

角度测量

蒋作民 武晋瑩 庄志涛 编著

机械工业出版社

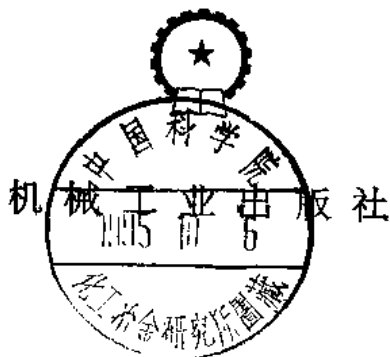
71.422
720

角 度 测 量

蒋作民 武晋燮 庄志涛 编著

(ZK506/34)

ZK506/24



161

537/2

(京)新登字054号

本书系统介绍了角度测量技术,包括角度测量方法、角度测量仪器和角度测量实例。全书共分六章。第一章绪论,叙述了平面角计量器具检定系统,角度单位与换算,角度测量误差。第二章非整圆角度测量,介绍了常用的角度测量器具和圆分度台,以及角度量块、角度样板,一般角度和圆锥角度的测量。第三章整圆角度测量,介绍了光学分度头和测角仪,以及分度板、花键、齿轮、蜗轮、齿轮滚刀和凸轮的角度测量。第四章小角度测量,介绍了小角度和倾斜角的机械法、光学法、电测和激光干涉法等测量方法和测量仪器。第五章角度传感器,介绍了电位器式、电阻应变式、光栅式、磁栅式、感应同步器和码盘式角度传感器及其应用。第六章标准圆分度误差测量,介绍了评定指标、精密圆分度测量仪基准(线角度),以及度盘、多齿分度台分度误差的测量和正多面棱体工作角的测量。

本书是高等院校精密仪器专业和相近专业的教学参考书,亦可供有关科研工作者和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

角度测量/蒋作民等编著. —北京:机械工业出版社,

1995.4

ISBN 7-111-04317-0

I. 角… I. 蒋… II. 角度测量-角度量仪 IV. TG82

中国版本图书馆CIP数据核字(94)第05131号

出版人:马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)

责任编辑:贺筑鑫 版式设计:王颖 责任校对:姚培新

封面设计:姚毅 责任印制:

机械工业出版社京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1995年3月第1版·1995年3月第1次印刷

787mm×1092mm^{1/16}·20.5印张·501千字

0 001—1 600 册

定价:25.00元

前 言

角度测量是技术测量中的一个组成部分，每个零件、部件的加工、装配和安装都会遇到各种角度测量的问题，随着生产和科学技术的发展，对产品和零件、部件角度测量的精度要求越来越高，角度测量的应用越来越广泛。为了适应工矿企业、科研部门、高等院校从事角度测量和有关专业人员的需要，我们编写了本书，供有关人员使用，也可作为“互换性原理与技术测量”、“几何量测量”、“机械量测量”、“精密测试技术”等课程的教学参考书。

在编写过程中，编著者广泛地收集了生产和科研中较常用、较成熟的测量仪器、测量方法和测量实例。注意理论联系实际，力求叙述通俗、内容广泛、实用性强。

需要说明的是：光学经纬仪主要用于大地测量，没有介绍；涉及仪器测量系统电路和计算机的内容从简；角度测量仪器属于精密仪器，保养好的已用几十年，有些仪器虽较老式，却代表着某种典型的测量方法，故作了相应的介绍；因篇幅所限，有关仪器的精度分析从略。

