

文章编号: 0253-2239(2001)02-232-04

精密角度传感器及其标定技术的研究

马军山¹⁾ 王向朝¹⁾ 方祖捷¹⁾ 张世宙²⁾ 清野慧²⁾

1), 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800
2), 日本东北大学大学院工学研究科, 仙台 980-8579

摘要: 介绍了精密角度传感器和不使用任何精密参考仪器的角度传感器的自标定方法。采用补偿技术制作了一对角度传感器, 可以克服光源热漂移带来的影响, 并进行了标定。两个角度传感器的测量范围为 180° , 分辨率分别为 $0.003''$, $0.004''$ 。平均灵敏度标定的重复性误差为 0.015% , 线性误差的标定重复性误差为 $0.015''$ 。

关键词: 角度传感器; 临界反射; 自标定

中图分类号: TH74 文献标识码: A

1 引 言

在超精密技术发展中, 用于镜面形状及微小目标姿态变化检测的光电式角度传感器越来越重要。在原子力显微镜的光杠杆弯曲的检测^[1]、镜面形状的在线测量^[2]等应用中, 要求能将传感器安装在各种仪器、设备内部, 传感器小型化就成为一重要条件, 而很多商品都不能满足这一条件。另外, 随着分辨率和精度的提高, 对标定该传感器的基准仪器的精度要求也相应提高了。已有的角度传感器标定方法是以光电自准直仪等为基准的比较测量, 标定精度依赖基准仪器精度。在这种情况下, 即使制作出分辨率比现有基准仪器高的传感器, 由于没有有效的标定方法, 也难以充分发挥其能力。清野等提出精密位移传感器的线性误差的自标定方法^[3], 但其标定前提是首先利用比较法标定其平均灵敏度。

本文给出了一种结构紧凑、分辨率高的光学精密角度传感器, 并且给出不使用高基准仪器的自标定技术。传感器采用补偿措施, 可以克服光源热漂移带来的影响。利用角度传感器的特点, 提出了平均灵敏度的绝对标定方法。在此基础上, 通过两个平均灵敏度已知的角度传感器的相互标定, 实现传感器线性误差的自标定。

2 传感器工作原理

2.1 临界反射角度传感器工作原理

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, 反射光强度将发生剧烈变化^[4]。对于 p 偏振光和 s 偏振光, 其反射率分别为:

$$R_s = \sin(\theta_i - \theta_t) / \sin(\theta_i + \theta_t), \quad (1)$$

$$R_p = \tan(\theta_i - \theta_t) / \tan(\theta_i + \theta_t), \quad (2)$$

式中的 θ_i 与 θ_t 分别为入射角和折射角, 它们满足折射定律

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t, \quad (3)$$

式中 n_i 与 n_t 为介质折射率。对于普通玻璃和空气界面, $n_i = 1.5$, $n_t = 1$, 临界角为 $\theta_c = 41.8^\circ$ 。

图 1 为 (1)~(3) 式计算得到的 p 偏振光和 s 偏振光在普通玻璃和空气界面的反射系数与入射角的关系曲线。在临界角附近, p 偏振光反射系数变化比 s 偏振光剧烈, 即 p 偏振光的测量灵敏度高。

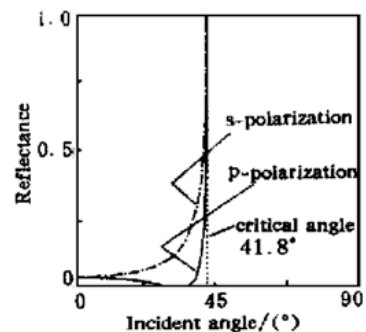


Fig. 1 Reflectance of internal reflection of an air and glass interface

图 2 为基于该测量原理的差动式角度传感器的结构示意图。CP₁ 和 CP₂ 为临界反射棱镜, 入射光由分光镜分为两部分, 分别进入 CP₁ 和 CP₂, 经过三次临界反射, 由探测器接收。调整 CP₁ 和 CP₂ 的初始角度, 当随入射角变化时, 一个输出增大, 一个输出降低。如 x_1 、 x_2 分别为探测器 PD₁ 和 PD₂ 的输

