

基于轴向梯度折射率校正镜的折反式光学系统设计

韩培仙^{1,2} 金光¹ 钟兴¹ 夏春秋²

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 传统的两镜折反式光学系统通常采用两片或多片均匀材料的球面校正镜校正同轴两反系统的剩余像差, 为了减少校正镜组镜片数量甚至要引入带有非球面的透镜。采用的单片轴向梯度折射率校正镜即可以校正同轴两反系统的剩余像差, 又可以减少校正镜片数。总结了轴向梯度折射率透镜和带有无光焦度校正元件光学系统的初级像差理论, 研究了轴向梯度折射率透镜作为两镜折反式光学系统校正镜的设计方法。并且给出了采用单片轴向梯度折射率透镜作为校正镜, 焦距为 3000 mm, 相对孔径为 1/8, 视场角为 1° 的两镜折反式光学系统设计。设计结果表明, 系统最大视场波前 RMS 值小于 0.07λ , 系统弥散圆半径接近艾里斑半径, 在 50 lp/mm 时的传递函数高于 0.35, 系统的最大畸变小于 0.5, 最大场曲小于 0.2, 系统像质接近衍射极限。

关键词 光学设计; 两镜折反式光学系统; 轴向梯度折射率透镜; 校正镜

中图分类号 O435.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.022202

A Two-Mirror Catadioptric Optical System with an Axial Gradient-Index Correction Lens

Han Peixian^{1,2} Jin Guang¹ Zhong Xing¹ Xia Chunqiu²

¹National & Local United Engineering Research Center of Small Satellite Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Traditional strategy of designing a two-mirror catadioptric optical system employs zero-power correcting elements to balance the residual aberrations, which usually contains two or three refracted, even asphere, lenses. The use of an axial gradient-index (AGRIN) lens can achieve the same goal of aberration correction, as well as a compact and light weight system which employs only one correction element. This paper summarizes primary aberrations theory of the two-mirror catadioptric optical system and the AGRIN lens. A method of designing a two-mirror catadioptric system with an AGRIN lens instead of homogeneous lenses is presented. As an example, a two-mirror catadioptricsystem, whose focal length is 3000 mm, F -number is 8, and the field of view is 1°, is promoted. The design result shows that the wavefront aberration is less than 0.07λ , the system dispersion radius is close to the radius of Airy, the transfer function at 50 lp/mm is higher than 0.35, the maximum distortion of the system is less than 0.5, the maximum field is less than 0.2, and the image quality almost reaches the diffraction limit.

Key words optical design; two-mirror catadioptric optical systems; axial gradient-index lens; correcting lenses

OCIS codes 220.4830; 220.1000; 110.2760; 220.3630

1 引言

同轴两反光学系统的镜面数量有限, 可供消除像差的变数较少。为了消除反射光学系统的残差, 就必须增加可供消像差的变量, 一种常用的方法是利用无光焦度校正元件对反射镜引入的像差进行补偿。均匀介质材料组成的校正镜组, 至少需要正负两片透镜平衡光焦度, 校正色差。并且当同轴反射系统的视场和相对孔径过大, 将需要 3 片或者更多片球面校正镜^[1-3]。因此限制校正镜的片数将有利于折反射系统在航天领域, 例如小卫星、微小卫星光学系统方面的应用。

收稿日期: 2015-07-06; 收到修改稿日期: 2015-08-24; 网络出版日期: 2015-11-20

基金项目: 国家 863 计划(2012AA121502)

作者简介: 韩培仙(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事光学系统设计和检测方面的研究。E-mail: jane1129@163.com

导师简介: 金光(1958—), 男, 博士, 研究员, 主要从事空间光学遥感器总体方面的研究。E-mail: jinguang5812@sina.com

梯度折射率材料主要包括径向梯度折射率材料和轴向梯度折射率材料。由于加工工艺的限制,径向梯度折射率透镜通光口径不可能做到很大,通常小于5 mm,一般用作变折射率光纤或者自聚焦透镜^[4]。轴向梯度折射率材料的直径可以做到200 mm以上,厚度可以做到25 mm以上^[5],可以满足大多数镜头口径尺寸的需要。为了简化校正镜组,非球面透镜的运用已有先例^[6]。但是非球面的高精度加工和精确检验仍是研究的热点和重要的技术难题。众所周知,在像差的校正方面,一个轴向梯度折射率球面可以等效于一个普通非球面的作用^[7-9]。因此可以采用梯度折射率透镜作为两镜折反式光学系统的校正镜。这不仅降低了系统机械加工的难度,而且减轻了系统重量。

