

台灣 探空火箭的發展

■ 吳明仁

探空氣球偵測的範圍以 50 公里以內的大氣層為主，而 400 公里外的太空探測由人造衛星擔綱，至於 50 公里到 400 公里間的空域，則由探空火箭彌補前述兩種工具的不足。

各國探空發展趨勢

目前世界各國已發射了上萬次的探空火箭，通常發展火箭技術的國家都會有探空火箭計畫，以做為大型火箭發射衛星進入地球軌道的先行指標，如美國、日本、俄國、中國、歐洲、加拿大、印度、巴西、韓國、台灣等。其中美國的阿拉斯加大學甚至在波克弗萊特研究中心（Poker Flat Research Range）擁有一個發射基地，可自行發射探空火箭。

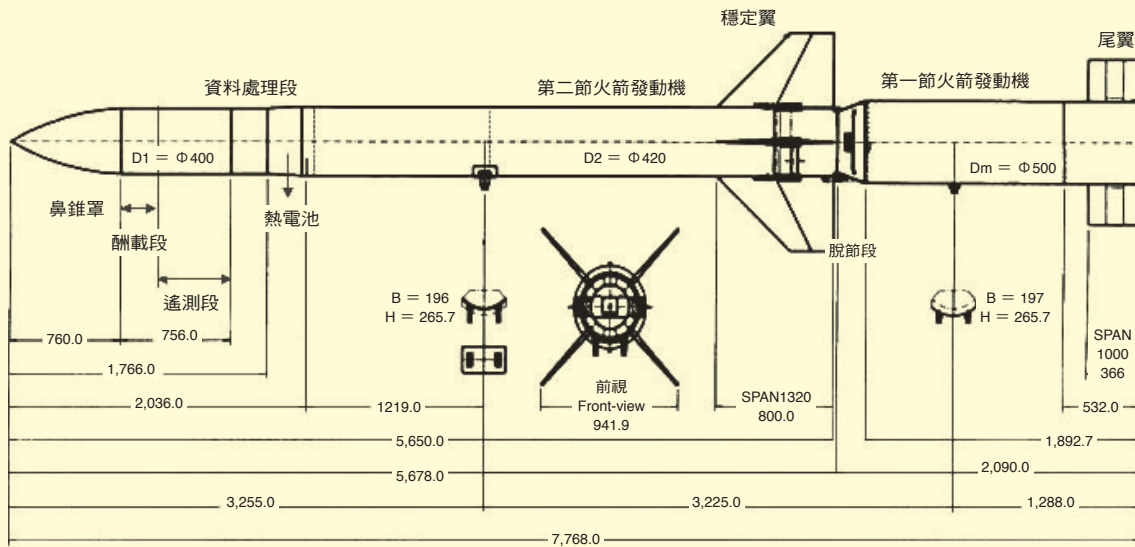
以上這些國家的探空火箭實驗通常只在其本國上空執行，近年來在低緯度區域的探空實驗比較稀少，大型重要的探空實驗則約十幾年才會舉行一次，如美國太空總署 NASA 2004 年在太平洋馬歇爾群島進行的赤道電離層實驗。台灣因位於低緯度的北緣地區，其上空電離層很活躍，所以進行探空火箭實驗在地緣與科學上都有其重要性與獨特性。

在眾多已發展探空火箭的國家中，以美國發射最早（1945 年）、型號最多（15 種）、數量最大（30 枚 / 年）。NASA 就備有十多種探空火箭本體與支援實驗室，可提供各大學研究所規劃、建置與實施各項探空科學實驗，以培育火箭、太空系統元件的人才，並供太空科學及火箭技術部門各種研究用。

日本於 1955 年開始研製固態探空火箭，其中每年約發射 6 枚以上的 S 型單節與 K 型、L 型多節火箭，以從事科學與太空研究。中國的探空火箭則從 1958 年開始發展，累計進行了上百次的發射，為太空技術打下深厚的基礎。

