

鱼眼镜头光学设计

陈晃明 陈向颖

(工程光学系)

摘 要

鱼眼镜头的视场高达 180° 或超过 180° ，可以作为全景电影的摄影和放映镜头，本文介绍了它的结构型式的发展，讨论了它的成像理论，给出了适合它的理想象高公式和光栏球差公式，最后提供了一个实例。

关键词：光学透镜/鱼眼镜头，等距离投影，等立体角投影，几何渐晕，象差渐晕。

鱼眼镜头早在1919年就有，那时 Wood R W 利用盛满水的针孔相机拍摄广角视场，如图 1a 所示；1922年 Bond W N 用一个半球形玻璃透镜代替针孔相机拍摄整个天空的云层，其表面复盖了中心有一小孔的屏，如图 1b 所示；到了1923年，Hill R 在半球形玻璃透镜前方加了一个负弯月形透镜，此透镜具有凸的外表面和深凹的内表面，使得系统的场曲又大大地减小，是现今的鱼眼镜头的雏形，称为希尔天文物镜，如图 1c 所示；随后1924年，Beck Conrad 在希尔天文物镜的基础上，设计了一个拍摄整个天空的物镜，他用两个单透镜组成的复合透镜代替了半球形透镜；从60年代起，鱼眼镜头的结构形式得到不断的改进，共同的特点是前组为具有很大负焦距的弯月形透镜组，用以实现视场为 180° 的光学性能，后组是复杂化的正透镜组，用以提高相对孔径和校正象差，图 1e 为1935年 Merte W 所设计的一种。

鱼眼镜头是一种具有大量桶形畸变的反望远型光学系统。在气象站，

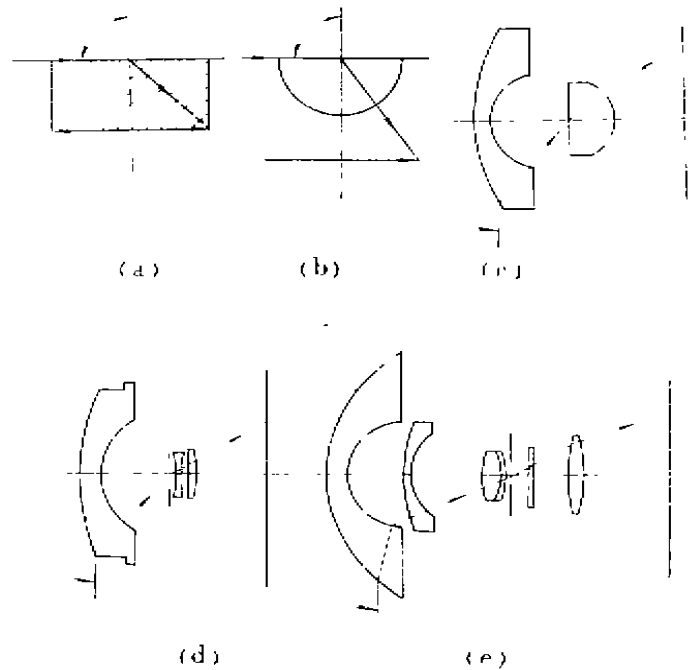


图1 鱼眼镜头结构型式的发展

用鱼眼镜头每隔一定的时间对云层进行摄影记录, 就可以获得一张张圆形的云层照片, 其中心对应着天空顶点的云层, 边缘对应着天空中接近水平方向的云层。如果进行连续拍摄, 就可以从获得的系列照片上分析云层的变化规律。

如果在 35 mm 的单反相机上安装鱼眼镜头进行拍摄, 便可以扩大摄影者的视野。鱼眼镜头具有一定规律的畸变, 摄影者可以获得一些诱人的、幽默的戏剧性效果。它的景深大, 拍摄的照片前景夸大, 近景和远景的深度感和距离感增强, 给人以身临其境的感觉。在目前世界上最新建立起来的电子天文馆中, 鱼眼镜头作为投影物镜代替了传统的光学天象仪。电子天象仪实际上是一套利用电子计算机作图的投影电视系统。表演时, 计算机用其存储器内的 6 000 多颗恒星数据, 以每秒钟变换 30 次的速度, 在高强度的阴极射线管屏幕上显示出各种星云的形状、位置和亮度, 然后再用一个鱼眼镜头把屏幕上的影象投影在半球形的天幕上供人们观赏, 用不着传统的哑铃式的光学投影系列。