本书由哈尔滨工业大学精密仪器教研室蒋作民、武晋璧、庄志涛、李占魁编写，蒋作民统校，哈尔滨量具刃具厂孙颂权审定。

由于编写者的水平有限，错误或不妥之处在所难免，恳请读者指正。

目 录

前 言

第一章 绪 论

一、角度测量与角度量值传递

1. 角度测量的特点

2. 平面角计量器具检定系统

3. 角度测量的发展

二、角度单位与换算

1. 角度单位

2. 常用角度单位的换算

三、测量误差

1. 测量误差及其表示方法

2. 测量误差的来源和防止措施

3. 误差的类型及其性质

4. 随机误差的分布规律与估算

5. 粗大误差的剔除

第二章 非整圆角度测量

一、常用的角度测量器具

1. 角度量具

2. 圆分度台

二、角度量块的检定

1. 角度量块

2. 角度量块的检定

三、样板的角度测量

1. 用角度规直接测量样板的角度

2. 间接测量样板的角度

四、一般角度的测量

1. 直接测量角度

2. 间接测量角度

五、圆锥角度的测量

1. 用工具圆锥量规综合测量圆锥

2. 圆锥角度的间接测量

六、光学零件角度的测量

1. 测角仪测量法

2. 自准直仪测量法

第三章 整圆角度测量

一、光学分度头

1. 目视式光学分度头

2. 影屏式光学分度头

3. 数显式光学分度头

4. 底座和底板

二、测角仪

1. SGO1.1型测角仪

2. C20型精密测角仪

3. JCY型精密测角仪

4. C3A型精密测角仪

5. GSJ-A型光栅式精密测角仪

三、整圆分度角的测量

1. 分度板圆分度角的测量

2. 花键圆分度角的测量

3. 齿轮圆分度角的测量

4. 蜗轮圆分度角的测量

5. 电机转子冲片圆分度角的测量

四、凸轮的测量

1. 对称圆盘凸轮的测量

2. 非对称圆盘凸轮的测量

3. 圆盘凸轮相位角的测量

4. 圆盘内凸轮行程的测量

5. 圆柱凸轮的测量

6. 圆锥凸轮的测量

第四章 小角度测量

一、机械法测量小角度

1. 小角度发生器

2. C2型小角度检查仪

3. C2型小角度检查仪的应用

二、光学法测量小角度

1. 自准直仪及其应用

2. 激光干涉法测量小角度

3. 其它干涉法测量小角度

4. 光栅式小角度测量仪

三、电测法测量倾斜角

1. 电位器式倾斜角传感器

2. 电阻应变式倾斜角传感器

3. 液体摆式倾斜角传感器

4. 振弦式倾斜角传感器

5. 力平衡式倾斜角传感器	202
6. 电子水平仪	204
第五章 角度传感器	210
一、电位器式角度传感器	211
1. 工作原理	211
2. 圆弧电位器式角度传感器	215
3. 整圆电位器式角度传感器	218
二、电阻应变式角度传感器	221
三、光栅式角度传感器	224
1. 光栅	225
2. 莫尔条纹	227
3. 光栅式角度传感器及其应用举例	231
四、磁栅式角度传感器	236
1. 磁栅	237
2. 磁头	237
3. 信号处理方式和应用举例	239
五、感应同步器	240
1. 工作原理	242
2. 信号处理方式	243
3. 旋转式感应同步器	244
六、码盘式传感器	248
1. 工作原理	248
2. 码制与码盘	249
3. 二进制与循环码的转换	251
4. 应用举例	253

七、角度测量中的动态精度	255
第六章 标准圆分度误差测量	259
一、圆分度误差的评定指标	259
1. 刻线误差与零起刻线误差	259
2. 间隔误差	260
3. 直径误差	261
二、精密圆分度测量仪基准(线角度)	263
1. 工作原理	264
2. 基准分度信号系统	265
3. 电子学细分和计数系统	266
4. 计算机数据采集接口和计算程序	268
5. 辅助系统	268
三、度盘分度误差测量	269
1. 圆分度误差的直接测量法	269
2. 度盘的单常角测量法	275
3. 用对称联系法测量度盘	278
四、正多面棱体工作角的测量	286
1. 正多面棱体	286
2. 用多齿分度台直接测量多面棱体	288
3. 排列常角法测量多面棱体	291
4. 排列互比法测量多面棱体	298
五、多齿分度台的测量	300
1. 多齿分度台	300
2. 多齿分度台分度误差的测量	308
附录 莫氏与公制圆锥量规	314

第一章 绪 论

一、角度测量与角度量值传递

1. 角度测量的特点

角度是机械、仪器仪表和电子产品制造业中的重要几何参数之一，它的准确度直接影响着产品的质量与寿命，因而角度测量在几何量测量中占有重要地位。众所周知，具有角度要素的机械加工零件和部件经常见到，如楔形块、燕尾槽、导轨的倾斜角，凸轮、花键、滚刀、齿轮的分度，内、外锥体的锥度，螺纹半角，工件轴线、平面间的垂直度、倾斜度，工作台与水平面的角度等。角度测量是几何量测量技术中的重要组成部分。

角度测量与长度测量的性质基本相似。如零件上某一角度是由两个平面间夹角确定其角度值，与长度是由两个平面间的最短距离来确定其长度值是相似的。因而，角度与长度统称为几何量。但是，角度的测量方法与长度的测量方法还是有区别的。角度有它的特殊性。比如长度可由两点间的直线距离表示，而角度则由两点分别与第三点的连线所构成，或由一个动点围绕一个定点回转而成，这个第三点或定点称为中心点（或称极点）。因此角度测量的特点是建立绕中心点回转的角位移标准，与被测角度相比较来进行测量，在比较时还应考虑中心点的位置。

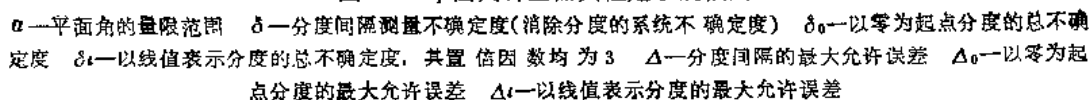
平面角度常以度（°）、分（′）、秒（″）作为角度单位来表示，即绕中心点回转一周的圆周角定为360°，1°定为60′，1′定为60″。这是使用最广泛的六十进制角度单位，是我国（与绝大多数国家）选定的非国际单位制单位。另一种角度单位是弧度，符号为rad，它是国际单位制的辅助单位，仅在计算中常用。还有一种是将角度转化为长度的方法表示，即用斜度或锥度来表示，如斜度1:10相应的斜角为5°43′29″，锥度1:50的锥角为1°8′45″。用斜度或锥度表示角度的实质，是以两条直线或两个平面在一定距离的两点高度差值，即在一定条件下可以利用一般的测量长度的方法，间接地测量角度。这是角度测量的又一个特点。

