

二向异性鱼眼镜头理论分析与设计实现

陈 琛^{1,2} 胡春海¹ 李维善² 刘宵婵²

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数字影像装备与数字视频技术秦皇岛重点实验室, 河北 秦皇岛 066000

摘要 为了提高鱼眼镜头在单机位球幕放映系统中的像素利用率,提出了二向异性鱼眼镜头的设计思想。通过理论分析柱面透镜的特性,给出了柱像散对各向度焦距的函数关系,也给出了弧矢和子午二向度共面成像的焦距配置关系;对二向异性鱼眼镜头结构进行了分析与设计,通过在镜头结构中引入柱面透镜,使之具有各向度差异化的渐变式焦距,该镜头在相同工作视场条件下,实现了弧矢和子午两向度的像高差异,形成了各向异性的映射规律。所设计的镜头光学结构中含有4个弧矢柱面和一个子午柱面,弧矢和子午向度的最大像高比为1.52:1,且具有较高的分辨能力。利用二向异性数字鱼眼镜头构建单机位球幕电影放映系统与使用传统鱼眼镜头相比至少可提高像素利用率52%。

关键词 光学设计; 鱼眼镜头; 二向异性; 柱面透镜

中图分类号 TH703; TH741.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0122001

Theoretical Analysis and Design of Bi-Directional Anisotropic Fisheye Lens

Chen Chen^{1,2} Hu Chunhai¹ Li Weishan² Liu Xiaochan²

¹Hebei Province Key Laboratory of Measuring and Testing Technologies & Instruments, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

²Qinhuangdao Key Laboratory of Digital Image Equipment and Digital Video Technology, Qinhuangdao Audio-Visual Machinery Research Institute, Qinhuangdao, Hebei 066000, China

Abstract In order to improve the pixel utilization rate of single projector dome movie system constructed by fisheye lens, the design concept of bi-directional anisotropic digital fisheye projection lens is proposed. By analyzing the characteristics of cylindrical lens, the function relationship of astigmatism and the focal length of cylindrical lens is given, and the focal length distribution relationship in sagittal direction and meridian direction is given. The structure of bi-directional digital fisheye projection lens is analyzed and designed, and gradual changing focal lengths along dimensions are produced by introducing cylindrical lens in lens structure. The lens have different image heights in sagittal direction and meridian direction at the same field of view, finally, the anisotropic mapping law is formed. The optical system of lens contains four sagittal cylindrical surfaces and one meridian cylindrical surface, the ratio of the sagittal image height to the meridian image height is 1.52:1, with high resolution. Compared with the traditional fisheye lens, the pixel utilization rate of the single projector digital dome screen system constructed by the bi-directional anisotropic digital fisheye projection lens is increased by 52%.

Key words optical design; fisheye lens; bi-directional anisotropic; cylindrical lens

OCIS codes 220.3620; 080.3620; 080.3095; 080.6775

收稿日期: 2015-7-17; 收到修改稿日期: 2015-8-24

基金项目: 科技部科研院所技术开发研究专项基金(2011EG119199)、科技部中小企业科技创新基金(10C26211303678)

作者简介: 陈 琛(1968—),男,博士研究生,教授级高工,主要从事影像系统光学设计方面的研究。

E-mail: chenchen_5168@sina.com

导师简介: 胡春海(1966—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事机器视觉和数据融合等方面的研究。

E-mail: fred-hu@ysu.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

单机位(单通道)的数字球幕放映系统构成形式因其构成简单、成本低廉及后期维护的便利性一直占据重要地位^[1]。目前,国内外单机位球幕放映系统均由传统鱼眼镜头结合一台高亮度数字放映机构成,球幕的尺寸也趋于大型化,最大直径已达到 30 m,在数字放映机像素数和光输出不能无限增加的情况下,幕上画面的清晰度和亮度问题已成为制约球幕大型化的瓶颈,因此,出现了多机位拼接方案,而多机位方案存在成本高昂、系统稳定性差等诸多缺点。故此,定位单机位方案,重点考虑镜头“物方”区域采集方式,对传统各向同性的鱼眼镜头进行改进,一定程度拓展单机位球幕系统的适应性。

由于数字放映机影像芯片上“像素”的矩形分布和球形幕在形状上存在较大差异,使用包括鱼眼镜头在内的任何传统意义的放映镜头,都无法在球幕和数字放映机的影像芯片之间建立完整的“物-像”满射^[2],从而使得系统的像素利用率低下,如何有效提高鱼眼镜头的像素利用率,并使大尺寸球幕上画面获得足够高的亮度和清晰度,一直是该领域面临的一大技术难题。目前,对该技术问题更有效的研究与探讨在国内外均未见公开报道。随着计算机图形图像学的技术进步,在数字片源制作领域,对图形的非线性变形编辑技术越来越成熟,从而为使用复杂映射规律来提高系统像素利用率奠定了基础。本文首先针对二向度性能差异化的鱼眼放映镜头提出了设计理念,之后针对柱像散处理及焦距配置问题进行了理论探讨,最后给出了设计实例,通过在光学结构中合理引入柱面透镜群,在相同工作视场条件制造不同向度的像高差异,从而营造全新的光学映射关系,提高了单机位球幕放映系统中鱼眼镜头的像素利用率。

2 二向异性鱼眼镜头的设计理念

传统鱼眼镜头的设计采用“非相似”成像原理^[3],平面与球面互为共轭面,镜头的光学性能和结构的轴向旋转对称性,无法在球幕和数字放映机的影像芯片(矩形)之间建立完整的“物-像”满射,以长(L)宽(W)比 1.896:1 的芯片为例,如图 1 所示,能投射到球幕上的像域内的像素(阴影区)仅占影像芯片像素的 41.4%,像素利用率很低。

