

非球面技術發展

Development of Aspherics Technology

李建興、林洵焜、郭慶祥、廖俛境

Chien-Shing Lee, Shyun-Kuen Lin, Ching-Hsiang Kuo, Liang-Ching Liao

國科會精密儀器發展中心於日前發表口徑 300 mm 之 Zerodur[®] 及 160 mm 之 SiC 等太空用途之特殊材料所製非球面鏡，為我國首度公開航太等級大口徑非球面光學元件的研製成果。適逢國科會精密儀器發展中心成立三十周年，特別針對非球面技術領域的發展概括地作一介紹，期許藉由本文之歸納能對相關研究人員有所助益，積極累積我國在此非球面領域上技術能量。

Last December, Precision Instrument Development Center (PIDC), National Science Council officially announced the launch of aspherical lenses made from special materials for aerospace applications, such as 300 mm Zerodur[®] and 160 mm SiC lenses. The accomplishments of PIDC show that Taiwan has mastered the art of generating and polishing large aerospace-grade aspherical optical elements. This article reviews the development of aspherics technology and many popular applications. Hopefully, this article can be helpful for the researchers in this field and lay the foundation of the aspherics technology in Taiwan as well.

一、前言

國科會精密儀器發展中心 (以下簡稱精儀中心) 於民國六十三年成立時，即籌建我國第一座光學工廠，提供早期學術研究所需之光學元組件，為我國光電科技發展奠定基礎。以現有超過二十五年光學加工經驗之資深技術人力配合專業研究人員，目前精儀中心已建立了國內第一套與球面鏡製作流程相同之非球面鏡加工技術，大幅提升非球面鏡加工的效率。日前發表口徑 300 mm 之 Zerodur[®] 及 160 mm 之 SiC 等太空用途之特殊材料所製非球面鏡，為我國首度公開航太等級大口徑非球面光學元件的研製成果。

近年來國內光電產業發展迅速，各項光學相關消費性產品如液晶顯示器、投影機、數位相機及光碟機等均佔世界重要的地位，其中精密光學鏡片更是各項產品中最不可或缺的關鍵性元件。早期光學鏡片幾乎全是以單一曲率之球面設計而成，就光學成像原理而言，當光線穿過鏡片後出現折射，其聚焦面的軸心需落在同一點才能順利成像；然而，受到材料、折射率和製造技術的影響，實際上光線通過球面鏡片後，僅會在某一區域成像且有像差現象。而為了減低像差影響和提升成像品質，往往整個光學系統需由數片球面鏡來組成，所增加的修正鏡片除了增加鏡頭整體體積和重量外，亦將使得光學系統內部中雜散光發生的機會增加。因此，為了

能夠降低光學系統元件數量，以減少影響系統品質的因素，一種以非固定曲率設計之鏡面－「非球面鏡 (aspherical lens)」即孕育而生。

早在十七世紀就發現許多單一片非球面透鏡之設計，如橢圓曲面及雙曲曲面透鏡，其可將有限物距發出的光束無球差地集中於焦點上。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。

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，連一般相機之變焦鏡頭為了獲得更大的景深與廣角範圍，特別使用非球面設計以取代傳統多片球面鏡所組成之變焦鏡頭。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。

目前產業上非球面鏡片因製作方式的不同可區分為：非球面拋光鏡片、非球面塑膠鏡片及非球面玻璃模造鏡片。其中，非球面拋光鏡片雖製程複雜且費時，卻是唯一適用各種非球面設計的鏡片，一般應用在天文望遠鏡系統的主次反射鏡及金屬模具。而非球面塑膠鏡片由於耐候性差，不適用於溫度變化大的環境中，可應用於汽車之光電產品或一些精度不需太高的儀器上等。非球面玻璃模造鏡片的應用甚廣，例如影像電話、數位相機及 CD/DVD-ROM 讀取頭等，唯適用於模造用的玻璃材質僅限於一些低熔點的材質。

