

由歧路亡羊到量子指數搜尋

文·圖/張慶瑞



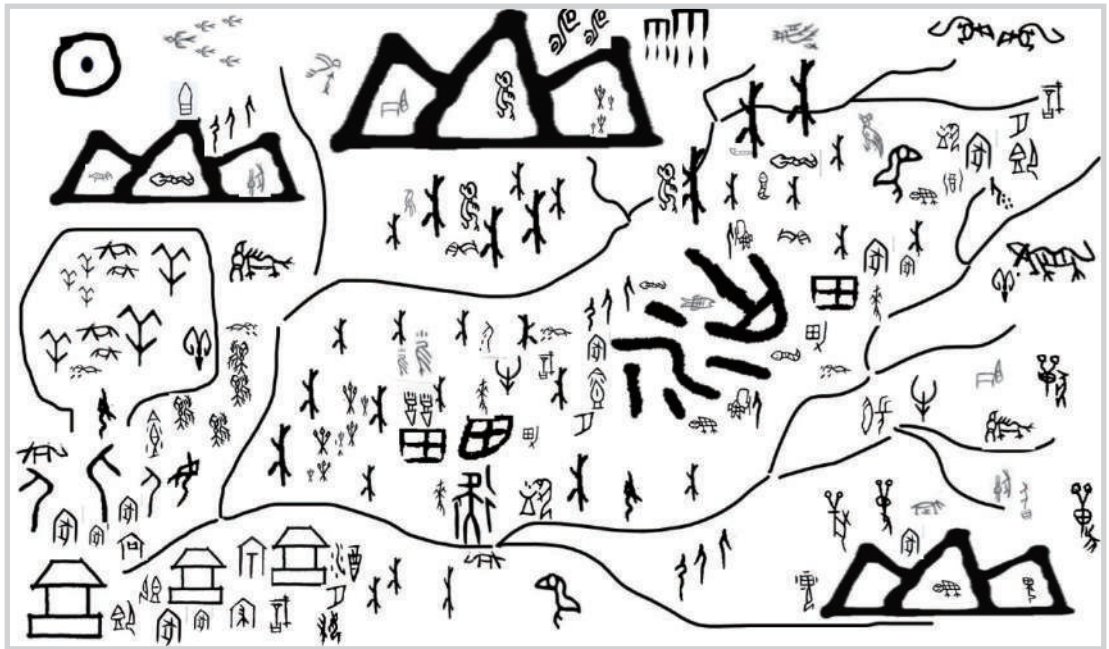
「疑」字的甲骨文像一個拄著手杖的人張大嘴巴，感到困惑而不知如何是好的模樣。有些甲骨文也會在左邊加上「彳」（十字路口），用來強調在十字路口迷路而不知怎麼前往。「辵」字則是由足與行的兩個字合成的會意字，「足」字始見於商代甲骨文，像連腿帶腳的整個下肢，而「行」字像四通八達的十字路口，「辵」字就像人走到十字路口時不知所措。「道」字中間在甲骨文時是人，後來演化成為首，或許表示必須要用頭腦思考才能在眾多岔路中找出正道。「疑」，「辵」與「道」這三個甲骨文字由於非常形象，原意都是人走到岔路時，不知如何是好。第一次在河南許慎文化園看到這些甲骨文時，就覺得與我談到古典粒子通過兩個狹縫時，必須選擇一個方向通過有異曲同工之妙。「疑」字在金文中加入一頭牛在路口，除代表音符外更添一番歧路尋牛之風味。「辵」字篆文省去了半條街，並把「止」（腳）拉到字的下邊，寫作「辵」。辵字目前主要是當部首索引使用，辵部，其附形部首為「辵」，簡體中文以「辵」為主部首，「辵」為附形部首。「道」字中間的人則完全消失，改以頭腦的首字取代，或許是用以表達人力並不能解決岔路的困難，只有使用頭腦才能找出正道。

字	意義	甲骨文	金文	篆文	隸書	楷書
行	甲骨文像四通八達的十字路口；《文解字》：行，人之步趨也。漢典：走。					
足	甲骨文的「足」像連腿帶腳的整個下肢。口像脛骨，下部為腳趾。《文解字》：足，人之足也。漢典：腳；器物之下部支撐部分。					
止	止，甲骨文是一幅腳掌剪影，像腳趾頭張開的腳掌形狀，以三趾代五趾。《文解字》：止，下基也。象艸木出有址，故以止為足。漢典：停住不動。					

