

# 透镜自动设计的衍射基价值函数\*

庄 松 林

(上海光学仪器研究所)

## 提 要

本文描述了三种基于衍射理论(或称为衍射基)的光学系统质量指标作为透镜自动设计的价值函数的方法。这三种指标是: 1. 波差方差; 2. 波差导数; 3. 几何光学传递函数。得到了简化计算的相应公式。实践证明, 这种价值函数不但可用于象差平衡的开始阶段, 更可用于象差的精细校正过程, 以获得象差的最佳平衡方案。

## 一、引 言

自五十年代开展透镜自动设计以来, 已取得了非常显著的成绩。现在透镜象差的平衡工作, 绝大部分由自动设计程序来进行。但是, 尽管在优化数学方法上进行了大量的试验, 并且得到了诸如阻尼最小二乘法、正交化法、适应法等透镜设计上应用良好的方法, 但用于优化过程的价值函数在大部分程序中却仍然采用经典几何象差来构成。如众所知, 几何象差只是光学系统成像质量的一种近似描模。特别对于低质量系统, 用几何象差判断好的系统, 往往在实用时却不行。另一方面, 即使对几何象差的要求有很明确的判断, 由于多数优化过程的价值函数是由几何象差的平方和来构成, 所以不容易选择恰当的权重因子, 来使几何象差都达到各自的目标值。所以, 用几何象差作为评价标准并不理想。但是, 要使一个比较客观反映光学系统质量的标准, 诸如中心点亮度, OTF (光学传递函数)、区域能量等构成价值函数还存在着某些困难。主要是这些函数有相当大的计算工作量, 往往使优化的迭代过程很慢而化去大量的机器时间。为了得到一个实用的衍射基价值函数, 就需要在计算量及计算精度之间获得某些折衷。即牺牲某些计算的精度或对价值函数的使用范围加以适当的限制, 以提高其计算速度。对此, 不少作者进行了研究。Hopkins<sup>[1]</sup> 得到相对调制传递函数在小象差或低频近似下, 可以用波差差分函数的方差直接表示, 当得到了波差多项式后, 它可以通过一次线性变换而得到。King<sup>[2,3]</sup> 假定在象差精细校正过程中, 参数的变动很小, 这样波差可以泰勒级数展开而只保留线性项, 从而简化了 OTF 的计算; 伊藤<sup>[4]</sup> 采用了 OTF 带权积分的小象差低频近似, 将波差差分函数在 OTF 的积分域上作正交展开, 以正交多项式的系数构成价值函数; Meiron<sup>[5]</sup> 对三种不同的价值函数 (MTF 的小象差低频近似, 波差, 点列图) 作了实际计算的比较; 而 Rosenbruch<sup>[6]</sup> 则叙述了几何 OTF 用于自动设计的程序。本文讨论了三种基于衍射理论

\* 1978 年 5 月 22 日收到。

的质量指标,即: 1. 波差方差, 2. 波差导数, 3. 几何 OTF, 作为价值函数的方法, 得到了为简化计算的相应公式, 讨论了它们的适用范围, 并列出了某些典型系统的应用结果. 实践证明, 这种价值函数可用于象差平衡的开始阶段, 更可用于象差的精细校正过程, 以获得象差的最佳平衡方案.

## 二、一般理论

在光学系统成像质量的评价标准中, 中心点亮度及 OTF 是属于较好的一类标准. 前者在空间域上进行评价, 后者在频率域上进行评价. 它们是基于成像的衍射理论及通讯理论而得到的.

### 1. 象面复振幅分布

光学系统出射光瞳处光扰动的分布以光阑函数来表示

$$f(x, y) = \begin{cases} A(x, y)e^{ikW(x, y)} & \text{在光瞳内;} \\ 0 & \text{其余地方.} \end{cases} \quad (1)$$

当光学系统无振幅调制时,  $A(x, y) = 1$ .  $W(x, y)$  为波差,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为波长. 同时选取正则座标:

正则光瞳座标为

$$x = X/h_o, \quad y = Y/h_o \cos \alpha_p; \quad (2a)$$

正则象面座标为

$$u = \frac{n \sin \alpha_s}{\lambda} \xi, \quad v = \frac{n \sin \alpha_t}{\lambda} \eta, \quad (2b)$$

式中  $h_o$ ,  $h_i$  分别为出瞳的弧矢及子午方向的最大尺寸,  $\alpha_p$  为视场角,  $n \sin \alpha_s$  及  $n \sin \alpha_t$  分别为弧矢及子午数值孔径. 而  $X, Y$  及  $\xi, \eta$  分别为出瞳及象面的实际座标. 在正则座标定义下, 当满足菲涅耳近似时, 象面复振幅分布是光阑函数的傅里叶变换, 即

$$U(u, v) = c \iint_A f(x, y) \exp \{-2\pi i [xu + yv - W(x, y)]\} dx dy, \quad (3)$$

式中积分域在正则座标下为单位圆;  $c$  是与象面座标有关的位相因子; 波差以波长为单位计量.

