

# 基于干涉法的反射式光栅旋转角度检测方法

张文涛<sup>1</sup>, 杨越越<sup>1</sup>, 张玉婷<sup>1</sup>, 吴萍<sup>2</sup>, 熊显名<sup>1</sup>, 杜浩<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;

<sup>2</sup>上海微电子装备(集团)股份有限公司, 上海 201203

**摘要** 基于多块光栅拼接理论,建立了光栅旋转角与衍射光束偏角关系的数学模型,设计了一种基于干涉法的光栅旋转角度检测光路,用 Zygo 干涉仪实现了光栅 0 级与 1 级衍射波前检测,并研究了反射镜安装误差引起的模型误差。实验结果表明,利用理论模型对光栅姿态在 0~500  $\mu\text{rad}$  内调整时,光栅间栅线平行度的最大相对测量误差为 3.85%。而反射镜俯仰角和偏摆角在 0''~20'' 变化时,所引起的光栅间栅线平行度的最大相对测量误差分别为 4.99% 和 3.77%。

**关键词** 光栅; 转角检测; 干涉; 衍射波前

中图分类号 TN247 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.110501

## Detection of Rotation Angle of Reflective Grating Based on Interference Method

Zhang Wentao<sup>1</sup>, Yang Yueyue<sup>1</sup>, Zhang Yuting<sup>1</sup>, Wu Ping<sup>2</sup>, Xiong Xianming<sup>1</sup>, Du Hao<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

<sup>2</sup>Shanghai Micro Electronics Equipment (Group) Co., Ltd., Shanghai 201203, China

**Abstract** Herein, a mathematical model of the relationship between grating rotation angle and diffraction beam deflection angle was established based on the theory of mosaic gratings. An optical path was designed to detect the grating rotation angle using interferometry. A Zygo interferometer was used to detect the zero- and first-order diffraction wavefronts of a grating. In addition, the model error caused by the reflector installation error was studied. The experimental results show that in the range of 0-500  $\mu\text{rad}$ , the maximum relative measurement error of grid line parallelism between gratings is 3.85% when the theoretical model is used to adjust the grating attitude. When pitch and yaw angles of the reflector vary in the range of 0''-20'', the maximum relative measurement errors of grid line parallelism between gratings are 4.99% and 3.77%, respectively.

**Key words** gratings; rotation angle detection; interference; diffraction wavefront

**OCIS codes** 050.2770; 040.1880; 050.1950; 050.1940

## 1 引言

集成电路的发展依赖于半导体制造装备,随着芯片集成度的不断提高,极大规模集成电路的制造装备及成套工艺成为关键技术之一<sup>[1]</sup>。应用于光刻机工件台的反射式衍射光栅测量系统,通过多块光栅组合实现长行程工件台位置的测量。由于光栅在

组合使用时栅线不一致会直接减小系统的测量范围,因此在多光栅集成过程中,保证光栅间栅线平行度具有重要的现实意义。

早在 20 世纪末,就已经开始了光栅位置偏差对光束空间特性影响的研究。关于光栅间的相对位置误差理论分析与测量方法也一直是国内外学者的研究热点。杨学东等<sup>[2]</sup>利用拼接光栅的零级反射光和

收稿日期: 2018-12-12; 修回日期: 2018-12-23; 录用日期: 2019-01-02

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX02101007-003)、国家自然科学基金(61565004)

\* E-mail: 781057414@qq.com

一级衍射光实现对旋转面平行和栅线平行的分别监测,并将偏转量反馈给光栅调节装置。Hornung 等<sup>[3]</sup>将监测光照射在双光栅上,利用远场衍射光斑的形态判定光栅的相对位置。夏兰等<sup>[4]</sup>设计了用于测量两块相邻光栅之间相对空间姿态的检测系统,利用相移式干涉仪测量待测光,通过快速傅里叶变换还原波前,进而得到空间角度偏差。卢禹先等<sup>[5-7]</sup>提出将 5 维误差分别分配到零级和高衍射级次进行调整,并通过棱镜分离纵向位移误差,成功实现拼接。Sharma 等<sup>[8]</sup>通过同时监测衍射光干涉条纹和远场光斑,配合纳米级调整架可降低光栅面内旋转角的测量误差。

