

激光球波面干涉仪

李德培 何业文

(中国科学院南京天文仪器厂)

提 要

本文叙述了用氦-氖气体激光管作为光源的干涉仪光路原理、使用方法及注意事项。

该仪器专门用来检验张角 $\leq 1:3$ 的会聚球波面的完善性,因此可以用来无接触地直接检验任意口径的镀铝或未镀铝的凹球面镜。加入辅助镜后可以检验平面、天文望远镜用的各种非球面、介质(如光学玻璃)的均匀性、光学系统的质量及安装变形情况。如果装上标准尺及导轨还可以测量凹球面的曲率半径,并能给出物镜对于现用激光波长 6328\AA 的波面差及测出某些象差。

检验结果以干涉条纹的形式给出,加工人员及检验人员一看便知光圈数值是否满足图纸要求,看到的是整个镜面情况,既省时又客观,只要几分钟就行了。如有必要还可以把条纹拍摄下来。在这以前都是用阴影法定性,用哈特曼法定量。阴影法只给出什么地方缺陷严重,给不出局部光圈差值。哈特曼法做一次很费时间,而且不直观,只是检验了整个镜面上的一些带,故结果也未完全反映客观情况。

一、前 言

阴影检验法在制造天文镜面的工艺中应用很广,它有极高的灵敏度、设备简单、非接触、检验速度快,不但可以检验凹球面,加了辅助镜后还可以检验各种凸、凹非球面、物镜、光学系统、安装变形等,用途是多方面的。它的最大不足之处是不能直接用来定量,即只能通过阴影图知道镜面上那些部位高,那些部位低,高低的量只有一个比较的概念,而无数值标记。因此我们在看到阴影图时只能凭以前的“经验”判断其是否达到了图纸要求,能否结束加工。这是有某种任意性的:不同的人可能得出不同的结论,有人说可以结束,有人说不可以结束。即使同一个人不同时间,其标准也不一定一致。样板法完全可以定量,但对一个曲率半径值就要做一对样板,且当口径超过 200 毫米后,因为自重变形、不经济、容易划伤等,已失去了实际意义,尤其对于旋转非球面,用样板法是不现实的,而对于几米直径的镜面,用样板法更是荒谬的。

长期以来我们也为阴影法不能直接定量而感到束手无策。而现有的一些定量方法都是伴随着一系列繁杂过程:如拍摄、测量、计算等,周期长、不直观,而且也不能完全真实地、连续地反映镜面误差情况。有些(如哈特曼法做一次要 8 小时以上)可能是很好的“检定方法”,但不

是理想的“工作方法”，即不能使工人同志一看就知道下一步应怎样修改，而修改后又马上知道修改的效果，因此这些方法不能用来直接指导生产。

自从我们把氦-氖气体激光管用于“平面干涉仪”上作为光源以来，经过实践，发现激光有很多优越性，如光程差很大时仍可看到清晰的等厚干涉条纹，这给了我们很大启示。接着我们又把激光干涉技术应用于旋转 180° 的精确测定中，试验是成功的。激光球波面干涉仪的试制便是由此开始的。

二、仪器的光路及结构

图 1 及照片 1 是该仪器的光路及基本结构。由氦-氖气体激光管 1 发出的 6328\AA 单色光束经平面反射镜 2、3 反射到小聚光镜 4 聚焦于 O' 点，然后发散，经立方棱镜 5（这是由两块等程直角棱镜胶合而成，胶合面镀半反半透膜）把光线分为两束：一束穿过半透膜到标准球面 6（ $\phi 80$ 、 $R250$ 毫米、张角 $1:3$ ），由 6 反射至 5 并折射到球心 O 处。另一束由棱镜 5 折射反射至被检光学系统或光学元件 9，再反射至 O ，两路光在 O 处重合，我们可以在 O 点目视或拍摄，看到的是等厚干涉条纹。

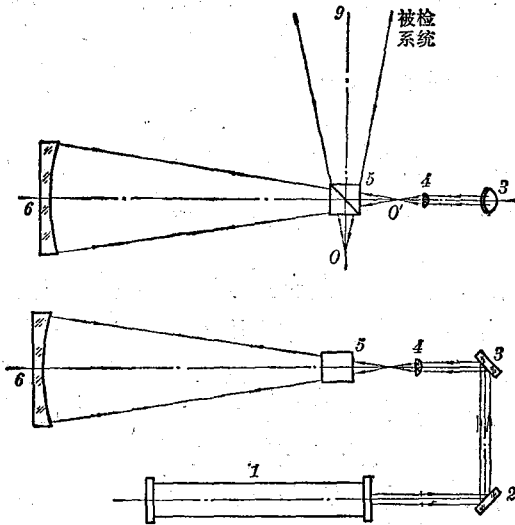
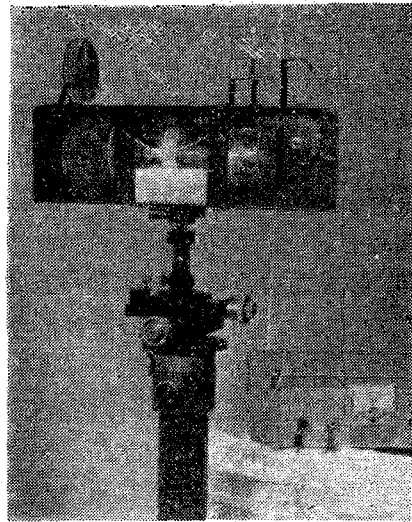


图 1 激光球波面干涉仪光路图
(以后的光路图中只画棱镜 5 代表整个仪器)



照片 1 激光球波面干涉仪外形

同样规格的标准球面有三块：一块镀铝，一块镀增透膜，一块不镀，三者可以分别地、准确地放在同一位置 6 处，用来检验反射率不同的被检对象。

整个仪器装在一个具有减震设备的架子上面。仪器可以前后、左右、上下运动，还可以左右偏转及小角度范围的俯仰。仪器上下、左右、前后运动丝杆每转一周行程为 1 毫米，丝杆应无空回，活动范围约 40 毫米，装配严密，活动自如，一个方向运动时不致使其他方向受影响。

左右、上下活动丝杆是调二光点左右、上下是否重合，微调时则可改变条纹数目。前后丝杆为调焦，是把弯条纹调直用的。左右偏转及俯仰角是调干涉图在视场中的位置用的。

由整个光路可以看出,它的用途与阴影仪相似,只能检验会聚球波面的缺陷。因此凡是能用阴影仪检验的光学元件或光学系统,都可以用它来做定量检验。如用它直接检验镀铝或不镀铝的凹球面,加用各种辅助镜后可用它检验平面、各种非球面及其光学系统,也可以检验物镜、消球差单透镜对于 6328\AA (对目视系统应该用 5500\AA) 的波面差,还可以鉴定光学系统的象差、光学元件的安装变形、光学介质均匀性、空气等介质流受物体阻碍后的流线分布情况等,用途是广泛的。

三、仪器的使用方法举例

1. 检验凹球面镜:

(1) 先用眼找到球心的大致位置,找法是用灯或自然光把自己的脸照亮,脸靠近镜面时就会看到在球面镜中有一被放大的脸的正象,人逐渐向后退并移动头部把眼睛的象移到镜面中心,这时眼的象被逐渐放大直至瞳孔充满整个镜面为止,此处即球心位置,再往后退则眼象逐渐缩小,并变成倒象。对于长曲率半径的球面也可以用小电珠灯丝充满整个球面找到球心。对于有经验的工作者很快能找到球心位置,对于镀铝球面,因反射率很高,容易找到球心位置。