在胶片电影时代,曾出现过“变形放映镜头”,通常在电影放映机的标准电影放映镜头前,加装一组无焦柱面望远镜式附加镜来对单向度视场进行放大,继而在不改变原镜头焦距的情况下造成镜头像高在子午和弧矢向度拉伸和压缩。如果对鱼眼镜头延续使用早期变形镜的设计理念,由于望远镜式附加镜在大视场应用环境中会造成镜头几何尺寸过大,且单向放大倍率有限,故此,对鱼眼镜头加装附加镜的方案不具有实际应用价值。对于相同的视场角度值来说,倘若鱼眼镜头可以在子午和弧矢向度具有不同的焦距和像高,就可以营造一种映射关系,而最大限度适应数字放映机芯片的尺寸,从而提高系统像素利用率,如图 2 所示,鱼眼镜头的像高在弧矢向度上被拉伸,使能映射到球幕上的芯片像域范围(阴影区)扩大。

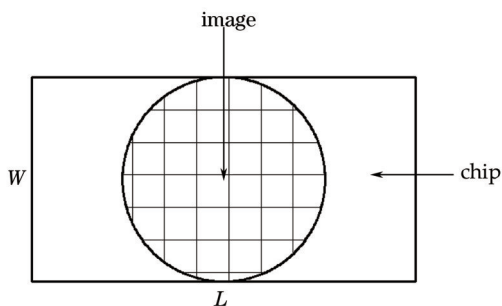


图 1 鱼眼镜头在数字放映机芯片上的像域

Fig.1 Fisheye lens image area on the chip of digital projector

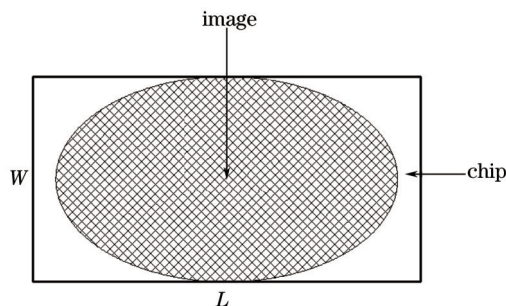


图 2 被拉伸的鱼眼镜头像域

Fig.2 Stretched image area of fisheye lens

传统鱼眼镜头的光学结构都是关于光轴旋转对称的,称其光学特性为“各向同性”,即在工作状态下,当镜头沿光轴旋转时,光学特性不发生改变。而讨论的鱼眼镜头结构,其各个向度具有不同的光学特性,暂且称其光学特性为“二向异性”^[4]。二向异性鱼眼镜头在子午与弧矢向度具有不相等的极值焦距值,而其他任意向度焦距值均在两极值焦距区间内,即

$$f'_i < f'_p < f'_s, \tag{1}$$

式中 f'_p 、 f'_i 、 f'_s 分别为二向异性鱼眼镜头在任意向度、子午向度、弧矢向度的焦距值,镜头各个任意向度均

存在确定焦距值,该焦距值在弧矢和子午焦距值范围内连续。二向异性鱼眼镜头在子午向度、弧矢向度的成像公式^[5]分别满足

$$y_{in} = -k_i f'_i (\omega_{yn} \pi / 360), \quad 0.5 < k_i < 1, \quad (2)$$

$$y_{sn} = -k_s f'_s (\omega_{xn} \pi / 360), \quad 0.5 < k_s < 1, \quad (3)$$

式中 y_{in} 为镜头子午向度在任意工作视场 $(0, \omega_{yn}/2)$ 处所对应的像高, f'_i 为镜头在子午向度有效焦距; y_{sn} 为镜头弧矢向度在任意工作视场 $(\omega_{xn}/2, 0)$ 处所对应的像高, f'_s 为镜头在弧矢向度有效焦距; k_i 和 k_s 分别是子午向度和弧矢向度的畸变调节系数。镜头在子午向度的最大像高 y_i 由所采用的数字放映机的芯片宽度尺寸 W 决定,理想值 $y_i = W/2$; 在弧矢向度的最大像高 y_s 由采用的数字放映机的芯片长度尺寸 L 决定,最大值为 $y_s = L/2$ 。故,保证二向异性鱼眼镜头增大像素利用率的有效方式是提高弧矢向度对子午向度的像高比,即,尽量增大弧矢向度全视场像高 y_s ,使 y_s 的数值更接近 $L/2$,并始终保持子午向度全视场像高 y_i 等于 $W/2$ 。镜头弧矢向度的最大像高范围是: $3W/4 \leq y_s \leq L/2$,即, $y_s \geq 1.5y_i$ 较为合理;镜头子午向度和弧矢向度的最大工作视场 $\omega_y/2$ 和 $\omega_x/2$ 相等或近似相等, $\omega_y/2$ 和 $\omega_x/2$ 的角度值由球幕的空间尺寸、镜头与球幕的相对位置关系决定,并分别对应 y_i 和 y_s 。

柱面透镜的非轴对称性,可用来构造子午向度和弧矢向度性能差异化^[6],以实现镜头各向异性的特殊性能,从而实现上述构想。

3 柱面透镜的特性

3.1 柱面透镜光焦度

柱面透镜^[7],如一个平面和一个柱面组成平凸柱面透镜,图3所示,其主截面为一半圆,主轴与 X 轴夹角大小为 α_0 ,其主光焦度 Φ_0 为

$$\Phi_0 = \frac{n-1}{r}, \quad (4)$$

式中 n 为柱面透镜的折射率, r 为主截面半径。

过 Z 轴任意方向切柱面透镜,剖面形状将会是半个椭圆,如图3、4所示,过 Z 轴与主轴成 α' 角方向斜切,得到半个椭圆,长轴为 a ,短轴为 b , p 为椭圆上的任意一点, θ 表示与椭圆长轴的夹角,则柱面透镜任意向度的光焦度为

$$\Phi_p = \frac{n-1}{r_p} = \frac{n-1}{r \cdot \sin \alpha' \left(\frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \alpha'} + \cos^2 \theta \right)^{3/2}} = \frac{n-1}{r} \cdot \frac{1}{\sin \alpha' \left(\frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \alpha'} + \cos^2 \theta \right)^{3/2}} = \Phi_0 \cdot \frac{1}{\sin \alpha' \left(\frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \alpha'} + \cos^2 \theta \right)^{3/2}}. \quad (5)$$

