

基于波前法的光栅拼接误差检测及计算方法

卢禹先^{1,2} 齐向东¹ 糜小涛¹ 姜珊¹ 于海利¹ 李晓天^{1*} 尹禄^{1,2}

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 光栅拼接法是目前制作大尺寸平面衍射光栅的重要方法之一, 而拼接误差是评价拼接光栅是否能够使用的重要指标之一。实时定量测量拼接误差, 能够实现对拼接误差的自动闭环调整, 通过实时指导拼接提高光栅拼接的精度。建立了衍射波前与光栅拼接误差关系的数学模型, 分析了干涉仪测量光栅拼接误差的原理, 用 ZYGO 干涉仪实现拼接光栅 0 级及 -1 级衍射波前的数字化定量提取, 分析并计算了拼接误差波前, 得到五维拼接误差的数值解。利用拼接光栅 -2 级的衍射波前验证五维拼接误差结果的准确性, 实验结果表明由 0 级、-1 级、-2 级拼接波前计算的拼接误差具有较好的一致性, 为利用波前检测光栅拼接误差并实现自动化闭环调整提供了理论指导。

关键词 衍射; 光栅拼接; 干涉仪; 衍射波前; 拼接误差

中图分类号 O436.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0505001

Detection and Calculation of Mosaic Grating Error Based on Wavefront Method

Lu Yuxian^{1,2} Qi Xiangdong¹ Mi Xiaotao¹ Jiang Shan¹

Yu Haili¹ Li Xiaotian¹ Yin Lu^{1,2}

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Mosaic grating is one of the most important methods for fabricating large-size plane diffraction gratings, and mosaic error is an important index to evaluate whether the mosaic grating can be used. Therefore, the real-time quantitative measurement of mosaic error can realize automatic closed-loop adjustment and improve the accuracy of mosaic grating fabrication. The mathematical model of the diffraction wavefront and the mosaic error of the grating is established and the mosaic error is analyzed. The diffraction wavefront of the mosaic grating at the zeroth-order and the negative first-order is extracted quantitatively by using a ZYGO interferometer. The numerical solution of five dimensional error is calculated by analyzing the mosaic error wavefront, and its accuracy is verified by the negative second-order diffraction wavefront. The experimental results show that the mosaic error of the gratings at the zeroth-order, the negative first-order and the negative second-order is consistent with each other, which provides theoretical guidance for measuring mosaic error by wavefront and realizing automatic closed-loop adjustment.

Key words diffraction; mosaic grating; interferometer; diffraction wavefront; mosaic error

OCIS codes 050.1950; 050.1960; 260.1960

1 引 言

大尺寸平面衍射光栅是应用于天文光谱分析^[1-4]、激光惯性约束核聚变^[5-9]等领域的重要光学元件。天

收稿日期: 2015-12-16; 收到修改稿日期: 2016-01-11

基金项目: 国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2008-1)、国家自然科学基金(61505204)、国家 973 计划(2014CB049500)、吉林省重大科技发展项目(20140203011GX)

作者简介: 卢禹先(1989-), 女, 博士研究生, 主要从事光栅拼接等方面的研究。E-mail: hongyulu0412@hotmail.com

导师简介: 齐向东(1965-), 男, 本科, 研究员, 博士生导师, 主要从事光栅制作等方面的研究。

E-mail: chinagrating@263.com

* 通信联系人。E-mail: lixt_1981@163.com

文望远镜需要尺寸为米量级以上的平面衍射光栅来实现高光谱分辨率,例如正在研制的 30 m 望远镜(TMT)、巨型麦哲伦望远镜(GMT)和欧洲极大望远镜(ELT)。随着天文望远镜的发展,光栅的尺寸将逐步增大。此外,激光核聚变项目也使用米量级以上尺寸的平面衍射光栅以满足对高聚光能力的要求,例如美国的 OMEGA EP 项目^[7]、法国的 Pico2000 项目^[6]、日本的 FIREX-I 项目^[10]。光栅的制作一般采用机械刻划法和全息曝光离子束刻蚀法^[11],机械刻划法在制作大尺寸光栅时对刻刀和刻划机定位精度要求非常高,全息曝光离子束刻蚀法无法通过单次曝光得到大口径光栅,因此国内外学者也在探索新的全息光栅曝光方法^[12],如利用锁相多次曝光或者扫描光束干涉法^[13],但仍对光栅基底位置和姿态以及曝光光束角度的控制精度要求极高。与直接制作整块大光栅相比,小光栅的制作技术成熟,容易获得高的衍射效率和更好的衍射波前质量。鉴于此,利用现有成熟方法制作的小尺寸光栅拼接得到大尺寸光栅具有重要的意义。