上述研究的衍射光栅多数应用于天文光谱分析<sup>[9-10]</sup>、激光惯性约束核聚变<sup>[11-15]</sup>等领域,要求多块光栅 5 维严格拼接,使衍射光相位变化极其接近,最终等效成一整块光栅,因此检测装置大多较为复杂且机械结构稳定性要求高。对于工件台的平面光栅尺而言,多块光栅在组合使用时,面外面内旋转误差引起的栅线不一致相较于位移误差对测量系统影响更大。因此,本文研究主要包括两个方面:1)设计简易的光栅旋转角检测光路,建立光栅小角度旋转角与光束偏角关系的理论模型,并进行仿真和实验验证;2)研究由光路中平面镜安装位置不理想带来的栅线一致性测量误差。

## 2 模型建立

设计的衍射光检测光路如图 1 所示,其中激光器、分光镜、准直镜、参考平板组成 Fizeau 干涉仪。其会发出两束光,其中一束光经过反射镜 1,垂直入射到光栅面,零级反射光沿原路返回到 Fizeau 干涉仪中,反射镜 1 与反射镜 2 成一定角度放置;另一束光经过反射镜 2 后,以利特罗角入射到光栅面,一级衍射光同样沿原路返回到 Fizeau 干涉仪中。在干涉仪内部,标准波前与被测光栅面的波前进行等厚

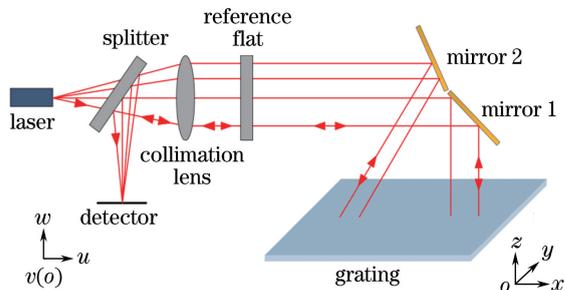


图 1 光栅转角检测光路

Fig. 1 Optical path for detection of grating rotation angle

干涉,在显示屏上同时观察到零级反射光和一级衍射光的干涉场。通过零级反射光干涉场检测面外角度偏差和一级衍射光干涉场检测面内角度偏差实现光栅绕 3 个轴向偏转的检测,其中面内角度偏差反映了栅线的角度变化。

以一维光栅建立空间直角坐标系 1,  $xOy$  面为光栅面,定义垂直于光栅栅线方向为  $x$  轴,沿栅线方向为  $y$  轴,垂直于光栅面方向为  $z$  轴。光栅绕  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴的旋转角度分别为  $\Delta\theta_x$ 、 $\Delta\theta_y$  和  $\Delta\theta_z$ 。以 Fizeau 干涉仪探测面所在平面建立空间直角坐标系 2, 设  $u$  轴是探测面的水平方向,平行于光栅的矢量方向, $v$  轴是探测面的垂直方向,平行于光栅的刻线方向, $w$  轴垂直于探测面。

当光栅只绕  $y$  轴旋转  $\Delta\theta_y$  时,旋转前、后的入射光线和衍射光线均在光栅主截面内,衍射光线变化如图 2 所示,其中  $G$  表示旋转前的光栅,  $G'$  表示旋转后的光栅。设入射光波长为  $\lambda$ ,入射角和衍射角分别为  $\alpha$  和  $\beta$ ,光栅栅距为  $d$ ,衍射级次为  $m$ ,光栅旋转后的入射角和衍射角变为  $\alpha'$  和  $\beta'$ 。根据光栅方程,存在关系式表示为

$$\begin{cases} \sin \alpha - \sin \beta = \frac{m\lambda}{d} \\ \sin \alpha' - \sin \beta' = \frac{m\lambda}{d} \end{cases} \quad (1)$$

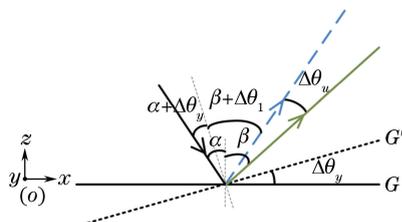


图 2 光栅绕  $y$  轴旋转时的衍射光线变化示意图  
Fig. 2 Schematic of diffraction beam change when grating rotating around  $y$ -axis

