

文章编号 2095-1531(2014)01-0169-06

小型连续变焦相机的结构实现

苗健宇*, 张立平, 翟岩, 梅贵

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:介绍了一种小型大变倍比变焦相机的主要技术参数,以及采用的变焦方法;详细描述了相机的组成结构,其中变倍和补偿透镜组通过滑架在主体内滑动,其运动轨迹取决于导钉在凸轮曲线槽内的运动状态;阐述了加工和装调过程中为保证相机设计质量而采取的精度保证措施,凸轮曲线槽与滚子的配合间隙应控制在 $6 \sim 9 \mu\text{m}$,确保主体的刚度和圆柱度,变倍和补偿滑架在主体内滑动时的返回空回误差 $< 2''$,滑架直径 D 与滑架长度 L 之间的比值 ≥ 1 。经高低温和振动试验后检测结果表明:在 50 lp/mm 空间频率下,相机光学传递函数 > 0.2 ,相机外景成像清晰,层次分明。

关键词:变焦相机,凸轮,精度,光学传递函数

中图分类号:TH703; P236 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20140701.0169

Structural realization of small zoom camera

MIAO Jian-yu*, ZHANG Li-ping, ZHAI Yan, MEI Gui

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: mjyokok@163.com

Abstract: The main technical parameters and the zoom method for the camera with small size and large zoom ratio are introduced. Each structural part of the camera is described in detail. The zoom and compensating lens group slide in the main body through the slide frame, whose movements are assured by the movement of the guide pin in the cam curve groove. The measures to ensure the quality and the precision taken in the process and assembling of the camera are expatiated. The clearance between cam curve groove and roller is controlled about $6 \sim 9 \mu\text{m}$, and the stiffness and column of the main body are insured. The return errors are less than $2''$ when the zoom and compensation slide frame slide in the main body. The ratio between diameter and length of the slide frame should be no less than 1. The results show that optical transfer function of the camera is more than 0.2 in the space frequency of 50 lp/mm after high-and-low temperature vibration tests, and the location images of camera are clear.

Key words: zoom camera; cam; precision; optical transfer function

收稿日期:2013-10-12;修订日期:2013-12-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61108066)

1 引言

变焦相机是指光学镜头的焦距在一定范围内连续可调,而像面位置保持不变的相机。随着图像处理、数字控制,以及精密加工技术的不断发展和提高,变焦相机在各种领域得到了广泛的应用,国内外专家都致力于设计与研究体积小、控制灵活、精度高的变焦距光学系统^[1-4]。

连续变焦距光学系统在设计、加工、装调上比定焦光学系统复杂、难度大,但其可实现对近距离目标的快速捕获,以及对远距离目标的精确跟踪与测量^[5-6]。本文介绍了一种可用于导引头的连续五倍变焦相机,由于相机安装空间有限,相机必须实现小型化和轻量化的设计目标,即必须严格控制相机的体积和重量。

2 主要技术参数

根据变焦相机的实际应用要求,镜头的主要设计指标如下:

- (1) 焦距 f' : 30 ~ 150 mm, 五倍连续变焦;
- (2) 相对孔径 D/f' : 1/4;
- (3) 光谱范围: 0.486 1 ~ 0.656 3 μm , 中心波长 0.587 96 μm ;
- (4) 相机整体尺寸要求: 安装在 $\Phi 60 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 的空间内;
- (5) 相机质量: $\leq 1\ 000 \text{ g}$ 。

变焦相机的光学系统如图1所示。此光学系统采用机械补偿法,为四组元件连续变焦系统,包括前固定透镜组、变倍透镜组、补偿透镜组和后固定透镜组4个光学透镜组。机械补偿法是变倍透镜组做线性移动以改变焦距,补偿透镜组作少量移动以补偿像面位移。补偿透镜组的移动与变倍透镜组的移动方向不同且不等速,但它们的相对运动却有严格的对应关系,变倍组和补偿组之间通过一个复杂的凸轮机构实现相对运动,此类变焦相机的焦距在一定范围内连续改变^[7-8]。

