著記憶負荷提升而增加，並藉由 MRI 觀察到 α 波來源定位於頂葉—枕葉附近的腦區域。(Tuladhar et al., 2007)

θ 腦波

在 Theta(θ) 波的相關研究發現，在記憶實驗中，當實驗操作與回憶實驗內容之間有一段為期數秒以上的時間間隔時，前額「 θ 波」反應出短期記憶中訊息回憶的情形(Frisk & Milner, 1990)。

也有學者指出， θ 波反應大腦在處理工作記憶時的狀態，當 θ 波的強度逐漸增強時，就表示大腦處理短期記憶的負荷量也逐漸升高(Klimesch et al., 1997)。就 θ 波產生反應的位置而言，也有學者表示在記憶實驗中，當大腦試圖去提取工作記憶時，從「額葉到頂葉」所反映的電極群偵測到其所在的位置，「 θ 波」的強度顯著地升高(Sarnthein, Petsche, Rappelsberger, Shaw, & Von Stein, 1998)。

Jensen, Claudia D. Tesche (2002) 的研究中，使用「MEG」來測量工作記憶，並對於「前額葉」的「 θ 波」進行觀察，研究結果顯示：(1) θ 波段的能量

會隨工作記憶的提升而增加、且(2)當運用工作記憶瀏覽及記憶時，相關的 θ 值會伴隨著出現，在記憶任務結束後，theta值便隨之下降，也就是說， θ 波段的能量在記憶期間會有持續性的活動(Jensen & Tesche, 2002)。

Gevins(1997)利用「EEG」進行與工作記憶相關的實驗，其研究結果顯示：當實驗難度提高時，「前額 θ 波」的強度也隨之升高，而此時前額 θ 波對於實驗中刺激物所傳遞的資訊形式並不敏感，也就是說前額 θ 波不因刺激物的資訊型態改變而在強度上有顯著變化；而當實驗的操作時間拉長後，受試者即使在之前的實驗已經歷過多次的練習與操作，前額葉 θ 波的強度仍然呈現上升的現象(Gevins et al., 1997)。

除此之外，在有關記憶階層的研究中，有學者提到當受試者正試圖從長期記憶系統(LTMS)中提取記憶時，會激發 θ 從額葉散播往頂葉；而當記憶已從長期記憶系統中被提取後， θ 波則以相反的方向行進，即從頂葉往額葉的方向散播(Sauseng et al., 2002)。

由於另有許多相關研究指出額葉區的 θ 波會隨著任務難度的增加而隨之活躍(Jensen & Tesche, 2002; Klimesch et al., 2001; Onton et al., 2005)，而 α 波與工作記憶的關係還不是那麼明確。因此，本研究初步以「 θ 腦波」為演算基礎的分析法，嘗試評估受試者感受到的認知負荷，並將其與試題難度間的相關性進一步分析。

第四節 資料處理

腦波訊號處理

本研究中，我們所設定的腦波取樣頻率為 250，意思是每秒會量測到 250 個腦波資料點，本實驗量測腦波訊號主要有三個位置，分別為前額葉及前額葉的左右兩側，而經實驗所得到的腦波訊號數據中常常會含有許多雜訊，這些雜訊可能來自於眼動、心跳、呼吸或是在環境中受 60Hz 交流電所干擾的訊號，所以第一步就是將這些雜訊去除以便後面的資料分析，我們設計一個濾波器將環境中 60Hz 的訊號去除，並利用 `filtfilt` 指令來做正向及反向的濾波，其目的是為了讓相位不要有延遲的情形，讓量測的時間範圍更準確。

接下來將處理好雜訊的數據利用「傅立葉轉換」公式，在訊號分析上，傅立葉轉換 (Fourier Transformation) 是相當好用的工具，傅立葉轉換就是從複雜波形中把不同頻率分解出來，計算每一種頻率所占的比率，透過傅立葉轉換後，原本複雜的波形便可以分析成不同頻率的單頻波。相較於傳統的傅立葉轉換，快速傅立葉轉換能減少計算量，讓運作更為順暢，本研究即是使用快速傅立葉轉換，將原本是時域的數據轉換成頻譜的訊號。

本次實驗無法使用事件關聯電位的分析方式是因為當受試者在運算數學乘法時，是屬於連續的過程，而這個學習過程無法定義出一個事件點，而是要量測「一段時間」的腦波，所以我們觀察的範圍為題目出現到受試者按鈕回答的這段時間，並把要觀察的 theta 頻段取出來，接下來算出每一題的頻率能量，在實驗中的四個難度皆有 25 題，我們將這 25 題的頻率能量做一個平均的動作，來觀察四個難度間的相關性。

第四章 研究結果

研究結果一：本研究的數學乘法試題確實有難度上的不同

依據受試者的行為資料，我們可以發現：當難度提升時，受試者作答的正確率跟著下降，證實了我們所設計的題型的確有難度上的區別。這表示某種程度上確保了我們實驗的可信度。

受試者	難度一正確率	難度二正確率	難度三正確率	難度四正確率	平均正確率
1	100%	96%	92%	92%	95%
2	100%	92%	92%	72%	89%
3	96%	96%	80%	80%	88%
4	100%	100%	92%	72%	91%
5	96%	96%	88%	72%	88%
6	100%	96%	92%	48%	84%
7	96%	96%	92%	80%	91%
8	96%	96%	88%	64%	86%
9	100%	100%	100%	96%	99%
10	96%	100%	100%	92%	97%
11	100%	92%	100%	56%	87%
12	100%	100%	96%	80%	94%
13	100%	100%	92%	92%	96%
14	100%	80%	80%	84%	86%
15	96%	96%	84%	64%	85%
16	96%	100%	100%	88%	96%
17	100%	76%	84%	72%	83%
18	92%	92%	92%	72%	87%
19	100%	96%	100%	100%	99%
20	100%	100%	100%	96%	99%
平均值	98%	95%	92%	79%	91%
標準差	2%	6%	7%	14%	5%

