

基于莫尔信号的超精密复合定位研究

徐 慧¹, 张金龙¹, 刘京南², 内田敬久³, 郭怡倩¹

(1. 南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042;

2. 东南大学 自动化学院, 江苏 南京 210096;

3. 日本爱知工业大学智能机械工学科, 丰田市 470-0392)

[摘要] 应用光学理论研究了透射式激光莫尔信号的位移特性, 建立了衍射莫尔信号强度与对应位移的数学模型, 并通过计算机仿真对莫尔信号的位移特性进行了研究. 在此基础上设计了一套基于激光莫尔信号的超精密定位系统, 系统取透射的零次莫尔信号为控制信号, 由微机控制实现高精度位置检测及精密自动定位. 针对精密定位高精度与大行程之间的矛盾, 提出了一种利用一对细光栅实现复合定位的解决方法, 通过粗定位和精定位相结合的两段式复合定位, 可保证在较大的信号捕捉范围内, 实现高速高精度定位. 由于系统仅使用一对光栅, 结构简单、可靠性高. 实验结果表明, 基于一对衍射细光栅的复合式精密定位可在 $\pm 500\mu\text{m}$ 信号捕捉范围获得 $\pm 10\text{nm}$ 的定位精度, 对精密加工工程领域具有重要的实用价值.

[关键词] 衍射光栅, 莫尔信号, 纳米定位, 复合控制

[中图分类号] TP274+.5 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1672-4292(2011) 01-0033-06

Research on Compound Ultra-Precision Alignment Based on Moiré Signals

Xu Hui¹, Zhang Jinlong¹, Liu Jingnan², UCHIDA Yoshihisa³, Guo Yiqian¹

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China;

2. Automatization College, Southeast University, Nanjing 210096, China;

3. Department of Intelligent Machinery Engineering, Aichi Institute of Technology, Toyoda 470-0392, Japan)

Abstract: The correlation between displacement of double diffracting gratings and the intensity of Moiré signal is studied using optics theory; A mathematical model of precise displacement detection based on the Moiré signal is established. The characteristics of laser Moiré signals are studied by numerical simulation of Moiré signals. The research results are applied to develop ultra-precision positioning stage. The stage can achieve precise position measurement and automatic precision alignment by the 0-th order Moiré signal. In view of the contradiction between high accuracy and long work range of alignment, a novel compound alignment method is developed and reported, in which the coarse and fine alignment are completed only using one pair of narrow pitch grating. By using the two-step alignment, the high alignment accuracy and quick alignment speed are obtained in the wide positioning range. The positioning system is simple in structure by using only one pair of narrow pitch gratings. The experimental result shows the compound alignment can perform positioning accuracy of $\pm 10\text{nm}$ in $\pm 500\mu\text{m}$ positioning range. The approaches are of high value for accelerating the advancement of precision machining technology.

Key words: diffracting gratings, moiré signals, nanometer alignment, compound control

超精密定位技术是超精密加工、微型机械制造、微电子制造、微型机械零件的操作和装配、生物工程等领域的关键性基础性技术, 利用激光莫尔信号进行超精密自动定位是当今世界采用的一种高新技术方法, 与传统的定位方法相比较, 它具有定位精度高、稳定性好等优点^[1-8]. 本文在研究应用激光莫尔信号实现超精密定位的基础上, 设计了一套基于激光莫尔信号的超精密定位系统, 系统取衍射的 0 次莫尔信号为控制信号, 由微机控制实现高精度位置检测及精密自动定位. 针对精密定位高精度与大行程之间的矛盾, 提出了一种利用一对细光栅实现复合定位的方法, 通过对激光束直径的有效调控, 使衍射产生的莫尔光呈正弦

收稿日期: 2010-10-26.

基金项目: 国家 863 计划项目(2005AA303610)、江苏省自然科学基金项目(BK2009406).

通讯联系人: 张金龙, 博士, 副教授, 研究方向: 超精密定位技术. E-mail: ZJL0310@163.com

包络线形状分布. 然后在正弦包络线的分布范围内进行粗定位, 捕捉出用于精密定位的莫尔信号. 再在捕捉到信号的光栅常数范围内进行精密定位. 采用精密定位的复合控制技术, 可保证在较大的信号捕捉范围内, 实现高速、高精度定位, 且系统结构简单、可靠性高.

