飛機上的驚奇科學課：

從機場、機艙到機窗外，航空旅途中的103個科學疑問全解答

作者：布萊恩・克雷格（Brian Clegg）
出版社：晨星出版有限公司
出版日期：2015 年 5 月 1 日

文／白榮銓

乘坐飛機旅行時，機場的安全檢查系統、旅行者血栓症（traveler's thrombosis）的形成、惱人的時差、飛機的導航系統、機翼的變換動作、機窗外的雲層變化、以及地面上迷人的碎形（fractal），這些從機場、機艙到機窗外的所見所聞，常帶給旅客許多的驚奇和疑問，到底在航空旅途中，還有那些相關的科學現象？這些現象隱含的科學原理是什麼？

本書作者英國知名科普作家布萊恩・克雷格（Brian Clegg, 1955-），擁有劍橋大學自然科學的學士學位及蘭卡斯特大學（Lancaster University）作業研究（operations research，又稱運籌學）的碩士學位，曾為《自然》（Nature）、《衛報》（The Guardian）等多家媒體撰寫專欄與評論，同時是多本科普暢銷書作者。本書共分為七部分，作者介紹及解析搭飛機旅行過程中，「機場、天空、地面景致、雲之上、機艙人生、飛行時的科技、回到地球」等階段相關的科學原理與奧秘。

金屬探測安檢門

在機場安檢作業上，通常以金屬探測安檢門，對旅客作大範圍篩檢，或以掌上型金屬探測器，對可疑旅客進行複檢。到底金屬探測器的工作原理是什麼？除了安檢，還應用在那些領域？

1881 年 7 月 2 日，第 20 任美國總統加菲爾德（James Garfield, 1831-1881）遭到謀官未成、心懷忿恨的刺客，於背後開槍暗殺，子彈深入體內，為了幫忙外科醫生定出子彈的位置，美國發明家和企業家貝爾（Alexander Bell, 1847-1942）發明了金屬探測器，這是一種電磁裝置，他稱之為「感應平衡器」（induction balance）。雖然金屬探測器可以正常工作，就是定不出子彈的位置，原來貝爾不知道加菲爾德躺在螺旋彈簧床墊上，而當時的彈簧床墊也是新發明之一，螺旋彈簧線圈干擾了金屬探測器，產生許多假信號。貝爾稍後的改良型金屬探測器，讓醫生於戰時挽救了許多生命，直到 X 光機發明為止。

1920 年代末，美國工程師費舍爾（Gerhard Fisher, 1899-1988）發明了「飛機無線電測向儀」（aircraft radio detection finders），飛行員發現：如果在發射器和接收器之間出現金屬物體，或當他們飛經某些地域時，方向就會出現錯誤。費舍爾研究發現這些錯誤，是由於高導電、礦化物（highly conductive, mineralized substances）所導致的結果。於是費舍爾利用同樣的原理，開發一種可攜式電子探勘儀器，用來檢測埋藏在地下的金屬物體和地下礦床（ore deposits）。

1931 年，費舍爾在加州帕洛阿爾托（Palo Alto, California）住家的車庫裡，成立了研究實驗室，並發明了易於使用的金屬探測器，他稱之為 metalloscope（簡稱 M-Scope），並取得專利。金屬探測器被廣泛應用於各領域，例如礦產業者用它來檢測和發現自然金屬顆粒，尋寶者用它來探測埋藏在地下和古墓的金屬物品，公用事業公司用它來探測地下的金屬管道，伐木廠用它來檢測原木是否有金屬內含物，執法部門用它來探測隨身攜帶和隱藏的武器，軍事上用它來探測金屬地雷，工業上用它來監測食品是否有金屬雜物。

