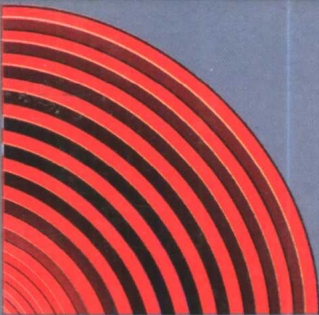




机械制造 检测技术手册

刘巽尔 主编
于春涇

冶金工业出版社
机械工业出版社

机械制造检测技术手册

刘巽尔 于春涇 主 编

冶金工业出版社
机械工业出版社

本手册的主要内容有：检测技术基础，长度标准与通用计量器具，线性尺寸检测，表面粗糙度检测，形状和位置误差检测，角度、锥度检测，平台检测，螺纹检测，齿轮测量，新技术在检测中的应用等。

本书适用于机械行业从事检测、制造、设计的工程技术人员、高级技术工人使用，亦可供高等工科院校机械类专业师生参考。

图书在版编目（CIP）数据

机械制造检测技术手册/刘巽尔，于春泾主编. —北京：冶金工业出版社 机械工业出版社，2000.3
ISBN 7-5024-2428-8

I. 机… II. ①刘…②于… III. 机械制造-技术
测量-技术手册 IV. TG8-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字（1999）第 52880 号

责任编辑：孙本绪 版式设计：冉晓华 责任校对：姚培新
封面设计：姚毅 责任印制：何全君
北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2000 年 3 月第 1 版·第 1 次印刷
787mm×1092mm¹/₁₆·28.75 印张·2 插页·705 千字
001—4 000 册
定价：54.00 元

前言

检测技术是保证机械产品质量的重要手段。零件的几何精度是机械产品质量的主要标志,也是机械行业进行质量体系认证工作的重要组成部分。

《机械制造检测技术手册》根据我国机械行业的实际需要,详尽介绍诸如线性尺寸、表面粗糙度、形状和位置误差、角度和锥度、平台、螺纹和丝杠、圆柱齿轮等零件基本几何精度和典型几何要素的常用检测技术的原理、方法和数据处理,以及有关几何量检测、测量误差和测量不确定度的概念与应用,并适当介绍各种极限量规、功能量规、新型传感技术、三坐标测量机和自动检测技术的基本原理与应用。为了帮助读者了解设计图样上对零件几何精度要求的概念及其表达形式,本手册还摘要介绍了近几年来颁布和实施的最新国家标准,如极限与配合、表面粗糙度、光滑工件尺寸的检验、形状和位置公差、功能量规等。各章还列举了适当的计算实例,如测量不确定度评定、齿距相对测量、量规工作尺寸计算、直线度和平面度误差评定、分度误差计算等,以供参考。

随着对外开放的扩大和测试仪器生产的发展,主要功能相同的测试仪器的型号和规格繁多,但它们只是在结构、外型、传感技术、数据显示与处理手段等方面有所变化,以实现使用方便、提高测量效率和测量精度、改善外观以及降低成本的要求,而其基本测量原理仍是相同的。因此,本手册主要介绍各种检测对象的测量原理与方法,而不详细说明测试仪器的型号、工作原理及操作技术。

本手册由刘巽尔、于春泾主编。各章执笔人员为:第一章于春泾,第二章郭振英,第三章刘巽尔、郭振英,第四章于春泾,第五章刘巽尔、庞瑞华,第六章庞瑞华,第七章何永熹,第八章于春泾,第九章齐宝玲,第十章何永熹。

本手册适用于机械行业从事检测、制造、设计和管理工作的工程技术人员和技术工人,亦可供高等院校机械类专业师生参考。

编者诚挚地希望得到读者的批评与指正。

编者
2000年1月

目 录

前言

第一章 检测技术基础

第一节 基本知识	1
第二节 测量误差	6
第三节 测量不确定度	19

第二章 长度标准与通用计量器具

第一节 长度计量标准	23
第二节 普通量具	30
第三节 比较仪	41
第四节 测长仪和测长机	48
第五节 投影仪和工具显微镜	50
第六节 自准直仪	54
第七节 光学分度头	56
第八节 气动量仪	57

第三章 线性尺寸检测

第一节 极限与配合	62
第二节 光滑工件尺寸的检验标准	75
第三节 轴和孔的测量	78
第四节 大尺寸的测量	86
第五节 光滑极限量规	96
第六节 高度、深度量规	100

第四章 表面粗糙度检测

第一节 表面粗糙度标准	103
第二节 样板比较法	111
第三节 光切法	112
第四节 干涉法	114
第五节 触针法	116
第六节 印模法	116
第七节 其他方法	117

第五章 形状和位置误差检测

第一节 形状和位置公差	118
第二节 形状和位置误差	139
第三节 形状误差的评定与检测	151
第四节 定向误差的评定与检测	189
第五节 定位误差的评定与检测	196
第六节 轮廓度误差的检测	201
第七节 跳动的检测	203
第八节 功能量规	205

