

文章编号: 0253-2239(2009)11-3183-03

基于大面阵 CCD 的复消色差航空相机物镜设计

李玉瑶 唐 勇 林昭珩 李 宁

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 为了满足航空相机物镜结构简单及高分辨率的要求, 提出了一种基于波差法校正长焦距、宽波段的大面阵 CCD 航空相机物镜二级光谱的方法。介绍了二级光谱的基本原理, 给出了波差法设计复消色差物镜的方程组。采用普通光学材料设计了复消色差航空相机物镜, 系统焦距为 400 mm, 相对孔径为 $F/4$, 工作波段为 420~850 nm。给出了光学系统图、纵向像差图及调制传递函数图。设计结果表明, 采用该方法设计的航空相机物镜在 60 lp/mm 处各视场传递函数均在 0.75 以上, 满足接收器件有效尺寸为 36 mm×48 mm 的大面阵 CCD 成像要求。

关键词 光学设计; 二级光谱; 波差法; 复消色差; 航空相机物镜

中图分类号 O435 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092911.3183

Design of Apochromatism Objective Lens of Aerial Camera Based on Large Frame Array CCD

Li Yuyao Tang Yong Lin Zhaocheng Li Ning

(College of Optoelectronic Engineering Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract To meet the requirement for simple structure and high-resolution, a method for correcting secondary spectrum of large frame array CCD aerial camera's objective lens with long focal length and wide band based on wave aberration method is proposed. The principle of secondary spectrum is introduced and the equations of designing apochromatism objective lens based on wave aberration are presented. The apochromatism objective lens of aerial camera is designed by common optical materials. Objective's focal length is 400 mm, relative aperture is $F/4$, and work waveband is 420~850 nm. The figures of optical system, longitudinal aberration and modulation transfer function (MTF) are given. Designing results show that the MTF of every field above 0.75 in 60 lp/mm, and satisfy the requirements of imaging for large frame array CCD whose effective size is 36 mm×48 mm.

Key words optical design; secondary spectrum; wave-aberration method; apochromatism; objective lens of aerial camera

1 引 言

航空相机是以航空飞行器为平台, 以拍摄海上、陆地目标来获得信息的光学仪器。随着技术的进步, 航空相机已被世界各国广泛用于资源普查、地形测绘、军事侦察等许多领域。

航空相机物镜的成像质量直接影响所拍摄信息的分辨率。由于光谱仪对信号的接收是采用 CCD

装置, 具有宽谱段、长焦距、高分辨率等特点, 因此, 在航空相机物镜的设计过程中, 会遇到各种像差校正问题, 其中二级光谱的校正是必须要解决的重要问题^[1]。通常二级光谱校正的最有效方法是采用特殊光学材料, 如萤石 (CaF_2)、氟冕玻璃、特火石玻璃、晶体和光学液体等^[2,3], 但特殊光学材料极少, 较脆, 理化性能不稳定, 大尺寸的材料更难以获得,

收稿日期: 2008-12-17; 收到修改稿日期: 2009-03-06

作者简介: 李玉瑶(1982—), 女, 硕士研究生, 主要从事光学设计与光学仪器等方面的研究。

E-mail: liyuyao1983@163.com

导师简介: 唐 勇(1956—), 男, 副教授, 主要从事光学仪器设计和光电检测等方面的研究。

E-mail: tangyong_56@163.com

工艺性欠佳且价格昂贵。以往也有采用二级光谱校正器或二元光学元件等方法实现纯折射式系统二级光谱的校正^[4,5]。

本文以像差理论为基础,结合航空相机物镜的特点,应用波差法,采用普通光学材料设计了复消色差航空相机物镜。同时,在航空相机照相时,由于飞行器运动和震动及相机摆扫等原因导致了成像模糊,像移补偿成为必须解决的关键技术之一^[6,7],这就需要在光学设计时保留较大的后截距以安装补偿反射镜。

2 复消色差航空相机物镜的设计

2.1 技术要求

焦距: $f' = 400 \text{ mm}$;

相对孔径: $D/f' = 1/4$;

接收器:有效尺寸 $36 \text{ mm} \times 48 \text{ mm}$ 的大面阵 CCD;

响应波段: $420 \sim 850 \text{ nm}$ (选取 CCD 量子效率较高的 550 nm 作为中心波长)。

2.2 采用波差法校正二级光谱

光学镜头的色差是由光学材料的色散引起的,消色差与光焦度的分配有关。一般来说,光学系统在两个消色差波长 λ_1 和 λ_2 的像点校正重合后,与参考波长 λ_0 的像点仍有一定偏离,这种偏离就是二级光谱。校正了二级光谱的系统称为复消色差系统^[8]。

