

文章编号 1004-924X(2013)02-0323-13

球幕投影通用型变焦鱼眼镜头设计

陈 琛^{1,2*}, 胡春海¹

(1. 燕山大学 测试计量技术及仪器河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;

2. 秦皇岛视听机械研究所, 河北 秦皇岛 066000)

摘要:为了匹配不同类型和规格的工程数字投影机的投影球形幕,提出了设计通用型投影变焦鱼眼镜头的基本方法。首先,基于投影鱼眼镜头自身特性和通用性特点,确定了目标系统采用的光学结构类型;通过优选配置二组元变焦核初始条件参数,对补偿组的位移曲线进行了线性改造,从而使两条凸轮曲线可同步构造为标准螺旋线。之后,通过合理控制前固定组球差及后固定组焦距,使变焦过程中的像面保持稳定。设计结果表明,光学系统采用二运动组元机械补偿式正组变焦倍负组补偿结构,在变焦过程中可以保持全视场角 160° 和孔径 $F\#$ 为 2 基本不变。通过合理控制过程参量,可以使系统适配光学引擎中棱镜的有效光学厚度为 16.5~26 mm,满足 1LCD、3LCD 和 1DMD 常见技术类型、16~24 cm(0.63~0.95 in)芯片尺寸及 16:9 和 4:3 两种芯片长宽比的数字工程投影机使用,像面位移量控制在 ± 0.03 mm 以内。该设计可以满足投影鱼眼镜头的常规投影及通用性要求,结构简单,工艺性强。

关键词:光学设计;变焦鱼眼镜头;球幕投影;像面位移;线性补偿;凸轮曲线

中图分类号:TH703;TH741.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132102.0323

Design of general type zoom fish-eye lens for dome-screen projector

CHEN Chen^{1,2}, HU Chun-hai¹

(1. Hebei Province Key Laboratory of Measuring and Testing

Technologies & Instruments, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. Qinhuangdao Audio-Visual Machinery Research Institute, Qinhuangdao 066000, China)

* Corresponding author, E-mail: chenchen6@yahoo.cn

Abstract: To match the projecting images on dome screens from different types and specs of mainstream digital engineering projectors, a basic design method for a general projection fisheye zoom lens was presented. First, based on the characteristics and universality of the projection fisheye lens, the optical structure used in the final system was defined. By configuring the initial parameters of moving unit bestly, the moving path of compensating group was linearized to construct synchronously two cam curves to be standard helical lines. Then, image surface position was kept steady during a zooming process by controlling the spherical aberration of front fixed group and the focal length of back fixed group. The final design indicates that the optical system can always keep a full field angle of view of 160° and a $F\#$ of 2.0 as it uses two moving components that contain a positive zooming group and a negative compensating group. By controlling parameters reasonably, the system can match

收稿日期:2012-10-17;修订日期:2012-11-13.

基金项目:科技部科研院所技术开发研究专项基金资助项目(No. 2010EG119161, No. 2011EG119199);科技部企业科技创新基金资助项目(No. 10C26211303678)

prisms of different effective optical thicknesses from 16.5 mm to 26 mm in several kinds of digital projector engines, and also can match digital engineering projectors by using 1LCD, 3LCD and 1DMD technologies with the chip sizes from 16—24 cm (0.63—0.95 in) and the length-width ratio of chip in 16 : 9 and 4 : 3 when the image shift is within ± 0.03 mm. The design can fulfill the requirements of common and general projections with its simpler structure and good technology.

Key words: optical design; zoom fish-eye lens; dome-screen projection; image surface shift; linear compensation; cam curve

1 引言

随着数字视频制作技术和数字投影机技术的快速发展,采用数字投影机平台的球幕投影应用越来越受到青睐,已经广泛应用于地理、天文教学、娱乐业、展览展示、科普宣传、调度指挥等领域。球幕投影方式包括多机位拼接方式和单机位方式两种,单机位方式由于系统稳定性高、成本低等特点已成为球幕投影的主流技术,尤其在对小型整球幕投影应用中更是无法替代。单机位投射球幕需要使用具有超大视场角的鱼镜头,由于目前市场上数字投影机的品牌和规格繁多,所需要的固定焦距鱼镜头的规格也很多,不利于鱼镜头的规模化生产,也不利于球幕投影的应用和推广,因此,能通用于多品牌、多规格数字投影机的变焦鱼眼投影镜头的开发研究显得十分迫切。目前,无论国际还是国内,在数字投影领域对通用型变焦鱼镜头的研究还未见公开报道,市场上也未见任何产品推出,本文讨论了可产品化的通用型变焦鱼镜头的设计。

2 设计指标和要求

所谓的通用型变焦鱼眼投影镜头,首先是投影用鱼镜头应具有大视场角、大相对孔径、大反远比特征;“通用”是指镜头可以匹配采用不同尺寸芯片(对角线)、不同芯片长宽比例(16 : 9 或 4 : 3 等)、不同技术类型(LCD、DLP、LCOS 等)的数字投影机。而一般来说,数字投影机芯片的差异使得投影机合光/分光棱镜组的结构(设计时采用平行玻璃平板等效)和引擎棱镜轴向有效出射光程长度具有差异,该光程长度差会造成非平行光线的像差,所以,镜头通用性首先要具有焦距调节能力,以适应不同的像高要求,其次,镜头在不同焦距处对应不同厚度的平行玻璃平板,即,镜头自身应该有能力抵消等效玻璃平板厚度差而造成的各种像差。

根据目前市场上主流工程数字投影机(3LCD 或 1DMD)的引擎情况可以总结出,引擎芯片对角线尺寸和棱镜组出射有效光程长度、芯片短边长(镜头像高)尺寸对应关系如表 1 所示。

表 1 主流工程投影机芯片尺寸及比例所对应的棱镜有效厚度及鱼镜头半视场像高

Tab. 1 Panel sizes and ratios of mainstream projectors and corresponding prism thicknesses and fish-eye lens image heights

Item/mm	Panel diagonal/cm (lin=2.54 cm)							
	2.41	2.2	2.0	1.9	1.78	1.7	1.65	1.6
Prism thickness	26	24	22.5	21	19	18	17	16.5
Image height (16 : 9)	5.91	5.29	4.98	4.67	—	—	—	—
Image height (4 : 3)	—	6.48	6.10	5.72	5.33	5.10	4.95	4.8

鱼镜头像高和视场角的对应关系有别于常规镜头,其像高和视场角的函数关系可以根据需要变化,选择了对应关系,镜头的畸变曲线就确定了,球幕投影领域常用形式为等距离投影形式和等立体角投影形式^[1],其关系式为:

$$y' = f' \omega, \quad (1)$$

$$y' = 2f' \sin(\omega/2), \quad (2)$$

其中: y' 为像高, f' 为镜头焦距, ω 为弧度制的视场角。无论是哪种对应关系,像高之比等于焦距之比,再考虑到工程投影机芯片纵向(短边方向)像素

数在 768~1 080 之间的具体情况,可确定通用型 变焦投影鱼镜头的光学设计指标如表 2 所示。

表 2 光学设计指标

Tab. 2 Optical design parameters

FOV(2ω)	Relative apertur	Zoom ratio	Image height	MTF	Back focal length
160°	$D/f' = 1/2$	1.33	4.8~6.48 mm	0.30FOV ≥ 0.4 30 lp/mm 0.85FOV ≥ 0.3 30 lp/mm	$L' > 40$ mm

