文章编号：1002-2082(2010)06-0876-07

变焦距镜头凸轮曲线形式的选择

晏 蕾[1,2]，贾 平[1]，洪永丰[1]，王 平[1]
(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春 130033；
2. 中国科学院 研究生院，北京 100039)

摘 要：在变焦镜头设计的最后阶段需要进行凸轮曲线的设计，为了平衡成像倍率变化的均匀性与凸轮转角，需要选择合适的凸轮曲线形式，要求建立成像倍率M与凸轮转角θ之间的某种函数关系。根据凸轮曲线所要满足的实际边界条件和函数连续性，建立M与θ几种常见的函数关系，利用Matlab对设计实例进行仿真。结果表明：建立的成像倍率M和凸轮转角θ的幂函数关系及压力升角都不超过允许值时，变倍倍率变化均衡性最好，倍率变化曲线平滑，且无凸轮拐点。该方法可以方便设计人员针对不同设计要求改变凸轮曲线形状，找到最佳变倍凸轮曲线。

关键词：变焦距镜头；凸轮曲线；压力升角
中图分类号：TN942.2 **文献标志码**：A

Selection of cam curve for zoom lens

YAN Lei[1,2], JIA Ping[1], HONG Yong-feng[1], WANG Ping[1]
(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In the final course of zoom lens design, the cam curves have to be designed. In addition, in order to balance the uniformity between imaging magnification change and cam corner, the appropriate cam curve should be chosen. So it is important to establish the relationships between imaging magnification M and cam corner θ. Based on the boundary conditions and the continuity of the function whcih cam curves have to meet, some functions are established and discussed. Some design examples were simulated with Matlab, which indicates that the exponential function fits well with M and θ. Besides, the pressure angle is less than the permitted value and the uniformity of cam curves is better and smooth without cam inflexions. Compared with other solutions used before, this method helps the designer to modify the cam curves effectively and find the best cam curves of the zoom lens.

Key words: zoom lens; cam curve; pressure ascending angle

引言

在变焦系统中，凸轮是控制镜组运动，使系统在保持像面稳定条件下改变焦距的组件。变焦操作的平滑、灵活和快速是变焦性能的重要内容，它与凸轮轮廓面的粗糙度和凸轮曲线压力角的大小有直接关系。如果凸轮曲线在某一段上倾斜角度较大，显得较陡，则在转动凸轮过程中将出现手感较重的情况，带动凸轮转动的齿轮磨损较大，甚至可使得凸轮槽边缘挤压变形，影响成像质量；更严重时，还会出现凸轮卡死现象，根本无法使用[1-2]。

收稿日期：2010-03-25； **修回日期**：2010-06-23
基金项目：973计划(2009CB72400105)
作者简介：晏蕾(1985－)，男，湖北孝感人，硕士研究生，主要从事变焦距光学系统的设计研究工作。
E-mail：limit _beyond@163.com

在机械补偿变焦距镜头中,通过对变倍组的移动和凸轮转角之间运动关系的选择,可以满足在变焦过程中,使成像倍率的变化是匀速的,或是匀加速的。这无论是对电视、电影摄影,还是用在军事跟踪中的变焦距镜头来说都是很希望的。但同时对应长短焦两端凸轮曲线的压力角会很大,在追求变焦镜头小型化时,往往会使凸轮的转动力距超过承受值。因此,选择凸轮曲线形式,在成像倍率变化的均匀性与凸轮转角之间找到一个平衡是很有必要的。文章建立了成像倍率M与凸轮转角θ的幂函数关系,结合变焦系统方程编写了Matlab仿真界面,对凸轮曲线形式进行仿真,结果表明建立M-θ幂函数比传统的曲线拟合[3]以及θ-x线性方法,凸轮曲线更加平滑,压力升角整体较小(<45°),倍率变化均衡性更好。