字	意義	甲骨文	金文	篆文	隸書	楷書
走	「走」的甲骨文字形像一個人擺動雙臂、邁開大步奔跑的樣子。金文字形在其下增加了一隻腳。「走」最初的意思相當於現在的「跑」。《說文解字》：趨也。漢典：行；移動。					
辵	會意字，甲骨文在「行」的中間又加了一隻腳，本意是在街上行走。篆文省去了半條街，把「止」拉到了下邊，寫作「辵」。《說文解字·辵部》辵：乍行乍止也。漢典：忽走忽停；步履躊躇。		(無)			
道	甲骨文未見，但也有人認為是如右圖中所列，十字路口中間一個人。金文的道字外部是「行」，即十字路口，內部為「首」（也有內部上為「首」，下為「止」的寫法），合在一起就是一個人正在通過十字路口。《說文解字》解釋為「所行道也。」意指人人通行的大路、正道，由此引申為有規範的道理。					
疑	甲骨文像一個拄著手杖的人發傻地張大嘴巴，困惑而不知所向的樣子。亦有加「彳」（十字路口），強調在十字路口迷路含義。造字本義：在十字路口不知所往。甲骨文三種字形，頭部可以向左或向右，也有的有一街口。	 	 金文在人形下添上「止」並加「牛」為聲符。			
量	口，即「日」，代替日月星辰，而東表示移動也代表旅行，有的甲骨文將「口」明確寫成「日」。造字本義：參照日月估算行程。金文字形中「日」與「東」的形象更加明確。有的金文在「東」下面加一橫，形成「土」形。					

表1：辵，道與疑字來源及相關之字來源，字型與意義之時代變化。疑、辵與道都有走至歧路交口，不知如何選擇，步履躊躇之意，但道字變化成走正道的大路，進而變成規範之義。表中也列出量子的量字的甲骨文，本意為行程的長短估計，也是計量單位。

「疑」字僅碰到一個岔路就造成困擾而猶豫不決，如果歧路一直分岔下去，那不是更不知如何是好？人生道路上的歧路更是比山間的羊腸小道還要複雜，隨著時間持續分岔，處處都是困難抉擇，而且蔓延不斷，怎一個疑字了得。《列子·說符》提到歧路亡羊的故事：



左邊村中男耕女織，飲酒啖肉，其樂融融，但羊圈中突然發現少隻羊，著急的老翁帶著小狗前往尋找，在岔路上撐著柺杖正猶豫該往哪條路前進去尋找迷路的羊，雖然許多鄉親放下手邊工作來協尋，但一再分岔的岔路展現出指數成長的威力，絕不是眾人之力可以克服，而且不但路途艱險，沿途又是豺狼虎豹，妖魔鬼怪遍佈。右方中間的老虎正準備吃掉迷路的羊，圖中有包括12生肖（有興趣讀者可以找找看分別在哪裡），以及各種直接能辨識出意義的甲骨文字組合出複雜而困難的歧路亡羊圖，此圖由楊英正及本人合繪。

「楊子之鄰人亡羊，既率其黨，又請楊子之豎追之。楊子曰：『嘻！亡一羊何追者之眾？』鄰人曰：『多歧路。』」楊朱因此聯想到：求學即使再努力，也會因為誤入歧路而永遠繞不出來，找不到正道，這就是「歧路亡羊」成語的典故。楊子在歧路亡羊的故事中，除發現「疑」與「走」時的抉擇困難外，也點出不斷分岔的指數的威力，已經不只是派多點人手找羊就能解決的難題，這就是NP 難題（Non-Polynomial hard）。有趣的是甲骨文的「道」字，從字形看，起初也是人走到岔路後，不知所措，後來演變成將「人」改成「首」，可能是因為老祖宗也已經發現只有利用頭腦思考後的正確判斷，才能走上光明大道。這或許是「道」後來與「首」結合的重要因素，「疑」與「走」兩字，只有人走至岔路，而沒有使用頭腦思考，所以就產生困惑而不知如何選擇。三個似乎同源自於岔路現象的甲骨文，因為有沒有使用頭腦，後來發展際遇竟然如此不同。

圖靈獎得主，臺大物理系的校友姚期智先生曾引用《淮南子》中的另一句話「楊子見達路而哭之，為其可以南可以北」來說明量子位元與古典位元有甚麼不一樣？如何在歧路處能夠做出快速而正確的選擇是人生成功的最重要的法則，多數人都會因為各種誘惑而無法做出正確選擇。人生路途中一步錯就步步錯，所以『維

