

文章编号 1004-924X(1999)05-0135-06

# 圆度仪与 V 形法测量轴圆度的比较

刘 伟

(中国科学院长春光学精密机械研究所 长春 130022)

**摘 要** 为了探究圆度仪与 V 形法测量轴圆度的精度所存在的差异,对圆度仪、V 形法测量轴圆度在原理及精度上进行了分析对比,并对同一轴颈进行了两种方法的测量,得到了两组测量结果。从测量结果上看,两种测量方法的精度基本在同一数量级。

**关键词** 圆度 圆度仪 V 形法

**中图分类号** TH741 **文献标识码** A

## 1 引 言

轴颈圆度的测量有多种方法,但最主要的有圆度仪、V 形法两种。圆度仪的测量方法属于半径测量法,是一种比较理想的测量方法。但由于圆度仪较为精密,要求恒温防振的工作环境,再加上圆度仪的价格比较昂贵,一般工厂和检测单位很少具备,而且也受到轴类零件的外形尺寸、重量所限制,所以圆度仪在使用上受到限制。因此在许多检测场合使用了 V 形法。在 V 形法测量中,前人进行了大量研究,使之逐渐完善。V 形法不受轴类零件的外形尺寸、重量的限制,测量精度也较高,自 60 年代以来得到了广泛的应用。

## 2 圆度仪法测量轴圆度的原理及精度分析

圆度仪有转台式、转轴式两种。转台式适用于小型工件,转轴式适用于大型工件。

### 2.1 转轴式测量原理

转轴式测量原理如图 1。将工件放在工件台上,将传感器固定在仪器精密回转轴系上,测量时工件不动,传感器随轴系一起转动,测头在空间的轨迹形成一理想圆,工件实际轮廓与此理想圆比较,其半径变化由传感器测出经电路处理后通过记录器描绘出被测工件的实际轮廓图形,由计算机算出测量结果。转台式与之相反,工件转动,测头不动。圆度误差函数可用下式

表示<sup>[1]</sup>:  $\Delta r(\theta) = \sum_{i=2}^n c_i \sin(i\theta + \alpha_i)$

式中  $c_i$ —— $i$  阶谐波振幅

$\alpha_i$ —— $i$  阶谐波初始相位

$i=2$ 时二次谐波为椭圆,  $i=3$ 时三次谐波为三棱,  $i=4$ 时四次谐波为四棱等依次类推。

## 2.2 圆度仪精度分析

### 2.2.1 主轴回转误差

在测量过程中, 主轴的晃动直接影响测量精度。目前圆度仪的主轴回转精度一般为  $0.02 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 。对于微米级的测量可以忽略, 对于亚微米级的测量则有影响。实测用的 Talorond73 型圆度仪主轴回转精度为  $\pm 0.01 \mu\text{m}$ 。

### 2.2.2 工件安放误差

#### 1. 工件安装偏心引起的误差

假设工件轴线与回转中心偏心为  $e$ , 则误差为<sup>[2]</sup>:  $\Delta = K e^2 / d_i$

$\Delta$ ——圆度误差

$K$ ——记录误差图形时的放大倍数

$d_i$ ——记录图形的最小直径

实测中  $K = 10000$ ,  $e = 0.5 \mu\text{m}$ ,  $d_i = 120\text{mm}$ , 则  $\Delta = 0.0208 \mu\text{m}$

#### 2. 工件安放倾斜引起的误差

当工件轴线与圆度仪主轴有倾角  $\varphi$  时, 实际圆的轮廓变为椭圆。如针形测头引起的直径误差为:

$\Delta d = 2r \left( \frac{1}{\cos\varphi} - 1 \right)$ , 当  $\theta$  角很小时,  $\frac{1}{\cos\varphi} - 1 \approx \frac{\varphi^2}{2}$ , 则

$\Delta d = r\varphi^2$ 。实测中被测轴的端面与轴线垂直度为  $1 \mu\text{m}$ , 则  $\Delta d = 8.3333 \times 10 \mu\text{m}$ , 此项误差可忽略。

### 2.2.3 测头引起的误差

测头的形状、测头的安装不当、测量力的大小都能引起测量误差。常用的测头有针形、球形、斧形、圆柱形。测头形状选择的原则是: 要同时反映表面粗糙度时, 可用针形测头; 如要排除表面粗糙度的影响时, 可用斧形或圆柱形测头。测量力的大小对测量原始数据是有影响的。测力太大则产生变形, 测力太小则有时接触不稳定。测头安装不当也会引起误差。如图 2, 如果测头水平偏离旋转中心的距离为  $e$ , 则相应的偏转角为:  $\theta = \arcsin(e/r)$ 。当被测表面有增量  $\Delta r$  时, 测头实际位移:

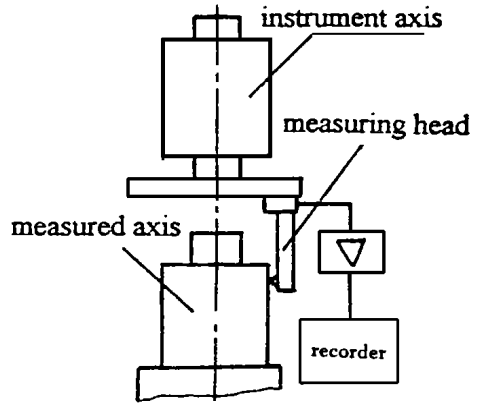


Fig. 1 The principle of roundness measuring instrument

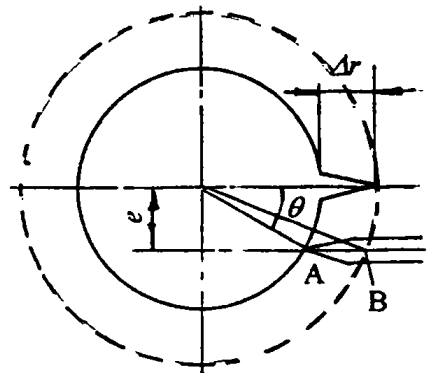


Fig. 2 Error caused by bias of measuring head

如果测头水平偏离旋转中心的距离为  $e$ , 则相应的偏转角为:  $\theta = \arcsin(e/r)$ 。当被测表面有增量  $\Delta r$  时, 测头实际位移:

$$\Delta = AB - \Delta r = \Delta r / \cos\theta - \Delta r = 2\Delta r \sin^2(\theta/2) = \Delta r \theta^2 / 2$$

当  $\theta < 8$  时, 则  $\Delta < 0.01\Delta_r$ , 此项误差可忽略。

### 2.2.4 表面粗糙度的影响

在圆度测量过程中, 表面粗糙度对测量结果有一定的影响。如要排除其影响, 采用滤波法可以消除。正确选择测头(如斧形测头)可达到机械滤波的作用。

### 2.3 误差合成

$$\Delta_{\text{总}} = 0.0208 \pm 0.01 = \begin{cases} 0.0308 (\mu\text{m}) \\ 0.0108 (\mu\text{m}) \end{cases}$$

## 3 V 形法测量原理及精度分析

### 3.1 V 形法测量原理

V 形法测量原理如图 3, 将工件放在 V 形块上, 在轴上放一个读数头, 通过旋转工件, 则在读数头上反映了  $a, b, c$  三点的变化<sup>[3]</sup>:

$$\Delta y = \Delta r_a + \Delta r_b \frac{\cos(\alpha - \gamma)}{\sin 2\alpha} + \Delta r_c \frac{\cos(\alpha + \gamma)}{\sin 2\alpha}$$

一般采用如下三种形式:

$$2\alpha = 60^\circ \quad \gamma = 30^\circ$$

$$2\alpha = 90^\circ \quad \gamma = 30^\circ$$

$$2\alpha = 60^\circ \quad \text{分别取 } \gamma = 0^\circ \text{ 和 } \gamma = 30^\circ$$

在实际测量中用  $2\alpha = 60^\circ, \gamma = 30^\circ$  进行如下方法测量: 将轴横截面分为十二等分, 各等分点的误差为  $\Delta r_1, \Delta r_2 \dots \Delta r_{12}$ , 测头反映的示值为  $\Delta y_1, \Delta y_2 \dots \Delta y_{12}$ , 则

$$\Delta y_1 = \Delta r_1 + \Delta r_6 / \sin 2\alpha + \Delta r_{10} / \text{tg} 2\alpha$$

将轴顺时针旋转 30 则 2 点的示值为

$$\Delta y_2 = \Delta r_2 + \Delta r_7 / \sin 2\alpha + \Delta r_{11} / \text{tg} 2\alpha$$

如此这样轴顺时针旋转一周停留 12 个位置, 就得到 12 个方程, 构成一个方程组:

$$\Delta y_1 = \Delta r_1 + \Delta r_6 / \sin 2\alpha + \Delta r_{10} / \text{tg} 2\alpha$$

$$\Delta y_2 = \Delta r_2 + \Delta r_7 / \sin 2\alpha + \Delta r_{11} / \text{tg} 2\alpha$$

