

10.6 微米窄带滤光片有了一些知识, 这些知识是从实践中得来的, 实践出真知是我们亲身体会, 我们决不上林彪、孔老二的当。

### 参 考 资 料

[1] H. A. Macleod; Thin-film Optical filters, ADAM. HILGER LTD; London, p. 154.

## 微孔叉丝迭象法用于光学谐振腔的调整

夏 生 杰

(中国科学院北京力学研究所)

### 提 要

本文介绍了一种既简便、精度又高的调腔方法, 并举例进行了计算分析和实验观察, 精度可达 0.01 毫弧度。与常用的望远镜调腔法相比, 这个方法有许多优点。

### 一、微孔叉丝迭象法

图 1 是微孔叉丝迭象法(简称微孔法)的示意简图。在激光器光腔的孔耦合镜前, 放一块刻有十字叉丝的白色漫反射分划板(见图 2), 中心钻有一微孔, 用白炽灯照明。于是通过耦合孔进入光腔的光线, 经过激光器两片反射镜多次反射, 形成了十字叉丝的一系列反射象。这些象可以通过分划板上的微孔由肉眼直接观察到。当光腔的两片反射镜中任一片发生偏转时, 叉丝的一系列象将随之作靠拢或分开的移动。

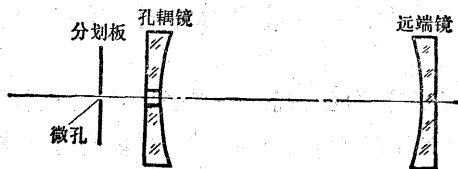


图 1 微孔法的布置

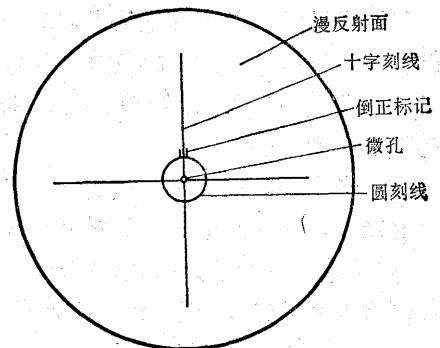


图 2 微孔分划板

调腔时, 首先是调准离分划板远端的反射镜, 使第一个叉丝象居中。然后再调准近端反射镜, 使所有叉丝象迭合在一起。这时, 光腔两片反射镜的光轴就完全重合。也就是调准了光腔。

这种方法的优点是:

(1) 不需任何精密仪器: 微孔法不需精密设备, 而是利用激光器光腔本身的反射镜所产生的多次反射象来进行迭象对准。

(2) 调腔精度较高: 常用的望远镜调腔法, 由于望远镜本身制造上的调焦精度一般在0.3毫弧度左右, 经过两次调焦后, 不能获得比这更高的调准精度。而微孔法不须两次调焦, 在整个调腔过程中光学基准是不动的, 保持了高的精度。而且各次象的叉丝是按对接法对准, 不象望远镜那样是自准象的叉丝重合对准。

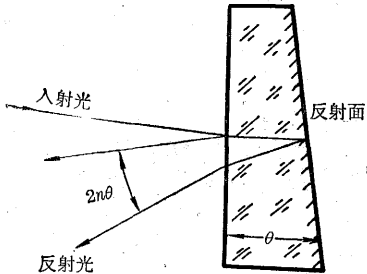


图3 不平行度引起的光楔作用

(3) 避免了光腔镜片加工不平行度给调腔带来的误差: 在用望远镜调腔时, 对近端反射镜的调准是间接对准的, 从反射镜的背面找自准象。由于镜片加工精度一般存在着1毫弧度左右的不平行度, 这就引起了光楔作用(如图3), 使望远镜的光轴偏离镜片反射面光轴 $2n\theta$ 角( $n$ 为镜片材料的折射率,  $\theta$ 为加工不平行度)。

对K<sub>9</sub>玻璃镜, 当 $\theta$ 为1毫弧度时, 则反射光偏离望远镜光轴约3毫弧度。若用不透明基底材料的镜片, 必须从背面对准, 要求镜片的两面都是光学反射面, 这时的精度只能是2毫弧度。这就大大降低了调腔精度。而微孔法是直接对准, 没有必要利用镜片背面, 避免了这种误差。

