



DOI: 10.12086/oe.2019.180462

一种 30 倍连续变焦电视光学系统装调技术研究

张向明*, 王中强, 昌明, 李玉喜, 姜峰,
王章利, 马力, 赵玮

西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065

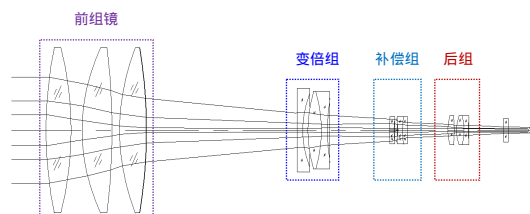
摘要: 针对 30 倍连续变焦电视公差灵敏度高, 装调难度大的问题, 运用光学仿真方法分析各分离透镜偏心对光学系统 MTF 的影响。结果显示, 前组镜中心偏差对系统像质影响敏感, 会产生非对称像差。本文优选光机界面的结构形式, 使透镜下表面自动定心, 微调上表面将偏心控制在公差范围内。变倍组、补偿组作为运动组件, 在变焦过程中光轴共轴性也是影响系统像质的关键因素。本文采用机械定心工装使运动组件的中心轴线与导杆轴线平行, 再以前组镜透射光轴为基准, 校正所有光学部件光轴与之共轴。光学系统经过精密装调, 小视场像质分辨率达到 2.43", 接近衍射分辨率极限。

关键词: 连续变焦; 光机界面; 定心方法

中图分类号: TN206

文献标志码: A

引用格式: 张向明, 王中强, 昌明, 等. 一种 30 倍连续变焦电视光学系统装调技术研究[J]. 光电工程, 2019, 46(4): 180462



Research on a 30 times ratio continuous zoom television optical system adjustment technology

Zhang Xiangming*, Wang Zhongqiang, Chang Ming, Li Yuxi, Jiang Feng,
Wang Zhangli, Ma Li, Zhao Wei

Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an, Shaanxi 710065, China

Abstract: Aiming at the problem of high tolerance sensitivity and difficult adjustment of 30 times continuous zoom TV, the effects of eccentricity on the MTF (modulation transfer function) of the optical system were analyzed by optical software. The results show that the central error of the front mirror group is sensitive to the asymmetric aberration. In this paper, the structural form of the spacer ring machine program is optimized, so that the lower surface of the lens is automatically centering. As the moving component of the system, both zoom lens group and compensation lens group are the key factors affecting the system image quality during the zooming process. In this paper, mechanical centering tooling is used to make the central axis of the moving assembly parallel to the axis of the guide rod. The optical axis of all components is corrected by the optical axis of the front mirror group. The optical system is precisely adjusted, and the optical resolution of the small field of view reaches 2.43", which is close to the limit of diffraction resolution.

Keywords: continuous zoom; optical machine interface; centering method

Citation: Zhang X M, Wang Z Q, Chang M, et al. Research on a 30 times ratio continuous zoom television optical system adjustment technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(4): 180462

收稿日期: 2018-09-06; 收到修改稿日期: 2018-10-29

作者简介: 张向明(1981-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事光电系统装配技术等方面的研究。E-mail: 532276445@qq.com

1 引言

连续变焦电视可以实现目标图像大小的连续变化,产生由远及近的感觉,在光电跟踪和侦察系统中,这种视场连续变化的特性具有重要意义,可以对目标进行更细致的观察,且不易丢失目标^[1-2]。因此,连续变焦电视已经在光电跟踪及侦察平台等领域得到广泛的应用。目前,国内外各种形式的连续变焦镜头种类很多,但变倍比一般均低于20倍,光学总长与小视场焦距的压缩比值一般在0.8左右。通过光学仿真,可知系统的压缩比值越小,对光学系统的装调精度要求越高,装调难度也越大。本文所述的连续变焦电视变倍比达到30倍,光学总长与小视场焦距的压缩比值达到0.5,因此对系统的装调精度提出了更高要求。传统的调试方法是以前组镜的透射光轴为基准,调校变倍组、补偿组和后组光轴与之共轴,但获得的图像质量较差,很难满足使用要求。前组镜的口径较大,镜片较多,需将所有透镜均定心到0.3'以内,系统非对称性像差才能获得较好的控制。本文采用反射定心法和优选光机界面结构形式使每片透镜的两个表面中心偏差均控制在0.3'以内,达到公差控制要求。变倍组、补偿组作为系统的运动组件,其在变焦过程中应保证运动组件的光轴平行性^[3],因加工、装调误差,共轴偏差较大,使系统成像质量下降。本文采用机械定心法使运动轴线与导杆轴线平行,再通过透射光轴校正法使所有光学部件实现0.5'的光轴平行性要求。光学系统最终获得了小视场光学分辨率为2.43"的清晰图像,接近衍射分辨率极限。

