

非球面目镜

郝沛明

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘 要 由于孔径光栏(出瞳)在目镜光学系统的外面, 所以光学系统的畸变矫正格外地困难。消除畸变的最佳方法是采用非球面。本文依据三级像差理论, 对新颖的非球面广角目镜的光学系统设计作了描述, 并给出设计的结果和数据。

关键词 非球面, 三级像差理论, 点列图。

1 球面目镜

目前使用的目镜都是由球面透镜所构成。由于, 目镜的焦距短, 视场大, 孔径光栏(出射光瞳)在目镜的外部, 这样要矫正轴外非对称像差, 如彗差、倍率色差、畸变是非常困难的。其中, 广角目镜的畸变就更显得突出, 以焦距 $f = 16 \text{ mm}$, 视场角 $2\omega = 82^\circ$ 的广角球面目镜的实例来说明。

球面光学系统的结构参数列入表 1, NS 为光学系统的总面数, UO 为入射角, H1 为入射高度, UPO 为半视场角, ISTOP 为光栏所在的面号, No 为面号, radius 为半径, sepn 为面与面之间的间隔, index 为光学玻璃的折射率, dispn 为部分色散, HCA 为通光口径的半高度, GL. 为光学系统设计程序中指定的光学玻璃序号, NGL 为所用的光学玻璃牌号的数目, NW 为采用几种波长, WL 为波长。光学系统结构近似如图 1 所示。其最大球差 LA 为 0.198 mm, 最大正弦差值 OSC 为 0.0048, 像散最大值 $AST = x_t - x_s = -3.5 \text{ mm}$, 最大畸变 DT 为 12.2%, 最佳离焦量为 $DFDCU = -0.20 \text{ mm}$ 点列图最大尺寸为 0.514 mm。

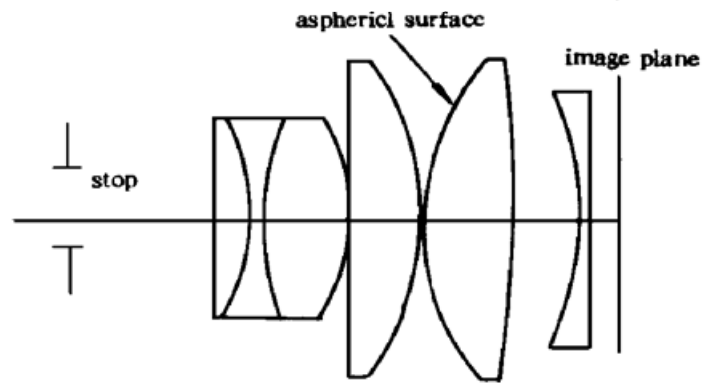


Fig. 1 Schematic diagram of optical system

Table 1. Structure parameters of the spherical optical system

NS	UO	H1	UPO	ISTOP			
12	0.000000	2.000	-41.000	1			
No.	radius	sepn	index	dispn	HCA	GL.	glass
1	0.0000	0.000	1.0000000	0.0000000	2.000	0	

No.	radius	sepn	index	dispn	HCA	GL.	glass
2	0.0000	9.500	1.0000000	0.0000000	10.258	0	
3	-23.0700	3.600	1.6125952	0.0104937	10.692	1	ZK6
4	30.0000	1.300	1.7280019	0.0256857	14.029	2	ZF4
5	-22.5000	8.200	1.6125951	0.0104937	13.953	1	ZK6
6	0.0000	0.100	1.0000000	0.0000000	16.223	0	
7	-27.6700	6.900	1.6125951	0.0104937	16.590	1	ZK6
8	26.0000	0.100	1.0000000	0.0000000	16.578	0	
9	-110.0000	8.700	1.6125951	0.0104937	16.125	1	ZK6
10	-31.6200	6.200	1.0000000	0.0000000	13.022	0	
11	-645.5600	1.000	1.7280019	0.0256857	12.686	2	ZF4
12	0.0000	2.617	1.0000000	0.0000000	12.209	0	
NGL	NW		1 WL	2 WL	3 WL		
2	3		0.5892938	0.6562725	0.4861327		
1	ZK6		1.6125951	1.6095008	1.6199945		
2	ZF4		1.7280019	1.7207950	1.7464807		

