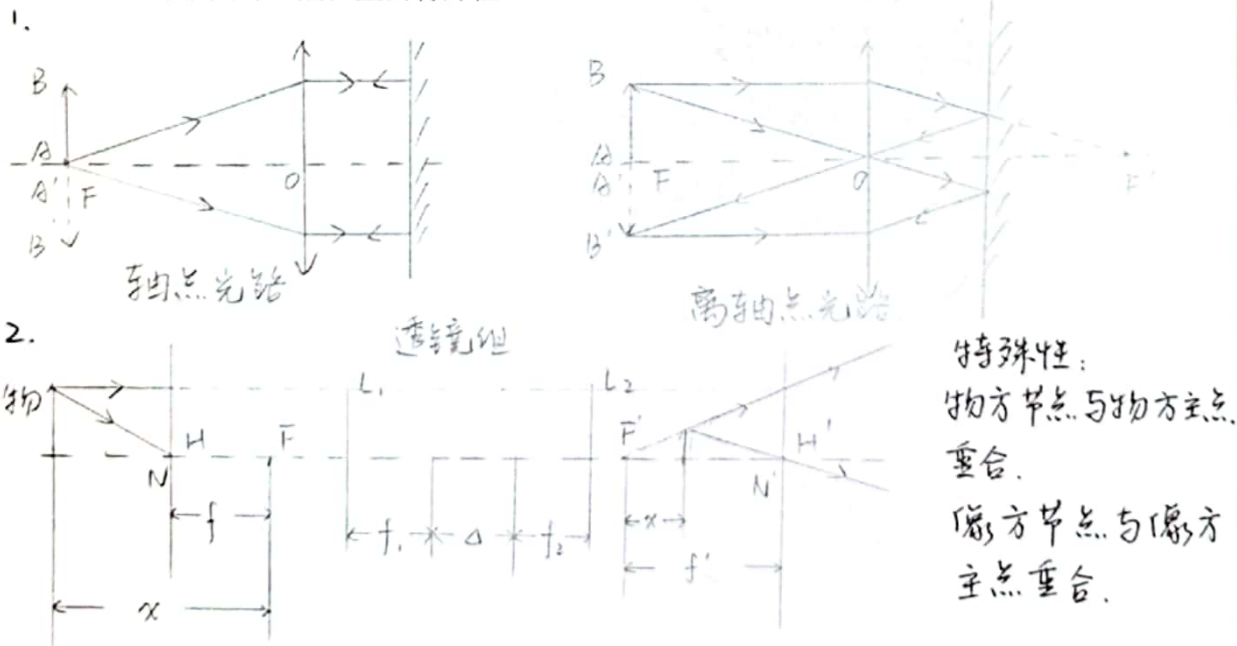


## 实验 A10 薄透镜焦距的测量

## 实验 A11 透镜组基本参数的测量

### [实验前思考题]

1. 采用三条基本光线绘图的方法画出自准法测量薄透镜焦距的实验原理光路图。
2. 作光路图画出被测透镜组及其各种基点的相对位置，并说明本实验中物方和像方节点与主点位置的的特殊性。





(请自行加页)

## [ 实验目的 ]

1. 掌握薄透镜焦距的测量方法 (自准法);
2. 掌握对称法测量透镜组的节点的方法

## [实验前阅读资料 ]

实验教材第 7 章全部内容。

## [ 仪器用具 ]

(清点设备, 并在已有设备的备注栏中打“√”)

