

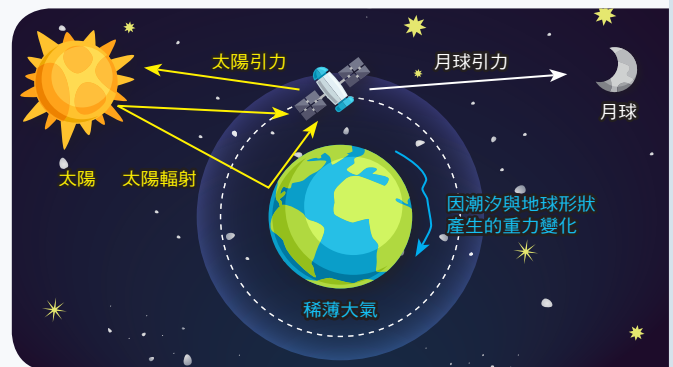
# 台灣自主衛星 推進器的研發

許紘璋

衛星推進器是確保衛星執行任務的重要次系統，經多年的研究發展，我國已逐步建立精準控制與快速反應的單基推進技術，並透過探空火箭以酬載方式完成了自主研製的單基液態推進反應式控制系統的高空動態測試。

人造衛星在今日的生活中已占有相當重要的地位，例如可透過衛星觀看球賽的實況轉播、以全球衛星定位系統進行導航及精準定位、運用地球資源衛星探測資源，乃至於利用衛星觀察大氣狀態、宇宙發展、進行各種實驗研究等，其功能與人們的生活緊密地結合在一起。

然而，在享受衛星帶來的便利生活之際，很少人會想到人造衛星是如何精準地執行任務？甚至以為只要把衛星以火箭送到太空使它繞行地球即可。事實上，把衛星送入運行軌道必須具備足夠的繞地球速度，使其離心力達到與地球引力平衡，若還要正確地執行任務，穩定的衛星姿態控制與維持其所處軌道更是不可缺一，而衛星上的噴射推進次系統就是達成這條件的重要單元。



衛星姿態與軌道位置會受到稀薄大氣的阻力、地球非正球體效應、太陽及月球重力、潮汐、太陽輻射壓等外力擾動而產生變化與偏移。

## 推進次系統的作用

人造衛星是繞行於地球上空並執行有效任務的人造飛行器，本身並不具備可進入太空軌道的動力，而需另以酬載（payload）的型態透過運載火箭布放。然而，太空中的軌道並非實體軌道，而是由速度與引力匹配所形成的抽象概念，因此人造衛星的布放不像行駛於地面上的軌道車輛，把車輛置於實體軌道後就可順利運行。人造衛星布放時，可能因軌道上的運行速度不足、姿態錯誤或不穩定、軌道偏差等問題，而影響了任務的執行。

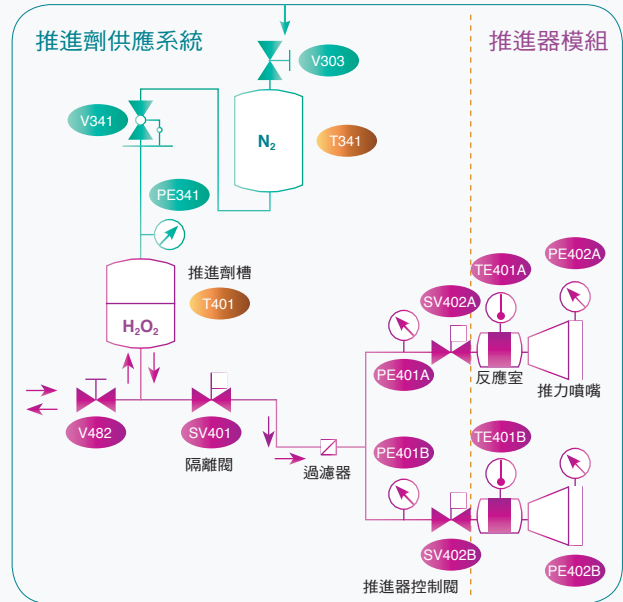
此外，即便衛星能順利地布放至預定的軌道，位於卡門線（Kármán line，指距地表 100 公里高處）以上數百公里間的衛星，仍會受到稀薄氣體的阻力、地球非正球體效應、太陽及月球重力、潮汐、太陽輻射壓等外力的干擾，使衛星的運行速度與姿態產生變化，進而造成軌道偏移。