总之, 鱼眼镜头作为一种特殊的光学镜头, 是现代科技领域所需要的。

1 鱼眼镜头的成象

鱼眼镜头的视场一般为 180° , 也有超过甚至达到 270° 的。我们必须考虑球面物体与平面象的共轭关系。光学系统的理想象高公式为

$$y' = f \operatorname{tg} \omega \quad (1)$$

其中 y' 为理想象高, f 为系统物方焦距, ω 为物方视场半角。可见, 当 $\omega = \pm 90^\circ$ 时, $y' = \pm \infty$, 象面变得无限大而无法实现。因此, 鱼眼镜头必须人为地引入桶形畸变, 但这种桶形畸变并不当作象差处理, 而是投影成象的结果。鱼眼镜头的桶形畸变对象的清晰度毫无影响, 而且会产生一些特殊的效果, 这正是鱼眼镜头区别于其它镜头的特点之一。另外, 引入固定的桶形畸变, 会使鱼眼镜头象面照度均匀性得到很大的改善。

在设计鱼眼镜头光学系统时, 需要引入多大的桶形畸变量, 也就是选择可以实现将半球视场或大于半球视场投影在平面有限范围内的投影公式, 它有下列 4 种

$$y' = 2f \operatorname{tg} \left(\frac{\omega}{2} \right) \quad (2)$$

$$y' = Kf \omega \quad (3)$$

$$y' = 2f \sin \left(\frac{\omega}{2} \right) \quad (4)$$

$$y' = f \sin \omega \quad (5)$$

可以将 (1) 式至 (5) 式描绘成视场角与象高的关系曲线, 如图 2 所示。

(2) 式表示的投影方法称为体视投影方法, 它与图 2 中的曲线 (2) 相对应。如图 3 所示, 设有一球心位在透镜系统入瞳中心的半球形球面物体, 半径为 r , 它被透镜系统投影在平面的有限圆内。假设该透镜系统的象高公式为体视投影公式, 那么对 (2) 式进行微分运算

$$dy' = 2f \sec^2 \left(\frac{\omega}{2} \right) \cdot \frac{1}{2} d\omega = \left[f / \cos^2 \left(\frac{\omega}{2} \right) \right] d\omega \quad (6)$$

