

天文爱好者望远镜制作

杨世杰

望远镜的发明延长了天文学家的视线。通过望远镜收集到的星光将比肉眼的要增加成千上万倍，甚至百万倍。天文学家像“淘金者”一样渴望从收集到的“光的矿砂”中提炼出他们所需要的信息。每一个天文爱好者当然也希望亲自通过望远镜来开阔一下自己的眼界。遗憾的是他们能到天文台通过天文学家专用的望远镜来进行观测的机会实在是太难得了，而买一架“像样”的现成望远镜往往又是力所不及。因此不少有志者就萌发出自己动手制造望远镜的念头。确实有不少天文爱好者在艰苦地从事着这样的工作，而且制造出了不少具有极好光学质量和结构别致的望远镜。这是因为他们有热忱和毅力，不因一时挫折而放弃新的努力。他们认为，成功的喜悦和从中学到各种知识是比什么都值得自豪的报酬。

为了少走弯路，增加成功的把握，爱好者应事先对不同型式的望远镜作一番了解，然后确定制作计划是十分必要的。根据望远镜采用的物镜（即用来聚集星光的那块直径较大的镜头）形式可分成折射式和反射式两大类（图 1），另外还包括二者结合的折返射式作为第三类。在折射式望远镜里用透镜作为物镜，光线需要在物镜中透过，所以必须要用透明度好，内部均匀的光学玻璃来制造。即使最简单的消色差物镜也至少要用二块不同光学性质的透镜组合而成。这种物镜共有 4 个表面需要加工，而且透镜的材料、表面的曲度、表面间的厚度和同心度都有严格的要求。这些对于既缺乏材料来源，又无成套设备的爱好者来说是比较困难的。

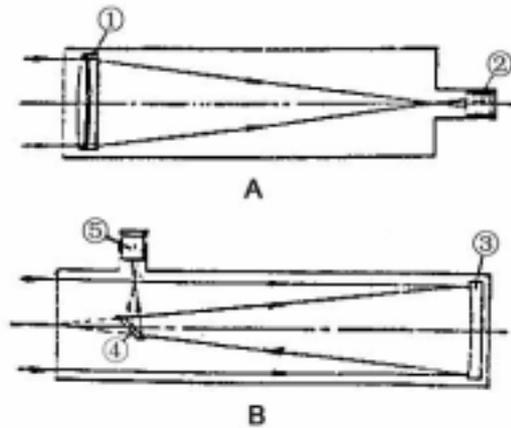


图 1 A 折射式望远镜 消色差物镜 目镜
B 反射式望远镜 凹面主镜 小平面镜 目镜

反射望远镜的物镜（有时也称主镜）是用凹的反射镜，光线只是在表面上反射而不需要透视镜面内部，所以制作镜面的材料对光学性能没有什么要求。它可以采用一般的平板玻璃，只要没有太多会被磨穿的气泡，即使透明度不好或有明显颜色的都无妨。反射镜本身是完全消色的，只有一个表面需要精确加工，它的曲率半径和原定的有些出入仅影响其焦距而不会影响到成像的清晰度。为了镜面有高的反射能力，必须用真空镀铝或化学镀银的方法在表面加上一层反射膜。反射膜层比较娇气，容易损坏，这是反射式望远镜的一个最主要缺点。但是只要小心使用和保养，镀铝的镜面通常可以使用三年到五年。即使有了污损之后，还可以请有条件的光学仪器厂把旧膜层退除后重新镀上新的反射膜，丝毫也不会改变原来的成像质量。总之，制作反射式望远镜要比折射式的容易取得好的效果，这就是大多数天文爱好者制作的望远镜都是反射式的缘故。

望远镜的口径越大,它的集光能力就越大,只要条件允许,自然应该将口径做得大一些。不过考虑到在采用手工磨制的情况下,镜面口径的大小要受到一定限制,口径过大,在磨制时,人的体力消耗也大。而口径太小,则又掌握不稳,这些都不便于操作和保证质量。经验表明,最合适徒手磨制的镜面口径是 10 到 20 厘米左右。另一方面望远镜的镜筒长度直接决定于物镜的焦距。牛顿式反射望远镜的目镜是位于镜筒上部的一则。如果我们希望观测时不使用梯子或凳子,就要求镜筒指向天顶时,目镜的位置不要超过观测者眼睛的高度。所以主镜的焦距不应超过 2 米。从几何学原理上来说,能将平行光精确汇聚到一点的镜面形状应是抛物面,而研磨形成的曲面都会自然地趋向球面(其中也包括平面)。只有当镜面的焦比(即口径与焦距之比)很小的时候,抛物面才和球面相接近,而且两者的差值还随口径增加。如口径 10 厘米,焦距 80 厘米(焦比 1 : 8)的凹球面镜可以直接作为物镜使用,而口径 20 厘米的镜面必须把焦距做到 180 厘米(焦比 1 : 9)以上才能使用,如果我们追求更大的口径,那就要做好修改抛物面的思想准备,或者把焦距做得更长,并配上很长的镜筒。

最后,有一点必须记住:一架口径稍小,但成像优良的望远镜往往比一架口径更大而成像质量差的望远镜能更有效地进行观测。所以在确定制作计划时不要过分追求大的口径,而应该从物质条件、使用条件综合考虑,特别是在质量的保证方面多下功夫,才能取得更好的实际效益。

从上边的情况出发,我们将以制造一架口径 15 厘米,焦距 150 厘米的牛顿式反射望远镜作为目标(图 2)。每个制作者还应根据自己的具体条件在尺寸上给予加大或缩小。

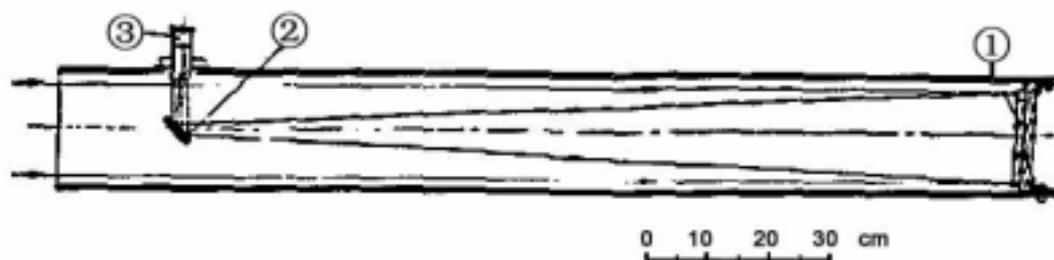


图 2 15cm 牛顿式反射望远镜
主镜 小平面镜 目镜

口径 150 毫米的镜坯需要厚度约为 20 毫米左右。在工业玻璃店里可以买到这种规格的硬质玻璃圆板。不过在我们的情况下凹面中心深度仅 1 毫米不到一些,可以使用厚度约 10 毫米的平板玻璃割成圆板。只是在磨制和装夹时不要让它受到过大的外加力,以免产生变形影响面形的精度。玻璃坯料一共需要二块,其中气泡和条纹较少的用作主镜,另一块稍差的作为研磨工具用。

