

光学系统设计技巧

郑保康

(云南北方光学电子集团有限公司 昆明 650114)

(续 2004 年 No.3)

§ 4.4 眼镜片设计

(一) 眼睛的折光缺陷

眼睛是一个理想的光学系统,它有一定的折光能力。在正常情况下,它可以将远处物体清晰成像在视网膜上,称这种眼为正常眼或正视眼,如图 4.6 所示。如果不作

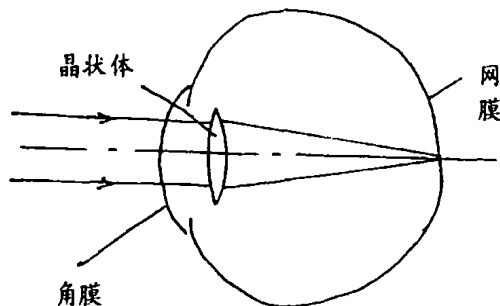
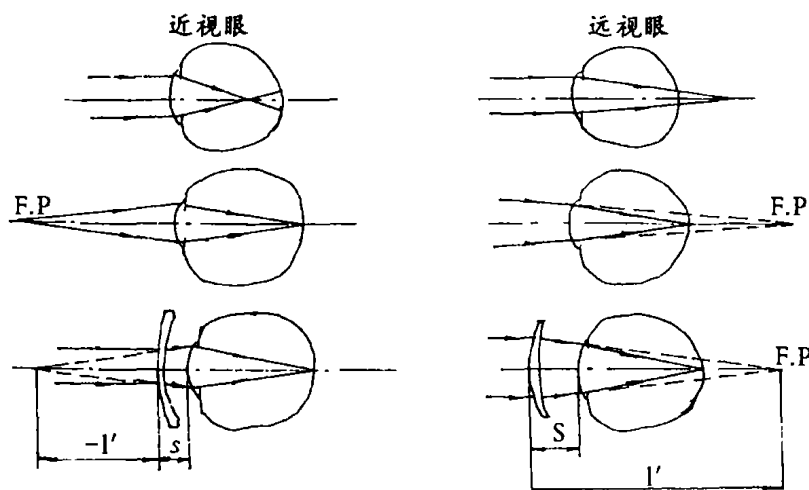


图 4.6 正常眼睛

视力调节,眼睛不能将远处物体清晰成像在视网膜上时,则称为非正常眼,或称“屈光不正”。非正常眼主要包括近视眼、远视眼和散光眼。

正视眼的远点在无穷远,能使无穷远物体成象于视网膜上。近视眼的远点(即与网膜上最敏感点共轭的物点)在眼睛前方,它使无限远物体成象在网膜之前;远视眼的远点在眼睛后方,使无限远物体成象在网膜之后,近视和远视均会使所见之物模糊不清,两种情况都可以用球面透镜校正之。只要使镜片的后焦点与眼睛的远点重合,就能看清楚远处物体,近视眼和远视眼的折光情况如图 4.7 所示。



$F.P$ —眼睛的远点; l' —镜片的后截距; S —镜片后顶点到角膜的距离

图 4.7

除了以上两种用球面镜校正视力的情形之外,非正常眼还包括散光眼,散光眼又可分为有规则的散光眼及无规则的散光眼。规则的散光眼能将远处物点造成互相垂直的两条焦线,无规则的散光眼成像情况较为

复杂。当散光与近视或远视同时存在时,称为复散光,一条焦线在网膜上,另一焦线在网膜前方或后方者称为单散光,我们可依据焦线与网膜的相对位置,将散光分为以下五种类型(如图 4.8 所示)。

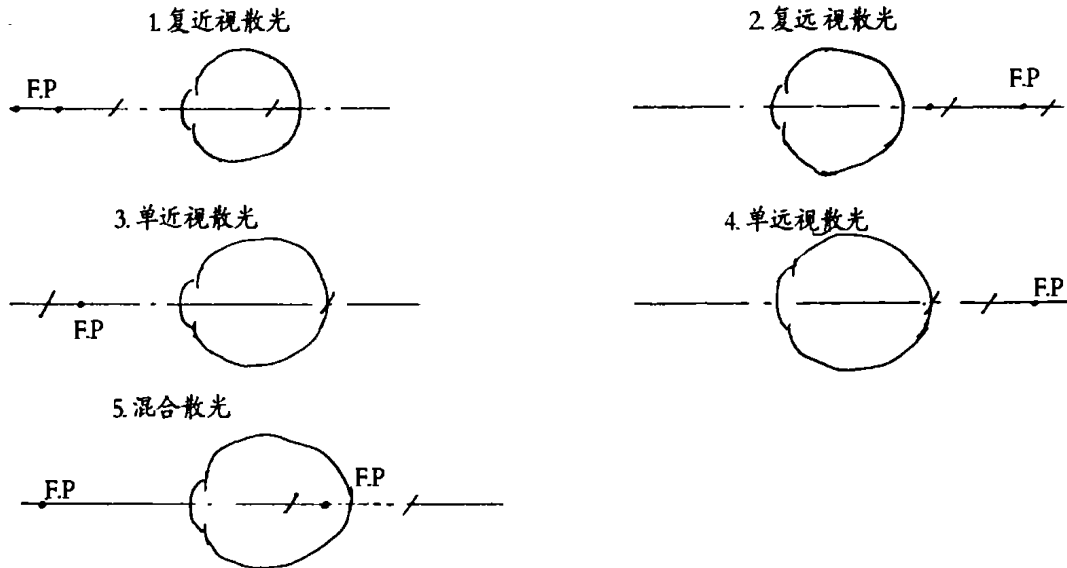


图 4.8 散光眼类型

1、复近视散光

两条焦线均在网膜之前,两个远点均在眼睛前方。

2、复远视散光

两条焦线均在网膜后方,两个远点均在眼睛后方。

3、单近视散光

一条焦线在网膜上,另一条焦线在网膜之前;一个远点在无限远,另一个远点在眼睛前方。

4、单远视散光

一条焦线在网膜上,另一条焦线在网膜后;一个远点在无限远,另一个远点在眼睛后方。

5、混合散光

一条焦线在网膜前,另一条焦线在网膜后;一个远点在眼睛前方,另一个远点在

眼睛后方。

不论何种类型的散光,均有两个远点与网膜共轭,为了校正散光眼,则要求配制的眼镜片有两个后焦点与两点重合,散光眼可用球柱面或环曲面透镜来校正。

(二) 眼镜“度数”的计算

现代眼镜的度数均以后顶镜度表示之。所谓后顶镜度是指以米为单位的后截距的倒数,其单位为镜度,以字母 D 表示。例如透镜的后截距为 1 米,则后顶镜度是 1D,后截距为 0.5 米,则后顶度为 2D 等。

眼镜度数通常以 1/4D 为级差,例如: $\pm 0.25D$, $\pm 0.50D$, $\pm 0.75D$, $\pm 1.00D$, 一般表示到小数后面两位,镜片的镜度为零,以 0.00D 表示,称为平光镜。有时候也用 1/8D 为级差,仍采用两位小数,如 $\pm 0.12D$, $\pm 0.25D$, $\pm 0.37D$, $\pm 0.50D$, $\pm 0.62D$, \pm

0.75D, ± 0.87D, ± 1.00D 等,比较常用的是前一种表示方法。

一个镜片有两个表面,中间夹着厚度为 d 的玻璃,如图 4.9 所示,折射率为 n ,两个表面的曲率半径分别为 r_1 、 r_2 。

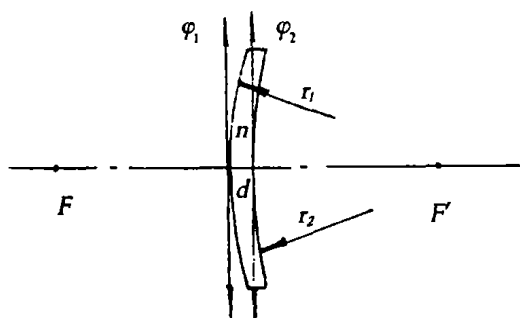


图 4.9 厚透镜的面镜度

根据几何光学中关于面光焦度的定义,可得到两个表面的镜度为:

$$\varphi_1 = \frac{n - 1}{r_1} \quad \dots\dots(4.46)$$

$$\varphi_2 = \frac{1 - n}{r_2} \quad \dots\dots(4.47)$$

则后顶镜度 φ' 可表示为:

$$\varphi' = \frac{\varphi_1 + \varphi_2 - \frac{d}{n}\varphi_1\varphi_2}{1 - \frac{d}{n}\varphi_1} \quad \dots\dots(4.48)$$

而前顶镜度 φ 可表示为:

$$\varphi = \frac{\varphi_1 + \varphi_2 - \frac{d}{n}\varphi_1\varphi_2}{1 - \frac{d}{n}\varphi_2} \quad \dots\dots(4.49)$$

现代眼镜片在制造时多以正面为基准面,因此当选定厚度 d 之后,便可按后顶镜度 φ' 的要求,用下式来算出背面镜度 φ_2 。

$$\varphi_2 = \varphi' - \frac{\varphi_1}{1 - \frac{d}{n}\varphi_1} \quad \dots\dots(4.50)$$

眼镜度数的计算并不复杂,但容易弄错,其原因多数在于用光焦度代替后顶镜度。当计算远视镜片,特别是高度数的镜片时,会引起较大的误差。因此,这一点应引

起特别注意。

(三) 镜片形式

当眼睛环视周围景物时,眼球将绕着转动中心旋转。网膜上的最敏感部分,即中心凹也随之转动,可以想见,与中心凹共轭的远点也将形成一个球面,称它为远点球面。对于远视眼,此球面在眼睛的后方;对于近视眼,远点球面在眼睛的前方(如图 4.10 所示)。

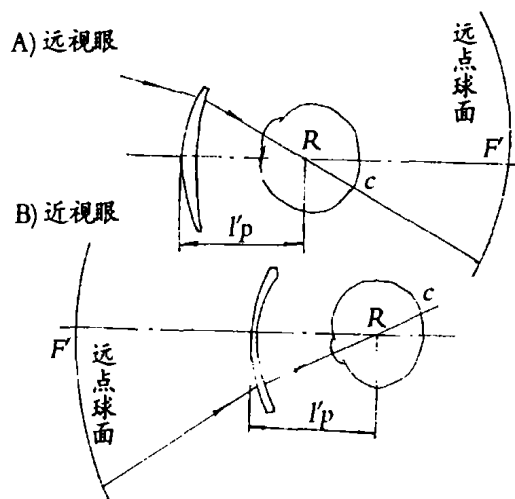


图 4.10 远点球面

一般情况下,人眼瞳孔仅有 3 ~ 4mm,在每个时刻眼镜被用到的部分只是极小一部分,所以眼镜是个大视场小孔径系统,而眼镜的设计乃是要计算一个单透镜,在选定的视场范围内,细光束焦点都与远点球面相重合。