2 非球面目镜

广角球面目镜的畸变没有得到很好的矫正, 严重地影响了其使用效果。矫正畸变的最佳方法是采用非球面, 采用非球面可以增加光学系统设计的变数, 对设计是有利的。

设计非球面目镜从三级像差理论出发。三级像差系数的表示式为:

$$\begin{aligned}
 S_{\text{I}} &= \sum hP + \sum h^4K, & S_{\text{II}} &= \sum h_p P - J \sum W + \sum h^3 h_p K, \\
 S_{\text{III}} &= \sum \frac{h_p^2}{h} P - 2J \sum \frac{h_p}{h} W + J \sum \Phi + \sum h^2 h_p^2 K, & S_{\text{IV}} &= J \sum \frac{\Pi}{h}, \\
 S_{\text{V}} &= \sum \frac{h_p^3}{h^2} P - 3J \sum \frac{h_p^2}{h^2} W + J^2 \sum \frac{h_p}{h} (3\Phi + \frac{\Pi}{h}) - J^2 \sum \frac{1}{h^2} \Delta(\frac{1}{n^2}) + \sum h h_p^3 K
 \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned}
 P &= \left(\frac{\Delta u}{\Delta(1/n)} \right)^2 \Delta\left(\frac{u}{n}\right), & W &= \frac{\Delta u}{\Delta(1/n)} \Delta\left(\frac{u}{n}\right), & \Pi &= \frac{\Delta u}{nn'}, \\
 \Phi &= \frac{1}{h} \Delta \frac{u}{n}, & K &= - \frac{e^2}{R^3} \Delta n
 \end{aligned}$$

式中 e 为二次曲面的偏心率, R 为顶点的曲率半径。从公式中可以看出, 含 K 项就是与非球面像差系数有关的项。在设计非球面目镜时必须注意如下:

1) 如果非球面放置在孔径光栏的位置, 主光线的入射高度 $h_p = 0$, 这样只能矫正轴上像差, 对轴外像差不起作用;

2) 如果非球面放置在视场光栏的位置, 孔径光线的入射高度 $h = 0$, 这样只能矫正轴外像差, 对轴上像差不起作用;

3) 非球面本身产生的高级像差很小, 生成主要的是初级像差, 这样与系统球面生成的初级和高级像差相平衡创造了有利条件;

4) 从 K 的表示式可以看出, K 与 e^2 、 Δn 成正比; 与 R^3 成反比。为了生成负像差, 希望增大 Δn 的值, 即选择高折射率的光学玻璃; 希望 R 在不影响光学设计的情况下, 尽可能的小, 这样可使生成的负像差增大;

5) 非球面一定位于凸面上, 这对设计和加工都是有利的;

6) 考虑矫正畸变, 非球面一定要位于背向孔径光阑的面, 即主光线与球面法线的夹角 i_p 比较大的面, 这对设计时的像差平衡是有利的。

根据上述分析, 非球面选择在第 8 面上 (R_8)。第 8 面, 即不是孔径光阑面, 也不是视场光阑面, 但主要对轴外像差起作用。加入非球面后, 要对光学系统的像差重新平衡。加工非球面后, 光学系统的结构没有发生变化, 光学系统示意图与球面的光学系统示意图一样, 所以利用图 1, 在第 8 面注明为非球面(aspherical surface)。在像差平衡时, 各透镜的光焦度作了一些微量改变, 即透镜的弯曲作了改变, 但光学系统的总光焦度没有变化。非球面广角目镜的设计结果列入表 2, 在表 2 中, NAS 为采用非球面的个数。入瞳 $2H1= 4 \text{ mm}$, 焦距 $EFL = 16.0071 \text{ mm}$, 视场角 $2UPO= 82^\circ$, 非球面位于第 8 面 $R_8 = 23.84 \text{ mm}$, A 为非球面系数, 对二次曲面而言 $A1 = 1 - e^2$, 其它高次项的非球面系数均为零, 这样 $e^2 = 1.65$ 。最大球差 $LA = 0.145 \text{ mm}$, 最大正弦差 $OSC = 0.0018$, 子午像面弯曲 X_t 、弧矢像面弯曲 X_s 和畸变 DT (%) 的像差曲线表示在图 2, 最大像散 $AST = - 2.5 \text{ mm}$, 最大畸变 $DT = 2.4\%$ 。最佳离焦量 $DFDCU = 0.5 \text{ mm}$ 时点列图表示在图 3, 图 3 的右部是光能集中度的曲线, 纵坐标表示点列图大小的圆半径 R (mm), 横坐标表示光强 $INTEN$, 以 100% 计算, 图中的横线表示光能集中度为 80% 的点列图大小的圆半径, 图 3 的左部表示点列图的大小和形状, 下标尺是点列图弥散大小的最大尺寸。从图 3 可以看出, 光能集中度为 80% 时, 点列图弥散圆的大小 $\phi = 0.15 \text{ mm}$, 光能集中度为 100% 时, 点列图弥散圆的大小 $\phi = 0.22 \text{ mm}$ 。