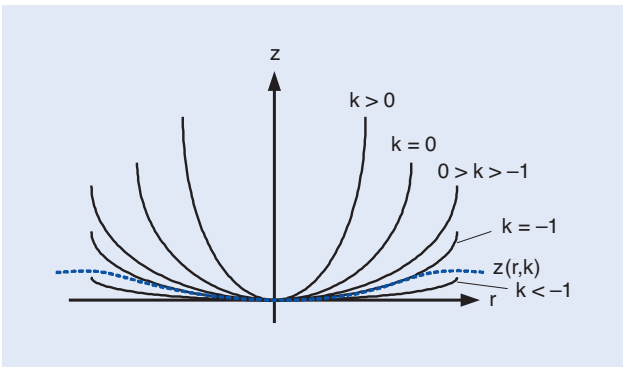


圖 1. 圓錐係數與非球面函數曲線示意圖。

目前已邁入奈米時代，近場光學相關應用技術如近場光學顯微鏡、奈米級儲存技術等已獲得廣泛研究，其中非球面微透鏡由於具有景深寬的優點，更是目前非球面光學研究之關鍵課題。另外，由於數位相機廣受消費者喜愛，許多相機廠商為提高產品競爭力，已紛紛引用非球面鏡設計系統，以改善鏡頭變焦比、視角及對比度等成像品質。本文是以技術層面來探討由現代光學理論、光學材料、超精密機械加工、精密拋光、精密檢測及光學鍍膜等技術能量組成一體之非球面技術。

二、非球面光學基礎設計原理

光學設計上的『非球面』其實是以高階次多項式來描述光學元件表面曲面方程，此曲面可為軸對稱、偏軸面或非旋轉對稱面等型式，除了部分望遠系統或燈源設計需要偏軸面外，多數光學元件表面都是軸對稱面。一般非球面曲線之數學定義如公式 (1)：

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^n \alpha_i r^i \quad (1)$$

其中， c 為曲面中心頂點的曲率， k 為圓錐常數， z 為相對 r 方向座標之對應 z 方向位置， r 為距離旋轉對稱軸位置座標， α_i 為非球面修正項各係數。

公式 (1) 若捨棄其中之高階項次，則非球面計算公式即成為二次曲線方程式，常見的二次曲面如圖 1 所示，有拋物球面 (paraboloid)、橢圓球面 (ellipsoid) 與雙曲球面 (hyperboloid) 等。在公式 (1) 中，當 $k = -1$ 時為拋物球面：可以將入射的平行光聚焦於一點；反之，若將光源置於拋物面的焦點處，反射後平行射出無窮遠處，可製作準直光源、車燈、碟形天線與望遠鏡主鏡等。若當 $0 > k > -1$ 時為橢圓球面：焦點發出的光線經橢圓反射面會聚另一共軛焦點，一般用於光學檢測上。其次，當 $k < -1$ 時為雙曲球面：焦點發出的光線經雙曲面反射後，再經特殊球面鏡反射會循原路徑折回，一般用於望遠鏡的主次鏡設計。



圖 2.(a) 鑽石車削金屬非球面鏡面 (<http://www.fresneltech.com/tooling.html>)，(b) 精儀中心電腦輔助拋光系統非球面鏡片拋光製作。

目前光學設計人員進行非球面系統設計作業時，通常會以二次曲線為基底，再加上數項高階係數項共同修正獲得，故在數學描述上，會應用幾個非球面參數來定義此曲面，例如圓錐常數 k 、中心曲率 c 及表面形狀誤差等，如此一來，只要掌握這些參數，即可得到欲設計之曲面。

三、非球面光學製造技術

由於非球面光學元件製作的方法不斷的演進，元件的尺寸亦從數十米的望遠鏡主鏡小到幾個微米等級的繞射陣列元件，其製造方式不外乎是傳統機械拋光、玻璃模造、射出成形與蝕刻成形等主體製程，而材料的使用不只是玻璃材料，就如塑膠、陶瓷、金屬及半導體等材料亦都包含在內。