眼镜片成象当然有各种象差。然而,对球差和慧差因其孔径小均可忽略,色差虽然存在,但因眼睛对光谱两端的视感度降低,而色差几乎不易被察觉。所以大致说来,色差也是不严重的。其余的象差有象散、场曲和畸变,畸变只改变象的形状,而不影响清晰度。场曲应当尽量符合远点球面的要求。由此来看,眼镜片设计时应当优先考虑的只有象散差。

一个单透镜用来校正象差的 factors 有：

- A、镜片后顶点到眼睛转动中心的距离 l'_p 。
- B、镜片厚度 d 。
- C、玻璃的折射率 n 。
- D、在保持总镜度 φ' 不变的情形下，改变镜片的弯曲形状。

为了美观，眼镜片应当尽量靠近眼睛，且镜片愈薄愈好。此外，为了经济，应当选用最普通的光学玻璃，由此看来，前三个因素实际上不能任意选择的，唯一可控制的因素是镜片的弯曲形状，通常是改变镜片的弯曲以达到校正象散差之目的。弯月透镜具有较小的象散差，因此，现代镜片皆为弯月形。

关于消象散镜片，用初级象差理论可以导出如下表达式：

$$(n + 2)\varphi_2^2 + \varphi_2[2L'_2(n^2 - 1) - \varphi'(n + 2)] - 2\varphi'L'_2(n - 1) + n\varphi'^2 + nL'^2_2(n - 1)^2 = 0$$

这就是所谓 TSCHERNING 方程式。式中 φ' 、 φ_2 分别为镜片的总镜度及背面镜度； n 为折射率， L'_2 为镜片后顶点到转动中心的距离 l'_p 的倒数，即 $L'_2 = \frac{1}{l'_p}$ 其单位是镜度。

设 $l'_p = 27\text{mm}$, $n = 1.523$,

则 $L'_2 = \frac{1000}{27} = +37.00D$

代入上式求得 φ_2 的二次方程式：

$$\varphi_2^2 + \varphi_2(27.7 - \varphi') - 10.98\varphi' + 0.432\varphi'^2 + 161.8 = 0$$

如果将方程绘成 φ_2 和 φ' 的曲线，则得所谓 TSCHERNING 椭圆，如图 4.11 所示。

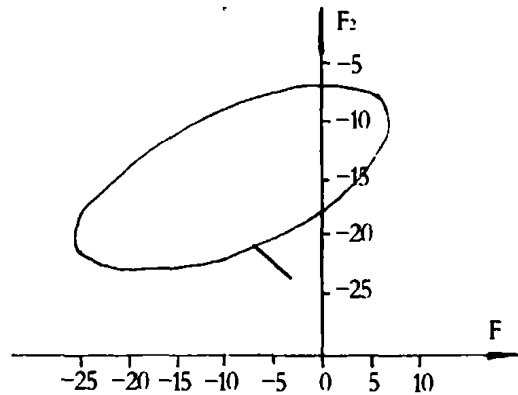


图 4.11 TSCHERNING 椭圆

椭圆表示出三级象差范围内，点焦镜片的形式，它对于眼镜设计有着原则上的指导意义。

(四) 眼镜的光线追迹法设计

由上图可以看出，以三级象差理论计算的镜片弯曲度太深，不仅制造困难，而且外形不够美观，近代眼镜多为近似点焦形式，留有少量象散差，以获得较之纯点焦镜片为佳的形式。

众所周知，三角法计算细光束焦点位置的公式如下：

$$\frac{n'}{s'} = \frac{n}{s} + \frac{n' \cos i' - n \cos i}{r}$$

$$\frac{n' \cos^2 i'}{t'} = \frac{n \cos^2 i}{t} + \frac{n' \cos i' - n \cos i}{r}$$

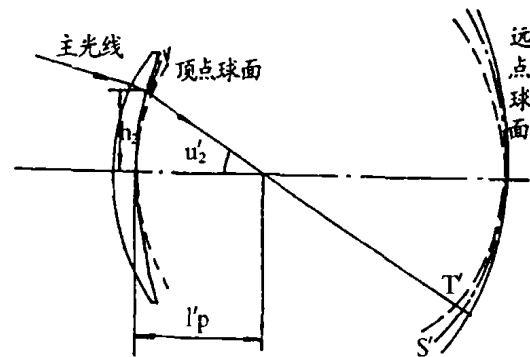


图 4.12 顶点球面

从光路计算得到的量 t'_2 、 s'_2 是自透镜第二表面沿主光线度量的量。为了使不

同形状的透镜有可比性,假设子午和弧矢焦点都从一个球面量起(如图 4.12 所示)。

这个球面是以眼球转动中心 R 为圆心,以镜片后顶点到 R 的距离 l'_p 为半径做出,我们称它为顶点球面。由图 4.12 可求出镜片表面到顶点球面的距离 V 。

$$V = \frac{h_2}{\sin U'_2} - l'_p$$

则从顶点球面度量的量可表示为

$$l'_{2V} = l'_2 - V$$

$$s'_{2V} = s'_2 - V$$

如果用 $\varphi'_i = \frac{1}{l'_{2V}}$

$$\varphi'_s = \frac{1}{s'_{2V}}$$

分别代表子午和弧矢顶球镜度,则象散差表示为 $(\varphi'_i - \varphi'_s)$ 。弥散园最小的位置是子午焦面和弧矢焦面之间的平均位置,显然应当使远点球面与它重合。如果用 $1/2(\varphi'_i + \varphi'_s)$ 表示平均轴外镜度,用 $\delta\varphi' = 1/2(\varphi'_i + \varphi'_s) - \varphi'$ 表示平均轴外镜度误差,那么近似点焦镜片的质量指标可以用平均轴外镜度误差 $\delta\varphi'$ 来表示。

(五) 眼镜设计实例

在实际生产中,眼镜片的形式应由多种因素决定,如成象清晰度,镜片外观,以及生产中使用尽可能少的磨具,以求降低工具制造费用,然而就成象清晰度论,每一不同的镜度对应着各自的最理想形式。为了做到在生产中使用尽可能少的磨具,应当在一定的镜度范围内选用一个基准镜度,而在整个镜度范围内选定几个不同的镜度,以使背面镜度能较多的重复出现。

不同的眼镜制造厂,各有其差别不大的理想形式,在下面的表 4.1 ~ 4.2 中列出了中国北方工业公司、法国、日本保谷、日

本清水光学股份有限公司等厂家的镜片基准面弯度。可以看出各厂家镜片的弯度略有差别,但差别不很大。

表 4.3 中给出各家远视镜片及近视镜片的平均轴外镜度误差 $\delta\varphi'$ 和不同的曲率半径数。由表可知中国北方工业公司出口眼镜片的平均轴外镜度误差最小,成象清晰度高,同时生产中所需要的磨具也较少。

表 4.4 ~ 4.9 列出北方工业公司三种规格的直径为 $\phi 56\text{mm}$ 、 $\phi 60\text{mm}$ 、 $\phi 65\text{mm}$ 的远视镜片和近视镜片的各种数据,可供读者参考。

表 4.1 远视镜片基准面弯度比较

厂 家 镜 度	中国北方工业公司	法国	日本保谷	日本清水
0.00				
+ 0.25	5.50	6.00	6.00	5.00
+ 0.50				
+ 0.75	弯	弯	弯	弯
+ 1.00				
+ 1.25	6.50	7.00	7.00	6.00
+ 1.50				
+ 1.75	弯	弯		弯
+ 2.00				
+ 2.25	7.25	7.50	弯	7.00
+ 2.50			8.00	
+ 2.75				
+ 3.00	弯	弯	弯	弯
+ 3.25	8.00	8.00	8.50	8.00
+ 3.50				
+ 3.75				
+ 4.00	弯	弯	弯	弯
+ 4.25	9.00	8.50		9.00
+ 4.50				
+ 4.75				
+ 5.00	弯	弯		
+ 5.25	9.75	9.00		弯
+ 5.50				10.00
+ 5.75				
+ 6.00	弯	弯		弯

表 4.2 近视镜片基准面弯度比较

镜 度 \ 厂 家	中国北方工业公司	法国	日本保谷	日本清水
0.00				
- 0.25	6.00	5.25	6.00	5.00
- 0.50				
- 0.75				
- 1.00			弯	
- 1.25	弯	弯	5.00	
- 1.50	4.75	4.75		
- 1.75				
- 2.00				弯
- 2.25				4.00
- 2.50	弯	弯		
- 2.75	4.00	4.25		
- 3.00			弯	
- 3.25			4.00	
- 3.50				
- 3.75	弯	弯		
- 4.00	3.50	3.75	弯	弯
- 4.25			3.00	3.00
- 4.50				
- 4.75	弯	弯		
- 5.00	2.75	3.25		
- 5.25				
- 5.50				
- 5.75				
- 6.00	弯	弯	弯	弯

表 4.3 平均轴外镜度误差及半径数比较

$\delta\varphi'$ \ 镜 度 \ 厂 家	中国北方工业公司	法国	日本清水
+ 1.00	- 0.001	- 0.019	0.020
+ 2.00	- 0.005	- 0.042	0.032
+ 3.00	- 0.000	- 0.033	0.0275
+ 4.00	0.0045	- 0.002	0.0095
+ 5.00	- 0.013	0.052	- 0.010
+ 6.00	0.014	0.134	- 0.022
半径数	14	19	11
- 1.00	0.002	- 0.014	- 0.13
- 2.00	0.0015	0.001	0.015
- 3.00	0.0025	0.019	- 0.0025
- 4.00	0.008	0.0345	0.0615
- 5.00	- 0.026	0.0475	0.011
- 6.00	0.051	0.134	0.094
半径数	16	18	18
合计	30	37	29

计算 $\delta\varphi'$ 时,

假设: $l'_p = 27\text{mm}$,

$U'_2 = 30^\circ$

光学眼镜片数值系列表

本数值系列表适用于直径为 $\phi 56$ 、 $\phi 60$ 、 $\phi 65$ 三种规格的平光和 $6.00D$ 以内的远视、近视光学眼镜片(见附表 4.4 ~ 4.9)。

本系列表中使用的符号及计算公式如下:

φ'_0 — 后顶镜度

φ_1 — 第一面光焦度

φ_2 — 第二面光焦度

φ'_0 、 φ_1 、 φ_2 的单位均为屈光度 D

d — 中心厚度

t — 边缘厚度

$$\varphi = \frac{n' - n}{R}$$

$$\varphi'_0 = \frac{\varphi_1 + \varphi_2 - \frac{d}{n}\varphi_1 \cdot \varphi_2}{1 - \frac{d}{n}\varphi_1}$$