.....

$$\Delta y_{11} = \Delta r_{11} + \Delta r_4 / \sin 2\alpha + \Delta r_8 / \text{tg} 2\alpha$$

$$\Delta y_{12} = \Delta r_{12} + \Delta r_5 / \sin 2\alpha + \Delta r_9 / \text{tg} 2\alpha$$

这个方程组的解是一系列不定解, 其数值均按正弦分布。为解此方程组, 按最小二乘圆算法, 加一条件——即使  $r_i^2$  为最小, 这样解得

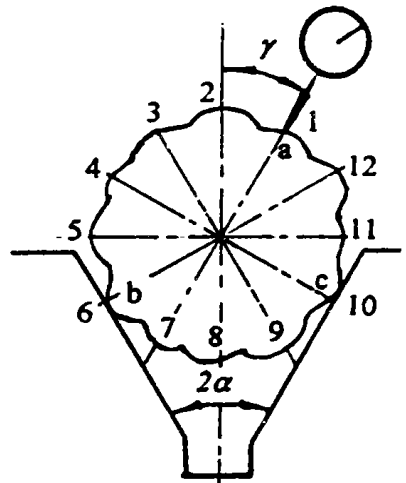


Fig. 3 The principle of V-type method

$$\Delta r_1 = K_1 \Delta y_1 + K_2 \Delta y_2 + K_3 \Delta y_3 + \dots + K_{12} \Delta y_{12}$$

$$\Delta r_2 = K_{12} \Delta y_1 + K_1 \Delta y_2 + K_2 \Delta y_3 + \dots + K_{11} \Delta y_{12}$$

$$\Delta r_3 = K_{11} \Delta y_1 + K_{12} \Delta y_2 + \dots + K_{10} \Delta y_{12}$$

.....

$$\Delta r_{11} = K_3 \Delta y_1 + K_4 \Delta y_2 + K_5 \Delta y_3 + \dots + K_2 \Delta y_{12}$$

$$\Delta r_{12} = K_2 \Delta y_1 + K_3 \Delta y_2 + K_4 \Delta y_3 + \dots + K_1 \Delta y_{12}$$

式中:  $K_1, K_2, K_3, \dots, K_{11}, K_{12}$  为系数, 分别为 0.208, 0.144, -0.167, 0.127, -0.167, 0, -0.042, 0.433, -0.167, 0.072, -0.167, 0。这样就得出了  $\Delta r_1, \Delta r_2, \dots, \Delta r_{12}$ , 其中圆度误差为:  $\Delta = \max \Delta r - \min \Delta r$

### 3.2 V形法测量精度分析

传统的V形法为卧式, 即在水平面上放置两个V形块, 被测轴放在V形块上, 测头放在轴上方。但在实际测量中由于被测轴的体积重量( $\Phi 120 \times 250, 25\text{kg}$ )较大, 采用传统的卧式转动较困难, 如加卸载装置, 则卸载皮带产生的振动严重地影响了测量结果, 因此采用了立式结构。如图4, 用手转动圆盘1, 使轴转动。

#### 3.2.1 两个V形块不在同一直线上带来的误差

设两个V形块不在同一直线上, 如图5, 则相当于与轴线有偏转角 $\Psi$ , 在测头的反映量为:

$$\Delta y = r(1/\sqrt{\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha \cos^2 \Psi} - 1)(1/\sin^2 2\alpha + 1/\text{tg}^2 2\alpha)$$

用刀口尺检测, 可以控制 $\Psi$ 在1以内, 则带来的圆度误差 $\Delta = 0.0017\mu\text{m}$ 。

#### 3.2.2 润滑油膜的影响

为了使被测轴在V形块上转动灵活, 须在被测轴与V形块之间加少许稀的润滑油。由于油膜有一定的厚度, 使轴浮动在油膜上, 因此在测头上有误差反映。所采用仪表油的油膜厚度一般为 $0.01\mu\text{m}$ , 则带来的圆度误差 $\Delta = 0.0047\mu\text{m}$ 。

#### 3.2.3 转动手劲不匀带来的误差

在测量过程中用手转动被测轴, 由于要转动十二次, 因此每次使用的手劲有一定的差别, 反映在测头上带来一定的误差。手劲不匀一般带来0.5~1个格值的偏差。读数干涉仪格值为 $0.05\mu\text{m}$ , 则带来的圆度误差 $\Delta = 0.0137\mu\text{m}$ 。

