

机载变焦距镜头光机结构设计

蒋宁¹ 谢斌² 贾继强¹

¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033

² 空军航空大学航空机械工程系, 吉林 长春 130022

摘要 设计了一种应用于特定机载平台上的变焦距镜头。为了减小轴向尺寸,后镜组进行了2次折反,光学系统的轴向尺寸96 mm,满足了空间的要求。镜头变倍比为20倍,焦距6~120 mm,相对孔径1/5.6。采用了机械补偿方法和滑架导向机构。该镜头轴向尺寸小、精度高、变焦过程光轴晃动小。通过试验,检测出变焦过程光轴晃动不大于34"。通过飞行试验实现了短焦距搜索目标、长焦距跟踪目标的功能,并且变焦快速,像面稳定,视频跟踪图像清晰。

关键词 光学设计;成像系统;变焦距镜头;光机结构;变倍比;导向机构

中图分类号 V245.6 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.072204

Design for Opto-Mechanical Structure of Airborne Zoom Lens

Jiang Ning¹ Xie Bin² Jia Jiqiang¹

¹ Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

² Department of Aviation Machinery, Aviation University of Air Force, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract A zoom lens is designed for a specific airborne platform. In order to decrease the axial dimensions, the rear-view mirror group is folded twice. It meets the space requirements since the axial dimension of the optical system is 96 mm. The zoom ratio of lens is 20, and the focal length is 6~120 mm, and the relative aperture is 1/5.6. The lens uses a method of mechanical compensation and a guiding mechanism of carriage. The lens has a small axial size, with high accuracy and a small optical axis shaking. Through the test, the optical axis shaking is found to be no more than 34" in the process of continuous zoom. Through flight test, it is proved that the zoom lens can search objectives in the short focal length and track the target in the long focal length. In addition, the zoom lens can quickly change the focal length, the obtained image is stable, and the tracking video image is clear.

Key words optical design; imaging systems; zoom lens; opto-mechanical structure; zoom ratio; guiding mechanism

OCIS codes 220.4880; 12.4640; 120.3620

1 引言

随着图像处理技术的深入发展和机械加工精度的不断提高,变焦距测量系统在跟踪测绘领域得到广泛的应用^[1-6]。变焦距镜头是指一个或多个组元沿光轴不断移动,而使焦距连续变化同时像面又保持不变的镜头^[7-9]。系统通过变焦距光学镜头把目标成像在 CCD 像面上,再通过光电转换把运动的目标以及背景成像在监视器上,并对目标进行跟踪与测量。系统用短焦距、大视场搜索目标,用长焦距、小视场对有兴趣的目标进行跟踪和测量^[10-14]。

在实际应用中,变焦距镜头频繁地在长焦距和短焦距之间变换,也就是说镜组要频繁地运动。而这个运动必将带来光轴的晃动。光轴的晃动直接影响成像的质量和跟踪的可靠性。这就要求光轴的晃动要控制在一定的范围之内(一般要求小于 60"),从而保证光学镜头迅速、稳定地连续变焦。而机载设备的空间往往非常有限,对设备的重量、体积、形状都有严格的限制。根据特定平台的要求,本文采用变倍滑架(补偿滑架)与

收稿日期: 2013-03-22; 收到修改稿日期: 2013-04-23; 网络出版日期: 2013-06-20

基金项目: 国家 973 计划(2009CB72400102A)

作者简介: 蒋宁(1973—),女,硕士,工程师,主要从事航空遥感器结构设计方面的研究。

E-mail: jiangning73@126.com

主镜筒之间两端接触的方式,降低了光轴的晃动,设计了一种变倍比为 20 倍,焦距为 6~120 mm,相对孔径 1/5.6,光轴晃动小于 $34''$ 的变焦距光学镜头。

2 机载光学镜头参数的确定

2.1 焦距

面阵 CCD 靶面尺寸确定后,焦距的选择与地面像元分辨率及飞机航高有关,理想成像关系为

$$f' = a \times H / r_{\text{GSD}}, \quad (1)$$

式中 f' 为光学系统的焦距, a 为 CCD 像元尺寸, H 为航高, r_{GSD} 为地面像元分辨率。

选用的面阵 CCD 像元数为 752 pixel × 582 pixel, 靶面尺寸 4.8 mm × 3.6 mm, 所以像元尺寸为 0.0065 mm; 飞机最大航高为 5000 m, 地面像元分辨率为 0.27 m, 地面覆盖范围 4 km × 3 km, 可计算出光学系统的焦距: $f' = 6 \sim 120$ mm。

