

利用光学台作镜头波面象差测定

向 才 新

摘要: 本文介绍我们干涉法检测镜头像差的原理、仪器结构和测试方法。

一、前 言

干涉法以它的反映信息全面、易于目视估值、使用方便, 而成为检测镜头的重要的通用工具之一^{〔1〕、〔2〕、〔3〕、〔4〕}。

在三十一—六十年代里, 对于大象差镜头, 如照相物镜, 只是由于波面象差没有明确的判断指标, 如小象差镜头的 Rayleigh 判断那样和难于求解单一波面象差, 而采用了 Hartman 方法之类的几何象差检测法。其他小象差镜头, 如显微物镜、望远物镜等则一直采用干涉法检测波面象差。

特别七十年代以来, 激光源、光电探测器、计算机和干涉仪相结合而形成了数字干涉仪。这种干涉仪, 比较易于加工, 系统误差小和数据判读迅速; 还具有其他旧干涉仪从未有的新功能, 如由波面象差测定值、实时直接求得分布函数, 传递函数, 以及点列图等。因而现在成为适用于检测大、小象差镜头的加工和使用质量的优良方法。

本文所述是我们正在研制的数字干涉仪的“先遣”工作的部份内容, ——我们所采用的干涉检测法的原理、仪器结构和检测方法等。

二、原理和干涉方程

检测镜头的波面象差, 以前采用 Twyman 干涉仪^{〔1〕、〔2〕}。六十年代有了激光源之后, 多采用 Fizeau 球面干涉仪^{〔4〕}。后者较之前者, 易于加工。于是, 我们采用了结构简单的 Fizeau 型激光球面干涉仪的自准检测法。光路图如图 1:

He—Ne 激光经转向棱镜、扩展镜、分束棱镜、干涉物镜后, 在参考球面镜处, 部份反射、部分折射。折射光束经被测透镜后, 自准返回, 通过参考球面, 与前部份反射光相干。目视或照相来测定波面象差值。

参考球面镜和自准镜面为光学面时, 形成双光束干涉。参考球面(镀膜)反射率为 70%, 自准镜面为全反射, 这时两者间形成一法伯利—皮诺共振腔, 而产生多光束干涉。后者有利于检测小于三个波长的波面象差, 特别是轴对称象差。前者有利于大于三个波长以上的波面象差。这两种系统, 我们都具备。

若以 ${}_R W'_{折}$ 、 ${}_R W'_{反}$ 、 W_R 、 $W_{测}$ 、 W_0 、 a 、 a' 和 S 分别表示参考球面的折射波面像差、参考球面的反射波面像差、参考球面的局部误差, 被测件的波面像差、干涉仪光学系统(物镜和分束棱镜等)的波面像差、常数、检测波面与参考波面间的夹角和干涉仪物镜与被测镜

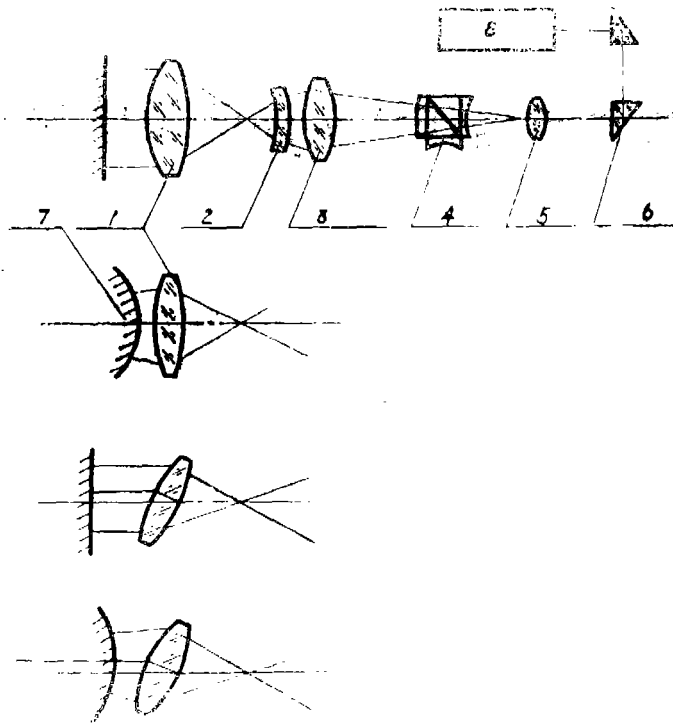


图1 1 被测镜头 2 参考球面 3 干涉仪物镜 4 分束棱镜
5 扩展镜 6 转向棱镜 7 自准镜 8 He—Ne激光

头两者出瞳的间距。则Fizeau球面干涉仪的干涉方程可表之为^[5]：

$$W'_{球干} = 2R W'_{前} - R W'_{反} + 2(W_{测} - R W) + 16(W_0)^2 S + a\alpha'' \dots \dots \dots (1)$$

在良好装配和正确检测条件下，(1)式可简化为：

$$W'_{球干} = 2(W_{测} - R W) + 16(W_0)^2 S \dots \dots \dots (2)$$

若以 $\Delta W_{局}$ 、 δ 、 F 和 Q 分别表示自准平面镜的局部误差、自准平面镜的平面度误差、被测镜头的相对孔径和被测镜头的视场角，则自准平面镜的系统误差为^{[6]*}：

$$\Delta W = 2(\Delta W_{局}) + \left(\frac{F}{8} + Q\right) F \delta \dots \dots \dots (3)$$

