

意識測量儀 初登場

意識是如此不可捉摸又抽象的概念，「測量」意識簡直就像科幻小說情節。科學家近年來在這方面已大有進展，藉由各項腦造影技術和實驗手法，能夠分析不同意識狀態下的大腦活動型態。

撰文／藍亭 (Timothy Lane)、曾祥非、吳昌衛、徐慈妤、明智煥 (Jihwan Myung)、鄧肯 (Niall Duncan)

試想以下畫面：你正躺在醫院的手術檯上進行手術，忽然感到劇痛，疼痛來源是外科醫師在你身上劃開的一道又一道切口，你想呼救、要醫師停止動作，卻無能為力，因為手術前你接受了全身麻醉而無法自主行動。你只能忍受劇烈痛楚直至手術結束。理論上，麻醉應可使患者進入無意識狀態，但很不幸地，臨床上確實出現如此案例：麻醉只讓患者不能動作或說話，卻保留了完整自我意識；外科醫師以為手術中的患者已進入無意識狀態，而患者可能正處於絕對清醒的狀態，親身經歷手術一刀刀劃開皮膚的痛楚。

再換到另一個場景：你因為頭部外傷陷入昏迷，經過一段時間，你漸漸甦醒，發現自己無法控制身體，連轉動眼球這樣的小事也做不到。在此情況下，神經科醫師極有可能因為你對外界事物沒有反應，判斷你為無反應性覺醒症候群 (UWS) 患者，也就是俗稱的「植物人」。但你很清楚自己還保有意識，也能清楚察覺別人在身旁談論自己的病情，此時的你如同與世隔絕，被困在一個無法與他人溝通的身體裡。

這些像是恐怖科幻小說的情節。然而在現實世界中，被困在自己身體但意識清楚的人並非少數——研究顯示這類患者的誤診機率（即有意識卻被判為無意識）可能高達40%。主要原因是這些患者表現的外顯行為為通常模稜兩可且缺乏一致性，加上大腦和身體神經連結的受損程度不一，醫師往往很難區分患者的動作是純粹反射或有意識的主動行為。因此，在缺乏有效的意識測量指標下，患者能否「覺察」(aware)，只能依賴外顯動作來推斷，有時容易低估了患者的意識狀態。

多方探索意識狀態

究竟如何判斷人類的意識狀態？面對此問題，美國艾倫腦科學研究所主任柯霍 (Christof Koch) 評論近期由義大利米蘭大學的卡薩拉托 (Silvia Casarotto)、馬西米尼 (Marcello Massimini) 等人發表的一項新指標：擾動複雜性指數 (PCI，參見32頁〈劃分意識的界線〉)。核心概念是藉由計算腦波訊號的複雜度做為判斷意識狀態的量尺，但複雜度僅限於跨顱磁性刺激 (TMS) 短暫干擾

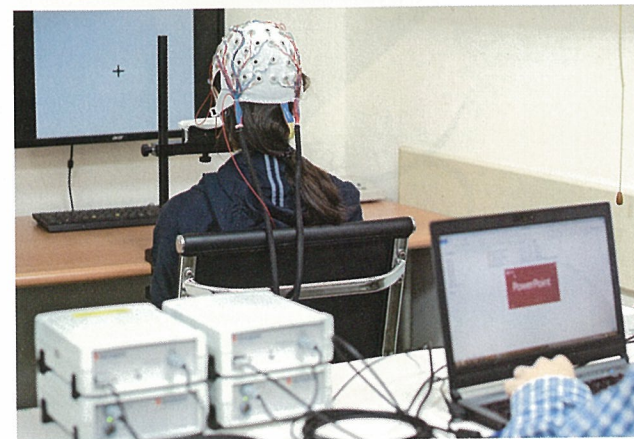


頭戴測量儀：利用跨顱磁性刺激（TMS，上圖，8字型線圈可產生磁場）對受試者的特定腦區進行磁刺激，引發大腦皮質神經元的活動變化。若該腦區正大量處理認知訊息，磁刺激引發的神經活動變化可視為雜訊，研究人員可從干擾結果推測大腦功能與腦區的關係；若受試者是腦傷病患，利用磁刺激試探大腦，猶如敲門試探房內是否有回應。接受腦電圖（EEG，下圖）測試時，受試者頭頂的電極會記錄腦波活動，研究人員從腦波訊號可得知受試者正在執行的認知活動，或判斷是否進入睡眠及睡眠階段；若受試者是腦傷病患，可觀察給予感官刺激所引發的腦波變化。