Table 2. Design of aspherical surface eyepiece

NS	U0	H1	UPO	ISTOP			
12	0.000000	2.000	- 41.000	1			
No.	radius	sepn	index	dispn	HCA	GL.	glass
1	0.0000	0.000	1.0000000	0.0000000	2.000	0	
2	0.0000	10.450	1.0000000	0.0000000	11.084	0	
3	- 23.0000	4.098	1.6125951	0.0104937	11.529	1	ZK6
4	40.0000	1.366	1.7280019	0.0256857	14.854	2	ZF4
5	- 23.4807	8.414	1.6125951	0.0104937	14.952	1	ZK6
6	260.0000	0.069	1.0000000	0.0000000	17.409	0	
7	- 31.0000	6.830	1.6125951	0.0104937	17.574	1	ZK6
8	23.8400	0.069	1.0000000	0.0000000	16.849	0	
9	- 120.0000	9.000	1.6125951	0.0104937	16.228	1	ZK6
10	- 37.8000	5.300	1.0000000	0.0000000	14.069	0	
11	109.0000	1.366	1.7280019	0.0256857	12.658	2	ZF4
12	0.0000	2.806	1.0000000	0.0000000	13.597	0	
NAS= 1							
No.	A1	A2	A3	A4	A5	lasp	
1	- 0.65000E+ 00	0.00000E+ 00	0.00000E+ 00	0.00000E+ 00	0.00000E+ 00	0.00000E+ 00	1000
NGL	NW	1 WL		2 WL	3 WL		
2	3	0.5892938		0.6562725	0.4861327		
1	ZK6	1.6125951		1.6095008	1.6199945		
2	ZF4	1.7280019		1.7207950	1.7464807		