镜面的加工过程分为粗磨、细磨和抛光三个阶段。粗磨的目的是把镜坯的表面磨成所要求曲率半径的凹面。为提高效率应选用硬度高、磨削速度快的磨料,如绿色或黑色碳化硅砂。细磨则主要为去掉上一阶段粗砂留下的砂痕,同时使面形的精度提高,所以希望用速度稍慢一些但留下来的砂痕浅一些的磨料,如刚玉砂。细磨结束时的镜面呈半透明状的毛面。还不能直接反射光线。只有在覆盖有抛光柏油的工具上使用抛光液才能将毛面抛光。抛光粉目前主要有氧化铁红粉和氧化铈抛光粉二种。前者抛光速度稍慢,容易使接触的物件染上红色,但它抛光后的表面光洁度好,价格较低;后者抛光速度较快,颜色较浅,但价格较高。抛光柏油和抛光粉最好能向光学仪器厂或眼镜加工厂家购买,而且要保持纯净,千万不要混杂有其他磨料,不然会影响表面的光洁度。下表列出了磨制口径 150 毫米镜面所需要的磨料规格、品种和数量。

附表： 加工 15 厘米反射镜所需磨料

品种、规格	成分	数量(克)
80# ~ 100# 砂	绿色或黑色碳化硅	250
180# ~ 200# 砂	黑色碳化硅	100
280# 砂	刚玉砂	100
303# 或 W20	刚玉微粉	50
抛光粉	氧化铁或氧化铈	100
抛光柏油		500

磨制镜面的工作地点要选择便于打扫和保持清洁的场所,不要在温度变化剧烈以及有风和气流的地方。若有条件最好做一个木制的专用工作台(图 3)。它的下面可以压些重物使其稳固。台面的最佳高度应是手臂向下伸直时的掌面再高出 20 厘米左右。若太低就要弯腰工作,容易疲劳,太高则不便在粗磨时施加压力。如果用合适的现成家俱代替专用工作台,那么一定要在上面另加一块木板,以防止水和磨料损坏家俱表面。

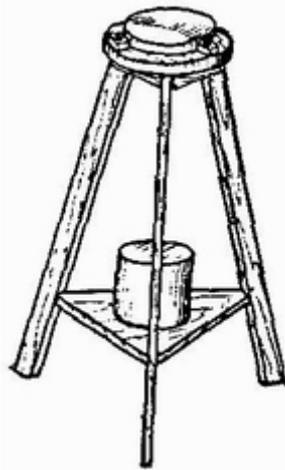


图 3 木制工作台

其他还需要准备擦洗面镜用的水盆、纱布、涂刷磨料和抛光液用的小油漆刷、毛笔、检查镜面用小放大镜、手电筒等用品。还有一些必需的专门装备将在以后的文章再作说明。

反射式望远镜中凹面反射物镜的加工质量好坏直接关系到望远镜的性能,所以我们将大部份的精力放在主镜的磨制加工上。我们计划的主镜口径 150 毫米、焦距 1800 毫米,凹面的曲率半径是焦距的 2 倍,即 3600 毫米,其外形尺寸如图 4。

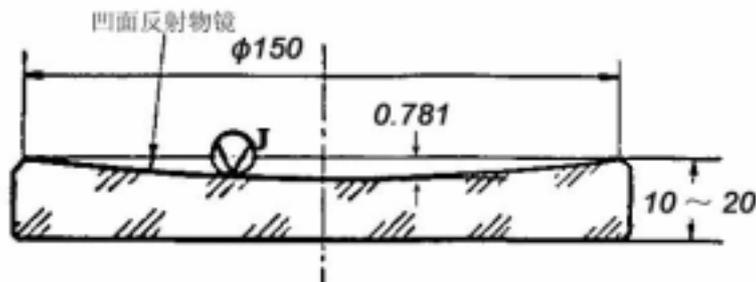


图 4

镜面研磨工作的第一步是用粗砂将平板玻璃面磨成所要求的曲度。这时无法用光学方法测定其焦距或曲率半径，只有通过测量镜面中心凹下的深度来控制曲度。如果镜面的半径是 y ，焦距是 f ，则镜面中的深度 h 可由公式：

$$h = y^2/4f$$

求得。对于我们的情况 $h = 75^2/(4 \times 1800) = 0.781$ (毫米)。

研磨时，把作为工具的那块玻璃固定在工作台面上，上面加上砂和水后，将镜面放在上面用手推动进行研磨（图 5）。整个的研磨动作由三种运动组合而成：

(1) 镜面在工具上来回磨动。这是产生磨削和形成曲度的主要运动，其速度大约是每分钟 60 次左右。(2) 研磨者绕着工作台慢慢地走动，使磨削和曲度在工具上均匀分布。大约一分钟回绕一周。如受工作条件限制，不能回绕走动，也可以经常转动工具位置来代替。(3) 让镜面在手中慢慢地转动，使镜面上各处也受到均匀的磨削。速度大致为每分钟一周。这些速度只要大致地保持，并不得要精确严格。关键是要镜面上施加均匀的压力，使镜面和工具在磨动时很好地贴合，动作要自然。



图 5

镜面在工具上来回磨动的距离（如图 6 中的 AA'）称为动程。在正常情况下约为镜面直径的 1/3 左右。这时研磨进行比较均匀，曲度的变化较慢。为了把镜面磨出曲度，就要使镜面中心的磨动速度加快。这可以采取下面两种研磨方法（图 6）：(1) 加长来回磨动的距离，如把动程增大到接近镜面的半径。(2) 使镜面的中心偏离工具的直径，即沿着工具的某一弦的方向来回磨动。后一种方法中心加深的速度较快，但形状不如前一种规则、均匀。所以磨到一定程度就更改用前一种方法继续研磨，并逐渐将动程缩短到正常的 1/3 口径的动程，使面形均匀。通常曲度不大的镜面可以直接用第一种方法磨出曲面。

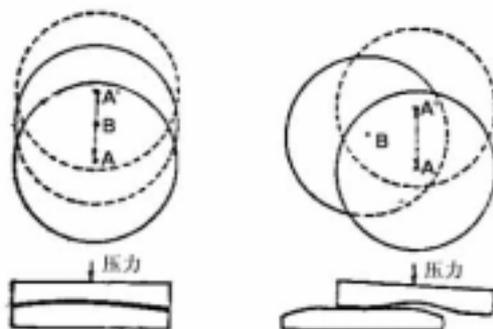


图 6

每次加砂量以能在工具上布满一层，加水量以能润湿加工面而磨动时不感到稠粘为宜。如果加的砂过多，砂粒本身互相挤磨，且多余的砂很快被挤出到工具外面，得不到充分利用

造成浪费。刚加上的砂磨起来声音响亮，磨削效率高。随着时间的增加，响声逐渐变弱，最后变成微弱的“沙沙、吸吸”声。砂浆又稠又粘，表示磨削力已降低了。这时需要将磨细的砂和玻璃粉末抹去，加上一份新的砂和水再继续工作。

倘若我们手头能有球径仪(图7)，可以直接测出球径仪三条腿所包含曲面的矢高 h ，然后根据公式： $f=y^2/4h$ ，计算得到镜面的焦距及曲率半径，与前面公式不同的是这里的 y 是球径仪的三条腿距中心测微螺旋的距离。对于不具备球径仪的爱好者可以采用曲率样板来检查曲度。当然精度稍低一些。图8说明了用卡纸制作样板和其使用方法。

