

评定圆度误差的方法 半径变化量测量

UDC 531.717.1

GB 7235—87

Methods for the assessment of departure from roundness —Measurement of variations in radius

1 引言

本标准规定了用接触式（触头式）仪器测量半径变化来确定圆度误差的方法及仪器的一般特性。本标准适用于在给定条件下，经轮廓变换，以下列任一圆心来评定零件轮廓对理想圆的偏离。

- a. 最小区域圆圆心；
- b. 最小二乘方圆圆心；
- c. 最小外接圆圆心；
- d. 最大内接圆圆心。

本标准参照采用国际标准 ISO 4291—1985《评定圆度误差的方法—半径变化量测量》。

注：给定条件包括触头、电子滤波器的频率特性（如使用的话），图形或数字描述轮廓的许可偏心（通常为图形平均半径的 7%~15%，见附录 E），测量截面的位置或与零件某些特征有关的截面位置。

2 引用标准

GB 1182—80《形状和位置公差 代号及其注法》。

3 仪器

3.1 仪器类型和一般要求

接触式圆度测量仪分二种：

- a. 传感器旋转式：带有触头的传感器随主轴旋转，放置在工作台上的被测零件固定不动。
- b. 工作台旋转式：带有触头的传感器固定，放置在工作台上的被测零件随工作台一起旋转。

仪器测量结果有二种输出方式：

- a. 图形记录式；
- b. 参数直接显示式。

同一仪器可具有上述一种或两种输出方式。

仪器触头应符合 3.1.1 至 3.1.3 的要求。

3.1.1 触头型式及其尺寸

被测零件的表面特征是选择触头型式的首要条件，为满足测量不同特征和大小的不规则表面的要求，触头有如图 1 至图 4 等不同型式。

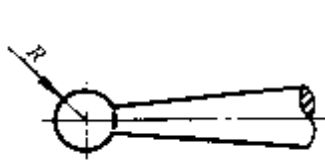


图 1 球形触头

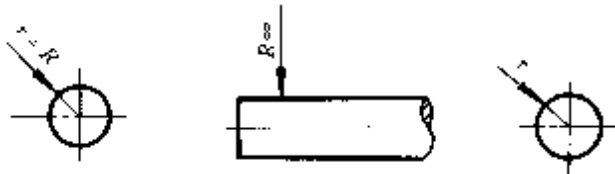


图 2 柱形触头

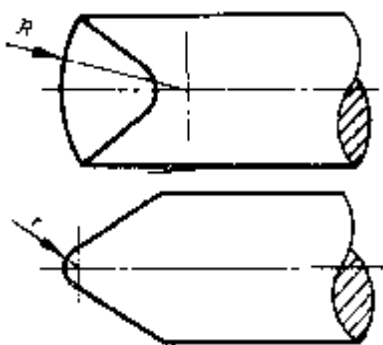


图 3 斧形触头

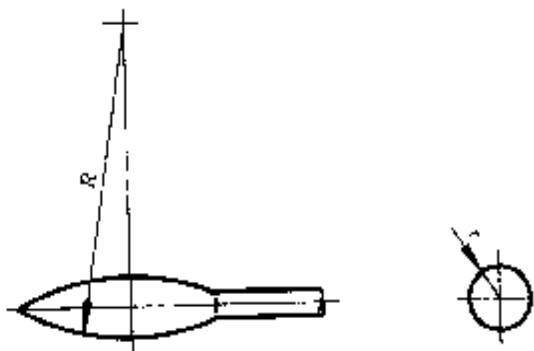


图 4 卵形触头

各触头尺寸 r 或 R 应按下列数值选取:

0.25, 0.8, 2.5, 8, 25mm

注: 为满足特定要求, 允许制造和使用其它适宜的形状和尺寸的触头。

3.1.2 触头静压力

触头的静压力应能在 0~0.25N 范围内调整, 测量时, 触头的测量力应调整到保证触头与被测表面连续接触的最低值。

3.1.3 仪器的频率响应

仪器滤波器的通带范围规定如下:

1~15, 1~50, 1~150, 1~500, 1~1500 波数/转 (upr)*, 滤波器通带名义截止端的传输率为 75%。

滤波器的幅度传输特性等效于相同时间常数的两个独立 CR 网络。

注: ① 图 5 曲线仅表示出幅度衰减特性而未考虑相位移, 可以使用具有相同衰减率 (或较小) 的已知特性的相位修正滤波器。

② 当用衰减高频的滤波器时 (通常采用双 C—R 形式), 由于高频相对于低频的相位移而造成的传输轮廓的畸变通常是不重要的。当用衰减低频的滤波器时, 由于相位移而造成的畸变可能是重要的, 并且不得不考虑其影响, 或采用相位修正滤波器加以避免。

③ 仪器频率 (以 Hz 为单位) 为主轴每秒钟的转数乘以工件每 360° 内的正弦波数。

④ 偏心率按每转一次波动计算, 当零件轮廓以最小二乘方圆心外的中心来评定时, 可以找到每转一次波动的正弦分量。

⑤ 当要求仪器电路的频响低于每转一次波动时, 为避免相位畸变, 常把电路频响做到零赫兹, 并允许用静态方法校正。

* upr 即 undulations per revolution。

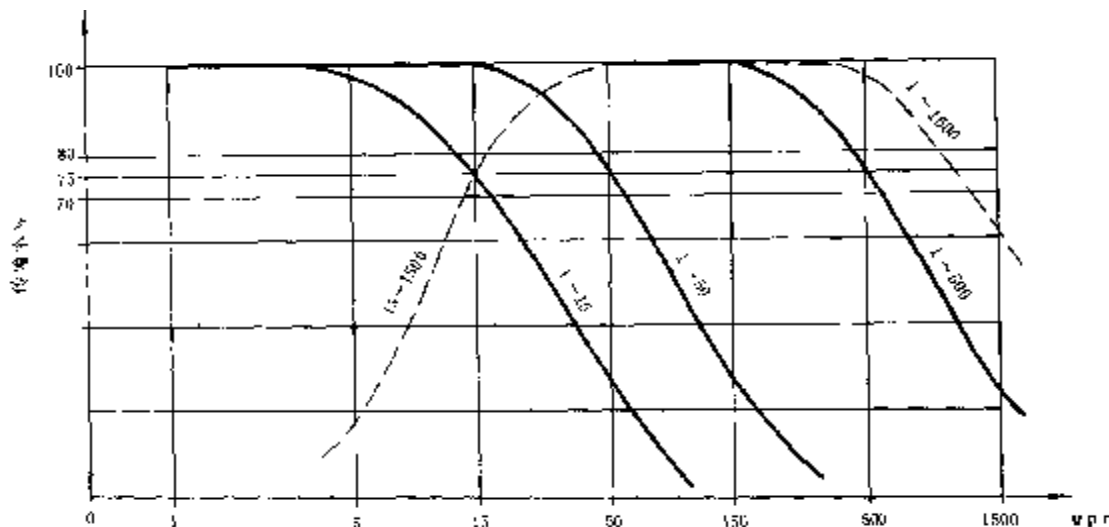


图5 滤波器幅度传输特性曲线

3.2 仪器误差

3.2.1 仪器总误差

仪器总误差是仪器所指示、显示或记录的参数值与该参数的真值间的差别。仪器总误差由引用误差，即由仪器得出的绝对误差与测量范围的上限值之比值的百分数来表示。仪器总误差由主轴误差、噪声、震动和放大倍率等所产生的系统误差和随机误差分量组成。

