

回顧我們學習天文攝影的過程，大概是個著這樣的步驟：

1. 固定攝影：用最簡單、最少量的器材，把星星與風景放在底片上。在這個階段，相機的操作是學習重點。
2. 星座攝影：用小赤道儀取代相機三腳，開始拍一些星座、銀河的照片。這個階段裏，赤道儀的操作與對星空的深入認識是學習的重點。
3. 星雲星團的攝影：最後這個階段，攝星者要面對的是各種複雜的器材，包括了望遠鏡、赤道儀、導星鏡、相機、底片...等，以及許多的技巧，如平衡，對焦、取景、導星、甚至暗房技術等。

在這套過程中，追蹤技巧的提升是一條明顯的脈絡。從一開始星流跡的拍攝，演進到短時間曝光的固定攝影，再藉赤道儀而能做長時間的曝光，直到最後用導星的方法把追蹤精度推上最高峰。

導星這項技術，做為追蹤攝影的最終解答，足以讓所有的攝星者在本身技術達到一個水平時，重頭檢視它。本文的主要目的，是希望幫助大家把對導星的認知，從實際操作的層次提升到理論的層次。其次是多少提供一些導星的經驗，和讀者們交流。

## PART I 追蹤的相關知識

### 導星精度的計算

導星的目的在於設法修正各種追蹤誤差。在談產生誤差的原因及修正方式前，我們要先問，多大的追蹤誤差是可以接受的？當誤差大到多少時要加以修正？

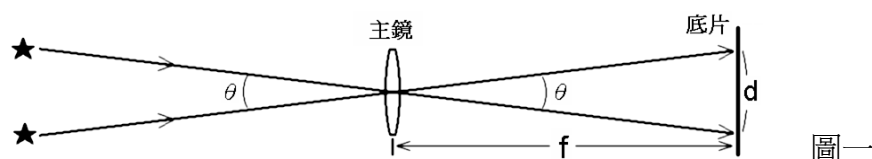
原則上，我們要求追蹤誤差不可以大到損及一張照片的解析力。而解析力要如何衡量？這得請各位參考我在天文通訊 265 期「[談星野攝影底片](#)」一文中，關於最小星像直徑的部份。有了最小星像直徑，我們便可以為追蹤誤差容許量給出一個大小。

通常，我們要求星點因追蹤不準確而在底片上發生的位移，要少於最小星像

直徑的一半。例如，要是算出某系統在某種大氣條件下，最小星像直徑為  $60\mu\text{m}$  ( $1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$ )，則導星時對星點的定位精確度要在  $30\mu\text{m}$  以內。很多時候，我們看到導星精度是被設定在  $20\mu\text{m}$ ，如 Vixen 的 GA-4 導星目鏡即是如此的設計。這是個很一般性的要求，有時嚴格了些，有時又嫌不足，攝星者應多加留意。

另一方面，星點在底片上的位移量當然是從其在天空中的角位移求得。若角位移是  $\theta$  角秒，則出現在底片上的位移量  $d$  將是（參考圖一）：

$$d \doteq 5 \times 10^{-6} \times f \times \theta \quad (1)$$



其中， $f$  是光學系統的（合成）焦距，算出的  $d$  會與  $f$  有同樣的單位。後文中，有時我會以角秒來表示追蹤誤差，讀者可利用公式(1) 自行換算出相對的底片上的誤差。同時，若讀者能熟悉角度單位的換算與三角學，對本文中各項計算的了解會很有幫助。（[註一](#)）

## 赤道儀周期誤差

在了解拍攝時對追蹤精度的要求後，便可以開始看看哪些因素會導致追蹤不準確，同時估計一下其所造成的誤差大小。

追蹤誤差的來源之一是赤道儀的傳動結構，即齒輪、蝸桿等。例如，齒輪非正圓、齒輪軸偏心、齒距不均等都會造成誤差。當然，馬達轉速不準也會造成誤差，只是這只在一些低價位赤道儀上發生。再考慮到大氣折射效應後，馬達是不是非常準就變得沒那麼重要了（見後文）。

