

衍射光栅空间滤波成像方法实验研究

高旭¹, 王仁杰², 李金环², 王玉婷², 黄继鹏²

¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

² 东北师范大学物理学院, 吉林 长春 130024

摘要 为了实现毫秒级分辨力光栅式角位移的测量,从光学角度出发,对光栅的设计、制作形成和空间滤波方法进行实验研究;依据马赫-曾德尔干涉法原理进行多光束全息光栅设计;同时对矩形光栅和制作的多光束干涉全息光栅进行相应的空间滤波成像处理;最后选取平行光和点光源两种光源进行检测,并利用面阵 CCD 和线阵 CCD 对光栅的衍射信息进行采集,分别从条纹质量、透过率函数和频谱三个方面对空间滤波成像处理前后的光栅进行检验。结果表明:空间滤波成像处理可以减少光栅中高次谐波的含量,明显改善光栅信号的质量;随着衍射光栅空间频率的增大,光栅的正弦性有效提高。

关键词 光栅; 空间滤波; 衍射光栅; 正弦性; 信号质量

中图分类号 TP394.1; TH691.9

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0205001

Experimental Study on Spatial Filtering Imaging Method of Diffraction Gratings

Gao Xu¹, Wang Renjie², Li Jinhuan², Wang Yuting², Huang Jipeng²

¹ School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

² School of Physics, Northeast Normal University, Changchun, Jilin 130024, China

Abstract To realize millisecond resolution measurement of grating angular displacement, we study the design, fabrication, and spatial filtering method of gratings from the viewpoint of optics. According to the Mach-Zehnder interferometry principle, multi-beam holographic gratings are designed. At the same time, spatial filtering imaging processing of the rectangular grating and the multi-beam holographic grating is carried out. Parallel light and point light are selected as light sources of the test. Diffraction information of the gratings is collected by using area array charge coupled device (CCD) and linear array CCD. The gratings before and after spatial filtering imaging are tested from aspects of fringe quality, transmittance functions, and frequency spectra. The results show that the higher harmonic contents of the gratings are decreased with the utilization of the spatial filtering imaging processing method, and grating signal quality is significantly improved. The sine property of the gratings is effectively improved with the increase of spatial frequency of the diffraction gratings.

Key words gratings; spatial filtering; diffraction grating; sine property; signal quality

OCIS codes 130.6010; 050.2770; 120.2440

1 引 言

光电轴角编码器是以高精度计量式光栅作为位移基准,根据莫尔条纹相关理论实现空间线位移及角位移测量的精密仪器。其综合光、机、电为一体,具有精度高、分辨力强、稳定性好等优点,广泛应用

于军事工业、航空航天领域的纳米测量领域^[1-2]。决定光电轴角编码器性能的关键指标是光栅莫尔条纹信号质量,而条纹信号的质量主要受光栅精度和光电成像扫描系统设计方法的制约。因此,通过研究光栅的衍射干涉理论和提高位移测量系统的光栅副扫描精度来改善条纹信号的质量成为了研究的突破口。

收稿日期: 2017-08-23; 收到修改稿日期: 2017-09-22

基金项目: 国家自然科学基金(51505078)、吉林省科技厅优秀青年人才基金(20180520187JH)、长春理工大学青年科学基金(XQNJJ-2016-09)

作者简介: 高旭(1987—),女,博士,讲师,主要从事光电位移精密测量技术方面的研究。E-mail: gaoux19870513@163.com

国内外相关研究通常采用电信号处理方法抑制高次谐波来改善精码莫尔条纹信号的质量。Heydemann^[3]于1981年首次利用最小二乘拟合法实现了莫尔条纹光电信号幅度偏差、直流漂移和正交性偏差的补偿; Warner等^[4]在此基础上提出了针对海德汉型编码器的椭圆插补算法; Zimmerman等^[5]依据扩展卡尔曼滤波(EKF)算法提出了一种提高线性编码器精确度的算法; Jenkins等^[6]通过设计开、闭环编码器的插补方法来减小莫尔条纹光电信号的细分误差; Watanabe等^[7]提出了一种基于EDA(equal-division-averaged)的细分检测系统自动校正方案; Kaul等^[8]提出一种谐波分析法,可提高高、低位编码器的测量精度。国内相关研究人员针对莫尔条纹偏差开展了大量的有关补偿方法的研究^[6,9-13],并取得了一定的成效。以上方法基本都是采用电信号处理的方式来改善条纹光电信号的质量,但是基于电信号处理的方案仍然存在一定问题:对信号的补偿处理大多都是在形成莫尔条纹信号之后进行偏差修正,这会导致时间滞后以及补偿精度受限等不足。目前,从光学角度来提高莫尔条纹信号质量的方案还很少。传统编码器中的光电接收元件是正交排列的,这种结构设计对码盘和狭缝光栅的倾斜非常敏感,为了克服编码器因工作中光栅盘倾斜而导致的测量误差, Song等^[14]提出了移相光栅补偿编码器相位误差的方法; Wang等^[15]提出了一种光栅信号误差修正方法,采用正弦指数光栅代替传统的二进制指示光栅,对光栅副调制光场中的空间谐波项进行调制,以补偿信号的正弦性偏差。

编码器设计过程中所应用的光栅大多属于刻划光栅。随着当前刻划水平的提高,刻划误差越来越小,对条纹信号质量的影响较小,但是不能完全消除,因此配合衍射光栅空间滤波理论,可以减小光栅条纹信号高次谐波分量误差,修正条纹信号的稳定性、正交性、正弦性。而全息光栅没有鬼线和像散,杂散光小,可消除机刻光栅的固有缺点,其实际分辨本领可达理论分辨本领的80%~100%。即在光学稳定的平玻璃坯件上涂一层给定型厚度的光致抗蚀剂或其他光敏材料的涂层,由激光器发生两束相干光束,在涂层上产生一系列均匀的干涉条纹,光敏物质就会被感光,然后用特种溶剂溶蚀掉被感光的部分,即可在蚀层上获得干涉条纹的全息像,进而制得透射式衍射光栅。例如,在玻璃坯背面镀一层铝反射膜可制成反射式衍射光栅。对于光电轴角编码器而言,高精度、高分辨力的发展趋

势对衍射光栅提出了更高的质量、精度要求,要求其条纹质量高,空间频率精确,平行度及均匀性好。而大部分光电轴角编码器采用的光栅为正弦光栅及矩形光栅,因此对其衍射光场的理论分析显得尤为重要。

