

文章编号: 1002-2082(2009)01-0001-05

高变倍比数码变焦镜头设计

高明, 段晶

(西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710032)

摘要: 为提高变焦距系统的工作性能, 使其在大视场时仍具有良好的像质, 且系统结构简单, 易于机械设计、加工及装调, 在设计中引入了传统球面光学设计与非球面相结合的设计思想。选择4个焦距位置进行设计计算, 用光学设计软件ZEMAX上机调试, 设计了焦距为6.9 mm~91.6 mm, 视场 $5^\circ\sim 60^\circ$ 的变焦系统, 整个系统由4组12片透镜组成, 其中包括3个非球面, 系统具有变倍比高、视场大等特点。设计结果表明: 在设计中采用非球面可使系统结构紧凑, 系统成像质量得到提高。

关键词: 变焦距镜头; 光学系统设计; 非球面; 像差

中图分类号: TN942.21

文献标志码: A

Optical design of high-magnification digital zoom lens

GAO Ming, DUAN Jing

(School of Opto-electronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

Abstract: To improve the performance of zoom systems and achieve a good imaging quality in WFOV, and to simplify the mechanical structure for the convenience of design, process and adjustment, a design concept that combines the conventional spheric optics with the aspheric optics was introduced in the design of zoom lens. A zoom lens system with $f' = 6.9\text{ mm} - 91.6\text{ mm}$ and $\text{FOV} = 5^\circ - 60^\circ$ was designed by choosing four positions of focal length for the design calculation and ZEMAX as the optical design software. The whole system is composed of 8 lenses in 4 sets, including 3 aspheric surfaces. The results show that the zoom lens has the characteristics of high magnification and large field of view, and the use of aspheric surface makes the structure compact and the imaging quality high.

Key words: zoom lens; optical system design; aspheric surface; aberration

引言

变焦距系统是一种焦距可以连续变化而像面保持稳定, 且在变焦过程中像质保持良好的光学系统。变焦距光学系统可以实现对距离目标的连续探测, 已广泛应用于国民经济和国防工业的很多领域, 由于光学参数、成像质量及自动化控制变焦的要求, 市场难以选择到合适的光学系统满足要求,

必须进行专门设计。

市场上常见的变焦镜头, 其变倍比不大, 视场也较小^[1-3]。这是因为受到成像质量以及加工工艺和加工条件等方面的限制, 一般的变焦结构难以实现大视场的连续变化, 视场很大时像差难以校正, 从而难以保证像面质量。本文主要研究高变倍比数码变焦镜头设计, 在设计中将传统球面光学设计与

收稿日期: 2008-06-30; 修回日期: 2008-07-13

基金项目: 国防科工委基础科研项目(B2220061084)

作者简介: 高明(1964-), 男, 吉林省人, 西安工业大学教授, 主要从事光电仪器研究与开发。

论文联系人: E-mail: duanjing608@hotmail.com

非球面相结合,设计出一焦距6.9 mm~91.6 mm,视场5°~60°的变焦系统,其特点是变倍比高、视场大、结构简单紧凑、成像质量好。

1 技术要求

变焦距光学系统的技术指标是:

- 视场变化范围: 5°~60°
 相对孔径: 1/4
 识别距离: 5 000 m
 CCD 像面尺寸: 1.27 cm (1/2 in)

2 变焦距光学系统的设计

2.1 确定变焦距光学系统的初始解

光学补偿型变焦镜头虽然结构简单,但是由于各透镜组必须移动到某些特殊的位置,才能得到稳定清晰的像面,其焦距不能连续地变化,而是几个离散值,因而在使用中受到了许多限制。机械补偿型变焦镜头的焦距能够连续地改变,因此得到了迅速的发展和广泛的应用^[4]。本文选用机械补偿型变焦系统,其像面稳定度高,可实现大变焦比,像质满足要求。

两组元机械补偿法变焦距系统设计理想光学系统的计算步骤:

1) 初步选择确定初始参数。选取 f_1' 和 f_2' ,预定出起算位置时的参数 β_1 和 β_2 ,在以下的计算中他们都作为已知量。

2) 利用式 $\beta_2 = \frac{f_2'}{f_1'(1-\beta_1) - d_{12} + f_2'}$,确定初始位置时的参数 β_2 。

3) 计算出系统在初始状态时的横向放大率。

4) 将系统的变焦范围划分为若干段,选择几个焦距位置进行设计计算。或者将变倍比 $g = f^*/f'$ 划分成相应的若干段进行设计计算。

5) 利用式 $G = f_1'(2 - \beta_1 - \frac{1}{\beta_1}) + f_2'(2 - \beta_2 - \frac{1}{\beta_2})$ 计算出共轭距 G 。

