



高等学校电子信息类“十二五”规划教材

# 光学测量技术

主编 周言敏 李建芳 王君



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

高等学校电子信息类“十二五”规划教材

# 光学测量技术

主编 周言敏 李建芳 王 君

西安电子科技大学出版社

## 内 容 简 介

本书由光学测量技术和光学测量实验两部分组成。主要包括光学测量基础知识、常用光学测量仪器及基本部件、光学玻璃的测量、光学零件的测量、光学系统特性参数的测量、光学系统光度特性的测量、光学系统像质检验与评价,以及7个典型光学测量实验。在选材上既强调科学性、实用性,又注意吸取大量新的测试理论和技术,保持教材的先进性。每章后面附有大量思考题和习题,以加深和巩固读者对光学测量理论的理解及应用。

本书可作为应用型本科及高职院校光电专业的专业课教材,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,也可作为相关行业岗位培训教材及科技人员的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

光学测量技术/周言敏,李建芳,王君主编.

—西安:西安电子科技大学出版社,2013.10

高等学校电子信息类“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5606-3214-8

I. ① 光… II. ① 周… ② 李… ③ 王… III. ① 光学测量—高等学校—教材  
IV. ① TB96

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 233659 号

策 划 邵汉平

责任编辑 邵汉平 段 蕾

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2013年10月第1版 2013年10月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 12.5

字 数 292千字

印 数 1~3000册

定 价 24.00元

ISBN 978-7-5606-3214-8/TB

**XDUP 3506001-1**

\*\*\* 如有印装问题可调换 \*\*\*

# 前 言

近年来,光学制造业的迅猛发展,对光学测量技术提出了新的要求,而干涉技术、光电技术和激光技术的快速发展又为光学测量技术的提高提供了很好的条件。光学测量技术的发展对从事光学测量的人员也提出了较高的要求,高素质的应用型职业技能人才的需求量不断加大,与之对应,在高职院校和应用型本科院校开设光学测量技术课程的学校也越来越多。但是,目前适用于上述院校的光学测量教材却不多。为了满足教学和生产实践需要,我们组织了实践经验和教学经验非常丰富的教师编写了本教材。

本教材以就业为导向,以能力培养为目标,按照高职院校和应用型本科院校对该课程的课程标准,并参照相关国家职业标准及有关行业的职业技能鉴定规范编写而成。编写中特别注意了教材内容的先进性和实用性,具有一定的深度和广度。在章节划分上,坚持以测量技术为主线,并兼顾测量对象。这样安排有利于培养学生分析问题、解决问题的能力,既适应光学课程的教学要求,又可满足科研、生产实践的需要。

本书由光学测量技术与光学测量实验两部分组成,依次介绍了光学测量基础知识、常用光学测量仪器及基本部件、光学玻璃的测量、光学零件的测量、光学系统特性参数的测量、光学系统光度特性的测量及光学系统像质检验与评价,并安排了7个典型实验,各章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、误差理论与精度分析、光电技术及计算机技术等有关知识。它是一门专业课,与光学设计、光学加工工艺及光学薄膜等课程密切相关,同时对培养学生的研究能力和实验技术起着十分重要的作用。

本教材由周言敏、李建芳和王君主编。其中,周言敏编写了第1、2、4、7章,全部实验技术,思考题与习题;李建芳编写了第5、6章;王君编写了第3章。

本教材在撰写过程中得到重庆电子工程职业学院王正勇教授、彭克发教授,天津大学王晋疆教授及重庆傲飞光学薄膜有限公司、国营第三零八厂、重庆天缔光电有限公司、重庆莱特光学仪器公司、河南工业职业技术学院光电工程系等单位领导的大力支持和指导,在此对他们和为本教材的出版付出艰辛劳动的相关人员表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中错误及不足之处在所难免,敬请各位读者批评指正。