金屬探測器使用的技術有三種，分別是甚低頻（very low frequency，縮寫 VLF）、脈波感應（pulse induction，縮寫 PI）、差拍振盪器（beat frequency oscillator，縮寫 BFO）。大多數機場的金屬探測門都是使用脈波感應，做法是在金屬探測門的一側，裝設單個線圈，扮演發射器（transmitter）和接收器（receiver）的雙重角色，如果向線圈輸送強大且短脈波的電流，則每一次脈波都會產生一個瞬時磁場。脈波結束後，磁場極性會反轉，然後迅速衰減，產生一個急遽上升的「尖峰脈衝」（spike）；這一尖峰脈衝可持續幾個微秒（microseconds），並導致線圈上產生另一電流，這一電流稱為「反射脈波」，持續的時間約為 30 微秒；隨後線圈再發射另一個脈波，並重複上述過程。以 PI 為基礎的金屬探測器，通常每秒發送約 100 個脈波，但此數字可因生產商和產品型號的不同而有很大變化，每秒發送的脈波數約 25 ～ 1,000。

如果有金屬物體通過金屬探測器，脈波會在該物體內部形成反向磁場，延長了反射脈波從衰減到消失的時間，這一過程的原理有些類似於回聲現象；如果在一間只有幾面硬壁的房間內叫喊，只能聽到短暫的回聲，甚至根本聽不到回聲；但如果在一間都是硬壁的房間內叫喊，回聲持續的時間就會延長。PI 金屬探測器中，目標物產生的磁場加強了反射脈波的「回聲」，使得它持續的時間要比沒有「回聲」時略長一些。

金屬探測器中的抽樣電路（sampling circuit）被設置來檢測反射脈的時間長短，比較「實測時間」與預期時間的長短，就能判定是否存在另一個磁場，延緩了反射脈波的衰減；當反射脈波的衰減時間，比平常情況多出幾個微秒，就可能是金屬物體干預了反射脈波。抽樣電路將它所監測到的微弱信號，傳送給積分器（integrator），積分器會讀取從抽樣電路傳來的信號，將其放大並轉換為直流電，連接至聲頻電路（audio circuit）並發出聲音，而金屬探測器就是利用聲音，做為發現目標物的指示信號。（請參考 How Airport Security Works：http://science.howstuffworks.com/transport/flight/modern/airport-security3.htm）

由上述可知，金屬探測器是利用電磁

感應的原理，首先產生迅速變化的磁場，在金屬物體內部能感生渦電流，然後渦電流又會產生互動的磁場，反過來影響原來的磁場；最後由金屬探測器的電路讀取信號，經過相關處理後，發出鳴聲或使儀表指針發生轉動。

導航及飛航交通管制

飛機要維持正確的航向，需經常測定現在的位置，以及瞭解到目的地的方向和距離，隨著飛行科技的演變，從早期的地形導航、推測導航（dead reckoning navigation）、天文導航（celestial navigation），進而發展至無線電導航（radio navigation）。到底什麼是無線電導航？飛航管制人員如何掌握航機的航行動態？

無線電導航是利用地面無線電台發射無線電波，導引航機安全飛行及起降的「助導航」科技。高空航行的飛機，接收到地面上「極高頻全向導航台」（VHF omni-directional radio range beacon，縮寫 VOR）發射出 108 ～ 118MHZ 頻率的無線電波，飛機的駕駛，依據座艙內的無線電羅盤儀（radio magnetic indicator）儀表，可以判斷飛機相對於 VOR 導航台的位置，並維持在設定的航道上。臺北飛航情報區（Taipei FIR）的航路上，在本島及外島的不同地點，共設有 9 套「都卜勒特高頻多向導航台」（Doppler VOR），Doppler VOR 是第二代的 VOR，能提供更好的信號品質及精確度。

提供航機定向指引的助導航科技，還有「全方位無線電導航台」（non-directional radio beacon，縮寫 NDB），通常作為 VOR 的輔助設施。NDB 發射出 190 ～ 535MHZ 頻率的無線電波，經由機上的自動定向儀（automatic direction finder）接收，提供駕駛修正航線的資訊；因為電波到來之方向就是 NDB 的位置，故只要將機首對準並保持 NDB 的方位，就能到達該 NDB 的位置，其作用就像燈塔導引船舶的方式。供航路上之航機使用的 NDB，稱為「歸航台」；配合機場降落系統使用的 NDB，稱為「定位台」（locator）。臺北飛航情報區的航路上，在本島及外島的不同地點，共設有 10 套歸航台和 13 套定位台。

