

# 连续变倍双筒望远镜的误差分析

任志文

(北京理工大学工程光学系 100081)

**摘要:**本文介绍采用三组元变焦目镜的双筒望远镜在变倍过程中产生的离焦、倍率差、光轴平行差,较详细地导出这些误差的表达式,同时结合具体实例计算出误差的影响关系。

**关键词:**望远镜 误差 变焦

## Error analysis for continuously zoom binocular

Ren Zhiwen

**Abstract:** The deviation of focus, magnification and parallelism of optical axis due to changign the magnification in binocular with zoom type of triplex eyepiece are introduced. The expressions of those errors are derived in detail. Practical exmples are given for making calculations of the effect and the correlation of errors.

**Key words:** binocular, error, zoom

### 一、变倍望远镜原理简介

本文所述的手持式变倍望远镜的物镜和转像系统与普通双筒望远镜相同,而目镜则采用一种三组元连续谱焦目镜。这种目镜的光学系统如图 1(a)所示,它由固定组 I、变焦组 II、补偿组 III 组成。在变焦过程中,如果变焦组移近固定组、补偿组移离固定组,则目镜的组合焦距变短,望远镜的倍率变大。

为了便于观察,望远镜在变倍过程中像面位置要求保持稳定,即目镜的焦点保持不变,这就要求变倍组和补偿组符合一定的运动关系。为此目的,需要某种运动机械,最典型的运动机械结构如图 1(b)所示。这种结构由三个基本构件:凸轮筒 1、导针 2、基座 3 组成。凸轮筒 1 上有两条曲线槽,基座 3 上有两条直线槽。两个导针 2 穿过凸轮筒的曲线槽,一端分别与变倍组和补偿组相联,另一端嵌入基座上的直线槽中。当凸轮筒 1 转动时,通过导针 2 则可带动两个镜组按既定关系作轴向运动。

为了便于使用和保证左右支光学性能的一致性,望远镜的左右变焦目镜采用相同的光学系统和基本结构,而左右支的凸轮筒的转动用一联动机构相连,如图 1(c)中虚线所示。这种联动机构有钢带传动机构、软索传动机构、齿轮

传动机构。这种联动机构都得保证左右凸轮筒同步转动。

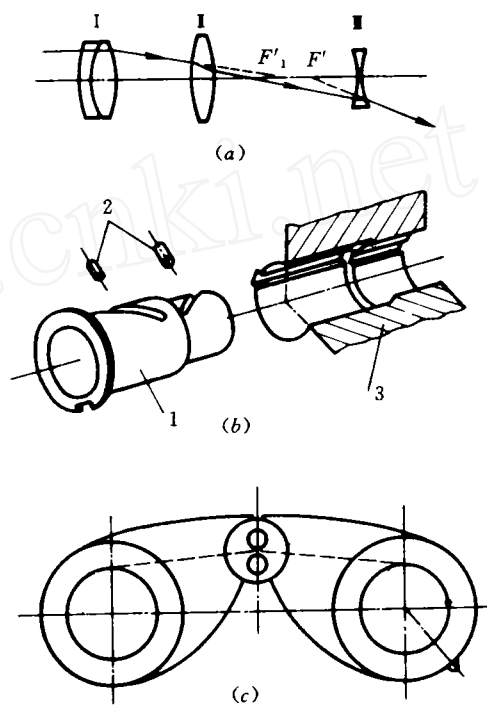


图 1

变倍望远镜的性能,除了一般望远镜共有的性能如像质、视场、放大率、出瞳、光轴平行性、像倾斜、视度调节等外,还有一些特别要求,如像面稳定性、左右支倍率一致性、光轴保持平

