

文章编号: 0253-2239(2010)09-2657-05

消畸变、长焦距相机光学系统设计

李旭阳^{1,2} 李英才¹ 马 臻^{1,2} 易红伟¹ 贺天兵¹

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

(² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 随着空间光学技术的不断发展,时间延时积分电荷耦合器件(TDI-CCD)相机得到了广泛的应用,TDI-CCD图像传感器的应用不仅提高了相机系统的信噪比而且使相机的光机结构更加紧凑,但光学系统的畸变在推扫过程中会造成像移,并最终导致图像模糊,因此对光学系统的设计提出了新的要求。分析了光学系统畸变对TDI-CCD推扫成像时的影响,研究了空间相机光学系统中消除畸变的方法,并进行了光学系统设计。设计了谱段位于450~900 nm,焦距 $f=6000$ mm, F 数为10的三反射消畸变光学系统。设计结果表明,当光学系统视场角为 1.6° 时,光学系统的畸变量小于0.01%,当面中心遮挡为0.06时,Nyquist频率(50 lp/mm)处调制传递函数优于0.50,成像质量达到衍射极限,可以满足高分辨率TDI-CCD空间相机的使用要求。该光学系也适用于多光谱、立体成像和立体测绘等对光学系统畸变有严格要求的相机系统。

关键词 光学设计; 空间相机; 三反消像差光学系统; 长焦距; 消畸变

中图分类号 TH703 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103009.2657

Optical System Design of Space Camera with Long Focal Length and Correction of Image Distortion

Li Xuyang^{1,2} Li Yingcai¹ Ma Zhen^{1,2} Yi Hongwei¹ He Tianbing¹

(¹ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)

(² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract With the development of space optical technology, time delay and integration charge coupled device (TDI-CCD) space camera has been widely applied. TDI-CCD image sensor not only improves signal-noise-ratio(SNR) of the optical system but also makes the opto-mechanical structure of the camera more compact, but the optical system distortion will affect image quality, so the optical system design must satisfy the new demand. The optical system distortion which affects TDI-CCD integral is analyzed. The method of image distortion elimination of space camera optical system is researched. An optical system is designed with distortion correction lens which is characterized by the spectral band of 450~900 nm, focal length of 6000 mm, and F number of 10. The result indicates that the view field angle reaches 1.6° , optical system distortion is less than 0.01%. modulation transfer function reaches 0.50 at 50 lp/mm Nyquist frequency with 0.06 central obscure, and the quality of image reaches the diffraction limit. The designed optical system can meet the demand for the use of high resolution space cameras, and is suitable for multi-spectrum, stereo imaging, and stereo mapping camera system which has little distortion.

Key words optical design; space camera; three-mirror, anastigmatic optical system; long focal length; correction of image distortion

1 引 言

随着空间光学技术的不断发展,时间延时积分

电荷耦合器件(TDI-CCD)相机得到了广泛的应用,国外在轨运行或在研的高分辨率商业卫星大多采用

收稿日期: 2009-10-28; 收到修改稿日期: 2009-12-15

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724006)资助课题。

作者简介: 李旭阳(1981—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事光学设计与光学检测等方面的研究。

E-mail: lixuyang2008@126.com

导师简介: 李英才(1945—),男,研究员,博士生导师,主要从事空间光学方面的研究。E-mail: liyingcai@opt.ac.cn

了 TDI-CCD 传感器^[1]。TDI-CCD 采用对同一目标多次曝光的方法从而使相机系统获得了较高的能量和信噪比,因此采用 TDI-CCD 器件的光学系统的相对孔径可以更小,在相同的通光口径下,光学系统的焦距可以更长,从而获得更高的角分辨率,达到更高的地元分辨率^[2],所以 TDI-CCD 的采用缩小了空间相机的体积和重量,使相机结构更加紧凑。但 TDI-CCD 相机在成像过程中要求 TDI-CCD 的扫描速度与目标运动速度一致,成像才能清晰。当两者的速度产生失配时,将产生像移并最终导致图像模糊。TDI-CCD 相机在轨运行过程中,受到各种因素的影响将使两者产生失配,但在光学设计阶段主要是光学系统的畸变对 TDI-CCD 的积分成像过程产生影响。本文分析了光学系统中的畸变对 TDI-CCD 积分的影响,研究了光学设计过程中消除光学畸变的方法,并进行了光学系统设计。

