

文章编号 : 0253-2239(2002)11-1375-07

部分相干光学成像系统的 光学传递函数 和像质评价准则

向 阳¹⁾ 向才新²⁾

(1), 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 长春 130022)
(2), 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130022

摘要 : 根据光学成像理论, 建立了部分相干成像光学系统的光学传递函数。该函数与非相干成像光学系统传递函数相同, 因而部分相干成像和非相干成像两者的光学系统波面像差公差标准也是相同的。这一点解释了显微镜光学系统的光学设计惯用法则。镜头像差公差标准的选择, 并不因为采用成像照明方式的不同而有所差异。

关键词 : 部分相干成像 ; 光学传递函数 ; 像质评价

中图分类号 : O435.2 文献标识码 : A

1 引 言

HopKins^[1]建立了非相干成像系统的光学传递函数和像质评价准则。Born 和 Wolf^[2]讨论了相干光照明与部分相干光照明两种光学传递函数, 然而这两种光学传递函数是分别针对光振幅和互强度的传递, 而不是针对成像系统像点的光强, 因而不能用于相干或部分相干光成像的像质评价^[3]。为弥补这种不足, Born 和 Wolf^[4]提出了透射交叉系数, 或称之为广义传递函数^[5], Becherer 和 Parrent 等^[6]提出了表观传递函数, 杨健和王之江等^[7]提出了 π 相位直边像强对比方法。透射交叉系数和表观传递函数可以评价部分相干成像(包括相干成像)的特点。但前者除了包括光学系统像质参量(空间频率和波面像差)外, 还包含了照明光相干度; 后者另外还包括了物体相位结构等因素。这样, 上述二者和光学系统像质参量之间都没有一个像非相干光学传递函数那样的“单一”的简单关系。因而, 该二者不便于用于对光学系统的像质评价。 π 相位直边像强对比方法也是这样。本文拟建立部分相干成像光学系统的光学传递函数, 以弥补上述之不足, 从而为采用光学传递函数评价部分相干成像的光学系统, 如显微光学系统的像质, 提出一个合理可行的方法和准则。

为与光学系统的光学传递函数相区分, 也可以将“透射交叉系数”和“表观传递函数”都称之为“复

合像质传递函数”。所谓复合像质传递函数, 即包括照明光束、物体和光学系统三者中任意两种或两种以上影响像质因素在内的传递函数。

2 部分相干成像的像强频谱

Born 和 Wolf^[2]、Thompson^[3]等人先后讨论了部分相干成像的像强频谱。前者讨论了在照明光强与像强两者的空间频率基频相同条件下的像强频谱。后者的讨论没有前者的条件限制。他们所得两种像强频谱的公式, 基本形式相似, 但不完全相同。本文的讨论, 采用了 Thompson 的像强、物体照射光互强度、物体复振幅透过率和光学系统脉冲响应等多种物理量的空间频率赋给原则^[3], 所不同之处, 只是采用了与其指数函数正负号不相同的傅里叶变换式, 以期获得另一种形式的像强频谱公式, 便于部分相干成像光学系统的像质评价及其波像差公差标准的建立。

如图 1 所示, (x_0, y_0) 、 (x'_0, y'_0) 和 (x_i, y_i) 分

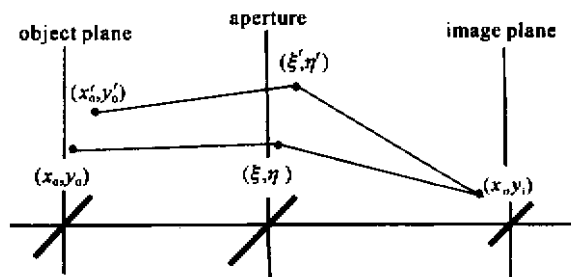


Fig.1 (x_i, y_i) is the image of (x_0, y_0) and (x'_0, y'_0) through the lens aperture