光栅拼接法制作大尺寸光栅是通过机械结构调整两块或多块光栅之间的拼接误差使其满足使用要求^[14-16],光栅拼接误差的理论分析及测量方法是保证拼接能够实现的基本条件。Cotel 等^[6]利用斐索干涉仪测量拼接误差,通过测量区域的干涉条纹重构光栅衍射波前并计算点扩展函数,从理论上计算得到拼接光栅的远场能量分布,但是该方法并未定量计算拼接误差值,只是测量出特定拼接误差情况下的光栅波前并计算出相应的远场能量分布。Yang 等^[17]通过 CCD 接收能量并利用随机并行梯度上升(SPGA)算法实现拼接误差的闭环自动控制调整,提高了光栅拼接精度,但是不同的光学系统存在不同的像差,远场能量分布并不能直接反映拼接误差对拼接光栅质量的影响。对于光栅质量的评价,光栅的衍射波前是最重要也是最直接的评价数据^[18],若能通过干涉仪直接测得的拼接波前计算拼接误差并以此作为反馈调节的目标值,实现拼接误差的闭环自动控制调整,将会提高光栅的拼接精度。因此,通过测得的拼接波前计算拼接误差就显得尤为重要。

本文建立了光栅拼接误差与衍射波前关系的理论模型。根据干涉仪的测量原理,得到拼接误差与干涉仪测量数据的矩阵方程,对拼接光栅的零级及非零级波前进行数字化定量提取,通过波前干涉仪测得拼接光栅的零级及某一衍射级次的数值化波前矩阵,计算拟合出零级及该衍射级次的拼接误差波前。拼接误差波前是指待拼接光栅相对于基准光栅存在的拼接误差所形成的波前。根据建立的拼接误差与衍射波前关系的理论模型,计算出拼接误差的数值解。实验采用 ZYGO 干涉仪,分别测量拼接光栅的 0 级、-1 级、-2 级的拼接波前,通过 0 级、-1 级的拼接波前计算得到的拼接误差值代入-2 级波前的理论计算公式中,得到的理论波前值与-2 级测得的实验波前值具有较好的一致性,验证了理论模型的正确性,为通过波前法测量拼接光栅误差,实现拼接误差的闭环自动控制调整提供理论指导。

2 光栅拼接误差理论模型

2.1 光栅拼接误差与衍射波前关系的理论模型

拼接误差示意图如图 1 所示。 G_1 是基准光栅, G_2 是相对于 G_1 存在五维拼接误差的待拼光栅。以光栅 G_1 所在平面建立笛卡儿空间直角坐标系,设 x 轴为光栅 G_1 的矢量方向, y 轴为光栅 G_1 的栅线方向, z 轴垂直于光栅 G_1 表面。定义绕 x 轴、 y 轴、 z 轴的旋转角度误差分别为 $\Delta\theta_x$ 、 $\Delta\theta_y$ 、 $\Delta\theta_z$,沿 x 轴、 y 轴、 z 轴的平移误差分别为 Δx 、 Δy 、 Δz 。 G_2 的姿态由以上 6 个自由度决定, Δy 的存在并不影响拼接光栅的相位,因此拼接光栅 G_1 、 G_2 共存在 5 种拼接误差 $\Delta\theta_x$ 、 $\Delta\theta_y$ 、 $\Delta\theta_z$ 、 Δx 、 Δz ,定义 $\Delta\theta_x$ 、 $\Delta\theta_y$ 、 $\Delta\theta_z$ 绕坐标轴顺时针旋转为正,逆时针旋转为负, Δx 、 Δz 沿坐标轴正方向移动为正,负方向移动为负。

假定一束波长为 λ 的单色平行光入射至拼接光栅 G_1 和 G_2 表面,入射角和衍射角分别为 α 和 β ,光栅常数为 d ,衍射级次为 m 。

首先考虑只存在 $\Delta\theta_y$ 的情况,入射光线和衍射光线均在光栅的主截面内。以探测器所在平面建立空间直角坐标系,设 u 轴是探测器的水平方向,平行于光栅的矢量方向, v 轴是探测器的竖直方向,平行于光栅的刻线方向, w 轴垂直于探测器平面。

入射至光栅 G_1 的入射角和衍射角分别为 α 和 β ,当 G_2 相对于 G_1 有 $\Delta\theta_y$ 的角度偏差时,入射至光栅 G_2 的入射角变化为 $\alpha - \Delta\theta_y$,设衍射角为 $\beta + \Delta\theta_1$,根据光栅方程有

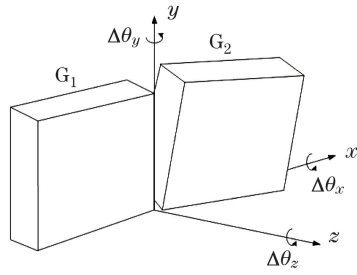


图 1 拼接光栅坐标系及拼接误差

Fig.1 Definition of grating mosaic error

$$\begin{cases} \sin \alpha - \sin \beta = \frac{m\lambda}{d} \\ \sin(\alpha - \Delta\theta_y) - \sin(\beta + \Delta\theta_1) = \frac{m\lambda}{d} \end{cases} \quad (1)$$

角度偏差 $\Delta\theta_y$ 引起的衍射光移动只发生在探测器的 u 轴方向, 设光栅 G_1 和 G_2 的衍射光夹角为 γ_u , 因拼接误差 $\Delta\theta_y$ 产生的光程差 Δ_u 如图 2 所示, 根据推导可得

$$\begin{cases} \Delta_u = u \cdot \sin \gamma_u \\ \gamma_u = \Delta\theta_y - \Delta\theta_1 \end{cases} \quad (2)$$