換言之，衛星自運載火箭點火開始，便需要不斷地監控自身軌道位置與姿態的變化，並於運載火箭彈射布放與軌道運行階段都需要軌道與姿態的調整，甚至進行軌道變換操作使其得以正確執行任務。而這些操作都是藉由衛星上的噴射推進與姿態控制次系統達成的，其中噴射推進次系統更是維持、調整與變換軌道時的唯一動力來源。

## 衛星噴射推進系統

噴射推進次系統是利用流體壓力差流動的特性，驅動燃料由高壓往低壓處不斷噴出，以產生作用力使衛星前進，衛星噴射推進器就是運用這原理開發而成。衛星推進系統主要由推進劑供應系統與推進器兩大部分組成，前者依衛星需求，透過下吹式型態的系統設計，把推進劑從高壓往低壓處輸送注入下游的推進器，後者則把注入的推進劑轉換為高速氣流噴出產生推力。

依據推進劑是否需經反應才噴出的條件，衛星推進器可概分為冷氣體推進器與單基推進器兩類。其中，冷氣體推進器是利用高壓氣體做為推進劑，經漸縮漸擴推力噴嘴直接加速噴出以產生推力。單基推進器則屬於化學推進，通常利用液態推進劑經由觸媒



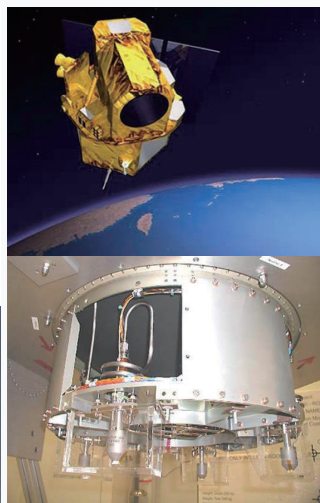
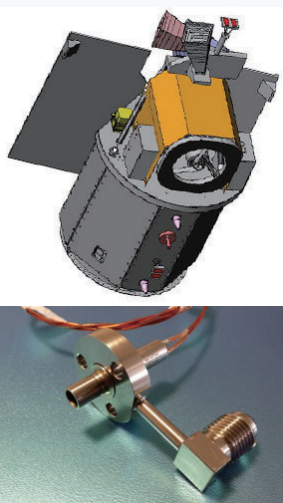
衛星推進系統主要由推進劑供應系統與推進器兩大部分組成。圖中是國家探空火箭八號計畫的過氧化氫單基推進器酬載系統架構設計。

分解產生高溫高壓氣體，再經推力噴嘴加速噴出產生推力。相較於冷氣體推進器，單基推進器在設計上雖然較複雜，卻具有較佳的推進劑儲存能力以及推進效率，因此成為衛星任務的首選，也是追求航太自主技術國家積極投入的標的技術。

## 衛星姿態與軌道控制

如前所述，衛星在軌道上運行時會受到諸多外力的影響，因而造成軌道偏移與高度降低。就圓周運動而言，軌道高度變化僅需透過圓周切線速度改變就可有效地改善，軌道傾角偏移與姿態改變則需透過推進器各方向出力的合力，來進行方位或轉動力矩的調變以修正與轉換。

