



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

工程光学实验教程

第2版

吕且妮 谢洪波 等编著

机械工业出版社
MACHINE PRESS

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

工程光学实验教程

第2版

吕且妮 谢洪波 戴海涛 尤 勐 编著



机械工业出版社

本书是“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材，分几何光学和物理光学两部分，与《工程光学》教材相配套。几何光学内容涵盖照相、显微和望远等典型系统，设立了15个实验；物理光学内容涉及光的干涉、衍射和偏振等，设立了21个实验。实验内容包括设计性、模拟性及应用性实验，强调培养学生的实验和实践技能、创新意识及解决实际问题的综合能力，达到针对“工程光学”课程的系统性训练的目的。

本书基本概念准确、思路清晰、应用性强，可作为普通高等院校光电信息工程、仪器与测控、应用物理学等专业的“工程光学”“基础光学”课程的实验教材，也可作为相关技术人员的参考书。

(责任编辑邮箱: jinacmp@163.com)

图书在版编目(CIP)数据

工程光学实验教程/吕且妮等编著. —2版. —北京: 机械工业出版社, 2018.6

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

ISBN 978-7-111-59985-2

I. ①工… II. ①吕… III. ①工程光学-实验-高等学校-教材 IV. ①TB133-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第104851号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑: 吉玲 责任编辑: 吉玲 王康

责任校对: 刘秀芝 封面设计: 路恩中

责任印制: 李昂

河北鹏盛贤印刷有限公司印刷

2018年8月第2版第1次印刷

184mm×260mm·8.5印张·200千字

标准书号: ISBN 978-7-111-59985-2

定价: 23.00元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88379833

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-88379649

机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网: www.golden-book.com

实验教学是培养学生实验技能和实验能力、进行创新思维训练的重要途径。《工程光学实验教程》是“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。本书针对实验中出现的問題，对第1版进行了很大的改进，探索并提出了一种新的工程光学实验教学体系。该体系包含三个模块：理论模拟性实验、实际技能性实验和应用设计性实验。通过理论模拟性实验加强学生对课堂理论授课内容的理解和掌握，通过实际技能性实验提高学生的实验技能和实验能力，并将二者结合完成应用设计性实验，培养学生的实践能力及创新能力，同时强调了课程学习的延续性及其应用。本书更适应于新时期开展的国际工程教育认证和新工科建设的培养要求。

本书编者具有十多年的“工程光学”课程教学经验。在广泛调研工程光学、光学、大学物理等实验教材及相应课程的基础上，了解学生的反馈，与实验教师多次交流，结合本课程教学大纲、新工科建设以及国际专业认证培养要求，确定了实验内容及写作思路。本书的特点是采用了新的写作模式，增加了模拟仿真实验，便于学生理解本课程的教学内容，借助于理论模拟结果和科研/课题的应用设计性实验，使技能性实验更具新颖性和实效性，更能激发学生进行创新实验的兴趣和主动性，促使学生发现并提出问题，并能解决问题，培养学生的自信心、创新意识及解决实际问题的综合能力，真正达到实践和能力训练的目标。

全书内容共分5章。第1章为常用光学元器件及基本实验技术，主要介绍常用光学元件及其保养与清洁、光路调试技术以及常用光学仪器；第2章和第3章为几何光学实验，包括基本实验和综合实验，内容涉及照相、显微和望远三大系统；第4章和第5章为物理光学实验，内容涉及光的干涉、衍射和偏振，设计性实验包括光学基本概念及详细的基本原理，理论模拟性实验贯穿于实际技能性实验和应用设计性实验中，便于学生理解和完成实验。

本书是为光电信息科学与工程、测控技术与仪器、应用物理学以及相近专业学生学习光学、工程光学及光电检测所设计的，也是为大三、大四已修过电磁学、大学物理、计算机语言的学生所设计的。本书可作为光电信息科学与工程、测控技术与仪器、生物医学工程、应用物理学等专业的基础光学实验教材，也可作为相关专业学生及技术人员的参考书。

本书在天津大学郁道银教授、蔡怀宇教授指导下，通过多次讨论、沟通确定了内容体系，经过作者们的努力完成了编写。两位教授对全书内容提出了许多宝贵的建议和意见，在此表示衷心的感谢！

本书的编写分工为：尤勔编写了1.1节、1.3节及第2章；吕且妮编写了1.2节、4.1节、4.2.1节、实验4.2.1、实验4.2.2、4.3.1节、实验4.3.2、实验5.1~实验5.4、实验5.13；戴海涛编写了实验4.2.3、实验4.3.1，实验5.5~实验5.12，并绘制了第4章和第5章中的实验光路装置图；谢洪波编写了第3章。

在本书的编写过程中参考了大量的国内光学实验工作者的教材和著作、国外相应教材、光学领域的最新研究成果，以及编者本人的一些研究成果等，有些已在参考文献中列出，有些未能一一列出，在此一并表示诚挚的谢意。

