

庶民衛星 上天看

良好的姿態控制系統可以讓衛星
在執行太空任務時更加順利，
成功大學的PACE團隊
自行開發的立方衛星，
除了能夠測試新的姿控系統，
也兼具教育的價值。

撰文／莊智清



重點提要

- 立方衛星的概念已行之有年，然而受限於重量與體積，一直沒有很好的姿態控制系統。
- 成功大學的立方衛星「姿態控制實驗平台」(PACE)，以動量輪與數位式太陽感測器做為主要酬載，研發最新的姿態控制技術。
- 這項計畫讓參與的師生全程擔負起研發與組裝、測試等過程，兼具研究與教育的價值。

有些人對於人造衛星的印象是很傳統的，衛星張開太陽能板，對地球進行通訊或遙測任務；也有些人的印象是很前衛的，就像是電影「星際大戰」或「變形金剛」裡的飛行器。乍看立方衛星(CubeSat)的外型，或許你會覺得生硬、缺乏科技美感，也很難想像這種衛星可以在太空中優雅地運行。

的確，立方衛星的外觀就像一塊積木，採正方體形狀，標準尺寸為1000立方公分，重量為一公斤。相較之下，國家太空中心所發射、負責執行遙測任務的福衛二號，重量約

有741公斤，又有美麗的翅膀(太陽能板)與大大的眼睛(大口徑光學相機)。但是，衛星的重要性並不在外表，而在內在。立方衛星雖小，但仍具備基本的性能，可以在太空中存活並執行任務。

一般而言，衛星本體包含七個不同功能的次系統，我們可以用人體來做對比：結構次系統猶如人體的骨架與肌肉，負責支撐全身的重量；熱控次系統宛若人體循環系統，負責因應溫度的變化；姿態控制次系統則類似人體的平衡系統；電能次系統則可視為人體能量產供之經絡；遙傳指令次系



統近似於人們的溝通能力；指令與資料處理次系統則等同於人體的大腦；最後，推進次系統相當於人體的運動系統。

要在一具微小的立方衛星中，將這些次系統縮裝、搭配合適的酬載，並於太空中執行特定功能，所需要的努力並不亞於大型衛星計畫。但是由於立方衛星小，開發經費較低，再加上立方衛星已經像個人電腦一樣，有了標準化規格，也定義了單位立方衛星的尺寸與重量，並依照此標準來規範彈射艙的電機介面標準，因此近10年來，許多大學與研究機構紛紛投入

立方衛星的研發，為太空科技的進程引領出新一波高潮，也帶動「庶民衛星」的思維。

相較於傳統衛星強調單一衛星必須具有完整的系統工程設計，立方衛星比較類似積木式的建構與分散式的佈署，我們可以結合兩個單位的立方衛星，組成一個長方體衛星，來加強衛星的功能，佈署時也可以採用星群 (constellation) 方式、編隊飛行 (formation flight) 方式或伴飛方式，以執行較複雜的任務。有鑑於立方衛星的技術逐漸成熟，參與單位也越來越普及，美國航太總署 (NASA)、美

國國家科學基金會 (NSF) 與美國空軍都持續推動立方衛星的太空任務，歐洲太空總署 (ESA) 亦不遑多讓，正展開一系列以立方衛星為主軸的研究項目 (見★頁〈太空探索新要角——立方衛星〉)。