由(2)、(3)式之和得到，表徵自准式Fizeau球面干涉仪的光学特性的干涉方程为：

$$W'_{准球} = 2(W_{测} + R W + \Delta W_{局}) + 16(W_0)^2 S + \left(\frac{F}{8} + Q\right) F \delta \dots \dots \dots (4)$$

(4)式中包含被测件的波面像差和其他光学件的波面差。参考球面与自准平面镜的局部误差的影响，与被测镜头的波面像差的相等同。

* 对于自准球面镜，仅须考虑其局部误差的影响。

三、仪器结构和系统误差

实际仪器如图 2 照片所示:

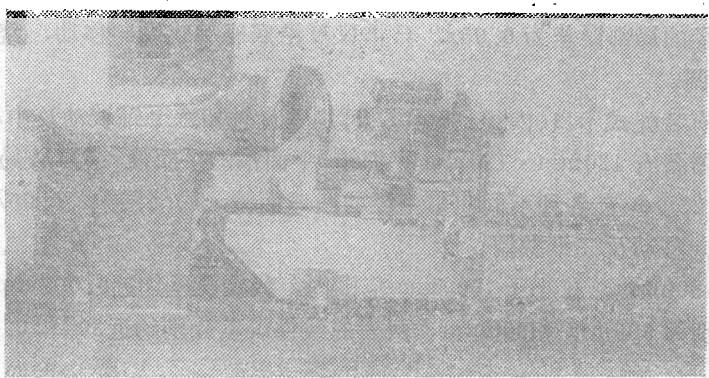


图 2

仪器结构的示意图如图 3:

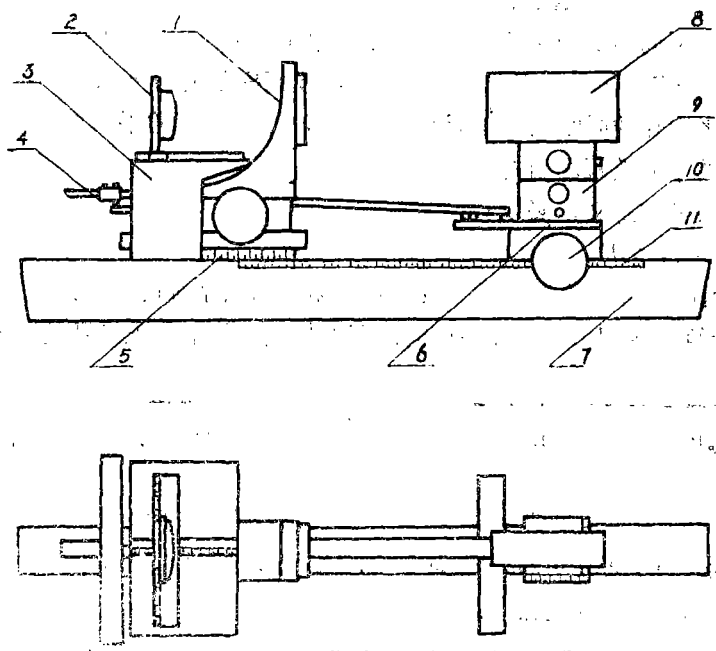


图 3 波面像差测定仪示意图

- | | | |
|---------|---------|---------|
| 1 镜头夹持器 | 2 球面反射镜 | 3 反射镜台座 |
| 4 丁字尺 | 5 角度标尺 | 6 导轨 B |
| 7 导轨 | 8 干涉仪 | 9 干涉仪底座 |
| 10 手轮 | 11 标尺 | |

本仪器用以检测机壳小于 $\phi 120\text{mm}$ 、相对孔径小于 $F/1$ 、后截距小于 1000mm 的光学镜头，如照相、望远、微缩、付里叶等镜头的轴上、轴外波面像差。

整个仪器由四个主要部分所组成：<1>干涉仪；<2>镜头夹持器；<3>自准镜和自准镜夹持器和<4>节点式导轨、即底座导轨和丁字导轨。前三者基本同轴。

干涉仪物镜的相对孔径为 $F/1$ ，波面像差（包括干涉仪物镜和其分束棱镜） $< 0.25\lambda$ 。参考球面镜的全口径的局部误差为 0.05λ 。干涉仪可沿底座导轨纵向移动，绕丁字导轨参考点转动，及三维微调。

镜头夹持器有装配式卡口、内径 120mm ，可绕垂直轴和水平轴转动及中心轴的微调。

自准镜夹持器备有 $120\text{mm} \times 120\text{mm}$ 平面镜，平面镜的平面度 $< 0.1\lambda$ ，局部误差 $< 0.05\lambda$ 。还备有 $10\text{mm} \sim 128\text{mm}$ 等各种不同曲率半径的凸球面镜，局部误差 $< 0.05\lambda$ 。自准镜夹持器可沿底座导轨纵向移动及二维微调。

底座导轨长 1300mm ，在小于 1000mm 范围内，线性误差约近 0.001mm 。丁字导轨的纵轨和横轨长度分别为 900mm 和 300mm ，两者的线性误差分别约近 $30''$ 和 0.001mm ，垂直度误差为 $30''$ 。

总结上述，光学的系统误差包括：<1>干涉仪光学系统的象差和参考球面的局部误差；<2>自准检测时的自准镜面的面形差和局部误差。(4) 式中，除 $W_{测}$ 外，其余各项均属所谓光学的系统误差 $\Delta W_{\text{光统差}}$ ，即：

$$\Delta W_{\text{光统差}} = (rW + \Delta W_{\text{局}}) + 8(W_0)^2 S + \frac{1}{2} \left(\frac{F}{8} + Q \right) F \delta \dots\dots\dots (5)$$

