

V形法测量中支承对测量精度的影响

张景和

(中国科学院长春光学精密机械研究所 长春 130022)

摘要 分析了在V形法测量轴径过程中,单个钢球支承与多个钢球支承对测量精度的影响,设计了多个钢球支承结构,给出了两组实测数据。数据对比可以看出,支承结构不同会带来很大的测量误差。

关键词 支承结构 V形法测量 轴径圆度

1 引言

回转轴系的精度主要取决于回转轴径的圆度,目前决大多数轴径的圆度都是用圆度仪进行测量的。但轴径的圆度在亚微米级精度以及轴径的外形尺寸和重量都很大时,圆度仪的系统误差对测量精度的影响以及圆度仪受所能容纳被测件的空间限制,就造成了圆度仪对特殊轴径测量的局限性。为了解决这一问题,在实际工作中我们选用了V形法测量轴径的圆度。该方法自60年代以来在我所高精度轴径圆度的测量中得到了广泛的应用。我所0.2圆光栅刻划机回转主轴轴径的圆度及角度基准仪回转主轴轴径的圆度都是用V形法测量出来的,其中角度基准仪回转主轴轴径的圆度达到 $0.03\mu\text{m}$,装配后轴系的回转精度达到 $0.022\mu\text{m}$ 。本文介绍的回转主轴与以往的回转主轴有些不同。它重量大(25kg),直径大($\varnothing 20$),长度小($L = 260\text{mm}$),已不能用传统的V形法卧式检测轴径圆度。本文论述了在V形法立式检测中,由于对轴径支承方式的不同,对圆度的测量精度有很大影响。通过理论分析,我们设计了一个相应的支承结构,解决了这一问题。

2 V形法测量轴径不圆度的原理

将轴放在V形块上,如图1所示。把轴径在V形块截面处分成12等份,各等分点处的误差分别为 $\Delta r_1, \Delta r_2, \dots, \Delta r_{11}, \Delta r_{12}$ 。图1中,测量表反映的示值 Δy_1 包含了轴径在1点处的误差 Δr_1 ,6点处的误差 Δr_6 在测头方向的分量 $\Delta r_6 \sin \alpha$ 以及10点处的误差 Δr_{10} 在测头方向的分量 $\Delta r_{10} \frac{1}{\tan \alpha}$,也就是,

$$\Delta y_1 = \Delta r_1 + \Delta r_6 \sin \alpha + \Delta r_{10} \frac{1}{\tan \alpha}$$

轴径顺时针转30°到达2点, 同上面一样, 此时2点处的测头示值为

$$\Delta y_2 = \Delta r_2 + \Delta r_7 \sin \alpha + \Delta r_{11} \frac{1}{\tan \alpha}$$

轴径顺时针转动一圈停留12个位置, 便可以构成一个线性方程组

$$\Delta y_1 = \Delta r_1 + \Delta r_6 \sin \alpha + \Delta r_{10} \frac{1}{\tan \alpha}$$

$$\Delta y_2 = \Delta r_2 + \Delta r_7 \sin \alpha + \Delta r_{11} \frac{1}{\tan \alpha}$$

.....

$$\Delta y_{11} = \Delta r_{11} + \Delta r_4 \sin \alpha + \Delta r_8 \frac{1}{\tan \alpha}$$

$$\Delta y_{12} = \Delta r_{12} + \Delta r_5 \sin \alpha + \Delta r_9 \frac{1}{\tan \alpha}$$

解这个方程组, 便可以得到轴径各点的误差式^[1]

$$\Delta r_1 = k_1 \Delta y_1 + k_2 \Delta y_2 + k_3 \Delta y_3 + \dots \dots + k_{11} \Delta y_{11} + k_{12} \Delta y_{12}$$

$$\Delta r_2 = k_{12} \Delta y_1 + k_1 \Delta y_2 + k_2 \Delta y_3 + \dots \dots + k_{10} \Delta y_{11} + k_{11} \Delta y_{12}$$

$$\Delta r_3 = k_{11} \Delta y_1 + k_{12} \Delta y_2 + k_1 \Delta y_3 + \dots \dots + k_9 \Delta y_{11} + k_{10} \Delta y_{12}$$

