

基于利特罗式激光反馈光栅干涉的微位移测量技术

孔令雯, 蔡文魁, 施立恒, 郭冬梅*, 夏巍, 倪小琦, 郝辉, 王鸣

南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏 南京 210023

摘要 通过在激光反馈干涉(LFI)系统中引入衍射光栅,提出了一种基于利特罗结构的激光反馈光栅干涉(LFGI)技术,用于一维和二维精密位移的测量。半导体激光器出射的光束以利特罗条件入射至反射式全息光栅,衍射光沿入射光方向返回激光腔后,腔内会发生激光反馈干涉效应。引入正弦相位调制解调技术,高精度地测量一维和二维微位移。利特罗结构和 LFGI 系统具有自准直性好、结构紧凑、易于操作和系统稳定性高的优点。实验结果表明,利特罗式 LFGI 系统的位移测量精度可以达到 10 nm 量级。

关键词 测量; 位移测量; 自混合干涉; 衍射光栅; 利特罗结构; 正弦调制

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0404012

Micro-Displacement Measurement Technology Based on Littrow-Configured Laser Feedback Grating Interference

Kong Lingwen, Cai Wenkui, Shi Liheng, Guo Dongmei*, Xia Wei,
Ni Xiaoqi, Hao Hui, Wang Ming

School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210023, China

Abstract By introducing a diffraction grating into the laser feedback interference(LFI) system, we propose a laser feedback grating interferometry (LFGI) based on Littrow configuration for the measurement of one-dimensional and two-dimensional displacement. The beam emitted from the semiconductor laser is incident onto the reflective holographic grating under the condition of Littrow configuration. After the diffracted light returns to the laser cavity in the direction of the incident light, a laser feedback interference effect occurs in the cavity. The sinusoidal phase modulation and demodulation technique is introduced to obtain the one-dimensional and two-dimensional displacement with high precision. The Littrow configuration and LFGI system have the advantages of great self-collimation, compact structure, easy operation and high stability. The experimental results show that the displacement measurement accuracy of the Littrow LFGI system can reach the order of 10 nm.

Key words measurement; displacement measurement; self-mixing interference; diffraction grating; Littrow configuration; sinusoidal modulation

OCIS codes 120.3180; 120.4820; 120.5060

1 引言

微纳米位移测量在半导体工业、微机电系统制造技术、纳米光刻技术及纳米传感技术等领域有着重要意义。近年来,激光反馈干涉(LFI)以其独特的紧凑性、稳健性和自对准性受到越来越多的关注,被证明是精密位移测量的有力工具^[1]。该技术是一种区别于常规双光束干涉的位移测量技术,它是指

激光器的输出光被外部物体反射或散射后,其中一部分光反馈回激光器的谐振腔,反馈光携带了被测物体的信息,与腔内光混合后,可调制激光器的输出功率和输出频率^[2-3]。与传统的双光束干涉仪相同,激光干涉仪法具有测量速度快、精度高和非接触等优点^[4],但它以光波波长作为测量基准,对环境因素要求比较高。另外,环境中温度、湿度、气压和气流的变化也会导致测量精度的下降,因此,必须严格控

收稿日期: 2018-12-07; 修回日期: 2019-01-09; 录用日期: 2019-01-22

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51875292)、江苏省高等学校自然科学研究重大项目(17KJA510002)

* E-mail: guodongmei@njnu.edu.cn

制环境条件,以获得较高的测量精度。

光栅干涉(GI)是以光栅的栅距作为测量基准,对环境因素的要求比较低,与传统双光束干涉仪相比,在成本和环境控制方面具有很大优势^[5-9]。目前,德国的海德汉、英国的雷尼绍及日本的三丰和索尼等公司生产的光栅位移传感器产品已被广泛地应用到各种高精密装备中。在相关的研究领域,哈尔滨工业大学和国防科学技术大学的单光栅干涉系统^[10-12]、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的绝对式光栅测量系统^[13-14],及合肥工业大学的二维(2D)光栅测量系统^[15]等,都能获得约 10 nm 的实测分辨率;Fan 等^[16]对其在 2008 年提出的基于光栅自准直结构的一维激光编码器进行了改进,研制了一种分辨率为 1 nm 的二维光栅位移测量装置;日本东北大学研发的二自由度光栅测量定位系统的分辨率可以达到 0.5 nm^[17]。

