文章编号:1002-2082(2010)06-0893-04

利用镜面形变实现共轴折反射式变焦光学系统设计

董伟辉[1,2]，谢永军[2]，李恩玲[1]
(1. 西安理工大学 理学院，陕西 西安 710054；
2. 中国科学院 西安光学精密机械研究所，陕西 西安 710119)

摘 要：在光学系统中加入2个或多个可变光学元件，保持光学元件位置不变，通过微调装置改变这些可变光学元件的焦距使得整个光学系统的有效焦距发生变化。基于该设计思想，结合卡塞格林（Cassegrain）反射式望远镜结构模式，使用ZEMAX光学设计软件设计了焦距为1 600 mm～800 mm，视场0.6°～1.2°的变焦系统，整个系统由2个可变形反射面、1个平面反射面和1个透镜组成，主要通过主镜和次镜面型曲率（可变形镜DMs，Deformable Mirrors）以及入瞳直径的变化实现系统变焦。设计结果表明：系统在空间频率16 lp/mm处调制传递函数大于0.75，最大均方根弥散斑半径均小于探测元尺寸，满足成像要求。

关键词：成像系统；光学设计；可变形镜；变焦系统
中图分类号：TN942；TH703 **文献标志码**：A

Design of coaxial catadioptric zoom system using deformable mirrors

DONG Wei-hui[1,2], XIE Yong-jun[2], LI En-ling[1]
(1. Department of Physics, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China;
2. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, CAS, Xi'an 710119, China)

Abstract: In order to change the focal length of optical zoom system without using moving parts, two or more active optics were added, which could provide variable focal length and create an imaging system with variable magnification. Based on this design concept and combined with Cassegrain reflective telescope, a zoom system was designed with active optical elements in ZEMAX. Its effective focal length is from 1 600 mm to 800 mm, and its field of view (FOV) is 0.6°～1.2°. The whole system consists of 2 reflective deformable mirrors, 1 fold mirror and 1 refractive lens. In order to achieve zoom function, the entrance pupil diameter, the first and the second reflective mirror's radius are variable. Its MTF at the spatial frequency of 16 lp/mm is more than 0.75, the maximum RMS spot diameter is less than detector size. The results show that the imaging quality can satisfy system requirements.

Key words: imaging system; optical design; deformable mirror; zoom system

收稿日期:2010-06-10； **修回日期**:2010-07-29
基金项目:国家自然科学基金(60878034)
作者简介:董伟辉(1985－),男,硕士,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail:dongwh_1985@163.com
通信联系人,谢永军,E-mail:yjxie@opt.ac.cn

引言

变焦系统现在已经广泛应用于光学成像和激光工程应用等方面,它要求整个系统的焦距可以连续变化,并且在变焦过程中像质保持良好、像面保持稳定。变焦光学系统可以实现对距离目标物的连续探测,这在国防经济和国防工业中有着重要的应用价值。最早的变焦距物镜为 1902 年 C. C. Allen 设计的放映物镜[1],直到 1932 年,才出现随着改变焦距而移动焦点的镜头[2]。目前的变焦距系统大都利用改变透镜组间的间隔来实现。而在移动透镜组间隔变焦时,总会伴随着像面的移动,因此要对其进行补偿。补偿方法主要有光学补偿和机械补偿两种[3]。1960 年以前,补偿方式主要以光学补偿为主,其优点是系统结构简单,但是其焦距不能连续变化,而是几个离散值,因而在使用中受到了许多限制。1960 年以后,主要为机械补偿变焦[4]。但是其机械装置较为复杂,变焦速度较慢,在一些特殊领域也受到限制。近几年来,随着国外液晶技术(LC, liquid crystal)、微机电系统(MEMS, micro electro mechanical system)的发展日益成熟,提出了新型的变焦模式[5-10]。在光学系统中加入 2 个或多个可变形液晶透镜(LC SLMs, liquid crystal spatial light modulators)或可变形镜(DMs),通过改变加载的电压使液晶透镜或可变形镜产生弯曲和变形,实现变焦。

2004 年 David V. Wick 等利用 ZEMAX 初步设计了变焦倍率为 3.9× 的变焦系统,在光学系统中加入 2 个变焦透镜来实现变焦[6];之后他们在系统中加入可变形镜,通过其面形的变化实现系统变焦[7-10]。2009 年 Kristof Seidl 等为数码相机设计了变焦倍率为 3× 的离轴全反射式变焦光学系统,整个系统由 4 个反射面构成,其中利用了 2 个可变形反射面[11]。本文分析研究了共轴两反光学系统实现变焦的理论基础,并在 ZEMAX 软件中设计了变焦倍率为 2× 的光学系统。

