

# 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。

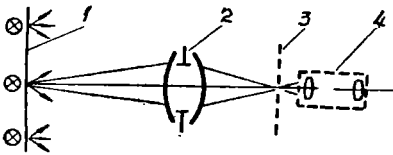


图1 检验物镜鉴别率的原理图

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)

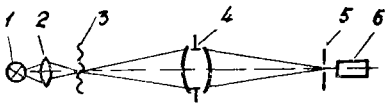


图2 调制传递函数测定原理图

- 1.光源, 2.聚光镜, 3.光栅板(实验目标),  
4.被测物镜, 5.狭缝, 6.光接收器

在各种不同空间频率的透射光强正弦分布的周期光栅目标的情况下, 光学系统的调制传递函数定义为象的调制度与物的调制度比值。

正弦目标中的光强分布可以写作:<sup>[2]</sup>

$$I = i_0 + i \cos \alpha \pi N x \quad (1)$$

这里

- $i_0$  —— 平均强度,
- $i$  —— 调制振幅,
- $x$  —— 空间坐标,
- $N$  —— 空间频率, 线/毫米。

象中的光强分布为

$$I' = i'_0 + i' \cos(\alpha \pi N' x - \varphi) \quad (2)$$

这里  $N' = \frac{1}{\beta} N$  —— 是考虑到光学系统放大率的空间频率,

- $\varphi$  —— 相移角度
- $\beta$  —— 成象倍率

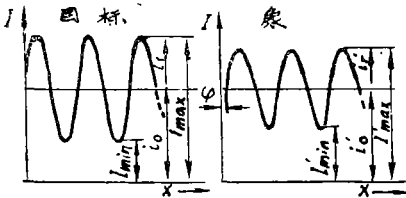


图3 正弦目标物和象中的光强分布

目标的调制度定义为

$$\begin{aligned} K &= \frac{I_{\text{最大}} - I_{\text{最小}}}{I_{\text{最大}} + I_{\text{最小}}} \\ &= \frac{(i_0 + i) - (i_0 - i)}{(i_0 + i) + (i_0 - i)} \\ &= \frac{i}{i_0} \end{aligned} \quad (3)$$

相应地, 象调制度为

$$K' = \frac{i'}{i'_0}$$

调制传递函数  $\ddot{u}(N)$  或调制传递系数  $K$  定义为

$$K = \frac{K'}{K} = \frac{i_0 i'}{i'_0 i} = \ddot{u}(N)$$

在确定的  $N$  范围内, 取比值  $i_0/i'_0 =$  常数, 可以写成

$$K = \ddot{u}(N) = \frac{K'}{K} \approx \frac{i'}{i} \quad (4)$$

这就是说, 调制传递函数由在起作用的空间频率上象和物的调制振幅的比值来加以说明。很大的目标, 即空间频率很小的目标(无限大目标的空间频率等于 0)由被测物镜传递, 与物镜的象差无关。这意味着, 象和物中调制, 振幅的比值, 即调制传递系数, 在这个频率上为 1。对所有的小目标, 空间频率全都大于 0, 物镜的象差使象中的调制振幅下降, 调制传递系数变得小于 1。

在图示当中, 调制传递系数的大小是空间频率的函数, 得到调制传递函数曲线。这时必须注意被测物镜的成象倍率。

在进行频率分析时, 光学特性表现为光栅衍射, 因此, 即使是对于理想校正的系统, 空间频率增加时, 传递函数  $\ddot{u}(N)$  的图形也不是水平变化。光学传递函数的大小随空间频率增加而减少, 光栅越小, 下降越快。在任何空间频率范围上, 光学系统都不可能恒定的调制传递系数。

图4表示理想物镜在各种相对孔径,  $\lambda = 546$ 毫微米的调制传递函数图形<sup>[2]</sup>。

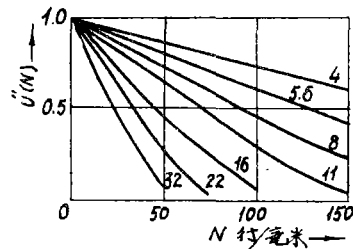


图4 理想物镜在不同相对孔径的传递函数

下面研究一下用非相干光照明的狭缝, 用它作为光学系统的实验目标。目标中的强度分布一般是两个变量  $x$  和  $y$  的函数  $L(x, y)$ 。为了简便, 设它是一维的  $L(x)$ 。狭缝象的光强分布可以表示成  $L'(x)$ , 叫做线扩散函数。(图5)。

