



赵德庆 赵光新 杭 标 吕正俊 编

# 测量仪器检修

上 册

燃料化学工业出版社

79.931  
381  
1.1

# 测量仪器检修

## 上册

赵德庆 赵光新 杭 标 吕正俊

燃料化学工业出版社

## 内 容 提 要

本书根据测量仪器检修的需要而编写, 分上、下两册出版。上册阐述了与测量仪器有关的几何光学、仪器零部件的结构原理、修配工艺, 并汇集了不同类型的测量仪器一百余台, 分别介绍了它们的技术规格、光学系统和结构特点等。下册选择了典型仪器四十余台, 分别进行了拆装、调整及检修方法的论述。

本书可供仪器检修人员、测量人员参考, 也可作专业学校的辅助教材。

## 测 量 仪 器 检 修

### 上 册

赵德庆 赵光新 杭 标 吕正俊

燃料化学工业出版社 出版

(北京安定门外和平北路 16 号)

燃料化学工业出版社印刷一厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

\* \* \*

开本  $787 \times 1092^{1/16}$  印张  $17^{1/4}$

字数 408 千字 印数 1—16200

1974 年 4 月第 1 版 1974 年 4 月第 1 次印刷

\* \* \*

书号 15063·2069(煤-36) 定价 1.40 元

## 前 言

随着我国科学技术、工业生产的迅速发展，测量仪器的使用日益广泛，其规格型号也越来越多。如何正确的检修仪器，保证仪器的精密度，延长仪器的使用年限，是贯彻“勤俭建国”“勤俭办一切事业”伟大方针的重要问题。我们根据多年来从事测量仪器检修工作的体会，感觉到有必要向广大测量工作者及仪器检修人员介绍这方面的知识，以利于各有关部门及时检修仪器，提高生产效率。1967 年原煤炭部基建司组织我们编写《测量仪器维修》一书供内部使用。根据几年来各方面反映，此书有一定的参考价值。为了满足广大读者的需要，燃化部开发组组织我们将该书修改定稿，公开出版。在编写过程中得到沈阳煤矿设计研究院、西安煤矿仪表厂、辽宁煤田地质勘探公司、兴隆煤矿、中国人民解放军总参测绘局、北京煤矿规划设计院、北京光学仪器厂等单位的大力支持和协助并蒙郭达志、张明义、苏殿文三位同志给予具体帮助，特此表示谢意。

由于水平和经验所限，书中谬误之处，在所难免，恳请广大读者批评指正。

编著者

一九七三年五月于北京

# 目 录

## 第一篇 测量仪器检修基本知识

|                           |                      |
|---------------------------|----------------------|
| 第一章 几何光学的基本知识.....1       | 第一节 修前检查.....60      |
| 第一节 光的概念.....1            | 第二节 光学零件检修工艺.....62  |
| 第二节 测量仪器中常用的光学零件.....2    | 第三节 金属零件的检修工艺.....65 |
| 第三节 透镜与透镜组的成像.....5       | 第四节 其它检修工艺.....67    |
| 第二章 检修设备工具及材料.....12      | 第五章 测量仪器的检验.....70   |
| 第一节 检修工作室.....12          | 第一节 望远镜性能的检验.....70  |
| 第二节 几种验校设备.....12         | 第二节 水准器的检验.....74    |
| 第三节 常用工具的介绍.....16        | 第三节 测微装置的检验.....83   |
| 第四节 仪器检修材料.....19         | 第四节 度盘的检验.....86     |
| 第三章 测量仪器的零部件.....25       | 第六章 水准仪的校正.....88    |
| 第一节 光学零件与机械零件的连接.....25   | 第一节 概述.....88        |
| 第二节 测量仪器的瞄准设备——望远镜.....27 | 第二节 活镜水准仪的校正.....90  |
| 第三节 自动归算曲线板.....32        | 第三节 定镜水准仪的校正.....91  |
| 第四节 测量仪器的读数设备.....36      | 第七章 平板仪的校正.....94    |
| 第五节 水准器.....46            | 第一节 概述.....94        |
| 第六节 自动归零装置.....48         | 第二节 平板及其附件的校正.....96 |
| 第七节 轴系.....52             | 第三节 照准仪的校正.....97    |
| 第八节 制动和微动设备.....55        | 第八章 经纬仪的校正.....100   |
| 第九节 复测机构.....57           | 第一节 概述.....100       |
| 第十节 安平螺旋.....57           | 第二节 经纬仪的校正.....102   |
| 第四章 仪器的检修工艺.....60        | 第三节 度盘偏心差的检校.....106 |

## 第二篇 测量仪器样机介绍

|                                              |                                               |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 第九章 水准仪.....108                              | 第十三节 瑞士(WILD)N <sub>1</sub> 型水准仪.....119      |
| 第一节 南京水工 584 型水准仪.....108                    | 第十四节 瑞士(WILD)N <sub>10</sub> 型水准仪.....119     |
| 第二节 上海 CSZ 030 型水准仪.....109                  | 第十五节 瑞士(WILD)NK01型水准仪.....120                 |
| 第三节 云南 ND <sub>1</sub> 型水准仪.....109          | 第十六节 瑞士(WILD)N <sub>2</sub> 型水准仪.....121      |
| 第四节 匈牙利(MOM)G-Ni-D <sub>1</sub> 型水准仪.....110 | 第十七节 瑞士(WILD)N <sub>3</sub> 型水准仪.....121      |
| 第五节 匈牙利(MOM)Ni-3、Ni-5型水准仪.....112            | 第十八节 瑞士(WILD)NA <sub>2</sub> 型水准仪.....122     |
| 第六节 英国(Watts)1型水准仪.....113                   | 第十九节 瑞士(Kern)GKo型水准仪.....123                  |
| 第七节 英国(Watts)2型水准仪.....114                   | 第二十节 瑞士(Kern)GK <sub>1</sub> 型水准仪.....125     |
| 第八节 英国(Watts)水准仪.....115                     | 第二十一节 瑞士(Kern)GK <sub>23</sub> -C型水准仪.....126 |
| 第九节 日本 Z-12 型水准仪.....115                     | 第二十二节 瑞士(Kern)GK <sub>1-A</sub> 型水准仪.....128  |
| 第十节 日本 AP 型水准仪.....116                       | 第二十三节 意大利(SALMOIRAGHI) 5173 型水准仪.....130      |
| 第十一节 日本 AL-31 型水准仪.....117                   | 第二十四节 意大利(SALMOIRAGHI) 5190 型水准仪.....130      |
| 第十二节 日本 AL-21 型水准仪.....118                   |                                               |