但一般常用的鏡片主要可分為玻璃及塑膠鏡片兩種，其中塑膠鏡片是使用高純度光學級的合成樹脂，其硬度及耐候性雖不如玻璃，但低熔點樹脂易於利用射出成形方式製成非球面鏡片，對於性能要求稍低，且以價格低廉為導向的產業而言，存在極大的發展空間。玻璃本身耐候性好，且熔點較高，較適用於精度高的多層鍍膜鏡片。由於加壓模造製程之模具製作、維護費用高，因此就生產成本考量，目前非球面鏡片材質以塑膠為主，球面鏡片多為玻璃材質。

傳統機械拋光技術起源最早，目前高精度平面、球面元件及特殊稜鏡的製程仍沿用此方法。隨後興起的塑膠射出成形與玻璃模造製程比較適合商業化大量生產用。另外，由於半導體製程蝕刻技術

的成熟，目前許多小尺寸的繞射光柵或二元光學陣列皆採用雷射、電漿或離子束加工等高能量法製作。以下針對各項非球面製造技術的相關問題作一探討。

1. 機械成形拋光

傳統機械成形拋光製程是指利用鑽石車削或輪磨將金屬模具或玻璃毛胚成形至原非球面設計外形(如圖 2)。由於超精密車床的定位精度相當高($< 0.1 \mu\text{m}$)，故一般金屬模具只要稍加鍍膜(無電解鍍或鍍)即可完成。而硬脆材料如玻璃、陶瓷等，則需要另外一道拋光精修過程，這個流程依其所需精度而有不同的做法，但卻十分費時，故機械拋光一般用在射出成形、模造模具或壓模模仁的製作，較不適用於大量生產之產業。

近年來，非球面拋光技術流程逐步走向自動化，其拋光參數的控制技術日益成熟，所以許多知名光機廠商紛紛推出全自動化的非球面拋光系統。不過，由於全自動化的精密拋光機只能控制表面粗糙度(roughness)，並無法有效修正其表面形狀誤差(form error)，故對於高面精度($< \lambda/2$)的非球面鏡而言，目前自動化控制技術仍需配合即時的檢測修正。

在非球面成形過程中，刀具的形狀與切削路徑的設計比一般 CNC 車床來得精細，因為切削會造成刀具磨損且後段研磨及拋光等製程並不能大幅修正表面形狀，故必須精確成形到所需外形。通常，成形後的鏡面表面並不能直接進行拋光，原因是刀具會在物件表面留下一些約 $3-6 \mu\text{m}$ 的細刀痕，一般的肉眼不容易檢視到，所以經驗上，拋光人員都會在鏡面成形後，加上一道消除刀痕的細磨工作，以降低表面粗糙度並修正成適合拋光的輪廓外形。由於細磨後的鏡面仍無法充分反射以產生干涉圖，故鏡面在做輪廓粗切時，普遍使用表面輪廓儀做檢測。

非球面的拋光與檢驗的方式可以與傳統製作球面鏡(如圖 3)時相同，所不同的是自動化拋光機可以對拋光時間、工具與物件轉速及接觸壓力等做循環控制，另外在檢測時亦須加上一些補償器做為非球面波前修正用。精儀中心之非球面鏡拋光技術是



圖 3. 精儀中心球面鏡傳統拋光製作。

以成形機將鏡胚輪磨成形，以達到光學設計之表面曲線，並以表面輪廓儀校驗各基本非球面常數。細磨後的非球面鏡在拋光機上做表面粗糙度修正，再以 CGH 干涉儀確認其鏡面表面形狀精度，直到預定精度容差之內為止，其製程流程如圖 4 所示。

由以上流程可知，非球面拋光精度決定在是否有搭配的成形機、拋光前用的粗細磨機、檢驗儀器及有經驗的操作人員等，所以非球面拋光技術的建立首重系統連結之完整性。

2. 塑膠射出成形

射出成形是一個整合性的技術，包含電腦輔助模具設計加工、電腦輔助射出成形過程之模擬分析、塑膠原料運輸及加工前處理、自動快速換模、整合製造流程控制等技術。與玻璃模造流程相仿，

