

非球面負形拋光系統研製

Development of Aspherics Polishing System

余宗儒、曾釋鋒、黃國政、郭慶祥

Jung-Ru Yu, Shih-Feng Tseng, Kuo-Cheng Huang, Ching-Hsiang Kuo

儀器科技研究中心長期累積光學元件製作能量，並且發表過太空用途之特殊材料非球面鏡研製成果。在非球面光學鏡片需求增加的今日，儀科中心整合光、機、電技術，發展出應用負形拋光法之非球面拋光系統。期能在非球面鏡片製作上持續累積技術能量。

Instrument Technology Research Center (ITRC) accumulates a lot of experiments in lenses fabrication, and announced the launch of aspherical lenses made from special material for aerospace applications. Because of the demand of aspherical lenses, ITRC combines optical, mechanical and electrical technology to develop an aspherics polishing system using negative-shape polishing method. ITRC will keep on increasing the technology of aspherics fabrication.

一、前言

近年來全球光電產業蓬勃發展，各項消費性光學相關產品之產值達到顛峰，如數位相機、液晶顯示器、投影機、光碟機等成長更是快速，相對帶動其關鍵光學元件之發展。一般光學元件大略可分為折射元件(透鏡、稜鏡)、反射元件、繞射元件與混合元件(hybrid)等，其應用與材料之使用依照不同製造方式而有所差異。早期由單一曲率之光學鏡片組成之光學系統，需要數片球面透鏡來減少並修正像差與提升成像品質，但往往增加了系統之體積與重量。時至今日，以非球面光學元件來提升整體光學性能之應用愈來愈廣泛。非球面光學元件不但能減少像差、提升光學性能，使光學系統有較好的成像品質，同時能減少系統組合鏡片數目、降低成本與符合特殊的體積與重要的限制。因此，朝向高精

度與輕薄短小之光電消費性產品，使用非球面光學元件的應用愈來愈多，需求量亦愈來愈大，如照相機、光碟機、投影機，甚至於天文望遠鏡、精密光學儀器等，可以想見其未來之發展。

二、非球面鏡片製造技術

非球面鏡片不似球面鏡片製作容易，球面鏡片由於是單一曲率之球面，因此傳統之研磨、拋光製程技術已非常成熟，並且可達到較高的表面形狀精度(form error)。即使如此，在市場需求的因素下，非球面鏡片製造技術不斷地演進，材料不只有玻璃，如塑膠、陶瓷、金屬等材料亦廣泛地被應用。

非球面鏡片製造技術主要有傳統研磨拋光法、玻璃模造成形法、塑膠射出成形法、蝕刻成形法等⁽¹⁾，各有其應用層面與市場需求。傳統研磨拋光法

適用於玻璃、金屬、陶瓷等材料。以玻璃材料來說，鑽石砂輪將玻璃塊材成形出非球面之曲面，再以小面積接觸或類似車削的方式作研磨、拋光，此因非球面鏡片無法以單一曲率之磨碗進行研磨、拋光。由於研磨、拋光只能以小面積接觸鏡片來消除成形後所留下之刺孔與刮痕，所需花費的時間較長，對形狀精度之修正亦有限，為了達到表面形狀精度，在成形的階段必須將形狀精度控制在 $5\ \mu\text{m}$ 以內，以利於後續之研磨拋光並縮短鏡片製作時程。近年來由於超精密加工機之發展，能以鑽石輪磨或以鑽石車削成形出高形狀精度之非球面玻璃鏡片以及非球面金屬鏡片，再經過一道拋光修整程序，即可得到高形狀精度之非球面鏡片⁽²⁾。傳統研磨拋光製程十分費時，並且需仰賴高精度之非球面成形機、研磨拋光機以及檢測儀器等以作為補償研磨、拋光之修正基準。

以傳統研磨拋光法製作非球面鏡片相當耗時，為了能提升生產速度與產量，因此藉由玻璃材料特性發展出玻璃模造成形法。將玻璃預型體置於精密加工之模具內，一般稱之為模仁。在充以惰性氣體下加溫達到玻璃軟化點，由模造機加壓使玻璃成形為模仁之形狀，經過穩壓、冷卻後，即可取出成品，其每一循環所生產鏡片數量依照模具所設計之模穴數而不同。以模造成形法製造非球面鏡片，其表面精度取決於模仁之表面精度、硬膜技術等，以及玻璃收縮率之精密計算。因此，模仁之壽命、鏡片之尺寸等亦同時受到限制，但仍為小尺寸非球面玻璃鏡片之大量生產方式。

