

200 道布森反射式望远镜的设计与制作

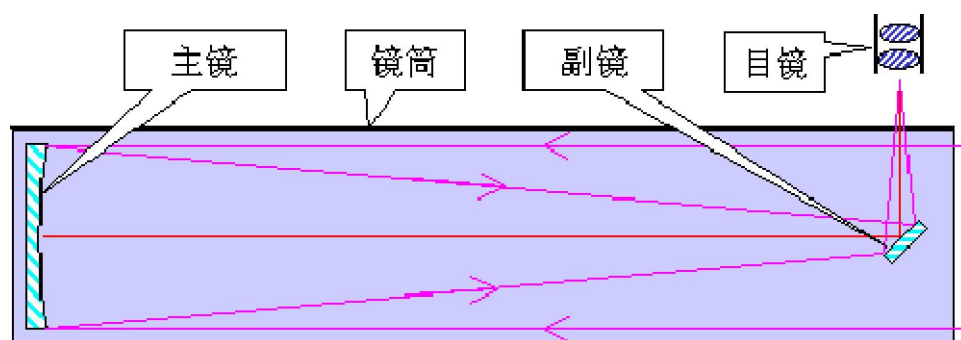
20CM 反射望远镜可以说是目视天文观测的一种标准配置，国内外很多知名的爱好者都拥有这种望远镜，他们用这种望远镜进行了许多卓有成效的观测。多年以前河南开封的张大庆先生就给我磨制了一块 200 抛物面反射镜（焦距 107CM），但由于种种原因我一直没能动手制作。

同好会的寇文也有同样口径和焦距的一面反射镜，他的望远镜已经快完工了。北京另一位天文同好何景阳先生还热情地帮我做了一个铝质镜筒，我想现在该是动手的时候了。

我计划 99 年上半年制作一个道布森式的反射望远镜，下半年逐步完善它，同时作为一种尝试，为它加装两个步进电机，实现计算机自动控制。

我将把我的每一个设想、每一步实践放在这个网页上，如果你有兴趣，可以与我分享制镜的快乐，如果你有更好的方法，欢迎与我联系。

现在我手头的主要配件如下：



- 抛物面反射镜（主镜）：焦距 1075mm，直径 198mm，厚 20mm
- 小平面反射镜（副镜）：短边直径 35mm，厚 12mm
- 铝质镜筒：内直径 229mm，长度 1000mm，壁厚 1.5mm
- 目镜：接口 31.7mm

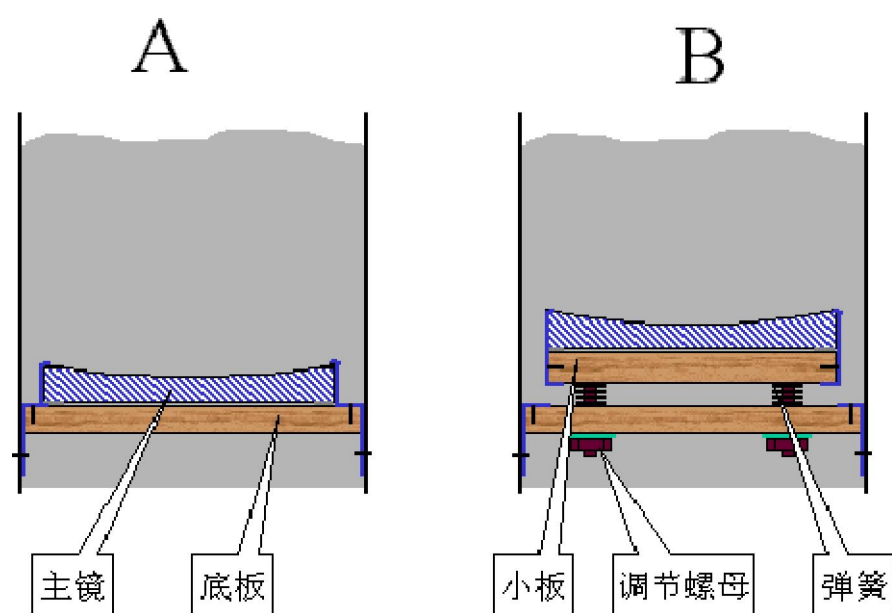
各种类型的牛顿式反射望远镜，其光学结构都是一样的（见上图），这里就不再罗嗦了。装配望远镜的镜身首先要解决三大问题：