但模具製作精度不若玻璃模造要求來得高，也是適合大量生產的模式。常見的射出成形塑膠材料可分為：壓克力樹脂 (PMMA)、乙烯基樹脂 (PC) 及聚碳酸酯。

射出成形雖已廣為使用，但其產品有許多缺點，如易凹陷及翹曲及有雙折射率現象等，為了改善這些缺點，最近產業已開發出射出壓縮成形的機台，射出壓縮成形技術即結合射出成形及壓縮成形兩種技術而成。這種製程經實際測試製造後，證明不但可以降低充填模穴所需之射出壓力，而且由於均勻加壓使得製程可以在低壓的環境下完成，比起傳統的射出成形，射出壓縮成形具有以下優點：

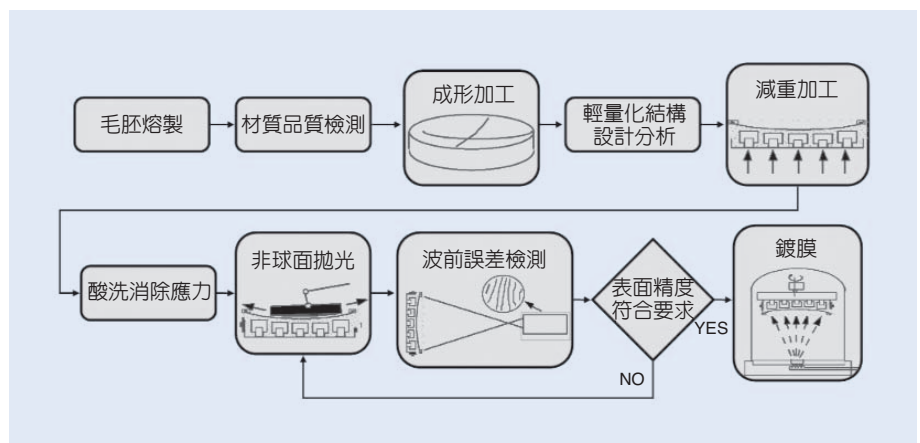
- (1) 可降低射出壓力。
- (2) 均勻保壓，減少不均勻收縮及降低殘餘應力。
- (3) 減少產品凹陷及翹曲，增進尺寸精度。
- (4) 減少成品雙折射率差。

雖然國內塑膠射出成形技術相當普遍，但近年來由於光學元件精密度愈來愈高且環保意識的抬頭，塑膠射出之光學元件似乎有被模造玻璃所取代的趨勢。

3. 玻璃模造成形

玻璃模造是利用玻璃隨溫度升高黏滯度降低之特性，將已成形的玻璃預型體 (pre-form) 置於精密加工成形的模具內，在適當的環境氣體下 (一般為氮氣) 升溫至玻璃軟化點附近，藉由模具表面施壓使玻璃變形，製造模仁形狀，冷卻後去除壓力、分模，取出成品。其中包含了模仁硬膜、精密玻璃預

圖 4. 精儀中心大口徑非球面鏡製作流程。



型體製造與壓造製程三個技術流程，故以「玻璃模造」的方式製作非球面光學元件，其產品的精度與可靠度完全掌握在模仁表面，以及硬膜的品質上。一般而言，一套模具依其大小可壓製 5,000–20,000 件成品，市面上已量產的模具因受制於壓製變形量，目前最大尺寸約在 30 mm 左右，也由於昂貴的模具，故「玻璃模造」一般僅使用在大量生產，投產萬顆以上的批量，其單顆售價方能符合成本。

4. 蝕刻成形

蝕刻是使用化學反應或物理撞擊作用而將材料移除的技術。蝕刻技術可以區分為「濕蝕刻 (wet etching)」及「乾蝕刻 (dry etching)」兩類。在濕蝕刻中是使用化學溶液，經由化學反應以達到蝕刻的目的，而乾蝕刻通常是利用高能量使元件成形，例如離子束蝕刻法 (ion beam etching) 是利用離子束撞擊元件表面產生微量移除作用，以達到加工的目的。此外亦有以兩種混合的方式進行加工者，如電漿中活性自由基與元件表面原子間的化學反應。目前蝕刻成形因精度控制不易，多半使用在微光學繞射元件製作上。

