

# 創造性思考－立方衛星的挑戰與機會

## Think Outside the Box - The Challenges and Opportunities of CubeSats

陳嘉瑞

Chia-Ray Chen

立方衛星的標準化規範讓系統設計、製造和發射變得相對容易，這種技術標準不僅有助於節省設計時間，同時也為設計人員提供了更多客製化的靈活性。模組化構型使得設計人員能夠輕鬆地混合和匹配不同的組件和功能。經過 20 多年的發展，立方衛星已經成為太空產業中不可或缺的一部分，除了教育和技術展示的功能外，在遙測、物聯網與氣象等相關應用領域上亦成為扮演著重要角色。

The standardized specifications of CubeSats make system design, manufacturing and launch relatively easy. This technical standard not only helps save design time, but also provides designers with more customization flexibility. Modular configuration allows designers to easily mix and match different components and functionality. After more than 20 years of development, CubeSats have become an indispensable part of the space industry. In addition to their functions of education and technology demonstration, they also play an important role in related application fields such as remote sensing, Internet of Things, and meteorology.

### 一、背景說明

在 1957 年，蘇聯成功發射了人類歷史上第一顆人造衛星，即史普尼克 1 號 (Sputnik 1)，拉開了美國與蘇聯之間的太空競賽序幕。隨著數十年的太空科技發展，衛星從昂貴的國家任務逐漸轉變為普遍應用於商業領域，深刻地影響了我們的日常生活。

自 1999 年起，加州州立理工大學的 Jordi Puig-Suari 教授和史丹佛大學的 Bob Twiggs 教授提出了立方衛星的概念，旨在讓大學生和研究生能夠輕鬆設計和製造小型衛星<sup>(1)</sup>。立方衛星 (CubeSat) 是一種小型衛星的標準設計，每個模塊 (1U) 的尺寸為 10 公分×10 公分×10 公分。這種標準化設計不僅使立方衛星的製造更加迅速，同時降低了發射成本，也鼓勵更多的學術和研究機構參與太空任務。

美國太空總署 NASA 於 2010 年啟動立方衛星發射計畫 (CubeSat Launch Initiative)<sup>(2,3)</sup>，為美國教育機構和非營利組織研發的立方衛星提供發射機會，提供了太空飛試驗證的低成本

途徑，從而鼓勵更多學研單位投入太空領域發展，並獲得飛行硬體設計、開發和製造的實務經驗。自 2010 年啟動以來，立方體衛星發射計畫已發射了 150 多個立方衛星，對於美國在立方衛星先進技術的領先功不可沒。同樣的，歐洲太空總署 (European Space Agency, ESA) 及日本宇宙航空研究開發機構 (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA) 也分別在 2013 年及 2012 年開始提供產學研界立方衛星發射機會，也帶動了歐洲和日本的立方衛星研發熱潮(4,5)。

## 二、科技發展趨勢

近年來由於科技的快速發展，過去必須仰賴大型設備與電腦才能執行的工作也逐漸能夠在小型裝置如手機及穿戴裝置上執行。以下是一些近年來與衛星相關的一些科技趨勢<sup>(6-8)</sup>：

- 人工智慧 (artificial intelligence, AI) 與機器學習 (machine learning)：人工智慧和機器學習的發展是當今科技中的一個主要趨勢，相關技術也快速落實在衛星資料處理分析上，能夠更有效率的提升即時衛星服務，無論是地面端或太空端的太空科技發展都產生了重大影響。
- 大數據分析 (big data analysis)：為了能夠快速處理與日俱增的全球衛星資料，例如影像資料和氣象數據，大數據分析和應用成為衛星服務中一個重要領域，相關技術使得人們能夠更好地利用大量的衛星數據來進行分析、預測和決策，例如遙測服務公司能夠提供衛星影像內的重要資訊給客戶而非單純照片而已。
- 雲端 (cloud) 存儲與運算與邊緣 (edge) 運算：雲端運算與邊緣運算的出現對於太空科技發展與應用有了重大變革，地面的雲端提供龐大的資料存儲與計算資源，以及較高的安全性，方便衛星資料供應商與使用者在全球即時連線使用。而衛星端的邊緣運算則可進行即時資料處理與判讀，適用於需要低延遲、即時反應的場景，例如物件偵測與災害判讀。
- 物聯網 (IoT)：IoT 技術將許多設備連接到互聯網，彼此能夠相互通信和共享數據。衛星的特性能夠將此一應用由區域內提升到全球覆蓋，無論是高山、海洋或空中均能夠透過衛星連線來實現此一目標，為人們提供更便利生活。
- 精密機械製造：如精密磨削、雷射加工及 3D 列印技術等，可以實現高精度與提高生產效率，並適合多樣少量的客製化衛星發展，對於衛星小型化及先進酬載研發有重要幫助。
- 先進材料：如高強度、輕量、耐腐蝕和高溫特性先進合金和金屬材料，以及具有特殊的物理、化學和機械特性的奈米材料，可應用於太空環境，有利於特殊需求的太空產品研發。
- 輕巧省電晶片：在資源受限環境中，如立方衛星，晶片的大小、重量、和功率 (SWaP) 往往會受到嚴苛限制。目前電子產業朝向體積小、重量輕、和低功率發非常有利於立方衛星應用。