歐洲在瑞典國家航天局支持下於 1995 年成功發射了 REXUS1（REXUS 是大學生火箭發射試驗的英文縮寫），其後德國航空航天中心和瑞典國家太空委員會（Swedish National Space Board, SNSB）簽訂了雙邊協議，於 2007 年正式推出學生探空火箭和氣球

發展火箭技術的國家都會有探空火箭計畫，
以做為大型火箭發射衛星進入地球軌道的先行指標。



固態火箭系統

項目 REXUS / BEXUS。按計畫每年發射兩枚火箭和兩顆氣球，攜帶約 20 項由學生設計和建造的實驗。2012 年歐洲學生探空火箭 REXUS 11 成功發射，完成了「地球重力梯度」、「微重力下的毛細作用」等多項實驗。

探空火箭的種類

探空火箭依任務不同可分為氣象火箭、地球物理火箭、生物實驗火箭、微重力實驗火箭和太空技術試驗火箭 5 種。其中，氣象火箭是探測中層大氣的熱力學參數（如：溫度、壓力、密度）及動力學參數，探測高度約 30 ~ 100 公里；地球物理火箭是探測高層大氣電離層、磁層、宇宙線等地球及太空物理資料，探測高度約 80 ~ 600 公里；生物實驗火箭是把生物和儀具送到高空，研究高空環境對生物的影響，包含太空生物學、太空生理學、太空醫學等；微重力實驗火箭是利用太空中微重力及無塵、無菌等超淨環境進行材料科學、藥物加工、太空工藝等實驗研究；太空技術試驗火箭則因為部分人造衛星或太空船的關鍵系統無法在地面模擬，所以需利用探空火箭在太空環境中進行先期模擬試驗。

探空火箭的發展歷史

早期的探空火箭垂直軌跡高度約 40 公里，1961 年時平均酬載重約 23 公斤，射高小於 160 公里。到 1970 年代時，平均酬載增至 160 公斤，射高可達 1,000 公里以上。以美國為例，1945 年 NASA 始致力於探空火箭的研製工作，到 70 年代就有至少 20 個國家參與並發射達 600 枚以上的探空火箭。直到目前，對發射探空火箭仍有需求，它已成為發展新儀器設備、新試驗方法、新觀測技術及探索新領域的有效工具。

探空火箭經過七十多年的發展，已有了很大的進展，其趨勢是固體化、輕型化、系列化、低成本、短前置時間、高性能、可回收等特徵。其中固體化是指由早期液體火箭發動機逐漸改為固態火箭發動機，以降低火箭複雜性及造價，尤其近年來的固體燃料 / 液體氧化劑的混合式發動機技術的發展新趨勢，更提升了火箭的性能、可靠度及安全性。

輕型化是指儘量減小探測儀器的體積、重量，提高探測高度或增加探測項目及儀器數量，以進行多目的探測。系列化是針對不同的酬載重量和高度需求，從已經研



混合式火箭系統

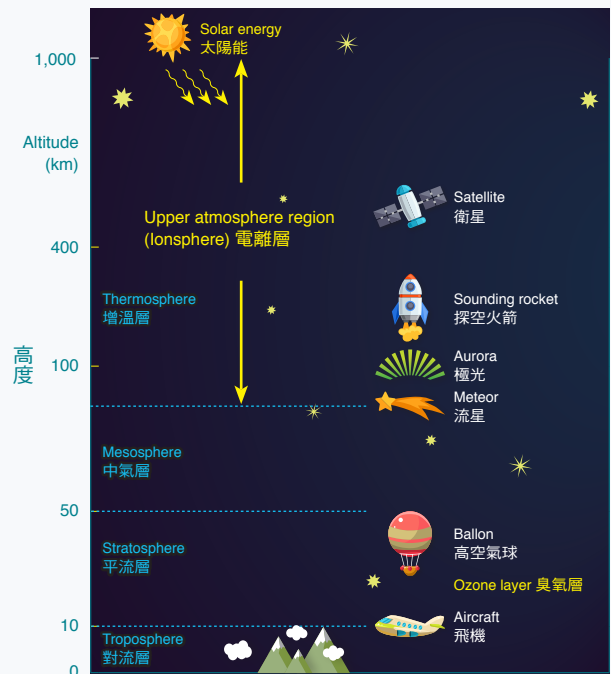
製成功的幾種發動機加以適當的挑選和組合，以降低研發成本、縮短研製時程和提高火箭可靠度。低成本的趨勢則是因探測種類與項目日益增多，發射探空火箭日趨頻繁，所以必須從已研發成熟的發動機中選取，以降低發射成本。

