



“十三五”职业教育规划教材

公差配合与 测量技术基础

GONGCHA PEIHE YU CELIANG JISHU JICHU

程 玉 汤 萍 主 编
何 伟 柳吉庆 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五” 职业教育规划教材

公差配合与 测量技术基础

GONGCHA PEIHE YU CELIANG JISHU JICHU

主 编 程 玉 汤 萍
副主编 何 伟 柳吉庆
编 写 杜 皓 赵华新 陈 阳
主 审 孙敬华



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”职业教育规划教材。本书共分十章，主要包括测量技术基础，光滑圆柱的公差配合与检测，表面粗糙度与检测，几何公差与检测，光滑极限量规，键、花键的公差与检测，滚动轴承的公差与检测，普通螺纹的公差与检测，圆柱齿轮的公差与检测，尺寸链。本书以贯彻互换性国家标准为主线，以讲清楚互换性与测量基本概念为前提，以学会运用为目的，结合我国高职高专教育的特点和教学要求，将各知识点进行了有机整合，注重实用性，重点突出，易读易懂。

本书可作为高职高专机械类、自动化类等专业的教材，也可供相关技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

公差配合与测量技术基础/程玉，汤萍主编. —北京：中国电力出版社，2015.8

“十三五”职业教育规划教材

ISBN 978-7-5123-6778-4

I. ①公… II. ①程… ②汤… III. ①公差-配合-高等职业教育-教材②技术测量-高等职业教育-教材 IV. ①TG801

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 270501 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 [http: //www. cepp. sgcc. com. cn](http://www.cepp.sgcc.com.cn))

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 8 月第一版 2015 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 11.75 印张 280 千字

定价 25.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

公差配合与测量技术基础是机械类专业的一门实践性很强的专业基础课,它的任务是使学生获得机械零件的几何精度及其相互配合的基础知识,掌握几何参数检测的基本技术,是机械制造类专业技术人才必须具备的基础知识与基本能力。本书在编写方面具有以下特点:

1. 体现高职高专教育的特色

(1) 实用为主,管用为度,必需够用。

(2) 加强理论联系实际,充实应用实例的内容,“以例释理”,将基础理论融入大量的实例之中。

(3) 把基本技能的培养贯穿于教材内容的始终,对岗位所需知识和能力结构进行恰当的设计安排。

2. 符合行业 and 职业发展的实际,具有时代特征

全书采用新的国家标准,教材内容以介绍成熟稳定的、在实践中广泛应用的技术为主,同时适当介绍新知识、新技术、新设备等,反映科技发展的趋势,使学生能够适应未来技术进步的需要,毕业后具备直接从事生产第一线技术工作和管理工作的能力。

3. 具有很强的课堂操作性

教材语言流畅,通俗易懂,图表丰富,编排醒目;突出机械专业的特色,内容具有广泛的应用性和实用价值,易于学生掌握。

本书共十章,由安徽水利水电职业技术学院、河北师范大学职业技术学院、中国电子科技集团第三十八研究所等单位的教师和工程技术人员联合编写。编写分工如下:汤萍(第一、六、八章),何伟(第二章),柳吉庆(第三章),程玉(第四、七章),杜皓(第五章),赵华新(第九章),陈阳(第十章)。本书由程玉、汤萍任主编,何伟、柳吉庆任副主编。

本书由安徽水利水电职业技术学院孙敬华教授主审。孙敬华教授在审阅中对本书提出了很多宝贵的意见和建议,谨在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请广大读者批评指正。

编者

2015年3月

目 录

前言

第一章 测量技术基础	1
第一节 测量的基本概念	1
第二节 常用的计量器具的使用和测量方法的选择	5
第三节 测量误差和测量结果的数据处理	8
思考与练习	21
第二章 光滑圆柱的公差配合与检测	22
第一节 基本术语及定义	22
第二节 公差带的标准化	27
第三节 公差带与配合的选择	41
第四节 线性尺寸的一般公差	46
思考与练习	47
第三章 表面粗糙度与检测	50
第一节 表面粗糙度的基本概念	50
第二节 表面粗糙度的评定参数	51
第三节 表面粗糙度的选用与标注	54
第四节 表面粗糙度的检测	61
思考与练习	62
第四章 几何公差与检测	64
第一节 几何公差的基本概念	64
第二节 几何公差的标注方法	67
第三节 几何公差带及几何公差	74
第四节 公差原则	92
第五节 几何公差的选择	103
第六节 几何误差的检测	108
思考与练习	111
第五章 光滑极限量规	115
第一节 光滑极限量规的基本概念	115
第二节 光滑极限量规的公差带	116
第三节 工作量规的设计	119
思考与练习	123
第六章 键、花键的公差与检测	124
第一节 平键的公差与配合	124