编 者

2013年6月

# 目 录

|                            |    |
|----------------------------|----|
| <b>第 1 章 光学测量基础知识</b>      | 1  |
| 1.1 测量的基本知识                | 1  |
| 1.1.1 测量的概念                | 1  |
| 1.1.2 基本物理量及其单位            | 1  |
| 1.1.3 测量方法的组成              | 2  |
| 1.1.4 测量的分类                | 3  |
| 1.2 测量误差及数据处理              | 4  |
| 1.2.1 量的真值和残值              | 4  |
| 1.2.2 测量误差的来源和分类           | 4  |
| 1.2.3 偶然误差的评价              | 4  |
| 1.2.4 算术平均值和残差             | 5  |
| 1.2.5 算术平均值的标准偏差           | 6  |
| 1.2.6 不确定度                 | 6  |
| 1.2.7 粗大误差的判断              | 7  |
| 1.2.8 有效数字                 | 7  |
| 1.2.9 等精度测量数据处理步骤          | 7  |
| 1.3 人眼及目视光学仪器的瞄准误差         | 8  |
| 1.3.1 人眼在测量中带来的瞄准误差        | 8  |
| 1.3.2 人眼通过目视光学仪器观察时的瞄准误差   | 8  |
| 1.4 光电瞄准技术                 | 10 |
| 1.4.1 光电自动对准               | 10 |
| 1.4.2 光电自动定焦               | 12 |
| 本章小结                       | 14 |
| 思考题与习题                     | 14 |
| <b>第 2 章 常用光学测量仪器及基本部件</b> | 16 |
| 2.1 平行光管                   | 16 |
| 2.1.1 平行光管的光学原理及主要结构       | 17 |
| 2.1.2 平行光管的调校              | 19 |
| 2.2 自准直目镜                  | 22 |
| 2.2.1 高斯式自准直目镜             | 23 |
| 2.2.2 阿贝式自准直目镜             | 23 |
| 2.2.3 双分划板式自准直目镜           | 24 |
| 2.2.4 自准直望远镜和显微镜           | 26 |

|                            |           |
|----------------------------|-----------|
| 2.3 测微目镜 .....             | 27        |
| 2.3.1 测微目镜的细分原理 .....      | 27        |
| 2.3.2 几种常见的测微目镜 .....      | 28        |
| 2.4 光具座 .....              | 32        |
| 2.5 测角仪器 .....             | 35        |
| 2.5.1 精密测角仪 .....          | 35        |
| 2.5.2 经纬仪 .....            | 39        |
| 2.6 积分球和球形平行光管 .....       | 42        |
| 2.6.1 积分球 .....            | 42        |
| 2.6.2 球形平行光管 .....         | 44        |
| 2.7 单色仪 .....              | 45        |
| 2.7.1 棱镜式单色仪的工作原理 .....    | 45        |
| 2.7.2 单色仪主要零件的要求 .....     | 46        |
| 2.7.3 单色仪的主要光学性能 .....     | 46        |
| 2.7.4 常用单色仪简介 .....        | 47        |
| 2.8 干涉仪 .....              | 49        |
| 2.8.1 有标准镜的干涉仪 .....       | 49        |
| 2.8.2 无标准镜的干涉仪 .....       | 54        |
| 2.8.3 干涉图的分析 .....         | 59        |
| 2.9 波面相位光电检测技术 .....       | 59        |
| 2.9.1 移相干涉术 .....          | 60        |
| 2.9.2 锁相干涉术 .....          | 62        |
| 2.9.3 外差干涉术 .....          | 63        |
| 本章小结 .....                 | 64        |
| 思考题与习题 .....               | 65        |
| <b>第3章 光学玻璃的测量</b> .....   | <b>66</b> |
| 3.1 光学玻璃折射率与色散的测量 .....    | 66        |
| 3.1.1 折射率的概念及影响因素 .....    | 66        |
| 3.1.2 折射率和色散的测量 .....      | 68        |
| 3.2 光学玻璃的双折射测量 .....       | 73        |
| 3.2.1 应力与双折射 .....         | 73        |
| 3.2.2 双折射的测量方法 .....       | 74        |
| 3.3 光学玻璃光学均匀性的测量 .....     | 78        |
| 3.3.1 产生光学不均匀的原因 .....     | 78        |
| 3.3.2 检查光学均匀性的方法 .....     | 78        |
| 3.4 光学玻璃光吸收系数的检测 .....     | 83        |
| 3.4.1 无色光学玻璃光吸收系数的定义 ..... | 83        |
| 3.4.2 测量原理 .....           | 84        |
| 3.4.3 检测时需要考虑的几个问题 .....   | 84        |
| 3.4.4 测量仪器 .....           | 85        |
| 3.4.5 对试样的要求和几点说明 .....    | 86        |