1 精密位移测量原理

基于激光莫尔信号的精密定位原理如图 1 所示, 两片衍射光栅平行设置, 当激光光束垂直入射光栅 1 缝隙上时, 由于光栅的衍射形成莫尔信号, 由菲涅耳衍射积分公式, 可得光栅 2 前面 P 点处在柱坐标下的衍射光复振幅为^[9]:

$$U_1(P) = \frac{i}{2\lambda} \int_{-b_1/2}^{b_1/2} U_0(Q) r^{-1/2} (1 + \cos\theta) \exp(-ikr) dx_0,$$

式中, b_1 为光栅缝隙宽度, 设 $A_1 = \frac{i}{2\lambda} \cdot U_0(Q)$, 则 P 点衍射光复振幅为:

$$U_1(P) = A_1 \int_{-b_1/2}^{b_1/2} r^{-1/2} (1 + \cos\theta) \exp(-ikr) dx_0. \quad (1)$$

当激光光束所覆盖的光栅条数为 $2M + 1$ 时, 则由式(1) 可得 P 点的衍射光复振幅 $U_1(x_1, G)$ 为:

$$U_1(x_1, G) = A_1 \sum_{m=-M}^M \int_{-b_1/2}^{b_1/2} r^{-1/2} (1 + \cos\theta) \cdot \exp(-ikr) dx_0.$$

由图可知 $\cos\theta = G/r$, 代入上式得:

$$U_1(x_1, G) = A_1 \sum_{m=-M}^M \int_{-b_1/2}^{b_1/2} r^{-1/2} (1 + G/r) \cdot \exp(-ikr) dx_0, \quad (2)$$

式中, $r = [G^2 + (\Delta x + md)^2]^{1/2}$; $\Delta x = x_1 - x_0$ 为两片光栅之间的相对位移; $k = 2\pi/\lambda$ 为波数; λ 为激光波长; d 为光栅常数; G 为两光栅间距; b_1 为第一片光栅的光栅缝隙宽度.

经光栅 1 衍射形成的衍射光 $U_1(x_1, G)$, 再经光栅 2 二次衍射, 设光栅 2 的透光特性函数为 $T(x_1 - \Delta x)$, 则在光栅 2 出射处的二次衍射光复振幅为:

$$U'_1(x_1, G) = U_1(x_1, G) \cdot T(x_1 - \Delta x).$$

在光栅 2 出射的远处(距离为 z_0 处), 第 n 级衍射光的复振幅可由夫琅和费衍射公式计算^[9], 其大小为:

$$U_2(\Delta x, G)_n = \frac{1}{i\lambda z_0} \cdot \exp(ikz_0) \exp\left(i \frac{kx_0^2}{2z_0}\right) \cdot \int U'_1(x_1, G) \cdot \exp(-i2\pi f_0 x_1) dx_1,$$

令 $A_2 = \frac{1}{i\lambda z_0} \cdot \exp(ikz_0) \cdot \exp\left(i \frac{kx_0^2}{2z_0}\right)$, 并由傅里叶光学理论可得知空间频率 $f_0 = \frac{n}{p}$, 则有:

$$U_2(\Delta x, G)_n = A_2 \int U(x_1, G) T(x_1 - \Delta x) \cdot \exp\left(-i \frac{2\pi n x_1}{p}\right) dx_1 = A_2 \int_{-b_2/2 + \Delta x}^{b_2/2 + \Delta x} U_1(x_1, G) \cdot \exp\left(-i \frac{2\pi n x_1}{p}\right) dx_1. \quad (3)$$

式中, n 为衍射级次; b_2 为第二片光栅的光栅缝隙宽度. 当 $n = 0$ 时, 由激光衍射理论可知, 其光强最强, 其 0 次衍射光复振幅为:

$$U_2(\Delta x, G)_0 = A_2 \int_{-b_2/2 + \Delta x}^{b_2/2 + \Delta x} U_1(x_1, G) dx_1. \quad (4)$$

两光栅之间的间距 G 可由菲涅耳公式得^[9], 其大小为:

$$G = m \frac{d^2}{\lambda}, \quad (5)$$

式中, m 为非负的整数. 当两光栅间隙满足上式时, 光栅衍射产生的莫尔条纹信号最强.

