



北京市高等教育精品教材立项项目

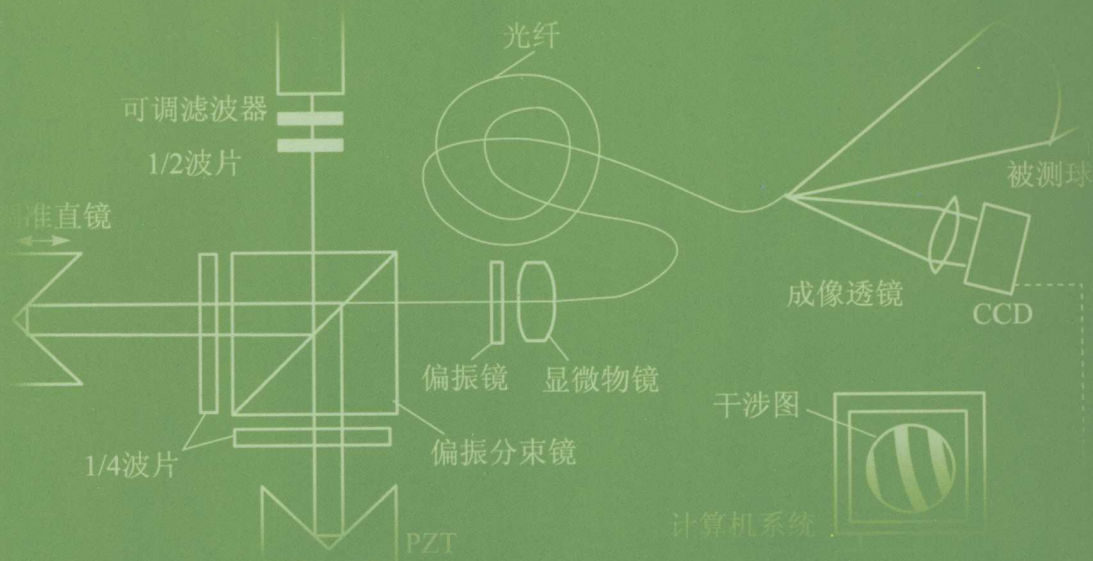


面向 21 世纪高等院校精品规划教材

光学测试技术

(第2版)

沙定国 主编 苏大图 主审



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



北京市高等教育精品教材立项项目

面向 21 世纪高等院校精品规划教材

光学测试技术

(第 2 版)

沙定国 林家明 张旭升 周桃庚 编著
陈凌峰 何 川 邱丽荣

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书是一门技术基础课程教材,适合于光学工程、光电技术、测控技术与仪器各专业。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。在教材内容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新技术,其中不少是作者多年来的科研成果。因而使本教材既拓宽了知识面,又能适应光学测试近期发展的需要。各章附思考与练习题、参考文献,便于自学和组织教学。

本书所介绍的测试技术,不仅适用于光学行业,对航空航天、计量、测绘、机械、轻工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、生产的工作人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

光学测试技术/沙定国主编. —2版. —北京:北京理工大学出版社, 2010.1

ISBN 978-7-5640-2564-9

I. 光… II. 沙… III. 光学仪器-测试技术-高等学校-教材
IV. TH740.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第134472号

出版发行/北京理工大学出版社

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/天津市建新彩色印刷有限公司

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/14.25

字 数/330千字

版 次/2010年1月第2版 2010年1月第3次印刷

印 数/5001~9000册

定 价/28.00元

责任校对/陈玉梅

责任印制/边心超

图书出现印装质量问题,本社负责调换

前言（第2版）

采用光学原理进行精密测试，一直是测试计量领域中的主要方法之一。将光学方法与光电传感、数字图像处理、激光和光纤等技术结合，用于检测光学量和非光学量，形成的近代光学测试技术，是当今发展中的一门学科研究方向。它始终是科学技术和生产发展必不可少的高新技术及其支撑技术之一。为了适应科技发展和教学改革及经济建设的需要，本教材再次改版修订。本着教材应具有科学性、先进性和普适性的原则，这次改版的教材内容调整为七章，分别是：一、基本光学测量技术；二、光学准直与自准直技术；三、光学测角技术；四、光学干涉测量技术；五、偏振光分析法测量；六、光学系统成像性能评测；七、光度测量。