(4) 调腔步骤简单, 易于迅速进行调准: 用望远镜调腔时, 必须将望远镜光轴与激光器光轴调到一致。但望远镜法的光学基准是一根空间光轴(即三维基准), 它有四个可调节的自由度, 要使两根空间光轴重合是很困难的, 调准不能迅速完成。而微孔法的光学基准是一平面基准(即二维基准), 只有两个可调节自由度, 且直接利用光腔本身的镜片调准。这就可以随时复查光腔的对准状态。还可以观察镜片在器件运转前后受应力及受热引起的畸变, 易于迅速找准器件原来的光轴。

## 二、微孔法的基本原理

(1) 微孔的作用: 分划板中心的微孔作为光阑以扩大景深, 可以同时清晰地观察到两片反射镜交替反射形成在不同位置上的各次叉丝象。微孔越小, 景深越大。一般用 $\phi 0.5 \sim 0.8$ 毫米的微孔时, 成象在眼睛前后约10厘米以远的象都可清晰地观察到。因此, 对所有的反射象都不需要调焦。

(2) 光束多次反射时在镜面上的光点分布: 由于有了球面反射镜, 一束平行光入射到两片反射镜组成的光腔中时, 在镜面上形成一定范围内循环分布的光点。反射镜越偏离对准状态, 光点分布范围就越大, 如图4所示。这组照片为一束氩-氟激光通过微孔射入光腔时, 从一片镜面上摄下的光点分布图。图4(a)是人为地将入射光束与孔耦镜在某一方向上偏离一定角度。远端反射镜在同一方向上偏离时形成一直线分布。图4(b)和图4(c)则是将远端镜在另一方向上分别偏转2.28毫弧度和5.7毫弧度时光点分布的变化情况。可以看出, 在镜片偏转时, 除第一光点不动外, 其余各光点以不同的速度向外移动。图5是各光点在镜片偏转时的移动轨迹, 图上数字代表光点的序号。从图4(c)可以看到23个光点循环分布于一个椭圆上, 对镜片偏转灵敏的光点位移较大, 离第1光点较远, 如图5中第3点; 反之, 对偏转引起的位移较

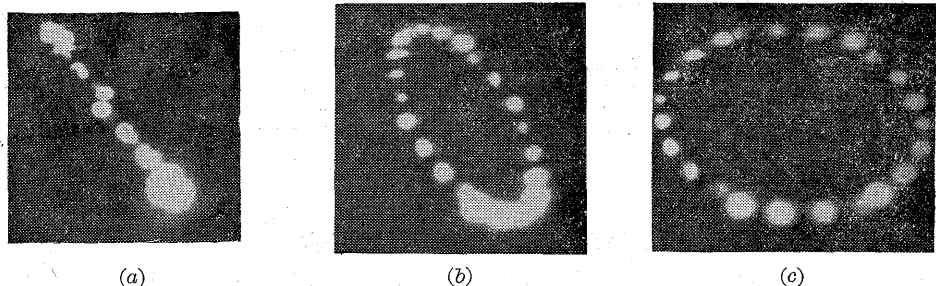


图4 光点的分布范围

小, 离第 1 光点较近的较为迟钝。光点的数目由三个条件来决定: 如果某次反射光束反射回入射孔或与任一镜面垂直或超越出镜面时都不再继续反射。图 6 为各光点循环排列的顺序。共分四个循环, 每个循环六个点, 以每  $63^\circ$  角左右顺序循环分布。

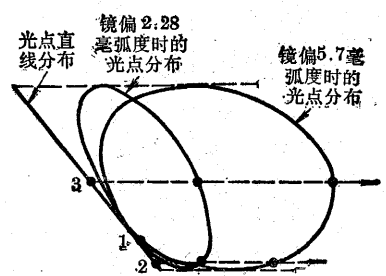


图5 镜片偏转时各点的轨迹

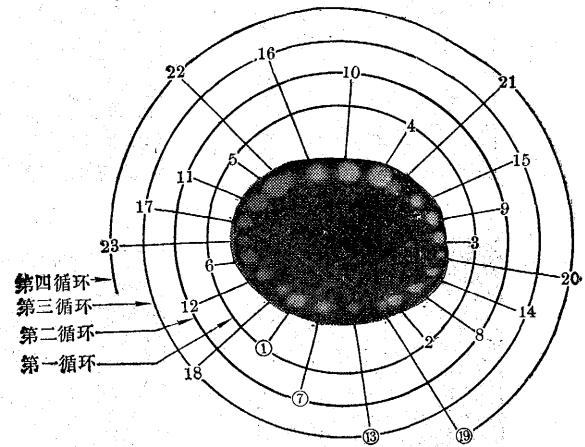


图6 镜面上光点的循环分布图

光点的分布顺序, 可以从亮度大致区分开; 也可以从遮挡某个光点时, 镜面上剩下的光点数来判定它的序号。图 7(a) 即是在图 4(c) 的分布中挡住第 4 光点, 就只剩下 3 个光点。图 7(b) 为挡住第 7 光点, 图 7(c) 为挡掉第 13 光点。