### 2. 中心点亮度

中心点亮度 ( $S \cdot D$ ) 定义为有象差时  $u = v = 0$  点的强度与无象差时的强度之比, 即

$$S \cdot D = \frac{1}{\pi^2} \left| \iint_A e^{2\pi i W(x, y)} dx dy \right|^2. \quad (4)$$

对于高质量系统,  $S \cdot D$  直接与波差的方差成比例, 即

$$S \cdot D = 1 - (2\pi)^2 \text{Var } W(x, y), \quad (5)$$

其中

$$\text{Var } W(x, y) = \frac{1}{\pi} \iint_A W^2(x, y) dx dy - \left\{ \frac{1}{\pi} \iint_A W(x, y) dx dy \right\}^2. \quad (6)$$

可以直接用波差方差作为高质量系统较好的评价标准。

### 3. 几何 OTF

对于线性等晕系统, OTF 定义为点扩散函数的傅里叶变换, 即

$$D(s, t) = \iint |U(x, y)|^2 e^{-2\pi i(xs+yt)} dx dy, \quad (7)$$

式中  $s, t$  分别为弧矢及子午方向的简化空间频率

$$s = \frac{hN_s}{n \sin \alpha_s}, \quad t = \frac{hN_t}{n \sin \alpha_t}, \quad (8)$$

$N_s$  及  $N_t$  分别为弧矢及子午方向的实际线频。

由 (3) 式和 (7) 式根据 Parseval 定理可得

$$D(s, t) = \iint_S \exp \{2\pi i [W(x, y) - W(x-s, y-t)]\} dx dy. \quad (9)$$

积分域  $A$  为光瞳交错位移后的公共区域。对于低质量系统, 由于关心的是低频时的 OTF, 此时 (9) 式中被积函数的指数部分可近似地用泰勒展开的线性项来表示, 而积分域也可以直接取为出瞳面, 这样对计算积分就带来了很大的便利。即

$$D(s, t) = \iint_A \exp \left\{ 2\pi i \left[ \frac{\partial W(x, y)}{\partial x} s + \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} t \right] \right\} dx dy. \quad (10)$$

另一方面, 由点列图表示的几何强度分布的傅里叶变换, 定义为几何 OTF, 与 (10) 式相同。所以, 当光学系统波差的高阶导数很小, 或者是使用的频率很低时的 OTF 就是几何 OTF。

### 4. 波差导数

由 (10) 式可见, 几何 OTF 的优劣, 并非由波差的大小来决定, 而是取决于波差的一阶导数  $\partial W/\partial x$  及  $\partial W/\partial y$ 。即波面扭曲较剧烈的系统, 其 OTF 亦较差, 故可以设想直接用波差的导数来作为光学系统的质量标准。Brixner<sup>[7]</sup> 用大量光线追迹所得的点列图作为评价标准, 与成象的清晰度有明显的关系。并在称为 Lasl 的程序中用点列图构成价值函数。由于波差导数与几何弥散圆有下述关系:

$$\frac{\partial W(x, y)}{\partial x} = (n \sin \alpha_s) T A_s, \quad \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} = (n \sin \alpha_t) T A_t, \quad (11)$$

式中  $T A_s$  及  $T A_t$  分别为弥散圆的弧矢及子午分量。故可以用波差导数的平方在整个光瞳上的积分, 来构成价值函数, 即

$$\phi = \frac{1}{S} \iint_A \left[ \left( \frac{\partial W(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy, \quad (12)$$

其中  $S$  为光瞳的面积。

必须指出, 用弥散圆作为评价指标由来已久, 但是要与清晰度有对应的关系, 必须要进行大量光线的计算。取少量的光线去描写点列图是不准确的, 而 (12) 式表示了点列的积分, 即完善地描写了点列图的状况, 所以可作为一个合适的评价标准。