3.2.2 仪器回转误差

仪器回转误差应在给定条件下确定。

3.2.2.1 仪器径向误差

在与基准回转轴线相垂直的方向测量一个具有理想圆度和理想同心的试件截面时，由仪器测得的圆度值。

3.2.2.2 仪器轴向误差

测量一个与基准回转轴线理想垂直的理想平面时，仪器测得的区域值。

3.2.3 回转误差

仪器回转误差通常由下述成分组成：

- a. 与回转轴平行的径向位移；
- b. 与回转轴平行的轴向位移；
- c. 倾斜。

仪器径向误差的大小取决于触头的轴向位置，仪器轴向误差的大小取决于触头在测量平面上的径向位置。因此必须说明评定时所选择的轴向和径向位置。

仪器径向误差应用沿轴向二个充分分隔的位置上的径向误差表示，或用某一位置的径向误差及其沿轴向的变化率来表示。

仪器轴向误差应该在轴向，并且以一个规定半径上的轴向误差来表示。

4 圆度误差的评定

4.1 评定中心

本标准规定以下列任一圆心（评定基准圆的中心）得出的被测零件轮廓的最大半径和最小半径之差来确定被测截面的圆度误差。

- a. 最小区域圆圆心（MZC）（参见图 6）；
- b. 最小二乘方圆圆心（LSC）（参见图 7）；
- c. 最小外接圆圆心（MCC）（参见图 8）；

d. 最大内接圆圆心 (MIC) (参见图 9)。

注：使用体现零件安装偏心的记录图形时，零件对仪器轴线应有足够好的同心（参见附录 A、附录 E）。

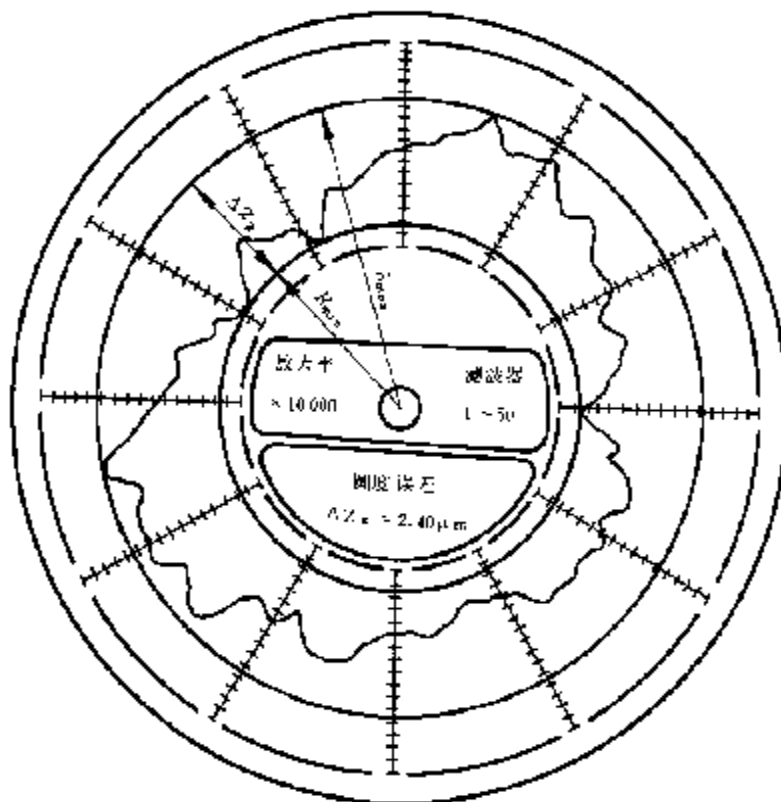


图 6 以最小区域圆圆心评定圆度误差 ΔZ_z

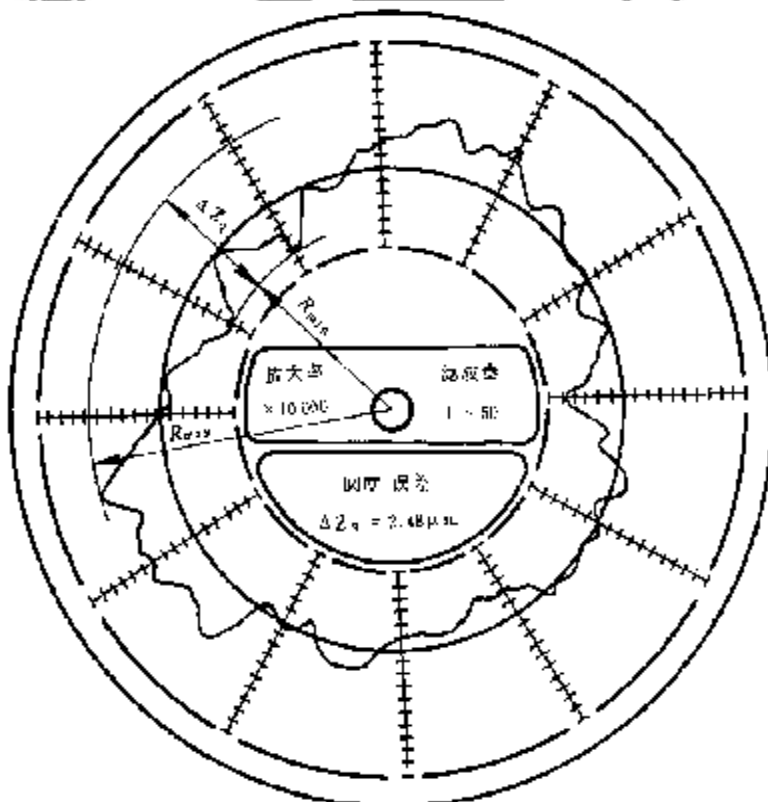


图 7 以最小二乘圆圆心评定圆度误差 ΔZ_q

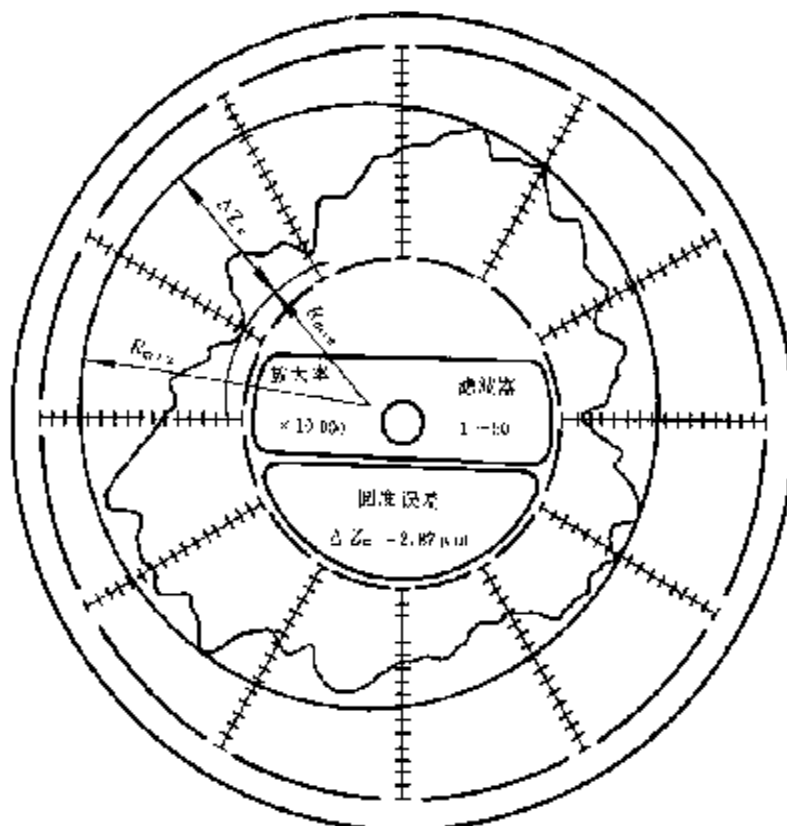


图 8 以最小外接圆圆心评定圆度误差 ΔZ_c

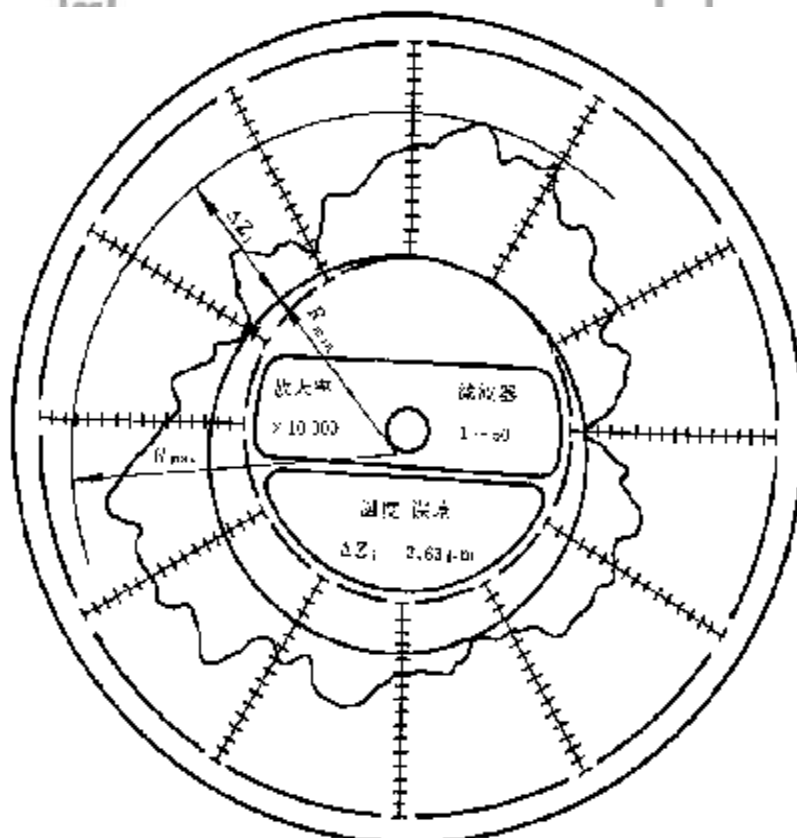


图 9 以最大内接圆圆心评定圆度误差 ΔZ_i

4.2 评定代号

评定代号由 Δ Z 加上表示相应评定中心的一个角标字母构成，见表。

