

文章编号 1004-924X(2008)11-2087-05

大口径折反射式变焦距物镜的设计

崔继承

(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:介绍了一种大口径变焦距物镜的设计方法。该方法将整体光学系统分为前后两个部分,前端光学系统采用反射式的结构来满足大口径的要求,后端光学系统采用将变焦距物镜倒接的方式,在系统的一次像面处进行组合,通过对后端倒接变焦距物镜的优化设计来保证系统的成像质量。用具体的实例验证说明了该项设计,结果表明这种设计方法是可行的,系统结构简单紧凑,解决了大口径光学系统难以实现连续变焦的问题。

关键词:变焦距物镜;光学系统;大口径;成像质量

中图分类号:TH703 **文献标识码:**A

Design of large aperture refractive-reflective zoom lens

CUI Ji-cheng

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

Abstract: An optical design method for large aperture zoom optical system was introduced. The optical system was divided into two segments called front optical system and back optical system. The front optical system used a reflective system to meet the request of large aperture and the other one used a converse zoom objective. The two segments were assembled at the first imaging of the optical system to ensure the imaging quality of the optical system through optimizing the converse zoom objective of back optical system. This method is proved feasible from a design example, it also shows that designed system is simple and compact and easy to focus for zoom lens with large aperture.

Key words: zoom lens; optical system; large aperture; imaging quality

1 引言

随着现代观察和测量技术手段的不断提高,越来越多的情况下需要对远距离的目标进行观察和监视。由于要对远距离的物体清晰成像,所以

对观察用光学系统的要求也随之提高。能实现远距离观察和测量的大口径光学系统越来越多地应用在地面观察测量系统中。为了满足对远距离目标同时发现和识别的要求,本文将变焦镜头的设计思想结合到大口径光学系统中,使大口径的光学系统在保证成像质量的同时又能实现光学系

收稿日期:2008-07-22;修订日期:2008-09-25.

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划重大项目(No. 2006BAK03A02)

统焦距的连续变化。

2 光学系统的设计思想

变焦距镜头是一种焦距(或倍率)可以连续变化而像面位置保持相对稳定的镜头^[1-2]。光学系统的放大率 β 与焦距 f' 有如下关系:

$$\beta = \frac{f'}{x}, \quad (1)$$

式中: f' 为光学系统的后焦距;

x 为光学系统前焦点到物面的距离。

放大率的变化为:

$$\frac{d\beta}{\beta} = \frac{df'}{f'} - \frac{dx}{x}. \quad (2)$$

从式(2)可知,如果光学系统的焦距不变,要想在画面上得到不同倍率的像,必须改变被摄体到前焦点的距离 x ,而在被摄体的距离不变时,光学系统放大率的连续变化,就取决于焦距的连续变化^[3]。

对远距离物体成像时,为了使到达接收器的能量高于接收器响应值,可根据式(3)增大光学系统的通光口径。

$$E' = \frac{1}{4} \pi B \tau (D/f)^2, \quad (3)$$

式中: E' —— 像面照度;

B —— 物体光亮度;

τ —— 物镜的透过率。

因此,大口径的光学系统往往采用卡塞格林式或牛顿式的结构。大口径变焦距物镜就是在这种结构基础上结合变焦距物镜设计的。这种光学系统为了减小后端变焦距设计的难度通常都有一次像面,在一次像面的后端接变焦距结构。由于变焦距物镜的设计是以远距离物体为目标进行的,可近似地看成平行光入射,在焦距变化的过程中像面保持不变,因此,将变焦距结构应用到大口径光学系统时,如果采用传统的对接方式(变倍组在前大于补偿组在后)就相当于对有限远的目标进行连续变焦,使得后端变焦距系统的结构复杂,如果将传统的变焦距结构颠倒(补偿组在前大于变倍组在后)与前端大口径光学系统产生的一次像面进行对接,即将一次像作为后端变焦距系统的成像面,在变焦距物镜的出射处形成平行光,再

