

# 表面测量干涉仪的设计和应用

**摘要** 在光学生产中，表面评定的最普通方法是用光学检验板。检验板的主要缺点是由于接触可能造成表面损伤以及对每个不同的表面需要用不同的检验板。本文介绍的表面测量干涉仪可以单独测量曲率半径及表面的面形。因为所有曲率误差可以化为零，评定表面面形的过程可以简化。本文也介绍了干涉仪的其它有效的应用。

## 引言

干涉术的主要用途之一是检验高质量的光学件。观测加工表面与光学检验板之间的牛顿环是当代所用的干涉术的最古老和最普通的形式。由于努力克服了检验板的限制在干涉术方面获得许多进展。主要的限制是：由于接触而造成的被检面的损伤的可能性，以及对不同的曲率半径需要用不同的检验板。

斐索干涉仪不要平板表面上的接触。为了检测在曲率范围内的球面盖特斯<sup>[1]</sup>(Gates)修改斐索干涉仪。为了不用检验板也可以采用全息技术。其它新近的途径包括 Biddles<sup>[3]</sup>和 Baldwin<sup>[4]</sup>的方法。为了既测量曲率半径又测量表面面形，除借助已知半径的球面外这些仪器中没有一种仪器被设计出来。

这篇文章介绍一种改进的泰曼—格林干涉仪的设计和各種应用，它可以单独地测量曲率半径和面形<sup>[5]</sup>。我们称这种干涉仪为“表面测量干涉仪”(SMI)。在概念上它类似于 Herriott<sup>[6]</sup>所介绍的仪器。

## 常规的表面检测技术

如上所述，检测光学表面的经典方法包含使凹面和凸匹配的检验板的加工。通常凹面是先加工的，并且曲率半径是用机械的或光学的球径计<sup>[7]</sup>测量，然后制成凸面以匹配

凹面。通过记录在两个表面相对转动时条纹花样的变化来检测两个表面面形。检验板既费钱又浪费时间，因为加工检验板的关键一步是制作匹配面，一些残差可以存在于额定的曲率半径中。一旦完成一批样板，便可以为车间的使用生产一些子样板，通过检验板与被检验面接触，这些子样板用来检查或者凸面或者凹面。两面之间任何不吻合作为等厚条纹出现。

光学表面通常用圆形条纹数或“光圈”数来表示，它表示了曲率半径（或曲率）与表面曲率的误差。圆形条纹的偏差说明表面不规正。实际上，不规正的标志是比较重要的因素，并且曲率公差被定得很小足以使得不规正可以明显地探测出。由于不规正引起的条纹偏差直接与条纹的间隔有关。曲率误差条纹数与不规正条纹标志数之间的普通比值一般是4比1。许多透镜设计允许有比标准图样要大得多的曲率公差。

一旦挑选了合适的检验板，用检验板作光学表面检验的方法是难于比得上的检验。因为检验板与被检验面的实际接触，没有专门装置来保持表面干涉的稳定。因此，表面的灰尘、手拿后压力和温度变化都可以使检验板与工作面之间的吻合发生变化。对用斐索干涉仪平面和对用盖特斯球面干涉仪球面而言，没有与接触和压力有关的一些问题。然而，这些仪器只能测面形而不能测曲率半径。

测量球面曲率半径的最普通仪器是机械

球径计。这种仪器测量是由球面和平面相切而形成的球缺高度。于是，测定曲率半径是需要作数学变换。运用自准直技术的光学球径计也被采用。一个自准直显微镜被聚焦在球面上并且光被反射，因此在目镜上可看到照亮叉丝的像。然后移动显微镜以便聚焦在表面曲率中心上，并且目镜上再次形成像点。显微镜在两点之间行进的距离等于表面曲率半径。

通常这种方法的极限精度是工作者确定最好焦点的能力。焦深一般是由显微镜或被检表面的数值孔径测出，但偶而表面的不规正也可以是限定因子。

## 一般设计的考虑

在设计任何一种仪器时应该提出在大多数情况下使用仪器方便，而在几种特殊情况不太复杂。在用测量曲率半径的仪器情况下，必须考虑到，光学公差通常是与曲率测量百分比误差有关。所以当曲率半径变得越小时，绝对测量精度必须提高。