代 号	评定中心	角标字母
Δ Z _z	最小区域圆圆心	z
Δ Z _q	最小二乘方圆圆心	q
Δ Z _c	最小外接圆圆心	c
Δ Z _i	最大内接圆圆心	i

4.3 测量要求

4.3.1 一般测量条件

当采用 GB 1182—80 方法标注圆度公差时 (图 10)，规定：圆度误差一般按 Δ Z_z 评定，测量时，仪器的频率响应范围为 1~50upr。

4.3.2 特定测量条件

对特定要求的测量条件，应在按 GB 1182—80 规定注法的公差框格下方按顺序分别标注（或部分标注）以下内容 (图 11)：

评定代号/测量时仪器的频率响应范围/触头形状及半径

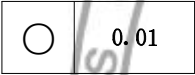
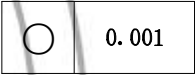


图 10



Δ Z_q/150/柱形 r2.5

图 11

附录 A

圆 度 测 量

(参考件)

A.1 概述

本附录在仪器的调整和测量方面给以一般性指导。

A.1.1 被测零件必须调整,控制安装偏心在规定的范围内(见 E.2.2),以避免过量的偏心畸变。被测零件轴线应平行于仪器回转轴线,以避免过量的倾斜误差(见 A.1.4)。

A.1.2 在偏心方向,偏心图形的半径并未因偏心而变化,但在垂直方向的半径略有变化,其变化量与偏心量的平方成正比(见图 A1)。

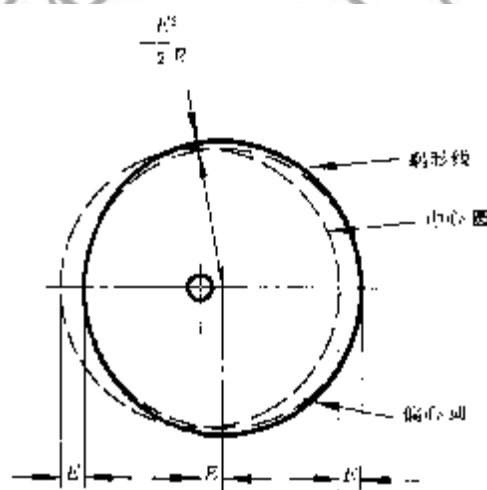


图 A 1 偏心对图形的影响

E —偏心量; R —图形半径

理想圆的偏心图形为蜗形线,然而当偏心量很小时,蜗线形状几乎不明显。现已广泛地使用电子学方法进行补偿,并正在实现用数字修正来消除畸变。

某些畸变是由于极坐标图本身的原因,因为记录图上仅对零件的径向变化和偏心作高频放大,而对半径本身并未进行相应的放大。

A.1.3 分布在周期性变化轮廓上的波峰间的周向距离大于波谷间的距离,而实际零件上的差别可能是很小的,甚至可以忽略。为避免造成错觉,从图形中心测量的波峰与波谷半径的比例不能太大(见 E.2.1)。