由于时间仓促、编者水平有限，希望广大读者对书中的不足给予指正。

编 者

前 言

第1章 常用光学元器件及基本实验技术	1
1.1 常用光学元件及其保养与清洁	1
1.1.1 常用光学元件	1
1.1.2 光机产品机械部分的保养与维护	3
1.1.3 光学元件保养	4
1.1.4 常用的光学元件清洁工具	5
1.2 光路调试技术	5
1.2.1 激光光路的调试	5
1.2.2 扩束镜的调节	6
1.2.3 针孔滤波器及其调整方法	7
1.2.4 准直光束的获得与检测	8
1.2.5 焦点位置的确定	10
1.3 常用光学仪器	11
1.3.1 光具座	11
1.3.2 分光计	12
1.3.3 环式球径仪	14
第2章 几何光学基础实验	16
实验 2.1 用最小偏向角法测量透明材料的折射率	16
实验 2.2 用插针法测量透明材料的折射率	18
实验 2.3 用掠入射法测量固体的折射率	18
实验 2.4 用插针法测量透明材料的色散曲线	19
实验 2.5 用光具座测量透镜的焦距/截距	20
实验 2.6 基于光具座的焦距/截距虚拟仿真测量	22
实验 2.7 测量透明材料表面夹角的两种方法	23
实验 2.8 光学系统分辨率的检测	25
实验 2.9 物镜像差检测实验	28
第3章 几何光学综合实验	31
3.1 典型几何光学系统的软件模拟与观察	31

3.1.1 球透镜的成像规律与像差观察	31
3.1.2 天塞物镜的成像规律与渐晕观察	34
3.1.3 双高斯物镜的成像规律与像差观察	36
3.1.4 超广角物镜的场曲与畸变	38
3.1.5 光瞳匹配的体会与观察	39
3.1.6 反射式光学系统的成像特点	42
3.2 典型几何光学系统综合实验	44
实验 3.2.1 照相物镜参数测量	44
实验 3.2.2 组建开普勒望远镜	45
实验 3.2.3 组建伽利略望远镜	48
实验 3.2.4 望远系统特性参数测量	50
实验 3.2.5 组建生物显微镜	51
实验 3.2.6 组建测量显微镜	53
第4章 物理光学理论模拟性实验及实际技能性实验	55
4.1 光的干涉	55
4.1.1 两束光的干涉	55
4.1.2 干涉条件	56
4.1.3 相干光波及光源	57
4.1.4 实验	58
实验 4.1.4.1 干涉仪	58
实验 4.1.4.2 全息光栅制作及参数测量	61
实验 4.1.4.3 全息透镜制作及应用	66
4.2 光的衍射	68
4.2.1 衍射的基本理论	68
4.2.2 实验	69
实验 4.2.2.1 基于衍射法和成像法的圆孔(圆屏)尺寸测量	69
实验 4.2.2.2 细丝直径测量	71
实验 4.2.2.3 菲涅耳波带片的设计及聚焦特性	73
4.3 光的偏振	77
4.3.1 基本概念	77
4.3.2 实验	78
实验 4.3.2.1 利用布儒斯特角测量薄膜的折射率	78
实验 4.3.2.2 偏振光的产生及检验	81
第5章 应用设计性实验	84
实验 5.1 三/多光束干涉实验	84
实验 5.2 基于衍射法的粒子尺寸测量——激光粒度仪	87
实验 5.3 基于干涉粒子成像技术的粒子尺寸测量	90

实验 5.4	基于数字全息干涉技术的晶体电光系数测量	94
实验 5.5	基于反射光谱测量薄膜的厚度	99
实验 5.6	波带片的拓展及其聚焦和成像特性	100
实验 5.7	利用椭偏仪测量薄膜的厚度和折射率	104
实验 5.8	液晶空间光调制器的使用	109
实验 5.9	利用液晶空间光调制器实现光学器件的功能	114
实验 5.10	利用液晶空间光调制器实现动态全息显示	116
实验 5.11	特殊光束的生成及其传播特性	117
实验 5.12	基于联合傅里叶变换原理实现图像的相关识别	120
实验 5.13	声光效应实验	122
参考文献		127

第 1 章

常用光学元器件及基本实验技术

1.1 常用光学元件及其保养与清洁

1.1.1 常用光学元件

光学元件是光学实验中的基本部件,如透镜、平面反射镜、分束镜、立方角锥棱镜等。下面分别介绍它们的结构、光学性能及其使用要求。

1. 透镜

透镜 (Lens) 是构成光学系统的最基本单元,它是由两个折射面包围一种透明介质 (如玻璃) 所形成的光学元件。根据透镜的形状可分为凸透镜和凹透镜两类。凸透镜的特点是中间厚边缘薄,具有使光线会聚的作用,即当一束平行于透镜光轴的光线通过凸透镜后将会聚于光轴上。会聚点 F' 称为该透镜的焦点。一般情况下,像方主平面到焦点 F' 的距离称为焦距 f' ,如图 1-1a 所示。凹透镜的特点是中间薄边缘厚,具有使光束发散的作用,即一束平行于透镜光轴的光线通过凹透镜后将散开。将发散光的延长线与光轴相交,其交点 F' 称为该透镜的焦点。一般情况下,像方主平面到焦点 F' 的距离称为它的焦距 f' ,如图 1-1b 所示。