1　共轴两反射镜变焦理论基础

由文献[8]可知:对于共轴自适应变焦光学系统(以 2 个可变形反射面组成的系统为例),要使系统的数值孔径 n_a 保持不变,系统在变焦时入瞳直径要随着变焦比 τ($\tau=f_{\max}/f_{\min}$)作相应的改变;同时孔径光阑需设置在第 2 个可变形面上。变焦前系统的入瞳直径 D 和半视场角 θ,要根据变焦比,在变焦后成线性变化,即 D 减小 τ 倍,θ 就增加 τ 倍。这也是为了能保证光学不变量(或拉氏不变量)在变焦前后不变。不变量 H 为

$$H=\frac{D}{2}\sin\theta=\frac{W}{2}n_a \tag{1}$$

式中:D 为入瞳直径;θ 为半视场角;W 为探测器的宽;数值孔径 n_a 可由公式(2)近似求得:

$$F/\#\approx\frac{1}{2n_a} \tag{2}$$

探测器的尺寸和数值孔径是固定的,所以对于一个光学系统,H 值在变焦前后是不变的。由公式(1)可知,减小视场角 θ 就需要相应地增加 D 的值。未变焦时系统的总焦距 F 为

$$F=\frac{W}{2\tan\theta} \tag{3}$$

在主镜和次镜之间定义一个小间距 s,其值为

$$s=\frac{S}{F} \tag{4}$$

S 为主镜到次镜的间距;同时定义一个 q,其值为

$$q=\frac{D_2}{D_1} \tag{5}$$

式中:D_1、D_2 分别为主镜和次镜的半径。主镜和次镜的焦距分别为

$$F_1=F-\frac{\tau s}{\tau-q},\quad F_2=F-\frac{qs}{q+s-\tau} \tag{6}$$

由公式(6)可知,当 τ 取 1 时,F_1、F_2 即为系统未变焦时主镜和次镜的焦距,变焦后两反射镜的焦距可根据变焦比 τ 代入以上两式求得。主镜和次镜的形变量可由下式求得:

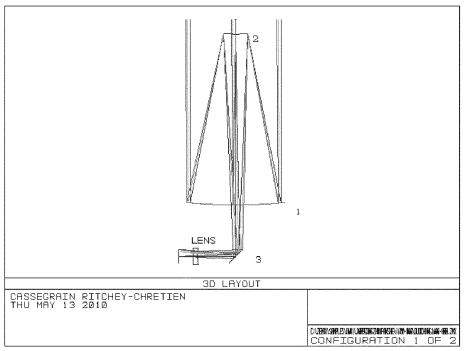
$$\begin{aligned}\Delta s_1&=\frac{1}{16F}\left(D+W\frac{s}{q}\right)^2\frac{q}{s}\frac{\tau-1}{\tau}\\ \Delta s_2&=-\frac{1}{16}\frac{D_2^2}{F}\frac{\tau-1}{qs}\end{aligned} \tag{7}$$

2　设计实例及像质评价

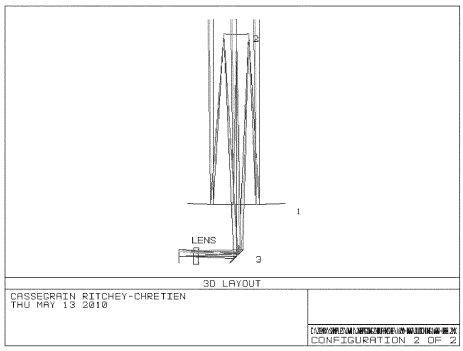
根据第 1 部分的理论,以 Ritcheny-Chretien Cassegrain 光学系统的参数为依据,在 ZEMAX 中优化得到最终的光学系统如图 1 所示。第 1、2 反射面为可变形镜面,为了减少整个光学系统的长度,在第 2 个反射面和透镜之间加了一个具有折叠光路的平面反射镜 3。最终优化得到一个变焦倍率为 2× 的共轴折反射式光学系统,长焦距为 1 600 mm,入瞳直径 113 mm,视场角 0.6°,短焦距为 800 mm。入瞳直径和视场角依据公式(1)可知,分别为 56.7 mm 和 1.2°,系统中心波长为 550 nm。