### 三、价值函数的构成

本节叙述我们的精细校正程序所用的一个完整价值函数的构成方式, 其中包括单色象差、色差及畸变。

#### 1. 波差多项式

为了确定在光瞳面上有足够数量分布的光线的波差值, 并要避免大量的实际光线追迹, 在足够的精度下, 我们将波差多项式以十四项展开, 并通过入瞳上的十四个取样值来确定展开式的系数。波差展开式为

$$\begin{aligned}
 W(x, y) = & c_{20}(x^2 + y^2) + c_{40}(x^2 + y^2)^2 + c_{30}(x^2 + y^2)^3 + c_{80}(x^2 + y^2)^4 \\
 & + c_{10,0}(x^2 + y^2)^5 + c_{11}y + c_{31}y(x^2 + y^2) + c_{51}y(x^2 + y^2)^2 + c_{71}y(x^2 + y^2)^3 \\
 & + c_{91}y(x^2 + y^2)^4 + c_{22}y^2 + c_{42}y^2(x^2 + y^2) + c_{33}y^3 + c_{44}y^4. \quad (13)
 \end{aligned}$$

考虑到对大多数光学系统, 波差在沿子午方向的变化较弧矢方向剧烈, 所以波差展开式中取了较多的含  $(x^2 + y^2)$  的项。同样, 我们在子午方向亦选择较多的取样点(如图 1 所示)。取样点在孔径上的分割常数, 考虑到波差的变化随孔径的增大而变化趋于剧烈, 同时又要照顾到小孔径处的波面形状, 我们按下述原则选取:

$$\begin{aligned}
 x_i = 0, \quad y_i = \frac{1}{8} \sqrt{79 - 15i} \quad i \leq 5; \\
 x_i = 0, \quad y_i = -y_{11-i} \quad 5 < i \leq 10; \\
 x_{11} = x_{14} = y_{11} = -y_{14} = 0.707, \\
 x_{12} = 1, \quad x_{13} = 0.707, \quad y_{12} = y_{13} = 0. \quad (14)
 \end{aligned}$$

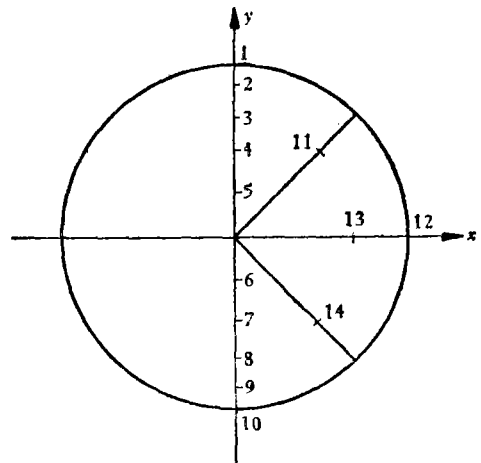


图 1 光瞳取样点分布

松居<sup>[8]</sup>曾经报道, 对通常的光学系统, 采用六次波差展开(即九项展开)已具有足够的精度。所以, 对大多数光学系统采用波差的十四项展开, 可以在整个光瞳区域内, 对实际的波面形状得到满意的逼近。

#### 2. 波差方差的计算公式

将(13)式代入(6)式, 在单位圆上积分, 可以得到波差方差的最后表达式

$$\begin{aligned}
 \phi_1 = & \overline{W^2(x, y)} - \overline{W(x, y)}^2 \\
 = & \left( \frac{c_{20}}{12} + \frac{c_{60}}{6} + \frac{3c_{80}}{20} + \frac{2c_{90}}{15} + \frac{5c_{10,0}}{42} + \frac{c_{22}}{12} + \frac{c_{42}}{12} + \frac{c_{44}}{16} \right) c_{20} \\
 & + \left( \frac{4c_{40}}{45} + \frac{c_{60}}{6} + \frac{16c_{80}}{105} + \frac{5c_{10,0}}{36} + \frac{c_{22}}{12} + \frac{4c_{42}}{45} + \frac{c_{44}}{15} \right) c_{40} \\
 & + \left( \frac{9c_{60}}{112} + \frac{3c_{80}}{20} + \frac{5c_{10,0}}{36} + \frac{3c_{22}}{40} + \frac{c_{42}}{12} + \frac{c_{44}}{16} \right) c_{60}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left( \frac{16c_{60}}{225} + \frac{2c_{10,0}}{15} + \frac{c_{22}}{15} + \frac{8c_{42}}{105} + \frac{2c_{44}}{35} \right) c_{80} + \left( \frac{25c_{10,0}}{396} + \frac{5c_{22}}{84} + \frac{5c_{42}}{72} + \frac{5c_{44}}{96} \right) c_{10,0} \\
& + \left( \frac{c_{11}}{4} + \frac{c_{31}}{3} + \frac{c_{51}}{4} + \frac{c_{71}}{5} + \frac{c_{91}}{6} + \frac{c_{33}}{4} \right) c_{11} + \left( \frac{c_{31}}{8} + \frac{c_{51}}{5} + \frac{c_{71}}{6} + \frac{c_{91}}{7} + \frac{3c_{33}}{16} \right) c_{31} \\
& + \left( \frac{c_{51}}{12} + \frac{c_{71}}{7} + \frac{c_{91}}{8} + \frac{3c_{33}}{20} \right) c_{51} + \left( \frac{c_{71}}{16} + \frac{c_{91}}{9} + \frac{c_{33}}{8} \right) c_{71} + \left( \frac{c_{91}}{20} + \frac{3c_{33}}{28} \right) c_{91} \\
& + \left( \frac{c_{22}}{16} + \frac{5c_{42}}{48} + \frac{3c_{44}}{32} \right) c_{22} + \left( \frac{17c_{42}}{360} + \frac{c_{44}}{12} \right) c_{42} + \frac{5c_{33}^2}{64} + \frac{5c_{44}^2}{128}. \quad (15)
\end{aligned}$$