第二节 矩形花键的公差与配合·····	126
第三节 键和花键的检测·····	128
思考与练习·····	129
第七章 滚动轴承的公差与检测·····	130
第一节 滚动轴承的应用与精度等级·····	130
第二节 滚动轴承与轴颈、外壳孔的配合·····	132
思考与练习·····	137
第八章 普通螺纹的公差与检测·····	139
第一节 螺纹的基本概念·····	139
第二节 普通螺纹几何参数对互换性的影响·····	143
第三节 普通螺纹的公差与配合·····	145
第四节 螺纹的检测·····	150
思考与练习·····	151
第九章 圆柱齿轮的公差与检测·····	152
第一节 渐开线圆柱齿轮传动精度的基本概念·····	152
第二节 齿轮精度的评定指标及检测·····	153
第三节 齿轮副的精度指标和侧隙指标·····	158
第四节 渐开线圆柱齿轮精度标准及检测·····	161
思考与练习·····	163
第十章 尺寸链·····	164
第一节 尺寸链的基本概念·····	164
第二节 极值法计算·····	167
第三节 统计法计算·····	173
思考与练习·····	177
参考文献·····	179

第一章 测量技术基础

在机械制造中,加工后的零件,其几何参数(尺寸、几何公差、表面粗糙度等)需要测量,以确定它们是否符合技术要求,并实现其互换性。

测量是指为确定被测量的量值而进行的实验过程,其实质是将被测几何量 L 与复现计量单位 E 的标准量进行比较,从而确定比值 q 的过程,即 $L/E=q$,或 $L=qE$ 。

一个完整的测量过程应包括 4 个要素。

(1) 测量对象:本课程涉及的测量对象是几何量,包括长度、角度、表面粗糙度轮廓、形状和位置误差等。

(2) 计量单位:在机械制造中常用的单位为毫米(mm)。

(3) 测量方法:是指测量时所采用的测量原理、计量器具及测量条件的总和。

(4) 测量精确度:是指测量结果与真值的一致程度。

第一节 测量的基本概念

学习目标

1. 了解尺寸量值传递系统。
2. 掌握量块的使用方法。

一、长度单位与量值传递系统

1. 长度单位及长度基准

为了进行长度计量,必须规定一个统一的标准,即长度计量单位。1984 年国务院发布了《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》,决定在采用先进的国际单位制的基础上,进一步统一我国的计量单位,并颁布了《中华人民共和国法定计量单位》,其中规定长度的基本单位为米(m)。机械制造中常用的长度单位为毫米(mm), $1\text{mm}=10^{-3}\text{m}$ 。

米的最初定义始于 1791 年的法国。随着科学技术的发展,对米的定义不断进行完善。1983 年,第十七届国际计量大会正式通过米的新定义如下:“米是光在真空中 $1/299\,792\,458\text{s}$ 时间间隔内所经过的距离”。由于频率(或波长)稳定的激光光源的频率(或波长)具有极高的稳定性和复现性,完全能够满足复现米定义的要求,因此,在现行米定义的复现过程中,作为波长基准装置的稳频激光系统扮演了十分重要的角色。目前,在世界范围内,现行有效的激光波长基准共有 12 个。其中,碘吸收稳定的 $0.633\mu\text{m}$ 氦氖激光波长标准是我国和国际上最重要的也是使用频度最高的波长标准。

2. 尺寸量值的传递

在实际生产和科研中,不便于用光波作为长度基准进行测量,而是采用各种计量器具进行测量。因此,必须建立长度量值传递系统,将复现的长度基准量值逐级准确地传递到计量器具和被测工件上去。长度量值分为两个平行的系统向下传递(见图 1-1):一个是端面量

