

## 刀口仪

刀口仪是一种科学仪器，但是它又是很主观的仪器，它的灵敏度由使用者与具体环境决定。

刀口仪是一种简单的仪器，但是它又是很精密的仪器。

### 甲 理论篇

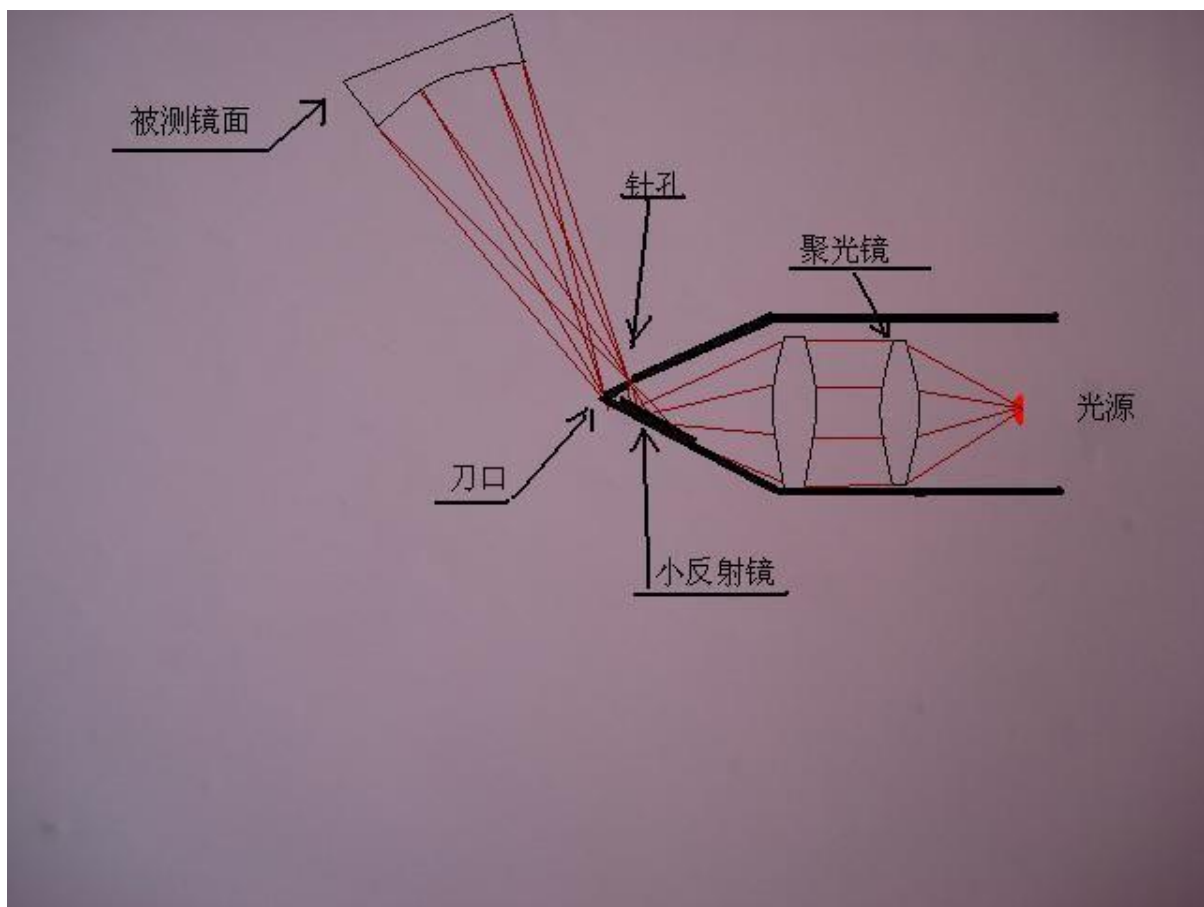
刀口仪是光学仪器检测中最常用的仪器，它以制作容易，检测灵敏度高，检测简单，方便直观，而深受光学检测人员，尤其是广大业余天文爱好者的钟爱。

刀口仪是莱翁·傅科于 1856 年发明。所以也有人将刀口仪叫做傅科刀口仪 傅科试镜器。由于是用它看镜面的阴影图来判断镜面的精度，所以也常常叫它阴影仪。在傅科发明刀口仪以前已经有人将点光源放在抛物面的焦点上，观察抛物面的反光来判断抛物面的质量。也许傅科受到这个启发，并将它完善，从而发明了刀口仪

刀口仪是定性检测的仪器。用它检测镜面有没有误差是它的强项。也可以用它粗略估计镜面误差的大小。请注意只是粗略估计误差大小。用它直接计算镜面误差的精确值不是它的强项

刀口仪是一个科学的检测仪器。应该是很客观的，可是用它做检测又有很大的主观性。所以常常有人争论，这个说“刀口仪可以发现  $1/100$  波长误差”。那个说：“刀口仪只能发现  $1/10$  波长误差”。这都是由于它先天的主观性引起

### 一 经典刀口仪的结构

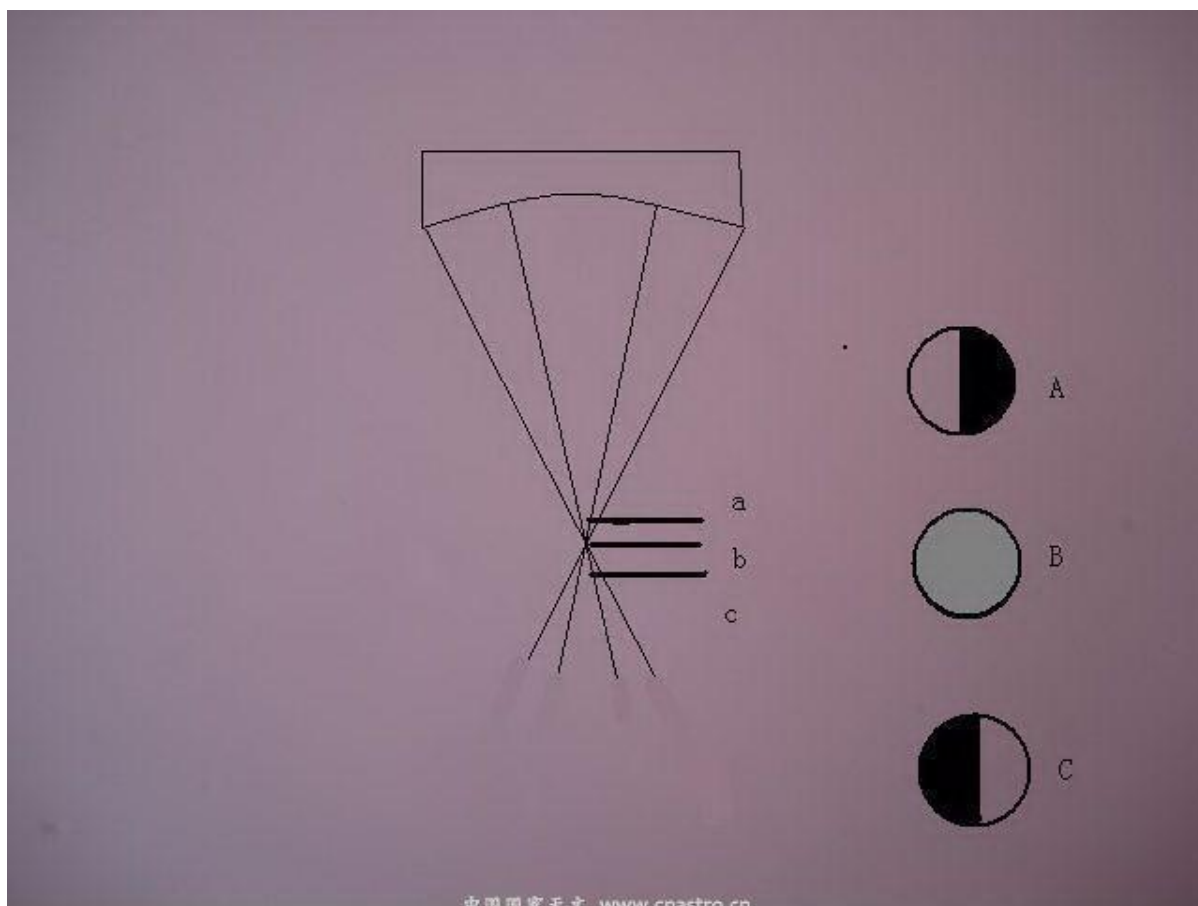


中国国家天文 [www.cnastro.cn](http://www.cnastro.cn)

由光源发出的光线经第一聚光镜 汇聚成平面光波，再经第二聚光镜汇聚并经过小的平面反射镜转向，将光源成像在刀口附近。在光源的像上放一个针孔，这样我们就得到了标准的点光源。

从针孔打出的球面光波照到被检测的球面镜上，经过球面反射，再成像到刀口上。我们用刀口切割这个针孔像，在刀口后不远处就可以看到被测球面镜上阴影的情况，从而了解被测球面镜上的误差。