本文将激光反馈干涉效应和利特罗式光栅干涉的思路相结合,通过在激光反馈干涉系统中引入衍射光栅,使得激光反馈干涉的测量基准由波长变为相对稳定的光栅的栅距,极大地提高了系统稳定性;同时衍射效率的限制,使得激光反馈干涉自动工作

在弱反馈条件下,无需额外地控制光反馈量。分别设计了单光路激光反馈光栅干涉仪用于一维(1D)面内微位移的测量,对称式激光反馈光栅干涉(LFGI)结构用于二维面内和面外微位移的测量。为了高精度地解调出 LFGI 信号的相位,利用铌酸锂电光晶体对激光反馈干涉信号进行高频相位调制,实现了 10 nm 量级精度的微位移测量。这种新型的激光反馈干涉系统既具有激光反馈干涉仪的结构简单、紧凑及无需外部探测器的优点,又具有光栅干涉仪的测量精度高和抗干扰能力强的优点。

2 单光路 LFGI 面内位移测量系统

2.1 原 理

单光路 LFGI 一维位移测量系统装置图如图 1 所示。系统主要包括半导体激光器(LD, HL6320G, Thorlab, 美国, 波长为 635 nm)、LD 温控源和电流源、铌酸锂电光晶体(EOM, 4002, New Focus, 美国)及驱动、反射式全息光栅(栅距为 1/2400 mm)、二维纳米定位平台(P621.2CD, PI, 美国)、低噪声前置放大器,及模数(A/D)转换器等器件。

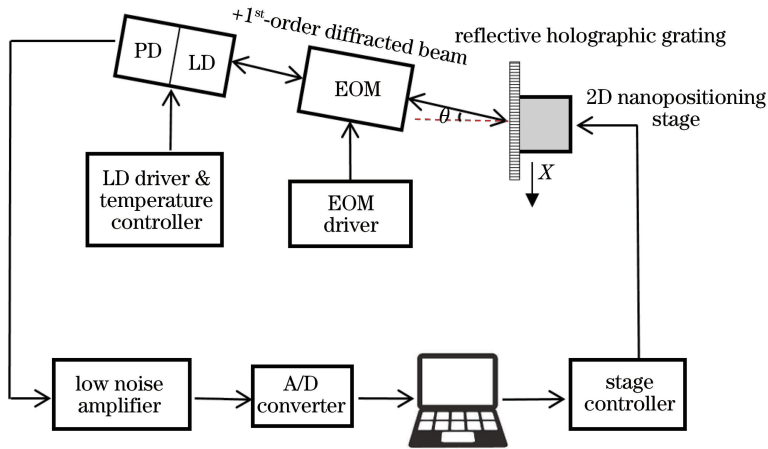


图 1 单光路 LFGI 一维位移测量系统装置图

Fig. 1 1D displacement measurement system setup for LFGI of single optical path

LD 出射的光穿过铌酸锂电光晶体后,以利特罗条件入射到反射式全息光栅上并发生光栅衍射,光栅被固定在二维纳米定位平台上。+1 级衍射光沿原光路返回到激光器腔内,与腔内光发生激光反馈干涉,干涉信号由置于激光器后向输出光路的光电探测器(PD)接收,再由低噪声前置放大器放大,经过 A/D 转换器传输至计算机,利用计算机 Labview 软件进行数据处理,得到待测位移 Δx 和 Δz 。由衍射定律可知,从 LD 出射的激光相对于法