6) 联立

$$\begin{cases} G = f_1'(2 - \beta_1^* - \frac{1}{\beta_1^*}) + f_2'(2 - \beta_2^* - \frac{1}{\beta_2^*}) \\ g = \frac{\beta_1^* \beta_2^*}{\beta} \end{cases}$$

将第4)步确定的变倍比 g 和第(5)步算出的共轭距 G 代入,求出 β_1^* 和 β_2^* 。

7) 利用式 $t_1 = \int_{\beta_1}^{\beta_1^*} \frac{f_1'}{\beta_1^2} \delta\beta_1 = f_1'(\frac{1}{\beta_1} - \frac{1}{\beta_1^*})$ 算

出第1个透镜组元的移动量 t_1 。

8) 利用式 $t_2 = \int_{\beta_2}^{\beta_2^*} f_2' \delta\beta_2 = f_2'(\beta_2^* - \beta_2)$ 算出第2个透镜组元的移动量 t_2 。

9) 采用下一个变倍比 g ,再做第6)步到第8)步的计算,直至算完所有变倍比的情况,并画出2个透镜组元的变倍及补偿曲线进行分析。上式中, f_1' 、 β_1 分别为第1个透镜组元的焦距和初始状态时的横向放大率; f_2' 、 β_2 分别为第2个透镜组元的焦距和初始状态的横向放大率; d_{12} 为第1个透镜组元像方主面至第2个透镜组元物方主面间的间隔; G 为整个变焦系统的共轭距。

2.2 技术参数的确定

根据设计要求,选用1.27 cm(1/2 in) CCD,其靶面尺寸为6.4 mm × 4.8 mm,对角线8 mm。

由公式 $2\omega = 2\arctan(\frac{l}{2f'})$ 及公式 $y' = f' \tan\omega$ 即可计算出系统在各个焦距位置对应的视场值,其中 l 为CCD靶面对角线长。

选择4个焦距位置进行设计计算,选取另外2个焦距位置16.5 mm及38.7 mm,每个焦距位置对应的视场如表1所示。

表1 系统在4个变焦结构的焦距和视场值

Table 1 Focal lengths and FOV of 4 zoom lens structures

参数	结构1	结构2	结构3	结构4
焦距 f'	6.9 mm	16.5 mm	38.7 mm	91.6 mm
视场 2ω	60°	27.2°	11.8°	5°

2.3 非球面的引入

非球面是指表面各点半径都不相同的曲面,最常见的非球面为有一个对称轴的回转非球面,有偶次非球面、奇次非球面两类。偶次非球面的曲面方程为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + a_1r^2 + a_2r^4 + a_3r^6 + a_4r^8 + a_5r^{10} + a_6r^{12} + a_7r^{14} + a_8r^{16}$$

奇次非球面的曲面方程为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + a_1r + a_2r^2 + a_3r^3 + a_4r^4 + a_5r^5 + a_6r^6 + a_7r^7 + a_8r^8$$

式中: $c = 1/R$, R 为非球面顶点的曲率半径; k 为二次曲面常量; $k < -1$ 表示双曲面, $k = -1$ 表示抛物面, $-1 < k < 0$ 表示椭球面, $k = 0$ 表示球面, $k > 0$ 表示扁平椭球面; $r^2 = x^2 + y^2$; $a_1 \sim a_8$ 为非

球面各高次项的系数。

由于球面只有一个参数决定面形,它校正像差的局限性很大,并使结构复杂化。与球面相比,非球面的面形系数由多个自由变量决定,具有高级像差小,产生负球差的特点,可以平衡球面生成的初级像差和高级像差,故系统设计中采用非球面透镜可以很好地校正轴外点的像差^[5-6]。

2.4 变焦凸轮曲线

变焦距系统机械结构设计的实质是变焦距凸轮曲线设计,变焦距凸轮是光学元件上用于实现焦距变化的重要部件,变倍系统在变倍过程中,由于补偿组的放大率和变倍组的放大率与变倍系统的变倍比的关系是非线性的,因而变倍组和补偿组的移动和凸轮转角的关系也是非线性的。这样,它们的转移都要由复杂的凸轮来控制。为了简化凸轮,常把变倍的移动作成线性的,即变倍组的移动与凸