第六章 角度、锥度检测

第一节 概述	221
第二节 比较法测量	228
第三节 绝对法测量	230
第四节 间接法测量	238
第五节 角度块的检定	248
第六节 圆分度的检定	252
第七节 角度和锥度量规	265

第七章 平台检测

第一节 平台检测基础	272
第二节 半径与直径测量	280
第三节 交点尺寸测量	284
第四节 相关尺寸测量	292
第五节 单角度斜孔坐标尺寸测量	294
第六节 空间直线测量	298
第七节 空间平面测量	302

第八章 螺纹检测

第一节 基本概念	307
第二节 普通螺纹标准	309
第三节 其他螺纹标准	319
第四节 外螺纹测量	331

第五节	内螺纹测量	344
第六节	圆锥螺纹测量	349
第七节	丝杠测量	355
第八节	螺纹量规	358

第九章 齿轮测量

第一节	渐开线圆柱齿轮公差	366
第二节	圆柱齿轮综合测量	381

第三节	圆柱齿轮单项测量	386
第四节	圆柱齿轮副测量	419

第十章 新技术的应用

第一节	新型传感技术与应用	422
第二节	三坐标测量机	446
第三节	自动检测技术	450

参考文献		452
------	-------	-----

第一章 检测技术基础

第一节 基本知识

一、测量与检验

(一) 测量

“测量”是以确定量值为目的的全部操作。测量过程实际上就是一个比较的过程，也就是将被测量和标准量（或单位量）进行比较，并确定其比值的过程。

通过测量可以得到被测量的具体数值（以单位量的倍数或分数表示）。一个完整的测量过程应包括被测对象、计量单位、测量方法（包括测量器具）和测量误差等四个要素。

(二) 检验

“检验”是确定产品是否满足设计要求的过程。

将测量结果与设计要求相比较，从而判定其合格性，称为“测量检验”。它是一种定量检验。用量规进行检验是一种定性检验。量规是一种无刻度的专用量具，结构简单，精度可靠，使用方便、检验效率高。

量规一般可分成两大类。一类是极限量规，主要用于判断被测尺寸是否在两极限尺寸之间。另一类是综合量规，用于判断被测实际轮廓是否超越设计给定的边界。综合量规包括形状、位置综合量规、花键量规（通端）、螺纹量规（通端）等。

各种量规的分类、作用、结构尺寸及公差带分布可参阅有关章节。

二、长度基准及标准

计量单位及其基准的建立是进行测量的基础。几何量的计量单位包括长度单位和角度单位两类。

(一) 长度单位及其基准

在国际单位制（SI）及我国法定计量单位中，长度的基本单位名称是“米”，其单位符号为“m”。

“米”的定义于18世纪末始于法国，当时规定“‘米’等于经过巴黎的地球子午线的四千万分之一”。19世纪“米”逐渐成为国际通用的长度单位。1889年在法国巴黎召开了第一届国际计量大会，从国际计量局订制的30根米尺中，选出了作为统一国际长度单位量值的一根米尺，把它称之为“国际米原器”。大会确定“米”的定义为：“米是在国际计量局保存的国际米原器上两端刻划的中间刻线的轴线在0℃时的距离”。国际米原器是当时国际上具有最高计量特性的标准米尺，其复现精度为 1.1×10^{-7} 。国际米原器一端的形状如图1-1所示。

由于实物计量基准的复现精度较低，容易变形，且损坏后难以复制，因此，1960年第十一届国际计量大会废除了以国际米原器为基准

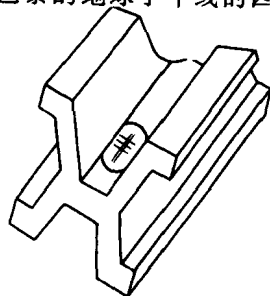


图 1-1 国际米原器的一端

的米的定义，而代之以的光波波长作为长度基准的米定义，并规定：“‘米’等于氪-86 原子在 $2p_{10}$ 和 $5d_5$ 能级之间跃迁时的辐射在真空中的波长的 1650763.73 倍”，从而实现了长度单位建立在自然基准上的设想。其复现精度可达 4×10^{-9} 。

1983 年第 17 届国际计量大会又更新了米的定义，规定：“‘米’是在真空中在 $1/299792458s$ 的时间间隔内行程的长度”。该定义的特点是把反映物理量单位概念的定义与复现单位的方法分开，使复现精度的提高不受定义的限制。

