

文章编号:1002-2082(2012)03-0474-06

连续变焦大气相干长度测量系统设计

李 广, 汪建业, 邵 慧, 徐 鹏

(中国科学院 安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气成分与光学重点实验室,安徽 合肥 230031)

摘要:望远镜在大气光学参数测量中起到至关重要的作用,测量方法是通过跟踪恒星或者信标实时测量数据。基于不同速度信标的移动特点,需要设计3 m~6 m变焦大气相干长度测量系统用于大气相干长度的测量,设计波段为可见光486 nm~656 nm,探测元全视场11 mm,入瞳直径300 mm。利用光学设计软件设计出一款折返式变焦望远系统,光学结构由卡式望远系统和三组元机械补偿式连续变焦系统组成,系统结构简单,成本低,凸轮曲线平滑,压力升角均小于45°。系统可对变焦焦距数据实时输出,适合于快速和慢速不同场合下实时进行大气参数测量。

关键词:变焦系统; Zemax; 光学设计; 望远系统

中图分类号:TN942.2; TH743

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201233.0301006

Continuous zoom measurement system for atmospheric coherence length

LI Guang, WANG Jian-ye, SHAO Hui, XU Peng

(Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and

Fine Mechanics, CAS, Hefei 230031, China)

Abstract: Telescope is important to measure atmosphere optical parameters by tracking star or beaconing to measure data in real time. Based on the moving characteristics of beaconing at different speeds, design of a continuous zoom measurement system for atmospheric coherence length was required. The designed focal length of the system was 3 m~6 m, the wavelength was 486 μm~656 μm, the charge coupled device (CCD) size was 11mm and the entrance pupil diameter was 300mm. By using optical design software, a catadioptric zoom telescope system was designed which consisted of a Cassegrain telescope and three-component mechanically compensated zoom system. The optical zoom system has high quality, simple structure, low cost and smooth cam curve, and all the pressure rise angles are no more than 45°. It can output real-time zoom data of focus length and is suitable for measuring the atmosphere coherent length real-timely on the occasion of high and low speeds.

Key words: zoom system; Zemax; optical design; telescope system

引言

大气相干长度是用于激光大气传输以及自适应光学研究的重要参量,望远镜是主要的测量工具,传统的测量是对于静态的信标或者恒星,这些目标都是不动或者慢速移动的,所以选用定焦望远镜就可以满足跟踪需求。现需要跟踪快速目标测量大气相干长度,用定焦望远镜会存在寻找目标困难、跟踪容易丢失目标等问题,因此要设计一

款连续变焦大气相干长度测量系统,来满足不同速度的目标跟踪测量^[1-2],跟踪和寻找目标时使用短焦模式,测量时选用长焦模式。

1 测量系统结构

测量大气相干长度仪测量光路系统包括光楔,望远系统,电荷耦合元件(charge coupled devices, CCD),如图1所示。光束通过光楔和望远镜在CCD

分成 2 个像,通过计算机数据处理软件分别求出 CCD 靶面上 2 个星象的中心位置,求出总抖动量 $\Delta\rho_c$,利用 howard waldie, A. (1988) 方法计算两星象连接方向的总抖动量 $\Delta\rho_c$ 与 r_0 的关系式(1),计算出大气相干长度 r_0 。 $\Delta\rho_c$ 与望远镜的焦距 f 、光楔楔角 α 、光楔折射率 n 成正比,关系如式(2)所示^[1-2]。 $\Delta\rho_c$ 越大,仪器抗干扰能力越强,抖动力差越稳定,测量越精确,所以焦距应越大越好。

$$r_0 = \left\{ \frac{2f^2 [0.36(\lambda/D)^{1/3} - 0.242(\lambda/d)^{1/3}] \lambda^{5/3}}{\Delta\rho_c \Delta\rho_c} \right\}^{1/3} \quad (1)$$