线的入射角(利特罗角)满足

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2d}\right), \quad (1)$$

式中: λ 为激光波长, d 为光栅栅距。光栅沿 X 方向移动时,+1 级衍射光将产生多普勒频移 Δf ,可表示为

$$\Delta f = \frac{v}{d}, \quad (2)$$

式中: v 为光栅移动速度。当光栅沿 X 方向移动 Δx 时,根据光栅多普勒效应可知,+1 级衍射光的

相位变化为

$$\varphi_g = \frac{2\pi\Delta x}{d}, \quad (3)$$

即待测位移 Δx 可以表示为

$$\Delta x = \frac{d\varphi_g}{2\pi}. \quad (4)$$

存在光反馈时,反馈光的相位变化会引起激光器输出光的强度和频率的调制,光反馈条件下激光器的输出光频和光功率满足^[18]

$$\omega\tau = \omega_0\tau - C\sin[\omega\tau + \varphi_g(\tau) + \arctan\alpha] \quad (5)$$

和

$$I(t) = I_0[1 + k\cos(\omega\tau + \varphi_g)], \quad (6)$$

式中: τ 为外腔往返时间; I_0 为无反馈时激光输出强度; ω 和 ω_0 分别为有反馈和无反馈时的激光器角频率; C 为光反馈强度; k 为调制系数, α 为激光器的线宽增强系数, t 为调制时间。

2.2 正弦相位调制技术

为了提高位移测量的分辨率,如图1所示,在光路中加入电光晶体用于引入正弦相位调制,相位调制函数为 $\psi(t) = a\sin(2\pi f_m t)$, 其中: a 为调制深度, f_m 为调制频率。考虑到光在外腔中两次穿过电光晶体,调制后的干涉光强可表示为^[19]

$$I(t) = I_0\{1 + k\cos[\varphi_0 + \varphi_g + 2a\sin(2\pi f_m t)]\}, \quad (7)$$

式中: φ_0 为干涉信号的初始相位。

对(7)式进行贝塞尔展开,可以分别得到中心频率为 f_m 和 $2f_m$ 的谐波:

表1 正弦运动的测量结果(10 Hz)

Table 1 Measurement results of sinusoidal motion (10 Hz)

Δx /nm	Measurement result /nm										Mean /nm	Standard deviation /nm
	1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th	6 th	7 th	8 th	9 th	10 th		
200	203	198	205	195	201	198	201	198	200	206	200.5	3.44
800	809	799	798	796	796	805	806	786	795	810	800	7.45
1000	1009	1001	1008	992	989	1001	999	994	1001	1008	1000.2	6.94
5000	4992	5004	5004	5005	4997	4994	5000	4999	4992	5005	4999.2	5.27
8000	8002	7991	7996	8005	7994	8007	7997	8003	7999	7999	7999.3	5.01

实验结果表明,该 LFGI 系统面内位移测量误差范围在纳米量级,系统的重复性好,精度较高。

2.4 系统噪声水平测量

为了评估该一维位移测量系统的噪声水平,对二维纳米定位平台施加零电压,解调平台的一维位移^[20]。实验结果如图3所示,该一维位移测量系统在 200 ms 内的噪声水平优于 10 nm。

$$A_1(t) = 2kI_0\sin(\varphi_g + \omega\tau)J_1(2a), \quad (8)$$

$$A_2(t) = 2kI_0\cos(\varphi_g + \omega\tau)J_2(2a), \quad (9)$$

式中: $J_1(2a)$ 和 $J_2(2a)$ 分别为一阶和二阶贝塞尔函数。将(8)式和(9)式相除消除常数项,即可解调出相位 φ_g :

$$\varphi_g = \arctan\left[\frac{A_1(t)}{A_2(t)} \cdot \frac{J_2(2a)}{J_1(2a)}\right]. \quad (10)$$

2.3 系统测量实验及结果

控制二维纳米定位平台在面内 X 方向进行频率为 10 Hz 的正弦振动,铌酸锂电光晶体的调制深度为 1.23 rad,采样频率为 50 kHz。定位平台在 0~1000 ms 内进行峰峰值 Δx 分别为 200, 800, 1000, 5000, 8000 nm 的正弦运动,图2是对应的重构结果。

