

立方衛星之演進

The Evolution of Cube Satellites

莊智清

Jyh-Ching Juang

立方衛星善用資通訊之優勢與標準化之規格，大幅降低衛星之體積、重量與成本，也因此於近年有相當快速之發展，除應用於太空教育與科技發展也引領太空產業之變革。台灣學研界對於立方衛星技術亦積極耕耘且有相當多成果，目前已有十枚立方衛星發射之紀錄。展望未來，可應用本土資源精進差異化之技術並與國際合作進行創新之應用。

Cube satellites (CubeSats) standards, and the consequent reductions of size, weight, and development time, have simplified the design of satellites and the arrangement of launch. In the past several years, the CubeSats have revolutionized the space industry and promoted a variety of space business models. Academic organizations in Taiwan have actively involved in the development and applications of CubeSats, leading to the launches of 10 CubeSats in the past 10 years. The CubeSats can be further explored from the upstream and downstream to take advantage of domestic industrial strengths, technological innovations, and international collaborations.

一、前言

早期太空系統之發展與設計一直秉持著「失敗絕非選項」(failure is not an option)之不妥協精神，進行系統工程技術發展包含細緻的分工、完整的測試與嚴謹的審查。此一思維與作為雖成功地完成數項經典之太空任務，但往往也伴隨著高昂之成本與限縮了商業之發展。於上世紀 80 年代之前，太空科技與衛星系統，由於進入門檻高，一直處於相對封閉之生態圈。自 80 年代以後，資通訊產業之急速發展大幅改變人們之生活樣態，電腦應用、行動通訊以及穿戴裝置之普及均深深影響日常生活。而資通訊產業強調「輕、薄，短、小」之特點也相當程度地成為我國半導體晶片、微型感測、精密製造產業發展之契機。資通訊產業之發展影響到許多工業發展與商業活動；不過由於太空系統一直強調履歷與認證故在導入資通產品之過程一直很緩慢。雖然包括美國太空總署之許多專家學者於 90 年代提倡所謂 FBC (faster, better, and cheaper) 策略以期加速發展、優化性能與降低成本，惜此一策略並未全面性地造成改變。於 1999 年，美國史丹福大學 Bob Twiggs 與加州科技大學 Jordi Puig-Suari 兩位教授提出立方衛星 (cube satellite 或 CubeSat) 之構想^(1, 2)。立方衛星為一以立方體為標準單位所建構之衛星，一單位立方衛星之長、寬、高分別為 10 公分，此一體積可容納衛星所需之電力、計算、通訊與控制功能之電路板而構成可以於太空運作之單元。此一立方衛星之倡

議主要解決衛星系統發展之兩項痛點。其一係此一規範是以電子電路為主要考量，有利於微型化與模組化之設計進而有機會發揮「以小博大」之精神，促成衛星微小化與星群化，另一則為此標準合理區隔衛星與火箭之介面有利於衛星以共乘 (ride share) 方式搭載於不同型式火箭送入太空。

衛星系統整合許多機械與電機之專業知識，立方衛星定義衛星尺寸之上限，採用立方體平面之外觀有利於太陽能板之貼覆而 10 公分尺寸亦符合習見工業電腦之標準，故此一標準實際引領電路板堆疊之參考設計構型；也因此衛星系統所需之電腦電路板、電力電路板、通訊電路板等均可以基於此一構型進行設計，間接引領產業之發展。衛星之發射一直是衛星系統發展之一重要項目。的確，衛星設計之軌道分析與機械分析均與衛星發射之火箭息息相關。也因此，衛星之設計根據系統工程得將發射火箭參數與限制納入考量。對於微小衛星之發射一般不容易順利協調出發射機會。相對而言，立方衛星之構型可以藉由彈射莢艙 (deployer) 包納，相當容易與發射載具整合，簡化發射協調程序並可以降低衛星發射與衛星設計之相依性。例如，衛星於設計之初可以將不同之潛在發射載具納入考量進行設計與測試，一俟衛星完成整合測試可善用不同之發射機會。由於立方衛星標準所引領之設計模組化與擴增性再加上發射靈活性與便捷性，此一標準於過去二十幾年已改變太空科技發展之生態也造就太空產業之良性發展。

