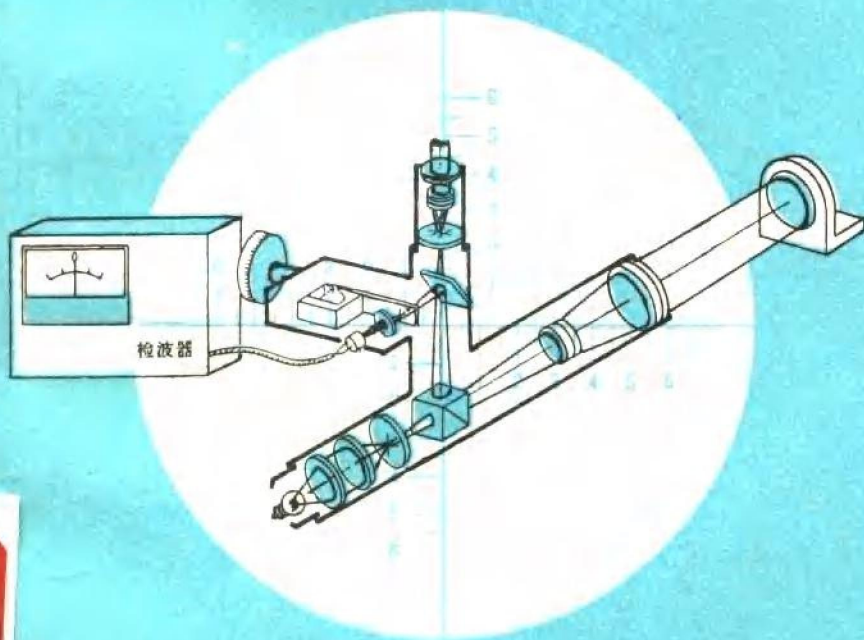


普通高等教育
理工类规划教材

光学测量

杨志文等 编著



北京理工大学出版社

光 学 测 量

杨志文 等编著

北京理工大学出版社

内 容 简 介

本书由光学测试技术和实验技术两部分组成。书中系统地介绍了光学零部件和光学系统的检测原理和方法,以及 21 个典型实验。在选材上既强调科学性和实用性,又注意吸取新的测试理论和技术,保持教材的先进性。本书按最新国际标准 ISO 编写。书后附有大量思考题和习题,以加深对光学测试理论的理解。

本书是“光学技术与光电仪器”专业的专业课教材,兼作精密仪器、检测技术及仪器仪表、光学计量测试等专业的选用教材,亦可作相关行业的科技人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

光学测量/杨志文等编著. —北京:北京理工大学出版社,1995
ISBN 7-81045-038-7

I. 光… I. 杨… III. 光学-测量-高等学校-教材 IV. 0432.2
中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 10245 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)

各地新华书店经售

北京地质印刷厂印刷

*

850×1168 毫米 32 开本 13.75 印张 354 千字

1995 年 8 月第一版 1995 年 8 月第一次印刷

印数:1—1600 册 定价:9.50 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,建立了由主审人审查,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。

本教材由韩昌元研究员主审,经中国兵器工业总公司光学技术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

1994年9月

前 言

本教材是按光学技术与光电仪器专业所设光学测量课的教学大纲要求编写的,并经高等工业学校光学技术与光电仪器专业教学指导委员会审定通过。

教材是编著者积历次编写《光学测量》与《光学测量实验》讲义的经验,总结在本学科领域长期从事教学、科研的成果,同时广泛吸取国内外最新文献资料的基础上完成的。编写中注意教材内容的先进性和实用性、具有一定的广度和深度。为突出重点、压缩篇幅,书里常略去一些中间叙述过程,也为读者深入思考留有余地。在章节划分上,坚持以测试技术为主线,并兼顾测试对象。这样安排有利于学生分析问题、解决问题能力的培养,既适应光学测量课程教学要求,又可满足科研、生产实践的需要。

本书由光学测试技术与实验技术两部分组成,依次介绍光学测量基础知识、光学玻璃主要性能测量、光学零部件的基本量测量、光学系统特性参数的检测以及象质检验与评价方法;并介绍了21个典型实验,各章及各实验题目均列有一定数量的思考题和习题。