表4-1-1 正確率隨難度變化表

研究結果二：本研究的數據呈高度相關，尤其是在前額葉右側的位置

依據可攜式腦波儀測得各個受試者前額葉及前額葉左、右側在不同難度下

θ 波的能量平均值如下表：

前額葉

受試者	前額葉			
	難度一	難度二	難度三	難度四
1	0.03048	0.05552	0.06532	0.09638
2	0.01134	0.03095	0.03035	0.05003
3	0.03225	0.03717	0.05676	0.05896
4	0.02533	0.04229	0.05250	0.06115
5		0.03095	0.06795	0.06343
6		0.01945	0.02520	0.02679
7	0.03670	0.05267	0.05585	0.08546
8	0.02416	0.03145	0.04574	0.05671
9	0.03761	0.05312	0.05260	0.05850
10	0.03470	0.04442	0.03845	0.03573
11	0.03998	0.06629	0.05852	0.09649
12	0.02778	0.04770	0.05898	0.08080
13	0.03638	0.03896	0.05443	0.05854
14	0.25691	0.24494	0.24078	0.32674
15	0.19261	0.25617	0.46361	0.79338
16	0.03009	0.04081	0.05284	0.07808
17	0.31681	1.01492	1.18230	2.18913
18	0.13113	0.22410	0.35227	0.37262
19	0.53874	0.56630	0.69081	0.60991
20	0.06231	0.04482	0.72061	0.04731
平均值	0.10363	0.14715	0.21829	0.26231
標準差	0.14004	0.24306	0.31429	0.49894

表4-1-2 前額葉在不同難度下 θ 波能量平均值表

(上表中缺值表示實驗中未量測到數據)

前額葉左側

受試者	前額葉左側			
	難度一	難度二	難度三	難度四
1	4.18367	0.05603	0.06968	0.10302
2	0.64273	0.98754	0.71559	3.38978
3	0.25563	0.04046	0.05877	0.05853
4	0.02191	0.03432	0.04497	0.04925
5		0.02537	0.07083	0.04653
6		0.01718	0.02387	0.0276
7	0.02853	0.04278	0.04473	0.06669
8	0.02502	0.03435	0.05091	0.06559
9		0.03599	0.03747	0.0562
10	0.03678	0.03646	0.03301	0.02822
11	0.02906	0.05038	0.04485	0.07173
12	0.5654	0.79679	2.20926	0.63124
13	0.99259	1.0483	1.27334	1.04018
14	5.00882	5.58391	4.85314	26.866
15	33.7335	16.2312	0.47201	5.67012
16	0.26545	3.54486	0.04347	0.06485
17	0.59053	1.0892	1.19644	2.21102
18	1.58964	1.54519	1.80917	1.72914
19	31.2081	7.6501	45.3655	47.4815
20	0.09694	0.08514	1.2776	0.243
平均值	4.6632	1.94678	2.98473	4.49501
標準差	10.5758	3.94853	10.0447	11.7547

表4-1-3 前額葉左側在不同難度下 θ 波能量平均值表

(上表中缺值表示實驗中未量測到數據)

前額葉右側

受試者	前額葉右側			
	難度一	難度二	難度三	難度四
1	0.02644	0.05499	0.05965	0.0854
2	0.01101	0.02946	0.02894	0.04526
3	0.0291	0.03536	0.05247	0.05353
4	0.01977	0.03651	0.04257	0.05007
5		0.01865	0.03861	0.0392
6		0.01272	0.01585	0.01757
7	0.02259	0.03171	0.0337	0.05087
8	0.02012	0.02609	0.03782	0.05267
9	0.0224	0.03363	0.03159	0.03482
10	0.02205	0.0295	0.02622	0.02721
11	0.02651	0.0435	0.03909	0.06346
12	0.01531	0.02537	0.03225	0.04172
13	0.02057	0.02399	0.0302	0.0338
14	0.20657	0.19046	0.18191	0.24367
15	0.17283	0.2384	0.44374	0.77572
16	0.01904	0.02276	0.03063	0.0436
17	0.3227	1.02597	1.19571	2.2127
18	0.09486	0.16562	0.26507	0.28193
19	0.41731	0.43979	0.52317	0.46147
20	0.09647	0.08959	0.65755	0.04448
平均值	0.08698	0.1287	0.18834	0.23296
標準差	0.11848	0.23593	0.30314	0.50257

表4-1-4 前額葉右側在不同難度下 θ 波能量平均值表

(上表中缺值表示實驗中未量測到數據)

接著，我們再依據試題難度與 θ 波能量平均值進行相關性分析，可以由下表發現，貼在前額葉及前額葉左右側的數據皆呈高度相關，表示整體的預測力很高，尤其是前額葉右側的位置，相關性最高。

受試者	前額葉	前額葉左側	前額葉右側
1	1	-0.2	1
2	0.8	0.8	0.8
3	1	-0.4	1
4	1	1	1
5	0.5	0.5	1
6	1	1	1
7	1	1	1
8	1	1	1
9	0.8	1	0.8
10	0.2	-1	0.4
11	0.8	0.8	0.8
12	1	0.4	1
13	1	0.4	1
14	0.2	0.4	0.2
15	1	-0.8	1
16	1	-0.6	1
17	1	1	1
18	1	0.6	1
19	0.8	0.8	0.8
20	0	0.6	-0.4
平均值	0.81	0.42	0.82
標準差	0.32	0.65	0.36

表4-1-5 試題難度與 θ 波強度相關性分析表

第五章 結果討論與研究限制

第一節 研究結果討論

過去許多文獻指出處理工作記憶/認知負荷的腦區，是位於我們的頂葉區、內側顳葉及額葉區，但大多是著重於使用事件相關電位來分析(ERP)，利用一個一個的刺激作為事件的定位點，透過處理工作記憶模式的實驗(n-back 實驗等)，來觀察腦波的變化。若要套用至實際教學現場，偵測我們在進行記憶、推理、操作等「歷程」中所感知道的「難度」，我們會懷疑在分析方法上是否一樣能維持好的預測力。因此，本研究利用可攜式腦波儀，透過額葉區的測量來分析受試者在運算不同難度的數學乘法歷程中大腦活動的情形，並透過演算法評估大腦活動與測驗難度間的相關。