对式(4) 采用 Gauss 数值积分法和 Newton 迭代法进行计算机数值运算和分析, 并将仿真计算得到的

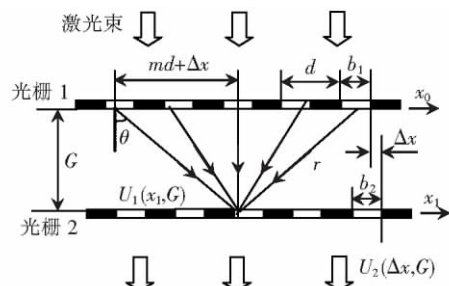


图 1 光栅的配置

Fig.1 Arrangement of gratings

数据再采用 MATLAB 工具进行显示,如图 2 所示. 由图可见,莫尔信号强度随两片光栅的相对位移呈周期性变化,同时也随两光栅的间距呈周期性变化,特别是当光栅距离 G 为 d^2/λ 的整数倍时,光强幅度变化最大. 这说明经双光栅衍射后的 0 次光光强变化具有稳定的规律性,且 0 次光在各级衍射光中光强最强,非常适合于精密位移测量及控制.

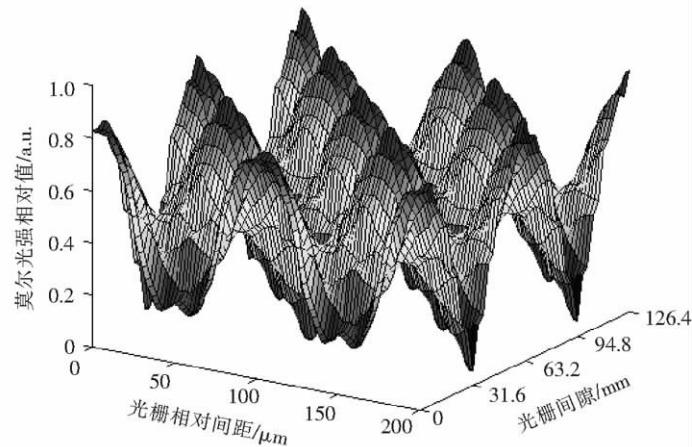


图 2 0 次透射莫尔信号的仿真曲线
Fig.2 Calculated results of 0-th order moiré signals

依据上述关系,通过光电二极管将透射的 0 次莫尔光转换为电信号,并由计算机检测 0 次莫尔光信号强度,从而确定两片光栅间的相对位移 Δx .

2 精密定位控制系统

依据上述原理设计的精密定位系统如图 3 所示,系统由精密位移检测系统、精密定位机构、电机驱动系统、压电陶瓷驱动系统及微机控制系统等组成.

2.1 信号检测装置

信号检测装置的精度和特性直接影响工作台的性能指标,要求测量精度高、反应灵敏、性能稳定等. 本装置采用激光技术进行精密位置检测,由于激光光束能量集中、方向性强、且具有可干涉特性,其中尤以半导体激光器具有光强稳定、波长适宜、便于安装检测等特点,是精密位置检测中较为理想的光源之一. 工作台采用半导体激光光源,波长为 635 nm. 激光器发出的激光束经过分光镜分光被分成两束,垂直透

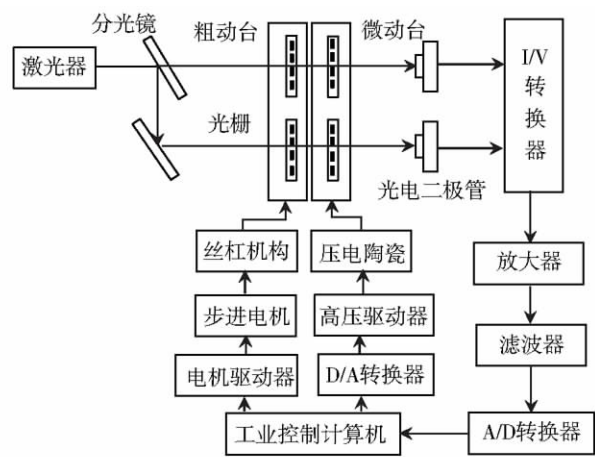


图 3 精密定位装置结构框图
Fig.3 Apparatus of precision alignment

过光栅副,通过光栅副的衍射,产生透射的激光莫尔信号,由光电二极管转换为电信号,经放大、滤波、A/D 转换等处理后,输入工业控制计算机,进行莫尔光信号强度的检测,从而确定两光栅之间的位移偏差.

2.2 精密定位机构

精密定位机构是定位装置的关键部件,要求结构紧凑、移动平稳、响应速度快、定位精度高. 整个定位机构由粗定位机构和精定位机构两部分组成.

粗定位机构由高精度步进电机和精密滚珠丝杠机构组成,采用脉冲细分式驱动步进电机,并通过精密丝杠机构将细分后步进电机的微小角度转化为微米级的线性位移. 其直线移动时的位移分辨率 0.3 μm .

