

文章编号:1000-582x(2000)01-0049-04

⑬  
49-52

# 空气静压轴承主轴回转精度的检测

TH133.35

TH133.36

陈海斌<sup>1</sup>, 程雪梅<sup>2</sup>, 钟先信<sup>3</sup>

(1 第三军医大学大坪医院野战外科研究所, 重庆 400042; 2. 渝州大学自动化及电子工程系, 重庆 400033; 3. 重庆大学光电工程学院, 重庆 400044)

**摘要:** 研制空气静压轴承主轴回转精度检测系统, 提出正弦回归法分离测量球的安装偏心, 采用“反向法”剔除测量球的形状误差, 并引用实验予以验证。

**关键词:** 空气静压轴承; 主轴; 回转精度; 检测; 正弦回归法; 反向法

**中图分类号:** TH 133.35

**文献标识码:** A

空气静压轴承在现代精密机械、仪器中得到了日益广泛的应用, 已成为超精密支承的一个重要发展方向<sup>[1,2]</sup>。主轴回转精度的测量是提高空气静压轴承制造精度的关键<sup>[2-7]</sup>。笔者研制一种新型的主轴回转精度测量系统, 提出正弦回归法分离测量球的安装偏心, 采用“反向法”来剔除测量形状误差, 试图有效地检测主轴回转精度。

## 1 理论分析

### 1.1 主轴回转误差的检测方法

主轴的实际回转中心线对其理想回转轴线的偏离, 就广义地被称为主轴的回转误差。主轴回转精度的评定指标应按其使用要求、反映误差特性、便于检测等需要来确定。通常以主轴径向晃动误差来评定是适宜的<sup>[2,7-9]</sup>。本文中测量主轴回转精度的方法是: 在被测主轴的上端安装一个测量球, 用非接触式传感器拾取主轴的径向运动误差。无疑, 传感器拾取的信号必然包含下列3个因素: 主轴径向运动误差、测量球的形状误差、测量球的安装偏心。如何分离这3个误差分量是研究主轴回转精度测量系统的关键。

### 1.2 正弦回归法分离偏心误差

图1为一组主轴回转运动的误差曲线。图1中,  $y(\theta)$  表示主轴径向位移,  $\theta$  为转角即相位角, 误差曲线相当于主轴径向运动位移、测量球的形状误差和由

测量球偏心引起的正弦信号的叠加。由图1知,  $\theta$  是一个普通变量;  $y(\theta)$  却有随机性, 是一个随机变量, 用  $Y$  表示。假设  $Y$  是正态变量, 有恒定的方差  $\sigma^2$ 。则  $Y$  和  $\theta$  存在一元正弦回归关系, 即

$$Y = a + b\sin(\theta + \theta_0) + E$$
$$E \sim N(0, \sigma^2) \quad (1)$$

式中,  $\theta = \omega t$ ,  $b\sin(\theta + \theta_0)$  为一次谐波分量,  $a, b, \theta_0$  为回归系数。

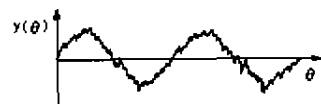


图1 主轴回转运动的误差曲线

构造高差平方和

$$Q_{\text{总}} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{a} - \hat{b}\sin(\theta_i + \hat{\theta}_0))^2 \quad (2)$$

由最小二乘原理得  $a, b, \theta_0$  的无偏估计量分别为:

$$\hat{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$
$$\hat{b} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n y_i \sin(\theta_i + \theta_0)$$

· 收稿日期:1998-10-19

基金项目:机械工业技术发展基金资助项目(86JB 4010(1))

作者简介:陈海斌(1965-),男,湖北黄冈人,第三军医大学大坪医院野战外科研究所副研究员,博士后,从事精密仪器与测量、交通安全与防护等研究。

$$\hat{\theta}_0 = \arctg\left(\frac{\sum_{i=1}^n y_i \sin \theta_i}{\sum_{i=1}^n y_i \cos \theta_i}\right)$$

分解式(2) 化简得  $\sigma^2$  的无偏估计

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n-2} Q_{est} = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3)$$