除了平面角度的表示方法外，还有立体角度的表示方法。立体角的单位称为球面度，符号为sr，球面度是顶点位于球心，在球面所截取的面积等于以球半径为边长的正方形面积所对的中心扩张的立体角度。

2. 平面角计量器具检定系统

角度的基准及其传递与其它某些测量领域不同的是，圆周分度具有封闭特性，即圆周角总和恒等于360°，是一个常量，因此一个圆周角本身就是一个自然基准。以很高的精度将一个360°等分的圆分度器件可以作为角度的实物基准。

现有平面角计量器具检定系统框图如图1-1所示，该系统适用于以各种技术手段（如机械、光学、电学等）进行圆分度的器件或由其组成的测角仪器、测角装置以及非整圆分度的各种平面角计量器具的检定。该检定系统还规定了平面角单位国家基准的用途，基准所包括的全套基本计量器具，基准的计量学参数和借助于副基准及计量标准器具向工作计量器具传递平面角单位的程序，并指明其总不确定度和基本检定方法等。



框图中需要说明的:①二等及二等以下总不确定度相同或相近的两圆分度计量器具之间,允许用排列互比法检定分度误差(但其中一台计量器具连同检定结果需由上一等计量标准的检定单位校核。当确认检定结果有效后,开具检定证书)。②“常角组合”是指不用上一等计量标准器具直接传递量值,而是用适当角度的常角以适当的方法对圆分度计量器具进行全圆周测量,通过数学处理求得分度误差(但检定结果需经上一等计量标准的检定单位校核。当确认检定结果有效后,开具检定证书)。③“多位置测量”系指在上一等的圆分度标准器上均布的多个位置测量同一角度,并取平均值作为测量结果,以减小标准器具系统误差的影响。其位置数按 δ 的要求而定。也允许用更高一等的计量标准器具直接测量。对可修正系统误差的计量器具, δ 取修正后的值。④框图中虚线表示基准、副基准间的量值比对和排列互比或常角组合法测量的溯源、校核关系。

3. 角度测量的发展

随着工业生产和科学技术的发展,对角度测量技术提出了高精度和新方法的要求。许多角度测量技术已非一般机械式量具和仪器所能解决,甚至一般的光学-机械式仪器也不胜任,因此要求设计出更好的角度测量方法和提供技术新、精度高的角度测量仪器。高新技术和新的元件、器件的出现,也促进了角度测量技术的发展。

我国1990年12月起实施了平面角计量器具检定系统(图1-1),角度量值传递得到了保证,相应的检定设备和仪器已确定或不断完善,如激光干涉小角度测量仪器配备了微计算机系统,用圆光栅作分度基准以动态测量为主的精密圆分度测量仪成为国家线角度基准设备,已于1993年7月23日起进行量值传递,替代了原“度盘检查仪基准”。

角度测量仪器是测量方法的体现和物质基础。角度测量仪器近年来也有较大的发展,从而推动了角度测量技术的进展和提高,下面举一些实例说明之。

激光的出现为实现干涉法测量角度提供了更好的条件。由于激光具有良好的方向性、单色性、相干性和高亮度,为光波干涉测量提供了理想的光源,推动了光波干涉测量角度技术的发展。如采用激光干涉小角度测量方法设计的小角度测量仪(图4-25、4-29)可静态或动态测量。仪器的分辨率约 $0.025''$,测量精度在 $\pm 1''$ 范围内为 $0.03''$ 、在 $\pm 5''$ 范围内为 $0.25''$ 。配以微计算机已成为国家小角度仪器的基准和标准仪器。

多齿分度台已有多种规格的产品(表6-16),在角度测量中得到了较广泛的应用,最小分度误差达到 $\pm 0.1''$,配以机械式细分器(图6-29、6-30),最小分度值可为 $0.1''$ 。差动形式的多齿分度台(图6-31),最小分度值可达到 $0.625''$ 或 $1' \sim 10'$ (表6-17)。差动式多齿分度台再配用激光干涉小角度测量仪作光学细分器,并安装在气浮转台上(图4-35),此高精度角度测量仪器可在水平角度 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内任意分度,差动弹性多齿分度盘最小分度值为 $1'$ 、激光干涉小角度测量仪最小分度值为 $\leq 0.004''$,仪器总分度误差 $\leq 0.25''$ 。

由720齿多齿分度台、激光干涉小角度测量仪、调焦望远镜瞄准系统和精密转台等组成的高精度锥度测量仪(图2-113、2-115),已作为标准锥度量规的传递基准仪器。

光栅式小角度测量仪(图4-41)作静态测量,分辨率为 $0.001''$,仪器总不确定度为 $\pm 0.2''$;作动态测量,分辨率为 $0.5''$ 、仪器总不确定度为 $\pm 1.5''$ 。可用作角度传感器的测试仪,测试角度传感器灵敏度、阈值(灵敏阈)、线性度、重复性以及进行定度。