近年來由於消費性光電產品蓬勃發展，光學元件相對地也朝向輕、薄、短、小發展。在這些微小系統中嵌入微小光學元件已是關鍵性技術。繞射光學元件 (DOE) 不僅可以實現傳統光學元件所無法實現之特殊功能，而且具有體積小、重量輕、結構緊密、易於複製、成本低等優點，使得光學系統朝向輕型化、微型化及積體化等方向發展。

四、非球面光學檢測技術

長久以來，準確而有效率的非球面檢測方法一直是非球面光學元件能否廣泛應用的主要關鍵。精確快速檢測出剛製作完成的非球面曲線輪廓與實際設計值之間的誤差，以即時補償原製造的相關加工參數，不僅可以降低生產過程的成本，更能提高成品的品質良率。但因鏡面製作的品質精度遠高於傳統機械量測法所能鑑別的範圍，且非球面不同於一般球面檢測標準，對於各項設計參數、精度及品質要求具有特殊性。

在現行的光學產業做法上，非球面光學元件的檢測可以區分為研磨過程中即時檢驗法、拋光過程中即時檢驗法及最終成品評定。在研磨過程中即時檢驗，主要是能在一般粗磨與細磨過程中，保證曲面參數能符合原設計要求。一般可分為：樣板參考面比對法、機械式檢驗法及自準直儀量測法。

在拋光過程中即時檢驗，其可量測靈敏度必須達到 $\lambda/10$ 以上，大略可概分為干涉圖法、陰影圖成像法及表面輪廓法，其中干涉圖法又細分有兩種，一是干涉波前補償法，如電腦全像干涉片檢驗法、附加補償鏡法等，另外一種是無波前補償法，如各式剪切干涉法、雙波長干涉法及長波長干涉法等。陰影圖成像法屬於較簡便的檢測方式，一般以刀口檢測法作為代表。以下針對各式典型非球面檢測技術原理與應用領域作一探討，而各式非球面的檢測方法都有其優點。

1. 樣板參考面比對法

利用斜切錐體或圓柱體製作模板參考面，需由實際待測非球面形式而決定，以橢圓面樣板製作而言，其斜切角度為：

$$\theta = \cos^{-1} \frac{L_m}{L_M} \quad (2)$$

其中， L_M 為橢圓長軸，而 L_m 為橢圓短軸。

使用樣板比對方式測量非球面並無法獲得高精度誤差值，可測得最佳的誤差值僅為 $10 \mu\text{m}$ 左右，但因其可以迅速的比對誤差，在粗細磨製作上可當作初步檢測工具。

2. 機械式檢測法

利用千分表與橫尺規將非球面待測件沿單一水平軸向滑動，藉由讀取各橫向位置值配合千分表對應的量測值，經下列座標關係式可得實際待測件曲線座標：

$$\begin{aligned} x &= x_G - r_G \sin\alpha \\ y &= y_G + r_G \cos\alpha \end{aligned} \quad (3)$$

