

基于 ZEMAX 软件的二组元变焦系统 凸轮曲线设计程序*

曹红曲¹, 金 宁²

(1. 成都奥晶科技有限责任公司, 四川 成都 611730; 2. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 变焦系统凸轮曲线设计是变焦系统后期设计过程中十分重要的一环, 曲线设计的好坏直接关系到系统最后像面的稳定程度。针对较普及的 ZEMAX 光学设计软件界面编写的二组元变焦系统凸轮曲线设计程序确保像面稳定, 像质优良。程序可准确给出凸轮曲线的数据和形状。可借助该程序对变焦系统任意焦距位置的光学性能和像差特性进行实时评估。提高变焦系统的设计效率和精度, 对变焦系统的前期和后期设计有着积极的作用。

关键词: 变焦系统; 变焦组; 补偿组; 凸轮曲线

中图分类号: TN214 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2004)01-0038-06

引言

设计变焦系统的首要因素是必须保证像面稳定, 一个像差设计优良的变焦系统也必须靠准确的凸轮设计作必要保证。传统的变焦系统凸轮设计是系统在几个焦距位置校完像差后, 用插值法算出凸轮曲线的各点数据, 不仅计算烦琐, 且仍然存在一定的像面位置误差, 对变焦系统补偿组的拐点位置也要作细致的验算, 更主要的是系统的像差设计和凸轮设计是分阶段进行, 不能很好的融合、方便实时地评估系统性能。由此, 作者针对目前使用很广的 ZEMAX 光学设计软件编写了二组元变焦系统凸轮曲线设计程序。运用动态光学和高斯光学原理, 借助 ZMAX 的宏语言功能准确计算凸轮曲线的数据, 大大提高了设计效率, 不仅能让设计者方便评估各个点的光学性能, 还可实时根据曲线形状分析变焦系统的合理性和可靠性。

1 设计思想和程序说明

1.1 光学设计原理

二组元变焦光学系统一般由前固定组、后固定组、变焦组及补偿组构成。变倍组线形运动, 而补偿组曲线运动, 因此, 设计二组元变焦系统的关键技术是如何求得补偿组的运动曲线。针对较普及的 ZEMAX 光学设计软件, 本文按照动态光学理论和高斯光学理论分别得出不同形式的补偿组移动量的准确计算公式, 编制基于 ZEMAX 光学设计软件的变焦曲线计算程序。

1.1.1 动态光学公式

由动态光学理论可知, 对于一个二组元的稳像系统, 考虑到变焦镜头变倍组和补偿组均为沿光轴的一维运动, 同时变倍组为线性运动, 可以得到以下关系:

假设 Q_1 为变倍组沿光轴移动量, Q_2 为补偿组沿光轴移动量, 则有 Q_2 和 Q_1 的运动关系

$$AQ_2^2 + BQ_2 + C = 0$$

其中:

$$A = (f_1' - \beta_{Q_1})\beta_2$$

$$B = \beta_1\beta_2Q_1^2 + [f_2'(1 - \beta_2^2)\beta_1 - f_1'(1 - \beta_1^2)\beta_2]Q_1 - f_1f_2'(1 - \beta_2^2)$$

$$C = \beta_2^2f_2'\beta_1Q_1 - f_1'(1 - \beta_1^2)Q_1$$

$$\text{即}^{[1]} Q_2 = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

* 收稿日期: 2003-12-11; 修订日期: 2004-01-05

β_1 为变焦组的放大率, β_2 为补偿组的放大率, f_1 为变焦组的焦距, f_2 为补偿组的焦距。由此即可计算出补偿组的运动轨迹。

1.1.2 高斯光学的推导

如图 1 所示, 无穷远物点经过变焦组成像于 A 点, 再经过补偿组成像于 B 点, 此时, 对于补偿组(焦距为 f), 物距和像距分别为 L_1, L_1' , 放大率为 β_1 , 共轭距为 L_{g1} 。当变焦后, 假设 A 点移动到了 A' 点, 移动量为 Δ , 在 ZEMAX 中根据光路追迹可方便求出 Δ , 为了保持像面不动, 设补偿组移动了 Q_2 , 即要求补偿组的共轭距:

$$L_{g2} = L_{g1} - \Delta$$

此时, 设补偿组的物距和像距分别为 L_2, L_2' , 放大率为 β_2 , 为了求出 Q_2 , 只要知道了 L_1, L_2 和 Δ , 就可以求出 Q_2 ($Q_2 = L_1 + L_2 + \Delta$)。下面给予推导: 对于一组透镜, 共轭距 L_g , 垂轴放大率 β , 焦距 f 之间有如下关系:

$$L_g = (2 - \beta - \frac{1}{\beta}) f'$$

变焦前:

$$L_g = \left(2 - \beta_1 - \frac{1}{\beta_1} \right) f' = L_1' - L_1 (\beta_1 \text{ 通过程序求出})$$

$$\beta_1 = L_1' / L_1$$

$$L_1 = L_{g1} (\beta_1 - 1) \quad (1)$$

变焦后:

$$L_{g2} = L_{g1} - \Delta \left(2 - \beta_2 - \frac{1}{\beta_2} \right) f'$$

$$\beta_2 (L_{g1} - \Delta) = \left(2\beta_2 - \beta_2^2 - 1 \right) f'$$

$$\beta_2^2 - (2 - (L_{g1} - \Delta) / f') \beta_2 + 1 = 0$$

设 $H = 2 - (L_{g1} - \Delta) / f'$ 则:

$$\beta_2 = \frac{H \pm \sqrt{H^2 - 4}}{2}$$

$$L_2 = L_{g2} / (\beta_2 - 1) \quad (2)$$

根据公式(1)和(2): 有

$$Q_2 = L_1 + L_2 + \Delta$$

为了求出 Q_2 , 在计算过程中将有较多的中间参量, 都通过 ZEMAX 程序自动求出。同时, 还充分考虑到光学符号规则。

1.2 程序流程图

程序流程图见图 2。

1.3 程序使用说明

二组元变焦系统的变焦组和补偿组有相临和相隔两种情况, 相临就是变焦组和补偿组之间没有其它光学组件, 相隔就是变焦组和补偿组之间有光学组件。程序分别采用两种不同的方法处理, 相邻的情况运用动态光学原理, 相隔则采用高斯算法, 充分考虑了符号规则。为使用方便, 设计者只需按要求输入即可, 两种情况均保证像面稳定。在求解过程中, 对于一定量的变焦组的移动(程序始终将变焦组视为线性移