椭圆与 Z 轴相交的 p 点,即 $\theta = 90^\circ$,此时截面在 Z 轴方向的光焦度为

$$\Phi_z = \frac{n-1}{r_z} = \Phi_0 \cdot \frac{1}{\sin \alpha' \left(\frac{1}{\sin^2 \alpha'} \right)^{3/2}} = \Phi_0 \cdot \sin^2 \alpha'. \quad (6)$$

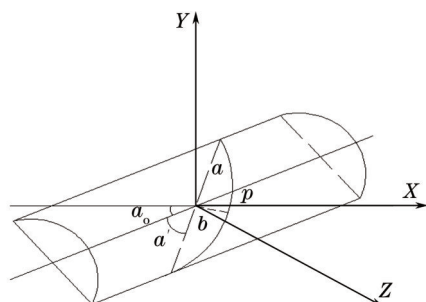


图3 柱面透镜任意向度的光焦度

Fig.3 Focal power of cylindrical lens in any direction

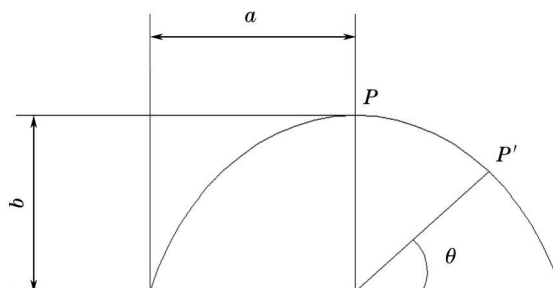


图4 柱面透镜在任意向度的截面

Fig.4 Section of cylindrical lens in any direction

所以,在 Z 轴方向,当截面平行于柱面透镜的主轴时,即 $\alpha' = 0^\circ$,光焦度 $\Phi_z = 0$;当截面垂直于柱面透镜的

主轴时,即 $\alpha' = 90^\circ$, 光焦度 $\Phi_z = \frac{n-1}{r} = \Phi_0$; 当截面在与柱面透镜的主轴呈任意角度时, 光焦度 $\Phi_z = \Phi_0 \cdot \sin^2 \alpha'$, 其值介于 $\Phi_z = 0$ 与 $\Phi_z = \frac{n-1}{r}$ 之间。故, 由(5)式、(6)式就可以计算出柱面透镜在任意向度的光焦度。

3.2 柱面透镜初级像差

假设物体在无限远成像, 柱面透镜产生的波像差可以表示为^[8]:

$$-W = \frac{1}{4}S_{Iz'}z'^4 + S_{IIx'}x'^3z + \frac{1}{2}(3S_{IIIx'} + S_{IVx'})z'^2z^2 + S_{Vx'}z'z^3 + \frac{1}{2}S_{IIIx'y}x'^2y^2 + S_{V'y'}y'y^3 + S_{V'y'z}y'yz^2 + S_{Vx'y}z'zy^2, \quad (7)$$

式中 x, y, z 为物面坐标, x', y', z' 为入瞳面坐标, 物面坐标 y 轴和入瞳面坐标 y' 轴和柱面透镜的母线平行。式中前四项是柱面透镜系统弧矢面内的初级像差^[9], 完全类同于普通球面透镜系统的子午初级像差。式中的 $S_{IIIx'y}$ 为柱像散, $S_{Vx'y}$ 和 $S_{V'y'z}$ 均为柱畸变。 $S_{IIIx'y}$ 和 $S_{Vx'y}$ 是由于斜光束的“等效折射率”差异所引起的高斯像面位置及理想像高的变化。一般来说, 通过对折射率进行关于向度的转换, 球面系统的像差表达方法就可以应用到柱面系统中^[10], 其中柱像散 $S_{IIIx'y}$ 可以用球面系统的位置色差的形式来表示, 而柱畸变 $S_{Vx'y}$ 可以用球面系统的倍率色差的形式来表示

$$S_{IIIx'y} = \sum_1^m (d-D)(n''-n), \quad (8)$$

$$S_{Vx'y} = \sum_1^m (D_{up} - D_{down})(n''-n), \quad (9)$$

式中 d 为柱镜沿光轴的厚度, D 为光线在柱镜两折射面间沿光路度量的间隔, D_{up} 、 D_{down} 分别为柱镜有效孔径上下边缘处光线沿光路度量的间隔, n 为柱镜本身材料折射率, n'' 为柱镜相对于空气的等效转换折射率, 其表达式为

$$n'' = \sqrt{(n^2 - \cos^2 \alpha') / (1 - \cos^2 \alpha')} \approx n + (n^2 - 1) \cos^2 \alpha' / 2n(1 - \cos^2 \alpha'). \quad (10)$$

而另一个柱畸变 $S_{V'y'z}$ 是由于子午向度和弧矢向度具有不同放大率所引起的, 其值为

$$S_{V'y'z} = \frac{(\Gamma)^2 - 1}{2(\Gamma)^2} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\Gamma^2} \right), \quad (11)$$

式中 Γ 为柱面透镜系统的视场放大率。

鱼眼类型光学结构中, 各类畸变均可作为“弹性量”对待, 它不影响最终的成像质量, 因此重点考察柱像散。采用等效的概念, 将二向异性鱼眼镜头的光学结构等效为一个柱面和一个球面构成的单透镜, 如设该柱面透镜的柱面半径为 r_1 、球面半径为 r_2 、任意向度的柱面半径为 r_p , 那么, 该透镜在任意向度的焦距 f'_p 满足下式

$$\frac{1}{f'_p} = (n-1) \left[\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_2} + \frac{d(n-1)}{nr_p r_2} \right] = (n-1) \left[\frac{\sin^2 \alpha'}{r_1} - \frac{1}{r_2} + \frac{d \sin^2 \alpha' (n-1)}{nr_1 r_2} \right]. \quad (12)$$

由柱像散(8)式知, 等效单柱面镜产生的柱像散为

$$S_{IIIx'y} = (d-D)(n''-n) \approx (d-D) \cdot \frac{n^2-1}{2n} \cdot \cos^2 \alpha' \cdot \frac{1}{1-\cos^2 \alpha'}, \quad (13)$$