### 3. 波差导数计算

(12) 式所表示的波差导数平方的积分是在整个光瞳上进行, 为了简化计算, 可将波差导数对  $y$  进行奇偶分解, 即令

$$\frac{\partial W(x, y)}{\partial x} = U_x + V_x, \quad \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} = U_y + V_y, \quad (16)$$

其中

$$U_x(x, y) = U_x(x, -y), \quad V_x(x, y) = -V_x(x, -y)$$

以及

$$U_y(x, y) = U_y(x, -y), \quad V_y(x, y) = -V_y(x, -y). \quad (17)$$

并且

$$\begin{aligned}
U_x &= 2c_{20}x + 4c_{40}x(x^2 + y^2) + 6c_{60}x(x^2 + y^2)^2 + 8c_{80}x(x^2 + y^2)^3 \\
&\quad + 10c_{10,0}x(x^2 + y^2)^4, \\
V_x &= [2c_{31}x + 4c_{51}x(x^2 + y^2) + 6c_{71}x(x^2 + y^2)^2 + 8c_{91}x(x^2 + y^2)^3 + 2c_{42}xy]x,
\end{aligned}$$

以及

$$\begin{aligned}
U_y &= c_{11} + c_{31}(x^2 + 3y^2) + c_{51}(x^2 + y^2)(x^2 + 5y^2) + c_{71}(x^2 + y^2)^2(x^2 + 7y^2) \\
&\quad + c_{91}(x^2 + y^2)^3(x^2 + 9y^2) + 3c_{33}y^2, \\
V_y &= 2c_{20}y + 4c_{40}y(x^2 + y^2) + 6c_{60}y(x^2 + y^2)^2 + 8c_{80}y(x^2 + y^2)^3 \\
&\quad + 10c_{10,0}y(x^2 + y^2)^4 + 2c_{22}y + 2c_{42}(x^2 + 2y^2)y + 4c_{44}y^3. \quad (18)
\end{aligned}$$

由性质 (17) 式在单位圆中被积函数交叉项的积分为零, 所以

$$\phi_2 = \frac{1}{\pi} \iint_A \{U_x^2 + V_x^2 + U_y^2 + V_y^2\} dx dy. \quad (19)$$

