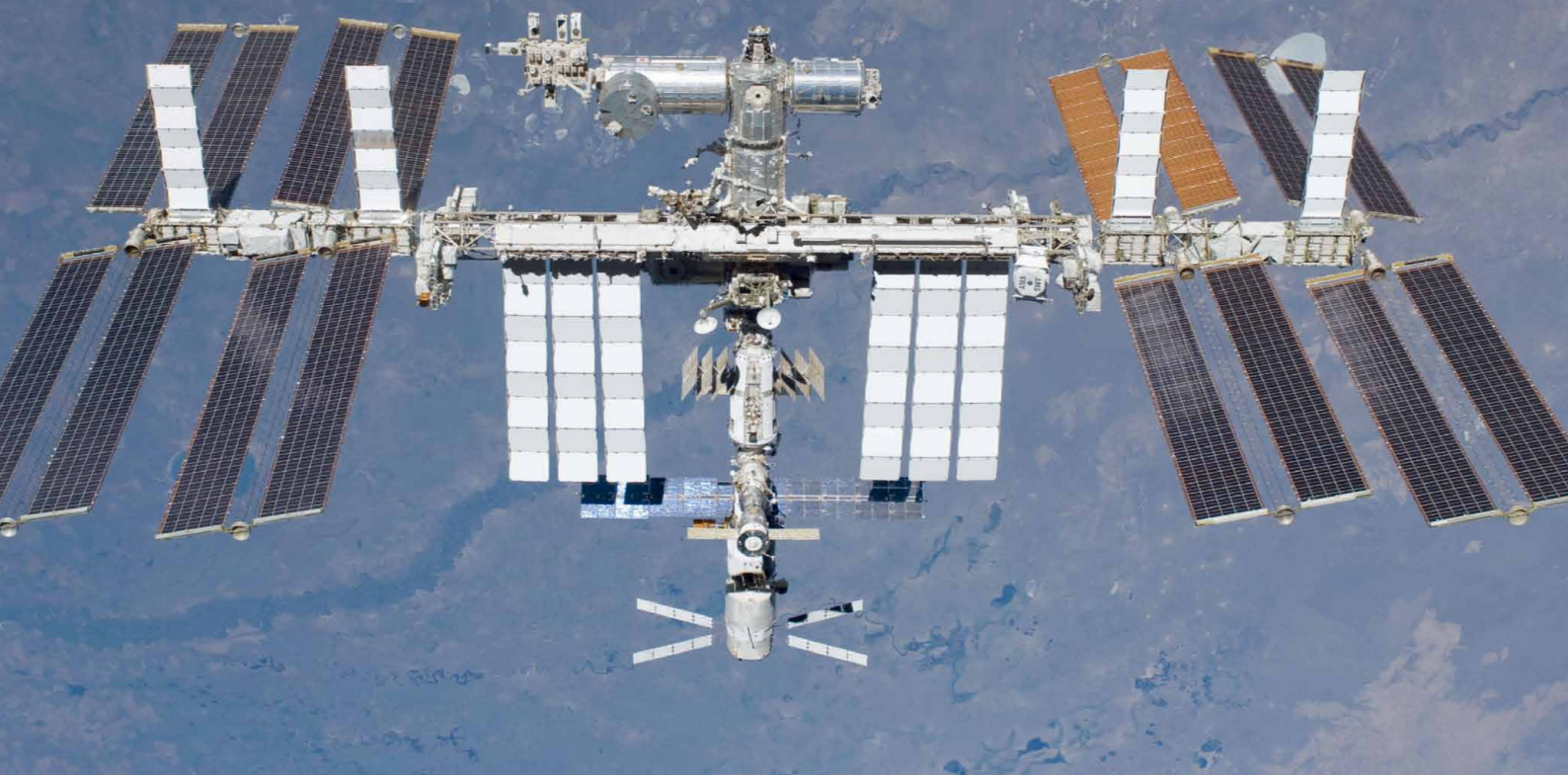


文/ 陳彥升

也許你曾經在日出前或日落後的傾刻間仰望天空，發現一顆比金星略為明亮的光點滑過天際，一開始你可能會以為那是一顆星星，但又察覺星星不應該會移動那麼快？此時，也許你看到的是這顆國際知名的人造月亮——國際太空站（International Space Station, ISS）。由於它是在離我們很近的低軌道上繞行，在日出前或日落後天色較暗的時刻，它所反射的陽光就會特別耀眼。也由於它是目前太空中最大的人造物體，有時我們在白天也可經由望遠鏡捕捉到它的影像。你會發現，它飛行的方向較偏南北走向，因為它的飛行軌道傾角（Orbital Inclination，軌道面與地球赤道面的夾角）大約是51.6度。