组合上一组正光焦度的透镜形成最终的像面。这样的设计思想便于后端变焦距物镜的设计,使得整体光学系统结构简单紧凑,便于装调。

3 光学系统的设计过程

为了进一步地说明大口径变焦距物镜的设计思想,以一个实例来进行具体阐述。以一款像元数为 $1\,400 \times 1\,400$, 像素大小为 $7.5 \mu\text{m}$ 的高清晰度 CCD 作为接收器件,光学系统的焦距定为 $f' = 2\,000 \sim 6\,000 \text{ mm}$, 可以进行连续变焦。

3.1 光学系统指标的确定

在已知接收器的尺寸和光学系统焦距的前提下,取探测器的对角线视场作为系统的视场,得到系统的视场角在焦距为 $f' = 2\,000 \sim 6\,000 \text{ mm}$ 时, $2\omega = 2 \times 0.211\,7^\circ \sim 2 \times 0.070\,6^\circ$, 系统的入射口径为 $\Phi 600 \text{ mm}$, 系统相对孔径的选择以 CCD 接收器靶面灵敏度为确定标准,取: $D/f' = 1:3.33 \sim 1:10$, 参考波长取 CCD 探测波长的应用范围 $\lambda = 486.13 \sim 525.17 \sim 620 \text{ nm}$, 系统的变倍比为 3 倍。

3.2 前端大口径光学系统的确定

考虑实际使用情况及总体尺寸,前端大口径光学系统采用卡塞格林式的结构,如图 1 所示。

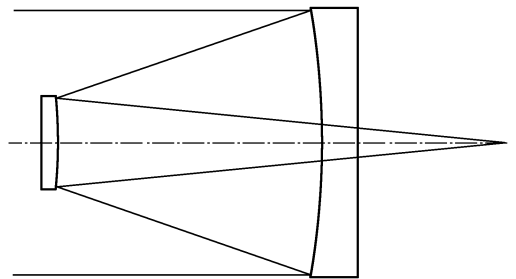


图 1 前端光学系统

Fig. 1 Front optical system

前端采用卡塞格林式有以下几种优势:前端光学系统不会带来色差的影响,从而减轻了后端光学系统对于色差及二级光谱校正的压力;前端光学尺寸较小;前端光学系统的球差和场曲较小;由于视场角小,前端光学系统畸变也很小。这样的一种光学系统可以有效地减小后端变焦距物镜的设计难度,减小后端变焦距系统像差校正的压

力,能够得到较为理想的结果。前端光学系统焦距的选取原则为:充分考虑前端光学系统的遮拦比值;使前端光学系统紧凑;考虑前端光学系统实际加工的难易程度。根据以上的要求,前端卡塞格林式光学的焦距选取为 $f' = 3\ 060\ \text{mm}$,其光学系统像差曲线如图 2 所示。

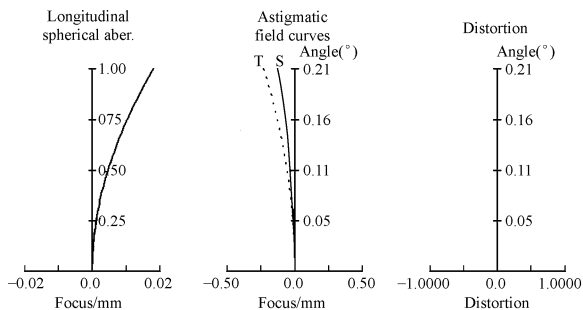


图 2 前端光学系统像差曲线

Fig. 2 Imaging aberration curves of front optical system

3.3 后端变焦距光学系统的确定

光学系统的焦距由组成该系统的各组元光焦度及其间隔所决定,而各组元的焦距是不能连续变化的。因此,光学系统焦距的连续变化,取决于后端各组元透镜间隔的连续变化。在各组元透镜间隔发生连续变化的同时,系统的像面位置要保持不变^[4]。