SDS型电子水平仪(图4-58~4-61)采用高灵敏度的三电极空心电容式传感器,可和微

机 (IBM-PC等) 自动检测系统配置, 打印出相应的直线度、垂直度、平面度或平行度数据, 绘制出相应的一维、二维、三维图形。

有一种发展趋势是采用新颖的电子元器件。如在光电自准直仪器中采用半导体激光器作光源, 光电接收器采用线阵或面阵的CCD器件, 它的象素很小并进行细分, 从而提高了分辨率, 可对互成 90° 的两坐标轴向以及三坐标轴向进行测量, 并有RS232和BCD接口, 与计算机配合进行数据处理, 具有显示、打印、绘图等功能。

由精密轴系、稳速转动机构、基准莫尔条纹信号的分度系统、莫尔条纹细分与计数系统和PC计算机等组成的精密圆分度测量仪系国家线角度基准设备。它用圆光栅 (64800线/周) 做分度基准, 测角分辨率 $0.001''$, 仪器总不确定度 $\pm 0.017''$ (图6-5~6-11)。仪器可测60进制、十进制、二进制和密位制的圆分度器件。仪器具备较多的功能: 采用莫尔条纹读数头可测量圆光栅、码盘等密纹圆分度器件; 采用动态光电显微镜可测量光学度盘等疏线纹圆分度器件; 采用动态自准直光管可以测量正多面棱体。可手动或自动测量。

目前, 在角度测量方法和测量仪器中采用机、光、电、计算机相结合的实践已取得了好的效果, 也是今后发展的方向。总之, 角度测量技术随科学技术的发展而不断地前进和提高, 从而使测量范围不断扩大, 精确度和自动化、智能化程度不断地提高。

二、角度单位与换算

1. 角度单位

(1) 弧度 弧度是一个圆内两条半径之间的平面角。如图1-2所示, 两条半径在圆周上截取的弧长与半径相等时, 即 $\overline{OA} = \overline{OB} = \widehat{AB}$ 或 $R = S$ 时, 则 $\angle AOB$ 定义为一弧度。一弧度的弧所对应的圆心角 α 叫做一弧度的角, 一弧度简称一弧。弧度是国际单位制的辅助单位之一, 弧度用符号“rad”表示。

一个圆心角所对弧长 $\widehat{S}$ 是半径 R 的几倍或几分之几的数量称为弧度数 (简称弧度数), 可用下式计算:

$$\alpha = \frac{\widehat{S}}{R} \quad (\text{rad})$$

一个整圆不论其大小如何, 圆周与其2倍半径之比 (圆周/直径) 为一常数, 该常数用 π 来表示, 称为圆周率, 其值约为

$$\pi = 3.141592653589793238\cdots$$

π 是半圆的弧度数, 一般计算时 $\pi = 3.1416$ 。一个整圆的弧度数为

$$2\pi = 6.283185307179586476\cdots$$

弧度这一单位主要用于计算中。如以一定长度上的线位移反映角度时, 用弧度表示在计算中是很方便的。

(2) 六十分制 六十分制角度单位是将一个整圆分成360等分, 每一等分叫做一“度”, 记为 1° ; 每一度分成60等分, 每一等分叫做一“分”, 记为 $1'$; 每一分又分成60等分, 每一等分叫做一“秒”, 记为 $1''$ 。即用下式表示度、分和秒:

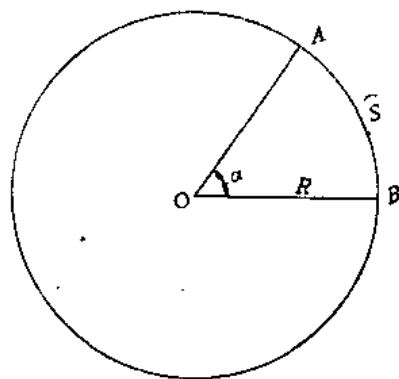


图1-2 弧度

$$\begin{aligned}
 \text{一圓周角} &= 360^\circ \\
 &= 21600' \\
 &= 1296000''
 \end{aligned}$$

“秒”是六十分制的最小单位，小于一秒时均按十进制计。如十分之一秒记为0.1″，百分之二秒记为0.02″…等。有时也将不满一度的分值或不满一分的秒值按十进制写法，如将30′写为0.5°，1°30′写为1.5°，或将30″写成0.5′，1′30″写成1.5′等。