短前置時間則是因應甚多科學家，尤其是大學生及研究生，於從事科學領域研究時都要求探空火箭前置整備時期短於半年而來的發展趨勢。高性能是因應酬載的探測方法及精度的大幅改進與提升，對探空火箭提出相對應的要求，如火箭需具有高性能的姿態控制系統。可回收性是由於探測儀器和火箭的研製日趨精密和複雜，費用也增加，因此回收儀器和火箭並加以改進、重複使用，有助於長期科學研究發展的延續和降低成本。

台灣探空火箭的發展與演進

台灣先期探空火箭的研發為求降低成本，省去導引及控制系統，以氣動力翼翅或裙狀外型使氣動力中心位於重心之後，以保持火箭穩定自由飛行。但是這種無控的火箭各種準直公差所形成的不對稱，會造成軌跡偏差及箭體滾轉。此外，發動機本身由於燃燒作用，也可能產生某些側向推力及滾轉力矩而影響飛行。尤其當滾轉速率與氣動力的俯仰、偏航自然振頻接近時，會發生共振現象，使飛行攻角突然放大。

如果再加上氣動力耦合問題，使其長期處於滾轉共振狀態，則會發生滾轉鎖定，造成極大的軌跡偏差與結構負荷，因此飛



地球太空科學的工具主要有 4 種，依高度區分為：地面觀測設備、探空氣球、探空火箭、人造衛星。

行時都需極力避免。由於無控探空火箭無法完全滿足當前科學探測的需求，多功能型探空火箭的研發便起而代之。

台灣探空火箭計畫於 1997 年至 2014 年間總共發射了 10 枚，由國家太空中心主導系統整合與任務規劃。其中火箭是由中科院負責，採用兩節式固體燃料火箭，科學酬載則由國內學術研究單位提出科學研究及酬載儀器研製計畫。同時國家太空中心也與成功大學及交通大學兩個團隊合作，於 2010 年至 2014 年間共執行了 4 次混合式探空火箭發射。各次探空火箭計畫的測

試目標與主要酬載任務，以及發射與測試結果如下：

探空一號火箭任務 探空一號火箭於1998年12月15日執行飛試，首航並無搭載任何科學酬載。飛試中蒐集到各項大氣溫度與振動資料，成功達成各項測試目標。

探空二號火箭任務 中央大學於1998年獲國科會補助與美國南卡州克萊姆森（Clemson）大學合作發展三甲基鋁（trimethylaluminum, TMA）科學酬載 TMA，進行電離層 E 層高度從 80 至 150 公里範圍內大氣中性風場及亂流參數的量測。這次實驗是利用在半導體業十分常見的液體易與空氣中的氧氣和水汽起燃燒作用的特性，實驗結果有助於了解台灣地區上空的大氣與太空動力現象。

惟探空二號火箭於2001年10月24日凌晨發射後，12秒時就因第二節火箭未能依照預設指令點火而失去上升推力，火箭未達預定高度就提早落海。這次火箭實際飛行時間114秒，因第二節火箭熄火，所以預計於59秒時進行的 TMA 釋放動作終止。

探空三號火箭任務 探空三號火箭仍以 TMA 為科學酬載，希望以相同的酬載介面驗證探空二號火箭飛行失效原因已確實改進。這次科學實驗成為全球首次在低緯度地區執行電離層中性風的測量研究。

探空三號火箭於2003年12月24日發射，火箭最大高度約265公里，飛行約508秒後落海，射程最遠達約180公里，這次任務圓滿成功。火箭飛行途中的 TMA 噴釋、TMA 火焰斷、續及燄跡持續擴散等 TMA 火焰軌跡影像，都被科學團隊攝得。