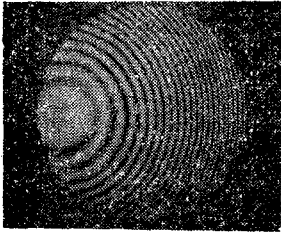
(2) 把仪器移过来,粗调左右、前后及高度,使立方棱镜大致位于球心内偏下一些,棱镜高度要大致等于球面的中心高度。

(3) 打开电源开关,便有激光射出,调节电流至适当值,一般使用小电流时灯管寿命长,但当电流太小时则管子输出时亮时暗不稳定。

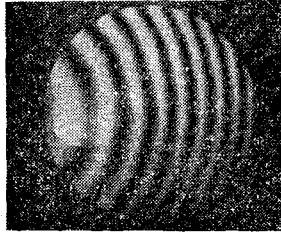
(4) 在仪器上方找到被检球面镜的反射象,若上方没有,可以在罩壳上找到反射象,调仪器使反射象落入立方棱镜中,并与标准球面的光点靠近,前后调丝杆使二象大小近于相等,然后调至重合。

(5) 眼从重合点 O 看进去即可看到干涉条纹。此时很可能是一组“偏心的同心干涉环”,如照片 2。“偏心”是指诸同心干涉圆环的圆心与被检验镜面的中心不重合。偏心的原因是被检球面球心与标准球面球心上下或左右没完全重合。呈干涉环的原因是二球面球心前后不重合。因此我们应当首先调前后,使球心大致重合,调法是眼离棱镜约 25 厘米处看点象,头左右晃动,若二象点有相对移动则前后不重合。可以左右先调分开一点,用手挡住被检球面的象,以便判断那个象是被检球面的象,一般说来标准球面的象总是调在正方形棱镜中央的,头左右晃动时若被检球面的象与头同方向运动则表示此象比标准球面的象远离了我们,所以应把仪器往被检球面移动,即应逆时针旋转前后移动的丝杆。然后左右调使二象重合,就可看到如照片 3 所示的图样。此时干涉环曲率变小,数目变少了。如果是调过头,仍继续调时,干涉环数目会又增多了,需反调,应调成如照片 4 所示的干涉图,即把干涉条纹调直才能看局部差。若同心干涉环与被检球面也是同心的,则表示二球心上下、左右重合,只是前后不重合。在调节熟练后前后调丝杆,看条纹增加或减少的趋势,很快可以调到球心重合。在检测时必须把条纹数调到 3 条或 5 条即让一条是通过被检球面的中心,否则中心的缺陷易被漏掉。若条纹数目再多则密,不便于测量。因为产生的是等厚干涉条纹,所以判断缺陷的方法与样板法相同,可用手指稍碰仪器的左或右,看条纹变化趋势来判断局部是高还是低,此处不再赘述。它与样板法不同的地方是条纹弯曲度是可调的。因为样板是用一个固定不变的曲率半径 r 测量几乎与它完全一样的曲率半径 r (当条纹不是非常直时),因而对于一个固定的 r 就要造一对样板。由

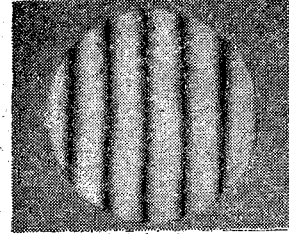
该仪器发出的球波面的曲率半径可视为任意的值,所以它能测定任何曲率半径的凹球面,只要该球面的 r 不过分长或太短,便于观测就可以了。



照片 2



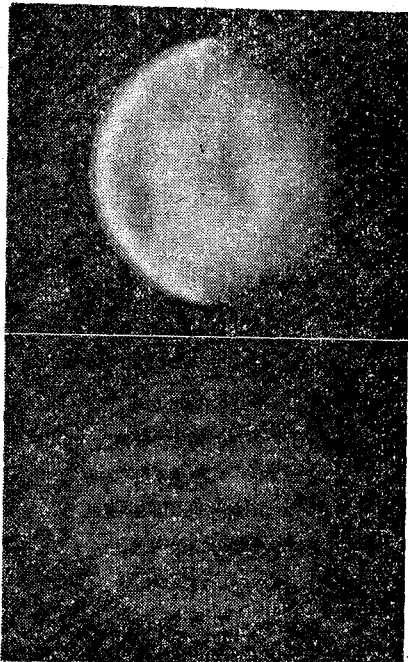
照片 3



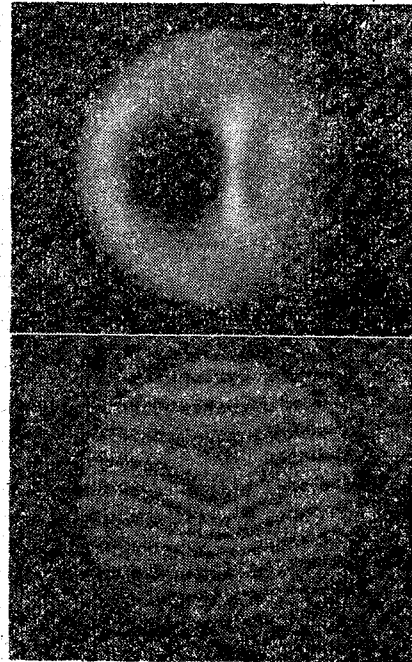
照片 4

值得注意的是空气的流动与稳定对测量的影响,对于 r 大于 1.5 米的球面镜需在镜子前面套上一长管以减少空气流动,否则由于介质均匀性不一致,条纹就把这种不均匀性反映出来,它往往远大于镜面误差,随着均匀性的变化。干涉条纹也在变化。另外仪器对于震动很敏感,因此除加防震设备外,地基要好,震动大时条纹抖动,不易观察。

严格说来,在无导轨时,这种仪器只能检验凹球面的局部误差 ΔN ,对于有带差或局部差的球面,我们只能把条纹的某一部分调直,而其余便形成局部差,如照片 5 和照片 6。这两张照片上面的是阴影图,下面是相应的干涉图。从阴影图看没有量的标志,而从干涉图马上就知道边塌及另一镜中央低的数量结果。因为现用激光波长为 6328\AA ,所以 1 个条纹 = $1/2$ 波长 = 0.3164 微米,也就是二个条纹间相应波面隙的厚度差为 0.3164 微米。对于带区差及地区差严重的镜面在定量时还存在最接近比较球面问题,为此,需要适当前后调焦,找到局部差最小值,因为选取不同 r 的比较球面时可以得出不同误差分布情况及数值,这点应特别注意。



照片 5



照片 6

用阴影仪检验时水平方向精度最高,垂直方向精度为零。用激光球波面干涉仪检验时各方向精度相同,所以我们可以使干涉条纹扫描在镜面上的不同方向进行检验。若有象散时,条纹不等距,后面还要详述。