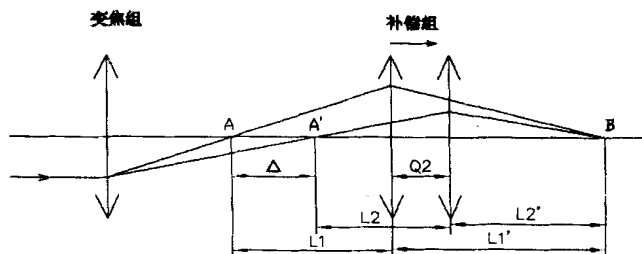


图 1 补偿组与变焦组关系图

Fig. 1 Relationship of compensation unit and zoom unit

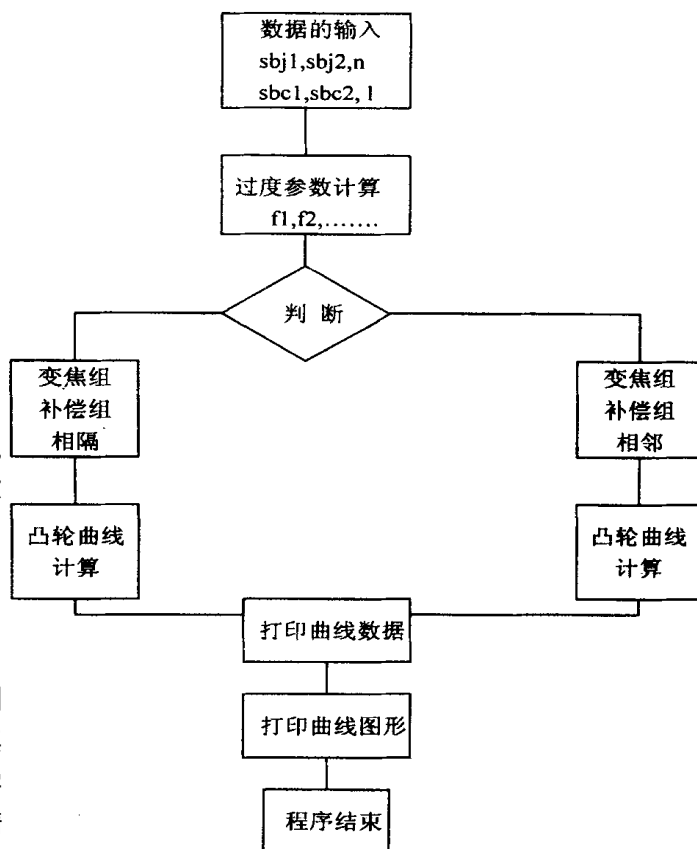


图 2 程序流程图

Fig. 2 Program flowchart

动),补偿组的位移量存在两个解,取绝对值较小的一组解是可行、可靠、且更实用的。为了得到更直观的结果,在打印数据的同时,也给出了相应的曲线形状,程序对采样点数没有限制,采样点越多,曲线图形的精度越高。

使用该程序,只需按程序要求输入变焦组的起始面序号 SBJ1 和结束面 SBJ2 的序号、补偿组的起始面序号 SBC1、结束面的序号 SBC2、变焦组的导程 L (即变焦组的总的移动量,单位:mm) 以及采样点数 N 即可,程序便自动计算补偿组的相应位移量(中间运算过程的所有参量如 f' 、 β 等都靠程序光路追迹求出),若设计者需要查看整个变焦过程中光学性能的变化情况,只需要打开相应的数据或图形窗口再运行该程序即可。程序将对每一个采样点位置的各种性能图形实时更新,对于系统光路图,每一焦距位置的视场和孔径也是根据性能要求作相应的变化,保证像高不会超出要求的像面尺寸。需要注意的是,程序要求变焦组面的序号必须小于补偿组面的序号,也就是变焦组必须在补偿组的前面。当需要选用第一或最后一面时,需在第一面之前或在最后一面之后插入一虚拟面。程序格式如下:

```
input      "      First Sur. for Zoom Unit :      ",sbj1 (输入变焦组起始面序号)
input      "      Last Sur. for Zoom Unit :      ",sbj2 (输入变焦组结束面序号)
input      "      First Sur. for Comp. Unit :      ",sbc1 (输入补偿组起始面序号)
input      "      Last Sur. for Comp. Unit :      ",sbc2 (输入补偿组结束面序号)
input      "      Max. Zooming Dis. :      ",l (输入变焦组的导程 L)
input      "      Number of Sampling Points :      ",n (输入采样点数 N)
.
.
.
END
```

程序数据输出表中, Q_1 、 Q_2 分别代表变焦组、补偿组的位移量,正值表示从左向右移动,负值表示从右向左移动,我们始终认为变焦组作线性运动,它的步进量为 $l/(n-1)$ mm,FOCAL 代表焦距,SSS1,SSS2,SSS3,SSS4 (当变焦组和补偿组相隔时,才存在 4 个变化的间隔值),代表变化的间隔。

程序的图形输出中,纵坐标表示焦距,横坐标表示移动距离。右边有两条变焦组的运动曲线,直线是表明变焦组作线性运动,曲线表征了变焦组的移动量与总的焦距的关系。左边是补偿组对应的运动曲线,这些都是按比例给出,比如在变焦组和补偿组相临时,如果出现两条曲线相交,则说明变焦组和补偿组相碰。

程序使用简单,易理解,使用时将其拷贝到 ZEMAX 下的 MACRO 目录下即可在宏命令菜单使用。

2 设计示例

我们通过对两个比较成熟的产品的光学系统进行了计算,结果均证明了本程序的计算结果不仅是正确的,而且还可以提高变焦曲线的计算精度。以下为两个光学系统的变焦曲线的计算结果和示意图(见图 3)。