$$\Delta\rho_c = 2f \cdot \alpha(n-1) \quad (2)$$

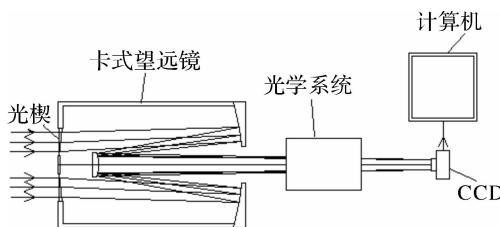


图 1 测量系统结构

Fig. 1 Structure of measurement system

2 设计指标

假设斜程移动目标的角速度为 4 mrad/s, 望远镜焦距为 6 m, CCD 尺寸选用 1.69 cm(2/3 in), 其对角线尺寸 11 mm, 靶面上 2 个星象移动速度为 24 mm/s, 这样跟踪系统跟踪起来比较困难。所以在跟踪快速移动目标时应选择短焦模式, 跟踪慢速移动目标时应选择长焦模式。

光学系统的焦距为 3 m~6 m, 视场为 3.67 mrad~1.83 mrad, 入瞳直径为 300 mm, 光谱波段为 486 nm~656 nm, 调制传递函数 (modulation transfer function, MTF) 在 30 lp/mm 处大于 0.3, MTF 在 60 lp/mm 处大于 0.1。系统总机械长度应控制在 700 mm 以内。

3 设计思路

根据设计指标要求,提出了一种带三组元机械补偿式连续变焦系统的望远系统,基本思路是采用焦距 6 000 mm 反射式望远镜后接 2^\times 三组元机械补偿式连续变焦系统。

3.1 望远系统设计

望远镜是小视场、大焦距的光学系统,包括折射式、反射式和折反式。折射式包括伽利略和开普勒望远镜,折射式主要适用小口径大视场的望远系统,

反射式和折反式望远物镜应用于天文望远镜中,与透射式相比具有制造工艺较简单、设计灵巧、成本低的优点,反射式物镜还有无色差、工作波段大的优点,折反式望远镜能更好地校正像差,但成本要增加。对于此系统选用卡塞格林反射式望远物镜,其系统长度较短,同时主镜和副镜的场曲符号相反,系统像差校正简单,有利于扩大视场^[3-4]。

3.2 三组元机械补偿式连续变焦系统设计

三组元机械补偿式连续变焦系统由如图 2 所示的正透镜 f_0 、变倍透镜 f_1 、补偿透镜 f_2 组成,它的物方数值孔径 (numerical aperture, NA) $NA = D/2 \cdot f_{\text{望}} = 0.025$, 视场物方最大 11 mm, 其光焦度分配正透镜 f_0 焦距为 64 mm, 变倍透镜 f_1 和补偿透镜 f_2 组合焦距为 32 mm~64 mm。系统需要补偿望远镜的场区、球差并消除色差。

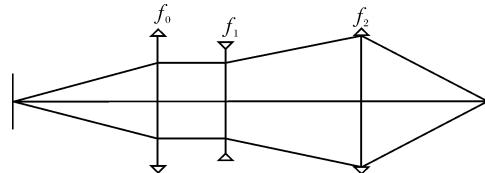


图 2 三组元变焦系统图

Fig. 2 Three-component zoom system

变焦距镜头目前有两大类型,即光学补偿焦距镜头和机械补偿变焦镜头。由于凸轮加工精度的不断提高,机械补偿法变焦距镜头已经成为目前应用的主体。机械补偿变焦镜头有好多种,但都是为了保证物和像之间的共轭距不变,通过变焦组和补偿组的相对运动来达到变焦的目的。变焦系统一般由前固定组、变倍组、补偿组、后固定组构成,前后固定组的存在可以更好地平衡变焦系统的像差和分配系统的光焦度。为了使变焦比为 2^\times 的系统结构简单轻巧,正透镜 f_0 使光路准直,在其后采用二组元变焦距系统,结构如图 3 所示。

