

# 目 录

<b>第一章 生产概述</b> .....	1
1. 现代化生产准备的某些特点.....	2
2. 辐射能接收器的特性.....	4
3. 象质标准.....	6
4. 技术条件和对仪器光学部件的要求.....	10
5. 光学零件图.....	13
6. 对光学零件的要求.....	16
7. 把照相物镜换算成玻璃炉号.....	27
8. 透镜按厚度配套.....	36
9. 关于玻璃按折射率偏差配套.....	42
10. 关于透镜玻璃按色散偏差配套.....	48
<b>第二章 对光学零件玻璃要求的依据和公差计算</b> .....	51
11. 折射率偏差的公差计算.....	51
12. 关于玻璃色散公差的计算.....	60
13. 关于光学均匀性.....	67
14. 关于玻璃的双折射.....	69
15. 关于玻璃的光吸收.....	70
16. 关于条纹度类别的选定.....	73
17. 气泡度类别和级别的选定.....	74
<b>第三章 光学零件的公差计算和制造要求的依据</b> .....	78
18. 关于按照玻璃样板加工各光学表面和 玻璃样板半径的公差.....	78

19. 玻璃样板公差和按照玻璃样板加工后的 表面公差计算.....	89
20. 光学零件表面偏离正确球面的公差计算 .....	100
21. 按照玻璃样板加工平面镜和棱镜的公差计算 .....	109
22. 反射面偏离正确球面的公差计算 .....	114
23. 关于非球面公差 .....	118
24. 光学零件表面的光洁度 .....	122
25. 棱镜角度公差的计算 .....	123
26. 光学系统透镜表面的中心偏差 .....	143
27. 某些光学系统的镜框结构 .....	152
28. 关于照相物镜镜框的改进 .....	159
29. 温度改变对光学系统离焦的影响 .....	167
30. 温度波动对成象质量的影响 .....	172
<b>第四章 几种光学零件公差计算 .....</b>	<b>177</b>
31. 反光镜和棱镜反射表面公差计算举例 .....	177
32. 胶合表面按玻璃样板加工的公差 .....	186
33. 吸收率和厚度偏差对滤光片透过率的影响 .....	192
34. 推荐如何选配观察和检验测量仪器用的滤光片 .....	199
35. 对光学零件镀透光膜的要求 .....	205
<b>符号 .....</b>	<b>208</b>

## 第一章 生产概述

必须遵循下列条件，光学仪器才能符合技术要求：

1) 从计算上和结构上能够考虑并保证达到定货者对仪器提出的和技术条件中规定的全部要求；

2) 仪器各零部件和整个仪器均应按照图纸和技术条件制造，即尺寸、加工质量和材料（特别是玻璃）质量，均保持在图纸和技术条件的公差范围内；

3) 仪器的部件和整个仪器装调正确，当然，这里指的是，按技术条件和使用守则进行仪器的检验和试验，以及以后的使用。

可以考虑和设计在实际上无误差或接近理想的光学系统，但是，这样的系统并不是非要不可的，因为象的接收器官——眼睛、感光层本身就不是理想的，而是有着误差和缺陷。如果一定要求按照接近理想的质量计算、设计和制造仪器，那么，仪器的制造就大大复杂化，而且，就目前工艺条件来讲，会有许多困难，最后还得采取降低对仪器要求的办法。因此，计算和设计仪器，只要能符合接收器官的要求就可以了。因为，制造仪器，由于多种原因，不可能非常精确，从而，零部件及整个仪器会有一定的计算数据误差，那么，对生产必须提出要求，使偏差不要超出零部件和整个仪器给定的公差界限。

公差应该经过预先计算并给定得当，使得按照公差制造

的仪器及零部件具有高质量。如果制造的零部件及整个仪器一旦超过允许的偏差，使其不符合技术条件，确实是劣质的，应该报废或者返修。

提高公差不见得会显著改进仪器的性能，特别是其光学部分的性能，但是必然会大大地提高仪器的造价，浪费制造时间，需要较熟练的工人和检验人员、过份精密的制造和检验设备，束缚企业的生产能力；由此可见，必须给定合理的公差，才能保证制造的仪器质量好，生产费用适宜。

### 1. 现代化生产准备的某些特点

光学机械工业在迅速发展，研制新型的高级光学系统，如长焦距、强光力、广角光学系统已经大批量生产，需要经济核算、严格对待公差计算、结构的工艺性以及装调等问题。

在进行现代化生产的准备时，建议达到下列要求：

1) 工艺组应该同主任设计师一起参与确定仪器结构的方案。现在通常工艺员不参加结构方案的研究，而工艺员只在仪器结构制定后检查其工艺性，这样实际上已不可能进行任何重大的改动，而个别零件工艺性的小改进则意义不大。

2) 确定仪器结构方案时，设计员和工艺员应该：

(1) 保证结构最大限度地分成各初装部件，这样可大大简化并加速零件的制造和仪器的装配。所制定出的各个装配部件的结构最好能够单独装调和检验。

(2) 合理使用材料、确定形状、尺寸和公差，保证零件制造和仪器装配工序尽量简化，避免重体力劳动。

装配的合理性也包括采用合理的调校工序，例如：调整补充加工某一零件，来保证空气间隙或定中心，这样就能够

放宽许多零件的公差。形状和材料的选定，要便于在制造零件时采用高生产效率的方法——压型、压铸等。

(3) 正确计算公差，提出对零件、装配部件和仪器的要求，消除一切没有根据的窄公差和不必要的要求，因为零件的制造方法、设备、刀夹量具的选择均取决于公差值。

公差值合理（即根据计算给定公差）能够容易确定特别重要的零件和装配部件，因为重要零件和装配部件的制造和装配误差会明显地影响象质和仪器应该精确保持的其他性能。不需要窄公差的地方，若采用窄公差，则使人迷惑，给迅速查明仪器性能下降的原因增加困难，同时难于发现可能使仪器质量明显降低的零件和装配部件的误差，例如：不久以前，对相物镜的所有透镜的厚度给定公差为 $\pm 0.01 \sim 0.02$ 毫米，所有表面的玻璃样板加工公差为 $N=2 \sim 3$ ， $\Delta N=0.2 \sim 0.3$ ，采用一类的 $\Delta n_D$ 和 $\Delta(n_F - n_C)$ 玻璃；在这种情况下，制造时便不知道究竟哪些表面和厚度确实需要精确制造，哪些透镜的 $\Delta n_D$ 和 $\Delta(n_F - n_C)$ 应该保证，才不致降低象质。常发生低质量产品的原因是在零件和装配部件的图纸中没有明文规定要求。装配部件的图纸现在也存在着不够明确的缺点，难于按其加工，首先特别是装配工艺过程卡片的制定非常不及时。

(4) 消除修整和手工工序、多余的装配和拆卸，保证调整简便。手工工序生产效率低，经济上不合算，如机加车间制造的零件因公差超出或没有修好而在装配车间进行修整的此类工序。然而有的工序，如修切照相物镜镜框的支持端面、航空摄影机调焦隔环，以保持工作距离。这些工序在装配照相物镜或航空摄影机时都是必要的。

在确定试制品的结构方案时，主任设计师和工艺员很少重视适用于成批生产的结构，而在制造试制品时没有系统地了解其制造、装配和调校，图纸上不反映所有的修改和要求，在结构上不能消除在成批生产中根本不能容许的缺陷；以后消除这样的缺陷将有许多困难，因为文件已经过批准，刀夹量具已经设计和制造出。

满足上述的要求，就能得到工艺性好的结构。仪器中的杂、散光严重降低所观察物体的对比度，使得难于发现物体，分辨率下降，对于观察和拍摄对比度低，照度不足的物体特别有害；因此在低对比度、照度不足的条件下工作的仪器具有尽可能大的透过系数是很重要的，在定结构方案和确定图纸时，要合理地给定膜层，正确选定镜框和光圈的形式。对试制品，必须作透过系数和有害的杂光系数的检验。在现代化的仪器中，杂光系数不应超过2~3%。在照相物镜和普通视度筒的透过系数为80~85%。

近来对仪器质量要求大大地提高了，在仪器结构、制造工艺过程、公差计算以及检验和试验方法中都必须考虑到这一点。对仪器和对生产利润的总要求中，一个重要的问题是仪器的成本，这在很大成度上取决于结构的工艺性。

## 2. 辐射能接收器的特性

对光学机械仪器和对光学零件制造的基本要求，是根据辐射能接收器的特性提出的。最常见的辐射能接收器是人的眼睛和照相乳胶，眼睛或照相乳胶最重要的性能是分辨极限（分辨率）——角度分辨极限，两点或两线条之间的最小距离线对数，依靠分辨性能，使仪器或接收器根据具体的试验情

况或使用条件就可得到清晰的象。

眼睛的分辨率，在观察点目标时〔对比度  $k = 1$  (白底黑线条)，照度为  $50 \sim 200$  勒克司〕，认为等于  $1'$ ，随着对比度降低，分辨率减小；当  $k = 0.5$  时， $\varepsilon = 2'$ ；当  $k = 0.1$  时， $\varepsilon = 3'$ ；而在黄昏或黎明观察时， $\varepsilon$  下降到  $3' \sim 5'$ 。游标视觉锐度为  $10''$ ，细线条为  $30''$  的双象用眼睛已经能分辨出。进入眼睛内光束的视差和象散为  $0.25 \sim 0.5$  屈光度，以及尖塔差为  $0.5$  ( $\sim 18'$ ) 核镜屈光度是无害的，但用眼睛已经能分辨得出。中年人眼睛的调节宽度为  $5 \sim 6$  屈光度，象面弯曲等于此值之半还是允许的。清晰的视场角  $2^\circ$  是眼睛黄斑的角度值。角色差为  $1' \sim 3'$  用眼睛即能分辨得出。用双筒镜观察时，两筒的放大率差在  $5\%$  以内分辨不出，并且是无害的；两筒的放大率差为  $10 \sim 15\%$ ，象倾斜差超过  $30'$  时就损坏了体视效应，呈现双象，但眼睛很快疲劳。如果用双筒镜观察，由于镜筒光轴不平行度的原因使眼睛的轴线发散不大于  $30'$ ，会聚不大于  $1'$ ，垂直平面内交错不大于  $20'$ ，出现这些情况还是无害的——眼睛不感到疲劳。在黄白光照射下，眼睛最不容易感到疲劳，其次是绿、红和紫光。

现代荧光屏的分辨率不高，为  $4 \sim 6$  线对/毫米，而光电变换器的分辨率在降低象的对比度的情况下为  $30 \sim 40$  线对/毫米。

常用照相胶卷(照相负片 KH 型，全色片 X 型)的分辨率等于  $65 \sim 80$  线对/毫米，微粒胶卷的分辨率为  $100 \sim 140$  线对/毫米，专用乳胶的分辨率超过  $500$  线对/毫米。因离焦而造成图象模糊不清，这时若弥散圆不超过  $1/R$ ，也不会降低分辨率，这种情况还是允许的， $R$ ——照象物镜能分辨的每毫米上的线对数，于是，物在有限距离时象面的景深和物在无限

远时象面的景深  $\Delta x'$  分别按下式算得:

$$\Delta x' = \pm \frac{1}{R} \cdot \frac{f' + x'}{D_p} = \pm \frac{1}{R} \cdot \frac{f'}{D_p} (1 - \beta)$$

$$\Delta x' = \pm \frac{1}{R} \cdot \frac{f'}{D_p} \quad (1)$$

实际照相物镜的景深, 一般大于10~20%。公式(1)中采用的符号为一般常用的符号。

如果是高分辨率光学系统用的光学零件, 例如: 复制机物镜、准直镜、高倍率的观察镜以及广角强光力照相物镜, 由于其视场大, 对畸变要求严格和景深小等特性, 所以对材料和对光学零件的制造要求都有所提高。

### 3. 象质标准

望远镜用来观察远处的目标, 而显微镜则是用来分析目标的细节, 在最佳情况下, 其实际象质与理想象质的差别应该用眼睛观察时不能分辨出来的。因为无论是望远镜(或显微镜)的物镜, 或是目镜都不是彼此单独工作的, 也不能离开眼睛工作的, 所以在检查象质和计算公差时, 例如: 对于物镜来说, 必须根据目镜的焦距或者物镜工作的倍率, 对于显微镜物镜也是同样的情况。望远镜或显微镜的象质(特别是视场中心)主要取决于物镜的象质。目镜的放大率(即望远镜或显微镜的放大率)选取极限放大率, 即使换算到眼睛前目镜后的物镜分辨率值不超过眼睛的角度分辨率(45"~60"), 这样为了使放大率达到最大限度, 势必追求得到物镜的最高分辨率, 它等于物镜的绕射——理想分辨率, 而这只



有在物镜无象差的条件下才会得到, 现在实际上不可能达到。因此, 如果望远镜或显微镜的象差 (以波长计) 不超过瑞利极限 ( $\lambda/4$ ), 也符合斯特列尔标准, 按照这种情况, 如果聚积在绕射点象中心的光能不少于 80%, 则点象与理想点象的差别甚微, 这就认为是十分满意的了。望远镜和显微镜的实际光学系统在中心一般都符合瑞利极限和斯特列尔标准。即使在这种情况下, 望远镜和显微镜的实际物镜的象差也存在弥散圆 (模糊不清), 通过倍率  $\Gamma = 15 \sim 25\times$  的目镜观察时就可见出来。例如: 如果具有理想象质的相对孔径为 1:6 的望远镜物镜, 其波象差不超过瑞利极限, 那么, 在光瞳区 ( $h = 0.7D_p/2$ ) 内的轴向球差符合这样的波象差:

$$\delta s'_k = \frac{n_{2n}^2 l_n}{17.5} \quad (2)$$

$$\delta s'_k = \frac{6^2 \times 0.25}{17.5} = 0.5$$

在最佳的装定平面内, 符合这种轴向球差的弥散圆为:

$$\delta z' \approx \frac{0.7 \delta s'_k}{5n_n} = \frac{0.7 \times 0.5}{5.6} \approx 0.01$$

经过目镜 (例如, 当  $f'_n = 10.0$  时) 就可以看见, 张角为:

$$\epsilon = \frac{\delta z'}{f'_n} \rho = \frac{0.01}{10} \times 3438 = 3.4'$$

也就是说可分辨得出。现在也可以求出物镜的景深, 在此景深范围内装定平面的位移引起的弥散圆还不超过:

$$\delta z' = \frac{0.7 \delta s'_k}{5n_n}$$

即:

$$\Delta x' \approx n_{gn} \delta z' \approx \frac{\delta s'_k}{7} \approx 0.07$$

以及视差:

$$\sigma'_g = \frac{1000 \Delta x'}{f'_g} \quad (\text{用屈光度计})$$

和

$$e' = \frac{\sigma'_g D_f'}{0.35} \quad (\text{用角度计})$$

由于制造误差可以允许象差有一定的变化,但不得超过10~15%。就是说,在此例中,轴向球差在光瞳区可以变化,但不得超过 $\pm 0.05 \sim 0.07$ 毫米。

由于物镜表面与正确球面的偏差 $\Delta N$ 而产生的轴向象散 $\alpha$ 也会引起波象差:

$$l_u \approx -\frac{114 \alpha}{n_{gn}^2} \quad (3)$$

如果允许,由于 $\Delta N$ 而产生的波象差的变化不超过瑞利极限的 $1/3 \sim 1/5$ ,则可求出允许象散:

$$\alpha_{\text{允许}} = \frac{l_{u \pm R} n_{gn}^2}{114} = \frac{0.1 \sim 0.05}{114} n_{gn}^2 \approx \frac{9 \sim 4.5}{1000} n_{gn}^2$$

对于 $n_{gn} = 6$ 的物镜, $\alpha_{\text{允许}} = 0.03 \sim 0.015$ 毫米,此值也可用于计算光圈不规则 $\Delta N$ 的公差。

上述原理和数值,也可用于显微镜的光学系统,由此也可进行光学零件制造公差计算。

根据照相胶卷的已知分辨率,照相物镜的象差(由于计

算和制造误差而产生), 求出照相物镜-照相胶卷系统的分辨率。按照众所周知的伊斯托明 (Истомин) 公式可求出照相物镜系统近似分辨率:

$$\frac{1}{R_4} = \frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_{c_s}}$$

式中  $R_4$ 、 $R_s$  和  $R_{c_s}$  分别表示系统的照相分辨率、照相物镜和感光层的目视分辨率。但是, 对于具有 65~75 线对/毫米分辨率的常用照相胶卷, 物镜系统的照相分辨率(就视场中心而言)可按下式求得:

$$R_4 = (1.5 \sim 1.3) / dz'$$

式中  $dz'$  ——在理想装定平面内的弥散圆直径, 系数 1.5~1.3 为考虑到弥散圆上的能量分布。如果视场中心, 当对比度  $k = 0.5 \sim 0.55$ , 频率为 40~50 线对/毫米, 在场区, 当对比度  $k = 0.2 \sim 0.25$ , 频率为 20~25 线对/毫米时, 认为两线对能分辨清楚, 则上述系数也符合照相物镜的频率对比特性。按 (1) 式求得的高焦或景深也可证实频率对比特性 (ЧКХ), 例如:  $f' = 52.4$ , 1:3.5 的 И50 型照相物镜的高焦  $\Delta x' = \pm 0.1$  时, 当  $R_4 = 48$ , 对比度由 0.52 降到 0.2 (当  $R_4 = 36$ , 对比度由 0.6 降到 0.3), 也就是说, 这样的频率分辨还是可能的 (在 (1) 式的景深范围内:  $\Delta x' = \frac{1}{45 \sim 50} \times 3.5 \approx \pm 0.07$ )。在视场中心和在场区的弧矢和子午光束的最佳对比度平面的位置也与计算的 (与象差值) 相一致, 例如: 计算 И50 型物镜的频率对比特性时, 装定的最佳平面在视场中心和弧矢截面都相重合, 子午截面上最佳平面为 0.35~0.40 毫米 (当  $\omega = 15'$  时) 与计算值 ( $\delta s'_4 \approx x'_{i_s} = -0.20$  和  $x'_m = 0.09$ ;

1108298

$x'_s - x'_m = -0.30$ ) 相符合。因此, 在计算照相物镜参数的公差时, 大概还可以允许改变视场中心或场区的象差, 只要不超过景深的  $1/5 \sim 1/10$ , 认为象质(分辨率和频率对比特性)的变化还是不大的。同时, 允许合理地改变由于制造误差产生的轴上点象差时, 也可以不改变场区的点象差, 或者认为轴上点或场区点的象差改变会引起在视场中心和视场边缘最佳装定平面位置的变动(破坏重合), 由此进行公差计算。

#### 4. 技术条件和对仪器光学部件的要求

技术条件(TY)应该包括图纸中所有未写进去的。但在仪器及其部件的制造、验收和试验时必需的技术要求。

观察镜、瞄准镜、方向盘等的望远系统的最重要的特性是其放大率、出瞳直径和距离。分辨率、视差、屈光度零位分划装定、透过率和杂散光系数(特别是在较复杂的系统中), 对这些参数的要求, 均应在技术条件中一一载明, 然后还要有一般的要求。

放大率偏差在  $3 \sim 5\%$  范围内实际上不会影响仪器的使用质量, 但是放大率偏差太宽, 在其制造(大量的光学件)时是不允许的误差, 因为, 这可能导致象质下降和引起分划板刻度值的误差。放大率的改变, 一般只规定为负号, 因为正偏差不会降低仪器质量, 这个观点对视场来讲也是适用的(如果物镜的焦距和分划板镜框或视场光阑的通光直径在公差范围内, 则视场在公差范围)。通过仪器观察时, 眼睛网膜上的主观图象亮度与观察有限尺寸目标时的出瞳直径平方成正比(一般  $D_p' < D_m$ )。仪器的出瞳直径不可能设计得太大, 一般等于眼睛的瞳孔直径即可( $5 \sim 6$ 毫米), 所以此规定公差范

围还要负的偏差是不允许的，而正偏差一般不作规定。

观察时眼睛瞳孔应该与出瞳相重合，这时无须移动眼睛就可看到整个视场，此条件在大视场目镜的望远镜中，以及双目观察镜中必须严格执行，在此种仪器中，两视筒的出瞳的距离应该一致。出瞳距目镜后表面的距离一般变动很小——物镜，目镜和旋转系统的焦距偏差（一般不大）影响出瞳的位置很小，但是，出瞳可能偏离光轴，呈非圆形，特别是在棱镜系统中。允许出瞳与所要求的形状有偏差，但是光瞳外形的内接圆直径不得小于其最小直径。

分辨率（分辨极限）与象质一起是仪器的重要特性；象质通常是与样品相比较，以对比度有无边缘渐晕衬度等来衡量好坏。

视差——象与分划板、与测距仪的测标或分划线不重合，由于图象模糊很难观察，并因当眼睛垂直于光轴移动，象相对于分划线或测标移动。在测量角度或距离时引起误差。

视度分划屈光度的零位正确装定——误差不超过0.25屈光度（当  $D_p \approx 3 \sim 5$  毫米），视度分划装定正确——能够完全补偿眼睛的缺陷（近视或远视），特别是在长时间观察时可以很快消除眼睛疲劳。

在光照不利条件下（阴雾天、凌晨或夜晚）观察时，特别是用较复杂的仪器（测距仪、潜望镜、瞄准镜）观察时，光的透过和杂散光具有重大意义；在上述仪器中，引起透过系数降低和有害的杂光系数增大的因素较多。

**对照相物镜和滤光镜的要求** 照相物镜的重要特性包括有：有效焦距、分辨率、相对孔径、透过和杂光系数以及振动和温度变化试验时，物镜工作性能和象质的稳定性。

滤光镜的重要特性包括有：玻璃的光谱特性、最小焦距、楔形度和象质。拍照的质量直接与象质、光谱特性、焦距的大小有关，所以这几个参数是主要的。象质和焦距取决于滤光镜的表面精度和滤光镜在镜框内的装定牢固度（不许压得太紧）。在广角制版照相物镜上可以有超过 $2' \sim 3'$ 的楔形度，使图象变形在 $0.02 \sim 0.03$ 毫米范围。在不大范围内的 $\lambda_{\text{透}}$ 偏差实际上不会影响滤光镜的使用性能。

在满足照相物镜的所有其他要求（主要是分辨率和象质的要求）的条件下，在个别情况，焦距偏差可以允许超过1%，因为，这样不致影响物镜的使用质量，即如调焦固定不变（航空照相机）和在测距器上或固定的距离刻度盘上不进行调焦，则比例变化很小。焦距偏差大说明物镜制造过程中偏差太宽，通常也会造成象质下降，因此，是不能允许的。作用距离偏差对于可换物镜（例如电影照相物镜或“爱好者”照相物镜）是不允许的；对于所有的其他物镜，保持作用距离便于在物镜装配对镜箱装定时照相机调焦。分辨率和象质直接说明物镜和拍照的质量，因而是最重要的参数，在确定滤光镜和胶卷之后可以用视场中心和场区几点(角)的分辨率和象质代表此二者的全面情况。对于广角制版、复制以及专用照相物镜，畸变具有重要意义，畸变值一般不得超过0.02毫米。透过系数的偏差不大（ $\pm 2 \sim 3\%$ ），在生产稳定之后，对曝光的选择和胶卷的使用影响甚微；透过和杂光系数的超差说明严重的破坏了零件的制造工艺过程——镀膜及其精饰。最好使物镜的所有特性在各种使用条件下（例如 $t = \pm 60^\circ\text{C}$ ； $H$ 达20公里等）保持不变，这在目前尚难达到，因而只好限定要求，使物镜经得住规定的温度影响和振动试验。

而不破坏或不损坏工作性能；例如：航空照相物镜，温度由  $+50 \sim -60^{\circ}\text{C}$ ，以加速度  $4g$  超负荷振动（运输），如果按照技术条件，要求光阑在这样的条件下工作，那么就要选择相应的材料，装上镜框，涂好油。分辨率和象质通常都是在实验室条件下（即  $t = +20^{\circ}\text{C}$ ）检验。

**对显微镜的要求** 显微镜的重要特性包括有：放大率、数值孔径和分辨率。在技术条件中规定有显微镜的倍率或者分别指明物镜和目镜的倍率（焦距），以及物镜对自然标本、允许象差值或者跟标准样品相比较的象质方面的分辨率。应调校读数显微镜的放大率，以消除读数主要刻度盘的分划值不一致。

## 5. 光学零件图

根据 ГОСТ 2412-68《光学产品绘图规则》绘制光学零件图。以几面投影画出光学零件，注明玻璃或零件其他材料的牌号、尺寸及其公差、加工质量要求。对于工作面抛光后常常要求达到 14 级光洁度；对于非工作的闪光面要求 5 级或 6 级（对于 2~3 级精度的零件也有要求 7 级光洁度）。设计图标准图幅上有主要印记表格，在其右上方印有补充要求表格，其中包括三部分内容：上（规定对材料的要求），中（对制造的要求），下（计算的数据），不注明单个透镜和胶合镜组的焦距或顶焦距的公差，因为在制造透镜时重要的是保持  $\Delta n_D$ ， $N$ ， $\Delta N$ ， $\Delta d$  和  $\Delta R$ ，这些参数的偏差直接影响象质，特别是长焦距、广角、强光力、复制物镜。由于象差，各个透镜的  $f'$ ， $s_F$  和  $s'_F$ ，测量精度低（大曲率的短焦距负透镜）， $f'$ ， $s_F$  和  $s'_F$  由近轴光线计算求得。

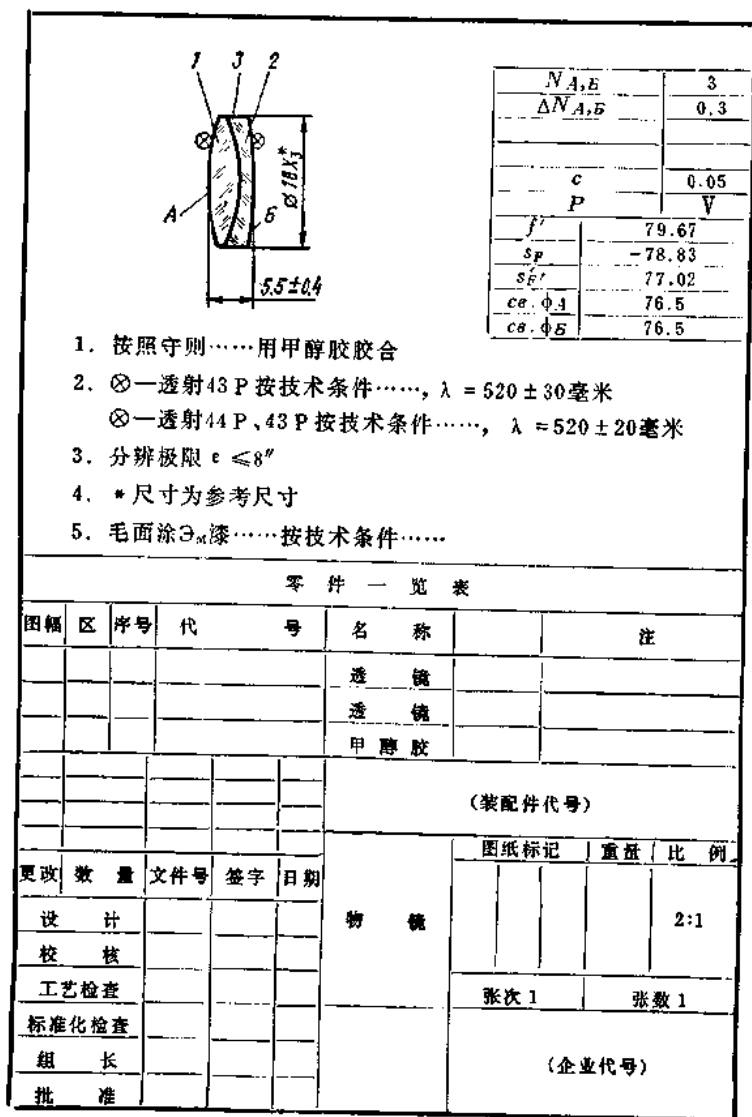
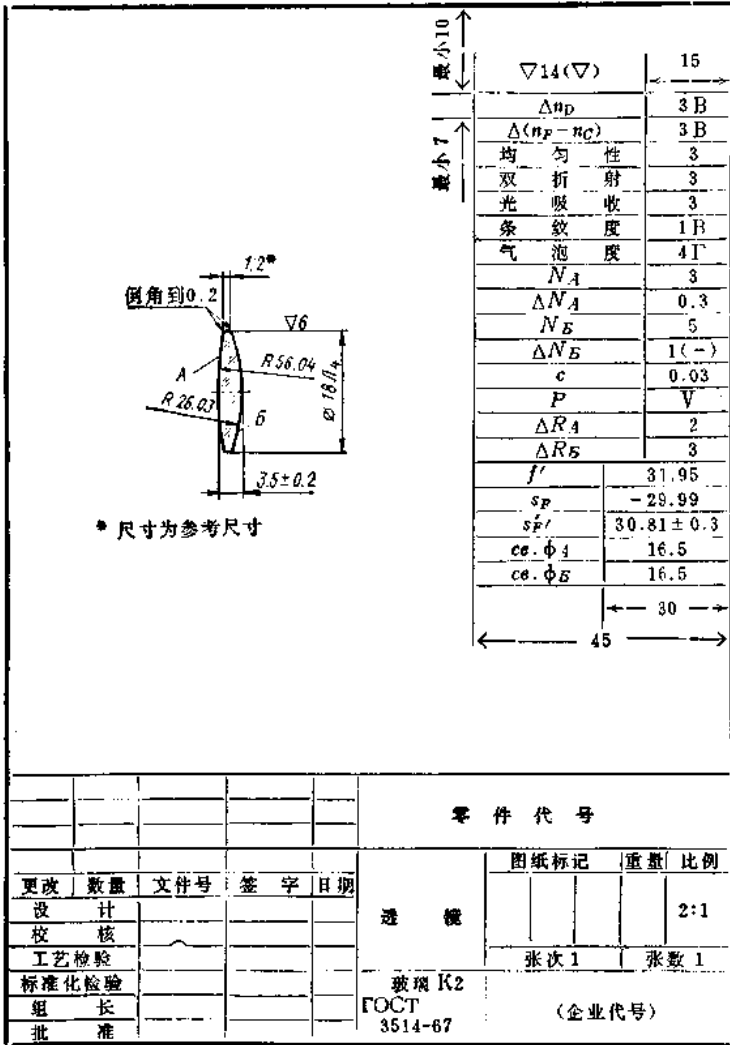


图1 视度管胶合物镜的图例





				零件代号	
更改	数量	文件号	签字	日期	透 镜
设计					
校核					
工艺检验					
标准化检验					
组长					玻璃 K2 ГОСТ 3514-67
批准					
				(企业代号)	
				张次 1      张数 1	

描图:

图幅:

图 2 视度管胶合物镜第一透镜的图例

倘若零件的总直径大大超过形成点象的轴向光束截面，则必须在图纸上注明给定的 $P$ 、 $N$ 和 $\Delta N$ 所涉及到的零件的限定直径（轴向光束的通光直径），这样便于制造和保持优良的象质；距物镜较远的（其中也包括在变焦物镜前的）滤光镜和保护玻璃，望远镜的第二组分，“鲁萨尔(Руссар)”和“奥里昂(Орион)”物镜的第一和最后的透镜。会聚光束和摄影系统的反射镜等都属于这类零件。

在照相物镜的光学系统图中，应该注明基本特性——焦距、相对孔径、视场、分辨率、透过系数；在望远镜的光学系统图中注明放大率、视场、分辨率、出瞳的直径和距离、视差、透过系数等与仪器结构和用途有关的其他参数；在技术条件中应该引用到这些数值并提出检验的方法，简化更改的手续。图1是视度管双透镜胶合物镜的图例；图2是视度管胶合物镜正透镜的图例。

## 6. 对光学零件的要求

光学系统的计算极为繁杂，不仅由于加工低劣，而且由于图纸中对光学零件的规定要求不正确，不能保证优良的象质，也会造成光学系统的低质量。在相同的系统（照相物镜、目镜、望远镜、显微镜）中，对不同零件的要求不可能相同，因为它们在系统中各部位的作用各不相同。同一系统不同零件的公差变动相当大，对该系统的所有零件提出一个任何平均要求都是行不通的，因为这样，通常会导致大量零件的公差不必要的提高，一旦系统不合格，也难于查找原因。

**对玻璃折射率和中部分色散的要求** 现在制造大多数光学系统都是先将其换算成玻璃的光学常数，就是说，进行光学

的补充计算，按折射率和中部色散的实际值，进行象差修正。为了补偿由于折射率和色散的偏差而引起象差变化，可对透镜的空气间隙和厚度作某些改变，以及对1-2表面的曲率半径作一些改变（后者对于生产较难一些）。在这样的条件下，在小批生产高级照相物镜和高倍率的望远镜物镜时可以用 $\Delta n_D (\pm 0.0005 \sim 0.0010)$  1~3类玻璃和 $\Delta(n_F - n_C) (\pm 0.00070 \sim 0.00010)$  2~3类玻璃，甚至放宽一些。

在大批生产中，为了尽量利用制造过程中所剩下不成套的一批零件，而在另一批零件中应该使用 $\Delta n_D$ 和 $\Delta(n_F - n_C)$  1~2类玻璃，在这种情况下计算不要求改变半径和厚度，而只改变某些空气间隙。对于望远物镜的第二组分、光焦度不大的透镜、目镜、会聚光路上的棱镜使用 $\Delta n_D$ 和 $\Delta(n_F - n_C)$  3~4类玻璃，而对于玻璃平板——保护玻璃，分划板，毛玻璃，反射镜，聚光镜，场镜，平行光路中的棱镜以及弯月透镜， $\Delta n_D$ 和 $\Delta(n_F - n_C)$ 不作规定。如果大多数“爱好者”照相物镜和摄影物镜的某些零件使用 $\Delta n_D$ 和 $\Delta(n_F - n_C)$ 零级玻璃，则无须换算成 $n_D$ 和 $(n_F - n_C)$ 的实际值就可制造。很明显，一批毛坯中一致性是A和B级 [ $\Delta n_D = \pm 0.00005 \sim 0.0001$ 和 $\Delta(n_F - n_C) = \pm 0.00001$ ]，应该在换算成 $n_D$ 和 $(n_F - n_C)$ 实际值的光学系统（照相物镜和高倍率的望远镜物镜）的图纸中注明，所以在同一批毛坯中，实际上应该是同一的 $\Delta n_D$ 和 $\Delta(n_F - n_C)$ ；在其他任何情况下，图纸中应注明B级；在同一批毛坯中， $n_D$ 和 $(n_F - n_C)$ 的偏差应该在图纸规定的类别范围之内。对于系统中每一零件A级或B级的选定，可以不管系统换算时一批玻璃的 $n_D$ 或 $(n_F - n_C)$ 偏差如何，也就是说，可以忽视在A级和B级范围内由于个别毛坯 $n_D$ 和 $(n_F - n_C)$ 的

偏差而造成的象差变化如何。例如，在望远物镜第一组分的透镜图纸中可以指明A级，然而对于第二组分的透镜用B级完全可以满足。这个结论对于“格利奥斯（Гелиос）”物镜的外部透镜和胶合透镜也是适合的。

**对玻璃光学均匀性的要求** 第1类的玻璃（分辨率和星点象与理想系统相同）只适用于高精度干涉、天文和测地仪器，准直管，显微镜等，即高分辨率和高象质的观察仪器的物镜（甚至轻微的星点象变形也不允许）。均匀性第2~3类的玻璃可用于精确的望远镜、瞄准镜、观察镜。具有高分辨率和高象质的复制仪器物镜。

对于在分辨极限为70~80线对/毫米的胶片上成象用的普通照相物镜，应使用第3~4类的玻璃，就是说，允许较目视分辨率为400~700线对/毫米的理想系统的分辨极限降低10~20%。对于望远镜的第二组分、广角物镜的弯月透镜、位置靠近象平面的光学零件（窄光束——场镜、分划板、棱镜），以及目镜的透镜，均可采用均匀性第4~5类的玻璃；对于有一面为毛面的分划镜，均匀性不作规定；对于保护玻璃、棱镜和滤光镜，玻璃均匀性的要求与其位置靠近的零件的均匀性相同，对玻璃的其他要求也用类似的方法处理〔除 $\Delta n_D$ 和 $\Delta(n_F - n_C)$ 外〕。

**对玻璃双折射的要求** 双折射第5类以下的玻璃由于退火时冷却不均匀，玻璃产生很大的内应力（寻常光和非寻常光通过厚度为1厘米的玻璃其光程差超过50毫微米），可能引起光学零件在加工时出现裂纹和崩落，和在加工过程中或经过一段时间零件表面产生变形，即使应力消除之后，零件的形状也不能保持原状。显然，对于玻璃内光程较大的干涉

和天文仪器只能使用双折射为第1类的玻璃，使得光程差不超过瑞利极限，即波长的 $1/4$ 。对于高精度的望远镜、准直镜和复制显微镜的物镜和反射镜的零件的玻璃双折射应该是第2~3类的，照相物镜是第3~4类的玻璃，聚光镜、普通仪器的目镜、放大镜采用双折射第4~5类的玻璃。

**对玻璃光吸收的要求** 与空气临界面较多的、玻璃内光程长度较短（20~50毫米）的复杂系统，光的主要损失是由折射面的反射和反射面的吸收。因此，在这样的系统中，以及较薄的光学件就没必要采用000，00，0和1类（光吸收系数分别为0.2，0.4，0.6和0.8%）的玻璃，而应该采用第2~3类的玻璃（光吸收系数为1~1.5%）。玻璃内光程较长的零件（棱镜、天文、照相及其他仪器的透镜）应该使用光吸收00，0和1类的玻璃。

**对玻璃条纹度的要求** 对于物镜的各个透镜及其他位置距象平面较远的零件，清晰的细线状或点状的条纹是允许的，因为其面积小，不会明显影响象质，但是，对于位置靠近或处于象平面上的零件，上述疵病是不允许的，因为这些疵病看得见或者影响物体的个别点象。对于具有极限分辨率和象质的干涉和天文仪器、平行光管以及显微镜的物镜必须采用B级条纹度的第1类玻璃（在规定的某一方向观察），但是，细条纹是允许的；玻璃内大片的条纹流是特别有害的。

目镜、聚光镜、毛玻璃用的玻璃可以有第2类的条纹。重冕玻璃、重钡火石玻璃，成分较其他牌号的玻璃复杂，条纹也多一些。

**对玻璃气泡度的要求** 位置靠近或处于象平面上的零件的玻璃不应有气泡——1，1a，2，3类（用于棱镜、聚光镜、

在照相乳胶为普通分辨率情况下，大尺寸的毛玻璃、幻灯片)。大倍率观察的分划板、分度盘、平行光管分辨率图案板的毛坯或者有极限线宽为  $0.003 \sim 0.005$  毫米的分划，对其气泡度提出特别严格的要求 (1, 1a 类)。

所有光学系统物镜玻璃内的气泡不会对象质有任何显著的影响。因此，例如，在“爱好者”照相物镜上和双筒望远镜、测地仪器的物镜上，允许气泡度为 5~7 类(最大气泡的直径为  $0.5 \sim 1.0$  毫米)和 Г, Д, E 级(每一公斤玻璃内分别为 300, 1000, 3000 个气泡)。在望远镜物镜和大口径的照相物镜中允许气泡度为 7~9 类(气泡直径为  $2 \sim 3$  毫米)或更宽一些。如果统计气泡的可能面积，此面积一般小于入射光瞳面积的  $0.1\%$ ，同时，极限尺寸的气泡很少。

对滤光镜的玻璃提出上述相同的要求(除了折射率和色散的要求之外)。对于各种仪器，一般按照光谱特性可采用 2~3 类玻璃(航空照相机及其他类似的仪器，采用 2 类玻璃)。

**对玻璃样板及其加工的要求** 玻璃样板用来检验光学零件表面与给定的正确球面半径间的偏差，检验时将其放置在被检的表面上。当光的波长  $\lambda = 500 \sim 560$  毫微米时， $0.25 \sim 0.28$  微米表示一个光圈(干涉环或带)的偏差。

半径和表面弯曲的变化与玻璃样板放置在被检表面上时所观察到的光圈数成正比，与表面直径的平方成反比。因此，如果玻璃样板或零件的直径相同而出现的光圈数相同，则各个表面弯曲的变化是相同的，固定的。如果遇到各种不同直径的表面，则在各表面本身允许的弯曲变化情况下，应该规定与直径平方成正比的光圈数  $N$ 。与空气临界的物镜表面，

一般公差是 $N=3\sim 5$ ,  $\Delta N=0.3\sim 0.5$ , 采用2级玻璃样板对其进行检验。

非胶合双透镜物镜的内表面或“捷列马尔(Телемар)”型物镜的第一组分和折反射物镜的球面镜, 公差应该较严一些( $N=1\sim 2$ ;  $\Delta N=0.2\sim 0.03$ ;  $\Delta R=1$ 级), 冕玻璃透镜的胶合表面, 公差较宽一些。对于位置在望远镜物镜或照相物镜前面或在其后面、但距象平面较远的反射镜和棱镜的反射平面, 玻璃样板的研磨公差也应该严一些, 这样的表面, 用于玻璃样板的公差只能为第1级。道威棱镜和屋脊棱镜的反射面必须精确制造, 其公差一般为 $N=0.2\sim 0.5$ ,  $\Delta N=0.05\sim 0.1$ ; 具有一两个反射面的直角棱镜和平面镜,  $N=0.5\sim 1$ ,  $\Delta N=0.2\sim 0.3$ 。位置靠近物平面或象平面的零件表面的公差要求不严( $N=---$ ,  $\Delta N=---$ ), 对其检验采用3级玻璃样板。

以光圈数 $N_{\text{检}}$ 表示的玻璃样板的公差, 同所有的量具的公差一样, 应该比用其所检查的表面的公差 $N$ 严格3~5倍。

**对表面定心的要求** 显微物镜、强光力、广角、复制照相物镜和望远镜的第一组分(包括内调焦的望远镜)的表面, 对定心很敏感, 这些表面的偏心差应为0.003~0.010毫米, 可采用自动准直的方法或在装配时由镜框结构来保证。透镜偏心差的加工精度可达0.02~0.03毫米, 望远镜物镜透镜偏心差也要求这个精度, 而目镜透镜的偏心差为0.03~0.05毫米就足够了, 放大镜和聚光镜的偏心差为0.05~0.1毫米。对于大直径的透镜, 要注意偏心差并检查透镜的斜度-厚度差, 作这项检查也比较方便。

**对平板玻璃的平行差和棱镜角度的要求** 滤光镜和保护

玻璃的平行差会引起瞄准线和光轴的偏差，测地仪器和摄影经纬仪的准直误差，航空照相机和望远镜的长焦距物镜象的变色（色差），以及广角航测照相机象的畸变，一般都要考虑楔形度的公差。

照相机和电影摄影机的滤光镜和保护玻璃的平行差允许  $3' \sim 5'$ ，分划板的平行差允许  $5' \sim 10'$ ，毛玻璃的平行差与厚度差一样允许  $0.03 \sim 0.05$  毫米。棱镜角度的制造误差为  $3' \sim 5'$ ，唯独屋脊表面之间的角度误差不得大于  $2'' \sim 5'' \sim 10''$ ，其具体值根据系统的倍率和棱镜的位置而定。

**对表面光洁度的要求** ГOCT11141-65 中规定了光洁度等级的选定。光学零件表面应该经过抛光，抛光后的零件不应有损坏产品外貌和影响观察的麻点和划痕，如果有这样的疵病在象平面内：规定光洁度等级为 I，I-10，I-20，I-40（数字 10，20，40——目镜的焦距，根据这些焦距，按照光洁度等级来观察完工零件表面的疵病情况），I-0 级——用于宽角目镜和倍率  $> 10\times$  的显微物镜的第一透镜表面（擦痕宽度  $< 0.004$  毫米，麻点直径  $< 0.02$  毫米）。位置靠近象平面的表面（目镜透镜的表面、平行光管的分划板、目镜的棱镜、目镜的聚光镜以及放大率  $< 10\times$  的显微物镜）规定为 II~III 级；目镜的透镜和高级照相物镜的外表面规定为 IV 级，因为 V 级的麻点较大（直径为  $0.02 \sim 0.5$  毫米）损坏产品的外貌。照相物镜、望远镜和天文仪器的物镜规定为 V~VII 级（擦痕宽度为  $0.03 \sim 0.1$  毫米，麻点直径为  $0.5 \sim 2.0$  毫米），大尺寸（ $100 \sim 300$  毫米）的照相物镜和天文物镜的零件规定为 VII 级，尺寸为  $300 \sim 500$  毫米的上述零件规定为 VIII 级，尺寸为  $300 \sim 500$  毫米的非主要观察玻璃规定为 IX 级。



(擦痕为 0.3 毫米，麻点为 3 毫米)。

**透镜的厚度公差和空气间隙** 透镜厚度和空气间隙的偏差会损坏对光学系统的修正；影响象质，改变象差；因其影响各不相同，公差也各有所异。聚光镜的透镜厚度和空气间隙，其公差为 0.2~0.5 毫米，放大镜和普通目镜，公差为  $\pm 0.1\sim 0.2$  毫米，复杂的目镜，公差为 0.05~0.1 毫米，在望远镜中，物镜透镜的厚度公差保持为 0.1~0.3 毫米，胶合物镜的空气间隙精度高一些，为  $\pm 0.03\sim 0.05$  毫米。

非强光力和视场不大的照相物镜，厚度和空气间隙的公差保持为 0.05~0.1 毫米，透镜最好按厚度配套。在强光力和广角照相物镜内，透镜的厚度公差为  $\pm 0.05\sim 0.1$  毫米，在胶合和装配之前必须按厚度选配透镜，以便补偿由于透镜厚度偏差引起的象差变化，因为不选配而规定单个透镜的厚度偏差为 0.01~0.02 毫米时，就会大大影响象质。空气间隙的误差保持为  $\pm 0.01\sim 0.02$  毫米，其中有的还要精密一些，特别是在广角复制物镜中以及高级显微物镜中。在批生产的照相物镜透镜的图纸上应标注非对称的透镜厚度公差——负偏差大于正偏差，否则多数透镜厚度偏差为正，造成在胶合和装配时难于配套。

**透镜直径的公差** 关于透镜的公差和配合有标准，应根据标准规定直径公差。

在胶合透镜中，边缘厚度较厚的透镜是定心透镜。要求特别精密定心的透镜允许镜框按透镜的直径搪孔；例如，为了温度补偿，必须保持一定的空隙时，在镜框图纸上应注明空隙值。如果透镜涂漆，则在涂漆前制成其 X 配合代替  $\Delta$

配合， $J$ 配合代替 $X$ 配合，并在图纸上指明尺寸，例如

$\phi 40 \frac{X_{\text{涂漆后}}}{J_{\text{涂漆前}}}$ 。建议保持漆层的厚度为 0.005~0.01 毫米。

用滚边法固定透镜时，为提高定心精度而在滚边时按照“光点”（光斑），或按照自准直管使透镜在镜框内定中心，那么，可以按配合 $X_3$ 或 $J_4$ 进行加工，所得到的空隙可用来作透镜定中心。上述配合也适用于显微镜和照相物镜的透镜。

用自准直管装配时，镜框配合部位的最终加工工序是在把固定在该镜框内的透镜放在专用夹具内进行（此专用夹具能使镜框与透镜组的组分移动和转动，直到定好表面中心为止），透镜的直径也可以保证 $C_3$ 或 $X_3$ 配合。若透镜在镜框内用胶固定并在上胶时定中心，透镜的公差还可以宽一些；在光学车间透镜磨边时，定中心可以放宽一些（ $c = 0.05 \sim 0.1$ ）。

对在光学机械仪器中最常用的一些零件的材料和制造的要求列于表 1 中，除了表中规定的要求，对序号 1、2、10、11 各项作如下补充说明：通常把物镜换算成每批玻璃的具体的  $\Delta n_D$  和  $\Delta(n_f - n_c)$ ，因此，根据  $\Delta n_D$  和  $\Delta(n_f - n_c)$  的象差变化值来规定每批玻璃的  $\Delta n_D$  和  $\Delta(n_f - n_c)$  是 A 级或 B 级。在计算  $\Delta(n_f - n_c)$  时，必然改变系统的半径，这样，对于生产有一定的困难。第 1、2 项：内表面的  $N_{2,3}$  和  $\Delta R_{2,3}$  较外表面的  $N_{1,4}$  和  $\Delta R_{1,4}$  严格——与表面会聚度的变化大致成反比例。胶合透镜中冕玻璃透镜的胶合面的  $N = 5 \sim 10$ ， $\Delta N = 1 \sim 2$ ，火石玻璃透镜胶合面的  $N = 3 \sim 5$ ， $\Delta N = 0.5 \sim 1$ 。镜框按照透镜搪孔并留有必要的间隙时，采用  $C_3$ ， $X_3$  配合。第 10、11 项：对共轴度有要求的透镜采用  $X$  和  $J$  配合；