2 连续变焦光学系统简介

连续变焦的基本原理是利用系统中两个或两个以上透镜组的移动,改变系统组合的焦距,同时保持像面位置不变,从而使系统在变焦过程中获得连续清晰的图像^[4-5]。本文选用的四组式变焦系统如图1所示,

要求变焦范围12 mm~360 mm,口径60 mm,光学总长不大于180 mm,光学系统传递函数值48 lp/mm处不小于0.4,小视场光学分辨率达到2.5"。

3 影响成像质量的装调因素分析

根据变焦系统的工作原理可以看出,影响连续变焦电视成像质量的主要装调因素有透镜偏心误差和光学运动组件共轴性误差。本文将为这两个方面开展研究。

3.1 透镜偏心误差

变焦系统的光学压缩比值越小,对透镜共轴性要求越高,因机械加工和装调误差的存在,系统中各透镜会产生平移、倾斜等误差,破坏了透射式光学系统轴线的唯一性与旋转对称性,使系统产生非对称性像差^[6-7]。因此,约束透镜偏心误差是提高系统成像质量的关键。

3.2 光学运动组件的共轴性

变倍组、补偿组均是通过螺钉与滑块连接,由曲线套筒驱动滑块沿导杆轴向移动,实现系统焦距变化。因螺钉连接只在轴向起到约束作用,径向自由度较大,不易保证系统光轴共轴,变焦过程中图像会出现横向位移且像质变差。因此,运动组件与固定组件的光轴共轴性也是提高系统成像质量的关键。

3.3 透镜偏心误差对系统MTF影响

光学仿真方法可分析各分离透镜偏心对系统MTF(modulation transfer function)的影响,并针对实测偏心值实时评价系统MTF^[8]。仿真结果如图2,前组镜中任意一块透镜出现偏斜,MTF值下降均很快,只有将偏心误差控制在0.3'以内,在特征频率48 lp/mm处才高于0.4,而变倍组、补偿组和后组中单块透镜位置精度要求较低,整体光轴共轴偏差控制在0.5',以内其特征频率48 lp/mm处就高于0.4,满足系统要求。