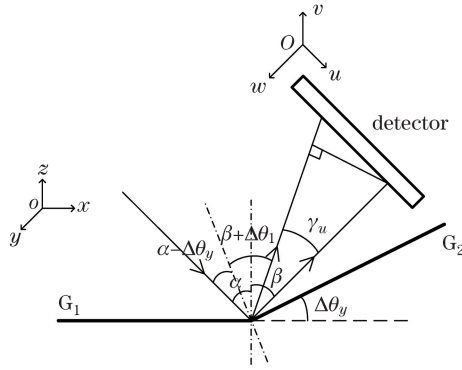


图 2 拼接误差 $\Delta\theta_y$ 引起的光程差示意图

Fig.2 Optical path difference caused by mosaic error $\Delta\theta_y$

在角度拼接误差满足小角度近似条件时, 由(1)、(2)式可得

$$\Delta_u = \frac{\cos \alpha + \cos \beta}{\cos \beta} \cdot \Delta\theta_y \cdot u \quad (3)$$

考虑只存在 $\Delta\theta_x$ 的情况, 光栅 G_1 的入射光和衍射光均在主截面内, 只存在角度偏差 $\Delta\theta_x$ 时, 设入射至光栅 G_2 的入射角和衍射角分别为 α' 和 β' , 入射光与光栅 G_2 的主截面夹角为 φ_1 , 衍射光与光栅 G_2 的主截面夹角为 φ_2 , 由光栅方程及光栅的锥面衍射方程可知

$$\begin{cases} \sin \alpha - \sin \beta = \frac{m\lambda}{d} \\ \sin \alpha' \cos \varphi_1 - \sin \beta' \cos \varphi_2 = \frac{m\lambda}{d} \\ \sin \varphi_1 = \sin \varphi_2 \end{cases} \quad (4)$$

角度偏差 $\Delta\theta_x$ 引起的衍射光移动只发生在探测器的 v 轴方向, 光栅 G_1 和 G_2 的衍射光夹角为 γ_{v1} , 因拼接误差 $\Delta\theta_x$ 产生的光程差 Δ_{v1} 如图 3(a) 所示, 图 3(b) 为误差的局部放大图。

$\Delta\theta_2$ 是光栅 G_1 的衍射光与光栅 G_2 的主截面夹角, 根据图 3 中的角度关系可知

$$\begin{cases} \Delta_{v1} = -v \cdot \sin \gamma_{v1} \\ \gamma_{v1} = \Delta\theta_2 + \varphi_2 \end{cases} \quad (5)$$

式中 $\Delta\theta_2$ 、 φ_2 满足

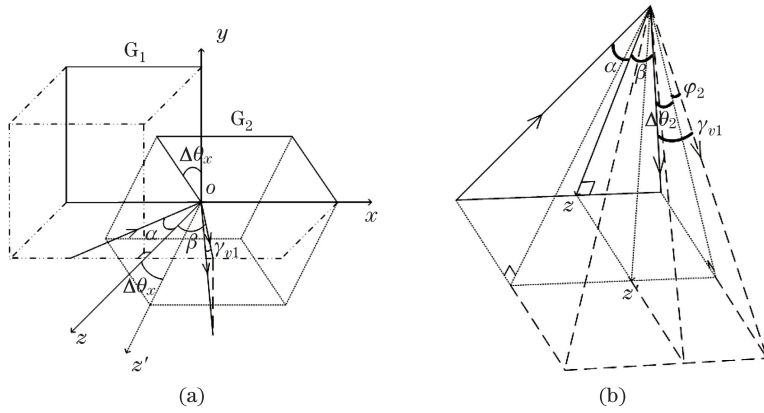


图 3 (a)拼接误差 $\Delta\theta_x$ 引起的光程差; (b)误差局部放大图

Fig. 3 (a) Optical path difference caused by mosaic error $\Delta\theta_x$; (b) partially amplified drawing

$$\begin{cases} \sin \Delta\theta_2 = \sin \Delta\theta_x \cdot \cos \beta \\ \cos \Delta\theta_2 = \frac{\sin \beta}{\sin \beta'} \\ \sin \varphi_2 = \sin \varphi_1 = \sin \Delta\theta_x \cdot \cos \alpha \\ \cos \varphi_2 = \cos \varphi_1 = \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha'} \end{cases} \quad (6)$$

角度拼接误差满足小角度近似条件时,由(4)~(6)式可得

$$\Delta_{v1} = -(\cos \alpha + \cos \beta) \cdot \Delta\theta_x \cdot v. \quad (7)$$

考虑只存在 $\Delta\theta_z$ 的情况,光栅 G_1 的入射光和衍射光均在主截面内,只存在角度偏差 $\Delta\theta_z$ 时,设入射至光栅 G_2 的入射角和衍射角分别为 α'' 和 β'' ,入射光与光栅 G_2 的主截面夹角为 φ_{11} ,衍射光与光栅 G_2 的主截面夹角为 φ_{22} ,由光栅方程及光栅的锥面衍射方程可知

$$\begin{cases} \sin \alpha - \sin \beta = \frac{m\lambda}{d} \\ \sin \alpha' \cos \varphi_{11} - \sin \beta' \cos \varphi_{22} = \frac{m\lambda}{d} \\ \sin \varphi_{11} = \sin \varphi_{22} \end{cases} \quad (8)$$