精定位机构采用压电驱动器. 压电材料是一种具有压电效应的弹性体,当在压电陶瓷上加一电场时,压电陶瓷会产生应变和应力,这种由电场产生应变或应力的现象称为逆压电效应. 其应变与电场的关系为:

$$X = kE + ME^2, \quad (6)$$

式中, kE 为逆压电效应; k 为压电系数; E 为外电场强度; ME^2 为电致伸缩效应; M 为电致伸缩系数。

在给压电材料提供一定的电压时能够产生稳定的微米、纳米量级的位移或运动,同时,压电驱动结构紧凑具有线性好、控制方便、位移分辨率高、频率响应好、不发热、无磁干扰、无噪声等优点,因此微动部分采用压电驱动器作为直接驱动部件。

2.3 控制装置

控制装置由微型计算机、电机驱动电路、D/A 转换器、高压运算放大电路等组成,为确保定位的高精度,采用抗干扰能力强的工业控制计算机作为控制装置的核心。精密定位时,工控机根据莫尔信号的大小和极性不断发出相应的驱动信号,驱动定位台,达到所要求的定位精度范围。当系统受到扰动,反映位置变化的莫尔信号曲线偏离误差带,工控机便会发出相应的控制信号进行自动复位,使位置偏差始终控制在所要求的精度范围内,整个定位过程由计算机进行闭环实时控制。

3 复合式精密定位技术

3.1 修正莫尔定位技术

为确保高的测量与定位精度,本系统采用了修正式精密定位方法,使用一组衍射光栅,通过检测 0 次莫尔信号的瞬时值 I_1 、最大值 I_{\max} 及最小值 I_{\min} 来计算出反相信号 I_0 ,反相信号 I_0 可由下式计算:

$$I_0 = I_{\max} + I_{\min} - I_1, \quad (7)$$

取两信号 I_1 、 I_0 的差值(即修正莫尔信号 S_m)为控制信号,其大小为:

$$S_m = I_1 - I_0 = 2I_1 - (I_{\max} + I_{\min}). \quad (8)$$

图 4 为实验测得的莫尔信号 I_1 及计算出的反相莫尔信号 I_0 和修正莫尔信号 S_m 。由图可以看出修正莫尔信号将反映位移变化的莫尔信号值有效地放大了一倍,特别是在定位点附近修正莫尔信号的变化率很陡,微小位移便会致大的光强变化,极大地提高了位移测量的分辨率。

修正莫尔信号随两光栅的相对位移呈周期性变化,在一个位移周期内,修正信号为零的点设置为定位点,此时位移偏差为零。精密定位控制时一片光栅固定,另一片光栅由工控机根据差动莫尔信号的大小和正负精密驱动,控制范围为精密定位点两侧 $\pm d/2$ 。

3.2 复合式精密定位

精密定位的定位信号捕捉范围与定位精度是一对矛盾。由于定位信号的捕捉范围处于精密定位点附近的一个光栅常数范围内,因此光栅常数越大,则定位信号的捕捉范围就越大,但光栅常数的增大,会引起定位精度的降低。因此如何实现大范围信号捕捉条件下的超精密定位是精密定位技术研究的难点。目前已有文献提出采用粗光栅与细光栅相结合的复合定位技术^[10],可有效解决上述矛盾,但该方法存在的缺陷是由于需要粗、细两种光栅,并需配备相应的分光系统和传感器系统,从而使系统结构复杂、可靠性差。

本文在研究应用激光莫尔信号实现超精密定位的基础上,提出了一种仅利用一对细光栅实现复合定位的新方法。实验研究表明,激光束直径对莫尔信号的形状与强度有着较大的影响。激光束直径缩小,可以使外来的噪声干扰相对减弱,但激光束直径的变细会使得与衍射相对应的光栅缝隙条数减少,从而影响莫尔信号的形状与强度。通过对理论关系式(2)和(4)的数值仿真及实验验证,可发现当激光光束覆盖的光栅缝隙条数在 20 条左右时,衍射产生的莫尔光峰值分布呈现出规则的正弦包络线形状,如图 5 所示,图中光栅的光栅常数 $d = 25 \mu\text{m}$,包络线的分布范围为 $\pm 500 \mu\text{m}$ 。依据上述莫尔信号的发布特点,定位台定位时,先在 $\pm 500 \mu\text{m}$ 包络线分布范围内进行大范围信号捕捉,大步驱动粗动台,快速捕捉出用于精定位的莫尔信号,即图 5(a) 中最强的莫尔信号,完成粗定位,捕捉到的精定位信号如图 5(b) 所示。粗定位完成后,再在捕捉到信号的一个细光栅常数范围内进行精定位。精密定位时,为保证高的定位精度,采用上述修正莫尔技术。工控机根据修正莫尔信号的大小和极性不断发出相应的驱动信号,通过压电陶瓷精密驱动微动台,达到所要求的定位精度范围,实现超精密定位。