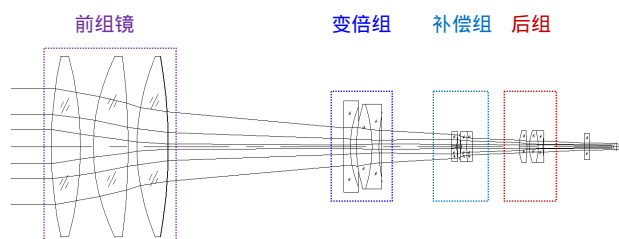


图1 变焦光学系统图

Fig. 1 Zoom optical system diagram

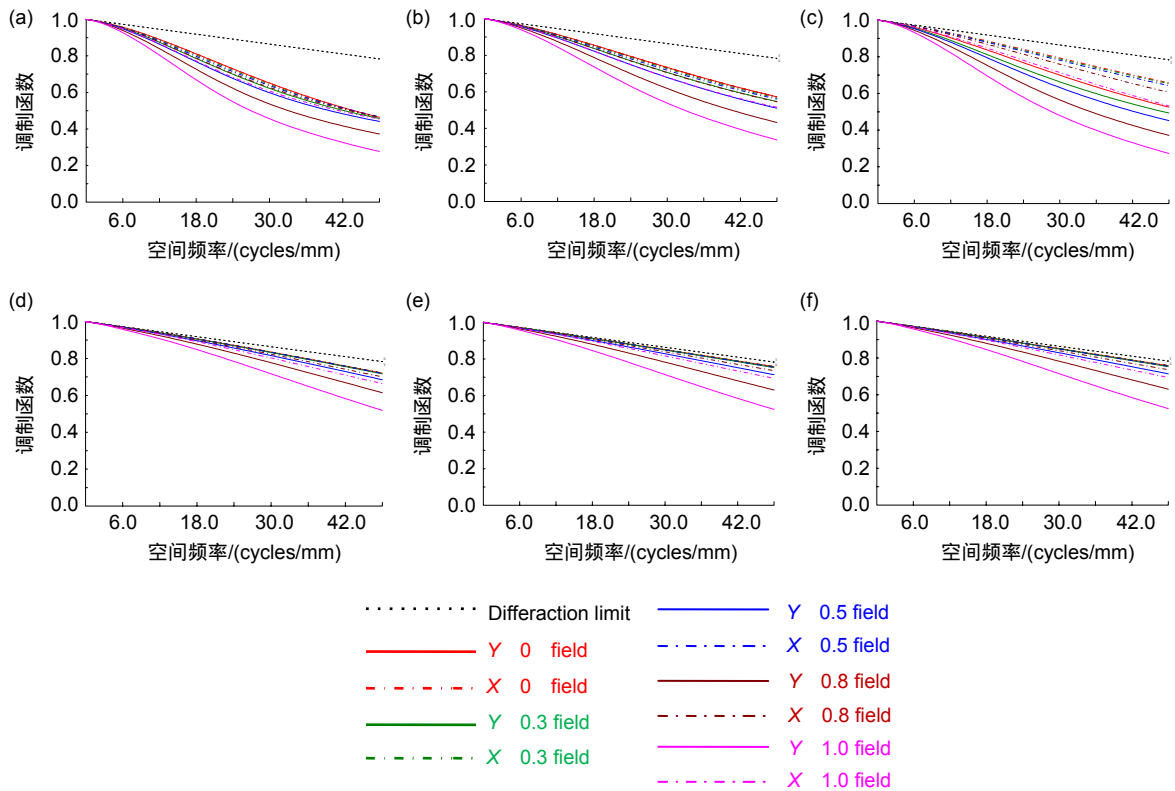


图 2 光学仿真结果。(a) 前组镜透镜 1; (b) 前组镜透镜 2; (c) 前组镜透镜 3; (d) 变焦组; (e) 补偿组; (f) 后组

Fig. 2 Optical simulation results. (a) Front group lens 1; (b) Front group lens 2; (c) Front group lens 3; (d) Multifocal group; (e) Compensating group; (f) Posterior group

4 前组镜定心方法研究

前组镜由三片双凸透镜组成，推顶透镜时，透镜在重力作用下只能在隔圈的光机界面上沿曲面滑动，无法平移，因此不能实现双面定心。但是如果球面与隔圈匹配良好，则下表面球心会在重力作用下自动位于隔圈的中心轴上，且调整透镜倾斜不会对下表面球心位置产生影响，实现透镜下表面自动定心效果^[9-10]。

常用的光机界面类型如图 3 所示。

- 1) 尖角界面：这是目前最常见的结构形式，易于加工，应用广泛，接触应力均匀但接触应力较大，易形成系统象散；
- 2) 相切界面：相切界面只适合凸球面，加工精度高，成本低且比尖角界面更小的接触应力，对于凸球面而言是一种较理想的光机界面；
- 3) 球形界面：将光机界面加工成与透镜下表面曲

