

doi: 10.3788/gzxb20134201.0094

# 变焦曲线拟合方法的比较与研究

高天元, 侯振岩

(长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

**摘 要:**在机械补偿变焦距光学系统中, 通过利用变焦曲线控制变倍组与补偿组的移动来达到变焦目的. 因此, 为使变焦距光学系统在变焦过程中能够始终成像清晰且稳定, 拟合出良好的变焦曲线是十分必要的. 本文运用动态光学理论、CODE V 和 ZEMAX 宏三种方法分别对一个 20 倍变焦距光学系统进行变焦曲线拟合, 得到相应的运动曲线方程. 根据所得到的三组曲线方程, 随机选取若干变焦位置点, 分别对这些位置点的光学系统离焦量、中心视场 MTF 和边缘视场 MTF 进行评价. 数据分析表明, 动态光学理论拟合出的变焦曲线在满足系统要求前提下更能够保证像面的稳定性.

**关键词:**变焦曲线; 曲线拟合; 动态光学; CODE V; ZEMAX 宏

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)01-0094-4

## Comparison and Research of Zoom Curve Fitting Methods

GAO Tian-yuan, HOU Zhen-yan

(College of Photo-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,  
Changchun 130022, China)

**Abstract:** In mechanical compensation zoom optical system, the zoom can be achieved through the zoom curve to control the movement of the zoom group and the compensation group. Therefore, it is very necessary to fit a good zoom curve to make the imaging of zoom optical system clear and stable during the zoom process. In this paper, the dynamic optical theory, CODE V and ZEMAX macro are used individually to fit zoom curve for a  $20 \times$  zoom optical system, then the corresponding movement curve equations can be generated. According to the three groups of curve equations, several random zoom position points are selected and evaluated in defocus and MTF of central field and edge field. Through the analysis of the data, the zoom curve fitted by the dynamic optical theory can meet the system requirements, and it is better to ensure the image plane stable.

**Key words:** Zoom curve; Curve fitting; Dynamic optics; CODE V; ZEMAX macro

## 0 引言

变焦距镜头即在保持像面不动的前提下, 可在一定范围内实现焦距连续变化的光学系统<sup>[1-2]</sup>. 目前, 变焦距镜头已经广泛应用于军事和民用领域<sup>[3-4]</sup>. 目前, 在变焦系统设计中大数采用机械补偿法, 在机械结构上也多数采用变焦凸轮作为动力传动机构<sup>[5]</sup>, 而如何得到一个良好的变焦曲线是变焦光学系统设计的又一重要研究内容.

在求解变焦曲线的方法中, 利用追迹光线的方法较为简单. 它是将透镜或透镜组等效为薄透镜, 进而将各主点之间的间隔作为镜面定点之间间隔进行计算. 由于计算中存在较大误差, 使得成像质量难以

满足要求. 多点拟合法在实际应用中较为常见, 它是以前优化好的变焦光学系统为基础, 在短焦到中焦、中焦到长焦之间分别插入点进行优化, 当插入足够多的位置点时便可得到光滑的变焦曲线. 但是, 这种方法不能实现曲线上所有的位置都能良好成像, 而且工作量较大. 本文以变焦距光学系统设计为例, 分别运用动态光学理论、CODE V 及 ZEMAX 宏对其进行变焦曲线拟合并对结果做出比较, 得到良好的变焦曲线.

## 1 曲线拟合

### 1.1 主要技术指标

变焦距镜头的主要技术指标见表 1.

第一作者: 高天元(1970-), 男, 副研究员, 博士研究生, 主要研究方向为光学仪器与结构. Email: gty@cust.edu.cn

通讯作者: 侯振岩(1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光电测控技术及仪器. Email: 470576584@163.com

收稿日期: 2012-04-13; 录用日期: 2012-08-05

表 1 光学系统参量

Table 1 Parameters of optical system

Focal length	10~200 mm
F/#	5
Spectral range	485~656 nm
Field	6 mm

该系统为一个机械补偿变焦系统,包括四个组元,即:前固定组、变倍组、补偿组、后固定组,采用的是正组补偿方式.图 1 为该变焦系统分别在短、中、长焦距时的系统示意图.

