

三组式伸缩型高倍率变焦距光学系统设计

李宏壮

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

摘要 针对三组式伸缩型结构高倍率变焦距镜头设计进行了研究。对含中间固定组的三组式结构高斯光学进行了讨论,给出了高倍率设计的高斯解范围和选取原则,并编制了可视化辅助设计软件,为高斯参数的最优化选取提供条件。采用这种结构设计了一套焦距 12~600 mm、变倍比 50 倍、视场角 $0.85^\circ\sim 41.2^\circ$ 的伸缩型变焦距镜头,短焦时前片至像面 175 mm、长焦时为 309 mm,长焦端远摄比达 0.51;各焦距位置在 100 lp/mm 处轴上视场调制传递函数(MTF)大于 0.3,边缘视场 MTF 大于 0.2,同时系统具有小型、便携的特点。

关键词 光学设计;三组式伸缩型结构;连续变焦距镜头;高斯光学计算

中图分类号 TH751 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.122203

Design of Three-Group Flexible High Ratio Zoom Optical System

Li Hongzhuang

*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130033, China*

Abstract High ratio zoom lens design using three-group flexible structure is researched. The Guassian optics for three-group structure with fixed middle group is discussed. The range of Guassian parameters and principle of selection for high ratio design are presented. The visible assist design software for Guassian parameters selection is developed. A flexible zoom lens with ratio $50\times$, focal length 12~600 mm, and field of view $0.85^\circ\sim 41.2^\circ$ is designed. The optical total length is 175 mm for short focal length, 309 mm for long focal length, and the telephoto ratio of long focal length is 0.51. The modulation transfer function (MTF) at 100 lp/mm for each focal length is higher than 0.3 at center field, and higher than 0.2 at edge field. The system possesses the characters of miniature and portable.

Key words optical design; three-group flexible structure; continuous zoom lens; Guassian optical calculation

OCIS codes 220.3620; 220.4830

1 引言

变焦距镜头可实现成像倍率和视场范围的连续变化,因此能产生较高的真实感和艺术效果,在电视摄影、照相等领域被广泛采用。这些领域要求镜头具有小型化与便携的特点。同时随着摄影技术的发展,希望镜头具有更长的焦距、更大的变倍比和更高的成像质量,一般镜头的长度与其焦距相近,因此长焦镜头的小型化设计难度很大。另外当变倍比高时,变焦组元的移动量大,像差校正困难,这些又都增加了镜头紧凑型设计的难度^[1-2]。

从变倍补偿方式角度,为实现镜头的小型和便携,照相物镜常采用能够伸缩的两组或三组式结构。其中两组式为最简单的机械补偿连续变焦结构,其前组为负光焦度补偿组,后组为正光焦度变倍组,变倍组做线性移动实现变倍,补偿组做非线性移动补偿像面位置。这种结构适用于低变倍比镜头。

在两组式基础上增加一个固定组,即为三组式结构,固定组可放在变倍、补偿组的前端、中间、后端。放在后端时其与两组式基本一致;放在前端时,固定组为变倍补偿组提供一个稳定的物面,在相对孔径和视场

收稿日期: 2016-07-12; 收到修改稿日期: 2016-08-05; 网络出版日期: 2016-11-20

作者简介: 李宏壮(1980—),男,博士,副研究员,主要从事光学设计、主动光学和波前探测方面的研究。

E-mail: jilinbayan@163.com

均不大时,适宜做变焦距显微物镜,变倍比可达4~5倍;放在中间时,固定组为负光焦度,前组为正光焦度变倍组,后组为正光焦度补偿组。这种形式在变倍过程中可实现伸缩,在照相摄影物镜中被广泛采用,俞福民^[3]设计了焦距为45~90 mm、变倍比为2倍的三组元伸缩型变焦距镜头;蔡伟等^[4]采用这种形式设计了焦距为50~200 mm、变倍比为4倍的变焦距镜头。Hull等^[5]采用含前固定组的三组元结构设计了焦距为9.2~82.8 mm、变倍比为9倍的变焦距镜头,而目前采用三组式结构的商业变焦距镜头产品变倍比也都不超过20倍^[5-7]。

