

# 提升遙測衛星成像品質的秘密—開箱全臺灣唯一的大口徑非球面鏡

## The Secrets of Improving Image Quality of Remote Sensing Satellites Unboxing the Only Large-diameter Aspherical Lens in Taiwan

陳柏荔、林麗娥、魏崇倫、莊子右

Po-Li Chen, Claire Lin, Chong-Lun Wei, Tzu-Yu Chuang

### 遙測衛星上的光學系統就如同衛星的眼睛，它的結構應該是什麼樣子？

大家都知道，太空科技的元件，大多是國際管制輸出的項目，是你有錢也買不到的，買不到怎麼辦呢？只能靠自己開發！遙測衛星中的光學系統，其中的大口徑非球面鏡製作技術更是關鍵瓶頸，國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心（以下簡稱國研院儀科中心）團隊以 40 年的光學技術與經驗，用了超過 3 年的時間，一步一腳印地突破拋光以及檢測技術，才開發出衛星遙測系統用的大口徑非球面鏡片，目前國研院儀科中心是全臺灣唯一可以製作 40 公分以上非球面鏡片的重要單位！讓我們一起開箱好好認識臺灣的技術與驕傲吧！

### 非球面鏡與球面鏡哪裡不同？

一般而言，透過球面鏡看到的影像，在邊緣會有模糊的現象產生，這是為什麼呢？如圖 1 所示，以會聚平行光束為例，使用球面透鏡時接近光軸光線與靠近鏡緣光線不會完美聚焦在同一個焦平面上而產生「球面像差」，使得聚焦點模糊，品質不如預期；而非球面鏡，在鏡片的邊緣修正曲率後，光線就能完美聚焦在同一個焦平面上，提升影像品質。

### 非球面鏡的優點

就光學成像原理而言，當光線經過鏡片折射，會聚於像平面時，成像點收斂的越小，影

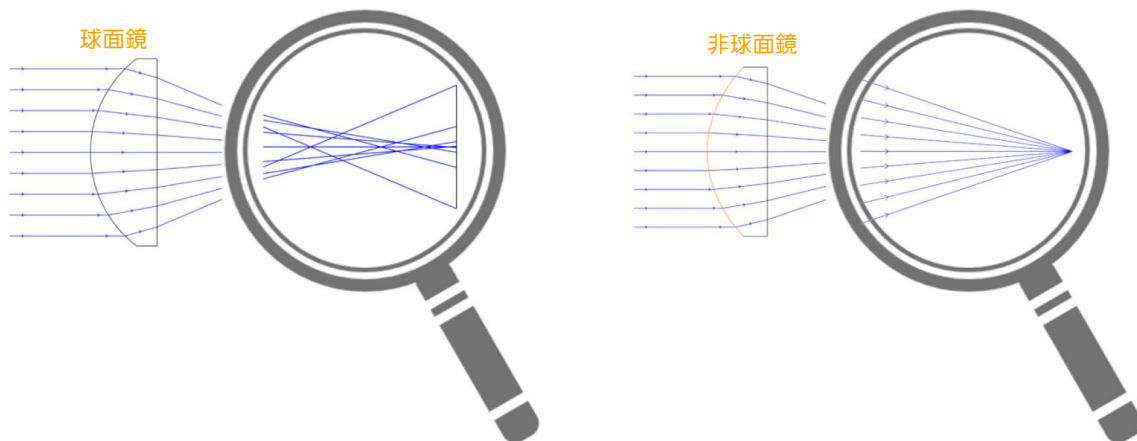


圖 1. 以會聚平行光束為例，使用球面透鏡與非球面透鏡的聚焦示意圖。

像愈臻於完美。像差，是光線實際落點與理想落點有差異所造成，起因於鏡片選材與配置，會造成影像模糊與扭曲。光學鏡頭為了規格與品質，需要依賴多片鏡片組合來減低像差影響。早期光學鏡頭幾乎全是以單一曲率之球面鏡所構成，然而，為了實現越來越高的規格與品質要求，光學鏡頭在設計上就會需要不斷增加鏡片數量，也就是說，會增加鏡頭整體體積和重量。

因此，為了能夠有效率地修正像差、提升光學品質、降低光學鏡片數量，一種具備了非固定曲率光學表面的鏡片－「非球面鏡片 (aspherical lens)」孕育而生。在複雜的光學系統中，可利用 1 個非球面透鏡取代多個球面透鏡，達到類似或更佳的效能，同時，可簡化系統組裝程序，並減少系統體積及重量。