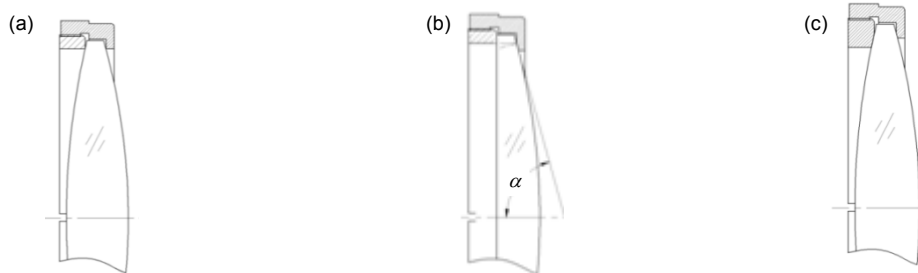


图 3 光机界面结构形式。(a) 尖角界面; (b) 相切界面; (c) 球形界面

Fig. 3 Interface structure of optical machine. (a) Sharp angle interface; (b) Tangent interface; (c) Spherical interface

率半径相同的弧形面，其优点是轴向力作用在大面积上，透镜所受应力小，缺点是加工精度要求高，加工难度大，成本高。

本文前组镜的镜筒光机界面选择球形界面，隔圈选择相切界面，镜筒预设灌胶孔和顶丝孔，透镜与镜筒之间的间隙为 0.1 mm，留出中心偏的调整空间，压圈与透镜之间放置弹性橡胶圈，起到防松和减小应力作用。前组镜结构如图 4 所示。

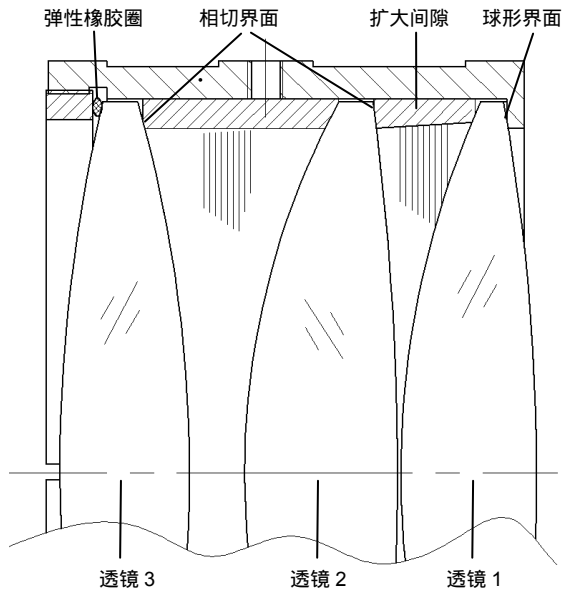


图 4 前组镜结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of front group mirror

4.1 前组镜定心装调

将镜筒固定到双光路中心偏测量仪的气浮转台上，通过打表实现镜筒内圆柱面的轴线与气浮转台旋转轴同轴，误差控制在 5 μm 以内，使用专用吸盘将透镜 1 装入镜筒中，然后观察上表面球心像的划圈，

通过顶丝孔中的螺钉推顶透镜，使镜片在光机界面上滑动，将上表面划圈调整到 0.3' 以内，然后在灌胶孔中注入硅橡胶，在胶层固化过程中监测划圈变化，如有变化及时调整，待硅橡胶固化后完成该透镜装配。透镜 2、透镜 3 的定心方法如上，同时透镜的清洁度应满足要求。

4.2 中心偏差测量

通过双光路中心偏测量仪对前组镜中心偏进行测量，以回转轴为基准，实测透镜上下表面中心偏差如表 1 所示，可见透镜下表面自定心效果良好，每个面的中心偏差均控制在 0.3' 以内。

5 运动组件共轴性装调

变焦系统需要在整个变倍过程中图像清晰且光轴稳定，因此运动组件不仅应与运动轴线平行，还应与系统光轴共轴，传统装调方法只能实现在变焦某个特定的装调位置处光轴共轴，不能保证在变焦运动范围内全程共轴，图像会在变焦过程中出现横向移动和像质变差现象。针对以上问题，本文设计了芯轴定心工装(如图 5 所示)，在机械装调过程中，通过机械定位的方式使运动轴线与导杆轴线平行，然后再通过透射光轴校正法实现光轴同轴。

