

文章编号 1004-924X(2011) 07-1444-07

三线阵测绘相机光学系统的设计和公差分析

王 红, 田铁印^{*}
(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所
中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要: 针对三线阵测绘相机光学系统设计的指标要求, 综合考虑空间环境适应性、结构布局等因素, 采用像方远心光路设计了一种兼具匹兹瓦型与对称型优点的新型光学系统结构。该系统在 Nyquist 频率 77 lp/mm 时, 正视相机全视场的平均传递函数为 0.613, 前、后视相机全视场的平均传递函数为 0.578; 正视相机畸变为 2×10^{-5} , 前、后视相机畸变为 2.4×10^{-5} 。运用公差的灵敏度分析和反转灵敏度分析, 计算了系统内各公差参数对光学系统成像质量的影响, 给出合理的公差要求及合适的补偿调整参数。按给定的公差要求, 加工、装调了具有较高成像质量的光学系统。实验检测结果表明, 各相机光学系统传递函数的测试值均在 0.451 以上, 满足实验室静态传递函数 > 0.2 , 相对畸变 $< 3 \times 10^{-4}$ 的指标要求, 制定的公差合理、可行, 验证了公差分析与研究方法的正确性。

关 键 词: 三线阵测绘相机; 光学设计; 公差分析
中图分类号: V447.3; TH703 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20111907.1444

Design of three line array mapping camera and its tolerance analysis

WANG Hong, TIAN Tie-yin^{*}
(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)
^{*} Corresponding author, E-mail: tiantieyin@ciomp.ac.cn

Abstract: According to the configurations of optical system in a three line array mapping camera, a new optical system integrated with excellent features by Petzval and symmetry was designed based on a telecentric path to meet the requirement of stereoscopic mapping. The system shows a good imaging quality, and the MTF value of each lens is close to the diffraction limit at the Nyquist frequency of 77 lp/mm. Furthermore, the distortion of each optical system is less than 2.0×10^{-5} for the straight-sight camera and 2.4×10^{-5} for forward-sight and backward-sight cameras. Sensitivity analysis and inverse sensitivity analysis were used to compute the effect of each tolerance parameter on the optical system performance, and the proper tolerance requirements and compensators were determined. On the basis of tolerance given, the optical system with high image quality and low distortion was fabricated and assembled. The tested result shows that the MTF of each optical system can reach 0.451 at the Nyquist frequency of 77 lp/mm, which meets the requirements for static MTF more than 0.2 and relative dis-

ortion less than 3×10^4 and proves that tolerancing analysis methods are correct and feasible.

Key words: three line array mapping camera; optical design; tolerance analysis

1 引言

随着计算机功能的日益强大以及设计软件水平的提升, 光学设计与光学工程水平持续提高。目前, 光学设计的关键步骤之一是将理论设计转化为函数关系, 从而实现公差分配。理论上, 这样做可以确保以最小的成本(至少在预算时是)使光学设计结果满足系统要求^[1]。

公差的分配在任何光学系统设计中都是必需的, 因为一个理论上设计得再好的结果, 在光学加工与装调过程中都不可避免地产生误差, 使最终结果偏离设计结果, 而正确地分配公差可使光学系统性能(如成像质量)、加工周期和成本等之间达到一个合适的平衡。因此, 选择一个好的公差分配方法, 对于加工、装调满足性能要求的系统, 效果将事半功倍。

通常情况下, 根据光学系统指标要求进行设计与优化会得到很多满足性能要求的设计结果, 这样需要分析和判断哪个设计型式最适合加工与装调。最好的设计型式的确定, 应该综合考虑可加工性、像差平衡、系统装调与测试等多方面的因素, 如果设计的结构型式要求光学元件有严格的公差, 就会加大加工与装调的难度, 甚至无法实现。所以在光学设计完成之后, 对其进行公差的分析与研究, 合理分配公差是必要的^[2]。