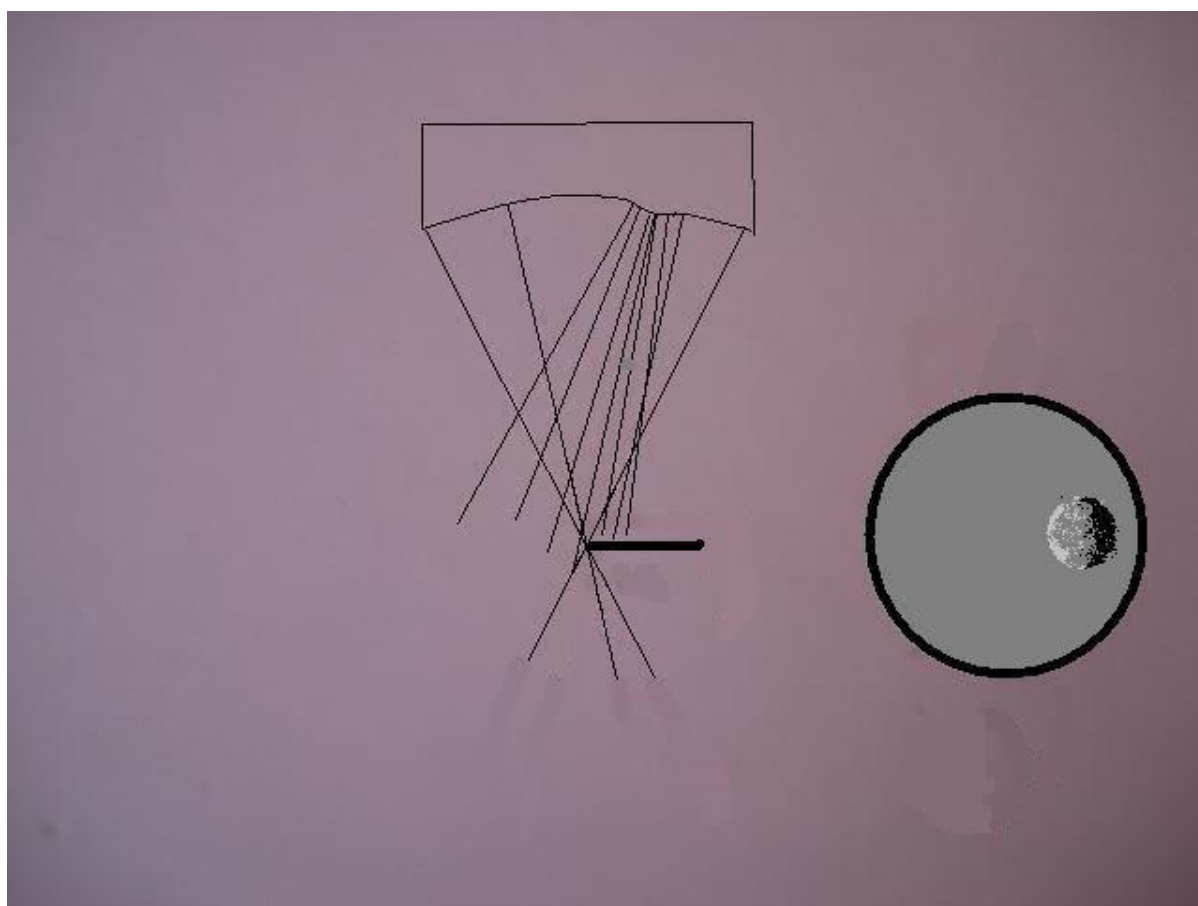
## 二 检测的原理。



从镜面汇聚的光线，我们在 a（焦点前）用刀口切入，这时镜面右侧的光线首先被遮挡。看到镜面如 A 图。如果我们将刀口移到 c（焦点后）切入。这时我们看到镜面左边的光线首先被遮挡，看到镜面如图 C。如果我们将刀口移动到 b（焦点上）切入，这时镜面上所有的光线都同时被刀口切住。镜面应该突然一下子就变暗了。但是由于针孔不是无穷小，总有一定的尺寸，就是针孔无穷小，由于光的波动性，针孔的像最小也是个衍射斑，所以我们会看到镜面是渐渐变暗，请记住这就是“平面现象”我们也常常称“镜面平了”我更简单的称“一刀清”。这是刀口仪进入最灵敏区。 如图 B

上面是被测镜面没有误差时的情况。

如果被测镜面有误差呢？如图 3



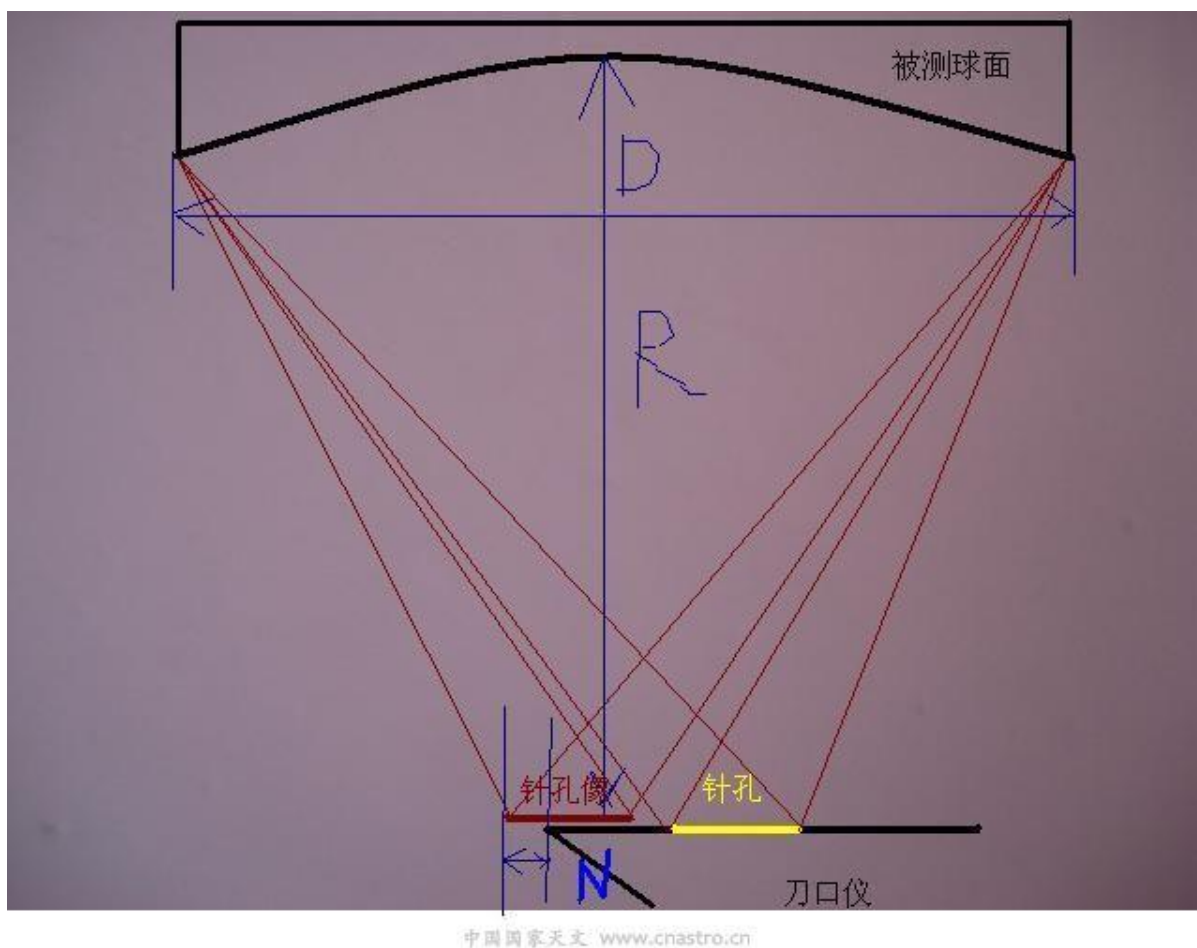
中国国家天文 www.cnastro.cn

在镜面渐渐变暗时，我们看到镜面凸起的地方 明显右侧比镜面更暗而左侧比镜面亮多了。就这样看到误差了。

### 三 刀口仪的灵敏度（刀口仪能发现的最小误差）

1 用几何光学理论探讨很简单，理论上刀口仪可以发现无穷小的误差。灵敏度无限高。见图 2.2)

2.2.JPG



灵敏度 = （能发现的最小对比度差别）

理论上  $N$  可以无穷小， $R$  也可以很大，因而刀口仪的灵敏度可以无穷高。

我认为在粗检时这个公式还是可用的。对于好一点的刀口仪， $N$  可以调到  $0.02\text{MM}$ ，（能发现的最小对比度差别）在不严格的环境中以  $10\%$  较为保守。那么对口径  $200\text{MM}$  曲率半径  $2000\text{MM}$  (F5)的镜子，发现  $1/20$  波长的误差还是有可能的。

当然我们可以将  $N$  调到  $0.001$  这样能发现的误差就到了  $1/200$  波长了，但是当  $N$  被调到  $0.001\text{MM}$  时，光线主要显示的是它的物理性，不能用几何光学来解释，应该用光的物理性来解释。

用物理光学理论来讨论图 4。

假定将镜子劈成二瓣，将一瓣稍稍倾斜一点，这时镜子会将针孔汇聚成二个靠得很近的针孔像。用刀口切入，这二个像同时都被遮挡，由于二个像是分开的，所以在二个像的衍射边缘遮挡是有差别的。这样在镜面的不同部位就有不同的对比度。就可以看到镜面上有阴影。当对比度差别 2 % 时。

灵敏度 = 0.015 波长

我曾经实际测量过，稍为严格一点的环境了，在刀口仪上看 1/70 球差是很明显的，这和理论相符。

无论从几何光学还是从物理光学上讨论刀口仪的灵敏度，镜面上的“对比度差异”总是决定刀口仪灵敏度的关键。从这里我们就看出刀口仪的主观性了。不同的人，由于发现的镜面最小对比度差异不同，就可以测到不同的灵敏度。说：“刀口仪只能测几分之一波长的误差”，说：“刀口仪能测几十分之一波长的误差”。都是对的，也都不全面。能发现镜面的最小对比度差别才是关键。一切提高刀口仪灵敏度的方法都是围绕提高发现的最小对比度差别而展开。



4.JPG



## 2 刀口仪灵敏度的实际测量

一个磨镜师，在用一台刀口仪检测镜子之前，要对这台刀口仪的灵敏度有个大概的了解。做到心中有数。如何了解你拿到的刀口仪的灵敏度呢？

如图 2.1，

我们将刀口仪移动到镜子的焦点前，这时我看到明显的右侧阴影，一点一点的将刀口仪向后移动，到右侧阴影刚刚可以看见的 A 位置（再向后移动一点点就看不到了）。进入灵敏区。再向后移动刀口仪，到左侧阴影刚刚出现的 B 位置，走出灵敏区。根据灵敏区 AB 二点的距离 K 我们就可以计算出这台刀口仪实际测出的最小误差

如果你用口径 200 焦距 1000 ( $R=2000$ ) 的镜子做试验，测出  $K=0.05\text{MM}$ 。这时我们完全有理由肯定，对于这个镜子这台的刀口仪的灵