本文对三组式伸缩型变焦距镜头的高变倍比设计进行了研究,对实现长焦距、大变倍比的高斯解条件及结构形式进行了探讨,尤其对三组式伸缩型结构的换根特性进行了研究,给出了能够实现高倍率的高斯解范围和选取原则。采用这种结构,设计了焦距为12~600 mm、变倍比为50倍、视场角为0.85°~41.2°的伸缩型变焦距镜头,系统达到了小型化,镜头短焦时前片至像面为175 mm、长焦时为309 mm,长焦端远摄比达0.51;50倍的高变倍比突破了目前文献报道的三组式变焦距镜头的变倍比指标。另外通过远摄结构设计,使后面的固定组和补偿组口径减小、镜筒变细,达到了小型、便携的目的。

2 含中间固定组三组式变焦结构的高斯光学

2.1 高斯计算过程

含中间固定组三组式伸缩型结构变焦过程如图1所示,设A、B、C分别代表前变倍组、中间固定组和后补偿组, f'_A 、 f'_B 、 f'_C 为三组焦距, l_B 、 l'_B 为B组物距和像距, l_C 、 l'_C 为C组物距和像距, d_{AB} 、 d_{BC} 分别为AB和BC组间隔, f' 为系统焦距, L 为中间固定组到像面距离, m_B 、 m_C 为B、C组倍率。

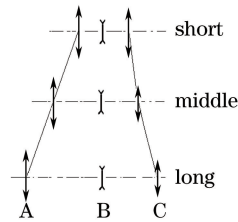


图1 含中间固定组三组式伸缩型结构变焦过程

Fig. 1 Zoom process of three-group flexible structure with fixed middle group

以长焦端为起始位置,令 $f'_B = -1$,首先根据组元间隔预选 f'_A 和 f'_C ,而后计算各参数,得到起始位置的 L 值, L 在变倍过程中保持恒定。

$$l_B = -\left(1 - \frac{1}{m_B}\right) f'_B, \quad l'_B = -(1 - m_B) f'_B, \quad (1)$$

$$l_C = -\left(1 - \frac{1}{m_C}\right) f'_C, \quad l'_C = (1 - m_C) f'_C, \quad (2)$$

$$d_{AB} = f'_A - l_B, \quad d_{BC} = l'_B - l_C, \quad (3)$$

$$f = f'_A \cdot m_B \cdot m_C, \quad (4)$$

$$L = d_{BC} + l'_C, \quad (5)$$

以短焦端为终止位置,计算长焦到短焦变倍过程中各参数的变化,变化过程中上述各参数以*表示。

计算方法为:首先给出中间固定组B的倍率 m_B^* ,计算固定组B的物距和像距,即

$$l_B^* = -\left(1 - \frac{1}{m_B^*}\right) f'_B, \quad l'^*_B = -(1 - m_B^*) f'_B, \quad (6)$$

则变倍组A与固定组B间隔为

$$d_{AB}^* = f'_A - l_B^*, \quad (7)$$

结合以下各式

$$d_{BC}^* = l'^*_B - l_C, \quad (8)$$

$$l_C^* = -\left(1 - \frac{1}{m_C^*}\right) f'_C, \quad l'^*_C = (1 - m_C^*) f'_C, \quad (9)$$

以及中间固定组到像面距离 L 恒定为

$$L = d_{BC}^* + l_C^* \quad (10)$$

得:

$$m_C^{*2} + \left(\frac{L - l_B^*}{f_C} - 2 \right) \cdot m_C^* + 1 = 0, \quad (11)$$

令

$$b = \frac{L - l_B^*}{f_C} - 2, \quad (12)$$

则(11)式简化为

$$m_C^{*2} + b \cdot m_C^* + 1 = 0, \quad (13)$$

则补偿组 C 的倍率 m_C^* 为

$$m_C^* = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4}}{2}, \quad (14)$$

式中:

$$m_{C,1}^* = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4}}{2}, \quad m_{C,2}^* = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4}}{2}, \quad (15)$$