当呈现少数圆形条纹  $m$  时，表面曲率半径误差与条纹数关系是

$$\Delta R = 4m\lambda(R/D)^2 \quad (1)$$

其中  $R$  是曲率半径， $D$  是第  $m$  级条纹的直径。

图 1 是光学件直径为 25 毫米，曲率半径是

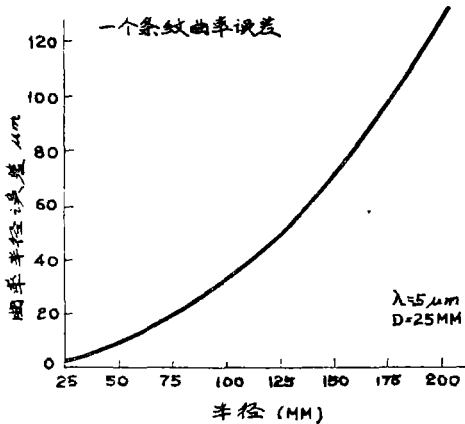


图 1 曲率半径误差（相当于一个 25 毫米表面随着曲率半径增大的一个条纹）

25 毫米到 200 毫米范围、相应一个条纹误差的曲率半径误差图。这个图表明，所需的绝对精度随曲率半径增加迅速地减少，同时测量精度在从曲率半径为 25 毫米的几微米量级到曲率半径为 200 毫米的 0.1 毫米量级范围内。

除了知道需要测量的灵敏度外，必须熟悉在光学工厂中常用的曲率半径范围。图 2 是法兰克福 Arsenal 光学工厂每隔 25 毫米间隔的检验板数量的图示。这个厂生产很宽范围的或是照相或是目视应用的光学仪器。很明显，80% 以上检验板的曲率半径小于 30 厘米。常用的表面测量装置似乎是一种能测量半径为 25 毫米以下的曲率半径误差为 1 微米量级，若减少测量精度，能测量曲率半径达 300 毫米的表面。

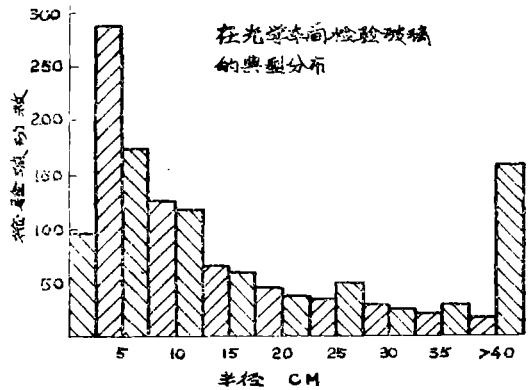


图 2 用典型的光学生产设备时在每 1 时间隔内检验板数的图示

## 干涉仪的设计

图 3 是满足上述要求设计的表面测量干涉仪的草图。主要部件有：He-Ne 激光器、光束扩展器、分束器、参考反射镜、聚焦透镜、聚焦透镜滑块、检测面调正装置和观测望远镜。观测望远镜折叠在分束器和参考反射镜上，以便调整方便。聚焦透镜装在精密的滑块上，以便能在聚焦于曲率中心和聚焦于检验元件表面的两点之间快速移动。整个