表 1 对光学零件材料和制造的推荐要求示例

序号	零件名称	1 平行光管、天文望远镜的物镜	2 测量仪器的物镜		3 分划板	4 凯尔纳目镜(物镜)	5 凯尔纳目镜(接目镜)(透镜)	6 双筒望远镜物镜	7 双筒望远镜棱镜	8 聚光镜
			第一组	第二组						
对材料的要求	$\Delta n_D$ $\Delta n_{D-nc}$ 均匀性 双折射 光吸收 条纹度 气泡度	(1~3)A~B (1~2)B~B 1 3 0~3 1B, Д (7~9)Г, Д 及更宽一些	3B 2B 4 3 3 2 1B (4~5) Г, Д	— — —, 4 —, 4~5 3 2B 1	— — —, 5 4~5 1~3 1B; 2B (2~3) B, Г, Д	— — —, 5 4~5 4 1~3 1B (6~7) Г, Д	(3~4)B; 3B 4~5 4 1~3 1B (3~4)Г, Д	(3~4)B (2~3)B 3~4 4 2~3 1B (6~7) Г, Д	—, 4B (2~3)B 4, 5 4 1 1B (3~5)Г, Д	— — — 4; 5 0~1 2B (3~7)Г, Д
		$N_{1,4} = 3$ $\Delta N_{1,4} = 0.3$ $N_{2,3} = 1 \sim 2$ $\Delta N_{2,3} = 0.3$ H; M V~W	5 3 1 5 1 IV 0.03 $\Delta R_4 = 3$ $\Delta R_1 = 2$ $\Delta R_{2,3} = 1$ $\pm 0.2$ X, D J <sub>4</sub> , X <sub>4</sub>	用柏油或 呢纸抛光 I-10; I-20 或 I-40 $\theta = 10' \sim 5'$	—; 5 —; 1 5 1 I~II 0.1 —0.05 —; 3 $\pm 0.1$ X <sub>3</sub> ; X <sub>4</sub> J <sub>3</sub> ; J <sub>4</sub>	5 1 5 1 I~IV 0.05 3 $\pm 0.1$ X <sub>3</sub> ; X <sub>4</sub> X <sub>3</sub> ; X <sub>4</sub> ; J <sub>3</sub> ; J <sub>4</sub>	5 1 5 1 I~IV 0.05 3 $\pm 0.1$ X <sub>3</sub> ; X <sub>4</sub> X <sub>3</sub> ; J <sub>4</sub>	5 1 5 1 I~IV 0.05 3 $\pm 0.1$ X <sub>3</sub> ; X <sub>4</sub> X <sub>3</sub> ; J <sub>4</sub>	3; 5 0.3; 1 — — V~W 0.03 $\sim 0.05$ 2~3 0.1~0.2 $\pm 0.5 \sim 1.0$ X <sub>3</sub> ; J <sub>4</sub>	3 0.3 0.5~1.5 0.2~0.3 I~V $\Delta 45^\circ 5'$ , $\pi: 5'$ 1~2 $\pm 0.5 \sim 1.0$ —
对制造的要求	$c$ $\Delta R$ $\Delta d$ $D$	0.02 $\Delta R_{1,4} = 2$ $\Delta R_{2,3} = 1$ $\pm 0.5 \sim 1$ 及更宽一些 C <sub>3</sub> ; X <sub>5</sub> 及更宽一些	0.03 $\Delta R_4 = 3$ $\Delta R_1 = 2$ $\Delta R_{2,3} = 1$ $\pm 0.2$ X, D J <sub>4</sub> , X <sub>4</sub>	$\theta = 10' \sim 5'$ 3; — $\pm 0.1$ X <sub>3</sub> ; X <sub>4</sub>	0.1 —0.05 —; 3 $\pm 0.1$ X <sub>3</sub> ; X <sub>4</sub> J <sub>3</sub> ; J <sub>4</sub>	0.05 3 $\pm 0.1$ X <sub>3</sub> ; X <sub>4</sub> X <sub>3</sub> ; J <sub>4</sub>	0.03 $\sim 0.05$ 2~3 0.1~0.2 $\pm 0.5 \sim 1.0$ X <sub>3</sub> ; J <sub>4</sub>	0.03 $\sim 0.05$ 2~3 0.1~0.2 $\pm 0.5 \sim 1.0$ X <sub>3</sub> ; J <sub>4</sub>	3 0.3 0.5~1.5 0.2~0.3 I~V $\Delta 45^\circ 5'$ , $\pi: 5'$ 1~2 $\pm 0.5 \sim 1.0$ —	$N_{1,2} = 10$ $\Delta N_{1,2} = 2$ 或 用柏油、呢 纸抛光 I~W 0.1~0.2 3 $\pm 0.3 \sim 0.5$ X <sub>4</sub> ; J <sub>4</sub>

(续)

序号	9	10	11	12	13	14	15	16
零件名称	眼镜	“尤皮捷尔-8”型物镜	“鲁萨尔”型物镜	望远镜和航空照相机的反棱镜	航空照相机的保护玻璃 $f' = 1000; 1:7$ (更美的)	航空照相机的遮光镜 $f' = 1000; 1:7$ (更美的)	望远镜前的保护玻璃	望远镜, 目镜后的遮光镜
$\Delta PD$ $\Delta(\eta_F - \eta_C)$ 均匀性 双折射 光吸收 条纹度 气泡度	— —, 5 —, 5 2 2 B (3~5) Γ	(1~3) B 或 OB; (1~2) B 4 3~4 1~2 1 B 5 Γ, Δ, E	(2~3) B 2 B 4 3~4 1~2 1 B (4~6) Γ	— — 3 — — (5~7) Γ, Δ 及更宽一些	— 3~4 3 0~2 1 B (7~9) Γ 及其 以上	二类光谱特性 3~4 3 $K_A = 2$ 1 B 类 (7~9) I 及其 以上	— 2~3 3~4 1~3 1 B (5~7) Γ, Δ	二类光谱特性 —, 5 4~5 $K_A = 2$ 2 B 类 (3~4) Γ, Δ
对材料的要求	—, 10 —, 2 或用玻璃纤维 光 IV	3~5 0.3~0.5 — IV~V	5~10 0.5~1 0.5~1 0.2~0.3 IV~V	0.3~0.5 0.1~0.3 — V~VI	$N_1 = 3 \sim 5$ $\Delta N = 0.3 \sim 0.5$ 为了保证 $f'_{min}$ 光面总数 $N_1 + N_2 < 0.5 \sim 1$ V~VI	$N_1 = 3 \sim 5$ $\Delta N = 0.3 \sim 0.5$ V~VI	3~5 — — V~VI	—, 10 —, 2 或用玻璃纤维 光 $f'_{min} = 5 \sim 10$ 米 V~VI
对制造的要求	0.1~0.3 及其以上 —, 3	0.02~0.01 2~3	0.01 ~0.005 2~3	— 1~2	$\theta = 30' \sim 3'$ 2	$\theta = 30' \sim 3'$ 2	$\theta = 30' \sim 3'$ 2	$\theta = 5' \sim 10'$ —, 3 0.1~0.2
$N_1$ $\Delta N_1$ $N_2$ $\Delta N_2$ $F$								$H_4, X_4$
$c$								$H_4, X_4$
$\Delta R$								$H_4, X_4$
$\Delta d$								$H_4, X_4$
$D$								$H_4, X_4$

对共轴度没有要求的透镜(一般为倒窄边的正透镜)采用  $X_4$ ,  $J_4$  配合。第 3 项: 通过焦距为  $f' = 10, 20$  或  $40$  毫米的目镜观察的分划板分别采用 P 1-10, 1-20 和 1-40 级。第 6 项: 对共轴度有要求的采用  $X_3$  配合; 对共轴度没有要求的为  $J_4$  配合。第 7 项: 物镜棱镜的折射面公差为  $N = 3, \Delta N = 0.3$ ●; 反射面为  $N = 0.5, \Delta N = 0.2$ ; 目镜棱镜的反射面为  $N = 1.5$  和  $\Delta N = 0.3$ 。45° 角差的公差为  $\delta 45^\circ$ , 尖塔差的公差—— $\pi$ 。第 8 项: 根据透镜的  $f'$  给定偏差(公差), 一般  $(c/f') \times 3438 < 20' = 0.5$  棱镜屈光度。第 10, 11 项: 当  $\Delta d = 0.05 \sim 0.1$  时, 按守则的规定, 胶合与装配之前, 透镜务必按厚度配套。对于装配好的物镜规定定心公差。当用自准直法装配或者在装配时定中心,  $c = 0.02 \sim 0.05$  毫米(指透镜加工时的定中心精度), 冕玻璃透镜的胶合面或者外透镜表面——半球面的公差为  $N = 5 \sim 10$  和  $\Delta N = 1 \sim 2$ , 外表面的公差为  $N = 0.5 \sim 1$  和  $\Delta N = 0.2 \sim 0.3$ , “鲁萨尔”物镜胶合件的火石玻璃透镜的胶合面的公差为  $N = 3$  和  $\Delta N = 0.5$ 。第 7, 12 项: 反射面的公差  $N$  和  $\Delta N$  应该按以后所述的公式计算。第 13, 14, 15 项: 平行差  $\theta$  根据允许的色差、照片主要点的位移或象的畸变算出;  $f'_{min}$  根据航空照相机的允许离焦量或望远镜的视差值计算给定。

## 7. 把照相物镜换算成玻璃炉号

还在 1930 年就已有人指出: 使用透镜厚度偏差引起的参数变化表示为对象差的影响表的可能性, 并提出透镜成套

● 原书误为  $\Delta N = 3$ 。——译者注

送往装配车间。尽管在成批生产中透镜按厚度配套可以发挥最大的效率，但是，直到 1942~1944 年，实际上这种可能性在成批生产中并未得到应用，作者在 1944~1963 年期间，从事研究和改进大批生产中把光学系统换算成玻璃炉号的方法，大批或试制生产中所制造的一系列各种照相物镜按厚度配套透镜的规则，这样的照相物镜以前没有制造过，或者制造过但批量不大。下面介绍制造高级照相物镜时这种方法的某些特点。

在多透镜系统中有大量参数，这对各个参数误差的补偿条件较为有利，即有极限偏差的各参数的重合或然率较少。因此，只要注意哪些是应该特别精确的，并在制造中对特别敏感的参数严格保持其公差。在正确制定公差的情况下，公差不太严格就可以制造出来多透镜系统。切勿忘记，大多数参数偏差具有一贯性的特点，在光学系统的制造过程中要适当加以消除，因为只有考虑到这点，其他参数的公差才能扩大，而象质才能提高。如果不能消除这类偏差，则可能造成不利的结合；但这样的结合不得降低象质，所以要求装配精密。只有在制成光学系统之后，才能知道象质不好的情况。应该把与折射率、色散、对板半径的计算值有出入的偏差作为该批玻璃每个物镜上重复的经常性的参数偏差。对板半径偏差对于无论哪一批玻璃都是个系统误差。此类偏差在对板制成并测量之后，应该用补充校正系统的方法立即计算出来。每批透镜玻璃的折射率和色散偏差，也必须在该批玻璃投入生产之前用补充校正的方法（换算系统）计算出来。

透镜厚度、空气间隙，按玻璃样板磨配时，透镜表面半径的误差都属于偶然性误差。此类误差可以测量并具有必要的

精度，当然希望有可能消除其影响，特别是透镜厚度偏差的影响。

这样一来，折射率和玻璃色散的偏差，对板（包括表面半径）的制造和透镜厚度的误差，即系统的大部分参数误差的不良影响都可以消除，如同系统误差的各个影响一样。如果在制造时不考虑透镜表面与玻璃样板的偏差，认为是偶然的，那么按玻璃样板磨配的系统表面的公差计算任务（即参数不多）就简化了。

**系统换算成炉号的方法和透镜按厚度配套法** 所谓系统换算成炉号的方法和透镜按厚度配套法，就是制造光学系统时，要计算并消除折射率和个别透镜厚度偏差的影响的方法。

此方法包括下述步骤：

1) 光学玻璃厂制成一批（系统）透镜的毛坯，保证符合图纸或配套守则对玻璃的各项要求，并附上合格证。

2) 计算室根据合格证或该组（批）毛坯玻璃的常数（ $n_D$ ,  $n_F - n_C$ ）的测量结果，检查由于玻璃常数偏差而造成的象差偏差，看其是否在允许范围内。如果不要求补充校正系统的象差（象计算系统那样），那么，就通知光学车间，按照主要计算的数据，该组毛坯可以制造透镜。如果该组毛坯不能保证良好的象质，则要进行系统的补充校正：改变个别的空气间隙、透镜厚度或者在万不得已时改变某些表面的半径。给各组玻璃编号，并把该组的参数变化情况通知光学车间，在透镜配套之后再通知装配车间。

3) 在换算时应尽量使用简单的方法，使该系统在象质主要方面接近原始系统，同时也要考虑到生产的可能性，不

致给制造过程带来新的困难。如果光学玻璃厂按照计算室制定的守则进行玻璃配套，则便于换算。如果光学玻璃厂生产一系列炉号的物镜透镜，则计算室可以从其中编成组，编组时不要求改变系统的参数，虽然所用玻璃的  $\Delta n_D$  和  $\Delta(n_F - n_C)$  甚至超出普通公差以外，象质仍然优良。

4) 制成透镜之后测量其厚度。要胶合的透镜在胶合和选配之前按厚度配套，配套时使透镜厚度的一部分偏差为另一部分所补偿，否则，如果没有这样的透镜，则会改变空气间隙。把所得到的数据登记在厚度表内，技术检验科或车间的工作人员按照厚度表进行透镜配套，把配成套的透镜与厚度表一起送到装配车间。当批量过大时，为了方便，透镜配套应该分组进行，以实际相同的参数（厚度和空气间隙）为一组。

5) 在装配车间按照厚度表装配每一物镜，即只能用规定的那一组和厚度的透镜，并按厚度表中规定的空气间隙装配物镜。

6) 计算室与装配车间、技术检验科一起共同注意物镜的质量，并对透镜的配套方法和光学系统的换算方法作若干修正。

此方法的优点如下：

1) 消除了由于透镜厚度和折射率以及玻璃样板半径的偏差而产生不利配合的可能性；配合不良就会形成制造误差。

2) 提供了把公差扩大到系统的所有参数的可能性，而不降低象质。

3) 改善了光学系统的象质，以较宽的公差保证光学系统透镜的互换性。



4) 有可能把公差扩大到装配工作上, 因为光学零件制成之后系统装配之前, 实际上在象质方面与原始系统没有任何偏差, 留给机械装配工较宽的公差范围可以利用, 不致降低象质(例如: 在保持空气间隙的情况下)。

经验表明, 此方法能够用来制造对透镜厚度和折射率偏差敏感的强光力和广角物镜, 玻璃的  $\Delta n_D$  为 (2~3) B类,  $\Delta(n_F - n_C)$  为 (1~2) B类, 透镜厚度偏差到 0.1~0.2 毫米(代替普通的 0.01~0.03 毫米)。以往通常给定空气间隙的误差为 0.02~0.03 毫米, 实际上是为了保证有较高的象质, 但是采用现在这种方法, 给某些空气间隙以较宽的误差也不会引起象质显著的下降。制造各种高级照相物镜的多年经验证明了这种配套和换算法的优点。对透镜厚度偏差敏感的广角照相物镜, 特别是在对畸变要求提高的情况下, 采用上述方法就可以成批制造, 保证生产利润。

上述意见用于对  $n_D$  和  $(n_F - n_C)$  偏差敏感的测地和天文仪器的物镜, 也是正确的。

**照相物镜换算成熔炼光学常数时的注意事项** 对板半径偏差对象质的影响可以通过补充校正的办法重新系统来予以排除, 可采用类似的方法, 在光学系统投入生产之前, 精确测量对板半径, 把玻璃换算成熔炼的光学常数。采用参数变化对象差的影响表(简称影响表)可以轻而易举地换算成玻璃样板的半径和玻璃的炉号。根据光学系统参数 ( $n_D$ 、 $n_F - n_C$ 、 $d$ 、 $l$ 、 $r$ ) 逐个的变化, 在影响表中列有通过光学系统一系列光线的计算结果。通过计算可以算出焦距和顶焦距、轴向色差、球差、彗差(有时只是等晕系数)、象散、放大率色差以及畸变(对轴上点和视场两点——角度  $\omega$  和  $0.7\omega$ )

——而言)变化的曲线表中所采用诸参数的变化应与生产中常遇到的制造误差相接近,使能看出由于制造误差引起象差的明显变化。例如:对于 $f' = 30 \sim 100$ 毫米,相对孔 $1:2.8 \sim 1:2$ , $2w = 70^\circ \sim 30^\circ$ 的照相物镜可以采用 $\Delta n_D = \pm 0.001$ , $\Delta(n_F - n_C) = \pm 0.0001$ , $\Delta d = 0.2 \sim 0.3$ 毫米, $\Delta r_1' = \pm 1\% \times \Delta r_1$ 和 $\Delta r_2 = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 \Delta r_1$ 。对于广角系统应取 $\Delta d = \Delta l = 0.05 \sim 0.1$ 毫米。影响表是成批生产中光学系统换算成炉号和玻璃样板、按照厚度制定玻璃和透镜配套规则、以及计算光学系统参数公差时的基本指南。借助影响表,可以解决由于制造误差结合不好而在装配后造成质量降低的光学系统的修正问题。计算光学系统的象差变化之后,用影响表可以确定使象差达到原始系统的数值所需空气间隙的变化值。

在换算光学系统时,要注意原始系统与计算时所校正的象差的补充校正问题。例如色差的偏差实际上不可能消除(要求改变胶合半径),换算时只能确定色差变化的允许性和使用给定色散偏差的玻璃的可能性,因此在图纸中应该把 $\Delta(n_F - n_C)$ 规定为(1~2)B类,其影响通常可以忽略不计。同时还要注意焦距和顶焦距的偏差。首先,当物镜与测距器一起工作,若偏差使得采用测距器会破坏正确的聚焦(或者可能明显改变其他仪器上分划板的分划值)这样的焦距和顶焦距偏差值就不允许;其次不能保证物镜工作距离的焦距和顶焦距偏差值也不允许。在广角、测地和复制物镜中还要注意畸变增大的不许可性。在换算时,要力争一方面改变空气间隙或透镜厚度,一方面尽可能完全消除象差与原始系统象

差值的偏差，以便由此造成较宽的制造范围并使该组的象质接近原始系统的象质。为此，通常改变一两个空气间隙，一两个透镜的厚度；改变参数不大时，生产较简单。这样一来，尽管光学系统的参数与基本系统的参数有偏差，通过换算保证了投入生产的光学系统在整个视场具有高的象质。

象差的允许偏差可根据所允许的弥散圆来确定，由于各个象差不一样，最佳装定象面位置也随各个象差而不同，可以选取各弥散圆相等的位置，例如景深的五分之一。如果换算时此象差偏差越小，则在制造透镜和装配物镜时可利用的象差偏差的公差范围越大。

光学系统换算成炉号的方法如下：算出个别透镜玻璃折射率与其公称值的偏差，将其写在相应零件号的对面，借助影响表计算与各个透镜折射率偏差相应的象差、焦距和顶焦距的变化，也将其记在相对的一栏，然后加以总计。如果总数未超出允许偏差范围，就通知光学车间可以用该组玻璃而不改变参数来制造零件。如果该组玻璃的象差偏差超出允许范围，则首先改变一两个空气间隙，如果还不够，则改变一个或几个透镜的厚度，完全补偿或使之达到允许值。在多组件的系统换算中总会有一些参数显著影响一些象差，而对另外的象差和必须满足的系统特性影响不大，借助影响表进行换算之后，应该对改变参数后的系统进行核算（即检查计算）；但是当参数接近以前的试验数值时也可以不作核算。表 2 为影响表的实例。

例如：I150 型物镜的换算如下（见下表）。

## 组号2

透镜	$n_D$	$\Delta n_D$	$\Delta f'$	$\Delta s_F'$	$\Delta \delta s'$	$\Delta \alpha'_i$	$\Delta \alpha'_m$
1	1.6135	+ 5	- 0.06	- 0.078	- 0.011	- 0.005	- 0.010
2	1.5743	- 1	- 0.015	- 0.016	- 0.004	- 0.005	- 0.001
3	1.5291	- 3	- 0.041	- 0.036	- 0.010	- 0.004	- 0.015
4	1.6135	+ 5	- 0.117	- 0.102	- 0.024	- 0.012	- 0.029
总计	.....		- 0.236	- 0.232	- 0.049	- 0.027	- 0.055
$\Delta \Delta_1 - 0.05$			+ 0.047	+ 0.177	+ 0.051	+ 0.009	+ 0.045
结果	.....		- 0.189	- 0.055	+ 0.002	- 0.018	- 0.009

补偿玻璃样板的半径偏差和折射率偏差所引起的象差偏差，很少采用改变表面半径的办法，在这种情况下，仍使用玻璃样板和工具的实际半径。当然，在光学车间制造零件的过程中，必须避免不同的各组透镜间的混合，特别是对象差变化敏感的光学系统的透镜。由于某些透镜报废而使该组中的一部分透镜就成为无用，如果计算新组透镜参数的偏差，则其中合格的透镜就可以用于这些新组。

应该看到，因为光学玻璃工厂不能很快掌握新牌号的玻璃，并严格保证其  $n_D$  和  $(n_F - n_C)$ 。如果在 1942 ~ 1950 年把光学系统换算成一批玻璃的  $\Delta n_D$  和  $\Delta(n_F - n_C)$ ，并按照  $\Delta n_D$  和  $\Delta(n_F - n_C)$  配套玻璃是必要的，那么，现在由于较高级的新系统的计算和对象质要求的提高，这种方法更是必要的。例如：用  $\Delta n_D$  I 类（不计算  $\Delta n_D$ ）的玻璃制造“英杜斯塔尔”型，“尤皮捷尔（Юпитер）”型，和“格利奥斯”型物镜是冒险的，因为只要是个别透镜的  $\Delta n_D$  组合不良时，上述这些物镜的焦距偏差就可能达到  $\pm 0.5\% f'$ ，这对配有测距器工作的物镜或对使用距离刻度盘工作的物镜都是不允许的，同时象差的变化也很明显。其优点是简化了换算，一批透镜



可以随便采用另外一批，玻璃混乱现象较少。

如果玻璃熔炼厂成套提供的玻璃，有个别透镜的  $\Delta n_D$  和  $\Delta(n_F - n_C)$  是 1 类的，虽然按照一般规则——正负透镜的玻璃（不是所有的，指特别规定的）在数值和符号方面应该相同（负透镜最好大于 30~50%），折射率和色散偏差，分别在  $\pm 0.002 \sim 0.0003$  和  $\pm 0.00003 \sim 0.0005$  范围内，那么业余爱好者用的短焦距照相物镜就可以按照对透镜的  $\Delta n_D$  和  $\Delta(n_F - n_C)$  的一般检验进行换算。对于测地和天文仪器，以及航空照相机的长焦距物镜，即使采用 1 类的  $\Delta n_D$  和  $\Delta(n_F - n_C)$  的玻璃也有必要换算成玻璃炉号。例如， $f' = 1000; 1:7$  的“捷列马尔”型物镜个别透镜的  $n_D$  偏差值为 0.0002，造成象差的改变很大（为 0.02~0.05 毫米）。所以，在换算时应该估计到。只有使用  $\Delta n_D$  0 类和  $\Delta(n_F - n_C)$  1~2 类的玻璃才能制造短焦距的照相物镜而无须按照  $\Delta n_D$  和  $\Delta(n_F - n_C)$  换算。

### 8. 透镜按厚度配套

透镜厚度的偏差具有偶然性，分布曲线（形状接近瑞利-高斯统计分布曲线）向透镜厚度正差移动。在这方面光学工人力求制造的透镜较公称尺寸厚一些，以便必要时可以修正不圆或表面光洁度。采用厚度公差可以扩大到 0.1~0.2 毫米的透镜配套方法，透镜的厚度偏差最好是负的，因此公差范围应是非对称的——正差小，负差大。

**胶合之前，透镜按厚度配套** 为了避免单个被胶合的透镜厚度误差重叠，降低象质，被胶合的透镜在胶合之前要按厚度配套，在批量生产中不难得到厚度偏差很小（ $\pm 0.02 \sim$

0.05)的胶合透镜组。

胶合透镜的单个透镜厚度偏差对象差变化的影响是单值的，所影响的数值不完全相同。因为被胶合的透镜厚度偏差不大（在照相物镜上为0.1~0.2毫米，在普通望远镜上为0.2~0.5毫米）。可认为单个被胶合的透镜厚度偏差对象差的变化具有等同的影响，这对于补偿象差偏差可得到良好的结果，同样可大大简化透镜配套和光学系统的装配（可以失去胶合透镜的特征），因此，透镜在胶合之前要按厚度配套，使得厚度偏差的代数总和等于零或大致等于零；一片透镜的厚度偏差为正，则与其胶合的另一片的厚度偏差为负，反之也可以，其正负值相等。三个透镜胶合的镜组，其中一片透镜厚度偏差在符号上应与另外两片透镜厚度偏差总和相反，而其绝对值应该相等。透镜组的组成最好是其厚度在胶合前比其公称值薄一些，在胶合后达到公称值。一次胶合层的厚度为0.015~0.03毫米。胶合层的厚度要合适，因此胶合透镜的折射率应采用接近胶的折射率（一般 $n = 1.52 \sim 1.54$ ），并使其对象质的影响等于透镜厚度对象质的影响。在对于厚度变化敏感的系统（例如：广角航空照相物镜和复印物镜），胶合层厚度的计算要特别准确严格。

对于象质没有显著影响的双胶合物镜的透镜和目镜的胶合透镜不用配套，但要便于装配：当目镜个别被胶合的透镜公差大一些（达 $\pm 0.5$ 毫米）应得到同镜组厚度相等的厚度才能减少镜框顶端的修切余量，便于放置镜框的压紧圈。但是透镜在胶合前的配套就是补偿由于透镜厚度偏差造成的象差变化所用的普通方法，而用此种不能改进光学系统的质量，因此可能很不适当。往往在胶合前不得不按厚度选配透镜，

根据系统各透镜经常出现的偏差情况（绝大多数透镜都有厚度偏差，或只有正，或只有负），使胶合后的镜组具有一定量的厚度偏差（或正或负）。

透镜按厚度配套，不考虑单个透镜厚度偏差的特别影响，在这种情况下，胶合镜组的透镜厚度偏差的代数和（其中考虑到胶合层的厚度）等于零。对于“基辅（Киев）”、“佐尔基（Зоркий）”以及其他型号的照相机的照相物镜（单个透镜的厚度偏差达 $\pm 0.2$ 毫米）来说结果良好，这点已为实验并被计算所证实。但是，在广角航空照相物镜“鲁萨尔”中还应该计算单个要胶合的透镜厚度偏差对象差的变化影响。透镜不能混乱，应该编号，以便在下一道工序装配之前配套时计算厚度偏差。

**装配前透镜按厚度配套** 透镜按厚度配套的必要性是显而易见的：就连在短焦距的物镜“英杜斯塔 50”型“尤皮捷尔 8”型和“尤皮捷尔 9”型中，某些透镜厚度偏差为 0.05 毫米，如果不用透镜厚度配套的方法或用改变空气间隙的方法予以补偿，也会引起 0.05~0.1 毫米的球差和子午场曲的变化（而在广角物镜中可达 0.5~0.8 毫米）。现在采用两种透镜厚度配套法，第一种方法用在试制或小批生产中，因为其劳动强度大，此方法不应该、实际上也不能用在批生产中。这种方法为：拥有光学零件不多——两三套，若不改变空气间隙或者改变量不大（0.02~0.05 毫米），欲使厚度偏差对象差的影响得到补偿，则无论怎样好的方式把这些透镜排列在厚度表中，也是很少能成功。因此，最好以适当的方法把透镜排列在厚度表之后，采用影响表计算与每一套透镜厚度偏差相应的象差偏差，然后求其总和。如果偏差总和达到



不允许，则改变空气间隙，使其达到允许值。改变后的空气间隙记在厚度表内，并配套透镜，然后装配光学系统，保持厚度表中规定的空气间隙。此方法劳动强度大，因为实际上就是把光学系统换算成每套光学零件的透镜厚度。然而只有用这种方法才能制造高级的复制和制版广角照相物镜，这种物镜最重要的是消除畸变的变化，一般都是小批制造。应该指出，如果透镜厚度偏差达 $\pm 0.01$ 毫米不被空气间隙的相应变化所补偿，那么保持同样精度的空气间隙就毫无意义。在这样的系统中配套时不变的或改变后的空气间隙必须保持误差不超过 $\pm 0.01 \sim 0.02$ 毫米（对于多镜头照相机器的“鲁萨尔”物镜来说，不得超过0.01毫米）。如果不进行配套，也不补偿透镜的厚度偏差，那么，高的精度装配不会得到优质的物镜，例如“鲁萨尔”型物镜，当每一个透镜的厚度改变0.05毫米时， $x'_m$ 值改变0.5~0.8毫米，畸变改变0.1~0.3毫米。

第二种方法用在成批和大批量的生产中，这种方法就是根据影响表确定光学系统个别透镜厚度偏差对象差影响之间的相互关系，使透镜厚度偏差得到补偿，也按照这种相互关系选择配套光学零件的透镜。在大批量制造的简单系统中，空气间隙在配套和装配时不改变，而根据上述的相互关系在配套中用恰当安排透镜厚度的方法来保证补偿厚度偏差的影响。但是，当透镜的毛坯昂贵，厚度公差比较宽，小批制造——透镜少时，因此没有可能选择适当厚度偏差的透镜，为了得到完全补偿就要改变空气间隙。例如：“佐尔基”照相机的“英杜斯塔尔50”型物镜，根据影响表(表2)可以得出简单的透镜按厚度配套的规则：给第一透镜选择绝对值一样

的或稍小一些的第二透镜，但厚度偏差符号相反，并给二者选择厚度偏差相等的或比第一透镜稍大一些胶合透镜（第三，第四）。空气间隙可以不变，但是当第一透镜的厚度偏差大于 $\pm 0.1$ 和第二透镜的厚度偏差大于 $\pm 0.05$ 时，就要改变第一空气间隙，改变量等于第一透镜厚度偏差之半，符号与其相反。厚度偏差最好不要大于0.02毫米（特别是第二透镜）。对于物镜来说，保持球差和象散（只要 $x'_m$ 值基本上足够）的变化在允许范围内是很重要的。如果有可能只改变一个空气间隙，那么，很显然，只能部分补偿这两种象差，在类似M50型的物镜中和“佐尔基”，“基辅”照相机的物镜中就是这样做的。在这种情况下，例如：在强光力的非广角的系统中，最重要的象差——球差，象散和场曲（在“奥里昂”，“鲁萨尔”广角系统中 $x'_m$ 足够）都能完全补偿，应由此来构成配套规则。然而在规则中需要说明个别透镜厚度偏差间的规定关系或者限定其偏差，在这种情况下，在允许的范围内仍然改变一个或两个其他的象差。作为类似注解的例子为：关于IO11型物镜的配套，第四透镜的厚度负偏差应该符合胶合透镜的厚度正偏差，反之亦可。此条规则用以限制物镜的焦距偏差，此物镜在照相机中借助测距器调焦。为了控制畸变，在配套规则中也可以加上上述这样的注解。如果有可能改变两个空气间隙，例如，“捷列马尔”型物镜可以完全补偿两个象差的变化，比如，球差和象散( $\Delta x'_m$ )。如果希望或必要时，还可以改变畸变，只要通过一定的组合使个别透镜厚度偏差保持在一定的公差范围内。根据影响表(表3)，以表格的形式填写表示个别透镜厚度偏差和空气间隙对球差和子午光束焦点位置( $x'_m$ )影响的相对数值（与第一透镜厚度

偏差的影响相比较, 把第一透镜偏差的影响定为 1)。

表 3 参数变化对象差的影响表“捷列马尔”型照相物镜

参数变 化 值	$u_1 = 0; h_1 = 0;$ $f' = 994.47;$ $s_F' = 409.81$		$u_1 = 0;$ $h = 49.5;$ $\delta s' = -0.50$		$u_1 = 0;$ $h = 70.5;$ $\delta s' = 0.06$		$u_1 = -12^\circ$	
	$\Delta f'$	$\Delta s_F'$	$\Delta \delta s'$	$\Delta \delta s'$	$x_s' = -0.52$	$x_m = -0.18$	$\delta Y' \% = 0.32$	$Y_F' - Y_C' = -0.26$
$\Delta d_1 = 0.5$	-2.80	-2.60	-0.16	-0.38	0.15	0.34	0.01	0.01
$\Delta d_2 = 0.5$	-11.44	-9.29	-1.45	-3.41	-1.37	-4.42	0.10	0.03
$\Delta d_3 = 0.5$	-2.11	-1.96	-0.13	-0.29	0.13	0.40	0.01	0.0
$\Delta d_4 = 0.5$	-1.16	-1.38	-0.12	-0.27	0.20	0.56	0.01	0.0
$\Delta d_5 = 0.5$	-0.24	-0.02	0.0	0.00	0.09	0.24	-0.01	-0.01
$\Delta d_6 = 0.5$	0.22	-0.03	0.0	0.01	0.07	0.21	0.01	-0.01
$\Delta d_7 = 0.5$	0.15	-0.03	0.0	0.01	0.04	0.10	0.0	0.0

按照一般规则, 为了补偿配套和光学系统换算时, 象散和场曲的变化, 需充分补偿  $x_m'$  值的变化。例如“捷列马尔 7”型望远物镜, 我们得出下表:

象差变化	$\Delta d_1$	$\Delta l_1$	$\Delta d_2$	$\Delta l_2$	$\Delta d_3$	$\Delta l_3$	$\Delta d_4$
$\Delta \delta s'$	1	8.34	0.69	0.65	0	0	0
$\Delta x_m'$	+1	-15.0	1.37	1.87	0.8	0.7	0.33

借助此表, 便于照相物镜透镜的配套, 因此把用来配套的透镜以适当的方法配成套 (放在厚度表的直行), 例如, “捷列马尔 7”型, 使第一透镜的厚度偏差等于第二透镜的厚度偏差或使第二透镜的厚度偏差比第一透镜的厚度偏差稍大一点, 但符号应相反。第三和第四透镜的厚度偏差最好与第一透镜的厚度偏差的符号相同, 但其厚度差值稍小一些。把透镜厚度差连同其符号乘以第一行相应的数值, 代数相加后

将其总和除以 0.65, 以便求得第二空气间隙的变化值。由于有透镜厚度偏差, 故对补偿球差的变化是必要的。由第二空气间隙的公称值中 (连同其符号) 减去除得的商, 得出的结果就是该套透镜的第二空气间隙。然后, 把透镜厚度和空气间隙 (第二或第一) 的偏差乘以第二行的数值, 代数相加后将其总和除以 0.7。由第三空气间隙值中 (连同其符号) 减去除得的商, 确定其第三空气间隙值。这样, 由于透镜厚度差而造成的  $x'_m$  值的变化就得到补偿, 与此同时, 象散和场曲的变化也完全精确地得到补偿。

对称的、广角的且要求保持畸变的物镜, 在透镜配套时, 最好不损坏对称性; 即对于物镜组的任何一半来讲, 透镜厚度偏差实际上都应是等值等符号的。但是在透镜厚度公差较宽的情况下, 特别是在广角系统中, 这就造成不能改变象散和场曲。为了补偿这种状况, 不得不采取这样的透镜组结构形式, 即改变中间空气间隙, 或者对于物镜组的两半采取不同符号的厚度偏差, 以改变空气间隙的办法来补偿畸变和局部象散的变化。

透镜厚度配套的近似规则可以借助对顶焦距和球差变化比较敏感的个别透镜厚度的偏差公式来拟定。当影响表编制不合理, 同时又不能及时作出的时候, 在试制样品或仪器生产批量不大时, 用这种方法也是有用的。

### 9. 关于玻璃按折射率偏差配套

国立光学研究所首先开始对某些照相物镜按照折射率偏差  $\Delta n_D$  和色散  $\Delta(n_F - n_C)$  拟定玻璃的配套规则。作者从事于按照厚度拟定玻璃和透镜的配套规则, 涉及的照相物镜有

“卢奇(Лыч)”、“英杜斯塔尔”、“尤皮捷尔”、“格利奥斯”、“奥里昂”、“鲁萨尔”等等。经验表明,对于长焦距航空照相物镜,强光力和半广角的照相物镜和天文、测地仪器的长焦距物镜,玻璃配套是必要的,对于这些物镜的玻璃在 $\Delta n_D$ 和 $\Delta(n_F - n_C)$ 的要求方面极为严格(比1类和0类严格),光学玻璃工厂不花费大量费用来完成此种物镜的玻璃是办不到的。执行玻璃配套规则就能用低要求的玻璃制造出高质量的光学系统。另一方面,按照玻璃配套规则就能用较便宜的 $\Delta n_D$ 和 $\Delta(n_F - n_C)$ 为3~4类的玻璃代替0~1类的玻璃制造出复杂的光学系统,这在大批量生产中,例如照相物镜,可以说是主要的。但是按照一般的配套规则,冕牌玻璃和火石玻璃透镜(后者 $\Delta(n_F - n_C)$ 和 $\Delta n_D$ 稍大一些)必须是单值的 $\Delta n_D$ 和 $\Delta(n_F - n_C)$ ,才能改善任何系统的象质。

制定玻璃配套规则时,要使用 $n_D$ 和 $(n_F - n_C)$ 变化对象差的影响表,从其中也可确定光学系统各个透镜的 $\Delta n_D$ 和 $\Delta(n_F - n_C)$ 之间的相互关系。这种关系或者可以保持系统的 $f'$ 和象差不变,或者允许这样的透镜,能使按照成批玻璃个别透镜的 $n_D$ 和 $(n_F - n_C)$ 的实际值在补充计算系统时,用一般改变空气间隙和透镜厚度的办法使象差和 $f'$ 达到原始系统中透镜的值,即用该批玻璃制造光学系统时保持透镜不变。在第一种情况时,光学玻璃工厂执行玻璃配套规则比第二种情况要稍困难一些,但是第一种情况不要求在制造各个透镜时在系统中有任何改变。

但是,玻璃配套规则的制定可以采取必要的精度和不用影响表两种方法:

1) 例如制定玻璃配套规则时,在 $\Delta n_D$ 方面可以根据使

系统的光焦度  $\varphi'$  和焦距  $f'$  保持不变, 或者让  $\Delta f' \approx (0.1 \sim 0.2\%) f'$ 。在这种情况下, 根据单透镜在空气中的光焦度为  $\varphi'_\mu$ 。薄透镜系统的光焦度  $\varphi'$  按下式确定:

$$\varphi' = \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \frac{h_\mu}{h_1} \varphi'_\mu \quad (4)$$

系统的光焦度和焦距  $f'$  随单透镜的  $n_D$  的变化而变化:

$$[\Delta \varphi' = \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \frac{h_\mu}{h_1} \left( \frac{\varphi'}{n_D - 1} \Delta n_D \right)_\mu \quad (5)$$

$$\Delta f' = -f'^2 \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \frac{h_\mu}{h_1} \left( -\frac{\varphi'}{n_D - 1} \Delta n_D \right)_\mu \quad (6)$$

当  $\Delta \varphi' = 0$  和  $\Delta f' = 0$  时, 可表为下面的等式:

$$\sum_{\mu=1}^{\mu=m} \frac{h_\mu}{h_1} \left( \frac{\varphi'}{n_D - 1} \Delta n_D \right)_\mu = 0 \quad (7)$$

当  $\Delta f' = (0.1 \sim 0.2\%) f'$  时, 可表为:

$$\sum_{\mu=1}^{\mu=m} \frac{h_\mu}{h_1} \left( \frac{\varphi'}{n_D - 1} \Delta n_D \right)_\mu = \frac{0.001 \sim 0.002}{f'} \quad (8)$$

由(5)~(8)式可以得出, 光焦度不大的透镜, 焦距大的透镜(弯月透镜)或者位置靠近象平面的透镜( $\frac{h_\mu}{h_1}$ 小——聚光镜, 调焦透镜和望远物镜的第二组透镜), 其  $\Delta n_D$  对光学系统的  $\Delta f'$  和  $\Delta \varphi'$  的影响不是主要的。对于双胶合的或非胶合

的物镜，条件式(7)表为下式：

$$\sum_{\mu=1}^{\mu=m} \left( \frac{\varphi' \Delta n_D}{n_D - 1} \right)_{\mu} = 0 \quad (9)$$

$$\left( \frac{\varphi'}{n_D - 1} \Delta n \right)_1 + \left( \frac{\varphi'}{n_D - 1} \Delta n \right)_2 = 0$$

因为

$$\frac{\varphi'_1}{v_1} + \frac{\varphi'_2}{v_2} = 0, \quad \varphi'_1 = -\frac{v_1}{v_2} \varphi'_2$$

为了得到  $\Delta f' = 0$ ，则条件式(7)可表为：

$$\left( \frac{\Delta n}{n_D - 1} \right)_2 - \frac{v_1}{v_2} \left( \frac{\Delta n}{n_D - 1} \right)_1 = 0$$

即

$$\Delta n_2 = \frac{v_1}{v_2} \cdot \frac{(n_D - 1)_2}{(n_D - 1)_1} \Delta n_1$$

因为

$$\frac{v_1}{v_2} = 1.5 \sim 2, \quad \frac{(n_D - 1)_2}{(n_D - 1)_1} \approx 1$$

则

$$\Delta n_2 = (1.5 \sim 2) \Delta n_1$$

为了得到  $\Delta f' = 0$ ，最好在玻璃熔炼和配套时，保证冕牌玻璃的正透镜和火石玻璃的负透镜的折射率是单值偏差，同时，火石玻璃的  $\Delta n_D$  最好大于冕牌玻璃透镜的  $\Delta n_D$  的 1.5~2 倍。条件式(7)对于胶合镜组的正负透镜和近距离的透镜也是正确适用的。对于“英杜斯塔尔 50”型物镜  $f' = 52.5$ ；1:3.5； $2w = 45^\circ$ ； $f'_1 = 27.9$ ；TK 14； $n_D = 1.6130$ ； $f'_3 = -29.5$ ； $\text{O}\Phi 1$ ； $n_D = 1.5294$ ； $h_3 = 0.8h_1$ ； $f'_2 = -17.5$ ； $\text{I}\Phi 5$ ； $n_D = 1.5749$ ； $h_2 = 0.77h_1$ ； $f'_4 = 15.62$ ；TK 14； $n_D = 1.6130$ ；

$$h_4 = 0.86h_1.$$

按照(7)式, 我们写出配套的条件式:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta n_1}{27.9 \times 0.6130} - \frac{0.77\Delta n_2}{17.5 \times 0.5749} - \frac{0.80\Delta n_3}{29.65 \times 0.5294} \\ + \frac{0.86\Delta n_4}{15.62 \times 0.6130} = 0 \\ 0.0584\Delta n_1 - 0.0767\Delta n_2 - 0.0511\Delta n_3 \\ + 0.0898\Delta n_4 = 0, \end{aligned}$$

$$\text{或} \quad 5.84\Delta n_1 - 7.67\Delta n_2 - 5.11\Delta n_3 + 8.98\Delta n_4 = 0$$

由“英杜斯塔尔 50”型照相物镜的影响表(表 2)可以看出,  $f'$  和  $\delta s'_k$  的变化(相对孔径为 1:5)精确符合列出的数字。当相对孔径为 1:3.5 时,  $\Delta \delta s'_k$  的变化,  $\Delta n_1$ 、 $\Delta n_2$ 、 $\Delta n_3$  分别比  $\Delta n_1$  大 2、1.8 及 1.5 倍。视场角为  $w = 15^\circ$  时,  $\Delta x_m$  的变化,  $\Delta n_3$ 、 $\Delta n_4$  比  $\Delta n_1$  和  $\Delta n_2$  大 1.6 倍和 3 倍, 它们在数值上比全孔径时的  $\Delta \delta s'_k$  要小, 在视场边缘 ( $w = 22.5^\circ$ ) 处的  $\Delta x_m$  比  $\Delta \delta s'_k$  稍大一点。

2) 可以制定玻璃配套规则, 例如不许改变球差。大家知道(参见第二章), 在空气中, 薄透镜系统球差的变化与透镜系数  $A_\mu$  变化有关, 公式如下:

$$\Delta \delta s'_k = - \frac{1}{2} h_1^2 f'^2 \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \left( \frac{h_\mu}{h_1} \right)^4 dA_\mu$$

因而, 当

$$\sum_{\mu=1}^{\mu=m} \left( \frac{h_\mu}{h_1} \right)^4 dA_\mu = 0 \quad (10)$$



时,  $\Delta\delta s'_k = 0$ 。

(10)式是玻璃按  $\Delta n_D$  配套的条件式, 按照此式, 球差 (甚至其他的象差) 实际上保持不变。

对于采用 TK14 和  $\Phi 1$  玻璃的双透镜物镜, 当  $f' = 100.0$  时,  $1:3.3$ ,  $dA_1 = 0.000144\Delta n_1$  和  $dA_2 = 0.00066\Delta n_2$ ; 当  $dA_1 + dA_2 = 0$  时,  $h_1 = h_2$  和  $\Delta\delta s'_k = 0$ , 由(10)式可以得出:  $0.000144\Delta n_1 = 0.00066\Delta n_2$  或  $\Delta n_2 = 2.18\Delta n_1$ , 这样就可以得到采用 TK14 和  $\Phi 1$  玻璃的双透镜用的玻璃配套条件式, 执行此条件式, 球差保持不变。此条件式近似如上所述的  $\Delta f' = 0$  时的配套条件式。这样的配套条件式也可以引用于较复杂的系统, 例如: “英杜斯塔尔”、“尤皮捷尔”和“格利奥斯”照相物镜、观察仪器的物镜等。很显然, 可以使用从  $\Delta f' = (0.1 \sim 0.2\%)f'$  式所得到的允许的  $\Delta n_D$  值, 同时可以对于成批生产中不希望的气空间隙、透镜厚度 (对于观测望远镜影响很小), 和曲率半径的改变不进行补偿。因为改变曲率半径要求新的玻璃样板、工具和夹具等。在“英杜斯塔尔”、“尤皮捷尔”, “格利奥斯”等照相物镜中, 可以允许对配套条件式有一个总的折射率偏差指标, 偏差量在  $\pm 0.0005$  范围内 (在执行配套条件式时, 为了实现完全消除  $\Delta f'$ 、 $\Delta\delta s'_k$ 、 $\Delta x_m$  所计算的透镜  $\Delta n$ ), 这个  $\Delta n$  指的是对象差变化的影响最大的其中一片透镜而言的, 因此可以提出这样的  $\Delta n_D$  玻璃的配套条件式, 在执行此配套条件式时, 系统的焦距和象差实际上保持不变: 例如“英杜斯塔尔”物镜  $\Delta n_1 = 1.5\Delta n_2$ ,  $\Delta n_3 = 1.5\Delta n_4$  或  $\Delta n_1 = \Delta n_2 = \Delta n_3 = \Delta n_4$ ; “格利奥斯”物镜 (PO, OKC):  $\Delta n_1 = \Delta n_6$ ;  $\Delta n_2 = -\Delta n_5$ ;  $\Delta n_3 = -\Delta n_4$  或  $\Delta n_2 = \Delta n_3$ ;  $\Delta n_4 = \Delta n_5$ ; “鲁萨尔”物镜:  $\Delta n_1 = -\Delta n_6$ ;  $\Delta n_2 =$

$$\Delta n_5; \Delta n_3 = -\Delta n_4 \text{ 或 } \Delta n_2 = \Delta n_3; \Delta n_4 = \Delta n_5.$$

### 10. 关于透镜玻璃按色散偏差配套

透镜玻璃的色散与计算值有偏差就会引起轴向色差的配套，从而可能大大降低大量光学系统（测地仪器的焦距、强光力物镜和照相物镜）的象质，同时也会改变垂轴色差，而垂轴色差的改变在广角系统中具有重要的作用。用补充计算由工厂得到的成批光学系统的毛坯具体色散值的方法来消除色差的改变是困难的，实际上也不可能，因为在保持所有其他象差的情况下，要求消除色差，需要改变表面曲率半径。这样的计算需要光学车间制造新的整套工具、夹具和玻璃样板。因此，为了避免色散的变化引起轴向色差和垂轴色差超出允许的规定，在图纸中给定严格的（有时过于严格的）色散偏差公差，这又是光学玻璃工厂难于完成的。在这种情况下，按照玻璃的色散偏差合理配套，即采用已知色散偏差的现有玻璃来熔炼玻璃或制造该系统其他牌号玻璃毛坯，使得对色散偏差改变的总影响等于零或者成为次要的。这种关系到玻璃配套的规则，除了影响表之外，可用下述方法来确定，对于许多系统是相当近似的。

处于空气中的薄透镜系统的轴向色散按下式计算：

$$ds'_{ke} = -f'^2 \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \left( \frac{h_{\mu}}{h_1} \right)^2 \frac{\varphi'_{\mu}}{v_{\mu}} \quad (11)$$

由于透镜玻璃的色散偏差，轴向色差的变化为：

$$\Delta ds'_{ke} = -f'^2 \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \left( \frac{h_{\mu}}{h_1} \right)^2 \frac{\varphi'_{\mu}}{(n_D - 1)_{\mu}} \Delta(n_r - n_c) \quad (12)$$

在执行玻璃配套规则或条件式时，考虑到系统透镜玻璃的色散偏差，轴向色差的变化应等于零，因而配套规则或条件式为：

$$\sum_{\mu=1}^{\mu=m} \left( \frac{h_{\mu}}{h_1} \right)^2 \frac{\Delta(n_F - n_C)_{\mu}}{f'_{\mu}(n_D - 1)_{\mu}} = 0 \quad (13)$$

由(12)式和(13)式可以得出光焦度小的透镜(弯月透镜、平板玻璃)的色散偏差，其中包括火石玻璃负透镜(光焦度一般小于冕牌玻璃正透镜1.5~2倍)，他们对于轴向色散的改变影响不是主要的，这对于位置靠近物平面或象平面的透镜(场镜，内调焦的测地仪器的调焦负透镜以及望远物镜的第二组件的透镜)也是正确的。

由公式中可以看出，为了补偿由于色散偏差造成的轴向色差改变，正负透镜应有单值的色散偏差，而且在数值上火石玻璃负透镜的色散偏差应大于邻近位置的冕牌玻璃正透镜的色散偏差1.5~2倍。这对于双透镜物镜以及望远物镜和照相物镜的双透镜组是很明显的。例如：对于双透镜物镜，配套规则的形式为

$$\left( -\frac{f'_2}{f'_1} = \frac{v_1}{v_2} \right),$$

$$\begin{aligned} \Delta(n_F - n_C)_2 &= \frac{(n_D - 1)_2}{(n_D - 1)_1} \times \frac{v_1}{v_2} \Delta(n_F - n_C)_1 \\ &\approx (1.5 \sim 2) \Delta(n_F - n_C)_1 \end{aligned} \quad (14)$$

可以把  $\frac{\Delta ds'_{\text{axn}}}{f'^2_{\text{axn}}}$  值放在(13)式的右边。

式中  $\Delta ds'_{\text{axn}}$ ——不恶化象质条件下所允许的轴向色差变化。

举例：M50型照相物镜按  $\Delta(n_F - n_C)$  的玻璃配套规则；

$$\frac{\Delta(n_F - n_C)_1}{27.9 \times 0.6130} - \frac{(0.77)^2 \Delta(n_F - n_C)_2}{17.5 \times 0.5749}$$

$$- \frac{(0.80)^2 \Delta(n_F - n_C)_3}{29.65 \times 0.5294} + \frac{(0.86)^2 \Delta(n_F - n_C)_4}{15.62 \times 0.6130} = 0$$

$$0.0585 \Delta(n_F - n_C)_1 - 0.0589 \Delta(n_F - n_C)_2$$

$$- 0.0408 \Delta(n_F - n_C)_3 + 0.0743 \Delta(n_F - n_C)_4 = 0$$

这个方程式与三角计算的结果正好一致。可把不等于零的数值放在右边，例如：

$$\frac{\Delta ds'_{\text{光轴}}}{f_{\text{物}}'^2} \approx \frac{1/5 \Delta x'_{\text{光轴}}}{f_{\text{物}}'^2}$$

式中  $\Delta x'_{\text{光轴}}$ ——景深。

对于 M50 型物镜：

$$\Delta x'_{\text{光轴}} = \frac{1}{R_{\phi, \text{кр}}} \left( \frac{f'_{\text{物}}}{D_{\text{эк.кр}}} \right) = 3.5/25 = 0.14$$