1　变焦系统基本理论

变焦距镜头设计的最后阶段,即各透镜组元的光学机构参数(半径,间隔,玻璃材料)确定之后,还需要计算变倍组与补偿组位移量的数值关系,从而加工凸轮轨道。下面我们探讨凸轮曲线方程的两种形式。

形式一　从变倍组移动量x得到补偿组移动量y,进而求得变倍倍率凸轮曲线[4],即

$$x\rightarrow y\rightarrow m_2^*,m_3^*\rightarrow M \tag{1}$$

形式二　由系统要求之变倍倍率M分别求得变倍组和补偿组的倍率m_2^*和m_3^*,可得到变倍组和补偿组的移动量x,y,进而得到凸轮曲线[5],即

$$M\rightarrow m_2^*,m_3^*\rightarrow x,y \tag{2}$$

从上面两种形式看出,要建立凸轮方程进而加工凸轮轨道必须建立凸轮转角和上述某一变量的函数关系。

2　变焦凸轮曲线的设计

为了平衡成像倍率变化的均匀性与凸轮转角,需要选择合适的凸轮曲线形式。这就要求我们建立成像倍率M与凸轮转角θ之间的某种函数关系,下面对其进行讨论。

2.1　形式讨论

首先对下列符号进行规定。

f_1,f_2,f_3,f_4:分别为前固定组、变倍组、补偿组和后固定组的焦距;

m_2,m_3:分别为变倍组、补偿组的横向放大率;

$m_{23}=m_2m_3$:由变倍组和补偿组组成的变倍部分的横向放大率;

m_{230}:起点($\theta=0$)焦距位置时,变倍部分的横向放大率。本例为最短焦距位置;

L:变倍组的最大移动量;

θ:凸轮的转角;

α:凸轮的最大转角;

R:转筒半径;

$M=\dfrac{m_{23}}{m_{230}}$

M:变焦倍率;

$M_{\max}$:最大变焦倍率;

x,y:分别代表变倍组和补偿组的移动量;

$k_x=\lim\limits_{\Delta\theta\rightarrow0}\dfrac{\Delta x}{R\cdot\Delta\theta},k_y=\lim\limits_{\Delta\theta\rightarrow0}\dfrac{\Delta y}{R\cdot\Delta\theta}$。其中$k_x,k_y$分别是凸轮曲线变倍组和补偿组的斜率,即是它们压力升角的正切值。

构造θ与M之间的函数关系时,需要注意2个边界条件:

边界条件一:$\theta=0°$时,$M=1$

边界条件二:$\theta=\alpha$时,$M=M_{\max}$

1)θ与M成线性关系

可使倍率变化产生匀速的效果,这个关系式可表示为

$$M=1+\frac{M_{\max}-1}{\alpha}\theta \tag{3}$$

上式对θ微分可得倍率变化速率:

$$\upsilon=\frac{\mathrm{d}m_{23}}{\mathrm{d}\theta}=\frac{M_{\max}-1}{\alpha}m_{230}=\mathrm{const} \tag{4}$$

2)θ与M之间为非线性关系

a)先构造θ与M的幂函数关系:

$$M^n=1+\frac{M_{\max}^n-1}{\alpha}\theta \tag{5}$$

式中,$M,M_{\max},\alpha,\theta$的定义如上,n是凸轮曲线系数,也可看作是调节系数,并规定$n\neq0$。(5)式对θ微分可得:

$$\frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}\theta}=\frac{1}{m_{230}}\frac{\mathrm{d}m_{23}}{\mathrm{d}\theta}$$

$$\upsilon=\frac{\mathrm{d}m_{23}}{\mathrm{d}\theta}=\frac{M_{\max}^n-1}{\alpha}\frac{m_{230}}{n\cdot(1+\dfrac{M_{\max}^n-1}{\alpha}\theta)^{1-\frac{1}{n}}} \tag{6}$$