(5) 式表明：不同种类的系统误差，其影响也不相同；<1>参考球面与自准镜面的局部误差的影响为“一次”的；<2>干涉仪光学系统的波面象差则为“二次”的，且随干涉仪物镜与被测镜头两者出瞳的间距的减小而减小；<3>自准平面镜的平面度误差的影响与被测镜头的相对孔径角的平方及视场角有关。

为了使所测结果有意义，必须有：

$$\Delta W_{\text{光统差}} \ll W_{测}$$

$\Delta W_{\text{光统差}}$ 至少比 $W_{测}$ 小一个数量级。或采用措施，消除系统误差的影响。

由(5)式，计算了我们仪器在几种可能出现的检测条件下的光学系统误差值，如(表1)：

表1

镜头种类	$W_{测}$	rW	$\Delta W_{\text{局}}$	W_0	S	$8(W_0)^2 S$	F	Q	δ	$\frac{1}{2} \left(\frac{F}{8} + \theta \right) F \delta$	$\Delta W_{\text{光统差}}$
照相	$\geq 1.5\lambda$	0.05λ	0.03λ	0.25λ	100mm	0.03λ	0.25	0.42	0.5λ	0.014λ	0.12λ
微缩	$\geq 0.13\lambda$	0.05λ	0.02λ	0.25λ	50mm	0.01λ	0.25	0.25	0.5λ	0.009λ	0.09λ
付里叶	$> 0.1\lambda$	0.025λ	0.025λ	0.13λ	300mm	0.02λ	0.05	0.5λ	$8 \times 10^{-6}\lambda$		0.07λ

(5) 式和表1表明，质量比较好的仪器在几种典型的检测条件下，光学系统误差的参考球面和自准镜面的局部误差的影响最大，干涉仪光学系统象差次之，自准平面镜的平面度误差最小。仪器的总的光学系统误差 $\Delta W_{\text{光统差}}$ 约为 $0.12\lambda \sim 0.07\lambda$ 。这样大小数值的光学的系统误差基本上可以作为鉴定照相、微缩、付里叶等镜头的像质之用。为了更严格准确，最好把仪器的光学精度提高一倍或更高一点。比如使 rW 、 $\Delta W_{\text{局}} \leq 0.01\lambda$ 、 $W_0 =$

0.1λ, δ=0.1~0.2λ。这样,光学的系统误差可能为0.01~0.02λ。这有利于提高由波面像差计算其他测定值的准确性,比如,使传递函数的误差≤0.01~0.02**。

从前面的讨论还看到,机械的误差包括:<1>镜头夹持器的垂轴偏心差,<2>底座导轨的线性差和<3>丁字导轨的垂直度误差和纵、横轨的线性差。机械的系统误差,如同畸变像差和场曲像差的影响一样,使得被测像点远离观测系统参考点,而形成新的“畸变”和“场曲”差,以及由此而引起的球差、彗差和像散差的改变量。若以*l'*_轴、*l'*_底、φ₁、φ₂、Δ*l*、*f*和*Q*分别表示:镜头夹持器垂轴的横向偏心差、底座导轨的线性差、丁字导轨的垂直度误差、丁字导轨的纵轨线性差、丁字导轨的横轨线性差、被测镜头的焦距、和被测镜头的视场角。则在平面自准的检测条件下,实际像点偏离观测系统参考点的相对位置坐标为^[7]:

$$\Delta L^{\text{平准}} = 2[l'_{\text{轴}} + l'_{\text{底}} + f(\varphi_1 + \varphi_2)]\tan Q + 2\Delta l \dots\dots\dots (6)$$

$$\Delta L^{\text{平准}} = 2[l'_{\text{轴}} + l'_{\text{底}}]\sec Q \dots\dots\dots (7)$$

Δ*L*^{平准}相当于“场曲”差、Δ*L*^{平准}相当于畸变差。通常情况下,*l'*_轴+*l'*_底≪*f*(φ₁+φ₂),则(6)式可简化为:

$$\Delta L^{\text{平准}} \approx 2[f(\varphi_1 + \varphi_2)\tan Q + \Delta l] \dots\dots\dots (8)$$

(6)、(7)式表明:底座导轨的线性差与镜头夹持器垂轴偏心差具有相等的影响。根据(6)、(7)式,计算了我们仪器的机械精度在某些测试条件下的Δ*L*^{平准}和Δ*L*^{平准}值,如表2、表3:

表2

视 场 角	<i>l'</i> _轴 (mm)	<i>l'</i> _底 (mm)	Δ <i>L</i> ^{平准} (mm)
5°	0.001	0.001	0.004
		0.01	0.022
10°	0.001	0.001	0.004
		0.01	0.022
20°	0.001	0.001	0.004
		0.01	0.023
30°	0.001	0.001	0.005
		0.01	0.025

表3

视 场 角	<i>l'</i> _轴 (mm)	<i>l'</i> _底 (mm)	φ ₁ ~φ ₂	<i>f</i> (mm)	Δ <i>l</i> (mm)	Δ <i>L</i> ^{平准} (mm)
5°	0.001	0.001	30"	100	0.001	0.007
		0.01				0.009
10°	0.001	0.001	30"	100	0.001	0.013
		0.01				0.016
20°	0.001	0.001	30"	100	0.001	0.025
		0.01				0.031
30°	0.001	0.001	30"	100	0.001	0.038
		0.01				0.048

