

轴向梯度折射率光学元件的设计

林中天

薛鸣球

(中国科学院长春光学精密机械研究所)

(中国科学院西安光学精密机械研究所)

提 要

本文提出一种轴向梯度折射率光学元件的 $|P|$ 、 $|W$ 设计方法。把对光学系统的像差要求, 通过元件的 $|P^\infty|$ 、 $|W^\infty|$ 初级像差系数表达式, 变成对于系统的结构和折射率梯度的要求。这种设计方法不仅对于单片轴向梯度折射率透镜, 而且对于同时包括均匀介质元件的光学系统也是很方便的。

人们对于梯度折射率光学材料的研究, 已经证明。如果用梯度折射率材料作为光学元件, 折射率梯度系数就可以作为一个新的校正像差的参数^[1]。

本文提出一种轴向梯度折射率光学元件的设计方法。考虑到轴向梯度折射率与非球面对于元件初级像差的影响很相似^[2], 我们采用 $|P|$ 、 $|W$ 设计方法^[3]。把对系统的像差要求, 通过 $|P^\infty|$ 、 $|W^\infty|$ 的表达式, 变成对系统的结构和折射率梯度的要求。

一、近轴光线计算公式

轴向梯度折射率光学材料的折射率分布可以表示为

$$n = n(X) = N_{00} + N_{01}X + N_{02}X^2 + \dots, \quad (1)$$

其中, N_{00} 、 N_{01} 和 N_{02} 分别为常数项(基本折射率)、线性项和二次项系数。

根据费尔马原理, 不难导出轴向梯度折射率元件近轴光线计算公式, 已知第 K 面的 u'_K 和 h_K (见图 1), 便可求出 u'_{K+1} 和 h_{K+1}

$$\begin{cases} h_{K+1} = h_K - n_{0K} u'_K I_{1K}, \\ u'_{K+1} = n_{0K} / n_{TK} \cdot u'_K, \\ i'_{K+1} = h_{K+1} \cdot c_{K+1} - u'_{K+1}, \\ i'_{K+1} = n_{TK} / n_{0K} \cdot i'_{K+1}, \\ u'_{K+1} = h_{K+1} \cdot c_{K+1} - i'_{K+1}, \end{cases} \quad (2)$$

式中 n_{0K} 和 n_{TK} 分别表示第 K 面后和第 $K+1$ 面前的折射率值, 若第 K 面后的折射率分布为 $n_K(X)$, 则 $n_{0K} = n_K(0)$,

$n_{TK} = n_K(T_K)$, $I_{1K} = \int_0^{T_K} \frac{dX}{n_K(X)}$, T_K 为第 K 面到第 $K+1$ 面的间隔, c_K 为第 K 面的曲率。

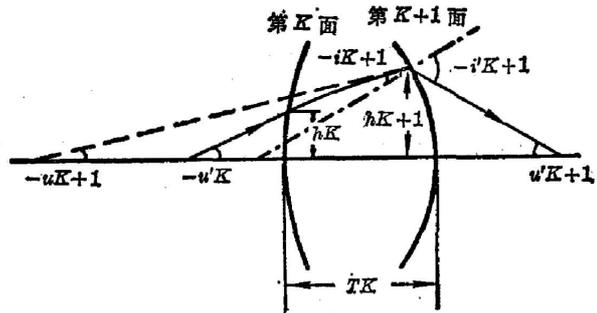


图 1

在此基础上,由焦距的定义,可以得到空气中轴向梯度折射率透镜的焦距公式

$$f' = \frac{1}{(n_0-1)c_1 - (n_T-1)c_2 + (n_0-1)(n_T-1)c_1c_2I_1} \quad (3)$$

并确定主平面的位置

$$X'_H = \frac{-(n_0-1)c_1I_1}{(n_0-1)c_1 - (n_T-1)c_2 + (n_0-1)(n_T-1)c_1c_2I_1} \quad (4)$$