行等。

## 二、像面稳定性误差分析

像面稳定性是指在整个变倍过程中,变焦目镜的物方焦平面位置保持不变,以保证望远镜在任何倍率下均不必重新调节视度。

在 JT11 标准<sup>[1]</sup>中,像面稳定性有如下规定:望远镜从最高倍率变化到最低倍率时,像面的视度变化不大于 1 个视度。像面位置不稳定

我们在下面简称为离焦。下面将分析一些光学机械误差对离焦的影响。

利用理想光学系统作误差分析与实际光学系统几乎是一样的。图 2 是变焦目镜的理想光学系统,图中各参量按逆光路标准,关于各镜组与整个目镜的参数关系可以阅读文献[2],这里只标注与误差分析有关的参量。

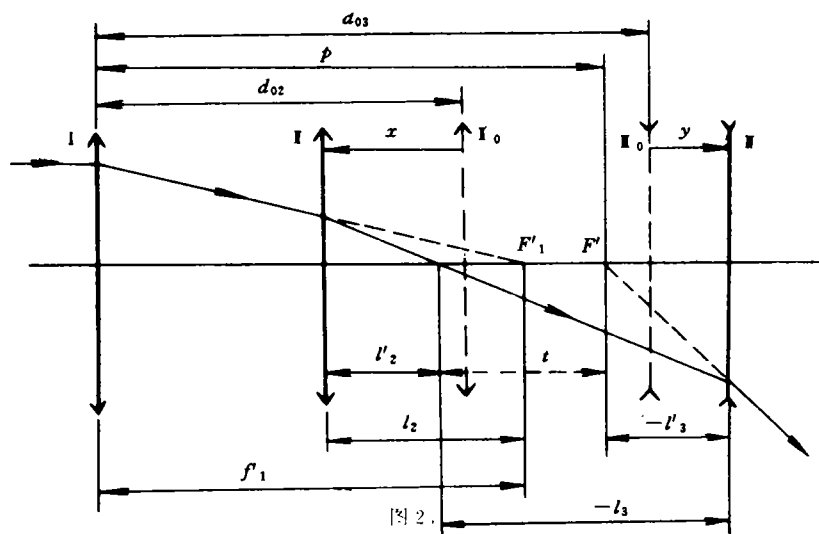


图 2

平行光由最后一面入射, $F'$ 是整个目镜的像方焦点,变焦组由初始位置 $II_0$ 变到现时位置,补偿组由初始位置 $III_0$ 变到现时位置 $III$ ,它们的位置变化量分别用 $x$ 、 $y$ 表示,它们的初始位置分别用 $d_{02}$ 、 $d_{03}$ 表示,而目镜的像面位置 $F'$ 用距离 $P$ 表示。其他符号按光学系统的有关规则。

由图 2 可知

$$P = d_{03} + y - (-l_3) = d_{03} + y + l'_3$$

根据物像关系式

$$\frac{1}{l'} = \frac{1}{f'} + \frac{1}{l_3}$$

得

$$l'_3 = \frac{f'_3 \cdot l_3}{f'_3 + l_3}$$

$$\begin{aligned} \Delta P = & \frac{l_3^2}{(f'_3 + l_3)^2} \Delta f'_3 + \frac{f'^2_3}{(f'_3 + l_3)^2} \cdot \frac{1}{(f'_2 + l_2)^2} (l_2^2 \Delta f'_2 + f'^2_2 \Delta f'_1) \\ & + \frac{f'^2_3}{(f'_3 + l_3)^2} \cdot \frac{l_2(2f'_3 + l_2)}{(f'_2 + l_2)^2} (\Delta d_{02} - \Delta x) + \frac{l_3(2f'_3 + l_3)}{(2f'_3 + l_3)^2} \cdot (\Delta d_{03} + \Delta y) \end{aligned} \quad (6)$$