.....

$$\Delta r_{11} = k_3 \Delta y_1 + k_4 \Delta y_2 + k_5 \Delta y_3 + \dots \dots + k_1 \Delta y_{11} + k_2 \Delta y_{12}$$

$$\Delta r_{12} = k_2 \Delta y_1 + k_3 \Delta y_2 + k_4 \Delta y_3 + \dots \dots + k_{12} \Delta y_{11} + k_1 \Delta y_{12}$$

式中: $k_1, k_2, k_3, \dots \dots, k_{12}$ 为系数, 它们分别为0.208, 0.144, -0.167, 0.217, -0.167, 0, -0.042, 0.433, -0.167, 0.072, -0.167, 0

3 影响测量精度的分析

从V形法的测量原理我们可以看出, 在测量轴径圆度的过程中, 轴径要与V形块的两个面始终保持接触, 一旦脱离了接触, 就会造成测量不准确, 影响测量精度。实际测量中我们感觉到这种脱离是存在的。

3.1 单个钢球支承对轴径测量精度的影响

在V形法测量中, 轴径的几何中心在旋转测量时相对于理论圆的中心而变化, 也就是相对V形块的几何中心而变化, 如图2所示。轴径的圆度越差, 其变化值越大。

在单个钢球支承时, 由于接触应力使钢球支承面处产生应力变形, 如图3所示。如果被测轴的重量为25kg,

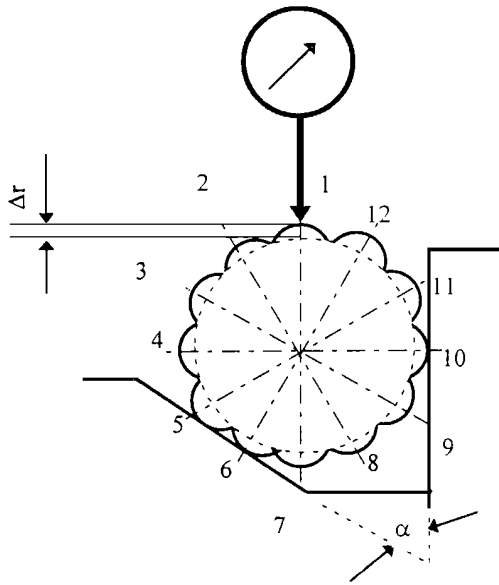


Fig. 1 The principle diagram of V-shape method

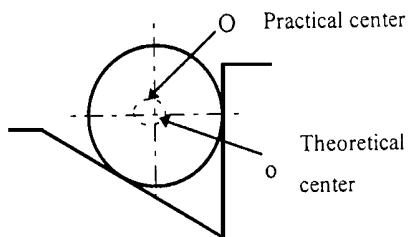


Fig. 2 The change of measured axle centre

支承钢球的直径为 96mm , 其支承处钢对钢的接触应变为^[2]:

$$\delta = 1.231 \left[\left(\frac{P}{E} \right)^2 \frac{1}{R} \right]^{\frac{1}{3}}$$

式中: P ——被测轴的重量, $P = 25\text{kg}$

E ——钢的弹性模量, $E = 206 \times 10^9$

R ——支承钢球半径, $R = 3\text{mm}$

此时接触应变为

$$\delta = 1.231 \left[\left(\frac{23 \times 9.8}{206 \times 10^9} \right)^2 \times \frac{1}{0.003} \right]^{\frac{1}{3}} = 9.06 \mu\text{m}$$

由于应力变形的产生, 使得轴径在转动时其几何中心不能自由的变动, 而是以钢球的应力点为旋转中心。这样在测量过程中, 轴径就时而接触时而不接触 V 形块, 从而造成了测量的不准确性。

3.2 多个钢球支承结构及其分析

上面的分析可以看出, 单个钢球支承由于接触应变会产生固定的回转中心, 造成测量的不准确性。为了解决这一问题, 我们采取了多个钢球支承, 其结构如图4所示。在单个钢球的下面加了一块中间滑板, 中间滑板下面是一组钢球。单个钢球虽然不能在中间滑板上滚动(或自由滑动), 但中间滑板可以在多个钢球上滚动, 使被测板保持始终与 V 形块接触。

