

# 滚转角误差的光学精密测量技术研究\*

马军山 王向朝 方祖捷

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘 要** 提出了基于两点法的精密移动台滚转角测量新方法, 可以将移动台滚转角误差与参考镜角形状误差分离开。实验结果表明, 滚转角误差的测量重复性精度可达  $0.05''$ , 这个值是由测量系统稳定性决定的。

**关键词** 滚转角误差测量, 角度传感器, 误差分离。

随着液晶显示器、晶片尺寸的大型化, 对移动台的运动精度提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。对于单轴运动, 通常存在三种位置误差(标尺误差、水平和垂直方向直线度误差)和三种角度误差(俯仰角误差、偏转角误差及滚转角误差)。角度误差中, 最不容易检测的是滚转角误差, 目前还没有高精度检测滚转角的简单、有效的方法<sup>[2]</sup>。已有的滚转角检测有水平仪法和测量到两个基准镜距离的方法。前者在测量速度和精度上都不能满足目前的检测要求。后者检测精度受基准镜自身精度制约, 尤其对于移动范围较大的移动台, 高精度、大尺寸基准镜的加工是困难的。文献[3]提出了使用 V 型反射镜和双频激光干涉仪结合的检测方法, 测量范围大, 但测量分辨率仅为  $0.31''$  并没有超过已有的方法。而且测量精度受 V 型反射镜平面度、俯仰角误差和偏转角误差影响, 难以进一步提高测量精度。本文提出了基于两点法测量原理的滚转角检测方法, 可在角度传感器测量范围和分辨率界限内高精度测量滚转角。

## 1 检测原理

### 1.1 两点法测量原理

两点法(或三点法)测量技术在直线度及圆度的精密测量中得到广泛应用<sup>[4]</sup>。使用多个传感器对目标同时测量, 其目的是消除由于导轨加工误差产生的运动误差对测量精度的影响。本文将这一技术拓展到移动台滚转角误差的精密测量中。

如图 1 所示, 建立直角坐标系,  $x$  轴为运动方向, 则滚转角表示移动平台沿  $x$  轴方向运动时绕  $x$  轴转动的

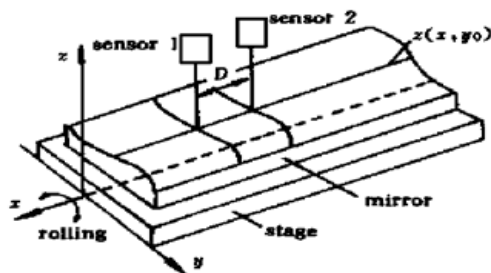


Fig. 1 Principle of rolling error measurement

\* 日本尼康公司生产技术本部资助项目。

收稿日期: 2000-01-04; 收到修改稿日期: 2000-03-16

角度。将一平面参考镜固定在移动台上,其三维形状误差为  $Z(x, y)$ 。沿  $x$  轴方向在空间上安装两个角度传感器,可以同时获得测量曲线  $Z(x, y_0)$  上的两点  $x_i$  与  $x_i + D$  处关于绕  $x$  轴旋转的滚转角和参考镜沿  $y$  轴方向的角形状误差信息,其中  $D$  为两个传感器光束间隔。参考镜在  $y$  轴方向的角形状误差  $f(x)$  为

$$f(x) = \left. \frac{\partial Z(x, y)}{\partial y} \right|_{y = y_0}. \quad (1)$$

设传感器 1 和 2 的输出值为  $m_1(x_i)$  与  $m_2(x_i)$ , 则有以下关系成立:

$$m_1(x_i) = f(x_i) + e_r(x_i), \quad (2)$$

$$m_2(x_i) = f(x_i + D) + e_r(x_i), \quad (3)$$

式中:  $e_r$  为移动台滚转角。  $i = 0, 1, \dots, N - 1$ ,  $N$  为对应于扫描长度  $L$  的采样点数,  $N = L/d$ ,  $d$  为空间采样间隔。取(2)式与(3)式之差,并以一大跨度的差商代替  $f(x)$  在  $x_i$  处的导数,即

$$[f(x_i + D) - f(x_i)]/D = [f(x_i + d) - f(x_i)]/d, \quad (4)$$

则可以分离参考镜角度形状与移动台滚转角误差,由下式可得到参考镜角度形状:

$$f(x_{i+1}) = f(x_i) + [m_2(x_i) - m_1(x_i)]d/D. \quad (5)$$

移动台滚转角可由下式求出:

$$e_r(x_i) = m_1(x_i) - f(x_i). \quad (6)$$

## 1.2 精密角度传感器

精密角度传感器是本测量系统的核心部分。其原理基于临界反射原理,在不同折射率介质界面处,当光入射角在临界角附近变化时,反射光强将发生剧烈变化。图 2 给出单个传感器结构示意图,该结构包含两个角度测量传感器,一个是用来测量的,另一个是用来补偿光源发射光的角度变化的。以半导体激光器为光源,光束经准直后,  $p$  偏振光经偏振分光镜 PBS 进入对面补偿端。  $s$  偏振光经 PBS 与四分之一波片后被反射镜 9 反射回来,再次经四分之一波片变为  $p$  偏振光,进入测量端。