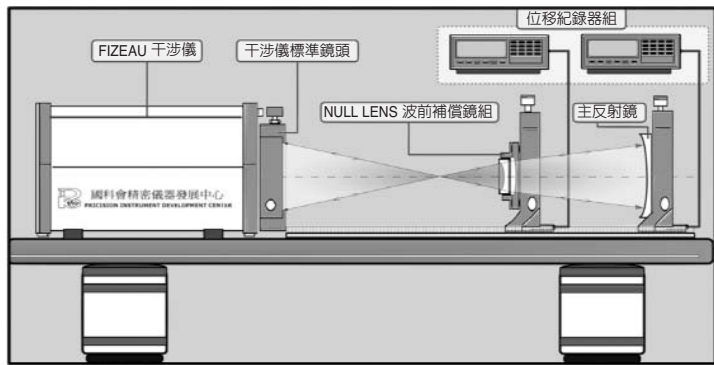


圖 5. 精儀中心 NULL-LENS 檢測系統示意圖。

其中， x_G 表示測試頭中心 x 方向座標， y_G 表示測試頭中心 y 方向座標， r_G 表示測試頭半徑， α 表示座標切線夾角。

若配合的平台表面平坦度與表規靈敏度達 $0.1 \mu\text{m}$ 以上，則此接觸式檢測精度將可達到 $1 \mu\text{m}$ 以上，但因儀器校正的不便與人為操作上的不確定性太大，實際使用上並不廣泛。目前依此原理已成功開發出配合感測雷射光微偏移量，獲取精密探針頭上下移動量的非球面表面輪廓系統，精度可達 10 nm 。此接觸式檢測方式的優點是幾乎可以量測各式表面，缺點是只能以單一方向量測，並且對硬度不高的材質很容易造成待測物件表面的破壞。

3. 自準直儀量測法

將非球面待測件依直徑方向分割等間隔距離，利用一可移動之平面反射鏡與鏡面接觸，測量時先移動反射鏡至鏡面中心處，調整自準直儀光軸垂直於平面反射鏡，沿著直徑方向將反射鏡移動到等間距之各點上，依序紀錄自準直儀所得各傾斜角秒值，經換算後獲得對應的曲線座標值。此類光學式檢測法檢測精度與非球面物件大小相關，大尺寸非球面鏡(口徑 150 mm 以上)在拋光製程中，可以利用此方式即時檢測拋光精度，但需特別注意其平面反射鏡接觸點是否會刮傷待測面。

4. 干涉波前補償法

光學干涉法係利用鏡面表面所造成的雷射光波前與標準鏡片所產生的參考波面形成干涉，並藉由電腦軟體對於干涉條紋進行解析，以得到鏡片實際

表面形狀，應用於非球面檢測可分為兩種主要方式：(1) 補償鏡檢驗法及 (2) 電腦全像干涉片檢驗法。

(1) 補償鏡檢驗法

額外增加一組補償性光學系統，將平面波前或球面波前折射轉換為對應非球面波前，再利用傳統干涉方式解析(如圖 5)。例如一折反射式望遠鏡頭是由凹的主反射鏡、凸的次反射鏡及修正鏡組等組成，其中凹的主反射鏡與凸的次反射鏡的量測可採行附加波前補償器的方式。兩者之間的差異在於波前補償器的位置，檢測凸面時，置於焦點前；而檢測凹面時，置於焦點後。每個波前補償器對應一組非球面外形，其曲率半徑或圓錐常數的適用範圍並不一定，一般說來，波前設計偏離值愈小，可適用的範圍愈大。至於波前補償器需內含幾片球面透鏡，則依照偏離球面程度而定，一般無高階次項或離球面較小的待測非球面僅需一片透鏡或反射鏡即可。

(2) 電腦全像干涉片檢驗法

利用電腦軟體模擬實際光路，利用化學蝕刻或電子束加工的方式將繞射條紋複製於一非常薄且平行的玻片上，將此全像玻片架於定位平台，所產生球面波前繞射成非球面波前，再以干涉儀進行條紋解析(如圖 6)。特別是以化學蝕刻製作出來的全像玻片，由於其繞射率過低(25%)，檢測精度也因而降低，故目前逐漸改用離子束配合光罩的方式來製作，單階的繞射率可提高為 40%，若使用二階方式製作，其繞射率可提高為 81%。

