

文章编号 1004-924X(2001)02-0155-04

用反向法测轴系回转误差

张景和, 冯晓国, 刘 伟

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

摘要: 阐述了用反向法对高精度轴系回转误差测试的过程及测试的一些结果。对轴系各种测试方法作了简单介绍, 重点介绍了“二元光学元件激光直接写入设备”轴系回转误差的测试过程。测得轴系回转误差为 $0.018\mu\text{m}$ 。对反向法测试原理、误差分离的数学方法及实际应用, 进行了描述。总结了影响测量结果重复性的几个因素。测试结果证明, 此方法简单实用、结果准确, 适合于精密机械设计人员使用。

关键词: 轴系回转误差; 反向法; 误差分离

中图分类号: TH133.35 **文献标识码:** A

1 引言

高精度轴系回转误差的测试已成为精密计量学所研究的课题之一。早在70年代, 国际机械生产技术研究会计量科学技术委员会(CIPP)就通过了关于轴系回转性能描述和测定方面的文件, 其中主要是关于回转轴回转误差的测量问题。国内在高精度回转轴系测试方面的研究开展较早, “全国高精度回转轴系测试基本理论与应用学术讨论会”已召开多次, 不少高等院校及科研单位有许多文章论述对回转轴系测试方面的研究。高精度轴系装配之后, 为尽快了解到轴系精度, 以便对之修研或重新装配, 则需用一简便有效方法进行测量。在中科院重大设备改造项目“二元光学元件激光直接写入设备”课题的研制过程中, 采用了反向法对轴系的回转精度进行测试, 得到了较好结果。该测量结果与后来国家计量院测试的结果基本相符。

2 轴系回转误差的检测方法

理想的轴系回转运动是不存在的, 主轴的实际回转运动与其理论的回转运动之间的差异就是轴系的回转运动误差^[1]。轴系回转误差的测量方法有多种, 按轴系是否在正常速度运转下测量, 有静态测量和动态测量之分; 以信号处理方法, 又可分为模拟量测量和数字量测量法。此外, 还有低速

轴系和高速轴系测试之分和超高精度、高精度及精密测试之分等。

在高精度轴系测量中一般均采用高精度标准球。标准球由托架支撑, 放在轴系的顶端, 精密调整标准球与轴系回转中心的偏心, 即可用测量传感器测回转轴系的精度。这种测量方法一般都在标准球自身的圆度误差和标准球与轴系的偏心差。所以在测量数据的处理中必须采用误差分离技术(EST)。

EST的方法很多, 常用的有反向法、多步法、多测头法和三测头同方位同步测量法^[2]。反向法的优点是: 仅需一个传感器, 测试系统较易调整, 数学原理简单, 可直接在时域内处理。本文论述了用反向法测气浮轴系回转误差, 并对测量结果进行了数据处理。

3 反向法测轴系回转误差

反向法测量原理如图1所示, 先按图1(a)进行一次测量, 再按图1(b)进行第二次测量, 这时已将基准球及传感器都相对于轴转过了 180° 。其信号关系为:

$$T_1(i) = P(i) + S(i)$$

$$T_2(i) = P(i) - S(i)$$

$P(i)$ —— 测量球的形状误差

$S(i)$ —— 轴的回转误差

$T(i)$ —— 测微仪读数。

收稿日期: 2000-09-07; 修订日期: 2000-09-30

基金项目: 中科院重大设备改造项目

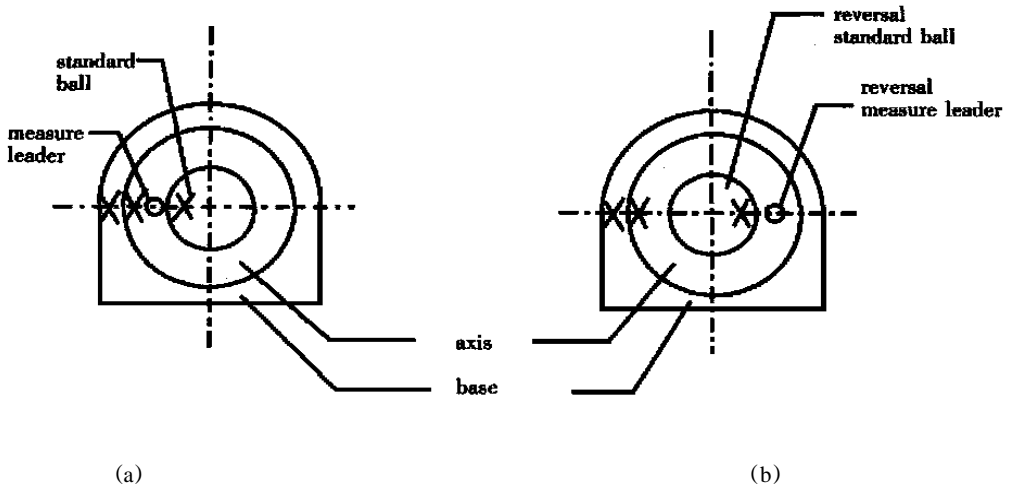


Fig 1 Theory of reversal method

由此可分别求得 $r(\theta)$ 及 $x(\theta)$ 。考虑球偏心的影响, 可以采用计算消偏法进行消偏, 动态测试中, 一般采用快速傅立叶变换来消除直流分量及测量球安装偏心, 其算法为^[3-4]:

$$S(i) = \frac{1}{2} [\bar{f}_{1m}(i) - \bar{f}_{2m}(i)] -$$

$$\frac{1}{2} [A_0 + A_1 \cos \omega T + B_1 \sin \omega T]$$

$$P(i) = \frac{1}{2} [\bar{f}_{1m}(i) + \bar{f}_{2m}(i)] -$$

$$\frac{1}{2} [C_0 + C_1 \cos \omega T + D_1 \sin \omega T]$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

其中,

$\bar{f}_{1m}(i)$ —— 翻转前 m 圈数据平均;

$\bar{f}_{2m}(i)$ —— 翻转后 m 圈数据平均;

T —— 采样间隔;

$T = \frac{1}{f_r}, f_r$ —— 采样频率;

N —— 圈上的采样点数, ω —— 基频

$$\frac{A_0}{2} = \frac{a_0 - a_0''}{2} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \bar{f}_{1m}(i) di - \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \bar{f}_{2m}(i) di$$

$$A_1 = a_1 - a_1'' = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \bar{f}_{1m}(i) \cos(\omega \cdot i \cdot T) di -$$

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \bar{f}_{2m}(i) \cos(\omega \cdot i \cdot T) di$$

$$B_1 = b_1 - b_1'' = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \bar{f}_{1m}(i) \sin(\omega \cdot i \cdot T) di -$$

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \bar{f}_{2m}(i) \sin(\omega \cdot i \cdot T) di$$

$$\frac{C_0}{2} = \frac{a_0 - a_0''}{2} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \bar{f}_{1m}(i) di + \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \bar{f}_{2m}(i) di$$

$$C_1 = a_1 + a_1'' = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \bar{f}_{1m}(i) \cos(\omega \cdot i \cdot T) di +$$

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \bar{f}_{2m}(i) \cos(\omega \cdot i \cdot T) di$$

$$D_1 = b_1 + b_1'' = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \bar{f}_{1m}(i) \sin(\omega \cdot i \cdot T) di +$$

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \bar{f}_{2m}(i) \sin(\omega \cdot i \cdot T) di$$

采用数值分析方法, 对 FFT 算法进行简化, 得:

$$\frac{A_0}{2} = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{f}_{1m}(i)}{N} - \frac{\sum_{i=1}^N \bar{f}_{2m}(i)}{N}$$

$$A_1 = \left[\frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \bar{f}_{1m}(i) - \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \bar{f}_{2m}(i) \right] \cos(\omega \cdot i \cdot T)$$

$$B_1 = \left[\frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \bar{f}_{1m}(i) - \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \bar{f}_{2m}(i) \right] \sin(\omega \cdot i \cdot T)$$

$$\frac{C_0}{2} = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{f}_{1m}(i)}{N} + \frac{\sum_{i=1}^N \bar{f}_{2m}(i)}{N}$$

$$C_1 = \left[\frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \bar{f}_{1m}(i) + \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \bar{f}_{2m}(i) \right] \cos(\omega \cdot i \cdot T)$$

$$D_1 \left[\frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \overline{f_{1m}}(i) + \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \overline{f_{2m}}(i) \right] \sin(\omega \cdot i \cdot T)$$

这样, 采用准静态测试方法, 不需要编制动态测试软件包以及购买硬件设备, 用 C 语言编制一段简短的程序就可以较精确地算出高精度轴系径向运动误差。

实际测量装置如图 2 所示, 把一标准钢球粘接在一托盘上, 将托盘放在气浮轴系的工作台上, 调整轴系回转中心与标准钢球的偏心至 $\pm 0.18\mu\text{m}$ 左右, 用分辨力为 2nm 的电容传感器及自制转位装置, 对此轴系进行了测试, 测试数据如下:

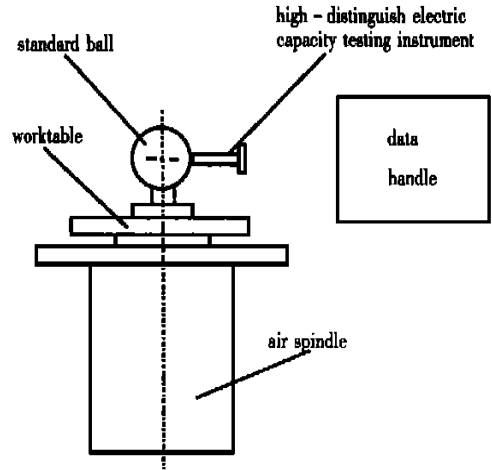


Fig 2 Sketch of the reversal testing

Table 1 Rotating errors of axis testing data

Unit: nm

before reversal(condition as Fig. 2- (a))				after reversal(condition as Fig. 2- (b))			
times				times			
order	1	2	3	order	1	2	3
1	632	632	636	1	110	112	114
2	636	634	638	2	98	102	104
3	652	652	656	3	108	108	112
4	668	668	674	4	118	120	122
5	696	700	700	5	134	136	140
6	726	732	734	6	156	158	160
7	764	770	776	7	182	188	192
8	810	816	824	8	222	226	228
9	858	860	874	9	252	254	258
10	890	896	904	10	282	286	292
11	920	924	930	11	310	312	316
12	940	944	948	12	332	334	336
13	954	958	964	13	346	350	356
14	954	960	962	14	354	352	360
15	946	950	954	15	352	358	362
16	922	924	926	16	340	344	350
17	890	892	898	17	318	322	324
18	854	858	860	18	300	296	300
19	820	822	828	19	310	312	316
20	782	786	790	20	260	264	268
21	740	740	744	21	212	218	222
22	706	706	708	22	184	186	190
23	668	672	674	23	152	158	162
24	644	648	652	24	124	128	132

用上面公式对该数据进行了计算, 计算结果: 轴系径向运动误差 $0.018\mu\text{m}$, 标准球测量弧线形

状误差 $0.025\mu\text{m}$ 。与国家计量院采用动态测试方法测试结果趋势(在球与轴误差未分离情况下, 测

得轴系径向运动误差小于 $0.02\mu\text{m}$) 基本一致。

4 结 论

高精度回转轴系的测试, 在各种高精度设备制造过程中有很重要的意义与价值^[5]。本文阐述了中科院重大设备改造项目“二元光学元件激光直接写入设备”课题中的气浮轴系的测试过程和计算结果, 是对反向法测量轴系的又一尝试。尤其

我们感受到, 标准球调整偏心时不能过大, 也不能过小, 应在 $\pm 0.2\mu\text{m}$ 左右, 否则最后得到的结果重复性不好。另外, 反向后的对准精度(标准球反向 180 和测微仪反向 180 的对准精度)也影响测量数据的重复性。经过反复测试和计算, 最后得到的结果基本是准确的。本文阐述的测试方法简单实用, 测试精度能够满足需要, 可供精密机械研究人员参考。

参考文献:

- [1] 李志杰, 蔡鹤皋. 主轴回转运动精度的评定误差[J]. 计量学报, 1993(4): 297- 301.
- [2] 卓兴红. 三测头同方位同步测量实时分离轴系回转误差[J]. 计量学报, 2000(2): 106- 112.
- [3] 张华容. 机床主轴回转精度的数学描述和分析[J]. 机械工程学报, 1982(18)4: 65- 73.
- [4] 蔡鹤皋, 等. 回转运动误差的精确测试理论及方法[J]. 机械工程学报, 1988(24)2: 84- 89.
- [5] 刘伟. 圆度仪与 V 形法测量轴圆度的比较[J]. 光学 精密工程, 1999(7)5: 135- 137.

Testing rotating errors of axis with reversal method

ZHANG Jing-he, FENG Xiao-guo, LIU Wei

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

Abstract: In addition to describing a course of testing rotating error of high-precision axis with reversal method, the paper also introduces all kinds of testing methods, especially the testing process of the rotating error of axis in manufacturing laser direct writing of binary optics elements. The rotating error of the axis measured is $0.018\mu\text{m}$. This paper gives the testing theory, the way to separate the error and the practical applications in detail. Several factors that affect the reduplication of consequence are summarized. Finally, the authors conclude that the method is not only simple and practical, but also very accurate, being suitable for mechanists.

Key words: rotating error of axis; reversal method; error separation

作者简介: 张景和(1955-), 男, 山东阳谷县人, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所副研究员, 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。