

模块一 互换性与测量技术

图 0-1 所示铣削加工中心上的轴承、行程开关等零件损坏后，换上相同规格的新零件，仍能正常使用，这是因为这些零件具有“互换性”。互换性是指相同规格的零部件具有互相替换使用的性能。互换性包括几何参数、机械性能（强度、硬度等）、物理性能（磁性等）和化学性能等多方面的功能互换，称为广义互换性。仅包含几何参数的互换称为狭义互换性，本模块所介绍的是狭义互换性。

所谓几何参数是指尺寸大小、几何形状和相互位置关系，以及表面粗糙度等，如图 1-1 某机床齿轮泵中齿轮轴零件图所示的 $\phi 16k6$ 、 $\text{H}9/k8$ 、 $\perp 0.015 A-B$ 、 $\sqrt{Ra 1.6}$ 等。为满足互换性的要求，对同规格零部件的几何参数不可能做到绝对一致，但可以做到合理地控制几何参数的误差不超出一定的范围，这样就能达到互换性的要求。加工误差是指实际几何参数相对其理想设计值的偏离程度，公差则是允许零件几何参数的变动量。可见，公差是用来控制误差的，而实现互换性也必须要用公差来保证。

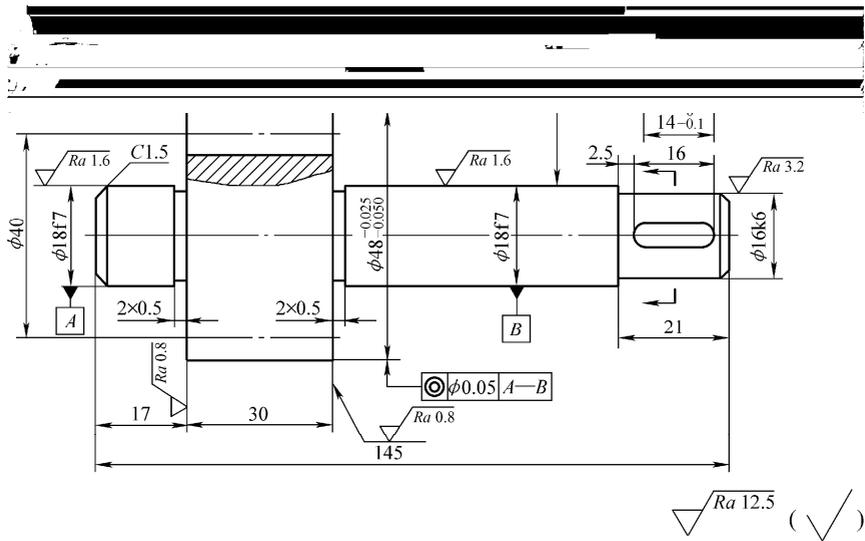


图 1-1 齿轮轴

现代机械产品除少数单件生产外，大多要求零部件具有互换性，就是说，从一批相同规格的零件（或部件）中任取其一，不需修配就能装到所属的部件（或机器）中去，并能满足技术要求及保证良好的使用性能。

零件或部件具有互换性之后，能够缩短机器的加工和装配周期，并能提高产品质量，降低生产成本，同时给机器的维修带来极大的方便。在机械工业中，互换性是产品设计最基本的原则。

现代化生产是建立在先进技术、严密分工和广泛协作基础上的社会化生产。它要求各部门及许多生产环节之间密切配合，协调一致，要实现这种专业化协作生产，就必须遵循互换



性原则。其结果是不仅能显著提高劳动生产率，而且能有效保证产品质量和降低成本。

保证互换性生产的前提是标准化。标准化是对研究的对象进行简化、优选和统一的科学管理过程。如本模块所讨论的公差与配合（项目1）、形状和位置公差（项目2）、表面粗糙度（项目3）等标准都属于基础标准。

零件加工完成后是否符合公差或标准化要求，必须利用合适的工具进行检验或测量才能得知，而只有检测合格的零部件才具有互换性，因此检测非常重要。不仅如此，检测还有另一重要作用，就是根据检测的结果，分析产生加工质量异常的原因，以便采取相应措施减少或防止废品。关于质量检测的方法、手段、注意事项等将在项目4中详述。

项目1 尺寸公差与配合

学习目标

1. 了解标准及标准化，优先数和优先数系。
2. 掌握孔、轴、尺寸及尺寸偏差、公差及公差带、配合、基准制等概念。
3. 掌握基本偏差系列并能查表确定基本偏差值。
4. 掌握常用及优先配合，了解一般配合。
5. 能根据使用功能（极限间隙或过盈）正确选用尺寸公差与配合。

任务1 认识标准及标准化

任务引入

现代制造业发展的趋势是大规模、专业化生产；分工越来越细，往往零部件由多家企业协作制造最后由某一企业总装成品。为了使各部门、各企业在生产中协调一致，使各生产环节良好衔接，必须有一种手段使分散的、局部的生产部门和生产环节保持统一，成为一个有机整体，这样才能达到互换性的目的。制定标准从而使相关工作标准化就是实现这种目标的主要途径和手段。

1.1.1 标准及标准化定义

1. 标准

国际标准化组织（ISO）理事会于1985年7月25日发布的第2号指南修正草案（ISO/STACO144）中对“标准”这一术语给出了如下定义：“基于一致并由公认团体批准的标准化成果的文件。为获得最佳秩序，对重复使用的问题给出答案的文件，它在一致同意的基础上，由公认团体批准。”

1997年ISO/IEC导则第3部分（第3版）对“标准”这一术语又给出了新的定义：“在



一定的范围内获得最佳秩序，对活动或其结果规定共同的和重复使用的规则、导则或特性的文件。该文件经协商一致制定并经一个公认机构批准。标准应以科学、技术和经验的综合成果为基础，以促进最佳社会效益为目的。”

不难看出，在机械制造领域，标准是规范技术要求的法规，由国家和相关部门用文字形式颁发。例如：GB/T 1804—2000《一般公差、未注公差的线性和角度尺寸的公差》就是国家标准“极限与配合”中的一项。

标准对于缩短产品设计周期、规范简化产品制造过程、改进生产质量、发展经济和对外贸易等诸多方面均有着十分重要的意义。

2. 标准化

发展互换性生产必须实行标准化，也就是将设备、加工工具、量具量仪、材料、产品、零部件以及质量指标、检测方法等统一和简化，制定相互协调的标准，并按照统一的术语、符号、计量单位，将它们的几何和性能参数以及公差数值标注在图纸上，在生产过程中贯彻，并取得最好的经济效益。这样有利于推行互换性，扩大互换的范围。

标准化是将具有重复性特征的物质和信息（如程序、方法、图形、符号等）制定标准，以便多次重复应用。其内容很广泛，就机械产品而言，主要包括型式质量标准化、品种规格系列化和零部件通用化三方面。

标准化是研究社会化生产过程中技术协调的规律和方法，是组织现代化大工业生产的重要基础，是科学管理的基本手段。标准化对于改进产品、防止贸易壁垒、促进技术合作等方面具有特别重要的意义。