角度偏差 $\Delta\theta_z$ 引起的衍射光移动只发生在探测器的 v 轴方向,光栅 G_1 和 G_2 的衍射光夹角为 γ_{v2} ,因拼接误差 $\Delta\theta_z$ 产生的光程差 Δ_{v2} 如图 4(a)所示,图 4(b)是其局部误差示意图。

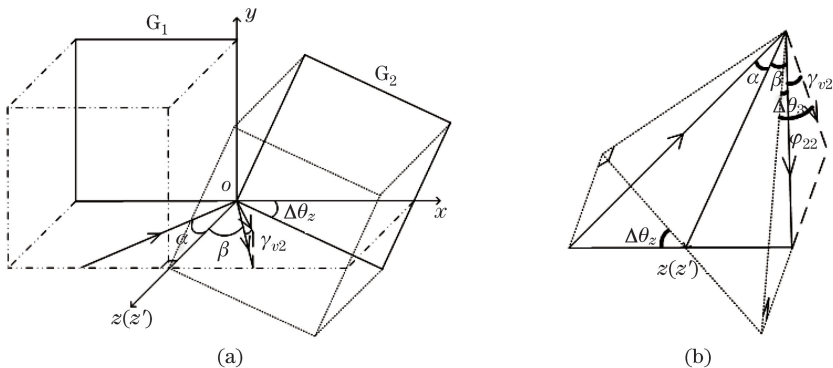


图 4 (a)拼接误差 $\Delta\theta_z$ 引起的光程差; (b)误差局部放大图

Fig. 4 (a) Optical path difference caused by mosaic error $\Delta\theta_z$; (b) partially amplified drawing

$\Delta\theta_3$ 是光栅 G_1 的衍射光与光栅 G_2 的主截面夹角,由图 5 所示的角度关系可知

$$\begin{cases} \Delta_{v2} = v \cdot \sin \gamma_{v2} \\ \gamma_{v2} = \varphi_{22} - \Delta\theta_3 \end{cases}, \quad (9)$$

式中 $\Delta\theta_3$ 、 φ_{22} 满足

$$\begin{cases} \sin \varphi_{22} = \sin \varphi_{11} = \sin \alpha \cdot \sin \Delta\theta_z \\ \cos \varphi_{22} = \cos \varphi_{11} = \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha''} \\ \sin \Delta\theta_3 = \sin \beta \cdot \sin \Delta\theta_z \\ \cos \Delta\theta_3 = \frac{\cos \beta}{\cos \beta''} \end{cases} \quad (10)$$

角度拼接误差满足小角度近似条件时,由(8)~(10)式可得

$$\Delta_{v2} = \frac{m\lambda}{d} \cdot \Delta\theta_z \cdot v \quad (11)$$

因 $\Delta\theta_x$ 、 $\Delta\theta_z$ 对衍射光的影响在探测器上只发生 v 方向的位移,因此可将 $\Delta\theta_x$ 、 $\Delta\theta_z$ 对光程差的影响相叠加,联立(7)、(11)式,光栅 G_1 和 G_2 的衍射光因 $\Delta\theta_x$ 、 $\Delta\theta_z$ 的存在产生的光程差 Δ_v 为

$$\Delta_v = \Delta_{v1} + \Delta_{v2} = \left[-(\cos \alpha + \cos \beta) \cdot \Delta\theta_x + \frac{m\lambda}{d} \cdot \Delta\theta_z \right] \cdot v \quad (12)$$

考虑只存在 Δx 、 Δz 的情况,光栅 G_1 、 G_2 的入射光和衍射光均在主截面内,因拼接误差 Δx 、 Δz 产生的光程差 Δ_m 如图 5 所示。

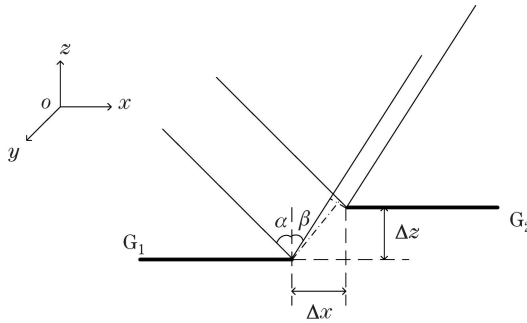


图 5 拼接误差 Δx 、 Δz 引起的光程差

Fig. 5 Optical path difference caused by mosaic error Δx and Δz

入射至光栅 G_2 的入射角和衍射角分别为 α 和 β ,光栅 G_2 的衍射光并未在探测器的 u 和 v 方向发生移动,只改变了衍射光的相位,通过计算可得光栅 G_1 和 G_2 的衍射光因 Δx 、 Δz 产生的光程差 Δ_m 为

$$\Delta_m = \frac{m\lambda}{d} \cdot \Delta x - (\cos \alpha + \cos \beta) \cdot \Delta z \quad (13)$$

根据(3)、(12)、(13)式,即可求得拼接误差 $\Delta\theta_x$ 、 $\Delta\theta_y$ 、 $\Delta\theta_z$ 、 Δx 、 Δz 在任意衍射级次和入射角下的光栅拼接波前。