出, Y 为角度传感器的输出, 则 Y 由下式给出:

$$Y = (x_1 - x_2) / (x_1 + x_2). \quad (4)$$

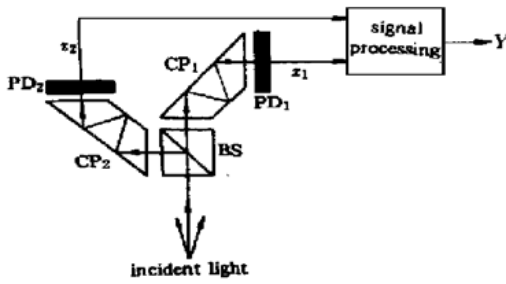


Fig. 2 Optical system of the differential detection method

差动式结构可以使传感器输出线性化, 灵敏度提高一倍, 并可以消除入射光强度变化的影响。当入射光在初始入射角 θ_0 处变化 $\Delta\theta$ 时, 经过三次临界反射后, 对于 p 偏振光, x_1 、 x_2 的表达式分别为

$$x_1 = \left| \frac{\tan(\theta_0 + \Delta\theta - \sin^{-1}a)}{\tan(\theta_0 + \Delta\theta + \sin^{-1}a)} \right|^3, \quad (5)$$

$$x_2 = \left| \frac{\tan(\theta_0 - \Delta\theta - \sin^{-1}b)}{\tan(\theta_0 - \Delta\theta + \sin^{-1}b)} \right|^3, \quad (6)$$

这里

$$a = \frac{\sin(\theta_0 + \Delta\theta)}{\sin\theta_c}, \quad b = \frac{\sin(\theta_0 - \Delta\theta)}{\sin\theta_c}.$$

由(4)式~(6)式, 可以得到以 θ_0 为参量的差动式传感器输出 Y 与入射角变化 $\Delta\theta$ 的理论关系曲线, 如图3所示, 入射光为 p 偏振光。可以看出, 初始入射角越接近临界角, 传感器的灵敏度就越高, 而测量范围相应就越小。在传感器的调整中, 应根据测量范围和灵敏度的要求, 合理选择最佳的 θ_0 角。

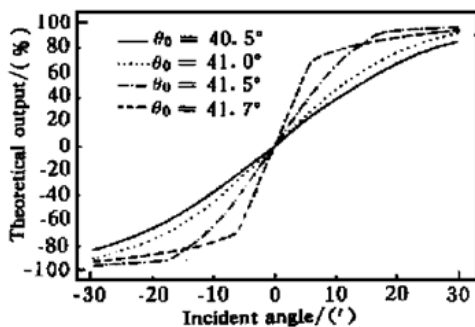


Fig. 3 Theoretical output of the differential detection method (p polarized light)

2.2 精密角度传感器

图4为精密角度传感器的原理图。该结构包含两个角度测量传感器, 一个是用来测量的, 被测对象为反射镜9; 另一个是用来补偿光源发射光的角度漂移的。

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, 则角度传感器的输出 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。

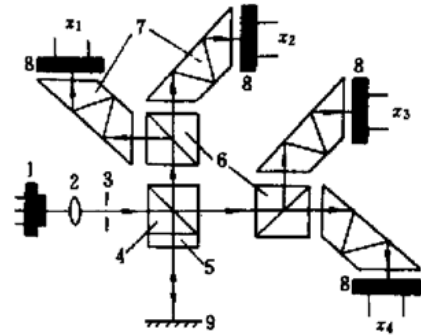


Fig. 4 Optical schematic of a precision angle sensor. 1: Laser diode; 2: Collimator lens; 3: Aperture; 4: Polarized beam splitter; 5: Quarter wave plate; 6: Cube beam splitter; 7: Critical angle prism; 8: Photo diode; 9: Mirror