A.1.4 被测零件轴线对回转轴线的倾斜将使理想圆柱体出现椭圆。图形上直径的变化由下式给出:

$$MD (1 - \sec \theta)$$

式中: D ——零件直径(见图 A 2);

θ ——倾斜角(见图 A 2);

M ——放大倍数。

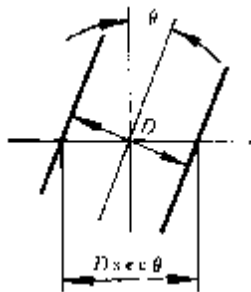


图 A 2 零件轴线倾斜的影响

反之，适当的倾斜能使椭圆出现正圆。

A. 1.5 图形记录和读极坐标图的规则由附录 E 给出。

A. 2 测量方向

A. 2.1 当零件是圆柱体时，其圆度在垂直于仪器的回转轴线的横截面中测量，测量方向垂直于该轴线，被测量和描绘的轨迹轮廓即为该被测表面横截面的轮廓。

A. 2.2 当零件是圆锥面和环形曲面时，应根据零件的功用来确定测量方向，图 A 3 表示被测面为一圆锥面，如果要求测量方向垂直于被测表面，则被测轮廓为由假想圆锥面（与被测圆锥面共轴，且该假想圆锥面的母线与被测圆锥面的素线垂直，由该母线所形成的轨迹即为假想圆锥面）与被测圆锥面相截交而形成，测量方向为沿着该假想圆锥面母线的方向，测得值也是该方向上轮廓的变化量，当需要用径向值表达时，其误差区域宽度必须乘以零件圆锥半角的正割（见图 A 3）。

对于环形曲面（如轴承滚道）的测量方向应按接触头接触部位的切线所形成的圆锥来处理（见图 A 4）。

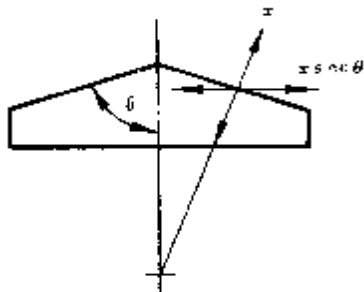


图 A 3 圆锥面测量方向的选择

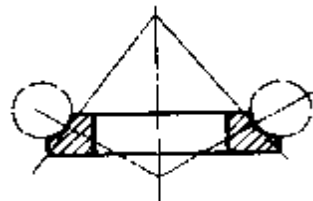


图 A 4 轴承滚道测量方向的选择

A. 3 圆度、粗糙度和触头半径的关系——关于粗糙度特征的考虑

A. 3.1 加工遗留的痕迹（通常是表面粗糙度特征的周向成分）是否应计入圆度的评定区域必须反映出零件的用途。例如与相同形状的零件表面作滑动接触应区别于作滚动接触。仪器计入或除去粗糙度特征，将极大地影响圆度值。

图 A 5 (a) 与 A 5 (b) 所表示的轮廓，虽然它们有相同的误差区域宽度，但其影响效果却不一样。如果两个图形的截面都是滚珠轴承滚道，则图 A 5 (a) 会产生高频振动并且造成噪音，而图 A 5 (b) 则较平稳。但如果是轴、心轴、活塞等的轮廓时，则图 A 5 (a) 反而较好。



图 A5 不同表面特征的轮廓图形

对于零件的几何形状、机床的几何精度，则有效地评定应不包含粗糙度。当粗糙度足以使圆度失真时，粗糙度必须分离。

A.3.2 粗糙度特征的周向成分的影响程度取决于表面特征的特点（方向、高度、间距）、触头尺寸及仪器频率响应的综合结果。

A.3.3 用 10mm 半径的触头测量圆柱形零件将抑制大部分通常遇到的磨削和车削痕迹的轴向成分，但抑制残余周向成分或轴向纹理（挤压、拉削）的表面粗糙度的效率很低，其原因是难以获得周向曲率的较好一致性。

图 A6 表示出半径大小不同的触头如何影响带有加工痕迹的圆柱体的测量。小半径尖触头由截面一侧波峰处移到截面另一侧波谷处，再回到原波峰处，如果加工痕迹的形状恰为规则正弦波，则触头的轨迹为一理想圆。其次，如用大半径斧形触头，则不论加工痕迹如何，记录图形反映被测截面的实际几何形状。

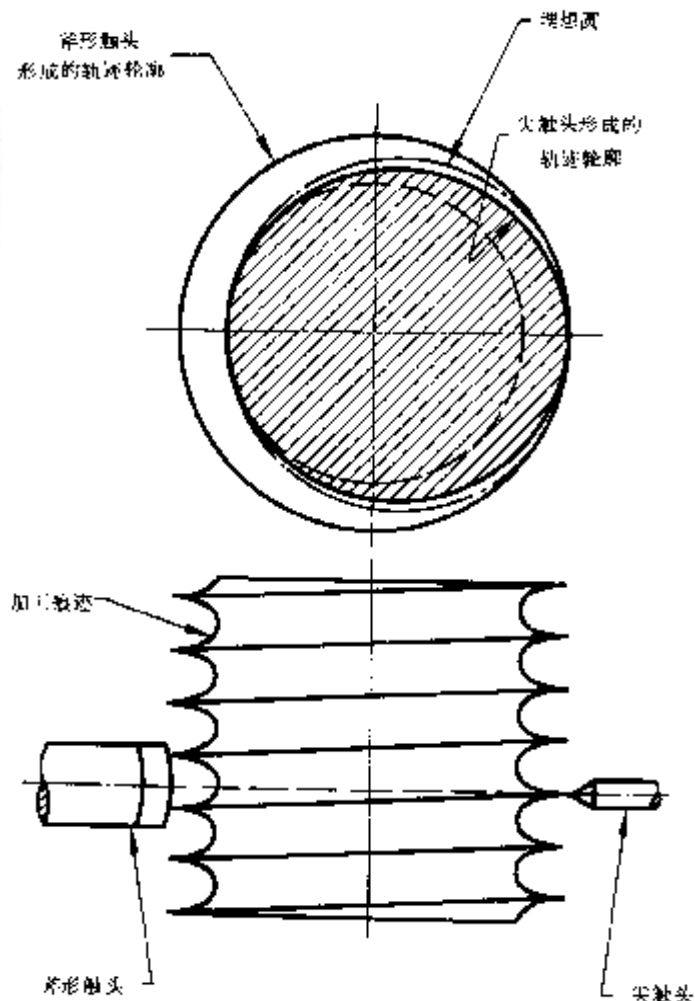


图 A6 接触式测量时触头半径的影响

图 A7 是由普通车床切削零件的轨迹轮廓，局部放大部分表示出刀具产生的切削痕迹。图中 A 为用斧形触头所描绘的轨迹，B 为用针状触头所描绘的轨迹，触头调整成与圆柱体同一截面的光滑部分接触。这样，除在两曲线相重的最高波峰处外，由针状触头描绘的曲线应位于由斧形触头所描绘的曲线的内侧。由斧形触头描绘的外轮廓轨迹，在低放大倍率下，可用作圆度的评定，而针状触头得到的被测截面的轨迹，造成了圆度的明显失真。