- 物镜的安装
- 目镜调焦座的安装
- 副镜的安装

在牛顿式反射望远镜中，镜筒的内径一般比物镜直径大 20 ~ 30mm，以方便物镜的安装和调节；另外镜筒的长度一般至少应等于物镜的焦距长度，这样目镜开口离镜筒端面有一定距离，可以避免杂散光的干扰，而且主镜焦点伸出镜筒不会太长，否则除非副镜尺寸足够大，当用广角目镜观测时，视场边缘肯定会有光线损失。（然而我的物镜焦距和主镜筒长度并不能满足这个要求。改变物镜焦距显然是不可能的，而加长镜筒长度难度也很大，外观也不好看。所以设计时要着重考虑这个问题，必要时得在某方面作出牺牲。）

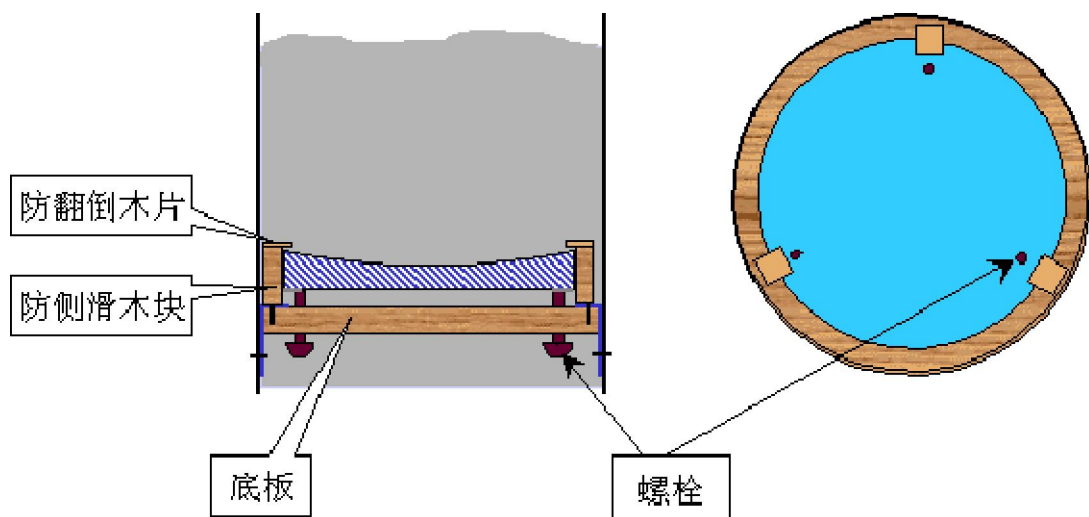
只有当主镜的光轴和目镜的光轴完全重合时，望远镜才能达到最好的成像效果。然而即使在家仔细调整好光轴，经过长时间使用或长途运输后，光轴仍可能会歪，所以装配镜身时，主镜的指向、副镜的位置和指向以及目镜的指向最好都是可以调节的。这一点在整个望远镜的设计和制作过程中不能忘记。

首先设计物镜座。《天文爱好者》杂志曾两次连载杨世杰先生的文章《怎样自制天文望远镜》，其中介绍了两种物镜的固定方法。第一种是最简单的方法（下图 A）：找一个与镜筒内径相同的木板（底板），先用三个金属片弯成的小钩将物镜固定在底板上，然后用三个角铁把底板固定在镜筒上即可。这种方法制作简单，镜片固定稳固，但物镜的指向调节很困难。对于强光力的望远镜，校准光轴是很重要而且时常需要做的事，所以这种方法不太合适。第二种方法（下图 B）首先将物镜固定在一个小板上，小板通过三个螺栓与底板相连，螺栓中间加上弹簧，通过调节底板背后的螺母可以很方便地调节物镜的方向。这种方法制作相对复杂些，但使用效果却非常好，也是现在国际上很流行并且使用最多的一种方法。



