

一种大视场反射光学系统的研究

刘 卜^{1,2,3} 樊学武¹ 屈有山¹ 陈荣利¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所空间光学研究室, 西安 710068)

(2 西安工业大学, 西安 710032)

(3 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要 从 Schwarzschild 系统出发, 基于设计大视场光学系统的同心原则, 设计了一种大视场的三反射光学系统. 该系统有两个球面反射镜, 一个二次非球面镜, 系统在频率 50 lp/mm 处 $22^\circ \times 11^\circ$ 的条形大视场范围内具有良好的成像性能, 可以用于紫外探测光学系统中.

关键词 光学系统; Schwarzschild; 传递函数

中图分类号 O435; O435.2 **文献标识码** A **文章编号** 1004-4213(2007)01-0081-3

0 引言

在望远镜光学系统这一设计领域, 有许多类型能够获得较大的视场, 如反远摄形式的纯折射系统, 将折射和反射光学元件组合而成的施密特系统以及同心和平场形式的 Schwarzschild 系统, 当然还有其它形式的三反射和四反射系统^[1].

大视场的光学系统主要是采用折射系统. 它采用较多的透镜来提供足够的设计变量来校正像差, 而且在可见光波段有许多可用的性质优良的玻璃材料来满足校正像差的需要. 折射系统有一个显而易见的优点就是没有遮拦, 另外装调较容易. 缺点是对环境温度较为敏感, 而且由于二级光谱的存在, 使得使用的光谱范围受到限制.

卡塞格林系统消除了球差和彗差, 但是却有相当大的像散和场曲, 这限制了视场的扩大, 加校正透镜后, 一般所能达到的视场在 3° 以内. 若加第三反射镜, 可以校正更多的三级像差, 因而可以扩大系统的视场, 但这也是有限的, 一般在 5° 以内^[2-3]. 对于再大的视场和相对孔径, 可以使用 Schmidt-Cassegrain 和 Maksutov 光学系统, 但缺点是系统有明显的遮拦. 如果考虑重量、遮拦和材料的限制, 折射和折反射系统在许多应用情况下要同时满足大孔径、大视场和从紫外到红外的宽的波段范围内是很困难的, 因此需研究纯反射系统来满足上述具有挑战性的要求.

本文将结合同心反射镜 (Schwarzschild 系统) 这一对称原则来讨论大视场三反射光学系统, 设计系统的具体技术指标如下: 焦距: 100 mm; 视场角: 在一个方向的视场角 $> 20^\circ$; 相对孔径: 1/5; 波段: $0.25 \sim 2.7 \mu\text{m}$; MTF: 优于 0.5 ($N=50 \text{ lp/mm}$, 全

视场全谱段平均); 像场: 平场; 视场渐晕: 无; 消杂光: 易处理.

1 Schwarzschild 系统介绍

设计大视场反射光学系统在很大程度上是对系统对称性的理解和把握, 而系统的对称性一般是与各反射面的半径和间隔相联系的, 而与系统各反射面的倾角无关^[4-6], 因此, 计算并寻找合适的半径和间隔是设计大视场反射光学系统的关键.

同心两反射镜的特殊例子是 Schwarzschild 系统, 它由两个球面反射镜组成, 并且两反射镜间的间隔为

$$t = 2(f'_1 - f'_2) \quad (1)$$

二反射镜半径间的关系

$$R_2/R_1 = f'_2/f'_1 = (3 \pm \sqrt{5})/2 = 0.382 \text{ 或 } 2.618 \quad (2)$$

Schwarzschild 系统的场曲在与两镜同心的某一球面上为零.

2 系统的设计、成像性能和像差分析

短焦、大视场的折射光学系统通常选用反远摄系统, 如图 1. 前组是负光焦度组, 后组是正光焦度组, 孔径光阑在透镜中间以提高系统对称性, 增加光学系统校正像差的能力, 负光焦度组减小在孔径光阑处的视场角并且控制像差.

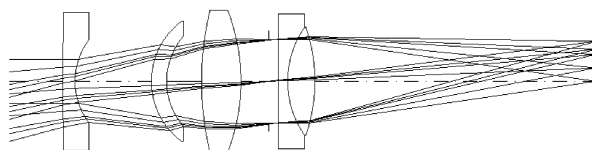


图 1 反远摄光学系统光路示意

Fig. 1 Optical layout of inverted telephoto lenses

图 2 是 Schwarzschild 望远镜系统, C_1, C_2 分别是两反射镜 M_1, M_2 的曲率中心, H' 是系统的主点, C_1, C_2 两点重合, 最后的像是实像. 从图 2 中两反

射镜的弯曲可以看出 Schwarzschild 系统和反远摄系统在光焦度的分配上相似,前组是负光焦度组,后组是正光焦度组. 具有相似的对称性,因此,可能具备设计大视场光学系统的潜质.