类别	序号	名称	数量	基本参数 (型号, 规格等)	备注
镜片	1	凸透镜	1	$f = 190\text{mm}$ , $\phi = 50\text{mm}$	✓
	2	平面镜	1	铝反射膜, $\phi = 50\text{mm}$	✓
	3	微尺分划板	1	也称 1/10 分划板, $\pm 4\text{mm}$ , 精度 0.1mm	✓
	4	待测目镜 Le	1	$f_e = 29\text{mm}$ , $\phi = 50\text{mm}$	✓
	5	物镜 Lo	1	$f_o = 150\text{mm}$ , $\phi = 50\text{mm}$	✓
	6	透镜	1	$f = 300\text{mm}$ , $\phi = 50\text{mm}$	✓
支架等	8	三维平移底座	2	SZ-01, 每维 0-10mm, 精度 0.01mm	✓
	9	二维平移底座	2	SZ-02, 每维 0-10mm, 精度 0.01mm	✓
	10	升降调整座	1	SZ-03	✓
	11	通用底座	1	SZ-04, 无微调装置	✓
	12	二维调节架	1	SZ-07 或透镜架 SZ-08	✓
	13	三维调节架	1	SZ-16	✓
	14	测微目镜架	1	SZ-36	✓
	15	双棱镜架	1	SZ-41	✓
	16	节点架	1	SZ-28, 也称为测节器	✓
其他	17	白光光源	1	GY-6 型, 亮度可调, 即溴钨灯。	✓
	18	物屏	1	SZ-14	✓
	19	测微目镜 ME	1	XW-1 型读数显微镜, 6mm, 精度 0.01mm	✓
	20	毫米尺	1	30mm, 精度 1mm。	✓



## | 原理概述 |

## (一) 薄透镜焦距的测量

薄透镜是指厚度远小于焦距, 也远小于球面曲率半径的透镜, 是光学仪器中最常用的光学元件之一。透镜一般采用光学玻璃制作, 具有两个折射面。若折射面是球面的一部分则称为球面透镜, 若不是球面则称为非球面透镜。对于球面透镜, 折射面形状通常有凸球面、凹球面和平面三种, 可组成双凸、平凸、正弯月(凸凹)、双凹、平凹、负弯月(凹凸)六种形状的透镜。前三种透镜使入射的平行光会聚, 像方焦距为正值, 称为会聚透镜(或正透镜); 后三种透镜使入射的平行光发散, 像方焦距为负值, 称为发散透镜(或负透镜)。

## 1. 薄透镜成像公式

对于如图1所示的双凸透镜, 平行光束通过透镜后的会聚点为焦点, 从焦点到透镜光心的距离称为焦距。在近轴光线条件下, 薄透镜成像的位置关系可用高斯公式表示为

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

如果物距 $u$ 和像距 $v$ 不从光心 $O$ 算起, 而是从焦点 $F$ 和 $F'$ 算起, 这两个量分别记为 $x$ 和 $x'$ 。如图1所示, 假设物体在透镜左边, 光线由左向右传播, 可对 $x$ 和 $x'$ 的正负号作如下约定:

- (1) 当物点 $A$ 与透镜光心距离大于物方焦距 $f$ , 即 $A$ 点在 $F$ 点左侧, 则 $x > 0$ , 反之 $x < 0$ ;
- (2) 当像点 $A'$ 与透镜光心距离大于像方焦距 $f'$ , 即 $A'$ 点 $F'$ 右侧, 则 $x' > 0$ , 反之 $x' < 0$ 。

则有

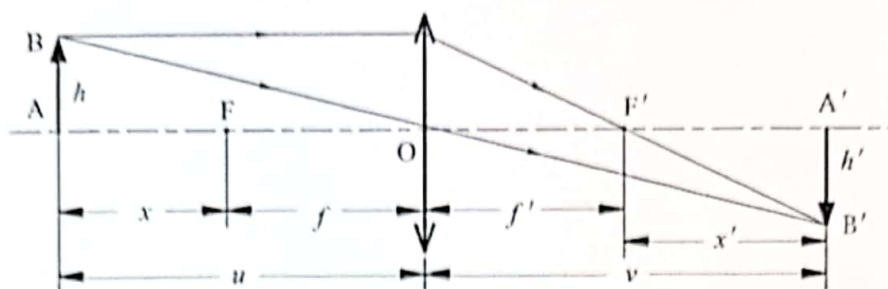
$$u = x + f, \quad v = x' + f' \quad (2)$$