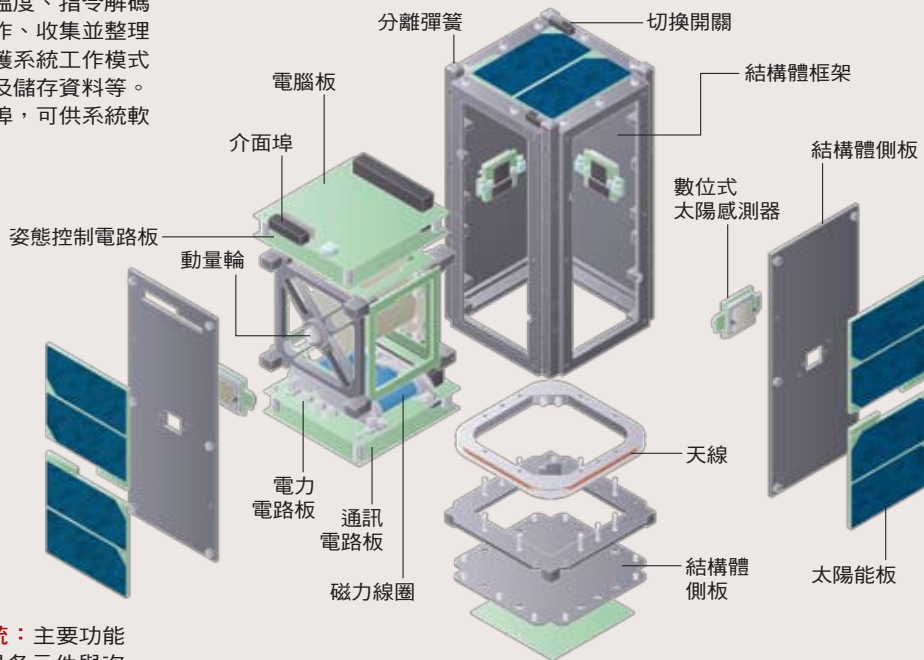
控制姿態，提升品質

台灣在立方衛星領域的研究並未落後其他先進國家太多。立方衛星的第一代標準於1999年提出後，國家太空中心就設計並製作了一公斤級蕃薯號 (yamsat) 立方衛星，於2001年完成，主要的研究目標是進行微光譜儀

六個次系統、兩大姿態控制法寶

姿態控制實驗平台（PACE）立方衛星由六個次系統構成，唯獨不具有推進次系統，因此升空後無法改變軌道。它的主要酬載是一具動量輪以及數位太陽感測器，用來增進立方衛星姿態控制系統品質。

指令與資料處理次系統：包含電腦板以及執行任務所需的飛行軟體。電腦板由微電腦電路、記憶體與周邊裝置構成，任務是監測衛星的飛行軟體，包含系統運作狀態如電力與溫度、指令解碼並啟動相對應動作、收集並整理下載的資料、維護系統工作模式與衛星時鐘，以及儲存資料等。電腦板上有介面埠，可供系統軟體發展與測試。



熱控次系統：主要功能為確保衛星各元件與次系統的溫度在許可範圍內；除了針對衛星構型配置，分析內部與外部熱源的影響外，也特別在關鍵位置安裝溫度感測元件。

切換開關及分離彈簧：位於衛星上端。衛星彈射入軌道前，會安置於彈射艙內，當發射載具到達所設定的高度與姿態後，彈射艙就會開啟，將衛星彈射出去。

衛星在彈射艙內時，切換開關處於閉合狀態，確保衛星於發射過程處於待命狀態；一旦彈射艙開啟，切換開關也隨之開啟，衛星就可以執行設定好的動作。

結構次系統：由環繞的結構體框架、結構體側板以及主酬載動量輪的框架構成，主要用途是支撐衛星的酬載與其他次系統。

電能次系統：PACE衛星的外表貼有20片高轉換效能的太陽能板，以提供所需的電力，並由兩顆鋰離子電池儲存電力。

姿態控制次系統：主要由感測元件、致動元件與姿態控制電路板構成。PACE衛星的姿態判定主要依賴姿態控制電路板上的磁力計與陀螺儀，以及數位式太陽感測器（如右方插圖）。磁力計可量測衛星所處位置的三維磁場向量，陀螺儀可提供衛星的角速度資訊，太陽感測器則可以偵測太陽的方位。這些感測元件測量到的資料，會經由電路板上的微處理器計算，得到衛星的姿態狀況。

姿態控制主要依賴動量輪（如右上插圖）與磁力線圈，動量輪提供角動量以維持衛星穩定的指向，磁力線圈除了提供穩定控制的功能外，也負責釋放動量輪所累積的角動量，避免動量輪飽和而失控。

遙傳指令次系統：包含衛星天線與通訊電路板。通訊電路板主要為衛星的無線收發與資料編解碼電路，與衛星的天線接合。

當衛星位於彈射艙內時，天線利用線束包覆於天線固定框架；當切換開關開啟後，藉由通電可將線束熔斷，天線便隨之展開。

的實驗，可惜蕃薯號後來無法取得發射的機會。

近10年來，有將近40枚立方衛星採用「搭便車」的方式成功升空；但是大部份的立方衛星受限於重量與體積，並沒有很好的姿態控制次系

統。「姿態」（attitude）指的是衛星三軸於空間中相對於一參考系統的方位。為了良好的觀測效果或對地通訊品質，衛星必須維持恆定的指向，而且，衛星的太陽能板也比較能正對太陽，以提高充電的效率。