又由图 2 可知

$$l_3 = l'_2 + d_{02} - d_{03} - x - y$$

同理

$$l'_2 = \frac{f'_2 l_2}{f'_2 + l_2}$$

式中  $l_2 = l'_1 - d_{02} + x$

对上面各式分别取生分并用增量代替得

$$\Delta P = \Delta d_{03} + \Delta y + \Delta l'_3 \quad (1)$$

$$\Delta l'_3 = \frac{1}{(f'_3 + l_3)^2} (l_3^2 \Delta f'_3 + f'^2_3 \Delta l_3) \quad (2)$$

$$\Delta l_3 = \Delta l'_2 + \Delta d_{02} - \Delta d_{03} - \Delta x - \Delta y \quad (3)$$

$$\Delta l'_2 = \frac{1}{(f'_2 + l_2)^2} (l_2^2 \Delta f'_2 + f'^2_2 \Delta l_2) \quad (4)$$

$$\Delta l_2 = \Delta f'_1 - \Delta d_{02} + \Delta x \quad (5)$$

上面五式由(5)至(1)依次代入并整理得:

(6)式表示由于原始误差  $\Delta f'_1, \Delta f'_2, \Delta f'_3, \Delta d_{02}, \Delta d_{03}, \Delta x, \Delta y$  的存在,使得象平面位置偏离了理想值的一个  $\Delta P$ 。以这些原始误差中,焦距误差  $\Delta f'_1, \Delta f'_2, \Delta f'_3$  和初始位置误差  $\Delta d_{02}, \Delta d_{03}$  不随望远镜变倍而改变,而运动误差  $\Delta x, \Delta y$  则是随着变倍而变化。但是即使  $\Delta x, \Delta y$  不变化,而从(6)式知各原始误差前的系数均会随着变倍而变化,这样  $\Delta P$  值在变倍过程中也将

随之改变。这就产生像面不稳定,即离焦。

在望远镜校正中,可以对某一倍率时的离焦现象消除,然后再考察其他倍率时的离焦情况。我们称这样度量的离焦量为位移离焦量。

位移离焦量用  $\Delta P_{\#}$  表示,它等于某一位置的离焦量  $\Delta P$  减去校正位置的离焦量  $\Delta P_0$ 。在(6)式中有关变量加注脚“0”则得  $\Delta P_0$ 。所求位移离焦量如下式表示

$$\begin{aligned} \Delta P_{\#} = & \left[ \frac{l_3^2}{(f'_3 + l_3)^2} - \frac{l_{03}^2}{(f'_3 + l_{03})^2} \right] \Delta f'_3 \\ & + \left[ \frac{f_3'^2}{(f'_3 + l_3)^2} \cdot \frac{f_2'^2}{(f'_2 + l_2)^2} - \frac{f_3'^2}{(f'_3 + l_{03})^2} \cdot \frac{f_2'^2}{(f'_2 + l_{02})^2} \right] \Delta f'_2 \\ & + \left[ \frac{f_3'^2}{(f'_3 + l_3)^2} \cdot \frac{f_1'^2}{(f'_1 + l_1)^2} - \frac{f_3'^2}{(f'_3 + l_{03})^2} \cdot \frac{f_1'^2}{(f'_1 + l_{01})^2} \right] \Delta f'_1 \\ & + \left[ \frac{f_3'^2}{(f'_3 + l_3)^2} \cdot \frac{l_2(2f'_2 + l_2)}{(f'_2 + l_2)^2} - \frac{f_3'^2}{(f'_3 + l_{03})^2} \cdot \frac{l_{02}(2f'_2 + l_{02})}{(f'_2 + l_{02})^2} \right] \Delta d_{02} \\ & + \left[ \frac{l_3(2f'_3 + l_3)}{(f'_3 + l_3)^2} - \frac{l_{03}(2f'_3 + l_{03})}{(f'_3 + l_{03})^2} \right] \Delta d_{03} \\ & - \frac{f_3'^2}{(f'_3 + l_3)^2} \cdot \frac{l_2(2f'_2 + l_2)}{(f'_2 + l_2)^2} \Delta x + \frac{l_3(2f'_3 + l_3)}{(f'_3 + l_3)^2} \Delta y \end{aligned} \quad (7)$$