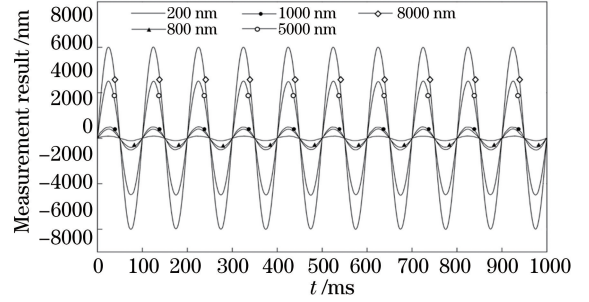


图2 光栅正弦运动的重构结果(10 Hz)

Fig. 2 Reconstruction results of grating sinusoidal motion (10 Hz)

对测量数据统计分布进行分析,表1所示为图2中每组测量值的平均值和标准差。

3 对称式 LFGI 位移测量系统

3.1 原 理

当光栅在平面外发生移动时,也会对反馈光相位造成影响。为了从 LFGI 信号中分辨这一信息,采用如图4所示的对称式 LFGI 测量系统进行测量。将型号相同的两个激光二极管 LD1 和 LD2 放

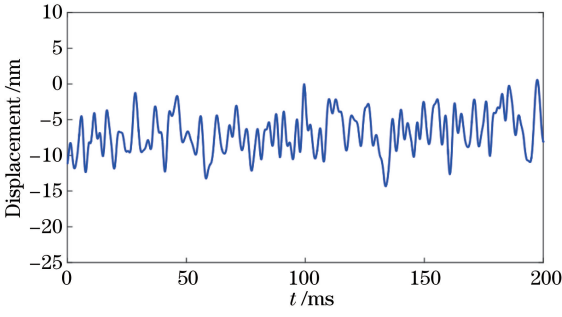


图 3 一维位移测量方法的系统噪声

Fig. 3 System noise of 1D displacement measurement method

置在对称位置, LD 输出的光以利特罗条件入射至反射光栅, 发生衍射, ± 1 级衍射光沿原光路返回到激光器腔内, 与腔内光发生激光反馈干涉, 干涉信号由置于激光器后向输出光路的光电探测器接收, 再由低噪声前置放大器放大, 经过 A/D 转换器传输至计算机, 利用计算机 Labview 软件进行数据处理, 得到待测位移。