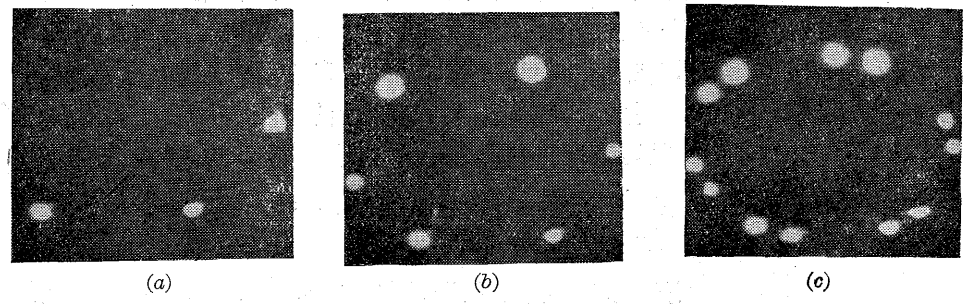


图7 光点顺序图

(3) 光束多次反射时, 又丝象在光轴上的分布: 根据反射镜公式, 可以计算出叉丝被两片反射镜交替反射时所形成的历次象在光轴上的分布, 如图 8 所示。由于有了球面镜, 而成象位置有时又在眼睛后面, 所以观察到的象就有倒、正、虚、实之分。另外按各次象的放大率和距人眼的远近, 就构成大小不等的视角。使观察到的象大小不等, 线条粗细不一。

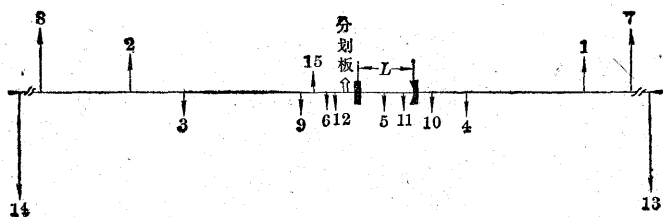


图8 各次叉丝象沿光轴的分布

(4) 迭象的效果: 由于微孔的作用, 可以清晰地观察到叉丝的纵向分布和横向分布的多次反射象, 这就便于在水平和垂直两个方向上调节镜片, 使各次叉丝象完全迭合在一起, 达到对准状态。如图 9(e)-9(a) 系列记录了各个叉丝象的逐渐靠拢直至完全迭合的调腔过程。

