



第四章测量技术基础



一、测量

测量是将被测量和一个具有测量单位的标准量进行比较过程。

一个完整的测量过程应包括：

四要素：

测量对象、测量单位、测量方法和测量精度。



1. 被测对象:

几何量: 长度、角度、表面粗糙度、几何形状和相互位置等。

2. 计量单位:

长度单位: 米 (m) 毫米 (mm) 微米
(μm)

角度单位: 弧度 (rad) 度 ($^{\circ}$) 分 (') 秒 (")

3. 测量方法:

测量时所采用的测量原理、计量器具、测量条件的总和。

4. 测量精度:

测量结果与真值的一致程度。与之相对的概念即测量误差。



二、检验

指确定零件的实际几何参数是否在规定的公差范围之内，从而判断是否合格。

检验特点：

不能测得被测量的实际数值，只能确定被测量是否在两极限尺寸之间。



第一节

长度计量单位和基准量值的传递



一、长度计量单位基准

1 米 (m) = 1000 毫米 (mm)

1 毫米 (mm) = 1000 微米 (μm)

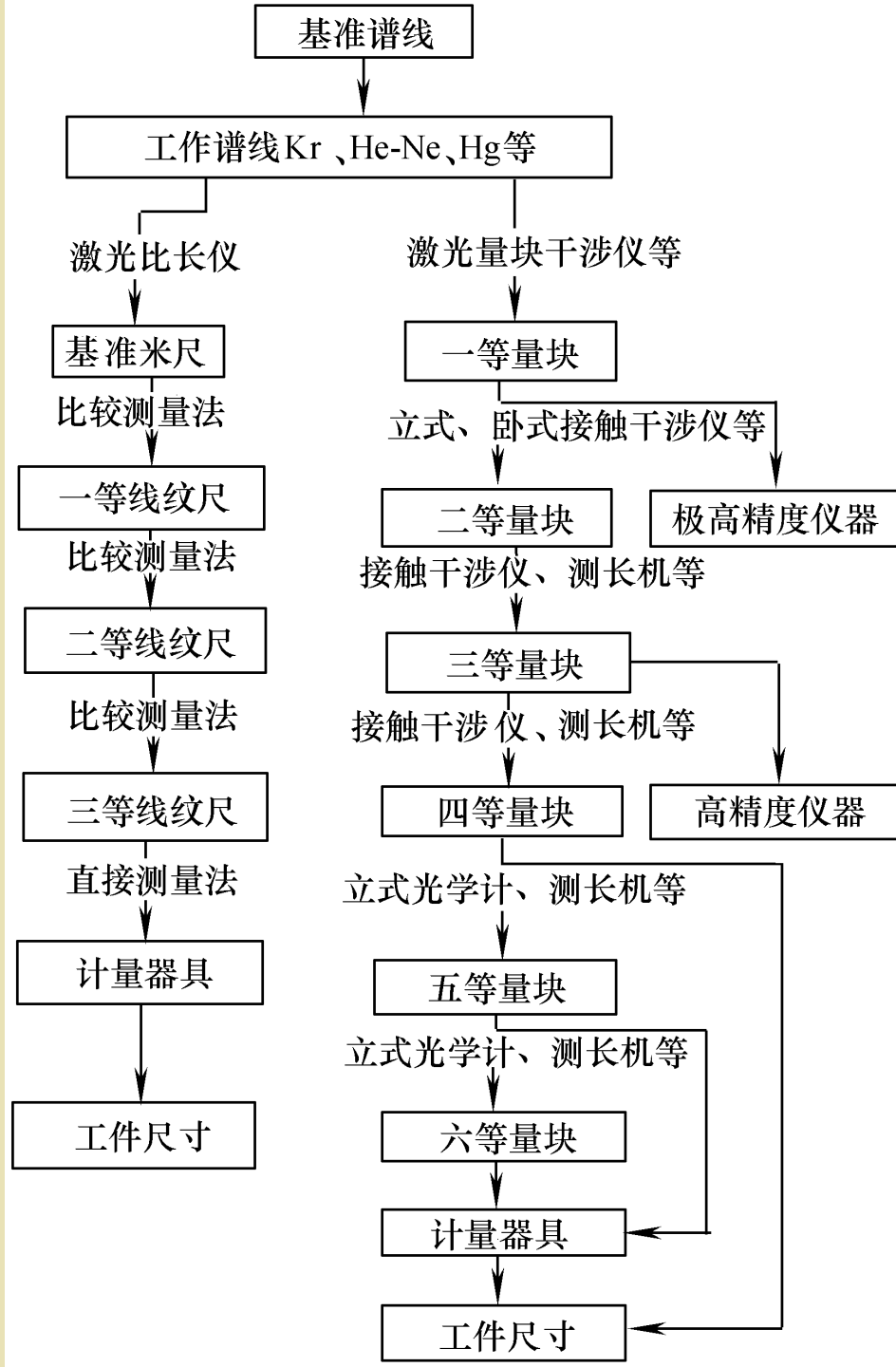
二、量值传递系统

传递系统：

长度基准、测量器具、工件尺寸。

我国尺寸传递机构：

国家计量局、各地区的省市计量机构 、工厂的
中心计量室、车间计量站



三、量块（又名块规）
是由两个相互平行的测量面之间的距离来确定其工作长度的一种高精度量具。

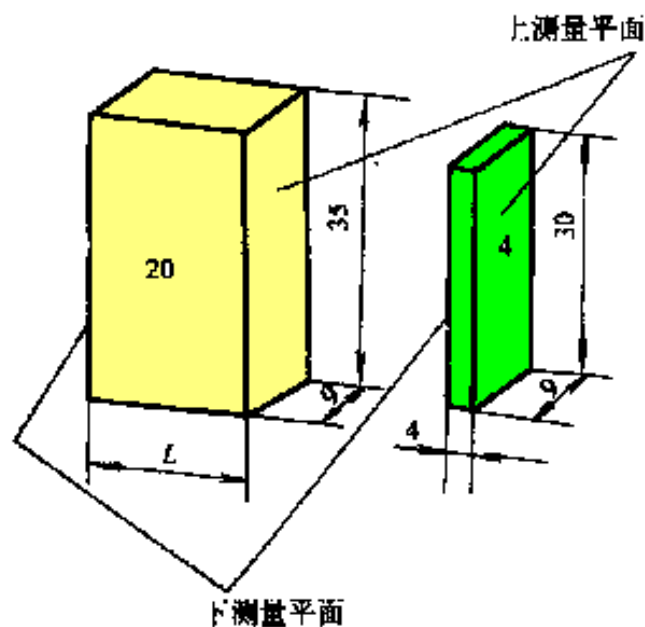


图 2-2 量块

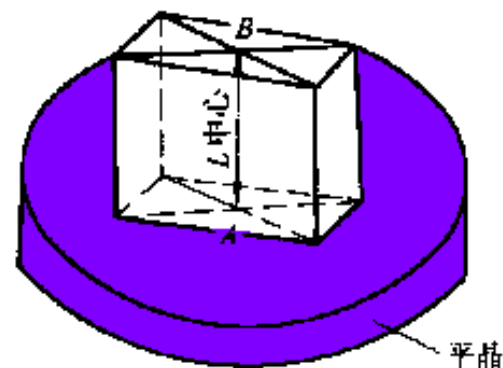


图 2-3 量块长度



量块实物



陶瓷量块实物



1、量块的特性：

稳定性、准确性和粘合性是量块的重要特性，利用它可从成套量块中选择适当的量块组合成各种尺寸。

2、量块的组合方法：

- （1）首先去除尾数（从最后一位数字开始选择量块）
- （2）总块数力求不超过 4 — 5 块，以减少测量误差。



2、量块精度的划分两种方法：

(1) 按中心长度的制造偏差分为六级：

00， 0， 1， 2， 3、K

00级精度最高，3级精度最低。K级为校准级，主要用于校准0，1，2，3级量块。

(2) 按中心长度的检定精度分为六等：

1， 2， 3， 4， 5， 6

1级精度最高

在各级计量部门中，量块常按检定后的尺寸使用。因此，按检定的技术要求，量块分为6等，



3、量块的组合方法：

- （1）首先去除尾数（从最后一位数字开始选择量块）
- （2）总块数力求不超过 4 — 5 块，以减少测量误差。



◆ 例 1：从 83 块一套的量块中组合成 66.765mm 尺寸
方法如下：

1) 1.005 第一块

65.76

2) 1.26 第二块

64.5

3) 4.5 第三块

60

4) 第四块

$$66.765 = 1.005 + 1.26 + 4.5 + 60$$

四块粘合而成。



◆ 例 2： 38 块一套的量块中组合成 53.025mm 尺寸
◆ 方法如下：

◆ 1) 1 第一块

◆ 52.025

◆ 2) 1.005 第二块

◆ 51.02

◆ 3) 1.02 第三块

◆ 50

◆ 第四块

◆ $53.025 = 1 + 1.005 + 1.02 + 50$

◆ 四块粘合而成。



第二节 测量器具 和 测量方法



一、测量器具和测量方法的分类

1、测量器具的分类：

量具：以固定形式复现一给定量的一个或多个已知值的一种测量器具。

量仪：将被测的量值转换成可直接观察指示值或等效信息。



按测量器具的结构特点和用途分：

- 1) 基准量具和量仪：测量中用作基准的量具。
- 2) 极限量规：没有刻度的专用检验工具。
- 3) 通用量具和量仪：有刻度并能量出具体数字值的量具和量仪。
- 4) 检测装置：
量具、量仪和定位元件等构成的组合体，是一种专用检验工具。

2、测量方法的分类

1) 按测量值取得方法不同分：

- ① 直接测量：直接测量被测参数来获得被测尺寸。
 - ② 间接测量：测量与被测尺寸有关的几何参数，经过计算获得被测尺寸。
- (例右图圆弧直径的获得)

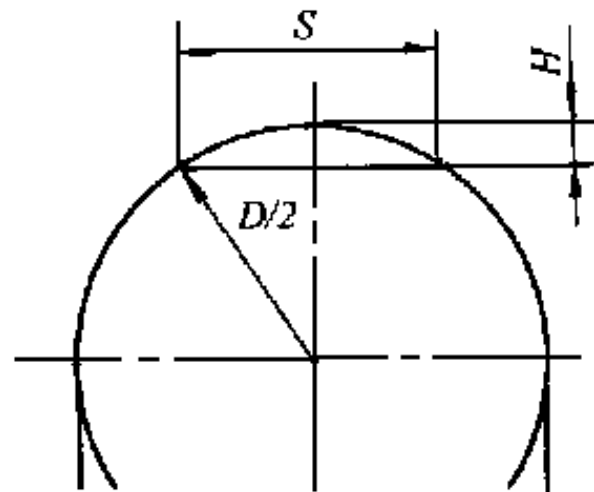


图 2-4 用弦高法测量



2) 按量具量仪的读数值是否直接表示被测尺寸的数值可分为:

- ① 绝对测量: 读数值直接表示被测尺寸的大小。
- ② 相对测量: 读数值只表示被测尺寸相对于标准量的偏差。



3) 按有无机械测量力可分为:

① 接触测量:

测量头与被测零件表面接触，并有机机械作用的测量力存在。

② 非接触测量:

测量头不与被测零件表面接触。

4) 按测量参数指标多少可分:

① 单项测量:

对被测零件的每个参数分别单独测量。

② 综合测量:

测量反映零件有关参数的综合指标。



5) 按测量在加工过程中所起的作用分:

① 主动测量 :

零件在加工过程中进行测量, 其结果直接用来控制零件的加工过程, 防止废品的产生。

② 被动测量:

零件加工后进行的测量。

6) 按工件在测量过程中的状态分:

① 动态测量:

测量时被测表面与测量头模拟工作状态中相对运动。

② 静态测量:

测量相对静止。

二、测量器具的基本度量指标

度量指标是合理选择和使用测量器具的主要指标。

- 1、分度值：
- 2、标尺间距：
- 3、测量范围：
- 4、示值范围：
- 5、灵敏度：
- 6、测量力：
- 7、示值误差：
- 8、回程误差：

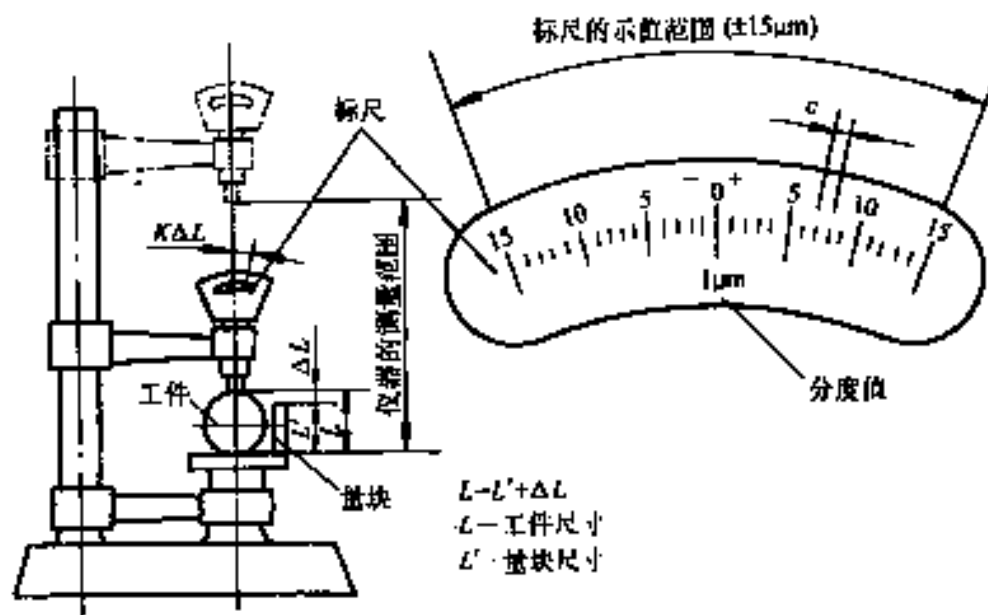


图 2-5 测量器具的基本度量指标示意图



三、常用测量器具的测量原理、基本结构与使用方法

(一) 游标类量具：是利用游标读数原理制成的一种常用量具，它具有结构简单、使用方便、测量范围大等特点。

种类：游标卡尺、深度游标尺、高度游标尺

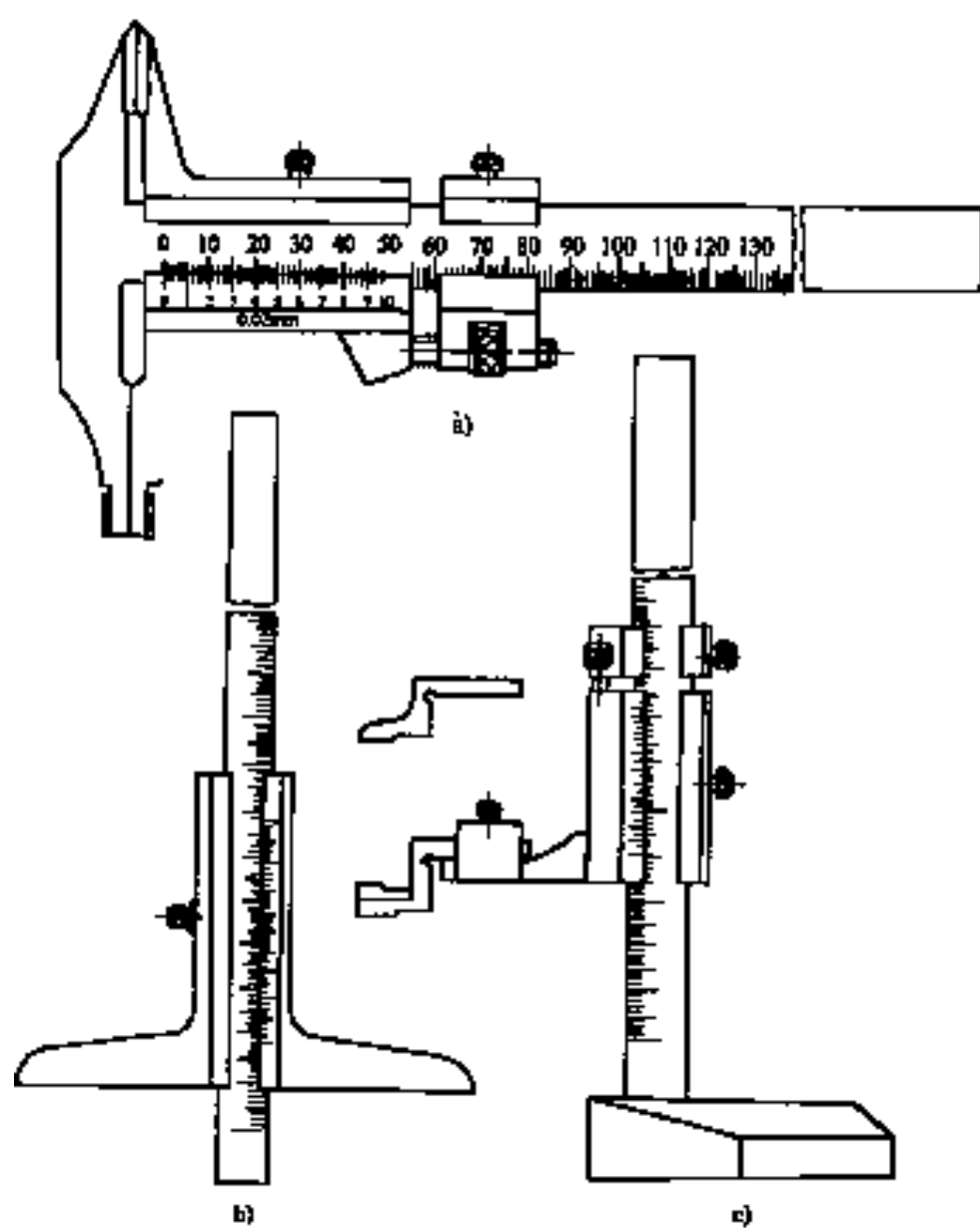


图 2-7 游标量具

a) 游标卡尺 b) 深度游标尺 c) 高度游标尺

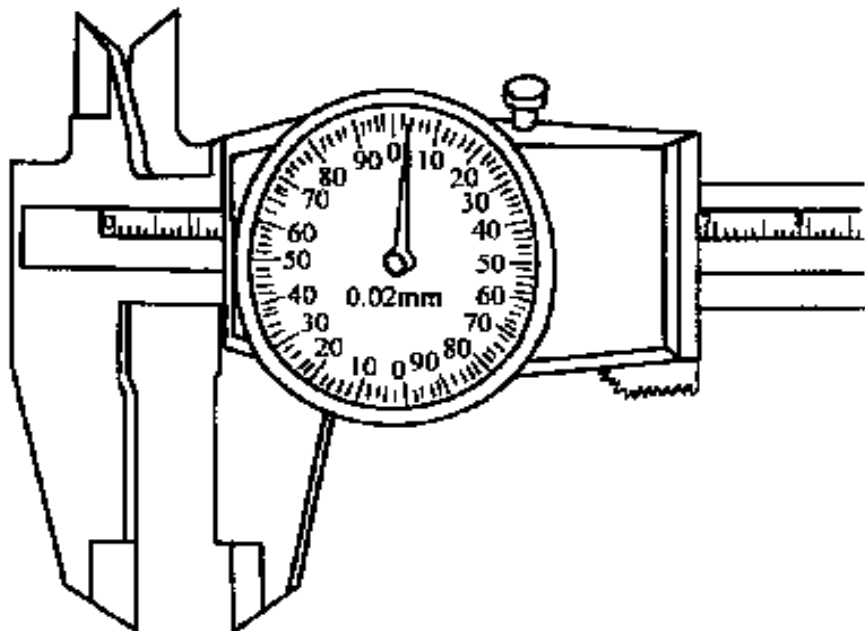


图 2-8 带表游标卡尺

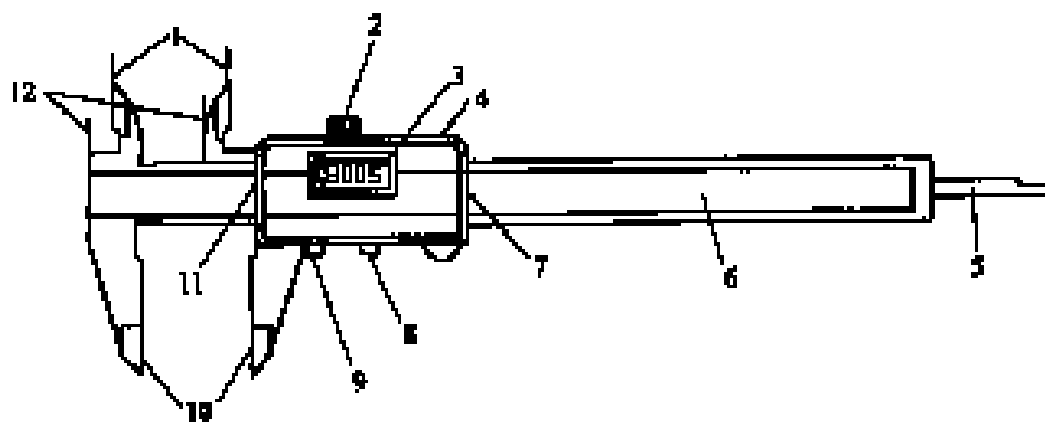
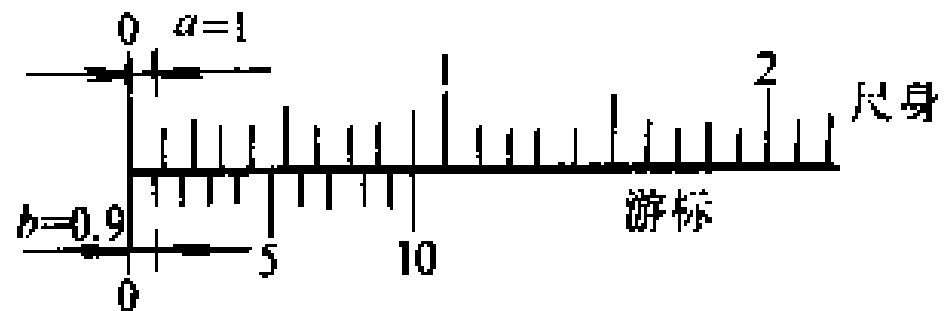
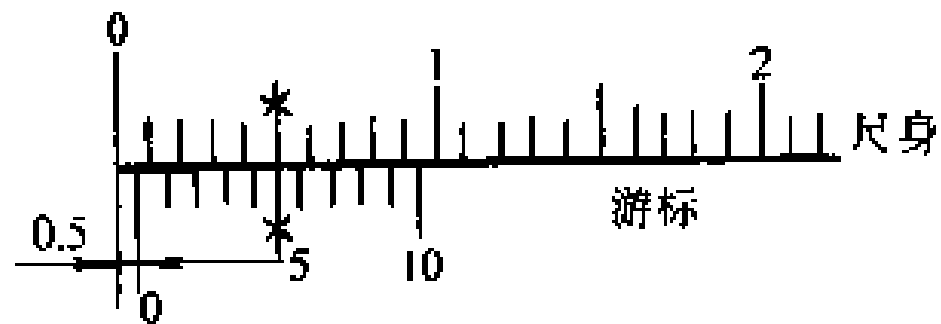


