

中波红外连续变焦机构设计分析

李运动¹, 仇振安², 孙树旺³, 刘先胜¹, 王璐¹, 张良¹

(1. 中国航空工业洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471009;

2. 陆航驻北京军事代表室, 北京 100176; 3. 郑州大学, 郑州 450052)

摘要: 红外系统对目标进行搜索与探测时,对连续变焦光学系统的需求日益增强,其中一个措施就是改变两个或两个以上透镜在光学系统中的位置,从而改变光学系统的焦距。根据某中波红外光学系统的设计特点,对连续变焦机构的导向机构和凸轮机构进行了详细分析,给出了设计要点和设计结果。试验结果表明:该机构运行平稳、可靠、精度高,光学系统的成像质量高。

关键词: 红外系统; 光学系统; 连续变焦机构; 导向机构; 凸轮机构

中图分类号: V271.4; TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)01-0094-04

Analysis of Continuous Zooming Mechanism Design for Medium Wave Infrared System

LI Yundong¹, QIU Zhen'an², SUN Shuwang³, LIU Xiansheng¹, WANG Lu¹, ZHANG Liang¹

(1. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471009, China; 2. Military Representative Office of Army Aviation in Beijing, Beijing 100176, China; 3. Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: The continuous zooming optical system has become more and more important for an infrared system in target searching and detecting. One method is changing two or more lens's location in order to change focal length in optical system. Based on the optic design features of medium wave infrared system, the guide mechanism and cam mechanism of the continuous zooming mechanism are discussed in detail. The key points and result of the design are given. The test result indicates that the mechanism can operate smoothly and reliably with higher precision, and the image quality of optical system is fine.

Key words: infrared system; optical system; continuous zooming mechanism; guide mechanism; cam mechanism

0 引言

随着现代军事战场信息化需求的日益增加,红外成像系统由于具有一定的穿透烟、雾、霾、雪以及识别伪装的能力,不受战场强光、闪光干扰而致盲^[1],可以实现远距离、全天候观察等优点,在军事、民用等方面都得到了广泛应用。为了实现对小型运动目标远距离搜索、探测(宽视场),同时又要实现近距离识别(窄视场)等要求,而传统的单一定焦距的光学系统无法满足,因此必须采取变焦距光学系统,即对红外光学系统进行视场变换的设计,从而实现光学系统焦距的改变。变焦距光学系统常用的措施是设计一套变倍镜组,根

据变倍镜组在光学系统中的不同位置而改变系统焦距,同时保证变焦过程中保持像面稳定、像面清晰,根据变倍镜组移动方向可以分为轴向变倍、径向变倍、旋转变倍等方式,其中,红外多视场独立光学系统及视场切换机构设计已经比较成熟,可见光连续变焦光学镜头设计也已经普及^[2-4],而红外连续变焦镜头因受到光学材料、大口径、高质量的红外材料制备等方面限制,连续变焦红外热像仪的发展相对缓慢^[5-6]。

连续变焦红外热像仪在有限的设计空间内,既要满足体积小、重量轻的要求,又要满足机载环境适应性的要求,连续变焦系统设计比多视场系统设计要困难得多,其中,连续变焦机构设计好坏直接影响连续变焦红外热像仪的各项功能和性能要求。根据某中波红外光学系统的设计特点,对连续变焦机构进行了详细分析,为光机结构设计提供了参考依据。

1 中波红外连续变焦光学系统

连续变焦光学系统的基本原理是利用光学系统中两个或两个以上透镜组的移动,改变光学系统的组合焦距,同时保持像面位置不动,且在变焦过程中像质始终保持良好。

某中波红外连续变焦光学系统构型如图1所示,其光学结构由前固定组、变倍组、补偿组和后固定组4个透镜组组成,该系统属于透射式光学系统。在设计时综合平衡各方面因素,确定系统的F数为4。在尽量减小物镜尺寸的同时保持系统的冷光阑效率为100%,光学系统设计中采用二次成像的方法。在光学系统设计中共用了7个透镜,其中3个透镜采用了非球面设计技术,成像组件采用 320×256 凝视焦平面阵列探测器,光学系统焦距的变化范围是 $55 \sim 275$ mm,变倍比为5:1,变焦视场为 $2^\circ \times 1.5^\circ \sim 10^\circ \times 7.5^\circ$,图1a为窄视场 $2^\circ \times 1.5^\circ$,图1b为宽视场 $10^\circ \times 7.5^\circ$ 。

