

·光电系统·

一种易于制造的空间相机光学系统设计

王洪伟¹, 巩青歌¹, 王彩铃², 张殿富¹

(1. 武警工程大学, 陕西 西安 710086; 2. 西安石油大学计算机学院, 陕西 西安 710065)

摘要:空间技术的不断发展对空间相机光学系统的设计不断提出新的要求, 为了提高相机系统的可靠性, 对系统的面型加工精度有更高的要求。介绍了一种易于制造的空间相机光学系统, 基于R-C系统, 设计了含有三块球面校正镜组件的折反式光学系统。结果表明, 该光学系统在空间频率50 lp/mm处, 调制传递函数均大于0.4, 主镜和次镜均为二次曲面, 其余均为球面, 具有易于制造装调等优点。

关键词:光学设计; 空间遥控设计; 图像质量

中图分类号: O436

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2013)-03-0001-03

Easily Fabricated Optical System Design of Space Camera

WANG Hong-wei¹, GONG Qing-ge¹, WANG Cai-ling², ZHANG Dian-fu¹

(1. Engineering University of Chinese People's Armed Police Force, Xi'an 710086, China; 2. Computer Department of Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: With the development of space technology, new design requirements for optical systems of space cameras are provided. Higher accuracy requirements are provided for system processing so as to improve the reliability of camera systems. An easily fabricated optical system of space camera is introduced. A catadioptric optical system with three pieces of spherical collimating mirror subassembly based on Ritchey-Chretien (R-C) system is designed. It shows that when the space frequency of the system is 50 lp/mm, all the modulation transfer functions are more than 0.4. And the surface of primary and secondary mirror are quadric, the rest is spherical, which has the advantages of easiness in fabrication, installation and debugging.

Key words: optical design; space remote design; image quality

长焦距、高分辨率、高像质的光学系统成为空间光学领域研究的热点。由于像斑大小正比于光学系统相对孔径的倒数, 因此增大焦距的同时, 必须增大口径, 才能保证具有足够高的空间分辨率。但考虑到加工、装配、检测等方面的原因, 光学透镜的口径受到了一定的限制。

目前文献报道中, 衍射面和非球面在光学镜头的应用较多, 如文献[1]中报道了白瑜等人设计了基于衍射光学面的头盔显示光学系统, 文献[2]报道了白瑜等人设计了含有衍射面的红外镜头, 设计了一

个容易加工检测的大口径、长焦距、高分辨率空间相机光学系统, 光学系统口径为1.0 m, 焦距为10.0 m, 视场角为1.2°, 500 km像元分辨率可达0.5 m。

1 光学系统分析

在光学系统的像差足够小时, 光学系统口径的衍射决定了系统的最高分辨率。衍射对系统分辨率的影响由如下艾里斑半径 d 来表征

$$d = \frac{1.22\lambda f}{D} \quad (1)$$

收稿日期: 2013-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(40301031)

作者简介: 王洪伟(1982-), 山东人, 博士, 主要从事工程光学研究。

式中, λ 为波长; f 为光学系统焦距; D 为光学系统口径。

空间相机地面像元分辨率为像面上 CCD 像元尺寸对应的物面尺寸, 等于 CCD 采样的地面采样间距 GSD (ground sample distance)。光学系统的成像质量最好能做到衍射极限, 即像斑直径最小为衍射极限。空间相机的地面像元分辨率由探测器的像元尺寸、轨道高度及光学系统的焦距决定

