

〈系统与设计〉

五组元变焦镜头凸轮曲线设计

侯国柱^{1,2}, 吕丽军²

(1. 上海电机学院工业技术中心, 上海 201306; 2. 上海大学精密机械工程系, 上海 200072)

摘要: 变焦镜头设计过程中, 为了实现变焦镜头更好的变焦效果, 需要设计出优良的变焦凸轮, 而变焦凸轮曲线的设计是设计出好的变焦凸轮的关键, 变焦凸轮曲线设计的好坏直接影响最终成像质量。首先通过对投影灯镜头系统划分为五组元变焦结构, 在 CODE V 中将所得镜头材料转成 SCHOTT 材料, 并在 CODE V 中把变焦过程设置成 9 重结构的方式, 然后运行五组元变焦宏程序后, 得到五组元变焦镜头的变焦数据, 最后利用 AUTOCAD 软件的多线 PL 命令最终作出变焦镜头凸轮曲线图。所得凸轮曲线既要保证凸轮有较小的压力角, 还要有一定的锁紧力。

关键词: 凸轮曲线; 五组元; 变焦镜头

中图分类号: TN202; TH703; O439

文献标志码: A

文章编号: 1001-8891(2018)05-0477-04

Cam Curve Design of Five Component Zoom Lens

HOU Guozhu^{1,2}, LYU Lijun²

(1. Industrial Technology Center, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China

2. Department of Precision Mechanical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: For better zoom effect, it is necessary to include superior zoom cam while designing zoom lens. As the major tool for achieving superior zoom cam, cam curve design directly affects the final imaging quality. In this work, we first categorized a projector lamp system into a five-component zoom structure. Next, we transformed the lens material to SHOOT material, and set the zoom process into nine structures using CODE V optical design software. The five-component zoom macro program was then run, and data was obtained using the five-component zoom lens. Finally, zoom lens cam curves were obtained using the PL multiline command of AutoCAD. They were observed to exhibit a relatively small pressure angle and specific locking force.

Key words: cam curve, five components, zoom lens

0 引言

变焦镜头在不改变拍摄距离的情况下, 可以通过变动焦距来改变拍摄范围, 因此非常有利于画面构图, 产生人们生活中视觉经验以外的流畅的运动样式, 增强了画面造型表现的随意性和灵活性。由于一个变焦镜头可以担当起若干个定焦镜头的作用, 节省了更换镜头的时间, 在一个位置上就可拍得场面的全景和人物特写。变焦镜头的应用变得越来越广泛, 而在其设计阶段, 变焦凸轮在其变焦过程中起到关键的

作用, 所以快速设计出简单实用的变焦凸轮曲线具有非常重要的现实意义^[1-5]。目前, 变焦镜头凸轮曲线设计的方法主要有: 由修正凸轮曲线产生的像面位移来抵消最佳像面的位移原理而获得最佳凸轮曲线修正函数的算法^[6], 利用 Macro-PLUS 凸轮优化宏程序进行优化设计^[7], 通过构造凸轮变倍组和补偿组驱动力矩与各自压力角的函数表达式的方式进一步优化设计^[8], 通过对影响凸轮曲线的变倍组和补偿组的焦距及其间隔 3 个参量之间的讨论进一步优化设计^[9], 依据连续变倍传动机构的工作原理及变倍精度和速度

收稿日期: 2017-12-30; 修订日期: 2018-05-02

作者简介: 侯国柱 (1976-), 男, 内蒙古赤峰市人, 工程师, 博士研究生, 主要从事光学设计研究。

通信作者: 吕丽军 (1963-), 男, 浙江缙云人, 教授, 博导, 主要从事真空紫外、软 X 射线光学及超大视场光学系统等方面的研究。

基金项目: 国家自然科学基金 (11274223)。

的要求，应用 Excel 软件计算出凸轮曲线上各个点的机械坐标方法^[10]。本文主要是通过编制 ZEMAX 的宏程序得到变焦凸轮曲线数据的方法，最终得出五组元变焦镜头凸轮曲线。