為了維護航機的飛行安全，並保持空中交通的秩序與暢通，航空交通管制（air traffic control）必須實施區域管制（area control）、終端（又稱近場）管制（terminal approach control）及機場管制（airport control），這些飛航管制仰賴「航管雷達」系統，航管雷達依據涵蓋需求，可區分為長程雷達（long range radar）及終端雷達（terminal radar）兩種。長程雷達用於航路管制使用，涵蓋距離約為 250 浬；終端雷達用於終端管制使用，涵蓋距離約為 60 浬。

當飛機上的詢答器（transmitting-responder，縮寫 transponder）接收到航管雷達的訊號時，它會將航機距離、方位、高度及航機代碼等資訊，傳送給飛航管理系統，顯示於雷達幕，以便飛航管制人員能夠掌握航機動態，引導航機安全飛行、降落和起飛。

除此之外，機場設有「機場場面搜索雷達」（surveillance movement radar）系統，一般稱為「機場場面偵測裝備」(airport surface detection equipment)，主要用於搜索機場範圍內之地面滑行航機和移動車輛之動態，以提供機場塔臺管制員執行飛航管制之參考。

由於航空空運的快速成長，為了降低飛航成本及提高飛航效益，相較於傳統的「航管雷達」系統，現已有更精確可

靠的「廣播式自動回報監視」（automatic dependent surveillance -broadcast，縮寫 ADS-B）系統。配置有 ADS-B Out 的航機，利用全球導航衛星系統（global navigation satellite system）來確認航機位置，然後將現在位置、識別資訊、航行高度及速度等資訊，每半秒自動向外播送 1 次，當地面站接收到航機播送之訊息，立即傳送給飛航管理系統，並將其顯示於管制員之顯示幕。臺北飛航情報區的航路上，在本島及外島的不同地點，共設有 9 套廣播式自動回報監視系統。

只要有 ADS-B 接收器，就可以接收到附近航機的訊號，瞭解附近航機的動態，例如 Flightradar24（http://www.flightradar24.com/）和 Planefinder（https://planefinder.net/）網站，就是藉由在世界各地布署的 ADS-B 接收器，主動記錄全球各班機的航跡，呈現在網站上，只要輸入機場名稱或航班代號，就可以查詢到該機場或航機目前的位置或飛行動態。

由上述可知，「無線電導航」是航機接收地面「極高頻全向導航台」和「全方位無線電導航台」系統的信號，導引航機正確安全地飛抵目標；航管雷達、機場場面偵測裝備和廣播式自動回報監視系統，讓飛航管制員在地面監看航機動態，協調、指揮空域或機場內不同航機的航行路線，以確保地面機場或空中交通皆能有秩序地運作順暢。

機翼的構造與功能

飛機在飛行時，外表任何部份都可產生升力（lift），但主要的升力來自機翼，到底機翼受到的升力是如何產生的？機翼的構造為何？各具有那些功能？

因為空氣是順著機翼表面上方的曲線，「向下」流經機翼，所以流動的空氣具有加速度，而且加速度的方向也是「向下」，表示機翼對空氣產生「向下」的作用力；而空氣也相對地對機翼施以大小相等、方向相反的反作用力，故機翼受到「向上」的升力。（請參考 Lift from flow turning，https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/right2.html）

機翼下方有數支流線型的滑軌延伸支桿，稱為襟翼滑軌整流罩（flap track fairing），它們可以控制襟翼（flap）的伸縮，當飛機起飛或下降時，安裝在機翼後緣的襟翼，將隨著襟翼滑軌整流罩後退且下偏（圖 1），使得機翼面積增大，並改變了機翼向下偏的角度，目的是增大升力，但也增大了阻力。起飛時，伸展襟翼，襟翼向後下方的偏角較小，主要是增加升力的作用，以利於飛機加速起飛；升空到達安全高度後，收起襟翼，減少阻力，以利高速巡航；降落時，全面伸展襟翼，襟翼向後下方的偏角較大，可以使飛機的升力和阻力同時加大，以利於降低著陸速度。