别为物面内两点和像点的归化位置坐标。

互强度为 $J_0(x_0, y_0; x'_0, y'_0)$ 的部分相干光照射在透过率为 $t(x_0, y_0) \lambda t^*(x'_0, y'_0)$ 的物体上, 通

过振幅传递函数为 $K(x_0, y_0; x_i, y_i) \lambda K^*(x'_0, y'_0; x_i, y_i)$ 的光学系统, 成像在像面 (x_i, y_i) 点处。当物面不太大时 (x_i, y_i) 点像强可以表示为^[2]

$$I(x_i, y_i) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} J_0(x_0 - x'_0, y_0 - y'_0) K(x_i - x_0, y_i - y_0) K^*(x_i - x'_0, y_i - y'_0) \times t(x_0, y_0) t^*(x'_0, y'_0) dx_0 dy_0 dx'_0 dy'_0, \quad (1)$$

以上各上标“*”均代表共轭复量(以下同)。设物点 $(x_0, y_0) \lambda (x'_0, y'_0)$ 和像点 (x_i, y_i) 的光强分布的子午、弧矢空间频率分别为 $(f', g') \lambda (f'', g'')$ 和 $(f, g) \lambda$

$I(x_i, y_i) \lambda J_0(x_0 - x'_0, y_0 - y'_0) \lambda K(x_i - x_0, y_i - y_0) \lambda K^*(x_i - x'_0, y_i - y'_0)$ 和 $t(x_0, y_0) \lambda t^*(x'_0, y'_0)$ 对应各个空间频率的傅里叶变换式分别为

$$I(x_i, y_i) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} G_i(f, g) \exp[-j2\pi(fx_i + gy_i)] df dg, \quad (2)$$

$$J_0(x_0 - x'_0, y_0 - y'_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} G_0(f + f' - f'', g + g' - g'') \exp\{-j2\pi[(f + f' - f'')(x_0 - x'_0) + (g + g' - g'')(y_0 - y'_0)]\} df' dg'', \quad (3)$$

$$K(x_i - x_0, y_i - y_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \kappa(f + f', g + g') \exp\{-j2\pi[(f + f')(x_i - x_0) + (g + g')(y_i - y_0)]\} df' dg' \quad (4)$$

$$K^*(x_i - x'_0, y_i - y'_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \kappa^*(f', g') \exp\{j2\pi[f(x_i - x'_0) + g'(y_i - y'_0)]\} df' dg', \quad (5)$$

$$t(x_0, y_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \tau(f'', g'') \exp[-j2\pi(f''x_0 + g''y_0)] df'' dg'', \quad (6)$$

$$t^*(x'_0, y'_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \tau^*(f'' - f', g'' - g') \exp\{j2\pi[(f'' - f')x'_0 + (g'' - g')y'_0]\} df'' dg'', \quad (7)$$

由(4)式、(5)式得到

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} K(x_i - x_0, y_i - y_0) K^*(x_i - x'_0, y_i - y'_0) \exp\{j2\pi(fx_i + gy_i)\} dx_i dy_i = \exp[j2\pi(fx_0 + gy_0)] \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \kappa(f + f', g + g') \kappa^*(f', g') \exp\{-j2\pi[f(x'_0 - x_0) + g'(y'_0 - y_0)]\} df' dg', \quad (8)$$

由(2)式、(6)式得到

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} J_0(x_0 - x'_0, y_0 - y'_0) t(x_0, y_0) \exp\{j2\pi[(f + f')x_0 + (g + g')y_0]\} dx_0 dy_0 = \exp\{j2\pi[(f + f')x'_0 + (g + g')y'_0]\} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} G_0(f + f' - f'', g + g' - g'') \kappa(f', g') \exp\{-j2\pi(f'x'_0 + g'y'_0)\} df' dg''. \quad (9)$$