|          |                                         |       |                                         |     |
|----------|-----------------------------------------|-------|-----------------------------------------|-----|
| 水准仪····· | 131                                     | 第十三节  | 匈牙利 (MOM) Te-C <sub>1</sub> 型光学经纬仪····· | 171 |
| 第廿五节     | 奥地利 (MILLER) NiV、NiVI 型水准仪·····         | 第十四节  | 匈牙利 (MOM) Te-B <sub>1</sub> 型光学经纬仪····· | 173 |
| 第廿六节     | 法国 (SLOM) SNA <sub>2</sub> 型水准仪·····    | 第十五节  | 匈牙利 (MOM) Gi-B <sub>1</sub> 型陀螺经纬仪····· | 175 |
| 第廿七节     | 德国 (Fennel) 水准仪·····                    | 第十六节  | 英国 (Cooke) V208 型光学经纬仪·····             | 176 |
| 第廿八节     | 德国 (ASKANIA) 水准仪·····                   | 第十七节  | 英国 (Cooke) V308 型光学经纬仪·····             | 179 |
| 第廿九节     | 德国 (BREITHAUPT) IVa 型水准仪·····           | 第十八节  | 英国 (Cooke) V400 型光学经纬仪·····             | 181 |
| 第卅节      | 德国 (ERTEL) INA 型水准仪·····                | 第十九节  | 英国 (Watts) №1 型光学经纬仪·····               | 183 |
| 第卅一节     | 德国 (ERTEL) INA65 型水准仪·····              | 第二十节  | 英国 (Watts) №2 型光学经纬仪·····               | 185 |
| 第卅二节     | 德国 (OPTON) Ni <sub>2</sub> 型水准仪·····    | 第廿一节  | 英国 P. I. M. 型陀螺经纬仪·····                 | 187 |
| 第卅三节     | 德国 (Zeiss) Ni <sub>4</sub> 型水准仪·····    | 第廿二节  | 日本 (Nikon) H <sub>5</sub> 型经纬仪·····     | 188 |
| 第卅四节     | 德国 (Zeiss) Koni025 型水准仪·····            | 第廿三节  | 日本 (Nikon) NT-2 型光学经纬仪·····             | 189 |
| 第卅五节     | 德国 (Zeiss) Koni 007 水准仪·····            | 第廿四节  | 日本 TH <sub>32</sub> 型光学经纬仪·····         | 190 |
| 第卅六节     | 德国 (Zeiss) Ni 060 型水准仪·····             | 第廿五节  | 瑞士 (WILD) T <sub>0</sub> 型光学经纬仪·····    | 192 |
| 第卅七节     | 德国 (Zeiss) Ni 030 型水准仪·····             | 第廿六节  | 瑞士 (WILD) T <sub>16</sub> 型光学经纬仪·····   | 193 |
| 第卅八节     | 德国 (Zeiss) Ni 004 水准仪·····              | 第廿七节  | 瑞士 (WILD) T <sub>1</sub> 型光学经纬仪·····    | 195 |
| 第十章      | 平板仪·····                                | 第廿八节  | 瑞士 (WILD) T <sub>1-A</sub> 型光学经纬仪·····  | 197 |
| 第一节      | 南京 24 型平板仪·····                         | 第廿九节  | 瑞士 (WILD) T <sub>2</sub> 型光学经纬仪·····    | 198 |
| 第二节      | 上海 101 型平板仪·····                        | 第卅节   | 瑞士 (WILD) RDS 型光学经纬仪·····               | 200 |
| 第三节      | 匈牙利 (MOM) MF 型平板仪·····                  | 第卅一节  | 瑞士 (WILD) RDH 型光学经纬仪·····               | 201 |
| 第四节      | 苏联 KB-1 型平板仪·····                       | 第卅二节  | 瑞士 (WILD) T <sub>3</sub> 精密光学经纬仪·····   | 204 |
| 第五节      | 苏联 KA-2 型平板仪·····                       | 第卅三节  | 瑞士 (WILD) T <sub>4</sub> 型全能经纬仪·····    | 206 |
| 第六节      | 德国 (Fennel) 平板仪·····                    | 第卅四节  | 瑞士 (Kern) DK <sub>1</sub> 型光学经纬仪·····   | 208 |
| 第七节      | 瑞士 (WILD) 平板仪·····                      | 第卅五节  | 瑞士 (Kern) K <sub>1-A</sub> 型光学经纬仪·····  | 209 |
| 第八节      | 瑞士 (WILD) RK <sub>1</sub> 型平板仪·····     | 第卅六节  | 瑞士 (Kern) K <sub>1-RA</sub> 型光学经纬仪····· | 210 |
| 第九节      | 瑞士 (Kern) RK 型平板仪·····                  | 第卅七节  | 瑞士 (Kern) DKM <sub>1</sub> 型光学经纬仪·····  | 212 |
| 第十一章     | 经纬仪·····                                | 第卅八节  | 瑞士 (Kern) DK <sub>2</sub> 型光学经纬仪·····   | 214 |
| 第一节      | 游标经纬仪·····                              | 第卅九节  | 瑞士 (Kern) DKM <sub>2</sub> 型光学经纬仪·····  | 216 |
| 第二节      | 上海 CGW-1 型经纬仪·····                      | 第四十节  | 瑞士 (Kern) DK-RV 型光学经纬仪·····             | 218 |
| 第三节      | 上海 CGW-2 型光学经纬仪·····                    | 第四十一节 | 瑞士 (Kern) DK-RT 型光学经纬仪·····             | 220 |
| 第四节      | 西安经 II 型光学经纬仪·····                      |       |                                         |     |
| 第五节      | 北京红旗 II 型光学经纬仪·····                     |       |                                         |     |
| 第六节      | 北京 DJ <sub>2</sub> -1 型光学经纬仪·····       |       |                                         |     |
| 第七节      | 捷克 (Meoptd) 经纬仪·····                    |       |                                         |     |
| 第八节      | 捷克 (Meoptd) T <sub>10</sub> 型光学经纬仪····· |       |                                         |     |
| 第九节      | 匈牙利 (MOM) 17SU 型经纬仪·····                |       |                                         |     |
| 第十节      | 匈牙利 (MOM) 17KS 型光学经纬仪·····              |       |                                         |     |
| 第十一节     | 匈牙利 (MOM) Te-D <sub>1</sub> 型光学经纬仪····· |       |                                         |     |
| 第十二节     | 匈牙利 (MOM) Te-D <sub>2</sub> 型光学经纬仪····· |       |                                         |     |