上式简写为  $\Delta P_{\#} = \sum A_i \Delta_i$

$\Delta_i$  为原始误差,  $A_i$  为误差系数。要想了解各个原始误差分别对  $\Delta P$  移的影响大小,只要考察一下各个误差系数  $A_i$  的大小即可。

下面以一具双筒望远镜为例,定量显示各个  $A_i$  的大小。其目镜的基本数据如下:

$$\begin{aligned} f'_1 &= 24.006 & f'_2 &= 16.886 \\ f'_3 &= -18.427 & d_{02} &= 14.940 \\ d_{03} &= 24.479 & d_{03} &= 9.539 \end{aligned}$$

计算时是以最小倍率即  $x=0$  校正离焦的(见表1)。

表 1

$x$	0	2.75	5.5	8.25	11.0
$A(\Delta f'_3)$	0	0.06497	0.1168	0.16370	0.2062
$A(\Delta f'_2)$	0	-0.001153	-0.001511	-0.003164	-0.005823
$A(\Delta f'_1)$	0	-0.1206	-0.1794	-0.2142	-0.2365
$A(\Delta d_{02})$	0	-0.07694	-0.1226	-0.1582	-0.1873
$A(\Delta d_{03})$	0	0.2033	0.3078	0.3782	0.4296
$A(\Delta x)$	-0.4030	-0.3261	-0.2804	-0.2448	-0.2157
$A(\Delta y)$	0.2960	0.5038	0.6038	0.6742	0.7256

从实例结果可以看出:

组高;

(1)  $A(\Delta f'_2)$  绝对值比其他项都小,即变焦组的焦距误差不是影响离焦的主要因素;

(3)  $A(\Delta f'_1), A(\Delta f'_2), A(\Delta d_{02}), A(\Delta d_{03})$  的绝对值都是随  $x$  增加而增大,而且速率也相近,因而有可能将这几项误差进行部分互相补偿。

(2)  $A(\Delta d_{02})$  与  $A(\Delta d_{03})$  对比,  $A(\Delta x)$  与  $A(\Delta y)$  对比可知,补偿组的位置精度要求比变倍

### 三、左右放大率误差分析

左支和右支光学系统放大率一致性是保证双眼观察能将左右二像合一的重要条件,是双筒望远镜的重要性能之一。普通双筒望远镜的左右倍率差要求不大于 1.5%<sup>[1]</sup>。在变倍望远镜中,由于光学、机械的误差影响,使得左右倍率差将会增大。

下面先分析一支的放大率差。

望远镜的放大率差一般用相对误差表示,放大率相对误差与物镜焦距、目镜焦距的相对误差有如下关系

$$\frac{\Delta \Gamma}{\Gamma} = \frac{\Delta f'_{\text{物}}}{f'_{\text{物}}} - \frac{\Delta f'_{\text{目}}}{f'_{\text{目}}}$$

我们着重分析  $\Delta f'_{\text{目}}/f'_{\text{目}}$ ,为书写简洁,下面全部去除注脚“目”,统一用离焦分析中的符号。

根据光学放大率关系

$$\Delta f' = \Delta f'_1 \beta$$

$$\beta = \beta_2 \cdot \beta_3$$

$$\beta_2 = l'_2/l_2$$

$$\beta_3 = l'_3/l_3$$

式中  $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 、 $\beta$  分别是变焦组、补偿和整个变倍目镜的横向放大率。