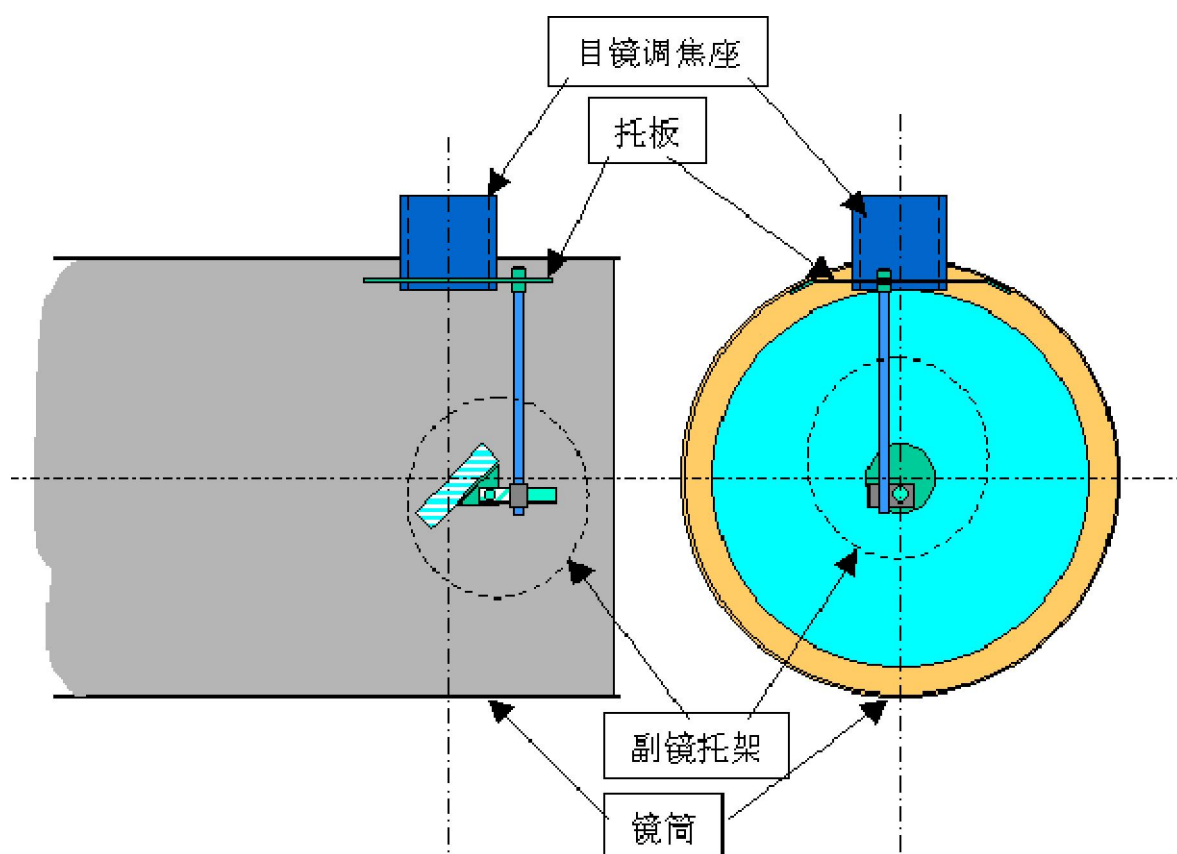
而随着物镜口径的增大，其重量也在增加，上述第二种方法中所用的螺栓和弹簧的强度必须增加，这最终会导致物镜座的重量随物镜口径的变大而急剧

增加。因此对于较大口径的物镜（我理解应是大于 30cm 的）又有了一种新的固定方法。这种方法使用一块底板，没有小板，没有弹簧，但底板上却保留三个螺栓，螺母嵌入底板中，物镜片是直接放在螺栓的三个顶点上的，调节螺栓可以调节物镜的指向（螺栓顶点要打磨光滑，与镜片之间要垫上薄的皮革，以防止划伤镜片）；为防止镜片滑动，要在底板上钉三个小木块挡在镜片边上，为防止运输时物镜片翻倒（正常观测时镜筒开口都是朝上的，物镜重量落在三个螺栓上，不会翻倒），三个小木块上还要各加一个木片，木片末端要超出物镜边缘 3、4 个毫米（见下图）。观测时，物镜片只与两个防侧滑木块接触，与三个防翻倒木片不接触，没有任何外力卡住物镜，因此物镜不会产生任何形变。

