

# 干 涉 仪 物 镜 的 设 计

张二星

**摘要:** 本文介绍干涉仪物镜的特点并讨论用微计算机进行光学设计和辅助机械设计的方法。

## 一、引 言

物镜在干涉仪中占有很重要的地位。本文将从光学、机械方面加以介绍,并试图用微计算机进行设计,阐明设计方法。

## 二、一 般 介 绍

干涉测量都要对干涉图进行处理。其方法一是判别干涉条纹的位移,例如条纹计数。二是判别条纹的倾角。三是判别条纹的形状。前者对波面变形要求低一些,但也要限制在 $\lambda/5$ 以内。判别条纹的倾角时,波面变形应控制在 $\lambda/20$ 以内。判别条纹的形状时,波面变形应控制在 $\lambda/20$ 以内或更小。物镜是在干涉光路中直接影响波差大小的元件,因此,要求它只能产生较小的波差。

干涉仪物镜大部分是小视场的,要很好地校正球差。其彗差及象散对波差只有较小的影响。但是,在视场增大时,其影响也随着增大。

物镜的面形误差会引起波面变形。外反射时,其值为 $2h \cos i$ ,内反射时为 $2h n \cos i$ ,透射时为 $h(n/\cos i' - 1/\cos i)$ 。其中 $h$ 为局部凸凹的高度或深度, $n$ 为玻璃的折射率。 $i$ 和 $i'$ 分别为该点的入射角和折射角<sup>[1]</sup>。从上面几个式子看出,对干涉仪物镜的面形要求较高,尤其是有反射面的物镜。

材料的光学不均匀性,在透射时也使波面变形。其值为 $\Delta N t/\lambda$ 。其中 $\Delta N$ 为光学不均匀性, $t$ 为物镜厚度, $\lambda$ 为光波波长<sup>[2]</sup>。可见,材料的光学不均匀性常常会引起较大的波面变形。因此,对干涉仪物镜,除了选择光学均匀性好的玻璃外,还要求物镜的结构简单,玻璃的总厚度应尽量小。

在装配时,要考虑物镜在自重和其它外力作用下的变形。它会引起波面变形。物镜的固定,要有足够的刚度,否则,物镜位置的微小变化也会引起波面变形。还应考虑温度的影响,尤其是物镜和框架尺寸较大的情形。

## 三、光 学 设 计

在光学自动设计中,对干涉仪的光学系统来说,用波象差构成评价函数比较合理。它与使用的目标一致,容易获得最佳校正结果。本文介绍的程序用波象差构成评价函数。

波象差的计算可用计算光程的方法来完成。按等光程原理<sup>[3]</sup>，在任意两波前之间的光程对于所有的光线都是相等的。对一个实际的光学系统，由于有一定数量的象差，材料的折射率也不均匀，各面的面形也有误差等原因，可使出射波面偏离某一理想波面。此偏离量就是波差。在图1所示的光学系统中，有  $n$  个表面， $P$  是物点， $P'$  是高斯象点， $P_1, P_2, \dots, P_n, P_{n+1}$  是某一光线与各面的交点， $N_1, N_2, \dots, N_{n+1}$  依次是各介质的折射率。以高斯象点  $P'$  为中心，做一球面与系统最后一面相切，可取此球面为参考球面。总的光程

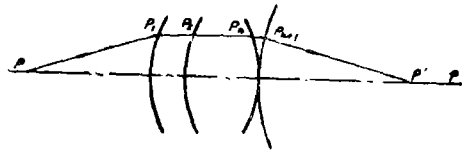


图 1

$$OP = N_1 P P_1 + N_2 P_1 P_2 + \dots + N_{n+1} P_n P_{n+1} \quad (1)$$

从出射面到参考球面的光程可以这样算

$$P_n P_{n+1} = (h_n + h_{n+1}) / \cos u_n' \quad (2)$$

其中  $h_n, h_{n+1}$  分别是系统最后一面和参考球面的弧高， $u_n'$  是出射光线对光轴的倾角。评价函数  $\phi$  有如下的形式

$$\phi = \sum_{k=1}^m (P_k W_k)^2 \quad (3)$$

其中  $k$  是波象差的序号， $m$  是波象差的个数， $P_k$  是加于第  $k$  个波象差上的权， $W_k$  是第  $k$  个波象差。

计算的目的在于求使评价函数达最小值的一组解。为此，先用较长的步长改变变量，在某范围内找出最小值。然后，自动缩小范围，缩小步长，精算最小值。这个过程循环进行。最后，以需要的精度收敛于最小值。这是一个逐次逼近最小值的方法。

