

泛卡塞格林光学系统的色差研究

韦晓孝^{1,2} 许 峰^{1,2} 余建军^{1,2}

(¹ 苏州大学现代光学技术研究所, 江苏 苏州 215006)
(² 江苏省现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006)

摘要 泛卡塞格林光学系统结构简单、像质优良,广泛应用于空间光学领域中。从对研制完成的谱段位于 500~800 nm 的泛卡塞格林光学镜头的调制传递函数(MTF)的测量结果出发,结合泛卡塞格林光学系统的结构特点,分析表明光学设计的色差来源于其高次施密特非球面镜,提出了一种利用非球面镜的最小色差条件来改进光学系统的新方法。通过三级像差理论,分析了施密特非球面镜的面形方程,计算出最小色差条件及相应的中性带高度,进行光学设计的优化改进,取得了良好的效果。结果表明,改进后光学系统的色差由原来的 31.4 μm 减少为 4.25 μm ,且光学系统的 MTF 值达到 0.6 以上(40 lp/mm),像质优良。该方法为类似光学系统的设计提供了一定的参考价值。

关键词 光学设计;泛卡塞格林;色差;施密特;非球面;调制传递函数

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.0722002

Study of Chromatic Aberration of Pan-Cassegrain Optical System

Wei Xiaoxiao^{1,2} Xu Feng^{1,2} Yu Jianjun^{1,2}

(¹ Institute of Modern Optical Technology, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)
(² Key Laboratory of Modern Optical Technologies of Jiangsu Province, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

Abstract With the advantage of its simple structure and good image quality, the pan-Cassegrain is widely used in the field of space optics. Based on the modulation transfer function (MTF) measurement results of the pan-Cassegrain optical lens with the spectrum band of 500~800 nm, and combined with the characteristics of pan-Cassegrain optical system, the cause of chromatic aberration is analyzed, resulting from its high-order aspheric, and a new method to improve the performance the optical system is proposed correspondingly based on the minimal chromatic aberration of aspheric. According to the third class optical aberration theory, the surface equation of Schmidt aspheric is analyzed and the minimal chromatic aberration and its zone-aperture height are figured out. Improvement of optical system is achieved correspondingly and the results show that the full-aperture spherochromatic aberration of improved optical system is reduced from 31.4 μm to 4.25 μm , and its MTF values are more than 0.6. The results provide a good guiding to the design of other similarity optical systems.

Key words optical design; pan-Cassegrain; chromatic aberration; Schmidt; aspheric; modulation transfer function

OCIS codes 220.1010; 220.1250; 220.4840

1 引 言

泛卡塞格林光学系统(PC)^[1]自 2003 年被提出之后,凭其显著的优点:1)相对于 Ritchey-Cretien (R-C)系统或经典卡塞格林系统,能实现较大的视

场和相对口径;2)反射面均为球面,加工简单;3)通过密封窗平行平板的高次非球面化及像面前的 2~4 块由同种玻璃组成的球面校正镜组消像差,引入的色差较小;4)像质优良等,在空间光学领域中得到

收稿日期: 2011-10-21; **收到修改稿日期:** 2012-03-12

基金项目: 国家 863 计划(2008AA12A203)和江苏高校优势学科建设工程(PAPD)资助课题。

作者简介: 韦晓孝(1983—),女,博士研究生,主要从事光学工程及光学设计等方面的研究。

E-mail: weixx@suda.edu.cn

导师简介: 薛鸣球(1930—),男,中国工程院院士,博士生导师,主要从事光学设计方面的研究。

E-mail: xuemq@suda.edu.cn

广泛应用。

相比于卡塞格林系统,PC系统的两块反射镜采用易于加工的球面反射镜,窗口采用的施密特板(曲率半径无穷大的非球面)可明显提高光学系统成像质量^[2]。入射的平面波经过它后发生变形,恰好抵消球面反射镜产生的球差,因此也可以称它为消球差校正板。像面附近采用多块球面透镜组成的无光焦度像差补偿器,可分别有效地校正与光阑和视场有关的像差^[3],因此可实现更大的视场和相对口径。从PC系统的结构组合上来看,两球面反射镜只提供光焦度,不产生色差,而校正镜组由同种玻璃组成,无光焦度,也不产生色差,因此,PC系统唯一的色差来源是窗口施密特非球面镜。施密特校正板的曲面是有两个拐点的曲面^[4]。