1.1.2 标准化发展史

1. 国际标准化发展史

1798年，美国的E.惠特尼首创了生产分工专业化、产品零部件标准化的生产方式，成为“标准化之父”。

1841年，英国的J.B.惠特沃思设计了“惠氏螺纹”，在此基础上产生了统一的螺钉和螺母，为互换性的实现创造了条件。

1901年，英国工程标准委员会成立，这是世界第一个国家标准化组织。同年，美国成立了国家标准局，1918年成立了美国工程标准委员会，其他工业国家德国、法国、瑞士、荷兰、日本、奥地利等也都纷纷成立了国家标准化机构。

1902年英国伦敦的Newall公司（主要生产剪羊毛机）编制了纽瓦尔标准《极限表》，实现了零件加工装配的可互换性，可以说是最早的极限与配合标准。

1906年英国颁布了国家公差标准BS27，从此开创了零件标准化和可严格控制加工质量、用机器大量生产机器的时代。人类制造机器工具的效率达到了史无前例的高度。

20世纪30年代左右，各工业国相继颁发了公差与配合标准。德国DIN标准最早采用了基孔制与基轴制，并提出公差单位的概念，将精度等级与配合区分开。

1926年国际标准化协会ISA成立，1935年颁布了国际公差制草案。二战后于1947年重建国际标准化组织ISO，1962年颁布了ISO/R 286—1962极限与配合制，1969年ISO理事会决定10月14日为“世界标准日”。目前，ISO是世界最大的国际标准化机构，至2004年底



已经制定了大约两万个国际标准。

2. 我国标准化发展史

我国的标准化工作是在新中国成立后开始发展的，吸收了先进国家的成功经验。

1949~1955年间着手建立了企业标准和部门标准。1956年成立国家科学技术委员会时设立了标准局进一步加强了标准化工作。

1959年，颁布了第一套公差与配合国家标准 GB 159~174—59。

1963年，召开了全国第一次标准化工作会议，1978年恢复成为 ISO 成员国，承担 ISO 技术委员会秘书处工作和标准草案起草工作。

1979年，国务院颁布了《中华人民共和国标准化管理条例》，并在同年成立了国家标准总局，这是对标准化工作的又一次强化。同年颁布第二套公差与配合标准 GB 1800~1804—79。

1988年7月，颁布了《中华人民共和国标准化法》，将标准化工作在新中国的历史上正式纳入了法制轨道，同时对老标准进行了修订。

1997年颁布了第三套极限与配合国家标准及其他新国标。

我国积极采用国际标准和国外先进标准，并结合我国国情加以吸收利用。中国入世前后，标准和标准化事业受到了格外关注，入世就意味着中国要承认和遵守世界贸易组织规则，由此才能享有世贸组织成员的权利，作为平等的一员参加全球经济一体化。中国在入世谈判中涉及标准和标准化的承诺达 13 条之多。

随着我国制造业水平的提高和国际化进程的发展，我国的国家标准体系已经逐步完善，达到技术先进、适合国情、与国际标准水平相当，适应我国建设的形势需要。

1.1.3 优先数和优先数系

在工业生产中，为了满足用户不同需求，同一品种同一个参数要从大到小取不同的值，从而形成不同规格的产品系列，参数的取值必须合理有序，否则会使得产品的系列杂乱无章。优先数和优先数系是一种科学的数值制度，它适合于各种数值的分级，是国际上统一的数值分级制度。目前我国数值分级的国家标准《优先数和优先数系》GB/T 321—2005 也采用这种制度，它与国际标准《优先数和优先数系》ISO 17: 1973 基本一致。

采用优先数系，能使工业产品以较少的品种和规格，经济合理地满足用户各种各样的需求。优先数系由一系列十进制等比数列构成，其代号为 Rr (R 是优先数系创始人 Renard 名字的第一个字母)。其项值包含了 10 的所有整数幂，如…，0.001, 0.01, 0.1, 1, 10, 100, 1000, …，可以向两边无限延伸。对这些数按…，0.01~0.1, 0.1~1, 1~10, 10~100, …划分区间，称为十进区间。每个十进区间各有 r 个优先数，相应的公比代号为 q_r 。

设每个十进段内，每进 r 项就使项值增大 10 倍。则公比 q_r 应满足： $q_r = \sqrt[r]{10}$ ，相应的理论数列为 (a 为起始项值)

$$a, a(\sqrt[r]{10}), a(\sqrt[r]{10})^2, \dots, a(\sqrt[r]{10})^{r-1}, 10a$$

国标 GB 321—2005 与国际标准 ISO 17: 1973 采用的优先数系相同，规定的 r 值有 5, 10, 20, 40, 80 五种，它们是各个十进段内项值的分级数。分别用符号 R5、R10、R20、R40、R80 表示，称为 R5 系列、R10 系列、…、R80 系列。各系列公比如下：

$$\text{R5 系列: } q_5 = \sqrt[5]{10} \approx 1.5849 \approx 1.60;$$

$$\text{R10 系列: } q_{10} = \sqrt[10]{10} \approx 1.2585 \approx 1.25;$$



R20 系列: $q_{20} = \sqrt[20]{10} \approx 1.1220 \approx 1.12$;

R40 系列: $q_{40} = \sqrt[40]{10} \approx 1.0593 \approx 1.06$;

R80 系列: $q_{80} = \sqrt[80]{10} \approx 1.0292 \approx 1.03$ 。

R5、R10、R20 和 R40 四个系列是优先数系中的常用系列，称为基本系列。R80 系列称为补充系列，它的分级很细，一般不常用。优先数的理论值多数是无理数，使用时须加以圆整，如表 1-1 所示。

表 1-1 优先数的基本系列 (摘自 GB/T 321—2005)

R5	R10	R20	R40	R5	R10	R20	R40	R5	R10	R20	R40
1.00	1.00	1.00	1.00			2.24	2.24		5.00	5.00	5.00
			1.06				2.36				5.30
		1.12	1.12	2.50	2.50	2.50	2.50			5.60	5.60
			1.18				2.65				6.00
	1.25	1.25	1.25			2.80	2.80	6.30	6.30	6.30	6.30
			1.32				3.00				6.70
		1.40	1.40		3.15	3.15	3.15			7.10	7.10
			1.50				3.35				7.50
1.60	1.60	1.60	1.60			3.55	3.55		8.00	8.00	8.00
			1.70				3.75				8.50
		1.80	1.80	4.00	4.00	4.00	4.00			9.00	9.00
			1.90				4.25				9.50
	2.00	2.00	2.00			4.50	4.50	10.00	10.00	10.00	10.00
			2.12				4.75				

从表 1-1 可以看出: R5 系列的项值包含在 R10 系列之中, R10 系列中的项值包含在 R20 系列之中, R20 系列中的项值包含在 R40 系列之中。这样便于中间插值, 满足或密或疏的分级要求。

优先数系的系列种类, 除基本系列和补充系列外, 还有派生系列、化整值系列和复合系列等。

派生系列是从基本系列或补充系列 R_r 中, 按一定项差 p 取值导出的系列, 以 R_r/p 表示。例如, 若在 R10 中按项差 $p=3$ 取值, 则构成 R10/3 系列: $\dots, 1, 2, 4, 8, \dots$, 其公比 $q_{10/3} = (\sqrt[10]{10})^3 = 2$, 即 R10/3 是公比为 2 的倍数系列。