故

$$S_{IIIx'y} \approx (d-D) \frac{n^2-1}{2n} \cdot \cos^2 \alpha' \cdot \frac{\left[\frac{n-1}{r_1} + \frac{d(n-1)^2}{nr_1 r_2} \right]}{\left(\frac{1}{f'_p} + \frac{n-1}{r_2} \right)}, \quad (14)$$

也即

$$\frac{1}{f'_p} = \left[1 - \frac{S_{IIIx'y}}{S_{IIIx'y} + \frac{(d-D)(n^2-1)}{2n}} \right] \cdot \left[\frac{n-1}{r_1} + \frac{d(n-1)^2}{nr_1 r_2} \right] - \frac{n-1}{r_2}. \quad (15)$$

(14)式、(15)式表明柱像散 $S_{\text{柱},y}$ 是关于多个自变量的函数,且随着向度等变量的变化而变化,在子午和弧矢两个特殊向度, $S_{\text{柱},y}$ 达到极值,只有一个向度可以为零,其余向度必定存在非零值,也可以认为,柱像散作为一个因子对焦距值产生修正作用。在位置任意且柱面、球面交替出现的大视场光学结构中,作为“单向变倍器”的柱面镜或镜组,其产生的柱像散、倍率柱畸变本应得到很好的校正和消除,但是,由于柱面镜或镜组的其他像差也需要消除,而无法达到兼顾,例如,仅仅同时消色差、柱像散条件就异常困难,对光学材料特性的近似要求为: $\delta n = \cos^2 \alpha' \left(\frac{n^2 - 1}{n} \right) / 2$, 其中 δn 为柱镜的材料色散值。因此,加入有焦柱镜或母线共面的有焦柱镜组时,为了兼顾和平衡其他像差、兼顾光学系统的良好加工工艺性,在(0,0)视场残留柱像散是一种可选择的妥协处理办法,即在弧矢或子午向度分别处理柱像散,保证子午和弧矢两个极端向度的某一个或两个等值视场,例如,(30,0)和(0,30)、(45,0)和(0,45)、(60,0)和(0,60)处,柱像散值为零,而很难像通常那样把(0,0)视场的像散值控制为零,其他视场,则使像面分离的分离趋势接近,量级相当,绝对值趋小,例如,在子午和弧矢向度均加入有效柱面,或者在弧矢、子午向度的一个向度加入有效柱面而另一向度提前预留符号相反的像散值。

3.3 柱面透镜弧矢和子午向度共面成像焦距关系

含有柱面透镜的光学镜头系统,在成像时,需要保证各个向度的像均成在同一像面内,以弧矢和子午向度为例进行说明,将镜头分为弧矢镜组和子午镜组。针对相同的无限远物距,不同焦距值的系统应该有不同的像距。由(7)式也可知,柱面透镜成像时,会产生初级像差,其中的柱像差,包括柱像散会通过改变系统的弧矢、子午向度等效主面位置而产生两向度像面位置漂移,如图5所示,镜头等效弧矢主面和子午主面关系。

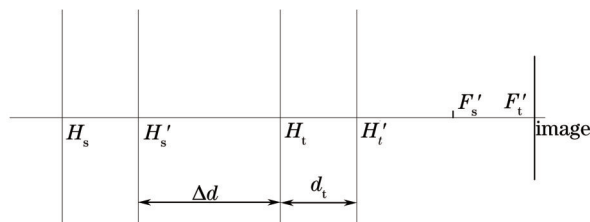


图5 等效光学系统主平面

Fig.5 Principal plane of equivalent optical system

图5中 H_s 、 H'_s 分别为弧矢镜组的物方主点和像方主点; H_t 、 H'_t 分别为子午镜组的物方主点和像方主点; F'_s 、 F'_t 分别为弧矢镜组和子午镜组的像方焦点; Δd 为弧矢镜组等效像方主面与子午镜组等效物方主面的间隔; d_t 为子午镜组等效主面间隔。

当弧矢面内的平行光入射时,子午镜组不会影响光束的偏折,仅相当于一块平行平板,其等效空气厚度为 d_s/n_s , d_s 是弧矢向度所有有效透镜的等效透镜的光学厚度, n_s 是弧矢向度所有有效透镜的等效透镜的折射率,此时像面位置 image 距弧矢镜组像方主点 H'_s 的距离为 $f'_s - d_s/n_s$ 。当子午面的平行光束入射时,弧矢镜组不会影响光束的偏折,仅相当于一块平行平板,经过弧矢镜组的光线仍是平行光,将汇聚于子午镜组的像方焦点 F'_t , F'_t 与像面位置 image 重合。此时像面位置 image 与 H'_s 之间的距离为: $\Delta d + d_t + f'_t$ 。所以 $f'_s - \frac{d_s}{n_s} = f'_t + \Delta d + d_t$, 也即

$$f = f'_t + \Delta d + d_t + \frac{d_s}{n_s} \quad (16)$$

(16)式为构造二向异性鱼眼镜头的焦距配置的基本关系,但由于柱面透镜产生的柱像散的存在,导致两向度像面位置发生一定量“漂移”,因此,像面共面条件得到一定程度的“放宽”,若在系统中的弧矢和子午向度均存在有效柱面时,可将两向度的柱像差作为“有利”条件加以利用,从而使镜头各向度共面成像的条件关系(16)式获得了一定的弹性变化空间。

继续把镜头系统等效为一个由柱面和球面组成的柱面透镜,由(16)式可得到进一步变化,此时 $n = n_s = n_t$, 透镜的光学厚度 h 与沿光轴的厚度 δ 有以下关系^[11]: $h = \delta - \frac{\delta f'(n-1)}{n} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$, 在子午和弧矢分别考虑,则有

$$d_i = d - \frac{df'_i(n-1)}{n} \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = d \left[1 - \frac{r_2 - r_1}{n(r_2 - r_1) + d(n-1)} \right], \quad (17)$$

和

$$d_s = d - \frac{df'_s(n-1)}{n} \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = d - \frac{d}{n}, \quad (18)$$

