

新型大视场无遮拦三反光学系统设计

庞志海^{1,2}, 樊学武¹, 邹刚毅¹, 赵惠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, 陕西 西安 710119;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对传统形式三反光学系统难以实现大视场的缺点, 提出了一种基于反望远镜结构的三反光学系统, 并获得初始结构参数求解方程。在反望远镜结构三反光学系统中, 将主、次镜组成反转伽利略望远镜结构形式, 以便简化三反光学系统初始参数的求解方程, 最终通过视场偏置的办法实现无遮拦设计。基于上述方法, 采用光学设计软件 Code V 设计了焦距 $f=100\text{ mm}$, F 数为 5, 视场为 $20^\circ \times 20^\circ$ 。像质评价结果表明, 系统在空间频率为 50 lp/mm 处的 MTF 值均大于 0.6, 像质优良。与其他三反光学系统相比, 该系统不仅具有大视场, 而且仅使用了两块非球面反射镜, 降低了系统成本。

关键词: 光学设计; 反射系统; 三反光学系统; 大视场

中图分类号: TB133 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)09-2449-04

Design of new wide-angle unobscured three-mirror optical system

Pang Zhihai^{1,2}, Fan Xuewu¹, Zou Gangyi¹, Zhao Hui¹

(1. Space Optics Laboratory, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Science, Xi'an 710119, China; 2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: For the disadvantage of conventional three mirrors system to achieve wide field of view, a new-style unobscured three-mirror optical system with wide field of view was designed based on the retrofocus-type objective configuration. One powerful retrofocus design approach was the combination with a reversed Galilean Telescope, the expression of initial configuration parameters was obtained and the unobscured style was carried out by decenter the field. A system with effective focal length of 100 mm, field of view of $20^\circ \times 20^\circ$ and F -number of 5 was designed, the modulation transfer function value at spatial frequency of 50 lp/mm was over 0.6 and image qualities were excellent. Compared with traditional common three-mirror optical systems, the most prominent advantage of this new three-mirror system are that it can provide wide field of view and just use two aspheric mirrors and one spherical, so that the cost of this system will be reduced.

Key words: optical design; reflective system; three-mirror system; wide-angle

收稿日期: 2013-01-10; 修订日期: 2013-02-15

基金项目: 国家“863”计划(Y112G81800); 青年科学基金(Y111B6150Z); 西部之光(Y129341213)

作者简介: 庞志海(1985-), 男, 博士生, 主要从事光学系统设计、检测与装调等方面的研究。Email: uestc_pzh@126.com

导师简介: 樊学武(1972-), 男, 研究员, 博士, 主要从事光学系统设计、检测与装调等方面的研究。Email: 307604830@sina.com

0 引言

反射式光学系统凭借其宽波段、结构紧凑、宜轻量化等优点在航天遥感领域受到科研人员的长期关注,其中应用较多的有两反射镜和三反射镜系统。著名的两反式卡塞格林系统能很好地校正球差和彗差,但有相当大的像散和场曲,限制了视场的扩大,一般能达到的视场在 1° 以内,虽然加上第三块反射镜后可以校正更多的三级像差,扩大系统视场,但其效果并不明显,一般在 10° 以内^[1-3]。在大视场反射光学系统设计过程中,为了得到较大视场,国内目前大都采用长条形视场的方式(Y 方向的视场较小,为了克服该方向像差难校正的缺点)^[3-5],而真正的圆形宽视场三反射系统全视场不超过 4° 。

文中介绍了一种新型的基于反摄远结构的三反光学系统设计方法,由计算同轴三反光学系统基本结构参数的方程组出发,选用反摄远型式的反转伽利略望远镜为基本结构,采用偏视场的方式实现无遮拦,设计了视场为 $20^\circ \times 20^\circ$ 的离轴三反光学系统。该系统主镜为球面,次镜、三镜为非球面,系统像质良好,具有大视场及易于制造的优点,适用于大视场要求的相机光学系统。

1 设计原理

离轴三反射光学系统是以共轴三反射系统为初始结构进行孔径离轴或视场偏置优化而得到的。传统的三反光学系统的光焦度分配遵循^[6-7]“正+负+正”的原则。为了实现大视场反射光学系统的设计,采用可以实现大视场的反摄远结构^[8]来获得三反光学系统的初始参数,光学系统的光焦度分配遵循“负+正+正”的原则。为便于分析,假设三反系统中各反射镜均为薄透镜,采用反摄远结构的三反系统的初始结构参数(如图 1 所示):主镜 M1、次镜 M2、三镜 M3 的曲率半径分别为 r_1 、 r_2 、 r_3 ;M1 与 M2 之间的间隔