本文主要从光学角度出发,剔除光栅制作的刻线误差,重点研究衍射光栅空间滤波理论。从基于马赫-曾德尔干涉法设计不同线数的全息光栅出发,采用激光干涉法实现多光束干涉光栅和矩形光栅的滤波成像,合理设计基于电荷耦合器件(CCD)探测器的信号接收系统,进而对信号质量、形态、参数进行分析。

2 空间滤波成像原理

光电轴角编码器的光栅盘由大量精密间隔的孔或栅线集成,检测到的光信号穿过每个孔、缝时内插光信号,从而可以实现每秒数百万计数的弧秒精度和分辨力。光电轴角编码器光栅信号衍射原理如图1所示,其中 a 为矩形光栅狭缝的宽度, y 为衍射条纹位置, θ 为衍射角, D 为光栅到屏的垂直距离, m 为衍射级次, λ 为光的波长, δ 为光程差。

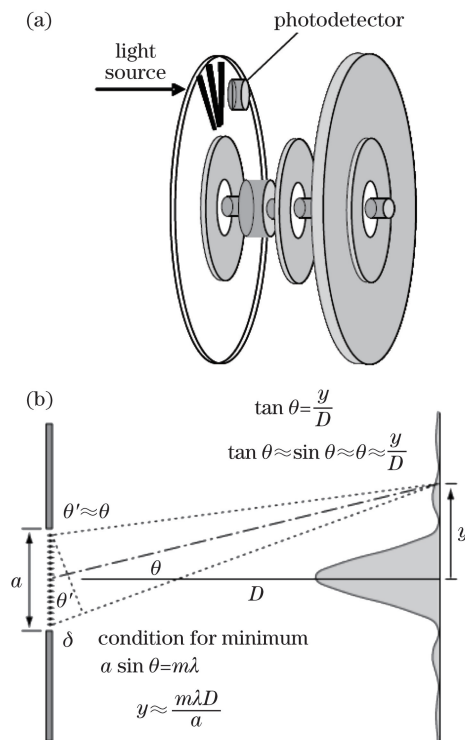


图1 光电轴角编码器光栅信号衍射原理。

(a)编码器光机头部示意图;(b)光衍射传播过程

Fig. 1 Diffraction principle of photographic encoder grating signal. (a) Schematic of the head of an encoder;

(b) propagation of light diffraction

根据傅里叶光学理论可知,任意复杂的光场都可以看作是若干个平面光场的叠加。本研究采用双光束干涉法制作全息光栅,但在制作过程中,会由于各种元器件的反射引入其他光束,使干涉的光束由双光束变为多光束,从而使制作的光栅由正弦型振幅光栅变为多光束干涉全息光栅。因此,利用干涉法制作全息光栅后,再对矩形光栅和制作的多光束干涉全息光栅进行空间滤波成像处理。下面根据物理光学理论知识^[16]对矩形光栅和多光束干涉全息光栅的空间滤波成像过程进行推理。

采用一维矩形光栅,当单位振幅单色平面光垂直照射该矩形光栅时,在其后方频谱面 P_2 上,采用双孔滤波器只允许 ± 1 级的频谱通过,则可以得出透过的频谱为

$$t_0(x_0, y_0) = \frac{1}{2} + \frac{m_{12}}{2} \cos(2\pi f_{12} x_0) + \frac{m_{13}}{2} \cos(2\pi f_{13} x_0), \quad (1)$$

式中 t_0 为复振幅透过率函数,为紧靠光栅后的复振幅 $u(x, y)$ 与紧靠光栅前的复振幅 $u_0(x, y)$ 的比值,可以是 0 到 1 的任意实数; x_0 和 y_0 为传播方向位置。为了进行多列平面波干涉的理论推导,首先推导三列平面波的干涉光场,设三列平面波的入射角度分别为 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$, 三列平面波的振幅分别为 A_1, A_2, A_3 (均取实数), 三列平面波的光强分别为 U_1, U_2, U_3 。由物理光学可知,三列平面波干涉区域的光场光强由三列平面波各自的光强以及两两相互的干涉项组成。

假设 $U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 = \frac{1}{2}, \frac{2A_1 A_2}{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2} = m_{12}, \frac{2A_1 A_3}{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2} = m_{13}, \frac{2A_2 A_3}{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2} = m_{23}, f_{12} = \frac{\sin \theta_1 - \sin \theta_2}{\lambda}, f_{13} = \frac{\sin \theta_1 - \sin \theta_3}{\lambda}$, 则在输出平面 p_i (i 为像面级次) 上光场分布变为

$$g(x_i) = \mathcal{F}^{-1}[T(f_x)H(f_x)] = \frac{2a}{d} \operatorname{sinc}\left(\frac{2a}{d}\right) \operatorname{rect}\left(\frac{x_i}{L}\right) \cos\left(\frac{4\pi x_i}{d}\right), \quad (2)$$

式中 x_i 为像面位置, g 为光场分布函数, \mathcal{F}^{-1} 为傅里叶逆变换, T 为在单位振幅平面波的垂直照明下像平面上的频谱, H 为针孔透过率函数, 具体表示为

$$H(f_x) = \begin{cases} 1, & \frac{1}{L} < |f_x| < \frac{1}{L} + \frac{1}{d}, \\ 0, & \text{others} \end{cases}, \quad (3)$$

式中 $f_x = x_1/(\lambda f)$, d 为矩形光栅的光栅常数, L 为该矩形光栅在 x_0 方向的尺寸。

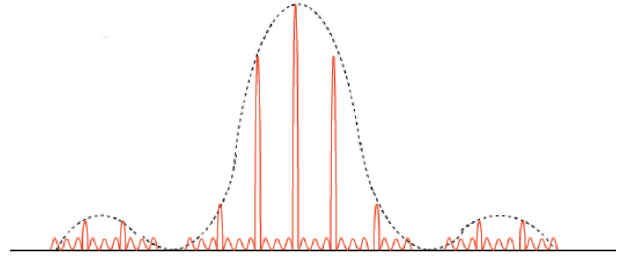


图 2 矩形光栅的夫琅禾费衍射强度分布

Fig. 2 Fraunhofer diffraction intensity distribution of rectangular grating

可以看出,在输出相平面上将得到明暗相间的余弦条纹,并且滤波成像处理后光栅的空间频率变为原来的 2 倍。如果用单位振幅单色平面波垂直照射矩形光栅,则夫琅禾费衍射图样如图 2 所示,其复振幅衍射强度为

$$I(x, y) = \left(\frac{aL^2}{\lambda z d}\right) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \operatorname{sinc}^2\left(\frac{an}{\lambda z}\right) \times \operatorname{sinc}^2\left[L\left(\frac{x}{\lambda z} - \frac{n}{d}\right)\right] \operatorname{sinc}^2\left(\frac{Ly}{\lambda z}\right), \quad (4)$$