## 三、衛星發展趨勢

受到上述科技發展影響，衛星發展也出現了不同面貌，主要有以下幾個方向<sup>(9,10)</sup>：

- 小型化和輕量化：追求小型化和輕量化是目前的一個趨勢，特別在大量星系佈署的任務中，它們成本較低、製造周期短，能以較低的成本實現不同的任務。
- 低軌通訊衛星網絡：為縮短高軌衛星通訊延遲的問題，許多公司正在計劃建立全球低軌衛星互聯網，以提供全球無縫覆蓋的高速互聯網服務。
- 即時地球觀測和環境監測：衛星在地球觀測、環境監測和氣象預報等方面的應用持續擴大。這些衛星能夠提供高解析度的地球影像、環境變化監測、天氣預報和自然災害監測等

信息。

- 大型星系佈署：大量衛星部署在軌道上，以達到全球覆蓋與即時服務，如通信、導航和監測。

在此同時，也產生了有別於過往傳統太空的發展模式，一般稱之為新太空 (NewSpace)。

## 四、新太空

在本世紀的前十年，出現了多家私人發射公司，其中 SpaceX 的成功對後續太空產業的發展產生了決定性的影響。在 2008 年，Falcon 1 (獵鷹 1 號) 成為第一顆進入軌道的私人全液體燃料運載火箭，SpaceX 的核心策略是持續降低成本，首先通過工程和生產優化，然後是實現火箭的回收再利用。到了 2010 年，獵鷹 9 號的每公斤發射成本比其他公司降低了一半以上，這一成功引發了新的太空浪潮，使私人資本和太空新創企業在太空經濟領域迅速擴展<sup>(11)</sup>。

到 2013 年，商業發射的數量超過了政府客戶的數量，LEO 的發射數量超過了 GEO 的發射數量。SpaceX 低軌通訊星鏈 starlink 計畫的上萬顆衛星部署，引爆了太空產業的高速成長，同時吸引了更多資金與人才投入太空產業。傳統航太企業與具有創新能力和低成本結構的新進入者之間形成了新的合作關係。政府機構開始關注商業供應商，並轉向近地軌道新架構<sup>(11)</sup>。

此外，近年來，私募股權 (private equity, PE) 投資者和風險投資 (venture capital, VC) 積極參與太空產業，經濟利益成為推動太空活動的主要動力。因此，這表示太空企業以及其產品和服務的構想和實踐方式正在經歷典範轉移。這種轉變涉及技術、商業和政策層面的影響，這些影響共同形成了今天所謂的新太空 (NewSpace)<sup>(12)</sup>。

新太空的特點包括但不限於<sup>(12-14)</sup>：

- 商業化取向：新太空著重於商業化應用，重點放在太空活動的商業價值和商業潛力上，而非僅僅專注於科學研究或政府機構主導的太空探索。
- 創新和技術驅動：新太空業者不斷追求創新，尋求應用最新技術、工程和科學發現，以創建更有效、更可靠、成本更低的太空解決方案。
- 私人投資和風險投資：新太空活動通常依靠私人投資和風險投資，而不僅僅依賴政府資金。
- 多樣化的應用領域：新太空不僅局限於傳統的通訊、地球觀測和科學研究，還延伸到太空旅遊、太空採礦、環境監測、農業、教育等多個領域。
- 效率提升：不同於傳統太空任務的風險規避方式，為能夠降低成本與採用最新技術，對失敗的風險接受度有所提升。傳統太空機構發展衛星通常需要 3-5 年，新太空的公司通常在 1-2 年內完成衛星發射。
- 成本效益：新太空的任務成本通常是傳統太空的一成左右，主要是因為大量使用商規零件 (commercial off-the-shelf, COTS) 硬體及衛星小型化來實現。

整體而言，新太空具有創新、商業化、私人投資驅動和多樣化應用等特點。這種新型的太空活動模式為太空產業的發展帶來了新的可能性和商機，同時也為人類在太空探索和利用方面開啟了新的篇章。