|                              |            |
|------------------------------|------------|
| 3.5 有色光学玻璃光谱特性的测量 .....      | 86         |
| 3.5.1 离子着色选择吸收玻璃的光谱特性 .....  | 87         |
| 3.5.2 硒镉着色玻璃的光谱特性 .....      | 87         |
| 3.5.3 中性玻璃的光谱特性 .....        | 88         |
| 3.5.4 光谱特性的测量 .....          | 89         |
| 本章小结 .....                   | 91         |
| 思考题与习题 .....                 | 92         |
| <b>第4章 光学零件的测量</b> .....     | <b>93</b>  |
| 4.1 光学面形偏差的检验 .....          | 93         |
| 4.1.1 球面光学零件面形的检验 .....      | 94         |
| 4.1.2 非球面检验 .....            | 99         |
| 4.2 曲率半径的测量 .....            | 102        |
| 4.2.1 机械法 .....              | 102        |
| 4.2.2 自准直法 .....             | 104        |
| 4.3 平面光学零件角度的测量 .....        | 106        |
| 4.3.1 测角仪法 .....             | 106        |
| 4.3.2 比较测量法 .....            | 107        |
| 4.3.3 干涉法 .....              | 108        |
| 4.4 平面光学零件平行度的测量 .....       | 108        |
| 4.4.1 自准直法测玻璃平板光学平行度 .....   | 109        |
| 4.4.2 反射棱镜光学平行度的测量 .....     | 109        |
| 4.5 焦距和顶焦距的测量 .....          | 112        |
| 4.5.1 精密测角法 .....            | 113        |
| 4.5.2 放大率法 .....             | 114        |
| 4.5.3 附加透镜法 .....            | 116        |
| 4.5.4 附加接筒法 .....            | 117        |
| 本章小结 .....                   | 118        |
| 思考题与习题 .....                 | 118        |
| <b>第5章 光学系统特性参数的测量</b> ..... | <b>121</b> |
| 5.1 望远系统特性参数的测量 .....        | 121        |
| 5.1.1 望远系统视度的测量 .....        | 121        |
| 5.1.2 望远系统视差的测量 .....        | 124        |
| 5.1.3 望远系统视放大率的测量 .....      | 127        |
| 5.2 显微系统特性参数的测量 .....        | 128        |
| 5.2.1 显微系统视放大率的测量 .....      | 128        |
| 5.2.2 显微镜物镜数值孔径的测量 .....     | 130        |
| 5.3 照相物镜特性参数的测量 .....        | 132        |
| 5.3.1 照相物镜相对孔径的测量 .....      | 132        |
| 5.3.2 照相物镜有效光阑指数的测量 .....    | 134        |
| 本章小结 .....                   | 136        |
| 思考题与习题 .....                 | 136        |