式中 I 为夫琅禾费衍射强度, x 和 y 为各自传播方向位置, z 为传播距离, λ 为波长, n 为波列。

同理,采用单位振幅单色平面波垂直照射制得了多光束干涉全息光栅,在该光栅后方 P_2 频谱面上仍采用双孔滤波器,只允许 ± 1 级频谱通过。由图 2 可知,在输出平面上的条纹为正弦(余弦),滤波后光栅的空间频率变为原来的 2 倍。

3 马赫-曾德尔干涉法制作正弦光栅系统的搭建

根据光栅滤波成像理论,基于马赫-曾德尔干涉原理搭建全息光栅制作的光学系统,并分别利用线阵 CCD 和面阵 CCD 这两种探测器作为图像信息采集元器件,从条纹图像、透射率函数、频谱三个方面,对矩形光栅以及多光束干涉光栅进行滤波前后光栅常数的检验等。

3.1 马赫-曾德尔干涉系统分析

利用双光束干涉法制作正弦全息光栅具有成本低、制作简单、容易实现等优点,因此根据相干涉的两束光的产生机理不同,将光栅制作方法分为分波面法和分振幅法两种。不同制作方法的优缺点如表 1 所示。

在马赫-曾德尔干涉法的基础上设计了一种光栅条纹均匀、光栅常数准确的光栅设计系统,如图 3 所示,并将制作的全息光栅作为被测物体,采用 $4f$ 系统进行空间滤波,以提高正弦光栅的正弦性。

表 1 制作正弦光栅方法的优缺点
Table 1 Advantages and disadvantages of sine grating fabrication method

Method	Advantage	Disadvantage
Fresnel double sided mirror and biprism	1) Fewer components; 2) Symmetrical optical system and the optical path difference is almost zero; 3) The range of the grating constant is wide	1) The light spot of interference area is small when using collimating lens; 2) Two light beams are non-parallel without collimating lens
Lloyd mirror method	1) Fewer components and no secondary images; 2) Simple operation and convenient adjustment	1) Relatively high requirements for the reflectivity of the reflector, collimation property of two light beams and the intensity ratio; 2) Only suitable for the fabrication of gratings with larger constant and smaller spatial frequency; 3) The interferential light beams are not strictly parallel
Michelson interferometry method	1) Larger size of the grating fabricated; 2) Two-dimensional grating fabricated by one exposure	1) More transmissive components, so that the wave surface of the plane wave will be deformed and deviate from the plane wave; 2) Only suitable for the fabrication of gratings with larger constant
Mach-Zehnder interferometry method	1) Symmetrical optical system and convenient to set up; 2) The optical path difference of two light beams is small and the interference effect is good; 3) The adjustment is convenient and the spatial frequency of gratings can be changed with the adjustment of one beam splitter angle	1) More optical components and the fringe is uneven and the symmetry property is decreased; 2) The angle between the reflected light and the transmissive light is small and the grating constant is not accurate; 3) The angle of two light beams is restricted by the area of beam splitter and this method is not suitable for the fabrication of gratings with small constant

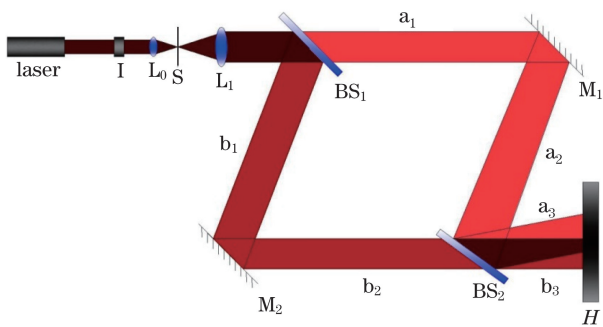


图 3 正弦全息光栅的光路设计原理

Fig. 3 Optical design principle of sine holographic grating

为了防止回光对激光器产生影响, He-Ne 内腔激光器(632.8 nm)发出的细光束首先经过光隔离器 I, 通过空间滤波器的显微物镜 L_0 ($L = 35$ mm, 放大倍数为 40) 和针孔 S ($15 \mu\text{m}$) 后变为均匀、发散的光斑, 再通过准直透镜 L_1 ($f = 15$ cm) 后变为平行光。这时, 针孔 S 在准直透镜 L_1 的焦点上, 均匀平行光经过半反半透分束镜 BS_1 后得到两束光, 一束光为透射光 a_1 , 另一束光为反射光 b_1 , 2 束光的光强都变为原光束光强的 $1/2$, 且 a_1 与 b_1 的光强比为 $1:1$; 两束光分别由平面镜 M_1 、 M_2 反射到半反半透

分束镜 BS_2 上, 又分别经 BS_2 反射和透射到全息干板的平面 H 处。由于两路光都经过半反半透镜的透射和反射, 因此 a_2 与 b_2 的光强比为 $1:1$ 。在光路设计和搭建时, 应尽量保证 a_1 和 a_2 的光程和与 b_1 和 b_2 的光程和近似相等。因光束 a_3 与 b_3 之间会有微小的夹角 θ , 因此 a_3 与 b_3 会在 H 处产生明暗相间的干涉条纹。

如果在 H 处放置全息干板进行曝光, 就会在全息干板上记录下明暗相间的条纹。如果在 H 处放置一个透镜, 并在透镜的后焦面处放置一个白屏, 就会在白屏上形成 2 个亮点。根据(4)式可知, 通过测量 2 个亮点之间的距离可以间接得到光栅的空间频率。2 个亮点之间的距离 d_0 与光栅的空间频率 f_0 之间的关系为

$$f_0 = \frac{d_0}{\lambda f} \quad (5)$$

d_0 与 f_0 之间的对应关系如表 2 所示。根据表 2, 调节 BS_2 的角度使 2 个亮点之间的距离分别为 0.791, 1.582, 1.898, 2.373 cm, 则可得到空间频率分别为 50, 100, 120, 150 lp/mm 的全息光栅。

