

工程光学实验

阳威 编写

华中科技大学武昌分校

2005年12月

前 言

工程光学含应用光学和物理光学两门课程内容，是光学类、光电子学科中基础的基础，是现代光学技术、光电子技术的总入口。因为学生不具有比较完整的光学知识、光学基本理论、基本技能就无法进一步学习光信息科学技术、现代光电子技术中的任何一门课程。而学生光学知识和理论的获得仅靠书本是不可能的，因为对光学现象的认识、对应用光学和物理光学理论的掌握必须通过实验。

在分校二期实验室工程投资中，信息科学与技术系获得足够的经费，建设了工程光学实验室。为我校有关专业学生进行光学实验创造了有利条件。

阳威老师在参与到总校有关实验室进行实验教学的工作和学习的基础上，按《应用光学》和《物理光学》教学大纲的要求，结合我系工程光学实验室的实验条件，总结、整理和编写了这本《工程光学实验》的讲义，可供学生进行实验的指导。

本《工程光学实验》由徐啟阳教授审核。在编写过程中还得到了吴长发副教授、褚玉喜副教授的指导和帮助，参考并吸收了其他院校和相关企业的有关资料和经验。本讲义的编印得到了学校教务处和系办公室的大力支持。在此一并致谢。

由于编者初次编写，难免有错误和不足之处，恳请读者批评指正。

光信息教研室

二〇〇五年十二月

目 录

绪 论.....	1
应用光学实验	
实验一 临界角法测量光学玻璃或液体的折射率和色散.....	18
实验二 自准直法测量平面光学零件光学不平行度.....	25
实验三 平行光管调校.....	32
实验四 放大率法测量透镜焦距.....	37
实验五 分光计的调节和使用.....	42
实验六 透镜组基点和焦距的测定.....	49
实验七 薄透镜焦距的测定.....	55
实验八 目镜焦距 f_e 的测量.....	63
实验九 显微镜光学特性分析及参数测量.....	65
实验十 自组显微镜.....	70
实验十一 自组望远镜.....	74
实验十二 自组透射式幻灯机.....	78
实验十三 自组加双波罗棱镜的正像望远镜 (演示实验)	81
物理光学实验	
实验一 菲涅尔双棱镜干涉及应用.....	83
实验二 偏振光的获得与检测.....	90
实验三 迈克耳逊干涉仪.....	98
实验四 用法布里-珀罗(F-P)干涉仪测量钠双线的波长差.....	105
实验五 偏振光的分析及其应用.....	110
实验六 夫朗和费单缝衍射.....	116
实验七 等厚干涉的应用.....	120
实验八 衍射光栅分光特性测量.....	128
实验九 杨氏双缝干涉.....	134
实验十 洛埃镜干涉.....	138
实验十一 菲涅尔双面反射镜干涉.....	140
实验十二 阿贝成像原理和空间滤波.....	142
实验十三 测量空气折射率.....	146
实验十四 全息照相 (演示实验)	150
实验十五 旋光仪及其应用 (演示实验)	156
实验十六 应力仪及其应用 (演示实验)	160
实验十七 偏振光实验系统及其应用 (演示实验)	167
实验十八 光栅单色仪 (演示实验)	171
实验十九 智能单缝衍射测量仪 (演示实验)	174
实验二十 法拉第效应测试仪及其应用 (演示实验)	181
实验二十一 棱镜摄谱仪 (演示实验)	186
实验二十二 θ 调制和颜色合成 (演示实验)	188

绪论

§1 光学实验的目的、要求与特点

一、光学实验的目的

光学从它的产生和发展,都一直与生产实践和科学实验紧密地联系在一起,彼此互相促进。光学理论与光学实验是光学课不可分割的两个组成部分。通过光学实验的学习,不仅有助于我们真正理解和掌握一些重要的光学理论和规律,而且有利于培养良好的实验素质及较强的分析、解决问题的能力。因此,我们应该十分重视它。

光学实验的主要目的是:让学生在一定的光学理论的指导下,通过实验(包括课前预习、课堂实验操作和课后小结写出实验报告三个环节),学会正确使用常用的光学仪器;掌握研究光学现象的基本实验方法与技能;能正确地处理与分析实验中的问题及所得到的实验结果。通过这些实践活动,进一步加深对光的本性及其规律的认识。

二、光学实验的基本要求

光学实验的基本要求可概括为下述四个方面:

1. 基本仪器及元件

(1) 对下列仪器的基本结构、作用及使用方法有较深的了解,达到操作正确,运用熟练:分光计、平行光管(望远镜)、读数显微镜、测微目镜、迈克尔逊干涉仪、单色仪、光具座。

(2) 了解下列元器件的性能,正确使用与维护:

透镜、三棱镜、光栅、偏振片、波长片、光电池(光电管)、光源(低压白炽灯、汞灯、钠光灯、氦灯、He-Ne 激光器)。

2. 实验方法

掌握测量下列物理量的基本原理与基本方法:

透镜(透镜组)的焦距、透明介质(固体与液体)的折射率、光波波长、相对光强、微小角度或长度。

3. 基本技能

(1) 学会分析判断实验中遇到的光学现象的形成原因,学会耐心细致的操作技术,以达到能按照光路图调整仪器元件获得预期光学现象的目的。

(2) 掌握光学系统的共轴调节技术、光学仪器的调节要领和光学仪器的渐近调节技术。

(3) 初步了解摄影技术和全息照相技术。

4. 基本程序

(一) 实验前的预习

为保证实验顺利进行和较好地完成实验,达到预期地实验目的,学生进入实验室前必须认真做好预习。

(1) 仔细阅读实验教材或查阅相关资料,明确所做实验的目的和要求。掌握实验原理、测试方法及实验步骤,熟悉仪器性能。

(2) 在专用实验报告上写好实验预习报告。预习报告应包括:实验名称、实验目的、实验原理摘要,给出实验所要用到的主要公式、光路图。预习报告是实验报告的前半部分,做完实验后将实验仪器、实验内容、数据处理等写在预习报告后面就是一份完整的实验报告。

(二) 进行实验

(1) 实验仪器的安装调试。实验前,要对照仪器仔细阅读教材和仪器说明书,进一步熟悉有关实验仪器的使用方法和注意事项,检查仪器是否完好,根据使用要求和操作规程将仪器安装调试好,使其处于正常工作状态。摆放仪器时,尽量做到便于观察、读数和记录。

(2) 实验操作。实验中要正确使用仪器,有条不紊地按照实验步骤,精心操作,使实验在规定的条件下进行。

(3) 实验观测。实验中要仔细观察,精心测量,尽量排除外界干扰。从各种仪器上读数时,要按仪器的读数规则读数,减小或消除由视差引起的读数误差,根据仪器的最小分度值或准确度等级决定实验数据的有效数字。

(4) 实验记录。实验记录是以后计算与分析问题的依据,在实际工作中则是宝贵的资料。因此,在实验中,做好一个整洁、正确的实验记录是特别重要的。记录时,应将实验中观察到的现象和测量的原始数据用钢笔或圆珠笔及时、正确的实验记录在实验记录纸上。每次从仪器上读出数值后,立即记录,不要先记忆后补记录,也不要先将数据随意记在草稿纸上,然后再誊写在表格内,以免发生错误。记录时,要遵从仪器的客观反映,不能拼凑数据,并注意测量数据的有效数字和单位。出现异常数据时,应增加测量次数,反复观察。如觉得测量数据有误,应保留原始数据,在错误数据上划一道线,并说明理由,不要涂改或随意改动。

记录的内容包括:日期、仪器型号及编号、室温、简图、实验的原始数据、实验过程中一切不正常或自己认为有意义的现象等。

实验过程中要随时整理数据,测量结束要及时对数据进行整理计算,并画出必要的图表。

实验完毕,应将实验原始数据记录交给教师审阅,经教师签字认可,这就是原始数据。最后将仪器整理还原,填写完《仪器设备使用记录表》后方可离开实验室。

(三) 实验报告

实验报告是实验工作的全面总结,要用简明的形式将实验结果完整而又准确地表达出来。每位同学必须独立完成实验报告。实验报告要做到文字通顺,字迹端正,图表规范,结果正确,讨论认真。

实验报告地内容一般包括:

1. 实验名称。包括实验者姓名,实验如期。
2. 实验目的。
3. 实验原理。包括主要计算公式,光路图等。
4. 实验仪器及用具。应列出主要实验仪器的型号、规格和编号。
5. 实验内容。应总结出重要的实验步骤。
6. 实验记录。将实验中的原始数据及表格数据的形式列出。
7. 数据处理。将测量所得数据,代入有关公式计算实验结果,画出有关图表,并根据要求对实验结果进行分析。
8. 实验结果。包括测量值、不确定度和单位。若实验是为了观察某一光学现象或某一规律,只需扼要出实验结论。
9. 讨论与分析。对实验结果进行分析,说明实验目的的完成情况;分析实验误差的原因;实验过程中观察到的异常现象及其可能的解释;实验的心得体会;对于改进实验方法、实验仪器和装置的建议;实验中存在的问题。

10. 思考题。

下次上实验课时将上次的实验报告交实验指导教师。

5. 误差分析及数据处理

(1) 能根据实验的条件(如仪器的准确度、测量时的误差等)正确确定有效数字的位数。

(2) 学会分析简单实验中系统误差和偶然误差对测量结果的影响,及消除或减少它们的办法。

(3) 能对实验结果做出正确的数据处理,并根据实验结果做出待求的关系曲线图。

三、光学实验的特点

为了较顺利地实现上述目的要求,除了应了解光学实验与我们以前做过的力学、热学和电磁学实验所具有的共同性(如皆由学生亲自操作测量、分析、处理数据等)外,还必须特别注意光学实验本身所具有的特殊性,亦即光学实验的特点。