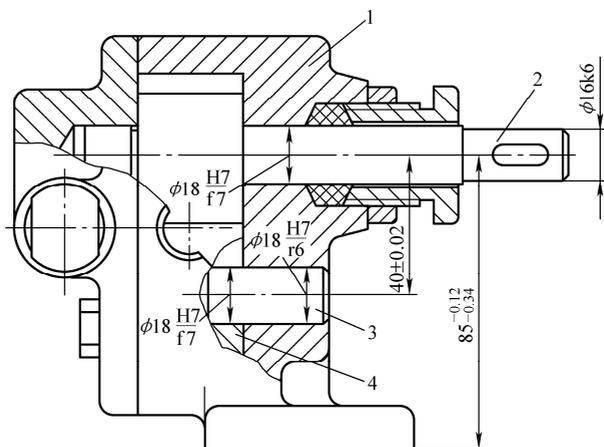
优先数在各种标准中应用很广, 例如在 $>500 \sim 3150\text{mm}$ 尺寸段的公差标准尺寸分段中就采用了 q_{10} 数系, 它们是 500、630、1000、 \dots 。又如表面粗糙度的取样长度就采用了 R10/5 数系, 它们的项值分别为 0.08、0.25、0.8、2.5、8.0 和 25。



任务 2 掌握基本术语和定义

任务引入

图 1-2 所示为某机床润滑系统的齿轮油泵装配图。其中标注了若干尺寸：如 (40 ± 0.02) mm 为主动齿轮轴 2 与从动轴 3 之间中心距的距离尺寸要求，40mm 为公称尺寸，+0.02mm 为上极限偏差，-0.02mm 为下极限偏差，公差是 0.04mm。此外还标注了若干配合要求：如 $\phi 18H7/r6$ 反映从动轴颈与泵体内孔的装配要求，即基本配合尺寸为 18mm，采用基孔制，H7 是一种优先选用的孔公差带，r6 是一种常用的轴公差带，H7/r6 为过盈配合。这些尺寸、公差与配合的选择都是根据油泵的使用功能来确定的，为了掌握极限配合的国家标准与选择方法，必须先熟知相关知识的基本术语和定义。



1—泵体；2—齿轮轴；3—从动轴；4—从动轮

图 1-2 机床润滑系统的齿轮油泵

1.2.1 孔和轴

1. 孔

孔主要指圆柱形内表面，也包括其他内表面中由单一尺寸确定的部分。

2. 轴

轴主要指圆柱形外表面，也包括其他外表面中由单一尺寸确定的部分。

如图 1-3 所示， d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 为轴，槽宽 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 为孔。孔和轴的特征是包容面为孔，被包容面为轴；切削加工时孔的尺寸越来越大，而轴的尺寸越来越小。

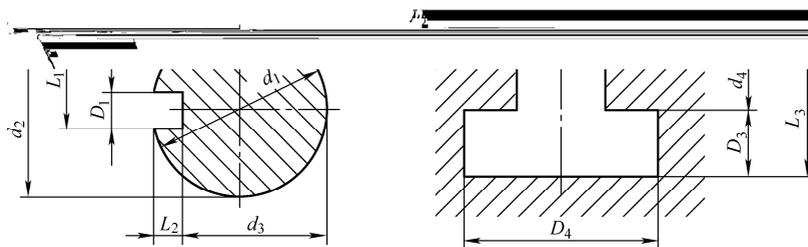


图 1-3 孔和轴

1.2.2 尺寸

1. 尺寸

尺寸是指用特定单位表示线性尺寸的数值（在国标规定的尺寸标注中，以 mm 为通用单位）。

2. 公称尺寸

公称尺寸是指由图样规范确定的理想形状要素的尺寸。其数值应圆整后按国家标准中《标准尺寸》的基本系列选取，以减少定值刀具、量具的规格。孔、轴配合时的公称尺寸应相同。例如， $\phi 50_0^{+0.025}$ mm 孔与 $\phi 50_{-0.025}^{-0.009}$ mm 轴配合，公称尺寸都为 50mm。

3. 提取组成要素的局部尺寸

提取组成要素的局部尺寸是指一切提取组成要素上两对应点之间的距离。该尺寸可以通过测量得到。当然由于存在测量误差，因此测量尺寸并非提取组成要素的局部尺寸的真值。同一表面的不同部位的提取组成要素的局部尺寸往往不同。孔和轴提取组成要素的局部尺寸分别用 D_a 、 d_a 表示。

4. 极限尺寸

极限尺寸是指允许尺寸变化的两个界限值。其中，较大的一个界限值称为上极限尺寸（前例中 $D_{\max} = 50.025\text{mm}$ ， $d_{\max} = 49.991\text{mm}$ ）；较小的一个界限值称为下极限尺寸（前例中 $D_{\min} = 50\text{mm}$ ， $d_{\min} = 49.975\text{mm}$ ），如图 1-4 所示。

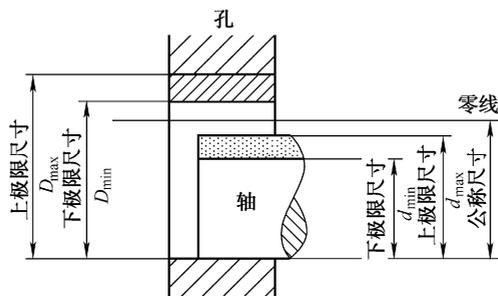


图 1-4 公称尺寸、极限尺寸



5. 实体状态和实体尺寸

(1) 最大实体状态 (MMC) 和最大实体尺寸 (MMS): 孔或轴在尺寸公差范围内具有材料最多时的状态, 称为最大实体状态。在此状态下的尺寸称为最大实体尺寸。因此最大实体尺寸就是指 D_{\min} 和 d_{\max} 。

(2) 最小实体状态 (LMC) 和最小实体尺寸 (LMS): 孔或轴在尺寸公差范围内具有材料最少时的状态, 称为最小实体状态。在此状态下的尺寸称为最小实体尺寸。因此最小实体尺寸就是指 D_{\max} 和 d_{\min} 。

6. 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_m ; 与实际轴外接的最小理想孔的尺寸称为轴的作用尺寸 d_m , 如图 1-5 所示。作用尺寸是实际尺寸和形状误差的综合结果。配合时, 孔的作用尺寸小于其实际尺寸, 而轴的作用尺寸大于其实际尺寸。因此, 孔、轴的实际配合效果不仅取决于孔、轴的实际尺寸, 而且亦与孔、轴的作用尺寸有关。