因此,(16)式可表示为

$$f'_s - f'_i = \Delta d + d \left[1 - \frac{r_2 - r_1}{n(r_2 - r_1) + d(n-1)} + \frac{1}{n} - \frac{1}{n^2} \right]. \quad (19)$$

(19)式进一步表明了弧矢和子午向度焦距差异与各个光学参数之间的关系,该关系为精确调整镜头结构指明了调整方向。

综上所述,加入柱面透镜成像时^[12],如果平行于母线方向的成像尺寸不变,则垂直于母线方向的成像尺寸将会被拉伸或压缩,其他向度的成像尺寸拉伸或压缩量大小介于两者(平行和垂直母线)之间,如图6所示,圆经过柱面透镜的成像示意图^[13]。在传统的鱼镜头结构基础上,在适当位置加入柱面透镜便可以有效的制造向度差异化性能,从而提高单机球幕放映系统的像素利用率。另外,针对“有焦”柱面系统,控制处理像散的方式需要脱离传统方法,其在(0,0)视场不必为零值,而在其他视场制造零值点,可以是一个也可能是多个,以保证场曲值的合理性。同时,(0,0)视场像散值不为零也为各向度共面成像提供了像差平衡的宽松环境。

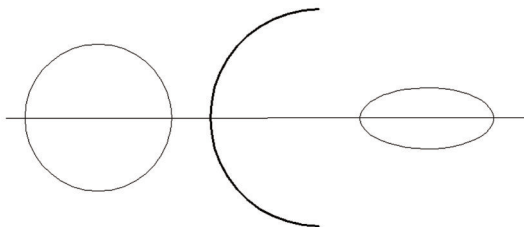


图6 圆经柱面透镜的成像

Fig.6 Image of circle through cylindrical lens

4 二向异性鱼镜头结构设计

4.1 设计分析

二向异性鱼镜头结构的设计目的是提高单机球幕放映系统像素利用率。设计基础是传统鱼镜头理论、基础结构、柱面透镜像差特性,在此基础上,合理控制柱像散以满足各向度共面成像,再利用二向度焦距差异化关系式精确控制各个光学参数以达到二特殊向度——子午和弧矢向度的焦距比和像高比目标。二向异性鱼镜头属于非轴对称性结构,各个向度上的最大成像像高不同,其成像公式为

$$y_p' = -kf'_p(\omega_{\max} \cdot \pi/360), \quad (20)$$

式中 y_p' 为任意向度的最大像高, f'_p 为任意向度的焦距, ω_{\max} 为最大半视场角, k 为畸变调节系数。 y_p' 的不同是由于各个向度的焦距 f'_p 值不同,而 f'_p 值的不同是由柱面透镜的光焦度特性决定的,满足(5)式、(6)式。该光学系统在弧矢与子午向度具有极值焦距值,且两者满足(19)式,而其他任意向度焦距值均在两极值焦距区间内,即满足(1)~(3)式。基于以上特性,可以重点考虑弧矢和子午两个极端向度,若镜头匹配 1.38 英寸 (35.052 mm) 3DMD 的 4K 分辨率数字放映机,其成像芯片的长和宽的尺寸约为 31 mm 和 16.35 mm,镜头在子午向度上的最大像高为 $y_{ip}' = W/2 = 8.17$ mm,而镜头在弧矢向度上的最大像高满足: $1.5y_{ip}' \leq y_{sp}' \leq L/2$,该值的选定决定着成像芯片像素利用率的大小。像素利用率由下式表示

$$\frac{S_c}{S_{\text{chip}}} = \frac{\pi \cdot y_{sp}' \cdot y_{ip}'}{L \cdot W} = \frac{\pi \cdot y_{sp}'}{2L} \quad (21)$$

式中 S_c 为镜头成像椭圆的面积, S_{chip} 为数字放映机成像芯片的面积。由上式知, y_{sp}' 越接近极限值 $L/2$,像素利用率越高,像素利用率极限可以达到 $(\pi/4) \times 100\% \approx 78.5\%$ 。

4.2 设计结果

设计选定镜头畸变调节系数,如, $k = k_s = k_t = 0.75$, 设定最大像高比,如, $y_{sp}' = 1.52y_{ip}'$, 综合上述分析和给定的技术指标,可得镜头的主要设计参数,如表1所示。

表1 二向异性鱼眼镜头光学设计参数

Table 1 Optical design parameters of bi-directional anisotropic digital fisheye lens

Parameter	Design value in sagittal direction	Design value in meridian direction
Effective focal length /mm	$f'_s = 12.21$	$f'_t = 8.035$
Full field of view /($^\circ$)	$\omega_s/2 = 80$	$\omega_t/2 = 80$
$F\#$	2.4	2.4
Image height/mm	$y_s = 12.42$	$y_t = 8.17$
Working wavelength /nm	430~660	430~660
Back focal length in air /mm	116	116

根据表1的主要光学设计参数,首先在光学专业设计软件上输入合适的传统鱼眼镜头光学初始结构,建立合理的数据文件以及边界控制条件,针对技术指标给出对应的优化操作数,在评价函数中建立系统各种像差的控制操作符。然后在结构中的合理位置处,根据(16)式、(19)式插入一定数量的柱面透镜,以满足系统的设计要求。最后经过不断的设计优化,结构局部更改,优化参数指标更改,得到符合要求的光学结构。表2给出了光学结构的详细数据。

表2 二向异性鱼眼镜头光学结构的详细数据

Table 2 Detailed data of optical structure of bi-directional anisotropic digital fisheye lens

