

用星点法估值波面像差——I. 球差

向 才 新

(中国科学院长春光学精密机械研究所)

提 要

比较了镜头的实测波面球差值与其星点像的图像,初步得到了波面球差值的大小与最佳像点前后衍射圈图像特征二者间的对应关系,从而有了用星点法估值波面球差的可能性。

一、前 言

星点检测法是光学检测中设备简单、操作方便、因而是广泛、常用的方法之一。大约五、六十年前, Groffths 认为成像系统有球差时,最佳像点前后的能量分布是不对称的^[1]。Taylor 曾全面定性地研究了星点检测法^[2], Maréchal 指出,当波面球差为 $\lambda/4$ 时,最佳像点前后的能量分布即出现显著的不对称性^[3],然而他并没有阐明这个显著的不对称性究竟具有何种特征。Welford 从理论上说明星点法检测波面球差的极限灵敏度为 $\lambda/20$ ^[4]*。总之,到目前为止,星点法仍是一个定性检测法。

本文旨在探讨不同波面球差的最佳像点前后光能分布的差异,也即该点前后衍射圈图像特征(宽度、亮度、清晰度和对比)的差异和最高可分辨衍射圈数**的差数,以此来解决星点法不能定量检测波面球差这一长期存在的问题。

二、理 论 基 础

光学系统有三级波面球差时,像点邻近空间的能量分布表示式为^[5]

$$[U(u, v, \varphi)]^2 = C \{ U_0 + 2i \alpha_{040} \exp(-iu/4) (2\pi/u)^{1/2} / v \sum_{s=0}^{\infty} (i)^s (2s+1) \times J_{s+1/2}(u/4) \cdot [a_s \cdot J_{2s+5}(v) + b_s \cdot J_{2s+1}(v) + c_s \cdot J_{2s-3}(v)] + \dots \}^2, \quad (1)$$

式中 C 为常数, u, v, φ 分别为像点的规化坐标与方位角, U_0 为无像差像点的振幅分布, α_{040} 为三级球差系数, J 为 Bessel 函数, a_s, b_s, c_s 为仅与自然数 s 有关的常数。

在(1)式中,明显地含有球差系数而没有相对孔径这一变量。这说明:(1)像点附近空间的能量分布,即最佳像点前后衍射圈图像特征(宽度、亮度、清晰度和对比)的差异和最佳像点前后最高可分辨衍射圈数的差数,只与球差有关,而与相对孔径无关。改变相对孔径,只能使能量分布的几何位置发生相似变化。因此可以根据最佳像点前后衍射圈图像特征的

收稿日期: 1982年1月8日

* 他的出发点不是很合理的,不能建立在最佳像点前后等距离处两点的能量差异,而应该是衍射圈的对比的差异。

** 离最佳像点不同距离的各位置处,随着距离的增加,其衍射圈数逐渐增加,直到某位置不可辨认。

差异和最高可分辨衍射圈数的差数,来判断波面球差的大小,而无需考虑相对孔径的影响*;
 (2) 改变被测镜头的通光口径,就可以得到一系列波面球差值与最佳像点前后衍射圈图像特征和最高可分辨衍射圈数的差数之间的对应关系。

三、实验步骤、方法与结果

首先,用 Twyman 干涉仪或检测显微物镜的干涉仪测量望远物镜、照相物镜、显微物镜以及单透镜的最佳像面处的波面球差值。检测望远物镜与显微物镜波面球差的光路图分别如图 1、图 2 所示。测得各个镜头的波面球差值如图 3 所示。图 3 中 1、2 为自制望远物镜的波面球差值,其通光口径和焦距分别为 35 mm、33 mm 和 340 mm、280 mm; 3 为胶合透镜的波面球差值,其通光口径和焦距分别为 40 mm 和 295 mm; 4、5 为单透镜的波面球差值,其通光口径和焦距分别为 36 mm、67 mm 和 200 mm、275 mm; 6 为 Zopking-4 型 $F_{1\frac{1}{2}}$ 焦距为 50 mm 照相物镜的波面球差值; 7、8、9 均为自制 45× 显微物镜的波面球差值,其中曲线 9 增大了透镜间的空气间距,使其球差值增大。