由图 2 可知,入射角  $\alpha' = \alpha - \Delta\theta_y$ , 设衍射角  $\beta' = \beta + \Delta\theta_1$ , 其中  $\Delta\theta_y$ 、 $\Delta\theta_1$  为小角度,满足小角度的近似条件。将(1)式展开,化简得  $\Delta\theta_1 = -(\cos \alpha / \cos \beta) \cdot \Delta\theta_y$ 。由几何关系可知  $\Delta\theta_y = \Delta\theta_1 + \Delta\theta_u$ , 则衍射光线在探测器  $u$  轴方向扫过的角度  $\Delta\theta_u$  为

$$\Delta\theta_u = \Delta\theta_y - \Delta\theta_1 = \frac{\cos \alpha + \cos \beta}{\cos \beta} \Delta\theta_y \quad (2)$$

当光栅只旋转  $\Delta\theta_x$  时,衍射光线变化如图 3 所示。设入射光线与旋转后光栅主截面  $AOB$  的夹角为  $\varphi_1$ , 旋转前衍射光线与  $AOB$  的夹角为  $\Delta\theta_2$ , 旋转后衍射光线与  $AOB$  的夹角为  $\varphi_2$ , 由于旋转前、后入射光线和衍射光线遵循光栅方程、光栅锥面衍射方



图 5(a)所示是光栅绕轴转动时观察到的一级干涉图样,每一处测量点的光强变化对应着相位差的变化。仿真结果得到的是理想无噪声、边界形状规则的包裹波面,可以直接通过行或列扫描法对空间上相邻点的相位主值进行比较来完成解包,从而复现被测光栅波前如图 5(b)所示,进一步得到光栅姿态信息。

绕轴转动光栅,得到光栅转角与衍射光束偏转角关系曲线如图 5(c)所示, $k_x$  表示绕  $x$  轴转角与光束在  $v$  轴方向偏转角度的比例系数,即为  $\Delta\theta_{v1}$  与

$\Delta\theta_x$  的比例系数,同理, $k_y$  为  $\Delta\theta_{u1}$  与  $\Delta\theta_y$  的比例系数, $k_z$  为  $\Delta\theta_{v1}$  与  $\Delta\theta_z$  的比例系数。仿真实验结果表明,当波长  $\lambda$  为 632.8 nm、光栅栅线为 1200 line/mm、衍射级次为 1 时, $k_x$  约为 1.8508(相关系数  $R^2=0.9994$ ),而  $k_y$  和  $k_z$  分别约为 2.0013 ( $R^2=0.9998$ )和 0.7599( $R^2=0.9964$ ),与理论模型推导的比值关系一致,即在测量条件理想的情况下,衍射光束偏转角度与光栅绕轴转角呈线性关系,可通过测量衍射光束偏转角得到光栅旋转角。

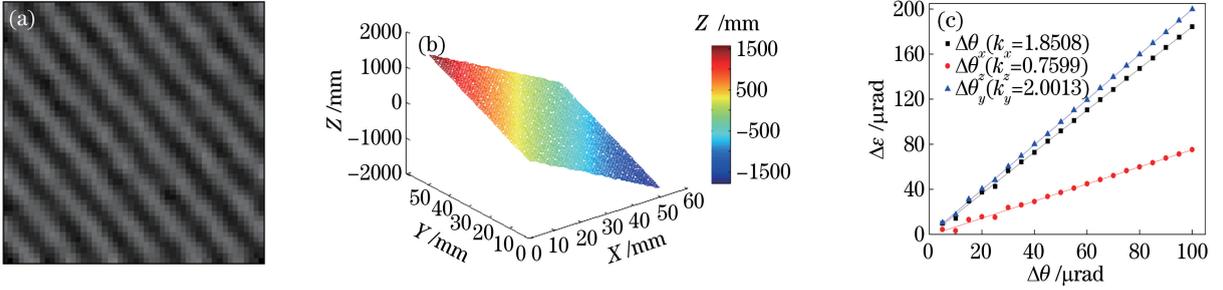


图 5 模型仿真结果。(a)仿真采集的干涉图样;(b)波前复现结果;(c)光栅转角与衍射光束偏角关系曲线

Fig. 5 Simulation results of model. (a) Interference patterns by simulation; (b) result of wavefront reconstruction; (c) relationship between grating rotation angle and diffraction beam deflection angle