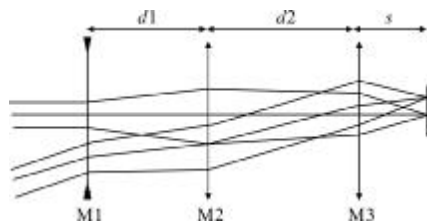


图 1 反摄远三反光学系统示意图

Fig.1 Structure of the retrofocus three mirror optical system

为 d_1 ,M2 与 M3 的间隔为 d_2 ,系统的后截距为 s 。

为使光学系统平像场(消除场曲)^[9]满足给定的焦距 f 及后截距 s ,由初级像差及高斯光学理论可以得到三反光学系统的初始结构求解方程:

$$\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} = 0 \quad (1)$$

$$r_1 r_2 r_3 / (2r_2 r_2 + 2r_1 r_3 + 2r_1 r_2 + 8d_1 d_2 - 4r_1 d_2 - 4r_3 d_1 - 4r_2 d_1 - 4r_2 d_2) = f \quad (2)$$

$$1 - \frac{2d_2}{r_2} + \frac{4d_1 d_2}{r_1 r_2} - \frac{2d_1 + 2d_2}{r_1} = \frac{f}{s} \quad (3)$$

式中: f 为光学系统的焦距; r_1 、 r_2 、 r_3 分别为三个镜面的顶点曲率半径。在焦距 f 一定的情况下,选择合适的光学系统后截距 s 以及两个间隔 d_1 和 d_2 ,并将其带入方程(1)~(3)中,可以求出三个镜面的顶点曲率半径 r_1 、 r_2 、 r_3 ,利用光学设计软件将上述参数优化即可获得反摄远三反光学系统结构。

为简化系统初始参数的求解方程,采用反转伽利略望远镜结构作为反摄远三反光学设计起点。将主镜(负光焦度)、次镜(正光焦度)组成反转伽利略无光焦度结构,则三镜的焦距与系统的后截距相等(如图 2 所示)。由于主镜、次镜的焦点重合,所以组成的反转伽利略望远镜结构的反射远三反光学系统满足:

$$\frac{r_1}{2} + \frac{r_2}{2} = d_1 \quad (4)$$

将公式(4)带入公式(2)、(3)化简可得:

$$\frac{r_3}{2} \cdot \frac{-r_1}{r_2} = f \quad (5)$$

$$\frac{r_3}{2} = s \quad (6)$$

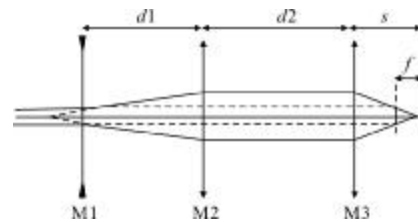


图 2 反转伽利略望远镜结构

Fig.2 Structure of the reversed Galilean telescope

将光学系统平像场的条件公式(1)和公式(5)、(6)组合即可得到由光学系统焦距 f 和后截距 s 所表示的系统初始结构:

$$r_1 = 2(f - s) \quad (7)$$

$$r_2 = 2s \left(\frac{s}{f} - 1 \right) \quad (8)$$

$$d_1 = \frac{(f - s)}{f} \quad (9)$$

若已知系统焦距 f , 则通过选择合适的后截距 s 即可由公式(6)~(9)获得基于反转伽利略结构的反摄远三反光学系统的初始结构参数, 而选取适当的偏视场和次镜与三镜的间隔即可获得合理的系统初始结构。

2 设计实例与性能分析

根据理论公式给出了具体的设计实例, 要求系统的焦距为 100 mm, 全视场为 $20^\circ \times 20^\circ$, F 数为 5, 工作波段为 $0.45 \sim 0.75 \mu\text{m}$ 可见光波段, 所用 CCD 像素尺寸大小为 10。选取系统的后截距为 200 mm, 带入公式(6)~(9)可获得三反光学系统的初始参数 r_1 、 r_2 、 r_3 、 d_1 值分别为 -200、400、400、100, 选择次镜和三镜的间隔 d_2 为 200 mm, 并将 Y 方向的中心视场偏置 -35° (Y 方向视场角为 $-25^\circ \sim -45^\circ$), 将此初始结构的参数输入到光学设计软件 CODE V 中可得系统的初始结构, 如图 3 所示。

