



本期內容

- 專題報導：立法院三讀通過「太空發展法」
淺談太空磨潤學
- 活動預告：iCASE2021 國際研討會
線上舉辦「飛奔到太空-2021 立方衛星微重力實作營隊」

發行人：吳宗信

編輯群：黃楓台、梁尹綺

專題報導

立法院三讀通過「太空發展法」

文/國家太空中心黃楓台

一、前言

就在台灣陷入 COVID-19 疫情泥沼，朝野立委還在為紓困條例激烈辯論之際，立法院仍然還是傳出好消息，終於在 5 月 31 日本會期最後一天，「太空發展法」順利完成三讀程序，寫下我國太空發展史一個重要里程碑。本文首先以編年方式回顧我國太空法發展的歷程，並就該法案與原行政院版內容的差異做進一步的說明。

二、台灣太空法發展大事記

2.1 太空法研究期(2014-)

台灣對於太空法開始比較有系統的進行資料蒐集與研究，可以回溯到 2013 年 12 月鄭麗君立委要求國科會對於我國太空研究著重於技術的發展，而缺乏太空法、太空政策與太空產業等相關研究的因應提出報告。在此之後國家太空中心與學術界開始針對各國太空法展開蒐集翻譯，並針對一些議題進行相關研究。這些資料蒐集與研究的成果在現在這個時間點來看，實為後續能夠順利立法奠定了基礎。

- 2014 年 4 月 國家太空中心委託國立清華大學黃居正教授進行我國「國家太空法」立法研究。
- 2014 年 9 月 黃居正教授完成「國家太空法基本

法」草案(黃教授版)，並舉辦「國家太空基本法」法制研究座談會，針對該草案進行討論，以凝聚利益相關人(stakeholder)的共識

- 2015 年 11 月 中華民國航空太空學會邀請黃居正教授於「航太法規論壇」針對「國家太空基本法」草案進行口頭報告，希望讓航太學界了解太空法議題。
- 2017 年 10 月 國家太空中心委託律師完成國家太空基本法草案修正版(律師版)
- 2018 年 12 月 黃居正教授完成「太空活動管理法」草案。

國家太空中心在這段時間也持續進行太空法研究，分別在 2018 年發表「各國衛星遙測法比較」，2019 年發表「登記公約與我國衛星登記問題探討」，以及 2020 年發表「台灣太空發展與太空法有關責任公約及太空保險研究」。

2.2 太空法立法期(2020-2021)

西元 2019 年年底與 2020 年年初國內民間公司在台東南田進行探空火箭試射引發的爭議，凸顯出台灣沒有太空相關法規的困境。台灣也因為這個事件觸發了國家太空法立法的契機。

- 2020 年 4 月 10 日 蘇巧慧立委提出「太空發展法」草案。
- 2020 年 10 月 20 日 蘇巧慧立委國會辦公室舉辦

- 「太空法立法與台灣太空產業之發展」公聽會。
- 2020 年 10 月 23 日 科技部進行「太空發展法」草案預告。
 - 2021 年 2 月 18 日 行政院通過行政院版太空發展法草案。
 - 2021 年 4 月 8 日 立法院教育及文化委員會完成太空發展法審查(答詢)。
 - 2021 年 4 月 22 日 立法院教育及文化委員會舉辦太空發展法公聽會。
 - 2021 年 4 月 26 日與 28 日 立法院教育及文化委員會完成太空發展法初審(逐條審查)。
 - 2021 年 5 月 31 日「太空發展法」完成三讀。

三、太空發展法主要內容

立法院三讀通過的「太空發展法」，與行政院版本相同，共計六章二十二個條文，這六章分別是總則、太空發展之基本原則、太空活動及太空產業、太空事故之處理、罰則與附則。通過後的太空發展法與原行政院版本，主要差異說明如下：

1. **太空發展的基本原則**：行政院版原本列出我國太空發展幾個基本原則，包括：尊重國際公約規範(第六條)、環境保護及永續發展原則(第七條)、保障原住民族權益原則(第八條)、兼顧國家安全及資訊透明(第九條)。通過後版本除保留尊重國際公約規範、環境保護及永續發展原則、以及兼顧國家安全及資訊透明外。增加主管機關應透過教育宣導，促進太空科學普及、增進國民對我國太空政策之瞭解，並培育太空人才。而原先在第八條尊重原住民族權益部分，則是在國家發射場域設置一條具體彰顯。
2. **國家發射場域建立**：原行政院版草案明定中央目的事業主管機關為推動太空活動設置發射場域，主管機關應協助取得所需用地，並得委託專責法人營運及管理(第十二條)。原條文隱含未來不僅科技部，其他中央機關若有需要亦可以依據本條款設置發射場。為避免最後沒有中央目的事業主管機關要設置國家發射場域的窘境，通過後的版本為：主管機關為推動太空活動，提供適合及安全之發射場所，應設置國家發射場域。所相對應主管機關掌理事項由原先的發射場域之統籌協調，修正為國家發射場域之設置。(第五條第三項)