光学系统采用正组补偿的结构形式,保证相

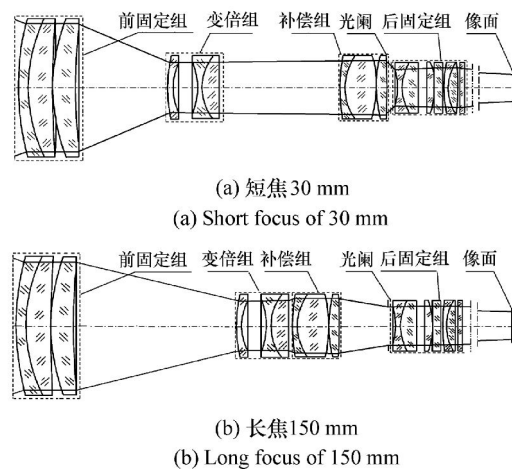


图1 变焦相机光学系统

Fig. 1 Optical system diagram of zoom camera

机的质心位于中心位置;尽量缩短变倍透镜组和补偿透镜组的焦距,减小了导程和补偿量,降低了后固定组的入射光线高度。同时,后工作距离缩短到 34 mm,实现了变焦相机的小型化设计。

3 相机结构

变焦相机的结构如图2所示,由前固定组、变倍组、补偿组、后固定组、主体、凸轮、CMOS传感器、电机和相机安装过渡件等部分组成。

变倍透镜组和补偿透镜组通过各自的滑架部件在主体内做滑动,电机上的齿轮带动凸轮在主体上转动,导钉连接的滑架沿凸轮上的曲线槽做直线运动^[9-11]。滑架以轴孔配合方式的轴向往复直线运动,孔与轴间隙配合,限制4个方向的自由度;导钉也在主体直槽内滑动,限制周向的一个方向的自由度。主体前端连接前固定组,后端连接后固定组。当变倍透镜组随滑架直线运动时,滑架距前固定组物镜越近相机的放大倍数越小,反之,滑架距前固定组物镜越远相机的放大倍数越大。补偿透镜组随滑架是把不同焦距的每一个像点都补偿到后固定透镜组上;后固定透镜组只为拉长光学系统的后节距,以使像点落在 CCD 像面上。相机由长焦到短焦的变换时间设计为 3 s;相机的外轮廓尺寸为 195 mm \times 60 mm \times 55 mm,

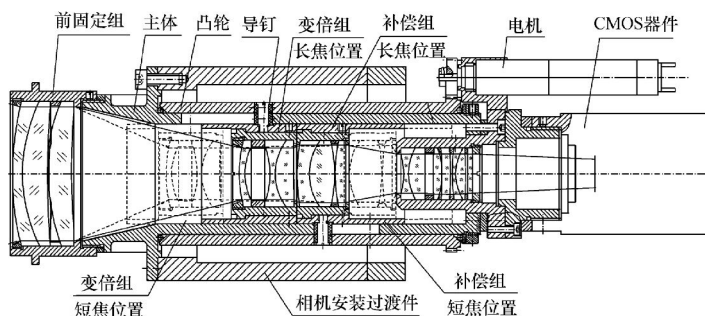


图 2 变焦相机结构

Fig. 2 Structure diagram of zoom camera

满足相机安装空间的要求。

凸轮展开图如图 3 所示。凸轮的外径为 40 mm,壁厚为 3 mm,材料为硬铝合金,光学设计理论计算出变倍透镜组凸轮槽曲线与补偿透镜组凸轮槽曲线的对应关系,由加工中心仿形加工出曲线槽;相机由长焦变到短焦,变倍透镜组运动的轴线距离,即最大导程为 20.39 mm,相应的补偿透镜组运动的轴线距离为 13.1 mm。

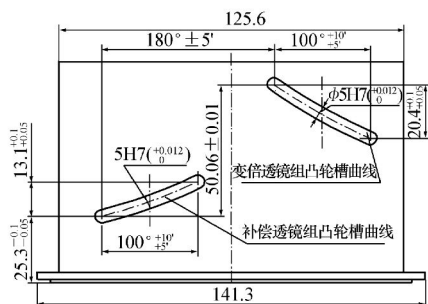


图 3 凸轮展开图

Fig. 3 Diagram of cam

4 精度保证措施

变焦距镜头的检测装置如图 4 所示。

变焦距镜头装配后,影响镜头质量的因素有变倍透镜组和补偿透镜组在连续变焦过程中直线度晃动精度,和各透镜组的像在理论上的点(称等效节点 J)沿光轴方向移动 ΔX (物镜允许沿光轴方向的安装误差),以及垂直光轴方向移动 ΔY (像点的位移量)。在镜头变焦过程中,沿光轴安