討論一：利用「額葉區」的「 θ 波」可以有效預測難度。

過去測量認知負荷的研究中，許多學者認為，利用「主觀測量方法」評估學習者的認知負荷較為可行，目前在教育領域中也廣泛地被使用。如 Paul Ayres (2006) 則利用「主觀測量方法」來測量內在認知負荷，受試者被要求完成數學代數問題，並為每題題目評估自己的認知負荷，結果顯示錯誤率與認知負荷呈現高度相關 ($r = 0.74; p < 0.001$)。近年來，Irene T. Skuballa (2015) 等人利用眼動實驗來探討在多媒體學習的學習成效，並透過「九點李克特量表」來評估受試者的認知負荷與心智努力，結果顯示，認知負荷與學習成效呈高度負相關 ($r = -0.783, p < 0.001$)，心智努力也顯示了同樣的結果與學習成效呈現負相關 ($r = -0.508; p < 0.001$) (P. Ayres, 2006; Skuballa, Fortunski, & Renkl, 2015)。

由上述研究可看出，使用主觀測量方法來評估學習者感受到的認知負荷，預測力約達 60% ($r = -0.783$)，而本研究的演算法，與試題難度間的相關預測力約達 67% (前額葉右側 $r = 0.82$)，表示相較於主觀測量方法，透過腦部神經影

像不但具有即時性，還有較高的預測力。另外，也可看出額葉區的 θ 波跟工作記憶有關，所以利用「額葉區」的「 θ 波」為基礎的演算法可以有效預測「難度」。也就是說，某種程度上我們利用額葉區的 θ 波來預測學習者在學習歷程中感受到的負荷。

1. 「額葉區」與工作記憶有關

這樣的結果與之前許多學者的研究結果類似，過去研究中顯示，個體執行工作記憶作業時，「額葉區」扮演了重要角色(Callicott et al., 1998; Jansma et al., 2000; Owen, 1997; Owen et al., 2005)。

且許多相關的研究中指出額葉區的「背側前額葉皮質」(dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC) 與工作記憶有關。我們由研究結果二(表4-1-2)中前額葉及額葉右側顯示的高度相關，推測某種程度上可反應出「DLPFC」與「工作記憶」確實可能是有關聯的。不過，因為EEG是將電極放在頭皮量測，我們無法確定是否準確測到DLPFC的位置。

另外，從研究結果二(表4-1-2)亦可看出，額葉「右側」的數據呈高度相關，這樣的結果與 Mizuhara 等人(2005)的研究結果類似，他們利用 fMRI 和 EEG 來研究人類處理數學運算時大腦的活動情形，透過 fMRI 量測到大腦中血氧濃度的結果及腦電波的變化發現：大腦在進行數學「減法」運算時，「右腦」背側前額葉皮質層(DLPFC)是能量集中的區域(Mizuhara et al., 2005)。

2. 「 θ 波」與工作記憶有關

本研究的演算法達高預測力，表示運用 θ 波為演算基礎的分析法，可用來偵測學習者在學習歷程中隨難度感受到認知負荷/工作記憶的變化。

這樣的結果與許多學者提出的論點一致，過去研究中顯示： θ 波能反應大腦在處理工作記憶時的狀態，當 θ 波的強度逐漸增強時，大腦處理工作記憶的負荷量也逐漸升高(Jensen & Tesche, 2002; Klimesch et al., 2001; Onton et al., 2005)。

另外，本研究結果達高預測力，推測可能是因為在分析時我們發現同一難度下，個體間腦波的變異程度很較大，也就是說，每個受試者的腦波在本質上不一定相同，因此我們在分析腦波與難度間的相關性時，並非利用所有受試者的腦波平均，反而是將各個受試者一個一個進行分析。未來進一步可將受試者休息狀態下的腦波納入處理或者參考 α 波與工作記憶的關係加以分析，再觀察是否有更高的預測力。

討論二：利用 θ 波為基礎的演算法預測不同難度時，受試者的正確率愈高，演算法預測力就會偏低

由研究結果二(表 4-1-2)中，我們可以看到部分受試者的相關性是偏低的，如果將資料(表 4-1-1 與表 4-1-2)進一步比對後發現(如下表 5-1-1)：相關性偏低的受試者，答題的正確率似乎相對是比較高的，如受試者 19、20。

受試者	前額葉	前額葉左側	前額葉右側	受試者	難度一正確率	難度二正確率	難度三正確率	難度四正確率	平均正確率
1	1	-0.2	1	1	100%	96%	92%	92%	95%
2	0.8	0.8	0.8	2	100%	92%	92%	72%	89%
3	1	-0.4	1	3	96%	96%	80%	80%	88%
4	1	1	1	4	100%	100%	92%	72%	91%
5	0.5	0.5	1	5	96%	96%	88%	72%	88%
6	1	1	1	6	100%	96%	92%	48%	84%
7	1	1	1	7	96%	96%	92%	80%	91%
8	1	1	1	8	96%	96%	88%	64%	86%
9	0.8	1	0.8	9	100%	100%	100%	96%	99%
10	0.2	-1	0.4	10	96%	100%	100%	92%	97%
11	0.8	0.8	0.8	11	100%	92%	100%	56%	87%
12	1	0.4	1	12	100%	100%	96%	80%	94%
13	1	0.4	1	13	100%	100%	92%	92%	96%
14	0.2	0.4	0.2	14	100%	80%	80%	84%	86%
15	1	-0.8	1	15	96%	96%	84%	64%	85%
16	1	-0.6	1	16	96%	100%	100%	88%	96%
17	1	1	1	17	100%	76%	84%	72%	83%
18	1	0.6	1	18	92%	92%	92%	72%	87%
19	0.8	0.8	0.8	19	100%	96%	100%	100%	99%
20	0	0.6	-0.4	20	100%	100%	100%	96%	99%
平均值	0.81	0.42	0.82	平均值	98%	95%	92%	79%	91%
標準差	0.32	0.65	0.36	標準差	2%	6%	7%	14%	5%