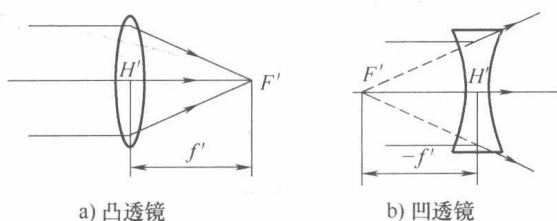


图 1-1 透镜的焦点和焦距

以上按薄透镜考虑。如果透镜有一定厚度,像方主点与物方主平面不重合,则其主点、焦点位置如图 1-2 所示。

当透镜的厚度与焦距相比很小时,该透镜称为薄透镜。在近轴光线的条件下,薄透镜的成像规律可表示为

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'}$$

式中, l 为物距; l' 为像距; f' 为透镜焦距,凸透镜的 f' 取正值,凹透镜的 f' 取负值。

薄透镜的厚度比其折射球面的曲率半径 r 和焦距 f' 要小得多,一般是用均匀的光学材料制成,每块薄透镜的直径可以用 D 来表示,具有一定的焦距。在实验中,定义 f'/D 为透镜的“ F 数”,即光圈数。由于相对孔径的定义是 D/f' ,所以,光圈数也是相对孔径的倒数。

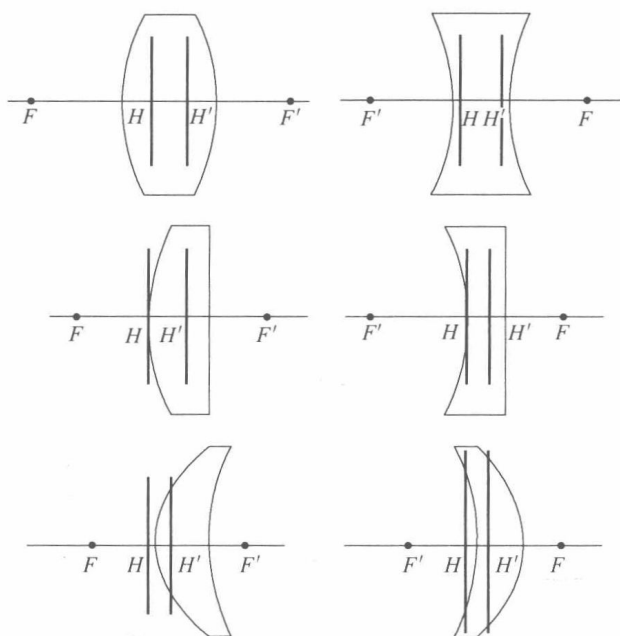


图 1-2 几种不同形状透镜的主点和焦点位置

2. 平面反射镜

平面反射镜 (Plane Mirror) 一般用于折转光路, 其直径大小应根据所折转的光束直径而定。如图 1-3 所示, 设光束直径为 d , 光束光轴与反射镜面的法线夹角为 i , 则反射镜的直径应为 $D = \frac{d}{\cos i}$ 。

当反射镜用于转折宽光束时, 除了孔径要求之外, 还要对表面的平面度提出要求。另外, 为了消除附加反射光的影响, 反射镜通常都是在前表面上镀制反射膜。

反射镜上镀制的反射膜通常有两类:

1) 金属膜。真空镀铝外加一层一氧化硅薄膜, 或者真空镀铝后经阳极氧化加固。其主要优点是反射比几乎与入射角无关, 也不存在明显色散; 缺点是反射比不够高, 仅 84% 左右, 多片串联使用时光能损失较大, 膜层的机械强度也不够高, 擦拭时易出现划痕。

2) 多层介质反射膜。这种反射膜通常是在玻璃基片上交替蒸镀氟化镁和硫化锌膜系, 或者氧化钛和一氧化硅膜系, 膜层可为单层、三层或者 19 ~ 21 层。其优点是反射比高, 可达 99% 以上; 缺点是反射比会随光的波长和入射角的改变而改变, 垂直入射时反射比最高, 入射角增大时反射比迅速下降, 当入射角大于 45° 时反射比很快下降到零。

在激光光路中常用直角棱镜代替平面反射镜, 直角棱镜的主截面为等腰直角三角形, 光在其斜面产生全反射。这种棱镜的反射比远比镀金属或介质膜层的平面镜要高, 而且不存在镀层对光的吸收, 也不像镀层那样随着时间的变化, 镀层光泽减弱和反射比会降低。

3. 分束镜

分束镜 (Beam Splitter) 主要用于将入射光束分成具有一定光强比的两束光, 如图 1-4 所示。其主要性能参数是分束比, 即透射光强 I_T 与反射光强 I_R 的比值, 又称透反比。