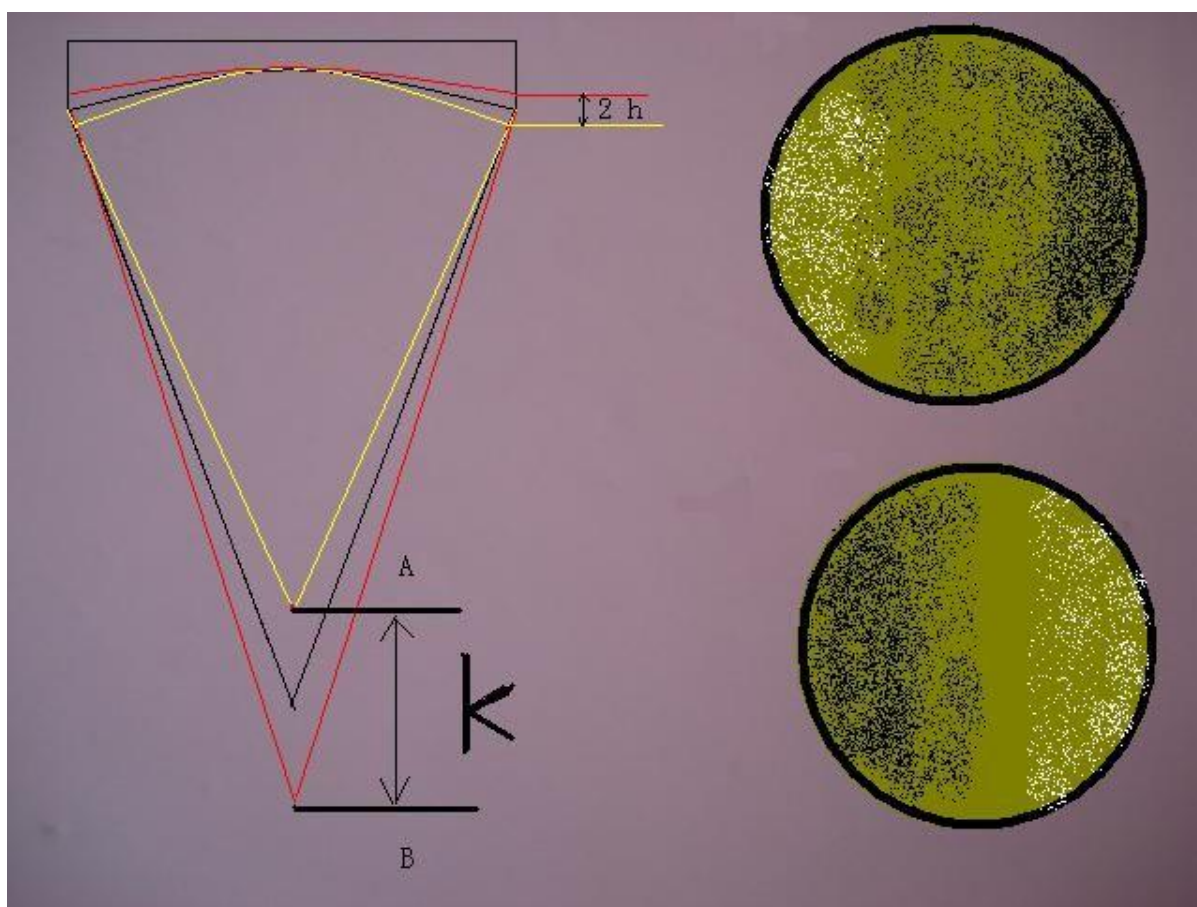


敏度至少是  $1/70$  波长。这里要强调的是不同的刀口仪，不同的使用者，在不同的环境，能测出的  $k$  值是不一定相同的，因而刀口仪的灵敏度也是不同的。所以刀口仪有很强的主观性。

一个磨镜师知道了自己的刀口仪的灵敏度，当他用这台刀口仪检测的镜子时看不到误差了，然后声称这个镜子是  $1/XX$  波长的精度，就不能认为他是毫无依据的吹牛了。



2.1.JPG



中国国家天文 www.cnastro.cn

#### 四 如何提高刀口仪的灵敏度

刀口仪灵敏度 = (针孔宽度  $\times$  能发现的最小对比度差别  $\times$  镜子的口径) / (镜子的曲率半径  $\times 2$ )

从这个公式看，在镜子的参数（口径和曲率半径）已定的情况下我们



只有：

1 减小针孔直径(不少人认为上面公式中的针孔宽度就是指刀口仪上针孔的实际大小。我认为最后我们看到的，被刀口切剩的针孔像的宽度姑且认同这个观点)。但是小于 0.05MM 直接的针孔是很难做出来的。用最先进的激光打孔，可以做到 0.009MM(有人说可以手工做出 0.01MM 的针孔，和激光打的孔接近，我不信!)但是容易堵塞。价格也很贵，一个就要好几百元。做小针孔的潜力是有限的。被刀口切剩的针孔像的宽度，可以调到无穷小(只要刀口仪支架足够精密)。

2 提高发现的最小对比度差别，为此我们要尽可能的在黑暗的场所检测镜子。在检测前要在黑暗的场所适应一段时间，让眼睛适应黑暗。刀口仪的刀口处不能漏光干扰眼睛(看到香港同好拍的阴影图上都可以看到环境的景物，说明杂散光大的不可想象了)。刀口仪打出的光不能太暗也不能太亮。刀口切到针孔的衍射边缘才能看到镜面对比度的差别。只有针孔像的衍射边缘是有用的，大针孔是多余的，而且由于针孔大了。多余的光线成了有害的杂散光。所以理论上针孔越小越好。检测时还要佩戴好眼镜。。。。。。种种努力都是为了发现更小的对比度差异。

3 用狭缝代替针孔。

如图 5:

刀口切掉针孔的大部分，到了针孔的衍射边缘，才看到阴影。只有这一小部分的衍射边缘有用，其它的衍射边缘没有起作用。用狭缝代替针孔，狭缝的可以用衍射边缘很长，比针孔多若干倍。这样能发现的最小对比度差别提高很多倍。

但是用狭缝时，狭缝的像的边缘一定要平直，同时还一定要和刀口的

刃口在三维空间严格平行，如果不平行如图 6。狭缝的优势就没有了。而且多余的有害的杂散光反而干扰了眼睛，降低了我们发现很低的对比度差异的可能性。。

我常常看到香港和国外的朋友用狭缝，刀口和狭缝又是分开的。这样的检测是不严谨的，也说明他们没有领会用狭缝的精髓。

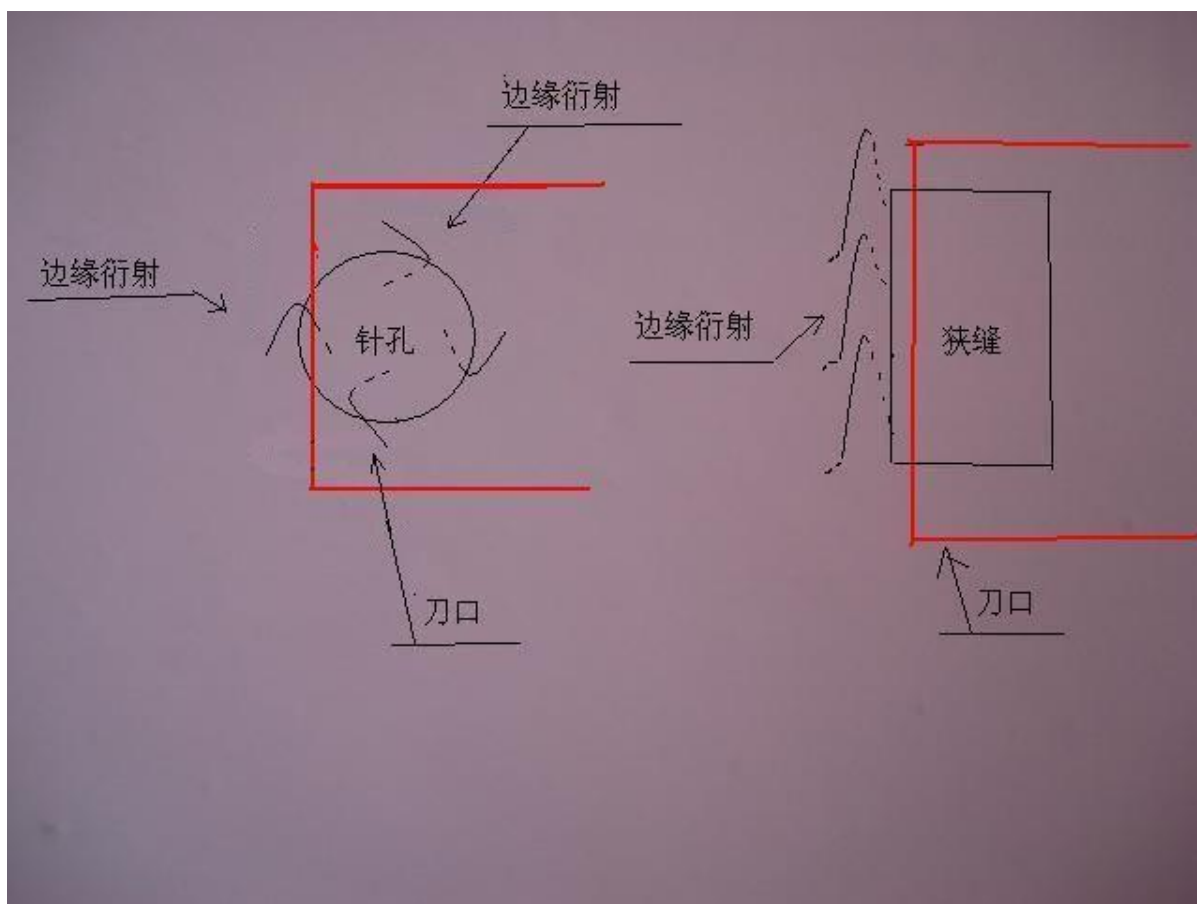
根据马克苏托夫的实践，用和针孔直径一样大的狭缝代替针孔，刀口仪的灵敏度可以提高两倍。

#### 4 用数码相机代替人的眼睛。

我发现用数码相机代替眼睛，将阴影图拍下来放到电脑上细细的对比，可以大幅度的提高刀口仪的灵敏度。很多眼睛看不到误差的阴影图，用数码相机拍下来细细的对比，误差就明显了。马克苏托夫时代没有数码相机，用胶片拍图做修改过程中的常规检测是不可能的。现在用数码相机拍图比那时的胶片相机拍图方便若干倍。而且数码相机图比人眼看到的更客观。尤其是测法线计算抛物面精度时，更应该用数码相机拍图。因为在法线的附近要辨别 10% 的对比度差异是很困难的。要精确的将法线的位置确定到 5MM（就是改用细丝）也是很困难的。而对于口径 200 焦距 1000 的抛物面，法线位置测量偏差 2MM，计算的结果就有 1/12 波长左右的误差。只有用数码相机拍图，然后细细的在电脑上比对，才有可能尽可能的减小测量误差。



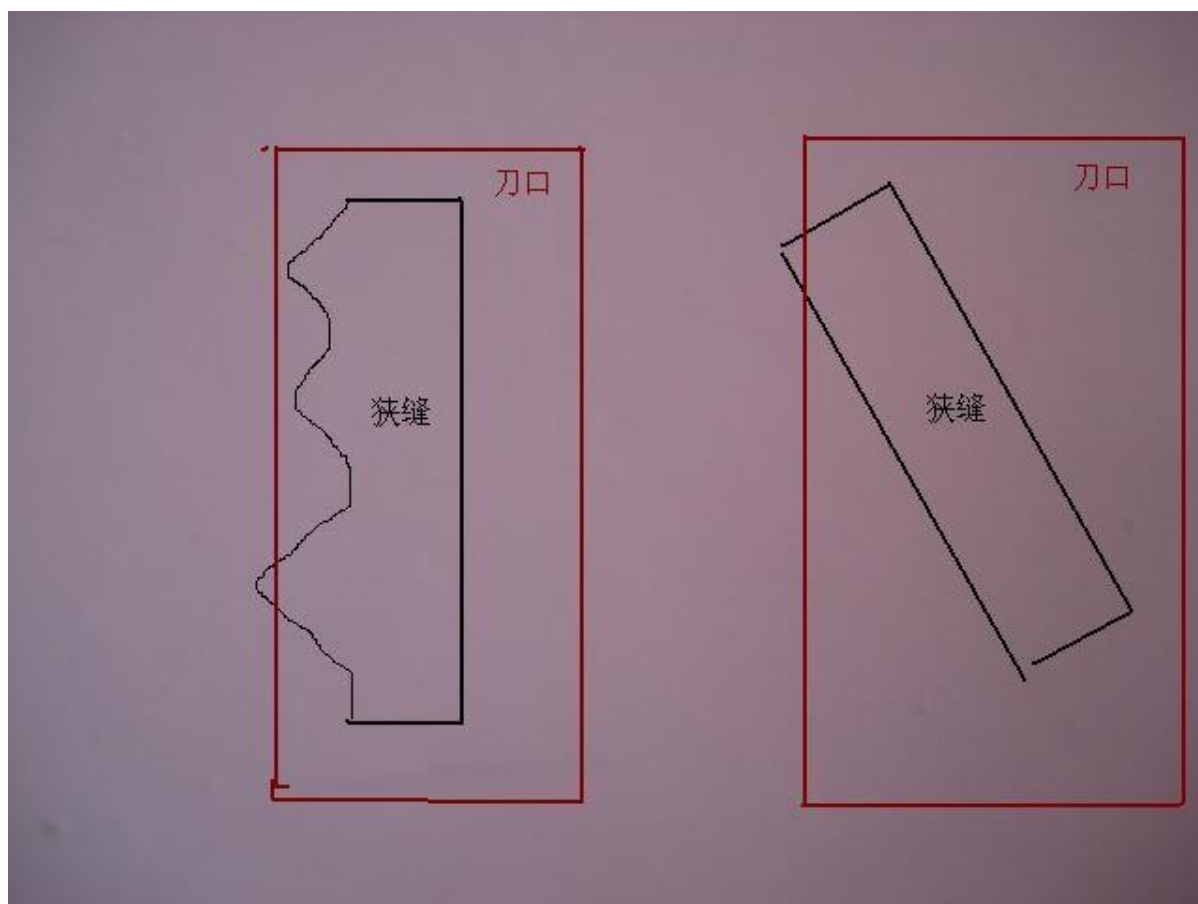
5.JPG



中国国家天文 [www.cnastro.cn](http://www.cnastro.cn)