由像差理论可知,对轴上点而言, λ_1 光和 λ_2 光在出瞳处两波面之间的波色差 $W'_{\lambda_1, \lambda_2}$ 与初级色差系数 C_1 之间有如下关系:

$$W'_{\lambda_1, \lambda_2} = -\frac{1}{2} \sum_1^k C_1 = -\frac{1}{2} \sum_1^k \frac{\varphi}{\nu} h^2, \quad (1)$$

式中 $\nu = (n_{\lambda_0} - 1)/(n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2})$ 。

$$W'_{\lambda_1, \lambda_2} = W'_{\lambda_1} - W'_{\lambda_2} = \frac{n'_{\lambda_1}}{2} \int \delta L'_{\lambda_1} du'^2_{\lambda_1} - \frac{n'_{\lambda_2}}{2} \int \delta L'_{\lambda_2} du'^2_{\lambda_2}, \quad (2)$$

式中 $W'_{\lambda_1}, W'_{\lambda_2}$ 分别为 λ_1 光和 λ_2 光的波像差, $\delta L'_{\lambda_1}, \delta L'_{\lambda_2}$ 分别为 λ_1 光和 λ_2 光的单色球差。当光学系统处于空气中时, $n'_{\lambda_1} = n'_{\lambda_2} = 1, u'_{\lambda_1} \approx u'_{\lambda_2} = u', u'$ 为 λ_0 光的孔径角。如果以 u'^2 作为纵坐标(以 λ_0 光的理想像面作为参考点)作球差曲线, (2) 式中的积分就是 λ_1 光和 λ_2 光球差曲线所围成面积的一半, 其值为

$$W'_{\lambda_1, \lambda_2} = \frac{1}{2} \int_0^{u'_m} (L'_{\lambda_1} - L'_{\lambda_2}) du'^2, \quad (3)$$

式中 L'_{λ_1} 和 L'_{λ_2} 分别为 λ_1 光和 λ_2 光的像方截距。

由于接收器件为大面阵 CCD, 因此轴外像差也会成为影响成像质量的因素, 故将整个系统分为前、后两个透镜组。而光阑位置对轴上像差无影响, 所以为了校正轴外像差先将光阑放置在两透镜组之间。物镜结构如图 1 所示。

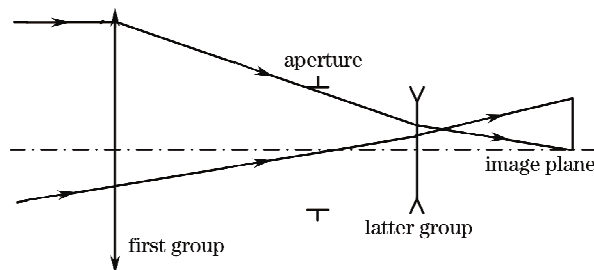


图 1 物镜示意图

Fig. 1 Sketch of objective lens

对于前组正光路, 后组逆光路的波色差可以进行补偿校正。同样, 对于任意两条谱线的波色差都可以按照上述思想求出。结合(1)式和(3)式可以得出求解各组中每块透镜的光焦度 Φ 和每块透镜的曲率差 $\Delta\rho_i = x_i$ 的方程组:

$$\begin{cases} \Phi = \sum \Phi_i = \sum (n_i - 1)x_i, \\ 2W'_{\lambda_1, \lambda_2} = -h^2 \sum (\delta n_{\lambda_1, \lambda_2})_i x_i = \Delta L'_{\lambda_1, \lambda_2} u'^2, \\ 2W'_{\lambda_1, \lambda_0} = -h^2 \sum (\delta n_{\lambda_1, \lambda_0})_i x_i, \end{cases} \quad (4)$$

式中 $(\delta n_{\lambda_1, \lambda_2})_i = n_{\lambda_1 i} - n_{\lambda_2 i}, (\delta n_{\lambda_1, \lambda_0})_i = n_{\lambda_1 i} - n_{\lambda_0 i}$ 。

3 设计结果

将 $\lambda_1 = 420 \text{ nm}, \lambda_2 = 850 \text{ nm}, \lambda_0 = 550 \text{ nm}$ 代入(4)式求得系统的初始结构, 并采用光学设计软件 Zemax 进行优化。根据接收器的尺寸计算得出该系统视场角为 8.6° , 为校正轴外像差, 需要调整光阑位置以及各透镜之间的空气间隔。同时, 因航空相机需要进行像移补偿, 故要求留有较大的后截距以放置补偿反射镜。应用 Zemax 进行光路优化设计及像差平衡后的光学系统结构如图 2 所示。系统的总长度为 489 mm , 后截距为 133 mm , 满足筒长

