

文章编号 1004-924X(2017)12-3027-07

光栅复制拼接光路中入射光角度对拼接误差的影响

丛敏^{1,2}, 齐向东^{1*}, 糜小涛^{1,2}, 于海利¹, 李晓天¹, 卢禹先^{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:设计了一种基于干涉检验法的复制拼接光栅测量光路。针对光栅复制拼接光路中入射光角度难以精确测量的问题,分析了光栅拼接实验中入射光角度对光栅拼接的影响。建立了光栅拼接误差模型,分析了五维拼接误差的容限要求。按照光栅复制拼接光路的要求,设计了一种干涉仪角度调节装置。根据误差模型和拼接光路分析了500 mm×500 mm大尺寸中阶梯光栅复制拼接光路中入射光角度误差与拼接误差的关系。结果显示:入射光角度误差为1°,拼接光路中绕x轴,y轴的转动误差 $\Delta\theta_x, \Delta\theta_y$ 和沿z轴的位移误差 Δz 的计算值与实际值之间分别相差0.002 1 μrad , 0.003 3 μrad 和0.348 2 nm时,引起波前差为2.590 1 nm。根据这一计算结果,给出了干涉仪角度调节装置的设计指标,即设置角度调节分度为0.1°时,可满足大尺寸光栅复制拼接要求。

关键词:光栅拼接;光栅复制;拼接误差;误差分析

中图分类号: O346.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172512.3027

Influence of incident light angles on mosaic grating errors in optical path for grating replication and mosaic

CONG Min^{1,2}, QI Xiang-dong^{1*}, MI Xiao-tao^{1,2}, YU Hai-li¹, LI Xiao-tian¹, LU Yu-xian^{1,2}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

* *Corresponding author, E-mail: chinagrating@263.net*

Abstract: A measuring path for grating replication and mosaic was designed based on interferometric method. In consideration of the difficulty of measuring incident light angles in the optical path for grating replication and mosaic, the influence of the angle error of the incident light on the grating replication and mosaic was analyzed. A mathematical model of mosaic grating errors was established, and the tolerance of the mosaic grating errors was given. According the requirement of incident light angle in the optical path for grating replication and mosaic, an angle adjustment structure of the interferometer was designed. On the basis of error mathematical model and the mosaic path, the relation between the incident angle error and the mosaic grating errors was analyzed for a 5 000 mm×500 mm

收稿日期: 2017-05-23; **修订日期:** 2017-06-26.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61505204); 吉林省青年人才基金资助项目(No. 20170520167JH); 国家973重点基础研究计划资助项目(No. 2014CB049500); 国家重大科研装备研制项目(No. ZDYZ2008-1); 重大科学仪器设备开发专项(No. 2016YFF0103304); 国家重点研发计划(No. 2016YFF0102006)

large echelle grating. The results show that when the incident angle error is 1° , and the differences of calculation value and actual value for the $\Delta\theta_x$, $\Delta\theta_y$, Δz (mosaic grating errors around the x , y , z axes) are $0.0021 \mu\text{rad}$, $0.0033 \mu\text{rad}$, 0.3482 nm , respectively, the wavefront error is 2.5901 nm . According to the calculation and analysis, it shows that the angle adjustment structure of the interferometer needs a dividing plate of 0.1° as the min measuring range, which can meet the requirement of the grating mosaic.

Key words: grating mosaic; grating replication; mosaic error; error analysis

1 引言

大尺寸平面衍射光栅是用于天文光谱分析^[1-3]、激光惯性约束核聚变^[4-6]等领域的核心光学元件。在天文观测方向,8 m 主镜的日本 SUB-RAR 望远镜,10 m 主镜的美国 KECK 望远镜等一系列大口径望远镜的建成促进了光谱分析技术的发展,而大口径光栅在光谱分辨率方面的优势,使它成为主要的研究对象。在惯性约束核聚变反应中,光栅尺寸决定了整个系统的输出能量,在美国 LLE 承担的激光惯性约束核聚变 OMEGA EP 项目以及中国工程物理研究院激光聚变研究中心承担的神光 III 项目中,光栅尺寸要求已经达到米级。然而,传统的光栅制作方法^[7-9]很难加工出满足使用要求的米级大面积光栅,一种新的大光栅制作方法——光栅拼接法^[10-11]应运而生。