半径小于 0.8mm 的球形触头，例如 0.25mm，会整个进入常用 0.8 mm 半径的刀具所产生的切削痕迹中，并很可能进入磨削造成的痕迹中，但仍能抑制由研磨、珩磨和超精加工产生的超精细表面特征。

使用具有大轴向半径、小周向半径的触头是有好处的，因此，常使用斧形触头。

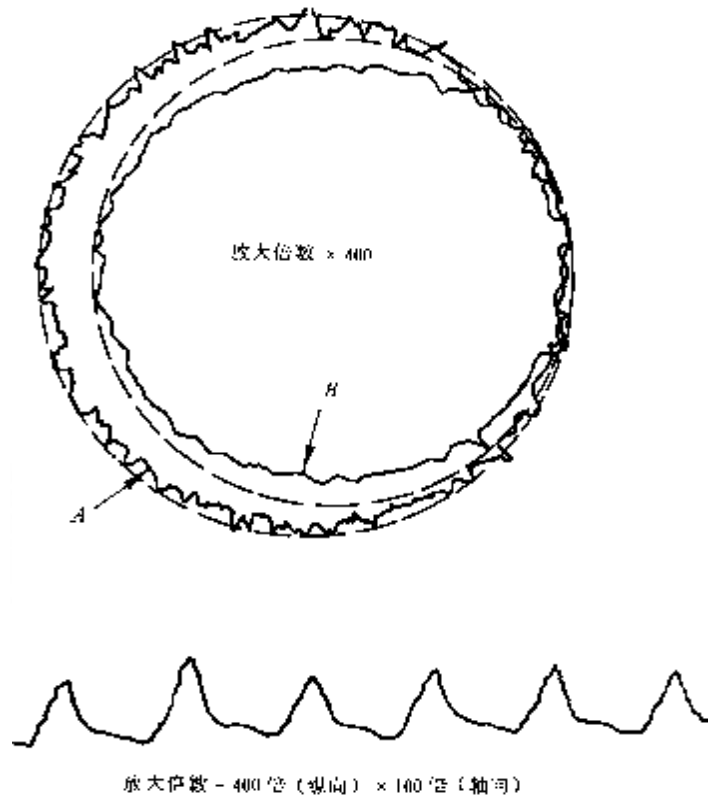


图 A7 由斧形和尖形触头形成的轨迹轮廓

A. 3. 4 无论是使用尖触头还是钝触头，使用滤波器来抑制高频周向分量是有效的。

A. 3. 5 选择测量沟槽（如滚珠轴承滚道）的触头半径不仅应根据零件的表面粗糙度，而且还应注意测头在沟槽中的位置。

从图 A8 可以看出，如果触头中心偏离测量方向 xx ，则当偏离量 y 随触头的旋转而变化时，将产生测量误差。出现误差的可能性随着触头与零件的半径差的减小而增大。

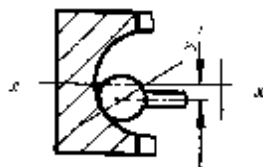


图 A8 偏离量变化引起测量误差

附录 B
校 准
(参考件)

B.1 径向放大倍率的校准

静态校准可以用任何方便并精确地使仪器触头位移的方法实现。例如，用螺旋微动杠杆或量块。

动态校准可以用圆周上有一个或数个小平面的圆柱体进行，见图 B1。因为一般平面所对应的圆周角较小，已接近仪器的高频响应，所以，当使用该圆柱体来校准仪器的特性参数时，其小平面必须有适度的尺寸（图 B1 中尺寸 x ），并应经过检定。

轴向放大率的校准

校准轴向放大率通常用静态方法，并使用与径向放大率相同的校正装置。

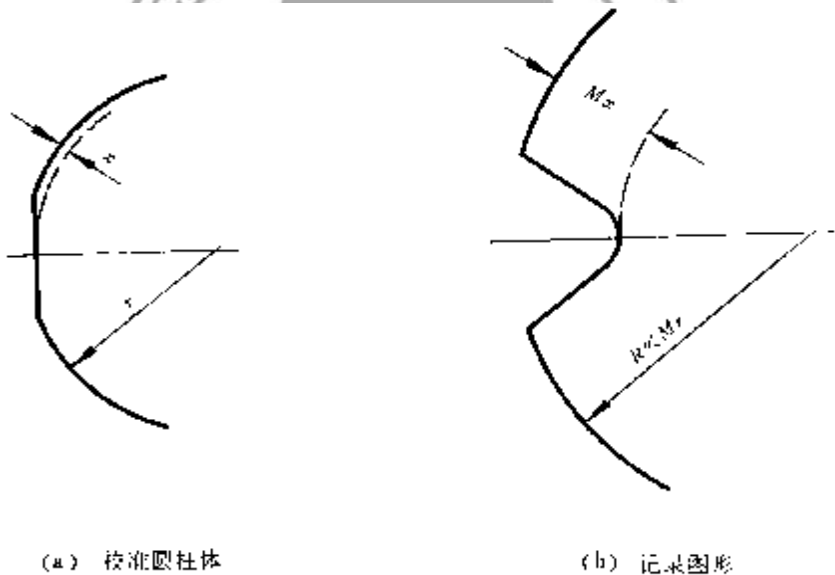


图 B1 动态校准

r —校准圆柱体半径； x —小平面矢高； M —校准时仪器放大倍数； R —记录图形半径

附录 C

主轴系统误差的确定

(参考件)

C.1 概述

如果仪器的主轴误差充分重复,则主轴的系统误差就能被确定,并可用来修正轨迹轮廓。有些仪器能自动进行主轴误差修正,因此显示轮廓和输出数据自动地消除了仪器的主轴误差。

C.2 确定主轴误差的方法

把主轴误差从主轴和试件的合成误差中分离出来有二种方法,即为“多步法”和“反向法”。

两种方法均假定,主轴误差充分重复,并且在适宜的环境下,通过多次测量,用误差平均的方法能使随机误差降至最小。

C.2.1 “多步法”可应用于径向、轴向误差及其综合误差的测量。在“多步法”测量中,试件放置在分度指示台上,当有效测量开始时,分度指示台保持静止状态,因此分度指示台的旋转精度是不重要的。记录并存储多转测量数据,例如 4 转,取平均,以尽可能减少随机误差的影响。然后,试件转过一定的角度,例如 30° ,并再次记录和存储测量数据,接着试件又进入下一个定位位置。这一过程是连续的,直至分度指示台指示出试件旋转 12 步(即转过 360° ,回到起始位置)。如再增加测量数据,则可以用来判别仪器的系统漂移。