(6) 如需将条纹拍摄下来,就把照相机放在眼睛观看处 O 点的后面一些,打开快门在放底片的地方用毛玻璃看,把象调正,然后将条纹方向及数目调好,调压电陶瓷电压,使条纹清晰并使一条通过中心,再装底片进行拍摄。曝光时间根据所用底片速度及激光亮度试验定出。一般对于不镀铝的球面用21定底片曝光约1/2秒钟;对镀铝球面要用标准镀铝球面进行检验,用14定底片半秒以下曝光时间即可。

(7) 用后切断电源并接触放电。

2. 检验平面镜:

小的平面镜可以用平面干涉仪检验。对于大些的必须用标准辅助球面镜检验(图2)。这球面镜要事先研究过,精度要远高于被检平面精度要求才行,镜面镀铝。标准辅助球面的球心

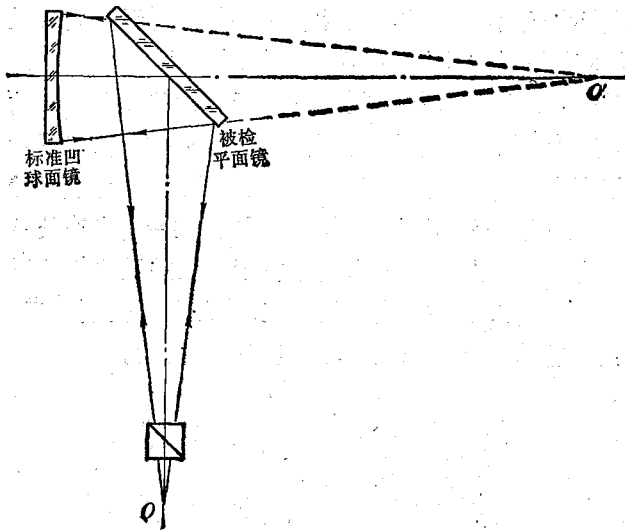


图2 检验平面镜

在 O' 点,经被检平面反射后到 O 点。仪器用法同检验凹球面。因为平面要经常检验不能镀膜,所以检验时用镀增透膜的标准球面使得二干涉光束具有同等亮度。增透膜的反射率对 6328\AA 应在 $1/400$ 左右。

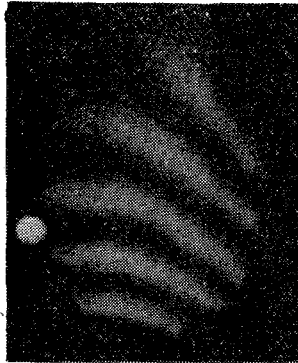
平面镜在视线方向的投影为椭圆形,长轴垂直,短轴水平。一般是把平面镜法线与光轴倾斜 45° 角左右,并尽可能靠近球面。标准辅助球面镜可取 $\frac{R}{D} \approx 10$,此处 R 为球面镜的曲率半径, D 为球面镜通光口径。最好选择 D 比被检验平面镜略大些,至少也要相同。但是,被检平面口径不能比标准辅助球面口径

D 小太多,因为在眼处张角太小也不方便。被检平面由于要经常检验不能镀膜,所以当背面也是抛光时要注意不要检验到背面,要把二者分开。

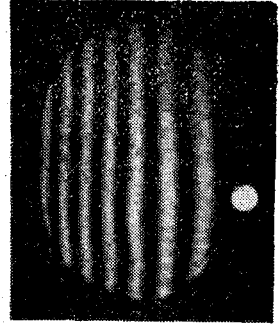
检验局部差时与检验球面相同,如果看到的条纹是直的,则表示局部差很好,但此时平面可能带有一些曲率,当平面镜是均匀高或低时,我们从激光球波面干涉仪中会看到象散现象,如照片7及8。这种象散现象,表示平面 N 有问题,所以还要判断一下曲率的符号,即判断出是均匀高些还是均匀低些。方法是先把仪器上下左右倾斜使标准球面中心与平面投影椭圆形中心重合。前后、上下、左右微调把条纹调成水平并呈直线,然后保持前后不动,再微调上下、左右把条纹调成垂直,看是否还是直的?是直的则表示平面是平的,若条纹变弯就不是一个平面,而是一个有曲率的球面,弯得愈多表示 N (平直度)愈差。此时我们把前后微调一下,看往哪个方向调时条纹变直。若往前调(即往靠近镜子方向调)时条纹变直,则说明此平面有些凸,否则若往后调时变直则平面有些凹。仪器一定要造得稳定,不能前后动时还会左右摇摆。用这种方法检验平面时,垂直方向的干涉条纹某处有缺陷,直接对应于镜面该带,而水平干涉条纹由于与椭圆短轴重合(通过中心的这条),带区宽度被压缩,所以看垂直条纹较方便些。如照片9,



照片7



照片8



照片9

该平面仍有象散。检验镀铝平面时就用镀铝的标准球面。

对于自准直用平面的检验,我们仍主张用阴影法,对检验 ΔN 的精度阴影检验较高,而用激光球波面干涉仪检验时没有用阴影法精度高。对于其他元件检验也存在这一问题。对于检定平面镜的 N ,干涉法更好些,它便于发现象散。对于好的平面镜,其上各个方向的干涉条纹在同一焦面位置均是直的且等距离,即无象散。

3. 检验物镜:

检验物镜时要用标准平面做自准直检验,如图3是用二片分离式物镜为例子,把欲检验的物镜事先装好校好:开始先在透镜边缘 120° 均布垫以计算好厚度的等厚铝箔,等厚性在5微米以内,然后在单色光下看第二、三面间的干涉环是否与镜框同心,不同心则表示铝箔不等厚或距中心不等距,应拿出来重装,直到装校正确。

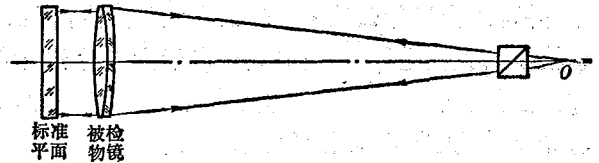
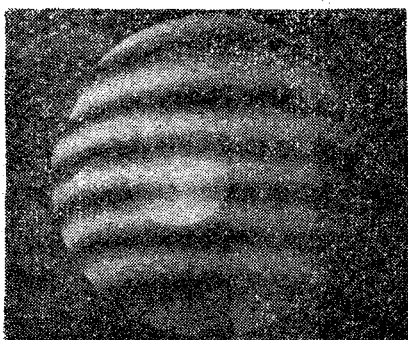


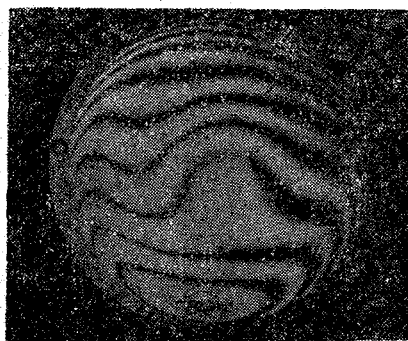
图3 平面自准直法检验物镜

物镜的 r_1 面(即对向平行光的那个面)向平面镜,使平面垂直于物镜光轴,在物镜焦点附近放上激光球波面干涉仪,把立方棱镜放在焦点内稍低一些。焦点的找法同找凹球面球心的方法,脸在焦点内时是放大的正象,在焦点外时是倒立缩小的象,正好在焦点上时瞳孔充满整个物镜。