2004 年,日本山梨大学的 Harimoto 利用弗朗禾费积分方法建立了拼接光栅误差与远场光斑能量的数学模型^[12],仿真计算了子光栅衍射光束在存在五维拼接误差时的远场光斑衍射图样。2007 年,美国 OMEGA EP 项目指出大尺寸拼接光栅应该以子光栅的拼接波前作为光栅拼接的最终评价标准^[13]。2016 年^[18],长春光机所卢禹先提出了一种严格的光栅拼接方法并且设计了实验光路,给出了严格拼接的实验结果,即将五维拼接误差分配到零级和衍射级次分别调整,将其中较难确定的纵向位移误差用棱镜分离,以不同的入射角度单独测量计算和调整,实现了一台干涉仪单波长检测五个维度的拼接误差,运用该方法成功实现了光栅拼接。但是,携带调整架的拼接光栅在使用中会产生诸多不便,此外,拼接用光栅是竖直放置的,光栅拼接完成后无法复制成一块光栅永久的保存。因此,实现拼接光栅的复制尤为必要。

本文设计了一种基于干涉检验法的复制拼接

光栅测量光路结构,主要考虑入射光角度误差对光栅拼接的影响。而在光栅拼接的实验中影响拼接结果的因素有很多,例如光栅拼接调整架的机械误差,实验室环境因素、实验台振动、zygo 测量的不精确,光栅基底面型以及刻线误差等。本文从拼接误差计算公式出发,对理论部分的不确定性进行了分析和评价,建立了拼接误差模型。根据严格拼接光栅的要求,将两块波前 $\lambda/3$ 的待拼接光栅拼接成一块波前 $\lambda/2$ 的拼接光栅,计算出五维拼接的误差容限。为了实现拼接光栅的复制,结合拼接误差模型和复制拼接光路的特点,分析了入射光角度误差对五维拼接误差计算值的影响,结果表明入射光角度误差为 1° 时,即可满足光栅拼接的实验要求,根据这一分析结果,给出了干涉仪角度调节装置的角度调节分度值为 0.1° 。

2 光栅复制拼接

2.1 拼接误差模型建立

光栅拼接误差示意图如图 1 所示,G1 为基准光栅,建立空间直角坐标系,G2 为待拼接光栅。光栅拼接的五维拼接误差定义如下: $\Delta\theta_x$ 为 x 轴

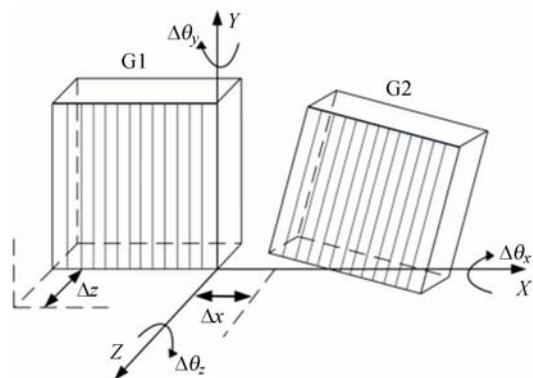


图 1 光栅拼接误差示意图

Fig. 1 Definition of mosaic grating errors

转角误差; $\Delta\theta_y$ 为 y 轴转角误差; $\Delta\theta_z$ 为 z 轴转角误差; Δx 为沿 x 轴的位移误差; Δz 为沿 z 轴的位移误差。

建立光栅拼接误差与衍射波前关系的理论模型实际上就是建立由光栅拼接误差产生的光程差的数学表达式^[14-16]。虽然由拼接光栅表面至探测器表面有其他光学元件,但是由费马原理可知光线在光学元件中所产生的光程差是相等的。这里认为光栅表面为理想表面,不会产生附加的光程差,因此只需计算由拼接误差在光栅表面产生的光程差即可^[17]。

两拼接光栅间的拼接误差可以表示为:

$$\Delta(m) = H(\cos \alpha + \cos \beta) + \frac{Wm\lambda}{d}, \quad (1)$$

其中: $\Delta(m)$ 为拼接误差引起的光程差, α 为入射光角度, β 为衍射光角度, m 为光栅的衍射级次, λ 为入射光波长, d 为光栅常数。由式(1)可知,光栅拼接五个维度的误差可以细分为共面误差(H)和非共面误差(W)两类,即有:

$$\begin{cases} H = -L \cdot \Delta\theta_x + P \cdot \Delta\theta_y + \Delta z \\ W = L \cdot \Delta\theta_z + \Delta x \end{cases}, \quad (2)$$