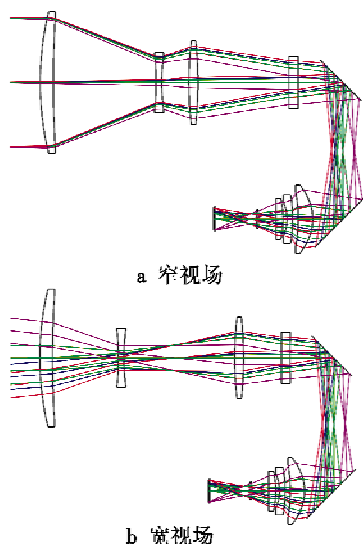


图1 光学系统图

Fig.1 Schematic drawing of zoom optics

2 连续变焦机构设计

通过改变变倍组和补偿组在光学系统中的位置,实现光学系统的连续变焦距功能,在结构设计中就需要设计一套运动机构实现连续变焦功能,保证变倍组和补偿组沿光轴方向按照不同的移动轨迹进行连续移动。

某中波红外光学系统的设计特点为变倍组沿光轴做线性移动,补偿组做非线性移动。一般的直线驱动机构很难满足二者的同步移动,一种精密型圆柱凸轮驱动机构可以实现连续改变变倍组和补偿组的位置和间隔,使得光学系统的组合焦距连续变化,以获得光学系统倍率的改变,同时也降低了驱动控制系统的复杂性。

图2所示为一种连续变焦机构的结构示意图,它

主要由电机、齿轮、变倍凸轮、限位装置、导向销、变倍组、补偿组、导向机构等组成,其中,导向机构和变倍凸轮设计是连续变焦机构的核心技术。其工作原理为:当产品需要进行变焦时,由控制系统发给电机变倍信号,电机驱动齿轮,由齿轮带动变倍凸轮进行运动,此时,变倍组和补偿组通过导向销在满足函数关系的两条凸轮槽中进行运动,实现变倍组和补偿组直线运动,当变倍组和补偿组移动到两个极限位置时,通过压力开关来控制驱动电机的工作。精密电位计在齿轮的驱动下随变倍凸轮一起转动,电位计随着变倍凸轮转角的不同输出不同的电压,通过对电压值的换算可以得到系统的对应焦距。

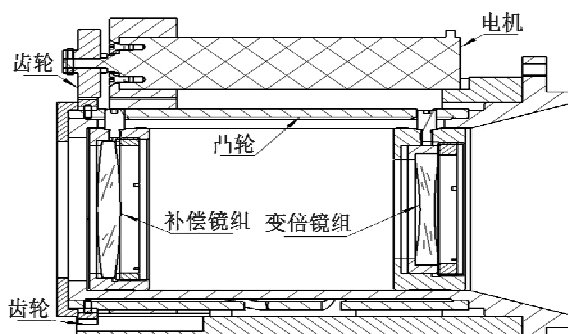


图2 连续变焦机构

Fig.2 Continuous zooming mechanism

2.1 导向机构设计

变倍组和补偿组沿光轴方向移动的过程中会造成系统光轴的跳动,光轴跳动量的大小直接影响光学系统的成像质量,因此,变倍组和补偿组移动的导向机构设计在连续变焦机构设计中显得特别重要。

变焦镜组的导向机构种类很多,根据接触摩擦形式不同可以分为滑动摩擦机构和滚动摩擦机构^[7]。常用的导向机构有以下几种形式:

1) 1根光杠导轨和滚珠丝杠组合滑动机构,这种结构精度较高,由于变倍和补偿同时移动的轨迹不同,需要两套导向驱动机构,占用较大空间,控制系统设计也有难度;

2) 2根光杠导轨滑动机构,这种结构变位精度高,承载大,由于是过定位结构,在长距离移动过程中,易产生机构卡死现象;

3) 3根光杠导轨滑动机构,这种机构在运动过程中舒适平稳,不易出现卡死现象,可以带动通光口径较大的透镜,这种导向机构运动精度较低。

滚动摩擦机构是在上述滑动机构的基础上,将滑动套筒换成精密直线轴承,使得滑动摩擦变为滚动摩擦,减小了摩擦力,缺点是直线轴承与导柱之间存在间隙,使得变倍组和补偿组移动过程中的光轴角偏,没有滑动机构容易控制。

在本例结构设计中,采用了3根光杠导轨滑动机构的形式,变倍组和补偿组均采用双导柱形式,其中共用1个副导柱,即变倍组和补偿组的导柱各有1个主导柱和副导柱,如图3所示。