光学实验的第一个特点是:仪器的调整工作特别重要。它决定了实验能否顺利进行和测量结果是否精确可靠。换言之,仪器调整工作是进行光学实验成败的关键。之所以如此重要,这是因为在研究或观测某一光学现象(如光的干涉现象)时,首先必须调整仪器或装置的各个部件,使一切有用的光线按照预定的路径和方向进行传播,并遮挡掉一切无用

的光线，以形成该光学现象。在要求测量某物理量（如波长、焦距、折射率等）时，由于这些物理量一般都是通过测量长度或角度等几何量来实现的，因此要求进一步调整仪器，使测量的各个几何量与仪器系统的机械结构相一致（例如光具座上的刻度尺，分光计上的度盘）。因为只有这样才能保证从仪器中读取的数值就是所要测量的各量的数值，从而保证实验结果的可靠性。不难看出，光学实验的上述特点是与光波的传播方向紧密相关的。

光学实验的第二个特点是它的精密性。在进行与光的波动性有关的实验时，许多现象都与光波波长 λ 有密切的联系。例如用迈克尔逊干涉仪测未知光波波长，长度变化 $\lambda/2$ 则可移动一个干涉条纹，那么，长度有 10^{-4} mm （甚至更小）的变化便可察觉出来。显然进行这类实验的光学仪器，其机械结构也必须适应这一精密性的要求。因此，在进行这些精密测量的实验时，除了要求细心观察外，还必须特别注意精密光学仪器的操作规程。否则，不仅得不到预期的实验结果，而且往往会严重损坏仪器。

§2 光学实验预备知识

光学实验要求测量精度高，所用仪器和装置比较精密，对测量条件、周围环境以及对实验者的实验技能都有较高的要求。因此，在做实验之前，除必须认真阅读实验教材及有关资料，了解清楚实验的目的、原理、方法、步骤和要求外，进入实验室后还必须自觉遵守实验室的规则和对某些实验的特殊要求。

一、实验室的一般规则

1. 光学仪器多是精密贵重仪器。取放仪器时，思想要集中，动作要轻、慢。在还没有了解清楚仪器的使用方法之前，切勿乱拧螺丝，碰动仪器或随意接通电源。
2. 大部分光学元件用玻璃制成，光学面经过精细抛光，一般都具有 $Ra0.010$ 的粗糙度。使用时要轻拿轻放，勿使元件相互碰撞，挤压，更要避免摔坏；暂时不用的元件，要放回原处，不要随意乱放，以免无意中将其扫落地面导致损坏。
3. 人的手指带有汗渍脂类分泌物，用手触摸光学面会污染该光学面，影响其透光性和其它光学性质。因此，任何时候都不能用手去触摸光学表面，只能拿元件的磨砂面。



预备图-1 手持光学元件的方式

I—光学面 II—磨砂面

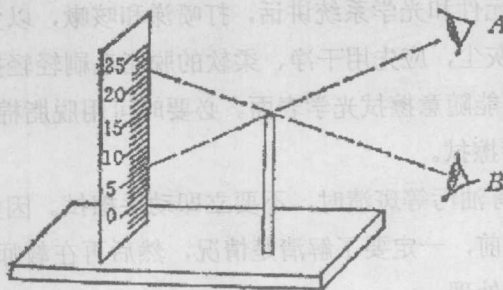
4. 不要对着光学元件和光学系统讲话, 打喷嚏和咳嗽, 以免涎液溅落镜面造成污痕。
5. 光学面若落有灰尘, 应先用干净、柔软的脱脂毛刷轻轻掸去或用“洗耳球”吹除。严禁用嘴去吹。一般不能随意擦拭光学表面。必要时可用脱脂棉球蘸上酒精乙醚混合液轻轻擦拭, 切忌用布直接擦拭。
6. 光学面上若沾有油污等斑渍时, 不要立即动手擦拭。因为很多光学表面镀有特殊的光学薄膜, 在擦拭之前, 一定要了解清楚情况, 然后再在教师或实验工作人员指导下, 采取相应的措施, 精心处理。
7. 光学仪器中有很多经过精密加工的部件。如光谱仪和单色的狭缝、迈克耳逊干涉仪的蜗轮蜗杆、分光计的读数度盘等, 都要小心使用, 按规则操作, 用力要轻, 动作要慢, 要全神贯注, 不得随意旋转和拨动, 切忌拆卸仪器, 乱拧旋钮。
8. 要讲究清洁卫生, 文明礼貌, 不得大声喧哗, 更不准打闹嬉笑。
9. 实验完毕, 要向指导教师或实验工作人员报告实验结果和仪器的使用情况。整理好仪器, 填写仪器使用卡, 经允许后方可离开实验室。

二、消视差

光学实验中经常要测量像的位置和大小, 经验告诉我们, 要测准物体的大小, 必须将量度标尺与被测物体紧贴在一起。如果标尺远离被测物体, 读数将随眼睛的位置不同而有所改变, 难以测准, 如预备图-2 所示。可是在光学实验中被测物往往是一个看得见摸不着的像, 怎样才能确定标尺和待测像是紧贴在一起的呢? 利用“视差”现象可以帮助我们解决这个问题。