代入式(1)可得薄透镜成像的牛顿公式为

$$xx' = ff' \quad (3)$$

根据图1可知, 对于薄凸透镜, 其横向放大率为 $M = -h'/h$ , 利用牛顿公式可得

$$M = -\frac{h'}{h} = -\frac{v}{u} = -\frac{x'+f'}{x+f} = -\frac{x'}{f} = -\frac{f'}{x} \quad (4)$$



$x$  物至物方焦点的距离,  $x'$  像至像方焦点的距离,  $u$  物距 (即物至透镜物方主点的距离),  $v$  像距 (即像至像方主点的距离),  $f$  物方焦距,  $f'$  像方焦距,  $h$  物高,  $h'$  像高

图 1 薄凸透镜成像原理

## 2. 自准法测薄透镜焦距

自准法测薄透镜焦距的光路如图2所示, 在透镜的像方放置平面反射镜与光轴垂直。实验中不断改变物AB与透镜之间的距离 $u$ , 当物AB处在透镜的物方焦平面上时, 反射光所成的像是与物等大的倒立实像A'B', 且A、A'、F三点重合。图2 (a) 和 (b) 分别画出了轴线上的物点和非轴线上物点的成像光路。成像最清晰时的物距 $u$ 就是物方焦距 $f$ 。像方焦距 $f'$ 的测量方法相同。

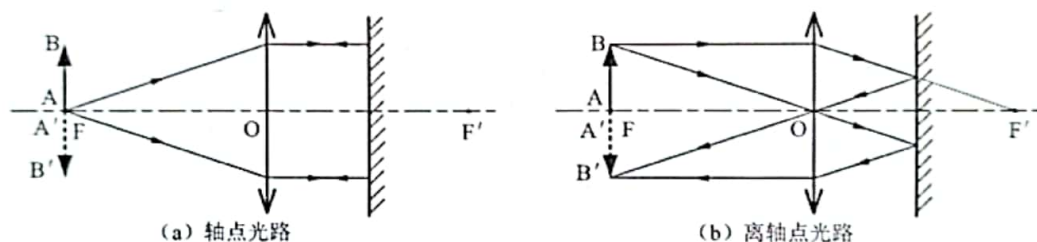


图 2 自准法测薄透镜焦距光路图

## 3. 其他方法

还可采用平行光法、二次成像法 (也称为贝塞尔法)、物像放大法等方法测量薄透镜的焦距, 相关方法因在本次实验中不采用, 请自行查阅相关资料。

### (二) 透镜组基点的测量

#### 1. 透镜组的基点和基平面

两个以上薄透镜或者厚透镜组成的共轴球面系统称为透镜组, 对称轴称为透镜组的光轴。对透镜组来说, 单个薄透镜的成像规律已不能简单地推广应用, 透镜组已无法象薄透镜那样定义光心, 故不能简单地将物距、像距等参量定义为物、像到光心的距离。为更方便地描述系统在成像上的规律, 对系统定义了几个特殊的位置, 只要能确定这些





像的位置, 就不需要追究光线在透镜组非成像面传播过程, 使用高斯公式、新公式或牛顿公式、成像图就能求解成像的位置。这些成像位置就是系统的基点和基面, 基点和主平面、节点和节平面。我们统称为系统的基点和基面。

### (1) 焦点和焦平面

那一确定的透镜组而言, 存在着一点, 其一侧为轴上无穷远能成像对应的物点, 称为物方焦点  $F$ ; 另一侧为轴上无穷远能成像对应的像点, 称为像方焦点  $F'$ 。通过焦点垂直于光轴的平面称为焦平面, 相应的有物方焦平面和像方焦平面, 如图 4-1 所示。



图 4-1 透镜组的焦点和焦平面



图 4-2 主点和主平面

### (2) 主点和主平面

在理想共轴透镜组中存在一种特殊的, 垂直于光轴的实平面, 若物体在其中一个平面内, 则在另一平面内形成与物大小和取向都相同的像, 即像的横向放大率为 1, 这一对实平面称为主平面 (简称主面)。主面与光轴的交点称为主点。与物方对应的主点称为物方主点, 以  $H$  表示; 与像方对应的主点称为像方主点, 以  $H'$  表示。对于每一薄透镜的情形, 两主点和  $H$  与  $H'$  重合。而在一般透镜下, 两主点是分开的。