三线阵立体相机的光学系统决定了相机的外形尺寸和布局^[3], 为保证相机的小型化、轻量化及稳定性, 光学设计必须根据光学系统设计指标要求, 综合考虑空间环境适应性、结构布局等因素。

本文根据三线阵立体 CCD 测绘相机的参数要求, 采用像方远心光路, 设计了一种兼具匹兹瓦型与对称型优点的新型光学系统结构, 通过优化设计, 得到满足测绘精度要求的高成像质量光学系统, 运用灵敏度分析、反转灵敏度分析方法对光学系统的公差进行了分析与研究, 对光学元件公差进行了分配, 提出合适的调整环节。运用蒙特卡罗法预测分析了光学系统的性能, 最终通过

光学实验和检测验证了分析方法的准确性和可行性。

2 光学系统设计

三线阵 CCD 立体测绘相机的光电扫描成像部分由光学系统焦面上的 3 个线阵 CCD 传感器组成, 3 个线阵 CCD 相互平行排列并与航天飞行器飞行方向垂直。当航天飞行器飞行时, 每个 CCD 以一个同步的周期 N 连续扫描地面并产生 3 条相互交迭的条带图像, 这 3 个 CCD 的成像角度不同。

垂直对地成像的相机称为正视相机, 向前倾斜成像的相机为前视相机, 而向后倾斜成像的相机称为后视相机。前、后视相机具有一定的交角^[4]。

2.1 设计参数

三线阵立体测绘相机光学系统参数如下:

焦距: 正 视 $f = 650.00 \text{ mm}$

前、后视 $f = 717.20 \text{ mm}$

相对孔径: $D/f = 1/5$

视场: 正 视 $2 = 6.88$

前、后视 $2 = 6.23$

波段: $0.51 \sim 0.69 \text{ m}$

2.2 光学设计传递函数及相对畸变的要求

在工程光学应用中, 当光学系统视场角较小时, 光学系统的传递函数 $\text{MTF}_{\text{optic}}$ 和由 CCD 接收器及电子线路决定的 MTF_{CCD} 近似于满足线性关系, 所以相机的实验室静态传递函数可由 $\text{MTF}_{\text{optic}}$ 和 MTF_{CCD} 的乘积确定。同样, $\text{MTF}_{\text{optic}}$ 由光学设计的 $\text{MTF}_{\text{design}}$ 和加工装调引起的 $\text{MTF}_{\text{alignment}}$ 的乘积确定^[5], 即 $\text{MTF}_{\text{optic}} = \text{MTF}_{\text{design}} \text{MTF}_{\text{alignment}}$, 那么

$$\text{MTF}_{\text{static}} = \text{MTF}_{\text{design}} \text{MTF}_{\text{alignment}} \text{MTF}_{\text{CCD}}$$

其中, 取 $\text{MTF}_{\text{alignment}} = 0.80$, 所选 CCD 器件及电子线路的平均传递函数 $\text{MTF}_{\text{CCD}} = 0.50$, 为了满足 $\text{MTF}_{\text{static}} \geq 0.2$ 的技术指标要求, $\text{MTF}_{\text{design}}$ 必须满足

$MTF_{design} = 0.50$

所选 CCD 器件的像元尺寸为 $6.5\text{ }\mu\text{m}$, 其 Nyquist 频率为 77 lp/mm , 在这样高的频率下, 相机静态传递函数要求大于 0.2, 可见光学设计、加工、装调等的难度均较大, 加工装调后光学系统的传递函数要求大于 0.4。