齒輪誤差在赤道儀運轉時會周期性地重覆出現，例如，赤經齒盤一個恆星日轉一圈，則由赤經齒盤產生的誤差便每隔一個恆星日出現一次。而對於 144 齒（例如）的赤經齒盤，帶動它的蝸桿便會是約 10 分鐘轉一圈，則此蝸桿的誤差便以 10 分鐘為周期重覆出現。當然，在蝸桿之上還會有更多級的減速齒輪，這些齒輪的誤差便會以更短的周期重覆出現。

周期誤差的存在使得我們在追蹤時，會看到星點做東西向、周期性的來回擺動，在各種不同長短的周期誤差中，最值得注意的是蝸桿造成的周期誤差（原因很多，請讀者自行思考），其周期視赤經齒盤的齒數不同而互異，一般在 5 到 10 分鐘。許多廠商宣稱它們的赤道儀周期誤差是正負多少角秒，指的正是這一項。

當然，許多更短周期的誤差都被包含進去了。而更長周期的誤差雖然誤差量可能更大，卻不在廠商的測試範圍內，讀者要特別注意。

在判斷是否需藉導星來修正各種誤差時，尤其對於使用 200mm 到 400mm 的焦距來拍攝的話，周期誤差是重要的考慮因素。例如，對於一台周期誤差 5" 的赤道儀（中上等級了），當使用 400mm 以下的鏡頭時，從公式(1)可算出，周期誤差造成的位移量將在 20μm 以下，可不予理會（其它的誤差仍要小心）。

## 極軸誤差

追蹤誤差除了來自赤道儀的傳動結構外，極軸不準也是原因之一。在照片上，極軸誤差將以兩種型態出現。當極軸不準且沒有導星時，在赤緯方向會出現誤差，使星點在南北方向上拖線。而若是極軸不準卻有導星時，照片上的星點會繞著導引星做同心圓狀的旋轉，稱作假極現象。

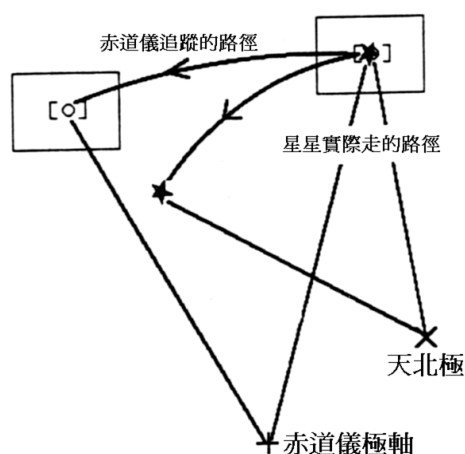
先看第一種現象，如圖二，我們可以看到因極軸不準而發生的誤差基本上是在赤緯方向上（小幅不準的話）。反過來說，若導星時發現導引星一直往南或北飄，那應馬上想到或許極軸出了問題。另一方面，我們也可以藉觀察導引星在南北方向的偏移，來對赤道儀的極軸做極精細的修正，有心的攝星者應自行學習這技巧（這方法稱做漂移法）。

要估算因極軸不準而產生的星點偏移可利用下式（註二）：

$$T = 8 \sin^{-1} \left[ \frac{90 \times d}{\delta \times \pi \times f} \right] \quad (2)$$

其中， $d$  是底片上可容忍的星點位移， $f$  是光學系統焦距， $d$  與  $f$  採用同樣的單位。 $\delta$  是極軸誤差量，以度為單位，最後算出的  $T$  是允許的曝光時間，單位是分鐘。