图 1 为应用背投整球幕、数字投影机、鱼镜头等组成的系统,图 2 为系统中镜头和球幕的位置关系,可见,镜头出瞳位置远远偏离了球幕的球心位置,便可确定镜头像高 ∞ 视场角关系应采用式(2)描述的等立体角类型,其畸变数据如表 3 所示,为了配合制作数字视频工艺的实际需要,要求所设计镜头在任何视场畸变偏离等立体角类型畸变绝对值不大于 5%。



图 1 地理教学/航海、飞行调度指挥用数字星球系统
Fig. 1 Dispatch and command digital planet system of geography teaching, navigation, and flight

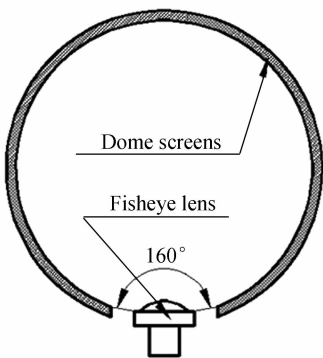


图 2 数字星球系统中镜头和整球幕的位置关系
Fig. 2 Positional relationship of lens and whole dome in digital planet system

表 3 等立体角投影标准畸变

Tab. 3 Standard distortion of equisolid projection

FOV (Radian) ($\omega = \pi/2$)	Real Height(f) $2f' \sin(\omega/2)$	Ref. Heigh(f') $y_0' = f'$ $\tan \omega$	Distortion/% $(y' - y_0')/y_0'$
0.1 ω	0.156 9	0.158 4	-0.92
0.3 ω	0.466 9	0.509 5	-8.36
0.5 ω	0.765 4	1	-23.46
0.707 ω	0.917 8	2.017 4	-50.58
0.85 ω	1.238 2	4.165 7	-70.28
1 ω	1.414 2	∞	-100

考虑到镜头的加工工艺性,特确定当变倍组间隔变化轨迹为线性时,补偿组的间隔变化轨迹也为线性,从而在机械设计过程中能够使两条凸轮曲线都设计成标准的螺旋线^[2]。

3 结构分析

鱼镜头具有超大视场角的性能特点,其前部结构有数值很大的负光焦度,大入射角的轴外光线经其强烈偏折后,使夹角大大减小,如果其角放大率为 γ ,则 $1/\gamma$ 为镜头的规化后工作距离,具有反远距物镜特征, $1/\gamma$ 越大则视场角越大,与视场角相关的像差就越大^[3]。一般具有较大的光阑像差,包括光阑球差和光阑彗差,光阑球差是鱼镜头前组对光阑成像所造成的球差,它对光阑前的任何物体成像,都存在这样的像差,一般称之为大像差前组结构。很多时候,在固定焦距的鱼镜头设计过程中,为了达到提高视场角、增加相对孔径、增大反远比、提高像面照度均匀度等目的,需要人为制造光阑像差,造成孔径光阑的有益渐晕,提高大视场光束的通过比例。在得到合理控制的条件下,光阑像差有益于定焦距鱼镜头的性能提升,对于变焦鱼镜头的设计,合理残留前固定组结构的球差对补偿组间隔变化轨迹曲线的

改造也有帮助。

根据经典的变焦设计理论,从像面位置稳定因素考虑,光学补偿法的变焦距物镜的像面位移不能完全补偿(除去设计规定的几个特征点外),而机械补偿法的变焦距物镜像面位移可以完全补偿;光学补偿法适用于小相对孔径和小视场的低倍率变焦距物镜,机械补偿法适用于大相对孔径和大视场的变焦距物镜。对于本文目标应选择机械补偿法,根据通行方法,机械补偿法确定高斯解变焦核方案的基本方法分为 3 个步骤,

(1) 确定变焦结构像面位移的补偿形式;

(2) 决定倍率选段,合理选择变倍组的起始放大率位置 m_{20} ,再根据变倍比 Γ 计算变倍组的终端放大率 m_2 ;

(3) 确定补偿组焦距 f_3' 。

因为 f_3' 和 m_2 共同决定着全部高斯参数^[4],所以在确定了结构的型式之后,高斯解的核心问题就是确定 m_2 和 f_3' 。

数字投影类鱼镜头由于需要更大的反远比(大量工程实践归纳出,对 3lcd 类型引擎要求最小达到 6 倍,对 3DLP 类型引擎最小达到 9 倍,对于 3 芯片 LCOS 和其变种 SXRD 引擎最少需要达到 11 倍,后工作距离考虑成等效空气),结构在同等复杂程度条件下,需要物镜结构的负焦前组和正焦后组间隔距离更大,造成物镜的总长更长,在保障工程所必需的最小镜头长度前提下,要做到镜头尽量短,镜头前部口径尽量小,才有利于降低成本,使镜头有更强的实用价值。定焦距鱼镜头的前组都具有很大负光焦度,变焦鱼镜头的前固定组也应如此。假设变倍组选择为负光焦度,将使前固定组和变倍组的组合负光焦度的绝对值更大,因为光焦度组合公式为 $\phi_q = \phi_1' + \frac{h_2}{h_1} \phi_2'$, h_2 和 h_1 分别是变倍组前主面上和前固定组后主面上的第一辅助光线高度,在鱼镜头结构中 $\frac{h_2}{h_1}$ 绝大多数情况为正,将导致镜头长度大大增加,镜头结构中间部分口径变粗,最终使镜头尾部的口径尺寸变大,从而不利于和投影机的连接;如果变倍组选择负光焦度,对后期的像差处理不利,需要后固定组结构更复杂,因为校正大视场光线像差是鱼镜头结构面临的巨大挑战。直观地从光程差的角度来判断,若给光学系统边缘视场光程在不

同透镜上制造更多的产生局部突变的机会,给大视场光线以更曲折复杂的路径,会增加各个视场、各个孔径光线光程相等的几率,所以基于像差校正考虑,变倍组选择负光焦度也不利。根据上述分析,只能选择正光焦度的变倍组。同理,基于等光程差和减小镜头几何尺寸的考虑,补偿组也最好采用负光焦度结构。光焦度为正负交错的高斯光学系统如图 3 所示。图中 ϕ_1' 、 ϕ_2' 、 ϕ_3' 和 ϕ_4' 分别代表前固定组、变倍组、补偿组和后固定组。