持初心，一以貫之』，以簡馭繁才是最佳解法。在古典世界中，無數的選擇是成長過程中必要的惡，不同選擇也造成完全不同的人生發展；但在量子世界卻可以同時探討多條路徑的發展。楊子是一個主張「損一毫利天下，不與也」的人，與胡適後來提過的觀點類似：「爭你們個人的自由，便是為國家爭自由！爭你們自己的人格，便是為國家爭人格！」。犧牲個人自由與爭取國家自由常被政治家誤導為必須二選一，但其實個人自由與國家自由永遠是糾纏在一起，可以同時選擇。

數位電腦自1949年以來呈指數級增長，1965年英特爾創始人摩爾（Gordon Earle Moore）注意到電晶體數量定期翻倍，被稱為摩爾定律。D-Wave創始人羅斯（Geordie Rose）發現從1989年開始每隔五年，量子位元數目也翻倍，被稱為量子電腦的羅斯定律，但是量子位元糾纏出來的高維次運算空間會形成另一個指數成長，2018年尼文（Hartmut Neven）進一步提出雙指數的尼文定律。硬體製程進步的指數成長與量子位元糾纏的指數成長共同打造出比古典電腦的摩爾定律更驚人的量子電腦的尼文定律。

指數成長的威力有多強大？古印度有個寓言故事，相傳國王要獎勵宰相，宰相輕鬆的說只需要在西洋棋盤的第一個格子上放上一顆麥粒，以後每天在隔壁格子再加上一倍，直到放滿這8x8格子棋盤的所有格子就好了，國王不以為意的同意了。宰相當天就去倉庫取了第一粒麥子，第二天放二粒麥子，第三天放四粒，等到第二十六天時，格子內要放的麥子已經很多了。到了第三十天時，麥子已經遠超過國庫的存量，國王才瞭解到指數成長的威力。任何企業如果能找到指數成長的獲利方法，則會達成驚人利潤。量子電腦遵循的是雙指數定律，成長速度比麥粒寓言中的指數成長更驚人。以另一個更直接與有趣例子來說明古典位元與量子位元的差異，如果每次走1公尺，走30次後可以走多遠？按照古典電腦的做法就像是 1×30 也就是30公尺，量子電腦則是指數成長，可以走出 2^{30} 公尺，約等於繞地球26圈，『指數級成長』是量子電腦的真正威力。每增加一個量子位元，都會將存儲的狀態加倍：兩個量子位元可以儲存四種狀態，三個量子位元則可以儲存八種狀態，以此類推。因此72個量子位元的量子系統，所建立量子態的數目等於 2^{72} 個古典位元的編碼才能完成，大約要26台目前世界最強大的超級電腦才能實現。量子位元的真正可怕處，除了計算速度外，其實電腦本身體積也是一個重要因素。簡單的估算，276個量子位元大約等於是 2^{276} 個古典位元，也就是大約等於 10^{81} 個古典位元。如果每個古典位元尺寸是台積電尚未開發出來的1nm製程所製作的， 10^{81} 個古典位元的每邊邊長所佔有的空間長度是 10^{18} 公尺，這個長度比太陽系還長，根本無法放置在地球之上的，可是有276個量子位元的量子電腦可能未來只是在一個小型房間內。

Multivac是偉大的科幻作家以撒·艾西莫夫（Isaac Asimov, 1920-1992）在其作品中使用的超級電腦。只要是與我年齡類似的人應該都在1970年代「使用」過臺灣大學的UNIVAC。那時在臺大修Fortran課使用IBM輸入卡打洞機，在研究生圖書館中打洞機數量不足，而且色帶常常用完，因

張慶瑞 專欄

此也不知道輸入卡片上到底打出的是甚麼，但也只能硬著頭皮去櫃檯繳交上機。上機是經由計算機中心的一個窗口的操作員小姐，只要編碼有錯，就是一個星期拿到輸出報表後，才能進行偵錯。一學期有十個作業，許多同學都無法做完，就是因為臺大打洞機常常壞掉與不能讓學生直接使用UNIVAC之故。Uni望文生義是一個，Vac 就是vacuum tube，UNIVAC就是一個真空管，艾西莫夫的MultiVac就是許多真空管組成的超級電腦。艾西莫夫1955年到1979年的15部小說中，都有用超級電腦來模擬宇宙。簡單估計知道宇宙中約有 10^{80} 個原子，如果用一個古典位元來代表一個原子，模擬宇宙的超級電腦至少需要 10^{80} 個古典位元，真空管遠比台積電的1nm產品更大，照前文中粗淺估計，這種Goliath等級的超級電腦的體積一定遠大於地球，因此也無法放在地球，這是艾西莫夫寫科幻小說時所沒有想到的。