从另一方面解释,由于施密特非球面镜面形曲线是高次的,因此曲线斜率有正、负值的变化,从而导致色差的产生。但任何曲线,总存在两个位置的斜率数值相等而符号相反的情形,对施密特校正镜来说,便是其色差最小的条件^[5],在光学设计时应把它作为一个重要的条件来考虑。

介于上述情况,本文以一个PC光学系统为例,结合其像质测量结果,对其色差问题进行了讨论,同时计算出施密特非球面镜的最小色差条件,完成对系统的优化改进。

2 光学系统设计结果及像质检测

根据光学技术指标要求,经优化设计得到一个波段位于500~800 nm的PC系统,如图1所示,焦距为953 mm, F 数为6.4,视场角 0.8° 。

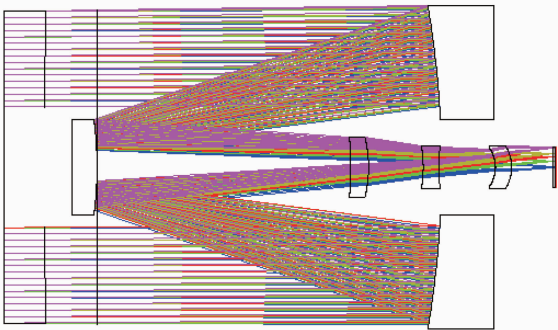


图1 光学系统方案

Fig. 1 Layout of optical system

光学系统的调制传递函数(MTF)曲线如图2所示,奈奎斯特频率为40 lp/mm处的MTF值高于0.55,接近衍射极限,像质良好。图3给出了光学系统在500~800 nm波段上的轴向色差曲线,从曲线

可以看出,光学系统在0.6带孔径附近很好地校正了色差。

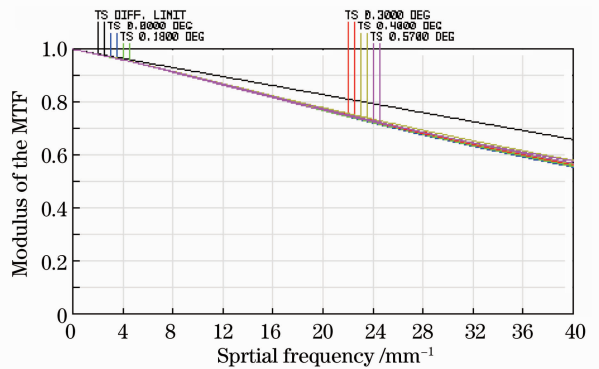


图2 PC光学系统调制传递函数曲线图

Fig. 2 MTF curves of PC system

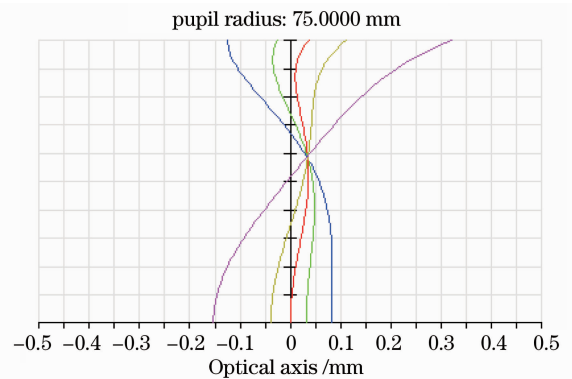


图3 PC光学系统轴上色差曲线

Fig. 3 Longitudinal aberration curves of PC system

图4为基于上述的光学设计方案,完成PC光学系统的加工和装调后,采用美国Optest公司的光学传递函数仪进行的MTF测量。

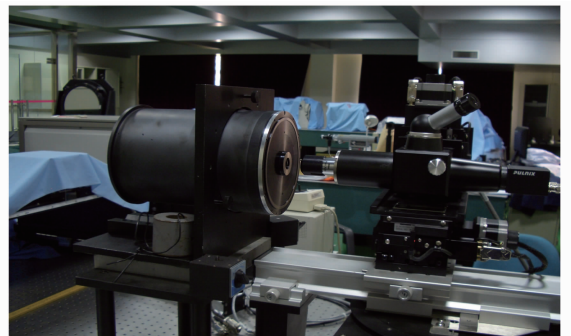


图4 PC镜头调制传递函数测量

Fig. 4 MTF test of PC optical lens

根据要求,研制出的PC镜头MTF值需达到以下指标:

- 1) 在扩展光谱500~800 nm范围内综合测量值优于0.35(40 lp/mm);
- 2) 在波长550 nm窄波段的测量值优于0.4

(40 lp/mm);

3) 在波长 650 nm 窄波段的测量值优于 0.4 (40 lp/mm)。

首先在全波段 500~800 nm 范围内进行测量, 保证镜头在该谱段范围内处于最佳焦点位置, 测得 40 lp/mm 处的 MTF 值大于 0.4; 保持最佳焦点位置不变, 在光源前分别加上红色滤光片(650 nm)和绿色滤光片(550 nm), 发现 MTF 值下降, 甚至小于 0.35, 如图 5 中曲线所示。经过多次重复调整测试得到了同时满足 3 个波段的焦面位置, 它是在全波段 500~800 nm 最佳焦面处离焦 57.7 μm , 如图 6 所示。

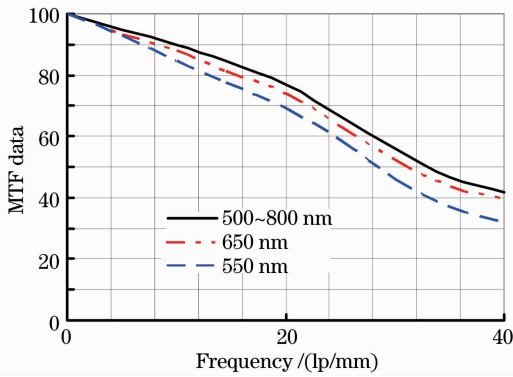


图 5 在 500~800 nm 最佳焦面处 3 个波段的 MTF 值
Fig. 5 MTF values of three spectrum in the best focal plane of 500~800 nm

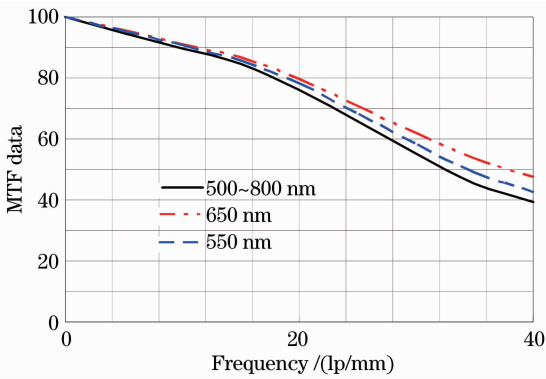


图 6 PC 镜头在 500~800 nm 最佳焦面处离焦 57.7 μm 后 3 个波段的 MTF 值

Fig. 6 MTF values of three spectrum in 57.7 μm defocused from the best focal plane of 500~800 nm

以上的测量结果表明, PC 光学系统在设计中还存在较大的色差, 由图 4 可知, 主要是在全孔径处存在色球差, 大小为 31.4 μm 。从光学系统结构分析, 共轴光学系统一般存在中心遮拦^[6], 此系统中, 次镜存在对主镜的遮拦, $\alpha = h_2/h_1 = 0.33$, 表明 0~0.33 孔径处的光线未参与到光学设计的计算中^[7]。为了

获得较准确的结果, 从使用的角度希望校正色差的带孔径高度接近全孔径。从理论上讲, 主要的原因是施密特非球面镜在设计中存在最小色差条件, 若能计算光学系统在最小色差时相对应的中性带高度, 便能得到 PC 光学系统的最小色差的情况。

3 施密特非球面镜最小色差条件

如图 7 所示, 在没有施密特非球面镜时, 球面反射镜近轴平行光的焦点在 F , 边缘光的焦点在 M , 球面镜的三级球差为 A_{FM} , 等于 $y^2/(8f)$, 如果不是以近轴光的焦点为焦点, 而是有一个离焦量 Δ , 则球差可以表达为

$$A'_L = \frac{y^2}{8f} - \Delta, \quad (1)$$

式中 A'_L 为存在离焦量时的三级轴差。则角像差为

$$\eta_y = A'_L \frac{y}{f^2} = \frac{y^3}{8f^3} - \Delta \frac{y}{f^2}. \quad (2)$$

波面差为

$$W_y = \int_0^y \eta_y dy = \frac{y^4}{32f^3} - \frac{\Delta \cdot 16fy^2}{32f^3}. \quad (3)$$

若施密特非球面镜的折射率为 n , 则其面形应为

$$x = -\frac{W_y}{n-1} = -\frac{1}{n-1} \frac{y^4 - \frac{\Delta \cdot 16f}{y_0^2} y_0^2 y^2}{32f^3}, \quad (4)$$