立方衛星之模組化以及擴充性為一項重要特色。設計者可以根據任務之需求進行堆疊與擴充。目前以一單位為基礎可以擴充成兩單位、三單位、六單位、十二單位乃至更大。此一明確之標準以及擴充之性質促使此一立方衛星構型可適用於許多不同之衛星任務，也因此有些元件、電路與模組發展之廠商依據此一標準進行量產與製作，構成產業發展之動能。目前已有相當多市售立方衛星系統與次系統模組，發展衛星之單位可因此有許多選擇以顧及成本、品質與時程。整體而言，此一良性循環造就立方衛星發展時程之縮短、新創衛星單位之成立與衛星數量之增加。立方衛星之發展與發射載具之發展於此一階段也產生相輔相成之效果。由於彈射莢艙設計之相容性易於與發射載具整合，目前幾乎所有運載火箭均有共乘立方衛星之彈性。另一方面，隨著可回收火箭之發展，衛星發射之成本降低與機會增加。此一勇於接受風險與直球對決態度也引領出所謂 Fly-Learn-Refly 之思維，主要利用實際飛行快速吸取與累積經驗並經由持續飛試進行精進。立方衛星之發射與操作需求造就了發射服務商與地面接收網路等商業模式之興起。後者更與雲端服務充分結合形成完整之資料服務生態鏈。要言之，立方衛星之標準被廣泛採用且目前已形成一連貫衛星系統設計工具發展、衛星零組件生產、次系統電路製作、發射服務代理與資料接收分送之新太空 (new space) 產業生態系統。第一批之立方衛星於 2003 年發射，隨後每年發射之立方衛星個數呈現指數方式成長之趨勢。歷 20 年，立方衛星發射之個數已超過 2300 枚而相關之太空科技與服務公司亦超過 700 家⁽³⁾。立方衛星市場規模，由 2021 年之美金兩億一千萬至 2030 年之美金八億五千七百萬，年成長率為 15.1%⁽⁴⁾。

二、台灣之立方衛星發展

我國學界對於立方衛星之研究並未落後其他先進國家，表一列出我國歷年發射之立方衛星。此表顯示我國立方衛星之發展步調於近年來在政府之推動下有加速之現象，於過去十年台灣發射十枚立方衛星。以下針對部分立方衛星之實例與發展成果進行說明。