按照我们仪器的机械精度, $\Delta L'_{\text{平轴}}$ 和 $\Delta L'_{\text{平轴}}$ 都较小, 约为 0.007~0.048 和 0.004~0.025, 由此因物距改变而产生的球差、彗差和像散等像差的改变量, 可以忽略不计。因而只衍生“畸变”和“场曲”差。——这两种机械的系统误差, 不同于上述的光学系统误差, 只是影响畸变像差和场曲像差的精密测定, 而光学系统误差则主要影响球差、彗差和像散等像差的精密测定。

四、测试方法和结果

用一平面镜紧贴被测镜头机壳的前方, 在调整被测镜头轴线位置的同时, 绕水平轴旋转镜头夹持器, 至自准像不动为止, 这时被测镜头的轴线与镜头夹持器的水平轴线重合, 并通过其垂直轴线。

纵向移动干涉仪, 同时在垂直方向转动干涉仪, 至自准像不动为止, 这时干涉仪参考点与其垂直转轴轴线重合。

去掉贴在被测镜头机壳前方的平面镜, 调整自准平面镜, 至自准像点与干涉仪参考点重合。这时, 干涉仪被测镜头和自准平面镜是同轴的。

固定自准平面镜, 纵向移动被测镜头和干涉仪, 同时, 在垂直方向, 旋转镜头夹持器, 直至自准像不移动。这时, 被测镜头的后节点与夹持器垂轴轴线重合。

在垂直方向, 旋转镜头夹持器, 对准“0”度位标。微调干涉仪, 使出现“最直”的干涉条纹, 且两个侧边条纹图形趋向对称, 如图 5 所示。这时, 干涉仪对准在被测镜头的最佳焦点位置处。若波面像差大于一个波长以上, 则再调整干涉仪, 直至中心对称的“圆”条纹出现。然后旋转镜头夹持器, 对准 $\pm 5^\circ$ 、 $\pm 10^\circ$ 、 $\pm 15^\circ$... 等位标, 目视或照相, 测得每一位置处的波面像差。

检测有限工作距离的镜头*, 如显微物镜或微缩镜头, 则采用自准球面镜, 其曲率半径尽可能接近被测镜头的工作距离。调整自准球面镜与被测镜头, 使两者机壳同轴。纵向移动自准球面镜与干涉仪, 至“直”的干涉条纹“最值”, 或“圆”的条纹数最少。图 4、图 5、图 6 分别是照相物镜、微缩镜头和显微物镜的轴上最佳像面处的干涉图:

