高变倍比全动型变焦距光学系统设计

许利峰[1,2],张 新[1],蔡 伟[1,2],曲贺盟[1,2]

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 光学系统先进制造技术中国科学院重点实验室,
吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:为了提高变焦距系统的变倍比、扩大系统的视场,同时简化系统的结构,采用多组全动型机械变倍补偿形式,同时对系统的前组进行复杂化设计。选取 10 个焦距位置进行设计计算,设计了焦距 7.0~1 400.0 mm,视场 0.25°~47.44°的 200 倍连续变焦距系统。整个系统由 6 组 19 片透镜组成,系统具有超大变倍比,大视场等特点。结果表明:多组元全动型变倍补偿形式对于实现大变倍比和简化系统结构是十分有效的。通过对设计结果以及凸轮拟合曲线分析,整个系统成像质量达到设计要求。

关键词:光学设计; 高变倍比; 全动型透镜组; 组员移动

中图分类号:O439 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2013)07-1748-06

Optical design of high-magnification zoom systems with multiple moving lens groups

Xu Lifeng[1,2], Zhang Xin[1], Cai Wei[1,2], Qu Hemeng[1,2]

(1. Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to get high-magnification and large field of view in zoom system designing, adopts new methods in zoom lens designing with multiple moving lends groups. The design a kind of high-magnification continuous zoom lens, the systems adopts 5 moving lens groups has achieved the continuous zoom from 7 mm to 1 400 mm and the field of view from 0.25° to 47.44°. By choosing 10 positions of focal length for the design and calculation, The results show that this continuous zoom has the characteristics of high magnification and large field of view, and the imaging quality high.

Key words: optical design; high-magnification; multiple moving lens groups; component action

收稿日期:2012-11-05; **修订日期**:2012-12-08

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(61007009)

作者简介:许利峰(1988-),男,硕士生,主要从事变焦距光学系统设计方面的研究。Email:xulifengalxh@sina.com

导师简介:张新(1968-),男,研究员,博士生导师,博士,主要从事成像、非成像光学系统的总体设计等方面的研究。
Email:optlab@ciomp.ac.cn

0 引 言

变焦距光学系统是一种焦距可以连续变化而保持系统像面稳定的光学系统。变焦距系统可以实现对远距离目标的连续探测,已经广泛地应用于军事、民用的各个领域[1-4]。随着变焦距系统光学设计理论的不断完善,驱动变焦的凸轮加工工艺的不断成熟,变焦距系统已经逐渐从简单的两组式、三组式向着双组联动型以及全动型发展。多组元全动型机械变焦距系统不仅可以实现大的变倍比,同时可以实现系统的小型化,因此逐渐成为变焦距光学系统设计的亮点。

国内对全动型变焦距系统的研究起步较晚,超大变倍比的变焦距系统相关报道很少。文中采用 1/3 in CCD,系统选取 10 个不同焦距位置进行设计计算,在选择合理的初始结构基础上,利用光学设计软件进行优化设计,最终设计了焦距 7~1 400 mm,视场 0.25°~47.44°的 200 倍连续变焦距系统,成像质量达到要求。

1 变焦距光学系统分析

1.1 变焦距光学系统变焦原理

光学系统的焦距是由组成该系统的各个透镜焦距以及各透镜的间距决定,以两组元为例,系统组合焦距与组元焦距以及组元间隔关系如下:

$$\frac{1}{F}=\frac{1}{f_1'}+\frac{1}{f_2'}-d_{12}\cdot\frac{1}{f_1'}\cdot\frac{1}{f_2'} \tag{1}$$

显然整个系统的焦距 F 由组成该系统的两个组元的焦距以及组元间隔决定,由于系统中各个透镜的焦距是不能连续变化的。因此,整个系统焦距的连续变化只能依靠组元间距的连续移动。有的组元的移动主要用作焦距的连续变化,有的组元移动主要用作补偿像面,使像面始终保持不变。根据补偿方式的不同,变焦距光学系统大体上可以分为光学补偿和机械补偿[5-7]。