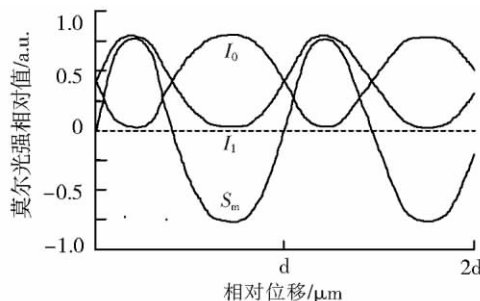


图 4 修正莫尔信号

Fig.4 Modified Moiré signal

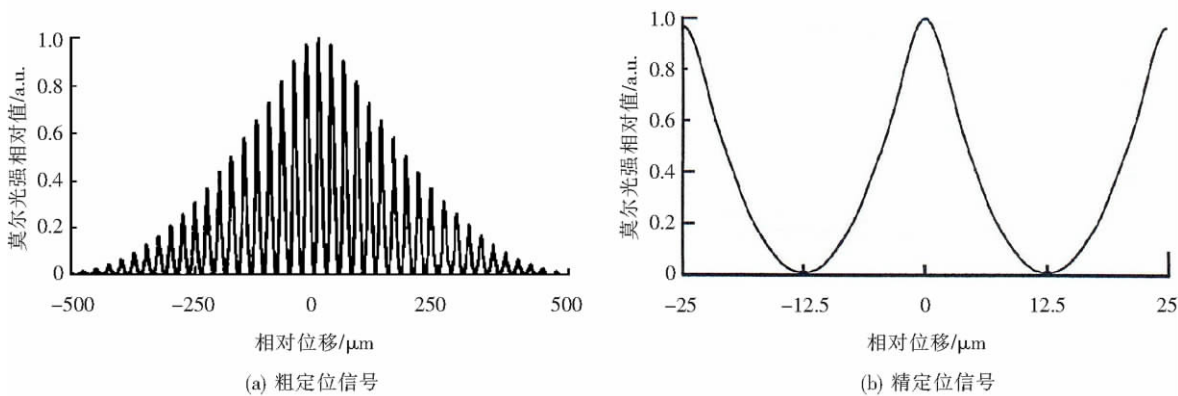


图 5 莫尔定位信号
Fig.5 Moiré alignment signal

采用两段式复合定位,可使精密定位装置在较大的信号捕捉范围内实现高精度定位,同时通过大步快速驱动与细分步精密驱动相结合,使精密定位装置在实现高精度的同时,又能大大缩短定位时间,实现高速高精度定位.此外,由于仅使用一对光栅,系统结构简单,可靠性高.

4 实验研究

实验所用激光光源为半导体激光,波长 $\lambda = 633\text{ nm}$, 功率 1.8 mW , 激光光束所覆盖的光栅条数为 $2M + 1 = 20$, 光栅的光栅常数 $d = 25\text{ }\mu\text{m}$, 两片光栅间的间距 $G = 1\text{ mm}$. 微机的采样及控制循环时间设定为 0.2 s . 定位时, 激光器发出的激光束垂直透过光栅副, 产生透射的 0 次莫尔信号, 由光电二极管转换为电信号, 并经 I/V 转换、放大、滤波等处理后, 输入工业控制计算机, 工控机根据莫尔信号大小和极性发出相应的驱动脉冲信号, 驱动粗动台运动, 进行大范围信号捕捉, 捕捉出最大的莫尔信号以作为精定位用信号, 完成粗定位. 粗定位完成后, 工控机在捕捉到信号的一个光栅常数范围内进行精密定位, 工控机根据莫尔信号大小发出相应的驱动信号, 通过压电陶瓷精密驱动微动台运动, 达到所要求的位置定位精度. 图 6 示出了精定位的实验结果, 精定位精度为 $\pm 10\text{ nm}$.