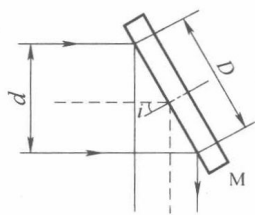


图 1-3 平面反射镜

分束镜一般有两类：固定分束比分束镜和可变分束比分束镜。前者分束比不能调整，可在宽光束中使用；后者分束比可以调整，但只能在未经扩束的激光细光束中使用。可变分束比分束镜又分为阶跃分束镜和连续渐变分束镜两种。



图 1-4 常用分束镜

固定分束比分束镜是在玻璃基片上镀制均匀析光膜而制成的，分为偏振分束镜和非偏振分束镜。分束镜一般分束比为 1:1、1:4、1:7、1:9 和 9:1 等。用于装夹固定分束比分束镜的镜座应具有方位微调和俯仰微调装置。

阶跃分束镜是在玻璃基片的不同区域分别镀制不同的膜系，使各区域具有不同的分束比。连续渐变分束镜是在玻璃基片上镀制厚度连续变化的析光膜，由于膜厚连续变化，分束比也随之连续变化。

连续渐变分束镜有条形和圆形两种形式。条形渐变分束镜的镜架具有精密平移装置和俯仰微调装置。当分束镜平移时，分束比将随之变化。圆形渐变分束镜是通过转动分束镜来改变分束比的，因此其镜架应具有精密旋转装置。

4. 立方角锥棱镜

立方角锥棱镜的形状相当于立方体切下来的一个角，如图 1-5 所示。它的三个内表面相互垂直，是反射面，而底面为输入-输出面。立方角锥棱镜具有两种结构形式：一种由玻璃四面体构成，为实心立方角锥棱镜；另一种由镀膜的金属面组成，内部是空的，为空心立方角锥棱镜。两种形式的立方角锥棱镜在光谱反射率方面性质有所不同。

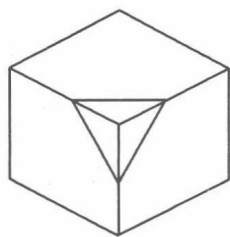


图 1-5 立方角锥棱镜

立方角锥棱镜具有下列反射特性：

1) 迎底面入射棱镜的光线，经三个直角反射面反射后，其出射光线平行于入射光线。当棱镜绕角顶转动时，出射光线方向不会变化。

2) 不管入射光线以何种角度入射底面，只要光线在三个直角面上依次反射，其入射光线和出射光线沿光线方向看去，其投影与棱镜的顶点呈中心对称。因此物体经立方角锥棱镜反射后，其坐标绕出射光线转动 180° 。

在设计和选用反射棱镜及棱镜组时，除满足仪器的基本要求外，还应考虑如下原则：

1) 对人眼瞄准用或测量用的反射棱镜及棱镜组，应使光学系统成完全一致像，以避免产生错觉。

2) 充分利用全反射面，尽量减少光能损失。

3) 棱镜内光轴长度要短，以便减轻镜组重量并减小光能损失。为了减轻重量，常把棱镜中不通光的部分切去。

立方角锥棱镜的用途之一是和激光测距仪配合使用。激光测距仪发出一束准直激光束，经位于测站上的立方角锥棱镜反射，沿原方向返回，由激光测距仪的接收器接收，从而计算出测距仪到测站的距离。

1.1.2 光机产品机械部分的保养与维护

光学元件通常都是由机械结构支撑和调节的，并完成相应的光学功能。对于机械部分的

保养和维护,有以下几点要求:

1) 润滑和紧固。定期调试仪器设备易磨损部件,润滑转动部件,对易松动部件进行检查和紧固。使用润滑油脂,使仪器运转灵活,保护机械零件的工作面不致磨损和腐蚀。

2) 除尘。根据灰尘附着情况,采用相应的除尘方法。在干燥的空气中,若灰尘较少或未结成块斑,可用干布拭擦、掸刷、软毛刷等方法清除。若灰垢不易拭擦干净,可用沾有酒精或乙醚的棉球进行拭擦。

3) 除锈。可根据机械表面的锈蚀程度采用不同的除锈方法。对尺寸较大、精密程度不高的部位,可采用机械除锈方法,即先除去锈蚀层,再用砂纸打磨,最后涂上保护层。对用机械方法除锈不易除净的钢铁零部件,可采用化学方法腐蚀除锈。

4) 塑料零件清洗。塑料的种类很多,有聚氯乙烯、尼龙、有机玻璃等,一般对有机溶剂比较敏感,不能使用有机溶剂作为清洁剂。清洗塑料件用清水、肥皂水配制的洗涤剂洗擦为宜。

5) 橡胶零件清洗。橡胶沾上有机溶剂后会老化,并产生形变。可用酒精、四氯化碳等作为清洗剂,清洗橡胶件上的油污。清洗时可用棉球或丝布蘸清洗剂拭擦,待清洗剂自然挥发干净后即可。应注意,四氯化碳具有毒性,对人体有害,清洗时应保证良好的通风条件,注意安全。