|       |                                               |                                                          |
|-------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 第四十二节 | 瑞士 (Kern) DKM <sub>3</sub> 型全能经纬仪.....222     | 经纬仪.....249                                              |
| 第四十三节 | 意大利 (GALILEO) TG <sub>2</sub> 型光学经纬仪.....224  | 第五十九节 德国 (ASKANIA) T <sub>pr</sub> 型全能经纬仪.....250        |
| 第四十四节 | 意大利 (GALILEO) TG <sub>2b</sub> 型光学经纬仪.....226 | 第六十节 德国 (Zeiss) Theo 120 型光学经纬仪.....251                  |
| 第四十五节 | 意大利 (GALILEO) TG <sub>1</sub> 型光学经纬仪.....228  | 第六十一节 德国 (Zeiss) Theo 030 型光学经纬仪.....252                 |
| 第四十六节 | 意大利 (GALILEO) TG <sub>1b</sub> 型光学经纬仪.....230 | 第六十二节 德国 (Zeiss) Theo 010 型光学经纬仪.....254                 |
| 第四十七节 | 意大利 (SALMOIRAGHI) T4150R 型光学经纬仪.....232       | 第六十三节 德国 (Zeiss) Redta 002 型光学经纬仪.....256                |
| 第四十八节 | 意大利 (SALMOIRAGHI) T4150NE 型光学经纬仪.....232      | 第六十四节 德国 (Zeiss) Dahlta 020 型光学经纬仪.....257               |
| 第四十九节 | 意大利 (SALMOIRAGHI) T4180 型光学经纬仪.....235        | 第六十五节 德国 (Zeiss) Dahlta 010 型光学经纬仪.....259               |
| 第五十节  | 奥地利 (MILLER) TIV 型光学经纬仪.....236               | 第六十六节 德国 (OPTON) Th <sub>4</sub> 型光学经纬仪.....261          |
| 第五十一节 | 苏联 OMT-30 型光学经纬仪.....238                      | 第六十七节 德国 (OPTON) Th <sub>3</sub> 型光学经纬仪.....263          |
| 第五十二节 | 苏联 OTIII 型光学经纬仪.....239                       | 第六十八节 德国 (OPTON) Th <sub>2</sub> 型光学经纬仪.....264          |
| 第五十三节 | 苏联 OT-10 型光学经纬仪.....240                       | 第六十九节 德国 (Freiberger) VEB Th <sub>I</sub> 型光学经纬仪.....265 |
| 第五十四节 | 苏联 TB-1 型光学经纬仪.....242                        | 第七十节 德国 (Freiberger) VEB Theo 6 型悬挂经纬仪.....267           |
| 第五十五节 | 德国 (Fennel) 经纬仪.....244                       | 第七十一节 德国 (Freiberger) VEB Theo 6.1 型悬挂经纬仪.....267        |
| 第五十六节 | 德国 (Fennel) 经纬仪 (带归算曲线).....245               |                                                          |
| 第五十七节 | 德国 (ASKANIA) T <sub>K</sub> 型光学经纬仪.....247    |                                                          |
| 第五十八节 | 德国 (ASKANIA) T <sub>U</sub> 型光学               |                                                          |

# 第一篇 测量仪器检修基本知识

## 第一章 几何光学的基本知识

测量仪器是光学机械仪器的一大类。光学机械仪器是由一些光学零件：透镜、棱镜、平面镜等所组成的系统，并用一些镜框和机械构件联结起来。光学机械仪器的作用原理是建立在光学基础上的，因此，为了熟悉测量仪器的使用和维修，应具备一定的光学知识。

光学可分成物理光学、几何光学和生理光学三部分。物理光学研究光的本性；几何光学研究光的概念及其反射、折射定律；生理光学则研究人眼的构造和它的光学性质。在此我们仅对几何光学作概略介绍。

### 第一节 光的概念

#### 一、光的直线传播和独立传播定律

我们之所以能看到一切物体是因为有光。能发光的物体称为光源，光源可分为天然光源与人造光源两种。如太阳就是天然光源，蜡烛、电灯等即为人造光源。

从发光体即光源发出的光，是向四周扩散的，表示它扩散的方向通常称之为光线。光在均匀的介质中是沿直线传播的，光线不会改变方向。不同方向的光线发生交叉时，彼此互不干涉影响，各依原来的方向直线传播。如光学经纬仪中的光学读数系统与望远镜的光学系统交叉，但互不干涉影响。这种现象在光学经纬仪中是常见的。

发光体是向四周发射光线的。如果只取这许多光线中的一部分，例如图 1-1 所示，成为一锥形，则称为光锥。锥顶  $A$  为发光体，由于发光体通常是有一定大小的，如太阳、蜡烛、电灯等。因此，光锥之顶不能为一点，假设把发光体缩小成为一点，这样的光源称之为点光源。由锥顶  $A$  向锥底中心  $O$  所连的光线  $AO$ ，称之为光束锥的中心线或主光线。若将光源点  $A$  移向无限远，则这一光锥所有光线将互相平行，我们称之为平行光。点光源在测量仪器的精度检验上和平行光在测量仪器的望远镜中都有着十分重要的意义。

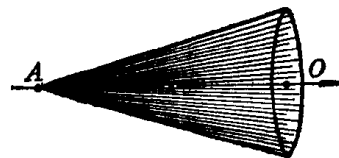


图 1-1 光锥

$A$ —光源； $O$ —光锥中心

#### 二、光的反射和折射定律

任何物质对光线而言可分为透明体与不透明体两种。凡是能让光线通过的物质称为透明体；光线不能通过的物质称为不透明体。例如玻璃、空气、水等为透明体，铜、铁、木块等为不透明体。

光线射至不透明体后，可能产生两种现象，即吸收和反射。白色光是由各种颜色混合而成的。当白光射至红色物质上时，则红色光被反射，其余各色光被吸收；若白光射至白色物质上时，则白色全部反射；而射至黑色物质上则全部吸收。这是光的一种被物质吸收和反射的现象。

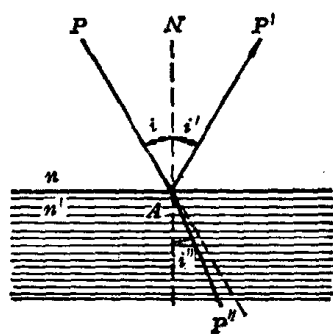


图 1-2 光线的反射和折射 实践证明，反射光线  $P'A$ 、入射光线  $PA$  和法线  $NA$  在同一平面内；反射光线和入射光线分居在法线的两侧，入射角  $i$  和反射角  $i'$  的绝对值相等，符号相反，即  $|i| = |i'|$ 。这就是光的反射定律。光的折射定律指出：入射光线  $PA$ 、法线  $NA$  和折射光线  $P''A$  在同一平面内；入射角  $i$  的正弦和折射角  $i''$  的正弦的比值与角度大小无关，而与两边介质的绝对折射率成反比，即

$$\frac{\sin i}{\sin i''} = \frac{n''}{n} = K (\text{常数}) \quad (1-1)$$

现列举几种物质的绝对折射率如下：

|               |                 |
|---------------|-----------------|
| 冕牌玻璃·····1.51 | 水·····1.33      |
| 火石玻璃·····1.62 | 空气·····1.000029 |