$$\lim_{x\rightarrow0}\frac{\mathrm{d}m_{23}}{\mathrm{d}\theta}=\frac{m_{230}}{\alpha}M_{\max}^{\frac{\theta}{\alpha}}\ln M_{\max} \tag{7}$$

b)构造θ与M的指数函数关系

$$\mathrm{e}^{n(M-1)}=1+\frac{\mathrm{e}^{n(M_{\max}-1)}-1}{\alpha}\theta\Rightarrow M=1+\frac{1}{n}\ln\left(1+\frac{\mathrm{e}^{n(M_{\max}-1)}-1}{\alpha}\theta\right) \tag{8}$$

(8)式对θ微分可得:

$$\upsilon=\frac{\mathrm{d}m_{23}}{\mathrm{d}\theta}=\frac{1}{n}\frac{m_{230}}{\dfrac{\alpha}{\mathrm{e}^{n(M_{\max}-1)}-1}+\theta} \tag{9}$$

$$\lim_{n\to 0}\frac{\mathrm{d}m_{23}}{\mathrm{d}\theta}=m_{230}\frac{M_{\max}-1}{\alpha}=\text{const} \tag{10}$$

c) 构造θ与M的对数函数关系

$$\frac{\ln(\mathrm{e}+n\cdot(M_{\max}-1))-1}{\alpha}=$$

$$\frac{\ln(\mathrm{e}+n\cdot(M-1)-1}{\theta}\cdot(n>-\frac{\mathrm{e}}{M_{\max}-1})\Rightarrow$$

$$M=1+\frac{1}{n}(\mathrm{e}^{\left[1+\frac{\ln(\mathrm{e}+n\cdot(M_{\max}-1))-1}{\alpha}\right]}-\mathrm{e}) \tag{11}$$

微分后,有

$$\upsilon=\frac{\mathrm{d}m_{23}}{\mathrm{d}\theta}=m_{230}\frac{\ln(\mathrm{e}+n\cdot(M_{\max}-1))-1}{n\alpha}\times$$

$$\mathrm{e}^{\left[1+\frac{\ln(\mathrm{e}+n\cdot(M_{\max}-1))-1}{\alpha}\theta\right]} \tag{12}$$

$$\lim_{n\to 0}\frac{\mathrm{d}m_{23}}{\mathrm{d}\theta}=m_{230}\frac{M_{\max}-1}{\alpha}=\text{const} \tag{13}$$

d) 构造θ与M的高斯函数关系

$$\mathrm{e}^{-n\cdot(\frac{1}{M^2}-1)}=1+\frac{\mathrm{e}^{-n\cdot(\frac{1}{M_{\max}^2}-1)}}{\alpha}\theta\Rightarrow$$

$$M=(1-\frac{1}{n}\ln(1+\frac{\mathrm{e}^{-n\cdot(\frac{1}{M_{\max}^2}-1)}-1}{\alpha}\theta))^{-\frac{1}{2}} \tag{14}$$

$$\upsilon=\frac{\mathrm{d}m_{23}}{\mathrm{d}\theta}=\frac{m_{230}}{2n}-\frac{1}{\dfrac{\alpha}{\mathrm{e}^{-n\cdot(M_{\max}^2-1)}-1}+\theta}$$

$$\lim_{n\to 0}\frac{\mathrm{d}m_{23}}{\mathrm{d}\theta}=\frac{m_{230}}{2\alpha}(1-\frac{1}{M_{\max}^2})=\text{const} \tag{15}$$

e) 上述4种函数关系用于$n\neq 0$的情形,对于$n=0$的情形,我们规定:

$$x=\frac{L}{\alpha}\theta \tag{16}$$

即θ与x之间为线性关系的情况,这是目前最常用的关系。对(16)式以及凸轮方程[4]微分,得到倍率变化速率为

$$\frac{\mathrm{d}m_{23}}{\mathrm{d}\theta}=\frac{m_{23}[f_2m_3(m_2^2-1)-f_3m_2(m_3^2-1)]}{f_2f_3}\frac{L}{\alpha} \tag{17}$$

