

用于球幕电影的鱼眼物镜

冯秀恒

摘要: 本文介绍了球幕电影的原理以及球幕电影摄影用和放映用鱼眼物镜的设计方法, 论述了鱼眼物镜的结构型式和象差特点, 并给出了摄影用和放映用两种鱼眼物镜的实例。

近年来, 电影在与电视争夺观众的竞争中, 发展了一种球幕电影。所谓球幕电影, 顾名思义, 它的放映银幕是个半球形, 因而视场角特别大, 甚至高达 180° 。这样就需要采用鱼眼物镜来拍摄和放映球幕电影。在拍摄时, 因为视场角为 180° , 那么摄影物镜的位置就自然而然地处于所拍摄的球形景物的球心, 而在放映时, 放映物镜的位置也处于球形银幕的球心。这样, 由于拍摄和放映过程是景象还原过程。因而, 一方面鱼眼物镜本身存在的很大畸变会自动消除。另一方面观众在近于银幕球心的位置观看, 从而产生强烈的立体感。作为一种电影手段, 球幕电影可以用来拍摄和放映旅游风光片, 马戏或武打片, 观众仿佛身临其境一般。这种强烈的临场感, 普通银幕电影是无法实现的。

鱼眼物镜是拍摄和放映球幕电影的关键。很多其它要求广视野的场合也均使用鱼眼物镜。鱼眼物镜除了用作照相之外, 还可以用在电视摄像上, 在机场对飞机的起飞和降落进行监控, 在繁华的路口和要道指挥交通, 也可以对大气云层实行监测。

所谓鱼眼物镜, 就是视场角为 180° 左右, 而此时的畸变为 100% 的反远距物镜。既然鱼眼物镜可以被看作是反远距物镜的一种, 那么在高斯光学的结构上, 鱼眼物镜同反远距物镜一样, 均采用负光焦度的透镜组作为前组, 正光焦度的透镜组作为后组, 前组和后组采用分离的型式, 如图1所示。

在图1中, φ_1 为前组光焦度, φ_2 为后组光焦度, d 为前组和后组之间的距离。在规范化条件下, 即 $\varphi=1$, $h_1=1$, $u_{p1}=-1$, 反远距物镜前组主光线的角放大率的例数为

$$\gamma_1 = \frac{u_{p1}}{u'_{p1}} = 1 - d\varphi_1 \quad (1)$$

且

$$l'_2 = h_2 = 1 - d\varphi_1 \quad (2)$$

从式(1)和式(2)中可以看出

$$l'_2 = \gamma_1 \quad (3)$$

也就是说, γ_1 即为高斯光学的工作距离 l'_2 。我们定义工作距离 l'_2 与焦距 f' 之比 l'_2/f' 为反远比, 当焦距规范化为 $f'=1$ 时, 从式(3)中可以看出, γ_1 即为反远距物镜的反远比。

因为前组光焦度 φ_1 为负值, 从式(1)中可以看出, γ_1 将大于1, 而且 γ_1 越大, 则 u_{p1} 也越大, 亦即视场角越大。

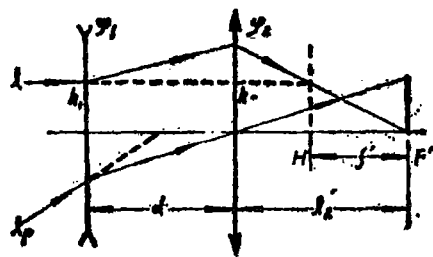


图 1

因此可以说， γ_1 的大小决定反远距物镜视场角和反远比的大小。

为了实现高达 180° 的视场角，鱼眼物镜前组的 γ_1 要比一般的反远距物镜前组的 γ_1 大得多。为此，鱼眼物镜前组的结构型式应比一般的反远距物镜的前组更为复杂，并且为使垂直光轴的光线（即半视场角 $\omega = 90^\circ$ 的轴外光线）不致发生掠射，前组第一透镜的半径应尽可能地弯向光阑，这样从外观上看，仿佛是鱼的眼睛，为了跟一般的反远距物镜相区别，就把这种物镜称为鱼眼物镜。