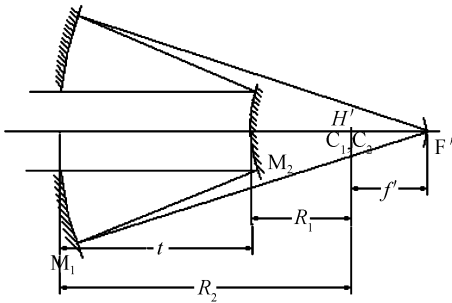


图2 Schwarzschild 望远镜系统
Fig.2 Schwarzschild telescopes

当然, Schwarzschild 系统由两个反射镜组成,无法在较大的视场上获得平的像面,系统的视场受到限制. 为了消除场曲,扩大系统的视场,应加第三反射镜来消除系统的场曲. 在设计的过程中,先计算出 Schwarzschild 系统的初始结构参量,然后根据场曲为零计算出第三反射镜的半径,根据焦距值计算出第三反射镜和第二反射镜的间隔. 并以此作为设计无遮拦大视场反射光学系统的初始结构. 传统的共轴 Schwarzschild 系统是有中心遮拦的,为了避开中心遮拦,使系统在 y 方向的视场偏离^[7-13],并适当倾斜主反射镜,避开遮拦. 选取合适的结构参量优化得到主镜和第三镜为两个球面反射镜,次镜为凹面的椭球面镜的三反射系统,系统结构如图 3.

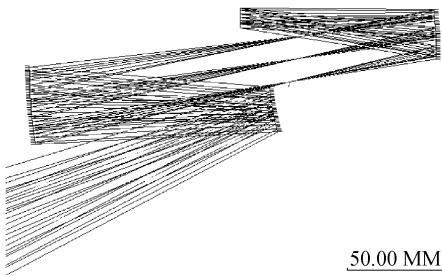


图3 基于 Schwarzschild 系统的大视场三反射光学系统
Fig.3 Layout of big field three mirror reflective optical systems based on Schwarzschild system

系统的成像性能的评价必须选取具有代表性的视场点,在这一设计中选取如图 4 的视场点: $A(0^\circ, 17^\circ), B(5.5^\circ, 17^\circ), C(11^\circ, 17^\circ), D(0^\circ, 22.5^\circ), E(5.5^\circ,$

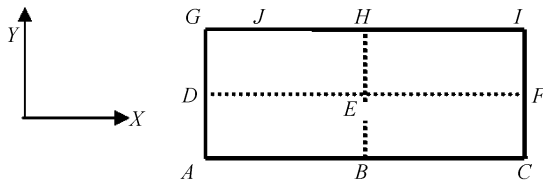


图4 系统的视场点的分布情况
Fig.4 Distribution of the system's field point

$22.5^\circ), F(11^\circ, 22.5^\circ), G(0^\circ, 21^\circ), H(5.5^\circ, 21^\circ), I(11^\circ, 21^\circ), J(2^\circ, 21^\circ)$ 来评价整个系统的成像情况,由于系统视场关于 Y 方向具有对称性,因此这些点可以代表系统在整个 $22^\circ \times 11^\circ$ 的成像情况.

从图 5 的系统传递函数曲线可以看出,系统在 Nyquist 频率 50 lp/mm 处 $22^\circ \times 11^\circ$ 的大视场范围内具有良好的成像性能,传递函数接近衍射极限.

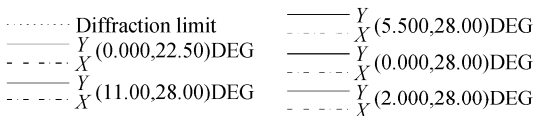
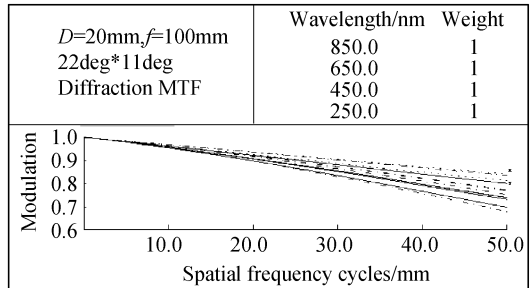
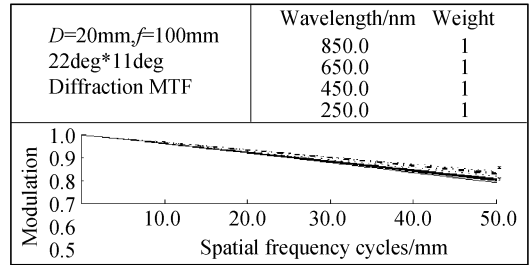


图5 基于 Schwarzschild 系统的大视场三反射光学系统的传递函数曲线

Fig.5 The MTF of the three mirror reflective optical system based on Schwarzschild system

