

《机械工程基础实验》

实 验 指 导 书

互换性测量实验 1

形位误差测量 1：导轨直线度测量

形位误差测量 2：平板平面度测量

浙江大学机械工程实验教学中心

2024 年 9 月

实验一 形位误差测量 1：导轨直线度测量

一、实验目的和要求

1. 了解水平仪、光学平直仪的测量原理及使用方法；
2. 掌握导轨直线度的检验方法及数据处理；

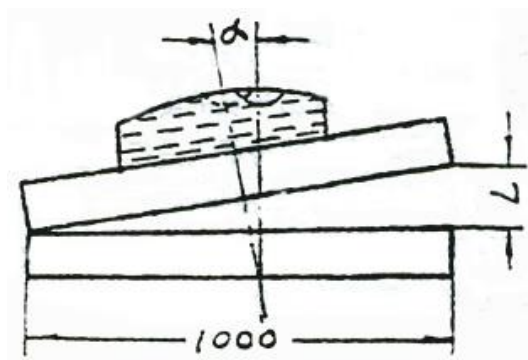


图 1-1

二、测量原理与仪器说明

1. 水平仪

水平仪测量精度高，使用方便，广泛用来调整机床或仪器的水平位置，也是导轨直线度测量中常用的一种检查方法，它只能用来检查导轨在垂直平面内的直线度，在加用垫铁后可检查导轨的扭曲度。

水平仪是一种测角仪器，其主要工作部分是水准器，见图 1-1，水准器是一个封闭的玻璃管，内装液体并留有一定长度的气泡，玻璃管上刻有与内壁曲率半径相应的间距刻线，不论水平仪放在任何倾斜位置，水准器内的液面始终是在水平位置，而气泡总是向水准最高处移动，这就是水平仪的工作原理。

水平仪有条形水平仪、框形水平仪和合象水平仪三种。框形水平仪最常用，它的壳体的四个外表面经过仔细加工。两侧面与底面垂直，顶面与底面平行。

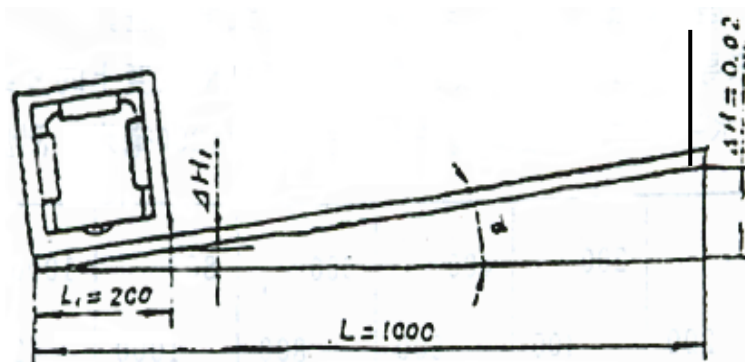


图 1-2

水平仪的刻度值是气泡移动一格时的倾斜度，以角度秒表示，也采用以毫米 / 米表示。刻度值为 $0.02 / 1000$ 的水平仪，即水平仪气泡移动一格，表示在 1000 毫米长度上，二端点相距高度为 0.02

毫米，见图 1—2，如果在距离 L_1 为 200 毫米处，二端点高度相差一格时，按三角函数关系，可得 ΔH_1 为 0.004 毫米。

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta H}{L} = \frac{0.02}{1000} = 0.00002$$

$$\Delta H_1 = L_1 \times \operatorname{tg} \alpha = 200 \times 0.00002 = 0.004 \text{ 毫米}$$

由上式可知，水平仪的实际变化值与所使用的水平仪垫铁二支点间距有关。

为了精确地测量出导轨的实际形状误差，以及防止水平仪工作表面的磨损，往往将水平仪放在专用的垫铁上进行测量。测量时，依次移动水平仪垫铁，使每次的测量位置互相衔接，这样才能测得与导轨直线度形状接近的连续曲线，通常将导轨在全长上按垫铁支承间距分段，水平仪依次移动，记下每一位置的读数值，用坐标作图法画出曲线，用直线连接首尾二点，则曲线与此直线相应坐标的最大差数，即为所测导轨的直线度误差。