3.太空產業推動：有關太空產業推動，原行政院草案規範為促進我國太空產業健全發展，政府應：鼓勵民間投資太空事業；推動高附加價值太空技術產業應用及必要獎勵措施；協助關聯產業發展與國際接軌；培育太空產業發展人才；輔導育成太空新創事業等(第十四條)。而在通過的版本則是強化了主管機關與經濟部在產業推動的角色，另外推動事項，新增第六款、火箭發射後掉落物之防護與處理。第七款、有關結合在地資源與人才，發展地方產業鏈，營造在地產業生活圈，及其他促進太空產業發展之事項。

四、結論

「太空發展法」終於在今年 5 月 31 日順利通過，總統也於 6 月 16 日正式公布，目前即等待相關子法完備相關程序後，預計明年初可以正式實施，為我國的太空永續發展奠定穩固的法制基礎。

淺談太空磨潤學

文/ 唐紀雲，現任宏誠動力科技有限公司總經理
(台灣太空產業發展協會團體會員)

一、前言

太空磨潤學 (Space Tribology) 是磨潤學 (Tribology) 的一門分支，對一般人來說可能相當陌生，即使在學術界也算是冷門學科。臺灣只有少數大學的機械系(所)有開設磨潤學這一門課，而講授太空磨潤學的教授更有如鳳毛麟角[1]。我們參考美國的太空磨潤技術發展經驗可以發現，即使像 NASA 這樣的尖端科技單位，在 1980 年代以前對太空機構的潤滑劑選用也多是仰賴飛行實績和經驗傳承，而不是選用最新的材料或技術[2]。這樣的策略在當時何以能奏效？因為早期的太空任務壽命有限、任務週期短，而其它的零組件，如：電子零件、電池和微處理器在太空機構潤滑還沒有出現問題之前就先故障了。到了 1980 年代末，伴隨著電子科技的快速成長，這些電子輔助元件的性能和壽命都大大的提升，太空機構的磨潤系統反成為影響太空設備可靠度和性能的一個重要因素。雖然太空磨潤的成本僅僅佔整個太空設備的一小部分，但是太空磨潤若出了一點點小問題，往往就會造成昂貴的太空設備效能衰退、甚至癱瘓[3]。

●太空磨潤學的特點

研究太空磨潤學首先要考慮到太空環境，因為太空環境與地表環境有著極大的差異。例如：真空、無(微)重力、極溫(高溫、低溫)、輻射、原子氧、化學反應(其它星球)；另外還有：冷凝、熱傳導、宇宙塵、太空微粒等其它因素。其次要考慮太空機構和零組件的製造、測試、組裝、儲存和運輸環境，例如：無塵室潔淨度、環境溫度和濕度、熱真空測試、運輸條件、儲存條件和時間、磨潤實驗分析等。再來還要考慮發射過程和航行過程，例如：發射過程的劇烈震動、長時間的航行過程；因為有些太空任務必須航行很長一段時間才能抵達目的地，而一旦抵達目的地就要立刻展開任務行動，這對太空機構和太空磨潤都是很大的挑戰。

二、太空機構零組件(Space Mechanism Components)

太空磨潤學的研究範圍包含了火箭(Rocket)、人造衛星(Satellites)和太空船/太空站(Spacecraft/Space station)的機構[4]，其中有動態(dynamic)機構也有靜態(static)機構，如：姿態控制系統、電源系統、天線系統、太陽能板機構、推進系統、扣件等各式機械零組件，不同的機構分別有不同的操作條件和環境條件。以下列舉幾個常見的太空機構，參見圖 1.[5]：