具（量块）系统；另一个是刻线量具（线纹尺）系统。量块和线纹尺都是量值传递的媒介，其中量块的应用更为广泛。

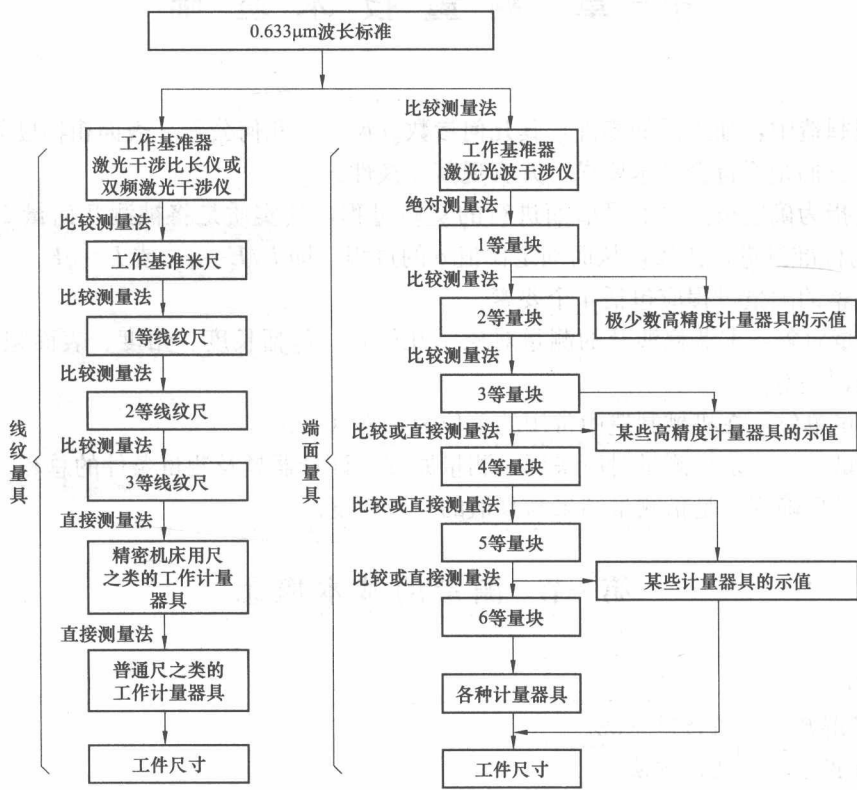


图 1-1 长度量值传递系统

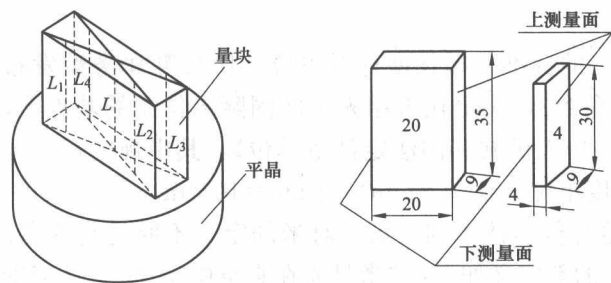


图 1-2 量块的形状和尺寸

二、量块

在实际生产和科研中，量块是没有刻度的、截面为矩形的平面平行的端面量具。如图 1-2 所示，量块上有两个平行的测量面，其表面光滑平整，两个测量面间具有精确的尺寸，另外还有四个非测量面。

量块长度 L_i ：从量块一个测量面上任意一点（距边缘 0.5mm 区域除外）

到与此量块另一个测量面相研合的面的垂直距离。

量块的中心长度 L ：从量块一个测量面上中心点到与此量块另一个测量面相研合的面的垂直距离。

量块的标称长度：量块上标出的尺寸。

为了能用较少的块数组合成所需要的尺寸，量块应按一定的尺寸系列成套生产供应。GB/T 6093—2001《几何量技术规范（GPS） 长度标准 量块》共规定了 17 种系列的成套量块。表 1-1 列出了其中四套量块的尺寸系列。

表 1-1 成套量块尺寸表 (摘自 GB/T 6093—2001)

套别	总块数	精度级别	尺寸系列 (mm)	间隔 (mm)	块数
1	91	00, 0, 1	0.5, 1	—	2
			1.001, 1.002, …, 1.009	0.001	9
			1.01, 1.02, …, 1.49	0.01	49
			1.5, 1.6, …, 1.9	0.1	5
			2.0, 2.5, …, 9.5	0.5	16
			10, 20, …, 100	10	10
2	83	00, 0, 1 2, (3)	0.5, 1, 1.005	—	3
			1.01, 1.02, …, 1.49	0.01	49
			1.5, 1.6, …, 1.9	0.1	5
			2.0, 2.5, …, 9.5	0.5	16
			10, 20, …, 100	10	10
3	46	0, 1, 2	1	—	1
			1.001, 1.002, …, 1.009	0.001	9
			1.01, 1.02, …, 1.09	0.01	9
			1.1, 1.2, …, 1.9	0.1	9
			2, 3, …, 9	1	8
			10, 20, …, 100	10	10
4	38	0, 1, 2 (3)	1, 1.005	—	2
			1.01, 1.02, …, 1.09	0.01	9
			1.1, 1.2, …, 1.9	0.1	9
			2, 3, …, 9	1	8
			10, 20, …, 100	10	10

根据不同的使用要求，量块做成不同的精度等级。划分量块精度有两种规定：按“级”划分和按“等”划分。

GB/T 6093—2001 按制造精度将量块分为 00、0、1、2、3 级，共五级，精度依次降低。此外，还规定了一个标准级，即 K 级。量块按“级”使用时，是以量块的标称长度作为工作尺寸，该尺寸包含了量块的制造误差，它们将被引入到测量结果中。

JJG 146—2003《量块检定规程》按检定精度将量块分为 1~6 等，精度依次降低。量块按“等”使用时，不再以标称长度作为工作尺寸，而是用量块经检定后所给出的实测中心长度作为工作尺寸，该尺寸排除了量块的制造误差，仅包含检定时较小的测量误差。

量块按“等”使用的测量精度比按“级”使用的测量精度要高。量块的精度指标见表 1-2 和表 1-3。

表 1-2 各级量块的精度指标 (摘自 GB/T 6093—2001) (μm)

