ICS 17.040.10
J 04

中华人民共和国国家标准

GB/T 11336—2004
代替 GB 11336—1989

直线度误差检测

Measurement of departures from straightness

2004-11-11 发布 2005-07-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会 发布

前　　言

本标准代替 GB/T 11336—1989《直线度误差检测》。

本标准与 GB/T 11336—1989 相比主要变化如下：

——规范性引用文件考虑了最新标准的制修订情况；

——术语定义根据相关标准的新概念，作了适当的补充修改；

——删掉了原标准的两个参考件附录：附录 A“直线度误差的测量误差分析”和附录 B“直线度误差测量应用示例”。

本标准由全国产品尺寸和几何技术规范标准化技术委员会提出并归口。

本标准起草单位：机械科学研究院、中国计量科学研究院。

本标准主要起草人：李晓沛、张恒。

本标准所代替标准的历次版本情况为：

——GB/T 11336—1989。

直线度误差检测

1 范围

本标准规定了直线度误差检测的术语定义、评定方法、检测方法和数据处理方法。

本标准适用于机械产品中零件要素的直线度误差检测。

本标准是对 GB/T 1958 中直线度误差检测的具体规定。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB/T 1182 形状和位置公差 通则、定义、符号和图样表示法(GB/T 1182—1996,eqv ISO/DIS 1101:1996)

GB/T 1958 形状和位置公差 检测规定

GB/T 8069—1998 功能量规

GB/T 18780.1 产品几何量技术规范(GPS)几何要素 第 1 部分:基本术语和定义(GB/T 18780.1—2002,idt ISO 14660-1:1999)

3 术语和定义

GB/T 1182、GB/T1958 和 GB/T 18780.1 中确立的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1

理想直线 straight line

具有几何学意义的直线。

3.2

实际直线 real line

零件上实际存在的直线(参见 GB/T 18780.1 的 2.4 工件实际表面)。

3.3

测得直线(提取直线) measured line(extracted line)

测量时按规定方法，由实际直线提取有限数目的点所形成的直线(参见 GB/T 18780.1 的 2.5 提取组成要素)。

注:在评定直线度误差时，用测得直线代替实际直线。

3.4

直线度误差(值) departure from straightness

实际直线对其理想直线的变动量，理想直线的位置应符合最小条件。即用直线度最小包容区域的宽度 f 或直径 ϕf 表示的数值，见图 1～图 3。直线度误差分为：

a) 给定平面内的直线度误差(见图 1)；

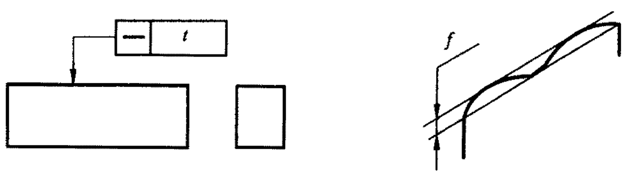
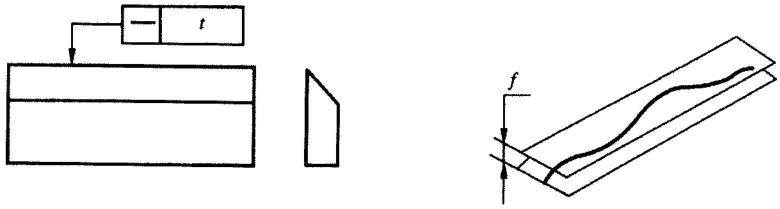
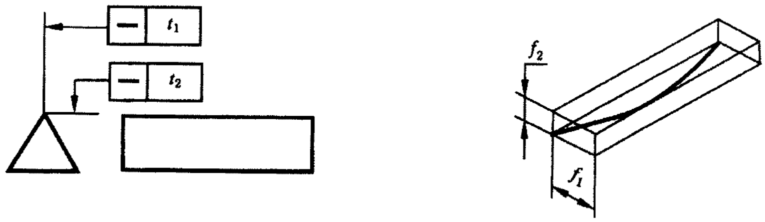


图 1

b) 给定方向上的直线度误差(见图 2);



a) 给定一个方向



b) 给定两个方向

图 2

c) 任意方向上的直线度误差(见图 3)。

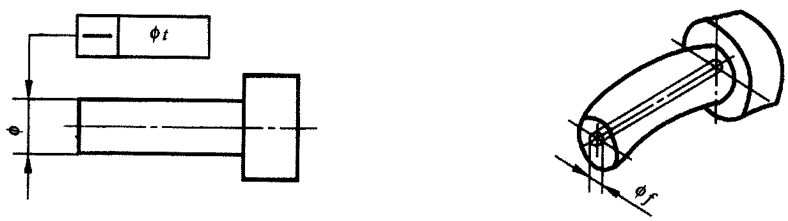


图 3

3.5

直线度最小包容区域　minimum zone of straightness

包容实际直线,且具有最小宽度的两平行直线或两平行平面之间的区域,或具有最小直径的圆柱面内的区域。

3.6

测量基线　reference line for assessment of departure from straightness

在测量过程中,获得测量值的参考线。

3.7

评定基线　reference line for assessment of departure from straightness

评定直线度误差的理想直线。

3.7.1

最小区域线　minimum zone line

构成直线度最小包容区域的两平行理想直线之一或轴线。

注:当用两平行平面构成最小包容区域时,最小区域线是平行平面在平行于给定方向平面上的投影线之一。

3.7.2

最小二乘中线 l_{LS}　least squares mean line

使实际直线上各点到该直线的距离平方和为最小的一条理想直线。

3.7.3

两端点连线 l_{BE}　two endpionts line

实际直线上首末两点的连线。

3.8

最小二乘中线包容圆柱面　cylindrical envelope with the least squares mean line

在评定任意方向直线度误差时，为包容实际直线，且轴线的方向与最小二乘中线 l_{LS}平行（或重合）并具有最小直径 ϕf_{LS}的圆柱面。

3.9

两端点连线包容圆柱面　cylindrical envelope with the least squares mean

在评定任意方向直线度误差时，为包容实际直线，且轴线的方向与两端点连线 l_{BE}平行（或重合）并具有最小直径 ϕf_{BE}的圆柱面。

3.10

极点　extreme point

在最小包容区域线（或面）上的测得点。

4　评定方法

直线度误差的评定方法有：最小包容区域法、最小二乘法和两端点连线法。其中最小包容区域法的评定结果小于或等于其他两种评定方法。

4.1　最小包容区域法及其判别法

4.1.1　最小包容区域法

以最小区域线 l_{MZ}作为评定基线的方法，按此方法求得直线度误差值 f_{MZ}。

4.1.1.1　对给定平面（或给定方向）的直线度误差（见图4）：

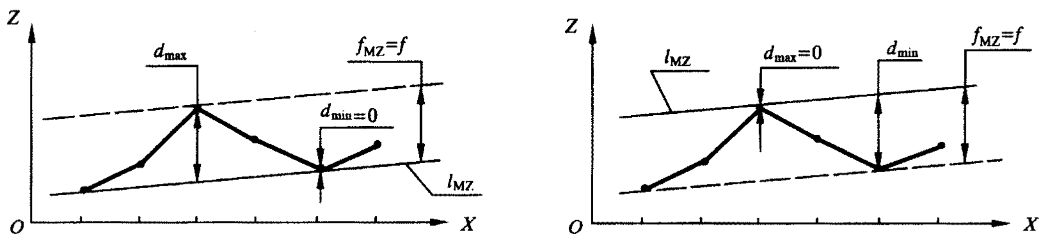


图 4

$$f_{MZ} = f = d_{max} - d_{min} \quad \cdots\cdots(1)$$

式中：

d_{max}、d_{min}——各测得点中相对最小区域线 l_{MZ}的最大、最小偏离值。

d_i 在 l_{MZ}上方取正值，下方取负值。

4.1.1.2　对任意方向直线度误差（见图5）：

$$f_{MZ} = \phi f = 2d_{max} \quad \cdots\cdots(2)$$

式中：

d_{max}——测得点到最小区域线 l_{MZ}的最大距离值。

4.1.2　最小包容区域判别法

4.1.2.1　在给定平面内，由两平行直线包容实际直线时，成高—低—高或低—高—低相间接触形式之一（见图6）。

4.1.2.2　在给定方向上，由两平行平面包容实际直线时，沿主方向（长度方向）上成高—低—高或低—高—低相间接触形式之一（见图7），也可按投影进行判别，其投影方向应垂直于主方向及给定方向。

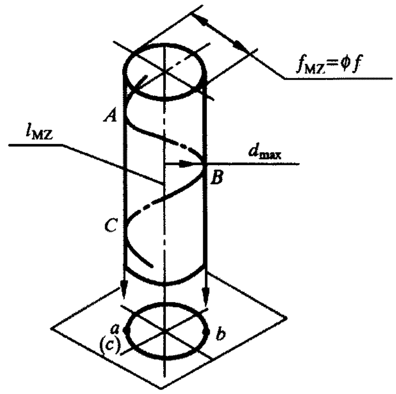


图 5

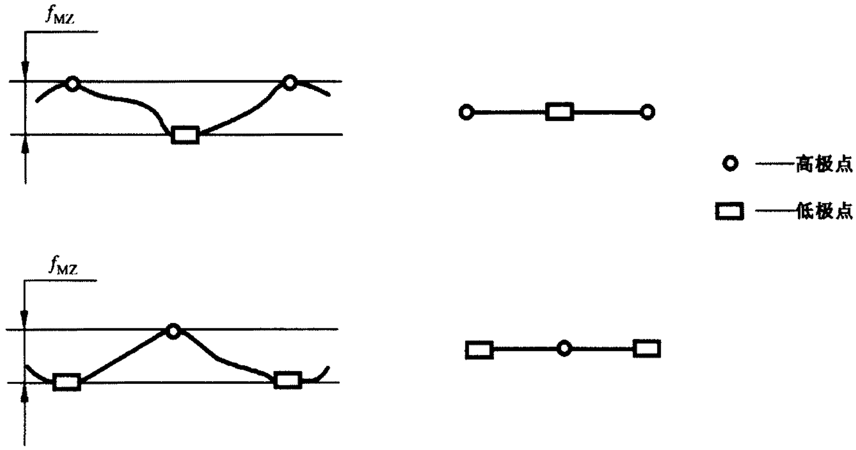


图 6

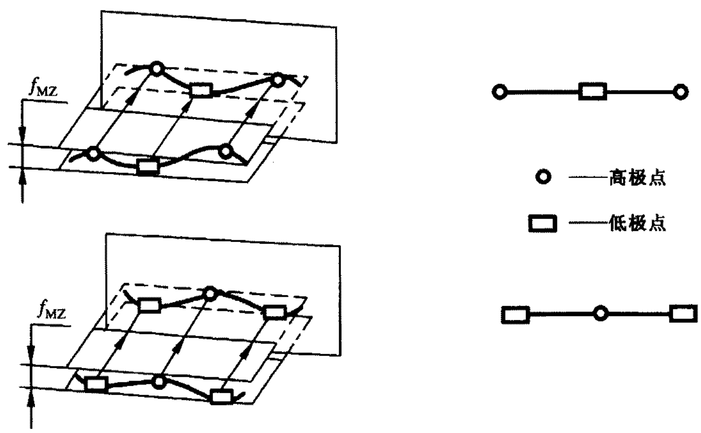


图 7

4.1.2.3 在任意方向上，由圆柱面包容实际线时，成下列三种形式之一：

a) 三点形式

三点在同一轴截面上，且在轴向相间分布(见图 8)。

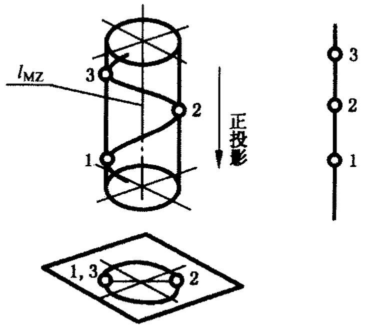


图 8

注：图中 1、3 两点沿轴线方向的投影重合在一起，即：1、3 两点在一条素线上，且 2 点在 1、3 两点之间。

b) 四点形式(见图 9)。

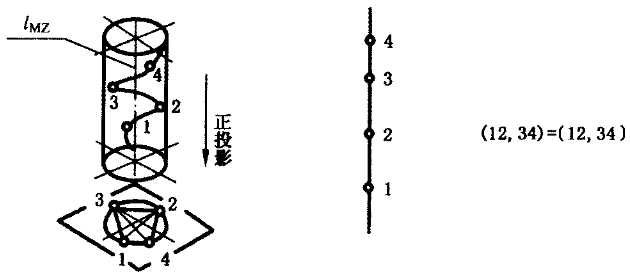


图 9

c) 五点形式(见图 10)。

说明：

1) 上列各图中，在直线上有编号的点"○"表示包容圆柱面上的测得点在其轴线上的投影。

2) 上列各图中，在圆周上有编号的点"○"表示包容圆柱面上的测得点在垂直于轴线的平面上的投影，其编号与直线上点的编号对应。

3) $(12,34)=\dfrac{\overline{13}\cdot\overline{24}}{\overline{23}\cdot\overline{14}}$，其中$\overline{ab}$表示图中直线上两个编号点之间的距离。

4) $〔12,34〕=\dfrac{\sin\hat{13}\cdot\sin\hat{24}}{\sin\hat{23}\cdot\sin\hat{14}}$，其中 ab 表示图中圆周上两个编号点对圆心的张角。

5) 四点形式中的(12,34)=〔12,34〕，

$$即：\left|\frac{\overline{13}\cdot\overline{24}}{\overline{23}\cdot\overline{14}}\right|=\frac{\sin\hat{13}\cdot\sin\hat{24}}{\sin\hat{23}\cdot\sin\hat{14}}$$