1.1.3 光学元件保养

光学元件容易磨损,为了达到标称性能,延长元件使用寿命,在清洁时必须遵循一定的清洁程序。在正常使用中,光学元件也会接触灰尘、水汽和油脂等污染物。这些灰尘、污点、水汽等会造成入射光线的散射,当入射光为功率较强的激光时,杂质会和激光相互作用,甚至损坏光学镀膜。使用正确得当的清洁方法,可以有效避免光学元件的损坏,延长元件的使用寿命。

工作中不要用手直接操作光学元件,因为皮肤油脂可能会造成光学元件的永久损伤。清洁光学元件时,应尽量在干净无尘的环境中进行,有条件时请佩戴专业手套或指套。对于较小的光学元件,应使用光学镊子夹取操作。不管用什么方法夹持光学元件,尽量只接触非光学表面,如磨砂边缘。同时,尽量不要重复使用镜头纸,以免造成不必要的损伤。

在清洁工作开始之前,可以把需要清洁的光学元件放置在可见光源下,肉眼观察不同角度的表面,明确附着灰尘和污点的大概位置。然后,可采用以下几种清洁方法进行清洁。

1) 使用空气清洁器。首先清除元件表面的颗粒灰尘,在用镜头纸擦拭元件表面之前,可以尝试使用压缩的过滤空气或氮气吹拂光学表面。如果吹拂后,元件表面的灰尘得到清除,可以停止清洁过程。如果污点依然存在,可选用合适的溶剂和镜头纸进行清洁。

2) 使用溶剂和镜头纸。选用溶剂或者镜头纸取决于光学元件的种类,但是无论何种元件,动作一定要轻柔,并且从元件边缘开始清洁。

普通的溶剂容易在光学元件表面留下印痕,而普通纸巾非常容易造成表面划伤。因此,要选用专业的光学清洁溶剂或者光学清洁专用的镜头纸。镜头纸需要配合溶剂使用,因为干燥的镜头纸依然会划伤光学元件表面。

一种常用的溶剂是 60% 的丙酮混合 40% 的甲醇。纯丙酮容易挥发,并且难以有效去除所有杂质,而甲醇挥发比较缓慢,并有助于溶解丙酮不能溶解的杂质。在清洁元件时,首先

清洁光学元件的边缘,避免把污染带到元件中心部位。缓慢的擦拭元件表面,可以使溶剂充分挥发,减少残留痕迹。

清洁过程一般遵循如下规则:

1) 对于正常尺寸的光学元件来说,可以采用“拖拽”技术清洁。首先把光学元件放置在干净的表面上,如超净间常用的清洁布,然后用干净的压缩空气或氮气吹净元件表面,再在表面上覆盖一层镜头纸,在上面滴加少许溶剂,缓慢地把浸润的镜头纸从元件表面拖过。

2) 对于尺寸较小的光学元件,可以采用“擦拭”技术清洁。首先依然是尝试用吹拂的方法清洁表面的灰尘,然后用镊子夹着镜头纸,稍稍用力,从元件表面的一边轻轻擦起,朝同一方向一直擦到另一边。

3) 对于难以清除的顽固污点,可以使用“抹除”技术清洁。其总体流程与上述的“擦拭”技术相同,但是用手而不是用镊子,均匀用力,用镜头纸沿同一方向擦抹光学元件的表面。

4) 对于光学元件表面更容易损坏的镀膜,可以使用“浸泡”技术清洁。首先吹拂干净元件表面的灰尘,然后将光学元件浸泡在专业溶剂中。如果元件比较脏,可放入超声波清洗仪中。经过多次的冲洗、浸泡,直到光学元件被清洗干净。在干燥时,小心地沿同一个方向把元件表面上的溶剂吹干,以免留下印痕。

1.1.4 常用的光学元件清洁工具

- 1) 手套:无绒棉或者无粉乳胶手套。
- 2) 镊子:光学镊子可用来夹取小尺寸的元件,由于其尖端经过专门设计,可以减少光学元件划伤风险。真空镊子利用吸盘来夹取光学元件,更适用于固定不同形状和尺寸的光学元件。
- 3) 纤维擦拭纸:可用于清洁光学元件表面,并且可用于存放光学元件。
- 4) 镜头纸:可用于处理和清洁光学元件,也可以用于包裹光学元件。
- 5) 光学存储盒:内部通常有泡沫或者模压塑料填充物,保证光学元件不轻易移动或者接触坚硬的表面。
- 6) 放大器:用于观察光学元件表面的清洁度和完整性。
- 7) 惰性除尘气体:适合用于清洁灰尘,可提供持续的高压气流,从光学元件表面吹走污染物。

1.2 光路调试技术

光学实验通常是由多个独立的光学元件组成的,如成像系统,包括光源、透镜,可能还有反射镜、分光镜等元件。光路系统要求这些光学元件必须同轴等高,且每个元件要放置在一定空间位置上,才能观察到预期的光学现象,实现测量与分析。光学元件的同轴等高调节是光路系统调节中必不可少的一个重要环节,因此,调节光路是实验者应具备的基本技能。下面介绍光路的基本调整方法。