從光學性能來看，玻璃材質比塑膠材質之鏡片擁有較好的光學性能，並且較不受環境溫度、濕度之影響而變形，因此應用於高精度之光學儀器均採用玻璃鏡片為主。但應用於精度要求不高且有成本考量之產品時，塑膠鏡片即可達到所要求之光學性能，射出成形技術因此應用於製作塑膠非球面鏡片。其流程與玻璃模造技術相仿，但其模仁精度要求相對較低，是降低成本、大量生產的方式之一。

相對於之前所提的光學鏡片，近來微小光學元件之使用亦愈來愈多。如繞射光學元件 (DOE)，可以達成傳統光學元件無法達到之特殊功能，並且具有體積小、重量輕等優點，而此種光學元件即是利用蝕刻成形的方式來製造。

不論是由何種方式來製造非球面鏡片，非球面檢測技術亦是不可或缺之一環。目前非球面鏡片的檢測方式有接觸式表面輪廓儀檢測、非接觸式的電腦全像片輔助檢測以及刀口法檢測等。精密、準確與即時的檢測技術能提供相關的補償參數予加工機，以降低製作成本、時間與提升產品良率，亦是非球面製作技術能否再進一步提升的關鍵。

二、負形拋光法原理

在傳統研磨拋光法的製作流程，使用一個可容許微小變形 (包含側移及傾角) 之樹脂基鑽石材負形拋光頭 (如圖 1 與 2)，亦即撓性拋光頭⁽³⁾，在已成形之鏡片表面上作研磨、拋光之工作。藉此負形拋光頭加上可微變位的設計，使得拋光頭與鏡片接觸，以類似傳統球面鏡片拋光方法直接於非球面鏡片上做拋光，稱此為負形拋光法。

在拋光頭的部分，依鏡片表面粗糙度不同，可選用用粒度 #800—#4000 鑽石材與樹脂燒結而成，並在樹脂基鑽石材加入 25%—35% 的石墨材⁽⁴⁾，以增加其拋光時的潤滑性⁽⁵⁾，其鑽石磨粒亦可以碳化矽 (SiC)、立方晶氮化硼 (CBN) 磨粒代替。另外在樹脂基鑽石拋光頭表面製作導流槽，使拋光液可藉由導流槽流出，均勻填充在拋光頭與鏡片表面之間，增加拋光效率及穩定性。

使用負形拋光頭拋光中心曲率半徑 (R) 之凹面鏡片時，修正拋光頭之負形形狀，使其中心曲率半徑為 $(R - \Delta R)$ ，略小於鏡片之中心曲率半徑 (R)；用於拋光中心曲率半徑 (R) 之凸面鏡片時，修正拋光