图 2-10 电子数显卡尺

游标卡尺读数原理



a)



b)



(二) 螺旋测微类量具
利用螺旋副运动原理进行测量和读数的装置
按用途分有：
外径千分尺、内径千分尺、深度千分尺。

结构

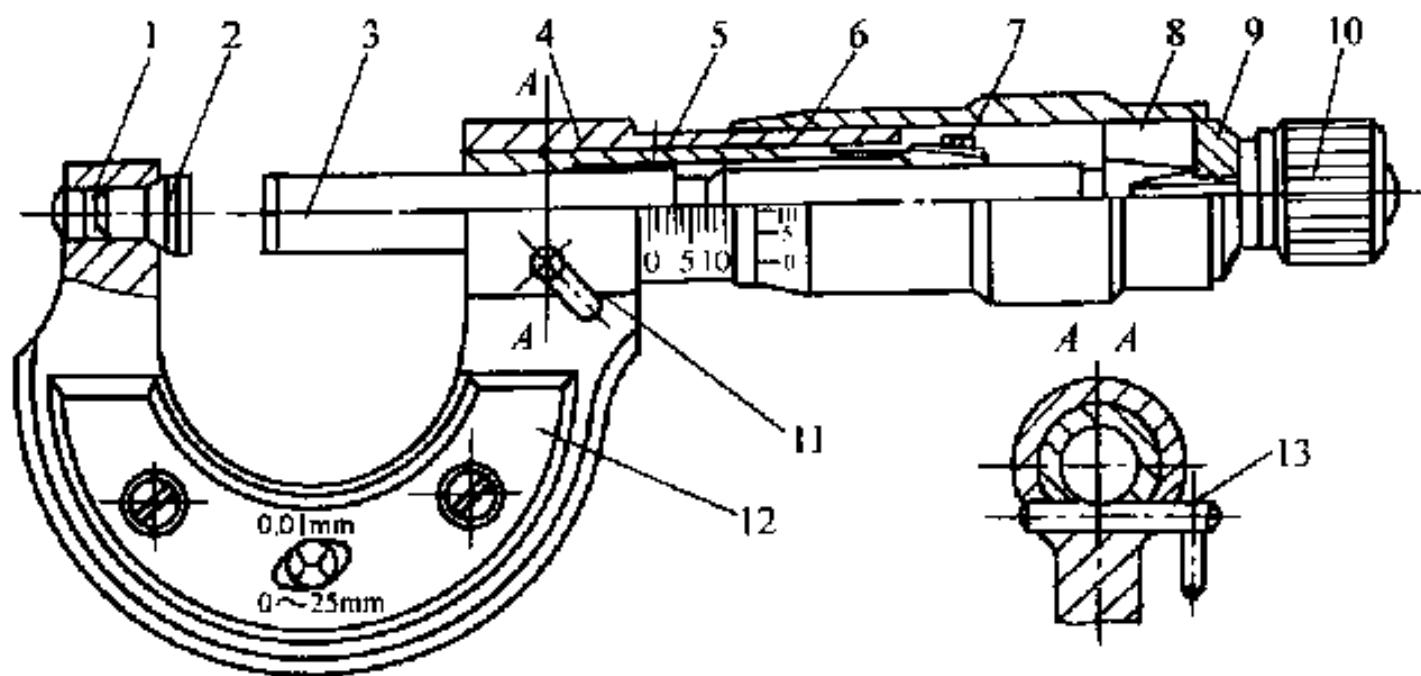


图 2-11 外径千分尺

- 1—尺架 2—固定测砧 3—测微螺杆
4—螺纹轴套 5—固定套筒 6—微分筒
7—调节螺母 8—接头 9—垫圈 10—测力装置
11—锁紧手把 12—绝缘板 13—锁紧轴

读数原理

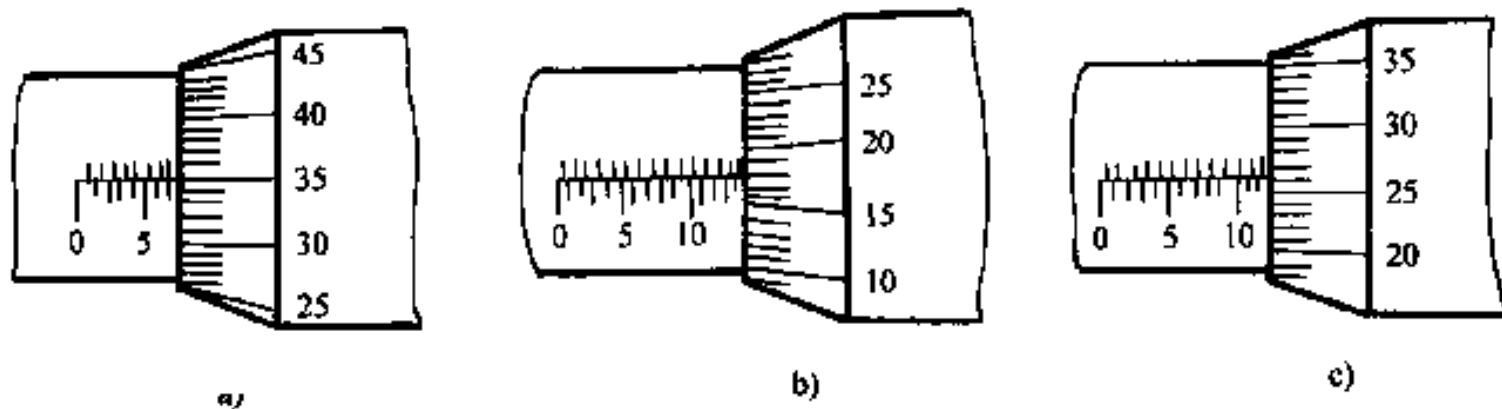


图 2-13 千分尺读数举例

a) 8.35mm b) 14.68mm c) 12.765mm



四、机械量仪

利用机械结构将直线位移经传动放大后，通过读数装置表示出来的一种测量器具。

常见的种类：

百分表、内径百分表、杠杆百分表、扭簧比较仪、机械比较仪等

1、百分表的结构

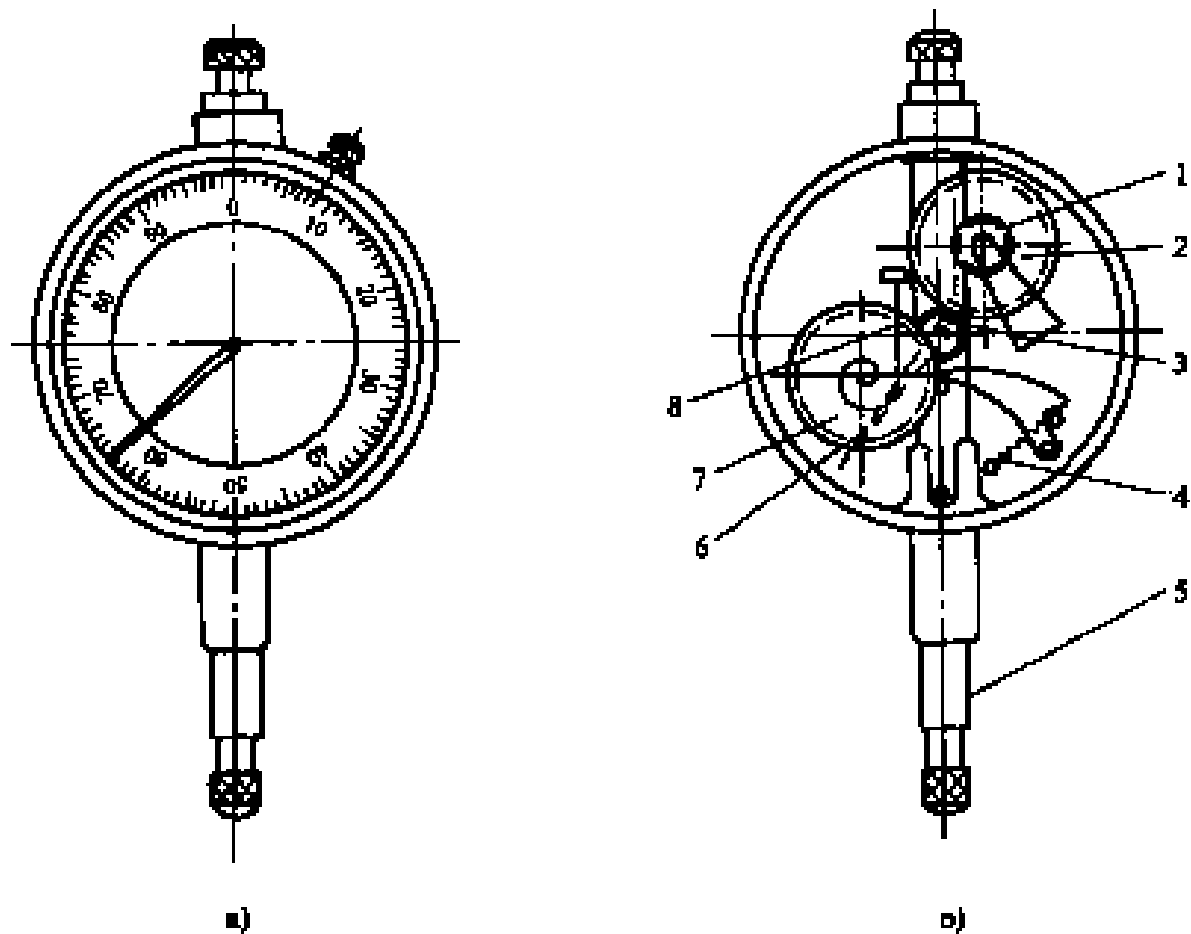


图 2-14 百分表



2、百分表的特点和用途：

特点：

传动比大，结构简单、使用方便等。

用于：

机械零件的长度尺寸、形状和位置偏差的绝对测量和相对测量，也能在某些机床或测量装置中作定位和指示用。



3、百分表的量程：

百分表的分度值为 0.01mm

表盘上有 100 条等分刻线。

百分表的齿轮传动系统应使测量杆移动 1mm ，

指针回转一圈。

其测量范围一般有：

$0 \sim 3\text{mm}$ 、 $0 \sim 5\text{mm}$ 、 $0 \sim 10\text{mm}$ ，

特殊情况下有：

$0 \sim 20\text{mm}$ 、 $0 \sim 100\text{mm}$ 大量程的表。



五、光学量仪

利用光学原理制成的光学测量仪，在长度测量中应用比较广泛。

立式光学计、万能测长仪等。

A vertical strip of a historical manuscript page. It features a red and white Maltese cross with a blue ribbon tied around its center. Above the cross is a circular seal with a blue and white floral design. Below the cross is a compass rose with a white face and black markings. The background is a textured, aged parchment or paper.



1—平面反射镜 2—测量杆

光学系统

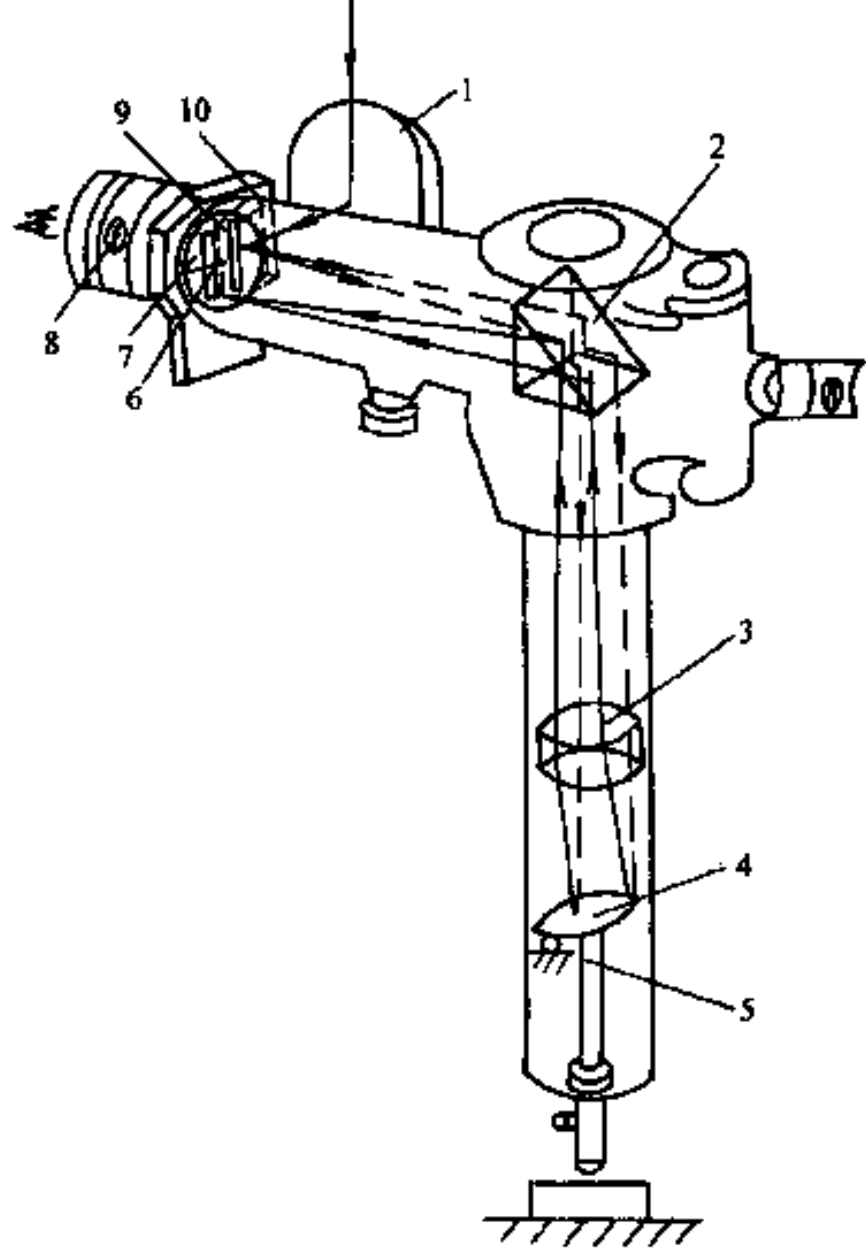
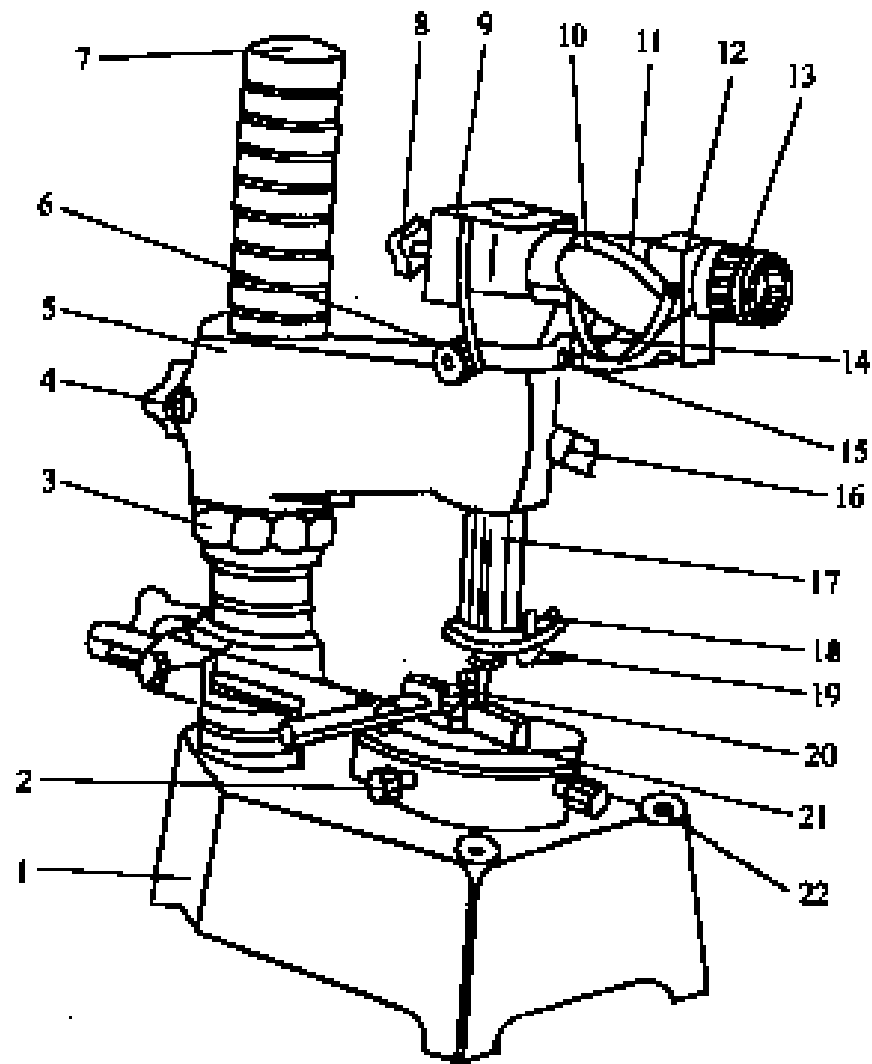


图 2-21 光学计管的光学系统

立式光学计



2、万能测长仪：是一种精密量仪，它是利用光学系统和电气部分相结合的长度测量仪器。

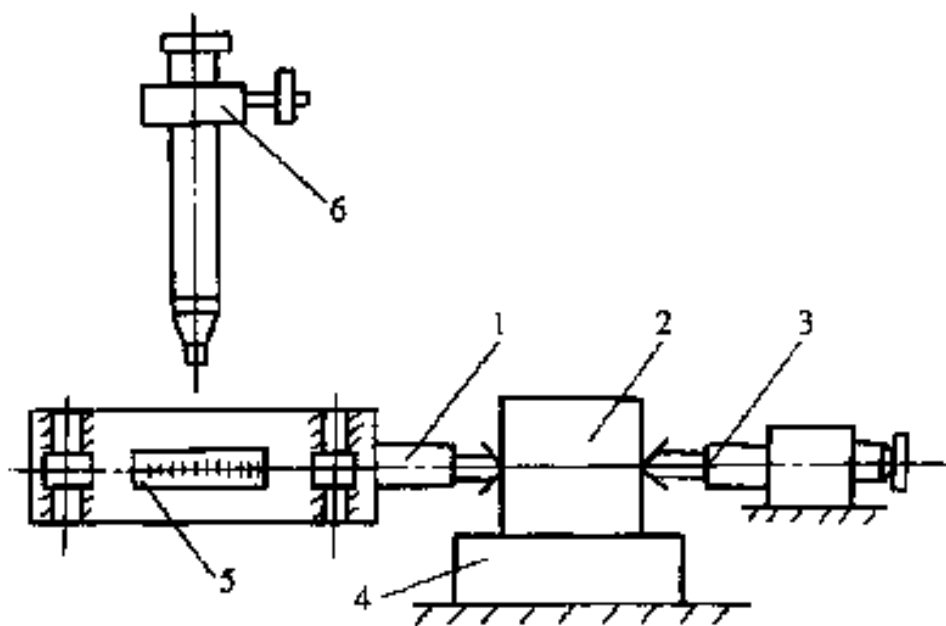


图 2-23 万能测长仪的测量原理

1—测量杆 2—被测工件 3—尾管测量头
4—工作台 5—刻线尺 6—读数显微镜

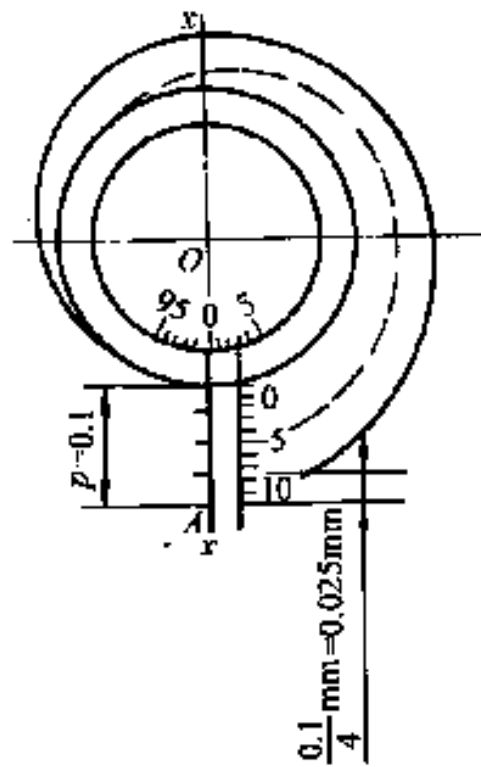


图 2-24 螺旋游标读数原理

万能测长仪

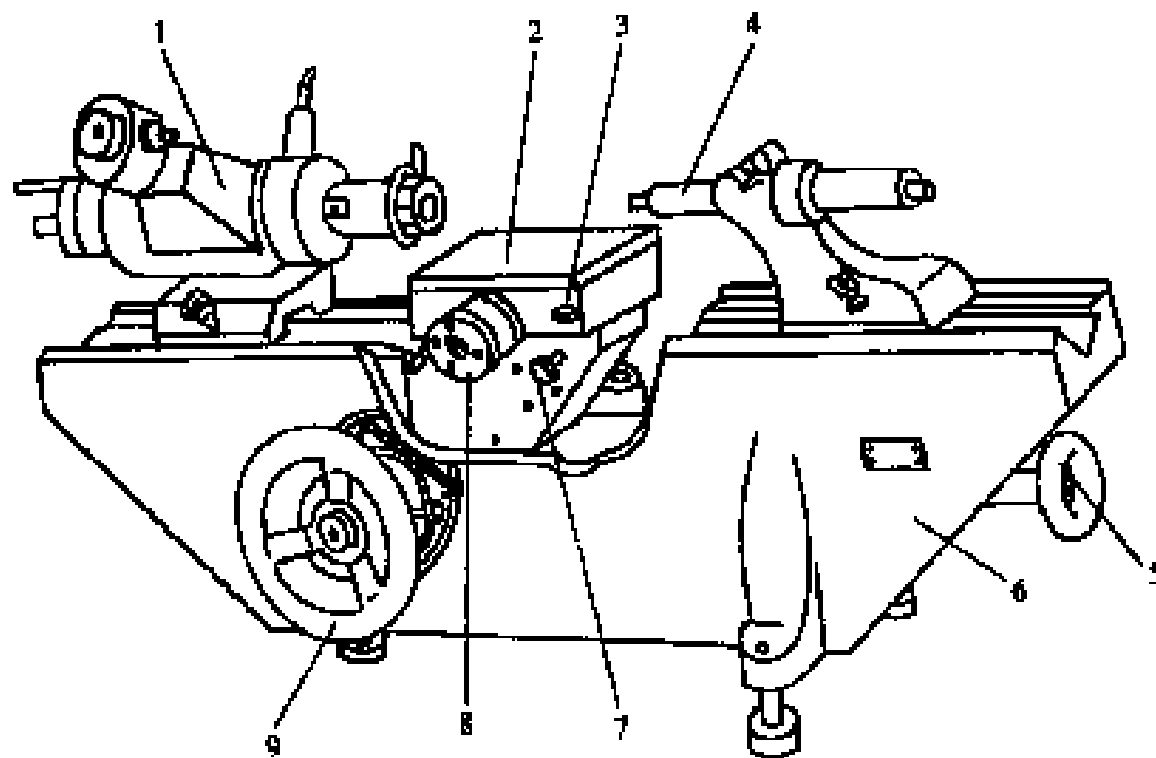


图 2-26 万能测长仪

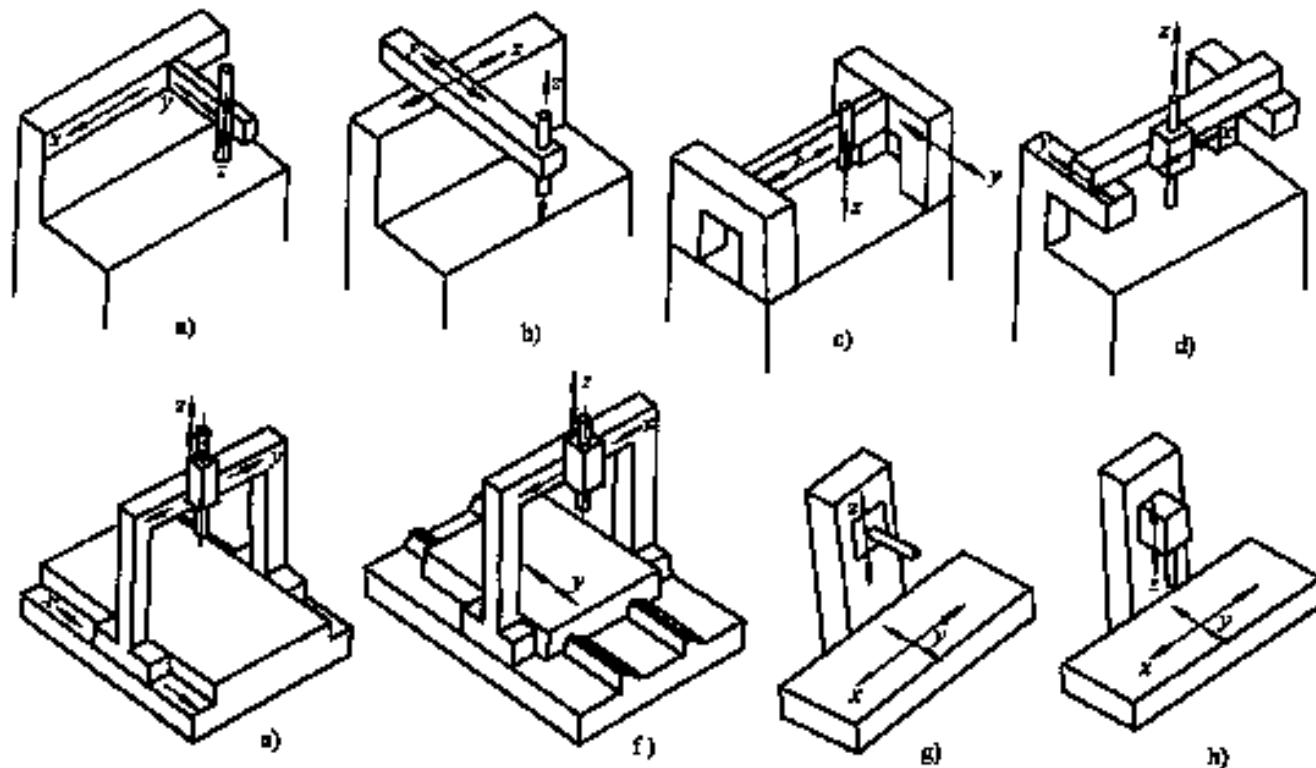
1—测座 2—万能工作台 3、7—手柄
4—尾座 5、9—手轮 6—底座 8—微分筒

六、三坐标测量机

1、主要功能：

2、分类：

(1) 按其工作方式分为：点位测量方式和连续扫描测量方式



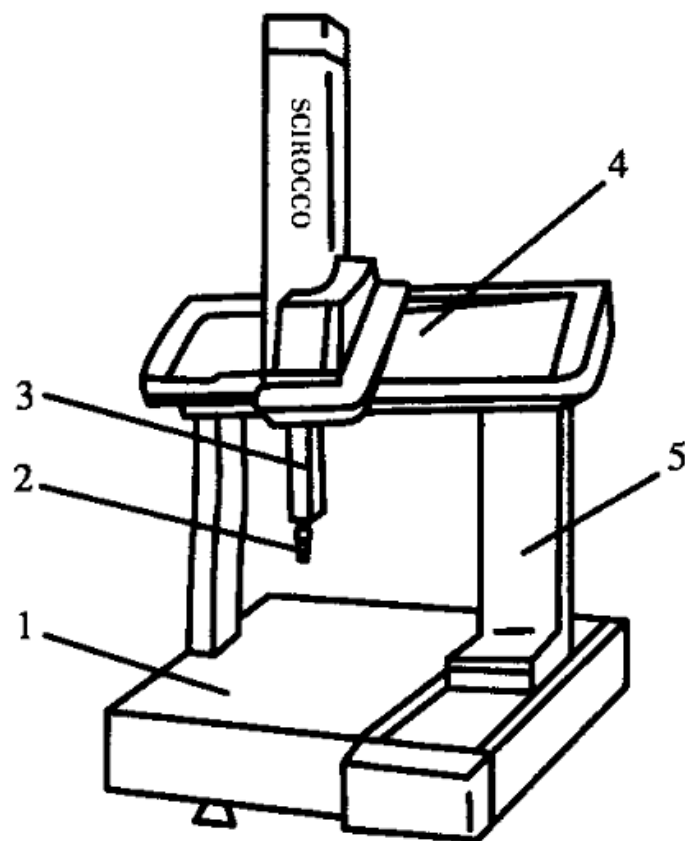


(2) 按测量范围可分为大型、中型和小型。

(3) 按其精度可分为两类：一类是精密型，一般放在有恒温条件的计量室，用于生产精密测量，另一类为生产型。

3、三坐标测量仪的构成：

(1) 主体



(2) 三坐标测量机的测量系统

- ① 测头的类型：
接触式和非接触式。
- ② 电气接触式开关测头：

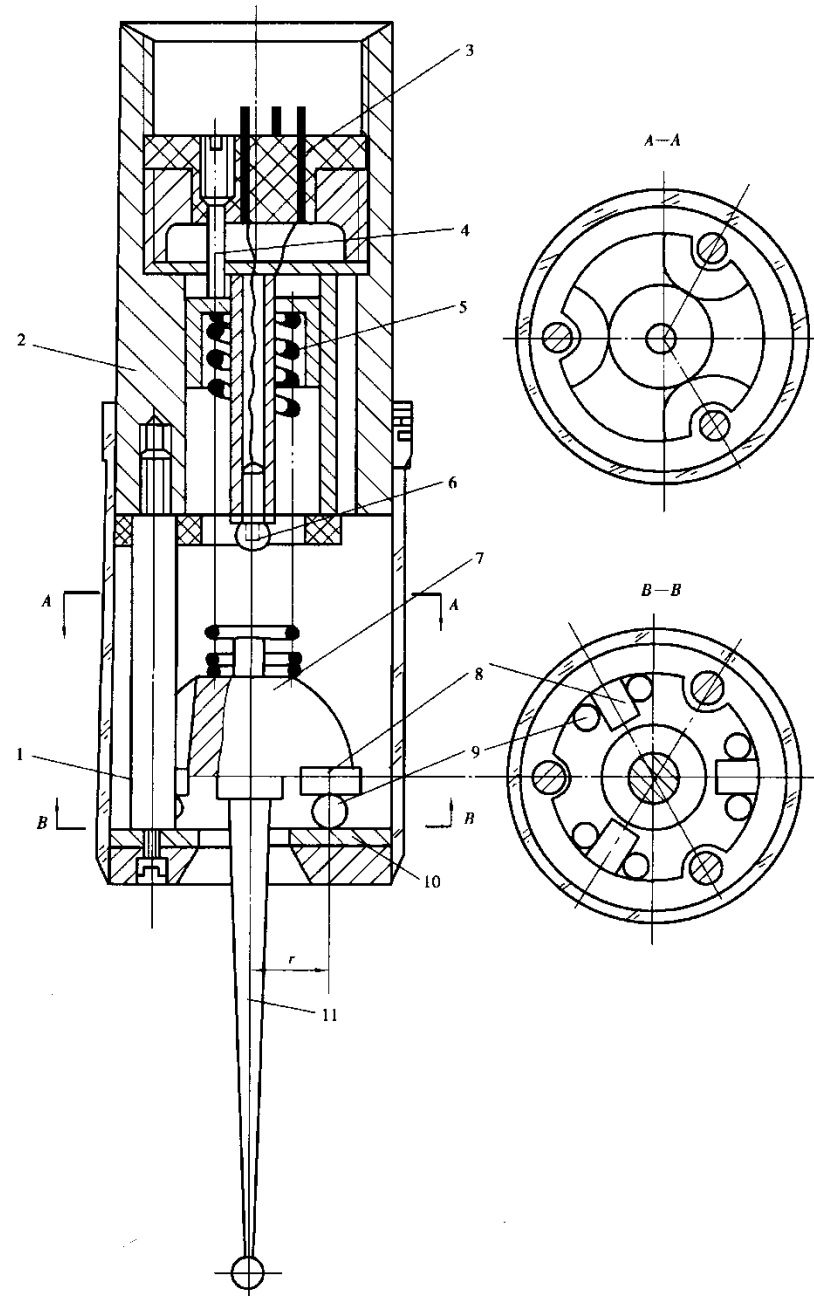
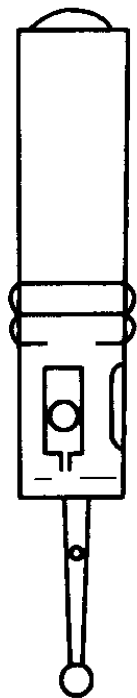
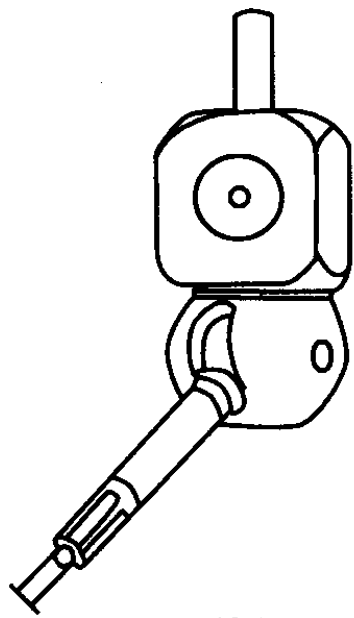


图 6.35 电触式开关测头的结构及工作原理
1—防转杆 2—上主体 3—插座 4—螺杆 5—压力弹簧 6—指示灯 7—测头座
8—圆柱体 9—钢球 10—下底座 11—测杆

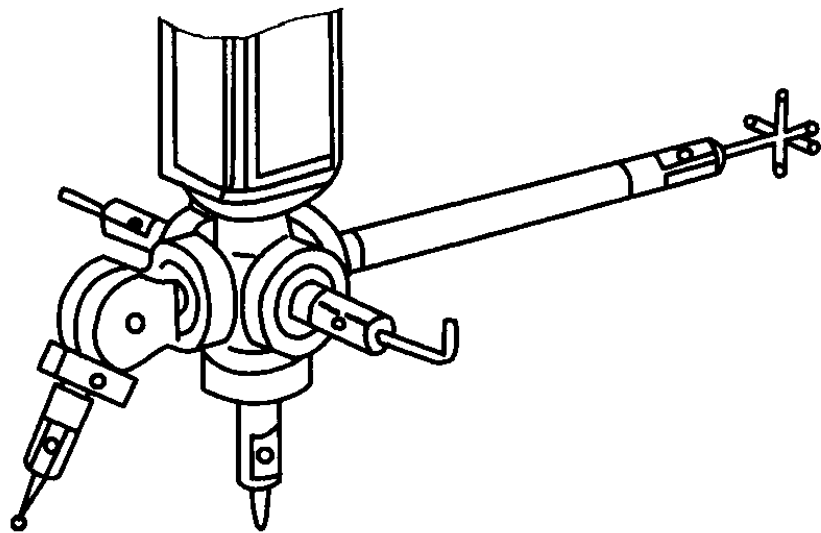
电触开关式单测头及测头座



(a)



(b)



(c)



(3) 三坐标测量机的计算机系统和软件

- ① 通用程序
- ② 公差比较程序
- ③ 轮廓测量程序
- ④ 自学习零件检测程序的生成程序、统计计算程序、计算机辅助编程程序等



（4）三坐标测量机的测量方式

- ① 直接测量方式
- ② 程序测量方式
- ③ 自学习测量方式

(5) 三坐标测量机的应用

- ① 对于在数控机床上加工的形状复杂的零件，当其形状难于建立数学模型时程序编制困难，常常可以借助于测量机。
- ② 轻型加工

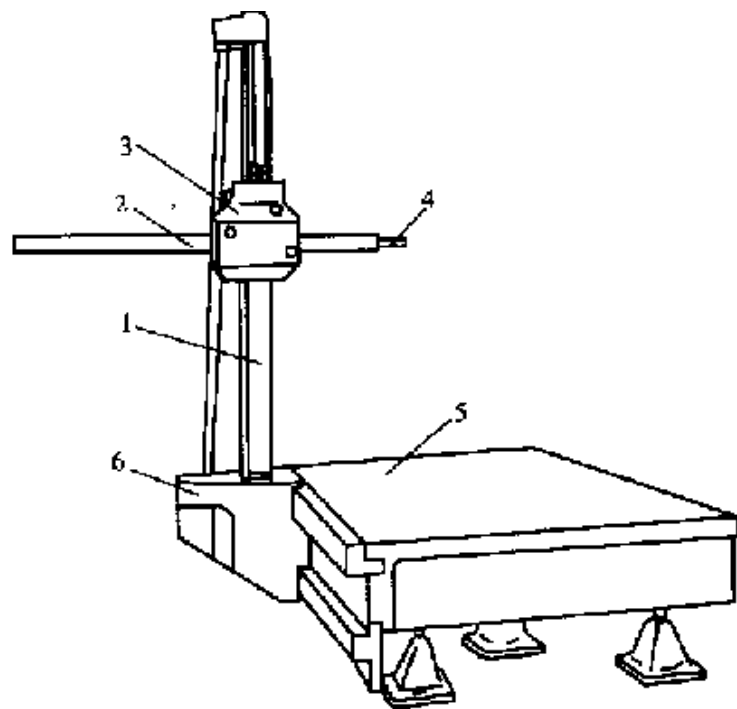


图 2-31 立柱式三坐标划线机

1—立柱 2 水平臂 3—支承箱
4 测头 5—工作台 6—基座

③ 多种几何量的测量

触头的定义和校验

零件的找正

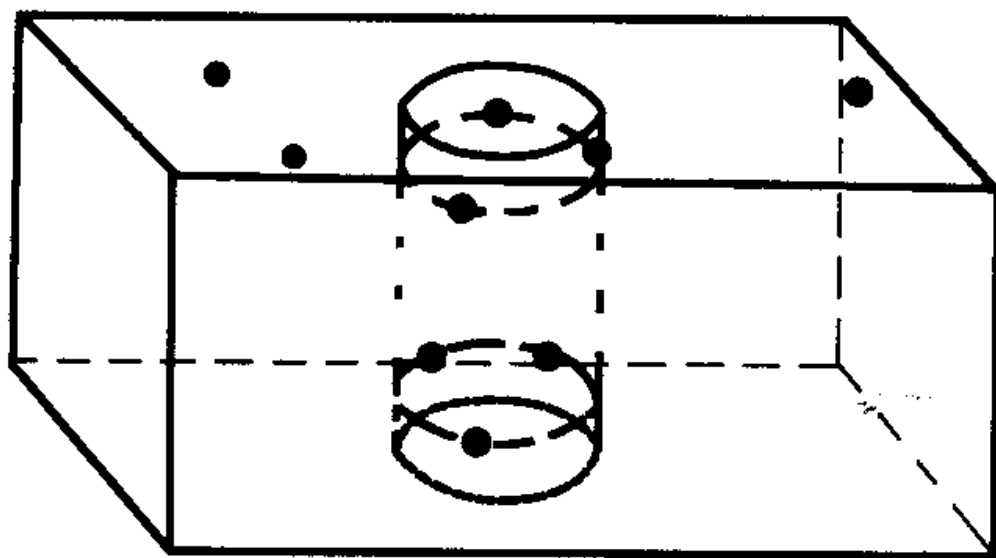


图 2—32 零件三维找正的实例



七、气动量仪

将工件被测尺寸的变化量转换成空气压力或流量的变化，用压力计或流量计显示量值。

八、电动量仪

将工件被测尺寸的变动量转换为电量变化（电感、电容），经过电路的放大、整流、运算等变换后，用指示表指示。



第三节

测量误差的基本知识



一、测量误差的概念（ ε ）：

任何测量结果都不可能绝对精确，只能在某种程度上近似于被测量的真值，它们之间的差值称为测量误差。

（1）绝对误差

（2）相对误差



例 3：测量一个长 100mm 尺寸
误差为 0.01mm;
测量另一个长 1000mm 尺寸
误差也为 0.01mm,
求：测量误差。（用相对误差表示）



二. 测量误差的来源:

1、测量器具误差：设计原理、制造、装配和

使调整不准确而引起误差。

2、测量方法误差：选择的测量方法和定位方

式完善引起的误差。

3、环境影响：温度、湿度、振动等。

4、人为误差：由于人为的原因所引起的测量

误差



三. 测量误差的分类

1) 随机误差:

在相同条件下，多次重复测量时绝对值和符号以不可预定的方式变化的误差。

2) 系统误差:

在相同条件下，多次重复测量时绝对值和符号保持不变或按一定规律变化的误差。

3) 粗大误差:

由于测量者主观上的疏忽或客观条件的剧变所造成的误差。

A decorative vertical strip on the left side of the slide. It features a collection of medals and a compass. At the top, there are several small circular medals. Below them is a larger, ornate cross-shaped medal with a blue ribbon. At the bottom, a portion of a circular compass with a needle and degree markings is visible.

四、随机误差的处理

对随机误差的处理原则是：设法减小它对测量结果的影响，并运用概率论和数理统计的方法，在足够大的置信程度下估算出随机误差的分布范围。

1. 随机误差的分布规律及其特性

设用立式测长仪对同一零件的某一部位用同一方法进行 150 次重复测量，然后将 150 个测得值按尺寸大小分组列入表 4-1 中。



表 4-1 测得值的分布

组别	测量值范围	测量中值 X_i	出现次数 n_i	相对出现次数 n_i / N
1	7.1305 ~ 7.1315	$X_1=7.131$	$n_1=1$	0.007
2	7.1315 ~ 7.1325	$X_2=7.132$	$n_2=3$	0.020
3	7.1325 ~ 7.1335	$X_3=7.133$	$n_3=8$	0.054
4	7.1335 ~ 7.1345	$X_4=7.134$	$n_4=18$	0.120
5	7.1345 ~ 7.1355	$X_5=7.135$	$n_5=28$	0.187
6	7.1355 ~ 7.1365	$X_6=7.136$	$n_6=34$	0.227
7	7.1365 ~ 7.1375	$X_7=7.137$	$n_7=29$	0.193
8	7.1375 ~ 7.1385	$X_8=7.138$	$n_8=17$	0.113
9	7.1385 ~ 7.1395	$X_9=7.139$	$n_9=9$	0.060
10	7.1395 ~ 7.1405	$X_{10}=7.140$	$n_{10}=2$	0.013
11	7.1405 ~ 7.1415	$X_{11}=7.141$	$n_{11}=1$	0.007

将这些数据画成图表，横坐标表示测得值 X_i ，纵坐标表示出现的频率 n_i/N ，得到图 4-4 所示的图形，称频率直方图。连接每个小方图的上部中点得到一折线，称为实际分布曲线。