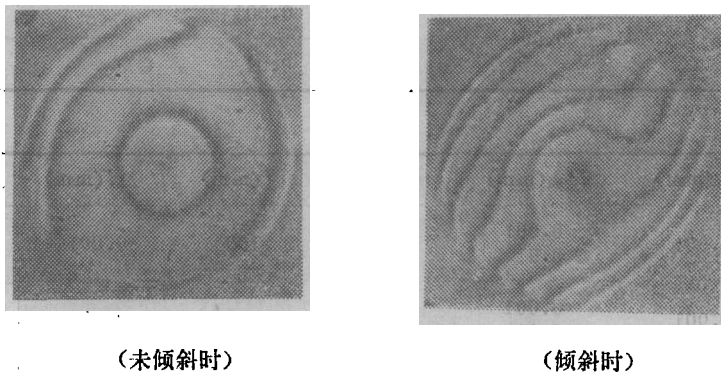


图4 长春二光学厂的照相物镜 $f = 100 \text{ F}/2.8$

* 现在仅能作轴上检测。

** C. Birch, 1982年来所讲学。

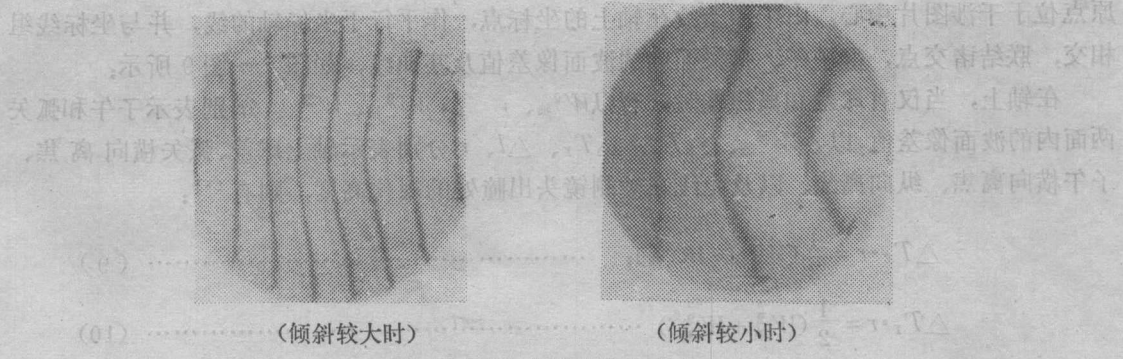


图5 光机所的微缩镜头 F/1.8

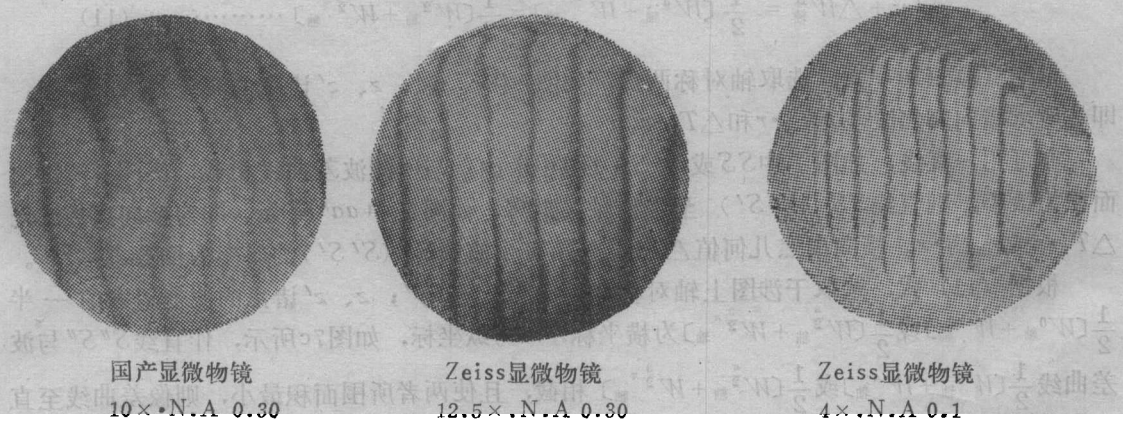


图 6

以手轻压镜头夹持器或干涉仪，使被测镜头与参考球面互相靠近。“圆”形和非封闭“圆”形的干涉条纹内向收缩者，被测波面为凹形、即正波面像差，外向扩张者，被测波面凸形，即负波面像差。反之，使被测镜头与参考球面相互分离，则条纹内向收缩者，被测波面为凸形、负波面象差；外向扩张者为凹形，正波面象差^[1]。上述法则，也适用于判断任意复杂干涉图的被测波面的局部面形凸凹。

选取被测波面最凹处的条纹级数为零级，其他条纹的级数，以远离“凹”点，顺序增加。干涉条纹为“直”条纹时，可选取中间条纹的级数为零级。

在干涉图片上作直角坐标系及与坐标轴平行的间距长度单位为 $\lambda/2$ 的坐标线组。坐标系

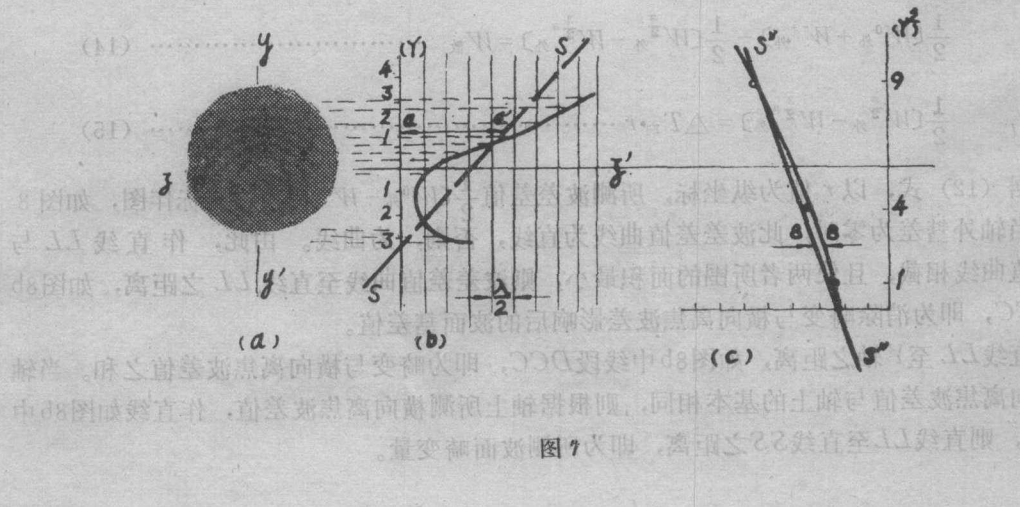


图 7

原点位于干涉图片中心。由于干涉条纹在轴上的坐标点，作平行于坐标轴的线，并与坐标线组相交，联结诸交点，得子午、弧矢面内的波面像差值及其曲线，如图7~图9所示；

在轴上，当仅有球差和离焦差时，若以 $W^0_{轴}$ 、 $W^{\pi}_{轴}$ 、 $W^{\frac{\pi}{2}}_{轴}$ 、 $W^{\frac{3}{2}\pi}_{轴}$ 分别表示子午和弧矢两面内的波面像差值，以 $\Delta W^0_{轴}$ 、 ΔT_z 、 ΔT_r 、 Δl 、 r 分别表示轴上球差、弧矢横向离焦、子午横向离焦、纵向离焦、以及光线在被测镜头出瞳处的规化高度，则有^{〔8〕}：

$$\Delta T_z \cdot r = \frac{1}{2} [W^0_{轴} - W^{\pi}_{轴}] ; \dots\dots\dots (9)$$

$$\Delta T_r \cdot r = \frac{1}{2} (W^{\frac{\pi}{2}}_{轴} + W^{\frac{3}{2}\pi}_{轴}) \dots\dots\dots (10)$$

$$\Delta l r^2 + \Delta W^0_{轴} = \frac{1}{2} [W^0_{轴} + W^{\pi}_{轴}] = \frac{1}{2} [W^{\frac{\pi}{2}}_{轴} + W^{\frac{3}{2}\pi}_{轴}] \dots\dots\dots (11)$$

根据(9)、(10)式，选取轴对称两点，如图7中 y 、 y' 、 z 、 z' 诸点的波差差值的一半，即是所求横向离焦波差 $\Delta T_z \cdot r$ 和 $\Delta T_r \cdot r$ 。

亦可用一直线，如图7中 SS 或 $S'S'$ （图中未画）与所测波差曲线相截，使两者所围之面积为最小，则直线 SS （ $S'S'$ ）至坐标轴之距离，如图7中 aa' 所示，即为横向离焦波差 $\Delta T_z \cdot r$ 或 $\Delta T_r \cdot r$ 。横向离焦几何值 ΔT_z 、 ΔT_r 可由直线 SS （ $S'S'$ ）的斜率的倒数求得^{〔9〕}。