表 5-1-1 相關性與正確率比較表

因此我們將表 5-1-1 中，「相關性」分別與「正確率的平均值」及「第四難度正確率」再進行一次相關性分析，結果如下表 5-1-2：

θ 波跟難度的相關性			
	前額葉	前額葉左側	前額葉右側
第四難度正確率	-0.36	-0.26	-0.40
平均正確率	-0.28	-0.18	-0.35

表 5-1-2 「 θ 波跟難度的相關性」與「正確率」的相關性分析表

由上表 5-1-2 我們可以看出：

1. 對「 θ 波跟難度的相關性」與「正確率的平均值」進行分析，無論是在前額葉或前額葉兩側皆呈負相關，這表示當受試者的平均正確率愈高時，相關性會愈低。
2. 且第四個難度是本實驗中最難的難度，而「 θ 波跟難度的相關性」與「第四難度正確率」分析時也發現，無論是在前額葉或前額葉兩側皆呈負相關，這表示在本實驗中最難的難度下，當受試者的正確率愈高時，相關性會愈低。

也就是說，當受試者作答時的正確率愈高，我們的演算法預測力就會偏低，雖然在題目設計上，以研究者的教學經驗認為：在數學乘法心算時，三位數乘一位數且需進位兩次的題目應該具有一定的困難性，但由上表 5-1-1 可看出，在最困難（難度 4）的題目中，似乎對某些受試者來說，答對率還是相對的高。

表示在本研究中，即使是最難的難度，可能對某些受試者來說並沒有難度上的分別，這樣的話，我們便比較難使用我們的演算法來偵測受試者所感受到的難度。

因此，推測我們利用 θ 波預測難度時，某些受試者的相關性是偏低的，可能是因為在四個難度指標中，那些受試者在作答時感受到的負荷其實是差不多或是都偏低的，並未達到我們預期（難度愈高會造成比較高的負荷）。

未來在研究中可考量先評估受試者在解題過程中的正確率，並根據正確率來調整題目的難度。

討論三： θ 波可以反應答題正確率

根據研究結果一可看出，在難度提升時，受試者的作答正確率確實會降低，也就是說正確率可以反應出難度，如下圖 5-1-1：

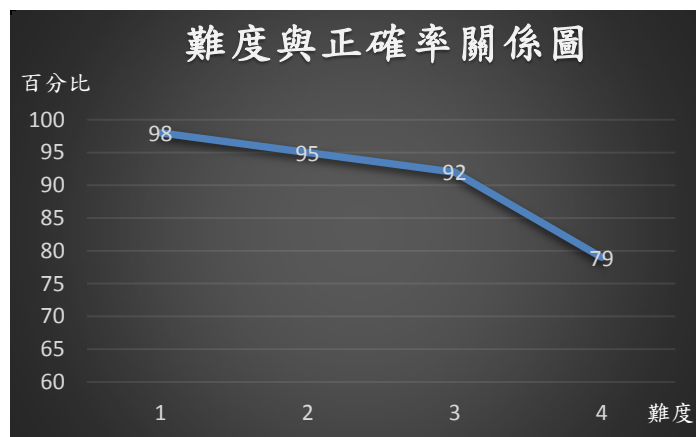


圖 5-1-1 難度與正確率關係圖

且本研究結果二中顯示，我們發展的 θ 波為基礎的演算法可以有效預測難度，既然正確率可以反應出難度，我們便想探討 θ 波是否可以反應出答題的正確率。因此將各個受試者在不同難度下的「 θ 波」與「正確率」進行相關性分析，分析結果如下表 5-1-3：

θ 波與正確率相關性			
受試者	前額葉	前額葉左側	前額葉右側
1	-0.89	0.87	-0.89
2	-0.96	-0.97	-0.94
3	-0.99	0.51	-0.98
4	-0.82	-0.79	-0.79
5	-0.68	-0.29	-0.77
6	-0.72	-0.82	-0.82
7	-0.95	-0.93	-0.95
8	-0.91	-0.92	-0.95
9	-0.60	-1.00	-0.50
10	0.70	0.67	0.25
11	-0.93	-0.91	-0.93
12	-0.89	0.17	-0.87
13	-0.98	-0.63	-0.94
14	0.03	-0.15	0.22
15	-0.99	0.65	-0.99
16	-0.71	0.48	-0.73
17	-0.86	-0.82	-0.86
18	-0.60	-0.33	-0.61
19	0.35	0.92	0.30
20	0.34	0.21	0.41
平均值	-0.60	-0.20	-0.62
標準差	0.52	0.70	0.48

表 5-1-3 θ 波與正確率相關性分析表

從上表 5-1-3 可看出，「 θ 波」與「正確率」呈負相關，前額葉與前額葉右側的相關性較高，預測力約為 36%。表示 θ 波可以反應答題正確率。

過去的相關研究中，常使用如 n-back 實驗或魏氏智力量表等標準化的測驗來作為難度的指標。而在本研究中，雖然 θ 波可以反應答題正確率，但是否能以正確率作為難度的指標還不是那麼確定，因為原本將試題難度區分為 1-4 的難度時，我們的演算法與試題難度間的相關預測力約可達 67%，但是，如果用作答的正確率作為難度的指標，預測力便降為約 36%，也就是說，本研究設計 1-4 的難度確實不同，但是受試者的正確率差異並不大，表示我們比較難用作答正確率當作難度的指標。

這樣的結果可能與實驗題目設計有關，因為受試者皆為大學生族群，可能本

研究設計的數學乘法心算對受試者來說難度不大，所以在作答的正確率上並未精準的反應出難度。未來的研究可以考慮：將題目難度增加、或者增加受試者的族群（年齡差異等）。



討論四：可攜式腦波儀的發展

隨著科技發展日新月異，愈來愈多新興的技術或數位產品等可用於教學環境，協助教師及學生，除了可以在課前協助教師對教材進行調整與設計外，課堂中科技又該如何運用才能協助學生學習呢？現今台灣的教學現場，多數仍以教師講授的方式進行課程，且僅有少數學生在遇到困難或問題時會主動提出，此時，教師對於學習狀況的掌握度便格外重要，需了解學生是否聽懂，是否感覺困難，是否跟不上進度…等。

目前在認知負荷的測量上仍多使用 Paas 於 1992 年開發的單題量表，除了受試者對於「難度」或「認知負荷」的定義可能不同外，單一試題是否能完整反映出學習者認知負荷的也受到質疑，並且無法「即時」地偵測認知負荷，不過，卻可應用於「複雜的課程教材」中。