## 「慢工」出細活的非球面鏡製造流程

遙測衛星中的非球面鏡為什麼如此關鍵？是因為若沒有掌控好鏡片的形狀以及表面粗糙度，都有可能造成影像模糊，就像 1990 年升空的哈伯望遠鏡，由於當初測量鏡片的儀器出了問題，主鏡被研磨拋光成錯誤的形狀，雖只是 2 微米的誤差，卻造成回傳的照片模糊，可謂是差之毫釐，失之千里！

如何才能製造出光滑無瑕的遙測衛星鏡片？尤其是大口徑的非球面鏡，十分仰賴專業技術與經驗，在製造過程中，其研磨拋光的製程繁瑣且難度極高，連技術純熟、經驗豐富的技師都必須時刻調整工序中的細節，需要「慢工」才能出細活，如圖 2 所示，一片精密的非球面鏡，需要經過許多複雜的程序，大致分為成形、球面預拋光及非球面拋光等。

在確認非球面鏡的光學設計規格後，首先進行「成形」，為了提升效率以及保持鏡片的強度，會將鏡片加工為近似球面的形狀，而非直接加工為非球面，通常會以鑽石磨砂輪大量移除材料，表面會產生較深的刀紋、刺孔等表面瑕疵，以及微裂縫等次表層破壞層，再以「球面預拋光」移除表面瑕疵與大部分次表層破壞層，過程中需控制其曲率半徑以符合所要求的公差與表面品質，採用球徑計 (spherometer) 進行快速曲率半徑檢測，再以三次元量床 (coordinate measuring machine, CMM) 或表面輪廓儀確認最後的近似球面形狀，可有效節省量測時間。

