

引用格式: PENG Jian-wei, SHI Kui, LEI Yang-jie, *et al.* Optimal Design of Cam Curve Structure of the  $30\times$  Continuous Zoom System[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(12): 1222002

彭建伟, 史魁, 雷杨杰, 等. 三十倍连续变焦系统凸轮曲线结构优化设计[J]. 光子学报, 2019, 48(12): 1222002

# 三十倍连续变焦系统凸轮曲线结构优化设计

彭建伟, 史魁, 雷杨杰, 梅超, 武力

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

**摘 要:** 以某三十倍连续变焦镜头为例, 研究了改变曲线压力角的方法。以压力角为目标函数, 将凸轮曲线转角构造为分段函数对转角重新划分, 压力角过大位置分配较大转角, 压缩压力角较小处的转角, 从而降低曲线整体压力角, 并可有效抑制曲线中较大拐点。利用 Matlab 进行仿真计算, 对比多种转角分配取值的优化结果, 得到相对优化的凸轮曲线。优化结果使得曲线最大压力角值由原始的  $76.9^\circ$  降低为  $41.9^\circ$ 。经试验验证, 利用该方法优化完的变焦镜头成像质量良好, 光轴跳动不大于 3 个像素, 光轴稳定性不大于 1 个像素。

**关键词:** 大变焦比; 连续变焦系统; 凸轮曲线; 优化设计; 压力角

中图分类号: TH703

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20194812.1222002

## Optimal Design of Cam Curve Structure of the $30\times$ Continuous Zoom System

PENG Jian-wei, SHI Kui, LEI Yang-jie, MEI Chao, WU Li

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** Taking a  $30\times$  continuous zoom lens as an example, the method of changing the pressure angle of the curve is researched. The pressure angle is taken as the objective function, and the cam curve rotation angle is constructed as a piecewise function to re-divide the angle, the position where the pressure angle is too large is distributed large rotation angle, and the rotation angle of position where the pressure angle is small is compressed, so as to reduce the overall pressure of the curve, and also to restrain the large inflection point effectively in the curve. The optimization results of various angular allocation values are compared with the simulation using Matlab and the optimal cam curve is obtained. The optimal result reduces the maximum pressure angle of the curve from the original  $76.9^\circ$  to  $41.9^\circ$ . The experimental results show that the zoom lens optimized by this method has good imaging quality, the line-of-sight liner is not more than 3 pixels, and the stability of the line-of-sight is not more than 1 pixel.

**Key words:** Large zoom ratio; Continuous zoom system; Cam curve; Optimal design; Pressure angle

**OCIS Codes:** 220.2740; 220.4830; 120.4630

## 0 引言

连续变焦系统在航空光电领域的应用日益广泛。连续变焦系统可以根据目标的作用距离和大小, 实时连续调整焦距, 使目标始终清晰成像于监视尺寸内。借助于光电稳定平台, 连续变焦系统可以完成对目标的持续捕获和高精度跟踪。随着航空光电稳定平台对目标跟踪、测量、作用距离及其它特殊任务精度指标要求越来越高, 系统平台对于连续变焦光学系统的焦距、相对孔径、变倍比及光轴稳定性等指标的要求也越来越高。

凸轮曲线设计的好坏, 直接影响到镜头的光轴跳动、光轴稳定性和成像质量。对于长焦距大变倍比的连续变焦系统, 这种影响更为明显。如果曲线压力角较大, 则会使凸轮驱动力矩过大, 低温工况时无法启动。若

**基金项目:** 国家重点研发计划 (No. 2016YFC0803000), 陕西省自然科学基金研究计划 (No. 2019JQ-295)

**第一作者:** 彭建伟 (1988—), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为光学仪器系统结构设计。Email: pengjianwei13@mails.uca.ac.cn

**收稿日期:** 2019-08-19; **录用日期:** 2019-11-01

<http://www.photon.ac.cn>

曲线中存在较大拐点,则会使运动镜组受力不均,出现光轴跳动,严重时,还会导致凸轮卡死,无法使用<sup>[1]</sup>.压力角小且平滑的凸轮曲线还有利于保证机械加工精度和表面粗糙度,提高凸轮的加工质量<sup>[2-3]</sup>.

目前常见的连续变焦光学系统均采用二组元联动机械补偿式结构<sup>[4]</sup>.该变焦系统结构相对简单,两条原始凸轮曲线往往较为平滑无拐点,通过选择合适的工作转角,便可保证凸轮曲线压力角满足使用要求.该结构形式对于中短焦距,低变倍比的光学系统,能实现较为优良的像质和高光轴稳定性.但随着光学系统焦距和变倍比的增加,两组联动的光学系统的各类像差难以校正,系统的总长和动组行程均会大幅增大,导致系统的空间尺寸和凸轮曲线压力角增大,无法满足使用要求.

通过增加一组像差稳定组实现三组联动变焦光学系统可以有效压缩长焦距、高变倍比的光学系统的空间尺寸,减小各动组的运动行程,且其像差更容易控制.对于三十倍连续变焦系统,通过三组联动形式配合合适的换根点,可以解决小型化和大变倍比之间的矛盾.这往往会导致凸轮曲线在换根位置处出现拐点,以及某一段处的压力角较大,这对于变焦系统的光轴跳动、成像质量及稳定性都是不利的.本文以三十倍连续变焦系统为例,提出通过将凸轮曲线转角构造为分段函数,目的是降低曲线特定段的压力角,抑制曲线中较大拐点.利用 Matlab 编程得到相对优化的凸轮曲线.经样机试验验证变焦过程顺畅,光轴跳动及成像质量均满足指标要求.该方法对变焦系统的凸轮设计具有指导意义.

## 1 光学系统参数及凸轮曲线初始结构

以某三十倍变焦系统为例,其工作在可见光和近红外双波段,输出 1080P 彩色视频.系统焦距为 17~560 mm,视场为  $0.7^\circ \sim 21^\circ$ ,短焦和长焦相对孔径分别为 1/2.4 和 1/8,系统总长为 285 mm.同时,指标还要求变焦过程中的光轴跳动不大于 0.4 mrad.光学系统设计完成后如图 1 所示.

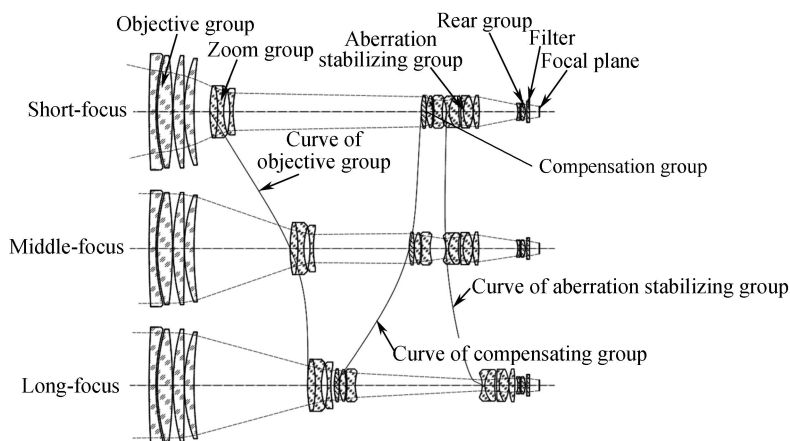


图 1 三十倍变焦系统光学图

Fig.1 Optical system diagram of 30× continuous zoom lens

系统采用三组元联动机械补偿式结构,由前组(前后移动用于调焦)、变倍组、补偿组、像差稳定组、后固定组以及滤光片组成.变倍组、补偿组和像差稳定组作为动组沿轴向联动,保证系统在连续变焦过程中,像面位置稳定.动组的运动关系是通过高斯光学理论给出的,通过换根,压缩系统轴向长度,实现大变倍比<sup>[5-7]</sup>.

动组在运动过程中,需要高精度的凸轮严格限制各自的轴向位置.凸轮曲线由光学设计给出的 1 000 个离散点经三次样条曲线拟合得到.原始凸轮曲线结构如图 2 所示.变倍组、补偿组和像差稳定组行程分别为 71.35 mm、63.51 mm 和 27.21 mm.结构设计变焦凸轮直径 94 mm,为保证三条曲线整体较小压力角和零件足够的强度,选取凸轮曲线工作转角  $160^\circ$ .受限于导向机构设计,补偿组曲线相位超前  $120^\circ$ .像差稳定组曲线在换根位置处出现较大拐点,且压力角最大达到  $76.9^\circ$ ,无法使用.

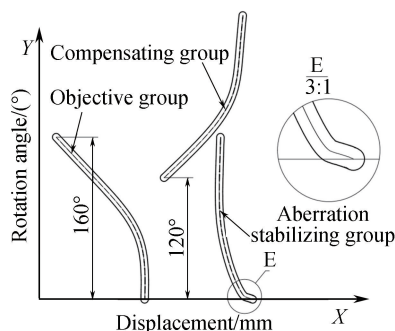


图 2 凸轮曲线初始结构

Fig.2 Original structure of the cam curve

## 2 凸轮曲线优化原理

凸轮曲线严格保证变焦光学系统动组的轴向位置关系.为简化说明,以三个离散点的凸轮曲线为例进行分析,示意图如图 3 所示.以轴向移动距离和凸轮旋转角度为  $X$  轴和  $Y$  轴,建立坐标系.通过均分凸轮旋转角度,将其与动组的轴向位置一一对应,得到一系列离散的坐标点,经拟合得到初始凸轮曲线结构.保持凸轮总转角不变,调整凸轮转角的分配关系,可以改变凸轮曲线的压力角.

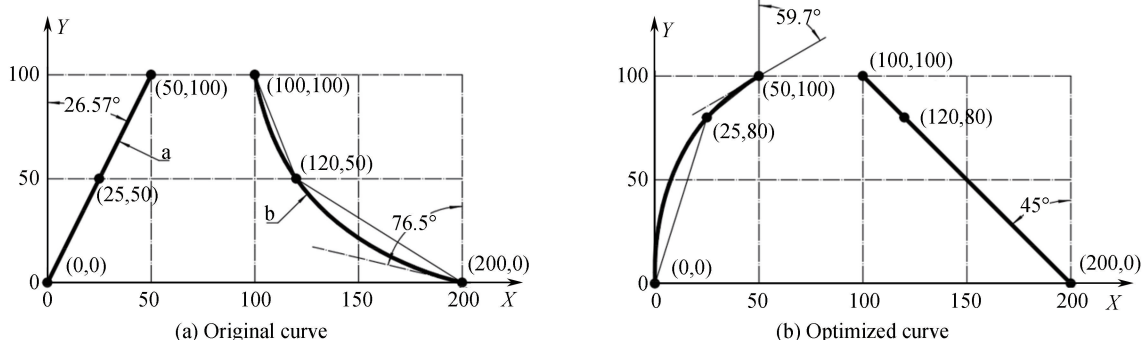


图 3 凸轮曲线优化原理

Fig.3 Principle of the optimal design of the cam curve

曲线  $a$  和曲线  $b$  均由三个离散点拟合而成.曲线  $a$  限制动组  $a$  三个轴向位置  $(0, 25, 50)$ , 曲线  $b$  限制动组  $b$  三个轴向位置  $(100, 120, 200)$ .凸轮工作转角为  $100^\circ$ , 原始曲线采用均分转角的方式, 其纵坐标分别为  $(0, 50, 100)$ .用 Matlab 进行三次样条曲线拟合, 并计算两条曲线最大压力角.压力角计算公式为:  $\alpha = \arctan\left(\frac{dy}{dx}\right)$ , 得到曲线  $a$  和曲线  $b$  最大压力角分别为  $26.57^\circ$  和  $76.5^\circ$ .曲线  $b$  在前半段的压力角过大, 无法满足使用要求.

在满足两个动组轴向位置不变的条件下, 对曲线转角重新划分, 增大前段转角, 使其纵坐标分别为  $(0, 80, 100)$ .即将转角的均分方式变为非等距, 对各离散点进行重新拟合, 并计算压力角, 得到曲线  $a$  和曲线  $b$  最大压力角分别为  $59.7^\circ$  和  $45^\circ$ .分析表明, 曲线  $b$  的压力角明显减小, 而曲线  $a$  的压力角随之增大, 但整体压力角较为均衡, 相比于原始曲线, 优化后曲线有明显改善.

## 3 优化三十倍变焦凸轮曲线

在三十倍连续变焦系统凸轮曲线优化过程中, 通过将  $160^\circ$  均分为 1 000 个离散点, 与轴向位置构成坐标点, 拟合为原始曲线.其中像差稳定组前在 20 个点部分压力角较大, 约为  $75^\circ$ , 且存在较大拐点.将凸轮转角构造为分段函数对转角重新划分, 对凸轮曲线进行优化, 目的是降低像差稳定组曲线的压力角, 使整体曲线压力角满足使用要求.构造的分段函数需满足函数的连接处函数值相等且前后过渡平滑, 否则曲线会出现新的拐点.以压力角为目标函数, 分段函数各自所覆盖的转角范围经过多次迭代, 找到相对优化的凸轮曲线.借助于 Matlab 编程, 实现这一优化过程, 程序流程图如图 4 所示.通过均分转角建立原始凸轮曲线, 判断原始压力角是否满足使用要求.以压力角大于  $60^\circ$  且存在明显拐点作为判断, 对原始曲线进行优化.通过构造分段函数, 分配转角值得到拟合曲线, 重新计算曲线压力角.通过多次迭代, 得到优化完成的凸轮曲线.

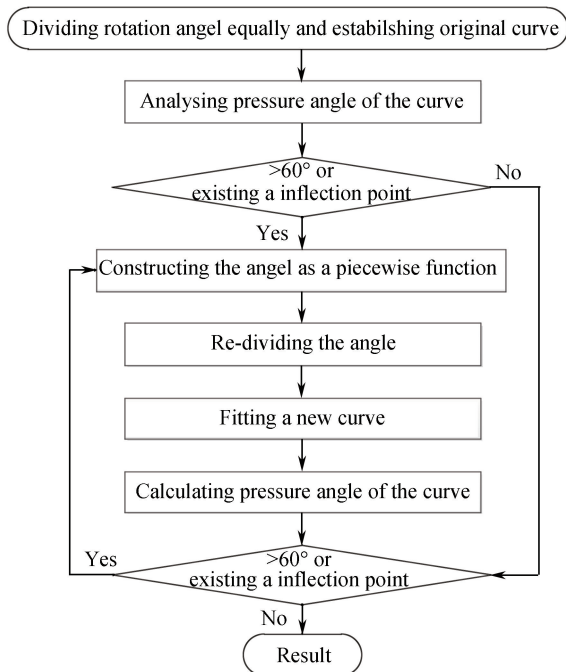


图 4 程序流程

Fig.4 Program flowchart

将凸轮曲线转角构造成为两段分段函数,同时通过方程描述其在连接处函数值相等及前后过渡平滑,为

$$\begin{cases} y(i) - y(i-1) = \frac{r \cdot \theta_2}{n-m} + (m+1-i) \cdot \delta & i = [2:m] \\ y(i) = r \cdot \theta_1 + \frac{r \cdot \theta_2}{n-m} \cdot i & i = [m:n] \\ r \cdot \theta_1 + \frac{r \cdot \theta_2}{n-m} \cdot i = (m-1) \cdot \frac{r \cdot \theta_2}{n-m} + \sum_{i=1}^{m-1} i \cdot \delta \\ [y(m+1) - y(m)] - [y(m) - y(m-1)] = [y(m) - y(m-1)] - [y(m-1) - y(m-2)] \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\theta_1, \theta_2$  分别为两个分段函数转角,  $\theta_1 + \theta_2 = \frac{8\pi}{9}$ ,  $r$  为凸轮直径,  $m$  为前段函数的离散点数,  $n$  为总点数.  $\delta$

为保证两个分段函数在连续处函数值相等的中间变量. 前段函数对应曲线压力角较大部分, 分配较大转角, 且相邻步长依次递增, 在第一个离散点处, 步长达到最大值; 后段函数对应曲线压力角较小, 转角相应压缩, 且步长均分. 将分段函数在 Matlab 中编程, 并设置相关参数, 通过选取多种  $\theta_1$  和  $m$  值, 得到了相应的凸轮曲线. 为对比清晰, 将三条曲线设置为同一初始相位, 如图 5 所示, 并计算了压力角值, 见表 1.

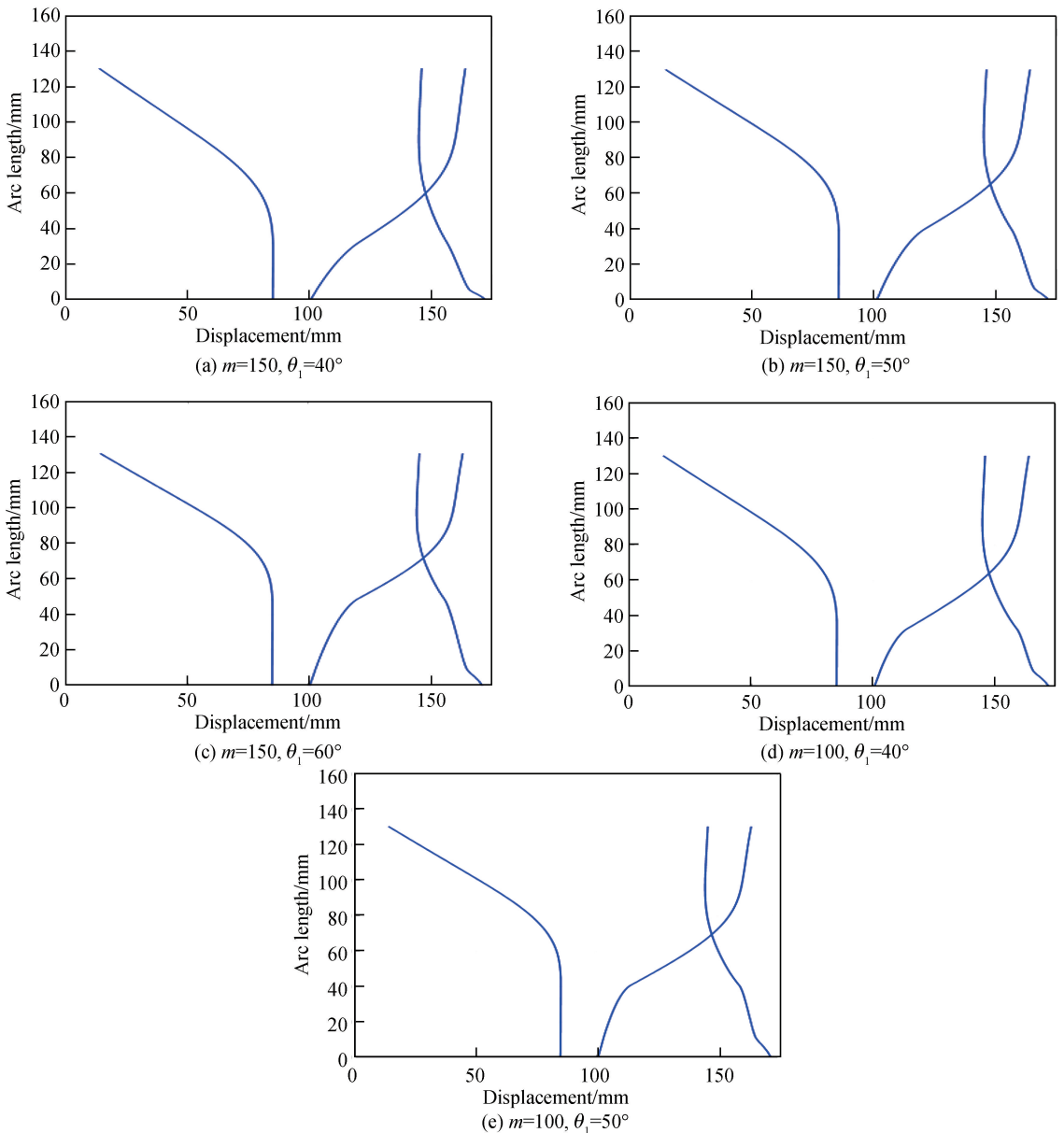


图 5 多种工况凸轮曲线  
Fig.5 Cam curve on various working conditions

表 1 多种工况下凸轮曲线最大压力角  
Table 1 Maximum pressure angle of the curve on various working conditions

|                                                                | Equalstep size | 150 points, rotation angle 40° | 150 points, rotation angle 50° | 150 points, rotation angle 60° | 100 points, rotation angle 40° | 100 points, rotation angle 50° |
|----------------------------------------------------------------|----------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Maximum pressure angle of the zoom group/(°)                   | 43.6           | 47.1                           | 49.6                           | 52.3                           | 48.8                           | 51.2                           |
| Maximum pressure angle of the compensating group/(°)           | 48.1           | 48.8                           | 51.3                           | 53.9                           | 51.2                           | 53.6                           |
| Maximum pressure angle of the aberration stabilizing group/(°) | 76.9           | 55.9                           | 46.3                           | 39.1                           | 41.9                           | 34.0                           |

从图 5 和表 1 中可以看出,随着前段函数转角  $\theta_1$  的增大,像差稳定组最大压力角呈现明显减小趋势,变焦组和补偿组压力角随之增大,但增大量较小.前段函数离散点数  $m$  的减小,有助于三条曲线整体压力角的减小,但  $m$  值过小,会导致补偿组出现较大拐点.对比 5 种工况可知,当  $m=100, \theta_1=40^\circ$  时,像差稳定组最大压力角为  $41.9^\circ$ ,为可接受值,且变焦组和补偿组压力角整体较小,凸轮曲线整体得到优化;同时,由于对像差稳定组拐点处针对性地分配较大转角,原始曲线中出现的较明显拐点也在优化后得到较好抑制,可满足使用要求.在程序中还选取了其它多种  $\theta_1$  和  $m$  值,分析计算的结果均不如上述 5 种工况.最终选取  $m=100, \theta_1=40^\circ$  优化结果为相对优化的凸轮曲线.以上述优化结果为依据,在三维软件中建立变焦凸轮模型如图 6 所示.

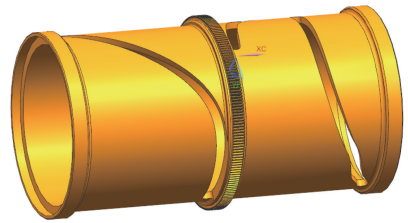


图 6 变焦凸轮三维模型  
Fig.6 The model of zoom lens cam

#### 4 试验结果

依据优化设计结果,加工生产并完成整机装配,图 7 为三十倍连续变焦系统完成高低温试验后现场照片.装调完成后的镜头变焦全程流畅无卡滞,三个动组轴向位置精准,全焦段成像质量优良,实测长焦 560 mm 处传函达到 0.3,短焦 17 mm 处传函达 0.5.图 8 是在做外场试验时拍摄的城市道路和车辆人员图片,图片效果清晰.



图 7 三十倍连续变焦系统完成高低温试验  
Fig.7 Temperature test of 30× continuous zoom lens



(a) Image of the short focus



(b) Image of the long focus

图 8 外场试验图像  
Fig.8 Image of outfield test

光轴跳动是指光轴在长短焦切换过程中与靶面中心的偏差.在平行光管焦面上放置星点孔,调整变焦镜头长焦和短焦共轴并与平行光管同轴.在像面处用测量显微镜测量变焦过程全程星点像偏离光轴的最大位移,实测镜头变焦全程光轴跳动不大于3个像素.对整机进行振动和高低温试验,振动试验前后光轴稳定性不大于1个像素,在低温 $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下,变焦机构仍正常工作.试验和测试结果表明,经凸轮曲线优化后的三十倍变焦镜头完全达到设计指标<sup>[8]</sup>.

## 5 结论

通过调整凸轮转角的分配关系,可以改变凸轮曲线的压力角.在压力角过大位置分配较大转角,压缩压力角较小处的转角,将其构照为分段函数,可以有效降低曲线整体压力角.以三十倍连续变焦光学系统为例对凸轮曲线优化方法进行了验证,构造出两段分段函数,将像差稳定组曲线最大压力角值由原始的 $76.9^{\circ}$ 降低为 $41.9^{\circ}$ ,同时维持变倍组和补偿组曲线在合理范围内,得到了相对优化的凸轮曲线.在实际应用中,经凸轮曲线优化后的三十倍变焦镜头取得良好效果,表明此凸轮曲线优化方法对变焦光学系统的凸轮结构设计具有指导意义,有助于设计出优良的连续变焦镜头.

## 参考文献

- [1] YAN Lei, JIA Ping, HONG Yong-feng, *et al.* Selection of cam curve for zoom lens[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, **31**(6): 877-882.  
晏蕾,贾平,洪永丰,等.变焦距镜头凸轮曲线形式的选择[J].应用光学,2010,**31**(6):877-882.
- [2] TANG Jian-bing. Optimized design of vari-focus cam contour[J]. *Optical Technique*, 1994, **20**(1): 27-29.  
唐剑兵.变焦凸轮曲线的优化设计[J].光学技术,1994,**20**(1):27-29.
- [3] CHEN Xin, FU Yue-gang. Optimal design of cam curve for zoom system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, **29**(1): 45-47.  
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.
- [4] TIAN Hai-xia, YANG Jian-feng, MA Xiao-long. Design for visible video zoom optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(9): 1797-1799.  
田海霞,杨建峰,马小龙.可见光变焦距电视光学系统设计[J].光子学报,2008,**37**(9):1797-1799.
- [5] GAO Tian-yuan, WU He-long, HAN Xu. Method for reducing pressure angle of cam curve in zoom system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(2): 0222001.  
高天元,吴合龙,韩旭.减小变焦系统凸轮曲线压力角的方法[J].光子学报,2019,**48**(2):0222001.
- [6] MENG Jun-he, ZHANG Zhen, SUN Xing-wen. Cam optimization of a zoom lens[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, **31**(1):51-54.  
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.
- [7] 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.  
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.
- [8] WANG Ping, ZHANG Bao, CHENG Zhi-feng, *et al.* Optimal design of cam structure of zoom lens[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(4): 894-898.  
王平,张葆,程志峰,等.变焦距镜头凸轮结构优化设计[J].光学精密工程,2010,**18**(4):894-898.