第 6 章 光学系统光度特性的测量 ..... 137

6.1 光学系统透射比的测量 ..... 137

6.1.1 透射比概述 ..... 137

6.1.2 望远系统透射比的测量 ..... 138

6.1.3 照相物镜透射比的测量 ..... 140

6.1.4 照相物镜透射比测量的条件和注意事项 ..... 142

6.2 光学系统杂光系数的测量 ..... 142

6.2.1 杂光系数概述 ..... 142

6.2.2 杂光系数的度量 ..... 143

6.2.3 杂光系数的测量 ..... 144

6.3 照相物镜渐晕系数的测量 ..... 148

6.3.1 照相物镜渐晕系数概述 ..... 148

6.3.2 照相物镜渐晕系数的测量方法 ..... 148

6.4 像面照度均匀度的测量 ..... 150

本章小结 ..... 152

思考题与习题 ..... 152

第 7 章 光学系统像质检验与评价 ..... 154

7.1 星点检验 ..... 154

7.1.1 星点检验原理 ..... 154

7.1.2 星点检验装置 ..... 156

7.1.3 星点检验的判别技术 ..... 158

7.2 分辨率检测 ..... 162

7.2.1 衍射受限系统的分辨率 ..... 162

7.2.2 分辨率图案 ..... 163

7.2.3 望远系统分辨率检测 ..... 165

7.2.4 照相物镜分辨率检测 ..... 167

7.2.5 显微镜分辨率检测 ..... 169

7.2.6 低对比分辨率检测 ..... 169

本章小结 ..... 171

思考题与习题 ..... 171

光学测量实验 ..... 173

实验一 平行光管调校 ..... 173

实验二 V 棱镜折光仪测量折射率和色散 ..... 176

实验三 光学零件曲率半径测量 ..... 180

实验四 放大率法测量焦距和顶焦距 ..... 183

实验五 激光球面干涉仪检测面形偏差 ..... 185

实验六 望远镜的视度与视差检测 ..... 187

实验七 光学系统分辨率检测 ..... 189

参考文献 ..... 192



# 第 1 章 光学测量基础知识

本章首先介绍光学测量的基础知识、误差来源及数据分析的方法，其次重点介绍人眼的特性及目视光学仪器的瞄准误差，最后介绍目前较新的光电瞄准技术。

## 教学目的

1. 掌握光学测量的基本概念和测量方法的组成要素。
2. 掌握测量的分类及基本物理量和单位。
3. 掌握测量过程中误差来源分析和测量结果的数据处理方法。
4. 掌握人眼及目视光学仪器的瞄准误差。
5. 掌握光电瞄准技术的原理及方法。

## 技能要求

1. 能够根据测量目的，合理选择测量方法。
2. 掌握等精度测量的数据处理方法。
3. 掌握目视光学仪器瞄准误差的计算方法。
4. 掌握光电瞄准技术的基本原理。

## 1.1 测量的基本知识

### 1.1.1 测量的概念

测量就是将被测量与一个作为计量单位的标准量进行比较，并确定出被测量是计量单位的几倍或几分之几的过程。

若以  $L$  表示被测量， $E$  表示计量单位，则比值为

$$q = \frac{L}{E} \quad (1-1)$$

于是，只要读出  $q$  值，就可得出测量结果：

$$L = qE \quad (1-2)$$

### 1.1.2 基本物理量及其单位

物理量是物理学中量度物体属性或描述物体运动状态及其变化过程的量，它们通过物理定律及其方程建立相互间的关系。目前，在实践中引入的物理量的量纲是由国际单位制规定的七种基本物理量导出的。国际单位制的基本物理量有长度、质量、时间、电流、热力学温度、物质的量和发光强度，见表 1-1。

在国际单位制的有专门名称的导出单位中，与光学测量紧密相关的有两种，即光通量和光照度，见表 1-2。

表 1-1 国际单位制的基本物理量及其单位名称和单位符号

| 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   |

表 1-2 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   |

1.1.3 测量方法的组成

测量方法是对特定的测量对象测量某一被测量时，参与测量过程各组成因素和测量条件的总和。它包括以下几个方面：

(1) 测量目的、被测对象和被测量：测量目的是指最终要求得的那个量；被测量是指直接与标准量进行比较的量，它本身也可以是测量目的；被测对象是指被测量的载体。以上三者都是确定测量方法的依据。