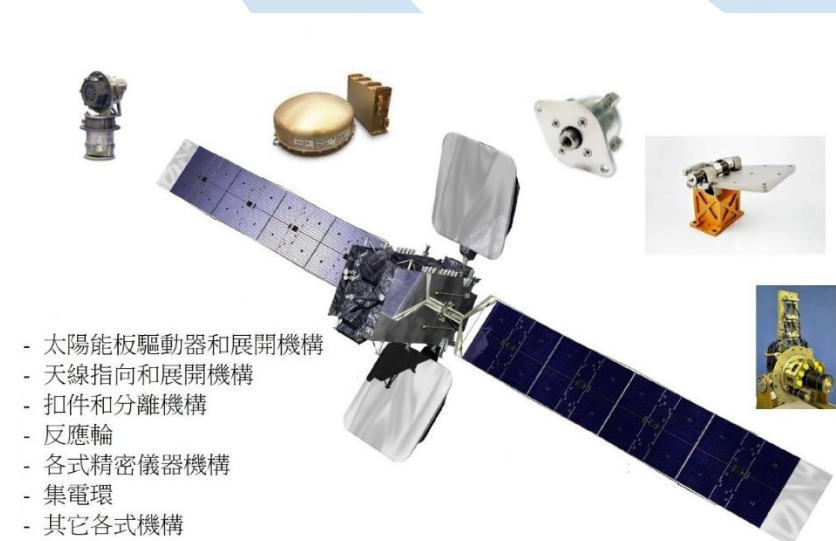


圖 1. 太空機構圖示 [5]

●太陽能板驅動器和展開機構 (Solar array drives/SAD & Deployment mechanisms) – SAD包含軸承、螺桿、諧波齒輪等傳動裝置；而展開機構的速度雖然較慢，仍要求低摩擦係數(低摩擦扭矩)，需要良好潤滑和防止冷焊現象。

●反應輪 (Reaction wheels/Momentum wheels) – 由於轉速高 (3000 ~ 20,000 rpm)同時在真空條件下

，使用的液體潤滑劑容易因溫升而產生爬移(creep)、降解、流失和揮發。現階段的研究朝向：降低液體潤滑劑的揮發率、加強迷宮環密封設計、塗佈防爬移屏障(anti-creep barrier)和裝置自動潤滑補給系統。

●儀器機構 (Instrument mechanisms) – 精密的光機電裝置，如：光學掃描器(optical scanning)、指向機構(pointing)、調焦機構(focus)、濾光定位器(filter positioning)...等機構，都需要良好的潤滑，以確保精度和穩定性。

●天線指向和展開機構 (Antenna pointing and deployment mechanisms) – 要求低摩擦係數(低摩擦扭矩)，需要良好潤滑並防止冷焊現象。

●集電環 (Slip rings) – 必須將電力或訊號從固定機構傳輸到旋轉機構，其低速運轉和導電性是影響潤滑的兩個重要因素。過度的電氣噪音(electric noise)最常導致集電環故障，原因是其表面產生雜質，宜選用Hybrid方式潤滑(固體潤滑+氟素潤滑脂)。

綜觀以上，太空機構仍離不開基本的機械零組件，如：滾動軸承、線性軸承、滾珠螺桿、線性滑軌、凸輪、齒輪、諧波減速機(Harmonic Drive)、集電環、分離件、扣件、密封件和其它相對運動的零件(如：閥門)，而這些太空機構的潤滑系統都可以依據磨潤學的斯特里貝克曲線 (Stribeck Curve) 來描述，參見圖 2.[6]。