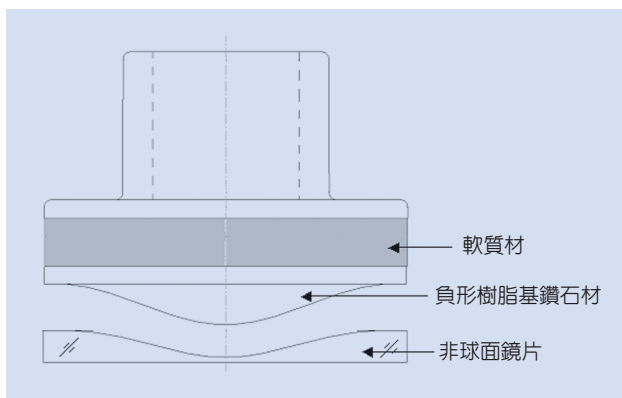


圖 1. 負形拋光頭示意圖。

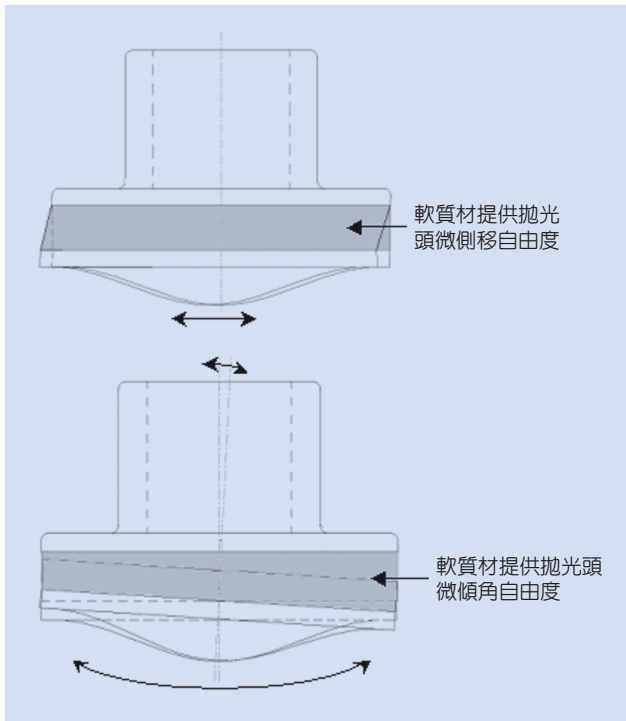


圖 2. 拋光頭具有微側移及傾角自由度。

頭中心曲率半徑為 $(R + \Delta R)$ ，略大於鏡片之中心曲率半徑 (R) 。其中 $\Delta R = KR$ ， K 依工件大小而定。

此外，用軟質、可微變形之材料結合刀柄及硬質拋光頭，可使拋光頭具有些許傾角及側移之自由度，並利用此一功能逐一在鏡片表面作拋光的工作。拋光頭金屬柄的軸心設計有導流孔，提供拋光液流入，最後於樹脂基鑽石材導流槽流出至鏡片表面。拋光機制以拋光頭中微粒鑽石微量地磨拋削鏡片，以去除鏡片表面的刺孔與刮痕，達到拋光的效果。