大腦後所引發的腦波變化。TMS是利用磁電共生的原理，把線圈靠在頭皮上的任何一個位置，線圈產生的磁脈衝能輕易且無痛穿過頭皮和頭骨、刺激大腦皮質。研究人員分析TMS所誘發的腦波訊號，訊號的複雜度通常會隨著磁刺激穿過大腦而改變。在這項研究中，人類意識存在與否的臨界值為0.31，當個人的PCI值大於0.31即視為有意識，低於0.31則視為無意識（訊號處理方式參見42頁〈解構腦波訊號的複雜度〉）。

卡薩拉托和馬西米尼等人並非最先發表植物人意識相關研究的學者，首度嘗試進行這類實驗的是曾任職於英國劍橋大學、現於加拿大西安大略大學的神經科學家歐文（Adrian Owen）團隊，他們要看似無意識的患者想像自己在房子裡行走或正在打網球，同時利用功能性磁共振造影（fMRI）記錄他們的大腦活動。透過這樣的研究方法，科學家首次得以觀察這些沒有任何外顯行為表現的患者是否有任何意識跡象。他們發現，至少有一名患者能夠依研究人員的指示，想像自己正在探索房子的四周或打網球。雖然目前沒有臨床指標能確認，可依循指示並想像特定事物是否等同於擁有與一般人相同程度的意識經驗，但此類型的腦造影研究為臨床診斷標準開創新的可能性。

台北醫學大學的團隊則從另一種角度進行研究，探討在不需要做任何特定事情的狀況（也就是休息狀態）下不同腦區間活化的強度與意識的關聯。目前已從fMRI影像觀察到，即使在健康受試者身上也可看到意識層次間的變化，特定腦區的功能性連結表現在清醒和睡眠時具顯著差異，例如部份腦區在睡眠時的神經連結比清醒時強，有的腦區則相反。神經網路的連結和互動



似乎與意識層次間有微妙關聯，未來可進一步探討其他特殊意識狀態，例如夢遊。相關研究仍在起步階段，除了PCI的單一指標之外，需要更多研究投入、參考並匯整多項技術和生理指標以建立「意識測量工具」。

除了避免單一指標，大腦活動型態也不是唯一可衡量意識程度的目標。大腦並非可獨立於身體其他部位而存在的器官，人體隨時隨地都有許多複雜且重要的機制進行交互作用，而在腦和身體的交互作用中，心臟扮演極為重要的角色：大腦活動型態也會影響心臟的活動，反之亦然，兩者的交互作用是研究意識的重要素材。測量心臟律動，也就是隨著時間變化的心率變異性（heart rate variability, HRV），是最直接的方式。一般人的心率在一天的生活中有快有慢，並在適當的數值範圍內變化，若心率持續太慢或太快反而是沒有變化，即變異性低，而忽快忽慢則像雜訊一般，變異性太高，這類似腦