(2) 标准量系统：是指用以体现测量单位的物质标准，用来与被测量进行比较，以便求得被测量。

(3) 定位系统：用以确定被测量的合理位置。

(4) 瞄准系统：用以确定被测量相对于标准量的位置，以便进行比较。

(5) 显示系统：将测得量进行运算，并显示出测量结果或作为控制信号的输出。

(6) 测量条件：任何测量都是在一定的条件下进行的，如环境、温度、湿度、压力、时间等。

由此可知，在拟定了测量方案之后，完成一个测量过程通常需要经过以下几个步骤：

(1) 定位。定位就是按测量原则调整标准量和被测量至合适的位置。由于定位对测量原则的偏离将造成测量误差，因此，应设计、选择合适的定位方法。

(2) 瞄准。为了进行比较，定位之后，必须使被测量的一个端点或该端点的像与标准量的某一位置重合，称为瞄准。瞄准是测量过程中基本的步骤之一，只有瞄准后，才能由标准量上读出被测量的大小。瞄准产生的误差将直接影响测量的精度，为了减小瞄准误差，必须要设计较好的瞄准方法。

(3) 读数。瞄准之后，我们并没有得到关于被测量的数量概念，这只有在对两个瞄准位置读数(在标准量上)之后才有可能。读数是将瞄准位置用数字形式确定下来，就是瞄准位置的数字表现形式。读数也会产生误差，同样影响测量的精度，因此，还必须研究提高

读数精度的措施。

(4) 数据处理。得到测量的原始数据之后,就可求得被测量的大小,并可按测量原理方程式求得测量目的。同时,还要考虑到测量环境对测量结果的影响而进行必要的修正。最后,依据测量误差理论给出测量结果。目前,在一些自动化检测设备中,读数和数据处理都由仪器自动完成,并显示最后的测量结果,或作为控制信号输出。

#### 1.1.4 测量的分类

对测量的分类可以从以下几个不同的角度进行。

##### 1. 按获得测量结果的方式分类

从获得测量结果的方式来分,测量可分为直接测量和间接测量。

直接测量:测量目的就是被测量,此时,测量目的直接与标准量进行比较,从而求得测量目的的大小。

间接测量:在这种测量中,被测量不是测量目的。测量目的的大小,是通过与它有一定关系的被测量的测量,而间接地按已知的函数关系求得的。

##### 2. 按比较方式分类

按照比较方式的不同,测量可分为绝对测量和相对测量。

绝对测量:通过与绝对标准量进行比较而实现的测量称为绝对测量。

相对测量:通过与相对标准量进行比较而实现的测量称为相对测量。相对测量直接得到的是对标准值的偏差。

##### 3. 按接触形式分类

按照接触形式的不同,测量可分为接触测量和非接触测量。

接触测量:测量时,瞄准是通过量具或者量仪的触端与被测对象发生机械接触来实现的。

非接触测量:测量时,瞄准不是通过量具或量仪与被测对象发生机械接触,而是通过与其它介质(光、气流等)接触来实现的,或者说测量过程中的瞄准是非机械式的。

##### 4. 按测量目的的数目多少分类

按照测量目的的数目的不同,测量可分为独立测量和组合测量。

独立测量:只有一个量作为测量目的的测量。一般说来,它的测量原理可用一个方程式来表示。

组合测量:测量目的为两个及两个以上的测量。此时,测量原理必须用方程组来表示。

##### 5. 按测量时所处的条件分类

按照测量时所处条件的不同,测量可分为等精度测量和非等精度测量。

等精度测量:在同一条件下进行的一系列重复测量,称为等精度测量。如每次测量都使用相同的方法、相同的仪器、在同样的环境下进行,而且每次都以同样的细心和注意程度来工作等。

非等精度测量:在多次测量中,进行每一次测量时,若对测量结果精确度有影响的一切条件不能完全维持不变,则所进行的一系列重复测量称为非等精度测量。

##### 6. 按实用情况分类

按实用情况的不同,测量可分为实验室测量和技术测量。

实验室测量：这类测量需要考虑测量误差的数值，其任务是给出测量误差的值。

技术测量：这类测量只需要考虑误差的上限值，而不考虑误差的具体值，其任务是给出测量目的的最佳值及误差的极限值。

除了上述对测量进行的分类外，还可按测量时被测量所处的状态，将测量分为静态测量和动态测量，这里不再详述。

## 1.2 测量误差及数据处理

### 1.2.1 量的真值和残值

量的真值是指一个量在被测量时，该量本身所具有的真实大小。量的真值是一个理想概念，一般来说真值是不知道的。在实际测量中，常用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，就是满足规定准确度的用来代替真值使用的量值。