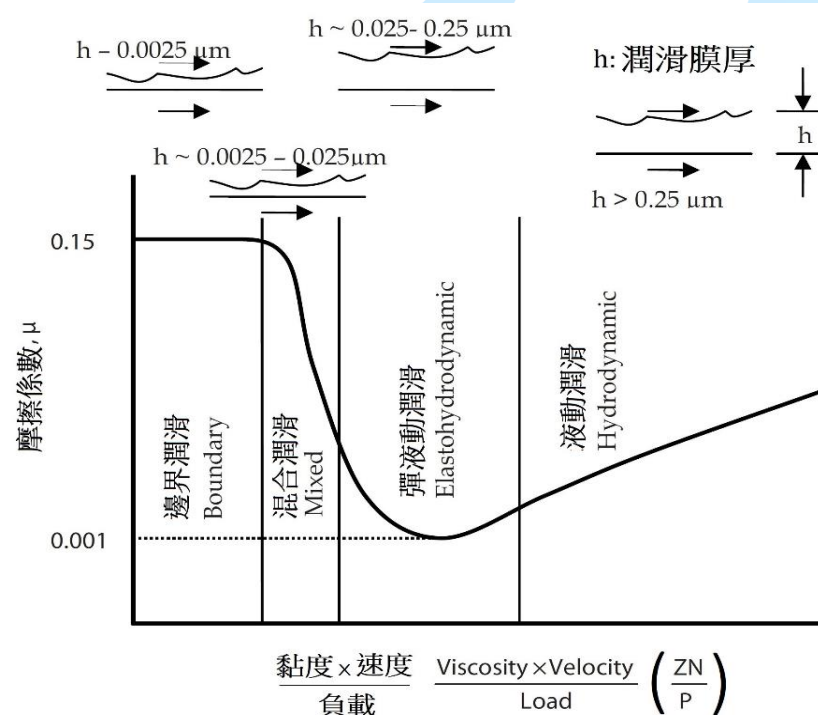


圖 2. 斯特里貝克曲線 (Stribeck Curve) [6]

三、太空潤滑劑 (Space Lubricants)

過去數十年人類對太空的探索，曾使用過許多不同的潤滑劑，主要分為兩大類：液體潤滑劑和固體潤滑劑。其中，液體潤滑劑包含：礦物油、矽油、酯類、全氟聚醚(PFPE)、合成烴(Synthetic Hydrocarbons)

等；而合成烴包括：聚-烯烴(PAO)和多烷基化環戊烷(MAC)兩種。經過多年不斷的演進，目前在太空應用的液體潤滑劑多半使用 PFPE 和 MAC 潤滑劑 [2-4]。近年美國空軍材料實驗室 (Air Force Materials Laboratory) 開發出一款新型的 SiCH 液體潤滑劑 (Silahydrocarbons)，具有低揮發性和高黏度指數，但尚未普及應用在太空潤滑。另外，固體潤滑劑包含：層狀(過渡金屬)化合物、軟金屬和聚合物。到底液體潤滑劑和固體潤滑劑哪一個比較好？其實這兩者在太空應用各有其優缺點，表 1.分別列舉了乾式(固體)潤滑劑和濕式(液體)潤滑劑的相對優缺點.[7]。

表 1. 乾式(固體)潤滑劑和濕式(液體)潤滑劑的相對優缺點

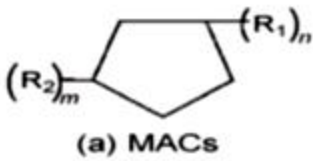
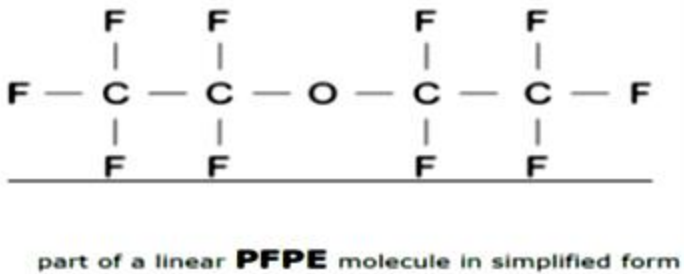
乾式(固體)潤滑劑	濕式(液體)潤滑劑
真空條件下可忽略揮發性	真空條件下易揮發
工作溫度範圍廣	黏度、蠕動和揮發性易受溫度影響
可忽略表面遷移	需要密封
適用於加速壽命測試	不適用加速壽命測試
潮濕空氣條件下不適用	對空氣較不敏感
磨粒會導致摩擦噪音	較低的摩擦噪音
摩擦與速度無關	摩擦與速度有關
工作壽命與潤滑劑磨耗有關	工作壽命與潤滑劑蛻化有關
熱傳導性較差	熱傳導性較佳
具導電性	具電絕緣性

3.1.液體潤滑劑 (Liquid Lubricants)

太空液體潤滑劑必須具有良好的真空穩定性(低揮發性)、低爬移性、高黏度指數(黏度不易受溫度影響)、良好的彈液動特性(elastohydrodynamic properties)和良好的邊界潤滑特性(boundary lubrication properties)、還需具備抗輻射和抗原子氧的能力，表 2.列舉了液體潤滑劑的特性；此外光學和紅外線穿透性對某些儀器也很重要。即使有迷宮環的密封設計，長時間的揮發損失仍是液體潤滑劑的一個關鍵問題。經過多年演進，目前在太空應用的液體潤滑劑大多使用 PFPE 和 MAC 潤滑劑。因此，本文僅就 PFPE 和 MAC 來介紹，參見圖 3.[5]。