为了满足测绘精度的要求, 要求光学系统的相对畸变小于 3×10^{-4} 。

2.3 光学系统设计结果

优化设计了一种亚对称型光学系统结构, 这种结构兼具匹兹瓦型与对称型的优点, 并能够设计成像方远心光路, 可满足测绘的精度要求^[6]。

前、后视相机的视场角小于正视相机, 设计中减少一片透镜同样可以满足使用要求。正视相机光学系统结构如图 1 所示, 前、后视相机光学系统如图 2 所示。

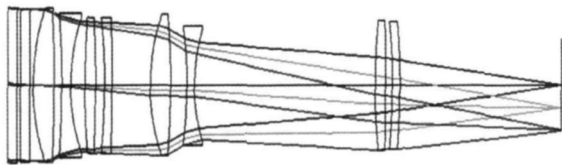


图 1 正视相机光学系统结构图

Fig. 1 Configuration diagram of optical system for straight-sight camera

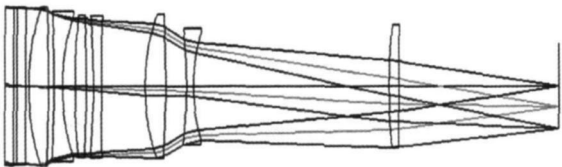


图 2 前、后视相机光学系统结构图

Fig. 2 Configuration diagram of optical system for forward-sight and backward-sight cameras

2.4 光学系统成像质量评价

表 1 为正视和前、后视光学系统的传递函数, 图 3 为正视光学系统传递函数曲线, 图 4 为前、后视光学系统的传递函数曲线, 图 5 为正视相机光学系统的场曲和畸变曲线, 图 6 为前、后视相机光学系统的场曲和畸变曲线。对于正视相机光学系统, 畸变为 2×10^{-5} ; 对于前、后视相机光学系统, 畸变为 2.4×10^{-5} , 满足小于 3×10^{-4} 的指标要求。

表 1 正视和前、后视光学系统的传递函数

Tab.1 MTF values of systems in cameras

光学系统	MTF (频率: 77 lp/mm)					
	0	0.5	0.71	0.85	1.0	平均
正视	0.624	0.619	0.617	0.617	0.589	0.613
前、后视	0.586	0.572	0.573	0.581	0.576	0.578

可见, 正视和前、后视相机光学系统设计的传递函数均满足 $MTF_{design} > 0.50$ 的要求。

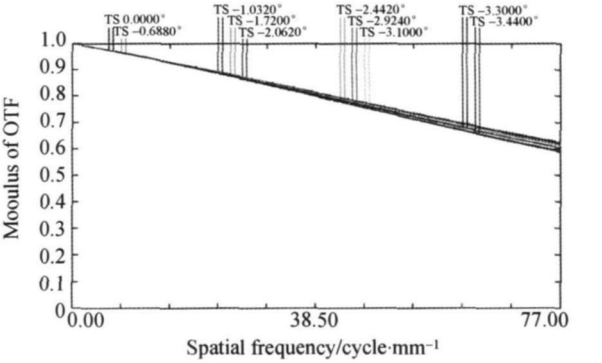


图 3 正视光学系统传递函数曲线

Fig. 3 MTF curves of optical system for straight-sight camera

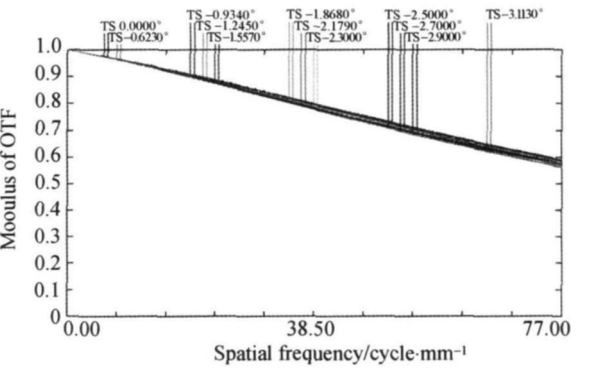


图 4 前、后视光学系统的传递函数曲线

Fig. 4 MTF curves of optical systems for forward-sight and backward-sight cameras

3 公差分析

3.1 公差分析方法

首先, 给光学系统内的所有参数分配可变公差, 如果系统对某一参数的变化很敏感, 系统需要很高的性能水平, 那么对该组公差要求应该严, 反之则可以采用较为宽松的公差。