上述等式成立，相当于图 11 所示的作图成立。

将图 11 中圆周上的四个点与圆心连接并延长，作任意一条直线与这四条线相交于 1′、2′、3′、4′；将具有相应编号直线移向上图，使其点 1 与点 1′重合，若 2、2′连线，3、3′连线，4、4′连线的延长线汇交于一点，那么上述等式成立，即圆柱面包容区域的直径已为最小。

6) 五点形式还有其他的变形形式，在此从略。

4.2 最小二乘法及其判别法

4.2.1 最小二乘法

以最小二乘中线 l_{LS}作为评定基线(或基线方向)的方法，按此方法求得直线度误差值 f_{LS}。

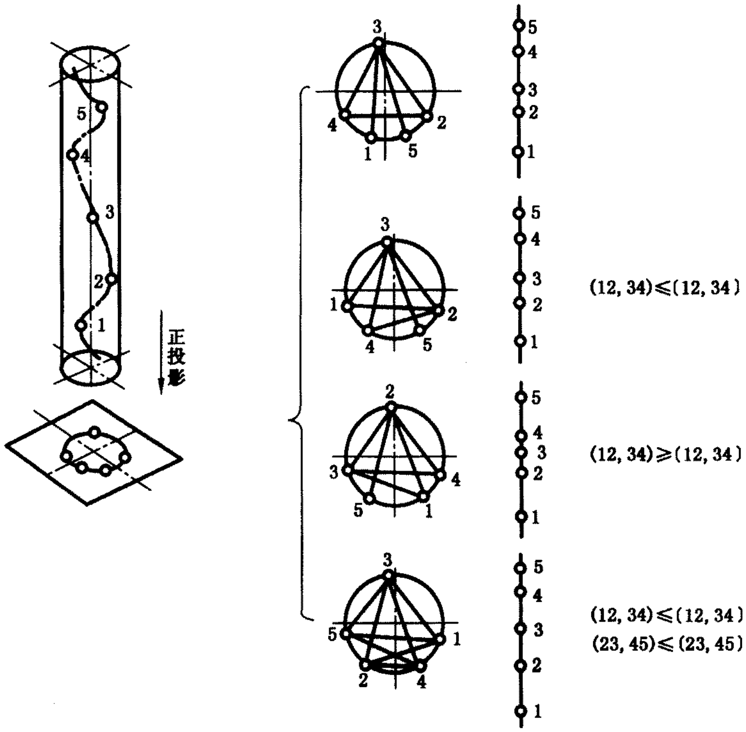


图 10

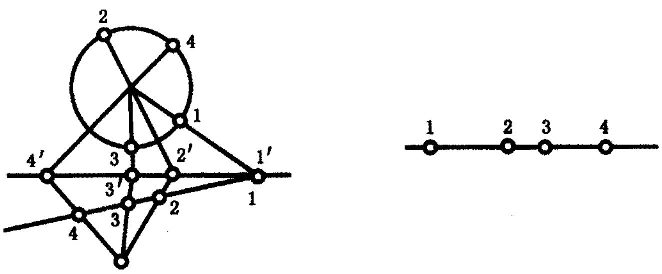


图 11

4.2.1.1 对给定平面(或给定方向)的直线度误差(见图 12)：

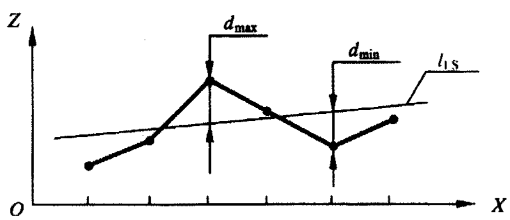


图 12

$$f_{LS} = d_{max} - d_{min} \quad \cdots\cdots(3)$$

式中：

d_{max}、d_{min}——测得点相对最小二乘中线 l_{LS}的最大、最小偏离值。

d_i 在最小二乘中线 l_{LS}上方取正值，下方取负值。

4.2.1.2 对任意方向的直线度误差(见图 13)：

$$f_{LS} = \phi f_{LS} \quad \cdots\cdots(4)$$

式中：

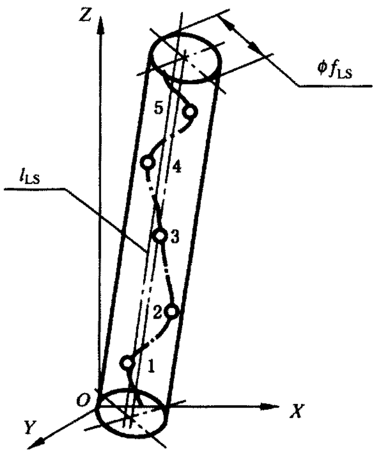


图 13

ϕf_{LS}——最小二乘中线包容圆柱面的直径。

4.2.2 任意方向直线度误差的判别法

用轴线平行于最小二乘中线 l_{LS} 的圆柱面包容实际直线时，成下列两种形式之一：

a) 三点形式(见图 14)。

b) 两点形式(见图 15)。

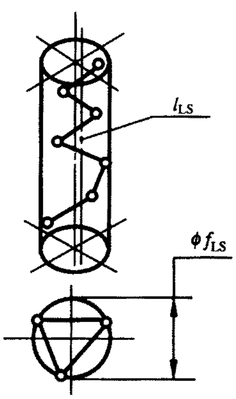


图 14

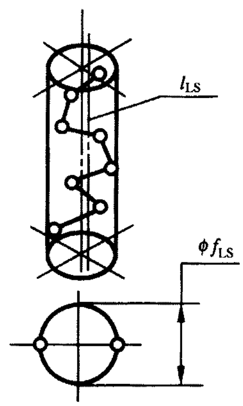


图 15

在实际应用中，可按式(5)进行简化计算(见图 16)。

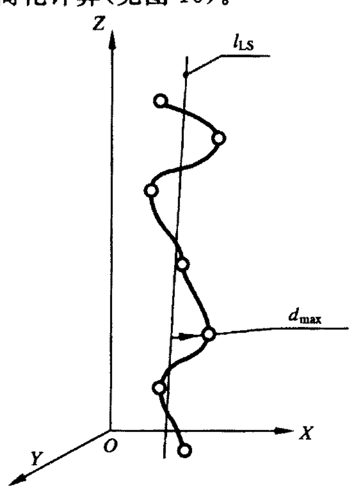


图 16

$$f_{LS} \approx 2d_{max} \quad \cdots\cdots(5)$$

式中：

d_{max}——测得点到最小二乘中线 l_{LS} 距离中的最大值。

4.3 两端点连线法及其判别法

4.3.1 两端点连线法

以两端点连线 l_{BE} 作为评定基线(或基线方向)的评定方法，按此方法求得直线度误差值 f_{BE}。

4.3.1.1 对给定平面(或给定方向)的直线度误差(见图17)：

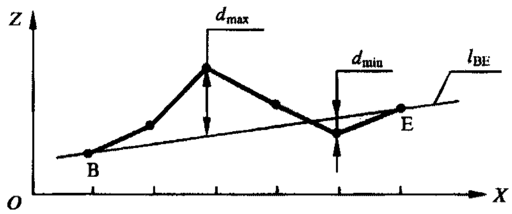


图 17

$$f_{BE} = d_{max} - d_{min} \quad \cdots\cdots(6)$$

式中：

d_{max}、d_{min}——测得点相对两端点连线 l_{BE} 的最大、最小偏离值。

d_i 在两端点连线 l_{BE} 上方取正值，下方取负值。

4.3.1.2 对任意方向的直线度误差(见图18)：

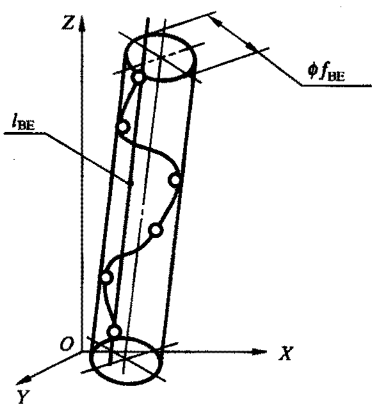


图 18

$$f_{BE} = \phi f_{BE} \quad \cdots\cdots(7)$$

式中：

ϕf_{BE}——两端点连线包容圆柱面的直径。

4.3.2 任意方向直线度误差判别法

用轴线平行于两端点连线 l_{BE} 的圆柱面包容实际直线时，成下列两种形式之一：

a) 三点形式(见图19)。

b) 两点形式(见图20)。

在实际应用中，若测得点在两端点连线的各个方向分布较均匀，则可按式(8)进行简化计算(见图21)。

$$f_{BE} \approx 2d_{max} \quad \cdots\cdots(8)$$

式中：

d_{max}——测得点到两端点连线 l_{BE} 距离中的最大值。

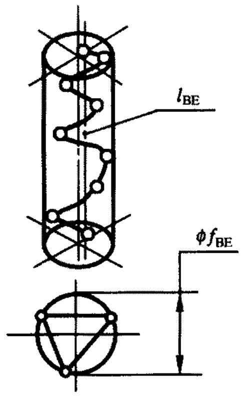


图 19

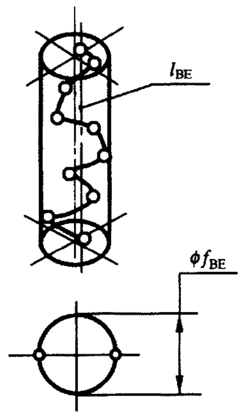


图 20

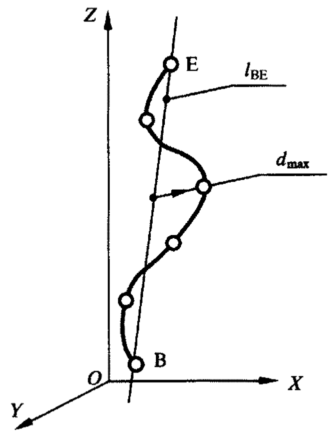


图 21

5 检测方法

5.1 检测方法的分类

本标准中的检测方法按测量原理、测量器具等分类，见图 22。

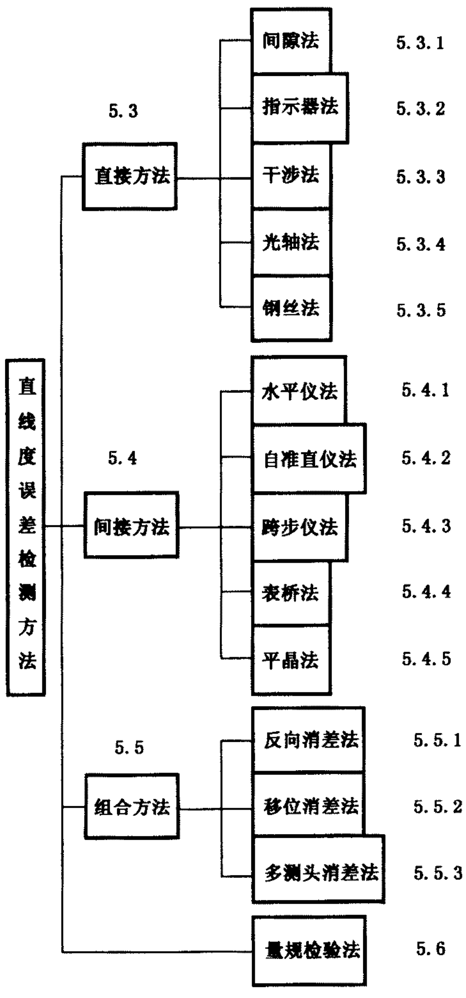
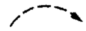
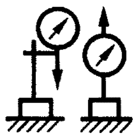


图 22

5.2 常用符号及说明

本标准中所用的各符号及其说明见表 1。

表 1

序号	符　　号	说　　明	序号	符　　号	说　　明
1		平板、平台(或测量平面)	7		连续转动(不超过一周)
2		固定支承	8		间断转动(不超过一周)
3		可调支承	9		旋转
4		连续直线移动	10		指示器或记录器
5		间断直线移动	11		带有指示器的测量架(测量架的符号根据测量设备的用途,可画成其他式样)
6		沿几个方向直线移动			

5.3 直接方法

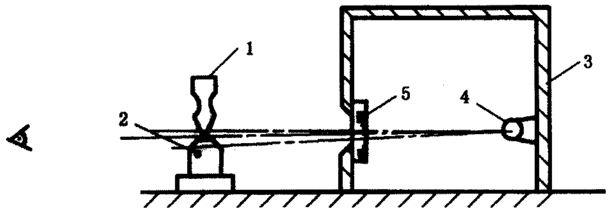
通过测量可直接获得测得直线各点坐标值或直接评定直线度误差值的测量方法。

5.3.1 间隙法

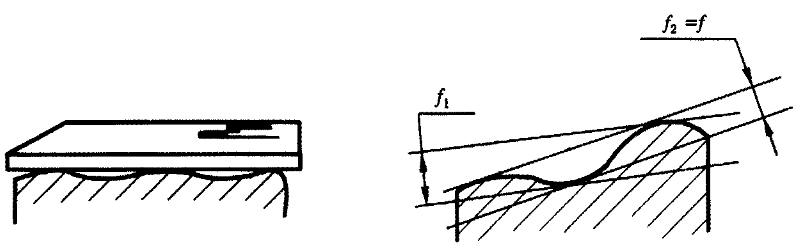
5.3.1.1 将被测直线和测量基线间形成的光隙与标准光隙相比较,直接评定直线度误差值的方法,见图 23。