本文设计了一个适用于微小卫星的两镜折反式光学系统,其焦距为3000 mm,相对口径为1/8,视场为1°。为了满足系统像差要求,引入了单片轴向梯度折射率薄透镜作为系统的校正镜,代替了三片普通薄透镜组成的校正镜组,实现了两镜折反式光学系统的轻量化、简捷化。

2 像差理论分析

2.1 两镜折反式光学系统像差理论分析

带有无光焦度校正元件的两镜折反式光学系统的结构模型如图1所示,其单色像差一共有5种:球差、彗差、像散、场曲和畸变。其三级像差系数分别表示为 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 和 S_5 ,具体内容参考文献[10],由三级像差理论给出各系数的表达式为:

$$\begin{cases} S_1 = \sum hP + \sum h^4 K \\ S_2 = \sum h_p P - J \sum W + \sum h^3 h_p K \\ S_3 = \sum \frac{h_p^2}{h} P - 2J \sum \frac{h_p}{h} W + J^2 \sum \Phi + \sum h^2 h_p^2 K \\ S_4 = \sum \frac{\Pi}{h} \\ S_5 = \sum \frac{h_p^3}{h^2} P - 3J \sum \frac{h_p^2}{h^2} W + J^2 \sum \frac{h_p}{h} \left(3\Phi + \frac{\Pi}{h} \right) - J^3 \sum \frac{1}{h^2} \Delta \frac{1}{n^2} + \sum h h_p^3 K \end{cases}, \quad (1)$$

式中,

$$\begin{cases} P = \left(\frac{u' - u}{1/n' - 1/n} \right) \left(\frac{u'}{n'} - \frac{u}{n} \right) \\ W = \left(\frac{u' - u}{1/n' - 1/n} \right) \left(\frac{u'}{n'} - \frac{u}{n} \right) \\ \Pi = \frac{n'u' - nu}{nn'} \\ \Phi = \frac{1}{h} \left(\frac{u'}{n'} - \frac{u}{n} \right) \\ K = -\frac{e^2}{R^3} (n' - n) \end{cases}. \quad (2)$$

如图1所示,光线以平行光入射,系统中参数值介质折射率 $n_1 = n_2' = n_3 = n_3' = 1$, $n_1' = n_2 = -1$;孔径角 $u_1 = 0$, $u_1' = u_2 = \beta_2$, $u_2' = u_3 = u_3' = 1$,其中 β_2 为次镜的放大率;主光线高度 $y_1 = 0, y_2 = -(1 - \alpha_2)/\beta_2$, $y_3 = [\beta_2(\alpha_2 - \alpha_3) - \alpha_3(1 - \alpha_2)]/\alpha_2\beta_2$,其中 α_2 为主次镜遮拦比 $\alpha_2 = h_2/h_1 = l_2/l_1'$, α_3 为无光焦度校正元件与主镜遮拦比 $\alpha_3 = h_3/h_1$;主次镜间隔 $d_{12} = f_1' - l_2 = (1 - \alpha_2)/\beta_2$,无光焦度校正元件与次镜间距为 $d_{23} = (y_2 - y_3)/u_2' = \alpha_2 - \alpha_3$;主镜曲率半径 $R_1 = f_1'/2$,次镜的曲率半径 $R_2 = \alpha_2\beta_2 R_1/(\beta_2 + 1)$ 。将以上各参数代入(2)式,可得:

$$\begin{cases} P_1 = -\frac{\beta_2^3}{4} & P_2 = \frac{(1 - \beta_2)^2(1 + \beta_2)}{4} \\ W_1 = \frac{\beta_2^2}{2} & W_2 = \frac{1 - \beta_2^2}{2} \\ \Pi_1 = \beta_2 & \Pi_2 = -(1 + \beta_2) & \Pi_3 = 0, \\ \Phi_1 = -\beta_2 & \Phi_2 = \frac{1 + \beta_2}{\alpha_2} \\ K_1 = \frac{e_1^2}{4}\beta_2^3 & K_2 = -\frac{e_2^2(1 + \beta_2)^3}{4\alpha_2^3} \end{cases}, \quad (3)$$