打开电源开关,找到经平面反射的亮点,把棱镜放到这位置。用纸挡住平面镜,我们可以在物镜中看到三个红色亮点(实际上是四个,因为 r_2 及 r_3 很接近,二象点几乎重合),调物镜倾斜,大致调到三点的连线通过平面反射的亮点。移动干涉仪,使物镜反射的三亮点通过立方棱镜中央标准球面的反射亮点。然后取去挡平面的纸,调标准平面镜,使其反射象也通过标准球面反射的亮点。通过微调把二亮点调重合,则可看到干涉条纹。微调后将条纹调直即可进行检验。对于未进行组合修改以消去残存球差的物镜,其干涉条纹不是直的,有带差,其弯曲程度由残存球差量决定。组合修改过的物镜条纹应是直的。应注意的是我们看到是高(低)切带的地方,相应于物镜某一面(我们进行组合修改的面)来说是低(高)的切带,因此修改时不能判断错,否则愈改缺陷愈严重。照片10为一 $\phi 150, F1200$ 双分离物镜的干涉条纹照片,边上塌边很易看出。照片11为双胶合物镜 $\phi 80, F280$ 的干涉图,可看出残存球差引起的波面差变形很大,对称性也不好。



照片10



照片11

要注意因为受激光管输出波长的限制,还不适于检验目视系统的物镜。如果用 6328\AA 单色光,把物镜条纹修直,则对于 5893\AA 的光条纹就不直了,因为有色球差的影响,尤其对于相对口径大的物镜相差更多。所以输出波长为 6328\AA 的激光管不适合检验目视或一般照相的折射物镜,只适用于红光照相如天文上用观测太阳色球层的望远镜物镜。如采用波长可调谐的激光器,本仪器的应用范围将会扩大到各种折射系统。

用激光球波面干涉仪检验物镜时其干涉图形直接与瑞利条件联系起来,把透镜的四个面均磨成球面时会有残存球差,尤其当相对口径较大时更明显,这是设计者无法克服的。由于残存球差的存在就使得物镜焦点处形成的会聚球波面有缺陷,其大小及分布情况是可以利用激光干涉仪测出的。有时由于玻璃均匀性较差形成地区差,干涉仪也可指示出来,允许修改其中任何一个面达到形成理想的球波面。工人同志在修改过程中也可以通过它来看实际修改的效果,并可以指出什么地方应修去的量的多少,直至一步一步地完成。利用这种装置还可以对折射棱镜的光程进行检验和修改,对于大块折射棱镜,由于光学玻璃的不均匀性,做这一步是非常必要的。若把这棱镜换成平行平面镜,事先把二面光圈修好,厚度差1微米左右,则可对此块光学玻璃进行均匀性的定量检验。

自准直检验用的标准平面可以镀铝,也可以不镀铝。镀铝时则干涉仪中用镀铝的标准球面,对不镀铝的则用不镀铝的标准球面。对此平面的要求是其局部差要很小,要远小于对物镜的要求,而对于 N 的要求则可以降低,即可以是一个曲率半径相当大的球面。所允许矢高数值与物镜的相对口径 A 及精度要求有关。 $A = \frac{D}{F}$, 其中 D 为物镜的通光口径, F 为物镜焦距。 A 愈大,则要求平面的平直度 N 愈小。

对于多片物镜或更复杂的折射系统检验方法与前相同。这样所检验的是对 6328\AA 单色光由物镜产生的会聚球波面与理想球波面二者的局部差。由于光线通过物镜二次,所以实际应用时为检验时看到的误差的一半,并且,我们还可以在物镜不同方向上进行检验。

用此仪器检验物镜象散、夹紧及安装变形比用阴影法方便。

4. 检验凹抛物面:

检验凹抛物面的方案很多,一般是用平行光管法、平面自准直法或补偿检验法。现各以两种常见光路为例。

(1) 平行光管法: 这类方法是用标准凹抛物面或标准物镜(也可以用消球差单透镜,它们都是用 6328\AA 检测的)发出平行光,然后以被检抛物面来接收,在焦点进行检验,如图4(a)(b)所示。其中标准凸球面是作反光用,球心要调到与抛物面焦点重合才行,对辅助抛物面要

用平面自准直法把干涉仪棱镜位置放好。可以把小凸球面反光镜与被检抛物面固定在一个架子上,把抛物面很好地定位,以便一放就是既定位置而没有相对位移,保证光轴正确,应用起来很方便。

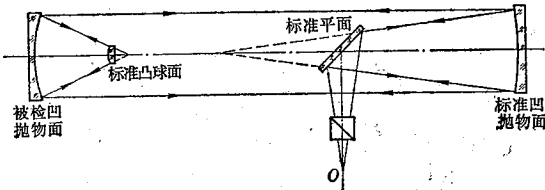


图 4(a) 反射式平行光管法检验凹抛物面镜

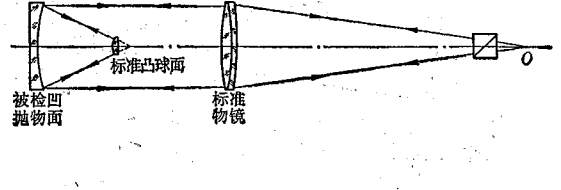


图 4(b) 折射式平行光管法检验凹抛物面镜

这种检验方案多用于被检抛物面的相对口径比较大的情况下,此时自准直法不适用,而对于适当相对口径的抛物面用平面自准直法较好。

(2) 平面自准直法: 这种方法较方便,引入的误差较小。它是利用标准平面对抛物面进行自准直检验,如图 5(a)(b)所示。用于自准直法检验的标准平面只要求局部差 ΔN 要小,其精度要求要远高于对抛物面的精度要求,而对于整个平直度 N 则不要求那么高,对于相对口径小的抛物面,标准平面 N 有时超过几十圈均可用。就是对于 $A=1:1$ 的抛物面,当精度要求为 0.2 光圈即 $\frac{1}{10}\lambda$ 时(对大直径抛物面很难达到)标准平面的 $N < 10$ 就足够用了。但此时用干涉仪很难检验 ΔN ,所以我们制造时还是要把它加工得好些,如 $N \leq 1$,这样看局部差才有利。若是用阴影仪检验则只要求左右切看 ΔN ,不需上下切就可以了,此时也不必担心 N ,因为 N 为几圈时阴影中会发现象散,当然这是不允许的,应该判断出高低进行修改。

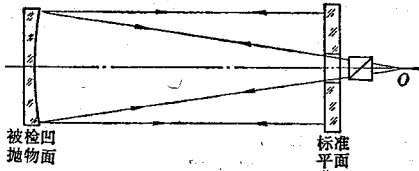


图 5(a) 平面自准直法检验凹抛物面镜

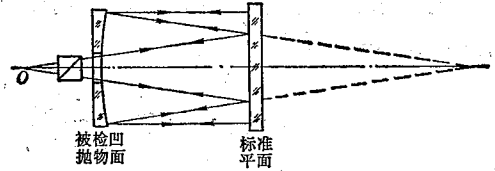


图 5(b) 平面自准直法检验凹抛物面镜

图 5(a) 表示激光先经过抛物面反射到平面,再反射到抛物面,在抛物面焦点放上激光球波面干涉仪。图 5(b) 的光先经过平面,这方案比图 5(a) 方案光线在平面上多反射两次,所以对平面的要求也相应地提高了。

在检验过程中抛物面不可能镀膜,平面则是镀铝的,光在不镀铝的面上反射两次,所以也应该象检验平面镜那样,用镀增透膜的标准球面进行检验。

这两方案中抛物面或平面二者之一,中心必须有孔才行,否则就要用对角平面镜把光路引出来进行检测,如图 6 所示。

(3) 补偿检验法: 此法主要是利用口径较小的凹球面检验口径较大的凹抛物面或双曲面。选择球面的曲率半径、光点位置及与抛物面的距离,使球面产生的纵向球差补偿抛物面的法线象差,如图 7(a)(b),详见参考资料[1]。也可用透射式补偿法,如图 8。

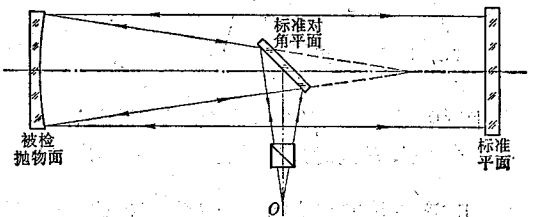


图 6 平面自准直法检验凹抛物面镜

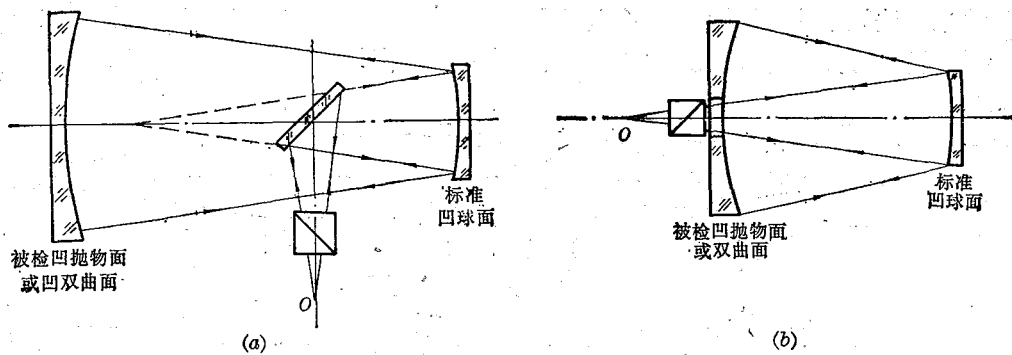


图7 反射式补偿检验法检验凹抛物面或凹双曲面

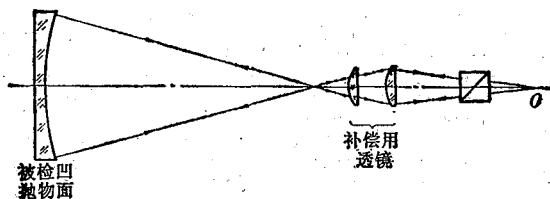


图8 折射式补偿检验法检验凹抛物面或凹双曲面

5. 检验其他非球面及其光学系统举例:

各种镜面的检验可以有各种组合, 归根结底是把欲检验的元件或光学系统想方设法加入辅助镜面(要易于加工检验), 使发散的球波面经它们作用后成为会聚球波面, 然后借助于激光球波面干涉仪进行检验测定。下面以几个常用光路为例, 余类推。这些元件间的关系从图中可以看出来, 不一一叙述。

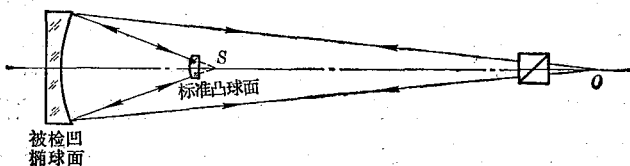


图9 检验凹椭球面(S 、 O 为椭球面二共轭点)

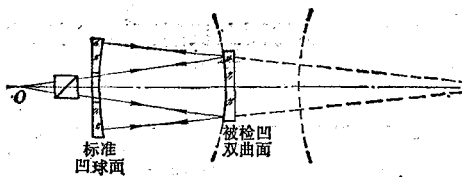


图10 检验凹双曲面(S 、 O 为双曲面二共轭点, S 同时又是标准球面的球心)

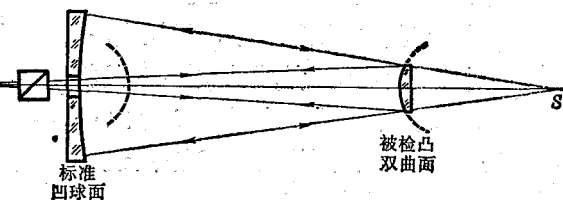


图11 检验凸双曲面(S 、 O 为双曲面二共轭点, S 同时又是标准凹球面的球心)

用补偿检验法检验凸双曲面见参考资料[2], 如图12。

用标准凹椭球面补偿检验凹扁球面, 见图13。由 O 点发出的光经椭球面反射后成为有一定象差的反射光, 事先选择椭球面参数, O 点到椭球面的距离及至扁球面的距离, 使反射光沿

被检凹扁球面的法线方向入射,然后沿原光路回来,在 O 点进行检验。严格说来只是外带光及近轴光得到补偿,而其余各带有残存球差,因此需先试算几次,使残存球差小于一定值才行。

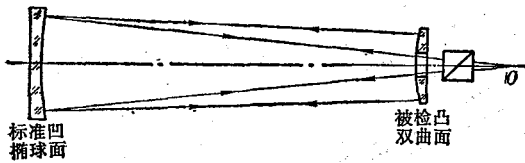


图 12 用凹椭球面补偿检验凸双曲面

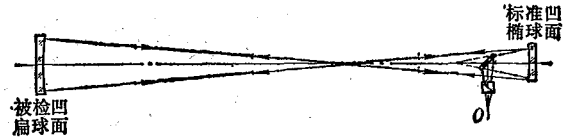


图 13 用凹椭球面补偿检验凹扁球面



图 14 用平面自准直法检验三片型物镜



图 15 用平面自准直法检验消球差单透镜

也可以用“平行光管法”检验特长 R 凸、凹球面,见图 16(a)(b)。但,这时发出的不是平行光,因为光源不在焦点。这种方案只是检验了局部差 ΔN ,当然,若先用一个标准平面放在被检球面处,定出物镜焦点位置,然后换上特长 R 球面再定出“焦点”位置,如果能精确测定出这二焦点位置差,就可以推算出特长 R 球面的曲率半径 R 值。一般只用它测 ΔN 。

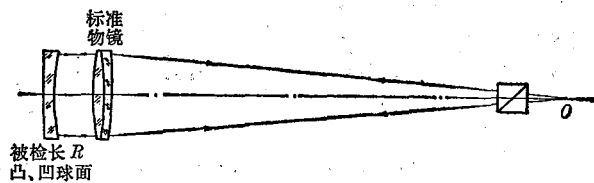


图 16(a) 用透射式“平行光管”法检验长 R 的凸、凹球面

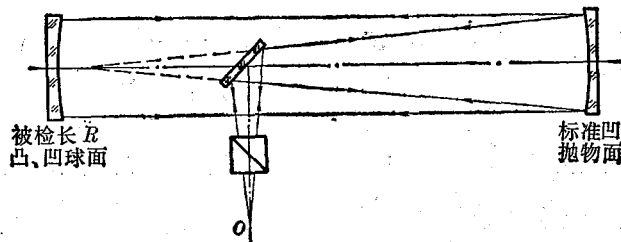


图 16(b) 用反射式“平行光管”法检验长 R 的凸、凹球面

R 长到什么程度才能用此法?这与所用物镜或抛物面的光力 ν 及球面局部差要求 ΔN 有关。此中 $\nu = \frac{1}{A} = \frac{F}{D}$ 。设特长 R 球面矢高为 h ,则在给定物镜或抛物面 ν 及球面精度要求 ΔN 后: $h < 128 \cdot \Delta N \cdot \nu^2$,则此检验有效。注意 h 与 ΔN 同单位。此公式也适用于平面自准直法对平面矢高的要求。