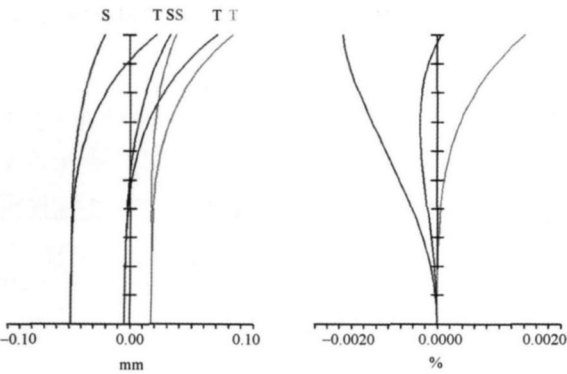


图 5 正视相机光学系统的场曲和畸变

Fig. 5 Image field curvature and distortion curves of optical system for straight-sight camera

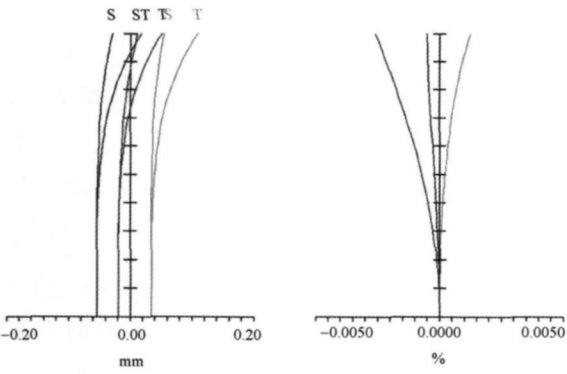


图 6 前、后视相机光学系统的场曲和畸变

Fig. 6 Image field curvature and distortion curves of optical systems for forward-sight and backward-sight cameras

对于三线阵立体测绘 CCD 相机而言, 由于对光学系统成像质量要求高, 不仅传递函数要求高, 而且对畸变的要求也高, 所以对各光学元件公差要求相对较严。运用 ZEMAX 软件中的公差计算与分析程序计算光学系统内各参数性能下降的敏感度, 即分析所有元件的加工、装调公差, 确定敏感度。公差参数包括: 半径、光学元件厚度、空气间隔、偏心、折射率、阿贝数和玻璃不均匀性。也包括其它因素, 如热环境影响等。

其次, 在分析公差敏感度的过程中, 需要选择合适的调整参数。调整参数是只在最终光学系统装调时允许的调整环节, 选择合适的调整环节, 对降低其它参数公差的范围, 确保光学性能满足指标要求是十分必要和有效的。一般地, 后截距是最常用的调整参数, 总是用作系统最终装调期间的最后调整参数, 原则上还可以有其它调整参数,

如: 空气间隔、倾斜和偏心等。

计算分析每个初始公差组的性能敏感度, 对于三线阵立体测绘 CCD 相机, 其性能判据是 77lp/mm 处的传递函数, 需要考虑每个公差参数, 其光学性能下降的情况, 将 ZEMAX 软件不能分析的其它影响加入到性能下降的预算中, 预先分析总的光学系统性能误差; 对敏感的光学元件, 给出较严的公差, 对于非敏感的光学元件, 可以放松其公差要求;

最后, 通过灵敏度分析、反转灵敏度分析及蒙特卡罗分析得到合理的公差分配及对光学系统性能的预算结果^[7]。

3.2 公差分配结果

使用设计软件中的公差分析程序, 计算光学系统各公差参数性能下降的敏感度, 对所有光学元件的加工、装调进行了公差分析计算, 公差参数包括半径、对光学样板的光焦度匹配、表面不规则性、元件厚度、空气间隔、元件偏心、折射率、阿贝数及玻璃的不均匀性等。运用 ZEMAX 光学设计软件, 通过灵敏度分析、反转灵敏度分析及蒙特卡罗分析得到正视、斜视相机合理的公差分配。