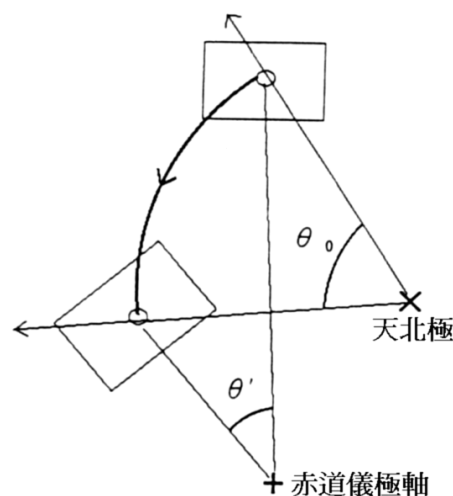
例如，對於市面上內藏極望的赤道儀來說，極軸校對精度在 10 角分以內不成問題，很多都宣稱可在 2 角分以內。以 10 角分（0.17 度）為例，追蹤容許誤差定為 20μm，使用 85mm 的鏡頭，由公式(2)可算出，容許的曝光時間是 20 分左右。而若極軸精度為 2 角分（0.03 度），焦距 1000mm，則允許的曝光時間是不到 8 分鐘。



圖二：極軸不準而未導星時的追蹤誤差。本例中，攝星者會發現被攝天體漸漸往北偏移。

以此，利用公式(2)，我們便可針對自己赤道儀的極望精度及所用的光學系統，算出可用的最長曝光時間。如果此一時間上限達不到我們想用的曝光時間，沒辦法，只好導星了。更進一步，雖然導星可消除上述的赤緯偏移，假極現象卻不可能藉導星來修正，而且不論如何，想修正假極現象一定是不切實際的。

假極現象就如圖三，雖然導星可以讓我們一直跟著欲攝天體，但赤道儀的時角變化與天體實際的時角變化並不一致，在圖中就是  $\theta' \neq \theta_0$  的意思。如此便造成了畫面的旋轉，而且這樣的旋轉是以你所選取的導引星為中心。



圖三

與前面一樣，假極現象也會給出一個曝光時間的上限，計算式如下：

$$T = d / \left[ \Omega \left( f \tan D + \frac{A}{2} \right) \right] \quad (3)$$

$$\text{其中 } \Omega = 5 \times 10^{-5} \tan^{-1} \left[ \frac{\delta(90 - Dec)}{(90 - Dec)^2 - \delta^2} \right] \quad (3)$$

其中， $T$ 、 $d$ 、 $f$ 、 $\delta$ 的意義及單位與公式(2)中所用的相同。 $Dec$  為拍攝天體的赤緯，以度為單位，不計正負號。 $D$  為導引星到畫面中心（通常就是我們要拍的天體）的角距離。 $A$  為底片長邊長度，所用單位與  $f$  或  $d$  相同。算出的  $\Omega$  的意義是，畫面旋轉的平均角速度，單位是 (rad/min)。

例如，若極軸誤差為 2 分，拍攝赤緯 60 度的天體，導引星離拍攝目標 2 度，容許  $20\mu\text{m}$  的誤差，光學系統焦距一公尺，使用 135 底片（長邊長度 36mm），則可算出  $\Omega = 3.2 \times 10^{-6}$  rad/min，曝光時間上限約為兩小時。而若改用離目標 5 度的導引星，則曝光時間上限將只有 70 分左右（很危險了！）。若讀者願意多算幾次，會發現假極現象的誤差通常比赤緯偏移誤差小很多。

赤緯偏移的誤差可用導星來修正，假極現象卻幾乎修正不掉。要徹底避免這些誤差，根本的辦法是把極軸對得很準，這包括了平時對赤道儀的維修、保護以及熟知對極軸的技巧。而由公式(3)可看出，選擇靠近被攝物的導引星也有助於減緩假極現象的影響。之後我們唯一能做的，就是控制曝光時間，不要超過公式(2)、(3)所給出的上限。（註三）