线扩散函数的付里叶级数展开与被测系统的光学传递函数由下式联系起来<sup>[3]</sup>。

$$F(R) = \frac{1}{A} \int_{-\infty}^{+\infty} L'(x) e^{-2\pi i R x} dx \quad (5)$$

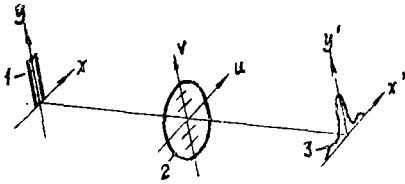
这里,  $1/A$ ——光度常数,

$R = 2\lambda N\beta$ ——归化空间频率,

$\lambda$ ——波长

$N$ ——空间频率, 线/毫米,

$\beta$ ——象面上的放大率。



1.狭缝(目标), 2.被测光学系统, 3.线扩散函数

图5 狭缝象中的光强分布

光学传递函数一般用一复函数来描述, 其实部  $\bar{u}(R)$  叫做调制传递函数, 虚部  $\varphi(R)$  叫做位相传递函数。

$$D(R) = \bar{u}(R) e^{i\varphi(R)} \quad (6)$$

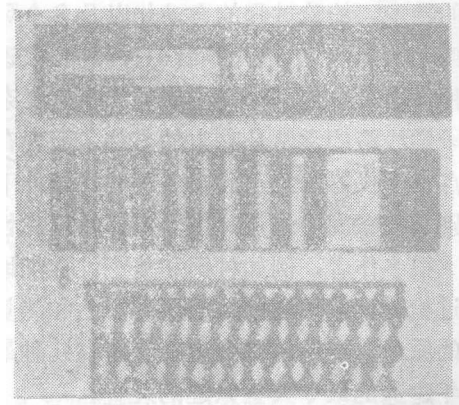
调制传递函数决定着空间频率为  $N$  的正弦光栅的真实象的调制度相对于理想象的调制度的变化, 而位相传递函数决定着光强最大值的移动量。正如上面所指出的那样, 调制度的变化表示成相对值, 把 0 频时的调制度作为 1。象移表示成弧度, 并从垂直于实验目标线条的方向开始计算 (相移  $360^\circ$  相当于重新移动一个完整的空间周期  $1/N$ )。位相传递函数值并不总是都要知道。很好校正过的小相对孔径的复杂物镜, 位相传递函数与 0 相差甚小。因此只要确定调制传递函数就足够。大相对孔径和广角物镜需要同样地确定调制传递函数和位相传递函数。

在过去的十年内, 成功地拟定了许多测量光学传递函数的方法。其中之一是直接对象进行正弦扫描。另一些是测量线扩散函数的值, 然后根据测量数据用计算机计算出光学传递函数和调制传递函数。方法的选择取决于实验目的, 譬如, 在成批生产物镜的自动线上检查产品质量时, 就不需要测量实

际的传递函数, 只要求得说明产品质量合格或不合格的几个相对值就足够了。

光学传递函数的测量方法分成两大类: 象扫描法和积分法<sup>[3]</sup>。每组根据扫描方法和信号类型可进一步分类。例如, 象扫描法可以是直接的(正弦象, 典型的正弦余弦象对, 矩形信号象, 莫尔条纹象)或间接的(线扩散函数分析, 刃边象分析)。积分法分成自相关积分法和互相关积分法。

测量系统中最关键的部件是信号。当用波形正确的正弦光栅时, 计算值和实际值的对应较好。由于要获得正确的正弦信号的复杂性, 实际上常采用另外一些形式的信号, 如矩形波和莫尔条纹。光栅的形式如图 6 所示。



a. 正弦波光栅 b. 矩形波光栅 c. 莫尔条纹

图6 光栅类型

如果利用矩形波信号, 那么传递特性将略微不同于正弦波的特性。但是如排除矩形波的高次谐波, 可以得到与用正弦波测量等价的结果。高次谐波的排除一般是用电学滤波器来实现的。