2.2 视场角

视场半角由下式确定:

$$\omega = \arctan(h/f'), \quad (2)$$

h 为靶面尺寸的一半。通过面阵 CCD 的参数, 可求出 $h = 2.4$ mm (1.8 mm)。由 (2) 式可求得半视场角 ω 为 21.8° (16.7°), 全视场角 2ω 为 43.6° (33.4°)。

2.3 相对孔径

光学系统相对孔径决定了理论分辨率和探测器靶面照度, 通常在满足分辨率的前提下, 要根据靶面照度来选择 CCD 探测器, 该系统选取 $D/f' = 1/5.6$ 。

3 光学结构设计

3.1 补偿方法的确定

变焦距光学系统是焦距在一定范围内改变, 而像面保持不动的光学系统。其每个组元一经设计和加工, 焦距就是固定不变的。要变焦, 只能改变各个组元之间的空气间隔^[7]。间隔的改变必将带来系统像面的移动。为了消除像面的移动, 就需要某些组元进行补偿运动。

补偿方法有两种: 光学补偿法和机械补偿法^[7,10]。

光学补偿法是使几个组元同方向等速度运动, 该方法在达到变焦目的的同时, 能减少像面的移动。其优点是运动方式简单, 缺点是不能做到像面始终稳定不变。而机械补偿结构由前固定组、变倍组、补偿组、后固定组构成, 如图 1 所示。变倍组沿光轴方向移动, 补偿组沿光轴反方向作补偿移动。这种补偿方式的优点是像面始终稳定, 缺点是变倍过程复杂, 机械加工困难。伴随着数控加工技术的发展, 精确的凸轮已经能完全达到系统的要求, 从而使机械补偿法得到广泛的应用。本设计采用机械补偿法进行补偿设计。

3.2 结构形式

考虑机载空间对径向尺寸的约束, 以及加工、装调性能, 选择了透射式结构。光学系统结构如图 2 所示, 由前固定组、变倍组、补偿组、后固定组四部分组成。补偿方式为机械正组补偿, 这有利于在变焦过程中减小质心变化, 达到力矩的平衡。当系统变倍组和补偿组逐渐靠拢时, 焦距由 6 mm 到 120 mm 逐渐变大。变倍组和补偿组的运动都为非线性运动, 从而充分保证了像面的稳定性。由于机载平台上装有多个镜头, 而作为视频跟踪使

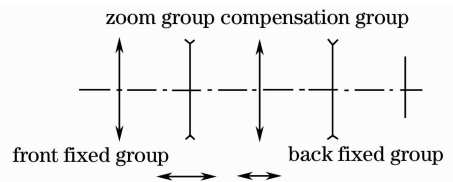


图 1 机械补偿法结构示意图

Fig. 1 Schematic of mechanical compensation structure

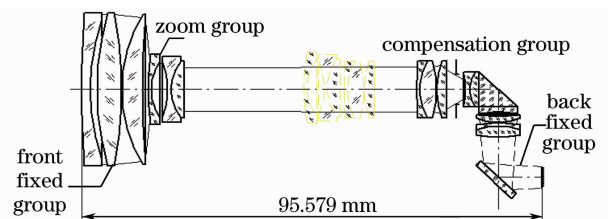


图 2 光学系统图

Fig. 2 Optical system diagram

用的变焦距镜头放置在中心偏下的位置,因此镜头轴向尺寸有限,所以对后固定组进行了两次折反,从而使光学系统的轴向尺寸小于 96 mm,满足了机载平台空间的要求。

3.3 变倍量和补偿量的确定

设变倍组沿光轴移动量为 q_1 , 补偿组沿光轴移动量为 q_2 , 由动态光学和稳像原理可知^[8]

$$\beta_2 \beta_{20} (1 - \beta_2 \beta_{10}) q_1 + (1 - \beta_2 \beta_{20}) q_2 = 0, \quad (3)$$

式中 β_{10} 为变倍组在初始位置的垂轴放大率, β_{20} 为补偿组在初始位置的垂轴放大率, β_1 为移动后变倍组的垂轴放大率, β_2 为移动后补偿组的垂轴放大率。

