

# 变焦系统凸轮曲线的优化设计

陈鑫, 付跃刚

(长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 由于变焦系统凸轮曲线的质量直接影响像质,因此从实际应用出发,以变焦方程和动态光学原理为依据,结合实际工作中需要设计的变焦镜头,通过对变焦系统高斯计算的过程进行分析,指出影响凸轮曲线的主要因素为变倍组和补偿组的焦距以及二者的间隔。针对3个参量之间的对应关系进行讨论,提出了优化凸轮曲线的方法。

**关键词:** 变焦距系统;凸轮曲线;光学设计;优化设计

中图分类号: O439; TN942.2

文献标志码: A

## Optimal design of cam curve for zoom system

CHEN Xin, FU Yue-gang

(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Based on the zoom equation, the dynamic optics principle and the process analysis of the Gauss calculation for zoom systems, it is pointed out that the primary factors which influence the cam curve are the focal length of the zoom lens group and compensating lens group, and the distance between them. The relationships between the three parameters were discussed. The method to optimize the cam curve is proposed.

**Key words:** zoom system; cam curve; optical design; optimal design

## 引言

随着变焦距系统在军事和日常生活中的应用日益广泛,凸轮作为变焦距系统的重要组成部分,如何快速、简单地设计和优化凸轮曲线具有重要的现实意义。在实际应用中,设计并加工出来的变焦距系统存在光轴跳动较大等问题,如一些测量仪器中使用的变焦距系统光轴跳动过大会严重影响仪器测量的精度,因此需要最大可能地减小光轴跳动量。引起光轴跳动除了加工凸轮曲线过程中存在加工误差等因素外,还有就是凸轮曲线不够平滑,在某一点的曲率突然增大,或者该点是整个曲线的曲率极值点。目前加工凸轮曲线大多采用数控机床,加工误差影响的概率大大减小,因此,凸轮曲线的优化设计就对减小光轴跳动量具有重要意义。

## 1 变焦系统高斯光学计算

一般的机械补偿变焦系统由前固定组、变倍组、补偿组和后固定组组成。变焦系统高斯光学计算的主要目的是确定各组的焦距和各组之间的间隔,即确定变焦系统各组在变焦过程中的运动关系,为光学设计提供初始参数。

变焦系统高斯结构如图1所示。首先确定初始位置,一般选择长焦端开始计算,对于采用换根补偿形式的系统则从变倍组和补偿组的放大率相等处开始计算<sup>[1]</sup>。已知初始位置的倍率为 $m_{20}$ 和 $m_{30}$ ,将变倍组焦距取规划值为-1,给出变倍组和补偿组之间的间隔 $d_{23}$ ,由下式计算初始位置的高斯解:

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'} \quad (1)$$

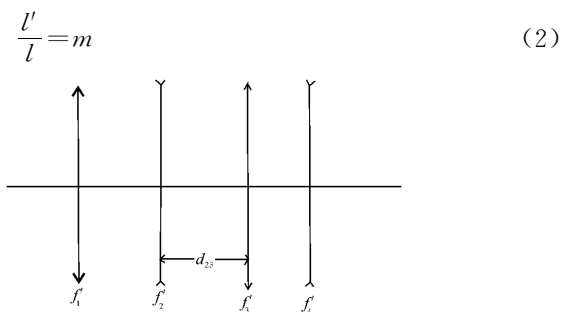


图1 变焦系统高斯结构

Fig.1 Gauss structure of zoom system

要求其他任意位置变倍组焦距的规划值  $m_2$  和  $m_3$ , 需要采用以下变焦方程进行计算:

$$\begin{cases} f'_2(m_{20} + \frac{1}{m_{20}}) + f'_3(m_{30} + \frac{1}{m_{30}}) = \\ f'_2(m_2 + \frac{1}{m_2}) + f'_3(m_3 + \frac{1}{m_3}) = C \\ m_2 m_3 = \Gamma m_{20} m_{30} = D \end{cases} \quad (3)$$