残值也叫残差，是指测量列中的一个测得值  $a_i$  和该列的算术平均值  $\bar{a}$  之间的差值  $v_i$ ，即

$$v_i = a_i - \bar{a} \quad (1-3)$$

### 1.2.2 测量误差的来源和分类

总的来说，测量误差产生的原因可归纳为以下几种：

(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、照明等与要求的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。

有时候被测件本身的变化也可造成误差。

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(大小和符号已知)和未定系统误差。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) 偶然误差：也称随机误差，是指在实际测量条件下，多次测量同一量时，误差的绝对值和符号以不可预定的方式变化的误差。但偶然误差就整体而言是符合统计规律的。

(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当删除。

### 1.2.3 偶然误差的评价

对于偶然误差的评价，由于单个误差的出现没有规律性，因此采用标准偏差、平均误

差、或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  $\sigma_0$  是表征同一被测量值的  $n$  次测量所得结果分散性的参数，按下式计算：

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}} \quad (1-4)$$

式中： $d_i$  为测量得值与被测量真值之差。

极限误差是指各误差实际上不应超过的界限。极限误差由  $\pm t\sigma_0$  确定， $t$  为系数，它由偶然误差分布决定。偶然误差主要有以下三种分布。

### 1. 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。

正态分布具有如下特征：

对称性：绝对值相等的正误差和负误差的概率相等。

单峰性：绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的概率大。

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

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i = 0 \quad (1-5)$$

正态分布的标准偏差  $\sigma_0$  和极限误差  $\Delta$  的关系为

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

### 2. 等概率分布

等概率分布又称均匀分布，偶然误差在区间  $[-\Delta, +\Delta]$  内各处出现的概率相等，区间外概率为零。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，像均是清晰的，超出景深范围就不清晰了，所以调焦误差服从等概率分布。

等概率分布的标准偏差  $\sigma_0$  和极限误差  $\Delta$  的关系为

$$\Delta = \sqrt{3}\sigma_0 \quad (1-7)$$

### 3. 三角形分布

概率密度函数曲线呈三角形。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。

三角形分布的标准偏差  $\sigma_0$  和极限误差  $\Delta$  的关系为

$$\Delta = \sqrt{6}\sigma_0 \quad (1-8)$$

## 1.2.4 算术平均值和残差

对某一量进行一系列等精度测量，测得值为

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

取算术平均值, 有

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \cdots + x_n) \quad (1-9)$$

此时式(1-3)中的  $v_i$  应为偶然误差  $\delta_i$ , 由该式求和得

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

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

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

可见, 当测量次数  $n$  无限增大时, 算术平均值趋于真值。当测量次数有限时, 可把算术平均值近似地视为真值。因此, 测量中用算术平均值表征真值。

各测得值与算术平均值之差代表残差。残差有以下两个性质:

(1) 当  $n \rightarrow \infty$  时, 残差代数和为零, 即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n v_i = 0 \quad (1-10)$$

(2) 残差的平方和为最小, 即

$$\sum_{i=1}^n v_i^2 = \min \quad (1-11)$$

### 1.2.5 算术平均值的标准偏差

真值往往是无法确切知道的, 只能用算术平均值代替真值, 又由于测量次数总是有限的, 因此标准偏差只能由残差计算出的所谓标准偏差来估计。

在有限次数的测量中, 用残差求出的  $\sigma$  估计  $\sigma_0$  的计算公式如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} \quad (1-12)$$