1 设计过程

1.1 镜头组元划分

高性能五组元变焦镜头的系统光路图及其组元划分，如图 1 所示，有五个变焦凸轮曲线需要计算和设计。关于其组元划分，面 1~面 8 组成前固定组，面 9~面 12 组成变焦组 1，面 13~面 16 组成变焦组 2，面 18~面 23 组成变焦组 3，面 24~面 27 组成调焦组。其中 d8 是前固定组和变焦组 1 的间隔，d12 是变焦组 1 和变焦组 2 的间隔，d16 是变焦组 2 和变焦组 3 的间隔，d25 是变焦组 3 和调焦组的间隔，d27 决定了接受器是否固定不变。

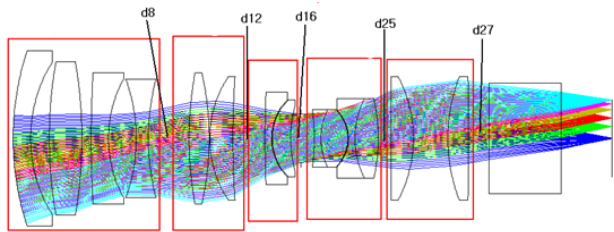


图 1 变焦系统组成及其组元划分

Fig.1 Composition and components division of zoom system

1.2 ZEMAX 中的变焦系统向 CODE V 中转换

首先，在 ZEMAX 软件优化设计好的五组元变焦系统中，从其材料框里编辑好镜头材料，得镜头材料文本参数。然后，在 CODE V 中将所得镜头材料转成 SCHOOT 材料。其方法为：在 ZEMAX 中打开五组元变焦系统，确定其基本结构，然后在 CODE V 中载入材料转换后的文件。此时出现如图 2 所示视窗。

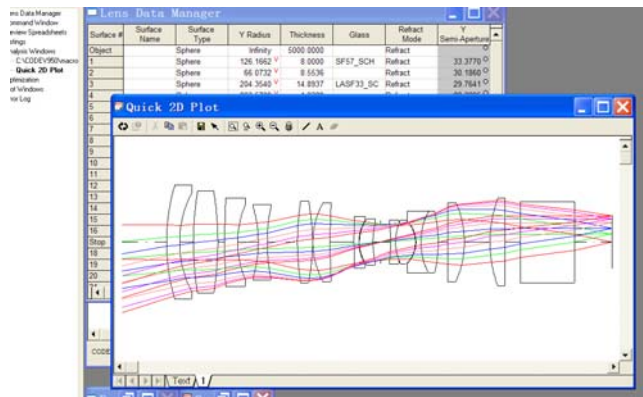


图 2 CODE V 中载入 SCHOOT 材料后的视窗

Fig.2 The window after loading SCHOOT materials in CODE V

图 2 说明变焦系统当前结构（第 1 重结构）已载入，但不是多重变焦结构。该系统有长、中、短 3 个

变焦，而且在每个焦距位置处还有 5 m、10 m、20 m 远的调焦位置，所以总共是 3×3=9 重结构。如图 3 所示是将其设置成 9 重结构的变焦系统。在电子表格中将 d0,d8,d12,d16,d25,d27 设置成变焦结构。