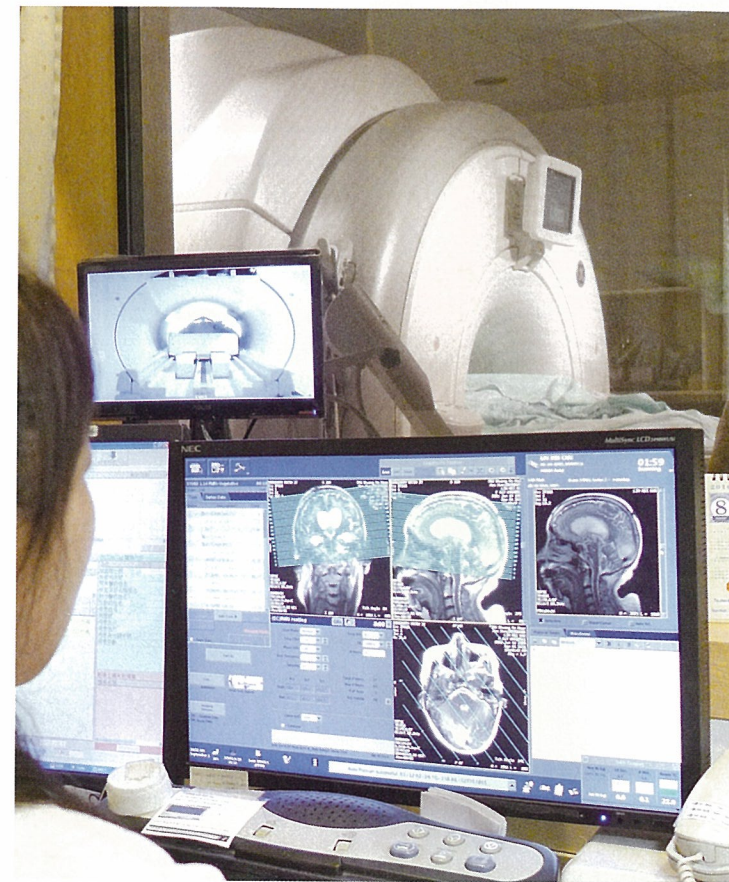
重點提要

■ 擾動複雜性指數（PCI）結合腦波訊號、跨顱磁性刺激（TMS）以及壓縮電腦檔案的演算法，是近年具潛力的意識測量工具。

■ 除了PCI，科學家也發展結合功能性磁共振造影（fMRI）、喚名、觀察心率等不同研究取向和觀察面向的技術，致力於多方探索意識狀態，發展

出臨床診斷工具。

■ 發展意識測量指標的同時也帶出關於意識本質的哲學思考，例如動物是否具有意識、意識演化途徑。



進入測量儀：透過功能性磁共振造影（fMRI）可觀察不同腦區的血流分佈，進而得知各腦區之間功能性的連結，例如不同腦區間活化的強度。

主動「喚起」意識

無論是前述結合腦電圖（EEG）和TMS的PCI研究，或整合EEG、fMRI、正子斷層掃描（PET）等多模態腦造影的研究，目標都是讓醫療團隊在臨床實務上得以快速且有效區分患者是否具有意識。但當我們把焦點放在嚴重意識異常的患者身上，親友家屬亟欲得知的往往是：患者未來能否清醒？

測量「喚名」（naming）引發的大腦活動型態，這類研究也許可以回答這個問題。自我意識有一項特性，就是會對與個人有關的事物產生特定反應，例如聽到自己的名字。中國的研究團隊在最小意識狀態（MCS）和UWS患者身上發現，患者聽到自己的名字所引發的大腦活化反應，與患者的意識程度呈現某種相關性，而此相關性強的患者通常日後恢復狀況較好。這項研究結果意味，大腦對自我相關訊息

的處理似乎是病人未來恢復意識的一項重要因素，但目前受試人數仍未達科學研究門檻，尚待蒐集更多實證。

此外，歐洲和南美洲的團隊發現，大腦對聽覺的反應也會反映在心率上，例如受試者看似無意識，但在聲音刺激下心率會產生變化，表示其大腦仍有處理聽覺訊息的能力。綜合以上發現，未來研究若同時記錄大腦活化型態和心臟活動，加以分析後有可能區分意識狀態。