式中,  $y_i, \hat{y}_i$  分别表示主轴径向位移的实测值、估计值。

为了验证  $Y$  与  $\theta$  是否有式(1) 所示模型, 仅需检验假设  $H_0: b = 0, H_1: b \neq 0$  是否成立。若假设  $b = 0$  被拒绝, 则正弦回归关系可被接受, 反之式(1) 所示模型则不能成立。令

$$x = \sin(\theta + \theta_0)$$

忽略  $\theta_0$  的随机性, 则

$$Y_i = a + bx_i + E_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$\hat{a}$  和  $\hat{b}$  分别是回归系数  $a$  和  $b$  的一个估计值, 它们随样本的变动而变动, 可由随机变量  $A, B$  来表示。且

$$\begin{aligned} B &\sim N(b, \sigma^2/L_x) \\ A &\sim N(a, \sigma^2(1/n + \bar{x}^2)/L_x) \end{aligned}$$

利用  $t$  检验法检验假设  $H_0: b = 0$

则当  $H_0: b = 0$  为真时,  $Q_{est}$  与  $B$  相互独立, 且有

$$T = \frac{\frac{B \sqrt{L_x}}{\sigma}}{\sqrt{\frac{Q_{est}}{\sigma^2(n-2)}}} = \frac{B \sqrt{L_x}}{\sqrt{\frac{Q_{est}}{n-1}}} \sim t(n-2) \quad (5)$$

若以  $\alpha$  为显著水平, 则

当  $|T| > t_{1-\alpha/2}$  时, 拒绝  $H_0$ , 接受  $H_1$

当  $|T| < t_{1-\alpha/2}$  时, 拒绝  $H_1$ , 接受  $H_0$

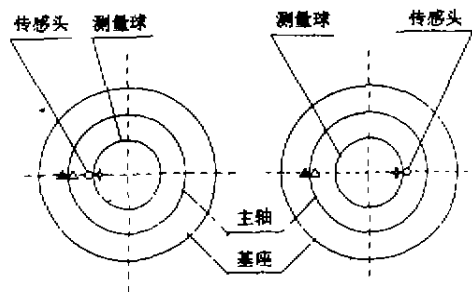
### 1.3 反向法剔除测量球形状误差

选用“反向法”剔除测量球的形状误差<sup>[2]</sup>。其原理是: 通过反向前、反向后传感器与测量球相对主轴的位置变化(如图2) 来分离测量球的形状误差。

设反向前传感器与测量球同时相对于主轴的相位角等于零, 则反向后传感器与测量球同时相对于主轴的相位角等于  $180^\circ$ 。

设反向前、反向后分别测量  $m$  个周期, 每个周期采样  $n$  点, 则有

反向前各点的平均值



▲, △, ○, ◆ 分别表示基座、

主轴、传感器、测量球的原始位置记号

(a) 反向前

(b) 反向后

图2 反向前、反向后传感器与测量球相对主轴的初始位置

$$T_1(\theta_j) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m C_{ij}$$

$$i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$$

反向后各点的平均值

$$T_2(\theta_j) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m D_{ij}$$

$$i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$$

式中,  $C_{ij}, D_{ij}$  分别是反向前、反向后第  $i$  个周期第  $j$  点的样本值, 其值的大小分别等于反向前、反向后第  $i$  个周期第  $j$  点的实际测量值扣去常数项和一次谐波分量之后剩下的值。令主轴径向误差运动、测量球形状误差运动分别用  $R(\theta)$  和  $S(\theta)$  表示, 则有

$$T_1(\theta_j) = S(\theta_j) + R(\theta_j) \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$T_2(\theta_j) = S(\theta_j) - R(\theta_j) \quad j = 1, 2, \dots, n$$

由上式可得

$$S(\theta_j) = \frac{1}{2}(T_1(\theta_j) + T_2(\theta_j)) \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$R(\theta_j) = \frac{1}{2}(T_1(\theta_j) - T_2(\theta_j)) \quad j = 1, 2, \dots, n$$

分别求出  $S(\theta_j), R(\theta_j)$  的最大值, 最小值:  $S_{\max}, S_{\min}; R_{\max}, R_{\min}$ 。则有