系统的点列图如图 2 所示,具体数值见表 1。探测器像元尺寸取 30 μm×30 μm 时,可以看出,系

统在焦距1 600 mm 和800 mm 时的最大均方根弥散斑半径分别为2.997 36 μm 和11.975 0 μm,均小于探测元尺寸,满足系统成像要求。



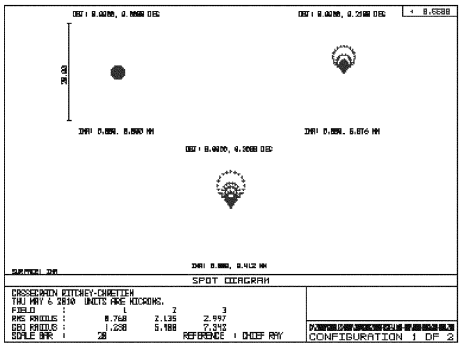
(a) 焦距1 600 mm,FOV=0.6°



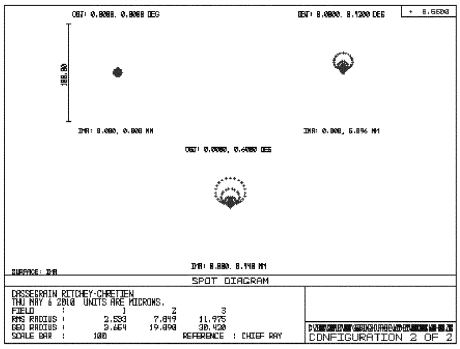
(b) 焦距800 mm,FOV=1.2°

图1　最终光学系统图

Fig. 1　Optical layout of the final design



(a) 焦距1 600 mm,FOV=0.6°

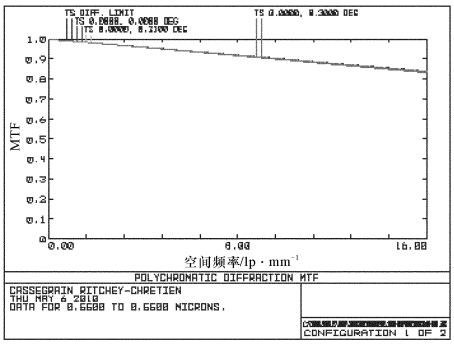


(b) 焦距800 mm,FOV=1.2°

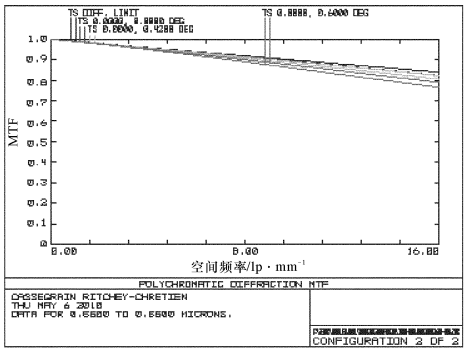
图2　系统点列图

Fig. 2　The spot diagram of the system

系统长焦和短焦的调制传递函数曲线如图3中(a)和(b)所示,具体传递函数值(16 lp/mm)见表1。由图2和表1可知,系统在变焦前后都取得了较好的成像质量,各个视场下的MTF 值都接近衍射极限。



(a) 焦距1 600 mm,FOV=0.6°



(b) 焦距800 mm,FOV=1.2°

图3　系统调制传递函数

Fig. 3　MTF curves of the system

表1　均方根弥散斑半径值和传递函数值(16 lp/mm)

Table 1　RMS of spot diameters and values of MTF(16 **lp/mm**)

焦距/mm	视场/tan	均方根弥散斑半径/μm	MTF
1 600	0	0.767 66	0.838 88
1 600	0.7	2.135 21	0.837 77
1 600	1	2.997 36	0.836 56
800	0	2.532 69	0.823 26
800	0.7	7.849 03	0.822 95
800	1	11.975 0	0.789 70