标称长度 (mm)	00 级		0 级		1 级		2 级		3 级		标准级 K	
	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②
~10	0.06	0.05	0.12	0.10	0.20	0.16	0.45	0.30	1.0	0.50	0.20	0.05
>10~25	0.07	0.05	0.14	0.10	0.30	0.16	0.60	0.30	1.2	0.50	0.30	0.05
>25~50	0.10	0.06	0.20	0.10	0.40	0.18	0.80	0.30	1.6	0.55	0.40	0.06
>50~75	0.12	0.06	0.25	0.12	0.50	0.18	0.00	0.35	2.0	0.55	0.50	0.06
>75~100	0.14	0.07	0.30	0.12	0.60	0.20	0.20	0.35	2.5	0.60	0.60	0.07
>100~150	0.20	0.08	0.40	0.14	0.80	0.20	0.60	0.40	3.0	0.65	0.80	0.08

① 量块的标称长度偏差 (极限偏差±)。

② 长度变动量的允许值。

表 1-3 各等量块的精度指标 (摘自 JJG 146—2003) (μm)

标称长度 (mm)	1 等		2 等		3 等		4 等		5 等		6 等	
	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②
~10	0.022	0.05	0.06	0.10	0.11	0.16	0.22	0.30	0.6	0.50	2.1	0.50
>10~25	0.025	0.05	0.07	0.10	0.12	0.16	0.25	0.30	0.6	0.50	2.3	0.50
>25~50	0.030	0.06	0.08	0.10	0.15	0.18	0.30	0.30	0.8	0.55	2.6	0.55
>50~75	0.035	0.06	0.09	0.12	0.18	0.18	0.35	0.35	0.9	0.55	2.9	0.55
>75~100	0.040	0.07	0.10	0.12	0.20	0.20	0.40	0.35	1.0	0.60	3.2	0.60
>100~150	0.050	0.08	0.12	0.14	0.25	0.20	0.50	0.40	1.2	0.65	3.8	0.65

① 测量不确定度的允许值 (±)。
② 长度变动量的允许值。

量块在使用时,常常用几个量块组合成所需要的尺寸。组合量块时,为减小量块组合的累积误差,应力求使用最少的块数获得所需要的尺寸,一般不超过 4 块。

例如,使用 83 块一套的量块组,从中选取量块组成 33.625mm,查表 1-1,可按以下步骤选择量块尺寸:

- 33.625 量块组合尺寸
- 一) 1.005 第一块量块尺寸
- 32.620
- 一) 1.02 第二块量块尺寸
- 31.6
- 一) 1.6 第三块量块尺寸
- 30.000 第四块量块尺寸

三、角度量值传递系统

角度也是机械制造中重要的几何参数之一。

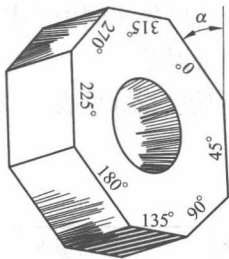


图 1-3 多面棱体

我国法定计量单位规定平面角的角度单位为弧度 (rad) 及度 (°)、分 (′)、秒 (″)。1rad 是指在一个圆的圆周上截取弧长与该圆的半径相等时所对应的中心平面角。1°=(π/180)rad。度、分、秒的关系采用 60 进位制,即 1°=60′,1′=60″。由于任何一个圆周均可形成封闭的 360°(2πrad) 中心平面角,因此,角度不需要和长度一样再建立一个自然基准。但在计量部门,为了工作方便,在高精度的分度中,仍常以多面棱体(见图 1-3)作为角度基准来建立角度传递系统。

多面棱体是用特殊合金钢或石英玻璃精细加工而成。常见多面棱体的工作面数有 4、6、8、12、24、36、72 等几种。图 1-3 所示为正八面棱体,在任意轴切面上,相邻两面法线间的夹角为 45°。它可作为 n×45° 角度的测量基准,其中 n=1,2,3,……。以多面棱体为基准的角度传递系统如图 1-4 所示。

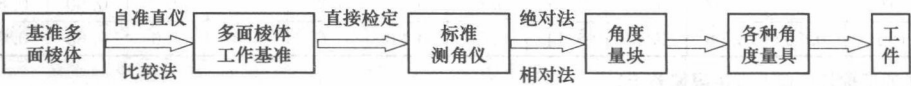


图 1-4 以多面棱体为角度基准的量值传递系统

四、角度量块

在角度量值传递系统中,角度量块是量值检定和调整普通精度的测角仪器,校正角度样板,也可直接用于检验工件。

角度量块有三角形和四边形两种,如图 1-5 所示。三角形角度量块只有一个工作角,角度值为 $10^{\circ}\sim 79^{\circ}$ 。四边形角度量块有 4 个工作角,角度值为 $80^{\circ}\sim 100^{\circ}$,并且在短边相邻的两个工作角之和为 180° ,即 $\alpha+\delta=\beta+\gamma$ 。