该方法适用于磨削或研磨加工的小平面及短圆柱(锥)面等的直线度误差测量。

1——样板直尺;
2——被测工件;
3——灯光箱;
4——光源;
5——毛玻璃。

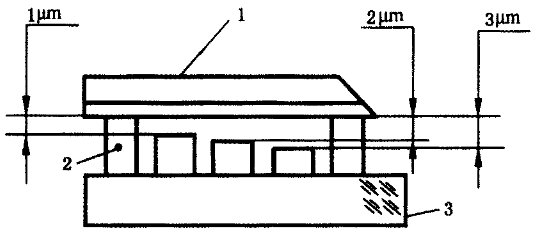


a) 测量原理



b) 使最大光隙为最小

图 23



1——样板直尺；

2——量块；

3——平晶。

c) 标准光隙

图 23(续)

测量步骤：

1) 样板直尺与被测直线直接接触，并置于光源和眼睛之间的适当位置，见图 23a)；

2) 调整样板直尺，使最大光隙尽可能最小，见图 23b)；

3) 与标准光隙相比较，估读出所求直线度误差值。

注 1：测量基准常用样板直尺(刀口尺)、平尺类量具体现；

注 2：标准光隙由样板直尺、量块和平晶组合产生，见图 23c)；

注 3：应在相同条件下观察标准光隙和被测工件的光隙。

5.3.1.2 用量块(或塞尺)测量被测直线和测量基线之间的间隙，直接评定直线度误差值的方法，见图 24。该方法适用于低精度被测零件的直线度误差测量。

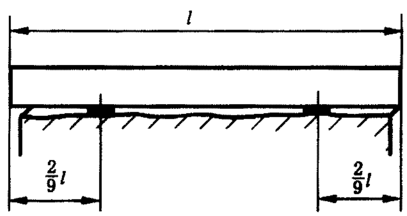


图 24

测量步骤：

1) 将平尺置于被测直线上，并在离平尺两端约$\frac{2}{9}l$ (l 为平尺长度)处垫上等厚量块；

2) 用片状塞规或塞尺直接测出平尺工作面与被测直线之间的距离；

3) 测得的最大距离减等厚量块的厚度即为所求的直线度误差近似值。

注：测量基线常用平尺类量具体现。

5.3.2 指示器法

用带指示器的测量装置测出被测直线相对测量基线的偏离量，进而评定直线度误差值的方法，见图 25～图 27。

该方法适用于中、小平面及圆柱，圆锥面素线或轴线等的直线度误差测量。

5.3.2.1 给定平面线的直线度误差测量

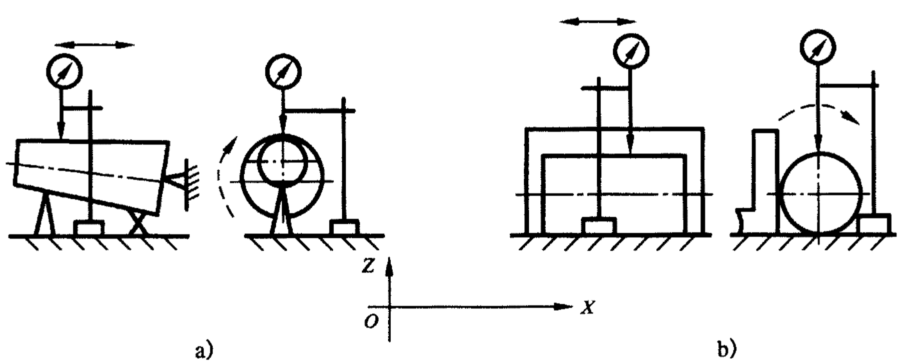


图 25

测量步骤：

1) 将被测直线的两端点连线与测量基线大致调平行；

2) 沿被测直线移动指示器，同时记录各点示值(X_i,Z_i)；

3) 按第 6 章的方法对(X_i,Z_i)进行数据处理，求出直线度误差值；

4) 按上述方法测量若干条素线，取其中的最大值作为被测零件的直线度误差值。

注：测量基线常用平板、精密导轨等体现。

5.3.2.2 对任意方向的轴线直线度误差测量

5.3.2.2.1 用一个指示器测量

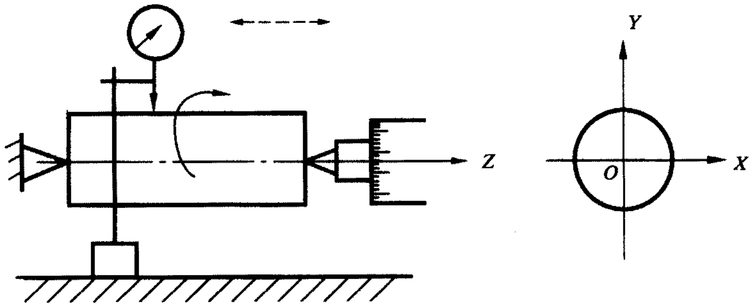


图 26

测量步骤：

1) 将被测零件安装在平行于平板且具有精密分度装置的两同轴顶尖之间，见图 26；

2) 确定横向测量截面数及各截面上的等分测量点数；

3) 转动被测零件，在各横向截面上对等分测量点逐一进行测量，并记录各点的示值；

4) 将各点的示值绘制在极坐标图上（或按其他方法），按最小区域圆心、最小二乘圆心之一确定各截面中心坐标值(X_i,Y_i,Z_i)；

5) 按第 6 章的方法对中心坐标 X_i,Y_i,Z_i 进行数据处理，求出轴线的直线度误差值。

5.3.2.2.2 用两个指示器测量

测量步骤：

1) 将被测零件安装在平行于平板的两同轴顶尖之间，见图 27；

2) 按图 27 所示，将固定在同一测量架上的两个指示器对径放置于被测零件铅垂横截面上下两侧；

3) 沿铅垂轴截面的两条素线移动测量架进行测量，同时分别记录两指示器在各测点的示值 M_{ai}、M_{bi}；并求出其差值：$\Delta_i = M_{ai} - M_{bi}$；

4) 取各测得点示值差 Δ_i 中最大值 Δ_{max} 和最小值 Δ_{min} 之差的一半作为该截面的轴线直线度误差近似值 f'，即：

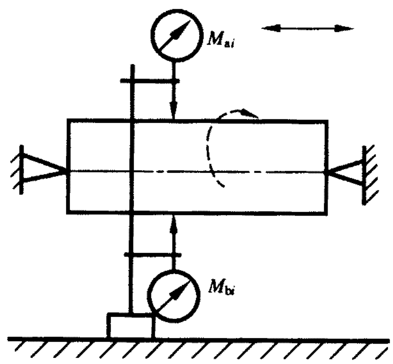


图 27

$$f'=\frac{1}{2}(\Delta_{max}-\Delta_{min}) \quad \cdots\cdots(9)$$

5） 转动被测零件，在若干个轴截面上重复上述测量，取其中的最大值作为轴线直线度误差近似值。

注：测量基线由两顶尖连线体现，适合用带和差演算的仪器进行测量。

5.3.3 干涉法

利用光波干涉原理，根据干涉条纹的形状或干涉带条数来评定直线度误差值的方法，见图 28。

该方法适用于精研表面的直线度误差测量。

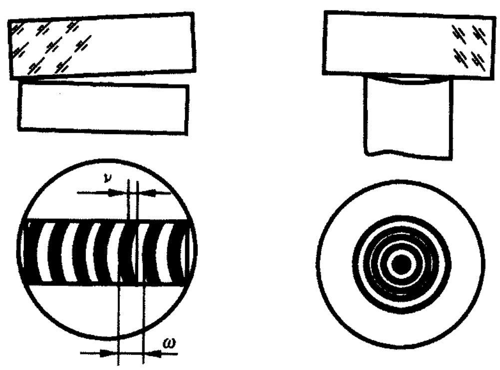


图 28

测量步骤：

1） 将平晶工作面与被测面接触，使之出现干涉带；

2） 按下式计算所求的直线度误差近似值 f'：

a） 均匀弯曲干涉带

$$f'=\frac{\nu}{\omega}\cdot\frac{\lambda}{2} \quad \cdots\cdots(10)$$

式中：

ω——干涉带间距；

ν——干涉带弯曲量；

λ——光波波长。

b） 环形干涉带

$$f'=\frac{\lambda}{2}\cdot n \quad \cdots\cdots(11)$$

式中：

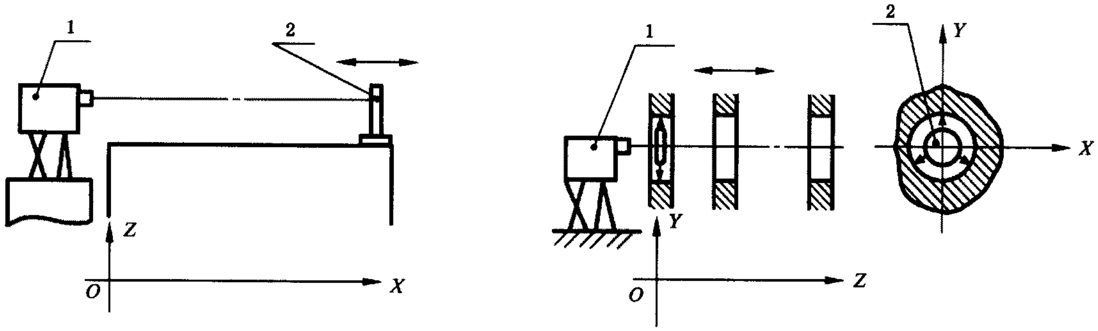
n——环形干涉带数量。

注：尽量采用单色光，否则应取与环心带纹色彩相同的干涉带数。

5.3.4 光轴法

以几何光轴作为测量基线，测出被测直线相对该基线的偏离量，进而评定直线度误差值的方法，见图29。

该方法适用于大、中型平面和孔、轴的轴线直线度误差测量。



1——测微准直望远镜；

2——瞄准靶。

图 29

测量步骤：

1） 将被测直线的两端点连线与光轴测量基线大致调平行；

2） 沿被测直线移动瞄准靶，同时记录各点示值；

a） 若被测直线为平面线（X_i，Z_i），则 X_i 为被测直线长度方向坐标值，Z_i 为相对测量基线的偏离值；

b） 若被测直线为轴线（X_i，Y_i，Z_i），则 X_i，Y_i 为各测量截面上的水平和垂直方向相对测量基线的偏离值，Z_i 为被测轴线长度方向的坐标值。

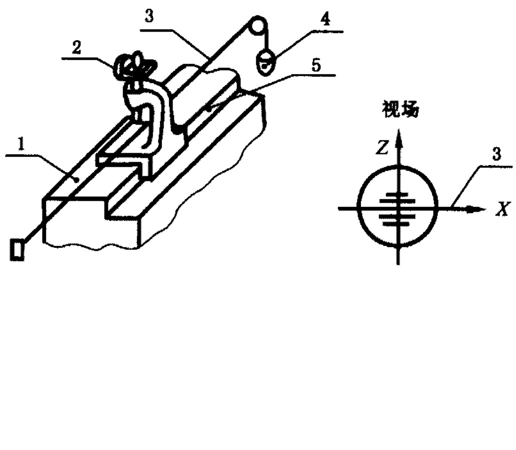
3） 按第6章的方法对（X_i，Z_i）或（X_i，Y_i，Z_i）进行数据处理，求出直线度误差值。

注：几何光轴常用自准直仪、测微准直望远镜类仪器产生。

5.3.5 钢丝法

以张紧的优质钢丝作为测量基线，测出被测直线相对测量基线的偏离量，进而评定直线度误差的方法，见图30。

该方法适用于测量水平方向的直线度误差。



1——被测工件；

2——显微镜或测微表；

3——钢丝；

4——重锤；

5——被测直线。

图 30

测量步骤：

1） 调整钢丝，使其两端点连线与被测直线大致平行；

2） 沿被测直线移动显示装置，同时记录各点示值(X_i,Z_i)；

3） 按第6章的方法对(X_i,Z_i)进行数据处理，求出直线度误差值。

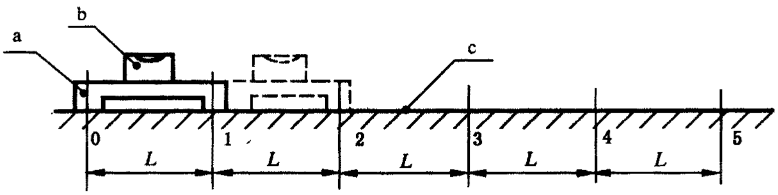
5.4 间接方法

通过测量不能直接获得测得直线各点坐标值，需经过数据处理获得各点坐标值的测量方法。

5.4.1 水平仪法

将固定有水平仪的桥板放置在被测直线上，等跨距首尾衔接地拖动桥板，测出被测直线各相邻两点连线相对水平面(或其垂面)的倾斜角，通过数据处理求出直线度误差值的方法，见图31。

该方法适用于大、中型零件垂直截面内的直线度误差测量。



a——桥板；

b——水平仪；

c——被测直线。

图 31

测量步骤：

1） 根据被测直线的长度 l，确定分段数 n 和桥板跨距 L，并在被测直线上标出各测点的位置；

$$L = \frac{l}{n} \qquad \cdots\cdots(12)$$

2） 用水平仪将被测直线大致调成水平，沿被测直线等跨距首尾衔接地拖动桥板，同时记录各点示值 a_i($i=1,2,\cdots\cdots n$)；

3） 按下述方法之一求出各点坐标值 Z_i：

——作图法(见图32)