TMA 在高空中由火箭釋出後，由設在地面的三套高性能數位照相機追蹤 TMA 火焰尾跡，而利用三角測量法可以得到 TMA 尾跡隨時間漂移的情形，進而推算出不同



中指環型 TMA 尾跡由屏東九鵬基地所拍攝，是火箭發射後約 161 秒釋放的 TMA 液體燃燒形成的火焰尾跡。尾跡底部高度約為 80 公里，頂端高度約為 110 公里。這尾跡在空中持續約達 10 分鐘。



由台東成功商業水產職業學校所拍攝 TMA 實驗的環型尾跡

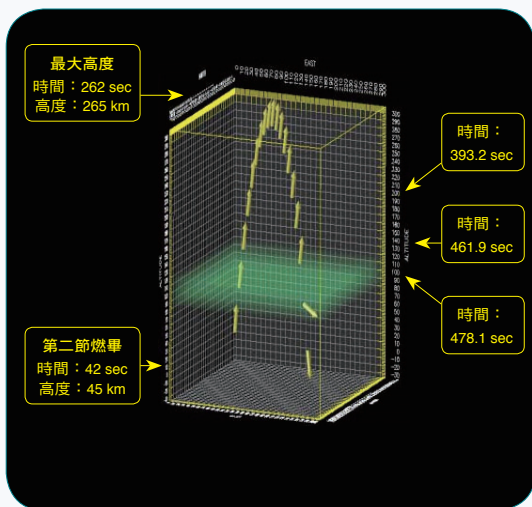
高度的中性風風速與位置。這次地面觀測地點設置於高雄縣樹德科技大學、台東縣成功商業水產職業學校，以及屏東九鵬發射基地。

探空四號火箭任務 探空四號火箭承載「光度計」及「GPS」二項酬載，其中光度計由中央大學提供，進行高度 70 ~ 250 公里間的大氣綠色輝光（557.7 nm）強度與分布現象量測；GPS 酬載則由中科院與成功大學提供，進行火箭全程軌跡量測，

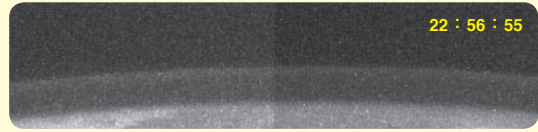
並提供光度計酬載所需的火箭高度資料。火箭於 2004 年 12 月 14 日發射，GPS 接收機全程鎖定，地面同時進行 DGPS 量測，並提供大氣觀測飛行路徑即時精密數據，光度計也於試驗高度獲得所需資料。

探空五號火箭任務 探空五號火箭承載「離子探測器」及「三軸磁力計」兩項科學酬載，其中離子探測器是由中央大學與日本大阪市立大學合作研製，量測離地 80 到 280 公里高度之間太空環境的電漿密度與離子溫度；磁力計則用來量測火箭的姿態變化。為了掌握最佳的發射時機，中央大學架設了地面電離層雷達，觀測電離層不規則體分布的狀態。這次任務同時規劃與福衛二號進行台灣上空氣輝（airglow）的聯測，以做為電離層量測的參考。

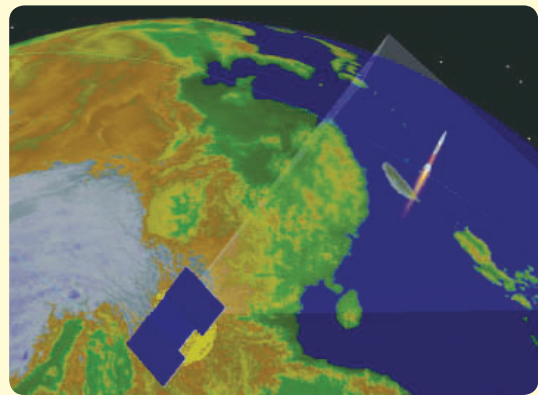
探空五號火箭於 2006 年 1 月 18 日發射。這次任務的特色：在國際上很難找到針對特定的電離層不規則體事件，同時利用探空火箭（量測電漿密度與離子溫度垂直分布）、地面雷達（定出不規則體位置及三維結構，並觀測漂移速度），以及人造衛星（觀測氣輝）共同觀測的先例。