六十分制角度单位是我国法定计量单位中选用的非国际单位制单位，在机械制造和角度测量中普遍被采用。

为了设计上的方便，推荐一些标准角度供参考。表1-1是我国适合机械制造业一般用途的角度。表中所列角度的优先顺序是第一系列、第二系列、第三系列。

表1-1 标准角度

第一系列	第二系列	第三系列	第一系列	第二系列	第三系列
0°		0°15′			35°
	0°30′				36°
		0°45′	45°		40°
	1°				50°
	2°	1°30′	60°		55°
	3°	2°30′			65°
		4°			70°
				75°	72°
5°		6°			80°
		7°			85°
	8°	9°	90°		100°
	10°	12°			105°
15°		18°	120°		110°
	20°	22°30′		150°	135°
		25°	180°		165°
30°			360°		270°

(3) 百分制 百分制角度单位是将一圆周角分成400等分，每一等分叫做一度，记为1°；每一度分成100等分，每一等分叫做一分，记为1′；每一分又分成100等分，每一等分叫做一秒，记为1″。可见有

$$\begin{aligned}
 \text{一圓周角} &= 400^\circ \\
 &= 40000' \\
 &= 4000000''
 \end{aligned}$$

百分制的特点是将一圆周角分成四等分，即四个象限，每一个象限分成100°，以下都是百分进位。在有些场合，应用百分制角度单位是很方便的。

(4) 线值制 线值制有时也称斜度制, 是以一定长度上的垂直线位移表示角度。主要应用在垂直位置或水平位置的偏差方面。如两个相交的垂直面的垂直度偏差为若干微米, 指的是两垂直面相对于直角的偏差。又如某导轨一端相对于另一端的垂直高低差值也表示微小角度的大小。反映这方面的计量仪器有水平仪和平直度检查仪等。平直度检查仪的分度值一般用线值表示, 如分度值为 $5\mu\text{m}/\text{m}$ 或 $1\mu\text{m}/200\text{mm}$ (即在 200mm 长度上一端相对于另一端的垂直线位移为 $1\mu\text{m}$), 在角度范围很小时, 它相当于 $1''$ 。

所谓斜度, 也是以长度的比值来反映小角度的一种表示方法。如图1-3所示, 斜度 h/L 反映角度 α 的大小。如斜度为 $1/20$ (即 $1:20$) 表示 $\alpha = 2^\circ 51' 53.2''$ 。

(5) 锥度 锥度 C 是两个垂直轴线截面的圆锥直径差与该两截面间的轴向距离之比, 如圆锥体大端直径 D 与小端直径 d 之差值与圆锥长度 L 之比值, 即

$$C = \frac{D-d}{L}$$

如图1-4所示, α 为圆锥角, 是圆锥轴截面两母线间的夹角, $\alpha/2$ 为圆锥轴线与母线间夹角。锥度 C 与圆锥角 α 的关系: $\ominus$

$$C = 2 \tan \frac{\alpha}{2} = 1 : \frac{1}{2} \cot \frac{\alpha}{2}$$

为了减少圆锥体零件生产所需用的定值刀具、量具的种类和规格, 设计圆锥零件时应选用标准圆锥角或标准锥度。GB157-89,

《锥度与锥角系列》中一般用途圆锥的系列适用于一般机械工程中的光滑圆锥 (表1-2), 应优先选用第1系列; 特殊用途圆锥的系列适用于工具类圆锥 (表1-3)。

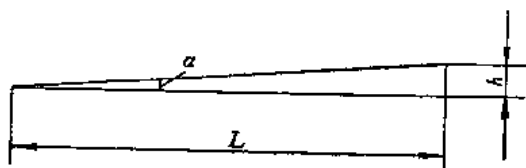


图1-3 斜度

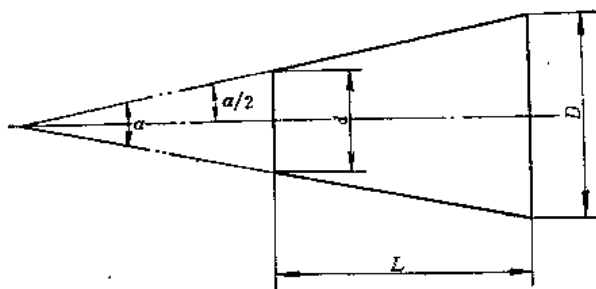


图1-4 锥度

(6) 密位 密位是军用光学仪器中应用的一种角度单位。密位是将圆周角分成6000等分, 每一等分即为一密位。一密位相当于六十分制的 $3' 36''$ 。

密位的写法如下例所示:

6000密位写为60—00

600密位写为6—00

60密位写为0—60

$\ominus$ 根据GB157-89, 圆锥角为 α , 锥度为 C 。如 $C=1:50$ 是指直径 D 与 d 之间距离 $L=50\text{mm}$ 上 $(D-d)$ 的差为1mm, 而以往其它标准圆锥角为 2α , 锥角为 α , 锥度为 K , 并且

$$K = \frac{D-d}{L} = 2 \tan \alpha = 1 : \frac{1}{2} \cot \alpha$$

6 密位写为 0—06

0.6 密位写为 0—006

4364 密位写为 43—64

以上是常用的一种定义密位的方法。有的国家还有另外定义密位的方法, 如将圆周角分成 6400 等分, 每一等分为一密位; 或将圆周角分为 6300 等分, 每一等分为一密位。