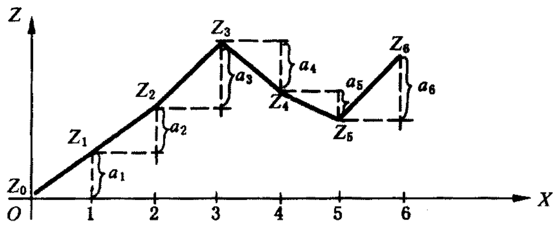


图 32

作图步骤：

a） 选择适当比例，将起始点“O”绘于坐标系 XOZ 的原点；

b） 按水平仪测量原理，在图上绘出第 i 点相对第($i-1$)点在 Z 轴方向的示值 a_i，即：a_1 是第1点相对起始点在 Z 轴方向的距离，a_2 是第2点相对第1点在 Z 轴方向的距离，……，a_i 是第 i 点相对第($i-1$)点在 Z 轴方向的距离；示值为正，绘在相对点之上，为负绘在相对点之下，由此可得各测得点的坐标值 Z_i(水平仪格值)；

c） 连接图中各测得点，得到测得直线图形。

——计算法

各测得点坐标值 Z_i 由下式计算：

$$Z_i = Z_{i-1} + a_i = \sum_{k=1}^{i} a_k \quad \cdots\cdots (13)$$

$$Z_0 = 0, (i = 1, 2, \cdots, n)$$

式中：

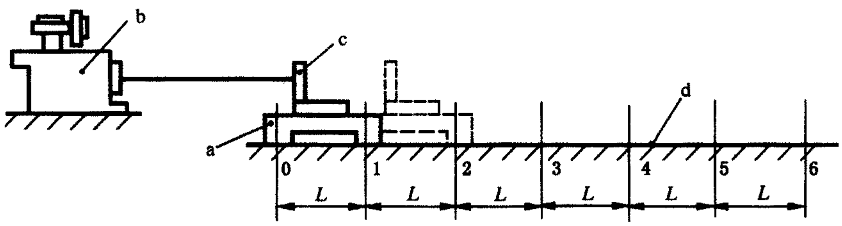
a_i——水平仪示值(格值)；

4) 按第 6 章的方法对 Z_i 进行数据处理，求出直线度误差值。

5.4.2 自准直仪法

将固定有反射镜的桥板置于被测直线上，等跨距首尾衔接地拖动桥板，测出被测直线各相邻两点连线相对主光轴的倾斜角，通过数据处理求出直线度误差值，见图 33。

该方法适用于大、中型零件的直线度误差测量。



a——桥板；

b——自准直仪；

c——反射镜；

d——被测直线。

图 33

测量步骤：

1) 按公式(12)确定分段数 n 和桥板跨距 L，并在被测直线上标出各测点的位置；

2) 将光轴与被测直线的两端点连线大致调平行，沿被测直线等跨距首尾衔接地拖动桥板，同时记录各点示值 $a_i(i=1,2,\cdots\cdots,n)$；

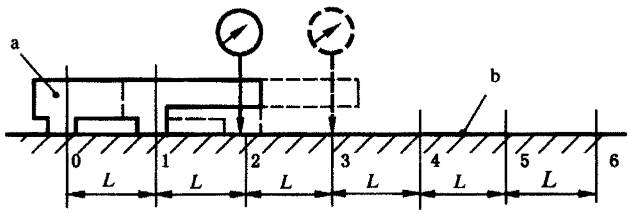
3) 求出各点坐标值 Z_i(见水平仪测量的相应方法)。

4) 按第 6 章的方法对 Z_i 进行数据处理，求出直线度误差值。

5.4.3 跨步仪法

以跨步仪两固定支点连线作为测量基线，测出第三点相对测量基线的偏离量，通过数据处理求出直线度误差值，见图 34。

该方法适用于大、中型零件的直线度误差测量。



a——跨步仪；

b——被测直线。

图 34

测量步骤：

1) 按公式(12)确定分段数 n 和跨步仪跨距 L(其跨距为跨步仪两固定支点的中心距)，并在被测

直线上标出各测点的位置；

2） 将跨步仪放在研磨平尺上，使指示器示值对零；

3） 沿被测直线等跨距首尾衔接地移动跨步仪，同时记录各点的示值 c_i（$i=2,3,\cdots\cdots n$）；

4） 求出各点坐标值 Z_i：

——作图法（见图 35）

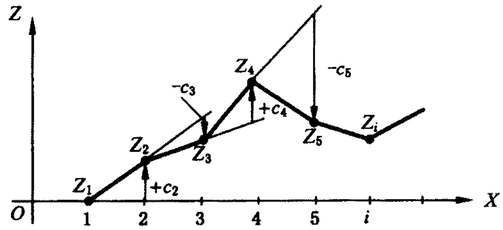


图 35

作图步骤：

a） 选择适当比例，使 X 轴与跨步仪起始位置的相邻两固定支点连线重合，即：0、1 两点在 X 轴上，$Z_0=Z_1=0$；

b） 各点示值 c_i 是相对两个固定支点连线（测量基线）的偏离量，当 c_i 为正值时，在第 i 点的 Z_{i-2}，Z_{i-1} 两点连线上方，距离为 c_i（沿 Z 方向量取）处，绘出 Z_i 点；c_i 为负值时，绘制在其下；

c） 连接各测得点得到测得直线图形。

——计算法

各测得点坐标值 Z_i 可按下式计算：

$$Z_i = Z_{i-1} + \sum_{k=2}^{i} c_k = \sum_{k=1}^{i-1}(i-k)c_{k+1} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(14)$$

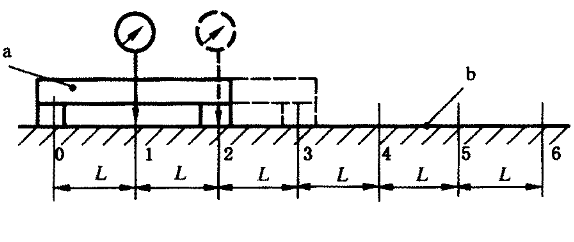
$$Z_0 = Z_1 = 0(i=2,3,\cdots\cdots,n)$$

5） 按第 6 章的方法对 Z_i 进行数据处理，求出直线度误差值。

5.4.4 表桥法

以表桥相间两固定支点的连线作为测量基线，测出中间点相对测量基线的偏离量 b_i，通过数据处理求出直线度误差值，见图 36。

该方法适用于大、中型零件的直线度误差测量。



a——表桥；

b——被测直线。

图 36

测量步骤：

1） 按公式(12)确定分段数 n 和表桥跨距 L（其跨距为表桥两固定支点的中心距离之半），并在被测直线上标出各测点的位置；

2） 将专用表桥放在研磨平尺上，使指示器示值对零；

3） 沿被测直线等跨距首尾衔接地移动表桥，同时记录各点示值 b_i（$i=1,2,\cdots\cdots,n-1$）；

4） 按下述方法之一求出各点坐标值 Z_i：

——作图法(见图 37)

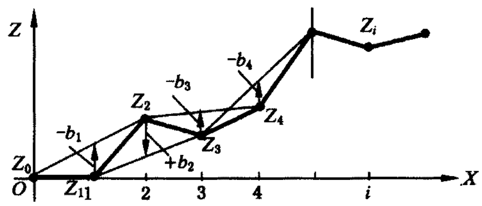


图 37

作图步骤:

a) 选择适当的比例,使 X 轴与表桥起始位置固定支点和测头的连线重合,即:0、1 两点在 X 轴上,$Z_0=Z_1=0$;

b) 各点示值 b_i 是相对前后两点连线(测量基线)的偏离量,当 b_i 为正值时,在 Z_i 点向下绘制,为负值时,在 Z_i 点向上绘制;

c) 依 b_1 的正负,将 b_1 绘制在 Z_1 处,连接 Z_0 与 b_1 顶点交第 2 点纵坐标线于 Z_2 点,求出坐标值 Z_2;同理,已知 b_1 及 Z_{i-1},即可绘制出 Z_{i+1}点的位置,求出 $i+1$ 点的坐标值 Z_{i+1};

d) 连接各测得点,得到测得直线图形。

——计算法

各测得点坐标值 Z_i 可按下式计算:

$$Z_i = Z_{i-1} - 2\sum_{k=1}^{i-1} b_k = -2\sum_{k=1}^{i-1}(i-k)b_k \qquad \cdots\cdots (15)$$

$$Z_0 = Z_1 = 0(i = 2,3,\cdots\cdots,n)$$

5) 按第 6 章的方法对 Z_i 进行数据处理,求出直线度误差值。

5.4.5 平晶测量

以小平晶某一轴向截面边缘的两点连线作为测量基线,测出各段误差值 b_i,通过数据处理求出直线度误差值,见图 38。

该方法适用于无大平晶时的窄长精研表面的直线度误差测量。

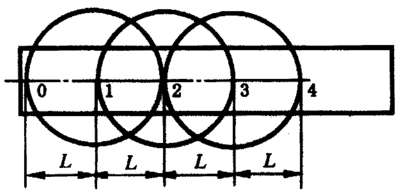


图 38

测量步骤:

1) 按公式(12)确定分段数 n 和平晶的半径 L;

2) 将平晶放置在被测零件上,使之出现平行于测量方向的干涉条纹;

3) 等跨距移动平晶,同时根据干涉带形状按公式(10)或公式(11)求得各段误差值 b_i($i=1,2,\cdots\cdots,n-1$);

4) 求出各点的坐标值 Z_i(方法见 5.4.4 表桥测量中的相应方法);

5) 按第 6 章的方法对 Z_i 进行数据处理,求出直线度误差值。

5.5 组合方法

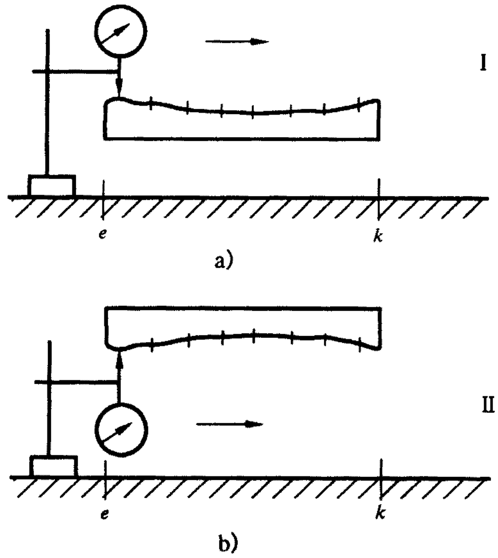
通过两次测量,利用误差分离技术,消除测量基线本身直线度误差,从而提高测量精度的测量方法。

5.5.1 **反向消差法**

通过正反(翻转 180°)两次测量,经数据处理消除测量基线本身的直线度误差,求出被测零件直线度误差的方法。

该方法适用于高精度零件的直线度误差测量。

5.5.1.1 用一个指示器进行反向消差测量,见图 39。



a)

b)

图 39

测量步骤:

1) 将被测零件装在可作直线移动的工作台上,指示器固定在固定支架上;或将被测零件放置在测量平板上,指示器固定在可作直线移动的工作台上;

2) 移动工作台,调整被测零件,使其两端点示值大致相等;

3) 沿被测直线逐点顺序测量,见图 39a),同时记录各点示值 $h_{\mathrm{I}i}$;

4) 将被测零件翻转 180°,见图 39b),并尽可能与翻转前处于相同轴向位置(k,e 点之间),即使用同一段导轨,重复上述操作,测得被测直线上与第一次测量对应点处的第二次测量示值 $h_{\mathrm{II}i}$;

5) 求出各测得点的坐标值 Z_i:

$$Z_i = (h_{\mathrm{I}i} + h_{\mathrm{II}i})/2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (16)$$

6) 按第 6 章的方法对 Z_i 进行数据处理,求出直线度误差值。

注 1:测量基线由移动导轨或测量平板体现;

注 2:通过该方法测量,可同时获得导轨或平板各测得点的坐标值:

$$Z'_i = (h_{\mathrm{I}i} - h_{\mathrm{II}i})/2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (17)$$

5.5.1.2 用两个指示器对两个相同规格、精度相近的平尺进行反向消差测量,见图 40。

该方法适用于无标准平尺、标准平晶,而又需进行高精度测量的场合。

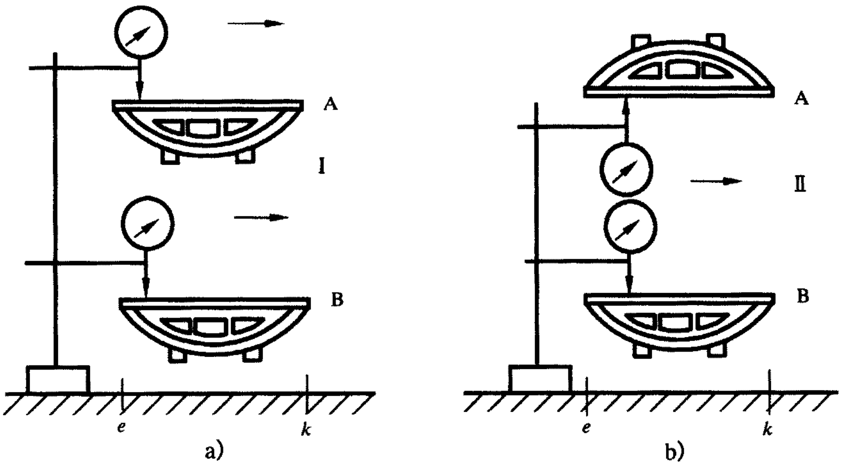
测量方法:

1) 将 A、B 两被测零件放置在可作直线移动的工作台上,两指示器固定在固定支架上;或将被测零件放置在测量平板上,指示器固定在可作直线移动的工作台上或直接放置在测量平板上;