由补偿组 C 的倍率 m_C^* 进而可求出补偿组的物距、像距,即得出补偿曲线。

2.2 换根解的讨论

要实现高的变倍比,变焦距系统的高斯解一般可采用最速变焦的换根解。如图 2 所示为补偿曲线换根示意图,为实现换根,须满足变倍组、补偿组放大倍率同时等于 -1 ,即 $m_B = m_C = -1$,此时 $b = 2$,在此位置补偿组倍率的两个解相等,即 $m_{C,1} = m_{C,2}$,可实现两条补偿曲线平滑换根。

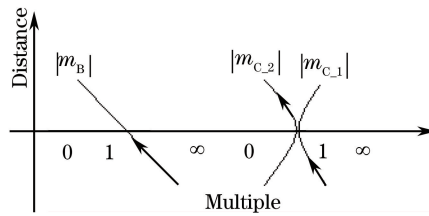


图 2 补偿曲线示意图

Fig. 2 Compensation curves sketch

下面对含中间固定组的三组式结构能否平滑换根进行讨论。

令换根点位置各参数以 $_h$ 表示,由 $m_{B,h} = m_{C,h} = -1$,由(1)、(2)式得:

$$l'_{B,h} = -(1 - m_{B,h})f'_B = -2, \quad (16)$$

$$l_{C,h} = -\left(1 - \frac{1}{m_{C,h}}\right)f'_C = -2f'_C, \quad (17)$$

$$l'_{C,h} = (1 - m_{C,h})f'_C = 2f'_C. \quad (18)$$

由(3)式得:

$$d_{BC,h} = l'_{B,h} - l_{C,h} = -2 + 2f'_C, \quad (19)$$

由(5)式得:

$$L_h = d_{BC,h} + l'_{C,h} = 4f'_C - 2, \quad (20)$$

对于除换根点的其他位置,由(6)式得:

$$l_B^* = -(1 - m_B^*)f_B = m_B^* - 1, \quad (21)$$

由(12)式得:

$$b = \frac{L - l_B^*}{f_C} - 2 = \frac{(4f'_C - 2) - (m_B^* - 1)}{f_C} - 2, \quad (22)$$

为使其他位置有解,须满足 $|b| > 2$,又由于系统光焦距为正,因此 $m_c < 0$,由(14)式,只能取 $b > 2$,即

$$b = \frac{L - l_B^*}{f_c} - 2 = \frac{(4f_c^l - 2) - (m_B^* - 1)}{f_c} - 2 > 2, \quad (23)$$

得:

$$m_B^* < -1, \quad (24)$$

由此可见, m_B^* 取值只能小于 -1 ,无法在 $-1 \sim 0$ 之间取值,因此含中间固定组的三组式结构无法实现平滑换根。因此对于(15)式开根号取负号,即

$$m_c^* = m_{c_2}^*. \quad (25)$$

2.3 高斯参数选取

1) 为获得 20 倍以上高的变倍比,焦距变化应主要由前变倍组产生,高斯解应更加偏下选段。因此对于大变倍比系统,长焦初始位置中间固定组放大倍率 $|m_{B_l}|$ 应取尽量大,而短焦位置 $|m_{B_s}|$ 则尽量小,短焦位置补偿组放大倍率 m_{c_s} 尽量小于 -1 ,中间固定组和后补偿组放大倍率应满足:

$$-2 < m_{B_l} \leq -1, \quad -0.1 < m_{B_s} < 0, \quad -3 < m_{c_l} \leq -2, \quad m_{c_s} \approx -1, \quad (26)$$

式中 m_{B_l} 、 m_{B_s} 分别为中间固定组 B 在长、短焦端的倍率, m_{c_l} 、 m_{c_s} 分别为补偿组 C 在长、短焦端的倍率。

2) 由(2)、(3)式,增加变倍组焦距 f_A 可保证大变倍比下短焦端变倍组与中间固定组的间隔,增加补偿组焦距 f_B 可保证长焦端中间固定组与补偿组的间隔,因此高变倍比时前固定组、变倍组、补偿组的光焦距应满足如下条件,即

$$10 < |f_A/f_B| < 20, \quad 1.5 < |f_c/f_B| < 3. \quad (27)$$

3) 前变倍组焦距增加可使变倍组与中间固定组间隔增加,使正光焦距前移,增加远摄比,减小光学系统总长,并降低后面各组元光线高度。但限制条件为前组轴外视场主光线高度应低于轴上边缘光线高度。