光学补偿是通过两组或者三组透镜作相关的线性移动实现变焦,像面不能完全补偿,一般只有 4 个或者 6 个补偿点,结构尺寸较大,一般只用于低变倍比、小相对孔径系统。机械补偿通过各个组元的非相关移动实现系统的连续变焦,同时保证像面稳定和成像质量。组元非相关移动依靠精密凸轮实现,随着凸轮加工精度的提高以及替代凸轮的程控技术的不断成熟,机械补偿变焦距系统已经逐渐取代光学补偿变焦距系统。同时,随着机械补偿变焦距系统设计理论的不断完善,机械补偿变焦距系统已经逐渐从简单的两组式、三组式向着双组联动型以及多组全动型发展。系统变倍比不断提高,视场不断扩大,其应用也得到不断发展。

1.2 全动型机械补偿变焦距光学系统

多组元全动型机械变焦距光学系统是一种相对而言新型的变焦距系统。由于全动型变倍补偿系统突破传统系统内共轭距为常量的限制,系统在变焦运动过程中,各个组元可以按最有效的轨迹作曲线运动,这样可以使各组元按最佳的方式移动,以达到最大限度的变焦效果,从而可以实现系统在变倍比增大的情况下依然能够使镜头的全长尽量最短,易实现高变倍比和变焦镜头的小型化。这种镜头没有传统变焦距镜头的正、负之分。整个系统移动组元共同完成系统的变倍与补偿。通常情况下,系统采用第一组元调焦,其余组元移动实现变倍补偿。由于系统各个移动组元均对系统变倍比有贡献,这就可以避免单一组元移动实现大变倍比时移动量过大的缺点。对于每一个组元而言,其承担的变倍比减小,可以减小其在系统整个变倍补偿过程中的导程,同时可以对各个移动组元光焦度进行均匀分配。与此同时,从像差校正角度考虑,移动组元增加,而各个组元物像共轭距、相对孔径以及光线的偏折角变化都不是很大,这有利于系统的相差校正。由于全动型变焦距系统移动形式复杂,下面对全动型变焦距系统高斯参数简单进行整理。

系统总焦距为:

$$F=f_1'\cdot m_2\cdot m_3\cdots\cdot m_n \tag{2}$$

系统变倍比为:

$$\beta=\frac{F_L}{F_S}=\frac{m_{2L}\cdot m_{3L}\cdot\cdots\cdot m_{nL}}{m_{2S}\cdot m_{3S}\cdot\cdots\cdot m_{nS}} \tag{3}$$

各组元变倍比:

$$\gamma_i=\frac{m_{iL}}{m_{iS}} \tag{4}$$

各组元物像距:

$$l_i=\left(\frac{1}{m_i}-1\right)\cdot f_i',\ l_i'=(1-m_i)\cdot f_i' \tag{5}$$

各组元间隔:

$$d_{i,i+1}=(1-m_i)\cdot f_i'-\left(\frac{1}{m_i}-1\right)\cdot f_{i+1}' \tag{6}$$

系统后截距:

$$l_n'=(1-m_n)\cdot f_n' \tag{7}$$

各组元移动量:

$$Y_i=\sum_{k=i}^{n}(d_{k,k+0}-d_{k,k+1})+l'_{n0}-l_n' \tag{8}$$

式中:$(i=1,2,\cdots n)$。

相比较简单形式的变倍补偿系统, 全动型变焦距系统高斯参数只是在组元移动量上复杂化了,但是这直接导致高斯参数求解变的十分困难, 随着全动型变焦距系统高斯参数求解问题的不断解决,通过引入广义哈密顿算子、特殊算法和乘子罚函数等方法已经可以求出任意焦距位置各组元移动量。此外,理论上在选择合理初始结构参数基础上[8],可以通过对各组元移动形式的优化达到最速变焦。图 1 是最简单的四组元全动型变焦距系统示意图。