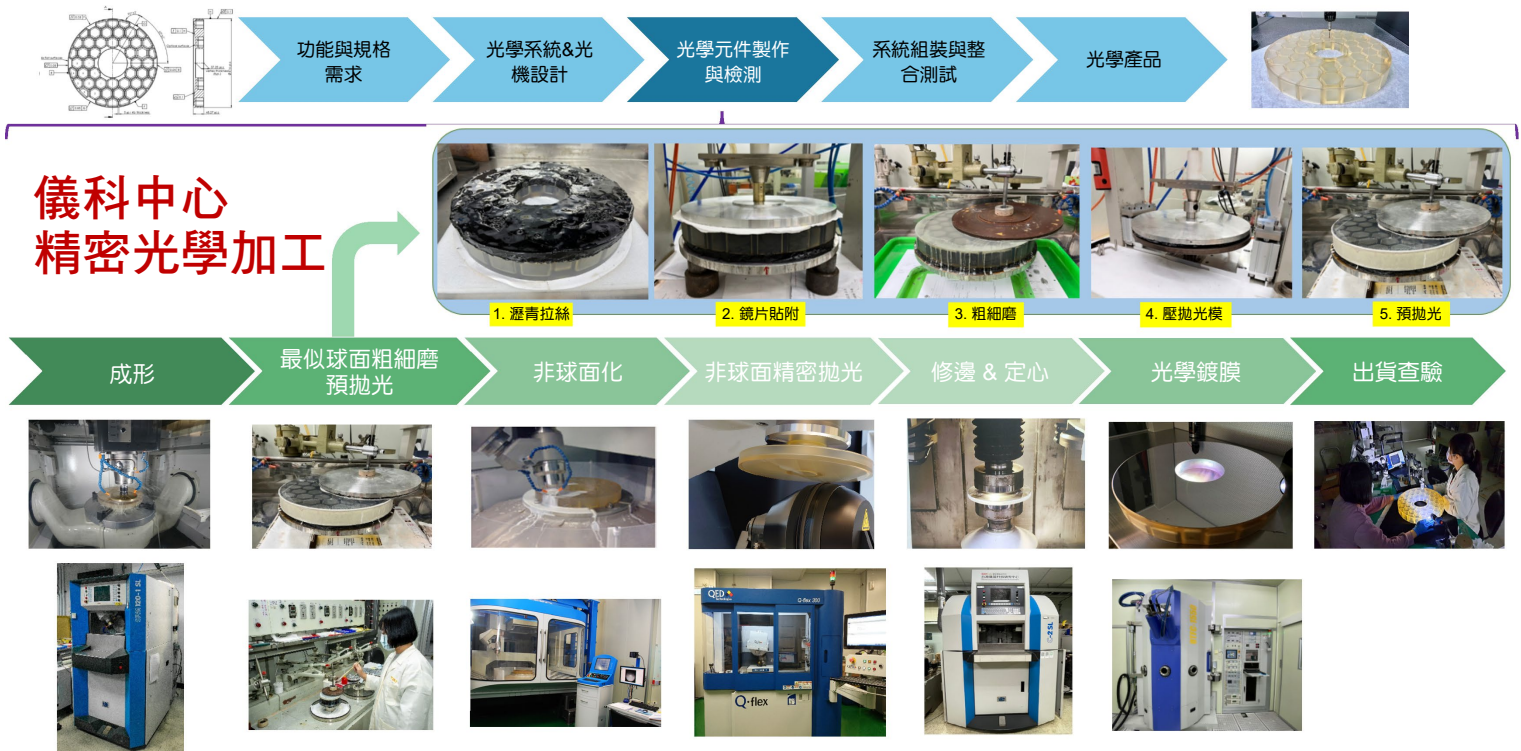


圖 2. 國研院儀科中心精密光學元件製作流程。

最後一個步驟則是「非球面拋光 (aspherization polishing)」，利用數控拋光機 (Computer Numerical Control, CNC) 搭配適當尺寸之拋光頭，並以穩定的材料移除率及停留時間將球面鏡片的形狀修正成為非球面曲面，國研院儀科中心以磁流拋光技術精準控制含有磨料之拋光流體，讓其持續且穩定地在鏡面表面循環流動，流體中的拋光磨料可穩定地移除鏡片材料，進而精準修正鏡片表面形貌誤差。非球面拋光製程並非一蹴可幾，每一回合的面形修正拋光會收斂面形精度往規格邁進。初始的非球面修正拋光回合往往會耗時超過 10 小時以上，隨著面形精度愈來愈好所需的拋光時間將也會逐漸減少。且在每個拋光回合後都需要搭配雷射干涉儀與電腦全像片來確認鏡片形狀誤差以作為下次修正拋光之依據。為了確認鏡片的形狀誤差，在檢測上所花費的時間通常會比拋光時間還久，有時甚至要花費數天進行重複性驗證才能獲得正確的數據，這樣的拋光/檢測循環的步驟需要持續到面形精度量測結果符合規格才算完成。

作為反射鏡的非球面鏡需再鍍製高反射率的金屬薄膜以提高其反射率。最後，非球面鏡需要符合所有檢驗規格，以保證上太空可達到期待的光學效能。由此可知，要製作出一片精密的非球面鏡，除了充滿了學問與技術經驗，更是「急不得」呀！

## 工欲善其事，必先利其器－非球面鏡的檢測

在製作出一片精密的非球面鏡後，要知道鏡片的表面形狀精度，需要搭配高精度的檢測設備，如圖 3 所示，大致可分為接觸式與非接觸式的檢測方式。使用接觸式的檢測設備 (如表面輪廓儀) 時，其探針尖端在量測過程中會以微小的力量接觸鏡片表面，好處在於可直接取得鏡片的表面形貌，但探針通常由紅寶石或鑽石製成，在檢測時還是有可能會劃傷鏡片表

面。而非接觸式的檢測設備 (如拼接式干涉儀以及光學檢測塔—電腦全像干涉量測)，屬於光學式檢測方式不需要接觸到測量鏡片表面，可以避免在表面留下刮痕，且能進行三維的曲面量測。

因此，如上節所述，為盡量避免鏡片刮傷，國研院儀科中心在進行非球面拋光的製程之前，會採用接觸式的檢測來確認鏡片的表面形貌，而在開始非球面拋光的製程之後，則會採用非接觸式的檢測來量測鏡片的形狀誤差與粗糙度，讓拋光設備依據量測結果進行修正拋光，逐步收斂鏡片形狀誤差以得到更高品質之光學元件。拼接式干涉量測技術是利用量測次口徑小範圍之鏡面形貌，再比對次口徑相互重疊區域並逐步拼接為完整鏡面形貌，突破了傳統干涉儀量測口徑的限制，甚至在不依靠其他輔助光學元件下得以量測非球面鏡面，對於開發遙測衛星之精密光學系統有莫大幫助。