(1)式两侧分别乘以 $\exp\{j2\pi(fx_i + gy_i)\}$, 对 x_i, y_i 积分, 根据(3)式, 得到像点 (x_i, y_i) 的像强分布的频谱表示式:

$$G(f, g) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} K(x_i - x_0, y_i - y_0) K^*(x_i - x'_0, y_i - y'_0) \exp[j2\pi(fx_i + gy_i)] dx_i dy_i \right\} \times \\ [J_0(x_0 - x'_0, y_0 - y'_0)] t^*(x'_0, y'_0) dx_0 dy_0 dx'_0 dy'_0. \quad (10)$$

先后将(8)式、(9)式代入(10)式,并根据(6)式、(7)式,得到

$$G(f, g) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp[j2\pi(fx_0 + gy_0)] \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \kappa(f' + f, g' + g) \kappa^*(f', g') \times \\ \exp\{-j2\pi[f'(x'_0 - x_0) + g'(y'_0 - y_0)]\} df' dg' \times \\ [J_0(x_0 - x'_0, y_0 - y'_0)] t^*(x'_0, y'_0) dx_0 dy_0 dx'_0 dy'_0 = \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \kappa(f' + f, g' + g) \kappa^*(f', g') t^*(x'_0, y'_0) \exp[-j2\pi(f'x'_0 + g'y'_0)] \times \\ \left(\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} J_0(x_0 - x'_0, y_0 - y'_0) \kappa(x_0, y_0) \exp[j2\pi((f' + f)x_0 + (g' + g)y_0)] dx_0 dy_0 \right) df' dg' dx'_0 dy'_0 = \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \kappa(f' + f, g' + g) \kappa^*(f', g') t^*(x'_0, y'_0) \exp[-j2\pi(f'x'_0 + g'y'_0)] \times \\ \left[\exp\{j2\pi((f' + f)x'_0 + (g' + g')y'_0)\} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} G_0(f + f' - f'', g + g' - g'') \tau(f'', g'') df'' dg'' \right] df' dg' dx'_0 dy'_0 = \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \kappa(f' + f, g' + g) \kappa^*(f', g') \left(\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} t^*(x'_0, y'_0) \exp\{-j2\pi((f'' - f')x'_0 + (g'' - g')y'_0)\} dx'_0 dy'_0 \right) \times \\ G_0(f + f' - f'', g + g' - g'') \tau(f'', g'') df'' dg'' df' dg' = \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \kappa(f' + f, g' + g) \kappa^*(f', g') \tau(f'', g'') \tau^*(f - f'', g - g'') G_0(f + f' - f'', g + g' - g'') df'' dg'' df' dg'. \quad (11)$$

上式可以改写成以下两种形式:

$$G(f, g) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \tau(f'', g'') \tau^*(f - f'', g - g'') \mu_{G_0}(f, g; f', g'; f'', g'') df'' dg'', \quad (12)$$

$$G(f, g) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} L_{G_0}(f, g; f', g'; f'', g'') \kappa(f + f', g + g') \kappa^*(f', g') df' dg'. \quad (13)$$

(12)式、(13)式中:

$$\mu_{G_0}(f, g; f', g'; f'', g'') = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} G_0(f + f' - f'', g + g' - g'') \kappa(f + f', g + g') \kappa^*(f', g') df' dg', \quad (14)$$

$$L_{G_0}(f, g; f', g'; f'', g'') = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} G_0(f + f' - f'', g + g' - g'') \tau(f'', g'') \tau^*(f - f'', g - g'') df'' dg''. \quad (15)$$

分别称 $G_0(f + f' - f'', g + g' - g'')$ 、 $\tau(f'', g'')$ 、 $\tau^*(f - f'', g - g'')$ 和 $\kappa(f + f', g + g') \kappa^*(f', g')$ 为照明光互强度频谱、物互强度透过率频谱和类互强度传递函数*。这三种量为影响像谱强度(即像质)的三种“单元”的基本物理量。