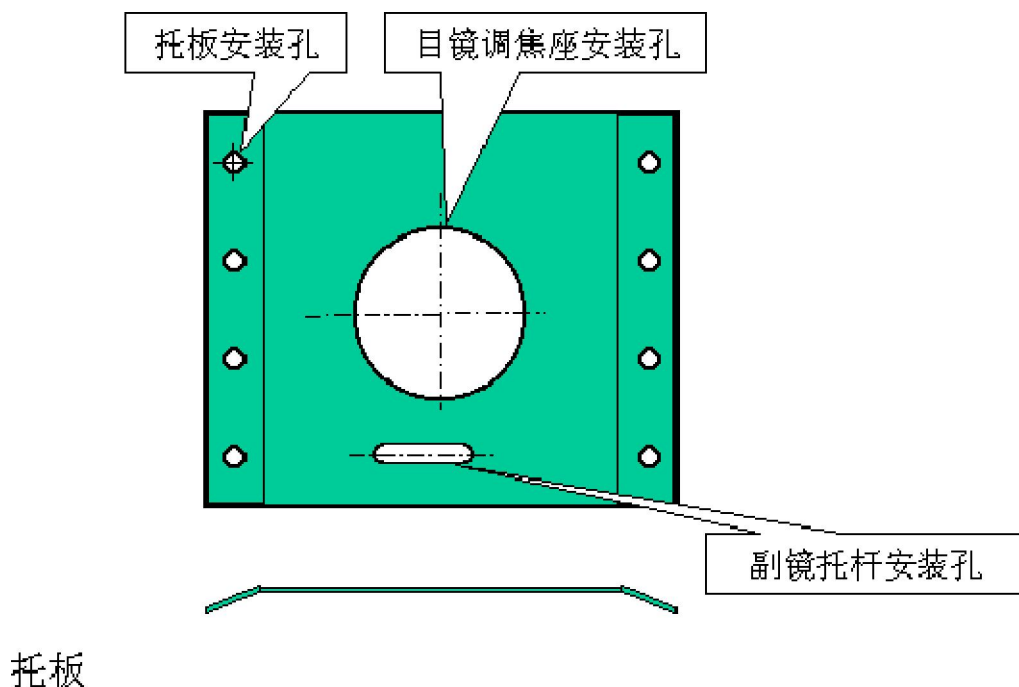


这第三种方法制作难度介于前两种方法之间，物镜变形最小，可运输时固定不太牢靠。只要解决物镜固定问题，这还是一种不错的方法。另外，由于我的镜筒比较短，这种方法可以省出 1~2cm 的空间，我决定采用这种设计。

目镜调焦座和副镜的安装设计方案已经完成，它们都是依附于固定在镜筒内壁的一块钢质托板上的，请参见下图，具体设计想法下次再谈。



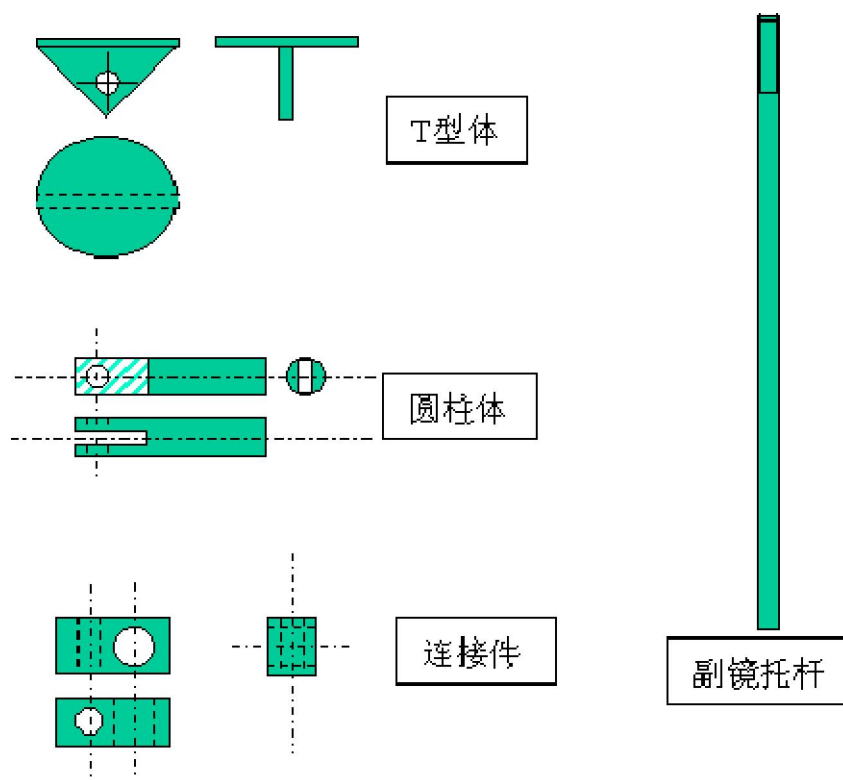
托板由一块 $120\text{mm}\times 100\text{mm}\times 2\text{mm}$ 的钢板制成（见下图），两侧折弯，各打四个安装孔，然后只要在镜筒上打上相应的孔，就可以将托板牢牢地固定在镜筒的内壁上。考虑到将来会接照相机，托板上会受较大的力，所以安装孔较多，所用材料也较厚。