No.	Surface type	Radius	Thickness	Glass
OBJ	-	∞	∞	Air
1	Sagittal cylindrical surface	342.63	5.00	H-LAF10
2	Spherical surface	67.16	36.12	Air
3	Spherical surface	-124.72	3.61	H-LAK53A
4	Spherical surface	128.91	70.34	Air
5	Spherical surface	190.52	26.84	H-ZF2
6	Spherical surface	-108.88	3.01	H-ZF72
7	Spherical surface	-215.56	2.00	Air
8	Sagittal cylindrical surface	135.89	21.60	H-LAK1
9	Sagittal cylindrical surface	-143.59	6.08	H-F51
10	Plane surface	∞	11.99	Air
11	Plane surface	∞	3.02	H-LAK1
12	Sagittal cylindrical surface	179.99	8.16	Air
13	Plane surface	∞	3.03	H-LAK53A
14	Spherical surface	50.16	19.40	F3
15	Spherical surface	-130.88	3.00	Air
16	Spherical surface	-154.67	3.00	H-LAK53A
17	Spherical surface	48.93	17.20	F3
18	Spherical surface	264.02	125.33	Air
19	Meridian cylindrical surface	1825.64	13.47	H-FK61
20	Spherical surface	86.69	23.51	Air
STO	Plane surface	∞	2.43	Air
22	Spherical surface	246.18	3.19	H-ZF2
23	Spherical surface	315.67	0.18	Air
24	Spherical surface	82.00	18.31	ZF51
25	Spherical surface	-369.14	10.37	Air
26	Spherical surface	-190.48	3.00	H-LAF54
27	Spherical surface	60.81	9.82	H-FK61
28	Spherical surface	-135.61	0.20	Air
29	Spherical surface	407.02	10.55	ZF51
30	Spherical surface	57.20	11.05	H-FK61
31	Spherical surface	-135.49	0.20	Air
32	Spherical surface	66.51	15.00	H-FK61
33	Spherical surface	-286.76	0	Air

图7给出了该镜头结构图,(a)、(b)分别为镜头结构沿子午面、弧矢面剖开的剖面图。结构中包含5个柱面工作面,其中4个为弧矢柱面,一个为子午柱面。弧矢柱面用以营造各个向度焦距差异化,实现像高比,子

午柱面用以平衡柱像散及孔径光阑像差,并能保障弧矢和子午向度具有相同孔径,即控制系统的光阑为圆孔状,而非椭圆状,有利于镜头的装配调试。

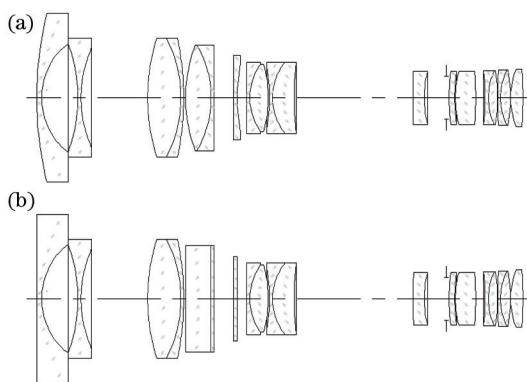


图7 镜头结构。(a) 子午方向剖面图; (b) 弧矢方向剖面图

Fig.7 Lens structure. (a) Sectional view in meridian direction; (b) sectional view in sagittal direction

在像差控制阶段^[14],在确保其他像差匹配优良的前提下,通过改变柱面透镜组的曲率半径和折射率等参量,保证焦距值和像高比。而柱像散 $S_{III_{x,y}}$ 应针对子午和弧矢向度透镜群分别考虑,可认为柱像散通过修正焦距而对像面位置产生类似位置色差的影响,必须加以控制。图8给出了该镜头在弧矢和子午向度的场曲和像散曲线,(a)图中标识“S”、“T”和(b)图中标识“T”、“S”分别对应,含义相同,可看出在(0,0)视场各色光均存在像面分离量,而纵观其他视场,各色光曲线两次相交,也即,有两个视场像面重合。图9给出了该镜头在弧矢和子午向度的光谱焦移,可看出焦移趋势相同,量级相近。

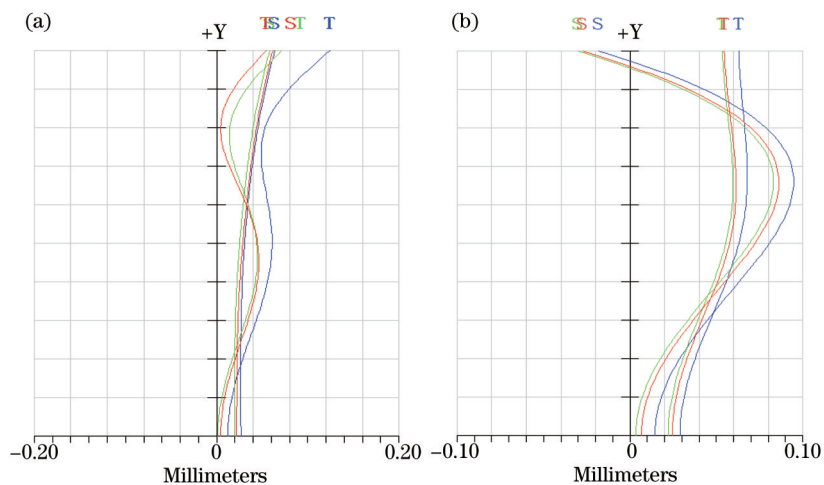


图8 镜头的场曲和像散曲线。(a) 弧矢向度; (b) 子午向度

Fig.8 Field curvature and astigmatism curve of lens. (a) Sagittal direction; (b) meridian direction