其中 e_1^2 、 e_2^2 分别为主镜和次镜的面型系数。

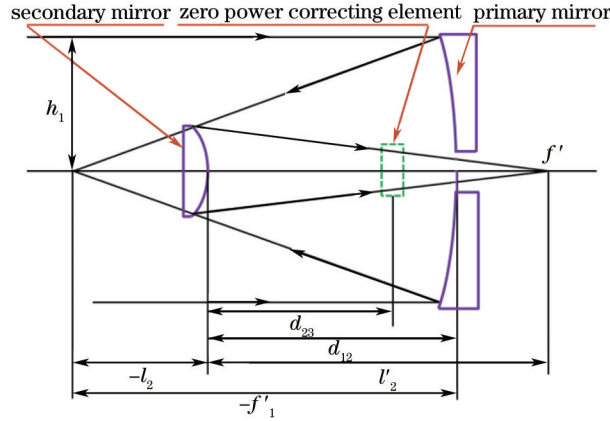


图1 两镜折反式光学系统结构模型

Fig.1 Two-mirror catadioptric optical system configuration

将(3)式中的值带入初级像差表达式(1)中,校正元件在后的两镜折反式光学系统像差理论公式为:

$$\begin{cases} S_1 = \left[\frac{\alpha_2(\beta_2 - 1)^2(\beta_2 + 1)}{4} - \frac{\alpha_2(\beta_2 + 1)^3}{4} e_2^2 \right] - \frac{\beta_2^3}{4}(1 - e_1^2) + \alpha_3 P_3 \\ S_2 = \frac{\alpha_2 - 1}{4\beta_2} E_2 + \frac{1}{2} + y_3 P_3 + W_3 \\ S_3 = \frac{(1 - \alpha_2)^2}{4\alpha_2 \beta_2^2} E_2 + \frac{(1 - \alpha_2)(\beta_2^2 - 1) + \beta_2(1 - \alpha_2 \beta_2 + \beta_2)}{\alpha_2 \beta_2} + \frac{y_3^2 P_3 + 2y_3 W_3}{\alpha_3} \\ S_4 = \beta_2 - \frac{1 + \beta_2}{\alpha_2} \\ S_5 = -\frac{(1 - \alpha_2)^3}{4\alpha_2^2 \beta_2^2} E_2 + \frac{y_3^3 P_3 + 3y_3^2 W_3}{\alpha_3^2} - \frac{(1 - \alpha_2)(1 + \beta_2)[3(1 - \alpha_2)(1 - \beta_2) - 2\beta_2(3 + \alpha_2)]}{2\alpha_2^2 \beta_2^2} \end{cases}, \quad (4)$$

式中,

$$E_2 = (\beta_2 - 1)^2(\beta_2 + 1) - (\beta_2 + 1)^3 e_2^2. \quad (5)$$

带有无光焦度校正元件的折反射系统,由反射系统和无光焦度校正元件组成。折反射系统的5个独立变量 α_2 、 β_2 、 α_3 、 e_1^2 、 e_2^2 中, α_2 、 β_2 根据系统的焦距和相对孔径而确定,剩余变量 α_3 、 e_1^2 、 e_2^2 可以满足3个条件,当同时满足消除球差、彗差、像散,即 $S_1 = S_2 = S_3 = 0$,由(4)式可得:

$$\begin{cases} P_3 = \frac{y_2(2\alpha_2 y_3 - \alpha_3 y_2) \beta_2^3 (e_1^2 - 1) + 4\alpha_2(\alpha_2 y_3 - \alpha_3 y_2 - \alpha_3)}{4(\alpha_2 y_3 - \alpha_3 y_2)^2} \\ W_3 = -\frac{1}{2} - \frac{y_2 \beta_2^3 (e_1^2 - 1) - 4(\alpha_2 y_3 - \alpha_3 y_2) P_3}{4\alpha_2} \end{cases}. \quad (6)$$

