

高等学校规划教材

光电大地测量仪器学

周丙申 蒋芷华 孙鹤群 编

中国矿业大学出版社

高等学校规划教材

光电大地测量仪器学

周丙申 蒋芷华 孙鹤群 编

中国矿业大学出版社

前 言

本书是煤炭高等学校测量工程类专业的规划教材,是根据新的教学计划与教学大纲,集编者多年的教学经验与科研成果,编写而成。

大地测量仪器属计量仪器的一个分支。由于微电子技术及计算技术的飞速发展,使得光电测距仪(特别是中、短程光电测距仪)、电子经纬仪和电子速测仪像钢卷尺及光学经纬仪一样,已成为大地测量和工程测量的常用仪器。因此,本书将光学测量仪器和光电测量仪器两方面的内容合在一起,并定名为《光电大地测量仪器学》。

本书共八章,第一章至第五章着重讲述光学和光电测角仪器的结构原理;仪器的使用方法及观测成果的整理方法;仪器主要误差来源、性质、影响规律及减小其影响的措施。第六章至第八章着重讲述光电测距仪器的结构原理、技术指标、精度检测方法和成果处理方法。为了方便教学起见,将光学经纬仪、水准仪等的检修知识、检修技术以及仪器性能、技术指标和精度的检测、成果处理等内容另编了一本书,单独进行介绍。

陀螺经纬仪已在矿山测量及工程测量中广泛应用。这类仪器的结构原理、定向方法及成果处理等内容,根据教学计划的安排,在《矿山测量学》中介绍,本书不再重复。

本书由中国矿业大学周丙中担任主编。绪论、第六、七、八章,第三章第七节,第四章第七节中的三、四由周丙中编写,第一、二、四(第七节中的三、四除外)章由西安矿业学院蒋芷华编写,第五、三(第七节除外)章由阜新矿业学院孙鹤群编写。全书由主编修改、统校、定稿。

在编写过程中,中国矿业大学郭达志教授对全书作了认真仔细的审阅;北京光学仪器厂副总工程师仲跻旺、张瑞欣及李泽根同志,徐州光学仪器厂,济宁激光研究所刘家鸣高级工程师等同志给予了大力支持与帮助;编者参阅了一些论文及资料;责任编辑洪健同志为编辑本书付出了艰辛的劳动。在此对上述同志和论文、资料作者致以衷心的感谢。

由于水平有限,书中纰漏,差错及不当之处在所难免,敬希读者批评指正。

编 者

1992年11月

目 录

结 论	(1)
第一节 大地测量仪器的分类和系列标准	(1)
第二节 大地测量仪器的发展概况	(4)
第一章 测量仪器的光学部件	(6)
第一节 平面镜和棱镜	(6)
第二节 厚透镜	(11)
第三节 透镜组	(20)
第四节 光学系统中的光栏	(22)
第五节 光学系统的像差	(25)
第二章 测量仪器的望远镜	(30)
第一节 眼睛的构造及其光学特性	(30)
第二节 望远镜的成像及视放大率	(33)
第三节 测量仪器望远镜的结构	(34)
第四节 望远镜的主要光学性能	(39)
第三章 经纬仪的测角装置	(46)
第一节 测角装置的组成与分类	(46)
第二节 光学度盘的构造原理	(48)
第三节 放大镜和显微镜	(50)
第四节 显微带尺读数装置和单平板玻璃光学测微器	(53)
第五节 度盘对径分划符合读数原理及读数测微装置	(56)
第六节 光学数字化读数结构	(65)
第七节 光电测角的基本原理	(67)
第四章 测量仪器的安平装置	(80)
第一节 水准器的用途、分类及工作原理	(80)
第二节 水准器的灵敏度及其影响因素	(81)
第三节 自动安平原理	(84)
第四节 灵敏元件及典型的自动安平方案	(87)
第五节 自动安平补偿器的阻尼、限程、安全及检查装置	(97)
第六节 自动安平水准仪的测量误差	(101)
第七节 经纬仪竖盘指标自动归零补偿器	(104)
第五章 测量仪器的机械部件	(116)
第一节 竖轴	(116)
第二节 竖轴轴系及其共轴性和定向误差	(120)