2) 第一次测量时,把 A、B 两被测零件的被测面同向安装,见图 40a),移动工作台或指示器,分别调整两被测面,使其两端点示值大致相等;

3) 沿被测直线逐点顺序测量,同时分别记录两指示器的示值 $h_{\mathrm{AI}i}$,$h_{\mathrm{BI}i}$,完成第一次测量;

4) 将被测要素 A 翻转 180°,见图 40b),并尽可能与翻转前处于相同的轴向位置(k,e 点对齐),即使用同一段导轨,然后重复上述操作,获得 A、B 两被测直线上与第一次测量对应点处的第二次测量示



a)　　b)

图 40

值 $h_{A\mathrm{II}i}$，$h_{B\mathrm{II}i}$；

5)　按下式求出 A、B 两被测直线上各测得点的坐标值：

$$Z_{Ai}=[(h_{A\mathrm{II}i}+h_{B\mathrm{II}i})+(h_{A\mathrm{I}i}-h_{B\mathrm{I}i})]/2 \quad \cdots\cdots(18)$$

$$Z_{Bi}=[(h_{A\mathrm{II}i}+h_{B\mathrm{II}i})-(h_{A\mathrm{I}i}-h_{B\mathrm{I}i})]/2 \quad \cdots\cdots(19)$$

6)　按第 6 章的方法对 Z_{Ai}，Z_{Bi}进行数据处理，分别求出 A、B 被测直线的直线度误差值。

注 1：测量基线可由移动导轨或测量平板体现；

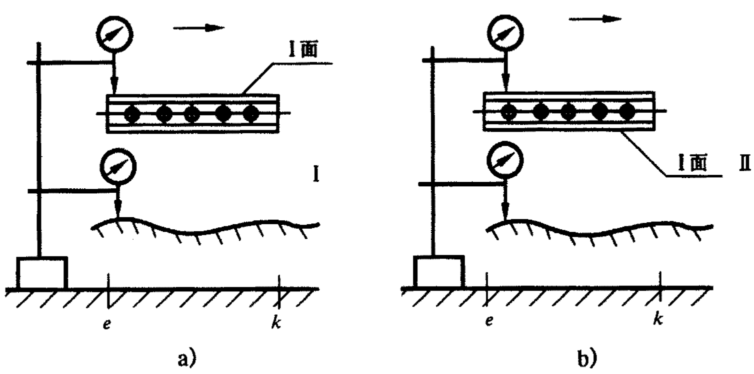
注 2：本方法宜于采用带和差演算装置的仪器进行测量。当按图 40a)安装时，用(A－B)演算装置，按图 40b)安装时，用(A＋B)演算装置；

注 3：采用该方法测量，可同时获得移动导轨或测量平板的各测得点坐标值：

$$Z'_i=h_{A\mathrm{I}i}-Z_{Ai}=h_{B\mathrm{I}i}-Z_{Bi}=Z_{Ai}-h_{A\mathrm{II}i}$$

5.5.1.3　用一个平尺和两个指示器对被测零件进行反向消差测量，见图 41。

该方法适用于被测零件难于翻转的高精度直线度误差测量。



a)　　b)

图 41

测量步骤：

1)　按测量要求将平尺分成 n 段；

2)　测出平尺上各测得点的厚度尺寸 $H_i(i=0,1,2,\cdots,n)$；

3)　将平尺和被测零件放置在可作直线移动的工作台上，两个指示器固定在工作台底座上；

4)　移动工作台，分别调整平尺和被测零件，使其两端点的示值大致相等；

5)　沿平尺和被测直线逐点顺序测量，同时分别记录平尺上指示器的示值 h_{1i}和被测直线上指示器的示值 $h_{\mathrm{I}i}$，完成第一次测量，见图 41a)；

6) 将平尺翻转180°，并尽可能与翻转前处于相同轴向位置（k，e点对齐），见图41b)，重复上述操作，测得平尺和被测直线上与第一次测量对应点处的第二次测量示值h_{2i}和$h_{\mathrm{II}i}$；

7) 求出各测得点坐标值：

$$Z_i = [A_i - (h_{1i} - h_{\mathrm{I}i}) - (h_{2i} - h_{\mathrm{II}i})]/2 \qquad \cdots\cdots(20)$$

式中：$A_i = H_i - (i/n)H_n - H_0(n-i)/n$

8) 按第6章的方法对Z_i进行数据处理，求出直线度误差值。

注1：测量基线由工作台导轨或测量平板体现；

注2：平尺1,2两面各测得点的坐标值：

$$Z_{1i} = [A_i + (h_{1i} + h_{\mathrm{I}i}) - (h_{2i} + h_{\mathrm{II}i})]/2 \qquad \cdots\cdots(21)$$

$$Z_{2i} = [A_i + (h_{2i} + h_{\mathrm{II}i}) - (h_{1i} - h_{\mathrm{I}i})]/2 \qquad \cdots\cdots(22)$$

注3：本方法宜于采用带和差演算装置的仪器进行测量。

5.5.2 移位消差法

通过起始测量位置的变动进行两次测量，经数据处理消除测量基线本身的直线度误差，求出被测零件直线度误差的方法，见图42。

该方法适用于高精度的直线度误差测量。

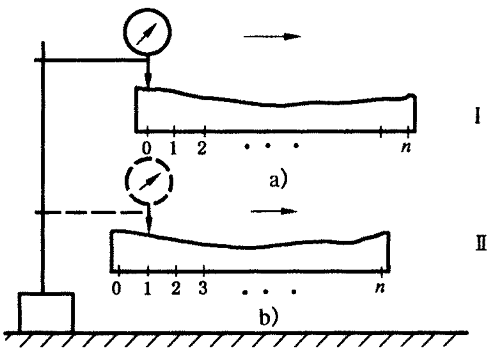


图42

测量步骤：

1) 将被测零件分为n段，并固定在可作直线移动的工作台上，指示器固定在工作台底座上或相反；

2) 如图42a)所示，先将被测直线大致调平行，然后沿测量方向移动工作台进行第Ⅰ次测量，同时记录各点示值$h_{\mathrm{I}i}(i=0,1,2,\cdots\cdots,n)$；

3) 将零件逆测量方向平移一个跨距，如图42b)所示，从第1点开始进行第Ⅱ次测量，同时记录各点示值$h_{\mathrm{II}i}(i=1,2,\cdots\cdots,n)$；

4) 求出各测得点的坐标值：

$$Z_0 = h_{\mathrm{I}0}$$

$$Z_i = Z_{i-1} + (h_{\mathrm{II}i} - h_{\mathrm{I}(i-1)}) \quad (i = 1,2,3,\cdots\cdots,n) \qquad \cdots\cdots(23)$$

5) 按第6章的方法对Z_i进行数据处理，求出直线度误差值。

注：测量基线由工作台导轨体现；导轨各测得点的坐标值为：$Z'_0=0$，$Z'_i=h_{\mathrm{I}i}-Z_i \quad (i=1,2,\cdots\cdots,n)$。

5.5.3 多测头消差法

通过两个测头同时测量，经数据处理消除测量基线本身的直线度误差，求出被测零件直线度误差的方法，见图43。

该方法适用于高精度的直线度误差测量。

测量步骤：

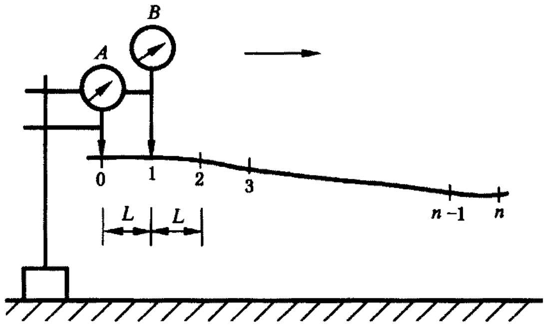


图 43

1) 将被测零件分为 n 段，两测头相距为一个跨距 L 的两个指示器装在可作直线移动的工作台或刀架上，零件放置在工作台底座的固定支撑上；并调整被测直线，使其两端点示值大致相等；

2) 沿被测直线移动指示器，逐点顺序测量，同时分别记录 A、B 两指示器上的示值：

$h_{Ai}(i=0,1,2,\cdots\cdots,n)$，$h_{Bi}(i=1,2,\cdots\cdots,n)$；

3) 求出各测点的坐标值：

$$Z_i = Z'_i + h_{Ai} - h_{A0} \quad (i=0,1,2,\cdots\cdots,n) \qquad \cdots\cdots(24)$$

式中：$Z'_0=0$；

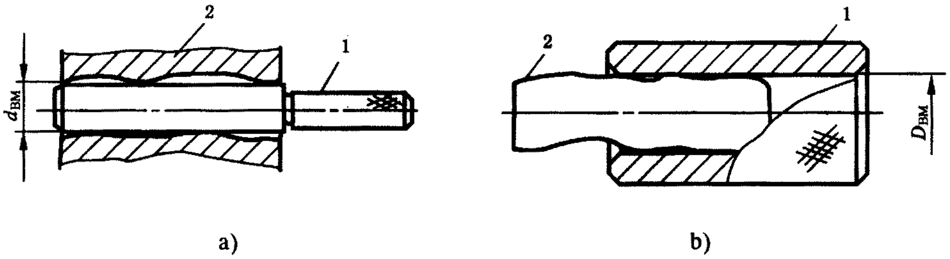
$Z'_i = Z_{i-1} + h_{Bi} - h_{Ai} \quad (i=1,2,\cdots\cdots,n)$；

4) 按第 6 章的方法对 Z_i 进行数据处理，求出直线度误差值。

5.6 量规检验法

用直线度量规判断被测零件是否超越实效边界的检验方法，见图 44。

该方法适用于检验轴线直线度公差遵守最大实体要求的零件。



1——量规；

2——被测零件。

图 44

检验步骤：

1) 将直线度量规置入被测零件；若量规能通过，则被测零件未超越规定的理想边界；否则零件不合格。

2) 直线度量规测量部位的基本尺寸 d_{BM}，D_{BM} 计算：

对孔类零件：$d_{BM} = D_{vc} = D_{min} - t$ ……(25)

对轴类零件：$D_{BM} = d_{vc} = d_{max} + t$ ……(26)

式中：

D_{vc}，d_{vc}——零件内、外表面的实效尺寸；

D_{min}——零件孔的最小极限尺寸(即：孔的最大实体尺寸)；

d_{max}——零件轴的最大极限尺寸(即：轴的最大实体尺寸)；

t——框格中注有Ⓜ的轴线直线度公差值。

直线度量规的量规公差参照 GB/T 8069 的规定。

6 数据处理

获得被测点坐标值后，根据需要选用不同的评定方法，按作图法或计算法进行数据处理，求出相应的直线度误差值。

对水平仪、自准直仪的等跨距测量，应将求出的直线度误差值 f(格值)乘以系数 K 换算为线性误差值 $f(\mu m)$；如为不等跨距测量，则应将示值 a_i 乘以系数 K 后再进行数据处理，求出直线度误差值 $f(\mu m)$。

$$K=\tau \cdot L(\mu m) \quad \cdots\cdots(27)$$

或

$$K=0.004\,8\tau' \times L(\mu m) \quad \cdots\cdots(28)$$

式中：

τ ——仪器分度值，单位为毫米每米(mm/m)；

τ'——仪器分度值(角)，单位为秒(″)；

L——桥板跨距，单位为毫米(mm)。

6.1 按最小包容区域法评定

6.1.1 作图法

将各测得点坐标值按一定比例绘制在坐标图上，并顺序连接各测得点，得到测得直线图形；用下述方法之一求出符合最小包容区域评定方法的直线度误差值。

该方法适用于给定平面、给定方向的直线度误差值的评定。

方法一(见图 45)：

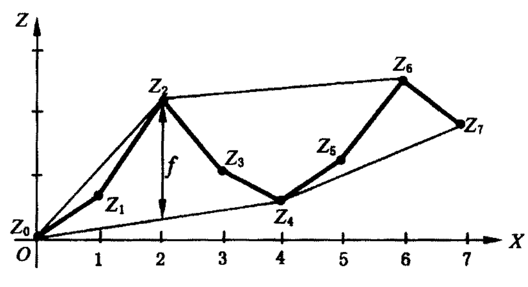


图 45

作图步骤：

1) 作测得直线图形的外接多边形(见图 45)，此时，多边形的任一内角必须小于 180°或必须为凸边形；

2) 沿 Z 轴方向量取该多边形的最大距离 f，则直线度误差值 $f_{MZ}=f$；

方法二(见图 46)：

作图步骤：

1) 在测得直线图形上作首末两端点连线，找出连线上方和下方的最大偏离值点(图 46 的 Z_2 和 Z_4 点)；

2) 过上方最大偏离值点(图 46 中的 Z_2 点)，向下方的最大偏离值点(图 46 中的 Z_4 点)一侧作测得直线图形的上外接线(过图 46 中的 Z_5 点)l_1；

3) 过下方最大偏离值点(图 46 中的 Z_4 点)，向上方的最大偏离值点(图 46 中的 Z_2 点)一侧作测得直线图形的下外接线(过图 46 中的 Z_0 点)l_2；

4) 分别以两条连线为评定基线，沿 Z 方向量取各测得点到基线的最大距离 f_1 和 f_2；

5) 两值中的最小值即为直线度误差值 f_{MZ}。

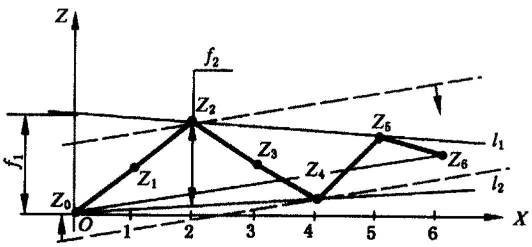


图 46

6.1.2 计算法

根据各测得点的坐标值,用下述方法之一求出符合最小包容区域评定方法的直线度误差值。

6.1.2.1 给定平面(或给定方向)的直线度误差

方法一:变换计算法

根据各测得点坐标值,经多次变换直线方程系数 q_1,逐步使求出的直线度误差值为最小的计算方法。

计算步骤:

1) 以各测得点中的两个端点坐标值($X_0, Z_0; X_n, Z_n$)求出两端点连线的直线方程系数 q_1 作为初始值:

$$q_1 = \frac{Z_n - Z_0}{X_n - X_0} \qquad \cdots\cdots(29)$$

式中:

X_n, Z_n——末端点的坐标值;

X_0, Z_0——起始点的坐标值。

2) 将各测得点的坐标值 Z_i 用下式变换为新的坐标值:

$$d_i = Z_i - Z_0 - q_1 \cdot X_i \qquad \cdots\cdots(30)$$

式中:

d_i——变换 q_1 后的各点纵坐标值;

Z_i——变换 q_1 前的各点纵坐标值。

3) 求出 d_i 中的最大、最小值之差 f_1;

$$f_1 = d_{\max} - d_{\min}$$

4) 按一定优化方法改变 q_1 值;

5) 按式(30)逐个算出变换后的坐标值 d_i,并求出 d_i 中的最大、最小值之差 f_2;

6) 将 f_2 与 f_1 相比较,使较小者为 f_1;

7) 反复进行 4)～6)的步骤,使 f_1 为最小;

8) 最后求出的 f_1 最小值即为直线度误差值 f_{MZ}。

方法二:极点计算法

根据各测得点的坐标值,用某种方法判断出符合最小包容区域法的极点,并将极点坐标值代入公式算出直线度误差值的方法。

计算步骤:

1) 按下述方法判断极点:

——按式(29)计算出两端点连接直线方程系数 q_1 的初始值;

——按式(30)求出各点相对两端点连线的偏离值 d_i;

——找出 d_i 中的最大偏离值点($X_{(d\max)}, d_{\max}$)和最小偏离值点($X_{(d\min)}, d_{\min}$);

——若最大或最小偏离值中有一个为零，则两端点和一个不为零的最大或最小偏离值点即为极点；

——若最大或最小偏离值均不为零，则进一步按下式计算出过最大偏离值点，向最小偏离值点一侧与该侧其余各点连线的斜率 K_{1i} 和过最小偏离值点，向最大偏离值点一侧与该侧其余各点连线的斜率 K_{2i}：

$$K_{1i} = \frac{|d_{\max} - d_i|}{|X_{(d\max)} - X_i|} \qquad \cdots\cdots(31)$$

$$K_{2i} = \frac{|d_{\min} - d_i|}{|X_{(d\min)} - X_i|} \qquad \cdots\cdots(32)$$

——分别求出 K_{1i}，K_{2i} 中的最小值 K_1，K_2；

若 $K_1 < K_2$，则确定 K_1 的 $(X_{(d\max)}, d_{\max})$ 点和 (X', d') 点，以及最小偏离值点 $(X_{(d\min)}, d_{\min})$ 为极点；

若 $K_1 > K_2$，则确定 K_2 的 $(X_{(d\min)}, d_{\min})$ 点和 (X'', d'') 点，以及最大偏离值点 $(X_{(d\max)}, d_{\max})$ 为极点；

2) 用三个极点(L,M,R)的坐标值(见图 47)按下式计算出直线度误差值 f_{MZ}：

$$f_{MZ} = \left| \frac{X_M - X_R}{X_R - X_L}(Z_R - Z_L) - (Z_M - Z_R) \right| \qquad \cdots\cdots(33)$$

式中：

X_M、Z_M—— 中间极点 M 的坐标值；

X_L、Z_L—— 左极点 L 的坐标值；

X_R、Z_R—— 右极点 R 的坐标值。

注：给定方向线可经投影后按上述方法处理。

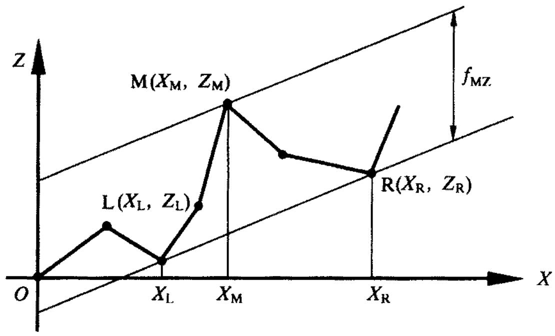


图 47

6.1.2.2 任意方向上的直线度误差(见图 48)

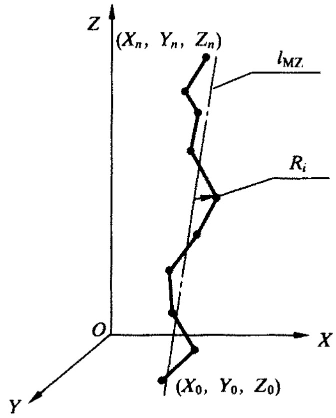


图 48

计算步骤：

1） 以各测得点中的两个端点坐标值〔(X_0,Y_0,Z_0)和(X_n,Y_n,Z_n)〕求出两端点连线的直线方程系数 q,p 作为初始值：

$$q=\frac{X_n-X_0}{Z_n-Z_0} \quad\cdots\cdots(34)$$

$$p=\frac{Y_n-Y_0}{Z_n-Z_0} \quad\cdots\cdots(35)$$

2） 将各测得点的坐标值代入下式，算出各点距该直线的径向距离：

$$R_i=[(X_i-X_0-q\cdot Z_i)^2+(Y_i-Y_0-p\cdot Z_i)^2]^{1/2} \quad\cdots\cdots(36)$$

3） 找出 R_i 中的最大值 f_1；

4） 按一定优化方法改变 X_0,Y_0,p,q 值；

5） 按式(36)逐个计算变换后的 R_i 值，并找出 R_i 中的最大值 f_2；

6） 将 f_2 与 f_1 相比较，使较小者为 f_1；

7） 反复进行 4)～6)的步骤，使 f_1 为最小；

8） 最后求出的最小值 f_1 的两倍即为直线度误差值 ϕf_{MZ}。

注：第 1)步骤也可改为：

1） 以各测得点的坐标值求出最小二乘中线方程系数 a,b,q,p 的初始值，系数 a,b,q,p 按公式(44)～(47)计算。

6.2 按最小二乘法评定

6.2.1 作图法

将各测得点坐标值绘制在坐标图上，用下述方法之一求出符合最小二乘法评定的直线度误差值。

本方法仅适用于给定平面、给定方向的直线度误差在等跨距测量时的数据处理。

方法一（见图 49)：本方法适用于测量点数较少（一般少于 10 点)的场合。

注：本方法称为"阿斯卡维兹(Askovitz)"作图法。

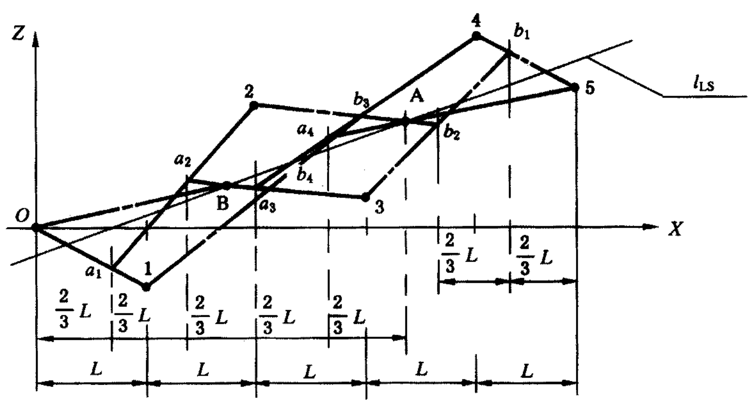


图 49

作图步骤：

1） 将各测得点的坐标值按一定比例绘制在坐标系中；

2） 按图 49 所示，从首末两点分别标出 X 轴方向的$\frac{2}{3}L$线段长度；

3） 从起始点绘制 0,1 两点的连线，与第 1 段$\frac{2}{3}L$线交于 a_1 点；

4） 绘制 a_1 点和第 2 点的连线，与第 2 段$\frac{2}{3}L$线交于 a_2 点；

5） 同理，逐步向右作图；

6） 绘制第 a_{n-1} 点和第 n 点的连线，与第 $n-1$ 段 $\frac{2}{3}L$ 线交于 a_n 点，即图 49 中的 A 点；该点即为最小二乘中线上的一个点；

7） 以第 n 点为起始点，按上述原理从右向左逐步绘制，求出另一个最小二乘中线点 B；

8） 连接 A，B 两点，即得到最小二乘中线 l_{LS}；

9） 量出各测得点相对最小二乘中线 l_{LS} 上、下方在 Z 坐标方向的最大、最小偏离值 d_{max}，d_{min}；

10） 直线度误差值 f_{LS} 为：

$$f_{LS} = d_{max} - d_{min}$$

方法二（见图 50）：本方法适用于测量点数较多（一般大于或等于 10 点）的场合。

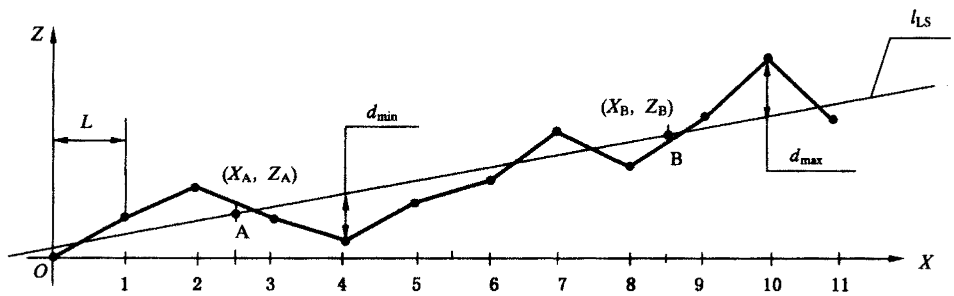


图 50

作图步骤：

1） 将各测得点坐标值按一定比例绘制在坐标系中，依次连接各点得到测得直线图形；

2） 通过 A，B 两点，绘出最小二乘中线 l_{LS}；

A，B 两点的坐标 X_A，Z_A；X_B，Z_B 为：

a） 当 n 为奇数时：

$$X_A = \frac{n-1}{4}L,\quad Z_A = \frac{2}{n+1}\sum Z_i(i = 0,1,\cdots\cdots,(n-1)/2) \qquad (37)$$

$$X_B = \frac{3n+1}{4}L,\quad Z_B = \frac{2}{n+1}\sum Z_i(i = (n+1)/2,\cdots\cdots,n) \qquad (38)$$

b） 当 n 为偶数时：

$$X_A = (n/4)L,\quad Z_A = \frac{2}{n+2}\sum Z_i(i = 0,1,\cdots\cdots,n/2) \qquad (39)$$

$$X_B = (3n/4)L,\quad Z_B = \frac{2}{n+2}\sum Z_i(i = n/2,\cdots\cdots,n) \qquad (40)$$

式中：

L——测量跨距；

n——分段数。

3） 量出各测得点相对该最小二乘中线 l_{LS} 上、下方在 Z 坐标方向的最大、最小偏离量 d_{max}，d_{min}；

4） 直线度误差值 f_{LS} 为：

$$f_{LS} = d_{max} - d_{min}$$

6.2.2 计算法

6.2.2.1 给定平面（或给定方向）的直线度误差

计算步骤：

1） 根据各测得点的坐标值，求出最小二乘中线 l_{LS} 的方程系数 a，q：

$$a = \frac{\sum Z_i \sum X_i^2 - \sum X_i \sum X_i Z_i}{(n+1)\sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \qquad (41)$$

$$q=\frac{(n+1)\sum X_iZ_i-\sum X_i\sum Z_i}{(n+1)\sum X_i^2-(\sum X_i)^2} \qquad \cdots\cdots(42)$$

式中：

n——分段数；

X_i——各测得点的横坐标值（$i=0,1,2,\cdots\cdots,n$）；

Z_i——各测得点的纵坐标值（$i=0,1,2,\cdots\cdots,n$）。

2） 将各测得点的坐标值 Z_i，用下式变换为新的坐标值：

$$d_i=Z_i-a-qX_i \qquad \cdots\cdots(43)$$

3） 求出 d_i 中的最大、最小值之差，该差值即为直线度误差值 f_{LS}：

$$f_{LS}=d_{max}-d_{min}$$

除采用计算机进行上述计算外，还可采用以下表格法进行计算。

	1	2	3	4	5	6
序号	X_i	Z_i	X_i^2	X_iZ_i	qX_i	Z_i-a-qX_i
0	X_0	Z_0				
1	X_1	Z_1				
⋮	⋮	⋮				
n	X_n	Z_n				
$\sum$						
	$\sum X_i$	$\sum Z_i$	$\sum X_i^2$	$\sum X_iZ_i$		

$$a=\frac{\sum Z_i\sum X_i^2-\sum X_i\sum X_iZ_i}{(n+1)\sum X_i^2-(\sum X_i)^2}$$

$$q=\frac{(n+1)\sum X_iZ_i-\sum X_i\sum Z_i}{(n+1)\sum X_i^2-(\sum X_i)^2}$$

表格计算步骤：

1） 分别在表中的第 1 列和第 2 列中填入 X_i 和 Z_i 值；

2） 分别算出 X_i^2 和 X_iZ_i 的值，并依次填入第 3 列和第 4 列；

3） 依次算出 $\sum X_i$，$\sum Z_i$，$\sum X_i^2$ 和 $\sum X_iZ_i$ 的值，并填入最后一行；

4） 算出 a 值和 q 值；

5） 依次算出 Z_i-a-qX_i 的值，并填入第 6 列中；

6） 在第 6 列诸数中找出最大、最小值；

7） 最大、最小值之差即为直线度误差值 f_{LS}。

6.2.2.2 任意方向的直线度误差

计算步骤：

1） 根据各测得点的坐标值，求出最小二乘中线 l_{LS} 方程的系数 a,b,q,p；

$$a=\frac{\sum Z_i^2\sum X_i-\sum X_iZ_i\sum Z_i}{(n+1)\sum Z_i^2-(\sum Z_i)^2} \qquad \cdots\cdots(44)$$

$$b=\frac{\sum Z_i^2\sum Y_i-\sum Y_iZ_i\sum Z_i}{(n+1)\sum Z_i^2-(\sum Z_i)^2} \qquad \cdots\cdots(45)$$

$$q=\frac{(n+1)\sum X_iZ_i-\sum X_i\sum Z_i}{(n+1)\sum Z_i^2-(\sum Z_i)^2} \qquad \cdots\cdots(46)$$

$$p=\frac{(n+1)\sum Y_iZ_i-\sum Y_i\sum Z_i}{(n+1)\sum Z_i^2-(\sum Z_i)^2} \qquad \cdots\cdots(47)$$