表 1. 我國立方衛星之發射情形。

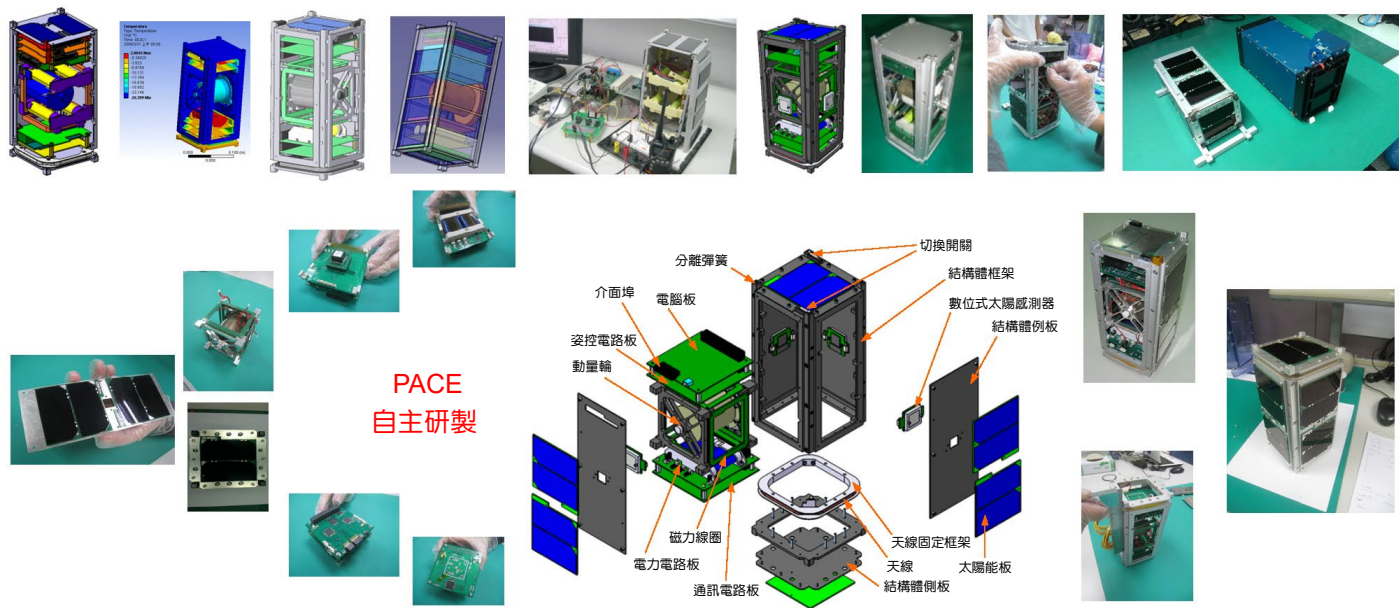
衛星名稱	發射年月	發射載具	執行單位
PACE	2014.06	Dnepr	成功大學
PHOENIX	2017.04	Altas V/ISS	成功大學
YUSAT	2021.01	Falcon 9	海洋大學
IDEASSat	2021.01	Falcon 9	中央大學
IRIS-A	2022.01	Falcon 9	成功大學
NutSat	2022.11	Falcon 9/ISS	虎尾科大
IRIS-C	2023.04	Falcon 9/Vigoride 6	成功大學
IRIS-C2	2023.11	Falcon 9	成功大學、智探太空
PEARL-1C	2023.11	Falcon 9	中央大學、鴻海
PEARL-1H	2023.11	Falcon 9	中央大學、鴻海
LILIUM-1	2023.12	Falcon 9	成功大學

國立成功大學立方衛星團隊自 2002 年開始進行立方衛星之研究，自 2014 年開始陸續發射 PACE、PHOENIX、IRIS-A、IRIS-C、IRIS-C2 與 LILIUM-1 六枚立方衛星⁽⁵⁾。PACE (Platform for Attitude Control Experiment) 為兩單位之立方衛星，主要任務為發展立方衛星三軸穩定技術平台並進行太空驗證。此一衛星於 2003 年開始發展並於 2014 年由 Dnepr 火箭發射，係第一枚台灣發射之立方衛星。PACE 立方衛星之發展與研製，全程經歷不同設計、審查、組裝、整合、發射均依系統工程之作法進行。圖 1 為 PACE 立方衛星由概念出發至產品完成之路程，此圖同時也說明由 PACE 立方衛星由地面發展經歷不同測試而進行發射之過程。圖 1 也說明此一立方衛星系統之內部構造並說明各自主發展模組之內容。

PHOENIX 鳳凰立方衛星為成功大學團隊於 2012 年開始參與歐盟 QB50 計畫⁽⁶⁾ 所自主發展之二單位立方衛星。此一立方衛星於 2017 年 4 月 18 日由聯合發射聯盟 (ULA) 擎天神五號 (Altas V) 運載火箭運送至國際太空站 (International Space Station, ISS)，並於當年 5 月 17 日由國際太空站進行佈放至 400 公里高度之軌道。此一衛星持續正常工作近兩年，並持續下傳科學酬載與衛星本體之資料。於 2019 年 5 月進入大氣層也結束其任務。圖 2 顯示 PHOENIX 之發展歷程。QB50 計畫主要目的為於全球佈放近 50 枚立方衛星，以進行中低變溫層 (mid-lower thermosphere) 多點 (multi-point)、現地 (in-situ) 量測與進行重返大氣層 (re-entry) 之研究。除了科學研究之外，QB50 計畫亦具有技術發展、太空任務執行與教育之目的。成功大學團隊自主發展之 PHOENIX 立方衛星搭載離子／中性粒子質譜儀作為主要酬載，也搭配成功大學自行發展之太陽紫外線感測器以量測太陽紫外線之活動。圖 3 為 QB50 網頁摘錄顯示 PHOENIX (TW01) 衛星成功執行任務與資料下傳之狀況，彰顯此一衛星任務之成功以及團隊善盡國際參與之責任。