其中: L 为光栅的刻线长度, P 为光栅的刻划宽度。根据式(1)和式(2)可以推导出任意的衍射级次和衍射角度、不同口径等情况下拼接误差引起的两光栅之间的光程差。

根据式(1)和式(2)可以推导出每个拼接误差对光程差的影响,如下:

$$\begin{cases} \Delta_1 = L \cdot \Delta\theta_x (\cos \alpha + \cos \beta) \\ \Delta_2 = P \cdot \Delta\theta_y (\cos \alpha + \cos \beta) \\ \Delta_3 = \frac{L \cdot \Delta\theta_z \cdot m\lambda}{d} \\ \Delta_4 = \frac{\Delta x \cdot m\lambda}{d} \\ \Delta_5 = \Delta z \cdot (\cos \alpha + \cos \beta) \end{cases}. \quad (3)$$

由式(3)推导出拼接误差的表达式,如下:

$$\begin{cases} \Delta\theta_x = \frac{\Delta_1}{L \cdot (\cos \alpha + \cos \beta)} \\ \Delta\theta_y = \frac{\Delta_2}{P \cdot (\cos \alpha + \cos \beta)} \\ \Delta\theta_z = \frac{d \cdot \Delta_3}{L \cdot m \cdot \lambda} \\ \Delta x = \frac{d \cdot \Delta_4}{m \cdot \lambda} \\ \Delta z = \frac{\Delta_5}{(\cos \alpha + \cos \beta)} \end{cases}. \quad (4)$$

拼接前单块光栅波前值为 $\lambda/3$, 光栅拼接完成后波前指标为 $\lambda/2$, 光栅拼接要求为 $\lambda/6$ 。光栅使用参数如表 1 所示。

表 1 拼接光路参数

Tab. 1 Parameters of mosaic optical path

参数	光栅尺寸/mm	
	35×35	500×500
光栅刻线数/(line·mm ⁻¹)	600	79
入射光波长/nm	632.8	632.8
入射角 α	30	64
光栅使用级次	-1	-36
拟合波前要求	$\lambda/6$	$\lambda/6$
光栅的刻线长度 L /mm	35	500
光栅的刻划宽度 P /mm	35	500

根据式(4)和表 1 中的参数,计算得到由拼接误差 $\Delta\theta_x, \Delta\theta_y, \Delta\theta_z, \Delta x, \Delta z$ 单独产生拼接波前为 $\lambda/6$ 时, 五维拼接误差的极限值分别为:

$$\begin{cases} \Delta\theta_x = 1.6212 \mu\text{rad} \\ \Delta\theta_y = 1.6212 \mu\text{rad} \\ \Delta\theta_z = 7.9365 \mu\text{rad} \\ \Delta x = 277.7780 \text{ nm} \\ \Delta z = 56.7404 \text{ nm} \end{cases}. \quad (5)$$

根据计算所得的拼接误差极限值,均衡分配每项误差,选取 $\Delta\theta_x$ 的权重因子为 0.3, $\Delta\theta_y$ 的权重因子为 0.48, $\Delta\theta_z$ 的权重因子为 0.1, Δx 的权重因子为 0.02, Δz 的权重因子为 0.1, 以上五维误差的权重因子不唯一。本文计算出的满足拼接要求的五维拼接误差容限如下:

$$\begin{cases} \Delta\theta_x = 0.4867 \mu\text{rad} \\ \Delta\theta_y = 0.7782 \mu\text{rad} \\ \Delta\theta_z = 0.7937 \mu\text{rad} \\ \Delta x = 5.5556 \text{ nm} \\ \Delta z = 5.6740 \text{ nm} \end{cases}. \quad (6)$$

目前,大尺寸中阶梯光栅的市场需求量越来越大,所以拼接大尺寸中阶梯光栅研究越来越重要。中阶梯光栅的参数如表 1 所示,入射角度 α 为 64° ,刻线数为 79 line/mm,拼接光栅尺寸为 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$,在要求光栅拼接波前误差 $\lambda/6$ 的情况下,根据式(4)计算得到每个拼接误差的极

限值分别为:

$$\begin{cases} \Delta\theta_x = 0.240\ 6\ \mu\text{rad} \\ \Delta\theta_y = 0.240\ 6\ \mu\text{rad} \\ \Delta\theta_z = 4.219\ 4\ \mu\text{rad} \\ \Delta x = 58.600\ 0\ \mu\text{m} \\ \Delta z = 120.293\ 8\ \text{nm} \end{cases} \quad (7)$$