计算在 Nyquist 频率 77 lp/mm 处的 MTF, 通过分析每一公差参数在该空间频率下的 MTF 下降情况, 最终确定合适的公差。表2是正视相

表 2 正视相机光学系统公差要求

Tab. 2 Tolerance demands of optical system for straight-sight camera

元件序号	N, N'	d	$l/()$
1		0.05	
		0.03	
2		0.05	
		0.03	
3	1, 0.1	0.03	5
	1, 0.1	10.043	5
4	1, 0.1	0.02	5
	1, 0.1	0.01	5
5	2, 0.2	0.02	8
	1, 0.1	0.01	8
6	1, 0.1	0.02	8
	2, 0.2	0.02	8
7	1, 0.1	0.03	5
	1, 0.1	21.788	5
8	1, 0.1	0.02	5
	1, 0.1	0.04	5
9	2, 0.2	0.02	10
	2, 0.2	0.01	10
10	2, 0.2	0.02	12
	2, 0.2	216.403*	12

机光学系统的公差要求,表 3 是前、后视相机光学系统的公差要求。

表 3 前、后视相机光学系统公差要求
Tab.3 Tolerance demands of optical systems for forward-sight and backward-sight cameras

元件序号	N, N	d	$l()$
1		0.05	
		0.03	
2		0.05	
		0.03	
3	1, 0.1	0.03	5
	1, 0.1	8	5
4	1, 0.1	0.02	5
	1, 0.1	0.01	5
5	2, 0.2	0.02	8
	1, 0.1	0.01	8
6	1, 0.1	0.02	8
	2, 0.2	0.02	8
7	1, 0.1	0.03	5
	1, 0.1	29.6	5
8	1, 0.1	0.02	5
	1, 0.1	0.04	5
9	2, 0.2	0.02	10
	2, 0.2	228.694*	10

表中: N, N 为元件表面的光圈和局部光圈要求, d 为厚度及空气间隔的公差要求, 为光学元件的偏心要求; 带* 的为复算后的可调整参数。

对光学系统公差灵敏度的分析表明, 元件的厚度、偏心为敏感公差, 正视、斜视相机的敏感公差均位于元件 3, 4, 7, 8。因此, 需要严格保证这些光学元件的加工与装调公差, 其它元件可以适当放宽公差要求。同时, 准确分析并判断合适的补偿、调整环节, 可以适当放松某些光学元件的公差要求, 降低加工难度, 最终实现高精度、高性能要求的光学系统加工与装调。

3.3 光学系统性能预测

确定各元件公差后, 每个公差都为正态概率的分布形式, 所有的结构参数在一个范围内变化, 在正、负公差极值间变化, 整个光学系统的性能也在一个范围变化。评价全部公差是否合适的有效

方法是进行蒙特卡罗分析(Monte Carlo Analysis)。

计算分析了 500 个 Monte Carlo 样本, 每个样本实际上就是一个模拟加工、装调后的光学系统。通过计算光学系统各视场的 MTF 及视场内的平均 MTF, 得到相关的统计结果, 如表 4 所示。

表 4 光学系统的蒙特卡罗分析结果
(Nyquist 频率:77 lp/ mm

Tab.4 Monte Carlo analysis results of optical systems

蒙特. 卡罗系统	MTF	
	正视相机	前、后视相机
90%	0.43	0.42
50%	0.52	0.51
10%	0.59	0.56

公差的分析结果表明: 按照设置的公差加工、装调后, 90% 以上的正视相机光学系统的 MTF 0.43; 90% 以上的前、后视相机光学系统的 MTF 0.42, 可以满足光学系统静态传递函数的要求。