轮转角的变化成线性,这样,变倍组的运动用螺旋槽控制,补偿组的运动由凸轮控制。通过凸轮的转动带动固定在曲线凹槽上的透镜组前后移动,以实现整个系统组合焦距在规定的范围内变化。

3 设计结果及像质评价

选择4个焦距位置进行设计计算,系统由4组12片透镜组成,其中包括3个非球面,第1块双胶合透镜与其后面的透镜之间的间隔为0.5 mm,第2块双胶合透镜与其前面的透镜之间的间隔为8.7 mm,第3块双胶合透镜与其前面的透镜之间的间隔为1.0 mm,第4块双胶合透镜与其前面的透镜之间的间隔为5.5 mm,系统总长为246.2 mm,最大半口径为50.5 mm,结构如图1所示。图1分别给出系统在短焦6.9 mm、中焦16.5 mm、中焦38.7 mm、长焦91.6 mm时的位置。

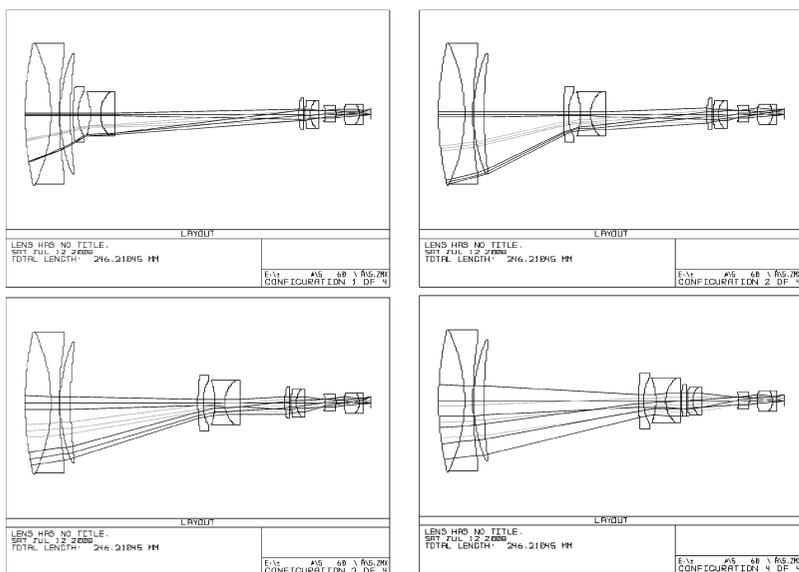


图1 非球面系统结构

Fig. 1 Configuration of aspherical zoom lens

系统采用3个偶次非球面,表2列出了所采用非球面的位置及非球面系数。

表2 系统的非球面系数

Table 2 Aspherical coefficients of zoom lens

面数	k	a_2	a_3	a_4
第6个面	-11.271 558	-0.000 001	-8.08109E-010	-1.661 42E-012
第17个面	1.995 682	-0.000 032	0.000 003	-2.483 97E-007
第18个面	1.102 650	-0.000 015	2.144 283E-007	-1.751 97E-008

非球面变焦距系统在4个焦距位置的光学传递函数与畸变如图2所示。在空间频率为40 lp/mm时,轴上传递函数分别为0.86、0.87、0.87、0.83;轴外全视场的子午传递函数分别为0.67、0.40、0.71、0.40;轴外全视场的弧矢传递函数分别为0.86、0.87、0.86、0.82。当系统的焦距为6.9 mm时,畸变为6%;焦距为16.5 mm时,畸变为2%;焦距为38.7 mm时,畸变为3%;焦距为91.6 mm时,畸变