表 1-2 一般用途圆锥的锥度与锥角
(GB157—89)

基 本 值		推 算 值		
系 列 1	系 列 2	圆 锥 角 α	锥 度 C	
120°	75°	—	—	1 : 0.288675
90°		—	—	1 : 0.500000
		—	—	1 : 0.651613
60°		—	—	1 : 0.866025
45°		—	—	1 : 1.207107
30°		—	—	1 : 1.866025
1 : 3	1 : 4	18°55'28.7"	18.924644	—
		14°15'0.1"	14.250033°	—
1 : 5		11°25'16.3"	11.421186°	—
		9°31'38.2"	9.527283	—
		8°10'16.4"	8.171234°	—
		7°9'9.6"	7.152669°	—
1 : 10	1 : 12	5°43'29.3"	5.724810°	—
		4°46'18.8"	4.771888°	—
		3°49'5.9"	3.818305°	—
1 : 20		2°51'51.1"	2.864192°	—
1 : 30		1°54'34.9"	1.909682°	—
		1°25'56.8"	1.432222°	—
	1 : 40	1°8'45.2"	1.145877°	—
1 : 50		0°43'22.6"	0.572953°	—
1 : 100		0°17'11.3"	0.286478°	—
1 : 200		0°6'52.5"	0.114591°	—

表 1-3 特殊用途圆锥的锥度与锥角
(GB157—89)

基 本 数 值	推 算 值			适 用
	圆 锥 角 α	锥 度 C		
18°30'	—	—	1 : 3.070115	纺 织 工 业
11°54'	—	—	1 : 4.797451	
8°40'	—	—	1 : 6.598442	
7°40'	—	—	1 : 7.462208	
7 : 24	16°35'39.4"	16.594290	1 : 3.428571	机 床 主 轴, 工 具 配 合 电 池 接 头 贾 各 锥 度 NO.2 贾 各 锥 度 NO.1 贾 各 锥 度 NO.33 医 疗 设 备 贾 各 锥 度 NO.3
1 : 9	6°21'34.8"	6.359660	—	
1 : 12.262	4°40'11.6"	4.669884°	—	
1 : 12.972	4°24'53.1"	4.414746°	—	
1 : 15.748	3°38'13.4"	3.637060°	—	
1 : 16.666	3°26'12.2"	3.436716°	—	
1 : 18.779	3°3'1.0"	3.050200°	—	

(续)

基 本 数 值	推 算 值			适 用
	圆 锥 角 α	锥 度 C		
1:19.002	3°0'52.4"	3.014543°	—	莫氏锥度NO.5
1:19.180	2°59'11.7"	2.986582°	—	莫氏锥度NO.6
1:19.212	2°58'53.8"	2.981618°	—	莫氏锥度NO.0
1:19.254	2°58'30.6"	2.975179°	—	莫氏锥度NO.4
1:19.264	2°58'24.8"	2.973556°	—	贾各锥度NO.6
1:19.922	2°52'31.5"	2.875406°	—	莫氏锥度NO.3
1:20.020	2°51'41.0"	2.861377°	—	莫氏锥度NO.2
1:20.047	2°51'26.7"	2.857417°	—	莫氏锥度NO.1
1:20.288	2°49'24.7"	2.823537°	—	贾各锥度NO.0

密位在有些场合使用很方便,如半径为 R 的圆周长度 $l=2\pi R$,若 $\pi \approx 3$ 时,则 $l \approx 6R$,若以 $1/6000$ 圆周角为一密位时,则有

$$\text{一密位所对弧长} \approx \frac{6R}{6000} = \frac{R}{1000}$$

即一密位角所对弧长相当于距离的千分之一。由于 π 取近似值3所带来的误差约为5%,虽然精度较低,但计算很方便,通过观测目标的仰角即可方便地求出距离。如已知某棵树高4m,从光学仪器中观测到树高所含的夹角为5密位,则从观测点到树的距离为 $(1000 \times 4) / 5 = 800\text{m}$ 。

2. 常用角度单位的换算

(1) 弧度与六十分制角度单位的换算 圆周角为 2π 弧度,即 $2\pi \text{ rad}$,也等于 360° ,因此它们的关系为

$$360^\circ = 2\pi \text{ rad} \approx 6.28318 \text{ rad}$$

$$180^\circ = \pi \text{ rad} \approx 3.14159 \text{ rad}$$

$$1^\circ = \pi/180 \text{ rad} \approx 0.01745329 \text{ rad}$$

$$1' = \pi/180 \times 60 \text{ rad} \approx 0.00029088 \text{ rad}$$

$$1'' = \pi/180 \times 60 \times 60 \text{ rad} \approx 0.000004848 \text{ rad}$$