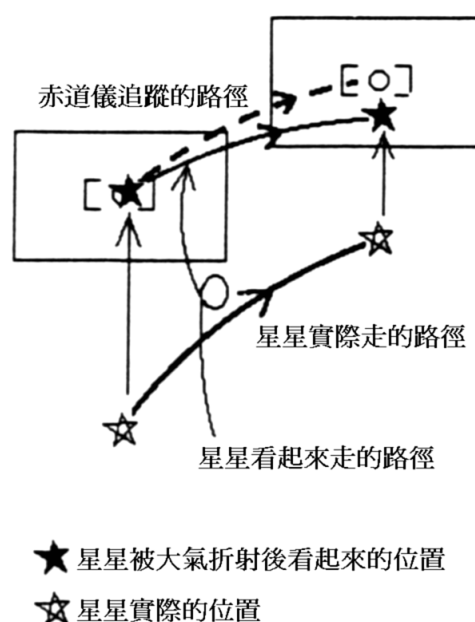
## 大氣折射效應

一個不常被重視的追蹤誤差來源是大氣折射效應。大氣對星光的折射將使星點看起來比實際的位置（沒有大氣時看到的位置）要高出一些，這個星點上浮的角度，在低仰角時比較大，高仰角時比較小。對台灣這樣一個低緯度地區，這基本上將在赤經方向造成追蹤誤差，如圖四。

要計算大氣折射造成的星點上浮量，可利用下面的近似式：

$$s = 58 \times \cot(h) \quad (4)$$

其中， $s$  是星點上浮的角度，單位是角秒， $h$  是星的仰角。舉個例子，要拍某個剛東升不久的天體，曝光開時其仰角為 45 度，估計曝光結束後該天體將有 55 度的仰角（在台灣，對赤道上的天體來說，這約相當於一小時的曝光）。從公式(4)，在仰角 45 度與 55 度時的星點上浮量各約為 58"與 40"，也就是說將有約 18"的追蹤誤差。從公式(1)，18"的追蹤誤差即使對焦距 300mm 的鏡頭都嫌太多。這時，必須縮短曝光時間或用導星來修正此一誤差。



圖四

欲以導星來修正大氣折射誤差的話，選取的導引星要和被攝目標盡量接近，這個要求和修正極軸誤差的要求是一致的！另一方面，要是讀者願意針對各種拍攝狀況去計算各種追蹤誤差，會發現，經常，大氣折射誤差會比周期誤差、極軸誤差都要大。這告訴我們，即使有零誤差的赤道儀與完美的極軸校對，也不可能有零誤差的追蹤。（註四）

## 器材形變

另一個少被注意到的追蹤誤差來自器材受重力影響而產生的變形。例如，主鏡與導星鏡約兩端因重力而向下彎（中間有鏡筒環支撐）、鏡片些微的移位或晃動、導星鏡雲台因導星鏡的重量而變形、雲合板變形....等等。問題的關鍵在，這種變形的變形量、彎曲的方向會隨望遠鏡的指向而改變，儀器每一部份的變形也都不會一致。這就導致在曝光的過程中，隨著望遠鏡指向的慢慢改變，導星鏡與

主鏡的相對指向發生變化，造成導星失敗。

這種現象主要影響著大口徑、長焦距的系統，因為不論較重的重量或是較長的鏡筒，這種受重力而產生的變形都會比較嚴重。對業餘攝星者來說，使用主、副鏡移動式對焦設計的鏡筒（像在美國流行的施密特蓋賽格林式）時，這問題是一定逃不掉的。

這種因器材變形、鏡片移位造成的誤差是不可能從導星鏡中查覺的，唯一合理的解決方式是，選取在主鏡像場邊緣、攝影用不到的地方的星像來導星。如此，因導星用的星像與攝影用的星像屬同一個像場，二者完全同步，即使有變形或鏡片移位的現象發生，也可在導星時被查覺而獲得修正。這種導星方式稱 *off-axis guiding*，如果你願意的話，可以叫它"偏軸導星"。其操作上的一些問題將在本文的後半段提到。