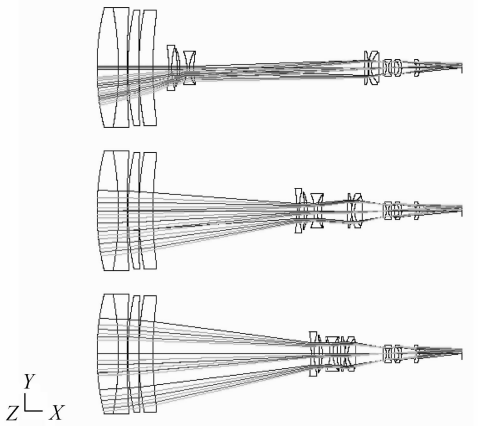


图 1 短、中、长焦距时系统

Fig. 1 Short, medium and long focus system schematic

1.2 动态光学理论的曲线拟合

动态光学<sup>[6-7]</sup>是对光学系统、光学空间、光学元件、光学物像之间的内在关系的研究.从动态光学理论上讲,变焦镜头属于一维动态稳像光学系统.应用动态光学理论可推导出像移补偿公式,并准确计算出补偿曲线,从而设计补偿像移的凸轮机构<sup>[8]</sup>.

由于该系统中只有两个组元运动,而一般情况下可将变倍组的运动视为线性运动.因此由动态光学理论中二元稳像系统推导出变倍组与补偿组的运动关系为

$$Aq_2^2 + Bq_2 + C = 0 \tag{1}$$

式中

$$\begin{cases} A = (f'_1 - \beta_1 q_1) \beta_2 \\ B = \beta_1 \beta_2 q_1^2 + [f'_2 (1 - \beta_2^2) \beta_1 - f'_1 (1 - \beta_1^2) \beta_2] q_1 - f'_1 f'_2 (1 - \beta_2^2) \\ C = \beta_2^2 f'_2 [\beta_1 q_1 - f'_1 (1 - \beta_1^2)] q_1 \end{cases} \tag{2}$$

式中  $q_1$  为变倍组沿光轴位移量;  $q_2$  为补偿组沿光轴位移量.  $\beta_1$  为变倍组初始位置的垂轴放大率;  $\beta_2$  为补偿组初始位置的垂轴放大率;  $f'_1$  为变倍组焦距;  $f'_2$  为补偿组焦距.

求解式(1)可得

$$q_2 = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \tag{3}$$

由此可通过式(3)准确计算出补偿组的运动迹<sup>[8-10]</sup>.

根据式(1)~(3)建立 Matlab 数学模型,得到变倍组与补偿组的运动轨迹曲线如图 2.

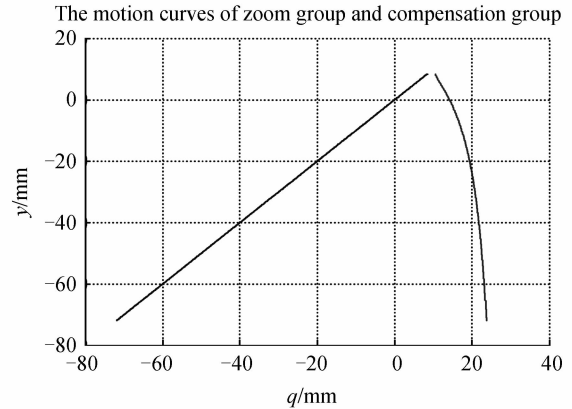


图 2 动态光学理论拟合的变焦曲线

Fig. 2 Zoom curve fitted by dynamic optics

根据所得到的变焦曲线,分别运用 Matlab 工具选项中的一阶线性方程和四阶多项式分别拟合变倍组与补偿组的运动曲线,由于变倍组曲线的常量项趋于零,而拟合出的曲线方程是后续凸轮加工的依据,则在此将该常量项省略. CODE V 和 ZEMAX 宏所拟合的曲线方程也省略了此项.