式中 P_3 、 W_3 为校正镜应满足的PW值,设计中,给定 α_2 、 β_2 、 α_3 、 e_1^2 、 e_2^2 的值,可以根据系统要求的初级像差,解出校正镜应满足的PW值,从而确定校正镜的结构参数,以消除系统的剩余像差。

2.2 轴向梯度折射率透镜的初级像差理论

轴向梯度折射率材料的折射率分布可表示为^[12]:

$$n = n(Z) = N_{00} + N_{01}Z + N_{02}Z^2 + \dots, \quad (7)$$

式中 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。

空气中轴向梯度折射率薄透镜的光焦度公式为^[12]:

$$\Phi = (n_0 - 1)c_1 - (n_r - 1)c_2, \quad (8)$$

式中 n_0 是光轴上的折射率(等于 N_{00}), n_r 为沿光轴方向最大折射率。 c_1 和 c_2 为折射率透镜各面的曲率。在像差校正方面,一个轴向梯度折射率球面可以等效于一个普通非球面的作用,因此单片轴向梯度折射率薄透镜对于初级像差系统的贡献可表示为^[12]:

$$\begin{cases} S_1^* = h^4 \Phi^3 |P^* - 2h^4 K' \\ S_2^* = h^3 h_p \Phi^3 |P^* + Jh^2 \Phi^2 |W^* - 2h^3 h_p K' \\ S_3^* = h^2 h_p^2 \Phi^3 |P^* + 2Jh h_p \Phi^2 |W^* + J^2 \Phi - 2h^2 h_p^2 K' \\ S_4^* = J^2 \Phi / n_0 \\ S_5^* = h h_p^2 \Phi^3 |P^* + 3Jh_p^2 \Phi^2 |W^* + J^2 (h_p / h) (3 + 1/n_0) \Phi - 2h h_p^3 K' \end{cases} \quad (9)$$

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。因此折射率分布是只取到线性项,则(9)式中 K' 有如下表达式:

$$K' = -\frac{1}{2}(c_1^2 - c_2^2)N_{01}, \quad (10)$$

其中 $|P^*$ 、 $|W^*$ 可以近似表示为:

$$\begin{cases} |P^* = |P^{*\infty} - \bar{u}_1(4|W^{*\infty} + 1) + \bar{u}_1^2[3 + (2/n_0)] \\ |W^* = |W^{*\infty} - \bar{u}_1[2 + 1/n_0] \end{cases}, \quad (11)$$

其中 $|P^{*\infty}$ 、 $|W^{*\infty}$ 为物在无穷远时 $|P^*$ 、 $|W^*$ 的值,于是

$$\begin{cases} |P^{*\infty} = \bar{c}_1(1 - 1/n_0)/n_0 + (\bar{c}_2 - 1)^2(\bar{c}_2 - 1 - n_T)(1/n_T - 1)/n_T \\ |W^{*\infty} = \bar{c}_1(1 - 1/n_0)/n_0 + (\bar{c}_2 - 1)[\bar{c}_2 - (1 + n_T)](1/n_T - 1)/n_T \end{cases}, \quad (12)$$

(11)、(12)式中, \bar{c}_1 、 \bar{c}_2 和 \bar{u}_1 分别为规划的曲率和孔径角,即 $\bar{c}_1 = c_1/\phi$, $\bar{c}_2 = c_2/\phi$, $\bar{u}_1 = u_1/h\phi$ 。

可以将(9)式表示为:

$$\begin{cases} S'_1 = h^4 \Phi^3 |P' \\ S'_2 = h^3 h_p \Phi^3 |P' + Jh^2 \Phi^2 |W' \\ S'_3 = h^2 h_p^2 \Phi^3 |P' + 2Jh h_p \Phi^2 |W' + J^2 \Phi \\ S'_4 = J^2 \Phi / n_0 \\ S'_5 = h h_p^2 \Phi^3 |P' + 3Jh_p^2 \Phi^2 |W' + J^2 (h_p / h) (3 + 1/n_0) \Phi \end{cases}, \quad (13)$$

