

机械精度设计基础

几何精度设计是根据产品的使用性能要求和加工制造误差确定机械零部件几何要素允许的加工和装配误差——公差，所以精度设计也称公差设计。精度设计的主要依据是产品性能对零部件的静态与动态精度要求，以及产品生产和维护的经济性。因为任何加工方法都不可能没有误差，而零件几何要素的误差都会影响其功能要求的实现和性能的好坏，允许误差的大小又与生产经济性、产品的无故障使用寿命密切相关。因此几何精度设计应遵循互换性与标准化原则。

1.1 互换性

1.1.1 互换性的概念

零件的互换性是指在同一规格的一批零部件中，可以不经任何挑选、调整或附加修配，任取一件都能装配在机器上，并能达到规定的使用性能要求，零部件具有的这种性质称为互换性。

显然，为了使零部件具有互换性，首先应对某几何要素提出适当的、统一的要求。因为只有保证了对零部件几何要素的要求，才能实现其可装配性和装配后满足与几何要素（尺寸、形状等）有关的功能要求。这就是零部件的几何要素的互换性。

1.1.2 互换性的意义

互换性给产品的设计、制造和使用维修都带来了很大的方便。

① 设计可充分利用前人的经验，可以最大限度地采用标准件、通用件，大大减少计算、绘图等工作量，缩短设计周期，并有利于产品品种的多样化和计算机辅助设计，促进新产品的高速发展。

② 制造有利于组织大规模专业化生产，有利于采用先进工艺和高效率的专用设备，以至于用计算机辅助制造，有利于实现加工和装配过程的机械化、自动化，从而减轻工人的劳动，提高生产率，保证产品质量，降低生产成本。

③ 零部件具有互换性，及时更换那些已经磨损或损坏了的零部件，可以减少机器的维修时间和费用，保证机器能连续而持久地运转，提高设备的利用率。

综上所述，互换性对保证产品质量、提高生产效率和增加经济效益具有重大的意义，因此，互换性已成为现代机械制造业中一个普遍遵守的原则。

1.1.3 互换性的分类

机械制造中的互换性可分为几何参数的互换性和功能的互换性。几何参数的互换性是指机器的零部件只在几何参数(如尺寸、形状、位置和表面粗糙度)方面和保证零件尺寸配合要求方面达到互换性的要求。功能的互换性是指机器的零部件在各种性能方面都达到了互换性的要求。

互换性按其互换程度可分为完全互换(绝对互换)与不完全互换(有限互换)两种。

若一批零部件在装配时不用分组、挑选、调整和修配,装配后即能满足预定的要求,这称为完全互换。当装配精度要求较高时,采用完全互换将提高零件制造精度要求,加工困难,成本增高。这时可适当降低零件的制造精度,使之便于加工,而在加工好后,通过测量将零件按实际尺寸的大小分为若干组,两个相同组号的零件相装配,这样既可保证装配精度,又能解决加工难的问题,这称为分组装配。仅同一组内零件有互换性,组与组之间不能互换,属于不完全互换。装配时需要调整的零部件也属于不完全互换。

1.1.4 公差与检测

由于零件在加工过程中,不可避免地会产生各种误差。要想把同一规格一批零件的几何参数做得完全一致是不可能的。实际上,那样做也没有必要。只要把几何参数的误差控制在一定的范围内,就能满足互换性的要求。零件几何参数误差的允许范围称为公差。它包括尺寸公差、形状公差、位置公差、角度公差等。

加工好的零件是否满足公差要求,要通过检测加以判断。检测不仅用于评定零件合格与否,而且用于分析不合格的原因,及时调整生产,监督工艺过程,预防废品产生。检测是机械制造的“眼睛”。无数事实证明,产品质量的提高,除设计和加工精度的提高外,往往更依赖于检测精度的提高。检测包含检验与测量。几何量的检验是指确定零件的几何参数是否在规定的极限范围内,并做出合格性判断,而不必得出被测量的具体数值;测量是将被测量与作为计量单位的标准量进行比较,以确定被测量的具体数值的过程。

1.2 标准化

现代生产的特点是品种多、规模大、分工细和协作多。为使社会生产有序进行,必须通过标准化使分散的、局部的生产环节相互协调和统一。

① 标准是对重复性事物和概念所做的统一规定,它以科学、技术和实践经验的综合成果为基础,经有关方面协商一致,由主管机构批准,以特定形式发布,作为共同遵守的准则和依据。我国标准分为国家标准、部标准、专业标准、企业标准等。

对需要在全国范围内统一的技术要求,制定国家标准,代号为 GB;对没有国家标准而又需要在全国某个行业内统一的技术要求,可制定行业标准,如机械标准(JB);对没有国家标准和行业标准而又需要在某个范围内统一的技术要求,可制定地方标准(DB)和企业标准(QB)。

② 标准化是指在经济、技术、科学及管理等社会实践中,对重复性事物和概念通过制定、发布和实施标准,达到统一,以获得最佳秩序和社会效益的全部活动过程。即按照标准化的原理,给零部件制定统一的标准,将各项公差的术语、定义、代号、概念及原理、误差

的测量与评定、图样上的标注方法等都规定在技术标准中。这不仅是零部件精度设计的依据,也是实现互换性的重要保证。为此,我国颁布了一系列的公差标准,如极限与配合、形位公差、表面粗糙度、轴承公差与配合、键与花键公差与配合、螺纹公差与配合齿轮公差等,这一系列标准和国际标准基本上是一致的,是几何量标准化的具体体现,为我国机械工业的发展提供了技术上的保证。

③ 优先数和优先数系标准。制定公差标准及设计零件的结构参数时,都需要通过数值表示。任何产品的参数值不仅与自身的技术特性有关,还直接、间接地影响与其配套系列产品的参数值,如螺母直径数值,影响并决定螺钉直径数值,以及丝锥、螺纹塞规、钻头等系列产品的直径数值。由参数值间的关联产生的扩散称为“数值扩散”,为满足不同的需求,产品必然出现不同的规格,形成系列产品。产品数值的杂乱无章会给组织生产、协作配套、使用维修带来困难。

为使产品的参数选择能遵守统一的规律,使参数选择一开始就纳入标准化轨道,必须对各种技术参数的数值做出统一规定。《优先数和优先数系》国家标准(GB/T 321—2005)就是其中最重要的一个标准,要求工业产品技术参数尽可能采用它。

国家标准规定的优先数系分档合理,疏密均匀,有广泛的适用性,简单易记,便于使用。常见的量值,如长度、直径、转速及功率等分级,基本上都是按一定的优先数系进行的。本课程所涉及的有关标准,如尺寸分段、公差分级及表面粗糙度的参数系列等,基本上采用优先数系。

习题 1

1. 什么叫互换性?为什么说互换性已成为现代机械制造业中一个普遍遵守的原则?列举互换性应用实例。
2. 按互换程度来分,互换性可分为哪两类?它们有何区别?
3. 什么是公差、标准和标准化?它们与互换性有何关系?

尺寸的公差与配合

为使零件具有互换性，必须保证零件的尺寸、几何形状和相互位置，以及表面特征技术要求的一致性。就尺寸而言，互换性要求尺寸的一致性，即指要求尺寸在某一合理的范围之内，在此范围内，既要保证相互结合的尺寸之间的关系，以满足不同的使用要求，又要在制造上经济合理。由此，尺寸的公差与配合是一项应用广泛而重要的标准，也是最基础、最典型的标准。

2.1 基本术语及定义

2.1.1 有关孔和轴的定义

- ① 孔：主要指圆柱形内表面，也包括非圆柱形内表面，如图 2.1 所示。
- ② 轴：主要指圆柱形外表面，也包括非圆柱形外表面，如图 2.1 所示。

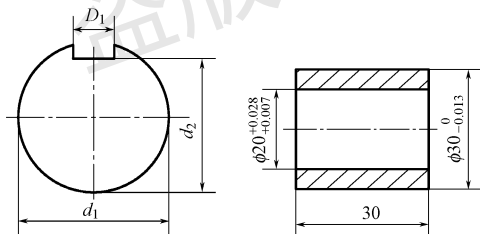


图 2.1 尺寸表示

2.1.2 有关尺寸的术语及定义

- ① 尺寸：用特定单位表示长度值的数字。在机械制造中一般常用特定单位为毫米。长度值表示两点间距离的大小，包括直径、长度、宽度、高度、厚度及中心距、圆角半径等。
- ② 基本尺寸 (D 、 d ，分别表示孔、轴的直径)：设计时给定的尺寸 (图 2.1)，它是确定偏差位置的起始尺寸，一般要求符合标准的尺寸系列。
- ③ 实际尺寸 (D_a 、 d_a)：通过测量所得的尺寸。由于存在被测工件形状误差和随机性测量误差的影响，所以实际尺寸并非尺寸的真值。
- ④ 极限尺寸：允许尺寸变化的两个界限值。它们是以基本尺寸为基数来确定的。界限值大者称为最大极限尺寸 ($D_{\max}$ 、 $d_{\max}$)，界限值小者称为最小极限尺寸 ($D_{\min}$ 、 $d_{\min}$)。

⑤ 作用尺寸：在配合面全长上，与实际孔内接的最大理想轴的尺寸，称为孔的作用尺寸 D_f ；与实际轴外接的最小理想孔的尺寸，称为轴的作用尺寸 d_f 。作用尺寸是实际尺寸和形状误差的综合结果，所以，孔、轴的实际配合效果，不仅取决于孔、轴的实际尺寸，而且也与孔、轴的作用尺寸有关。如图 2.2 所示， $D_f < D_a$ ， $d_f > d_a$ 。

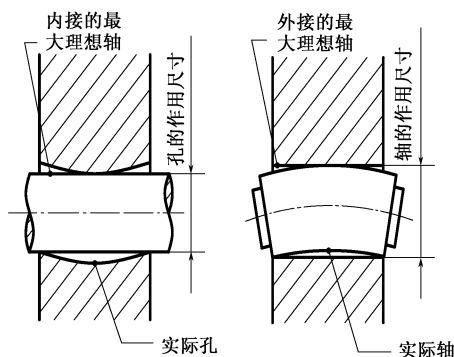


图 2.2 孔、轴的作用尺寸

⑥ 极限尺寸判断原则（泰勒原则）：孔或轴的作用尺寸不允许超过其最大实体尺寸（MMS），在任何位置的实体尺寸不允许超过其最小实体尺寸（LMS），即孔 $D_f > D_{\min}$ ， $D_a < D_{\max}$ ，轴 $d_f < d_{\max}$ ， $d_a > d_{\min}$ 。

2.1.3 有关偏差与公差的术语和定义

1. 尺寸偏差

尺寸偏差（简称偏差）是指某一尺寸减其基本尺寸所得的代数差。孔用 E 表示，轴用 e 表示。偏差可以为正值、负值或零。

实际尺寸减其基本尺寸所得的代数差称为实际偏差；最大极限尺寸减其基本尺寸所得的代数差称为上偏差，孔和轴的上偏差用 E_S 和 e_s 表示；最小极限尺寸减其基本尺寸所得的代数差称为下偏差，孔和轴的上偏差用 E_I 和 e_i 表示。上偏差与下偏差统称为极限偏差，如图 2.3 所示。

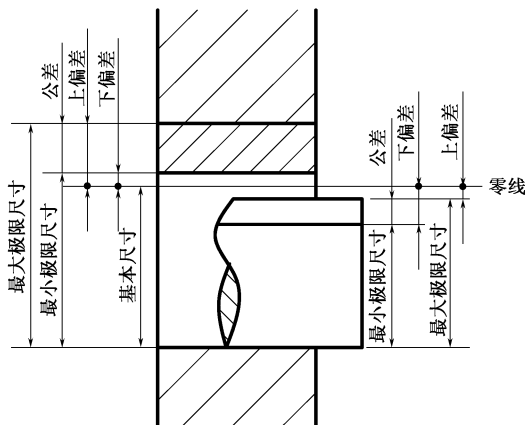


图 2.3 公差与配合示意图及其图解

孔上偏差 $E_S = D_{\max} - D$, 下偏差 $E_I = D_{\min} - D$

轴上偏差 $e_s = d_{\max} - d$, 下偏差 $e_i = d_{\min} - d$

偏差值可以是正值、负值或是零，偏差值除零外，前面必须冠以正、负号。

2. 尺寸公差

尺寸公差（简称公差）是指允许尺寸的变动量。公差等于最大极限尺寸与最小极限尺寸代数差的绝对值，也等于上偏差与下偏差之代数差的绝对值。公差取绝对值不存在负公差，也不允许为零。

孔公差 $T_D = |D_{\max} - D_{\min}| = |E_S - E_I|$

轴公差 $T_d = |d_{\max} - d_{\min}| = |e_s - e_i|$

偏差是从零线起计算的，是指相对于基本尺寸的偏离量。偏差可为正值、负值或零；而公差是允许尺寸的变化量，代表加工精度的要求，故公差值不能为零。

3. 公差带图

由于公差或偏差的数值与基本尺寸相差太大，不使用同一比例表示；同时为了简化，在图 2.4 中分析有关问题时，不画出孔轴的结构，只画出放大的孔轴公差区域和位置。采用这种表达方法的图形，称为公差带图，或称为公差与配合图解。公差带图由零线与公差带组成。

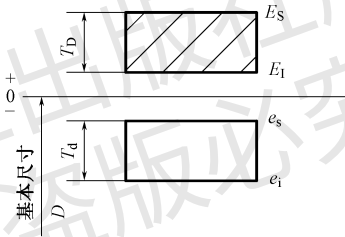


图 2.4 公差带图

① 零线：在公差带图中，确定偏差位置的一条基准直线，称为零偏差线（简称零线）。通常零线位置表示基本尺寸位置，正偏差位于零线的上方，负偏差位于零线的下方。

② 公差带：在公差带图中，由代表上偏差和下偏差或最大极限尺寸与最小极限尺寸的两条平行直线所限定的区域。

例 2-1 $\phi 45^{+0.039}_0$ 的孔分别与 $\phi 45^{+0.018}_{-0.050}$ 、 $\phi 45^{+0.018}_{+0.002}$ 、 $\phi 45^{+0.059}_{+0.043}$ 轴配合，作出其公差带图。

解 如图 2.5 所示：

- 画零线；
- 画出上下偏差位置；
- 标注出上下偏差值；
- 在孔公差带上画上斜线使之与轴公差带区别。

公差带图包含了“公差带大小”与“公差带位置”两个要素，前者由标准公差确定，后者由基本偏差确定。

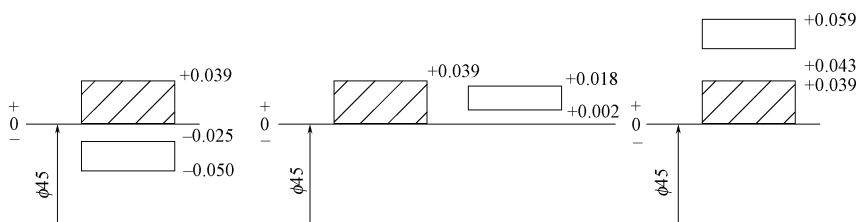


图 2.5 例 2-1

2.1.4 有关配合的术语和定义

1. 配合

配合是指基本尺寸相同的、相互结合的孔和轴公差带之间的关系。这种关系反映了孔、轴的配合性质，即孔、轴装配后配合的松紧和配合松紧的变动。

2. 间隙或过盈

孔的尺寸减去相配合的轴的尺寸所得的代数差，此差值为正时是间隙，为负时是过盈，如图 2.6 所示。

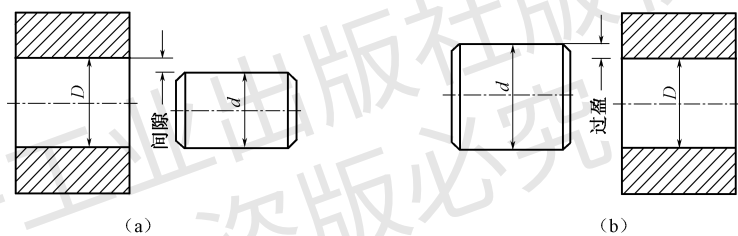


图 2.6 间隙与过盈

3. 间隙配合

间隙配合是具有间隙（包括最小间隙等于零）的配合。此时，孔的公差带在轴的公差带之上，如图 2.7 所示。

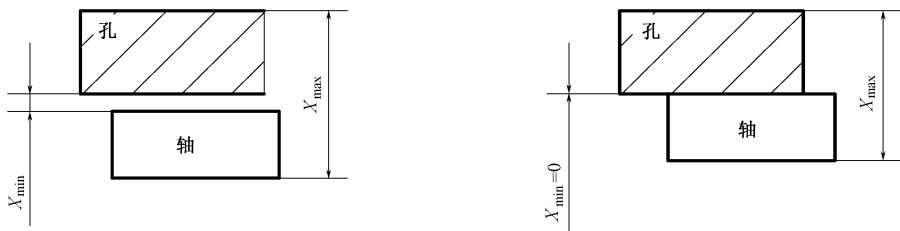


图 2.7 间隙配合

间隙配合的性质用最大间隙 $X_{\max}$ 、最小间隙 $X_{\min}$ 和平均间隙 X_{av} 表示：

$$X_{\max} = D_{\max} - d_{\min} = E_S - e_i \quad X_{\min} = D_{\min} - d_{\max} = E_I - e_s$$

$$X_{av} = \frac{X_{max} + X_{min}}{2}$$

4. 过盈配合

过盈配合是具有过盈（包括最小过盈等于零）的配合。此时，孔的公差带在轴的公差带之下，如图 2.8 所示。

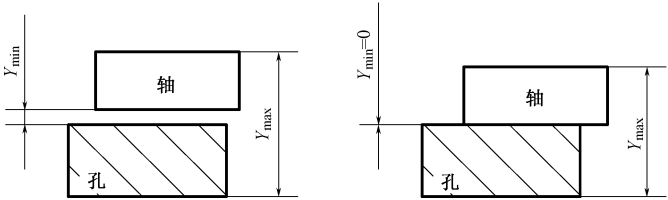


图 2.8 过盈配合

过盈配合的性质用最大过盈 Y_{max} 、最小过盈 Y_{min} 和平均过盈 Y_{av} 表示：

$$Y_{min} = D_{max} - d_{min} = E_S - e_i \quad Y_{max} = D_{min} - d_{max} = E_1 - e_s$$
$$Y_{av} = \frac{Y_{max} + Y_{min}}{2}$$

5. 过渡配合

过渡配合是可能具有间隙或过盈的配合。此时，孔的公差带与轴的公差带相互交叠，如图 2.9 所示。它是介于间隙配合和过盈配合之间的一类配合，但其间隙或过盈都不大。

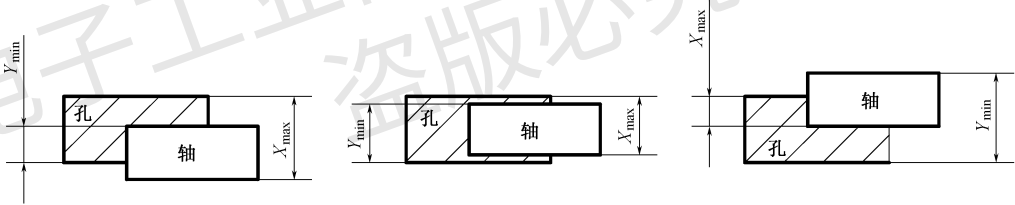


图 2.9 过渡配合

过渡配合的性质用最大间隙 X_{max} 、最大过盈 Y_{max} 和平均间隙 X_{av} 或平均过盈 Y_{av} 表示：

$$X_{av} (Y_{av}) = D_{av} - d_{av} = \frac{(X_{max} + Y_{max})}{2}$$

按上式计算，所得的值为正时是平均间隙，表示偏松的过渡配合；所得值为负时是平均过盈，表示偏紧的过渡配合。

6. 配合公差

配合公差是组成配合的孔、轴公差之和。它是允许间隙或过盈的变动量。配合公差是一个没有符号的绝对值，用代号 T_f 表示。

对于间隙配合 $T_f = T_D + T_d = |X_{max} - X_{min}|$

对于过盈配合 $T_f = T_D + T_d = |Y_{min} - Y_{max}|$

对于过渡配合 $T_f = T_D + T_d = |X_{max} - Y_{max}|$

7. 配合公差带

由代表极限间隙或极限过盈的两条直线所限定的区域,称为配合公差带,如图 2.10 所示。

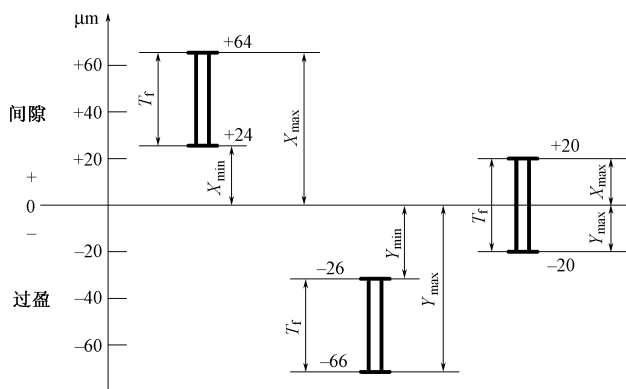


图 2.10 配合公差带图

配合公差带图就是以零间隙（或零过盈）为零线，用适当比例画出极限间隙或极限过盈的位置，以表示配合的松紧及松紧变动范围的图形。

在配合公差带图中，零线表示间隙或过盈值为零，零线以上为间隙，零线以下为过盈。配合公差带两端的坐标值代表极限间隙或极限过盈，它反映配合的松紧程度，上下两端的距离为配合公差，它反映配合的松紧变化程度。

例 2-2 已知 $D=\phi 45\text{mm}$, $T_f=41\mu\text{m}$, $X_{\max}=+16\mu\text{m}$, $T_D=25\mu\text{m}$, $e_i=+9\mu\text{m}$, 求作尺寸公差带图与配合公差带图。

解 因为 $T_f=T_D+T_d$, 所以 $T_d=T_f-T_D=41-25=+16\mu\text{m}$ 。

因为 $T_d=e_s-e_i$, 所以 $e_s=T_d+e_i=16+9=+25\mu\text{m}$ 。

因为 $X_{\max}=E_s-e_i$, 所以 $E_s=X_{\max}+e_i=16+9=+25\mu\text{m}$ 。

因为 $T_D=E_s-E_i$, 所以 $E_i=E_s-T_D=25-25=0$ 。

已知 $X_{\max}=+16\mu\text{m}$, $Y_{\max}=E_i-e_s=0-25=-25\mu\text{m}$, 作配合公差带图（图 2.11）。

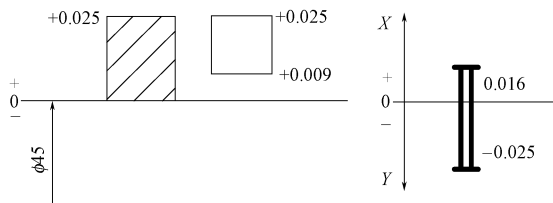


图 2.11 例 2-2

8. 基准制

① 基孔制：基本偏差为一定的孔的公差带，与不同基本偏差的轴的公差带形成各种配合的一种制度，如图 2.12 (a) 所示。

基孔制的孔称为基准孔，是配合中的基准件，国标规定其下偏差为零，上偏差为正值，以 H 为基准孔的代号。

② 基轴制：基本偏差为一定的轴的公差带，与不同基本偏差的孔的公差带形成各种配合的一种制度，如图 2.12 (b) 所示，基轴制的轴称为基准轴，是配合中的基准件，国标规定其上偏差为零，下偏差为负值，以 h 为基准轴的代号。

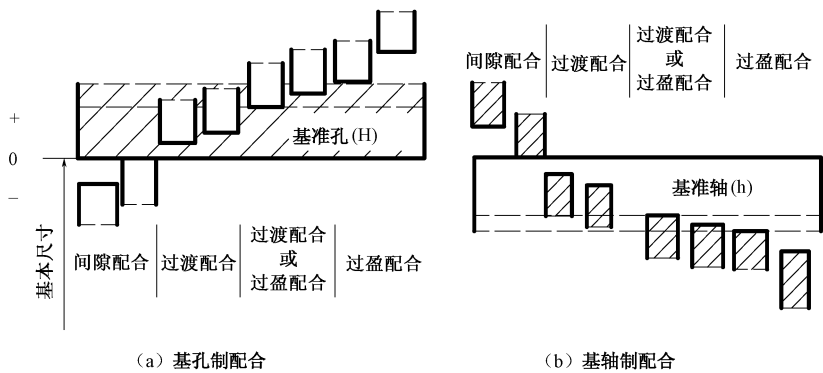


图 2.12 配合制

2.2 极限与配合的国家标准

为了实现互换性和满足各种使用要求，《公差与配合》国家标准对不同的基本尺寸，规定了一系列的标准公差（公差带大小）和基本偏差（公差带位置），组合构成各种公差带，然后由不同的孔、轴公差带结合，形成各种配合。

2.2.1 标准公差

在机械产品中，常用尺寸为小于或等于 500 的尺寸，它们的标准公差值见表 2.1。
GB/T 1800.2—2009 中，标准公差用 IT 表示，将标准公差等级分为 20 级，用 IT 和阿拉伯数字表示为 IT01、IT02、IT1、IT2、IT3、…、IT18。其中 IT01 最大，等级依次降低，IT18 最低。从表 2.1 中可以看出，公差等级越大，公差值越小，加工难度越高。其中 IT01~IT11 主要用于配合尺寸，而 IT12~IT18 主要用于非配合尺寸。同时可以看出，同一公差等级中，基本尺寸越大，公差值也越大，说明相同公差等级尺寸的加工中，难易程度基本相同。

表 2.1 标准公差数值（摘自 GB/T 1800.2—2009）

公差等级	IT01	IT02	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
基本尺寸/mm	/ μm													/ mm						
≤ 3	0.3	0.5	0.8	1.2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	0.10	0.14	0.25	0.40	0.60	1.0	1.4
$>3\sim 6$	0.4	0.6	1	1.5	2.5	4	5	8	12	18	30	48	75	0.12	0.18	0.30	0.48	0.75	1.2	1.8
$>6\sim 10$	0.4	0.6	1	1.5	2.5	4	6	9	15	22	36	58	90	0.15	0.22	0.36	0.58	0.90	1.5	2.2
$>10\sim 18$	0.5	0.8	1.2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	0.18	0.27	0.43	0.70	1.10	1.8	2.7
$>18\sim 30$	0.6	1	1.5	2.5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	0.21	0.33	0.52	0.84	1.30	2.1	3.3
$>30\sim 50$	0.6	1	1.5	2.5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	0.25	0.39	0.62	1.00	1.60	2.5	3.9
$>50\sim 80$	0.8	1.2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	0.30	0.46	0.74	1.20	1.90	3.0	4.6
$>80\sim 120$	1	1.5	2.5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	0.35	0.54	0.87	1.40	2.20	3.5	5.4
$>120\sim 180$	1.2	2	3.5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	0.40	0.63	1.00	1.60	2.50	4.0	6.3

续表

公差等级	IT01	IT02	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
基本尺寸/mm	/ μm													/ mm						
>180~250	2	3	4.5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	0.46	0.72	1.15	1.85	2.90	4.6	7.2
>250~315	2.5	4	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	0.52	0.81	1.30	2.10	3.20	5.2	8.1
>315~400	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	0.57	0.89	1.40	2.30	3.60	5.7	8.9
>400~500	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	0.63	0.97	1.55	2.50	4.00	6.3	9.7

2.2.2 基本偏差

1. 基本偏差代号及其特点

为了满足各种不同配合的需要, 国标分别对孔轴规定了 28 种基本偏差, 如图 2.13 所示, 每种基本偏差都以 1 个或 2 个拉丁字母表示, 大写为孔, 小写为轴, 并在 26 个字母中, 去掉了 I(i), L(l), O(o), Q(q)和 W(w), 又增加了由两个字母组成的 CD(cd)、EF(ef)、FG(fg)、JS(js)、ZA(za)、ZB(zb)、ZC(zc)。

由图 2.13 可见, 基本偏差系列具有以下特点。

- ① 对轴: $a \sim h$ 基本偏差是 e_s , $k \sim zc$ 基本偏差是 e_i 。
- ② 对孔: $A \sim H$ 基本偏差是 E_I , $K \sim ZC$ 基本偏差是 E_S 。
- ③ JS 与 js 为双向偏差, 其基本偏差可以认为是上偏差 ($+IT/2$), 也可以认为是下偏差 ($-IT/2$)。
- ④ 从 $A \sim H(a \sim h)$ 基本偏差的绝对值逐渐减小。从 $K \sim V$ $ZC(k \sim zc)$ 基本偏差的绝对值逐渐增大。
- ⑤ 基本偏差只确定公差带靠近零线的一端, 公差带的另一端取决于公差等级和这个基本偏差的组合。

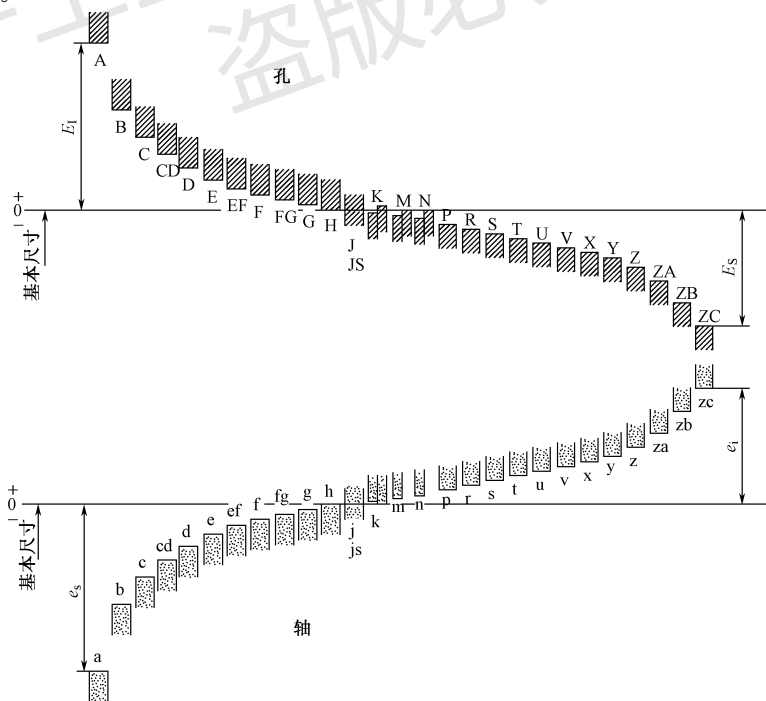


图 2.13 基本偏差系列

2. 基本偏差的数值

基本偏差数值也是经过试验公式计算得到的，实际使用时可查表（见附录 A）。

从附录 A 中可以看到，代号为 H 的基准孔，其基本偏差 E_1 总是等于零，代号为 h 的基准轴，其基本偏差 e_s 总是等于零。

3. 公差带代号与配合代号

① 公差带代号。由于公差带相对于零线的位置是由基本偏差确定的，公差带的大小由公差等级确定，因此孔和轴的公差带代号由基本偏差代号与公差等级代号组成。

例如：



其中，公差等级数字确定公差带的大小，基本偏差代号确定公差带的位置。在零件图上，一般标注基本尺寸与极限偏差值。

② 配合代号。标准规定，用孔和轴的公差带代号以分数形式组成配合的代号，其中分子为孔的公差带代号，分母为轴的公差带代号。例如， $\phi 25H8/f7$ 表示基孔制间隙配合， $\phi 45K7/h6$ 表示基轴制过渡配合。

显然，在基孔制配合中：

H/a~h 为间隙配合，H/j~n 为过渡配合，H/p~zc 为过盈配合。

在基轴制配合中：

A~H/h 为间隙配合，J~N/h 为过渡配合，P~ZC/h 为过盈配合。

4. 极限与配合的标注及查表

在装配图上标注极限与配合，采用组合式注法。它是在基本尺寸后面用一分数形式表示。通常分子中含 H 的为基孔制配合，分母中含 h 的为基轴制配合，如图 2.14 (a) 所示。

在零件图上标注公差的形式有 3 种：只注公差带代号，如图 2.14 (b) 所示；只注极限偏差数值，如图 2.14 (c) 所示；同时注公差带代号和极限偏差数值，如图 2.14 (d) 所示。

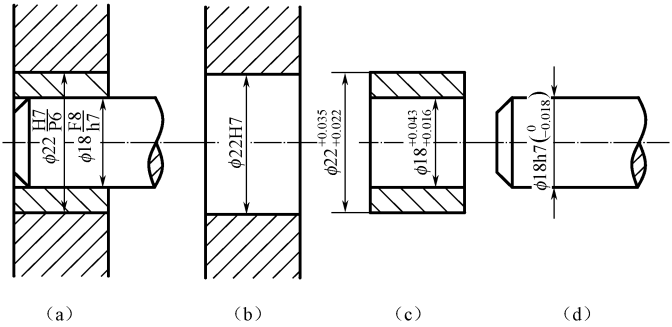


图 2.14 极限与配合在图样上的标注

例 2-3 查表写出 $\phi 22(H8/F7)$ 的极限偏差数值。

解 对照基本偏差系列图 2.13 可知，H8/F7 是基孔制配合，其中 H8 是基准孔的公差带代号，f7 是配合轴的公差带代号。

① $\phi 22H8$ 基准孔的极限偏差,可由附录 A 中查得。在表中由基本尺寸从大于 18~24 的行和公差带 H8 的列相交处查得 $^{+33}_0$ (即+0.033mm 和 0mm) 这就是基准孔的上、下偏差,所以, $\phi 22H8$ 可写成 $\phi 22^{+0.033}_0$ 。

② $\phi 22f7$ 配合轴的极限偏差,可由附录 A 中查得。在表中可由基本尺寸从大于 18~24 的行和公差带 f7 的列相交处查得 $^{-20}_{-41}$ (即-0.020mm 和-0.041mm),它是配合轴的上偏差和下偏差,所以 $\phi 22f7$ 可写成 $\phi 22^{0.020}_{-0.041}$ 。

5. 一般公差（线性尺寸的未注公差）

线性尺寸的一般公差是指在车间普通工艺条件下,机床设备一般加工能力可保证的公差。在正常维护和操作情况下,它代表经济加工精度,主要用于低精度的非配合尺寸。采用一般公差的尺寸在车间正常生产能保证的条件下,一般可不检验,而主要由工艺装备和加工者自行控制。应用一般公差可简化制图,节省图样设计时间,明确可由一般工艺水平保证的尺寸,突出图样上注出公差的尺寸(这些尺寸大多数是重要而且需要控制的)。

GB/T 1804—2000 对线性尺寸的一般公差规定了 4 个公差等级,即 f(精密级)、m(中等级)、c(粗糙级)和 v(最粗级)。对尺寸也采用了大的尺寸分段。国家标准对孔、轴与长度的极限偏差均采用与国际标准 ISO 2768—1: 1989 一致的双向对称分布偏差。其极限偏差值全部采用对称偏差值,线性尺寸的未注极限偏差数值见表 2.2。

表 2.2 线性尺寸的未注极限偏差数值（摘自 GB/T 1804—2000）(mm)

公差等级	尺寸分段							
	0.5~3	>3~6	>6~30	>30~120	>120~400	>400~1000	>1000~2000	>2000~4000
f (精密级)	±0.05	±0.05	±0.1	±0.15	±0.2	±0.3	±0.5	—
m (中等级)	±0.1	±0.1	±0.2	±0.3	±0.5	±0.8	±0.2	±2
c (粗糙级)	±0.2	±0.3	±0.5	±0.8	±1.2	±2	±3	±4
v (最粗级)	—	±0.5	±1	±1.5	±2.5	±4	±6	±8

采用一般公差的尺寸,在图样上只注基本尺寸,不注极限偏差,而在图样上或技术文件中用国家标准号和公差等级代号表示,在两者之间用一短画线隔开。例如,选用 m(中等级)时,则表示为 GB/T 1804—m。这表明图样上凡未注公差的线性尺寸(包含倒圆半径与倒角高度)按 m(中等级)加工和检验。

习题 2

- 1. 什么是极限尺寸?什么是实际尺寸?二者关系如何?
- 2. 作用尺寸和实际尺寸的区别是什么?工件在什么情况下,其作用尺寸和实际尺寸相同?
- 3. 试述标准公差、基本偏差、误差及公差等级的区别和联系。
- 4. 什么是配合?当基本尺寸相同时,如何判断孔轴配合性质的异同?
- 5. 间隙配合、过渡配合、过盈配合各适用于什么场合?
- 6. 如何根据图样标注或其他条件确定尺寸公差带图?

形状与位置公差

在零件加工过程中，由于机床、夹具和刀具系统存在几何误差，以及切削中出现受力变形、热变形、振动和磨损等影响，不可避免会产生尺寸误差，因此，为满足零件装配后的功能要求，保证零件的互换性和经济性，不仅对零件尺寸误差要加以限制，而且对零件的几何要素规定必要的形状和位置公差。本章重点要求掌握各种形位误差的常用检测方法及数据处理。

3.1 形状和位置误差的基本概述

3.1.1 零件的几何要素

几何要素（简称要素）是指构成零件几何特征的点、线和面。如图 3.1 所示为零件的球面、圆柱面、圆锥面、端面、轴线、球心等。

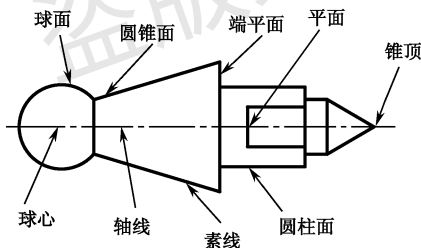


图 3.1 零件的几何要素

几何要素可按不同角度来分类。

1. 按结构特征分

(1) 轮廓要素

轮廓要素是指构成零件外形的点、线、面各要素，如图 3.1 中的球面、圆锥面、圆柱面、端面，以及圆锥面和圆柱面的素线。

(2) 中心要素

中心要素是指轮廓要素对称中心所表示的点、线、面各要素，如图 3.1 中的轴线和球心。

2. 按存在状态分

(1) 实际要素

实际要素是指零件实际存在的要素，通常用测量得到的要素代替。

(2) 理想要素

理想要素是指具有几何意义的要素，它们不存在任何误差。机械零件图样表示的要素均为理想要素。

3. 按所处地位分

(1) 被测要素

被测要素是指图样上给出形状或（和）位置公差要求的要素，是检测的对象。

(2) 基准要素

基准要素是指用来确定被测要素方向或（和）位置的要素。

4. 按功能关系分

(1) 单一要素

单一要素是指仅对要素自身提出功能要求而给出形状公差的要素。

(2) 关联要素

关联要素是指相对基准要素有功能要求而给出位置公差的要素。

3.1.2 形位公差的特征项目及其符号

按国家标准 GB/T 1182—2008 的规定，形位公差特征项目共有 14 个。其中，形状公差有 4 个，它是对单一要素提出的要求，因此无基准要求；位置公差有 8 个，它是对关联要素提出的要求，因此，在大多数情况下有基准要求；形状或位置（轮廓）公差有 2 个，若无基准要求，则为形状公差；若有基准要求，则为位置公差。位置公差又分为定向公差、定位公差和跳动公差。各项的名称及符号见表 3.1。被测要素、基准要素的标注要求及其他附加符号见表 3.2。

表 3.1 形位公差项目、符号及分类

公差类别	项目	符号	公差类别	项目	符号
形状公差	直线度	υ	位置公差	平行度	ϕ
	平面度	χ		垂直度	β
	圆度	ε		倾斜度	α
	圆柱度	γ		同轴度	ρ
形状或位置公差	线轮廓度	κ		对称度	i
	面轮廓度	δ		位置度	φ
				圆跳动	η
				全跳动	τ

表 3.2 被测要素、基准要素的标注要求及其他附加符号

说 明		符 号	说 明	符 号
被测要素的标注	直接		最大实体要求	m
	用字母		最小实体要求	l
基准要素的标注			可逆要求	}
基准目标的标注			延伸公差带	p
理论正确尺寸			自由状态（非刚性零件）条件	@
包容要求		{	全周（轮廓）	

3.1.3 形状和位置公差代号

GB/T 1182—2008 规定用代号来标注形状与位置公差。

形位公差代号包括形位公差的各项目的符号（表 3.1）、形位公差框格及指引线、形位公差值和其他有关符号及基准代号等。这些内容可参阅图 3.2 及图中说明。框格内字体的高度与图样中的尺寸数字等高。对被测要素的形状要求见表 3.3。

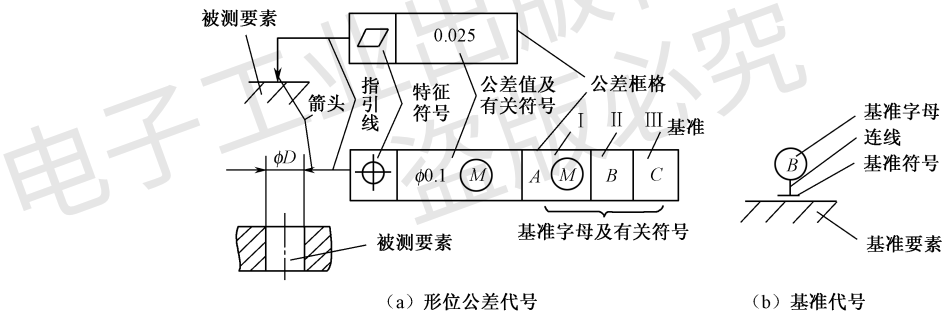


图 3.2 公差框格及基准代号

表 3.3 对被测要素的形状要求

含 义	符 号
只许中间向材料内凹下	(-)
只许中间向材料外凸起	(+)
只许从左至右减小	(▷)
只许从右至左减小	(◁)

3.1.4 形位公差的标注示例

如图 3.3 所示为气门阀杆形位公差标注，从图中可以看到，当被测定的要素为线或表面时，从框格引出的指引线箭头，应指在该要素的轮廓线或其延长线上。当被测要素是轴线

时, 应将箭头与该要素的尺寸线对齐, 如 $M8 \times 1$ 轴线的同轴度注法。当基准要素是轴线时, 应将基准符号与该要素的尺寸线对齐, 如基准 A 。

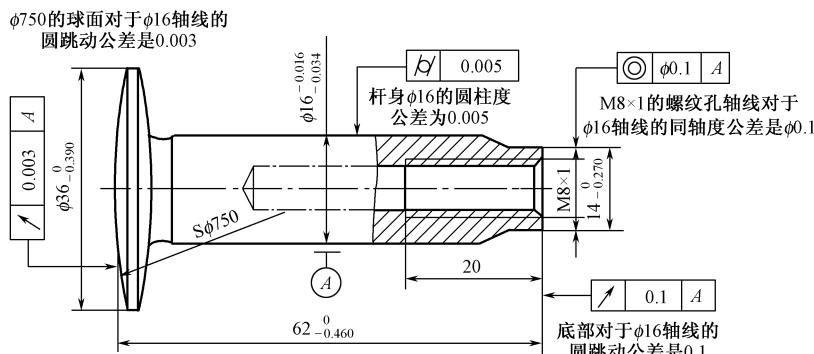


图 3.3 气门阀杆形位公差标注

3.2 形状公差及公差带

形位公差带是用来限制被测要素变动的区域。它是一个几何图形, 只要被测要素完全落在给定的公差带内, 就表示该要素的形状和位置符合要求。

形位公差带具有形状、大小、方向和位置 4 要素。公差带的形状由被测要素的理想形状和给定的公差特征项目所确定。常见的形位公差带的形状如图 3.4 所示。公差带的大小是由公差值 t 确定的, 指的是公差带的宽度或直径。形位公差带的方向和位置有两种情况: 公差带的方向或位置可以随实际被测要素的变动而变动, 没有对其他要素保持一定几何关系的要求, 这时公差带的方向或位置是浮动的; 若形位公差带的方向或位置必须和基准要素保持一定的几何关系, 则是固定的。所以, 位置公差 (标有基准) 的公差带的方向和位置一般是固定的, 形状公差 (未标基准) 的公差带的方向和位置一般是浮动的。

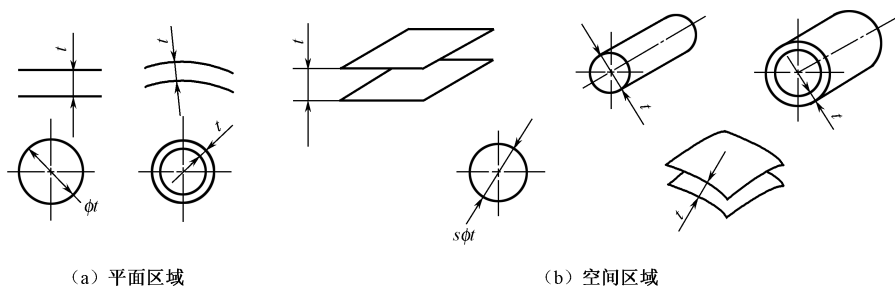


图 3.4 常见形位公差带的形状

3.2.1 形状误差和形状公差

1. 形状误差

形状误差是指被测实际要素对理想要素的变动量。

2. 形状公差

形状公差是指单一实际要素的形状所允许的变动全量。形状公差（包括没有基准要求的线、面轮廓度）共有 6 项，随被测要素的结构特征和对被测要素的要求不同，直线度、线轮廓度、面轮廓度都有多种类型。

3. 形状误差的评定

① 形状误差的评定准则——最小条件。所谓最小条件，是指被测实际要素相对于理想要素的最大变动量为最小，此时，对被测实际要素评定的误差值为最小。

② 形状误差值的评定。评定形状误差时，形状误差数值的大小可用最小包容区域（简称最小区域）的宽度或直径表示。最小包容区域是指包容被测要素时，具有最小宽度 f 或直径 f 的包容区域，如图 3.5 所示。显然，各项公差带和相应误差的最小区域，除宽度或直径（即大小）分别由设计给定和由被测实际要素本身决定外，其他三特征应对应相同，只有这样，误差值和公差值才具有可比性。因此，最小区域的形状应与公差带的形状一致（即应服从设计要求）；公差带的方向和位置则应与最小区域一致（设计本身无要求的前提下应服从误差评定的需要）。

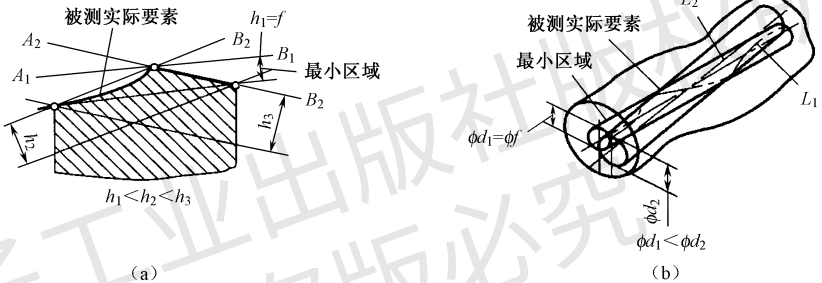


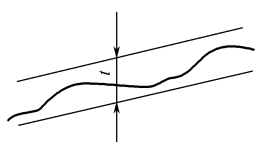
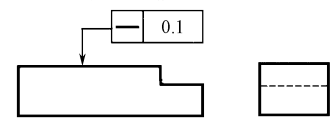
图 3.5 最小条件与最小区域

遵守最小条件原则，可以最大限度地通过合格件。但在许多情况下，又可能使检测和数据处理复杂化。因此，允许在满足零件功能要求的前提下，用近似最小区域的方法来评定形状误差值。近似方法得到的误差值，只要小于公差值，零件在使用中会更趋可靠；但若大于公差值，则在仲裁时应依据最小条件原则。

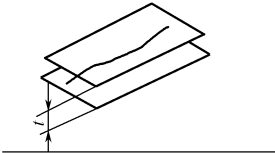
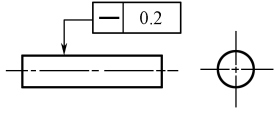
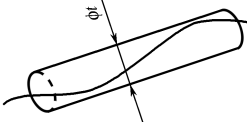
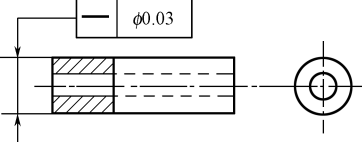
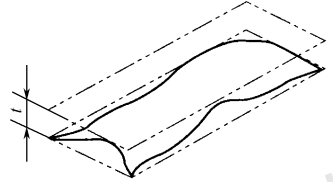
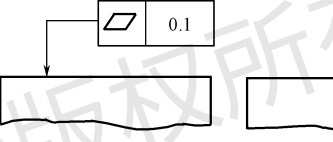
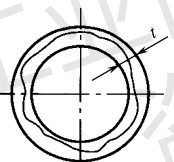
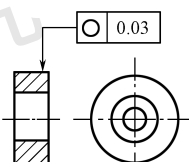
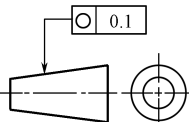
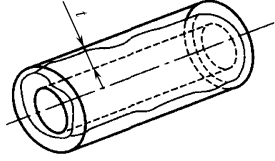
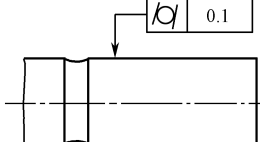
3.2.2 形状公差带

形状公差带特点：只对要素有形状要求，无方向、位置约束，是指单一实际要素的形状所允许的变动全量。形状公差带定义、标注和解释见表 3.4。

表 3.4 形状公差带定义、标注和解释

特征	公差带定义	标注和解释
直线度	在给定平面内，公差带是距离为公差值 t 的两平行直线之间的区域 	被测表面的素线必须位于平行于图样所示投影面且距离为公差值 0.1mm 的两平行直线内 

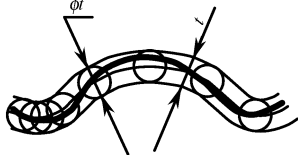
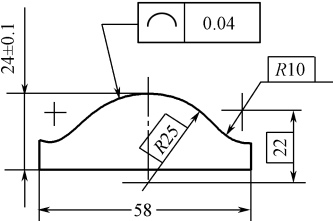
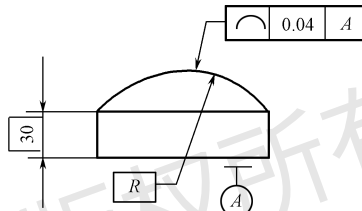
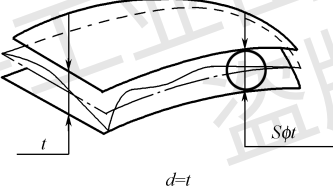
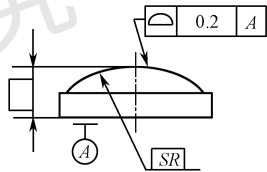
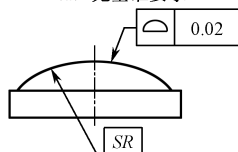
续表

特征	公差带定义	标注和解释
直线度	在给定方向上，公差带是距离为公差值 t 的两平行平面之间的区域 	被测圆柱面的任一素线必须位于距离为公差值 0.2mm 的两平行平面之内 
	如在公差值前加注 ϕ ，则公差带是直径为 t 的圆柱面内的区域 	被测圆柱体的轴线必须位于直径为 $\phi 0.03\text{mm}$ 的圆柱面内 
平面度	公差带是距离为公差值 t 的两平行平面之间的区域 	被测表面必须位于距离为公差值 0.6mm 的两平行平面内 
圆度	公差带是在同一正截面上，半径差为公差值 t 的两同心圆之间的区域 	被测圆柱面任一正截面的圆周必须位于半径差为公差值 0.03mm 的两同心圆之间 
		被测圆锥面任一正截面上的圆周必须位于半径差为 0.1mm 的两同心圆之间 
圆柱度	公差带是半径差为公差值 t 的两同轴圆柱面之间的区域 	被测圆柱面必须位于半径差为公差值 0.01mm 的两同轴圆柱面之间 

3.2.3 轮廓度公差与公差带

轮廓度公差特征有线轮廓度和面轮廓度。轮廓度无基准要求时为形状公差，有基准要求时为位置公差。轮廓度公差带定义、标注和解释见表 3.5。

表 3.5 轮廓度公差带定义、标注和解释

特征	公差带定义	标注和解释
线轮廓度	公差带是包络一系列直径为公差值 t 的圆的两包络线之间的区域。诸圆的圆心位于具有理论正确几何形状的线上 	在平行于图样所示投影面的任一截面上，被测轮廓线必须位于包络一系列直径为公差值 0.04mm，且圆心位于具有理论正确几何形状的线上的两包络线  (a) 无基准要求  (b) 有基准要求
面轮廓度	公差带是包络一系列直径为公差值 t 的球的两包络面之间的区域，诸球的球心位于具有理论正确几何形状的面上 	被测轮廓面必须位于包络一系列球的两包络面之间，诸球的直径为公差值 0.02mm，且球心位于具有理论正确几何形状的面上  (a) 无基准要求  (b) 有基准要求

3.3 位置公差及公差带

3.3.1 位置误差和位置公差

1. 位置误差

位置误差是指关联被测实际要素对其理想要素的变动量。

2. 位置公差

位置公差是指关联实际要素的位置对基准所允许的变动全量。位置公差按几何特征分类如下。

- ① 定向公差：具有确定方向的功能，即确定被测实际要素相对基准要素的方向精度。
- ② 定位公差：具有确定位置的功能，即确定被测实际要素相对基准要素的位置精度。
- ③ 跳动公差：具有综合控制的能力，即确定被测实际要素的形状和位置两方面的综合精度。

3. 位置误差的评定

① 定向误差：是被测实际要素对一具有确定方向的理想要素的变动量，该理想要素的方向由基准确定。

定向误差值用定向最小包容区域（简称定向最小区域）的宽度或直径表示，如图 3.6 所示，定向最小区域是指按理想要素的方向包容被测实际要素时，具有最小宽度或直径的包容区域。

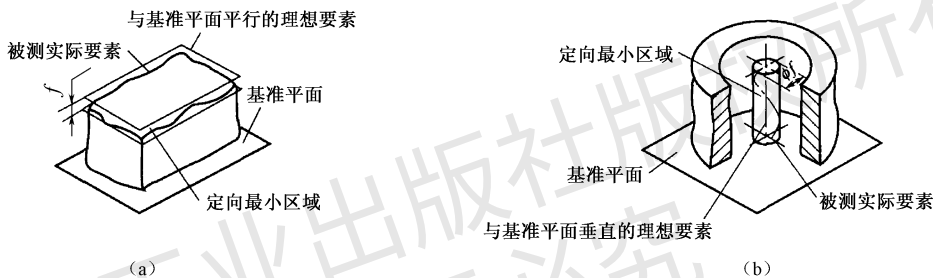


图 3.6 定向误差

② 定位误差：是被测实际要素对一具有确定位置的理想要素的变动量。该理想要素的位置由基准和理论正确尺寸确定。

所谓“理论正确尺寸”是用来确定被测要素的理想形状、方向和位置的尺寸。它只表达设计时对被测要素的理想要求，故不附带公差，而该要素的形状、方向和位置误差则由给定的形位公差来控制。

定位误差用定位最小包容区域（简称定位最小区域）的宽度或直径表示，如图 3.7 所示。定位最小区域是指以理想要素定位来包容被测实际要素时，具有最小宽度或直径的包容区域。

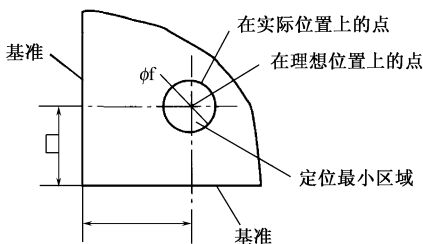


图 3.7 定位误差

③ 跳动：是当被测要素绕基准轴线旋转时，以指示器测量被测实际要素表面来反映其

几何误差，它与测量方法有关，是被测要素形状误差和位置误差的综合反映。

跳动的大小由指示器示值的变化确定，例如，圆跳动是被测实际要素绕基准轴线作无轴向移动回转一周时，由位置固定的指示器在给定方向上测得的最大与最小示值之差。

3.3.2 基准

基准是具有正确形状的理想要素，在实际运用时，则由基准实际要素来确定。由于实际要素存在形位误差，因此，由实际要素建立基准时，应以该基准实际要素的理想要素为基准，理想要素的位置应符合最小条件。

基准的种类通常分为如下 3 种。

① 单一基准：由一个要素建立的基准称为单一基准，一般是由圆柱轴线建立的基准。

② 组合基准（公共基准）：凡由两个或两个以上要素建立一个独立的基准称为组合基准或公共基准。一般由两段轴线 *A*、*B* 建立公共基准。

③ 基准体系（三基面体系）：确定被测要素在空间的理想位置所采用的基准，由 3 个互相垂直的基准平面组成，是这 3 个互相垂直的基准平面组成的基准体系。三基面体系（含三个基准平面）：第一基准平面、第二基准平面、第三基准平面。

零件的基准数量和顺序的确定：根据零件的功能要求来确定，一般零件上面积大、定位稳的表面作为第一基准；面积较小的表面作为第二基准；面积最小的表面作为第三基准。



NOTICE 注意

在加工或检测时，设计时所确定的基准表面和顺序不可随意更改，以保证设计时提出的功能要求。

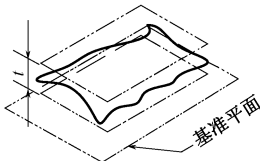
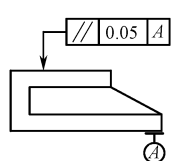
3.3.3 位置公差带

1. 定向公差

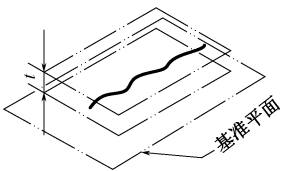
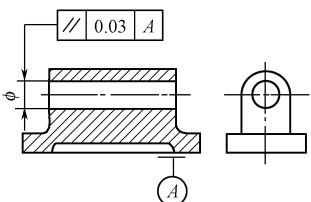
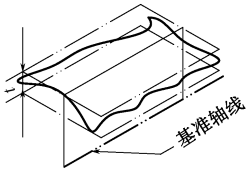
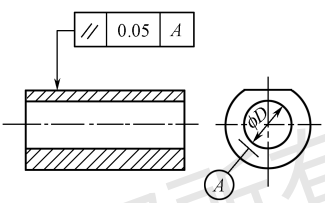
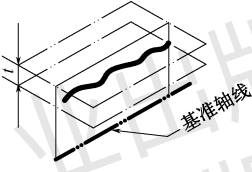
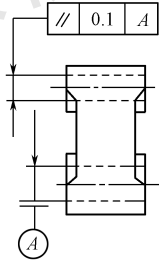
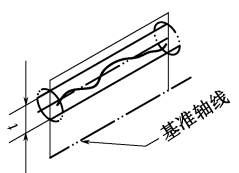
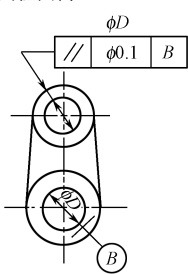
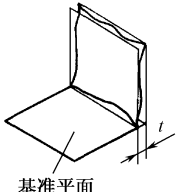
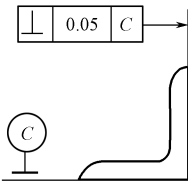
定向公差是关联被测要素对基准要素在规定方向上所允许的变动量，定向公差与其他形位公差相比有其明显的特点：定向公差带相对于基准有确定的方向，并且公差带的位置可以浮动；定向公差带还具有综合控制被测要素的方向和形状的职能。

根据两要素给定方向不同，定向公差分为平行度、垂直度和倾斜度 3 个项目，见表 3.6。

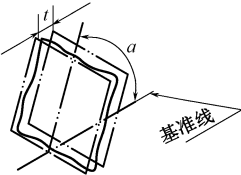
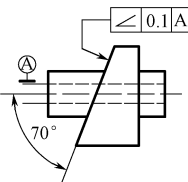
表 3.6 定向公差带定义、标注和解释

特 征		公差带定义	标注和解释
平行度	面对面	公差带是距离为公差值 <i>t</i> ，且平行于基准面的两平行平面之间的区域 	被测表面必须位于距离为公差值 0.05mm，且平行于基准表面 <i>A</i> （基准平面）的两平行平面之间 

续表

特 征	公差带定义	标注和解释
线对面	公差带是距离为公差值 t ，且平行于基准平面的两平行平面之间的区域 	被测轴线必须位于距离为公差值 0.03mm，且平行于基准表面 A （基准平面）的两平行平面之间 
面对线	公差带是距离为公差值 t ，且平行于基准轴线的两平行平面之间的区域 	被测表面必须位于距离为公差值 0.05mm，且平行于基准线 A （基准轴线）的两平行平面之间 
线对线	公差带是距离为公差值 t ，且平行于基准线，并位于给定方向上的两平行平面之间的区域 	被测轴线必须位于距离为公差值 0.1mm，且在给定方向上平行于基准轴线的两平行平面之间 
	公差带是直径为公差值 t ，且平行于基准线的圆柱面内的区域 	被测轴线必须位于直径为公差值 0.1mm，且平行于基准轴线的圆柱面内 
垂直度	公差带是距离为公差值 t ，且垂直于基准平面的两平行平面之间的区域 	被测面必须位于距离为公差值 0.05mm，且垂直于基准平面 C 的两平行平面之间 

续表

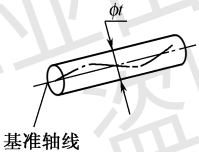
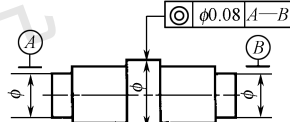
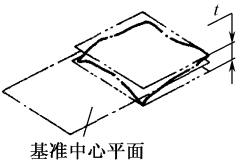
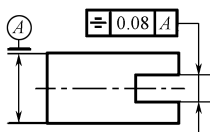
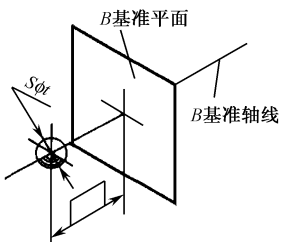
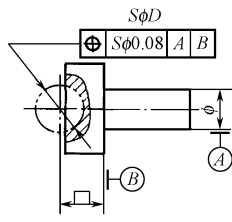
特 征		公差带定义	标注和解释
倾斜度	面对面	公差带是距离为公差值 t，且与基准线成一给定角度 α 的两平行平面之间的区域 	被测表面必须位于距离为公差值 0.1mm，且与基准线 D（基准轴线）或理论正确角度呈 70° 的两平行平面之间 

2. 定位公差

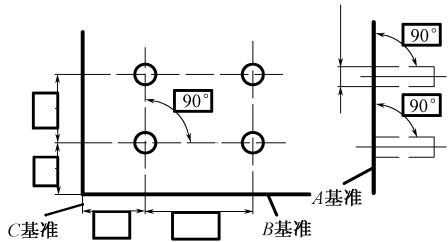
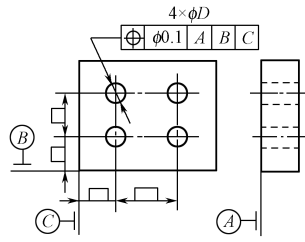
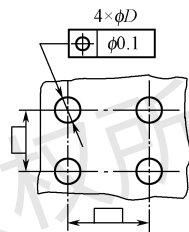
定位公差是关联实际被测要素对基准在位置上所允许的变动量。定位公差带与其他形位公差带比较有以下特点：定位公差带具有确定的位置，相对于基准的尺寸为理论正确尺寸；定位公差带具有综合控制被测要素位置、方向和形状的功能。

根据被测要素和基准要素之间的功能关系，定位公差分为位置度、同轴度和对称度，见表 3.7。

表 3.7 定位公差带定义、标注和解释

特征		公差带定义	标注和解释
同轴度	轴线的同轴度	公差带是公差值 t 的圆柱面的区域，该圆柱面的轴线与基准轴线同轴 	大圆的轴线必须位于公差值 $\phi 0.08\text{mm}$，且与公共基准线 $A-B$（公共基准轴线）同轴的圆柱面内 
对称度	中心平面的对称度	公差带是距离为公差值 t，且相对基准的中心平面对称配置的两平行平面之间的区域 	被测中心平面必须位于距离为公差值 0.08mm，且相对基准中心平面 A 对称配置的两平行平面之间 
位置度	点的位置度	如公差值前加注 $S\phi$，公差带是直径为公差值 t 的球内的区域，球公差带的中心点的位置由相对于基准 A 和 B 的理论正确尺寸确定 	被测球的球心必须位于直径为公差值 0.08mm 的球内，该球的球心位于相对基准 A 和 B 所确定的理想位置上 

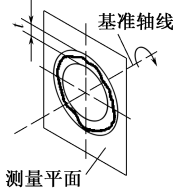
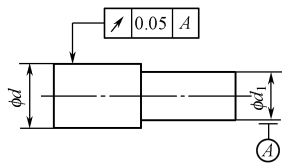
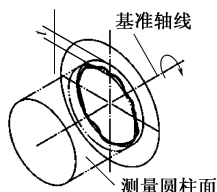
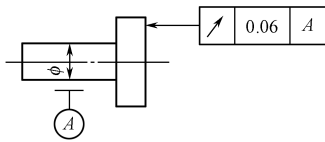
续表

特征	公差带定义	标注和解释
线的位置度	如在公差值前加注ϕ，则公差带是直径为t的圆柱面内的区域，公差带的轴线的位置由相对于三基面体系的理论正确尺寸确定 	每个被测轴线必须位于直径为公差值 0.1mm，且以相对于 A、B、C 基准表面（基准平面）所确定的理想位置为轴线的圆柱内  每个被测轴线必须位于直径为公差值 0.1mm，且以理想位置为轴线的圆柱内 

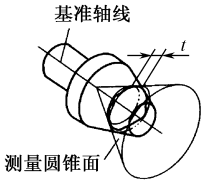
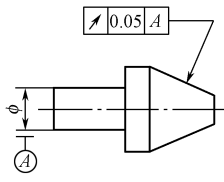
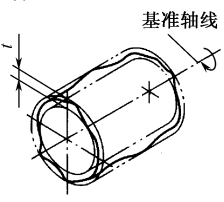
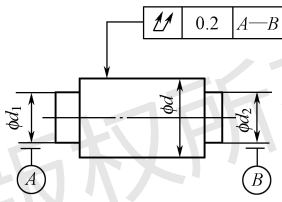
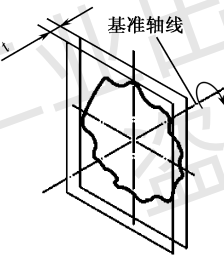
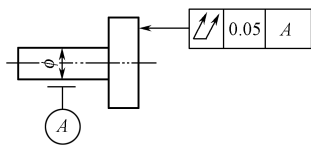
3. 跳动公差

跳动公差是关联实际要素绕基准轴线回转一周或连续回转时所允许的最大跳动公差。跳动公差与其他形位公差比较有以下特点：跳动公差带相对于基准轴线有确定的位置；是以检测方式定出的公差项目，具有综合控制形状误差和位置误差的功能。跳动公差分为圆跳动和全跳动，见表 3.8。

表 3.8 跳动公差带定义、标注和解释

特 征	公差带定义	标注和解释
圆跳动	公差带是在垂直于基准轴线的任一测量平面内，半径差为公差值 t，且圆心在基准轴线上的两个同心圆之间的区域 	当被测要素围绕基准线 A（基准轴线）作无轴向移动旋转一周时，在任一测量平面内的径向圆跳动量均不大于 0.05mm 
端面圆跳动	公差带是在与基准同轴的任一半径位置的测量圆柱面上距离为 t 的圆柱面区域 	被测面绕基准线 A（基准轴线）作无轴向移动旋转一周时，在任一测量圆柱面内的轴向跳动量均不得大于 0.06mm 

续表

特 征		公差带定义	标注和解释
全 跳 动	斜 向 圆 跳 动	公差带是在与基准轴线同轴的任一测量圆锥面上距离为 t 的两圆之间的区域, 除另有规定, 其测量方向应与被测面垂直 	被测面绕基准线 A (基准轴线) 作无轴向移动旋转一周时, 在任一测量圆锥面上的跳动量均不得大于 0.05mm 
	径 向 全 跳 动	公差带是半径差为公差值 t, 且与基准同轴的两圆柱面之间的区域 	被测要素围绕基准轴线 $A-B$ 作若干次旋转, 并在测量仪器与工件间同时作轴向移动, 此时在被测要素上各点间的示值差均不得大于 0.2mm, 测量仪器或工件必须沿着基准轴线方向并相对于公共基准轴线 $A-B$ 移动 
	端 面 全 跳 动	公差带是距离为公差值 t, 且与基准垂直的两平行平面之间的区域 	被测要素绕基准轴线 A 作若干次旋转, 并在测量仪器与工件间作径向移动。此时, 在被测要素上各点间的示值差不得大于 0.05mm, 测量仪器或工件必须沿着轮廓具有理想正确形状的线和相对于基准轴线 A 的正确方向移动 

3.4 公差原则与公差要求

对同一零件既规定尺寸公差, 又规定形位公差。从零件的功能考虑, 给出的尺寸公差与形位公差既可能相互有关系, 也可能相互无关系, 而公差原则与公差要求就是处理尺寸公差与形位公差之间关系的规定, 即图样上标注的尺寸公差和形位公差是如何控制被测要素的尺寸误差和形位误差的。公差原则在大的方面可以分为独立原则和相关要求两大类, 相关要求又可以分为包容要求、最大实体要求和最小实体要求, 以及可应用于最大实体要求和最小实体要求的可逆要求。

3.4.1 有关术语及定义

1. 局部实际尺寸 (D_a 、 d_a)

在实际要素的任意正截面上, 两对应点之间测得的距离称为局部实际尺寸, 简称实际

尺寸。 D_a 和 d_a 分别表示内、外表面（孔、轴）的实际尺寸，如图 3.8 所示。

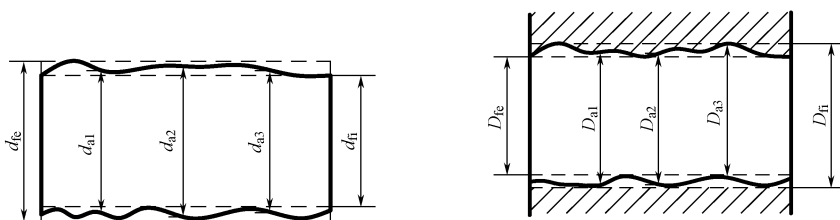


图 3.8 实际尺寸和作用尺寸

2. 体外作用尺寸 (D_{fe} 、 d_{fe})

在被测要素的给定长度上，与实际内表面（孔）体外相接的最大理想面或与实际外表面（轴）体外相接的最小理想面的直径（或宽度）称为体外作用尺寸。 D_{fe} 和 d_{fe} 分别表示内、外表面（孔、轴）的体外作用尺寸，如图 3.8 所示。对于关联要素，该理想面的轴线或中心平面必须与基准要素保持图样给定的几何关系。

体外作用尺寸的特点是表示该尺寸的理想面处于零件的实体之外。因此，轴的体外作用尺寸大于或等于轴的实际尺寸，孔的体外作用尺寸小于或等于孔的实际尺寸。实际中可用以下公式计算：

$$\begin{aligned} d_{fe} &= d_a + t_{\text{形位}} \\ D_{fe} &= D_a - t_{\text{形位}} \end{aligned}$$

3. 体内作用尺寸 (D_{fi} 、 d_{fi})

在被测要素的给定长度上，与实际内表面（孔）体内相接的最小理想面或与实际外表面（轴）体内相接的最大理想面的直径（或宽度）称为体内作用尺寸。 D_{fi} 和 d_{fi} 分别表示内、外表面（孔、轴）的体内作用尺寸，如图 3.8 所示。对于关联要素，该理想面的轴线或中心平面必须与基准要素保持图样给定的几何关系。

体内作用尺寸的特点是表示该尺寸的理想面处于零件的实体之内。因此，轴的体内作用尺寸小于或等于轴的实际尺寸，孔的体内作用尺寸大于或等于孔的实际尺寸。

作用尺寸是由实际尺寸和形位误差综合形成的，体外作用尺寸是对内、外表面的装配功能起作用的尺寸；体内作用尺寸是对零件强度起作用的尺寸。实际中可用以下公式计算：

$$\begin{aligned} d_{fi} &= d_a - t_{\text{形位}} \\ D_{fi} &= D_a + t_{\text{形位}} \end{aligned}$$

4. 最大实体尺寸 (MMS)

孔或轴具有允许的材料量为最多时的状态，称为最大实体状态 (MMC)。在此状态下的极限尺寸，称为最大实体尺寸 (MMS)，它是孔的最小极限尺寸和轴的最大极限尺寸的统称。

轴的最大实体尺寸代号为 d_M ，它等于轴的最大极限尺寸 $d_{\max}$ ；孔的最大实体尺寸代号为 D_M ，它等于孔的最小极限尺寸 $D_{\min}$ ，即

$$\begin{aligned} d_M &= d_{\max} \\ D_M &= D_{\min} \end{aligned}$$

5. 最小实体尺寸 (LMS)

孔或轴具有允许的材料量为最少时的状态, 称为最小实体状态 (LMC)。在此状态下的极限尺寸, 称为最小实体尺寸 (LMS), 它是孔的最大极限尺寸和轴的最小极限尺寸的统称。

轴的最小实体尺寸用代号为 d_L , 它等于轴的最小极限尺寸 $d_{\min}$; 孔的最小实体尺寸用代号为 D_L , 它等于孔的最大极限尺寸 $D_{\max}$, 即

$$\begin{aligned}d_L &= d_{\min} \\ D_L &= D_{\max}\end{aligned}$$

6. 最大实体实效尺寸 (MMVS)

在配合的全长上, 孔、轴为最大实体尺寸, 且其轴线的形状 (单一要素) 或位置误差 (关联要素) 等于给出公差值时的体外作用尺寸称为最大实体实效尺寸 (MMVS)。

轴的最大实体实效尺寸代号为 d_{MV} , 孔的最大实体实效尺寸代号为 D_{MV} 。根据定义, 对于某一图样中的某一轴或孔的有关尺寸应该满足

$$\begin{aligned}d_{MV} &= d_M + t_{\text{形位}} \\ D_{MV} &= D_M - t_{\text{形位}}\end{aligned}$$

7. 最小实体实效尺寸 (LMVS)

在配合的全长上, 孔、轴为最小实体尺寸, 且其轴线的形状 (单一要素) 或位置误差 (关联要素) 等于给出公差值时的体内作用尺寸称为最小实体实效尺寸 (LMVS)。

轴的最小实体实效尺寸代号为 d_{LV} , 孔的最大实体实效尺寸代号为 D_{LV} 。根据定义, 对于某一图样中的某一轴或孔的有关尺寸应该满足

$$\begin{aligned}d_{LV} &= d_L - t_{\text{形位}} \\ D_{LV} &= D_L - t_{\text{形位}}\end{aligned}$$

8. 边界

由设计给定的具有理想形状的极限包容面 (极限圆柱面或两平行平面) 称为边界。边界尺寸为极限包容面的直径或宽度。

边界是理论上具有理想形状的一种极限边界, 没有任何误差, 实际要素不应超越该极限包容面。单一要素的边界没有方位的约束, 而关联要素的边界应与基准保持图样上给定的几何关系。外表面 (轴) 的边界尺寸和内表面 (孔) 的边界尺寸分别用符号 BSS 和 BSh 表示。

① 最大实体边界 (MMB 边界)。当理想边界的尺寸等于最大实体尺寸时, 该理想边界称为最大实体边界。

② 最大实体实效边界 (MMVB 边界)。当理想边界尺寸等于最大实体实效尺寸时, 该理想边界称为最大实体实效边界。

③ 最小实体边界 (LMB 边界)。当理想边界的尺寸等于最小实体尺寸时, 该理想边界称为最小实体边界。

④ 最小实体实效边界 (LMVB 边界)。当理想边界尺寸等于最小实体实效尺寸时, 该理想边界称为最小实体实效边界。

单一要素的实效边界没有方向或位置的约束, 关联要素的实效边界应与图样上给定的基准保持正确的几何关系。

3.4.2 独立原则

独立原则是指零件要素的形位公差与尺寸公差相互独立并分别满足各自要求的一种公差原则。即尺寸误差由尺寸公差控制, 形位误差由形位公差控制, 彼此无关, 互不联系, 尺寸公差与形位公差之间不存在补偿关系。

图 3.9 为独立原则应用示例, 标注时, 不需要附加任何表示相互关系的符号。该标注表示的局部实际尺寸应在 $\phi 21.97 \sim \phi 22 \text{mm}$ 之间, 不管实际尺寸为何值, 轴线的直线度误差都不允许大于 $\phi 0.05 \text{mm}$ 。

独立原则是形位公差与尺寸公差相互关系的基本原则。



图 3.9 独立原则应用示例

3.4.3 相关要求

相关要求是指图样上给定的尺寸公差与形位公差相互有关的公差要求。

1. 包容要求

包容要求是指被测要素的实际轮廓应遵守最大实体边界 (MMB)、其局部实际尺寸不得超出最小实体尺寸的一种公差原则。

包容要求适用于单一要素, 如圆柱表面或两平行表面。采用包容要求的单一要素应在尺寸极限偏差或公差带代号后面注有符号 {}。

采用包容要求时被测要素的合格条件如下。

对于外表面 (轴): $d_{fe} \leq d_M(d_{\max})$ 且 $d_a \geq d_L(d_{\min})$ 。

对于内表面 (孔): $D_{fe} \geq D_M(D_{\min})$ 且 $D_a \leq D_L(D_{\max})$ 。

单一要素采用包容要求时, 被测实际要素在最大实体状态下的形状公差为零。当被测实际要素尺寸偏离最大实体状态 ($d_a < d_{\max}$, $D_a > D_{\min}$) 时, 形状公差获得尺寸公差的补偿, 偏离多少就补偿多少。当被测实际要素为最小实体状态时, 形状公差获得的补偿量最多, 即补偿的形状公差等于尺寸公差, 如图 3.10 所示。

图 3.10 (a) 表示单一要素轴 $\phi 22_{-0.03}^0 \text{mm}$ 的实体不得超越边界尺寸为 $d_m = \phi 22 \text{mm}$ 的最大实体边界 (MMB), 实际尺寸 d_a 不得小于最小实体尺寸 $d_L = \phi 21.97 \text{mm}$ 。如图 3.10 (b) 所示, 轴在 $d_M = \phi 22 \text{mm}$ 时的轴线直线度公差 $t=0$ 。在 $d_a < d_M$ ($\phi 22 \text{mm}$) 且 $d_a \geq d_L$ ($\phi 21.97 \text{mm}$) 时, 轴线直线度公差获得补偿, 补偿量为最大实体尺寸与实际尺寸之差。当实际尺寸处于最小实体尺寸 ($d_L = \phi 21.97 \text{mm}$) 时, 直线度获得补偿最多, 最大补偿值为尺寸公差值 $T_s = \phi 0.03 \text{mm}$ 。图 3.10 (c) 为表示轴的实际尺寸和轴线直线度公差变化关系的动态公

差图。

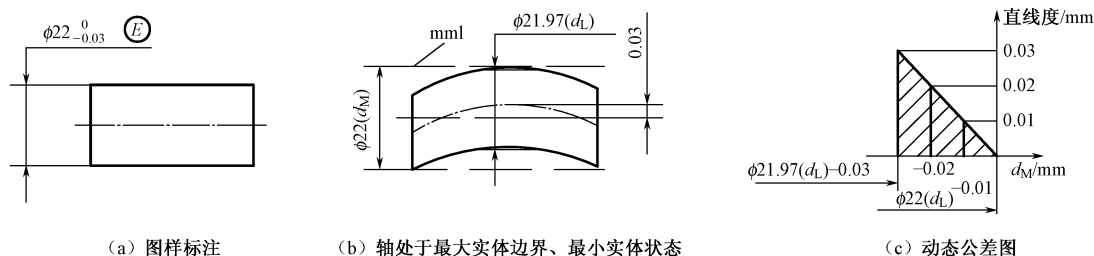


图 3.10 包容要求应用示例

2. 最大实体要求

最大实体要求是指被测要素的实际轮廓应遵守其最大实体实效边界 (MMVB) 的一种公差原则。即当实际尺寸偏离最大实体尺寸时, 允许其形位误差值超出其给定的公差值, 而要素的局部实际尺寸应在最大实体尺寸与最小实体尺寸之间。

最大实体要求适用于中心要素, 既适用于被测要素, 又适用于基准要素。在被测要素形位公差框格中的公差值后面标注符号 $\textcircled{M}$ 。

采用最大实体要求时, 被测要素的合格条件如下。

对于外表面 (轴): $d_{fe} \leq d_{MV}$ 且 $d_L(d_{min}) \leq d_a \leq d_M(d_{max})$ 。

对于内表面 (孔): $D_{fe} \geq D_{MV}$ 且 $D_M(D_{min}) \leq D_a \leq D_L(D_{max})$ 。

最大实体要求应用于被测要素时, 图样上标注的形位公差值是被测要素处于最大实体状态时给定的公差值。当被测要素的实际尺寸偏离其最大实体尺寸 ($d_a < d_{max}$, $D_a > D_{min}$) 时, 允许形位误差值大于图样上标注的形位公差值, 即允许形位公差获得尺寸公差补偿, 偏离多少就补偿多少。当被测实际要素为最小实体状态时, 形位公差获得的补偿量最多, 即形位公差最大补偿值等于尺寸公差, 如图 3.11 所示。

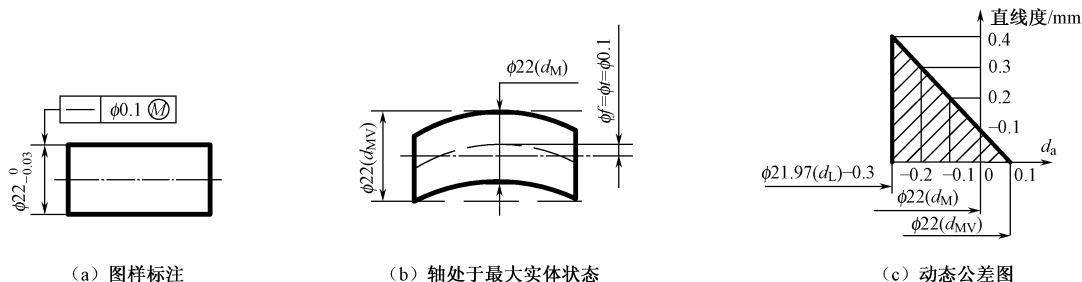


图 3.11 最大实体要求应用于被测要素

图 3.11 (a) 表示单一要素轴 $\phi 22_{-0.03}^0 \text{ mm}$ 的轴线直线度公差与尺寸公差的关系采用最大实体要求。当该轴处于最大实体状态 ($d_M = \phi 22 \text{ mm}$) 时, 其轴线直线度公差值 $t = \phi 0.1 \text{ mm}$ 。如图 3.11 (b) 所示, 在 $d_a < d_M$ ($\phi 22 \text{ mm}$) 且 $d_a \geq d_L$ ($\phi 21.97 \text{ mm}$) 时, 轴线直线度公差获得补偿, 补偿量为最大实体尺寸与实际尺寸之差。当该轴处于最小实体状态 ($d_L = \phi 21.97 \text{ mm}$) 时, 直线度获得补偿最多, 最大补偿值为尺寸公差值 $T_s = \phi 0.3 \text{ mm}$, 其轴线直线度最大公差值为给定直线度公差 t 与尺寸公差值 T_s 之和, 即 $t_{max} = \phi (0.1 + 0.3) = \phi 0.4 \text{ mm}$ 。图 3.11 (c)

为其动态公差图。

3. 最大实体要求的零形位公差

关联要素遵守最大实体边界时,可以应用最大实体要求的零形位公差。关联要素采用最大实体要求的零形位公差标注时,要求其实际轮廓处不得超越最大实体边界,且该边界应与基准保持图样上给定的几何关系,要素实际轮廓的局部实际尺寸不得超越最小实体尺寸,如图 3.12 所示。

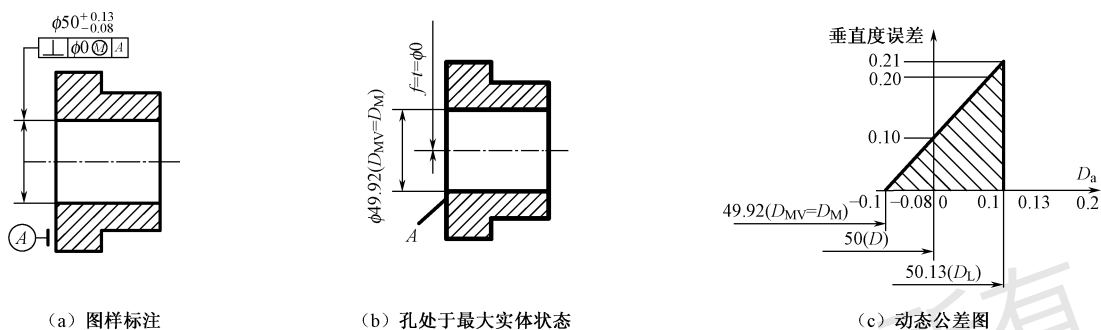


图 3.12 最大实体要求零形位公差标注

4. 最小实体要求

最小实体要求是指被测要素的实际轮廓应遵守其最小实体实效边界 (LMVB) 的一种公差原则。即当实际尺寸偏离最小实体尺寸时,允许其形位误差值超出其给定的公差值。

最小实体要求适用于中心要素。既适用于被测要素,又适用于基准要素。

最小实体要求应用于被测要素时,应在被测要素形位公差框格中的公差值后面标注符号 $\textcircled{L}$,如图 3.13 (a) 所示。

采用最小实体要求时被测要素的合格条件如下。

对于外表面 (轴): $d_{fi} \leq d_{LV}$ 且 $d_L(d_{min}) \leq d_a \leq d_M(d_{max})$ 。

对于内表面 (孔): $D_{fi} \geq D_{LV}$ 且 $D_M(D_{min}) \leq D_a \leq D_L(D_{max})$ 。

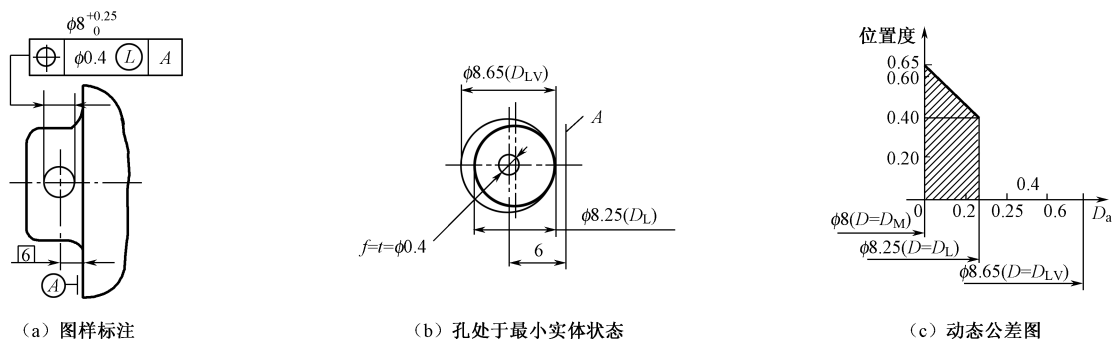


图 3.13 最小实体要求零形位公差标注

最小实体要求应用于被测要素时,图样上标注的形位公差值是被测要素处于最小实体状态时给定的公差值。当被测要素的实际尺寸偏离其最小实体尺寸 ($d_a > d_{min}$, $D_a < D_{max}$)

时, 允许形位误差值大于图样上标注的形位公差值, 即允许形位公差值获得尺寸公差的补偿, 偏离多少就补偿多少。当被测实际要素为最大实体状态时, 形位公差获得的补偿量最多, 即形位公差最大补偿值等于尺寸公差。

图 3.13 (a) 所示零件孔实际尺寸在 $\phi 8 \sim 8.25 \text{ mm}$ 之间。

① 当孔径为 $\phi 8.25 \text{ mm}$ (D_L) 时, 允许的位置度误差为 $\phi 0.4 \text{ mm}$, 最小实体实效边界是 $D_{LV} = D_L + t = \phi 8.25 + \phi 0.4 = \phi 8.65 \text{ mm}$ 的理想圆。

② 当实际孔径偏离 D_L 时, 孔的实际轮廓与控制边界之间会产生一间隙量, 从而允许位置度公差增大。当实际孔径为 $\phi 8 \text{ mm}$ 时, 等于图样中给出的位置度公差 ($\phi 0.4 \text{ mm}$) 与孔尺寸公差 ($\phi 0.25 \text{ mm}$) 之和 ($\phi 0.65 \text{ mm}$)。

5. 可逆要求

在不影响零件功能的前提下, 当被测轴线或中心平面的形位误差值小于给出的形位公差值时允许相应的尺寸公差增大。它通常与最大实体要求或最小实体要求一起应用。

可逆要求的标注方法是在图样上将表示可逆要求的符号 $\}$ 置于被测要素的形位公差值后的符号 μ 或 χ 的后面。此时被测要素应遵守最大实体实效边界 (MMVB) 或最小实体实效边界 (LMVB)。

框格内加注 μ 表示: 被测要素的实际尺寸可在 LMS 和 MMVS 之间变动。

框格内加注 λ 表示: 被测要素的实际尺寸可在 MMS 和 LMVS 之间变动。

当可逆要求用于最大实体要求或最小实体要求时并不改变它们原有的含义 (MMVC 或 LMVC 的极限边界), 但在形位误差值小于图样给出的形位公差值时允许尺寸公差增大, 这样可为根据零件功能分配尺寸公差和形位公差提供方便。

6. 可逆要求用于最小实体要求

可逆要求用于最小实体要求, 表示在被测要素的实际轮廓不超出其最小实体实效边界的条件下, 允许被测要素的尺寸公差补偿其形位公差, 同时也允许被测要素的形位公差补偿其尺寸公差; 当被测要素的形位误差值小于图样上标注的形位公差值或等于零时, 允许被测要素的实际尺寸超出其最小实体尺寸, 甚至可以等于其最小实体实效尺寸。可逆要求用于最小实体要求时, 应在被测要素形位公差框格中的公差值后面标注双重符号 $\textcircled{\mu}$ $\textcircled{\lambda}$, 如图 3.14 (a) 所示。

可逆要求用于最小实体要求时被测要素的合格条件如下。

对于外表面 (轴): $d_f \geq d_{LV}$ 且 $d_L(d_{\min}) \leq d_a \leq d_M(d_{\max})$ 。

对于内表面 (孔): $D_f \leq D_{LV}$ 且 $D_M(D_{\min}) \leq D_a \leq D_{LV}$ 。

图 3.14 (a) 中的被测要素 (孔) 不得超出其最小实体实效边界, 即其关联体内作用尺寸不超出最小实体实效尺寸 $\phi 8.65 \text{ mm}$ ($= 8 + 0.25 + 0.4$)。所有局部实际尺寸应在 $\phi 8 \sim 8.65 \text{ mm}$ 之间, 其轴线的位置度误差可根据其局部实际尺寸在 $0 \sim 0.65 \text{ mm}$ 之间变化。例如, 如果所有局部实际尺寸均为 $\phi 8.25 \text{ mm}$ (D_L), 则其轴线的位置度误差可为 $\phi 0.4 \text{ mm}$, 如图 3.14 (b) 所示; 如果所有局部实际尺寸均为 $\phi 8 \text{ mm}$ (D_M), 则轴线的位置度误差可为 $\phi 0.65 \text{ mm}$, 如图 3.14 (c) 所示。如果轴线的位置度误差为零, 则局部实际尺寸可为 $\phi 8.65 \text{ mm}$ (D_{LV}), 如图 3.14 (d) 所示。图 3.14 (e) 给出了表达上述关系的动态公差图。

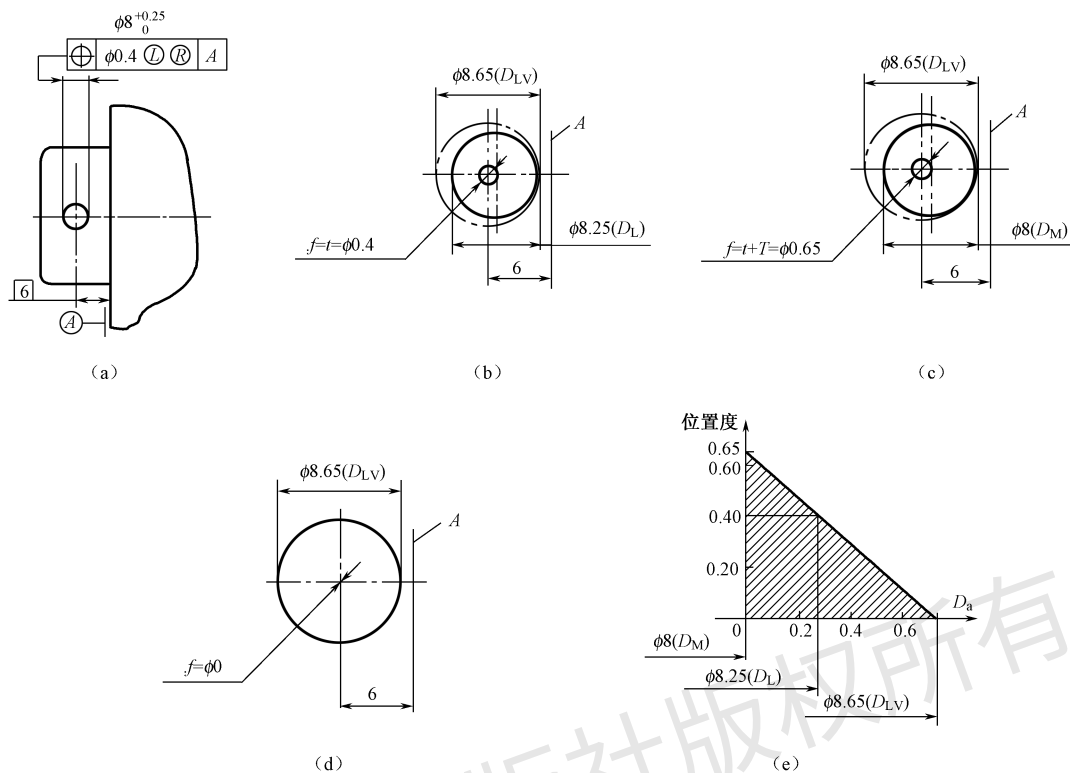


图 3.14 可逆要求应用于最小实体要求

习题 3

1. 形状和位置公差各规定了哪些项目？它们的符号是什么？
2. 形位公差的公差带有哪几种主要形式？形位公差带由什么组成？
3. 基准的形式通常有几种？

测量技术基础常识

4.1 测量概述

4.1.1 测量概念

现代制造技术的提高，对测量技术在测量精度与方法上提出了更高的要求，从而使精密测量在现代制造技术中得到了迅速的发展和普及，为机械制造中工件的互换性和产品质量提供了更好的保证。与常规测量一样，精密测量也是将被测量与标准量（或单位量）进行比较，并确定其比值的过程。这一测量过程包括被测对象、计量单位、测量方法和测量误差 4 个要素。其测量的内容包括长度、角度、几何形状、表面相互位置及表面粗糙度等参数。一般以 μm 作为测量单位。

4.1.2 测量方法分类

测量方法是指完成测量任务所用的方法、量具或仪器，以及测量条件的总和。当没有现成的量具或仪器时，需要自行拟订测量方法，这就需要根据被测对象和被测量的特点（形体大小、精度要求等）确定标准量，拟订测量方案、工件的定位、读数和瞄准方式及测量条件（如温度和环境要求等）。

测量方法可以根据被测量类别的不同、测量条件和实验数据处理方法的不同进行分类。

（1）单项测量和综合测量

单项测量是单独测量工件的各个几何参数，综合测量是测量工件几个相关参数的综合效应或综合参数。

（2）绝对测量和相对测量

绝对测量是指量值直接表示被测参数的测量方法。相对测量是指量值仅表示被测参数相对标准量偏差的测量方法。

（3）接触测量和不接触测量

接触测量是指被测表面与测量工具的测头有机械接触并有机作用力的测量方法。按接触形式可分为点接触、线接触和面接触。不接触测量是指被测表面与测量工具的测头不直接接触的测量方法。

（4）直接测量和间接测量

直接测量是将被测参数与已知参数直接比较，从而得出所需的测量结果，是常用的测

量方法。间接测量的测量结果是通过测量与被测参数有一定函数关系的其他参数，经过计算后才得到的。

(5) 主动测量和被动测量

主动测量也称在线测量，是把加工过程中测量所得信息直接用于控制加工过程以得到合格工件的测量。被动测量也称线外测量，是测量结果不直接用于控制加工精度的测量。

4.1.3 测量仪器分类与简介

测量仪器又称计量器具，是一种单独或与其他设备一起使用进行测量工作的器具或设备。它可将被测量转换成可直接观察的示值或等效信息。测量仪器在质量检验工作中具有相当重要的作用，全国量值的统一首先反映在测量仪器的准确和一致上，所以测量仪器是确保全国量值统一的重要手段，是计量部门加强监督管理的主要对象，也是质量检验部门提供计量保证的技术基础。

测量仪器可以按仪器输出方式进行分类，也可以按测量仪器的结构原理进行分类。

1. 按测量仪器输出方式分类

- 显示式测量仪器：也称指示式测量仪器，是指显示量值的测量仪器。
- 记录式测量仪器：是指提供示值记录的测量仪器。
- 累计式测量仪器：是指通过对来自一个或多个测源同时或依次得到的被测量的部分值求和，以确定被测量值的测量仪器。
- 积分式测量仪器：是指通过一个量对另一个量积分，以确定被测量值的测量仪器。
- 模拟式测量仪器（即模拟式指示仪器）：是指其输出或显示为被测量或输入信号为连续函数的测量仪器。
- 数字式测量仪器（即数字式指示仪器）：是指提供数字化输出的测量仪器。

2. 按测量仪器的结构原理进行分类

- 机械式量仪：用机械方法实现计量原始信号放大和转换的测量仪器称为机械式量仪。
- 光学量仪：以光学方法为主，将计量原始信号转换和放大的测量仪器称为光学量仪。
- 电动量仪：将计量原始信号变化转换成电信号变化的测量仪器称为电动量仪。
- 气动量仪：气动量仪是以压缩空气为介质，把被测量的变化转换成空气压力或流量的变化，然后用各种形式的压力计或流量计进行指示的测量仪器。因此，气动量仪分压力计式和流量计式两种。通常压力计式气动量仪为高压式，而流量计式气动量仪为低压式。

4.1.4 常用名词、术语及定义

1. 测量单位和标准量

几何量测量中常用的长度单位有米（m）、毫米（mm）、微米（ μm ），角度单位为度（ $^{\circ}$ ）、分（'）、秒（"）。

在测量过程中，测量单位必须以物质形式来体现，是指为定量表示同种量的大小而约定采用的特定量。测量单位的量值是以约定或法定形式规定的，具有规定的名称和符号，用

来定量地表示同种量的大小。能体现测量单位和标准量的物质形式有光波波长、精密量块、线纹尺、各种圆分度盘等。

2. 测量仪器及其技术性能指标

(1) 分度值与分度间距

分度值——测量仪器的标尺上相邻两刻线所代表的量值之差。一般来说,分度值越小,测量仪器的精度越高。

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。一般量仪的分度间距为1~2.5mm。

(2) 示值范围与测量范围

示值范围——由测量仪器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)。

测量范围——使测量仪器误差处于规定极限内的一组被测量值。测量范围也可称为工作范围,指测量仪器的误差处于规定的极限范围内的这一被测量值的范围,在这一规定的测量范围内使用,其示值误差应处在允许误差限内,超出测量范围使用,则示值误差将超出允许误差限。

(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。

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

在分子、分母是同一类物理量的情况下,灵敏度也称放大比。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。

(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。通常稳定性是相对时间而言的。

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4.1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) 测量力

测量力——在测量过程中,量具或量仪触端作用在被测零件表面接触处的力叫做测量力。测量力将引起被测零件和测量装置的弹性变形,从而影响测量精度。

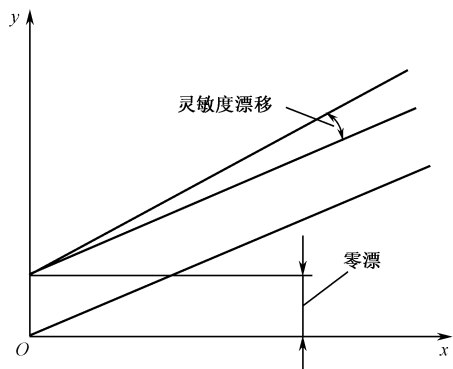


图 4.1 漂移

(8) 视差

视差——检测者眼睛相对于指针或刻线变动位置时，其读数也随之不同。视觉读数与正确读数之差叫做视差。

(9) 校正值

校正值——指大小与误差相等，但符号相反的值。

(10) 安全裕度

安全裕度——因任何测量结果都存在误差，故国家标准要求在判断产品合格与否时将轴或孔的公差带两头均内缩一个尺寸，这个尺寸就是“安全裕度”，如图 4.2 所示。图中 A 为安全裕度。国家标准规定安全裕度 A 为公差带宽度 T 的 1/10。

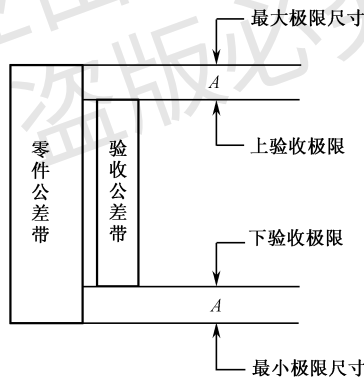


图 4.2 安全裕度

3. 测量误差

(1) 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。所谓测量误差 δ ，是指测得值 x 与真值 Q 之差。

$$\delta = x - Q$$

式中， δ ——测量误差；
 x ——测得值；
 Q ——真值。

δ 值大, 误差大; δ 值小, 误差小。

- 误差是评定测量结果准确与否的重要标准;
- 误差是评定测量方法准确与否的依据;
- 误差是评定仪器设计质量高低的依据;
- 误差是评定检测者技术熟练程度的标志之一。

上式所表达的测量误差, 反映了测得值偏离真值的程度, 也称绝对误差。由于测得值 x 可能大于或小于真值 Q , 因此测量误差可能是正值或负值。若不计其符号正负, 则可用绝对值表示:

$$|\delta| = |x - Q|$$

这样, 真值 Q 可用下式表示:

$$Q = x \pm \delta$$

为了比较不同尺寸的测量精度, 可应用相对误差的概念。

相对误差 ε , 是指绝对误差的绝对值 $|\delta|$ 与被测量真值 Q 之比, 即

$$\varepsilon = \frac{|\delta|}{Q} \approx \frac{|\delta|}{x} \times 100\%$$

相对误差是一个无量纲的数值, 通常用百分数 (%) 表示。

(2) 误差的分类

误差按性质可分为系统误差、随机误差和粗大误差 (过失误差) 3 种。

① 系统误差。系统误差是指在一定测量条件下, 多次测量同一量时, 误差的大小和符号均不变或按一定规律变化的误差。系统误差的消除方法如下。



MEANS 方法

- 从产生误差的根源上消除: 在测量前, 应对测量过程中可能产生系统误差的环节作仔细分析, 将误差从产生的根源上加以消除。
- 用加修正值的方法消除: 这种方法是预先检测出测量仪器的系统误差, 将其数值反号后作为修正值, 用代数法加到实际测得值上, 即可得到不包含该系统误差的测量结果。
- 用两次读数方法消除: 若两次测量所产生的系统误差大小相等 (或相近)、符号相反, 则取两次测量的平均值作为测量结果, 就可消除系统误差。

② 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。而精密测量要求随机误差越小越好。

③ 粗大误差。粗大误差是指由于测量者主观疏忽大意或客观条件发生突然变化而产生的误差。在正常情况下, 一般不会产生这类误差。

4. 评定测量精度的两个综合性指标

在测量过程中不可避免地总会存在或大或小的测量误差, 使测量结果的可靠程度受到一定的影响。测量误差大, 则测量结果的可靠性就低; 测量误差小, 则测量结果的可靠性就高。因此, 不知道测量精度的测量结果是没有意义的。为此, 对每一个测量结果, 特别是精密测量结果, 都应给出一定的测量精度。

(1) 量仪的不确定度

量仪的不确定度表示指示式测量仪器内在误差影响测得值分散程度的一个误差范围。测量仪器的内在误差包括示值误差、示值变动性、回程误差、灵敏限, 以及由于结构原理、工艺、装调等引起的误差。

(2) 测量方法(或过程)的不确定度

测量方法的不确定度表示测量过程中, 各项误差影响测得值分散程度的一个误差范围。它包括测量仪器的不确定度、基准件误差, 以及测量条件的误差, 如温度、振动、读数、瞄准等。

4.2 测量技术基础常识

4.2.1 测量方法的选择

在测量中为了提高测量结果的准确度, 必须正确选择测量方法。

1. 阿贝原则

在测量时, 测量装置需要移动, 而移动方向的正确性通常由导轨来保证。由于导轨有制造和安装等误差, 因此使测量装置在移动过程中产生方向偏差。为了减小这种方向偏差对测量结果的影响, 1890 年德国人艾恩斯特·阿贝提出了以下指导性的原则: “将被测物与标准量尺沿测量轴线成直线排列”。这就是阿贝原则, 即被测尺寸与作为标准的尺寸应在同一条直线上, 按串联的形式排列, 只有这样, 才能得到精确的测量结果。

2. 比较原则

比较原则是将被测量件与标准长度进行比较, 得到测量结果。

3. 圆周封闭原则

在圆周分度器件(如刻度盘、圆柱齿轮等)的测量中, 利用在同一圆周上所有分度夹角之和等于 360° , 也即所有夹角误差之和等于零的这一自然封闭特性。在没有更高精度的圆周分度基准器件的情况下, 采用“自检法”也能达到高精度测量的目的。

4. 选择合适的测量力

测量力是指测量时工件表面承受的测量压力。由于各种材料受力后都会产生变形, 这种变形量看起来不大, 但在精密测量中, 尤其对小尺寸零件就必须予以考虑。在检验标准中, 规定了测量过程中应视测量力为零。如果测量力不为零, 则应考虑由此而引起的误差, 必要时应予以修正。

4.2.2 测量仪器的选择

正确地选择合适的测量仪器既是测量中的重要环节, 又是一个综合性的问题, 要具体情况具体分析。应根据零件的特点, 选择最合适的测量方法, 既能保证测量准确度又能满足经济上的合理性, 即考虑选用测量仪器的效率和成本。

选用测量仪器的原则如下。

- ① 保证测量准确度。选用测量仪器的主要依据是被测零件的公差等级,即测量仪器的性能指标(示值误差、示值变动性和回程误差)能否符合作为检测零件的公差等级的要求。
- ② 经济上的合理性。在保证测量准确度的前提下,应选用比较经济、测量效率较高的测量仪器。按被测零件的加工方法、批量和数量选择测量仪器。
- ③ 根据被测零件的结构、特性,如零件的大小、形状、质量、材料、刚性和表面粗糙度等选用测量仪器。按零件的大小确定所选用的仪器测量范围。零件材料的软硬、形状不同,其测量方法也就不同,测量的难度同样相差很大。
- ④ 按被测零件所处的状态和所处的条件选择测量仪器。

4.2.3 测量基准面和定位形式的选择

在精密测量中,测量基准面和定位形式的选择具有相当重要的作用,若测量基准面和定位形式选择不当,会直接影响测量精度。

1. 基准统一原则

测量基准面的选择,要尽量遵循基准统一原则,即设计、工艺、装配和测量等基准面必须一致。但有时会出现工艺基准面不能和设计基准面一致的情况,因而测量基准面要根据工艺过程的不同而改变,具体应遵循如下原则。

- 在工序间检验时,测量基准面应与工艺基准面一致。
- 在终结检验时,测量基准面应与装配基准面一致。

同时,在不能遵循基准统一原则时,可以选择相应的基准作为辅助基准。辅助基准面的选择应遵循如下原则。

- 选择较高精度的面(点或线)作为辅助基准,若没有合适的辅助基准面时,应事先加工一辅助基准面作为测量基准面。
- 基准面的定位稳定性要好。
- 在被测参数较多的情况下,应选择精度大致相同、各参数间关系较密切、便于控制各参数的面(点或线)作为辅助基准。

2. 正确选择定位形式

即使正确选择了测量基准面,但如果不能正确选择与其相适应的定位方法,也不能保证测量准确度。在几何量测量中,常用的定位方法有平面、外圆柱面、内圆柱面和中心孔定位等。

4.2.4 测量条件的选择

测量条件是指测量时的外界环境条件。在测量过程中,如果对环境条件的影响不充分考虑,即使用最好的测量设备,最仔细地进行测量,测量的结果也可能是不准确的。影响测量准确度的客观条件有温度、湿度、振动、灰尘等。因此,在进行测量时,必须考虑这些因素的影响。

1. 温度

物体都有热胀冷缩的特性，同一尺寸在不同温度条件下的测量值是不同的，因此给出某零件尺寸时，必须说明其温度。零件的尺寸如果没有指明温度条件，那是没有意义的。为了使测量工作能在一个统一的标准温度下进行，在长度测量中，是以 20℃ 为标准温度的。但在实际中，无论是加工还是测量往往都不是在 20℃ 温度下进行的，因而会产生一定的测量误差。这种误差可通过物理学公式计算出来，从而可对测量结果进行修正。该公式为：

$$\Delta L = L[a_1(t_1 - 20^\circ) - a_2(t_2 - 20^\circ)]$$

式中， L ——工件的被测尺寸，单位为 mm；

ΔL ——由于温度和线膨胀系数不同而引起的测量误差，单位为 mm；

a_1 ——工件材料的线膨胀系数；

a_2 ——量仪材料的线膨胀系数；

t_1 ——工件的温度，单位为℃；

t_2 ——量仪的温度，单位为℃。

此外，为减小温度影响，还要注意在检测前对零件进行“定温”处理。所谓“定温”，是指把零件与量具、量仪置于同一温度环境中，经过一定的时间，使两者温度趋向一致。

2. 湿度

湿度是指空气中水分的多少。精密测量时，相对湿度一般规定为 60%~70%。湿度的大小一般可不必考虑，但湿度过高会影响检定结果的准确性。例如，在量块研合性的检定中，由于湿度高，往往会使平面度不合格的量块也能产生研合良好的假象，使本来研合性不合格的量块被误认为合格。湿度过大还会引起光学镜头发霉、半镀层和反射镜镀层脱落，使材料变质。

3. 防振

防振是精密测量工作的基本要求之一。所有的光学长度计量仪器的光路系统都是由反光镜、棱镜、透镜等组成的，有些反光镜是以弹簧力作为夹持力的。所以必须考虑振动对仪器结构和仪器示值的影响。振动对于精密测量工作的影响主要表现为示值不稳定，严重时甚至无法进行读数。特别对应用光波干涉原理的高精度仪器和装置，振动的影响尤为明显。

4. 防尘

保证精密测量工作顺利进行，空气洁净是极重要的环境条件之一。灰尘对于精密测量危害极大。实践证明，在精度较高的产品生产中，测量和实验中发生反常规现象或严重问题，往往都与环境条件的不洁净密切相关。例如，散落在光学镜头和反光镜上的灰尘会使被测零件或刻线影像不清晰，影响读数；散落在仪器活动部分的灰尘，会使仪器活动受到阻滞，以致影响测量的正确指示，还会加速活动部位的磨损，降低测量器具的精度，缩短其使用寿命。在防尘达不到要求的测量室里，灰尘还会划伤光学镜头、量块和平晶等。带有酸性或碱性的灰尘还会腐蚀测量器具和被测零件。

习题 4

1. 什么是测量? 测量过程的四要素是什么?
2. 测量和检验有何不同?
3. 什么是绝对测量和相对测量? 举例说明。
4. 什么是系统误差? 举例说明。
5. 什么是粗大误差? 如何判断?
6. 某测量仪器在示值为 40mm 处的示值误差为 $\pm 0.004\text{mm}$ 。若用该测量仪器测量工件时, 读数正好为 40mm, 试确定工件的实际尺寸是多少。

电子工业出版社版权所有
盗版必究

轴套类零件的测量

机械制造业中，轴套类零件是一种非常重要的非标准零件。它主要用来支持旋转零件，传递转矩，保证转动零件（如凸轮、齿轮、链轮和带轮等）具有一定的回转精度和互换性。大部分轴套类零件的加工，可以在数控车床上完成。轴套类零件参数的精确度将直接影响装配精度和产品合格率。对轴套类零件的主要技术要求有尺寸精度、几何形状精度、相互位置精度、表面粗糙度，以及其他要求。

下面对轴套类零件测量内容进行具体介绍。

5.1 课题 1：轴径的测量

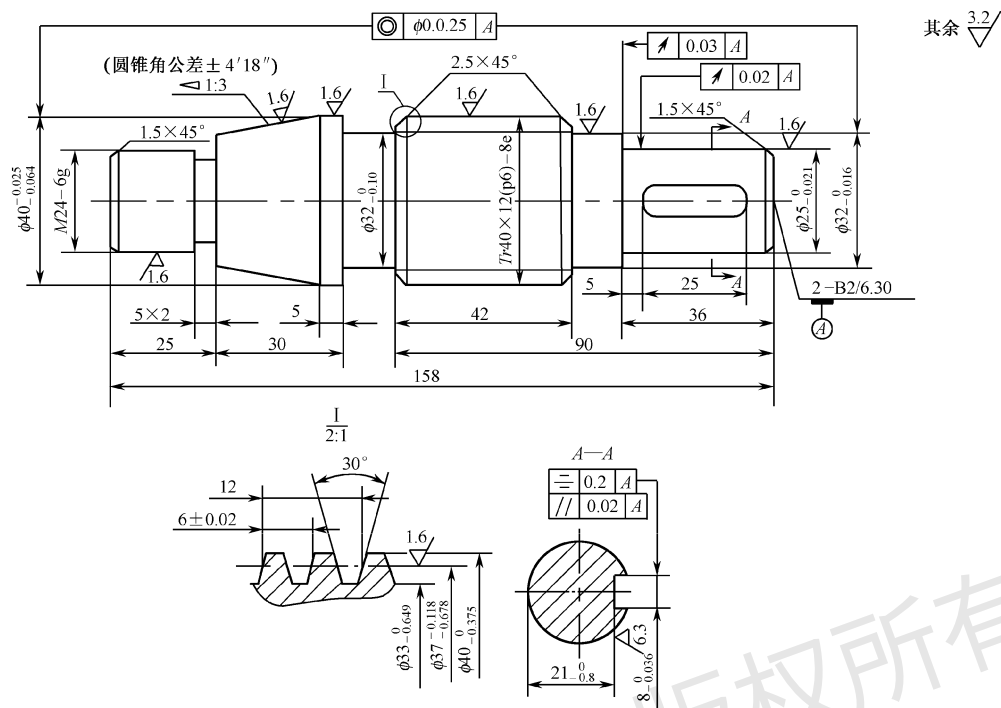
轴颈是轴与轴上零件接触的面，具有一定的精度和互换性，有较高的技术要求。

5.1.1 学习目的

- ① 掌握轴径测量的常用方法。
- ② 了解数字式立式光学计和数显外径千分尺的正确使用方法。
- ③ 测量轴类零件外径值。
- ④ 判定测量值是否合格。

5.1.2 量具与测量仪器的选用

- ① 数字式立式光学计。
- ② 数显外径千分尺。
- ③ 偏摆仪。
- ④ 数显外径千分尺接口。
- ⑤ 零件盘一只。
- ⑥ 被测工件（图 5.1）。
- ⑦ 全棉布数块。
- ⑧ 油石。
- ⑨ 汽油或无水酒精。
- ⑩ 防锈油。



技术要求
1. 内外锥配合用涂色法查接触面积≥65%。
2. 锐边倒钝 0.3×45°。

图 5.1 轴类零件

5.1.3 测量方法与测量步骤

轴径测量方法较多，其方法分类见表 5.1。

表 5.1 轴径测量方法分类

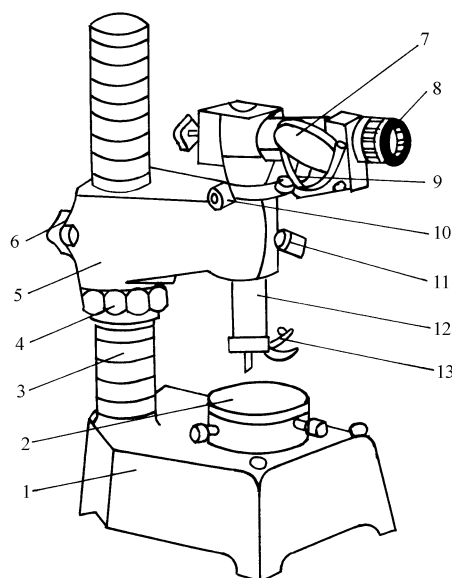
序 号	方 法	所需测量器具	说 明
1	通用量具法	游标卡尺、千分尺、三沟千分尺、杠杆千分尺	准确度中等，操作简便
2	机械式测微法	百分表、千分表、扭簧比较仪、量块组	其中扭簧比较仪较准确
3	光学测微仪法	各种立、卧式光学比较仪，量块组	准确度较高
4	电动量仪法	各种电感或电容测微仪、数显或电子柱卡规、量块组或标准圆柱体	准确度较高，易于与计算机连接
5	气动量仪法	气动量仪、标准圆柱体及喷嘴	准确度较高，效率高
6	测长仪法	各种立式测长仪、万能测长仪、量块组	准确度较高
7	影像法	大型和万能工具显微镜	准确度一般
8	轴切法	大型和万能工具显微镜、测量刀组件	准确度较高

常用的测量方法有用数字式立式光学计测轴径，用数显式外径千分尺测轴径等，下面分别介绍。

1. 用数字式立式光学计测轴径

(1) 量仪介绍

数字式立式光学计是一种可以用于测量长度的仪器，如图 5.2 所示为 LG-1 型立式光学计的外形结构。

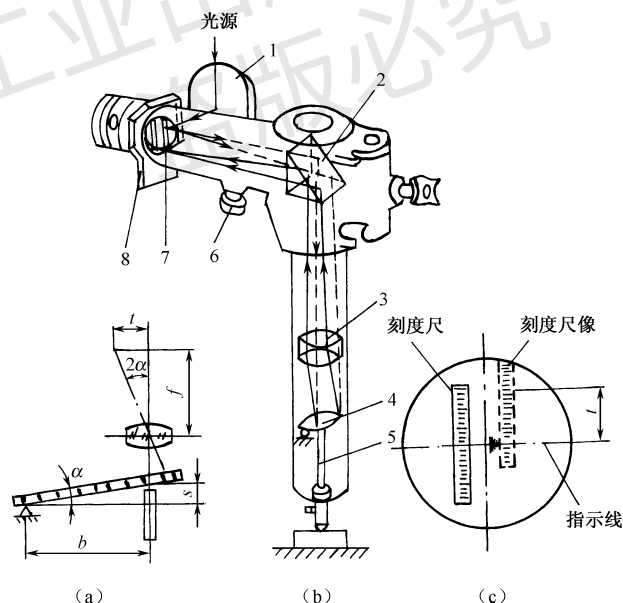


1—底座；2—工作台；3—立柱；4—粗调节螺母；5—支臂；
6—支臂紧固螺钉；7—平面镜；8—目镜；9—零位调节手轮；
10—微调手轮；11—光管紧固螺钉；12—光学计管；13—提升器光源

图 5.2 LG-1 型立式光学计的外形结构

(2) 工作原理

立式光学计光学系统图如图 5.3 所示。



1、4—反射镜；2—直角棱镜；3—物镜；
5—测杆；6—微调手轮；7—刻度尺像；8—刻度尺

图 5.3 立式光学计光学系统图

立式光学计是利用光学杠杆放大原理进行测量的仪器。如图 5.3 (b) 所示，照明光线经反射镜 1 照射到刻度尺 8 上，再经直角棱镜 2、物镜 3，照射到反射镜 4 上。由于刻度

尺 8 位于物镜 3 的焦平面上, 故从刻度尺 8 上发出的光线经物镜 3 后成为平行光束。若反射镜 4 与物镜 3 之间相互平行, 则反射光线折回到焦平面, 刻度尺像 7 与刻度尺 8 对称。若被测尺寸变动使测杆 5 推动反射镜 4 绕支点转动某一角度 α , 如图 5.3 (a) 所示, 则反射光线相对于入射光线偏转 2α 角度, 从而使刻度尺像 7 产生位移 t , 如图 5.3 (c) 所示, 它代表被测尺寸的变动量。物镜 3 至刻度尺 8 间的距离为物镜焦距 f , 设 b 为测杆中心至反射镜支点间的距离, S 为测杆 5 移动的距离, 则仪器的放大比 K 为:

$$K = \frac{t}{S} = \frac{f \tan 2\alpha}{b \tan \alpha}$$

当 α 很小时, $\tan 2\alpha \approx 2\alpha$, $\tan \alpha \approx \alpha$ 。因此,

$$K = \frac{2f}{b}$$

若光学计的目镜放大倍数为 12, $f=200\text{mm}$, $b=5\text{mm}$, 则仪器的总放大倍数 n 为

$$n = 12K = 12 \times \frac{2f}{b} = 12 \times \frac{2 \times 200}{5} = 960$$

由此说明, 当测杆移动 0.001mm 时, 在目镜中可见到 0.96mm 的位移量。

- 仪器的测量范围: $0 \sim 180\text{mm}$ 。
- 仪器的分度值: 0.001mm 。
- 仪器的示值范围: $\pm 0.1\text{mm}$ 。
- 仪器的不确定度: $\pm 0.25\mu\text{m}$ (按仪器的最大示值误差给出)。
- 测量不确定度: $\pm (0.5 + \frac{L}{100})\mu\text{m}$ (按仪器的总测量误差给出)。

(3) 操作步骤



STEP 步骤

① 根据被测工件形状, 正确选择测帽装入测杆中。测量时被测工件与测帽的接触面必须最小, 因此在测量圆柱形时使用刀口形测帽 (本课题是测量圆柱形, 用刀口形测帽), 测量平面时须使用球形测帽, 测量球形时则使用平面形测帽。测帽形式如图 5.4 所示。

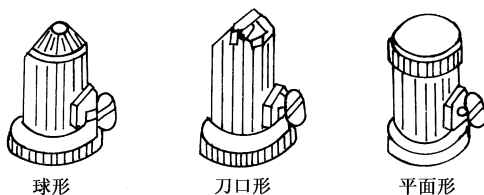


图 5.4 测帽形式

② 按被测的基本尺寸组合量块。本课题测 $\phi 25_{-0.021}^0\text{mm}$, 量块取 25mm 。

③ 调整仪器零位。

a. 选好量块组后, 将下测量面置于工作台 2 (图 5.2) 的中央, 并使测头对准上测量面中央。

b. 粗调节: 松开支臂紧固螺钉 6, 转动粗调节螺母 4, 使支臂 5 缓慢下降, 直到测头与量块上测量面轻微接触, 并能看到数显刻度有变化 (压表现象), 再将支臂紧固螺钉 6 锁紧。

c. 细调节: 松开光管紧固螺钉 11, 转动微调手轮 10, 直至从目镜 8 中看到零位置指示线为止, 然后拧紧光管紧固螺钉 11。

d. 将测头抬起，回放零位观察是否稳定。

④ 抬起提升杠杆，取出量块，轻轻地将被测工件放在工作台上，并在测帽下来回移动，其最高转折点即为测得值。

⑤ 在靠近轴的两端和轴的中间部位共取 3 个截面，并在互相垂直的两个方向上共测量 6 次。

⑥ 填写轴径测量与误差分析报告，并按是否超出工件设计公差带所限定的最大与最小极限尺寸，判断其合格性。

(4) 注意事项



NOTICE 注意

① 由于接触面间脏物和油层会引起测量不精确，因此要注意对工作台与工件表面的清洁工作。

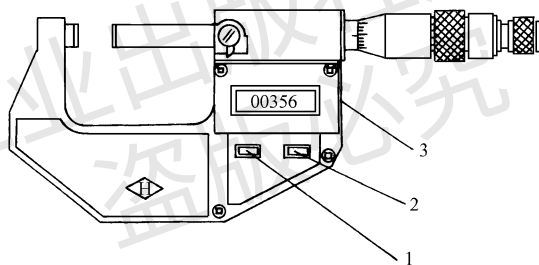
② 测量过程中测头与被测件接触的测量力不要太大，注意轻放测杆。

③ 多件测量时，应注意要经常用量块复检零位。

2. 用数显式外径千分尺测轴径

(1) 量仪介绍

如图 5.5 所示为数显式外径千分尺，它由尺架、测砧、测微螺杆、测力装置和锁紧装置等组成。



1—公、英制转换按钮；2—置零按钮；3—数据输出端口

图 5.5 数显式外径千分尺

(2) 工作原理

数显式外径千分尺的工作原理为：利用一对精密螺纹耦合件，把测微螺杆的旋转运动变成直线位移，该方法是符合阿贝原则的。测微螺杆的螺距一般制成 0.5mm ，即测微螺杆旋转一周，沿轴线方向移动 0.5mm 。微分筒圆周有 50 个分度，所以微分筒每格刻度值为 0.01mm 。

(3) 操作步骤



STEP 步骤

① 擦净被测工件表面。

② 调整量具零位。

③ 将被测工件装在偏摆仪上（注意将两项针孔内的毛刺和脏物清理干净）。

④ 测量并记录数据。

⑤ 测量结束，将量具复位（若不复位，则数据重测）。

⑥ 根据仪器的示值误差，修正测量结果。如果不用数显量具来测量，则还应注意量具的读数视差。

(4) 注意事项



NOTICE 注意

① 必须使用棘轮。任何测量都必须有一定的测量力下进行，棘轮是外径千分尺的测力装置，其作用是在外径千分尺的测量面与被测面接触后控制恒定的测量力，以减小测量力变动引起的测量误差。在测量中必须使用棘轮，在它起作用后才能进行读数。因此，在测量中，当外径千分尺的两个测量面快要与被测面接触时，就轻轻地旋转棘轮，待棘轮发出“咔咔”声，说明测量面与被测面接触后产生的力已经达到测量力的要求，这时即可进行读数。

② 注意微分筒的使用。在比较大的范围内调节外径千分尺时，应该转动微分筒而不应该旋转棘轮，这样不仅能提高测量速度，而且能避免棘轮不必要的磨损。只有当测量面与被测面快要接触时才旋转棘轮进行测量。退尺时，应该旋转微分筒，而不应该旋转棘轮或后盖，以防后盖松动而影响零位。旋转微分筒或棘轮时，不得快速旋转，以防测量面与被测面发生猛烈撞击，把测微螺杆撞坏。

③ 注意操作外径千分尺的方法。使用大型外径千分尺时，要由两个人同时操作。测量小型工件时，可以用两只手同时操作外径千分尺，其中一只手握住尺架的隔热装置，另一只手操作微分筒或棘轮。也可以用左手拿工件，右手的无名指和小指夹住尺架，食指和拇指旋转棘轮。也可以用右手的小指和无名指把外径千分尺的尺架压在掌心内，食指和拇指旋转微分筒（不用棘轮）进行测量。这种方法由于不用棘轮，测量力大小是凭食指和拇指的感觉来控制的，所以不容易操作正确。

④ 注意测量面和被测面的接触状况，如图 5.6 所示。当两测量面与被测面接触后，要轻轻地晃动外径千分尺或晃动被测工件，使测量面和被测面紧密接触。测量时，不得只用测量面的边缘。

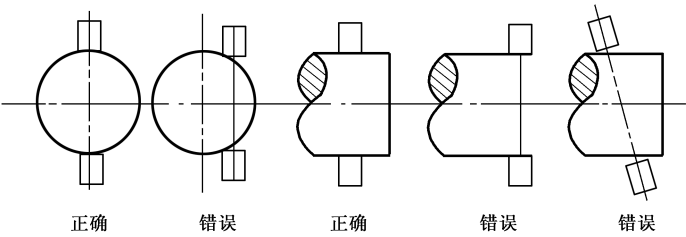


图 5.6 测量面和被测面的接触状况

5.1.4 测量与误差分析报告

测量完毕后，应填写轴径测量与误差分析报告，见表 5.2。

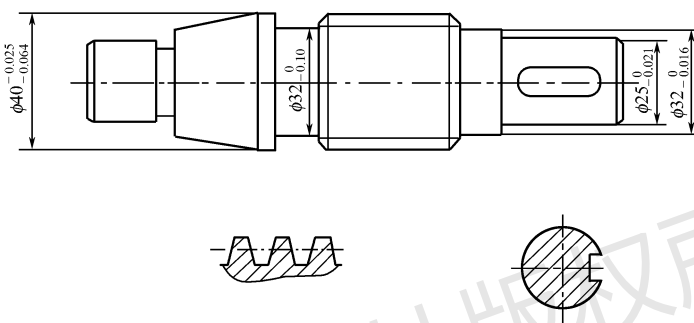
表 5.2 轴径测量与误差分析报告

检测报告

编号:

测量项目:

测量零件简图:



测量工具:

测量方法及要求:

检测结果:

内容 \ 测量位置							
测量值 (1)							
测量值 (2)							
合格							
不合格							
加工后仍可用							

分析:

姓名

年 月 日

5.2 课题 2: 孔径的测量

内孔是套类零件起支撑或导向作用最主要的表面，它通常与运动着的轴颈或活塞等零件相配合。因此在长度测量中，圆柱形孔径（图 5.7）的检测占很大的比例。根据生产批量、孔径精度和孔径尺寸等的不同，可采用不同的检测方法。成批生产的孔，一般用光滑极限量规检测；中、低精度的孔，通常采用游标卡尺、内径千分尺、杠杆千分尺等进行绝对测量，或用百分表、千分表、内径百分表等进行相对测量；高精度的孔，则用机械比较仪、气动量仪、万能测长仪或电感测微仪等仪器进行测量。

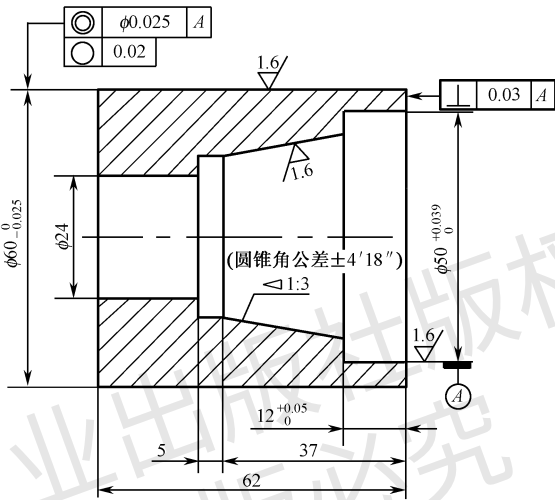


图 5.7 套类零件

5.2.1 学习目的

- ① 掌握孔径测量的常用方法。
- ② 熟练使用内径指示表，掌握其正确使用方法。
- ③ 了解万能测长仪的工作原理和测量方法。
- ④ 测量套类零件的内径值。
- ⑤ 判定测量值是否合格。

5.2.2 量具与测量仪器的选用

- ① 内径指示表。
- ② 万能测长仪。
- ③ 零件盘一只。
- ④ 被测工件。
- ⑤ 全棉布数块。
- ⑥ 油石。
- ⑦ 汽油或无水酒精。
- ⑧ 防锈油。