鱼眼物镜的视场角高达 180° ，视场角的增加必然引起与视场有关的象差急剧增加，尤其是畸变更为严重。在反远距物镜中，前组残存的畸变是用后组加以补偿的。可是当视场角急剧增加时，前组的畸变也急剧增加，当半视场角增加到 $\omega = 90^\circ$ 时，理想象高为

$$H_i' = f' \operatorname{tg} 90^\circ = \infty \quad (4)$$

相对畸变则为

$$DT' = \frac{H_i' - H_i'}{H_i'} = \frac{\infty}{\infty} = 100\% \quad (5)$$

即当视场角为 $2\omega = 180^\circ$ 时，相对畸变必然是 100% 。因此，我们索性对前组的畸变不加控制，后组也不必加以补偿，这样，鱼眼物镜的畸变就随着视场角的增加而增加，直至当视场角为 $2\omega = 180^\circ$ 时畸变为 100% 。这样大的畸变使得所摄的景物产生严重变形。前已述及，鱼眼物镜的畸变可以通过拍摄和放映过程，使景象得以还原。而鱼眼物镜本身的畸变，也可以使象面照度分布得到改善。

为了实现视场角为 $2\omega = 180^\circ$ ，就要求鱼眼物镜负光焦度的前组具有尽可能大的 γ_1 ，为了获得尽可能大的 γ_1 ，应该采用什么样的前组结构型式呢？

下面我们分析前组结构型式与 γ_1 的关系。

一般的反远距物镜前组的基本结构大致可以归纳为以下四种：

- (1) 单负透镜；
- (2) 双负透镜分离；
- (3) 正负透镜分离；
- (4) 负正透镜分离。

上述四种基本结构型式，在用初级象差求解初始结构时，通常是把单元透镜的厚度及其间隔当作零来处理。这样，前组的结构型式无论正负光焦度的排列顺序如何，轴上光线到达后组的高度均是一致的。而且当光阑位置相同时，轴外主光线在前组的高度也均为一致。实际上，单元透镜均具有一定的厚度和弯曲形状，透镜之间又均具有一定的间隔。我们把单元透镜的厚度及其间隔等价于两个单元薄透镜之间的距离，图 2 所示就是上述四种前组结构型式的高斯光学示意图。以 e 表示前组主面到后组主面的距离，而以 d 表示前组第一面到后组主

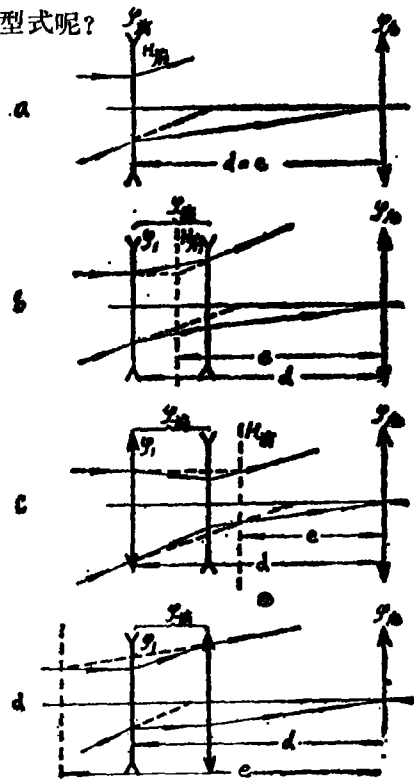


图 2

面的距离。前组的 γ 可以表示为

$$\gamma = \frac{u_{p1}}{u_{p2}} = 1 - e\phi_{前} \quad (6)$$

(1) 当前组为单负透镜时, 如图2a所示。此时 $e = d$, 则

$$\gamma_{单} = 1 - d\phi_{前}$$

这与式(1)是一致的。

(2) 当前组为双负透镜分离时, 如图2b所示。此时, $e_{双负} < d$, 则 γ 比 $\gamma_{单}$ 小, 即

$$\gamma_{双负} < \gamma_{单}$$

(3) 当前组为正负透镜分离, 而正透镜在前时, 如图2c所示。此时 $e_{正负} < e_{双负} < d$, 则 γ 比 $\gamma_{双负}$ 更小, 即

$$\gamma_{正负} < \gamma_{双负} < \gamma_{单}$$

(4) 当前组为负正透镜分离, 而负透镜在前时, 如图2d所示。此时 $e_{负正} > d$, 则 γ 最大, 即

$$\gamma_{负正} > \gamma_{单} > \gamma_{双负} > \gamma_{正负}$$

由此可以看出, 上述四种结构型式, 负正透镜分离而负透镜在前的结构可以获得最大的 γ 。如果反过来要求相同的 γ , 那么负正透镜分离的结构可以缩短前组与后组之间的距离 d , 从而缩短了整个光学系统的结构长度。由上述分析中可以得出