按照本文的权重因子,计算出的满足拼接要求的五维拼接误差容限如下:

$$\begin{cases} \Delta\theta_x = 0.072\ 2\ \mu\text{rad} \\ \Delta\theta_y = 0.115\ 5\ \mu\text{rad} \\ \Delta\theta_z = 0.421\ 9\ \mu\text{rad} \\ \Delta x = 1.172\ 0\ \mu\text{m} \\ \Delta z = 12.029\ 4\ \mu\text{m} \end{cases} \quad (8)$$

2.2 基于干涉检验法的复制拼接光栅测量光路设计

为了使光栅拼接后能够复制,待拼接光栅需水平放置,拼接完成后直接在光栅上匀胶复制成一块光栅。光栅复制拼接光路如图 2 所示,该光路将五维拼接误差分离成共面误差和非共面误差,两种误差分别使用衍射级次和零级进行调节。其中虚线部分为衍射级拼接光路,实线部分为零级拼接光路。

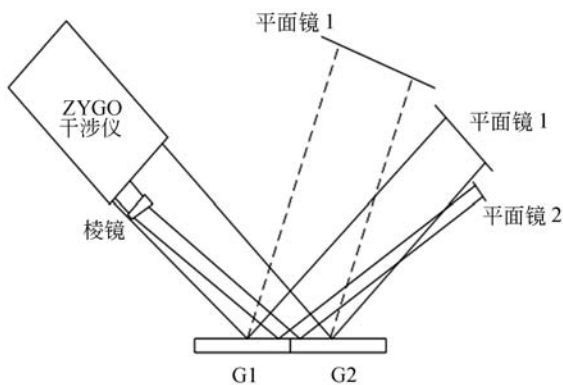


图 2 光栅复制拼接光路简图

Fig. 2 Schematic diagram of grating replication mosaic

使用零级调节非共面误差,按照式(1),式(2)中给定的误差计算方法反演计算出拼接误差,将非共面误差调整到式(6)的范围内,再将光路切换到衍射级次调节共面误差,最后使计算出的光栅五维误差满足式(6)给出的理论误差值,拼接实验完成。

五维误差中,纵向位移误差在测量过程中存在整数倍波长的测量盲点。为了解决这个问题,在零级测量非共面误差光路中增加了一个小棱镜,将光栅的入射光分为两个角度,两束不同的入射光分别经过两个反射镜接收,最后在探测器上显示两部分干涉条纹,以此测量纵向位移 Δz , 进行调节。

2.3 干涉仪角度调节装置设计

根据光栅复制拼接光路的具体需求,设计了如图 3 所示的干涉仪角度调节装置。该装置通过调整干涉仪的倾斜角度来改变光栅拼接的入射光角度,角度调节范围在 $-10^\circ \sim 70^\circ$,可以满足刻线数 1 800, 600, 300 line/mm 等普通闪耀光栅的复制拼接需求,也可以满足大闪耀角度中阶梯光栅的拼接要求。

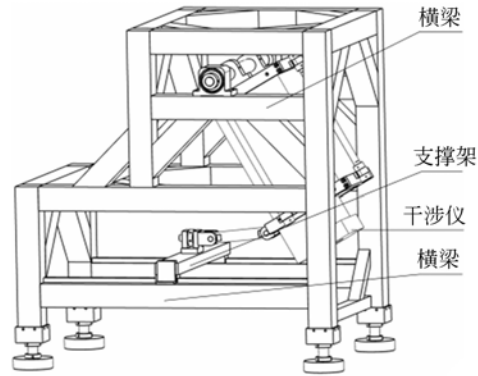


图 3 干涉仪角度调节装置

Fig. 3 Angle adjustment setup for interferometer

如图 3 所示,角度调节装置上下有两组横梁,将干涉仪安装在固定框架上,悬挂在两组横梁中间支撑固定,在下方横梁上由一根支撑梁连接干涉仪,推动支撑梁即可改变干涉仪的出射光角度,以此来满足光栅复制拼接光路中对入射光角度的要求。大量模态分析表明,整个调整结构稳定性良好,适用于光栅复制拼接光路。

