現代天問啟示錄

太空垃圾——正成為人類航天探索的棘手「路障」。隨着全球航天發展快速推進，各國爭相發射各種衛星與載具，加上無法回收的廢棄衛星和碰撞碎片，讓地球空間的近地軌道充斥着數以億計、俗稱「太空垃圾」的軌道碎片與微流星體。它們以每秒7.8公里的速度飛行，撞擊能量極高——一顆直徑1cm的小碎片，力道相當於一輛汽車以時速40公里直接衝撞，這些超高速撞擊，對衛星、太空船及空間站構成重大威脅。香港理工大學機械工程學系智慧結構與系統講座教授蘇眾慶直言：「現在的地球空間，遠看一片空曠、藍藍的，但實際上已經非常擁擠！」為應對這些致命超高速撞擊，他正帶領團隊，利用「全增材製造」工藝研發創新感測技術，透過預先將感測器封裝在太空載具組件的結構內部，希望能如同人體「神經系統」一樣，賦能太空載具做到「自我感知、自我診斷、自主決策」，以爭取時間調節或求助，助力守護航天器的安全。●香港文匯報記者 劉沐藝



●香港理工大學機械工程學系智慧結構與系統講座教授蘇眾慶 香港文匯報記者曾興偉 攝

航天器如生「神經元」 理大應對「太空垃圾」威脅

建構分散式內嵌感測網絡 借鏡仿生學

本報專訪

由蘇眾慶領導的「基於『全增材製造』理念的新型感知技術用以快速評估空間系統在太空垃圾超高速衝擊下的健康狀態」項目，是特區政府「創新及科技支援計劃特別徵集（航天科技）」關鍵項目之一，獲近450萬港元資助進行為期三年的研發。

他接受香港文匯報專訪時介紹說，大眾俗稱的「太空垃圾」，業界統稱為「微流星體與軌道碎片（MMOD）」，由小至肉眼看不見的塗料碎屑，大至報廢的衛星與火箭殘骸，數量不斷累積，正以極高速度在地球軌道上運行，為各種航天器帶來重大風險。

蘇眾慶強調，在超高速飛行情況下這些軌道碎片撞擊的損毀並非危言聳聽，一旦是10cm以上的大型碎片，如果撞上，不論衛星或是載人太空船，幾乎必然導致結構解體，而中小型碎片的破壞力也相當驚人。

對普通商用衛星來說，那還只是經濟損失，可以重新發射；但載人載具與長期空間站一旦受損，更會直接威脅航天員的生命，而且這些設施的服役周期本可長達二三十年。

3D打印 一體成型

針對太空垃圾的威脅，蘇眾慶團隊正以「全增材製造」為核心工藝研發新型感測技術。增材製造（Additive Manufacturing）指從零開始逐層堆疊材料成型，亦即是大家常聽到的3D打印，能製造較複雜結構。而「全」的意思，在於它能同步打印航天器的結構本體與內嵌感測系統——感測器、信號傳輸線路、防護層等所有配套結構，全部一次過整合製造列印完成，正由於感測器與載具本體一體成型，無須後續黏貼組裝。

遇險自主感知決策 爭取應變時間

蘇眾慶形容，這項設計的概念來自仿生學：「人體感知外界的神經元與生俱來，不是後來黏貼上去的。」他們借鏡這個概念，在列印載具零組件的同時，把感測器封裝在結構內部，建構一套分散式內嵌感測網絡，「如同人體全身神經元」，讓整架載具擁有遍布全身的「神經系統」。

而該系統核心功能是實現「自我感知、自我診斷、自主決策」。當碎片撞擊時，內嵌感測網絡即時擷取衝擊波及彈性波信號，再配合力學模型及地面數據庫進行分析比對，精準判定撞擊位置、評估損傷程度，如同人體神經系統即時反映痛覺。

數據支援載具在軌自主決策，調整姿態或向地面發出警報，為載人任務爭取寶貴應變時間。

其團隊目前已在地面完成多項測試，包括高低溫循環、紫外線輻射及離子粒子轟擊等環境模擬，並在北京進行高速撞擊模擬實驗。下一階段將完成航天適配，優化系統體積、重量及低功耗設計，製作可供搭載的標準化樣機，並尋求立方星、商業衛星及其他航天任務的搭載機會，最終進行太空環境下的實測驗證。「這項研究的最終目標，不只是監測太空碎片，更是讓航天器具備更全面的結構健康感知能力，提升長期在軌及載人航天任務的安全性。」

用納米導電材料與柔性聚合物 輕薄靈敏兼備

蘇眾慶團隊研發新型「全增材製造」柔性傳感器，面向航天器結構健康監測而設計，可視為貼附其結構表面的一層「電子皮膚」。在軌運行期間，一旦航天器遭受太空垃圾或微小隕石超高速撞擊，這層「電子皮膚」能即時感知撞擊引發的結構響應，為撞擊位置判定、結構損傷評估及後續處置決策提供關鍵數據參考。