对于已知波面球差值的望远物镜、照相物镜和单透镜、胶合透镜,观测最佳像点前后最

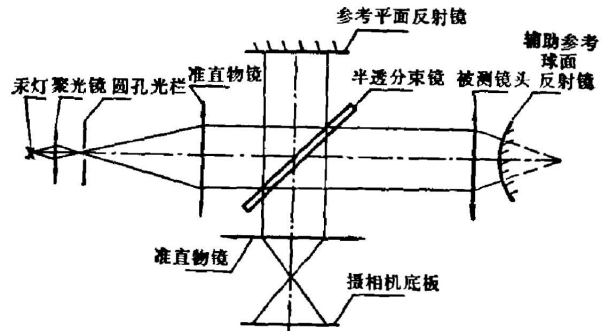


图 1 检测远距离镜头波面球差的光路图

Fig. 1 Optical schematic diagram for testing the wave-spherical aberrations of long-distance lenses

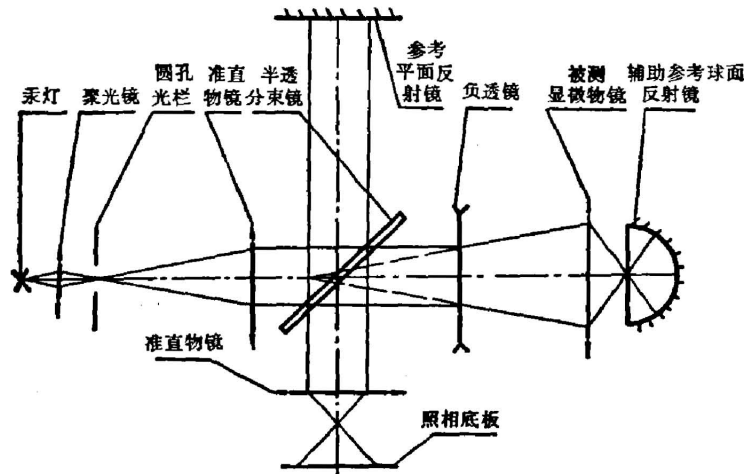


图 2 检测显微物镜波面球差的光路图

Fig. 2 Optical schematic diagram for testing the wave-spherical aberrations of microscope objectives