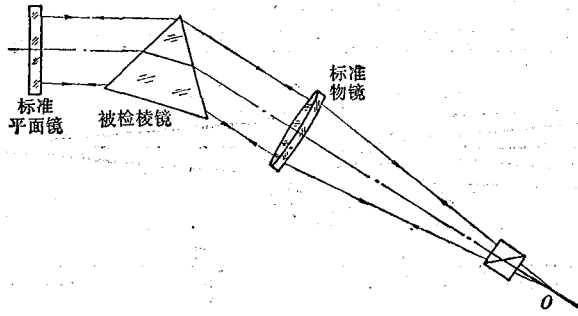


图 17 用平面自准直法检验棱镜修光程

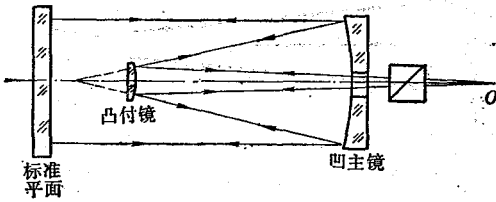


图 18 用平面自准直法检验望远镜系统
包括其组成元件

组合	主镜(凹)	付镜(凸)	注
1	抛物面	双曲面	轴上点无象差
2	双曲面	“双曲面”	修凸双曲面
3	球面	“扁球面”	修扁球面
4	“椭球面”	球面	修椭球面

消去带球差

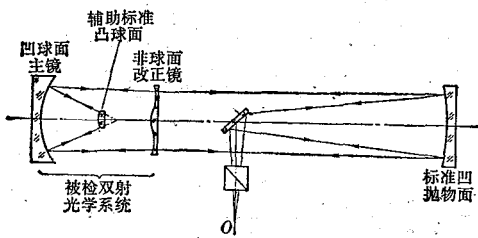


图 19 用反射式平行光管法检验双射光学系统

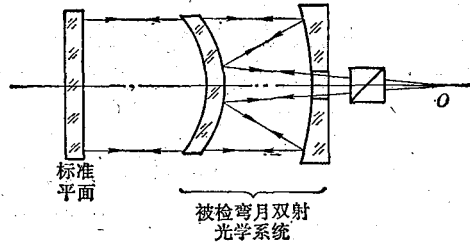


图 20 用平面自准直法检验弯月型双射系统

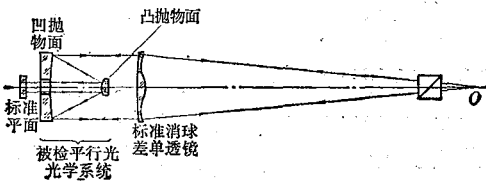


图 21 用平行光管法检验平行光光学系统

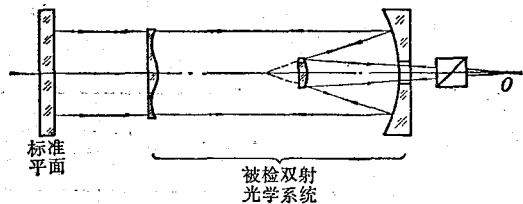


图 22 用平面自准直法检验双射系统

6. 在顶点曲率中心附近检验二次旋转凹非球面:

取顶点为坐标原点, x 轴为旋转轴(也即光轴)的二次曲线旋转面,用通过光轴的平面去截曲面,得到平面上的曲线族,其公共方程式为 $y^2 = 2Rx - (1 - e^2)x^2$, 此中 R 为在顶点密切圆的半径, e 为表征曲线的特性值,称为离心率。

$e^2 < 0$ 为扁球面(即绕椭圆短轴旋转而成的面,它不是无象差面,但可以做为无象差系统中的光学元件)。

$e^2 = 0$ 球面。

$0 < e^2 < 1$ 椭球面。

$e^2=1$ 抛物面(此时方程式为 $y^2=2Rx$)。

$e^2>1$ 双曲面。

曲线上各带的法线与光轴的交点 O_y 到顶点 O 的距离称为法线截距。各带法线截距是不相等的, $\Delta R_y = R_y - \dot{R} = e^2 x$, x 为该带的矢高, 见图 23(a)。可以看出, 随着带区高度的增加, 法线截距是逐渐远离镜面的, 而扁球面正好相反, 由于 $e^2 < 0$, 所以随带区高度的增加, 法线截距是逐渐靠近镜面的见图 23(b), 可以与图 13 对照, 因此用焦内的补偿检验(方法如图 7 那样)就无法检验, 而只能用图 13 的方案检验, 但这种方案光路较长。对抛物面, 因为 $e^2=1$, 所以 $\Delta R_y = x$ 即等于所在带的矢高。

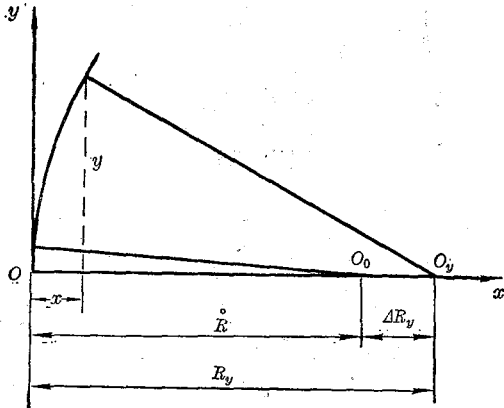


图 23(a) 椭球面、抛物面、双曲面各带法线截点分布情况

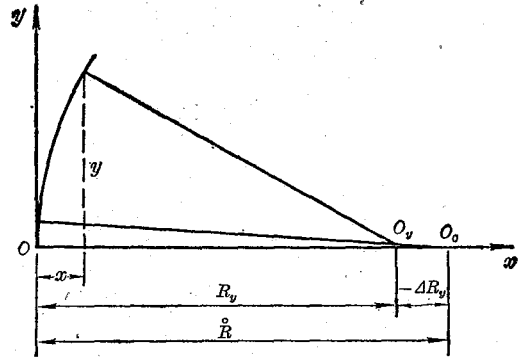


图 23(b) 扁球面上各带法线截点分布情况

注意, O_y 并不是 y 带的曲率中心, 它只是法线与光轴的交点, 二次曲线顶点附近的曲率中心的轨迹如图 24。 P_1, P_2, P_3 的曲率中心分别在 O_1, O_2, O_3 点(扁球面除外), 它们的轨迹称为焦散线。