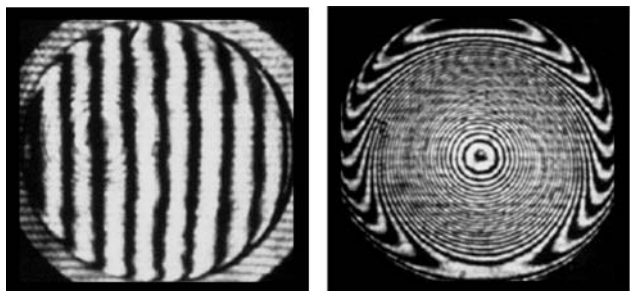


圖 6. (a) CGH 電腦全像干涉法量測非球面條紋干涉圖，(b) 一般干涉法量測非球面條紋干涉圖。



圖 7. 精儀中心數位取像刀口儀檢測系統。

以上兩種檢測方式需要很高的定位精度，一般定位精度通常要求在 0.1 mm 以內，則所得到的量測精度可達 $\lambda/4$ 以上。

5. 刀口檢測法

刀口檢測原理是由 Foucault 於 1858 年提出，其基本原理為利用鏡面上表面粗糙度或形狀上的誤差，造成反射光束行進方向的變化，部分光線不受放置於鏡面理論聚焦處刀緣的影響，照射在取像系統上形成明亮區，其他部分反射光線則被光源遮蔽住，形成陰影。檢測時，表面微小缺陷已能夠造成很大的反射誤差；缺陷越大，成像對比越清晰。百年來雖然非球面鏡檢測方法推陳出新，但由於此種傳統檢測方式不需要其他參考波面，設備要求簡單(如圖 7 所示)，檢測精度可達 $\lambda/20$ 以上，因此仍廣泛應用於各式非球面鏡檢測，目前已開發出許多針對二次曲面等檢測光路架設方法。

五、非球面技術應用

雖然非球面光學元件已逐步取代過去只能「成像與聚焦」的球面鏡元件，但由於形狀精度、光學鍍膜控制及玻璃材料取得上的困難，故非球面元件目前約只占有光學元件產值的 5% 左右。由於光纖通訊與薄型光碟機的需求愈來愈受到光電市場的認同，包括光纖準直器用漸變折射率耦合鏡、雷射封裝用的光纖耦合鏡、光隔絕器以及 DVD 光碟讀取

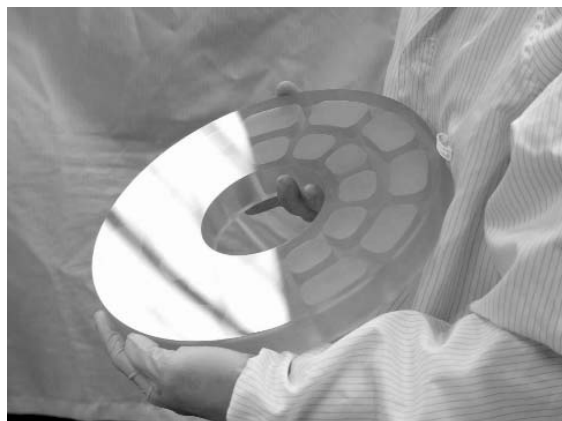


圖 8. 精儀中心自製航太級大口徑非球面鏡(口徑：300 mm，材質：Zerodur[®] 陶瓷玻璃)。

頭等，其中 DVD 光碟讀取頭用的光學元件可由一片非球面聚焦透鏡所取代，可同時為兩種以上不同波長之聚焦。此類非球面鏡是利用模造玻璃的技術，配合極小曲率半徑的超精密光學模仁加工技術，以及小面積的光學鍍膜技術等。其元件尺寸已小於 2 mm 以下，可以預見未來的光電市場中，小於 1 mm 的小尺寸非球面光學元件的開發與製作將為主流。

目前國內廠商幾乎都引用日系專用模造玻璃或塑膠射出成形技術，而其低溫玻璃或光學用 PMMA 塑膠材料卻限於幾家光學材料大廠可以供應。為了能夠提高元件製造之自主性，國內已有廠商開始開發新的低溫模造用玻璃或是研究高溫模具合金鍍膜等技術，並引用石英玻璃來模造之可行性，以克服目前材料來源窘境。

因應太空衛星遙測科學研究潮流，為了獲得更寬廣的視野及清晰的觀測物，所使用的航太遙測鏡頭口徑必須加大，且亦需使用二至三個大口徑非球面鏡方能達成低影像扭曲的效果。面對世界各國航太衛星產業競爭，開發大口徑非球面鏡系統(如圖 8)更成為星載光學遙測系統與機載遙測系統的入門磚。此外，發展大口徑遙測鏡頭除了可應用在農林漁業資源探測、環境監測、災害防治及國土規劃等工作之外，隨著半導體產業中矽晶圓尺寸加大、線寬尺寸日益縮小的技術發展趨勢，採用大口徑非球面鏡之曝光鏡頭亦是提升半導體矽晶圓製程光刻圖形辨識率之關鍵技術。