在每个定位位置测量时,其测量数据将是主轴误差和试件圆度的合成。图 C1 表示出在不同的定位位置,误差以不同的相位合成。分度指示台相对于仪器主轴旋转 360° 后,将得到一系列完整的矩阵方程,用计算机求解该矩阵,并且打印出所分离的仪器主轴误差和试件误差或通过数模转换后将误差记录在图上。

C.2.2 “反向法”仅应用于径向误差测量,测量时,以尽可能高的仪器放大倍率记录试件的轮廓图形,然后在同一记录纸上记录试件和仪器传感器相对于主轴转位 180° 后测得的轮廓图形,此两轮廓图形的等分点的轨迹为试件的显示轮廓,主轴误差可用类似方法获得,但在记录第二轮廓图形时,需改变仪器的信号方向。其原理类似于解 $x+y$ 和 $x-y$ 形成的二个方程。

图 C2 表示出从合成误差中分离出来的主轴误差和试件的圆度误差。

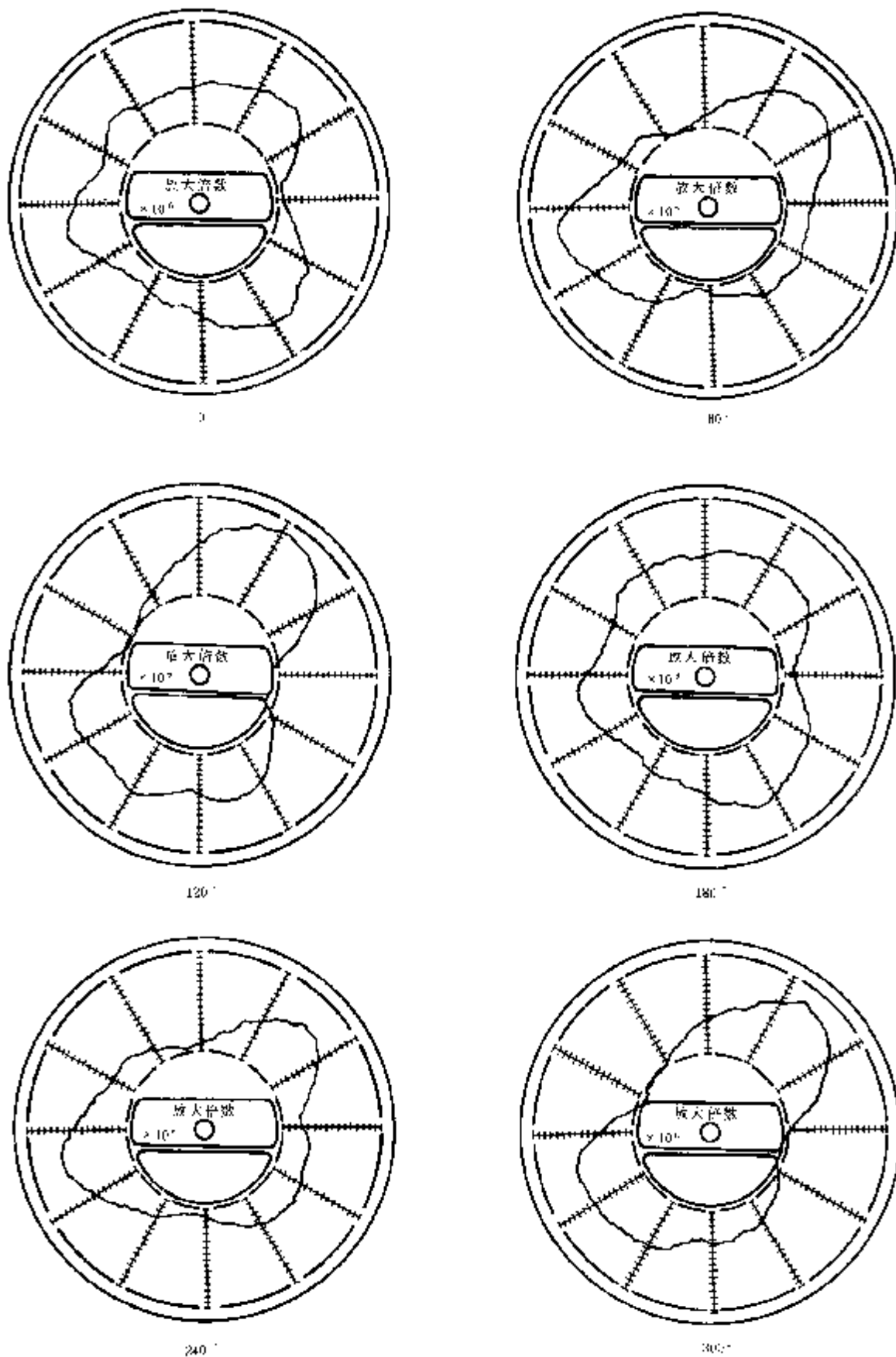


图 C1 主轴误差和试件的圆度误差在不同定位位置的合成

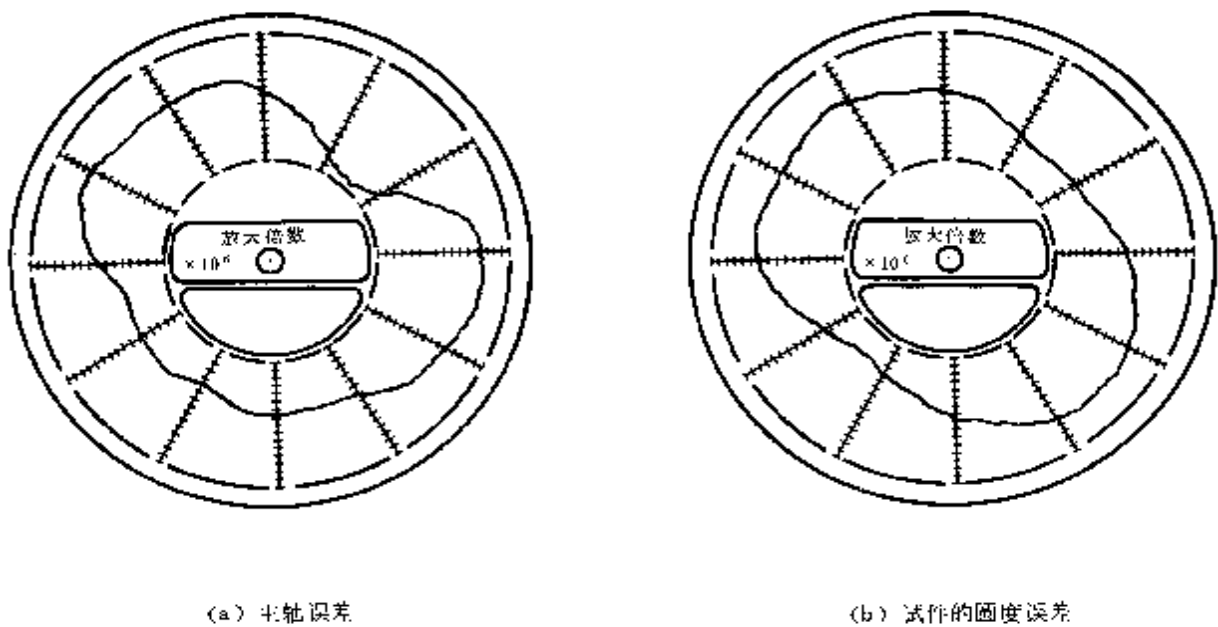


图 C2 分离出来的主轴误差和试件的圆度误差

附 录 D
最小二乘方圆和圆心的确定
(参考件)