分别定义 $\mu_{G_0}(f, g; f', g'; f'', g'')$ 和 $L_{G_0}(f, g; f', g'; f'', g'')$ 为透射交叉系数^[2]和广义照明光互强度频谱函数,这两种量是照明光互强度频谱分别与

类互强度传递函数和物互强度透过率频谱组成的“二元”复合函数,分别表征各不同组合物理量对像质的影响。 μ_{G_0} 和 L_{G_0} 两概念的提出在于把(11)式右侧简化成两种物理量,如同非相干成像的像谱方程,以便了解 μ_{G_0} 或 L_{G_0} 的变化对像质所起的作用,以及

* 互强度传递函数表示式为 $\kappa(f, g) \kappa^*(-f', -g')$ (Born M., Wolf E., *Principles of Optics*. New York: Pergamon Press, 1959. 523 ~ 526)。

便于透过率形式不同物体的像谱计算^[2,3]。

部分相干成像的非线性^[2],不论在三种基本量构成的像谱转换方程(11)式,或复合量构成的像谱转换方程(12)式、(13)式,都清楚地表现了出来。

(11)式~(13)式,在 Born 和 Wolf^[2]、Becherer 和 Parrent^[6]、Thompson^[3]等人的讨论中,已有基本相似但不完全相同的公式表述。本文结果不同之处在于(11)式~(13)式中的类互强度传递函数 $\kappa\kappa^*$ 与非相干传递函数的被积函数的形式^[2]相同,这将有利于讨论部分相干成像的成像特性及其光学系统公差。

3 散射体部分相干成像和非相干成像的像谱

当物体为散射体,该物体可视作点状集合体,其互强度透过率可以表示为^[8]

$$\kappa(x_0, y_0)\kappa^*(x'_0, y'_0) = \bar{K}(x_0, y_0; x'_0, y'_0)\delta(x'_0, y'_0), \quad (16)$$

其中 \bar{K} 为某点互强度透过率规范化值 $\delta(x_0, y_0)$ 、 $\delta(x'_0, y'_0)$ 为 δ 函数。由(16)式和(6)式、(7)式,以及 δ 函数的性质^[9],可得

$$\begin{aligned} \tau(f'', g'')\tau^*(f - f'', g - g'') &= \bar{K} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x_0, y_0) \exp\{j2\pi(f''x_0 + g''y_0)\} dx_0 dy_0 \times \\ &\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x'_0, y'_0) \exp\{-j2\pi[(f'' - f)x'_0 + (g'' - g)y'_0]\} dx'_0 dy'_0 = \bar{K}, \end{aligned} \quad (17)$$

由(12)式或(13)式和(17)式,得到

$$G_c(f, g) = \bar{K} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \mu_{ck}(f, g; f', g'; f'', g'') df' dg'', \quad (18)$$

或

$$G_c(f, g) = \bar{K} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} G_0(f + f' - f'', g + g' - g'') \kappa(f + f', g + g') \kappa^*(f', g') df' dg' df'' dg''. \quad (19)$$

(18)式、(19)式表明,一般情况下,即使物体是散射体,部分相干成像的频谱传递仍是非线性的。

当照明光为非相干光时,有^[10]

$$J_0(x_0 - x'_0, y_0 - y'_0) =$$

$$I_0(x_0, y_0)\delta(x_0 - x'_0, y_0 - y'_0), \quad (20)$$

其中 $I_0(x_0, y_0)$ 为物点 (x_0, y_0) 的光强,将(20)式代入(3)式,得到^[9]

$$\begin{aligned} G_0(f + f' - f'', g + g' - g'') &= \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} J_0(x_0 - x'_0, y_0 - y'_0) \exp\{j2\pi[f + f' - f''(x_0 - x'_0) + (g + g' - g''(y_0 - y'_0))]\} dx_0 dy_0 &= \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I_0(x_0, y_0) \delta(x_0 - x'_0, y_0 - y'_0) \exp\{j2\pi[f + f' - f''(x_0 - x'_0) + (g + g' - g''(y_0 - y'_0))]\} dx_0 dy_0 &= \\ I_0(x_0, y_0). \end{aligned} \quad (21)$$