例：有一机床导轨长 1.6 米，测出其全长上的直线度误差。用 0.02 / 1000 水平仪进行测量，垫铁长度为 200 毫米，测量结果读数如下：

水平仪位置 (毫米)	0	200	400	600	800	1000	1200	1400
	~200	~400	~600	~800	~1000	~1200	~1400	~1600
水平仪读数(格)	1	5	-3	-2	0	6	4	5

(1) 作图法

根据所测各点数据作图，由图 1—3 可知导轨的形状，按二端点连线法可得，此导轨在垂直面上的直线度误差值 $f = \Delta f_1 + \Delta f_2 = 2 + |-9| = 11$ 格 $= 11 \times 200 \times 0.02 / 1000 = 44 \mu\text{m}$

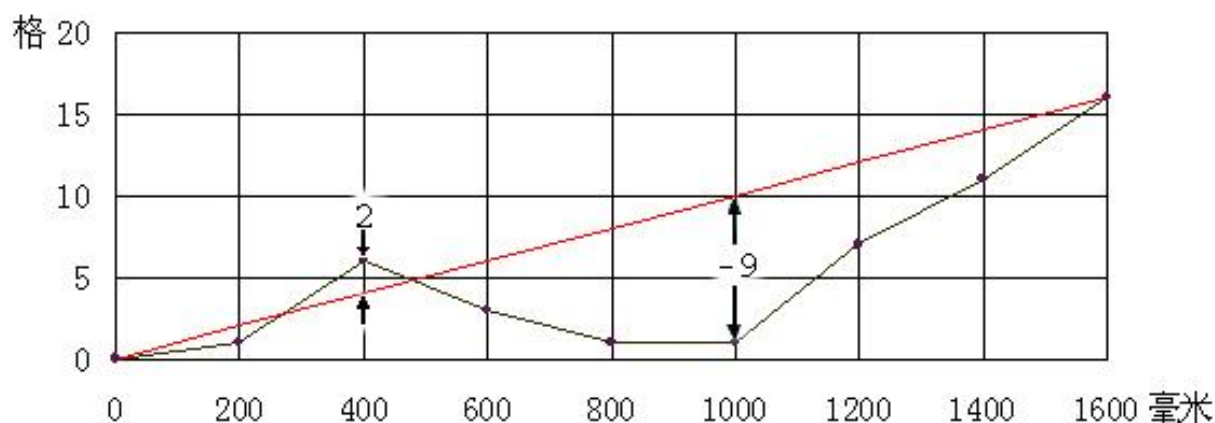


图 1—3

(2) 计算法

水平仪位置 (毫米)	0 ~200	200 ~400	400 ~600	600 ~800	800 ~1000	1000 ~1200	1200 ~1400	1400 ~1600
水平仪读数(格)	1	5	-3	-2	0	6	4	5
算术平均值(格)	$(1+5-3-2+0+6+4+5) / 8 = 2$							
相对值(格)	-1	3	-5	-4	-2	4	2	3
累积值(格)	-1	(2)	-3	-7	(-9)	-5	-3	0
直线度误差(μm)	$[2 - (-9)] \text{ 格} = 11 \times 200 \times 0.02 / 1000 = 0.044 \text{ mm} \times 1000 = 44 \mu\text{m}$							