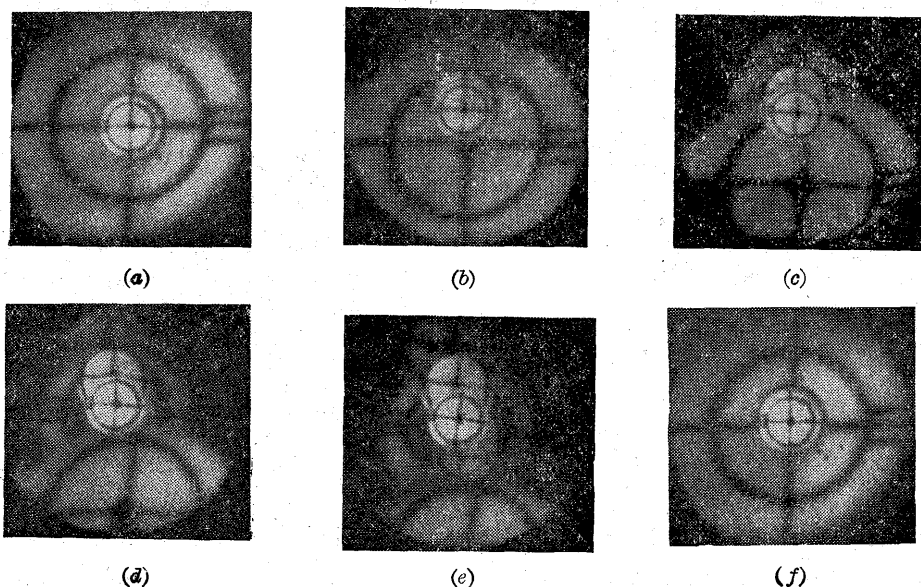


图9 迭象图

从迭象图中可以看出, 由于象有倒、正、虚、实之分, 在调腔过程中, 各次叉丝象是分别从两个方向向中间靠拢的, 而不是从一个方向逐步接近的。这就可以利用视角放大较多又较灵敏的两个相对移动的叉丝象按对接法对准, 也可以用不动的第 1 象为基准进行对接对准。

利用光线在反射镜间多次反射的累积结果, 可以观察到镜面加工精度不高所引起的象畸变, 从而判定镜片的分辨本领。甚至在光腔中透明介质有较强的扰动时, 就能引起迭象图中灵敏象的漂移。下面将举例计算这一方法的精度及它的一些规律。

### 三、光腔的计算及实验结果

#### 1. 计算

对于孔耦合输出的稳定腔, 在这种封闭式的光学系统中, 光线应在腔内无穷次地往复反射。在图 10 中取  $d=50, L=400, R_2=\infty, R_1=1500$  为例。以分划板为物, 在平面镜  $M_2$  上有耦合孔。用球面反射镜公式, 算出前 15 次反射象的位置、放大率及视角。当物或象处于反射

镜曲率中心的同侧时,物距  $S$  和象距  $S'$  为正,异侧时为负。当物或象处于眼睛的前方时,它与眼睛的距离  $S^*$  为正,后方时为负。计算结果见表 1。

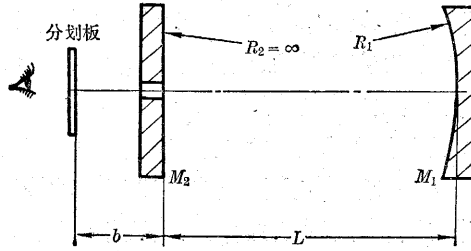


图 10 计算参数图

表 1

象 序	物 距 (毫米)	象 距 (毫米)	积 累 放 大 率	象 离 眼 睛 的 距 离 (毫米)	视 角 (毫 弧 度)	视 角 比
1	$S_1=450$	$S'_1=-1125$	2.5	$S_1^*=1575$	1.59	1
2	$S_2=1525$	$S'_2=-1525$	2.5			
3	$S_3=1925$	$S'_3=1230$	1.59	$S_3^*=-780$	2.04	1.31
4	$S_4=-830$	$S'_4=830$	1.59			
5	$S_5=-430$	$S'_5=273$	1.01	$S_5^*=177$	5.71	3.59
6	$S_6=127$	$S'_6=-127$	1.01			
7	$S_7=527$	$S'_7=-1770$	3.39	$S_7^*=2220$	1.52	0.96
8	$S_8=-2170$	$S'_8=2170$	3.39			
9	$S_9=2570$	$S'_9=1060$	1.4	$S_9^*=-610$	2.29	1.45
10	$S_{10}=-660$	$S'_{10}=660$	1.4			
11	$S_{11}=-260$	$S'_{11}=193$	1.04	$S_{11}^*=257$	4.05	2.55
12	$S_{12}=207$	$S'_{12}=-207$	1.04			
13	$S_{13}=607$	$S'_{13}=-3180$	5.45	$S_{13}^*=3630$	1.5	0.94
14	$S_{14}=-3850$	$S'_{14}=3850$	5.45			
15	$S_{15}=3980$	$S'_{15}=925$	1.26	$S_{15}^*=-475$	2.66	1.65