算术平均值的标准偏差最佳估计值  $\sigma_{\bar{x}}$  为

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1-13)$$

### 1.2.6 不确定度

不确定度  $s$  是根据测量误差表征待测量的真值处于某个量值范围内。精确计算不确定度是一个相当复杂的问题, 因为有些值只能用经验或依靠其它已知条件估算。为简便起见, 可以用算术平均值标准偏差估计值乘某一系数来估算, 即

$$s = k\sigma_x \quad (1-14)$$

其中,  $k$  可取 3, 认为测量的不确定度  $s$  等于 3 倍算术平均值标准偏差估计值。



1.2.7 粗大误差的判断

常用的粗大误差判断准则有五种：拉依达(PauTa)准则、格拉布斯(Grubbs)准则、肖维勒(Chauvenet)准则、狄克逊(Dicon)准则和 T 检验准则。

T 检验准则的判断步骤如下：

- (1) 将测得值由小到大排列为  $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 。
- (2) 选定风险率  $\alpha$ ，一般取 5% 或 1%。
- (3) 计算判定值  $T$ 。如果  $x_1$  或  $x_n$  是可疑的，则

$$T = \frac{\bar{x} - x_1}{\sigma} \quad \text{或} \quad T = \frac{\bar{x} - x_n}{\sigma}$$

(4) 根据  $n$  和  $\alpha$  查表 1-3 得  $T(n, \alpha)$  值。若  $T > T(n, \alpha)$  值，则相应的  $x_1$  或  $x_n$  就应舍去。

表 1-3  $T(n, \alpha)$  值

| $\alpha \backslash n$ | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1%                    | 1.15 | 1.49 | 1.75 | 1.94 | 2.10 | 2.22 | 2.32 | 2.41 | 2.48 | 2.55 |
| 5%                    | 1.15 | 1.46 | 1.67 | 1.82 | 1.94 | 2.03 | 2.11 | 2.18 | 2.23 | 2.29 |

1.2.8 有效数字

关于有效数字值和计算法则应注意的问题：一切表示误差和精度的数字，一般都保留一位；测量结果数据的有效数字，应与结果的误差位数适应，即由测量误差确定测量结果的有效数字。

1.2.9 等精度测量数据处理步骤

1. 直接测量数据处理步骤

- (1) 计算算术平均值  $\bar{x}$ ；
- (2) 计算残差  $v_i$ ；
- (3) 计算标准偏差的估计值  $\sigma$ ；
- (4) 判断粗大误差，如有粗大误差，应删除，然后重新计算(1)、(2)、(3)步，直到无粗大误差数据出现；
- (5) 求算术平均值的标准偏差  $x$  估计值  $\sigma_{\bar{x}}$ ；
- (6) 求测量的不确定度  $s$ ；
- (7) 写出测量结果  $x = \bar{x} \pm s$ 。

2. 间接测量数据处理步骤

- (1) 计算间接测量值  $v, v = f(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ ，一般是对某一值  $x_i$  直接测量，其余  $x$  值已知；
- (2) 计算间接测量值的标准偏差估计值：

$$\sigma_v = \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_{x_2}^2 + \cdots + \left(\frac{\partial v}{\partial x_n}\right)^2 \sigma_{x_n}^2}$$

(3) 由  $\sigma_v$  确定测量结果的有效数字。

## 1.3 人眼及目视光学仪器的瞄准误差

### 1.3.1 人眼在测量中带来的瞄准误差

#### 1. 瞄准误差的概念

对准：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，又称为横向对准。对准残留的误差称为对准误差。

调焦：指目标和比较标记沿瞄准轴方向重合或置中的过程，又称为纵向对准。调焦残留的误差称为调焦误差。

在测量中对准误差和调焦误差都称为瞄准误差。

#### 2. 对准误差

人眼的对准误差除与视场的照度、目标的对比度有关外，还与目标的形式(或对准方式)有关。图 1.1 给出了几种常见的对准方式及其可能产生的对准误差。

#### 3. 调焦误差

对于调焦误差，有两种计算方式。一种是利用物像清晰作为定焦条件，可按下式计算：

$$|\Delta SD| = \frac{8\lambda}{K_\omega n \Phi^2} \quad (1-15)$$

其中： $\Delta SD$  为视度差； $\lambda$  为工作波长； $n$  为仪器物方介质折射率； $K_\omega$  为波像差容限； $\Phi$  为仪器物方实际工作孔径。