下面对上述结果进行讨论

1) θ与M成线性关系时,由(4)式看出,系统变倍匀速,是很期望的。但由于变倍组移动量x与M的非线性关系[4],必然导致镜组移动速度非均匀性以及压力角不均衡。

2) θ与M成非线性关系,且θ与M成幂函数关系时,若n一定,则变倍倍率与转角呈幂函数关系变化。从(7)式可以看出,当凸轮曲线系数n趋近于0时,变倍倍率与转角呈指数变化,即在凸轮转动过程中,倍率增长速度越来越快。

当$n=1$时,$\frac{\mathrm{d}m_{23}}{\mathrm{d}\theta}=m_{230}\frac{M_{\max}-1}{\alpha}$,倍率变化率是定值,即在凸轮从最短焦一端到最长焦一端整个转动过程中,倍率变化是匀速的,也就变成(4)式讨论的情形。

当 $m=1/2$ 时,$\frac{\mathrm{d}m_{23}}{\mathrm{d}\theta}=2m_{230}(\frac{M_{\max}^{\frac{1}{2}}-1}{\alpha})^2\theta\Rightarrow$ $\frac{\mathrm{d}^2m_{23}}{\mathrm{d}\theta^2}=2m_{230}(\frac{M_{\max}^{\frac{1}{2}}-1}{\alpha})^2=\text{const}$,所以倍率变化是匀加速的,这也是我们所期望的。

3) θ与M成指数、对数和高斯函数关系。当n一定时,倍率变化率$\frac{\mathrm{d}m_{23}}{\mathrm{d}\theta}$与$\theta$成反比关系,即在凸轮从最短焦逐渐转动到最长焦时,倍率变化速率越来越慢。n变化,倍率变化率$\frac{\mathrm{d}m_{23}}{\mathrm{d}\theta}$与$\theta$曲线变化呈非线性。当凸轮曲线系数$n$趋近于0时,倍率变化率是一常数,即倍率变化是线性的。

一般而言,选择凸轮曲线的原则是在压力升角都不超过允许值的情况下,选取变倍倍率变化均衡性最好,倍率变化曲线平滑的曲线形式[6-8]。通过上面形式的讨论以及Matlab实验仿真,我们了解到θ与M成幂函数关系时,通过选取合适的调节系数n可以实现在压力角接近允许值时,变倍倍率变化均衡性最好,倍率变化曲线平滑,且无凸轮拐点。而取其他几种函数形式都无法达到更好的效果。图1是根据前面的分析结果利用三维绘图软件设计的凸轮仿真图。下面介绍我们的仿真实验结果。

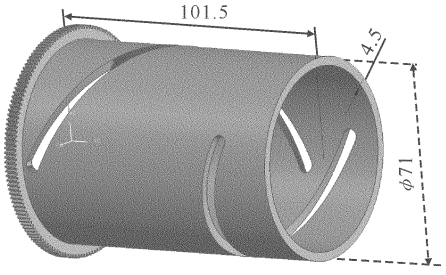


图1 凸轮结构仿真图

Fig. 1 Simulation figure of cam

2.2 分析与仿真

结合前面给出的两种形式的凸轮曲线求解方法,以及θ与M的函数关系,编写Matlab GUI界面。

程序输入参数为:

凸轮曲线系数n,光学系统的短焦焦距f_0,变倍组焦距f_2,补偿组焦距f_3,导程(变倍组由短焦到长焦的移动距离)wl,短焦时变倍组的物距l_{20},短焦

时补偿组的像距ll_{30},凸轮最大转角α,以角度为单位的转角间隔mu,凸轮转筒的直径dd。

程序输出参数为:

转角,变倍组移动量,补偿组移动量,焦距,变倍组压力升角,补偿组压力升角,变倍倍率这几项数据以及图形。

通过这个程序界面,可以方便地看出变倍倍率随转角的变化关系,观察压力升角是否超过允许值,并可以改变调节系数来迅速改变上述关系,以找出要求的最佳凸轮曲线。

以课题组设计的20×连续变焦正组补偿系统为例,进行凸轮曲线选择。

固定参数为:$f_2=-12$ mm,$f_3=25.5$ mm,$f_0=10$ mm,$l_{20}=58.076\ 9$ mm,$ll_{30}=35.291\ 3$ mm,$wl=38.117\ 1$ mm,$\alpha=200°$,$mu=5°$,$dd=71$ mm。

可变参数:调节系数n。

本程序对上述所有参数都是可编辑的,为了方便讨论此处我们主要考虑的是调节系数n对结果的影响。

图2　Matlab 仿真界面

Fig. 2　Matlab simulation interface

1）$n=0$ 时θ与x之间为线性关系,如图3所示。

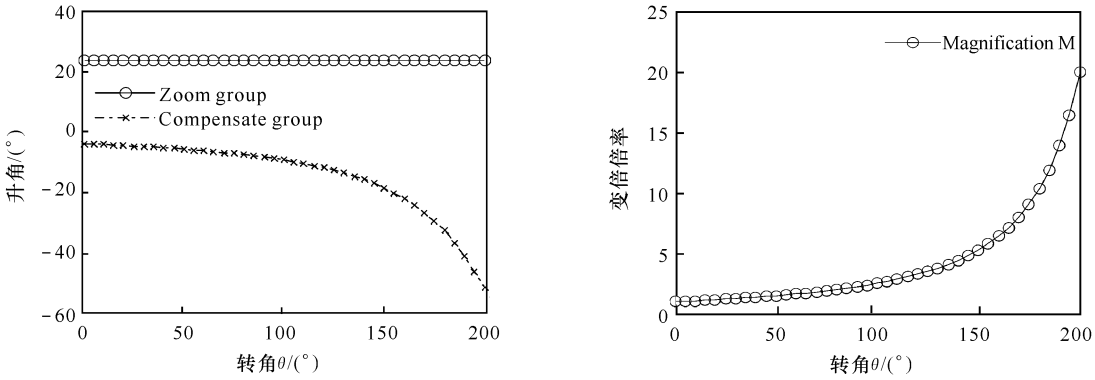
2）$n=0.047$ 时幂函数图形如图4所示。

3）$n=0.000\ 1$ 时指数函数图形如图5所示。

4）$n=2.32$ 时对数函数图形如图6所示。

5）$n=0.1$ 时高斯函数图形如图7所示。

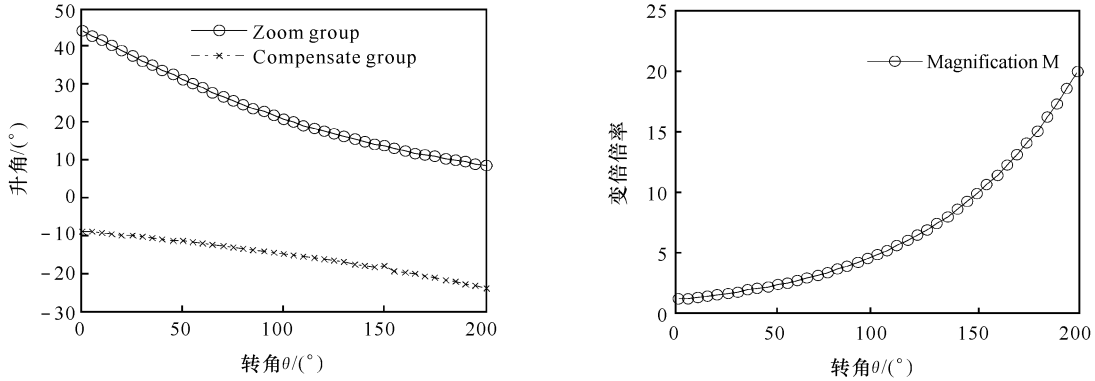
试验证明前面对各种函数关系的讨论与图形曲线走势符合。



(a) 压力升角与转角的关系　　(b) 变倍倍率与转角的关系

图3　θ与x线性关系

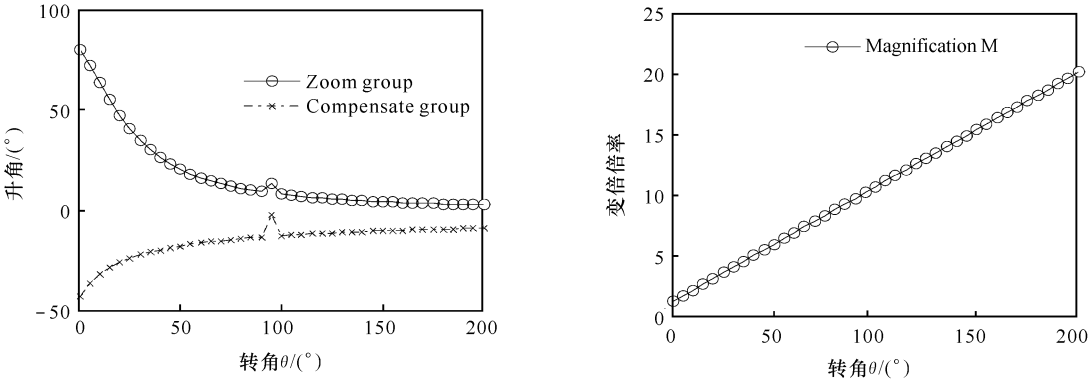
Fig. 3　Linear relationship between θ and x