反觀「可攜式腦波儀」，不但能夠直接、客觀的測量，還可以即時偵測個別學習者在某個學習當下所感受到的認知負荷，雖然研究結果中顯示的是平均資料，不過若將時間切的更小，便可作為即時的偵測。如此一來，透過本研究發展的演算法，便可在課堂中即時分析各個學習者的腦波，協助教師在課堂上隨時知道每一位學生的「即時負荷」，掌握課堂中的學習狀況。不過，本研究目前僅以數學心算為試題測量，未來仍需使用較複雜的課程材料進一步測試。

另外，若未來要將本研究應用於教室中，我們仍須注意「個人化」的重要性。雖然本研究結果顯示 θ 波可以有效預測難度，不過本研究在分析腦波時發現，同一難度下，個體間腦波的變異程度很大，也就是說，每個受試者的腦波在本質上不一定相同，如同一難度的題目，可能有人覺得難，有人覺得簡單；或者每個人在進行不同主題的作業時，感受到的負荷量可能不同。因此，針對「個人」先瞭解個別的難度指標或是繪製出難度曲線等，讓教師知道「各個學習者」在什麼樣的狀況下會達到認知負荷的極限值或已經認知超載，這樣一來，便能有效的協助每個學習者學習。

討論五：「認知負荷」某種程度上即是工作記憶負荷

本研究利用工作記憶的負荷來作為評估「認知負荷」的依據，不過，究竟工作記憶負荷是否等同於認知負荷呢？

根據Sweller, Van Merriënboer, & Pass(1998)的定義：認知負荷(cognitive load)是將一特定工作加諸於學習者的認知系統(包括工作記憶區及長期記憶區)時所產生的負荷。當這樣的概念引用至教育領域時，許多學者指出：「認知負荷」是指學習者在面對接收到訊息的「負荷量」。當工作記憶的項目愈多，負荷量愈大：表示學習的過程中，個體對於學習內容所知覺的困難度越高(如：多餘的訊息或無關的因素越多)，或是個體覺得需要投入更多的努力來理解內容時，認知負荷就越大。Marcus 等人(1996)指出，儘管元件關連性較低的教材內容易於學習，但當資訊量過多時，在學習上仍有困難；Sweller 等人(1988)則認為認知負荷與工作記憶內所能處理的元件量有關，在學習過程中，如果將大量的教學內容置於工作記憶區中，則會形成「過度」的認知負荷。

綜合以上的觀點，本研究認為學習者在學習歷程中感受到的認知負荷，某種程度上就是該學習者的工作記憶負荷，也就是說，本研究發展的演算法可以有效預測「難度」(工作記憶負荷)，某種程度上我們就能用來預測學習者的認知負荷。

不過，在實驗設計上我們並未清楚定義所評估的是內在或是外在認知負荷，而研究者推斷在分類上應是偏向「內在」認知負荷，因為實驗設計是利用改變題目的「難易度」來分析。未來可考慮將實驗設計得更為嚴謹，清楚區分內外在此的認知負荷，並發展相應的演算法進行評估。

第二節 研究限制

1. 硬體限制：

EEG是記錄大腦「頭皮上」的電流活動，在頭皮上放置電極，記錄或在特殊情況皮質的神經生理測量。這樣的測量方法無法確定是否能準確地反映出人腦內部的情况。

且「可攜式腦波儀」為求輕便、方便測量，因此在硬體設計上的接孔比較少，表示我們只能選擇最可能量測到的點來觀察；另外，雖然過去的文獻也提出個體執行工作記憶作業時，除了額葉區扮演著重要的角色外，顳葉、頂葉可能也有相關，但受限於可攜式腦波儀的電極並不是像傳統腦波儀利用電極帽，而是使用鈕釦式的電極貼片，這樣的測量方法會造成電極貼片無法附著在有毛髮的頭皮上，為改善此限制，「可攜式腦波儀」的電極目前還在改良中。

2. 演算法限制：

由於 EEG 的訊號易受干擾，本研究發展之演算法僅消除環境雜訊，因此，所測得之腦波可能受到眼動、肢體運動的干擾而失真，未來可考量將影響因子全面排除，發展更為嚴謹的演算法。不過，若我們換個角度思考，教室中其實存在許多因子可能干擾測量，而本研究的演算法僅消除環境雜訊就達到高預測力，表示未來可將此研究結果應用於教室環境。

參考文獻

- Adrian, E. D., & Matthews, B. H. (1934). The interpretation of potential waves in the cortex. *The Journal of Physiology*, 81(4), 440-471.
- Aggleton, J., Shaw, C., & Gaffan, E. (1992). The performance of postencephalitic amnesic subjects on two behavioural tests of memory: concurrent discrimination learning and delayed matching-to-sample. *Cortex*, 28(3), 359-372.
- Antonenko, P., Paas, F., Grabner, R., & Van Gog, T. (2010). Using electroencephalography to measure cognitive load. *Educational psychology review*, 22(4), 425-438.
- Ayres, P. (2006). Impact of reducing intrinsic cognitive load on learning in a mathematical domain. *Applied cognitive psychology*, 20(3), 287-298.
- Ayres, P., & Sweller, J. (1990). Locus of difficulty in multistage mathematics problems. *The American Journal of Psychology*, 167-193.
- Ayres, P. L. (2001). Systematic mathematical errors and cognitive load. *Contemporary Educational Psychology*, 26(2), 227-248.
- Baddeley, A. (1992). WORKING MEMORY. *Science*, 255(5044), 556-559.
doi:10.1126/science.1736359
- Baddeley, A. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4(11), 417-423.
doi:10.1016/s1364-6613(00)01538-2
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working memory. *Psychology of learning and motivation*, 8, 47-89.
- Barbey, A. K., Koenigs, M., & Grafman, J. (2013). Dorsolateral prefrontal contributions to human working memory. *Cortex*, 49(5), 1195-1205.
- Brouwer, A.-M., Hogervorst, M. A., Van Erp, J. B., Heffelaar, T., Zimmerman, P. H., & Oostenveld, R. (2012). Estimating workload using EEG spectral power and ERPs in the n-back task. *Journal of neural engineering*, 9(4), 045008.
- Brunken, R., Plass, J. L., & Leutner, D. (2003). Direct measurement of cognitive load in multimedia learning. *Educational psychologist*, 38(1), 53-61.
- Callicott, J. H., Ramsey, N. F., Tallent, K., Bertolino, A., Knable, M. B., Coppola, R., . . . Frank, J. A. (1998). Functional magnetic resonance imaging brain mapping in psychiatry: methodological issues illustrated in a study of working memory in schizophrenia. *Neuropsychopharmacology*, 18(3), 186-196.
- Cave, C. B., & Squire, L. R. (1992). Intact verbal and nonverbal short-term memory following damage to the human hippocampus. *Hippocampus*, 2(2), 151-163.
- Chandler, P., & Sweller, J. (1991). COGNITIVE LOAD THEORY AND THE FORMAT OF