此外，目前意識測量的相關研究大多採用休息狀態下的被動式腦造影，即研究人員記錄患者的腦造影並觀察這些訊號是否隨著患者的行為或意識程度不同而有變化，沒有和患者有所互動。而PCI以及喚名研究不同於被動式測量，PCI研究採用TMS主動干擾患者的大腦活動，試圖量化大腦對外界刺激的反應，喚名研究則是測量患者大腦對自己名字的反應。

主動式研究如同擲出卵石到一池靜止的湖水，透過觀察漣漪推測湖水有多深或多黏稠；TMS如同聲納作用於大腦，透過TMS所引發在腦波上的漣漪表現來區分個人的意識程度。相對地，休息狀態的研究取向則單純觀察湖水表面，是從另一種角度觀察與意識相關的神經活動變化。

近幾年，主動式測量的研究結果大有進展，區分個體有無意識以及預測腦傷患者恢復意識的成功率都相對提高，不僅是因為可記錄並分析大腦對外界刺激如何反應，更重要的是所謂外界刺激可依實驗目的而「客製化」，例如採用受試者的名字、喜歡的歌曲甚或一個簡單的磁刺激，都能有效提升這類型研究的精確度。

關於作者

藍亭（Timothy Lane）是台北醫學大學心智意識與腦科學研究所教授以及人文暨社會科學院院長，研究專長是神經哲學與意識科學。

曾祥非是台北醫學大學心智意識與腦科學研究所副教授，研究專長是認知心理學與非侵入性腦刺激。

吳昌衡是台北醫學大學心智意識與腦科學研究所副教授，研究專長是電機工程與磁共振造影。

徐慈好是台北醫學大學心智意識與腦科學研究所助理教授，研究專長是認知神經科學與腦電波。

明智煥（Jihwan Myung）是台北醫學大學心智意識與腦科學研究所助理教授，研究專長是生物物理學與數據模型。

鄧肯（Niall Duncan）是台北醫學大學心智意識與腦科學研究所助理教授，研究專長是神經科學與磁共振頻譜造影。

解構腦波訊號的複雜度

義 大利米蘭大學的神經科學家馬西米尼等人建立了在跨顱磁性刺激 (TMS) 短暫干擾下腦波訊號複雜度的計算方式，他們利用藍波-立夫 (Lempel-Ziv, LZ) 複雜度演算法，這也是壓縮電腦檔案「zip壓縮」的方法。

當腦波訊號轉換成二進制序列，也就是用1和0表示訊號的最小單位，例如011001、100001等片段式的訊息。這相當於二進制世界裡的文字，一旦有了文字，就可創造出相對應的字典，而zip壓縮方法就是利用該字典去產生更短的二進制序列。在這樣的觀念下，LZ複雜度則是表達有多少不同文字出現在一個序列內，進而顯示有多少訊息存在其中。

舉一個簡單的例子，一個重複出現01的序列，例如0101010101，相較於有點變化的0111010101，顯然後者比前者的複雜度高，同時LZ複雜度指標也具有較高的數值。然而第二個序列可能被誤認成第一個序列，因為兩者差異只在第三位置的「0」替換成「1」。

在複雜度計算概念下，些微差異會是潛在問題：原始

訊號內的雜訊可能被誤認為有意義訊號的一部份，而使複雜度增加或減少，連帶影響PCI計算的正確率。腦波中的雜訊量會因個人和環境而異，PCI估算的錯誤率也相對跟著變動。這在PCI值遠高於0.31時可能不是大問題，但若PCI非常接近0.31，而該數值又是用來判定意識存在與否的臨界值，這就是相當棘手的問題！

為了解決這問題，勢必需要一套比PCI更強大且有效的數學演算法，令人興奮的是這套數學演算法的革命正在台灣進行。中央大學黃鏐教授領導的研究團隊正在發展更強大的演算法，可拆解動態非線性的腦波訊號，這也是在複雜度計算前的重要運算步驟。同時台灣的其他研究團隊例如台北醫學大學和政治大學的合作團隊，正利用此套數學演算法結合腦波和功能性磁共振造影 (fMRI) 來研究不同型式的無意識狀態，例如深度睡眠。此外，我們在台北醫學大學的團隊也採用類似方法進行無意識患者的臨床試驗，以研究意識狀態異常的神經機制，並且尋找幫助患者恢復意識狀態的方法。