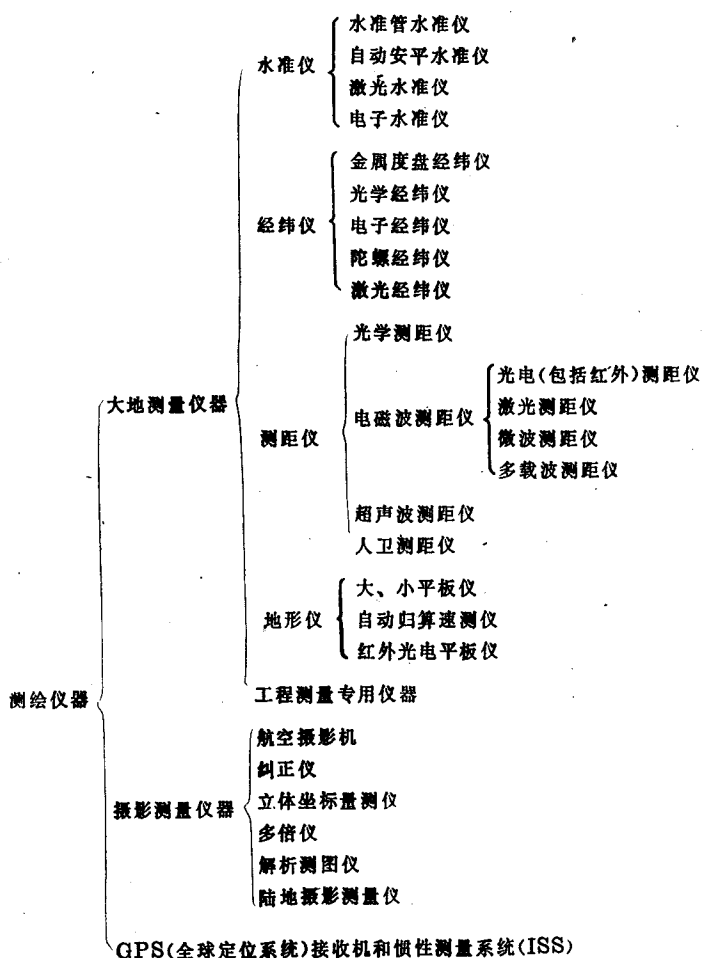
第三节	横轴	(121)
第四节	制动、微动机构和粗微调机构	(122)
第五节	复测机构和拨盘机构	(127)
第六节	对中机构和强制归心机构	(130)
第七节	脚螺旋和三脚架	(133)
第八节	仪器的稳定性	(136)
第六章	中短程光电测距仪的结构原理	(138)
第一节	光电测距仪的载波	(138)
第二节	调制光波的形成与探测	(143)
第三节	光电测距仪的光学系统	(147)
第四节	光电测距仪的测程	(154)
第五节	脉冲法测距原理	(156)
第六节	相位法测距的基本原理	(158)
第七节	完善自动数字测相的技术措施	(171)
第八节	光电测距仪的一般结构及时序控制	(182)
第七章	电子速测仪及其应用	(188)
第一节	电子速测仪的基本结构及功能	(188)
第二节	电子数据记录器	(189)
第三节	测距成果的改正	(195)
第四节	斜距的归算	(203)
第八章	光电测距仪的误差及检测	(216)
第一节	光电测距仪的误差	(216)
第二节	光电测距仪的检测	(230)
参考文献		(256)

绪 论

第一节 大地测量仪器的分类和系列标准

光电大地测量仪器广泛应用于工业、农林、水利、交通、国防等部门的工程建设中。例如各级控制点的三维定位,各种比例尺的地形图、地籍图和房地产图的测绘,以及各类工程的施工放样和检查等都要使用大地测量仪器。测绘仪器是精密光电仪器的一个重要分支,而光电大地测量仪器又是测绘仪器的重要组成部分。测绘仪器可作如表 0-1 所示的分类:

表 0-1 测 绘 仪 器 分 类



本书只讲述大地测量仪器中的光学经纬仪、水准仪、光电测距仪以及全站型电子速测仪等。这些用于测量水平角、竖直角(或天顶距、高程以及两点间距离的仪器根据使用上

对精度要求的不同,可大致分为以下四等:

- 1) 高精度仪器 指用于国家一、二等控制测量和特别精密的工程测量的仪器;
- 2) 中等精度仪器 指用于国家三、四等控制测量及精密工程测量的仪器;
- 3) 一般精度仪器 指用于等外测量、测图及一般工程测量的仪器;
- 4) 低精度仪器 主要用于野外勘测、概略测量及精度要求不高的工程测量的仪器;

微电子技术及微处理机技术的飞速发展,促使大地测量仪器发生了革命性的变革。光学经纬仪向电子经纬仪过渡,光学测距、钢尺量距向光电测距仪过渡,导致测绘仪器向自动数字测角、测距、存储和计算一体化(如全站型电子速测仪)、多功能的方向发展。

光电测距仪按测程可分为

- 1) 短程测距仪 测程小于 3km,标称精度为 $\pm (5\text{mm} + 5 \times 10^{-6}D)$,主要用于各种工程测量;
- 2) 中程测距仪 测程 5~15km,标称精度为 $\pm (3 \sim 5\text{mm} + 2 \times 10^{-6}D)$,用于三、四等以下控制测量;
- 3) 长程测距仪 测程大于 15km,标称精度为 $\pm (3 \sim 5\text{mm} + 1 \times 10^{-6}D)$,常用于一、二等及特种控制测量。

为了使仪器产品在制造、使用与维修上既经济又统一,重要的措施之一是在全国范围内实行标准化和系列化。我国从 60 年代初即开展了大地测量仪器的标准化、系列化工作,制定了仪器系列型谱和参数系列标准。我国大地测量仪器系列化方案中规定,大地测量仪器的总代号为“D”,经纬仪的代号为“J”,水准仪的代号为“S”,平板仪的代号为“P”,连起来就写成为“DJ”、“DS”及“DP”。每一类仪器又按精度划分若干个等级。经纬仪

表 0-2 经纬仪系列标准表

仪 器 型 号			DJ07	DJ1	DJ2	DJ6	DJ30
室内、外一测回水平方向中 误差不超过, (″)			±0.7 ±0.6	±1.0 ±0.8	±2.0 ±1.6	± 6 ± 4	±30 ±20
主 要 参 数 及 尺 寸	望远镜放大倍数。(倍)		30, 45, 55	24, 30, 45	28	25	18
	望远镜物镜有效孔径。(mm)		65	60	40	35	25
	望远镜最短视距。(m)		3	3	2	2	1
	水 准 器 角 值	照准部, (″)/2mm	4	6	20	30	/
		垂直度盘指标, (″)/2m	10	10	20	30	/
		望远镜, (″)/2mm	/	/	20	30	30
		圆水准器, (′)/2mm	8	8	8	8	8
	垂 直 度 盘 指 标 补 偿 器	工作范围, (′)	/	/	± 2	± 2	/
		安平中误差, (″)	/	/	± 0.3	± 1	/
	刻 划 直 径 mm	水平度盘	≥150	≥130	90	90	60
		垂直度盘	90	90	70	70	50
水平读数最小格值		0.2″	0.2″	1″	1′	120″	
仪器净重, kg		≤17	≤13	≤6	≤4.5	≤2.5	
主 要 用 途			国家一等 三角测量	国家一、二 等三角测量和 导线测量及精 密工程测量	国家三、四 等三角测量和 导线测量及精 密工程测量	大比例尺地 形测图及一般 工程测量	矿山测量 及一般工程 测量