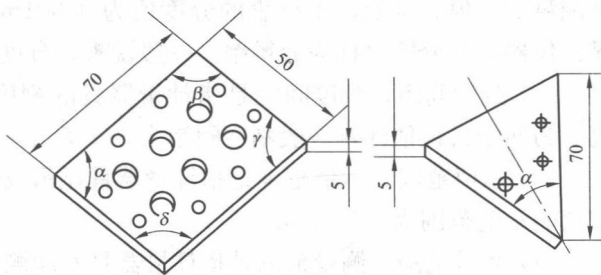


图 1-5 角度量块

第二节 常用的计量器具的使用和测量方法的选择

学习目标

1. 熟悉常用的计量器具。
2. 了解常用的测量方法。

一、计量器具的分类

1. 按用途分类

(1) 标准计量器具:是指测量时体现标准量的测量器具,通常用来校对和调整其他计量器具,或作为标准量与被测几何量进行比较,如线纹尺、量块、多面棱体等。

(2) 通用计量器具:指通用性大、可用来测量某一范围内各种尺寸(或其他几何量),并能获得具体读数值 of 的计量器具,如千分尺、百分表、测长仪等。

(3) 专用计量器具:是指用于专门测量某种或某个特定几何量的计量器具,如量规、圆度仪等。

2. 按结构和工作原理分类

(1) 机械式计量器具:是指通过机械方法实现对被测量的转换和放大的计量器具,如机械式比较仪、百分表等。

(2) 光学式计量器具:是指通过光学方法实现对被测量的转换和放大的计量器具,如光学比较仪、投影仪、工具显微镜等。

(3) 气动式计量器具:是指以压缩空气为介质,通过气动系统的状态(流量或压力)变化来实现对被测量的转换的计量器具,如水柱式和浮标式气动量仪等。

(4) 电动式计量器具:是指将被测量通过传感器转变为电量,再经变换而获得读数的计量器具,如电动轮廓仪、电感测微仪等。

(5) 光电式计量器具:是指利用光学方法放大或瞄准,通过光电元件再转换为电量进行检测,以实现几何量测量的计量器具,如光电显微镜、光电测长仪等。

二、计量器具的基本度量指标

度量指标是用来说明计量器具的性能和功用的,它是选择和使用计量器具,研究和判断测量方法正确性的依据。基本度量指标如下:

(1) 分度值(刻度值)。分度值是指在测量器具的标尺或度盘上,相邻两刻线间所代表被测量的量值。例如,千分表的分度值为 0.001mm ,百分表的分度值为 0.01mm 。对于数显式仪器,其分度值称为分辨率。一般说来,分度值越小,计量器具的测量精度越高。

(2) 刻度间距。刻度间距是指计量器具的刻度尺或刻度盘上相邻两刻线中心之间的距离。为便于目视估计,一般刻度间距为 $1\sim 2.5\text{mm}$ 。

(3) 示值范围。示值范围是指计量器具显示或指示的最小值到最大值的范围,如光学比较仪的示值范围为 $\pm 0.1\text{mm}$ 。

(4) 测量范围。测量范围是指计量器具所能测量零件的最小值到最大值的范围,如某一千分尺的测量范围为 $75\sim 100\text{mm}$ 。

(5) 灵敏度。灵敏度是指计量器具对被测量变化的反应能力。若被测量变化为 ΔL ,计量器具上相应变化为 Δx ,则灵敏度 S 为

$$S = \Delta x / \Delta L \quad (1-1)$$

当 Δx 和 ΔL 为同一类量时,灵敏度又称放大比,其值为常数。放大比 K 为

$$K = c / i \quad (1-2)$$

式中 c ——计量器具的刻度间距;

i ——计量器具的分度值。

(6) 测量力。测量力是指计量器具的测头与被测表面之间的接触力。在接触测量中,要求要有一定的恒定的测量力。测量力太大会使零件或测头产生变形,测量力不恒定会使示值不稳定。

(7) 示值误差。示值误差是指计量器具上的示值与被测量真值的代数差。

(8) 示值变动。示值变动是指在测量条件不变的情况下,用计量器具对被测量测量多次(一般 $5\sim 10$ 次)所得示值中的最大差值。

(9) 回程误差(滞后误差)。回程误差是指在相同条件下,对同一被测量进行往返两个方向测量时,计量器具示值的最大变动量。

(10) 不确定度。不确定度是指由于测量误差的存在而对被测量值不能肯定的程度。不确定度用极限误差表示,它是一个综合指标,包括示值误差、回程误差等。例如分度值为 0.01mm 的千分尺,在车间条件下测量一个尺寸小于 50mm 的零件时,其不确定度为 $\pm 0.004\text{mm}$ 。

三、测量方法的分类

按照不同的出发点,测量方法有不同的分类。

1. 直接测量和间接测量

直接测量是指直接从计量器具获得被测量的量值的测量方法。例如用游标卡尺、千分尺测量外圆直径,用比较仪测量长度尺寸等。

间接测量是指测量与被测量有一定函数关系的量,然后通过函数关系算出被测量的测量方法。例如测量大尺寸圆柱形零件直径 D 时,先测出其周长 L ,然后再按公式 $D=L/\pi$ 求得零件的直径 D 。