两个互相重迭的光栅, 形成莫尔条纹, 它的波形是三角波。但是, 由于在三角波中高次谐波收敛比矩形波快很多, 莫尔条纹光栅可以用来作为正弦波信号的近似。

测量光学传递函数的间接方法是利用快速计算机。

用分析线扩散函数的方法进行测量, 是如下这样进行<sup>[4]</sup>。用非相干光源照明的狭缝

象中的光强分布,用第二个狭缝扫描,进行测量。测得的扩散函数用计算机根据公式(5)变换成光学传递函数。

光学传递函数也可用测得刃边象中的强度分布的间接方法计算出来。为了测量刃边象,要借助于狭缝和光接收器。测量结果的模拟形式或不连续形式输入计算机,进行付里叶积分计算,并相应地算出光学传递函数。

测量光学传递函数的积分法尚未得到广泛的实际应用。

## 几种测量各种物镜光学传递函数的装置

最近,着重研究了测量光学传递函数仪器的精度,检验过程的自动化以及各个环节和部件的规范化。前几年有一种倾向,在设计这种仪器时总是利用一些新的和带有复杂的电子学线路的常常是吃力的方法。而现在着眼点在于仪器的校正和在各种使用条件下,特别是在车间中使用仪器工作的可靠性。

很多作者,例如村田和美<sup>[5]</sup>,详细地描述过检验调制传递函数的现有方法和测量仪器的原理。在这篇文章中,将研究几种最近几年建造的最令人感兴趣的装置。

测量光学传递函数的原理是基于下列各种假设:——用正弦实验目标时,象中的强度分布也是正弦的;

——被测系统的象差与衍射一起,使象中调制的振幅减小,而这是空间频率的函数。

空间频率的相移效应,因为现在对位相数据的需要还不很广泛,所以不被注意。

任意一种测量调制传递函数的仪器都包含着几个典型的部件:实验目标,被测系统,象分析器和电学部件。

实验目标是正弦或其它形式的图案,它的用途是作为被测系统的目标。

整个系统用平行光管(或者不用),在被测镜头的焦面上形成目标的象。根据上面指

的条件,象也是正弦的。在用狭缝扫描所有空间频率目标的象的过程中,被调制的光通量用放在狭缝后面的光电倍增管接收。被传递的信号可以用很多方法转换,以求得被测系统的光学传递函数。

如果被测系统的实验目标是狭缝,将有类似的结果,狭缝象将用象分析器中的光栅扫描<sup>[3]</sup>。

文献<sup>[6]</sup>中研究了能测量各类物镜的装置,其中包括强光物镜和显微物镜,纤维光学和其它光学系统。基本系统是平面性很好的大理石平台。由于被测光学系统焦距经常改变,仪器的两个部份是由统一形式的部件构成的。在短焦距的情况下,利用透镜平行光管,对于长焦距是利用安放在大理石平台外边的离轴抛物面镜(图7)。

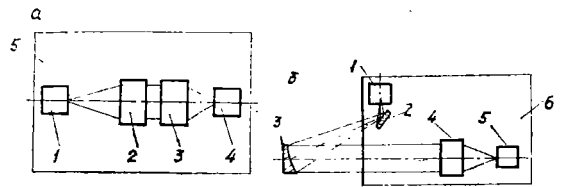


图7 测量各种物镜的仪器部件图

a—测量短焦距物镜的原理图:1.实验目标,2.准直物镜,3.被测物镜,4.象分析器,5.大理石平台;  
b—测量长焦距物镜的原理图:1.实验目标,2.反射镜,3.抛物面镜,4.被测物镜,5.象分析器,6.大理石平台

为了测量调制传递函数,需要有刚性的镜头夹持器,它应保证物镜的精确调整和移动。

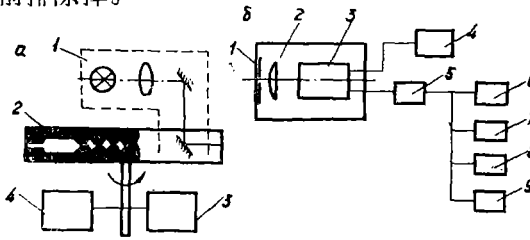
一种装置的目标发生器(图8,a),在其本身中将光源和实验目标联接起来,并有一白炽灯,形成对平环的非相干照明。后者固定在用直流伺服电机使其恒速旋转的转鼓上。环是用胶电制作的各种空间频率的正弦光栅,每种频率大约有30个周期(参看图6,a)。为了归一化,预先规定0线/毫米时,信号振幅为整个和半个。空间频率在0.267—4.0线/毫米范围内变化。利用显微物镜使空间频率进一步改变。