表 2 d_0 与 f_0 之间的对应关系
Table 2 Relationship between d_0 and f_0

$f_0 / (\text{lp} \cdot \text{mm}^{-1})$	50	100	120	150
d_0 / cm	0.791	1.582	1.898	2.373

3.2 光栅常数检验分析

正弦光栅的检测原理如图 4 所示。激光器发出的细光束垂直照射全息干板, 会在全息干板后方的白屏上出现衍射图样。由于光栅到白屏之间的距离远大于光栅常数, 因此该衍射图样即为夫琅禾费衍射图样, 亦即频谱, 如图 5 所示。

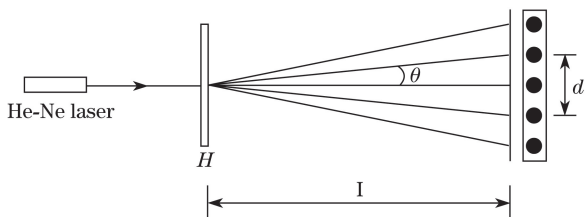


图 4 全息光栅的衍射花样及空间频率检测

Fig. 4 Diffraction pattern of holographic grating and spatial frequency detection

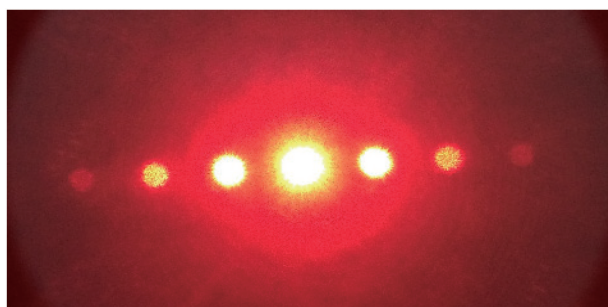


图 5 全息光栅的夫琅禾费衍射图样

Fig. 5 Fraunhofer diffraction pattern of holographic grating

设光栅与白屏之间的距离为 l , ± 1 级谱点之间的距离为 p , 则由光栅衍射公式 $d \sin \theta = \lambda$ 可得到该光栅的实际空间频率为

$$f_0'' = \frac{p}{2l\lambda}. \quad (6)$$

采用氦氖激光作为光源, 波长为 632.8 nm, 系统光栅与白屏之间的距离为 20 cm, 空间频率 f_0'' 与 ± 1 级频谱之间的距离 p 之间的关系如表 3 所示。

根据 ± 1 级频谱之间的距离是否为 1.265, 2.531, 3.037, 3.797 cm 来判断所制光栅的空间频率

表 3 f_0'' 与 p 之间的关系

Table 3 Relationship between f_0'' and p

$f_0'' / (\text{lp} \cdot \text{mm}^{-1})$	50	100	120	150
p / cm	1.265	2.531	3.037	3.797

是否对应为 50, 100, 120, 150 lp/mm。通过实验发现制作的光栅的衍射图样包含 0, ± 1 , ± 2 , ± 3 级频谱, 说明制作的光栅为多光束干涉光栅。

4 光栅空间滤波成像分析

空间滤波即在光学系统的空间频谱面上通过放置适当复振幅透过率的滤波器滤去某些空间频率成分或改变振幅或相位, 使得在相平面上物体的像按要要求得以改善。

4.1 光栅空间滤波成像系统搭建

光栅空间滤波的原理图如图 6 所示。根据空间滤波系统的原理, P_1 为输入平面, P_2 为频谱平面, P_3 为输出的像平面。则图 6 中 P_1 处放置衍射光栅, P_2 处放置双孔滤波器, P_3 处放置全息干板, L_2 处、 L_3 处放置傅里叶透镜 ($f = 10 \text{ cm}$)。

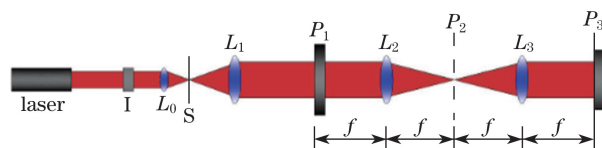


图 6 光栅空间滤波原理图

Fig. 6 Spatial filtering principle of grating

采用 $4f$ 空间滤波系统, 该系统频谱为原函数的精准傅里叶变换, 系统误差较小。平行光垂直照射到衍射光栅后会携带衍射光栅的信息, 在物面 P_1 后方 f 处放置一个傅里叶透镜, 会在透镜的后焦面上形成该衍射光栅的频谱。在频谱平面 P_2 处放置一个双孔滤波器, 只允许 ± 1 级的光通过频谱面, 并经过一次傅里叶逆变换在 P_3 平面上进行干涉, 形成明暗相间的条纹。如果在 P_3 平面处放置全息干板, 并进行曝光、显影、停影、定影、漂白等处理, 则会在全息干板上记录下明暗相间的条纹, 形成全息光栅。

根据第 2 节的分析可知, 所制全息光栅的空间频率为原光栅空间频率的 2 倍。正弦光栅滤波后的光栅是空间频率分别为 100, 200, 240, 300 lp/mm 的全息光栅, 矩形光栅滤波后光栅的空间频率变为 200 lp/mm。

4.2 滤波后光栅常数检验

激光器发出的光束垂直照射到光栅上会在光栅后方形成夫琅禾费衍射光斑, 即频谱。当光栅经过空间滤波成像处理后, 光栅的衍射频谱如图 7 所示。滤波前空间频率 f_0'' 与滤波后空间频率 f_1'' 、 ± 1 级频谱之间的距离 p 之间的距离如表 4 所示。由表 4 可知, 经过滤波成像处理后, ± 1 级频谱之间的距离 p 分别变为 2.530, 5.065, 6.075, 7.600 cm。对应的空

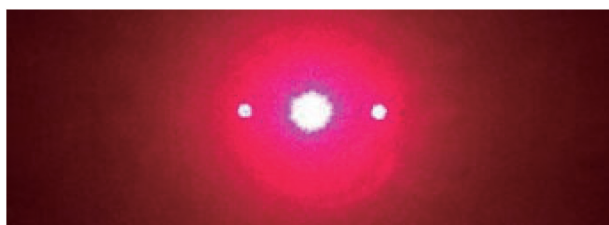


图 7 滤波后全息光栅的夫琅禾费衍射图样

Fig. 7 Fraunhofer diffraction pattern of filtered holographic gratings

表 4 f''_0, f''_1 与 p 之间的关系

Table 4 Relationship among f''_0, f''_1 , and p

$f''_0 / (\text{lp} \cdot \text{mm}^{-1})$	50	100	120	150
p / cm	2.530	5.065	6.075	7.600
$f''_1 / (\text{lp} \cdot \text{mm}^{-1})$	100	200	240	300