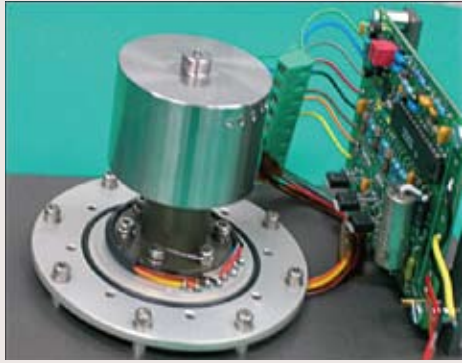
如果可以完整建立並驗證立方衛星的姿態控制功能，開發出關鍵技術與成品，就能大幅提升庶民衛星的品質與功能，進而賦予更具科學價值的任務。

2002年，由成功大學師生共同

動量輪

動量輪由馬達、飛輪、電子控制與驅動電路構成，通常操作於特定的轉速，以產生特定軸向的角動量，此角動量可以讓衛星較不易受到外界干擾，進而擁有穩定的指向。若動量輪的轉速接近零，則可當做「反應輪」(reaction wheel)，藉由控制轉速來提供調整衛星姿態所需的力矩。

由於配重的關係，動量輪安置於衛星中央，周圍並安置了三組相互垂直的磁力線圈，通電後可以產生磁場，並與地球磁場交互作用，產生衛星控制力矩。



數位式太陽感測器

數位式太陽感測器的工作原理與針孔相機相似，利用針孔將太陽光點成像於平面感測器上，藉由偵測成像光點的位置來推算入射光的角度，估測衛星的相對姿態。



組成的團隊，在有限的經費下開始開發一枚立方衛星：姿態控制實驗平台 (Platform for Attitude Control Experiment, PACE)，它採用兩單位的立方衛星設計，其長寬各為10公分、高度為20公分，重量為兩公斤，主要

目標就是研發立方衛星的姿態控制技術，並進行太空驗證。

為了進行這項實驗，成功大學團隊自主設計、製作並測試PACE衛星的本體與酬載。PACE衛星的主要酬載為動量輪 (momentum wheel)，負責提供穩定的指向控制，以及數位式太陽感測器 (digital sun sensor)，負責感知太陽方位，以便判定衛星的姿態。PACE衛星本體包含六個次系統 (見左方〈六個次系統、兩大姿態控制法寶〉)，唯一沒有包含的是推進次系統，因此PACE衛星一旦進入軌道，就會依設定好的軌道運行，無法轉換軌道。

設計與製作上的重要挑戰

在我們的PACE衛船上，除了高效能太陽能板之外，其他次系統與酬載完全是自行設計與製作的。我們根據衛星姿控性能的要求來設計動量輪裡的飛輪、選定馬達，並委由中山科學院進行組裝與測試；數位式太陽感測器也是自行設計，並利用南區微奈米中心的設備來製作關鍵的光罩。

在教科書中，已經有很多種不同的姿態控制方法，而PACE衛星發展之初，我們也曾評估過各種方案。但主要的問題在於，姿態控制元件的尺寸常常比立方衛星本體還大、耗電量也很高，而且並不便宜。因此經過評估與分析後，我們決定以兩公斤的立方衛星進行設計，並且盡量朝向元件微小化著手，以期能符合立方衛星的尺寸、重量與功耗需求。

然而，PACE衛星發展之初，市面上並沒有微型動量輪，我們只好自行設計、製作。動量輪的構成組件包含馬達、驅動器、飛輪、固裝機構與介面。在設計的過程中，我們分析了動量輪在太空環境下受到干擾的程度，以擇定產生的動量。原則上，馬達與飛輪越大，可產生的角動量就越大，但耗電量也就越高，因此整體設計經歷多次的反覆修改，才終於取得一兼顧需求的設計。

設計完成之後，製作也是另一項挑戰。因為動量輪必須維持一定轉速，所以如何取得平衡以及避免軸承摩擦，都是製作過程中有待克服的難題。

庶民衛星強調低成本的製作與自行組裝的實務精神，所以在衛星開發與製作過程中，有相當多意想不到的功課。

以太陽能板的安裝為例，衛星的太陽能板除了必須有比較高的效率之外，也得非常緊密地貼覆於衛星結構體上。然而，太空環境的溫度變化很大，熱脹冷縮可能會使太陽能板變形，造成短路或斷路。