單基推進器屬於化學推進，通常利用液態推進劑經由觸媒分解產生高溫高壓氣體，再經推力噴嘴加速噴出產生推力，具有較佳的推進劑儲存能力。



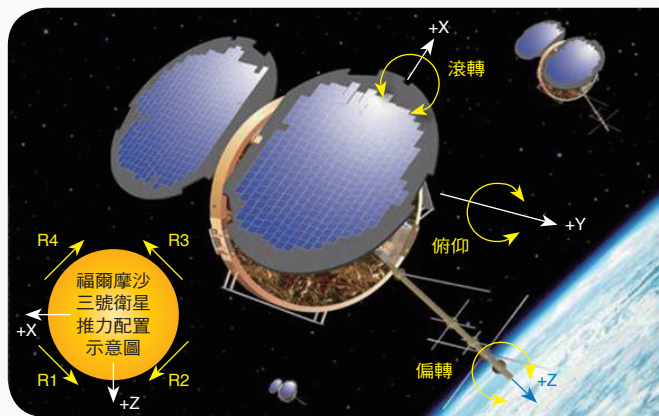
福爾摩沙五號衛星的推進次系統由 4 具 40 毫牛頓推力等級的冷氣推進器構成，左圖是國家太空中心人員正進行福衛五號推進次系統裝配的照片，右上圖是福衛五號構型立體圖、右下圖則是所使用的冷氣體推進器。（圖片來源：福衛五號推進器主要支援合約商與製造商 SpaceTech GmbH 與 Advanced Space Technologies GmbH 網頁；<http://www.spacetechnologies.com>，<http://www.ast-space.com>）

福爾摩沙二號衛星透過 4 具 1 牛頓推力等級的聯胺單基推進器進行其姿態與軌道控制（圖片來源：福衛二號推進器製造商 Airbus Safran Launchers Space Propulsion 公司網頁；<http://www.space-propulsion.com/>）

衛星推進次系統一般都配置有數個推進器以進行組合控制，透過它們微小推力的組合，以脈衝或連續噴射模式促使衛星產生特定方向的運動或轉動。當然，若要達成更精確控制衛星姿態以執行如影像遙測之類的任務，則還需進一步配合反應輪或磁力矩姿態控制等進行精確的三軸平衡穩定。

由於衛星以離心力等於地球引力的高速圓周運動條件環繞於大氣極度稀薄的地球上空軌道，在幾乎無阻力的環境下，推進器只要以相對於衛星質量極微小的推力，就可有效使衛星產生姿態變化與軌跡偏移，因此衛星推進器的額定推力通常不大，約介於數十微牛頓至數牛頓推力之間。

舉例來說，於去年除役的我國福爾摩沙二號衛星（簡稱福衛二號）重達 760 公斤，僅配置 4 組 1 牛頓推力等級的推進器，便足以支援衛星影像遙測任務的軌道調整



衛星推進系統透過不同方向推進器出力的合力進行方位或轉動力矩的改變，以進行衛星的姿態與軌道偏移修正。以福爾摩沙衛星三號為例，是透過 4 具以  $10^\circ$  偏置裝配的推進器 (R1 ~ R4) 組合來達到衛星控制的目的。（圖片來源：國家實驗研究院網頁；<http://www.narlabs.org.tw>）