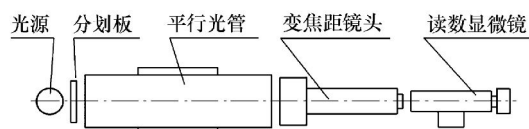


图 4 变焦距镜头检测示意图

Fig. 4 Testing sketch map of zoom lens

装误差 ΔX ,一般为反向误差;像点的位移量 ΔY ,一般为直线度误差,也就是结构装配后的动态变焦检测,即晃动精度^[12-13]。

在相机连续变焦过程中为保证像面的稳定性,变倍透镜组和补偿透镜组的相互滑动必须满足式(1)的函数关系。

$$f'_b \left[\frac{1}{\beta_b} + \beta_b \right] + f'_c \left[\frac{1}{\beta_c} + \beta_c \right] = f'_b \left[\frac{1}{\beta_{bi}} + \beta_{bi} \right] + f'_c \left[\frac{1}{\beta_{ci}} + \beta_{ci} \right] = c, \quad (1)$$

式中: f'_b 为变倍透镜组的焦距, f'_c 为补偿透镜组的焦距, β_b 为变倍透镜组的初始倍率, β_c 为补偿透镜组的初始倍率, β_{bi} 为变焦过程中任一位置变倍透镜组的倍率, β_{ci} 为变焦过程中任一位置补偿透镜组的倍率, c 为常量。

本文结合变焦相机的结构特点,对镜头结构设计、加工,以及后期装调过程中需要控制的精度问题进行阐述,对于影响变焦相机最终成像质量的各种复杂因素的精度分析请参阅其它文献资料。

4.1 凸轮曲线槽与滚子的配合间隙

对于像质要求高的镜头应尽可能提高齿轮精

度以减小电机齿轮与凸轮上齿轮间的传动误差。目前齿轮加工制造水平较高,齿轮传动引起的空回误差对变焦镜头焦距的影响可以忽略不计,因此只需要选择合适的齿轮配合精度。随着数控机床的蓬勃发展,凸轮曲线槽的加工误差几乎为零,也可忽略不计,但凸轮曲线槽宽与导钉的配合精度必须严格控制,其引起的误差可使变倍透镜组和补偿透镜组在主体内的滑动不按照设计要求轨迹沿光轴方向运动,造成一定的位移,从而影响变焦距镜头像面的一致性^[2,14]。首先,凸轮加工完成后应修整凸轮槽的等宽,就数控机床加工能力而言,已能够保证等宽要求;但在利用金属刀具铣削凸轮曲线过程中,会在凸轮槽内壁留下刀痕,主要措施是利用油石或是小型号砂纸对凸轮槽内壁进行修整,进一步提高光洁度,使凸轮槽更接近等宽;对凸轮槽宽度一致性要求一般为小于0.01 mm,表面粗糙度小于0.4 μm 。其次,导钉上滚子材料的选择尤为重要,既要耐磨,还需有一定的润滑性,这样变焦过程中运动才会平稳。二硫化钼作为一种新型材料已被广泛应用到有类似需求的结构件上,本文采用了二硫化钼作为变焦距镜头滚子的材料。再次,凸轮槽等宽修整好后与二硫化钼滚子进行配做,二者的配合间隙决定了系统光轴在长短焦变换过程中的重复精度和焦距的大小,因此二者的间隙一般选取为6~9 μm ;导钉与滚子之间的配合一般选取过盈配合,即滚子不绕导钉转动;配合间隙的选取因相机使用环境或是精度需求不同而不同,当间隙过大时,相机长短焦变换过程中系统的像面将沿光轴窜动,造成像面不一致;当间隙过小时,若相机使用环境温度过低,会出现卡滞或抱死现象,因此最好在二硫化钼滚子与凸轮槽之间留有合适的间隙。

4.2 主体的精度

主体是镜头的核心结构件,主要问题集中在主体的刚度和圆柱度。主体的刚度不好会造成加工过程中加工应力释放,装卡时变形,以及加工过程中抖动等问题;为提高主体的圆柱度必须重视车削过程中的切削量分配,并加强热处理工艺,如果主体与滑架配合处圆柱度不好,变焦距镜头很难达到设计指标。