1) 测量前组镜的镜筒内孔尺寸，设计高精度的定心芯轴，其中芯轴与镜筒配合间隙为 0.01 mm，芯轴各段同轴度也为 0.01 mm。

2) 定心芯轴依次穿入前组镜、变倍组和补偿组的镜筒中，通过调节变倍组、补偿组与滑块之间的空间位置，使滑块沿导杆运动时可带动镜筒在芯轴上平滑滑动，实现运动轴线与导杆轴线平行。然后拆除定心芯轴，安装变倍组和补偿组的透镜。

3) 光轴一致性调校，以前组镜透射光轴为基准，

表 1 前组镜实测中心偏结果

Table 1 Results of the test center of front group mirror

透镜		中心偏差/(°)		
透镜名称	曲率半径/mm	X向	Y向	合计
透镜 1	184.38	0.026	-0.058	0.064
	-171.79	-0.081	-0.244	0.257
透镜 2	104.23	0.062	0.049	0.079
	-221.34	0.177	-0.068	0.189
透镜 3	94.62	0.025	0.141	0.143
	-234.43	-0.223	-0.131	0.259

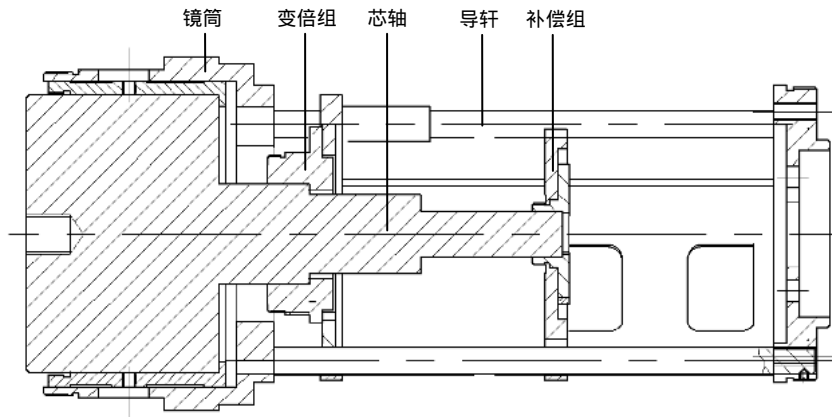


图5 芯轴定心示意图

Fig. 5 Centering diagram of mandrel

通过旋转或微调透镜，使变倍组、补偿组光轴与前组镜光轴共轴。后组通过微调螺孔的过孔量使光轴与系统光轴共轴，完成光学系统的装调。表2为使用双光路中心偏测量仪分别测量变倍组、补偿组和后组的透射光轴与前组镜光轴之间的相对偏差量的测量结果。

光学系统经过精密装调并获得调试数据，通过光学仿真得到了连续变焦系统小视场的光学传递函数曲线，可以看出，传递函数值在特征频率 48 lp/mm 处优

于 0.4，满足系统的设计要求，如图6所示。

6 效果验证

光学系统检测结果如下：小视场星点图像能量集中，无明显像差，小视场光学分辨率达到 2.43"，图像对比度良好，通过实测 MTF 曲线可以看出，在特征频率 48 lp/mm 处优于 0.4，满足设计要求，如图7所示。

表2 实测运动组分光轴平行差结果

Table 2 Result of the parallel difference of the optical axis of the motion component