及維持所需的推力。福衛五號更僅配置 4 只 40 毫牛頓推力等級的冷氣體推進器，就可調控 475 公斤質量的福衛五號。

聯胺單基推進器是性能優異且穩定可靠的單基推進劑類別的液態火箭推進器，以高濃度聯胺為推進劑，經觸媒分解產生高溫高壓氣體後，通過推力噴嘴高速噴出轉換為推力。

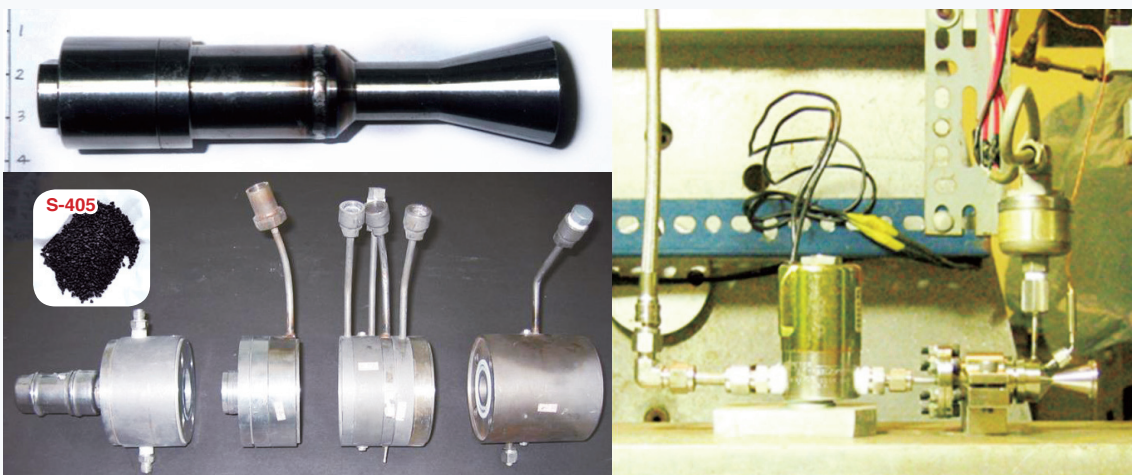
## 台灣衛星推進器的發展

台灣發展自主衛星用推進器雖晚於其他航太先進國家，但迄今也累積了 20 年以上的研究基礎。技術研發的萌芽階段始於 90 年代，初期因國家衛星推進需求投入了聯胺單基推進相關的技術研發，但數年後，因輸出許可管制問題因緣際會地轉進了過氧化氫綠色衛星推進技術。這兩個前後發展的自主推進技術與建立的研發能量，於 2005 年終因探空火箭科學酬載任務的執行，逐步朝系統化與成熟化發展，也為台灣自主衛星任務擔負起重責大任。

成功大學航太系液態火箭實驗室是台灣少數具有火箭推進完整研究能量的實驗室，也是最早投入高性能衛星推進器研製的單位。90 年代初期，有感於國家對衛星

自主技術需求與日俱增，液態火箭實驗室就投入聯胺單基推進器相關的研究，約莫 10 年的時光逐步掌握了聯胺單基推進器相關參數與單基推進器的關鍵技術，奠定了台灣自主太空推進的基礎。

聯胺單基推進器是性能優異且穩定可靠的單基推進劑類別的液態火箭推進器，以高濃度聯胺為推進劑，經觸媒分解產生高溫高壓氣體後，通過推力噴嘴高速噴出轉換為推力。但由於聯胺本身屬腐蝕、易燃、劇毒性且難以純化的液態物質，加上高可靠度的分解用觸媒是關鍵專利技術，受到各航太先進國家出口管制，因此聯胺單基推進器使用於衛星上雖已超過 40 年，卻仍屬難以接觸的尖端航太科技。



成功大學航太系液態火箭實驗室以購得的聯胺推進劑與 Shell-405 聯胺分解用觸媒投入聯胺單基推進器相關研究工作，打開台灣自主衛星推進器研究之門。左下圖是用以進行噴注器與觸媒床參數探討的多段組合式反應器與聯胺分解用 Shell-405 觸媒，左上圖是 2 磅推力等級聯胺單基推進器實驗室級原型推進器，右圖是聯胺單基推進器的實驗測試系統。



探空六號火箭聯胺推進器酬載計畫的執行，促使國內推進研究從實驗室走入系統工程，是國內衛星推進研究的重要里程碑。左圖是探六推進器酬載系統真空艙測試照片，右圖是探六火箭發射前聯胺推進器酬載推進劑灌注作業照片。

成功大學航太系液態火箭實驗室從聯胺推進劑的認識、基礎安全訓練與正確的推進研究觀念建立開始，直接投入台灣當時尚無任何經驗，且具有潛在危險性的衛星推進研究領域。實驗室以學術研究途徑購得數量極其有限的推進級聯胺推進劑與Shell-405 (S-405) 聯胺分解用觸媒，在實驗室精確控制參數的條件下，投入聯胺單基推進器的研究。

在研發過程中，透過系列不同型態噴注器設計、多段組合式觸媒反應室，以及推力噴嘴的設計，探討各類型噴注器與觸媒床組合反應的狀態與特性，逐步建立國內自主的聯胺分解反應動力模式資料庫。此外，由於掌握聯胺單基推進器噴注器與觸媒床設計的關鍵參數，也開啟了台灣自主衛星推進系統研發之門。

2002年12月通過，2004年開始執行的「第二期國家太空科技發展長程計畫」，其國家探空六號火箭（簡稱探六）計畫首度納入工程驗證酬載，促使台灣的衛星推進器研究踏入了系統開發的階段。2005年