$$R_{\text{GSD}} = \frac{aH}{f} \quad (2)$$

式中, R_{GSD} 为地元分辨率, H 为轨道高度, f 为光学系统焦距, a 为探测器的像元尺寸。

地面的覆盖宽度将由空间相机的有效视场角 2ω 决定, 当轨道高度 H 一定时, 地面覆盖宽度 W 表示为

$$W = 2 \cdot H \cdot \tan \omega \quad (3)$$

式中, W 为覆盖宽度, ω 为半视场角。

由式(2)、式(3)可知, 在波长、卫星高度和探测器尺寸 a 确定后, 空间分辨率与光学系统相对孔径有关, 当光学系统口径一定时, 在相同的轨道高度条件下, 增大焦距可以提高地面分辨率, 增大系统的视场角可以扩大对地面的覆盖宽度。同时, 增大系统的口径有利于提高空间光学系统的性能。在设计长焦距光学系统时, 很少采用折射式和折反射式结构形式, 一方面是由于大尺寸的光学材料对加工和装调提出的要求极高, 而且对环境温度和压力的变化也特别敏感; 其次由于成像谱段二级光谱消除困难。与折射式和折反射式结构形式相比, 反射式结构形式具有以下特点: (1) 无任何色差, 也不存在二级光谱, 因此可以用于可见光、紫外、红外谱段很宽的谱段成像, 特别适用于遥感和多光谱成像的光学系统; (2) 光学元件数相对较少, 光学系统口径可以做得较大, 且容易实现轻量化设计, 减小相机体积, 使整个光学系统的质量减轻, 适用于空间光学系统的需要; (3) 反射式光学系统对材料要求相对较低, 取材容易, 设计形式非常灵活, 可以借助折转反射镜来折叠光路使结构紧凑, 还可以用非球面来获得大口径、大视场、长焦距等多种性能要求的系统。两反射式光学系统中使用的非球面多为高次非球面, 加工、检测和装调难度较大, 由于两反射式光学系统中主镜口径最大, 主镜的质量决定着整机系统的性能, 如果主镜采用抛物面, 加工精度和检测难度更小, 合理分配各个镜子的光焦度、曲率半径和厚度, 同样可以得到高性能的大口径长焦距高分辨率光学系统。

2 设计实例与性能分析

应用光学设计软件 Code V 设计了一焦距 $f=10\ 000\ \text{mm}$, 入瞳口径 $D=1\ 000\ \text{mm}$, 工作谱段为 $500 \sim 800\ \text{nm}$, 视场角为 1.2° 的大口径长焦高分辨率空间光学系统, 设置合适的优化函数对系统进行优化, 最终优化后得到的光学系统如图 1 所示, 系统采用带有三块校正镜组件的 Ritchey chretien 结构形式。系统主镜采用抛物面面型, 利用补偿法检测抛物面检测难度小精度高。次镜采用双曲面, 双曲面的系数为 -28.638 , 为了有效校正系统中所有像差, 在两反射镜的基础上加入校正组件, 这样系统就有了多个变量可以用于校正像差, 实现大口径长焦距。校正组件为三片式结构, 三片校正组件均为球面镜, 大大减小了加工、检测和装配的难度。

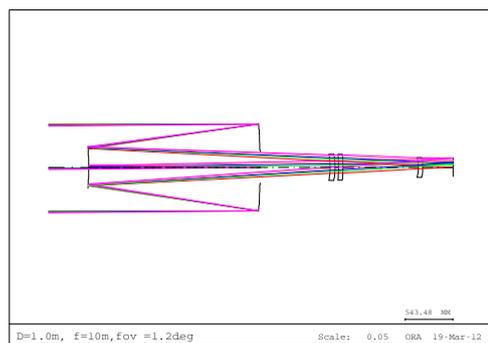


图1 系统形式

图2给出了系统的调制传递函数曲线, 由图2可知, 在空间频率 $50\ \text{lp/mm}$ 时, 所有视场的调制传递函数均接近衍射极限, 各视场 MTF 均优于 0.42 , 且系统无渐晕。