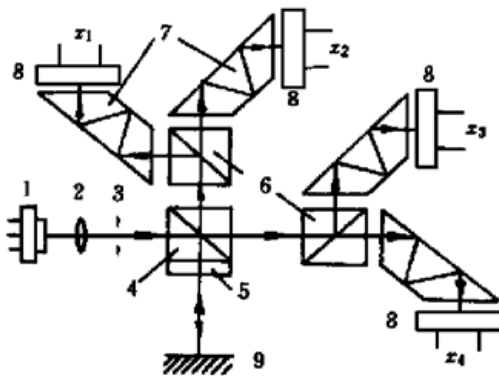


Fig. 2 Optical schematic diagram of a precision angle sensor. 1: Laser diode, 2: Collimator lens, 3: Aperture, 4: Polarized beam splitter, 5: Quarter wave plate, 6: Cube beam splitter, 7: Critical angle prism, 8: Photo diode, 9: Mirror

如  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$  分别为探测器  $PD_1$ 、 $PD_2$ 、 $PD_3$ 、 $PD_4$  的输出,  $Y$  为角度传感器的输出,则  $Y$  由下式给出:

$$Y = \frac{x_1 - x_2}{x_1 + x_2} - K \frac{x_3 - x_4}{x_3 + x_4}, \quad (7)$$

式中:  $K$  为补偿系数,由实验确定。

实际的滚转角测量用传感器包括两层(传感器 1 及传感器 2),共用一个光源。准直后的光束经分光镜分为两部分,透射光进入传感器 1,反射光再经一个 45 度反射镜进入传感器 2。两个传感器光束间隔 25 mm,光束半径约为 3 mm。

## 2 实 验

### 2.1 实验装置

实验测量系统如图 3 所示。计算机发出指令,经 I/O 卡、编码器驱动步进电机带动移动

台沿导轨移动, 一个脉冲当量为  $8 \mu\text{m}$ , 移动范围为  $200 \text{ mm}$ 。参考镜长度为  $240 \text{ mm}$ 。传感器输出信号由高精度数字电压表采样后, 经 GP-IB 接口进入计算机。测量空间采样间隔为  $1 \text{ mm}$ 。

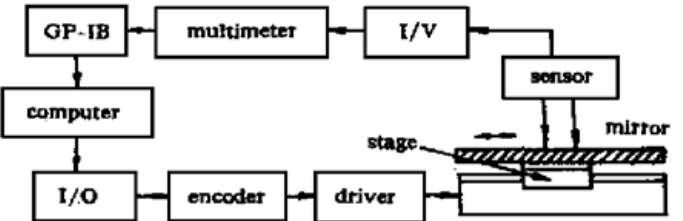


Fig. 3 Diagram of the rolling error measurement system

### 2.2 传感器标定结果

传感器用文献[5]提出的自标定方法标定。传感器 1 和 2 测量范围均为  $180''$  平均灵敏度分别为  $0.5327\%/角秒$ ,  $0.5273\%/角秒$ , 标准偏差分别为  $0.014\%$  和  $0.015\%$ 。传感器的分辨率取决于信号的高频噪声, 传感器 1 为  $0.003''$ , 传感器 2 为  $0.004''$ 。图 4 给出了线性误差标定结果。线性误差的标定重复性误差为间隔一天的两次标定结果的偏差, 传感器 1 为  $0.012''$ , 传感器 2 为  $0.014''$ 。可见, 标定的可靠性比传感器的稳定性及分辨率要差, 本标定方法的重复性约为  $0.015''$ 。

### 2.3 检测系统输出漂移

图 5 为滚转角传感器的静态输出漂移测量曲线。系统一次测量所需时间为 3 分钟, 故记录了 5 分钟的漂移数据。在记录过程中, 测量装置附近温度变化约  $0.02^\circ\text{C}$ , 传感器 1 和 2 的输出漂移均为  $0.035''$ , 但两传感器输出之差只有  $0.02''$  的漂移。这个数值比标定时大 5 倍, 这是由于测量装置比标定装置复杂得多, 易受外界振动及热变形的影响。在此测量环境下, 滚转角传感器稳定性及分辨率的上限为  $0.02''$ 。