六、結論

非球面拋光與檢測技術發展至今已數十年，目前多半拋光的關鍵技術仍需依賴國外光學設備廠商。基於未來產業需求，國內若能建立非球面金屬模具成形或鑽石輪磨精密成形、非球面拋光及相關量測技術，即可開發各式高精度非球面拋光鏡片與金屬模具，不但可以提高國內光電產業及衛星遙測技術相關的能量，亦可每年為國內光電產業帶來近百億的產值。

光學原本是相當傳統的技術與產業，向來重視經驗累積與傳承，即使在先進國家，最後的拋光也常需要老師父幾十年工作經驗的一雙巧手，做最後修飾，因為他們所成就的是一件藝術品。有鑑於此，三十年來精儀中心所累積的非球面光學加工與檢測技術成果豐富，期許在未來能協助產業界進行非球面光學元件開發，積極提升我國光學產業技術能量。

參考文獻

1. 葉德川, 光訊, **97**, 28 (2002).
 2. 李鴻鈞, 光訊, **97**, 1 (2002).
 3. R. E. Fischer and B. Tadic-Galeb, *Optical System Design*, McGraw-Hill (2000)
 4. L. A. Selberg, *Optical Engineering*, **31**, 1961 (1992).
 5. D. Golini, W. I. Kordonski, P. Dumas, and S. Hogan, *SPIE*, **3782**, 80 (1992).
 6. D. D. Walker, R. Freeman, G. McCavana, R. Morton, D. Riley, J. Simms, D. Brooks, A. King, "The Zeeko/UCL Process for Polishing Large Lenses and Prisms", *Proc. Large Lenses and Mirrors Conference, SPIE*, 106 (2001).
 7. D. D. Walker, D. Brooks, R. Freeman, A. King, G. McCavana, R. Morton, D. Riley, and J. Simms, "The First Aspheric Form and Texture Results from a Production Machine Embodying the Precession Process", *SPIE 46th Annual Meeting*, **4451**, 267 (2001).
 8. S. M. Arnold, *SPIE*, **1052**, 19 (1989).
 9. K. M. Leung, S. M. Arnold and J. C. Lindquist, *SPIE*, **306**, 112 (1981).
 10. D. G. Bruns, *Appl. Opt.*, **22**, 12 (1983).
 11. A. Offner, *Appl. Opt.*, **2**, 153 (1963).
 12. M. Daniel, *Optical Shop Testing*, 2nd (1992).
 13. R. T. Holleran, *Appl. Opt.*, **2**, 1336 (1963).
 14. 黃國政, 王必昌, 廖俊境, 郭慶祥, 科儀新知, **23** (3), 96 (2001).
 15. 廖俊境, 黃國政, 王必昌, 郭慶祥, 科儀新知, **23** (6), 30 (2002).
 16. 徐德行, 科儀新知, **22** (1), 30 (2000).
-
- 李建興先生為國立成功大學機械工程碩士，現任國科會精密儀器發展中心助理研究員。
 - 林洵焜先生畢業於明新科技大學，現任國科會精密儀器發展中心助理工程師。
 - 郭慶祥先生為大葉大學機械工程碩士，現任國科會精密儀器發展中心助理研究員。
 - 廖俊境先生為國立台灣大學機械工程碩士，現任國科會精密儀器發展中心助理研究員。
 - Chien-Shing Lee received his M.S. in mechanical engineering from National Cheng Kung University. He is currently an assistant researcher at Precision Instrument Development Center, National Science Council.
 - Shyun-Kuen Lin is graduated from Ming Hsin University of Science and Technology. He is currently an assistant engineer at Precision Instrument Development Center, National Science Council.
 - Ching-Hsiang Kuo received his M.S. in mechanical engineering from Da Yeh University. He is currently an assistant researcher at Precision Instrument Development Center, National Science Council.
 - Liang-Ching Liao received his M.S. in mechanical engineering from National Taiwan University. He is currently an assistant researcher at Precision Instrument Development Center, National Science Council.