表 2. 液體潤滑劑的特性

特性	現象	改善方式
揮發 (Volatility)	真空條件下快速揮發	選擇低揮發性潤滑劑、裝置密封件、改善公差
極溫 (Extreme Temperature)	低溫時黏度上升、內摩擦增加；高溫時黏度下降、容易揮發	選擇低黏度潤滑劑；選擇低揮發性潤滑劑
爬移 (Creep)	低表面能 (surface-energy) 易導致潤滑劑流失	選擇高表面能的潤滑劑、塗佈防爬移屏障 (anti-creep barrier)
彈液動 (Elastohydrodynamics)	黏度與分子量和化學結構有關	選擇高黏度指數的潤滑劑
邊界潤滑 (Boundary lubrication)	易受接觸應力和表面化學反應影響	選擇惰性的 PFPE 潤滑劑、添加極壓添加劑
輻射 (Radiation)	有機潤滑劑易離子化導致失效	盡可能密封以避免輻射或改用固體潤滑劑



where R₁ and R₂ are hydrocarbyl groups

圖 3.全氟聚醚(PFPE)、多烷基化環戊烷 (MACs) 簡易分子結構圖 [5]

●合成烴 (Synthetic Hydrocarbons)

早期常用的合成烴有兩種：聚-烯烴 (PAO) 和多烷基化環戊烷 (MAC)。由於 PAO 在太空應用中其磨耗率和揮發率都比 MAC 來得高，近年已較少被採用。而 MAC 因其全合成、長鏈、良好的化學穩定性和惰性，逐漸受到太空磨潤工程師的青睞；通常低黏度的

MAC 用於較低的工作溫度，而高黏度版本的 MAC 則用於較高的工作溫度，這一點跟傳統的潤滑油相似。

●全氟聚醚 (Perfluoropolyethers/PFPE)

全氟聚醚 (PFPE) 大約出現在 1960 年代，它的物理、化學性質非常安定，幾乎不受任何酸鹼物質侵蝕，在 215 K ~ 530 K (-58 °C ~ +257 °C) 的溫度範圍內性質穩定、低蒸氣壓 (10⁻⁶ ~ 10⁻¹⁴ Pa)；它的密度 ~1.9 g/cm³ 大約是傳統潤滑油的兩倍，在相同的運動黏度 (Kinematic viscosity) 條件下，PFPE 的潤滑膜厚也幾乎是傳統潤滑油的兩倍 [2]，這有利於彈液動潤滑 (Elasto Hydrodynamic Lubrication)。由於 PFPE 的高密度，可彌補其表面張力較低的缺點，使其潤滑性比同屬於低表面張力的矽油來得高，不過仍然遠低於 PAO，參見圖 4. [8]。另外需要注意的是，由於長時間的表面接觸，PFPE 可能會造成抗爬移阻障膜 (anti-creep barrier film) 的降解失效 [8]。由於 PFPE 的物理、化學性質非常安定，這使得它對各種潤滑添加劑的溶解度很低，不過已有一些可溶於 PFPE 的添加劑和奈米潤滑添加劑在過去幾年被開發出來，未來這些特殊添加劑有機會可以應用到太空潤滑。

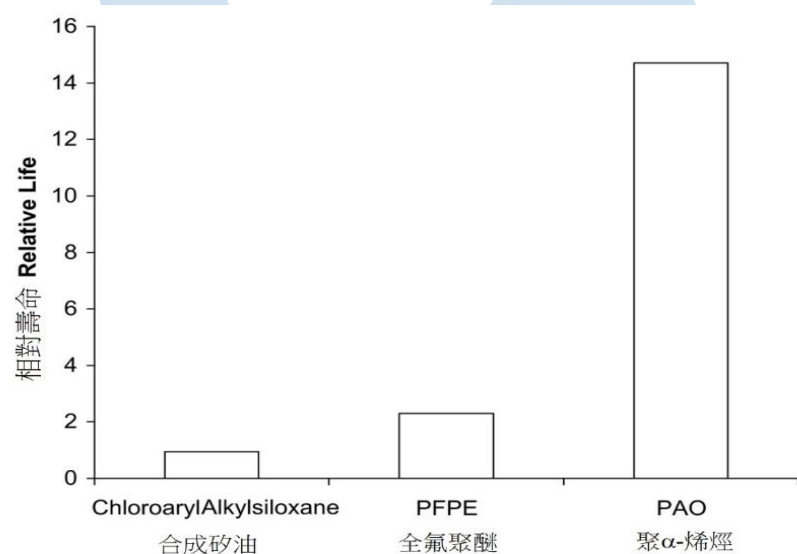


圖 4. 三種不同太空潤滑劑的相對壽命測試結果 (掃描儀和機構). [8]