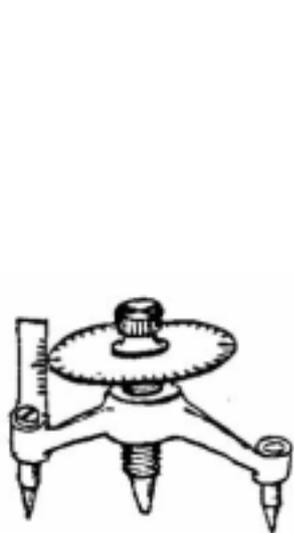


图 7

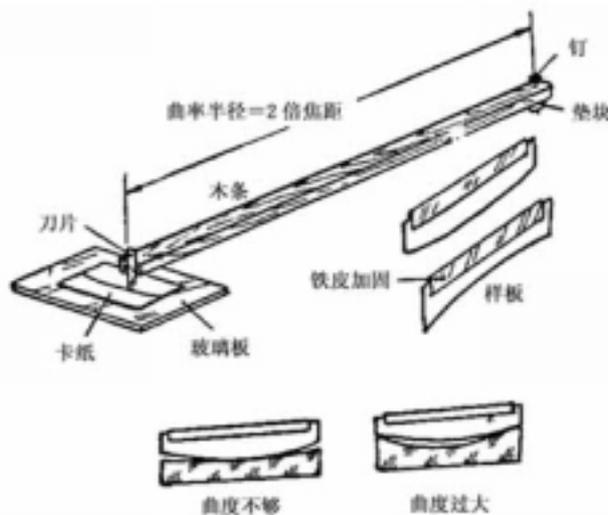


图 8

由于在细磨过程中镜面的曲度还会继续增加，所以粗磨结束时曲度应比要求的稍浅一些。倘若掌握不当，镜面的曲度过头了，纠正并不困难。只要把镜面和工具的位置对换一下。用前述同样的方法研磨一段时间，曲度就会向相反方向发展。直至略过一点，调换二者的位置再磨上一段时间才能结束。这是因为凸面放在下面不容易磨得很规则。

细磨的任务是把粗砂留下的砂痕去除，使表面变细并提高面形的精度，它并不要求过多地加深镜面的曲度。所以细磨应采用镜面直径 $1/3$ 的动程。切忌使用过长的或偏心的动程。一般细磨至少要用200#、280#、303#(w20)等几种砂，逐步提高表面的细度。随着磨料的变细，加砂量也要适当减少。在前一道砂结束后一道砂开始之前，应特别注意清洁工作。工件和各种用具都要彻底清洗干净，铺垫用的纸和塑料膜最好换用新的。也不要忘记将自己身上弄干净，不要隐藏有粗砂粒。最好在在工作中养成尽量不让砂粒到处扩散的习惯。否则靠一次打扫是很难保证彻底的。细磨中混入了粗砂粒就会在镜面上留下难看的划痕。不深的划痕可以用本道砂延长一些时间将它磨掉，不幸遇上深的划痕那就只好用较粗的砂返工重磨了。

检查前几道砂留下的砂痕是否已被磨去时，要把镜面对向光源，如窗户、电灯等。在细磨开始不久可以看到有较多剩留的粗砂痕，在适当角度下它们会闪闪发亮。如果用一个5至10倍的放大镜观测就可以看得更清楚了。记录下个别最大砂痕的所在位置，利用它们作为细磨进程的指示标记。只要它们都被磨去了，就说明本道砂的研磨可以结束了。

在细磨中还必须经常检查镜面的曲度和面形的均匀性。当用280#砂研磨后表面已经比较平滑，可以用更直接的方法来检查曲率半径和焦距，办法是在洗净的镜面上浇上一些清水，将它竖放在一个木制的镜架上，使多余的水自然淌下，使在镜面上留下一层均匀的水膜，

这时镜面就能反射光线了。用一个小电珠照亮镜面，同时借助一块毛玻璃捕捉从镜面反射回来的光束。移动光源使反射光束移到紧靠小电珠的旁边。再将小电珠和毛玻璃一起前后

移动找到光束聚集最小的位置。这时从镜面到毛玻璃和光源的距离就是镜面的曲率半径或是二倍焦距（图9）。

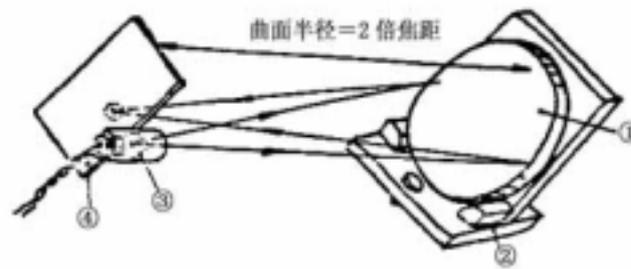


图9

检查镜面形状均匀性的方法是在洗净、干燥的镜面和工具上用铅笔划上数条线段，然后将它们合起来研磨几下（注意！不要夹砂粒，否则会引起划道）。如果所有线条都被擦到，说明镜面和工具符合得很好，球面也是精确的。如果留有未被擦到的线条，则说明该处符合不好。最常遇到的面形偏离球面的情况如图10所示。这是由于动程过长，加砂量过多等原因引起的。在细磨开始时有少许偏差是可以容忍的，但到快结束时应尽量使面形符合得好些，不然用下一道更细的砂来消除这些误差将花费更多的时间。



图10

镜面的最后细磨至少需要用 303 # 砂来结束，而且，最后一次加砂后要加长一些研磨时间，使表面能磨得更细些，如果能增加一道 303½ (W14) 或 304 # (W10) 砂细磨一遍，那就可以大大缩短抛光的时间。

细磨完的表面仍是毛面，不能反射直射的光线。但是当光线以很小的角度掠射到毛面上时就能出现反射，特别是波长较长的红光。当我们将镜面放在光源与眼睛之间的合适位置上（如图11中1），稍摆动镜面就容易地看到反射的灯丝像。慢慢降低镜面的位置，反射的灯丝像就逐渐变红变暗，最后反射能力消失。镜面越细开始出现反射的角度 ϕ 就越大。一般 ϕ 在 20~30。左右能反射就说明表面已经磨得足够细了。如果出现一部分能反射而另一部分还不能反射的现象，则表明镜面上的细度不均匀。

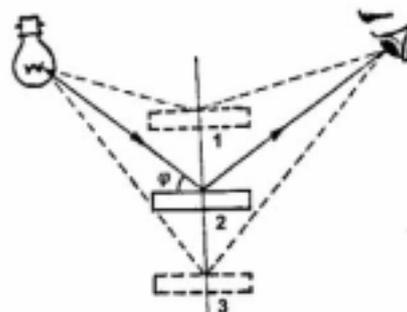


图11

通常，镜面的边缘部分比中央部分粗糙一些。这时要采取把工具外围堆积的砂清理掉，每研磨一段时间把镜面取下来将砂重新布匀后，再继续研磨并适当延长加砂的时间等措施来加以改善。细磨完的镜面呈半透明状，通过它可以看见明亮的景物，把它正面向上放在书报上面，可以清楚地阅读镜面下面的文字。这时我们要进行一次更彻底的清洁工作，准备迎接难度更大的抛光工作。