如图 4-3 所示, 由  $H$  到  $F$  的距离称为物方焦距  $f$ , 由  $H'$  到  $F'$  的距离称为像方焦距  $f'$ 。物方焦距  $f$  以物方主点  $H$  为计算起点, 顺光路方向为正, 逆光路方向为负; 而像方焦距  $f'$  以像方主点  $H'$  为计算起点。

### (3) 节点和节平面

在透镜组中, 还存在着另外一对特殊的物像点, 其物像的角放大率为 1, 这对实点称为节点, 以  $N$  和  $N'$  表示, 如图 4-4 所示。凡是通过物方节点  $N$  的光线必通过像方节点  $N'$ , 并且入射光线和出射光线平行。若透镜组的物方和像方的介质折射率相同, 则节点和主点位置重合。

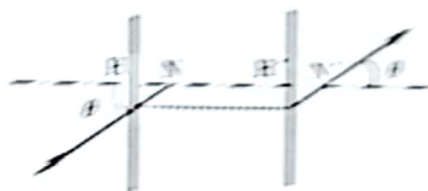


图 4-4 节点和节平面

若已知透镜组的两个基点, 那么简单的高斯公式和牛顿公式也将适用, 不必追究



光线在透镜组中的实际传播细节,也能用作图法把物像关系表示出来。例如图 6 所示,是一个由两个焦距分别为 $f_1$ 和 $f_2$ 的薄透镜组成的系统,光学间隔(即两透镜焦点间的距离)为 $\Delta$ 。透镜组的焦点为 $(F, F')$ 、主点为 $(H, H')$ 、节点为 $(N, N')$ ,各点之间距离的符号顺光路定义为正,逆光路为负。

实际使用的透镜组,多数情况下是放在空气中,物方和像方的介质折射率相同,根据亥姆霍兹-拉格朗日定理可知,两个节点分别与两个主点重合,在这种情况下,透镜组的成像规律只用四个基点就可以完全确定。

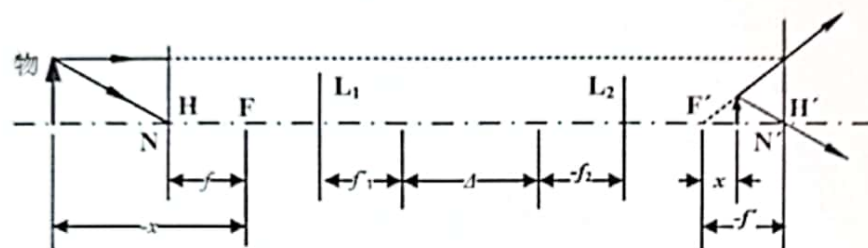


图 6 作图法描述透镜组的成像

## 2. 透镜组基点和基平面的测量

确定焦点的位置在实验上是比较容易做到的,只要设法产生平行光(如自准法),并使平行光通过待测透镜组,然后沿光轴移动白屏确定透镜组的会聚面,就可以确定透镜组的焦点和焦平面。至于主点和节点位置的确定,可以用节点架来辅助完成。

如图 6 所示,当透镜组置于空气中,物方和像方的介质折射率相同时,有 $-f = f'$ ,则式(3)的牛顿公式变为

$$f^2 = f'^2 = -xx' \quad (5)$$

其中物距 $x$ 和像距 $x'$ 分别以物方焦点 $F$ 和像方焦点 $F'$ 为计算起点。

只要在实验中把透镜组的两个焦点 $F$ 和 $F'$ 找到,并在一定物距 $x$ 下测得像距 $x'$ 。便能利用式(5)计算出焦距的绝对值。再由所成像的倒正,应用横向放大率公式