- INSTRUCTION. *Cognition and Instruction*, 8(4), 293-332.
doi:10.1207/s1532690xci0804_2
- Cohen, N., & Eichenbaum, H. (1993). *Memory, amnesia, and the hippocampus*: Cambridge, MA: MIT Press.
- Cooper, N. R., Croft, R. J., Dominey, S. J., Burgess, A. P., & Gruzelier, J. H. (2003). Paradox lost? Exploring the role of alpha oscillations during externally vs. internally directed attention and the implications for idling and inhibition hypotheses. *International journal of psychophysiology*, 47(1), 65-74.
- D'Esposito, M., Postle, B. R., Ballard, D., & Lease, J. (1999). Maintenance versus manipulation of information held in working memory: an event-related fMRI study. *Brain and cognition*, 41(1), 66-86.
- Dalley, J. W., Cardinal, R. N., & Robbins, T. W. (2004). Prefrontal executive and cognitive functions in rodents: neural and neurochemical substrates. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 28(7), 771-784.
- Daneman, M., & Carpenter, P. A. (1980). INDIVIDUAL-DIFFERENCES IN WORKING MEMORY AND READING. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 19(4), 450-466. doi:10.1016/s0022-5371(80)90312-6
- Das, J. P., Naglieri, J. A., & Kirby, J. R. (1994). *Assessment of cognitive processes: The PASS theory of intelligence*: Allyn & Bacon.
- Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., & Cohen, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive neuropsychology*, 20(3-6), 487-506.
- Eichenbaum, H. (2004). Hippocampus: cognitive processes and neural representations that underlie declarative memory. *Neuron*, 44(1), 109-120.
- Eichenbaum, H., Dudchenko, P., Wood, E., Shapiro, M., & Tanila, H. (1999). The hippocampus, memory, and place cells: is it spatial memory or a memory space? *Neuron*, 23(2), 209-226.
- Fingelkurts, A., Fingelkurts, A., Krause, C., Kaplan, A., Borisov, S., & Sams, M. (2003). Structural (operational) synchrony of EEG alpha activity during an auditory memory task. *Neuroimage*, 20(1), 529-542.
- Frisk, V., & Milner, B. (1990). The relationship of working memory to the immediate recall of stories following unilateral temporal or frontal lobectomy. *Neuropsychologia*, 28(2), 121-135.
- Funahashi, S., Bruce, C. J., & Goldman-Rakic, P. S. (1989). Mnemonic coding of visual space in the monkey's dorsolateral prefrontal cortex. *Journal of Neurophysiology*, 61(2), 331-349.
- Gevins, A., Smith, M. E., McEvoy, L., & Yu, D. (1997). High-resolution EEG mapping of cortical activation related to working memory: effects of task difficulty, type of processing, and practice. *Cerebral cortex*, 7(4), 374-385.

- Glass, A., & Holyoak, K. (1986). *Cognition*. NY: Random House.
- Gopher, D., & Braune, R. (1984). On the psychophysics of workload: Why bother with subjective measures? *Human Factors*, 26(5), 519-532.
- Hendy, K. C., Hamilton, K. M., & Landry, L. N. (1993). Measuring subjective workload: when is one scale better than many? *Human Factors*, 35(4), 579-601.
- Henke, K., Weber, B., Kneifel, S., Wieser, H. G., & Buck, A. (1999). Human hippocampus associates information in memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96(10), 5884-5889.
- Jansma, J. M., Ramsey, N. F., Coppola, R., & Kahn, R. S. (2000). Specific versus nonspecific brain activity in a parametric N-back task. *Neuroimage*, 12(6), 688-697.
- Jansma, J. M., Ramsey, N. F., Slagter, H. A., & Kahn, R. S. (2001). Functional anatomical correlates of controlled and automatic processing. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13(6), 730-743.
- Jensen, O., Gelfand, J., Kounios, J., & Lisman, J. E. (2002). Oscillations in the alpha band (9–12 Hz) increase with memory load during retention in a short-term memory task. *Cerebral cortex*, 12(8), 877-882.
- Jensen, O., & Lisman, J. E. (2005). Hippocampal sequence-encoding driven by a cortical multi-item working memory buffer. *Trends in neurosciences*, 28(2), 67-72.
- Jensen, O., & Tesche, C. D. (2002). Frontal theta activity in humans increases with memory load in a working memory task. *European journal of Neuroscience*, 15(8), 1395-1399.
- Jex, H. R. (1988). Measuring mental workload: Problems, progress, and promises. *Advances in Psychology*, 52, 5-39.
- Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1992). A CAPACITY THEORY OF COMPREHENSION - INDIVIDUAL-DIFFERENCES IN WORKING MEMORY. *Psychological Review*, 99(1), 122-149. doi:10.1037/0033-295x.99.1.122
- Klimesch, W., Doppelmayr, M., Pachinger, T., & Ripper, B. (1997). Brain oscillations and human memory: EEG correlates in the upper alpha and theta band. *Neuroscience letters*, 238(1), 9-12.
- Klimesch, W., Doppelmayr, M., Roehm, D., Pöllhuber, D., & Stadler, W. (2000). Simultaneous desynchronization and synchronization of different alpha responses in the human electroencephalograph: a neglected paradox? *Neuroscience letters*, 284(1), 97-100.
- Klimesch, W., Doppelmayr, M., Schwaiger, J., Auinger, P., & Winkler, T. (1999). Paradoxical alpha synchronization in a memory task. *Cognitive Brain Research*, 7(4), 493-501.