根据折射定律可知，若光线由密度大的介质进入密度小的介质时，即  $n > n'$ ，则折射角  $i''$  大于入射角  $i$ ，如图 1-3。入射角逐渐增大，折射角也随着增大。当折射角  $i'' = 90^\circ$  时， $\sin i = 1$ ，折射光线沿着两介质的分界面前进，此时的入射角称为全部内反射的临界角。假如入射角大于临界角时，因为  $\sin i'' > 1$  是不可能的，这时光线被全部反回到原来的介质  $n$  中，这种现象称为全部内反射。

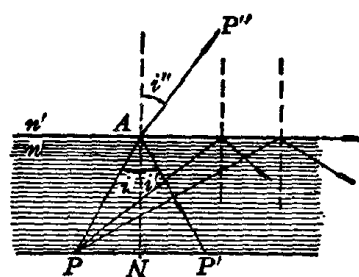


图 1-3 光线的全部内反射

现列举几种介质的临界角如下：

|                          |                        |
|--------------------------|------------------------|
| 冕牌玻璃····· $40^\circ 49'$ | 水····· $48^\circ 45'$  |
| 火石玻璃····· $34^\circ 51'$ | 空气····· $88^\circ 37'$ |

由于全反射较之平面反光镜反射的光量多，因此在光学测量仪器中常应用全部内反射原理，以直角棱镜来代替平面反射镜，从而改变光线方向，使光线损失较小。

## 第二节 测量仪器中常用的光学零件

在测量仪器中为了进行光学成像、影象放大，改变光线的方向及测微作用等，应用了各种光学零件，如透镜、棱镜、光楔、平行平面玻璃板等。现分别介绍于后：

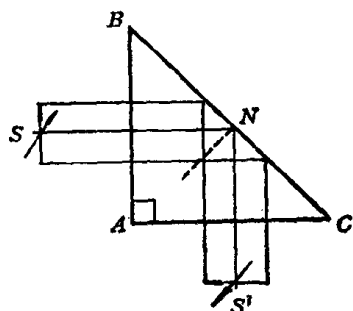


图 1-4 直角棱镜

### 一、直角棱镜

当垂直于棱镜的棱线所作的横断面均为等腰直角三角形时，该棱镜称为直角三棱镜。我们可以利用它的任意面进行反射或折射，现举几种常见的例子。

利用斜面  $BC$  进行反射，见图 1-4，其作用类似一个平面镜。光线  $S$  垂直于  $AB$  面射到  $BC$  面上，在  $BC$  面上产生全反射后，改变  $90^\circ$  的方向垂直于  $AC$  面射出光线  $S'$ ，图中  $N$  为法线。若入射光线  $S$  方向不变，而棱镜转动一个角度  $\alpha$ ，则出射

光线  $S'$  沿棱镜转动方向偏转  $2\alpha$  角。这一原理对光学经纬仪的光路调整很有用处。

直角棱镜还可以用两个直角面来反射,如图 1-5 中的  $CA$  和  $AB$  面,其作用与两块相互垂直的平面镜相似。光线  $S$  经直角面  $CA$  和  $AB$  反射后改变方向  $180^\circ$  后射出  $S'$ 。

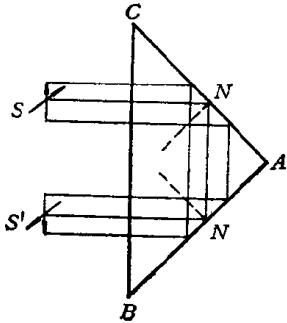


图 1-5 直角棱镜

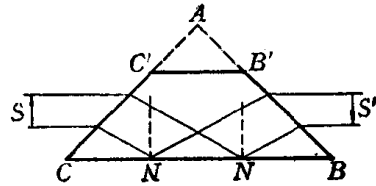


图 1-6 道威棱镜

还有一种是利用斜面  $BC$  反射、两直角面  $CC'$ 、 $BB'$  折射,且入射光线的方向平行于斜面(图 1-6)。光线  $S$  平行于斜面  $BC$  射入,经  $AC$  面的折射, $BC$  面的反射,再经  $AB$  面的折射后射出光线  $S'$ ,光线不改变方向而上下倒转过来。这种棱镜称为旋转棱镜或道威(Dove)棱镜。棱镜的上部  $AB'C'$  常因无用而截去。

## 二、屋脊棱镜

屋脊棱镜(图 1-7)是一种变形的直角棱镜,其斜面用两个构成  $90^\circ$  角的屋脊形反射面  $ABCD$  和  $BCEF$  所代替。两反射面的交线  $BC$  称为屋脊棱,屋脊棱镜中  $BC$ 、 $AD$ 、 $FE$  与底面的夹角均为  $45^\circ$ ,角  $FBA$  为  $90^\circ$ ,角  $BAH$  为  $135^\circ$ ,角  $AHG$  和  $HID$  为  $90^\circ$ 。

光线  $S$  射到棱镜  $ABCD$ 、 $BCEF$  面经两次反射后改变  $90^\circ$ ,以  $S'$  方向射出。屋脊棱镜能使光线改变方向,又使象倒转。这种屋脊棱镜在光学经纬仪的读数系统中得到广泛的应用。如蔡司(Zeiss)Theo 010、Th II 和苏联 TB-1 等经纬仪都采用此种棱镜。

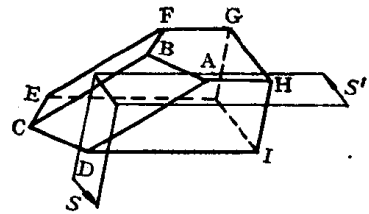


图 1-7 屋脊棱镜

## 三、菱形棱镜

菱形棱镜的作用是使光线平行位移而方向不变(图 1-8)。两对棱角  $A$  和  $C$  为  $45^\circ$ ,  $B$  和  $D$  为  $135^\circ$ 。在经纬仪 WILD T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub> 的读数系统中应用了这种棱镜。

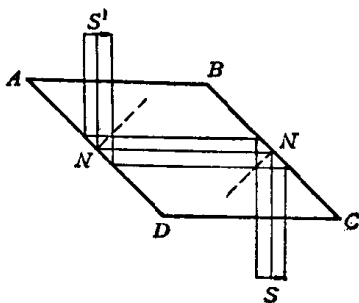


图 1-8 菱形棱镜

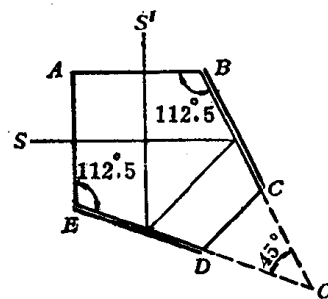


图 1-9 五角棱镜

## 四、五角棱镜

这种棱镜用来使光线方向改变  $90^\circ$ (图 1-9)。和直角棱镜比较其优点在于:即使入射角不严格垂直于棱镜的  $AE$  面,而入射光线  $S$  与出射光线  $S'$  在一定条件下恒相差  $90^\circ$  角。由于光线在  $BC$ 、 $ED$  面上的入射角为  $22^\circ 5'$ ,小于全内反射临界角,所以该两面必须镀银。

五角棱镜广泛应用在各种测距仪和矿井光学定向仪上,也应用在经纬仪的读数光学系统中,如蔡司 Theo 030、上海产 CGW-2 等经纬仪中。

### 五、光楔

棱角  $\theta$  很小的三棱镜称为光楔(如图 1-10)。光线  $S$  经过光楔折射后,出射光线  $S'$  将倾斜一个角度  $\delta$ , 如果入射角  $i$  相当小,则偏向角  $\delta$  可按下列近似公式计算:

$$\delta = \theta(n-1)\left(1 - \frac{n+1}{2n}i_1^2\right) \quad (1-2)$$

式中  $\theta$ ——光楔的棱角(折射角);

$n$ ——光楔的折射率;

$i_1$ ——光线的入射角。

若入射角很小很小,入射光线近似与法线重合时(图 1-10b),则(1-2)式可简化成下式:

$$\delta = \theta(n-1) \quad (1-3)$$

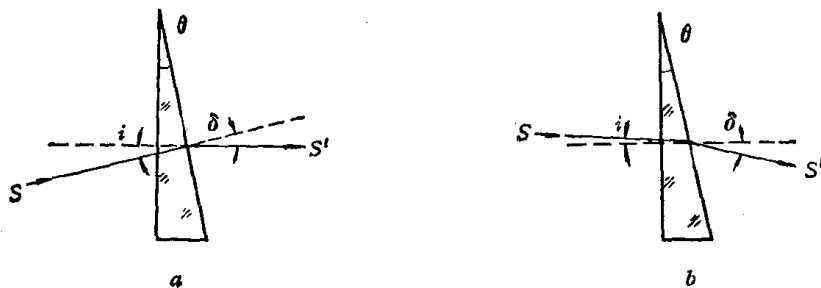


图 1-10 光线在光楔中的折射

由于  $\theta$ 、 $n$  都是常数,所以入射角很小时偏向角  $\delta$  为定值。利用光楔能使光线倾斜一个很小角度的特性,在测量仪器中得到广泛的应用,如 Theo 010 经纬仪、TAVISTOCK V400

经纬仪、Th II 经纬仪等的测微系统中,都有一对固定光楔和一对活动光楔,当移动光楔时使光束早一些或晚一些发生倾斜,从而使得不同的倾斜光线都能折射到光轴上的某一固定点(图 1-11)。在经纬仪测微系统中,光楔移动值是与度盘分划移动量成正比。因此,测角时就可以用测微计

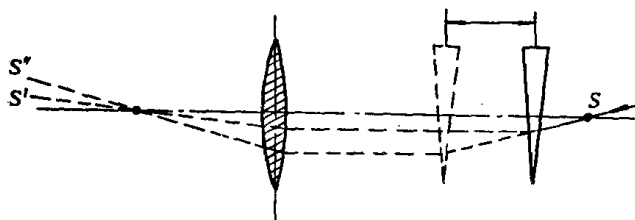


图 1-11 光楔移动的作用

精确地测出 1/10 秒的数量级。此外光楔还应用在双象测距仪等光学仪器中。

### 六、平行平面玻璃板(简称平板玻璃)

平行平面玻璃板的两界面互相平行,其作用可使倾斜的光线移动一段距离,而不改变方向。

在图 1-12 中,光线  $SO_1$  射到平板玻璃的  $AB$  平面后,在  $O_1$  点和  $O_2$  点产生折射,最后从  $O_2S'$  方向射出,并且  $SO_1$  平行于  $O_2S'$ 。入射光线与出射光线平移的距离为  $h$ , 现求证如下:

光线在  $O_1$  和  $O_2$  处的入射角各为  $i_1$  和  $i_2$ , 折射角为  $i'_1$  和  $i'_2$ , 由折射定律,即公式

① 公式(1-2)的推导可参阅 B. B. 费菲洛夫著“应用光学”第 27 页。

(1-1)得

$$\left. \begin{aligned} n_1 \sin i_1 &= n \sin i'_1 \\ n \sin i_2 &= n_2 \sin i'_2 \end{aligned} \right\}$$

因为平板玻璃位于空气中, 所以  $n_1 = n_2 \approx 1$ ,  $n_1$  和  $n_2$  为空气折射率,  $n$  为平板玻璃的折射率, 又因为  $AB$  面与  $CD$  面相平行, 故  $i'_1 = i_2$  则

$$\sin i_1 = \sin i'_2$$

$$i_1 = i'_2$$

即证明  $SO_1 \parallel O_2S'$ 。假设平板玻璃的厚度为  $d$ , 由图 1-12 可得:

$$h = O_1O_2 \sin(i_1 - i'_1)$$

和

$$O_1O_2 = \frac{d}{\cos i'_1}$$

所以

$$h = \frac{d \sin(i_1 - i'_1)}{\cos i'_1} \quad (1-4)$$

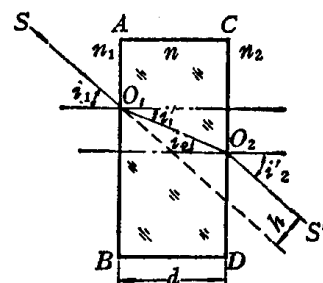


图 1-12 光线在平行平面玻璃板上的折射

由上式可知, 光线通过平板玻璃之后, 平移的距离随入射角  $i_1$  的大小而变,  $i_1$  越大  $h$  也越大。当  $i_1$  等于 0 时, 即光线垂直  $AB$  面射入平板玻璃时,  $h$  也就等于 0。并且  $h$  与玻璃板的厚度  $d$  成正比。

若入射角  $i_1$  很小时, 则(1-4)式可简化为:

$$h = di_1 \frac{n-1}{n} \quad (1-5)$$

平板玻璃在测量仪器中广泛用作光学测微器的活动光学零件。

### 第三节 透镜与透镜组的成象

#### 一、透镜

具有两个折射面, 其中一个是或者两个都是球面的光学零件称为透镜。透镜是光学机械仪器中应用最多的一种光学零件。

透镜的种类很多, 根据其光学特性及球面的方向不同, 可分为两大类: 会聚透镜(或称凸透镜)和发散透镜(或称凹透镜)。会聚透镜又分为双凸透镜(图 1-13a)、平凸透镜(图 1-13b)和收敛凸透镜(图 1-13c)三种, 其共同特点是中间厚而四周薄。发散透镜又有双凹透镜(图 1-14a)、平凹透镜(图 1-14b)和发散凹透镜(图 1-14c)三种, 其共同特点是中间薄而四周厚。

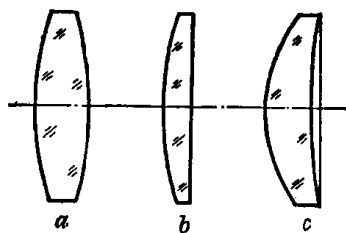


图 1-13 会聚透镜

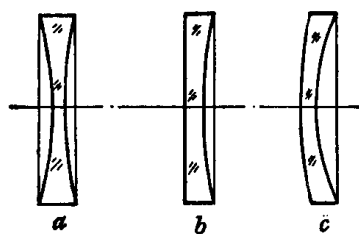


图 1-14 发散透镜

通过透镜两球面中心的连线称为透镜光轴。对于平凸或平凹透镜来说, 通过透镜的球面中心且垂直于平面的直线称为透镜光轴。

为了讨论问题简单起见, 我们把透镜近似地认为都是薄透镜。现将通过透镜中心且垂

直光轴的平面称为主平面，并以 $H$ 表示。与光轴平行的光束射到透镜上，经过透镜的折射后，从主平面 $H$ 起改变方向前进，并与光轴 $OO'$ 相交于 $F'$ 或 $F$ 点（图1-15）、（图1-16），该点叫做透镜的焦点。透镜有两个焦点——前焦点和后焦点。从左方平行于光轴射来的光线（图1-15），经过透镜折射后通过后焦点 $F'$ ；从右方平行于光轴射来的光线（图1-16），经过透镜折射后通过前焦点 $F$ 。凸透镜的前后焦点 $F$ 和 $F'$ 分别位于透镜的前后；凹透镜则相反，后焦点 $F'$ 在透镜的前面，而前焦点 $F$ 在透镜的后面。凹透镜的焦点是折射光线的延长线与光轴的交点。

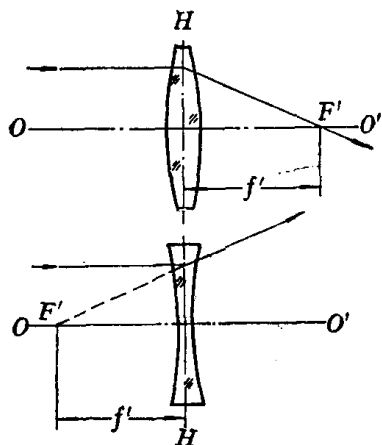


图1-15 透镜的焦点

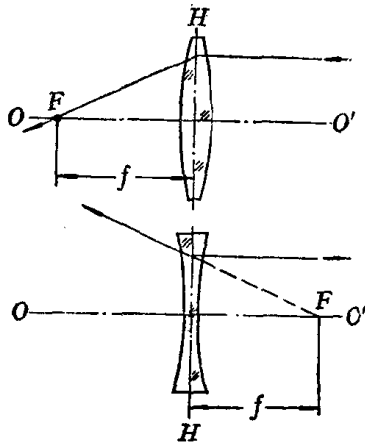


图1-16 透镜的焦点

焦点与透镜主平面 $H$ 之间的距离叫做焦距，并分别用 $f$ 和 $f'$ 表示透镜的前焦距和后焦距。焦距的大小决定于透镜的曲率半径。曲率半径越小，即透镜表面凸凹的程度愈大，它的焦距就愈短；反之曲率半径愈大，焦距就愈长。通过焦点垂直于光轴的平面叫做焦平面。

## 二、透镜成像的作图及基本公式

如果透镜的主平面和焦点的位置已知，可以用图解的方法求物体通过透镜后所成的象。作图时选择三条特殊成像光线中的任意两条，则可确定物体的象。这三条特殊成像光线是：

1. 平行光轴的光线经透镜成像后，从主平面起转向而通过后焦点 $F'$ ；
2. 经过前焦点的光线，经透镜成像后平行于光轴；
3. 通过透镜光心（可近似认为与透镜中心重合）的光线不改变方向。

利用上述三条特殊光线的任意二条就可进行作图。图1-17所示为物体 $QP$ 位于前焦点之外时，所得到的实象 $Q'P'$ 。当物体位于前焦点和透镜之间时，得到放大的正立的虚象

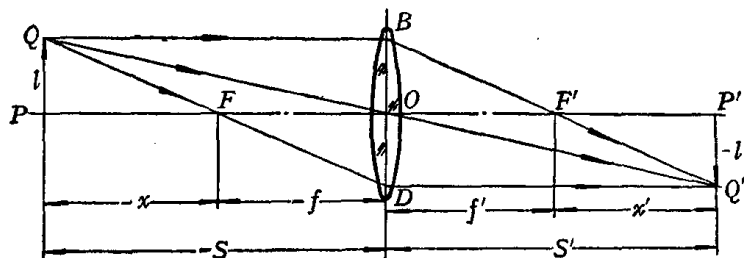


图1-17 透镜成像的作图

(如图 1-18)。用放大镜观察物体时,看到的的就是放大的正立虚象。

除了用作图法求物象的位置和大小之外,还可以用计算的方法求物象的位置和大小。已知条件是透镜的焦距和物体的位置。为了计算方便,我们规定透镜左边和光轴下方的线段为负,其反方向为正。

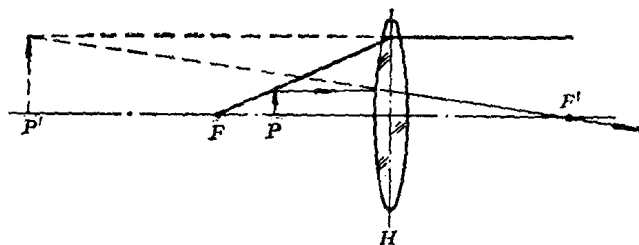


图 1-18 物体位于透镜和焦点之间的成像

1. 已知物体到透镜前焦点的距离,求象的位置。在图 1-17 中,已知物体  $QP$  到前焦点  $F$  的距离为  $-x$ , 焦距  $-f=f'$  求象的位置。因为  $\triangle QPF$  和  $FOD$  相似, 所以

$$\frac{l}{-l'} = \frac{x}{f} \quad (a)$$

因为  $\triangle BOF'$  和  $\triangle F'Q'P'$  相似, 所以

$$\frac{l}{-l'} = \frac{f'}{x'} \quad (b)$$

由 (a)、(b) 两式则可以得出:

$$xx' = ff' \quad (1-6)$$

这就是根据物体到前焦点的距离  $x$ , 求象的位置 (即象到后焦点的距离  $x'$ ) 的公式, 也称之牛顿公式。

2. 已知物体到透镜主平面的距离  $-S$ , 求象的位置 (由  $S'$  来确定) 从图 1-17 可知:

$$\left. \begin{aligned} -S &= -x - f \\ S' &= x' + f' \end{aligned} \right\} \quad \text{即} \quad \left. \begin{aligned} x &= S - f \\ x' &= S' - f' \end{aligned} \right\}$$

将上式代入 (1-6) 式, 经改化后得

$$\frac{f}{S} + \frac{f'}{S'} = 1 \quad (1-7)$$

该公式通称高斯公式。

3. 线放大率公式

由式 (a)、(b) 可得线放大率公式:

$$\beta = \frac{l'}{l} = -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f'} \quad (1-8)$$

### 三、透镜组的成像

在测量仪器中, 为了得到良好的成像质量, 减除各种象差的有害影响, 提高仪器的精度, 通常采用二块或二块以上的透镜组成透镜组, 而很少用单片透镜。透镜组有胶合型的和分离型的。

求物体通过透镜组后象的位置, 同样可以将物体依次对各个透镜成像, 最后所得到的象就是物体通过整个透镜组所成的象。然而, 这种办法十分麻烦, 通常是根据各单一透镜的焦距, 求出透镜组的焦距 (称等效焦距), 此后运用 (1-6)、(1-7) 和 (1-8) 公式来计算物象的位置和大小。

在图 1-19 中, 透镜  $H_1$  和  $H_2$  组成透镜组, 它们的前后焦点分别为  $F_1$ 、 $F'_1$  和  $F_2$ 、 $F'_2$ 。现在先利用作图法确定透镜组的焦点和主平面的位置。平行于光轴的光线  $BA$  经过透镜  $H_1$

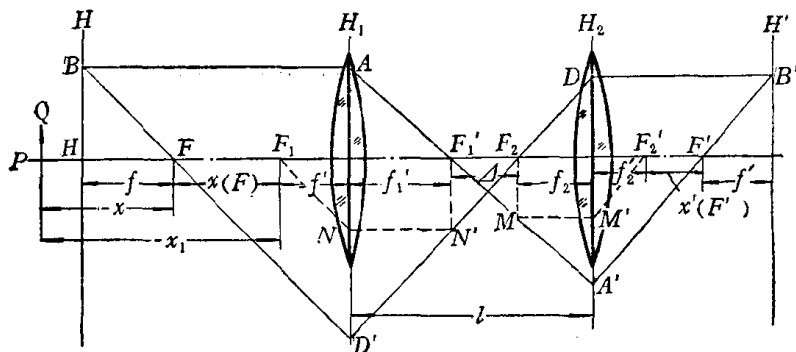


图 1-19 透镜组焦点和焦距的确定

后通过其后焦点  $F'_1$ ，出射  $AM$  又是透镜  $H_2$  的入射光线，它通过透镜  $H_2$  后出射光线为  $A'B'$ ， $A'B'$  光线与光轴的交点就是透镜组的后焦点  $F'$ 。入射光线  $BA$  与最后出射光线  $A'B'$  的交点  $B'$  就是后主平面上的一点，通过  $B'$  垂直于光轴所作的平面  $B'H'$  就是透镜组的后主平面，以  $H'$  表示，它到后焦点  $F'$  的距离则为等效后焦距  $-f'$ 。同理，利用从右方来的平行光线  $B'D$ ，可以求出透镜组的前焦点  $F$ ，前主平面  $H$  和前焦距  $f$ 。

现在我们来推导透镜组的焦距和线放大公式：

在图 1-19 中， $\triangle B'H'F'$  和  $\triangle M'H_2F'_2$  相似，所以

$$\frac{B'H'}{H_2M'} = \frac{F'H'}{H_2F'_2} = \frac{-f'}{f'_2}$$

$\triangle AH_1F'_1$  和  $\triangle MF_2F'_1$  相似，所以

$$\frac{AH_1}{MF_2} = \frac{H_1F'_1}{F'_1F_2} = \frac{f_1}{\Delta}$$

又因  $B'H' = AH_1$ ， $H_2M' = MF_2$ ，所以

$$\frac{-f'}{f'_2} = \frac{f_1}{\Delta}$$

由此得到：

$$f' = -\frac{f'_1 f'_2}{\Delta} \quad (1-9)$$

同理，由  $\triangle BHF \approx \triangle NH_1F_1$  和  $\triangle N'F'_1F_2 \approx \triangle F_2DH_2$

可得  $\frac{BH}{NH_1} = \frac{f}{-f_1}$  和  $\frac{DH_2}{N'F'_2} = \frac{-f_2}{\Delta}$ ，

因为  $BH = DH_2$ ， $NH_1 = N'F'_1$

所以  $f = \frac{f_1 f_2}{\Delta} \quad (1-10)$

求得透镜组的焦距之后，为了定出焦点的位置，还应求出后焦点  $F'$  相对于  $F'_2$  的位置  $x'(F')$ ，前焦点  $F$  相对于  $F_1$  的位置  $x(F)$ 。 $F'$  点是  $F'_1$  对透镜  $H_2$  所成的象， $F$  点是  $F_2$  对透镜  $H_1$  所成的象，因此利用牛顿公式(1-6)可得

$$x'(F') = -\frac{f_2 f'_2}{\Delta} \quad (1-11)$$

和  $x(F) = \frac{f_1 f'_1}{\Delta} \quad (1-12)$

因为两透镜之间的距离：

$$l = \Delta + f'_1 - f_2$$

故

$$\Delta = l - f'_1 + f_2$$

将上式代入(1-9)、(1-10)两式则得:

$$f' = \frac{f'_1 f'_2}{f'_1 + f'_2 - l} \quad (1-13)$$

$$f = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 + l} \quad (1-14)$$

上面两式表明, 透镜组的等效焦距随着两透镜间距  $l$  的变化而变化。在光学经纬仪的读数系统中, 就是根据这一道理来调整视差的。

透镜的线放大率公式仍然是(1-8)式  $\beta = -\frac{f}{x}$ , 式中  $f$ —透镜组的等效焦距,  $x$ —物体到透镜组前焦点  $F$  的距离。由图 1-19 可知:

$$x = x_1 - x(F) = x_1 - \frac{f_1 f'_1}{\Delta}$$

将上式和(1-10)式代入  $\beta = -\frac{f}{x}$  中, 整理后则得:

$$\beta = \frac{f_1 f_2}{f_1 f'_1 - x_1 \Delta} \quad (1-15)$$

上式表明, 透镜组的线放大率决定于物体 (如度盘分划线) 到透镜组的距离  $x_1$  及两透镜之间的距离  $l$ 。根据这一道理, 在光学经纬仪的读数光学系统中, 因度盘 (物平面) 和读数窗 (象平面) 的位置是不能调的, 而是通过调整显微物镜组的位置 (改变  $l$  或  $x_1$ ), 来调整行差和视差。