按照对像面的补偿方式考虑,变焦距镜头目前有两大类型,即光学补偿变焦距镜头和机械补偿变焦距镜头。光学补偿通过两组或三组透镜做相联的线性移动实现变倍,像面不能完全补偿,只有几个补偿点,避免了凸轮的使用,但结构尺寸较大。机械补偿通常由前固定组、变倍组、补偿组和后固定组构成,其中变倍组和补偿组是运动组元。变倍组做线性运动以实现焦距的连续变化,补偿组做非线性运动以补偿变倍组运动时引起的像面偏离,从而保持变倍过程中的像面稳定。一般用凸轮实现两运动组元的移动,由于凸轮加工精度不断提高,机械补偿法变焦距镜头已经成为目前应用比较广泛的一种形式^[5-6]。本实例是采用正组机械补偿的变焦距镜头倒接作为后端光学系统实现焦距的连续变化的。

正常的四组式正组补偿变焦距镜头的结构形式如图 3 所示。该结构主要由前固定组、变倍组、补偿组和后固定组构成。

本实例采用前面所述的倒接式光学系统的设

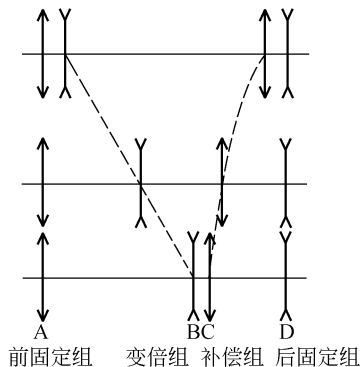


图 3 正组补偿结构

Fig. 3 Configuration of positive compensated zoom lens

计方法,即后固定组作为前固定组,前固定组为后固定组的方式,这样使后端变焦距光学系统的光阑前置,通过变倍组和补偿组的相关联动实现像面的稳定。这种结构方式的设置使光学系统得到了简化,结构更加紧凑,能实现较好的成像质量。

3.4 光学系统设计结果

根据上述设计思想,设计了光学系统,其结构形式如图 4 所示。

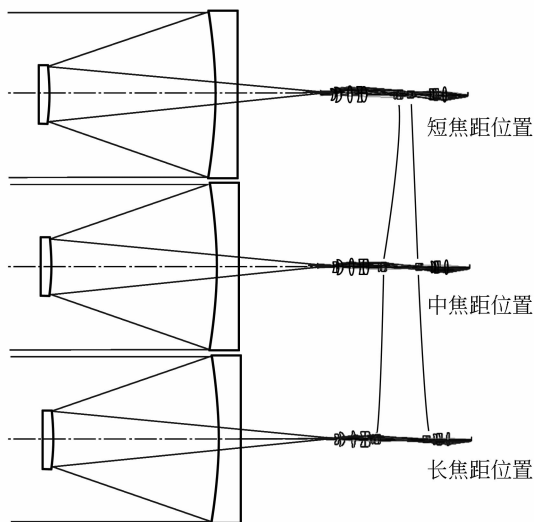


图 4 光学结构图

Fig. 4 Configuration of zoom optical system

后端变焦距光学系统的结构如图 5 所示。

该光学系统的焦距范围是 $f' = 2\ 000 \sim 6\ 000\ \text{mm}$,在整体像差校正过程中由于焦距较长,因此对系统二级光谱的校正就成为像差校正的主要矛盾,而球差对于系统光学传递函数所带来的影响相对于二级光谱来说比较小,属于次要矛盾,所以在进行像差校正时放开对球差的限制,主要针对

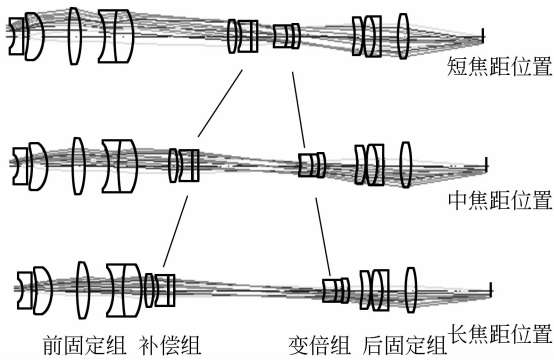
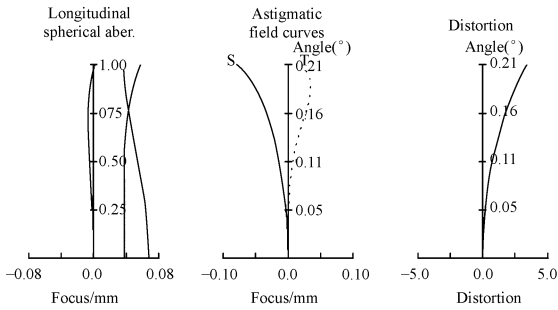