为减小测量误差,一般采用直接测量,必要时才采用间接测量。

2. 绝对测量和相对测量

绝对测量是指被测量的数值从计量器具的读数装置直接读出。例如用测长仪测量零件,

其尺寸由刻度尺上直接读出。

相对测量是指计量器具的示值仅表示被测量对已知标准量的偏差,而被测量的量值为计量器具的示值与标准量的代数和。例如用比较仪测量时,先用量块调整仪器零位,然后测量被测量,所获得的示值就是被测量相对于量块尺寸的偏差。

一般说来,相对测量的测量精度比绝对测量的测量精度高,尤其在量块出现后,为相对测量提供了有利条件,在生产中得到广泛应用。

3. 示值单项测量和综合测量

单项测量是指单独地、彼此没有联系地测量零件的单项参数。例如分别测量齿轮的齿厚、齿形、齿距等。这种方法一般用于量规的检定、工序间的测量,或用于工艺分析、调整机床等。

综合测量是指同时测量工件上某些相关的几何量的综合结果,以判断综合结果是否合格。例如用螺纹通规检验螺纹的单一中径、螺距和牙型半角实际值的综合结果,即作用中径。综合测量一般用于终结检验,其测量效率高,能有效保证互换性,在大批量生产中应用广泛。

单项测量的效率比综合测量低,但单项测量结果便于进行工艺分析。

4. 接触测量和非接触测量

接触测量是指计量器具在测量时,其测头与被测表面直接接触的测量,例如用卡尺、千分尺测量工件。为了保证接触的可靠性,测量力是必要的,但它可能使测量器具及被测件发生变形而产生测量误差,还可能破坏对零件被测表面质量。

非接触测量是指计量器具的测头与被测表面不接触的测量。属于非接触测量的仪器主要是利用光、气、电、磁等作为感应元件与被测件表面联系,例如干涉显微镜、磁力测厚仪、气动力仪等。

非接触测量较接触测量而言,不会产生因测头与被测表面接触引起的弹性形变,没有测量力引起的测量误差,因此特别适用于薄壁易变形工件或软质表面的测量。但此种测量方法对工件形状有一定要求,且要求工件定位可靠,没有颤动,表面清洁。

5. 主动测量和被动测量

主动测量又称在线测量或积极测量,是指在加工过程中对工件的测量。其测量结果用来控制工件的加工过程,决定是否需要继续加工或调整机床,可及时防止废品的产生。

被动测量又称离线测量或消极测量,是指在加工后对工件进行的测量,主要用来发现并剔除废品。

主动测量使检测与加工过程紧密结合,从而保证产品质量,是检测技术的发展方向。

6. 等精度测量和不等精度测量

等精度测量是指决定测量精度的全部因素或条件都不变的测量。例如由同一人员,使用同一台仪器,在同样的条件下,以同样的方法和测量次数,同样仔细地测量同一个量。实际上,绝对的等精度测量是不可实现的。

不等精度测量是指在测量过程中,决定测量精度的全部因素或条件可能完全改变或部分改变的测量。例如上述的测量,当改变其中之一或几个甚至全部条件或因素的测量,则为不等精度测量。

在一般情况下,为了简化测量结果的处理,大都采用等精度测量。不等精度测量的数据

处理比较麻烦,只运用于重要的科研实验中的高精度测量。

7. 静态测量和动态测量

静态测量是指测量时被测件表面与测量器具测头处于静止状态。例如用外径千分尺测量轴径、用齿距仪测量齿轮齿距等。

动态测量是指测量时被测零件表面与测量器具测头处于相对运动状态,或测量过程是模拟零件在工作或加工时的运动状态,它能反映生产过程中被测参数的变化过程。例如用激光比长仪测量精密线纹尺,用电动轮廓仪测量表面粗糙度等。

在动态测量中,往往有振动现象的发生,故而对测量仪器有特殊要求。因此,在静态测量中使用情况良好的仪器,在动态测量中不一定能得到满意的结果。

以上测量方法的分类是从不同的角度考虑的。一个具体的测量过程往往具有几种不同的测量方法特征。例如,用外径千分尺测量轴径,属于直接测量、绝对测量、接触测量、被动测量等。

确定一个完善的测量方法是一个综合性的问题,具体应考虑被测零件的结构特征、精度要求、生产批量、检测效率、经济效果等。

第三节 测量误差和测量结果的数据处理

学习目标

1. 掌握测量误差的种类和特性。
2. 掌握随机误差的分布及特性。
3. 掌握对测量结果进行数据处理的方法。

一、测量误差的概念

任何测量过程,由于受到计量器具和测量条件的影响,不可避免地会产生测量误差。测量误差可用绝对误差和相对误差来表示。

1. 绝对误差

绝对误差 δ 是指测得值 x 与其真值 x_0 之差,即

$$\delta = x - x_0 \quad (1-3)$$

由于测得值 x 可能大于或小于真值 x_0 ,所以绝对误差 δ 可能是正值也可能是负值。因此,真值可表示为

$$x_0 = x \pm |\delta| \quad (1-4)$$

式(1-4)说明,可用测得值 x 和绝对误差 δ 来估算真值 x_0 所在的范围。绝对误差的绝对值越小,说明测得值越接近真值,因此测量精度就高;反之,测量精度就低。