3 传感器标定原理

3.1 平均灵敏度的标定

本文利用一个旋转周期内角度分度误差的总和为零的这一性质进行平均灵敏度标定。标定原理如图5所示。系统由轴心在一条轴线的两个转台1和2构成, 转台分别由带有减速机构的步进电机5、6驱动。将欲标定的角度传感器3固定在转台1上, 并使其光轴经过转台轴心。在转台2上固定一平面反射镜4。将 360° 划分为 N 等份, 每一份 α 与传感器的测量范围大致相同。

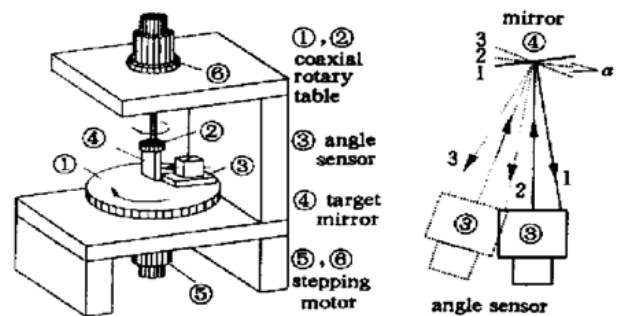


Fig. 5 Calibration of mean sensitivity of an angle sensor

标定按以下顺序进行: 首先调整传感器角度, 使其读数在其测量范围内最小, 记为 V_{Li} ; 然后平面反射镜转动 α 角度, 记下传感器读数的最大值 V_{Hi} ; 然后转台1沿与转台2转动相同的方向转动, 使传感器读数最小, 记为 V_{Li+1} ; 重复以上步骤, 得到以下测量方程:

$$B_2 - A_1 + \alpha = V_1 / S_0,$$

$$B_3 - A_2 + \alpha = V_2 / S_0, \dots,$$

$$\begin{aligned} B_N - A_{N-1} + \alpha &= V_{N-1}/S_0, \\ B_1 - A_N + \alpha &= V_N/S_0, \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $V_i = V_{Hi} - V_{Li}$, $i = 1 \sim N$; S_0 为传感器平均灵敏度; A_i 、 B_i 为转台 1、2 的 N 等份分度误差。

对(8)式两边取和, A_i 与 B_i 总和均为零, 则得到下式:

$$S_0 = \frac{1}{\alpha N} \sum_{i=1}^N V_i, \quad (9)$$

这样, 由角度传感器 N 次读数值的平均值, 就可以得到平均灵敏度。

3.2 线性误差标定

线性误差采用由两个已标定平均灵敏度的角度传感器在一悬臂梁相互标定的方法进行标定, 其原理如图 6 所示。在悬臂梁顶侧加力 W , 并测量其角位移 θ 。设加力点到固定端的距离为 L , 测量点到固定端的距离为 d , 则其角位移 θ 为:

$$\theta = \frac{W}{2EI}d(2L - d), \quad (10)$$

式中 E 为弹性系数, I 为悬臂梁截面的二阶矩。

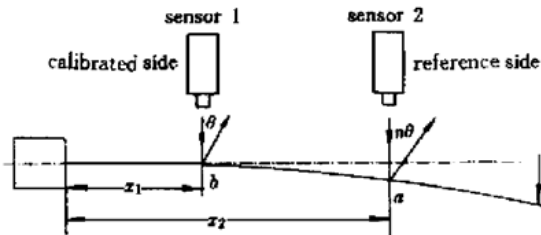


Fig. 6 Calibration system for linearity error of an angle sensor

悬臂梁上两测量点 d_1 、 d_2 对应的角位移的比值 n 由下式决定:

$$n = \frac{d_1(2L - d_1)}{d_2(2L - d_2)}. \quad (11)$$

标定时, 调整转台使传感器 2 读数为最小值, 增加悬臂梁的弯曲, 使作为基准的传感器 2 读数为最大值, 并记下被标定的传感器 1 的读数; 再调整转台使传感器 2 读数回到最小值; 把上述步骤重复进行 n 次, 完成对传感器 2 的标定, 然后将传感器 1 和传感器 2 互换, 对传感器 2 进行标定, 线性误差分为 n 段标定。再以传感器 1 最大读数的 $1/n$ 为基准, 按上述过程, 把传感器 2 的 n 段的每一段再分为 n 段进行标定; 然后, 将传感器 1 和传感器 2 互换, 把传感器 1 的 n 段的每一段再分为 n 段进行标定; 将这一过程重复下去, 直到满足角度标定要求。

传感器在 a 、 b 两处的定位误差将给放大倍数 k 带来误差, 最终影响标定结果。如 Δd_1 与 Δd_2 分别为在 a 、 b 两处的定位误差, 则放大倍数 k 变化率为:

$$\frac{\Delta k}{k} = \frac{2(L - d_1)}{(2L - d_1)d_1} \Delta d_1 - \frac{2(L - d_2)}{(2L - d_2)d_2} \Delta d_2. \quad (12)$$

在 L 、 d_1 、 d_2 为 100 mm 量级, 定位误差小于 0.1 mm 的条件下, 放大倍数 k 变化极小, 对标定的影响可以忽略。

4 实 验

4.1 输出漂移

图 7 为传感器 1 和 2 的输出漂移特性测量曲线。分别记录测量端和补偿端输出, 由(7)式可以得到补偿系数 K 。传感器 1 和 2 的补偿系数分别为 $K_1 = 0.8$, $K_2 = 0.82$ 。经补偿后的输出低频部分被消除了, 说明补偿措施在降低光源热漂移对输出的影响的有效性。高频噪声部分代表传感器的分辨率, 对于传感器 1 为 $0.003''$, 对于传感器 2 为 $0.004''$ 。

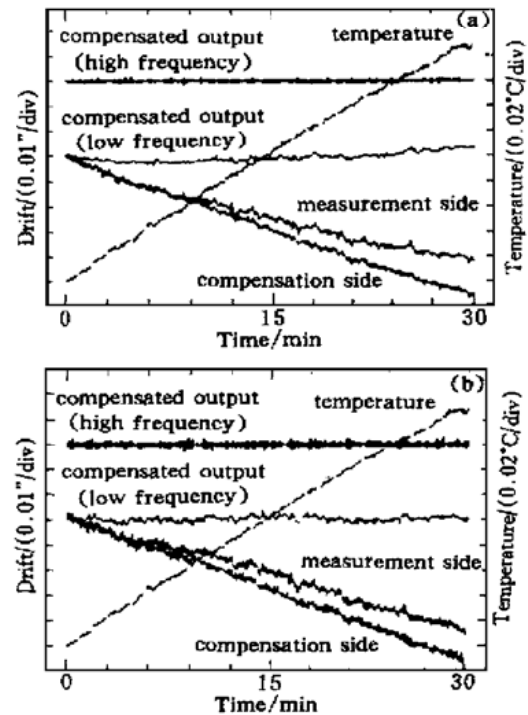


Fig. 7 Thermal drifts of angle sensor 1 and 2

4.2 平均灵敏度标定

标定对象为一对测量范围为 $180''$ 的精密角度传感器, 将圆周进行 7200 份分度, 即 $N = 7200$ 。步进电机的一个脉冲当量为 $0.324''$, 整个标定过程需要 10 个小时完成。对三次标定结果进行平均, 传感器 1 和 2 的平均灵敏度分别为 $0.5327\%/(')$ 、 $0.5273\%/(')$, 标准偏差分别为 0.014% 和 0.015% 。

4.3 线性误差标定

图 8 为线性误差标定实验装置。将作为基准的传感器固定在一转台上, 以使其能够回到初始角位

置。用一微测头顶在悬臂梁自由端, 来提供一必要的角度变化, 两角传感器角位移的比为 3。图 9 给出了两传感器线性误差标定结果及其重复性误差。本标定实验中, 将传感器 1 和 2 共互换了 3 次, 即传感器 $180''$ 的测量范围分为 27 段。在实际使用中, 在每一段内可以使用线性插值的方法来得到输出值。图 9(b) 所示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 $0.015''$ 。