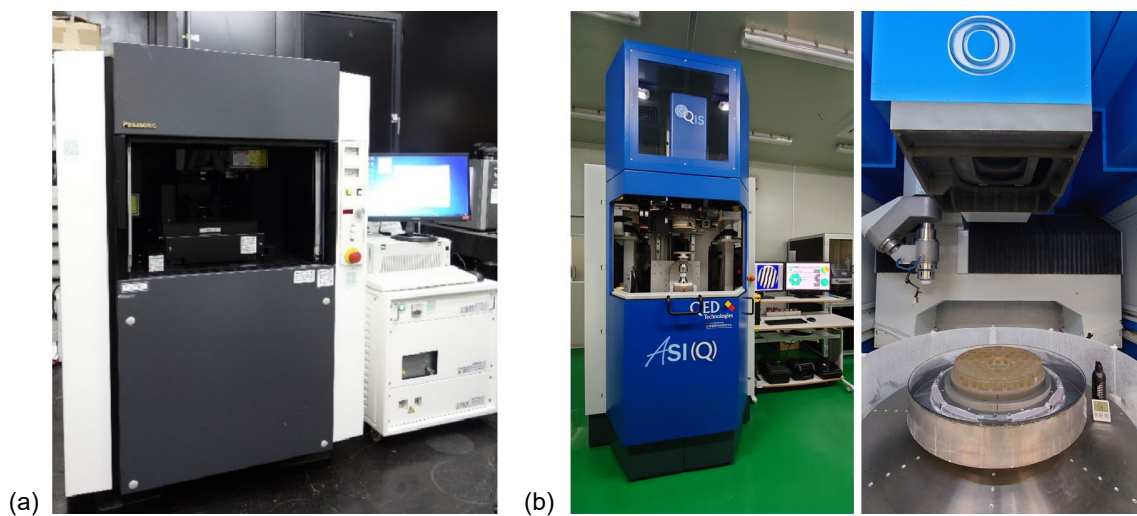


圖 3. (a) 接觸式檢測設備：表面輪廓儀；(b) 非接觸式檢測設備：拼接式干涉儀以及光學檢測塔 (電腦全像干涉量測)。

干涉儀的檢測原理是以標準鏡頭的反射波前做為參考，與從鏡面反射的波前產生干涉條紋，通過測量干涉條紋的變化，可獲得鏡片的表面形貌，如圖 4 所示，以福衛八號的鏡片為例，鏡片修正拋光過程的量測數據，顯示面形精度已逐漸收斂至系統要求的規格。

偷偷告訴你，國研院儀科中心製作出來的福衛八號主鏡，其外徑 41.6 cm、有效口徑 39.6 cm，「面形精度」達到  $PV < 126 \text{ nm}$ ，若以臺灣本島的面積換算，最高的山不能超過 7 公分 (6.832 cm)！若以足球場的大小換算，最大的高低差不能超過 30 nm！

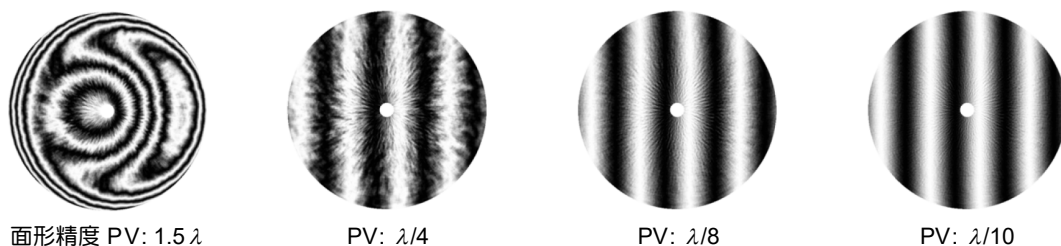


圖 4. 使用拼接式干涉儀量測鏡片修正拋光過程的數據。

備註：面形精度是指精密拋光表面與理想平面的偏差量，一般使用測量波前的干涉儀來檢測。 $\lambda$  為波長， $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 。

## 探索未知—望遠鏡的種類

望遠鏡依照光學系統的結構主要分三大類型：折射式、反射式，以及折反射式，其原理以及優缺點歸納如表 1 所示。

二十世紀初，許多特殊設計的非球面鏡已廣泛應用在各式天文望遠鏡、顯微鏡和照相機中，例如 1931 年 B. Schmidt 開發出以一片近乎平面之非球面薄透鏡與球面反射鏡所組裝成的折反射式天文望遠鏡。太空望遠鏡為獲得清晰的星體影像，如果採用伽利略折射式望遠鏡，望遠鏡會變得很大又很笨重；透過卡塞格林改良式望遠鏡，光線經過多次反射與折射之後，望遠鏡可以縮成很短也可以增加口徑獲得很好的影像，重量也很輕方便送上太空。