式中 y_0 为边缘光的高度。令 $\frac{\Delta \cdot 16f}{y_0^2} = a$, 则

$$x = -\frac{y^4 - ay_0^2 y^2}{32(n-1)f^3}, \quad (5)$$

式中 a 是和离焦量 Δ 有关的参量, 将(5)式微分, 得

$$\frac{dx}{dy} = \frac{4y^3 - 2ay_0^2 y}{-32(n-1)f^3}. \quad (6)$$

为了讨论方便, 不失一般性, 令分母(常数项)为 1, 即

$$\frac{dx}{dy} = 4y^3 - 2ay_0^2 y, \quad (7)$$

求二次导数

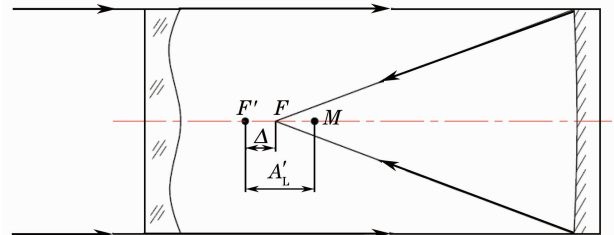


图 7 施密特系统结构图

Fig. 7 Layout of Schmidt system

$$\frac{d^2x}{dy^2} = 12y^2 - 2ay_0^2, \quad (8)$$

令 $\frac{d^2x}{dy^2} = 0$, 得斜率为极值的条件为

$$y = y_0 \left(\frac{a}{6} \right)^{1/2}. \quad (9)$$

对于施密特非球面镜来说, 最小色差应该出现在边缘带的斜率与中间某一个带的斜率数值相等而符号相反的情形, 写成方程式即为

$$y_0^3 - \frac{1}{2}ay_0^3 = -y^3 + \frac{1}{2}ay_0^2y. \quad (10)$$

结合(9)式、(10)式即可解出

$$a = 1.5. \quad (11)$$

这便是非球面镜的最小色差条件, 根据 a 值, 不难从(5)式中求出与边缘带斜率数值相等而符号相反的中性带高度 $y_n = \sqrt{3}y_0/2$, 其相应的施密特曲线形状如图 8 所示。

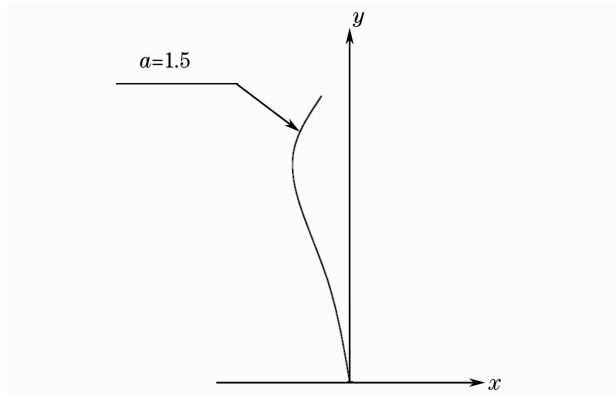


图 8 施密特非球面曲线

Fig. 8 Curve of Schmidt aspheric

4 光学系统的最小色差结果

以上的分析表明, 在光学设计中应考虑到非球面镜的最小色差条件, 即在相应的中性带高度 y_n 处进行像差校正时, 其产生的色差最小, 鉴于以上的设计思想, 对 PC 光学系统进行改进。

改进后光学系统的 MTF 曲线如图 9 所示, 可以看出, 奈奎斯特频率为 40 lp/mm 处的 MTF 平均值高于 0.6, 且轴上点 MTF 值达到 0.64, 从 MTF 曲线及表 1 中改进前后的 MTF 值对比看出, 改进后光学系统的综合性能明显高于原光学系统。图 10 为改进后光学系统轴上色差曲线, 可以看出, 改进后的光学系统在 0.8 带孔径处校正了色差, 与计算得到的中性带高度 $y_n = \sqrt{3}y_0/2$ 接近, 此时全孔径处 500 nm 波长与 800 nm 波长的色球差大大减小, 为 4.25 μm 左右, 达到预期的结果。