注:公式中 R 、 d 的单位均为米。

表 4.4 $\phi 56$ 远视镜片数值系列 $n = 1.523$

φ'_0	φ_1	R_1	φ_2	R_2	d	(t)	$(\varphi'_0 \text{实})$
+ 0.25	5.46	95.8	- 5.25	99.6	2.0	1.8	0.249
+ 0.50	5.46	95.8	- 5.00	104.6	2.1	1.7	0.501
+ 0.75	5.46	95.8	- 4.75	110.1	2.2	1.6	0.753
+ 1.00	5.46	95.8	- 4.51	116.0	2.3	1.5	0.995
+ 1.25	6.43	81.3	- 5.25	99.6	2.4	1.4	1.246
+ 1.50	6.43	81.3	- 5.00	104.6	2.5	1.3	1.499
+ 1.75	6.43	81.3	- 4.75	110.1	2.7	1.3	1.754
+ 2.00	6.43	81.3	- 4.51	116.0	2.8	1.2	1.997
+ 2.25	7.14	73.2	- 5.00	104.6	3.0	1.2	2.242
+ 2.50	7.14	73.2	- 4.75	110.1	3.2	1.2	2.499
+ 2.75	7.14	73.2	- 4.51	116.0	3.4	1.2	2.746
+ 3.00	7.14	73.2	- 4.27	122.5	3.6	1.2	2.993
+ 3.25	7.85	66.6	- 4.75	110.1	3.7	1.1	3.253
+ 3.50	7.85	66.6	- 4.51	116.0	3.9	1.1	3.501
+ 3.75	7.85	66.6	- 4.27	122.5	4.1	1.1	3.749
+ 4.00	7.85	66.6	- 4.03	129.9	4.2	1.0	3.994
+ 4.25	8.77	59.6	- 4.75	110.1	4.4	1.0	4.248
+ 4.50	8.77	59.6	- 4.51	116.0	4.6	1.0	4.499
+ 4.75	8.77	59.6	- 4.27	122.5	4.8	1.0	4.749
+ 5.00	8.77	59.6	- 4.03	129.9	5.0	1.0	5.000
+ 5.25	9.45	55.3	- 4.51	116.0	5.2	1.0	5.255
+ 5.50	9.45	55.3	- 4.27	122.5	5.3	0.9	5.501
+ 5.75	9.45	55.3	- 4.03	129.9	5.5	0.9	5.754
+ 6.00	9.45	55.3	- 3.79	138.0	5.6	0.9	6.000

表 4.5 $\phi 60$ 远视镜片数值系列 $n = 1.523$

φ'_0	φ_1	R_1	φ_2	R_2	d	(t)	$(\varphi'_0 \text{实})$
+ 0.25	5.46	95.8	- 5.25	99.6	2.0	1.8	0.249
+ 0.50	5.46	95.8	- 5.00	104.6	2.1	1.7	0.501
+ 0.75	5.46	95.8	- 4.75	110.1	2.2	1.6	0.753
+ 1.00	5.46	95.8	- 4.51	116.0	2.4	1.5	0.997
+ 1.25	6.43	81.3	- 5.25	99.6	2.5	1.4	1.249
+ 1.50	6.43	81.3	- 5.00	104.6	2.6	1.3	1.501
+ 1.75	6.43	81.3	- 4.75	110.1	2.7	1.2	1.754
+ 2.00	6.43	81.3	- 4.51	116.0	2.9	1.1	2.000
+ 2.25	7.14	73.2	- 5.00	104.6	3.1	1.1	2.245
+ 2.50	7.14	73.2	- 4.75	110.1	3.3	1.1	2.502
+ 2.75	7.14	73.2	- 4.51	116.0	3.5	1.1	2.749
+ 3.00	7.14	73.2	- 4.27	122.5	3.7	1.0	2.996
+ 3.25	7.84	66.7	- 4.75	110.1	3.9	1.0	3.251
+ 3.50	7.84	66.7	- 4.51	116.0	4.2	1.0	3.503
+ 3.75	7.84	66.7	- 4.27	122.5	4.4	1.0	3.752
+ 4.00	7.84	66.7	- 4.03	129.9	4.6	1.0	4.000
+ 4.25	8.75	59.8	- 4.75	110.1	4.8	0.9	4.248
+ 4.50	8.75	59.8	- 4.51	116.0	5.1	0.9	4.504
+ 4.75	8.75	59.8	- 4.27	122.5	5.3	0.9	4.755
+ 5.00	8.75	59.8	- 4.03	129.9	5.5	0.9	5.006
+ 5.25	9.41	55.6	- 4.51	116.0	5.7	0.8	5.243
+ 5.50	9.41	55.6	- 4.27	122.5	5.9	0.8	5.496
+ 5.75	9.41	55.6	- 4.03	129.9	6.1	0.8	5.749
+ 6.00	9.41	55.6	- 3.79	138.0	6.3	0.8	6.001

表 4.6 $\phi 65$ 远视镜片数值系列 $n = 1.523$

φ'_0	φ_1	R_1	φ_2	R_2	d	(t)	$(\varphi'_0 \text{实})$
+ 0.25	5.46	95.8	- 5.25	99.0	2.0	1.8	0.249
+ 0.50	5.46	95.8	- 5.00	104.6	2.1	1.6	0.501
+ 0.75	5.46	95.8	- 4.75	110.1	2.2	1.5	0.753
+ 1.00	5.46	95.8	- 4.51	116.0	2.4	1.4	0.997
+ 1.25	6.42	81.5	- 5.25	99.6	2.6	1.3	1.241
+ 1.50	6.42	81.5	- 5.00	104.6	2.8	1.2	1.497
+ 1.75	6.42	81.5	- 4.75	110.1	3.0	1.1	1.752
+ 2.00	6.42	81.5	- 4.51	116.0	3.3	1.1	2.001
+ 2.25	7.13	73.4	- 5.00	104.6	3.5	1.1	2.249
+ 2.50	7.13	73.4	- 4.75	110.1	3.7	1.0	2.506
+ 2.75	7.13	73.4	- 4.51	116.0	4.0	1.0	2.756
+ 3.00	7.13	73.4	- 4.27	122.5	4.2	1.0	3.003
+ 3.25	7.81	67.0	- 4.75	110.1	4.5	1.0	3.244
+ 3.50	7.81	67.0	- 4.51	116.0	4.8	1.0	3.497
+ 3.75	7.81	67.0	- 4.27	122.5	5.0	1.0	3.746
+ 4.00	7.81	67.0	- 4.03	129.9	5.2	0.9	3.994
+ 4.25	8.71	60.0	- 4.75	110.1	5.5	0.9	4.243
+ 4.50	8.71	60.0	- 4.51	116.0	5.8	0.9	4.499
+ 4.75	8.71	60.0	- 4.27	122.5	6.0	0.9	4.749
+ 5.00	8.71	60.0	- 4.03	129.9	6.3	0.9	5.000
+ 5.25	9.36	55.9	- 4.51	116.0	6.6	0.8	5.240
+ 5.50	9.36	55.9	- 4.27	122.5	6.8	0.8	5.498
+ 5.75	9.36	55.9	- 4.03	129.9	7.1	0.8	5.757
+ 6.00	9.36	55.9	- 3.79	138.0	7.3	0.8	6.010

表 4.7 $\phi 56$ 近视镜片数值系列 $n = 1.523$

φ'_0	φ_1	R_1	φ_2	R_2	d	(t)	$(\varphi'_0 \text{实})$
0.00	5.96	87.8	- 6.00	87.2	2.0	2.0	0.007
- 0.25	5.96	87.8	- 6.25	83.7	1.8	2.0	- 0.243
- 0.50	5.96	87.8	- 6.50	80.5	1.7	2.1	- 0.50
- 0.75	5.96	87.8	- 6.75	77.5	1.6	2.3	- 0.75
- 1.00	5.96	87.8	- 7.00	74.7	1.6	2.5	- 1.00
- 1.25	5.96	87.8	- 7.25	72.1	1.5	2.6	- 1.25
- 1.50	4.73	110.6	- 6.25	83.7	1.4	2.6	- 1.49
- 1.75	4.73	110.6	- 6.50	80.5	1.4	2.8	- 1.749
- 2.00	4.73	110.6	- 6.75	77.5	1.3	2.9	- 2.000
- 2.25	4.73	110.6	- 7.00	74.7	1.3	3.2	- 2.253
- 2.50	4.73	110.6	- 7.25	72.1	1.2	3.3	- 2.501
- 2.75	3.99	131.1	- 6.75	77.5	1.2	3.4	- 2.747
- 3.00	3.99	131.1	- 7.00	74.7	1.1	3.5	- 2.998
- 3.25	3.99	131.1	- 7.25	72.1	1.1	3.7	- 2.248
- 3.50	3.99	131.1	- 7.50	69.7	1.1	3.9	- 3.498
- 3.75	3.99	131.1	- 7.75	67.5	1.0	4.1	- 3.750
- 4.00	3.49	149.9	- 7.50	69.7	1.0	4.2	- 4.002
- 4.25	3.49	149.9	- 7.75	67.5	1.0	4.4	- 4.252
- 4.50	3.49	149.9	- 8.00	65.4	1.0	4.7	- 4.502
- 4.75	3.49	149.9	- 8.25	63.4	1.0	4.9	- 4.752
- 5.00	2.75	190.2	- 7.75	67.5	1.0	5.0	- 5.000
- 5.25	2.75	190.2	- 8.00	65.4	1.0	5.2	- 5.245
- 5.50	2.75	190.2	- 8.25	63.4	1.0	5.4	- 5.495
- 5.75	2.75	190.2	- 8.50	61.5	1.0	5.7	- 5.745
- 6.00	2.75	190.2	- 8.75	59.8	1.0	5.9	- 5.995

表 4.8 $\phi 60$ 近视镜片数值系列 $n = 1.523$

φ'_0	φ_1	R_1	φ_2	R_2	d	(t)	$(\varphi'_0 \text{实})$
0.00	5.96	87.8	-6.00	87.2	2.0	2.0	0.007
-0.25	5.96	87.8	-6.25	83.7	1.7	2.0	-0.250
-0.50	5.96	87.8	-6.50	80.5	1.7	2.2	-0.500
-0.75	5.96	87.8	-6.75	77.5	1.5	2.3	-0.755
-1.00	5.96	87.8	-7.00	74.7	1.5	2.5	-1.005
-1.25	5.96	87.8	-7.25	72.1	1.4	2.7	-1.257
-1.50	4.73	110.6	-6.25	83.7	1.3	2.7	-1.501
-1.75	4.73	110.6	-6.50	80.5	1.3	3.0	-1.751
-2.00	4.73	110.6	-6.75	77.5	1.2	3.1	-2.002
-2.25	4.73	110.6	-7.00	74.7	1.2	3.3	-2.252
-2.50	4.73	110.6	-7.25	72.1	1.1	3.5	-2.504
-2.75	3.99	131.1	-6.75	77.5	1.1	3.7	-2.748
-3.00	3.99	131.1	-7.00	74.7	1.0	3.8	-3.000
-3.25	3.99	131.1	-7.25	72.1	1.0	4.1	-3.250
-3.50	3.99	131.1	-7.50	69.7	1.0	4.3	-3.500
-3.75	3.99	131.1	7.75	67.5	1.0	4.6	-3.750
-4.00	3.49	149.9	-7.50	69.7	0.9	4.7	-4.003
-4.25	3.49	149.9	-7.75	67.5	0.9	4.9	-4.253
-4.50	3.49	149.9	-8.00	65.4	0.9	5.2	-4.503
-4.75	3.49	149.9	-8.25	63.4	0.9	5.4	4.753
-5.00	2.75	190.2	-7.75	67.5	0.9	5.6	-4.996
-5.25	2.75	190.2	-8.00	65.4	0.9	5.8	-5.246
-5.50	2.75	190.2	-8.25	63.4	0.9	6.1	-5.496
-5.75	2.75	190.2	-8.50	61.5	0.9	6.3	-5.246
-6.00	2.75	190.2	8.75	59.8	0.9	6.6	-5.998

表 4.9 $\phi 65$ 近视镜片数值系列 $n = 1.523$

φ'_0	φ_1	R_1	φ_2	R_2	d	(t)	$(\varphi'_0 \text{实})$
0.00	5.96	87.8	-6.00	87.2	2.0	2.0	0.007
-0.25	5.96	87.8	-6.25	83.7	1.7	2.0	-0.250
-0.50	5.96	87.8	-6.50	80.5	1.5	2.1	-0.505
-0.75	5.96	87.8	-6.75	77.5	1.4	2.3	-0.757
-1.00	5.96	87.8	-7.00	74.7	1.3	2.5	-1.010
-1.25	5.96	87.8	-7.25	72.1	1.3	2.8	-1.260
-1.50	4.73	110.6	-6.25	83.7	1.3	3.0	-1.501
-1.75	4.73	110.6	-6.50	80.5	1.2	3.2	-1.752
-2.00	4.73	110.6	-6.75	77.5	1.1	3.4	-2.004
-2.25	4.73	110.6	-7.00	74.7	1.0	3.6	-2.255
-2.50	4.73	110.6	-7.25	72.1	1.0	3.9	-2.505
-2.75	3.99	131.1	-6.75	77.5	1.0	4.1	-2.750
-3.00	3.99	131.1	-7.00	74.7	0.9	4.2	-3.001
-3.25	3.99	131.1	-7.25	72.1	0.9	4.5	-3.251
-3.50	3.99	131.1	-7.50	69.7	0.9	4.8	-3.501
-3.75	3.99	131.1	-7.75	67.5	0.9	5.1	-3.751
-4.00	3.49	149.9	-7.50	69.7	0.9	5.4	-4.001
-4.25	3.49	149.9	-7.75	67.5	0.9	5.7	-4.251
-4.50	3.49	149.9	-8.00	65.4	0.9	6.0	-4.501
-4.75	3.49	149.9	-8.25	63.4	0.8	6.2	-4.754
-5.00	2.75	190.2	-7.75	67.5	0.8	6.3	-4.996
-5.25	2.75	190.2	-8.00	65.4	0.8	6.7	-5.246
-5.50	2.75	190.2	-8.25	63.4	0.8	7.0	-5.496
-5.75	2.75	190.2	-8.50	61.5	0.8	7.3	-5.746
-6.00	2.75	190.2	-8.75	59.08	0.8	7.6	-5.996

§4.5 目镜设计

(一) 概述

目镜相当于一个放大镜,它把望远镜物镜或显微镜物镜所成的象再次放大供人眼观察。一般目镜的特点是焦距短($f_{目} = 10 \sim 40$);相对孔径小($D'/f_{目} = 1:4 \sim 1:10$);大视场($2\omega' = 30^\circ \sim 100^\circ$);光阑(孔径光阑)位于目镜的外部($P' \geq 10$));以人眼为接收器。当然,这里的目镜不包括夜视仪器的目镜。这些特点决定着目镜的象差性质和校正方法以及它们的容许限度。

由于焦距短和相对孔径小,目镜的轴上象差(球差和位置色差)的绝对值基本上在0.2以下,这样的数量级是不能被人眼感觉出来的。考虑到目镜的视场大和光阑外移,主光线通过目镜以后的总偏向角很大。如图4.13所示,主光线的总偏向角 $\Sigma\Delta\omega$ 等于目镜视场半角 ω' 和物镜视场半角 ω 绝对值之和,有:

$$\Sigma\Delta\omega = \omega' + \omega$$

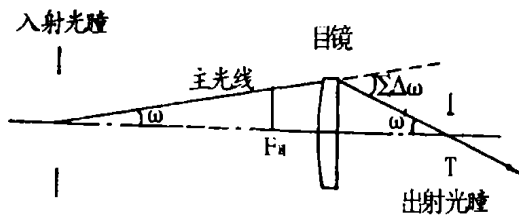


图 4.13

由象差理论可知,主光线的偏向角大,在每个折射面上的折射角 i_p 亦大,轴外象差:象散、场曲、放大率色差(或称横向色差)、慧差和畸变也随之而大,不但初级象差大,而且出现大量的高级象差。因目镜的光阑必须位在目镜的外部,其中的轴外象差又不可能自动地加以消除。因此,除了对畸变要求不高,一般不加以校正以外,如何控制其他轴外象差:象散、场曲、横向色差

和慧差则成为目镜设计的主要矛盾,特别是广角目镜,矛盾尤其突出。

考虑到目镜的接收器是眼睛,因而对目镜象差公差的要求与其他系统不同。例如,眼睛能自动调焦,允许象散和场曲的剩余值较大;在大多数情况(白天观察),眼睛瞳孔很小,从而成象光束口径很小,球差、慧差和轴外球差也不大;在有些观察和瞄准仪器中,视场的周围部分仅起参考作用,必须细致观察时,可以将目标调到视场的中央,因而目镜视场边缘的象质容许比视场中央低。

现在介绍常用的各种类型的目镜:

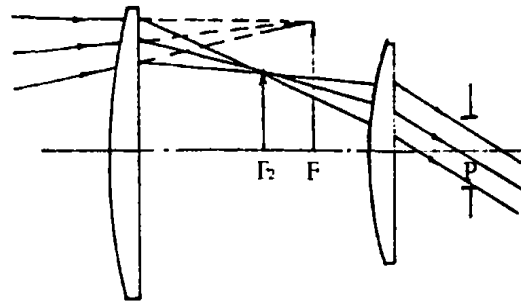


图 4.14 惠更斯目镜

1、惠更斯

如图4.14所示,由两平凸透镜组成,凸面均朝向物方,第一块为聚光镜(或称场镜),第二块为接眼镜。目镜的物方焦点位于场镜的后方,利用它仅能观察物镜所成的虚象,因此不能安装分划板。由于光学结构简单,广泛应用于显微镜目镜。

2、冉斯登目镜

如图4.15所示,也是由两平凸透镜组成,两凸面彼此相对,中间有一空气间隔 d 相隔,前焦面是实象面,允许安装分划板,广泛应用于大地测量仪器的望远镜中,也用于测量显微镜。

3、凯涅尔目镜

如图 4.16 所示,是在冉斯登目镜基础上改进而成。它是冉斯登目镜的更完善形式,场镜为双凸透镜,接目镜为胶合透镜,故轴上的色差和球差较好。目镜的场镜与接目镜的距离 d 同冉斯登目镜相比有所缩短,因此它的匹兹万和减少,而相对出射光瞳距离增大,达到 $\frac{p'}{f} \approx \frac{1}{2}$ 。目镜的视场为 $45^\circ \sim 50^\circ$ 。

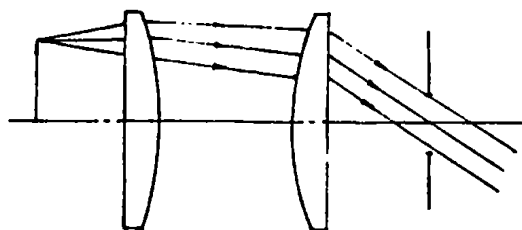


图 4.15 冉斯登目镜

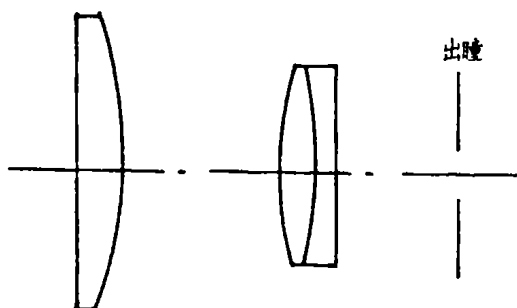


图 4.16 凯涅尔目镜

目镜的象散可以利用场镜第二面曲率的改变加以校正,因为主光线在该面的 ip 角较大;慧差则利用改变靠近出射光瞳的第三面曲率予以消除;至于畸变,比以上两种目镜的小,就不校正了。这种目镜广泛用于军用光学仪器和大地测量仪器中。

4、对称目镜

如图 4.17 所示,由一对相同的双胶合物镜组成,彼此间相隔很近,它的特点是:相对出射瞳孔距离较大 $\frac{p'}{f} = \frac{3}{4}$ 。目镜的两组透镜由于相隔很近,因此匹兹万和小;又

由于两组胶合透镜分别消色差,故色差不大。目镜中的胶合面曲率半径较小,产生较大的高级象差,因此视场不可能大,一般只能达到 $40^\circ \sim 42^\circ$ 。在常用的对称目镜中,有的光学结构并不对称,为的是有利于消色差。

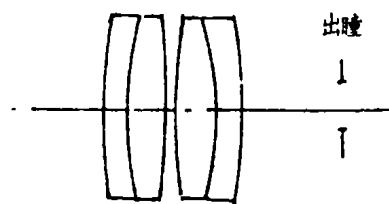


图 4.17 对称目镜

5、无畸变目镜

如图 4.18 所示,目镜系由三胶合透镜与一块以平面向着眼睛的平凸透镜组成。由于二透镜组很靠近,匹兹万和较小,相对出射光瞳距离较大, $\frac{p'}{f} \approx \frac{3}{4}$ 。它的各种象差能够较好地校正,特别是校正了畸变,因此称为无畸变目镜。这种目镜适用于测量仪器,它的视场为 50° 。

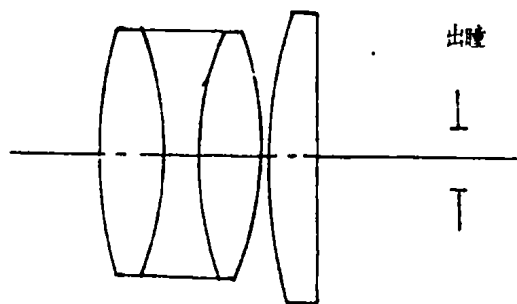


图 4.18 无畸变目镜

6、艾尔弗目镜

如图 4.19 所示,在对称式目镜当中多了一个单透镜,其目的是减少高级象差。它是广角目镜中一种很重要的型式,畸变在 10% 左右,多年来一直用于 Zeiss 双筒望远镜上,它的视场达 70° ,相对出射光瞳距离

较大, $\frac{p'}{f} = 0.7 \sim 0.9$ 。

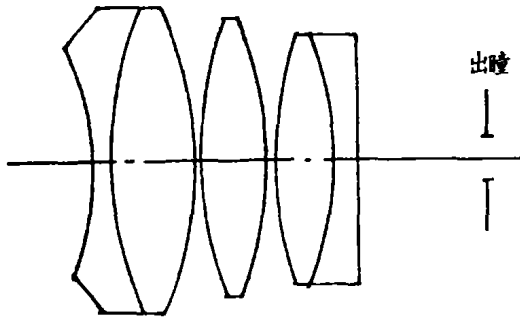


图 4.19 艾尔弗目镜

7、长出射光瞳距离目镜

如图 4.20 所示,由一组三胶合透镜和一块负透镜,中间加一块弯月透镜组成。由于它采取与摄远物镜相似的光学结构,因此相对出瞳距离很大, $\frac{p'}{f} = 1.37$,但是目镜的视场不大,一般为 40° 。

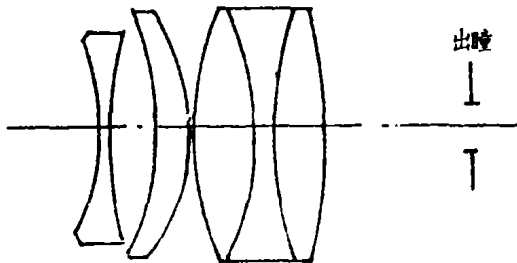


图 4.20 长出射光瞳距离目镜

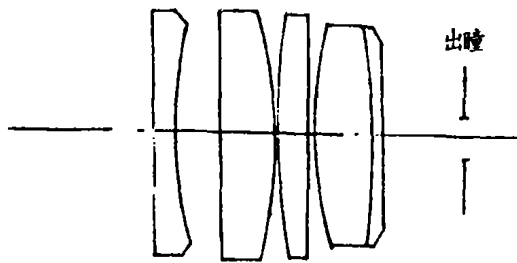


图 4.21 广角目镜

8、广角目镜

如图 4.21 所示,由一组双胶透镜、两块平凸透镜和一块凹透镜组成,它的视场达到 90° ,相对出射光瞳距离 $\frac{p'}{f} = \frac{2}{3}$ 。这种

目镜的双胶透镜为基本组元,后面三块透镜为辅助组元。双胶透镜能够在一定的人射光瞳距离(反向光路下)校正象散,两块平凸透镜用来减小主光线在双胶透镜上的偏向角,平凹透镜用来校正畸变,至于放大率色差,可以选择透镜的玻璃材料得到校正。

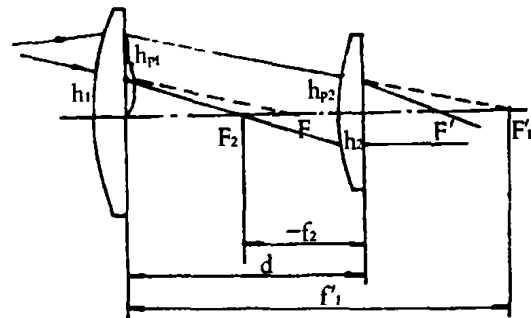


图 4.22 惠更斯目镜光学结构

(二) 惠更斯目镜设计

设计这种目镜时,当玻璃选定之后,只有三个参数可供支配,即两个凸面的曲率半径和两透镜之间的距离,两个透镜的厚度不大,不能用于校正象差。

该目镜能够消除放大率色差,下面来求由两块单透镜构成的目镜的消色差条件,根据初级色差公式:

$$S_{cII} = \sum hhp_c$$

$$c = \frac{\varphi}{\nu}$$

则有:

$$S_{cII} = h_1 h_{p1} \frac{\varphi_1}{\nu_1} + h_2 h_{p2} \frac{\varphi_2}{\nu_2}$$

为了消色差,必须 $S_{cII} = 0$,

因此有:

$$\frac{\varphi_1}{\nu_1} + \frac{h_2}{h_1} \frac{h_{p2}}{h_{p1}} \frac{\varphi_2}{\nu_2} = 0 \quad \dots\dots(4.50)$$

从图 4.22 得到:

$$\frac{-h_2}{h_1} = \frac{-f_2}{d - (-f_2)},$$

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{f_2}{f_2 - d} = \frac{1}{1 - d\varphi_2} \dots\dots(4.51)$$

在大多数情况下,望远物镜的焦距比目镜的焦距大很多倍,整个系统的出射光瞳接近于目镜的第二焦点。因此,可以认为主光线射入场镜前与光轴平行。

于是,从图 4.22 中同样得到:

$$\frac{hp_2}{hp_1} = \frac{f_1 - d}{f_1} = 1 - d\varphi_1 \dots\dots(4.52)$$

把公式(4.51)和(4.52)的关系代入公式

$$(4.50), \text{得到: } \frac{\varphi_1}{\nu_1} + \frac{1 - d\varphi_1}{1 - d\varphi_2} \cdot \frac{\varphi_2}{\nu_2} = 0$$

将上式化简,得到:

$$\frac{\varphi_1}{\nu_1} + \frac{\varphi_2}{\nu_2} - d\varphi_1\varphi_2\left(\frac{1}{\nu_1} + \frac{1}{\nu_2}\right) = 0,$$

最后进一步化简为:

$$d = \frac{\nu_1 f_1 + \nu_2 f_2}{\nu_1 + \nu_2} \dots\dots(4.53)$$

上式就是由两个单透镜构成的目镜的消色差条件。如果两个单透镜的玻璃材料相同,则消色差条件变成:

$$d = \frac{f_1 + f_2}{2} \dots\dots(4.54)$$

根据这个条件,如果将透镜焦距和间隔采取 $f_1:d:f_2 = 1:1:1; 3:2:1; 2:\frac{3}{2}:1$ 等各种比例,都能消色差,而 $2:\frac{3}{2}:1$ 系为通常采用的比例。

因为这种目镜由两个正透镜组成,显然球差和位置色差不能消除,不过一般目镜的相对孔径很小,它们不会影响整个系统的成像质量。

这种目镜只能校正一种轴外单色象差,即慧差或象散。当在一个光阑位置校正了象散时,若改变靠近出瞳的透镜的半径来校正慧差,则又破坏了已经校正好的象

散,二者是矛盾的。这两种象差中存在任何一种都是不利的,一般采取折衷的办法,即使两者都留有合适的量。

这种目镜用于显微镜和天文望远镜中。它的相对出射光瞳距离 $\frac{p'}{f} = \frac{1}{3}$ 。天文望远镜中目镜焦距为 100 ~ 150 时,视场将近 30°,焦距为 70 ~ 80 时,视场可以达到 50°。

从上面的分析,可以清楚地看到,惠更斯目镜的设计较为简单,其步骤如下。

① 确定 $f_1:d:f_2$ 的比例,既考虑不远离消色差条件(消色差条件见公式(4.54)),又考虑轴外象差慧差和象散的部分校正。

② 根据目镜的总焦距要求和 $f_1:d:f_2$ 的比例求出 f_1, f_2, d 的实际值。因为有公式:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - d\varphi_1\varphi_2 \dots\dots(4.55)$$

③ 选定两透镜的玻璃材料(一般选用相同的材料),计算透镜的曲率半径,因为有公式:

$$\varphi = (n - 1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \dots\dots(4.56)$$

④ 根据计算得到的光学参数,计算象差能否达到要求,若未能达到预期的要求,只要作少量的调整,改变 $f_1:d:f_2$ 的比例,重复以上步骤即可。

举例:设计一个 6.3× 的生物显微镜目镜,视场为 18°,出瞳直径为 2.08mm。

具体的设计计算如下:

① 选定 $f_1:d:f_2 = 1.36:1.36:1$

② 根据目镜 6.3× 的要求得: $f_{\text{目}} = \frac{250}{6.3} = 39.7$

由公式(4.55)得:

$$\varphi_{目} = \varphi_1 + \varphi_2 - d\varphi_1\varphi_2 = \frac{1}{1.36} + \frac{1}{1} - 1.36 \cdot \frac{1}{1.36} \cdot \frac{1}{1} = 0.735$$

$$f'_{目} = 1.36$$

$$\text{所以目镜系统的实际值应放大 } \Gamma = \frac{39.7}{1.36} = 29.2^{\times}$$

$$f_1 = 1.36 \times 29.2 = 39.7$$

$$f_2 = 1 \times 29.2 = 29.2$$

$$d = 1.36 \times 29.2 = 39.7$$

③ 选定两透镜均采用 K_9 玻璃, 则有 $n_D = 1.5163$ 。用公式(4.56) 计算两平凸透镜的凸面曲率半径:

$$\varphi_1 = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = (1.5163 - 1) \left(\frac{1}{r_1} \right)$$

$$r_1 = 0.5163 f_1 = 0.5163 \times 39.7 = 20.497 (\text{场镜})$$

$$\varphi_2 = (n - 1) \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) = (1.5163 - 1) \left(\frac{1}{r_3} \right),$$

$$r_3 = 0.5163 f_2 = 0.5163 \times 29.2 = 15.076$$

④ 选取透镜厚度, 曲率半径进行归整和标准化, 从而得目镜如下数据:

R	d	材料
20.51	4.2	K'_9
∞	37.4	1
15.101		K_9
∞	2.3	1

(三) 冉斯登目镜设计

冉斯登目镜也是由两块平凸透镜组成, 只是两凸面彼此相对放置, 它的原始形

式系采用 $f_1:d:f_2 = 1:1:1$ 比例符合消色差条件, 可是目镜的焦点分别与两个透镜重合, 这是很不合适的。于是一般破坏消色差条件, 取 $f_1:d:f_2 = 1:\frac{2}{3}:1$ 比例。这样, 目镜的焦点就处在两个透镜的外部, 既可以安置分划板, 又可以使整个系统的出瞳处于合适的位置。

冉斯登目镜象差校正的可能性与惠更斯目镜一样, 除了位置色差以外, 其他象差比惠更斯目镜要小。

这种目镜主要用于大地测量仪器的望远镜中, 其次用于测量显微镜中。它的视场不大于 40° , 相对出射光瞳距离 $\frac{p'}{f} = \frac{1}{3} \sim \frac{1}{4}^\circ$ 。

冉斯登目镜的设计方法与惠更斯目镜完全相同, 这里不一一叙述了。

(四) 凯涅尔目镜设计

凯涅尔目镜的光学结构如图 4.16 所示, 双胶透镜为接目镜, 单透镜为场镜。目镜的焦距和相对孔径一般均不大, 故 c_I 与 s_I 可以不考虑; 这种目镜中由于校正透镜组分离, s_{IV} 无法校正, s_V 的公差较大, 故也可不计及此。因而凯涅尔目镜的设计步骤为:

(1) 由要求的目镜焦距、工作距离、出瞳距离及望远镜倍率(瞳孔位置的垂轴放大率) 决定场镜和接目镜的焦距分配, 即有公式:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 + l'_k \varphi_2 &= 1 \\ 1 + l p_1 \varphi_1 - 1/\Gamma &= [-l p_1 + d(l p_1 \varphi_1 + 1)] \varphi_2 \\ 1 - d \varphi_1 &= l'_k \end{aligned} \right\} \dots(4.57)$$

即可求出 φ_1 、 φ_2 、 d 。式中的有关字母

代表:

f' —目镜总焦距; lp_1 —出瞳距离;

l'_k —目镜工作距离; Γ —望远镜倍率;

φ_1 —接目镜光焦度; φ_2 —场镜光焦度。

由此可以求出瞳距离 $l'p_2$ 。

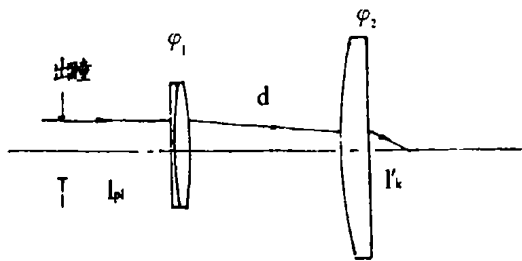


图 4.23 凯涅尔目镜结构

(2) 给定场镜的玻璃材料,即已知 ν_2 、 h_2 由下式解出 ν_1 、 c_I (考虑消放大率色差的要求)。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\nu_2}{\nu_1} &= \frac{+(f'_1 - d)}{f'_2 \frac{l'p_2 + d}{l'p_2} - d}, \\ c_I &= \frac{\varphi_1}{\nu_1} \end{aligned} \right\} \dots\dots(4.58)$$

(3) 给定场镜的弯曲 lQ_2 , 由公式(4.17)、(4.18)、(4.19)、(4.20)、(4.21)、(4.22) 求出 lP_2 、 lW_2 。

(4) 由初级象差表示式(4.12) 解出接目镜的 lP_1 、 lW_1 。

$$\begin{aligned} s_{II} &= \Sigma h^3 hp \phi^3 |P - j \Sigma h^2 \phi^2 |W \\ s_{III} &= \Sigma h^2 hp^2 \phi^3 |P - 2j \Sigma h hp \phi^2 |W + j^2 \Sigma \phi \end{aligned}$$

(5) 由 lP_1 、 lW_1 根据公式(4.31) 解出 lP_{01} 。

(6) 决定场镜和接目镜的结构参数。

举一实例来加以说明设计的全过程:

设计一个焦距为 20mm, 出瞳距离大于

6mm, 工作距离大于 3mm, 望远镜倍率为 $-12\times$, 视场为 40° 的凯涅尔目镜。

解: 其有关参数见图 4.24 所示。取规格化求解, 令 $f' = 1$, $h_1 = 1$, $lp_1 = -0.4$ (即取 lp_1 实际值 8mm), $l'_k = 0.25$ (即取 l'_k 实际值 5mm), $\Gamma = -12\times$, $up_1 = -1$ 。

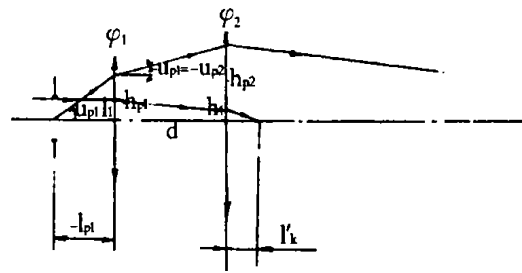


图 4.24 凯涅尔目镜参数

由公式(4.57) 有:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 + 0.25\varphi_2 &= 1 \\ 1 - 0.4\varphi_1 + 0.0833 &= \\ [0.4 + d(-0.4\varphi_1 + 1)]\varphi_2 & \\ 1 - d\varphi_1 &= 0.25 \end{aligned} \right\}$$

解上面方程组得:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= 0.81448, \varphi_2 = 0.74208, \\ d &= 0.92083. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore up_1 &= \frac{hp_1}{lp_1} \quad hp_1 = up_1 lp_1 = (-1) \\ &\times (-0.4) = 0.4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} up_2 &= u'p_1 = hp_1 \varphi_1 + up_1 = 0.4 \times 0.81448 \\ &+ (-1) = -0.67421, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} hp_2 &= hp_1 - dup_2 = 0.4 - 0.92083 \times (- \\ &0.67421) = 1.0208, \end{aligned}$$

$$l'p_2 = \frac{hp_2}{u'p_2} = \frac{hp_2}{\frac{up_1}{\Gamma}} = \frac{1.0208}{\frac{-1}{-12}} = 12.25,$$

$$\begin{aligned} h_2 &= h_1 - du'1 = h_1 - d\varphi_1 = 1 - \\ &0.92083 \times 0.81448 = 0.25 \end{aligned}$$

$$lu_2 = \frac{1}{(f'_1 - d)\varphi_2}$$

$$= \frac{1}{\left(\frac{1}{0.81448} - 0.92083\right) \times 0.74208}$$

$$= 4.3902$$

选定场镜光学玻璃为 $K_9, n_D = 1.5163, \nu = 64.1$, 由公式(4.58)有:

$$\frac{64.1}{\nu_1} = \frac{\varphi_1 + \left(\frac{1}{\varphi_1} - d\right)}{\frac{1}{\varphi_2} \cdot \frac{l'p_2 + d}{l'p_2} - d}$$

$$+ \left(\frac{1}{0.81448} - 0.92083\right)$$

$$= \frac{1}{0.74208} \cdot \frac{12.25 + 0.92083}{12.25} - 0.92083$$

$$\frac{64.1}{\nu_1} = \frac{+0.306947}{0.52803}, \nu_1 = +110.27,$$

$$c_1 = \frac{\varphi_1}{\nu_1} = \frac{0.81448}{-110.27} = +0.007386$$

令 $Q_2 = -1, (\because Q_2 = k_2 - 1, \text{单透镜第二面为平面, } lc_2 = 0)$

$$|W_2^\infty = -\frac{n+1}{n} |Q - \frac{1}{n-1}$$

$$= \frac{1.5163+1}{1.5163} (-1)$$

$$- \frac{1}{1.5163-1}$$

$$= -0.27736,$$

$$|P_{02} = \frac{n}{(n-1)^2} \left[1 - \frac{9}{4(n+2)}\right]$$

$$= \frac{1.5163}{(1.5163-1)^2} \left[1 - \frac{9}{4(1.5163+2)}\right]$$

$$= 2.04848$$

$$|P_2^\infty = |P_{02} + 0.84(|W_2^\infty - 0.14)^2$$

$$= 2.04848 + 0.84(-0.27736 - 0.14)^2$$

$$= 2.04848 + 0.1463 = 2.1948$$

$$|W_2 = |W_2^\infty + \left(2 + \frac{1}{n}\right) u_2 = -0.27736$$

$$+ \left(2 + \frac{1}{1.5163}\right) \times 4.3902$$

$$= -0.27736 + 11.6757$$

$$= 11.3984$$

$$|P_{\min_2} = |P_{02} - \frac{n}{n+2} (|u_2 + |u_2^2) =$$

$$2.04848 - \frac{1.5163}{1.5163+2} (4.3902$$

$$+ 4.3902^2)$$

$$= 2.04848 - 0.43122 \times$$

$$23.664$$

$$= -8.156$$

$$|P_2 = |P_{\min_2} + 0.84[|W_2 - 0.14(1 + 2|$$

$$u_2)]^2 = -8.156 +$$

$$0.84(11.3984 - 1.369256)^2$$

$$= -8.156 + 84.49 = 76.334$$

根据 $|P_2, |W_2$ 利用公式(4.12)和(4.31)求 $|P_{01}$:

令 $s_{II} = 0, s_{III} = 0$, 即有:

$$\left. \begin{aligned} h_1^3 h p_1 \varphi_1^3 |P_1 - j h_1^2 \varphi_1^2 |W_1 + \\ h_2^3 h p_2 \varphi_2^3 |P_2 - j h_2^2 \varphi_2^2 |W_2 = 0 \\ h_1^2 h p_1^2 \varphi_1^3 |P_1 - 2j h_1 h p_1 \varphi_1^2 |W_1 + \\ j^2 \varphi_1 + h_2^2 h p_2^2 \varphi_2^3 |P_2 - \\ 2j h_2 h p_2 \varphi_2^2 |W_2 + j^2 \varphi_2 = 0 \end{aligned} \right\} \dots(4.59)$$

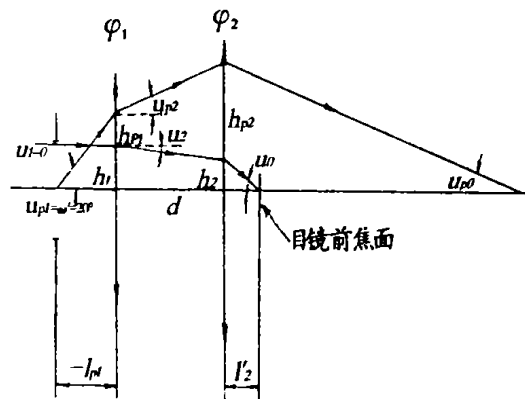


图 4.25

求 h 、 hp ：

选取 $lp_1 = 8\text{mm}$, $l'_k = l'_2 = 5\text{mm}$, 已知 $\omega' = 20^\circ$, 设望远镜物镜口径为 48mm , 则出瞳直径为 $\frac{48}{12} = 4\text{mm}$ 。所以, $h_1 = 2\text{mm}$ 。已知 $f' = 20\text{mm}$, $f' = 1$ 的规化的数据前面已做出, 则写成未规化的 φ_1 、 φ_2 、 d 有：

$$\varphi_1 = 0.81448 \div 20 = 0.040724,$$

$$\varphi_2 = 0.74208 \div 20 = 0.037104,$$

$$d = 0.92083 \times 20 = 18.4166。$$

已知 $u_1 = 0$, 以上的数据和下面要计算的 h 、 hp 、 u_2 、 u_0 详见图 4.25 所示。

$$\Delta u_1 = u_2 - u_1 = h_1 \varphi_1 = 2 \times 0.040724 = 0.081448,$$

$$u_2 = \Delta u_1 + u_1 = 0.081448 + 0 = 0.081448,$$

$$h_2 = h_1 - d u_2 = 2 - 18.4166 \times 0.081448 = 0.5,$$

$$\Delta u_2 = u_0 - u_2 = h_2 \varphi_2 = 0.5 \times 0.037104 = 0.018552,$$

$$u_0 = \Delta u_2 + u_2 = 0.018552 + 0.081448 = 0.1$$

校对: $\frac{h_1}{u_0} = \frac{2}{0.1} = 20$ (与 $f' = 20$ 相符合)。

$$up_1 = \omega' = 20^\circ, \tan up_1 = \tan 20^\circ = 0.363970, \therefore up_1 = 0.363970$$