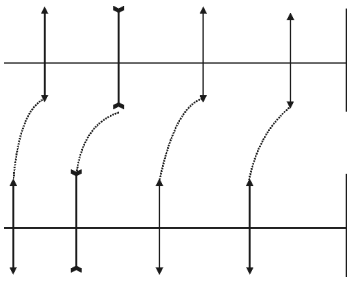

图 1 四组元全动型机械变焦距系统简略图

Fig.1 Simple notation of four moving groups zoom lens

2 光学系统技术要求

2.1 变焦距系统技术指标:

变焦范围为 7.0~1 400.0 mm; 光圈数 $F^{\#}$ 为 4~10; 视场角 2ω 为 47.44°~0.25°;CCD 靶面尺寸为 4.9(H)mm×3.7(V)mm;CCD 像元尺寸为 7.5 μm×7.5 μm。

2.2 技术参数的确定

根据设计要求,选择 1/3(英寸)CCD,其靶面尺寸为 4.9(H)mm×3.7(V)mm,对角线 6.15 mm,像元尺寸为 7.5 μm×7.5 μm。由 CCD 截止频率=1/(2·CCD 像元尺寸)得出 CCD 截止频率为 66.7 lp/mm。由下面的公式即可计算系统在各个焦距位置处对应的视场值,其中 L 为 CCD 靶面对角线长度。

$$2\omega=2\arctan\left(\frac{L}{2\times f'}\right) \tag{9}$$

系统选择 10 个焦距位置进行设计计算,各个位置处的焦距以及视场角如表 1 所示。

表 1 系统在 10 个变焦结构的焦距和视场角

Tab.1 Focus and the field of view in ten position

Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Focus	7	70	140	210	280	350	420	560	700	1 400
Field of view	47.44	4.74	2.36	1.58	1.2	0.95	0.80	0.60	0.48	0.25

3 设计结果及像质分析

3.1 设计结果

文中采用全动型机械变焦形式, 在选择合理的结构基础上进行修改设计[9-13],整个系统由双-单-单-单结构组成前组,11 块透镜组合成为 4 个移动组,最后是 3 个单透镜组成的后固定组。系统总长固定为 621.5 mm,最大口径为 141.95 mm。系统结构示意图如图 2 所示。由于篇幅所限,系统结构示意图只取 3 个位置,图 2 中的 3 个结构分别对应焦距为 7 mm、280 mm、1 400 mm 的位置。

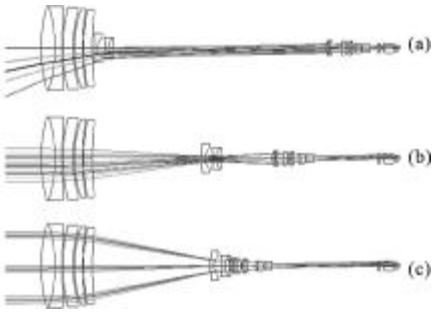

图 2 光学系统结构示意图

Fig.2 Notation of zoom lens system

3.2 变焦凸轮曲线

变焦距光学系统机械结构设计的实质就是变焦凸轮曲线的设计, 由于变焦距光学系统中各个移动组元之间的非线性非相关移动直接决定凸轮设计与实现的难度, 一般情况下应尽量使各组元的移动接近线性或者有规律的变化[7-10]。文中采用全动型机械变焦形式,其各个组元移动情况比较复杂,在保证系统满足设计要求和成像质量的前提下尽量简化组元