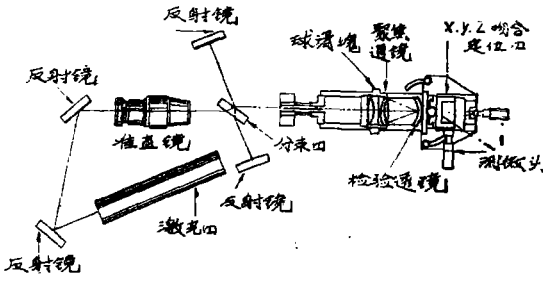


图3 表面测量干涉仪草图（上面的反射镜直接将干涉图样反回分束器，再进入观测望远镜）

仪器安装在防震平台上，以保证在观测期间内条纹的稳定。图4是整套的干涉仪照片。

He-Ne 激光器是表面测量干涉仪用的理想光源。它的时间相干性允许在干涉仪中采用不等光程结构，它的空间相干性允许用自准直形式去观测干涉条纹，用此形式时来自检验臂的波前相对于干涉仪的参考臂是倒转。干涉仪比普通观测聚焦像的方法能改进目视精度。 $\frac{\lambda}{4}$  判据是被用来测定目视像的焦深，其实在干涉仪中 $\frac{\lambda}{10}$ 球形条纹的偏离用目视是容易被探测出来。

因为单频稳定激光器比普通标准激光器昂贵，希望设计不需要单频而工作的干涉仪。多膜激光器有一个相干函数，当程差等于激光腔长时它是最大，而在其中间时它是最小。相干函数下限率取决于膜数。多膜相干退化问题可以如下解决：固定从分束器到被检表面的总距离等于激光腔长整数倍加上从分束器到参考反射镜的距离。然后曲率半径的测量通过相对于被检面移动聚焦透镜来完成。由于光束进入聚焦透镜是准直光，聚焦透镜的位置相对分束器是不严格的。

光束扩展器将光束扩展到至少25毫米直径。用8毫米口径的显微物镜作检验时看出，由于灰尘和镜面反射影响产生的虚假条纹，用小口径光学元件是不合适的。准直光束越大，任何标准面的缺陷相对于全干涉图就越小。即是说，灰尘粒子与给定大小的划痕将截掉较大的准直光束的总量中的较小百分比，并因此产生费涅耳衍射圈将是弱的。

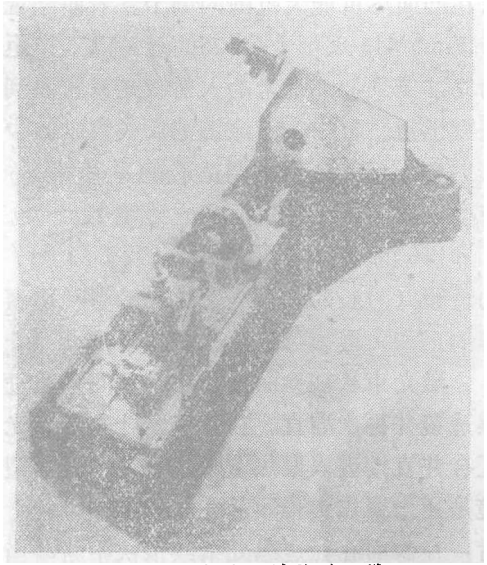


图4 图整套干涉仪的照片

用一个空间滤光器消除被激光器漏掉的光束中产生的花样是有必要的。干涉仪具有  $f/4$  的入射和带有6微米针孔的出射物镜。通过激光束完全充满入射物镜得到较好的输出均匀。激光束的大小可采用激光器前面的一薄透镜以及为非准直线重调入射物镜的焦点。

分束器放成布鲁斯特角位置。靠近准直器的表面不镀膜且对水平偏振光有100%的透过。第二个表面镀高折射率的电介质膜。因为低的吸收和散射是主要因素，不想作成具有相等透过率和反射率。分束器不对称为30% R 和70% T 时，它是理想分束器效率的84%，因为输出是由R和T的乘积决定。当从分束器前表面观测反射光并且反射为最小的时候，细调分束器角及激光偏振角。

通过分束器的光线是准直的。因此，从分束器到聚焦透镜的距离是可变的。这个事实，再加上希望有一个被检表面固定在激光相干函数的峰值处，这就导致设计一个聚焦透镜可以移动并且被检面在曲率半径测量期间是固定不动的。故条纹对比度与被检面曲率半径无关。