间频率分别变为 100, 200, 240, 300 lp/mm, 光栅的空间频率变为原来的 2 倍。与 4.1 节中的结论一致。

5 正弦光栅质量检测系统

5.1 检测原理

当波长为 λ 的单位振幅平面光波垂直照射到光栅表面时,在光栅后表面光波的复振幅为 $E_0(x_1, y_1)$,即为光栅的透射率函数 $t(x_1, y_1)$ 。由夫琅禾费衍射公式可以得到衍射图样的夫琅禾费复振幅分布。当光栅的空间频率足够大时,衍射光强的 3 个中央最大值之间才不会相互交叠。由此可知,正弦型光栅的夫琅禾费衍射光强分布,即单位振幅平面波垂直照射到正弦型振幅光栅时,会在光栅后方形形成 3 个衍射斑,分别为 0 级和 ± 1 级。0 级对应的横坐标 $x_0 = 0$, ± 1 级对应的横坐标 $x_{\pm 1} = \pm f_{12} \lambda z$; 对应的衍射角分别为 $\sin \theta_0 = 0$, $\sin \theta_{\pm 1} = \pm f_{12} \lambda$; 每个衍射斑的宽度均为 $2\lambda z / L$, 间距均为 $f_{12} \lambda z$; 复振幅最大值分别为 1, $m/2, m/2$, 对应的光强分别为 1, $m^2/4, m^2/4$ ^[17]。

根据以上的分析可以得出:如果衍射光斑存在 ± 2 级以及 ± 2 级以上的高级频谱,就可以判断该光栅的正弦性较差; ± 1 级衍射光斑越强,条纹的反衬度越高。

为了实现正弦光栅的质量检测,选取平行光和点光源作为衍射光栅的照明系统,以面阵 CCD 和线阵 CCD 这两种探测器作为图像信息采集元器件,从条纹图像、透射率函数、频谱三个方面进行检测,包括正弦性检测、条纹质量检测 and 反衬度检测等。对采集的条纹信息进行数据处理,以获得光栅中各点的灰度值,利用灰度值计算得到光栅的正弦性以及

反衬度,也可以通过衍射光斑来判断光栅的正弦性和反衬度。

5.2 光栅质量检测系统搭建

利用平行光和点光源 2 种光源来垂直照射光栅进行数据采集并对信号进行检测。

当用均匀平行光源照射光栅时,分别把探测器放置在图 3 及图 4 中全息干板所在的位置,通过计算机采集空间滤波成像处理前后光栅的条纹图像以及光波的光强形式(即光栅的透过率函数)。由于实验得到的条纹分布比较密集,所以在探测器前放置凸透镜,可使图像经凸透镜放大后进入探测器中。具体的光路设计如图 8 所示,其中 P_3 处放置凸透镜,在 P_3 后方放置 CCD 探测器接收。

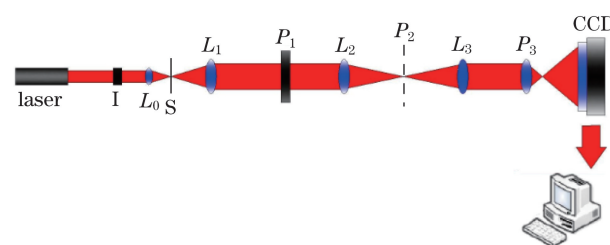


图 8 平行光检测光栅的光学系统原理图
Fig. 8 Optical system principle of grating test using parallel light

系统采用 TCD1208AP 型二相线阵 CCD 芯片和 ICX409AK 型隔行转移型面阵 CCD 芯片。前者是一款 5 V 供电的高灵敏度、低暗电流的图像传感器,包括 2160 个有效像敏单元,每个像敏单元的大小(即像敏单元中心间距)为 $14 \mu\text{m}$; 后者总像素单元数为 $795(\text{H}) \times 582(\text{V})$, 像元尺寸为 $6.50 \mu\text{m}(\text{H}) \times 6.25 \mu\text{m}(\text{V})$, 像敏区的总面积为 $5.59 \text{mm}(\text{H}) \times 4.68 \text{mm}(\text{V})$, 封装在 16 脚的 DIP (dual in-line package) 标准管座上^[17]。

当用点光源照射光栅时,光路如图 9 所示,其中 P_1 处放置偏振片、 P_2 处放置偏振片, H 处放置衍射光栅。点光源垂直照射到附有光栅的平面上,会在光栅后形成夫琅禾费衍射,在夫琅禾费衍射面 P_1 上放置线阵 CCD 可对光波的光强分布进行采集。为了避免 CCD 接收的光强超出 CCD 的测量范围,导致线阵 CCD 饱和,在光源与光栅之间的 P_1 和 P_2 处放置 2 个偏振片,通过转动 2 个偏振片的偏振方向来改变照射到光栅上的光强。由于细激光束呈近似高斯型振幅或光强分布,因此当激光束通过短聚焦的透镜聚焦时,根据傅里叶变换可知,将在透镜的后焦面上形成输入光场的傅里叶变换频谱,其仍为高斯分布。但实际上输入的光场为高斯分布与相关噪

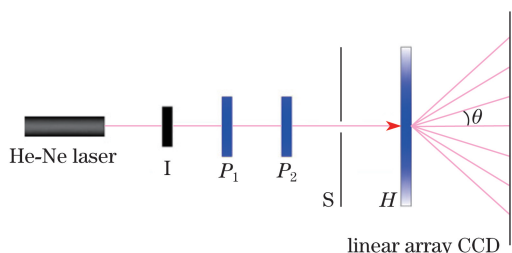


图 9 点光源检测光栅的光学系统

Fig. 9 Optical system for testing grating using point light
 声的叠加,噪声函数一般为高频成分,可认为噪声频谱与信号频谱是分离的,因此只要选择适当的孔径,就可以消除噪声,净化信号,得到平滑的高斯分布。