#### 3.2.4 底部支撑结构的影响<sup>[4]</sup>

由于被测轴立式放置, 在底部要有一定的支撑。轴在转动过程中, 由于半径误差轴心有径向窜动。如采用一个钢球支撑, 当被测轴较重时, 使钢球变形较大, 这时轴不能自由由径向窜动, 从而使轴与V形块产生较大的变形而带来误差。对于重量较小的轴此项误差较小。改变结构,

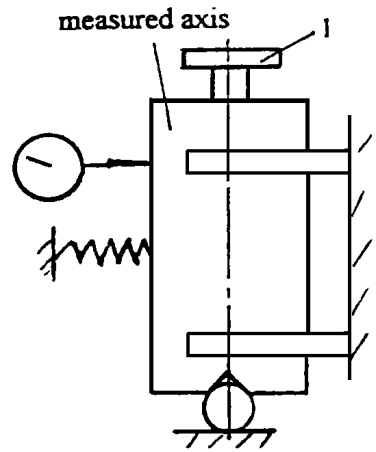


Fig. 4 V-type method of vertical structure

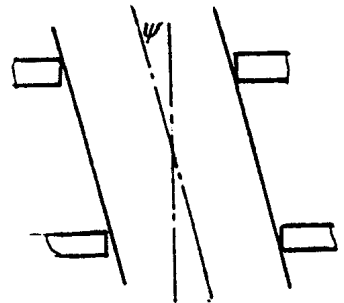


Fig. 5 Error caused by incorrect place

采用多个钢球支撑可消除此项误差。

### 3.2.5 测头安装偏心引起的误差

此项误差与 2.2.3 中圆度仪的测头安装偏心引起的误差类似。

$$\Delta = \Delta_y - \Delta_y = \Delta_y \theta^2 / 2$$

同 2.2.3 中一样, 当  $\theta < 8$  时, 此项误差可忽略。

### 3.2.6 测头指示值漂移引起的误差

由于测量需要持续一定的时间, 因此测头指示值会漂移而带来误差。例如使用干涉仪读数时, 如在 3min 内完成四个测回, 则漂移 0.5 ~ 1 个格值。干涉仪格值为  $0.05\mu\text{m}$ , 则带来的圆度误差  $\Delta = 0.0137\mu\text{m}$ 。

### 3.3 误差合成

$$\Delta_{\text{总}} = 0.0017 \pm \sqrt{(0.0047)^2 + (0.0137)^2 + (0.0137)^2} = \begin{cases} + 0.0216(\mu\text{m}) \\ - 0.0182(\mu\text{m}) \end{cases}$$

## 4 两种方法对同一轴测得的结果

对一直径  $\Phi 120\text{mm}$ , 长  $250\text{mm}$  的轴, 用两种方法分别测量三个截面, 得出圆度结果如下。

V 形法测量(最小二乘圆法评定):

截面 I:  $0.11\mu\text{m}$ , 截面 II:  $0.09\mu\text{m}$ , 截面 III:  $0.09\mu\text{m}$

圆度仪测量(最小包容法评定):

截面 I:  $0.09\mu\text{m}$ , 截面 II:  $0.06\mu\text{m}$ , 截面 III:  $0.06\mu\text{m}$

## 5 结 论

两种方法测量的结果基本接近, 属于同一数量级。V 形法可以在加工过程中监测轴的圆度, 最后用圆度仪作出最终的检定结果。

### 参 考 文 献

- 1 黄清渠. 几何量计量. 北京. 机械工业出版社, 1981
- 2 童竟. 几何量测量. 北京. 机械工业出版社, 1986
- 3 皱自强. 不圆度的 V 形测量法. 光学机械, 1978(2): 41 ~ 57
- 4 张景和. V 形法测量中支承对测量精度的影响, 光学 精密工程, 1998(5): 128 ~ 132

## Comparison Between the Use of Roundness Measuring Instrument and V-type Method in Measuring the Axis' Roundness

LIU Wei

(*Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022*)

### Abstract

In order to probe if there has measuring precision difference between Roundness Measuring Instrument and V-type Method in measuring roundness, the article compares the two methods for measuring the axis' roundness on the principle and precision. The two methods are used to measure the roundness of the same axis neck and two groups of measuring results are obtained. From the measuring results we can conclude that the measuring precision of the two methods has the same magnitude order.

**Key words:** Roundness, Roundness measuring instrument, V-type method

刘伟男, 1967年生, 1990年毕业于陕西机械学院精密仪器工程系, 获学士学位。自毕业以来一直从事精密仪器、精密检测的设计研究工作。