移动形式。图 3 为通过 9 焦距位置各个移动组元移动量拟合出的组元移动曲线。

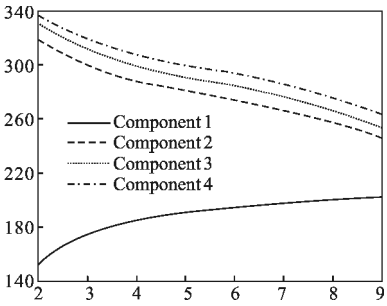

图 3 组元移动曲线

Fig.3 Curves of component moving

3.3 设计结果分析

光学系统的评价方法很多，总的可以分为几何光学的方法和波动光学的方法。光学传递函数作为波动光学的方法，是目前被公认的最能充分反映系统实际成像质量的评价指标，它不仅可以全面、定量的反映光学系统的衍射和像差所引起的综合效应，而且可以根据光学系统的结构参数直接计算出来。因此，评价光学系统成像质量首先要从光学传递函数入手。此外，点列图作为几何光学的方法，其形状可以直接衡量系统成像质量的好坏。由于设计系统比较复杂，为了更好的对系统进行评价，文中还给出系统的相差、场曲、畸变曲线。由于篇幅所限，系统传递函数、相差曲线只给出如图 4、5 所示的 5 个位置，分别对应焦距为 7 mm、140 mm、280 mm、700 mm、1 400 mm，表 2 给出不同视场的 RMS 值。

从系统的传递函数可以看出，系统除在最长焦 1 视场子午面传递函数略低以外，其他各个焦距位置各个视场均接近衍射极限，所以系统可以在全视场内达到较好的成像质量。系统相差曲线可以看出，畸变均控制在 5%以内，满足成像质量要求。从系统 RMS 值可以看出，系统在各个位置各个视场处均达到小于 2 pixel×2 pixel(15 μm)的要求。此外，通过变倍补偿曲线可以看出，各个组元移动曲线平滑，为凸轮设计提供可能，总体上系统设计满足设计要求。