近三十年來，由於非球面拋光製造精度大幅提升，不僅大型望遠鏡系統使用非球面鏡片，連單眼相機的鏡頭在設計上，也特別使用非球面鏡片，來減少所需的鏡片總數，進而減少鏡頭的整體大小與重量，此外，由於非球面鏡片可大幅改善球面像差，所以淺景深時，背景的模糊會更柔和，也能藉此獲得更佳的景深效果。另外，針對以往光學系統幾乎必定存在的色差問題，利用開發出的非球面繞射鏡片 (hybrid lens) 不僅可成功改善此類問題，亦可達成鏡頭輕、薄、短、小的設計目的。此外，在日常生活上的應用，對於高度數近視或散光或老花的人，非球面是必要的，因為度數高的情形，物體縮放的比例會增加，而且同一屈折率和同一度數的鏡片相比，非球面鏡片會較輕薄美觀。

## 大口徑非球面鏡的三個秘密

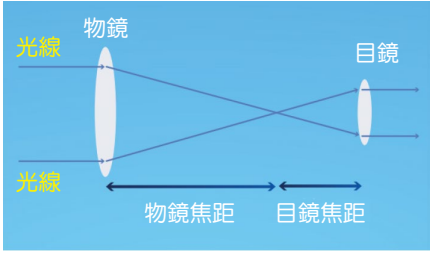
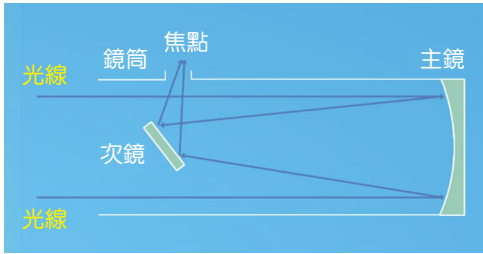
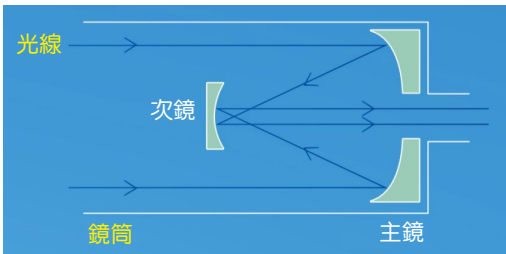
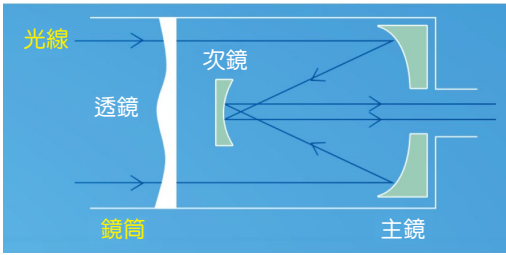
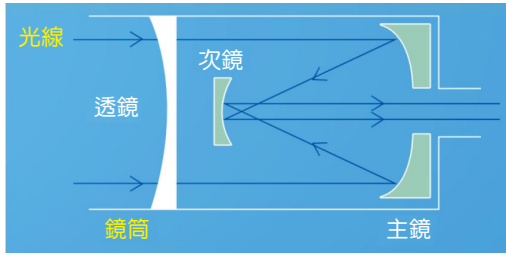
大家還記得 2017 年 8 月 25 號升空的福爾摩沙衛星五號 (FORMOSAT-5，簡稱福衛五號) 嗎？那是臺灣第一顆完全自主研发的光學遙測衛星，解析度達 2 米，相當於從 101 大樓上拿著望遠鏡，可以看到地上的螞蟻，現在它還在離地球 720 公里的軌道上繼續守護臺灣！

太空級天文望遠鏡內的元組件在國際間屬於管制性元件，且價格昂貴、不易取得，其中的大口徑非球面鏡更是需要突破關鍵技術瓶頸，2012 年國研院儀科中心累積 40 年的光學元件研製技術，研製福衛五號用主鏡片直徑達 46.6 公分 (如圖 5 所示)，是國內製造之最大型非球面鏡片。