象分析器(图8、B)由狭缝,会聚机构和光电倍增管组成。狭缝宽度这样选择,使其传递函数接近于1,并且落在光电接收器上的光量足够大。利用宽度可变的狭缝是方便的,它的宽度为几个微米到0.5微米。文献<sup>[7]</sup>中提出狭缝宽度必须根据关系式

$$2a = \frac{0.28}{\pi R'} -$$

来确定。

光电倍增管的信号经过前置放大器,输入转换回路,使操作者选择瞄准方法。为了调零,目标发生器转鼓处于光栅的不透明部份并在0线/毫米时整个振幅的范围中。准直调整是用信号为振幅一半时使转鼓停止的方法来实现。这时观测到输出信号,如果测得的信号值不等于整个振幅的一半,说明系统中有杂光,这必须在进一步实验开始之前排除掉。



a—目标发生器: 1.照明系统, 2.光栅转鼓, 3.编码机构, 4.伺服电机; B—象分析器: 1.狭缝, 2.会聚透镜, 3.光电接收器; 4.电源, 5.前置放大器, 6.示波器, 7.显示仪表, 8.自动记录仪, 9.磁带

图8 测量各种物镜光学传递函数装置的主要环节的部件示意图

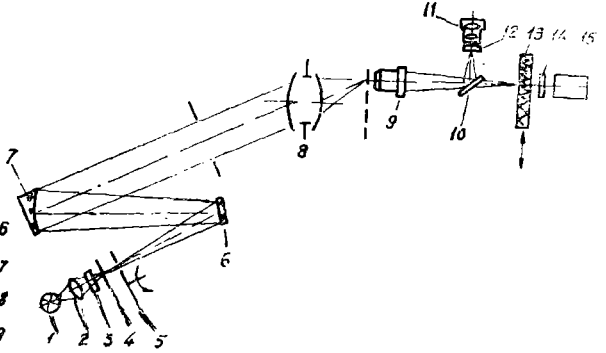
法国«Engins-Matya»公司出产测量调制传递函数的装置«Acofam»。在平行光管焦面上放一狭缝,在被测物镜焦面上成象。将这个象用显微物镜放大,投射到在垂直于光轴方向平动的实验光栅板上。正弦光栅板有六种不同的空间频率,以便在这些频率上测量调制传递函数。通过光栅的光投射到光接收器上,其信号用计算系统变换,以数字形式和模拟形式给出调制传递函数。还可以根据星点研究光学系统并进行其它测量。

«Acofam»装置可测焦距10—1000毫米

物镜的调制传递函数。被测物镜象面上的空间频率可以用改变显微物镜放大倍数的方法加以改变。因此,由6种空间频率的光栅,可以得到12种空间频率:7.5—15—20—30—40—50—60—70—80—100—120—140线/毫米。

使平行光管绕通过被测物镜入瞳的轴转动,视场角可在 $2\beta = 120^\circ$ 的范围内变化。子午和弧矢方位的测量,用转动狭缝并相应地使实验光栅转过 $90^\circ$ 来进行。用带有一离轴抛物面镜的反射系统作为平行光管物镜。平行光管焦距等于2000毫米。

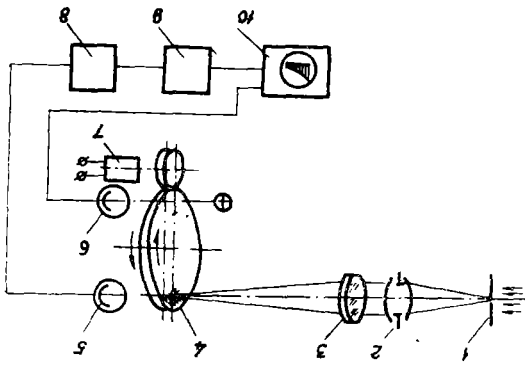
利用正弦板不需要采用电学滤波器,从而大大简化了装置的电学部份。



1.光源, 2.聚光镜, 3.滤光片, 4.狭缝, 5.调制器, 6.反射镜, 7.抛物面镜, 8.被测物镜, 9.显微物镜, 10.半反半透反射镜, 11.目镜, 12.分划板, 13.实验目标, 14.毛玻璃, 15.光电倍增管