4 实测结果

各相机光学系统完成装调、注胶、振动后进行传递函数测量。采用 Optiks Corporation 的成像分析系统进行光学系统传递函数的测量, 得到的实测结果如表 5 所示。图 7、图 8 和图 9 分别为正视、前视和后视相机光学系统轴上传递函数的测试曲线, 由于轴上、轴外视场的传递函数比较一致, 所以只给出轴上传递函数的测试曲线。

表 5 正视和前、后视相机传递函数实测结果
Tab.5 MTF tested results of each camera

光学系统	MTF (频率: 77lp/mm)					
	0	0.5	0.71	0.85	1.0	平均
正视	0.463	0.449	0.465	0.432	0.447	0.451
前视	0.447	0.461	0.461	0.460	0.432	0.452
后视	0.488	0.452	0.459	0.443	0.444	0.457

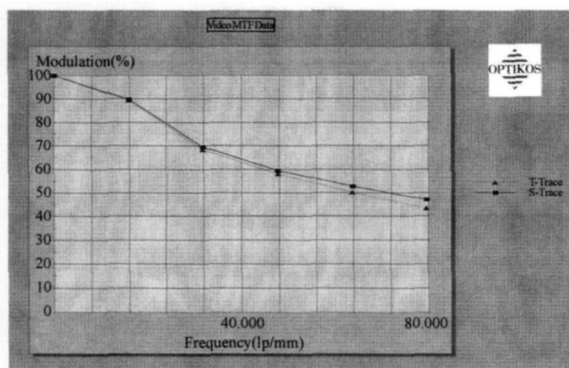


图 7 正视相机光学系统传递函数测试曲线

Fig. 7 MTF tested curves of optical system for straight-sight camera

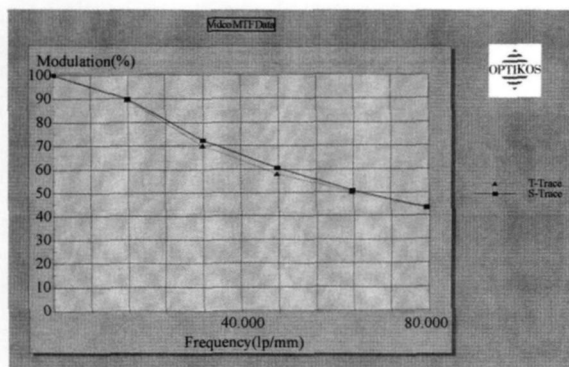


图 8 前视相机光学系统传递函数测试曲线

Fig. 8 MTF tested curves of optical system for forward-sight camera

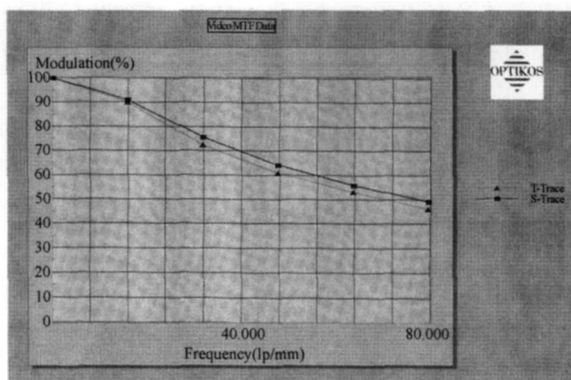


图 9 后视相机光学系统传递函数测试曲线

Fig. 9 MTF tested curves of optical system for backward-sight camera

5 结 论

本文对光学系统各光学元件的公差进行了分析, 给出合适的分析方法。针对三线阵立体 CCD 测绘相机的设计结果, 通过 ZEMAX 光学设计软件, 对各光学参数公差进行分析、计算, 在明确相应的调整参数的前提下, 对光学系统敏感元件和非敏感元件给出了合适的公差要求, 通过蒙特卡罗法的统计分析, 按所给出的公差要求进行了光学加工、装调, 所得结果 90% 以上可以满足光学性能要求。装调完成后, 对各相机光学系统传递函数进行了检测。结果显示, 正视和前、后视相机光学系统的全视场平均传递函数均在 0.451 以上, 满足测绘相机高成像质量的要求, 验证了分析方法的正确性及给出的公差要求的合理性。