2 畸变对 TDI-CCD 光学系统的影响

光学系统畸变随着视场角的增大而迅速增大,目前消除光学系统畸变的方法有两种:一种是光学系统装配完成后测量出光学系统各视场的畸变量,然后用各个视场的畸变系数校正最后所得到的图像^[3]。另一种是在光学设计阶段尽可能消除光学系统的畸变量,使其成像质量不影响系统的正常使用。

对于一般的成像系统,畸变仅影响成像的几何位置精度,并不影响图像的清晰度。但对 TDI-CCD 成像系统而言,畸变会引起像移,最终导致成像模糊并影响成像质量。

光学系统的畸变对 TDI-CCD 积分成像的影响如图 1 所示。在 TDI-CCD 推扫方向上起始点的畸变为 $f(\theta)$,在终点的畸变量为 $f(\theta + \Delta\theta)$,则在推扫方向上的畸变量为

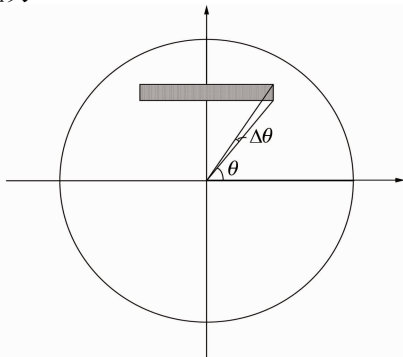


图 1 像面 CCD 排布图

Fig. 1 Image plane CCD configuration

$$D_{\text{dist}} = f(\theta + \Delta\theta) - f(\theta), \quad (1)$$

利用泰勒级数展开,并忽略高次项,(1)式可改写为

$$D_{\text{dist}} = f(\theta + \Delta\theta) - f(\theta) = f'(\theta)\Delta\theta. \quad (2)$$

由(2)式可知,当积分级数越多时, $\Delta\theta$ 值越大,则 TDI-CCD 的积分时间内的光学畸变量也越大,并最终对成像质量影响较大。

光学系统的畸变量与视场角的三次方成比例

$$D_{\text{dist}} = g(\omega^3), \quad (3)$$

式中 ω 为光学系统的半视场角。由(3)式可知,当视场角越大时,光学畸变量也迅速增大,为了使光学畸变量不影响 TDI-CCD 成像,则应该使参与推扫成像的 CCD 尽可能接近光轴,减小畸变对 TDI-CCD 积分的影响。

由以上的分析可知,当光学系统的畸变不大时可以不考虑畸变对 TDI-CCD 积分成像的影响,但当光学系统畸变大到一定程度时,则需要考虑像光学畸变对 TDI-CCD 积分成像的影响。为了减小光学畸变对 TDI-CCD 成像的影响,即可以通过降低 TDI-CCD 的积分级数来实现,也可以通过降低整个光学系统的畸变来实现。但降低 TDI-CCD 相机的积分级数将使系统的能量降低,信噪比下降。但通过降低整个光学系统的畸变量不仅可以减小 TDI-CCD 积分级数对成像的影响,也可以使参与推扫的 TDI-CCD 位于像面上任意位置。

3 光学系统结构分析

在空间光学领域,折射式光学系统存在结构尺寸和二级光谱等问题,需要采用特殊的材料和复杂的结构来消二级光谱,折射式系统虽然视场角可以作得较大,但一般焦距都不长,相对应的地元分辨率都不高,因此应用受到一定的限制。折反式光学系统则存在体积大,口径受限等问题。而反射式光学系统零件数量相对较少,无色差,且容易实现轻量化,使结构紧凑、体积减小、重量减轻,同时在抗热性能方面也有较强的优势。因此反射式光学系统在空间光学领域得到了广泛应用^[4]。而三反消像散系统是最少的可以满足消像差、平像场要求的反射式光学系统,同时由于共轴系统制造、加工和装配方便得到广泛应用^[5,6]。

三反射镜光学系统的初始结构如图 2 所示: M_1, M_2 和 M_3 分别代表三反系统的主镜、次镜和三镜,其结构参数共有 8 个:3 个面的半径 R_1, R_2 和 R_3 ,主镜到次镜的距离 d_1 ,次镜到三镜的距离 d_2 ,3 个反射面的二次非球面系数 $-e_1^2, -e_2^2, -e_3^2$ ^[7]。