## 專家開箱解析 (1) — 為什麼鏡片中間會有一個洞？

我們先來看看福衛五號光學系統的架構，如圖 6 所示，在福衛五號採用的是卡塞格林 (Cassegrain) 折反射式光學系統，焦長為 3,600 mm，通光口徑為 450 mm (即主鏡的有效直徑)，此種系統設計常見於地對空大型天文望遠鏡，以及可拍攝影像資料的遙測衛星，其系統組成主要為一凹面雙曲面主鏡 (M1)、一凸面雙曲面次鏡 (M2)，以及修正透鏡組、影像感測器。一般光學鏡頭會使用很多片的球面鏡來消除像差，讓鏡頭很長很重，這個設計就是利用非球面鏡取代多片的球面鏡，除了消除像差，更可減輕衛星的重量跟體積。當光線進入後會先被主鏡接收後反射至次鏡，次鏡再將光線反射通過主鏡中間的圓孔後，光線會進入修正透鏡組，最後成像在影像感測器上。這也是為什麼鏡片中間會有一個洞的原因。

表 1. 折射式、反射式，以及折反射式望遠鏡。

|  |   |
|--|---|
| <b>伽利略折射式望遠鏡 (1609 年)</b>  |   |
| 1609 年伽利略發明了折射式望遠鏡，用來觀測月球、太陽、金星以及衛星，實現天文觀測。  |   |
|                                       | <p>原理：光線穿透凸透鏡物鏡折射聚焦。</p> <p>優點：成像品質比同口徑反射望遠鏡好、使用方便、易於維護。</p> <p>缺點：會產生色差與球面像差，造成影像失真；鏡片太重、鏡頭太長。</p>   |
| <b>牛頓反射式望遠鏡 (1668 年)</b>   |   |
| 1668 年牛頓發明了反射式望遠鏡，優點是結構簡單，容易製造大口徑的望遠鏡。口徑越大進來的光線越多，觀測物的細節也越明顯喔！   |   |
|                                       | <p>原理：使用曲面和平面的反射鏡組合來反射光線。</p> <p>優點：結構簡單，容易製造大口徑的望遠鏡；沒有色差；適合設計成短焦比，鏡筒的長度比同口徑折射式系統要短得多，以利攜帶性。</p> <p>缺點：會產生球面像差、彗形像差，造成影像失真；反射鏡上的光學薄膜會氧化，隨時間反射率會降低；容易撞歪，需減少碰撞；屬於開放式鏡筒，灰塵容易堆積在主鏡上，不易維護。</p> |
| <b>卡塞格林反射式望遠鏡 (1672 年)</b>   |   |
| 1672 年卡塞格林發明反射式望遠鏡，主要由兩塊反射鏡組成的一種望遠鏡，大的反射鏡稱為主鏡其中央開孔，小的稱為次鏡。   |   |
|                                     | <p>原理：以拋物面鏡作主鏡，第二反射鏡是雙曲面鏡，將光線反射回後方，並穿過主鏡中心的洞孔。</p> <p>優點：成像品質比同口徑反射式望遠鏡好；使用方便；屬於密閉式鏡筒，灰塵不易堆積在主鏡上，易於維護。</p> <p>缺點：會產生球面像差、彗形像差，造成影像失真；鏡頭比折反射式望遠鏡長。</p>                                     |
| <b>折反射式望遠鏡</b>   |   |
| 現今觀測天文所使用的折反射式望遠鏡，是由卡塞格林望遠鏡改良衍生出來的，折反射式望遠鏡的系統到今日已經發展許多種類，世界級大型天文台許多都採用折反射式系統。  |   |
| <b>施密特－卡塞格林折反射式望遠鏡 (1931 年)</b>  | <b>馬克蘇托夫－卡塞格林折反射式望遠鏡 (1940 年)</b>   |
|                                     |   |
| <p>原理：結合折射式與反射式兩種原理的光學系統。</p> <p>優點：大幅減小望遠鏡長度，便於攜帶；便宜實用；屬於密閉式鏡筒，灰塵不易堆積在主鏡上，易於維護。</p> <p>缺點：製作困難，容易撞歪，產生光軸偏移，需減少碰撞。</p> |   |