$$L_{负正} < L_{单} < L_{双负} < L_{正负}$$

假如上述四种结构型式的光阑均在后组上, 并且对于后组而言, 其视场角 u , 亦相同。那么, 轴外主光线从后组反向到达前组时, 正负透镜分离的结构型式, 先经过负透镜发散后再收敛。因此前组第一透镜上的轴外主光线高度很高, 导致前片口径很大, 而负正透镜分离的结构型式, 先经过正透镜收敛后再发散。因此前组第一透镜上的轴外主光线高度很低, 导致前片口径很小。由上述分析中同样可以得出

$$\phi_{负正} < \phi_{单} < \phi_{双负} < \phi_{正负}$$

这样, 由于负正透镜分离的前组可以得到最短的结构长度和最小的前片口径, 因而可以实现结构型式的小型化。

上述四种结构型式, 同样反过来要求相同的 γ , 负正透镜分离的结构型式, 不但可以缩短前组与后组之间的距离, 而且前组和后组的光焦度分配也可以小得多, 从而有利于高级象差的降低。还由于轴外主光线在前组的高度降低, 其轴外高级象差也大为降低, 从而提高大视场轴外光束的成象质量, 这对广角和超广角的反远距物镜乃至鱼眼物镜是很有意义的。

由此可见, 负正透镜分离的前组结构型式可以使结构小型化与象差校正统一起来。

如果在负正透镜分离的前组中, 使正透镜的厚度加厚, 如图3所示。此时正光焦度后移, 使前组组合主面更加前移, 前组主面到后组主面之间的距离 e 更大, 此时的 $\gamma_{负厚}$ 比 $\gamma_{负正}$ 更大, 即

$$\gamma_{负厚} > \gamma_{负正}$$

同时, 轴上光线在后组的高度也增加了, 可以获得更长的工作距离, 而从后组反向过来的轴外主光线更早地开始收敛, 当到达前组第一透镜时, 轴外主光线的高度更低, 使得前片口径更小, 即

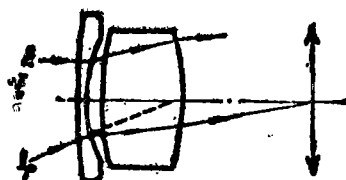


图 3

$$\phi_{\text{负厚}} < \phi_{\text{负正}}$$

而且由于轴外主光线在前组的高度进一步降低，从而进一步降低轴外高级象差。因此，在负正透镜分离的前组结构中加厚正透镜，可以更加有效地解决结构小型化和成象质量之间的矛盾。我们把这种双凸厚透镜称为“鼓形透镜”，以便与其它厚透镜相区别。

鼓形透镜可以看作是由两个正薄透镜中间夹一块厚的平行平板所构成。它的象差亦可看成是两个正薄透镜和一块平行平板的象差总和。鼓形透镜用作前组的正透镜，它处于光束散区， u 、 u_p 均为负值，那么所有初级象差均为负值，能够使前组的 S_{II} 、 S_{III} 和 S_V 变负正是校正象差所需要的。鼓形透镜不但可以在前组中应用，而且在后组中，只要满足 u 、 u_p 同号，对校正象差和结构的小型化同样也是有利的。

在鱼眼物镜的设计中，为获得非常大的 γ_1 ，前组结构通常采用负正透镜分离的型式做基础加以复杂化，复杂化的方向往往是在前面增加单负透镜，并且引入鼓形透镜。我们知道，单负透镜的 γ 虽不及负正透镜分离大，但却比正负透镜分离大，而且结构非常简单，这也是单负透镜经常被用来作为前组的原因。

由于鱼眼物镜的前组具有很大的 γ_1 ，其负光焦度很大，因此产生很大的负 S_{IV} ，这就要求后组尽可能地多产生正 S_{IV} ，以便相互抵消。为此，后组的结构型式通常采用正透镜的分离。因为