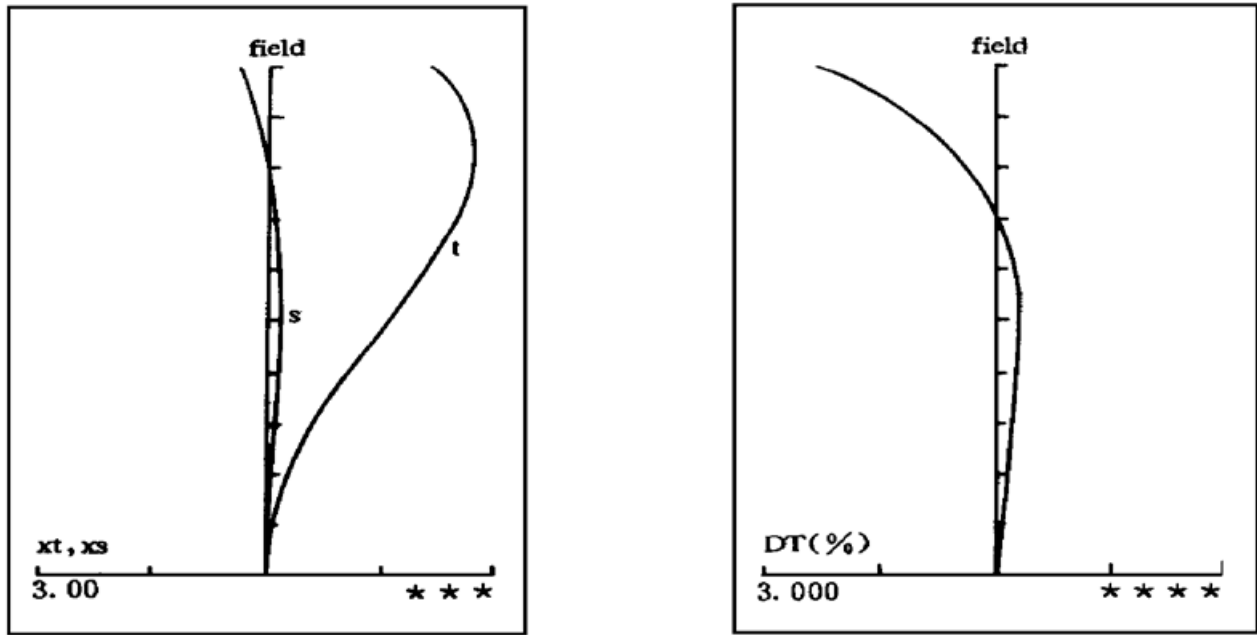


Fig. 2 Aberration curves of astigmatism (a_t, x_s) and distortion

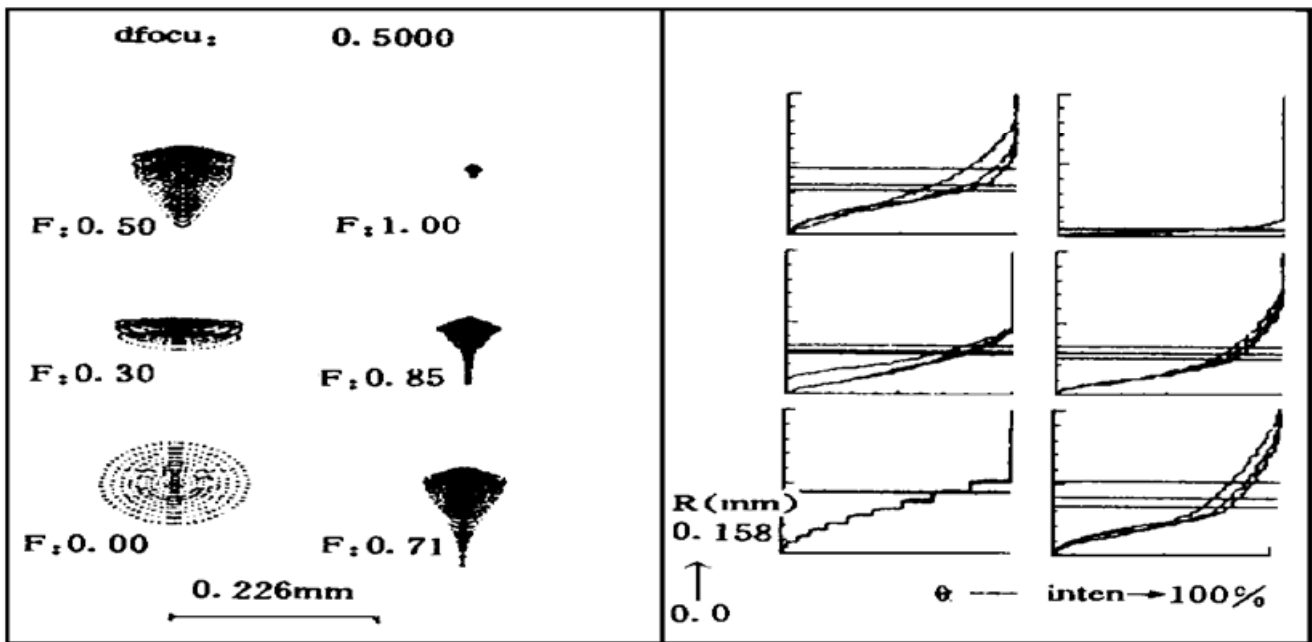


Fig. 3 Stop diagram

结 论 通过上述焦距为 16 mm、相对孔径为 1/4、视场角为 82°的球面和非球面广角目镜的光学系统设计结果对比来看，结论如下：

采用非球面可以矫正目镜光学系统的畸变，同时光学系统其他像差也可得到改善。这说明，非球面的光学系统优于球面的光学系统，成像质量得到明显改善。

设计的广角非球面目镜已经开始批量生产，非球面加工请参阅文献[5]，并开始正式应用。

感谢纪玉峰先生给予此项工作的大力支持。

参 考 文 献

- [1] Warren J. Smith, *Modern Optical Engineering*, New York, McGraw, Hill Book Company, 1966
- [2] 《光学仪器设计手册》编辑组编, 光学仪器设计手册——上册. 北京, 国防工业出版社, 1971: 217~226, 282~304
- [3] 王之江, 光学设计理论基础. 北京, 科学出版社, 1965: 295~317
- [4] 潘君骅, 郝沛明, 两个二次曲面反射镜组成的光学系统的一般研究. 天文学报, 1965, **13**(1): 46~56
- [5] 郝沛明, 凸非球面加工. 光学学报, 1991, **11**(10): 931~937

The Eyepiece of Aspherical Surface

Hao Peiming

*(Anhui Insitute of Optical and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)**(Received 10 March 1996; revised 12 August 1996)*

Abstract Because the aperture stop (exit pupil) is normally outside of the eyepiece optical systems, it's especially difficult to correct the distortion of the optical system. The best way to eliminate the distortion is to use aspherical surface. The novel design of the optical system with aspherical surface of a wide angle eyepiece is described by the third-order aberration theory. The designning results and data are given.

Key words aspherical surface, third-order aberration theory, stop diaphragm.