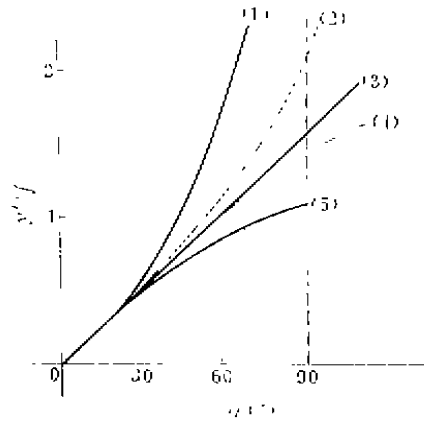


图 2 不同视场角时视场角与象高的关系曲线

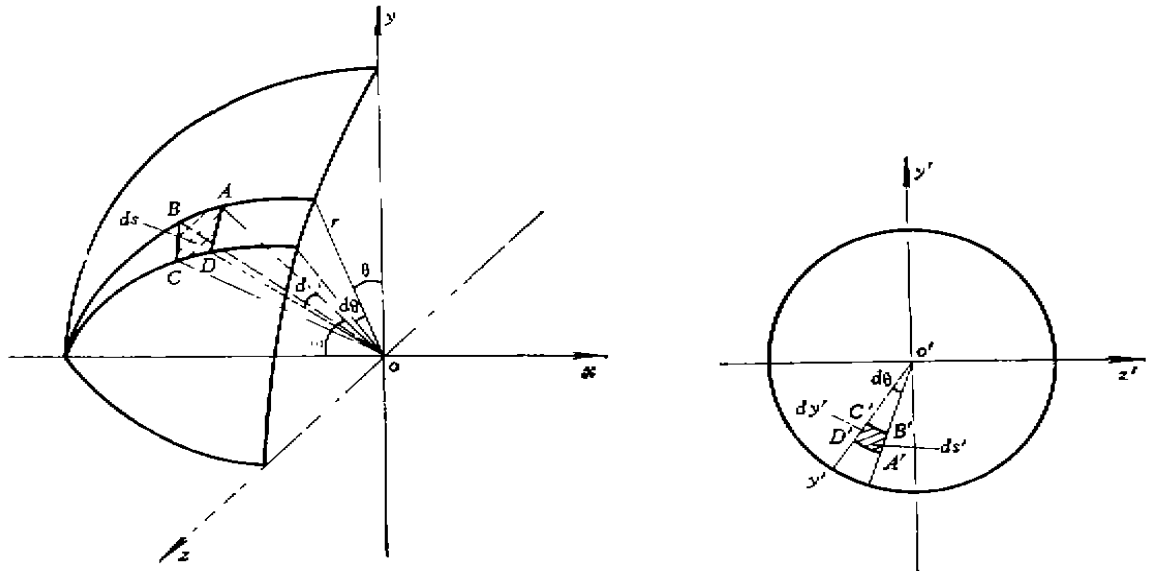


图 3 球面物体与平面象的对应关系

设 θ 为两个子午平面之间的夹角，将 (2) 式两边乘以 $d\theta$ ，并考虑 (6) 式的关系，有：

$$\begin{aligned}
 y' d\theta &= 2f \operatorname{tg}\left(\frac{\omega}{2}\right) d\theta = f \cdot \frac{2 \sin\left(\frac{\omega}{2}\right) \cos\left(\frac{\omega}{2}\right)}{\cos^2\left(\frac{\omega}{2}\right) \cos\left(\frac{\omega}{2}\right)} d\theta \\
 &= \left[f / \cos^2\left(\frac{\omega}{2}\right) \right] (\sin \omega \cdot d\theta) \quad (7)
 \end{aligned}$$

从 (6) 式和 (7) 式可以看出，物象之间径向和圆周方向的放大率对某一个视场来说是相等的，都是 $f / \cos^2\left(\frac{\omega}{2}\right)$ 。如果在半球面上有一个小圆，那么经体视投影关系成像以

后,象仍然是一个小圆,但是各个视场的放大率随视场的增大而增大,位于半球面上不同位置同样大小的圆成象以后大小将各不相同。例如,当 $\omega=0^\circ$ 时,放大率 $f/\cos^2\left(\frac{\omega}{2}\right)=f$,当 $\omega=\pm 90^\circ$ 时, $f/\cos^2\left(\frac{\omega}{2}\right)=2f$,即视场边缘小圆象的直径是视场中心小圆象的直径的两倍。

(3)式表示的投影方法称为等距离投影方法,它与图2中的曲线(3)相对应。式中 K 是一个将角度转换成弧度的系数,如果视场角 ω 用角度表示, K 值为

$$K = -\frac{\pi}{180^\circ} \approx 0.017 \text{ (rad/}^\circ\text{)}$$

对(3)式进行微分

$$dy' = Kf d\omega \quad (8)$$

同样,将(3)式两边乘以 $d\theta$,有

$$y' d\theta = Kf \omega d\theta = \left[fK \left(-\frac{\omega}{\sin\omega} \right) \right] [\sin\omega d\omega] \quad (9)$$