6.JPG



中国国家天文 www.cnastro.cn

## 五 刀口仪的局限性

1 刀口仪在小角距上精细对比很容易，在大角距上对比镜子的对比度差异困难。如图 6.9，对比 A-A'对比度差异容易，对比 B-B'的对比度差异困难。所以在刀口仪技术已经很成熟时，对于口径特别大，焦距很小的镜子。人们仍然要用复杂哈脱曼检测法，干涉检测法。。。。。。来做验证检测。

2 刀口仪只有在检测到“平面现象”（也有称零位检测）时才有很高精度。这时刀口仪最灵敏。不在“平面现象”时，刀口仪的检测精度是有限的。马克苏托夫曾经用测法线的方法计算镜面的精度。最后他认为用这种方法检测小焦比的镜子，检测的灵敏度是不够的。他也只能寻求补偿法来检测非球面。

3 刀口仪检测的方向上的性 如图 7

在 A-A'方向上检测的灵敏度最高。在 B-B'方向上灵敏度为零。其他方向上的灵敏度和角度  $L$  的余弦成正比。要克服这个问题就要用点和屏，然而微米级的并且和针孔完全一致的屏是很难实现的。

#### 4 刀口仪检测象散的局限性。

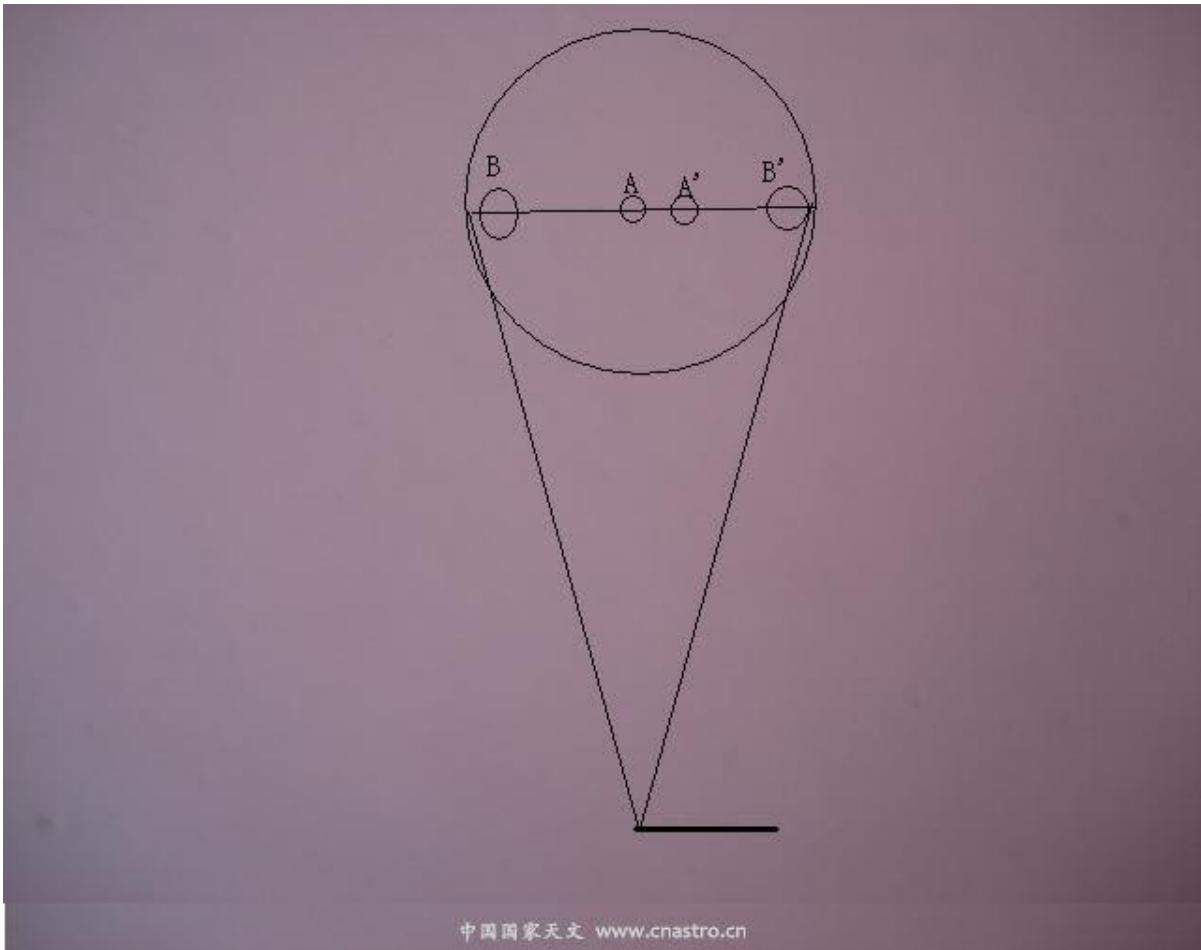
如果象散的方向和刀口平行或者垂直，刀口仪就发现不了这个象散。因此必须旋转被测镜子 45 度，再测一次，同时还要前后移动刀口，看镜面阴影的变化。

在检测镜子的象散时，一定要用针孔。不能用狭缝。8 p" h8 M/ G5 ^

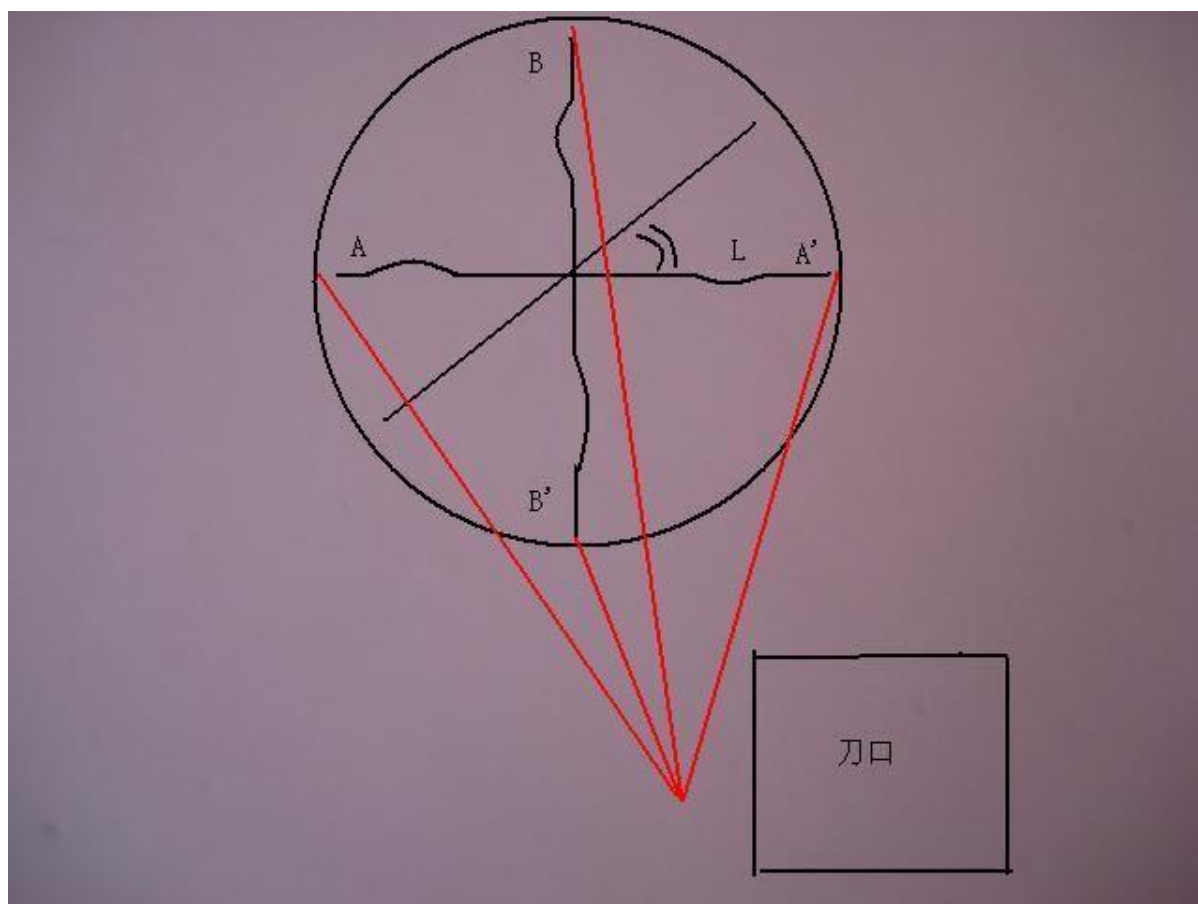
所以很多镜子在刀口仪上检测--很好！但是使用效果--不好！就是刀口仪检测的方向性问题在作怪，象散和地区误差没有测出来。大而薄，非球面度很大反复修改的镜子，又是很容易有象散和地区误差的，尤其是象散，它对成像质量的危害比球差更厉害。



6.9.JPG



7.JPG



中国国家天文 www.cnastro.cn

## 六 使用刀口仪额外要注意的问题。

1 刀口仪在使用前，要校正打出的光锥。将光锥打到白纸上，看一看光斑是否一致均匀。因为阴影图是看镜面亮度的不同。如果打出的光锥就亮暗不一，检测的精度就要打折扣了。用 LED 前直接加针孔（狭缝）而不用聚光镜 的朋友应该注意，只要针孔（狭缝）和 LED 发光体的距离不是零，打出的光锥就不可能一致均匀。这种刀口仪检测大焦比的镜子没有问题，因为在很小的范围内，可以认为光斑是均匀的，但是用来检测小焦比的镜子是不严谨的。