由于激光具有方向性好，稳定性好等诸多优点，且复现精度可达 3×10^{-11} ，故在精密测量中，“米”的定义主要采用二氧化碳、碘等稳频激光器来实现。

（二）角度单位及其基准

在国际单位制（SI）及我国法定计量单位中，立体角的单位名称是“球面度”，其单位符号为“sr”，平面角的单位名称是“弧度”，其单位符号为“rad”，为辅助单位。另外，我国在平面角的单位中还保留了 60 进制的（°）（度）、（′）（分）、（″）（秒）单位，它们与弧度的换算关系为 $1^\circ = \pi/180\text{rad}$ 、 $1' = (1/60)^\circ = \pi/10800\text{rad}$ 、 $1'' = (1/60)' = \pi/648000\text{rad}$ 。

角度基准和长度基准有本质的区别。角度的自然基准是客观存在的，因为一个整圆所对应的圆心角是定值（ $2\pi\text{rad}$ 或 360° ）。因此，将整圆任意等分得到的角度的实际大小，可以通过各角度相互比较，利用圆周角的封闭性求出。这就是角度基准的复现方法。

（三）量值传递与溯源性

量值传递是“将国家计量基准所复现的计量单位的量值，通过检定（或其它方法）传递给下一等级的计量标准（器），并依次逐级传递到工作计量器具上，以保证被测对象的量值准确一致的方式”。

国家计量基准就是国家规定作为统一全国量值最高依据的计量标准。它可以代表国家参加国际对比，使其量值与国际计量基准的量值保持一致。副基准是与国家基准比较以确定其量值的计量标准，其地位仅次于国家基准。工作基准则是通过与副基准（或国家基准）比较以确定其量值的计量标准。工作基准可用于检定一等计量标准或高精度的计量器具。

综上所述，尺寸传递系统如下：

国家基准（副基准）——工作基准——计量器具。

长度计量检定系统有端面量具和刻线量具两个子系统、角度计量检定系统由基准棱体起逐级传递。

量值传递目的是保证量值准确一致，而量值准确一致的前提是，计量结果必须具有“溯源性”，即被测量值必须具有能与国家计量基准或国际计量基准相联系的特性。所用计量器具要获得这一特性，就必须经过具有较高准确度的计量标准的检定，而该计量标准又需受到上一级计量标准的检定，逐级往上溯源，直至国家计量基准或国际计量基准。因此，在 GB/T19000 “质量管理和质量保证”系列标准中，对企业的计量器具提出了“溯源性”的要求，从而实现了企业的量值在国际范围内合理的统一。

（四）端面量具和刻线量具

端面量具就是量块。量块是一种可以组合使用的单位量具。它是一种准确度很高、应用很广的实物计量标准。

另一种实物计量标准就是刻线量具，其种类较多，凡是稳定的在一条直线上呈周期性均匀排列的物体或物理现象都有可能作为刻线量具，如线纹尺、线位移光栅、感应同步器、磁

尺、电栅、直线编码器等。

(五) 角度实物标准器

角度实物标准除端面，线纹两种标准器外，还有机械分度标准及量子测角标准。

端面角度标准有角度块和多面棱体。角度块包括只有一个工作角的和具有 4 个工作角两种，它们可以组合使用。多面棱体是一种高准确度的正多边形多值量具。

线纹角度标准的种类较多，凡是在圆周上呈周期性均匀排列并可等分圆周的实物或物理现象皆可成为线纹角度标准。线纹角度标准器除刻度盘外，还有圆光栅、圆感应同步器、磁性度盘、电栅盘和编码盘等。机械分度标准器有多齿分度盘、分度台和分度蜗轮等。量子测角标准器指的是环形激光器。

三、测量方法的分类

测量方法可根据其获得测量结果的方式，特点和作用等进行不同的分类：

(一) 直接测量法与间接测量法

直接测量法——不必对与被测量有函数关系的其它量进行测量，而能直接得到被测量值的测量方法。例如用卡尺测量轴的直径。

间接测量法——通过对与被测量有函数关系的其它量的测量，而得到被测量值的测量方法。例如在图 1-2 所示零件上，被测量是半径 R ，而实际测量的是与半径 R 有函数关系的弦长 L 和弓高 H ，再由公式 $R = L^2/8H + H/2$ 求出半径 R 的量值。

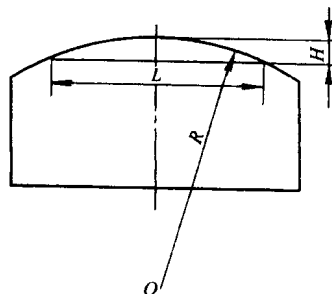


图 1-2 间接测量的实例

(二) 直接比较测量法与微差测量法

直接比较测量法——将被测量直接与已知其量值的同种量相比较的测量方法。例如，用卡尺或百分尺测量轴径。

微差测量法——将被测量与同它的量值只有微小差别的同一种已知量相比较、并测量这两个量值之差的方法。例如，比较仪用量块调零后测量轴的直径。比较仪的示值就是量块与轴径的量值之差。