将上面四式处理成

$$\begin{aligned} \frac{\Delta f'}{f'} &= \frac{l'_3}{f'_3} \cdot \frac{\Delta f'_3}{f'_3} + \frac{l'_2}{f'_2} \left[ \frac{l'_2}{l_3} (\beta_3 - 1) + 1 \right] \frac{\Delta f'_2}{f'_2} \\ &+ \left\{ f'_1 \left[ \frac{\beta_2^2}{l_3} (\beta_3 - 1) + \frac{1}{l_2} (\beta_2 - 1) \right] + 1 \right\} \frac{\Delta f'_1}{f'_1} \\ &- \left[ (\beta_2^2 - 1) \frac{1}{l_3} (\beta_3 - 1) + \frac{\beta_2 - 1}{l_2} \right] (\Delta d_{32} - \Delta x) \\ &- \frac{1}{l_3} (\beta_3 - 1) (\Delta d_{03} + \Delta y) \end{aligned} \quad (16)$$

(16)式表示一个目镜各个原始误差对目镜焦距的影响,也就是对一个镜筒的放大率的影响。下面仍以上面的变倍望远镜为例,用(16)式计算各误差系数的大小(见表 2):

从例表中数据可以看出:

(1)目镜中三组镜片的焦距误差对目镜焦距误差的影响约为 0.5,其中固定组和变倍组影响比补偿组大,但是  $A(\Delta f'_2/f'_2)$ 、 $A(\Delta f'_1/f'_1)$  随  $x$  变化比较小,说明在变倍过程中固定

$$\frac{\Delta f'}{f'} = \frac{\Delta f'_1}{f'_1} + \frac{\Delta \beta}{\beta} \quad (8)$$

$$\frac{\Delta \beta}{\beta} = \frac{\Delta \beta_2}{\beta_2} + \frac{\Delta \beta_3}{\beta_3} \quad (9)$$

$$\frac{\Delta \beta_2}{\beta_2} = \frac{\Delta l'_2}{l'_2} - \frac{\Delta l_2}{l_2} \quad (10)$$

$$\frac{\Delta \beta_3}{\beta_3} = \frac{\Delta l'_3}{l'_3} - \frac{\Delta l_3}{l_3} \quad (11)$$

另外由

$$\frac{1}{l'_3} = \frac{1}{f'_3} + \frac{1}{l_3}$$

$$\text{及 } \frac{1}{l'_2} = \frac{1}{f'_2} + \frac{1}{l_2} \text{ 关系}$$

可以求得

$$\frac{\Delta l'_3}{l'_3} = \frac{l'_3}{f'_3} \frac{\Delta f'_3}{f'_3} + \beta_3 \frac{\Delta l_3}{l_3} \quad (12)$$

$$\frac{\Delta l'_2}{l'_2} = \frac{l'_2}{f'_2} \frac{\Delta f'_2}{f'_2} - \beta_2 \frac{\Delta l_2}{l_2} \quad (13)$$

又由(3)式(5)式可得

$$\frac{\Delta l_3}{l_3} = \frac{1}{l_3} (\Delta l'_2 + \Delta d_{02} - \Delta d_{03} - \Delta x - \Delta y) \quad (14)$$

$$\frac{\Delta l_2}{l_2} = \frac{1}{l_2} (\Delta f'_1 - \Delta d_{02} + \Delta x) \quad (15)$$

将上面从(15)式至(8)式依次代入并经整

理得

组和变倍组的影响比较恒定,而补偿组的影响变化较大。

(2)从  $A(\Delta d_{02})$ 、 $A(\Delta d_{03})$  可知初始位置误差对倍率影响也很大的,如果误差为 0.2mm,将构成倍率差约 1%,而变倍过程中倍率的变化约 0.5%。

至于左右两支系统组合后的左右倍率差则是左支和右支差的代数和。在批生产中,一般左右支的  $f'_1$ 、 $f'_2$ 、 $f'_3$  相差很小,而由于传动系统