根据(11)式，选取干涉图上轴对称点，如图7 y 、 y' 、 z 、 z' 诸点的波差值和的一半 $\frac{1}{2} [W^0_{轴} + W^{\pi}_{轴}]$ 或 $\frac{1}{2} [W^{\frac{\pi}{2}}_{轴} + W^{\frac{3}{2}\pi}_{轴}]$ 为横坐标， r^2 为纵坐标，如图7c所示，作直线 $S''S''$ 与波差曲线 $\frac{1}{2} [W^0_{轴} + W^{\pi}_{轴}]$ 或 $\frac{1}{2} [W^{\frac{\pi}{2}}_{轴} + W^{\frac{3}{2}\pi}_{轴}]$ 相截，且使两者所围面积最小，则像差曲线至直线 $S''S''$ 之距离，如图7c中 BB 线段，即为消除纵向离焦 $\Delta l \cdot r^2$ 影响后的波面球差 $\Delta W^0_{轴}$ 。 $S''S''$ 直线至 r^2 坐标轴之距离即为纵向离焦波差值 $\Delta l \cdot r^2$ 。纵向离焦几何值 Δl 为直线 $S''S''$ 斜率的倒数两倍所决定^{〔9〕}。

当物（像）点在轴外时，各种波面像差均可单独或同时出现。若以 $W^0_{外}$ 、 $W^{\pi}_{外}$ 、 $W^{\frac{\pi}{2}}_{外}$ 、 $W^{\frac{3}{2}\pi}_{外}$ 分别表示子午、弧矢两面式的波面像差，以 $W_{畸}$ 、 $W_{彗}$ 、 $W_{曲}$ 、 $W_{球}$ 、 $W_{散}$ 分别表示畸变、彗差、场曲、球差、像散等波面像差，则有^{〔8〕}：

$$\frac{1}{2} [W^0_{外} - W^{\pi}_{外}] = \Delta T_z \cdot r + W_{畸} + W_{彗} \dots\dots\dots (12)$$

$$\frac{1}{2} [W^{\frac{\pi}{2}}_{外} + W^{\frac{3}{2}\pi}_{外}] = \Delta l \cdot r^2 + W_{曲} + W_{球} \dots\dots\dots (13)$$

$$\frac{1}{2} [W^0_{外} + W^{\pi}_{外}] - \frac{1}{2} [W^{\frac{\pi}{2}}_{外} + W^{\frac{3}{2}\pi}_{外}] = W_{散} \dots\dots\dots (14)$$

$$\frac{1}{2} [W^{\frac{\pi}{2}}_{外} - W^{\frac{3}{2}\pi}_{外}] = \Delta T_r \cdot r \dots\dots\dots (15)$$

根据(12)式，以 r 值为纵坐标，所测波差差值 $\frac{1}{2} [W^0_{外} - W^{\pi}_{外}]$ 为横坐标作图，如图8所示。当轴外彗差为零时，此波差差值曲线为直线，否则，为曲线。由此，作直线 LL 与波差差值曲线相截，且使两者所围的面积最小，则波差差值曲线至直线 LL 之距离，如图8b中线段 CC ，即为消除畸变与横向离焦波差影响后的波面彗差值。

而直线 LL 至 Y 轴之距离，如图8b中线段 DCC ，即为畸变与横向离焦波差值之和。当轴外的横向离焦波差值与轴上的基本相同，则根据轴上所测横向离焦波差值，作直线如图8b中 SS 所示，则直线 LL 至直线 SS 之距离，即为所测波面畸变量。

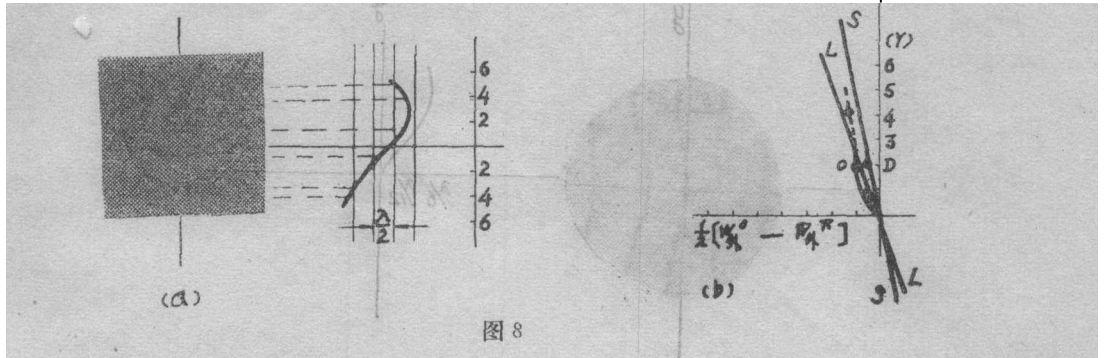


图 8

根据 (13) 式, 以 r^2 为纵坐标, 所测波差的和值 $\frac{1}{2}[W_{外}^{\lambda/2} + W_{外}^{\lambda/2}]$ 为横坐标作图, 如图 9 所示。当轴外球差为零时, 此波差和值曲线为直线, 否则, 为曲线。由此, 作直线 $L'L'$ 与波差和值曲线相截, 且使两者所围的面积为最小, 则波差和值曲线至直线 $L'L'$ 之距离, 如图 9b 中线段 $C'C'$, 即为消除场曲与轴向离焦波差影响后的轴外波面球差值。