$$S_{IV} = i^2 \sum \frac{\varphi}{n} \quad (7)$$

即当光焦度为定值时， S_{IV} 仅与玻璃折射率成正比。因此，正透镜的折射率应尽可能低，负透镜的折射率应尽可能高。

下面所举的是鱼眼物镜的两个实例。

例1：球幕电影摄影用鱼眼物镜。

焦距 $f' = 7.5\text{mm}$

相对孔径 1:2.8

视场角 $2w = 180^\circ$

反远比 $l'/f' = 2.408$

结构型式如图4所示。前组是单负透镜和负正透镜分离型式的复杂化，后组是引入鼓形透镜的正透镜的分离，光阑处于后组的中间。

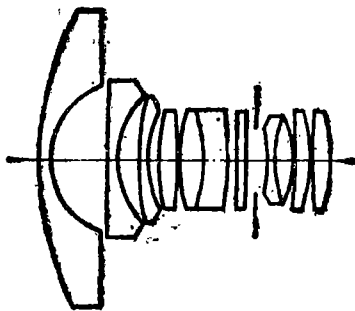


图 4

象差曲线如图5所示。从象差曲线可以看出，球差、正弦差和象散均校正得很好，而畸变当视场角 $w = 90^\circ$ 时为100%，轴外视场的象差曲线，在 $2w = 90^\circ$ 以内校正得很好，在 $2w = 130^\circ$ 以外，随着视场角的增加，轴外球差逐渐增大，但相对孔径降为1:4时，成象质量则明显提高。这一方面可以用渐晕来实现，另一方面鱼眼物镜多用于外景拍摄，可以缩小相对孔径使用。

例2：球幕电影放映用鱼眼物镜

我们希望球幕电影的球形银幕尽可能大些，以便于更多的观众一同观看。银幕大，则鱼眼物镜的放映倍率就大。放映的物象倍率为

$$m = \frac{l}{f'} + 1 \quad (8)$$

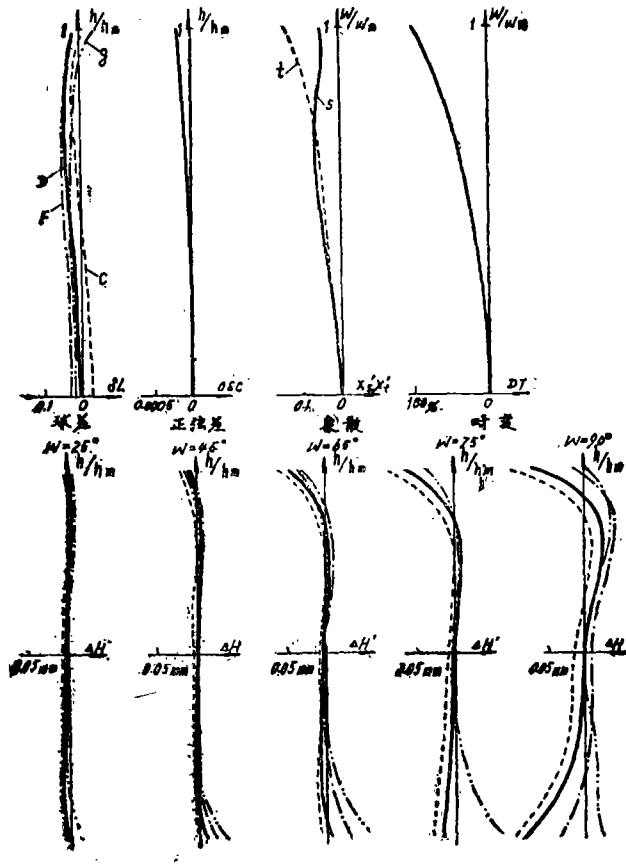


图 5

比如球形银幕的半径为5m，鱼眼物镜位于球幕的球心，即放映距离为5m，鱼眼物镜的焦距为 $f' = 8.38\text{mm}$ ，那么放映倍率

$$m = -596$$

这里，放映倍率即为鱼眼物镜的角放大率，即

$$m = \frac{u'}{u} \tag{9}$$

而鱼眼物镜的相对孔径为1:2.8，当放大倍率为 $m = -596$ 时，球幕上的成像孔径角为 $2u = 0.0006$ ，成像孔径角小，则照度降低，为了提高球形银幕上的照度，一方面应增大照明光源的发光强度，另一方面则应提高鱼眼物镜的相对孔径，而相对孔径的增加将导致象差增大。