式中：

n——分段数；

X_i，Y_i——各测得点在横截面上的坐标值（$i=0,1,2,\cdots\cdots,n$）；

Z_i——各测得点的轴向坐标值（$i=0,1,2,\cdots\cdots,n$）。

2） 将各测得点的坐标值 X_i，Y_i 代入下式，算出各点距该直线的径向距离 R_i：

$$R_i=[(X_i-a-qZ_i)^2+(Y_i-b-pZ_i)^2]^{1/2} \qquad \cdots\cdots(48)$$

3） 找出 R_i 中的最大值 f_1；

4） 按一定优化方法改变 a，b 值；

5） 按式(48)逐个计算变换 a，b 值后的 R_i 值，并找出 R_i 中的最大值 f_2；

6） 将 f_2 与 f_1 相比较，使较小者为 f_1；

7） 反复进行 4)～6)的步骤，使 f_1 为最小；

8） 直线度误差值 $\phi f_{LS}=2f_1$。

除采用计算机进行上述计算外，还可采用以下表格计算法进行近似计算。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
序号	X_i	Y_i	Z_i	X_iZ_i	Y_iZ_i	Z_i^2	X_i-a-qZ_i	$(X_i-a-qZ_i)^2$	Y_i-b-pZ_i	$(Y_i-b-pZ_i)^2$	$\sqrt{(X_i-a-qZ_i)^2+(Y_i-b-pZ_i)^2}$
0	X_0	Y_0	Z_0								
1	X_1	Y_1	Z_1								
⋮	⋮	⋮	⋮								
n	X_n	Y_n	Z_n								
$\sum_{i=0}^{n}$	$\sum X_i$	$\sum Y_i$	$\sum Z_i$	$\sum X_iZ_i$	$\sum Y_iZ_i$	$\sum Z_i^2$	$\phi f_{LS}\approx 2R_{max}$				

$$a=\frac{\sum Z_i^2\sum X_i-\sum X_iZ_i\sum Z_i}{(n+1)\sum Z_i^2-(\sum Z_i)^2} \qquad b=\frac{\sum Z_i^2\sum Y_i-\sum Y_iZ_i\sum Z_i}{(n+1)\sum Z_i^2-(\sum Z_i)^2}$$

$$q=\frac{(n+1)\sum X_iZ_i-\sum X_i\sum Z_i}{(n+1)\sum Z_i^2-(\sum Z_i)^2} \qquad p=\frac{(n+1)\sum Y_iZ_i-\sum Y_i\sum Z_i}{(n+1)\sum Z_i^2-(\sum Z_i)^2}$$

表格计算步骤：

1） 分别在表格的第 1，2，3 列中填入 X_i，Y_i，Z_i 值；

2） 分别算出 X_iZ_i，Y_iZ_i 和 Z_i^2 的值，并依次填入第 4，5，6 列中；

3） 依次算出 $\sum X_i$，$\sum Y_i$，$\sum Z_i$，$\sum X_iZ_i$，$\sum Y_iZ_i$ 和 $\sum Z_i^2$ 的值，并填入最后一行中；

4） 算出 a，b，q 和 p 的值；

5） 依次算出 X_i-a-qZ_i，$(X_i-a-qZ_i)^2$，Y_i-b-pZ_i 和 $(Y_i-b-pZ_i)^2$ 的值，并依次填入第 7，8，9，10 列中；

6） 算出 $[(X_i-a-qZ_i)^2+(Y_i-b-pZ_i)^2]^{1/2}$ 的值，并填入第 11 列中；

7） 在第 11 列中找出一个最大值；

8） 最大值的两倍即为直线度误差值 ϕf_{LS} 的近似值：

$$\phi f_{LS}\approx 2R_{max} \qquad \cdots\cdots(49)$$

6.3 按两端点连线法评定

6.3.1 作图法

将各测得点的坐标值按一定比例绘制在坐标图上，并顺序连接各点得到测得直线图形，用下述方法之一求出符合两端点连线法评定的直线度误差值。

6.3.1.1 给定平面、给定方向或任意方向的直线度误差的投影（见图 51）

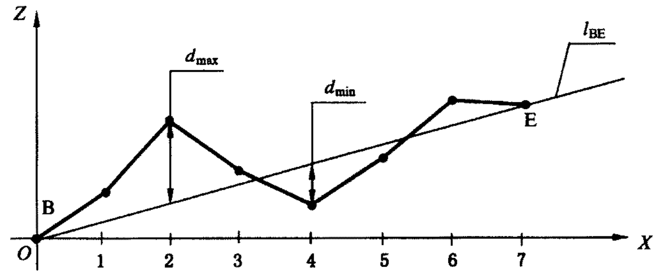


图 51

作图步骤：

1） 在测得直线图形上绘出首末两点 B、E 的连线 l_{BE}；

2） 沿 Z 方向量出各点在两端点连线 l_{BE}上、下方的最大、最小偏离量 d_{max}和 d_{min}；

3） 直线度误差值 $f_{BE}=d_{max}-d_{min}$。

6.3.1.2 在任意方向上(见图 52)

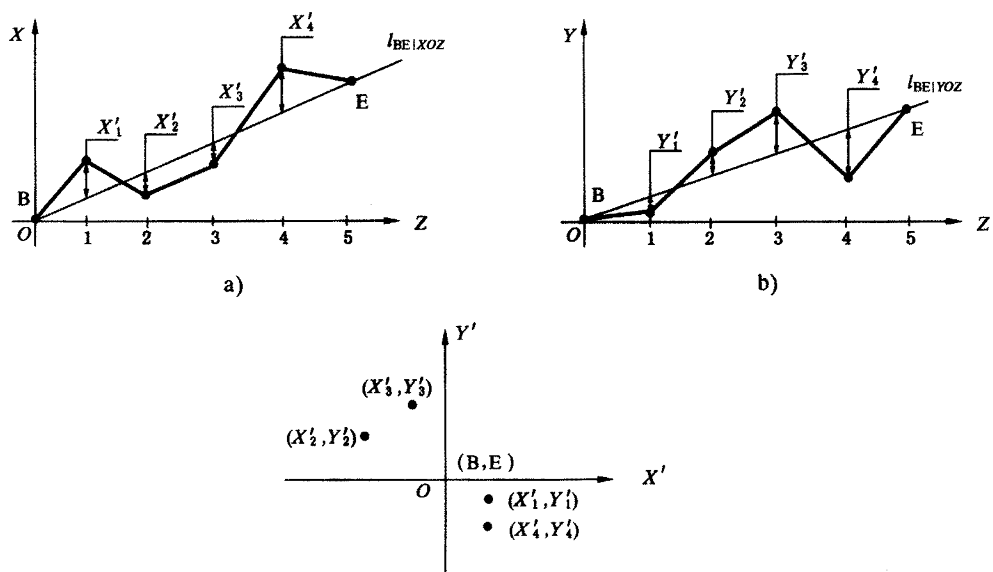


图 52

作图步骤：

1） 将各测得点的坐标值(X_i,Y_i,Z_i)按一定比例分别绘制在 XOZ,YOZ 两个平面坐标系中，得到两个投影面内的测得直线图形，见图 52a)、b)；

2） 分别连接图 52a),b)上的首末两点 B、E，得到两端点连线 l_{BE}在 XOZ,YOZ 坐标平面上的投影线 $l_{BE|XOZ}$,$l_{BE|YOZ}$；

3） 沿 X 和 Y 方向分别量取各测得点到两端点连线 l_{BE}的距离 X'_i 和 Y'_i，且找出 X'_i 和 Y'_i 中的最大、最小值 X'_{max},X'_{min},Y'_{max},Y'_{min}；

4） 将 XOZ 和 YOZ 平面上最大、最小值点投影到垂直于两端点连线 l_{BE}的平面 $X'OY'$上，见图 52c)；

5） 按下述几种最大、最小值的不同情况，选择作图方法，求出直线度误差值 ϕf_{BE}：

a） 一个坐标平面上的最大、最小值为单向或双向，见图 53a)、b)，另一个坐标平面上的最大、最小

值均为零，见图 53c)(两点情况)：

则成单向或双向的测得直线图形上，其纵坐标方向的最大值与最小值之差即为直线度误差值 f_{BE}，见图 53d)，e)。

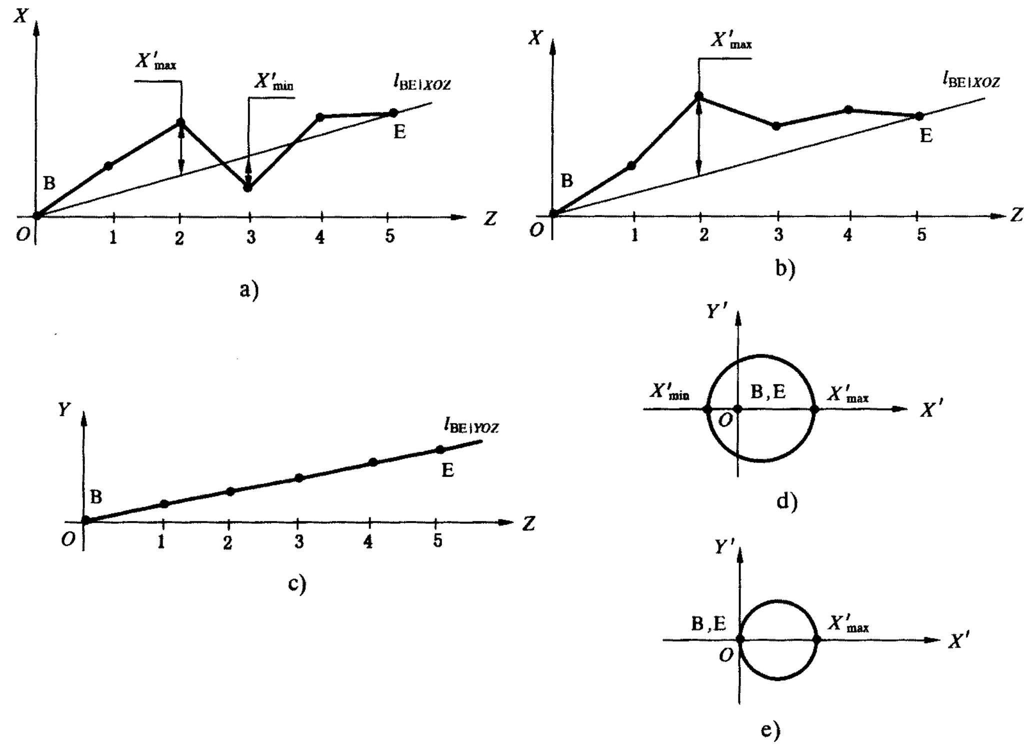


图 53

b) 两个坐标平面上的最大、最小值均为单向，见图 54a)，b)(三点情况)：

先以距离最远两点的连线为直径作圆，如另一点位于圆内，则该圆直径即为直线度误差值 ϕf_{BE}，见图 54c)；如另一点不在圆内，则以三点作圆(步骤如下)，其直径即为直线度误差值 ϕf_{BE}(见图 55)。