为了认识“视差”现象, 可做一简单实验: 双手各伸出一只手指, 并使一指在前, 一指在后相隔一定距离, 且两指平行。用一只眼睛观察, 当左右(或上下)晃动眼睛时(眼睛移动方向应与被观察手指垂直), 就会发现两指间有相对移动, 这种现象成为“视差”。而且还会看到离眼近者, 其移动方向与眼睛移动方向相反; 离眼远者则与眼睛移动方向相同。若将两指紧贴在一起, 则无上述现象, 即无“视差”。由此可以利用视差现象来判断测像与标尺是否紧贴。若待测像和标尺间有视差, 说明它们没有紧贴在一起, 则应该稍稍调节像或标尺位置, 并同时微微晃动眼睛观察, 直到它们之间无视差后方可进行测量。这一调节步骤, 我们常称之为“消视差”。在光学实验中, “消视差”常常是测量前必不可少的操作步骤。

有时也要进行对准和调焦: 对准是指在垂直于瞄准轴方向上, 使目标和比较标记重合或置中的过程, 又称横向对准。调焦是指目标和比较标记沿瞄准轴方向重合和置中的过程, 又称纵向对准。



预备图-2 眼睛位置不同, 所得测量结果不同

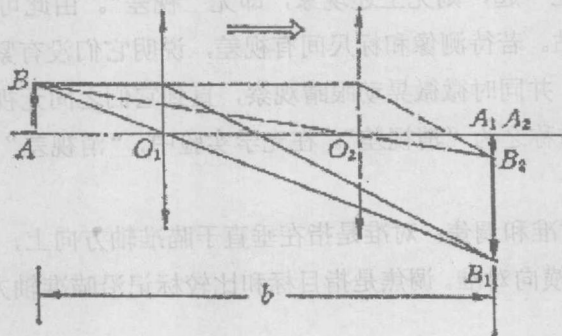
三、共轴调节

光学实验中经常要用一个或多个透镜成像。为了获得质量好的像, 必须使各个透镜的主光轴重合(即共轴)并使物体位于透镜的主光轴附近。此外透镜成像公式中的物距、像距等都是沿主光轴计算长度的, 为了测量准确, 必须使透镜的主光轴与带有刻度的标尺平行。为了达到上述要求的调节我们统称为共轴调节。调节方法如下:

1、粗调, 将光源、物和透镜靠拢, 调节它们的取向和高低左右位置, 凭眼睛观察, 使它们的中心处在一条和标尺平行的直线上, 使透镜的主光轴与标尺平行, 并且使物(或物屏)和成像平面(或像屏)与平台垂直。这一步因单凭眼睛判断, 调节效果与实验者的经验有关, 故称为粗调。通常应再进行细调(要求不高时可只进行粗调)。

2、细调, 这一步骤要靠其他仪器或成像规律来判断和调节。不同的装置可能有不同的具体调节方法。下面介绍物与单个凸透镜共轴的调节方法。

使物体与单个凸透镜共轴实际上是指将物上的某一点调到主光轴上。要解决这一问题, 首先要知道如何判断物上的点是否在透镜的主光轴上。根据凸透镜成像规律即可判断。如预备图-3所示, 当物 AB 与像屏之间的距离 b 大于 $4f$ 时, 将凸透镜沿光轴移到 O_1 或 O_2 位置都能在屏上成像, 一次成大像 A_1B_1 , 一次成小像 A_2B_2 。物点 A 位于光轴上, 则两次像的 A_1 和 A_2 点都在光轴上而且重合。



预备图-3 共轴调节的光路图

物点 B 不在光轴上, 则两次像的 B_1 和 B_2 一定都不在光轴上, 而且不重合。但是, 小像的

B_2 点总是比大像的 B_1 点更接近光轴。由此可知, 若要将 B 点调到凸透镜光轴上, 只需记住像屏上小像的 B_2 点位置 (屏上贴有坐标纸供记录位置时作参照物), 调节透镜 (或物) 的高低左右, 使 B_1 向 B_2 靠拢。这样反复调节几次直到 B_1 与 B_2 重合, 即说明 B 点已调到透镜的主光轴上了。

若要调多个透镜共轴, 则应先将物上 B 点调到一个凸透镜的主光轴上, 然后, 同样根据轴上物点的像总在轴上的原理, 逐个增加待调透镜, 调节它们使之逐个与第一个透镜共轴。

§3 实验室常用光学仪器介绍

光学仪器的种类繁多, 本书实验中采用的光学仪器按其用途大致可分为下列几类:

(1) 观测仪器——光具座、平行光管、迈克耳孙干涉仪、瑞利干涉仪、干涉显微镜、旋光仪、投影仪、比长仪等。

(2) 助视仪器——显微镜 (读数显微镜、测量显微镜、生物显微镜、金相显微镜、偏光显微镜)、望远镜。

(3) 光谱仪器——分光仪、单色仪 (棱镜单色仪、平面光栅单色仪、凹面光栅单色仪)、小型摄谱仪、法布里——珀罗干涉仪、球面扫描干涉仪、分光光度计等。

(4) 照相类仪器——照相机、翻拍机、放大机、乳剂感光特性仪等。此外还有用于光全息与信息处理实验及其他近代光学实验的专用一起和装置。

上述光学仪器中, 有些只要求一般了解, 学会操作使用, 有些则应按 §1 中提出的要求重点掌握。这些要求掌握的基本仪器也是光学实验中常用的, 其中分光计、迈克耳孙干涉仪、单色仪、小型摄谱仪在各有关实验中专门描述, 下面仅介绍几种涉及实验面广的常用光学仪器。

一、光具座

利用光具座可以进行透镜、球面镜焦距的测量, 并可将透镜组装成各种助视光学一起, 例如望远镜、平行光管和显微镜等, 以便测定它们的参数。同时还可以在光具座上构成双棱镜干涉、双缝干涉、单缝衍射、光栅衍射、偏振等实验装置及某些信息光学实验装置。在较精密的光具座上加上平行光管和测量显微镜可以组合成焦距仪; 在大型精密光具座上可以建立电光效应、磁光效应等近代光学实验装置, 也可将光具座用作气体或固体激光器的调试装置, 其用途是极其广泛的。

光具座主要包括一个水平的横杆 (双杆或水平床面), 长为 1~2 米, 上面刻有毫米标

尺。另外还有多个可在横杆上滑动的支架（或光具架），用以支撑各种透镜、屏幕、物体和光源。各个支架在横杆上的位置可由横杆上的刻度读出，其中某些支架可以进行上下和左右微调，以保证各类光学元件达到共轴状态。

二、测微目镜

测微目镜一般作为光学精密计量仪器的附件使用，如干涉显微镜、调焦望远镜、测微平行光管、各种测长仪等都装有这种目镜。它也可以单独使用，直接测量非定域干涉条纹的宽度，或由光学系统所成实象的大小等。它的测量范围只有 0~8 毫米，但精度较高，其结构略图如图 A-1 所示。带有目镜的镜筒（图中未画出）相套接，以构成一台显微镜（如焦距仪的测量显微镜）。靠近目镜焦平面的内测，固定了一块毫米刻度的玻璃标尺。与该尺相距 0.1mm 处平行地放置一块分划板，分划板由玻璃片制成，其上刻有十字叉丝和竖直双线。人眼贴近目镜观察时，即可在明视距离处看到玻璃尺上放大的刻线像及与其相叠的叉丝像（图 A-2）。因为分划板的框架与由读数鼓轮带动的丝杆通过弹簧（图中未画出）相连，故当读数鼓轮旋转时，丝杆就会推动分划板在导轨内左右移动，这时目镜中的竖直双线和十字叉丝将沿垂直于目镜光轴的平面横向移动。读数鼓轮每转动一圈，竖线和十字叉丝就移动 1mm；由于鼓轮上又细分 100 小格，因此每转过 1 小格，叉丝相应地移动 0.01mm。测微目镜十字叉丝中心移动的距离，可从分划尺上的数值加上鼓轮上的读数而得到。

使用测微目镜时应注意以下几点：

- (1) 测量时先调节目镜与分划板的间距，看清楚十字叉丝。
- (2) 调节整个目镜筒与被测像与叉丝像无视差，亦即两者处在同一平面上。只有无视差的调焦，才能保证测量精度。
- (3) 松开测微目镜固定螺丝，旋转它使其分划板移动方向转动与被测间隔方向一致，然后再固定好。
- (4) 测量过程中，应缓慢转动鼓轮，且一个方向转动，中途不要反向。因为转过此间隙后分划板（叉丝）才能跟着螺旋移动。因此若旋过了头，必须退回一圈，再从原方向旋转推进，重测。
- (5) 要求叉丝中心不得移出刻度尺所示的刻度范围，如叉丝已达刻度尺一端，则不能再强行旋转测微鼓轮。

三、读数显微镜

它是用于精密测量长度的专用显微镜，由显微镜管、读数移动装置和光源反射镜组成。它的测量范围为 0~50mm/180mm，精度为 0.01mm，通常具有几十倍的放大室，工作距离也比较大，因此读数显微镜的应用比测微目镜更广泛。