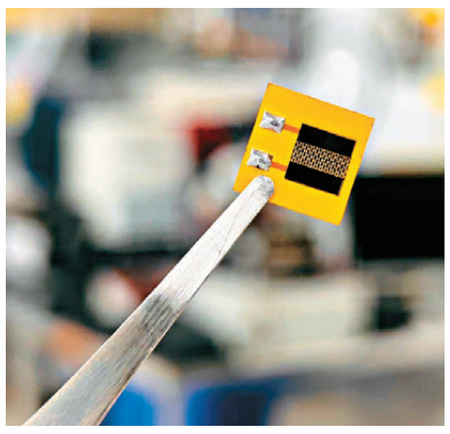
相較於傳統傳感器，該產品具備更輕、更薄、適形性更佳等優勢，能良好貼合航天器複雜曲面與複合材料結構。

在材料設計上，傳感器以納米導電材料與柔性聚合物為主體——石墨烯與納米銀線協同建構高靈敏導電網絡，柔性聚合物則賦予其優異的柔韌性與附着力，使其能適應結構表面的微小形變。

製備過程中，團隊貫徹「全增材製造」理念，採用高精度氣溶膠噴射打印技術，將傳感材料、導電線路與功能結構逐層直接沉積於柔性薄膜或結構表面。

適應太空環境 可響應多類信號

該工藝材料損耗低、流程簡潔、圖案設計靈活，便於實現輕量化和一體化集成。針對太空環境中劇烈溫差、紫外輻照、真空及原子氧等極端條件，傳感器還特別增設保護層，顯著提升長期服役的穩定性與可靠性。



●蘇眾慶帶領團隊研發出新型「全增材製造」柔性傳感器。 受訪者供圖

目前，團隊已完成材料製備、打印工藝優化，以及多項結構健康監測試驗，涵蓋靜態變形監測、低頻振動監測、超聲導波監測和衝擊定位驗證。結果顯示，該「全增材製造」納米複合傳感器，能有效響應結構緩慢變形、異常振動及超高速衝擊等多類信號。

蘇眾慶補充，團隊並已將太空製造的「全增材製造」工藝納入長期規劃，希望能透過微重力環境下的3D打印，讓材料分布更均勻，進一步製造更高性能感測器及結構，他日若技術成熟，便可於軌道直接製造或更換部分受損部件，提升太空任務的自主性。

兩地分當「腦」與「手」 助科研成果落地

是次「全增材製造」「太空垃圾」感測技術，集合「香港研發、深圳測試、北京驗證」的模式，協力貢獻國家航天發展。各項目合作單位優勢互補，由理大擔當「大腦」，藉着國際化科研環境、頂尖3D打印中心和深空探測研究中心，專注基礎研究、新材料開發與核心全增材工藝攻關。

至於哈爾濱工業大學（深圳）扮演「雙手」角色，利用深圳完善的產業配套，負責常規加工、中型環境模擬測試，把大腦的創新概念快速轉化為可測試樣品。

另北京衛星環境工程研究所則為「實戰場」，提供航天級環境模擬與可靠性驗證，為技術把關，確保成果能抵禦太空極端環境的考驗。蘇眾慶強調，航天是需要高度跨學科的領域，涉及材料、結構、電子、電路、電源及控制等不同專業，正需要不同地區及科研團隊互相配合，推動實際科研成果落地應用。

