

# 内调焦望远镜的精度分析

王 文 桂

(中国科学院上海光机所)

## 提 要

本文分析了影响内调焦望远镜精度的各种主要因素,并指出,若利用安装误差对制造误差进行补偿,则将会提高仪器的使用精度。

内调焦望远镜采用负的调焦系统,可以观察一系列有限距离的物体。相对于外调焦系统,该系统具有:降低加工要求;减少视轴晃动;保持望远镜筒长度不变,因而可以很好地防止灰尘和污秽进入仪器内部等优点。仪器具有:结构紧凑、使用方便、用途多样等特点。原则上可用作一般光学系统的主要调整仪器,尤其对多个透光面组合的光学系统(例如激光谐振腔)的调整是十分方便的。它可对平面反射镜、非平面反射镜(包括凸的或凹的球面、二次曲面等)进行同心、共轴的调整。使用中仪器还可以较好地取代普通的平行光管。

## 一、工作原理

仪器的光学系统如图1所示(该系统是由本所王之江同志拟定的),由光源1发出的光束,经过聚光镜2及反射棱镜3均匀地照明球面反射镜4,在球面反射镜上镀以铝全反射膜,并于其上刻去十字形膜层,形成一个暗视场中亮的十字丝。当调焦物镜组5被调节在无穷远位置时,十字丝恰好位于物镜系统5、6的组合焦面上。因而,由十字丝射出的光束通过物镜系统后以平行光射出,从反射面7(或欲测物)反射回来又通过物镜系统

将十字丝的象成在球面反射镜的镀铝面上。通过平面反射镜8及转象物镜9,在目镜11的分划板10上,可以观察到十字丝及其自准象的重合程度,并可从测微目镜的鼓轮上读出其不重合程度。调焦组5可借助于调焦长螺母牵引,使不同距离的目标均成象于球面反射镜上。调焦使 $f > f_{\infty}$ 时,可以观察到仪器后方的虚目标;当 $f < f_{\infty}$ 时,可以观察到仪器前方的实目标。

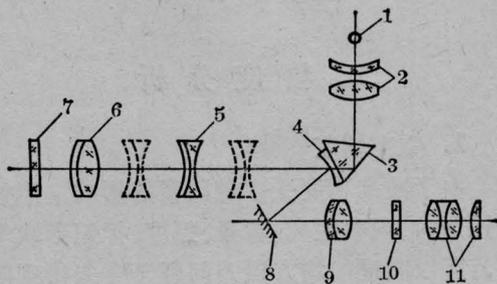


图1 光学系统

仪器的物镜系统分成两组,依靠调焦组5相对于固定组6的移动得到焦距的变化,从而保持调焦时望远镜的长度不变,使相应不同距离的物体均可成象在球面反射镜上。物镜系统的组合焦距 $f'$ ,由固定物镜组的焦距 $f'_1$ 、调焦物镜组的焦距 $f'_2$ 以及两组之间的主点间隔 $e$ 决定:

收稿日期:1978年11月9日。

$$f' = \frac{f'_1 \cdot f'_2}{f'_1 + f'_2 - e} \quad (1)$$

图2给出间隔  $e$  与组合焦距  $f'$  及对应的物距  $x$  的关系。

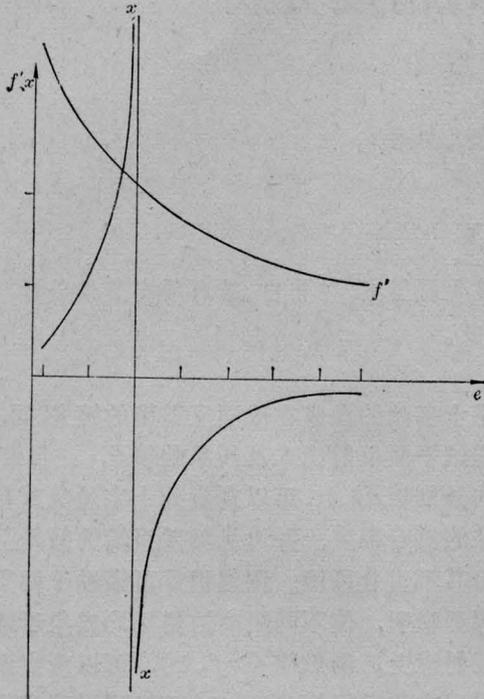


图2 间隔  $e$  与焦距  $f'$  及物距  $x$  的关系  
 $e:f'_1=1:5; e:x=1:100$

## 二、精度分析

### 1. 瞄准精度

由于瞄准精度受多种因素的影响,诸如物镜形式、观察距离、背景、照度、标记形状等等,所以瞄准的均方误差问题至今未得到明确结果。但是,决定瞄准精度的基本因素是望远镜的放大率、望远镜和观察者肉眼的鉴别率以及十字丝宽度等。

如果望远镜的视轴与目标方向倾斜成  $\alpha''_1$  角,则目标的象对十字丝中心将偏离一个距离,只有当这个值对肉眼的视网膜所张开的角度大于肉眼的鉴别率  $R''_r$  时,才能鉴别出来。也就是必须满足:

$$\alpha''_1(f') = \frac{R''_r}{x'} f_H \quad (2)$$

式中  $f_H$  为目镜焦距,  $x'$  为物体通过物镜系统的象距,因为  $x'$  随  $f'$  变化而变化,所以  $\alpha''_1$  是焦距  $f'$  的函数而表示为  $\alpha''_1(f')$ 。对于无穷远物体,

$$\alpha''_1 = R''_r / M$$

上式说明:瞄准精度随着望远镜的放大率  $M$  和观察者肉眼的鉴别率而异。

望远镜分划板上的十字丝宽度也是影响瞄准精度的因素,当十字丝与目的物(有时是十字丝的自准象)重合时,瞄准的限制误差  $\alpha''_2(f')$  是焦距  $f'$  的函数,可表示为:

$$\alpha''_2(f') = \frac{t}{x'} \rho'' \quad (3)$$

式中  $t$  为十字丝宽度的中值,  $\rho = 206265$  为弧度化秒系数。由式(3)看出,十字丝宽度越宽,瞄准限制误差越大,即瞄准精度越低。但是,十字丝太细,光能的透过减少,亮丝变暗,能见度变差,影响瞄准精度,应选取最佳值。

### 2. 调焦时视轴的晃动

内调焦望远镜调焦时,调焦镜组在镜筒内移动,由于镜筒制造误差和必然存在的间隙,导致调焦组不能沿着固定组的后主点与十字丝中心的连线移动。调焦镜位移产生:调焦镜光轴相对于望远镜光轴平移,和调焦镜光轴相对于望远镜光轴的倾斜两种偏差。

调焦镜光轴相对于望远镜光轴的平移偏差  $\delta$  引起的视轴晃动角  $\alpha''_3(f')$  (图3)为:

$$\alpha''_3(f') = -\frac{f'_1 - e}{f'_1 f'_2} \delta \rho'' = \frac{f' - f'_1}{f'_1} \delta \rho'' \quad (4)$$

由(4)式可知,当调焦组与固定组之间间隔  $e$  值小于焦距  $f'_1$  时,随着间隔的增大晃动角

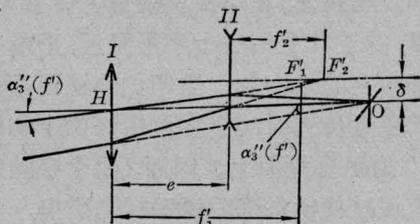


图3 平行偏离引起的视轴晃动

$\alpha_3''(f')$  减小, 与  $\delta$  同号; 当  $e > f_1'$  时, 随着间隔的增大幌动量  $\alpha_3''(f')$  增大, 与  $\delta$  异号; 当  $e = f_1'$  时不论调焦镜组偏离多大均不幌动。