成功大學團隊之 IRIS (Intelligent Remote sensing and Internet Satellite) 立方衛星計畫主要發展具光學遙測功能、物聯網技術與人工智慧內涵之立方衛星，以精進前瞻關鍵之技術以利佈局太空產業。IRIS-A 立方衛星於 2022 年 1 月 13 日由獵鷹 9 號運載火箭順利發射至 520 公里高度之軌道。此一兩公斤等級 IRIS-A 立方衛星至今在軌成功運作兩年，除驗證衛星物聯網之功能也完成立方衛星之取像與下傳。IRIS-A 另也驗證國家太空中心所發展之衛星

PACE 由概念至成品



PACE
自主研製

PACE 由地面至太空

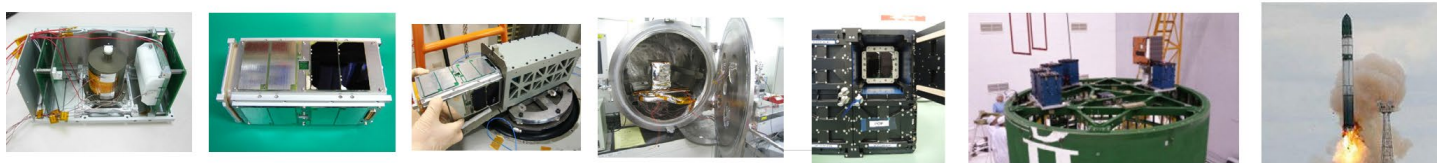


圖 1. PACE 立方衛星之研發。



圖 2. PHOENIX 立方衛星之發展歷程。

Legend

About last data	
Code	Description
Grey	Cubesat not operational
About last data	
Code	Description
Green	Less than 3 days about the last contact
Yellow	Between 3 and 7 days about the last contact
Red	More than 7 days about the last contact
A	All
SU	Science unit data
WOD	Whole orbit data
About amount	
Code	Description
Green	Data received
Red	Data not received
About WOD	
Code	Description
Green	SU active / Voltage, current or Temperature inside range
Red	SU inactive / Voltage, current or Temperature outside range
V _{Bat}	Voltage of battery
I _{All}	Average current of all components
T _{All}	Average temperature of all components

ID	Last data			Amount			WOD			ID	Last data			Amount			WOD		
	A	SU	WOD	SU	WOD	SU	V _{bat}	I _{all}	T _{all}		A	SU	WOD	SU	WOD	SU	V _{bat}	I _{all}	T _{all}
AT03	0	81	0	166	5674		4.030	-0.120	-2.67	GB03	226		0	0					
AU01				0	0					GB06	250		0	0					
AU02	12		248	0	3		8.250	0.157	16.67	GR01	256		256	0	2		8.300	0.102	11.33
AU03	6520		6520	0	6		8.250	0.528	31.67	GR02	305		0	0					
AZ01				0	0					IL01	1	1	1	3021	3404		8.250	0.228	1.0
AZ02	1	118	350	127	1		8.300	1.008	16.33	IN01			0	0					
BE05	289	289	330	1	0					IT02	318		0	0					
BE06	17			0	0					KR01	172		270	0	69		8.300	0.055	11.08
CA03	18	286	271	1	1004		14.800	-0.079	-0.67	KR02			0	0					
CN02	247		247	0	16		3.900	-0.181	6.0	KR03	1		0	0					
CN03	10			0	0					LT01	12		161	0	9		8.250	0.827	-1.0
CN04	69		69	0	18		6.650	0.307	15.17	RU01			0	0					
CZ02	267		267	0	3662		8.250	0.047	15.33	SE01	18		0	0					
DE02				0	0					TR01	339		0	0					
DE04			323	0	0					TR02	345		0	0					
EO79	169			0	0					TW01	0	0	52	3203	418		8.050	0.236	28.75
EO80	273		288	0	5		15.750	0.055	7.33	UA01	14		0	0					
ES01				0	0					US01	19		251	0	2018		6.550	0.000	10.17
F101	319			0	0					US02	47		0	0					
FR01	58			0	0					US03			0	0					
FR03	248		248	0	1		8.250	0.157	16.67	US04	65		0	2					
FR05	387			0	0														