反之,可求得

$$1 \text{ rad} = 180^\circ/\pi \approx 57.29578^\circ$$

$$= (180 \times 60')/\pi \approx 3437.74677'$$

$$= (180 \times 60 \times 60'')/\pi \approx 206264.8062'' \approx 206265''$$

(2) 弧度与百分制角度单位的换算 圆周角为 $2\pi \text{ rad}$,也等于 400° ,因此可得下列关系:

$$400^\circ = 2\pi \text{ rad} \approx 6.28318 \text{ rad}$$

$$1^\circ = 2\pi/400 \text{ rad} \approx 0.01570796 \text{ rad}$$

$$1' = 2\pi/(400 \times 100) \text{ rad} \approx 0.00015708 \text{ rad}$$

$$1'' = 2\pi/(400 \times 100 \times 100) \text{ rad} \approx 0.00000157 \text{ rad}$$

反之,可求得

$$1 \text{ rad} = 400^\circ/2\pi \approx 63.66198^\circ$$

$$= (400 \times 100)^\circ/2\pi \approx 6366.198^\circ$$

$$= (400 \times 100 \times 100)^\circ/2\pi \approx 636619.8''$$

(3) 六十分制与百分制角度单位的换算 一周角为 360° ，也等于 400° ，因此可得下列关系：

$$1^\circ = 400^\circ / 360 \approx 1.111^\circ$$

$$1' = (400 \times 100)^\circ / (360 \times 60) \approx 1.85185^\circ$$

$$1'' = (400 \times 100 \times 100)^\circ / (360 \times 60 \times 60) \approx 3.08642^\circ$$

反之，可求得

$$1^\circ = 360^\circ / 400 = 0.9^\circ = 0^\circ 54'$$

$$1' = (360 \times 60)' / (400 \times 100) = 0.54' = 0' 32.4''$$

$$1'' = (360 \times 60 \times 60)'' / (400 \times 100 \times 100) = 0.324''$$

(4) 六十分制与线值制角度单位的换算 为将线值制比值换算成六十进制角度时，只要将线值比值乘以相应的角度单位即可。如将 $1/10$ 换算成角度时

$$\alpha \approx \frac{1}{10} \times 206265'' \approx 20626.5'' \approx 5^\circ 43' 46.5''$$

又如将 $1/50$ 换算成角度时

$$\alpha \approx \frac{1}{50} \times 206265'' = 1^\circ 8' 45.3''$$

几种常用角度单位的换算见表1-4。

表1-4 常用角度单位换算表

		六十分制	百分制	弧 度	密 位
六十分制	1°		1.111 $^\circ$	0.01745329	16.6666密位
	$1'$	—	1.8518 $^\circ$	0.00029088	
	$1''$		3.08642 $^\circ$	$0.000004848 = \frac{1}{206265}$	
百分制	1°	54'		$\frac{1}{63.66}$	15密位
	$1'$	32.4''	—	$\frac{1}{6366}$	0.15密位
	$1''$	0.324''		$\frac{1}{636620}$	0.0015密位
弧 度	1rad	57°17'44.8062''	63.662 $^\circ$	—	954.93密位
密 位	1密位	3'36''	6.666 $^\circ$	0.001047rad	—

三、测量误差

测量误差是评定测量结果的质量指标。在测量过程中，不论使用的仪器多么精密，采用的测量方法多么可靠，操作时多么细致，所得到的测量结果与被测量的真实值总会有差异，这个差异即测量误差。即使对同一个参数重复测量多次，也会发现测量结果各不一样。这就证明误差是不可避免的。测量误差的存在是普遍的、绝对的，随着科学技术的发展，测量误差可以越来越小，但不可能使测量误差等于零。

对测量误差的正确分析和估算，是测量工作的重要组成部分。误差估算过大，会造成不

必要的浪费；误差估算过小，会使测量结果的精度不可靠，势必影响产品的质量。只有在准确估算测量误差，合理使用测量仪器，正确掌握测量方法，严格控制测量环境和遵守操作规程的条件下，才能获得与被测量精度要求相适应的测量结果。因此，误差估算的大小是评定测量水平的重要标志。

讨论误差的目的，是以误差理论为基础，正确地处理测量数据，合理评价测量结果，求出测量结果的不确定度。在误差理论的指导下合理地选择测量仪器、测量方法和测量条件。因此，讨论和研究误差理论是很有必要的。