其中,

$$\begin{cases} |P' = |P'^{\infty} - \bar{u}_1(4|W'^{\infty} + 1) + \bar{u}_1^2[3 + (2/n_0)] \\ |W' = |W'^{\infty} - \bar{u}_1[2 + (1/n_0)] \end{cases}, \quad (14)$$

对比(9)、(13)式写成下列关系式:

$$\begin{cases} |P'^{\infty} = |P'^{\infty} + \Delta |P^{*\infty} = |P^{*\infty} - 2K'/\Phi^3 \\ |W'^{\infty} = |W^{*\infty} \end{cases}. \quad (15)$$

3 模拟验证

3.1 初始结构设计方法

设计一个采用轴向梯度折射率材料作为校正镜的同轴两镜折反式光学系统,其焦距 $f' = 3000$ mm,相对孔径 $D/F' = 1/8$,视场角 $2\omega = 1^\circ$,系统设计指标如表1所示^[13-14],采用均匀材料作为校正镜组的光学系统如图2所示。首先根据R-C光学系统初始结构设计的相关理论^[15],计算得到两镜系统的初始结构参数,然后根

表1 两镜系统设计指标

Table 1 Specifications of two-mirror system

Parameter	Numerical value
Focal length f'	3000 mm
Field of view 2ω	1°
Relative aperture D/F'	1/8
Distortion	<0.5%
MTF@50 lp/mm	>0.3

据上述理论计算轴向梯度折射率透镜的相关参数。初始结构计算流程图如图3所示。

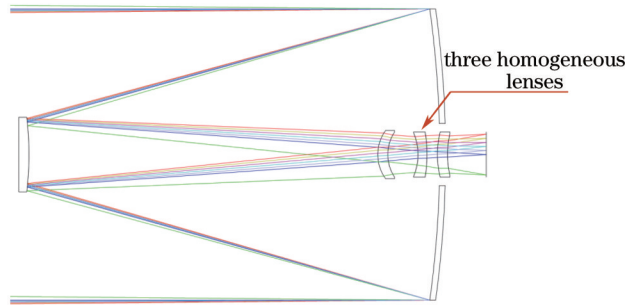


图2 带有均匀材料校正镜的两镜折反式光学系统

Fig.2 Structure of the catadioptric system with homogeneous lenses

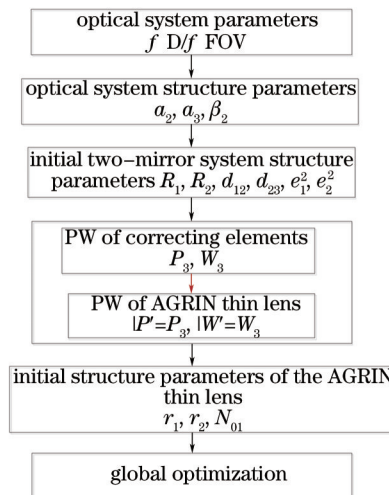


图3 初始结构计算流程图

Fig.3 Flow diagram of the computing process

两镜系统的初始结构参数如表2所示：

表2 两镜系统的初始结构

Table 1 Initial R-C system structure parameters

α_2	β_2	α_3	R_1	R_2	d_{12}	d_{23}	e_1^2	e_2^2
0.248	-4	0.1	-1500	-496	-564	444	1.0412	3.1718

将表1中数据带入(6)式计算得到校正镜的PW值, $P_3 = -1.1861$ 、 $W_3 = -0.7227$, 即轴向梯度折射率透镜的PW值为:

$$|P'| = -1.1861, \quad |W'| = -0.7227. \quad (16)$$

将(12)、(15)式代入(14)式, 结合光焦度(8)式组成方程组^[12], 采用Matlab软件运用最小二乘法^[16-17]解方程组, 计算得到满足消两镜折反式光学系统球差、彗差和像散的轴向梯度折射率透镜结构参数 c_1 、 c_2 和梯度折射率系数 N_{01} 。将系统初始结构参数带入Zemax软件计算仿真, 得到系统的初级像差系数如表2所示, 由表3可知, 计算所得两镜折反式光学系统的初始结构满足消球差、彗差和像散的条件。