光学测量是研究光学量的测试和非光学量以光学方法检测的一门学科。其理论基础是应用光学、物理光学以及误差理论与精度分析,并应用光电技术及微机技术等有关知识。它是一门专业课,与光学设计、光学工艺等课程密切相关,并同时对学生能力的培养和实验技能起着十分重要的作用。

本教材由杨志文主编,王文生、王志坚等参编。由长春光机所国家光学机械产品质量监督检测中心主任韩昌元研究员主审。其

中,杨志文编写第三、六、七章和 § 1.4、§ 4.3、§ 4.4、§ 5.1、§ 5.2、§ 5.3、全部实验技术及思考题和习题;王文生编写第二章和 § 4.1 § 4.2、§ 5.4;王志坚编写 § 1.1 至 § 1.3;韩昌元等同志参编 § 3.1、§ 7.2 中部分内容。

本教材在撰写过程中得到许多单位和个人的大力支持与帮助;主审韩昌元研究员和本书责任编辑蔡立教授对本书编写给予热情的指导;中国兵器工业总公司教材编审室宋筱平同志和北京理工大学出版社郑锡琏编审以及有关领导,对本书的审定、出版付出了艰辛的劳动,在此表示衷心感谢。

由于水平有限,书中错误及不足之处在所难免,敬请各位读者批评指正。

编著者

1994年7月

目 录

第一章 光学测量基础

- § 1.1 测量误差与数据处理 (1)
- § 1.2 目视光学仪器的对准误差和调焦误差 (13)
- § 1.3 光学测量仪器的基本部件 (16)
- § 1.4 准直检测新技术 (21)

第二章 光学玻璃主要光学性能测量

- § 2.1 光学玻璃折射率与色散的测量 (32)
 - 2.1.1 V 棱镜法 (33)
 - 2.1.2 最小偏向角法 (39)
- § 2.2 光学玻璃的双折射测量 (42)
 - 2.2.1 干涉色法 (43)
 - 2.2.2 四分之一波片法 (45)
- § 2.3 有色光学玻璃光谱特性的测量 (49)

第三章 光学零部件的基本量测量

- § 3.1 光学面形偏差的检测 (56)
 - 3.1.1 斐索平面干涉仪检测面形偏差 (57)
 - 3.1.2 斐索球面干涉仪检测面形偏差 (59)
 - 3.1.3 刀口阴影法检测面形偏差 (66)
 - 3.1.4 全息干涉法检测面形偏差 (74)
 - 3.1.5 超精镜面的干涉检测方法 (78)
- § 3.2 球面曲率半径的测量 (83)
 - 3.2.1 机械法 (83)
 - 3.2.2 自准球径仪法 (87)
 - 3.2.3 自准望远镜测量法 (89)
 - 3.2.4 平行板剪切干涉法 (94)

§ 3.3	平面光学零件光学不平行度测量	(97)
3.3.1	自准直法测光学不平行度	(98)
3.3.2	等厚干涉法测光学不平行度	(104)
3.3.3	激光点光源干涉法测不平行度	(110)

第四章 光学系统特性参数检测

§ 4.1	显微系统特性参数检测	(115)
4.1.1	显微系统放大率的检测	(115)
4.1.2	显微镜物镜的数值孔径检测	(117)
§ 4.2	望远系统光学特性参数的检测	(119)
4.2.1	视度检测	(119)
4.2.2	视差检测	(124)
4.2.3	视放大率的检测	(129)
§ 4.3	照相物镜光学特性参数检测	(131)
4.3.1	相对孔径的检测	(132)
4.3.2	有效光阑指数的检测	(134)
4.3.3	渐晕系数的检测	(137)
4.3.4	象面照度均匀度的检测	(139)
4.3.5	变焦距照相物镜象面稳定性检测	(142)
§ 4.4	焦距和顶焦距的测量	(145)
4.4.1	放大率法	(147)
4.4.2	附加透镜法	(150)
4.4.3	附加接筒法	(151)
4.4.4	精密测角法	(153)
4.4.5	平面光学元件最小焦距的测量	(154)