三反射光学系统在满足系统焦距及球差、彗差、像散、场曲和畸变条件下剩余 3 个可变参数,如果再给定有关结构方面的 3 个条件,则整个系统就可以确定了。

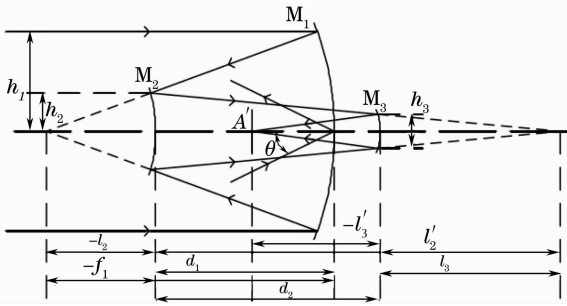


图 2 共轴三反系统的初始结构

Fig. 2 Initial configuration of coaxial three-mirror system

共轴三反射光学系统由于受到自身结构的限制,系统畸变一般不会很小,即使通过放大光学系统的整体尺寸,降低光线的入射高度,或通过缩短主次镜的焦距、提高三镜放大率,在有效视场角内一般不能使整个系统的畸变降低至 0.5% 以下^[8,9]。为了进一步降低光学系统的畸变,常采用将反射镜非球面系数高次化和增加畸变校正反射镜的方法,反射镜面高次化后将使加工和检测难度增大很多,并最终导致整个系统的实现难度增加。增加畸变校正反射镜将增加光学系统的整体尺寸和装配难度,不利于空间相机轻量化设计。

在众多消畸变的方法中,本文通过对比和分析选择了在最终像面前加消畸变校正组件的方法消除系统畸变,消畸变组件采用由熔石英玻璃构成的透镜组组成,透镜组采用正、负透镜分离的形式^[10]。通过采用正负透镜分离的形式,在对原光学系统焦距影响不大的情况下,取入了多个变量,不仅可以有效地消除光学系统的畸变,也可以消除由于使用透镜所引入的位置色差和倍率色差,同时也保证了光学系统的整体尺寸和结构的变化量尽可能的小。

4 光学设计实例

设计了一焦距 $f = 6000$ mm,入瞳直径 $D = 600$ mm,相对孔径 $D/f = 1/10$,视场角 1.6° ,工作波段为 $450 \sim 900$ nm 的折轴三反射式消畸变光学系统,采用的 TDI-CCD 传感器的像敏单元尺寸为 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$,光学系统的 Nyquist 频率为 50 lp/mm。

一个好的初始结构是光学设计的前提,本文的初始结构根据三反光学系统的初始结构公式可计算得到:入瞳位于主镜上,主镜为接近抛物面的椭球

面,同时为了缩小主次镜的间隔,主镜采用大相对孔径的反射镜^[11,12]。次反射镜为凸双曲面,第三反射镜采用椭球面。具体光学参数如表 1 所示。

表 1 光学系统参数

Table 1 Optical system parameter

Name	Radius /mm	Distance /mm	Conic
Primary mirror	1900	792	-0.9532
Second mirror	460	1046	-2.037
Fold mirror	infinity	476	0
Third mirror	732	851	-0.5054

加入畸变校正组件后并用光学设计软件 CODE V 优化得到的光学系统光路如图 3 所示。由图 3 可知所示的光学系统可知,由于消畸变透镜组的引入改变了光线的入射角度和高度,使主镜、次镜和三镜的二次曲面系统发生了一定的变化,其它光学系统参数基本不变。光学系统的长度介于系统焦距的 $1/6 \sim 1/7$ 之间,由正、负透镜组成的校正组件位于像面邻近,第 1 块透镜采用弯月形正透镜,第 2 块透镜采用双曲负透镜。