$$hp_1 = up \cdot lp_1 = 0.363970 \times 8 = 2.91176,$$

$$\Delta up_1 = up_1 - up_2 = hp_1 \varphi_1 = 2.91176 \times 0.040724 = 0.116698,$$

$$up_2 = up_1 - \Delta up_1 = 0.363970 - 0.116698 = 0.247272,$$

$$hp_2 = hp_1 + dup_2 = 2.91176 + 18.4166 \times 0.247272 = 7.46568,$$

$$\Delta up_2 = up_2 - up_0 = hp_2 \varphi_2 = 7.46568 \times 0.037104 = 0.277006,$$

$$up_0 = up_2 - \Delta up_2 = 0.247272 - 0.277006 = -0.029734,$$

$$hp_0 = hp_2 + up_0 l'_2 = 7.46568 + (-0.029734) \times 5 = 7.317。$$

即象面上的象高 $\eta' = 7.317$ 。

$$j = n' \mu' \eta' = 1 \times 0.1 \times 7.317 = 0.7317。$$

将 $h_1 = 2$, $h_2 = 0.5$, $hp_1 = 2.91176$, $hp_2 = 7.46568$, $\varphi_1 = 0.040724$, $\varphi_2 = 0.037104$, $|P_2 = 76.334$, $|W_2 = 11.3984$ 代入公式(4.59)解得：

$$\left. \begin{aligned} |P_1 &= 3.085 |W_1 - 0.52 \\ |P_1 &- 6.1706 |W_1 = -4.487 \end{aligned} \right\}$$

最后得到: $|W_1 = 1.285$, $|P_1 = 3.44$ 。

因为目镜第一组是接目镜, 如图(4.25)所示, 平行光入射, 物在无穷远, 前面计算得到的 $|P_1$ 、 $|W_1$ 即是 $|P_1^\infty$ 、 $|W_1^\infty$, 可利用公式(4.31)计算 $|P_{01}$ ：

$$|P_{01} = |P_1^\infty - 0.84(|W_1^\infty - 0.14)^2 = 3.44 - 0.84(1.285 - 0.14)^2 = 2.34$$

$$|c_1 = \frac{c}{\varphi_1} = \frac{0.007386}{0.81448} = 0.00906, \text{ 有了}$$

$$\left\{ \begin{aligned} |P_{01} &= 2.34 \\ |c_1 &= 0.00906 \end{aligned} \right. \text{, 利用选玻璃程序或 } |P_0 \text{ 表}$$

选取玻璃对, 得：

$$\text{BaF6: } n_D = 1.6076, \nu = 46.1,$$

$$\text{ZK}_{10}: n_D = 1.622, \nu = 56.7,$$

由公式(4.36)得：

$$\left\{ \begin{aligned} \varphi_a + \varphi_b &= \varphi_1 = 0.81448, \\ \frac{\varphi_a}{\nu_a} + \frac{\varphi_b}{\nu_b} &= c_1 = 0.007386 \end{aligned} \right.$$

$$\text{解得: } \varphi_a = -1.720893, \varphi_b =$$

2.535373,

再取接目镜的规化条件,令 $\varphi_1 = 1$ (即未规化 φ_a, φ_b 除以 0.81448), 则得:

$$\begin{cases} \varphi_a = -2.11287 \\ \varphi_b = 3.11287 \end{cases}$$

将 φ_a, φ_b 代入公式(4.25), 则有

$$a = \frac{na + 2}{na} \varphi_a + \frac{n_b + 2}{n_b} \varphi_b = \frac{1.6076 + 2}{1.6076} \times (-2.11287) + \frac{1.622 + 2}{1.622} \times 3.11287 = 2.210$$

$$b = \frac{3\varphi_a^2}{n_a - 1} - \frac{3\varphi_b}{n_b - 1} - 2\varphi_b = \frac{3 \times (-2.11287)^2}{1.6076 - 1} - \frac{3 \times (3.11287)^2}{1.622} - 2 \times 3.11287 = 22.042 - 46.736 - 6.226 = -30.920$$

$$c = \frac{na}{(na - 1)^2} \varphi_a^3 + \frac{nb}{(nb - 1)^2} \varphi_b^3 + \frac{nb}{nb - 1} \varphi_b^2 = \frac{1.6076}{(1.6076 - 1)^2} (-2.11287)^3 + \frac{1.622}{(1.622 - 1)^2} (3.11287)^3 + \frac{1.622}{1.622 - 1} (3.11287)^2 = -41.073 + 126.460 + 25.269 = 110.656$$

核对: $IP_{01} = c - \frac{b^2}{4a} = 110.656 -$

$$\frac{(-30.920)^2}{4 \times 2.210} = 2.51, \text{此值与要求的 } IP_{01} =$$

2.34 相差不大, 不必重选玻璃对。

$$\therefore IQ_0 = -\frac{b}{2a} = -\frac{-30.920}{2 \times 2.210} = 6.995$$

$$\therefore IQ = IQ_0 - \frac{2}{a + 1} (IW^\infty - 0.14) \dots(4.60)$$

$$\therefore IQ = 6.995 - \frac{2}{2.210 + 1} (1.285 - 0.14) = 6.28$$

$$\therefore lc_2 = IQ + \varphi_a \dots\dots(4.61)$$

$$lc_2 = 6.28 + (-2.11287) = 4.167$$

$$lc_1 = lc_2 + \frac{\varphi_a}{na - 1} \dots\dots(4.62)$$

$$lc_1 = 4.167 + \frac{-2.11287}{1.6076 - 1} = 0.6896$$

$$lc_3 = lc_2 - \frac{\varphi_b}{n_b - 1} \dots\dots(4.63)$$

$$lc_3 = 4.167 - \frac{3.11287}{1.622 - 1} = -0.8376$$

根据曲率求半径:

$$r_1 = \frac{f_1}{lc_1} \dots\dots(4.64)$$

f_1 — 双胶透镜焦距

$$r_1 = \frac{1}{lc_1 \varphi_1} = \frac{1}{0.6896 \times 0.040724} = 35.61$$

$$r_2 = \frac{f_1}{lc_2} \dots\dots(4.65)$$

$$r_2 = \frac{1}{lc_2 \varphi_1} = \frac{1}{4.167 \times 0.040724} = 5.893$$

$$r_3 = \frac{f_1}{lc_3} \dots\dots(4.66)$$

$$r_3 = \frac{f_1}{lc_1} = \frac{1}{-0.8376 \times 0.040724} = -29.32$$

求场镜的半径:

$$\varphi_2 = (n_2 - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right),$$

$$\therefore \text{设第二面为平面, } n_2 = 1.5163, \varphi_2 = 0.037104$$

$$\therefore \text{将 } r_1 = 13.915, r_2 = \infty.$$

到此,半径数据已全部求出,再配上适当的透镜厚度便可以进行光线计算,逐步校正象差了,以便达到设计要求。

§4.6 小尺寸望远镜物镜设计

(一) 概述

小尺寸望远镜物镜是指通光口径较小,一般为口径小于60mm,双胶合物镜。双胶物镜的相对孔径 $\leq \frac{1}{4}$,视场不大于 12° 。

(二) 双胶合小尺寸望远镜物镜设计

小尺寸望远镜物镜由于视场很小,所需校正的象差只有球差、轴向色差及慧差。一般用双胶合薄透镜组即能满足要求。一般的设计步骤为:

(1) 由所需的 $|P^\infty|$ 、 $|W^\infty|$, 按公式(4.31), 计算出 $|P_0|$;

(2) 在 $|P_0|$ 表中找出所需要的玻璃对, 或用选玻璃程序计算出符合 $|P_0|$ 要求玻璃对。并计算出 $|Q_0|$;

(3) 由公式(4.32) 或公式(4.60) 求出 $|Q|$;

(4) 由公式(4.61)、(4.62)、(4.63) 求出半径。

举例如下:

设计一双胶合小尺寸望远镜物镜, 要求其 $f = 100\text{mm}$, 相对孔径 $\frac{D}{f} = 1:5$ 。

解:(1) 要求双胶物镜的 $|P^\infty| = 0$, $|W^\infty| = 0$, 故由公式(4.31) 计算出 $|P_0|$:

$$|P_0| = |P^\infty| - 0.83(|W^\infty| - 0.14)^2 = 0.83 \times 0.14^2 = 0.016,$$

(2) 由 $|P_0|$ 表选取玻璃组合, 或用选玻璃程序计算符合 $|P_0|$ 要求玻璃组合:

$$k_9 \quad N_D = 1.5163, \nu = 64.1,$$

$$ZF_2 \quad N_D = 1.6725, \nu = 32.2,$$

同时亦查到 $|Q_0| = -4.29$,

(3) 消色差定焦距分配, 由公式(4.36) 可得:

$$\because \varphi_a + \varphi_b = 1, \frac{\varphi_a}{\nu_a} + \frac{\varphi_b}{\nu_b} = 0, \text{可以得到}$$

$$\varphi_a = \frac{\nu_a}{\nu_a - \nu_b} = \frac{64.1}{64.1 - 32.2} = 2.0094, \varphi_b = 1 - \varphi_a = -1.0094$$

(4) 由公式(4.25) 求出 a, b, c :

$$\begin{aligned} a &= \frac{n_a + 2}{n_a} \varphi_a + \frac{n_b + 2}{n_b} \varphi_b \\ &= \frac{1.5163 + 2}{1.5163} \times 2.0094 + \frac{1.6725 + 2}{1.6725} \times (-1.0094) \\ &= 2.319 \times 2.0094 - 2.1958 \times 1.0094 \\ &= 4.6598 - 2.2164 = 2.4434 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b &= \frac{3\varphi_a^2}{n_a - 1} - \frac{3\varphi_b^2}{n_b - 1} - 2\varphi_b \\ &= \frac{3 \times 2.0094^2}{1.5163 - 1} - \frac{3 \times (-1.0094)^2}{1.6725 - 1} - 2 \times (-1.0094) \\ &= 23.4613 - 4.54523 + 2.0188 \\ &= 20.93487, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c &= \frac{n_a}{(n_a - 1)^2} \varphi_a^3 + \frac{n_b}{(n_b - 1)^2} \varphi_b^3 + \frac{n_b}{(n_b - 1)} \varphi_b^2 \\ &= \frac{1.5163}{(1.5163 - 1)^2} \times 2.0094^3 + \frac{1.6725}{(1.6725 - 1)^2} \times (-1.0094)^3 \\ &\quad + \frac{1.6725}{(1.6725 - 1)} \times (-1.0094)^2 \\ &= 46.1509 - 3.8034 + 2.5340 \\ &= 44.8815 \end{aligned}$$