若元件是薄透镜, $I_1 = \int_0^T \frac{dX}{n(X)} \approx 0$, 于是便得到了空气中轴向梯度折射率薄透镜的光焦度公式

$$\phi = (n_0-1)c_1 - (n_T-1)c_2 \quad (5)$$

除此之外, 轴向梯度折射率薄透镜成像同样满足牛顿公式 $X \cdot X' = f \cdot f'$ 和高斯公式 $(1/s') - (1/s) = (1/f')$, 并且拉氏不变量 J 也成立, 由此还可以得到倍率公式

$$M = \eta'/\eta = nu/n'u' \quad (6)$$

二、初级像差系数

轴向梯度折射率元件(尤其是薄透镜), 由于折射率变化, 光线在元件中传播对于初级像差的影响(S_n^*)是较小的^[4], 而主要表现为沿元件表面折射率的变化所产生的影响(S_n^\dagger)。这与非球面对像差的贡献很相似。非球面的作用相当于在以其近轴半径构成的球面透镜的 $|P^\infty|$ 、 $|W^\infty|$ 上附加了一项 $\Delta|P^\infty|$ 。并且 $\Delta|P^\infty|$ 仅与非球面面形系数有关。对于轴向梯度折射率元件的研究可以得到类似的结果。

轴向梯度折射率光学元件的初级像差系数由三个部分组成^[4]

$$\begin{cases} S_I = S_I^\circ + S_I^\dagger + S_I^*, \\ S_{II} = S_{II}^\circ + S_{II}^\dagger + S_{II}^*, \\ S_{III} = S_{III}^\circ + S_{III}^\dagger + S_{III}^*, \\ S_{IV} = S_{IV}^\circ + S_{IV}^\dagger + S_{IV}^*, \\ S_V = S_V^\circ + S_V^\dagger + S_V^*, \end{cases} \quad (7)$$

其中, S_n° 为轴向梯度折射率元件对于初级像差系数的一般表面贡献, S_n^\dagger 为非均匀表面贡献, S_n^* 为非均匀传输贡献。

如果元件是薄透镜, 那么光线与前后表面的交点高度可以近似认为相等, 记作 h 和 h_P 。于是, 轴向梯度折射率薄透镜对于初级像差系数的一般表面贡献

$$\begin{cases} S_I^\circ = hP^*, \\ S_{II}^\circ = h_P P^* + JW^*, \\ S_{III}^\circ = (h_P^2/h) \cdot P^* + 2J(h_P/h) \cdot W^* + J^2\phi, \\ S_{IV}^\circ = J^2\phi/\bar{n}, \\ S_V^\circ = (h_P^3/h^2) \cdot P^* + 3J(h_P^2/h^2) \cdot W^* + [3 + (1/\bar{n})] \cdot J^2(h_P/h) \cdot \phi, \end{cases} \quad (8)$$

其中, $P^* = \sum_1^2 ni(i-i')(i'-u)$, $W^* = \sum_1^2 (i-i')(i'-u)$, \bar{n} 表示折射率的平均值。

进一步用规化的 $|P^*|$ 、 $|W^*|$ 来表示

$$P^* = h^3 \phi^3 |P^*, \quad W^* = h^3 \phi^2 |W^*, \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{其中,} \quad |P^* &= (\bar{c}_1 - \bar{u}_1)^2 [\bar{c}_1 - \bar{u}_1(1+n_0)](1-1/n_0)/n_0 + (\bar{c}_2 - 1 - \bar{u}_1)^2 \\ &\quad \times [\bar{c}_2 - 1 - \bar{u}_1 - (1+\bar{u}_1)n_T](1/n_T - 1)/n_T, \\ |W^* &= (\bar{c}_1 - \bar{u}_1) [\bar{c}_1 - \bar{u}_1(1+n_0)](1-1/n_0)/n_0 + [\bar{c}_2 - (1+\bar{u}_1)] \\ &\quad \times [\bar{c}_2 - (1+\bar{u}_1)(1+n_T)](1/n_T - 1)/n_T, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中, $\bar{c}_1, \bar{c}_2, \bar{u}_1$ 分别为规化的曲率和孔径角, 即 $\bar{c}_1 = c_1/\phi, \bar{c}_2 = c_2/\phi, \bar{u}_1 = u_1/h\phi$ 。