聚焦透镜是干涉仪的最关键部分。它必须保证将平面波前转换成球面波前。同时要

求在凸面尽可能大范围的调节。表面测量干涉仪(SMI)采用 $f/1.25$ 的透镜以工作距离为55.3厘米把25毫米的入射激光束扩展到46毫米出射。每一表面涂镀消反射膜以减少干涉。剩余反射是用来调正透镜垂直准直光束。表面测量干涉仪的其它透镜设计包括 $f/0.75$ 的透镜(对短凹面)以及 $f/4$ 和 $f/6$ 的透镜(对长的凸面)。对很长的半径而言,薄的正和负透镜可以用来测量面形。

激光束从被检面反射后,返回来通过聚焦透镜并再次准直。在分束器处与参考光束汇合并直接进入聚焦望远镜系统。聚焦望远镜是用来聚焦被检面的孔径。当完全聚焦时,在表面孔径边缘处条纹很快中断,当离焦时,由于费涅耳衍射,边缘条纹呈弯曲形。

## 曲率半径测量

当聚焦透镜聚焦在透镜的近表面时,在干涉仪中出现圆形条纹。通过圆条纹图定中心于光轴上,把参考反射镜调垂直于光束。调正聚焦透镜和被检面之间的距离可以使条纹数减少到零。当移动聚焦透镜使其聚焦在曲率中心时,能遇见同样条件,问题就简化到测量两点之间聚焦透镜的移动。对凹透镜是没有限制的;但对凸透镜,聚焦透镜的后焦距必须比要测试的曲率半径大。

如果用普通尺子去测量聚焦透镜的位置,则出现问题。首先,因为凹面和凸面的测量需要相对于尺子作不同的移动,尺子必须能在其任一厘米部分内读出1微米的差值。这个判读能力要求读数要很精确且与测量范围无关。其次,一个尺子能在给定位置指零,以排除两个读数相减的必要。最后,希望能移动一个固定距离并读出误差。后面这条要求可以通过从表面到曲率中心的精确地移动并且读出尺子读数及固定偏置之间的差值来满足,或者通过移动额定的偏置数并且读出这个数与聚焦在表面点之间的误差。

在第一种情况下,误差将是尺子的单位。在第二种情况下,观测误差的选取直接干涉条纹而定。因为圆形干涉条纹和曲率圈是测球面曲率半径特定误差的标准方法,所以后种技术是优先。

用电子计算机的测量系统,如条纹计数干涉仪或莫尔尺满足指零和测量相对偏置误差的要求。但基本系统是昂贵的并且不能利用长半径减少精度。移动精确距离的简单方法使用块规,这种方法也能利用快速减少线性精度。聚焦透镜装在精密导轨的上面,它在导轨上可以很容易地移到任意位置并适当地夹紧,在整个曲率范围内以便既能调节凸面又能调节凹面透镜。聚焦透镜可以通过聚焦在被检元件表面上准确的定位。当聚焦透镜被夹住之后,通过用测微器调节来移动被检验面而进行细调。对凸面来说,块规是放在精密导轨及其弹簧负载接点之间。移动使得聚焦透镜在被检面曲率中心上。 $X$ ,  $Y$ 和 $Z$ 的细调要求检验面的曲率中心准确地聚焦透镜的焦点上定位。这种细调是很关键的,因为它可以保证不至于由测量曲面上的毛病而引起误差。唯一留下的要求是精密导轨的直线运动。激光束方向与导轨之间的任何误差将只引起相对于聚焦透镜孔径的准直光束少量的剪切。

当一凹面被检验时,在调正精密导轨上的聚焦透镜之前,先放上块规。然后移动块规,以使聚焦透镜从聚焦在被检验表面上移到聚焦在曲率中心点上。

在检查检验表面在轴上的排列之后,聚焦透镜会再次精密地聚焦在表面上。当块规放在预定位置时,任何其余圆形条纹表示出表面的曲率误差。

## 面形测量

球面面形的测量常常是受到检验板和被检表面之间球形曲率误差的限制。因此,球形曲率公差比为适当地评价面形的严厉。

表面测量干涉仪(SMI)始终可以调整,以便消除残余的曲率误差。因为没有物理接触,波前可以作到与平均表面匹配或相切于表面的任何一点。为了压在高斑点上,一个检验板受到物理接触的限制。