1. 测量误差及其表示方法

测量误差指的是测得值 a 与被测量的真实值（真值） a_0 之差，即

$$\Delta a = a - a_0$$

例如，测量三角形样板，三个内角之和的真实值应是 180° ，若测得值为 $180^\circ 00' 03''$ 时，则测量的绝对误差为

$$\Delta a = a - a_0 = 180^\circ 00' 03'' - 180^\circ = 3''$$

测量误差常用绝对误差和相对误差两种形式表示。

(1) 绝对误差 绝对误差是指测得值 l 与被测量真实值 L 之代数差值，即

$$\delta = l - L$$

由于真实值 L 不可知，所以绝对误差 δ 无法求得，但是通常可以估算出它的绝对值 $|\delta|$ 不会超出某一数值 λ ，即

$$|\delta| = |l - L| \leq \lambda$$

λ 应尽可能小，满足上式的 λ 称为绝对误差限，简称绝对误差，记为 $\delta_{\max}$ ，即

$$|l - L| \leq \delta_{\max}$$

去掉绝对值符号时，得以下不等式：

$$l - \delta_{\max} \leq L \leq l + \delta_{\max}$$

即给出了真实值的一个最小极限范围，可简写成

$$L = l \pm \delta_{\max}$$

上述误差的条件是在被测量值相同或相近情况下绝对误差的表示方法。绝对误差越小，说明测量的精度越高，反之，测量的精度越低。

(2) 相对误差 对于大小不同的被测量的测量结果，若比较它们的精度高低，显然不能用绝对误差来比较。如测得被测量结果分别为 $20^\circ \pm 0.01^\circ$ 和 $100^\circ \pm 0.02^\circ$ 。按绝对误差来看， 0.01° 小于 0.02° ，但并不表示前者的精度比后者高，应通过测量误差的绝对值与被测值的比较来加以判断。即 $0.01/20$ 与 $0.02/100$ 比较得 0.05% 与 0.02% ，说明后者精度比前者高。因此，为了弥补绝对误差在表示方法上的不足，引进了相对误差的概念。

相对误差是指绝对误差的绝对值与被测量的真实值之比，通常写成百分数。因为真实值未知，一般用测得值代替，即

$$E = \frac{|\delta|}{l} \times 100\%$$

由此可见，绝对误差和相对误差都可以用来判断测量结果的精度，只是应用的场合不同而已。

2. 测量误差的来源和防止措施

测量是测量者使用测量仪器，在一定的环境条件下采用某种测量方法的实验操作。因此

误差来源于测量仪器、环境条件、测量方法和测量者等因素。

(1) 测量仪器误差

1) 原理误差 由设计和计算等造成的系统误差,如正弦原理误差等。除了设计时注意控制在允许范围之内,使用时可以通过修正方法来提高测量精度。

2) 制造、装配和调整误差 仪器各种零件(如金属件、光学件)的加工误差,装配调整误差,如度盘安装偏心等误差。加工应控制在公差之内,装配时可以互相补偿或减小。

3) 标准量误差 如量块、线纹尺、度盘等误差将直接影响测量结果的精度。

4) 附件误差

(2) 方法误差 对同一个参数的测量,由于方法不同,测量结果就不一样。有时采用近似的方法,甚至方法不合理时,测量误差将很大。对于参数关系比较复杂的零件,测量方法的正确性和可靠性很重要。因此在测量之前应对被测参数认真了解和研究,如怎样安装定位合理,支承点的位置应该怎样安置,如何能选择最佳条件的间接测量方案等,从而减小或消除由于测量方法不当所造成的测量误差。

(3) 环境误差 环境误差因素包括温度、湿度、振动、气流、灰尘、腐蚀性气体、介质折射率等。应根据测量要求决定主要环境因素,如一般情况以温度为主要因素,其它因素是在测量精度要求更高,或特殊要求时才加以考虑。

(4) 人员误差 在同一环境,用同一台测量仪器,不同的操作者会有不同的测量结果。这主要是由于测量者的视力、判断能力、注意力、技术熟练程度、经验等不同而造成的误差。要求测量人员加强责任心,在测量过程中积累经验,熟练掌握仪器性能和有关知识,便能最大限度地改变客观上的不利因素,使测量误差减小到最小限度,即人为地提高测量精度。

3. 误差的类型及其性质

测量误差按性质可分为三类,即系统误差、随机误差和粗大误差。

(1) 系统误差 在同一条件下对同一个参数进行多次重复测量时,其绝对值和正负号固定不变,或随测量条件的改变而按一定规律变化的测量误差,称为系统误差。系统误差的出现具有必然性,是在测量之前就存在的一些误差因素造成的。

系统误差又可分为已定系统误差和未定系统误差。已定系统误差还可分为定值系统误差和变值系统误差。变值系统误差又可分为线性系统误差、周期性系统误差和复杂性系统误差。如测量仪器本身的误差,仪器安装不正确或使用不当引起的误差,一些环境误差和人员误差属于系统误差。量块、线纹尺、度盘等固定不变的误差属于定值系统误差。度盘或仪表盘安装偏心造成的误差,属于周期性系统误差。系统误差通常可通过分析,实验或检定掌握其大小和规律,设法消除或在测量结果中加以修正。还可以在结构时消除系统误差,如采用符合成像方法消除由于度盘安装偏心造成的周期性系统误差。

(2) 随机误差(偶然误差) 在同一条件下,对同一参数进行多次重复测量时,其绝对值和符号是无法预知的随机变化的测量误差,称为随机误差。随机误差是由许多未知因素或一时不便控制的微小因素综合影响产生的,如轴与孔之间间隙造成的晃动,摩擦产生的阻力,微小温度变化等多种误差因素综合影响的结果,因而无法在测量结果中消除或修正。但是在基本条件相同时,对同一个参数进行大量重复测量,发现随机误差服从统计规律。因而可用统计规律进行研究,对含有随机误差的测量数据进行处理,求得被测量的最佳近似值,并估