2 刀口仪的支架要精密，纵向和横向的移动最好能精密到 5 微米。用来测法线计算抛物面精度的刀口仪要求更高。纵向不精密测得的法线差值不准，计算出来的精度就没有根据了。横向不精密，刀口很难放到对比



的差异最佳的位置。在测法线计算抛物面时，刀口阴影或细丝阴影在镜面的位置不正，法线在镜面的位置就无法精确的确定了。有人说“用几元钱做个刀口仪，可以测出 1/10 精度的抛物面”。那是他太自信了。

第一次拜读马克苏托夫的（天文光学工艺），对第 162 页“.....所以制造很粗糙或者磨损很快的阴影仪对光力很小的系统能作高灵敏度的检验，而对强光力或超强光力系统作同样检验就不满足了，这点是没有什么奇怪的”很长时间不能领会。刀口仪的针孔和刀口怎么会有磨损？.....后来才领会到这句话的意义

## 七 刀口仪检测的延伸。

刀口仪最基本的检测对象是凹球面。现在刀口仪的检测范围已不仅仅局限在凹球面了。

从“只要有‘无像差汇聚点’就可以用刀口仪检测”出发，刀口仪可以检测任何光学系统。不汇聚的系统，可以加光学单元，让它汇聚，然后再用刀口仪检测。

图 7.01 是用刀口仪检测折射镜。用不同的单色光，不但可以测出折射镜的色球差，带区，还可以测出色差和剩余色差。

图 7.1 是检测凹球面

图 7.2 是检测平面镜

图 7.3 是检测透镜玻璃的均匀性

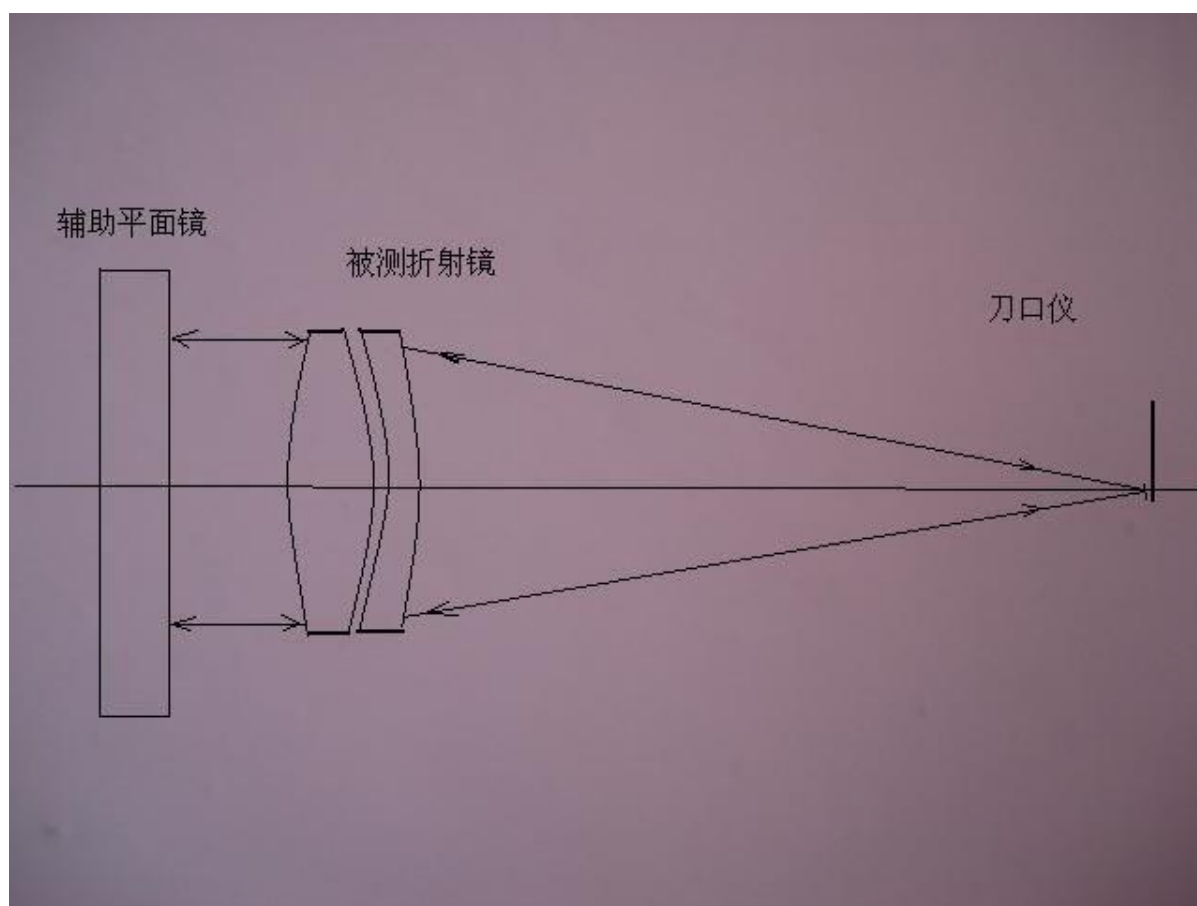
图 8 是检测凹椭球

图 9 是检测凹双曲面

图 10 是检测凸双曲面



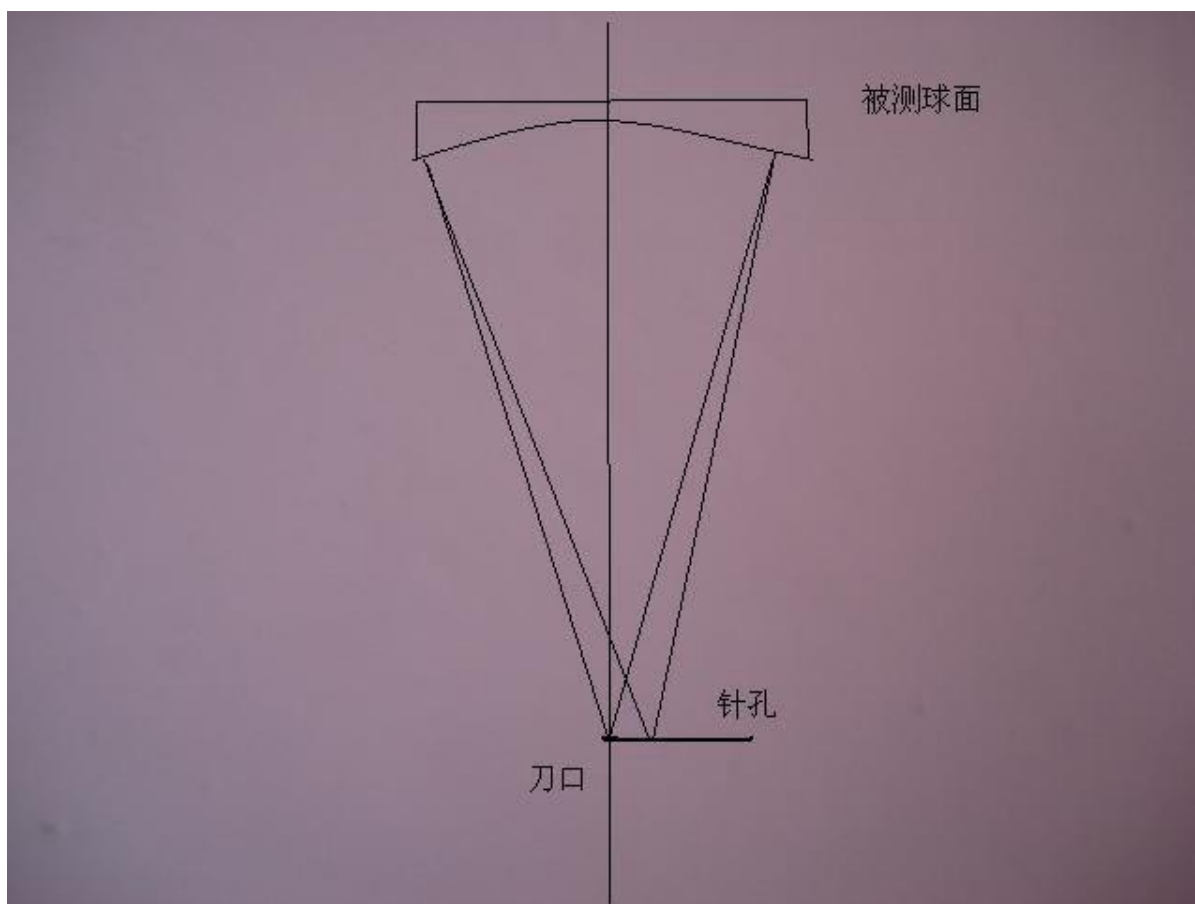
7.01. JPG



中国国家天文 [www.cnastro.cn](http://www.cnastro.cn)



7. 1. JPG



中国国家天文 [www.cnastro.cn](http://www.cnastro.cn)



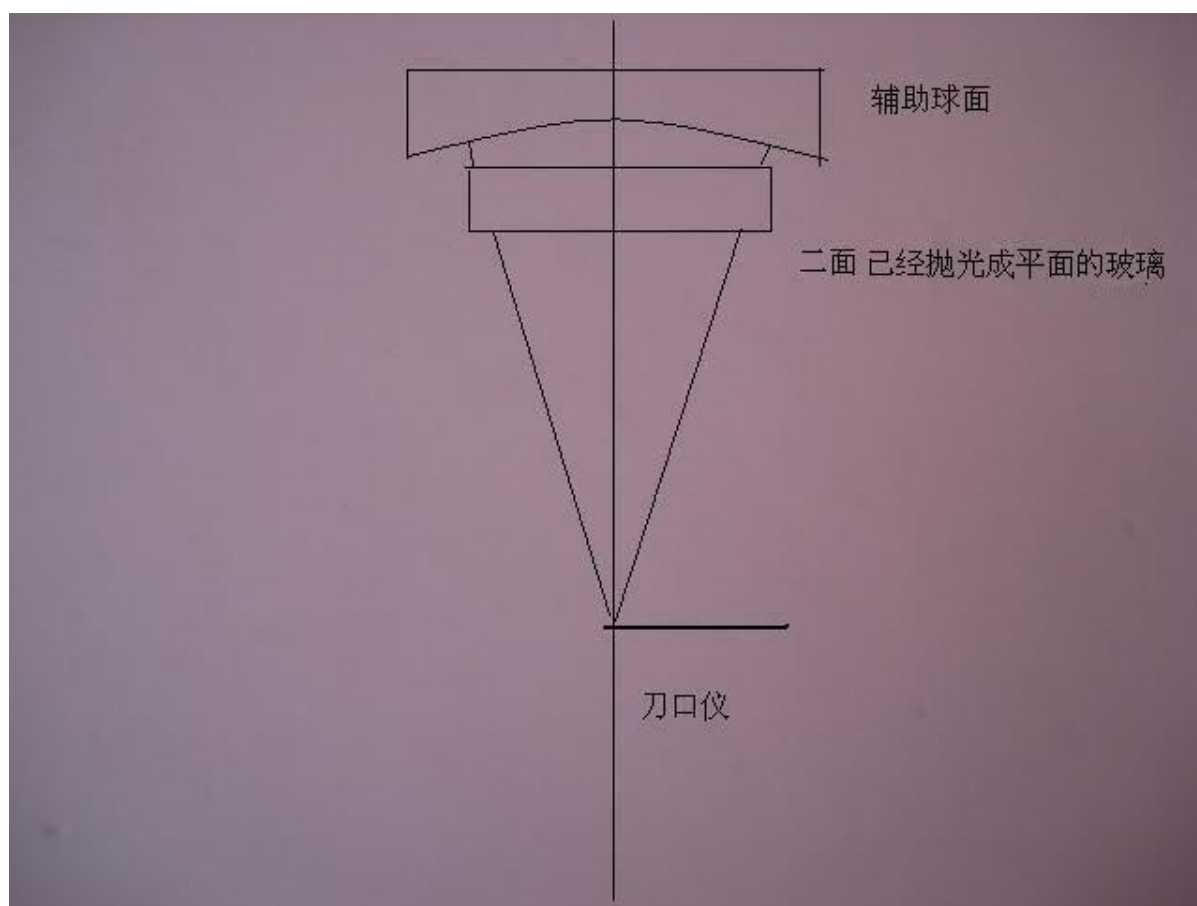
7. 2. JPG



中国国家天文 [www.cnastro.cn](http://www.cnastro.cn)