拼接光栅波前由探测器接收,利用程序计算两光栅之间存在的程差,式(1)和式(2)计算出拼接误差值,然后进行调整,使光栅的拼接波前满足使用要求。分析式(1)和式(2)可得出结论,对拼接误差计算值产生影响的只有入射光角度 α , 可由光栅方程求出衍射光角度 β , 由干涉仪决定入射光波长 λ 为 632.8 nm, 光栅为理想光栅。而且,本文所设计的光栅复制拼接光路中,干涉仪的角度调节装置决定了光栅复制拼接光路中的入射

光角度,所以,需要对角度调节分度值进行规范和约束以保证光栅拼接复制实验的成功。

3 入射光角度误差影响分析

3.1 光栅拼接

无拼接误差的理想情况下,拼接光栅的干涉条纹如图 4 所示,因拼接过程中两光栅间会存在缝隙,因此仿真过程中也存在拼接缝隙。左侧是基准光栅 G_1 的干涉条纹,右侧是待拼光栅 G_2 的干涉条纹。两块光栅的干涉条纹图样一致,条纹之间没有错位和倾斜,每根条纹的宽度一致。若存在拼接误差,两块光栅的干涉条纹将存在错位、倾斜、宽窄不一的情况,不同拼接误差的表现形式不一。

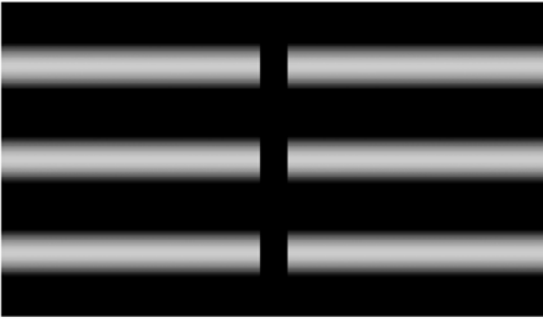


图 4 无拼接误差时拼接光栅的干涉条纹

Fig. 4 Simulation result of two interference fringes without mosaic grating errors

3.2 入射光角度误差对拼接误差的影响

在光栅拼接过程中,将拼接光路按照图 2 搭建完成后,在探测器上接收到两块拼接光栅的干涉条纹,测量干涉条纹,计算出两块光栅之间存在的光程差,应用式(1)和式(2)计算出每个拼接误差的大小。根据计算出的误差量,调节光栅的位置姿态,最后使其满足光栅拼接要求的 $\lambda/6$,并且五维拼接误差的计算值小于式(6)和式(8)中的理论值,光栅拼接完成。

式(1)和式(2)中的入射角 α 为光路设计中的 30° 。如果在干涉仪调节过程中存在微小的角度误差,即入射角度并非准确的 30° ,根据式(4)和计算的拼接误差值式(6)来分析入射角度对于拼接误差反演计算的影响。

根据式(4)可知,五维拼接误差计算值与入射角度有关的 3 个量分别是 $\Delta\theta_x, \Delta\theta_y, \Delta z$ 。光栅尺

尺寸为 $35 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$,分析这三个误差与入射角度之间的关系。在入射光角度存在 1° 误差的情况下,3 个拼接误差的计算值如图 5 所示(彩图见期刊电子版)。

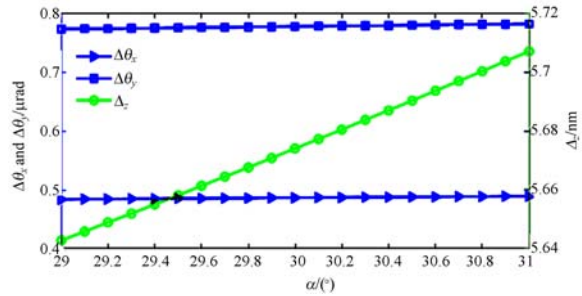


图 5 入射角度误差与拼接误差的关系

Fig. 5 Relations between incident angle and mosaic grating errors

图 5 中圆圈代表 Δz ,方块代表 $\Delta\theta_y$,三角代表 $\Delta\theta_x$ 。入射角度为 30° 时,三个拼接误差为:

$$\begin{cases} \Delta\theta_x = 0.4864 \mu\text{rad} \\ \Delta\theta_y = 0.7782 \mu\text{rad} \\ \Delta z = 5.6750 \text{ nm} \end{cases} \quad (9)$$