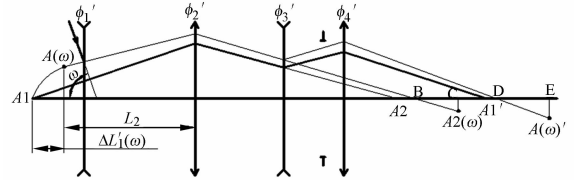


图 3 高斯光学系统图

Fig. 3 Gauss optical system

4 变焦核讨论

关于变焦结构设计的论述有很多^[4-11],此处采用陶纯堪先生的方法^[4]。一般把引起镜头倍率变化的变倍组和补偿组统称为“变焦核”。这里按照理想光学系统,讨论鱼眼变焦镜头在轴上的情况。如图 3,变倍组 ϕ_2' 在变倍过程中最小共轭距时,其放大率为 $m_2 = -1$,当 ϕ_2' 移动时, ϕ_1' 、 ϕ_2' 的组合光焦度发生变化, $\phi_q = \phi_1' + \frac{h_2}{h_1} \phi_2'$ 。当 ϕ_2' 向左移动(靠近 ϕ_1' 时, h_1 基本不变,而 h_2 变大,从定焦距投影鱼镜头结构得到的普遍规律),组合光焦度的绝对值变小,由于 ϕ_1' 的绝对值远远大于 ϕ_2' ,组合后的光焦度 ϕ_q 仍为负值,即,组合后的光焦度的绝对值变小,为负光焦度。 ϕ_2' 向右移动正相反,再考虑到光焦度为正的固定组,最终镜头的焦距变化规律为 ϕ_2' 在最左端时,镜头处在长焦距段, ϕ_2' 在最右端时,镜头处在短焦距段, $f' = f_{12}' / \Delta$,其中 f' 是镜头总焦距, f_{12}' 是前固定组和变倍组的组合焦距, f_4' 是后固定组的焦距,是相应的光学间隔。于是,便得到如图 4 所示的焦距变化形式。

观察图 4,如果再考虑到镜头将匹配不同的投影机,即引擎棱镜模拟平板厚度和该平板距离后固定组的空气间隔也是变化的,发现它既有双

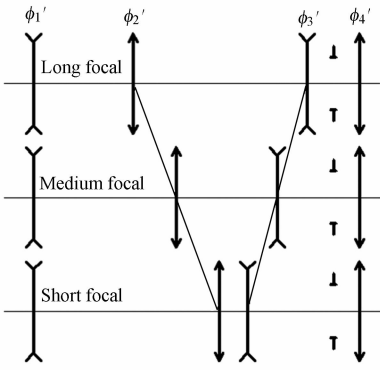


图 4 不同焦距运动组元位置图

Fig. 4 Position of moving group during zoom

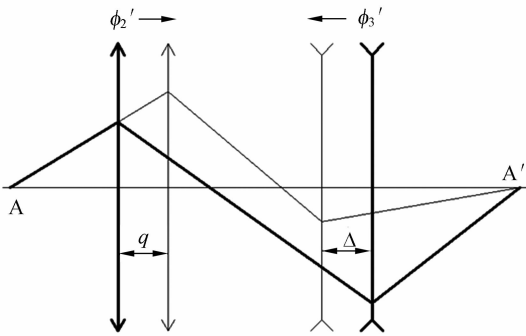


图 5 变焦核像点移动示意图

Fig. 5 Movement of the image point of moving group

组联动的结构特点,又有二运动组元负组补偿特点。图 5 所示为变焦核轴上像点位移关系图。变倍组 \$\phi_2'\$ 因变倍移动 \$q\$ 后,补偿组 \$\phi_3'\$ 要移动 \$\Delta\$ 来保障物点 A 的像点 A' 位置不动,如果 \$m_2\$ 是变倍组的放大率, \$m_3\$ 是补偿组的放大率,并且其余所有符号规则都和通常一样, \$\phi_2'\$ 移动 \$q\$ 引起的运动组份像面微小移动为:

$$m_3^2(1-m_2^2)dq, \tag{3}$$

\$\phi_3'\$ 移动引起的运动组份像面微小移动为:

$$(1-m_3^2)d\Delta. \tag{4}$$

为达到像面稳定,两个像面移动量的代数和必须为 0,则:

$$m_3^2(1-m_2^2)dq+(1-m_3^2)d\Delta=0, \tag{5}$$

而 \$dq\$ 和 \$d\Delta\$ 又可以用相应的放大率来表示为:

$$dq=\frac{f_2'}{m_2^2}dm_2; d\Delta=f_3'dm_3, \tag{6}$$

代入(5)式得:

$$\frac{1-m_2^2}{m_2^2}f_2'dm_2+\frac{1-m_3^2}{m_3^2}f_3'dm_3=0. \tag{7}$$

若给定了变倍组初始放大率 \$m_{20}\$,就可以解出微分方程,其解 \$m_3\$ 是对应变倍组任意 \$m_2\$ 的补偿组的放大率,其解有两个满足一元二次方程:

$$m_3^2-bm_3+1=0, \tag{8}$$

两根为:

$$\begin{cases} m_{31}=\frac{b+\sqrt{b^2-4}}{2} \\ m_{32}=\frac{b-\sqrt{b^2-4}}{2} \end{cases}, \tag{9}$$

其中:

$$b=-\frac{f_2'}{f_3'}\left(\frac{1}{m_{2m}}-\frac{1}{m_{20}}+m_{2m}-m_{20}\right)+\left(\frac{1}{m_{30}}+m_{30}\right), \tag{10}$$

\$m_{20}\$、\$m_{30}\$ 是初始位置的放大率, \$m_{20}\$ 是选定的, \$m_{30}\$ 可以通过下式计算:

$$m_{30}=\frac{f_3'}{f_2'(1-m_{20})-d_{230}+f_3'}, \tag{11}$$

其中: \$d_{230}\$ 是初始位置变倍组和补偿组间隔 \$d_{23}\$ 极限最小间隔,而式(10)中的 \$m_{2m}\$ 是某一位置的过渡放大率,是假设变倍组从初始位置移动 \$q\$ 的距离后而具有的瞬时放大率, \$m_{2m}\$ 和初始放大率具有如下关系:

$$m_{2m}=\frac{1}{\frac{1}{m_{20}}+\frac{q}{f_2'}}. \tag{12}$$

\$m_{31}\$、\$m_{32}\$ 两根实际上也是当变倍组从初始位置移动 \$q\$ 的距离后补偿组具有的瞬时放大率。如果设定步长合理的 \$q\$ 系列数值,就可以得到一系列的 \$m_{2m}\$、\$m_{31}\$ 和 \$m_{32}\$,再用对应相同 \$q\$ 的 \$m_{2m}\$、\$m_{31}\$ 和 \$m_{32}\$ 计算出总的变倍比:

$$\Gamma=\frac{m_{2m}m_{3m}}{m_{20}m_{30}}. \tag{13}$$

一直到达所需要的变倍比为止。式(13)中的 \$m_{2m}\$ 和 \$m_{3m}\$ 就是上述过渡瞬时放大率, \$m_{20}\$ 和 \$m_{30}\$ 是初始放大率。如果初始位置在长焦段,变倍比是式(13)的倒数,即:

$$\Gamma=\frac{m_{20}m_{30}}{m_{2m}m_{3m}}. \tag{14}$$

找到满足变倍比放大率后,便可求得补偿组移动的距离 \$\Delta\$, \$\Delta\$ 分别和 \$m_{31}\$、\$m_{32}\$ 对应:

$$\begin{cases} \Delta_1=f_3'm_{31}-m_{30} \\ \Delta_2=f_3'm_{32}-m_{30} \end{cases}. \tag{15}$$