第五章 光学系统象质检验与评价

§ 5.1	星点检验	(160)
§ 5.2	分辨率检测	(171)
§ 5.3	物镜几何象差检测	(187)
5.3.1	哈特曼法检测几何象差	(187)
5.3.2	摄影物镜畸变检测	(195)
5.3.3	刀口阴影法检测几何象差	(204)
§ 5.4	物镜波象差检测	(217)

5.4.1	泰曼—格林干涉仪检测波象差	(217)
5.4.2	剪切干涉法检测波象差	(224)
5.4.3	波面位相自动探测技术	(232)
5.4.4	干涉图形的自动判读	(241)
第六章 光学系统杂光与透射比检测		
§ 6.1	光学系统的杂光	(248)
§ 6.2	杂光系数的检测	(253)
§ 6.3	杂光扩散函数(GSF)的检测	(259)
§ 6.4	检测条件的标准化	(263)
§ 6.5	光学系统的透射比	(268)
§ 6.6	光学系统透射比的检测	(274)
§ 6.7	照相物镜色贡献指数(CCI)的检测	(281)
第七章 光学传递函数测量		
§ 7.1	光学传递函数测量基础	(290)
7.1.1	光学传递函数的基本概念	(290)
7.1.2	光学传递函数测量概述	(301)
§ 7.2	光学传递函数的扫描测量法	(305)
7.2.1	光学傅里叶分析法	(305)
7.2.2	光电傅里叶分析法	(311)
7.2.3	数字傅里叶分析法	(317)
§ 7.3	用光学传递函数评价象质	(325)
7.3.1	光学传递函数的表示及评价方法	(325)
7.3.2	光学传递函数与其它象质检测的关系	(334)
光学测量实验技术		
实验一	平行光管调校	(339)
实验二	准直检测的新方法	(345)
实验三	V 棱镜折光仪测折射率与色散	(348)
实验四	最小偏向角法测玻璃折射率	(354)
实验五	光学零件曲率半径测量	(357)
实验六	放大率法测量焦距和顶焦距	(363)
实验七	平面光学元件的光学不平行度测量	(367)
实验八	激光点光源干涉法测棱体转镜的角差与棱差	(372)

实验九	泰曼干涉仪检测双象差	(374)
实验十	平面干涉仪检测面形偏差	(377)
实验十一	激光球面干涉仪检测面形偏差	(379)
实验十二	全息干涉法检测面形偏差	(382)
实验十三	刀口阴影法检验面形偏差	(384)
实验十四	望远镜的视度与视差检测	(388)
实验十五	光学系统分辨率检测	(392)
实验十六	光学系统的星点检验	(395)
实验十七	刀口阴影法检测几何象差	(397)
实验十八	泰曼干涉仪检测波象差	(403)
实验十九	光学系统透射比的测量	(406)
实验二十	光学系统杂光系数测量	(409)
实验二十一	光学传递函数测量(光电傅氏分析法)	(412)
习题与思考题	(415)
参考文献	(425)

第一章 光学测量基础

§ 1.1 测量误差与数据处理

一、测量的概念及方法

测量是日常生活中经常遇到的现象。为使测量有一个规范化的定义,首先要明确以下概念。

(1) 计量单位:有明确定义和名称并命其数值为 1 的固定的量。

国际上对七种基本物理量和有专门名称的导出物理量规定了基本单位。表 1-1 列出基本物理量的基本单位。

表 1-1 国际单位制的基本单位

量的名称	单位名称	单位符号
长 度	米	m
质 量	千克(公斤)	kg
时 间	秒	s
电 流	安(培)	A
热力学温度	开(尔文)	K
物质的量	摩(尔)	mol
发光强度	坎(德拉)	Cd

此外尚有辅助单位,见表 2-2

表 2-2 国际单位制的辅助单位

量的名称	单位名称	单位符号
平面角	弧 度	rad
立体角	球 面 度	Sr

国际单位制中具有专门名称的导出单位中,与光学测量联系紧密的有两种,见表 3-3。

表 3-3 国际单位制中光学量的导出单位

量的名称	单位名称	单位符号
光通量	流(明)	lm
光照度	勒(克斯)	lx

(2)量值:数值和计算单位的乘积。

测量:为确定被测对象的量值而进行的实验过程。

测试:具有试验性质的测量。

光学测量:对光学材料、零件及系统的参数和性能的测量。

测量方法可以从不同角度进行分类。最基本的是将其分为两类,即直接测量和间接测量。

直接测量:无需对被测的量与其它实测的量进行函数关系的辅助计算,而直接得到被测量值的测量。

间接测量:直接测量的量与被测的量之间有已知函数关系,从而得到该被测量的测量。

二、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 。

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

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,按某确定规律所引起的误差。

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(误差的大小和符号未知)。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)精密度的定义:由偶然误差引起的测得值和真值的偏离程度。