## PART II 導星的進行

在了解我們為何要導星、導星是要修正哪些東西之後，我想來談談實際導星的一些方法與技巧。

### 導星的儀器

前面已經談過，*off-axis guiding* 所用的導引星與攝影取用的屬同一個像場，是最理想的導星方式。但是，在實際操作時，用導星鏡卻遠比用 *off-axis guiding* 方便。

*off-axis guiding* 用的儀器稱 *off-axis guider* 或 *easy guider*，其外觀如圖五，是放塊小菱鏡在相機前方，把像場邊緣的星像導開，再用目鏡加以擴大供導星之用。如此，或許讀者就想問：「要是像場邊緣也就是目標天體附近沒有亮星怎麼辦？」答案是一沒救！使用 *off-axis guider* 時，可選取導引星的範圍相當小，我們總是不能保證在這個小範圍內會有夠亮的星可用，這是它的致命缺點。此外，也不是每支鏡筒都能找到適用的 *off-axis guider*。



圖五

相對的，使用導星鏡來導星就輕鬆多了。藉著導星鏡雲台，導星鏡的指向與主鏡差個四、五度並不足為奇。在這好幾十平方度



的天空裡，要找到夠亮的導引星並不是難事。因此，對大部份的攝星者來說，只要狀況許可，一定寧願用導星鏡而不輕易嘗試 off-axis guiding。

在此，有兩件事要提醒導星鏡的使用者。一是，連結導星鏡與主鏡或赤道儀的結構一定要極強壯。尤其對於主鏡焦距在 1000mm 以上的使用者，器材變形的問題已經有點明顯了，雲台板與導星鏡雲台一定要用最好的，甚至導星鏡的目鏡座都不可以馬虎。

另一件事是，雖然導星鏡的影像品質不直接影響拍出的照片，但一台好的導星鏡總是能讓人輕鬆地導星。例如，口徑大一點的導星鏡使你能選用更暗的導引星，找導引星時導星鏡才不致於偏離主鏡太遠。而解析力高的導星鏡經得起高倍擴大，有助於提升導星精度。因此，花大錢在導星鏡上固無必要，視其為附屬品而隨便將就也是不好的。

## 赤道儀的特異功能

近幾年推出的赤道儀常具備一些電子輔助功能，其中與追蹤有關的有 PPEC、赤緯游隙修正與大氣折射修正等。

PPEC 的全名是 periodic perturbation error correction，主要用於修正蝸桿的周期誤差。它的操作模式是，例如該赤道儀的蝸桿周期是 10 分鐘，那麼在拍攝的頭十分鐘裏，攝星者必須親自導星，修正追蹤誤差，而同時，赤道儀會記憶起這十分鐘裏攝星者的修正動作，之後由赤道儀接管導星的進行，不斷重覆剛才攝星者下的指令。

讀者馬上會看出問題在哪。追蹤誤差並不只來自蝸桿的周期誤差，更長周期的誤差、極軸誤差、大氣折射與器材變形造成的誤差等，都不是隨時間均勻發生的，至少長時間而言不是，這些誤差都不可能透過 PPEC 獲得修正。而且事實上，這些寫進赤道儀裏的 PPEC 程式仍不夠成熟，還不到能充份信賴的地步。

所謂游隙，指的是齒輪與齒輪的咬合間隙。當我們操作赤緯馬達做極低速的運轉時，常會感到馬達好像沒有在動，其實這是齒輪正在跨過游隙。這會延遲赤道儀的反應時間，造成導星時極大的不便。一些新的赤道儀有克服游隙的功能。

大致上，在平衡良好的狀態下，只有當赤緯馬達準備反向運轉時才會遇到游隙。因此，這些赤道儀的方法是，當你下達給赤緯馬達的指令和前一個指令方向相反時，它會先用高速運轉一段短時間，好加速越過游隙，之後再切回低轉速。攝星者可事前視游隙的嚴重程度，對這段加速運轉的時間長短加以調整。