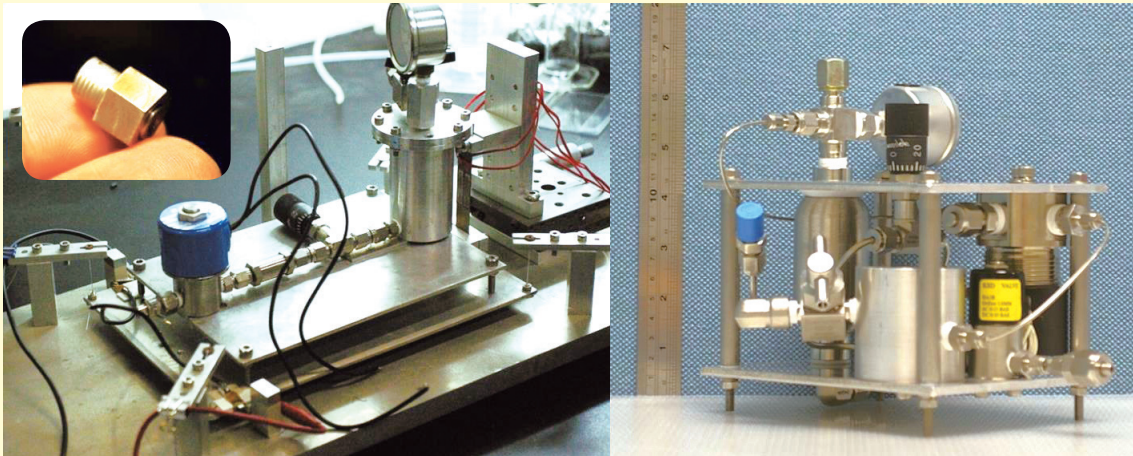
成功大學整合校內航太系液態火箭實驗室、燃燒實驗室，以及航太科技研究中心各項研究資源，投入探空六號衛星推進研製計畫。這計畫的執行不單讓推進研究自實驗室測試平台踏入了系統工程設計階段，更把研究觀點自實驗室直接拉到火箭、酬載角度進行思考設計。

在系統方面，探六推進器酬載整合國內的學研資源，利用自主研製的1磅推力等級聯胺單基推進器，搭配中科院研製的活塞式燃料槽與爆通閥，並依據火箭酬載艙介面需求，把實驗室級推進器系統化地建置完成一套包含雙推進器配置的推進器酬載系統。計畫執行期間，除取得實務上推進劑供給管路設計經驗，並掌握管路壓損與壓力震盪回授控制的技術外，更透過中科院真空艙的支援測試，建立了地面靜推力測試與真空環境推力對應分析方法。

在發射程序上，為符合載具環境、射場安全、聯合整測、飛試執行等需求，推進器研究團隊檢討了工安需求、建置地面輔助設施、進行嚴苛的環境篩選測試，



推進級高濃度過氧化氫提純精煉技術的建立是台灣全自主衛星推進系統的關鍵



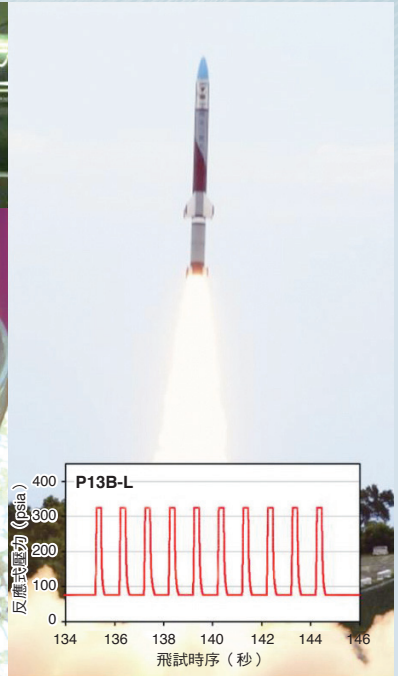
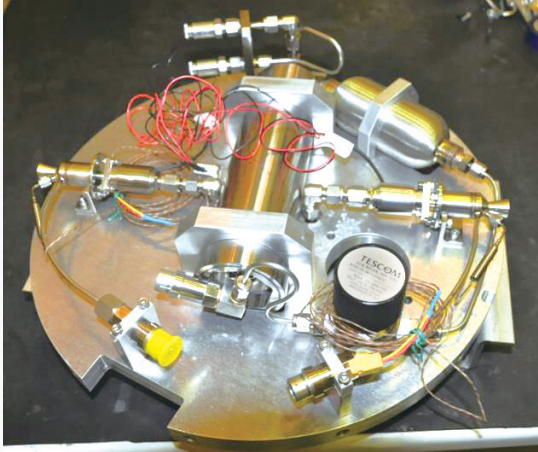
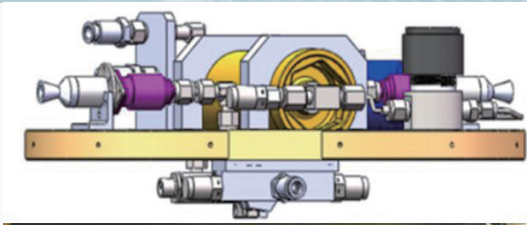
成功大學航太系燃燒實驗室以自主純化的高濃度過氧化氫配合銀觸媒的使用，完成台灣第一個 100 毫牛頓等級的過氧化氫單基推進展示系統，驗證了自主發展的可行性。