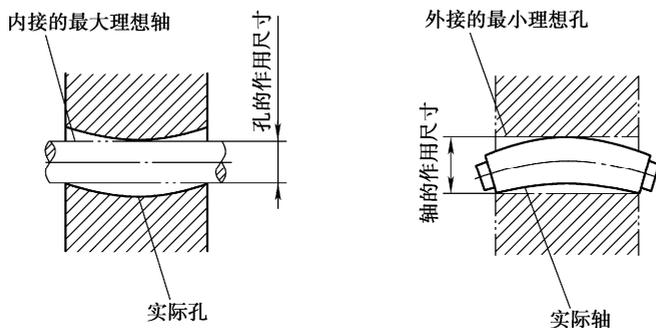


图 1-5 孔和轴的作用尺寸

7. 极限尺寸判断原则 (泰勒原则)

国家标准对如何根据极限尺寸来判断孔、轴是否合格的判断原则 (也叫泰勒原则) 定义如下: 孔或轴的作用尺寸不允许超过最大实体尺寸。即对于孔, 其作用尺寸应不小于下极限尺寸, 对于轴应不大于上极限尺寸。而任何位置上的实际尺寸, 不允许超过最小实体尺寸。对于孔, 其实际尺寸应不大于上极限尺寸, 对于轴则应不小于下极限尺寸。

由此可见, 孔或轴的最大实体尺寸主要是控制其作用尺寸, 孔或轴的最小实体尺寸主要是控制其实际尺寸。无论孔或轴, 只有当其实际尺寸和作用尺寸均不超过其最大、最小实体尺寸时才算合格。

【例 1-1】 某设计尺寸为 $\phi 50_{+0.025}^{+0.050}$ mm 的孔, 制造后测得其实际尺寸为 $\phi 50.038 \sim 50.049$ mm, 其作用尺寸为 $\phi 50.032$ mm, 试按泰勒原则判断孔是否合格。

解: $LMS = D_{\max} = 50.050$ mm

$MMS = D_{\min} = 50.025$ mm

$D_m = 50.032$ mm $> D_{\min}$, $D_a = 50.038 \sim 50.049$ mm $< D_{\max}$

根据泰勒原则该孔满足制造要求, 为合格品。



1.2.3 尺寸偏差、公差及公差带

1. 尺寸偏差（简称偏差）

尺寸偏差是指某一尺寸减其公称尺寸所得的代数差。偏差分为极限偏差和实际偏差，而极限偏差又分为上极限偏差和下极限偏差，如图 1-6 所示。上极限偏差是上极限尺寸减公称尺寸所得的代数差，孔、轴上极限偏差分别用代号 ES 和 es 表示；下极限偏差是下极限尺寸减公称尺寸所得的代数差，孔、轴下极限偏差分别用代号 EI 和 ei 表示。例 1-1 中， $\phi 50_{+0.025}^{+0.025}$ mm 的孔 ES=+0.025mm，EI=0， $\phi 50_{-0.025}^{-0.009}$ mm 的轴 es=-0.009mm，ei=-0.025mm。实际偏差是实际尺寸减公称尺寸所得的代数差。偏差可以为正、负或零值。合格零件的实际偏差应在规定的极限偏差范围内。

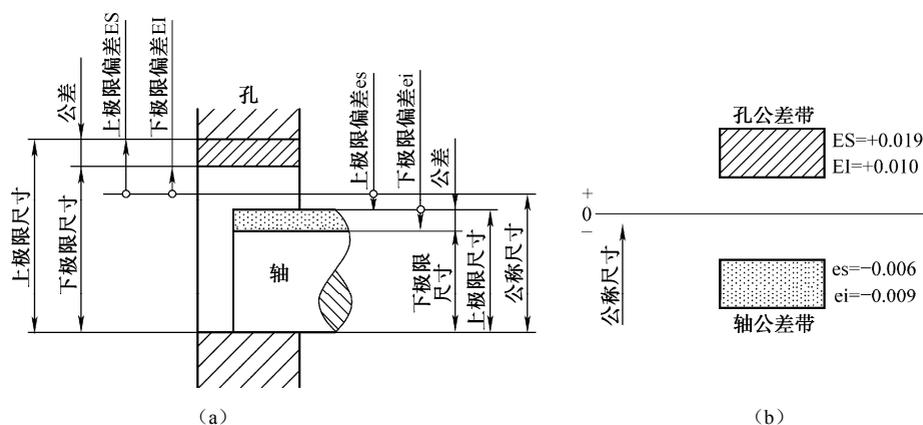


图 1-6 极限与配合示意图

2. 尺寸公差（简称公差）

尺寸公差是指尺寸允许的变动量。公差等于上极限尺寸与下极限尺寸之差，也等于上极限偏差与下极限偏差之差。即

$$\text{孔公差: } T_D = D_{\max} - D_{\min} = |ES - EI|$$

$$\text{轴公差: } T_d = d_{\max} - d_{\min} = |es - ei|$$

3. 尺寸公差带（简称公差带）

公差、偏差的数值与公称尺寸相比要小得多，不共用同一比例表示。因此，实际中一般使用公差带图，如图 1-6 所示。其中，确定偏差的一条基准直线称为零偏差线（零线）。通常用零线表示公称尺寸，正偏差位于零线之上，负偏差位于零线之下。代表上、下极限偏差的两条直线所限定的一个区域，称为公差带。

4. 基本偏差

用来确定公差带相对零线位置的上极限偏差或下极限偏差称为基本偏差。基本偏差一般指靠近零线的那个偏差，如图 1-6 所示。当公差带位于零线上方时，其基本偏差为下极限偏



差；当公差带位于零线下方时，其基本偏差为上极限偏差；当公差带对称于零线时，两者皆可。

1.2.4 配合

1. 配合定义

配合是指公称尺寸相同、相互结合的孔和轴公差带之间的关系。由于配合是指一批孔、轴的装配关系，而不是指单个孔与轴的装配关系，所以用公差带关系来反映配合比较确切。

2. 间隙配合

孔的尺寸减去与其相配合的轴的尺寸所得的代数差为正时是间隙，为负是过盈。具有间隙（包括最小间隙等于零）的配合为间隙配合，如图 1-7 所示。此时，孔的公差带在轴的公差带之上，其极限值为最大间隙 X_{max} 和最小间隙 X_{min} 。间隙配合主要用于孔、轴间的活动连接。间隙的作用在于储藏润滑油，补偿温度引起的变化，补偿弹性变形及制造与安装误差等。间隙的大小影响孔、轴相对运动的灵活程度。例 1-1 中， $\phi 50_0^{+0.025}$ mm 孔与 $\phi 50_{-0.025}^{-0.009}$ mm 轴配合就是间隙配合，其极限间隙为

$$X_{max} = D_{max} - d_{min} = ES - ei = [0.025 - (-0.025)]\text{mm} = 0.050\text{mm}$$

$$X_{min} = D_{min} - d_{max} = EI - es = [0 - (-0.009)]\text{mm} = 0.009\text{mm}$$

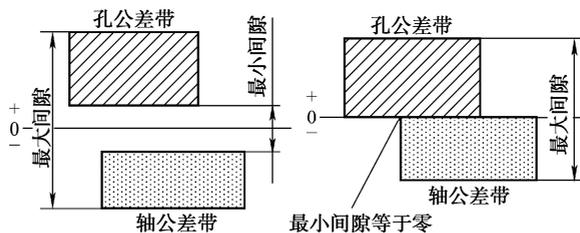


图 1-7 间隙配合

3. 过盈配合

具有过盈（包括最小过盈等于零）的配合为过盈配合，如图 1-8 所示。此时，孔的公差带在轴的公差带之下，其极限值为最大过盈 Y_{max} 和最小过盈 Y_{min} 。过盈配合用于孔、轴间的固定连接，不允许两者有相对运动。