计算结果与作图所得结果完全一致。

注意：在进行导轨扭曲度测量时，必须使用垫铁，水平仪安放位置与导轨方向垂直，如图 1—4 装置进行，测量也是分段进行，读数的最大代数差值，即导轨的扭曲度误差。

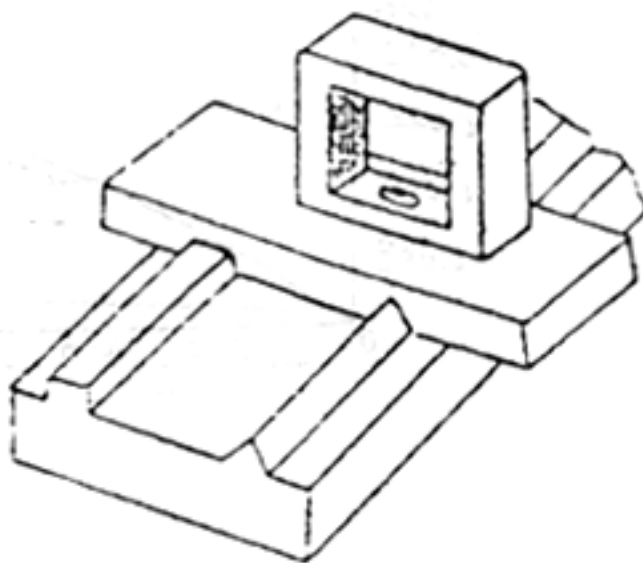


图 1—4

2. 光学平直仪

光学平直仪也叫自准直仪，它是一种测量微小角度变化量的精密光学仪器。该仪器的读数目镜能转 90° ，即可测量导轨在垂直面内的直线度，又能测量水平面内的直线度，还可测量平面度、垂直度和平行度误差以及小角度等。仪器的分度值为 $0.005 / 1000$ 。

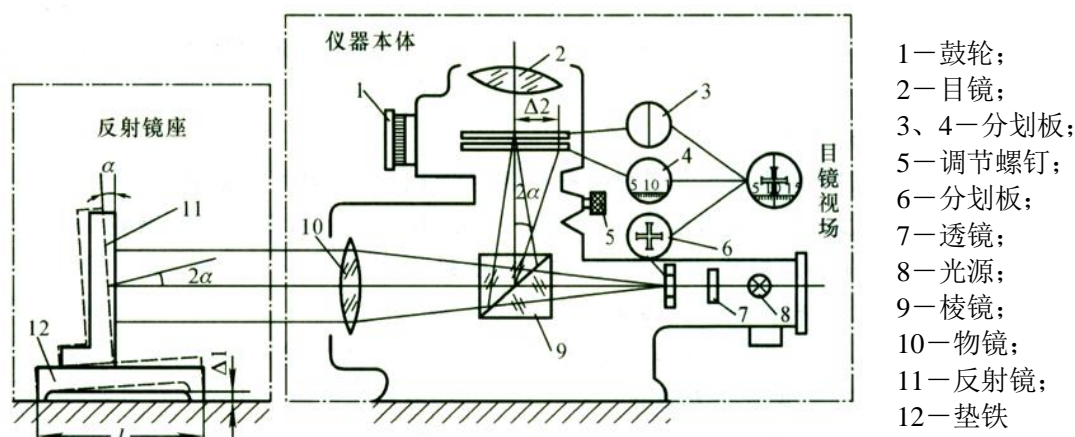


图 1-5 平直仪光学系统

仪器由仪器本体和反射镜座两部分组成，其光学系统如图 1-5 所示。由光源 8 发出的光线照亮了带有一个十字刻线的分划板 6（位于物镜 10 的焦平面上），并通过立方棱镜 9 及物镜 10 形成平行光束投射到反射镜 11 上。而经反射镜 11 返回之光线穿过物镜 10，投射到立方棱镜 9 的半反半透膜上，向上反射而会聚在分划板 3 和 4 上（两个分划板皆位于物镜 10 的焦平面上）。其中件 4 是固定分划板，上面刻有刻度线，而件 3 是可动分划板，其上刻有一条指标线。在目镜视场中可以同时看到可动分划线、固定分划线及十字刻线的影像（见图 1-6）。当反射镜镜面与主光轴的交角发生变化时，十字像的位置也随之变化。用丝杆测微机构移动可动分划板，使其上的指标线对十字像作跟踪瞄准，则可测出此位移量，从而测出了反射镜与主光轴的交角变化。丝杆测微机构的鼓轮 1 上共有 100 个小格。而鼓轮每回转一周，分划板 3 上的指标线在视场内移动 1 个格，所以视场内的 1 格等于鼓轮上的 100 个小格。鼓轮上的 1 小格为仪器的角分度值 $1''$ ，即 1 小格的刻度值为 $0.005 / 1000$ 。