- Klimesch, W., Doppelmayr, M., Stadler, W., Pöllhuber, D., Sauseng, P., & Roehm, D. (2001). Episodic retrieval is reflected by a process specific increase in human electroencephalographic theta activity. *Neuroscience letters*, *302*(1), 49-52.
- Krause, C. M., Lang, A. H., Laine, M., Kuusisto, M., & Pörn, B. (1996). Event-related EEG desynchronization and synchronization during an auditory memory task. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, *98*(4), 319-326.
- Kumaran, D., & Maguire, E. A. (2006). The dynamics of hippocampal activation during encoding of overlapping sequences. *Neuron*, *49*(4), 617-629.
- Lee, K. M. (2000). Cortical areas differentially involved in multiplication and subtraction: a functional magnetic resonance imaging study and correlation with a case of selective acalculia. *Annals of neurology*, *48*(4), 657-661.
- Marcus, N., Cooper, M., & Sweller, J. (1996). Understanding instructions. *Journal of educational psychology*, *88*(1), 49.
- Mayer, R. E., & Moreno, R. (2003). Nine ways to reduce cognitive load in multimedia learning. *Educational Psychologist*, *38*(1), 43-52.
doi:10.1207/s15326985ep3801_6
- McEvoy, L., Smith, M., & Gevins, A. (2000). Test–retest reliability of cognitive EEG. *Clinical Neurophysiology*, *111*(3), 457-463.
- Miller, G. (1956). Human memory and the storage of information. *IRE Transactions on Information Theory*, *2*(3), 129-137.
- Miyake, A., & Shah, P. (1999). *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control*: Cambridge University Press.
- Mizuhara, H., Wang, L.-Q., Kobayashi, K., & Yamaguchi, Y. (2005). Long-range EEG phase synchronization during an arithmetic task indexes a coherent cortical network simultaneously measured by fMRI. *Neuroimage*, *27*(3), 553-563.
- Mousavi, S. Y., Low, R., & Sweller, J. (1995). Reducing cognitive load by mixing auditory and visual presentation modes. *Journal of educational psychology*, *87*(2), 319.
- Nichols, E. A., Kao, Y.-C., Verfaellie, M., & Gabrieli, J. D. (2006). Working memory and long-term memory for faces: Evidence from fMRI and global amnesia for involvement of the medial temporal lobes. *Hippocampus*, *16*(7), 604.
- O'Donnell, R. D., & Eggemeier, F. T. (1986). Workload assessment methodology.
- Olesen, P. J., Westerberg, H., & Klingberg, T. (2004). Increased prefrontal and parietal activity after training of working memory. *Nature neuroscience*, *7*(1), 75-79.
- Onton, J., Delorme, A., & Makeig, S. (2005). Frontal midline EEG dynamics during working memory. *Neuroimage*, *27*(2), 341-356.
- Owen, A. M. (1997). The functional organization of working memory processes within human lateral frontal cortex: the contribution of functional

- neuroimaging. *European journal of Neuroscience*, 9(7), 1329-1339.
- Owen, A. M., McMillan, K. M., Laird, A. R., & Bullmore, E. (2005). N-back working memory paradigm: A meta-analysis of normative functional neuroimaging studies. *Human brain mapping*, 25(1), 46-59.
- Paas, F., Renkl, A., & Sweller, J. (2003). Cognitive load theory and instructional design: Recent developments. *Educational Psychologist*, 38(1), 1-4.
doi:10.1207/s15326985ep3801_1
- Paas, F., Tuovinen, J. E., Tabbers, H., & Van Gerven, P. W. (2003). Cognitive load measurement as a means to advance cognitive load theory. *Educational psychologist*, 38(1), 63-71.
- Paas, F. G. (1992). Training strategies for attaining transfer of problem-solving skill in statistics: A cognitive-load approach. *Journal of educational psychology*, 84(4), 429.
- Paas, F. G., Van Merriënboer, J. J., & Adam, J. J. (1994). Measurement of cognitive load in instructional research. *Perceptual and motor skills*, 79(1), 419-430.
- Penfield, W., & Milner, B. (1958). Memory deficit produced by bilateral lesions in the hippocampal zone. *AMA Archives of Neurology & Psychiatry*, 79(5), 475-497.
- Pfurtscheller, G., Stancak, A., & Neuper, C. (1996). Event-related synchronization (ERS) in the alpha band—an electrophysiological correlate of cortical idling: a review. *International journal of psychophysiology*, 24(1), 39-46.
- Ranganath, C., & D'Esposito, M. (2001). Medial temporal lobe activity associated with active maintenance of novel information. *Neuron*, 31(5), 865-873.
- Roland, P., & Friberg, L. (1985). Localization of cortical areas activated by thinking. *Journal of Neurophysiology*, 53(5), 1219-1243.
- Rubio, S., Díaz, E., Martín, J., & Puente, J. M. (2004). Evaluation of subjective mental workload: A comparison of SWAT, NASA-TLX, and workload profile methods. *Applied Psychology*, 53(1), 61-86.
- Sarnthein, J., Petsche, H., Rappelsberger, P., Shaw, G., & Von Stein, A. (1998). Synchronization between prefrontal and posterior association cortex during human working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 95(12), 7092-7096.
- Sauseng, P., Klimesch, W., Gruber, W., Doppelmayr, M., Stadler, W., & Schabus, M. (2002). The interplay between theta and alpha oscillations in the human electroencephalogram reflects the transfer of information between memory systems. *Neuroscience letters*, 324(2), 121-124.
- Schendan, H. E., Searl, M. M., Melrose, R. J., & Stern, C. E. (2003). An fMRI study of the role of the medial temporal lobe in implicit and explicit sequence learning. *Neuron*, 37(6), 1013-1025.