3 系统的工程可实现性分析

此全反射大视场光学系统包括:凸球面反射主镜,它接收反射光源的光;次镜是凹椭球反射面的一部分,它用来接收和反射从凸球面反射主镜的光;第三镜是凹球面反射镜的一部分,它将把从上述凹椭球反射面镜的光汇聚到平焦面上. 在这一系统中,有两个球面反射镜,这对于实际的工程来说优点是非常明显的^[14,15]. 加工和装调的难度和代价大大降低. 第二镜为二次的椭球面镜,也较易加工. 孔径光阑位于上述的第二反射镜和第三反射镜中间光束最细的地方. 这种大视场无遮拦反射光学系统,可以工作在很宽的电磁波谱,从紫外到红外,包括可见光范围的波谱,相比折射系统,没有材料的限制,并准备用于短焦距大视场的月球紫外探测系统中.

参考文献

- [1] FIGOSKI J W. The QuickBird telescope; the reality of large, high-quality, commercial space optics [C]. *Proc of SPIE*, **3779**:22~30.
- [2] RUBEN P L. Aberrations arising from decentrations and tilts [J]. *J Opt Soc Am*, 1964, **54**(1):45~52.
- [3] ROGERS J R. Vector aberration theory and the design of off-axis systems[C]. *Proc of SPIE*, 1985, **554**:76-81.
- [4] SASIAN J M, DESCOUR M R. Power distribution and symmetry in lens systems[J]. *Optical Engineering*, 1998, **37**(3):1001~1004.
- [5] EGDALL I M. Manufacture of a three-mirror wide-field optical system[J]. *Optical Engineering*, 1985, **24**(2):285~289.
- [6] FIGOSKI J W. Development of a three-mirror, wide-field sensor, from paper design to hardware[C]. *Proc of SPIE*, 1989, **1113**:126~131.
- [7] COOK L G. Wide field of view three-mirror anastigmat (TMA) employing spherical secondary and tertiary mirrors[C]. *Proc of SPIE*, 1987, **766**:158~162.
- [8] FIGOSKI J W. Aberration characteristics of nonsymmetric systems[C]. *Proc of SPIE*, 1985, **554**:104~111.
- [9] THOMPSON K. A graphic approach to the analysis of perturbed optical systems[C]. *Proc of SPIE*, 1980, **237**:127~134.
- [10] SHACK R V, Thompson K. Influence of alignment errors of a telescope system on its aberration field[C]. *Proc of SPIE*, 1980, **251**:146~153.
- [11] ROGERS J R. Design techniques for systems containing tilted components[C]. *Proc of SPIE*, 1999, **3737**:286~299.
- [12] FAN Xue-wu, MA Zhen, CHEN Rong-li, *et al.* The design of cassegrain optic system for double infrared wavebands[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(4):463~465. 樊学武, 马臻, 陈荣利, 等. 红外双波段卡塞格林光学系统设计. *光子学报*, 2003, **32**(4):463~465.
- [13] FAN Xue-wu, CHEN Rong-li, MA Zhen, *et al.* A study on the primary aberration theory of decentered and tilted optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4):494~496. 樊学武, 陈荣利, 马臻, 等. 偏心和倾斜光学系统初级像差理论的研究. *光子学报*, 2004, **33**(4):494~496.
- [14] PAN Jun-hua. Comprehensive consideration on aspherical optical system design, fabrication and testing[J]. *Optical Technique*, 2001, **27**(6):566~567. 潘君骅. 非球面光学系统设计、加工及检验的综合考虑. *光学技术*, 2001, **27**(6):566~567.
- [15] FAN Xue-wu, MA Wei-hong, CHEN Rong-li, *et al.* Study on three-mirror reflective optic system having one image surface [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8):1001~1003. 樊学武, 马卫红, 陈荣利, 等. 具有二次像面的三反射光学系统的研究[J]. *光子学报*, 2003, **32**(8):1001~1003.

Study On Wide FOV Reflective Optical System

LIU Bo^{1,2,3}, FAN Xue-wu¹, QU You-shan¹, CHE Rong-li¹

(1 Xi'an institute of Precision Optics and Mechanics, CAS, Xi'an 710068)

(2 Xi'an Institute of Technology, Xi'an 710032)

(3 Graduate School of CAS, Beijing 10039)

Received date:2005-08-23

Abstract On the basic principles of optical design, a wide-field three-mirror-reflective optical system is designed from the Schwarzschild system. The optical system is comprised by two spherical reflective mirrors and one aspheric mirror. Good performance can be achieved among a wide strip field ($22^\circ \times 11^\circ$) at the frequency 50 lp/mm. It can be used in ultraviolet optical systems.

Key words Optical system; Schwarzschild; Optical transfer function



LIU Bo was born in 1964. He received his B. S degree in physics from Beijing University in 1985 and received his M. S degree in Plasma Body from Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics in 1990. Now he is an Associate Professor in Xi'an Institute of Technology, and a Doctor candidate in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, CAS. His research interests include space optics, and image processing.