细磨完的镜面须用覆盖有一层抛光柏油的工具作抛光后，才能最后成为光洁无暇、形状极其精确的光学镜面。这种抛光柏油是柏油(或称沥青)和松香的混合物，其软硬程度要合适。通常可用指甲在抛光柏油表面按压片刻来检定，以压后刚能出现指甲痕为合适。如果压后不留痕迹，说明硬度太大；如果很容易陷进去，则是太软了。对于硬度不合适的柏油可以放在罐内慢慢熔化后，滴入几滴机油或加入几块松香充分搅匀，来降低或增加它的硬度。自行配制抛光柏油时，必须用剔除杂质的干净原料，不过最好还是向光学仪器厂购买现成配好的抛光柏油。

图12表明制作抛光工具的过程。先把抛光柏油包在干净的牛皮纸内，用槌或木块把它敲成碎块，然后把细磨用过的工具玻璃均匀缓慢地加热(最好使用电炉或红外灯烘烤，便于控制)，务必防止局部过热而炸裂。直到摸上去感到烫手时，将碎柏油堆放在工具上面。放的数量应使它能够足够在工具上形成约5毫米厚的一层。让柏油逐渐升温软化粘到工具表面，并用手按压摊开(如图1, a)。如果温度下降可以继续加热烘烤，直到均匀软化无硬块时，将柏油摊成中间稍厚，四周稍薄，最外边缘可以空出一些。然后把工具固定到工作台上，立即用已在热水中浸热的镜面压在上面，像研磨时那样来回推动。让它们从中央逐渐向外扩大接触面积(图1, b)。为了防止粘住，可以涂抹一些肥皂水。尽量把夹在镜面和工具间的气泡挤走。在这期间要经常把工具和镜面浸入热水中加热不使它冷却变硬，直到差不多全部都接触到为止(图1, c)。这时取开镜面，用涂抹着肥皂水的尺子(金属的或木制的都可以，但不要塑料的)在温软的柏油面上压出一组约2厘米见方的网格槽。网格要略带偏心，不要对工具形成中心对称。然后再用镜面将挤压上来的槽边压平(图1, d及e)。这一步骤一般要重复进行几次，才能获得宽度和深度都比较均匀的方格槽(图13)。等柏油冷却后，挤出到工具边外的柏油用锋利的小刀削去，再把宽深不够的槽子也用小刀修正一下。最后重新将工具和镜面在热水中再稍加温一下，在镜面上涂上稍浓的抛光粉液后，和工具压合在一起，上面再放上些重物，放置一段时间，使它们吻合得更好一些。现在，抛光用的工具就算制作完成了。

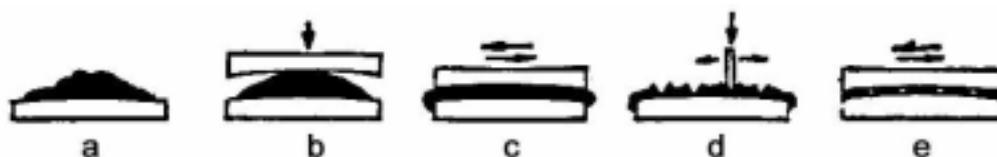


图12



图13

抛光的动作和细磨时的完全一样，但是摩擦力明显增加了，特别是当水份快干时，要花较大的力才能移动镜面，这时抛光的速度亦较快。不过我们不能让抛光液出现干涸的情况，一定要及时添加新的抛光液，也不能一次加得太多，否则会使镜面打滑，既降低了抛光效率，也浪费了抛光液。

经过半小时到一小时的抛光之后，镜面就出现抛光迹象，能直接反射光线了。如果一切都正常，那么在整个镜面上是均匀抛光的。如果发现中心或者边上抛光得过快，说明工具和镜面的吻合情况不够好。这时需要重新把工具加热压吻合后，再继续工作。

在抛光工作开始后，镜面的检验工作就得紧跟上。由于镜面抛光不久就能直接反射光线，用细磨时介绍的小电珠和毛玻璃的方法就可以把焦距测定到几毫米的精确度。但是为了检验面形上存在的误差以及它们的所在部位和大小，还要求采用更精确的刀口阴影检验法。这种装置用一个很小的点光源代替小电珠，用一直立的刀口代替毛玻璃的位置，在镜面的曲率中心处来检查光线的聚焦情况。装置的本身结构并不复杂，零件精度要求也不高。我们可以参照图14，自己动手用木块和铁皮等材料制作一套。

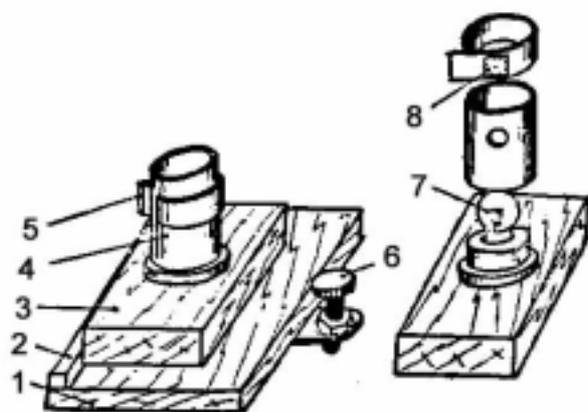


图14

当刀口检验装置位于镜面的曲率中心附近，点光源发出的光线经镜面反射后会重新聚集到光源位置，移动检验装置，使焦点位于刀口外侧，用眼睛紧靠刀口后面去观察镜面，若聚集的光束进入眼睛时可以看到整个镜面呈现一片光亮。现在把装置向左移动一些（可旋下微调螺钉6），当刀口进入光束时，光线就被挡住一部分。这时镜面上的相对应部分就会出现阴影。如果刀口是在焦点之内，那么阴影是从右面开始出现，并和刀口同一方向移动（图15，1）；如果刀口是在焦点之外，则阴影是从左面开始，而移动的方向和刀口相反（图15，3）；如果刀口恰好位于焦点上，那么全部反射回来的光束差不多都同时会被刀口挡住，这时只感到镜面是很快均匀地变暗，但不能辨别图形是从什么方向开始出现的（图15，2）。

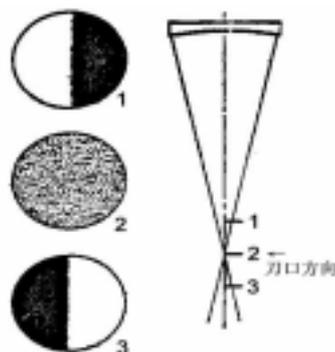


图15

上面是当镜面为精确球面时的情况。如果镜面偏离球面那么就会呈现不同的阴影图样。图16是几种典型镜面缺陷所对应的阴影图样。图的下部是镜面剖面形状的示意图,如果是精确的球面那就以平线表示。通常初学的磨制者最容易产生的镜面毛病是中央低凹,边缘倒塌,图17就是这种阴影图样。