核对 $|P_0 = c - \frac{b^2}{4a} = 44.8815 - \frac{20.93487^2}{4 \times 2.4434} = 44.8815 - 44.8421 = 0.039$, 此值与要求的 $|P_0 = 0.016$ 相差不大, 不必重选玻璃。

(5) 由公式(4.60) 求 $|Q$:

$|Q_0 = -\frac{b}{2a} = -\frac{20.93487}{2 \times 2.4434} = -4.28397$, 当然也可以用前面查表得到的 $|Q_0$ 值。

$$\begin{aligned} |Q &= |Q_0 - \frac{2}{a+1}(|W^\infty - 0.14) \\ &= -4.28397 - \frac{2}{2.4434+1}(0 - 0.14) \\ &= -4.28397 + 0.081315 \\ &= -4.20266, \end{aligned}$$

(6) 求曲率半径:

由公式(4.61)、(4.62)、(4.63) 计算曲率:

$$|c_2 = |Q + \varphi_a = -4.20266 + 2.0094 = -2.19326$$

$$|c_1 = |c_2 + \frac{\varphi_a}{n_a - 1} = -2.19326 + \frac{2.0094}{1.5163 - 1} = 1.69866,$$

$$|c_3 = |c_2 - \frac{\varphi_b}{n_b - 1} = -2.19326 - \frac{-1.0094}{1.6725 - 1} = -0.69229,$$

根据公式(4.64)、(4.65)、(4.66) 求半径:

$$r_1 = \frac{f}{|c_1} = \frac{100}{1.69866} = 58.870,$$

$$r_2 = \frac{f}{|c_2} = \frac{100}{-2.19326} = -45.594,$$

$$r_3 = \frac{f}{|c_3} = \frac{100}{-0.69229} = -144.448。$$

(7) 加厚度:

透镜加厚度的原则是使零件加工和装配时不变形, 同时不要因为中心厚度太小以致透镜边缘尖锐, 从而使透镜直径不够。一般选负透镜的中心厚度为透镜外径的十分之一, 正透镜的边缘宽度取 0.5 ~ 2.5mm, 若正透镜的边缘厚度和中心厚度相差很小时, 为了防止变形, 也应该象负透镜一样来选取中心厚度。取 $d_1 = 4, d_2 = 2$ 。

54.7 低倍显微镜物镜的设计

低倍显微镜物镜象差要求与小尺寸望远镜物镜相同, 物体位置和象面位置均在近距离, 物面至象面的距离称为共轭距离。其设计步骤首先由共轭距离 c 和放大倍数 β 计算出物距和象距:

$$\left. \begin{aligned} l &= \frac{c}{\beta - 1} \\ l' &= \beta l = \frac{\beta c}{\beta - 1} \end{aligned} \right\} \dots(4.67)$$

下面的设计步骤类似于小尺寸望远镜物镜的设计步骤, 并举例如下:

设计一低倍显微镜物镜, 要求 $\beta = -8^x$, 共轭距离 $c = 180, N.A = 0.12$ 。

在求解低倍显微镜物镜的结构参数时, 为了使得由薄透镜求解出的高斯光学性能(如放大倍率), 不因透镜加厚而有较大变化, 一般将截距大的一方作为物方。

(1) 由公式(4.67) 解初始数据:

$$l = \frac{c}{\beta - 1} = \frac{180}{-8 - 1} = -20\text{mm},$$

$$l' = \beta l = (-8) \times (-20) = 160\text{mm},$$

$$u_1 = -0.12,$$

$$u_1 = \frac{u_1}{\beta} = \frac{-0.12}{-8} = 0.015,$$

如前面所说的理由, 把物镜系统倒过

来进行计算,因此如图 4.26 所示,初始数据为:

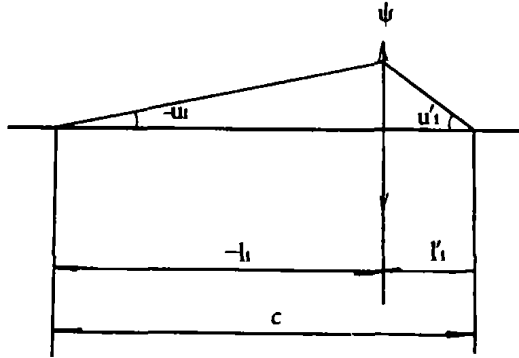


图 4.26

$l_1 = -160, l'_1 = 20, u_1 = -0.015, u'_1 = 0.12。$

(2) 求规范化 lu_1 :

$$\begin{aligned} \frac{1}{f} &= \frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{20} + \frac{1}{160} \\ &= 0.05 + 0.00625 = 0.05625 \\ f &= 17.778, \end{aligned}$$

$$lu_1 = \frac{f}{l} = \frac{17.778}{-160} = -0.11111。$$

(3) 求 $|P_0$:

由公式(4.33)、(4.35) 求 $|P_0$:

$$|P| = |P_{\min}| + 0.83[|W| - 0.14(1 + 2|lu_1|)]^2,$$

$$|P_{\min}| = |P_0| - 0.44(|lu_1| + |lu_1|^2),$$

∴ 从象差角度要求 $|P| = 0, |W| = 0,$

$$|P_{\min}| = |P| - 0.83[|W| - 0.14(1 + 2|lu_1|)]^2$$

$$= 0 - 0.83[0 - 0.14(1 + 2 \times (-0.11111))]^2$$

$$= -0.83 \times 0.011857$$

$$= -0.009841$$

$$\begin{aligned} |P_0| &= |P_{\min}| + 0.44(|lu_1| + |lu_1|^2) \\ &= -0.009841 + 0.44[-0.11111 + (-0.11111)^2] \\ &= -0.009841 - 0.043456 \end{aligned}$$

$$= -0.0533$$

(4) 由 $|P_0$ 表选取玻璃对,或用选玻璃程序选取玻璃对:

$$BaK_3 \quad n_D = 1.5467, \nu = 62.8,$$

$$F_5 \quad n_D = 1.6242, \nu = 35.9,$$

同时得 $|Q_0| = -5.06。$

(5) 消色差定焦距分配:

由公式(4.36) 有:

$$\varphi_a + \varphi_b = 1$$

$$\frac{\varphi_a}{\nu_a} + \frac{\varphi_b}{\nu_b} = 0$$

由上面 2 式可以得:

$$\begin{aligned} \varphi_a &= \frac{\nu_b}{\nu_a - \nu_b} = \frac{62.8}{62.8 - 35.9} \\ &= 2.33457, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varphi_b &= 1 - \varphi_a = 1 - 2.33457 \\ &= -1.33457, \end{aligned}$$

(6) 求 a, b, c :

由公式(4.25) 有:

$$\begin{aligned} a &= \frac{N_a + 2}{N_a} \varphi_a + \frac{N_b + 2}{N_b} \varphi_b \\ &= \frac{1.5467 + 2}{1.5467} \times 2.33457 \\ &\quad + \frac{1.6242 + 2}{1.6242} \times (-1.33457) \\ &= 5.35335 - 2.97793 = 2.37542 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b &= \frac{3\varphi_a^2}{N_a - 1} - \frac{3\varphi_b^2}{N_b - 1} - 2\varphi_b \\ &= \frac{3 \times 2.33457^2}{1.5467 - 1} \\ &\quad - \frac{3 \times (-1.33457)^2}{1.6242 - 1} \\ &\quad - 2 \times (-1.33457) \\ &= 29.90790 - 8.560127 + 2.66914 = 24.01691, \end{aligned}$$

$$c = \frac{N_a}{(N_a - 1)^2} \varphi_a^3 + \frac{N_b}{(N_b - 1)^2} \varphi_b^3$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{N_b}{N_b - 1} \varphi_b^2 \\
 & = \frac{1.5467}{(1.5467 - 1)^2} \times 2.33457^2 \\
 & + \frac{1.6242}{(1.6242 - 1)^2} \times (-1.33457)^3 \\
 & + \frac{1.6242}{1.6242 - 1} \times (-1.33457)^2 \\
 & = 65.84588 - 9.908686 \\
 & + 4.63445 = 60.5716
 \end{aligned}$$

(7) 核对 lP_0 值:

$$\begin{aligned}
 lP_0 & = c - \frac{b^2}{4a} = 60.5716 - \frac{24.01691^2}{4 \times 2.37542} \\
 & = 60.5716 - 60.706 = -0.1344,
 \end{aligned}$$

此值与要求的 $lP_0 = -0.0533$ 很相近。

(8) 求 lQ_0 值:

$$lQ_0 = \frac{b}{2a} = -\frac{24.01691}{2 \times 2.37542} = -5.055,$$

此处计算的 lQ_0 值与 lP_0 表中的 lQ_0 值是基本相符合。

(9) 求曲率:

由公式(4.60)、(4.10) 求 lQ , 由公式(4.61)、(4.62)、(4.63) 求透镜的三个曲率。

$$lQ = lQ_0 - \frac{2}{a+1}(lW^\infty - 0.14),$$

$$lW^\infty = lW - lu(2 + u)$$

$$\begin{aligned}
 lW^\infty & = 0 - (-0.11111)(2 + 0.7) \\
 & = 0.299997
 \end{aligned}$$

$$lQ = lQ_0 - \frac{2}{a+1}(lW^\infty - 0.14)$$

$$= -5.055 - \frac{2}{2.37542 + 1}$$

$$(0.299997 - 0.14)$$

$$= -5.055 - 0.0948 = -5.1498,$$

$$\begin{aligned}
 lc_2 & = lQ + \varphi_a = -5.1498 + 2.33457 \\
 & = -2.81523,
 \end{aligned}$$

$$lc_1 = lc_2 + \frac{\varphi_a}{N_a - 1}$$

$$= -2.81523 + \frac{2.33457}{1.5476 - 1}$$

$$= -2.81523 + 4.26328 = 1.44805,$$

$$lc_3 = lc_2 - \frac{\varphi_b}{N_b - 1}$$

$$= -2.81523 - \frac{-1.33457}{1.6242 - 1}$$

$$= -2.81523 + 2.13805$$

$$= -0.67718,$$

(10) 求半径:

由公式(4.64)、(4.65)、(4.66) 求取实际的双胶透镜的曲率半径。

$$r_1 = \frac{1}{lc_1 \varphi_1} = \frac{f}{lc_1} = \frac{17.778}{1.44805} = 12.277,$$

$$r_2 = \frac{1}{lc_2 \varphi_1} = \frac{17.778}{-2.81523} = -6.315$$

$$r_3 = \frac{1}{lc_3 \varphi_1} = \frac{17.778}{-0.67718} = -26.253$$

(11) 加透镜厚度:

如同小尺寸望远镜物镜加厚度的原则,取中心厚度 $d_1 = 1.0$, $d_2 = 0.5$ 。

(未完待续)