式中  $\Gamma$  是要求的倍率。根据变焦方程(3)可以得到所求位置的  $m_2$  和  $m_3$ :

$$\begin{cases} m_2 = \frac{CD \pm \sqrt{C^2 D^2 - 4(Df'_2 + f'_3)(Df'_2 + f'_3 D^2)}}{2(Df'_2 + f'_3)} \\ m_3 = \frac{D}{m_2} \end{cases} \quad (4)$$

对于换根补偿形式, 将  $m_2 = m_3 = -1$  作为初始点, 任意给出变倍组和补偿组的间隔  $d_{23}$ , 在计算得到初始位置的高斯解后, 试取长焦端的变倍组焦距规划值为  $m_2$ , 根据(1)式和(2)式计算长焦端的高斯解和变倍组焦距规划值  $m_3$ , 然后再利用(1)式~(3)式得到短焦端的高斯解。

根据动态光学原理<sup>[2]</sup>, 知补偿组的运动轨迹曲线为

$$q_2 = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (5)$$

式中:

$$\begin{cases} A = (f'_2 - m_2 q_1) m_3 \\ B = m_2 m_3 q_1^2 + [f'_3 (1 - m_3^2) m_2 - f'_2 (1 - m_2^2) m_3] q_1 - f'_2 f'_3 (1 - m_3^2) \\ C = m_3^2 f'_3 [m_2 q_1 - f'_2 (1 - m_2^2)] q_1 \end{cases} \quad (6)$$

当  $m_2 = m_3 = -1$  时, 有

$$q_2 = \frac{-q_1^2 \pm \sqrt{q_1^4 - 4f'_2 f'_3 q_1^2 - 4f'_3 q_1^3}}{-2(f'_2 + q_1)} \quad (7)$$

对(7)式求  $q_1$  的一阶导数, 有

$$\frac{dq_2}{dq_1} = \frac{q_1 \mp \frac{q_1^3 - 2f'_2 f'_3 q_1 - 3f'_3 q_1^2}{(q_1^4 - 4f'_2 f'_3 q_1^2 - 4f'_3 q_1^3)^{1/2}}}{f'_2 + q_1} + \frac{-q_1^2 - (q_1^4 - 4f'_2 f'_3 q_1^2 - 4f'_3 q_1^3)^{1/2}}{2(f'_2 + q_1)^2} \quad (8)$$

(8)式即为补偿曲线的曲率。因此, 根据动态光学原理<sup>[2]</sup>, 利用 Matlab 软件计算可拟合出变焦系统的凸轮曲线。

## 2 实例分析

以实际工作中需要的  $20\times$  变焦系统为例, 要求焦距为 10 mm ~ 200 mm, 整个系统长度小于 170 mm, Number  $F=5$ 。该系统的变倍比较大, 但是整体长度较小, 因此, 笔者考虑使用换根形式的正组补偿变焦系统。换根正组补偿系统以  $m_2 = -1$  和  $m_3 = -1$  处为起始点开始计算(这一点即为补偿曲线的换根点)。选取变倍组和补偿组的间距值  $d_{23}$  和补偿组焦距  $f'_3$  开始计算, 变倍组焦距  $f'_2$  取规划值  $-1$  时补偿组焦距  $f'_3$  与  $d_{23}$  存在如下关系<sup>[1]</sup>:

$$d_{23} = 2f'_3 - 2 \quad (9)$$

由(9)式计算得出  $d_{23} = 10.74$  mm 时, 系统的焦距  $f' = 142.87$  mm, 变倍组的焦距  $f'_3 = -13.42$  mm, 补偿组焦距  $f'_3 = 18.79$  mm。根据动态光学像移补偿公式建立一个 Matlab 数学模型, 将数据输入 Matlab 程序即可得到变倍组和补偿组的运动轨迹曲线, 如图2所示。