依照艾西莫夫科幻小說，一個原子需要一個位元，則按照古典電腦的摩爾定律與量子電腦的尼文定律，可以估算出如下表的有趣結果。雖然現在人工智慧的說法甚囂塵上，依照摩爾定律要做出真實電腦來模擬宇宙的路途還非常遙遠，但是現在半路殺出的量子電腦，雙指數定律的尼文定律讓艾西莫夫的Goliath巨型電腦變成有機會在可見的未來出現在地球上。

欲模擬系統	模擬系統內原子數目 10^n	所需的古典電腦邊長	摩爾定律估計的古典電腦出現年代 [y-1949=6.64n]	尼文定律估算量子電腦出現年代 [Y-1989=16.8 log(3.33n)]
人	10^{16}	$10^4 - 10^3\text{m}$	2055	2018 (Eagle, 127 qubits, 2021)
地球	10^{50}	$10^7 - 10^8\text{m}$	2281	2025 (Osprey, 433 qubits, 2022)
太陽系	10^{58}	$10^{10} - 10^{11}\text{m}$	2335	2027 (Condor, 1121 qubits, 2023)
宇宙	10^{80}	$10^{17} - 10^{18}\text{m}$	2480	2030 (Starling, 100M qubits, 2029)

表2：依照摩爾定律與尼文定律，艾西莫夫科幻小說的Goliath巨型電腦可能出現時間與尺寸。摩爾定律與尼文定律欄位中的n是模擬系統欄位內的指數數目，而四位數字代表模擬不同體系的Goliath電腦出現的西元年代。Eagle（127量子位元），Osprey（433量子位元）與Condor（1121量子位元）則是IBM的量子電腦出現年代。IBM 預估2029將推出一億個量子位元的可糾錯的量子電腦。

表2表示只要模擬比地球大的系統的古典電腦邊長都大於地球直徑（ $1.27 \times 10^7\text{m}$ ）。由於量子電腦的出現，似乎艾西莫夫的Goliath巨型電腦的確有機會在地球上出現，雖然表2是估計物理量子位元的出現時間，邏輯量子位元仍要多點時間，但比起古典電腦而言，已經不是毫無機會。美國量子新創公司Quera最近宣布2026年將推出100個邏輯量子位元的量子電腦，約等於表2中 10^{30} 的系統，是

模擬介於人與地球之間所需的數目，更重要的是100個邏輯量子位元已經超過古典電腦可以模擬的量子電腦。看來quantum advantage 的量子電腦元年將在2026至2029年間逐漸成熟，艾西莫夫科幻小說的情境可能即將出現。

「疑」與「走」就像人的粒子特性，只有不斷嘗試錯誤來尋找正確道路，所以就會有歧路亡羊的指數難題，量子搜尋就像「道」字利用頭腦思想找出正道，不但解決歧路亡羊的困惱，更讓艾西莫夫的Goliath超級電腦可能在地球上出現。當初創造甲骨文的老祖宗，如果早知道量子搜尋技術，就不會有粒子選擇歧路的疑惑，可能「疑」與「走」字也不會出現，而只會發明有頭腦的「道」字了。本文最後用宋詞【聲聲慢】詞林正韻詞牌，填一首〈岔路亡羊聲聲急〉，在複雜岔路中搜尋對粒子性的人而言，是困難而無解的NP-hard 問題，只有會使用頭腦的人，才能快速找出正道，有詞為證曰：

搖搖晃晃，覓覓尋尋，忙忙撞撞躑躑，日暮途窮。人从众激情旺，
心煩呼，意亂喚，聲聲急，語顫音幌。
見岔路，欲前行，四面霧，八方望。
滿落松針壘壤，糾纏地，如今旅途織罔。盼著羊兒，擾擾紛紛漸忘。
愁歧道，憂蔓野，又黃昏，復復往往，剎那間，恨指數礙處難闖！



張慶瑞 小檔案

1979 年畢業於臺大物理學系，1988 在加州大學聖地牙哥分校取得物理博士學位，1989 年二月進入臺大服務，曾經擔任臺大副校長並代理校長。

張教授從事微磁學數值研究與自旋傳輸機制，已發表 280 篇以上專業論文並獲得 28 個專利。他是美國物理學會（APS）與國際工程學會（IEEE）會士，及俄國國際工程學會（RIAE）的院士。曾擔任亞洲磁性協會理事長，及臺灣磁性協會理事長暨臺灣物理學會理事長。近來曾主持 NTU-IBM 量子計畫，積極加速培養新興跨領域人才。近期推動量子計算相關研究，應用於新材料、新藥物合成，與財務金融領域，並創建臺灣量子電腦暨資訊科技協會，擔任理事長。於 2022 年擔任中原大學物理系講座教授並兼任校級量子資訊中心主任。