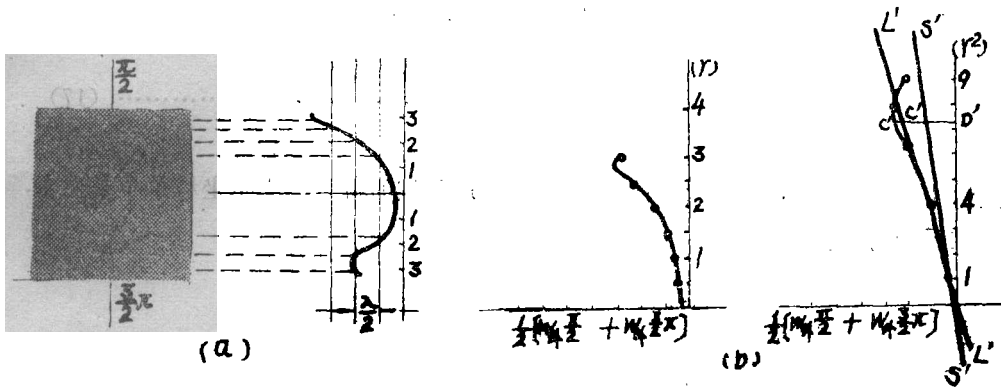


图 9

直线 $L'L'$ 至 r^2 轴之距离, 如图 9b 中线段 $DC'C'$, 为场曲与轴向离焦波差之和。当轴外的轴向离焦波差与轴上的相同, 则根据轴上所测轴向离焦波差值, 作直线如图 9b 中 $S'S'$ 所示, 则直线 $L'L'$ 至直线 $S'S'$ 之距离, 即为所测波面场曲值。

代所测 $W_{外}^0$ 、 $W_{外}^{\lambda/2}$ 、 $W_{外}^{\lambda/2}$ 、 $W_{外}^{\lambda/2}$ 於 (14) 式, 即可求得波面像散值。

当被测系统的场曲或畸变很大, 比如大于十个波长以上时, 轴向或横向移动干涉仪 (准确地讲, 移动干涉仪参考点), 使干涉场中的干涉条纹数目尽可能少, 则这个纵向或横向移动距离即代表场曲或畸变几何值。

波面像差小于一个波长时, 采用“直”的干涉条纹图像, 并使一条纹位于干涉图中间。作 (X, Y) 直角坐标系, 坐标原点位于干涉图中心, 其中一轴, 比如 Y 轴, 与中间的干涉条纹相密切, X 轴“垂直”于干涉条纹。

量出 Y 轴至条纹之间距 ΔS 及相应处两条纹的间距 S , 如图 10 所示, 则得 Y 轴上各点处的波差值为:

$$\Delta W_{小} = \frac{\Delta S}{S} \cdot \frac{\lambda}{2} \dots\dots\dots (16)$$

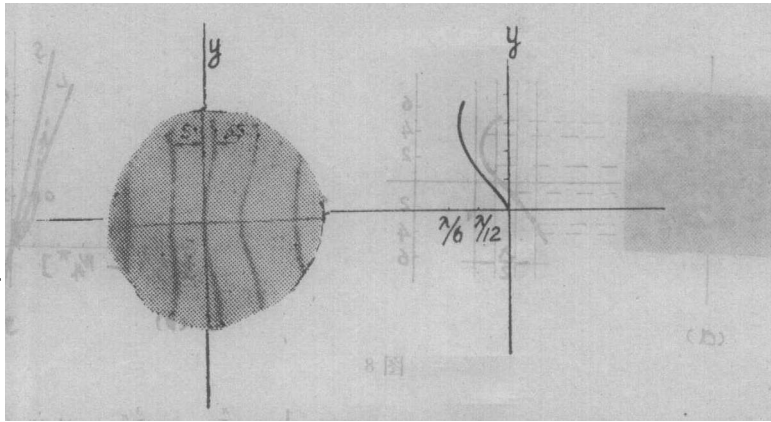


图10

按下述方法,求得 x 轴上诸点的波差值。以中心条纹距相邻两条纹中之任一条纹之间距,或以诸条纹间距的平均宽度为单位,等分 X 轴,如图11中,0、 $\pm 1 \cdots \pm n$ 所示,并赋与诸点邻旁的条纹以相应的序号。任一位置坐标点至相应序号条纹的距离,如图中坐标点“1”至“2”条纹的距离,为 $\Delta S'$,其两侧条纹间距为 S' ,则该点之波面像差为:

$$\Delta W_{\text{小}} = \pm \frac{\Delta S'}{S'} \cdot \frac{\lambda}{2} \dots\dots\dots (17)$$