与第1版的《光学测试技术》教材相比，本版教材充实了光学和光电调焦、对准和准直细分等基本测试技术，增补了光学测量的误差分析与测量不确定度评定内容；增加了双频激光测小角度、点衍射移相干涉、偏振外差干涉、光学系统成像性能数字化评测，以及辐射度与光度测量等新内容；限于学时等原因删去了“现代莫尔测量技术”一章、“光学系统的光度和色度性能测量”中的色度性能测量部分。总之，力求从全貌上更好反映基本而新近的光学测量的主要科学技术内容。

本教材在编写中，注意处理好以下几个关系：① 与基础课程和专业课程内容的衔接，如物理光学、应用光学、激光与光电检测技术、计算机应用技术等；② 在保留原版大量有特色内容的基础上，增加或点出了反映当今光学测试技术新进展的内容；③ 突出测量技术及其解决测量问题的原理和方法的同时，引导学生通过实验去掌握相关的实验操作技能，某些间接的实验性测试技术，如平行光管的调校方法不再列入本教材内容。

为使初学者掌握好光学测试技术的基本而重要的内容，建议：① 在教学内容选材上，必学第一、二章内容，选学后五章中大部分章节内容，也可结合各高校自身培养特色增补和更新个别新的内容；② 安排若干光学测试基本技能训练的实验教学环节，建议结合各高校自身的实验教学条件选用或自编实验教材大纲；③ 提倡学生自拟实验内容及其解决方案，选做本教材各章末的思考与练习题，选学推荐的参考文献内容。

本教材由沙定国主编，苏大图主审。林家明编写了第一章的第一节、第二节、第四节，以及第二章、第三章的内容，周桃庚编写了第一章第三节、第六章第四节内容，沙定国编写了第四章、第六章第一节内容，张旭升编写了第五章、第六章第二、三和五节内容，以及第一章中光电自动定焦及其基于数字图像处理测焦距的内容，陈凌峰编写了第七章内容。另外，邱丽荣编写了第二章中高精度激光束准直技术内容，何川编写了第三章中正交激光双频长基线测量光学角规的内容。

本教材是该课程组几代教师长期从事该课程教学和科研的结晶，在编写中曾得到一些研究所、工厂、院校科技人员的热情帮助，特别是主审苏大图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
2009年9月

前言（第1版）

《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、基本光学测试技术；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射法。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”历年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。“偏振光分析方法测量”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

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.....	13
第三节 光学测量误差与测量不确定度.....	19
第四节 焦距和顶焦距测量.....	32
第二章 光学准直与自准直技术.....	40
第一节 激光准直与自准直技术.....	40
第二节 自准直法测量平面光学零件光学平行度.....	47
第三节 自准直法测量球面曲率半径和焦距.....	50
第三章 光学测角技术.....	57
第一节 光学测量用的精密测角仪.....	57
第二节 测角技术的应用.....	61
第四章 光学干涉测量技术.....	74
第一节 干涉测量基础.....	74
第二节 泰曼干涉测量和斐索干涉测量.....	85
第三节 移相干涉测量.....	96
第四节 错位干涉测量.....	102
第五节 点衍射移相干涉测量.....	115
第六节 激光外差干涉测量.....	118
第五章 偏振光分析法测量.....	125
第一节 偏振光分析法基本原理.....	125
第二节 光学玻璃应力双折射测量.....	129
第三节 光学薄膜厚度和折射率测量.....	134
第四节 偏振干涉测量.....	138
第六章 光学系统成像性能评测.....	144
第一节 成像性能评测的基本理论.....	144
第二节 星点检验.....	152
第三节 分辨率测量.....	156
第四节 畸变测量.....	164