变倍组与补偿组的运动曲线方程分别为

$$\begin{cases} y_1 = q_1 \\ y_2 = -0.0059q_2^4 + 0.3555q_2^3 - 8.0311q_2^2 + 78.47q_2 - 270.32 \end{cases} \tag{4}$$

1.3 用 CODE V 进行曲线拟合

CODE V 是目前世界上分析功能最全,优化设计功能最强的光学工程软件.它有一项功能为“变焦凸轮设计”,该功能通过设定 CAM 步数,参量值线性步进量,使变倍组做线性运动,可得到一系列的组元间隔数值.把所得到的数据输入到 matlab 程序中,可得到变倍组与补偿组的运动轨迹,如图 3.

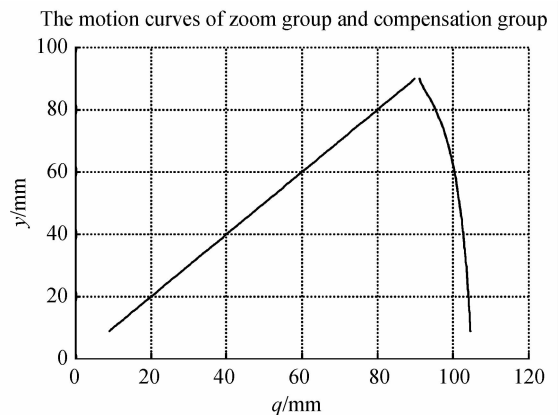


图 3 CODE V 拟合的变焦曲线

Fig. 3 Zoom curve fitted by CODE V

其中,变倍组与补偿组的运动曲线方程分别为

$$\begin{cases} y_1 = q_1 \\ y_2 = -0.0056q_2^4 + 2.1213q_2^3 - 303.83q_2^2 + 19341q_2 - 461590 \end{cases} \quad (5)$$

#### 1.4 用 ZEMAX 宏进行曲线拟合

ZEMAX 设计软件不能像 CODE V 一样直接对一个设计好的变焦光学系统做变焦曲线计算,但通过输入特定的宏命令可实现对变焦系统组元间隔的计算.图 4 为变焦过程中各组元之间的间距.

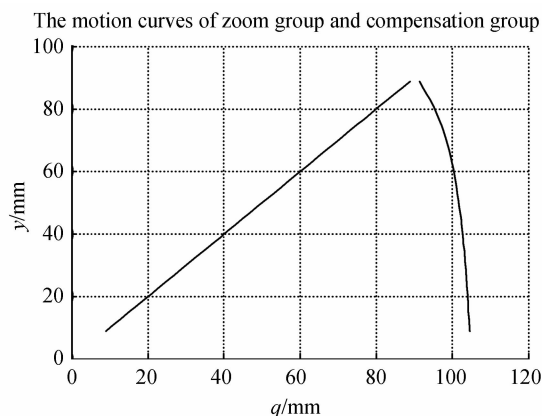


图 4 ZEMAX 宏拟合的变焦曲线

Fig. 4 Zoom curve fitted by ZEMAX macro

该宏命令是基于高斯光学原理中光线追迹的方法.它只能用于变焦系统中只有两个运动组元,且其中一个运动组元作线性运动的情况.通过设定线性运动组元步长值,即可计算出变焦过程中的各个组元间的间距见表 2.

表 2 变焦过程中的组元间隔

Table 2 Intervals of groups in the zooming process

EFFL	THIC S7	THIC S14	THIC S19
11.00	8.865 82	95.665 32	1.996 53
11.44	10.865 82	93.589 47	2.075 65
11.90	12.865 82	91.500 85	2.164 09
12.39	14.865 82	89.374 63	2.289 58
12.91	16.865 82	87.281 65	2.382 63
13.47	18.865 82	85.188 44	2.475 94
14.06	20.865 82	83.088 72	2.575 61
14.69	22.865 82	80.981 13	2.682 97
15.37	24.865 82	78.833 13	2.830 27
16.09	26.865 82	76.700 95	2.961 96
16.86	28.865 82	74.582 64	3.08
17.70	30.865 82	72.474 2	3.186 6
18.60	32.865 82	70.365 83	3.295 39
19.56	34.865 82	68.222 02	3.439 27
20.61	36.865 82	66.070 98	3.590 41
21.73	38.865 82	63.912 09	3.749 41
22.96	40.865 82	61.744 36	3.917 26
24.29	42.865 82	59.568 6	4.093 24
25.74	44.865 82	57.379 98	4.281 87