4) 对含中间固定组的三组式结构,光阑一般位于后补偿组前端,并随补偿组移动,因此前组轴外光线高度最高的位置并不是短焦端,而是次短焦位置。

为快速合理地选择高斯参数,编制了可视化辅助设计软件,软件界面如图 3 所示。功能包括变倍曲线计算、光学总长计算、各组元不同焦距位置轴上边缘光线与轴外主光线高度计算,并绘制其变倍补偿曲线和各组元相对孔径变化曲线,分别如图 3(a)和(b)所示。图 3(a)中横坐标为凸轮转角,单位为 $^\circ$,纵坐标为变倍、补偿组位置变化量,单位为 mm。图 3(b)中 h/f 为各组元轴上边缘光线高度 h 与组元焦距 f 的比值,表示变倍过程中各组元的相对孔径; h_p/f 为各组元轴外主光线高度 h_p 与组元焦距 f 的比值,表示变倍过程中各组元的轴外光线变化。在上述原则基础上,通过辅助软件调节初始参数,使其满足变倍曲线平滑、光学总长短、各组元承担光焦距适中、组元间隔合适等要求,从而使高斯参数选取达到最优^[8-9]。

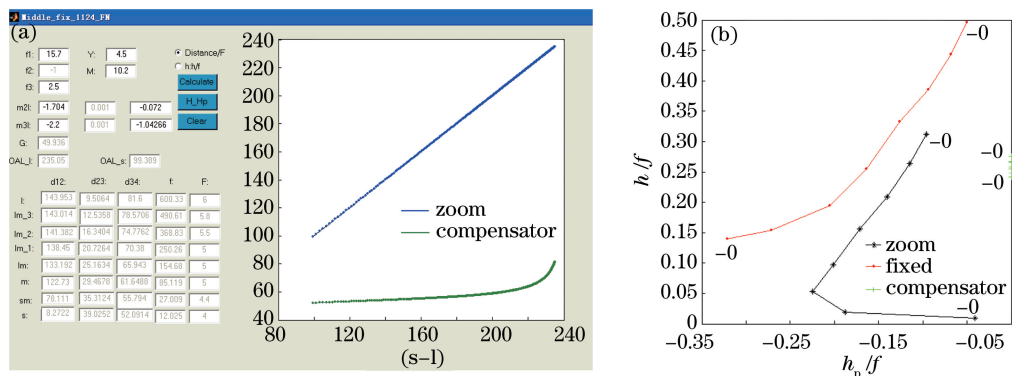


图 3 可视化辅助设计软件界面。(a) 变倍补偿曲线; (b) 相对孔径变化曲线

Fig. 3 Visible assist design software interface. (a) Zoom compensation curves; (b) relative aperture curves

3 50倍三组式变焦距系统设计

3.1 设计指标

系统设计波段为 486~656 nm 的可见光波段,焦距为 12~600 mm,变倍比为 50,系统 F 数为 4.5~7,靶面尺寸为 10 mm(对角线),视场角 $0.85^\circ\sim 41.2^\circ$;该镜头属于小型、高倍、广角镜头,且焦距长、像质要求高。考虑到系统对结构紧凑和便携的要求,采用三组式可伸缩型结构设计。

3.2 高斯光学计算

选定变焦系统形式后,首先进行高斯光学计算,初始解按照(26)、(27)式选取。而后通过可视化辅助设计软件,按(26)、(27)式选择初始参数并反复调整,使变倍比达到 50 倍,各项性能达到优化。

最终确定系统归一化高斯光学参数为 $f_A = 15.7$ 、 $f_B = -1$ 、 $f_C = 2.5$ 、 $m_{B_1} = -1.707$ 、 $m_{B_s} = -0.072$ 、 $m_{C_1} = -2.2$ 、 $m_{C_s} = -1.024$,由此计算出变倍组导程 $q = 13.3$ 、补偿量 $\Delta = 2.951$;光学总长 $L = 9.74\sim 23.04$;系统比例因子 $M = 10.2$ 。