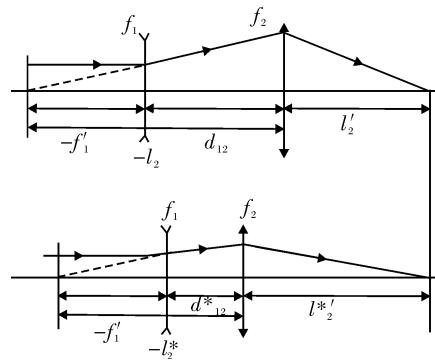


图 3 二组元机械补偿变焦图

Fig. 3 Two-component mechanically compensated zoom system

对于二组元变焦距系统,后组为变倍组,前组为补偿组,变倍组做线性运动,补偿组做非线性运动保持像面稳定,根据变焦系统高斯光学可求出二组元的变焦轨迹^[4-9]。设 M 为变倍比,初始系统焦距为 f_{12} ,某一焦点处的焦距为 f_{12}^* ,补偿组焦距为 f_1 ,变倍组焦距为 f_2 ,初始二组元间距 d_{12} ,某一焦点处的二组元间距 d_{12}^* ,变倍组初始物距和像距分别为 $-l_2$ 、 l'_2 ,变倍组某一焦点处的物距和像距分别为 $-l_2^*$ 、 l'^*_2 ,变倍组放大倍率为 β_2 ,变倍组某一焦点处的放大倍率为 β_2^* ,某一焦点处补偿组和变倍组移动距离分别为 x 、 y ,则:

初始系统焦距为

$$f_{12} = \frac{f_1 \cdot f_2}{f_1 + f_2 - d_{12}}$$

求出对应系统焦距变倍组放大倍率为

$$\beta_2^* = \frac{f_{12}^*}{f_1}$$

对应系统焦距变倍组像距为

$$l_2^* = (1 - \beta_2^*) \cdot f_2$$

对应系统焦距变倍组物距为

$$l_2 = (\frac{1}{\beta_2^*} - 1) \cdot f_2$$

对应系统焦距两组元间距为

$$d_{12}^* = f_1 - l_2^*$$

补偿组移动距离为

$$x = l'_2 - l'^*_2$$

变倍组移动距离为

$$y = d_{12}^* - d_{12} + x$$

变焦初始参数设定为 $f_1 = -80$ mm、 $f_2 = 40$ mm、 $d_{12} = 60$ mm, 补偿组移动量为 x 时, 相应便可求得像面稳定时变倍组移动量 y , 对应关系列于表 1。

表 1 补偿组和变倍组移动量 x 和 y

Table 1 Compensated component group movement x and variable component group movement y

X	y	X	y
0	0	27.900 0	-9.6
7.490 9	-1.6	29.976 5	-11.2
13.466 7	-3.2	31.644 4	-12.8
18.276 9	-4.8	32.968 4	-14.4
22.171 4	-6.4	34.000 0	-16
25.333 3	-8		

3.3 变焦凸轮曲线

机械变焦凸轮曲线在变焦系统设计中也是一

个重要环节,设计出的凸轮要平滑,压力角不能过大,并满足实际加工需要。变焦系统优化后,凸轮变化与焦距的曲线关系如图 4 所示。

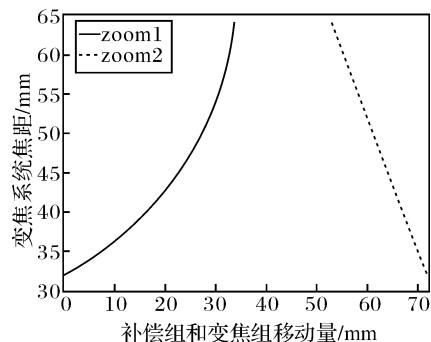


图 4 补偿组、变焦组移动量与系统焦距的曲线关系

Fig. 4 Zoom system focal length versus variable group and compensated group movement

凸轮曲线斜率方程^[10]为

$$\tan\alpha_x = \frac{180 \cdot dx}{R \cdot d\theta}$$

$$\tan\alpha_y = \frac{180 \cdot dy}{R \cdot d\theta}$$

式中 α_x 、 α_y 为凸轮压力升角; d_x 、 d_y 为补偿组和变倍组微移动量; R 为凸轮外圆半径; $d\theta$ 为转角微移动量(单位:°)。由经验可知,凸轮曲线的压力升角要小于 45°,否则容易出现卡死状况。为了让变焦系统的焦距变化均匀,采用焦距与凸轮旋转角度成线性比例关系,这样可以方便地得出各转角的焦距数值,关系如下式:

$$f = f_{\text{短}} + \frac{f_{\text{长}} - f_{\text{短}}}{\theta_{\max}} \theta$$

根据这种线性关系可以画出各组元移动轨迹,如图 5 和图 6 所示。

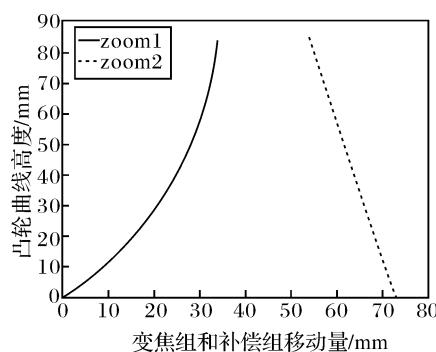


图 5 变焦组、补偿组移动量与凸轮曲线展开高度关系

Fig. 5 Cam curve height versus compensated group and variable group movement

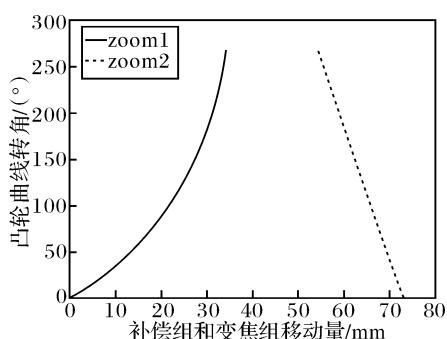


图6 补偿组、变焦组移动量与凸轮曲线旋转角度关系

Fig. 6 Cam curve angle versus variable group and compensated group movement

4 系统设计结果

望远物镜需要校正的像差有球差,正弦差,色差,光学系统优化后结构图如图7所示。系统机械总长660 mm,光学系统的长焦、中焦、短焦局部如图7和图8所示,各组元间距值在表2中给出。

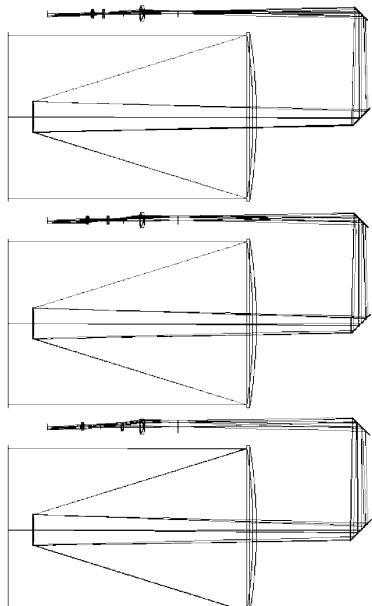


图7 优化后系统结构

Fig. 7 Optimized system structure

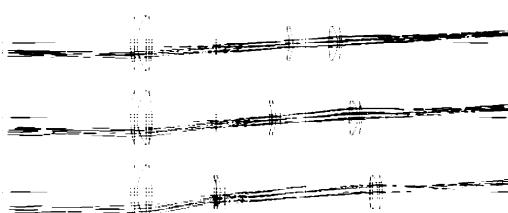


图8 三组元变焦系统仿真图

Fig. 8 Simulation diagram of three component zoom system

表2 长焦、中焦、短焦各组元位置

Table 2 Two vari-groups positions at long EFL, medium EFL and short EFL

焦距/mm	补偿组 f_1 与 f_0 距离/mm	变焦组 f_2 与 f_0 距离/mm
长焦 6	64	82.973
中焦 4.5	55.926	92.342
短焦 3	30	101.745

探测器单元像素尺寸 $8 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$,探测器极限分辨率是 62.5 lp/mm,本文选取 10 lp/mm、30 lp/mm、62.5 lp/mm 各视场的 MTF 曲线图,图9、图10 和图11 分别给出长焦、中焦和短焦的 MTF 曲线。可以看出,此望远系统在视场各变焦位置的 MTF 均大于 0.1,说明此系统有较好的成像质量。图12 和图13 是望远系统实验采集的短焦和长焦图像。