光度計於第二節火箭燃畢後執行觀測，火箭於上升、下降過程直至落海，都可觀測到氣輝現象。



福衛二號高空大氣閃電影像儀於晚間所觀測到的台灣上空氣輝



火箭與衛星聯合觀測任務的電腦模擬



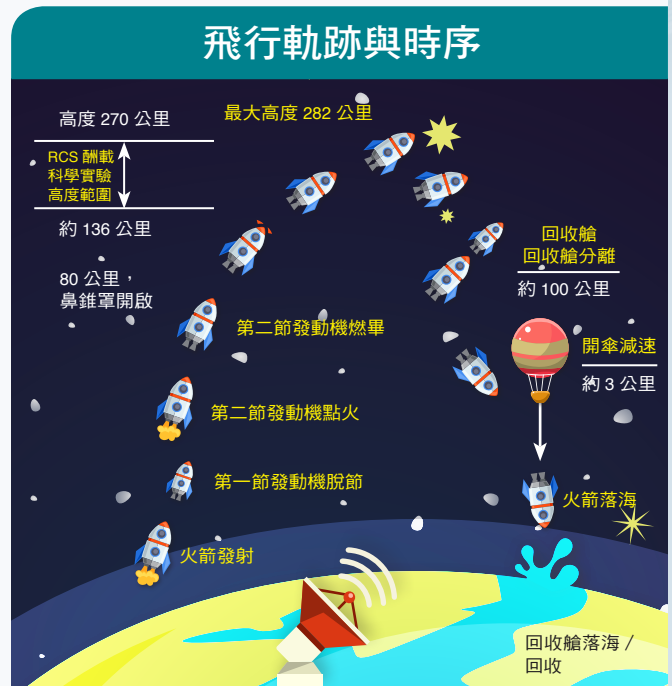
探空五號火箭發射實景

探空六號火箭任務 探空六號火箭承載「回收艙」及「 N_2H_4 單基推進」兩項酬載，兩者分別由中央大學與成功大學研製。火箭於 2007 年 9 月 13 日發射，任務需求是在高度 80 ~ 280 公里間，進行成功大學衛星用反應式控制系統的功能測試。

另一需求是中央大學回收艙酬載的科學試驗，須於飛行全途中（高度 0 ~ 270 ~ 0 公里間）進行地球磁力量測。另於火箭升空達 80 公里處須開啟鼻錐，並在重返大氣 100 公里高處同時啟動開傘機構的計時器，回收艙酬載 GPS 資料訊號開始下傳。回收艙在下降過程中所量得的數據資料由內建記憶體儲存，待回收後再行下載分析。這次任務火箭除了展現鼻錐罩開啟功能外，另驗證酬載脫離功能並奠定多功能探空火箭及發射載具發展的基礎。

探空六號火箭首次於白天發射，任務是歷年來技術最困難、支援項目最複雜，包括火箭或酬載完全由國人自製、火箭驗證鼻錐開啟與酬載脫離技術；成功大學推進器酬載系統驗證太空飛行性能並量測 1 磅級推力輸出、中央大學回收艙酬載系統驗證太空飛行存活性並進行全程地球磁力量測、陸海空聯合作業打撈落海回收艙酬載等項目。

探空七號火箭任務 探空七號火箭於 2010 年 5 月 5 日發射，攜帶 6 具科學酬載包括：兩個離子捕獲器、一個阻滯電位分析儀、一具電漿探針，並搭配姿態量測計與全球定位儀。科學酬載的量測參數包括：電離層電漿密度、離子溫度、電子溫度、火箭飛行位置與姿態、地球磁場向量。這次任務是國內首次有高中學生參與探空火箭科學實驗，以及利用離子捕獲器、阻滯電位分析儀、電漿探針與福爾摩沙衛星三號進行電離層電子密度與電漿不規則體的聯測。