在上述高斯参数下计算的补偿曲线如图 3(a)所示,可以看出变倍补偿曲线平滑。

图 3(b)为根据各组元轴上边缘光线及轴外主光线高度,计算系统从 12~600 mm 的 5 个不同焦距位置下各组元的相对孔径变化,即 $h/f-h_p/f$ 图,图中标注的 P_1 为长焦位置, P_s 为短焦位置;由图可以看出各组元承担的光焦度适中,且满足前组轴外视场主光线高度应低于轴上边缘光线的条件。

3.3 各组元结构选择

各组元的结构形式应根据其承担的像差特性选择,如果像差负担大,则需要复杂化。通过辅助软件计算各组元的轴上边缘光线及轴外主光线高度,绘制相对孔径变化图^[1,9,11],如图 3(b)所示。由相对孔径变化图对各组元承担像差的特点分析,从而确定其初始结构。

由图 3(b)可以看出,系统前变倍组长焦端轴上光线和短焦端轴外光线都很高,长焦端 h/f 和短焦端 h_p/f 分别达到了 0.5 和 0.35,因此需较复杂结构,用于校正长焦端的球差、正弦差,以及短焦端的像散、畸变和轴外球差;另外由于长焦端焦距较长,还要注意对二级光谱的校正。采用双胶合、单透镜、单透镜、单透镜结构(即双、单、单、单结构),并将胶合面分离,以校正轴上光线的高级球差和正弦差,同时控制轴外下光线的成像特性,校正正象散和轴外球差;为了校正二级光谱,正元件采用特殊色散材料 FK61^[12-13]。

中间固定组长焦端 h/f 和次短焦 h_p/f 分别达到了 0.32 和 0.23,相对孔径也较大,为校正长焦端轴上高级球差和高级正弦差,及次短焦的高级正象散,中间固定组采用单、单、双、单结构,其中三块单透镜均为弯月形负透镜,前面两块单透镜弯向光阑,后面一块单透镜背向光阑,胶合透镜的胶合面背向光阑,形成正光焦度胶合面,以对球差、彗差和像散进行校正。

后端补偿组的 h/f 为 0.24~0.28,较为适中;由于光阑设置在补偿组上,因此 h_p/f 为 0。为进一步缩短总长,补偿组采用正负分离的远摄型结构,由于其后组光焦度为负,且由中间固定组出射光束为发散光,因此补偿组前组将具有很大的正光焦度,采用双、双结构,胶合面均为正光焦度,并采用高折射率材料以校正轴上高级像差;补偿组后组远离光阑,采用双、单结构,且单透镜为厚透镜化,为平衡前面各组元的 Petzval 和,后组胶合透镜的正元件采用低折射率材料,负元件采用高折射率材料^[10-12]。各组元结构形式如图 4 所示。

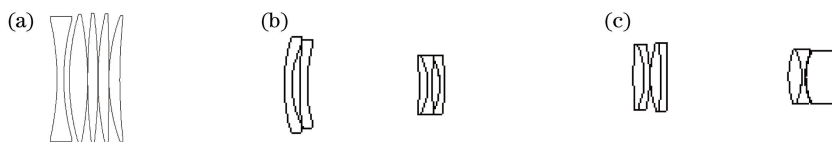


图 4 各组元结构。(a) 变倍组; (b) 固定组; (c) 补偿组

Fig. 4 Structure of each group. (a) Zoom group; (b) fixed group; (c) compensation group

3.4 整体优化

由像差校正与平衡基础上选定各组元初始结构后,采用自动化设计进行整体优化,优化过程中通过软件宏命令编写优化程序,严格按照高斯光学参数,控制各组元焦距、主面间隔,并约束光学总长、组元最小间隔等^[12-14],最终得到光学结构如图 5 所示。

镜头由前变倍组、中间固定组、后补偿组组成,共 13 组片,短焦时前端变倍组与中间固定组距离最近,后端补偿组与中间固定组距离最远,此时镜头长度最短;变倍过程中,变倍组及补偿组均向前移动,长焦时,变倍组与中间固定组距离最远,此时镜头最长。