调焦镜光轴对望远镜光轴倾斜  $\varphi$  角引起的视轴幌动  $\alpha_4''$ :

如图 4 所示, 若厚度为  $d$  的负透镜, 其主截面  $H$ 、 $H'$  之间的距离为  $d_0$ , 则主截面位置  $S(H)$  及  $S'(H')$  由下式决定:

$$S(H) = -f_2' \frac{n-1}{n} \frac{d}{r_2}$$

$$-S'(H') = f_2' \cdot \frac{n-1}{n} \cdot \frac{d}{r_1}$$

式中  $r_1$ 、 $r_2$  为透镜的曲率半径,  $n$  为透镜材料的折射率。因为透镜具有一定厚度  $d$ , 以倾斜角  $\varphi$  入射的光线  $I$  将于  $I'$  出射, 而移动了距离  $Z$ , 由图 4 得:

$$Z = d_0 \sin \varphi$$

因为  $d_0 = d - [S(H) - S'(H')]$   
故

$$Z = d \left[ 1 - f_2' \frac{n-1}{n} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \right] \sin \varphi$$

В.С. Гриппин 将倾斜角  $\varphi$  与平移偏差引起的幌动角直接综合<sup>[2]</sup>, 在视轴的幌动上没有考虑  $\varphi$  角引起的偏移量  $Z$  还受到固定物镜组的

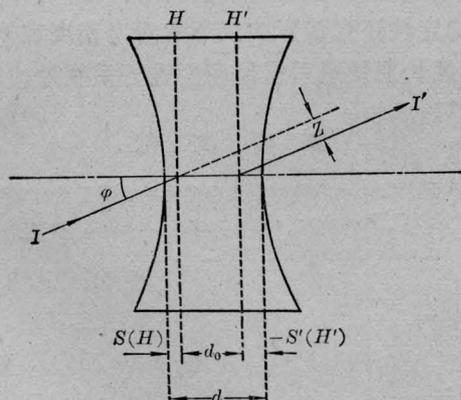


图 4 倾斜偏移量

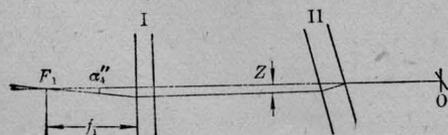


图 5 倾斜引起的视轴幌动

影响。实际上,  $Z$  值在系统中引起的视轴幌动角  $\alpha_4''$  (图 5) 为

$$\alpha_4'' = \frac{Z}{f_1} \rho''$$

$$= \frac{d}{f_1} \left[ 1 - f_2' \frac{n-1}{n} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \right] \sin \varphi \rho'' \quad (5)$$

由(5)式看出:  $\varphi$  引起的视轴幌动  $\alpha_4''$  与组合焦距  $f'$  无关, 一般来说  $\alpha_4''$  比  $\alpha_3''(f)$  小, 故在图 6 中未予表示; 对于薄透镜, 不论倾斜角  $\varphi$  多大, 视轴不幌, 随着透镜的厚度增加, 幌动增大。

3. 十字丝中心的位置偏离光轴引起的误差(以下简称置中误差)

球面反射镜 4 (见图 1) 上的十字丝中心若未安置在望远镜的光轴上, 便形成视轴对光轴的偏离, 其变化规律由下式决定:

$$\alpha_5''(f) = \frac{\varepsilon}{x'} \rho'' \quad (6)$$

式中  $\varepsilon$  为十字丝中心对光轴的偏离量,  $\alpha_5''(f')$  为置中误差  $\varepsilon$  所引起的视轴偏离角。对于一台已校好的仪器, 这个误差属于系统误差。