从(8)式可以看出,应用等距离投影方法,物象之间径向放大率不随视场而变,而从(9)式可以看出,圆周方向的放大率是随着视场的变化而变化的。径向和圆周方向的放大率有如下关系

$$|Kf| \leq \left| Kf \cdot \frac{\omega}{\sin\omega} \right|$$

可见,半球面上的小圆,经过透镜系统成象以后变成椭圆,椭圆的短轴是沿直径方向的,并且只要小圆在半球面上的大小相等,那么它们的椭圆象的短轴总是相等的,即等视场角在象面上产生等径向距离,“等距离投影”就由此而得名。由于等距离投影公式使视场角与象高成线性关系,便于分析计算,并且它引入的桶形畸变可以使象面照度的均匀性得到良好的改善,因此应用这一投影公式做为象高公式的鱼眼镜头很多。

(4)式表示的投影方法称为等立体角投影方法,按照图3,立体角可以表示为

$$d\Omega = \frac{ds}{r^2} = \frac{1}{r^2} [rd\theta r \sin\omega d\theta] = \sin\omega d\omega d\theta \quad (10)$$

物面上的微小面积 ds 在象面上的共轭面积为 ds' ,从图中可得

$$ds' = y' d\theta dy' \quad (11)$$

对(4)式进行微分

$$dy' = 2f \cos\left(\frac{\omega}{2}\right) \frac{d\omega}{2} = f \cos\left(\frac{\omega}{2}\right) d\omega \quad (12)$$

将(4)和(12)式代入(11)式,并考虑(10)式的关系,可得

$$ds' = 2f \sin\left(\frac{\omega}{2}\right) d\theta \cdot f \cos\left(\frac{\omega}{2}\right) d\omega = f^2 \sin\omega d\omega d\theta = f^2 d\Omega \quad (13)$$

(13)式表明,物方的等立体角将在象平面上产生相等的面积,即物方的立体角与象平

面上的面积具有正比的关系。对 (13) 式积分, 得到

$$\Omega = \frac{s'}{f^2} \quad (14)$$

由此可见, 只要测得象平面上某块面积 s' , 就可以知道它对应的物方立体角这个有用的物理量。应用等立体角投影公式做为象高公式的鱼眼镜头很多。

(5) 式表示的投影方法称为正投影方法, 将 (5) 式进行微分

$$dy' = (f \cos \omega) d\omega \quad (15)$$

将 (5) 式两边同乘以 $d\theta$

$$y' d\theta = f (\sin \omega d\theta) \quad (16)$$

从 (15) 和 (16) 式看出, 正投影方法对径向和圆周方向的放大率是不相等的, 特别是当 $\omega = \pm 90^\circ$ 时, $dy' = 0$, 这说明在半球面物体的边缘的小圆将被投影成一条直线, 显然这种方法是不太理想的。但是由于这种投影方法引入的桶形畸变量很大, 可以使象面照度的均匀性得到很好的改善, 所以仍然有采用的必要。

2 鱼眼镜头光线追迹的方法

在大视场情况下, 轴外最边缘的光线是由孔径光阑以及各个透镜的口径所限制的。因此, 在进行光线追迹时, 可以根据孔径光阑的大小以及系统中各个透镜的口径, 用光线追迹的方法决定轴外视场光束的口径。

设某一视场的主光线在物空间与光轴的交点距系统第一面的距离为 $LZ(\omega)$, 即对应传统光学中的实际入瞳距, 它在理论上应满足如下的等式

$$LZ(\omega) = LZ + \delta LP(\omega) \quad (17)$$

式中 LZ 为光学系统的近轴入瞳距, $\delta LP(\omega)$ 为该视场在入瞳处的光阑球差。本文利用象差理论和大量的上机计算结果, 对鱼眼镜头光阑球差的变化规律进行了研究, 推导出来了对各种鱼眼镜头均适用的 $\delta LP(\omega)$ 表达式, 从而解决了确定鱼眼镜头主光线初始位置问题, 它是编制鱼眼镜头光线追迹程序的关键问题之一。由于篇幅限制, 本文没有列出整个 $\delta LP(\omega)$ 公式的推导过程, 只能写出它的结论形式

$$\delta LP(\omega) = cs \{ f^{-1} n_s^2 [A^2(I) + xA'(I) + yA''(I)] \} \quad (18)$$

式中 cs 为待定系数, 不同的鱼眼镜头 cs 值是有差别的, 它的变化范围在 $-0.16 \sim -0.87$ 之间, 在程序中, 经过简单的迭代就可以确定它的值; f' 为焦距值 (光阑球差一般与焦距成正比); n_s 为鱼眼镜头的最大视场半角; $A(I) = 1.00, 0.85, 0.70, 0.50, 0.30$, 为视场角系数; x 和 y 等于

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{16(1-2K_k^{f^2})(2K_k^f-1) - (1-2K_k^f)(2K_k^{f^2}-1)}{4(2K_k^{f^2}-1)(2K_k^f-1) - (2K_k^f-1)(2K_k^{f^2}-1)} \\ y &= \frac{16(1-2K_k^{f^2})(2K_k^f-1) - 4(2K_k^f-1)(1-2K_k^f)}{(2K_k^{f^2}-1)(2K_k^f-1) - 4(2K_k^{f^2}-1)(2K_k^f-1)} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

上式中的 K_A 和 K'_A 又分别等于

$$\left. \begin{aligned} K_A &= 0.070163(|u_z| - 1.92087)^{-1.5} + 0.802676 \\ K'_A &= 0.070163\left(\left|-\frac{u_z}{2}\right| - 1.92087\right)^{-1.5} + 0.802676 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

利用(17)和(18)式求得主光线的初始位置以后,在进行光线追迹时,注意它在孔径光阑上的高度 V_z , 如果 $V_z \neq 0$, 说明此条光线不是主光线, 需要对 $LZ(\omega)$ 值进行调整, 首先给 $LZ(\omega)$ 一个小的增量, 追迹一次以后, 再利用以下公式进行迭代

$$LZ_n(\omega) = LZ_{n-1}(\omega) - [LZ_{n-1}(\omega) - LZ_{n-2}(\omega)] \frac{V_{z,n-1}}{V_{z,n-1} - V_{z,n-2}} \quad (21)$$

其中 n 为迭代次数, 直到 $V_z = 0$ 为止, 此条光线即为该视场的主光线。

3 计算实例

我们按照等距离投影方法设计和计算了下列光学特性的鱼眼镜头

视场: $2\omega = 180^\circ$

焦距: $f' = 8.5 \text{ mm}$

相对孔径: $\frac{D}{f'} = \frac{1}{2.8}$

它可以用在 35 mm 单镜头反光照相机上, 所成的象是直径为 23 mm 的圆形象。对这个镜头, 我们还计算了它对 $L = -10 \text{ m}$ 的有限远球面物体的成象, 即将它倒置使用, 可以将直径为 23 mm 的圆形象投影在半径为 10 m 的球形屏幕上, 做为球幕电影的放映镜头使用。结构参数如下, 光学系统和象差曲线如图 4 所示, 其中(a)为轴上点 3 种色光的球差曲线, (b)为象散曲线, (c)为 g 光的垂轴象差曲线。

附表 结构参数

r/mm	d/mm	n_d	n_g	n_c	Glass
45.532	1.044	1.000	1.000	1.000	
6.141	4.592	1.713	1.729	1.708	LaK7
10.200	0.783	1.000	1.000	1.000	
6.528	2.609	1.620	1.633	1.617	ZK9
11.104	3.392	1.000	1.000	1.000	
-8.446	0.733	1.595	1.615	1.591	QF14
-57.317	0.261	1.620	1.633	1.617	ZK9

续附表

$r/r.m$	d/mm	n_1	n_2	n_c	Glass
0.000	0.731	1.000	1.000	1.000	
0.000	0.652	1.518	1.529	1.516	K16
0.000	0.652	1.000	1.000	1.000	
-15.482	0.522	1.000	1.000	1.000	
12.913	1.565	1.806	1.848	1.797	ZF7
-11.804	0.052	1.516	1.526	1.513	K9
-125.049	1.148	1.000	1.000	1.000	
-13.168	0.052	1.620	1.633	1.617	ZK9
151.941	1.565	1.000	1.000	1.000	
-14.831		1.620	1.633	1.617	ZK9

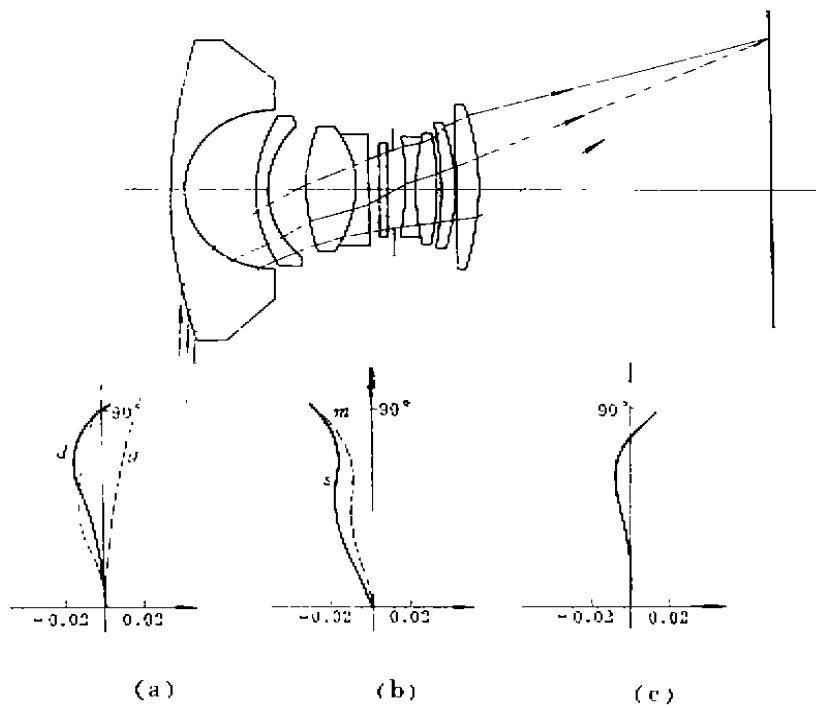


图 4 光线追踪和象差比较

参 考 文 献

- 1 Kingslake R, Some interesting and unusual lenses, SPIE, 1980, 237: 448
- 2 Kingslake R, A classification of photographic lens types, J. Opt. Soc. Amer., 1976, 36(5): 5
- 3 Miyamoto K, Fish eye lens, J. Opt. Soc. Amer., 1974, 54(8): 1069
- 4 Horimoto M, U. S. Pat., 1983, 421(4), 726

FISH EYE LENS OPTICAL DESIGN

Chen Huangming Chen Xiangying

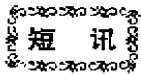
(Department of Optical Engineering)

Abstract

The field angle of fish eye lenses can be made to reach or even surpass 180 degrees. It can be utilized in a panoramic cinema as either a photographic or a projection lens. Its structural development is introduced, the theory of image formation discussed, the formulae of both the ideal image height and the stop spherical aberration are given. Finally a practical example is shown.

Key words: optical objective/fish eye lens, equidistance projection, equisolid angle projection, geometric vignetting, aberration vignetting.

.....



我校两项成果获首届“火炬杯”高新技术 产品展评会优秀产品奖

日前,在中国科技情报研究所展览厅内,国家科委“火炬”计划办公室、中国科技情报研究所及北京市科学技术研究院共同举办了首届“火炬杯”高新技术产品展评会,我校有8项成果参展,其中“ Fe_3O_4 磁性超细粉”、“多弧型离子镀膜系列及其产品”两项荣获优秀产品奖。

“ Fe_3O_4 磁性超细粉”是机械工程系王建华等同志经过几年的艰苦努力研制成功的,1988年9月通过部级鉴定,属80年代国际先进水平,居国内领先地位。

“多弧型等离子镀膜系列及其产品”是王殿儒等同志研究的成果,第三代离子镀膜技术,已达到80年代国际先进水平, TG-8已经远销美国和台湾。

此次参展单位来自全国20多个省市自治区的高校、科学院、研究所和工厂共展出800多项有150项获奖。

科研处