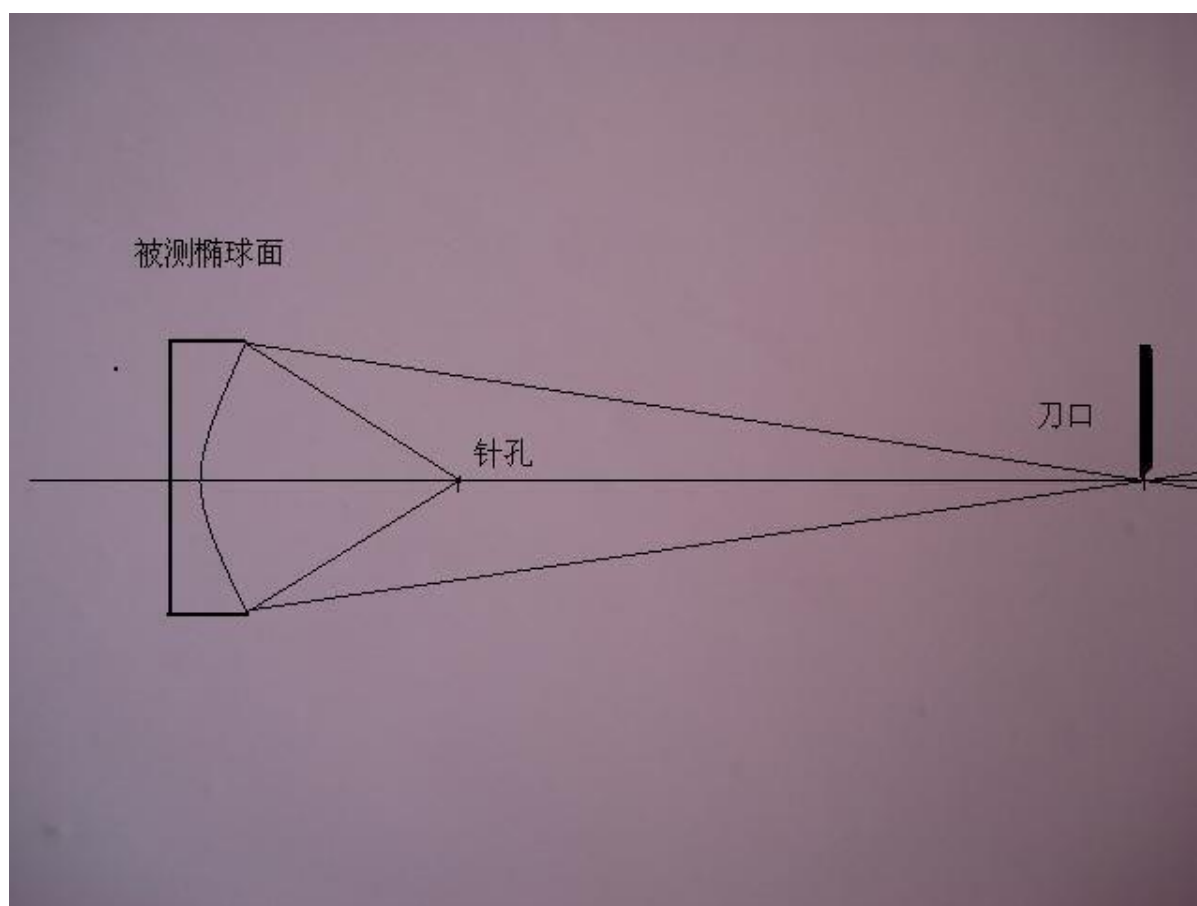
7. 3. JPG



中国国家天文 [www.cnastro.cn](http://www.cnastro.cn)



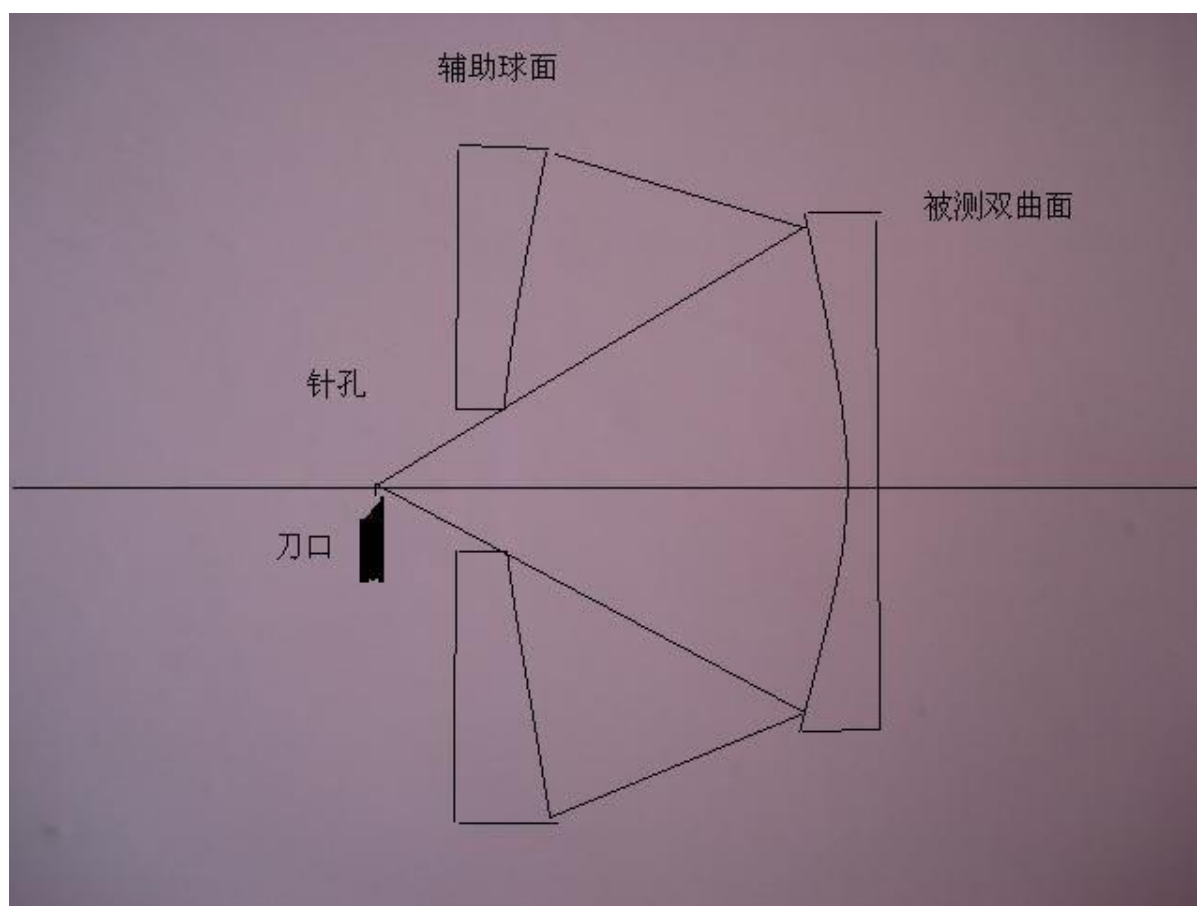
8. JPG



中国国家天文 [www.cnastro.cn](http://www.cnastro.cn)



9. JPG

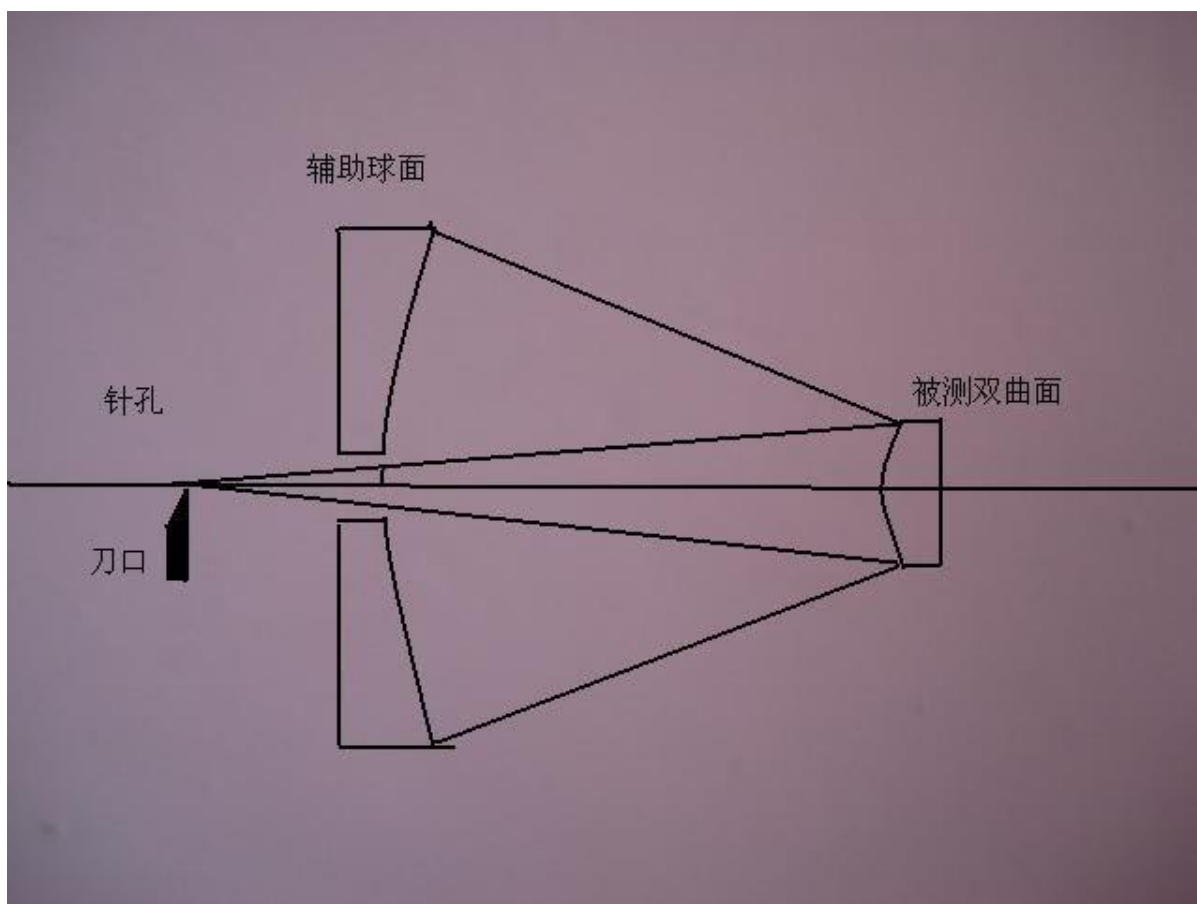


中国国家天文 [www.cnastro.cn](http://www.cnastro.cn)