拋光方式為，在樹脂基鑽石材表面成形出與所設計鏡片外形成負形曲面之拋光頭，將拋光頭裝置

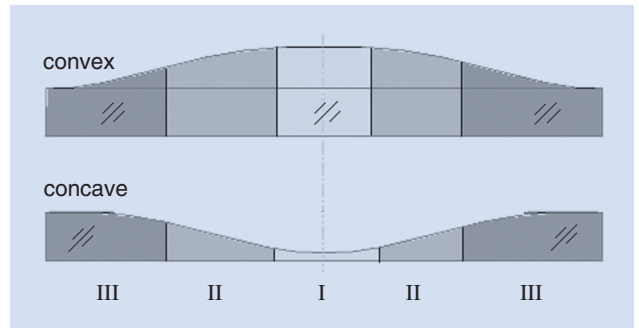


圖 3. 鏡片分區拋光示意圖。

於一刀具主軸上，所成形的鏡片裝於另一工件主軸上，校正拋光頭與鏡片之軸心。啟動拋光頭與鏡片主軸，並供給拋光液，緩慢使拋光頭與鏡片接觸而執行拋光工作。

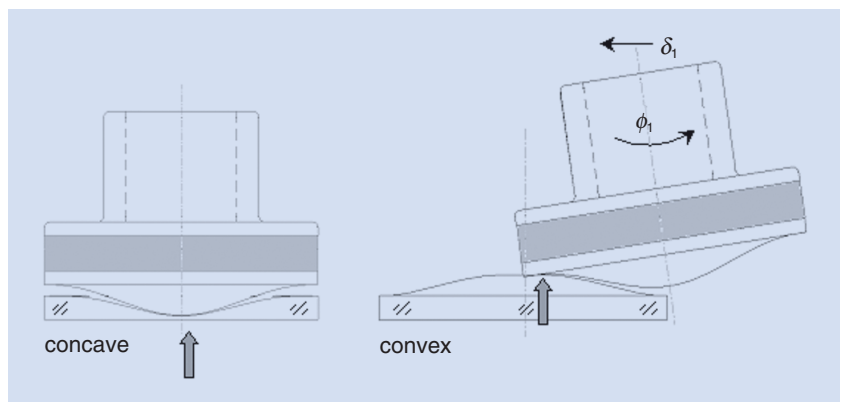
1. 均勻拋光

依鏡片表面刮痕及刺孔的大小及均勻度，選用粒度粗、中、細作進階拋光，亦即利用負形拋光頭及可微位移與傾角的機制，逐一接觸鏡片達到整面鏡片拋光。

2. 修正拋光

鏡片經過均勻拋光後，量測鏡片表面形狀精度，以作為修正拋光之依據。以圖 3 為例，將鏡片表面分為三個區域 (I、II、III)。依鏡片量測結果，當鏡片第 I 區域需修正形狀誤差時，此時凸面鏡片 (convex) 可控制拋光頭側移 δ_1 並轉動 ϕ_1 角度，使與鏡片接觸在第 I 區域，並控制拋光時間以執行第 I 區域修正拋光工作 (如圖 4)。當第 II 區域需修正形狀誤差時，將凹面鏡片 (concave) 拋光頭

圖 4.
鏡片第 I 區修正拋光。



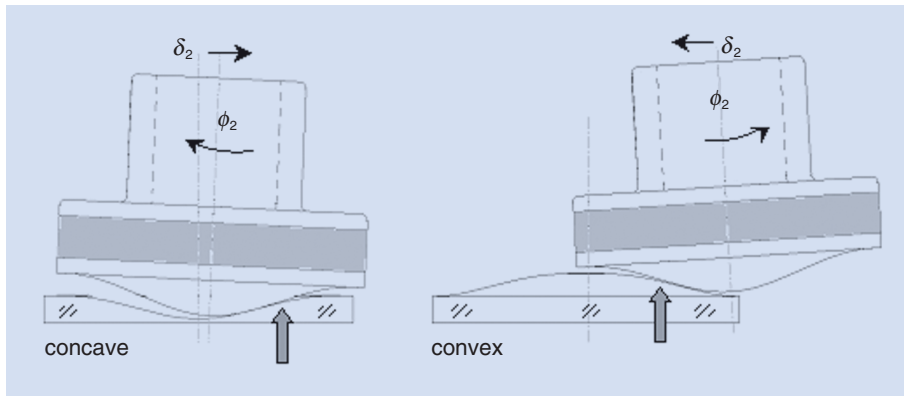


圖 5.
鏡片第 II 區修正拋光。

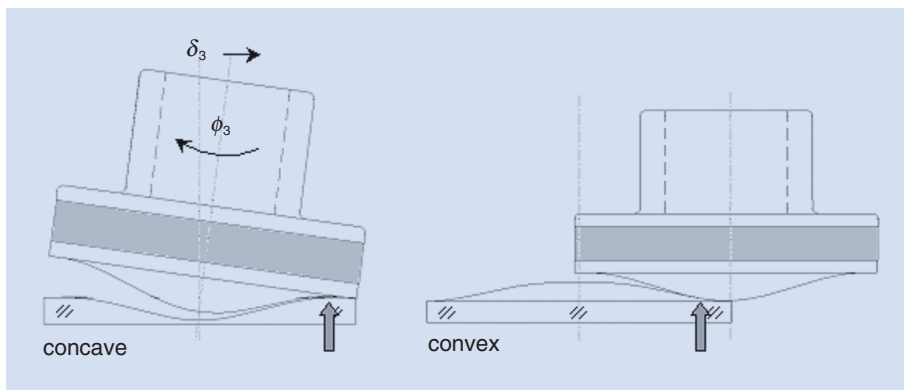


圖 6.
鏡片第 III 區修正拋光。

主軸逐漸側移 δ_2 並轉動 ϕ_2 角度，使拋光頭與鏡片接觸面積集中在第 II 區域，藉由拋光頭軟質材變形的機制達到密合拋光效果，進行第 II 區域修正拋光工作 (如圖 5)。若鏡片第 III 區域需修正形狀誤差時，將拋光頭側移 δ_3 並轉動 ϕ_3 角度 (concave)，使拋光頭與鏡片接觸面積集中至第 III 區域，同理拋光頭軟質材亦逐漸變形達到密合拋光效果，使鏡片修正拋光工作集中在第 III 區域 (如圖 6)。執行以上的步驟達到整片鏡片拋光及修正形狀誤差的工作。