太空站與太空旅行



國際太空站外觀（圖片來源：NASA）

自1998年組裝及發射第一個模組件來，這個多國合作，在軌道上建造的國際太空站，已成為一個長期穩定的太空實驗室與觀測站，它同時也可成為未來人類前進月球、火星及小行星探索的中繼站，提供運輸與維修的功能。這呼號被定為「Station Alpha」的國際太空站，目前總長約為72.8公尺、寬約108.5公尺、高約20公尺，在平均330公里至413公里高的軌道上，以每秒大約7.66公里的高速飛行（是海平面音速的22.3倍），每天環繞地球大約15圈半，讓研究人員能在太空及微重力的環境中，進行各種科學實驗，以及對地球上氣象與天文的觀測。

太空站的設計經驗 與技術發展

國際太空站是繼俄羅斯放棄「和平號」(Mir)太空站，並決定讓其返回大氣燒毀之後，最大規模、也是最為複雜的國際合作太空計畫。是基於之前累積的8座載人太空站的技術與設計經驗所規劃建造而成。人類設計與建造太空站的實現是由前蘇聯開始的，最早是1960年初期的「鑽石號」(Almaz)、1971年的「禮炮號」(Salyut)，還有後來俄羅斯的1986年至2001年的「和平號」(Mir)，其間也有1973年至1979年美國建造的「太空實驗室」(Skylab)。由這些歷史記錄看來，俄羅斯在太空站的設計上是較有經驗的，也因此，在現今國際太空站系統中，俄羅斯段(Russian Orbital Segment, ROS)的模組結構設計有較多安全考量，較能抵抗太空碎片的撞擊，同時也備有調整飛行軌道高度的推進引擎系統，可以獨立自成一套太空站系統。而美國段(United States Orbital Segment, USOS)則較注重實驗操作的多樣性、太空人生活空間的設計改進，以及太空站電力與結構系統的擴充與完整性。

其實，國際太空站的計畫發展與準備過程歷時十多年，而且也有些曲折。於1980年代初期，美國太空總署(NASA)開始規劃，繼太空實驗室之後如何延續長期的太空與微重力研究，因此，NASA在1984年邀請歐洲太空總署(ESA)，來參與「自由號」(Freedom)太空站的建造，而於



太空梭運載能量幫助國際太空站的建造
(圖片來源：NASA)

1993年蘇聯解體後，計畫變更為結合美國的自由號及俄羅斯的和平二號設計，而終於成為最後的國際太空站設計。

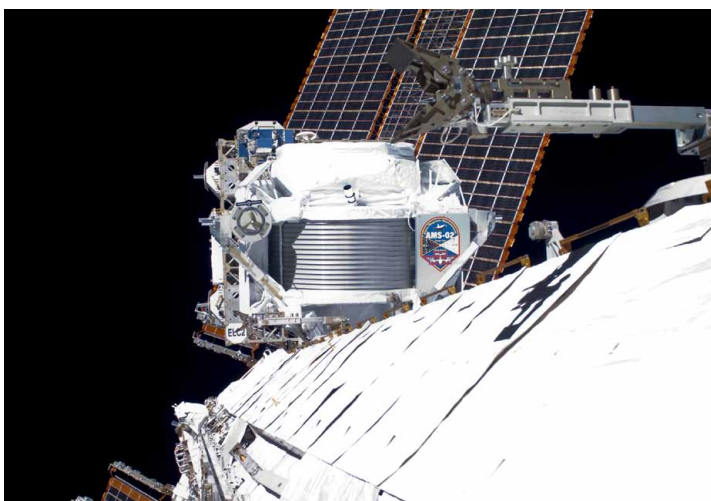
國際太空站的經費來源

當然這樣大規模太空計畫的建造，除了科技人員參與及技術需求之外，最重要的還是需有足夠的經費才能完成，就如同航太系統工程始祖，也是屢創航太設計奇蹟的凱利強森(Kelly Johnson, 1910-1990, Lockheed Skunk Works)曾經表示，若無巧妙的預算規劃，就不可能完成挑戰性的計畫。國際太空站至2010年為止的總經費估計約1500億美元，其中包括NASA建造太空站使用了756億，36趟太空梭發射費用(每趟約14億，共504億)，俄羅斯出資120億，歐盟及日本各挹注入50億，加拿大出了20億。這筆經費看來龐大，但與NASA之前的太空實驗室比較，這個新太空站的每人使用費用可是便宜了一半，而它的科學、醫學及材料實驗與科技發展所產生的民生與產業實質效益，更是難以金錢來估計。為了擴大國際參與，歐洲太空總署(ESA)曾提議邀請中國、印度及南韓共同投資，但因為美國國會法案禁止美國