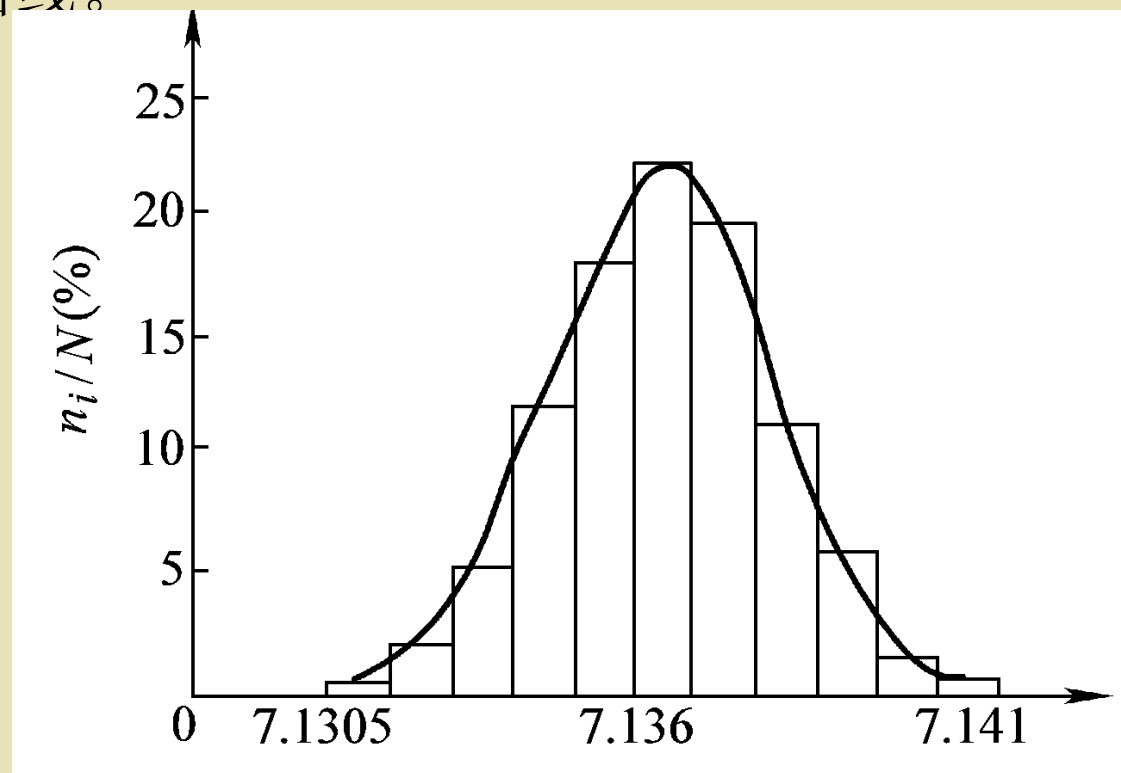


图 4-4 频率直方图

如果测量次数足够多且分组足够细，则会得到一条光滑曲线，即正态分布曲线。如图 4-5 所示。

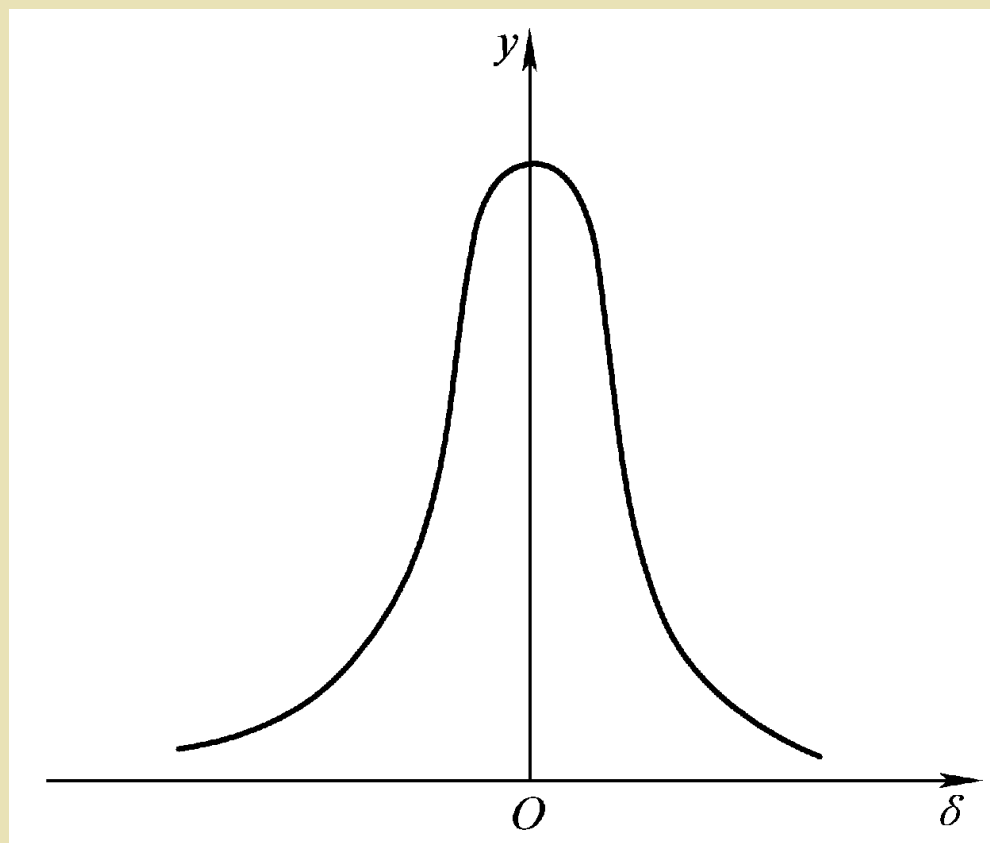


图 4-5 正态分布曲线



随机误差通常服从正态分布规律，具有如下四个基本特性：

- **单峰性** 绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的次数多。
- **对称性** 绝对值相等，符号相反的误差出现的次数大致相等。
- **有界性** 在一定测量条件下，随机误差绝对值不会超过一定的界限。
- **抵偿性** 对同一量在同一条件下进行重复测量，其随机误差的算术平均值随测量次数的增加而趋于零。

2. 随机误差的评定指标

正态分布曲线可用其分布密度进行描述，即：

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

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（ $e=2.71828$ ）。



□ **算术平均值** 在同一条件下，对同一个量进行多次（ n ）重复测量，由于测量误差的影响，将得到一系列不同的测得值 x_1 、 x_2 、…… x_n ，这些量的

算术平均值为

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

□ **标准偏差 σ** 它是评定随机误差的尺度。

在 $\delta = 0$ 时，正态分布的概率密度最大。

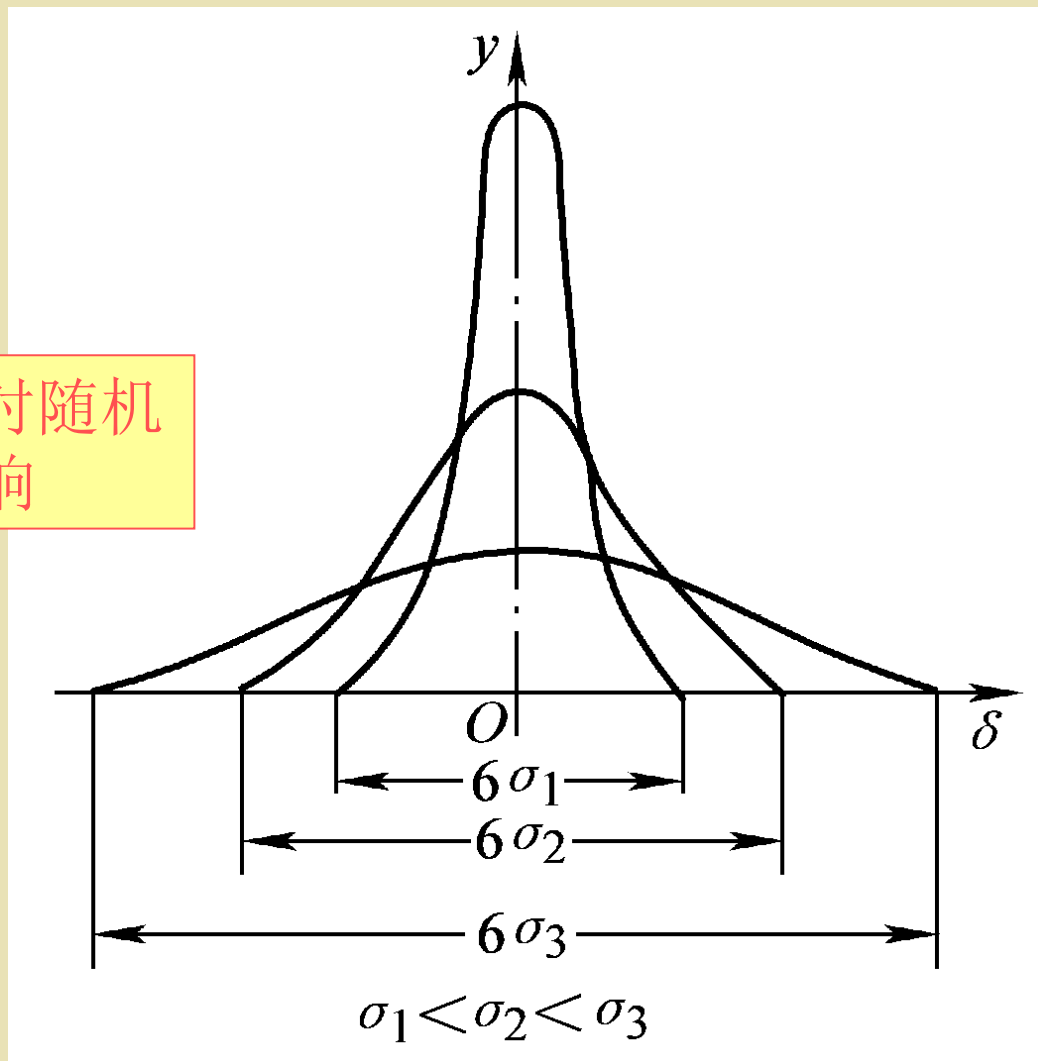
$$y_{\max} = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}}$$

标准偏差 σ 的大小可说明测量结果的分散性。

图 4-6 表示三种不同标准偏差的正态分布曲线，即

$$\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3。$$

图 4-6 标准偏差对随机误差分布特性的影响





由概率论可知，标准偏差为各随机误差平方和的算术平均值的平方根，即按下式计算：

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

式中 n ——测量次数；

δ_i ——为随机误差，即各次测得值与其真值之差



3. 随机误差的分布界限

从随机误差的单峰性和有界性可知，随机误差越大，则出现的概率越小，反之则出现的概率越大。

随机误差是有界的。

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 ，便可得到下式：

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



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：

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

将上式进行变量置换，设 $t = \delta / \sigma$ ，则有：
$$dt = \frac{d\delta}{\sigma}$$

将其代入上式可得：

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-t}^{+t} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