3　可变形镜的实现

薄膜变形镜(MDM, membrane deformable mirrors)结构简图如图4所示。在基片上产生一个或多个驱动,驱动基片上方设置一个导电薄膜,导电薄膜与基板驱动间形成电场,随着不同驱动上电压的变化,薄膜产生形变。r 处的面形 $S(r)$ 在静电驱动压力 $P(r)$ 的作用下变化量可由下式得出[11]:

$$\nabla^2 S(r) = -P(r)/T \tag{8}$$

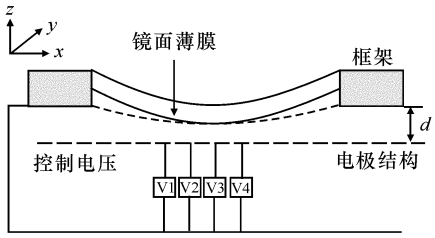


图 4　薄膜变形镜结构简图

Fig. 4　Simplified scheme of a membrane mirror

半径为r_m的薄膜,在r处由于压力P(半径r_a的驱动器产生)的作用得到的新面形$S(r)$可由下式得出[11]:

$$S(r) = \frac{P}{4T_m}\left[r^2 - r_a^2 + 2r_a^2 \ln\left(\frac{r_a}{r_m}\right)\right] \quad r < r_a \tag{9}$$

$$S(r) = \frac{P}{4T_m}\left[2r_a^2 \ln\left(\frac{r_a}{r_m}\right)\right] \quad r_a < r < r_m \tag{10}$$

式中静电驱动压力$P = \varepsilon_0 V^2/d^2$($\varepsilon_0$为空间介电常数,$V$为驱动电压,$d$驱动器与薄膜间的距离);$T$为薄膜表面拉力。

美国海军研究实验所(NRL, naval research laboratory)以此变形模式,利用低热膨胀系数的碳化纤维增强聚合物(CFRP, carbon fiber reinforced polymer)已制得孔径可达0.4 m,变焦比为3.1的变曲率反射镜[12],结合两反变焦原理实验制得的变焦望远镜,如图5所示[9]。由于主镜和次镜尺寸相差较大,会造成电路和面型变化的同步性较差,分析其原因主要为两镜所需的驱动器数目不同,要处理的电流数据量不同,导致2个面的反应时间不同。

图 5　0.4 m CFRP 望远镜原型

Fig. 5　0.4 m CFRP telescope prototype

在实际应用中,可提前实验建立相应的面型变化数据库,对2个面的驱动器单个控制施加相应电压,可增强其同步性。

4　结论

本文分析了2个共轴反射面其面形曲率变化,实现变焦系统的理论基础,结合卡塞格林反射式望远镜的结构模型,在ZEMAX中模拟设计了一个变焦倍率为2×的光学系统。根据像质评价结果可知,这种变焦模式满足成像要求。加入反射镜折叠光路,使得整个系统结构更加紧凑,并分析了系统实现的可行性。本文的研究对于特殊领域变焦光学系统的设计具有指导意义。

参考文献:

[1] 陈鑫.用于机载激光通信的变焦系统设计[D].长春:长春理工大学,2008.
CHEN Xin. Design of zoom lens in air-borne laser communication system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)

[2] 温同强.变焦距光学系统的研究与设计[D].镇江:江苏大学,2009.
WEN Tong-qiang. Study and design of the zoom lens system [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009. (in Chinese)

[3] 白玉琢.光学变焦透镜系统的设计[D].长春:长春理工大学,2007.
BAI Yu-zhuo. Design of optical zoom lens system [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)

[4] 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(4):21-26.
LIU Chong-jin, SHI Guang-hui. General situations of mechanical compensation zoom lens in its three development and its developing direction[J]. Journal of Applied Optics, 1992, 13(4):21-26. (in Chinese with an English abstract)

[5] TAM E C. Smart electro-optical zoom lens[J]. Opt. Lett., 1992,17(5):369-371.

[6] WICK D V, MARTINEZ T. Adaptive optical zoom [J]. OE Letters, 2004,43(1):8-9.

[7] WICK D V, MARTINEZ T, PAYNE D M, et al. Active optical zoom system[J]. SPIE, 2005, 5798: 151-157.

[8] WICK D V, BAGWELL B E, SWEATT W C, et al. Active optical zoom for space-based imaging [J]. SPIE, 2006, 6307:63070A 1-12.

[9] BAGWELL B E, WICK D V, COWAN W D, et al. Active zoom imaging for operationally responsive space[J]. SPIE, 2007, 6467: 64670D 1-8.

[10] SEIDL K, KNOBBE J, GRüGER H. Design of an

all-reflective unobscured optical-power zoom objective[J]. Applied Optics, 2009, 48(21): 4097-4107.

[11] RESTAINO S R, ANDREWS J, MARTINEZ T, et al. MEMs based adaptive optics systems: the naval research laboratory program[J]. SPIE, 2006, 6113: 61130E 1-6.

[12] TEARE S W, MARTINEZ T, JONATHAN R, et al. A lightweight adaptive telescope[J]. SPIE, 2006, 6306: 630609, 1-8.