(三) 接触测量法与非接触测量法

接触测量法——测量仪器的敏感元件（测头）与被测表面发生机械接触并有机作用力的测量方法。例如，用卡尺或百分尺测量工件尺寸。

非接触测量法——测量仪器的敏感元件与被测表面不直接接触的测量方法。例如，用工具显微镜或投影仪测量工件尺寸。

(四) 被动测量法与主动测量法

被动测量法——对完工后零件进行测量，并按其测量结果判别其合格性的测量方法。

主动测量法——在加工过程中测量工件尺寸的变化，并按测量结果及时地调整或控制加工过程，以防止产生废品的测量方法。

(五) 单项测量法与综合测量法

单项测量法——单独测量工件的各个参数。例如分别测量螺纹的实际中径、螺距、牙型半角等。

综合测量法——测量工件几个相关参数的综合效应或综合参数。例如，测量螺纹作用中径、测量齿轮的综合误差等。

(六) 静态测量法与动态测量法

静态测量法——若在测量过程中，被测量值可以认为是恒定的，称为静态测量法。例如，量块的检定、用百分尺测量轴径等

动态测量法——若在测量过程中，被测量值是随时间变化的，称为动态测量法。例如，在单面啮合检查仪上测量齿轮综合误差、在丝杠动态检查仪上测量螺旋线误差等。

(七) 等精度测量法与不等精度测量法

等精度测量法——在测量过程中，决定测量精度的全部因素或条件是不变的。例如在相同的条件下、用同一台仪器，由同一个人测量同一个量，求测量结果平均值时所依据的测量次数也相同，则可认为每一测量结果的可靠性和精确程度都是相同的。通常都采用等精度测量。

不等精度测量法——在测量过程中，决定测量精度的因素完全改变或部分改变。

以上测量方法的分类是从不同角度考虑的，对于某一具体测量过程，可能兼有多种测量方法的特征。此外，尚有符合测量法、替代测量法等多种其它测量方法，不再一一介绍。

四、测量器具及其技术性能指标

(一) 测量器具的种类

测量器具是量具、测量仪器及测量装置的总称。

1. 量具

量具（即实物量具）是一种具有固定形态、用以复现或提供一个或多个已知量值的器具。例如，量块、多面棱体、直角尺、线纹尺等都是量具。有些量具可组合使用，如量块、角度块等。

2. 测量仪器

测量仪器是一种单独或与其它设备一起使用进行测量工作的器具。它可将被测量转换成可直接观察的示值或等效信息。例如，百分尺、比较仪、圆度仪等都是测量仪器。

通常，测量仪器又可分为机械式、光学式、气动式、电动式等。

3. 测量装置

测量装置是为确定被测量值所必须的一台或若干台测量仪器（或量具）连同有关的辅助设备所构成的系统。

(二) 测量器具的总体构成

测量器具一般由三部分构成：输入部分、中间变换部分和输出部分，如图 1-3 所示。

输入部分主要指传感器、敏感元件等。传感器的作用是将被测量的信息（激励）转变成便于处理的信号。在几何量测量中，作用于传感器上的信息主要是位移，传感器则将其转

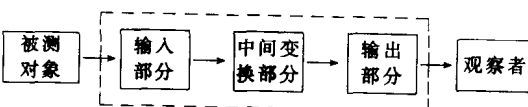


图1-3 测量器具总体构成方框图

换成便于处理的其他物理量。例如，电感传感器可将位移信号转换为电感量的变化。有的仪器输入部分不起转换作用。例如，机械比较仪的测杆只传递位移而不将其转换成其他物理量。

通常把测量器具的输入信息或被测量值，统称为“激励”。

中间变换部分把来自输入部分的信号进行放大、滤波、调制解调、运算或分析等变换，使之适合输出的需要。例如，电感测微仪的中间变换部分包括振荡器和放大器，它们将电感量

的变化放大、整流以得到与测杆位移成比例的电压信号；机械比较仪的中间变换部分只起放大作用，由正弦杠杆机构将位移信号放大。

输出部分包括指示装置和记录装置，它将被测量的等效信息提供给观察者或电子计算机。例如，电测微仪的输出部分是指示电表，可显示示值，亦可通过记录器画出误差曲线，或把信息送入电子计算机给出测量结果；机械比较仪则是用指针和表盘显示经过放大的位移量。

通常把测量器具提供的输出信号、示值或记录器的记录值等，统称为“响应”。

（三）测量器具及其技术性能指标

1. 分度值与分度间距

分度值——测量器具的标尺上相邻两刻线所代表的量值之差。例如，百分尺的微分套筒上相邻两刻线所代表的量值之差为 0.01mm，故其分度值为 0.01mm。分度值表示测量器具所能读出的被测尺寸的最小量值。一般地说，分度值越小，测量器具的精度越高。

分度间距——标尺或圆刻度盘上相邻两刻线中心的距离或圆弧长度。为了便于目力估计 1/10 分度值，一般量仪的分度间距在 1~2.5mm 之间。

2. 示值范围与测量范围

示值范围——由测量器具所显示或指示的最低值到最高值的范围。表示示值范围时，应标示最低值（起始值）和最高值（终止值）。例如，机械比较仪的示值范围为 -0.1~+0.1mm（或 ±0.1mm）。