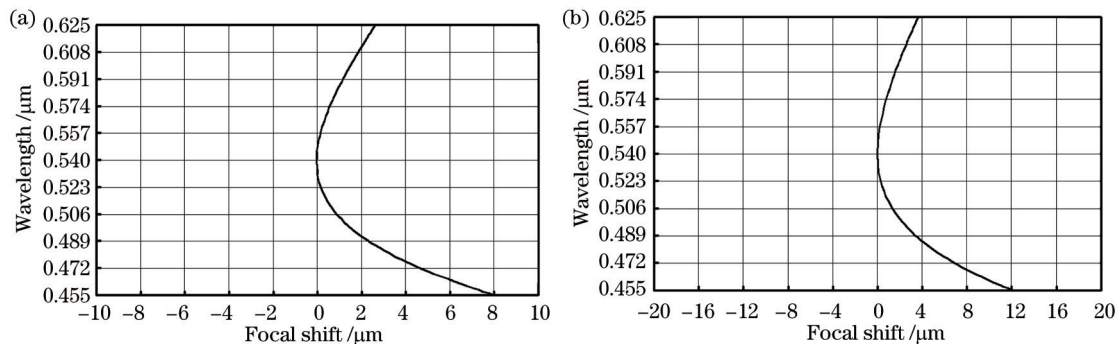


图9 镜头的光谱焦移。(a) 弧矢向度; (b) 子午向度

Fig.9 Focal shift of lens. (a) Sagittal direction; (b) meridian direction

图 10 给出了二向异性鱼眼镜头的传递函数曲线图,纵轴为调制值,横轴为每毫米的线对数,表述了二向异性鱼眼镜头在各个二维视场的光学分辨率水平或解像能力,即描述了弧矢、子午向度以及介于此两向度之间的任意向度的分辨率。从图中可知,各个向度各个视场的光学传递函数(MTF)值在 67 lp/mm^[15]处均大于 0.3,在 40 lp/mm 处镜头的各个向度各个视场的 MTF 值均大于 0.6,镜头具有较高的分辨率,可以满足 4 K 数字放映机的使用要求。从图中也可以反映出镜头具有较好的对比度。

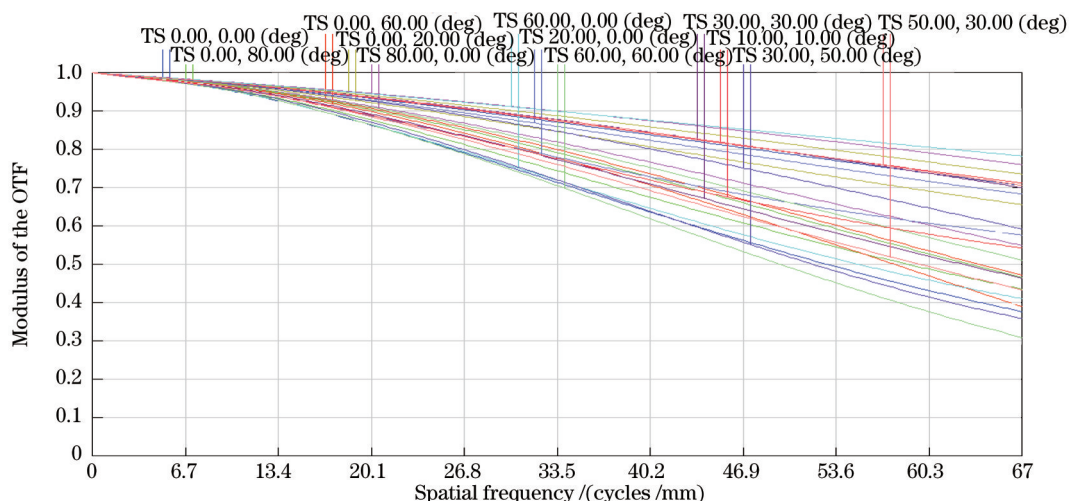


图 10 MTF 曲线图

Fig.10 MTF curves

该二向异性鱼眼镜头在单机位球幕放映系统中,将球幕逆映射到像面上,会形成椭圆边界的像域,椭圆长轴为 $2y_s=24.84$ mm,短轴长为 $2y_i=16.34$ mm,则像域面积为 $S_c = \pi y_s y_i = 318.62$ mm²。而传统鱼眼镜头在单机球幕放映系统中,将球幕逆映射到像面上,会形成圆边界的像域,圆的半径为 $r = 8.17$ mm,像域面积为 $S_e = \pi r^2 = \pi y_i^2 = 209.59$ mm²。该二向异性鱼眼镜头的像素利用率相对传统鱼眼镜头提高了 $\frac{S_c - S_e}{S_e} = 52\%$ 。

图 11 是根据上述设计生产出的镜头照片。表 3 为该镜头主要参数的设计值和测试值的对比,由测试结果知,试制镜头的各项参数较好地符合了设计要求,所造成的像高及焦距差异主要来自各柱面镜母线的平行度和垂直度的偏差。图 12 是在实验室条件进行投影鉴别率分析时幕上效果照片,检测专用投影机型号为 WJ CX-1,拍摄



图 11 根据设计方案生产的二向异性鱼眼镜头

Fig.11 Bi-directional anisotropic fisheye lens produced according to design scheme

表 3 镜头参数对比

Table 3 Parameter comparison of lens

Parameter	Design value of the lens		Detection value of the lens	
Effective focal length /mm	$f'_s = 12.21$	$f'_i = 8.035$	$f'_s = 12.14$	$f'_i = 7.98$
Full field of view /($^\circ$)	$\omega_s/2 = 80$	$\omega_i/2 = 80$	$\omega_s/2 = 80$	$\omega_i/2 = 80$
F#	2.4	2.4	2.39	2.39
Image height /mm	$y_s = 12.42$	$y_i = 8.17$	$y_s = 12.25$	$y_i = 8.07$
Back focal length in air /mm	116	116	115.92	115.92

相机型号为 NIKON-D5000, 鱼镜头标准投影鉴别率板经镜头在直径 5m 的球幕上投影成像, 其目视投影鉴别率情况为: 0 视场达到 125 lp/mm, 0.5 视场达到 100 lp/mm, 0.7 视场达到 80 lp/mm, 1 视场达到 63 lp/mm。表明镜头具有较好的成像质量。