镜组	实测结果/(")
变倍组	20.02
补偿组	26.03
后组	19.92

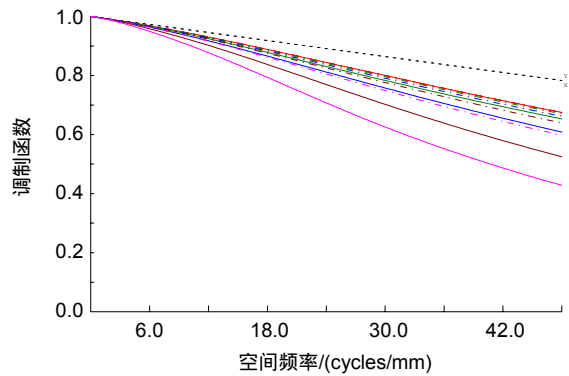


图6 小视场光学传递函数曲线

Fig. 6 MTF results of small field of view

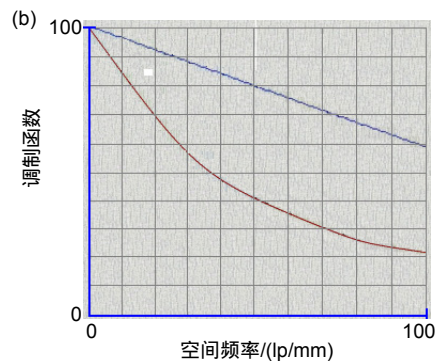
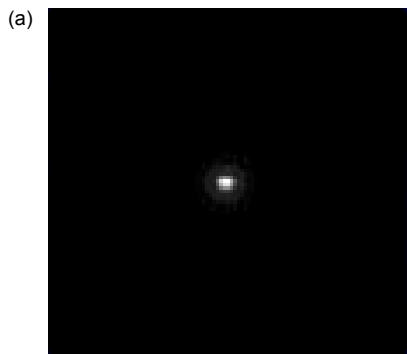


图7 系统星点像(a)和实测 MTF 曲线(b)

Fig. 7 System star (a) and measured MTF curve (b)

7 结 论

本文通过单组透镜组自身定心装调与镜组间机械定心装配的方法相结合,实现变焦系统的定心装调。优选光机界面的结构形式,使透镜下表面获得良好的自定心效果,通过反射法对上表面进行定心装调,使前组镜单片透镜的上下两个面的中心偏差均小于 $0.3'$ 。采用机械定心法使运动轴线与导杆轴线平行,通过透射光轴校正法实现所有光学部件共轴,使运动组件在变焦过程中始终与光轴共轴,图像无横向移动,成像清晰,小视场光学系统像质分辨率达到 $2.43''$ 。

参考文献

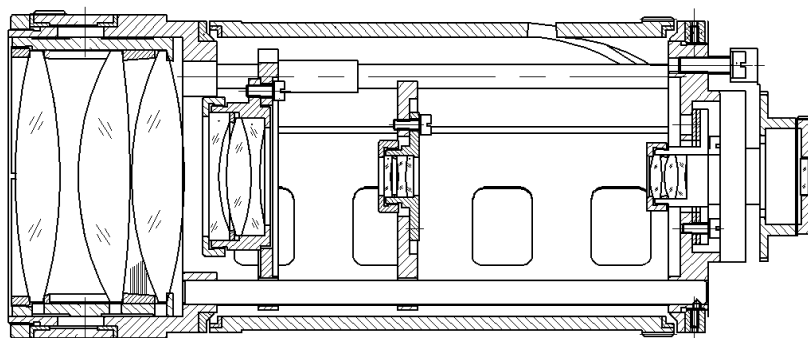
- [1] Tian H X, Yang J F, Ma X L. Design for visible video zoom optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(9): 1797–1799.
田海霞, 杨建峰, 马小龙. 可见光变焦电视光学系统设计[J]. *光子学报*, 2008, **37**(9): 1797–1799.
- [2] Zhao Y, Gong Y, Hu Y N. Method of tolerance sensitivity reduction of zoom optical system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(7): 121–125.
赵阳, 巩岩, 胡宜宁. 变焦距光学系统降低公差灵敏度的方法[J]. *光电工程*, 2009, **36**(7): 121–125.
- [3] Li L P, Tang L B. A new method of compensation for optic axis offsets in continuous zoom TV camera[J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(S1): 208–209.
李丽平, 唐良宝. 补偿电视摄像机连续变焦中光轴偏移的一种新方法[J]. *光学技术*, 2007, **33**(S1): 208–209.
- [4] Li Z L, Xue D L, Zhang X J. Optical and mechanical design for long focal length and wide-field optical system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(12): 2485–2490.
李志来, 薛栋林, 张学军. 长焦距大视场光学系统的光机结构设计[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(12): 2485–2490.
- [5] Tao C K. *Zoom Lens Design*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988: 153–163.
陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988: 153–163.
- [6] Zhang Y M. *Applied Optics*[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 1987: 576–596.
张以谟. 应用光学[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 1987: 576–596.
- [7] Yang X J, Wang Z Q, Mu G G, et al. Aberration properties of the decentered and tilted optical systems[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(11): 1658–1662.
杨新军, 王肇圻, 母国光, 等. 偏心和倾斜光学系统的像差特性[J]. *光子学报*, 2005, **34**(11): 1658–1662.
- [8] Song Y F, Sun W P, Wang G L. One kind of high resolution TV guided optical zoom system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, **34**(2): 203–208.
宋岩峰, 孙卫平, 王国力. 一种高分辨率电视制导连续变焦光学系统[J]. *应用光学*, 2013, **34**(2): 203–208.
- [9] Yoder P R, Jr. *Opto-Mechanical Systems Design*[M]. Zhou H X, Cheng Y F, trans. Beijing: China Machine Press, 2008: 185–189.
约德. 光机系统设计[M]. 周海宪, 程云芳, 译. 北京: 机械工业出版社, 2008: 185–189.
- [10] Yao Q H, Yan J C. Design of zoom optical system with high zoom ratio[J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, **36**(5): 667–672.
姚清华, 闫俊岑. 高变倍比变焦光学系统设计[J]. *应用光学*, 2015, **36**(5): 667–672.