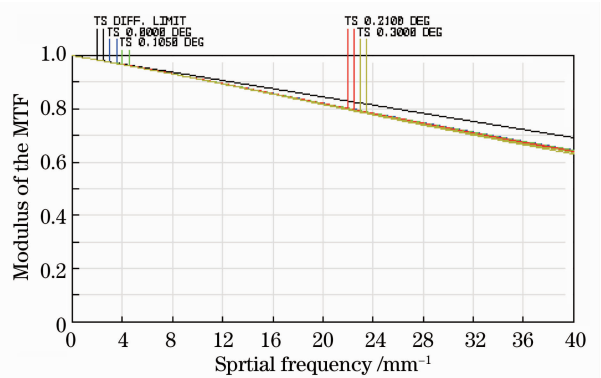


图 9 改进后光学系统调制传递函数曲线

Fig. 9 MTF curves of improved system

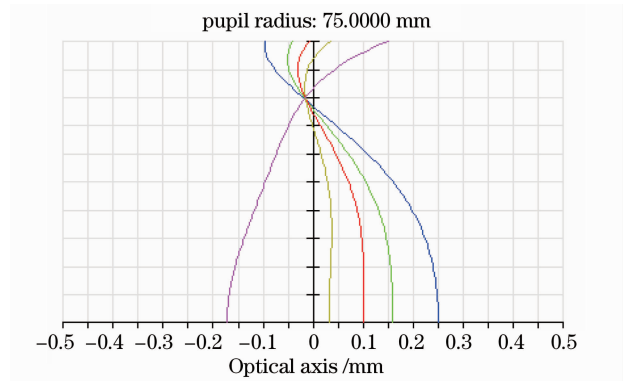


图 10 改进后光学系统轴上色差曲线

Fig. 10 Longitudinal aberration curves of improved system

表 1 改进前后光学系统在 40 lp/mm 的 MTF 值对比

Table 1 MTF values on 40 lp/mm before and after improved system

	Before					After				
	Limit	0°	0.18°	0.28°	0.4°	Limit	0°	0.18°	0.28°	0.4°
x	0.683	0.580	0.584	0.593	0.603	0.692	0.645	0.641	0.633	0.622
y	0.683	0.580	0.584	0.590	0.593	0.692	0.645	0.644	0.640	0.637

5 结 论

通过对泛卡塞格林光学系统结构的分析, 研究了

一种利用施密特非球面镜的最小色差条件指导光学系统改进的新方法, 在相对应的中性带高度进行色差

的校正,可使光学系统得到最小色差的结果,光学系统的色球差由原来的 31.4 μm 减少为 4.25 μm 。从 40 lp/mm 处的 MTF 值看出系统成像质量良好,接近衍射极限,且光学系统性能有了很大的改善。此方法所得的结果可以为类似具有中心遮拦的光学系统,尤其是大口径光学系统的设计提供一定的参考价值。

参 考 文 献

1 Pan Junhua. New pan-Cassegrain telescope system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, **11**(5): 438~441
 潘君骅. 一个新的泛卡塞格林望远镜系统[J]. *光学精密工程*, 2003, **11**(5): 438~441

2 Zhu Yongjian, Pan Weiqing. Measurement of aspheric surface [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(1): 011202
 朱勇建, 潘卫清. 非球面面形测量技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(1): 011202

3 Yuan Jiannan, Fu Yuegang, Guo Jun *et al.*. Optimization of improved cassegrain telescope system [J]. *J. Changchun University of Science and Technology (Natural Science*

Edition), 2010, **33**(3): 8~10
 袁健男, 付跃刚, 郭俊等. 改进型卡塞格林望远光学系统的优化设计[J]. *长春理工大学学报*, 2010, **33**(3): 8~10

4 Chen Xiwen. Aplanatic parametric equation for the intersecting line of aspheric meridional ray [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1622~1628
 陈喜文. 等光程非球面子午截线的参数方程[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1622~1628

5 Pan Junhua. Design, Fabrication and Testing of the Aspherical Optical Surfaces [M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004. 130~138
 潘君骅. 光学非球面的设计、加工和检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004. 130~138

6 Li Xuyang, Li Yingcai, Ma Zhen *et al.*. Optical system design of space camera with large F number and long focal length[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2093~2097
 李旭阳, 李英才, 马臻等. 大 F 数长焦距空间相机光学系统设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2093~2097

7 Wang Xiaokun, Zheng Ligong. Accurate removal of misalignment errors from testing central obstructed optics [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(9): 091201
 王孝坤, 郑立功. 中心遮拦光学元件检测中调整误差的精确去除[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(9): 091201

栏目编辑: 谢 婧