前述兩功能看起來已快要成為新赤道儀的標準配備，相較之下，大氣折射效應修正的功能就不會太常見了。因為大氣誤差的修正需要知道目前望遠鏡的指向，包括赤經、赤緯及仰角，所以此一功能通常只在能做天體自動導入的赤道儀上看到。而若要用 PPEC 功能自動追蹤一段不算短的時間（太長了還是不行），至少大氣折射修正的功能是一定要同時間做的。

對於一些中、舊型赤道儀的使用者來說，要具備 PPEC、游隙修正等功能也不是難事。目前日本市場上有不少外加的控制系統可以支援這些較老的赤道儀，很值得考慮。

## CCD 自動導星

和前述那些赤道儀上的輔助功能比起來，CCD 自動導星是更值得一提的。傳統的導星工作是由人眼視觀察追蹤誤差，再透過控制器修正，現在這工作已可由 CCD 與微電腦取代。像 SBIG 的 ST-4 便是目前業餘市場上最普遍的自動導星 CCD，甚至不少專業天文台都在用它。

用 CCD 導星最大的好處是，攝星者省去了得一直盯著目鏡的重擔。另一個很重要的優點是，CCD 感度高，可用的導引星會比用人眼時暗了好幾個星等。對導星鏡的使用者來說，可做到讓導星鏡與主鏡盡量平行，避免大氣折射與極軸不準所可能造成的誤差。在拍彗星時，用 CCD 追蹤在導星鏡中人眼幾乎看不到的彗核也是可能的事。同時，對 off-axis guider 的使用者而言，找不到夠亮的導引星的問題也可說解決了一大半。

CCD 導星的缺點不外是嫌它太笨了，在強風之下或是大氣擾動嚴重時，CCD 並不會判斷這到底是不是真的追蹤出了問題，而對赤道儀亂下指令，結果當然會很有趣。由於目前國內用 CCD 自動導星的人不多，操作經驗累積得不夠快，想用 CCD 代替人眼導星的同好大概還得再努力一段時間。

## 彗星的追蹤

想追蹤移動的彗星是不容易的，主因是大部份的彗星都太暗了，難在導星鏡中看到。稍亮的彗星或許可以看到，但整個彗髮呈擴散狀，要是中心沒有一個明亮的核心，要導它也著實不容易。例外中的例外星 1996 年春天驚鴻一瞥的百武彗星，在小口徑導星鏡中，即使三、四百倍的倍率都還能看到明亮的核心，這時當然可以輕鬆地導它。



體認到大部份的彗星是不可能用導星鏡追蹤後，讓我介紹一種可以不看彗星，而讓赤道儀追著它跑的方法。這方法的第一步是，要先算出彗星移動的速度與方向（這計算不是很容易，你的數學得夠好才行）。例如，某彗星朝北偏東 30 度移動，速度是每分鐘 15 角秒。拍攝時，我們便可找某顆恆星做導引星，放入導星鏡中。曝光開始後不斯操作赤道儀，讓該導引星在導星目鏡中，看起來緩緩地向南偏西 30 度飄移，速度是每分鐘 15 角秒。其中，導星目鏡中的方向及角距離等，對 GA-4 的使用者來說是很容易得知的。GA-4 中大大小小的刻度線與同心圓，就是為此而設計。此法的細節請參考我所著「[移動天體的導星攝影](#)」一文。

如前所述，這方法主要的難點在於事前的計算，反而在操作上對熟練的使用者而言不會太難。另一種方法是用 CCD 來追蹤彗星，想起來這當然是簡單多了，但這種經驗在台灣實在太稀有了，我也不保證真的就一點問題也沒有。

## 一些經驗談

介紹完一些大方法後，我想談一些自己導星的小經驗給大家參考：

**平衡：**操作赤道儀時，平衡的問題是一再被強調的。消極地說，平衡不好會增加馬達負擔、加速齒輪磨損、縮短赤道儀壽命。積極地說，好的平衡可讓赤道儀發揮出最高精度的追蹤。有幾次，我發現我的 NJP 狀況很糟，檢查之下竟只是因為小小的不平衡，調回來後又準得嚇人。