用绝对误差表示测量精度,适用于评定或比较大小相同的被测量的测量精度。对于大小不同的被测量,则需要用相对误差来评定或比较它们的测量精度。

2. 相对误差

测量的绝对误差与被测量的真值之比的绝对值称为相对误差,用 f 表示。由于真值是未知的,实践中常用测量结果代替。相对误差是一个无量纲的数据,常用百分数表示,即

$$f = \frac{|x - x_0|}{x_0} \times \% = \frac{|\delta|}{x_0} \times \% \approx \frac{|\delta|}{x} \times 100\% \quad (1-5)$$

例如, 测量某两个轴颈尺寸分别为 30mm 和 300mm, 它们的相对误差分别为 $f_1 = 0.03/30 = 0.1\%$, $f_2 = 0.03/300 = 0.01\%$, 由此可看出后者的测量精度要比前者高。

二、测量误差的来源

1. 计量器具误差

计量器具的误差是指计量器具本身所具有的误差, 包括计量器具的设计、制造和使用过程中的各项误差, 这些误差的综合反映可用计量器具的示值精度或精确度来表示。

此外, 相对测量时使用的标准量, 如量块、线纹尺等制造误差, 也将直接被反映到测量结果中。

2. 测量方法误差

测量方法误差是指测量方法不完善所引起的误差。包括计算公式不准确、测量方法选择不当, 测量基准不统一, 工件安装不合理以及测量力等引起的误差。例如测量圆柱的直径 D , 先测量周长 L , 再按 $D = L/\pi$ 计算直径, 若取 $\pi = 3.14$, 则计算结果会带入 π 取近似值的误差。

3. 测量环境误差

测量环境误差是指测量时的环境条件不符合标准条件所引起的误差。环境条件是指湿度、温度、振动、气压、灰尘等。其中, 温度对测量结果的影响最大。在长度计量中, 规定标准温度为 20°C 。若不能保证在标准温度 20°C 条件下进行测量而引起的测量误差可按下式进行计算:

$$\Delta L = L[a_2(t_2 - 20) - a_1(t_1 - 20)] \quad (1-6)$$

式中 ΔL ——测量误差;

L ——被测尺寸;

t_1 、 t_2 ——计量器具和被测工件的温度, $^\circ\text{C}$;

a_1 、 a_2 ——计量器具和被测工件的线膨胀系数。

为了减小温度引起的测量误差, 一般高准确度测量均在恒温条件下进行, 并要求被测工件与计量器具温度一致。

4. 人员误差

人员误差是指测量人员的主观因素所引起的误差。例如, 测量人员技术不熟练、视觉偏差、估读判断错误等引起的误差。

总之, 造成测量误差的因素很多, 测量时应采取相应的措施, 设法减小或消除它们对测量结果的影响, 以保证测量精度。

三、测量误差的种类和特征

测量误差按其性质分为随机误差、系统误差和粗大误差。

(一) 随机误差

随机误差是指在一定测量条件下, 多次测量同一量值时, 其数值大小和符号以不可预定的方式变化的误差。它是由于测量中的不稳定因素综合形成的, 是不可避免的。

1. 随机误差的分布规律

随机误差可用试验方法来确定。实践表明, 大多数情况下, 随机误差符合正态分布。

例如，对一轴，用同样的方法在同样条件下重复测量轴的同一部位尺寸 200 次，得到 200 个数据，其中最大值为 20.012mm，最小值为 19.990mm，然后按测得值大小分别归入 11 组，分组间隔为 0.002mm，有关数据见表 1-4。

表 1-4 测量数据统计表

组号	尺寸分组区间 (mm)	区间中心值 (mm)	频数 n_i (mm)	频率 n_i/n (mm)
1	19.990~19.992	19.991	2	0.010
2	19.992~19.994	19.993	4	0.020
3	19.994~19.996	19.995	10	0.050
4	19.996~19.998	19.997	24	0.120
5	19.998~20.000	19.999	37	0.185
6	20.000~20.002	20.001	45	0.225
7	20.002~20.004	20.003	39	0.195
8	20.004~20.006	20.005	23	0.115
9	20.006~20.008	20.007	12	0.060
10	20.008~20.010	20.009	3	0.015
11	20.010~20.012	20.011	1	0.005

根据表 1-4 所统计的数据，以尺寸为横坐标，以频数或频率为纵坐标，画出频率直方图，如图 1-6 (a) 所示。连接直方图各项线中点，得到一条折线，称为实际分布曲线。如果将上述测量次数无限增大 ($n \rightarrow \infty$)，再将分组间隔无限缩小 ($\Delta x \rightarrow 0$)，则实际分布曲线就会变成一条光滑的曲线，如图 1-6 (b) 所示。该曲线称为正态分布曲线，也称为高斯 (Gauss) 曲线。