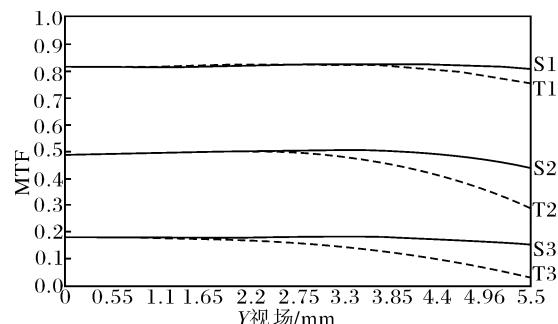


图9 长焦在各视场不同频率的MTF曲线

Fig. 9 Long EFL MTF curve versus FOV at different frequencies

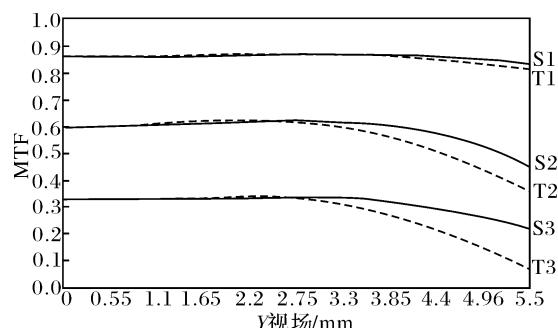


图10 中焦在各视场不同频率的MTF曲线

Fig. 10 Middle EFL MTF curve versus FOV at different frequencies

5 变焦机构设计

三组元变焦系统是变焦望远系统的核心部分,主要介绍变焦望远镜后的三组元变焦系统结构。变焦系统导向机构除了保持变倍组和补偿组

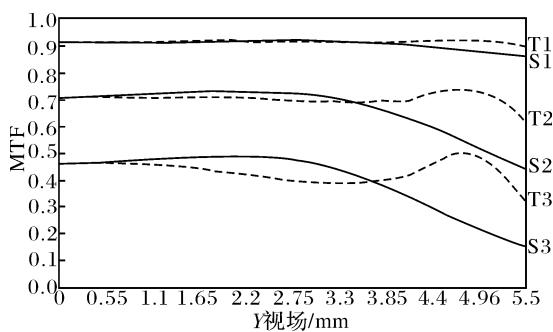


图 11 短焦在各视场不同频率的 MTF 曲线

Fig. 11 Short EFL MTF curve versus FOV at different frequencies



图 12 短焦时采集的图像

Fig. 12 Collected image at short EFL



图 13 长焦时采集的图像

Fig. 13 Collected image at long EFL

直线运动外,变倍组和补偿组的其余 5 个自由度都要限制,导轨种类多种多样,包括圆筒导轨、槽型导轨、圆棒导轨,3 种导轨各有特点和适用范围。

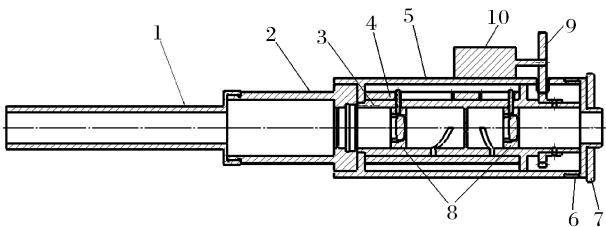
圆筒导轨的结构是变倍组和补偿组的外框,与凸轮内壁配合,凸轮旋转时带动其直线运动,机构工艺简单、结构紧凑、装配方便,适用于小口径的变焦望远镜中。其在设计上存在不足,比如约束条件不够,变倍组和补偿组会与凸轮仪器旋转,

导致望远镜像面跳动,导向精度低^[11]。

槽型导轨的结构是变倍组和补偿组与主体上加工的方型槽配合,构成槽型导向结构。方型槽的分度精度要求高,装配方便,导向精度高。

圆棒导轨的结构是把圆棒作为变倍组和补偿组的导轨,其在电影摄像变焦镜头使用普遍。圆棒导轨的导向精度高,承载的负荷大,是超定位结构,其装配困难,需要精确装配。

本系统变焦部分的变焦组和补偿组透镜直径是 16 mm,为了让其机构装配方便,导轨精度高,采用槽型导轨结构,如图 14 所示。变焦机械部分包括凸轮筒、带直槽上套筒、外套筒、补偿组和变倍组。