2.2 干涉仪测量光栅拼接误差的原理

用干涉仪测量平面反射光栅时,大多采用利特罗结构,即干涉仪的单色光入射角与光栅衍射角绝对值相等的光路结构。测量拼接光栅的零级光波前时,满足 $\alpha = \beta = 0$;测量拼接光栅的非零级光波前时, $\alpha = \beta$ 。光栅常数 d 、干涉仪的测量波长 λ 、衍射级次 m 已知。用波前检测干涉仪对拼接光栅的零级光及非零级光检测拼接误差时,有如下矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} 0 & 2u & 0 & 0 & 0 \\ -2v & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2 \\ 0 & 2u & 0 & 0 & 0 \\ -2v \cdot \cos \alpha & 0 & \frac{m\lambda}{d}v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{m\lambda}{d} & -2\cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta_x \\ \Delta\theta_y \\ \Delta\theta_z \\ \Delta x \\ \Delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta_u(0) \\ \Delta_v(0) \\ \Delta_0 \\ \Delta_u(m) \\ \Delta_v(m) \\ \Delta_m \end{bmatrix}, \quad (14)$$

式中 $\Delta_u(0)$ 、 $\Delta_v(0)$ 分别为拼接光栅零级光波前的拼接误差波面相对于干涉仪探测器 u 轴和 v 轴方向的光程差, Δ_0 为拼接光栅零级光波前的误差拼接波面在 w 轴上的偏移量。 $\Delta_u(m)$ 、 $\Delta_v(m)$ 分别为拼接光栅 m 级光波前的拼接误差波面相对于干涉仪探测器 u 轴和 v 轴方向的光程差, Δ_m 为拼接光栅 m 级光波前的误差拼接波面在 w 轴上的偏移量。

因干涉仪测量光栅的边缘区域时会存在较大误差, 测量中选择的测量区域为光栅中间的 $n \times n$ 区域, 避免选择边缘且以所选区域面积最大为优, 当干涉仪测量基准光栅 G_1 的零级光波前时, 测得的数值化矩阵为 $\mathbf{\Delta}_1(0)$, 测得的待拼光栅 G_2 的数值化矩阵为 $\mathbf{\Delta}_2(0)$, 矩阵的表达形式为

$$\mathbf{\Delta}_1(0) = \begin{bmatrix} x_{01} & y_{01} & z_{01} \\ x_{02} & y_{02} & z_{02} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{0n} & y_{0n} & z_{0n} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{\Delta}_2(0) = \begin{bmatrix} x_{01}' & y_{01}' & z_{01}' \\ x_{02}' & y_{02}' & z_{02}' \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{0n}' & y_{0n}' & z_{0n}' \end{bmatrix}。$$
 (15)

根据测得的数值化矩阵 $\mathbf{\Delta}_1(0)$ 和 $\mathbf{\Delta}_2(0)$ 拟合出零级光的拼接误差波面为

$$\begin{bmatrix} 1 & x_{01}' & y_{01}' \\ 1 & x_{02}' & y_{02}' \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{0n}' & y_{0n}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta a_0 \\ \Delta b_0 \\ \Delta c_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{01}' - z_{01} \\ z_{02}' - z_{02} \\ \vdots \\ z_{0n}' - z_{0n} \end{bmatrix}。$$
 (16)

当干涉仪测量 m 级衍射光波前时, 仍选择与零级光测量时相同的 $n \times n$ 区域, 测得的基准光栅 G_1 的数值化矩阵为 $\mathbf{\Delta}_1(m)$, 测得的待拼光栅 G_2 的数值化矩阵为 $\mathbf{\Delta}_2(m)$, 矩阵的表达形式为

$$\mathbf{\Delta}_1(m) = \begin{bmatrix} x_{m1} & y_{m1} & z_{m1} \\ x_{m2} & y_{m2} & z_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{mn} & y_{mn} & z_{mn} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{\Delta}_2(m) = \begin{bmatrix} x_{m1}' & y_{m1}' & z_{m1}' \\ x_{m2}' & y_{m2}' & z_{m2}' \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{mn}' & y_{mn}' & z_{mn}' \end{bmatrix}。$$
 (17)

根据测得的数值化矩阵 $\mathbf{\Delta}_1(m)$ 和 $\mathbf{\Delta}_2(m)$ 拟合出 m 级衍射光的拼接误差波面为

$$\begin{bmatrix} 1 & x_{m1}' & y_{m1}' \\ 1 & x_{m2}' & y_{m2}' \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{mn}' & y_{mn}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta a_m \\ \Delta b_m \\ \Delta c_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{m1}' - z_{m1} \\ z_{m2}' - z_{m2} \\ \vdots \\ z_{mn}' - z_{mn} \end{bmatrix}。$$
 (18)

根据(12)、(14)、(16)式可知

$$\begin{cases} \Delta_u(0) = \Delta b_0 \cdot u \\ \Delta_v(0) = \Delta c_0 \cdot v \\ \Delta_0 = \Delta a_0 \\ \Delta_u(m) = \Delta b_m \cdot u \\ \Delta_v(m) = \Delta c_m \cdot v \\ \Delta_m = \Delta a_m \end{cases}。$$
 (19)