EFFL	THIC S7	THIC S14	THIC S19
27.32	46.865 82	55.179 77	4.482 08
29.05	48.865 82	52.967 2	4.694 66
30.96	50.865 82	50.741 08	4.920 77
33.06	52.865 82	48.500 1	5.161 76
35.37	54.865 82	46.242 75	5.419 1
37.94	56.865 82	43.967 31	5.694 55
40.80	58.865 82	41.671 86	5.99
44.00	60.865 82	39.354 15	6.307 71
47.58	62.865 82	37.011 61	6.650 24
51.62	64.865 82	34.641 31	7.020 55
56.20	66.865 82	32.239 74	7.422 12
61.41	68.865 82	29.802 93	7.858 92
67.37	70.865 82	27.326 29	8.335 56
74.23	72.865 82	24.804 41	8.857 45
82.19	74.865 82	22.231 06	9.430 8
91.47	76.865 82	19.599 22	10.062 63
102.38	78.865 82	16.901 3	10.766 5
115.29	80.865 82	14.130 16	11.531 7
130.65	82.865 82	11.281 64	12.382 3
148.94	84.865 82	8.362 88	13.298 99
170.49	86.865 82	5.415 55	14.246 31
194.69	88.865 82	2.579 7	15.082 16
210.80	90.865 82	1.353 92	14.357 8

将表 2 中变化的组元间距带入到 matlab 程序中可得到相应的变倍组与补偿组的曲线,如图 4.

其中,变倍组与补偿组的运动曲线方程分别为

$$\begin{cases} y_1 = q_1 \\ y_2 = -0.0058q_2^4 + 2.2325q_2^3 - 320.08q_2^2 + 20398q_2 - 487350 \end{cases} \quad (6)$$

## 2 拟合曲线的结果比较

从动态光学理论、CODE V 和 ZEMAX 三种方法所得到的变倍组与补偿组的运动曲线中不难看出变倍组均成线性运动,补偿组的曲线形状基本相似,所得到补偿组的运动曲线方程在同次幂系数上略有差别.

为进一步比较三种方法,分别从该变焦系统的短焦到中焦之间取三个位置点,中焦到长焦之间取出两个位置点,这些位置点由变倍组与前固定组之间的间距确定.然后分别对其离焦量、中心视场 MTF 及边缘视场 MTF 值进行比较,具体如表 3.

该变焦系统要求:系统焦深为 0.055 mm,在空间频率为 60 lp/mm 时,中心视场  $MTF \geq 0.4$ ,边缘视场  $MTF \geq 0.3$ .从表 3 中可知,当变倍组相距前固定组为 20.865 8 mm 时,ZEMAX 宏所得到变焦曲线在该位置的离焦量大于焦深,而且中心视场的 MTF 也不满足像质要求;由动态光学理论和 CODE V 所拟合的变焦曲线在各位置均满足成像要求.其

表 3 分析数据  
Tabel 3 Analyse of data

Fitting methods	Location of points/mm	Defocus/mm	MTF of central field	MTF of edge field
Dynamic optics	20.865 8	-0.012 628	0.651 930	0.597 686
	34.865 8	-0.001 197	0.671 221	0.530 483
	66.865 8	0.023 864	0.660 162	0.546 176
	82.865 8	-0.019 974	0.534 364	0.381 344
CODE V	84.865 8	0.029 307	0.519 535	0.322 954
	20.865 8	0.002 304	0.704 761	0.573 682
	34.865 8	0.008 388	0.702648	0.510 324
	66.8658	0.024 123	0.660 923	0.545 705
ZEMAX macro	82.8658	-0.022 982	0.522 563	0.377 107
	84.8658	0.034 509	0.501 465	0.313 363
	20.8658	-0.081 973	0.193 673	0.409 835
	34.8658	-0.020 732	0.571 262	0.548 695
ZEMAX macro	66.8658	0.022 931	0.657 437	0.547 765
	82.8658	-0.035 474	0.466 301	0.358 329
ZEMAX macro	84.8658	-0.042 044	0.471 820	0.300 575