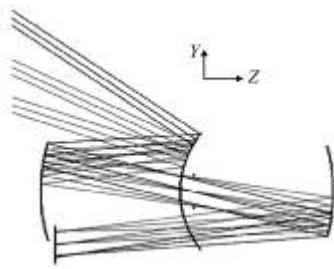


图 3 初始反摄远三反结构

Fig.3 Structure of the initial retrofocus three mirror system

由于在初始结构中各个反射面均为球面, 系统中可以用来校正像差的变量较少, 初始结构的 MTF 曲线较差。利用光学设计软件 CODE V 对初始反摄远三反结构进行优化以提高系统的成像质量, 系统中可以优化的变量有主镜、次镜、三镜的曲率半径及非球面系数和两个间隔。由于采用反摄远结构, 系统的主镜为凸反射面, 而大口径凸非球面反射镜的制造和检测仍然为光学冷加工中的难点。因此, 在满足系统像质要求的情况下, 要求主镜尽量采用球面反射镜以降低系统的制造难度。仅将次镜和三镜非球面化对系统进行优化, 在优化过程中应注意以下问题: (1) 控制主次镜的间隔使得次镜上边缘不与入射到主镜的光束发生遮挡; (2) 主镜下边缘不与次镜反射的光束发生遮挡; (3) 孔径光阑(STOP)的上下边缘均不对光束发生遮挡, 最后得到的最终系统结构如图 4 所示, 系统的参数如表 1 所示。系统的总长为 295 mm, MTF 曲线如图 5 所示, 系统点列图及其直

径均方根如图 6 所示。

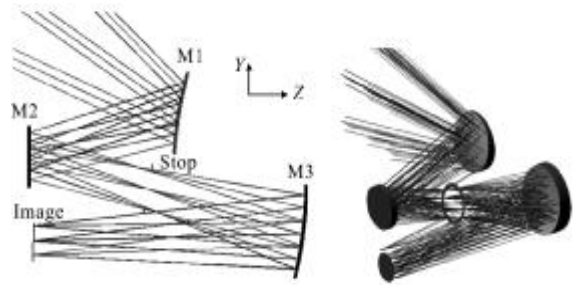


图 4 最终反摄远三反光学系统

Fig.4 Structure of the final retrofocus three mirror system

表 1 优化后的系统参数

Tab.1 Optimized parameters of system

Surface	R	K	A	B	Thick-ness
Primary mirror	414.65	0	0	0	-150
Secondary mirror	1 468.96	-7.721	-7.702E-10	-6.687E-15	125
Stop	NA	NA	NA	NA	165
Third mirror	-522.84	-8.987	-7.349E-9	9.001E-11	-286

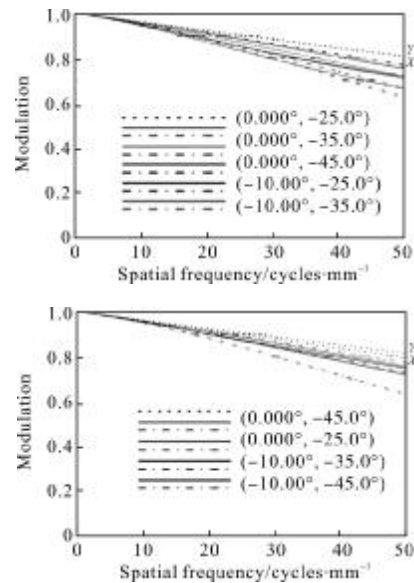


图 5 最终系统 MTF 曲线

Fig.5 Modulation transfer function curves of final system

由图 5 可以看出, 在系统主镜为球面反射镜的情况下(次镜、三镜均用到了六次非球面系数), 系统各个视场在截止频率 50 lp/mm 处的 MTF 值均大于 0.6, 而且由图 7 可知系统全视场内的像斑最大不超过 8, 全视场内的像差均衡, 像质接近衍射极限。参考文献[10]指出对于大偏置视场的反射系