### 三、仪器精度

#### 1. 十字丝置中误差对视轴幌动的校正

如若装校时使置中的偏离角  $\alpha_5''(f')$  对制造误差引起的幌动  $\alpha_3''(f)$  及  $\alpha_4''$  进行补偿, 将使仪器得到较佳结果。由于仪器结构限制, 函数  $\alpha_3''(f')$  及  $\alpha_4''$  在指定的平面内变化, 当让函数  $\alpha_5''(f')$  也在这个平面内变化时, 幌动误差函数与置中误差函数的综合取其代数和, 以  $\varphi(f')$  表示:

$$\varphi(f') = \alpha_3''(f') + \alpha_4'' + \alpha_5''(f')$$

$$= \frac{f' - f_1'}{ff_1'} \delta \rho'' + \frac{Z}{f_1} \rho'' + \frac{\varepsilon}{x'} \rho'' \quad (7)$$

式(7)中设  $\varepsilon = k\delta$ , 显然, 当  $k$  取正值时, 综合误差取其和, 为最不利的情况。当  $k$  取负值时, 综合误差取其差, 仪器精度得到提高, 为

最有利的情况。令  $\varphi(f')=0$  时得:

$$k = -\left(\frac{f' - f'_1}{f' f'_1} + \frac{Z}{f'_1 \delta}\right) x' \quad (8)$$

由(8)式看出:因  $f'_1$  是固定值,  $k$  值的大小取决于组合焦距  $f'$ 。也就是说,每选取一个  $k$  值,便可在一个对应焦距位置上,将误差校正到零值,在该位置只剩下瞄准误差,其附近位置的误差也得到改善。 $k$  值的选取,由仪器使用要求决定,作为激光腔调整用时多选择  $f' = f'_\infty$  处  $\varphi(f') = 0$ 。

## 2. 误差综合

在装校仪器时,我们采用了下述方案,于仪器前方盲区之外,放置一平面反射镜,将球面分划板粗略地放置于可在视场中观察到其自准象与十字丝重合的位置上,然后用分划板和调整架各调一半逐次接近的办法,反复观察球心象及十字丝的自准象是否重合,调节调焦螺母于近点到远点之间,使十字丝与其自准象始终保持重合,这样就使置中误差补偿了视轴晃动误差在无穷远位置的值。校正其它位置的方法类推。

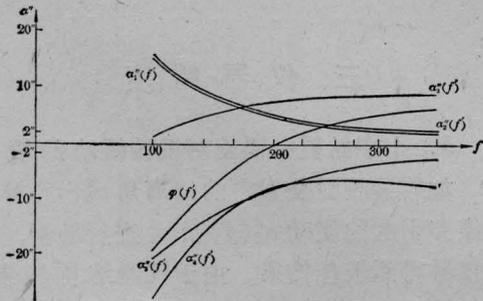


图6 误差分布曲线

一般情况下,仪器的误差函数由下式决定:

$$\alpha(f') = \sqrt{[\alpha_1(f')]^2 + [\alpha_2(f')]^2 + [\varphi(f')]^2} \quad (9)$$

该误差函数曲线示于图6。

## 四、结 束 语

瞄准误差对精度影响甚大,即便加工制造十分精确,装配校准十分精心,如果操作者瞄准时不仔细,所造成的瞄准误差会远远大于仪器制造及装校所造成的误差。为此,要求操作者使用仪器时务须细心。

仪器用以观察实目标时,随着物体向仪器靠近,误差迅速增大。因此,提高仪器的鉴别率、放大率、改善分划板形式、提高调焦镜筒的制造质量和十字丝置中精度是提高仪器精度的途径。当仪器用以观察虚目标时,提高调焦镜筒的制造质量尤为重要。合理地制订调焦镜公差,由仪器的使用范围和精确度要求决定。

仪器调整机构调节的连续性和精细度,不仅决定仪器使用时是否得心应手,同时其不稳定性还直接影响仪器的对准精度和重复性,经长期使用后仪器需要进行系统地检验。

## 参 考 文 献

- [1] P. Kissam; «精密制造中使用的光学工具», 1965.
- [2] В. С. Гришин; «Юстировка сложных оптических систем приборов», 1976.