表3 系统的初级像差系数

Table 2 Primary-aberration coefficients of the initial optical system

S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
0.00	0.00	0.00	0.01	0.01

3.2 全局优化

基于均匀介质材料的无光焦度校正镜组, 至少需要正负两片透镜抵消光焦度, 校正色差。由于轴向梯度折射率材料, 沿光轴方向折射率成非线性变化, 因此光焦度趋于0的轴向梯度折射率单透镜, 类似于不同折射率均匀介质薄透镜组成的无光焦度校正镜组。为了提升系统的色差特性, 在Zemax软件中对初始结构

做优化,将两反射镜曲率半径 R_1 、 R_2 ,主次镜间隔 d_{12} ,校正元件与次镜间距 d_{23} ,以及轴向梯度折射率透镜的曲率半径和折射率梯度系数,设为变量。同时,放开总系统的光焦度,使轴向梯度折射率透镜的光焦度趋近于0,消除系统色差,最后做焦距缩放,得到满足要求的两镜折反式光学系统。

3.3 设计结果和分析

优化后结构如图4所示,主镜和次镜都是双曲面反射镜,消除R-C系统校正系统的初级球差和彗差。采用单片轴向梯度折射率透镜作为系统校正镜,校正R-C系统的剩余像差。通过Zemax软件优化仿真可得带有单片轴向梯度折射率透镜的两镜折反式光学系统结构参数如表4所示。

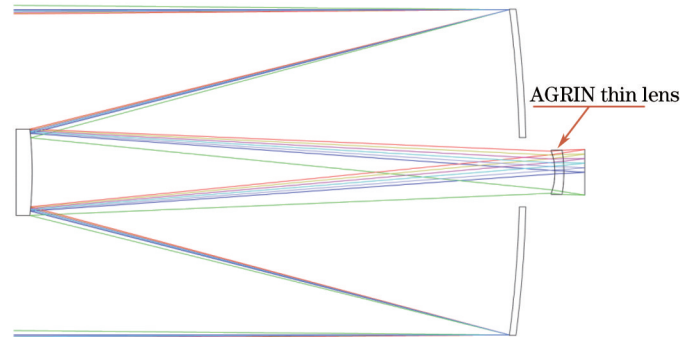


图4 两镜折反式光学系统最终结构图

Fig.4 Structure of the integral catadioptric system

表4 两镜折反式光学系统最终结构参数

Table 4 Dual-reflective catadioptric system parameters

Surface	Radius	Thickness	Glass	Semi-diameter	Conic
1	Infinity	581			
Stop	-1476.389	-563.008	Mirror	190	-1.073
3	-485.495	603.558	Mirror	50	-3.968
4 (Gradient 5)	-71.052	10.344	GSF	26	
5	-155.103	24.106		26	

在本设计中,梯度折射率透镜的折射率随光轴方向的变化为

$$n(Z) = 1.649 + 0.017Z + 0.00043Z^2. \quad (17)$$

在本设计中,轴向梯度折射率材料按照上述关系的准确变化是本光学系统成像质量的保障。因此,针对轴向梯度折射率材料随光轴方向的变化系数做了公差分析,各系数允许的误差范围如表5所示。

表5 轴向梯度折射率材料变化系统公差

Table 5 Tolerance of the axial gradient-index material

Coefficient	N_{00}	N_{01}	N_{02}
Tolerance	1.649 ± 0.005	0.017 ± 0.0005	0.00043 ± 0.00005

优化所得最终光学系统各视场的波前像差均值如表6所示。

表6 各视场波前差值

Table 6 RMS wavefront error for every field angles

Field angle	RMS wavefront error
0°	0.0160
0.1°	0.0247
0.2°	0.0428
0.3°	0.0586
0.4°	0.0559
0.5°	0.0676

对于优化得到的光学系统,各视场光学传递函数(MTF)值如图5所示,截止频率为50 lp/mm处的MTF值高于0.35,接近衍射极限。系统弥散圆半径接近艾里斑半径,如图6所示,单像素中全视场能量多于95%,

