

叶云(ecloud)

e.cloud@163.com

2019年9月24日 Rev 3.0

# 星点法校准牛顿式望远镜光轴

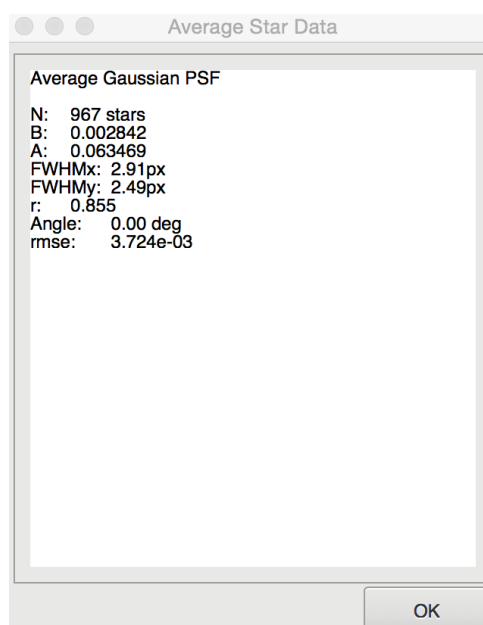
精确校准牛顿式结构的反射/折反射望远镜光轴以满足较大幅面相机的深空摄影需求

## 前言

本文所介绍的为高精度校准牛顿式（含牛顿反射式，施密特牛顿，马克苏托夫牛顿，等任何牛顿结构的前/后改正镜折反射光学系统）望远镜的光轴校准方法。在进行本文所述的校准方法之前，需要使用者已经完成了常规的低精度校准，比如使用十字目镜和激光准直器等机械校准方法。本文所介绍的高精度校准方法，需要使用人工星点发生器，并且需要用户以实际深空拍摄中所使用到的所有接环，滤镜，改正镜，OAG等配件安装齐全。在精调阶段需要在户外进行实际拍摄。

根据作者的经验，粗调过程需要约10-20工作小时，精调过程需要至少5工作小时以上。具体耗时基于用户的运气和悟性。

使用本文所述之方法可以达到怎样的效果呢？右图为作者在D180/F720马克苏托夫牛顿式望远镜上所达到的最好FWHM。相机为Pentax K5，APSC画幅，像素尺寸 $4.8\mu\text{m}$ ，曝光时间450秒。也就是说在整个APSC幅面里，不饱和星点的半宽大小平均值在 $15\mu\text{m}$ 以内，这应该是很多APO也无法达到的成绩了。当然，你有可能用本方法获得更好的成绩！



## 粗调

粗调的主要目的是修正副镜深度，并且把主/副镜的姿态调整到大致准确的位置，为精调提供一个良好的基础。

粗调需要在虚焦（焦点内）模式下调整。因为视宁度会极大的影响虚焦光斑的造型，并且这个步骤需要累积超过10个小时以上的操作时间，所以最好使用人工星点发生器。为了能够校准副镜深度，粗调模式需要进行多轮迭代，因此耗时较长。使用人工星点时，要尽量远，并且相机要求保证垂直向下的角度，所有接环、滤镜、改正镜等光路结构按照实际拍摄时来装配。

粗调的星点光斑必须位于像场中心区域。如果在迭代中由于调整主副镜姿态而使得光斑离开像场中心，那就必须重新构图。

本方式的精度受限于人工星点的距离是否真正达到无限远，以及如何精确判断圆度极同心，因此只能作为粗调。

另外要注意的一点，焦点内的虚焦光斑与正像倒像无关。

在假设相机成像中心即为调焦座圆心的情况下，可以使用某些机械调校设备来修正副镜深度，以替代粗调过程。

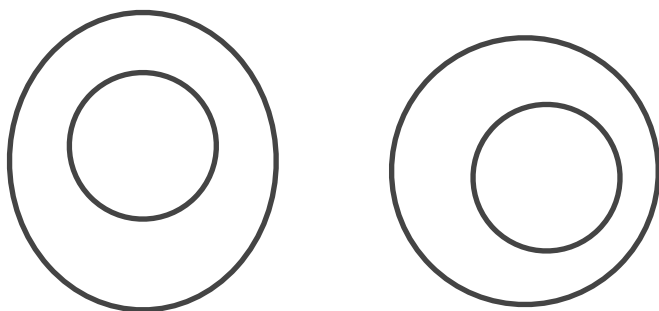
## 首轮迭代

将星点虚焦，形成一个甜甜圈造型，保证外圈的大小在 $200\mu\text{m}$ 以内。

粗调方法的主要原理为：

外圈轮廓实际就是副镜轮廓，因此体现了副镜相对于焦平面的姿态。

内圈黑圈为副镜在主镜中的影子，因此内圈体现了主镜相对于焦平面的姿态。



如上图左，外圈椭圆，表示副镜姿态不正，副镜在纵向拉长（副镜抬头偏转），因此需要调整副镜。

如上图右，内圈位置不正，则需要调整主镜姿态。

当主镜或者副镜其一有所调整后，光斑构形会有较大变化，因此还需要反复多次调整主镜和副镜才能达到较完美的同心圆。

## 副镜深度

副镜深度如果不正确，那么是不可能得到一个完美的，亮度均匀的同心圆的。原理如下：



当副镜深度不正确时，你会得到两种结果：

A：副镜相对于焦平面姿态正确，甜甜圈外圈是正圆。但是此时如果要内圈位于正中，那么主镜必须偏斜以补偿，才能得到同心圆。不过由于主镜已经偏斜，光线能量中心就发生了变化，同心圆的亮度会不平均。主镜抬头，能量往前集中；主镜低头，能量往后集中。