$$M = -f/x = -x'/f' \quad (6)$$

来确定 $f$ 和 $f'$ 的符号。知道了 $f$ 和 $f'$ 的大小和符号,便可根据透镜组焦距的定义来确定主点的位置。

### [ 安全注意事项 ]

1. 实验中需带手套,尽量避免用手直接接触镜片的光学面。若不小心触摸了光学表面,需尽快用镜头纸或擦镜布擦拭干净。



2. 安装镜片时需将光学平台上尽量靠近台面的高度操作, 以免失手跌落摔碎镜片。
3. 实验平台配件所用固定螺钉需拧紧, 以免镜架晃动; 但不可过紧, 以免损坏。
4. 实验前需按仪器清单检查镜片盒内的光学元件是否齐全, 实验结束后按照顺序放回元件盒。
5. 摆放光路时需注意光路的几何结构, 保证光线不超出光学平台的范围。
6. 光学元件的共轴调整需要先目测, 之后采用光路可逆的方法进行细调。

### 1 实验内容及步骤 1

#### 1. 用自准法测薄凸透镜焦距

实验装置: 如图 7 所示, 注意图中的底座为磁性表座, 而本实验实际采用的是非磁性底座, 相关实验配件的名称、功能、调节方式请参阅教材。

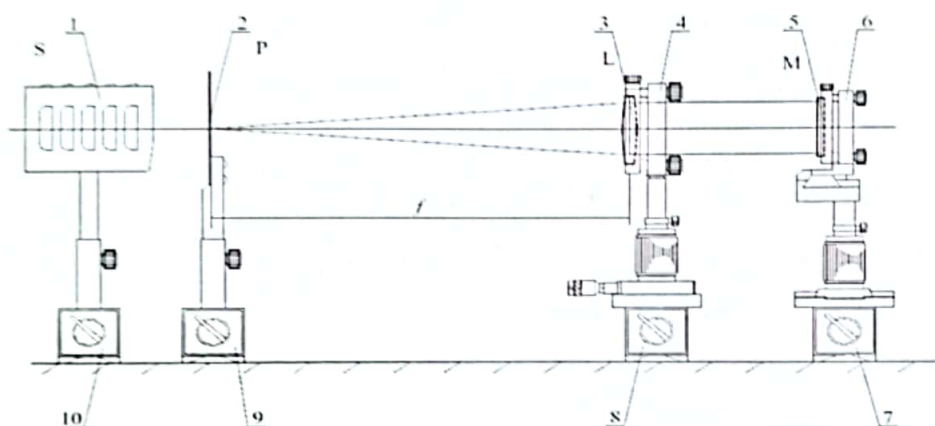


图 7 用自准法测薄透镜焦距装置图

(请写出自准法实验装置各部分的名称)

1. 白光光源	2. 物屏	3. 凸透镜 L ( $f=190\text{mm}$ ) = 透镜架 (或透镜架)	4. = 透镜架 (或透镜架)
5. 平面镜 M	6. 三角固定架	7. = 三维平移底座	8. 三维平移底座
9. 通用底座	10. 通用底座		

#### 实验步骤:

- 1) 参照图 7, 选择平台的螺丝孔坐标装妥各元件, 并调至共轴。
- 2) 沿光轴移动 L, 直至物屏上获得镂空图案的倒立实像。
- 3) 调 M 镜, 并微移 L, 使像最清晰且与物等大, 物与像构成一个完整的圆形。
- 4) 用钢尺和三角板配合测量 P 和 L 的位置  $a_1$ 、 $a_2$  并记录。



- 5) 由于判断成像是否清晰存在较大的人为误差, 故需进行多次测量并求平均。  
 6) 保持底座不动, 将 P 和 L 都绕 z 轴 (竖直方向) 转  $180^\circ$ , 再重复步骤 3-5。  
 7) 记录 P 和 L 新的位置  $b_1$ 、 $b_2$ 。  
 8) 计算透镜 L 的焦距  $f$  及其实验标准差。

实验次数	1	2	3	4	5
$a_1 / \text{mm}$	<del>55.7</del> <sup>62.7</sup>	75.3	86.7	100.0	110.4
$a_2 / \text{mm}$	<del>250.6</del> <sup>251.2</sup>	262.5	276.0	288.8	298.3
$b_1 / \text{mm}$	70.8	83.0	100.5	117.2	130.9
$b_2 / \text{mm}$	256.0	270.9	286.3	308.0	317.0
$(f_a = a_2 - a_1) / \text{mm}$	<del>194.9</del> <sup>188.5</sup>	187.2	189.3	188.8	187.9
$(f_b = b_2 - b_1) / \text{mm}$	185.2	187.9	185.8	190.8	186.1