图5至8是用不同调整同一表面的一系列干涉图。图5\*给出了具有4条球面曲率误差条纹的面形。条纹近椭圆形。整个不规正给定为沿长轴及短轴的条纹数之差。在这种情况下它为  $5\frac{1}{2} - 3\frac{1}{2} = 2$  即使在照片上也很难计算出比  $\frac{1}{2}$  条纹好得多的条纹。因为上半部条纹数和下半部条纹数是不相等的,计算中也必须考虑到误差不纯粹是圆柱形的。这种校正通常是取中心每一边条纹数的平均值或计算最大条纹数的一边及最小条纹数的边的

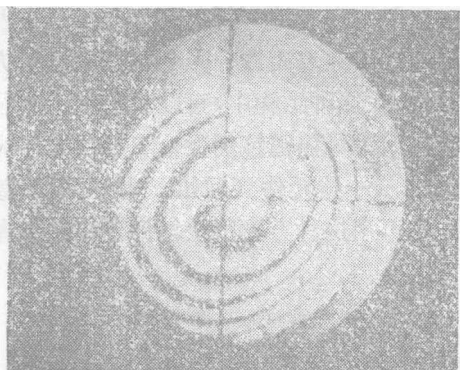


图5 具有圆柱形不规正及球形曲率误差的表面干涉图。不规正等于从中心沿两个轴测量的条纹数的差值

图6表明一个曲率调整到与曲率半径沿一椭球轴匹配的表面。残余条纹平行于该轴。可以很容易看到在中心一边有两个条纹,而在另一边有一个条纹。就这一点,表面误差全在参考球面一边。

图7表示用倾斜的参考镜对球面曲率作相同的调整,以产生垂直于长轴的条纹。又丝转成平行于长轴。表面的不规整由穿过垂直叉丝的条纹数给出。我们很容易算出上半部一个条纹和下半部的两个条纹。用这种调整比用图6的调整容易计算小数条纹。

至此,表面误差落在参考球的一边。图8表示这样的一种调整,即曲率误差沿短轴

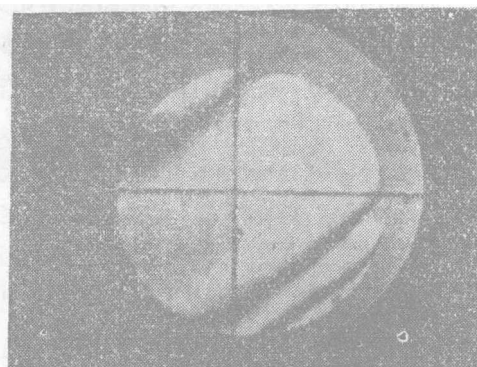


图6 曲率误差沿一个轴调整到零的同一表面的干涉图。不规整等于从中心算起垂直轴的条纹数

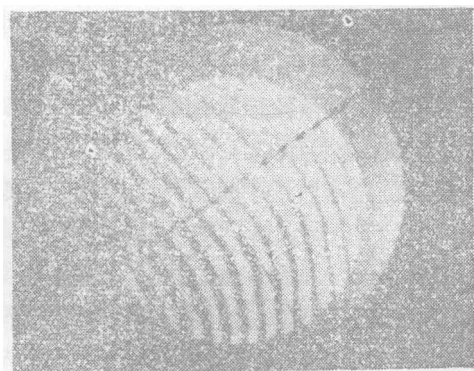


图7 用曲率的相同调整的另一表面干涉图,但用倾斜参考镜。不规整等于从中心算起跨过参考线的条纹数

和长轴大致相等但符号相反。产生这类干涉图样的表面称为马鞍形面,并且沿两个轴的误差必须相加,另外,我们把  $1\frac{1}{2}$  和  $\frac{1}{2}$  条纹相加得到2个条纹的最大偏差。

