

基于 Matlab 的变焦光学系统设计

高铎瑞^{1,2} 钟刘军² 赵 昭² 付 强^{1,2} 刘显著^{1,2}

(¹ 长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022)
(² 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 为了降低变焦距系统设计时对经验的过度依赖, 提出用 Matlab 仿真分析来分配变焦系统各组元光焦度。以组元之间的间隔为初始量, 把变倍组的物距作为自由量, 通过计算公式求出满足间隔要求的光焦度分配和组元运动形式。并通过 Matlab 仿真, 画出变焦过程中各组元移动轨迹, 分析各组元偏角、视场角等因素对系统复杂程度的影响, 合理分配各组的光焦度, 最后制定出初始结构。对没有经验的设计者, 是一种很好的方法。为了验证该方案的可行性, 设计一个 $14\times$ 正组补偿型变焦系统, 所设计系统优化后的光焦度分配值和计算的结果很接近。

关键词 光学设计; 连续变焦系统; 初始结构参数; Matlab 仿真; 变焦曲线

中图分类号 O439; TN942.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0416002

Zoom Optical System Design Based on Matlab

Gao Duorui^{1,2} Zhong Liujun² Zhao Zhao² Fu Qiang^{1,2} Liu Xianzhu^{1,2}

¹ Institute of Space Photoelectric Technology, Changchun University of Science
and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

² School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China

Abstract A method which can well distribute optical power of each component of zoom system through analysis of Matlab to bring down excessive dependence on experiences is proposed. We treat the gaps between each component as the initial configuration, and the object distance of zoom group as free parameters, then find out the optical power distribution and movement type which meet the space requirement. Matlab simulation can draw mobile trajectory of each component in the process of zooming and analyze the drift angle, field angle and other factors affect on the system complexity, which may help to achieve the reasonable allocation of optical power and initial configuration. It is a wonderful idea for the green hands. A $14\times$ zoom optical system is designed, and its optimized optical power allocation is close to the results of calculation using Matlab, which may verify the feasibility of the scheme.

Key words optical design; continuous zoom system; initial configuration parameters; Matlab simulation; zoom curve

OCIS codes 220.3620; 220.2740; 220.4830

1 引 言

连续变焦光学系统是指焦距在一定范围内连续变化、而变焦过程中像面位置保持不动、相对孔径也基本不变并且在变焦过程中像质保持良好的光学系统^[1-4]。变焦系统的设计一般都要经过高斯光学计算来确定系统的初始参数以及系统焦距的分配原

则^[5], 基本结构的选取是否合理决定了镜头设计的成功与否。在初始计算时需要根据经验对变倍组和补偿组进行光焦度分配, 这大大增加了变焦系统设计过程中对经验的依赖。对于没有设计经验者, 在没有现成的初始结构时, 对光焦度的分配存在一定困难。

收稿日期: 2013-10-25; **收到修改稿日期**: 2013-11-26

作者简介: 高铎瑞(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学系统设计及激光大气传输特性等方面的研究。

E-mail: gaoduorui@126.com

导师简介: 姜会林(1945—), 男, 博士, 教授, 主要从事光学系统设计及激光通信技术等方面的研究。

E-mail: hljiang@public.cc.lj.cn

本文以此为基础,通过 Matlab 软件计算仿真变焦过程中各透镜的移动轨迹和变焦曲线,并通过偏角和视场角的计算分析系统各组元的复杂程度,最后合理地取段,定出一个相对较好的初始结构和光焦度分配。为了验证方法的可行性,设计了一款 $14\times$ 连续变焦光学系统,在中焦时使用平滑换根方法提高了系统变焦倍率。

2 设计参数及设计原理

2.1 主要指标要求

连续变焦光学系统的主要技术指标如表 1 所示。

表 1 光学设计指标

Table 1 Optical design parameters

Parameter	Value
Spectral band /nm	380~760
Zoom range	$14\times$
Focal length range /mm	20~280
F number	5
Image plane diagonal/mm	10

2.2 设计原理

变焦系统大体上可分为光学补偿和机械补偿两大类。由于光学补偿只能做低变倍比、小相对孔径的变焦距系统,而且焦距仅是几个离散值,因而在使用中受到很多限制^[6]。而采用机械补偿法的变焦系统的焦距能够在一定范围内连续改变,使其得到广泛的应用^[7]。机械补偿变焦光学系统的基本原理是利用系统中 2 个或 2 个以上透镜组的移动来改变系