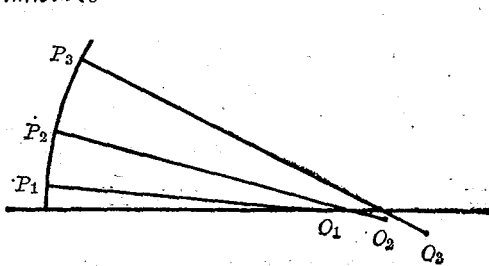


图 24

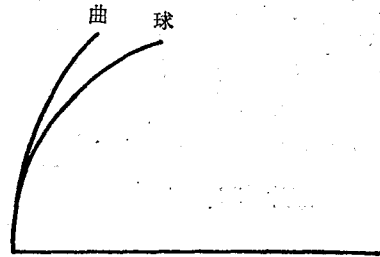
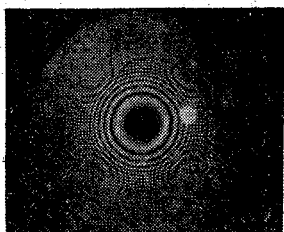


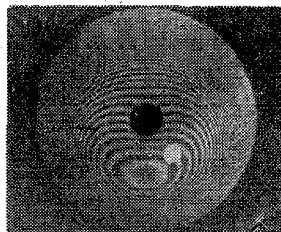
图 25

当我们把干涉仪标准球面球心对到与顶点的曲率中心 O_0 重合时, 就会看到中心附近是无条纹的(即均匀的一片亮或暗)。稍移开一点, 则中心附近条纹是直的。愈往外带则条纹愈多愈密。就等于我们用与曲面顶点相切的密切球面与之比较, 如图 25。这两个面形之间成等厚干涉条纹。厚度差每变化 $\frac{1}{2}\lambda (=0.3164 \text{ 微米})$ 就形成一条干涉条纹。以中心到外带厚度差几个 $\frac{1}{2}\lambda$ 就有几条干涉条纹。所以我们把照片拍下来, 在直径方向量出各条纹与直径交点的坐标值, 就可以求出实际镜面与 \dot{R} 球面的偏差, 拿它同理论镜面与 \dot{R} 球面的计算值比较就可求出镜面误差。

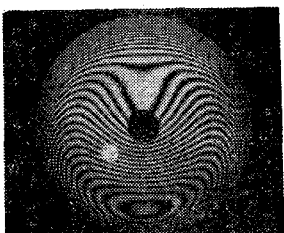
照片 12 至照片 18 为一个凹双曲面($\phi 212$, $R 1200$, 中孔 $\phi 32$)依次从顶点曲率中心起逐渐往外沿光轴取一些点到外带法线交点所摄的干涉图。从照片可清楚地看出用不同比较球面时干涉条纹的变化。当我们把干涉仪标准球面球心放在某带法线截点上时就可看到该带的条纹变宽, 而向内、向外条纹变窄, 如照片 16。因为选 O_y 至 y 带距离为半径, O_y 为球心的球面与双曲面相比较, 则在此带二面相切, 所以在此带条纹变宽了。



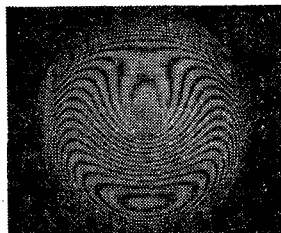
照片 12



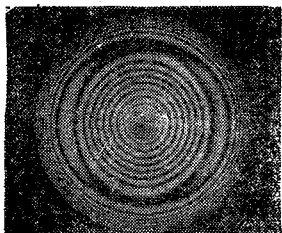
照片 13



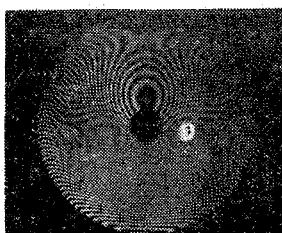
照片 14



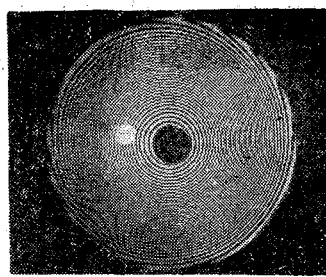
照片 15



照片 16



照片 17



照片 18

从这些照片上条纹的变化就不难看出, 在修改这种凹非球面时, 为何选 0.7 带为界向内、向外逐渐多磨的道理(对于凹扁球面则是保持中心与外带向 0.7 带逐渐多磨, 而在 0.7 带磨去的最多), 因为这样加工时, 修去的玻璃深度最少(见照片 16), 否则须磨去的深度都会增加, 给加工带来困难。

从这些照片中可以找到最有利的一组条纹, 用它通过测量计算而求出表面实际形状, 这一工作尚待进行。

我们还可以大胆地设想制造一具专用光电测量仪, 用它对底片某条直径扫描, 记录条纹最中心带的坐标, 并通过编码尺输出到一台专用小型电子计算机中, 事先把计算程序编好并连同原始数据输入, 当扫描完成后, 由计算机立即算出表面误差分布情况, 用来指导加工, 从而也为程序控制修改镜面创造条件。看来这种可能性是有的, 这种专用计算机并不难制造。还可以把

激光干涉仪装在磨镜机的适当位置上,检验时只须将镜面上的抛光粉擦净,温度平衡后就可以进行扫描,很快把镜面形状测出。若擦净后测一次,过一段时间再测一次,还可以看出镜面变化趋势。

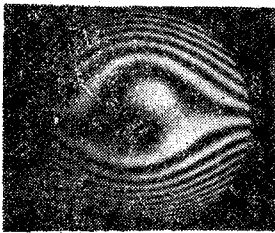
7. 几种象差引起的波面差在干涉仪中的表现:

这方面的工作我们没有开展,这里只是定性的介绍一下,现在也只能是对 6328\AA 测定。

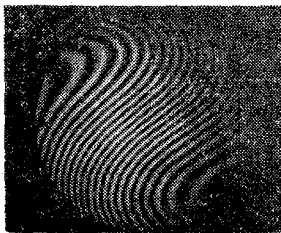
(1) 波面差的测定: 由于干涉仪所测量的是实际波面与理论球波面的等厚干涉条纹,所以用平面自准直法测定光学系统在焦点的波面差是可行的,拍下来的照片就是波面差的2倍的照片。这种波面差与所选比较球面有关,应选最接近比较球面,同时也与空气的均匀性有关,所以一定要等空气稳定后才可检验,否则条纹会由于光程的变化而变动。

(2) 纵向球差: 对于没有球差的波面,可以把干涉条纹调成直的。对于有球差的波面干涉条纹就调不直,会发生局部弯曲。注意这种弯曲与调焦不准(如照片3)不同,有球差的波面干涉条纹各点曲率不同,如照片6。无论怎样调都不能把通过中心的这条干涉条纹完全调直,我们只能调到使条纹上对称的某二部分的条纹平行于该方向的直径,这时表示仪器的标准球面的球心是在这部分法线截点上,因此若测定纵向球差,就需要把镜面上相应的带的法线截距差测出。

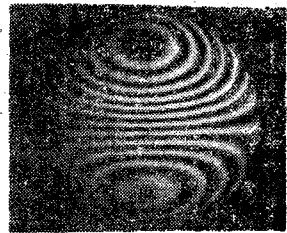
(3) 彗差: 具有彗差的波面在干涉仪中的干涉图,如照片19、照片20、照片21。