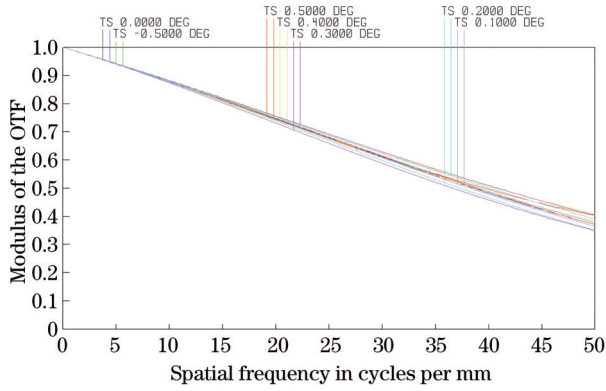


图5 折反光学系统传递函数曲线

Fig.5 MTF plot of the catadioptric system

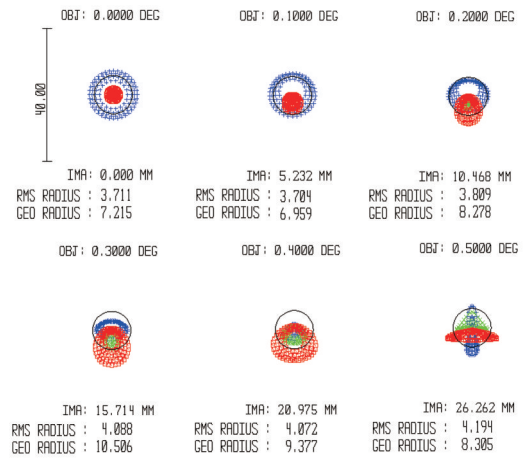


图6 折反光学系统弥散圆半径

Fig.6 Spot diagram of the catadioptric system

如图7所示,系统畸变如图8所示,其全视场畸变优于0.5%,满足要求。比较图2与图4可以看出带有轴向梯度折射率校正镜的光学系统已经成功的将3片均匀材料校正镜变为1片轴向梯度折射率透镜,系统结构简单,易于装调和检测。

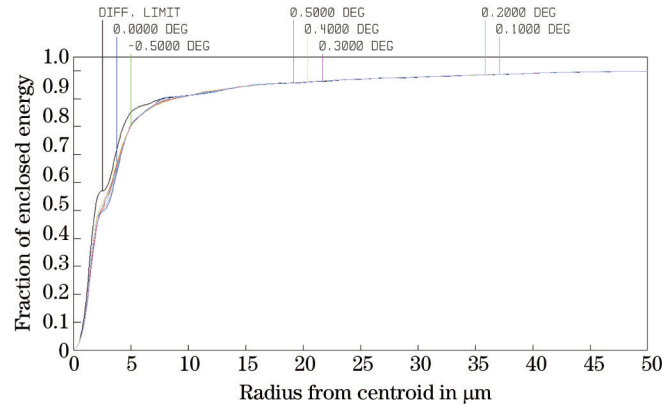


图7 折反光学系统能量曲线

Fig.7 Energy encircle of the catadioptric system

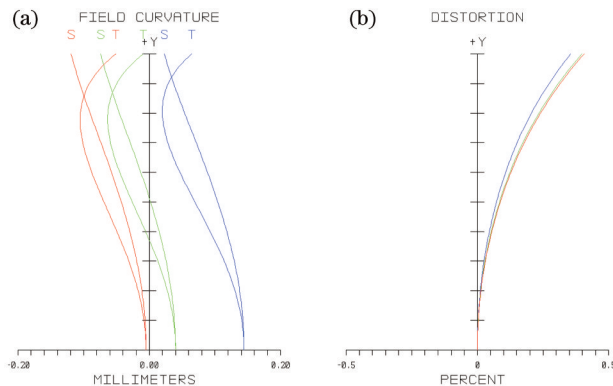


图8 折反光学系统(a)场曲和(b)畸变

Fig.8 (a) Field curvature and (b) distortion curve of the catadioptric system

4 结 论

对于宽视场、大孔径的同轴两反光学系统,通常采用两片或多片均匀球面透镜作为校正镜,校正同轴两反光学系统的剩余像差。本设计采用单片轴向梯度折射率薄透镜代替均匀球面透镜校正镜组,使宽视场、大孔径的同轴两反光学系统成像质量接近衍射极限。研究了带有单片轴向梯度折射率薄透镜的两镜折反式光学系统的设计方法,并且通过 Zemax 软件模拟验证了方法的正确性,设计了焦距为 3000 mm,相对孔径为