焦距的倒数称为光焦度, 以  $\varphi$  表示, 即  $\varphi = \frac{1}{f}$ 。当后焦距为 1 米时为单位光焦度, 称之为屈光度。例如, 后焦距  $f' = 400 \text{ mm}$  的透镜, 其光焦度 (衡量光线会散程度)

$$\varphi' = \frac{1}{0.4} = 2.5 \text{ 屈光度}$$

从望远镜、眼镜等射到人眼里的光焦度应该适合人眼的屈光度, 对正常眼睛  $\varphi'$  应该等于零 (实际上是很难办到), 即为平行光线。由于人眼可能有近视或远视, 所以在测量仪器的望远镜中目镜位置是可以调节的, 并且在目镜的外罩圈上刻有屈光度的标线 (一般刻有  $\pm 5$  个屈光度的标线), 以便使眼睛屈光度不同的观察者都能看清楚分划板上的十字线。

将 (1-13) 式换成光焦度的形式, 则为

$$\varphi' = \varphi'_1 + \varphi'_2 - \varphi'_1 \varphi'_2 l \quad (1-16)$$

如果两块薄透镜胶合在一起, 即  $l = 0$  时,

$$\varphi' = \varphi'_1 + \varphi'_2 \quad (1-17)$$

上式说明, 胶合在一起的透镜组的等效光焦度等于每一个透镜光焦度之和。这一结论可以推广到有二块以上的透镜胶合而成的透镜组中, 其等效光焦度为:

$$\varphi' = \varphi'_1 + \varphi'_2 + \cdots + \varphi'_n \quad (1-18)$$

#### 四、象差的概念

我们通常采用白光来照明, 而白光是红、橙、黄、绿、靛、蓝、紫等色光组成的复合光线。由于各色光的折射率不同, 以及透镜球面各部分的折射能力不等, 使物体经透镜成象后影

象带有象差,即产生模糊不清和变形。

象差的种类很多,主要的有球面象差、色象差、慧形象差、畸变、象散和象场弯曲等。要完全消除各种象差是极困难的,一般是根据光学仪器的用处和需要,减少或消除危害最大的象差,忽略一些次要的象差。

下面简述球面象差、慧形象差、色象差的产生及其消除方法。

### (一) 球面象差

透镜可以看作是由许多顶角不同的棱镜组成的。凸透镜中央部分的棱镜的顶角比边缘部分的小。凹透镜则相反。我们假设透镜的厚度不计、光线为近轴光线时,从 $P$ 发出的光线是可以完全聚焦于 $P'$ 的。但是,由于透镜的中央与边缘是有区别的,而且透镜的厚度是存在的,光线也不可能都是近轴光线。所以,当光线通过透镜时往往不能聚焦于一点。这种现象叫做球面象差。

图 1-20 所示乃简单聚光透镜的球面纵向偏差。由此可知:射往聚光透镜的平行光线离开光轴的距离 $h$ 越大,则该平行光束通过透镜后的汇合距离越是短,若在成像点上或在

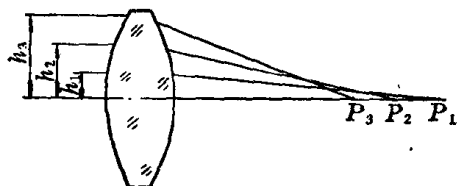


图 1-20 凸透镜的球面象差

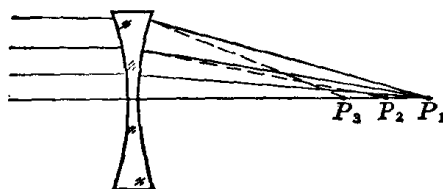


图 1-21 凹透镜的球面象差

成像点的前后竖一垂直于光轴的承影面,则可得出一漫射的圆弧即不清晰的成象,同时通光孔径与其象距的比例越大,则越不清晰,甚至对成象的反差性也起重要的影响。

### (二) 慧形象差

慧形象差产生的情况与球面象差相似,但光束中的中间光线不是垂直于而是倾斜地射往折射面。因此对称轴是入射面的中间光线,而不再是光轴,见图 1-22 所示。其原因是:斜光束中的中间光线不再同时是球面中心的光轴。慧形象差也是与光学系统孔径比的大小有关。

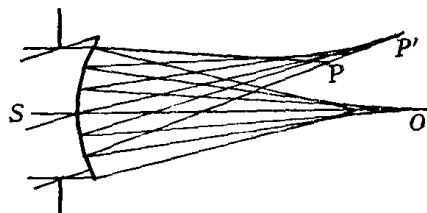


图 1-22 慧形象差

### (三) 色象差

色象差与光的物理性能有关。因为光的波长越大则光学玻璃对它的折射率越小。上面

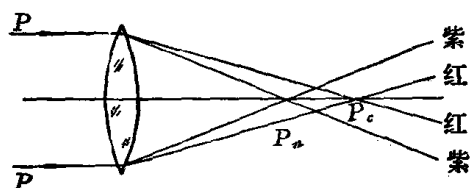


图 1-23 色象差

已讲过白光是由许多种色光组成的复合光线,当白光经过透镜折射后,由于各色光的波长不等,所以,各色光的折射率也就不同,不同波长的光与光轴相交的点,其距离也不一样,如红色光线的相交点就大于紫色光线的相交点(图 1-23)。其它色光的相交点亦依次排列在 $P'_c$ 和 $P'_n$ 之间。若将一屏幕放在 $P'_c$ 和 $P'_n$ 之间,

则可以看到许多彩色不同的同心圆。

透镜的色象差往往比球面象差大。色象差的存在使象的轮廓模糊不清,并带上不真实的色彩,对瞄准精度影响很大。所以,在精度较高的光学经纬仪中,应该尽力消除色象差。