1.2.1 激光光路的调试

光学实验通常是在光学实验平台上进行的,首先用水准仪调节光学平台,使台面在同一

高度上。根据所设计的光路系统选择合适的光学元件,包括光学元件的孔径、焦距、放大倍率、透过率、表面精度以及光具架的调节机构等,且需要考虑光能利用,如在选择扩束镜时,应尽量避免用大倍数扩束镜代替小倍数扩束镜。光学元件应安装在具有调节机构(包括调节维数、调节范围和调节精度等)的光具架上,以便把这些元件按光路图准确地定位到适当的空间位置上。光具架的调节机构应连续平稳、定位稳定、锁紧不变。使用前应轻轻晃动光具架的各个结合部,检查其是否稳定。调整光路前应先将所有的微调螺钉调至中间位置,使之留有足够的调节量。

调整光路的基本原则是必须保证整个光路系统的光轴都在平行于工作台面在一个平面内,即同轴等高。先将激光器输出光束调节在某一高度上,且与工作面平行,再将光路系统中其他所有光学元件的中心高度调节到激光束位置,这个高度尽量低一点。调整步骤如下:

1) 激光器输出光束调节。这种调节可以通过升降整个激光器来完成,也可以借助于两个带有俯仰装置的反射镜来实现,或者采用专用的“光束升降器”来调整。

2) 将各光学元件逐个放到激光细光束中,调节所有光学元件的中心高度,使激光束通过各元件的中心。用镜头纸观察其表面反射的激光束是否与入射的激光束中心重合,若不重合应调节俯仰装置使二者严格重合。

3) 按照光路系统布置好各光学元件的位置,观察光路系统中由各光学元件表面(包括平面和球面)反射和透射产生的一系列自准像点,使它们处于激光束高度的一条直线上,以便使光学系统成为共轴系统。图 1-6 给出了反射镜调节实例。在图 1-6a 中,经反射镜的光斑与激光器出射端口不重合,反射镜平面不垂直于激光光束。调节反射镜俯仰和高低,使两次成像中心重合,如图 1-6b 所示,即为共轴。透镜及其他元件调节方法类似。

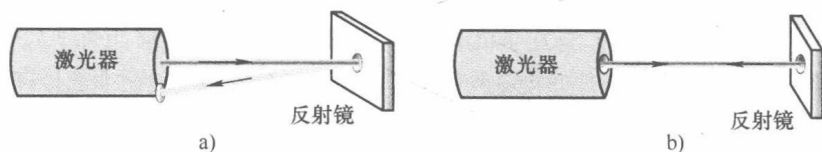


图 1-6 反射镜调节示意图

1.2.2 扩束镜的调节

光路系统中,通常要将激光器发出的细光束扩束成宽光束,这就需要扩束镜。扩束镜通常是短焦距的凸透镜或显微镜。激光细光束经扩束镜后会聚于其后焦点上,再从焦点发散,成为发散的球面波。因此在调节好激光器后,就需要调节扩束系统。图 1-7 为扩束系统调节示意图,先在光路中放置一个中心带孔的纸屏 P_1 或小孔光阑,孔的直径约等于细激光束的直径(3~5mm),让细激光束无遮挡地通过,再将扩束镜 L_0 放入光路中,扩束镜后放置一个光屏 P_2 ,屏 P_1 与屏 P_2 离扩束镜的距离为 5~50 cm。先粗调扩束镜使光屏 P_2 上的光斑尽可能成为一个高斯型光斑,然后在纸屏 P_1 上仔细寻找类似于牛顿环的干涉光环。这个干涉光环是由扩束镜的前后两个表面对入射光的部分反射在屏 P_1 上干涉形成的。这个干涉光斑光强很弱,且还可能由于没调节好而使光环中心远离光轴,故应仔细观察。找到光环,哪怕是很微弱的局部光环之后,仔细调节扩束镜,直到光环中心与光轴重合为止。通常要反复几

次调整平移和旋转微调旋钮,才能使屏 P_1 上的光环中心与光轴重合,且屏 P_2 上的光斑均匀不偏。

1.2.3 针孔滤波器及其调整方法

在扩束准直系统中,常在扩束镜焦点上放置空间滤波器 (Spatial Filter, SF) 对光束进行空间滤波,滤去由于扩束镜上的灰尘与脏物所引起的衍射光,以改善光束质量,如图 1-7 所示。空间滤波器也称为针孔 (针孔滤波器)。对光束质量要求不高或扩束镜上没有灰尘时,也

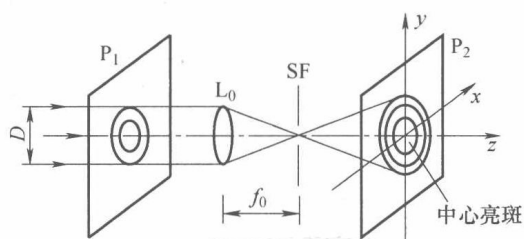


图 1-7 扩束镜和针孔滤波器的调整

可以不要针孔。若扩束镜没有像差,也不存在灰尘的衍射,则会聚光点的直径很小。从空间频谱的观点来看,这相应于光斑的零频成分。光斑中那些不均匀的部分,如各种环状衍射结构,对应于光束的高频成分,将出现在扩束镜后焦面上远离焦点的位置。因此,若把直径很小 (一般为 $5 \sim 40 \mu\text{m}$) 的针孔置于焦点上,只让零频通过而挡掉高频成分,则在针孔后的光场将是非常均匀的,那些相应于高频成分的衍射环将会消失,但加入空间滤波器会损失一部分光能。