主轴平均径向运动误差

$$\delta_1 = S_{\max} - S_{\min}$$

钢球的形状误差

$$\delta_c = R_{\max} - R_{\min}$$

### 1.4 主轴回转精度的评定

主轴径向运动误差包括两部分：重复性误差和非重复性误差<sup>[2]</sup>。前面已经求出了重复性误差即主轴平均径向误差  $\delta_1$ ，下面求解非重复性误差  $\Delta$ 。

无论是反向前、反向后均等精度连续测试  $m$  周期，每周期测量  $n$  点。则有

反向前残差

$$u(i, j) = C_v - T_1(\theta_i) \\ i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$$

反向后残差

$$v_D(i, j) = D_v - T_2(\theta_i) \\ i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$$

根据贝塞尔公式得各点的标准差

反向前

$$\sigma_{C_i} = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m u_c^2(i, j)$$

反向后

$$\sigma_{D_i} = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m v_D^2(i, j)$$

则主轴随机运动误差

反向前

$$\Delta_c = K \frac{\sum_{j=1}^n \sigma_{C_j}}{\sqrt{n}}$$

反向后

$$\Delta_D = K \frac{\sum_{j=1}^n \sigma_{D_j}}{\sqrt{n}}$$

式中， $K = 3, \Delta = \max(\Delta_c, \Delta_D)$  作为主轴随机运动误差。

这样，主轴的径向运动误差为：

$$\delta = \sqrt{\delta_1^2 + \Delta^2}$$

## 2 实验

### 2.1 材料与方法

测试装置<sup>[2]</sup>如图3所示。图3中，被测实验轴承为

自行研制的一个圆柱-止推式轴承，止推轴承的气隙厚度为  $0.021 \mu\text{m}$ ，圆柱轴承润滑区域的半径平均间隙为  $0.021 \mu\text{m}$ ；主轴轴颈圆度误差为  $1.4 \mu\text{m}$ ，轴承径向回转精度为  $0.4 \mu\text{m}$ （作为主轴回转精度参考值），测量球圆度误差小于  $0.05 \mu\text{m}$ （作为形状误差参考值）。

测量过程中，主轴由涡流电机直接驱动，额定转速为  $11 \text{ r/min}$ ，即频率为  $0.18 \text{ Hz}$ ；轴承的润滑区域由上下两排节流孔供气，止推轴承的润滑区域由一排节流孔供气，每排8个节流孔，供气压力为  $2.5 \text{ kgf/cm}^2$ 。无论是反向前还是反向后，均采集  $m = 5$  个周期的样点，每个周期共采集  $n = 64$  个测量点。

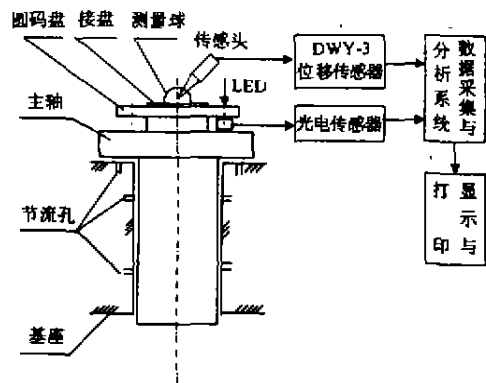


图3 主轴回转精度检测系统示意图

### 2.2 结果

表1表示反向前、反向后式(1)所示模型中  $a$ 、 $b$ 、 $\theta_0$  和  $\sigma$  的无偏估计值及相关的显著性检验。表2分别列出了两种安装偏心条件下测量球的形状误差  $\delta_2$ 、主轴平均径向运动误差  $\delta_1$ 、随机误差  $\Delta$  及综合误差  $\delta$ （即主轴径向运动误差）。表2中， $b$  的取值公式分别为：