並完成妥善安全的標準作業流程與相對應的配置。國內第一個具有完整衛星推進次系統開發與執行任務能量的團隊逐漸成形。

2007 年 9 月 13 日，探空六號火箭順利地自中科院屏東九鵬測試場發射，100 秒後成功傳回第一筆推進器測試驗證資料，依據設計呈現的連續與脈衝推力曲線，顯示台灣衛星推進器的研究已成功進入下一個里程碑。

## 成長到全自主的時期

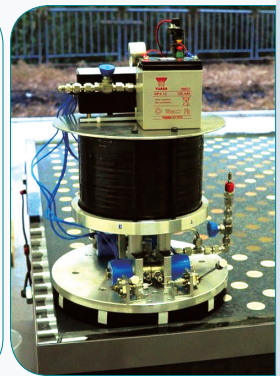
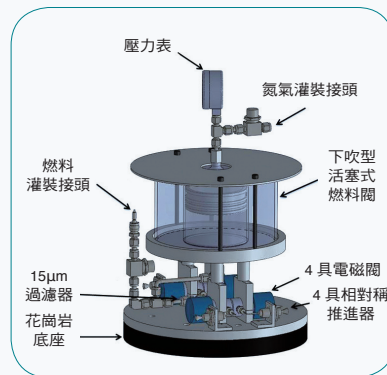
自主衛星推進器的發展在探空六號火箭推進器酬載成功驗證後，看似前途光明，實則困難重重。在關鍵的 S-405 觸媒製備與聯胺推進劑煉製自主技術無法突破，並且各國科技管制日趨嚴格之下，國家對以聯胺為基礎的傳統高性能推進劑液態火箭自主開發越顯窒礙難行的憂慮漸深，反而加速了衛星推進全系統自主研發的腳步。



國家探空八號火箭過氧化氫推進酬載系統是世界第一個成功透過探空火箭驗證的模擬衛星姿態控制用過氧化氫推進系統，其高空動態試驗結果成功地為台灣自主衛星推進的發展注入一股強心針。

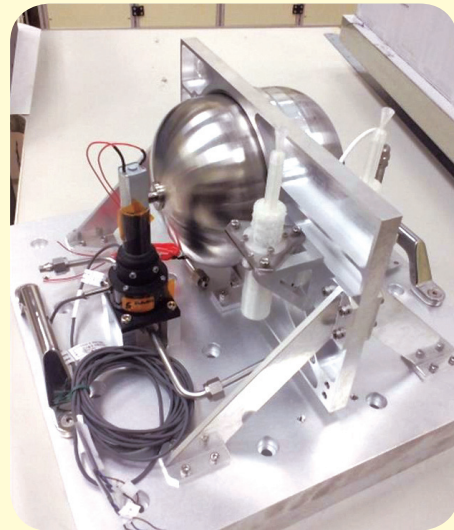
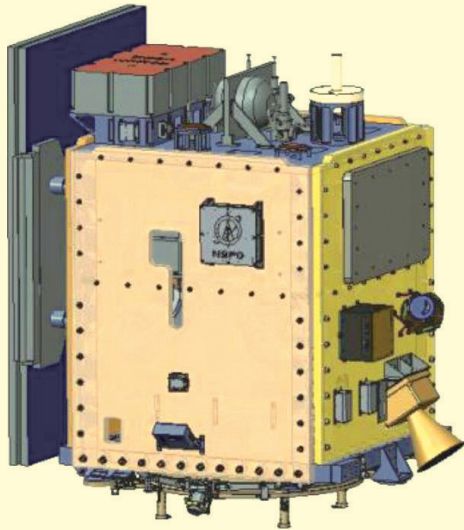
90年代末，中科院曾委託成功大學航太系燃燒實驗室進行水下推進相關研究，在無法透過外購取得水下慣用的推進級高濃度過氧化氫的情況下，燃燒實驗室轉而針對過氧化氫的物理特性，以減壓濃縮的原理開發出推進級過氧化氫的精煉提純技術，意外地開啟了一條可行的自主太空推進研發之路。