照片 19

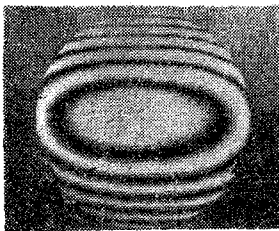


照片 20

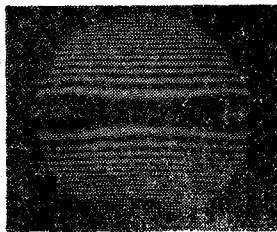


照片 21

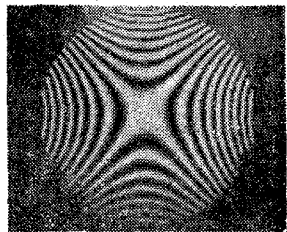
(4) 象散: 干涉仪是用理想球波面与被检光学元件或光学系统进行检验,干涉条纹在各直径方向精度是一样的。所以用干涉仪发现象散比阴影仪要灵敏、方便。象散在激光干涉仪中的表现如照片22、照片23、照片24。这是一块 $\phi 150$ 、 $F1200$ 双分离物镜的轴外象散照片,依次为一条焦线外、焦线上及二条焦线中间位置所摄。另一焦线以外的照片与此相同,只不过方向垂直。



照片 22



照片 23



照片 24

如欲测象散差,则要测出两个焦线的位置差。

如果光学元件安装不当,引起变形,则干涉条纹就会扭曲,本仪器也可测出。

四、仪器的安装调整及使用注意事项

1. 各光学元件应注意清洁,尤其是小聚光镜、棱镜,当上面有灰尘时,在干涉图中就会有脏的斑点,并有一些暗环围绕着。激光管输出端也应擦净,这样可使视场中杂乱的干涉条纹减少。但由于激光单色性强(谱线半宽小于 10^{-7}\AA),所以很难避免其中杂乱条纹的干扰,这从照片中是可以看出的。如果把聚光镜及立方棱镜各面均镀增透膜,可减少杂乱条纹。

先装入激光管,安装时一定要小心,将激光管固定在框中,螺丝不能上得太紧。将框架上电源接线柱板的电线小心地接在激光管阳极(红色)及阴极(黑色)上。接触要好,不可脱落,更不要接错。接压电陶瓷电线到接线柱(不分正负极)。

2. 装小反射镜 2,装小聚光镜 4(此处平面反射镜 3 与小聚光镜 4 是做在一个支架上的),装镀铝的标准球面 8 到 6 的位置。这些支架均不要固紧,以便调整。

3. 将电源线分别接在仪器框的面板接线柱上,正极接在红柱上,负极接在黑柱上,然后重新检查一遍,电源的阴极是否接在灯管阴极上?检查无误后才可把激光电源插头接通 220V 交流电源,此时扳动开关,即可发出激光。我们用的激光管起辉电压为 4500V,工作电压为 1500V。将电流表调到 4 毫安(换管子时此值可能略有出入)。

4. 调平面反射镜 2,使激光射至机架上孔中,并射到反射镜 3 及聚光镜 4 中央。调时要使激光经反射镜 3 后再沿着光轴射向小聚光镜 4,此时从小聚光镜 4 射出去的光会聚后发散的光束才能高低左右很合适地照到标准球面上。固定平面镜 2、3 及聚光镜 4。

5. 用一小块白纸在聚光镜附近找到标准球面的反射象,旋转并倾斜球面镜框使反射光点与聚光镜射出的亮点同心(此时球面反射象点是在聚光镜前,而在聚光镜处变大,因为未加入棱镜),并把球面镜框稍加固定。

6. 装入立方棱镜,旋转、倾斜使球面通过棱镜的象点在聚光镜亮点旁,前后移动标准球面,使象点在聚光镜焦面上最小,然后使象点与聚光镜亮点重合。

7. 眼从棱镜中可看到棱镜的平面与球面产生的干涉环。此环如果与球面镜同心则表示好的,可以固定立方棱镜及球面镜,固定后重看一遍,没有偏离就是好的。

8. 眼从棱镜中看球面上亮度是否一致,若亮度不均匀则稍调平面或激光管位置即可。

9. 将电位器的二线接在压电陶瓷接线柱上,串联 90 伏直流电源,找一个已镀膜的球面反射镜,按检验凹球面法进行检验,条纹若不清晰时,扭动电位器改变腔长使条纹清晰。一切正常则调整完毕。

10. 关断电源,接触放电,关断 90 伏电源。装罩壳,将保护盖盖好。

使用时注意事项:

1. 激光管正负极一定不能接错,若接反仍有激光射出,但激光管阳极很快就发黑,管子损坏。

2. 激光电源绝对不能空载,空载时可控硅及半导体元件会烧坏,所以接线一定要接牢。

3. 激光管及电源不要在短时间内时开时关,最好连续使用。若因工作需要,则在第二次启用接通电源之前,需用电线连接,使正负极放电,然后才能应用,否则影响激光管寿命。只有放电后,手才能触摸电极,因为电容器内是充电的,所以每次用完后立即接触放电。

4. 激光电源及激光管不可任意拆下,搬动时更要注意不能震坏。经常振动可能把电源

中印刷电路插板振掉，因此搬动后要检查一下。当电源出现异常现象或声音时应马上关掉，进行检查。

5. 仪器具备偏转装置及小范围俯仰角，以便把被检对象调到视场内适当位置便于观测，但转过后要重调焦，因为二光点位置移动。

6. 使用前应先了解仪器结构及性能，因为激光管寿命是有一定限度的。

7. 仪器对振动很敏感，稍有振动则条纹抖动很厉害。因此除加防振器外，地基应好。

8. 因为振动的影响，眼睛看到的条纹虽然很细，精度高，但拍出的底片条纹变粗。露光时间长则条纹模糊，短则太淡。所以待进一步提高管子的功率及防振才能得出高质量的照片。

9. 检验时要求空气稳定，否则条纹随气流而飘移，因此在光路稍长时应在光路中加筒使气流稳定，然后进行测定。

10. 仪器上所用两块标准球面可以互检，以便判断质量。照片 25 即为其互检照片。



照片 25

参 考 资 料

[1] 李德培, 科学仪器, 第 3 卷第 8 期(1965), 360~363.

[2] 潘君骅, 天文学报, 第 8 卷第 1 期(1960), 70~79.

* * * * *

激光在眼科应用上的新进展

——激光虹膜切除术成功

虹膜切除术在眼科是一种应用范围较广的手术。它不仅适用于原发或继发性青光眼，而且也适用于角膜白斑、虹膜睫状体炎后遗症、前后极或绕核性白内障以及各种原因引起的瞳孔畸形等常见眼病的临床治疗。

安徽省人民医院眼科与合肥工业大学激光组，在批林批孔运动的推动下，组成了“激光虹膜切除术”的三结合科研小组。他们通过对动物实验，离体虹膜、离体人眼虹膜以及在即将摘除的眼球上成功地实现了激光虹膜切除术之后，又颇有成效地用于眼科临床医疗，并取得了很有价值的经验。

目前，从治疗情况看，采用激光虹膜切除术有很多优点：患者不需住院，由于手术时间极短，也无需麻醉，术后反应轻，恢复快，根本没有拆线等手续；与其他常用方法的虹膜切除术相比还有一个突出的优点是对所要切除的虹膜部分的形状、大小易于控制。因此，激光虹膜切除术的成功，不仅标志着眼科手术的新突破，而且也是激光技术在医学上应用的新进展。