2.1 某一摄影变焦系统,变焦组是从第 6 面到第 11 面,补偿组是从 12 面到第 16 面,变焦组的移动距离为 35 mm,采样点为 10 (由于篇幅所限,我们仅去 10 点,在实际计算中,采样点越多越好),示意图和结果如下:

2.1.1 ZEMAX 光学软件计算结果

```
Cam Design for 2-Unit-Adjustable Zoom Lens
=====
First Sur. for Zoom Unit :      6
Last Sur. for Zoom Unit :      11
First Sur. for Comp. Unit :      12
Last Sur. for Comp. Unit :      16
Max. Zooming Dis. :      35
Number of Sampling Points :      10
Num = = = Focal = = = Q1 = = = Q2 = = - - - - - = = sss1 = = = sss2 = = = sss3 =
```

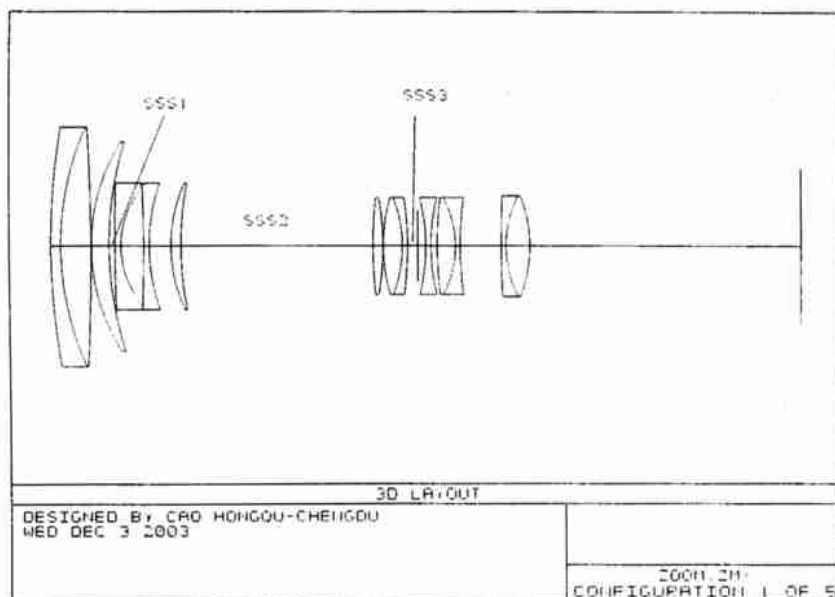


图 3 光学系统示意图 Fig. 3 Optical system sketch map

1	44.1450	0.0000	0.0000	- - - - -	1.4880	48.5420	2.5960
2	48.3120	3.8889	- 0.5656	- - - - -	5.3769	44.0875	3.1616
3	53.0370	7.7778	- 1.1554	- - - - -	9.2658	39.6089	3.7514
4	58.4021	11.6667	- 1.7635	- - - - -	13.1547	35.1118	4.3595
5	64.4944	15.5556	- 2.3801	- - - - -	17.0436	30.6063	4.9761
6	71.3986	19.4444	- 2.9886	- - - - -	20.9324	26.1090	5.5846
7	79.1839	23.3333	- 3.5627	- - - - -	24.8213	21.6459	6.1587
8	87.8807	27.2222	- 4.0634	- - - - -	28.7102	17.2564	6.6594
9	97.4474	31.1111	- 4.4348	- - - - -	32.5991	12.9961	7.0308
10	107.7322	35.0000	- 4.6044	- - - - -	36.4880	8.9376	7.2004

Num = = = Focal = = = Q1 = = = Q2 = = - - - - - = = sss1 = = = sss2 = = = sss3 =

2.1.2 ZEMAX 光学软件绘制的变焦曲线图见图 4

2.2 某一目镜变焦系统(由变倍组、补偿组和一个前固定组构成),变焦组是从第 4 面到第 5 面,补偿组是从 6 面到第 7 面,变焦组的移动距离为 18 mm,采样点为 10,示意图(见图 5)和结果如下:

2.2.1 ZEMAX 光学软件计算结果

Cam Design for 2-Unit-Adjustable Zoom Lens

= = = = =

First Sur. for Zoom Unit : 5
Last Sur. for Zoom Unit : 6
First Sur. for Comp. Unit : 7
Last Sur. for Comp. Unit : 8
Max. Zooming Dis. : 19
Number of Sampling Points: 10

Num = = = Focal = = = Q1 = = = Q2 = = - - - - - = = sss1 = = = sss2 = = = sss3 =

1	10.0004	0.0000	0.0000	- - - - -	4.7372	44.0868	7.4160
2	10.6841	2.0556	- 0.7658	- - - - -	6.7927	41.2655	8.1818

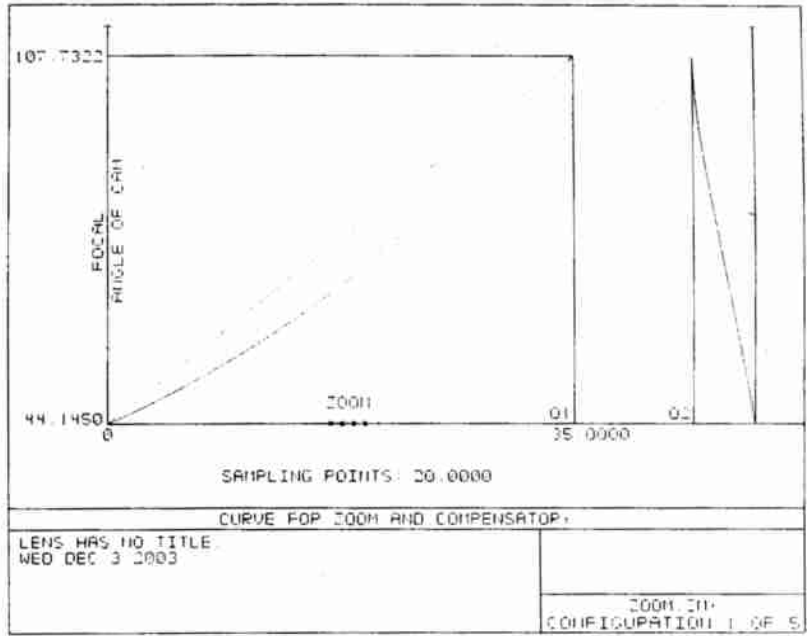


图 4 变焦曲线图 Fig. 4 Curves of zoom lens

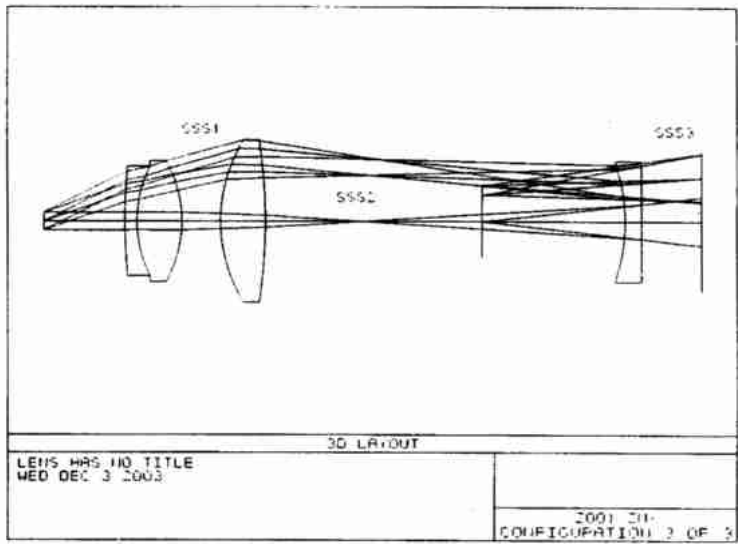


图 5 光学系统示意图 Fig. 5 Optical system sketch map

3	11.4426	4.1111	- 1.5857	- - - - -	8.8483	38.3901	9.0017
4	12.2877	6.1667	- 2.4663	- - - - -	10.9038	35.4539	9.8823
5	13.2336	8.2222	- 3.4156	- - - - -	12.9594	32.4490	10.8316
6	14.2979	10.2778	- 4.4434	- - - - -	15.0149	29.3657	11.8594
7	15.5026	12.3333	- 5.5619	- - - - -	17.0705	26.1916	12.9779
8	16.8757	14.3889	- 6.7873	- - - - -	19.1261	22.9106	14.2033
9	18.4542	16.4444	- 8.1420	- - - - -	21.1816	19.5004	15.5580
10	20.2898	18.5000	- 9.6604	- - - - -	23.2372	15.9264	17.0764
Num = = Focal = = Q1 = = Q2 = = - - - - - = = sss1 = = sss2 = = sss3 =							

2.2.2 ZEMAX 光学软件绘制的变焦曲线图见图 6

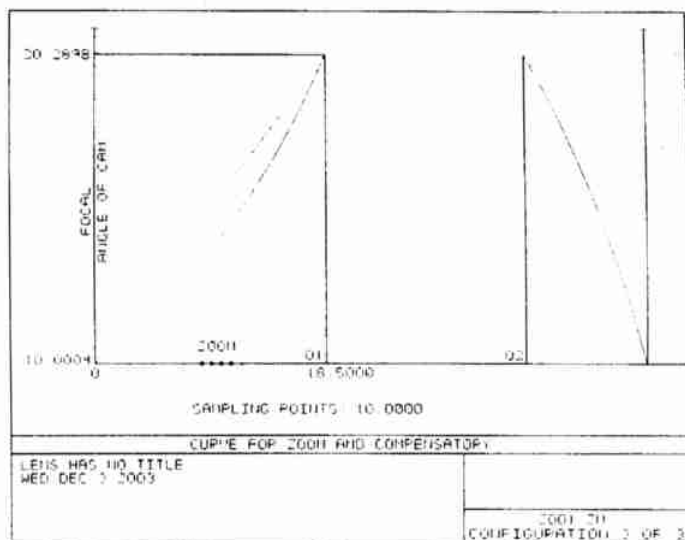


图 6 变焦曲线图 Fig. 6 Curves of zoom lens

3 结束语

通过对大量原有变焦光学系统的计算验证,本程序计算结果是正确的,程序的性能是稳定的、可靠的。需注意的是本程序仅适用于二组元的变焦系统。随着变焦光学系统性能要求的越来越高、凸轮加工工艺水平的不断改进,对变焦系统凸轮设计也提出了越来越高的要求,这就要求有不同的凸轮设计程序与之相适应。其实,设计者在使用本程序时可根据自己的习惯做适当改动、简化设计过程。