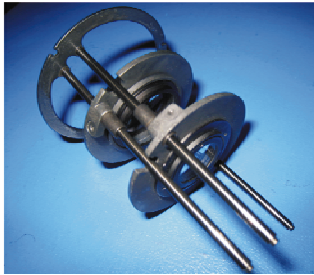


图3 导柱、变倍镜筒、补偿镜筒

Fig. 3 Guide pillar, varifocal drawtube and compensation drawtube

在变倍组和补偿组移动过程中为了避免出现过定位现象,在原机构的基础上进行了改进,将镜筒上与副导柱相配合的圆孔改为腰形孔与副导柱相配合,既限制了转动自由度,又可以补偿导柱中心距的变化,如图4所示。



图4 镜筒衬套

Fig. 4 Drawtube bushing

由于镜筒法兰厚度较薄,在主导柱与镜筒之间用过剩配合镶嵌了1个长度合适的衬套,如图4所示。为了增加衬套的耐磨性并减小摩擦,在原机构的基础上,衬套表面镀二硫化钼固体润滑膜。根据光学系统角偏的要求,设计合适的配合长度以及衬套与导柱之间的间隙,提高角偏精度。

为了保证变倍组和补偿组在移动过程中运动平稳顺畅,导向销固定在主导柱附近,提高导向销的强度刚度,可以减少变焦移动过程中的变形量。

2.2 变倍凸轮设计

变倍凸轮的设计是实现光学设计目标,最终实现连续变焦光学系统的关键所在。变倍凸轮设计的好坏,直接影响到连续变焦成像系统的性能、成像质量等。变倍凸轮的导程与直径是变倍凸轮的重要参数,在设计凸轮时需对凸轮的导程和直径进行优化设计^[8-9]。连续变焦成像系统的设计还必须考虑变倍运动的平滑性和变焦过程的快速性。

连续变焦光学系统是通过变倍组和补偿组的同时移动来实现焦距的连续变化和像面的稳定,为了保证在变焦过程中像质良好,变倍组和补偿组的移动必须满足光学系统设计的函数关系,同时考虑变倍凸轮直径空间尺寸及变倍凸轮转角范围,确定变倍曲线和补偿曲线,要求曲线平滑,不允许有明显的起伏,直到拐点出现,变倍曲线和补偿曲线展开如图5所示。

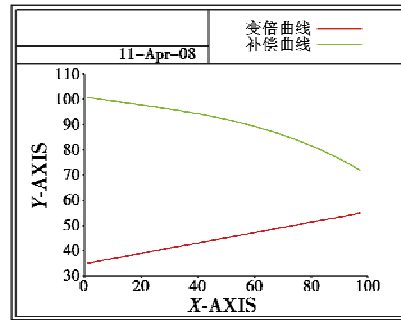


图5 凸轮曲线展开图

Fig. 5 Cam curve expansion

根据计算确定的变倍曲线和补偿曲线在变倍凸轮上拟合出两条空间曲线槽,如图6所示,通过变倍凸轮的转动,带动导向销移动,分别实现变倍组和补偿组沿导向机构进行直线移动,实现凸轮的功能。



图6 连续变焦凸轮

Fig. 6 Continuous zooming cam

导向销在变焦过程中一直与凸轮槽之间存在摩擦,导向销在原设计的基础上进行了改进,材料由钢质改为钢质螺钉和非金属材料的组合体,非金属材料部分与凸轮曲线槽为小间隙配合,在凸轮曲线槽内运动,同时凸轮曲线槽进行镀二硫化钼固体润滑膜处理,减少摩擦和磨损。

由于变倍凸轮属于薄壁圆环结构形式,为了减少该零件加工及工作过程中的变形,设计时将原来采用的铝合金材料改为高分子体 SiC/Al 复合材料。同时在凸轮内壁上加工若干螺距为 0.35 mm 细牙消光螺纹,并且进行发黑表面处理,对到达像面的杂散辐射能量进行衰减,从而达到对杂散辐射能量的抑制和吸收^[10]。

在变倍凸轮设计时应注意导向销和凸轮槽的摩擦系数与自锁角密切相关,摩擦系数越大,自锁角越小,凸轮槽倾斜得也越平坦,对凸轮槽的曲线设计显得尤为重要。

3 误差分析

产品的设计、加工和装调过程中影响中波红外连续变焦系统成像质量的因素有很多,主要体现在如下几个方面:

- 1) 齿轮的加工、传动误差及驱动电机的空回误差;
- 2) 凸轮曲线槽的加工误差及导向销与凸轮曲线槽之间存在间隙造成的误差;
- 3) 导向机构衬套与导向柱之间存在间隙造成的误差;
- 4) 精密电位计的测量误差;
- 5) 平行光管等调试设备的自身误差。

齿轮的加工、传动误差及驱动电机轴的空回误差主要体现在选用的精密电位计对凸轮转角的测量误差上。在相同转角范围内,由于凸轮曲线不同,造成的误差也有差异,最终导致电位计输出电压值在换算成相应焦距时的相对误差也不同。为了减小该误差,在以后的改进设计中可以采取谐波齿轮传动方式消除传动误差。导向销与凸轮曲线槽之间存在的间隙容易造成位移误差,但凸轮导槽曲线目前采用精密数控机加中心加工,所加工的导槽曲线精度都很高,可以大大减小加工误差,同时导槽曲线平缓,在变焦过程中运行平稳无卡滞现象。导向机构衬套与导向柱之间存在的间隙也会造成光轴角偏误差,该误差通过严格控制设计、加工和装配各个环节,将该间隙控制在 0.015 mm 以内,既能保证角偏精度要求,又能保证变倍组和补偿组轴向移动平稳舒适。选用高精度的平行光管等调试设备以减少额外误差。

4 试验及结果

对装调好的中波红外连续变焦热像仪进行相关光学测试,结果表明,连续变焦机构工作过程中光轴晃动量不大于 55"。通过对地面某目标进行成像,发现在连续变焦过程中图像连续、清晰,图 7 所示为对某目标的连续变焦成像过程。

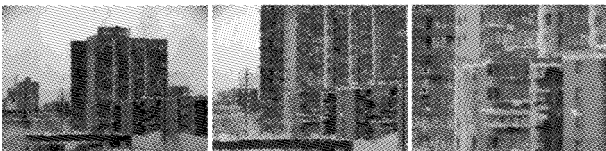


图 7 中波红外连续变焦过程

Fig. 7 Continuous zooming process of medium wave infrared system

红外热像仪并不经常单独使用,而是和电视、激光等光学传感器一起安装在光电侦察装置中,该装置可以挂装在无人机或直升机上,借助光电转塔的转动实现对目标的大范围搜索。对安装有中波红外连续变焦热像仪的某型光电侦察装置进行了振动试验,试验结果表明:通过设计的减震装置隔离载机的振动,在振动试验过程中产生的图像晃动误差在可接受的范围内;变焦机构运行平稳、无卡滞现象;振动环境下产品的稳定精度为 0.08 mrad,使得光学系统成像质量得到很大的提高。

5 结论

文中所设计的中波红外连续变焦机构,能在很大的范围内实现连续变焦且具有很宽的视场,而且设计时所采用的优化设计方法,使得结构设计紧凑,很具工程价值。通过高低温、振动等试验验证,该机构运行平稳、精度高,在变焦过程中,光学系统成像始终清晰,系统像面位置稳定不变,适用于导航、搜索、跟踪、侦察等侦察设备中。

参考文献

- [1] 张良. 中波红外变焦距系统的光学设计[J]. 应用光学, 2006, 27(1): 32-34.
- [2] 胡际先, 胡锋. 透雾连续变焦镜头的小型化设计[J]. 应用光学, 2009, 30(4): 547-551.
- [3] 董斌, 田海英, 郑丽娜, 等. 机载航空侦察相机调焦机构设计[J]. 光机电信息, 2010, 27(12): 73-76.
- [4] 丁亚林, 田海英, 王家骥. 空间遥感相机调焦机构设计[J]. 光学精密工程, 2001, 9(1): 35-38.
- [5] 李永刚, 张葆, 丁金伟. 红外连续变焦镜头的结构设计[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2009, 32(1): 60-63.
- [6] 乔健, 曹立华, 崔爽, 等. 连续变焦距镜头结构设计及焦距实时输出分析[J]. 应用光学, 2010, 31(4): 521-524.
- [7] 张治中, 李晓惕. 变焦距镜头导向机构的类型[J]. 光学机构, 1991(5): 50-55.
- [8] 孟军和, 张振, 孙兴文. 变焦距镜头的凸轮优化设计[J]. 红外与激光工程, 2002, 31(1): 51-54.
- [9] 王一凡, 薛育. 一种大口径高精度凸轮变焦机构的设计[J]. 光学精密工程, 2005, 15(11): 1756-1759.
- [10] 王骞, 张景旭, 郭劲. 红外系统中杂散辐射的抑制方法[J]. 光机电信息, 2002(12): 21-24.