赤道儀共有三個方向要做平衡，一個在赤經，兩在赤緯。最精細的平衡工作要藉助微動鈕，用手來回轉它的同時，感覺看看是否兩個方向所需的力道一致。另一方面，儀器架設的方式也會影響平衡狀態，最理想的架設法是讓所有的儀器（包括重錘）都排列在一直線上。對德式赤道儀來說，就是希望讓主鏡筒、導星鏡的重心都在沿重錘桿的方向上。實際情形常不允許如此，但總是要盡量把握這原則（[註五](#)）。

**游隙問題：**前面提過一些新的赤道儀有游隙修正的功能，對於舊赤道儀的使用者，這裏有一些我個人的看法。

首先，平衡仍是第一個要做好的工作。在平衡良好的狀態下，赤緯誤差一定是只會往同一個方向，如此，赤緯一直只往一個方修正，自然不必傷游隙的腦筋。其次，赤緯轉速一定要調到極慢，建議不要超過 0.3 倍速，否則轉太快的結果常常是修正過度，要再掉頭回來常然會碰到游隙問題。而每次按快門前，先看看導星鏡，能事先觀察出赤緯偏移的方向是最好的。同時也順便測量一下跨過游隙所需的時間，導星時心裡有個譜，比較不會修正過頭。

我曾在雜誌上看到一種克服游隙的方法，是讓赤緯稍有點不平衡，如此，齒輪會一直抵在某方向上而沒有游隙的問題。這方法我沒用過，但我相信這絕對是下下策。當問題已嚴重到需要用這方法時，應被檢討的不是赤道儀就是攝星者本身。

**極軸的校對：**好的極軸校對對於追蹤精度絕對有舉足輕重的影響，只因爲有導星而草率地對極軸是錯誤的觀念。目前市面上高級的赤道儀，最高的極軸精確度是 2 角分，這對大部份的使用者來說是夠了，使用者只需小心地對極軸、平時做好對水準儀、極軸望遠鏡的保護即可。如果需要更高精度的極軸校對（通常是在以長焦距做極長時間的曝光時），則可用漂移法做極細微的極軸修正。

**風的問題：**做長焦距的攝影時，強風是個很大的問題。經常，風一吹，星點就飄超過了好幾個誤差容許量。這時，最好的做法就是不要用那麼長的焦距拍，換用短焦的主鏡、甚至相機鏡頭。否則就算追蹤成功，拍出的星點也不會結實，一點意思也沒有。另一方面，台灣幾個高山的點，天生就會刮大風，當然是少去爲妙。像是合歡山區的武嶺、玉山國家公園內的塔塔加遊客中心即屬此類。

如果非要在強風之下導星，我的建議是不要去修正被風吹出來的誤差，等風暫時停下來後再做修正的工作。同時，把導星鏡中星點因風吹而移動的狀況（包括移動量、移動的方向、時間長短等）記錄下來，對事後檢討追蹤成敗會有很大的幫助。

**拖線的原因：**在山上拍照時，我常聽到有人大喊：「糟糕！星點跑出 GA-4 最內圈了，這張失敗了！」然後匆忙關掉快門，重拍一張。這真和我當初還是菜鳥時很像。其實，導引星偶而偏出你的誤差容許範圍是不影響拍出的照片的，即使一不小心讓它跑得老遠也一樣，趕快把它拉回來便是，這張照片八成還是會成功的。