圖 1　降落前，襟機隨著滑軌整流罩伸展並下偏。（圖片來源：Wikimedia Commons）

擾流板（spoiler）是安裝在兩側機翼的減速裝置，在飛行過程中升起，可以減緩速度並降低高度；飛機降落滑行時，向上升起擾流板（圖 2），增加阻力，以便降低滑行速度，縮短滑行距離。副翼（aileron）是一對可活動的翼面，安裝在兩側翼梢的後緣，幫助飛機在水平方向轉彎；若左邊副翼下偏，右邊副翼上偏，則流動空氣對兩邊副翼造成的力矩，將使機身繞著縱軸向右旋轉（圖 3）；若左邊副翼上偏，右邊副翼下偏，則飛機向左旋轉。

翼翹（winglet）是在兩側翼尖上的小翅（圖 4），當空氣流經機翼上、下表面時，會形成壓力差，產生升力；亦即機翼下表面的壓力大，上表面的壓力小，因此在翼尖的地方，就會出現下表面壓力大的氣流，向上表面壓力小的區域流動之現象，從而在翼尖形成渦流（vortex），增大了飛機的阻力，這種阻力稱為誘導阻力（induced drag）。在翼尖裝設小翅之後，阻斷了上繞氣流，使渦流減弱，因而減小了飛行阻力，達到節約油耗、降低飛行成本的目的。

圖 4　翼翹。（圖片來源：Wikimedia Commons）

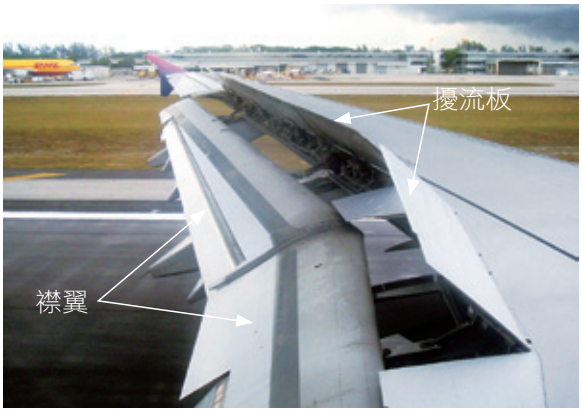

圖 2　降落滑行時，擾流板及襟翼的位置。（圖片來源：Wikimedia Commons）

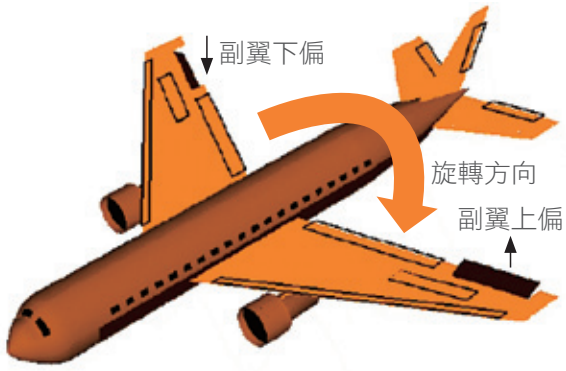

圖 3　副翼一上一下，可使機身發生旋轉。（圖片來源：Wikimedia Commons）

由上述可知，飛機仰賴主翼和襟翼提供主要的升力，但要全面操縱飛機，仍須仰賴主翼上的擾流板、副翼和翼翹，以及飛機尾部的水平安定面、升降舵、垂直安定面和方向舵等，作為輔助設施。

綜合上述，金屬探測安檢門的運作，牽涉到電與磁的交互作用；導航及飛航交通管制，應用了無線電波、雷達及全球導航衛星系統；飛機由滑行、升空到降落，呈現出機翼各部分的構造及變化。至於機場跑道怎麼編號？什麼是慣性導航系統？高空飛機外頭有生命嗎？為什麼起飛與降落時，兩台飛機之間要拉長間隔？……等其他相關問題，這些都有待您進一步的閱讀與思考！

白榮銓　臺中市立居仁國中退休教師