放映用鱼眼物镜的分辨率应该是多少呢？

比如球幕的半径仍为5m，观众亦在5m左右观看，如果人眼的视角对应于活动目标为 $\theta = 6'$ ，那么银幕上的弥散则为

$$\Delta H' = L \cdot \text{tg}\theta \tag{10}$$

计算得 $\Delta H' \approx 9\text{mm}$ ，而底片上的弥散则为

$$\Delta H = \Delta H' / |m| \tag{11}$$

计算得 $\Delta H \approx 0.015\text{mm}$ ，即底片的分辨率不应低于 66线/mm。这样的话，鱼眼物镜对应底片来说，分辨率是不低的。因此，要求放映用鱼眼物镜一方面相对孔径大，另一方面具有优良的成像质量，这是比较难的。

为了在增大相对孔径的同时提高成象质量，我们采用二次成象的原理，鱼眼物镜本身的相对孔径很小，利用转象物镜提高相对孔径，在鱼眼物镜和转象物镜之间放置场镜来衔接二者的入瞳和出瞳。这种成象原因也可以加大光学系统的工作距离。

我们应用二次成象原理设计的放映用鱼眼物镜，其技术指标如下，

焦距 $f' = 8.38\text{mm}$

相对孔径 1 2.8

视场角 $2w = 180^\circ$

结构型式如图 6 所示。

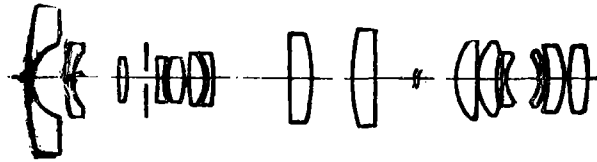


图 6

前面的鱼眼物镜结构比较简单，前组是单负透镜和负正透镜分离型式的组合，后组是两个正光焦度双贴合透镜的分离。其技术指标为：

焦距 $f' = 29.1\text{mm}$

相对孔径 1:9.7

视场角 $2w = 180^\circ$

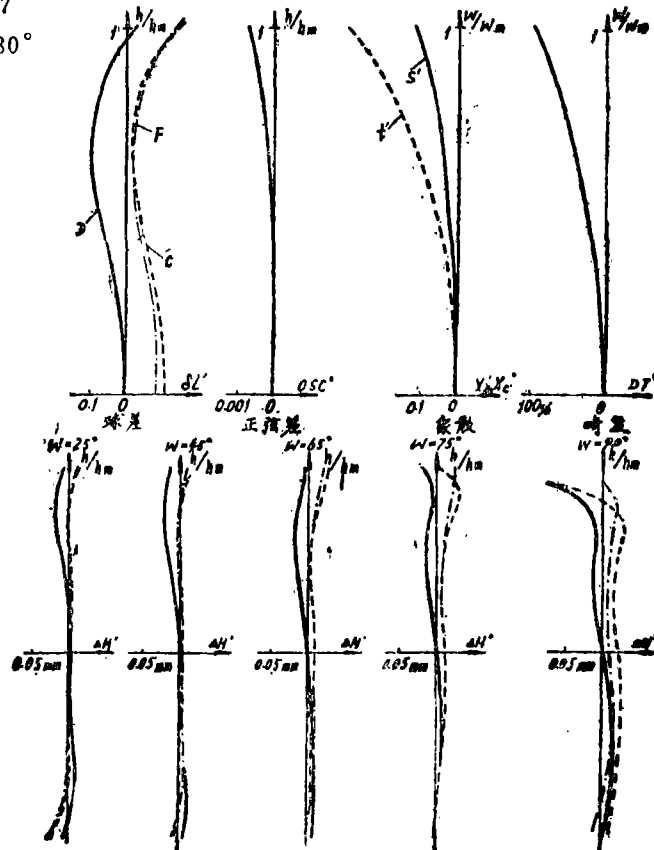


图 7

后面的转象物镜，其结构型式为双高斯物镜的变形。其技术指标为：

焦距 $f' = 132.07\text{mm}$

相对孔径 1:2.2

转象倍率 $m = -3.8\times$

象差曲线如图 7 所示。

这个设计结果因为采用二次成像原理，二级光谱有所增大，为 0.1mm 左右，因而颜色象差稍大，其中倍率色差可由拍摄和放映过程得到补偿。而单色象差引起的弥散均在 0.015mm 左右，可以满足球幕电影的放映要求。

The Fisheye Lens for Spherical Screen Motion-Picture

Feng Xiuheng

Abstract

This paper discusses the principle of spherical screen motion-picture and the design method of fisheye lenses for photograph and projection of it. The characteristics of the structure and the aberrations of the fisheye lens are described and two examples of The fisheye lenses are given respectively.