计算  $f_a$  和  $f_b$  的平均值和实验标准差

$$\bar{f}_a = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^{n=5} f_{ai} = 188.34 \text{ mm}$$

$$\bar{f}_b = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^{n=5} f_{bi} = 187.16 \text{ mm}$$

$$S_a = \sqrt{\frac{1}{5 \times 4} \sum_{i=1}^{n=5} (f_{ai} - \bar{f}_a)^2} = 0.36 \text{ mm}$$

$$S_b = \sqrt{\frac{1}{5 \times 4} \sum_{i=1}^{n=5} (f_{bi} - \bar{f}_b)^2} = 1.02 \text{ mm}$$





计算焦距  $f$  的平均值和实验标准差，并写出  $f$  的最终结果。

$$f = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^{n=5} \frac{f_{ai} + f_{bi}}{2} = 187.75 \text{ mm.}$$

$$\sigma_f = \sqrt{\left(\frac{1}{2}S_a\right)^2 + \left(\frac{1}{2}S_b\right)^2} = 0.54 \text{ mm.}$$

$$\therefore f = (187.75 \pm 0.54) \text{ mm}$$

## 2. 透镜组节点和焦距的测定

实验装置：如图 8 所示。

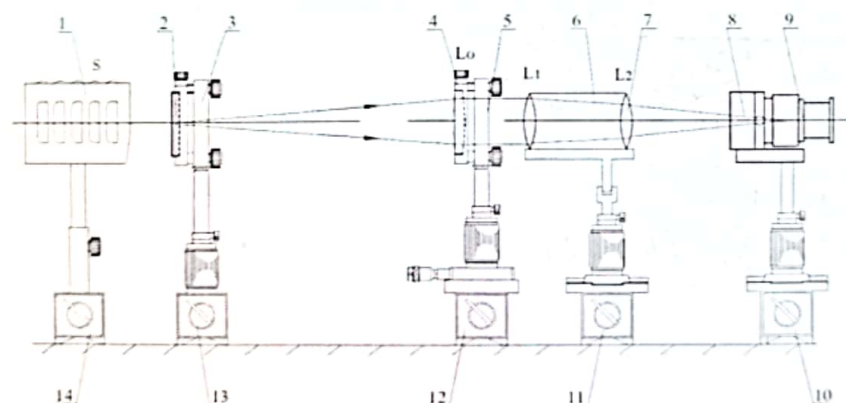


图 8 透镜组节点和焦距测量装置图

(请写出自准法实验装置各部分的名称)

1. 溴钨灯	2. 毫米尺	3. 双棱镜架	4. 物镜 $L_0$ ( $f_0 = 150 \text{ mm}$ )
5. 二维架(或透镜架)	6. 透镜组	7. 节点架	8. 测微目镜架
9. 测微目镜	10. 二维平移底座	11. 二维平移底座	12. 三维平移底座
13. 升降调平座	14. 通用底座		



### 实验步骤:

1) 先借助平面镜, 用“自准法”调节毫米尺与准直物镜  $L_0$  的距离, 使毫米尺位于  $L_0$  的物方焦平面上, 则通过  $L_0$  的光束为平行光。

2) 加入透镜组 ( $L_1+L_2$ ) 和测微目镜, 调共轴, 再沿光路移动测微目镜, 找到毫米尺的清晰像。提示:  $L_1$  和  $L_2$  之间的距离取 6cm。

3) 沿节点架导轨前后移动透镜组 (需保持  $L_1$  和  $L_2$  之间的距离不变), 同时相应地前后移动测微目镜, 直至节点架绕  $z$  轴作角度不大的转动时, 毫米尺像无横向移动, 此时像方节点  $N'$  即在节点架的转轴上。