因此在 P_2 处偏振片与光栅之间放置空间滤波器来消除散斑,空间滤波器由长度为 35 mm 的 40 倍显微物镜,厚度为 25 μm 、孔径为 15 μm 的针孔,以及多维调节支架组成,可以在 x 、 y 、 z 方向任意转动和移动,从而滤除杂散光,减小对衍射光强分布的影响。

6 实验验证

以空间频率为 100 lp/mm 的光栅为例,对空间滤波前后的条纹质量、透过率函数和频谱进行分析。空间频率为 100 lp/mm 的多光束干涉全息光栅滤波前后的条纹质量如图 10 所示。由图 10(a)可知,在平行光检测系统中,面阵 CCD 采集的光栅空间滤波成像处理前的条纹图像为明暗相间的直条纹,部分条纹出现弯曲,毛刺较多。可见,在空间滤波成像滤波处理前光栅的条纹质量较差。由图 10(b)可知,滤波后的条纹更加密集,间距变小,为滤波前的 1/2。可见,经过滤波成像处理后,光栅的空间频率变成原来的 2 倍。滤波处理后条纹变得更加光滑,毛刺变少,条纹质量得以提高。

图 11 所示为滤波前后多光束干涉全息光栅的透过率函数,其中显示界面是采用 VC++ 集成开发环境编写的,横、纵坐标为分度值。由图 11 可知,滤波成像处理后的条纹分布更加均匀,基本呈正弦分布,说明滤波后条纹的正弦性有所提高。

图 12 所示为滤波前后多光束干涉全息光栅的频谱。由图 12 可知,滤波前光栅的频谱包含 0、 ± 1 、 ± 2 、 ± 3 、 ± 4 级频谱成分,滤波后光栅的频谱只包含 0 级和 1 级频谱。可见,滤波方法抑制了光栅的高次谐波,提高了衍射光栅的信噪比,可以认为滤波后的光栅为标准正弦型振幅光栅,并可以通过适当加入背景光来提高所制光栅的反衬度。

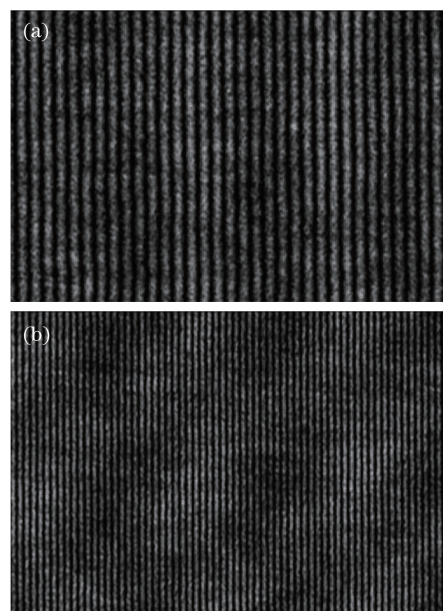


图 10 空间频率为 100 lp/mm 的多光束干涉全息光栅滤波成像处理前后的条纹图像。(a)滤波前;(b)滤波后

Fig. 10 Fringe images of multi-beam interferometry holographic grating with spatial frequency of 100 lp/mm before and after filtering imaging processing.

(a) Before filtering; (b) after filtering

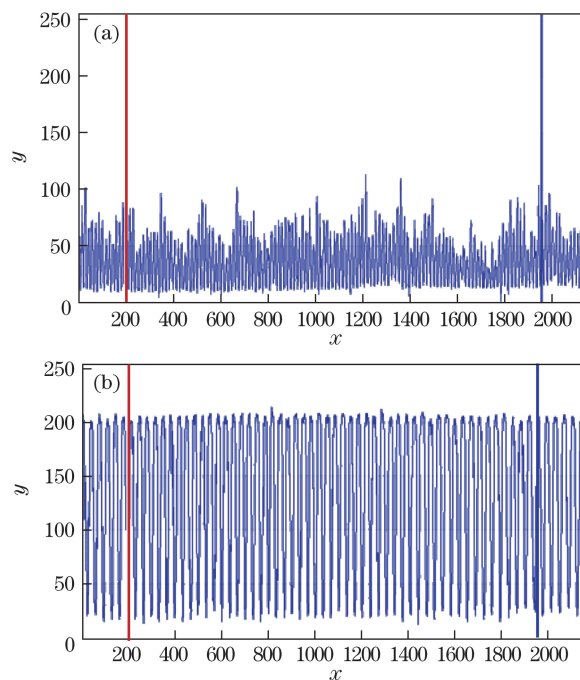


图 11 空间频率为 100 lp/mm 的多光束干涉全息光栅滤波成像处理前后的透过率函数。(a)滤波前;(b)滤波后

Fig. 11 Transmittance functions of multi-beam interferometry holographic grating with spatial frequency of 100 lp/mm before and after filtering imaging processing.

(a) Before filtering; (b) after filtering

图 13 所示为滤波前后多光束干涉全息光栅的

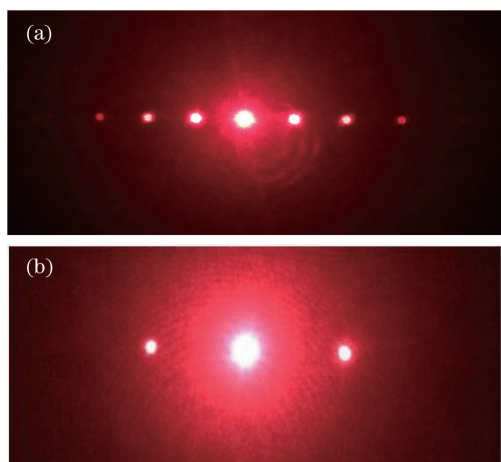


图 12 空间频率为 100 lp/mm 的多光束干涉全息光栅滤波成像处理前后的频谱。(a)滤波前;(b)滤波后

Fig. 12 Frequency spectra of multi-beam interferometry holographic grating with spatial frequency of 100 lp/mm before and after filtering imaging processing. (a) Before filtering; (b) after filtering