圖 3. PHOENIX 立方衛星相較於其他衛星之資料下傳情形。

導航接收機於太空之性能。圖 4 為 IRIS-A 立方衛星發展之歷程而圖五為所拍攝與下傳之照片。基於 IRIS-A 之基礎，成功大學持續精進立方衛星技術並於 2023 年 4 月發射三公斤等級之 IRIS-C 立方衛星以及與新創公司智探太空於 2023 年 11 月發射三公斤等級之 IRIS-C2 立方衛星，亦均成功驗證衛星與酬載之功能。

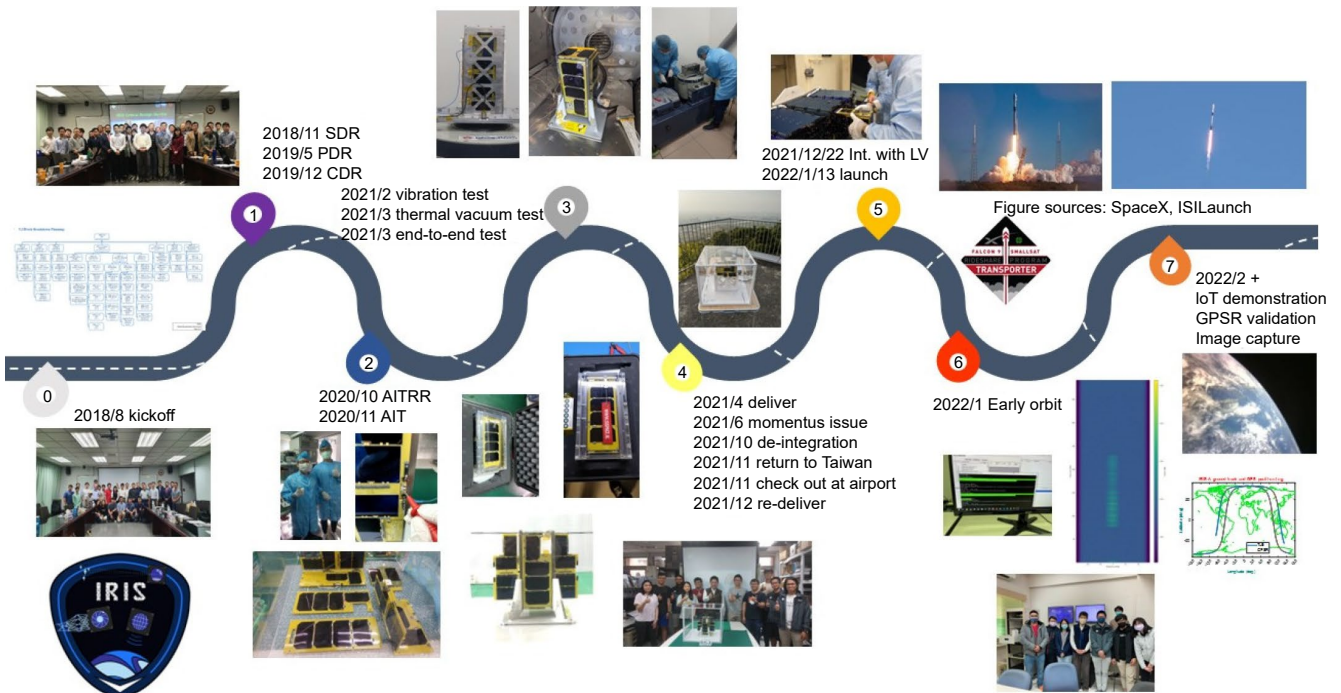


圖 4. IRIS-A 立方衛星之發展歷程。



圖 5. IRIS-A 拍攝與下傳之照片。

成功大學團隊之台灣百合一號 LILIUM-1 立方衛星於 2023 年 12 月 2 日利用美國獵鷹九號火箭由美國加州范登堡基地發射至 520 公里之低地球軌道，執行任務。此一由國科會資助之 LILIUM-1 衛星為四公斤等級之三單位立方衛星，主要技術含量為整合衛星導航定位、姿態控制、光學取像、星上資料處理與高速率通訊之功能，建立了衛星緊急應變偵照之應用潛力。LILIUM-1 立方衛星之命名是取台灣百合所具備之原生、堅忍與綻放的意涵。圖 6 紀錄 LILIUM-1 立方衛星之發展歷程而圖七為該衛星自拍之照片。