為此，團隊成員除向國外團隊諮詢各種做法外，也和國家太空中心等研究單位裡有經驗的專家相互討論，整個問題最後當然圓滿解決，但耗費了比預期更多的時間。這件事告訴我們，地面的經驗常常無法直接應用至太空，而太空系統的研發經驗，真的需要一點一滴地累積。

在開發其他各項次系統時，我們也秉持衛星系統工程的做法，逐步由需

PACE立方衛星的主要任務，就是發展立方衛星的姿態控制技術，並且實地進行太空驗證。



立方衛星由於較簡單，成本也較低，很適合做為教學平台。上方照片中，PACE團隊的學生成員正將PACE立方衛星工程體置入彈射英艙，準備利用震動平台進行震動測試。

求定義、初步設計、系統分析、細部設計、實體製作、工程驗證、整合組裝、功能測試到性能驗證，完成衛星工程體的開發並進行飛行體的製作。在這段過程中，國家太空中心工程師也提供許多建議，並且協助我們進行震動、熱控與真空環境的測試。

除了衛星本身之外，我們也研發了許多相關的配套工具、測試設備以及地面接收站。PACE衛星工程體（會經歷較嚴苛與完整的測試，以確認功能與性能）的開發與測試已經完成了，目前我們正積極製作並測試衛星

飛行體（屆時會實際在太空中飛行，因此只進行必要的測試，以避免發生損毀），並且計畫於今年內發射。

兼具教育與研究價值

國內大學教育近年來逐漸重視實作能力的培養以及團隊合作的學習。對於太空科學與工程教育，立方衛星是相當良好的平台，不但可以做為教育學習的工具，亦可開啟研究之窗。

加入或參與PACE實驗室的學生，不僅可以橫向地學習各種次系統技術，也可以縱向地認識系統發展的流程，有助於開拓全方位的視野。

此外，由於衛星相關的科學與工程研究是相當國際化的議題，PACE實驗室自成立以來，一直和各國大學進行合作與交流。目前為止，PACE實驗室除了台灣學生，也常常有來自德國、法國、馬來西亞、越南、秘魯等國的學生，進行中長期的技術學習與交流，美國、德國、法國、日本、韓國與俄羅斯等國的研究人員，也曾經來台灣進行參訪與交流。

另一方面，藉由地面接收站的建立，成功大學歸仁校區的地面接收站也和國際間其他大學的接收站共同組成地面接收網絡，並曾協助日本、德

國與美國的大學團隊接收並追蹤立方衛星下傳的訊號。

有一句俗諺說：「人在做，天在看。」從事衛星科研的精神則是「做個郎（玩偶），上天看。」尤其是台灣在太空科學與工程的研究上，由於缺乏產業的幫助與誘因，動能一向不足。藉由發展立方衛星這類庶民衛星，可以確實普及衛星實作的氛圍、累積與分享相關經驗，並激發新一代學子的興趣。

雖然各國發展太空計畫的背景與需求都不同，但是太空不應該是禁區，而應該代表一個願景、代表人類可

以跨越某些藩籬與限制，讓視野得以進一步擴展。這種勇於挑戰未知的精神，可以說是許多科學研究的根本。

另一方面，太空科學研究畢竟是嚴謹、嚴肅又嚴格的志業。PACE研製的經驗也顯示，面對太空的挑

戰，縱使只是一枚庶民衛星，也得經由系統化的設計、關鍵元件的開發與品質的提升，才能建立完善的功能，為更具科學價值的衛星計畫鋪路。SA

發展立方衛星 可以確實 普及衛星實作 的氛圍，累積與分享 經驗，並且激發 學子的興趣。

► 延伸閱讀

〈衛星能多小——皮米及奈米衛星〉，《科學發展》2011年1月號。

成功大學PACE團隊網站：
<http://satellite.ncku.edu.tw/pace/en/contact.htm>

國家太空中心的蕃薯號立方衛星計畫，請見網頁：
<http://www.nspo.org.tw/2008c/projects/projectothers/YamSat.htm>



關於作者

莊智清是成功大學電機工程學系教授，他曾服務於美國洛克希德（Lockheed）公司，研究領域包含衛星導航與控制。在執行衛星系統工程相關計畫的過程中，他深覺立方衛星是一項可以於學校推廣、兼具教育與研究意義的主題。