B：主镜相对于焦平面姿态正确，那么副镜必须偏斜以补偿，其结果就是得到了一个外圈是橄榄形的同心圆。副镜抬头，纵向轴拉长；副镜低头，纵向轴缩短。

如上图，副镜深度远离主镜。光路走绿线是不能到焦点的，也就形成不了同心圆。因此光路必须走红线。两条红线分别为主镜和副镜进行偏转补偿的结果。

A，主镜低头偏转，此时光线能量往后部集中，因此形成的甜甜圈，其靠近“后方”（也就是靠近主镜方向）亮度更大。

B，副镜低头偏转，由于副镜低头，所以纵向长度变短。所以形成的甜甜圈外圈纵向轴变短，而横向轴不变。因此得到的是一个横向长的橄榄形甜甜圈。

如果副镜深度靠近主镜，那么得到的结果正好相反。

总而言之，

副镜远离主镜：甜甜圈后部亮度高，或者得到横向橄榄形甜甜圈。

副镜靠近主镜：甜甜圈前部亮度高，或者得到纵向橄榄形甜甜圈。

## 迭代调整

由于副镜深度几乎一定都不正确，所以你在首轮迭代里得不到完美的结果，因此你需要根据首轮调整的结果，改变副镜深度，然后再次进行下一轮迭代。每新一轮迭代的结果，你就会发现甜甜圈的造型越来越完美。一般来说需要3-4次迭代可以达到粗调的最高精度。到此，副镜深度已经不需要再进行调整了。深空摄影允许焦平面有轻微的平移（3mm以内），星点法校准并不会使这种平移影响到下一步的精调精度。

## 精调

精调阶段需要对实际拍摄的合焦星点图像进行解读。建议选择曝光时间10秒的5-7等星作为对象，疏散星团为佳。

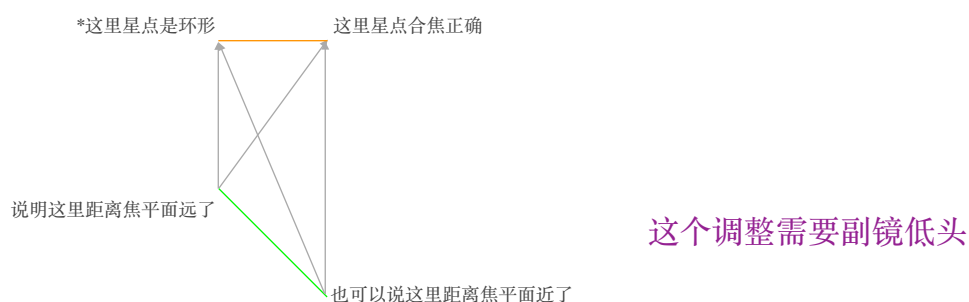
精调阶段需要进行的调整量非常之微小，此时主镜螺丝需要拧动的范围大约不会超过5度，而副镜螺丝可能只是需要轻轻感觉到拧动即可。

使用的相机幅面越大，精调的精度越高。

对于单反相机来说，得到的图片实际是倒像，要注意上下左右方位的对调。

## 合焦差异法

先以副镜举例来解释合焦差异法的原理。副镜相对于焦平面姿态不正确时，会造成焦平面倾斜，因此相机不同位置上的星点会脱焦。这里要注意的是单反相机的成像是**倒像**。比如，你看到左上角已经合焦准确，而右下角呈现焦内的构型，那么其结果是相反的。实际是右下角在焦面上，左上角距离靠近了。因此副镜左上角相应的位置需要远离。



使用合焦差异法，主要观察的是极边缘位置的星点。可以通过重新构图来使你所要观察的边缘存在亮度合适的星点。

用以上原理和方法，可以把副镜对于焦平面姿态调整到非常精确。前提是你需要一段时间来掌握焦内 / 焦外星点的不同构型，能够分清究竟是远离还是靠近。比如作者的主镜的边缘成像，在焦外为环形，焦内为蘑菇形，很容易分辨。如果实在是分不清楚，你可以试着轻微改变调焦，就知道究竟是近还是远了。

合焦差异法如何精调主镜？其实很简单，假想你的副镜朝着镜口方向转动，则相机也跟随之往镜口方向移动，最终使副镜垂直于主镜光轴，相机则位于了主焦点位置。此时“拿去”副镜，则成为了一个主焦点摄影系统，将系统关系简单化。如果你发现照片左下星点明显为焦外构型，根据**倒像**原理，推导出主镜在相当于相机右上的方位需要向更加靠近焦平面。