为了得到高质量的光束,同时又不能让光能损失太多,应选用孔径合适的针孔。针孔放置在扩束镜后焦点处,其孔径 d 应等于后焦面上衍射图样中心的艾里 (Airy) 斑直径,即针孔直径 d 为

$$d = 1.22 \frac{\lambda}{D} f_0 \quad (1-1)$$

式中, f_0 为扩束镜的焦距; D 为扩束镜上激光束的实际通光孔径; λ 为激光波长。

激光束能量为高斯型分布。由于高斯光束的束腰宽度决定了激光束存在一平均发散角,发散角的存在将使聚焦光斑的面积增大。考虑这一因素后,滤波器孔径 d 应为

$$d = 2 \frac{\lambda}{D} f_0 \quad (1-2)$$

例如,设 $D = 1.55 \text{ mm}$, $f_0 = 16.56 \text{ mm}$, $\lambda = 0.6 \times 10^{-3} \text{ mm}$,按式 (1-2) 计算得到 $d \approx 12.8 \mu\text{m}$ 。实际上,应该选择比 d 约大 30% 的针孔。如果针孔太小,光束就会被挡掉一部分;如果针孔太大,除了 TEM_{00} 模以外的其他部分就会透过针孔。为了不至于使光能损失太多,通常采用 $15 \sim 20 \mu\text{m}$ 的针孔。针孔的调节与使用方法如下:

调节好扩束镜之后再调节针孔。针孔是在金属镍上加工的一个微米级的小孔,如图 1-8 所示 (电镜照片),小孔是利用激光掩膜技术加工而成的。在安装针孔之前,先用显微镜检查针孔是否为圆形或堵塞。将合适孔径的针孔安装在针孔微调架上,如图 1-9 所示。针孔微调架具有 x 方向和 y 方向二维微调,微调旋钮分别用 S_x 和 S_y 表示,与扩束镜安装在沿 z 方向的一维平移台上,微调旋钮用 S_z 表示 (这里的 S 表示旋钮 “screw”)。先用可移动的光屏寻找扩束镜的后焦点位置,在该位置附近放置针孔。由于各方向的平移微调范围有限,粗调时就应使针孔尽可能置于焦点处,且三个微调旋钮均置于可调范围的中部。粗调完毕后将整个部件锁紧在台面上。旋转微调旋钮 S_x 和 S_y ,在观察屏上观察透过针孔的光,若有光透过且很亮,整个针孔边缘发亮,说明大致处于光斑中心。在扩束镜前放一小孔光阑,使细激光

束通过小孔,此时可在小孔光阑的屏上观察到由针孔周围的金属表面反射回的光点,仔细微调 S_x 和 S_y ,使光点进入小孔,透过的光最强,这就表明针孔调到光轴上了,如图 1-7 所示。在针孔后放一光屏,观察由针孔形成的衍射环。调节旋钮 S_z ,沿光轴方向(z 轴)前后移动调焦,使衍射圆环中心的亮斑直径不断扩大,亮度不断增强,直至屏上出现一均匀光斑,此时针孔处于最佳位置。越接近于最佳位置就越要仔细微调 S_z ,三个方向上的微调只能一个一个进行,不要两个同时调节,且尽可能不要调节过头。图 1-10 给出了一个经扩束镜后的光斑及其光强分布的实例,图 1-10a 所示为没有针孔滤波时的高斯光束,图 1-10b 所示为有针孔时的高斯光束。加入针孔后,只有高斯光束中心部分透过,有“噪声”条纹的旁瓣部分被挡掉,得到一个均匀的光斑。

