



趙丰曾任美國航太總署哥達德太空飛行中心的太空測地實驗室主任、中央大學地球科學院院長，現任中央研究院地球科學研究所所長；研究專長為地球與行星動力學、重力學、地球物理與地震學等。



蒼茫大地何去何從：方向為憑

天蒼蒼、野茫茫，經緯之辨只告訴了我們身在地球的何處，可是下一步何去何從？
天靈靈、地靈靈，拜託告訴我方向吧！

就像人生該有個目標，每個人的行止都缺不了方向的資訊。日常生活中我們並不會刻意在意方向，是因為總會有熟悉的實景可做為參考；然而一旦熟悉度不再時，只有等著迷途啦。

和人類活動息息相關的長程交通工具更是必須能夠訂定方向。古今中外，陸地上的車行、駝隊，大海裡的舟、船航行，天空中的飛機、飛彈，以至人造衛星、太空船，不論是遷徙、旅行、軍事行動、商業運輸，還是探索、開拓，能否訂定方向往往是成敗之關鍵，甚至攸關生死。在沒有日月星斗可參考的時節，要怎樣才能知道方向？

歷史上有過指南車。相傳（見晉代崔豹《古今註》）黃帝借助於它，在涿鹿擊敗了祭起大霧的蚩尤而成帝業。周公也曾製作指南車送給越南來使，希望他們回國途中不至於迷路。後來歷代陸續有能人巧匠做出款式不一的指南車，而晚至宋史裡真確的記載，才讓指南車（亦稱司南車）現了原形——原來車裡有著一套設計精妙的齒輪組！陸行車左右兩輪的轉動會傳到齒輪組，兩輪間的差速聯動到一個木製小仙童，而齒輪組的作用是讓仙童手指的方向保持恆定（例如向南，見右圖）。

指南車只能在工坊（或實驗室）環

境裡才能運作，或是當做新鮮玩意兒在晚宴上讓賓主盡歡，宋史也只有提到在「宗祀大禮始用之」。在實戰狀況下恐怕靠不了它，因為輪子相對地面總有打滑，於是誤差不斷累積，很快就破功啦。涿鹿之戰（其實只是部落間打群架）的勝負，恐怕無關乎指南車。

真正派得上用場的主角是指南針。中國古人很早就知道自由懸浮的磁針會自動指向南北（至於是怎麼發現這個現象的呢？真是不可思議！當時的

人當然並不懂得地球磁場會使磁針對齊磁力線的道理）。成書於1044年的北宋兵書《武經總要》記載：「若遇天景暝霾，夜色螟黑，又不能辨方向，則當縱老馬前行，令識道路（老馬識途也），或出指南車或指南魚（魚形的指南針）以辨所向。指南車法世不傳。魚法以薄鐵葉剪裁，長二寸、闊五分，首尾銳如魚形，置炭火中燒之，候通赤，以鐵鈴鈴魚首出火，以尾正對子位（北方向），蘸水盆中，沒尾數分則止（讓燒紅再冷卻的鐵魚將地球磁場「鎖入」而帶磁性），以密器收之。用時，置水碗於無風處，平放魚在水而令浮，其首常南向午（南方向）也。」同一時代沈括（1031~1095）所著的《夢溪筆談》，更清楚地描述了磁針指南一事，甚至注意到磁傾角的存在（見2011年10月號〈一代司天監，千古說夢溪〉）。

此後，12世紀以降，指南針（多屬水浮式）開始行其道，例如北宋朱彧《萍洲可談》：「舟師識地理，夜則觀星，晝則觀日，陰晦觀指南針。」最重要的例子當屬明朝鄭和（1371~1433）下西洋——隨行的幕僚鞏珍在《西洋番國志》中敘述：「往還三年，經濟大海，綿邈彌茫，水天連接，四望迢然，絕無纖翳之隱蔽。惟日月升墜，以辨西東，星頭高



明朝王圻撰寫的《三才圖會》，繪有一幅指南車圖，是根據先前所見的一款實物描畫的，旁註指出：「琢玉為人形，手常指南，足底通圓竅，作旋轉軸。」

低，度量遠近。斫木為盤，書刻干支之字，浮針於水，指向行舟。」明朝《武備志》中的〈鄭和航海圖〉收錄了多達109道「航海針路」，就是以指南針的指向為參考的航向路線圖。