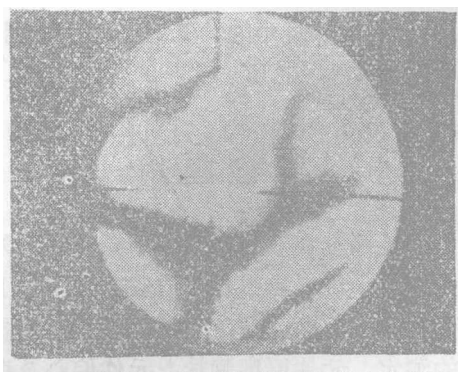


图8 为产生马鞍形作曲率误差调整的另一表面的干涉图,不规整等于从中心测量沿两个轴条纹数之和

\* 原文为“6”有误,应为“5”。

对圆柱形误差,净偏差与球面曲率无关,因为球面曲率增加仅仅使它的外貌从球体变到柱体至马鞍形,而不引起条纹的净偏差变化。

对于旋转对称面的偏差,球面曲率量可以改变净偏差,则必须用一些判据以确定如何平衡表面中心区和边缘区之间的曲率。一些普通的旋转对称误差包括塌边及透镜中心的微凹。例如,考虑一个标准化半径为  $y = y^1/y_{m1}$  的表面,它与参考球的偏差为

$$W = \lambda y^4 \quad (2)$$

图9(a)是干涉仪中看到的同心条纹形曲线,总偏差为  $\lambda$ 。当球面曲率的一项

$$W' = y^2/2R \quad (3)$$

被消除时,合成条纹形状如图9(b)。全部偏差现在仅仅是  $\lambda/4$  并且示出了该表面误差的最小偏离。当表面误差量级增加时,如图9(c) 其中

$$W = \lambda y^{16} \quad (4)$$

在边缘处误差减到零的球形曲率的修正留下较大的残余误差,如图9(d)。

有时加工在小中心区域内具有不同的曲率表面。穿过这表面中心一条条纹,如图10(a)表示那样。从图10(b)可以看出,球面曲率可以用来相加以平衡中心偏差  $W_0$ ,则总偏差量为

$$W_t = W_0 \left(1 - \frac{y^2}{y_m^2}\right) \quad (5)$$

另外,假如  $y$  是小的,  $W_t$  近似  $W_0$ ; 因而,由于近似  $ym$ , 则  $W_t$  趋于 0。

## 其它应用

除了测量球形元件曲率半径和面形外,表面测量干涉仪也很容易适应在光学加工中碰到的其它问题。其中包括:镀膜元件折射率的测定、元件厚度测量,元件偏心及楔角的测量,非球形聚焦透镜的评价,后焦长的测定及圆环表面的测量。

折射率可以由先聚焦在元件第一表面,

然后聚焦在第二表面进行测量。聚焦透镜的移动给出一个表观厚度  $t_0$ , 则折射率

$$n = \frac{t}{t_0} \frac{(R - t_0)}{(R - t)} \quad (6)$$

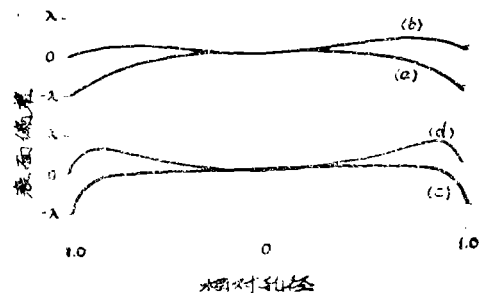
其中  $t$  是机械厚度,  $R$  是第一表面的曲率半径。

假如折射率为已知,并且透镜装或其机械厚度不易测量,可以由同样程序得到这个值,并由下式给出

$$t = \frac{nRt_0}{R + t_0(n-1)} \quad (7)$$

装在圆柱筒内元件的倾斜与偏心可以通过转动筒子及测量所要求的  $x-y$  量,以便聚焦透镜在曲率中心聚焦时倾斜条纹达到最少。

无限聚焦透镜可以由聚焦在焦点上及在透镜的无限焦点面放一光学平板用透射方式来评价。在这种结构中,可以检验较大直径的透镜,因为聚焦透镜的数值口径决定了光束的大小。一些元件(例如,非球面聚焦透镜)也可用这种方式很快地评价出并做抛光