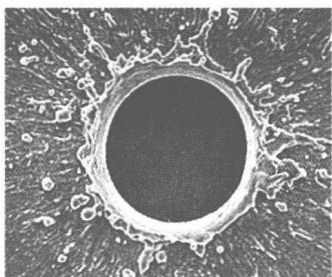


图 1-8 针孔

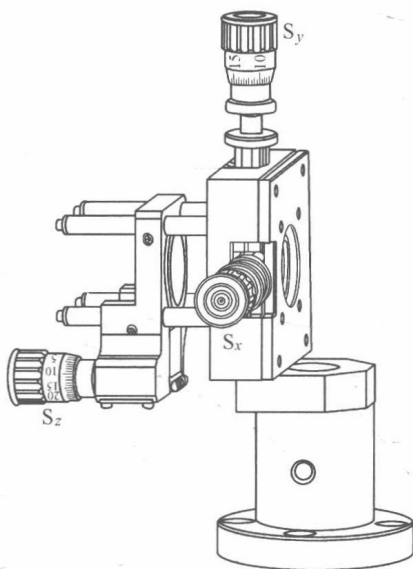


图 1-9 扩束镜和针孔调整架

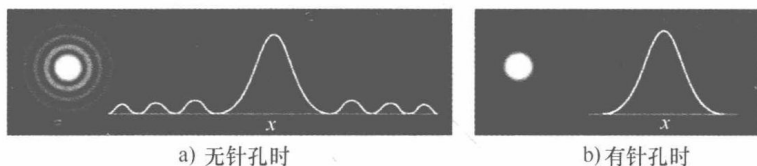


图 1-10 经扩束镜后的高斯光束

以上诸步骤并不都是必要的。当第一次安装或过分失调时,需按上述步骤调节。如果只是光束质量差一些,则只要按后几个步骤调节就可以了。一般只要微调扩束镜的微调旋钮 S_z 和针孔的两个平移微调旋钮 S_x 和 S_y ,使屏 P_1 上的光环对正,同时屏 P_2 上的光斑均匀即可。在实际使用过程中,由于各种原因,光斑质量有时会发生变化,因此要经常检查,随时调整,使之始终处于最佳工作状态,以发挥其最好的效能。在使用时要多观察判断,掌握调整方法,尽量避免大范围的盲目调节,以便节省时间并得到更好的效果。

1.2.4 准直光束的获得与检测

光学实验中,经常要用到准直性良好的平行光束,如制作全息光栅。这时可在扩束系统

之后放置准直透镜 L_c ，将发散的球面波变为较大口径的平面波。准直透镜的前焦点应与扩束镜的后焦点重合，且二者的光轴也应一致，如图 1-11 所示。图 1-11 所示系统称为扩束准直系统，用 BE 表示，经该系统后激光器发出的细激光束变为宽的平行光束。

1. 准直透镜的调节

1) 调节好扩束系统之后放置准直透镜 L_c 。准直透镜通常使用口径较大、焦距较长的双胶合透镜，这样可以获得截面较大的光束，以便处理较大一些的图像。在要求不太高的实验中，可使用单片的正透镜作为准直透镜，将其曲率半径较大的一面对向扩束镜，不可反向放置（见图 1-11）。若准直透镜是双胶合透镜，则应使负透镜对向扩束镜，以使其球差最小。准直透镜的中心应与光束的中心高度保持一致。

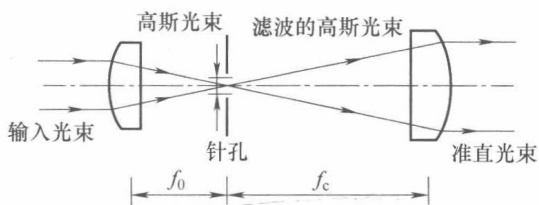


图 1-11 扩束准直系统

2) 粗移动准直透镜，使其前焦点大致与扩束镜的后焦点（即针孔位置）重合。

3) 在准直透镜后面放置光屏，观察输出光斑与准直透镜边框的影子，并横向平移准直透镜使光斑处于框影的中央位置。

4) 旋转准直透镜，使其光轴与主光线方向一致。方法是从扩束镜前面顺着激光传播方向观察随准直透镜光轴转动的三个光点。这三个光点是由准直透镜三个球面表面部分反射回来的光形成的。当这三个光点所形成的直线与激光束光轴方向重合时，就可认为准直透镜的光轴方向已调好。

5) 沿光轴方向微微平移准直透镜，使准直透镜前焦点位于显微物镜的焦点处，输出的光即为平行光束，光斑尺寸不再随距离而改变。

2. 准直光束的检测

从激光器输出的激光束通常具有一定的准直度，经扩束和准直系统后，不但光束直径增大，而且准直度也有所改善。设激光束原来的准直度为 φ_0 ，扩束镜的焦距为 f_0 ，准直透镜的焦距为 f_c ，则理论上准直光束的准直度为

$$\varphi = \frac{f_0}{f_c} \varphi_0 \quad (1-3)$$

通常 $f_0 < f_c$ ，故 $\varphi < \varphi_0$ 。准直光束的实际准直度取决于准直透镜的质量和调整精度。

准直光束准直度的检测方法有光斑法、剪切干涉法（在信息光学和物理光学实验中，光束平行性要求高时，大都使用剪切干涉法进行调节）和自准直法等。

光斑法是在准直透镜后近处和远处分别放置光屏，光屏面垂直于光轴，如图 1-12a 所示，分别测量在这两个光屏上的光斑直径 d_1 和 d_2 ，按式 (1-4) 计算光束的准直度。

$$\varphi = \frac{d_1 - d_2}{l} \quad (1-4)$$

式中， l 为两光屏之间的距离。

当 $d_2 = d_1$ 时，光束准直度最好，准直透镜处于最佳位置。

利用光斑法检测时尽量使 l 值大点，即两个光屏距离远点，这样效果好。光斑法需多次测量近处和远处光屏上的光斑直径，调整不太方便，且由于激光束的高斯性质，光斑直径不易测准。因而，此法一般只在粗调时使用，这时并不对光斑直径做精确测