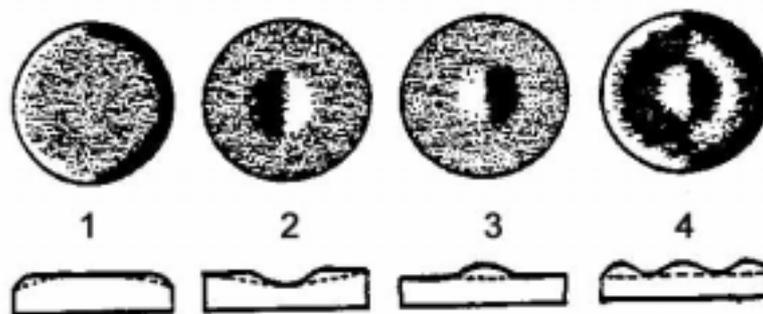


图16

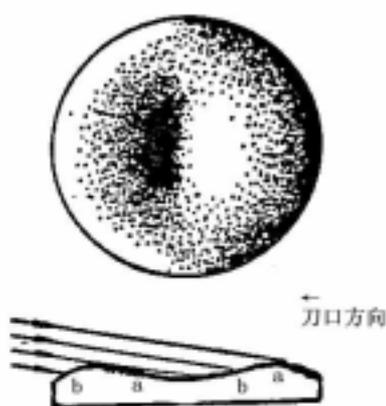


图17

用阴影图来判别面形情况的主要几条规律是:(1)阴影图样可以假想为有一束从刀口相反方向照射在镜面上的掠射光所形成的浮雕形象。如图17中a为阴影区域,b为照亮区域;(2)阴影图上的明暗交界处(或可称为半影部分)是镜面上的最高处或最低凹处;(3)阴影看起来越明显,明暗的对比度越大,表明起伏越大,毛病越严重。根据这些就可以对阴影图作出分析和解释。实际上一个镜面从开始到结束都不出任何缺陷的情况几乎是不存在的。整个抛光过程就是在不断地与出现的毛病作斗争,一直坚持到全部抛光为止。下面将图16中的几种典型缺陷的修正方法说明一下:

A. 倒边或塌边(图16,1)。这是初学者最容易出现的毛病之一,也较费时间和难修正的一种缺陷。较快的修改方法是用修利的小刀把工具中央部分的柏油刮去一些,深度不能太大,宁可工作一段时间后即能自行填平,再看需要作修刮否。不然过久地保持修正作用会造成矫枉过正。在抛光时将镜面的倒边部分偏出到工具边外,让镜面靠近倒边的外带部分多抛掉一些,使最后的面形成为图中虚线所示的剖面。这样倒边就得到了修正,但曲率半径会增加一些。另一种解决方法是当有倒边的镜面在使用时放上一个光栏把倒边部分档去。办法很简单,只是望远镜的口径就变小了。

B. 中央低凹(图16,2)。这也是较常见的毛病,如果低凹的范围较大,实际上也可以看成为较宽的倒边,因此也可以用相似的修改办法。将抛光工具中央与镜面上凹区相对应部分用小刀刮去一些,用稍长的动程抛光。所不同的是修改后镜面的曲率半径将会缩短一些。

C. 中央凸起 (图16, 3)。这种毛病修正比较容易, 只需加长抛光的动程或采用偏心的动程不难消除掉。但需注意不能操之过急, 因为镜面中心的面积较小, 抛去的速度较快, 不小心就会修过头, 变成中心低凹。

D. 复杂的面形误差 (图16, 4)。这种毛病大都是工具符合不好所造成的, 可以采用均匀抛光动程。每工作一段时间就把工具加热压合一下再继续抛光, 使其趋向均匀或向单纯的缺陷方向发展, 然后针对性地采取修刮或改变动程来进行修正。有时在阴影检验中发现镜面看起来显得很粗糙, 有些像桔皮或饼干表面模样, 这是由于细磨结束时的细度不够或抛光柏油太软等原因造成的。这就需要返工细磨或换用硬度较大的柏油重做抛光工具, 出较费时。所以我们宁可每一步都做得比较细致一点, 不要急于求成。另外也不要再在工具还没有冷却和符合不好情况下就用很大劲进行抛光。

在检查面形的同时, 还要检查抛光的程度。将表面擦干净后, 在较强的灯光下用放大镜仔细察看反射亮光下有无小毛点存在, 如果数量较多或分布密集, 说明抛光工作还要继续。作为一般使用要求, 有些稀疏的小毛点是可以容忍的。通常细磨到足够细度的镜面大约经过10小时左右才能完全搬光。如果细度不够, 那就要更长的时间。

这里必须说明一下, 阴影检验的灵敏度是很高的, 往往经过反复努力也很难做到在阴影图中看不到一点毛病, 其实作为观察应用也许精度已经足够了。为此, 可以用高倍的放大镜 (或目镜) 实际观察一下点光源或小电珠灯丝的像, 如果成像清晰, 像的周围没有明显的光晕, 那就说明镜面已经可以满足实用要求了。如果镜面已经完全抛光, 就可以结束修改工作。

掌握了自制镜面的技术, 即使开始不能做得十分理想, 但是只要认真总结经验, 努力精益求精, 就一定能够取得优异的成绩。

从光学原理上来说, 只要用一个物镜和一个目镜就可以组成一个天文望远镜。折射式天文望远镜常常是这样的, 而且最少的光学元件可以保证光的损耗为最少并避免引入额外的误差。但在反射式望远镜中, 反射物镜的焦点位于镜面入射光束的中央。若在那里放上目镜, 观察时观察者的身体就会挡掉大部分的入射光, 同时身体散发的热气也会使星像受到歪曲。所以牛顿在制作他的反射望远镜时, 采用了一块小平面镜把焦点转折后引出到镜筒的一侧, 将目镜安装在那里。这样, 小平面镜只挡去入射光束中心很小的一部分。观察者可以在入射光路之外方便地进行观察了。

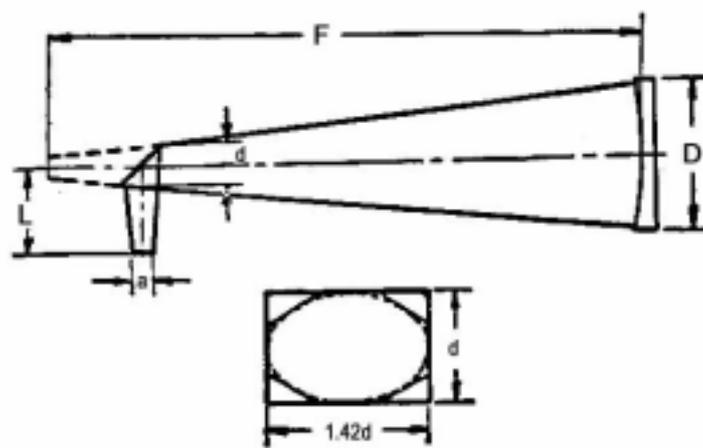


图18

由图18可以知道, 在光锥中倾斜45度的截面形状应该是椭圆形的。不过为了便于制作和安装, 小平面镜常常做成长方形或八角形的。它的尺寸可以用下面的公式进行计算:

$$d = L \times (D - a) / F + a$$

式中L是经过转折后焦点距离镜筒中心轴线的长度，它必须大于镜筒的半径。a是焦面上不产生失光的视场直径，超出此范围将有部分光线落到小平面镜之外，引起视场边缘逐渐变暗的现象，光学上称之为渐晕。

口径15厘米的的主镜需要镜筒的直径大约为18~20厘米。为安装目镜和进行照相工作要求焦点位于镜筒外约5厘米处，则L应取为15厘米左右。a可以取为25毫米，

$$d = 15 (15 - 2.5) / 180 + 2.5 \quad 3.5 \text{ 厘米}$$

因此另一边长度为 $1.41 \times d \quad 5 \text{ 厘米}$ 。

这块平面镜必须是经过很好加工的光学平面，并和主镜一样要在正面镀上反射膜后使用，不能简单地用普通背面镀银的镜子或平玻璃板来代替。当我们掌握了主镜的磨制方法之后，自己动手配制口径较小的平面镜是不会感到特别困难的。