## 五、立方衛星發展演變

### 1. 平台大型化

立方衛星最初由學術研究機構提出的概念，其低成本的進入方式迅速使太空領域成為政府機構和產業的熱門選擇。隨著更多工程人員的努力，立方衛星變得更加多樣化且具有更強的能力，使原本簡單的立方衛星能夠執行更為複雜的任務。為滿足更高的任務需求，立方衛星平台的發展已由早期以 1U 和 2U 為主流，逐步演變為 3U 和 6U，近期更包括 12U 和 16U 平台在內，如圖 1 所示<sup>(15)</sup>。這代表著立方衛星發展的重大突破，因為更大的平台意味著更強大的衛星能力，能夠提供更優越的應用服務和創造更大的商業價值。立方衛星已成為太空科技發展中不可或缺的一環。

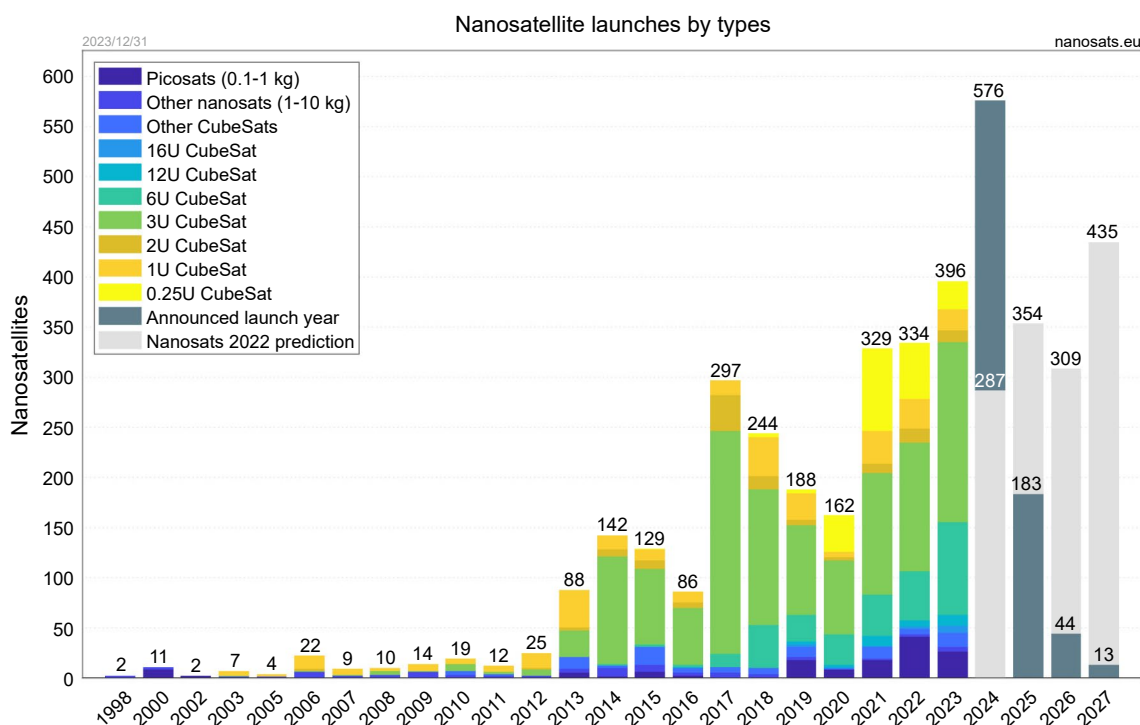


圖 1. 立方衛星發射尺寸，圖片來源 Nanosats Database<sup>(15)</sup>。

### 2. 平台超小型化

除了越來越多大型化的立方衛星出現外，從圖一也可看出，自 2020 年開始出現了大量超小型的立方衛星，其中包括 0.25U 的超小型立方衛星。這些衛星是衛星新創企業 Swarm Technologies 建立的 150 枚衛星物聯網星系的一部分。透過低成本的 0.25U 立方衛星的全球覆蓋星系佈建，可以提供低價及低流量的全球衛星物聯網服務。<sup>(16)</sup>

口袋衛星 (PocketQube) 是以 5 公分邊長的立方體，即一個單位 P (等於立方衛星體積的八分之一)，質量不超過 250 克。這個標準最初由 Morehead State University 的 Bob Twigg 教授提出，旨在創造一顆可以裝在口袋裡的衛星。如圖 2 所示，2013 年首次發射了 4 枚口袋衛星，之後直到 2019 年才再度發射 6 枚口袋衛星。由於新冠疫情的影響，2020 年未有發射，但在接下來的 2021 到 2023 年間，口袋衛星的發射再度大幅增加。根據衛星類型來