一般只有一个有意义,可以根据实际情况判断出合理值。

上述方法是一个经典逐次逼近的试根方法^[4],需要设定合理的初始条件,包括在变倍组 $f_2'=1$ 的归化条件下设定 f_3' 、 m_{20} 和 d_{230} 的取值,试探因子 q 的步进长度值,这些取值的正确与否,直接影响设计结果和设计效率。 f_3' 和 m_{20} 的取值将影响镜头的几何尺寸以及后期机械设计过程中凸轮曲线的线形和压力角的大小; d_{230} 的取值要考虑到变倍组和补偿组在移动过程中不能碰撞; q 的步进长度值影响设计时逐次逼近目标的速度。在上述 4 个需要设定的参数中, f_3' 和 m_{20} 的取值是关键。

一般来说,负组补偿设计原则分为物像交换原则和非物像交换原则,非物像交换原则又按初始位置变倍组放大率 m_{20} 的正负情况,分为 $m_{20} > 0$ 和 $m_{20} < 0$ 两种情况。不同倍率要求所采用的策略不同,本文目标属于低倍变焦,有很大的选择空间,完全可以在 m_3 曲线的取段上找到相对平滑、单调变化的一段工作段,而 m_3 曲线所处的位置又与 m_{20} 的取值相关。对于本文选定的正组变倍负组补偿结构方案,从镜头的工艺性考虑,尤其是考虑凸轮曲线的连续性、平滑性、单调性,需要补偿组和变倍组的位置移动量适中,位置对应变化轨迹曲线最好为直线。按物像交换原则,需要 f_2' 的放大率处于 $m_2 = -1$ 的附近,变倍组的共轭距最小为 $4|f_2'|$,此时光学总长最小,结构最紧凑,但是此时补偿组的间隔变化轨迹曲线过于“弯曲”,为了使 ϕ_2' 和 ϕ_3' 位置变化轨迹曲线为直线或接近直线,从而保证机械凸轮的凸轮曲线都可设计为螺旋线,且能回避 m_3 进入无解区间,应采用稍微偏离物像交换原则,即 $m_{20} < -\sqrt{F}$,本文设计变倍比目标为 1.33,则 m_{20} 取 -1.153 以下,这种条件下,变倍组将从短焦变化到长焦,相对应其放大率 m_2 将从一个负数开始变化到绝对值更大的一个负数。 f_3' 的大小一般决定二运动组移动距离的大小,根据负组补偿的一般规律, $|f_3'| = 1.8|f_2'|$ 时,变倍组移动距离 q 和补偿组的移动距离最接近,但考虑到运动轨迹不能过度“弯曲”,只能选择 $|f_3'| < 1.8|f_2'|$,而此时,补偿组从短焦处移动到长焦处其移动距离大于变倍组的移动距离 q ,这样 f_3' 的取值范围就基本可以确定在 $-1.5 \sim -1.7$ 。根据以上分析可初步确定镜头的高斯解过程的初始条件,在 $f_2'=1$ 的归化条件下,给定 m_{20} 、 f_3' 、 d_{230} 和 q 的步进长度,依次根据式(11)、

(12)、(10)、(9)、(15)、(13)得出逐次逼近的变焦过渡数据,直到达到所需要的变倍比要求。此处只取 m_{32} 的值及其对应的 Δ_2 和 Γ_2 的值。重点考虑 q 和 Δ_2 的对应关系,当变倍组间隔 q 按线性变化时,补偿组的间隔 Δ_2 也应该接近线性变化,否则,要对初始数据进行调整,调整策略为保持 m_{20} 不变调整 f_3' ,可得到一系列如图 6 所示的位移曲线,再保持 f_3' 不变调整 m_{20} 又可得到一系列曲线,然后对比优选。对得到的 m_{32} 系列曲线进行选择的依据有两点:一是要使长焦时的 $\Delta_2 + q$ 最小,二是要找线形最接近直线的曲线。图 7 中所示曲线是选出的 $\Delta_2 + q$ 最小的两条,确定线性的一个方法是“面积最小法”,将曲线的两端相连形成一条直线,该直线和曲线本身构成一个近似圆缺的区域,求出该区域面积,面积最小(无限接近

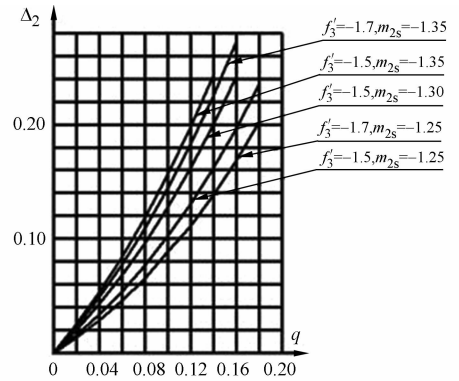


图 6 不同初始条件下补偿组间隔变化曲线

Fig. 6 Variation curves of the intervals among compensation groups under different initial conditions

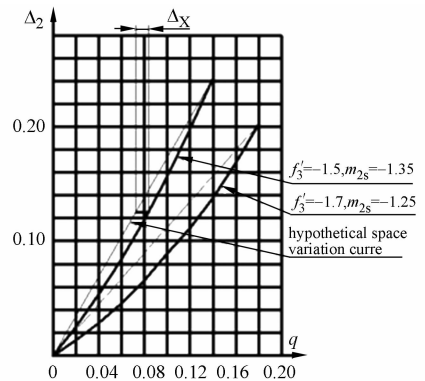


图 7 $\Delta_2 + q$ 最小两条补偿组间隔变化曲线

Fig. 7 Variation curves of the interval between two compensation groups at the minimum of $\Delta_2 + q$

0但不等于0)者即为最优结果。

在工程实践中,为了得到精确结果,一般选择 f_3' 按0.01、 m_{20} 按0.001的步长变化,完全可以得到非常精确的结果。图7中的“ $f_3' = -1.5, m_{20} = -1.35$ ”曲线是一个局部较优结果,设 $d_{230} = 2$ mm, q 的步进长度为0.02,计算得到变焦核的过渡数据如表4所示。

表4 优化后的变焦参量过渡数据

Tab.4 Transition data of zoom parameters after optimization

Serial Number	q	m_{2m}	b	m_{32}	Δ_2	Γ_2
1	0.00	1.350	2.361	1.807	0000	1.000
2	0.02	1.387	2.372	1.824	0251	1.037
3	0.04	1.427	2.385	1.843	0530	1.078
4	0.06	1.469	2.400	1.863	0839	1.122
5	0.08	1.513	2.416	1.886	1181	1.170
6	0.10	1.561	2.434	1.911	1558	1.223
7	0.12	1.611	2.455	1.939	1973	1.280
8	0.14	1.665	2.477	1.969	2429	1.343

5 构造镜头光学结构

要构造真实光学结构模型,需要明确前、后固定组的结构形式及焦距。如果参照常规镜头的变焦核情况进行分析,对于常规镜头确定前固定组焦距 f_1' 、后固定组焦距 f_4' 的关系式为^[4]:

$$f_1' = d_{12\min} + \frac{f_2'(1-m_{20})}{m_{20}}, \quad (16)$$

$$f_4' = \frac{2f'h_4d_{34\min}}{Dd_{34\min} - 2f'h_3 + 2h_4f'}, \quad (17)$$

式中: f' 、 $d_{12\min}$ 、 $d_{34\min}$ 、 h_3 、 h_4 、 D 分别为镜头当前焦距、前固定组和变倍组之间的长焦处的最小间隔、补偿组和后固定组之间在长焦处的最小间隔、第一辅助光线在补偿组上的光线高度、第一辅助光线在后固定组上的光线高度、入瞳直径。从式(16)、(17)可以看出, f_1' 和 f_4' 的取值和组与组之间的间隔相关。 f_1' 和 f_4' 的取值并不影响变倍比,只影响总焦距 f' 的分布范围。值得注意的是,在所有成熟的变焦高斯分析理论中,都假设了一个隐含条件即光路系统是理想的,是近轴的。而对于鱼镜头来说,镜头前组具有很大负光焦度并残留大像差,能产生剧烈的角放大率,已经超出了“理想光学系统”的范畴,所以,在处理鱼眼镜头