第五节 光学传递函数测量.....	170
第七章 光度测量.....	184
第一节 辐射度、光度量基础.....	184
第二节 积分球和 CIE 标准照明体	186
第三节 基本光度量的测量.....	195
第四节 光学系统透射比的测量.....	205
第五节 光学系统杂光系数的测量.....	210
第六节 照相物镜像面照度均匀性的测量.....	216

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；最后概要介绍光电对准技术，有关光电调焦的技术在第三节中介绍。

对准又称横向对准，是指一个目标与比较标志（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）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瞳中心的夹角表示。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瞳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。所以对准误差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）。图中的对准误差和调焦误差的表示方式 Δy 、 γ 和 Δx 、 ϕ 分别对应：(a) 用显微镜对准近物点；(b) 用望远镜对准远物点；(c) 用显微镜调焦近物点；(d) 用望远镜调焦远物点。

一、人眼的对准误差和调焦误差

在介绍目视观测仪器（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时，相当于直接观察目标时的这些误差。常见的人眼对准方式及其对准误差见

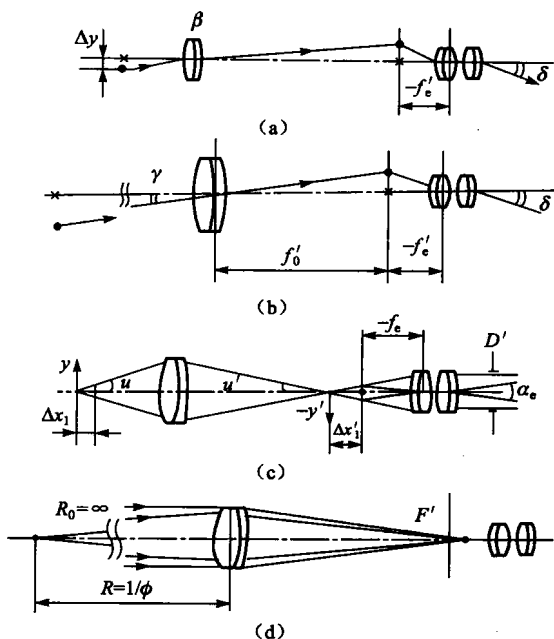
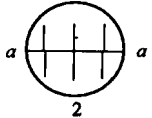
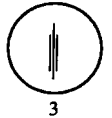
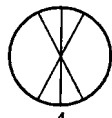
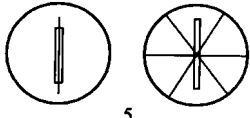


图 1-1 观察仪器物方的对准和调焦误差

- (a) 用显微镜对准近物点；(b) 用望远镜对准远物点；
(c) 用显微镜调焦近物点；(d) 用望远镜调焦远物点

表 1-1, 其最好的对准方式可做到 $10''$ 的对准误差。人眼对远处目标的调焦误差大致是 10^{-2} m^{-1} , 对近处目标的调焦误差大致是 10 mm 。以下具体分析人眼的调焦方式及其调焦误差。

表 1-1 5 种对准方式的对准误差*

对准方式	示意图	人眼对准误差 $\delta_e / ('')$	附 注
压线对准 (单线与单线重合)		60~120	两条实线重合时, 设线宽分别为 b_1 、 b_2 ($'$), 则 $\delta_e = 0.5(b_1 + b_2)$ ($'$)。实线与虚线重合时, 设虚线宽为 b_1 , $b_2 \leq b_1 < b_2 + 1$ 时, $\delta_e = 1'$
游标对准 (一直线在另一直线延长线上)		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平行细线中间)		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)		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		10	直线与狭缝严格平行

注: 表中 δ_e 指误差分布的置信区间半宽度, 按均匀分布考虑, 其标准偏差应为 $\delta_e / \sqrt{3}$ 。以后不加说明, 对准误差均指区间半宽度。参照 JJF 1001—1998 和 GJB 270—1996, 在评定测量结果时, 表中的对准误差又称之为由对准误差引起的对准扩展不确定度。以下提到的调焦误差、调焦扩展不确定度之间的关系也同上考虑。