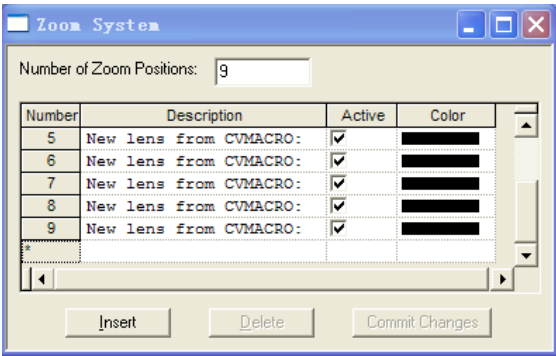


图 3 置 9 重结构

Fig.3 Set up 9 structures

CODE V 中更改材料参数时，先打开材料参数文档，将所有材料设置成变量，在 CODE V 的电子表格中对应复制粘贴即可进行修改。为了顺序输入各重结构，打开五组元变焦系统后，首先将当前的 CODE V 中结构设置成第 2 重结构，并将第 2 重结构存成 zmx 文件，再重新开启 CODE V，载入保存的 zmx 文件。此时的当前结构是第 2 重结构，将间隔列复制粘贴到前面的 9 重结构中的第 2 重结构中。仿此操作，可分别建立起 9 重结构的变焦系统，存成样例，然后在 CODE V 中运行此样例。

1.3 CODE V 中的凸轮曲线的计算与作图

凸轮曲线计算过程中，需将出现的凸轮曲线数据存为 txt 文本文档，并用 EXCEL 把保存的文本文档打开并整理成“凸轮曲线计算结果.xlsx”。然后对多重结构的变焦凸轮曲线进行计算与作图。其中凸轮曲线 Y 坐标值即套筒转过的角度值需要转变为弧度值，计算公式为：

$$2\pi R \times \frac{Q}{360} = R \times Q \times \text{度化弧度系数} = R \times Q \times 0.0174532925$$

(1)

式中：Q 为转过的角度值；R 为凸轮套筒的半径值，凸轮套筒尺寸如图 4 所示，变焦套筒半径为 37.0789 mm，凸轮曲线计算数据如表 1 所示。因为凸轮转动过程中要有一定的锁紧力，表中凸轮总转角选 40°比较合适，因为在此螺旋升角下，相互间的摩擦力所产生的螺旋锁紧力比较适中，把 40°的总转角 100 等分处理。THI8 列、THI12 列、THI16 列、THI25 列、THI27 列数据为凸轮曲线升程坐标（X 坐标），凸轮转过的弧度值为凸轮曲线转过弧长（Y 坐标）。

表 1 中凸轮曲线升程坐标中有负值，说明相应处

会发生位置干涉。在 CODE V 上计算凸轮线性型值点坐标时没有焦距值项,但有时候需要知道该焦距值,以便标注在镜框上。添加焦距项的计算时,由于变焦凸轮是线性的,故可用线性插值公式: $f=f_1'+k\times(f_2'-f_1')/100$ 来计算, f_1' 为短焦焦距, f_2' 为长焦焦距, k 为点顺序号,该式用于 100 等分凸轮曲线的焦距线性插值计算。

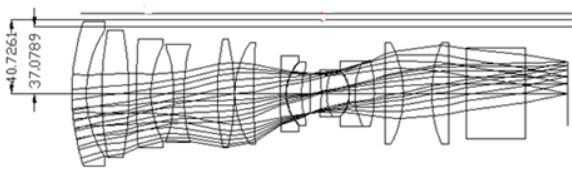


图4 轮套筒尺寸图
Fig.4 Cam sleeve size diagram

每个点坐标一定要以零空格结尾,关于凸轮曲线的修复方法可参考文献[7]。利用架构原理进行设计,画出变焦凸轮曲线图。根据凸轮压力角在 $40^\circ\pm1^\circ$ 范围确定凸轮曲线的合理性进行局部修改来确定,在知道变焦组的变焦曲线形状后,通过编写五组元变焦曲线设计程序,实现自动求解其余变焦曲线的方法得到初态,注意在新的变焦凸轮曲线下对系统进行像差校正,最后在 CODE V 中确定变焦凸轮曲线。

关于调焦凸轮曲线的确定,在计算变焦凸轮曲线的过程中,由于计算程序的特性决定第 1 个变焦间隔不能是物距,否则计算结果不可用。但这样就不能充分确定调焦组的移动范围,得不到调焦曲线。在短焦单一结构中运行五组元变焦宏程序,部分宏程序如下:

```
INPUT "变倍组表面 s1",s1(=8)
INPUT "厚度变量 s2",s2(=12)
INPUT "厚度变量 s3",s3(=16)
INPUT "厚度变量 s4",s4(=25)
```

```
INPUT "厚度变量 s5",s5(=27)
INPUT "变倍组步长 i",i(=0.067941)
INPUT "每步优化周期(>=1)",n(=10)
INPUT "变倍表面的终止点厚度",zmax(=25.4164)
```