实际入射角度为 $29^\circ \sim 31^\circ$,在其值并不确定的情况下,观察 3 个误差计算值的变化量。在入射角度存在 1° 误差时,拼接误差的实际值和计算值之差如下:

$$\begin{cases} \delta\theta_x = 0.0028 \mu\text{rad} \\ \delta\theta_y = 0.0047 \mu\text{rad} \\ \delta z = 0.0322 \text{ nm} \end{cases} \quad (10)$$

根据式(1)和式(2)计算出,拼接误差计算值与实际值间的误差所产生的波前误差为 $8.6412 \times 10^{-4} \lambda$,即为 0.5468 nm ;而拼接要求为 $\lambda/6$,即为 105.4667 nm ,所以入射角度存在误差为 1° 的情况下,仍可满足拼接要求。

当大口径中阶梯光栅的尺寸为 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 时,就此分析这 3 个误差 $\Delta\theta_x, \Delta\theta_y, \Delta z$ 与入射角度之间的关系。在入射光角度为 $63^\circ \sim 65^\circ$ 的情况下,3 个拼接误差的计算值如图 6 所示(彩图见期刊电子版)。

图中圆圈代表 Δz ,方块代表 $\Delta\theta_y$,三角代表 $\Delta\theta_x$ 。入射角度为 64° 时,3 个拼接误差值为:

$$\begin{cases} \Delta\theta_x = 0.0722 \mu\text{rad} \\ \Delta\theta_y = 0.1155 \mu\text{rad} \\ \Delta z = 12.0294 \text{ nm} \end{cases} \quad (11)$$

实际入射角度在 $63^\circ \sim 65^\circ$ 之间,在其值并不

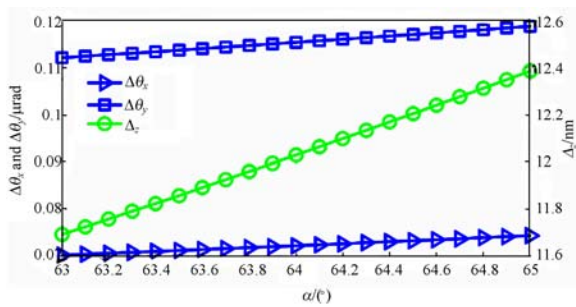


图 6 入射角度误差与拼接误差关系

Fig. 6 Relation between the incident angle and the mosaic grating errors

确定的情况下,观察 3 个误差计算值的变化量。在入射光角度存在 1° 误差的情况下,拼接误差的实际值和计算值之差为:

$$\begin{cases} \delta\theta_x = 0.0021 \mu\text{rad} \\ \delta\theta_y = 0.0033 \mu\text{rad} \\ \delta z = 0.3482 \text{ nm} \end{cases} \quad (12)$$

根据式(1)和式(2),光栅尺寸为 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$,拼接误差计算值与实际值的误差产生的波前误差为 0.0041λ ,即为 2.5901 nm ;而拼接要求为 $\lambda/6$,即为 105.4667 nm ,所以在入射角度误差为 1° 的情况下,仍可满足拼接要求。

根据以上分析和计算,在入射光角度存在 1° 误差的情况下,拼接误差的计算值和实际值之间的误差不会影响光栅拼接结果,据此设计干涉仪角度调节装置的角度调节分度:干涉仪角度调节

误差在 1° 范围内即可满足光栅拼接要求,可将角度调节分度值设计为 1° 。为了更好地满足拼接要求,在不增加机械设计和制作难度的基础上可以将角度调节装置的分度值设置为 0.1° 。

4 结 论

本文建立了拼接误差模型,分析了五维拼接误差的容限要求,设计了一种基于干涉检验法的复制拼接光栅测量光路结构,根据误差模型和拼接光路分析了 $35 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$ 和 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 光栅复制拼接光路中入射角度引起的误差,结果表明: $35 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$ 的光栅复制拼接光路中,入射角度误差为 1° ,拼接误差的计算值与实际值之差为: $\delta\theta_x = 0.0028 \mu\text{rad}$, $\delta\theta_y = 0.0047 \mu\text{rad}$, $\delta z = 0.0322 \text{ nm}$,此误差对波前产生 0.5468 nm 的误差; $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 的大尺寸中阶梯光栅复制拼接光路中,入射角度误差为 1° 的情况下,拼接误差的计算值与实际值之差为: $\delta\theta_x = 0.0021 \mu\text{rad}$, $\delta\theta_y = 0.0033 \mu\text{rad}$, $\delta z = 0.3482 \text{ nm}$,引起的波前误差为 2.5901 nm 。由上述两块光栅分析结果表明,入射角误差在 1° 满足光栅拼接对入射角的要求。根据光路结构和误差分析结果,为了更好地满足拼接要求,在不增加机械设计和制作难度的基础上可以将角度调节装置的分度值设置为 0.1° 。