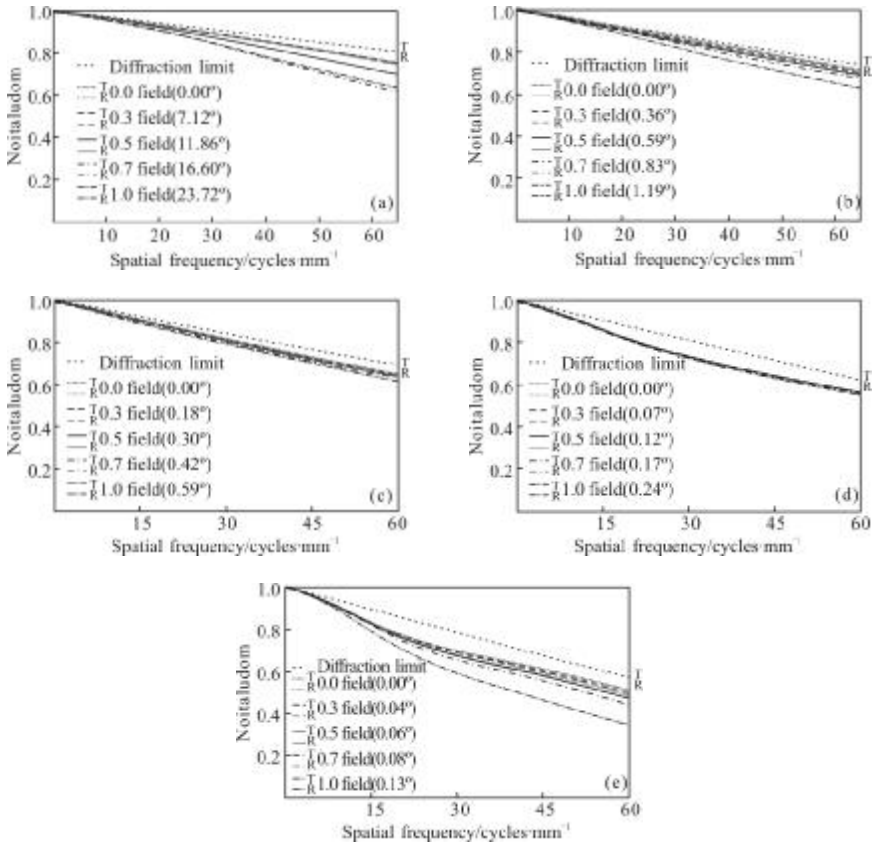

图 4 光学系统传递函数

Fig.4 MTF of the system

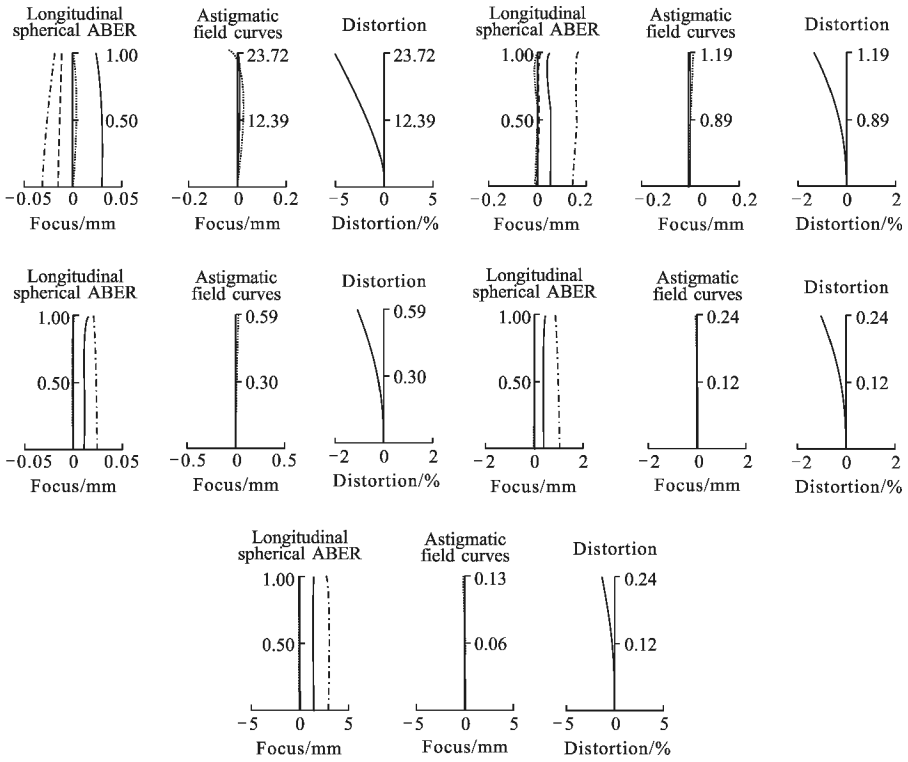

图 5 光学系统像差曲线

Fig.5 Ray aberration of the system

表 2 系统在 10 个变焦位置处不同视场的 RMS 值(单位:μm)

Tab.2 RMS of different field in ten zoom positions(Unit:μm)

Position		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Focus/mm		7	70	140	210	280	350	420	560	700	1 400
	0	2.17	1.96	1.15	1.13	1.43	1.67	1.85	2.58	3.43	10.60
	0.3	2.25	1.91	1.51	1.58	1.76	1.91	2.06	2.80	3.66	10.90
Field of view	0.5	3.29	1.95	1.99	2.12	2.21	2.24	2.31	3.10	3.95	11.27
	0.707	4.52	2.25	2.47	2.61	2.67	2.55	2.54	3.32	4.92	11.99
	1	3.71	3.32	3.36	3.33	3.05	2.88	2.72	3.44	4.48	13.81

4 结 论

文中采用全动型机械变焦形式，设计了焦距 7.0~1 400.0 mm 的 200 倍连续变焦距系统,通过对设计系统进行分析,该系统满足设计要求。该系统具有超大变倍比、大视场、结构紧凑的特点。高变倍比、大相对孔径、大视场、小型化连续变焦距系统将在军事、民用方面得到很大的发展。

参考文献:

[1] Liu Feng, Xu Xiping, Sun Xiangyang, et al. Design of high zoom ratio thermal infrared zoom optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(6): 1020-1024. (in Chinese)