#### 4 验证实验

实验光栅尺寸为 50 mm × 50 mm,刻线密度为 1200 line/mm,采用波长  $\lambda$  为 632.8 nm 的干涉仪(OMP-0272C,Zygo 公司,美国)测量零级反射光和一级衍射光波前,实验装置实物图如图 6 所示,其中反射镜 1 用于零级反射光检测,反射镜 2 用于一级衍射光检测。激光准直仪 1(HIP-1200,骏河精机公司,日本)和反射镜 3 辅助测量光栅实际  $\Delta\theta_z$  转角,减少由于光栅调整架自身精度低造成的测量误差。此外,入射光的入射角度以及是否在光栅主截面内入射分别受反射镜 2 的偏摆角( $\Delta\eta$ )、俯仰角( $\Delta\omega$ )变化影响,即除了仪器误差、环境误差,还需考虑反射镜 2 安装误差引起的模型误差。为此在反射镜 2 背面放置一个反射镜,与准直仪 2 配合,用于测量反射镜 2 相对于反射镜 1 的俯仰角和偏摆角变化。

采用零级反射光校准光栅水平,一级衍射光校准反射镜 1、2 的相对位置。图 7(a)、(b)分别用下三角和上三角表示了光栅绕  $x$ 、 $z$  轴旋转角的测量值与理论值,圆点表示测量值与理论值的差值。由图 7 可以看出,在 500  $\mu\text{rad}$  范围内分别绕  $x$ 、 $z$  轴旋转光栅,单点测量误差小于  $\pm 15 \mu\text{rad}$ 。拟合  $\Delta\theta_x$  的测量值和理论值,曲线关系式为  $\Delta\theta'_x =$

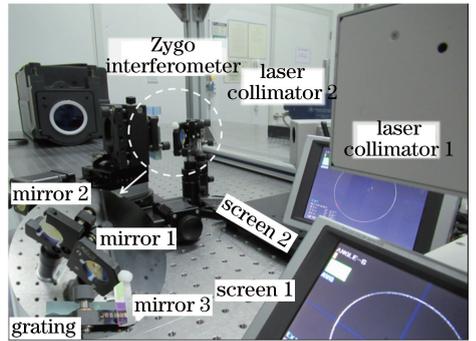


图 6 光栅旋转角测量实物装置

Fig. 6 Experimental setup for grating rotation angle measurement

$0.9954\Delta\theta_x - 1.2497$  ( $R^2=0.9998$ ),可得  $\Delta\theta_x$  的相对测量误差为 0.46%,由  $\Delta\theta_x$  的测量误差引起  $\Delta\theta_z$  的相对解算误差为 0.56%。同理,拟合  $\Delta\theta_z$  测量值和理论值的曲线关系式为  $\Delta\theta'_z = 1.0385\Delta\theta_z - 10.164$  ( $R^2=0.9992$ ), $\Delta\theta_z$  的相对测量误差为 3.85%,在测量环境理想的情况下,由理论模型可知  $\Delta\theta_z$  的系数为常数,不受入射光角度影响,测量误差主要来源于准直仪的读数误差。因此,在光栅栅线一致性检测时,选用精度更高的仪器监测  $\Delta\theta_z$  可直接减小测量误差。

由(11)式可知,光栅旋转角  $\Delta\theta_x$  与  $\Delta\theta_z$  在探测器  $v$  方向耦合,当  $\Delta\theta_x$  的系数变化时,解算  $\Delta\theta_z$  会