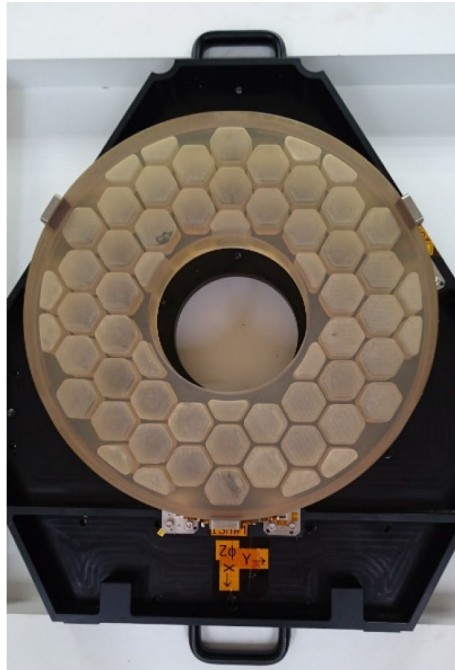
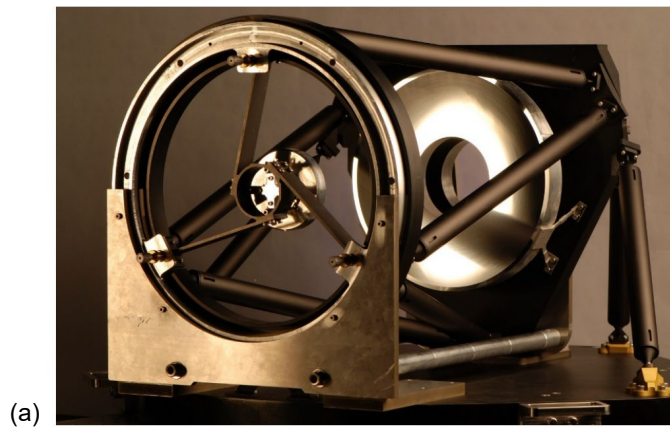
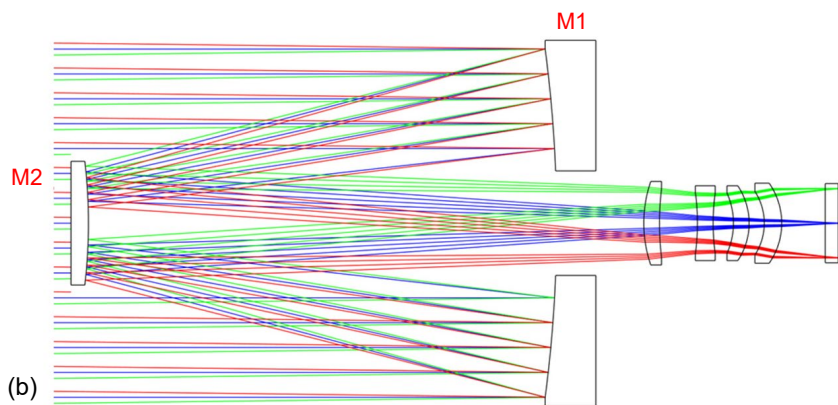


圖 5. 福衛五號主鏡 (鍍膜前)，鏡片直徑達 46.6 公分。



(a)



(b)

圖 6. (a) 福衛五號遙測系統實驗體。(b) 福衛五號卡塞格林式望遠鏡光路示意圖。

## 專家開箱解析 (2) – 為什麼鏡片顏色會黃黃的？

太空環境的日照和夜間溫差很大，為了避免鏡片因溫度變化產生表面變形，影響遙測取像品質，採用零膨脹係數的光學陶瓷玻璃來製作。像這樣特殊的鏡片材質，相對一般光學玻璃來的硬，不好加工，而且鏡片形狀精度要求為奈米等級，相當於一個足球場上不能夠找到一根頭髮。國研院儀科中心用了超過 3 年的時間，一步一腳印地突破拋光以及檢測技術，才開發完成福衛五號大口徑非球面鏡片，目前國研院儀科中心是全臺灣唯一可以製作 40 公分以上非球面鏡片的單位，目前持續製作福衛八號系統裡所需的鏡片，支援國家太空政策發展！

## 專家開箱解析 (3) – 為什麼鏡片後面會有蜂巢狀的結構？

通常太空望遠鏡的鏡片，為了減少自重力干擾影響成像品質，都會幫鏡片減重。幫鏡片減重的方法就是在鏡片背面以研磨的方式將背面材料移除，一般來說，以三角形及六角形結構效果較佳，如圖 7 所示。舉例來說，福衛五號的主鏡原本有 20 公斤，減重後剩 10 公斤，可大幅降低光學系統的總重量。此外，減重還可以節省發射費用喔！這是因為衛星發射是以重量來計算費用，以哈伯望遠鏡為例，主鏡 2.4 公尺，實重 3.628 噸，減重後 0.828 噸，依當時美國發射費用，衛星發射費用約 10,000 – 100,000 US\$/kg，減重至少省下發射費用 2,800 萬美元。(註：1981 年每公斤發射成本高達 85,216 美元，目前 SpaceX 的火箭每公斤承載發射成本最低為每公斤 1,410 美元，其他業者的成本約落在每公斤 5,000 美元，預估到 2040 年時會再降至每公斤 10 美元。)