读数显微镜的型号较多，实验室目前常用的有两种类型；一种是显微镜管固定不动，

通过载物平台的精密移动来进行测量，此类显微镜的显微镜管不能水平放置，其用途受到

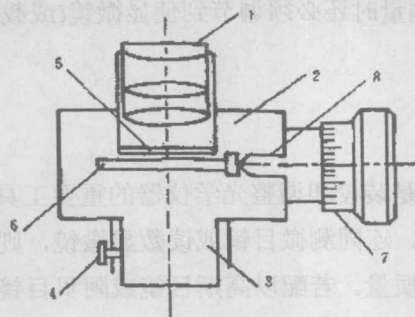


图 A-1

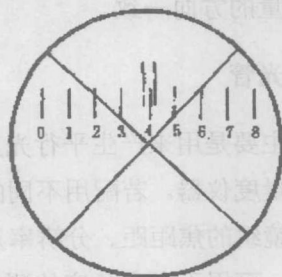


图 A-2

1. 目镜；2. 本体盒；3. 接头套筒；4. 螺丝；
5. 玻璃标尺；6. 分划板；7. 读数鼓轮；8. 丝杆。

一定的限制。另一种是载物台固定不动，而是通过显微镜的精密移动来进行测量，并且显微镜管既可竖直放置又可水平放置，应用范围更广（如 JXD 型、JCD2 型读数显微镜等。）

JXD 型读数显微镜的外形结构如图 A-3 所示，它由螺旋测微装置和显微镜两部分组成。测量前，将被测物体放在毛玻璃上，要求被测物表面与镜筒的光轴垂直。测量时，先放松底座手轮，粗调工作距离（ $\sim 41.9\text{mm}$ ），再用调焦手轮进行微调，使像清晰。调节目镜，清楚地看见视场中的十字叉丝后，转动读数鼓轮，使显微镜中十字叉丝点对准被测量线条的一端，即可在标尺和读数鼓轮上读数。读数标尺有 0~50mm 刻度线，每格为 1mm；鼓轮每旋转一圈，指标（10）的指示值就改变一格（1mm）；鼓轮的圆角等分为 100 小格，每小格代表 0.01mm。所以，读数时毫米以上部分由标尺读出，毫米以下部分由鼓轮读出。再旋转鼓轮使镜筒移动，让十字叉丝交点对准被测线条的另一端，又可读出读数。两次读数之差即为被测物体直线长度。

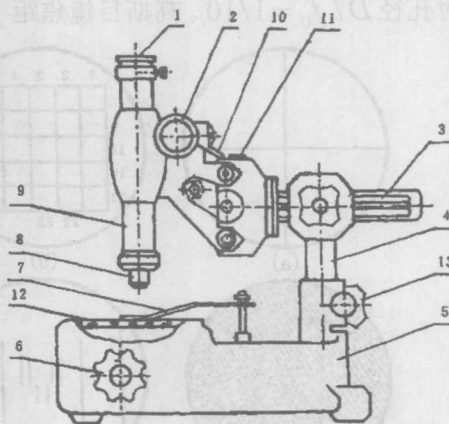


图 A-3

1. 目镜；2. 调焦手轮；3. 横轴；4. 立柱；5. 底座；6. 反光镜调节手轮
7. 工作台压簧；8. 物镜；9. 镜筒；10. 指标；11. 标尺；12. 毛玻璃；13. 底座手轮

由于显微镜管(或载物台)的移动均靠测微螺旋丝杆的推动,因此,读数显微镜和测微目镜一样也要防止螺距差(采用单方向测量)。测量时还必须调节到使显微镜(或载物台)的移动方向与被测量的方向一致。

四、平行光管

平行光管主要是用来产生平行光束的,它是装校和调整光学仪器的重要工具之一,也是重要的光学量度仪器。若配用不同的分划板,连同测微目镜或读数显微镜,则可测定和检验透镜或透镜组的焦距距、分辨率及其成像质量。若配以高斯目镜或阿贝目镜,就成为自准直望远镜,可用于微小角度的测量和导轨平直度的检查等。

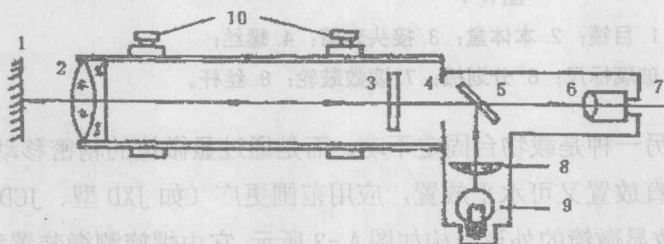


图 A-4

1. 可调试反射镜; 2. 物镜; 3. 分划板; 4. 光阑; 5. 分划板
6. 目镜; 7. 出射光瞳; 8. 聚光镜; 9. 光源; 10. 十字螺钉

实验室常用的国产 CPG-550 型平行光管附有高斯目镜和可调式平面反射镜,其光路结构如图 A-4 所示。光源发出的光,经分光板后照亮分划板,而分划板被调节到位于物镜的焦平面上。因此,分划板的象将成于无穷远,即平行光管发出的是平行光束。这可用高斯目镜根据自准直原理来检验。

550 型平行光管的规格: 平行光管物镜焦距 f 为 550mm (这是名义值,使用时按实测值),口径 $D=55\text{mm}$, 相对孔径 $D/f_0=1/10$ 。高斯目镜焦距 $f'=44\text{mm}$, 放大倍率为 5.7。