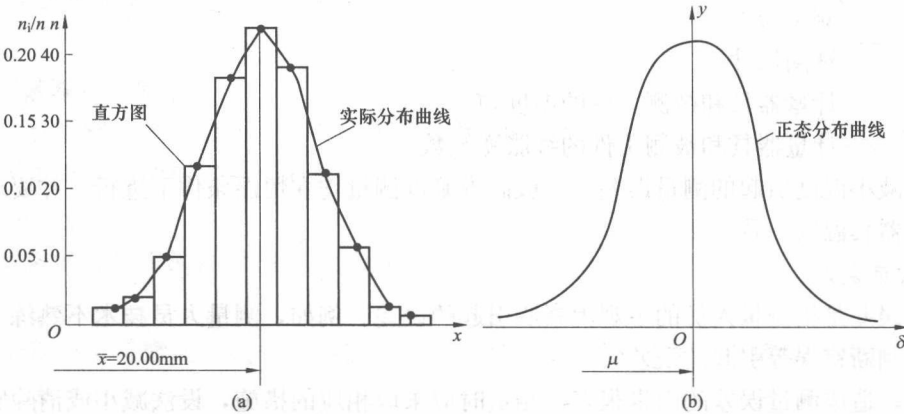


图 1-6 频率直方图和正太分布曲线
(a) 频率直方图；(b) 正态分布曲线

这时横坐标表示随机误差 δ ，纵坐标表示对应各随机误差的概率密度函数 y ，中心坐标为均值 μ 。正态分布曲线的数学表达式为

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \tag{1-7}$$

式中 y ——随机误差的概率分布密度；
 x ——随机变量；

x_0 ——数学期望（作为真值）；

δ ——随机误差；

σ ——标准偏差；

e ——自然对数的底， $e=2.718\ 28$ 。

可以看出：当 $\delta=0$ 时， y 最大， $y_{\max} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$ 。不同的 σ 对应不同形状的正态分布

曲线， σ 越小， $y_{\max}$ 值越大，曲线越陡，随机误差越集中，即测得值分布越集中，测量精度就越高； σ 越大， $y_{\max}$ 值越小，曲线越平坦，随机误差越分散，即测得值分布越分散，测量精度就越低。图 1-7 所示为 $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$ 时三种正态分布曲线。因此， σ 可作为表征各测得值的精度指标。正态分布中心位置的均值 μ 代表被测量的真值，标准偏差 σ 代表测得值的集中与分散程度。根据误差理论，标准偏差 σ 是各随机误差 δ 平方和的平均值的正平方根，即为

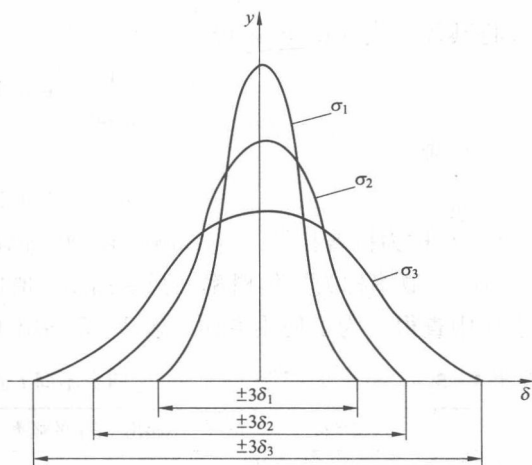


图 1-7 三种不同 σ 的正态分布曲线

$$\sigma = \sqrt{\frac{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \cdots + \delta_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}} \quad (1-8)$$

式中 n ——测量次数；

δ_i ——随机误差，即各次测得值与其真值之差。

2. 随机误差的特性

从正态分布曲线可以看出，随机误差具有以下特性：

- (1) 对称性：绝对值相等、符号相反的随机误差出现的概率相等。
- (2) 单峰性：绝对值小的随机误差出现的概率比绝对值大的随机误差出现的概率大。随机误差为零时，概率最大，存在一个最高点。
- (3) 抵偿性：在一定的测量条件下，多次重复进行测量，各次随机误差的代数和趋近于零。
- (4) 有界性：在一定的测量条件下，随机误差的绝对值不会超出一定的界限。

3. 随机误差的极限值

由随机误差的有界性可知，随机误差不会超出某一范围。随机误差的极限值是指测量极限误差，也就是测量误差可能出现的极限值。

若把整个误差曲线下包围的面积看作是所有随机误差出现的概率之和 P ，便可得到

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} y d\delta = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} d\delta = 1$$

研究随机误差出现在正、负无穷大区间的概率是没有实际意义的。在计量工作实践中，要研究的是随机误差出现在 $\pm\delta$ 范围内的概率 P ，于是便有