另一种是用空间的线量表示，可按下式计算：

$$\Delta l = \frac{8\lambda l^2}{K_\omega n \Phi^2} \quad (1-16)$$

### 1.3.2 人眼通过目视光学仪器观察时的瞄准误差

#### 1. 对准误差

##### 1) 望远镜观察

$$\gamma = \frac{\delta}{\Gamma} \quad (1-17)$$

式中： $\gamma$  为人眼通过望远镜观察时的对准误差； $\delta$  为人眼对准误差； $\Gamma$  为望远镜视放大率。

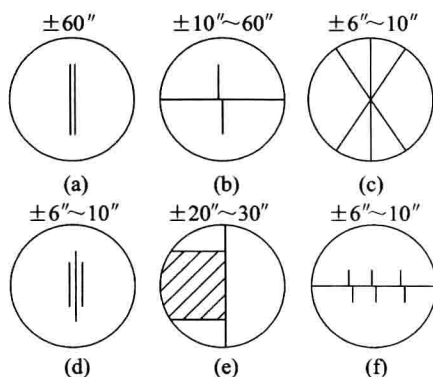


图 1.1 对准方式及其对准误差

- (a) 直线与直线重合；(b) 单线线端对准；  
(c) 叉线对准；(d) 夹线对准或置中；  
(e) 虚线与实线对准；(f) 多线线端对准

## 2) 显微镜观察

在明视距离处, 与人眼对准误差相应的横向距离为

$$\Delta y_0 = 250 \times \frac{\delta}{3438} = 0.073\delta(\text{mm}) \quad (1-18)$$

通过倍率为  $\Gamma_M$  的显微镜观察时, 对准误差为

$$\Delta y = \frac{0.073}{\Gamma_M} \delta(\text{mm}) \quad (1-19)$$

## 2. 调焦误差

常用的调焦方式有清晰度法和消视差法。

清晰度法: 以目标像和比较标志同样清晰为准, 其调焦误差由几何景深和物理景深决定。

消视差法: 以眼睛垂直于瞄准轴摆动时看不出目标像和比较标志有相对错动为准, 调焦误差受到对准误差影响。

### 1) 望远镜观察

#### (1) 清晰度法。

极限误差:

$$\varphi = \left( \frac{0.29\alpha}{\Gamma D} + \frac{4\lambda}{3D^2} \right) (\text{m}^{-1}) \quad (1-20)$$

标准偏差:

$$\sigma_{TP} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left( \frac{0.29\alpha}{\Gamma D} + \frac{4\lambda}{3D^2} \right) (\text{m}^{-1}) \quad (1-21)$$

式中:  $D$  为望远镜物方的有效通光孔径;  $\lambda$  为照明光波长( $\mu\text{m}$ );  $\alpha$  为人眼极限分辨角(分)。

#### (2) 消视差法。

极限误差:

$$\varphi = \frac{0.58\delta}{\Gamma^2 \left( D' - \frac{D_c}{2} \right)} (\text{m}^{-1}) \quad (1-22)$$

标准偏差:

$$\sigma_{TP} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ \frac{0.58\delta}{\Gamma^2 \left( D' - \frac{D_c}{2} \right)} \right] (\text{m}^{-1}) \quad (1-23)$$

式中:  $\delta$  为人眼对准误差(分);  $D'$  为望远镜出瞳直径;  $D_c$  为眼瞳直径。

### 2) 显微镜观察

#### (1) 清晰度法。

极限误差:

$$\Delta x = \left( \frac{73n\alpha}{2\Gamma NA} + \frac{n\lambda}{3NA^2} \right) (\mu\text{m}) \quad (1-24)$$

标准偏差:

$$\sigma_{MP} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left( \frac{73n\alpha}{2\Gamma NA} + \frac{n\lambda}{3NA^2} \right) (\mu\text{m}) \quad (1-25)$$

#### (2) 消视差法。

极限误差: