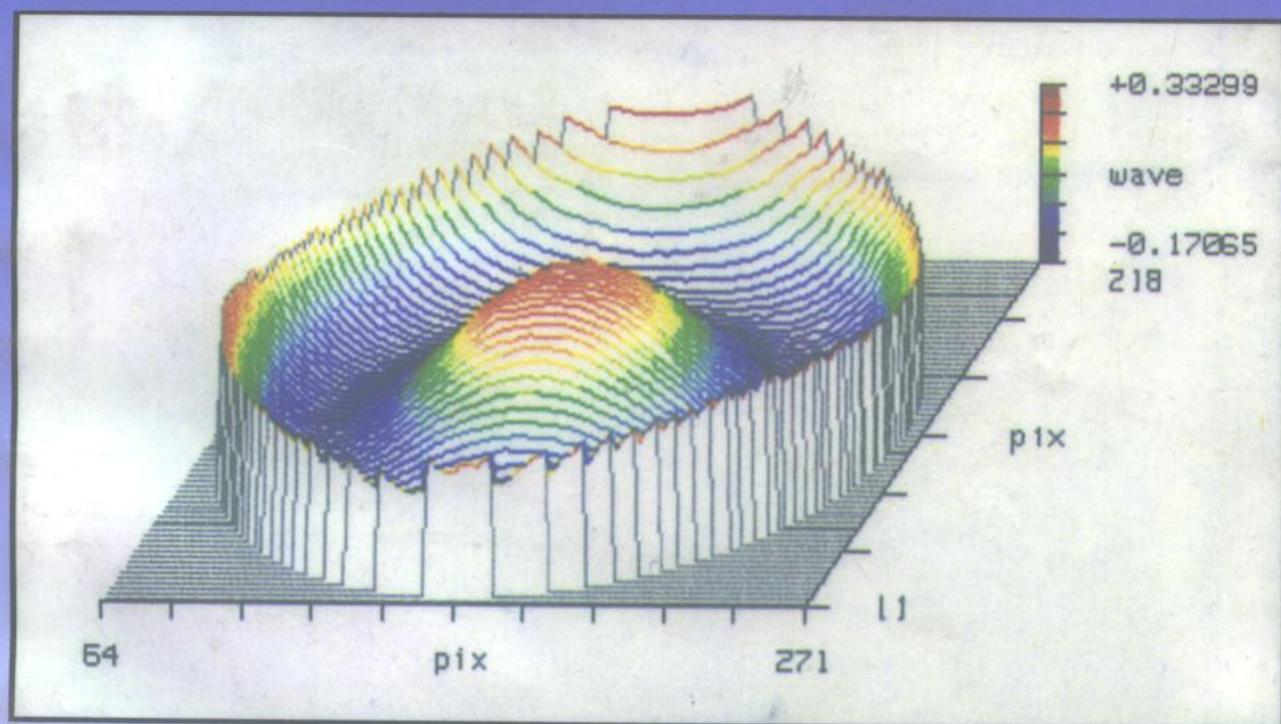


普通高等教育
兵工类规划教材

光学测试技术

苏大图 主编



北京理工大学出版社

光学测试技术

苏大图 赵立平 沙定国 编著
林家明 朱秋东

北京理工大学出版社

内 容 简 介

本教材为光学仪器、计量测试技术与仪器专业的专业课教材,还可供光电技术专业作为教材或教学参考书。本书系统介绍了光学测试中七种主要测试技术的基本理论、主要应用、测试方法和测量误差分析等。在选材上既注重基础理论及实用性,又注意选择国内外有重要应用价值的光学测试的新技术,其中不少是作者自己近年来的科研成果。因而使本教材既拓宽了知识面,又能适应光学测试技术近期发展的需要。

本书所介绍的测试技术,不仅适用于光学行业,对机械、轻工、航空、航天、计量、测绘等部门的有关行业也有实用价值。所以,本书还可供这些行业从事科研、生产的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

光学测试技术/苏大图主编. —北京:北京理工大学出版社, 1996. 9

ISBN 7-81045-161-8

I. 光… II. 苏… III. 光学-测试技术-高等学校-教材 IV. TH74

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 11913 号

北京理工大学出版社出版发行

(北京市海淀区白石桥路 7 号)

邮政编码 100081 电话 (010) 68422683

各地新华书店经售

北京房山先锋印刷厂印刷

*

787×1092 毫米 16 开本 14.25 印张 345 千字

1996 年 9 月第一版 1996 年 9 月第一次印刷

印数: 1—2500 册 定价: 16.50 元

※图书印装有误,可随时与我社退换※

出版说明

遵照国务院国发[1978]23号文件精神,中国兵器工业总公司承担全国高等学校兵工类专业教材的规划、编审、出版的组织工作。自1983年兵总教材编审室成立以来,在广大教师的积极支持和努力下;在国防工业出版社、兵器工业出版社和北京理工大学出版社的积极配合下,已完成两轮兵工类专业教材的规划、编审、出版任务。共出版教材211种。这批教材出版对解决兵工专业教材有无问题、稳定教学秩序、促进教学改革、提高教学质量都起到了积极作用。

为了使兵工类专业教材更好地适应社会主义现代化建设需要,特别是国防现代化培养人才的需要,反映国防科技的先进水平,达到打好基础、精选内容、逐步更新、利于提高教学质量的要求,我们以提高教材质量为主线,完善编审制度、建立质量标准、明确岗位责任,制订了由主审人审查、责任编委复审和教编室审定等5个文件。并根据兵工类专业的特点,成立了十个专业教学指导委员会,以更好地编制兵工类专业教材建设规划,加强对教材的评审和研究工作。

为贯彻国家教委提出的“抓好重点教材,全面提高质量,适当发展品种,力争系统配套,完善管理制度,加强组织领导”的“八五”教材建设方针。兵总教材编审室在总结前两轮教材编审出版工作的基础上,于1991年制订了1991~1995年兵工类专业教材编写出版规划。共列入教材220种。这些教材都是从学校使用两遍以上、实践证明是比较好的讲义中遴选的,专业教学指导委员会从兵工专业教材建设的整体考虑对编写大纲进行了审查,认为符合兵工专业培养人才要求,符合国家出版方针。这批教材的出版必将为兵工专业教材的系列配套,为教学质量的提高、培养国防现代人才,为促进兵工类专业科学技术的发展,都将起到积极的作用。

本教材由项敏达主审,经中国兵器工业总公司光学技术与光电仪器专业教学指导委员会复查,兵总教材编审室审定。

限于水平和经验,这批教材的编审出版难免有缺点和不足之处,希望使用本教材的单位和广大读者批评指正。

中国兵器工业总公司教材编审室

1996年1月

前 言

“光学测试技术”是用光学方法测量和检验光学量与非光学量的一门学科。根据新教学计划的安排,《光学测试技术》的讲课时数为原教材《光学测量与像质鉴定》的60%。为了适应教学改革和经济建设及科技发展的需要,本教材不仅应具有科学性、先进性,还要有广泛的适用性。为此,本教材共有七章,它们是:一、基本光学测量技术;二、光学系统的光度和色度性能测量;三、测角技术;四、准直和自准直技术;五、干涉测量;六、偏振光分析法测量;七、现代莫尔测量技术。与原教材比较,删去了“刀口阴影检验与朗契检验”和“光学传递函数测量”两章;将“光学测量基础”和“光具座上的综合检测”两章合并为一章,更名为“基本光学测量技术”;增加一章“现代莫尔测量技术”,鉴于莫尔测量技术在光学量和非光学量测量中的应用越来越多,而且近年出现了许多新技术,为适应“光学测试技术”发展需要,故增设这一章。“测角技术”一章介绍了目前国内最先进的JC-1型精密测角仪和我们提出的灵敏度最高、适于自动化测量折射率的直角照准法。还介绍了测量自聚焦透镜数值孔径的方法。“准直与自准直技术”介绍了激光束的准直与自准直技术,并扼要介绍零阶贝塞尔光束和相位共轭等新的准直与自准直技术;介绍了我们提出的新的定焦技术,使球面曲率半径及焦距的测量准确度提高了三倍以上;测量非球面面形的激光束平移转动法,也是我们提出的新方法。这一章不仅内容丰富了,技术上也更先进了。“干涉测量”历来在光学测试中占有重要地位,本次编写除精简了内容,采用了最新的移相干涉术外,还由过去基本上只介绍由实际波面对标准波面的偏差进而求得其他光学量的干涉测量,增加介绍另一类由干涉场上指定点的干涉条纹变化数进而求得长度、折射率等的干涉测量。使干涉测量技术的介绍更完整,本章的适用面更广了。“偏振光分析法测量”这一章在编写方法上作了革新,我们将目前常用于光学测量中的多种具体的看似多样的测量方法归纳出两种基本测量原理,讲清楚基本原理后,再介绍它们的几个重要应用。这种编写方法概念清晰,系统性也较好。相信会使一向被学生视为学习难点的这一章,将变得易于学习和运用了。“基本光学测量技术”与“光学系统的光度和色度性能测量”两章,虽然基本内容变化不大,但编写方法更科学,而且内容有所更新,贯彻了新的国际和国家标准,有利于学生的学习、理解。

本教材由苏大图主编,项敏达主审。第一、三章由林家明编写,第二章由赵立平编写,第四、六章由苏大图编写,第五章由沙定国编写,第七章由朱秋东编写。

本教材在编写过程中曾得到我系多位老师和一些研究所、工厂、院校科技人员的热情帮助,特别是主审项敏达研究员非常认真仔细地审阅了全书,提出了许多宝贵意见,使本书增色不少。在此一并表示衷心感谢!由于作者水平有限,书中会有许多不足之处,恳请各位读者指正。

编著者

1996年1月于北京

目 录

第一章 基本光学测量技术	(1)
第一节 光学测量中的对准与调焦技术	(1)
第二节 光学测试装置的基本部件及其组合	(10)
第三节 焦距和顶焦距的测量	(17)
第四节 星点检验	(23)
第五节 分辨率测量	(29)
第二章 光学系统的光度和色度性能测量	(38)
第一节 积分球和 CIE 标准照明体	(38)
第二节 光学系统透射比的测量	(43)
第三节 光学系统杂光系数的测量	(47)
第四节 色度学的基本知识	(53)
第五节 测色仪器	(71)
第六节 光学系统的色度性能测量	(75)
第三章 测角技术	(83)
第一节 光学测量用的精密测角仪	(83)
第二节 测角技术的应用	(86)
第四章 准直与自准直技术	(103)
第一节 激光束的准直与自准直技术	(103)
第二节 自准直法测量平面光学零件光学平行度	(111)
第三节 自准直法测量曲率半径和焦距	(116)
第四节 自准直法测量非球面面形	(122)
第五章 干涉测量	(125)
第一节 干涉测量基础	(125)
第二节 泰曼干涉测量和菲索干涉测量	(132)
第三节 错位干涉测量	(150)
第四节 移相干涉测量	(161)
第五节 外差干涉测量	(166)
第六章 偏振光分析法测量	(177)
第一节 偏振光分析法基本原理	(177)
第二节 光学玻璃应力双折射测量	(181)
第三节 光学薄膜厚度和折射率测量	(185)

第四节 偏振移相干涉术与偏振外差干涉术	(188)
第七章 现代莫尔测量技术	(194)
第一节 概述	(194)
第二节 莫尔条纹的形成原理	(195)
第三节 光栅调制测形法	(205)
第四节 莫尔偏折术	(214)
参考文献	(219)

第一章 基本光学测量技术

第一节 光学测量中的对准与调焦技术

在这一节中,首先给出对准和调焦的概念,然后介绍人眼直接观察目标时的对准误差和调焦误差;其次具体讨论人眼通过光学仪器(如望远镜和显微镜)观察目标像时的对准误差和调焦误差;最后较详细地介绍光电对准技术。

对准又称横向对准,是指一个目标(目标和标志都是广义的,在物空间比较,是真正的目标,在像方比较,则是目标的像)与比较标志在垂直瞄准轴方向的重合或置中(眼睛的瞄准轴是黄斑中心与眼睛后节点的连线,光学仪器的瞄准轴是指光学仪器的某个对准用标志与物镜后节点的连线)。调焦又称纵向对准,是指一个目标像与比较标志在瞄准轴方向的重合。调焦的目的主要是使物体(目标)成像清晰,其次是为了确定物面或它的共轭像面的位置,后者往往称为定焦。

对准以后,目标与标志在垂轴方向残留的偏离量称为对准误差。眼睛的对准误差是以偏离量对眼睛中心的夹角表示。定焦后目标像与标志沿轴向残留的偏离量称为调焦误差。眼睛的调焦误差以目标与标志到眼睛距离的倒数之差表示。

眼睛通过光学仪器去对准或调焦的目的是利用仪器的有效放大率和有利的比较标志(如叉线或双线分划板等)以提高对准和调焦的准确度。所以对准和调焦误差应以观察仪器的物方对应值表示。如图1-1中的 Δy 、 γ 和 Δx 、 ϕ 所示。

本节的最后还将介绍一下光电对准技术,而光电定焦技术则可通过相关专业课程了解。

一、人眼的对准误差和调焦误差

在介绍观测仪器(望远镜和显微镜)的对准误差和调焦误差之前,必须先了解人眼在仪器的像方,相当于直接观察目标时的这些误差。常见的对准方式和人眼的对准误差见表1-1。

要使目标位于标志所在的垂直瞄准轴的平面上,即二者位于同一深度上,常见的最简便的调焦方法是清晰度法和消视差法。

清晰度法是以目标与比较标志同样清晰为准。调焦误差是由于存在几何焦深和物理焦深所造成的。

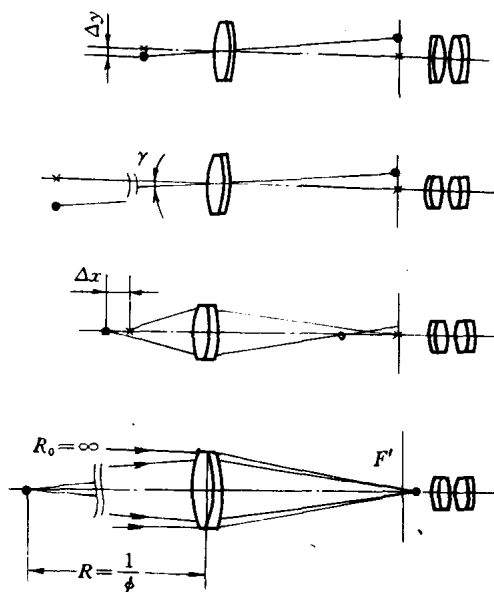
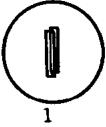
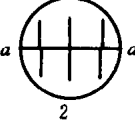
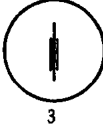
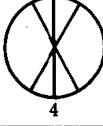
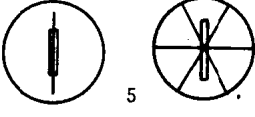


图1-1 观察仪器物方的对准和调焦误差

表 1-1 五种对准方式的对准扩展不确定度

对准方式	示意图	人眼的对准扩展不确定度 δ (秒)	附 注
压线对准 (单线与单线重合)	 1	60~120	两条实线重合时,设线宽分别为 b_1, b_2 (分), 则 $\delta = 0.5(b_1 + b_2)$ (分)。实线与虚线重合时,设虚线宽为 $b_1, b_2 \leq b_1 < b_2 + 1$ 时, $\delta = 1'$
游标对准 (一直线在另一直线延长线上)	 2	15	线宽不宜大于 $1'$ 分界线 aa 应细而整齐
夹线对准 (一条稍粗直线位于两条平行细线中间)	 3	10	三线严格平行。两平行线中心间距最好等于粗直线宽度的 1.6 倍
叉线对准 (一条直线位于叉线中心)	 4	10	直线应与叉线的一条角等分线重合
狭缝叉线对准或 狭缝夹线对准	 5	10	直线与狭缝严格平行

首先说明几何焦深这一概念。假定标志真正成像在眼睛网膜上,这时标志上一点在网膜上的像是一个几何点。调焦时目标不一定能与标志位在同一平面上,但只要目标上一点在网膜上生成的弥散圆直径小于眼睛的分辨极限,人眼仍把这个弥散圆当成一个点,即认为目标与标志同样清晰。当弥散圆直径等于人眼分辨极限时,目标至标志距离 δ_x (即为调焦扩展不确定度) 的两倍 $2\delta_x$ 称为几何焦深 (因为目标远于或近于标志 δ_x 的距离时效果相同)。可见几何焦深与人眼的极限分辨角 α_c 直接相关。通常取 $\alpha_c = 1'$ 。当人眼观察远距离处的物体时, δ_x 会很大,这时调焦扩展不确定度不用 δ_x 表示,而应以目标和标志到眼瞳距离的倒数之差值表示。设目标距离为 l_1 , 标志距离为 l_2 , $(l_1 - l_2)$ 为几何焦深的一半, 眼瞳直径为 D_e , 人眼极限分辨角为 α_c , 由于几何焦深造成的人眼调焦扩展不确定度为

$$\phi_1 = 1/l_2 - 1/l_1 = \alpha_c/D_e \quad (1-1)$$

式中 ϕ_1 应以 m^{-1} 为单位 (过去常称此单位为屈光度, 又称视度); 这时 l_1, l_2 和 D_e 的单位为 m ; α_c 的单位为 rad 。

下面给出物理焦深的概念。

根据衍射理论, 由于眼瞳大小有限, 即使是理想成像, 一物点在网膜上的像不再是一个点而是一个艾里斑。当物点沿轴向移动 Δl 后, 在眼瞳面上产生的波差小于或等于 λ/K (常取 $K=6$) 时, 人眼仍分辨不出这时网膜上的衍射图像与艾里斑有什么差别。即如果目标与标志

相距小于 Δl 时眼睛仍认为二者的像同样清晰。距离 $2\Delta l$ 称为物理焦深。由物理焦深造成的人眼调焦扩展不确定度 ϕ_2 由下式求得

$$\begin{aligned}\lambda/K &= D_e^2/8l_2 - D_e^2/8l_1 \\ \phi_2 &= 1/l_2 - 1/l_1 = 8\lambda/KD_e^2 \quad (\text{m}^{-1})\end{aligned}\quad (1-2)$$

式中 $l_2 = l_1 + \Delta l$; D_e —眼瞳直径 (D_e 与波长 λ 的单位皆为 m)。

由清晰度法产生的人眼调焦扩展不确定度 ($\sqrt{3}\sigma$) 为几何焦深和物理焦深所造成的调焦扩展不确定度的方和根, 即

$$\phi' = \sqrt{\phi_1'^2 + \phi_2'^2} = \left[\left(\frac{\alpha_e}{D_e} \right)^2 + \left(\frac{8\lambda}{KD_e^2} \right)^2 \right]^{1/2} (\text{m}^{-1}) \quad (1-3)$$

单次测量的标准不确定度为

$$\sigma_{ED} = 1/\sqrt{3} \left[(\alpha_e/D_e)^2 + (8\lambda/KD_e^2)^2 \right]^{1/2} (\text{m}^{-1}) \quad (1-4)$$

消视差法是以眼睛在垂直平面上左右摆动也看不出目标和标志有相对横移为准的。由于无相对横移时目标不一定与标志同样清晰, 所以消视差法不受焦深的影响。消视差后目标与标志的轴向距离即为本方法的调焦误差。

采用本方法时, 先使目标与标志横向对准, 再摆动眼睛, 如果看到二者始终对准, 则认为调焦已完成。由于本方法把纵向调焦变成横向对准, 从而可通过选择误差小的对准方式来提高调焦准确度。

设眼睛摆动距离为 b , 所选对准方式的对准误差为 δ , 定焦时目标和标志到眼睛的轴向距离分别为 l_1 和 l_2 , 此时人眼直接观察的调焦扩展不确定度参照式 (1-1) 可以得到

$$\phi' = \frac{1}{l_2} - \frac{1}{l_1} = \frac{\delta}{b} \quad (\text{m}^{-1}) \quad (1-5)$$

式中 δ 的单位为 rad; b 的单位为 m。

单次测量的标准不确定度为

$$\sigma_{EP} = \delta/(\sqrt{3}b) \quad (\text{m}^{-1}) \quad (1-6)$$

二、望远镜和显微镜的对准误差与调焦误差

人眼通过望远镜和显微镜去对准和调焦是为了提高对准与调焦的准确度。

(一) 对准误差

望远镜的对准误差 见图 1-2 (a), 设人眼直接对准的对准误差为 δ , 望远镜的放大率为 Γ , 通过望远镜观察时物方的对准误差设为 γ , 则有如下关系

$$\begin{aligned}f_e'\delta &= f_o'\gamma \\ \gamma &= \frac{\delta}{\Gamma}\end{aligned}\quad (1-7)$$

例: V 棱镜折光仪的望远镜放大率 $\Gamma=6\times$, 入瞳直径 $D=12\text{mm}$, 对准方式是夹线对准, 其扩展不确定度 $\delta=10''$, 则望远镜对准的扩展不确定度

$$\gamma = 10''/6 = 1.7''$$

显微镜的对准误差 见图 1-2 (b), 设显微镜的总放大率为 Γ , 其中物镜的垂轴放大率为 β 。通过显微镜观察时物方的对准扩展不确定度设为 Δy , 则有

$$\Delta y = \frac{f'_e \delta}{\beta}$$

式中 f'_e —目镜焦距。

因为 $\Gamma = \beta \cdot 250/f'_e$, 故得

$$\Delta y = \frac{250\delta}{\Gamma} \quad (\text{mm}) \quad (1-8)$$

式中 250—人眼的明视距离 (mm); δ —人眼的对准扩展不确定度 (rad)。

例一 V 棱镜折光仪的显微镜放大率 $\Gamma = 58\times$, 显微物镜的数值孔径 $NA = 0.15$, 对准方式是夹线对准, $\delta = 10'' = 10/206265 \text{ rad}$ ($1\text{rad} = 206265''$)。

显微镜物方的对准扩展不确定度

$$\Delta y = \frac{250 \times 10}{58 \times 206265} \text{mm} = 0.00021 \text{mm} = 0.21 \mu\text{m}$$

例二 经纬仪的度盘刻划圆直径 $D = 270 \text{mm}$, 用游标对准方式读数, 即 $\delta = 0.25'$, 要求由对准误差带入经纬仪测角误差的部分不大于 $\theta = 0.1''$, 求读数显微镜的放大率的下限值。

设显微镜物方的对准误差为 Δy , 则与 Δy 对应的测角误差为

$$\theta = \frac{2\Delta y}{D}$$

根据式(1-8)消去 Δy , 即得计算放大率的公式

$$\Gamma = \frac{500\delta}{D\theta} = \frac{500 \times 60 \times 0.25}{270 \times 0.1} \approx 278\times$$

对准误差与分辨率的关系 由式(1-7)和(1-8)可以看出, 对准误差与放大率 Γ 成反比。是否可以认为, 只要单纯增大 Γ , 对准误差必然减小呢? 实践证明, 对准误差的减小还受到光学仪器分辨率的限制。因为即使光学仪器的像质优良, 对准和分辨也都存在着目标经物镜成像的清晰度受衍射影响这一因素, 所以两者有一定的联系。

实验结果得出: 像质优良的望远镜和显微镜的单次对准不确定度最小只能达到它的理论分辨率的 $1/6 \sim 1/10$ 。即

$$\gamma_{\min} = \left(\frac{1}{6} \sim \frac{1}{10} \right) \alpha, \quad \Delta y_{\min} = \left(\frac{1}{6} \sim \frac{1}{10} \right) \epsilon \quad (1-9)$$

$$\alpha = \frac{1.02\lambda}{D}, \quad \epsilon = \frac{0.51\lambda}{NA} \quad (\text{参看表 1-6})$$

式中 D —望远镜的入瞳直径; NA —显微物镜的数值孔径; 当取 $\lambda = 0.56 \mu\text{m}$ 时, $\epsilon \approx 0.3/NA$ (μm)。 $\alpha = \frac{1.02 \times 0.56 \times 10^{-3}}{D/\text{mm}} \times 206265'' \approx \frac{120}{D/\text{mm}} (")$ 。

用式(1-9)去检查前面举出的 V 棱镜折光仪的两个例子。望远镜入瞳直径 $D = 12 \text{mm}$, 则理论分辨率 $\alpha = 120''/12/\text{mm} = 10''$, 前已算出 $\gamma = 1.7'' = \alpha/6$, 说明实际可以达到 $1.7''$ 的对准准确度。

显微物镜的数值孔径 $NA = 0.15$, $\epsilon = 0.3/0.15 = 2.0 (\mu\text{m})$, 前已算出 $\Delta y = 0.21 \mu\text{m}$, 而 $\Delta y_{\min} = \epsilon/6 = 0.33 \mu\text{m}$ (对扩展不确定度建议用 $1/6$, 标准不确定度才用 $1/10$)。故显微镜的对

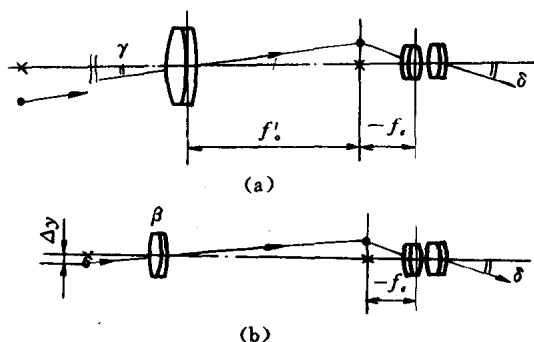


图 1-2 望远镜和显微镜的对准误差

准扩展不确定度最好也只能达到 $0.33\mu\text{m}$ ，对应标准不确定度为 $\frac{0.33}{\sqrt{3}}\mu\text{m}=0.2\mu\text{m}$ 。

(二) 调焦误差

1. 望远镜的调焦误差 常用清晰度法和消视差法。

清晰度法 将人眼的两部分调焦误差，如式(1-1)和(1-2)所示，分别换算到望远镜物方，即可求出望远镜用清晰度法调焦的误差。

设在望远镜像方的调焦误差为 ϕ' (m^{-1})时，对应于物方为 $\phi(\text{m}^{-1})$ 。应用牛顿公式 $xx'=ff'$ ，不难求出

$$\phi = \frac{\phi'}{\Gamma^2}$$

由此可得，在望远镜物方

$$\phi_1 = \frac{\phi'_1}{\Gamma^2} = \frac{\alpha_c}{\Gamma^2 D_c}$$

$$\phi_2 = \frac{\phi'_2}{\Gamma^2} = \frac{8\lambda}{K\Gamma^2 D_c^2}$$

当眼瞳直径 D_c 大于望远镜的出瞳直径 D' 时，以实际有效的像方通光孔径 $D'=D/\Gamma$ 代替公式中的 D_c ，上二式变为

$$\phi_1 = \frac{\alpha_c}{\Gamma D}, \quad \phi_2 = \frac{8\lambda}{KD^2}$$

式中 D —望远镜的入瞳直径。

若 $D' > D_c$ ，则 ΓD_c 为实际有效的入瞳直径，即应以 ΓD_c 代替式中的 D 。

望远镜的调焦扩展不确定度

$$\phi = \sqrt{\left(\frac{\alpha_c}{\Gamma D}\right)^2 + \left(\frac{8\lambda}{KD^2}\right)^2} \quad (\text{m}^{-1}) \quad (1-10)$$

标准不确定度

$$\sigma_{\Gamma D} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\left(\frac{\alpha_c}{\Gamma D}\right)^2 + \left(\frac{8\lambda}{KD^2}\right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{m}^{-1}) \quad (1-11)$$

消视差法 人眼通过望远镜调焦时，眼睛在出瞳面上摆动最大距离将受到出瞳直径的限制。因为在网膜上像的位置由进入眼瞳的成像光束的中心线与网膜的交点决定，因此眼瞳的有效移动距离不等于眼瞳的实际移动距离 t ，而等于出瞳中心到进入眼瞳的光束中心的距离 b ，如图1-3(a)所示。图中阴影线部分表示进入眼瞳的光束截面积。不难看出， b 越大进入眼睛的光束越细，像越暗，眼睛的对准准确度将越低。一般规定，当 $D_c=2\text{mm}$ 左右时(这时视场亮度约为 $2 \times 10^4 \text{cd/m}^2$)，计算调焦误差的眼睛最大移动距离是眼瞳中心移至出瞳边缘处[见图1-3(b)]，这时

$$b = D'/2 - D_c/4$$

在实验室条件下，视场亮度有时达不到要求的 $2 \times$

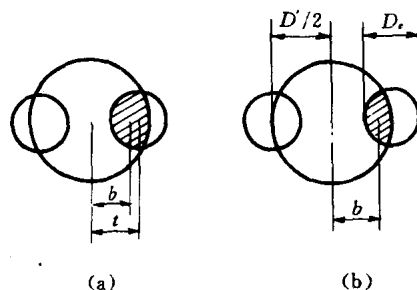


图1-3 眼瞳在出瞳面上摆动时的有效移动距离

10^4cd/m^2 的水平, D_e 将增大。但当 $D_e \leq 3 \text{mm}$ 时 (视场亮度大于 100cd/m^2), 只要保持进入眼睛的光束截面积基本不变 (与 $D_e = 2 \text{mm}$ 时, 图 1-3(b) 的画斜线的面积基本相同), 对准准确度不会有明显下降, 因此上式中的 $D_e/4$ 可看作是定值 $1/2 \text{mm}$, 公式变为

$$b = (1/2)(D'/\text{mm} - 1) \quad (\text{mm}) \quad (1-12)$$

将式(1-5)的 ϕ' 换算到望远镜物方得

$$\phi = \delta/\Gamma^2 b$$

将式(1-12)代入上式, 得调焦扩展不确定度为

$$\phi = \frac{2\delta}{\Gamma^2(D'/\text{mm} - 1) \times 10^{-3}} \quad (\text{m}^{-1}) \quad (1-13)$$

单次测量的标准不确定度为

$$\sigma_{TP} = \frac{2\delta}{\sqrt{3} \Gamma^2(D'/\text{mm} - 1) \times 10^{-3}} \quad (\text{m}^{-1}) \quad (1-14)$$

式中 δ 由表 1-1 查出, 但单位改用“rad”。

例 校正平行光管的分划板位置, 要求分划板位于平行光管物镜的焦面上。设平行光管口径 $D_e = 50 \text{mm}$, 物镜焦距 $f'_e = 550 \text{mm}$ 。用一个望远镜对向平行光管, 观察它的分划板像, 当看到这个像与望远镜的分划板刻线同样清晰和消视差时, 则认为平行光管已校正好。设望远镜入瞳直径 $D_T = 100 \text{mm}$, 物镜焦距 $f'_o = 1200 \text{mm}$, 放大率 $\Gamma = 40\times$ 。问调焦误差有多少?

用清晰度法: 观察时实际通光口径 $D = 50 \text{mm} = 0.05 \text{m}$, 取 $\alpha_e = 2' = 2/3438(\text{rad})$, $\lambda = 0.56 \mu\text{m} = 0.56 \times 10^{-6} \text{m}$, 代入式(1-10)得

$$\phi = \sqrt{\left(\frac{2}{3438 \times 40 \times 0.05}\right)^2 + \left(\frac{8 \times 0.56}{6 \times 0.05^2 \times 10^6}\right)^2} (\text{m}^{-1}) \doteq 4.2 \times 10^{-4} (\text{m}^{-1})$$

用消视差法: 设对准方式是压线对准, 取 $\delta = 1'$, 眼睛直径 $D_e = 2 \text{mm}$, $D' = 50/40 = 1.25 \text{mm}$ 。代入式(1-13)得

$$\phi = \frac{2 \times 1}{40^2(1.25 - 1) \times 10^{-3} \times 3438} (\text{m}^{-1}) = 1.5 \times 10^{-3} (\text{m}^{-1})$$

2. 显微镜的调焦误差 常用清晰度法和消视差法。

清晰度法 将人眼的调焦误差换算到显微镜物方的简单方法, 是把显微镜看作一个放大率较大的放大镜, 其等效焦距为

$$f'_{eq} = 250/\Gamma \quad (\text{mm})$$

式中 Γ —显微镜总放大率。

显微镜物空间的折射率为 n 时, 设人眼调焦不确定度为 ϕ'_1 , 则显微镜物方对应的调焦不确定度由(1-1)和牛顿公式可知, 为

$$\Delta x_1 = \phi'_1 n f_{eq}^2 = \frac{\alpha_e n}{D_e} f_{eq}^2$$

若 D_e 大于出瞳直径 D' , 上式变为

$$\Delta x_1 = \frac{\alpha_e n}{D'} f_{eq}^2 \quad (1-15)$$

显微镜的出瞳直径 D' 与数值孔径 NA 及总放大率 Γ 的关系见图 1-4, 得

$$D' = 2f'_{eq} (NA) \quad (1-16)$$

代入式(1-15)得

$$\Delta x_1 = \frac{n\alpha_e}{2(NA)} f'_{eq} \quad (1-17)$$

由物理焦深产生的调焦不确定度,也可通过较简单的方法求得。

如果 $D_e > D'$, 则当目标像和标志像发出的光束在显微镜出瞳范围内所截波面之间的波差小于 $\lambda/6$ 时, 人眼看到二者同样清晰。假定显微镜像质良好, 在目标像到标志像的深度范围内波像差的变化很小。那么, 在显微镜物方, 目标和标志对入瞳的波差也应是小于 $\lambda/6n$ (λ 为真空中的波长)。

设波差达 $\lambda/6n$ 时, 目标到入瞳的距离为 R_1 , 标志到入瞳的距离为 R_2 。入瞳直径为 D , 则二者之间在入瞳处的波差, 当 $NA \leq 0.50$ 时, 可近似得

$$\frac{D^2}{8R_2} - \frac{D^2}{8R_1} = \frac{\lambda}{6n}$$

假设物空间介质的折射率为 n , 物方最大孔径角为 U , 而且差值 $R_2 - R_1 = \Delta x_2$ 是个很小的数。则有

$$\begin{aligned} \frac{R_2}{2} \sin^2 U - \frac{R_1}{2} \sin^2 U &= \frac{\lambda}{6n} \\ \frac{\sin^2 U}{2} (R_2 - R_1) &= \frac{\lambda}{6n} \\ \Delta x_2 &= \frac{2\lambda}{6n \sin^2 U} = \frac{2n\lambda}{6(NA)^2} \end{aligned} \quad (1-18)$$

总的调焦扩展不确定度为

$$\Delta x = \sqrt{\left(\frac{n\alpha_e f'_{eq}}{2NA} \right)^2 + \left(\frac{2n\lambda}{6(NA)^2} \right)^2} \quad (1-19)$$

单次测量的标准不确定度为

$$\sigma_{MP} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\left(\frac{n\alpha_e f'_{eq}}{2NA} \right)^2 + \left(\frac{2n\lambda}{6(NA)^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1-20)$$

消视差法 求调焦误差的方法与求式(1-17)的方法相似。

将式(1-5)换算到显微镜物方得

$$\Delta x = \phi' n f_{eq}^2 = \frac{n\delta}{b} f_{eq}^2 \quad (1-21)$$

将式(1-12)代入上式中, 得调焦扩展不确定度为

$$\Delta x = \frac{2n\delta}{\frac{D'}{\text{mm}} - 1} f_{eq}^2$$

再应用式(1-16), 最后得消视差法的调焦扩展不确定度为

$$\Delta x = \frac{n\delta f_{eq}^2}{NA} \frac{D'/\text{mm}}{D'/\text{mm} - 1} \quad (1-22)$$

单次测量标准不确定度为

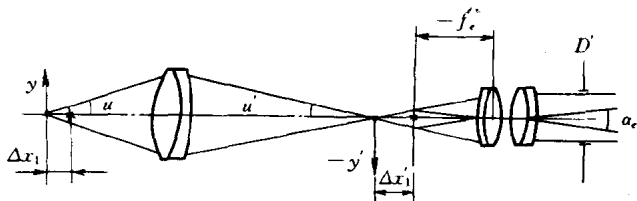


图 1-4 显微镜的几何焦深 Δx_1 与分辨角 α_e 以及出瞳直径 D' 与孔径角 u 的关系

$$\sigma_{MP} = \frac{n\delta f'_{eq}}{\sqrt{3} NA} \frac{D'/\text{mm}}{D'/\text{mm} - 1} \quad (1-23)$$

例 用一显微镜确定某分划板的位置。显微物镜 $NA=0.25$, $\beta=10\times$, 目镜 $\Gamma_e=10\times$ 。求显微镜对分划板刻线面调焦的调焦扩展不确定度。

(1) 清晰度法。取 $\alpha_e=1'$, $\lambda=0.56\times 10^{-3}\text{mm}$, $n=1$, 已知 $\Gamma=\beta\Gamma_e=100\times$, $f'_{eq}=250/100=2.5\text{mm}$, $NA=0.25$ 代入式(1-19)得

$$\Delta x = \sqrt{\left(\frac{1 \times 1 \times 2.5}{2 \times 3438 \times 0.25}\right)^2 + \left(\frac{2 \times 1 \times 0.56 \times 10^{-3}}{6 \times 0.25^2}\right)^2} = 3.3 \times 10^{-3}(\text{mm})$$

假如 $D_e=1\text{mm} < D'$, 则实际的数值孔径 $NA=0.20$, 这时 $\Delta x=5.0\mu\text{m}$ 。

(2) 消视差法。设被调焦的分划板刻有直线(线宽 0.01mm)，显微镜的分划板上刻有叉线，故有 $\delta=10''=0.17'$ 。显微镜的出瞳直径

$$D' \approx 2f'_{eq}(NA) = 2 \times 2.5 \times 0.25 = 1.25(\text{mm})$$

设眼瞳直径 $D_e=2\text{mm}$ 。将上面各值代入式(1-22)得

$$\Delta x = \frac{1 \times 0.17 \times 2.5 \times 10^3}{3438 \times 0.25} \times \frac{1.25}{1.25 - 1} = 2.5(\mu\text{m})$$

根据公式(1-10)、(1-13)和(1-19)、(1-22)，分析两种方法的调焦误差，可以得到如下结论：由于消视差法可通过选择有利的对准方式使对准误差 δ 大大减小，因此，系统出瞳直径 $D' \geq 2\text{mm}$ 时，用消视差法准确度高； $D' \leq 1\text{mm}$ 时，用清晰度法准确度高。 $1\text{mm} < D' < 2\text{mm}$ 时，两种方法准确度相差不多。这个结论与实践结果基本吻合。

实际进行目视法调焦时，往往两种方法同时采用。这就是，首先调至目标与标志同样清晰，再左右摆动眼睛观察二者间有无视差，最后以“清晰无视差”定焦。

三、光电对准

光学测量技术今后发展的关键问题是怎样广泛有效地应用光电探测技术。光电探测可以代替眼睛进行对准、定焦和读数，从而大大提高对准、定焦准确度，实现测量的自动化，提高工作效率。而且也是实现计算机实时控制，数据采集和处理的前提。因为只有通过光电探测高准确度地提取信号并输入计算机中，计算机才能有效地进行实时控制和处理。还可以降低对仪器制造精度的要求和减小外界环境对测量的影响，并且有可能扩大仪器的应用范围。近几年来以 CCD 传感器为代表的各种新的探测器发展很快。CCD 在光电对准和光电定焦技术中具有特殊的优越性能，目前已被广泛应用于各种测量仪器中。本课仅对光电对准的基本原理和方法作一简单介绍，以适应今后发展的需要。至于光电定焦、光电探测技术等内容将在相关课程中介绍。

光电对准 目前，光电对准装置可分为光电显微镜和光电望远镜两大类。主要用于对准线条，两类仪器的对准不确定度分别达到 $(0.01 \sim 0.02)\mu\text{m}$ 和 $0.05'' \sim 0.1''$ 。

光电对准按工作原理分为光度式和相位式两种。光度式是根据刻线像相对仪器的狭缝位置不同，通过狭缝到达光电接收器的光通量不同产生的光电流也不同这个原理，以指示光电流(或电压)最小时为对准的。这时刻线像中心与狭缝中心重合。为提高精度可在刻线像面上放置两个狭缝，用两个光电管分别接收通过每个狭缝的光通量，以指示两光电流相等时为对准。这称为差动光度式。

在光度式的基础上加入一调制器即成相位式。调制器有两种,一种是在成像光路中加入一个以一定频率振动的反光镜,使刻线像在狭缝处作同频率振动;另一种是刻线像不动,狭缝以一定频率在像平面内振动。由于相位式具有对光电接收器的稳定性(在直流下工作难以确保零点读数的稳定性)和刻线质量的要求都较低,而对准误差较小等优点,所以下面仅以光电自准望远镜为例介绍相位式对准的工作原理。

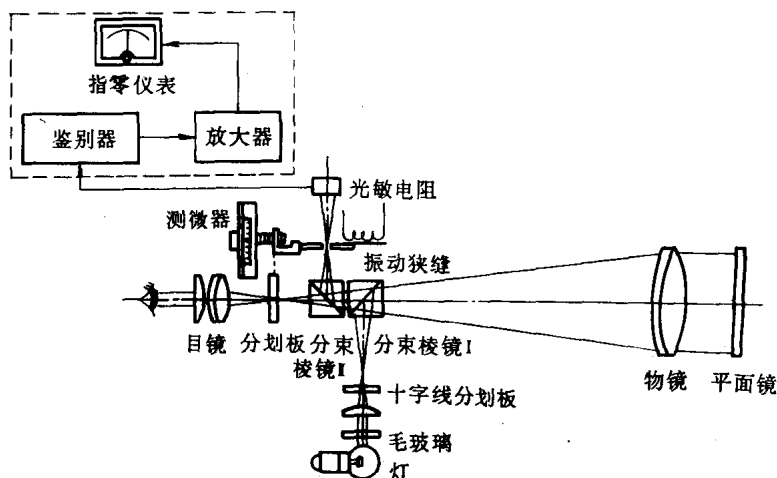


图 1-5 光电自准望远镜工作原理

光电自准望远镜的工作原理如图 1-5 所示。光源通过毛玻璃照亮十字线分划板,从分划板发出的光线经分束棱镜 I 反射射向物镜,从物镜射出的平行光经平面镜反射回来,又经物镜,透过两个分束棱镜会聚在分划板上,生成十字线像。入眼通过目镜观察,进行初步瞄准。经分束棱镜 I 反射的光束会聚在振动狭缝上,透过狭缝的光束投射在光敏电阻上。振动狭缝与一个测微器相连接,可用测微器螺杆调节狭缝的振动中心位置。当狭缝对称于十字刻线像振动时,光敏电阻接收的光通量是按正弦规律变化的,因此光敏电阻输出电流的波形是规则的正弦波形,频率为狭缝振动频率的 2 倍(见图 1-6(a))。在一个振动周期内狭缝两次处于对称十字刻线像状态,如图 1-6(a)的 3、5 位置,所以一个振动周期输出倍频的规则正弦波形,此时指零仪表指示零位。如果狭缝中心未与十字刻线像对准,输出波形不是规则的正弦波,在上述正弦波形上重叠有频率等于狭缝振动频率的分量,如图 1-6(b)所示,在 3 和 5 的位置振动狭缝均不能处于使十字刻线像刚好居中的振动过程,所以这种波形的电流输入到鉴别器中时,将产生直流电压输出,通过放大器,使指零仪表偏离零位。转动测微器推动狭缝,当指针又复指零时,从测微器上读出十字刻线像偏离系统瞄准轴的横向距离 a (注意到平面镜的倾角 α 与 a 的关系式为 $\text{tg}2\alpha = a/f'$, f' 为自准直望远物镜的焦距)。但在一般光电自准望远镜测微器上可以直接读出平面镜相对光电自准望远镜光轴垂轴位置的倾角 α 来。

这类仪器的测微器一般都能在推动狭缝的同时还带动分划板同步垂轴移动。当指零仪表指零时,十字线像也正好成像于分划板的双刻线中间。这种结构能方便地用目视法实现初步瞄准,并随时检查光电对准装置的工作情况。

表 1-2 给出一种光电自准望远镜的主要技术参数。

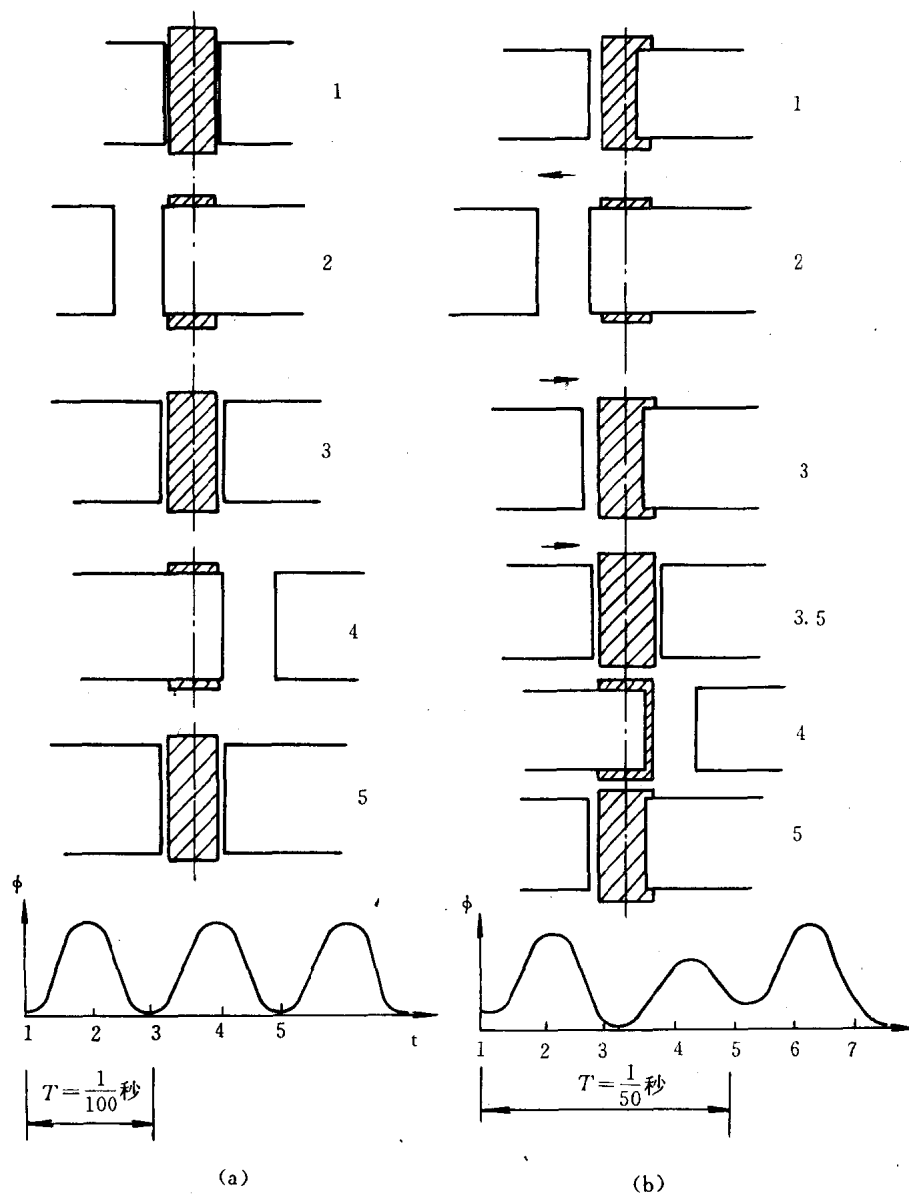


图 1-6 狭缝对称和不对称于刻线像振动时输出的波形图

表 1-2

物 镜		放大率	测量范围	最小格值	目视视场	最 大 工作距离	测量精度		安 置 重复性
焦 距	口 径						0~1'	0~10'	
860mm	46mm	43×	0~10'	0.1"	19'	30m	0.5"	2"	0.1"

第二节 光学测试装置的基本部件及其组合

典型的光学测试装置为光具座,光具座的类型一般以其上的平行光管焦距的长短来区分,焦距为 1200mm 的 GXY-08A 型光具座的外形如图 1-7 所示,它主要由平行光管、带回转工作台的自准直望远镜、透镜夹持器和带目镜测微器的测量显微镜组成,以上几个部件可排列在