为了磨制所需尺寸的小平面镜，要求准备三块直径6厘米、厚度约6毫米的圆玻璃。玻璃的背面要求是光的，并分别标记为A、B、C，先是A在下，B在上，互相进行对磨；再是B在下，C在上；然后是C在下，A在上；最后又回到A在下和B在上的情况。每加三到五次砂就调换一次位置。这样轮流研磨，使其中任意两块合在一起都能很好地吻合。因为只有三块都是严格的平面时才能做到这点，所以采用这一方法，即使没有特殊的装备，也能获得精确的平面。如果玻璃原先的表面比较平，则可以用较细的砂，如280#砂开始研磨。但需要另用一块同样直径的玻璃或金属板来制作抛光工具，为三块镜面共用。

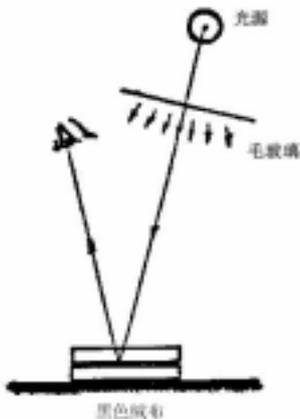


图19

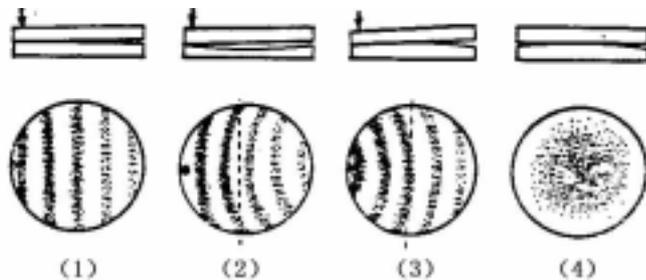


图20

当三块平面镜都经初步抛光之后，就要用干涉方法来检验他们的平面度。检验的布置如图19所示。光源最好用汞灯或黑光灯，平日日光灯也比白炽灯要好。实在没有，用灯蕊上洒有盐末的酒精灯可以代用。检验时镜面一定要擦拭干净，不能有硬颗粒和水汽等。将二块镜面的正面用软毛笔刷去浮尘后，相对地叠合在一起，下面垫上黑色的软布。过镜间将出现明暗相同的条纹，这就是光的干涉现象（图20）。用手指稍加按压，条纹的疏密和方向会产生变化。如果二个镜面形状是互相吻合的，就会出现直的条纹（图20（1）），如果二个镜面间有凹或凸的情况，那么就会出现如图20中（2）和（3）凸向和凹向压点的条纹（压点在图中用箭头和图点表示）。我们在镜面直径附近作一条联接暗或亮条纹两端的直线（图中用虚线表示）。估读出越过这一直线的条纹数，当不足一个条纹时，则以二个相邻条纹的间距为单位，读出条纹中点偏离该直线的小数，就可以估算凹凸的量。因为相邻二个条纹表明其间的高度差为0.0003毫米。如图中（2）和（3）分别为凹下和凸起0.5个条纹，即0.00015毫米。当（3）的一对镜面的接触点移到中央时，条纹就由圆弧变成圆斑或四环，如图20（4）。不过同一对镜面在所有情况下估算出来的面形偏差值都是一样的。

从这些组合检验结果能够解出每个镜面本身的误差。三块镜面可以给出三个组合的结果。如A和B出现一个凸条纹，B和C出现一个凹条纹，C和A出现二个凸条纹，我们得到方程组：

$$A + B = -1 \quad (+ \text{号表示凸} \quad - \text{号表示凹})$$

$$B + C = -1$$

$$C + A = +2$$

$$\text{其解为：} A = 2, B = -1, C = 0$$

即A凸二个条纹，B凹一个条纹，C为平的。这时我们只要保留一块面形较好的镜面作为标准，即使没有完全抛光也不要紧。再从剩下的镜面中选出一块继续抛光修改，直到完全抛光而且用标准镜检验时，读得的条纹数等于标准镜本身的为止。对一般要求，平度达到一个条纹已经可以用了。若能达到0.5个条纹，那就比较理想了。平面镜完成后，可以用玻璃刀截去多余部分（图21），再用砂在平板上将边和角都修磨整齐就成功了。



图21

随着光线的行程，现在将到达望远镜中最后的一个光学零件——目镜。通常天文望远镜都配备有几个不同焦距的目镜，以获得几种倍率来适应不同的观测要求。由于目镜中镜片直径较小，表面曲率较大，没有合适的装备，全部手工磨制是很不方便的，所以最好能买到现成的目镜。望远镜的放大倍率等于物镜焦距与目镜焦距的比值。专供望远镜用的成品目镜焦距范围一般为40~5毫米。使用在我们主镜焦距为1.8米的望远镜上可以得到45~360倍的放大率。此外，显微镜目镜也可以在我们的望远镜上使用。不过要注意的是显微镜目镜通常只标明目镜本身的放大倍率而不是焦距。所以10倍、15倍和20倍的目镜实际焦距分别是25、17及12.5毫米。

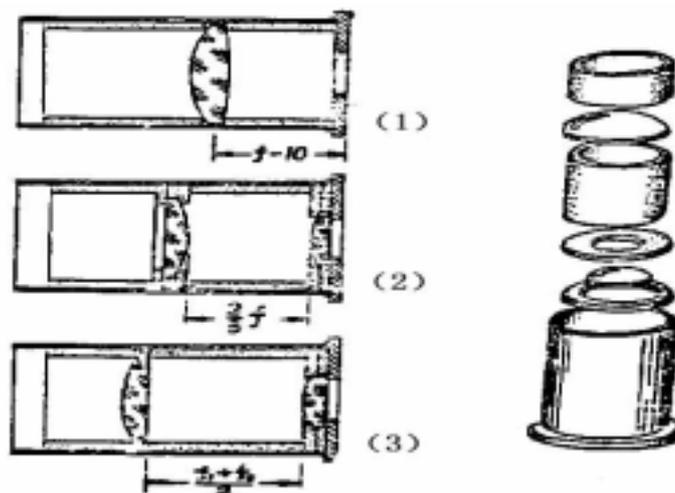


图22

如果手头有一些现成的小透镜，也可以自己动手将他们组装成一些简单形式的目镜：

(1) 用一片双凸透镜可以做一个如图22(1)那样的目镜。如果用的是平凸透镜，那么凸面应向前，做出来的效果较好。镜片后面要留出一段距离，使跟眼能处于出瞳位置。这种目镜的视场较小，边缘的像质较差。

(2) 用二片焦距相同的平凸透镜，可按图22(2)装配成冉斯登式目镜：较大的一块镜片应放置在前面，二块镜片的凸面相对，中间相隔距离为透镜焦距的 $2/3$ ，组合后的目镜焦距为原透镜焦距的 $3/4$ 。这种目镜比单透镜的要好得多。它的焦点在透镜组的外面。可以当放大镜使用或放置十字丝和分划板。

(3) 用二片焦距不同的平凸透镜，其中一片的直径较大，焦距为另一片的 $2\sim 3$ 倍，可以组装成图22(3)的惠更斯型目镜。焦距长的一片在前，短的一片在后，他们的凸面都朝向物镜，间隔的距离是二块镜片焦距的 $1/2$ 。组合后的目镜焦距为后一片透镜焦距的 $1.3\sim 1.5$ 倍。这种目镜的焦点在透镜组的内部。所以不能用作放大镜，也不便安装十字丝或分割板。