当光栅沿 X 方向位移 Δx 时, 根据光栅多普勒效应可知, ± 1 级衍射光的相位差可表示为

$$\Delta\varphi_{\pm x} = \pm \frac{2\pi\Delta x}{d}. \quad (11)$$

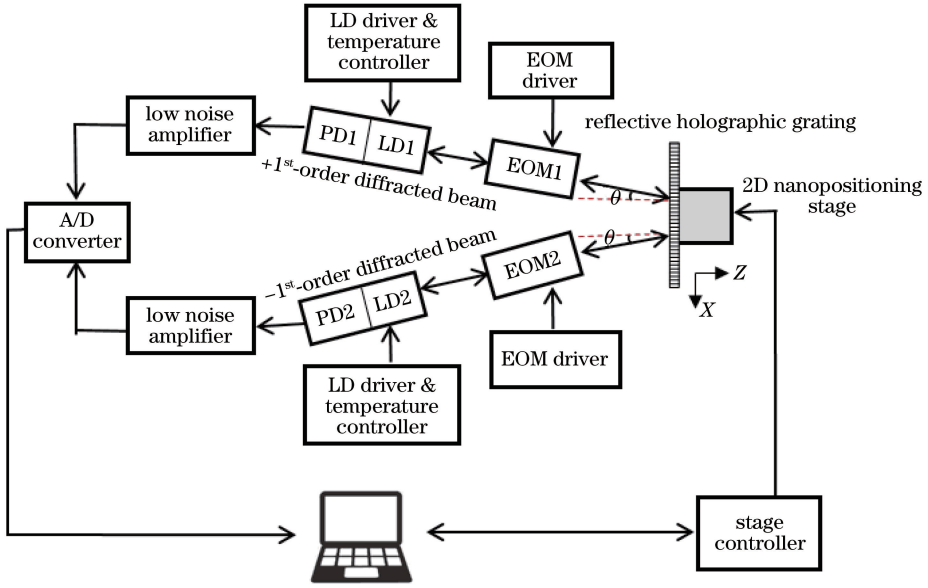


图 4 对称式 LFGI 二维位移测量系统装置图

Fig. 4 Symmetrical LFGI 2D displacement measurement system setup

当光栅沿 Z 方向位移 Δz 时, 干涉信号相位差是由激光反馈干涉外腔长度变化及光栅多普勒频移共同作用产生的, 即

$$\Delta\varphi_z = \varphi_L + \varphi_{gz}. \quad (12)$$

由激光反馈干涉外腔长度变化产生的相位差 φ_L 可表示为

$$\varphi_L = -2\pi \cdot \frac{2L}{\lambda} = -4\pi \cdot \frac{\Delta z}{\lambda \cos \theta}, \quad (13)$$

由光栅多普勒频移产生的相位差 φ_{gz} 可表示为

$$\varphi_{gz} = \frac{2\pi\Delta z \tan \theta}{d}, \quad (14)$$

式中: L 为外腔长度。

将(13)和(14)式代入(12)式可知, 光栅沿 Z 方向位移 Δz 时, ± 1 级衍射光产生的总干涉信号相位差为

$$\Delta\varphi_{\pm z} = \varphi_L + \varphi_{gz} = 2\pi \left(\frac{\Delta z \tan \theta}{d} - \frac{2\Delta z}{\lambda \cos \theta} \right). \quad (15)$$

因此, 由光栅移动引起 ± 1 级衍射光的总相位差可表示为

$$\begin{cases} \varphi_{+1} = \Delta\varphi_{+x} + \Delta\varphi_{+z} = 2\pi \left(\frac{\Delta x}{d} + \frac{\Delta z}{d} \tan \theta - \frac{2\Delta z}{\lambda \cos \theta} \right) \\ \varphi_{-1} = \Delta\varphi_{-x} + \Delta\varphi_{-z} = 2\pi \left(-\frac{\Delta x}{d} + \frac{\Delta z}{d} \tan \theta - \frac{2\Delta z}{\lambda \cos \theta} \right) \end{cases}, \quad (16)$$

式中: $\Delta\varphi_{+x}$ 和 $\Delta\varphi_{-x}$ 分别为光栅沿 X 方向位移 Δx 时 ± 1 阶衍射光产生的相位差; $\Delta\varphi_{+z}$ 和 $\Delta\varphi_{-z}$ 分别为光

栅沿 Z 方向位移 Δz 时 ± 1 阶衍射光产生的相位差。

由(16)式可得, Δx 和 Δz 的表达式为

$$\begin{cases} \Delta x = \frac{d}{4\pi}(\varphi_{+1} - \varphi_{-1}) \\ \Delta z = \frac{\lambda d \cos \theta}{4\pi(\lambda \sin \theta - 2d)}(\varphi_{+1} + \varphi_{-1}) \end{cases} \quad (17)$$

把(1)式代入(17)式,可得

$$\Delta z = \frac{\lambda d}{4\pi\sqrt{4d^2 - \lambda^2}}(\varphi_{+1} + \varphi_{-1}) \quad (18)$$