若物在无限远处, $\bar{u}_1 = u_1 = 0$ 。于是

$$\left. \begin{aligned} |P^{*\infty} &= \bar{c}_1^3(1-1/n_0)/n_0 + (\bar{c}_2 - 1)^2(\bar{c}_2 - 1 - n_T)(1/n_T - 1)/n_T, \\ |W^{*\infty} &= \bar{c}_1^2(1-1/n_0)/n_0 + (\bar{c}_2 - 1)[\bar{c}_2 - (1+n_T)](1/n_T - 1)/n_T. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

如果是均匀介质, $n_0 = n_T = n$, 则

$$\left. \begin{aligned} |P^\infty &= \bar{c}_1^3(1-1/n)/n + Q^2(Q-n)(1/n-1)/n, \\ |W^\infty &= (1+1/n)Q + 1/(n-1), \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

其中 $Q = \bar{c}_2 - 1$, 这与传统光学的结果一致的。

而轴向梯度折射率薄透镜对于初级像差系数的非均匀表面贡献为

$$S_I^\dagger = -2h^4 K, \quad S_{II}^\dagger = -2h^3 h_P K, \quad S_{III}^\dagger = -2h^2 h_P^2 K, \quad S_{IV}^\dagger = 0, \quad S_V^\dagger = -2hh_P^3 K, \quad (13)$$

若折射率分布式只取前三项, 则式中

$$K = -\frac{1}{2}(c_1^2 - c_2^2)N_{01} + \frac{1}{2}c_2^2 T N_{02}.$$

关于非均匀传输贡献 S_n^* , 从许多计算结果和文献资料^[4]来看, 一般情况下, $S_n^* \ll S_n^\dagger$ (尤其是薄透镜)。也就是说, 折射率的变化对于像差的影响主要表现为 S_n^\dagger 。所以, 在开始考虑的时候, 往往可以忽略 S_n^* 的作用。于是, 轴向梯度折射率薄透镜的初级像差系数就可以表示为

$$\left. \begin{aligned} S_I &\doteq S_I^\dagger + S_I^* = h^4 \phi^3 |P^* - 2h^4 K, \\ S_{II} &\doteq S_{II}^\dagger + S_{II}^* = h^3 h_P \phi^3 |P^* + J h^2 \phi^2 |W^* - 2h^3 h_P K, \\ S_{III} &\doteq S_{III}^\dagger + S_{III}^* = h^2 h_P^2 \phi^3 |P^* + 2J h h_P \phi^2 |W^* + J^2 \phi - 2h^2 h_P^2 K, \\ S_{IV} &\doteq S_{IV}^\dagger + S_{IV}^* \doteq J^2 \phi / \bar{n}, \\ S_V &\doteq S_V^\dagger + S_V^* = h h_P^3 \phi^3 |P^* + 3J h_P^2 \phi^2 |W^* + J(h_P/h)(3+1/\bar{n})\phi - 2h h_P^3 K. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

从(11)式可见 $|P^{*\infty}|, |W^{*\infty}|$ 仅仅与结构参数有关, 于是, 我们用 $|P^{*\infty}|, |W^{*\infty}|$ 来表示(14)式中的 $|P^*|, |W^*|$

$$\left. \begin{aligned} |P^* &= |P^{*\infty} - \bar{u}_1(4|W^{*\infty} + 1) + \bar{u}_1^2(2+3n_T)/n_T - \bar{c}_1^2 \bar{u}_1(n_0 - 1)^2(1/n_0^2 - 1/n_T^2) \\ &\quad + \bar{c}_1^3 \bar{u}_1^2(n_0 - 1)[(3+2n_0)/n_0^2 - (3+2n_T)/n_T^2] + \bar{u}_1^3(1/n_T^2 - 1/n_0^2), \\ |W^* &= |W^{*\infty} + \bar{u}_1(1+2n_T)/n_T + \bar{c}_1 \bar{u}_1(n_0 - 1)[(2+n_T)/n_T^2 \\ &\quad - (2+n_0)/n_0^2] + \bar{u}_1^2(1/n_T^2 - 1/n_0^2), \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