1/8, 视场为 1° 的两镜折反式光学系统。

参考文献

- 1 Pan Jinhua. Research on the field corrector design for the R-C system of the large telescope Cassegrain focus[J]. Optics and Precision Engineering, 2002, 10(3): 231-234.
潘君骅. 关于大大望远镜卡焦 R-C 系统视场改正镜设计的研究[J]. 光学精密工程, 2002, 10(3): 231-234.
- 2 Zhong Xing, Jin Guang. Design of extra wide short wave infrared spectral imager's fore-optics[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1022004.
钟兴, 金光. 超广角短波红外成像光谱仪前置光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1022004.
- 3 Chang Jun, Weng Zhicheng, Jiang Huilin, *et al.*. Design on three reflective mirror system used in space[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(2): 216-219.
常军, 翁志成, 姜会林, 等. 用于空间的三反射镜光学系统设计[J]. 光学学报, 2003, 23(2): 216-219.
- 4 乔亚天. 梯度折射率光学[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- 5 Xu Xiaojie, Max Wickson, Michael Savard, *et al.*. The control of gradient index profile for gradient index glasses of macro size and largen for a varifocal slide projector lens[C]. SPIE, 1993, 2000: 369-378.
- 6 Qian Yixian, Liang Wei, Gao Xiaodong. Optical design of Cassegrain system with wide angle and multiple aspheric surfaces [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 38(4): 896-898.
钱义先, 梁伟, 高晓东. 含多个非球面大视场卡塞格林系统光学设计[J]. 光子学报, 2009, 38(4): 896-898.
- 7 Zhao Cunhua, Wang Songde. Design laser beam focusing lenses including axial gradient index[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(3): 255-258.
赵存华, 王松德. 轴向梯度折射率材料用于激光束聚焦透镜设计[J]. 激光与红外, 2008, 38(3): 255-258.
- 8 J A Diaz, C Pizarro, J Arasa. Third-order aberrations of an AGRIN thin lens as a function of the shape and conjugate variables [J]. SPIE, 2006, 6342: 1-10.
- 9 P K Manhart, B V Hunter, R Blankenbecler. Dispersion sensitivity of large scale axial gradient index glass for spherochromat doublets[C]. SPIE, 1999, 3779: 190-201.
- 10 Kingslake R. Optical System Design[M]. New York: Academic, 1993.
- 11 Zhao Wencai. Study on the Catadioptric Imaging System with the Zero Power Correcting Elements[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2004.
赵文才. 带有无光焦度校正元件的折反射成像系统研究[D]. 长春: 长春精密机械与物理研究所, 2004.
- 12 Lin Zhongtian, Xue Mingqiu. Design of optical elements with axial-gradient indices[J]. Acta Optica Sinica, 1985, 5(7): 577-584.
林中天, 薛鸣球. 轴向梯度折射率光学元件的设计[J]. 光学学报, 1985, 5(7): 577-584.
- 13 Chen Qimeng, Zhang Guoyu, Sun Xiangyang, *et al.*. Optical system design of LCOS-based and high precision dynamic star simulator[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(7): 0716003.
陈启梦, 张国玉, 孙向阳, 等. 高精度 LCOS 动态星模拟器的光学系统设计[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 0716003
- 14 Xue Qingsheng. Optical system design of large relative-aperture and wide field of view spaceborne imaging spectrometer [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0316003.
薛庆生. 星载大相对孔径宽视场成像光谱仪光学系统设计[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0316003.
- 15 Pan Jinhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces[M]. Beijing: Science Press, 2004.
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- 16 Gao Duorui, Zhong LiuJun, Zhao Zhao, *et al.*. Zoom optical system design based on Matlab[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0416002.
高铎瑞, 钟刘军, 赵昭, 等. 基于 Matlab 的变焦光学系统设计[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0416002.
- 17 Mao Wenwei. Modern Optical Lens Design Methods and Examples[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
毛文炜. 现代光学镜头设计方法与实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.

栏目编辑: 韩峰