的精度指标规定为仪器在野外条件下的“一测回方向中误差”，例如，野外测量“一测回方向中误差”为6″(或稍小于6″)的经纬仪用“DJ6”表示，简称J6级经纬仪。水准仪的精度指标规定为“每公里往返测高差中误差”(即mm/km)，例如，“每公里往返测高差中误差”为±1mm的水准仪用代号“DS1”表示，简称S1级水准仪。此外，还有一些派生型号的变型仪器，如矿山经纬仪的代号为“DJK”，自动安平水准仪的代号为“DSZ”等。我国现行的经纬仪、水准仪及光电测距仪系列标准如表0-2、表0-3及表0-4所示。

表0-3 水准仪系列标准表

等级与型号			DS05	DS05-X	DS1	DS1-X	DS3	DS3-X	DS10	DS10-X	DS20	DS20-X
项 目												
每公里往返测高程偶然中误差mm/km			± 0.5	± 0.5	± 1	± 1	± 3	± 3	± 10	± 10	± 20	± 20
望远镜放大倍数, 倍			45	45	38	38	28	28	20	20	15	
望远镜物镜有效孔径,(mm)			55	55	47	47	38	38	28	28	20	
水准器角值	管状水准器 ([″])/2mm	符合式普通式	10		10		20		45		45	
	粗水准器 ([′])/2mm	十字型式圆水泡	3		3		8	8	8	8	15	
测微器 mm		测量范围	5	5	5	5						
		最小分划值	0.05	0.05	0.05	0.05						
用 途			国家一等水准测量及地震水准测量		国家二等水准测量及其它精密水准测量		国家三、四等水准测量及一般工程水准测量		一般工程水准测量		建筑及简易农田水利工程水准测量	

注：“X”表示同一等级内结构变化，由产品型号命名登记单位统一平衡后发给规定序号。

表0-4 光电测距仪系列基本参数(草案)

类 别	长 远 程	中 程		短 程			精 密 型
型 号	DCJ50	DCJ25	DCH10 (DCJ10)	DCH5 (DCJ5)	DCH2	DCH05	DCHJ1 DCHJ2
主要参数							
测程, km	50	25	10	5	2	0.5	1 (2)
精度, mm	$\pm(10+1 \times 10^{-4} \cdot D)$	$\pm(10+2 \times 10^{-4} \cdot D)$	$\pm(10+3 \times 10^{-4} \cdot D)$	$\pm(10+4 \times 10^{-4} \cdot D)$	$\pm(10+5 \times 10^{-4} \cdot D)$	±15	$\pm(0.2+1 \times 10^{-4} \cdot D)$ $\pm(2+1 \times 10^{-4} \cdot D)$
周期误差, mm	±3	±3	±3	±3	±5	±5	
平均功耗, W	72	60	24	24	12	12	12
主机重量, kg	20	18	15	13	13	10	13
工作温度, ℃	-20~+45	-15~+40	-15~+40	-15~+40	-10~+40	-10~+40	-15~+40
俯仰角, (°)	-15~+15	-15~+15	-20~+20	-20~+20	-30~+30	-30~+30	-30~+30
结构形式	整体式	整体式	整体式	组合式 整体式	组合式	组合式	组合式

说明：1.表中符号含义：DC(大地测量)，J(激光或精密)，H(红外)；

2.D为测量的距离。

第二节 大地测量仪器的发展概况

1949 年以前,我国光学仪器工业十分落后,没有一家能批量生产大地测量仪器的工厂。1949 年以后,在国家的关怀、支持下,较早建立的规模较大的光学仪器厂有:上海光学仪器厂、南京水工仪器厂、西安天祥仪器厂及北京光学仪器厂等。初期,它们生产过一般精度的水准仪、平板仪、游标经纬仪和低精度的光学经纬仪。之后,由长春光机研究所和北京光学仪器厂先后研制和生产了 6" 级光学经纬仪。1958 年以后,在广大科技工作者努力下,研制出用于国家一等三角测量的 0.7" 级高精度经纬仪及 1" 级光学经纬仪。此后,上海光学仪器厂、西北光学仪器厂及南京测绘仪器厂等单位先后研制出精密光学经纬仪、精密水准仪及自动安平水准仪。60 年代以后,光学仪器的研制和生产得到了迅速发展,又先后建立了苏州第一光学仪器厂、无锡测绘仪器厂、徐州光学仪器厂、江西光学仪器厂、靖江测绘仪器厂、华东光学仪器厂等一大批光学仪器厂。现在我国已能大批量生产从 DJ07 到 DJ60 各种精度等级的光学经纬仪,以及从 DS1 到 DS10 各种精度等级的水准仪和 DS3、DS 10 的自动安平水准仪。

在光电测距仪方面,自 60 年代北京科学仪器厂和苏州第一光学仪器厂、清华大学合作试制了以克尔盒为调制元件的目视接收光信号的普通光源光电测距仪以后,相继研制出了一些相位式精密激光测距仪(测程可达 30km 左右),以及以 GaAs 半导体发光管为光源的短程红外光电测距仪。目前,国内生产短程光电测距仪的厂家主要有北京光学仪器厂、苏州第一光学仪器厂及常州大地测距仪厂等,其中产量及型号较多的是北京光学仪器厂。