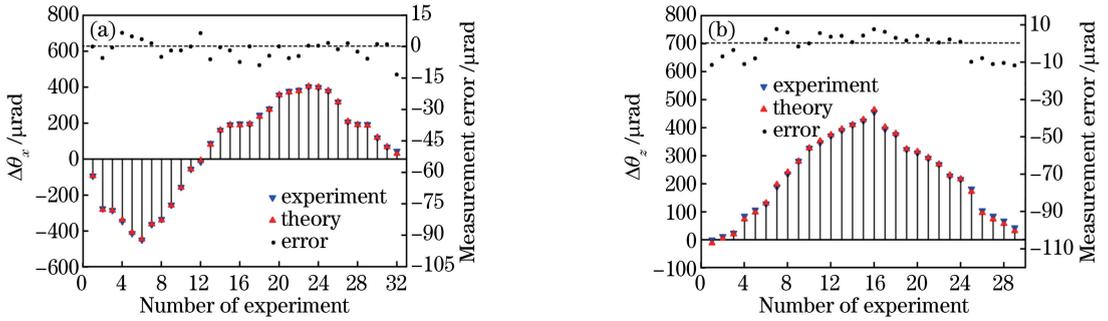


图7 光栅旋转角测量结果。(a)绕x轴;(b)绕z轴

Fig. 7 Experimental results of grating rotation angle measurement. (a) Rotating around x-axis; (b) rotating around z-axis

引入误差。在校准光栅和反射镜1、2后,测量反射镜2的俯仰角相对于反射镜1变化5"、10"、20"时的光栅旋转角 $\Delta\theta_x$ ,将测量值与理论值进行拟合,得到表征光栅旋转角 $\Delta\theta_x$ 与衍射光束偏角关系的系数, $\Delta\theta_x$ 的系数及系数变化量 $\Delta C_{\omega_0}$ 、 $\Delta C_{\omega}$ 如表1所示,其中 $\Delta C_{\omega_0}$ 表示光栅校准时未完全水平引起的系数变化量, $\Delta C_{\omega}$ 表示俯仰角变化引起的系数变化量。由表1可知,俯仰角变化引起的 $\Delta\theta_x$ 相对解算误差

分别为0.30%、0.66%、4.99%。同理,反射镜2偏摆角变化测得的 $\Delta\theta_x$ 系数、光栅初始姿态引起的系数变化量 $\Delta C_{\gamma_0}$ 、偏摆角变化引起的系数变化量 $\Delta C_{\gamma}$ 如表2所示。由此可得,偏摆角作相同角度变化时,引起的 $\Delta\theta_x$ 相对解算误差分别为2.28%、0.16%、3.77%。实验结果表明,在20"内,由反射镜俯仰角和偏摆角变化引起的光栅栅线平行度最大相对测量误差分别可达4.99%、3.77%。

表1 反射镜不同俯仰角 $\Delta\omega$ 时对应的 $\Delta\theta_x$ 系数

Table 1 Coefficients of  $\Delta\theta_x$  at different pitch angles  $\Delta\omega$  of reflector

Condition	$\Delta\omega_0 = 0''$	$\Delta\omega_1 = 5''$	$\Delta\omega_2 = 10''$	$\Delta\omega_3 = 20''$	$\Delta C_{\omega_0}$	$\Delta C_{\omega}$
1	0.9203	0.9180	—	—	0.0047	0.0023
2	0.9269	—	0.9219	—	0.0019	0.0050
3	0.9196	—	—	0.9575	0.0054	0.0379

表2 反射镜不同偏摆角 $\Delta\gamma$ 时对应的 $\Delta\theta_x$ 系数

Table 2 Coefficients of  $\Delta\theta_x$  at different yaw angles  $\Delta\gamma$  of reflector

Condition	$\Delta\gamma_0 = 0''$	$\Delta\gamma_1 = 5''$	$\Delta\gamma_2 = 10''$	$\Delta\gamma_3 = 20''$	$\Delta C_{\gamma_0}$	$\Delta C_{\gamma}$
1	0.9209	0.9382	—	—	0.0041	0.0173
2	0.9216	—	0.9204	—	0.0034	0.0012
3	0.9193	—	—	0.9479	0.0057	0.0286

## 5 结 论

从光栅拼接原理出发,建立光栅旋转角与衍射光束偏转角的数学关系,设计光栅旋转角检测光路,通过仿真光栅不同姿态干涉场的变化,验证了模型的正确性。此外,通过相关实验进一步验证模型,结果表明:1)通过波前检测干涉仪同时测量零级和一级衍射波前,解决了光栅旋转自由度解耦的问题,且光栅间栅线平行度的最大相对测量误差为3.85%;2)检测光路中反射镜俯仰角变化会使入射光偏离光栅主截面,偏摆角变化会造成入射光角度变化,从而引起模型系数误差。当反射镜2相对于反射镜1的俯仰角与偏摆角在0"~20"内变化,光栅间栅线平行度的最大相对测量误差分别达4.99%、3.77%。

这为后续通过约束反射镜安装误差,减小光栅安装误差,优化检测装置提供了参考。

## 参 考 文 献

[1] Dong J H, Tian X Z, Li Z L, *et al.* Development of 100 nm step-scanning projection photographic machine[J]. Ome Information, 2004, 21(5): 20-24. 董吉洪, 田兴志, 李志来, 等. 100 nm 步进扫描投影光刻机工件台、掩模台的发展[J]. 光机电信息, 2004, 21(5): 20-24.