将(21)式代入(12)式或(13)式,得到 $G_c(f, g) = L_c(f, g)\mu_s(f, g)$, (22)

其中

$$L_c(f, g) = I_0 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \tau(f'', g'')\tau^*(f - f'', g - g'') df'' dg'', \quad (23)$$

$$\mu_s(f, g) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \kappa(f + f', g + g') \kappa^*(f', g') df' dg'. \quad (24)$$

(22)式即为常见的非相干成像的线性频谱传递方程, $L_c(f, g, \lambda, \mu_s(f, g))$ 分别为非相干成像的物光频谱和光学传递函数^[2]。

4 部分相干成像的光学系统像质评价

4.1 光学系统像质公式

这个问题可以采用常用的像质评价方法:对(11)式~(13)式、(18)式和(19)式,把各式中除了光学系统本身以外的其他影响像质的各个彼此独立的诸因素,如物体透过率、照明光互强度等,均视作不变量。这时(11)式~(13)式、(18)式和(19)式,以及由(11)式~(13)式衍生得到的非相干成像的像谱(22)式,都简化成

$$G_c(f, g) = C\mu_s(f, g), \quad (25)$$

其中 C 为常数,

$$\mu_s(f, g) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \kappa(f + f', g + g') \kappa^*(f', g') df' dg'. \quad (26)$$

(25)式表明:不论哪一种形式、哪一种状况下的部分相干成像,其光学系统像质公式均为 $\mu_s(f, g)$;

(26)式表明: $\mu_s(f, g)$ 的形式与非相干成像传递函数的形式(24)式相同,但不同于相干传递函数和互强度传递函数^[2]的形式。为突出这一性质,把 $\mu_s(f, g)$ 称作部分相干成像的光学系统传递函数,或“广义成像光学系统传递函数”。

设 $P(\xi, \eta, \lambda)$ 、 $W(\xi, \eta)$ 分别为光学系统的光瞳函数和波面像差, $\xi = \lambda Rf$ 、 $\eta = \lambda Rg$ 为光瞳面位置坐标, λ 为波长, R 为高斯参考球面半径,则^[2]

$$\kappa(f, g) = \kappa(\xi/\lambda R, \eta/\lambda R) = P(\xi, \eta) = \begin{cases} \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda}W(\xi, \eta)\right], & \text{在 } A \text{ 内} \\ 0, & \text{在 } A \text{ 外} \end{cases} \quad (27)$$

其中 A 为光瞳面积。将(27)式代入(26)式,除以无像差的部分相干成像的光学系统传递函数 $\mu_{s0}(f, g) = \iint_S d\xi' d\eta' \kappa(\lambda R)^2$, 得到部分相干成像的相对光学系统传递函数如下式:

$$\mu_{rs}(f, g) = \frac{\mu_s(f, g)}{\mu_{s0}(f, g)} = \frac{\iint_S \exp\left\{j\frac{2\pi}{\lambda}[W(\xi + \xi', \eta + \eta') - W(\xi', \eta')]\right\} dS}{\iint_S dS}, \quad (28)$$

其中 S 为积分面积, $S = \iint_S d\xi' d\eta'$, $dS = d\xi' d\eta'/S$ 。

在 (ξ', η') 方向分别平移距离

$$-\frac{\xi}{2} = -\frac{\lambda Rf}{2}, \quad -\frac{\eta}{2} = -\frac{\lambda Rg}{2},$$

去掉 (ξ', η') 的上标“'”, (28)式可以改写为

$$\mu_{rs}(f, g) = \iint_S \exp\left[j2\pi\sqrt{f^2 + g^2}W(\xi, \eta; f, g)\lambda\right] dS, \quad (29)$$