燃燒實驗室承續探空六號推進器酬載的發展經驗，以系統的角度出發，利用自主精煉的推進級過氧化氫為推進劑，投入單基推進器系列研製工作。除了以純銀為觸媒成功地展示了100毫牛頓過氧化氫微推進器模組外，更於執行國家探空八號火箭科學酬載計畫時，掌握到單基推進器的另一關鍵元件技術，以填充配置法開發出得以突破過氧化氫單基推進器耐久問題的複合式觸媒，完成國家探空八號火箭過氧化氫推進酬載的研製，並獲得成功的飛試驗證。台灣自主衛星推進之路再次向前邁進了一大步。

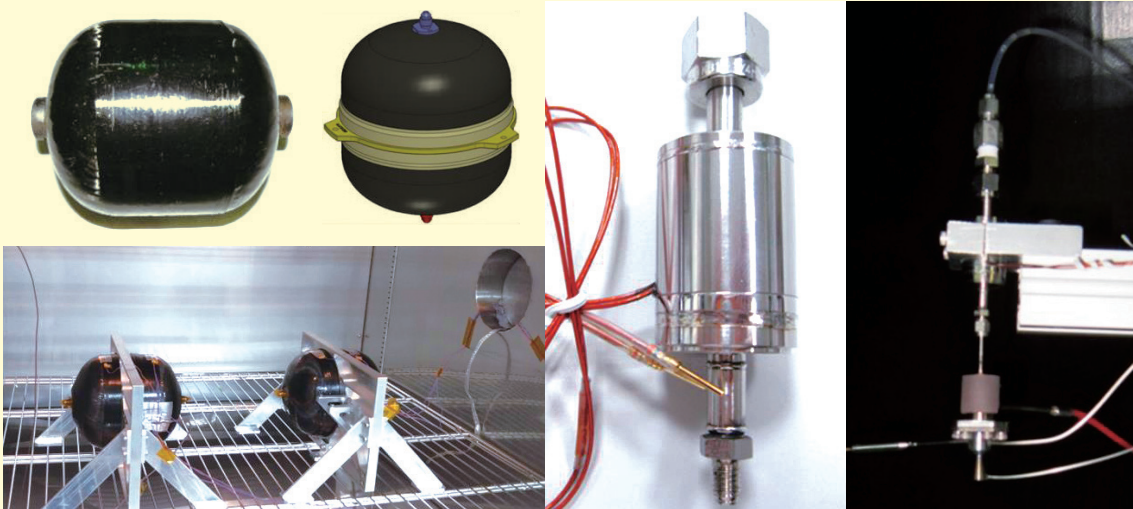


成功大學衛星推進實驗室展開全方位的過氧化氫單基推進次系統研究後，階段性地整合各項自主技術，配合氣浮平台建構出可進行衛星姿態控制模擬的二維推進展示模組，顯示已逐漸建立衛星推進次系統的完整研發能量。

2011年，成功大學航太系燃燒實驗室與航太科技研究中心整合成立衛星推進實驗室，與國家太空中心針對1牛頓推力等級衛星推進系統的自主研製展開長期合作計畫。在國家太空中心的衛星整測經驗協助下，全方位地展開過氧化氫單基推進次系統的研製工作。