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。

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。调焦时目标不一定恰好与标志位于同一平面上, 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_e 直接相关。通常取 $\alpha_e = 1'$ 。当人眼观察远距离处的物体时, δ_x 会很大, 这时调焦误差即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_e , 由于几何焦深造成的人眼调焦误差为

$$\phi'_1 = 1/l_2 - 1/l_1 = \alpha_e / D_e \quad (1-1)$$

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_e 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班有什么差别。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误差 ϕ'_2 由下式求得

$$\begin{aligned} \lambda/K &= D_e^2/8l_2 - D_e^2/8l_1 \\ \phi'_2 &= 1/l_2 - 1/l_1 = 8\lambda/KD_e^2 \end{aligned} \quad (1-2)$$

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

假设几何焦深和物理焦深的分布为均匀分布, 两者合成后的人眼调焦分布设为三角分布, 则由清晰度法产生的人眼调焦标准不确定度 ϕ'_u 和扩展不确定度 ϕ' 分别为

$$\begin{aligned} \phi'_u &= \sqrt{\phi'^2_1/3 + \phi'^2_2/3} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\left(\frac{\alpha_e}{D_e} \right)^2 + \left(\frac{8\lambda}{KD_e^2} \right)^2 \right]^{1/2} \\ \phi' &= \sqrt{6} \cdot \phi'_u \end{aligned} \quad (1-3)$$

式 (1-3) 中 ϕ'_u 采用的是两个分量的标准不确定度合成公式 (见第三节式 (1-43)), 式中 $\sqrt{6}$ 是三角分布的扩展因子。

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。

采用消视差法时, 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_e , 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误差, 参照式 (1-1) 可得

$$\phi' = \frac{1}{l_2} - \frac{1}{l_1} = \frac{\delta_e}{b} \quad (1-4)$$

式中, δ_e 的单位为 rad ; b 的单位为 m 。

在式 (1-3) 中代入人眼极限分辨角 $\alpha_e = 1' = 1/3438 \text{ rad}$, 眼瞳直径 $D_e = 4 \text{ mm}$, 波长 $\lambda = 0.55 \times 10^{-6} \text{ m}$, $k=6$ 后, 得知清晰度法产生的人眼调焦扩展不确定度大致为 $1.2 \times 10^{-1} \text{ m}^{-1}$ 。在式 (1-4) 中代入人眼对准误差 $\delta_e = 10'' \sim 60''$, 单眼摆动距离 $b = 4 \text{ mm}$ 后, 得知消视差法产生的人眼调焦扩展不确定度大致范围为 $7 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1}$ 。

二、望远镜和显微镜的对准误差与调焦误差

从上可见, 如果不借助光学仪器, 人眼不仅无法分辨远方物体和细小物体的细节, 而且

其直接对准和调焦的能力也是十分有限的。下面讨论人眼借助望远镜和显微镜来提高其对准与调焦准确度。

1. 对准误差

(1) 望远镜的对准误差

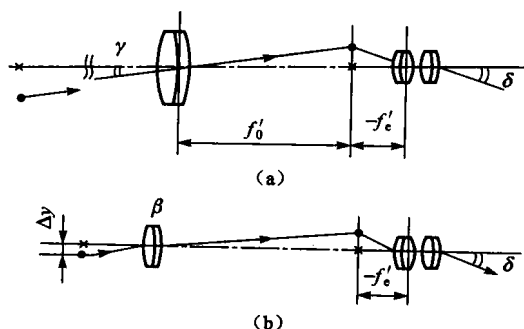
见图 1-2 (a), 设人眼直接对准的对准误差为 δ_e , 望远镜的放大率为 Γ , 通过望远镜观察时物方的对准误差设为 γ , 则有如下关系

$$\begin{aligned} f'_e \delta_e &= f'_0 \gamma \\ \gamma &= \frac{\delta_e}{\Gamma} \end{aligned} \quad (1-5)$$

例 1 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, 其对准误差 $\delta_e = 10''$, 则望远镜对准误差