有了托板，目镜调焦座的安装就容易多了。常用的方法是做一个法兰盘，一端用螺栓与托板连接，另一端接目镜。因为我手头有几个摄影用的 M42 螺口近摄接圈，所以我采用了更简单的方法，直接在托板中央挖一个直径 42.5mm 的孔，找一个比较短的接圈，将它的外螺纹一端从这个孔中穿过，与另一个长一些的接圈的内螺纹相接，拧紧后两个接圈便与托板紧密连接，再做一个 M42 螺纹到 31.7mm 目镜的转接口，便可以固定目镜了。

副镜的安装我采用了比较独特的设计，简单易做，固定牢靠，而且副镜的各个自由度都可调节。

副镜由副镜托架固定，如 2 月 8 日的图所示。副镜托架主要由四个零件组成，详见下图：



1. T 型体：由两个相互垂直的面构成，其椭圆面与副镜连接（可用胶粘或其他方法，注意不要让副镜受力太大而产生形变），另一面厚 3mm，钻 4 孔。可以用铝合金型材制成。
2. 圆柱体：直径 8mm，可用铝棍车制，一端铣一个 3mm 宽、15mm 深的槽，在与其垂直的方向上钻 4 孔。
3. 副镜托杆：用 6mm 钢棍制成，长度约大于镜筒半径，一端套扣（刚好能插入托板上的副镜托杆安装孔）。
4. 连接件：用长方体铝块制成，在相互垂直的方向上钻两个孔，一个 8mm，另一个 6mm，用以将圆柱体和副镜托杆连接。为保证连接牢固，要在每个孔旁边打孔攻丝，安装紧固螺丝。

装配方法如下：T 型体的一面插入圆柱体的槽中，用一个 M3 螺栓连接 T

型体和圆柱体。将圆柱体和副镜托杆用连接件连接，副镜托杆的攻丝的一端用两个螺母固定在托板的副镜托杆安装孔中。

副镜托杆安装孔实际上不是孔而是槽，副镜托杆可以左右移动；连接件可以沿着副镜托杆上下滑动；圆柱体可以在连接件的孔中前后移动，左右转动；副镜可以绕圆柱体的螺栓转动以调节仰角。副镜指向的方便调节为以后光轴的精确调整打下了扎实的基础。

镜筒设计完成，马上开始动手制作。

首先将托板和副镜托架（除 T 型体）的图纸送给作机加工的师傅，几天后取到货。T 型体可以自己制作：锯两截角铝（可以从铝合金型材上锯下，与角铁一样，它具有两个相互垂直的面），将它们的楞边对齐，另一面用环氧树脂紧密粘合，胶干后用钢锉锉成所需的形状，然后用手电钻打眼，T 型体就做好了。为了将副镜固定在 T 型体的椭圆面上，通常用的方法是先在 T 型体上固定一块长方形薄铁皮，薄铁皮的四个角弯上来就可以紧紧钩住副镜。而我的副镜厚度很厚，超过其短边直径的 $1/3$ ，不会产生形变的问题，所以我干脆在副镜的背后呈品字形涂上三小块环氧树脂，然后直接将它与 T 型体粘在一起了。

安装托板的工作主要就是打孔。首先根据物镜焦距和焦平面伸出镜筒的距离可以确定托板的位置，然后在镜筒上作好记号，用手电钻打 8 个孔。因为目镜调焦座一端固定在托板上，另一端要穿过镜筒，所以镜筒上要打一个大孔。这个孔也可以用手电钻完成：先在镜筒上画好孔的边界线，选用较细的钻头（2mm），沿着线打一排孔（孔间距约 1mm），然后用小的什锦锉将这些小孔