焦距小于10毫米的冉斯登和惠更斯型目镜的出瞳距太小，眼睛无法处于出瞳位置，能看到的视场显得很小时，所以用作高倍率观测时就得放弃一些对视场的要求，或者选用专门设计的高倍目镜。

目镜的外筒最好是金属的，并且做成统一的外径。国际上常用的天文望远镜用目镜的外径是31.7毫米，而普通显微镜的目镜外径为23.2毫米。目镜内部则可以根据镜片的尺寸和间隔要求设置适当的衬筒和垫圈。在图20的右边表示了用纸筒和卡纸垫圈安装固定镜片的一种方法。

光学元件齐全以后，我们需要一个镜筒把这些镜片安装起来，使望远镜在各个观察位置都能保持光学元件之间的距离和相对位置不发生变化，自制望远镜的镜筒尽量做到因地制宜，就地取材。例如，可采用现成的厚纸筒，塑料或玻璃钢管和用金属薄板制成的筒子。我们的主镜口径15厘米，焦距150厘米，需要一个内径约20厘米，长度160厘米左右的镜筒。一般来说，这样尺寸的镜筒采用厚纸筒和玻璃管较为理想，因为它们都易弯曲，筒壁有一定的强度和弹性，重量较轻。金属镜筒虽然牢固、耐久，但重量大、价格高。最经济和方便的镜筒是用马粪纸自己制作。这时镜筒的直径可以随自己的要求加工。用长条状的马粪纸采用正、反螺旋状的粘贴方法，可以获得长而直的圆筒。

主镜是安装在镜筒的底部。图23表示一种简易的安装主镜的方法，底板的直径和镜筒的内径相等，在上面相隔120度处垫有三块泡沫塑料的垫片。把主镜放在上面并用三个金属片弯成的小钩将它扣住。这三个小钩应尽量做得高度相等，使镜面和底板很好地平行，泡沫塑料垫片的厚度要仔细调整，使小钩用螺钉固定到底板上后，正好能将主镜稳妥地扣紧在底板上。以便镜面从水平转到垂直位置时不出现滑移为合适。注意不要卡得过紧，否则会引起镜面变形，使成像质量变坏。底板的背面还固定有三个铁皮弯成的角铁，利用角铁把底板和镜筒固定起来。不过暂时只固定其中的一只，镜筒上其余两个固定孔先不要开，要等主镜光轴调整好以后，才能最后开孔。

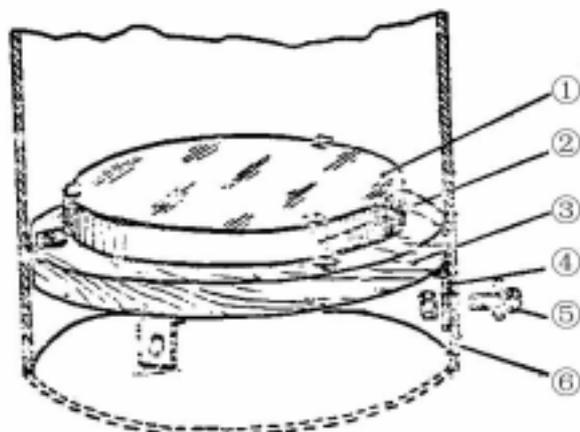


图23 主镜 固定钩 底板 角架 固定螺丝 镜筒

这种简易的装置中主镜不能随便拆装，小钩、垫片、底板上角铁对应于镜筒上的孔位置等都作好标记，不得放错，不然主镜光轴就不能复位。为了避免这种缺点，图24提供了另一种带有调节机构的主镜安装方法。当底板固定在镜筒上之后，只要转动背面的三个调节螺帽就可以改变主镜的倾斜位置，使用比较方便。

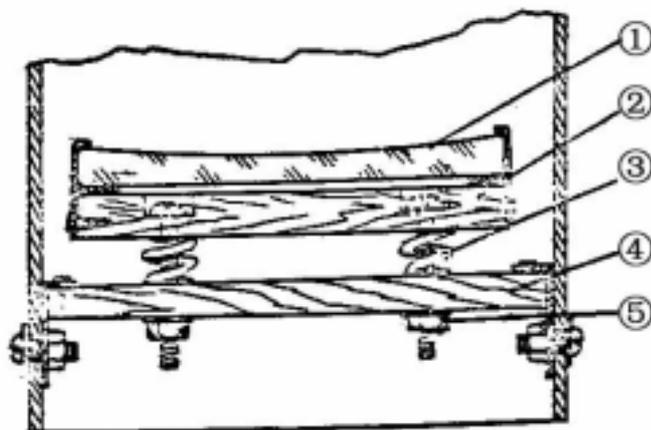


图24 主镜 镜座 弹簧 底板 调节螺母（共三个）

目镜和小平面镜是安装在镜筒的上部。图25是目镜和小平面镜整个装置的外形。当目镜筒移到最短位置应使主镜的焦点位于筒口外约10毫米，我们按这个要求在放置小平面镜的位置处在镜筒上开一个稍大于4厘米见方的孔。目镜座和小平面镜就安装在这个孔里。用螺钉和螺帽固定在镜筒（如图虚线所示）上。

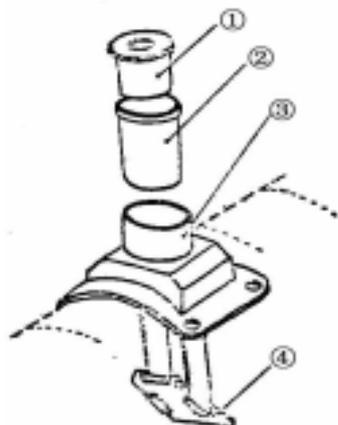


图25 目镜 目镜筒
目镜座 平面镜

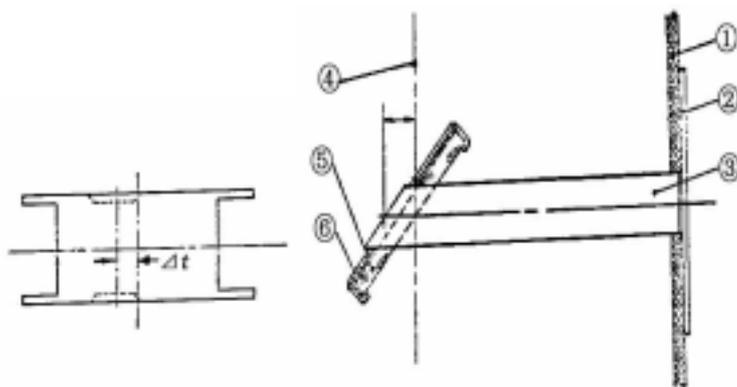


图26 镜筒架 目镜座底板 平面镜支架
镜筒轴线 平面镜 垫片

目镜座和小平面镜的支架可以用铁皮焊制。制作时要尽量使目镜筒和平面镜支架的位置和角度准确，不要歪斜。特别是小平面镜的中心应该位于镜筒的中心轴线上，所以支架臂的长度一定要严格按照实际镜筒的直径尺寸。小平面镜和垫片的厚度以及两支架臂的安装间距来确定。例如，镜筒的外径为 208毫米，平面镜包括垫片的厚度为5毫米，两支架臂之间的距离为40毫米。这时支架臂中心线的长度等于：镜筒半径104毫米，加上小平面镜和垫片厚度造成的 $S = 8$ 毫米（见图26），减去支臂间距内圆弧的矢高1.9毫米，约为110毫米。如果认为计算较繁，不直观，也可以按实物尺寸画出图纸，从图纸上直接用尺子量出所需的尺寸，只要误差不大于1毫米就不会有太大影响。