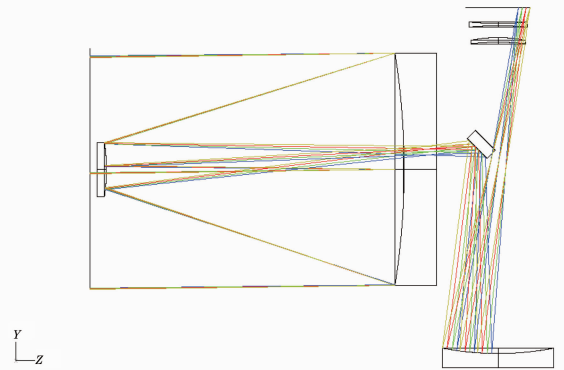


图 3 光学系统光路

Fig. 3 Layout of optical system

为了反映光学系统的成像情况,分别用点列图、调制传递函数和视场畸变和横向色差来评价各个视场的成像质量。

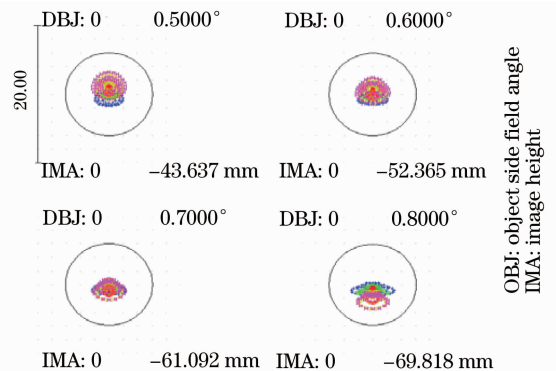


图 4 点列图

Fig. 4 Spot diagram

由图4可知各视场光线所成像点的半径均方根值均在 $1.3\ \mu\text{m}$ 以内,远小于光学系统的艾里斑直径。由图5可知所有视场的传递函数均达到衍射极限,50 lp/mm时各视场 MTF 均达到 0.50,且系统无渐晕。由图6中可知在各个视场基本无像散,有效视场内光学系统的畸变量小于 0.01% 。由图7可知,垂轴色差小于艾里斑直径,因此该光学系统的成像质量基本完好。

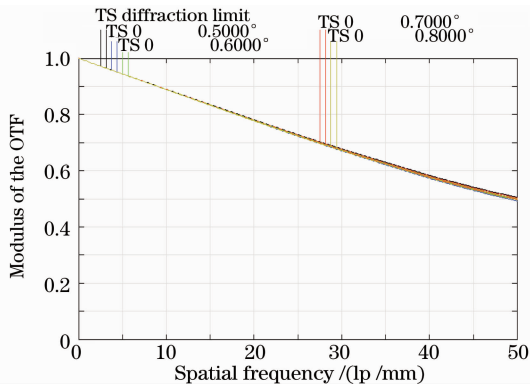


图5 MTF曲线

Fig. 5 MTF curve

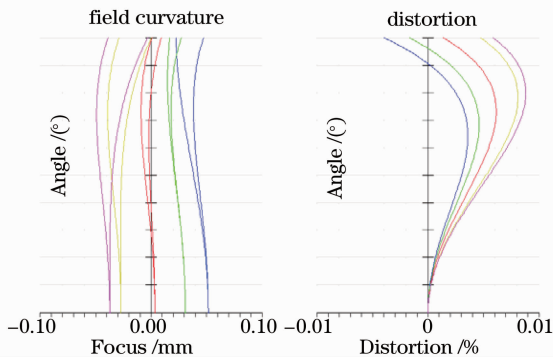


图6 场曲和畸变

Fig. 6 Field curvature and distortion

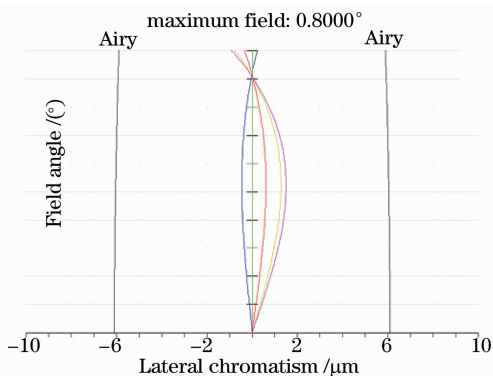


图7 横向色差

Fig. 7 Lateral chromatism

5 结 论

本文采用最终像面前加畸变校正组件所设计的折轴三反光学系统,在 1.6° 的有效视场内,光学系统的畸变量小于 0.01% ,基本上消除了光学系统的畸变。同时各种像差和色差基本得到完全校正,成像质量达到衍射极限。而校正组件均采用由普通玻璃组成的球面镜,大大减小了加工、检测和装配的难度。同时本文所设计的光学系统体积、质量、外形尺寸、适应性、工艺性和造价等都能满足一定的空间应用需求。因此该光学系统可以满足多光谱成像、立体成像和测绘等对光学系统的畸变有严格要求的系统的应用需求。