因此通过波前干涉仪测得拼接光栅 G_1 、 G_2 的零级光及 m 级衍射光的数值化波前矩阵, 通过对数值化

波前矩阵的计算,拟合出零级光及 m 级衍射光的拼接误差波面,根据(14)、(19)式可计算出拼接误差 $\Delta\theta_x$ 、 $\Delta\theta_y$ 、 $\Delta\theta_z$ 、 Δx 、 Δz 的数值解。

3 实验结果与分析

采用波长 λ 为 632.8 nm、误差重复性为 $\lambda/10000$ (2σ) 的 ZYGO 干涉仪(ZYGO 公司,美国)测量两块光栅尺寸为 35 mm×35 mm,刻线密度为 300 line/mm,衍射波前峰谷值为 0.15λ 的拼接光栅衍射波前,实验装置实物图如图 6 所示。

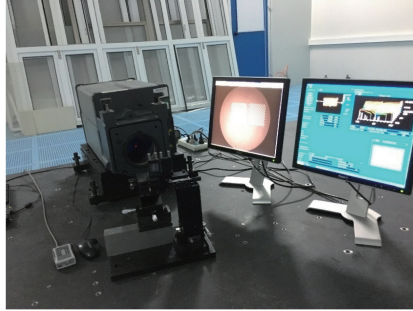


图 6 ZYGO 干涉仪测量拼接误差实验装置

Fig.6 Photograph of experimental setup to measure grating mosaic error by ZYGO interferometer

ZYGO 干涉仪测得的拼接光栅 0 级、-1 级、-2 级的衍射波前如图 7 所示。ZYGO 读取的数据未作去倾斜处理,其中 u 代表探测器在垂直于光栅刻线方向的像素, v 代表探测器在平行于光栅刻线方向的像素, u 、 v 均截取光栅中间的有效区域,波前的单位为波长 λ 。

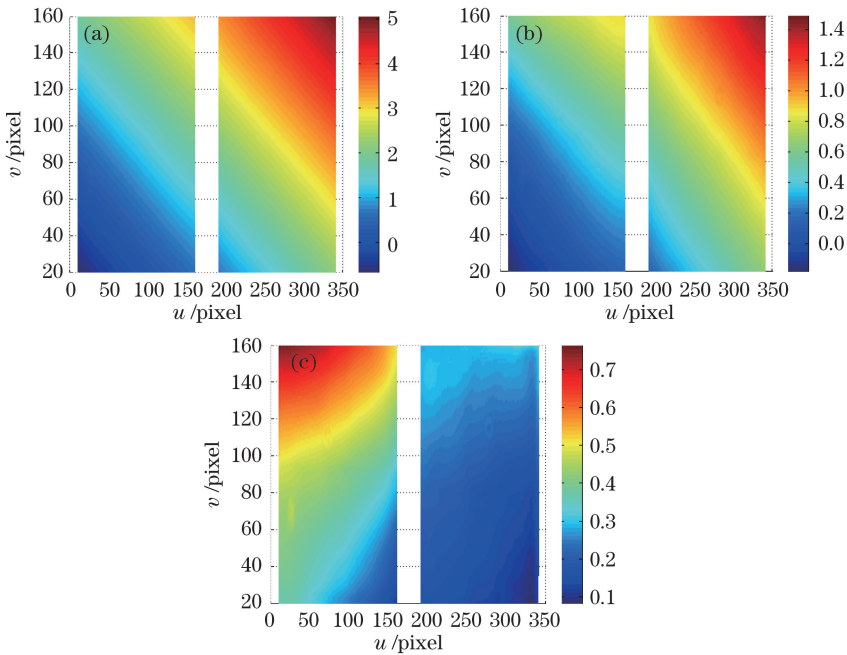


图 7 拼接光栅衍射波前。(a)0 级;(b)-1 级;(c)-2 级

Fig.7 Diffraction wavefront of mosaic grating. (a) Zeroth-order; (b) negative first-order; (c) negative second-order

根据(16)、(18)式分别计算光栅 G_2 相对于光栅 G_1 的 0 级、-1 级、-2 级拼接误差波前,计算结果如图 8 所示。

根据(19)式可知,通过拟合系数即可求得 Δb_0 、 Δc_0 、 Δa_0 、 Δb_m 、 Δc_m 、 Δa_m ,为了避免一次测量的随机性,采取多次测量求均值的方式,测量结果如表 1 所示。