参考文献:

- [1] SINCLAIR R L, TRITCHER S, JENNISON P. Tolerancing methodology for an IR optical telescope[J]. *SPIE*, 1990, 1309: 233-243.
- [2] RICHARD N. Youngworth. 21st century optical tolerancing: a look at the past and improvements for the future[J]. *SPIE*, 2006, 6342: 1-15.
- [3] 苗健宇, 张立平, 吴清文. 测绘相机光学镜筒设计、加工及装配[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(9): 1648-1653.
- [4] 田铁印, 王红, 谷凤安. 三线阵立体测绘相机光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(11): 2692-2697.
- [5] 张晓辉, 韩昌元, 潘玉龙. 传输型 CCD 相机综合像质评价方法的研究[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(4): 697-701.

1648-1653. (in Chinese)

TIAN T Y, WANG H, GU F A, Optical system design of three-line array stereoscopic mapping camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2692-2697. (in Chinese)

ZHANG X H, HAN CH Y, PAN Y L, Evaluation of general image quality of transfer optical remote sensing CCD camera [J]. *Infrared and Laser En-*

gineering., 2008, 37(4): 697-701. (in Chinese)
 [6] 胡 葦, 曹喜滨. 三线阵立体测绘卫星的测绘精度分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(5): 695-699.
 HU X, CAO X B. Analysis on precision of stereo mapping microsatellite using three-line array CCD images [J]. *Journal of Harbin Institute of Tech-*

nology., 2008, 40(5): 695-699. (in Chinese)
 [7] ROBERT E. FISCHER. *Optical System Design* [M]. McGraw-HILL, Inc, 2000: 315-352.
 [8] SMITH W J. *Modern Optical Engineering: the Design of the Optical System* [M]. Second Edition. McGraw-HILL, Inc, 1990.

作者简介:



王 红(1968-), 女, 吉林长春人, 研究员, 博士, 主要从事光学遥感器与大型光电经纬仪的研制工作, 研究方向为光学设计. E-mail: wanghong@ciomp.ac.cn

通讯作者:



田铁印(1967-), 男, 吉林长春人. 研究员, 主要从事光学遥感器与大型光电经纬仪的研制工作, 研究方向为光学总体及光学设计. E-mail: tiantieyin@ciomp.ac.cn

下期预告

13.5 nm Schwarzschild 显微镜系统及成像实验

王 新^{1,2,3}, 穆宝忠^{1,2}, 黄 怡^{1,2}, 朱京涛^{1,2}, 王占山^{1,2}, 贺鹏飞³

(1. 同济大学 精密光学工程技术研究所 物理系, 上海 200092;

2. 上海市特殊人工微结构材料与技术重点实验室, 上海 200092;

3. 同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092)

研制了工作波长为 13.5 nm 的 Schwarzschild 成像显微镜。从共轴两镜系统的基本理论出发, 通过消除三级球差、彗差和像散设计了 Schwarzschild 物镜的光学初始结构, 计算了物镜的光学传递函数, 结果表明物镜在 0.3 mm 视场范围内像方空间分辨率可达 550 lp/mm。根据工作波长和镜面的入射角度设计了 Mo/Si 周期多层膜反射镜, 制作了 Schwarzschild 显微镜光学元件, 多层膜元件对 13.5 nm 波长的反射率为 61%。为了消除可见光和紫外光对系统成像的影响, 设计并制备了材料为 Zr、Si 和 Si₃N₄ 的滤波片, 制备的滤波片在 13.5 nm 波长的透过率为 21.1%。利用激光等离子体光源对 60 lp/mm 网格进行了成像实验, 结果表明系统在 0.5 mm 视场内的分辨率优于 3 μm, CCD 探测器分辨率极限是影响成像实验分辨率的主要因素。