由于是薄透镜, 折射率平方在两个表面上值的倒数差在(15)式是个小量, 忽略它们, $|P^*|, |W^*|$ 就可以近似表示为

$$\left. \begin{aligned} |P^* &\doteq |P^{*\infty} - \bar{u}_1(4|W^{*\infty} + 1) + \bar{u}_1^2[3 + (2/n_0)], \\ |W^* &\doteq |W^{*\infty} - \bar{u}_1[2 + (1/n_0)]. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

将(16)式代入(14)式, 就得到了初级像差系数 S_n^* 与 $|P^{*\infty}|, |W^{*\infty}|$ 及 K 的函数关系。

三、设 计

轴向梯度折射率薄透镜的设计问题现在就在于如何根据初级像差的要求来确定 $|P^{*\infty}$ 、 $|W^{*\infty}$ 和 K 。我们令

$$\left. \begin{aligned} S_I &= h^4 \phi^3 |P', \\ S_{II} &= h^3 h_p \phi^3 |P' + J h^2 \phi^2 |W', \\ S_{III} &= h^2 h_p^2 \phi^3 |P' + 2J h h_p \phi^2 |W' + J^2 \phi, \\ S_{IV} &= J^2 \phi / n_0, \\ S_V &= h h_p^3 \phi^3 |P' + 3J h_p^2 \phi^2 |W' + J^2 (h_p/h) [3 + (1/n_0)] \phi, \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} |P' &= |P'^{\infty} - \bar{u}_1 (4 |W'^{\infty} + 1) + \bar{u}_1^2 (3 + 2/n_0), \\ |W' &= |W'^{\infty} - \bar{u}_1 (2 + 1/n_0). \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

比较(17)式与(14)式的右端,可得到下列关系式

$$\left. \begin{aligned} |P'^{\infty} &= |P^{*\infty} + \Delta |P^{*\infty} = |P^{*\infty} - 2K/\phi^3, \\ |W'^{\infty} &= |W^{*\infty}. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

从(19)式,我们可以看到:

I. 无论从定义式还是许多计算结果,我们注意到 $|P^{*\infty}$ 、 $|W^{*\infty}$ 和 $|P^{\infty}$ 、 $|W^{\infty}$ 的值是很接近的。如果忽略了非均匀传输贡献以及 $|P^{*\infty}$ 、 $|W^{*\infty}$ 与 $|P^{\infty}$ 、 $|W^{\infty}$ 的差别,那么(19)式就意味着,一片轴向梯度折射率薄透镜,其折射率的变化相当于在结构形式相同、折射率为 N_{00} 的均匀介质薄透镜的 $|P^{\infty}$ 、 $|W^{\infty}$ 的基础上叠加一项 $\Delta |P^{*\infty}$ 。而 $\Delta |P^{*\infty}$ 与折射率梯度系数的关系为

$$\Delta |P^{*\infty} = -2K/\phi^3. \quad (20)$$

II. (19)式进一步证明轴向梯度折射率薄透镜对于初级像差的影响与非球面非常相似。从(19)式很容易导出折射率梯度系数与非球面面形系数的对应关系。

最后,我们注意到,实际上单片均匀介质薄透镜初级像差系数 S_n 与 $|P^{\infty}$ 、 $|W^{\infty}$ 的关系与(17)式形式完全一样。这就是说,无论是均匀介质,还是轴向梯度折射率薄透镜,像差要求的 $|P^{\infty}$ 、 $|W^{\infty}$ (或 $|P'^{\infty}$ 、 $|W'^{\infty}$) 是相同的,问题在于如何使元件满足这样的 $|P^{\infty}$ 、 $|W^{\infty}$ ($|P'^{\infty}$ 、 $|W'^{\infty}$) 值。