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

(2) 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误差设为 Δy , 则有

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

式中, f'_e 为目镜焦距。

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

$$\Delta y = \frac{250 \delta_e}{\Gamma} \quad (1-6)$$

图 1-2 望远镜和显微镜的对准误差

(a) 望远镜的对准误差; (b) 显微镜的对准误差

眼的对准误差 (rad)。

式中, 250 为人眼的明视距离 (mm); δ_e 为人

例 2 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, $\delta_e = 10'' = 10 / 206\,265 \text{ rad}$ ($1 \text{ rad} = 206\,265''$)。则显微镜物方的对准误差

$$\Delta y = \frac{250 \times 10}{58 \times 206\,265} \text{ mm} = 0.000\,21 \text{ mm} = 0.21 \mu\text{m}$$

例 3 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 $\delta_e = 0.25'$, 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 (1-6) 消去 Δy , 即得计算放大率的公式

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

(3) 对准误差与分辨率的关系

由式(1-5)和式(1-6)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 ,对准误差就必然减小呢?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 $1/6 \sim 1/10$ (对扩展不确定度建议用 $1/6$,标准不确定度才用 $1/10$)。即

$$\gamma_{\min} = \left(\frac{1}{6} \sim \frac{1}{10} \right) \alpha, \quad \Delta y_{\min} = \left(\frac{1}{6} \sim \frac{1}{10} \right) \varepsilon \quad (1-7)$$

$$\alpha = \frac{1.02\lambda}{D}, \quad \varepsilon = \frac{0.51\lambda}{NA} \quad (\text{参看表 6-3})$$

式中, D 为望远镜的入瞳直径; NA 为显微物镜的数值孔径;当取 $\lambda = 0.56 \mu\text{m}$ 时, $\varepsilon \approx \frac{0.3}{NA} \mu\text{m}$ 。

$$\alpha = \frac{1.02 \times 0.56 \times 10^{-3}}{D \text{ mm}} \times 206265'' \approx \frac{120''}{D}。$$

用式(1-7)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 $\alpha = 120''/12 = 10''$,由式(1-5)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 $NA = 0.15$, $\varepsilon = 0.3/0.15 = 2.0 (\mu\text{m})$,由式(1-6)算出 $\Delta y = 0.21 \mu\text{m}$,而 $\Delta y_{\min} = \varepsilon/6 = 0.33 \mu\text{m}$ 。故显微镜的对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 $\frac{0.33}{\sqrt{3}} \mu\text{m} = 0.2 \mu\text{m}$ 。

2. 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' 时,对应于物方为 ϕ 。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

$$\phi_1 = \frac{\phi'_1}{\Gamma^2} = \frac{\alpha_e}{\Gamma^2 D_e}$$

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

当眼瞳直径 D_e 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_e ,上二式变为

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

式中, D 为望远镜的入瞳直径。

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

类似于式 (1-3) 中对调焦分布的讨论, 望远镜的调焦扩展不确定度 ϕ' 为

$$\phi' = \sqrt{6} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\left(\frac{\alpha_e}{\Gamma D} \right)^2 + \left(\frac{8\lambda}{KD^2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1-8)$$

其中标准不确定度为 $\phi'/\sqrt{6}$ 。

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 $D_e = 2 \text{ mm}$ 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的移动距离 (见图 1-3 (b)), 这时

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

在实验室条件下, 视场亮度有时达不到要求的 $2 \times 10^4 \text{ cd/m}^2$ 的水平, D_e 将增大。但当 $D_e \leq 3 \text{ mm}$ 时 (视场亮度大于 100 cd/m^2), 只要保持进入眼瞳的光束截面积基本不变 (当 $D_e = 2 \text{ mm}$ 时, 与图 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