* 一般衍射积分表示式也体现了这种性质。

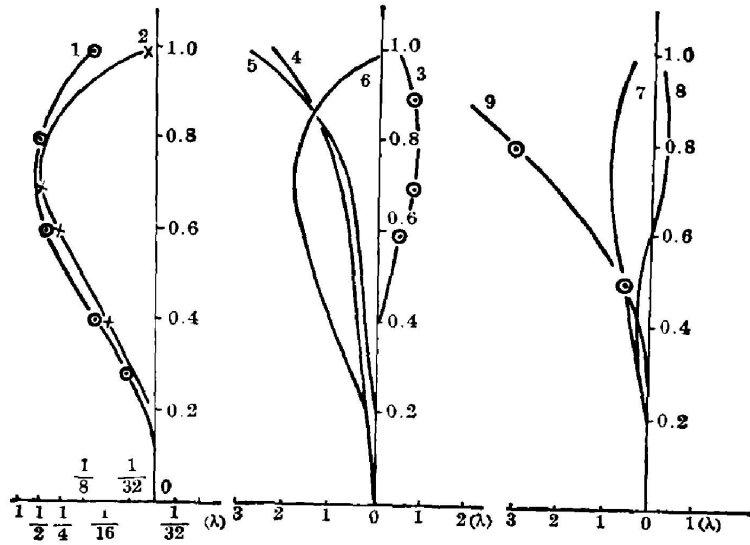


图 3 各个镜头的波面球差测定值

Fig. 3 The tested data of wave-spherical aberrations for various lenses

高可分辨衍射圈数和衍射圈图像的特征。其装置布置如图 4 所示。其中 S 为强度可变的炽热灯泡, C 为聚光透镜, 将来自 S 之光聚焦于星点板 h 的某一小孔上。 h 上有直径为 0.22 mm、0.23 mm、0.28 mm、0.58 mm、0.8 mm、0.97 mm、0.98 mm、1.5 mm、1.56 mm、2 mm 等小孔。 f 为 5500 Å 滤光片。来自 h 上某小孔之光通过被测物镜 O 及检测用显微镜 M 而达到检验者之眼 e 。 O 与 h 的间距为 20 m, 这时被测系统之球面波差值与理论上的无穷远处值的差异可以忽略不计, 以保证这时所测象差值与在干涉仪上所测的相同。

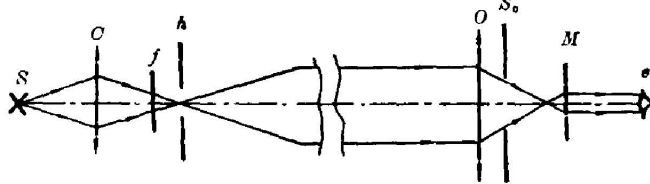


图 4 星点法检测望远物镜、照相物镜、单透镜和胶合透镜的光路图

Fig. 4 Optical schematic diagram for testing telescope objectives, photographic lenses, elements and doublets by star testing

O 后有一可变光阑 S_0 。改变 S_0 的口径, 使被测镜头的波面球差由最大逐渐变为最小, 于是, 对同一物镜可以获得不同波面球差的星点图像。

观测某物镜时, 对于某一 S_0 口径, 选择 h 上直径适当的小孔(但小孔的选择不宜过大, 因为星点像的空间图像与星点孔的直径大小有关)及光源 S 之强度, 使得被观察到的衍射圈尽可能清晰, 这样对人眼是“舒服”的。

显微镜 M 的物镜数值孔径不小于被测镜头的相对孔径。前后移动 M , 查得最佳像点前后最高可分辨衍射圈数及其差数, 比较最佳像点前后衍射圈图像特征差异。

观测已知波面球差值的显微物镜的星点像, 其光路如图 5 所示, 基本上与图 4 相同, 所不同点为 (1) h 为一镀铝星点板; (2) O 为被测显微物镜, M 为显微目镜, 两者安装在同一

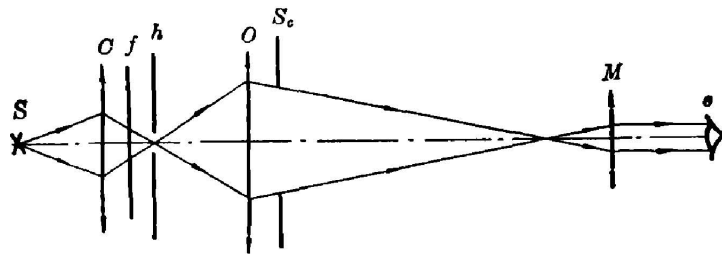


图5 星点法检测显微物镜的光路图

Fig. 5 Optical schematic diagram for testing microscope objectives by star testing

显微镜机筒上；(3) 正个地前后移动 O — M ，以观测 O 的最佳像点前后的最高可分辨衍射圈数，比较最佳像点前后衍射圈图像特征的差异。

根据图4、图5所示光路图，观测了图3中所列的波面球差值已知的几种类型镜头的星点像。最佳像点前后的最高可分辨衍射圈数，差数的部分结果如表1所示。

图6中的照片为 Zopking-4 型照相物镜在各个不同相对孔径位置处的干涉图(图6(a), (b), (c) 分别为波面球差 $\lambda/4$, $\lambda/4$, $\lambda/16$; 相对孔径 1:2, 1:5.6, 1:16) 与其相应的最佳像点、最佳像点前后的最高可分辨衍射圈数的图像。照片下面的波面球差值是指波面

表1 几种类型镜头，在不同波面球差时，其最佳像点前后的最高可分辨衍射圈数和差数

Table 1 The maximum numbers and its differences of resolvable diffraction rings both inside and outside the best focuses for some-lenses with various wave-spherical aberrations