从记录中心画足够数量的偶数个等间距的径向线，图 D1 中用标号为 1 至 12 表示的径向线。确定互成直角的两条线作直角坐标系中的 X 轴和 Y 轴，径向线与截面图形的交点 P₁ 至 P₁₂ 各点到坐标轴的距离在 X、Y 轴上量取，并取正负号计算。

最小二乘方圆圆心偏离记录中心的距离 a、b 按以下近似公式计算；

$$a=\frac{2\sum x}{n}$$

$$b=\frac{2\sum y}{n}$$

式中：Σx——所有 x 值的总和；
Σy——所有 y 值的总和；
n——径向线数。

按下式求出最小二乘方圆的半径 R

$$R=\frac{\sum r}{n}$$

式中：Σr——各 P 点距记录中心的径向距离之和。

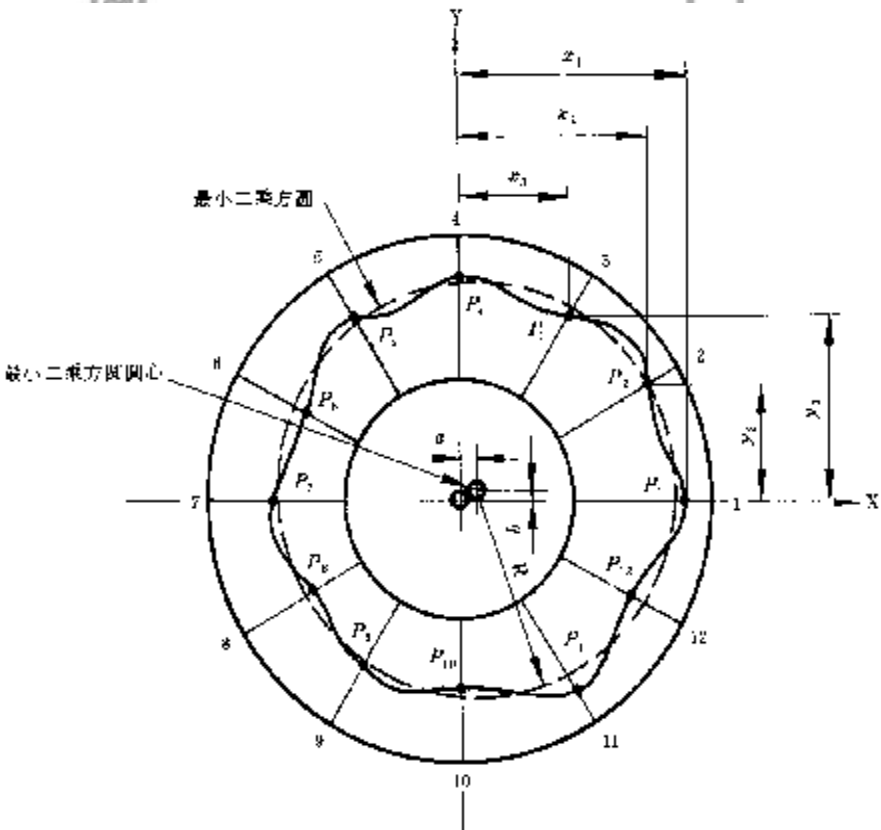


图 D1 最小二乘方圆及圆心位置的确定

附录 E

图形记录和读极坐标图的规则

(参考件)