Research on a 30 times ratio continuous zoom television optical system adjustment technology

Zhang Xiangming*, Wang Zhongqiang, Chang Ming, Li Yuxi,

Jiang Feng, Wang Zhangli, Ma Li, Zhao Wei

Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an, Shaanxi 710065, China



Continuous zoom TV

Overview: This paper introduces a kind of continuous zoom TV. The zoom ratio reaches 30 times and the ratio of total optical length to focal length of small field of view reaches 0.5. The smaller the optical compression ratio of the continuous zoom system is, the higher the tolerance sensitivity of the system is and the greater the difficulty of mounting and adjusting is. The traditional debugging method is that the transmission optical axis of the former set of mirrors is taken as the reference, and the optical axis of the adjusting group, the compensating group and the rear group are coaxial with the former set of mirrors. However, the image quality is poor and it is difficult to meet the use requirements. Eccentricity error of lens and coaxial error of optical motion module are the main factors affecting the image quality of continuous zoom TV. The effects of eccentricity on the MTF (modulation transfer function) of the optical system were analyzed by optical software. The results show that the central error of the front mirror group is sensitive to the asymmetric aberration. Because of the existence of machining and alignment errors, the lens of the system produces translation and tilt relative to the optical axis, so the system produces asymmetric aberration. The front mirror group consists of three double convex lenses. If the convex sphere of the lens is well matched with the optical-mechanical interface of the high-precision diaphragm, the spherical center of the lower surface of the lens is automatically located on the central axis of the diaphragm under gravity. Adjusting the inclination of the lens will not affect the position of the spherical center of the lower surface, thus realizing the automatic centering of the lower surface of the lens. In this paper, the structural form of the spacer ring machine program is optimized, so that the lower surface of the lens is automatically centering. As the moving component of the system, both zoom lens group and compensation lens group are the key factors affecting the system image quality during the zooming process. In this paper, mechanical centering tooling is used to make the central axis of the moving assembly parallel to the axis of the guide rod. The optical axis of all components is corrected by the optical axis of the front mirror group. The optical system is precisely adjusted, and the optical resolution of the small field of view reaches 2.43", which is close to the limit of diffraction resolution.

Citation: Zhang X M, Wang Z Q, Chang M, *et al.* Research on a 30 times ratio continuous zoom television optical system adjustment technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(4): 180462

* E-mail: 532276445@qq.com