三点作圆的步骤(见图 55)：

ⅰ) 作任意两点的两条连线，并分别作其中垂线；

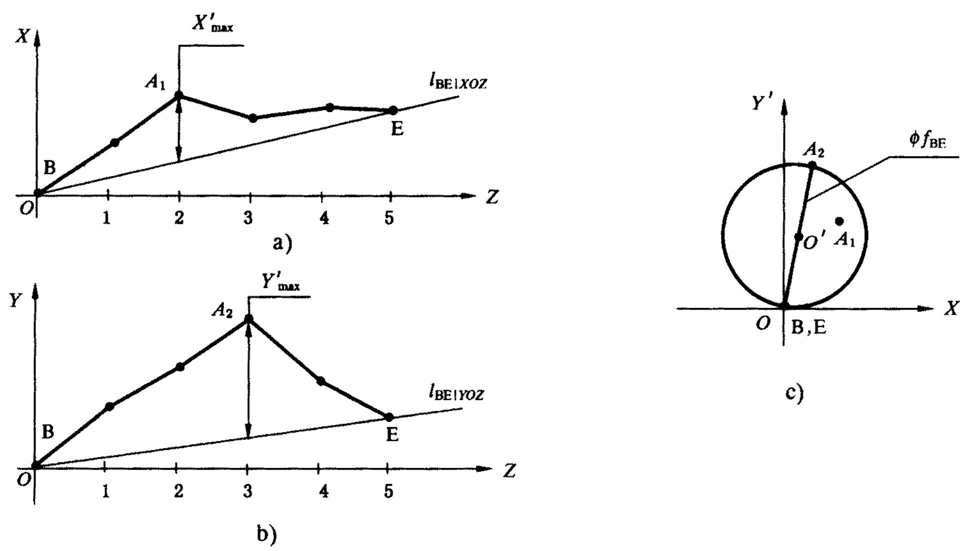


图 54

ⅱ） 以两条中垂线的交点为圆心，以 OO' 为半径作圆；

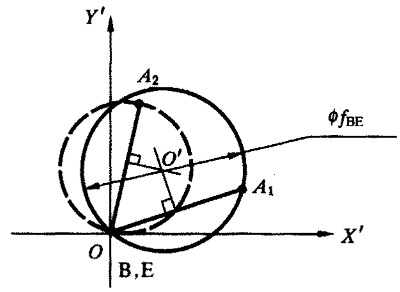


图 55

注：当两个坐标面上的最大值为同一点时，该点到两端点连线 l_{BE} 的距离即为直线度误差值 ϕf_{BE}，见图 56。

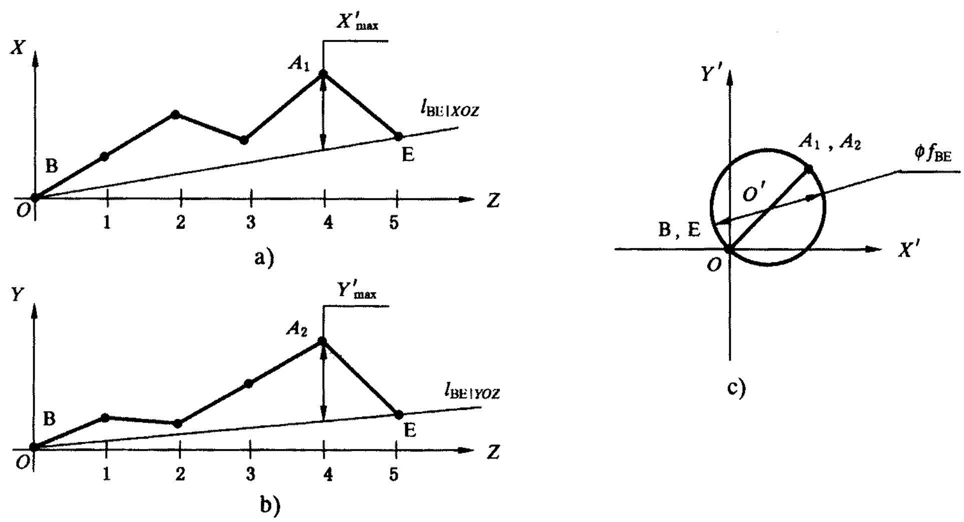


图 56

c） 一个坐标平面上的最大、最小值为单向，见图 57a)，另一个坐标平面上的最大、最小值为双向，见图 57b)(四点情况)：

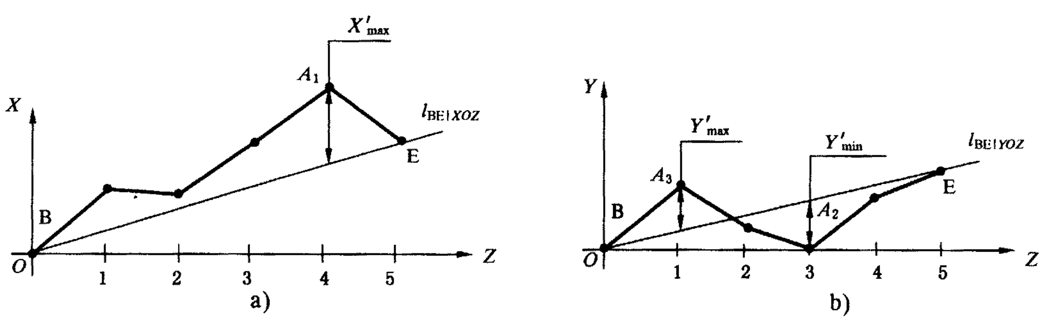


图 57

先在 $X'OY'$ 坐标图上连接三个最大、最小值对应点和坐标原点成一个四边形(见图 58)，按下述四点作图方法求出直线度误差值 ϕf_{BE}。

四点作图步骤(见图 58)：

ⅰ） 作四边形对角点连线；

ⅱ） 以两对角点连线中较长者为直径作圆；

ⅲ） 若另两个对角点位于该圆内，则该圆的直径即为直线度误差值 ϕf_{BE}；

ⅳ) 若另两个对角点中有一个点位于圆外，则以对角两点与圆外点这三点按三点作图步骤(见图55)作图，求出直线度误差值 ϕf_{BE}；

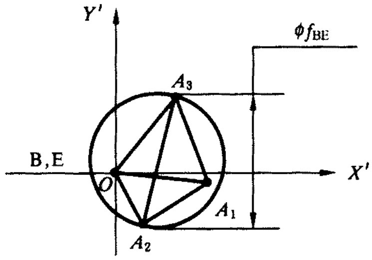


图 58

d) 两个坐标平面上的最大、最小值均为双向，见图 59a)、b)(五点情况)：

先在 $X'OY'$ 坐标图上连接四个最大、最小值点，成一个四边形，若坐标原点在该四边形之内，见图59c)，则按四点作图方法(见图 58)求出直线度误差值 ϕf_{BE}。

若坐标原点不在该四边形之内，见图 59d)，则连接五个点成一个五边形，参照四点或三点作图法步骤，求出直线度误差值 ϕf_{BE}。

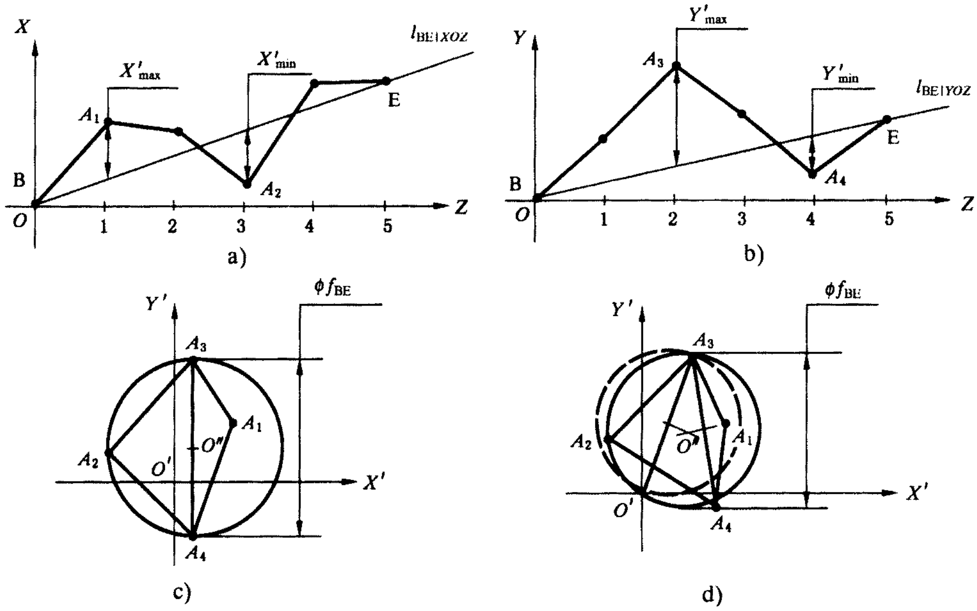


图 59

若各测得点较均匀地落在 $X'OY'$ 平面上的多个象限内，则可求出各点距两端点连线的半径距离 R_i：

$$R_i = (X_i^2 + Y_i^2)^{1/2} \qquad \cdots\cdots(50)$$

取其中 R_{max} 的两倍作为直线度误差值 ϕf_{BE} 的近似值(见图 60)。

6.3.2 计算法

6.3.2.1 在给定平面(给定方向或任意方向的投影)上(见图 61)

计算步骤：

1) 根据各测得点的坐标值，求出两端点连线 l_{BE} 的方程系数 a, q：

$$a = Z_B - \frac{Z_E - Z_B}{X_E - X_B} X_B \qquad \cdots\cdots(51)$$

$$q = \frac{Z_E - Z_B}{X_E - X_B} \qquad \cdots\cdots(52)$$

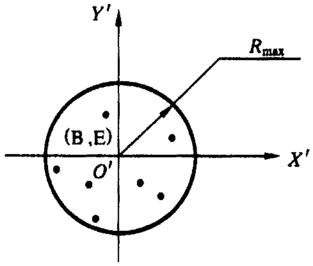


图 60

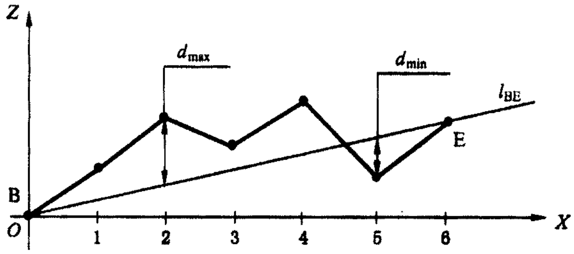


图 61

式中：

Z_B，X_B——起始点 B 的坐标值；

Z_E，X_E——末端点 E 的坐标值。

2) 将各测得点的坐标值 Z_i，用下式变换为新的坐标值：

$$d_i = Z_i - a - qX_i \quad \cdots\cdots(53)$$

3) 求出 d_i 中的最大、最小值之差，该值即为直线度误差值 f_{BE}：

$$f_{BE} = d_{max} - d_{min}$$

实际应用中，为了简化计算，可将起始点 B 定在坐标原点上，即：$X_0 = X_B = 0$，$Z_0 = Z_B = 0$；且将 X_i 用测点序号 0，1，2，……，n 代替，则式(51)、式(52)和式(53)可简化为：

$$q = \frac{Z_E}{n} \quad \cdots\cdots(54)$$

$$a = 0$$

$$d_i = Z_i - \frac{Z_E}{n} i \quad \cdots\cdots(55)$$

6.3.2.2 在任意方向上(见图 62)

计算步骤：

1) 根据各测得点的坐标值，求出两端点连线 l_{BE} 的方程系数 a，b，q，p：

$$a = X_B - \frac{X_E - X_B}{Z_E - Z_B} Z_B \quad \cdots\cdots(56)$$

$$b = Y_B - \frac{Y_E - Y_B}{Z_E - Z_B} Z_B \quad \cdots\cdots(57)$$

$$q = \frac{X_E - X_B}{Z_E - Z_B} \quad \cdots\cdots(58)$$

$$p = \frac{Y_E - Y_B}{Z_E - Z_B} \quad \cdots\cdots(59)$$

式中：

X_B，Y_B，Z_B—— 起始点 B 的坐标值；

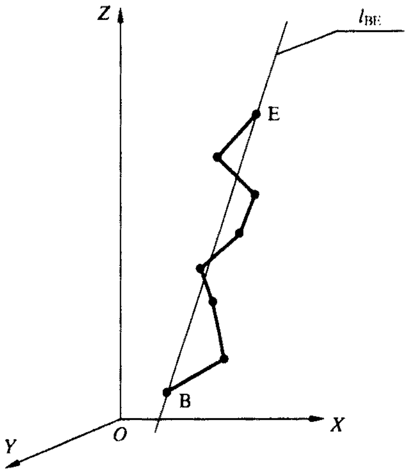


图 62

X_E, Y_E, Z_E—— 末端点 E 的坐标值。

2） 将各测得点的坐标值 X_i, Y_i 代入下式，求出各测得点距两端点连线 l_{BE} 的半径距离 R：

$$R_i = [(X_i - a - qZ_i)^2 + (Y_i - b - pZ_i)^2]^{1/2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (60)$$

3） 找出 R_i 中的最大值 f_1；

4） 按一定优化方法改变 a, b 值；

5） 按式(60)逐个计算变换 a, b 后的 R_i 值，并找出 R_i 中的最大值 f_2；

6） 将 f_2 与 f_1 相比较，使较小者为 f_1；

7） 反复进行 4)～6)的步骤，使 f_1 为最小；

8） 所求出的 f_1 最小值的两倍即为直线度误差值 ϕf_{BE}。

注 1：有时为了计算简化起见，把第 3)步找出的 R_i 最大值 f_1 的两倍作为按两端点连线法评定的直线度误差值 ϕf_{BE} 的近似值。

注 2：起始点 B 定在坐标原点时，即 $X_B = Y_B = Z_B = 0$，则上述公式可简化为：

$$a = 0, b = 0$$

$$q = \frac{X_E}{Z_E} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (61)$$

$$p = \frac{Y_E}{Z_E} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (62)$$

$$R_i = [(X_i - qZ_i)^2 + (Y_i - pZ_i)^2]^{1/2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (63)$$

7 仲裁

7.1 图样上未规定检测方案，而在测量时发生争议：

7.1.1 如用相同的测量方法和数据处理方法时，则用准确度更高的计量器具测量进行仲裁。

7.1.2 如用不同的测量方法时，则按不确定度较小的测量方法进行仲裁。

7.1.3 如用相同的测量方法，而用不同的数据处理方法时，则按最小包容区域法评定的误差值进行仲裁。

7.2 图样上已给定检测方案而在测量时发生争议，则按给定的检测方案进行仲裁。