$$b = (1/2) (D' - 1) \quad (1-9)$$

将式 (1-4) 的 ϕ' 换算到望远镜物方得

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

将式 (1-9) 代入上式, 得单次调焦误差为

$$\phi = \frac{2\delta_e}{\Gamma^2 (D' - 1) \times 10^{-3}} \quad (1-10)$$

式中 δ_e 由表 1-1 查出, 但单位改用 “rad”。其单次调焦的标准不确定度则为 $\phi'/\sqrt{3}$ 。

例 4 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

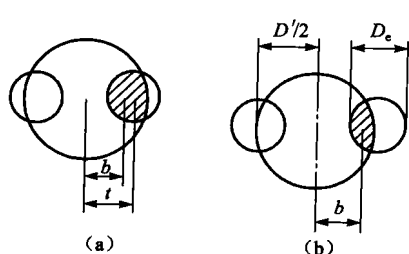


图 1-3 眼瞳在出瞳面上摆动时的有效移动距离

(a) 有效移动距离与实际移动距离; (b) 最大移动距离

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 (1-8) 得调焦误差

$$\phi = \sqrt{2} \sqrt{\left(\frac{2}{3438 \times 40 \times 0.05} \right)^2 + \left(\frac{8 \times 0.56}{6 \times 0.05^2 \times 10^6} \right)^2} \approx 5.9 \times 10^{-4} \text{ (m}^{-1}\text{)}$$

用消视差法：设对准方式是压线对准，取 $\delta_e = 1'$ ，眼瞳直径 $D_e = 2 \text{ mm}$ ， $D' = 50/40 \text{ mm} = 1.25 \text{ mm}$ 。代入式 (1-10) 得调焦误差

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

(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

$$f_{\text{eq}} = 250 / \Gamma \text{ (mm)}$$

式中， Γ 为显微镜总放大率。

显微镜物空间的折射率为 n 时，设人眼调焦误差为 ϕ'_1 ，则显微镜物方对应的调焦误差由式 (1-1) 和牛顿公式可知，为

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

若 D_e 大于出瞳直径 D' ，上式变为

$$\Delta x_1 = \frac{\alpha_e n}{D'} f_{\text{eq}}'^2 \quad (1-11)$$

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

$$D' = 2 f_{\text{eq}}' \cdot (NA) \quad (1-12)$$

代入式 (1-11) 得

$$\Delta x_1 = \frac{\alpha_e n}{2 \cdot (NA)} f_{\text{eq}}' \quad (1-13)$$

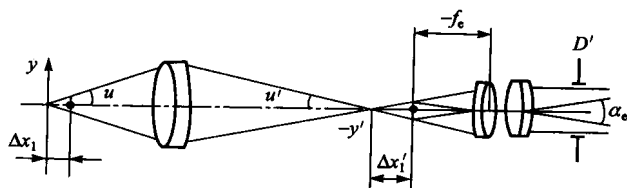


图 1-4 显微镜几何焦深 Δx_1 、分辨角 α_e 、出瞳直径 D' 和孔径角 u 的关系

如图 1-5 所示，由物理焦深产生的调焦误差，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

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

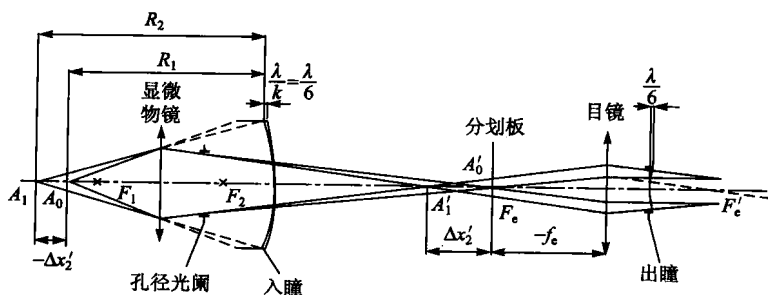


图 1-5 人眼经显微镜调焦物理焦深引入的调焦误差

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

$$\frac{R_2}{2} \sin^2 U - \frac{R_1}{2} \sin^2 U = \frac{\lambda}{6n}$$

$$\frac{\sin^2 U}{2} (R_2 - R_1) = \frac{\lambda}{6n}$$

$$\Delta x_2 = \frac{2\lambda}{6n \sin^2 U} = \frac{2n\lambda}{6(NA)^2}$$

总的调焦标准不确定度和扩展不确定度分别为

$$u_{\Delta x} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{n\alpha_e f'_{eq}}{2NA} \right)^2 + \left(\frac{2n\lambda}{6(NA)^2} \right)^2} \quad (1-14)$$

$$U_{\Delta x} = \sqrt{6} u_{\Delta x} = \sqrt{6} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{n\alpha_e f'_{eq}}{2NA} \right)^2 + \left(\frac{2n\lambda}{6(NA)^2} \right)^2} \quad (1-15)$$