变焦问题时不能完全采用惯用方法,但是,现有的处理和分析变焦问题的相关理论仍然具有指导意义。

对于鱼镜头来说,前固定组是使各个视场的光线的入射角度得到“压缩”并规范光线在后续各个光学工作面上的高度,对于有实用价值的鱼镜头结构来说,如果套用“像”的概念,前固定组对无穷远成像,也是包含有大像差的模糊“像”,如图3中的 $A1$ 和 $A(\omega)$,前固定组对无穷远成像,各个视场像的位置几乎都不同,像的位置是视场的函数,各个视场像点相对于变倍组的位置就不同,各个视场的 m_2 也不同,经 f_3' 放大后,情况就越发复杂,因此很难建立起 f_1' 和 f_2' 、 f_3' 的精确关系。但式(16)和(17)对于轴上或者小视场角情况的描述是准确的,可以用来粗略确定鱼镜头前固定组和后固定组焦距,但实践证明很多时候偏差较大,尤其是对于前、后固定组结构较简单的情况。况且,即使明确了前、后固定组的焦距,由于像差匹配和大视场工作的要求,也不能轻易构造出合理的光学结构模型。鉴于此,此阶段索性暂且不考虑 f_1' 和 f_4' 的取值(后面将给出结果)。试想,如果有一个像质良好、结构简单的固定焦距的鱼镜头光学结构(可称为“母结构”),该结构的前组和后组以光阑为界相互分离且有足够容纳变倍组和补偿组的空间,那么将上面讨论的变焦核植入已有的“母结构”后就形成了变焦鱼镜头结构,这样就暂时回避了 f_1' 和 f_4' 的取值问题,转而统一考虑,这样,就把变焦鱼镜头确定前、后固定组焦距的问题转化为了设计固定焦距鱼镜头的问题。作者有一鱼眼投影镜头结构发明专利,专利号为ZL201010173497.9,为定焦距结构,光学结构如图8所示。

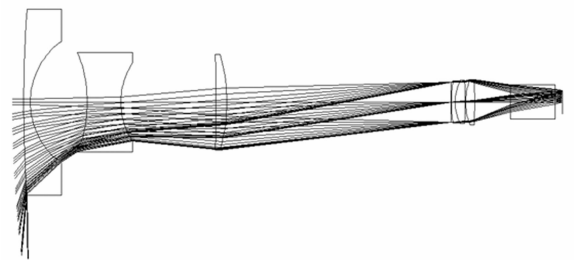


图8 作为镜头母体的定焦距鱼镜头光线追迹图
Fig.8 Ray tracing drawing of fixed-focus fish-eye lens as the matrix lens

将该结构缩放到本文目标所需要的最短焦距后,可以植入变焦核,植入的过程是把变焦核的规范化数值转换成实际数值的过程,方法为:分别计算出母结构前组和母结构本身对于无穷远物体所成轴上像点位置,插入变焦核后,给定短焦位置的最小 d_{34} (留出合理余量),把之前得到的两个像点作为变焦核加后固定组(母体后组)组分的共轭像点计算,可建立起关于 f_2' 的方程并计算出 f_2' 的值,于是可得到变焦鱼镜头的基础光学结构基本参数。考虑到所植入的变焦核应不改变母体结构的像差匹配关系,变焦核结构自身应该得到必要的像差处理,着重考察变焦核的初级像差,包括初级球差 S_I 、初级场曲 S_{II} 、位置色差 C_I 、倍率色差 C_{II} ,照顾到长、中、短焦距情况。在简单化前提下,得到变倍组由单片双凸透镜组成,补偿组由正弯月型和负弯月型透镜胶合而成,至此,就完成了光学结构模型设计过程,可以进入像差优化阶段,在优化过程中,为了适应不同厚度的引擎尺寸,并消除掉引擎棱镜厚度变化造成的像差,将图 8 中的第二透镜——双凹透镜分裂为 2 片透镜,并拉开一定的间隔,得到最终需要的结构,如图 9 所示。

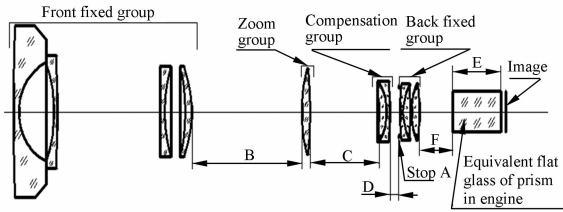


图 9 变焦鱼镜头光学结构图

Fig. 9 Final optical configuration drawing of zoom fish-eye lens

6 像面稳定性和补偿组运动轨迹曲线的线性改造

对于二运动组元的机械补偿式结构,补偿组的间隔变化轨迹一般为曲线,但通过对变焦核初始条件的合理配置,可以很大程度减小补偿组轨迹曲线的“弯曲程度”。如果把补偿组的间隔变化轨迹看作如图 7 所示的直线,将使中间焦距位置

d_{23} 和 d_{34} 和真实值存在 Δx 的误差。值得注意的是,前固定组的轴向球差(套用光阑球差概念,和视场有关)对于像面稳定、补偿组间隔变化轨迹的线性影响非常大,可以作为一个参量来校正 Δx 的影响,应努力调整而不是彻底消除前固定组各个视场的轴向球差,使得轴向球差的量 $\Delta L_1'(\omega)$ 造成的像面位移和 Δx 造成的像面位移相互弥补。参考图 3,当前固定组对于无穷远成像的大视场像点位置(也和孔径光阑位置及第一光线高度有关系)和轴上像点位置偏差 $\Delta L_1'(\omega)$ 较大时,变焦核的放大率和视场角 ω 有关系,应该准确的表示为 $m_2(\omega)$ 和 $m_3(\omega)$, $m_2(\omega)$ 随着 $\Delta L_1'(\omega)$ 的变化而变化,不仅数值发生变化,甚至会影响 $m_2(\omega)$ 符号极性,进而造成 $m_3(\omega)$ 的情况复杂甚至无解; $\Delta L_1'(\omega)$ 经 $m_2(\omega)$ 和 $m_3(\omega)$ 的放大会造成变焦核后像面位置的移动 $\Delta L_3'(\omega)$:

$$\Delta L_3'(\omega) = \frac{(f_2'f_3')^2 \Delta L_1'(\omega)}{(f_2'f_3' + f_2'L_2 + f_3'L_2 - f_2'd_{23} - d_{23}L_2)^2}, \quad (18)$$