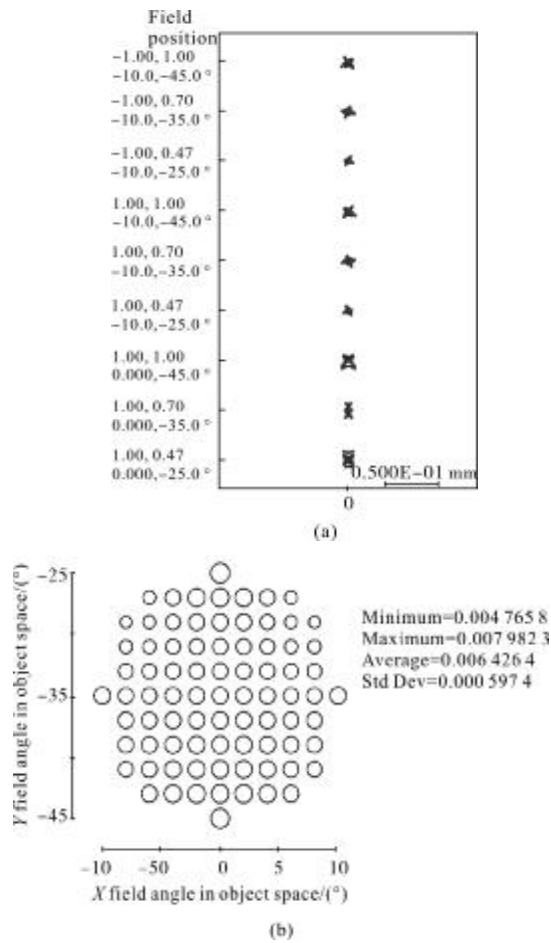


图 6 最终系统的点列图及其直径均方根

Fig.6 Spot and RMS spot diameter diagram of final system

统,在评价计算系统的畸变时不能按照传统的方法以轴上视场为参考点,应当将偏置视场的中心作为计算评价系统畸变的参考点。光学设计软件 CODE V 中 Field Map 的 Calibrated Distortion 选项具有此项功能,将畸变以矢量的形式在全视场内表现出来,由图中可知以偏置视场为计算参考点的最大畸变为 1.36%。

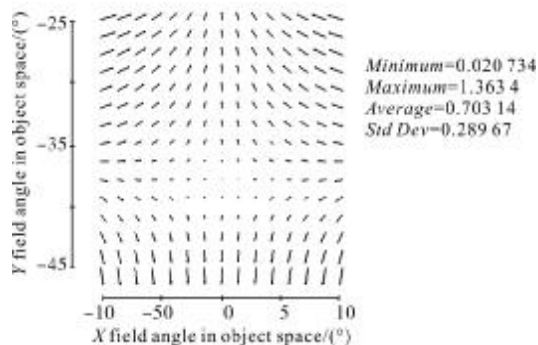


图 7 最终系统的畸变全视场显示

Fig.7 Full field display of calibrated distortion of final system

4 结 论

文中提出了一种反摄远结构的大视场三反光学系统的设计方法,得到了基于反转伽利略望远镜结构的反摄远三反光学系统初始参数求解方程。通过设计实例可以看出系统的成像质量良好,接近衍射极限,但是系统的结构较长(约为焦距的 3 倍),这是由于采用反摄远型结构使主平面后移所致。与其他三反射光学系统相比,文中的结构有两个优点:首先,采用反摄远结构可以实现较大的圆形视场,全视场为 $20^\circ \times 20^\circ$;其次,主镜采用球面反射镜,降低了系统的制造成本,且系统的像质优良。基于反摄远结构三反光学系统可以实现大的视场角,在要求大视场、宽波段的相机光学系统中具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] Guo Yongxiang, Li Yingcai, Liang Tianmei, et al. Optical design of the uncoaxial three mirror system with wide field of view [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30 (9): 2680-2683. (in Chinese)
- [2] Li Huan, Xiang Yang. Design of 10 FOV telecentric off-axis three-mirror anastigmatic telescope [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(9): 2256-2260. (in Chinese)
- [3] Zhang Liang, An Yuan, Jin Guang. Optical design of the uncoaxial three mirror system with wide field of view and long focal length [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(2): 278-280. (in Chinese)
- [4] Zhao Wencai. Design of improved off-axis TMA optical systems [J]. Opt Precision Eng, 2011, 19 (12): 2837-2843. (in Chinese)
- [5] Chen Haofeng, Li Yingcai, Fan Chao, et al. Design of off-axis three mirror reflective optical system with large field of view and long focal length [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(S1): 142-145. (in Chinese)
- [6] Song Yanfeng, Shao Xiaopeng, Xu Jun. Off-axis three-mirror reflective optical system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(4): 706-709. (in Chinese)
- [7] Ding Xuezhan, Wang Xin, Lan Weihua, et al. Design of four-mirror reflective anastigmat optical system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(2): 319-321. (in Chinese)
- [8] Hallam K L, Howell B J, Wilson M E. Wide-angle flat field telescope: US, 4598981 [P]. 1986.
- [9] Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces [M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004: 130-135. (in Chinese)
- [10] Owen R C. Easily fabricated wide angle telescope [C]//SPIE, 1990, 1354: 430-433.