看，1 到 3P 大小的口袋衛星是主流，如圖 3 所示。儘管口袋衛星體積極小，商業公司 Alba Orbital 已成功利用口袋衛星建立地球觀測星系，截至 2023 年底，已發射了 13 枚口袋衛星 (17, 18)。

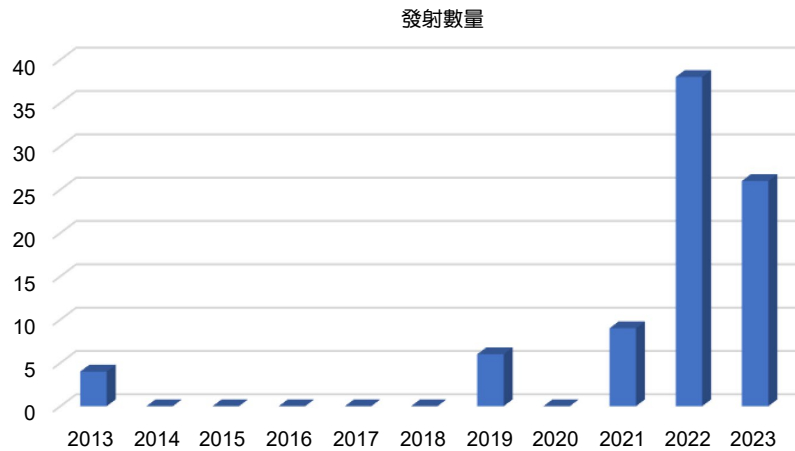


圖 2. 口袋衛星 (PocketQube) 發射數量。

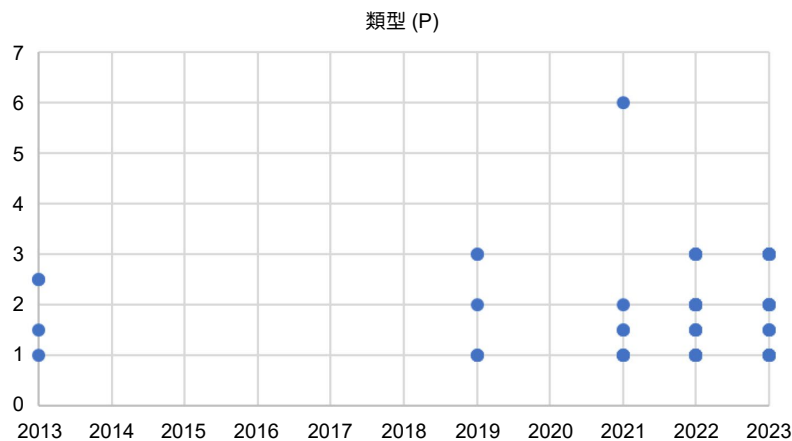


圖 3. 口袋衛星 (PocketQube) 發射類型。

### 3. 研發單位多元化

在過去的 20 年中，立方衛星的研發單位經歷了重大轉變。如圖 4 所示，在 2012 年之前，這些立方衛星主要由大學團隊主導開發，其主要目的是人員訓練和新科技展示。然而，隨著技術和應用的迅速發展，引起了業界和研究機構的關注。2013 年 4 月，商業公司 Planet Lab 發射了兩枚 3U 的光學遙測衛星 Dove，成功實現了以立方衛星提供地面採樣距離 (ground sampling distance, GSD) 為 3~5 米遙測影像資料。此後，每年發射數十枚衛星，這也解釋了為何 2013 年後 3U 立方衛星的發射量大幅增長 (見圖 1)，同時商業公司發射的立方衛星數量也迅速增加 (見圖 4)<sup>(15)</sup>。從 2014 年開始，商業公司發射的立方衛星數量正式超越了大學機構，標誌著立方衛星商業化時代的開始。

在過去的 10 年中，由於立方衛星的性能進一步提升，它不僅僅是學術研究的領域，更成為商業和科研應用的重要組成部分。許多企業和新興太空公司投入開發，利用這些小型平台進行科學研究、地球觀測、通訊和其他商業目的的任務。因此，立方衛星的研發單位已從



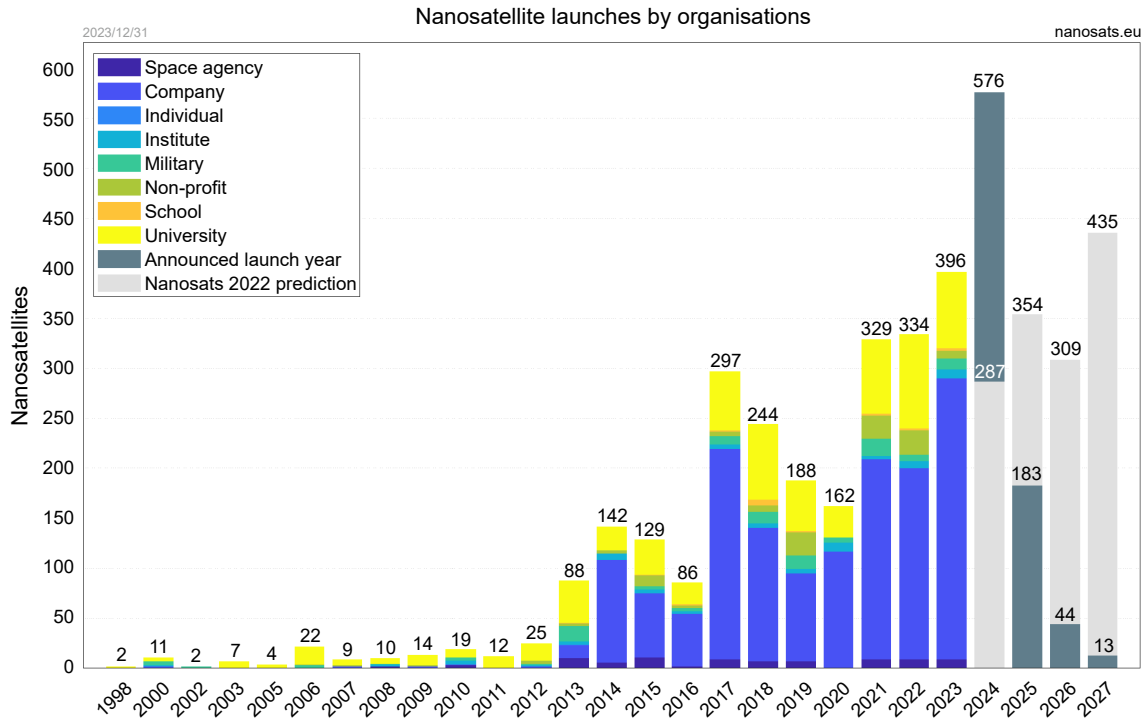


圖 4. 立方衛星研發單位，圖片來源 Nanosats Database<sup>(15)</sup>。

最初的大學團隊擴展到包括研究機構、企業和民間公司等多種參與者，形成了一個多元化的生態系統，推動著這種小型太空技術的不斷創新和應用。

#### 4. 任務多元化

伴隨著立方衛星的尺寸多元化與研發單位多元化，立方衛星所執行的任務也更多元，主要包含了下列應用<sup>(1-5)</sup> (15, 19)：

- 教育訓練：為學生或入門者提供了獲得衛星設計、開發和操作經驗的實用方法。
- 技術展示：太空進行新技術的驗證測試。
- 科學任務：進行太空科學任務。
- 遙測任務：提供低成本全球遙測服務，目前已有可見光及紅外光的多光譜與高光譜影像服務。
- 通訊中繼任務：主要為在軌資料中繼服務 (orbital data relay)。
- 物聯網 (IoT) 任務：提供低成本全球物聯網服務。
- 自動識別系統 (automatic identification system, AIS) 任務：透過衛星進行船隻自動追蹤，實現全球 AIS 覆蓋。
- 廣播式自動相關監視 (automatic dependent surveillance-broadcast, ADS-B) 任務：透過衛星 ADS-B 酬載來追蹤飛機的運動，用於空中交通管理。
- 氣象任務：提供低成本全球氣象觀測服務，如 GPS 電波掩星 (radio occultation, RO) 天氣資料。
- 無線電頻譜監測 (RF spectrum monitoring)：監測地表所發出之無線電頻譜訊號。
- 星際探索：立方衛星已在月球和火星探索任務上發揮輔助大型任務的功能。
- 空間監測 (space situation awareness, SSA)：主要用於與太空碎片監測和追蹤地球軌道上的物體。

根據 Nanosats Database<sup>(15)</sup>，從 2013 年到 2023 年底，多家商業公司推出了立方衛星星系計畫，應用範疇相當廣泛。圖 5 為這些公司首次衛星發射時間統計圖，從圖中可觀察到光學遙測、物聯網 (IoT)、氣象、AIS 及 ADS-B 等應用在 2013 年就已經開始佈署立方衛星星系。2018 及 2019 年明顯出現許多商業立方衛星公司及星系計畫。2020 年因受到新冠疫情的影響，新增商業立方衛星星系計畫有所減少，但到了 2021 年後已逐步恢復至疫情前水準。