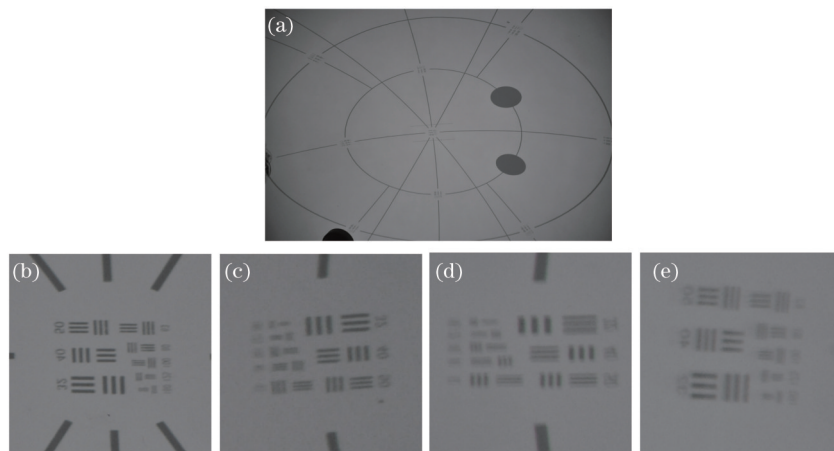


图 12 镜头成像效果图。(a) 整体效果; (b) 0 视场; (c) 0.5 视场; (d) 0.7 视场; (e) 最大视场

Fig.12 Picture of image projected by the lens. (a) Overall effect; (b) 0 field of view; (c) 0.5 field of view; (d) 0.7 field of view; (e) maximum field of view

5 结 论

在鱼镜头结构中合理加入柱面透镜, 可以使镜头产生各向度差异化的渐变式焦距, 形成新的各向异性的映射规律。设计二向异性鱼镜头的思路是使镜头子午和弧矢向度的像高最大限度匹配投影机芯片长、宽尺寸, 以提高映射像素利用率, 利用率的极限值为约 78.5%。设计过程中, 合理处理柱像散的方法是在子午和弧矢两个极端向度的某一、两个等值中间视场, 保证像面分离量相等, 而在其他视场, 则使像面分离的分离趋势接近, 量级相当, 绝对值趋小。而柱畸变无需特别处理。分析及设计结果表明, 二向异性鱼镜头的设计思路具有可行性, 设计实例在弧矢和子午向度的全视场像高比达到约 1.52 倍, 使得像素利用率相比传统镜头提高 52%, 而达到 65%, 相比利用率极限还有一定距离, 存在进一步提升的空间, 然而随着弧矢和子午像高比的提高, 各种像差, 包括柱像散的平衡与控制也越发困难。另外, 设计思想也可用于全景监控镜头和全景摄影镜头, 在此领域还有很多研究工作有待深入。

参 考 文 献

- 1 Feng Xiuheng. The fisheye lens for spherical screen motion-picture[J]. Optics and Precision Engineering, 1986, (5): 53-60.
冯秀恒. 用于球幕电影的鱼镜头[J]. 光学 精密工程, 1986, (5): 53-60.
- 2 Chen Chen, Wang Baoqi, Li Chenyou. Application of fisheye lens in digital movies projection[J]. Advanced Motion Picture Technology, 2008, (1): 29-32.
陈琛, 王宝琦, 李臣友. 鱼镜头在数字电影和数字投影中的应用[J]. 现代电影技术, 2008, (1): 29-32.
- 3 Wang Yongzhong. Fisheye Lens Optics[M]. Beijing: Science Press, 2006: 26-61.
王永仲. 鱼镜头光学[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 26-61.
- 4 陈琛, 宋涛, 于国辉, 等. 基于二向异性鱼镜头的环幕放映/投影系统单元: 中国, 201310307930.7[P]. 2015-04-22.
- 5 Chen Chen, Hu Chunhai. Design of general type zoom fisheye lens for dome-screen projector[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(2): 323-335.
陈琛, 胡春海. 球幕投影通用型变焦鱼镜头设计[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(2): 323-335.
- 6 Ma Hua, Zeng Xiaodong, An Yuying. Double half-cylindrical lens collimate the beam of laser diode[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(7): 937-940.
马华, 曾晓东, 安毓英. 双半圆柱透镜准直半导体激光光束[J]. 中国激光, 2006, 33(7): 937-940.
- 7 Zhou Wangzhi, Lu Zhenwu. Test of cylindrical lenses using holographic interference method[J]. Acta Optica Sinica, 1987, 7(6): 511-514.

- 周万治, 卢振武. 检测柱透镜象差的全息干涉法[J]. 光学学报, 1987, 7(6): 511-514.
- 8 Wang Zhijiang. Handbook of Optical Technology[M]. Beijing: China Machine Press, 1987: 16-134.
王之江. 光学技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987: 16-134.
- 9 Dong Meimei, Pu Jixiong. Focal shifts of partially coherent light focused by a cylindrical lens with spherical aberration[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(7): 1095-1098.
董梅梅, 蒲继雄. 部分相干光经柱面球差透镜聚焦所产生的焦移[J]. 光子学报, 2006, 35(7): 1095-1098.
- 10 Shi Lifen, Pu Jixiong. Effective Fresnel number and focal shift of partially coherent beams focused by cylindrical aberrated lens[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(12): 2548-2552.
石丽芬, 蒲继雄. 柱面球差透镜聚焦部分相干光束的焦移[J]. 光子学报, 2008, 37(12): 2548-2552.
- 11 Yao Qijun. Optical Tutorial[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 196-215.
姚启钧. 光学教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 196-215.
- 12 Zhu Rangtian. The application of cylindrical optical lens in optical imaging systems[J]. Industrial Technology, 2014, (5): 119.
朱让甜. 关于柱面光学透镜在光学成像系统中的运用[J]. 工业技术, 2014, (5): 119.
- 13 He Juming, Peng Yunxiong. Discussion on imagery of cylindrical mirror[J]. College physics, 2006, 25(1): 17-18.
何菊明, 彭云雄. 关于柱面镜成像的讨论[J]. 大学物理, 2006, 25(1): 17-18.
- 14 Zhang Baolong, Li Dan, Zhang Shaojing, *et al.*. Design of aspheric fisheye lens and study of distortion correction algorithms[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1222001.
张宝龙, 李 丹, 张少敬, 等. 非球面鱼眼镜头设计及畸变校正算法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1222001.
- 15 Song Jiajun, He Pingan. Design of zoom projection lens for the light engine of LCOS rear-projection TV[J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(1): 58-62.
宋家军, 何平安. LCOS背投光学引擎中变焦投影物镜设计[J]. 应用光学, 2007, 28(1): 58-62.

栏目编辑: 韩 峰