中,动态光学理论拟合的变焦曲线相比于 CODE V 所拟合出的变焦曲线中各个位置点的离焦量更小,实际像面位置更接近于理想像面位置.因此,动态光学理论所拟合的变焦曲线相比 CODE V 拟合出的变焦曲线能够更好地保持像面稳定.此外,尽管由动态光学理论拟合的变焦曲线中,其短焦到中焦之间的中心视场 MTF 比 CODE V 所拟合变焦曲线的中心视场 MTF 低,但边缘视场的 MTF 均高于后者,可见动态光学理论的拟合方法能够更好地考量系统整体的成像质量.

对于三种方法的难易程度及工作量,动态光学理论的拟合方法在 matlab 中的编程简单,只需知道变倍组和补偿组的焦距、初始位置垂轴放大倍率以及变倍组的光学导程即可拟合出变焦曲线;而利用 CODE V 拟合变焦曲线,则需首先生成运动点,然后再将各点数据导入 matlab 程序中才能拟合出变焦曲线,尽管方法简单,但增加了工作步骤;用 ZEMAX 宏的曲线拟合方法由于需要进行宏编程,增加了曲线拟合的工作量和难度.

### 3 结论

变焦曲线的拟合方法有很多,良好的成像质量以及简便的操作是光学设计者所追求的.本文运用动态光学理论、CODE V 及 ZEMAX 宏分别对一个四组元正组补偿的变焦系统进行曲线拟合,在对三

种拟合曲线的结果对比中,动态光学理论拟合变焦曲线的方法不仅简单而且能够使得成像面稳定,值得推广应用.

#### 参考文献

- [1] 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): 893-898.  
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):893-898.
- [2] LI Ling-yin, WANG Yi-fan, XUE Yu. Design of zoom lens system based on digital signal processing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9): 1346-1350.  
李零印,王一凡,薛育.基于数字信号处理技术的连续变焦镜头控制系统设计[J].*光子学报*,2011,**40**(9):1346-1350.
- [3] 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.
- [4] CHENG Ke, ZHOU Si-zhong, ZHANG Heng-jin. Design of a short focal-length zoom system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1825-1828.  
程珂,周泗忠,张恒金.短焦距变焦物镜设计[J].*光子学报*,2005,**34**(12):1825-1828.
- [5] WANG Bo. The driving technology in optical lens[J]. *Design and Calculation*, 2007, **2**: 84-86.  
王波.光学镜头中的驱动技术研究[J].*机械工程师*,2007,**2**: 84-86.
- [6] WANG Zhi-jian, ZHENG jian-ping. The object-image conjugate theory of optical systems and optical elements in motion[J]. *Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics*, 1992, **15**(2): 1-13.  
王志坚,郑建平.动态光学系统的物象共轭理论[J].*长春光学精密机械学院学报*,1992,**15**(2): 1-13.
- [7] BAI Su-ping, WANG Chun-yan, PANG Chun-ying. Imaging features of optics system in motion based on coordinate transformation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(7): 846-850.  
白素平,王春艳,庞春颖.基于坐标变换的动态光学成像性质研究[J].*光子学报*,2001,**30**(7):846-850.
- [8] 王志坚,王鹏,刘智颖.工程光学原理[M].北京:国防工业出版社,2010: 170-171.
- [9] CHEN Xin, FU Yue-gang. Optimal design of cam curve for zoom system[J]. *Journal of Applied Optic*, 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.
- [10] 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.  
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.