整體 LILIUM 計畫預計發射三枚立方衛星以驗證系統整合、衛星高頻通訊、星際通訊、智能遙測、太空推進、展開機構與衛星避撞/離軌功能。LILIUM-1 衛星所包含之系統整合、衛星通訊與智能遙測等技術將於後續 LILIUM-2 與 LILIUM-3 進一步精進。此一系列衛星可視為國家發展低軌通信衛星的先行實驗，可提供地面終端設備與物聯網裝置驗測之平台。

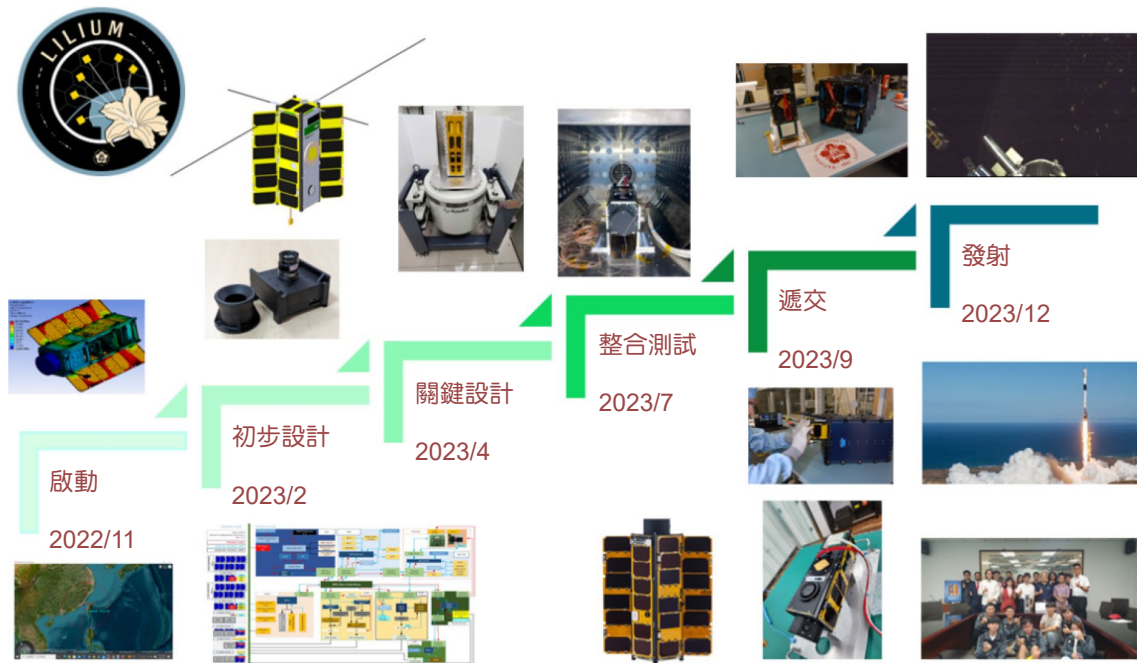


圖 6. LILIUM-1 立方衛星之發展歷程。



圖 7. LILIUM-1 立方衛星迎向太陽與拍攝地球之自拍影像。

由以上有關成功大學團隊發展立方衛星之經驗與結果可知，國內對於立方衛星系統之設計、製作、整合、組裝、測試、發射與操作已有相當基礎。由成功大學不同階段之衛星發展也可觀察到隨著知識與經驗之累積，衛星發展之期程 (由計畫啟動到衛星發射) 由 PHOENIX 之五年，到 IRIS-A 之三年再下修為 LILIUM-1 之一年。此一技術掌握有利於快速反應衛星之發展也有益於新穎技術之太空驗證。此些經驗與成果，對於衛星關鍵技術之發展、立方衛星系統工程之實踐、立方衛星發展環境之建構、國內產業之鏈結、國際合作之開展、太空人才之培育均奠定良好基礎。