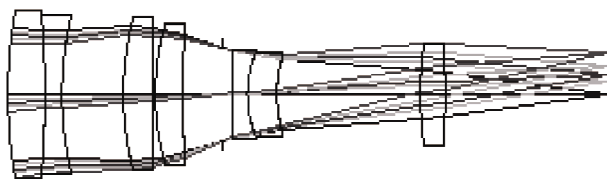


图 2 物镜光学系统结构

Fig. 2 Objective lens optical system's structure

短、体积小及放置补偿反射镜的要求。

图 3 为航空相机物镜的纵向像差曲线图。可以看出,中心波长光线在全口径处具有较小球差,同时系统在 0.7 口径处三条谱线的光线交于一点,实现了二级光谱的校正。在图 2 的物镜光学系统结构图中,各透镜的光学材料分别为:ZK6,ZF2,LAF10,LAF5,ZF2,LAK3 和 ZK6,从而实现了用普通光学玻璃校正二级光谱。

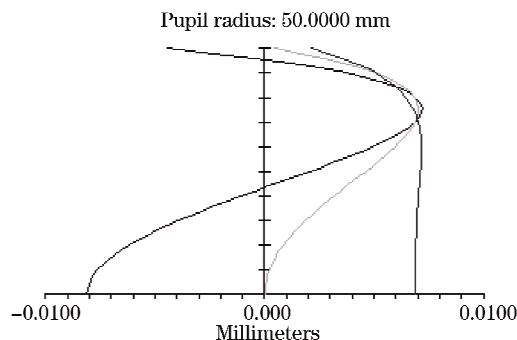


图 3 物镜纵向像差

Fig. 3 Longitudinal aberration of objective lens

图 4 为航空相机物镜设计结果的调制传递函数图。大面阵 CCD 像素尺寸为 $9 \mu\text{m} \times 9 \mu\text{m}$,从图中可以看出,在 60 lp/mm 处各个视场均在 0.75 以上,且接近理论衍射极限,设计完全满足成像质量的要求。

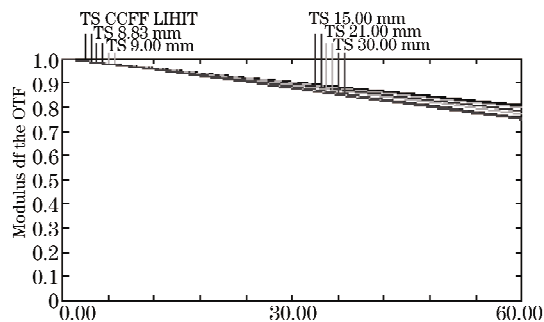


图 4 物镜的调制传递函数图

Fig. 4 The MTF drawing of objective lens

4 结 论

应用二级光谱的原理,采用波像差理论,结合航空相机物镜的特性,设计了波长范围在 420~850 nm、焦距为 400 mm、视场角为 8.6° 的宽波段、长焦距航空相机物镜,并采用普通光学材料实现二级光谱的校正。由物镜调制传递函数图可知,系统成像质量较好,满足了大面阵 CCD 成像质量的设计要求。同时,系统结构体积小、重量较轻,并可以安装用于像移补偿的反射镜。

参 考 文 献

- Zhao Shunlong, Wang Zhaoqi. Optical assessment of a projection lens design for head-mounted projective displays in visual space [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 730~735
赵顺龙,王肇圻. 投影式头盔物镜设计在视空间的性能评价[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 730~735
- Zhong Pinghua, Hu Yuxi, Zhou Shaoxiang *et al.*. Design method of apochromatic system based on S-L chart [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5): 589~592
钟萍华,胡玉禧,周绍祥等. 基于 S-L 图的复消色差方法[J]. *光子学报*, 2004, **33**(5): 589~592
- Yang Qinghua, Zhao Bochang, Zhou Renkui. Correction of secondary spectrum based on normal dispersion glasses [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4): 772~775
杨庆华,赵葆常,周仁魁. 基于正常色散玻璃二级光谱的校正[J]. *光子学报*, 2008, **37**(4): 772~775
- Rosete-Aguilar M. Correction of secondary spectrum using standard glasses [C]. *SPIE*, 1996, **2774**: 378~386
- Cui Qingfeng, Kuang Yuguang. Design principles of the hybrid apochromats [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(4): 499~503
崔庆丰,匡裕光. 混合复消色差透镜组的设计原理[J]. *光学学报*, 1995, **15**(4): 499~503
- Wang Jiaqi, Yu Ping, Yan Changxiang *et al.*. Space optical remote sensor image motion velocity vector computational modeling [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(12): 1585~1589
王家骐,于平,颜昌翔等. 航天光学遥感器像移速度失计算数学模型[J]. *光学学报*, 2004, **24**(12): 1585~1589
- Zhai Linpei, Liu Ming, Xiu Jihong. Calculation of image motion velocity considering airplane gesture angle in oblique aerial camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(3): 490~494
翟林培,刘明,修吉宏. 考虑飞机姿态角时倾斜航空相机像移速度计算[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(3): 490~494
- Cui Qingfeng. Realization of three-color achromats with binary optical elements [J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(8): 877~881
崔庆丰. 用二元光学元件实现复消色差[J]. *光学学报*, 1994, **14**(8): 877~881