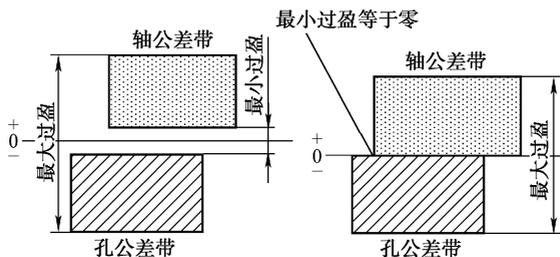


图 1-8 过盈配合



例如, $\phi 50_0^{+0.025}$ mm 孔与 $\phi 50_{+0.034}^{+0.050}$ mm 轴配合就是过盈配合, 其极限过盈为

$$Y_{\max} = D_{\min} - d_{\max} = EI - es = (0 - 0.050)\text{mm} = -0.050\text{mm}$$

$$Y_{\min} = D_{\max} - d_{\min} = ES - ei = (0.025 - 0.034)\text{mm} = -0.009\text{mm}$$

4. 过渡配合

可能具有间隙或过盈的配合为过渡配合。此时, 孔的公差带与轴的公差带相互交叠, 其极限值为最大间隙和最大过盈, 如图 1-9 所示。过渡配合主要用于孔、轴的定位连接。标准中规定的过渡配合的间隙或过盈一般都较小, 因此可以保证结合零件具有很好的同轴度, 并且便于拆卸和装配。

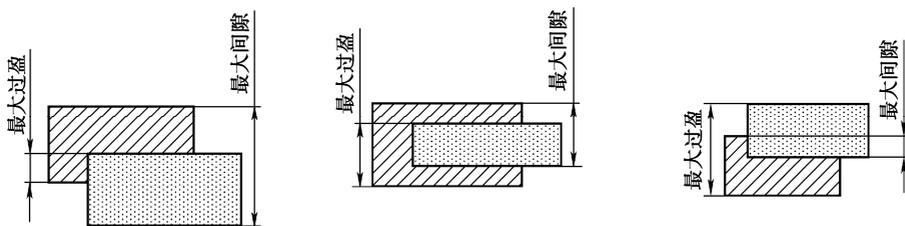


图 1-9 过渡配合

例如, $\phi 50_0^{+0.025}$ mm 孔与 $\phi 50_{+0.009}^{+0.025}$ mm 轴配合就是过渡配合, 其极限间隙或过盈为

$$X_{\max} = D_{\max} - d_{\min} = ES - ei = (0.025 - 0.009)\text{mm} = 0.016\text{mm}$$

$$Y_{\max} = D_{\min} - d_{\max} = EI - es = (0 - 0.025)\text{mm} = -0.025\text{mm}$$

5. 配合公差 T_F

配合公差 T_F 是指允许间隙或过盈的变动量。配合公差表示一批孔、轴配合时, 各对孔、轴配合松紧不一致的程度。

$$\text{对于间隙配合: } T_F = |X_{\max} - X_{\min}| = T_D + T_d$$

$$\text{对于过盈配合: } T_F = |Y_{\max} - Y_{\min}| = T_D + T_d$$

$$\text{对于过渡配合: } T_F = |X_{\max} - Y_{\max}| = T_D + T_d$$

当公称尺寸一定时, 配合公差 T_F 表示配合的精确程度, 反映了设计使用要求; 而孔公差 T_D 和轴公差 T_d 则分别表示孔、轴加工的精确程度, 反映了制造工艺要求, 即加工的难易程度。由以上关系式可见, 若使用要求或设计要求提高, 即 T_F 减小, 则 $T_D + T_d$ 也要减小, 因此加工将更加困难, 成本也将提高。因此, 这个关系式说明了公差的实质: 反映机器使用要求与制造要求的矛盾, 或设计与工艺的矛盾。

1.2.5 基准制

所谓基准制, 即以两个相配零件中的一个为基准件, 并选定标准公差带, 然后按使用要求的最小间隙或最小过盈, 确定非基准件公差带位置, 从而形成各种配合的一种制度。

1. 基孔制

基孔制是指基本偏差为一定的孔公差带, 与不同基本偏差的轴公差带形成各种配合的一种制度, 如图 1-10 (a) 所示。基孔制中配合的孔称为基准孔, 它是配合的基准件。国家标准



规定，基准孔的基本偏差（下极限偏差）为零，即 $EI=0$ ；而上极限偏差为正值，即公差带在零线上侧。

基孔制中配合的轴为非基准件。当轴的基本偏差为上极限偏差且为负值或零值时，是间隙配合；基本偏差为下极限偏差时，若孔与轴公差带相交叠为过渡配合，相错开为过盈配合。另外，在图 1-10（a）中，轴的另一极限偏差没有画出，是表示其位置由公差带大小来确定。

2. 基轴制

基轴制是指基本偏差为一定的轴的公差带，与不同基本偏差的孔形成各种配合的一种制度，如图 1-10（b）所示。

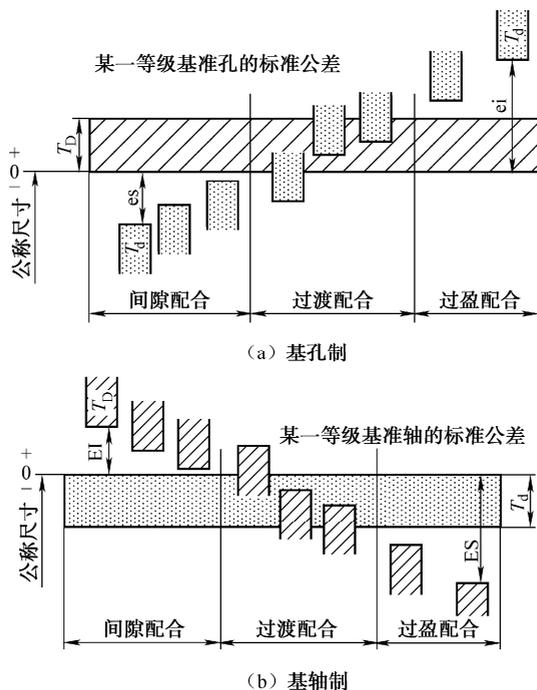


图 1-10 基孔制与基轴制

基轴制中配合的轴称为基准轴，是配合的基准件。国家标准规定，基准轴的基本偏差（上极限偏差）为零，即 $es=0$ ，而下极限偏差为负值，即公差带在零线下侧。基轴制的配合孔为非基准件，与基孔制相似，随着基准轴与相配孔公差带之间相互关系不同，可形成不同松紧程度的间隙配合、过渡配合和过盈配合。