(a) 压力升角与转角的关系　　(b) 变倍倍率与转角的关系

图4　θ与M幂函数关系

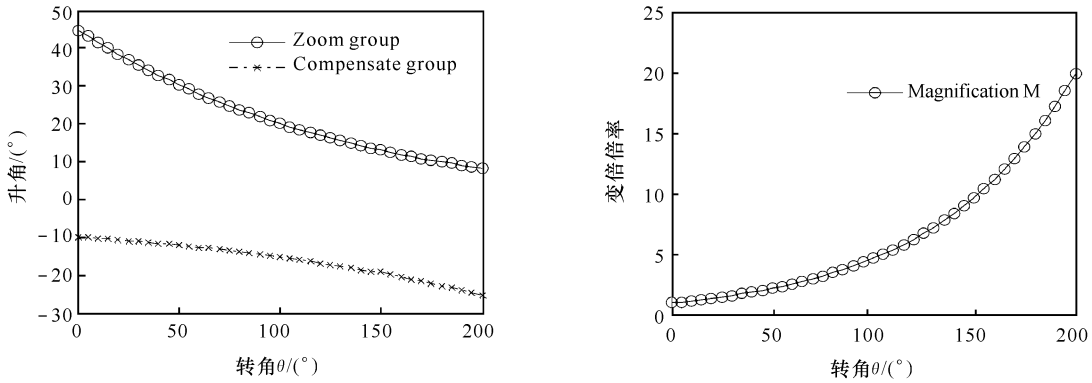
Fig. 4　Power function between θ and M



(a) 压力升角与转角的关系　　(b) 变倍倍率与转角的关系

图 5　θ 与 M 指数函数关系

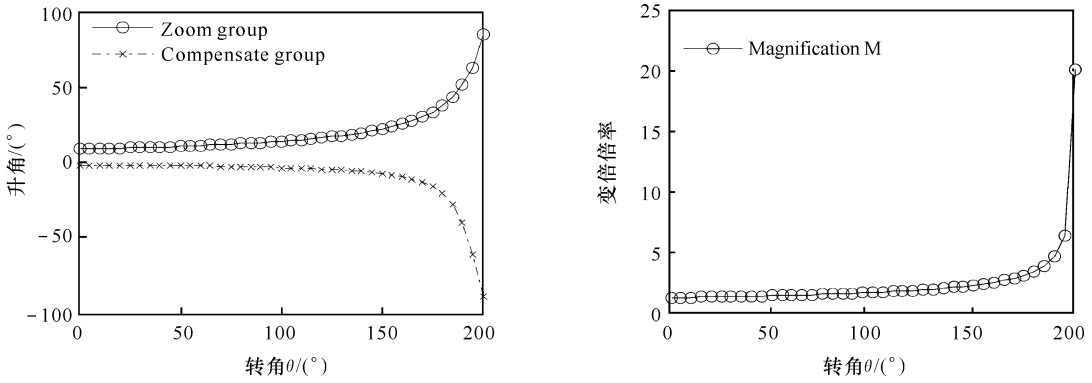
Fig. 5　Exponential function between θ and M



(a) 压力升角与转角的关系　　(b) 变倍倍率与转角的关系

图 6　θ 与 M 对数函数关系

Fig. 6　Logarithm function between θ and M



(a) 压力升角与转角的关系　　(b) 变倍倍率与转角的关系

图 7　θ 与 M 高斯函数关系

Fig. 7　Gauss function between θ and M

以上实例分析简要说明了调节系数 n 取不同值对凸轮曲线设计结果的影响情况,适当修改参数可获得更好的效果。在试验过程中,发现在 n 取某些特定值时,会出现凸轮曲线整体压力角均符合要求,只有某一个点突然超过合理值,这样的点就是我们常说的曲线拐点,就是在凸轮转动到一定角度的时候,突然不能继续旋转了,即机械中的卡死[9-11]。它不论是对于凸轮结构还是变焦效果都是致命的,所以在设计时,应该避免含有这样拐点的曲线。也就是要求多次试验保证取到合理的调节系数。同时,调节系数取某值能否使得凸轮曲线最优化,与凸轮直径、所能承受的凸轮曲线压力角、凸轮总转角的要求,系统体积和重量以及变焦速度的要求有关。因此,建立调节系数的变焦凸轮曲线方程的设计方法可以方便设计人员灵活修改曲线,使之能针对不同设计要求改变凸轮曲线形状,找到最佳

变倍凸轮曲线。

从上述实验数据中随机取出几个变倍位置,带到Code V验证均能保证像面稳定,像质满足设计要求。

2.3 实验结果

根据上述分析和仿真,我们设计的变焦镜头的凸轮得到成功应用,如图8所示。经过实地拍照检验,运用上述理论设计的凸轮在变焦镜头中,变焦快速平滑,补偿曲线准确,在不同焦点处成像质量良好,完全达到了设计指标,验证了前述分析的正确性。

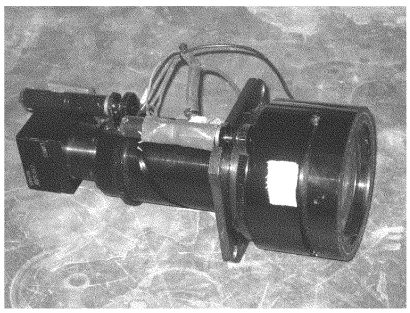


图8 变焦镜头

Fig. 8 Zoom lens

3 结论

选择θ与M的幂函数关系,通过改变调节系数n,可以在θ与x线性关系和θ与m_{23}线性关系两者之间进行不同的折中,既保证压力升角不会过大,也避免了倍率变化速度的严重非均匀性,这是最合适的一种方法。当然,为了获得$\theta-m_{23}$或$\theta-\mathrm{d}m_{23}/\mathrm{d}\theta$的线性关系,可以用增加$\alpha$角或增加凸轮转筒直径的办法来减小凸轮曲线的最大压力升角,但这会增加镜头的体积和重量。减小补偿组的焦距也会使补偿曲线的最大压力升角减小。但这会使固定组的结构复杂化,甚至降低光学设计质量。因此,选择θ与M的幂函数关系,可以帮助我们优化凸轮曲线,有助于我们设计出小型化的高质量的变焦距镜头。

参考文献:

[1] 唐剑兵.变焦凸轮曲线的优化设计[J].光学技术,1994,20(1):27-29.
TANG Jian-bing. Optimized design of vari-focus cam contour[J]. Optical Technique,1994,20(1):27-29. (in Chinese with an English abstract)

[2] 张秀丽.改善补偿组凸轮曲线的新方法[J].云光技术,2003,35(2):16-17.
ZHANG Xiu-li. A new method to improve the cam contour of compensate lens [J]. Yunguang Technique, 2003,35(2):16-17. (in Chinese with an English abstract)

[3] 崔军,何国雄.变焦系统凸轮曲线的拟合设计[J].仪器仪表学报,1990,11(1):107-112.
CUI Jun, HE Guo-xiong. Fitting design of zoom lens cam contour[J]. Chinese Journal of Scientific Insturment,1990,11(1):107-112. (in Chinese with an English abstract)

[4] 电影镜头设计组.电影摄影物镜光学设计[M].北京:中国工业出版社,1971.
Movie Lens Design Group. Optiacl design of movie photography objective lens [M]. Beijing: Chinese Industry Publishing Company, 1971. (in Chinese)

[5] 常群.光学设计文集[M].北京:科学出版社,1976.
CHANG Qun. Optical design corpus[M]. Beijing: Science Publishing Company, 1976. (in Chinese)

[6] 崔继承.大口径折反射式变焦距物镜的设计[J].光学精密工程,2008,16(11):2087-2091.
CUI Ji-cheng. Design of large aperture refractive-reflective zoom lens [J]. Optics and Precision Engineering, 2008,16(11):2087-2091. (in Chinese with an English abstract)

[7] 董科研,潘玉龙,王学进,等.谐衍射红外双波段双焦光学系统设计[J].光学精密工程,2008,16(5):764-770.
DONG Ke-yan, PAN Yu-long, WANG Xue-jin, et al. Optical design of a HDE infrared dual-band step-zoom system [J]. Optics and Precision Engineering,2008,16(5):764-770. (in Chinese with an English abstract)

[8] 郜洪云,熊涛.中波红外两档变焦光学系统[J].光学精密工程,2008,16(10):1891-1894.
HAO Hong-yun, XIONG Tao. Mid-wavelength infrared dual field-of-view optical system[J]. Optics and Precision Engineering,2008,16(10):1891-1894. (in Chinese with an English abstract)

[9] 陈鑫,付跃刚.变焦系统凸轮曲线的优化设计[J].应用光学,2008,29(1):45-47.
CHEN Xin, FU Yue-gang. Optimal design of cam curve for zoom system [J]. Journal of Applied Optic. 2008, 29 (1): 45-47. (in Chinese with an English abstrac)

[10] 许正光,赵一菲,宋才良,等.用OZSAD软件实现复合式变焦凸轮曲线优化设计[J].应用光学,2006,27

(3):203-207.
XU Zheng-guang, ZHAO Yi-fei, SONG Cai-liang, et al. Optimization of compounding zoom cam curve design with OZSAD[J]. Journal of Applied Optics, 2006,27(3):203-207. (in Chinese with an English abstract)

[11] 孟军和,张振,孙兴文.变焦距镜头的凸轮优化设计[J].红外与激光工程. 2002,31(1):51-54.
MENG Jun-he, ZHANG ZHen, SUN Xing-wen. Cam optimization of a zoom lens[J]. Infrared and Laser Engineering, 2002, 31(1):51-54. (in Chinese with an English abstract)