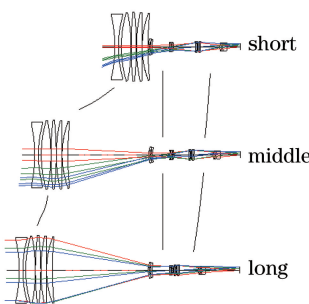


图 5 各焦距位置的光学结构

Fig. 5 Optical structure with different focal lengths

系统由 13 组 17 片透镜组成,即

- 1) 前变倍组最大通光口径 85 mm,中间固定组最大通光口径 20 mm,补偿组最大通光口径 13 mm;
- 2) 前片至像面总长:短焦端 175 mm,长焦端 309 mm,长焦端系统远摄比 0.51;
- 3) 后工作距离:长焦端 48 mm,短焦端 18 mm;
- 4) 变倍组导程:134 mm;
- 5) 补偿量:30 mm。

系统调制传递函数(MTF)曲线如图 6 所示,在短焦位置,100 lp/mm 处轴上视场 MTF 大于 0.5,边缘视场 MTF 大于 0.2;在中焦位置,100 lp/mm 处轴上视场 MTF 大于 0.5,边缘视场 MTF 大于 0.3;在长焦位置,100 lp/mm 处轴上视场 MTF 大于 0.3,边缘视场 MTF 大于 0.2;可以看出系统在各焦距位置均具有较好的成像质量。由 MTF 曲线可以看出,该镜头可以与像元尺寸大于 $5 \mu\text{m}$ 的相机进行较好的匹配。

长焦位置系统渐晕最大,边缘视场相对照度为 75.8%;短焦端视场角最大,相应畸变也最大,短焦端畸变小于 3%。

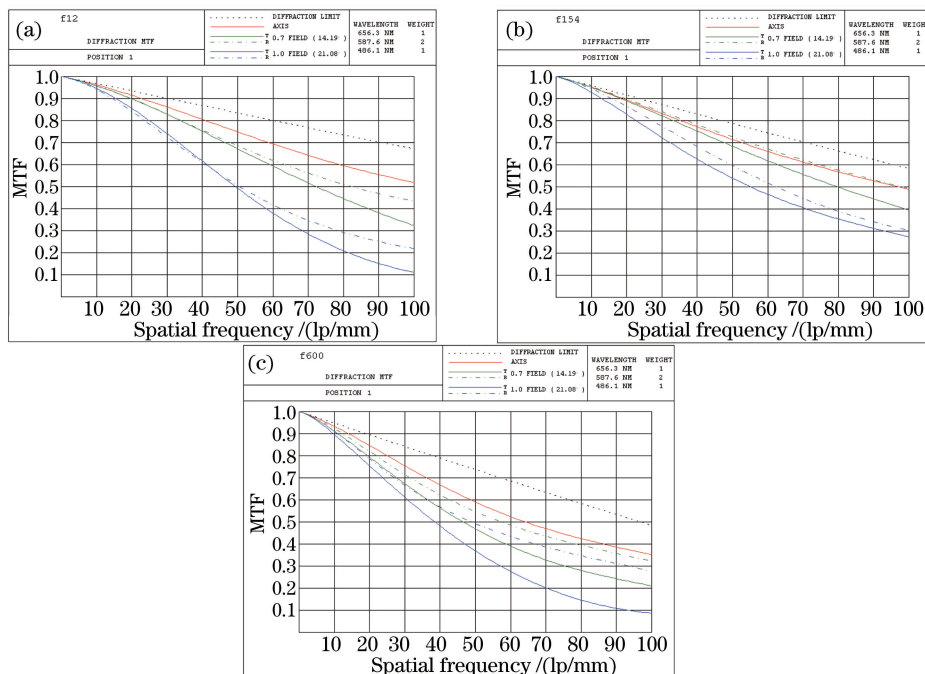


图 6 各焦距位置的 MTF。(a) 短焦;(b) 中焦;(c) 长焦

Fig. 6 MTF with different focal lengths. (a) Short focal length; (b) middle focal length; (c) long focal length

这种结构可采用变倍组同时作为调焦组,通过其与调焦环联动进行物距调焦,实现较好的近摄能力。可变电阑固定在补偿组前端,随补偿组移动,变倍过程中通过光阑孔径调节使相对孔径保持恒定。