三、非球面拋光系統設計

近年來，國家實驗研究院儀器科技研究中心 (以下簡稱儀科中心) 加快光機電整合的研究步伐，配合負形拋光法研製出非球面拋光系統 (如圖 7)。非球面拋光系統主要由精密軸系和精密導軌為核心，加上負形拋光法擺動與浮動拋光架構的功能要求進行設計。此機構設計需滿足下列幾項要求：1. 提供

高精度的拋光頭和鏡片夾持的旋轉主軸。2. 達到鏡片與拋光頭微米級高精度間隙調整。3. 保持主軸軸向、徑向迴轉精度及承載。4. 在拋光液充分供給且鏡片與拋光頭結構良好的情況下，玻璃拋去量隨壓力和相對速度增加而增加近似線性關係。

為使負形拋光法能夠發揮其機制，故開發非球面拋光系統。且為獲得高剛性的結構，非球面拋光系統的結構在設計上盡量簡單。因為增加過多結構數量和力的傳遞元件，會導致尺寸誤差增加、彈性位移量變大和剛性降低。結構越複雜，作用力在傳遞過程中受到彈性變形和熱的影響，運動誤差就會越大。拋光機基本構造如圖 7 所示，概括起來是以精密主軸、精密滑座、支撐件、傾角機構和擺動機構為核心，相關零組件設計分析如下。