「香港研發」衝出大氣層 港人熱誠化作宇宙星河

後記

當你見到天上星星，可會想起我……

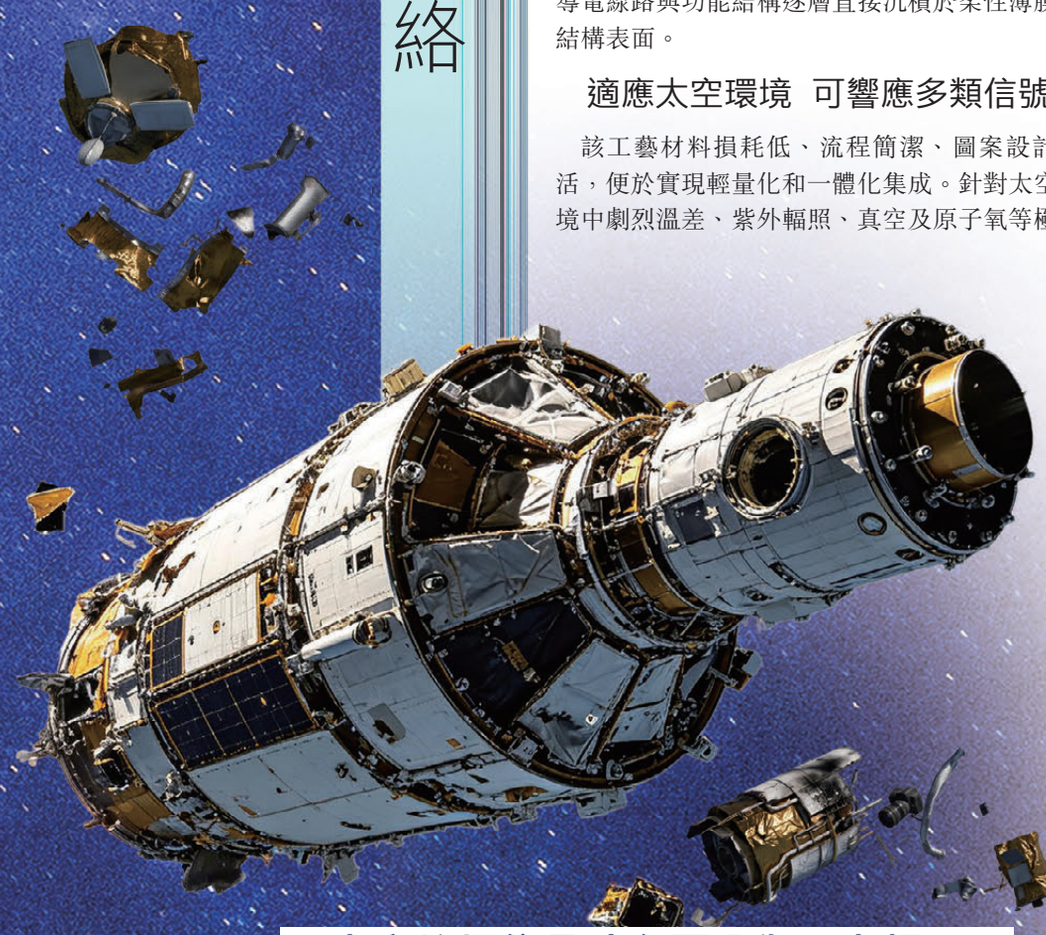
太空，對在香港的你我來說，曾幾何時只是遙遠的浪漫思念。但今年，首名港產航天員黎家盈隨神二十三升空；她在「天宮」操作香港研發的天韻相機；熟悉的粵語多次在「天地對話」中響起；大家正熱切期待她即將於日內凱旋回歸地球。頃刻間，航天變得前所未有地接近，天上各種實驗突破顯得確切有感，而航天夢的種子更廣泛於香港的新一代之中散播。

這顆種子萌芽，並非一朝一夕的偶然，而是香港科研界多年來厚積薄發的成果。從早期理大團隊研製相機及採樣裝置助力嫦娥任務，到天韻相機，再到本系列的月面機器人、月壤分析、火星光譜儀、太空垃圾感測系統，在「一國兩制」獨特優勢下，香港憑藉頂尖科研實力與精密技術，背靠內地龐大的航天工程體系，並連通國際前沿的學術視野與標準，漸漸成為國家航天版圖中不可或缺的關鍵拼圖。

放眼當前，人類正迎來新一輪的太空競賽，中美兩國在月球登陸及建立科研站上的競逐尤為白熱化；航天科技已不僅是綜合國力的展現，更是基礎科學突破的試金石。香港擁有多所世界排名前列的學府，在人工智能、遙感測繪、先進材料及深空探測儀器等領域屢創佳績，正好為國家的載人登月及深空探索任務提供技術支撐與創新動力，有望成為國家應對大航天時代、攀登科技高峰的戰略支點。

隨着愈來愈多「香港研發」儀器隨火箭衝出大氣層，香港科研人員正以專業與熱誠，將這座城市的智慧刻寫在浩瀚宇宙之中。

當你見到星河燦爛，讓你在心中記住的，既是人類對宇宙未知最純粹的探索與求真，更是一份深沉而自豪的家國情懷，見證香港與祖國攜手逐夢蒼穹的堅實足印。 ●香港文匯報記者 高鈺



太空垃圾依尺寸主要分為三大類：

大型碎片（10cm以上）：據歐洲太空總署統計，截至2025年底，直徑10cm以上的太空垃圾約有5.4萬片。全球航天機構正透過地基雷達、光學望遠鏡、空基感測器與大數據模型，希望能持續追蹤這些「致命級」碎片

中型碎片（1cm至10cm）：約有120萬片。這個尺寸的碎片無法逐一追蹤，但撞擊破壞力依然驚人

小型碎片（1mm至1cm）：數量高達1.3億片，這類碎片僅能透過模型估算總量

註：蘇眾慶補充，小於1mm的亞毫米級微粒碎片，數量更是多不勝數，雖然其單一撞擊未必能帶來重大破壞，但長年累積撞擊風險不容忽視，有關評估與監測技術，會是未來重點突破的方向之一。