统组合焦距,同时保持像面位置不动,且在变焦过程中像质始终保持良好^[8-10]。

根据补偿组的焦距正负分为正组、负组两种补偿方式。通常,变倍组焦距相同时,两种补偿方式相比较,正组补偿的连续变焦光学系统结构细而长,而负组补偿的系统结构粗而短,且负组补偿二级光谱和球差均比正组补偿大。对小视场系统,且对球差、二级光谱要求低的情况,负组补偿可以达到要求;但对大视场变焦系统,或大倍率变焦系统,要求二级光谱小,则必须采用正组补偿^[11]。

实际使用的变焦系统通常由前固定组、变倍组、补偿组和后固定组 4 个透镜组组成。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。首先确定初始位置,对于采用换根补偿形式的系统,从变倍组和补偿组的放大率相等处开始计算^[12]。已知换根处的倍率为 m_{20} 和 m_{30} ,将变倍组焦距取规范化值为 -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:

$$\begin{cases} \frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'}, \\ \frac{l'}{l} = m. \end{cases} \quad (1)$$

要求其他任意位置变倍组和补偿组的倍率 m_2 和 m_3 ,需要采用以下变焦方程进行计算:

$$\begin{cases} f'_2 \left(m_{20} + \frac{1}{m_{20}} \right) + f'_3 \left(m_{30} + \frac{1}{m_{30}} \right) = f'_2 \left(m_2 + \frac{1}{m_2} \right) + f'_3 \left(m_3 + \frac{1}{m_3} \right), \\ m_2 m_3 = \Gamma m_{20} m_{30}, \end{cases} \quad (2)$$

式中 Γ 是系统变倍比。通常求解的过程中只求出长、中、短焦三种状态,只可大致了解变焦过程中各组元移动情况。而以变倍组的物距为自变量,计算出变焦过程中每一点的结构参数,并用 Matlab 软件仿真出各组透镜移动的轨迹,可更直观地观察系统变焦过程中的运动情况。

3 Matlab 软件仿真分析

在 Matlab 软件编程中,给出平滑换根处变倍组和补偿组的倍率 $m_{20} = -1, m_{30} = -1$,本例中取规则化的 $f'_2 = -1, d_{23.0} = 0.95$,由此根据高斯公式可得出换根处的 $l_{20}, l'_{20}, l_{30}, l'_{30}$ 和 f'_3 。在变焦过程中,

变倍组的物距连续变化,故以变倍组的物距 l_2 为变量(变化范围为 $1.7\sim 4$),根据变焦方程得出在变焦过程中的 $m_2, m_{31}, m_{32}, l_{31}, l_{32}, l'_2, d_{23.1}$ 和 $d_{23.2}$,变倍组和补偿组的结构参数确定。取后固定组倍率 $m_4 = 0.9$,后截距 $l'_4 = 1.5$,求出后固定组焦距 $f'_4, l_4, l'_{31}, l'_{32}, d_{34.1}$ 和 $d_{34.2}$,后固定组结构参数确定。为保证前固定组与变倍组不发生碰撞,在 Matlab 软件中取前固定组焦距,编程语言是 $f_1 = \max(l_2) + 0.4$,求出参数 d_{12} ,前固定组参数确定。取光阑的位置在后固定组前边 0.1 处 ($l_s = d_{12} + d_{23.1} + d_{34.1} - 0.1$),所有参数确定后进行缩放。以各组间隔为自变量,物距为因变量,应用 plot 指令便可作出变焦系统各组移动轨迹,观察各组元在变焦过程中的移动情况,