4.3 返回空回误差

主体与滑架的配合间隙决定滑架在主体内滑动过程中的角晃动精度的返回空回误差。所谓返回空回误差就是在滑架运动到任意位置时,凸轮反向转动,导钉带动滑架反向运动,滑架在运动前后,滑架上的基准平面镜的反射像的角度变化值。返回空回误差的检测对于变焦镜头装调来说是非常重要的一个环节,其综合体现了变倍组和补偿组连续滑动的精度信息,一般要求变倍滑架和补偿滑架的返回空回误差小于2",否则将直接影响镜头在连续变焦过程中像面的不一致性。

4.4 滑架直径 D 与滑架长度 L 的比例

常温下,滑架能够直接装入主体,两者之间就是间隙配合,但间隙过大往往很难消除返回空回误差的影响,因此一般选择两者之间为过盈配合,但过盈量要尽可能地小,一般应在0.001~0.005 mm,以保证滑架弹性变形,并在主体内自如滑动;当滑架过盈装入主体时,滑架支撑主体内壁,增加主体内壁的压力,从而增大了摩擦,当相机在低温环境工作时容易抱死,因此应该尽可能提高滑架外圆和主体内壁光洁度,减小摩擦力,防止抱死现象;当滑架在主体内往复运动且自身的刚度较小时,由于摩擦力的作用会使其产生变形,而变形对返回空回误差的影响非常大,因此建议滑架直径 D 与滑架长度 L 之间的比值应该小于1,即滑架的长度最少应该与滑架的直径相等,以提高滑架自身的刚度,保证镜头装调时顺利消除返回空回误差。

5 相机检测

图5为变焦相机装调CMOS器件,定像面现

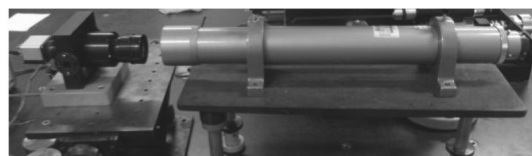


图5 变焦相机定像面

Fig. 5 Fixing CCD on the zoom lens

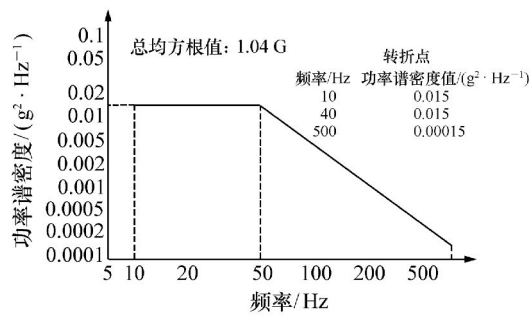


图6 随机振动曲线

Fig.6 Curve of stochastic vibration



(a) 短焦图像

(a) Image of the short focus



(b) 长焦图像

(b) Image of the long focus

图7 外场图像

Fig.7 Location images of camera

场照片,相机整机质量为0.71 kg。相机装调结束后进行3个方向的随机振动试验,随机振动曲线如图6所示,试验前、后相机各项指标参数稳定,工作正常。试验后检测相机的传递函数,在频率为50 lp/mm时,取各焦距下相机光学传递函数的平均值大于0.2。变焦相机外场拍摄的照片,如图7所示,图像清晰,层次丰富。

6 结 论

变焦相机采用五倍连续变焦距光学系统,由4个透镜组构成,外轮廓尺寸为195 mm × 60 mm × 55 mm。通过机械补偿的方法,即凸轮-齿轮运动实现连续变焦。前、后固定组安装在主体的两端,变倍和补偿透镜组通过滑架在主体内滑动,导钉安装在凸轮曲线槽内,导钉带动变倍和补偿透镜组滑架沿轴向运动,变倍和补偿透镜组按照理论设计轨迹运动,实现相机连续变焦。在加工和装调过程中相机凸轮曲线槽与滚子的配合间隙应控制在6~9 μm,注意主体的刚度和圆柱度,结构装调时应保证变倍滑架和补偿滑架的返回空回误差小于2",再转入光学装调。滑架直径 D 与滑架长度 L 之间的比例值应该小于1,使滑架具有足够的刚度,从而保证镜头像面的一致性。相机质量为0.71 kg,高、低温,以及振动试验后,相机的光学传递函数在50 lp/mm空间频率下大于0.2,外景成像图像清晰,层次分明。

参考文献:

- [1] 刘崇进,史光辉.机械补偿法变焦镜头三个发展阶段的概况和发展方向[J].应用光学,1992,13(2):12-13.
LIU CH J,SHI G H. General situations of mechanical compensation zoom lens in its three development phases and its developing direction[J]. *J. Appl. Opt.*,1992,13(2):12-13. (in Chinese)
- [2] 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.
MENG J H,ZHANG ZH,SUN X W. Cam optimization of a zoom lens[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2002,31(1):51-54. (in Chinese)
- [3] 史亚莉,王一凡,宋春鹏,等.连续变焦距镜头焦距实时输出问题研究[J].仪器仪表学报,2006,27(6):50-51.
SHI Y L,WAN G Y F,SONG CH P,*et al.*. Active focal length output of zoom lens[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*,2006,27(6):50-51. (in Chinese)
- [4] COX A. A survey of zoom lenses[J]. *SPIE*,1997,3129:2-12.
- [5] 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,2007,15(11):1756-1759.

- WANG Y F, XUE Y. Design of heavy caliber and high precision cam varifocal mechanism[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 5(11):175-21759. (in Chinese)
- [6] ARTHUR COX J, CALDWELL B. Tracking zoom lens: a survey of zoom lenses[J]. *SPIE*, 1997, 3129:2212.
- [7] 田铁印, 王红, 谷凤安. 三线阵立体测绘相机光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(11):2692-2698.
TIAN T Y, WANG H, GU F A. Optical system design of three-line array stereoscopic mapping camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11):2692-2698. (in Chinese)
- [8] 白瑜, 杨建峰, 阮萍. 长波红外连续变焦光学系统设计[J]. *光电技术应用*, 2008, 23(5):15-17, 21.
BAI Y, YANG J F, RUAN P. Design of long wavelength infrared continuous zoom optical system[J]. *Electrooptic Technology Appl.*, 2008, 23(5):15-17, 21. (in Chinese)
- [9] 苗健宇, 张立平, 吴清文. 测绘相机光学镜筒设计加工及装配[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(9):1648-1653.
MIAO J Y, ZHANG L P, WU Q W. Design, manufacturing and assembly for optical lens of mapping camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9):1648-1653. (in Chinese)
- [10] 梁来顺. 变焦距系统设计的快速求解[J]. *应用光学*, 2004, 25(1):17-20.
LANG L SH. A rapid computing method of zoom optical design[J]. *J. Appl. Optics*, 2004, 25(1):17-20. (in Chinese)
- [11] 苗健宇, 张立平, 吴国栋. 三线阵 CCD 立体测绘相机结构实现技术[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(10):2183-2189.
MIAO J Y, ZHANG L P, WU G D. Realizable technology of light-machine structure for three-line CCD tridimensional mapping camera[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2011, 32(10):2183-2189. (in Chinese)
- [12] 张存武. 变焦距光学系统设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2006:25-45.
ZHANG C W. Design of zooming optical system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2006:25-45. (in Chinese)
- [13] 苗健宇, 张立平, 翟岩. 三线阵 CCD 立体测绘相机集成装调技术[J]. *中国光学*, 2012, 23(8):366-372.
MIAO J Y, ZHANG L P, ZHAI Y. Technology of integrative assembly for three-line array CCD tridimensional mapping camera[J]. *Chinese Optics*, 2012, 23(8):366-372. (in Chinese)
- [14] 陈鑫, 付跃刚. 变焦系统凸轮廓线的优化设计[J]. *应用光学*, 2008, 29(1):63-64, 74.
CHEN X, FU Y G. Optimal design of cam curve for zoom system[J]. *J. Appl. Opt.*, 2008, 29(1):63-64, 74. (in Chinese)

作者简介:



苗健宇(1979—), 辽宁铁岭人, 博士, 副研究员, 2003年、2005年于中南大学分别获得学士、硕士学位, 2010年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事光学有效载荷光机结构设计和制造等方面的研究。E-mail: mjyokok@163.com



翟岩(1974—), 男, 吉林省长春人, 硕士, 副研究员, 2011年于吉林大学获得硕士学位, 主要从事遥感器机械设计方面的研究。E-mail: zhaiy163@tom.com



张立平(1957—), 吉林长春人, 学士, 研究员, 硕士生导师, 1982年于长春光学精密机械学院获得学士学位, 主要从事航天光学遥感器总体制造方面的研究。E-mail: zhang_lp2005@163.com



梅贵(1984—), 男, 江苏高邮人。助理研究员, 2006年、2009年于清华大学分别获学士、硕士学位, 主要从事空间遥感器机械结构设计方面的研究。E-mail: meigui840428@163.com