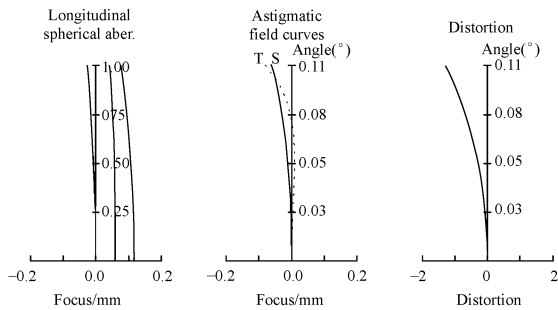
图 5 后端变焦距光学系统

Fig. 5 Back zoom optical system



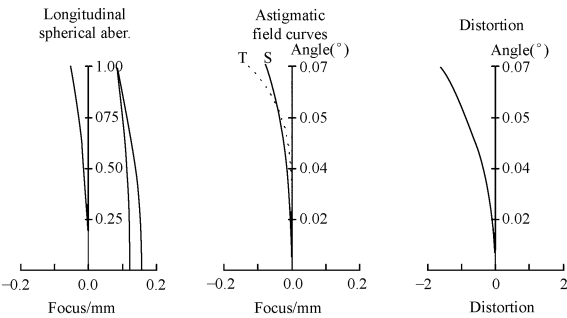
(a) 短焦距的像差曲线

(a) Imaging aberration curves of short focus



(b) 中焦距的像差曲线

(b) Imaging aberration curves of middle focus

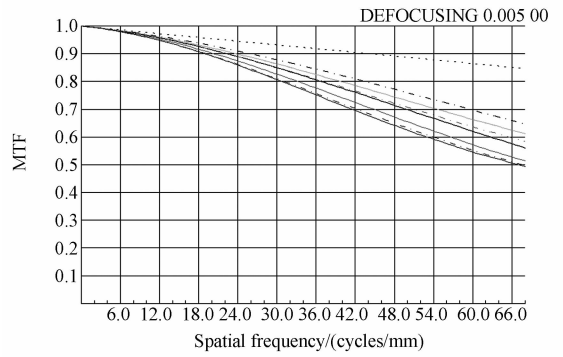


(c) 长焦距像差曲线

(c) Imaging aberration curves of long focus

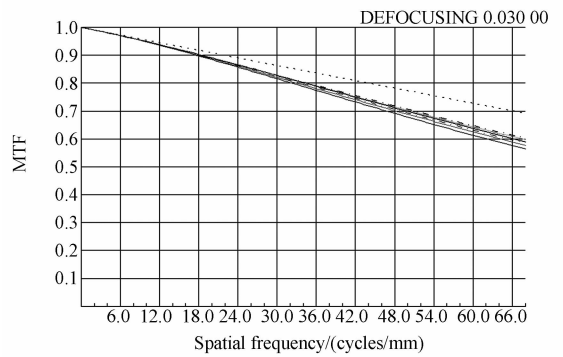
图 6 光学系统的像差曲线

Fig. 6 Imaging aberrations of optical system



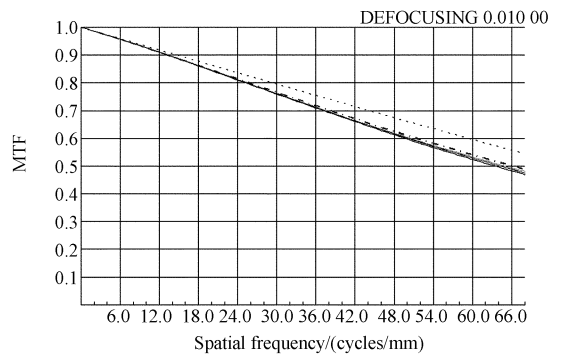
(a) 短焦距的传递函数曲线

(a) MTF curves of short focus



(b) 中焦距的传递函数曲线

(b) MTF curves of middle focus



(c) 长焦距的传递函数曲线

(c) MTF curves of long focus

图 7 调制传递函数曲线

Fig. 7 MTF curves

系统的二级光谱进行像差校正。事实表明,这种校正方法对于长焦距的连续变焦距系统是比较适合的,从光学传递函数的结果就可以得到很好的证明。

光学系统的像差曲线如图 6 所示。

从各焦距位置像差曲线图中可以看出,各焦

距位置时光学系统的整体像差控制得较好,各位置像差分布比较一致。

探测器像元大小为 $7.5 \mu\text{m}$,根据式(4)得到光学系统的特征频率为 68 lp/mm 。

$$A = \frac{1}{2a}, \quad (4)$$

式中: A 为光学系统特征频率; a 为探测器像元大小。

各焦距位置的光学传递函数曲线如图 7 所示。

从各位置传递函数曲线可以看出,系统在各焦距位置处的传递函数曲线数值较高,系统的二级光谱得到了很好的校正,各视场一致性较好,像质良好。

光学系统设计结果参数总结如下:

焦距: $f' = 2\,000 \sim 6\,000 \text{ mm}$,连续变焦;

视场角: $2\omega = 2 \times 0.211\,7^\circ \sim 2 \times 0.070\,6^\circ$;

入射口径: $\Phi 600 \text{ mm}$;

相对口径: $D/f' = 1:3.33 \sim 1:10$;

光学系统总长: $1\,520 \text{ mm}$;

后端变焦距光学系统总长: 500 mm ;