调整给出的参数在满足系统焦距情况下以保证变焦过程中各组元不发生碰撞,如图 1 所示。

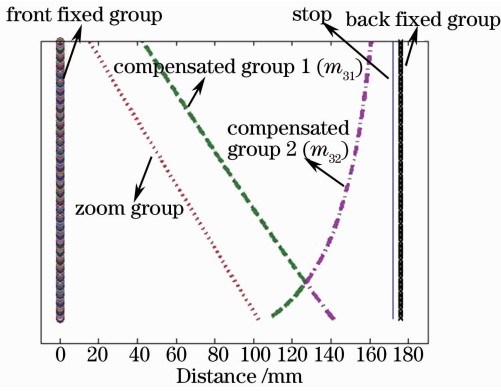


图 1 变焦系统各组移动轨迹

Fig. 1 Mobile trajectory of each component in zoom system

图 1 为各透镜组和光阑位置在变焦过程中的移动轨迹曲线,当变倍组移动时,系统焦距改变,像面同时发生位移,补偿组透镜作非匀速运动来补偿像面位移。由变焦方程(2)式可以看出,每一个 m_2 对应 2 个 m_3 ,且 $m_{31} = 1/m_{32}$ 。所以如图 1 所示,变倍组移动轨迹上每一个点对应两个补偿组位置。当 $m_2 = -1$ 时, m_3 两根相等为 -1 ,此时两曲线相切,曲线相切是实现快速变焦的必要条件。平滑换根可快速提高变倍比,采用换根形式的正组补偿可有效减小系统整体长度。实现换根,若在此情况下设计,一般取 $m_3 > -1$ 段,不能取 $m_3 < -1$ 段,此段为最慢变焦。取图 1 中平滑换根上半部分的 m_{32} 和平滑换根下半部分的 m_{31} ,以实现最快变焦。

由偏角公式 $2(u' - u) = D/f'$ 可计算出变焦过程中各组元偏角的变化,用 Matlab 软件计算出各偏角随系统焦距 f' 的变化,以系统焦距为自变量,各组元偏角为因变量便可作出变焦过程中各组元偏角变化,如图 2 所示。

图 2 展示了随焦距变化各组透镜偏角的变化。光学系统中可以用偏角来定量地分析本组透镜校正

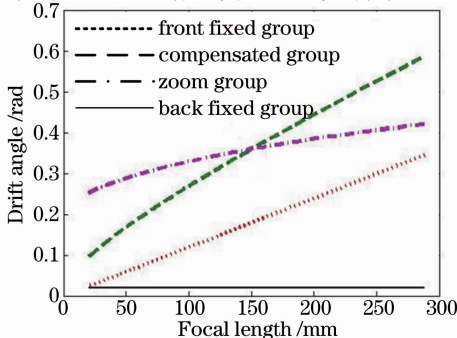


图 2 各组元偏角变化

Fig. 2 Drift angle of each component

像差的难易程度,由图可以看出固定组、变焦组和补偿组光线的偏角随焦距的增加而增大。变焦组和补偿组偏角较大,尤其是在长焦时,分别为 0.587 和 0.422,说明本系统中变倍组具有最复杂的结构,补偿组具有较为复杂的结构。应使各透镜组在变焦过程中的偏角尽量减小,这样可以减小系统的复杂程度。可以改变初始参数,尽可能减小偏角,通过降低固定组的倍率可使各组元偏角下降,但系统的总长度会增加,所以要综合考虑。为了使系统尽可能短,偏角就会增大,使系统变得结构复杂。

在设计过程中,先将各组单独设计,然后组合在一起。为了确保组合时能够光瞳衔接,在 Matlab 软件编程过程中求出光阑相对各组的入瞳和出瞳位置、口径。再根据设计要求取光学系统的半像高为 5 mm 计算出各组元在变焦过程中视场角的变化,以系统焦距为自变量,各组元视场为因变量便可作出变焦过程中各组元视场角的变化,如图 3 所示。

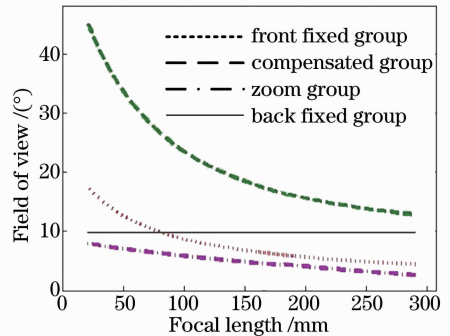


图 3 各组元视场变化

Fig. 3 Field change of each component

图 3 展示了随焦距的变化,各组元视场角的变化情况,从图可以看出从短焦到长焦视场逐渐变小,变倍组的视场较大,短焦时达到 43.8°,说明本系统中变倍组有最复杂的结构,通过调整初始给定参数可以减小各组元视场,但减小各组元所承担视场的代价是使各组元的偏角增大,同样会增加结构的复杂程度,所以要找到视场与偏角之间一个相对适合的结果,尽量降低结构的复杂性。