式中  $R_{\phi, \text{кр}}$ ——视场边缘处的分辨率。

那么，按  $\Delta(n_F - n_C)$  M50 型物镜玻璃配套条件表示如下：

$$0.0585 \Delta(n_F - n_C)_1 - 0.0589 \Delta(n_F - n_C)_2$$

$$- 0.0408 \Delta(n_F - n_C)_3 + 0.0743 \Delta(n_F - n_C)_4$$

$$= \pm 0.0000111$$

$$0.585 \Delta(n_F - n_C)_1 - 0.589 \Delta(n_F - n_C)_2$$

$$- 0.408 \Delta(n_F - n_C)_3 + 0.743 \Delta(n_F - n_C)_4$$

$$= \pm 0.00011$$

$$0.6 \Delta(n_F - n_C)_1 - 0.6 \Delta(n_F - n_C)_2 - 0.4 \Delta(n_F - n_C)_3$$

$$+ 0.75 \Delta(n_F - n_C)_4 = \pm 0.0001$$

## 第二章 对光学零件玻璃要求的 依据和公差计算

### 11. 折射率偏差的公差计算

现在我们还不能用确切的方法来表达系统各参数特别是玻璃折射率的变化与象差变化有关系的诸公式，因此也就没有迅速、简便地确定参数的方法，难于公差计算。但是对于许多光学系统有了参数变化对象差的影响表（简称影响表）以后，利用此表，可以确定光学系统结构元件的公差，考虑生产中出现的误差分布规律，以及给出在每种具体情况下最重要的象差变化允许值。

在多数情况下，按照焦距的变化值可以根据下式大致判断参数变化的允许值。

对于单薄透镜：

$$\varphi'_\mu = (n_\mu - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

由于折射率  $\Delta n$  的变化

$$\Delta \varphi'_\mu = \frac{\Delta n_\mu}{n_\mu - 1} \varphi'_\mu$$

因为复杂光学系统的光焦度可以通过薄透镜的光焦度以公式（4）表示，则对于薄透镜系统：

$$\Delta \varphi' = \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \left( \frac{h_\mu}{h_1} \right) \frac{\Delta n_\mu}{n_\mu - 1} \varphi'_\mu \quad (15)$$

已知  $\Delta f' = -f'^2 \cdot \Delta \varphi'$ ，必然

$$\Delta f' = -f'^2 \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \left( \frac{h_{\mu}}{h_1} \right) \frac{\Delta n_{\mu}}{n_{\mu}-1} \cdot \varphi'_{\mu} \quad (16)$$

很明显

$$\Delta n_{\mu} = \frac{\Delta f'_{\mu}}{m f'^2} \cdot \frac{h_1}{h_{\mu}} (n_{\mu}-1) f'_{\mu} \quad (17)$$

令  $\Delta f'_{\mu} = \Delta f'_1$ ，得出：

$$\Delta n_{\mu} = \frac{h_1}{h_{\mu}} \cdot \frac{(n_{\mu}-1)}{(n_1-1)} \cdot \frac{f'_{\mu}}{f'_1} \cdot \Delta n_1 \quad (18)$$

公式中的符号是光学中一般常用符号， $m$ ——透镜的数目。

对于双透镜物镜一般满足色差条件式：

$$\frac{\varphi'_1}{v_1} + \frac{\varphi'_2}{v_2} = 0$$

由此  $\varphi'_2 = -\frac{v_2}{v_1} \varphi'_1$ ，于是

$$\Delta f' = -f'^2 \varphi'_1 \left( \frac{\Delta n_1}{n_1-1} - \frac{\Delta n_2}{n_2-1} \times \frac{v_2}{v_1} \right) \quad (19)$$

由 (15) 式和 (19) 式可以得出，光焦度小的透镜（例如，长焦距的远焦弯月透镜或负透镜），以及位置接近物平面或象平面的  $h_{\mu}$  小的透镜（场镜、望远物镜第二组件的透镜）， $\Delta n$  对  $\Delta f'$  的影响非常弱， $\Delta n$  的公差比  $h_{\mu}$  和  $\varphi'_{\mu}$  大的透镜的  $\Delta n$  公差可以放宽一些。

**例1. M50型物镜** “英杜斯塔尔”型的四透镜物镜 ( $m=4$ )， $f'=52.4$  毫米，焦距公差  $\Delta f' = 1\% f' = 0.524$  毫米（物镜与测距器一起工作）。我们设由于玻璃折射率的变化所

引起的  $\Delta f' = 0.26$  毫米，因为对  $\Delta f'$  的影响还有玻璃样板的偏差，以及在很小程度上有透镜厚度和空气间隙的偏差。

使用 (17) 式时，我们把  $\Delta n$  的极限偏差代数相加，若 H50 型物镜共采用三种牌号的玻璃（第 1 和第 4 零件采用 TK14 玻璃， $n_D = 1.6130$ ；第 2 零件采用 ПФ5 玻璃， $n_D = 1.5749$  和第 3 零件采用 ОФ1 玻璃， $n_D = 1.5294$ ）。

第 1 零件：

$$\Delta n_u = \frac{0.26}{4 \times 52.4^2 \times 1} \times 0.6130 \times 29.7 = 0.00043$$

(比 1 类严格)；

第 2 零件：

$$\begin{aligned} \frac{h_2}{h_1} = 0.85; \quad \Delta n_u &= \frac{0.26}{4 \times 52.4^2} \times 1.15 \times 0.5749 \times 18.6 \\ &= 0.000292 \end{aligned}$$

(比 1 类严格)；

第 3 零件：

$$\frac{h_1}{h_3} = 1.1; \quad \Delta n_u = \frac{0.26}{4 \times 52.4^2} \times 1.1 \times 0.5294 \times 33 = 0.00049$$

(1 类)；

第 4 零件：

$$\begin{aligned} \frac{h_1}{h_3} = 1.1; \quad \Delta n_u &= \frac{0.26}{4 \times 52.4^2} \times 1.1 \times 0.6130 \times 16.7 \\ &= 0.000245 \end{aligned}$$

(比 1 类严格)。

按照影响表 (表 2) 所得的  $\Delta \sigma$  完全符合在入瞳边缘 (剩余象差相应为 0.23 和 0.10 毫米情况) 处，小于 0.005 毫米和 0.012 毫米的允许球差变化值。如果按照  $\Delta n_D$  进行配套，仍

可以采用  $\Delta n_D$  为 1~2 类的玻璃，虽然所得的数值是单个正负透镜的  $\Delta n_D$  值。

**例2. E6型物镜** 双透镜胶合的透镜， $f' = 122.85$  毫米。焦距公差为  $\pm 1\% f'$ （放大率差为 2%）。设由于透镜  $n$  的偏差产生的焦距公差为  $0.7\% f'$ ；我们采取极限偏差代数相加，即单透镜的  $\Delta n$  变化是  $0.35\% f' = 0.4$  毫米； $f'_1 = 56.48$  毫米，BK4,  $n_1 = 1.5302$ ； $f'_2 = -102.05$  毫米， $\Phi 2$ ,  $n_2 = 1.6164$ ；

$$\Delta n_{1\text{光}} = \pm \frac{0.4 \times 1}{122.85^2} \times 0.5302 \times 56.48 = \pm 0.0008$$

（按  $\Delta n_D$  的 2~3 类）

$$\Delta n_{2\text{光}} = \pm \frac{0.4 \times 1 \times 0.616}{122.85^2} \times 102.05 = \pm 0.0017$$

（比 3 类宽一些）

所得到的  $\Delta n_1$  和  $\Delta n_2$  完全符合在剩余象差为 0.23 毫米（计算出的）时入瞳边缘处的允许球差变化值  $\delta s'_k = 0.03$  毫米。

采用测距仪工作的照相物镜、望远镜和准直镜的长焦距物镜（其焦距的偏差不得大于装配条件式或放大率公差），其折射率变化公差可以根据光学系统的允许焦距变化确定，同时  $\Delta n$  的公差要严一些，使得由于  $n$  的允许偏差而造成的象差变化不超过允许值。在任何情况下应该使用影响表确定  $\Delta n$  的公差，像仔细研究过的光学系统那样填写影响表，或者根据三级象差理论，运用近似公式计算，这从研究所设计的光学系统的主要特性和光学系统各个参数（特别是玻璃的牌号）的观点来看是很重要的。

在非广角光学系统（望远镜物镜和照相物镜）中折射率



的变化，除了焦距和顶焦距之外，最明显的是改变球差，从而降低象质。在三级象差范围内，当物位于无限远时，处在空气中的光学系统的球差用下式表示：

$$\delta s'_k = -\frac{1}{2} h_1^2 f'^2 \sum_{v=1}^{v=k} \left( \frac{h_v}{h_1} \right)^4 Q_{2v}^2 \Delta \left( -\frac{1}{ns} \right)_v = -\frac{1}{2} h_1^2 f'^2 S_1$$

式中

$$S_1 = \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \left( \frac{h_\mu}{h_1} \right)^4 \cdot A_\mu$$

$$A_\mu = \left\{ \left( -\frac{n}{n-1} \right)^2 \varphi'^3 + \frac{3n+1}{n-1} \varphi'^2 \sigma + \frac{3n+2}{n} \varphi' \sigma^2 - \left[ \frac{2n+1}{n-1} \varphi'^2 + \frac{4(n+1)}{n} \varphi' \sigma \right] \rho + \frac{n+2}{n} \varphi' \rho^2 \right\}_\mu$$

如果把  $\varphi'_\mu = (n_\mu - 1) \times (\rho_1 - \rho_2)$  和  $\rho = \rho_1$  代入上式以取代  $\varphi'$ ，则得：

$$\begin{aligned} A_\mu = & \left\{ (n^3 - n^2) \cdot (\rho_1 - \rho_2)^3 + (3n^2 - 2n - 1) \cdot (\rho_1 - \rho_2)^2 \sigma \right. \\ & + \left( 3n - \frac{2}{n} - 1 \right) \cdot (\rho_1 - \rho_2) \sigma^2 - \left[ (2n^2 - n - 1) \right. \\ & \cdot (\rho_1 - \rho_2)^2 + \left( 4n - \frac{4}{n} \right) \cdot (\rho_1 - \rho_2) \sigma \left. \right] \rho_1 \\ & \left. - \left( n - \frac{2}{n} + 1 \right) \cdot (\rho_1 - \rho_2) \cdot \rho_1^2 \right\}_\mu \quad (20) \end{aligned}$$

(20) 式对透镜的  $n$  微分，则得

$$\begin{aligned} dA_\mu = & \left\{ (3n^2 - 2n) \cdot (\rho_1 - \rho_2)^3 + (6n - 2) \cdot (\rho_1 - \rho_2)^2 \sigma \right. \\ & \left. + \left( 3 + \frac{2}{n^2} \right) \cdot (\rho_1 - \rho_2) \sigma^2 - \left[ (4n - 1) \cdot (\rho_1 - \rho_2)^2 \right. \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left( 4 + \frac{4}{n^2} \right) \sigma \cdot (\rho_1 - \rho_2) \Big] \rho_1 \\
& + \left( 1 - \frac{2}{n^2} \right) \cdot (\rho_1 - \rho_2) \rho_1^2 \Big\} dn_u \\
= & \left\{ (3n^2 - 2n) \cdot (\rho_1 - \rho_2)^3 + [(6n - 2) \sigma \right. \\
& - (4n - 1) \rho_1] (\rho_1 - \rho_2)^2 + \left[ \left( 1 + \frac{2}{n^2} \right) \rho_1^2 \right. \\
& \left. \left. + \left( 3 + \frac{2}{n^2} \right) \sigma^2 - \left( 4 + \frac{4}{n^2} \right) \sigma \rho_1 \right] \cdot (\rho_1 - \rho_2) \right\} dn_u
\end{aligned} \tag{21}$$

把  $(\rho_1 - \rho_2)_u = \frac{\varphi'_u}{(n_u - 1)}$  的值代入(21)式, 取代  $(\rho_1 - \rho_2)_u$ , 则得:

$$\begin{aligned}
dA_u = & \left\{ \frac{3n^2 - 2n}{(n - 1)^3} \varphi'^3 + [(6n - 2) \sigma - (4n - 1) \rho_1] \right. \\
& \times \frac{\varphi'^2}{(n - 1)^2} + \left[ \left( 1 + \frac{2}{n^2} \right) \rho_1^2 + \left( 4 + \frac{4}{n^2} \right) \sigma \rho_1 \right. \\
& \left. \left. + \left( 3 + \frac{2}{n^2} \right) \sigma^2 \right] \frac{\varphi'}{n - 1} \right\} dn_u
\end{aligned} \tag{22}$$

按照(21)式或(17)式可以算出复杂系统每个光学零件的透镜系数  $dA_u$  的变化, 并且按照已知的透镜折射率偏差可以得知球差的变化:

$$\Delta \delta s'_k = -\frac{1}{2} h_1^2 f'^2 \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \left( \frac{h_\mu}{h_1} \right)^4 dA_\mu \tag{23}$$

给出允许的球差变化值 (例如在入瞳区不大于景深的  $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{5}$ ) 之后, 按照复合光学系统每一零件的已知透

镜系数的变化，由（18）式可以求得该零件的允许折射率变化：

$$\Delta n_{k,m} \leq \frac{\Delta \delta s'_{k,m} \left( \frac{h_1}{h_u} \right)^4}{0.5 \sqrt{m} h_1^2 f'^2 \frac{dA_p}{dn_u}} \quad (24)$$

式中  $m$ ——复杂系统的透镜数；透镜数较少（2~3）时，分母中不用  $\sqrt{m}$ ，而直接用  $m$ 。

由（24）式可以看出，光学系统透镜的折射率公差与  $\left( \frac{h_1}{h_u} \right)^4$  成正比，与光线射到系统入瞳的高度的平方、系统焦距的平方以及透镜系数的变化成反比。强光力长焦距系统的折射率公差较非强光力短焦距系统（例如目镜）的折射率公差严格得多。 $\frac{h_1}{h_u}$  大的（内调焦物镜的调焦透镜、望远物镜的第二组分、聚光镜）位置靠近象平面的光学零件不要求窄的折射率公差。

如果按照（24）式得出的折射率公差较 ГОСТ 3514-67 “无色光学玻璃”（1类， $\Delta n_D = \pm 0.0005$  毫米）保证的  $\Delta n_D$  值严格，那么在每次收到一批玻璃毛坯之后，要进行光学系统的补充复算，以算出该批玻璃的折射率与系统的原始计算值的偏差。在这种情况下，在光学零件图纸中应该还规定按照  $\Delta n_D$  该批毛坯一致性的相应级别（A 或 B）。如果此公差较宽，则在图纸中应指明该批玻璃一致性 B 级和  $\Delta n_D$  的相应类别（允许折射率偏差），对每批玻璃的  $\Delta n_D$  不进行光学系统的补充复算。

位于会聚光路中的平板玻璃和棱镜所产生的球差，在三级象差范围按下式计算：

$$\delta s'_k = \frac{1}{2} u_1^2 \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \frac{d_\mu (n_\mu^2 - 1)}{n_\mu^3}$$

由于折射率变化而引起的球差变化按下式计算:

$$\Delta \delta s'_k = \frac{1}{2} u_1^2 \sum_{\mu=1}^{\mu=m} d_\mu \frac{3 - u_\mu^2}{n_\mu^3} \cdot \Delta n_\mu \quad (25)$$

式中  $u_1$ ——孔径角; 在非强光力系统中  $u_1$  角不大的情况下和平板玻璃不太厚以及棱镜中光程不太长的情况下, 折射率偏差甚至于取在最宽的范围——4类 ( $\Delta n_D = \pm 0.002$ ) 内, 球差的变化也是很小的。

#### 例 非胶合的双透镜物镜

$$f' = 100 \text{ 毫米}; 1:4, 2w = 8^\circ$$

$$r_1 = 64.425$$

$$d_1 = 6.0 \quad \text{TK14}$$

$$r_2 = -39.75$$

$$d_2 = 0.1$$

$$r_3 = -38.84$$

$$d_3 = 2.0 \quad \Phi 1$$

$$r_4 = -737.87$$

当  $f' = 1$  时, 按 (22) 式计算得出  $dA_1 = 144.05dn_1$ ,  $dA_2 = -66.2dn_2$ , 当  $f' = 100$  时,  $dA_1 = 0.000144dn_1$  和  $dA_2 = -0.000066dn_2$ 。如果取  $\Delta n_1 = +0.001$  (3类), 对于  $h_1 = 0.7$   $\frac{D_f}{2} = 0.7 \times \frac{25}{2} = 8.75$ ,  $\frac{h_1}{h_2} \approx \frac{h_1}{h_2} \approx 1.0$ , 把必要的值代入 (23) 式, 则得出:

$$\begin{aligned}\Delta\delta s'_1 &= \left(-\frac{1}{2}\right) \times 8.75^2 \times 100^2 \times 0.000144 \times 0.001 \\ &= -0.055\end{aligned}$$

当  $\Delta n_2 = +0.001$  时，对于第二透镜：

$$\begin{aligned}\Delta\delta s'_2 &= -0.5 \times 8.75^2 \times 100^2 \times (-0.000066) \times 0.001 \\ &= +0.021\end{aligned}$$

显然，当  $\Delta n_2 = \frac{dA_1}{dA_2} \cdot \Delta n_1 = \frac{144}{66} \cdot \Delta n_1 = 2.2\Delta n_1$  时，球差变化得到补偿；在制造毛坯时，保证  $\Delta n_2 = 2.2\Delta n_1$  的条件，在此物镜中就可以消除由于玻璃熔炼和退火时透镜玻璃折射率偏差所引起的球差变化。

如果物镜与  $f' = 15 \sim 17$  毫米的目镜一起在高度为  $h = 0.7 \frac{D_p}{2}$  处工作（镜筒放大率  $\Gamma = 6$ ），则由于物镜透镜折射率的偏差引起最佳装定平面位移所产生的会聚度，允许变化 0.1 屈光度，大约大于光线球差变化的 2 倍：

$$\begin{aligned}\Delta\delta s'_{\text{光轴}} &= 2 \frac{f'^2 \Delta\sigma_{\text{光轴最大度}}}{1000} = 2 \times \frac{17^2 \times 0.1}{1000} \\ &= \pm 0.058 \approx 0.06\end{aligned}$$

或波象差：

$$l_n = \frac{15\delta s'_2}{n_n} = \frac{15 \times 0.06}{4^2} \approx 0.05 \lambda$$

于是按 (24) 式求得：

$$\Delta n_{1\text{光轴}} \approx \frac{0.06}{0.5 \times 2 \times 8.75^2 \times 100^2 \times 0.000144} = +0.0005 \quad (1 \text{类})$$

$$\Delta n_{2\text{光轴}} \approx \pm 0.0012 \quad (3 \text{类})$$

在图纸上我们规定该批毛坯的一致性为 B 级，不按常规

对该批毛坯进行换算。上述公式和非强光力光学系统透镜折射率公差的计算法（只是近轴光线计算的结果）能够在不同阶段（计算、出图、玻璃定货、制造）规定出透镜玻璃  $\Delta n_D$  的合理公差。

## 12. 关于玻璃色散公差的计算

在光学系统中，特别是在望远系统中，厚度和空气间隙的偏差在通常的制造范围内，实际上不会引起轴向色差的明显变化，色差的变化主要与色散（ $n_F - n_C$ ）的变化有关，它能导致产生不允许的象着色，降低光学系统的分辨率。

轴向色差的变化随着大致同样的色球差偏差，在个别情况下色球差的偏差主要影响象质。只有在长焦距和广角系统中才能明显地看出放大率色差的变化，但是轴向色差的变化往往能够判定色散（ $n_F - n_C$ ）偏差的许可值，如下所述可以简单地算出色差的变化。

已知物在无限远处，在空气中的薄透镜系统的轴向色差为：

$$ds'_{k\epsilon} = -f'^2 \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \left( \frac{h_{\mu}}{h_1} \right)^2 \cdot \frac{\varphi'_{\mu}}{v_{\mu}}$$

因为  $v = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$ ，则

$$ds'_{k\epsilon} = -f'^2 \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \left( \frac{h_{\mu}}{h_1} \right)^2 \frac{(n_F - n_C)}{(n_D - 1)_{\mu}} \varphi'_{\mu} \quad (26)$$

对上式中（ $n_F - n_C$ ）微分，则得：

$$\Delta ds'_{\text{轴}} = -f'^2 \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \left( \frac{h_{\mu}}{h_1} \right)^2 \frac{\Delta(n_F - n_C)_\mu \varphi'_\mu}{(n_D - 1)_\mu} \quad (27)$$

由上式得出，轴向色差变化与系统的焦距平方、 $\frac{h_{\mu}}{h_1}$ 的平方和色散偏差成正比，与透镜的焦距和该透镜玻璃的 $(n_D - 1)$ 成反比。望远物镜第二组分和内调焦望远物镜的透镜、目镜的透镜、平板玻璃、分划镜、棱镜等，因为这些光学件的 $\frac{h_{\mu}}{h_1}$ 之比或光焦度较小（焦距大），故对色散变化都是不敏感的。

在双透镜物镜中，火石玻璃负透镜的焦距比冕玻璃正透镜的焦距一般大1.5~2倍，这与轴向色差的修正有关，当满足条件式

$$\frac{\varphi'_{\text{冕}}}{v_{\text{冕}}} + \frac{\varphi'_{\text{火石}}}{v_{\text{火石}}} \approx 0 \text{ 时}$$

可以得出：

$$\varphi'_{\text{火石}} = -\frac{v_{\text{火石}}}{v_{\text{冕}}} \varphi'_{\text{冕}}$$

因为 $v_{\text{冕}} \approx (1.5 \sim 2) v_{\text{火石}}$ ，则 $\varphi'_{\text{冕}} \approx -(1.5 \sim 2) \varphi'_{\text{火石}}$ 和 $f'_{\text{火石}} \approx -(1.5 \sim 2) f'_{\text{冕}}$ 。所以火石负透镜色散变化对轴向色差的影响比正透镜色散偏差对轴向色差的影响小 $\frac{1}{2}$ 。因此，在双透镜物镜和复杂物镜的双透镜组分中，可以允许火石玻璃透镜的色散偏差比冕牌玻璃透镜的色散偏差大1.5~2倍。

也可以从反面来解答，根据已知的轴向色差偏差求透镜的色散变化：

$$\Delta(n_F - n_C)_\mu = -\frac{\Delta ds'_{\text{轴}}}{f'^2} \left( \frac{h_1}{h_{\mu}} \right)^2 (n_D - 1)_\mu f'_\mu \quad (28)$$

取影响  $m$  个透镜的色散极限偏差平方相加, 按下式可以求出单个透镜的允许色散偏差

$$\Delta(n_F - n_C)_{\text{允许}} \leq -\frac{\Delta ds'_{k_{\text{光谱色}}}}{\sqrt{m} f'^2} \left(\frac{h_1}{h_u}\right)^2 (n_D - 1)_v f'_u \quad (29)$$

在由两组透镜组成的系统中, 例如由空气间隙为有限距离的两组分组成的望远物镜, 求出第一组分透镜的  $\Delta ds'_{k_{\text{光谱色}}}$  后, 应换算成它在象方的贡献值, 即在 (27) 式中以  $f'_1$  取代  $f'$ , 并给此值乘以第二组分的轴向放大率  $\alpha = \beta^2$  (对于在空气中的系统)。计算第二组分透镜的  $\Delta ds'_{k_{\text{光谱色}}}$  值时, 在 (27) 式中, 应该以  $s'^2_{p_2}$  取代  $f'^2$ 。在这种情况下,

对于第一组分透镜:

$$\Delta(n_F - n_C)_{\text{允许}} \leq \frac{\Delta ds'_{k_{\text{光谱色}}}}{\sqrt{m} f'^2_1 \beta^2_1} \left(\frac{h_1}{h_u}\right)^2 (n_D - 1)_v f'_u \quad (29a)$$

对于第二组分透镜:

$$\Delta(n_F - n_C)_{\text{允许}} \leq \frac{\Delta ds'_{k_{\text{光谱色}}}}{\sqrt{m} s'^2_{p_2}} \left(\frac{h_1}{h_u}\right)^2 (n_D - 1)_v f'_u \quad (29b)$$

在薄透镜系统中, 把透镜分为若干组, 同一组内各透镜的  $h_1/h_u$  值取同样的大小, 例如, 四透镜的 M50 型物镜  $f' = 52.4$  毫米, 相对孔径 1:3.5,  $2\omega = 45^\circ$ ,  $ds'_{k_{\text{光谱色}}} = -0.19$ ,  $\Delta ds'_{k_{\text{光谱色}}} = \pm 0.03$  (大约是景深的  $\frac{1}{5}$ ), 于是, 对

第 1 透镜:  $\frac{h_u}{h_1} = 1$ ;  $f'_1 = 27.94$  毫米;  $(n_D - 1) = 0.6130$ , 玻璃牌号 TK14;

$$\Delta(n_F - n_C)_{\text{允许}} \leq \frac{0.03}{\sqrt{4}} \times \frac{0.6130}{(52.4)^2} \times 27.91 = 0.000095;$$

$\Delta(n_F - n_C)_{\text{允许}}$  按 3 类 ( $\pm 0.0001$ ) 给定;



第 2 透镜:  $\frac{h_2}{h_1} = 0.9$ ;  $(n_D - 1) = 0.5749$ ; 玻璃牌号 ПФ5;

$$f'_2 = -19.0 \text{ 毫米}; \Delta(n_F - n_C)_{\text{允}} \leq \frac{0.030 \times 0.5749 \times 19}{(52.4)^2 \times 2 \times (0.9)^2} \\ = 0.00008; \Delta(n_F - n_C)_{\text{允}} \text{ 按 2 类 } (\pm 0.00007) \text{ 给定};$$

第 3 透镜:  $\frac{h_3}{h_1} = 0.9$ ;  $(n_D - 1) = 0.5294$ ; 玻璃牌号 ОФ1;

$$f'_3 = -33.0 \text{ 毫米}; \Delta(n_F - n_C)_{\text{允}} \leq \frac{0.030 \times (0.5294) \times 33}{(52.4)^2 \times 2 \times (0.9)^2} \\ = 0.00012; \Delta(n_F - n_C)_{\text{允}} \text{ 按 3 类 } (\pm 0.0001) \text{ 给定};$$

第 4 透镜:  $\frac{h_4}{h_1} = 0.9$ ;  $(n_D - 1) = 0.6130$ ; 玻璃牌号 ТК14;

$$f'_4 = 15.5 \text{ 毫米}; \Delta(n_F - n_C)_{\text{允}} \leq \frac{0.030 \times 0.6130 \times 15.5}{(52.4)^2 \times 2 \times (0.9)^2} \\ = 0.000069; \Delta(n_F - n_C)_{\text{允}} \text{ 按 2 类 } (\pm 0.00007) \text{ 给定}.$$

这样一来, 在零件图纸上对于第 2 和第 4 透镜,  $\Delta(n_F - n_C)$  可以按 2 类 B 级规定, 对于第 1 和第 3 透镜可以按 3 类 B 级规定——不要求把物镜换算成该批玻璃的  $\Delta(n_F - n_C)$ 。

**56 双筒望远镜的物镜** 它由两片透镜组成, 第 1 透镜的  $f'_1 = 56.48$  毫米, 玻璃牌号 БК4 ( $n_D = 1.5302$ ); 第 2 透镜的  $f'_2 = -102.05$  毫米, 玻璃牌号 Ф2 ( $n_D = 1.6164$ );  $ds'_{\text{允}} = -0.48$ 。

在影响表中没有计算色散变化时的轴向色差的变化, 我们现在按 (27) 式算出此色差变化:

第 1 透镜, 当  $\Delta(n_F - n_C) = 0.0001$  时,

$$\Delta ds'_{\text{允}} = -(122.85)^2 \times \left(\frac{1}{1}\right)^2 \times \frac{0.0001}{0.5302} \times \frac{1}{56.48} \\ = -0.0505$$

第 2 透镜, 当  $\Delta(n_F - n_C) = 0.0001$  时,

$$\begin{aligned}\Delta ds'_{\lambda e} &= -(122.85)^2 \times \left(\frac{1}{1}\right)^2 \times \frac{0.0001}{0.6164} \times \frac{1}{(-102.05)} \\ &= 0.0245\end{aligned}$$

当允许  $\Delta ds'_{\lambda e}$  的变化等于  $\pm 0.1$ ，并且把极限偏差代数相加时，对于第 1 透镜应该规定  $\Delta(n_F - n_C)$  为 3 类 B 级，第 2 透镜为 4 类 B 级。

**B6 双筒望远镜的目镜** 此目镜为凯尔纳型目镜——由三片透镜组成， $f' = 20.6$  毫米，按光线行进方向，第 1 透镜——场镜， $f'_1 = 34.8$  毫米，玻璃牌号 K8， $n_D = 1.5163$ ， $h_v/h_1 = 0.6$ ；第 2 透镜——接目镜， $f'_2 = 12.69$  毫米，玻璃牌号 BK6， $n_D = 1.5399$ ， $h_v/h_1 = 1.1$ ；第 3 透镜——接目镜， $f'_3 = -21.36$  毫米，玻璃牌号  $\Phi 3$ ， $n_D = 1.6199$ ， $h_v/h_1 = 1.0$ 。透镜玻璃的色散改变 0.0001 (3 类) 时，轴向色差以下述方式变化 (与光线行进方向相反)：

第 3 透镜

$$\begin{aligned}\Delta ds'_{\lambda e} &= -(20.6)^2 \times \left(\frac{1}{1}\right)^2 \times \frac{0.0001 \times 1}{0.6199 \times (-21.36)} \\ &= 0.00322\end{aligned}$$

第 2 透镜

$$\Delta ds'_{\lambda e} = -(20.6)^2 \times \frac{(1.1)^2 \times 0.0001}{0.5399 \times 12.69} = -0.00750$$

第 1 透镜

$$\Delta ds'_{\lambda e} = -(20.6)^2 \times \frac{0.6^2 \times 0.0001}{0.5163 \times 34.84} = -0.00085$$

由上述数值可以得出，对 B6 目镜透镜来说， $\Delta(n_F - n_C)$  可以不作规定。

棱镜和平板玻璃所产生的轴向色差按下式计算：

$$ds'_k = \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \frac{d_{\mu}(n_F - n_C)_{\mu}}{n_{D_{\mu}}^2}$$

如果棱镜和平板玻璃（零件）恰好位于会聚光路内，则上述公式具有重要意义。由于零件玻璃色散的变化引起轴向色差的变化  $\Delta ds'_k$  按下式求得：

$$\Delta ds'_k = \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \frac{d_{\mu} \Delta(n_F - n_C)_{\mu}}{n_{D_{\mu}}^2} \quad (30)$$

轴向色差的变化与平板玻璃的厚度或棱镜内光程的长度、色散的变化成正比，与零件玻璃的折射率的平方成反比，与零件在光学系统中的位置无关。如果长光程零件的玻璃色散改变，则轴向色差的变化就很显著，例如， $\Delta(n_F - n_C) = \pm 0.0002$ （为4类）的K8玻璃的棱镜（光路长  $d = 50$  毫米）的色散变化，引起的轴向色差变化就不太显著，其值为：

$$\Delta ds'_k = 50 \times \frac{0.0002}{1.6163^2} = 0.004 \text{ 毫米}$$

如果按（29）式或（30）式求得允许色散变化小于ГОСТ3514-67中所保证的类别（ $\pm 0.00003 \sim 0.00005$ ；0~1类），则在图纸上对光学零件应该规定该批毛坯中  $\Delta(n_F - n_C)$  一致性为A级或B级和（1~4）类中的一个类，并且为了消除该批毛坯中不允许的色散偏差的影响，必须补充换算光学系统。在例（M50型物镜、双筒望远镜的物镜和目镜）中不要求换算，在图纸上只要规定该批毛坯的必要色散类别和B级一致性，也就是说，该批的任一毛坯在规定的类别范围内产生允许的色散偏差，不需进行系统的补充换算（不换算

成该批毛坯玻璃的具体色散偏差)。

(27) 式提供了由于玻璃熔炼厂在玻璃熔炼和退火生产的色散变化或按色散配套时, 为了消除由于毛坯色散变化而产生不允许的轴向色差变化所应该满足的条件, 当 (27) 式的总和等于零时, 就满足了此条件。

按照薄透镜系统的修正公式, 并对  $\Delta(n_F - n_C)$  微分, 可以近似地算出由于透镜色散变化所引起的放大率色差的变化为:

$$dL'_{k\Delta} = -l'_k \frac{x'_k s'_k}{x'_k - s'_k} \cdot \frac{h_\mu}{h_1} \cdot \frac{y_\mu}{y_1} \cdot \frac{\Delta(n_F - n_C)_\mu}{f'_\mu(n_D - 1)_\mu} \quad (31)$$

此公式也可用于由有限厚度的透镜组成的系统 (例如, 照相物镜), 得到满意的计算结果时, 应把  $l'_k$ 、 $x'_k$ 、 $s'_k$   $\left(\frac{h_\mu}{h_1} \approx \frac{y_\mu}{y_1} \approx 1\right)$  值乘上其后所有透镜的垂轴放大率, 以换算成在象方的贡献值。求  $l'_k$ 、 $x'_k$  时, 必须计算通过系统入射光瞳中心的第二辅助光线;  $s'_k$  值和轴向放大率可以从零光线计算中得到。但是, 如果已知每个透镜的主点和焦距, 经每个透镜后的光瞳  $x'_k$  的位置, 也可以按高斯或牛顿公式来求。对组分透镜厚度较其焦距小的望远物镜, 可采用这种简化计算方法, 结果与用光线计算法求得的  $dL'_{k\Delta}$  值完全相同。在这种情况下, 第 1 组分透镜:

$$dL'_{k\Delta} = -f'_1 \operatorname{tg} w \frac{x'_1 s'_1}{x'_1 - s'_1} \beta_1 \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \frac{\Delta(n_F - n_C)_\mu}{(n_D - 1)_\mu f'_\mu} \quad (32)$$

第 2 组分透镜:

$$dL'_{k\Delta} = -l'_k \frac{x'_k s'_k}{x'_k - s'_k} \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \frac{\Delta(n_F - n_C)_\mu}{(n_D - 1)_\mu f'_\mu} \quad (33)$$

计算结果表明，如果根据轴向色差的允许变化求色散的允许偏差，则此偏差值也同时满足使放大率色差的变化在允许范围之内。这一结论对于视场为  $40^\circ \sim 50^\circ$  以下的各种系统都是适用的，例如，“捷列马尔”型物镜， $f' = 1000$  毫米，相对孔径 1:7， $2\omega = 24^\circ$ ，透镜的  $\Delta(n_F - n_C) = 0.00005$  时，第 1、2、3、4 透镜的轴向色差变化分别为 0.013、0.007、0.007 和 0.004 毫米。在“尤皮捷尔”型照相物镜中单个透镜的  $\Delta(n_F - n_C) = 0.0001$  时，轴向色差变化为 0.01 到 0.02，而放大率色差变化为  $\sim 0.001$  毫米，也就是说， $\Delta(n_F - n_C)_{\text{允}}$ ——完全允许 3 类 B 级。

### 13. 关于光学均匀性

玻璃毛坯（直径不大于 150 毫米）的光学均匀性，见 ГОСТ3514-67 说明。其分辨角  $\varphi$  与理论分辨角  $\varphi_0$  之比等于  $120''/D$ ， $D$  为直径或毛坯的最小边长（以毫米计）。产生玻璃光学非均匀性的原因是在熔炼过程中混合玻璃成分时，特别是合成玻璃的化学成分中的个别组分或是挥发，或是溶解不好，玻璃粘度增大（TK、TФ、БФ 等玻璃），造成均匀性不好。光学非均匀性也与熔炼后或退火过程中玻璃的冷却条件有关；毛坯的各个部分不同时冷却（或加热），这样很难得到均匀的玻璃。

在多数情况下，均匀性的类别可以正确地以单值规定，例如，显微镜、平行光管、天文、干涉和光谱仪器中的物镜，要求理想的象点，必须使用均匀性为 1 类的玻璃。这点对于位于上述物镜位置附近的滤光镜、保护玻璃和棱镜也是适用的，其截面大致与系统的入瞳或与物镜的有效孔径相

等，也应当使用 1 类的玻璃。对于双筒型的普通望远镜、方向盘、炮队镜、瞄准镜的物镜可以采用 3~4 类玻璃，也就允许分辨本领比理想光学系统的降低 10~20% 或更多些，这不会影响仪器的使用质量，因为上述系统的放大率小于有效放大率  $\left( \Gamma_{*n} = \frac{60''}{120} D_p = 0.5 D_p \right)$ ，因而物镜的理论（理想）分辨本领比只用眼睛观察要高 1.5~2 倍或更高些。因此，完全允许此系数减少 10~30%。同时亦考虑到此类物镜的象差很小，实际上不会降低分辨本领。对此类仪器取放大率小于有效放大率，主要是为了得到等于或大于眼睛光瞳的出瞳，使通过该仪器观察有限尺寸（不是点）的物体时，特别是在照度不足的情况下，不致降低主观亮度。

在制造高级复制物镜时，应使用均匀性为 2~3 类玻璃，这种玻璃得到的象是在细颗粒的照相材料上，分辨率与所给定的相对孔径处理想物镜分辨率（超 800 线对/毫米）相接近。

照相物镜和航空照相物镜，由于照相物镜本身象差较大（特别是在视场边缘区）和照相材料分辨率低，所以物镜分辨率低。随着相对孔径增大、目视（接近理想的）分辨率增大  $\left( R_{*n} \approx R_{*n} = 1470 \frac{D_p}{f'_*} \right)$ ，照相分辨率大致不变（在视场中心可达到 50 线对/毫米，在边缘区为 15~25 线对/毫米），普通照相材料的分辨率为 70~80 线对/毫米。这样看来，强光照相物镜可以采用光学均匀性较低的 4~5 类玻璃（分辨率较理想系统的降低 30~50%）。普通的非强光力的照相物镜所用玻璃均匀性的类别一般应该是 3~4 类  $(\varphi'' = 1.1\varphi''_0 \sim 1.3\varphi''_0)$ 。同时应注意到，照相材料的分辨率可能在最近的将来有所提高（研制新的照相材料），而光学玻璃厂不需经过

很多困难就能达到小型透镜所要求的3~4类均匀性。所有上述情况，对于其他光学零件——棱镜、保护玻璃、滤光镜、分划板、目镜、望远物镜的第二组分，当它们的截面等于轴向光束宽度时，也是适用的。因此对于分划板、压平玻璃、位置靠近象平面的棱镜和透镜、直径显著超过轴向光束宽度的广角照相物镜（“奥里昂”型、“鲁萨尔”型）的透镜、望远物镜第二组分的透镜以及直径显著大于眼瞳直径的目镜（普通望远镜、步枪和机枪等用的瞄准镜），其玻璃均匀性的要求可以大大降低。对于此类零件，均匀性的类别不应严于4~5类。

采用上述观点，对于各种零件和各种光学系统，选定玻璃的光学均匀性类别可以无须过宽的偏差，这种选定类别也被大量生产经验所证明。

#### 14. 关于玻璃的双折射

当玻璃热加工时——冷却、加压、调质和退火过程中，产生内应力，在继续加工时，由于这种内应力可能发生使先前已加工的表面变形崩落，甚至当内应力过大时（较5类大，光程差每一厘米超过50微米）出现炸裂。当玻璃过厚时，双折射（由于应力关系）就可能具有与波长或瑞利极限（ $\lambda/4$ ）相等的值，从而降低了象质。从这种观点出发选定玻璃双折射的类别；如果光学系统中零件薄，玻璃中光程的总长不长，比如小于100毫米，则薄的、光圈要求不高的零件（分划板、保护玻璃、滤光镜、目镜透镜、聚光镜）可以采用双折射为4~5类的玻璃，以便消除加工时出现的崩落和炸裂现象；较厚的、光圈要求较高的零件（棱镜、物镜、

透镜)应采用3~4类的玻璃(光程差每一厘米不超过10~20微米);如零件光圈要求高而又厚(天文干涉仪、偏振镜、平行光管等仪器的物镜、棱镜和保护玻璃),则按光程差选定玻璃双折射的类别,在玻璃内的光路长度上(以厘米计)光程差不应超过所允许的波象差的局部偏离值(对于高级天文以及类似的系统为 $\frac{\lambda}{4} = 135$ 微米,对于照相物镜和普通望远镜为 $(0.5 \sim 1) \lambda = 270 \sim 550$ 微米)。用于上述零件的双折射玻璃不应低于2~3类,但是在上述仪器中,对于薄零件可以使用3~4类,甚至双折射为5类的玻璃。大概只有干涉仪和偏振仪的零件应该采用1类玻璃。另一方面,如果毛坯内应力在3类范围内(大型航空照相物镜的透镜和反射镜),表面光圈形状亦完好不变。

### 15. 关于玻璃的光吸收

与折射面光线的反射和反射面及部分反射面的金属层的吸收一样,玻璃的光吸收是光学系统的效率和透过系数低的一个主要原因。因此,在较薄的光学零件占多数的复杂系统中(照相物镜、普通望远镜等),造成降低透过系数 $\tau$ 的最大因素是折射面的光反射,而在玻璃中光程长的系统中则是玻璃的光吸收。 $\tau$ 低的仪器,则效率低(降低仪器的使用性能),此外,反射、折射和部分反射的表面(不参与成象)所产生的大量杂散光,在象平面内产生光亮的背影,因而降低了对比度——难于辨别目标,使分辨率下降。

光学系统的透射系数 $\tau$ 按下式计算:

$$\tau = (1 - r_1)(1 - r_2) \cdots (1 - r_n) p_1^{1/2} p_2^{1/2} \cdots p_k^{1/2} R_1 R_2 \cdots R_k \quad (34)$$



式中  $r_1, r_2, \dots, r_k$ ——系统折射表面的反射系数；

$p_1, p_2, \dots, p_k$ ——厚度为 1 厘米时，零件玻璃的透过系数； $p = 1 - \alpha$ ；

$\alpha$ ——玻璃的光吸收；

$l_1, l_2, \dots, l_k$ ——零件厚度（玻璃内的光程长度），用厘米度量；

$R_1, R_2, \dots, R_k$ ——反射面的反射系数，或部分反射膜层的透射系数。

上述各个系数应该根据透光、反射或部分反射膜层的形式和图纸中规定的光吸收类别来选定。如果折射面不镀透光膜，则折射和入射角小于  $45^\circ$  时的反射系数按费涅尔公式计算：

$$r = \left( \frac{n' - n}{n' + n} \right)^2$$

对 (34) 式微分之后，可求得当  $r$ 、 $p$  和  $R$  改变时光学系统的  $\tau$  的变化为：

$$d\tau = \sum_1^k \frac{\tau}{1 - r_k} dr_k + \sum_1^k \frac{\tau l_k}{p_k} dp_k + \sum_1^k \frac{\tau}{R_k} dR_k \quad (35)$$

由于在可见光谱波段玻璃的吸收很微弱，光学零件厚度偏差对  $\tau$  的影响可以忽略不计。滤光镜的厚度偏差与  $\tau$  的关系在第四章中再着重说明。

如果系数  $r_k$  和  $R_k$  采用常数，则  $\tau$  的变化随玻璃透过系数而变化：

$$d\tau = \sum_1^k \frac{\tau l_k}{p_k} dp_k \quad (36)$$

$$\frac{d\tau}{\tau} = \sum_1^k l_k \frac{dp_k}{p_k} \quad (36 a)$$

(36) 式给出由一个光吸收玻璃类别过渡到另一个类别时  $\tau$  的变化，例中的  $\tau$  值是个已知数。(36) 式表明，短焦距照相物镜和普通望远镜厚度小（厚度为 1~5 毫米），由于  $p_k$  的变化使  $\tau$  的变化很小，例如：M50 型照相物镜： $\tau = 0.80$ ； $l = 0.1 \sim 0.5$  厘米； $p_k = 0.985 \sim 0.995$ ，由 3 类过渡到 0 类时， $dp_k = 0.01$ ；于是，对于一个零件：

$$d\tau = \frac{\tau l_k}{p_k} dp_k = \frac{0.8 \times 0.1}{0.99} \times 0.01 = 0.0008 = 0.08\%$$

在最坏情况下，对于所有的四个零件：

$$\begin{aligned} d\tau &= \frac{0.8 \times 0.01}{0.99} \times (0.28 + 0.105 + 0.12 + 0.47) \\ &= 0.00857 \approx 0.86\% \end{aligned}$$

这个值小于  $\tau$  的测量误差，也小于由于一两个透光面的反射系数偏差而产生  $\tau$  的偏差。因此，对于薄零件的系统，从透过系数的观点看，采用 0 类的或者 3 类的光吸收玻璃都一样，但是 3 类光吸收玻璃的熔炼要简单得多。对于薄零件组成的光学系统，不应采用较 3 类光吸收严格的玻璃。

例如，双筒望远镜的棱镜具有  $l = 5 \sim 50$  厘米，在这种情况下，当  $\tau = 0.70$ ； $dp_k = 0.01$ ； $d\tau = 3.5\%$ ，即已经是可观的数值，因此对于棱镜最好使用光吸收不超过 0.01 的玻璃，也就是说，不低于 2 类。在研究长焦距航空照相物镜和天文仪器的透镜玻璃的光吸收时，也可以得出同样的结论。这些仪器的透镜具有相当的厚度（50~100 毫米及以上）。仪

器的高透过要求，望远镜系统比之照相物镜尤为重要，因为后者测定曝光时间和照片密度根本不能反映透过系数降低2~3%的变化。

00、0、1类的光吸收玻璃用化学纯材料来取得，成本较3类的玻璃则昂贵得多，所以仅在非用不可时，才使用这类玻璃。只要实际上不影响仪器的透过系数，在光学零件图纸上应该给定尽可能低的光吸收类别。在ГОСТ3514-67表13中列有光学玻璃厂能够保证的各种牌号玻璃所允许最高光吸收类别的规定。

### 16. 关于条纹度类别的选定

照相物镜和望远物镜上清晰的线状条纹，若在入瞳处所占面积不大，这样的条纹实际上不会影响象质和分辨率，因为清晰条纹所造成的衍射图象的亮度非常微弱。但在望远物镜和照相物镜中，占入瞳面积较大的熔炼条纹是有害的：这种条纹使点的衍射图象产生严重变形，影响象质（出现“光尾”，“双影”等），降低分辨率。相反，在位置靠近焦平面或象平面的分划板、聚光镜和棱镜的玻璃中不允许有清晰细条纹，这种条纹在仪器中观察时，可以看见，甚至歪曲分划板个别线条象。因此，只有在没有放大率或低倍率的反射棱镜以及放大镜、目镜、聚光镜、观察玻璃中可以允许有2类条纹。在所有其他零件的玻璃中——照相物镜、平行光管和天文仪器的物镜、显微物镜的透镜以及位置靠近此类透镜的零件可以允许不低于1类的条纹。在上述零件中，尺寸在150~300毫米时，可以允许2~3类的条纹，这实际上与尺寸150毫米以下的毛坯采用1类条纹相符合。根据方向数

(在这方面玻璃毛坯应符合定货时规定的类别) 规定两级条纹度: B 级——两相互垂直方向 (用于棱镜); B 级——单方向 (用于透镜、平板玻璃、保护玻璃等)。

外反射的反射镜条纹度不作规定。

### 17. 气泡度类别和级别的选定

对于望远系统, 国家光学研究所的 В. А. 萨文 (Савин) 拟定了如下所述的确定气泡度类别和级别的方法。

根据试验, 一般观察者能看得出来的气泡影象符合于下述条件:

$$\left(\frac{d}{\phi}\right)^2 = 0.002\omega' + 0.004$$

$$\text{或} \quad d = \phi \sqrt{0.002\omega' + 0.004} \quad (37)$$

式中  $d$  —— 气泡直径 (毫米);

$\omega'$  —— 处于观察者眼睛与仪器局部光学系统之间的气泡, 通过该局部系统后, 形成的气泡象对最小出瞳直径的夹角 (度);

$\phi$  —— 当仪器为最小出瞳时, 通过该零件的光束直径 ( $\phi = 2h$ )。

其中  $h$  —— 当仪器为最小出瞳时, 与零件相交的轴向光线的投射高度。

确定气泡度的类别时, 算出由观察者眼睛的瞳孔到气泡象中心的距离  $l$  求出  $\omega'$ , 并使最小出瞳等于眼睛的最小瞳孔 2 毫米 (如果仪器的出瞳大于 2 毫米时)。计算  $\omega'$  角时, 应为  $l + 5$  毫米, 因为对仪器出瞳不同的观察者的眼瞳可能有  $\pm 5$  毫米的偏差。

根据算出的气泡直径  $d$  选 ГОСТ3514-67 类别表中近似的直径来给定气泡度，且在满足该玻璃牌号能生产的条件下，应选取比计算值  $d$  小些的气泡度值。其理由是：因为两相邻位置相同的气泡在视场造成的阴影效果同一直径大于 1.4 倍的气泡一样。但是，这样选定气泡度可能不利，因为最好报废有双气泡的那部分零件，而不是提高对所有零件、所有玻璃气泡度的要求。

气泡、崩落、光点以及其他表面疵病在照相物镜象平面上所造成的衍射图象很微弱，用眼睛看不出来，即使用光电管和胶卷检查分辨率或目标的照片也未必能看得出来。确定照相物镜气泡度类别时的标准，可以采用国家光学研究所的公差：在系统的所有透镜表面上玻璃的气泡及其他疵病的总面积不应超过物镜入瞳面积的 2.5%。因此，有了允许疵病的总面积，根据已知的毛坯重量按照 ГОСТ3514-67 “无色光学玻璃” 找出光学玻璃厂能够保证的气泡度的类别和级别，计算一个零件上和整个仪器上出现的面积，大气泡的数量不得超过气泡总数的 5~10%。如果此面积很小，则应该采用下一个较低的气泡度的类别和级别。上述计算得出，高级照相物镜采用 5 类和 Д~E 级气泡度， $f' = 200 \sim 500$  毫米的航空照相物镜采用 7~8 类和 Г、Д、E 级气泡度；在这种情况下，气泡的总面积一般不超过入射光瞳面积的 0.2~0.3%。对于高级照相物镜，根据产品的外貌按最大气泡的直径选取，不得低于 5Д、6Д 气泡度。

例：求 Б6 双筒望远镜 ( $f'_0 = 120$  毫米， $f'_a = 20$  毫米， $D_p = 30$  毫米， $D'_p = 5$  毫米) 光学零件的气泡度类别。

物镜透镜：物镜透镜内的气泡几乎全在出瞳处成象，

于是

$$\omega^{\circ} = \frac{D_{p'}'_{\min} \times 57.3^{\circ}}{l} = \frac{2 \times 57.3^{\circ}}{5 + 0.3} = 21.6^{\circ}$$

$$\phi = \Gamma D_{p'}'_{\min} = 6 \times 2 = 12 \text{——相当最小出瞳 } 2 \text{ 毫米;}$$

$$d = \phi \sqrt{0.002\omega^{\circ} + 0.004} = \phi \sqrt{0.047}$$

$$= 12 \times 0.217 = 2.6$$

即允许气泡度低于 8 类。当按照计算得到大直径气泡时，则应该计算其面积，按照 ГOCT3514-67 选定气泡度的级别，并且大气泡的数量不得超过气泡总数的 10%。由于分划板、聚光镜、目镜的轴向光束直径不大，如果气泡面积超过 1.5~2%，则应根据所有气泡的允许面积控制在 1.5~2% 的原则，采用较严的气泡度类别，而不计算气泡的面积。对于双筒望远镜的物镜应该采用气泡度为 7~8 Г 的玻璃。

聚光镜：距分划板的距离  $x = 7 \sim 10$  毫米；

$$\phi = \phi_{*} \frac{x}{f_{*}} = 0.5 \sim 1 \text{ 毫米;}$$

$$l = \frac{f_{*}^2}{7 \sim 10} = \frac{425}{7 \sim 10} = 40 \sim 60 \text{ 毫米}$$

$$\omega^{\circ} = \frac{2 \times 57.3^{\circ}}{40 \sim 60} = 1.9^{\circ} \sim 2.8^{\circ}$$

$$d = (0.5 \sim 1) \sqrt{0.002 \times 2.8 + 0.004} \approx 1 \times 0.031$$

$$= 0.03 \text{ 毫米} \quad (1a \text{ 类})$$

可以根据分划值或光洁度等级给定分划板玻璃的气泡度。

分划板： $\phi = 0$ ； $\omega^{\circ} = 0$ ， $d = 0$ ——不允许有气泡

(1 类)

接眼透镜:  $\phi = D_{p'_{min}} = 2$  毫米,  $l = s'_{p'} = 15.0$  毫米;

$$\omega = \frac{2 \times 57.3^\circ}{15 + 5} = 5.73^\circ$$

$$d = 2 \sqrt{0.002 \times 5.73^\circ + 0.004} = 0.25 \text{ 毫米}$$

(3~4 类,  $\Gamma$ 、 $\Pi$  级)

用上述同样的方法求得距分划板 25 毫米处目镜棱镜的气泡度为 4~5 类, 距分划板 50 毫米处物镜棱镜的气泡度为 6~7 类。

### 第三章 光学零件的公差计算和 制造要求的依据

#### 18. 关于按照玻璃样板加工各光学表面和 玻璃样板半径的公差

作者由于工作性质在 1962 年直接参加了苏联国家标准 ГOCT2786-44 的修订并提出了重要的修改，并在新的苏联国家标准 ГOCT2786-62 “检验光学表面曲率半径用的玻璃样板”中基本上已被采纳。这种修改的依据列在下面。

光学零件（透镜、棱镜、平板玻璃、平面镜）用玻璃样板检验，该样板的半径应符合苏联国家标准 ГOCT2786-62 规定的高精度。光学表面半径  $r$  或曲率  $\rho$  与玻璃样板半径  $r_{\text{样}}$  两者的偏差以牛顿干涉环数即光圈  $N$  来表示，当玻璃样板与待检验表面的矢高差  $\Delta h = N\lambda/2$  时，如果把玻璃样板重迭于待检验的光学表面上时，这种干涉环数可观察到。光学表面半径或曲率的偏差值不仅取决于干涉环数、结合面的直径（在此直径范围内显出干涉环），干涉光波的长度，还取决于与样板是沿边缘相接触——在干涉环  $N$  中出现“低光圈”还是在中部相接触——在干涉环数  $N$  中出现“高光圈”现象。

玻璃样板和透镜沿边缘相接触——在干涉环数中出现“低光圈”（图 3）。因为：

$$r^2 = (r - h)^2 + R^2$$



$$\text{则} \quad r = \frac{R^2 + h^2}{2h} \quad (38)$$

如果  $r - r_{\text{理想}} = \Delta r$ ——曲率半径的变化量和  $\rho = \frac{1}{r}$ ——曲率，那么曲率变化量  $\Delta\rho$  可以用微分法求算如下：

$$\Delta\rho = -\Delta r/r^2$$

方程式 (38) 经过微分后：

$$\Delta r = -\frac{R^2 \Delta h}{2h^2} + \frac{\Delta h}{2} = \left(1 - \frac{R^2}{h^2}\right) \frac{\Delta h}{2} \quad (39)$$

因为  $\frac{R^2}{2h} = r - \frac{h}{2}$ ，将此值代入方程式 (39) 后，可以简化公式 (39)，则得出：

$$\Delta r = -\left(\frac{r-h}{h}\right) \Delta h = -\left(\frac{r-h}{h}\right) \frac{N\lambda}{2} \quad (40)$$

小曲率的、有微斜面的透镜常常是  $r \gg R$  和  $R \gg h$ ，故  $\frac{\Delta h}{2}$  可以忽略不计，于是：

$$\Delta r = -\frac{R^2 \Delta h}{2h^2} \quad (39 a)$$

一个干涉环（光圈）等于  $\frac{\lambda}{2}$ ，同时采用：

$$r = \frac{R^2 + h^2}{2h} \approx \frac{R^2}{2h} = \frac{D^2}{8h}; \quad h = \frac{D^2}{8r} \quad (41)$$

代入公式 (39 a) 后，得出：

$$\Delta r = -\frac{4r^2 N\lambda}{D^2} = -\frac{(2r)^2}{D^2} N\lambda \quad (42)$$

可以不考虑符号，因为半径偏差无论是正号或负号同样都是不良的。

公式 (42) 为近似的，当  $N = 3 \sim 10$  时，半球透镜的  $\Delta r$  和  $\Delta\rho$  的偏差无足轻重；但是这些值若按照近似公式算出，

那么结果就增大到 5~10 倍。半球透镜的曲率的变化量不大就极大地增多了干涉环的可见数；反之，干涉环数大，说明待检验表面和玻璃样板的实际曲率的差数很小。根据公式 (42) 得出结论：直径不大的透镜的曲率偏差与重迭玻璃样板时显出同样光圈数的、大直径的透镜相比较则是比较大。就曲率不大和直径不大的透镜来说（这种透镜是最多和最常遇到的），半径偏差与允许的光圈数或重迭玻璃样板时所见的光圈数成正比，与直径的平方成反比，或者，反之，可见光圈数与曲率偏差和在其内显现该光圈数的圆周直径的平方成正比，也就是：

$$\Delta\rho = \frac{4N\lambda}{D^2} \text{ 和 } N = \frac{D^2\Delta\rho}{4\lambda} = -\frac{D^2\Delta r}{4r^2\lambda} \quad (43)$$

如果不同直径的表面，允许有相同的曲率偏差，则所见到的或允许的光圈数应当与待检验表面的直径平方成正比，或者是在相同直径的情况下应该是一样的。应该不按照全部直径，而只是按照相当的直径，例如，相当于入射光瞳直径检验半球透镜，同时光圈数  $N$  不大时，可以很好地观察出光圈的歪曲部分，这种情况，对于不致引起曲率明显变化的，且具有较大的干涉环数的整个直径来说，也是符合的。

如果出现非圆形光圈和  $\Delta N = N_1 - N_2$  ( $\Delta N$ ——按照透镜的两个相互垂直的直径所量出的光圈数差)，则按照上述

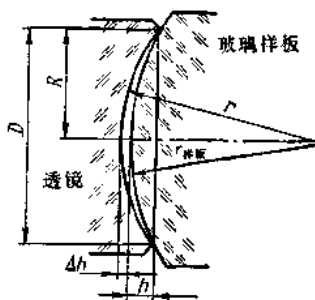


图 3 玻璃样板与待检验表面沿边缘相接触

直径用下列公式求算表面曲率差  $\Delta\rho$  (象散)：

$$\Delta\rho_s = \frac{4\Delta N\lambda}{D^2} \quad (44)$$

如果出现“局部”误差，也就是在零件上直径为  $D_s$  处不大的部分上的光圈出现歪曲  $\Delta N_s$ ，则为了确定这种误差是否在允许的光圈内，和将这种误差与图纸上给定的公差  $\Delta N$  相比较，应当算出  $\Delta N_D$ ——相应于零件直径  $D$  的歪曲，即：

$$\Delta N_D = \Delta N_s \left( \frac{D}{D_s} \right)^2 < \Delta N_{\text{图面上}} \quad (45)$$

如果零件不遵守上列不等式，则零件应被剔出并退修。

**玻璃样板和透镜在中部相接触——在光圈数  $N$  中出现“高光圈”** 由图 4 可见

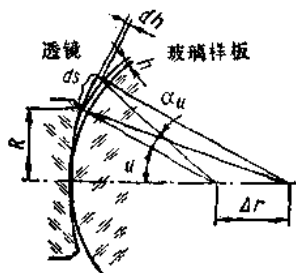


图 4 玻璃样板和待检验表面在中部相接触

$$h = \Delta r (1 - \cos u)$$

因为  $\frac{dh}{ds} = \frac{\Delta r \sin u}{r}$ ,  $ds = r du$ , 于是,

$$dh = \Delta r \sin u du$$

$$h = \Delta r \int_0^u \sin u du = -\Delta r \int_0^u \cos u = \Delta r (1 - \cos u)$$

由此

$$\Delta r = \frac{h}{1 - \cos u} = \frac{N\lambda}{2(1 - \cos u)}$$

消去  $\cos u$ ，得出：

$$\Delta r_o = \frac{rh}{r - \sqrt{r^2 - R^2}} \quad \text{或} \quad \Delta r_o = \frac{rN\lambda}{2h} \quad (46)$$

$$\Delta \rho_o = \frac{N\lambda}{2rh} \quad (47)$$

对半球透镜来说， $\Delta r_o = \frac{N\lambda}{2}$  是很小的值。比较公式 (40) 和 (46)，得出：

$$\frac{\Delta r_u}{\Delta r_o} = \frac{r - h}{r} = \cos u \quad (48)$$

公式(48)说明：当光圈数相同时，待检验透镜的半径偏差在中部相接触（“高光圈”）通常要比在沿边缘相接触（“低光圈”）的情况多。当角  $u = 60^\circ$ 、 $80^\circ$  和  $84^\circ$  时，其值相应达到大两倍、六倍和八倍。可是当透镜的曲率半径较大和直径不大时，该差数就无关重要并可忽略不计。例如：当  $u = 20^\circ$ ， $\Delta r_u$  比  $\Delta r_o$  大 10%。

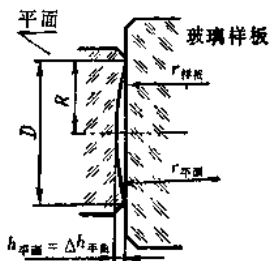


图5 玻璃样板和待检验平面相接触

平面(图5) 就平面来说， $h = 0$  和  $r_{\text{样板}} = \frac{R^2 + h^2}{2h} = \infty$   
当平面偏离玻璃样板时：

$$r_{\text{平面}} = \frac{R^2 + \Delta h^2}{2\Delta h} = \frac{R^2}{2\Delta h} + \frac{\Delta h}{2} \approx \frac{R^2}{2\Delta h}$$

最终，实际的平面半径为：

$$r_{\text{平面}} = \frac{R^2}{N\lambda} = \frac{D^2}{4N\lambda} \approx \frac{450D^2}{N} \quad (49)$$

和曲率为：

$$\Delta\rho = \frac{1}{r_{\text{平面}}} = \frac{4N\lambda}{D^2} \approx \frac{N}{450D^2} \quad (49a)$$

求出的值能与曲率半径大的和直径不大(与半径相比较)的球形表面的值相同。

**有关玻璃样板的公差** 在光焦度和光学系统象差的表达式内所用到的各参数是曲率，而不是表面半径；光焦度和象差与表面曲率成比例。这样在计算表面制造误差对光学系统象差的影响时，应当查明曲率误差的影响，而不是半径误差的影响。表面误差对象差变化量的影响程度只有在这种情况下才能够查明，即确定象差变化量时是对应于光学系统各不同表面的曲率给以同一的变化量，而不是对应其半径给以同一的变化量  $\Delta r$  或半径的相对变化量。对加工误差的影响来说，引起最大象差变化的某个表面曲率的改变量，要比作同样曲率改变量而引起较小象差变化的其他表面要更为“灵敏”。因此，从光焦度和象差的变化量观点来看，必须用表面的曲率变化量，而不是用半径的变化量  $\Delta r$ ，或目前所采用的半径相对变化量  $\Delta r/r$  作为玻璃样板和透镜表面制造公差的基础。

根据表面加工的难度，表面曲率变化量同样也成为表面制造误差的基础，因为只有当曲率变化量相同时，相对于透镜的中心线获得同样厚度的玻璃层，对于相同直径的不同表面来说，同样厚度的玻璃层应加以抛光。因此，必须把产生

同一曲率误差的那些误差看作是各表面的相同的制造误差。按照玻璃样板来加工各表面，其相同的光圈数对应于同一直径的透镜曲率的相等变化量。在同一的允许的曲率变化量下，也就是在同一制造误差时，应当相对于零件中心线来抛光的玻璃层的允许厚度与零件的直径平方成比例。这方面在这里显示出表面制造精度与其直径大小的关系。这种关系式在基孔和基轴公差制中具备。对光学系统所有的表面（多半是对透镜两个面）通常给定是相同的、允许的玻璃样板半径的相对误差  $\Delta r/r$  引起（或能引起）象差的不同变化，并且是玻璃样板和光学系统表面的不同的制造误差。在这种场合下，对大半径的来说，公差成为窄范围的，而且象差变化量要比小半径的迟钝。具有较大半径的玻璃样板的制造和测量（特别是用球径仪时）要比半径小的困难，如果对两者皆给定相同的相对半径误差的话。所以，从玻璃样板的制造和允许的半径变化观点来看，不准对透镜不同半径的相对误差  $\Delta r/r$  给予相同的公差。如果需要制造光学系统各个表面具有同样精度和相同曲率变化量的玻璃样板，并且其精度用相对的半径误差来表示感到方便的话，那么应当具有下列的、相对的、半径误差之间的关系式，例如：光学系统第一表面和所有的其余表面的相对的、半径误差的关系式：

$$\frac{\Delta r_v}{r_v} = \frac{r_v}{r_1} \cdot \frac{\Delta r_1}{r_1} \quad (50)$$

$$\Delta r_v = \left( \frac{r_v}{r_1} \right)^2 \cdot \Delta r_1 \quad (51)$$

在编制表面曲率半径的变化量对象差的影响表时，也应当满足这种比例关系，因为当透镜为不同直径时，对应于同

一的相对半径变化  $\Delta r/r$  或光圈数会引起不同的曲率变化, 这就使曲率变化量 (光学系统不同表面的制造误差) 对象差的影响难于对照。在透镜图中待规定的玻璃样板的制造公差经常要比按照玻璃样板加工的公差较粗略些, 如果这些公差用同一的曲率变化值或用玻璃样板和透镜相同直径下应得到牛顿环数来表示的话, 经常为:

$$N_{\text{样板}} = \frac{D^2}{4\lambda} \cdot \frac{\Delta r}{r^2} > N_{\text{透镜}}$$

也就是量具的误差大于透镜表面的制造允许误差, 而透镜用这种量具——玻璃样板来检验是不允许的。应当保证下列条件:

$$N_{\text{透镜}} > N_{\text{样板}} \approx \frac{D^2}{4\lambda} \cdot \frac{\Delta r}{r^2} \approx 450 \frac{D^2 \Delta r}{r^2}$$

玻璃样板的公差:

$$\Delta \rho = \frac{\Delta r}{r^2} \leq \frac{4N_{\text{透镜}}\lambda}{D^2_{\text{透镜}}} \quad (52)$$

$$\frac{\Delta r}{r} \leq \frac{4rN_{\text{透镜}}\lambda}{D^2_{\text{透镜}}}$$

比较正确地是采用下列关系式:

$$\frac{\Delta r}{r} \% = \left( \frac{1}{3} \sim \frac{1}{5} \right) \frac{400rN_{\text{透镜}}\lambda}{D^2_{\text{透镜}}} = \frac{rN_{\text{透镜}}}{(13 \sim 22)D^2_{\text{透镜}}} \quad (53)$$

如果按照玻璃样板加工的零件公差给定得正确的话, 根据象差的允许变化量, 玻璃样板的公差和按照它加工的零件公差处于这种比例关系时, 可以不考虑玻璃样板制造误差的影响 (大多数光学系统也是这样制造的)。同时应该考虑到, 如果上述公差被不正确给定的话, 则玻璃样板半径的偏差同

样会引起象差的变化和降低象质。

在图中标注有按照玻璃样板加工的、零件所允许的不正确公差 $N$ ，它经常被不正确地认为：偏离了给定的玻璃样板的曲率半径不影响象质而在图中表示这种偏离仅仅是为了定出偏离正确的范围。实际上偏离了给定的玻璃样板的半径，尤其是超出允许的偏差，引起象差的变化和降低象质，而且偏离了正确范围会引起目标点在光轴上出现象散。因此，对某些半径来说，玻璃样板的制造公差可以是较窄范围的，而对其它半径来说，该公差可以取比玻璃样板（苏联国家标准ГОСТ中规定的）较宽的范围。当遇到这种公差需成为窄范围的，而要保证窄公差带又有较大的困难的情况时，必须将玻璃样板制造得尽可能精确（例如：在 $\pm 0.03\%$ 的范围内），然后精确地加以测量（最好用平行光管装置），在将光学系统换算成炉号时，考虑玻璃样板的实际偏差。因为复杂的光学系统通常有6~10个及10个以上的表面，出现误差补偿的可能性较大，这就允许通过光学系统的其他参数（厚度、空气间隙）的较大变化来获得原光学系统设计的象差。如果玻璃样板公差在计算时是属于宽范围的，那么，可以使用与计算半径相接近的玻璃样板。可是，不建议制造半径偏离计算值（偏离半径的正常系列）的玻璃样板，因为这样会出现在曲率变化量灵敏的其他光学系统中不可能再使用上述的玻璃样板的现象，这是由于玻璃样板的半径公差在其他光学系统中这时比较窄。

这样，在透镜半径公差带窄和宽的情况下，应当制造具有这样一种误差的玻璃样板，即这种误差使有可能比较简单地由光学系统某些参数（空气间隙或透镜厚度）不大的变化



量所引起的象差的变化量予以补偿，或者可忽视这种半径变化量所引起的象差变化。因而，在光学零件图纸中，对公差的影响可忽视不计的透镜各表面必须标明半径公差。例如：为了制造优质照相镜头（焦距为 20~1000 毫米的广角的和强光力的），可以采用半径偏差为 0.03~0.05% 的玻璃样板（对最常用的 50~250 毫米的半径来说），而对某些要求较严格的表面，则保证玻璃样板半径偏差在 0.005~0.01% 范围内。具有较大半径的玻璃样板可以制造得较粗糙些，例如公差为：

$$\frac{\Delta r_v}{r_v} = \frac{r_v}{250} (0.01 \sim 0.05\%) \quad (54)$$

通常，如果光学系统表面之一具有最小的半径并与空气相邻接的话，可以采用偏差为  $\frac{\Delta r_k}{r_k}$  的玻璃样板，同样对其他的、同样也与空气相邻接的表面则可以采用具有下列偏差的玻璃样板：

$$\frac{\Delta r_v}{r_v} = \frac{r_v}{r_k} \cdot \frac{\Delta r_k}{r_k} \quad (55)$$

必须同时考虑到光学系统中表面的情况，公差应当与数值  $\left(\frac{h_k}{h_v}\right)^4$  成比例，也就是与高度比值的四次方成比例，而在此高度内零光线与  $k$  和  $v$  表面相交。对于冕牌玻璃透镜的胶合表面，这些公差可增到  $(n_{*k} - 1)/(n_{*k} - n_k)$  数值的倍数；对于火石玻璃透镜的胶合表面，公差与其外表面的公差相同。 $n_{*k}$  和  $n_k$  为零件材料和胶相应的折射率。只是对于球面反射镜的表面或物镜内表面或望远镜前面部分，规定公差应当比空气相邻接的表面的公差严格（至 2~3 倍）。

前面已指出：就范围极宽（10~1000 毫米）的半径而

言，如果玻璃样板半径相对误差的公差相同，就会导致在同一光学系统中，对象差有同样影响的、具有不同曲率半径的表面不得不制成具有不同的误差，这就不合理。

就半径超出 50~250 毫米范围的玻璃样板而言，半径公差应按下列公式给定：

$$\frac{\Delta r_v}{r_v} = \frac{r_v}{250} \left( \frac{\Delta r}{r} \right)_{\text{ннр}}$$

式中  $\left( \frac{\Delta r}{r} \right)_{\text{ннр}}$  —— 50~250 毫米范围内的半径公差。

玻璃样板的直径不得小于待检验零件的直径，在苏联国家标准 ГOCT2786-62 中，对此也有规定。当检验大直径（300~500 毫米）的零件时，玻璃样板的直径不得小于 200~250 毫米，为此，在 ГOCT2786-62 中包括有直径为 180~250 毫米的玻璃样板。

在 ГOCT2786-62 中，考虑到上述方案的主要玻璃样板采用如下的制造公差（见表 4）。

表 4 玻璃样板制造公差

玻璃样板 精度等级	球面样板的曲率半径名义值(毫米)						平面样板 以干涉 带计的平 面性偏差
	自 0.5 至 2	2 以上 至 10	10 以上 至 37.5	37.5 以上 至 250	250 以上 至 1000	1000 以上 至 40000	
	允 许 的 偏 差 以微米计(±)			以相对名义半径值的 百分比计(±)			
1 级	0.5	1.0	2.0	0.01	0.02	$\frac{0.02 r}{1000}$	0.05
2 级	1.0	3.0	5.0	0.03	0.05	$\frac{0.05 r}{1000}$	0.07
3 级	2.0	10.0	15.0	0.10	0.15	$\frac{0.15 r}{1000}$	0.10

在半径的每一范围的限度内，保持曲率的精度增加到

4~6倍,使达到一定程度并使之合理,因为大直径的玻璃多半在较长焦距的光学系统中采用,但这种光学系统在制造时也要求比较精确地保持曲率。从前一个半径范围至后一个半径范围,这种精度被提高,虽然比半径的增长要慢些;但是对最后一个范围和半径大于1000毫米而言,这种精度保持不变,而在0.5~2, 2~10和10~37.5的半径范围内,这种精度改变到16.25和14倍,1级公差 $\Delta r/r$ 在0.1~0.025%, 0.05~0.25%和0.02~0.005%限度内。平面玻璃样板的允许制造公差要比球面的小至1/17~1/40。

由研究出的光学表面半径和曲率变化的关系式可见,有必要较仔细地规定光学零件和玻璃样板的半径公差,这就节省制造精度过高的玻璃样板所耗费的非生产性的工时和劳动,并且提高光学系统的象质。

### 19. 玻璃样板公差和按照玻璃样板加工后的表面公差的计算

在计算简单照相物镜和中等光强度和视场的观测用物镜的参数公差时,可以持有这样的出发点,即将参数的公差限定在球差的允许变化量内,在这种情况下,其他象差的变化量也是无关紧要的,并且可以忽略不计。但是对某些光学系统来说,重要的是保持公称的焦距;使用测距器或按照距离分划圈工作的照相物镜、带有测距和瞄准分划板的物镜和双眼仪器的物镜就属于这类光学系统,当用上述物镜时,物镜和目镜的焦距偏差能够引起不允许的放大率差;

$$\Delta\Gamma = -\Gamma \left( \frac{\Delta f'_{物}}{f'_{物}} - \frac{\Delta f'_{目}}{f'_{目}} \right)$$

$$\frac{\Delta \Gamma}{\Gamma} = - \left( \frac{\Delta f'_{\text{物}}}{f'_{\text{物}}} - \frac{\Delta f'_{\text{目}}}{f'_{\text{目}}} \right) \quad (56)$$

照相物镜的焦距偏差  $\Delta f'_{\text{物}}$  引起距离分划圈或测距器的聚焦误差为:

$$\Delta x' = \pm \frac{2f'_{\text{物}} \cdot \Delta f'_{\text{物}}}{x} \quad (57)$$

观测用物镜的焦距偏差  $\Delta f'_{\text{物}}$  引起分划板的分划值误差为:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= \frac{l}{f'_{\text{物}}}; & \frac{\Delta \alpha}{\cos^2 \alpha} &= - \frac{l \Delta f'_{\text{物}}}{f'^2_{\text{物}}} \\ \frac{\Delta \alpha}{\alpha} &= - \frac{\cos^2 \alpha \Delta f'_{\text{物}}}{f'_{\text{物}}} \approx - \frac{\Delta f'_{\text{物}}}{f'_{\text{物}}} \end{aligned} \quad (57 \text{ a})$$

在这些系统中,  $\Delta n$ 、 $\Delta R$  和  $N$  相应为折射率、玻璃样板半径和按照玻璃样板加工表面的三项公差, 它们是根据  $\Delta f'_{\text{物}}$  允许变化量计算的, 并且公差带窄到使象差的变化量处于允许的范围这种程度, 但非胶合的物镜内表面、望远物镜的主要部分的内表面和照相物镜 (包括胶合面) 的某些大曲率表面除外, 这些地方的公差  $\Delta r$  和  $N$  应缩小至  $1/2 \sim 1/3$ 。

对薄透镜系统有:

$$\begin{aligned} \Delta \varphi' &= \sum_1^k \frac{h_v}{h_1} \Delta \varphi'_v \\ \Delta f' &= -f'^2 \Delta \varphi' = -f'^2 \sum_1^k \frac{h_v}{h_1} \Delta \varphi'_v \end{aligned} \quad (58)$$

随着表面曲率半径的变化, 透镜第  $v$  表面和整个光学系统的光焦度按下列方程式改变:

$$\Delta\varphi'_v = (n'_v - n_v) \frac{\Delta r_v}{r_v^2}$$

$$\Delta f' = -f'^2 \sum_1^k \frac{h_v}{h_1} (n'_v - n_v) \frac{\Delta r_v}{r_v^2} \quad (59)$$

第  $v$  表面曲率半径允许变化量为:

$$\Delta r_{v, \pm \text{限}} = \frac{\Delta f'_{\pm \text{限}}}{\sqrt{p} f'^2} \cdot \frac{h_1}{h_v} \cdot \frac{r_v^2}{n'_v - n_v} \quad (60)$$

$$\frac{\Delta r_{v, \pm \text{限}}}{r_v^2} = \frac{\left(\frac{h_1}{h_v}\right) \Delta f'_{\pm \text{限}}}{\sqrt{p} (n'_v - n_v) f'^2} \quad (61)$$

它与焦距公差、 $h_1/h_v$  比值和曲率半径平方成正比，与光学系统的焦距平方和介质（其界限是表面）的折射率差成反比。由公式（61）可见：此公差对长焦距的光学系统来说，是窄公差带的；对胶合表面及离象平面近的表面来说，是公差带不那么窄的（ $\frac{h_1}{h_v}$  比值很大）。选择公差  $\Delta f'_{\pm \text{限}}$  时也必须同时考虑其他参数（ $n$  和  $N$ ）的误差，故应当采用  $\Delta f'_{\pm \text{限}}$  为不大于其全部公差的  $1/3 \sim 1/5$ ，同时注意到玻璃样板——量具——不得在制造产品时带来误差，也就是应当遵守不等式：

$$\frac{\Delta r_v}{r_v^2} \leq \frac{4N_v \lambda}{D_v^2}$$

$$\frac{\Delta r_{v, \pm \text{限}}}{r_v^2} = \left(\frac{1}{3} \sim \frac{1}{5}\right) \frac{4N_{v, \pm \text{限}}}{D_v^2} \quad (62)$$

如果假定  $\Delta r_v$  和  $\Delta r_1$  的变化所引起的  $\Delta\varphi'$  和  $\Delta f'$  相同，则可以定出这样的比例式：

$$\frac{\Delta r_v}{r_v^2} = \frac{n'_1 - n_1}{n'_v - n_v} \cdot \frac{h_1}{h_v} \cdot \frac{\Delta r_1}{r_1^2} \quad (63)$$

$$\frac{\Delta r_v}{r_v} = \frac{h_1}{h_v} \cdot \frac{n'_1 - 1}{n'_v - n_v} \cdot \frac{r_v}{r_1} \cdot \frac{\Delta r_1}{r_1} \quad (64)$$

虽然，曲率半径的允许变化量应随着半径的值而定，数值  $\frac{\Delta r_v}{r_v}$  必须按照苏联国家标准 ГОСТ 2786-62 规定的数值化整。根据允许的焦距变化量计算按玻璃样板加工的表面公差  $N$  时，求得类似的公式如下：

$$\begin{aligned} \Delta \varphi'_v &= (n'_v - n_v) \frac{4N_v \lambda}{D_v^2} \\ \Delta f' &= -f'^2 \sum_v^p \frac{h_v}{h_1} (n'_v - n_v) \frac{4N_v \lambda}{D_v^2} \\ &= -\frac{f'^2}{450} \sum_v^p \frac{h_v}{h_1} (n'_v - n_v) \frac{N_v}{D_v^2} \end{aligned}$$

当  $\lambda = 0.00055$  毫米，同时给定光学系统有  $p$  个表面的  $\Delta f'_{\text{允}}$  时，则求得：

$$N_{v, \text{允}} = \frac{450 D_v^2}{\sqrt{p} f'^2} \cdot \frac{h_1}{h_v} \cdot \frac{\Delta f'_{\text{允}}}{(n'_v - n_v)} \quad (65)$$

式中应当取焦距偏差的全部公差的一部分 ( $1/3, 1/5$ ) 作为  $\Delta f'_{\text{允}}$ 。公差带  $N_v$  对长焦距光学系统来说是较窄的。  $N_v$  的数值增大与零件直径的平方、比值  $\left(\frac{h_1}{h_v}\right)$  成正比，与介质（表面为其分界限）的折射率差成反比。对胶合表面（式中

$n'_v - n_v$  差数小) 和对象面附近的表面 (此表面的  $\frac{h_1}{h_v}$  比值很大) 来说, 公差带将是较宽的 (如聚光镜、目镜棱镜表面、望远物镜第二组分的分划板和透镜)。如果假设各面的表面误差对光学系统焦距的影响为同一变化量, 由第一面对玻璃样板的偏差  $N_1$  计算第  $v$  面的  $N_v$ , 则  $N_1$  和  $N_v$  之间的比例关系为:

$$N_v = \frac{n'_1 - n_1}{n'_v - n_v} \cdot \frac{h_1}{h_v} \cdot \left( \frac{D_v}{D_1} \right)^2 N_1 \quad (66)$$

当公差  $N_1$  根据  $\Delta f'$  的公差或象差的变化量确定 (计算) 后, 利用公式 (66) 可以确定出光学系统公差  $N$  的非常接近的近似值, 但非胶合的双透镜物镜的内表面、望远物镜主要部分的内表面和照相物镜的某些表面 (包括胶合面、大曲面) 除外, 这些地方的公差应当更窄, 小至  $1/2 \sim 1/3$ 。

例: 计算 M50 型物镜按照玻璃样板加工的 表面公差;  $f' = 52.5$  毫米; 相对孔径  $1:3.5$ ;  $2w = 45^\circ$ ;  $D_{1,2} = 16.0$  毫米; 第二、第三和第四透镜的直径为 14.0 毫米, 但第二透镜两个表面上的通光直径为 12.8 毫米 (倒边);  $n_{1,4} = 1.6130$ ;  $n_2 = 1.5749$ ;  $n_3 = 1.5294$ ; 对第一透镜来说,  $h_1/h_4 = 1.18$ ; 采用  $\Delta f'_{\text{容}} = 0.2 \times 1\% f' = 0.1$  毫米 (全部公差的  $1/5 \sim \pm 1\% f'$ ), 表面数为 6 个 (胶合面除外):

$$N_{1,2} = \frac{450 \times 0.1 \times 16^2}{\sqrt{6 \times 52.5^2 \times 0.613}} = 2.8, \text{ 取 } N_{1,2} = 3.0$$

$$N_{3,4} = \frac{0.613 \times 1.18}{0.5749} \left( \frac{12.8}{16} \right)^2 \times 2.8 \approx 2.3,$$

$$\text{取 } N_{3,4} = 2.5$$

$$N_6 = \frac{0.613 \times 1.18}{0.5294} \left( \frac{12.8}{16} \right)^2 \times 2.8 \approx 2.4, \text{ 取 } N_6 = 2.5$$

$$N_7 = \frac{0.613 \times 1.18}{0.613} \left( \frac{12.8}{16} \right) \times 2.8 \approx 2.1, \text{ 取 } N_7 = 2.0$$

对第三个零件 ( $n_3 = 1.5294$  和第 6 表面  $n_6 = 1.52 \sim 1.54$ ) 和第四个零件 ( $n_4 = 1.6130$  和第 6 a 表面  $n_{6a} = 1.52 \sim 1.54$ ) 的胶合面公差可以给宽范围的公差,  $N_6 = -$ ,  $\Delta N_6 = -$  和  $N_{6a} = 10$ ;  $\Delta N_{6a} = -$ , 或同时考虑到用甲醇胶胶合的特点, 如果表面的  $N$  和  $\Delta N$  太差的话, 可能出现脱胶现象, 因此, 必须将  $N$  和  $\Delta N$  加工得较精确些 ( $N \approx 5$ ;  $\Delta N = 1 \sim 2$ )。应当尽量用较富于弹性的胶 (OK50, OK72) 胶合, 因为这种胶对具有较大偏差的表面不产生脱胶。

如果已知光学车间制造的零件表面大部分  $N$  和  $\Delta N$  在极限偏差的情况, 那么, 应当对这些公差给得严格一些; 如果很少出现有极限偏差的情况, 则可以放大  $N$  和  $\Delta N$  的公差。玻璃样板公差按照下列公式确定:

$$\frac{\Delta r}{r^2} \leq \frac{4N_{\text{玻璃}}\lambda}{D_{\text{玻璃}}^2}$$

$$\frac{\Delta r}{r} \% = \frac{100 \times 4N_{\text{玻璃}}\lambda r}{(3 \sim 5)D_{\text{玻璃}}^2} = (0.07 \sim 0.055) \frac{N_{\text{玻璃}}r}{D_{\text{玻璃}}^2} \quad (67)$$

对第一表面来说:

$$\frac{\Delta r_1}{r_1} \% = (0.07 \sim 0.055) \frac{3 \times 17.1}{(16)^2} \approx (0.014 \sim 0.01) \%$$

$\Delta r = 0.0024 \sim 0.0017$  (玻璃样板为 1 ~ 2 级精度);

对第三表面来说<sup>①</sup>:

①原书有误, 今改。——编者注



$$\frac{\Delta r_3}{r_3} \% = (0.07 \sim 0.055) \frac{2.5 \times 33.57}{(14)^2}$$

$$\approx (0.030 \sim 0.023) \%;$$

$\Delta r = 0.010 \sim 0.007$  (2 ~ 3 级精度);

对第五表面来说:

$$\frac{\Delta r}{r} \% = (0.07 \sim 0.055) \frac{2.5 \times 346.7}{(14)^2} = (0.31 \sim 0.24) \%$$

(3 级精度);

对第二表面来说:

$$r_2 = \infty; N_{\text{max}} = 0.2N_{\text{min}} = 0.6 > 0.1 \text{ (3 级)}.$$

可是, 影响焦距产生同一偏差的各表面的曲率变化使象差并不相同地改变(例如: 非胶合的双透镜物镜或望远镜主要部分的内表面或者某些大曲率表面)。因此, 不同表面的较精确的公差  $\Delta r$  和  $N$  不仅是根据  $\Delta f'_{\text{max}}$  来给定, 同时应根据规定的象差允许变化量。对非广角光学系统 ( $2\omega \ll 35^\circ \sim 50^\circ$ ) 只要考虑到球差的允许变化量, 就足以保持优良的象质。而对广角光学系统来说应当根据影响表来求算允许的公差  $\Delta r$  和  $N$ , 因为此时近似的公式不再产生可以认为满意的结果或者成为累赘的公式。

在三级象差范围内, 对位于无限远的物体来说, 可以按照公式 (377)● 和 (378)● 来算出轴向球差  $\delta s'_k$ , 这些公式对位于空气中的透镜组成的光学系统来说, 也可以用透镜系数表示〔公式 (390)●〕。按照每个透镜的表面曲率求算透镜系数

● 见Слюсарев Г. Г. Методы расчета оптических систем. Л., «Машиностроение», 1969, 670с. —译者注

的微分时，可以求出透镜系数的变化量、赛特第一和数和三级球差与透镜每个表面的曲率变化量的关系式。也就是可以求出复杂光学系统每个表面对按照玻璃样板加工的误差和玻璃样板制造误差的灵敏度。同样也可以求出玻璃样板制造公差和按照玻璃样板加工光学零件表面的公差，如果给定球差允许变化值，也就是可以对具体光学系统明显给出球差的变化与位于空气中的零件各个表面的曲率变化的关系式。可是所列的公式不能确定胶合面或当介质不是空气时其界面的关系。在这种情况下，应该按照表面曲率用公式 (377)● 和 (378)● 求出总和符号的各项微分，然后用  $s$  来代替  $s'$  或  $s'(s_1 = -\infty)$  来代替  $s$ ；

$$dA_v = d \left[ Q_{r,v}^2 \Delta \left( \frac{1}{ns} \right)_v \right] = n_v^2 \left[ 2 \left( \frac{3n_v}{n_v'^2} - \frac{2}{n_v'} - \frac{1}{n_v} \right) \times \sigma_v \rho_v - \left( \frac{3n_v}{n_v'^2} - \frac{2}{n_v'} - \frac{1}{n_v} \right) \sigma_v^2 + 3 \frac{n_v' - n_v}{n_v'^2} \rho_v^2 \right] d\rho_v \quad (68)$$

因为：

$$\frac{n_v'}{r_v} - \frac{n_v}{r_v'} + \frac{n_v}{s_v} = \frac{n_v'}{s_v'} = \frac{n_v'^2}{n_v' s_v'}$$

和

$$\frac{1}{n_v s_v} = \frac{1}{n_v^2} \left( -\frac{n_v' - n_v}{r_v} + \frac{n_v'}{s_v'} \right)$$

则

$$\begin{aligned} \Delta \left( \frac{1}{ns} \right)_v &= \frac{1}{n_v' s_v'} - \frac{1}{n_v^2} \left( -\frac{n_v' - n_v}{r_v} + \frac{n_v'}{s_v'} \right) \\ &= -\frac{n_v'^2 - n_v^2}{n_v^2} \cdot \frac{1}{n_v' s_v'} + \frac{n_v' - n_v}{n_v^2 r_v} \end{aligned}$$

※

● 参见95页脚注。——译者注

$$\begin{aligned}
 d \left[ Q_v^2 \Delta \left( \frac{1}{ns} \right)_v \right] &= n_v'^2 \left\{ 3 \frac{n_v' - n_v}{n_v^3} \rho_v^2 - \left( 2 \frac{n_v' - n_v}{n_v^2} \right. \right. \\
 &+ \left. \frac{n_v'^2 - n_v^2}{n_v^2 n_v'} \right) \left( 2 \rho_v \sigma_v' + \frac{n_v' - n_v}{n_v'} \rho_v^2 \right) + \left( \frac{n_v' - n_v}{n_v^2} + 2 \frac{n_v'^2 - n_v^2}{n_v^2 n_v'} \right) \\
 &\times \left( \sigma_v'^2 + 2 \frac{n_v' - n_v}{n_v'} \rho_v \sigma_v' \right) - 3 \frac{n_v'^2 - n_v^2}{n_v^2 n_v'} \times \frac{n_v' - n_v}{n_v'} \sigma_v'^2 \left. \right\} d\rho_v
 \end{aligned} \tag{68 a}$$

注意到不变量中有：

$$\begin{aligned}
 n_v' \left( \frac{1}{r_v} - \frac{1}{s_v'} \right) &= n_v \left( \frac{1}{r_v} - \frac{1}{s_v} \right) \\
 \frac{1}{s_v'} - \sigma_v' &= \frac{n_v' - n_v}{n_v'} \cdot \frac{1}{r_v} + \frac{n_v}{s_v} \\
 d\sigma_v' &= \frac{n_v' - n_v}{n_v'} \Delta\rho_v
 \end{aligned}$$

因为  $\sigma_v \neq$  常数和取决于  $\Delta\rho_v$ 。

根据球差的允许变化量求出曲率的允许变化量  $\Delta\rho_{z.n}$  后，既可以按照公式 (43) 求算按玻璃样板加工的公差，又可以按照公式 (65) 求算玻璃样板的制造公差。

选择不同光学系统的轴向球差的允许变化值是一项复杂的任务，并且需要特种审查。可是具有不大误差时，采用同一的变化值（例如：对观测用物镜和照相物镜来说，取景深的  $1/3 \sim 1/5$  是允许的），此时象质的变坏仍旧不易看出。允许的极限误差当平方相加时，这是单个表面可以取比球差允许的总变化量小  $\left( \text{小至} \frac{1}{\sqrt{p}} \right)$  的值作为变化量，此时根据公式 (23)、(68) 和 (68 a) 求得：

$$\Delta\rho_{\text{光管}} = \frac{2\Delta\delta s'_{\text{光管}}}{\sqrt{p} h_1^2 f'^2} \left(\frac{h_1}{h_v}\right)^4 \frac{1}{dA_v} \quad (69)$$

按照公式(43)和(69)算出:

$$N_{\text{光管}} = \frac{2\Delta\delta s'_{\text{光管}}}{4\sqrt{p} h_1^2 f'^2} \left(\frac{h_1}{h_v}\right)^4 \frac{D_v^2}{dA_v \lambda} \quad (69a)$$

如果取  $\lambda = 0.000555$ , 并且已知: 当  $\varphi' = \frac{1}{f'}$  的  $dA_v$  要比当  $\varphi' = 1$  时的  $dA_v$  小至  $1/f'^2$ , 将它代入公式 (69a), 则求得:

$$N_{\text{光管}} = \frac{900\Delta\delta s'_{\text{光管}}}{\sqrt{p} h_1^2 dA_v} \left(\frac{h_1}{h_v}\right)^4 D_v^2 \quad (70)$$

玻璃样板公差照公式(65)求算。例如, 对双透镜的非胶合物镜来说

$f' = 100$ 毫米	相对孔径 1:3	
$r_1 = 64.42$		D
$d_1 = 6.0$	TK14	35
$r_2 = 39.75$		
$d_2 = 0.1$		
$r_3 = -38.84$		
$d_3 = 2.0$	Φ1	35
$r_4 = -737.87$		

按照公式 (68) 和 (68a) 和  $\varphi' = 1$  算出: 对第一透镜来说,  $dA_1 = 24.4\Delta\rho_1$ ;  $dA_2 = -49.9\Delta\rho_2$  和对第二透镜来说  $dA_1 = 28.96\Delta\rho_1$ ;  $dA_2 = -6.84\Delta\rho_2$ 。如果假定这种透镜用于观测, 并且其放大率不大于  $\Gamma = 8^\times$ , 也就是具有  $f' = 12$  毫米的目镜, 那么, 当球差变化量不大于 0.2 屈光度时,

$\Delta\delta s'_k = \frac{0.2f'_n{}^2}{1000}$  可以认为是允许的, 也就是:

$$\Delta\delta s'_k = \frac{0.2 \times 12^2}{1000} = 0.03 \text{ 毫米}$$

此时

$$N_{1\text{光}} = \frac{900 \times 0.03 \times (1/1)^4}{\sqrt{4 \times (17.5)^2 \times 24.4}} \times (35)^2 = 2.2$$

$$N_{2\text{光}} = 1.1$$

对第二透镜来说,  $N_{1\text{光}} = 1.8$ ;  $N_{2\text{光}} = 8$ 。

玻璃样板公差:

第一透镜的

$$\frac{\Delta r_1}{r_1} = 0.07 \times \frac{2.2}{(35)^2} \times (64.42) = 0.0085\%$$

$$\frac{\Delta r_2}{r_2} = 0.003\%$$

第二透镜的

$$\frac{\Delta r_1}{r_1} = 0.005\% \text{ 和 } \frac{\Delta r_2}{r_2} = 0.4\%$$

在本例中, 如果此观测用物镜在较小的放大率情况下使用 (当  $f'_n$  增长时,  $\Delta\delta s'_k$  增大), 或把允许的球差变化量放大一倍时, 同时在最佳象面装定位置内该变化引起的弥散圆比高斯平面内的小  $1/2$  的话, 那么, 第一和第二透镜的窄公差带  $N_1$  和  $N_2$  可以放宽。球差的变化量可以用波差变化量表示, 或者可以这样说: 根据波差变化量可以确定按照玻璃样板加工的表面公差和玻璃样板的公差。

分析双透镜胶合的观测物镜、非胶合的三透镜和四透镜的观测物镜 (双筒望远镜和大地测量仪的物镜) 以及“特里

普列特 (Триплет)、“英杜斯塔尔”、“塔伊尔(Таир)”和较复杂的照相物镜表明, 所产生的结果按照三角公式计算光线的方法或用电子计算机算出的象差变化量十分吻合。所列出的公式使有可能可靠地确定出复杂光学系统中要求窄公差带的按玻璃样板加工的表面公差和玻璃样板制造公差, 也可以确定具有不引起象质变坏表面的较宽公差。例如: 用 K8 和  $\Phi 1$  玻璃制造的双透镜胶合物镜中按照玻璃样板加工材料为 K8 玻璃的第一透镜的待胶合的表面公差要比加工它与空气相邻的第一表面的公差宽至 100 倍, 而对第二透镜来说, 则宽至 7 倍。制造第二透镜的第二表面可以比第一透镜的第一表面粗糙 (加工精度为其  $1/5 \sim 1/4$ )。如果双透镜物镜制成胶合的, 那么按照玻璃样板加工第一透镜的第二表面的公差要求比加工第一透镜的第一表面的公差小去  $1/2 \sim 3/5$ , 而按照玻璃样板加工第二透镜的第一表面的公差要求比加工第一透镜第二表面的公差小去  $1/6$ 。

对位于离物镜不远的棱镜、保护玻璃和滤光镜来说, 按照玻璃样板加工的公差的给定可与物镜表面相同。对位于象平面附近的上述零件表面 ( $\frac{h_v}{h_1}$  很小) 来说, 则公差为粗略的, 大致与  $\left(\frac{h_1}{h_v}\right)^4$  成比例。

## 20. 光学零件表面偏离正确球面的公差计算

在光学系统中, 光学零件表面对正确球面的偏差导致光学系统和光轴上的象点产生象散现象。这就使象质变坏, 并且使整个视场和通常象质最好的视场中心的分辨率都降低,

故整个象质变坏，容易看得出来。根据光轴上象点的允许象散，在这种象散下，分辨率和象质还没有降低到不允许的程度，可以计算光学零件表面偏离正确球面的公差  $\Delta N$  及其象散。

具有折射率  $n_v$  和  $n'_v$  的两种介质分界面的一个  $v$  表面的光焦度  $\varphi'_v$  为：

$$\varphi'_v = (n'_v - n_v) \rho_v$$

由空气中的薄透镜组成的薄透镜系统的光焦度可以用单个表面的光焦度表示：

$$\varphi' = \sum_{v=1}^{v=k} \frac{h_v}{h_1} \varphi'_v$$

第  $v$  面光焦度的变化量  $\Delta\varphi'_v$  可由该表面曲率  $\rho_v$  的偏差按公式 (59) 来求算，并且对由很多表面组成的系统来说，则按如下公式来算：

$$|\Delta\varphi'| = \sum_{v=1}^{v=k} \frac{h_v}{h_1} \Delta\varphi'_v = \sum_{v=1}^{v=k} \frac{h_v}{h_1} (n'_v - n_v) \frac{\Delta r_v}{r_v^2} \quad (71)$$

当表面对正确球面具有偏差时，两个相互垂直的断面上的曲率差  $\Delta\rho_v$  按公式 (44) 确定。此时对  $v$  表面来说：

$$|\Delta\varphi'_{va}| = (n'_v - n_v) \frac{4\Delta N_v \lambda}{D_v^3} \quad (58a)$$

对由很多表面组成的光学系统来说：

$$\Delta\varphi'_a = \sum_{v=1}^{v=k} \frac{h_v}{h_1} \Delta\varphi'_{va} \quad (71a)$$

式中  $\Delta\varphi'_{v\alpha}$  和  $\Delta\varphi'_\alpha$ ——由第  $v$  表面和系统各表面在二个相互垂直的断面上对于正确球面的偏差所引起的单个表面及由许多表面组成的系统的光焦度差。

另一方面,

$$\begin{aligned}\varphi' &= 1/f'; \quad \Delta\varphi' = -\Delta f'/f'^2 \\ \Delta f' &= -f'^2 \Delta\varphi'\end{aligned}$$

可以采取:  $\Delta f'_\alpha \approx \Delta s'_\alpha$ , 也就是焦距的变化量等于顶焦距和象面位置的变化量。如果焦距的变化是由于曲率半径的变化引起的, 并且是薄透镜系统的话, 这是正确的, 即:

$$|\Delta s'_\alpha| \approx f'^2 \Delta\varphi'_\alpha$$

如果认为光学系统的  $p$  个表面均对光轴上象点的象散  $a_{\tau_0 \text{ 光轴}}$  的形成起相同的作用, 则用均方和计算极限误差, 并且认为:

$$|\Delta\varphi'_{\alpha \text{ 光轴}}| \leq \frac{a_{\tau_0 \text{ 光轴}}}{f'^2}$$

那么在单个表面的部分上可以认为:

$$\begin{aligned}|\Delta\varphi'_{v \text{ 光轴}}| &= \frac{h_v}{h_1} (n'_v - n_v) \cdot \frac{4\Delta N_{v \text{ 光轴}} \lambda}{D_v^2} \\ &\leq \frac{a_{\tau_0 \text{ 光轴}}}{\sqrt{p} f'^2}\end{aligned}$$

由此得出:

$$\Delta N_{v \text{ 光轴}} \leq \frac{D_v^2 a_{\tau_0 \text{ 光轴}}}{4\sqrt{p} \left(\frac{h_v}{h_1}\right) (n'_v - n_v) f'^2 \lambda} \quad (72)$$

如果对黄绿色光线来说, 采用  $\lambda = 0.00056$  毫米, 那么对照相物镜来说得到:



$$\Delta N_{\nu, \text{光野}} \leq \frac{450 D_{\nu}^2 a_{\text{To光野}}}{\sqrt{p} \left( \frac{h_{\nu}}{h_i} \right) (n'_{\nu} - n_{\nu}) f'_{\text{物}}{}^2} \quad (73)$$

对望远系统来说:

$$a_{\text{To光野}} = \frac{f_{\text{目}}{}^2}{1000} a_{\text{To光野照光度}}$$

则各表面的象散公差:

$$\Delta N_{\nu, \text{光野}} \leq \frac{0.450 D_{\nu}^2 a_{\text{To光野照光度}}}{\sqrt{p} \left( \frac{h_{\nu}}{h_i} \right) (n'_{\nu} - n_{\nu}) \Gamma^2} \quad (74)$$

式中  $f'_{\text{目}}$  —— 目镜焦距;  
 $\Gamma$  —— 视放大率;

$a_{\text{To光野照光度}}$  —— 望远镜系统允许的象散 (以屈光度计), 这种象散观测者不会发觉。由公式 (73) 和 (74) 得出结论: 各表面偏离正确球面的公差  $\Delta N$  与表面的直径平方成正比, 与比值  $\frac{h_{\nu}}{h_i}$ 、介质 (表面是其分界面) 的折射率差和照相物镜 (73) 的焦距的平方或望远系统 (74) 的视放大率的平方成反比。这样, 对大直径的表面——“奥里昂”或“鲁萨尔”照相物镜两端的透镜、“捷列马尔”照相物镜最后透镜的表面, 以及比值  $\frac{h_{\nu}}{h_i}$  很小的表面 (望远镜物镜的第二组分、有内调焦观测系统的调焦透镜、分划镜、目镜透镜、离象平面不远处的棱镜折射表面等) 来说, 偏离球面的公差  $\Delta N$  范围是宽的。这种公差可以给予胶合表面, 尤其是与具有玻璃和胶的折射率  $(n'_{\nu} - n_{\nu}) \approx 0.1$  相近似的表面那样宽的范围。但是, 反射面的公差  $\Delta N$  可以是窄范围的 ( $n'_{\nu} - n_{\nu} = 2$  —— 在空气

中和  $n'_2 - n_2 = 3$  ——在玻璃中)。凡按照公式 (73) 和 (74) 计算的各表面公差  $\Delta N$  是宽范围的公差, 这种表面公差在生产中比较容易达到 (例如:  $\Delta N = 1 \sim 2$  或  $\Delta N = -$ )。这些表面不进行公差计算 ( $p$  数减小), 因此, 其他表面的公差还可以稍微放宽些。在光学车间要制造的光学系统中的表面数不多或面数虽多而质量要求并不高的情况下, 最好取各表面对正确球面的极限偏差的算术和, 而不是平方和。

如果假设光学系统中任何一表面对正确球面的偏差应当产生相同的象散, 那么可以引用公式 (75), 以便计算或根据第一表面公差  $\Delta N_1$  快速检验系统的其余全部表面公差  $\Delta N_v$  给定的合理性:

$$\Delta N_v = \frac{h_1}{h_v} \cdot \frac{n'_1 - n_1}{n'_v - n_v} \left( \frac{D_v}{D_1} \right)^2 \Delta N_1 \quad (75)$$

公式 (75) 是根据公式 (73) 和 (74) 求得的, 只要将后者两公式相应地写成为系统的第  $v$  表面和第一表面, 然后用  $\Delta N_1$  来表示  $\Delta N_v$ 。由公式 (75) 只需根据对光学系统图的分析就可确定出表面应当制造成具有窄或宽范围的公差。

就照相物镜而言, 应当采取数值  $a_{\text{视, 光}} = (0.01 \sim 0.02) f'_v / D_p$ , 在这数值下, 还觉察不出物镜的分辨率下降。对观测系统来说, 应当采取数值  $a_{\text{视, 光}} = 0.1 \sim 0.2$  屈光度, 因为观测者视力在出瞳为 4~5 毫米的情况下, 对 0.25 屈光度以下的象散还觉察不出来。

利用公式 (73)、(74) 和 (75), 根据每个表面的作用和 在系统中的位置, 有可能简单但具有足够精确度而无需大量计算来求取每个表面偏离正确球面的公差。

对彼此位于最靠近距离上的两个薄组分组成的系统来

说，公式有些改变。例如，对望远物镜第一组分的透镜表面来说：

$$a_{r_0} = -f_1'^2 \sum_1^k \left( \frac{h_v}{h_1} \right)_1 (n'_v - n_v) \frac{4\Delta N \lambda}{D_v^2} \beta_1^2$$

$$\Delta N_{v,1} = \frac{450 D_v^2 a_{r_0, \lambda, \pi}}{\sqrt{p} \left( \frac{h_v}{h_1} \right)_1 (n'_v - n_v) f_1'^2 \beta_1^2} \quad (76)$$

对第二组分的透镜来说：

$$a_{r_0} = -s_{f'}^{\prime 2} \sum_1^k \left( \frac{h_v}{h_1} \right)_1 (n'_v - n_v) \frac{4\Delta N \lambda}{D_v^2}$$

$$\Delta N_{v,1} = \frac{450 D_v^2 a_{r_0, \lambda, \pi}}{\sqrt{p} \left( \frac{h_v}{h_1} \right)_1 (n'_v - n_v) s_{f'}^{\prime 2}} \quad (77)$$

式中  $\left( \frac{h_v}{h_1} \right)_1$  和  $\left( \frac{h_v}{h_1} \right)_2$  ——相应地用于第一和第二组分的

透镜；通常可以采用  $\left( \frac{h_v}{h_1} \right)_{0,1}$

$\approx 1.0$ ；

$f_1'$  ——第一组分的焦距 ( $f_1' \approx s_{f'}^{\prime 1}$ )；

$\beta_1$  ——第二组分的线放大率；

$s_{f'}^{\prime}$  ——光学系统的第二顶焦距。

在这种情况下，对第一组分透镜表面来说得到较窄范围的（窄 30~40%）公差  $\Delta N$ ，而对第二透镜来说得到比按照公式 (73) 求出的宽出 50~100% 的公差  $\Delta N$ 。

如果系统位于形成象的最靠边的距离上，那么应该将从表面或组分至象的距离代入公式，以代替  $f'$ ， $f_1'$  和  $s_{f'}^{\prime}$ 。

## 公式的应用例

1) 计算  $\Gamma = 6^\circ$  双筒望远镜光学零件各表面偏离正确球面的公差: 物镜直径  $D = 30$  毫米、棱镜通光直径为 20 毫米和目镜透镜通光直径为 10 毫米。对物镜来说,

$$\frac{h_1}{h_1} = \frac{h_2}{h_1} = \frac{h_3}{h_1} \approx 1$$

对棱镜来说:  $\frac{h_4}{h_1} \approx \frac{h_5}{h_1} \approx 0.6$

对目镜透镜来说:  $\frac{h_6}{h_1} = \frac{h_7}{h_1} = 0.4$  (图 6)

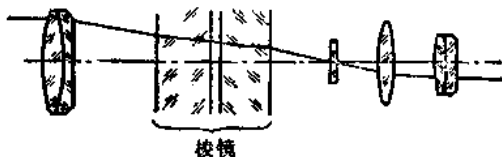


图 6 双筒望远镜光学系统图

胶合表面和分划板表面对正确球面的偏差可忽略不计。双筒望远镜具有总计  $p = 10$  个与空气分界的表面。允许由于各表面偏离正确球面的结果为: 从眼睛观测的一端所产生的象散不大于 0.1 屈光度。

解

按照公式(74), 对物镜来说:

$$\Delta N = \frac{0.450}{\sqrt{10}} \times \frac{(30)^2 \times 0.1}{1 \times 0.5 \times 6^2} \approx 0.6$$

对第一棱镜来说:

$$\Delta N = \frac{0.450}{\sqrt{10}} \times \frac{(20)^2 \times 0.1}{0.5 \times 0.6 \times 6^2} \approx 0.5$$

对第二棱镜来说:

$\Delta N \approx 0.7$  (所指的是棱镜的折射面),

对目镜透镜来说:

$$\Delta N = \frac{0.450}{\sqrt{10}} \times \frac{(10)^2 \times 0.1}{0.5 \times 6^2 \times 1/6} \approx 0.4$$

2) 计算 M50 型照相物镜透镜各表面对正确球面的偏离公差, 该物镜具有  $f' = 52.4$  毫米; 相对孔径 1:3.5; 透镜直径为 16 毫米。

可以采用近似值  $\frac{h_1}{h_1} = \frac{h_2}{h_1} = 1$ ;  $\frac{h_3}{h_1} = \frac{h_4}{h_1} = \frac{h_5}{h_1} = \frac{h_6}{h_1} = \frac{h_7}{h_1} = 0.7$ ; 对胶合面可忽略不计(图 7)。

透镜各表面对正确球面的极限偏差用算术加法; 同时考虑到物镜大批生产的这种情况, 最好完全消除对正确球面偏差的不良配合。



图 7 照相物镜光学系统图

允许象散为  $0.01 \times 3.5 \approx 0.03$  毫米。按照公式(73), 对第一透镜:

$$\Delta N = \frac{450 \times 16^2 \times 0.03}{6 \times 1 \times 0.6 \times 52.4^2} = 0.4$$

对第二、第三和第四透镜来说 (胶合面除外),

$$\Delta N = \frac{450 \times 14^2 \times 0.03}{6 \times 0.8 \times (0.53 \sim 0.61) \times 52.4^2} = 0.3 \sim 0.4$$

对第三透镜的胶合面来说  $\Delta N = -$ , 因为  $n_{玻璃} - n_{胶} = 0.02$ ; 对第四透镜的胶合面来说,  $\Delta N > 2$ , 因为  $n_{玻璃} - n_{胶} = 0.09$ 。

3) 求“捷列马尔7”型望远镜第二组分各表面偏离的公差  $\Delta N_2$ ，如果第一表面的  $\Delta N_1=0.5$  和  $h_{1k}/h_{2k}=2$ ， $D_{1k}=140$ ； $D_{2k}=170$ (图8)。

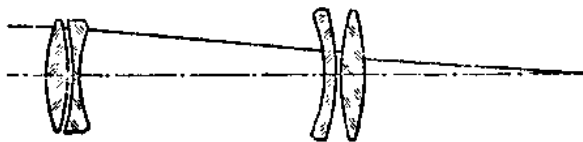


图8 望远镜光学系统图

解

按照公式(75)：

$$\Delta N_2 = 2 \times 1 \times \left(\frac{170}{140}\right)^2 \times 0.5 = 2 \times 1.47 \times 0.5 \approx 1.5$$

就是说该公差要比第一表面的公差范围为宽。

4) 计算天文望远镜的用甲醇胶胶合的 ( $n_D=1.54$ ) 物镜各表面对正确球面的偏差公差，已知： $f'=600$ ；相对孔径1:8；一个零件用K8玻璃制成 ( $n_D=1.5163$ )，其他零件用TФ3玻璃制成 ( $n_D=1.7172$ )，望远镜的放大率为50°。

解

目镜焦距：

$$f'_目 = \frac{f'_物}{\Gamma} = \frac{600}{50} = 12$$

可以认为：在出瞳为  $\frac{600}{8 \times 50} = 1.5$  毫米的情况下，光轴上的点象散为0.1~0.2屈光度时还觉察不出来，也就是：

$$a_{\text{允}} = \frac{\sigma_{\text{允}} \cdot f'_目}{1000} = \frac{(0.1 \sim 0.2) \times 12^2}{1000} = 0.015 \sim 0.03 \text{ 毫米}$$

波差也与此值相符合：

$$l_n = \frac{144 \alpha}{n_{3n}^2} = \frac{144 \times 0.0144}{8^2} = 0.025$$

波差在  $\lambda = 0.1 \sim 0.2$ ，这在瑞利范围是完全允许的，将此值代入公式，求得  $\Delta N_1 = 0.1$ ； $\Delta N_2 = -$ ； $\Delta N_3 = 0.5$ ； $\Delta N_4 = 0.7$ 。

如果假设象散稍放大一些或者在胶合或装配物镜时，以旋转透镜的方法来消除各误差的迭加，公差可稍加放宽至  $\Delta N = 0.15 \sim 0.2$ 。

## 21. 按照玻璃样板加工平面镜和棱镜的公差计算

平面镜和棱镜的反射表面位置通常与系统光轴成大角度。由于这些表面常常不是最理想的平面，系统光轴上点的象质会明显地被象散  $\alpha_r$  所破坏，为了求算与平面有偏差的反射表面所引起的象散值，以及计算按照玻璃样板加工的公差，可以使用云加 (Юнга)

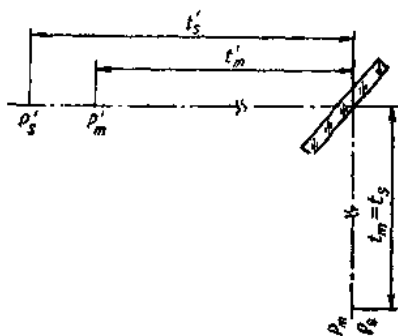


图9 对反射面偏离平面的公差计算

-阿贝公式<sup>●</sup>，这些公式在  $n' = -n = 1$  和  $i' = -i$  (从外反射的球面镜反射，图9)时，简化并得下式：

● 见Фефилов Б. В. Прикладная оптика. М. Изд. геодезич. и картограф. литер., 1947, 532 с. —译者注

$$\frac{1}{t'_m} + \frac{1}{t_m} = \frac{2}{r \cos i}$$

$$\frac{1}{t'_s} + \frac{1}{t_s} = \frac{2 \cos i}{r} \quad (78)$$

经稍加换算之后, 采用  $\frac{1}{r} = \frac{4N\lambda}{D^2}$ ;  $\lambda = 0.00055$ ;  $t_1 = \infty$ ;  $n'_1 = n_2 = n$  (图10) 和已知望远系统的放大率  $\Gamma$  或照相物镜的焦距 (反射面位于望远系统或照相物镜的前面), 按照公式● 求算照相物镜焦面上的以毫米计的象散值或望远系统后面 (眼睛前面) 的以屈光度计的象散值。对照相物镜来说:

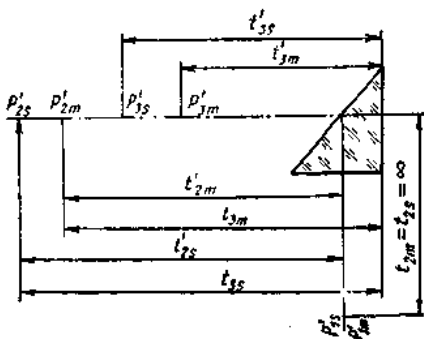


图10 对反射面偏离平面的公差计算

$$\alpha_{\tau_0} = \frac{1}{227} \cdot \frac{nNf_w'^2}{D^2} \sin i \operatorname{tg} i \quad (79)$$

对望远系统来说:

$$\alpha_{\tau_0} = \frac{1}{227} \cdot \frac{nN\Gamma^2}{D^2} \sin i \operatorname{tg} i \quad (80)$$

在给定光轴上象点的允许象散值  $\alpha_{\tau_0 \text{允许}}$  的情况下, 解相反的问题——在这种情况下求反射面偏离平面的允许干涉环

● 见 Мальцев М. Д., Каракулина Г. А. Прикладная оптика оптические измерения. М., «Машиностроение», 1968, 472 с.

——译者注



(光圈)数 $N_s$ ,

$$N_{\text{光}} = \frac{227 D^2 a_{\text{ro,光}}}{n f_{\text{物}}'^2 \sin i \operatorname{tg} i} \quad (79 \text{ a})$$

以上是当目标为无限远时,对位于照相物镜前面的反射面来说的。同样对位于望远系统前面的反射面来说,具有:

$$N_{\text{光}} = \frac{0.227 D^2 a_{\text{ro,光}}}{n \Gamma^2 \sin i \operatorname{tg} i} \quad (80 \text{ a})$$

在公式(79 a)中, $a_{\text{ro,光}}$ 以毫米计,而在公式(80 a)中以屈光度计。

对位于物镜原距离焦面或象面为 $l$ 的反射面来说,按照玻璃样板加工的公差显然应当扩大 $(f_{\text{物}}'/l)^2$ 倍。这样,对位于距象面为 $l$ 的反射面偏离平面的公差来说,应当将 $l^2$ 代入公式(79 a)中,替换 $f_{\text{物}}'^2$ ,同时将 $(l/f_{\text{物}}')^2$ 代入公式(80 a)中,替换 $\Gamma^2$ ,同时选择相应的 $a_{\text{ro,光}}$ 值。

在表5内列有按照玻璃样板加工的某些反射面公差的计算系数。

表5中所列按玻璃样板的反射面的公差计算公式(平面镜或棱镜位于光学系统的前面)如下:

对照相物镜来说:

$$N_{\text{光}} = k_1 \frac{D^2 a_{\text{ro,光}}}{f_{\text{物}}'^2}, \quad k_1 = \frac{227}{n \sin i \operatorname{tg} i}$$

对望远系统来说:

$$N_{\text{光}} = k_2 \frac{D^2 a_{\text{ro,光}}}{\Gamma^2}, \quad k_2 = \frac{0.227}{n \sin i \operatorname{tg} i}$$

对位于系统光轴上的象点的允许象散值,推荐如下:照相物镜的 $a_{\text{ro,光}} \leq (0.01 \sim 0.02) f_{\text{物}}' / D_{\text{max}}$ ,相当于不大于0.01~0.02毫米的弥散圆;望远系统的 $a_{\text{ro,光}} \leq (0.1 \sim 0.2) f_{\text{物}}'^2 / 1000$ 。

表5 按照玻璃样板加工平面镜和棱镜表面的公差计算系数

零件和表面的名称	系 数	
	$k_1$	$k_2$
平面镜 (与光轴成45°角)		
外反射面	321	0.321
内反射面	168	0.168
具有内反射面的平面镜的折射面	350	0.350
具有一个反射面的直角棱镜		
反射面	208	0.208
折射面	70	0.070
具有两个反射面的直角棱镜		
反射面	147	0.147
折射面	70	0.070
道威棱镜		
反射面	30	0.030
折射面	495	0.495
五棱镜		
反射面	660	0.66
折射面	118	0.118

由于平面镜和棱镜的表面与平面的偏差，在后一种情况下允许从眼睛一方有0.1~0.2屈光度的象散（当出射光瞳直径为4~5毫米时）。如果在系统中总共有 $P$ 个表面（反射面和斜折射面），则采用极限偏差平方的加法，每一个表面可以产生小于 $\frac{1}{\sqrt{P}}$ 的象散，对象散影响不灵敏的面可以在总计表面时不予考虑，并且这些表面数不应列入 $P$ 数中去。对象散出现灵敏的反射面的系统来说，应当采用极限偏差的算术加法，因为在很窄的公差情况下通常产生同一符号的极限偏差（边缘“塌边”）。如果光学车间抛光大多数的表面都具有

极限偏差的话，对普通的表面来说，这同样也是正确的。

因为光线以不同角度（不仅成  $45^\circ$ 、 $30^\circ$  或  $60^\circ$  角）入射到同一平面镜上，特别在广角系统中，反射面的不允许的制造误差就能导致象明显变坏，首先是视场边缘那一部分的象变坏，该部分所聚焦的是以大角度角入射到反射面的光线。按照玻璃样板研磨的公差计算，只考虑了光轴上点的象散，如果对视场边缘有可能允许稍微放大一些象散，则对视场边缘来说，也能获得完全满意的效果。必要时也可以考虑对应于视场边缘的、最大的主光线的入射角，同时直接利用公式 (79 a) 和 (80 a)。

如果把外反射面的平面镜表面制造公差  $N_0$  作为一个单位（该平面镜与光轴成  $45^\circ$  角），那么在所有其他不同条件下某些表面的制造允许误差  $N$  可以用下列的数值表示：

各表面的相对精度	$N/N_0$
(1) 平面镜外反射面	1
平面镜内反射面	0.52
具有内反射面的平面镜的折射面	1.09
(2) 具有一个反射面的直角棱镜的反射面	0.65
直角棱镜的折射面	0.22
(3) 具有两个反射面的棱镜表面	0.46
(4) 道威棱镜的反射面	0.09
道威棱镜的折射面	1.54
(5) 五棱镜的反射面	2.05
五棱镜的折射面	0.37

可见应该尽量避免采用与光轴成大角度倾斜的反射面，或者适当地将这种反射面布置在靠近焦面外。工艺上应该消

除这样的偏离平面的现象，即在这种偏差下，光圈沿着短的一边延伸；必须保证获得在重迭玻璃样板时，光圈沿着长边延伸的这样的表面。棱镜的反射面要求比平面镜外表面更精确地制造。使用复杂的可卸的潜望式附加棱镜就会知道，按玻璃样板加工进行较正确的公差计算，需要考虑到允许的视差。如果在系统或零件上具有数个反射或折射表面时，那么为了补偿各个表面的偏差的影响，最好不允许这些表面与平面具有同符号的偏差。

当计算平面镜和透镜的反射面的公差时，必须考虑表面的特征、大小和在系统中的位置以及系统的用途及其特点。只有在上述情况下才能正确计算出公差，再根据此公差挑选玻璃的厚度及牌号，正确选择玻璃的厚度与牌号，对零件加工难易程度的影响有很大关系。此时尚需搞清表面在系统中的作用，并应保证优良的象质。

## 22. 反射面偏离正确球面的公差计算

反射面的平面性偏差，甚至于在正确球面的情况下，也使光轴上的物点产生象散。正确球面偏差（表面的象散性）也同样使光轴上的物点产生象散。根据偏差的性质，后一种象散或被抵消，或与前一种相加。

当光线从外反射球面镜反射时，若  $t_m = t_s = \infty$ ，我们从云加-阿贝公式<sup>●</sup>得出：

$$t'_m = -\frac{r \cos i}{2}, \quad t'_s = \frac{r}{2 \cos i}$$

● 参见109页脚注。——译者注

在物镜的焦面上:

$$x'_s = \frac{f'_0{}^2 n N \cos i}{227 D^2}$$

$$x'_m = \frac{f'_0{}^2 n N}{227 D^2 \cos i}$$

$$N_{r, \text{光圈}} = \frac{227 D^2}{f'_0{}^2 n \cos i} x'_{s, \text{光圈}}$$

$$N_{m, \text{光圈}} = \frac{227 D^2 \cos i}{f'_0{}^2 n} x'_{m, \text{光圈}}$$

由此可以看出, 当  $x'_m = x'_s$  时,  $N_m < N_s$ , 当  $N_m = N_s$  (对光圈来说,  $r_m = r_s$ ) 时, 总是  $t'_m < t'_s$ , 因此  $x'_m > x'_s$ 。为了消除反射面的平面性偏差, 必须保证下列等式:

$$t'_m = t'_s, \quad \frac{r_m \cos i}{2} = \frac{r_s}{2 \cos i}, \quad \frac{r_s}{r_m} = \cos^2 i$$

由此得出:

$$\frac{N_m}{N_s} = \cos^2 i \quad (81)$$

$$\Delta N = N_s - N_m = N_s (1 - \cos^2 i)$$

$$\Delta N = N_s \sin^2 i \quad (82)$$

公式 (81) 表明, 两相互垂直截面上光圈数的关系, 在这种情况下, 没有平面性偏差的表面产生的象散:

$$N_m = N_s \cos^2 i = k_0 N_s$$

$$k_0 = \frac{N_m}{N_s} = \cos^2 i \quad (81 a)$$

某些表面的  $k_0$  系数数值列于表 6。光圈数指的是两相互垂直面上零件的同一直径  $D$ 。

从公式 (81) 及表 6 中得出, 在同一直径的表面上或在

玻璃样板上，光圈沿反射面长侧延伸，即是沿此侧的光圈比沿短侧的光圈数少，在这种情况下，平面性的偏差是较有利的。

表 6 各种表面的系数  $k_0$ 、 $k$  值

表面及零件名称	$k_0 = \frac{N_m}{N_r} = \cos^2 i$	$k = \frac{\Delta N_{\text{允许}}}{N_{\text{允许}}} = \sin^2 i$
反射镜与光轴成 $45^\circ$		
外反射面	0.5	0.5
内反射面	0.85	0.22
有内反射面的反射镜的折射面	0.35	0.36
具有一个反射面的直角棱镜		
反射面	0.5	0.5
折射面	0.25	0.75
具有二个反射面的直角棱镜		
反射面	0.5	0.22
折射面	0.25	0.75
道威棱镜		
反射面	0.056	0.86
折射面	0.50	0.50
五棱镜		
反射面	0.86	0.15
折射面	0.42	0.6

表 6 中的比例（系数  $k_0$ ）应在相应的反射面的图纸上标明。

因为在  $r_m = r_r$  及  $l'_m > l'_r$  时， $x'_m > x'_r$ ，所以在轴上象点为同一允许象散值的情况下，当  $N_r = 0$  时，子午平面上的光带数  $N_m$  少于  $N_m = 0$  时在弧矢平面上的光带数  $N_r$ 。所以光圈的允许歪曲  $\Delta N$  应在  $r_r = \infty$ ， $N_r = 0$ （这样比较有利）条件下根据光轴上象点的允许象散值来计算，而与平面性偏差的计算允许值  $N_{\text{允许}}$  无关（也可根据计算的  $N_{\text{允许}}$  来确定  $\Delta N_{\text{允许}}$ ）。

$$\Delta N_{\text{允許}} = N_{m, \text{允許}} = \frac{227 D^2 \cos i}{n f'^2} \quad a_{r, \text{允許}} = k N_{\text{允許}}$$

$$k = \frac{\Delta N_{\text{允許}}}{N_{\text{允許}}} = \sin^2 i \quad (83)$$

这样，充分利用象散允许值的可能性增大了。在这些条件下计算出来的  $\Delta N$  值，与系数  $k$  成比例，列于表 6 中。

如果  $N_r = 0$ 、 $N_m = k N_{\text{允許}}$ ，则还可以确定弧矢面上的偏差  $N_r$ 。此偏差在  $N_m = N_r \cos^2 i$  以前都是可以的，而且  $\Delta N_m = k N_{\text{允許}}$  或者  $\Delta N_m$  大于  $\Delta N_r$  的  $\cos^2 i$  倍是允许的。光圈数的进一步增大在照相机中受到象点离焦量的限制，在望远系统中受到视差的限制。

对于不同符号（鞍形）的偏差来说，平面性偏差允许值范围很窄，因为在这种情况下  $i'_m$  及  $i'_r$  值的符号不同，象散差增长快，所以鞍形表面偏差是不允许的，因为误差即使很小，但在两个互相垂直的表面上，其符号是相异的，这就会使象质降低到不允许的地步。

由于反射面的正确球面偏差所引起的光轴上点象散允许值  $a_{r, \text{允許}}$  与其平面性偏差所引起的象散允许值是一样的。

图 11 为棱镜 AP-90°（用 K8 玻璃按国家标准 ГOCT 3514-67 制成）的零件图，该棱镜位于望远物镜后面（靠近物镜），图上的附注是：

- (1)  $\otimes_A$ ——镀透光膜 24H 按技术条件……  $\lambda = 520 \pm 30$  毫微米。
- (2) 倒边  $0.3^{+0.4} \times 45^\circ$ ，倒角  $1^{+0.5} \times 45^\circ$ 。
- (3) 毛面涂  $\Theta_M$  漆，按技术条件……。

材料：K8 玻璃，国家标准 ГOCT3514-67。

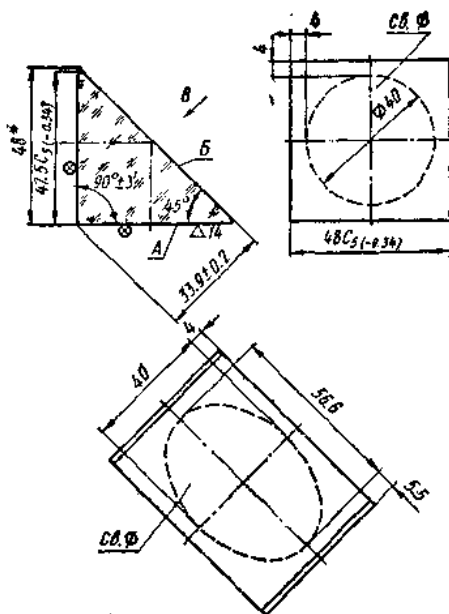


图11 棱镜AP-90°, 该棱镜位于望远物镜之后(靠近物镜)

▽6(▽)	
$\Delta n_D$	2B
$\Delta(n_D - n_C)$	2B
光学均匀性	3
双折射	2
光吸收系数	0
条纹度	1B
气泡度	5Γ
$N_A$	3
$N_B$	0.5
$\Delta N_{A,B}$	0.3
$P_A$	V
$P_B$	W
$\Delta R_A$	2
$\Delta R_B$	1
$\pi$	3'
$\delta_{45^\circ}$	3'
$\epsilon$	3.5°
$f'_{min}$	—
$l$	48

### 23. 关于非球面公差

非球面方程式一般写成  $y^2 = a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \dots$ ，而圆方程式为  $y^2 = 2r_0x - x^2$ 。众所周知，圆周上任何点的曲率半径和曲率是相等的，而且决定于其圆顶的曲率半径，而在非球面上，不同点的曲率半径及曲率是不相等的。所以球面顶部曲率变化时，球面其他点的曲率也发生同样变化；非球面顶部曲率变化时，其他各点的曲率可能发生另外的变化。非球面上不同点的非球面性是不同的，通常是靠零件边缘大一些，这主要决定于方程式的各项，其中包括高次幂的变数  $x$ 。



在一般情况下，方程式的每一项对表面某些部分的非球面性的影响为极大。

球面的  $N_{\text{光}}''$  及  $\Delta N_{\text{光}}''$  项是按一般象差理论的公式决定的，例如，只考虑非球面的球面象差，可以将方程式的系数、各点的曲率半径或整个表面的平均曲率半径等的变化用坐标  $x$  及  $y$  表示，或者用这些点的法线与其计算位置的偏差表示。后面一种表示方法的通用性大一些，因为它既可用于球面，也可用于非球面。法线的允许偏差  $\Delta\alpha''_{\text{光}}''$  按下列公式计算：

$$\Delta\alpha''_{\text{光}}'' = \frac{0.00027N_{\text{光}}''}{D} \times 206265 = \frac{55N_{\text{光}}''}{D}$$

或者

$$\Delta\alpha''_{\text{光}}'' = \frac{0.00027\Delta N_{\text{光}}''}{D} \times 206264 = \frac{55\Delta N_{\text{光}}''}{D}$$

式中  $D$ ——观察  $N$  或  $\Delta N$  处的直径，但是公差  $\Delta\alpha''$  要简单些（必要时根据  $\Delta\alpha''$  可求  $N_{\text{光}}''$ 、 $\Delta N_{\text{光}}''$ 、 $\Delta x$ 、 $\Delta y$ ），无复杂计算，可按该元件的分辨率来决定。例如，与空气接触的望远物镜表面，其法线偏差（球面或非球面）可这样来决定：

例如  $f' = 500$ ； $1:10$ ； $\varphi'' = \frac{120''}{50} \approx 2.5''$ ，用法线计算位置

的偏差不应使光路偏差大于允许值的  $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{5}$ ，即是说，

$\Delta\varphi''_{\text{光}} = 0.5''$ ，因此对于玻璃为 K8 的透镜来说，在  $n_D = 1.5163$  时， $\Delta\alpha''_{\text{光}} = \Delta\varphi''_{\text{光}} / (1.5163 - 1) = 1''$ ，而对于玻璃为

TΦ1 的透镜，当  $n_D = 1.6475$  时， $\Delta\alpha''_{\text{光}} = \frac{0.5''}{1.6475 - 1} = 0.77''$ 。

如果在物镜结构中还有 K8 玻璃的调焦透镜，其所在位

置使光束有效截面的直径等于 20 毫米，那么就得出下列值：

$$\varphi'' = \frac{120''}{20} = 6'' \text{ 及}$$

$$\Delta\alpha_{\text{光}} = \frac{6''}{5 \times 0.5163} = 2.2''$$

反射物镜的球面镜的公差  $\Delta\alpha'' = \frac{\Delta\varphi''_{\text{光}}}{n' - n} = \frac{\Delta\varphi''_{\text{光}}}{2}$  要比折射面的窄。

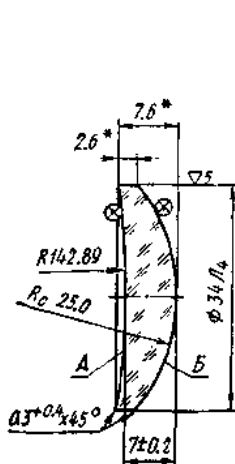


图12 第二面为非球面的聚光镜的零件图

▽14(▽)

$\Delta n_D$	3 B
$\Delta(n_F - n_C)$	2 B
光学均匀性	5
双折射	4
光吸收系数	1
条纹度	2 B
气泡度	4 Γ
$N_1$	5
$\Delta N_A$	2
$N_B, \Delta N_B$	(**)
$c$	0.05
$P_A$	IV
$P_B$	V
$\Delta R_A$	3
$\Delta R_B$	(**)
$f'$	47.87
$s_F$	-42.65
$s'_F$	48.7 ± 0.3
$ce \cdot \phi_A$	26.2
$ce \cdot \phi_B$	28.1

例如，对于望远镜中反射物镜的主要反射镜（直径  $D = 1000$  毫米）， $\Delta\alpha_{\text{光}} = \frac{120''}{5 \times 1000 \times 2} = 0.0012''$ 。检验直径 250 毫米表面上的  $\Delta N$  时得出：

$$\Delta N_{\text{光}} = \frac{250 \times 0.0012''}{206265 \times 0.00027} = 0.006$$

检验直径 1000 毫米表面时,  $\Delta N = \left( \frac{1000}{250} \right)^2 \times 0.006 = 0.1$   
(公差范围很小)。

对于照相物镜 ( $f' = 100$ , 相对孔径 1:2 及  $R = 100$   
线对/毫米,  $n = 1.5163$ ),

$$\Delta \alpha_{\text{光}}'' = \frac{1 \times 206265}{100 \times 100 \times 5 \times 0.5163} \approx 8''$$

在 8 个表面的情况下, 可以采取  $\Delta \alpha_{\text{光}}'' = 3'' \sim 4''$ 。

如果认为物镜的球面制造精确, 对于非球面可以采用  
 $\Delta \alpha_{\text{光}}'' = 6'' \sim 10''$ , 对于焦距长的系统来说, 公差范围应该小  
一些, 与焦距成反比。对于不同的接收装置的物镜, 允许极  
限应该根据允许的弥散圆来决定。例如, 在  $f' = 100$ , 相对  
孔径 1:2 及弥散圆为 0.1 毫米时,  $\Delta \varphi_{\text{光}}'' = \frac{0.1 \times 206265}{5 \times 100}$   
 $= 40''$  及  $\Delta \alpha_{\text{光}}'' = 1' \sim 1.5'$  (表面数不多时)。对聚光镜来说,  
公差可能还要大一些。

图 12 为非球面聚光镜 (ЛК5 玻璃, 国家标准 ГОСТ  
3514-67) 的零件图。图上的附注是:

- (1)  $\otimes_A$ ——镀透光膜 44P, 43P, 按技术条件……,  
 $\lambda = 560 \pm 20$  毫微米;  
 $\otimes_B$ ——镀透光膜 43P, 按技术条件……,  $\lambda = 560$   
 $\pm 30$  毫微米。

(2) 毛面涂  $\Theta_M$  漆, 按技术条件……。

(3) 非球面 B: 母线的方程式:  $y^2 = 2px = 50x$ 。工艺  
等级 Кп-Н1; 非球面性  $\Delta = 0.46$ ; 最小弥散圆  $dk < 0.08$  毫  
米; 参数误差  $\Delta p = \pm 0.1\%$ , 局部误差  $\alpha < 5.4'$ 。\* 参考  
尺寸。

## 24. 光学零件表面的光洁度

望远系统及其他光学系统光学零件表面光洁度的公差在国家标准 ГСОТ11141-65《光学零件表面光洁度》中已有规定。在国家标准备注中有关于望远系统及其他光学系统零件表面光洁度等级的选择规定，这些规定应该遵循。

对观察光学仪器，如望远镜、显微镜等，如果没有别的级别选择根据，可以按光学零件表面有效孔径来决定其光洁度等级。所谓有效孔径是指进入系统的轴向光束所遮盖的光学零件表面积，这一光束从目镜中出来时形成的直径为2毫米，如果瞳孔直径小于2毫米时，等于瞳孔直径的平行光束(图13)。

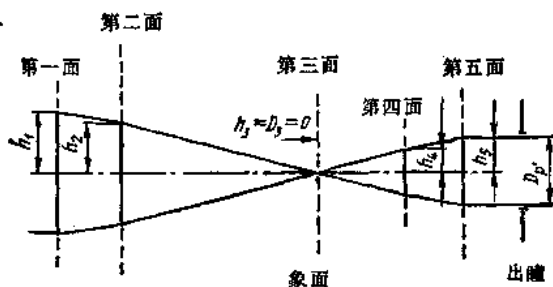


图13 望远系统光洁度等级的选择

表面的有效孔径按下列公式计算：

$$D_n = \frac{4h_n}{D_p'} \quad (\text{在 } D_p' > 2 \text{ 毫米时})$$

$$D_n = 2h_n \quad (\text{在 } D_p' \leq 2 \text{ 毫米时})$$

式中  $D_n$ ——系统中第  $n$  表面的有效孔径；

$h_0$ ——同一表面上轴向光束的边缘光线的投射高度  
(光学系统计算时决定);

$D_p'$ ——光学系统的出瞳直径。

按计算出来的有效孔径,从表7中选出光洁度等级。

表7 光洁度等级的选择

有效孔径(毫米)	光洁度等级	主要使用范围
0	PI-10 PI-20 PI-40	位于成像平面上的零件表面
0.5 以下	PI	不位于成像平面上的零件表面
0.5~1.5	PI	
1.5~4.5	PII	
4.5~10	PIV	
10~25	PV	
25~50	PVI	
50 以上	PVII	

## 25. 棱镜角度公差计算

反射棱镜主要用来改变视轴方向,改变象的形状——完全或不完全转换。光学系统中棱镜及棱镜组放置在物镜镜前或镜后——分划板之前或分划板与目镜之间。棱镜的制造误差为: 1) 外形尺寸误差; 2) 角度制造误差; 3) 平面制造误差(平面性和球面性偏差)。

外形尺寸误差导致象和视场的缩小,棱镜中光程的缩短和增长。后面这种情况会使望远镜中分划板不与物镜焦平面重合(棱镜位于物镜与分划板之间)。外形尺寸偏差允许值相当大,可根据具体情况来决定。棱镜玻璃牌号的改变会产

生同样的影响。在该光学玻璃牌号等级范围内折射指标的偏差对象质、焦面位置、视场大小及遮光等无影响。所以在简单瞄准镜及潜望镜里（放大率小于4<sup>\*</sup>）折射率及色散指标的偏差不应规定。对于高级望远镜的棱镜来说，其棱镜的作用已在计算时考虑，所以，所用玻璃的折射率及色散指标的偏差不低于3~4级。玻璃的不均匀性及应力大大降低仪器的分辨率。光吸收减少仪器的透光度，特别当棱镜中光程长的时候更是这样。但是为了降低成本，对于放大倍数不大或无放大作用、或距成象平面近的棱镜，可以利用均匀性4~5级、应力3~4级、光吸收1~3级的玻璃。对于望远镜的棱镜，应该采用折射率、色散、均匀性，应力均为2~3级，光吸收1~2级的玻璃。这样的等级对于制造棱镜的玻璃K8、BK6、BK10及K19是容易保证的。

棱镜位置误差使象与光轴错位，使双筒镜的筒轴线不平行，或者使象倾斜和出现双象。

分光镜由两个棱镜胶合而成，有时要用同一炉号、同一退火号的玻璃制成。如果不这样的话，复合棱镜（立方体）就与理想棱镜（立方体——平面平行板）及楔形镜等效，对于棱镜来说，折射角决定于各组成棱镜的折射指标差（例如， $\Delta n = 0.0020$ 时，等效棱角为5'）。

**棱镜角度公差** 有角度偏差的棱镜不再是反射镜和双面平行玻璃板的当量棱镜，而是反射镜和楔形镜的等效棱镜，从而出现彗差和象散。但更有意义的是出现视轴与计算方向的偏差和色差。我们来看一看设计得到的正确的棱镜，即光线入射和出射角均相同（沿法线）的棱镜。入射和出射两法线之间的夹角就是角度无误差的棱镜的光轴（入射光的）偏

转角。如果要使入射面的法线与出射面的法线相重合，必须将入射法线顺时针方向转动，这样的偏转角是正值。在研究任一棱镜时，可以轻易地求出与入射和出射面法线间的夹角和光轴位置有关的棱镜角度。但是棱镜角度有误差时，光轴（视线）不是沿法线，而是和它成某一角度投射到出射面上，这一角度的大小与棱镜角度误差值和结构有关。轴向光线投射到出射面的角度，将棱镜展开后就能轻而易举的求出，它也决定了角度有误差的等效棱镜的楔形镜的角度，色差就是由这一角度引起的。空气折射角与法线偏离正确位置的角度加在一起，就是棱镜出射光线与其正确方向的偏差角度。首先来研究一下入射和出射面与光轴相垂直的棱镜。

**具有单反射面的直角棱镜 ( $AP-90^\circ$ )** 当棱镜角度无误差时，棱镜内光线的偏差与折射面之间的夹角是相等的， $\omega = \gamma$ 。就是由这一角度决定入射和出射面法线之位置。入射和出射面法线之间夹角的偏差，在棱镜角有误差时，等于  $\gamma$  角与计算值的偏差值 ( $90^\circ$ )，即  $\Delta\omega = \Delta\gamma$ ，光线在出射面上的入射角  $i_3 = -(\alpha - \beta) = -(\Delta\alpha - \Delta\beta)$  (图 14)。因为角度小，所以在空气中  $i'_3 = ni_3 = -n(\Delta\alpha - \Delta\beta)$ 。如果直角  $\gamma$  没有误差， $i_3$  就可以决定光线正确方向的偏差，因为出射面法线处于  $\gamma$  角，与  $90^\circ$  差  $\Delta\gamma$ ，所以光线在角度无误差的棱镜中偏离其方向的数值为：

$$\Delta\omega = \Delta\gamma - n(\Delta\alpha - \Delta\beta) \quad (84)$$

当  $\Delta\gamma$  的符号与角差相反时，锐角差  $\Delta\alpha - \Delta\beta$  不变，光线偏差  $\Delta\omega$  达到最大值。

应该立刻注意到角  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  误差作用的差别。由角  $\alpha$

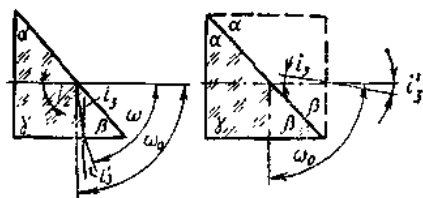


图14 棱镜AP-90°及其展开图

及 $\beta$ 之差得出光线在出射面上的投射角——楔形角，棱镜等效楔形角是由角 $\alpha$ 与 $\beta$ 的误差形成的，它说明色散作用，因为出射面的光线角度在折射后 $i_3' = -n(\Delta\alpha - \Delta\beta)$ 取决于玻璃折射指标。如果没有锐角误差，或锐角差等于零，误差 $\Delta\gamma$ 表明视线（光线）的偏差值。因此，如果根据允许色散来计算棱镜锐角的允许偏差，而直角偏差 $\Delta\gamma$ 根据视线允许偏差来计算，并考虑到 $\Delta\gamma = -(\Delta\alpha + \Delta\beta)$ ，那么就可以决定棱镜所有角度的公差。

如果入射角不垂直于光轴，从棱镜出来的光线角为 $i_3$ ，其起始方向为：

$$i_3 = -\frac{i_1}{n} - (\Delta\alpha - \Delta\beta) = -\left[\frac{i_1}{n} + (\Delta\alpha - \Delta\beta)\right]$$

式中  $i_1$ ——入射面的投射角；

$i_3$ ——出射面的投射角。

空气中光线沿出射面法线的角度：

$$i_3' = -(i_1 + n(\Delta\alpha - \Delta\beta))$$

如果直角的误差为 $\Delta\gamma$ ，出射光线的角度为：

$$i_3' = \Delta\gamma - [i_1 + n(\Delta\alpha - \Delta\beta)]$$



其方向为棱镜角无误差的棱镜中的方向。如果光线沿棱镜入射面的法线投射，这个公式就正确。显然，出射和入射光线之间的角度不是  $90^\circ$ ，而是  $\Delta\omega = \Delta\gamma - (i_1 + i_2) - n(\Delta\alpha - \Delta\beta)$ 。若让此式等于零，射入和射出的光线相互垂直。这样就可以决定光线沿入射面法线的角度，在这种情况下，光线从有角度误差的棱镜中射出时与其原始方向垂直，即在校正棱镜时决定棱镜的偏转角，以便保持视线方向。

$$i_1 = \frac{\Delta\gamma - n(\Delta\alpha - \Delta\beta)}{2} \quad (85)$$

所有这些既适用于望远镜物镜前的棱镜，也适用于望远镜物镜后的棱镜。例如，求放大倍数  $\Gamma = 30\times$  望远镜物镜前置棱镜各角的公差。为了看得清楚，将棱镜展开。展开后得棱镜入射和出射面法线之间直角的偏差：

$$\omega_0 = \gamma; \quad \Delta\omega_0 = \Delta\gamma$$

棱镜展开楔形角  $\theta = \Delta\alpha - \Delta\beta$ ，因为  $\theta = \alpha - \beta$ 。

视线正确方向的偏差  $\Delta\omega = \Delta\gamma - n(\Delta\alpha - \Delta\beta)$ 。

棱镜各角误差所产生的、以角度表示的色差为：

$$\Delta\omega_{FC} = (n_F - n_C)(\Delta\alpha - \Delta\beta) = \frac{(n - 1)(\Delta\alpha - \Delta\beta)}{v} \quad (86)$$

如果认为人眼看不出的色差（以角度表示）不大于  $2'$ ，对于 K8 玻璃的棱镜来说：

$$(\Delta\alpha - \Delta\beta) = \frac{2'v}{(n - 1)\Gamma}$$

$$(\Delta\alpha - \Delta\beta) = \frac{2' \times 64.1}{0.5 \times 30} = 8.5'$$

对于优质望远镜来说，如果不希望色差大于  $1'$ ，这一

公差应减小  $1/2$ 。如果系统中的棱镜数为  $m$ ，各角差的允许值减到  $1/\sqrt{m}$ 。 $90^\circ$  的公差  $\Delta\gamma$  可以在校正时，根据得出视线正确位置棱镜的允许偏转角度  $i_1$  来决定。如果认为

$$i_{1zm} = 10' \leq -\frac{\Delta\gamma - n(\Delta\alpha - \Delta\beta)}{2}$$

那么  $\Delta\gamma \leq 2i_{1zm} + n(\Delta\alpha - \Delta\beta) = 2 \times 10' + 1.5163 \times 8.5' = 32.8'$ 。即是说，公差范围是比较宽的。可以轻而易举地把公差限制在  $\Delta\gamma \leq 10'$  范围内。

如果棱镜位于物镜后，距焦平面的距离为  $l$ ，那么预先规定视线对分划板中心的允许位移或棱镜在校正时的允许偏转值就能计算棱镜各个角度的公差。而  $45'$  角差的允许值是根据允许色差来决定。例如，对于  $f'_a = 15$  毫米的望远镜来说，人眼看不出的色差等于  $1'$ ，角差的允许值这样来计算：在物镜焦平面上的线性值（毫米）：

$$\Delta L'_{FC} = l \frac{\Delta\omega_{FC}}{3438} = l \frac{(n-1)(\Delta\alpha - \Delta\beta)}{3438v}$$

而角度值（在人眼一侧）：

$$\Delta\omega_{FC} = \frac{\Delta L'_{FC} \times 3438}{f'_a} < 1'$$

由此得出：

$$(\Delta\alpha - \Delta\beta) \leq \frac{1' \times v f'_a}{(n-1)l}$$

对于  $l = 100$  毫米、 $f'_a = 15$  毫米、 $v = 64.1$ 、 $n - 1 = 0.5163$  的玻璃来说：

$$(\Delta\alpha - \Delta\beta) < \frac{1' \times 64.1 \times 15}{100 \times 0.5163} \approx 18'$$

公差范围大，容易达到。如果校正棱镜的允许偏转值为 $10'$ ，正如上所述，可以决定直角公差。计算棱镜的角度公差到现在为止一直认为棱镜没有尖塔差 $\pi$ 。

棱镜的尖塔差，即折射面的棱与斜面的不平行度，使视线在主截面的垂直平面上发生偏差，其偏差角为：

$$\omega_s = 2n \cdot \cos \alpha \cdot \Delta Y_s \quad (87)$$

色差为：

$$\omega_{FCs} = \frac{2\Delta Y_s \cdot \cos \alpha \cdot (n-1)}{v} \quad (88)$$

棱镜角误差及尖塔差产生的总光轴偏差为：

$$\Delta \omega'_0 = \sqrt{\Delta \omega^2 + \Delta \omega_s^2}$$

色差为：

$$\Delta \omega_{FC} = \sqrt{\Delta \omega_{FC}^2 + \Delta \omega_{FCs}^2}$$

因为尖塔差和角差在两相互垂直平面上使视线产生偏差和色差。所以误差的作用是互相影响的，而每一误差只产生一部分视线的允许偏差和色差。如果将这些误差取均方和，则

$$\Delta \omega_s = \Delta \omega = \sqrt{\frac{\Delta \omega_{总角}}{2}}$$

$$\Delta \omega_{FCs} = \Delta \omega_{FC} = \sqrt{\frac{\Delta \omega_{FC总}}{2}}$$

**二个反射面的直角棱镜（BP-180°）** 入射及出射面法线之间的夹角是常数，即 $\omega = 180^\circ$ 。由于棱镜角度有误差，出射面不与视线垂直，与法线的偏差等于楔形角，角度有误差的棱镜与此角度是等效的。棱镜（图 15）展开后得出：

$$i_3 = \alpha + \beta - \gamma; \quad i'_3 = n i_3 = n(\alpha + \beta - \gamma) \\ = n(\Delta\alpha + \Delta\beta - \Delta\gamma).$$

三角形三个角的总和等于  $180^\circ$ ，所以  $\Delta\gamma = -(\Delta\alpha + \Delta\beta)$  和  $i'_3 = -2\Delta\gamma$ ； $i_3 = -2n \cdot \Delta\gamma$ 。因为入射和出射面的法线位置是固定的，不取决于棱镜的角度误差，所以角  $i'_3$  同样等于角度无误差的棱镜中视线偏离其正确方向的值，即：

$$i'_3 = \omega = -2n \cdot \Delta\gamma \quad (89)$$

出射面光线角  $i_3$  值取决于棱镜玻璃折射率，所以这一角对不同颜色的光线是不同的，即直角的非允许偏差会导致象的不允许色差：

$$\omega_{FC} = 2(n_F - n_C) \cdot \Delta\gamma = \frac{2(n - 1) \cdot \Delta\gamma}{v} \quad (90)$$

这样，棱镜各个角的公差应根据允许色差或视线允许偏差来计算。视线允许偏差在双目镜中会引起双筒轴线的不平行。

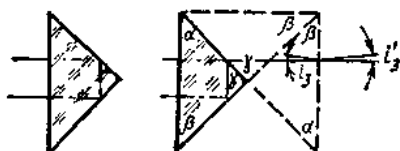


图15 棱镜EP-180°及其展开图

双目镜中的棱镜经常位于物镜的后焦面前。例如，物镜的焦距  $f'_0 = 120$  毫米， $f'_n = 20$  毫米，棱镜距焦面  $l = 20$  毫米，棱镜角误差所产生的望远镜双筒轴线不平行度  $\Delta'$  按下式决定：

$$\Delta' = \frac{2n \cdot \Delta\gamma l}{f'_0}$$

如果物镜方向的  $\Delta' = 2'$  (这相当于目镜方向的  $12'$ )，望远镜中有四个棱镜 (其中两个距物镜较近)，其误差可能积累，直角偏差可按下列公式决定：

$$\Delta\gamma = \frac{\Delta' f'_w}{2nl\sqrt{p}}$$

在我们的例子中

$$\Delta\gamma = \frac{2' \times 120}{\sqrt{4} \times 1.5 \times 20} = 4'$$

如果在装配时选配棱镜，可以消除误差积累，这一公差就可增大到  $6' \sim 8'$ 。制造棱镜时其锐角公差可采用  $10'$ 。如果只按允许色差来计算，所得出的公差比较宽。例如，棱镜后的色差为：

$$\Delta\omega_{FC} = 2\Delta\gamma(n_F - n_C) = \frac{2(n-1)\Delta\gamma}{v}$$

而在焦面上为 (以线值表示)：

$$\Delta L'_{FC} = \frac{l\Delta\omega_{FC}}{3438}$$

在目镜后为 (以角度表示)：

$$\Delta\omega'_{FC} = 3438 \times \frac{\Delta L'_{FC}}{f'_E} = \frac{2(n-1)\Delta\gamma l}{vf'_E} \quad (91)$$

假设人眼观察不出的色差 (以角度表示) 不大于  $1'$ ，则得出  $\Delta\omega_{FC} \leq 1'$  及

$$\Delta\gamma \leq \frac{\Delta\omega_{FC} \cdot v f'_E}{2(n-1)l} \quad (92)$$

对于我们的例子来说， $\Delta\gamma \leq \frac{1 \times 64.1 \times 20}{2 \times 0.5163 \times 20} = 64'$  ——

公差范围较宽。所以  $90^\circ$  角的公差应根据装配条件——双目

望远镜两筒轴线的允许不平行性来计算。如果棱镜位于望远镜物镜前，公式(91)中用  $f'_0$  代替  $l$ ，那时

$$\Delta Y_{\text{塔}} = \frac{\Delta \omega_{\text{塔}} v}{2(n-1)\Gamma} \quad (92a)$$

尖塔差  $\Delta Y_{\text{塔}}$ ，即两面夹角  $90^\circ$  的棱与斜面的不平行度的作用，与直角误差一样，只作用于与棱镜主截面成法向的平面上，引起视线的偏差，数值大时，产生色差。在与主截面成法向的平面上视线的偏差按关系式  $\Delta \omega_{\text{塔}} = 2n \cdot \Delta Y_{\text{塔}}$  决定。棱镜在没有尖塔差  $\Delta Y_{\text{塔}}$  的情况下展成楔形镜，其角  $\theta_{\text{塔}} = 2\Delta Y_{\text{塔}}$ ，其主截面与棱镜主截面成法向。尖塔差所产生的象色差为：

$$\Delta \omega_{\text{FC塔}} = 2\Delta Y_{\text{塔}}(n_F - n_C) = \frac{2\Delta Y_{\text{塔}}(n-1)}{v} \quad (93)$$

$90^\circ$  角及尖塔差误差共同产生的视线偏差为：

$$\Delta \omega_0 = 2n \sqrt{\Delta Y^2 + \Delta Y_{\text{塔}}^2}$$

而象的色差  $\Delta \omega_{\text{FC塔}} = \frac{2(n-1)}{v} \sqrt{\Delta Y^2 + \Delta Y_{\text{塔}}^2}$

尖塔差公差应与棱镜的直角公差相同。

从两个反射面的直角棱镜的例子中可以看到直角误差对视线偏差的影响，即对  $\Delta \omega = 2n \cdot \Delta Y$  的影响。如果光路不是先经过第一面，而后经过第二面，而是相反，先经过第二面，然后经过第一面，那么我们就得到屋脊棱镜的光程——即在其与屋脊棱面或法向的主截面上光线的偏差要加大一倍，即  $\Delta \omega = 4n \cdot \Delta Y$ 。如象在屋脊棱镜中那样，视线角为  $\varphi$ （在直角棱镜中  $\varphi = 45^\circ$ ，在屋脊五角棱镜中  $\varphi = 22.5^\circ$ ），那么先投射到第一面、后射到第二面或反之的光线的非平行性值（加一倍）为：

$$\Delta\omega_{\text{pr}} = 4\pi \cdot \Delta\gamma \cos\varphi \quad (94)$$

**道威棱镜 (长型, AP-0°)** 这种棱镜类似于具有一个反射面的直角棱镜; 不同之处在于光线入射到第一表面的角度不等于零, 而是  $45^\circ$ 。

此棱镜与具有一个反射面的棱镜(图 16)为同样的展开图。出射面对计算情况的偏差——入射面和出射面法线之间的角度  $i_3 = \Delta\alpha - \Delta\beta$ ; 该

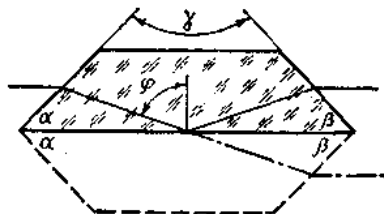


图16 道威棱镜AP-0°及其展开图

角度符合于和具有角度误差的棱镜相等效的楔形镜的角度。利用公式●求光线对正确方向的偏差角(光线在无角度误差的棱镜中的情况), 如果入射角为有限的角度, 那么用此公式可求得光线入射到具有小折射角的楔形镜的偏差角为:

$$\delta = \alpha \left( n \frac{\cos i_1'}{\cos i_1} - 1 \right)$$

改用我们的符号时, 为:

$$\Delta\omega = \left( n \frac{\cos i_1'}{\cos i_1} - 1 \right) (\Delta\alpha - \Delta\beta) \quad (95)$$

光线入射至第一表面的角度  $i_1 = 45^\circ$ 。

对 K8 玻璃来说, 比值  $\frac{\cos i_1'}{\cos i_1} = 1.25$ ; 而对 BK10 玻璃来说  $\frac{\cos i_1'}{\cos i_1} = 1.262$ , 此时  $\Delta\omega = 0.90i_3 = 0.90(\Delta\alpha - \Delta\beta)$  和  $\Delta\omega = 0.98(\Delta\alpha - \Delta\beta)$ 。相应于 K8 玻璃和 BK10 玻璃, 象的

● 见 Тулсовский А. И. Теория оптических приборов. Том 1. М. -Л. Изд. АН СССР, 1948, 662 с. —译者注

色差角为：

$$\Delta\omega_{FC} = (n_f - n_c)(\Delta\alpha - \Delta\beta) = (n - 1)(\Delta\alpha - \Delta\beta) \frac{1}{v} \quad (96)$$

并且正好得出  $\Delta\omega = 0.90(\Delta\alpha - \Delta\beta)$  和  $\Delta\omega = 0.98(\Delta\alpha - \Delta\beta)$ 。

根据瞄准线的偏差和允许色差（并且这种偏差在校正棱镜时转动棱镜就能易于消除），可以求出棱镜角度的公差。

具有角度误差的棱镜所造成的色差可以按照下列公式较精确地求算：

$$\Delta\omega_{FC} = \frac{\cos i'_1}{\cos i_1} (\Delta\alpha - \Delta\beta)(n_f - n_c) \quad (97)$$

或

$$\Delta\omega_{FC} = \frac{n - 1}{v} \cdot \frac{\cos i'_1}{\cos i_1} (\Delta\alpha - \Delta\beta) \quad (97a)$$

此公式易于由基本公式（95）求得。

绕棱镜的中心线旋转棱镜引起的象转动（倾斜），象倾斜角度要比旋转棱镜时的转动角度大出一倍。根据这些条件可以规定出棱镜相互位置的公差，如果给定了象倾斜公差的话。尖塔差  $\Delta\gamma_s$ ——斜面各折射棱的棱的不平行度——本文中叙述得较不充分，因为光线——瞄准线以大角度  $\varphi = 72^\circ$  与斜面相交。与主截面成法线方向的平面上的光线偏差为：

$$\Delta\omega_s = 2n\Delta\gamma_s \cos \varphi = 0.94\Delta\gamma_s \quad (98)$$

色差为：

$$\begin{aligned} \Delta\omega_{FCs} &= 2(n_f - n_c)\Delta\gamma_s \cos \varphi = 0.62 \times \frac{n - 1}{v} \Delta\gamma_s \\ &= 0.005\Delta\gamma_s \quad (\text{对K8玻璃而言}) \quad (99) \end{aligned}$$

如果棱镜同时具有尖塔差和角度误差的话，这些误差应



当均方相加，而且误差的影响应当采取彼此相等的。这样，允许的尖塔差或角度差值应为总允许色差或瞄准线偏差值的0.71。

**五棱镜 (БП-90°)** 研究棱镜的展开图(图17)和棱镜中光线的光路后得出结论：入射面和出射面的法线之间的角度  $\omega = \gamma$ 。角度的误差为  $\Delta\omega = \Delta\gamma$ 。出射面上入射光线和出射面法线之间的角度为：

$$i_4 = -\frac{\gamma - \beta}{2} + \beta - \frac{\gamma - \beta}{2} = 2\beta - \gamma = 2\Delta\beta - \Delta\gamma$$

出射光线与出射面法线之间的角度

$$i'_4 = ni_4 = n(2\Delta\beta - \Delta\gamma)$$

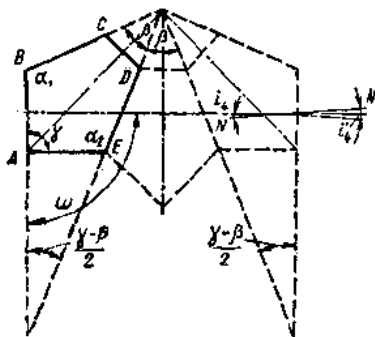


图17 五棱镜БП-90°  
的展开图

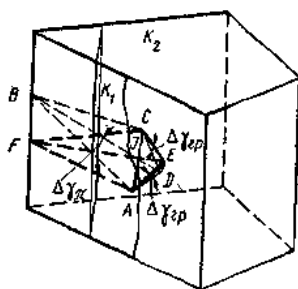


图18 对棱镜БП-90°尖塔  
差公差计算

假定五棱镜无误差，与出射面法线成的角度

$$\Delta\omega = i'_4 + \Delta\gamma = n(2\Delta\beta - \Delta\gamma) + \Delta\gamma$$

或

$$\Delta\omega = 2n\Delta\beta - (n - 1)\Delta\gamma \quad (100)$$

这样，等效楔形镜的角度最后等于  $i_4 = \theta = 2\Delta\beta - \Delta\gamma$ ，

光线与其正确射向的角度为  $\Delta\omega = 2n\Delta\beta - (n-1)\Delta\gamma$ 。色差为：

$$\Delta\omega_{fc} = (2\Delta\beta - \Delta\gamma)(n-1)/v \quad (101)$$

当公式 (100) 和 (101) 两项的作用相同时，根据瞄准线的允许偏差或允许色差求算棱镜角的公差。例如，如果五棱镜位于放大率  $\Gamma = 30^\circ$  的观测物镜的前面，同时假定色差不超过角度  $1'$ ，眼睛观察不出的话，那么棱镜角度的公差用下式来求：

$$\Delta\omega_{fc} = \frac{2\Delta\beta(n-1)}{v} - \frac{\Delta\gamma(n-1)}{v} \leq \frac{\Delta\omega'_{fc}}{\Gamma}$$

可以计算

$$\frac{2\Delta\beta(n-1)}{v} = \frac{\Delta\gamma(n-1)}{v} \leq \frac{1}{\sqrt{2}\Gamma}$$

$$\Delta\beta = \frac{v}{2(n-1)\sqrt{2}\Gamma} = \frac{61.1}{2 \times 0.5163 \times 1.41 \times 30} = 1.5'$$

$$\Delta\gamma \leq \frac{v}{\sqrt{2}\Gamma(n-1)} = \frac{61.1}{1.41 \times 30 \times 0.5163} = 2.94' \approx 3'$$

得出比较窄的公差。

分析公式 (100) 和 (101) 表明，角度  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  的偏差，既不影响光线的光路又不影响象的色差；直角和反射面之间  $45^\circ$  角的误差对瞄准线的位置和象的色差发生影响。

**尖塔差——五棱镜折射面和反射面的不平行度** 图 18,  $K_1$  和  $K_2$ ——反射面 (反射镜)，反射面之间成  $\angle 45^\circ = \angle AFC$ ;  $ABCD$ ——光线入射到反射面与反射面的棱成角度

$\Delta Y_s$ , 当具有尖塔差时, 以其折射面的棱为法线的平面部分;  
 $AFCE$ ——反射面的棱为法线的平面部分;

$$\operatorname{tg} \Delta Y_s = \frac{BF}{JF}, \quad \operatorname{tg} \Delta Y_{rp} = \frac{ED}{EC}, \quad FJ \cong JE = \frac{FC}{\cos 22.5^\circ}$$

$$JE = FC \operatorname{tg} 22.5^\circ \times \sin 22.5^\circ; \quad FJ = FC \cos 22.5^\circ$$

$$\frac{JE \operatorname{tg} \Delta Y_s}{EC} = \frac{JE \operatorname{tg} \Delta Y_s}{FC \operatorname{tg} 22.5^\circ} = \operatorname{tg} \Delta Y_{rp}$$

式中  $\Delta Y_{rp}$ ——面法线与光线入射平面 (与折射平面垂直) 之间的角度。经过置换之后得出:

$$\operatorname{tg} \Delta Y_{rp} = \frac{FC \operatorname{tg} 22.5^\circ \times \sin 22.5^\circ \times \Delta Y_s}{FC \operatorname{tg} 22.5^\circ} = \Delta Y_s \sin 22.5^\circ$$

即

$$\Delta Y_{rp} = \Delta Y_s \sin \frac{AFC}{2}$$

因为角  $\Delta Y_s$  和  $\Delta Y_{rp}$ ——很小。在单个反射面时, 尖塔差对光线出射方向的影响 (与正确位置相比较) 为:

$$\begin{aligned} \Delta \omega_1 &= 2 \Delta Y_{rp} \cos \frac{AFC}{2} = 2 \Delta Y_s \sin 22.5^\circ \times \cos 22.5^\circ \\ &= \Delta Y_s \sin 45^\circ \end{aligned}$$

式中  $\frac{AFC}{2}$ ——光线入射到反射镜面的角度。

对两个反射镜面来说, 光线的偏差角  $\Delta \omega_2 = 2 \Delta Y_s \times \sin 45^\circ = \sqrt{2} \Delta Y_s$ 。因此, 光线偏离其正确射向形成上述角度, 同时入射至出射折射面, 也就是角度  $\Delta \omega_2 = \theta = \sqrt{2} \Delta Y_s$  就是楔形角, 具有尖塔差的棱镜原来是与此楔形角等效的。当光线从玻璃中出射至空气中时, 光线与出射面法线成角度  $\Delta \omega_s = \sqrt{2} n \Delta Y_s$ , 因为在棱镜中此光线与法线成角度 (入射角)  $\Delta \omega_2$

$=\sqrt{2\Delta Y_n}$ 。与具有尖塔差误差的棱镜等效的楔形镜具有角度  $\theta_n = \sqrt{2\Delta Y_n}$  和色差  $\Delta\omega_{FCn} = \sqrt{2\Delta Y_n(n_F - n_C)}$  或  $\Delta\omega_{FCn} = \frac{\sqrt{2\Delta Y_n(n-1)}}{v}$ 。

共同地都具有棱镜角度误差时，瞄准线的偏差为：

$$\Delta\omega = \sqrt{[2n\Delta\beta - (n-1)\Delta Y]^2 + (2n\Delta Y_n)^2}$$

和色差为：

$$\Delta\omega_{FC} = (n_F - n_C) \sqrt{(2\Delta\beta + \Delta Y)^2 + (2\Delta Y_n)^2}$$

或

$$\Delta\omega_{FC} = \frac{n-1}{v} \sqrt{(2\Delta\beta + \Delta Y)^2 + (2\Delta Y_n)^2}$$

给定允许值  $\Delta\omega$  和  $\Delta\omega_{FC}$  并且采用角度和尖塔差误差的影响彼此相等时，可以求算棱镜的角度公差和尖塔差。

**菱形棱镜 ( $BC=0^\circ$ )** 从图 19 展开图和菱形棱镜中光线光路的研究中得出结论：

$$\begin{aligned} i_4 &= \alpha + \theta_{2,3} - \beta = \Delta\alpha + \theta_{2,3} - \Delta\beta \\ &= (\Delta\alpha - \Delta\beta) + \theta_{2,3} \end{aligned}$$

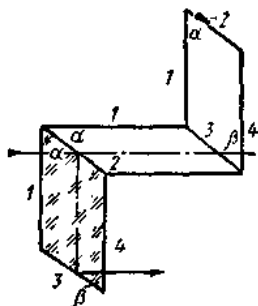


图19 菱形棱镜  $BC=0^\circ$  及其展开图

式中  $i_4$  —— 光线入射到出射面的角度 (与具有角度误差的棱镜等效的楔形镜角度);

$\alpha, \beta$  —— 棱镜锐角;

$\theta_{2,3}$  —— 边 2, 3 的不平行度。

无角度误差的棱镜中, 入射面和出射面的法线之间的角度等于零;  $\omega_0 = 0$ ; 在无角度误差的棱镜中, 上述角度  $\Delta\omega = \theta_{1,4}$  等于边 1, 4 的不平行度。从棱镜中射出的光线与出射面法线之间的角度为:

$$i'_4 = n i_4, \text{ 也就是 } i'_4 = n [(\Delta\alpha - \Delta\beta) + \theta_{2,3}]$$

光线与正确射向的偏差:

$$\Delta\omega = -\theta_{1,4} + [(\Delta\alpha - \Delta\beta) + \theta_{2,3}] n \quad (102)$$

在最坏的情况下:

$$\Delta\omega = \theta_{1,4} + [(\Delta\alpha - \Delta\beta) + \theta_{2,3}] n \quad (102 a)$$

具有角度误差的棱镜所造成的色差:

$$\begin{aligned} \Delta\omega_{FC} &= [(\Delta\alpha - \Delta\beta) + \theta_{2,3}] (n_F - n_C) \\ &= \frac{n - 1}{\nu} [(\Delta\alpha - \Delta\beta) + \theta_{2,3}] \end{aligned} \quad (103)$$

因而, 锐角的差数和反射棱镜彼此不平行造成色差; 仅仅这些值也应当被公差所限制。已知允许色差的情况下, 就可求出棱镜的角度公差。

**尖塔差** 如果把棱 3-4 与棱 1-2 的不平行度当作尖塔差, 再用字母  $\Delta_1$  和  $\Delta_2$  相应地表示它的话, 那么尖塔差的影响可以与倾斜成角  $\Delta_1$  的反射镜 (光线以  $45^\circ$  角入射至该镜) 的影响一样, 并且和具有角  $\Delta_2$  的楔形镜 (该镜的主截面与棱镜的主截面成垂直) 的影响一样地求算。此时与具有尖塔差  $\Delta_1$  和  $\Delta_2$  的棱镜中主截面成垂直的平面中光线的偏差为:

$$\Delta\omega_c = 2n\Delta_1 \cos 45^\circ + (n-1)\Delta_2$$

而色差为:

$$\begin{aligned} \Delta\omega_{FC} &= (n_F - n_C)(2\Delta_1 \cos 45^\circ + \Delta_2) \\ &= (2\Delta_1 \cos 45^\circ + \Delta_2) \frac{n-1}{\nu} \end{aligned} \quad (104)$$

应当将由于尖塔差引起的光线偏差和色差与由于角度误差产生的光线偏差和色差均方相加。根据象的允许色差或瞄准线的偏差，同时在尖塔差和角误差的影响为相同的情况下，可以求出尖塔差和角误差的公差。

**屋脊棱镜的双象** 研究具有双反射面的直角棱镜时，查明了光射至棱镜第一面的、然后经过屋脊面射至第二面的轴向光线，以及与此光线反向通过棱镜的轴向光线，他们计算的方向偏差为:

$$\Delta\omega = 4n\Delta Y \cos \varphi \quad (105)$$

式中  $n$  —— 棱镜玻璃的折射率;

$\Delta Y$  —— 屋脊角误差;

$\varphi$  —— 光线入射至屋脊棱的角度。

由于屋脊与直角的偏差  $\Delta Y$  引起象的色差为:

$$\Delta\omega_{FC} = \frac{4\Delta Y \cos \varphi (n-1)}{\nu}$$

当屋脊直角公差是经过计算获得必要的那种严格公差情况下，象的色差是觉察不出的，根据允许的公差用肉眼也看不出双象。

直角屋脊棱镜和五棱镜应用最广。对于用 K8 玻璃制的直角棱镜来说，双象为:

$$\Delta\omega = 4n \cos 45^\circ \Delta Y = 4.29 \Delta Y \quad (105a)$$

用同样的玻璃对五棱镜来说:

$$\Delta\omega = 4n \cos 22.5^\circ \Delta Y = 5.62\Delta Y \quad (105b)$$

用其它牌号的玻璃对直角棱镜来说:

$$\Delta\omega = 2.83n\Delta Y \quad (105c)$$

用其它牌号的玻璃对五棱镜来说:

$$\Delta\omega = 3.70n\Delta Y \quad (105d)$$

棱镜可以位于观测物镜之前,或在焦面与物镜之间。可以计算觉察不出双象的屋脊角公差。如果棱镜位于观测物镜之前,当双象在角度  $\Delta\omega \leq 1'$  下用肉眼或在角度  $\Delta\omega \leq 3'$  下用精度不高的仪器就能被看出来。当观测物镜放大率为  $\Gamma$  的话,要看不出双象,此时屋脊角公差为  $\Delta Y$ :

$$\Delta Y \leq \frac{1'}{4n\Gamma \cos \varphi} \quad (106)$$

直角棱镜的  $\Delta Y \leq 1/4.29\Gamma$  和五棱镜的  $\Delta Y \leq 1/5.62\Gamma$ 。假使棱镜位于照相物镜之前,此时焦面内的双象线性值应不超过此照相物镜的许可范围  $\Delta l' = 0.01 \sim 0.02$  毫米,即

$$\frac{\Delta\omega' f'_*}{3438} \leq 0.02$$

或

$$\Delta\omega' \leq \frac{0.02}{f'_*} \times 3438$$

则

$$\Delta Y \leq \frac{0.02 \times 3438}{4nf'_* \cos \varphi} \quad (106a)$$

如果棱镜位于物镜之后,则屋脊角的公差应当根据焦面内允许的,且肉眼觉察不出的双象来计算。如果从屋脊棱镜至出射面的距离为  $l_1$  和从棱镜的出射面至焦面的距离为  $l_2$  (距离按光轴方向计算)(图 20),那么在焦面内的线性位移(双象)

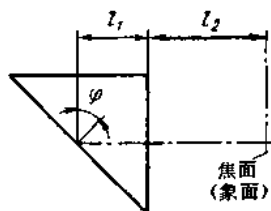


图20 AxP-90°屋脊棱镜

$$\Delta l' = \Delta \omega' \left( \frac{l_1}{n} + l_2 \right) \times \frac{1}{3438}$$

为使肉眼看不出双象，必须使

$$\frac{\Delta l'}{f'_n} \leq \frac{1}{3438}$$

即

$$\frac{\Delta \omega' (l_1/n + l_2)}{3438 f'_n} < \frac{1}{3438}$$

代入  $\Delta \omega$  值后得出：

$$\frac{4 n \cos \varphi \Delta Y \left( \frac{l_1}{n} + l_2 \right)}{3438 f'_n} \leq \frac{1}{3438}$$

及

$$\Delta Y \leq \frac{f'_n}{4 n \cos \varphi \left( \frac{l_1}{n} + l_2 \right)}$$

例如，当  $l_1 = 15$ ， $n = 1.5163$ ， $f'_n = 15$ ， $\varphi = 45^\circ$ ， $l_2 = 30$  时，得出  $\Delta Y = \frac{15}{4.29 n} = 5.24''$ ——屋脊角公差，公差带

小，但这种要求不算高。



## 26. 光学系统透镜表面的中心偏差

球面曲率中心偏离总光轴，称为该表面中心偏差。装配、试验和计算的经验表明，复杂光学系统透镜表面中心偏差的不良影响在于光轴上象点出现彗差，因轴上点比轴外点的成象质量好，对非广角光学系统的装配缺点，在观察轴上点象质时较明显。在这些光学系统内，研究表面中心偏差对点在系统光轴上成象质量的影响会受到限制。在非强光力广角物镜中，中心偏差引起象的场曲以及象散、色差、倍率和畸变的改变。采用计算通过系统（此系统各表面交替产生中心偏差）足够的光线的方法，确定象差的改变。这种精确的方法需要消耗大量时间。虽然用电子计算机能加速问题的解决，但不可能常用这样方法来研究每个面的中心偏差的影响。

当存在表面中心偏差时，得到的轴上象点，它是一个看得见的轴对称的、模糊的点象，而且比无中心偏差系统的点象要大。有中心偏的光学系统（图 21a）内的衍射环与基环不对称，由各个环段到基环的距离不一样，由中心到第一环的最大距离  $A$  大于同心系统衍射图（图 21b）内的同样距离。在此方向上分辨率减小，而与其垂直时，在较好的情况下无变化。由于象散造成光轴上的彗差。当  $A > a$ （图 21a）时，垂直条带分辨率坏一些，而水平条带无变化。当  $A = a$ （图 21b）时，垂直条带与水平条带同样清晰。因为一个方向的图案条纹比经过定心的条纹分辨率要差，所以表面中心偏差会降低分辨率。当中心差较大时，点象也会出现单向着色的衍射环，所以对具有较大中心偏差系统的点象及被观察目标来说，如同具有小折射角的棱镜系统一样，会产生明显

形状的中心偏差。

Г. Г. 斯柳萨列夫 (Слюсарев) 研究了会聚光束中棱镜的彗差, 并提出子午彗差的计算公式如下:

$$\delta g'_k = -\frac{3}{2} \cdot \frac{n^2 - 1}{n} \alpha \alpha \omega^2 \quad (107)$$

并证明彗差值与主光线投射到棱镜上的角度无关 (值的标志见图 22)。

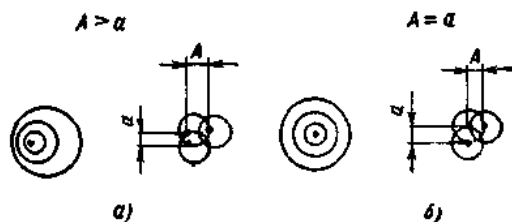


图21 光学系统内点的折射象  
a) 有中心偏差; b) 无中心偏差。

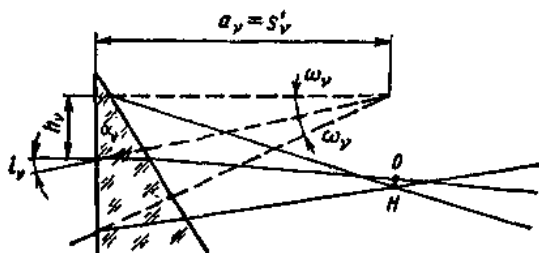


图22 表面定中心的公差计算

稍经换算后, 公式 (107) 可以用来计算中心偏差的公差。

取  $\omega_v = \frac{h_v}{s'_v}$ , 则  $s'_v \omega_v^2 = h_v^2 / s'_v = h_v^2 \alpha'_v$

对象平面的一个面:

$$\delta g'_v = -\frac{3}{2} \cdot \frac{n_v^2 - 1}{n_v} \alpha_v \frac{h_v^2}{s'_v}$$

系统象平面内具有中心偏差的第  $v$  面的彗差为下述值:  
透镜表面后的楔形镜

$$\delta g'_k = -\frac{3}{2} \cdot \frac{n_v^2 - 1}{n_v} \alpha_v h_v^2 \sigma'_v \beta_{k+1}^k \quad (108)$$

透镜表面前的楔形镜

$$\delta g'_k = -\frac{3}{2} \cdot \frac{n_v^2 - 1}{n_v} \alpha_v h_v^2 \sigma_v \beta_k^k \quad (109)$$

因为  $\alpha_v = \frac{c_v}{r_v}$  或者  $\alpha'_v = 3438 \cdot \frac{c_v}{r_v}$  ( $\alpha_v$ ——楔形角, 具有

中心偏差表面的旋转角;  $c_v$ ——中心偏差;  $r_v$ ——表面曲率半径), 所以按公式 (108) 及 (109) 可以算出每个有中心偏差的表面在系统焦面上的彗差或者根据允许的彗差计算出中心偏差。

对于系统的每一个表面来说, 用计算近轴光线的光路可以确定光线与每个面相交的高度, 以及由此面至成象的距离  $s'_v$ , 该象点是由包括第一面到我们确定中心偏差影响的这个面之间各个表面形成。根据计算出的值  $3(n^2-1)/2n$ ;  $h_v$ ;  $s'_v = 1/\sigma'_v$  及取  $\alpha'_{k+1}$  确定这个面在象平面内因中心偏差引起彗差, 再把这个彗差值乘以从所研究的这个面到最后面 (包括最后面) 的系统线放大率  $\beta_{k+1}^k$ , 得到最后实际象面上的彗差值。将得到的彗差与允许值比较后, 检查定心公差给定的正确性。根据肉眼或摄影乳胶分辨率确定的允许彗差值如果已知的话, 也能算出定心的公差, 以使彗差不致由于表面有中心偏差而超过允许界限范围, 由于中心偏差而产生的彗差

不应超过第一个衍射环的半径是较为正确的。在这种情况下，象质的降低在观察系统及普通照相系统内尚不明显。

对于胶合面或光胶面不采用折射率的绝对值而采用相对值——一个透镜相对另一个透镜或粘胶物 ( $n_{\text{相对}} = n_{i+1}/n_i \approx 0.9 \sim 1.2$ ) 或取差数  $(n_i^2 - 1)/n_i - (n_{i+1}^2 - 1)/n_{i+1}$  代替  $(n^2 - 1)/n$ ，代入公式。对于胶合面此乘数比空气界面小  $2/3 \sim 4/5$ 。在计算时，必须使光线落到透镜表面前或后的楔形镜位置上有较大的会聚度。确定保证严格定中心偏差的灵敏面是非常重要的。中心偏差不仅视光学零件的制造而定，在很大的程度上还要视镜框结构和装配方法而定。

以计算内调焦水平仪镜头的表面定心公差为例。

#### 例 1 镜头的结构参数

$$f' = 253.05; \quad 1:7.2; \quad 2\omega = 1^\circ; \quad h_1 = 17.5;$$

$$r_1 = 98.63$$

$$d_1 = 6.8 \quad \text{K8}$$

$$r_2 = -62.23$$

$$d_2 = 0.06$$

$$r_3 = -62.646$$

$$d_3 = 3.5 \quad \Phi 2$$

$$r_4 = -246.6$$

$$d_4 = 117.5$$

$$r_5 = -113.24$$

$$d_5 = 2.0 \quad \text{K8}$$

$$r_6 = -113.24$$

$p$ ——对中心偏差灵敏的表面数。此处取  $p = 6$ ，原来可取  $p = 4$ ，因为第五和第六表面对中心偏差不灵敏。

通过对镜头进行近轴光线光路的计算，进一步得到必须的  $s'_v$  及  $s_{v+1}$ ：

$v$	1	2	3	4	5	6
$s'_v$	289.66	73.22	422.22	157.23	73.58	60.15
$s_{v+1}$	282.86	73.16	418.72	39.72	71.58	—

由于中心偏差而允许的彗差：

$$\delta g'_k = r_s = \frac{f'/D_p}{1470} = \frac{1}{1470} \times \frac{f'}{D_p}$$

$$\frac{\delta g'_k}{\sqrt{p}} \approx \frac{3}{2} \times \frac{n_v^2 - 1}{n_v} \times \frac{c_v}{r_v} h_v^2 \sigma'_v \beta_{v+1}^k$$

$$k_v = \frac{3}{2} \times \frac{n_v^2 - 1}{n_v} h_v^2 \sigma'_v \beta_{v+1}^k$$

或

$$k_v = \frac{3}{2} \times \frac{n_v^2 - 1}{n_v} h_v^2 \sigma_v \beta_v^k$$

$$c_v = \frac{r_s \delta g'_k}{\sqrt{p} k_v} = \frac{r_s}{1470 \times (D_p/f') \sqrt{p} k_v}$$

$$c'_v = 3438 \frac{c_v}{r_v}$$

计算列表如下：

$v$	$h_v$	$h_v^2$	$\frac{3}{2} \cdot \frac{n_v^2 - 1}{n_v}$	$\sigma'_{v+1} f'$ ( $\sigma_v f'$ )	$\beta_{v+1}^k$ ( $\beta_v^k$ )	$k_v f'$	$c_v$	$c'_v$
1	17.5	306.25	1.285	0.87	1.32	455.08	0.11	3.33
2	17.08	291.73	1.285	3.456	3.372	4369.15	0.007	0.39
3	17.06	291.04	1.497	3.456	3.372	5077.92	0.006	0.33
4	16.92	286.29	1.497	1.607	1.556	1080.28	0.115	1.59
5	4.28	18.32	1.285	6.368	1.274	191.05	0.30	9.08
6	4.16	17.31	1.285	4.20	1.0	93.57	0.612	18.51

从表内可见，镜头的外表面必须准确地定心，且第四面比第一面准确，镜头内表面亦要求很准确地定心——隔圈的厚度差不超过 0.01 毫米。第三个调焦透镜的表面不要求准确地定心。

光学零件在其制造时可以扩大定心公差，为了提高成像质量，在装配校正时（在透镜与镜框胶粘，滚压，用密封胶胶合时），或者在透镜与镜框一起定心后，进行镜框配合处加工时，保证透镜定心。在这种情况下，在镜框结构中，不允许各个组分用螺纹连接及由于固定而产生的应力传到光学零件的斜棱上。

具有最大光焦度（最小的焦距）的单个表面或前述几个表面的和是对中心偏敏感的面，此时  $k_2\sigma'_i\beta'_{i+1}$  或  $\sigma'_i$  为最大。

上面的方法并不要求大量的计算工作便能得出满意的结果（特别是对于非广角系统）。光学系统的生产中，过去很少研究而又被忽视的表面中心偏差的公差计算问题很重要。考虑到系统中的各个表面对其中心偏差的灵敏度，应该拟定保证透镜定心的镜框结构，及其制造工艺，因为结构及工艺常常保证不了透镜的定中心，所以透镜的中心偏差成为返修废品及象质低的常见原因。

**例 2** 计算“佐尔基”相机用的“英杜斯塔尔 50”型照相镜头表面的中心偏差，该镜头  $f' = 52.52, 1:3.5, 2w = 45^\circ$ 。

**结构参数:**            材料             $n_D$             公式

$$r_1 = 17.10$$

$$\begin{aligned}
 d_1 &= 2.8 \quad \text{TK14} \quad 1.6130 & c_{v, \text{эф}} &= \frac{r_v}{1470 \frac{D_p}{f'} \sqrt{p} k} \\
 r_2 &= \infty & &= \frac{r_v}{1470 \frac{1}{3.5} \sqrt{8} k} \\
 d_2 &= 4.0 & &= \frac{r_v}{1188 k} \\
 r_3 &= -33.57 \\
 d_3 &= 1.10 \quad \text{ПФ5} \quad 1.5749 & c'_{v, \text{эф}} &= \frac{c_{v, \text{эф}}}{r_v} \\
 r_4 &= 14.56 & & \times 3438 = \frac{3.86'}{k} \\
 d_4 &= 5.05 & & \\
 r_5 &= 346.7 & k &= -\frac{3}{2} \times \frac{n_v^2 - 1}{n_v} \\
 & & & \times h_v^2 \sigma'_v \beta_{v+1}^k \\
 d_5 &= 1.20 \quad \text{ОФ1} \quad 1.5294 & \beta_{v+1}^k &= \frac{n_{v+1}}{n_v} \\
 & & & \times \frac{s'_{v+1}}{s_{v+1}} \dots \frac{s'_k}{s_k} \\
 r_6 &= 15.0 & h_1 &= 7.5 \\
 d_6 &= 0.02 \quad \text{甲醇胶} \quad 1.5200 \\
 r_7 &= 15.0 \\
 d_7 &= 4.30 \quad \text{TK14} \quad 1.6130 \\
 r_8 &= -23.60
 \end{aligned}$$

镜头近轴光线光路的计算结果:

	v	1	2	3	4
	$s'_v$	45.13	26.23	56.15	-93.67
	$s_v$		42.23	22.23	55.05
	$s'_v/s_v$		0.622	2.525	1.72
$\beta_v^k = \frac{s'_v}{s_v} \dots \frac{s'_k}{s_k}$			1.172	-1.883	0.745
	v	5	6	7	8
	$s'_v$	-177.26	-169.28	-540.78	43.68
	$s_v$	-98.72	-178.46	-169.30	545.08
	$s'_v/s_v$	1.798	0.944	3.195	0.0802
$\beta_v^k = \frac{s'_v}{s_v} \dots \frac{s'_k}{s_k}$		0.433	0.241	0.256	

公差计算见下表:

v	$h_v$	$h_v^2$	$\frac{3}{2} \frac{n_v^2 - 1}{n_v}$	$\sigma'_v$ ( $\sigma_v$ )	$\beta_{v-1}^k$ ( $\beta_v^k$ )	k	$c_v$ 用毫米计	$c'_v$
1	7.5	56.25	1.483	0.0222	1.874	3.469	0.004	0.8
2	7.02	49.25	1.483	0.0381	1.874	5.210	—	0.73
3	5.95	35.38	1.401	0.045	1.874	4.179	0.007	0.7
4	5.83	34.01	1.401	-0.0187	1.173	1.045	0.012	2.8
5	6.15	37.77	1.307	-0.0101	0.435	0.217	1.345	13.3
6	6.19	38.24	0.030	-0.0059	0.390	0.0026	4.850	14.80
7	6.19	38.29	0.138	-0.0059	0.390	0.0121	0.104	24.0
8	6.24	38.90	1.483	0.0229	1.0	1.321	0.015	2.18

第一透镜的两个面定心要求最高, 其次是第二透镜的第一和第二面(稍不严格)以及第四透镜的第二面。

例3 计算双筒望远镜的物镜定心公差:

$$f' = 123.0; 1:4; 2w = 8' 30'; \Gamma = 6'$$



结构参数:

$r_1 = 72.95$

$d_1 = 6.6 \quad \text{BK4} \quad 1.5302 \quad 60.5$

$r_2 = -49.20$

$d_2 = 2.8 \quad \Phi 2 \quad 1.6164 \quad 36.6$

$r_3 = -230.1$

单面中心偏差允许的彗差值:

$$\delta g_{k1} = \frac{\delta g_k'}{\sqrt{2P}} = \frac{0.00271}{\sqrt{6}} = 0.0011$$

$$c_{\text{光}} = \frac{\delta g_k' r_v}{A_v h_v^2 \sigma_v' \beta_{v+1}^k}; \quad A_v = -\frac{3}{2} \cdot \frac{n_v^2 - 1}{n_v}$$

$$\frac{h_v}{h_1} = \frac{s_2'}{s_1'} \cdot \frac{s_3'}{s_2'} \cdots \frac{s_v'}{s_{v+1}'}$$

$$\beta_{v+1}^k = \frac{n_{v+1}}{n_k} \cdot \frac{s_{v+1}'}{s_v'} \cdots \frac{s_k'}{s_k}$$

物镜近轴光线的计算结果:

v	1	2	3
$s_v'$	210.54	281.06	117.92
$s_v$	$-\infty$	203.94	278.26
$s_v'/s_v$		1.378	0.423
$\beta_v$		0.583	

公差计算见下表:

v	$h_v$	$h_v^2$	$\frac{3}{2} \cdot \frac{n^2 - 1}{n}$	$\sigma_v'$	$\beta_{v+1}^k$	$\frac{h_v^2 \sigma_v'}{\beta_{v+1}^k}$	k	$c_{v\text{光}}'$	$\alpha_{v\text{光}}'$
1	15.0	225.0	1.315	0.00475	0.583	0.622	0.818	0.099	4.7
2	14.52	211.0	1.496	0.00356	0.423	0.318	0.476	0.131	9.2
3	14.40	207.0	1.496	0.00848	1.0	1.758	2.630	0.111	1.7

因此，可以确定透镜在制造时及镜头装配时的定心公差，每一个面为0.1毫米。

## 27. 某些光学系统的镜框结构

试验证明，镜头及照相物镜提交检验后，可修废品返修的主要原因是透镜的中心偏差及保证空气间隔不够，降低了象质及分辨率。除了透镜在其制造中产生的中心偏差外，透镜在系统装配时还会由于镜框结构上的缺点而使定心变得困难。镜框结构上的误差常常不仅由于设计师工作中的保守，没有更多地考虑镜框结构，也由于对光学系统的特点及系统的镜框缺少经验和知识。结构设计师既不清楚应该最准确地保证空气隙，也对系统各表面应很精确地定心不够了解。后者，光学设计师亦有责任，他们不参加镜框结构设计，认为这项工作与己无关，不关心也不帮助结构设计师了解光学系统的特点（这些特点就是对象差改变敏感的空气隙及对中心偏差敏感的表面）。光学设计师在自己的图纸上通常对所有的空气隙及所有的系统表面标注一样的公差。问题的复杂性还在于，有时对系统还未充分研究过，结构设计师就已在拟定系统的镜框。如果结构设计师经验少，而且他以前没有接触过类似的系统，则在拟定全面合理的镜框结构以及镜框部件的公差时，会碰到很大的困难。在此阶段，重要的是要了解到，即便是没有关于空气隙对改变象差和透镜表面对中心偏差的敏感度的详细资料，亦应做出足以确定镜框结构特点的正确结论，为此目的可以应用下列规则。

对于中心偏差敏感的那些表面或透镜组来说，其值：

$$h_v^2 \sigma'_v \prod_{v+1}^k \beta_v, \quad h_v^2 \sigma_v \prod_v^k \beta_v,$$

(接近  $h_v^2 \sigma'_v = \frac{h_v^2}{s'_v}$ ,  $h_v^2 \sigma_v = \frac{h_v^2}{s_v}$ ) 和其他

表面的这些值相比较为最大。这条规则可以简言为：那些对不同心差敏感的表面或者在这些面以前的表面有最大的光焦度（最小的焦距）。在所列的值中  $h_v$ ——轴向光线与第  $v$  表面相交的高度； $\sigma'_v = 1/s'_v$  或  $\sigma_v = 1/s_v$ ——在第  $v$  面后或前的轴向

光线的会聚度， $\prod_{v+1}^k \beta_v$  或  $\prod_v^k \beta_v$ ——第  $v$  面后或包括第  $v$  表

面的线性放大率。关于透镜个别组分及组合可以重复这个规则。

在空气隙后面的透镜面轴向光束相交在最小高度处，其会聚度最小，也就是上述所有透镜面的光焦度不大（例如，摄远镜头各透镜组分间的空气隙，对称镜头及“英杜斯塔尔”、“特里普列特”、“尤皮捷尔”镜头的中间的（第二）空气隙），这样的空气隙对象差变化是不敏感的。对象差改变敏感的是那些空气隙，其中光线会聚度或所有前述表面的光焦度最大（例如，摄远镜头“捷列马尔”或双分离物镜的第一组分，或较复杂的望远镜的物镜和照相物镜的组分，它们的透镜间的空气隙，“英杜斯塔尔”、“特里普列特”、“尤皮捷尔”镜头内的第一空气隙），在拟定光学系统镜框的结构时应该利用这些规则。

这样一来，如果设计师能成功地设计出保证准确表面定

心及空气隙不变的镜框的话，可以认为他自己的任务完成了。在这种情况下，镜框应该是工艺性良好的，制造上无特殊困难。

图 23~34 为某些光学系统的轴向光路图，设计此轴向光路仅有正、负透镜上的光路知识是不够的，还必须提出关于表面对中心偏差及空气隙对改变象差的敏感度的意见。



图23 双胶物镜光路图

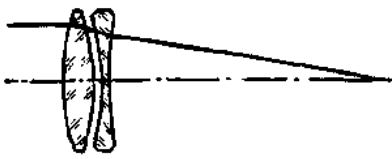


图24 双分离物镜光路图

望远镜的双胶物镜(例如测地仪器(图23))镜头的第二外表面对中心偏差敏感，而第一外表面对敏感度较弱；火石玻璃透镜的胶合面敏感度较小，冕牌玻璃透镜更小。

测地仪器的望远镜及准直仪以及摄影镜头的第一组分的双分离物镜(图24)空气隙偏差对象差偏差的影响是透镜厚度偏差的3~5倍。第二和第三表面对中心偏差特别敏感(他们特别应该避免相交不同心)，其次则是第四表面。第一表面中心偏差敏感度较小。

T05型经纬仪望远镜的物镜(图25)第二空气隙比第一

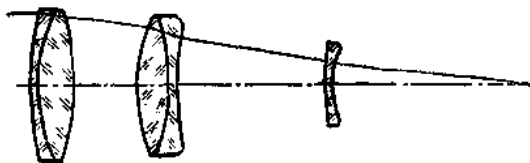


图25 T05型经纬仪物镜光路简图

空气隙对象差的影响更为显著。对第二透镜组的外表面要求精确地定心（表面跳动不超过 0.003~0.005 毫米），而对第二组分的胶合面则要求较低的定心精度（跳动 0.005~0.01 毫米以下）。此外，负调焦透镜的表面也要求精确的定心（跳动在 0.005~0.01 毫米以下），而第一软性组分的外表面及胶合面要求较低的定心精度（跳动在 0.02 毫米以下）。

夜视望远镜的强光力投影物镜（图 26）空气隙必须保持偏差的精度为  $\pm 0.02$

~0.03 毫米，胶合组的第二外表面比第一外表面对中心偏差更敏感，因此围绕第一表面曲率中心的光组转动比围绕第二表面危险性要小。

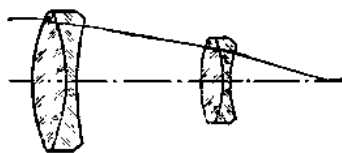


图 26 投影物镜的光路图

“塔伊尔”型照相机物镜  $f = 300$  毫米；  
 $f' = 600$  毫米，相对孔径



图 27 “塔伊尔”型照相机物镜的光路图

1:4.5（图 27）。第一空气隙的偏差显著影响到象差（ $\Delta l_1 = \pm 0.02 \sim 0.03$  毫米），而第二空气隙影响较弱（ $\pm 0.1 \sim 0.2$  毫米），第二和第三表面对中心偏差敏感（ $c = 0.005 \sim 0.01$ ）。第三透镜——月形透镜的表面（ $c = 0.01 \sim 0.02$ ），第四表面敏感较小（ $c = 0.01$ ），第一表面更不敏感（ $c = 0.02 \sim 0.03$ ）。第二和第三表面相交不同心以及月形透镜的厚度不均，则更危险。

“尤皮捷尔 11”型照相机物镜  $f' = 135$  毫米，相对孔径 1:4

(图 28)。第一和第二的空气隙的偏差影响象差 ( $\Delta l_1 \approx \Delta l_2 = \pm 0.05 \sim 0.1$  毫米)。中心偏差敏感程度依次排列为第一、第三、第五、第二、第六及第七表面 (显著降低了精度), 同时第六和第七表面相交不同心降低了象场的成像质量。

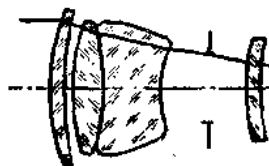


图28 “尤皮捷尔11(21)”  
型照相物镜光路图

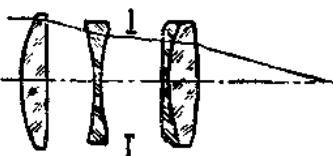


图29 “英杜斯塔尔”型照  
相物镜光路图

“英杜斯塔尔”型照相物镜  $f' = 50$  毫米, 相对孔径 1:35;  $f' = 500$  毫米; 1:5 (图 29), 第一空气隙的偏差 ( $\Delta l_1 = \pm 0.02$ ), 明显地影响象差的改变; 第二空气隙的偏差 ( $\pm 0.05$  毫米)。第一透镜的两面应精确定中心 ( $c = 0.005 \sim 0.01$  毫米), 第二透镜的第一和第二表面 (较不精确) 以及第四透镜的第二表面较不精确地进行定心 ( $c = 0.015 \sim 0.02$  毫米)。

“捷列马尔”型远摄镜头  $f' = 400, 750, 1000$  毫米; 相对孔径 1:6 ~ 1:7 (图 30) 改变第一空气隙对象差改变的影响很大, 改变第二空气隙对象差变化的影响明显地变小, 而第三空气隙的影响更小。第二和第三表面的中心偏差明显地使成像质量变坏, 第四、第一和第五表面较不明显, 其余的表面不要求精确地定心。

“格列奥斯”照相物镜  $f' = 20 \sim 100$  毫米, 相对孔径 1:2 (图 31)。空气隙变化在  $\pm 0.03 \sim 0.05$  毫米以内即可。第

一、第三、第五、第六、第八和第十表面的中心偏差对象质有明显的影晌。这些表面的跳动不允许超过 0.01~0.02 毫米。

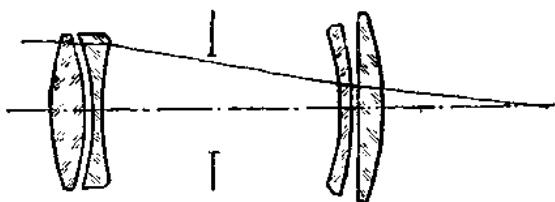


图30 “捷列马尔”型远摄物镜光路图

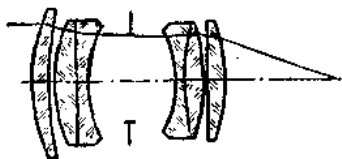


图31 “格列奥斯”型照相物镜光路图

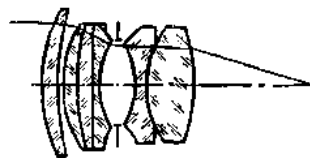


图32 “尤皮捷尔”型照相物镜光路图

“尤皮捷尔 3、8、9”型照相物镜  $f' = 52.4 \sim 85.0$  毫米，相对孔径  $1:1.5 \sim 1:2$  (图 32)。第一和第二空气隙的偏差对改变象差影响不大，其偏差保证在  $\pm 0.03$  毫米以内。对中心偏差敏感的有第一透镜的第一表面（第二表面较弱），第一胶合透镜组的第一和第二外表面以及第二胶合透镜组的后表面（跳动 0.01~0.02 毫米），具有大折射率的透镜胶合面对中心偏差亦很敏感。

“奥里昂”型照相物镜  $f' = 20 \sim 200$  毫米； $2w = 60^\circ \sim 90^\circ$  (图 33)。关于改变空气隙对象差的影响，以及中心偏差对

成像质量的影响，用近似规则得不出正确结论。为此必须应用光路计算的结果。一切空气隙的偏差对象差的变化有显著的影响，且必须保持其误差不超过0.005~0.01毫米。对中心偏差敏感的有第一、第三、第四、第五表面；而最后表面敏感稍差；第二、第六、第七表面对中心偏差不敏感。重要的是使第一透镜能很好地与第二透镜同心，同时第一和第二透镜与第三和第四透镜同心。后表面对中心偏差敏感，重要的是使该表面（以至整个镜头）对应于光学系统总光轴（镜框轴或配合处）处于正确的位置。

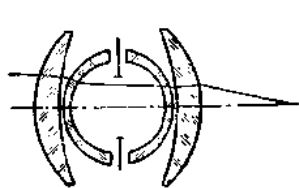


图33 “奥林昂”型照相物镜光路图

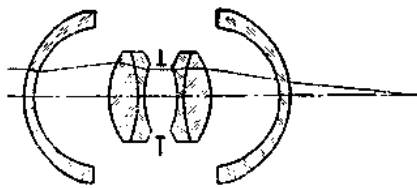


图34 “鲁萨尔”型照相物镜的光路图

“鲁萨尔”型广角照相物镜  $f' = 20 \sim 200$  毫米； $2\omega = 100^\circ \sim 120^\circ$ ；相对孔径 1:8（图 34）。全部空气隙的改变对象差影响很明显，因此透镜厚度配套表中所列的空气隙必须保持误差不超过 0.003~0.005 毫米，第三表面（即第一胶合组的第一表面）和第八表面、第九表面和第十表面对不同心差敏感，重要的是使后表面第六透镜的第二表面）对第二胶合组的后表面同心以及第一胶合组的第一表面对第二胶合组同心。

上述规则和意见在设计师设计镜框结构时以工艺师编制



制造镜框零件的工艺过程中，有时并不执行。因而，保证了制造镜框元件的必需精度，不考虑配合处和端面的加工基准以及在同一的基准上同时进行加工，这就容易引起装配上很大困难，以至降低成象质量。

在设计镜框结构和制造镜框时，以及装配高质量光学系统时，应该帮助设计师和工艺师执行上述建议。

## 28. 关于照相物镜镜框的改进

在设计高质量光学系统的镜框时，应该严格注意保证光学表面定心所必需的精度。研究望远镜物镜和照相物镜的装配质量表明，不只象场中心，而且整个象场成象质量低的最常见的原因是装配时光学系统定心粗糙，这不仅由于镜框在其制造时有误差以及不遵守透镜的定心公差，而且也是由于镜框结构不合理的结果（从定心观点看）。应该注意到，透镜在制造时虽然保证了定心，但还不能保证装配时定好中心，因为其基准面长度不够。例如不能只靠外径来保证精确的定心。因此，应该研究一些镜头的结构，按前述（即 26 节和 27 节）研究计算个别表面对不同心差的不同敏感度。

**双胶合物镜（相对孔径 1:4~1:15）** 如果透镜的配合处（端面和通光孔径——镜框的内径）在机床上一次定位，并相对于将物镜固定到仪器壳体的配合处无跳动，则通用的镜框结构可以保证物镜用后表面使其定位到镜框的配合处。通用的镜框结构应认为是正确的。为使压圈在固定时不至于产生不同心差（图 35），压圈的支承端面和通光孔径应该同时加工，并在机床上一次定位和切螺纹。用压圈从后表面固紧镜头，使物镜第一表面定位的方法，则稍不如已研究过的

方案。

**双分离物镜或远摄镜头的第一组分** 应如上述方法压紧,然而除了隔圈制造厚度公差不超过 $0.003\sim 0.005$ 毫米,第一和第二透镜间的空气隙是完全不允许出现厚度差(图36),这样的固紧比另外的一种结构更能可靠地定心。所谓另外一种结构,即固紧第一和第二透镜从左和从右进行,且其空气隙靠修切镜框上的凸出部位来保持。在这个方案中,还要求一个弹性压圈。透镜的直径大时,按不同的直径差值( $0.5\sim 2$ 毫米)合理制造,以便按每个透镜进行镜框搪孔时,都应有必须的空气隙(例如为了温度补偿)。



图35 双胶  
物镜的镜框



图36 双分离  
物镜的镜框

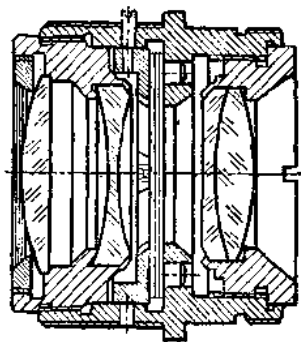


图37 “美杜斯塔尔50”  
型照相物镜

**“美杜斯塔尔50”型**( $f' = 52.4$ 毫米, 相对孔径 $1:3.5$ ,  $2\omega = 45^\circ$ )物镜 目前这种物镜大批进行制造,因此镜框是简单的,但不能损害成象质量。现有镜框的结构(图37),可以保证定心的必要精度。如果用膨胀法进行装配,即胶合透镜镜框壳体的配合处以第一组分的镜框螺纹面为基准进行

加工，第一组分装配时再车此螺纹，就是后面组分在前面组分的基准上装配，因而实际上消除了配合处的不同心差。小批生产和试制生产才能采用这种装配。因为它的特点是在一个工作地点集中了全部装配工序，而且必须使用高度熟练的装配工。

为了消除现有结构上的缺点，应该取消第一和第二组分的镜框的配合螺纹，因为透镜不同心差主要由此产生（第一和第三-第四透镜在自动滚边机上进行滚边时，也会产生不同心差）。改进的镜框结构见图 38。装配时转动第一和第二组分，以使透镜精确地定心是有可能的。在现有的结构中，并不希望更换组分，因为，这样会破坏透镜按厚度配套，而且工序也会更繁琐。此外，在镜框壳体内能以压圈压紧第三-第四透镜则是更合理的。

“英杜斯塔尔61”型( $f' = 52.4$ 毫米；相对孔径1:2.8； $2\omega = 45^\circ$ )物镜镜框(图39)是按自动准直法装配制造的，

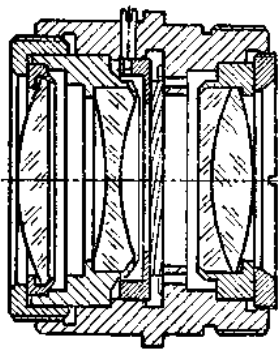


图38 “英杜斯塔尔50”型照  
相物镜镜框的改进

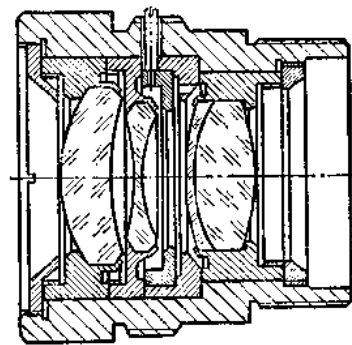


图39 “英杜斯塔尔61”  
型照相物镜镜框

即第一，第二和第三-第四透镜固定到预先制好的每个透镜的镜框上（配合处具有最后的加工余量），然后将带透镜的每个镜框装到机床的专用卡盘上，使透镜的光轴与机床主轴的旋转轴线相重合，并完成镜框配合处（外径和两个端面）的最后加工，即镜框按透镜进行定心。用这种方法加工镜框和装配物镜能保证透镜具有很高的定心精度。用同样的方法设计下列各种高质量的强光力和广角照相物镜——“米尔(Мир)”型、“维加(Bera)”型和“鲁萨尔”型的镜框（图40）。用这种方法在不恶化成象质量的条件下，可以降低透镜制造时对定心精度的要求，如以0.05~0.1毫米代替0.01~0.02毫米。然而由于镜框设计和制造以及物镜装配上的不合理，公差0.01~0.02毫米不能保证镜框中透镜定心的必需精度。

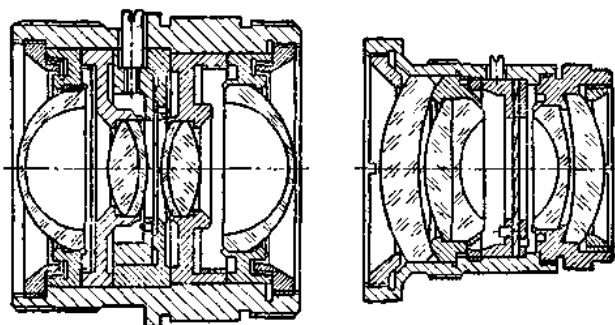


图40 “鲁萨尔”型和“维加”型照相物镜镜框

“格利奥斯”型(PO, OKC;  $f' = 22 \sim 100$ 毫米; 相对孔径1:2,  $2\omega = 45^\circ \sim 25^\circ$  ●) 强光力电影摄影物镜 现有的镜框结构（图41）只有用膨胀法装配才能保证足够高的定

● 原文如此。——译者注

心精度。下面组分的镜框在上面已装好的组分的基面上最后加工，这在高质量照相物镜的试制和小批生产中是完全允许的和合适的。对于大批生产，类似的结构不合用，并应更换（图 42）。镜框结构应由壳体和两个组分组成，其镜框有导向柱形带以及在壳体内固紧各个组分的螺纹。在第一组分内滚边固紧第一胶合组并用压圈固紧第一透镜。在第二组分内——相应滚边固紧第二胶合组及用压圈固紧第六透镜。显然，当第一和第六透镜及胶合组（第二、三和第四—第五透镜）分别滚边固定在各自的镜框内，而在壳体内则以压圈固定，这样改进后的 PO2 型镜头的镜框（图 43）具有很大的优点。在这种情况下，不采用螺纹连接（除用压圈压紧连接件外），是以精确地制造镜框并以滚边法固定透镜来保证同心度。在镜框的壳体内，可以转动带透镜的无螺纹镜框来调整同心度。

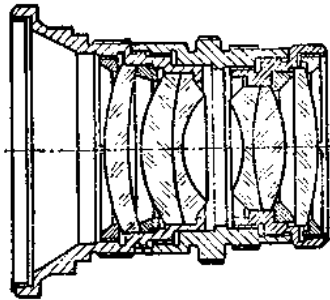


图 41 “格利奥斯”型照相物镜镜框

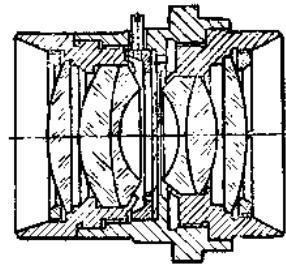


图 42 “格利奥斯”型照相物镜镜框的改进

“尤皮捷尔 8”型和“尤皮捷尔 3”型 ( $f' = 52.5$  毫米；  
相对孔径 1:2, 1:1.5,  $2\omega = 45^\circ$ ) 强光力物镜 在现有镜框

结构中第二组分（第二胶合组）用压圈固定在其镜框内，而镜框是用导向柱形带和螺纹固定在物镜壳体内，IO8物镜第一透镜通过隔圈用压圈固定在无螺纹镜框内。固定第一透镜的压圈，通过第一透镜的镜框又将第一胶合组固定起来(图44)。

IO3物镜内第一透镜及第一胶合组各以压圈固定在“总的”镜框内(图45)。在改进时，建议采用滚边法将第一透

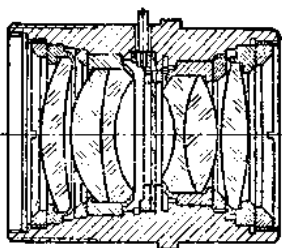


图43 PO<sub>2</sub> (OKC) 型照  
相物镜镜框的改进

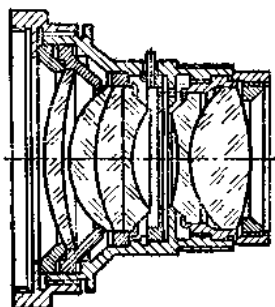


图44 “尤皮捷尔8”型照  
相物镜镜框

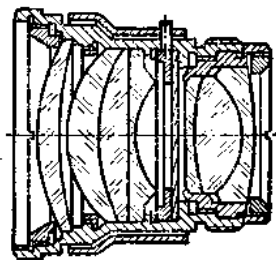


图45 “尤皮捷尔3”型  
照相物镜镜框

镜、第一及第二胶合组固定在各个无螺纹镜框内，而无螺纹镜框是用压圈（或固定销）固定在镜框壳体内(图46和图47)。压圈（或固定销）不要求制造得很精确。在这种情况下，装配时可以环绕其轴转动各组分来补充透镜定心。

然而“英杜斯塔尔”型、“尤皮捷尔”型、“格利奥斯”型和其他强光力和广角物镜的定心精确度是可以显著提高。

为此，不是用手工滚边或者用自动滚边机滚边（定心精度取决于连接的配合、镜框加工误差和透镜制造时的定中心的精度），而是将单个透镜和透镜组粘入制造很精确的无螺纹的镜框内。在胶或封口胶凝固的过程中，透镜还可以在镜框内补充定中心。此时，定心检验可以用光学车间胶合透镜时用的仪器进行（图 48）。在此情况下，以自准直法保证装配时具有的定心的高精度。完成这道工序不要求精密的机床及高度熟练的装配工。透镜在其制造时对定心的要求降到 0.05~0.1 毫米，对象质无损失。

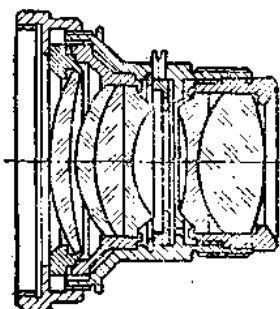


图46 “尤皮捷尔8”型照相  
物镜镜框的改进

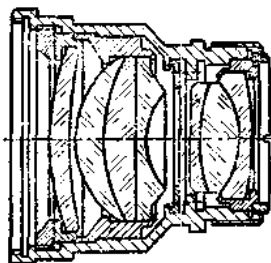


图47 “尤皮捷尔3”型照相  
物镜镜框的改进

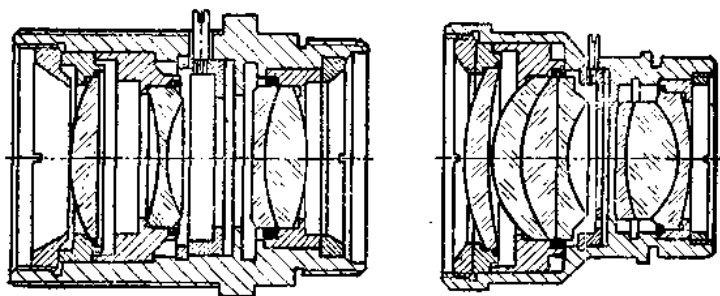


图48 用胶或封口胶固定镜框内的透镜

“捷列马尔 7”型 ( $f' = 1000$ 毫米; 相对孔径 1:7;  $2\omega = 24^\circ$ ) 远摄物镜 “捷列马尔 7”型照相物镜适用于航空摄影。当精确制造镜框以及制造透镜精确定中心时, 现有结构 (图 49) 可以保证得到令人满意的同心度和成象质量。用压圈固定各个透镜 (或透镜组, 即第一—第二透镜, 第三—第四透镜) 以及用压圈把镜框固定在物镜体内 (图 50) 可以提高定心的精度。在装配时绕镜框轴旋转透镜能使透镜补充定中心。如果在完全加工好的无螺纹的镜框内用胶或封口

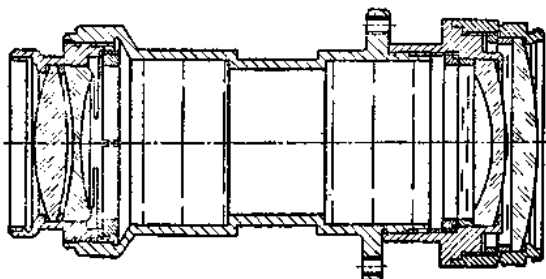


图 49 “捷列马尔”型照相物镜镜框

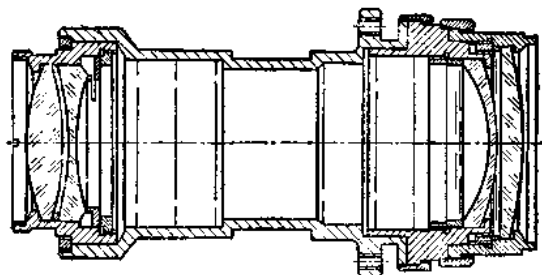


图 50 “捷列马尔”型照相物镜镜框的改进



胶固定透镜，此时镜框内的透镜在胶或封口胶凝固的过程中定中心，则可以得到更高的定心精度。

所阐述的各种改进镜框的意见，可以改进成象质量及简化通用光学系统的装配。也就是简化望远镜物镜，照相物镜及航空摄影镜头的装配。应注意到镜框内不允许有宽的柱形环带，因为宽的柱形环带会限制光束的宽度和光的均匀分布，这就会明显增大光的漫反射，降低成象对比度及分辨率。

### 29. 温度改变对光学系统离焦的影响

周围环境温度的变动会引起光学系统结构参数的改变——首先是曲率半径、折射率及大的空气隙以及自光学系统到接收平面的距离等参数的改变。透镜厚度改变量不大，一般可以忽略不计。结构参数的不稳定会引起焦距、顶焦距和到接受平面（分划板、照相乳剂层及遮光板等）的距离以及结构参数的不稳定。在个别光学系统内，还引起象差并使成象质量变坏。由于温度的波动，确定各参数允许改变值（这些参数的改变对离焦和成象质量变坏还不明显）的问题属于公差计算范围，因此它应和其他类似问题一样解决。

对于单个透镜：

$$\begin{aligned}\varphi' &= (n - 1)(\rho_1 - \rho_2) \\ \Delta\varphi' &= \frac{\Delta n}{n - 1}\varphi' + (n - 1)(\Delta\rho_1 - \Delta\rho_2) \\ &= \frac{\Delta n}{n - 1}\varphi' - (n - 1)\left(\frac{\Delta r_1}{r_1^2} - \frac{\Delta r_2}{r_2^2}\right)\end{aligned}$$

由于温度  $\Delta t$  的改变

$$\Delta r = r\alpha\Delta t; \quad \Delta n_D = \beta_D\Delta t, \quad \text{而现在}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta\varphi' &= \frac{\beta_D \Delta t}{n-1} \varphi' - (n-1) \alpha \Delta t \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \\
 &= \frac{\beta_D \Delta t}{n-1} \varphi' - \alpha \varphi' \Delta t = \left( \frac{\beta_D}{n-1} - \alpha \right) \varphi' \Delta t \\
 &= V_r \varphi' \Delta t
 \end{aligned} \tag{110}$$

式中  $\beta_D$ —— $D$ 光折射率的温度增量；  
 $\alpha$ ——线膨胀系数；  
 $\varphi'$ ,  $\Delta\varphi'$ ——透镜的光焦度及其改变量；  
 $V_r$ ——热光学常数。

$$V_r = \left( \frac{\beta_\lambda}{n_\lambda - 1} - \alpha_t \right)$$

按照公式 (58)

$$\Delta f' \approx \Delta s'_f = -f'^2 \Delta\varphi' = -f'^2 \varphi' V_r \Delta t \tag{111}$$

透镜系统的近似距离：

$$\Delta\varphi' = \sum_{\mu=1}^{\mu=k} \frac{h_\mu}{h_1} \Delta\varphi'_\mu \tag{110 a}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta f' &= -f'^2 \Delta\varphi' = -f'^2 \sum_{\mu=1}^{\mu=k} \frac{h_\mu}{h_1} \Delta\varphi'_\mu \\
 &= -f'^2 \sum_{\mu=1}^{\mu=k} \frac{h_\mu}{h_1} \varphi'_\mu V_{D\mu} \Delta t
 \end{aligned} \tag{112}$$

假定不存在离焦（不考虑壳体的改变——由光学系统后表面到接收表面的距离）

$$\begin{aligned}
 \Delta\varphi' &= 0; \quad \Delta f' = \Delta s'_f = 0 \\
 \sum_1^k \frac{h_\mu}{h_1} \varphi'_\mu V_{D\mu} \Delta t &= 0; \quad \sum_1^k \frac{h_\mu}{h_1} \varphi'_\mu V_{D\mu} = 0
 \end{aligned} \tag{113}$$

假定不存在离焦计算镜框:

$$\sum_1^k l_v \alpha_v \Delta t - \Delta f' = 0$$

$$\sum_1^k l_v \alpha_v \Delta t + f'^2 \sum_1^k \frac{h_u}{h_1} \varphi'_u V_{D_u} \Delta t = 0 \quad (114)$$

$$-f'^2 \sum_1^k \frac{h_u}{h_1} \varphi'_u V_u = \sum_1^k l_v \alpha_v \quad (114 a)$$

显然, 为了消除位置色差的改变, 等式 (113) 应满足光谱全部工作范围, 即将  $V_\lambda$  值代入式内。例如, 对目视仪器代入  $V_c$  和  $V_F$ 。对于由若干薄透镜组成, 并且有相当大的空气隙  $d$  的有限厚度系统,  $\Delta f'$  和  $\Delta s'_F$  可以根据下列公式计算:

(1) 由于第一透镜组分的  $r$  和  $n$  值的改变而计算  $\Delta s'_F$  和  $\Delta f'$  时:

$$\Delta s'_F = \Delta s'_F \beta_1^2 = -s'^2_1 \Delta \varphi'_1 \beta_1^2 \quad (115)$$

$$\Delta f' = -f'^2 \Delta \varphi'_1 (1 - d \varphi'_1) \quad (116)$$

式中  $s'_F$ ,  $\Delta s'_F$  —— 第一透镜组分后顶焦距及其改变量;

$d$  —— 第一和第二透镜组分间的距离;

$\varphi'_1$  —— 第二透镜组分的光焦度。

$\Delta \varphi'_1$  值按公式 (110 a) 计算。

(2) 由于第二透镜组分  $r$  和  $n(V_1)$  值的改变, 而计算  $\Delta s'_F$  和  $\Delta f'$  时利用普通公式:

$$\Delta s'_F = -s'^2_F \Delta \varphi'_1 \quad (115 a)$$

$$\Delta f' = -f'^2 \frac{h_1}{h'_1} \Delta \varphi'_1 \quad (116 a)$$

式中  $\Delta \varphi'_1$ ——第二透镜组分光焦度的改变，此光焦度的改变亦按公式 (110 a) 计算。

第一和第二组分之间的空气隙  $d$  的改变对焦距和顶焦距改变的影响，按下列公式确定：

$$\Delta s'_F = -\Delta d \beta_1^2 \quad (117)$$

$$\Delta f' = -f'^2 \Delta \varphi' = -f'^2 \Delta d \varphi'_1 \varphi'_1 \quad (118)$$

如果第一和第二透镜组分的折射率和半径误差以及两组分之间的空气隙的改变总量等于零，则远摄物镜的顶焦距在温度波动时为常数，即为：

$$-s'^2_{F1} \beta_1^2 \sum_1^k \left( \frac{h_u}{h_1} \varphi'_u V_u \Delta t \right) - s'_{F1} \sum_1^k \left( \frac{h_u}{h_1} \varphi'_u V_u \Delta t \right) - \Delta d \beta_1^2 = 0 \quad (119)$$

如果要求计算远摄物镜，使其参数改变在温度波动时引起顶焦距的改变，如同由镜头后表面到接收平面的仪器壳体长的改变一样，按下列公式确定：

$$\Delta p_c = \sum_1^k l_v \alpha_v \Delta t \quad (120)$$

应按公式 (120) 确定的值代入公式 (119) 的右面部分。

由公式 (115)、(115 a)、(117) 得出, 远摄物镜第一透镜组分的  $r$ 、 $n$  的改变 (是第二组分的 6~8 倍) 和各组分之间空气隙的改变表明对离焦有重要影响。经试验表明, 以改变仪器壳体长度  $\Delta l$  来补偿  $\Delta s'_p$  (顶焦距改变量)。计算物镜时, 采用特种牌号玻璃, 会导致降低成象质量 (消除象差困难), 以及导致必须给定加工玻璃样板和定心较窄的公差。在采用具有较大的线性膨胀系数的镜框材料 (例如铝合金) 时, 就更为不利。因此当  $l$  改变时, 改变  $f'$ 、 $s'_p$  和光学系统象差 (虽然, 由于改变了仪器壳体长度而补偿了工作距离的改变), 不以选择玻璃牌号来进行合适的聚焦 (消除离焦), 而是依靠用其他结构, 例如采用线性膨胀系数小的仪器壳体材料进行合适的聚焦。

双薄透镜物镜 (不考虑镜框) 公式简化为:

$$\Delta f' \approx \Delta s'_p = 0; \quad \varphi'_1 V_1 + \varphi'_2 V_2 = 0; \quad \varphi'_1 V_1 = -\varphi'_2 V_2$$

因为在物镜内通常是消除垂轴色差, 即假定为:

$$\frac{\varphi'_1}{v_1} + \frac{\varphi'_2}{v_2} = 0; \quad \frac{\varphi'_1}{v_1} = -\frac{\varphi'_2}{v_2}; \quad \varphi'_2 = -\frac{v_2}{v_1} \varphi'_1$$

则公式 (113) 如下:

$$\varphi'_1 V_2 = -\frac{v_2}{v_1} \varphi'_1 V_1; \quad V_1 = \frac{v_2}{v_1} V_2; \quad \frac{V_1}{V_2} = \frac{v_2}{v_1} \quad (121)$$

$$V_2 = \frac{v_1}{v_2} V_1 \approx (1.5 \sim 2) V_1 \quad (121 a)$$

从公式可以看出, 在双透镜物镜内, 为消除由于温度改变 (不考虑镜框) 而造成的离焦, 对于正负透镜必须采用与其中部色散系数  $v_D$  成反比的耐热光学常数  $V_D$  的玻璃。下列各种玻璃的组合可以满足这种要求。TK21, БФ23, К8,

БК13 和 БФ4 与 ТФ1, ТК9, БК9 与 ТФ7; БКФ●, ТК4 和 К20 与 ТФ4 和 ТФ5; БК10, К18, ТК8, ТК23 与 Ф2 和 Ф6; ТК23, К20 与 Ф1, Ф4, Ф7 和 Ф13 等。

按公式 (121) 计算, 温度变化时, 球差无变化。上述的玻璃组合及按公式 (121) 进行计算, 可以使焦距和顶焦距保持无变化, 这就说明了象差的不变性, 同时保持了成象质量。计算光学系统时, 保证各个薄透镜组的焦距和顶焦距在温度变化时无变化。

然而, 在各个光学系统内, 例如在具有不大的相对孔径及视场的准直仪(物镜)内, 考虑到管长(由物镜后表面到分划板平面的距离)的改变, 消除光学系统的离焦是合适的, 在这种情况下应满足公式(114 a)的条件。例如, 如果利用玻璃的组合 ТК17 与 ТФ3 和 ТФ4; БК4, ТК20 和 ТК21 与 ТФ12 及再差一些——БК4 与 ТФ10。准直仪的双透镜物镜采用钢管时, 安装在无穷大保持不变。准直仪的双透镜物镜采用铝合金管时, 在这种情况下可以利用组合玻璃 ЛК3 和 ТФ12, СТК8 和 ТФ10, 也就是不得不利用特殊玻璃。

所引用的公式可以合理的选择玻璃型号, 以保证光学系统的不失调或分析光学系统的失调。温度波动对成象质量及离焦的影响, Г.Г.斯柳萨列夫曾进行过更详细的研究。

### 30. 温度波动对成象质量的影响

在温度波动时, 折射率、曲率半径、透镜厚度及空气隙不保持常数, 这不仅能导致焦距及顶焦距的改变(在长焦距系统中更明显), 而且也能导致光学系统象差的改变。例如,

● 原文如此, 恐有误。——译者注

如果按公式 (112) 或 (115)、(115a) 及 (117) 计算, 以改变接收器敏感的两种极限波长光谱曲线 (对目视系统来说是  $F$  和  $C$  谱线) 的  $s'_e(\Delta s'_e)$ , 就可以容易地确定位置色差的变化。例如, 对于物镜  $f' = 500$  毫米, 相对孔径 1:10, 用玻璃 K8 和  $\Phi 1$  ( $f'_1 = 210$  毫米,  $f'_2 = -365$  毫米) 温度为  $60^\circ$  时, 位置色差为:

$$\begin{aligned}\Delta ds'_e &= -f'^2 \Delta t \{ \varphi'_1 (V_F - V_C)_1 + \varphi'_2 (V_F - V_C)_2 \} \\ &\approx -500^2 \times 60 \left[ \frac{1}{210} (-14 + 25) - \frac{1}{365} (24 - 3) \right] \\ &\quad \times 10^{-7} = 0.0075 \text{ 毫米。}\end{aligned}$$

此处, 玻璃 K8 的  $V_F = -14 \times 10^{-7}$ ,  $V_C = -25 \times 10^{-7}$ ; 而玻璃  $\Phi 1$  的  $V_F = 24 \times 10^{-7}$ ,  $V_C = 3 \times 10^{-7}$ 。

对于 K8 和  $\Phi 1$  的玻璃组合 ( $f'_1 = 234$  毫米,  $f'_2 = -442.0$  毫米):

$$\begin{aligned}\Delta ds'_e &= -500^2 \times 60 \left[ \frac{1}{234} (-14 + 25) - \frac{1}{442} (-13 + 38) \right] \\ &\quad \times 10^{-7} = 0.018 \text{ 毫米。}\end{aligned}$$

此外, 玻璃  $\Phi 1$  的  $V_F = -13 \times 10^{-7}$ ,  $V_C = -38 \times 10^{-7}$ 。

对于玻璃组合 B $\Phi$ 23 和  $\Phi 1$  ( $f'_1 = 146.5$  毫米,  $f'_2 = -206.5$  毫米):

$$\begin{aligned}\Delta ds'_e &= -500^2 \times 60 \left[ \frac{1}{146.5} (-7 + 24) - \frac{1}{206.5} (-13 + 38) \right] \\ &\quad \times 10^{-7} = -0.007 \text{ 毫米}\end{aligned}$$

玻璃 B $\Phi$ 23 有  $V_F = -7 \times 10^{-7}$ ,  $V_C = -24 \times 10^{-7}$ ,  $v_D = 52.4$ 。

对于 K8 和  $\Phi 10$  不谐调的玻璃组合,  $v_1 = 64.1$ ,  $v_2 = 25.3$  ( $f'_1 = 300.00$  毫米,  $f'_2 = -759.0$  毫米);  $\Delta ds'_e = 0.03$  毫米。

对于 TK17 和  $\Phi 4$  玻璃组合, 在  $f' = 500$  毫米时,  $\Delta ds'_e$

$=0.06$  毫米，即变得明显。这样，可以得出结论，甚至在比较长的焦距的物镜内，当温度改变时轴向色差实际仍无改变。这可解释为：在物镜内，随着色象差被校正，利用冕玻璃或钡火石玻璃与火石玻璃或重火石玻璃的组合，接近于：

$$\frac{(V_F - V_G)_1}{(V_F - V_G)_2} \approx \frac{v_2}{v_1} = -\frac{\varphi'_2}{\varphi'_1} = -\frac{f'_1}{f'_2}$$

可以得出温度改变时需补偿轴向色差的改变。对于较复杂的组分及系统，上述结论，同样是正确的。

尽管如此，在计算长焦距非失调的系统时，例如  $f' > 500$  毫米时，应以这样的方法来选择玻璃的牌号，即使各个薄透镜组有着近似的等式

$$\sum_{\mu=1}^{\mu=m} \varphi'_\mu (V_F - V_G)_\mu = 0 \quad (122)$$

如果合理的选择光学系统各个透镜的玻璃牌号，这样可以保证光学系统各组分的象差无变化，象差的改变可以归结为最小。例如在三级象差的范围内，由于温度波动，折射率改变，球差的改变按下列公式计算

$$\begin{aligned} \Delta \delta s'_k &= -\frac{1}{2} h_1^2 f'^2 \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \left( \frac{h_\mu}{h_1} \right)^4 dA_\mu \\ &= -\frac{1}{2} h_1^2 f'^2 \sum_{\mu=1}^{\mu=m} \left( \frac{h_\mu}{h_1} \right)^4 \frac{dA_\mu}{dn_\mu} (\beta_D \Delta t)_\mu \quad (123) \end{aligned}$$

通常透镜系统的变化值与透镜的焦距成反比，因此，如果取每个——正和负透镜（近距离）的玻璃牌号的  $\beta_D$ ，与其焦距成比例，则球差（连同其他象差）在温度波动时无变



化。例如，对于用 TK14 和  $\Phi 1$  玻璃制造的双透镜物镜，  
当  $\varphi' = 1$  时，如果

$$\frac{\beta_{D_1}}{\beta_{D_2}} = -\frac{\varphi'_2}{\varphi'_1} = -\frac{v_2}{v_1}$$

$$\frac{dA_1}{dn_1} = 144.05; \quad \frac{dA_2}{dn_2} = -66.2$$

$$v_1 = 60.6; \quad v_2 = 36.9; \quad v_2/v_1 = 0.61$$

$$\frac{dA_2}{dn_2} / \frac{dA_1}{dn_1} = 0.457, \text{ 则球差不变。}$$

实际对玻璃 TK14 来说， $\beta_D = 21 \times 10^{-7}$ ；对玻璃  $\Phi 1$  来说， $\beta_D = 49 \times 10^{-7}$ ，即  $\beta_1/\beta_2 = 0.43$ 。例如，在  $\Delta t = 60^\circ$  时，球差的改变很小：

$$\begin{aligned} \Delta \delta s'_k &= -\frac{1}{2} (12.5)^2 \times (100)^2 \times 60 \\ &\times \left( \frac{144.05 \times 21 - 66.2 \times 49}{100^3} \right) \times 10^{-7} \approx 0.01 \text{ 毫米} \end{aligned}$$

分母  $f'^3 = 100^3$ ，因为  $dA$  在  $f' = 100$  毫米时比  $f' = 1$  时，小  $1/f'^2$ 。

在温度波动时，曲率半径的改变引起主要系统的象差偏差值，例如球差为：

$$\begin{aligned} \Delta \delta s'_k &= -0.5 h_1^2 f'^2 \sum_1^k \left( \frac{h_v}{h_1} \right)^4 \frac{dA_v}{d\rho_v} \left( \frac{r \alpha \Delta t}{r^2} \right)_v \\ &= -0.5 \Delta t h_1^2 f'^2 \sum_1^k \left( \frac{h_v}{h_1} \right)^4 \frac{dA_v}{d\rho_v} \cdot \frac{\alpha_v}{r_v} \end{aligned}$$

对于物镜  $f' = 100$  毫米，相对孔径 1:4，用玻璃 TK14

( $\alpha = 63 \times 10^{-7}$ ;  $\nu = 60.6$ )及  $\Phi 1$ ( $\alpha = 71 \times 10^{-7}$ ;  $\nu = 36.9$ );  
 $\Delta t = 60^\circ$

$$\Delta \delta s'_k = -\frac{0.5 \times 60 \times 12.5^2 \times 100^2}{100^2} \left[ \left( \frac{24.4}{64.42} - \frac{49.9}{-39.75} \right) \right. \\ \left. \times 63 \times 10^{-7} + \left( \frac{28.96}{-38.84} - \frac{6.84}{-737.87} \right) \times 71 \times 10^{-7} \right] = 0.024$$

——极值不大。

从这些公式可以得出结论，正负透镜的总值  $\frac{dA_v}{d\rho_v}$  与其光焦度近似地成比例或与其色散系数成比例。因此，如果玻璃的线膨胀系数与正负透镜的焦距成线性比例，则正负透镜

所有整个系统的  $\sum_{v=1}^{v=k} \frac{dA_v}{d\rho_v} \cdot \frac{\alpha_v}{r_v}$  实际等于零。

此条件是无法实现的（没有这些牌号的玻璃）。然而，火石玻璃的  $\alpha$  平均值比冕玻璃及重冕玻璃的  $\alpha$  值略大。

这样，温度变化仅在成象平面的位置上有主要的影响，在此种情况下不致引起象差的明显改变。成象质量的降低与零件体积内的温度梯度有关，会随着零件表面形状的改变而改变，反射镜和棱镜的反射面以及非胶合物镜的透镜或远摄物镜第一组分的内表面最为敏感。

## 第四章 几种光学零件公差计算

### 31. 反光镜和棱镜反射表面公差计算举例

**位于航空摄影物镜前的反光镜** 一个位于航空摄影物镜前，并与光轴成  $45^\circ$  角的外反射膜层的反光镜，其尺寸为  $220 \times 300$ ，试求该反光镜按玻璃样板加工的公差。物镜焦距  $f'_0 = 2000$  毫米，相对孔径  $1:10$ ，视场中央的分辨率为 35 线对/毫米。

物镜焦面的景深

$$\Delta x' = \pm \frac{1}{35} f'_0 / D_p = 0.03 \times 10 = \pm 0.3 \text{ 毫米}$$

偏离平面的象散，允许为全景深的  $1/3$ ，也就是： $a_{\text{ro光}} \leq 0.3/3 = 0.1$  毫米或  $a_{\text{ro光}} \leq 0.01 f'_0 / D_p = 0.1$  毫米。偏离平面的公差按公式 (79 a) 或表 5 确定：

$$N_{\text{光}} \leq 321 \cdot \frac{D^2 a_{\text{ro光}}}{f'^2_0} = 321 \times \frac{300^2 \times 0.1}{2000^2} \approx 1.0$$

如果航空摄影机是同反光镜一起调焦的，那么，公差可以放宽到  $N = 2$  (两个光圈)。这对于直径  $D = 300$  毫米来讲，是比较窄的公差。

为了计算光圈的局部公差  $\Delta N$ ，我们利用如下公式：

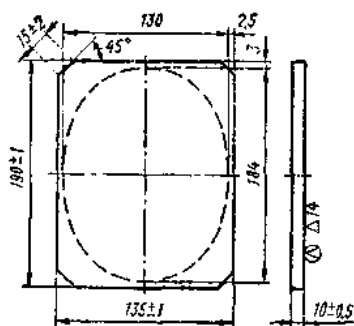
$$\Delta N_m = (N_m \text{ 当 } N_r = 0) = \frac{0.5 \times 321 a_{\text{ro光}} D^2}{f'^2_0} = 0.35$$

或利用表 6，也就是反光镜子午截面的公差允许比弧矢截面

大 $0.35$ 个光圈。在这些偏差下,光圈在子午截面被拉长是最有利的情况。应取牌号为JK5或MKP1,且具有小的 $\alpha = 33 \times 10^7$ 和厚度为 $45 \sim 50$ 毫米的玻璃做为反光镜。

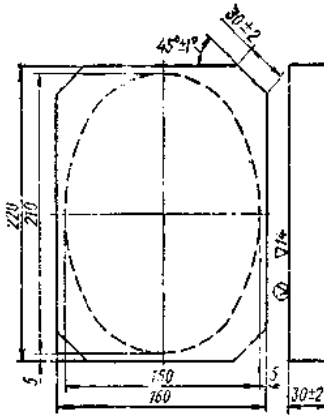
在图51上示出位于焦距 $f' = 130$ 毫米,相对孔径 $1:1$ 的照相物镜前的反光镜图面结构尺寸。而在图52上示出的是位于 $f' = 1000$ 毫米,相对孔径为 $1:7$ 的照相物镜前的反光镜图面结构尺寸。图53上示出的是位于照相物镜后,距胶片平面为 $20 \sim 25$ 毫米,与光轴成 $45^\circ$ 角的光学图面结构尺寸。对图纸有以下几点说明:

- 1) 按技术条件镀反光膜 1H21E;
- 2) 在抛光的表面上,不应有直径大于 $0.3$ 毫米的开口气泡;
- 3) 倒边 $1^{+0.4} \times 45^\circ$ , 倒角 $1.5^{+0.5} \times 45^\circ$  (图51)。倒边 $1.5^{+0.5} \times 45^\circ$ , 倒角 $2^{+0.5} \times 45^\circ$  (图52)。E面四周倒边 $0.5^{+0.8} \times 45^\circ$ , 其余倒边 $0.1^{+0.2} \times 45^\circ$  (图53)。



∇6(∇)	
$\Delta n_D$	—
$\Delta(n_F - n_C)$	—
光学均匀性	—
双折射	3
光吸收系数	—
条纹度	—
气泡度	5Γ
N	5
$\Delta N$	1
P	V
$\Delta R$	3

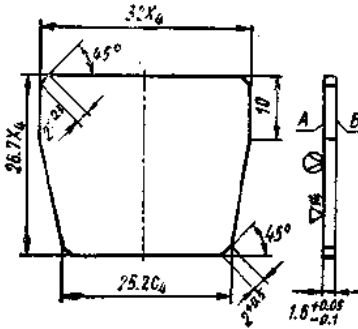
图51 位于焦距 $f' = 130$ ; 相对孔径为 $1:1$ 的物镜前, 且与光轴成 $45^\circ$ 角的光学图面结构尺寸; 材料: K8 玻璃



∇6(∇)

$\Delta n_D$	—
$\Delta(n_F - n_C)$	—
光学均匀性	—
双折射	3
光吸收系数	—
条纹度	—
气泡度	(*)
$N$	0.3^{**}
$\Delta N$	0.1^{**}
$P$	V
$\Delta R$	1

图52 位于焦距 $f' = 1000$ ，相对孔径1:7的照相机镜前，  
且与光轴成 $45^\circ$ 角的反光镜图面结构尺寸，  
材料：MKM或JK5玻璃



∇5(∇)

$\Delta n_D$	—
$\Delta(n_F - n_C)$	—
光学均匀性	—
双折射	3
光吸收系数	—
条纹度	—
气泡度	5Γ
$N$	10
$\Delta N$	2
$P$	W
$\Delta R$	3^{**}
$f'_{min}$	20M

图53 位于与“泽尼特(Зенит)”型照相机的光轴成 $45^\circ$ 角、在  
物镜后面且与胶片的距离为20~25毫米的反光镜

图面结构尺寸，

材料：K8或CBB玻璃

对图 55 的说明指出：当对表面要求非常严格时，在直径相同的情况下，以沿着长边拉长光圈而形成的偏差达到  $N_{\text{z}} = 0.5N_{\text{zop}}$  时，是最好的。从这些例子中可以看出，按玻璃样板研磨的公差  $N$  和  $\Delta N$  是怎样取决于系统的特性和反光镜在系统中的位置，以及怎样选择零件的材料和厚度。

**望远镜棱镜** 要求计算位于物镜后（图 54）的望远镜棱镜，反射表面按玻璃样板研磨的公差。望远镜放大率  $6\times$ ，物镜焦距  $f' = 122.94$  毫米；目镜焦距  $f'_n = 20.6$  毫米；棱镜玻璃 K8 ( $n_D = 1.5163$ )。

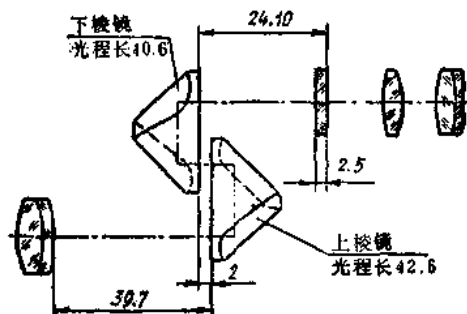


图 54 望远镜的光学系统

由于棱镜反射表面的平面性偏差，我们取目方允许象散数值为 0.1 屈光度，并认为这些表面（对每个表面及棱镜）所引起的象散相同，从而取极限偏差的算术和。于是，一个表面的允许象散可取为 0.025 屈光度。上棱镜表面距焦平面（平均）的距离：

$$l_1 = f' - 39.7 - \frac{42.6}{2 \times 1.5} = 122.94 - (39.7 + 14.2)$$

$$\approx 69 \text{ 毫米}$$

下棱镜表面位于:

$$l_2 = l_1 \frac{1}{1.5} \left( \frac{42.6}{2} + \frac{40.6}{2} \right) = 69 \times 27.7 = 41.3 \text{ 毫米}$$

上棱镜表面偏离平面的公差, 按公式(80 a)计算:

$$\begin{aligned} N_{\text{上}} &\leq \frac{0.208 D^2 a_{\text{上}}}{6^2} \left( \frac{f'}{l_1} \right)^2 = \frac{0.208 \times 31^2 \times 0.025}{6^2} \\ &\times \frac{(122.94)^2}{69^2} = 0.208 \times 26.6 \times 0.025 \times 3.16 \\ &= 0.44 \approx 0.5 \end{aligned}$$

$$N_{\text{下}} \leq 0.208 \times 26.6 \times 0.025 \times 8.8 = 1.23 \approx 1.0$$

成  $45^\circ$  角的表面对正确球面的偏差, 可以从表 6 选取, 即等于  $0.5 N_{\text{上}}$ , 也就是: 对于上棱镜  $\Delta N = 0.25$ , 对于下棱镜  $\Delta N = 0.5 \sim 0.3$ 。如果已知光学车间制造的棱镜表面的平面性偏差为极限值的数量不大, 公差可以有某些放宽 ( $N_{\text{上}} = 1$  和  $N_{\text{下}} = 2$ ), 在这种情况下可取极限偏差的平方和。

成批生产图纸上标出的不正确的太窄公差为: 对上棱镜  $N = 0.3$ ,  $\Delta N = 0.1$ ; 对下棱镜  $N = 0.3$ ,  $\Delta N = 0.1$ 。

**判读器的反光镜** 计算判读器反光镜 (尺寸及位置如图 55 所示) 的反射表面按玻璃样板研磨的公差。仪器的放大率为可变的:  $10\times$  和  $20\times$ , M50 型物镜在视场中央的目视分辨率不少于每毫米 200 线对。反光镜不应该再降低分辨率。

反转片平面允许的象散不大于:

$$\begin{aligned} a_{\text{上}} &\leq 0.005 \times 3.5 \left( 1 + \frac{\Delta x'}{f'} \right) \\ &= 0.005 \times 3.5 \left( 1 + \frac{5.6}{52.4} \right) \approx 0.02 \end{aligned}$$

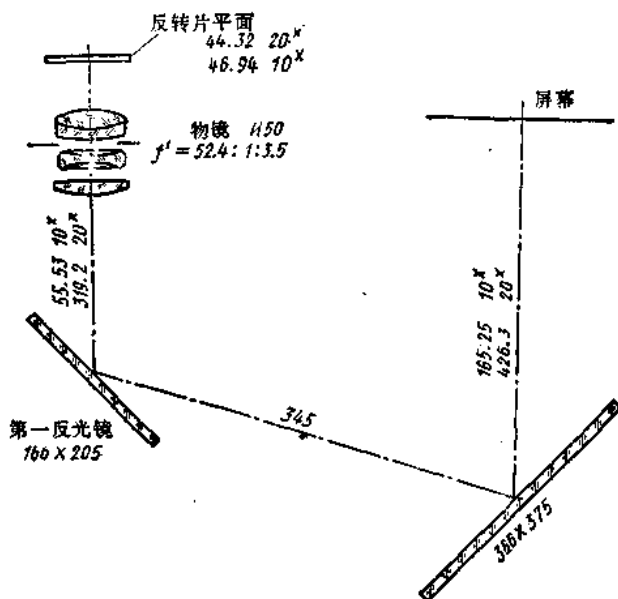


图55 判读器的光学系统

因为在此情况下，相对孔径等于  $D_0/(f' + x)$ 。在屏幕平面上此值相应为：

对  $\beta = 10^\circ$  来说， $a_{\text{相对孔径}} \leq 0.02\beta^2 = 0.02 \times 10^2 = 2$  毫米；

对  $\beta = 20^\circ$  来说， $a_{\text{相对孔径}} \leq 0.005 \times 3.5 \left(1 + \frac{3.1}{52.4}\right) \times 20^2 = 7.3$  毫米。

取这个公差用于第一反光镜，因为第二反光镜的公差要宽些。按公式 (79 a) 确定第一反光镜按玻璃样板研磨的公差：

当  $\beta = 10^\circ$  时， $N = \frac{320 \times 205^2 \times 2}{510^2} = 103.5$ ，用于全直径

(205 毫米)。



当直径为 50 毫米的玻璃样板检验表面质量时,

$$N = \frac{103.5}{\left(\frac{205}{50}\right)^2} = 6; \Delta N = 0.5N = 3。$$

当  $\beta = 20^\circ$ ,  $N = \frac{320 \times 205^2 \times 7.3}{770^2} = 166$ ; 在直径为 50 毫米的表面上必须使  $N = 10$ 。

在图纸上给出  $N = 5$ ;  $\Delta N = 1$ 。

对于第二反光镜:

当  $\beta = 10^\circ$ , 直径为 380 毫米时,  $N = \frac{320 \times 380^2 \times 2}{165^2}$   
 $= 3400$ ; 直径为 50 毫米时,  $N = 60$ ;

当  $\beta = 20^\circ$ ,  $N = \frac{320 \times 380^2 \times 7.3}{426^2} = 320 \times 7.3 \times 0.8$   
 $= 1870$ ; 直径为 50 毫米时, 必须使  $N = 30$ 。

在图纸上给出  $N = 10$ ;  $\Delta N = 2$ 。对精度要求不严格的话, 可用厚度为 8~10 毫米的 K8 玻璃做反光镜。

**炮队镜棱镜** 计算放大率为  $10^\times$ , 物镜焦距  $f'_o = 275.76$  毫米, 目镜焦距  $f'_e = 27.46$  毫米, 出射光瞳直径为 5 毫米的炮队镜, 反射表面按样板玻璃研磨的公差。

棱镜尺寸及其在系统中的位置如图 56 所示。轴向光线对棱镜屋脊表面法线所成的角  $i$ , 按下式确定:

$$\cos i = \cos 45^\circ \cos \varphi$$

式中  $\angle 45^\circ$  —— 轴向光线对表面法线的投影角;

$\varphi$  —— 屋脊的棱边对轴向光线 (屋脊棱边的法线) 的倾斜角。

对靴形棱镜  $\varphi = 15^\circ$ , 此时  $\cos i = \cos 45^\circ \cos 15^\circ = 0.707 \times 0.967 = 0.683$ 。

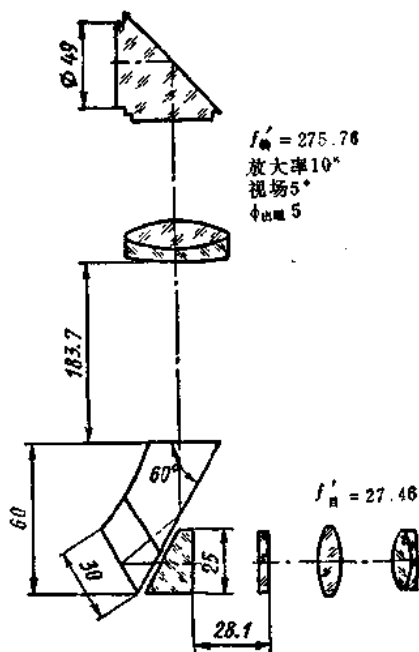


图56 炮队镜光学系统图：放大率 $10\times$ ，视场 $5^\circ$ 。  
物镜焦距 $f' = 275.76$ ；目镜焦距 $f' = 27.46$

在第一次近似时，我们认为所有4个反射表面的平面性偏差是相等的，并取极限偏差的算术和。允许目方的象散不大于0.1屈光度，对一个表面应不大于0.025屈光度。

对于头部棱镜：

$$N_{\text{光屏}} \leq 0.208 \frac{D^2 a_{\text{To 光屏}}}{\Gamma^2}$$

即

$$N_{\text{光屏}} \leq 0.208 \frac{75^2 \times (0.025)}{10^2} = 0.3; \Delta N = 0.15.$$

对于别汉棱镜的反射表面:

$$N_{\text{光野}} \leq \frac{0.227 \times 70^2 \times 0.025}{1.5 \times 10^2 \left(0.5 - \frac{1}{0.5}\right)} \left(\frac{275.76}{75}\right)^2 = 1.77 \approx 2$$

$$\begin{aligned} \Delta N &\leq \frac{0.227 D^2 a_{\text{光野}} \cos i}{\Gamma^2 n} \left(\frac{f_{\text{光野}}}{l}\right)^2 \\ &= \frac{0.227 \times 49 \times 0.025 \times 0.5 \times 14.4}{1.5} = 1.32 \approx 0.75 N_{\text{光野}} \end{aligned}$$

对屋脊的一个表面:

$$\begin{aligned} N_{\text{光野}} &\leq \frac{0.227 \times 30^2 \times 0.025}{1.5 \times 10^2 \left(0.683 - \frac{1}{0.683}\right)} \left(\frac{275.76}{50}\right) \\ &= \frac{0.227 \times 9 \times 0.025}{1.5 \times 0.78} \times 30.3 = 1.3 \end{aligned}$$

$$\Delta N \leq \frac{0.227 \times 30^2 \times 0.025 \times 0.683}{1.5 \times 10^2} \times 30.3 = 0.7 \approx 0.5 N_{\text{光野}}$$

在最后这种情况下, 我们得到比较宽的公差。这是由于别汉棱镜屋脊的棱几乎垂直于轴向光线 ( $i \ll 45^\circ$ ), 最主要的是它离焦平面很近。

由于头部棱镜按样板玻璃加工的公差太窄, 更合理的是将别汉棱镜反射表面的公差缩小, 而将研磨公差放宽到  $N=1$ ,  $\Delta N=0.3$ ; 也就是取反射表面的  $N=1$ ,  $\Delta N=0.5$ ; 而屋脊表面的  $N=1$ ,  $\Delta N=0.5$ 。

如果已知光学车间生产具有极限偏差的表面数量不大 (可以允许表面对平面的极限偏差取均方和, 而不是取算术和), 那么, 这些公差可以另行放宽。

在批生产的图纸上标出的公差有: 头部棱镜反射表面  $N=1$ ,  $\Delta N=0.2$ ; 别汉棱镜反射表面  $N=2$ ,  $\Delta N=0.5$ ;

屋脊表面  $N=0.5$ ,  $\Delta N=0.1$ , 也就是对屋脊表面公差太窄了。屋脊  $90^\circ$  角的公差为  $\pm 5''$ , 楔形镜—— $N=3$ ,  $\Delta N=0.5$ 。对头部棱镜和屋脊表面的公差  $\Delta N$  同样也太窄。

### 32. 胶合表面按玻璃样板加工的公差

文献记载：著名的阿列克西斯-杰-罗顺 (Алексис-де-Рошон) 第一次采用了胶合的光学零件。大约在 200 年前 (1783 年) 出版的著作中写道：在消色差物镜的表面间，采用透明液体能大大改善并减少三元物镜四个内表面制造不精确的影响。在开始时人们采用了纯净的水，其后又用油，但由于它们逐渐蒸发，所以采用它们就不适宜了。1785 年，格拉捷卢 (Грателу) 建议采用与冷杉树脂同一属性的树脂作为胶合用。自那以后对于透镜及其它零件的胶合主要采用了冷杉树脂胶。而只是胶合偏光棱镜才采用亚麻子油。而后采用乙烯树脂及丙烯酸 ( $n_D=1.48$ )。但是冷杉树脂胶在温度由  $-60\sim+60^\circ\text{C}$  变化时，不能保证必要的胶合强度，并且把透镜固定到镜框内时容易出现应力，在清洗时容易溶解在溶剂中。在 1938 年曾经研制出了新型胶——甲醇胶，而在最近几年又有 OK50、OK72φ 和甲醇胶 M。这些胶没有冷杉树脂胶所固有的那些缺点。

当选胶时，必须考虑到它的耐热性，不溶解性，对潮湿、热带气候、海水作用的稳定性，大直径透镜胶合的可靠性，以及配制和胶合是否简单。这些依据对于选择胶无疑是很重要的。但是，与此同时，必须注意与胶和玻璃折射率之差、胶合面的曲率、以及光学系统中胶合的部位有关的胶合面的允许误差。最近几年，研制并采用了具有大折射率的新牌号玻

璃——超重冕玻璃和火石玻璃，钡火石玻璃。并广泛采用重冕玻璃、钡和重火石玻璃。这种情况，在选择胶时，必须适当地予以考虑。由于目前有不同的折射率(由 1.48 到 1.58)的胶，从而有可能很理想地选用。但是胶合超重冕玻璃、重钡和重火石玻璃的透镜，胶的折射率还希望再大一些。在计算胶合表面的公差时，可以以焦距的允许变化，或以系统的象差(例如球差)的允许变化为依据。光学零件表面相对已知正确球面的偏差会引起系统焦距和顶焦距及其象差的改变。

在某些系统中，例如在具有测距机构或距离标尺的照相物镜系统，或具有测距游标式测距机构的大地测量仪器的物镜系统中，表面对玻璃样板的允许偏差可以依据焦距的允许变化来确定；在这种情况下(公式(65))按玻璃样板加工的公差就显得太窄，而象差的变化仍然不大，并不影响象质。例如，对  $f' = 52.4$  毫米，相对孔径为 1:3.5 的 И50 型物镜(图 57)。取  $\Delta f'_{\text{容}} = 0.2\% f'$  (因为还有其他参数误差改变系统的  $f'$ )，那么当  $D_{1,2} = 16$ ； $n_{1,4} = 1.6130$ ； $\frac{h_{1,2}}{h_1} = 1$ ； $p = 6$  时，按公式 (65) 得出：

$$N_{1,2} = \frac{450 \times 16^2 \times 0.1}{\sqrt{6 \times 1 \times 0.6130 \times (52.4)^2}} = 2.8$$



图57 “英杜斯塔尔”型  
照相物镜的光学系统



图58 双胶物镜  
的光学系统

$$N_6 = \frac{450 \times 14^2 \times 0.1}{\sqrt{6 \times 0.8 \times 0.6130 \times (52.4)^2}} = 2.7$$

因为  $h_6/h_1 = 0.8$ ;  $D_6 = 1.40$ 。

当  $h_{3,4,5}/h_1 = 0.8$  时, 相应的对于第 2 和第 3 透镜的  $n_D = 1.5749$ ( $\text{II}\Phi 5$ ) 和  $n_D = 1.5294$ ( $\text{O}\Phi 1$ )。

$$N_{3,4} = \frac{450 \times 0.1 \times 14^2}{\sqrt{6 \times 0.8 \times 0.5749 \times (52.4)^2}} = 28$$

$$N_5 = 3.0$$

因为玻璃零件 3 的  $n_D = 1.5294$  和零件 4 的  $n_D = 1.6130$  与甲醇胶 ( $n_D = 1.54$ ) 折射率之差比与空气临界表面 (对  $\text{II}50$  型物镜:  $n_D - 1 = 0.6130 \sim 0.5294$ ) 玻璃的折射率之差要小得多, 从而胶合表面按玻璃样板加工的公差显然较宽。由公式 (63) 得出对零件 3 的胶合表面  $N_{\text{光}} = 150$ , 而对零件 4 的胶合表面  $N_{\text{光}} = 22.0$ 。当相互配合的胶合表面偏差不良时 (例如在两个表面上均有“凸起”), 为了保证用甲醇胶牢靠的胶合, 又不允许胶层厚度不均匀, 这样, 如果取  $N_6 = 10$  和  $N_7 = 5$ , 那么  $f'$  实际上是不变的。

但是在很多系统中, 焦距的偏差可以大些, 例如大于  $1\% f'$ , 此时对玻璃样板的偏差  $N$  应根据象差的允许变化 (首先是球差) 来计算, 而球差的变化可能已使光学系统——望远镜物镜和具有中等视场 ( $2w = 10^\circ \sim 50^\circ$ ) 的照相物镜——视场中央的象质变坏。这对于大曲率表面和具有玻璃和胶的  $n_D$  相差显著的表面也是正确的。

给出轴向球差  $\Delta \delta s'_k$  允许变化的数值, 例如使其等于最深的  $1/3 \sim 1/5$ , 就可以按公式 (73) 确定光学系统每

一个表面（其中包括胶合表面）的玻璃样板加工的允许环数  $N_v$ ：

$$N_v = \frac{D_v^2 \Delta \delta s'_{r, \text{外}}}{4 \times 0.5 \sqrt{p} h_1^2 f'^2 \left( \frac{h_v}{h_1} \right)^4 \lambda dA_v}$$

$$\approx \frac{900 D_v^2 \Delta \delta s'_{r, \text{外}}}{\sqrt{p} h_1^2 \left( \frac{h_v}{h_1} \right)^4 f'^2 dA_v}$$

由于每一个表面对给定球面存在着偏差  $N$ ，如果允许球差的变化相同，那么在第 1 和第  $v$  个表面、按玻璃样板加工的公差之间就可确定如下关系：

$$N_v = \left( \frac{D_v}{D_1} \right)^2 \left( \frac{h_1}{h_v} \right)^4 \frac{dA_1}{dA_v} N_1$$

如果在公式 (68 a) 中，将玻璃和胶的折射率差值提到括号外面，那么在括号里的各被加数对于冕玻璃和火石玻璃透镜的第一个和第二个胶合表面将变成差不多是同样的了。也就是说对于胶合表面  $dA_v$  的数值主要是以玻璃和胶的折射率之差来确定，而且此折射率之差越小，该数值就越小，因此对  $N$  和  $\Delta N$  的公差就变宽了。

例如，我们计算用于快速自动记录照相机  $C\Phi P$  的双胶物镜（图 58），其  $f' = 750$  毫米；相对孔径为 1:5。取其中一个零件为 K8 玻璃 ( $n_D = 1.5163$ )，而另一零件为 T $\Phi$ 2 玻璃 ( $n_D = 1.6725$ )，当用冷杉树脂胶 ( $n_D = 1.52$ ) 胶合时，对于冕玻璃-胶表面取  $dA_2 = 0.099 d\rho_2$ ，而对于胶-火石玻璃表面取  $dA_3 = 3.2 d\rho_3$ 。当用 OK50 胶 ( $n_D = 1.58$ ) 胶合时，其相应的  $dA_2 = 1.624 d\rho_2$  而  $dA_3 = 1.37 d\rho_3$ 。与此同时，当用冷

杉树脂胶以及用 OK50 胶胶合时，对于第一个和最后一个外露表面  $dA_1 = 5.13d\rho_1$ ； $dA_4 = -6.61d\rho_4$ 。这样就可得出结论：用冷杉树脂胶胶合或用甲醇胶 ( $n_D = 1.52 \sim 1.54$ ) 胶合时，对于具有  $n_D = 1.50 \sim 1.55$  (牌号为 ЛК, К, БК, ФК, ЛФ, ОФ, ФК) 的透镜的被胶合表面，按玻璃样板研磨的公差 ( $N, \Delta N$ ) 可能规定的宽些 ( $N = -$ ； $\Delta N = -$ )，或可能由胶 ( $N = 5 \sim 10$ ； $\Delta N = -$ ) 的条件来确定，而对具有  $n_D = 1.60$  (牌号为 ТК, Ф, ТФ, БФ, СТК) 的透镜被胶合表面的公差  $N$  及  $\Delta N$  仍然保持和对外露的冕玻璃表面差不多一样的窄。当用 OK50 胶 ( $n_D = 1.58$ ) 胶合时，冕玻璃的被胶合表面的制造精度必须提高 (其精度应与外露表面一样)，而火石玻璃透镜的精度就比用冷杉树脂胶胶合时降低  $1/2$ ，而且比外露火石玻璃表面的精度降低  $2/3 \sim 3/4$ 。如果用  $n_D = 1.58$  或更大折射率的胶 (OK50, OK72φ) 代替甲醇胶来胶合折射率大于 1.58 的重冕玻璃和火石玻璃透镜的话。被胶合表面的公差  $N$  及  $\Delta N$  可以放宽，从而体现了它的优越性。

例如电影摄影物镜 PO, OKC, “格利奥斯”，等等。胶合表面按玻璃样板加工精度可以降低  $1/2 \sim 2/3$  或更多，而且公差  $N$  及  $\Delta N$  的下限仅仅以胶的条件来确定。同时，众所周知，在被胶合面偏差较大时，用胶 OK50 及 OK72φ 胶合比用甲醇胶或冷杉树脂胶胶合要牢靠的多。此时对于上述表面可取  $N > 10$ ， $\Delta N = -$ ，这就证实了当用胶 OK50 代替甲醇胶时，“格利奥

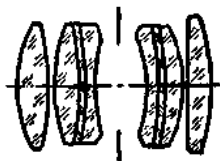


图59 “格利奥斯”型照相物镜的光学系统



斯-PO3”物镜（图59）胶合面的  $dA_v$  值的变化（表8）。

表8 “格利奥斯”型物镜胶合面  $dA_v$  的数值

表面序号	零件号	玻璃牌号	$n_D$	$dA_v$	玻璃牌号	$n_D$	$dA_v$
	2	TK16	1.6126		TK16	1.6126	
4				2.12			0.82
	甲醇胶		1.5200		OK50	1.58	
5				3.73			0.15
	3	Φ1	1.6128		Φ1	1.6128	
	4	TΦ1	1.6475		TΦ1	1.6475	
8				2.86			1.66
	甲醇胶		1.5200		OK50	1.58	
9				2.88			1.40
	5	БΦ13	1.6395		БΦ13	1.6395	

用胶 OK50 胶合时的  $dA_v$  值明显的小于用甲醇胶胶合时的  $dA_v$  值，因此公差  $N$  及  $\Delta N$  可以放宽些 ( $N = -$ ； $\Delta N = -$ )。

折射时反射的损失相应从 0.1 和 0.14% 降低到 0.01 和 0.03%。当胶合由 TΦ5 和 TΦ12（物镜 TO5）玻璃制成的零件时，则从 0.7 降低到 0.35%。

胶合表面  $\Delta N_{\text{胶合}}$  的公差可按以空气为界的外露表面的公差  $\Delta N$  的公式来确定：

$$\Delta N_{\text{胶合}} = \left( \frac{D_{\text{胶合}}}{D} \right)^2 \frac{h}{h_{\text{胶合}}} \times \frac{n_D - 1}{n_{\text{零件}} - n_{\text{胶}}} \Delta N$$

由公式得出结论：对于同一个零件，玻璃和胶的折射率差比  $(n_D - 1)$  的差小多少倍，则胶合表面  $\Delta N$  的公差比外露表面  $\Delta N$  的公差就大多少倍。当差数  $n_{\text{玻璃}} - n_{\text{胶}}$  很小时， $\Delta N$  可以不给定 ( $\Delta N$ ——在毛毡上抛光)。由于有了适合于胶合在所需温度范围内工作的各种零件的不同品种的胶，就可以用选择胶来使按玻璃样板加工的公差尽量放宽。在这种情况下，或者对胶合零件的两个表面把  $N$  和  $\Delta N$  都放宽（如果它们的折射率相近，并且胶的  $n_D$  可能与玻璃的  $n_D$  相接近）或者放宽那个制造较困难的表面（零件玻璃有缺陷或者太硬）。在后一种情况下胶的  $n_D$  应尽可能与零件的  $n_D$  接近。

### 33. 吸收率和厚度偏差对滤光片透过率的影响

在生产滤光片的过程中，经常遇到必须解决诸如给定滤光片的公差及要求、确定滤光片各参数偏差的可允许性和效应等一类问题。下面引出的结论和简化公式在很多情况下是有助于正确解决这些问题的。

**总则和公式** 滤光片玻璃的光学密度  $D_\lambda$  是透过率  $\tau_\lambda$  倒数的对数，即：

$$D_\lambda = \lg \frac{1}{\tau_\lambda} \quad \text{或} \quad 10^{D_\lambda} = \frac{1}{\tau_\lambda}$$

$$\tau_\lambda = \frac{1}{10^{D_\lambda}}$$

在有色玻璃样本中，常常引入数值  $k_\lambda$ ——厚度为 1 毫米的玻璃层对波长  $\lambda$  的吸收率。对于厚度为  $l$  的玻璃层有：

$$D_\lambda = k_\lambda l, \quad \tau_\lambda = \frac{1}{10^{k_\lambda l}} = 10^{-k_\lambda l}$$

如果考虑到滤光片两个反射表面的反射损失  $D_r$ ，那么，

滤光片的光学密度为:

$$D'_\lambda = D_r + D_s, \quad \tau'_\lambda = 10^{-k_\lambda l} \cdot 10^{-D_r},$$

式中  $\tau'_\lambda$ ——考虑到滤光片两个表面反射损失的透过系数 (对波长  $\lambda$  来说)。

$D_r = 0.038$ ——在可见光谱区域内, 对光线入射角 (通常沿光轴) 为已知的大多数牌号的玻璃和不镀透光膜层的滤光片来说, 这个数值通常是常数。

如果取滤光片玻璃的透过系数是对厚度为 1 厘米的而不是对厚度为 1 毫米的, 且将数值  $10^{-D_r}$  用字母  $p_r$  表示, 数值  $10^{-10k_\lambda l}$  用字母  $p_\lambda$  来表示, 那么就得到与光学课程上已知的表达透过系数的表达式相类似的透过系数  $\tau'_\lambda$  的表达式:

$$p_r = 10^{-D_r}, \quad p_\lambda = 10^{-10k_\lambda l}$$

和

$$\tau'_\lambda = p_\lambda^{l/10} p_r \quad (124)$$

如果  $D_r = 0.038$ , 在这种情况下  $p_r = 10^{-D_r} = 0.912$ 。

**厚度变化的影响** 将公式 (124) 写成如下形式:

$$\tau'_\lambda = p_r \times 10^{-k_\lambda l} \quad (124 a)$$

然后对  $l$  取微分, 并认为对已选取的玻璃牌号  $p_r$  及  $k_\lambda$  为常数, 求出滤光片透过系数对于厚度变化的关系式:

$$\Delta \tau'_\lambda = -p_r \ln 10 \times 10^{-k_\lambda l} \Delta l_{\text{毫米}}$$

简化后得到:

$$\Delta \tau'_\lambda = -2.3 \tau'_\lambda k_\lambda \Delta l \quad (125)$$

或

$$\Delta \tau'_\lambda / \tau'_\lambda = -2.3 k_\lambda \Delta l \quad (126)$$

从公式 (126) 中得出结论: 黑色的、密度大的滤光片 ( $k_\lambda$  大的) 厚度偏差对透过系数的影响是很明显的。在厚度

偏差较大的情况下，对于薄的滤光片来说也是如此。不过后者在将公式(126)变换以后就变得更清楚了，因为

$$k_{\lambda} = \frac{D_{\lambda}}{l}$$

那么 
$$\frac{\Delta \tau'_{\lambda}}{\tau'_{\lambda}} = -2.3 D_{\lambda} \frac{\Delta l}{l}$$

也就是滤光片透过系数的相对变化是与滤光片的光学密度和厚度的相对变化成正比。

例如，对厚度  $l = 10$  毫米，玻璃为 KC14 的滤光片，当  $k_{\lambda} = 0.005$ ， $\lambda = 680$  毫微米和  $\Delta l = \pm 0.3$  毫米时，得到  $\Delta \tau'_{\lambda} / \tau'_{\lambda} = -2.3 k_{\lambda} \Delta l = (-2.3) \times 0.005 \times (\pm 0.3) = \mp 0.00345 = \mp 0.345\% = \mp 0.34\%$ ——实际上是不太大的数值。

**吸收率  $k_{\lambda}$  的影响** 将公式(124 a)对  $k_{\lambda}$  微分得：

$$\begin{aligned} \Delta \tau'_{\lambda} &= -p \lg 10 l \times 10^{-k_{\lambda} l} \Delta k_{\lambda} = -\tau'_{\lambda} \ln 10 l \Delta k_{\lambda} \\ &= -2.3 \tau'_{\lambda} l \Delta k_{\lambda} \end{aligned}$$

最后得

$$\frac{\Delta \tau'_{\lambda}}{\tau'_{\lambda}} = -2.3 l \Delta k_{\lambda} \quad (127)$$

如果在公式(127)内，用  $l = D_{\lambda} / k_{\lambda}$  的数值代入，那么

$$\Delta \tau'_{\lambda} / \tau'_{\lambda} = -2.3 D_{\lambda} \frac{\Delta k_{\lambda}}{k_{\lambda}} \quad (127 a)$$

由公式(127 a)得出结论：滤光片透过系数的相对变化与滤光片的光学密度和吸收系数的相对变化成正比。

对于黑色滤光片（以及当数值  $k_{\lambda}$  小而滤光片厚度大的情况下），由于吸收系数的变化可以引起透过系数的非常重

● 原书误为  $\Delta k_{\lambda}$ 。——译者注

要的变化。例如，对玻璃牌号为 RC14 的滤光片来说，当  $\Delta k_\lambda/k_\lambda = 10\%$ ， $l = 10$  毫米， $D_\lambda = 0.05$ ， $\Delta \tau'_\lambda/\tau'_\lambda = -2.3D_\lambda \times \frac{\Delta k_\lambda}{k_\lambda} = -2.3 \times 0.05 \times 0.1 = -0.0115 = -1.2\%$ ，这个数值实际上是很少采用的。

**反射系数变化的影响** 反射系数是考虑到由于滤光片两个表面反射的光损失：滤光片一个表面反射的光损失大约为 4.5~5%，考虑到两个表面反射损失，则滤光片透过率  $p_r = 0.912$  ( $D_r = 0.038$ )。滤光片表面的透光膜使反射损失降低达到 1.5~2% 时，透过率则提高到： $p_r = 0.97 \sim 0.96$ 。这样， $\Delta p_r = 0.06 \sim 0.05$ 。

将公式 (124 a) 对  $p_r$  微分，得：

$$\Delta \tau'_\lambda \approx 10^{-2\lambda l} \Delta p_r \frac{p_r}{p_r}$$

因为  $10^{-2\lambda l} p_r = \tau'_\lambda$ ，则

$$\Delta \tau'_\lambda / \tau'_\lambda = \Delta p_r / p_r \quad (128)$$

由公式 (128) 得出结论：透过系数的相对变化等于光由于反射损失而计算的系数  $p_r$  的相对变化。

光学零件表面镀透光膜能使反射损失降低很多，也就是可以得到  $\Delta p_r = 0.06 \sim 0.05$ ，那  $\frac{\Delta \tau'_\lambda}{\tau'_\lambda} = \frac{0.05}{0.95} = 5.3 \sim 6.5\%$ ——就是个足够可观的数值，这要比在  $\pm 0.3 \sim 0.5$  毫米改变滤光片的厚度或在第 2~3 级范围内 (10~20%) 改变吸收系数来使其透过系数改变更为显著些。减少吸收系数不是一个容易的任务，而利用能透过很少光线的滤光片照相时，增加透光率正好是很重要的事。因此，将滤光片镀透光膜可以提高物镜的透光率达 3~4% (取物镜的透过率为 70~80%)。

滤光片的透过系数为 0.80~0.85); 也就是说, 滤光片镀透光膜和物镜表面镀透光膜同样是适宜的。镀透光膜应该是对滤光片具有最大透过率的那个波长而言的。最大透过率通常是与接收器的光谱灵敏度最大值的波长相吻合的。

**滤光片倍数** 滤光片通常还具有一个特性, 即倍数。也就是在照相时带滤光片应增加的曝光时间和不带滤光片时的曝光时间之比。倍数除与滤光片透过率有关外, 还与所采用的胶片型号、物体类别及照明条件有关。可以用两个面积相除精确的计算出倍数, 即横坐标轴和曲线(此曲线的纵坐标是由物体光线光谱组成的曲线和胶片灵敏度曲线的纵坐标连乘得到的)所包括的面积除以横坐标轴与同一曲线(此曲线的纵坐标应补充乘以滤光片透过率的纵坐标)所包括的面积。但是在制造滤光片时, 其倍数是在白色屏幕上用不带滤光片和带滤光片进行照相的办法确定的: 不带滤光片拍照所得照片的密度与带滤光片拍照所得照片的密度之比, 即为已知型号胶片的倍数。

中性滤光片倍数对透过系数的依赖关系比较简单, 就是中性滤光片透过系数的倒数, 即:

$$k = 1/\tau'_\lambda \quad (129)$$

或

$$\tau'_\lambda = 10^{-k \cdot d} \times 10^{-D} \quad (129 a)$$

在公式(129 a)中的数值  $k_{\text{中}}$ ——对于滤光片工作范围内的波长来说, 厚度为 1 毫米的玻璃平均吸收率。倍数的变化与透过系数的变化有如下关系:

$$\Delta k = - \frac{\Delta \tau'_\lambda}{\tau'_\lambda} \quad (130)$$

或因

$$-\frac{\Delta\tau'_\lambda}{\tau'_\lambda} = -2.3l\Delta k_\lambda$$

故

$$\Delta k = 2.3l\Delta k_\lambda / \tau'_\lambda = 2.3kl\Delta k_\lambda; \quad \Delta k/k = 2.3l\Delta k_\lambda \quad (131)$$

例如，对厚度为 12 毫米，倍数为 8，玻璃牌号为 HC1 的中性滤光片，当  $\Delta k/k = \pm 10\%$  时  $k_{\lambda_0} = 0.05$  (2 级)，也就是  $\Delta k_\lambda = 0.005$ ，得到

$$\Delta k = 2.3kl\Delta k_{\lambda_0} = 2.3 \times 12 \times 0.005 \bullet = 1.1$$

或  $\Delta k/k = 2.3l\Delta k_{\lambda_0} = 2.3 \times 12 \times 0.005 = 13.8\%$

滤光片倍数由于厚度变化也按如下形式变化：

$$\begin{aligned} -\frac{\Delta\tau'_\lambda}{\tau'_\lambda} &= -2.3k_{\lambda_0}\Delta l \\ \Delta k &= -\frac{\Delta\tau'_\lambda}{\tau'_\lambda} = 2.3kk_{\lambda_0}\Delta l \end{aligned} \quad (132)$$

最后

$$\frac{\Delta k}{k} = 2.3k_{\lambda_0}\Delta l \quad (133)$$

对于上述中性滤光片，当  $\Delta l = \pm 0.3$  毫米， $\Delta k = 2.3 \times 8 \times 0.05 \times (\pm 0.3) = \pm 0.28$ ； $\Delta k/k = \pm 3.45\%$ 。

对于有色滤光片，除胶片型号和光源辐射光谱组成外，如果认为其倍数的偏差主要取决于透过率为最大值的那个波长的吸收率  $k_\lambda$  的变化和滤光片厚度的变化，而在很小程度上取决于其光谱曲线的陡度的变化。那么，在此情况下可以得出与用于中性滤光片的 (131) 和 (133) 公式相同的公式，

● 原文如此，有误。——译者注

也就是可以认为：

$$\frac{\Delta k}{k} = 2.3l\Delta k_{\lambda_0}$$

和

$$\frac{\Delta k}{k} = 2.3k_{\lambda_0}\Delta l$$

例如：对于玻璃为KC14的红色滤光片，当 $k_{\lambda_0}=0.005$ ， $\Delta k_{\lambda_0}=0.0005(\pm 10\%k_{\lambda_0})$ ， $l=10$ ， $\Delta l=\pm 0.03$ 时，由于光吸收系数的改变得到 $\Delta k/k=2.3\times 10\times(\pm 0.0005)=1.15\%$ ，由于厚度的变化而得到的 $\Delta k/k=2.3k_{\lambda_0}\Delta l=2.3\times 0.005\times(\pm 0.03)=0.35\%$ ——显著的比滤光片倍数的变化要小，而这一变化是由在滤光片表面的反射损失所造成的：

$$\Delta k/k = -\Delta\tau'_\lambda\tau'_\lambda/\tau'^2_\lambda$$

因为

$$\Delta k = -\Delta\tau'_\lambda/\tau'_\lambda, \quad k = 1/\tau'_\lambda$$

$$\frac{\Delta k}{k} = -\frac{\Delta\tau'_\lambda}{\tau'_\lambda} = -\frac{\Delta p_r}{p_r} \quad (134)$$

对于有色滤光片

$$\frac{\Delta k}{k} = -\frac{\Delta p_r}{p_r} = -\frac{0.03}{0.91} = -3.3\%$$

当然，按公式 $k = 1/\tau'_\lambda$ 不能计算出有色滤光片的倍数。因为在此情况下没有考虑到滤光片在胶片的所有灵敏度范围内的透过率和被照物体的光谱辐射。

如果滤光片的透过范围，物体辐射和光谱灵敏度足够宽的话， $\lambda_{\text{通过}}$ 的偏差按2级（ $\Delta\lambda_{\text{通过}}=\pm 10$ 毫米），实际上不影响仪器的透过率。但对于OC14的滤光片（ $\lambda_{\text{通过}}=570\sim 585$ 毫微米）和KC14的滤光片（ $\lambda_{\text{通过}}=630\sim 650$ 毫微米）来说，



如果使用全色胶片照相时（此胶片灵敏度达  $\lambda = 650 \sim 670$  毫微米，偏差  $\Delta\lambda_{\text{раз}} = 10$  毫微米），已经显著的影响曝光时间。

### 34. 推荐如何选配观察和检验测量仪器用的滤光片

在文献<sup>●</sup>中指出，在光学系统中必须考虑衍射现象，此衍射现象不仅在眼睛光谱灵敏度最大值上观察到，而且在所有区域内也观察得到。在文献里曾指出为了得到最高的反衬度、最好的象质以及最高的分辨率，就应该将此区域不仅从蓝色光线方面而且也需从红色光线方面给以限制。

目前在大地测量仪器中，为了增强成象的反衬度而采用的滤光片应该用牌号为 OC17、厚度为 1~2 毫米和牌号为 ЖЗС1 与 ЖЗС6、厚度为 1~2.5 毫米的有色玻璃（ГОСТ 9411-66《有色光学玻璃》）来制造。为了同样目的，观察仪器用的滤光片应该采用牌号为 OC17、厚度为 1~2 毫米的玻璃来制造。但这些滤光片是有缺陷的。例如由 ЖЗС6 制造的滤光片，对于蓝色和红色光谱部分没有明显界限，而且较好地透过光谱红色部分，这样就降低了反衬度、分辨率和瞄准精度，从而使所给的光学系统不可能得到其最高值。由 ЖЗС1 制造的滤光片也具有同样的缺陷，并且透过的光线很少。而由 OC17 制造的滤光片能很好地透过光谱的红色部分，虽然对成象的主观亮度稍有增加，但其缺陷仍与 ЖЗС6 和 ЖЗС1 滤光片相同。

在图 60 (a) 中给出了下列滤光片透过系数  $\tau$  的光谱

● 见 Мальцев М. Д. Об ахроматизации визуальных измерительных оптических систем. - Известия вузов. Геодезия и аэрофотоъемка, 1969, стр. 109-112. —译者注

曲线，厚度为 1 和 2 毫米的 OC17 滤光片和厚度为 1.2 和 3 毫米的 ЖЗС6 和 ЖЗС1 滤光片。

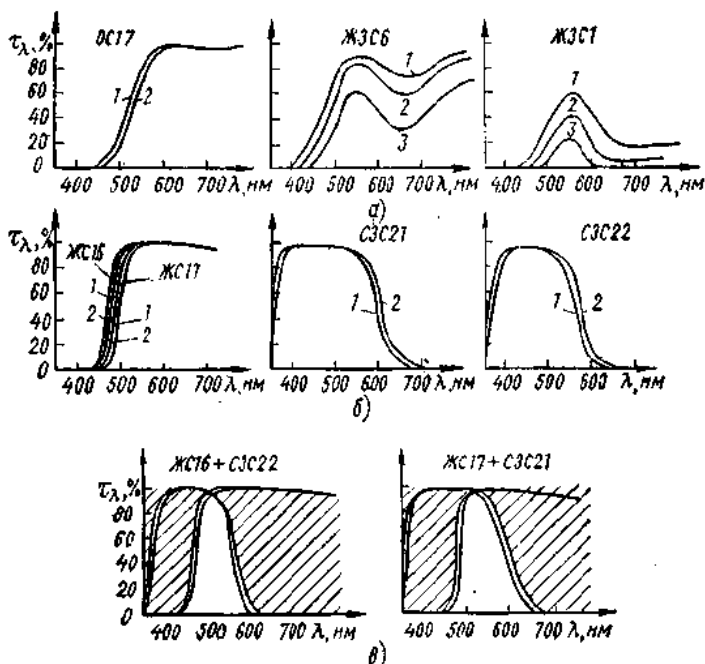


图60 用于观测仪器的滤光片的透过率

为了测量，最好用透过光谱区域为 460~580 毫微米 (560 毫微米)，透过最大值靠近 500 毫微米的滤光片来代替 ЖЗС6 和 ЖЗС1 滤光片，而利用透过光谱区域为 480~620 毫微米，并且对蓝-紫光谱区和红色光谱区都具有十分明显透过界限的观察用滤光片来代替在远距离烟雾中观察目标时为了增加反衬度专用的 OC17 滤光片。

对于增加系统的透过率和象的反衬度，以及提高分辨率

方面，这些滤光片比用 ЖЗС6、ЖЗС1 和 ОС17 要好，从而也就提高了瞄准精度和便于识别目标。这些滤光片可以由两种颜色玻璃（即每片厚度为 1~1.5 毫米的 ЖС16 和 СЗС22 玻璃或每片厚度为 1~2 毫米的 ЖС17 和 СЗС21 玻璃）相干涉或相组合而成。

在图 60(б) 中示出厚度为 1 和 2 毫米的 ЖС16, ЖС17, СЗС21 和 СЗС22 每个滤光片透过系数的光谱曲线，在图 60(в) 中示出每片厚度为 1~2 毫米的 ЖС16+СЗС22 和 ЖС17+СЗС21 复合滤光片透过系数的光谱曲线。

对于为了增加象的反衬度和减少观测者在观测、检验和测量过程中眼睛的疲劳程度、而在实验、检验和测量仪器中使用的滤光片应该是由厚度为 1 到 5.0 毫米的 ЖЗС9 和 ЖЗС1 和厚度为 1.5 毫米的 СС2 有色玻璃（ГОСТ9411-66）来制造，但是它们具有非常严重的缺点。例如厚度为 1~3 毫米的 ЖЗС9 和 ЖЗС1 滤光片透过的光谱区很宽，其中包括红色光谱部分，这种情况特别是对检验测量仪器是不希望的。

厚度为 5 毫米的 ЖЗС9 和 ЖЗС1 滤光片在橙色和红色光谱区没有明显的透过界限，而且透光很小。厚度为 1~1.5 毫米的 СС2 滤光片比 ЖЗС1 稍微好些，但透光也少，并且对短波和长波的光谱区域也没有明显的透过界限。

采用上面所列举的滤光片，对于已知光学系统来说，没有能得到最大可能的象的反衬度、最高分辨率和最高的瞄准精度。所以应同时重新审查一下用于检验测量仪器中的滤光片的配套情况：透过率范围应该有更加明显的界限，并且稍向蓝-淡蓝色光谱区移动，也就是应该位于 460~580 (560)

毫米的界限内。此光谱区是为干涉滤光片 ИС (图 61б), 或者是由每块厚度为 1~2 毫米的有色玻璃 ЖС16 和 С3С22 所组成的复合滤光片, 或是由同样厚度的 ЖС16 和 С3С21 玻璃组成的更亮些的滤光片所透过和限制的。这些复合滤光片不仅透过的光比 ЖС1 和 С3С2 滤光片多 3~10 倍, 而且反衬度提高了 10~20%, 并且还提高了仪器的分辨率和瞄准精度。同时它们还能允许采用小功率的光源, 这就不仅降低了能量的消耗, 而且还减少了仪器的受热、失调和由于温度变化而带来的测量误差。

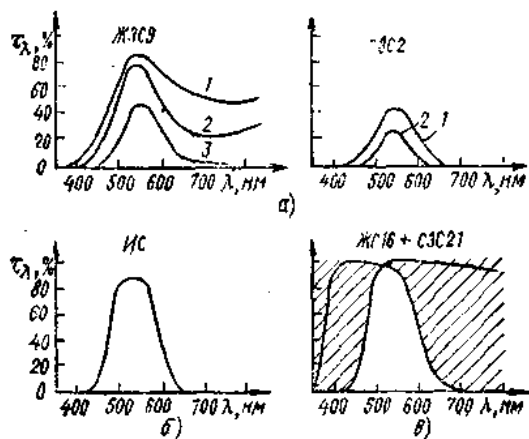


图61 检验测量仪器用的滤光片的透过系数

图 61 (а) 给出了厚度为 1.2 和 3 毫米的 ЖС9 和厚度为 1 和 2 毫米的 СС2 滤光片的透过系数  $\tau_{\lambda}$  的光谱曲线。图 61 (б) 和 (в) 上示出了建议采用的透过系数的光谱曲线。后者的优越性是显而易见的, 他们对蓝色和红色光谱

区都有明显的透过界限，透过率最大值移向蓝-绿光谱区 ( $\lambda_0 = 500 \sim 520$  毫微米)。

图 62 给出了位于焦距  $f' = 500$  毫米，相对孔径为 1:5， $2\omega = 45^\circ$  的照相物镜前面的滤光片的图面结构尺寸，该滤光片是由玻璃 ЖС18 (ГОСТ9411-66) 制造的。

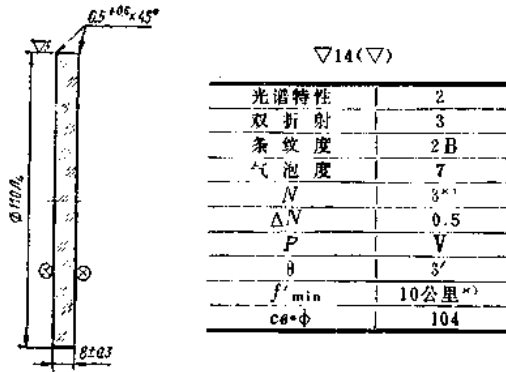


图62  $f' = 500$ , 1:5,  $2\omega = 45^\circ$ 的照相物镜前的滤光片的图面结构尺寸

几点说明，

(1) ⊗ 镀透光膜 43 P，按技术条件……， $\lambda = 560 \pm 30$  毫微米。

(2) 焦距  $f'_{\min} = 10$  公里，相当于两个表面上光圈的代数和并不大于一个光圈。

(3) 毛面涂 ЭМ 漆，按技术条件……。

图 63 给出了位于焦距为  $f' = 52.5$  毫米，相对孔径为 1:2 的照相物镜前面的滤光片的图面结构尺寸，该滤光片是由玻璃 ЖС17 (ГОСТ9411-66) 制造的。

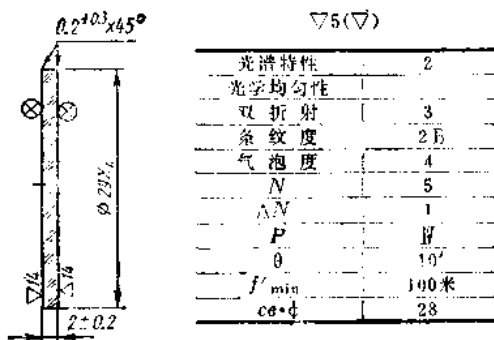


图63  $f' = 52.5$ ;  $1:2$ ;  $2\omega = 45^\circ$ 照相物镜前的滤光片的图面结构尺寸

#### 几点说明:

(1) ⊗镀透光膜 43 P, 按技术条件……,  $\lambda = 560 \pm 30$  毫微米。

(2) 焦距  $f'_{\min} = 100$  米, 相当于两个表面上光圈的代数和不大于一光。

图 64 给出了位于望远镜目镜后、眼睛前的滤光片的图面结构尺寸, 该滤光片是由玻璃 OC17 (ГОСТ9411-66) 制造的。

#### 几点说明:

(1) N、ΔN——在毛呢上抛光。

(2) 焦距  $f'_{\min} = 10$  米, 相当于两个表面上光圈的代数和不大于一光。

(3) ⊗镀透光膜 43 P, 按技术条件……,  $\lambda = 520 \pm 30$  毫微米。

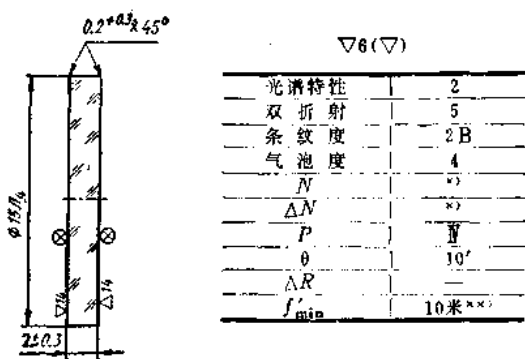


图64 望远镜目镜后的滤光片的图面结构尺寸

### 35. 对光学零件镀透光膜的要求

为了提高系统的光的透过率和某些牌号玻璃的化学稳定性，以及在减少反射系数的同时也降低光的漫射，光学零件折射表面镀合适的透光膜被广泛地采用着。

按镀透光膜的层数可分为一层的、双层的和三层的。按其镀的方法可分为化学溶液的（43P；44P，43P和45P，44P，43P），化学腐蚀的（通常用醋酸-63T）和物理真空蒸发法——通常用氟化镁24H。透光膜43P是在预先清洁好的旋转的零件上滴上硅酸乙酯溶液获得的。消色差透镜的透光膜44P，43P和44P，43P是在清洁的旋转零件上滴上钛酸乙酯和硅酸乙酯溶液获得的。镀透光膜45P，44P，43P是滴上钛酸乙酯和硅酸乙酯的混合溶液，钛酸乙酯和硅酸乙酯溶液获得的。零件的转数和溶液的浓度按如下方法选取：使膜层厚度等于 $\lambda/4$ ，而折射率 $n_m = \sqrt{n}$ ；在用化学腐蚀法镀膜时，这些条件是以选择酸的浓度和持续时间

来保证的；而在用物理方法镀膜时，则用选择蒸发时间来保证。其中  $n_1$  和  $n$  为膜层和玻璃的折射系数，而  $\lambda_0$ ——透过最大值和反射最小值的波长。

在比较宽的光谱区域内，镀单层和三层膜实际上对各种辐射的反射（或透射）是相同的，而且反射系数几乎不随波长而改变。单层膜 43P, 63T (24H——很少采用) 的反射系数随零件折射率的增加而减小。而且，如果当  $n = 1.5$  时， $r = 2.5\%$ ，而当  $n = 1.7$ ， $r = 1.4\%$ 。镀双层膜 44P, 43P 只是对窄光谱区（150~200 毫微米）具有小的反射系数。而在这光谱区的边缘，其反射系数就很快地加大（可达 4~8% 或更大）。所以对于复杂系统的大多数表面采用镀双层膜，特别是当膜层厚度 ( $\lambda_0$ ) 的偏差较大时，可能导致仅仅对窄光谱区有选择的透过。在用彩色胶片照相时，这种情况就造成了照相物镜色传导的畸变，透过系数的降低，在蓝和红色光谱部分光的色散的增加。另一方面，在这种情况下，具有狭窄的目标辐射区或具有接收器光谱灵敏度的目视系统中，诸如单筒望远镜和显微镜的系统，透过区受到严格的限制。镀 43P 和 63T 膜要比镀 44P, 43P 和 24H 膜牢固，所以，镀 43P 和 63T 膜被用于外表面或具有大的  $n_0$  的内部零件上，那时反射系数如同镀 44P, 43P 膜时一样的小。镀 63T 膜不仅所需的时间较长，而且由某些玻璃制造的零件在镀膜后还会在表面上出现划痕，因此仅仅在为了保护有挂灰危害的玻璃和由于直径大而又不能用其他方法镀膜的零件时，才采用这种方法镀膜。镀 24H 膜在其镀的过程中，不需零件旋转，因此表面疵病（擦痕，麻点）并不引起镀膜的缺陷（“膜花”等），而且在直角形式（棱镜）的表面上可以得到比较均匀的膜



层。如果在镀 24H 膜的过程中,把零件预热到 200~250°C,那么膜层将变得更为牢固,而且可以用于外表面上。镀 45P, 44P, 43P〔具有低的反射系数(0.4~0.8%)〕与折射率和波长无关,这种膜在宽光谱区没有选择性反射(透过),强度差,建议用于制造比较复杂、成本也高的内表面。透过最大值和反射最小值的波长  $\lambda_0$  (即膜层厚度)的选择应考虑到接收器辐射和接收器光谱灵敏度的最大值。选择  $\lambda_0$  和公差  $\Delta\lambda_0$  的例列于表 9 中。

表 9 镀膜应用举例及  $\lambda_0$  的公差

仪 器 名 称	$\lambda_0$ (毫微米)	反射光下的膜层颜色
望远系统和显微镜	520	淡红色调
高级照相物镜和短焦距航空照相物镜	540~560	从淡红色到紫红色和紫色
带滤光片 KC, OC 的长焦距航空照相物镜	600	紫-蓝色调
夜间用的仪器:		
物    镜	900	淡蓝色
目    镜	520	淡红色调
用于不含敏化剂胶片的复制物镜	450	石青色的
带滤光片 3C1, 3C2 的复制物镜	520	淡红色调
光电转换器和电视机荧光屏摄影物镜	480~520	石青-淡红色调
其他系统		$\lambda_0$ 按目标辐射或接收器的光谱灵敏度选择

$\lambda_0$  的公差

⊗镀膜 43P, 63T, 24H, 45P-44P-43P;  $\Delta\lambda_0 = \pm 30 \sim 50$  毫微米。

⊗镀膜 44P-43P;  $\Delta\lambda_0 = \pm 20$  毫微米。

⊗镀膜 44P-43P 消色差透镜;  $\lambda_0 = \pm 30$  毫微米。

## 符 号

### 1. 光学性能

$n_C, n_D, n_F$ ——和夫琅和费谱线  $C$ 、 $D$ 、 $F$  相对应的折射率;

$n_F - n_C$ ——中部色散;

$\nu$ ——中部色散系数;

$\beta_C, \beta_D, \beta_F$ ——温度变化  $1^\circ\text{C}$ ， $C$ 、 $D$ 、 $F$  各谱线折射率的增量;

$V_s$ ——温差光学常数;

$\alpha$ ——线膨胀系数;

$\lambda$ ——波长;

$\lambda_{\text{通过}}$ ——滤光镜规定的透过的光谱界限的波长;

$\lambda_0, \lambda_{\text{min}}$ ——滤光镜玻璃最小吸收范围内的波长;

$D$ ——光学密度——透过系数倒数的对数;

$\tau$ ——光学系统玻璃的透过系数;

$\kappa_p$ ——玻璃光学密度曲线的陡度，以波长  $\lambda_{\text{通过}} - 20$  毫微米和  $\lambda_{\text{通过}}$  处的光学密度值之差来表示;

$r, \rho$ ——反射系数;

$\alpha$ ——光吸收系数;

$\varepsilon, \varphi$ ——分辨本领——分辨率（用角度度量）;

$R$ ——同上，用线对度量（即每毫米的线对数）。

### 2. 线性值

$f'$ ——象方焦距或后焦距;

$f$ ——物方焦距或前焦距;

$\varphi' (\varphi)$ ——光焦度——焦距的倒数值;

$s_F$ ——由系统第一表面到物方（前）焦点的距离;

$s'_F$ ——由系统最后表面到象方（后）焦点的距离;

- $s (s')$  —— 由系统第一 (最后) 表面到物 (象) 的距离;  
 $\sigma (\sigma')$  —— 会聚度——到物 (象) 距离的倒数;  
 $\beta$  —— 系统的线性放大率;  
 $\Gamma$  —— 望远镜的放大率 (角放大率, 可见放大率);  
 $\Gamma'$  —— 显微镜、放大镜的放大率;  
 $D_p (D_p')$  —— 系统的入 (出) 瞳直径;  
 $0.2 A$  —— 相对孔径  $1 : f' / D_p$ ;  
 $n_{rel}$  —— 相对孔径的分母, 光圈数  $(f' / D_p)$ ;  
 $h_v, h_u$  —— 光线与透镜的第  $v$  表面相交点的高度;  
 $p, k$  —— 系统的内表面数;  
 $m$  —— 系统内的零件数;  
 $r, R$  —— 表面曲率半径;  
 $\rho$  —— 表面曲率—— $1 / r$ ;  
 $D$  —— 零件直径;  
 $cn, \phi$  —— 零件的通光直径;  
 $l, d$  —— 透镜内的光程长;  
 $d, l$  —— 系统内各表面间的距离。

### 3. 象差及象的其他误差

- $\delta s'$  —— 轴向球差;  
 $ds', ds'_m$  —— 轴向色差;  
 $l', dl', dl'_m$  —— 相应的垂轴象差;  
 $\delta z'$  —— 弥散圆;  
 $l'_m(x'_i)$  —— 细光束子午 (弧矢) 场曲;  
 $l'_m(t'_i)$  —— 同上 (沿主光线的);  
 $(x'_i - x'_m), a$  —— 象散;  
 $a_{ro}$  —— 轴上点象散;  
 $\varepsilon, \varepsilon'$  —— 物象空间的角视差;  
 $\Delta x, \Delta x'$  —— 线视差;  
 $\sigma, \sigma'$  —— 屈光度视差;

$\Delta x'$ ——离焦，象偏离象平面的量；

$\omega$ ——楔镜或棱镜的光线偏向角；

$d\omega$ ,  $\Delta\omega_{\text{B}}$ ——角色差。

#### 4. 公差

$\Delta n_D$ ——折射率极限偏差；

$\Delta(n_F - n_C)$ ——中部色散极限偏差；

$N$ ——以光圈(干涉环或带)数表示的零件表面曲率半径极限偏差；

$\Delta N$ ——以光圈数或带数的差表示的沿两相互垂直的、具有最大与最小光圈数的直径方向的零件表面偏离球面或平面的极限偏差；

$f'_{\text{min}}$ ——平板玻璃或棱镜由于加工时产生光学表面的球面性误差，所允许焦距的最小值(以毫米或米表示)；

$c$ ——允许的总偏心差或中心偏差，以毫米或透镜边缘厚度差表示；

$\theta$ ——平板玻璃的极限平行差，以分或秒表示；厚度差，以毫米表示；

$\pi$ ——棱镜极限尖塔差，以分或秒表示；

$\delta$ ——棱镜两相等角之间的极限偏差(指有数字表示角度的棱镜)，例如：直角棱镜  $\delta_{45^\circ}$ ，以分或秒表示；

$P$ ——按抛光后的表面上的麻点、擦痕表示的光洁度等级；

$\Delta R$ ——玻璃样板的精度等级(按 ГОСТ 2786-62)或表面半径极限偏差，以%表示。

[General Information]

书名=光学零件的公差计算

作者=BEXP

页数=210

下载位置=<http://book3.ssreader.com.cn/diskds/ds74/14/!00001.pdg>