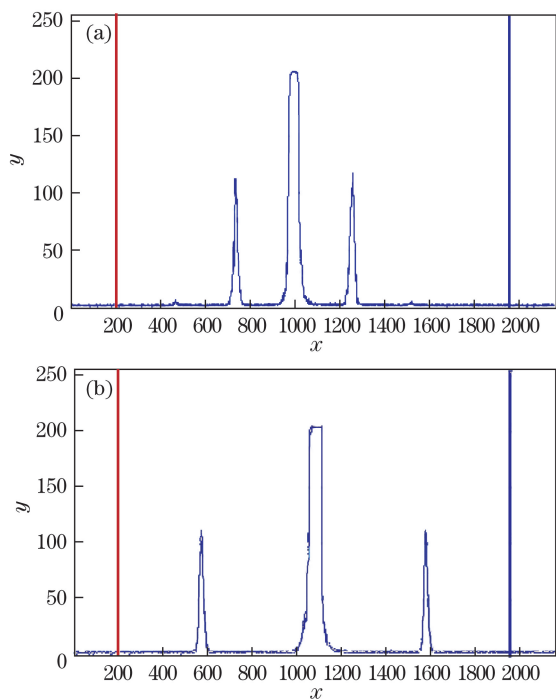


图 13 空间频率为 100 lp/mm 的多光束干涉全息光栅滤波成像处理前后的衍射光强分布。(a)滤波前;(b)滤波后

Fig. 13 Diffraction light intensity distributions of multi-beam interferometry holographic grating with spatial frequency of 100 lp/mm before and after filtering imaging processing.

(a) Before filtering; (b) after filtering

衍射光强分布。由图 13 可知,滤波前衍射光强包含 0、±1、±2 级光强,而滤波后衍射光强变为 0 级和 ±1 级,±2 级光强消失,说明滤波后光栅的正弦性有所提高。±1 级和 0 级光强之间的距离变为原

来的 2 倍,说明滤波后光栅的空间频率变为原来的 2 倍。

通过旋转图 9 中 P_1 处偏振片、 P_2 处偏振片的偏振方向,使图 13(a)中 ±1 级的光强从 100 到 200 每隔 10 取一个值,并记录滤波前 ±2 级对应的光强,计算 ±2 级与 ±1 级的光强比,结果如表 5 所示,其中 $y_{100}^{\pm 1}$ 为 ±1 级的光强, $y_{100}^{\pm 2}$ 为 ±2 级的光强, p_{100} 为 ±2 级与 ±1 级的光强比, \bar{p}_{100} 为 p_{100} 的平均值。

表 5 空间频率为 100 lp/mm 的光栅 ±2 级与 ±1 级的光强比

Table 5 Light intensity ratio of ±2 level to ±1 level of grating with spatial frequency of 100 lp/mm

$y_{100}^{\pm 1}$	$y_{100}^{\pm 2}$	p_{100}	\bar{p}_{100}
100	5.3850	0.0539	
110	5.6617	0.0515	
120	6.3600	0.0530	
130	6.8419	0.0526	
140	7.3262	0.0523	
150	7.3800	0.0492	0.0527
160	8.2240	0.0514	
170	8.8315	0.0520	
180	9.6426	0.0536	
190	9.8705	0.0520	
200	11.6800	0.0584	

为了增加实验的可靠性,制作空间频率为 50, 120, 150 lp/mm 的光栅,并计算它们衍射光强中 ±2 级与 ±1 级的光强比,结果如表 6 所示。由表 6 可知,随着光栅空间频率逐渐增大,衍射光强中 ±2 级与 ±1 级光强比越小,光栅的正弦性越强。依据这个规律,在光电轴角编码器中,对于精、粗码道而言,尽量使用空间频率较大的光栅可提高测量精度和分辨力。

表 6 各光栅 ±2 级与 ±1 级的光强比

Table 6 Light intensity ratio of ±2 level to ±1 level of each grating

Spatial frequency / (lp·mm ⁻¹)	50	100	120	150
Light intensity ratio / %	8.59	5.27	3.50	2.48

图 14 所示为空间频率是 100 lp/mm 的矩形光栅滤波前后的频谱,矩形光栅变为正弦型振幅光栅。图 15、16 所示分别为空间频率是 100 lp/mm 的矩形光栅滤波前后的衍射光强分布。由图 14 可知,经过空间滤波成像处理后,空间滤波成像使矩形光栅的衍射频谱点由多个变成 2~3 个,分别是 0 级和

±1级,0级频谱光强最强,±1级频谱强度次之。说明空间滤波成像处理使矩形光栅变为正弦型振幅光栅,且正弦性较好。可见空间滤波成像处理可以对高次谐波起到一定的抑制作用,提高光栅的正弦性。由图15和图16可知,光强分布也体现了这样的特点,说明空间滤波成像处理后矩形光栅变为正弦光栅,谐波含量大大减少。

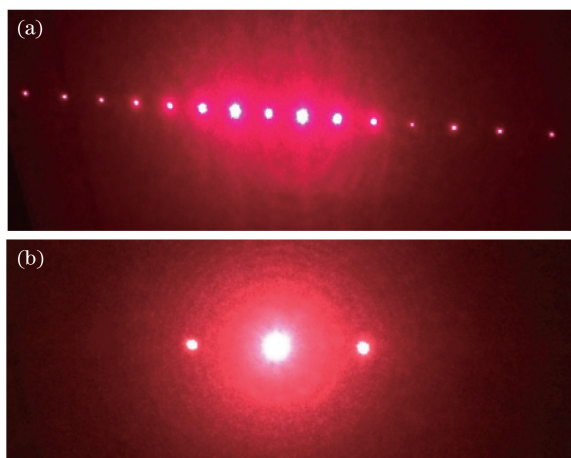


图14 空间频率为100 lp/mm的矩形光栅滤波前后的频谱。
(a)滤波前;(b)滤波后

Fig. 14 Frequency spectra of rectangular grating with spatial frequency of 100 lp/mm before and after filtering.
(a) Before filtering; (b) after filtering

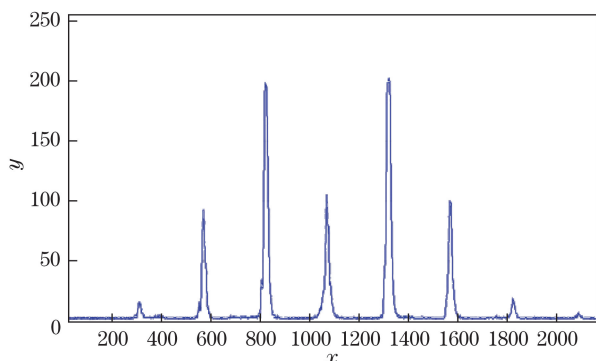


图15 空间频率为100 lp/mm的矩形光栅
滤波前衍射光强分布

Fig. 15 Diffraction light intensity distribution of rectangular grating with spatial frequency of 100 lp/mm