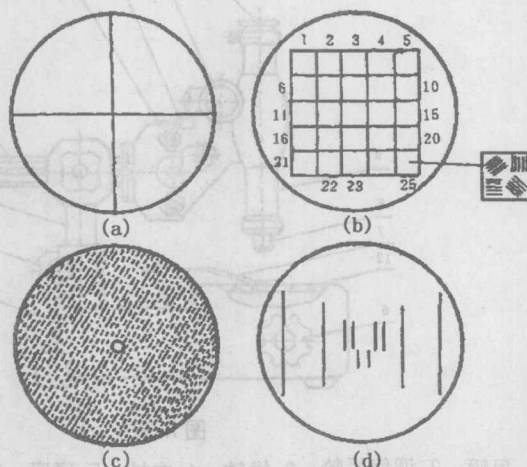


图 A-5

平行光管的主要附件有：

(1) 可调式平面反射镜。它主要是一块直径为 100mm 的玻璃平面反光镜，装在可以绕左右上下两个互相垂直的轴线转动(微小角度的转动)的调节架上，调节时每个方向由一个调节螺丝来控制。这种反射镜可在检查调整仪器时应用。

(2) 十字分划板如图 A-5(a)。可以作平行光的调整及装校平行光管时使用。

(3) 鉴别率板如图 A-5(b)。有 2 号和 3 号两种，板上有 25 个图案单元。每个单元由四个条纹方向不同的小方阵组成。各个单元的条纹宽度不同，根据图案单元的编号，可从说明书附表查出相应的条纹宽度。鉴别率板可用于检验物镜、望远系统和棱镜的分辨率。

(4) 星点板如图 A-5(c)。星点直径为 0.05mm。通过被检光学系统后，产生该星点的衍射花样，根据花样的形状、颜色及清晰度，可对光学元件或组件的成象质量进行定性检查。

(5) 玻罗板如图 A-5(d)。在玻璃基板上用真空镀膜的方法镀有五组线对，各线对间距的名义值分别是 1.000mm, 2.000mm, 4.000mm, 10.000mm 和 20.000mm。使用时，应以出厂的实测值为准。将玻罗板与测微目镜或读数显微镜组合，可用来测定透镜或透镜组的焦距。

§ 4 测量误差与数据处理

1. 量的真值和残值

量的真值：一个量在被测时，该量本身所具有的真实大小。

量的真值是理想的概念，一般说来真值是不知道的。在实际测量中，常用的是被测量的实际值或已修正过的算术平均值代替真值。所谓实际值是满足规定准确度的用来代替真值使用的量值。

残差：测量列中的一个测得值 a_i 和该列的算术平均值 $\bar{a}$ 之间的差 v_i 。

$$v_i = a_i - \bar{a} \quad (\text{A-1})$$

2. 测量误差的来源和分类

总的来说，测量误差产生原因可归纳为：

(1) 测量装置误差：来源于读数或示值装置误差、基准器（或标准件）误差、附件（如光源、水准器、调整件等）误差和光电探测电路误差等。按其表现形式可分为机构误差、调整误差、量值误差和变形误差等。

(2) 环境误差：温度、湿度、气压、照明等与要求标准状态不一致或由于振动、电磁干扰等导致的误差。

(3) 方法误差：由于测量采用的数学模型不完善，利用近似测量方法等引起的误差。

(4) 人员误差：由于人眼分辨率限制，操作者技术水平不高和固有习惯、感觉器官的生理变化等引起的误差。

有时待测件本身变化也可造成误差。

测量误差按其特点和性质,可分为系统误差、偶然误差(随机误差)和粗大误差三类。

(1) 系统误差:在偏离测量规定条件时或由于测量方法所引入的因素,按某确定规定所引起的误差。

系统误差可按对误差掌握程度分为已定系统误差(误差的大小和符号已知)和未定系统误差(误差和大小和符号未知)。系统误差可用理论分析或实验方法判断,对已定系统误差用加修正值的方法消除。

(2) 随机误差(也称偶然误差):在实际测量条件下,多次测量同一量值时,误差的绝对值和符号以不可预定方式变化的误差。随机误差就整体而言符合统计规律。

(3) 粗大误差:超出规定条件下预期的误差。如读错或记错数据,仪器调整错误,实验条件突变等引起的误差。含有粗大误差的测量值应删除。

3. 精度

反映测量结果与真值接近程度的量称为精度。精度高,则误差小。

精度分为:

(1) 正确度:由系统误差引起的测得值和真值的偏离程度。

(2) 精密度:又偶然误差引起的测得值和真值的偏离程度。

(3) 准确度:由系统误差和偶然误差综合引起的测得值和真值的偏离程度。

以射击为例,靶心相当于量值中的真值,弹痕相当于测得值,如图 A-6 所示。

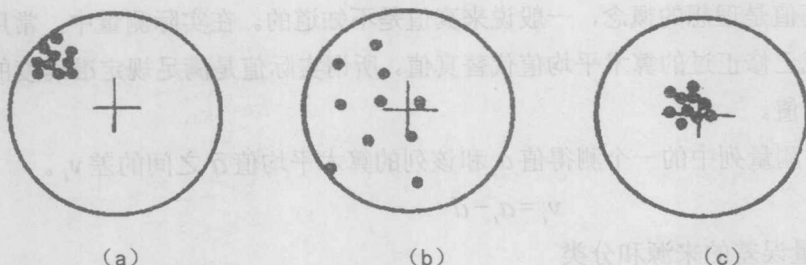


图 A-6 弹痕精确度

(a) 图中系统误差大,正确度低,但偶然误差小,精密度高;(b) 图偶然误差大,精密度低,但系统误差小,正确度高;(c) 图系统误差和偶然误差均小,精密度和正确度高,从而准确度高。

4. 偶然误差

在相同测量条件下,对同一个物理量进行多次重复测量,得到一个系列测量值(常称测量列),它们都含有偶然误差。偶然误差的单次出现没有任何规律,但就误差整体而言,却具有对称性、单峰性、有界性以及抵偿性等统计规律。

(1) 偶然误差的评价:由于单个误差的出现没有规律性,采用标准偏差、平均误差、

偶然误差及极限误差等表明某条件下一组测量数据的精密度。其中常用的是标准偏差和极限误差。

测量列中单次测量的标准偏差：测量列中单次测量的标准偏差 σ_0 是表征同一被测量值的 n 次测量所得结果的分散性参数，并按下式计算

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}} \quad (\text{A-2})$$

式中 d_i ——测得值与被测真值之差。

极限误差：各误差实际上不应超过某个界限，极限误差由 $\pm t\sigma_0$ 确定， t 为系数，它由误差分布决定，如正态分布， $t=3$ 。

(2) 正态分布：当由测量过程中多个互不相关的因素引起测量值微量变化而形成偶然误差时，量值的误差分布服从正态分布。由于大多数偶然误差服从正态分布，所以正态分布是极其重要和有用的。

正态分布具有以下特性：

单峰性：绝对值小的误差比绝对大的误差出现的概率大。

对称性：绝对值相等的正误差比绝对值大的误差出现的概率相等。

有界性：在一定的测量条件下，偶然误差和绝对值不会超过一定的限度。

抵偿性：偶然误差的算术平均值随着测量次数的不断增加而趋于零。即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i = 0 \quad (\text{A-3})$$

服从正态分布的偶然误差，其概率密度函数

$$f(\delta) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma_0^2}} \quad (\text{A-4})$$

式(A-4)又称高斯曲线，图 A-2 绘出该曲线。在曲线拐点处对应的横坐标恰为 σ_0 ，在 $\pm \sigma_0$

范围内，概率为 68.3%。误差位于 $\pm 3\sigma_0$ 区间内，概率为 99.7%。

由于概率在 $\pm 3\sigma_0$ 外仅为 0.3%，故常以 $\pm 3\sigma_0$ 作为正态分布的极限误差 Δ ，即

$$\Delta = 3\sigma_0 \quad (\text{A-5})$$

图中给出三条不同正态分布曲线 ($\sigma_{01} < \sigma_{02} < \sigma_{03}$)。可以看出， σ_0 越小，曲线越

高且越狭窄,偶然误差的分布越集密,表明测量的精度越高;反之, σ_0 可作为测量列中单次测量不可靠性的评定标准。

(3) 偶然误差的其它分布:偶然误差尚有其它分布,在光学测量中较为重要的等概率分布和三角形分布。

等概率分布(又称均匀分布):偶然误差在区间 $[-\Delta, +\Delta]$ 内各处出现概率相等,在区间外概率为零,如图 A-3 所示。

显微镜或望远镜对物体进行调焦时,调焦在景深范围内任一点,象均是清晰的,超出景深范围就不清晰了,所以调焦误差服从等概率分布。此外,眼睛瞄准产生的误差和度盘刻度误差也服从等概率分布。等概率分布的极限误差和标准偏差关系为

$$\Delta = \sqrt{3}\sigma_0 \quad (\text{A-6})$$

三角形分布:概率密度函数曲线呈三角形形状,如图 1-4 所示。

测角仪和经纬仪轴系晃动产生的角值误差服从三角形分布。三角形分布的极限误差和标准偏差的关系为

$$\Delta = \sqrt{6}\sigma_0 \quad (\text{A-7})$$

5. 算术平均值和残差

对某一量进行一系列等精度测量(在完成一系列测量时,认为仪器性能、测量方法,操作技术和外界条件均没有变化),测量值为

$$x_1, x_2, \dots, x_n$$

取算术平均值

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) \quad (\text{A-8})$$

此时式(A-1)中的 v_i 应为偶然误差 δ_i ,由该式求得

$$\sum_{i=1}^n \delta_i = \sum_{i=1}^n x_i - n\bar{x}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i$$

由于偶然误差的抵偿性,当 $n \rightarrow \infty$ 时, $\sum_{i=1}^n \delta_i \rightarrow 0$,所以