参 考 文 献

- [1] 王志坚,郑建平等. 变焦光学系统设计[J]. 长春光学学院精密机械学院学报,1992.
- [2] 李林,安连生. 计算机辅助光学设计的理论和应用[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
- [3] 陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京:国防工业出版社,1988.

作者简介: 曹红曲,1968年生,男,四川省成都人,北京理工大学光学工程系应用光学专业。现在成都奥晶科技有限责任公司工作。

金宁,1967年生,男,云南昆明人,南京理工大学光学仪器工程硕士研究生,现在攻读红外热成像技术专业的博士研究生。在昆明物理研究所从事红外光学的应用研究。

2-Unit Cam Design Program for Zoom Systems Based on ZEMAX

CAO Hong-qu¹, JIN Ning²

- (1. ChengDu Crystal Technology Co., Ltd, ChengDu 611730, China;
2. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: Zoom System Cam Design is an important step of the later-stage design of a zoom system. The quality of the curve design is directly related with the stability of the final image surface of the system. With reference to common optical design software Zemax, this Zoom System Cam Curve Design is specially developed to ensure a stable image surface. This program can accurately produce the data and shape of a cam curve. It can be used to really evaluate the optical performance and imaging characters at any focal length of a zoom system. It can improve the efficiency and accuracy of a zoom system design. Also, it will produce a positive effect on the earlier-stage and later-stage designs of a zoom system.

Key words: zoom system, zoom unit, compensation unit, cam curve, number of sampling points