●潤滑脂(Grease)

應用在太空的潤滑脂主要是以 PFPE 為基礎、輔以 PTFE (聚四氟乙烯) 為增稠劑製成。近年，也有研究以 MAC 為基礎的潤滑脂添加了特殊邊界潤滑添加劑 (boundary lubrication additives) [9-11]，經研究實驗比較 PFPE 潤滑脂和 MAC 潤滑脂在邊界潤滑條件下的工作壽命，發現 MAC 潤滑脂的工作壽命比 PFPE 潤滑脂的工作壽命更佳，參見圖 5 [9]。

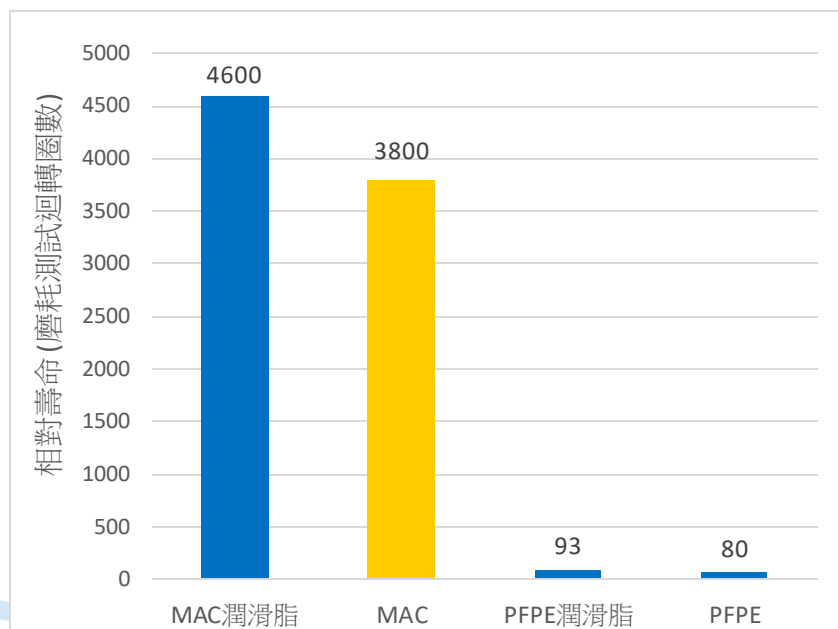


圖 5. 不同真空潤滑脂的相對壽命測試 with Spiral Orbit Tribometer. [9]

3.2.固體潤滑劑(Solid Lubricants)

太空固體潤滑多半是採用鍍膜的形式，真空離子鍍膜和真空磁控濺鍍是常用的方法之一。也可將固體潤滑劑 (微米級或奈米級) 與有機黏著劑混合，用塗刷、噴鍍或浸漬方式披覆在被鍍物表面，然後加溫固化成形。美國 NASA 對於固體潤滑劑的選用，依據真空度、溫度、輻射量有一份參考資料 [12]，參見圖 6、圖 7 和 圖 8。

●層狀(過渡金屬)化合物：以過渡金屬二硫化物為主，如：二硫化鉬 (MoS₂, molybdenum disulfide) 和二硫化鎢 (WS₂, tungsten disulfide)。MoS₂ 鍍膜在真空中的摩擦係數很低，但在潮濕空氣中性能會變差，這可能與 MoS₂ 晶格邊緣處會吸附水分子有關。MOS₂ 鍍膜的磨潤性能與真空濺鍍的條件參數以及基材表面粗糙度有關，如欲改善 MOS₂ 鍍膜在空氣中的性能和工作壽命，可將其與某些金屬 (如：Au、Ag、Cr、Co、Ni、Ta) 共同製作鍍膜。

●軟金屬(低剪力強度金屬)：鉛(Pb)、金(Au)、銀(Ag)、和銦(In)。

●聚合物(Polymer)：聚醯亞胺(Polyimides)、聚四氟乙烯(PTFE, Polytetrafluoroethylene) 或其複合材料，通常拿來做軸承的自潤保持器。