1-外接卡塞系统筒;2-前固定透镜筒;3-凸轮;

4-带直槽上套筒;5-外套筒;6-外套筒接头;

7-接头滚花压圈;8-变焦组和补偿组;

9-传动齿轮;10-电机

图 14 变焦机械结构装配图

Fig. 14 Zoom system mechanism structure assembly

变焦系统工作原理是,带直槽的上套筒通过沉头螺丝与外套筒固定,变焦组和补偿组通过导销连接在凸轮筒槽和凸轮上套筒的直槽里,电机带动凸轮旋转,由于直槽和凸轮槽的限制,变焦组和补偿组沿着各自直槽运动,其结构简单,变焦效果良好,未出现卡死现象。

6 结论

介绍一款连续变焦大气相干长度测量系统的光学和机械结构设计,采用光学系统结构简单、成本低的材料,设计出了光学质量接近衍射极限的光学变焦系统,凸轮曲线平滑且压力升角均小于 45°。其机械结构装配方便,导轨精度高,可实现自动化控制,可对变焦焦距数据实时输出,适合于快速和慢速不同场合下实时进行大气参数测量,解决了大气相干长度实时跟踪测量问题。

参考文献:

- [1] FRIED D L. Optical resolution through a randomly

- inhomogeneous medium for very long and very short exposures[J]. J. Opt. Soc., Am., 1966, 56: 1372
- [2] 汪建业. 大气光学湍流光学测量方法的研究[D]. 合肥:中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2004.
WANG Jian-ye. Studies of measuring atmospheric optical turbulence[D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese)
- [3] 王之江. 实用光学设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
WANG Zhi-jiang. Handbook of practical optical technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2006. (in Chinese)
- [4] 张以漠. 应用光学[M]. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2008.
ZHANG Yi-mo. Applied Optics[M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. (in Chinese)
- [5] 陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
TAO Chun-kan. Zoom optical system design[M]. Beijing: Defense Industry Publishing House, 1988. (in Chinese)
- [6] ANHK, PSK. Diffraction limited constant-resolution zoom lens across multiwavelengths for the advanced technology solar telescope [J]. SPIE, 2006, 6342: 63421L.
- [7] 钱义先, 梁伟, 高晓东. 含多个非球面大视场卡塞格林系统光学设计[J]. 光子学报, 2009, 38(4): 896-899.
QIAN Yi-xian, LIANG Wei, GAO Xiao-dong. Optimal design of cassegrain system with wide angle and multiple aspheric surfaces[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(4): 896-899. (in Chinese with an English abstract)
- [8] 曾吉勇, 金国藩, 王民强等. 折衍混合复消色差望远镜设计的 PWC 方法[J]. 光子学报, 2006, 35(10): 1569-1572.
ZENG Ji-yong, JIN Guo-pan, WANG Min-qiang, et al. Hybrid diffractive-refractive apochromatic telescope objectives design using pwc method [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(10): 1569-1572. (in Chinese with an English abstract)
- [9] 贺应红, 马臻, 赵葆常, 等. 实现两档长焦距的空间遥感光学系统设计[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 3028-3033.
HE Ying-hong, MA Zhen, ZHAO Bao-chang, et al. Optical system design of space sensor with two long focal length lens[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 3028-3033. (in Chinese with an English abstract)
- [10] 王平, 张葆, 程志峰. 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.
WANG Ping, ZHANG Bao, CHENG Zhi-feng. Optimal design of cam structure of zoom lens[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(4): 893-898. (in Chinese with an English abstract)
- [11] 廖胜, 沈忙作. 连续变焦望远镜导向机构的设计与研究[J]. 光电工程, 1999, 26(增刊): 59-61.
LIAO Sheng, SHEN Mang-zuo. An analysis of technological properties for cam in continuous zoom telescope[J]. Opto-Electronic Engineering, 1999, 26(s1): 59-61. (in Chinese with an English abstract)