與中國在太空計畫上的任何合作，最後於2010年底決定增加印度與南韓成為新成員，開始討論他們願意參與的項目。

國際太空站的主要功能

國際太空站的主要功能包括科學研究、微重力實驗、太空探索、以及教育與文化推廣等。在科學研究上，主要包括太空生物學、天文學、太空醫學、生命科學、物理學、材料學、太空天氣及大氣氣候研究等。例如，其中日本的「希望實驗室」(Kibo)主要目的在於加速日本的科技研發，並將所發現新知應用在日本的工業與醫藥產品上。此外，為了解開宇宙重要謎底的暗物質捕捉，來自世界各地的衆多工程師與科學家，參與了諾貝爾獎得主丁肇中博士(Dr. Samuel Ting)所主持的「反物質太空磁譜儀二號」(Alpha Magnetic Spectrometer, AMS-02，又譯為阿爾法磁譜儀)，NASA將其重要性與哈伯望遠鏡相提並論，這個實驗設備在2011年5月16日，由太空梭STS-134奮進號(Space Shuttle Endeavour)載送昇空，並於5月19日完成安裝在國際太空站上。2013年4月3日傳出首次AMS-02量測到無法解釋的多量高能正電子，NASA科學家認為這可能是反物質跡象的線索。值得一提的是，台灣的國家太空中心與中山科學研究院，都曾在AMS-02儀器的測試驗證與資料接收等工作上有所貢獻。



反物質太空磁譜儀二號(AMS-02)裝於國際太空站
(圖片來源：NASA)

在太空醫學與生物學方面，由於太空環境除了真空低壓與極端溫度變化外，還有對人體有害的強輻射效應，這主要是來自太陽風及宇宙射線的質子與次原子粒子。這些對人體與其他生物體的細胞與基因的短長期影響，以及如何對太空人進行遠距離的體檢與診療，都是很有價值的科學研究。例如，十年來在國際太空站上發展的利用先進超音波顯影的診斷技術，現在正持續發展，應用於地球上偏遠地區或緊急情況下的醫療服務。

此外，微重力也是太空中重要的環境因素之一。由於國際太空站以接近圓形的軌道繞著地球轉，在太空站上的地心引力與離心力正好抵消達到平衡，因此重力幾乎消失。在微重力的環境中，一些物理現象，如流體動力、材料合成、燃燒過程、蛋白質結晶過程等，都有很多有趣及值得研究的議題，其中材料科學及醫藥合成方面，將會帶來很可觀的產業應用、貢獻民生及經濟與環境改善上的種種效益。尤其，微重力對於太空站上的工作人員有明顯的影響，人體在這種環境下會產生骨質流失、流體於上半身累積、肌肉萎縮等現象，這方面的研究是國際太空站重要科學目標之一，而這些研究結果，對於未來有些需要太空人長途飛行的任務上，如人類登陸火星計畫及其他類似計畫，將可提供任務規劃及工程設計上重要的數據參考及設計經驗。例如，現在太空站上有精心設計的健身設備，太空人每天都需要達到固定的運動量，以防止肌肉萎縮及維持心臟與循環系統的健康，但這些運動對於骨質流失卻是沒有任何幫助，而是必須利用製造人工重力環境解決，例如太空船備有旋轉式生活區間的設計等。

在國際太空站上的微重力是會變化的，主要是由於太空站在低軌道上飛行，周遭還是有稀薄的空氣，這些空氣粒子隨時對它碰撞會產生微量的空氣阻力，還有要維持其飛行姿態所使用的控制力矩陀螺及實驗操作與人員移動的影響，加上軌道維持的推進力作用，以及與地心距離不同所產生的重力梯度影響等。這些微重力變化，可能對實驗結果產生影響，因此精確記載微重力環境數據，是實驗的重要步驟。國際太空站是目前



NASA太空人Sunni Williams在國際太空站上運動
(圖片來源：NASA)