镜头类型	改变通光口径 后最大波球差	星点孔直径 (mm)	最高可分辨的最佳像前后 衍射圈数及差数			最佳像点图像
			前	后	差数	
(1)号望远物镜	0.6λ	1.08(较大)	7	5	2(?)	
		0.58	10	7	3	
		0.28	10	7	3	
	$\lambda/2 >, > \lambda/4$	1.5	6	5	1	
		0.58	7	6	1	
(8)号显微物镜	$\lambda/8$	镀铝星点板	2	2	0(前后略有差异)	
	$\lambda/16$	镀铝星点板	2(3)	2(3)	0	
(6)号照相物镜	$\sim 2\lambda$	0.8	5	15	10	
	0.7λ	1.5	7	2	5	
	$\lambda/4$	2.0	5	4	1	
	$\lambda/8 \sim \lambda/10$	2.0	4	4	0	
	$\lambda/16$	2.0	2	2	0	

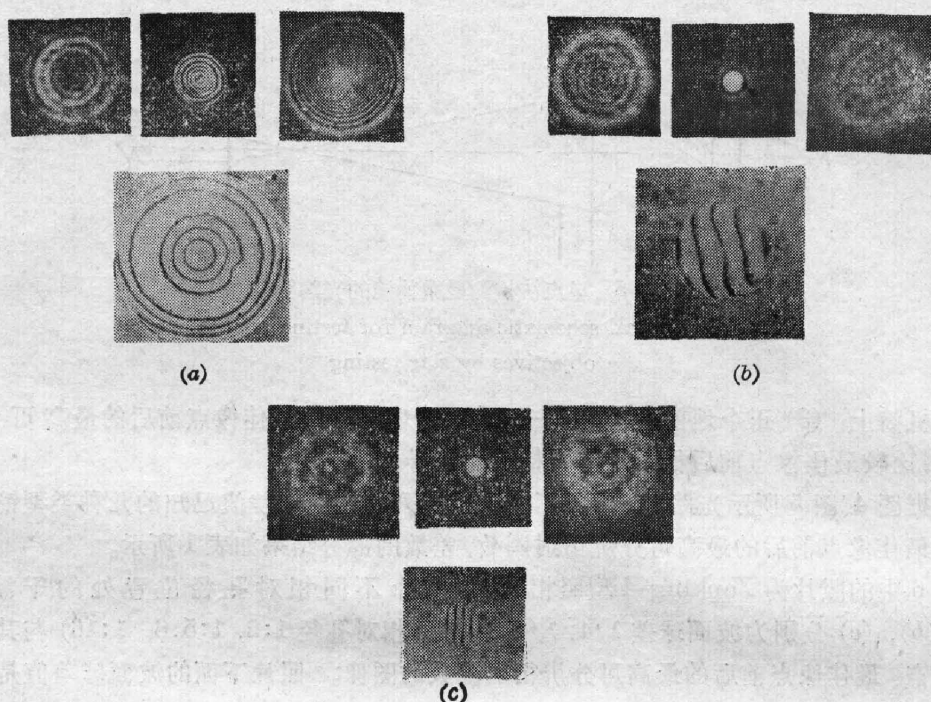


图 6 在 Zopking-4 型照相物镜的各相对孔径位置处的干涉图及其相应的最佳像点和最佳像点前后的最高可分辨衍射圈的图像 (这里的波面球差值是指波面球差的最大值)

Fig. 6 Intereferograms, the corresponding best-focus discs and resolvable diffraction patterns for various apertures of the photographic lens model Zopking-4. (The spherical aberration data at the bottom of the photo are their maximum values)

表 2 波面球差与最佳像点前后最高可分辨衍射圈数的差数之间对应关系

Table 2 Corresponding relationships between the wave-spherical aberrations and the differences of resolvable diffraction rings both inside and outside the best focuses