参考文献:

- [1] 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]. *SPIE*, 2014, 9147: 91478D.
- [2] SZENTGYORGYI A H, CHEIMETS P, ENG R, *et al.*. Hectochelle: a multiobject echelle spectrograph for the converted MMT[J]. *SPIE*, 1998, 3355: 242-252.
- [3] DEKKER H, DODORICO S. UVES, the UV-visual echelle spectrograph for the VLT[J]. *The Messenger*, 1992, 70: 13-17.
- [4] 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 France*, 2006, 133(1): 75-80.
- [5] ZUEGEL J D, BORNEIS S, BARTY C, *et al.*. Laser challenges for fast ignition[J]. *Fusion Science and Technology*, 2006, 49(3): 453-482.
- [6] BLANCHOT N, BIGNON E, COÏC H, *et al.*. Multi-petawatt high-energy laser project on the LIL facility in Aquitaine[J]. *SPIE*, 2006, 5975: 59750C.
- [7] 于海利, 齐向东, 巴音贺希格, 等. 利用泽尼克系数求取衍射光栅的分辨本领[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(1): 264-267.

YU H L, QI X D, BAYANHESHIG, *et al.*. Solving resolution of diffraction gratings using coefficients of Zernike polynomials[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(1): 264-267. (in Chi-

- nese)
- [8] 李晓天, 巴音贺希格, 齐向东, 等. 机械刻划光栅的刻线弯曲与位置误差对平面光栅性能影响及其修正方法[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 232-239.
LI X T, BAYANHESHIG, QI X D, *et al.*. Influence and revising method of machine-ruling grating line's curve error, location error on plane grating' performance[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(3):232-239. (in Chinese)
- [9] 杨超, 于海利, 张善文, 等. 光栅刻划机衍射波前质量的主动控制校正方法[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0108002.
YANG CH, YU H L, ZHANG SH W, *et al.*. Active control technology to correct the quality of the grating wave-front[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(1): 0108002. (in Chinese)
- [10] BREALEY G A, FLETCHER J M, GRUNDMAN W A, *et al.*. Adjustable mosaic grating mounts[J]. *SPIE*, 1981, 240: 225-229.
- [11] BLASIAK T, ZHELEZNYAK S. History and construction of large mosaic diffraction gratings [J]. *SPIE*, 2002, 4485: 370-377.
- [12] HARIMOTO T. Far-field pattern analysis for an array grating compressor[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004, 43(4A): 1362-1365.
- [13] QIAO J, KALB A, GUARDALBEN M J, *et al.*. Large-aperture grating tiling by interferometry for petawatt chirped-pulse-amplification systems [J]. *Optics Express*, 2007, 15(15): 9562-9574.
- [14] 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.
LU Y X, QI X D, MI X T, *et al.*. Detection and calculation of mosaic grating error based on wave-front method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0505001. (in Chinese)
- [15] SHI L, ZENG L J, LI L F. Fabrication of optical mosaic gratings with phase and attitude adjustments employing latent fringes and a red-wavelength dual-beam interferometer [J]. *Optics Express*, 2009, 17(24): 21530-21543.
- [16] SHI L, ZENG L J. Fabrication of optical mosaic gratings by consecutive holographic exposures employing a latent-fringe based alignment technique [J]. *SPIE*, 2010, 7848: 78480S.
- [17] SHI L, ZENG L J. Fabrication of optical mosaic gratings: a self-referencing alignment method [J]. *Optical Express*, 2011, 19(10): 8985-8993.
- [18] LU Y X, QI X D, LI X T, *et al.*. Removal of all mosaic grating errors in a single-interferometer system by a phase-difference reference window [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(28): 7997-8002.

作者简介:



丛 敏(1991—),女,吉林人,博士研究生,主要从事光栅拼接方面的研究。E-mail:695861544@qq.com

导师简介:



齐向东(1965—),男,吉林辽源人,研究员,博士生导师,主要从事光栅刻划机及衍射光栅研制方面的研究。E-mail: chinagrating@263.net