对于优化周期步长 n 值的确定,对优化时间影响很大。对于 n 的计算,先打开五组元变焦系统,只留短焦单一结构,不载入五组元变焦曲线计算宏程序。在创建优化函数时,对于每步优化周期,应注意缺省优化函数,从各视场权重因子、弥散权重因子、波像差权重因子及光学性能权重因子的给出来看,当优化函数优化重复次数 $n=5$ 时,优化函数值还在变化,说明优化周期选择不合适,当再次选优化重复次数 $n=5$ 时,优化函数值变化很小,所以最终确定优化周期为 10。

2 设计结果

打开“凸轮曲线计算结果.xlsx”,然后再做各凸轮曲线上点坐标的集合,其格式要符合 AUTOCAD 以多线 PL 命令的点输入格式,特别是弧长应在 Y 坐标上,升程在 X 坐标上。如图 5 所示是在 AUTOCAD 上作出的凸轮曲线图。横坐标 X 是凸轮沿光轴方向的移动量,纵坐标 Y 是凸轮转过的弧度值。

由图 5 可见各曲线的倾角均大于 40° ,即摩擦力稍大些,另外 d16 与 d27 曲线有交叉,d12 与 d25 距离较近,是因为原结构变焦时存在的问题,可以在凸轮起始点让位来解决。对于成像质量问题,可以利用理想架构的方式来提高像差平衡,这是最有应用潜力的方法,其基本思想就是用其光学系统无像差理想透镜的架构文件,得到系统最合理的优质像差匹配的配置文件,其弥散斑的均方根值、传递函数、波像差等由提取理想系统的现场值得到,是与原系统的像质状态最接近的小像差组态。

表1 凸轮曲线计算数据表 Table 1 Calculation data of cam curves

Point number	Focal length/mm	Object distance/mm	Cam curve lift (X coordinates) /mm					Arc length of cam curve (Y coordinates)	
			THI 8	THI12	THI16	THI25	THI27	Angle value/°	Radian value(radian)
1	0.000	5000.000	18.622	14.735	4.690	15.747	9.466	0.4	0.259
2	202.020	5249.464	23.062	12.530	6.379	13.873	7.967	0.8	0.518
3	404.040	5492.807	27.317	10.416	7.997	12.078	6.530	1.2	0.777
4	606.061	5730.028	31.388	8.394	9.546	10.361	5.154	1.6	1.035
5	808.081	5961.126	35.276	6.463	11.024	8.722	3.841	2	1.294
6	1010.101	6186.104	38.980	4.624	12.433	7.162	2.589	2.4	1.553
7	1212.121	6404.959	42.499	2.876	13.771	5.681	1.399	2.8	1.812

(续表 1)

Point number	Focal length/mm	Object distance/mm	Cam curve lift (X coordinates) /mm					Arc length of cam curve (Y coordinates)	
			THI 8	THI12	THI16	THI25	THI27	Angle value/°	Radian value(radian)
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
95	18989.898	16222.115	−38.867	43.363	−17.139	40.830	28.364	38	24.592
96	19191.920	16897.928	−29.025	38.443	−13.385	36.556	25.057	38.4	24.851
97	19393.939	17612.627	−18.347	33.106	−9.312	31.920	21.468	38.8	25.109
98	19595.959	18367.211	−6.811	27.341	−4.912	26.914	17.591	39.2	25.368
99	19797.980	19162.678	5.606	21.137	−0.177	21.527	13.419	39.6	25.627
100	20000.000	20000.000	18.926	14.482	4.903	15.751	8.943	40	25.886