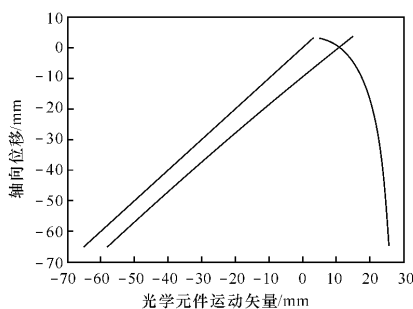


图2 初步计算所得系统的凸轮曲线

Fig.2 Preliminary calculation obtained system cam curve

由图2可知, 该补偿组的运动曲线曲率变化较大, 尤其是接近换根点时曲线的曲率变化过快, 容易引起光轴漂移。特别是系统经过换根点以后倍率快速增大。曲率变化较大是因为变倍组和补偿组的运动距离过短造成的。由于在短距离内要求倍率进行较大的变化, 因此使得曲线的压力过大。初始计

算的  $d_{23}$  值为设计者任取,在  $f'_2$  取规划值  $-1$  的情况下,  $d_{23}$  值的选取对  $f'_3$  有直接的影响,因此  $d_{23}$  值的选取对整个系统影响较大。另外,由于系统对长度有一定的要求,所以光学元件的横向运动长度应控制在一定的范围内。根据(7)~(9)式中  $d_{23}$ ,  $f'_2$  和  $f'_3$  之间以及它们与补偿曲线曲率的关系,修改  $d_{23}$ ,  $f'_2$  和  $f'_3$  的值然后重新开始计算,得到  $d_{23}=18$  mm 时,系统焦距  $f'=100$  mm,变倍组焦距  $f'=-15.01$  mm,补偿组焦距  $f'_3=24$  mm,运动轨迹如图3所示。

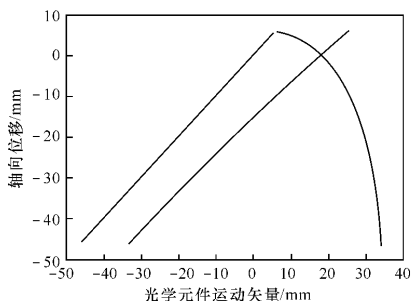


图3 修改后的系统凸轮曲线

Fig. 3 The system cam curve after revision

比较图3与图2可以发现,变倍组在换根点以前的运动距离有所减小,换根点以后的运动距离有少量增大,但补偿组的整个运动距离和换根点后运动距离增大明显,图3中的曲线较图2中的曲线过渡平滑,曲率变化速度减小,在一定的程度上减小了光轴的漂移。由图2与图3可见,对于相对紧凑的大变倍光学系统,在换根点后实现焦距快速变化并且变焦曲线过渡平滑,  $d_{23}$  的取值不宜过小,在规划值的情况下应使  $d_{23} > 1$ 。当然  $d_{23}$  的取值也不宜过大,可根据实际情况选取。另外,在动态光学原理中明确阐述为了使变焦过程中相面始终稳定,运动中变倍组与补偿组的位置要准确对应,可通过控制变倍组轴向位移量即可实现对补偿组位移量的控制。图3中变倍组位移较图2减小但补偿组的位移增

大,达到了减缓凸轮曲线曲率变化的目的。由以上设计可见,通过对初始计算过程和计算结果的分析 and 讨论,在修改关键参数的基础上,能够在一定程度上对凸轮曲线进行优化。

### 3 结论

通过分析实验结果,我们可以在初步获得凸轮曲线的基础上,依靠对变焦系统光学结构的进一步修改来实现凸轮曲线设计的优化,减小变焦系统的光轴跳动量,最终满足实际应用的需要。

#### 参考文献:

- [1] 陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京:国防工业出版社,1998.  
TAO Chun-kan. Zoom optical system design [M]. Beijing: Defense Industry Publishing House, 1998. (in Chinese)
- [2] 王春艳,王志坚,周庆才. 应用动态光学理论求解变焦光学系统补偿组凸轮曲线[J]. 光学学报,2006,6(6): 891-894.  
WANG Chun-yan, WANG Zhi-jian, ZHOU Qing-cai. Applies the dynamic optics theory solution zoom optical system to compensate the group cam curve [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 6(6): 891-894. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] 梅丹阳,焦明印. 变焦距投影光学系统中的远心光路设计[J]. 应用光学,2006,27(4):264-267.  
MEI Dan-yang, JIAO Ming-yin. Design of telecentric beam path for zoom projection optics[J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(4):264-267. (in Chinese)