参 考 文 献

- Zhang Keke, Ruan Ningjuan, Fu Danying. Analysis and consideration of development of overseas space off-axis TMA system camera[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2008, **9**(3): 63~70
张科科,阮宁娟,傅丹鹰. 国外空间用三反离轴相机发展分析与思考[J]. *航天返回与遥感*, 2008, **9**(3): 63~70
- Shi Guanghui. High resolution optical systems used to observation from the satellites to the earth and problems in design[J]. *Opt. Precision Engng.*, 1999, (2): 16~24.
史光辉. 卫星对地观测高分辨率光学系统和设计问题[J]. *光学精密工程*, 1999, (2): 16~24
- Wang Hu, Miao Xinghua, Hui Bing. The distortion correct of short focus wide-angle optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(11): 1409~1412
王 虎, 苗兴华, 惠 彬. 短焦距大视场光学系统的畸变校正[J]. *光子学报*, 2001, **30**(11): 1409~1412
- Xue Mingqiu. On optical system with high spatial resolution and wide angle of view in remote sensing[J]. *J. Suzhou Institute of Silk Textile Technology*, 2000, **20**(1): 1~6
薛鸣球. 高分辨宽覆盖遥感相机光学系统研究[J]. *苏州丝绸工学院学报*, 2000, **20**(1): 1~6
- Fan Xuewu, Ma Zhen, Chen Rongli 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 臻, 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
- Liang Minyong, Liao Ningfang, Feng Jie et al.. Design and optimization of three cylindrical reflectors optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1359~1363
梁敏勇, 廖宁放, 冯 洁等. 三反射式柱面光学系统设计及优化[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1359~1363
- Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces[M]. Soochow University Press, 2004, 12, 32~35
潘君华. 光学非球面的设计、加工与检验[M], 苏州大学出版社, 2004. 12, 32~35
- Li Xuyang, Li Yingcai, Ma Zhen. Coaxial three-mirror-anastigmat system of high-resolution space camera[J]. *J. Appl. Opt.*, 2009, **30**(5): 717~723
李旭阳, 李英才, 马 臻. 高分辨率空间相机共轴三反光学系统实现形式研究[J]. *应用光学*, 2009, **30**(5): 717~723

- 9 M. J. Sholl, M. L. Kaplan, M. L. Lampton. Three mirror anastigmat survey telescope optimization[C]. *SPIE*, 2008, 7010: 70103M1~11
- 10 Pan Junhua. Research on the field corrector design for the R-C system of the large telescope Cassegrain focus[J]. *Opt. Precision Engng.*, 2002, 6(3): 231~234
潘君华. 关于大望远镜卡焦 R-C 系统视场改正镜设计的研究[J], 光学精密工程, 2002, 6(3): 231~234
- 11 M. Lampton, M. Sholl. Comparison of on-axis three-mirror anastigmat telescopes[C]. *SPIE*, 2007 6687: 66870S1~8
- 12 Fu Lianxiao, Wu Yongguang, Li Xinglong *et al.*. Manufacture and test of Cassegrain system's primary mirror with large relative diameter and lightweight[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(4): 764~767
付联效, 吴永刚, 李兴隆等. 大相对口径轻量化卡塞格林系统主镜的加工检验[J], 光学学报, 2008, 28(4): 764~767

Chinese Optics Letters

首个影响因子位列亚洲入选 SCI 光学类期刊第 2 名

根据美国科学信息研究所 (ISI) 2010 年 6 月 18 日公布的期刊引证报告 (JCR), Chinese Optics Letters (COL) 2009 年的 SCI 影响因子为 0.804。

COL 创刊于 2003 年, 2007 年开始即被 SCI 收录。根据 ISI 影响因子的计算方法, JCR 从 2009 年开始首次公布 COL 的影响因子等有关数据。在全球入选 SCI 的 70 种光学类期刊中排名第 39 位 (总被引频次排名第 36 位), 在亚洲 (包括中国、韩国、新加坡、日本等) 入选 SCI 的光学类期刊中排名第 2 (总被引频次排名第 1), 在中国入选 SCI 的 114 种期刊中排名前 40%。

COL 是由中国光学学会和中国科学院上海光学精密机械研究所联合主办, 上海交通大学协办, 美国光学学会 (OSA) 全球发行的国际性英文版学术期刊。COL 创刊时即坚持走国际化办刊路线, 其宗旨是快速、全方位地报道国际光学研究领域的最新理论、实验和技术创新成果。在创刊不久, 即被国际知名检索机构 EI, CA, CSA 收录, 2006 年被 OSA 主办的 OpticsInfoBase 收录 (2009 年 COL 论文在 OpticsInfoBase 的年下载量为 24,137 次, 比 2007 年增长了 3 倍多), 2007~2008 年又相继被 SCI-E 和 MSB-S 收录。

COL 的创刊和现任主编为徐至展院士, 并拥有由 40 多名在光学各个领域有突出成就的专家组成的编委会 (其中国外编委比例超过 20%), 还拥有一支工作在光学科研一线的出色的审稿专家队伍 (其中国外审稿专家比例超过 35%)。在他们的支持和帮助以及编辑部人员的共同努力下, COL 不断成长, 现已发展为国内外光学研究的一个重要的成果传播平台。