$$(a) W = -\lambda y^4 \quad (b) W = \lambda(y^2 - y^4)$$

$$(c) W = -\lambda y^{16} \quad (d) W = \lambda(y^2 - y^{16})$$

图9 随着球面曲率减少的各级表面偏差

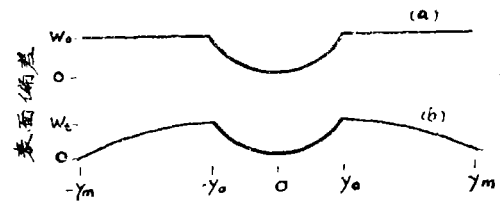


图10 (a)表示不同曲率半径的中心面积的表面, (b)由于球形曲率相加使全部偏差减少的同一表面

# 测量光学系统调制传递函数的几种仪器

本文叙述了测量光学系统调制传递函数的一般原理和测量方法的分类。研究了测量光学传递函数仪器的构造原理，并列举了几种根据各种原理所制作的具体装置的例子。文中做出了关于仪器的几种可能精度的结构，同时分析了误差来源。

目视和照相鉴别率，现在仍然是光机工业的一些工厂中评价照相物镜和电影物镜成像质量的主要标准。

照相物镜和电影物镜鉴别率的检验，是在干板上拍照实验目标（鉴别率板），然后用显微镜将结果放大进行目视观测。检验的原理图如图1。

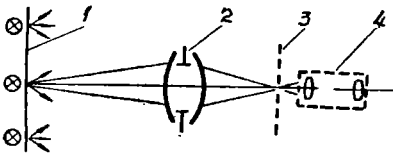


图1 检验物镜鉴别率的原理图

1. 实验目标（鉴别率板），2. 被测物镜。
3. 安装干板的平面，4. 显微镜

由于照相过程相对复杂，这些测量结果不能很好地再现。此外，这种方法也难于评价照相物镜本身的质量，因为所得结果是物镜和干板的综合数据。检验鉴别率时仅仅定量地确定了光学系统的极限分辨本领，而没有修正。透镜的后焦距可以通过把聚焦透镜从对应无限焦点的点移到聚焦在透镜的后表面上的点进行检验。

因为要求不接触，圆环形或圆柱形表面的曲率半径可以用沿元件的两个轴交替地匹配波前来测量。其它非球面可以通过测量使不同的曲率匹配表面的带直径来评价。

## 小 结

表面测量干涉仪可以单独测量曲率半径

有考虑所分辨的结构调制度。

检验照相鉴别率的过程要消耗大量时间和感光材料，并且无法限制与结果的目视评价相关连的偶然误差。

众所周知，如果把付里叶分析理论应用于光学系统，则可将物镜看作是线性传递器件，如滤波器或放大器，线性系统具有这样一种性质，即几个源同时作用的响应精确地等于每个源单独作用所引起的响应的总和。光学象的形成，是物体中的光分布线性变换成象的光分布。线性系统完全由输入脉冲的响应表征。在非相干照明下，光学系统在透射光强方面是线性的<sup>[1]</sup>。

线性传递器件的质量取决于它的频率和位相特性。对于光学系统，频率特性对应着调制传递函数，或频率调制特性（ $\Psi K X$ ）。光学上的频率是空间频率。

调制传递函数的测量原理是，光密度正弦分布的光栅目标经过被测物镜成象，在象面上用相应的接收器测量，如图2所示。

和面形，这就从根本上改变了透镜设计和生产的概念。设计上所用的时间不是谋取设计符合现有检验板上的标定，而是使设计能够对于各加工过程的变化最不敏感。光学技术人员还能在较宽的曲率公差内集中研制较规则的表面。对于给定的有规则的误差内最容易的修正手续可能引起半径更偏离检验板，当努力改变半径向着适合检验板方向时可能会增加面形误差。

译自“Optical Engineering” No2., p38-43, 1972. (关志远译 琦 玮校)