近二三十年来,国外大地测量仪器的发展较迅速,考查和研究它们的发展动态,对发展我国的测绘仪器及测绘事业是很有裨益的。

水准仪的重要变革是实现了自动安平,即利用补偿器使视线自动安平的自动安平水准仪。目前从 S05 到 S3 级的自动安平水准仪已有近百种类型,正在逐步替代水准器水准仪。具有自动数字读数和自动记录功能的电子自动安平水准仪已问世(如威特厂的 NA 2000 型电子水准仪),配合专用的条形码标尺,仪器可自动输出标尺读数及距离值,并可自动输入数据记录器。

经纬仪的变革更迅速和引人注目。首先是以玻璃度盘的光学经纬仪取代了金属度盘的游标经纬仪;之后,将自动安平水准仪的自动补偿原理引入经纬仪的竖直度盘指标系统,实现了竖盘指标自动归零,提高了测量效率;在 J2 级及以上精度光学经纬仪的度盘对径分划符合读数系统中,实现了读数的“数字化”,减少了读错十分位数的概率,减轻了操作人员的劳动强度;在仪器结构方面越来越多地采用了强制归心机构、制微动同轴机构、光学对点器、正像望远镜以及望远镜的粗-精调焦机构等,这样便于操作,有利于提高测量效率和精度。经纬仪的最新一代产品是采用了具有径向光栅度盘或编码度盘以及相应的光电读数、电子细分、数据自动处理的电子经纬仪,使经纬仪向着光电化、数字化以及自动化方向发展。

光电测距仪由普通光源的电子管式光电测距仪发展到目前的以 GaAs 半导体发光二极管和半导体激光管为光源、半导体化、集成化、高度自动化的测距仪,现在又正在向小

型或微型化、多功能、高精度、长测程及低功耗方向发展。目前,中、短程光电测距仪一般都具有常规测距、跟踪测距、加常数及气象改正、取平均值等功能,还附加有归算平距、高差、计算坐标增量及坐标、显示施工放样偏差值以及蜂鸣警示、故障显示等功能。有的仪器(如克恩厂生产的仪器)在镜站增设了供定线放样用的 RD10 远程接收器,其液晶显示器可显示放样时反射镜位置前、后、左、右的偏差值。中国矿业大学和北京光学仪器厂合作研制的 DCB1 型矿用本质安全型光电测距仪,可用于煤矿等含有爆炸性气体环境的测距工作,该仪器带有本质安全型单向光载波语音通讯装置,较好地解决了矿井或坑道内测距时无线电对讲机不能通讯联络的问题。

近几年来,全站型电子速测仪(简称全站仪)和机助成图系统有了长足的发展,预示着测绘工作正在向全过程数字化、自动化方向发展。光电测距仪和电子经纬仪的结合形成全站型电子速测仪,它可以是整体式的,也可以是组合式的。整体式电子速测仪有美国的 HP3820A,奥普托厂的 ELta2/3,威特厂的 TC1、TC1L 及 TC2000,日本的 SET2/3,AGA 厂的 AGA140 等。组合式全站型电子速测仪有克恩厂的 E1/E2 电子经纬仪加 DM502/503 光电测距仪,威特厂的 T1000/2000/2000s 电子经纬仪加 DI5/1000/3000 光电测距仪等。光电测距仪和光学经纬仪相结合形成半站型速测仪,半站型速测仪也有整体式和组合式之分。日本的 NTD-4、SDM3ER 等仪器属整体式结构,中国的 DCB1 等则为组合式半站型速测仪。

目前,测绘仪器的另一个发展动向是全站型电子速测仪系统和数控绘图系统组合形成一套完整的全自动化、数字化的作业系统,即从外业观测数据的采集(采用电子手簿等数据终端机进行数据的记录和预处理)到内业计算处理以至机助成图的全过程均由计算机程控完成。如威特厂的 Geomap 系统,克恩厂的 SICORD 系统,奥普托厂的 Geos-1 系统和美国的 Vectron 系统等。这种全自动化测绘系统可大大缩短成图周期,消除人为的读数和记录错误,减轻劳动强度,提高工作效率等。

GPS(Global Positioning System)全球定位系统是美国国防部自 70 年代开始研制的新一代卫星无线电导航和定位系统。该系统已在大地控制网及基线测量、城市测量、大型工程构筑物测量、变形测量、摄影测量和遥感中摄影站点及地面控制点定位、海上石油平台的精确定位、野外勘探定位等方面显示出广泛应用的前景和潜力。GPS 已逐渐成为测量的一种重要手段,它的广泛应用将使测绘技术发生深刻的划时代的革命。

ISS(Inertial Surveying System)惯性测量系统是另一种很有发展前途的自动定位系统。它无需接收外界信号,而是依据地球的重力场和自转的原理来定位的。在矿井和其他一些特殊条件下应用这种定位系统,具有很大的优越性。GPS 和 ISS 系统相结合的组合导航/定位系统将把测量技术推向一个崭新的阶段。

第一章 测量仪器的光学部件

第一节 平面镜和棱镜

测量仪器中无论是望远镜或是读数设备都是由许许多多的光学部件组成的,按照这些光学部件的光学性能和作用可分为平面镜、棱镜系统和球面系统两大类。平面镜、棱镜系统主要解决光线传播的方向、位置及成像方向(如正倒像作用)的问题,以达到缩小仪器体积及便于使用的目的;球面系统主要起成像和放大的作用。

一、平面反射镜

平面镜是一块十分平滑的玻璃,在玻璃的背后镀上反射材料制成。理想的平面镜应该是入射的一束平行光经平面镜反射后仍是一束平行光。平面镜的作用是使光线反射,从而改变光线的传播方向。将自然光引入仪器内部进行照明的反光镜及观看水准管的反光镜等均属这种平面镜,如图 1-1 所示。

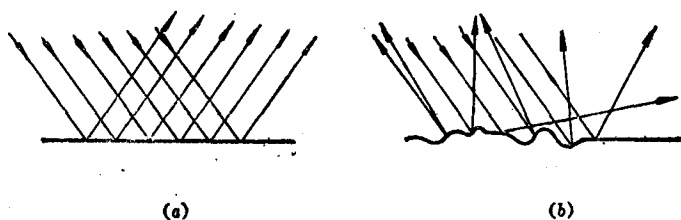


图 1-1

在测量仪器中所使用的平面镜有单平面镜和双平面镜两种。

单平面镜除反射光线以外,它还有一个重要的特性,这就是:如保持入射光线的入射方向不变,而使平面镜绕垂直于入射面的直线旋转 α 角时,反射光线将旋转 2α 角,如图 1-2 所示。这是因为入射角和反射角都变化了 α 角的缘故。

在许多自动安平补偿器上都应用了平面镜旋转的这一特性,使水平光线自动补偿。若将平面镜固定在运动的物体上,利用反射光线方向的变化,可以更灵敏地测定物体运动的情况。例如徐州光学仪器厂生产的 JT15 型陀螺经纬仪的观测系统,就利用了平面镜旋转这一特性。但是,固定在仪器光学系统中的反光镜若发生了转动或变形,则因光线的偏转又将给仪器的性能带来很大的影响。

双平面镜是用两块平面镜构成的一个光学组件,如图 1-3 所示。 P_1 和 P_2 为两块平面镜,它们之间的夹角为 α ,入射光线 AO_1 经两平面镜反射后,沿着 O_2B 的方向射出, AO_1 与 O_2B 相交于 M 点,入射光线与出射光线的夹角为 β 。由 $\triangle MO_1O_2$ 可知

$$\beta = 2(i_1 + i_2)$$

两平面镜法线的交点为 N ,两法线的夹角与两平面镜的夹角均为 α 。由 $\triangle NO_1O_2$ 可知

$$\alpha = i_1 + i_2$$

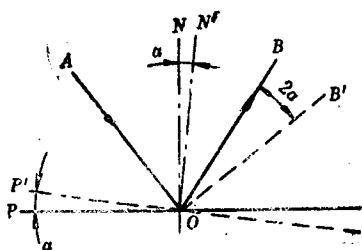


图 1-2

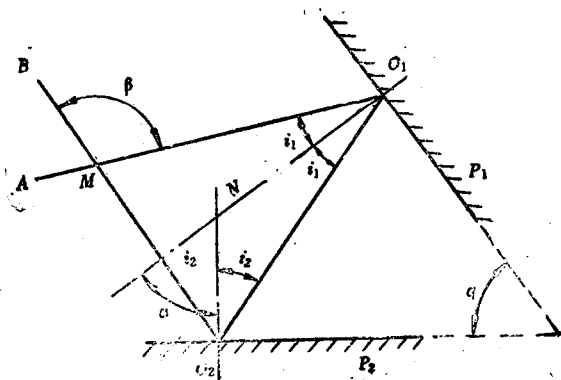


图 1-3

则得

$$\beta = 2\alpha$$

这说明,位于两平面镜公共垂直面内的光线,无论光线的入射角 α 如何,出射光线的转角 β 始终等于两平面镜夹角 α 的两倍。光线的旋转方向和由平面镜 P_1 转到平面镜 P_2 的方向相同。

由此可以推论:当二平面镜一起转动时,只要入射光线方向不变,出射光线的方向是不会改变的,但光线的位置可能发生平移。如果二平面镜的夹角变化 θ 时,则出射光线方向将改变 2θ 。

测量仪器中应用最多的是二平面镜夹角为 45° 的反光镜组,此时可以不考虑安装误差,它可使光线的方向始终改变 90° ,这是单平面镜难以实现的。

二、直角棱镜

由两个以上相交的折射平面或反射平面所组成的透明体称为棱镜。任何两平面的交线称为棱,垂直于棱的截面称为主截面。若主截面为等腰直角三角形,则称这种形状的棱镜为直角棱镜。由于入射光线在主截面内,出射光线也在主截面内,所以,研究光线在主截面内的折射情况就可以知道光线通过整个棱镜的折射情况了。图 1-4a 为直角棱镜立体图,图 b 为它的主截面图。

当光线在棱镜折射面上的入射角大于临界角时,将形成全反射。这时反射面上就不需要镀反射膜层了,且反射时几乎没有光能损失,故全反射直角棱镜在光学仪器中得到广泛应用。直角棱镜的使用方法一般有两种:

1. 用斜面作为反射面

如图 1-4b 所示,设有一光线 P 垂直于 AB 射入棱镜内,在斜面上 O 点的入射角为 45° ,大于玻璃相对于空气的临界角,故产生全反射,而且反射角也等于 45° ,所以,光线折转 90° 后垂直于 BC 面射出。位于主截面内的线段 ab 经斜面 AC 反射后,其方向将倒转 90° ;而垂直于主截面的线段 cd 经斜面反射后,其方向不变。在入射光线方向不变的情况下,若将棱镜转动 α 角,则出射光线的方向和单平面镜一样,将转动 2α 角。

2. 用两直角面作反射面

图 1-5 中,设光线 P 垂直于斜面 AC 射入棱镜,并以 45° 的入射角射向 AB 面,经全反射后方向折转 90° 到达 BC 面,再经第二次全反射,光线的方向又折转 90° 后与入射光

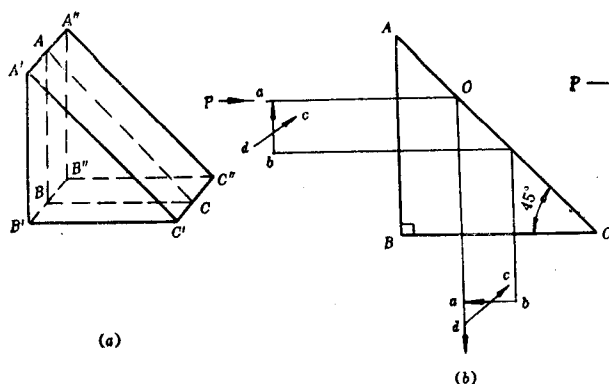


图 1-4

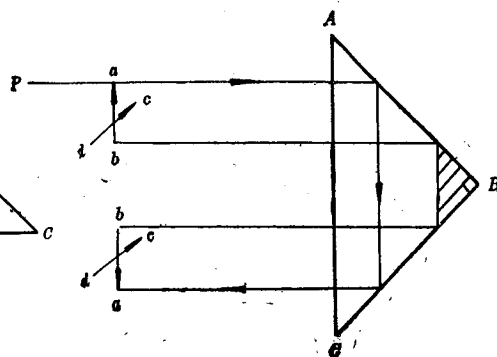


图 1-5

线平行射出。入射光线经两次全反射共折转 180° 。因此，位于主截面的线段 ab 经棱镜后将倒转 180° ，而垂直于主截面的线段 cd ，其方向不变。

当入射光线方向不变，棱镜转动 α 角时，它也和两个普通平面镜的两次反射一样，出射光线的方向始终保持不变，但光线的位置将发生平移。

为了装配及调整方便，有时把棱镜的直角切掉一部份(图 1-5 中影线部分)，而成梯形棱镜，其性能与直角棱镜完全一致。

三、五角棱镜

要使两个平面镜的夹角始终严格保持 45° ，最简单可靠的方法是把两个反射面做在同一块棱镜上，这就是我们常用的五角棱镜。图 1-6 是五角棱镜的主截面图。两个反射面 AB 、 DE 的夹角为 45° ， $\angle BCD$ 为 90° 。光线 P 垂直于 BC 面射入棱镜，到达 DE 面时，由于入射角小于 40° ，在 DE 、 AB 面上不可能形成全反射，必须在两个反射面上镀反射膜层，这样经过两次反射可使光线的方向改变 90° ，再由 CD 面射出。在入射光线不变的条件下，即使将棱镜转动某一角度 α ，出射光线也仍然垂直于入射光线，只是发生一些平移而已。故通常把这种棱镜安装在需使出射光线始终垂直于入射光线，且装调都比较困难的仪器部位。

四、屋脊棱镜

凡带有两个互相垂直的屋脊面的棱镜叫做屋脊棱镜。图 1-7 为测量仪器上常用的屋脊

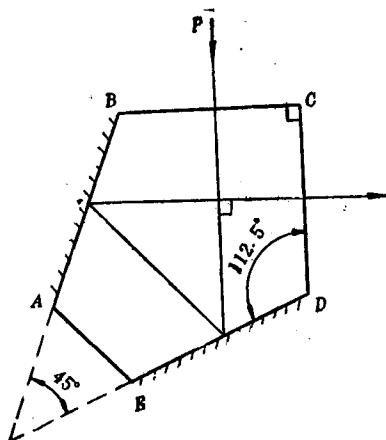


图 1-6

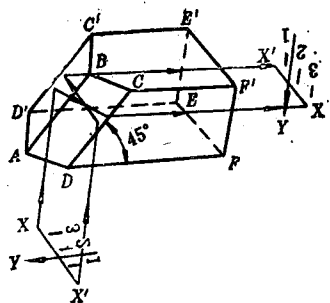


图 1-7

棱镜的立体图,平面 $ADFED'$ 及 $EE'F'F$ 互相垂直,是光线的入射面和出射面,平面 $ABCD$ 和 $ABC'D'$ 为两个互相垂直的反射面,也就是屋脊面,反射面的交线 AB 称为“屋脊”, AB 与底面 $ADFED'$ 的交角为 45° 。两个反射面必须严格垂直,其不垂直度的误差一般不应超过 $\pm 5''$ 。由于光线在这两个反射面上不能形成全反射,所以,必须镀上反射膜层。

屋脊棱镜的作用主要是用来使某个方向上的像发生颠倒(倒转 180°)。光线经过棱镜后的变化是:(1)光线的方向改变了 90° ;(2)平行于底面且垂直于屋脊的直线(如图 1-7 中线段 XX'),出射后倒转 180° ;而平行于屋脊(平行于 AB 的水平投影)的直线(图中 YY'),出射后折转 90° ,线段 YY' 由平行底面变成垂直于底面。

若把屋脊棱镜平行地安放在度盘的分划面上方,分划线就产生如图中所示的倒置情况。因此,常把它用在光学经纬仪的度盘对经分划线的符合读数系统中,还可应用在望远镜倒像系统中,制成正像望远镜。在使用和维修仪器时,应特别注意保护两个屋脊面的镀膜层和屋脊棱不被破坏。

五、光楔

主截面为等边或等腰三角形的棱镜统称为三棱镜,图 1-8a 为三棱镜的立体图。光线射入棱镜一般需经过两个折射面,在主截面上两个折射面的夹角 α 称为折射棱角(或称顶角),顶角很小(小于 1°)的三棱镜称为光楔。如图 1-8b 所示,光线经两次折射后,其方向将发生偏转,入射光线与折射光线延长线的夹角称为偏向角 δ 。根据折射定律可求出偏向角的表达式。由图 1-8b 可知:

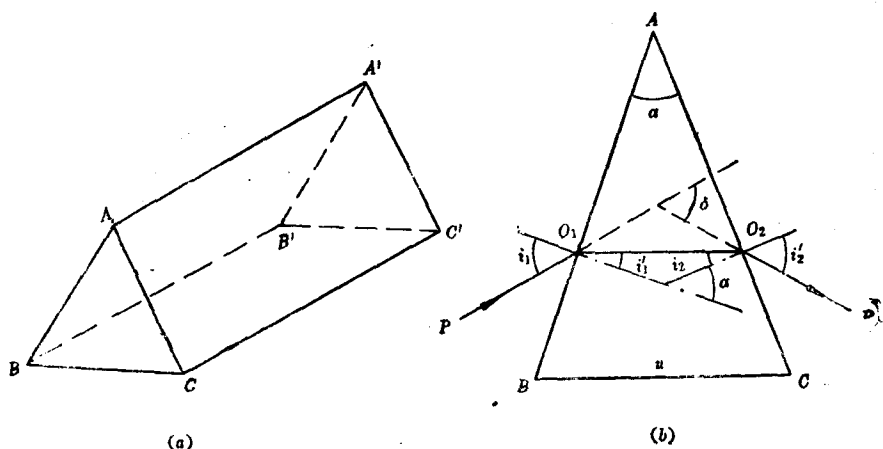


图 1-8

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= i_1' + i_2 \\ \delta &= (i_1 - i_1') + (i_2 - i_2') \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

设棱镜介质的折射率为 n , 取空气的折射率为 1, 根据折射定律则有

$$\left. \begin{aligned} \sin i_1 &= n \cdot \sin i_1' \\ n \cdot \sin i_2 &= \sin i_2' \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

将由式(1-1)求得的 i_2 及 i_2' 代入式(1-2), 则得

$$n \cdot \sin(\alpha - i_1') = \sin[(\delta + \alpha) - i_1]$$

将上式展开, 对光楔而言, α 很小, 故 δ 也一定很小, 则 $\sin \alpha \approx \alpha$; $\cos \alpha \approx 1$; $\sin(\delta + \alpha) \approx (\delta + \alpha)$; $\cos(\delta + \alpha) \approx 1$ 。于是上式可简化为

$$n \cdot \alpha \cdot \cos i_1' - n \cdot \sin i_1' \approx (\delta + \alpha) \cos i_1 - \sin i_1,$$

由式(1-2)知 $\sin i_1 = n \cdot \sin i_1'$, 则上式可化简为

$$\delta \cdot \cos i_1 \approx n \cdot \alpha \cdot \cos i_1' - \alpha \cdot \cos i_1$$

即

$$\delta \approx \alpha \left(\frac{n \cdot \cos i_1'}{\cos i_1} - 1 \right)$$

在光楔的使用中,一般入射角 i_1 很小,折射角 i_1' 必然也很小,故 $\cos i_1' \approx \cos i_1 \approx 1$ 。于是偏向角 δ 为

$$\delta \approx \alpha(n-1) \quad (1-3)$$

上式说明,偏向角取决于棱镜的顶角 α 及介质的折射率 n 。对于某个光楔而言, α 及 n 均为定值,故偏向角 δ 也是一个定值。在光学仪器上使用的光楔,其入射角一般都很小,多用在光学经纬仪的测微器或光路补偿器上。

六、平板玻璃

由两个相互平行的光学平面组成的光学零件称为平板玻璃。光学仪器中通常利用这两个平行的平面作为折射面,使光线位置发生平移。如图 1-9 所示,入射光线 P 进入平板玻璃,经两次折射后,出射光线 P' 和入射线的方向保持平行,但光线位置平移一段距离 h 。

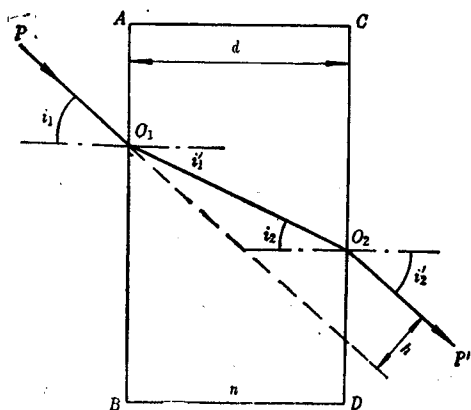


图 1-9

设玻璃的折射率为 n , 空气的折射率近似为 1, 因 AB 面平行于 CD 面, 故 $i_1' = i_2$, 根据折射定律并将其代入式(1-2)得

$$\sin i_1 = \sin i_2'$$

$$\text{故 } i_1 = i_2'$$

这说明,光线通过平板玻璃后,出射光线与入射光线平行。平移的距离 h 为

$$h = O_1 O_2 \cdot \sin(i_1 - i_1')$$

而

$$O_1 O_2 = \frac{d}{\cos i_1'}$$

代入上式,得

$$\begin{aligned} h &= \frac{d \cdot \sin(i_1 - i_1')}{\cos i_1'} \\ &= d \left(\sin i_1 - \frac{\sin i_1' \cos i_1}{\cos i_1'} \right) \end{aligned} \quad (1-4)$$

又

$$\sin i_1' = \frac{1}{n} \sin i_1, \quad \sin^2 i_1' + \cos^2 i_1' = 1$$

所以

$$\cos i_1' = \sqrt{1 - \frac{1}{n^2} \sin^2 i_1}$$

将上式代入式(1-4),得

$$h = d \cdot \sin i_1 \left(1 - \frac{\cos i_1}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i_1}} \right) \quad (1-5)$$

在光学仪器中,一般入射角 i_1 都很小,故可认为 $\sin i_1 \approx i_1$ 及 $\cos i_1 \approx 1$ 。于是式(1-5)可变为

$$h = d \cdot i_1 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{n^2 - i_1^2}} \right) = d \cdot i_1 \left(1 - \frac{1}{n \sqrt{1 - \left(\frac{i_1}{n}\right)^2}} \right)$$