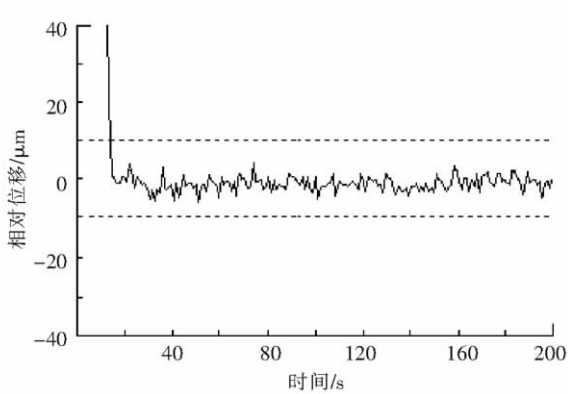


图 6 精密定位实验结果
Fig.6 Result of precision alignment

5 结论

研究了透射式激光莫尔信号的位移特性, 建立了衍射莫尔信号与对应位移的数学模型, 并进行了计算机仿真. 在此基础上设计了一套基于激光莫尔信号的超精密定位系统, 系统取衍射的 0 次莫尔信号为控制信号, 由微机控制实现高精度位置检测及精密自动定位. 针对精密定位高精度与大行程之间的矛盾, 提出了一种利用一对细光栅实现复合定位的方法, 通过对激光束直径的有效调控, 使衍射产生的莫尔光呈正弦包络线形状分布. 然后在正弦包络线的分布范围内进行大范围信号捕捉, 捕捉出用于精定位的莫尔信号, 完成粗定位. 再在捕捉到信号的一个光栅常数范围内进行精密定位. 采用精密定位复合控制技术, 可保证在较大的信号捕捉范围内, 实现高速高精度定位, 有效解决了定位精度、定位速度与信号捕捉范围三者之间的矛盾, 此外, 由于仅使用一对光栅, 系统结构简单, 可靠性高. 实验结果表明, 复合式精密定位可在 $\pm 500\text{ }\mu\text{m}$ 的信号捕捉范围获得 $\pm 10\text{ nm}$ 的定位精度.

[参考文献](References)

- [1] Akihito M, Furuhashi H. Influences of the inclination of gratings on the alignment accuracies in Moiré alignment systems [J]. Electrical Engineering in Japan, 2002, 139(2): 46-51.
- [2] Zhou G Y, Logeeswaran V J, Chau F S. An open-loop nano-positioning micromechanical digital-to-analog converter for grating light modulation [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(5): 1 010-1 012.
- [3] Kuo S H, Shan X M, Meng C H. Large travel ultra precision $x-y-\theta$ motion control of a magnetic-suspension stage [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2003, 8(3): 334-341.
- [4] Zhang J L, Yu L L, Liu J N. Ultra-precision positioning control technique based on neural network [J]. Journal of Southeast University: English Edition, 2006, 22(1): 1-4.
- [5] Wang Y, Liu Z G, Bo F, et al. Design and control of an ultraprecision stage used in grating tiling [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering: English Edition, 2007, 20(1): 1-4.
- [6] Zhou L Z, Furuhashi H, Uchida Y. Sensing characteristics of a precision aligner using Moiré gratings for precision alignment system [J]. Chinese Journal of Lasers B: English Edition, 2001, 10(4): 257-262.
- [7] 张金龙, 刘京南, 钱俊波, 等. 超精密角位移测量与控制技术的研究 [J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(12): 1 738-1 741.
Zhang Jinlong, Liu Jingnan, Qian Junbo, et al. Research on ultra-precision angular displacement measurement and control technique [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(12): 1 738-1 741. (in Chinese)
- [8] 张迎新, 刘京南, 陈从颜. 高精度位置检测及定位技术研究 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2003, 33(4): 495-497.
Zhang Yingxin, Liu Jingnan, Cheng Congyan. Research on high-accuracy position detection and alignment technology [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2003, 33(4): 495-497. (in Chinese)
- [9] 梁铨廷. 物理光学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1987.
Liang Quanting. Physical Optics [M]. Beijing: High Education Press, 1987. (in Chinese)
- [10] 周礼中, 古桥秀夫, 内田悦行. 利用激光莫尔信号精密定位的复合控制研究 [J]. 扬州大学学报: 自然科学版, 1999, 2(4): 72-74.
Zhou Lizhong, Furuhashi H, Uchida Y. The research on compound control over precision positioning by the application of Moiré signals [J]. Journal of Yangzhou University: Natural Science Edition, 1999, 2(4): 72-74.

[责任编辑: 刘 健]