- Schoenfeld, A. H. (1985). Metacognitive and epistemological issues in mathematical understanding. *Teaching and learning mathematical problem solving: Multiple research perspectives*, 361-380.
- Schon, K., Hasselmo, M. E., LoPresti, M. L., Tricarico, M. D., & Stern, C. E. (2004). Persistence of parahippocampal representation in the absence of stimulus input enhances long-term encoding: a functional magnetic resonance imaging study of subsequent memory after a delayed match-to-sample task. *Journal of Neuroscience*, 24(49), 11088-11097.
- Scoville, W. B., & Milner, B. (1957). Loss of recent memory after bilateral hippocampal lesions. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 20(1), 11-21.
- Simon, H. A. (1975). The functional equivalence of problem solving skills. *Cognitive Psychology*, 7(2), 268-288.
- Skuballa, I. T., Fortunski, C., & Renkl, A. (2015). An eye movement pre-training fosters the comprehension of processes and functions in technical systems. *Frontiers in psychology*, 6.
- Sweller, J. (1988). COGNITIVE LOAD DURING PROBLEM-SOLVING - EFFECTS ON LEARNING. *Cognitive Science*, 12(2), 257-285.
doi:10.1207/s15516709cog1202_4
- Sweller, J. (2008). Human cognitive architecture. *Handbook of research on educational communications and technology*, 369-381.
- Sweller, J., Van Merriënboer, J. J., & Paas, F. G. (1998). Cognitive architecture and instructional design. *Educational psychology review*, 10(3), 251-296.
- Tuladhar, A. M., Huurne, N. t., Schoffelen, J. M., Maris, E., Oostenveld, R., & Jensen, O. (2007). Parieto-occipital sources account for the increase in alpha activity with working memory load. *Human brain mapping*, 28(8), 785-792.
- van Merriënboer, J. J. G., & Sweller, J. (2005). Cognitive load theory and complex learning: Recent developments and future directions. *Educational Psychology Review*, 17(2), 147-177. doi:10.1007/s10648-005-3951-0
- Vanni, S., Revonsuo, A., & Hari, R. (1997). Modulation of the parieto-occipital alpha rhythm during object detection. *Journal of Neuroscience*, 17(18), 7141-7147.
- Wierwille, W. W., & Eggemeier, F. T. (1993). Recommendations for mental workload measurement in a test and evaluation environment. *Human Factors*, 35(2), 263-281.
- Winterer, G., Coppola, R., Goldberg, T. E., Egan, M. F., Jones, D. W., Sanchez, C. E., & Weinberger, D. R. (2004). Prefrontal broadband noise, working memory, and genetic risk for schizophrenia. *American Journal of Psychiatry*, 161(3), 490-500.

- Xie, B., & Salvendy, G. (2000). Review and reappraisal of modelling and predicting mental workload in single-and multi-task environments. *Work & stress*, 14(1), 74-99.
- Yeh, T. K., Tseng, K. Y., Cho, C. W., Barufaldi, J. P., Lin, M. S., & Chang, C. Y. (2012). Exploring the Impact of Prior Knowledge and Appropriate Feedback on Students' Perceived Cognitive Load and Learning Outcomes: Animation-based earthquakes instruction. *International Journal of Science Education*, 34(10), 1555-1570. doi:10.1080/09500693.2011.579640
- 宋曜廷. (2000). 先前知識, 文章結構與多媒體呈現對文章學習的影響 (未出版博士論文). 國立臺灣師範大學, 臺北市.
- 李晓东, 聂尤彦, 庞爱莲, & 林崇德. (2003). 工作记忆对小学三年级学生解决比较问题的影响. *心理发展与教育*, 3, 41-45.
- 曹寶龍, 劉慧娟, & 林崇德. (2005). 認知負荷對小學生工作記憶資源分配策略的影響: 心理發展與教育.
- 郭秀緞. (2005). 以認知負荷的觀點探討數學問題設計的適切性. *教育研究*, 13, 169-182.
- 陳蜜桃, & 陳埤淑. (2003). 多元智能理論在幼兒品格教育教學上的探討.
- 黃克文. (1996). 認知負荷與個人特質及學習成就之關聯. *國立臺北教育大學國民教育研究所學位論文*, 1-153.
- 黃柏勳. (2003). 認知上的瓶頸- 認知負荷理論. *教育研究*, 55, 71-78.
- 廖宇璫. (2009). 想像幾何旋轉動作與數學心算之腦電波分析. *臺灣師範大學機電科技研究所學位論文*, 1-96.
- 顏世杰. (2008). 記憶, 概念與心算複雜度在腦波 (EEG) 所呈現的反應與評估.

附錄 數學乘法測驗題目

難度一	難度二	難度三	難度四
二位數乘一位數	二位數乘一位數	三位數乘一位數	三位數乘一位數
32 X 4	23 X 4	341 X 4	664 X 3
53 X 3	56 X 3	126 X 3	156 X 8
25 X 2	25 X 9	721 X 9	379 X 5
41 X 4	14 X 8	551 X 8	558 X 2
51 X 6	17 X 6	372 X 3	477 X 6
72 X 3	77 X 8	652 X 2	293 X 7
81 X 9	49 X 3	432 X 3	735 X 5
61 X 7	26 X 4	261 X 4	459 X 3
35 X 2	62 X 8	340 X 5	197 X 8
32 X 3	32 X 7	491 X 7	368 X 4
45 X 2	45 X 5	105 X 5	563 X 6
11 X 9	18 X 9	181 X 9	672 X 7
72 X 4	72 X 6	572 X 4	956 X 2
43 X 3	43 X 5	431 X 5	684 X 4
71 X 7	19 X 7	393 X 3	527 X 5
82 X 2	82 X 7	621 X 7	823 X 6
52 X 4	54 X 4	682 X 4	148 X 9
23 X 3	27 X 4	209 X 8	515 X 7
85 X 2	86 X 2	863 X 2	388 X 6
93 X 3	93 X 4	272 X 4	419 X 6
52 X 3	28 X 9	451 X 9	767 X 5
41 X 6	48 X 6	943 X 2	636 X 3
21 X 7	37 X 7	604 X 7	228 X 8
16 X 5	16 X 6	162 X 4	833 X 7
13 X 3	58 X 3	808 X 3	458 X 4