$b$  取上限

$$b = \bar{b} + t_{\alpha/2}(n-2) \bar{s} \sqrt{\frac{2}{n}}$$

$b$  取下限

$$b = \bar{b} - t_{\alpha/2}(n-2) \bar{s} \sqrt{\frac{2}{n}}$$

表1  $a, b, \theta_0$  和  $\sigma$  的无偏估计值及相关的显著性检验

	$\bar{a}/\mu\text{m}$	$\bar{b}/\mu\text{m}$	$\bar{\theta}_0/\text{rad}$	$\bar{\sigma}/\mu\text{m}$	显著性 ( $\alpha = 0.05$ )
反向前	-1.39	2.52	0.208	0.042 8	$T = 3.417 > 2.01$ 显著
反向后	-2.57	-2.91	0.376	0.058 2	$T = 3.023 > 2.01$ 显著

表2 两种安装偏心条件下的误差参数  $\mu\text{m}$ 

		$\delta_1$	$\delta_2$	$\Delta$	$\delta$
b取 上限	反向前	0.450	0.061 0	0.08	0.458
	反向后			0.06	
b取 下限	反向前	0.508	0.048 4	0.08	0.514
	反向后			0.07	
标准		0.05		0.4	

由表1、表2可知:1) 钢球形状误差置信区间为 $[0.048\ 4, 0.061\ 0]$ (单位为 $\mu\text{m}$ ), 而参考值为 $0.05\ \mu\text{m}$ , 两者大致吻合; 2) 主轴径向运动误差置信区间为 $[0.450, 0.508]$ (单位为 $\mu\text{m}$ ), 而原有的计算结果为 $0.4\ \mu\text{m}$ , 两者比较接近。

### 3 结论

本文研制的空气静压轴承主轴回转精度检测系统、提出的主轴回转精度评定方法, 经实验初步验证是合理可行的; 由于适应加工、测量的实际需要, 对计算机实时控制比较有利, 有望将其作为加工制造过程中的一种检测精密轴系主轴回转精度的手段。

#### 参 考 文 献

[1] 陈海斌. 空气静压轴承的优化设计[J]. 重庆大学学报, 1997, 20(1): 21~26.

- [2] 陈海斌. 超精密空气静压轴承的研制和实验研究[D]. 重庆: 重庆大学光电精密仪器系, 1990.
- [3] 郑丽芳. 空气轴承压力试验台[J]. 磨床与磨削, 1996, (2): 50~51.
- [4] 张明亮. 亚微米级定位的控制策略[J]. 国防科技参考, 1997, 18(3): 73~75.
- [5] MIZUMOTO, HIROSHI, SHIRO, et al. Ultra-precision aerostatic guideway controlled by active inherent restrictors[J]. Journal of the Japan Society of Precision Engineering, 1997, 63(11): 1 543~1 547.
- [6] MIZUMOTO, HIROSHI, SHIMIZU, et al. Infinite-stiffness aerostatic spindle with active restrictors[J]. Journal of the Japan Society of Precision Engineering, 1993, 59(4): 607~612.
- [7] TANI, YASUHIRO, KATSUKI, et al. Development of high-speed and high-accuracy straightness measurement of a granite base of a CMM[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1995, 44(1): 465~468.
- [8] IWATO, TAKAYOSHI, YOSHIMOTO, et al. Static and dynamic characteristics of circular aerostatic porous thrust bearings[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (Part C), 1996, 62(593): 276~283.
- [9] TANI, YASUHIRO, KATSUKI, et al. Development of optical measurement for the straightness of a granite bed using laser beam datum[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (Part C), 1995, 61(592): 4 805~4 810.

## Test of Aerostatic Bearing's Spindle Rotary Precision

CHEN Hai-bin<sup>1</sup>, CHENG Xue-mei<sup>2</sup>, ZHONG Xian-xin<sup>3</sup>

(1. Research Institute of Surgery, Daping Hospital, Third Military Medical University, Chongqing 400042, China; 2. Dept of Automation & Electronic Engineering, Yuzhou University, Chongqing 400033, China; 3. School of Opto-electronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**ABSTRACT:** A test system of aerostatic bearing's spindle rotary precision is developed. The sine regression method is proposed to separate bias radius of the measuring globe from the spindle's rotary motion error signal. The reverse rotation method is also adopted to extract shape error of the measuring globe from the spindle's rotary motion error signal. The developed test system and methods are verified successfully by experiments.

**KEYWORDS:** aerostatic bearing; spindle; rotary precision; test; sine regression method; reverse rotation method

(责任编辑 李胜春)