将 (13) 式代入上式, 最后得到

$$\begin{aligned}
\phi_2 &= 2c_{20}^2 + 4c_{40}^2 + 6c_{60}^2 + 8c_{80}^2 + 10c_{10,0}^2 + c_{11}^2 + \frac{5}{3}c_{31}^2 + \frac{13}{3}c_{51}^2 + \frac{25}{7}c_{71}^2 + \frac{41}{9}c_{91}^2 \\
&\quad + c_{22}^2 + \frac{13}{8}c_{42}^2 + \frac{9}{8}c_{33}^2 + \frac{5}{4}c_{44}^2 + \frac{16}{3}c_{20}c_{40} + 6c_{20}c_{60} + \frac{32}{5}c_{20}c_{80} + \frac{20}{3}c_{20}c_{10,0} \\
&\quad + 2c_{20}c_{22} + \frac{8}{3}c_{20}c_{42} + 2c_{20}c_{44} + \frac{48}{5}c_{40}c_{60} + \frac{32}{3}c_{40}c_{80} + \frac{80}{7}c_{40}c_{10,0} + 4c_{40}c_{42} \\
&\quad + \frac{8}{3}c_{40}c_{22} + 3c_{40}c_{44} + \frac{96}{7}c_{60}c_{80} + 15c_{60}c_{10,0} + 3c_{60}c_{22} + \frac{24}{5}c_{60}c_{42} + \frac{18}{5}c_{60}c_{44} \\
&\quad + \frac{160}{9}c_{80}c_{10,0} + \frac{16}{5}c_{80}c_{22} + \frac{16}{3}c_{80}c_{42} + 4c_{80}c_{44} + \frac{10}{3}c_{10,0}c_{22} + \frac{40}{7}c_{10,0}c_{42}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{30}{7} c_{10,0} c_{44} + 2c_{11} c_{31} + 2c_{11} c_{51} + 2c_{11} c_{71} + 2c_{11} c_{91} + \frac{3}{2} c_{11} c_{33} + 4c_{11} c_{51} \\
& + \frac{22}{5} c_{31} c_{71} + \frac{14}{3} c_{31} c_{91} + \frac{5}{2} c_{31} c_{33} + 6c_{51} c_{71} + \frac{46}{7} c_{51} c_{91} + 3c_{51} c_{33} + 8c_{71} c_{91} \\
& + \frac{33}{10} c_{71} c_{33} + \frac{7}{2} c_{91} c_{33} + \frac{7}{3} c_{22} c_{42} + 2c_{22} c_{44} + \frac{11}{4} c_{42} c_{44}. \quad (20)
\end{aligned}$$

#### 4. 几何 OTF

(10) 式所表示的几何 OTF 是对整个光瞳进行积分。为了减少在整个光瞳域上计算偏导数的工作量, 可利用波差导数的对称性质, 除了关于  $y$  轴的对称性质之外, 对于  $x$  轴具有下面的对称性:

$$U_x(x, y) = -U_x(-x, y), \quad V_x(x, y) = -V_x(-x, y)$$

$$\text{以及} \quad U_y(x, y) = U_y(-x, y), \quad V_y(x, y) = V_y(-x, y). \quad (21)$$

这样仅需计算光瞳第一象限中的波差导数, 并由下面关系得到子午及弧矢方向的 MTF 值:

$$\begin{aligned}
D(s, 0) &= \frac{1}{2M} \sum_{i=1}^M [\cos 2\pi(U_x + V_x)s + \cos 2\pi(U_x - V_x)s], \\
D(0, t) &= \frac{1}{2M} \left\{ \left[ \sum_{i=1}^M (\cos 2\pi(U_y + V_y)t + \cos 2\pi(U_y - V_y)t) \right]^2 \right. \\
&\quad \left. + \left[ \sum_{i=1}^M (\sin 2\pi(U_y + V_y)t + \sin 2\pi(U_y - V_y)t) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (22)
\end{aligned}$$

单色评价量以下式表示:

$$\phi_3 = 1 - D(s, t). \quad (23)$$

#### 5. 色差

采用多色 OTF 来作为光学系统多色象质标准已有不少研究。但是, 为了得到准确的多色 OTF, 计算量是相当大的。所以, 我们仍采用通常的方法来评价色差: 对轴上点, 用波色差  $\sum(d - D)\delta N$  来表示; 对轴外点, 用各种波长主光线在象面的高度差来表示 (即通常定义下的倍率色差)。

这样, 我们所定义的价值函数的完整形式为

$$\phi = \sum_i \phi_i + \sum_i ch_i + \sum_i dist_i + \alpha \sum_{i,j} (OPD)_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, N_H, \quad (24)$$

$N_H$  表示需控制的视场个数,  $\phi$  可以是  $\phi_1, \phi_2$  或  $\phi_3$ , 表示单色象差的质量,  $ch$  表示色差,  $dist$  表示畸变。而  $(OPD)_{ij}$  表示各视场的取样光线的波差值。 $\alpha$  是一个可控制的常数, 它表示了单色象的单一评价尺度  $\phi$  与取样光线分立波差值的相对重要性。一般情况下, 取  $\alpha = 0$ , 即不需控制分立的波差值。 $\alpha \neq 0$  往往是用来防止过大的离焦量。