接下來讓我把拖線分成幾種可能的狀況，討論一下原因：

- a. 長而均勻的拖線 這鐵定和攝星者的導星技術無關，一定是因爲儀器的某部份發生緩慢而持續的鬆動、變形，或是來自極軸誤差、大氣折射誤差。若拖線有小中斷，那錯不了，鐵定是儀器有嚴重的鬆動。儀器的部份，請換用強壯的雲台、雲台板，並檢查主、斜鏡、對焦座、接環、及導星鏡各部份是否有鬆動，長焦距的系統請換用夠好的 off-axis guider。導星時，請一定要找拍攝物附近的星來當導引星，並小心眼鏡不要撞到目鏡。
- b. 橢圓形的星點 很可能是和上面一樣的狀況，只是不太嚴重而已。另一個可能的是風，或者使用的導星精確度不夠高，不妨再計算一次。如果這種小拖線在

整個畫面中不均勻，有些地方有、有些地方沒有，或者畫面不同部位的拖線方向不一樣，那最可能的原因是底片在拍攝過程中慢慢浮起。對大焦比的系統來說，這不見得會造成失焦，反而可能造成拖線。解決的方法請參考我在天文通訊第 263 期中「我的攝星鏡與星野攝影」一文。

- c. 星點乍看之下不錯、但旁邊有個小突起 這才是導星技術不佳的標準狀況。原因是你讓導引星偏離了一段太長的時間，或在赤緯方向出現了太多次修正過頭的現象，這些都是唯有小心謹慎才能克服的（[註六](#)）。

## 結語

拍了那麼多年的照片，我發現導星是星野攝影中很不容易的一件事，尤其它很不容易偵錯，常常搞了老半天不知道問題出在哪。這時，更充份的知識比盲目地導星、累積不知對不對的經驗還重要。這也是促使我寫這篇文章的主因，希望後起之秀們不必再踏著那條因照片拖線而沮喪的老路。

## 註釋：

註一：若未特別聲明，本文中出現的各種反三角函數的函數值皆取為角度而非弧度，請特別注意。

註二：關於極軸誤差的計算其實是很複雜的，我曾一度嘗試做最精確的計算，結果是知難而退。公式(2)是一個經過許多簡化後的結果，後來我發現它與「誠文堂新光社」的「天體寫真」一書中 45 頁的式子不謀而合。更精確的計算式在近幾年日文版的天文年鑑中有附，讀者可以自行參考。公式(3)是我自己導出的式子，並不太令我滿意，只是我也沒看到其它更好的式子可以用。

註三：想向讀者們強調的是，本文中所列出的各種計算式，並不是供大家在荒郊野外做攝影時使用。攝星者只需在閒來無事時，針對自己的系統及各種拍攝狀況按計算機，對這些問題多少有點感覺即可。雖然這些都是很重要的課題，但若讓過於嚴肅的態度影響了我們攝星的樂趣則是大可不必。

註四：所以，要是你聽到有誰宣稱他的赤道儀多準，對極軸的技術有多好，拍照時可以不必導星，大可一笑置之。大氣折射誤差會讓他嘗到苦果。

註五：這個問題我在天文通訊 263 期「我的攝星鏡與星野攝影」一文中也提過，讀者可以參考一下。

註六：話又說回來，人在精神狀況不佳時，再怎麼小心都會犯錯。因此，上山前充份的休息絕對是必要的。有很多人明知道要上山，前一晚還在熬夜，這種不把拍星星當一回事的態度是拍不出好照片的。

註七：本文原出處為 [ALOHA 天文小站](#)

## 版權聲明

本文作者是王為豪（[whwang@asiaa.sinica.edu.tw](mailto:whwang@asiaa.sinica.edu.tw)），本文著作權歸作者所有。只要將此版權聲明原封不動地放在文章中，並以此為唯一的版權聲明，任何人可自由地以任何形式修改、複製與散佈全部或部份的本文，包括販售圖利，以及將本文重新排版成各種檔案格式，而不需經任何人同意。請你注意的是，不論你如何散佈或修改本文，除了這段版權聲明，你不能對你的散佈品作任何其它的限制，也就是你不能限制他人散佈你的散佈品，否則作者將對你採取法律行動。如果你對擴充或修改本文有任何建議，請與作者聯絡，作者將樂於把你的大名放在本文的擴充版本裡。