表 2

$x$	0	2.75	5.5	8.25	11
$A(\Delta f'_3/f'_3)$	0.1650	0.2925	0.3706	0.4292	0.4762
$A(\Delta f'_2/f'_2)$	0.4427	0.5180	0.5808	0.6329	0.6760
$A(\Delta f'_1/f'_1)$	0.5354	0.4817	0.4710	0.4759	0.4838
$A(\Delta d_{02})$	0.06205	0.05752	0.05391	0.05066	0.04771
$A(\Delta x)$	-0.06206	-0.05752	-0.05391	-0.05066	-0.04771
$A(\Delta d_{03})$	-0.04348	-0.03681	-0.03277	-0.02972	-0.02727
$A(\Delta y)$	0.04348	0.03681	0.03277	0.02972	0.02727

的误差会使左右支的  $\Delta d_{02}$ 、 $\Delta d_{03}$ 、 $\Delta x$ 、 $\Delta y$  有较大的差别,这是应该重视的问题。

#### 四、光轴平行性误差分析

左右支系统光轴相互平行也是双筒望远镜的重要性能之一。在普通望远镜中光轴平行性校正好后就不会变化,而变倍望远镜中由于变倍组和补偿组在轴向移动时也会有少许的横向位置误差,至使光轴偏移。

分析各组镜片的影响,可以认为误差影响是独立,则认为各个原始误差独立造成光轴误差,它们的综合影响是其单个影响的代数和。

固定组由于横向位置误差引起的光轴差可以在光轴校正中消除。

变焦组的横向位置误差如图 3 所示。需要指出的是:在讨论变焦组误差时认为其他光组没有误差。

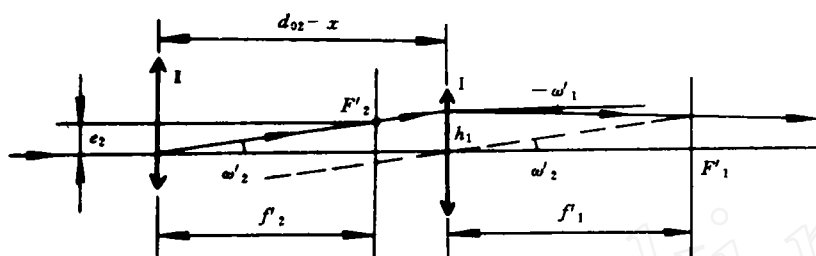


图 3

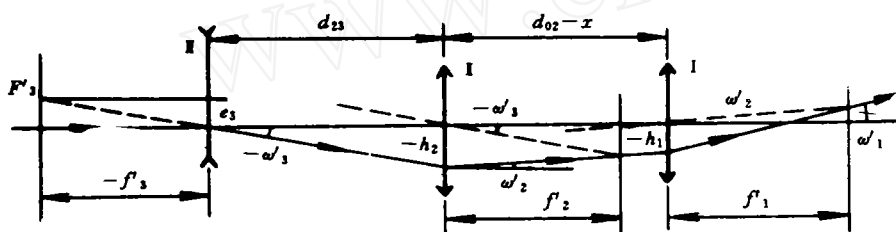


图 4

图中  $e_2$  表示变倍组的偏心,由图得

$$\Delta \omega'_2 = e_2 / f'_2$$

$$h_1 = (d_{02} - x) \omega'_2$$

$$-\omega'_1 = \frac{h_1}{f'_1} - \omega'_2$$

将上两式代入并整理得

$$\omega'_1 = \left(1 - \frac{d_{02} - x}{f'_1}\right) \frac{1}{f'_2} e_2 \quad (17)$$

补偿组的横向位置误差如图 4 所示,图中  $e_3$  表示补偿组的偏心。

由图可知

$$\omega'_1 = \frac{-h_1}{f'_1} + \omega'_2$$

$$-h_1 = -h_2 - (d_{02} - x) \omega'_2$$

$$\omega'_2 = \frac{-h_2}{f'_2} - (-\omega'_3)$$

$$-h_2 = d_{23}(-\omega'_3)$$

$$-\omega'_3 = \frac{e_3}{-f'_3}$$

$$d_{23} = d_{03} - d_{02} + x + y$$

$$\omega'_1 = \left[ \left( 1 - \frac{d_{02} - x}{f'_1} \right) \left( 1 - \frac{d_{23}}{f'_2} \right) - \frac{d_{23}}{f'_1} \right] \frac{1}{f'_3} e_3 \quad (18)$$