通过上述分析,可以更直观地观察系统在变焦过程中各组元的运动情况,所承担偏角和视场角的变化情况。在光学设计之前就对总体性能有了概括性了解,如本系统中为了保证筒长尽可能短,导致变倍组在长焦时承担较大的偏角,短焦时视场角也比较大,所以在光学设计时应考虑使用特殊玻璃或者非球面来提高像质,由此对变倍组的公差要求也特别严格。

4 光学系统设计

4.1 设计结果

变焦物镜系统由前固定组、变倍组、补偿组和后固定组组成,他们对系统光焦度的贡献分别为正、负、正、正。通过前面分析,给出各组光焦度,利用 Zemax 光学设计软件进行像差校正,优化系统。

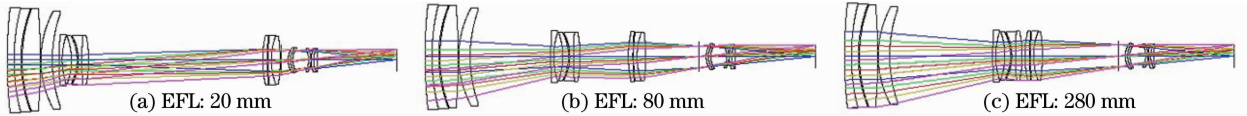


图 4 变焦系统结构图

Fig. 4 Structure charts of the zoom system

表 2 计算值和优化后值对比

Table 2 Comparison between calculated and optimized values

	f_1	f_2	f_3	f_4
Calculated /mm	166.98	-37.95	55.98	569.25
Optimized /mm	166.19	-36.04	52.79	623.06

图 5 所示为系统的凸轮曲线,横坐标为系统焦距,纵坐标为变倍组和补偿组在系统中相对于前固定组的位置。变倍组行程 122 mm,补偿组行程 73 mm,凸轮曲线平滑无拐点,这保证了系统变焦的可行性。