指南針被歐洲人引以為中國貢獻世界文明的四大發明之一，將它進一步再配以外盤、標出方向刻度，就成為羅盤。歐洲最早的相關記載出現在1187年（比中國晚了100多年），不意外地屬於航海用的水浮式羅盤。而在歷史上總是扮演了傳播東、西方文化橋樑角色的阿拉伯人，對指南針反倒是後知後覺，直到1232年才首次載諸阿拉伯文字，描述了一款中國式的水浮魚形磁鐵片。

指南針其實指向的是地球磁場的南北極，與地球自轉的真正南北極算是相當接近，但不全然相同（見2009年5月號〈燭龍：千百世代的古今奇緣〉），所以總得想辦法修正；這在緯度不太高的地球大部份地區問題不大，但到了高緯度，越接近磁南北極就越糟糕。反過來說，大航海世代的航海日誌裡磁羅盤讀數的記錄（早自哥倫布的橫越大西洋），倒包含了幾百年來地球磁場逐漸漂移的訊息，是相當珍貴的科學數據。

時至今日，磁羅盤依舊是實務上訂定方向的好幫手。然而在科技日益進步、精準度要求不斷提高的現代，訂定方向的重責大任逐漸歸到了陀螺儀的身上。

傳統的機械式陀螺儀，其主件只是一個快速旋轉著的飛輪，運作原理很簡單（與磁場無關）：以太空船為例，將轉輪架在一個沒有摩擦力的萬向平衡支架組上，後者固定在太空船身。由於已被萬向平衡架隔離掉任何



近代的機械式陀螺儀示意圖。

外力矩，轉輪的旋轉面在角動量守恆之下，相對於宇宙座標維持不變——也因此維持著出發時校準好的方向（見上圖）。於是無論太空船隨後怎麼東轉西繞，都可以根據陀螺儀的讀數得知太空船本身（在宇宙座標裡）當下的指向。早在19世紀初，陀螺儀就已經出現在德國，但要到幾乎一世紀以後，多虧了電動馬達的加持、克服了無法避免的機械摩擦力，而讓輪轉得以永不止息，這才成為長距的交通工具（尤其是軍事用途）必備的定向裝置。

非關乎動力、尤其是屬於訊息或智慧型的機械裝置，在新科技的趨勢下，終究躲不了被非機械的方式所取代的命運，陀螺儀也不例外。1887年，邁克生及莫立以光學干涉儀所做

的實驗，啟發了愛因斯坦揚棄了以太論而導出狹義相對論，把古典力學牽引進入了現代物理學的範疇。1926年，邁克生再展長才，和蓋爾（Henry Gale）兩人根據桑克效應，製作了一個周長1.9公里的大型光學環狀迴路干涉儀，成功偵測到了地球的絕對自轉。

近年來憑藉了雷射和光纖技術，光學迴路干涉方法一路演進，如今大型的實驗室版本，最精確的竟然已可以偵測到地球自轉裡那些微小的改變（見2009年8月〈地球自轉：多姿多采的旋舞〉）！而輕巧版則成為商用「雷射環陀螺儀」，大有取代機械陀螺儀之勢。同時，有些更小巧的專利陀螺儀或加速儀善用了某些電磁和科氏力交互作用，在日常的遊戲機和手機裡已成為不可或缺的元件。另一方面，量子物理範疇裡的現象，包括超導、超流體對旋轉的精細感應，則在物理實驗室裡被探索、試驗，更棒的定向裝置指日可待。

回頭看我們一般行車走船的定向：今天的GPS隨時隨地都可以告訴你極精確的時空座標。雖然這並不直接指引你正確的方向，但當你在行動（譬如開著車）時，連續進行GPS定位也就間接透露了你當時實際行進的方向（及速度），於是你是否要調整方向，就有所憑藉了。新時代的太空技術，其能耐令人歎為觀止！

2050年。一艘馳騁在太平洋上的超級戰艦，駕駛室牆邊裝著一個密封的玻璃櫥，以文字標示著：「如遇電力、機械或衛星系統故障或人為損壞，而無法訂定方向的緊急情況時，請敲破此櫥窗。」櫥窗裡靜躺著一具磁羅盤。

SA