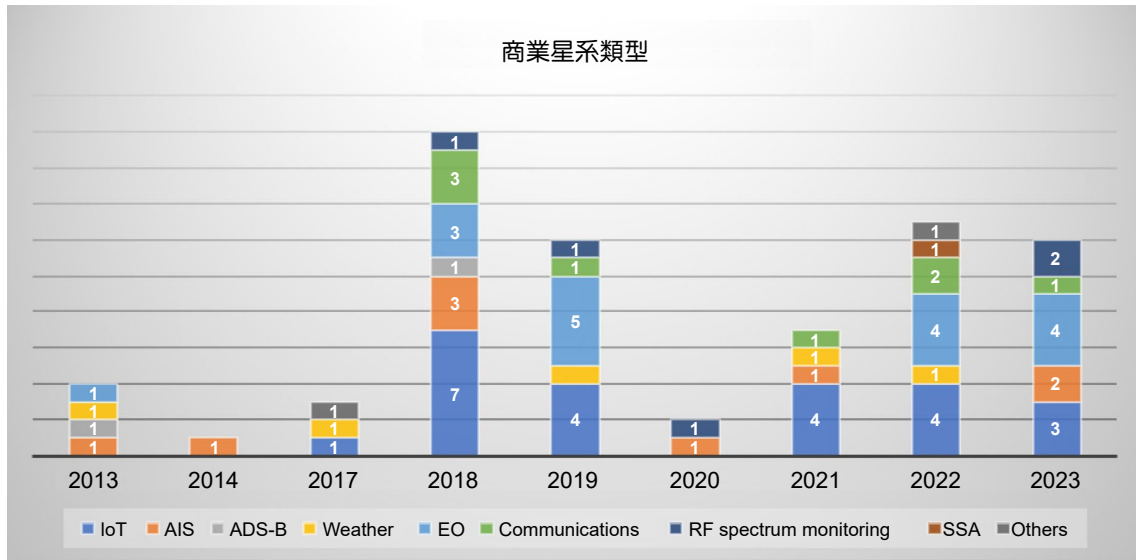


圖 5. 首次商業立方衛星星系發射統計圖。

根據 2013 年到 2023 年底的所有商業立方衛星星系統計 (見圖 6)<sup>(12)</sup>，統計資料顯示物聯網 (IoT) 立方衛星星系案最多，高達 23 個。其次是光學遙測 (earth orbit, EO) 立方衛星星系，共有 17 個；第三是自動識別系統 (AIS) 的星系計畫有 9 個；第四則分別有 5 個在軌資料中繼的通訊任務，無線電頻譜監測 (RF spectrum monitoring) 及氣象任務；而廣播式自動相關監視 (ADS-B) 及空間監測 (SSA) 則分別有 2 個和 1 個。這些星系的任務應用領域相當廣泛。

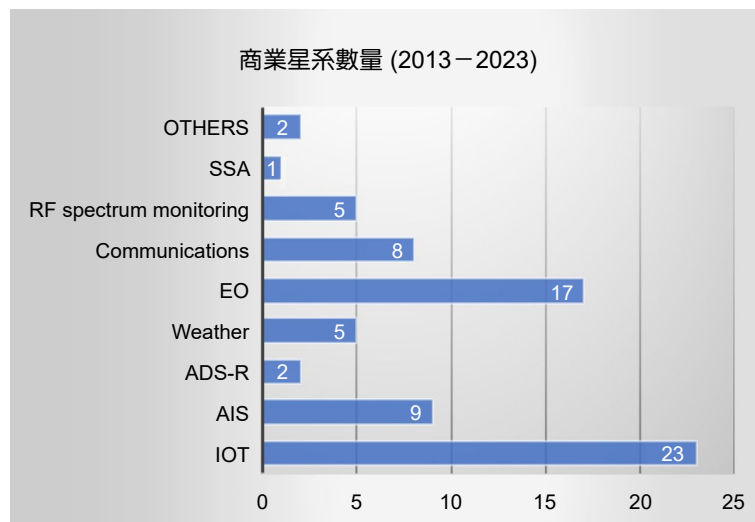


圖 6. 所有商業立方衛星星系統計。

## 六、代表性商業立方衛星星系介紹

■**光學遙測**：全球第一家光學遙測立方衛星公司 Planet Labs 於 2010 年創立，最初的目標是利用從太空收集的資訊來幫助地球上的生命。該公司設計和製造了名為 Doves 的 3U 立方衛星，配備了相機，可以捕捉地球的不同區域。Planet Labs 於 2013 年 4 月發射了兩顆 3U 立方衛星，分別為 Dove 1 和 Dove 2，能夠生成地面採樣距離 (GSD) 為 3~5 公尺的影像。為實現全球覆蓋和快速取像的目標，該公司每年發射數十枚衛星升空，以提供商業應用服務。截至 2023 年底，該公司已發射超過 500 顆光學立方衛星，形成了最大的立方衛星商業星座，目前有 150 顆處於活躍狀態<sup>(15-17)</sup>。