在计算中，还加入了由计算机代替人查样板和凑样板的程序。这既节省时间和人力，又可得到较精确的结果。

程序的计算过程大致是：第一步，改变系统各面的半径，求出使评价函数达最小值的一组半径，可称为计算值。第二步，由计算机查找与计算值最接近的一组样板半径。第三步，再改变各光学间隔，求出使评价函数达最小值的一组光学间隔。

## 四、机械 设 计

这里仅讨论机械设计全过程中要用计算机求解的那一部分。

物镜在自重作用下的变形，会使波面变形。这很早就被一些专家研究过。他们按着瑞利 (Rayleigh) 判据，先规定好镜面的变形。有人规定反射镜面的变形不大于  $\lambda/8$ ，也有规定  $\lambda/16$  的。再根据力学计算，选择适宜的尺寸比例和支承方式。这样计算的前提是镜子表面曲率半径与口径之比较大，形状扁平，可以简化成圆板。其计算方法，在一些文献中有详细的介绍<sup>[4][5]</sup>。

应当说明，常用的干涉仪口径并不大。镜子在重力作用下的变形很小，对波差的影响也不明显，常常不应计算。此时，其它外力，例如夹紧力，引起的变形是不可忽略的。这要靠选择适当的结构和装配方法，减小其影响。

除重力和夹紧力的影响外，安装物镜的框架因刚度不足或温度波动都会产生变形，使物镜发生位移，造成波面变形。

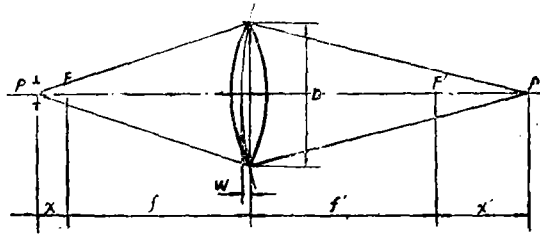


图 2

当物镜沿光轴方向发生位移时，我们分析准直物镜的情形。如图 2 所示，设  $x$  为位移， $F$ 、 $F'$  分别为物方及象方焦点， $f$ 、 $f'$  分别为物方及象方焦距， $P$ 、 $P'$  分别为小孔及其象，焦点  $F$  将离开小孔  $P$  而有位移  $x$ ，波面会发生弯曲  $W$ 。由牛顿公式

$$xx' = f^2$$

$$\left(\frac{D}{2}\right)^2 = (f' + x' + W)^2 - (f' + x')^2 = 2f'W + 2x'W + W^2$$

因  $W$  很小， $x' \gg f'$ ，所以取  $2f'W = 0$ ， $W^2 = 0$ ，

$$D^2 = 8x'W = 8\frac{f^2}{x}W$$

$$W = -\frac{x}{8}\left(\frac{D}{f}\right)^2 \tag{4}$$

其中  $D$  为物镜的通光口径， $D/f$  为物镜的相对孔径。(4) 式表明物镜的轴向位移  $x$  和它产生的波面弯曲变形  $W$  之间的关系。若物镜的相对孔径为  $1/4$ ，它沿光轴移动了 1 个波长，则波面弯曲

$$W = \frac{\lambda}{8} \left(\frac{1}{4}\right)^2 = \frac{\lambda}{128}$$

若物镜沿垂直于光轴的方向有一位移  $y$ ，如图 3 所示，物镜的焦距为  $f$ ，口径为  $D$ ，因

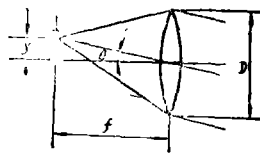


图 3

位移  $y$  很小，所以

$$\theta = \frac{y}{f}$$

干涉场边缘上的程差值，即波面变形

$$W = \theta D = y \frac{D}{f} \tag{5}$$

若物镜的相对孔径为  $1/4$ ，它在垂直于光轴的方向有  $1/10$  波长的位移，则产生的波面变形为

$$W = \frac{\lambda}{10} \cdot \frac{1}{4} = \frac{\lambda}{40}$$

### 五、误差的合成

到现在为止，已经考虑过的影响波差的主要因素有物镜的几何象差产生的波象差，物镜表面加工的局部面形误差引起的波面变形误差，物镜材料的光学不均匀性引起的波面变形误差，物镜在自重作用下的变形产生的波面变形误差，物镜因安装刚度不够或温度的影响沿光轴方向移动或沿垂直于光轴方向移动时产生的波面变形误差等等。总的波差可按下式计算

$$W = \sqrt{\sum_{i=1}^n W_i^2} \tag{6}$$

其中*i*为波差的序号，*n*为波差的个数。

### 六、软件设计

#### 1. 计算方法

采用的主要计算方法为“逐次逼近极值法”。计算时，首先要规定出合理的变量变化范围。然后取一较长的步长，粗略地找出最小值。再围绕这个最小值，引入某个因子，不断地缩小范围，缩小步长，进行精算，直到算出符合要求的值。