其中: $\Delta L_1'(\omega)$ 、 L_2 分别是前固定组 f_1' 的某视场轴向球差、变倍组对 f_1' 轴上像点的物距。 $\Delta L_1'(\omega)$ 越小则 $\Delta L_3'(\omega)$ 越小,同时,根据本文具体情况 L_2 要大于 f_2' ($|m_2| < 1$),所以, d_{23} 减小也有利于减小 $\Delta L_3'(\omega)$,而 $d_{23} = d_{12} + d_{34} + d_{230}$,而 Δx 是 d_{34} 的变化量,即 $\Delta L_1'(\omega)$ 通过一定的数学关系和 Δx 一起影响到大视场像面相对于轴上像面的位移量,从而用 $\Delta L_1'(\omega)$ 可以在某个视场完全抵消掉 Δx 的影响。

对于轴上情况来说, Δx 引起的像面位移可表示为:

$$\Delta L_3'(\omega) = \frac{(f_3')^2 [(f_2')^2 + L_2] \Delta x}{(f_2'f_3' + f_2'L_2 + f_3'L_2 - f_2'd_{23} - d_{23}L_2)^2}, \quad (19)$$

再考虑到移动量本身 Δx ,变焦核后的像面位移为:

$$\Delta_b = \Delta L_3' + \Delta x. \quad (20)$$

根据式(19)和(20)可以得出, Δx 小则 $\Delta L_3'$ 小,如果 $\Delta L_3'$ 和 Δx 移动方向相反,就可以相互补偿,从而使 Δ_b 进一步减小。通过式(18)、(19)、(20)可以得出,由于 $\Delta L_1'(\omega)$ 的存在,在补偿组没有移动 Δx 的情况下,镜头大视场的像面位移

$\Delta L_3'(\omega)$ (相对轴上像面)就已经存在了,而当补偿组需要移动 Δx 时,轴上像面发生了 Δ_b 的位移,如果 $\Delta L_3'(\omega)$ 和 Δ_b 能互相弥补,则使像面在某个视场保持了稳定,而一般很难做到各个视场 $\Delta L_3'(\omega) = \Delta_b$ 且符号相反,只需尽量使二者在中间某个视场,例如 0.7 视场,代数和为 0,而使其他视场残留少量的像面位移量,留待后固定组完成像面稳定任务,特别注意的是 $\Delta L_3'(\omega)$ 和 Δ_b 是变焦核后像面的位移量,而后面要提到的位移量 Δ_b 是后固定组后面的位移量。

对后固定组来说,补偿组位置的微量变化 Δx 引起的结果像面位置变化为:

$$\Delta_b = (1 - m_3^2)m_4^2\Delta x, \quad (21)$$

其中: m_4 是后固定组的放大率。从式(21)可以看出, m_4 以平方关系影响 Δ_b , 如果有 $|m_4| < 1$, 将使 Δ_b 大大减小, 当 $|m_4| \rightarrow 0$ 时, Δx 的变化将不能引起像面位移, 理解为当后固定组的轴上像面位置在其焦点附近时, 也即入射到后固定组上光线孔径角接近 0 时, $|m_4| \rightarrow 0$, 那么 Δx 引起的 $\Delta_b \rightarrow 0$ 。这样就使得补偿组的微量移动 Δx 对后固定组的成像位置影响大大降低, 同样也使得变焦核后的像面位移 $\Delta L_3'(\omega) - \Delta_b$ 因后固定组的放大而大大减小。为改造补偿组间隔变化轨迹曲线找到了理论依据。

上述规律不仅对补偿组轨迹的线性改造有帮助, 也为后固定组焦距 f_4' 的确定提供了参考, 实际上, f_4' 应该非常接近并稍微大于整个镜头的光学后截距 L' , 即 $f_4' \approx L'$, 而这样的规律和公式(17)给出的 f_4' 值差别较大。 $|m_4| \rightarrow 0$ 为变焦镜头的设计带来了很大的“弹性”, 在很多大反远比的镜头结构中都潜在着这样的“弹性”。

基于上述像面稳定特性的考虑, 通过合理的设计, 有充分理由能将补偿组的位置补偿轨迹改造成直线, 从而把决定补偿组位置的凸轮曲线改进为螺旋线。

7 设计结果

根据表 1 和 2 给出的数据以及图 9 给出的光学系统结构, 采用等立体角形式的焦距和像高对

应关系, 确定满足目标像高的焦距为 $f' = 4.7 \sim 6.3$ mm, 编制多重结构数据文件, 对多重结构数据文件插值处理, 设置为二十重结构, d_{12} 和 d_{34} 按线性间隔插值, 并通过母结构的共轭像计算, 把规化的变焦核数据转化为实际数据, 得到 $f_2' \approx 100$ mm, 则 $f_3' = -150$ mm, 取 $d_{23} = 2$ mm。则可以进行系统计算和像差优化, 在优化过程中控制半视场角为 80° , 相对孔径控制在 $D/f' = 1/2$, R、G、B 三色波长选取 630、546 和 450 nm, 所有视场无渐晕, 优化后得到结果见表 5 和表 6, 所用材料牌号都为国产光学材料牌号, 所有工作折射面都为标准球面。

表 5 光学系统结构数据

Tab. 5 Data of optical system structure

Serial number	Radius /mm	Thickness /mm	Glass
OBJ	∞	∞	Air
1	731.1	3	H-ZK11
2	23.77	18.78	Air
3	-59.98	1.81	H-LaK50
4	-420.7	54.66	Air
5	-1 052	2.42	H-ZK1
6	61.52	10.98	Air
7	-70.31	3.5	H-ZF52
8	-48.08	B	Air
9	74.5	4.5	H-QK3
10	-144.69	C	Air
11	-72.95	4.0	H-ZF11
12	-23.77	1.8	H-LAK53
13	-143.22	D	Air
STO	∞	0.49	Air
15	92.26	1.77	H-ZF52
16	23.77	4.0	H-BAK4
17	-151.577	0.59	Air
18	32.73	4.0	H-ZK9
19	-96.609	F	Air
20	∞	E	H-K9
21	∞	2.90	Air
IMA	∞		Air

表 6 中的 B、C、D 即为前述的 d_{21} 、 d_{23} 、 d_{34} , B、C、D 的变化呈现出很好的线性关系, 可认定变焦组间隔变化轨迹曲线和与之对应的补偿组间隔变

表 6 各个焦距段所对应的间隔尺寸

Tab. 6 Space value of every focal length section (mm)

f'	B	C	D	F	E
6.301	58.07	37.41	4.22	20.55	26.00
6.261	58.47	36.59	4.46	20.875	25.50
6.184	59.24	35.02	5.44	21.20	25.00
6.112	59.75	33.41	6.54	21.525	24.50
6.041	60.25	31.80	7.65	21.85	24.00
5.934	61.38	29.57	8.75	22.175	23.50
5.830	62.50	27.35	9.85	22.50	23.00
5.755	63.10	25.62	10.98	22.825	22.50
5.683	63.68	23.91	12.11	23.15	22.00
5.576	64.99	21.62	13.09	23.475	21.50
5.472	66.28	19.34	14.08	23.80	21.00
5.391	67.06	17.40	15.24	24.125	20.50
5.312	67.81	15.48	16.41	24.45	20.00
5.213	69.16	13.26	17.28	24.775	19.50
5.116	70.50	11.04	18.16	25.10	19.00
5.028	71.53	8.88	19.29	25.425	18.50
4.942	72.54	6.73	20.43	25.75	18.00
4.850	73.90	4.55	21.25	26.075	17.50
4.761	75.24	2.39	22.07	26.40	17.00
4.728	75.66	1.53	22.51	26.725	16.50