【例 1-2】 画出 $\phi 50_0^{+0.039}$ mm 孔与 $\phi 50_{-0.050}^{-0.025}$ mm 轴、 $\phi 50_0^{+0.025}$ mm 孔与 $\phi 50_{+0.043}^{+0.059}$ mm 轴、 $\phi 50_0^{+0.025}$ mm 孔与 $\phi 50_{+0.002}^{+0.018}$ mm 轴的极限配合公差带图，并判断基准制及配合性质。

解： $\phi 50_0^{+0.039}$ mm 孔与 $\phi 50_{-0.050}^{-0.025}$ mm 轴为基孔制间隙配合、 $\phi 50_0^{+0.025}$ mm 孔与 $\phi 50_{+0.043}^{+0.059}$ mm 轴为基孔制过盈配合，它们的极限配合公差带图如图 1-11（a）、（b）所示，计算过程略。

$\phi 50_0^{+0.025}$ mm 孔与 $\phi 50_{+0.002}^{+0.018}$ mm 轴为基孔制过渡配合，其极限配合公差带图如图 1-12 所示，计算过程略。

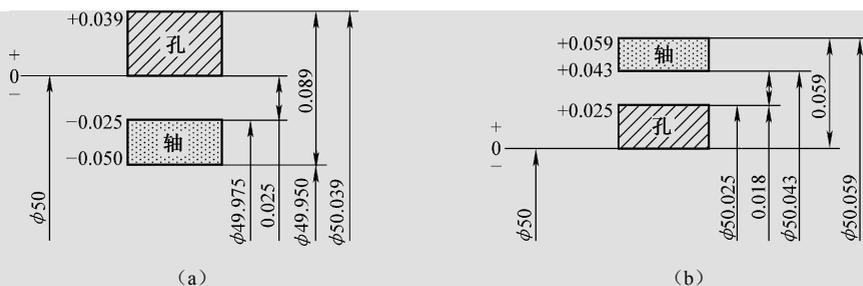


图 1-11 基孔制间隙、过盈配合公差带

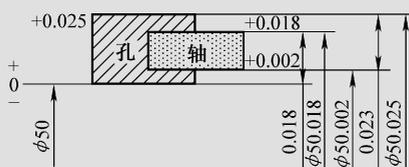


图 1-12 基孔制过渡配合公差带

任务 3 熟悉公差与配合的国家标准

任务引入

从图 1-6~图 1-12 任一图中都可以看出, 确定公差带的两要素是公差带的大小和位置。对于公称尺寸一定的零件, 公差带大小决定着该零件的加工精度, 公差带位置取决于其中一个极限偏差。在生产实践中如果随便确定公差带的大小和位置, 势必会产生数量繁多的公差带, 这样就发挥不了标准化的作用, 也就无法实现互换性生产。

为了实现互换性和满足各种使用要求, 《公差与配合》国家标准对不同的公称尺寸, 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, 形成各种配合。

1.3.1 标准公差系列

标准公差是国标规定的用以确定公差带大小的任一公差值。标准公差由公差单位及公差等级系数组成。标准公差系列是由不同公差等级和不同公称尺寸的标准公差构成的。

1. 公差单位

机械零件的加工误差不仅与加工方法有关, 而且与零件的公称尺寸有关。因而, 为了评定零件的精度等级的高低, 合理地规定公差数值, 需要建立公差单位。

公差单位是计算公差的基本单位, 是制定标准公差列表的基础。生产实践以及专门的科学试验和统计分析说明, 零件的加工误差与公称尺寸之间成立方根抛物线关系。

对尺寸 $\leq 500\text{mm}$, IT5 至 IT18 的公差单位计算式为

$$i = 0.45 \sqrt[3]{D} + 0.001D \quad (1-1)$$



式中 i ——公差单位, 单位为 μm ;

D ——零件的公称尺寸, 单位为 mm 。

式(1-1)中第一项主要反映加工误差的影响; 第二项用于补偿与直径成正比的误差, 比如由于测量时温度偏离标准温度 20°C 、测量误差等因素引起的误差, 成直线关系。实际上, 当尺寸很小时, 第二项所占的比例很小; 但当直径很大时, 公差单位随直径增加较快。

IT01 至 IT1 的标准公差计算公式与直径成线性关系, 如表 1-2 所示。主要考虑测量误差, 因为高精度零件的加工误差很小, 主要取决于测量水平。

表 1-2 公称尺寸 $\leq 500\text{mm}$ 的标准公差的计算公式

单位: μm

公差等级	公 式	公差等级	公 式	公差等级	公 式
IT01	$0.3+0.008D$	IT6	$10i$	IT13	$250i$
IT0	$0.5+0.012D$	IT7	$16i$	IT14	$400i$
IT1	$0.8+0.020D$	IT8	$25i$	IT15	$640i$
IT2	$(IT1) (IT5/IT1)^{1/4}$	IT9	$40i$	IT16	$1000i$
IT3	$(IT1) (IT5/IT1)^{2/4}$	IT10	$64i$	IT17	$1600i$
IT4	$(IT1) (IT5/IT1)^{3/4}$	IT11	$100i$	IT18	$2500i$
IT5	$7i$	IT12	$160i$		

2. 公差等级

确定尺寸精确程度的等级, 称为公差等级。规定和划分公差等级的目的是简化和统一公差的规格, 使较少的公差等级既能满足广泛的不同使用要求, 又能大致代表各种加工方法的精度。这样做能简化设计, 也有利于制造。

在国标中, 标准公差 T 是用公差等级系数 a 与公差单位 i 的乘积来表示的, 即

$$T = ai \quad (1-2)$$

对于公称尺寸相同的零件, 公差等级系数 a 是决定标准公差大小的唯一参数。它不随配合改变, 而且对孔、轴都一样。 a 的大小在一定程度上反映了加工的难易程度。

根据公差等级系数不同, 国标将标准公差共分为 20 个等级, 即 IT01、IT0、IT1、…、IT18, 其中 IT (ISO Tolerance) 表示标准公差, 数字表示公差等级, IT01 最高, IT18 最低, 等级依次降低, 公差值依次增大。

在尺寸 500mm 的常用尺寸段范围内, 各级标准公差的计算公式如表 1-2 所示。不难看出, 国标各级公差之间分布的规律性强, 便于向高、低两端延伸, 如果现有 20 个公差等级不够用时, 还可以根据计算公式自行延伸, 满足更广泛和特殊的需要。

3. 公称尺寸分段

按照标准公差的计算公式, 在同一公差等级中每对应一个公称尺寸就会有一个公差值。这样, 规格繁多既不实用也无必要。为了减少标准公差数目、统一公差值、简化公差表格以及便于生产实际应用, 国标对公称尺寸进行尺寸分段: 将 3150mm 以下的公称尺寸分成 21 个主段落, 尺寸分段后, 对同一尺寸段内的所有公称尺寸, 在相同公差等级情况下, 规定相



同的标准公差。公称尺寸分段如表 1-3 所示。

表 1-3 标准公差数值 (摘自 GB/T 1800.1—2009)

公称尺寸 /mm	标准公差等级																	
	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
	μm											mm						
≤3	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
>3~6	1.0	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
>6~10	1.0	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
>10~18	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
>18~30	1.5	2.5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	0.20	0.33	0.52	0.84	1.30	2.1	3.3
>30~50	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
>50~80	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
>80~120	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
>120~180	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
>180~250	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	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	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	0.54	0.89	1.40	2.30	3.60	5.7	8.9
>400~500	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
>500~630	9	11	16	22	32	44	70	110	175	280	440	0.70	1.00	1.75	2.80	4.40	7.0	11.0
>630~800	10	13	18	25	36	50	80	125	200	320	500	0.80	1.25	2.00	3.20	5.00	8.0	12.5
>800~1000	11	15	21	28	40	56	90	140	230	360	560	0.90	1.40	2.30	3.60	5.60	9.0	14.0
>1000~1250	13	18	24	33	47	66	105	165	260	420	660	1.05	0.65	2.60	4.20	6.60	10.5	16.5
>1250~1600	15	21	29	39	55	78	125	195	310	500	780	1.25	1.95	3.10	5.00	7.80	12.5	19.5
>1600~2000	18	25	35	46	65	92	150	230	370	600	920	1.50	2.30	3.70	6.00	9.20	15.0	23.0
>2000~2500	22	30	41	55	78	110	175	280	440	700	1100	1.75	2.80	4.40	7.00	11.0	17.5	28.0
>2500~3150	26	36	50	68	96	135	210	330	540	860	1350	2.10	3.30	5.40	8.60	13.5	21.0	33.0

注：公称尺寸>500mm 的 IT1 至 IT2 的标准公差数值为试行的。公称尺寸≤1mm 时，无 IT4 至 IT18。

标准公差计算公式中，同一段内所有公称尺寸的 D ，都以所属尺寸段内首、尾两个尺寸的几何平均值来进行计算。例如，30~50mm 公称尺寸分段的 $D = \sqrt{30 \times 50} \text{ mm} = 38.73 \text{ mm}$ ，这样做的结果，虽然不够精确，但经过生产实践证明，这一误差对生产影响不大，对于公差值的标准化却非常有利。标准公差数值见表 1-3。

从表 1-3 中可以看出：标准公差数值由标准公差等级和公称尺寸确定。同一公称尺寸，公差等级不同则对应的公差数值就不同；而同一公差等级，若公称尺寸不在同一尺寸段，则对应的公差数值也不同。国标规定，只有公差等级相同（而不是公差数值相同）才表示有相同的精度，即相同的加工难度。



【例 1-3】 公称尺寸为 $\phi 20$ ，计算 IT6、IT7、IT8 的标准公差。

解：20mm 在 $>18\sim 30$ mm 尺寸段内，所以 $D = \sqrt{18 \times 30} \text{ mm} = 23.24 \text{ mm}$ 。

$$i = 0.45\sqrt[3]{D} + 0.001D = (0.45\sqrt[3]{23.24} + 0.001 \times 23.24) \mu\text{m} \approx 1.31 \mu\text{m}$$

查表 1-2 得：

$$\text{IT6} = 10i = 13.1 \mu\text{m} \approx 13 \mu\text{m}$$

$$\text{IT7} = 16i = 16 \times 1.31 \mu\text{m} = 20.96 \mu\text{m} \approx 21 \mu\text{m}$$

$$\text{IT8} = 25i = 25 \times 1.31 \mu\text{m} = 32.75 \mu\text{m} \approx 33 \mu\text{m}$$

1.3.2 基本偏差系列

1. 基本偏差代号

如前所述，基本偏差是用来确定公差带相对于零线位置的上极限偏差或下极限偏差，除了 J 和 j 以外，均指靠近零线的、偏差绝对值较小的那个极限偏差。

基本偏差系列如图 1-13 所示，基本偏差的代号用拉丁字母表示，大写字母代表孔，小写字母代表轴。在 26 个字母中，除去易与其他含义混淆的 I、L、O、Q、W (i、l、o、q、w) 5 个字母，采用 21 个，再加上用双字母 CD、EF、FG、ZA、ZB、ZC、JS (cd、ef、fg、za、zb、zc、js) 表示的 7 个，共有 28 个，即孔和轴各有 28 个基本偏差。

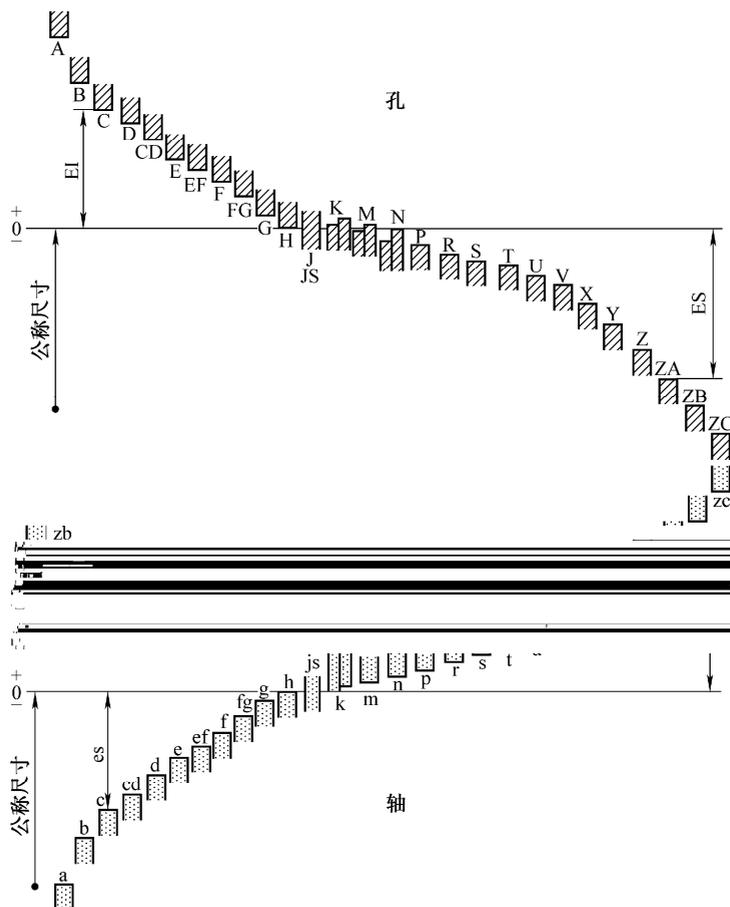


图 1-13 基本偏差系列



由图 1-13 可知，基本偏差的主要特点如下。

(1) 轴的基本偏差：从 a~h 为上极限偏差 e_s (为负值或零)，从 k~zc 为下极限偏差 e_i (为正值)。孔的基本偏差：从 A~H 为下极限偏差 E_i (为正值或零)，从 K~ZC 为上极限偏差 E_s (为负值)。

(2) H 和 h 的基本偏差均为零。H 和 h 分别为基准孔和基准轴的基本偏差代号。

(3) 以 JS 和 js 为基本偏差组成的公差带完全对称于零线，其基本偏差可为上极限偏差 (+IT/2)，也可为下极限偏差 (-IT/2)。以 J 和 j 为基本偏差组成的公差带跨在零线上，呈不对称分布，它们的基本偏差不一定是靠近零线的那个偏差。JS 和 js 逐渐取代近似对称的偏差 J 和 j，故在新国家标准中，孔仅保留了 J6、J7、J8，轴仅保留了 j5、j6、j7 和 j8 等几种。因此，在基本偏差系列中将 J 和 j 放在 JS 和 js 的位置上。