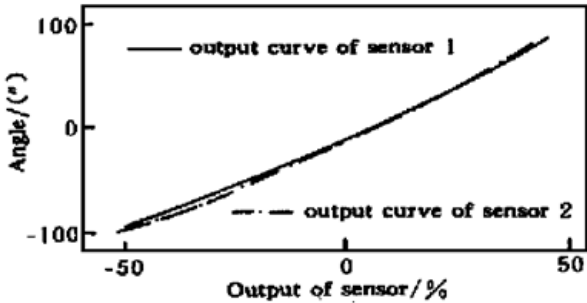


Fig. 4 Calibration results of two angle sensors

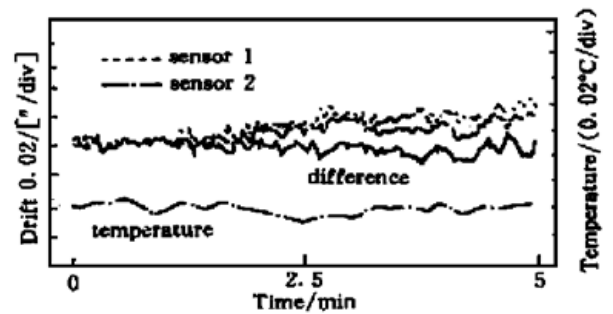


Fig. 5 Stability of measurement system of rolling

### 2.4 滚转角误差测量结果

为正确分离参考镜角形状误差与移动台滚转角误差, 需要精确测量两传感器的光点间隔。在参考镜上放置一片边缘整齐的白纸, 移动台运动时, 两传感器输出脉冲信号, 使用分辨率为  $1 \mu\text{m}$  的数字式测微仪测得光点间隔为  $24.986 \text{ mm}$ , 与设计值基本一致。

图 6 与图 7 分别为得到的参考镜角形状误差与移动台滚转角误差测量曲线, 同时给出了

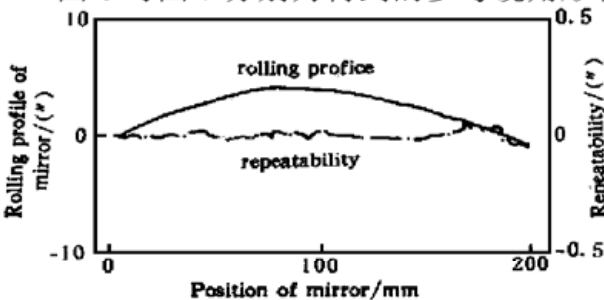


Fig. 6 Measurement results of rolling error of mirror

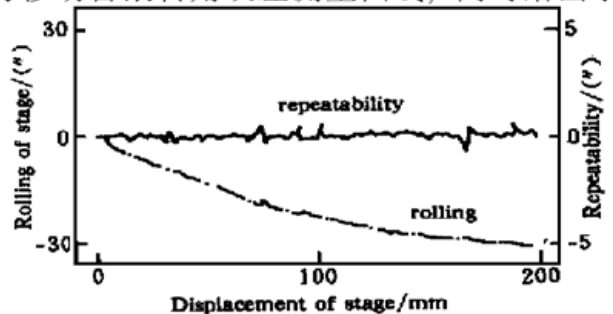


Fig. 7 Measurement results of rolling error of stage

两次测量结果之差。由图 6 可知,参考镜角形状误差在 200 mm 范围内最大为 5",两次测量的重复误差为 0.05"。由图 7 可知,被测移动台的滚转角误差在 200 mm 范围内最大为 30",两次测量之差为 0.5",这个差值为移动台运动时产生滚转角的再现性。移动台滚转角误差的再现性(0.5")对参考镜角形状测量的重复误差(0.05")没有明显影响,这说明本两点法可以准确分离参考镜角形状误差与移动台滚转角误差。

**结束语** 1) 提出了基于两点法测量原理的精密移动台滚转角误差测量新方法。本方法可以对参考镜基准的误差进行分离,因而测量精度不受基准影响。2) 制作了用于滚转角误差测量的精密角度传感器,分辨率高于 0.005",线性误差标定重复性为 0.015"。3) 对一移动范围为 200 mm、具有 30"摆角的精密移动台的滚转角进行了测量,实验结果表明测量重复性精度高达 0.05"。

感谢日本东北大学大学院工学研究科纳米计测研究室的帮助。

### 参 考 文 献

- [1] Zhang Shizhou, Gao Wei, Ma Junshan. Ultra-precision measurement and control of rolling of stage. *J. Japan Prec. Engng.*, 1999, **65**(1) : 100~ 105
- [2] Huang P S, Ni J. On-line error compensation of coordinate measuring machines. *J. Mach. Tools Manuf act.*, 1995, **35**(5) : 725~ 730
- [3] Nakayabu T, Mori H, Takita A *et al.*. Development of a practical measurement system for rolling by means of laser interferometry. *J. Japan Prec. Engng.*, 1995, **61**(2) : 253~ 257
- [4] Okuyama E, Moritoki H. Influence of the difference of characteristics between sensor to the roundness measurement based on 3-point method. *J. Japan Prec. Engng.*, 1999, **65**(3) : 447~ 451
- [5] Kiyono S, Zhang Shizhou, Uda Y. Self-calibration of precision angle sensor and polygon mirror. *Measurement.*, 1997, **21**(4) : 125~ 136

## Optical Precision Measurement Technique of Rolling Error

Ma Junshan      Wang Xiangzhao      Fang Zujie

(Shanghai Institute of Optical and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Science, Shanghai 201800)

(Received 4 January 2000; revised 16 March 2000)

**Abstract** A new method to measure rolling of a precision stage using the two-point method is presented. The rolling of stage and the rolling angle profile can be separated from each other by using the angle sensor output data. Experimental results showed that the rolling can be measured to 0.05" determined by the stability of the rolling measurement system.

**Key words** rolling measurement, angle sensor, error separate.