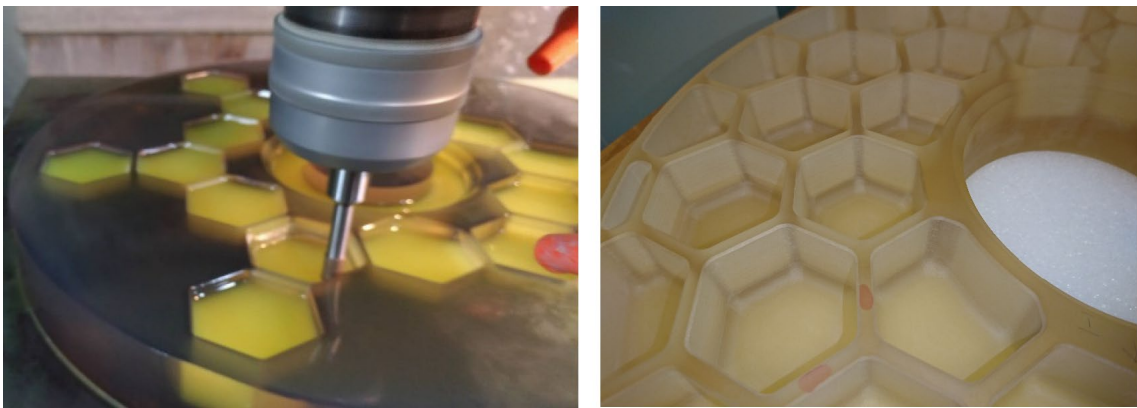


圖 7. 鏡片背面減重加工後的蜂巢結構。

## 結論

人類為什麼要瞭解宇宙的起源與奧秘？是為了找尋下一個適合居住的星球？解鎖黑洞和中子星的秘密？又或是研究星系形成和演化、觀測月球上的物質分布？在探索宇宙的過程中，科學家永遠少不了精密的望遠鏡設備，在太空中放一架由精密光學鏡片組成的望遠鏡，不會被大氣層干擾，讓探索未知太空世界的夢想化為可能。



然而，要製造出一台完全由臺灣自主研發的太空望遠鏡絕非易事，因太空元件不僅價格昂貴又受到國際監管，取得難度非常高，除了要克服技術挑戰，其中更缺少不了重要關鍵光學元件「大口徑非球面鏡」。本文期透過淺顯易懂的方式，引導讀者先了解球面鏡與非球面鏡的差異後，再開箱全臺灣唯一的大口徑非球面鏡，介紹大口徑非球面鏡的三大特點，了解太空元件自主開發的重要性。國研院儀科中心不僅是臺灣唯一為學術界提供跨領域客製前瞻儀器設備的研發機構，更憑藉超過 40 年的光學設計與鏡片製造經驗，突破大口徑非球面鏡的關鍵技術，成為國內唯一能夠生產太空衛星鏡片的重要單位，為臺灣自製太空科技元件的關鍵技術寫下里程碑，充分展現臺灣自製高階科研光學元件的技術與驕傲。

## 參考文獻

1. 郭慶祥, 余宗儒, 何承舫, 許巍耀, 陳峰志, 科儀新知 217 期, 福爾摩沙衛星五號專題 (2018).

## 作者簡介

陳柏荔女士為國立清華大學動力機械博士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心副研究員。  
Po-Li Chen received her Ph.D. in Power Mechanical Engineering from National Tsing Hua University. She is currently an Associate Researcher at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

林麗娥女士為國立政治大學東亞所碩士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心副工程師。  
Claire Lin receive her M.S. in the Graduate Institute of East Asian Studies from National Chengchi University. She is currently an Associate Engineer at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

魏崇倫先生為國立陽明交通大學材料科學與工程學博士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心助理工程師。

Chong-Lun Wei received his Ph.D. in the Department of Materials Science and Engineering from National Yang Ming Chiao Tung University. He is currently an Assistant Engineer at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

莊子右先生為國立成功大學工業設計碩士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心佐理工程師。

Tzu-Yu Chuang received his M.S. in Industrial Design from National Cheng Kung University. He is currently an Engineering Assistant at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.