测量范围——使测量器具误差处于规定极限内的一组被测量值。它的上、下限有时分别称为最大能力和最小能力。例如，某百分尺的测量范围为 25~50mm。

3. 灵敏度与鉴别力阈

灵敏度——测量仪器的响应变化 Δy 与相应激励变化 Δx 之商。即

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

在分子分母是同一类物理量的情况下，灵敏度亦称放大比。带有等分刻度标尺的线性量仪，其灵敏度为常数。它等于分度间距与分度值之比。

鉴别力阈——使测量仪器的响应产生可感知的变化的最小激励变化。也可以说是量仪对被测量值微小变化的不敏感程度，故习惯上也称其为灵敏阈或灵敏限。鉴别力阈与诸如内部或外部的噪声、摩擦、阻尼、惯性等因素有关。

4. 滞后与滞后误差

滞后——测量仪器对给定激励的响应与先前激励顺序有关的一种特性。

滞后误差——当激励恒定时，在相同条件下，测量仪器沿正、反行程在同一点上响应的变化量，习惯上也称为回程误差。

例如，当千分表的测杆从下向上和从上向下到同一位置时的示值往往是不同的，其差值就是滞后误差。它与摩擦力、机械元件之间的游隙、弹性材料形变等因素有关。

5. 稳定性与漂移

稳定性——测量仪器保持其测量特性恒定的能力。通常，稳定性是对时间而言的。

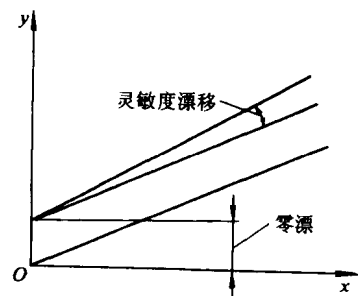


图 1-4 漂移

漂移——测量仪器的测量特性随时间的缓慢变化。例如，线性测量仪器静态响应特性 ($y=Kx$) 的漂移，表现为零点和斜率随时间的缓慢变化，前者称为仪器的零漂，后者称为仪器的灵敏度漂移，如图 1-4 所示。

6. 准确度与示值误差

准确度——测量仪器给出接近于被测量真值的示值的能力。

示值误差——测量仪器的示值与被测量的（约定）真值之差。示值误差是测量仪器本身各种误差的综合反映。

7. 偏差误差与抗偏差性

偏差误差——测量仪器示值误差中的系统误差分量。

抗偏差性——测量仪器给出的示值不受偏差误差影响的能力。

8. 重复性误差与重复性

重复性误差——测量仪器示值误差中的随机误差分量。

重复性——在规定的使用条件下，重复用相同的激励，测量仪器给出非常相似响应的能力。

第二节 测量误差

一、基本概念

（一）测量误差的含义

测量的目的是确定被测量的真值，但在测量过程中，由于测量器具本身的误差以及受到测量方法、测量条件诸因素的制约，其测得值往往不是被测量的真值，两者之间必然存在着差异。这种由于测量的不完善造成的测得值与被测量真值之间的差异，称为测量误差。

（二）测量误差的来源

测量误差的来源是多方面的，主要来源如下：

1. 标准器具误差

线纹尺、量块等标准器具本身也是有误差的，如线纹尺的刻线误差，量块中心长度的制造误差，以及它们的检定误差。标准器具的误差是测量误差的主要来源之一。

2. 测量器具误差

测量器具误差是指测量器具的内在误差。

（1）原理误差 设计测量器具时，以近似的实际工作原理代替理论工作原理所造成的误差称为原理误差。例如，以线性标尺代替理论上要求的非线性标尺造成的误差。原理误差往往已在设计时进行修正，故可忽略不计。

（2）阿贝误差 由于量仪的结构或工件的安置违背“阿贝原则”所造成的误差称为阿贝误差。“阿贝原则”是要求被测长度与基准长度安置在同一直线上的原则。如图 1-5 所示，其中阿贝比长仪图 1-5a 符

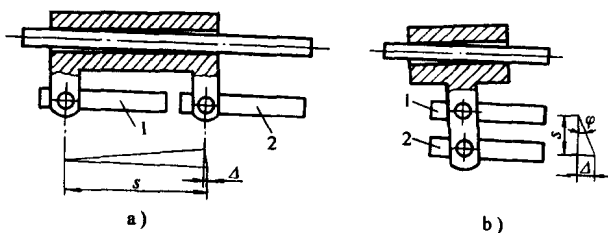


图 1-5 两种比长仪

a) 阿贝比长仪 b) 纵向比长仪

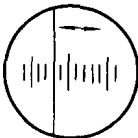
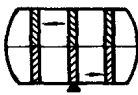
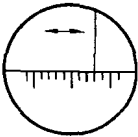
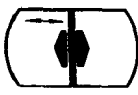
1—基准尺 2—被测尺