锉通，大孔就完成了。

用 8 副螺栓将托板固定在镜筒内壁，安装上目镜调焦座和副镜托杆，然后用螺丝将连接体、圆柱体等零件安装并固定好，一切都是按照原设计进行，非常顺利。

在制作物镜座时，遇到了一些困难。底板是一个圆板，本打算找 10 ~ 12mm 厚的木板用机器加工出来，但我最终只找到了 8mm 厚的胶合板，一时也没找到木工，我就自己在板上划好线，然后用钢锯锯出了这个圆板，不圆的地方最后用木锉修理修理，效果居然还挺好。连接镜筒和底板的角铁必须牢固，我选用了 2.5mm 厚的角铁，每边各钻了两个孔。因我的底板较薄，所以选用了螺栓将角铁和底板连接（其强度比直接用木螺钉要大得多）。我买了三个 M5 的螺栓安装在底板上用来调节物镜的方向，本打算将螺母嵌入底板，但这样制作难度大，螺丝也容易松动。我最后在底板上钻了三个直径略小于螺丝直径的孔，将螺丝直接旋入，借助木头的弹性和张力，可以将螺丝紧固，不会松动，同时借助改锥（起子）也可方便地对其进行调节。在原设计中，防翻倒木片是固定在防侧滑木块的顶端的，这样防侧滑木块的高度至少要比镜片厚度大 1 厘米（达到 3 厘米），而它的厚度却受底板和物镜相对大小的限制只能略大于 1 厘米，其强度十分有限，将来物镜的安全要大打折扣。最后我更改了设计，防侧滑木块的高度减小到 1.5 厘米，我另外找了三个 2 厘米宽、0.7mm 厚的铝片，一端钻孔，借助固定角铁的螺栓固定在底板上，另一端折弯，与物镜侧面平行，在安装完物镜后将铝片的末端再多折过来一些，这样，平时物镜与铝片不接触，当物镜要翻倒时就会被铝片钩住。为防止划伤镜片和产生杂散光，铝片最后包

上了一层黑色的电工胶布。

通过角铁将物镜座固定在镜筒底端后，镜筒部分就基本完工了，下一步是制作道布森支架。没有支架望远镜用起来十分不便，但好的支架制作起来有很麻烦，于是我决定先做一个简单的支架。

虽然简单，可这还是标准的道布森结构。首先给镜筒装两个“耳朵”：车两个 10 厘米直径 1 厘米厚度的圆饼（材料可以是铝或塑料），找 7 厘米宽的那种铝合金型材锯下长 12 厘米（略大于圆饼的直径）的一段，从其短边对剖开，铝板两侧面的高度留 5mm，其余锯掉。在镜筒重心部位两面对称的地方沿镜筒轴线方向各钻两个孔，孔距 8 厘米。沿圆饼直径和铝板中心线也各钻两个相距 8 厘米的孔，用螺栓依次穿过圆饼、铝块和镜筒，拧紧后两个“耳朵”就安装好了。

有了耳朵，下一步是做镜架。我将家中的一个旧方凳作了改造，去了一边的撑子，另两面加上木条锯出 V 型槽，镜筒的两各“耳朵”刚好能放在 V 型槽中。这样，简单的道布森支架就完成了，虽然简陋，但现在用起镜子来方便多了，以后有时间再做一个好的支架。

除了镜筒内壁的无光处理，望远镜已大体完工了。我调整了副镜和物镜的方向，当从目镜方向看过去，在副镜中物镜的像和副镜的二次像没有严重偏离圆心时，就认为光轴已经初步调整完成了。天一黑我迫不及待地将望远镜搬到阳台上，终于在目镜中找到一颗星。我开始调焦，期待着衍射环的出现，可令我奇怪的是，星像不但没有出现衍射环，甚至不能汇聚成一点，总是一团“小棉

花”，亮星、暗星都是如此，对准月亮，更是模糊一片，什么细节都看不清。

怎么回事，物镜质量有问题？副镜变形？……

大失所望！

几天后又是晴天，我一下班就把望远镜拿到阳台上，我想到了望远镜内外温差导致的镜筒内空气的流动可能会影响像质。晚饭后再去看，呀！果然不一样了！暗星已基本可以调成点状，亮星会带一朵小小的花，但也基本可以接受。我发现散焦后星像不是呈圆形，而是呈扇形，这下我心里就更有底了，目前光轴还没调整好，这架望远镜还大有潜力呢！

1999-3-29

经过几个月的不懈努力，终于掌握了牛顿镜的光轴调整方法，[具体内容见此。](#)

现在望远镜已经全部完工，我对它非常满意。在光轴调好、大气稳定度很好的时候，我用 200 倍放大率，可以清楚看到土星的卡西尼环缝，木星的大红斑自然不在话下，连云带上卷曲的形状也能看出来。有机会带出去看深空天体，效果一定不错。