波 面 球 差	$\geq \lambda$	$\sim \lambda/2$	$\sim \lambda/4$	$\sim \lambda/8$	$\sim \lambda/16$
最佳像点前后最高可分辨衍射圈数的差数	3	2	1	0 (清晰度有差异)	0 (清晰度几乎相同)

球差的最大值。

由表 1 及图 6 中的照片可以看到, 波面球差与其星点像最佳像点前后可分辨衍射圈数的差数大致有下面的对应关系:

查阅最高可分辨衍射圈数, 有时由于衍射数过多, 或由于衍射圈对比的降低, 以及杂散光的干扰等其它原因, 并不是一目了然的。一般说来, 最佳像点前后的某一方有衍射圈, 而另一方完全没有, 则被测系统的波面球差在 1λ 以上。

当波面球差 $< \lambda/4$ 时, 最佳像点的形像与艾里 (Airy) 斑相似, 当 $> \lambda/2 \sim \lambda$ 时, 最佳像点邻近开始出现杂散光, 随着波面球差的增加, 杂散光越来越严重, 如表 1 中所示星点像。

从图 6 中的照片可知: (1) 当波面球差接近 $\lambda/4$ 时, 除几何形像基本相似外, 不仅最佳

像点前后最高可分辨衍射圈数值有差异,而且最佳像点前后各对应处衍射圈的亮度、清晰度和对比也都有明显的差异;(2)当波面球差约为 $\lambda/2 \sim \lambda$ 时,最佳像点前后各对应处的衍射圈的几何形像也有显著的不同;(3)当波面球差接近 $\lambda/8$ 时,最佳像点前后,不仅最高可分辨衍射圈数值相等,而且各对应处的各衍射圈的宽度、亮度、清晰度基本相同,只是对比略有不同而已;(4)当波面球差接近 $\lambda/16$ 时,最佳像点前后的衍射圈的图像特征相同,最高可分辨衍射圈数相等。因此,用星点法判定小像差镜头,如显微物镜、望远物镜、微缩镜头和傅里叶变换镜头等,是否满足瑞利条件,估值其波面球差的数量级,是一种合适的简便方法。对于大于 1λ 以上波面球差,由于波面球差值与最佳像点前后衍射的图像特征,还没有一个简单明确的关系,此时,衍射圈数多,不易查数。因此用星点法估值大像差镜头,如照相物镜的波面球差的数量级,是不可能的。

观测望远物镜、照相物镜和单透镜、胶合透镜时,发觉到星点孔的直径大小只要等于或小于被测镜头理论分辨间距,不论任何值,只要在光强合适的条件下,对所测结果无影响。而对于波像大于 2λ 以上的镜头,星点孔直径可略大于其理论分辨间距。

从以上观察和讨论中得到的结论是:(1)所得结果与波面球差曲线的形状无关;(2) $\lambda/4$ 波面球差已显现出像点能量沿轴向分布的显著不对称性,这与 Maréchal 的理论^[3]一致;(3)作为星点定量检测波面球差,其实际灵敏度约为 $\lambda/16$,此值略低于 Welford 的理论值。

参 考 文 献

- [1] C. H. Griffich; *Trans. Opt. Soc.*, 1919~1920, 21, 81.
- [2] H. D. Taylor; *«The Adjustment and Testing of Telescope Objectives»*, fourth edition, (Newcastle upon tyne, 1947).
- [3] A. Maréchal; *«Handbuch der Physik»*, Band 24 (Springer-Verlag, Berlin, 1956), 323.
- [4] W. T. Welford; *J. O. S. A.*, 1960 50, No. 1 (Jan), 21.
- [5] M. Born, E. Wolf; *«Principles of Optics»*, (London Perg., 1959), 475.

Evaluating the wave aberrations by star testing I. spherical aberrations

XIANG CAIXIN

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 8 January 1982)

Abstract

Comparing the wave-spherical aberrations in practical test with the patterns of the same lens, the corresponding relations are preliminarily obtained between the quantities of spherical aberrations and the features of diffraction patterns both inside and outside the best focus. Thus, the evaluation of spherical aberrations by star test will be feasible.