合阿贝原则，而纵向比较仪图(1-5b)则违背阿贝原则。违背阿贝原则所造成的阿贝误差($\Delta = S \cdot \varphi$)为一阶误差，不能忽略。

(3) 制造与装调误差 测量器具的各个零部件的制造与装调误差都会引起测量误差。例如，表盘的制造、安装误差，测微螺杆的螺距误差，光学系统的放大倍数、鉴别率的误差以及电器元件各参数误差等。

(4) 读数方式误差 对于采用指针或指标线对准刻线进行读数的装置所造成的读数方式误差，由对准误差、视差和估读误差三部分组成。各种对准方式的对准误差见表 1-1。

表 1-1 对准方式与对准误差

对准方式	简 图	在明视距离处的对准误差		对准方式	简 图	在明视距离处的对准误差	
		角度值/ (")	线 值/ μm			角度值/ (")	线 值/ μm
单实线重合		± 60	75	双线线端对准		$\pm 5 \sim 10$	7~12
单线线端对准		$\pm 10 \sim 20$	12~25	双线对称跨单线		± 5	7

3. 测量方法误差

测量方法不同，测量误差的来源也不同。

(1) 间接测量的函数误差 采用间接测量时，需按一定的函数关系计算测量误差。如图 1-2 所示零件的半径 R 是通过间接测量法得到的。因此半径 R 的测量误差与弓高 H 和弦长 L 的直接测量误差及其函数关系有关。

(2) 测量力引起的误差 采用接触测量时，为了保证可靠的接触，必须给测头施加一定的测量力。测量力将使被测工件和测量器具的零部件产生弹性变形或其它状态的变化（如间隙、摩擦等状态之变化），引起测量误差。在一般测量中此项误差可以忽略，但在精密测量或对小尺寸、软材料测量时，应予以分析、估算并在必要时加以修正。接触测量中压陷量的计算公式列于表 1-2

(3) 定位安装方法误差 由被测工件测量基面的选定及其安装方式所造成的误差称为定位安装方法误差。当所选测量基面与设计基面或工艺基面不重合时，会产生定位方法误差。若测量基面选择正确，则由于安装方式的不同，也会产生不同的测量误差。例如，测量轴径时，若将工件置于平台上就存在素线形状误差的影响，而安装在小球台上，并在摆动中测量，就不存在安装方式误差，如图 1-6 所示。

4. 测量环境误差

温度、气压、湿度、振动、空气净化程度等因素的变动或对标准值的偏离所造成的测量误差，称为测量环境误差。在一般测量中，温度的影响是最主要的。

表 1-2 压陷量计算公式

接触方式	球对圆柱或球对球	球对平面	平面对圆柱
图示			
计算公式 (μm)	$K_1 \sqrt[3]{P^2 \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right)}$	$K_1 \sqrt[3]{\frac{P^2}{d}}$	$K_2 \frac{P}{l} \sqrt[3]{\frac{1}{D}}$

式中 P ——测量力 (N);

d ——球形测量头直径 (mm);

D ——被测工件直径 (mm);

l ——接触长度 (mm), 即平面测量头直径;

K_1 、 K_2 ——不同情况下的材料系数。

系 数	钢对钢	硬质合金对钢	钢对青铜	硬质合金对青铜	钢对黄铜
K_1	1.9	1.4	2.3	2.0	2.4
K_2	0.41	0.4	—	—	—

在几何量测量中, 标准温度为 $+20^\circ\text{C}$ 。当实际温度偏离 $+20^\circ\text{C}$ 时, 所引起之测量误差可按式计算:

$$\begin{aligned} \Delta L &= L[\alpha_2(t_2 - 20) - \alpha_1(t_1 - 20)] \\ &= L[(\alpha_2 - \alpha_1)(t_2 - 20) + \alpha_1(t_2 - t_1)] \end{aligned}$$

式中 L ——被测长度;

α_1 、 α_2 ——标准件和被测工件的线胀系数。常用材料的线胀系数列于表 1-3;

t_1 、 t_2 ——标准件和被测工件的实际温度。

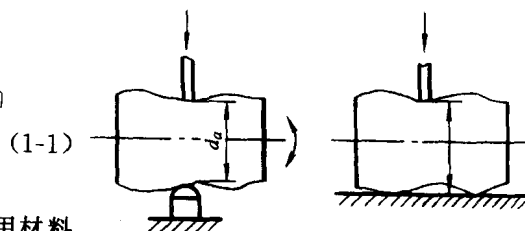


图 1-6 测量时的安装方式

在精密测量中, 为减小温度误差, 应保持恒温 (保持室内温度为 $+20^\circ\text{C}$) 和定温 (使被测工件和标准件温度保持一致)。此外, 还须防止诸如光源照射、人体温度等局部热源的影响。

表 1-3 常用材料的线胀系数 α (10⁻⁶/°C)

材 料	钢	铸 铁	青 铜	黄 铜	铝合金	镁合金	玻 璃	塑 料
α	11.5	10	17	18	23	26	6~10	37~60

温度的随机波动或温度本身的检定误差也会引起测量误差, 其大小可按随机误差合成的方法估算, 即

$$\Delta L = \pm L \sqrt{(\alpha_2 - \alpha_1)^2 \Delta t_2^2 + \alpha_1^2 (t_2 - t_1)^2} \quad (1-2)$$

式中 Δt_2 ——温度的变化范围。

当被测工件与标准件的材料相同时,在式(1-2)中取 $(\alpha_2 - \alpha_1) \approx 2$ 。因为相同材料的线胀系数也不完全相等。若被测工件与标准件经过定温,则可取 $(t_2 - t_1) = 0.5 \sim 1^\circ\text{C}$ 。

5. 测量人员误差

除了完全自动的测量过程以外,测量总离不开人的操作,因而测量人员的工作责任心、技术熟练程度、生理上的调节能力以及测量习惯等因素都可能影响测量误差。因此应不断提高测量人员的素质和技术水平,以减小此项误差。

(三) 测量误差分类

按产生原因及对测得值的影响,测量误差可分成三种基本类型:

1. 系统误差

在相同条件下,保持恒定或以可预知的方式变化的测量误差,称为系统误差。

系统误差的出现具有必然性。一般是由在测量之前就已存在,并在测量过程中始终以确定规律产生较显著影响的误差因素所造成的。系统误差有定值和变值两种。例如,采用微差测量法时调零所用量块的中心长度误差对各测得值的影响是相同的,它所引起的测量误差为定值系统误差。再如,由于指示表表盘安装偏心所造成的测量误差是按正弦规律变化的,则属变值系统误差。

系统误差是有确定规律的,有些系统误差可以通过分析、实验或检定掌握其规律,并对其进行估算,称为已定系统误差。已定系统误差可以消除或修正。有些系统误差的产生原因或大小难以确定,只能大致估算其可能出现的范围,称为未定系统误差。未定系统误差无法消除,也不可能对测得值进行修正。

2. 随机误差

在相同条件下,以不可预知的方式变化的测量误差,称为随机误差。

随机误差的出现具有偶然性或随机性。随机误差一般是在测量过程中存在的多种多样大小和方向各不相同,又都不很显著的误差因素的综合作用造成的。例如,测量器具中机械传动系统的支承间隙的变化,构件间的摩擦或受力变形,外界条件(如温度、电源、电磁场等因素)的随机波动等。由于此类误差的影响因素极为复杂,它对每次测得值的影响无规律可循,因此无法消除或修正。

在一定测量条件下进行大量重复测量时,随机误差既有相应的变动范围,又会偏向于某一值,其总体具有统计规律性。这是随机误差的重要特点。

3. 粗大误差

在相同条件下,由于某种反常原因造成的、显著歪曲测得值的测量误差,称为粗大误差。

粗大误差的出现具有突然性。它是由某些偶尔发生的反常因素造成的。例如,外界的突然振动,测量人员的粗心大意造成某次操作、读数或记录错误等。粗大误差会显著歪曲测得值,因此,应在一系列测得值中按一定的判别准则予以剔除。

(四) 测量精度

测量精度有三个概念;正确度、精密度和准确度(精确度)。

(1) 正确度 在相同条件下,对同一量进行多次测量时,各测得值的分布中心或其算术平均值与真值的符合程度。正确度的高低取决于系统误差的大小。

(2) 精密度 在相同条件下,对同一量进行多次测量时,各测得值之间的一致程度。精

密度的高低取决于随机误差的大小。

(3) 准确度（精确度） 在相同条件下，对同一量进行多次测量时，各测得值与其真值的一致程度。准确度的高低取决于系统误差和随机误差的综合影响。

以打靶为例，着弹点如图 1-7 所示。图 1-7a 表示正确度高而精密度低，图 1-7b 表示精密度高而正确度低、图 1-7c 表示准确度高，即正确度和精密度都高。

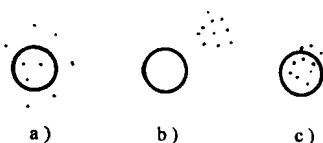


图 1-7 精度的概念

a) 正确度高 b) 精密度高
c) 准确度高

二、随机误差

(一) 随机误差的分布规律

虽然随机误差在每次测量中的出现具有偶然性，但就其总体来讲仍然具有一定的规律性。经过长期实践，人们在大量重复测量的基础上，总结出了随机误差的分布规律，并把这种方法称为实验统计法。下面举例说明实验统计法的步骤：