表中视角比为各象视角对第 1 象的倍数。

从表中视角比可以看出, 3 号象大于 1 号象, 而 5 号象最大。算出的各次象的位置、大小及倒正情况见图 8。

## 2. 观察出的几个规律

a. 人眼通过微孔和耦合孔所看到的象, 只能是远端反射镜  $M_1$  反射出来的各次象, 它们是按 1、3、5……奇数顺序排列的。而偶数象是由  $M_2$  镜反射的, 看不见。

b. 反射次数越多, 象的序号越大, 象就越暗。如 3 号象比 1 号象暗, 9 号象比 7 号象暗等。由于镀金镜面对长波橙红光的反射率远大于短波的黄、绿、蓝光, 所以象的序号越大越发红, 肉眼很容易判别出来。

c. 接近对准状态时, 视角大的象将盖住处于其后序号的视角较小的象, 因此在对准状态下只能看见少数象。偏离对准状态时, 才可以看见更多的象, 如图 9(a) 的三个象及图 9(e) 的七个象。

d. 如果叉丝象在人眼后面时, 看到的象与所成的象是颠倒的。

e. 当镜片偏离对准状态时, 倒象和正象分别以各种速度向两侧移开。

### 3. 对计算和观察结果的分析

a. 象的序号和倒正: 以上计算出的 15 次象中, 从视角比可知, 当完全对准时, 只能看到 1 号、3 号、5 号三个象; 5 号以后各象的视角比都小于它。按计算, 3 号象在轴上并处于眼睛的后面, 观察的象应与计算的象是颠倒的。因此计算的图 8 中 1 号和 3 号象是反向, 而图 9 所示的实验中, 从分划板标记判断它们是同向的。

b. 象的横向位移量: 从图 9 及图 5 中均可看出有的象随镜片偏转引起的位移较大, 如 5 号象, 有的较小, 如 11 号象。这一现象与上述光束多次反射时镜面上光点分布的原理是一致的。从照片上可以测出它们随偏转角所引起的位移, 示于图 11。可以看出各个象的位移和镜面偏角呈线性关系。

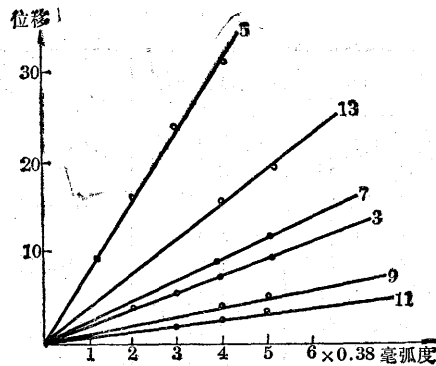
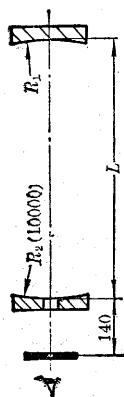


图 11 镜面偏转引起的象位移量

c. 精度的分析: 从图 9(a) 至图 9(e) 为镜片从对准状态开始沿一个方向上每偏 0.38 毫弧度时拍出一系列照片。图 9(a) 到图 9(b) 为角偏转 0.38 毫弧度, 5 号象相对 1 号象的位移为 7.5 毫米。在图 9(f) 中, 当 5 号象偏离只有 0.8 毫米时, 已经可以很明显地看出是处于未对准状态了。按比例, 这时的偏角只有 0.04 毫弧度。实际上人眼是很容易将迭象图调准到图 9(a) 的状态, 而图 9(f) 中, 5 号象的叉丝仅仅对准 1 号象三根倒正标记的边线上。因此当 1 号和 5 号叉丝象完全对准后, 则两个叉丝象对接偏差可以小于 0.2 毫米, 即不难得到 0.01 毫弧度的调准精度。

### 4. 改变光腔参数的计算和实验

选取  $R_2=10,000$  毫米, 变换  $R_1$  及腔长  $L$ , 组成几个系列的光腔, 并进行计算。从计算数据中可以判出某种光腔是那几次象对准, 视角有多大等等。实验出的一批光腔在对准状态下的迭象图示于图 12。每幅图中心小圆代表 1 号象, 外边每个圆代表一次象。对准时一般可以看到 2~4 个象。每个圆上的三角标记, 偏左或偏右代表着象的倒正。当成象离人眼较近时叉丝象变粗, 如  $R_1=3000$  毫米,  $L=300$  毫米时的情况, 按计算, 这是 1 号 7 号象对准, 7 号象距人眼 -92.778 毫米。成象更接近眼睛时, 不但叉丝变粗, 连微孔象也放大成模糊的黑斑, 如图  $R_1=3000$  毫米,  $L=500$  毫米时的情况, 按计算, 这时是 1 号 5 号象对准, 5 号象距人眼为 32.626 毫米。在每幅迭象图左边, 再用数字和符号说明各次象的状态。数字代表象序, 括号内的数是对准后视角较小而被盖住的象序。数字两边的“-”号区别象的倒正。当对准时, 如果某次象显得模糊, 可以前后移动分划板予以改善。