牛顿式反射望远镜光轴的校准

很多爱好者在使用反射式望远镜，特别是近年来越来越多的爱好者开始使用大口径、短焦距的抛物面牛顿式反射望远镜。说到望远镜的光学质量，人们比较关心的是主镜的口径及表面精度，而对于是否将反射镜的整个光学系统调整到最佳状态，似乎并没有给予足够的重视。我根据最近的一些实践经验，参考了网上的一些相关文章，把自己的体会写成此文。

反射望远镜光轴校准的重要性：

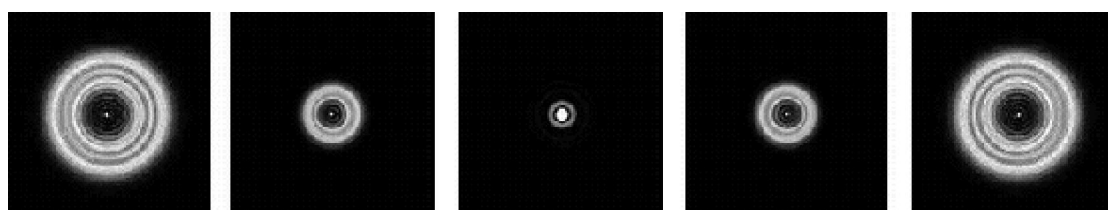
如果你拥有了一架反射望远镜，并且主镜是抛物面的，当你满怀希望投入观测，却发现像质平平，甚至恒星都不能聚成一个点，这个时候先别急着换镜子，你拥有的可能是一架很不错的望远镜，问题仅仅出在镜片装配上，经过对光轴的重新调整，望远镜里展现出的可能是完全不同的景象。

抛物面反射镜的成像有个特点，在光轴上成像很完美，没有像差，但离开光轴就会有明显的彗差（星点带了小尾巴）。在光轴上，使用一般视场的目镜，视场中心的星点是很锐利的，实际上视场边缘的像差也不易察觉。而如果在光轴外，整个视场中的星点可能都不实，而且离光轴越远这一点越严重。

怎样才算调好光轴了？

反射镜的光学系统中有两个光轴：主镜（物镜）光轴平行于主镜筒的轴线，经过副镜（小平面镜）；目镜光轴垂直于主镜筒轴线，也经过副镜。当两个光轴都经过副镜上的同一点，且被副镜反射后二者完全重合，也就是成了一个光轴，那么光轴就算调好了。

在缺乏检验手段时，可以通过实际观测来判断光轴是否调好。找一个大气宁静度较好的晴夜，用望远镜的最高倍率（用毫米表示的主镜的直径数）看一颗恒星（如果没有赤道仪则可以看北极星）。把星点放在目镜视场中心（以减少目镜带来的像差），仔细调整焦距，从焦点外调到焦点，然后调到焦点内。如果光轴调整没有问题，可以看到如下图所示的从左到右一系列图象（图中的圆环是光的衍射引起的，散焦后实际上还会看到副镜及其支架的影子，图中没有画出）。



在焦点上星像是否凝结得很实、很细、很锐利，散焦后衍射环是否是同心圆，这些都反映了望远镜的像质。如果散焦后可以看到几圈衍射环，但不象上图中那样完美，四周均匀地带有一些“毛刺”，这说明反射镜面的精度稍差，但光轴调整的还是好的。如果散焦后星点变成了一个小的扇形，而且在目镜视场中移动星象，扇形的发散方向不变，这说明望远镜的光轴需要调整了。

光轴调整步骤及辅助工具

光轴调整可按如下步骤进行：

调节目镜调焦筒使之垂直于主镜筒轴线

调节副镜使之位于主镜筒轴线上

调节副镜使之位于目镜调焦筒正下方

调节副镜指向，使目镜光轴经副镜反射后指向主镜中心

调节主镜指向，使其光轴与目镜光轴重合

以上只是调光轴的大致方法，具体操作的过程中会有一些问题，有时很难控制精确度。这里首先介绍几个辅助工具：

带双十字线的窥管：

管的外直径同目镜接口直径，管的一端加盖，盖的正中心挖 2mm 直径的圆孔，管的另一端用白色棉线对称地拉上双十字线，两线间距 3 ~ 4mm。管长用如下方法确定：从目镜调焦筒中放入窥管（窥孔在外），窥孔一端与目镜调焦筒外端口平齐，双十字线一端距副镜 20 ~ 30mm。