图9 装置«Acofam»的原理图

荷兰«De Oude Delft»公司制造仪器«Odelta»,用来测量透镜,纤维光学和其它成像元件的调制传递函数(图10)。在这个仪器中,经过被测镜头形成狭缝的象,这个象用莫尔条纹光栅进行解析(参看图6b)。穿过光栅落到光电倍增管上的光,是狭缝象和莫尔条纹透明度的迭加。在莫尔条纹后面的光电倍增管将总的透射光转换成电信号。装在放大器中的电学滤波器产生一窄频带,这样信号就可以认为是纯正弦的。作为实验目标的狭缝的宽度是0.004毫米,平行光管焦距:1200



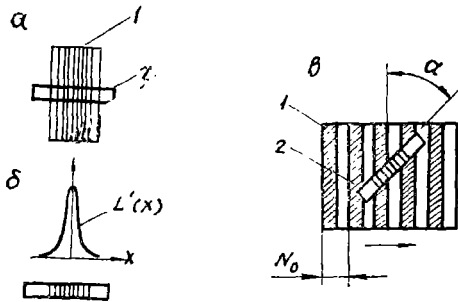
1.狭缝, 2.被测系统, 3.平行光管, 4.两个光栅, 5.测量信号的光接收器, 6.同步信号的光接收器, 7.光栅旋转传动装置, 8.窄带滤光片, 9.接收器, 10.示波器

图10 «Odelta» 装置的部件图

毫米, 莫尔条纹系统平面上的空间频率范围是0—10线/毫米。

英国 «Ealing Beck» 公司制造 «Eros» 型装置, 它能保证空间频率的连续测量, 测量结果用模拟形式和数字形式给出。

空间频率的连续改变是用下面的方法来达到。利用狭缝作为实验目标时, 如上所述狭缝象中的强度分布为  $L'(x)$ 。狭缝象与象分析器中恒定周期  $N$  的光栅迭加。在象分析器光栅前面放一限制狭缝, 它与目标狭缝成  $90^\circ$ 。限制狭缝由目标狭缝象中切出一段, 沿着它的长度方向光强分布仍然是  $L'(x)$  (图11 a, b) 限制狭缝宽度选择为  $N_0/2$ 。它与象分析器光栅的相互配置如图



a. 一目标狭缝和限制狭缝的配置: 1. 目标狭缝的象, 2. 限制狭缝; b. 沿着限制狭缝的光强分布, b. 限制狭缝和象分析器光栅的配置: 1. 象分析器光栅, 2. 限制狭缝

图11 获得连续改变的空间频率的原理图

11 b 所示。

如果光栅条纹与限制狭缝成  $90^\circ$  角, 则空间频率等于  $N_0$ 。当光栅条纹平行于限制狭缝时, 空间频率为 0。如果象分析器光栅条纹与限制狭缝方向成  $\alpha$  角, 则空间频率正比于  $\sin \alpha$ ,

$$N = N_0 \sin \alpha \quad (7)$$

这样一来, 只要在  $0-90^\circ$  改变象分析器光栅条纹对于限制狭缝的方向, 即可使空间频率由  $0-N$  连续变化。这时对于所有的空间频率, 时间频率相同, 因此只需要一个电学滤收器。

«Eros—200» 就属于这种类型的最新装置。它的突出优点是采用积木式结构, 使用统一的部件, 这样就可以利用 «Eros—200» 系统元件与用户所具备的光学台组合起来, 进行一些测量。

它的基本部件是根据上述原理工作的象分析器。方波光栅镀在一平盘上, 该圆盘以恒速旋转。使圆盘转过  $90^\circ$  角可以改变其条纹相对于目标狭缝方向的取向。

显微物镜的更换使所利用的空间频率数扩大很多。平行光管和实验狭缝的更换可以进行各种物镜的测试。

在检查成批生产的物镜质量时, 由于系列镜头的传递函数相当一致, 因而只要知道两个甚至一个空间频率的传递函数值就足够。这样就可以制造一合理的检查装置, 它可以供不太熟练的工作人员使用。

车间装置的自动化水平应当高。必须保证下列要求:

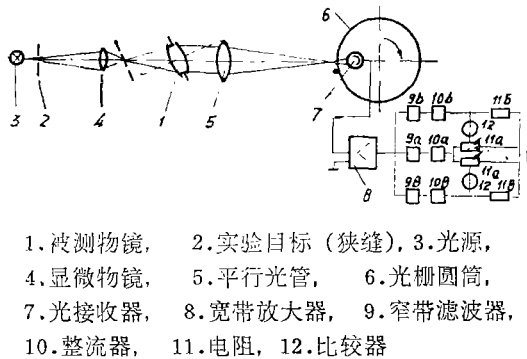
- 被测镜头在一两个空间频率上的传递函数值可以与标准样品的值进行比较; 对于标准照相物镜来说, 这个频率可以用 30 线/毫米<sup>[7]</sup>;
- 除了检验轴上成象质量, 还要在子午和弧矢面内对一两个象高进行检验;
- 评定被测物镜的质量, 根据在每个

象高上对所有方位测得的最差的值进行；测量时这个物镜必须能绕自己的光轴旋转；

- 要利用单色光或固定光谱成分的光测试物镜；
- 对不同的焦距来说，测量仪器应当容易重新调整；
- 物镜如果不满足质量要求，应当确定误差来源；

文献<sup>[8]</sup>中所描述的检验物镜质量的自动装置可以作为这种装置的例子，操作员将被测物镜安装到测量位置上后，它使物镜自动调焦。然后自动确定视场中心和在弧矢和子午方位选定的视场角上的成象质量。测量时物镜绕光轴旋转。测量结束时，在信号盘上发出信号，指示物镜是否可用。检验一个物镜只要10秒。

图12给出测量大批生产的光学系统象质的仪器部件图<sup>[9]</sup>。被测物镜1的实验目标是狭缝2，它由非相干光源3照明。显微物镜4将实验狭缝成象在被测物镜的象面上，经过被测物镜由平行光管5投射到象分析器6的旋转玻璃圆筒上，圆筒上镀有方波光栅（参看图66），它有4种空间频率。



1. 被测物镜，
2. 实验目标（狭缝），
3. 光源，
4. 显微物镜，
5. 平行光管，
6. 光栅圆筒，
7. 光接收器，
8. 宽带放大器，
9. 窄带滤波器，
10. 整流器，
11. 电阻，
12. 比较器

图12 大批生产时检查物镜的装置部件图

通过光栅的光会聚在光电接收器7上。光电接收器交变电信号的频率随着象分析器光栅的空间频率改变。信号输入宽带放大器8，其输出与窄带滤波器9 a, 9 b, 9 c 相连，它们分别调整到用光栅转鼓扫描狭缝象时所产生的频率上。其中滤波器9 a 调整到接近

于0频的光栅所对应的频率，因此，对该频率而言，调制度传输与被测物镜的性能无关，以便进行归一化。滤波器9 b、9 c 调整到更高的空间频率。所对应的频率上。

整流器10 a, 10 b, 10 c 产生正比于由相应的中间频率调制过的交变信号的直流电压，加到电阻11 a, 11 b, 11 c 上。归一化信号的电压加在电阻11 a 上，由此可以取出任何一部分电压。如果所取电压大小等于限定所允许的调制传递系数的大小，那在比较器12上比较从电阻11所取的电压值，即可确定被测物镜质量是否满足要求。相应的指示机构给出适用与否的信号。

在结语中必须指出：在确定物镜的光学传递函数时很难保证正确的测量条件，很难给出设备的工作精度。

测量时所要求的精度和稳定性，随着被测系统的孔径和校正程度而显著改变。测量大孔径和象差校正好的系统时，对稳定性和精度的要求最高。

关于测量误差的来源，可以指明下面几点：

- 周围环境（振动、灰尘、温度起伏）；
- 仪器的机械元件和光学元件（定向不准，部件偏心，平行光管和其它透镜的象差）；
- 实验目标（照明系统中的部份相干光，光源稳定性，光源色温，杂光，图案误差，被测系统孔径充满的误差）；
- 象分析器（光电接收器灵敏度的改变，对应着空间频率范围上的电学机构的灵敏度）。

现在，光学传递函数的测量不论再现性有多好（大约3%），在根据各种原理所制作的仪器上对相同的样品进行测试，仍不能保证，结果相当一致。但是仔细设计和检验，可以排除大多数系统误差，得到可靠的结果。

译自“OMI” №12. 1975. сmp. 62  
〔刘瑞祥译 叶铁树校〕