7 结 论

从光学角度出发,利用全息光栅设计和空间滤波成像的实验方法抑制了高次谐波,并采用CCD对空间滤波前后的光栅条纹质量、透过率函数、频谱分别进行系统分析,从根本上提高了光栅条纹信号的质量。实验结果表明:空间滤波成像处理可以提高多光束干涉全息光栅和矩形光栅的正弦性,使其变

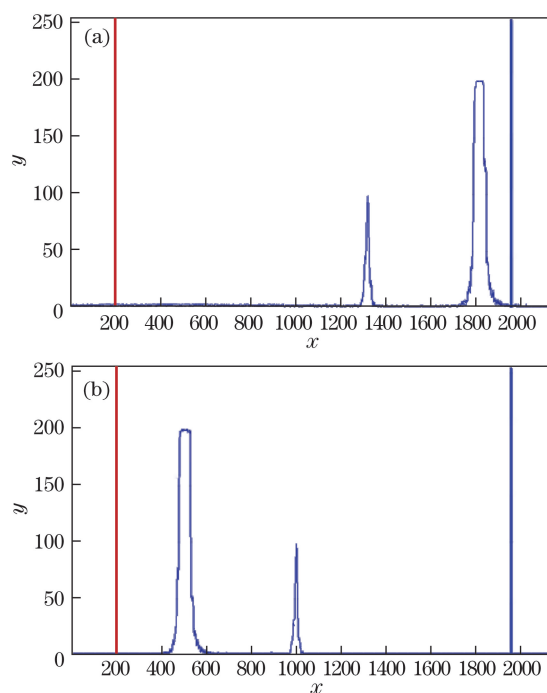


图16 空间频率为100 lp/mm的矩形光栅空间滤波成像处理后的衍射光强分布。(a) -1级与0级光强;
(b) 0级和+1级光强

Fig. 16 Diffraction light intensity distributions of rectangular grating with spatial frequency of 100 lp/mm after spatial filtering imaging processing.
(a) Light intensity of -1 level and 0 level;
(b) light intensity of 0 level and +1 level

为正弦性振幅光栅;并且光栅的空间频率越大,光栅的正弦性越好。这为毫秒级角位移绝对测量的高质量光电成像扫描技术以及光栅副系统设计奠定了理论基础和实验基础。尤其是在光电轴角编码器的主光栅精码光栅部分,其本身与指示光栅间叠合生成精码莫尔条纹光电信号,可从光学空间滤波成像角度利用本研究的理论,改进传统主光栅、指示光栅(滤波成像)的光学系统设计。

参 考 文 献

- [1] Yu H, Wan Q H, Zhao C H, *et al.* A high-resolution subdivision algorithm for photographic encoders and its error analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0312001.
于海, 万秋华, 赵长海, 等. 图像式光电编码器高分辨力细分算法及误差分析[J]. *光学学报*, 2017, 37(3): 0312001.
- [2] Zuo Y, Long K H, Liu J G, *et al.* Analysis and processing of Moire fringe signals based on non-uniform sampling[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(4): 1146-1152.

- 左洋, 龙科慧, 刘金国, 等. 非均匀采样莫尔条纹信号的分析与处理[J]. 光学精密工程, 2015, 23(4): 1146-1152.
- [3] Heydemann P L. Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers[J]. Applied Optics, 1981, 20(19): 3382-3384.
- [4] Warner M, Krabbendam V, Schumacher G. Adaptive periodic error correction for Heidenhain tape encoders[C]. SPIE, 2008, 7012: 70123N.
- [5] Zimmerman Y, Oshman Y, Brandes A. Improving the accuracy of analog encoders via Kalman filtering[J]. Control Engineering Practice, 2006, 14(4): 337-350.
- [6] Jenkins S T, Hilkert J. Sin/cosine encoder interpolation methods: Encoder to digital tracking converters for rate and position loop controllers[C]. SPIE, 2008, 6971: 69710F.
- [7] Watanabe T, Fujimoto H, Nakayama K, *et al.* Automatic high-precision calibration system for angle encoder[C]. SPIE, 2001, 4401: 267-274.
- [8] Kaul S K, Tickoo A K, Koul R, *et al.* Improving the accuracy of low-cost resolver-based encoders using harmonic analysis[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2008, 586(2): 345-355.
- [9] Dhar V K, Tickoo A K, Kaul S K, *et al.* Artificial neural network-based error compensation procedure for low-cost encoders[J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(1): 015112.
- [10] Gao X, Li J F, Zhang S M, *et al.* Real-time compensation of subdivision error for the Moire fringe photoelectric signal[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(11): 3013-3018.
高旭, 李俊峰, 张淑梅, 等. 莫尔条纹光电信号细分误差的实时补偿[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(11): 3013-3018.
- [11] Gao X, Wan Q H, Zhao C H, *et al.* Real-time compensation of orthogonality deviation for the Moire fringe photoelectric signal[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(1): 213-219.
高旭, 万秋华, 赵长海, 等. 莫尔条纹光电信号正交性偏差的实时补偿[J]. 光学精密工程, 2014, 22(1): 213-219.
- [12] Gao X, Wan Q H, Lu X R, *et al.* Automatic compensation of sine deviation for grating fringe photoelectric signal[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0712001.
高旭, 万秋华, 卢新然, 等. 光栅条纹光电信号正弦性偏差的自动补偿[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0712001.
- [13] Gao X. Research on automatic compensation technique of Moire fringe photoelectric signal[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
高旭. 莫尔条纹光电信号自动补偿技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [14] Song J H, Kim K C, Kim S H, *et al.* New error-compensation method in a linear encoder using phase-shifted grating[C]. SPIE, 1999, 3740: 124-127.
- [15] Wang C H, Zhang G X, Guo S Q, *et al.* Autocorrection of interpolation errors in optical encoders[C]. SPIE, 2002, 2718: 439-447.
- [16] 叶盛祥. 光电位移精密测量技术[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2003.
- [17] Du Y C, Song L, Wan Q H, *et al.* High resolution absolute code disk based on linear array image sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(11): 1112001.
杜颖财, 宋路, 万秋华, 等. 基于线阵图像传感器的高分辨率单圈绝对式编码方法[J]. 光学学报, 2016, 36(11): 1112001.