4.2 像质评价

传递函数是评价光学系统的重要手段。该光学系统的传递函数(OTF)曲线如图 6 所示,其中

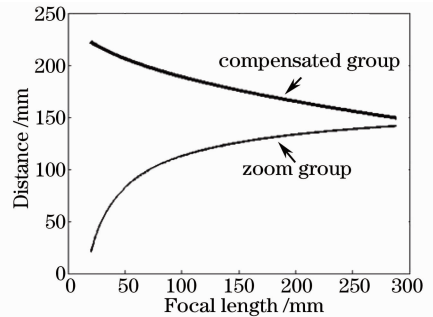


图 5 变焦补偿曲线

Fig. 5 Compensated curve of the zoom system

图 6(a)~(c)分别为短焦、中焦和长焦三种情况下的传递函数曲线。由图 6 可知,系统在各焦距位置均有良好的成像质量。

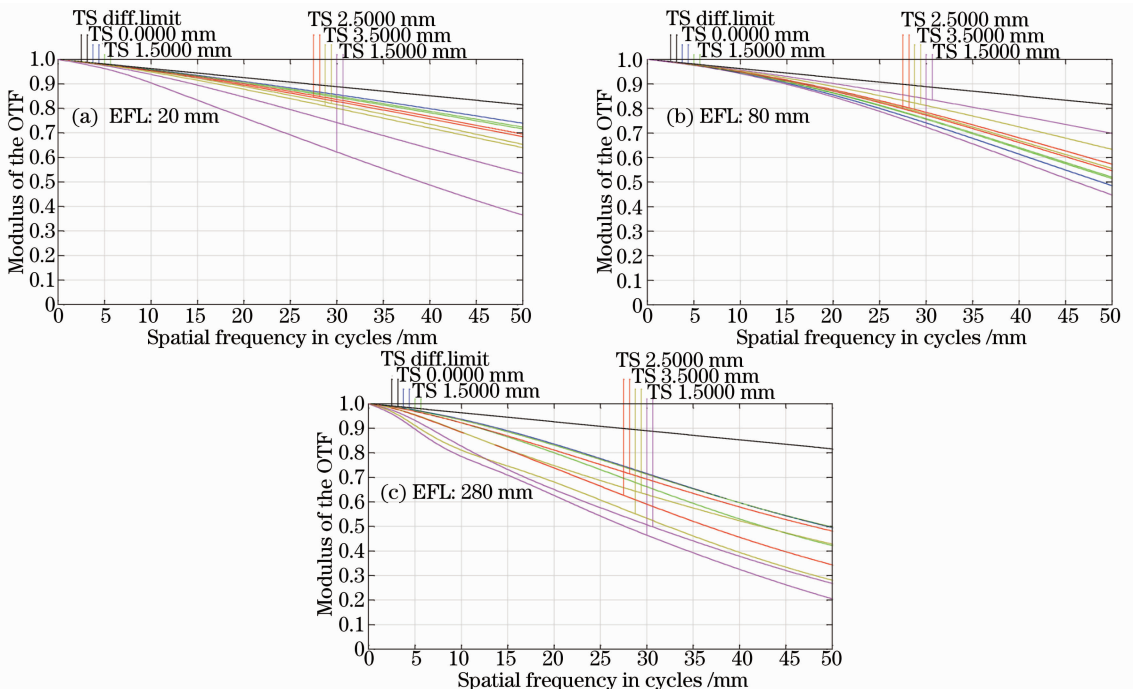


图 6 变焦光学系统的传递函数曲线

Fig. 6 OTF curves of the zoom optical system

5 结 论

提出一种用 Matlab 软件仿真分析变焦光学系统设计。通过 Matlab 软件仿真,画出变焦过程中各组元移动轨迹和偏角、视场的变化,分析各组元偏角、视场角等因素对系统的复杂程度的影响,综合考虑后合理分配各组的光焦度,最后制定出初始结构。设计了一个 $14\times$ 正组补偿型变焦系统,所设计系统优化后的光焦度分配值和计算的结果很接近。

参 考 文 献

- 1 Wang Ping, Zhang Bao, Cheng Zhifeng, *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 Zhou Hao, Liu Ying, Sun Qiang. Mid infrared zoom optical system with ratio of 25[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0422001.
周 昊, 刘 英, 孙 强. 25 倍中红外连续变焦光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0422001.
- 3 Gao Tianyuan, Hou Zhenyan. Comparison and research of zoom curve fitting methods[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(1): 94–97.
高天元, 侯振岩. 变焦曲线拟合方法的比较与研究[J]. 光子学报, 2013, 42(1): 94–97.
- 4 Nikon Corporation. Zoom Lens Systems: US, 2005/0083584 A1 [P]. 2005–04–21.
- 5 Li Lin, Wang Yongtian, Zhang Liqin, *et al.*. An approach on the calculation of Gaussian parameters of zoom lenses [J].

Transactions of Beijing Institute of Technology, 2003, 23(4): 424–427.

- 李 林, 王涌天, 张丽琴, 等. 变焦物镜高斯光学参数的求解[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(4): 424–427.
- 6 薛鸣球. 电影摄影物镜光学设计[M]. 北京: 中国工业出版社, 1971. 167–168.
- 7 Liu Chongjin, Shi Guanghui. General situations of mechanical compensation zoom lens in its three development phases and its developing direction[J]. J Applied Optics, 1992, 13(2): 12–13.
刘崇进, 史光辉. 机械补偿法变焦镜头三个发展阶段的概况和发展方向[J]. 应用光学, 1992, 13(2): 12–13.
- 8 Li Yan, Zhang Bao, Hong Yongfeng. Design of large zoom ratio middle wavelength infrared zoom optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0422005.
李 岩, 张 葆, 洪永丰. 大变倍比中波红外变焦光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0422005.
- 9 R L Sinclair. High magnification zoom lenses for $3\sim 5\ \mu\text{m}$ application[C]. SPIE, 1998, 3429: 120–125.
- 10 Zhang Tingcheng, Liao Zhibo. Design of 6X cooled thermal imaging middle infrared continuous zoom optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1122004.
张庭成, 廖志波. 6 倍制冷型中红外连续变焦光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1122004.
- 11 Xue Hui, Li Changwei. Optical design of infrared continuous-zoom lenses[J]. J Infrared Millim Waves, 2012, 31(5): 421–425.
薛 慧, 李常伟. 红外中波连续变焦光学系统的设计[J]. 红外与毫米波学报, 2012, 31(5): 421–425.
- 12 Tao Chunkan. Zoom Optical System Design [M]. Beijing: National Defense Industry House, 1998.
陶纯堪. 变焦光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.

栏目编辑: 韩 峰