[2] Gao Ming, Duan jing. Optical design of high-magnification digital zoom lens [J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30 (1): 1-5. (in Chinese)

[3] Xu Zhaodong, Liu Xin, Dong Tao. Design of airborne high resolution and continuous magnification IR thermal imager [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(3): 619-621. (in Chinese)

[4] Meng Jianqi. Dual field zoom (6×) infrared imaging optical system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(1): 89-92. (in Chinese)

[5] Xiao Zexin. Engineer Optical Design[M]. Beijing: Electronic

Industry Press, 2008. (in Chinese)

[6] Li Lin. New Method of Modern Optical Design[M]. Beijing: Press of Beijing Institute of Technology, 2009. (in Chinese)

[7] Zhang Liang, Liu Hongxia. Optical system design of long wave infrared zoom lens [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(7): 1279-1281. (in Chinese)

[8] Cai Wei, Zhang Ying, Zhang Xin, et al. New method for all movable zoom lens design [J]. Acta OPtica Sinica, 2012, 32(3): 0322008-1-0322008-5. (in Chinese)

[9] Li Lin, Wang Yongtian, Zhang Liqin, et al. An approach on the calculation of Gaussian parameters of zoom lenses [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2003, 23 (4): 424-427. (in Chinese)

[10] Zhang Liqin, Wang Yongtian, Li Lin. Method of determining gaussian parameters for zoom systems with multiple moving lens groups[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(5): 572-576. (in Chinese)

[11] Wang Qi, Wu Qiang, Huang Huijie, et al. Gaussian optics of zoom lens with all lens elements movable[J]. Acta Optica Sinica, 1999, 19(6): 830-834. (in Chinese)

[12] Fang Yichin, Lin Hanching. Optical design and optimization of zoom optics with diffractive optical element [C]//SPIE, 2009, 7280F: 1-15.

[13] Stato H, Yamaguchi S. Optical design of digital camera zoom lenses employing plastic lens elements[C]//SPIE, 2006, 61960D: 1-9.

(上接第 1705 页)

[6] Buford J A, Paone T Jr. Using hardware-in-the-loop simulation to provide low cost testing of TMD IR missile systems[C]//SPIE, 3368: 432-440

[7] Li Haiyan, Hu Yun'an, Liu Xudong. Energy estimation method for laser disturbing photoelectrical detectors in remote distance [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(6): 1038-1043. (in Chinese)
李海燕, 胡云安, 刘旭东. 激光干扰远场光电探测器能量估算方法[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(6): 1038-1043.

[8] Chu Xuelian, Qiu Zhen'an, Zhang Yuansheng, et al. Experimenta1 research of infrared detecting system disturbed by mid-wave infrared laser [J]. Infrared Technology, 2011, 33(8): 440-442, 449. (in Chinese)
初学莲, 仇振安, 张元生, 等. 中红外激光对红外探测系统的干扰试验研究[J]. 红外技术, 2011, 33(8): 440-442, 449.

[9] Zeng Xianwei, Fang Yangwang, Wang Hongqiang, et al. Technology of Radar/IR dual-mode seeker against infrared decoy jamming [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(6): 1054-1059. (in Chinese)
曾宪伟, 方洋旺, 王洪强, 等. 雷达/红外双模导引头抗红外诱饵干扰[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(6): 1054-1059.

[10] Wang Siwen, Guo Lihong, Zhao Shuai, et al. Experiments of high-power CO_2 laser disturbance to far-field HgCdTe detectors [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(4): 798-802. (in Chinese)
王思雯, 郭立红, 赵帅, 等. 高功率 CO_2 激光器对远场 HgCdTe 探测器的干扰实验[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(4): 798-802.

[11] Shen Tao, Song Jianshe. Study on the simulation of smoke screen counterworks laser guided weapon [J]. J System Simulation, 2008, 20(1): 210-214.