探空六號飛行剖面圖

探空八號火箭任務 探空八號火箭於 2013 年 6 月 5 日順利升空，執行酬載分離、姿態控制、回收等試驗，目的是開發衛星關鍵推進次系統與準衛星系統的測試。實驗時火箭必須與酬載分離，並驗證在太空飛行環境中的性能。科學酬載包括：過氧化氫推進系統、儀器回收艙系統及回收艙漂浮設計。此舉是自主發展衛星推進系統並驗證其於太空環境中的性能，同時驗證回收艙的通訊及執行實驗程序的性能，並測試整體酬載回收作業的程序。所發展的推進及回收艙系統能力將來可應用於衛星的設計，邁向太空科技自主的目標。

探空九號火箭任務 探空九號火箭於 2014 年 3 月 26 日升空，完成台灣南方上空 80 ~ 300 公里之間大氣電離層動態的量測。科學酬載包括：「電漿阻抗分析儀」及「電漿探測儀」，這些酬載以及地面的「電離層偵測雷達系統」都由中央大學主導研發。



探空九號火箭發射實景

台灣位於近赤道的低緯度地區，上空受「赤道電漿噴泉效應」的影響，電離層活動較活躍且形成電離層的「赤道異常區」。這區域的電漿濃度特別高，其擾動現象對於 GPS 使用者，以及其他與衛星通訊相關的民生和國防應用，都可能產生很大的影響。探空九號延續探空五號及探空七號實驗，使用更精進的電漿量測儀器，配合地面設備持續研究台灣上空「電離層不規則體」的產生機制。

探空十號火箭任務 探空十號火箭於 2014 年 10 月 7 日升空，完成台灣上空 90 ~ 286 公里之間大氣電離層與熱氣層 (thermosphere) 耦合動態的量測。這次搭載 6 項先進電離層科學酬載，以及國內首次研發的滾轉控制機制，使火箭滾轉速率

由每秒 4 轉降至實驗所需的每秒 1.1 轉以下。科學酬載測量火箭經過路徑上的中性粒子、離子、電子與磁場資料，可以協助驗證國家福爾摩沙衛星三號及七號分析大氣資料的準確性。滾轉控制機制則是以改變轉動慣量的方式，降低並精確控制火箭的滾轉速度，以利科學酬載的量測作業。

後續發展與展望

近年來國家太空中心與國內學術界合作進行混合式火箭研究，提出提升火箭效率的方式，並執行多次發射任務。在這良好的基礎下，國家太空中心將規劃由學研界主導混合式探空火箭的發展並執行探空任務，期望未來混合式火箭與傳統火箭相較能更具競爭力。具體成果如下：



燃燒推進效率 2 項發明專利應用於實體火箭的發射實景

發展混合燃料探空火箭關鍵技術—混合式探空火箭具安全環保的特性；經由團隊的研發，燃燒推進效率領先國際，已達美國 NASA 探空火箭基本功能技術水準，並獲台灣及美國 2 項發明專利：NSPO 第一項推進專利提升效率比衝值（specific impulse, I_{sp} ）可達 $I_{sp} = 250s$ ，NSPO 第二項推進專利提升效率比衝值可達 $I_{sp} = 290s$ ；發展碳纖高壓容器技術，可應用於氫燃料電池的儲氫容器。

太空科技傳承與人才培育—培育台灣學術界太空科技的研發人才，包括：中央大學、交通大學、成功大學、屏東科技大學、虎尾科技大學、臺北科技大學、清華大學；協助成功大學、交通大學建立混合式燃料火箭團隊，完成 20 公里以內發射試驗，以及滾轉控制酬載飛行驗證；16 年探空科學實驗共培育了碩博士生約 650 人，科普計畫高中生約 300 人。



大學團隊執行混合式探空火箭試驗現況

吳明仁
國家實驗研究院國家太空中心