如何决定调节主镜还是副镜？如果整幅照片出现明显的合焦差异对称性，比如左上焦外，右下焦内，那么此时应该调节主镜。如果合焦差异没有明显的对称性，那么需要尝试调节副镜。请注意副镜的调节程度需要及其轻微。

### 能量集中法

能量集中法的其实在粗调中有所涉及。能量集中法适用于使用较亮的星点放大观察。下面以主镜举例。

主镜所偏斜的方向，能量会更加集中。将各个边缘星点放大观看，它们的亮度集中方向应该是朝向光心。如果它们朝向光心的幅度不一样，那么就说明主镜的姿态不是很精确。这个过程是整个星点调整法里面最难的一个步骤，需要使用者拍摄多种亮度、位置的星点，掌握自己主镜的星点造型规律，才能准确的判断出能量集中的方向。并且，在后期软件中仔细分析星点亮度分布，效果会更好。

能量集中法一般应用于主镜调整，尤其是跟合焦差异法互为迭代，因为主镜姿态变化以后，之前的副镜结论就不做数了，需要再次使用合焦差异法精调副镜，然后循环。直到达到一个相对比较令你满意的结果为止。最理想的情况是，四个角落的星点造型完全呈中心对称分布。将左上星点旋转180度将完美合并到右下星点上。

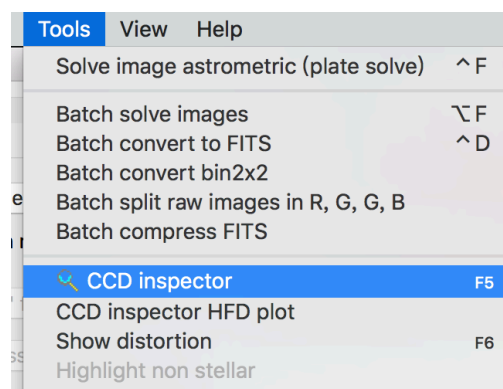
理论上精调的最终目的是四个角的星点调到完全对称。然而这并不容易实现。在实际操作中，笔者得到的结果一直是一个轴向上相对完美，而另一个轴向上却有着更大的像差。也就是说，左上星点转180度可以合并到右下。然而转90度却不能合并到右上。其中原理尚未查明，也许是主镜天生的精度所致，也许是相机传感器安装精度的问题，也许是什么其他的原因。

## 软件辅助

有一些软件是可以用于光轴/焦平面调整的。

这里我只介绍开源软件Astop: <http://www.hnsky.org/astap.htm>

Astop本是一个后期软件，不过里面带有了一个CCD inspector功能。



使用该功能可以检测照片的Median HFD (半宽中位数)，Tilt (偏斜) 和Curvature (照度)。这里对我们比较有用的主要是HFD和Tilt。这个功能虽然很简单，但是要注意以下规则：

1. 选取拍摄的目标最好是大面积的疏散星团，或者银河中心区域。原则是保证星点在整个画面的平均分布，这点非常重要。
2. 整体画面中不应该出现任何星云星系，行星彗星，和低星等的亮星，这会严重影响HFD的测定。
3. 以5等星不过曝（小于65535）来作为曝光适当的尺度。
4. HFD越小则表明对焦和光轴越精确。HFD较大的时候，Tilt会较低，这是因为合焦不精确所产生的一种错觉。所以借助此工具进行光轴调节，需要进行多轮迭代，不断调整光轴和对焦，直到HFD和Tilt同时达到最小值为止。
5. 在存在微小Shift的情况下（也就是说副镜深度有轻微偏差，这个可以通过拍摄平场，检查照度均匀性来确定），Tilt的优先级让位于HFD。此时可以容许Tilt的轻微放大而得到更好的HFD。因为在软件测算中，轻微的Shift会被算作Tilt，而HFD的测算不受Shift影响。

**三种精调方法各有优劣，如果能够综合应用，将获得更接近完美的效果！**

## 后记

小焦比牛顿式结构的光轴难点主要在于景深太浅，过于敏感。因此使用机械法无法达到足够的精确度。而星点法可以把光路上的所有干扰计算在内，甚至于相机CCD有偏斜也可以校准。也正是由于景深浅，所以在相机、滤镜的安装过程中也需要非常谨慎小心，往往一不注意就会造成焦平面的倾斜，甚至于镜筒刚性不足造成的影响也能都可能大过主副镜的姿态偏差。因此，仅仅是调好光轴还是不够的，需要在实际操作的每个步骤中都要小心谨慎，严格遵守流程，才能获得良好的效果。

另外在此分享一下笔者使用插孔式2寸接口旋转构图的经验。如何在保证焦平面尽量不变化的情况下旋转相机：轻轻松开锁紧螺丝，使之仍然保持一定阻力，**顺时针**匀速转动相机到你所需要的角度，然后锁紧。