为3%。由以上分析可知:系统的成像质量较好,完全满足设计要求。

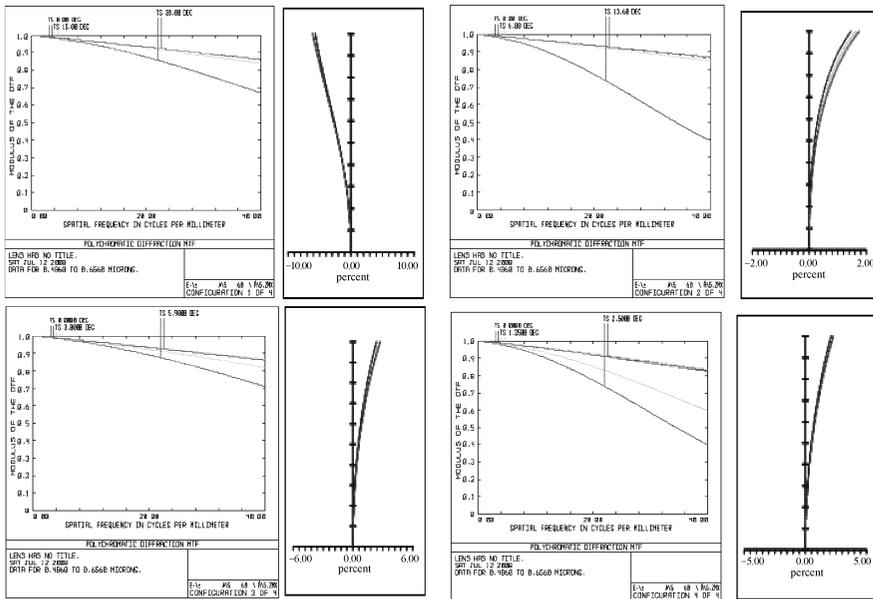


图2 光学传递函数与畸变

Fig. 2 Optical transfer function and distortion of zoom lens

设计中发现,非球面的面型直接影响着系统的成像质量,以下3种参数均能评价透镜成像质量:曲线上各点的切矢量、曲线上各点的曲率半径和水平光线的焦点。在保证成像质量的前提下,面型不同,参数可变化的范围也不同,两者之间的关系相当复杂。这里对此做简单分析说明:就本文而言,当 $k < -1$ 时,即在第6个面,其曲率半径允差为 ± 0.2 mm,厚度允差为 ± 0.02 mm;当 $k > 0$ 时,即第17、18个面,其曲率半径允差为 ± 0.01 mm,厚度允差为 ± 0.1 mm。另外,非球面各高次项系数的变化也影响着系统的像质,但这些系数的变化量在如表3所示的变化范围内变化时,像差变化较小,对系统的成像质量影响较小。

表3 非球面系数允差

Table 3 Tolerance of aspherical coefficients

	a_2	a_3	a_4
$k < -1$	$\pm 3.0E-008$	$\pm 2.0E-010$	$\pm 1.0E-012$
$k > 0$	$\pm 0.000\ 001$	$\pm 2.0E-007$	$\pm 5E-009$

4 结论

在满足成像质量的情况下,如果光学镜头全部采用球面,则必须采用更多的镜片和更加复杂的结

构型式,这将导致光学系统体积和质量增大。本文在高变比数码变焦镜头设计中引入了非球面设计理论,非球面的引入使得整个光学系统的成像质量得以提高、结构紧凑。在空间频率为40 lp/mm时,轴上传递函数可以达到0.8,轴外传递函数可以达到0.4,完全满足设计要求。本镜头的设计具有较大意义,可用这一个镜头代替多个镜头满足不同的需要。

参考文献:

[1] 梅丹阳,焦明印. 变焦距投影光学系统设计中的远心光路设计[J]. 应用光学,2006,27(4):264-167.
 MEI Dan-yang, JIAO Ming-yin. Design of telecentric beam path for zoom projection optics[J]. Journal of Applied Optics, 2006,27(4):264-167. (in Chinese)
 [2] 林妩媚,张凤鸣. 机械补偿法变焦距镜头的模块化设计[J]. 光电工程,1999,26(5):69-72.
 LIN Wu-mei, ZHANG Feng-ming. Modularized design of zoom lens with mechanical compensation [J]. Opto-Electronic Engineering, 1999,26(5):69-72. (in Chinese)
 [3] 梁采顺. 变焦距系统设计的快速求解[J]. 应用光学,2004,25(1):17-20.

LIANG Lai-shun. A rapid computing method of zoom optical design[J]. Journal of Applied Optics, 2004,25(1):17-20. (in Chinese)

[4] 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-ka. Zoom lens design [M]. Beijing: National Defence Industry Press,1988. (in Chinese)

[5] NEIL I A. Review of recent zoom lens developments

for 35mm cinematography at panavision[J]. Optical Review, 2001,8(4):214-217.

[6] 刘钧,尚华,宋波. 头盔式单目微光夜视仪中非球面物镜系统的设计[J]. 应用光学,2006,27(4):308-311.

LIU Jun, SHANG Hua, SONG Bo. Design of aspheric lens in helmet-mounted LLL night-vision system[J].

Journal of Applied Optics, 2006,27(4):308-311. (in Chinese)