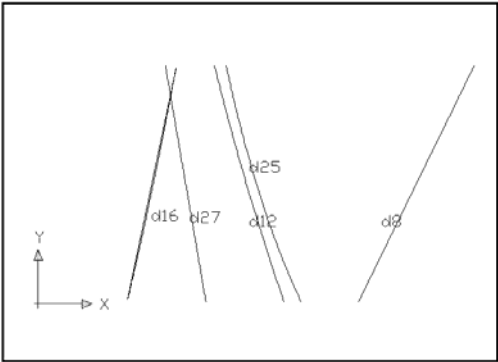


图 5 凸轮曲线 Fig.5 Cam curves

3 结论

通过把ZEMAX软件设计好的五组元变焦镜头系统载入 CODE V 软件中，把所得镜头材料转成SCHOOT材料，利用编制的五组元变焦宏程序，并在CODE V 软件中运行该宏程序，得到变焦过程中各个变倍组和调焦组不同焦距位置处的坐标数值，然后利用AUTOCAD 软件做出变倍组和调焦组的凸轮曲线。接下来的工作就是按照凸轮曲线把实际的凸轮设计并加工出来。随着变焦光学系统越来越复杂，变焦凸轮设计的要求也越来越高，此法可为类似变焦凸轮曲线设计提供一种思路和方法。

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，1988：153-163.
TAO Chunkan. Zoom Lens Design[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988: 153-163.

[2] 李宏壮. 三组式伸缩型高倍率变焦距光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 122203(2016): 122203-1-122203-7.
LI Hongzhuang. Design of Three-Group Flexible High Ratio Zoom Optical System[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 122203(2016): 122203-1-122203-7.

[3] 王新夏, 赖爱光, 赖英辉. 后组调焦高清变焦镜头调焦凸轮曲线分析与设计[J]. 光学仪器, 2017, 39(1): 6-10.
WANG Xinxia, LAI Aiguang, LAI Yinghui. Analysis and design of focusing cam curve of rear group focusing based high-definition zoom lens[J]. Optical Instruments, 2017, 39(1): 6-10.

[4] 曹红曲. 基于 ZEMAX 软件的三组元变焦系统凸轮曲线设计程序[J]. 光学与光电技术, 2011, 9(3): 31-34.
CAO Hongqu. 3-Unit Cam Design Program for Zoom Systems Based on ZEMAX[J]. Optics & Optoelectronic technology, 2011, 9(3): 31-34.

[5] 曹红曲, 金宁. 基于 ZEMAX 软件的二组元变焦系统凸轮曲线设计程序[J]. 红外技术, 2004, 26(1): 38-43.
CAO Hongqu, JIN Ning. 2-Unit Cam Design Program for Zoom Systems Based on ZEMAX[J]. Infrared Technology, 2004, 26(1): 38-43.

[6] 刘崇进. 变焦镜头最佳像面稳定的凸轮曲线修正[J]. 光学机械, 1992(2): 13-17.
LIU Chongjin. The Method of Revising Convex Wheel Curve for Making Optimum Image Steady in Zoom Lenses[J]. Optical machinery, 1992(2): 13-17.

[7] 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 Junhe, ZHANG Zhen, SUN Xingwen. Cam optimization of azoomlens[J]. Infrared and Laser Engineering, 2002, 31(1): 51-54.

[8] 陈卫宁, 杨洪涛, 刘伟, 等. 变焦凸轮曲线的优化设计方法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1535-1539.
CHEN Weining, YANG Hongtao, LIU Wei, et al. Optimization design method of cam curve for zoom lens[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(5): 1535-1539.

[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 Yuegang. Optimal design of cam curve for zoom system[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(1): 45-47.

[10] 周永峰, 毛翠丽. 基于 Excel 与 Pro/E 的连续变焦镜头凸轮设计[J]. 机械工程师, 2014(7): 173-174.
ZHOU Yongfeng, MAO Cuili. Design of continuous zoom lens cam based on Excel and Pro/E[J]. Mechanical Engineer, 2014(7): 173-174.