各点的两侧条纹的间距大于坐标单位长度者,取相同的符号,小于坐标单位长度者,则取与前者相反的符号。

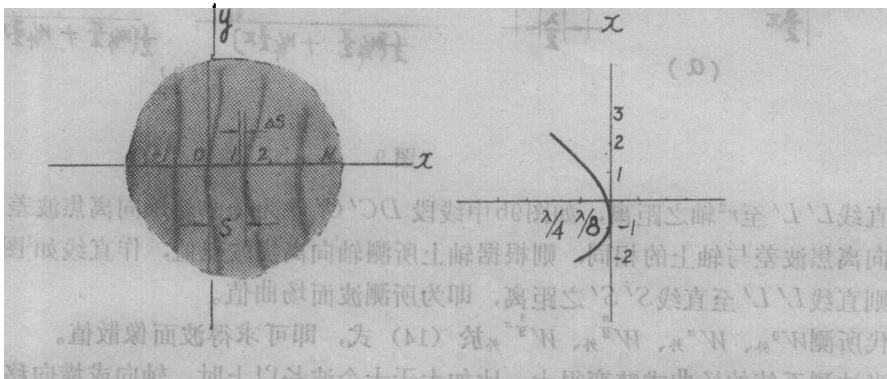


图11

也可以倾斜参考面或被测件,使干涉条纹平行于 x 轴,按上述计测 y 轴诸点波面像差的方法处理。

将所测 X 、 Y 轴上诸点波差值代入(9)式~(15)式,按前述法则,求解球差,彗差和像散等其他各种像差值。

上述的求解波面像差法是适用手工处理的方法。现在数字干涉仪中求解波差方程,则是:把测得的条纹峰值位置坐标,干涉图的两垂轴方向的边界值,以及条纹的级数值,代入波差方程,用最小二乘法求解各种波面象差值^[10]。

五、关于像质评价

Rayleigh的 $\lambda/4$ 判断是判断小像差镜头像质的重要指标。这一法则充分显示了用干涉法判定镜头像质的这一方法的优越性。四十年代以来, H. S. Coleman 等人^[11], N. Murcott 等人^[12]指出了分辨率随波面像差的减小而提高的定性关系, 提出了“I. Q. (干涉)质量”法, 但并没有找到定量的对应关系。七十年代, J. M. Geery 建立了干涉图像与波差均方差的定量关系^[13], 但处理欠方便。A. C. 库奇科对航摄镜头建立了分辨本领 R 与波像差 W 的一个简单的近似关系式^[14]。

$$R = u/4W \dots\dots\dots (18)$$

(18) 式中 u 是被测镜头的孔径角。

根据 (18) 式, 当 $\lambda = 500\text{nm}$ 时, 有下表结果:

表4

镜头	u	W	$R = \frac{u}{4W}$	分辨率实测值
微缩	$F1/1.8$	$\lambda/6$	833	794
照相	$F1/2$	1.5λ	83	350

表 4 表明: 微缩镜头的理论值与实测值比较接近, 而照相物镜的相差较大。因此, (18) 式可能只适用于航摄物镜和小像差镜头, 而不能作为一个普适公式。

企图建立一个简单的关系, 由干涉图来确定被测镜头的分辨率、或其他像质判断量, 或直接由波差值判断任意像差镜头的像质, 像 Rayleigh 判断那样, 尚须作大量的理论和实验工作。

六、结 论

用激光 Fizeau 球面干涉仪, 按自准光路, 检测镜头是适宜的。^{1>}干涉仪中的高精度光学元件少, 易于加工。^{2>}干涉仪的体积小, 仪器结构比较简单。

我们的干涉仪不论多光束或双光束, 干涉条纹对比比较好。各主要组件固定在同一基座上, 仪器“一体化”, 防震性能良好, 干涉条纹稳定。多光束干涉法比较适用于检测波面像差小于三个波长以下的镜头, 双光束比较适用于检测大于三个波长以上的镜头。

目视判测精度约 $\lambda/10$, 照相检测精度 $\lambda/20$, 基本满足镜头像质鉴定的要求。为了快速, 以及测得镜头的分布函数和传递函数, 今后应采用数字干涉仪。

现在的实验装置还需进一步完善。干涉仪物镜的相对孔径现在只有一种 $F/1$, 今后应有 $F/1$ 、 $F/3$ 、 $F/6$ 、 $F/10$ 等多种。在观测方面, 附加一变焦距物镜, 以适于检测各种相对孔径的镜头。同时尚需作一种物方丁字导轨, 以便检测有限工作距离镜头的轴外像差。干涉仪的纵向运动的匀滑性较差, 稳定性尚不够理想。

开展简易的干涉法评价像质的研究, 扩大干涉法的实用价值和使用范围, 从而有可能克服现在像质评价工作中的很多不足之处。如传递函数不能作为加工质量检测的手段, 而分辨率很难标准化等等, 虽然数字干涉仪具有较多的功能和优点, 但价格昂贵。

参 考 文 献

干涉仪光学

- [1] C.Candler; «Modern interferometers», Hilger & Watts LTD, 1951.
- [2] А.Н.Захаревский; «Интерферометры», Оборониз, 1952.
- [3] J.Dyson; «Interferometry as a measuring tool», The Machinery publishing CO, LTD, 1970.
- [4] D.Malacara; «Optical shop testing», John Wiley and Sons, 1978.
- [5] 向才新; 关于Fizeau干涉仪, 光学机械, 1980年, 第6期, 39.
- [6] 向才新; 自准检测法中平面反射镜的误差允许值, 光学学报, 1983年, 第1期, 58.
- [7] 向才新; 节点导轨光具座的机械误差对像差测量的影响, «光学检测文集», 计量出版社, 1978年.
- [8] 向才新; 一个简便的波面像差计测方法, 光学机械, 1981年, 第5期, 23.
- [9] H.H.Hopkings; «Wave theory of aberrations», Oxford, the clarendon press, 1950.
- [10] E.R.Freniere et al.; Interferogram evaluation program for the HP—9825A calculator, SPIE 1979, 171, 39.
- [11] H.S.Coleman et al.; Interferometer studies of telescopic system, J.O.S.A., 1947, 37, 671.
- [12] N.Murcott and H.Gotterid; Interferometer quality and its relation to photographic resolving power, J.O.S.A., 1955, 45, 644.
- [13] J.M.Geary; Optical windon interferograms, a simple method for their evaluation, App.Opt., 1977, 16, 2134.
- [14] A.C.库奇科; «航空摄影学», 测绘出版社, 1982.