用平直仪测量直线度误差，就是将被测要素与平直仪发出的平行光线（模拟理想直线）相比较，并将所得数据用作图法或计算法求出被测要素的直线度误差值。

三、实验步骤提示

1. 在导轨上按垫铁的支承间距分段并作标记。
2. 将垫铁移至靠仪器本体一端的第一个位置，转动读数鼓轮 1，使指标线与十字影像对准，记下平直仪读数（格数）。
3. 将垫铁依次移动位置，读取读数。
4. 分别用计算法和作图法求出直线度误差。

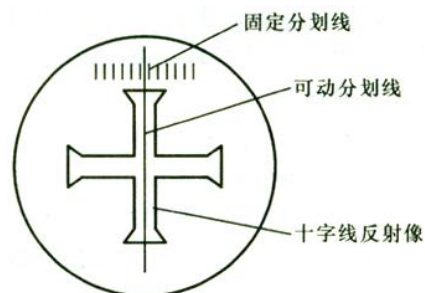


图 1-6

四、思考题

1. 光学平直仪测量导轨直线度时，若光束未在分划板上看到成像会是什么原因，该如何处理？

实验一 形位误差测量 2：平板平面度测量

一、实验目的和要求

1. 掌握所用仪器的使用方法；
2. 学习平面度的测量方法及其数据处理的方法。

二、测量原理与仪器说明

1. 合象水平仪

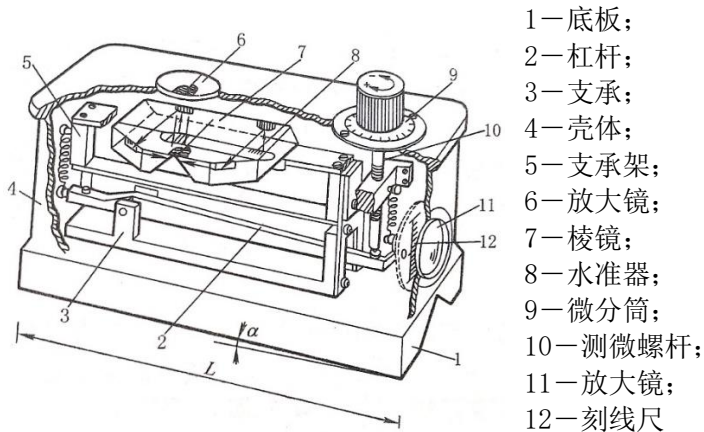


图 1—7

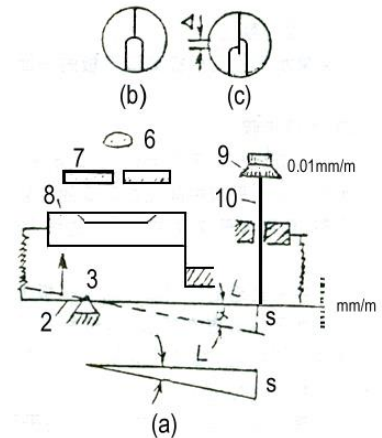


图 1—8

合象水平仪是测量平面度、直线度的主要仪器，它的结构如图 1—7 所示，它的内部测量系统如图 1—8 所示，由杠杆 2、水准器 8、两个棱镜 7、测量系统 9、10、11 以及放大镜 6 所组成。合象水平仪就是利用棱镜将水准器中的气泡象放大，来提高读数的精确度，利用杠杆、微动螺杆这一套传动机构来提高读数的灵敏度。所以被测量件倾斜 0.01mm/m 时，就可精确的在合象水平仪中读出（在合象水平仪中水准器主要是起指零的作用）。