多个钢球支承时在两接触面上产生的接触变形为

$$\delta = 1.231 \left[\left(\frac{P}{E \times n} \right)^2 \frac{1}{R} \right]^{\frac{1}{3}}$$

式中: n ——钢球的个数。

当钢球数为 $n = 18$ 时, $\delta = 1.231 \left[\left(\frac{23 \times 9.8}{206 \times 10^9 \times 18} \right)^2 \times \frac{1}{0.003} \right]^{\frac{1}{3}} = 1.319 \mu\text{m}$

在图4的支承结构中, 被测轴1由单个钢球7、中间滑板6、多个钢球组5及固定滑板4支承。在被测轴旋转时, 由于多个钢球支承的接触变形小, 中间滑板6可以在多个钢球组5上自由滑动, 在压力机构2的作用下, 被测轴会始终与 V 形块8和9接触, 测量表3反映了轴径在某一等分点处的测量值。

下面分析单个钢球支承及多个钢球支承时使被测轴横向移动所需的推力 F

在图3中, 半径为 $R = 3\text{mm}$ 的单个钢球, 在被测轴 $P = 25\text{kg}$ 重力的作用下, 接触点处产生一应变 $\delta = 9.09 \mu\text{m}$, 应力圈的半径 $a = \sqrt{3000^2 - (300 - 9.06)^2} = 232 \mu\text{m}$ 。在横向力 F 的作用下, 由于钢球卡在轴径的顶尖孔中不能滚动, 要使钢球移出应力圆, 钢球只能产生滑动。我们把应力圆等效于一个三角形, 如图5所示, 钢球沿等效三角形斜边推移所需的横向推力为

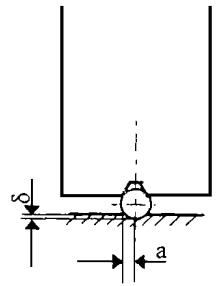


Fig. 3 The diagram of single steel ball support

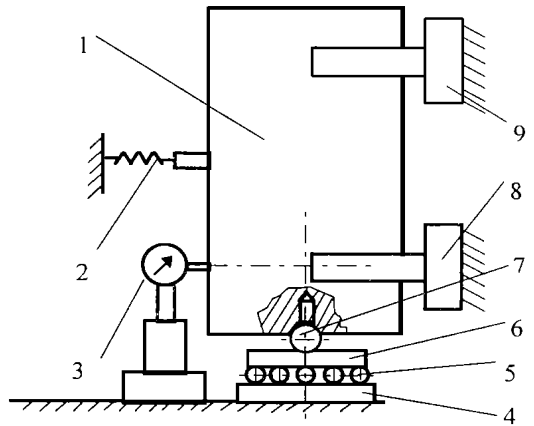


Fig. 4 The diagram of many steel

$$F_1 = \frac{\delta \times P}{a} = 0.89(\text{kg})$$

另外, 由于钢球不能滚动, 使其移出应力圆产生的滑动摩擦力为

$$F_2 = N \times \mu_{st} = 22.98 \times 0.15 = 3.45(\text{kg})$$

式中: N ——被测轴对等效斜面的正压力,

$$N = \frac{P \times a}{a^2 + \delta^2}$$

μ_{st} ——钢对钢的滑动摩擦系数。

由上面的计算可知, 要使被测轴平移的最小推力为

$$F = F_1 + F_2 = 0.89 + 3.45 = 4.34(\text{kg})$$

当18个钢球支承时, 压力仍为23kg, 应力圆的半径为

$$a = \sqrt{3000^2 - (3000 - 13.2)^2} = 88.98(\mu\text{m})$$

与图5所示相同, 使钢球滚出应力圆的横向力为,

$$F_1 = \frac{23\text{kg} \times 88.98\mu\text{m}}{6000\mu\text{m}} = 0.34(\text{kg})$$

由于应变小, 可以忽略应力圆的等效三角形, 使被测轴横向滚动的横向力为

$$F_2 = \frac{P \times \mu_{sl}}{18} = \frac{23 \times 0.1}{18} = 0.13(\text{kg})$$

式中 μ_{sl} ——钢对钢滚动摩擦系数。

多个钢球支承时使被测轴产生移动的最大横向力为

$$F = F_1 + F_2 = 0.34\text{kg} + 0.13\text{kg} = 0.47\text{kg}$$

可见多个钢球支承能大大地减轻被测轴的横向推力, 用很小的横向推力就可以把被测轴靠在V形块上, 同时也减轻了被测轴与V形块之间的接触变形, 提高了测量精度。

下面是单个钢球支承和多个钢球支承时两组测量数据, 测微表为乌氏干涉仪, 格值为 $0.05\mu\text{m}$ 。

Table 1 A set of data in practical measurement using single steel ball supporting

degree of unit	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
measuring meter resolution = $0.05\mu\text{m}$	12	17	19	16	12	7	5	7	10	12	13	13
	13	17	20	18	13	7	5	8	10	13	14	12
	12	17	19	16	11	6	3	6	9	11	12	12
	11	16	17	15	10	5	2	4	7	9	10	9

Continuous table

degree of unit	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345
measuring meter resolution = $0.05\mu\text{m}$	11	11	12	14	15	15	16	11	7	6	6	10
	10	10	10	13	15	15	15	11	7	5	5	7
	10	10	9	11	14	14	14	10	6	3	3	7
	8	8	9	9	12	12	12	9	4	1	1	5

该组数据运算后, 轴径的圆度值为: $0.440\mu\text{m}$

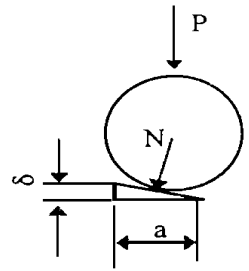


Fig. 5 Triangle model

Table 2 A set of data in practical measurement using many steel balls supporting

degree of unit	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
measuring meter resolution = 0.05 μm	6	6	6	6.5	8.5	9	7	8	7.5	6.5	6	5.5
	5	5.5	6.5	7	9	9	7.5	8.5	7.5	7	6.5	5
	5	5	6	6.5	9	9	8	8.5	8	7	6	5
	6	6	7	7.5	9.5	9.5	8	8.5	8.5	7.5	6.5	6.5

Continuous table 2

degree of unit	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345
measuring meter resolution = 0.05 μm	5	6	7	7	9	9	10	10	9	6	5	5
	6	6	7	7	9	9	9	10	8	6	4.5	5
	5	6	7	7.5	9.5	10	10	10	8	7	6	6
	7	7	7.5	7	10	9	10	10	9	6	6.5	6

该组数据运算后,轴径的圆度值为:0.154 μm 。

从上面的两组数据可以看出,不同形式的支承对测量结果的影响是很大的,在本实验中,其差值为0.286 μm 。且单个钢球支承时测量数据的重复性不好,会带来很大的计算误差。

4 小 结

本文根据实际工作中存在的问题,分析了在测量轴径圆度时影响测量精度的因素,设计了多个钢球支承结构,以较小的横向推力就可以使被测轴灵活移动。由于横向推力小,减轻了轴径对V形块的压力,提高了测量精度。通过实测数据对比,可以看出多个钢球支承完全可以满足高精度测量轴径圆度的要求。这种检测轴径圆度的方法,适合于被测轴质量大、要求检测精度高的轴类零件,这一方法会在科研单位和生产单位具有广泛的实用价值。

参 考 文 献

- 1 邹自强.不圆度的V形测量法.光学机械,1978(2):41~57
- 2 机械设计手册.北京:机械工业出版社,1992

Influence of Supporting to the Measure Accuracy Using V-type Method

ZHANG Jing-He

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

Abstract

The influence of a single steel ball supporting and some steels supporting to the measure accuracy is described in V-type method measuring axis-neck. The structure of some steel balls supporting is designed and two sets of practical data are given. In according to the comparison of the data, some measurement errors will be caused when different supporting structures are used.

Key words: Supporting structure, V-type method, Circle errors of axis-neck

张景和 男,1955年7月生。中国科学院长春光学精密机械研究所副研究员,1982年获长春光学精密机械学院学士学位。毕业后一直从事光学精密机械的科研工作。