目镜筒也是用薄铁皮焊制的，它既要能让目镜插入，又要能在目镜座的筒内移动调焦，松紧要适度。目镜筒的上口加焊一圈铁丝环，便于使用时拿住，并防止滑入目镜座内，还能起到增加强度的作用。

其实用木板及胶合板同样也可以制造镜筒。图27提供两种型式的木制镜筒。其中A是直接主镜和目镜座都敞开地装在一块长木板上。这样的“镜筒”只要会一点木工就可以做起来。当然，敞开的望远镜容易受四周光线的干扰，镜面不易保护，稳定性也不太好。图中的B则从板材加工的工艺性考虑，将镜筒做成方形。虽然形状特别，但用胶合板加工起来比较方便，由于都是平面和直边，目镜座和主镜的安装也不太困难，效果相当好。图28是在这种镜筒上安装可调节主镜的一种方法。它是将主镜固定在三根螺丝杆上。调整螺丝杆上的一对螺帽就可以调整主镜的倾斜。

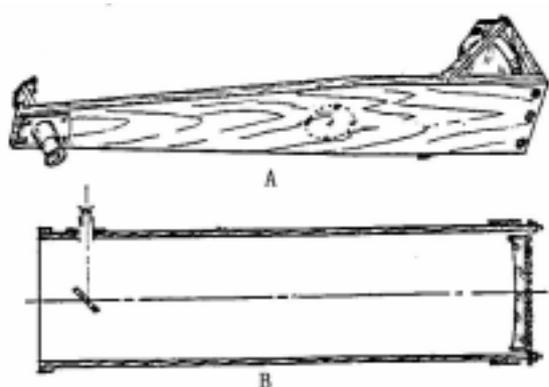


图27

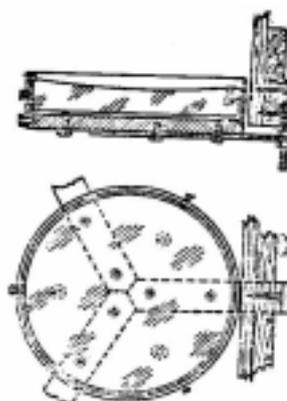


图28

望远镜的调整先从主镜开始。目的是使主镜的光轴和镜筒的轴线一致。这需要在主镜筒的口上用胶布贴上两根垂直相交的细线，组成一个交点位于镜筒中心的十字线。主镜连同底板装进镜筒底部适当位置，先用一个螺钉固定一下，然后我们站到镜筒前部向主镜看，应该同时能看到筒口的十字丝和它在主镜中的反射像，稍有放大，以及自己眼睛的反射像。移动眼睛位置，使十字线的中心投影在主镜的中心上，这时眼睛、十字丝中心和主镜中心位于一条直线上，这条直线就代表着镜筒的轴线（图29上）。如果这时主镜中十字丝的反射像不和实际的十字丝相重合，如图29A，这表示主镜的光轴不正，需要将两个未固定的角铁位置向前或向后移动一些，再观察调整的方向是否正确。经重复调整，直到出现图29B的情况为止。这时主镜的光轴就和镜筒的轴线一致了。安装角铁上孔的位置在镜筒上开好孔，用螺钉固定住。前面已提到，如果主镜不带有调节机构，为了今后主镜拆装需要留有少量调整余地，可以把这两个孔开成略带长形，允许螺钉有2~3毫米的移动范围。

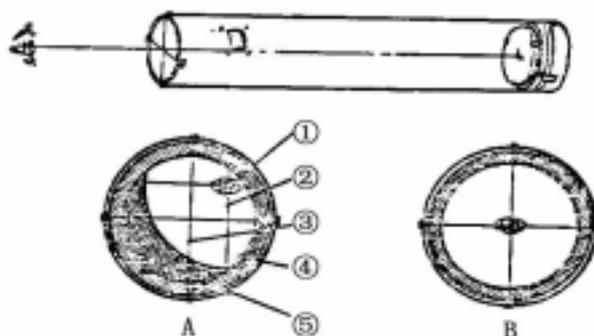
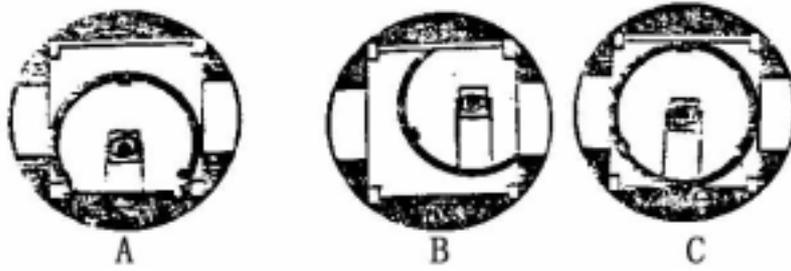


图29



- A 平面镜没有与镜筒轴线成45度
- B 平面镜不成45度，支架两臂长度不整等长
- C 平面镜位置正确

图30

现在将目镜座和小平面镜装到镜筒上部的方孔里。眼睛沿着目镜筒中心轴线向小平面镜观看，应能看到主镜在平面镜中的反射像和小平面镜及眼睛在主镜中的反射像。如果小平面镜的像不落在主镜像的中央，则说明小平面镜的中心位置不在镜筒的轴线上必须重新拿下来修正和调换尺寸不合适的支架臂。当上述毛病消除后，看到的主镜像不在小平面镜的中央(图30A及B)，表示小平面镜的倾角装得不正确。图30A表示小平面镜和主镜的光轴的倾角不筹于45度。当偏差不大时可以调节平面背后的垫片厚度来纠正。若偏差过多，那么只有把支架臂拆下来进行修整换掉。图30B表示小平面镜的倾角和方位角都有误差。这可能是支架臂的长度不相等或在底板上焊的位置不准或歪斜。经过修整或更换之后，应该能看到图30C的情况。这时就算调整完了。现在只要把目镜插入到目镜筒内，将望远镜指向远处的目标，调好焦距，就可以作试观察了。望远镜里所有暴露在光路中的非光学表面都应该涂上无光泽的黑漆，如黑板漆。这样能减少杂散光，提高像的对比度。但要等漆完全干之后，再装光学镜面。否则油漆中的挥发性物质会凝结到镜面上，使成像模糊和污染反射膜。

(完)



此 PDF 文档 pcfans 依据 1989 年的《天文爱好者》上连载的由杨世杰老师撰写的——天文爱好者望远镜制作系列讲座整理制作，以方便大家学习之用。该文著作版权始终为杨世杰老师所有，如果您获得此文档，请务必确认：

- 一、保证不会将此内容用于商业用途。
- 二、请维护此文档的内容完整。
- 三、如果发现内容与原版有出入或者存在其他错误，请尽快通知 pcfans，以便此文档能得到及时更正。

pcfans
2003.08.10

MSN: eituoz@hotmail.com