腔长 L (毫米)	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
曲率半径 $R_1$ (毫米)	1200	3000	4000	6000	10000	1200	3000	4000	6000	10000
	1-3-5	1-2-3	1-3	1-3	1-3	1-3-5-7	1-3-5	1-3-5	1-3-5	1-3-5
	1-3-5-7-9	1-3-5-7	1-3-5-7	1-3-5-7	1-3-5-7	1-3-5-7-9	1-3-5-7	1-3-5-7	1-3-5-7	1-3-5-7
	1-3-5-7-9	1-3-5-7-9	1-3-5-7-9	1-3-5-7-9	1-3-5-7-9	1-3-5-7-9	1-3-5-7-9	1-3-5-7-9	1-3-5-7-9	1-3-5-7-9
	1-3-5-7-9-11	1-3-5-7-9-11	1-3-5-7-9-11	1-3-5-7-9-11	1-3-5-7-9-11	1-3-5-7-9-11	1-3-5-7-9-11	1-3-5-7-9-11	1-3-5-7-9-11	1-3-5-7-9-11
	1-3-5-7-9-11-13	1-3-5-7-9-11	1-3-5-7-9-11	1-3-5-7-9-11	1-3-5-7-9-11	1-3-5-7-9-11	1-3-5-7-9-11	1-3-5-7-9-11	1-3-5-7-9-11	1-3-5-7-9-11

图 12 不同参数光腔的透象图

#### 四、微孔法推广至非耦合型光腔及其局限性

微孔法原则上适于孔耦合光腔的调准。但对于非孔耦合光腔,如部分透过输出型光腔,只要附加一片中心钻有一直径4毫米左右孔的辅助球面反射镜,仍能适用。其步骤如下:首先使分划板和辅助球镜的孔调至器件轴上,然后调准辅助球镜与远端反射镜形成的光腔,即 $AB$ 腔;最后再调准辅助球镜与近端反射镜背面形成的光腔,即 $AC$ 腔;这时 $BC$ 形成的实际光腔就自然处于调准状态了,如图13。这种方法没有考虑 $C$ 镜的不平行度,与望远镜法相似。

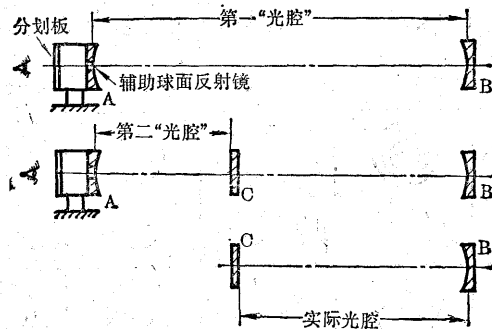


图13 带辅助球镜的微孔法

微孔法有一定局限性。当分划板置于远端反射镜的曲率中心前后时,1号象就处于眼睛附近,视角最大,盖住了它以后的各次象,无法迭象。这种情况亦类似于望远镜法中,望远镜如果置于远端反射镜的曲率中心和焦点之间时,又丝象将处于望远镜后面,无法调焦。另外微孔法不适于腔长过大、反射镜太小的光腔调准。

#### 五、结束语

微孔又丝迭象法直接利用了光腔本身的反射镜,加上用微孔以扩大景深的原理,可以不用调焦就同时观察到光腔两片反射镜间反复多次的反射象。选取对于偏转角最敏感同时视角放大较多的象进行又丝对接对准以获得高的调准精度。用于孔耦合光腔调准时,能获得两个反射面相互直接对准的状态,比望远镜法从背面间接对准的精度要高。即使用于部分透过输出型光腔,由于它不须调焦,仍然比望远镜法好。对于需要经常装卸反射镜的光腔和受工作环境影响较大的需经常调准的光腔,如果采用微孔法就简便而且精确得多。

#### 参 考 资 料

- [1] 《光学仪器设计手册》,上册,国防工业出版社。
- [2] P. 凯萨姆著,段贵耀译,《精密制造中使用的光学工具》,国防工业出版社。
- [3] B. A. 阿法拉西耶夫著,张炳勳译,《光学度量》,中国工业出版社。
- [4] C. J. Smith,《Optics》。
- [5] Kingslake, *Applied Optics and Optical Engineering*, 5.