三、量變產生質變

由於數目之急速增加，立方衛星科研與產業已經過轉折點 (tipping point)，正處於「量變產生質變」之階段。立方衛星之發展早期主要以太空教育或技術驗證為目的，但經歷二十年之發展技術已有相當成熟度，故目前之趨勢主要朝創新科學與商業應用邁進。關於後者，有相當多商業公司應用立方衛星之平台佈署衛星系統以進行服務。立方衛星雖有尺寸與體積之先天限制但由於具有成本較低與佈署容易之優點，故可以利用滿天星之策略建構星系或星群以得到較好的時間解析度。比較有名之立方衛星星系包含地球觀測之 Planet 星系⁽⁷⁾，船舶識別訊號與導航衛星訊號反掩 (occultation) 之 Spire 星系⁽⁸⁾，射頻訊號偵測之 Unseenlabs 星系⁽⁹⁾ 與 Kleos 星系⁽¹⁰⁾，衛星物聯網之 Lacuna 星系⁽¹¹⁾ 與 Sateliot 星系⁽¹²⁾ 等。此些立方衛星星系應用星海戰術之優勢建構出衛星網路，又可以與大型衛星形成互補完善衛星資料服務。

除了商業發展外，由於立方衛星之技術已有相當成熟度，許多科學任務也嚴肅地看待應用立方衛星進行科學探索之機會。美國國家學院 (National Academies) 發表了 *Achieving Science with CubeSats: Thinking Inside the Box*⁽¹³⁾，主要針對太陽系與太空物理、地球科學與太空應用、行星科學、天文學與天文物理以及太空之生物與物理等學門領域之立方衛星應用進行盤點。這其中更指出立方衛星之低成本優勢以及所提供地球觀測之時間解析度、縮短資料取得時間即時性等均有利於地球觀測與太空科學之應用。美國太空總署也持續鼓勵學研界並啟動相當多立方衛星科研計畫。事實上，於美國重返月球之阿提米絲計畫 (Artemis program)⁽¹⁴⁾ 之一部分就是利用立方衛星先行以取得資料與降低風險。此些立方衛星之任務

包含水冰偵測、氫氣測量、月表探測、月表撞擊量測、隕石探勘、太空輻射量測、輻射效應實驗、太空天氣量測與推進實驗等。可見大型太空計畫已槓桿立方衛星低成本與可容忍風險之特性，此一趨勢應會成為未來之常態。

以歐盟之 QB50 計畫⁽⁶⁾ 為例，主要也期望善用立方衛星之可拋棄性於大型衛星無法停駐之中低變溫層空間佈署多枚立方衛星進行現地量測。此一跨國 QB50 計畫計畫應用三項科學儀器進行中低變溫層氣體分子成分與電氣特性之量測：分別為離子／中性粒子質譜儀 (ion/neutral mass spectrometer, INMS)、通量偵測儀 (flux probe experiment, FIPEX)、多探頭蘭摩爾探測儀 (multi needle Langmuir probe, mNLP)。這些儀器所量測之離子、中性粒子、電子、氧原子、溫度等之物理量可增進人們對於低變溫層物理現象的理解，包含地球大氣層與太陽輻射間的關聯性，所獲得的全球分佈資訊，可進而強化預測模型，有利於地球暖化、大氣科學、太空天氣、高超音速飛行、太空旅行乃至於衛星殘骸軌道估測之研究。目前全世界均相當關注淨零碳排之議題，溫室氣體之排放具有空間與時間之特徵，故有團隊發展溫室氣體監測之立方衛星星系，以 GHGSat 為代表⁽¹⁵⁾，以持續收集與累積二氧化碳與甲烷資料。