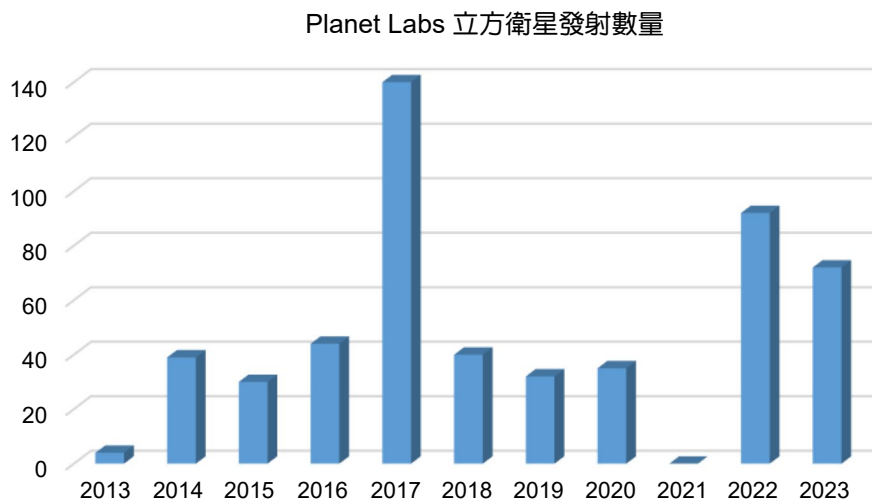


圖 7. Planet Labs 光學遙測立方衛星星系每年發射數量。

■**氣象**：Spire Global 成立於 2012 年，於 2013 年發射首顆 1U 衛星，隨後於 2014 年推出標準 3U 衛星第一代 Lemur-1。之後，該公司推出了第二代 Lemur-2 系列氣象立方衛星，以提供政府和商業客戶的天氣資料。透過測量 GPS 衛星訊號穿越大氣層，獲取大氣中的溫度、壓力和濕度剖面資料，並將這些資料納入天氣預報模型中。截至 2023 年底，該公司已發射 175 枚立方衛星，目前運營著近百顆立方衛星的艦隊，為主要立方衛星星系運營商之一<sup>(15, 22, 23)</sup>。



圖 8. Spire Global 氣象立方衛星星系每年發射數量。



■ **物聯網**：Swarm Technologies 成立於 2016 年，是全球最小的雙向通訊衛星 (0.25U) 公司之一。Swarm 提供全球連線的物聯網設備，並以全球最低成本提供這項服務。Swarm Technologies 的資料傳輸計畫每台連接裝置每年 60 美元，十分低廉。截至 2023 年底，Swarm Technologies 已經成功發射了 201 顆 Spacebee 立方衛星<sup>(16)</sup>。有鑑於 Swarm Technologies 所提供之低價的全球低速物聯網服務發展潛力，以及有別於 Starlink 的高速網路服務，SpaceX 於 2021 年斥資 5.24 億美元收購了 Swarm<sup>(24)</sup>。

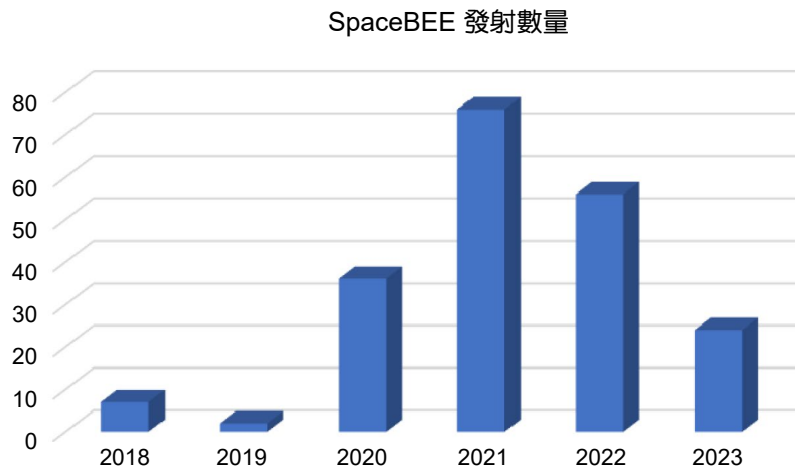


圖 9. Swarm Technologies 物聯網 IoT 立方衛星星系每年發射數量。

■ **無線電頻譜監測**：2015 年成立的 HawkEye 360 是一家地理空間分析公司，專責商業銷售衛星星系所收集的射頻 (RF) 訊號定位資料。其主要特色在於運用三顆編隊飛行衛星進行三角測量和繪製訊號位置。截至 2023 年 4 月，HawkEye 360 已成功發射了 7 個群 (包括探路者群)，目前在軌衛星總數達到 21 顆<sup>(15, 25)</sup>。