E.1 概述

E.2 和 E.3 中规定的规则可作一般应用。

E.2 图形记录

E.2.1 为避免由于极坐标图形记录造成的过分畸变，一般显示轮廓的轨迹应分布在轮廓图形平均半径的 $1/2$ 范围内 (见图 E1)。

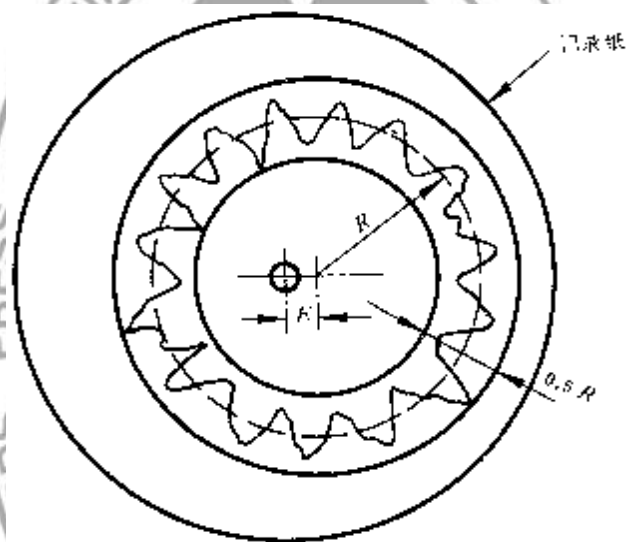


图 E1 轮廓轨迹分布示意图

E —安装偏心； R —平均半径

E.2.2 对于一般精度的测量，偏心 E 应限制在大约轮廓图形平均半径的 15% 以内，高精度测量应限制在 7% 以内。

E.3 读图

E.3.1 角度关系应从记录中心读取。例如试件上成 180° 的点与通过记录中心相隔 180° 的点相对应 (见图 E2)。

E.3.2 直径的变化要通过记录中心来评定 (见图 E3)。

E.3.3 半径的变化从轮廓图形中心来评定，但它受到由许可偏心引起的误差的影响。

E.3.4 应该注意，径向变化被高倍率放大而试件的实际半径没有相应放大，所以表面凸起部分在显示轮廓的圆周上可能出现凹形 (见图 E4)。

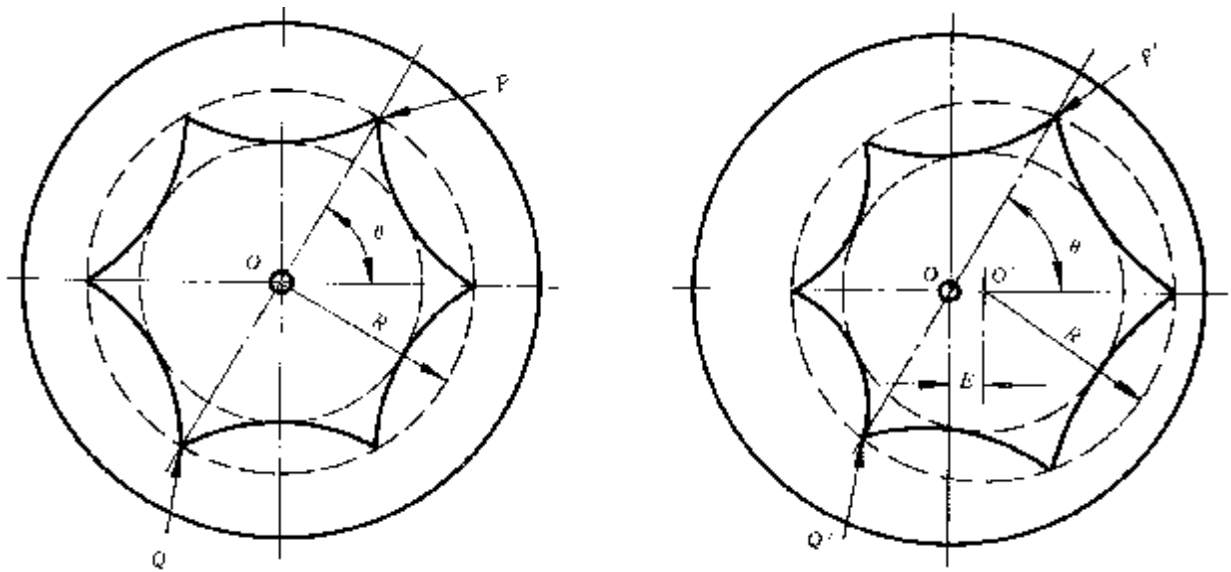


图 E2 角度关系示意图
 O —记录中心； O' —图形中心

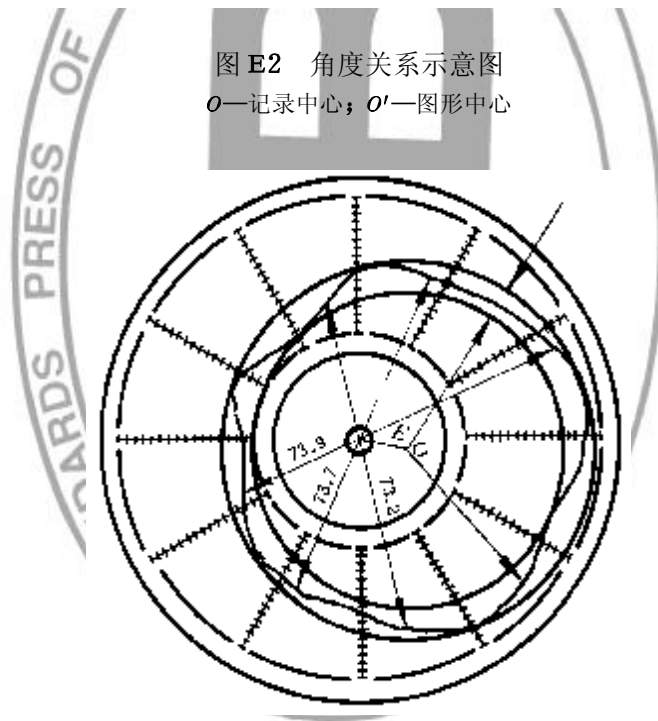
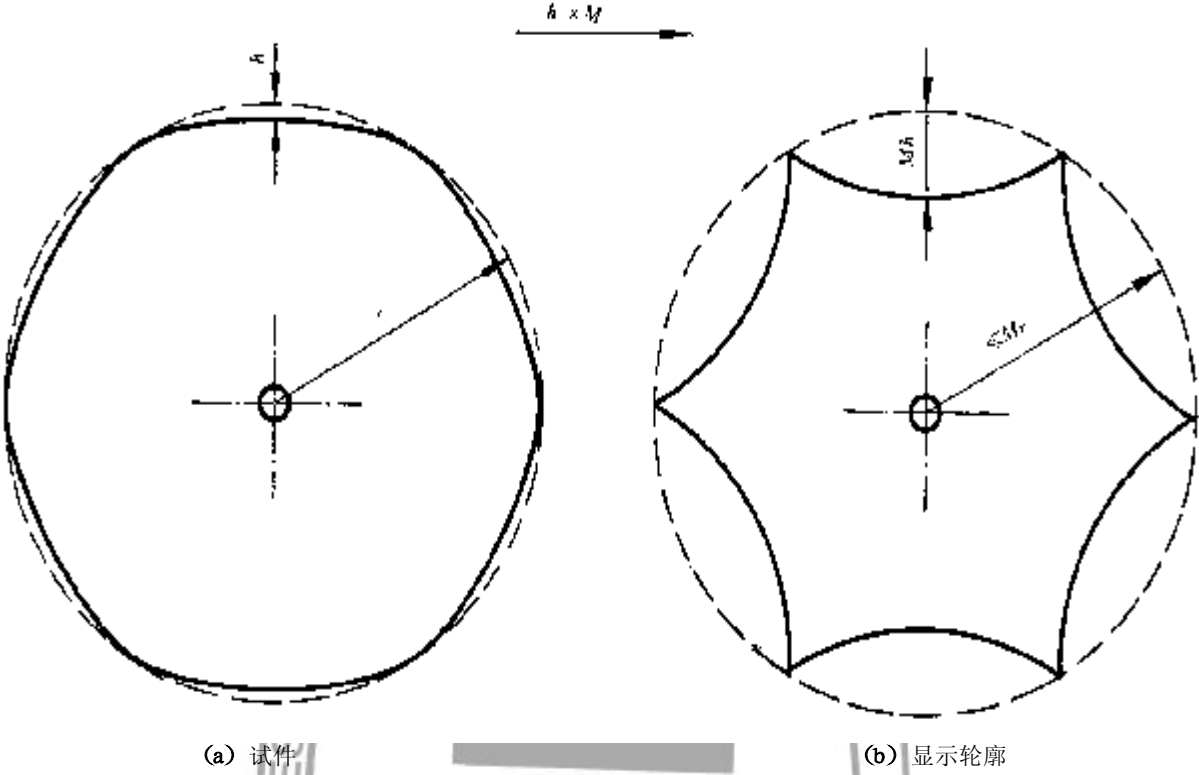


图 E3 直径变化示意图
 O' —图形中心； E —偏心量



(a) 试件

(b) 显示轮廓

图 E4 畸变示意图

M —放大倍数； h —试件半径变化量； r —试件理想圆半径

附加说明：

本标准由中华人民共和国机械工业部提出，由机械工业部标准化所归口。
本标准由机械工业部标准化所负责起草。
本标准主要起草人陈月祥、胡林、张惠珍。