化轨迹曲线为直线,反映到凸轮筒上,通过适当设置工作中径 Φ_d 能将凸轮曲线以标准的螺旋线布置在凸轮筒的不同直径区段上,最大程度提高了加工生产、装调和检测的工艺性,根据上述数据,变倍组的凸轮曲线旋转一周的导程可选择为 100 mm,接触工作直径为 50 mm,补偿组的凸轮曲线旋转一周的导程为 104 mm,接触工作直径为 41 mm。表 6 中的 E 是针对不同焦距(像高)人为给出的最接近的引擎棱镜模拟厚度, F 是为保证像面稳定和满足后工作距离需要而计算得到的补偿量, F 的变化量和 E 的变化量对应关系为: $\Delta F = (1/n-1)\Delta E$ 。各个焦距段最佳像面位置由表 5 所示的结构数据中的第 19、20、21 三个间隔厚度之和,即“ $F+E+2.90$ ”体现,而 $F+E$ 在同种介质(空气或玻璃)中的等效厚度为恒量,则不同焦距段像面位移量由最佳聚焦后的第 21 个厚度值“ $T_{21}=2.90\text{mm}$ ”的变化量决定,表 7 给出了分别

按照弥散斑质心规则和波前差规则聚焦后的像面位置及在不同焦距段计算得到的像面位移量,和原目标最大偏差为 $+0.037 \sim -0.019$ mm,则对称位移量为 ± 0.028 mm。

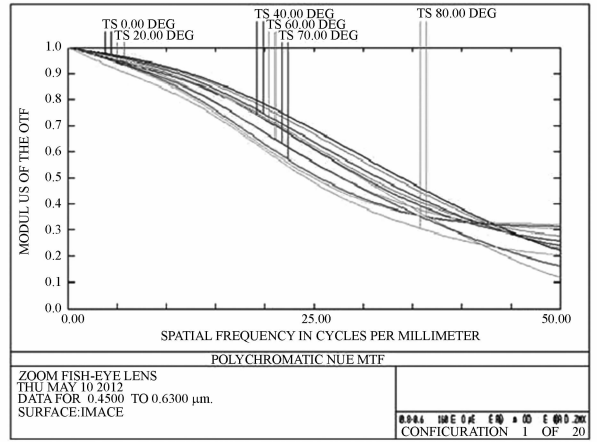
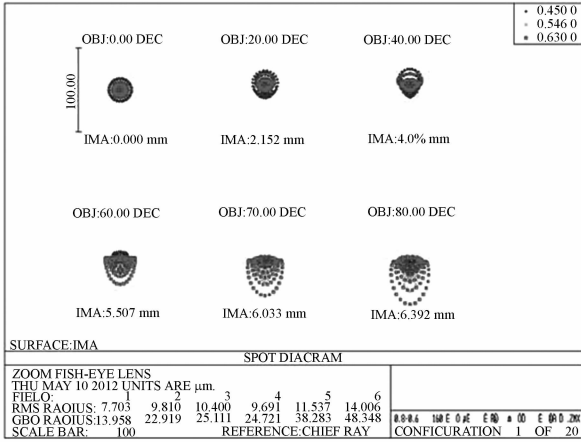
表 7 各个焦距段像面位移量

Tab. 7 Displacement of image plane of each focal length (mm)

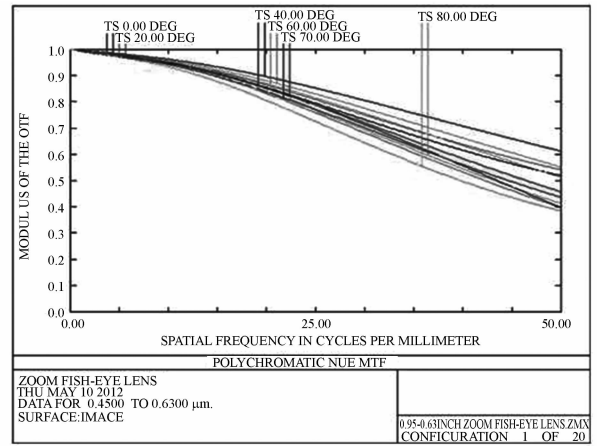
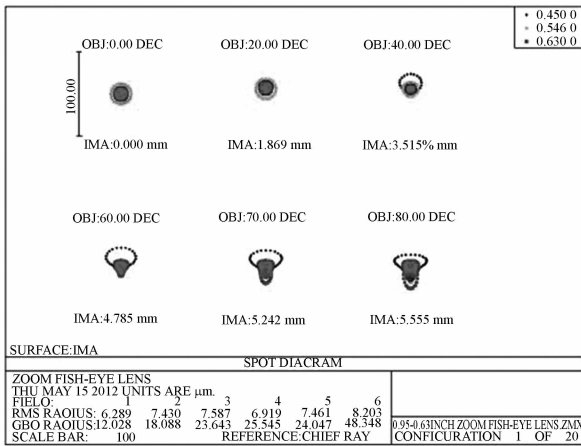
f'	T_{21}	T_{21}	T_{21}	ΔT_{21} Deviation
	Centroid rules	Wavefront rules	Average value	
6.301	2.948	2.925	2.937	0.037
6.261	2.938	2.917	2.928	0.028
6.184	2.922	2.902	2.912	0.012
6.112	2.931	2.913	2.922	0.022
6.041	2.941	2.924	2.933	0.033
5.934	2.921	2.907	2.914	0.014
5.830	2.905	2.893	2.899	0.001
5.755	2.914	2.904	2.909	0.009
5.683	2.925	2.917	2.921	0.021
5.576	2.904	2.897	2.901	0.001
5.472	2.887	2.883	2.885	-0.015
5.391	2.896	2.893	2.895	-0.005
5.312	2.906	2.905	2.906	0.006
5.213	2.891	2.892	2.892	-0.008
5.116	2.879	2.882	2.881	-0.019
5.028	2.885	2.890	2.888	-0.012
4.942	2.893	2.900	2.897	-0.003
4.850	2.886	2.894	2.890	-0.010
4.761	2.881	2.892	2.887	-0.013
4.728	2.885	2.897	2.891	-0.009