## 七、結論

立方衛星在過去十年受惠於科技快速發展與發射費用大幅下降之賜，產生了巨大的量變與質變，無論在衛星發射數量上和衛星應用領域上都大幅成長，未來將繼續扮演關鍵角色，廣泛應用於地球觀測、通信、氣象監測、科學研究等多個領域。其小型、模組化的特點使其成為各類任務和應用的理想選擇，預期將有更多產學研界及政府單位投入，並能持續吸引創投資金成立太空新創公司，加速立方衛星的發展與應用。

## 參考文獻

1. Please refer to the website: <https://en.wikipedia.org/wiki/CubeSat>
2. Jason Crusan, Carol Galica, "NASA's CubeSat Launch Initiative: Enabling broad access to space", *Acta Astronautica*, **157**, 51 (2019).
3. Please refer to the website: <https://www.nasa.gov/kennedy/launch-services-program/cubesat-launch-initiative/>
4. Roger Walker, "ESA Technology CubeSats: Pushing the Mission Autonomy Envelope", Oct 8, (2021).
5. Please refer to the website: <https://humans-in-space.jaxa.jp/en/biz-lab/experiment/strategy/j-ssod/history/>

6. B. Mazur, "10 major technological advances in the last decade", Dec 21, (2023). Please refer to the website: <https://www.ignitec.com/insights/10-major-technological-advances-in-the-last-decade/>
7. N. Duggal, "18 New Technology Trends for 2024: New Tech Horizons", Dec 5, (2023).
8. Mee Seong Im, Venkat R. Dasari, Lubjana Beshaj, Dale Shires, "Optimization problems with low SWaP tactical Computing", *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, May (2019).
9. Greg Patschke, "Key trends shaping the future of space technology", Sep. (2023).
10. Settapong Malisuwan, Borwonrat Kanchanarat, *American Journal of Industrial and Business Management*, **12**, 1480 (2022).
11. S. Crow, "Navigating the 3rd Wave of the New Space economy", October 25, (2023).
12. Alessandro Golkar and Alejandro Salado, *IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems*, **2** (1), (2021).
13. M. Thomas, "What is new space and how does it differ from traditional space? December 21, (2020).
14. Svetla Ben-Itzhak, "The Future of Space Technology and How It May Benefit Humanity", *Challenges and Opportunities at the Dawn of the New Space Age*, Spring (2022).
15. E. Kulu, Nanosats Database. Please refer to the website: [www.nanosats.eu](http://www.nanosats.eu).
16. Please refer to the website: <https://swarm.space/>
17. Please refer to the website: [https://en.wikipedia.org/wiki/Alba\\_Orbital](https://en.wikipedia.org/wiki/Alba_Orbital)
18. Please refer to the website: <https://en.wikipedia.org/wiki/PocketQube>
19. S. Weston, "State-of-the-Art Small Spacecraft Technology", NASA/TP-2022-0018058, January (2023).
20. Please refer to the website: [https://en.wikipedia.org/wiki/Planet\\_Labs](https://en.wikipedia.org/wiki/Planet_Labs)
21. Please refer to the website: <https://www.planet.com/>
22. Please refer to the website: <https://spire.com/>
23. Please refer to the website: [https://en.wikipedia.org/wiki/Spire\\_Global](https://en.wikipedia.org/wiki/Spire_Global)
24. M. Yang, "SpaceX 收購小型衛星連網新創業者 Swarm Technologies 佈局衛星物聯網應用市場 並延伸服務地區", Aug. 10, (2021).
25. Please refer to the website: [https://en.wikipedia.org/wiki/HawkEye\\_360](https://en.wikipedia.org/wiki/HawkEye_360)

## 作者簡介

陳嘉瑞先生為國立成功大學航太工程研究所博士，現為國家太空中心立方衛星計畫主持人。

Chia-Ray Chen received his Ph.D. in the Institute of Aeronautics and Astronautics from National Cheng Kung University. He is currently the Director of the TASA CubeSat Program.