合象水平仪在使用时应将合象水平仪放于图 1—9 所示的垫铁上，保持相对不动，再将垫铁放在被测表面上。如果被测表面与桥板接触的两点连线，同自然水平面基准平行，此时水准器的气泡位于两棱镜的中间位置，气泡边缘通过合象棱镜 7 所产生的影象，在放大镜 6 中观察，将出现如图 1—8 (b) 所示的情况。但在实际测量中，由于被测表面安放位置不理想和被测量表面本身不水平，导致气泡移动，其现场情况将如图 1—8 (c) 所示。此时可转动测微螺杆 10，使水准器转动一角度，从而使气泡返回棱镜组 7 的中间位置，则图 1—8 (c) 中两影象的错移量 Δ 消失而恢复成一个光滑的半圆头，如图 1—8 (b)，测微螺杆移动量 s 导致水准器的转角 α ，如图 1—8 (a)，与被测表面相邻两点的高度差 s 有确切的对应关系，即

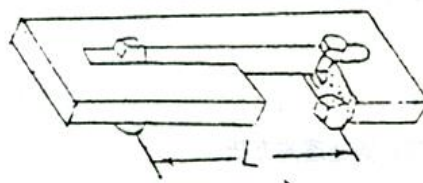


图 1—9

$$s = 0.01 La (\mu\text{m})$$

式中：0.01—合象水平仪的分度值 (mm / m)

L—垫铁节距 (mm)

a—角度读数值(用格数来计数)

在测量前，首先在平板上画好画格，如图 1—10 所示，根据画格的方向和测量点进行测量。

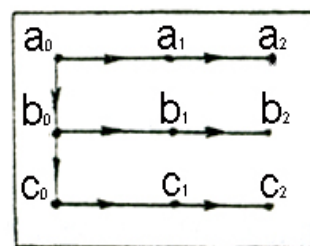


图 1—10

三、测量数据的处理

平面度误差值的评定有下列三个方法：

1. 三点法：

以实际被测要素上任意选定的三点所形成的平面作为评定基准，并以平行于此基准平面的两包容平面之间的最小距离作为平面度误差值 f 。

2. 对角线法：

以通过实际被测要素的一条对角线的两端点的连线、且平行于另一条对角线的两端点连线的平面作为评定基准，并以平行于此基准平面的两包容平面之间的最小距离作为平面度误差值 f 。

3. 最小包容区域法：

两平行包容平面与实际被测要素的接触状态符合平面度误差判别法中某一准则时，此两平行平面之间的距离即为平面度误差值 f 。

以上三种评定方法都需要将实际被测要素上各点对某基准平面（测量基准）的坐标值，转换为对与评定方法相应另一基准平面（评定基准）的坐标值，也就是要进行坐标变换。

若把实际被测要素上任一点 $P_{ij}(i, j)$ ，在坐标变换前后的两坐标值之差称为旋转量 Δ_{ij} ，显然，各点的旋转量与其在被测要素上的位置 (i, j) 有关，且呈线性关系，可写成图 1—11 所示的形式，并不失其一般性。

0	P	2P	nP
Q	P+Q	2P+Q	nP+Q
2Q	P+2Q	2P+2Q	nP+2Q
			
.....
			
mQ	P+mQ	2P+mQ	nP+mQ

图 1—11

因此只要按某种评定方法的要求，确定评定基准，即可算出相应的 P、Q 值，获得各点的旋转量，从而实现坐标变换，获得相应评定方法的平面误差值。

例：用水平仪按图 1—10 所示的布线方法测得 9 点共 8 个读数，如图 1—12 (a) 所示，试按各种评定方法确定其平面度误差值。

0	-6	-10
-7	10	-10
-3	22	-8

(a)

0	-6	-16
-7	3	-7
-10	12	4

(b)