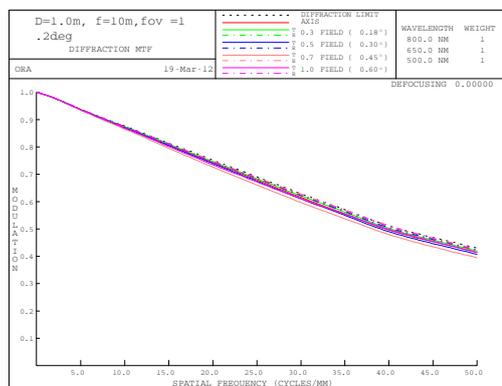


图2 传递函数曲线图

由图3可知, 各视场光线所成像点的半径均方根

值均在 $3.6 \mu\text{m}$ 以内,小于光学系统的艾里斑直径。图4给出了系统像散和畸变图,可知各个视场的像散都很小,光学系统最大视场处的畸变量为0.45%,小于0.5%,该空间光学系统的成像质量优良。当卫星轨道高度为500 km,根据式(3)计算可知,该相机地面的覆盖宽度可达10.47 km。

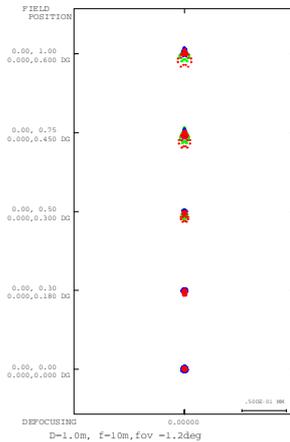


图3 点列图

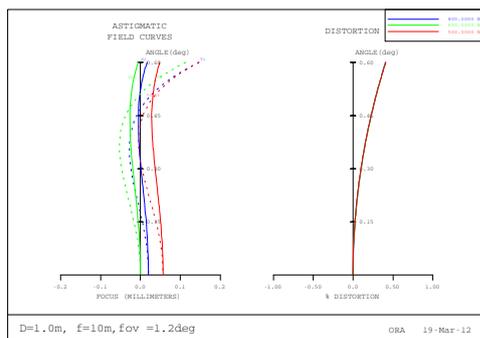


图4 场曲和畸变

3 结论

设计了一个容易加工检测的大口径、长焦距、高分辨率空间相机折反射光学系统,光学系统口径为1.0 m,焦距为10.0 m,视场角为 1.2° 空间频率 50 lp/mm 处,所有视场的调制传递函数均接近衍射极限,成像优良,系统主镜采用抛物面,易于加工检测,三片校正镜均为球面镜,有利于高精度加工检测的实现。

参考文献

- [1] 白瑜,邢廷文,冯成.基于衍射光学的头盔显示光学系统[J].红外与激光工程,2012,41(10):2753-2758.
- [2] 白瑜,杨建峰,李湘眷,等.采用非制冷红外探测器的折衍混合物镜设计[J].光电技术应用,2008,23(4):28-31.
- [3] 姜会林.关于二级光谱问题的探讨[J].光学学报,1981,2(2):225-232.
- [4] 潘君骅.大口径红外成像系统的光学设计[J].光学学报,2003,23(12):1475-1478.
- [5] D Subrahmanyam, Saji A Kuriakose, Pradeep Kumar, et al. Design and development of the Cartosat payload for IRS P5 mission[J]. Proc. of SPIE, 6405:640517-1-640517-10.
- [6] A S Kiran Kumar, A Roy Chowdhury. Terrain mapping camera for Chandrayaan-1[J]. J Earth Syst. Sci. 114, No. 6, 2005:717-720.
- [7] ZHANG Li-ping, WANG Zhi. Design of optical lens for space tridimensional mapping camera[J]. Proc. of SPIE. 7282:728226-1-728226-9.
- [8] Y Osawa, M Hiramatsu, K Ichida. PRISM: A panchromatic three-line-sensors for mapping boarded on ALOS[J]. SPIE. 3498:173-180.

欢迎利用期刊网站浏览本刊已发表文章

为了满足读者对《光电技术应用》期刊文章的快速、方便、阅读需求,《光电技术应用》期刊网站(网址为:<http://www.gdjsyy.com>),为读者提供了《光电技术应用》期刊2009~2012年已发表文章的在线浏览。读者可在过刊目录下,查阅2009~2012年期刊各期目录,点击文章题目或摘要,阅读文章全文。欢迎广大读者登陆期刊网站,及时了解《光电技术应用》期刊已发表文章的最新信息。

《光电技术应用》编辑部