4) 用白屏取代测微目镜接收毫米尺像, 沿光轴前后移动白屏至毫米尺的像最清晰。分别记下屏的位置  $a$ , 节点架转轴中心 (即像方节点  $N'$ ) 的位置  $b$ , 并从节点架导轨上读出透镜组中间位置与节点架转轴中心的偏移量  $d$ 。

5) 由于判断成像是否清晰存在较大的人为误差, 故需进行多次测量并求平均。

6) 将节点架绕  $z$  轴转动  $180^\circ$ , 重复(3)-(5)步, 测得另一组数据  $a'$ 、 $b'$ 、 $d$ 。

$f_1 = 300\text{mm}$   
 $f_2 = 190\text{mm}$  7) 计算透镜组的物方焦距  $f$  和像方焦距  $f'$  及实验标准偏差。

实验次数	1	2	3	4	5
$a / \text{mm}$	524.5 <del>394.3</del>	532.8	547.3	557.9	565.1
$b / \text{mm}$	394.3 <del>524.5</del>	402.0	415.6	424.6	436.0
$d / \text{mm}$	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0
$f' / \text{mm}$	130.2	130.8	131.7	133.3	129.1
$a' / \text{mm}$	530.0	546.0	550.4	560.3	571.0
$b' / \text{mm}$	416.1 <del>397.9</del>	412.0	417.1	432.5	438.3
$d' / \text{mm}$	<del>5.0</del> 7.0	<del>5.0</del> 7.0	<del>5.0</del> 7.0	<del>5.0</del> 7.0	<del>5.0</del> 7.0
$f / \text{mm}$	5.0 <del>132.1</del>	5.0 <del>134.6</del>	5.0 <del>133.3</del>	5.0 <del>127.8</del>	5.0 <del>132.7</del>

其中: (1)  $d$  为像方节点  $N'$  偏离透镜组中心的距离;  $d'$  为物方节点  $N$  偏离透镜中心的距离。

(2)  $f' = a - b$  为透镜组的像方焦距;  $f = a' - b'$  为透镜组的物方焦距。

注意: 由于透镜组两边的介质相同, 均为空气, 故主点和节点重合, 焦距可表示为焦点与节点之间的距离。



计算物方焦距和像方焦距的大小和实验标准差。

$$f_{\text{物}} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^{n=5} f_i = 132.1 \text{ mm}$$

$$f'_{\text{像}} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^{n=5} f'_i = 131.0 \text{ mm}$$

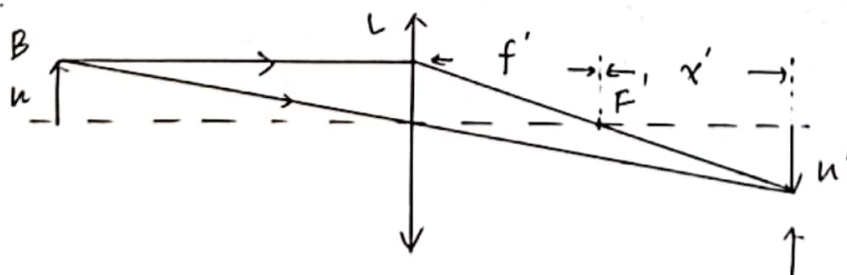
$$S_{f_{\text{物}}} = \sqrt{\frac{1}{5 \times 4} \sum_{i=1}^{n=5} (f_i - f_{\text{物}})^2} = 0.9 \text{ mm}$$

$$S_{f'_{\text{像}}} = \sqrt{\frac{1}{5 \times 4} \sum_{i=1}^{n=5} (f'_i - f'_{\text{像}})^2} = 0.7 \text{ mm}$$

### 【实验后思考题】

1. 用自准法测量薄透镜焦距时，为什么需要将 P、L 镜旋转 180° 再测量？
  2. 用物像放大率法测透镜焦距的实验中，测微目镜的物面在什么位置？作图说明。
1. ① 薄透镜本身制造时两面不一致造成误差，测出焦距不一致。  
② 测量时选取的测量点不一致，旋转后可以减小误差。

2.



物面放在这个位置。