[2] Yang X D, Xia L, Ma W X, *et al.* Experiment of real-time monitoring and adjusting of rotation error about tiled gratings[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(9): 1222-1226. 杨学东, 夏兰, 马伟新, 等. 光栅拼接旋转偏差实时

- 监测调节实验[J]. 中国激光, 2007, 34(9): 1222-1226.
- [3] Hornung M, Bödefeld R, Kessler A, *et al.* Spectrally resolved and phase-sensitive far-field measurement for the coherent addition of laser pulses in a tiled grating compressor[J]. Optics Letters, 2010, 35(12): 2073-2075.
- [4] Xia L, Yang X D, Xu G, *et al.* Tiled-grating rotation detecting technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(3): 0308001.  
夏兰, 杨学东, 徐光, 等. 光栅拼接旋转误差检测系统[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0308001.
- [5] Lu Y X, Qi X D, Mi X T, *et al.* Detection and calculation of mosaic grating error based on wavefront method[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0505001.  
卢禹先, 齐向东, 糜小涛, 等. 基于波前法的光栅拼接误差检测及计算方法[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0505001.
- [6] Lu Y X, Qi X D, Yu H L, *et al.* Precision analysis of grating replicated mosaic error based on the principle of Fraunhofer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 0508005.  
卢禹先, 齐向东, 于海利, 等. 基于夫琅禾费原理的光栅复制拼接误差精度分析[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0508005.
- [7] Cong M, Qi X D, Mi X T, *et al.* Influence of incident light angles on mosaic grating errors in optical path for grating replication and mosaic[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(12): 3027-3033.  
丛敏, 齐向东, 糜小涛, 等. 光栅复制拼接光路中入射光角度对拼接误差的影响[J]. 光学精密工程, 2017, 25(12): 3027-3033.
- [8] Sharma A K, Joshi A S, Naik P A, *et al.* Active phase locking of a tiled two-grating assembly for high-energy laser pulse compression using simultaneous controls from far-field profiles and interferometry[J]. Applied Physics B, 2017, 123: 117.
- [9] Panchuk V E, Klochkova V G, Yushkin M V, *et al.* The high-resolution spectrograph of the 6-m Large Azimuthal Telescope (BTA)[J]. Journal of Optical Technology, 2009, 76(2): 87-97.
- [10] Sakanoi T, Kasaba Y, Kagitani M, *et al.* Development of infrared Echelle spectrograph and mid-infrared heterodyne spectrometer on a small telescope at Haleakala, Hawaii for planetary observation[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9147: 91478D.
- [11] Kelly J H, Waxer L J, Bagnoud V, *et al.* OMEGA EP: high-energy petawatt capability for the OMEGA laser facility[J]. Journal de Physique IV (Proceedings), 2006, 133: 75-80.
- [12] Blanchot N, Bignon E, Coïc H, *et al.* Multi-petawatt high-energy laser project on the LIL facility in Aquitaine[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 5975: 59750C.
- [13] Li Z L, Wang X, Mu J, *et al.* Two-pass full-tiled grating compressor with real-time monitoring and control for XG-III petawatt-class laser facility[J]. Laser Physics, 2015, 25(1): 015301.
- [14] Zhang S, Zhang J W, Wang Y, *et al.* Theoretical and experimental research of tiling error compensation method based on a small-size mirror for large-aperture tiled-grating compressors[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 104: 190-196.
- [15] Qian G L, Wu J H, Li C M, *et al.* Compensational method for aberration in mosaic system of holographic grating[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 0305001.  
钱国林, 吴建宏, 李朝明, 等. 全息光栅拼接系统中的像差补偿法[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0305001.