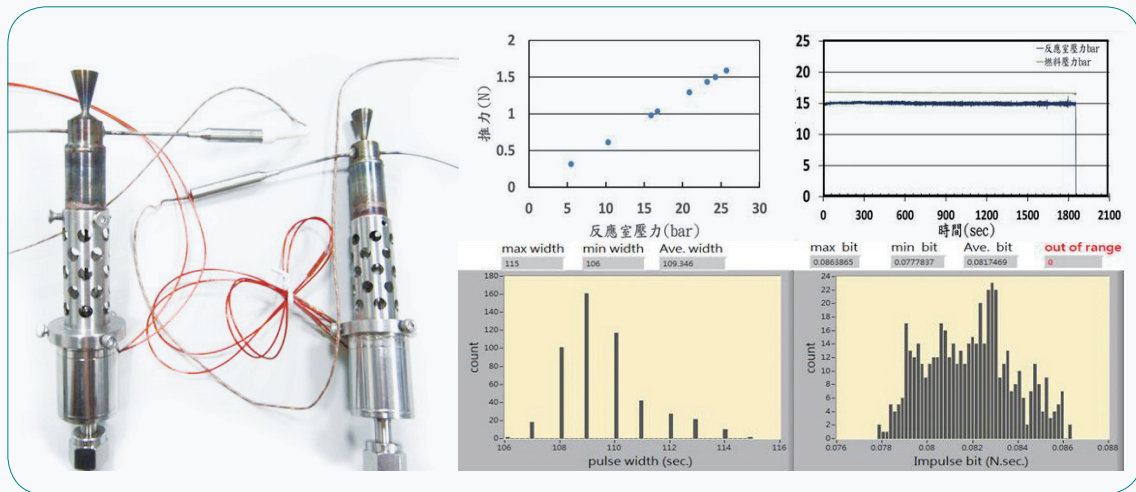


以微衛星姿態控制為對象的自主衛星推進次系統已透過自主開發的關鍵元件開始架構，台灣將一步步邁入衛星全自主開發的時代。左圖是福爾摩沙七號衛星系列中自主衛星的立體架構圖，其上方配置有測試驗證用的自主過氧化氫單基推進次系統，右圖則是自主過氧化氫單基推進次系統工程測試模組實體照片。（圖片來源：2016年於羅馬舉辦的 Space Propulsion 學術研討會論文 SP2016-3125071）



國家太空中心與中科院合作研製的薄膜式推進劑槽（左圖）以及與高苑科大合作開發的推進器控制閥（中圖），已陸續進入環境篩選測試階段，朝支援國家未來的衛星任務目標努力。左圖下是薄膜式推進劑槽進行溫度篩選測試照片，最右圖是推進器控制閥與推進器聯合測試照片。（圖片來源：2016年於新竹舉行的 Remote Sensing Satellite Technology Workshop 論文）





成功大學衛星推進實驗室研製的 1 牛頓推力等級過氧化氫推進器，其推進性能與推力精度表現已可達微衛星姿態控制的基本需求，左圖是推進器模組實體照片，右圖是其各項性能表現測試數據與統計分析結果。

這合作兼具基礎扎根與任務需求導向，從材料相容性、觸媒製備篩選、觸媒床設計、噴注器設計與觸媒床擴散關係、觸媒分解暫態行為等基礎研究，至微小推力測試平台建立、推進器模組設計與推力噴嘴真空效率提升、性能評估分析法則、衛星推進次系統關鍵元件開發，以至於完整的推進器性能測試統計分析與推進次系統模擬展示平台建立，建構完整的自主衛星推進次系統研製與整測能量。

目前，全自主研製的 1 牛頓等級過氧化氫單基推進器已可達微衛星的基本需求，而藉這合作所衍生的其他合作開發案，也完成了活塞式燃料槽、薄膜式燃料槽、推進器控制閥、電動球閥式隔離閥等衛星推進次系統關鍵元件的開發，將於未來國家太空中心的衛星計畫中進行飛行測試，並朝完全自主支援國家衛星任務的目標努力。

台灣自主研製的過氧化氫單基推進器、推進器控制閥、薄膜式燃料槽已進入環境測試階段，推進次系統也以微衛星為對象開始進行架構。回首整個發展，經長達二十餘年的努力，從外購關鍵元件進行聯胺單基推進器設計開發，再藉由探空火箭酬載任務的執行把實驗室測試系統轉為實體工程，進而成長蛻變出台灣自主的衛星推進次系統與研製能量。整個過程雖談不上筆路藍縷，但著實非反掌可成，可以肯定的是，台灣的衛星推進正從過氧化氫單基推進出發，邁出太空科技自主的第一里路。

許紘璋

成功大學航空太空科技研究中心