根据(3)式,可解出每个变倍量所对应的补偿量的值,从而为机械件凸轮的加工提供数据。

4 机械结构设计

4.1 系统组成与工作原理

变焦距镜头由前固定组、变倍组、补偿组、后固定组、变倍机构、焦距输出电位计等部分组成^[9-15], 其结构如图 3 所示。系统在接收到变焦指令后,进行焦距调节并实时输出镜头的焦距值,即相机控制器发出变倍指令后该变倍控制系统向焦距增大的方向移动,缩小视场范围以利于观察目标,反之向焦距减小的方向运动,扩大视场范围以利于搜索目标,同时实时地采集焦距信息并反馈给相机控制器,由相机控制器将此信息传给伺服控制系统。

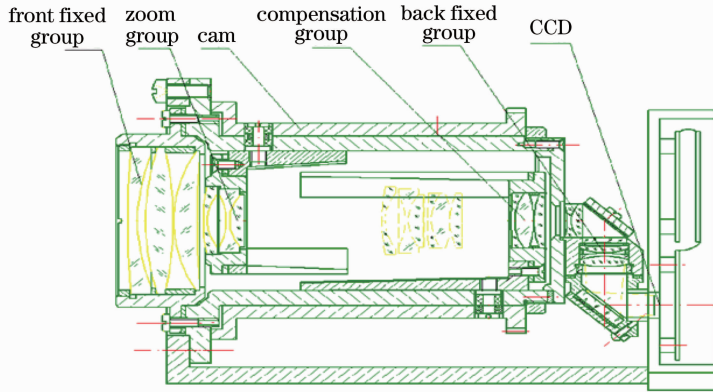


图 3 变焦距镜头结构图

Fig. 3 Structure of zoom lens

4.2 变倍组、补偿组导向机构设计

变倍组与补偿组变焦过程中光轴的平稳性是变焦距镜头设计的核心。光轴的晃动直接影响视频图像的质量。选择合适的导向机构可以有效地减小运动过程中光轴的晃动。

常用的变焦距镜头导向机构有两种:圆柱导轨滑动机构和滑架机构。圆柱导轨滑动机构的导向部件是圆柱导轨,其优点是传动精度高,能承载较大的载荷;缺点是径向尺寸大,易发生卡死现象。滑架机构的导向机构为滑架,其优点是结构径向尺寸小,传动精度高;缺点是能承载的载荷较小。滑架机构适用于通光口径较小的变焦距镜头。通过具体分析,该系统的变倍镜组和补偿镜组均为两片直径 13 mm 左右的透镜,重量轻,完全满足滑架机构的使用要求,所以选用了滑架导向机构。

通过长期的试验积累,在设计变倍滑架和补偿滑架时,为了降低光轴晃动采取了如下措施:

1) 滑架的长度控制在滑架直径的 1.1~1.4 倍之间,适当增加滑架的长度有利于运动中光轴的稳定,但由于变倍量往往较大,限制了变倍滑架的长度,所以设计的变倍滑架的长度为直径的 1.1 倍左右,补偿滑架的长度为直径的 1.4 倍左右。

2) 改变滑架与主镜头之间的接触方式。通常滑架和主镜筒在整个滑架长度中都是圆柱面接触,运动中容易增大光轴的晃动。所以在设计的变倍滑架(补偿滑架)与主镜筒之间采用两端接触的方式,减少了接触面,降低了光轴晃动。

5 试验验证

5.1 光轴晃动检测

采用了光电自准直方法检测系统在变焦过程中光轴的晃动。原理如图 4 所示,如果反射镜偏转了角度 α ,反射光线将偏转角度 2α ,通过物镜后所成的倒像将会偏移十字线 t 的距离。通过偏移量 t 即可求出 α 。试验时将变焦距光学镜头、光电自准直仪放置在高精度平台上,调整光电自准直仪,使其光轴与变倍镜组上的工装反射镜法线重合,用千分尺检测变倍镜组的移动量,通过凸轮机构顺时针和逆时针方向旋转实现变倍镜组前后移动。每移动 3 mm,测量一次偏移量 t ,统一计算出偏转角 α 。采用同样的方法,检测出补偿镜组的晃动。通过计算,得到镜头变焦过程中光轴晃动最大值为 $34''$,能够满足系统要求。

5.2 传递函数检测

为了全面准确地评价光学镜头的成像品质,对装调好的变焦距镜头进行了传递函数检测,在空间频率 77 line/mm 处,全视场传递函数弧矢和子午方向值分别为 0.375 和 0.382,满足系统的使用要求。

5.3 外场试验

研制的变焦距镜头装载在无人机上,进行了多架次的外场考核试验。通过飞行试验,变焦距系统实现了宽视场搜索目标,窄视场识别、跟踪目标的功能。并取得了清晰的视频图像。外场试验图像如图 5 所示。