其中

$$W(\xi, \eta; f, g) = \frac{1}{\sqrt{f^2 + g^2}} [W(\xi + \lambda Rf/2, \eta + \lambda Rg/2) - W(\xi - \lambda Rf/2, \eta - \lambda Rg/2)]. \quad (30)$$

用传递函数评价像质,一般采用规化值,因此(28)式、(29)式的 $\mu_{rs}(f, g)$ 即是所求的用于实际像质评价的部分相干成像的光学系统像质公式。

(29)式 $\mu_{rs}(f, g)$ 与 Hopkins 的非相干相对传递函数^[1]相似,所不同的只是前者为二维空间频率,而后者为一维空间频率,参考 Hopkins 的方法原则,从(29)式、(30)式得到部分相干成像的光学系统的二维空间频率的相移传递函数和调制传递函数分别为

$$\mathcal{A}(\xi, \eta; f, g) = (2\pi/\lambda)\sqrt{f^2 + g^2}W(\xi, \eta; f, g), \quad (31)$$

$$M(\xi, \eta; f, g) = 1 - \mathcal{A}(\xi, \eta; f, g)^2 K(\xi, \eta; f, g), \quad (32)$$

其中

$$\overline{W(\xi, \eta; f, g)} = \iint_S W(\xi, \eta; f, g) dS, \quad (33)$$

$$K(\xi, \eta; f, g) = \frac{\iint_S W(\xi, \eta; f, g)^2 dS - \left[\iint_S W(\xi, \eta; f, g) dS\right]^2}{\iint_S W(\xi, \eta; f, g) dS}. \quad (34)$$

4.2 光学系统像质评价质量指标

根据(25)式、(28)式,评价光学系统像质的规化值也可以表示为

$$\mu_{rs}(f, g) = \frac{\mu_s(f, g)}{\mu_{s0}(f, g)} = \frac{G_i(f, g)C}{G_{i0}(f, g)C} = \frac{G_i(f, g)}{G_{i0}(f, g)}, \quad (35)$$

其中, $G_{i0}(f, g)$ 为光学系统无像差时的像谱值。(35)式表明,按照传统的光学系统像质评价方法,

有:1)光学系统像质评价等同于系统复合像质评价,因此,利用前者可以评估后者;反之亦然;2) $\mu_{RS}(f, g)$ 的大小与 K 的大小无关。这意味:对光学系统像质规化值为 $\mu_{RS}(f, g)$ 的某一成像系统,可以有不同的 K 值,因而表现出不同的成像特征或像质差异*[如(25)式所示];也意味:同一成像系统,对其处于任一 K 值的相对像质优劣程度,都可以用同一的 $\mu_{RS}(f, g)$ 来表示。

综上所述,可以把非相干成像的像质评价准则和标准^[1,11]推广到部分相干成像及其光学系统像质评价中去。根据(32)式,得到部分相干成像及其光学系统的调制传递函数应满足

$$M(\xi, \eta; f, g) = 1 - 2\left(\frac{\pi}{\lambda}\right)^2 (f^2 + g^2) K(\xi, \eta; f, g) \geq 0.8^{[11]}, \quad (36)$$

或

$$M(\xi, \eta; f, g) = 1 - 2\left(\frac{\pi}{\lambda}\right)^2 (f^2 + g^2) K(\xi, \eta; f, g) \geq K'^{[11]}. \quad (37)$$

其中 K' 为一经验常数。为了表明非相干成像评价准则也适用于部分相干成像的光学系统像质评价,不妨把上述准则又称之为“广义光学系统像质评价准则”。

由(36)式、(37)式和(34)式,可以计算得到光学系统的各种波面像差容许值^[12]。根据上述,对同一光学系统,既然有相同的“广义光学系统传递函数”和“广义像质评价准则”,因而其波面像差容许值也应相同,不会因所使用的照明光是否相干、物体透过率的结构形式不同而有所差异。