后工作距离: 80 mm ;

变倍组导程: 42.69 mm ;

补偿组导程: 94.46 mm 。

4 结 论

从上述设计实例可以看出,大口径变焦距物镜在设计时,前端光学系统采用小球差、小场曲的结构设计,后端采用常规变焦距物镜倒接的方式,通过像差曲线及光学传递函数的判读可以看出这种方式是能够将系统的成像质量做得很好的,系统的二级光谱得到了很好的校正,同时整体光学系统结构简单紧凑,变倍组和补偿组导程量较小。综上所述,这种大口径变焦距物镜的设计方法是具有可行性的,通过进一步地控制变倍组及补偿组的相对孔径能够将整体尺寸做得更加紧凑。

参考文献:

- [1] 袁旭沧. 光学设计[M]. 北京:北京理工大学出版社,1988.
YUAN X C. *Optical Design*[M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press,1988. (in Chinese)
- [2] 胡家升. 光学工程导论[M]. 大连:大连理工大学出版社,2002.
HU J SH. *Introduction to Optical Engineering*[M]. Dalian:Dalian University of Technology Press,2002. (in Chinese)
- [3] 张铁男,傅汝廉,孙强. 折/衍混合 Petzval 光电摄像物镜设计[J]. 光学精密工程,2005,13(1):1-3.
ZHANG T N, FU R L, SUN Q. Design of hybrid refractive-diffractive petzval objective in visible band[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(1): 1-3. (in Chinese)
- [4] 杨近松,胡君. 光学镜头结构智能化设计系统[J]. 光学精密工程,2005,13(增):21-25.
YANG J S, HU J. Development of intellectualized design system for structural design of optics lens[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(Supp.): 21-25. (in Chinese)
- [5] SMITH W J. *Modern Lens Design*[M]. New York:McGraw-Hill,1992.
- [6] NEIL L A. Compound zoom lenses[J]. *SPIE*, 2005, 586507: 1-10.

作者简介:崔继承(1976—),男,吉林长春人,助理研究员,硕士,主要从事各类光学设计、光谱仪设计及非成像理论的研究。E-mail:jicheng_cui@yahoo.com.cn