6 结论

设计的变焦距光学镜头达到了设计指标的要求,满足了特定的机载平台对镜头形状和体积的要求。对滑架机构进行了降低光轴晃动设计。通过试验验证,镜头变焦过程中的光轴晃动不大于 $34''$ 。在空间频率 77 line/mm 处,镜头全视场传递函数大于 0.37。镜头实现了连续变焦的功能,并且像面始终稳定。

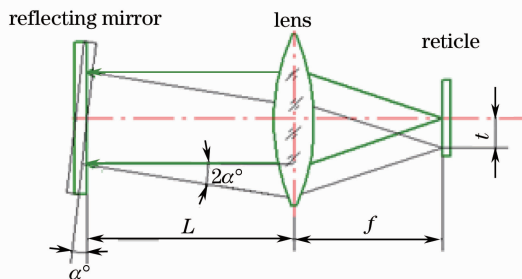


图 4 光电自准直法原理图

Fig. 4 Principle of photoelectric auto-collimation method



图 5 外场试验图像

Fig. 5 Image of field experiment flight test

参 考 文 献

- 1 Yan Lei, Jia Ping, Hong Yongfeng, *et al.*. Selection of cam curve for zoom lens[J]. J Applied Optics, 2010, 31(6): 876-882.
- 2 Wang Ping, Zhang Guoyu, Wang Wei, *et al.*. Passive athermal design of aerial zoom lenses[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0922006.
- 3 Xu Weicai, Huang Wei. Innovated lens design for catadioptric zoom system[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0622005.
- 4 Yan Aqi, Yang Jianfeng, Cao Jianzhong. Optical design of aerial digital camera based on large planar array CCD[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0622003.
- 5 Zhang Shanhua, Chen Huifang, Zhang Haiting, *et al.*. Design of optical lens for traffic surveillance system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(2): 022202.
- 6 Wang Ping, Zhang Bao, Cheng Zhifeng, *et al.*. Optimal design of cam structure of zoom lens[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(4): 893-898.

- 王平, 张葆, 程志峰, 等. 变焦距镜头凸轮结构优化设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 893-898.
- 7 Tao Chunkan. Optical Design of Zoom Lens System[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1988.
- 陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
- 8 Wang Zhijian. Optical Engineering Fundamentals [M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2005.
- 王志坚. 光学工程基础[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2005.
- 9 Cai Wei, Zhang Xin, Feng Xiuheng, *et al.*. Compensating modes for zoom system[J]. J Optics and Precision Engineering, 2011, 19(9): 2063-2071.
- 蔡伟, 张新, 冯秀恒, 等. 变焦距系统的变倍补偿方式[J]. 光学精密工程, 2011, 19(9): 2063-2071.
- 10 Liu Xiaomin. The design of high resolution zooming lens[J]. J Applied Optics, 1993, 14(4): 5-11.
- 刘肖民. 高倍率高分辨率变焦距镜头设计[J]. 应用光学, 1993, 14(4): 5-11.
- 11 Lu Qiang, Ji Yiqun, Shen Weimin. Design of a fore continual zoom system with high speed[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2674-2679.
- 陆强, 季轶群, 沈为民. 大相对孔径连续变焦前置物镜的光学设计[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2674-2679.
- 12 Hu Jixian. Design of long focal length large-aperture optical zoom system[J]. J Applied Optics, 2007, 28(5): 569-572.
- 胡际先. 长焦距大口径连续变焦光学系统的设计[J]. 应用光学, 2007, 28(5): 569-572.
- 13 Li Hongzhuang, Zhang Zhenduo, Cao Jingtai, *et al.*. Design of zoom optical system with long focal length and super-high zoom ratio[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(3): 358-363.
- 李宏壮, 张振铎, 曹景太, 等. 长焦距超高倍率变焦距光学系统设计[J]. 光子学报, 2012, 41(3): 358-363.
- 14 Liu Feng, Xu Xiping, Sun Xiangyang. Design of high zoom ratio thermal infrared zoom optical system[J]. J Applied Optics, 2009, 30(6): 1020-1023.
- 刘峰, 徐熙平, 孙向阳. 高变倍比红外变焦距光学系统设计[J]. 应用光学, 2009, 30(6): 1020-1023.
- 15 Li Xiaotong, He Guoxiong. Research of optimization design for zoom lens Gaussian parameters[J]. J Zhejiang University, 1993, 27(1): 122-127.
- 李晓彤, 何国雄. 变焦距系统高斯解优化的研究[J]. 浙江大学学报, 1993, 27(1): 122-127.