## 四、实 例

将本文所采用的三种价值函数用于光学系统设计的最后阶段,进行象差的精细平衡是相当有效的.曾经应用于各类物镜;包括  $F/0.7$ ,  $f = 50$  的照相物镜; 5 倍衍射极限微缩物镜; 100 倍  $NA = 1.25$  平场复消色物镜等. 这些系统都是用通常几何象差评价的自动程序得到并已实际使用的结果. 计算表明: 首先,用了新的价值函数,使性能获得了进一步提高. 对于初始象差很差的系统,新的方法亦得到了很满意的结果. 其次,用新的方法,在相当大的程度上克服了当采用阻尼最小二乘法时,权因子选择的困难. 设计者所需要考虑的仅是各视场的单色象的质量、色差及畸变的权因子,并且这种权因子的选择对结果的影响并不严格. 这样大大减少了反复上机计算的次数. 因为在老的方法中反复上机的原因之一是常常需要变更象差的权因子及控制象差的种类,而这在新的方法中是不需要的.

下面用两个计算例子来说明新方法的作用.

(1)  $F/0.75$ ,  $f = 50$ ,  $2\omega = 18.5^\circ$  光导摄像管用的大孔径照相物镜 为了比较三种价值函数的效果,用三种方法对同一个系统进行了精细校正. 初始设计已是一个实际使用的系统,其 0.7 视场的  $\Delta H \sim \text{tg } u' / \text{tg } u'_{\max}$  曲线及 MTF 曲线如图 2 所示. 其中 MTF 为相应视场的最佳参考面的调制传递. 图 3 为用三种价值函数分别进行校正所得到的相应的曲线. 很明显,用三种价值函数,系统都得到很好的改善,但波差方差作评价所得到的结果更好一些,当然波差导数由于略去了高次项,所以当系统波差的高阶导数较大时其结果的精确程度会差一些,而对于 MTF 评价,由于所选用的频率及方位较少,故其效果尚不如波差方差. 后者由于照顾到整个波面偏离球面的程度,它的效果较好是可以预料的. 计算表明,波差方差不但可以作为小象差系统精细校正时的价值函数,它亦可以很好地应用于大象差系统. 所以波差方差是值得推荐的价值函数. 这并不是说 MTF 不好,这仅是由于要很好地应用 MTF 作为价值函数,还应多选择一些频率及方位,而它的计算工作量较大的缘故.

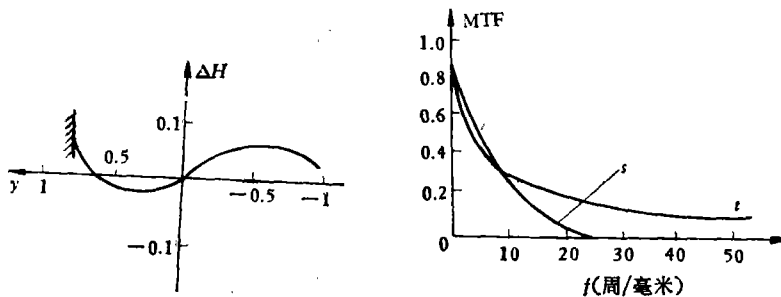
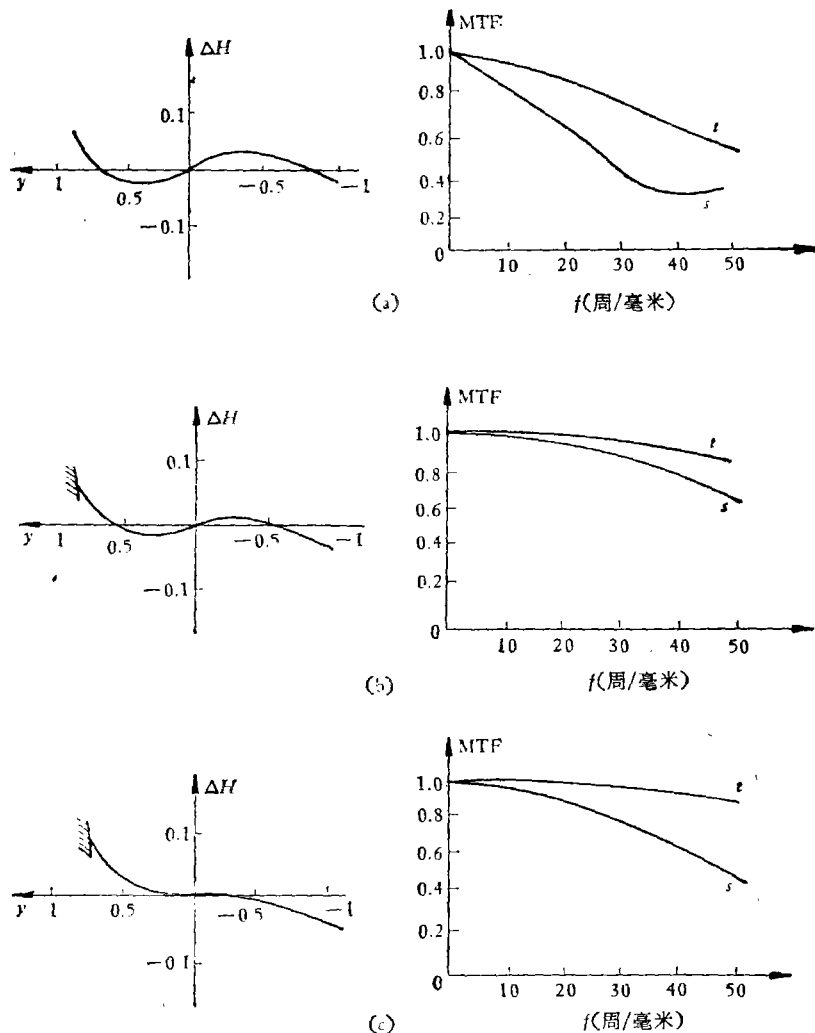