(4) K、M、N 的基本偏差为上极限偏差，k、m、n 的基本偏差为下极限偏差。但精度等级不同时，K、M、N、k 的基本偏差数值不同，故同一代号有两个位置。

(5) 在基本偏差系列图中，仅绘出了公差带的一端而另一端未绘出，因为它取决于公差等级和这个基本偏差的组合。

2. 轴的基本偏差系列

基本偏差的大小决定着孔与轴配合的性质，它由使用要求决定。轴的各种基本偏差是在基孔制的基础上根据生产实践经验和科学试验制定的。

a~h 用于间隙配合，其中 a、b、c 用于大间隙或热动配合；d、e、f 主要用于旋转运动，可以保证良好的液体摩擦；g 主要用于滑动和半液体摩擦或用于定位配合，这时要求间隙要小；cd、ef、fg 适用于小尺寸的旋转运动件，如钟表行业用得较多；h 与 H 是最小间隙为零的一种间隙配合，常用于定位配合。

j~n 主要用于过渡配合，其间隙或过盈量均不大，定心精度较高，拆卸也不困难。

p~zc 主要用于过盈配合，这时孔、轴连接强度高，能传递较大转矩。

轴的各种基本偏差数值列于表 1-4 中。孔、轴公差带如图 1-14 所示。

轴的基本偏差确定后，再根据公差等级，不难确定轴的另一个极限偏差。即

$$\text{对于 a~h: } e_i = e_s - IT \quad (1-3)$$

$$\text{对于 j~zc: } e_s = e_i + IT \quad (1-4)$$

将轴的基本偏差和公差等级代号组合就构成轴的公差带代号。例如，轴的公差带代号 h7、f8、m6、r6 等。

3. 孔的基本偏差系列

孔的基本偏差是由轴的基本偏差换算得到的。由于基轴制与基孔制是两种平行等效的配合制度：即当孔、轴为同一公差等级或孔比轴低一级的配合条件下，当基轴制中孔的基本偏差代号和基孔制中轴的基本偏差代号对应时（如 F 对应 f），基轴制配合（如 F6/h5）与基孔制配合（如 H6/f5）的性质是完全相同的，即两者的极限间隙或极限过盈是相同的。因此孔的基本偏差不需要另外制定一套计算公式，而是根据同一字母的轴的基本偏差，按一定规则换算得到。

(1) 通用规则。通用规则是指用同一字母表示的孔、轴的基本偏差的绝对值相同，而符号相反。也就是说，孔的基本偏差是轴的基本偏差相对于零线的倒影（反射关系）。因此这一规则也叫做倒影规则，即



$$\begin{cases} EI = -es \\ ES = -ei \end{cases} \quad (1-5)$$

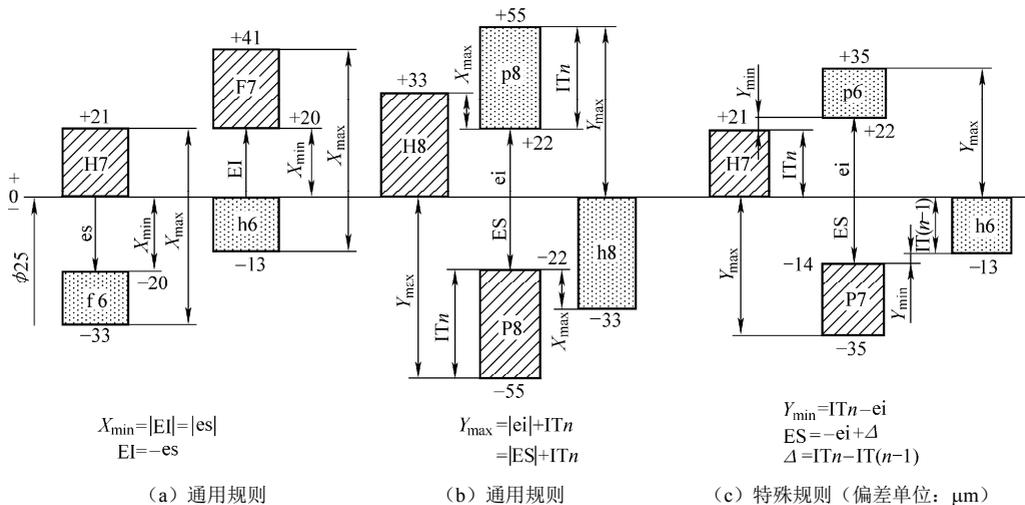


图 1-14 孔、轴公差带

通用规则适用范围：①对于 A~H，因其基本偏差（EI）和对应轴的基本偏差（es）的绝对值都等于最小间隙，故不论孔、轴是否采用同级配合，通用原则均适用；②对于 K~ZC，因标准公差大于 IT8 的 K、M、N 和大于 IT7 的 P~ZC，一般孔、轴采用同级配合，故也按通用原则，使用公式 $ES = -ei$ ；③标准公差大于 IT8、公称尺寸大于 3mm 的 N 除外，其基本偏差 $ES = 0$ 。

（2）特殊规则。特殊规则是指孔、轴的基本偏差代号对应时（如 P 和 p），孔、轴基本偏差（ES、ei）的符号相反，而绝对值相差一个 Δ 值，如图 1-14 所示。即

$$\begin{cases} ES = -ei + \Delta \\ \Delta = ITn - IT(n-1) \end{cases} \quad (1-6)$$

式中， ITn 为某级孔的标准公差， $IT(n-1)$ 为比某级孔公差高一级的轴的标准公差。

特殊规则适用于公称尺寸 $>3 \sim 500\text{mm}$ ，并且标准公差 $\leq IT8$ 的 K、M、N 孔和标准公差 $\leq IT7$ 的 P~ZC 孔。因为在较高的公差等级中，同一公差等级的孔比轴难加工，为了工艺匹配，因而常采用轴与低一级的孔相配合，并要求两种基准制所形成的配合性质相同。由图 1-14 可知：

基孔制时最小过盈： $Y_{\min} = ES - ei = ITn - ei$

基轴制时最小过盈： $Y_{\min} = ES - ei = ES - (-IT(n-1))$

由于最小过盈必须相等，所以 $ITn - ei = ES + IT(n-1)$ 。

由此得出孔的基本偏差公式（1-6）。

表 1-4 为轴的基本偏差数值，表 1-5 为孔的基本偏差数值。在实际应用中，孔、轴的基本偏差值可直接从表中查出，不必另行计算。

由标准公差和基本偏差可以组成各种孔、轴配合。注有公差尺寸可以表示为 $\phi 50_0^{+0.039}$ 或 $\phi 50H8_0^{(+0.039)}$ 。相互配合的一对孔、轴用分数形式表示，分子表示孔、分母表示轴。例如 $\phi 50 \frac{H8}{f7}$ 或 $\phi 50H8/f7$ 。