在二维位移测量系统中,同样采用 2.2 节中的相位调制技术来提高测量性能,±1 级衍射光的相

位可以被提取出,二维位移可通过(17)和(18)式计算得到。

3.2 系统测量实验及结果

控制二维纳米定位平台同时进行 X 方向和 Z 方向幅值为 5 μm 的正弦振动,调制频率为 5 kHz,采样频率为 200 kHz,调制深度为 1.23 rad,对两个 LD 进行校准,对两组不同类型的 Lissajous 位移进行重建。两组 Lissajous 轨迹的实验及仿真结果如图 5 所示。

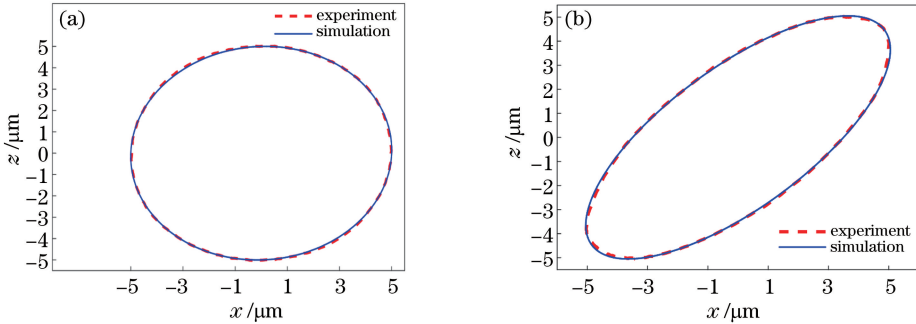


图 5 两组 Lissajous 轨迹的实验及仿真结果。(a)圆;(b)椭圆

Fig. 5 Experimental and simulation results of two Lissajous trajectories. (a) Circle; (b) ellipse

3.3 系统噪声水平测量

同样,为了测量该二维位移测量系统的噪声水平,对二维纳米定位平台施加零电压,利用提出的正弦调制解调方法解调平台的二维位移噪声^[20]。实验结果如图 6 所示,在 200 ms 内该测量系统二维位移测量的噪声水平平均优于 10 nm。

扰影响,约为几十纳米量级。后续工作将研究相应的信号处理及误差补偿方法,以减小测量时的低频噪声分量。研究结果为高精度的一维、二维位移测量提供一种解决方案,对推动机械制造中精密测量技术的发展具有一定的意义。

参 考 文 献

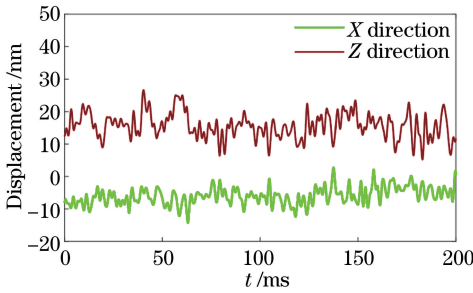


图 6 二维位移测量方法的系统噪声

Fig. 6 System noise of 2D displacement measurement method

4 结 论

提出了一种基于利特罗结构的激光反馈干涉测量结构,引入了正弦相位调制解调技术,重构纳米移动平台的一维、二维微位移。整个位移系统噪声包含高频分量和低频分量,其中高频噪声分量主要来自光电探测器、电光晶体及系统电子噪声,位移噪声幅度在 10 nm 以内,低频噪声分量主要来自环境干

- [1] Wan X J, Li D, Zhang S L. Quasi-common-path laser feedback interferometry based on frequency shifting and multiplexing[J]. Optics Letters, 2007, 32(4): 367-369.
- [2] Guo D M, Wang M. Note: Design of a laser feedback interferometer with double diffraction system [J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(9): 096111.
- [3] Huan H, Guo K L, Zhang Y, et al. Phase-extracting method of laser self-mixing interference signal with two feedback external cavity[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(6): 061203. 宦海, 郭克伦, 张雨, 等. 两路反馈外腔自混合干涉信号的相位提取方法[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(6): 061203.
- [4] Wang D P, Jin X, Zhou W J, et al. Nonlinear error calibration method for capacitive displacement sensor based on laser interferometry [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 101203. 王大鹏, 金星, 周伟静, 等. 基于激光干涉的电容位