图 2  $F/0.7$  系统精调前的子午象差及 MTF

(2)  $NA = 0.25$ ,  $f = 8$ ,  $10\times$  平场消色差显微物镜 首先用通常的经典象差自动平衡程序(数学方法为正交化法)进行了细致的平衡,得到了一个较好的解,其两个视场的几何象差、波差及 MTF 曲线如图 4 所示. 经过新的方法(用波差方差为价值函数)平衡一

图3 分别用三种价值函数精调后  $F/0.7$  系统的子午象差及 MTF

(a) 波差导数; (b) 波差方差; (c) 几何 OTF

次以后,明显地改善了原来的结果,波面变形大大降低,特别改善了轴外视场弧矢方向的 MTF. 证明新的方法对于最优方案的选择具有相当的能力. 新系统相应的象差曲线如图 5 所示.

## 五、讨 论

本文所描述的衍射基价值函数,用于透镜自动设计是有效的,在 TQ-16 电子计算机上编制的相应的自动设计程序,对于光学系统的精细校正已相当实用化. 已用该程序计算了几十个各种类型的系统. 但是要得到一个优良的象差精细校正程序还有许多事情要做. 首先,在价值函数的构造上,对色差最好应该采用多色 OTF, 这样必然要进一步研究多色 OTF 快而准的计算方法. 其次,为了得到对整个视场的单一评价量,最好能构造对