#### 2. 框图

下面，仅以双胶合物镜为例，画出主程序框图，见图4。对于单片透镜或各部分之间的

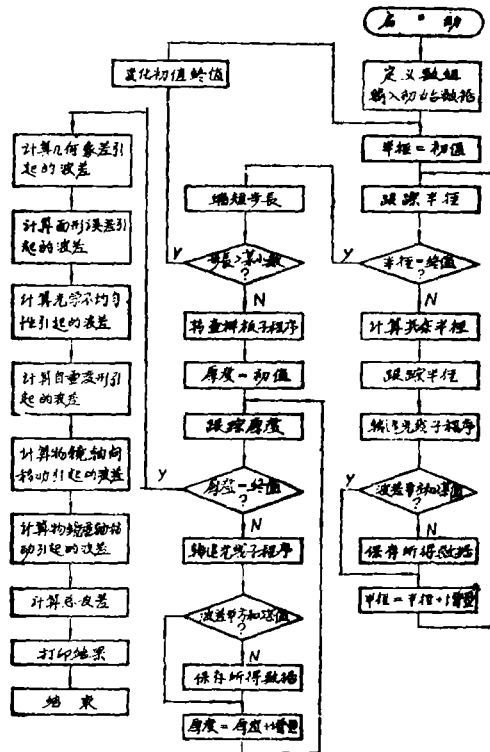


图 4

光焦度已分配好的复杂镜组，都可照此办理。

### 3. 程序上采取的某些措施

在PC—1500微计算机上完成上述计算有许多困难，为此，采取以下措施：

第一、在PC—1500机中，循环语句的步长只能取整数。为了取任意的步长，程序中用转移语句构成循环。

第二、为自动缩小变量变化范围及自动缩小步长，采用如下的程序：

```
100 R(1) = M
  ⋮
  ⋮
1020 M = R1 - K1 * S
1030 N = R1 + K2 * S
1040 S = C * S
1050 IF S >= DE THEN 100
```

其中 $R(1)$ 为某变量， $M$ 为其初始值， $N$ 为其终值， $S$ 为步长。 $K1$ 、 $K2$ 、 $C$ 为比例系数， $DE$ 为某一小数，即希望达到的计算精度。

第三、调用跟踪功能，进行动态跟踪，供计算者监督计算过程。

## 七、应用实例

利用上述方法设计了大口径的球面干涉仪物镜，见图5。先设计出一单片大物镜1，使其波象差达最小。再设计一小透镜2，平衡物镜1的波象差。此时剩余波象差达 $2\lambda/3$ 。这就设计出固定物镜组。再设计可换物镜组3，平衡剩余波象差。当相对孔径为 $1/3.5$ 时，波象差小于 $\lambda/10$ 。这里仅用了4片较大的球面透镜，比1981年苏联的一篇专利\*介绍的方案简单，易加工，易达高质量标准。

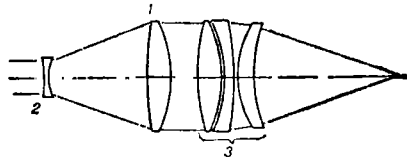


图 5

### 参 考 文 献

- [1] Ю. В. Коломыйцов, «干涉仪的理论基础及应用»中译本, 技术标准出版社, 北京, 1980, 145.
- [2] D. Malacara, «Optical Shop Testing», John Wiley, New York, 1978, 29.
- [3] M. Born and E. Wolf, «Principles of Optics», Pergamon, New York, 1980, 132.
- [4] 胡企千, 大型光学镜子的结构、支承及重力变形计算方法, 光学机械, 1983, 6, 29.
- [5] Д. Д. Максотов, «天文光学工艺»中译本, 科学出版社, 北京, 1964, 62.

\* 见苏联专利W081/02199

## The Design of the Objective Lens for Interferometer

Zhang Erxing

### Abstract

This paper represents distinguishing features of an objective lens for interferometer and discusses a method for its optical design and auxiliary mechanical design by computer.