意識測量指標PCI未完待續

PCI是具潛力的臨床診斷工具，相關研究也啟發更多關於意識本質的疑問。提出PCI的研究人員認為，該數值落在0.31代表有無意識的臨界值。然而，PCI值也可能落在0.31之上或之下。如果與0.31只有些微差異，該如何解釋意識程度？這是否代表意識不是非有即無的二分法，而是可以有多有少？如果與0.31的差異大呢？例如某人的PCI值高達0.9，是否表示此人比PCI落在0.4的人具有更多意識？那麼又該如何定義「更多意識」？是源自不同的感官層面，還是更深刻的體驗，或感受到更廣泛的意識經驗內容？而這些感受和經驗能對應到這些數值的變化嗎？

如果在人類身上可以得到廣泛的PCI值，相同技術套用在其他動物身上會發生什麼事？理論上，這項技術應該可以延伸到測量其他動物的PCI值（在不考慮其他變因下）。如果我們真的可以這麼做，屆時也是套用相同的意識評估指標在這些動物身上嗎？那麼當我們觀察到某些動物的PCI值高於0.31，又該如何下結論呢？以章魚為例，牠們有極複雜的神經系統並且能夠表現出具有智能的行為，但解剖結構和人類截然不同，章魚的PCI值有任何意義嗎？如果無法套用於其他動物，那我們能說PCI是一個測量意識的通則嗎？或只限定於「類人

類」（或靈長類）動物的測量？

再者，倘若我們發展出任一指標（不論是PCI或其他測量方式）可以運用到不同種類的生物，屆時我們必須準備好回答長久存在於哲學和科學的重要問題，包括我們知道自己具有意識，但如何知道其他人或動物是否具有意識？在漫長的演化過程中，人類是否因為某些特質而擁有不同於其他動物的意識？或者是否有一種可能情況：意識的演化如同眼睛，不同演化途徑造就各種生物以及不同型態的意識？在這樣的前提下，也許人類的意識並非如此迥異於其他生物。

如同柯霍所言，PCI已「開啟了新的想法」，該系列研究帶我們進入重要的哲學問題——意識的倫理和本質。過去也有人以不同方式提出相關問題，但在缺乏客觀標準下，人們很難提出解答。隨著PCI發展，哲學家 and 科學家終於可集思並尋找更好的方式來定義和比較這些概念。PCI和其他創新的研究方法以及益發精良的腦造影技術，為人類揭開意識起源帶來契機。■

延伸閱讀

訂戶專享 《科學人》雜誌知識庫中英對照版

〈量身微調你的大腦〉，《科學人》2015年2月號。

〈麻醉潛藏的危機〉，《科學人》2014年5月號。

〈植物人的腦中世界〉，《科學人》2007年6月號。



SCIENTIFIC AMERICAN 科學人雜誌

了解主宰你所知所想、所作所為的心與腦

窺探心智

人何以為人，在於獨特的心智。我們是靈巧的工具人、懂得合作的社會人，演化路上如何養成？我們聆賞音樂、具有美感，科學如何解釋這般「藝文氣息」？我們運用策略，難免陷入偏誤，我們發揮意志力，也常被惡習打敗，如何破解盲點、因應壓力、戰勝自我，在人生賽場全力表現？我們需要休息，睡眠為何是思緒清晰的關鍵？如何一夜好眠？我們是意識的主人還是潛意識的奴隸？本書帶領我們由心出發、從腦驗證，探索自我、精采生活。

精采單元

心與腦 · 睡與醒 · 原始與現代

特別邀請

中原大學心理學系副教授
鄭谷苑 專文導讀



每冊定價**380元**
規格：菊八開／全彩印刷