又写成如下形式：
$$P = 2\Phi(t)$$

$\Phi(t)$ 称为拉普拉斯函数，也称概率积分。

表 4-2 四个不同 t 值对应的概率

t	$\delta = \pm t\sigma$	不超出 $ \delta $ 的概率 $P = 2\Phi(t)$	超出 $ \delta $ 的概率 $P' = 1 - P$
1	1σ	0.6826	0.3174
2	2σ	0.9544	0.0456
3	3σ	0.9973	0.0027
4	4σ	0.99936	0.00064

从表 4-2 中误差估计的置信系数 t 与概率的数值关系上可以发现：超出 $\pm 3\sigma$ 的概率只有 0.27%。可以近似地认为超出 $\pm 3\sigma$ 的可能性为零。

测量极限误差为： $\delta_{\text{lim}} = \pm 3\sigma$

需要指出，在确定误差界限的做法上各国是不尽相同的，有的采用 $\pm 2\sigma$ ，也有的采用 $\pm \sigma$ 。



第四节

测量器具的选择

一、测量器具选择时应考虑的因素：

- 1、与被测工件的外形、位置、尺寸的大小相适应。
- 2、与被测工件的尺寸公差相适应。



二、普通测量器具的选择：

1、检验条件的要求

- (1) 工件尺寸是否合格只按一次测量结果来判断。
- (2) 考虑到普通测量器具的特点，一般只用来测量尺寸，不用来测量工件上可能存在的形位误差。
- (3) 对偏离测量的标准条件所引起的误差，以及测量器具和标准器具不显著的系统误差等一般不进行修正。



2、安全裕度与验收极限：

- (1) 安全裕度：各随机误差应按平方合成所得的总的极限误差计算，其允许值称为安全裕度。
- (2) 验收极限：将工件规定的最大极限尺寸和最小极限尺寸分别向公差带内移动一个安全裕度。

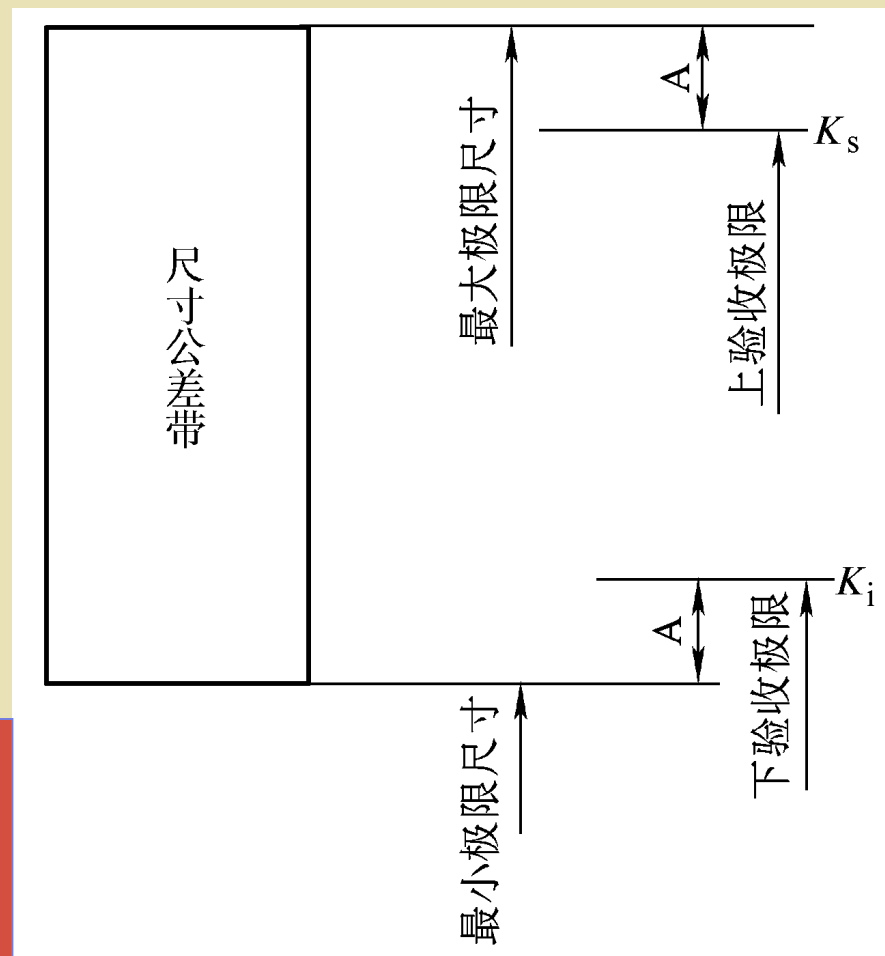
工件尺寸验收极限的确定

(GB3177/—1997)

规定：

工件尺寸的验收极限应分别从它们的最大与最小极限尺寸向尺寸公差带内移动一个安全裕度 A 。

安全裕度 A 按被测工件尺寸公差的大小确定，约占工件尺寸公差的 5 % ~ 10 % 。



尺寸公差带及验收极限



上验收极限 = 最大极限尺寸 - 安全裕度 A

下验收极限 = 最小极限尺寸 + 安全裕度 A

按上述验收极限来验收工件，会出现误废。从统计规律来看，与总产量相比误废量是极少数。

安全裕度 A 按被测工件尺寸公差的大小确定，约占工件尺寸公差的 5 % ~ 10 %。



测量器具的选择

1. 不确定度与安全裕度的关系

在测量中，由于测量误差的存在而使被测量值不能肯定的程度，用不确定度（ U ）来表示。

测得的实际尺寸分散范围越大，测量误差越大，即不确定度越大。

按测量误差的来源，测量的不确定度 u 是由测量器具的不确定度 u_1 和测量条件引起的不确定度 u_2 组成。两者都是随机变量，因此，其综合结果也是随机变量，并且应不超出安全裕度 A 。



u_1 与 u_2 对 u 的影响不同，一般按 2:1 的关系处理，取 $u_1=0.9A$ ， $u_2=0.45A$ ，则有：

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = \sqrt{(0.9A)^2 + (0.45A)^2} \approx 1.00A$$

2. 测量器具的选择

计量器具的选择主要取决于计量器具的参数、特性和经济指标。

- 选择计量器具时，应考虑与被测工件的外形、相互位置和被测尺寸的大小相适应。
- 选择计量器具应考虑与被测工件的尺寸公差相适应。



例 3-1 被测工件为 $\Phi 30h8(\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.033 \end{smallmatrix})$ ，试确定其验收极限

解：（1）根据 $\Phi 30h8$ 的尺寸公差，查表 3-5 确定安全裕度 A 和测量器具的不确定度 u_1 。

$$T_h=0.033\text{mm}, \quad A=0.0033\text{mm}, \quad u_1 = 0.003\text{mm}$$

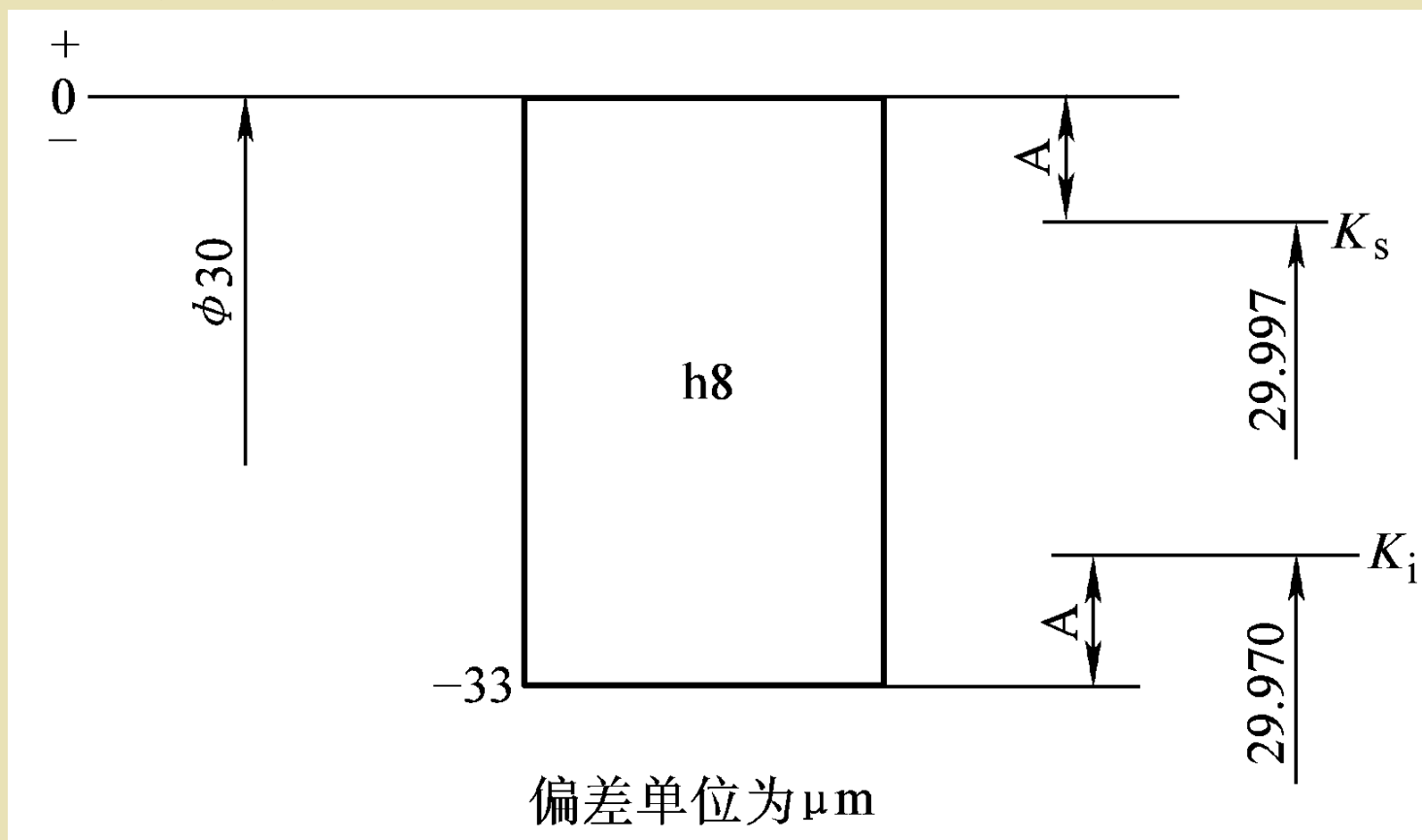
（2）选择测量器具。按被测工件的基本尺寸 $\Phi 30\text{mm}$ 和所要求的测量器具的不确定度允许值 $u_1=0.003\text{mm}$ ，从手册查得分度值为 0.002mm 的比较仪，其不确定度 $= 0.0016$ ， $< u_1$ ，满足使用要求。

(3) 确定验收极限:

$$\text{上验收极限} = d_{\max} - A = 30 - 0.003 = 29.997\text{mm}$$

$$\text{下验收极限} = d_{\min} + A = 29.967 + 0.003 = 29.970\text{mm}$$

Φ30h8 轴的尺寸公差带及验收极限如图 3-8 所示。



工件公差带
及验收极限