结论 1) 包含有类互强度传递函数的部分相干成像的像谱表示式,有利于说明部分相干成像的特性,有利于理解光学系统在部分相干成像中所起的“非相干成像的作用”,即具有“广义光学系统传递函数”,而不是“相干传递函数”或“互强度传递函数”的作用。

2) 对同一光学系统的像质评价,不论其所采用

的照明光束相干度的大小、物体透过率结构形式如何,只须采用同一的“广义光学系统传递函数”、同一的“广义像质评价准则”,因而可以采用同一的波面像差公差。该结论表明:i)其最终和主要结论与当今流行的显微镜头光学设计的惯用原则是一致的;ii)用传递函数检测仪检验显微镜头,可以采用非相干光照明;iii)对缩微、信息处理等精密镜头的像质评价和光学设计,也有参考价值。

参 考 文 献

- [1] Hopkins H H. The aberration permissible in optical system. *Proc. Phys. Soc.*, 1957, **70**(5):449~470
- [2] Born M, Wolf E. *Principles of Optics*. New York: Pergamon Press, 1959. 480~483; 523~526
- [3] Thompson B J. Image Formation with Partially Coherent Light. In: Wolf E ed. *Progress in Optics*. Vol. VIII, New York: John Wiley and Sons Inc., 1969. 171~229
- [4] Born M, Wolf E. *Principles of Optics*. New York: Pergamon Press, 1959. 527~529
- [5] Beran M, Parrent G B. *Theory of Partial Coherence*. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice Hall, 1964. 100~189
- [6] Becherer R J, Parrent G B. Nonlinearity in optical imaging system. *J. Opt. Soc. Am.*, 1967, **57**(12):1479~1486
- [7] Yang Jian, Wang Zhijiang. New method of image quality evaluation of microscope. *Science Bulletin*, 1987, **32**(3): 225~227 (in Chinese)
- [8] Thopson B J. *Image Formation With Partially Coherent Light*. In: Wolf E ed. *Progress in Optics*, Vol. VIII, New York: John Wiley and Son Inc., 1969. 191~192
- [9] Gaskill J D. *Linear System, Fourier Transform, and Optics*. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1978. 179~217
- [10] Goodman J W. *Statistical Optics*. New York: A Wiley and Sons, Inc., 1985. 205~207
- [11] Li Jianbai. Variance tolerance of wave Aberration in the characteristic frequency method of image quality evaluation. In: *Collected Papers of Image Quality Evaluation and Test of Optical System* (光学系统成像质量评价及检验文集). Beijing: Chinese Metrology Press, 1988. 75~85 (in Chinese)
- [12] Palmer J M. *Lens Aberration Data*. New York: American Elsevier Publishing Company, Inc., 1971. 81~90

Optical Transfer Function and Image Evaluation Criterion of an Optical System with Partially Coherent Illumination

Xiang Yang

(*State Key Laboratory of Applied Optics , Changchun Institute of Optics , Fine Mechanics and Physics ,
The Chinese Academy of Sciences , Changchun 130022*)

Xiang Caixin

(*Changchun Institute of Optics , Fine Mechanics and Physics ,
The Chinese Academy of Sciences , Changchun 130022*)

(Received 27 August 2001 ; revised 15 January 2002)

Abstract: The optical transfer function (OTF) of an optical system with partially coherent illumination was developed according to the theory of image formation. This function is the same as the incoherent OTF of optical system. So the permissible tolerances of the wave aberrations of optical system are identical for illumination either incoherent or partially coherent. This conclusion explained the customary rule of optical system design of microscope that the tolerances of wave aberrations are the same for both the incoherent and partially coherent illumination , no difference for various forms of illumination.

Key words: partially coherent image formation ; optical transfer function ; image quality evaluation