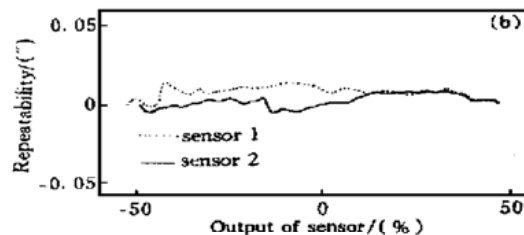
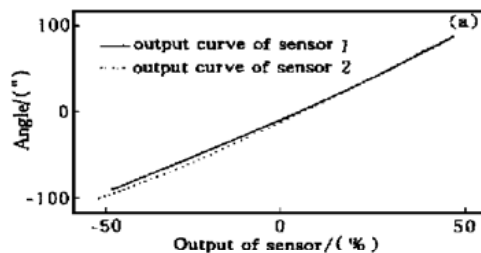


Fig. 9 Output curves and repeatability of calibration

结论 1) 制作了基于临界反射原理的精密角度传感器, 采用差动式结构, 并采取补偿措施, 实验结果证明传感器灵敏度高, 线性好, 稳定性高。

2) 提出了角度传感器的自标定方法, 在对两个传感器的平均灵敏度进行绝对标定以后, 借助一悬臂梁, 通过这两个传感器的相互标定完成线性误差的标定。

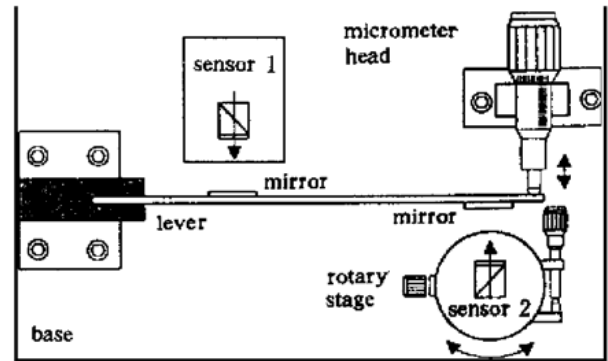


Fig. 8 Experimental apparatus of calibration of linearity error

参 考 文 献

- [1] 清野慧, 佐藤秀寿, 单学传. 角变位检出型 AFM の研究. 精密工学会志, 1992, **58**(3): 521~ 525
- [2] 清野慧, 高 伟, 镰田治. 镜面形状のオンマシン測定についての研究. 精密工学会志, 1992, **58**(2): 247~ 251
- [3] 清野慧, 杉渊亨, 森岛健. 形状測定用変位計の自律校正法. 精密工学会志, 1993, **59**(12): 2043~ 2047
- [4] Huang P S, Kiyono S, Kamada O. Angle Measurement Based on the Internal reflection Effect: A New Method. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(28): 6047~ 6052

Precision Angle Sensor and Its Calibration Techniques

Ma Junshan Wang Xiangzhao Fang Zujie

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

Zhang Shizhou Satoshi Kiyono

(Department of Mechatronics, Tohoku University, Sendai 980-8579)

(Received 30 September 1999; revised 30 November 1999)

Abstract: A high-precision angle sensor and a new method for calibrating precision angle sensor absolutely without any accurate reference instruments are described. Two angle sensors with compensate devices which compensating thermal drift of the light source are developed and calibrated by themselves. The measurement ranges of two angle sensors are $180''$, and the resolutions of two angle sensors are $0.003''$ and $0.004''$, respectively. The repeatability error of the evaluated mean sensitivity was improved to 0.015% by compensating device. The repeatability of the calibrated linearity error was reduced to $0.015''$.

Key words: angle sensor; critical reflection; self-calibration