10. JPG





中国国家天文 www.cnastro.cn

TOP

## 八 用刀口仪检测抛物面

绝大多数业余天文爱好者最关心的是如何用刀口仪检测抛物面。

图 11 是最标准的检测抛物面的方法。理论上这种检测方法最可靠，没有剩余误差。但是它只能检测中小口径的抛物面，成本高昂，大口径高精度的平面镜比同等口径抛物面还难磨制。很难用于检测大口径的抛物面。目前我就是用这种检测方法检测抛物面。

图 11.1 是又一检测抛物面的方法。这种方法对于没有能力磨制高精度平面镜的朋友是个好方法。只要球面的焦距

足够，剩余球差就可以控制在很小的范围。理论上这种方法是  
有剩余初级球差的。

图 12 是马克苏托夫提倡的补偿检测凹抛物面和双曲面的方法。用小球面检测大的抛物面双曲面，是很经济的。理论上这种检测没有初级球差，但是高级球差还是有的。有足够大的球面，检测中等口径和焦比的抛物面 双曲面，剩余的高级球差还是可以接受的。建议厂家在批量生产时用这个检测方法。它比下面介绍的“测法线”和光栅检测好多了。

“测法线”法检测抛物面和非球面。

图 11.11 球面的法线汇聚于球心，抛物面的法线不汇聚到一个点，在主轴上有不同的汇聚点。测出这些汇聚点和法线在镜面的精确位置就可以计算抛物面和非球面的精度。这个方法非常简单，所以被广泛应用。但是我们也应看到它的不足。在实际使用时，法线的汇聚点是可以精确测量的，但是法线在镜面的位置是不能精确测量的。要将镜面法线的位置精确定位

到毫米级是很困难的。如图 11.12.

这就是这个方法检测的精度不准的根本原因。

有朋友用光栏遮挡镜面，希望能将镜面法线精确定位，这也不能解决根本问题。要看出二个相距较大的点的对比度差异小于 10%是相当困难的。用旋转开孔的光栏。光栏的开孔和刀口不垂直时，刀口仪的灵敏度又迅速降低了。开出的小孔边缘的衍射也严重影响了对比度的观测。

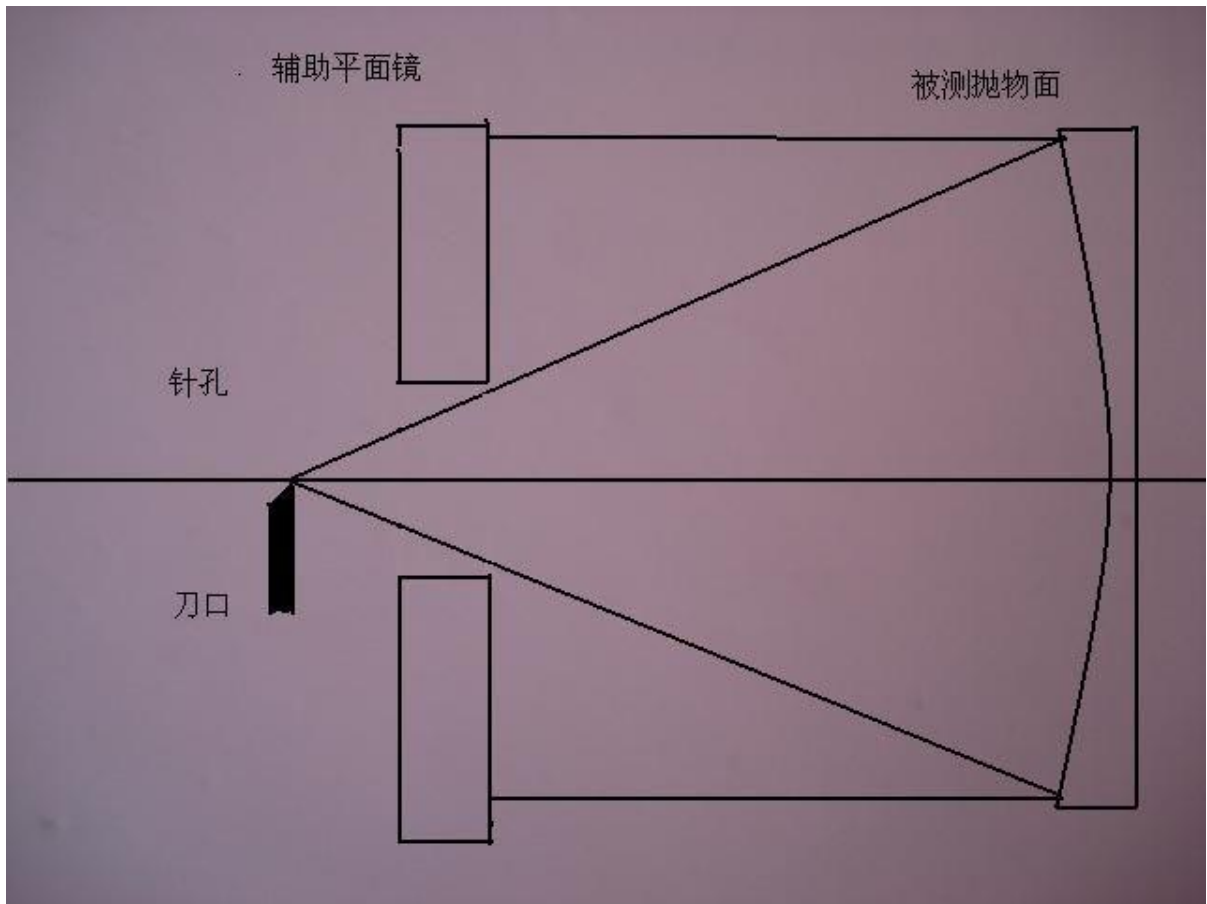
图 11.2 是“测法线”的改进型。它是将刀口换成细

丝，这样就不需要细细 的对比镜面阴影的对比度差异了，法线在镜面的位置就是细丝的位置。这是一个了不起的进步。通过测量的  $r'$  和  $R'$ 。再计算出镜子的面型。但是要将细丝在镜面的阴影的位置 定位精确到 2MM(如口径 200 焦距 1000MM 的抛物面) 仍然是十分困难的。

1996 年以前我曾经很长时间使用这种方法检测抛物面。我发现对于口径 200 焦距 1000 的抛物面，法线位置测量偏差 2MM，计算的结果就有  $1/12$  波长左右的偏差。如果这个镜子的真正精度是  $1/20$  波长。那么用这种方法测出的结果就在  $+1/7.5$  波长到  $-1/30$  波长之间了。



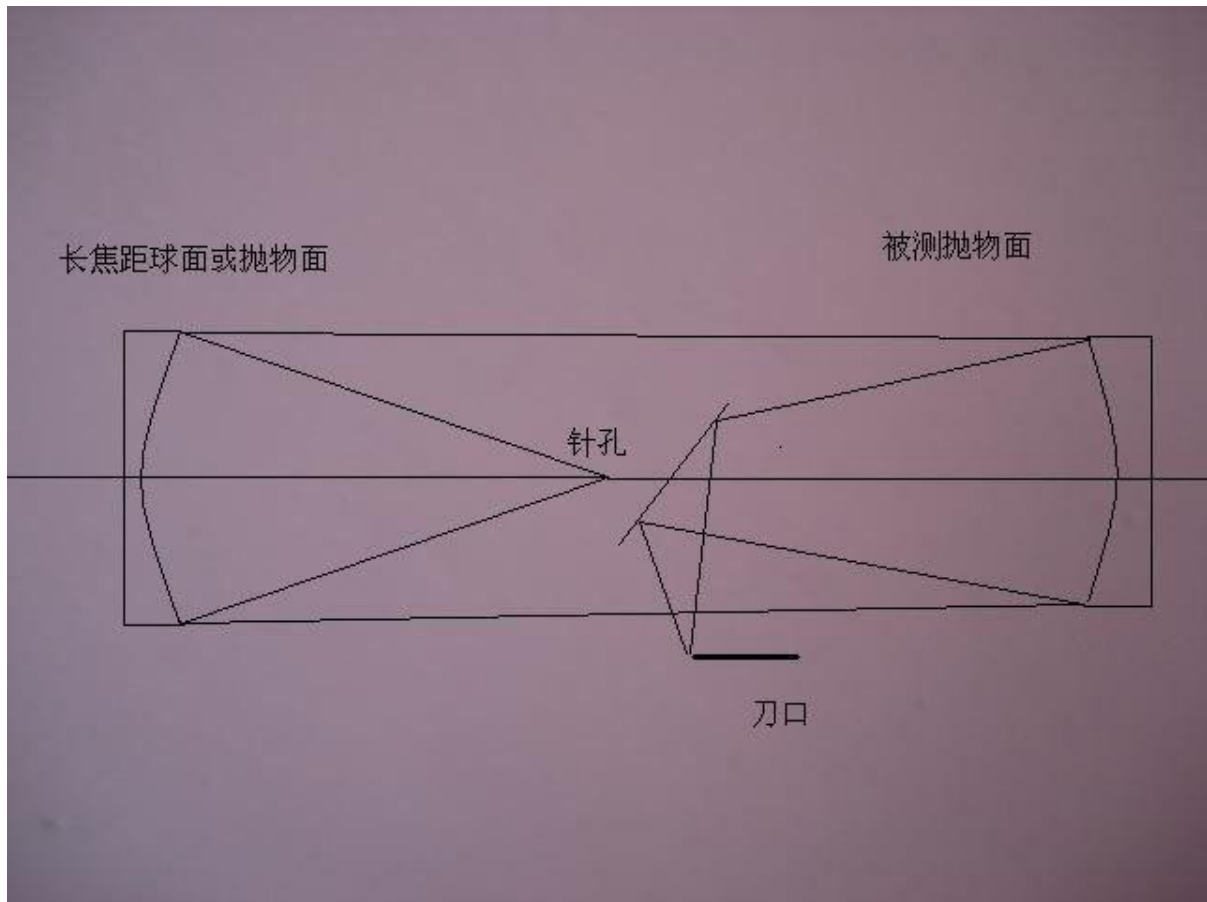
11. JPG



中国国家天文 [www.cnastro.cn](http://www.cnastro.cn)