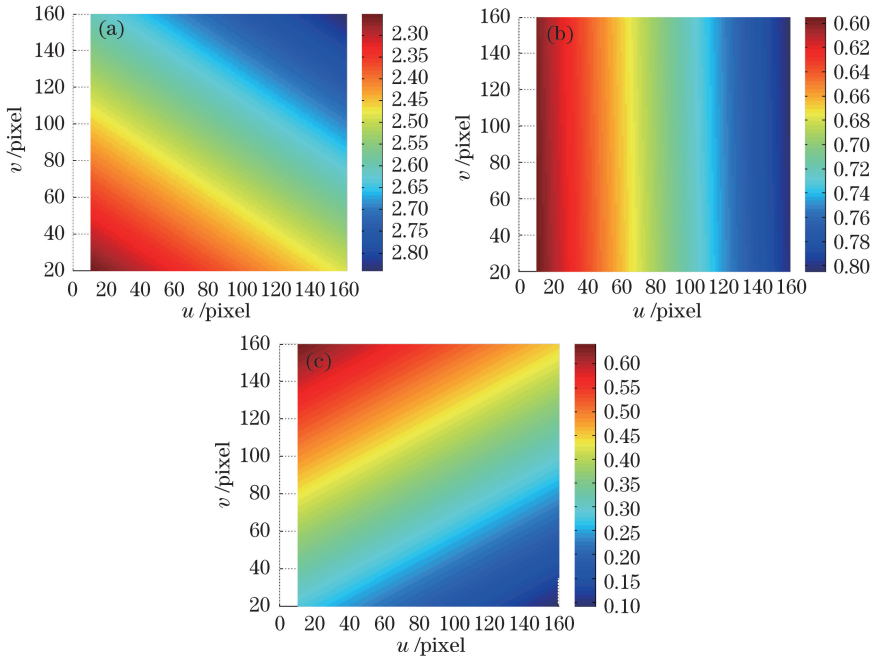


图 8 光栅拼接误差波前。(a)0 级;(b)-1 级;(c)-2 级

Fig.8 Mosaic error wavefront. (a) Zeroth-order; (b) negative first-order; (c) negative second-order

表 1 拼接误差拟合平面系数

Table 1 Coefficients of fitting planes for mosaic grating error

	1	2	3	4	5	Mean
$\Delta b_0 / 10^{-4}$	-9.2393	-9.2398	-9.2396	-9.2394	-9.2391	-9.23944
$\Delta c_0 / 10^{-3}$	-15.0219	-15.0216	-15.0217	-15.0211	-15.0215	-15.02156
Δ_0 / λ	-1.1288	-1.1283	-1.1287	-1.1288	-1.1278	-1.12848
$\Delta b_{-1} / 10^{-4}$	-9.2391	-9.2397	-9.2390	-9.2388	-9.2398	-9.23928
$\Delta c_{-1} / 10^{-3}$	-0.9868	-0.9863	-0.9865	-0.9861	-0.9860	-0.98634
Δ_{-1} / λ	-0.2963	-0.2965	-0.2967	-0.2966	-0.2961	-0.29644
$\Delta b_{-2} / 10^{-4}$	-9.2395	-9.2387	-9.2386	-9.2392	-9.2399	-9.23918
$\Delta c_{-2} / 10^{-3}$	13.0483	13.0486	13.0489	13.0488	13.0487	13.04866
Δ_{-2} / λ	0.5369	0.5362	0.5368	0.5366	0.5363	0.53656

由拼接光栅 0 级拼接误差波前可以计算得到

$$\begin{cases} \Delta b_0 = -9.23944 \times 10^{-4} \\ \Delta c_0 = -1.502156 \times 10^{-3} \\ \Delta_0 = -1.12848\lambda \end{cases} \quad (20)$$

由拼接光栅 -1 级拼接误差波前可以计算得到

$$\begin{cases} \Delta b_{-1} = -9.23928 \times 10^{-4} \\ \Delta c_{-1} = -0.98634 \times 10^{-3} \\ \Delta_{-1} = -0.29644\lambda \end{cases} \quad (21)$$

由拼接光栅 -2 级拼接误差波前可以计算得到

$$\begin{cases} \Delta b_{-2} = -9.23918 \times 10^{-4} \\ \Delta c_{-2} = 1.304866 \times 10^{-3} \\ \Delta_{-2} = 0.53656\lambda \end{cases} \quad (22)$$

根据理论分析,通过测量零级及任意一个衍射级次即可计算五维拼接误差,通过测量拼接光栅的 0 级及 -1 级拼接误差波前,计算 $\Delta\theta_x, \Delta\theta_y, \Delta\theta_z, \Delta x, \Delta z$, 测量拼接光栅的 -2 级拼接误差波前验证计算的拼接误

差值是否正确。

通过上述测量计算得到的 Δb_0 、 Δc_0 、 Δ_0 ，根据(14)式可得

$$\begin{cases} \Delta\theta_x = 0.751078 \text{ mrad} \\ \Delta\theta_y = -0.461972 \text{ mrad} \\ \Delta z = 0.56424\lambda \end{cases} \quad (23)$$

通过上述测量计算得到的 Δb_{-1} 、 Δc_{-1} 、 Δ_{-1} ，根据(14)、(23)式，因单独的-1级拼接误差波前测量结果并不能计算出 $\Delta\theta_z$ 、 Δx ，因此需要代入0级的 $\Delta\theta_x$ 、 Δz ，计算得到五维拼接误差值为

$$\begin{cases} \Delta\theta_x = 0.751078 \text{ mrad} \\ \Delta\theta_y = -0.461964 \text{ mrad} \\ \Delta\theta_z = -7.393184 \text{ mrad} \\ \Delta x = 0.83204d \\ \Delta z = 0.56424\lambda \end{cases} \quad (24)$$

将计算得到的0级和-1级五维拼接误差值代入(14)式中，得到-2级理论衍射波前结果为

$$\begin{cases} \Delta b_{-2} = -9.23928 \times 10^{-4} \\ \Delta c_{-2} = 1.304888 \times 10^{-5} \\ \Delta_{-2} = 0.5356\lambda \end{cases} \quad (25)$$