图 1—12

解：按测量方法将测得读数顺序累积，并取起始点 a_0 的坐标值为 0，即得图 1—12 (b) 所示各点的坐标值。

- ① 三点法：选定 a_1 、 c_0 、 c_2 三点形成的平面作为评定基准，经过坐标变换后，此三点坐标值应相同，据此可列出下列方程组

$$-6 + 1P = -10 + 2Q = 4 + 2P + 2Q$$

解得 $P = -7$; $Q = -1.5$

则各点的旋转量如图 1—13 (a) 所示，将图 1—12 (b) 与 1—13 (a) 对应点的值相加，即得经坐标变换后的各点坐标，如图 1—13 (b) 所示。

0	-7	-14
-1.5	-8.5	-15.5
-3	-10	-17

(a)

0	-13	-30
-8.5	-5.5	-22.5
-13	2	-13

(b)

图 1—13

由图可见， a_1 、 c_0 、 c_2 三点已为等高 (-13)，则平面度误差值

$$F = (+2) - (-30) = 32$$

- ② 对角线法：按评定方法要求列出下列方程组

$$0 = +4 + 2P + 2Q$$

$$-10 + 2Q = -16 + 2P$$

解得 $P = 0.5$; $Q = -2.5$

则各点的旋转量如图 1—14 (a) 所示, 将图 1—12 (b) 与 1—14 (a) 对应点的值相加, 即得经坐标变换后的各点坐标, 如图 1—14 (b) 所示。

0	0.5	1
-2.5	-2	-1.5
-5	-4.5	-4

(a)

0	-5.5	-15
-9.5	1	-8.5
-15	7.5	0

(b)

图 1—14

由图可见, a_0 和 c_2 等高 (0), c_0 和 a_2 等高 (-15), 则平面度误差值

$$F = (+7.5) - (-15) = 22.5$$

③ 最小包容区域法: 经分析, 估计图 1—12 (b) 所示的实际被测要素似马鞍形, 可能实现最小包容区域判别法的交叉准则, 试选 a_0 和 c_1 为最高点, a_2 和 c_0 两点为最低点。据此列出下列方程组。

$$0 = +12 + P + 2Q$$

$$-10 + 2Q = -16 + 2P$$

解得 $P = -2$; $Q = -5$

则各点的旋转量如图 1—15 (a) 所示, 将图 1—12 (b) 与图 1—15 (a) 对应点的值相加, 即得经坐标变换后的各点坐标值, 如图 1—15 (b) 所示, 由图可见, a_0 、 c_1 和 a_2 、 c_0 已实现交叉准则, 则平面度误差值 $F = 0 - (-20) = 20$

0	-2	-4
-5	-7	-9
-10	-12	-14

(a)

0	-8	-20
-12	-4	-16
-20	0	-10

(b)

图 1—15

比较平面度误差值的上述三个评定方法可见: 三点法的评定结果受选点的影响, 使评定结果不唯一; 对角线法因选点是确定的, 评定结果有唯一性, 但此两法的评定结果均大于定义值, 最小包容区域法的评定结果不仅唯一, 而且最小, 完全符合平面度误差的定义。但是在实际工作中往往需经多次选点试算, 才能获得符合判别法的最小包容区域, 因此, 它主要用于工艺分析及发生争议时的仲裁, 对角线法的评定结果虽然大于定义值, 但相差不多, 由于此法计算方便, 所以应用较广, 本实验采用对角线法。

四、测量步骤提示

1. 将平板放在千斤顶上,大致调水平。水平仪放在平板中间互相垂直的位置上,调整支承千斤顶,使水泡位于中间位置,反复进行调整,直到水平仪放在中间和边线上时水泡的位置变化不大,此时,被测平板大致调水平。
2. 按本实验选定的测量方法在平板上画上画格,如图 1—10 所示。
3. 将水平仪放置在垫铁上,然后使垫铁下边的两个支承与测量平板接触,按顺序测量平板截面上各测点的相对读数并作好记录。
4. 测量数据处理,判断被测平板的平面度误差。

五、思考题

- 1、平板平面度测量中,哪些因素会影响平面度测量结果,如何处理或改进?