立方衛星與科學酬載實為一體之兩面，二者均充分導入輕薄短小之技術以利布建。可以想見，此一趨勢將持續發展。一方面，太空科學儀器可沿用立方衛星平台進行在軌實驗與研究。此舉也促成立方衛星技術之發展與精進，包含高速通訊、光通訊，精確姿態控制、大型電力產生、太空推進、高增益天線、大口徑展開機構等。另一方面，立方衛星技術所夾帶之軟體定義框架與人工智慧技術也讓許多任務可以更有效率地執行。未來之立方衛星與科學任務將因此在微小 (small)、聰明 (smart)、星群 (swarm)、軟體 (software)、標準 (standard) 等元素之堆疊下進行。

四、結論

基於立方衛星標準之應用可以導入具革命性之創新思維，進行技術突破並開發出新產品、程序或商模，進而產生正向循環，累積快速成長之動能。立方衛星之發展於太空人才之培力、科研之發展、新創之育成與商模之展開均產生破壞式之創新，間接奠定今日新太空發展之重要基礎。此一標準之推動讓太空不再陌生與遙遠，應用低成本即可以進行太空技術發展與科學研究，如此激勵更多之參與者建構出可觀之生態系。對於前沿太空科學研究，無論是地球觀測或外太空探索均可以看到立方衛星之角色。隨著低軌道通訊衛星之發展與 6G 通訊網路之需求，立方衛星所提供之通聯服務亦將可以與大型星系互補共構達到無間歇與無縫之服務。台灣可善用資通產業與智慧製造之優勢進行創新之研究與國際合作，以建構立方衛星為體之科研與產業應用機制並布局全球。

參考文獻

1. H. Heidt, J. Puig-Suari, A. Moore, S. Nakasuka, R. Twiggs, "CubeSat: A new Generation of Picosatellite for Education and Industry Low-Cost Space Experimentation," *Proceedings of the Thirteenth Annual AIAA/USU Small Satellite Conference*, Logan, UT, August, (2000).
2. CubeSat Design Specification Rev 14.1, The CubeSat Program, Cal Poly SLO, (2022). Please refer to the website: <http://www.cubesat.org/>
3. Nanosats Database, (2024). Please refer to the website: <https://www.nanosats.eu/> (Accessed 2024/1/13).
4. CubeSat Market, (2024). Please refer to the website: <https://straitresearch.com/report/cubesat-market> (Accessed 2024/1/13).

5. NCKU Space Laboratory, (2024). Please refer to the website: <http://satellite.ncku.edu.tw/> (Accessed 2024/1/13).
6. QB50, (2024). Please refer to the website: <https://www.qb50.eu/> (Accessed 2024/1/13).
7. Planet, (2024). Please refer to the website: <https://www.planet.com/> (Accessed 2024/1/13)
8. Spire, (2024). Please refer to the website: <https://spire.com/spirepedia/cubesat/> (Accessed 2024/1/13).
9. Unseenlabs, (2024). Please refer to the website: <https://unseenlabs.space/> (Accessed 2024/1/13).
10. Kleos Space, (2024). Please refer to the website: <https://kleos.space/> (Accessed 2024/1/13).
11. Lacuna space, (2024). Please refer to the website: <https://lacuna.space/> (Accessed 2024/1/13).
12. Sateliot, Please refer to the website: <https://sateliot.space/en/> (Accessed 2024/1/13).
13. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. *Achieving Science with CubeSats: Thinking Inside the Box*. Washington, DC: The National Academies Press, (2016).
14. NASA Artemis program, Please refer to the website: <https://www.nasa.gov/specials/artemis/> (Accessed 2024/1/13).
15. GHGSAT Greenhouse Gas Emissions Monitoring Satellite, (2024). Please refer to the website: <https://www.ghgsat.com/en/technology/constellation/> (Accessed 2024/1/13).

作者簡介

莊智清先生為美國南加州大學電機博士，現為國立成功大學電機工程學系教授。

Jyh-Ching Juang received his Ph.D. in Electrical Engineering from University of Southern California, USA. He is currently a Professor in the Department of Electrical Engineering at National Cheng Kung University.