JAXA太空人Koichi Wakata在國際太空站上運動。(圖片來源：NASA)

世界最佳的微重力實驗室，這包括微重力品質、實驗時間的長度與重複執行的方便性等考量，但要把實驗送上太空站機會難得且經費昂貴。然而，在地球上要執行微重力實驗非常不容易，目前可使用的方法包括垂直掉落塔（Drop Towers or Drop Tubes）、NASA的減重力飛機（Reduced Gravity Aircraft or “Vomit Comet”）以及探空火箭（Sounding Rocket）等，其中掉落塔的最長實驗時間在10秒以內，NASA減重力飛機上的每次實驗時間大約是25秒，而探空火箭所提供最長的微重力時間和發射高度有關，每次微重力時間大約是10-15分鐘，但傳統的探空火箭實驗方法，並不保證每次都能安全回收所搭載的貴重實驗儀器設備。

國際太空站在長期太空探索規劃工作扮演了重要的角色。首先，它是試驗前往月球或火星長途飛行效應最理想與安全的實驗室，可提供在太空中進行操作、維護、修理、零件更換的經驗累積，及其程序與工具的改進與優化。歐洲太空總署的「火星-500」（MARS-500）實驗，就從太空站的實驗中得到很多寶貴的解答，包括微重力、輻射、隔離等對人員的長期影響，這有助於他們設計長途太空飛行任務，能夠真實達到符合安全規範的需求。

由於前往火星將是人類探索太陽系重要的下

一步，在太空推進飛行技術有全新的突破之前，來回大約需要400-450天，最快同時也是風險較高的設計要245天，因此長途太空旅行對人體生理與心理上的影響，的確是極為重要的太空研究課題。美國目前的政策，希望NASA在2030年代中期能夠達成任務，運送太空人進入火星軌道，並安全返回地球。荷蘭的一個財團法人機構，於2012年提出2024年開始前往火星移民的計畫，並向全世界招考有意願移民的太空人開始進行訓練，將於2018年先送一顆通訊衛星前往環繞火星，2020年之後將持續送機器人與建造基地的零件與設備過去，規劃建立第一座3000平方公尺的火星基地，而這些移民者所搭乘的太空船將是單程票，沒有回程的規劃，由此可見這第一批移民的決心與勇氣。這個計畫今年初才宣佈，在最初申請的數千人之中通過篩選的100人名單，其中4人將可能成為第一批的太空長途旅行者。但這個計畫也招到太空界諸多批評，認為計劃過於倉促，也因此計畫很可能還會生變。

教育及文化推廣

國際太空站的各成員國都非常重視教育及文化推廣方面。他們的學生透過影音通訊，能實況學習太空站上的生活與各項操作，也能透過遙控來操作他們所設計的實驗，在太空站中完成所有的步驟。這樣的學習與研究的過程與深度，確實能激發



俄羅斯質子號
運載太空船
(圖片來源：
NASA)



俄羅斯聯合
號運載火箭
(圖片來源：
NASA)

學生的研究熱忱與創新潛力。例如，歐洲太空總署提供網路上可下載的各類科學教材給課程使用，包括太空站的三維模型，以及要求即時解決一些自發性挑戰的練習問題。又如日本宇航研究開發機構（JAXA）以太空站的實驗設備教材來激起學生對科技的好奇與熱忱，並鼓勵他們追求工藝上精益求精的熱情，同時藉此過程，培養學生確認人生的重要性與目標及對社會的責任感。

國際太空站的組裝過程從1998年到2011年太空梭退役之前，其中重量與體積較大的模組大多是利用太空梭來運送，另外還有俄羅斯的「質子號」（Proton）及「聯合號」（Soyuz）火箭也擔負了人員與物品運送的工作。最近還有美國的太空探索科技公司（Space Exploration Technologies Corporation, SpaceX）的「獵鷹9號」（Falcon-9）火箭及軌道科學公司（Orbital Sciences Corporation）的「安塔瑞斯」（Antares）火箭加入運載服務行列。由於考量火箭載具運送的能力，太空站通常是在運送之前，由自然空氣阻力的軌道衰減來降低高度，而在完成運送之後，再以太空站的推進系統，或利用火箭載具的引擎來提供推力，將太空站的軌道再推高。太空站軌道高度的調整，是經由飛行速度的調節來達