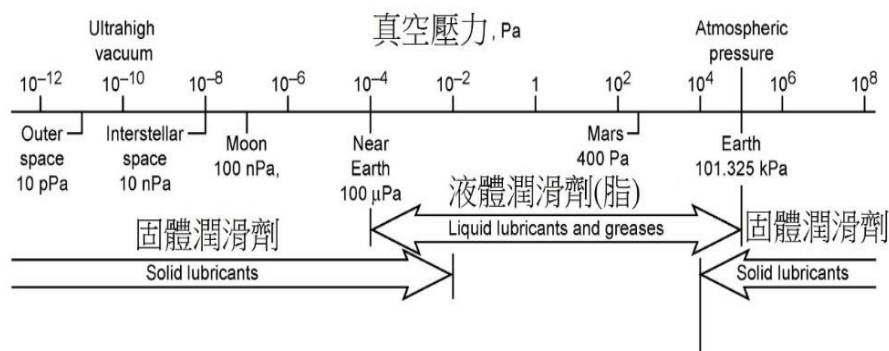


圖 6. 不同潤滑劑在真空環境下的應用範圍 (包含固體和液體潤滑劑)

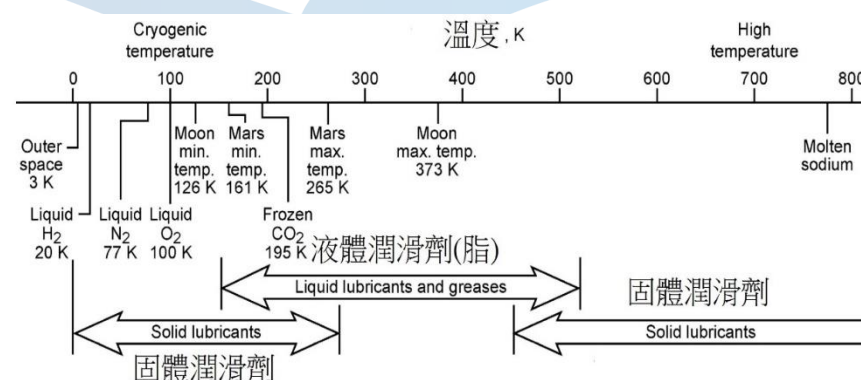


圖 7. 不同潤滑劑在超低溫和高溫環境下的應用範圍 (包含固體和液體潤滑劑)

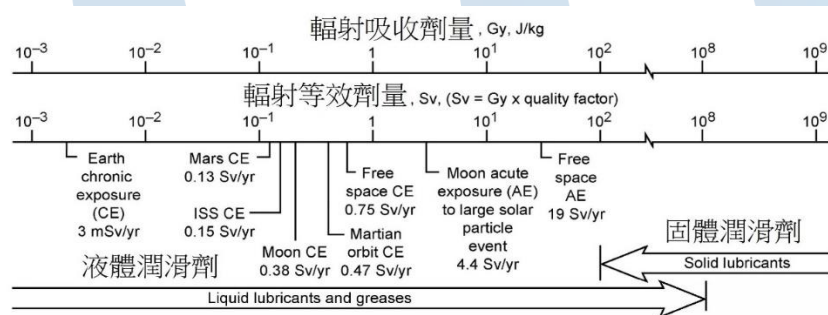


圖 8. 不同潤滑劑在輻射環境下的應用範圍 (包含固體和液體潤滑劑)

四、結語

太空磨潤學係研究火箭、人造衛星、太空船、太空站的機構之間相互接觸、表面相對運動與摩擦 (Friction)、磨損 (Wear) 和潤滑 (Lubrication) 有關的一門科學和技術，它包含了各式動態 (dynamic) 和靜態 (static) 的太空機構，範圍相當廣泛，而本文僅就太空磨潤學的基本概要做了初步的介紹。臺灣要發展太空產業，圖 9 [13]，除了結合既有的產業優勢，如：半導體、電子、精密機械、光學、材料...等，絕不能忽視太空磨潤學。否則，即使製造出精密的機械和儀器也上不了太空，尤其精密光機電設備在無(微)重力條件下對振動非常敏感，機構的摩擦係數(摩擦扭矩)和振動必須盡可能減到最低，才能有效的發揮功能。目前關鍵的太空磨潤技術多數仍掌握在國外手上，我們有時還會受制於 ITAR 管制無法取得。希望未來太空

磨潤學在臺灣可以受到越來越多的關注和研究，這將會是提升臺灣太空產業的一個全新開始。



圖 9. 福衛八號自主研發關鍵元件 (資料來源: 國家太空中心 NSPO Facebook)

參考資料:

1. 國立臺灣海洋大學/機械與機電工程學系/周昭昌教授/太空磨潤與元件設計實驗室(籌備中，預計 2021 年 9 月成立)。
2. William R. Jones, Jr. and Mark J. Jansen, "Tribology for space applications", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2008, Volume 222, Issue 8, pp. 997-1004).
3. William R. Jones, Jr. and Mark J. Jansen, "Space Tribology", NASA/TM--2000-209924.
4. William R. Jones, Jr. and Mark J. Jansen, ch. 31 "Space Tribology" in MODERN TRIBOLOGY HANDBOOK Vol. One - Principles of Tribology, Edited by Bharat Bhushan, ISBN 0-8493-8403-6 © 2001 by CRC Press LLC.
5. Lionel Gaillard, "Challenges of tribology in space mechanisms", KIVI Mechanics symposium, TU Delft, 3 Nov, 2016
6. Stribeck, R. (1902), Characteristics of plain and roller bearings, Zeit. V.D.I., Vol. 46.
7. Roberts, E. W. and Todd, M. J., "Space and vacuum tribology", Wear (1990), Vol.136, p.157-167.
8. Kalogeras, C., Hilton, M., Carré, D., Didziulis, S., and Fleischauer, P. (1993), The use of screening tests in spacecraft lubricant evaluation, Aerospace Corp. Report No. TR-93(3935)-6.
9. Marchetti, M., Jones Jr, W. R., Street, K. W., Pepper, S. V., and Jansen, M. J., "Preliminary evaluation of greases for space mechanisms using a vacuum spiral orbit tribometer". NASA/TM 2001-211157.
10. Marchetti, M., Jones Jr, W. R., and Sicre, J., "Relative lifetimes of MAPLUB(R) greases for space applications", NASA/TM 2002-211875.
11. Marchetti, M., Jones Jr, W. R., Street, K. W., Wheeler, D.

- W., Dixon, D., Jansen, M. J., and Kimura, H., "Tribological performance of some Pennzane®-based greases for vacuum applications", NASA/TM—2002-211373.
12. Kazuhisa Miyoshi, "Solid Lubricants and Coatings for Extreme Environments: State-of-the-Art Survey", NASA/ TM-2007-214668.
13. 國家太空中心 NSPO Facebook

育面奠定堅實的基礎。本研討會也特別將在第一天以及第三天分別舉辦「(第三屆)立方衛星任務設計競賽」及「學生論文競賽」。台灣「太空發展法」於 6 月 16 日公告，今年的 iCASE 國際研討會將是台灣第三次(屆)舉辦的大型綜合性太空研討會，未來將持續辦理成為國內每年最重要的國際太空會議，希望能吸引國際間的專家學者參加。

研討會相關訊息請詳閱網站：

<https://www.nspo.narl.org.tw/activity/iCASE/2021/>

活動預告

iCASE2021 國際研討會



由國家太空中心及台灣太空產業發展協會共同主辦的國際太空探索研討會(International Conference on Astronautics and Space Exploration 2021，簡稱 iCASE 2021) 訂於 2021 年 11 月 16 日至 18 日，假國立陽明交通大學電子資訊研究大樓國際會議廳舉行。

本研討會共分成六個主題，包括：1. 太空科技發展、2. 資料增值應用與服務、3. 太空政策與治理、4. 台灣太空產業發展、5. 外太空探索及科學創新、6. 太空教育等六個面向，是國內最大型的綜合性太空研討會，希望藉此帶動國內不同領域的專家學者一起關注我國太空發展，在技術面、政策面、法制面、產業面與教

線上舉辦「飛奔到太空-2021立方衛星微重力實作營隊」



為鼓勵國人參與太空科學、太空生物醫學等相關的基礎和應用研究，以激發更多的創新實作和更多有志於太空研究人員參與太空計畫，「飛奔到太空-2021 立方衛星微重力實作營隊」訂於 2021 年 8 月線上舉辦。凡高中職(含同等學歷)以上學生，皆可網路線上報名參加，報名期間：即日起至 7/25 日。主辦單位為國家太空中心。本實作營隊收費標準、課程規劃及其他注意事項，相關訊息請詳閱網站：<https://nspo2021.nebulax.tw/index.html> 對課程有興趣或疑問，請洽國家太空中心-方博士，Email 至 ISS_EXP@narlabs.org.tw 活動聯絡請洽：星希科技有限公司 Email：CONTACT@NEBULAX.TW