将-2级拼接波前的测量结果与(25)式进行比较， Δb_{-2} 的相对误差为0.0010823%， Δc_{-2} 的相对误差为0.0016856%， Δ_{-2} 的相对误差为0.1789%，理论结果与测量结果有较好的一致性。

4 结 论

建立了衍射波前与光栅拼接误差的数学模型，并根据干涉仪的测量原理，得到了数字化的波前矩阵与拼接误差的数学关系，并进行了相关实验验证，结果表明：1)通过波前检测干涉仪数字化波前矩阵的测量，拟合误差拼接波面，建立误差拼接波面与拼接误差的对应关系，测量零级及任意非零级次的拼接波前，可计算出拼接误差的数值解；2)解决了以远场能量分布测量拼接误差时存在像差影响的问题，直接采用衍射波前测量的方法，定量测量拼接误差，为后续利用衍射波前实现拼接误差的闭环自动调整提供理论依据；3)通过零级及任意非零级次衍射波前的测量，可以计算出拼接误差的数值解，并以另一非零级次的衍射波前测量结果验证计算结果的正确性；4)实验结果与理论计算结果有较好的一致性，说明理论模型合理，对用波前法计算并调整拼接误差具有理论指导意义。

参 考 文 献

- 1 Dekker H, D'Odorico S. UVES, the UV-visual echelle spectrograph for the VLT[J]. Messenger, 1992, 70: 13-17.
- 2 Mazzacurati V, Ruocco G. The super-gratings: How to improve the limiting resolution of grating spectrometers[J]. Optics Communications, 1990, 76(3): 185-190.
- 3 Vogt S S, Allen S L, Bigelow B C, *et al.*. Hires: The high-resolution echelle spectrometer on the Keck 10-M telescope [C]. Symposium on Astronomical Telescopes & Instrumentation for the 21st Century, International Society for Optics and Photonics, 1994: 362-375.
- 4 Tull R G. High-resolution spectrograph for the spectroscopic survey telescope[C]. SPIE, 1994, 2198: 674-685.
- 5 Hideaki H, Guang X, Takahisa J, *et al.*. Pulse compression and beam focusing with segmented diffraction gratings in a high-power chirped-pulse amplification glass laser system[J]. Optics Letters, 2010, 35(11): 1783-1785.
- 6 Cotel A, Castaing M, Pichon P, *et al.*. Phased-array grating compression for high-energy chirped pulse amplification lasers[J]. Optics Express, 2007, 15(5): 2742-2752.
- 7 Qiao J, Kalb A, Nguyen T, *et al.*. Demonstration of large-aperture tiled-grating compressors for high-energy, petawatt-class, chirped-pulse amplification systems[J]. Optics Letters, 2008, 33(15): 1684-1686.
- 8 Hornung M, Bödefeld R, Siebold M, *et al.*. Alignment of a tiled-grating compressor in a high-power chirped-pulse amplification laser system[J]. Applied Optics, 2007, 46(30): 7432-7435.
- 9 Cao Huabao, Lu Xingqiang, Fan Dianyuan. Signal-to-noise ratio degradation due to the tiled-grating gap[J]. Acta Optica

- Sinica, 2011, 31(10): 1005004.
- 曹华保, 卢兴强, 范滇元. 拼接光栅压缩器中光栅拼缝对脉冲信噪比的影响[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1005004.
- 10 Ezaki Y, Tabata M, Kihara M, *et al.*. Development of a segmented grating mount system for FIREX-1[J]. Journal of Physics, 2008, 112(3): 032027.
- 11 Shi Lei. Fabrication of large-size diffraction gratings: Latent-image-based optical mosaic technique[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- 石磊. 大尺寸衍射光栅的制造[D]. 北京: 清华大学, 2011.
- 12 Qian Guolin, Wu Jianhong, Li Chaoming, *et al.*. Study of gratings tiled by holographic exposure with wave aberration [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0305002.
- 钱国林, 吴建宏, 李朝明, 等. 有像差情况下的全息光栅拼接研究[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0305002.
- 13 Jiang Shan, Bayanheshig, Pan Mingzhong, *et al.*. An accurate method for measuring interference fringe period in scanning beam interference lithography system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0705001.
- 姜珊, 巴音贺希格, 潘明忠, 等. 扫描干涉场曝光系统中干涉条纹周期精确测量方法[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0705001.
- 14 Hoose J, Loewen E, Wiley R, *et al.*. Grand gratings: Bigger is better, thanks to mosaic technology - today's larger telescopes' unprecedented challenge[J]. Photonics Spectra, 1995, 29(12): 118-136.
- 15 Brealey G A, Fletcher J M, Grundmann W A, *et al.*. Adjustable mosaic grating mounts[C]. SPIE, 1981, 240: 225-229.
- 16 Blasiak T, Zheleznyak S. History and construction of large mosaic diffraction gratings[C]. SPIE, 2002, 4485: 370-377.
- 17 Yang Y, Wang X, Zhang J, *et al.*. Automatic phase-locked control of grating tiling[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2012, 50(2): 262-267.
- 18 Qiao J, Kalb A, Guardalben M, *et al.*. Large-aperture grating tiling by interferometry for petawatt chirped-pulse-amplification systems[J]. Optics Express, 2007, 15(15): 9562-9574.