因为 i_1 很小, $\left(\frac{i_1}{n}\right)^2$ 的值就更小,可忽略不计,则得

$$h = d \cdot i_1 \left(\frac{n-1}{n} \right) \quad (1-6)$$

或另一近似表达式

$$h = d \cdot \operatorname{tg} i_1 \left(\frac{n-1}{n} \right) \quad (1-7)$$

式中 d 为平板玻璃的厚度, i_1 的单位是弧度。

式(1-6)说明,对于一定的平板玻璃而言,由于玻璃的折射率 n 及平板的厚度 d 均为定值,所以,平移量 h 与入射角 i_1 成正比。但应注意,式(1-6)只能在入射角 i_1 较小时才能应用,其准确性随入射角的增大而越来越差。当入射角较大时,必须用式(1-5)进行平移量的计算。测量仪器中常利用平板玻璃的这一特性,制成经纬仪和水准仪的测微元件和补偿元件。

第二节 厚 透 镜

测量仪器中除使用以上平面折射或反射棱镜零件外,还大量应用由球面组成的光学系统,以达到成像、放大和提高相对亮度等目的。

由两个折射曲面(多为球面,其中一个也可以是平面)围限的透明体,称为透镜。仪器的光学系统通常由数个透镜按某种要求组合而成。透镜按型式可以分为两大类六种形状。第一类透镜中央部分比边缘部分厚,称为正透镜或凸透镜,如图1-10a所示。第二类透镜中央部分比边缘部分薄,称为负透镜或凹透镜,如图1-10b所示。正透镜对光束起会聚作用,

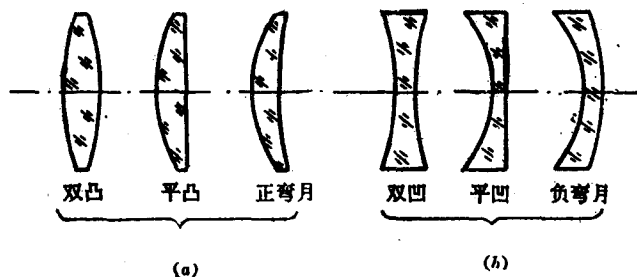


图 1-10

用,故又称会聚透镜;负透镜对光束起发散作用,故又称发散透镜。透镜前一个折射面顶点到后一个折射面顶点间的距离叫做透镜的厚度。通常把透镜厚度接近于零的透镜称为

薄透镜。一般情况下,根据薄透镜计算出的各种参数值与考虑厚度时计算出的真正值相比,差别不太大。因此,在定性地了解测量仪器光学性能时,可以把透镜视为薄透镜进行分析计算。

由透镜或透镜组组成的光学系统,都是由单球面组成的,故研究光线经透镜或透镜组的折射必须从单球面开始。

一、光线经单球面的折射

图 1-11 表示以单球面为界的两种介质,其折射率分别为 n 和 n' , 球面的曲率半径为 r , 曲率中心为 C , 过球面对称中心 O 与曲率中心 C 的连线称为主光轴, 光轴与球面的交点 O 称为顶点。并规定: 球面左边的空间为物体所处的空间, 称为物空间; 右边则为经球面折射得到像的空间, 称为像空间; 光线由左边射向右边, 即由物空间射向像空间。

从光轴上任一点 P 向球面发出一束光线, 折射后如果会聚于一点 P' , 那么 P' 就是 P 的像点。为了确定像点 P' 的位置, 只要用两条光线即可, 一条选取沿光轴射至球面的光线, 该光线由于入射角为零, 经球面后不发生折射, 另一条光线可任意选取, 如光线 PA 经球面折射后与光轴交于 P' 点, 则 P' 点就是 P 点的像。

在球面光学系统中, 物空间任意一点发出的一束光线都能会聚到像空间对应点上的光学系统, 称为理想光学系统。在图 1-11 中, 若从 P 点发出的光线与光轴的交角 u 很小, 与此相对应的 i 、 i' 、 u' 和 ϕ 也很小, 此时容易形成理想的像。把能满足理想光学系统物像关系的区域称为近轴区, 其余则称为远轴区。

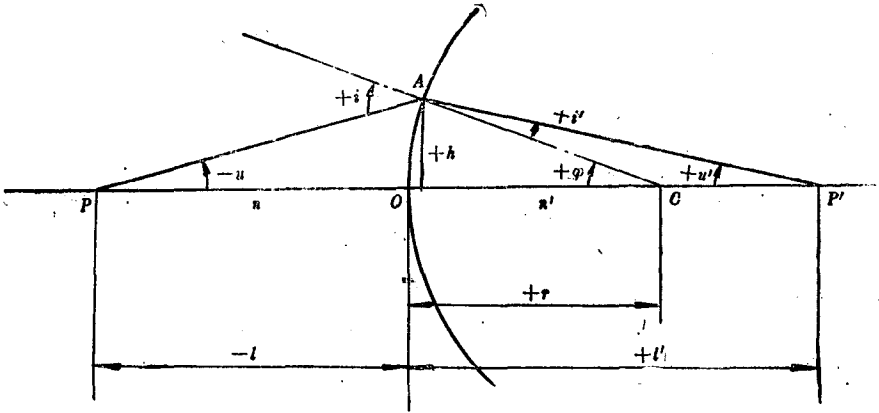


图 1-11

设光线 PA 在近轴区内, 由于角 u 、 u' 和 ϕ 很小, 弧线 AO 可以用入射高 h 来代替, 则有下列关系式

$$u = \frac{h}{l}, \quad u' = \frac{h}{l'}, \quad \phi = \frac{h}{r} \quad (1-8)$$

式中 u 和 u' ——入射光线与光轴的交角和折射光线与光轴的交角;

l 和 l' ——物距和像距;

h ——入射高。

根据折射定律

$$n \cdot \sin i = n' \cdot \sin i'$$