- 移传感器非线性误差标定方法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 101203.
- [5] Lee J Y, Lu M P. Optical heterodyne grating shearing interferometry for long-range positioning applications[J]. Optics Communications, 2011, 284(3): 857-862.
- [6] Lee J Y, Jiang G A. Displacement measurement using a wavelength-phase-shifting grating interferometer[J]. Optics Express, 2013, 21(21): 25553-25564.
- [7] Shi L, Wang C P, Wang H, *et al.* A new method based on diffraction grating for ultra-precision displacement detection and positioning [J]. Process Automation Instrumentation, 2017, 38(4): 55-57.
时轮, 王池平, 王鹤, 等. 衍射光栅超精密位移定位检测新方法[J]. 自动化仪表, 2017, 38(4): 55-57.
- [8] Guo D M, Shi L H, Yu Y G, *et al.* Micro-displacement reconstruction using a laser self-mixing grating interferometer with multiple-diffraction [J]. Optics Express, 2017, 25(25): 31394-31406.
- [9] Cheng F, Fan K C. Linear diffraction grating interferometer with high alignment tolerance and high accuracy[J]. Applied Optics, 2011, 50(22): 4550-4556.
- [10] Wang X Y. Research of high-precision displacement measurement system based on the principle of diffraction and interference [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014: 5-25.
王雪英. 基于衍射干涉原理的高精度光栅位移测量系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 5-25.
- [11] Chu X C, Lü H B, Zhao S H. Wide-range grating interferometer with nanometer resolution [J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(1): 55-59, 115.
楚兴春, 吕海宝, 赵尚弘. 大量程纳米级光栅干涉位移测量[J]. 光电工程, 2008, 35(1): 55-59, 115.
- [12] Yang D X, Yan S H, Du L B, *et al.* Design of a miniature single-grating displacement measuring system with nanometer resolution [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(4): 1020-1025.
杨东兴, 颜树华, 杜列波, 等. 一种小型化纳米级单光栅位移测量系统的研制 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(4): 1020-1025.
- [13] Qiao D. Study on the measurement technology of high precision absolute linear encoder [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015: 10-20.
乔栋. 高精度绝对式光栅尺测量技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2015: 10-20.
- [14] Qiao D, Xu Z J, Wu H S, *et al.* A method for compensating interpolation error of absolute linear encoder [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0112008.
乔栋, 续志军, 吴宏圣, 等. 绝对式光栅尺细分误差补偿方法[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0112008.
- [15] Xia H J. Research on precise 2-D plane grating measurement system and key technology [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2006: 83-100.
夏豪杰. 高精度二维平面光栅测量系统及关键技术研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006: 83-100.
- [16] Fan K C, Liao B H, Chung Y C, *et al.* Displacement measurement of planar stage by diffraction planar encoder in nanometer resolution [C] // 2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, May 13-16, 2012, Graz, Austria. New York: IEEE, 2012: 894-897.
- [17] Kimura A, Wei G, Arai Y, *et al.* Design and construction of a two-degree-of-freedom linear encoder for nanometric measurement of stage position and straightness [J]. Precision Engineering, 2010, 34(1): 145-155.
- [18] Donati S. Developing self-mixing interferometry for instrumentation and measurements [J]. Laser & Photonics Reviews, 2012, 6(3): 393-417.
- [19] Guo D M, Tan S Q, Wang M. Analysis of micro-displacement measurement accuracy in self-mixing interferometer based on sinusoidal phase modulating technique [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(6): 845-850.
郭冬梅, 谈苏庆, 王鸣. 正弦相位调制自混合干涉位移测量精度分析 [J]. 光学学报, 2006, 26(6): 845-850.
- [20] Lee J Y, Hsieh H L, Lerondel G, *et al.* Heterodyne grating interferometer based on a quasi-common-optical-path configuration for a two-degrees-of-freedom straightness measurement [J]. Applied Optics, 2011, 50(9): 1272-1279.