做窥管的材料不限（如果你使用的是 31.7mm 目镜接口，可以考虑用柯达胶卷的黑色包装盒来做窥管），关键是插入目镜调焦筒后要稳固，不能晃动太大。双十字线要拉正，相交处的小正方形与窥孔的连线应该是目镜调焦筒的轴线。

主镜中心定位点

剪一片直径 5mm 的黑纸，用两面胶准确地粘在物镜的正中心。（因为主镜的中心区域并不参与成像，所以这个黑点不会有负面影响）

主镜筒开口处十字线

在主镜筒开口处用粗线拉十字线，要求两线相互垂直，交点过主镜筒轴线。（在主镜筒开口处拉上十字线可能会影响对副镜的操作，所以最好标记出十字线与镜筒的四个交点的位置，觉得十字线碍事时可以先把它拆下来，必要时再重新拉上。）

这三个工具制作并不复杂，但你很快会发现它们很有用。借助它们，现在我们可以开始一步一步地调整望远镜光轴了。

预调主镜指向

取下副镜，调节主镜后面的螺栓，直到从镜筒开口前看过去，十字线交点、物镜中

心黑点、十字线交点在物镜中所成的像三者成一条直线时，表明主镜指向基本正确。（下面专门有的一步是调主镜的，预先加这一步操作可以使下面的操作更容易。）

调节目镜调焦筒使之垂直于主镜筒

将窥管装入目镜调焦筒中，从窥孔中观察，可以看到从窥孔到双十字线的连线（实际就是目镜调焦筒轴线）再延长，会与主镜筒壁交于某一点，标记出这一点，用尺子测量其位置，再参考目镜调焦筒在镜筒的位置，我们就可以判断出目镜调焦筒是否与主镜筒垂直。

调节副镜使之位于主镜筒轴线上

取下窥管，装上副镜，大致调节副镜指向，使眼睛从目镜调焦筒中可以看到经副镜反射所成的主镜的像，同时也应该可以看到副镜和十字线经两次反射后所成的像。从这些像中我们可以看出副镜和十字线的相对位置，如果副镜的圆心和十字线交点重合，说明副镜位于主镜筒轴线上，否则就需要做相应的调节。

调节副镜使之位于目镜调焦筒正下方

从目镜调焦筒方向看进去，副镜显然已经位于调焦筒的下方，但经过这样看精度无法保证。此时，装入窥管，眼睛从窥孔看到的，最外圈是窥管的内壁（双十字线现在不起作用，可以不管），中间是副镜。副镜的外圆轮廓和窥管的内壁轮廓如果是同心圆，说明满足要求，否则要在主镜轴线方向调节副镜。（如果因窥孔太小、光线太暗而看不清楚，可以在窥管正对的主镜筒壁垫上一张白纸，如果窥管太细，看不到副镜的外圆轮廓，可以把窥管往外抽或缩短其长度。）

调节副镜指向，使目镜光轴经副镜反射后指向主镜中心

在上一步的基础上，一面用眼睛从窥孔中观察，一面调节副镜指向，直到主镜在副镜中所成的像的外圆轮廓、副镜的外圆轮廓二者同心。

调节主镜指向，使其光轴与目镜光轴重合

用手电筒照亮窥管的双十字线，眼睛从窥孔看进去，可以看到双十字线、主镜的中心点所成的像以及双十字线经两次反射所成的像。调节主镜背后的螺栓，使上述三者同心。

至此，反射镜光轴调节完毕。下面给出从窥孔中所能看到的图象，以供参考。

上述各个调节步骤中，根据副镜支架的不同设计，下一步操作会对前一步的结果带来或多或少的影响，所以必要时可以返回前面的操作，可能要有几次反复，最后才能得到满意的结果。第一次调节会费一些工夫，一旦调好后，只要副镜支架稳固，以后的工作就轻松得多，即使为了运输而将主镜重装，一般只需调节主镜后的螺栓就行了，借助于窥管，可以很快将望远镜调整至最佳状态。

补充说明

一般认为光轴与副镜的交点在副镜的中心。在长焦距的望远镜中可以认为如此，但在大口径、短焦距的牛顿式反射望远镜中，副镜的尺寸也较大，副镜长边的两端到目镜的距离已经不能再近似认为是一样的了