(3)准确度的定义: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 1-1 所示

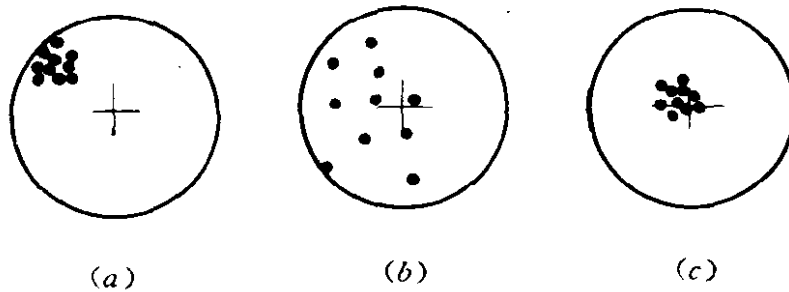


图 1-1 弹痕精度图

(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

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

式中 d_i —— 测得值与被测量真值之差。

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征:

单峰性: 绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的概率大。

对称性: 绝对值相等的正误差与负误差出现的概率相等。

有界性: 在一定的测量条件下, 偶然误差的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

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

服从正态分布的偶然误差, 其概率密度函数

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

式(1-4)又称高斯曲线, 图 1-2 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

$$\Delta = 3\sigma_0 \quad (1-5)$$

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, 曲线越高且狭窄, 偶然误差的分布越密集, 表明测量的精密度越高; 反之, σ_0 越大, 曲线越低且宽展, 偶然误差分布越稀疏, 精密度就越低。所以, σ_0 可作为测量列中单次测量不可靠性的评定标准。

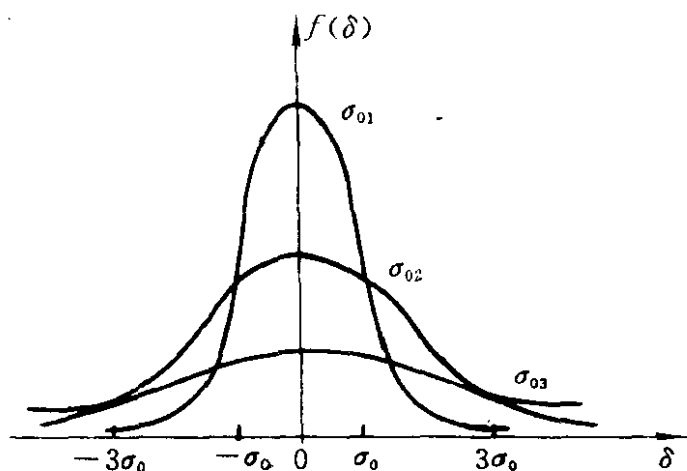


图 1-2 正态分布曲线

(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是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 1-3 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

$$\Delta = \sqrt{3} \sigma_0 \quad (1-6)$$

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。

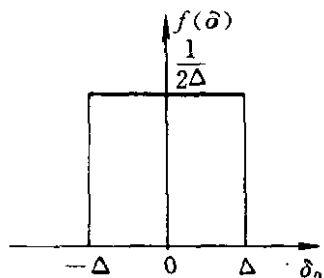


图 1-3 均匀分布的概率密度曲线

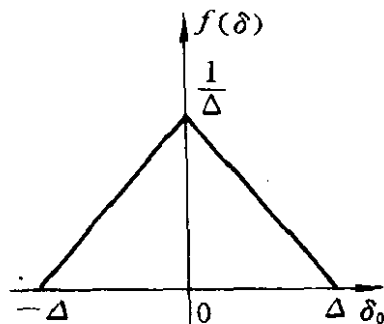


图 1-4 三角形分布的概率密度曲线