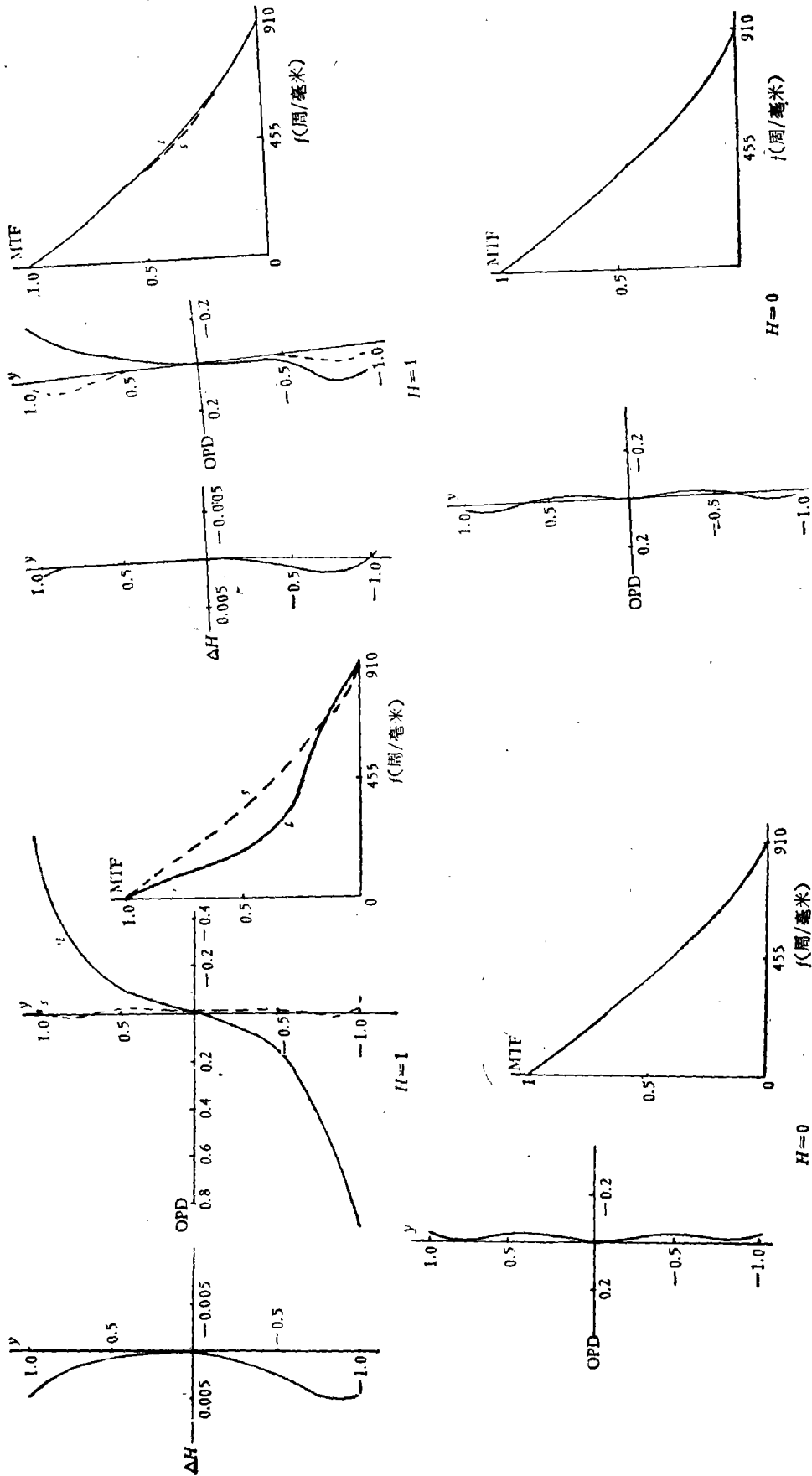


图 4  $10\times/0.25$  精调前的轴上 ( $H=0$ ) 及边缘视场 ( $H=1$ ) 的象差及 MTF

图 5  $10\times/0.25$  精调后的轴上 ( $H=0$ ) 及边缘视场 ( $H=1$ ) 的象差及 MTF

视场亦正交的价值函数,即将波差函数以视场及孔径的参数展开,然后构造其正交多项式,去得到单一评价量。

在数学方法上,由于进行精细校正的光学系统,大多已很接近要求的解,这样引起非线性程度的恶化,照理用阻尼最小二乘法是不合适的。在这种情况下,最好应采用直接方法,从而避免解的过早发散。

不管怎样,随着计算机容量及速度的提高,用于光学设计的计算机亦愈来愈大,自动设计程序的规模亦将愈来愈大,经典几何象差的评价方法,必将被衍射基价值函数所代替,我们亦将愈来愈接近获得系统设计的最优解。

本工作过程中,上海光学精密机械研究所王之江同志、长春光学精密机械研究所薛鸣球同志曾多次给予指导;上海光学仪器研究所方芳,王掌发,曾彭国,周元大,陈怀安等同志亦给予不少帮助,谨致谢忱。

### 参 考 文 献

- [1] H. H. Hopkins, *Opt. acta*, **13** (1966), 343.
- [2] W. B. King, *J. O. S. A.*, **62** (1972), 230.
- [3] W. B. King, *optical instruments and techniques*, Edited by J. H. Dickson (1969), 359.
- [4] Y. Iton, *J. O. S. A.*, **61** (1971), 302.
- [5] J. Meiron, *Appl. Opt.*, **17** (1968), 667.
- [6] K. J. Rosenbruch, *Opt. acta*, **22** (1975), 291.
- [7] B. Brixner, *Appl. Opt.*, **12** (1973), 2703.
- [8] 松居吉哉, *光学*, **1** (1972), 16.

## THE DIFFRACTION-BASED MERITE FUNCTION FOR AUTOMATIC LENS DESIGN

ZHUANG SONG-LIN

(*The Institute of Shanghai Optical Instrument*)

### ABSTRACT

In this paper, we describe three kinds of diffraction-based quality criteria for optical system assesment, which are adopted as the merite function for automatic lens design. The criteria are: a) the average deformation of wave-fronts; b) the derivative of wave aberrations; c) the geometrical optical transfer function. Hence the related calculating formulas have been simplified. Practice have shown that this merite function can be used not only for the initial step of aberration balance, but also for the accurately correcting process, with the purpose to obtain the optimal aberrations balance.