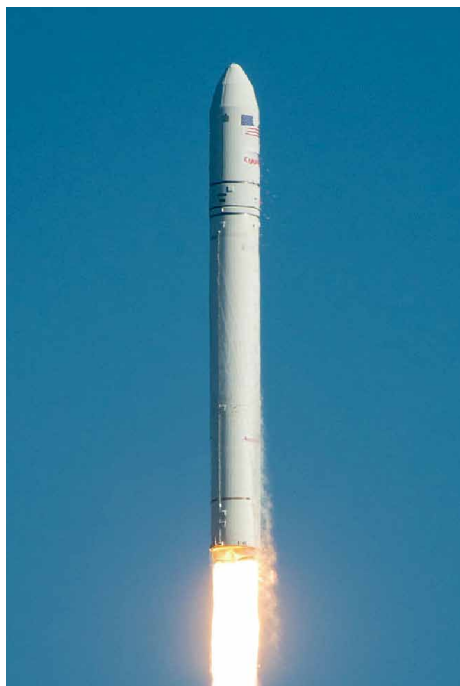


俄羅斯聯合號運載太空船(圖片來源：NASA)

成，大概每增加1公尺/秒的速度，可調高軌道約1.5公里。

這種改變軌道的方法，也應用在太空站避開太空碎片撞擊的安全操作（Debris Avoidance Manoeuvre, DAM）上。美國可追蹤軌道上5公分以上物體的軌道參數，並應用這些資料來操作，太空站就能避免被太空碎片或其他衛星撞擊。萬一飛行的操作已來不及躲避時，則會將所有人員集結至太空站的俄羅斯段，來度過可能的危機。在2009年之前，國際太空站總共執行過8次的DAM。在2011年之後，太空站上加裝了新型的彈道擋板（Ballistic

美國SpaceX公司的獵鷹9號
運載火箭
(圖片來源：
NASA)



美國OSC公司
的安塔瑞斯運
載火箭(圖片
來源：NASA)

Panel)，大幅提高了對太空站的保護。

在16年的國際太空站合作計畫中，共有7位自費參與的民間人士，他們每人付了約4千萬美元，搭乘俄羅斯的聯合號火箭登上國際太空站。這些太空商業的營運是由美國的「太空探險公司」(Space Adventures, Inc.) 所經營，他們先與俄羅斯達成合作協議，再由俄國向美歐成員強硬爭取同意，最後成行。一般人認為這些人士是「太空旅客」(Space Tourist)，對於這個稱呼他們非常不以為然，因為他們是有受過正規的太空人訓練，通過試驗才能登上太空站與太空人一起工作的。

自2012年10月起，國際太空站開始提供將立方衛星放入軌道的服務。一個單位的立方衛星尺寸為10立方公分，重量在1.33公斤以下，這類衛星也可設計成2至4個單位大小。由於設計快速經費又低，可大量使用商用零件，立方衛星成為當代最有效率的太空科技飛行驗證的奈米級衛星，至目前國際太空站總共已釋放了42枚立方衛星，這些立方衛星是搭乘運載火箭，順便登上太空站的。今年國家實驗研究院協同國立成功大學，與比利時的馮卡門研究所(von Karman Institute) 合作設計一枚立方衛星，將於2016年底送上國際

太空站釋放，在軌道上執行飛行姿態控制、通訊及返回大氣的再進入氣熱動力研究(Reentry Aerothermodynamics Study)。

根據NASA的規劃，國際太空站的合作將可操作到2024年，或甚至可維持到2028年。當初的設計分為美國段與俄羅斯段，在2014年美國因克里米亞事件，對俄羅斯祭出制裁後，俄國決定在2020年後，將俄羅斯段脫離國際太空站，加入他們自己重新建造的OPSEK (Orbital Piloted Assembly and Experiment Complex) 太空站，以繼續俄國的太空科技實驗與研究。這對俄羅斯來說是比較容易執行的方案，因為俄國段有自備的推進與姿態控制系統。他們的OPSEK新太空站的軌道傾角將會調整為71度，這樣的軌道較有利於俄國的火箭運載，同時也才能夠觀測到俄國全境。而美國則提議加上新的電力與動力模組，然後飛往介於地球與月球中間的引力平衡點(Lagrange Point) 長駐，以作為未來月球及火星任務的中繼站，這是較有長遠眼光及較具挑戰性的計畫。如果成功的話，則國際太空站將成為名符其實的在太空中的實驗室及中繼站。

陳彥升：國家太空中心資深研究員暨混合式火箭計畫主持人