用立式测长仪在工件的同一部位上，重复测量 $N=200$ 次。将 200 个测得值分成 9 组，统计每组内测得值出现的次数 n_i 和频率 n_i/N ，并列入表 1-4。以测得值 x 为横坐标、频率 n_i/N 为纵坐标作图，并连接各组中值 x_i 的纵坐标 y_i （图 1-8），所得折线即为测得值的实验分布曲线。在相同条件下，多次作类似的大量重复测量，各实验分布曲线均相近似。这说明随机误差具有一定的统计规律，而且重复测量次数越多，这种统计规律越稳定。经过对大量的实验分布曲线形状的分析，可以归纳出随机误差具有以下三个统计特性：

表 1-4 实验统计表

1	2	3	4	5	6
组序 i	测得值 x 的范围 /mm	各组的中值 x_i /mm	出现次数 n_i	频 率 $y_i = \frac{n_i}{N}$	残 差 $v_i = x_i - \bar{x}$
1	7.99825~7.99875	7.9985	2	0.01	-0.002
2	7.99875~7.99925	7.9990	4	0.02	-0.0015
3	7.99925~7.99975	7.9995	16	0.08	-0.001
4	7.99975~8.00025	8.0000	38	0.19	-0.0005
5	8.00025~8.00075	8.0005	78	0.39	0
6	8.00075~8.00125	8.0010	40	0.20	+0.0005
7	8.00125~8.00175	8.0015	18	0.09	+0.001
8	8.00175~8.00225	8.0020	3	0.015	+0.0015
9	8.00225~8.00275	8.0025	1	0.005	+0.002
Σ	—	—	$N = \sum_{i=1}^9 n_i = 200$	$\sum_{i=1}^9 \frac{n_i}{N} = 1$	$\sum_{i=1}^9 n_i v_i = 0$
$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^9 n_i x_i \approx 8.0005$			$\sigma \approx \sqrt{\frac{\sum n_i v_i^2}{N}} \approx 0.64 \mu\text{m}$		

(1) 单峰性 随机误差是所测得值的算术平均值为中心而相对集中分布的，即随机误差出现在该分布中心附近的频率最大，并呈现一个峰值。

(2) 对称性 随机误差是所测得值的算术平均值为中心而对称分布的。即绝对值相等、符号相反的误差出现的频率相等。由于随机误差具有对称性, 因此所有随机误差的总和随测量次数的增加而趋于零。也就是随机误差具有相消性。

(3) 有界性 在一定的测量条件下, 随机误差具有稳定的分布范围, 即绝对值超过一定界限的误差出现的频率为零。

为了对随机误差进行理论上的分析研究, 将图 1-8 中的纵坐标由频率 n_i/N 转换成频率密度 $y = n_i/\Delta x$, 显然, 这不会改变实验分布曲线的形状。在进行实验统计时, 若把重复测量次数无限增多, 即 $N \rightarrow \infty$, 而分组间隔无限减小, 即 $\Delta x \rightarrow 0$, 这时频率稳定于理论上的概率, 相应地, 频率密度分布统计图就转化为稳定的光滑曲线, 即正态分布曲线, 如图 1-9 所示。

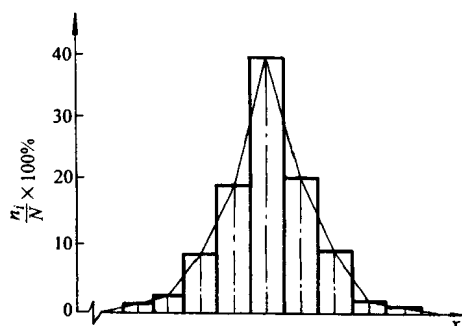


图 1-8 实验分布曲线

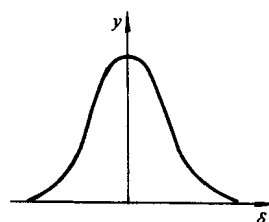


图 1-9 正态分布曲线

由概率论可知, 正态分布曲线的方程为

$$y = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (1-3)$$

式中 y ——随机误差的概率密度;

δ ——随机误差或真差;

σ ——标准偏差或均方根误差;

e ——自然对数的底 ($e=2.71828\cdots$)。

实践表明, 在几何量测量中, 多数测量过程的随机误差都服从正态分布。

(二) 正态分布的分布参数

1. 算术平均值

在一定条件下, 对同一量进行多次重复测量时, 一系列测得值 $x_1, x_2, \cdots, x_N$ 的算术平均值 $\bar{x}$ 可按式计算

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_N}{N} = \frac{1}{N} \sum x_i \quad (1-4)$$

在等精度测量条件下, 算术平均值 $\bar{x}$ 是真值 x_0 的最佳估计值。

因为

$$\delta_i = x_i - x_0$$

则

$$\sum \delta_i = \sum x_i - N x_0$$

$$\frac{\sum x_i}{N} - \frac{\sum \delta_i}{N} = x_0$$

由随机误差的相消性可知, 当 $N \rightarrow \infty$ 时, $\sum \delta_i / N \rightarrow 0$, 所以