对于均匀介质来说, $|W^{\infty}$ 及光焦度要求就决定了透镜的弯曲形式 (c_1 、 c_2)。 $|P^{\infty}$ 和 $|W^{\infty}$ 存在着一定的关系

$$|P^{\infty} = |P_0 + q(|W^{\infty} - |W_0)^2, \quad (21)$$

这就是说,对于某一种玻璃, $|W^{\infty}$ 确定了, $|P^{\infty}$ 也就确定了。要使一片薄透镜的 $|P^{\infty}$ 、 $|W^{\infty}$ 正好同时满足初级像差系数要求,一般来说是不可能的。

而轴向梯度折射率薄透镜,在 $|W^{*\infty}$ 确定之后,还可以适当选择折射率梯度系数 N_{01} , 使得 $|P'^{\infty} = |P^{*\infty} - 2K/\phi^3$ 有可能满足要求。

具体的设计可以这样进行,首先由所要求的两种初级像差系数,从(17)、(18)式解出系统应满足的 $|P'^{\infty}$ 、 $|W'^{\infty}$ 。将(11)式代入(19)式的两个方程,加上光焦度方程(5),构成一

个非线性方程组。设折射率分布为 $n = N_{00} + N_{01}X$ 。因为轴向分布的梯度折射率薄透镜对于初级像差的影响, 主要由线性项系数 N_{01} 产生的。并且在大部分情况下, 线性分布就基本上可以满足初级像差的设计要求。所以, 为了简单起见, 先假设折射率为线性分布。于是(19)式中

$$K = -\frac{1}{2}(c_1^2 - c_2^2)N_{01}, \quad (22)$$

代入方程组后, 三个方程就可以唯一地决定单片轴向梯度折射率薄透镜的结构参数 c_1, c_2 和折射率梯度系数 N_{01} (基本折射率 N_{00} 事先给定)。如果像差要求多于两种, 利用数值逼近的方法也有可能获得兼顾这几种像差的近似解。

我们可以先估算一下方程组的近似解, 作为方程组精确求解的初始数据。近似认为 $|P^{*\infty}| \doteq |P^\infty|$ 、 $|W^{*\infty}| \doteq |W^\infty|$, 利用均匀介质中 $|W^\infty|$ 与弯曲及 $|P^\infty|$ 的关系, 决定 c_1, c_2, N_{01} 。

需要指出的是: 第一, 上述的设计方法是从初级像差系数着手的, 对要求的几种像差, 校正的仅仅是其初级量。当系统的像差主要为初级量时, 设计结果是满足要求的。根据我们的设计计算, 物在无限远处, 焦距为 100 左右, 相对孔径不大于 $f/6$, 设计结果基本上是好的。当系统像差的高级量较大时, 设计所得系统的弯曲形式基本上是可以的。利用空间光线程序计算出系统的实际像差, 调整折射率梯度系数, 用适当的初级量来平衡其高级量, 便能够获得校正实际像差的结果。第二, 上述设计过程, 首先假设了折射率是线性分布的。在平衡高级量, 校正实际像差的时候, 有时会出现细光束欠校正而粗光束过校正的现象。这时如果增加一个适当的二次项系数 N_{02} , 问题就可能解决。

四、设计举例及结果

设计一个物在无限远, 焦距 $f=40$, 相对孔径为 $f/4$ 的单片轴向梯度折射率透镜。取玻璃基本折射率 $N_{00}=1.692$, 要求 $S_I=0, S_{II}=0$ 。显然, 薄透镜必须满足 $|P'^\infty|=0, |W'^\infty|=0$ 。根据上述设计方法, 可得结果如下

$$c_1=0.03822, \quad c_2=0.002173, \quad N_{01}=-0.0148$$

对方程组的解稍作修改(由于忽略 S_n^* 等), 所决定的轴向梯度折射率薄透镜的结构参数及初级像差系数如下:

$R_1=26.186$	$T=1.8$	$n=1.692-0.0148x$
$R_2=452.8$		
焦距 40.002,	λ 瞳半径 5,	2ω 6°
$S_I=0.0, S_{II}=0.0, S_{III}=0.0017, S_{IV}=0.00101, S_V=0.0$		

这个结果, 虽然 $S_I=0$, 但系统仍然存在实际球差:

孔 径	0.707	1.0
LA'	0.1284	0.2585

我们调整折射率梯度系数 N_{01} , 并增加二次项系数 N_{02} , 所得结果如下:

$R_1=26.24$	$T=1.5$	$n=1.692-0.0365x+0.0005x^2$
$R_2=453.25$		
焦距 40.005,	λ 瞳半径 5,	2ω 6°
孔 径	LA'	OSC'
0.707	-0.0000017	-0.0000147
1.00	-0.0000011	-0.0000027

我们用弯曲形式基本相同的均匀介质薄透镜的像差情况与之比较

$R_1=26.124$	$T=1.5$	$n=1.692$
$R_2=453.25$		
焦距 40.1003,	λ 瞳半径 5,	2ω 6°
孔 径	LA'	OSC'
0.707	0.2172	-0.000001
1.00	0.4375	-0.000004

显然, 对于均匀介质, 选择弯曲形式可以使 $OSC'=0$, 却无法使球差 LA' 同时得以校正。而一片弯曲形式基本相同的轴向梯度折射率透镜, 却很容易实现。

但是单片轴向梯度折射率薄透镜校正像差的作用是有限的, 因为它仅此均匀介质薄透镜多一个自由变数——折射率梯度系数, 只能多校正一种像差。单独作为一个光学系统是不理想的。现在我们来考虑包括轴向梯度折射率透镜的透镜组系统。

设光学系统有 M 个组元, 则其初级像差表示式就是(17)式对 M 个组元求和

$$\left. \begin{aligned}
 S_I &= \sum_{i=1}^M h_i^4 \phi_i^3 |P'_i|, \\
 S_{II} &= \sum_{i=1}^M (h_i^3 h_{P_i} \phi_i^3 |P'_i + J h_i^2 \phi_i^2 |W'_i|), \\
 S_{III} &= \sum_{i=1}^M (h_i^2 h_{P_i}^2 \phi_i^3 |P'_i + 2J h_i h_{P_i} \phi_i^2 |W'_i + J^2 \phi_i|), \\
 S_{IV} &= \sum_{i=1}^M J^2 \phi_i / n_i, \\
 S_V &= \sum_{i=1}^M \{h_i h_{P_i}^3 \phi_i^3 |P'_i + 3J h_{P_i}^2 \phi_i^2 |W'_i + J^2 (h_{P_i} / h_i) [3 + (1/n_i)] \phi_i\},
 \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

其中

$$\begin{aligned}
 |P'_i| &\doteq |P'_i{}^\infty - \bar{u}_{1i}(4 |W'_i{}^\infty + 1) + \bar{u}_{1i}[3 + (2/n_i)]|, \\
 |W'_i| &\doteq |W'_i{}^\infty - \bar{u}_{1i}[2 + (1/n_i)]|.
 \end{aligned}$$

设计这样的透镜组, 首先根据光学系统的像差要求, 解(23)式求出各组元应满足的 $|P'_i{}^\infty|$, $|W'_i{}^\infty|$ 。若某一组元是均匀介质透镜组, 分解 $|P'_i{}^\infty|$, $|W'_i{}^\infty|$ ^[3], 求出各薄透镜的结构参数。若某一组元是轴向梯度折射率薄透镜, 则可以利用上述的单片的设计方法, 求出其结构形式及折射率梯度系数。

在这里, 我们用一个变焦距物镜的例子来说明轴向梯度折射率透镜在比较复杂的系统中的应用。取一个已设计好的变焦距物镜, 用一片轴向梯度折射率透镜代换其补偿组, 然后

比较它们的像差情况。

这是一个焦距为 16~160, 相对孔径 $f/1.6$, 最大画面尺寸为 15.7 的变焦距系统。其双胶合的补偿组结构参数如下

$R_{14} = -53.2$	$T_{14} = -2.0$	n_{14}	1.6203
$R_{15} = 69.26$	$T_{15} = 4.0$	n_{15}	1.728
$R_{16} = 413.33$			

首先求出补偿组的焦距 f'_3 及 $|P^\infty|$ 、 $|W^\infty|$

$$f'_3 = -83.958, \quad |P^\infty| = 1.19, \quad |W^\infty| = -0.0135$$

选取玻璃基本折射率 1.728, 令 $|P'^\infty| = |P^\infty|$, $|W'^\infty| = |W^\infty|$, $\phi = 1/f'_3$ 。解(19)式及光焦度方程组, 结果

$$c_1 = -0.01781, \quad c_2 = -0.00145, \quad N_{01} = 0.00062, \quad T = 1.0$$

同时求出两个主面位置, 用这样一片轴向梯度折射率薄透镜代换原来均匀介质的双胶合补偿组, 保证原主面位置不变。下面, 我们来比较代换前后像差的情况。

代换前, 长焦距位置与短焦距位置各实际像差的差

	长 焦 距	短 焦 距	差
LA'	0.06547	-0.07396	0.1394
OSC'	-0.00289	0.0032	-0.0061
DT	-2.036%	4.793%	-6.83%
X_1	0.04897	-0.05927	0.1082
X_2	-0.03359	-0.157	0.1234
$X_1 - X_2$	0.0826	0.0978	-0.0152

代换后, 长焦距位置与短焦距位置各实际像差之差

	长 焦 距	短 焦 距	差
LA'	-0.0182	-0.1522	0.134
OSC'	0.0017	0.00794	-0.00624
DT	-2.017%	4.81%	-6.83%
X_1	0.1717	0.0696	0.102
X_2	0.0262	-0.0944	0.1206
$X_1 - X_2$	0.1455	0.164	-0.0185

从上面的比较来看, 用单片轴向梯度折射率薄透镜代替这个变焦距物镜的均匀介质双胶合补偿组, 像差情况几乎完全一样。另外, 我们还注意到, 原来系统的变倍组最后一个折射面到补偿组最后一个折射面的距离是 11.19, 而代换后的系统, 这两个面的距离只有 6.5。这就是说物镜系统的纵向尺寸可以有所减小。虽然在这个例子里相差 4.69, 并不很显著,

但是,如果变倍组、前、后固定组都采用梯度折射率元件,系统的尺寸可望有明显的减小。从这个简单的例子,我们已经看到了希望和前途。

本文由于篇幅有限,不能详细地介绍公式的推导过程及设计的其它例子。我们的工作得到许多同志的帮助,特此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] P. J. Sands; *J. O. S. A.*, 1970, **60**, No. 11 (Nov), 1436.
- [2] D. T. Moore; *J. O. S. A.*, 1977, **67**, No. 9 (Sep), 1143.
- [3] 王之江;《光学设计理论基础》, (科学出版社, 1965), 247.
- [4] P. J. Sands; *J. O. S. A.*, 1971, **61**, No. 8 (Aug), 1086.

Design of optical elements with axial-gradient indices

LIN ZHONGTIAN

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

XUE MINGQIU

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

(Received 19 June 1984; revised 5 March 1985)

Abstract

An $|P, |W$ method for designing optical elements with axial-gradient indices is presented. The aberration requirement for a system is replaced by requirements on structure and index gradient by means of $|P$ and $|W$ expressions of primary aberration coefficients. The use of the method is not limited to simple lenses with gradient indices. It can also be used conveniently in the design of systems having homogeneous-medium elements.