(17)和(18)中,  $x$  和  $d_{23}$ 在变倍过程中是个变量,而  $e_2$  和  $e_3$  不仅有大小变化可能还有方向变化,是向量误差。仍以上述实例,计算一下误差系数的大小(见表3)。

表 3

$x$	0	2.75	5.5	8.25	11
$A(e_2)$	73.77	95.23	116.7	138.1	159.6
$A(e_3)$	41.71	96.10	149.6	207.2	270.0

表中  $A$  的单位是:分/mm

表中数据表明,变倍组和补偿组在变倍中的横向位置变化所引起的光轴变化是比较大的。设在初始位置  $x=0$  时校好了光轴,那么变倍过程中其他位置的光轴变化量将按下式计算:

$$\begin{aligned} \omega'_{1\#} = & \left( 1 - \frac{d_{02} - x}{f'_1} \right) \frac{1}{f'_2} e_2 - \left( 1 - \frac{d_{02}}{f'_1} \right) \frac{1}{f'_2} e_{02} \\ & + \left[ \left( 1 - \frac{d_{02} - x}{f'_1} \right) \left( \frac{d_{23}}{f'_2} \right) - \frac{d_{23}}{f'_1} \right] \frac{1}{f'_3} e_3 \\ & - \left[ \left( 1 - \frac{d_{02}}{f'_1} \right) \left( \frac{d_{023}}{f'_2} \right) - \frac{d_{023}}{f'_1} \right] \frac{1}{f'_3} e_{03} \end{aligned} \quad (19)$$

#### 参考文献

#### BINOCULARS

- 1 JAPANESE EXPORT INSPECTION STANDARD PRISM
- 2 云光技术. 1992.No. 5

(上接第 11 页)

才一付眼镜,这个估计实不为过。光学塑料用量大的场合并非眼镜,据日本有关统计资料表明:用量最大的是建材,其次是汽车风档、灯具,最后才是眼镜、照相机、光学仪器。建材主要用作透明屋顶、门窗玻璃、室内装璜和灯具,日本 1988 年建材用光塑料已达万吨级。预测我国市场未来光学塑料应用量大体也是这个次序。

随着光学塑料应用范围的扩大,对高精度的光学制作,不但要求有先进的加工成型技术,更需要性能优异的光学树脂,既要对原有材料进行改性,又要进行新型材料的研制和开发,国内市场这种呼声比较强烈,说明光学塑料的开发有着良好前景和增加了紧迫感。

#### 参考资料

- 1 Stanley. Ballard, -H. C. Raine. Proceeding kf the louden conference on optical instruments. clipt 19. 20. 21. ICI Ltd Gr. Britain, Held at the Imperial College. Loudon. S. W. 7. 19 July 1950
- 2 T. A Aperans Kaya, L. I. Tarutina. Optical properties of polymers. khimiya Press. Moscow 1976
- 3 M. Tomozawa. Treatise on materials science and Technol-ogy. VOL. 12 序言(1977)
- 4 工业材料. VOL. 25 No. 3 (1978)
- 5 展望. VOL. 33 No. 7 (1977)
- 6 温瑞堂. 光学材料. 1. (1980)
- 7 刘耀华. 光学技术. 2. (1984)
- 8 黎新章. 应用光学. 4. (1980)
- 9 大藤吉雄. 日本透明树脂开发研究现状. 访华学术报告 1990 年于长春
- 10 刘正之. 光讯. (台湾)No. 24. 26(1990)
- 11 陈善明. 光讯. (台湾)No. 24. 16(1990)