1. 精密主軸

主軸組件工作時因摩擦產生的熱量，在熱量傳遞的過程中，由於各部位散熱條件不同，容易使主軸迴轉精度產生熱飄移，因此限制徑向迴轉精度 $\leq$

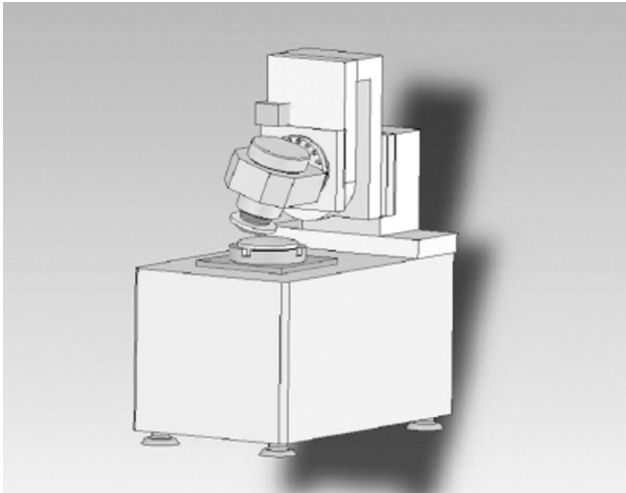


圖 7. 非球面拋光系統示意圖。



圖 9. II 代非球面拋光系統。

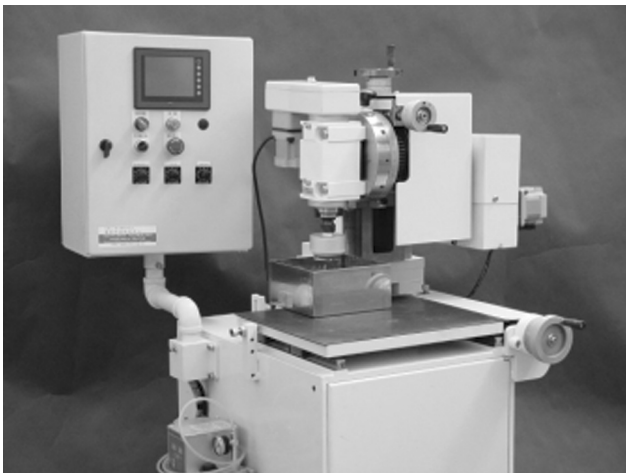


圖 8. I 代非球面拋光系統。

5 μm ，軸向迴轉精度也必須 $\leq 5 \mu\text{m}$ 。另外，為了適應精密拋光製程中各種轉速的需求，主軸在設計上會搭配變頻器調整轉速。

2. 精密滑座

採用精密直線滾珠導軌提高傳動速率，因傳動過程中有數個滾珠同時接觸，誤差被均化，整體機台精度得到提升。

3. 支撐件

拋光機支撐件包括床台、立柱及橫樑。支撐件的重量往往占機器總重 50% 以上，因此在滿足剛

性的要求下，可節省金屬材料。另外，支撐件材料採用鑄鐵製造，由於鑄鐵組織中的片狀石墨具有阻尼作用，抗振性會比鋼好。

4. 擺動機構

為了試驗各種負形非球面拋光方式，係使用伺服控制旋轉盤。其特點為拋光頭可在任意角度內達到拋光效果。

結合以上之機構，研製出一代與二代之非球面拋光系統，如圖 8 與圖 9。

四、應用

結合非球面負形拋光法以及相對應的拋光機而成的非球面負形拋光系統，將有利於非球面光學元件之製作。以往傳統非球面鏡片製作方式為成形、研磨、拋光、定心，但由於鏡片表面的曲率不同，故無法以球面模具來矯正其形狀精度與表面粗糙度⁽⁶⁾。因此其製作流程中研磨與拋光製程需改用小面積接觸或類似車削的方式作研磨、拋光，且需搭配高精度的加工機矯正形狀誤差，致使非球面鏡片的製作時間遠較同尺寸球面鏡長。藉由非球面負形拋光系統，在鏡片成形之後進入研磨的製程，即可用非球面負形拋光頭對其做大面積的形狀精度修正，更換負形拋光頭之鑽石粒度來去除鏡片表面的砂孔與刮痕，達到研磨的效果，並進一步使鏡片表面品

質均勻。

進入拋光製程時，選用鑽石粒度更細緻之負形拋光頭，並加入拋光液，藉由拋光機台控制拋光頭的微傾角與擺動對鏡片拋光。如此可縮短傳統非球面鏡片製作的時間，提昇製作效率。在研磨與拋光的製程中，以表面輪廓儀檢測非球面鏡片之形狀誤差，判斷所需修正誤差的位置與所需時間，將參數輸入此非球面負形拋光系統，進行非球面負形拋光法之修正拋光。此種針對鏡片局部區域誤差進行修正的技術，在非球面鏡片製作中佔有愈來愈重要的地位，國外亦有不同的技術在發展⁽⁷⁾，來修正非球面鏡片之誤差。

結合光、機、電等技術整合而成之非球面負形拋光系統，初期以大批量、精度要求較低之玻璃非球面鏡片加工為主，期能以低成本之機台快速完成非球面鏡片之製作。未來，儀科中心除了持續整合光、機、電的技術能量來發展精密儀器，亦同時朝向超精密加工技術之方向而努力。

參考文獻

1. 李建興, 林洵焜, 郭慶祥, 廖俚境, 科儀新知, **25** (4), 73 (2004).
2. 黃國政, 莊賀喬, 左培倫, 郭慶祥, 科儀新知, **24** (3), 71 (2002).
3. 黃國政, 王必昌, 廖俚境, 郭慶祥, 科儀新知, **23** (3), 96 (2001).
4. 余宗儒, 黃國政, 郭慶祥, 廖俚境, 李建興, 中國機械工程學刊, 21 (2004).
5. S. Y. Luo, Y. S. Liao, C. C. Chou, and J. P. Chen, *Journal of Materials Processing Technology*, **69**, 289 (1997).
6. 陳善明, 科儀新知, **14** (2), 14 (1996).
7. 張云熙, 光學技術, **4**, 17 (1995).

- 余宗儒先生為國立海洋大學機械工程碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心助理研究員。
- 曾釋鋒先生為國立彰化師範大學機電工程碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心助理研究員。
- 黃國政先生為國立台灣大學機械工程博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心研究員。
- 郭慶祥先生為大葉大學機械工程碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心助理研究員。
- Jung-Ru Yu received his M.S. in mechanical engineering from National Ocean University. He is currently an assistant researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.
- Shih-Feng Tseng received his M.S. in mechatronics engineering from National Changhua University of Education. He is currently an assistant researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.
- Kuo-Cheng Huang received his Ph.D. in mechanical engineering from National Taiwan University. He is currently an researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.
- Ching-Hsiang Kuo received his M.S. in mechanical engineering from Da-Yeh University. He is currently an assistant researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.