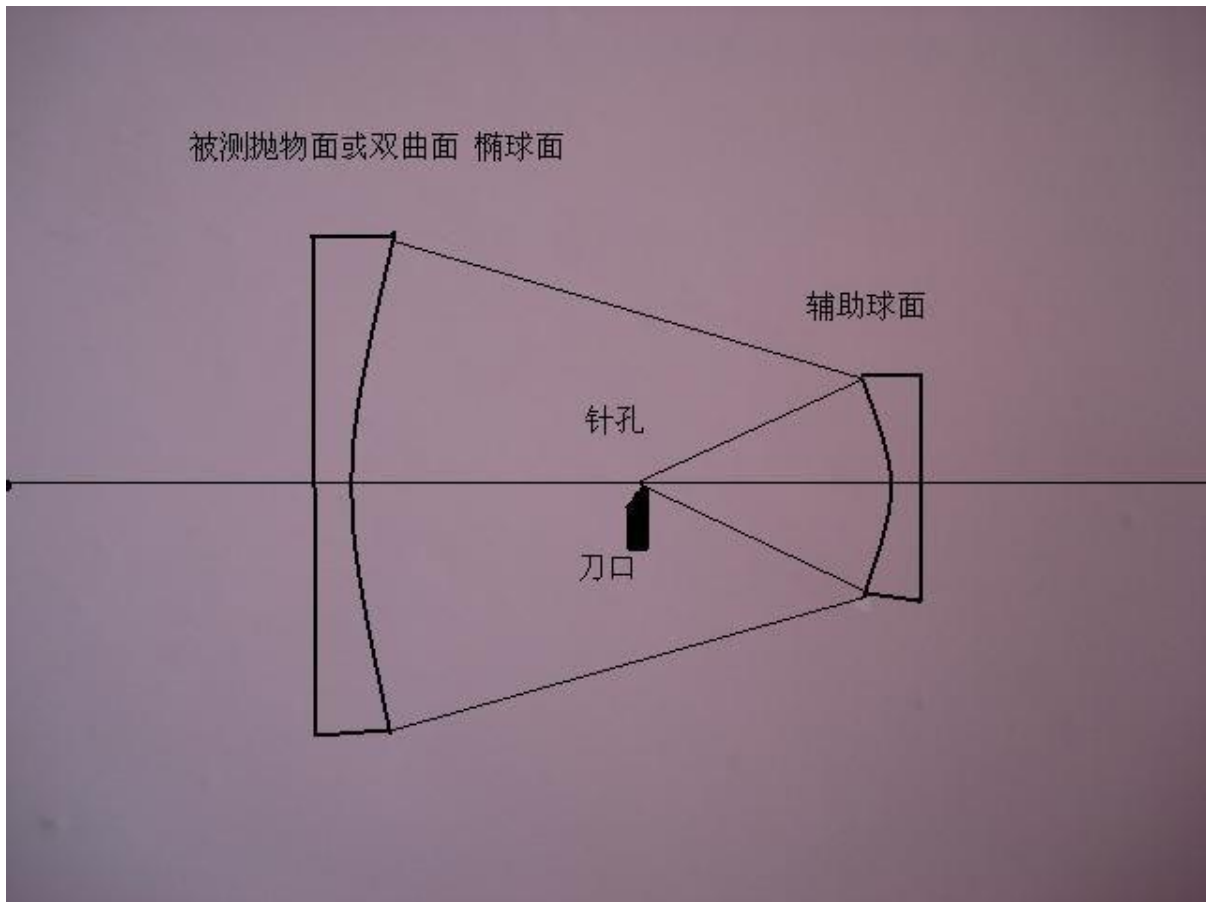
11. 1. JPG



中国国家天文 [www.cnastro.cn](http://www.cnastro.cn)



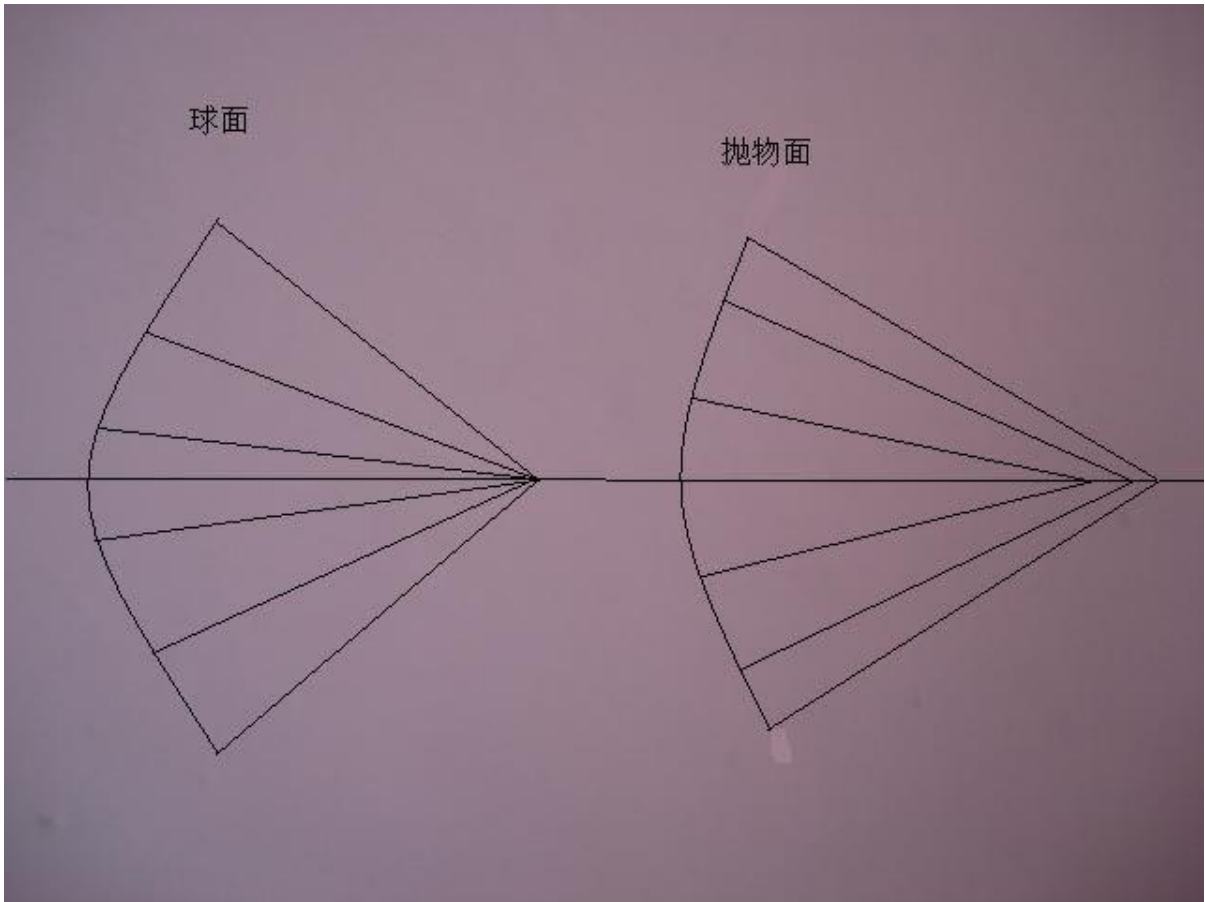
12. JPG



中国国家天文 [www.cnastro.cn](http://www.cnastro.cn)



11. 11. JPG

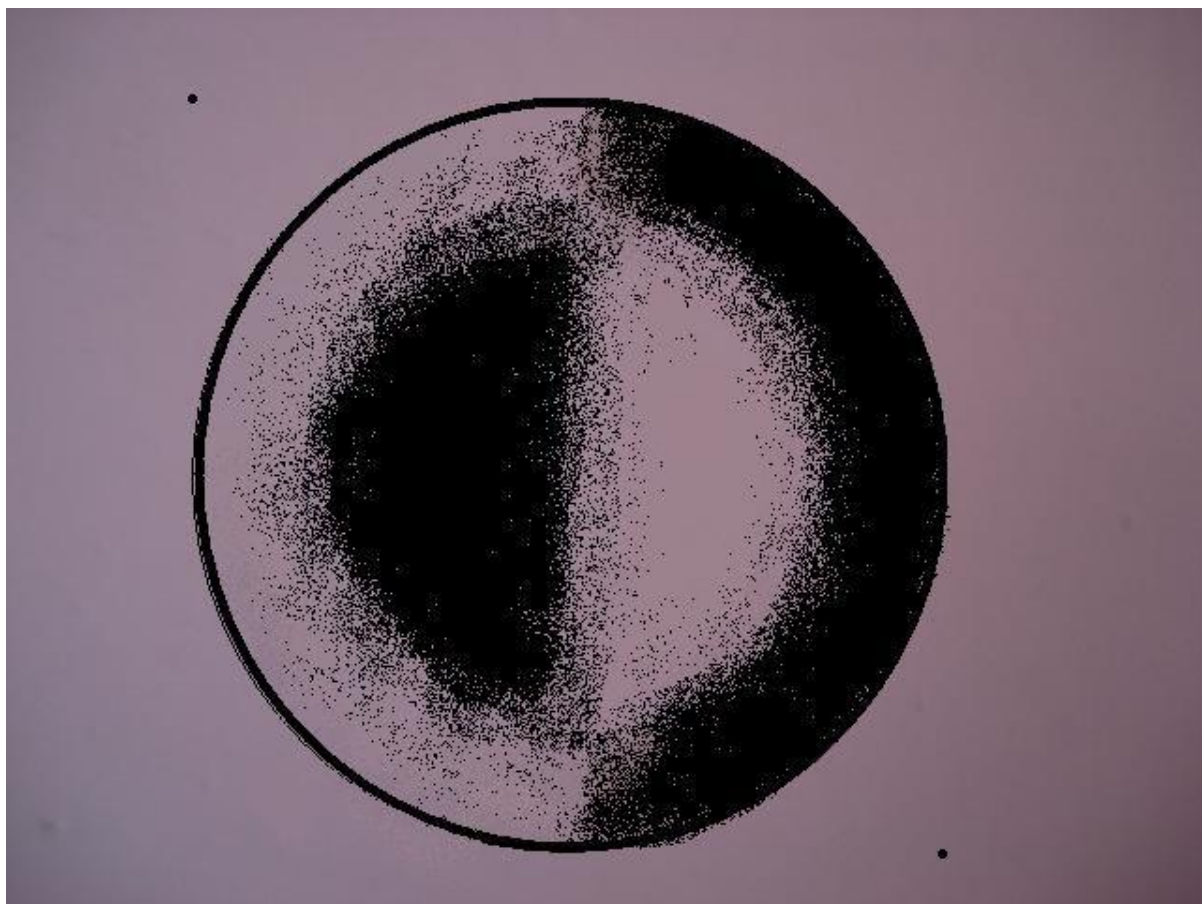


中国国家天文 [www.cnastro.cn](http://www.cnastro.cn)





11. 12. JPG



中国国家天文 www.cnastro.cn



11. 2. JPG