消视差法 求调焦误差的方法与推导式 (1-13) 的方法相似。将式 (1-4) 换算到显微镜物方得

$$\Delta x = \phi' n f_{eq}^2 = \frac{n \delta_e}{b} f_{eq}'^2 \quad (1-16)$$

将式 (1-9) 代入上式中, 得调焦误差为

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

再应用式 (1-12), 得消视差法的调焦误差为

$$\Delta x = \frac{n\delta_e f_{eq}'^2}{NA} \frac{D'}{D' - 1} \quad (1-17)$$

其单次调焦标准不确定度则为 $\Delta x / \sqrt{3}$ 。

例 5 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扩展不确定度。

用清晰度法: 取 $\alpha_e=1'$, $\lambda=0.56\times 10^{-3}$ mm, $n=1$, 已知 $\Gamma=\beta\Gamma_e=100^\times$, $f'_{eq}=250/100$ mm = 2.5 mm, $NA=0.25$, 代入式 (1-15) 得

$$\Delta x = \sqrt{2} \sqrt{\left(\frac{1 \times 1 \times 2.5}{2 \times 3438 \times 0.25} \right)^2 + \left(\frac{2 \times 1 \times 0.56 \times 10^{-3}}{6 \times 0.25^2} \right)^2} = 4.7 \times 10^{-3} \text{ (mm)}$$

假如 $D_e=1$ mm $< D'$, 则实际的数值孔径 $NA=0.20$, 这时 $\Delta x=7.0$ μ m。

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

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

设眼瞳直径 $D_e=2$ mm。将上面各值代入式 (1-17) 得

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

根据公式 (1-8)、式 (1-10)、式 (1-15) 和式 (1-17), 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_e 大大减小, 因此, 系统出瞳直径 $D' \geq 2$ mm 时, 用消视差法准确度高; $D' \leq 1$ mm 时, 用清晰度法准确度高; 1 mm $< D' < 2$ 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、光电自动对准

光学测量技术今后发展的关键问题之一是怎样广泛有效地应用光电探测技术。光电探测不仅可代替人眼进行对准、定焦和读数, 更重要的是可以大大提高对准和定焦的准确度。另外, 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, 实现测量的自动化, 提高工作效率, 扩大仪器的应用范围。近 10 多年来, 以 CCD 传感器为代表的各种新型光电探测器发展很快, 光电对准和光电定焦已越来越多地被广泛应用于各种测量仪器中。目前, 目视光学仪器选择好的对准方式, 其对准误差通常只能做到 $1'' \sim 2''$ 和 $2 \mu\text{m} \sim 3 \mu\text{m}$ 。而采用光电对准装置后, 其对准误差则分别达 $0.01'' \sim 0.1''$ 和 $0.01 \mu\text{m} \sim 0.02 \mu\text{m}$, 比目视对准装置要好一个数量级以上。

光电对准装置可分为光电显微镜和光电望远镜两大类, 主要采用对准线条的方式。这里, 简要介绍一种光电对准的基本原理及其电子细分技术。其中, 电子细分技术是光电自准直仪中用来改善其光电对准误差的主要技术手段。

一种二维光电自准直仪的光学原理图如图 1-6 所示。位于准直物镜两个共轭焦面上相互正交的目标狭缝, 由发光二极管发射波长 660 nm 的光经传光光纤和聚光镜照明, 分别通过分束棱镜和物镜准直出射后返回, 又分别成像在与目标狭缝共轭的两个线阵 CCD 探测器上。其中所形成的一路目标狭缝像光强分布如图 1-7 所示。两路 CCD 接收信号分别经 A/D 转换成数字信号, 再经微电子电路组件精确完成数字信号处理, 由液晶屏实时显示, RS-232 接口可将两路测量数据传输到计算机分别进行 x 轴和 y 轴两个方向的对准。