4 结 论

目前报道的三组式伸缩型变焦距镜头设计结果中,变倍比都不大,一般不超过 5 倍。针对三组式伸缩型变焦镜头的高变倍比、长焦距、小型化设计进行了高斯解讨论,得出了含中间固定组的三组式结构无法实现平滑换根结论,并给出了能够实现高倍率的高斯解范围和选取原则,编制了可视化辅助设计软件,为高斯参数的最优化选取提供依据。并针对一套焦距为 12~600 mm、变倍比为 50 倍的高倍率伸缩型连续变焦距镜头,采用所述的原则对其进行了高斯解选取和整体设计,使系统在保证倍率和成像质量的前提下,实现了小型化,镜头短焦时前片至像面 175 mm、长焦时为 309 mm,长焦端远摄比达 0.51。50 倍的高变倍比突破了目前文献报道的三组式变焦距镜头的变倍比指标。

参 考 文 献

- 1 Tao Chunkan. Zoom lens design[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988: 153-163.
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.
- 2 Wang Hong, Tian Tiejun. Miniature design of $5\times$ zoom optical system[J]. Chinese Optics, 2014, 7(2): 315-319.
王 红, 田铁印. 5 倍变焦距光学系统小型化设计[J]. 中国光学, 2014, 7(2): 315-319.
- 3 Yu Fumin. A zoom lens used for 135 mm camera[J]. Optical Instruments, 1982, 2(4): 33-37.
俞福民. 一个用于 135 相机上的变焦距镜头[J]. 光学仪器, 1982, 2(4): 33-37.
- 4 Cai Wei, Zhang Xin, Feng Xiuheng, *et al.* Compensating modes for zoom system[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(9): 2063-2071.
蔡 伟, 张 新, 冯秀恒, 等. 变焦距系统的变倍补偿方式[J]. 光学精密工程, 2011, 19(9): 2063-2071.
- 5 Hull A B, Arsenault R H, Hulan D G, *et al.* Design of a space-qualified zoom lens for the space station mobile servicing system video camera[C]. SPIE, 1995, 2539: 37-63.
- 6 Kryszczyński T. Method to solve any paraxial pupil problems in zoom systems[C]. SPIE, 1996, 3129: 193-204.
- 7 Kreitzer M, Moskovich J. Zoom projection lens[C]. SPIE, 1995, 2539: 64-74.
- 8 Li Xiaotong, He Guoxiong. Research of optimization design for zoom lens Gaussian parameters[J]. Journal of Zhejiang University (Natural Science), 1993, 27(1): 122-127.
李晓彤, 何国雄. 变焦距系统高斯解优化的研究[J]. 浙江大学学报(自然科学版), 1993, 27(1): 122-127.
- 9 Li Hongzhuang, Zhang Zhenduo, Cao Jingtai, *et al.* Design of zoom optical system with long focal length and super-high zoom ratio[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(3): 358-363.
李宏壮, 张振铎, 曹景太, 等. 长焦距超高倍率变焦距光学系统设计[J]. 光子学报, 2012, 41(3): 358-363.
- 10 Mann A. Developments and trends in infrared zoom lenses from 2000 to 2010[J]. Optical Engineering, 2013, 52(1): 013001.
- 11 Li Hongzhuang, Zhang Zhenduo. Design of $20\times$ double-linkage continuous zoom optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0222003.
李宏壮, 张振铎. 20 倍双组联动变焦距光学系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0222003.
- 12 Wu Yanxiong, Zhang Xin, Zhang Jizhen, *et al.* Research on the autonomous star sensor based on indirectly sensing horizon and its optical design[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0222001.
伍雁雄, 张 新, 张继真, 等. 星光折射自主导航星敏感器及光学系统设计研究[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0222001.
- 13 Yu Jiandong, Liang Zhongzhu, Liang Jingqiu, *et al.* Research and design of prefixing objective with large aperture in imaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0222002.
于建东, 梁中翥, 梁静秋, 等. 成像光谱仪大口径前置物镜设计研究[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0222002.
- 14 Li Honzhuang, Zhao Yongzhi, Ma Xinxue, *et al.* Design of large aperture catadioptric three group continuous zoom optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(10): 3037-3042.
李宏壮, 赵勇志, 马鑫雪, 等. 大口径折反式三组元连续变焦距光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 3037-3042.