图 10 给出了优化后镜头在最长焦、中焦、和最短焦距处的点列图和 MTF 曲线,可描述镜头的成像质量,可以确认设计结果的像质完全满足指标要求。

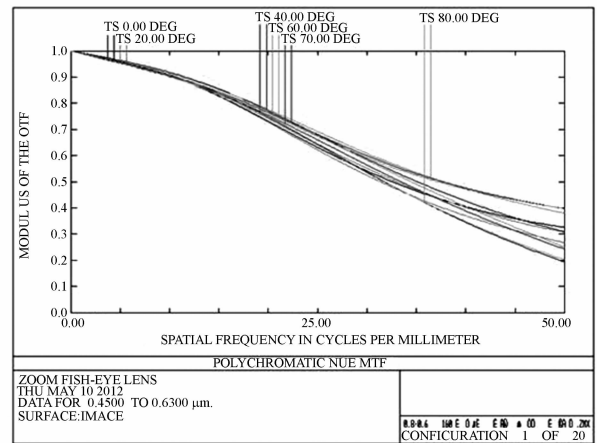
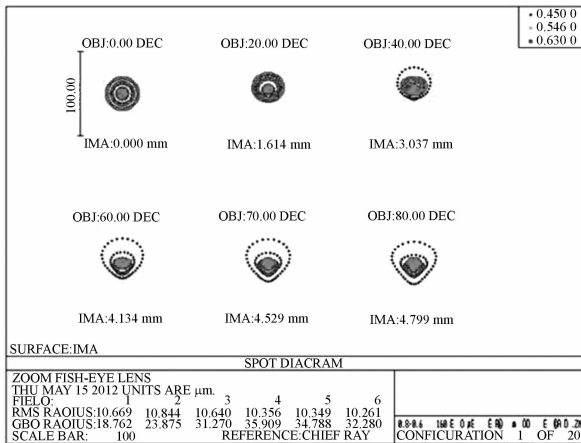
在设计过程中所细分的 20 个焦距段,光学相对畸变曲线几乎完全一致,以其中一条为例和目标曲线进行对比,如图 11 所示,所有视场畸变量偏差绝对值小于 5%。图 12 是根据上述设计实际生产出的镜头照片。



(a) $f_1 = 6.30$ mm



(b) $f_{10} = 5.47$ mm



(c) $f_{20} = 4.72$ mm

图 10 三典型焦距处的点列图和 MTF 曲线

Fig. 10 Spot diagrams and MTF curves at three typical focal length positions

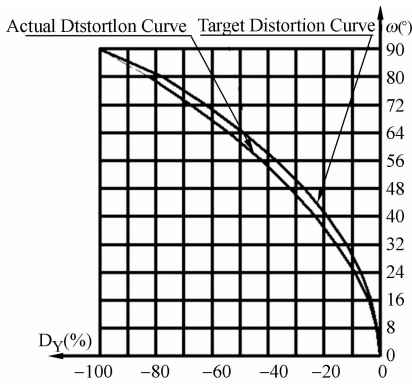


图 11 实际畸变曲线和目标畸变曲线的对比

Fig. 11 Contrast between actual distortion curve and target distortion curve



图 12 根据本设计生产出的镜头

Fig. 12 Lens by proposed design

8 结 论

给出了设计通用于常见主流数字投影机变焦

参考文献:

- [1] 王永仲. 鱼眼镜头光学[M]. 北京: 科学出版社, 2006, 26-61.
WANG Y ZH. *Fish-eye lens optics* [M]. Beijing: Science Press, 2006, 26-61. (in Chinese)
- [2] 帕霍莫夫著, 白淑惠译. 变焦距系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1980, 46-51.
BAI Shu-hui. *Zoom sestem* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1980, 46-51. (in Chinese)
- [3] 王之江, 陈杏蒲, 陆汉民, 等. 光学技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987, 1089-1091.
WANG ZH J, CHEN X P, LU H M, *et al.*. *Optical technical manual* [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1987, 1089-1091. (in Chinese)
- [4] 陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988, 8-18, 122-124.
TAO CH K. *Zoom focus optics system design* [M]. Beijing: National Defence Industry Press,

鱼眼镜头的方法和根据产品化要求而实际设计出的镜头结构数据。从经典变焦理论入手, 分析了小变倍比变焦鱼镜头基本结构的构造过程, 在保持像面稳定前提下, 提出了机械补偿二运动组元负组补偿结构中把补偿组间隔变化轨迹从曲线改造成直线的可行性和基本策略, 包括设置和调整变焦核初始数据、合理利用前固定组球差、确定前、后固定组焦距等三方面内容。理论分析和具体实践证明: 针对小变倍比情况, 在变焦过程中, 当变倍组移动距离总是小于补偿组移动距离时, 通过合理的设计总能把补偿组的间隔变化轨迹曲线改造成直线, 从而在机械设计过程中把调整变倍组和补偿组位置的两条凸轮曲线都设计成螺旋线。可以预见, 在投影、放映类型应用中, 具有大反远比、小变倍比的光学系统也应该具有把补偿组运动轨迹调整成直线的潜力。对于变倍组和补偿组空间间隔同时线性变化的变焦鱼镜头来说, 后固定组焦距的取值可以更简单化, 其值应该非常接近并稍大于镜头的光学后截距。实际设计结果表明, 该通用投影鱼镜头用最简单化的光学和机械结构形式, 实现了通用目的, 镜头分辨能力完全满足工程投影机投影整球幕使用, 在所有焦距段, 像面位移控制在 ± 0.03 mm 以内, 畸变曲线较好地符合等立体角投影类型的畸变曲线要求。

- 1988, 8-18, 122-124. (in Chinese)
- [5] 王琦, 王光宇, 程雪岷, 等. 变焦距镜头高斯光学设计的新方法[J]. 光学学报, 2002, 22(8): 983-988.
WANG Q, WANG G Y, CHENG X M, *et al.*. Gauss optics of zoom lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(8): 983-988. (in Chinese)
- [6] 胡际先. 长焦距大口径连续变焦光学系统的设计[J]. 应用光学, 2007, 28(5): 569-572.
HU J X. Design of long focal length large-aperture optical zoom system [J]. *Appl. Opt.*, 2007, 28(5): 569-572. (in Chinese)
- [7] 陆强, 季轶群, 沈为民. 大相对孔径连续变焦前置物镜的光学设计[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2674-2679.
LU Q, JI Y Q, SHEN W M. Design of a fore continual zoom system with high speed [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2674-2679. (in Chinese)
- [8] 江伦, 黄玮. 高变倍比变焦距系统设计[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1222006-1-2.

JIANG L, HUANG W. Lens design for optical system of high zoom ratio [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12):1222006-1-2. (in Chinese)

[9] 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):0422001-1.

ZHOU H, LIU Y, SUN Q. Mid-infrared zoom optical system with ratio of 25 [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4):0422001-1. (in Chinese)

[10] 崔占刚, 罗春华, 汤金丹. 三组元变焦目镜的光学设计及其凸轮曲线的绘制[J]. *光学技术*, 2011, 37

(6):695-698.

CUI ZH G, LUO CH H, TANG J D. Design of zoom eyepiece optical system and drawing of its cam curve [J]. *Optical Technique*, 2011, 37(6):695-698. (in Chinese)

[11] 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):2064-2070.

CAI W, ZHANG X, FENG X H, *et al.*. Compensating modes of zoom sestem [J]. *Opt. precision Eng.*, 2011, 19(9):2064-2070. (in Chinese)

作者简介:



陈琛(1968—),男,河北乐亭人,博士研究生,教授级高工,1991年于长春光机学院获学士学位,2006年于燕山大学获硕士学位,主要从事影像领域光学系统设计及国家/行业产品标准制定和修订工作。E-mail:chenchen6@yahoo.cn



胡春海(1966—),男,黑龙江大庆人,博士,教授,博士生导师,1991年、2004年于燕山大学分别获得硕士、博士学位,主要从事机器视觉及信息融合方面的研究。E-mail:fred-hu@ysu.edu.cn

(本栏目编辑:曹金)

(版权所有 未经许可 不得转载)