

文章编号: 0258-7025(2007)09-1222-05

光栅拼接旋转偏差实时监测调节实验

杨学东, 夏 兰, 马伟新, 戴亚平

(上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

摘要 为了获得拍瓦激光系统需要的大口径高破坏阈值光栅压缩机,用多块电介质膜光栅进行拼接是解决问题的有效方法。旋转偏差需要控制在 $1\ \mu\text{rad}$ 内,才能避免拼接误差带来的时空特性影响,因此利用零级光和一级衍射光对旋转偏差进行独立监测,采用二次曲线拟合法对干涉条纹中心位置进行高精度测量,测量精度可达 $0.1\ \text{pixel}$,检测到旋转偏差约 $0.5\ \mu\text{rad}$;高精度的要求受调节机构和环境的限制,需实时监测调节来保持光栅姿态,将偏转量反馈给光栅调节装置保持拼接子光栅的位置,可长时间保持在 $0.5\ \mu\text{rad}$ 偏差内。实验结果表明,光栅拼接旋转偏差实时监测调节能满足拼接高精度和长时间稳定的要求。

关键词 激光技术;大口径光栅;拼接光栅;实时调节

中图分类号 TN 247 **文献标识码** A

Experiment of Real-Time Monitoring and Adjusting of Rotation Error about Tiled Gratings

YANG Xue-dong, XIA Lan, MA Wei-xin, DAI Ya-ping

(Shanghai Institute of Laser Plasma, Shanghai 201800, China)

Abstract To obtain a large-aperture high damage threshold grating compressor for a perawatt laser system, the multi-piece dielectric membrane tiled grating is an effective method. In order to avoid the influence of tiling error on the temporal and spatial characteristics of grating, the rotation error needs to be controlled in $1\ \mu\text{rad}$. Therefore, the zero-order and first-order diffracting light is used to monitor the rotation error independently. $0.1\ \text{pixel}$ accuracy can be achieved by location of the center of fringe with quadratic curve-fitting, which can detect rotation error about $0.5\ \mu\text{rad}$. For the requirement of high precision is confined by the controlling device and environment, real-time monitoring and adjusting are necessary to maintain the grating posture, and feedback the deflection to the installations to maintain the sub-grating position. The deviation can be maintained within $0.5\ \mu\text{rad}$ for a long time. Experiments show the rotation error real-time monitoring and adjusting about tiled gratings can meet precision and stability requirements.

Key words laser technique; large-aperture grating; tiled grating; real-time adjustment

1 引言

大口径光栅在高功率激光发展中扮演着重要的角色,即使全电介质膜光栅的破坏阈值对于飞秒激光也仅在 $0.5\ \text{J}/\text{cm}^2$ 左右^[1,2],拍瓦、数千焦耳能量激光系统需要米量级尺寸的光栅,因此用拼接技术获得大面积光栅是很有前景的技术^[3,4]。

拼接光栅设计中偏差量对压缩脉冲的展宽量须控制在 25% 以内^[5],子光栅旋转偏差要控制在

$1\ \mu\text{rad}$ 内。拼接的高精度要求,容易受环境扰动和调节装置稳定性的限制,不能长时间保持在精度范围内,在高功率激光系统长时间运行中不能满足要求。同时旋转偏差控制在 $1\ \mu\text{rad}$,远场焦斑才不会分离,从而可忽略旋转偏差对检测拼缝和面垂直方向平移导致的相位差影响。旋转偏差控制在精度范围内是实现光栅二维平移维度更高精度拼接的基础和前提。通过拼接光栅的零级反射光和一级衍射光

收稿日期:2007-01-08;收到修改稿日期:2007-05-24

基金项目:国家863计划(2006AA804207)资助项目。

作者简介:杨学东(1978—),男,四川人,硕士研究生,主要从事光栅拼接方面的研究。E-mail:blueleaf_y@sohu.com

导师简介:马伟新(1965—),男,研究员,硕士生导师,主要从事强激光技术的研究。E-mail:Herrma@sohu.com

实现对旋转面平行和栅线平行的分别监测,与利用一级衍射光及其远场焦斑处理更利于自动检测反馈调节,能实现更高的测量精度,满足旋转偏差快速实时的检测要求。

2 实时监测调节的实现

大口径拼接光栅的实现关键在于定位方便、准确可靠的检测方法和各小光栅间高精度的实现。利用拼接光栅零级反射光和一级衍射光的干涉场实现绕旋转偏差的独立检测,而拼缝和面垂直方向的平移对干涉场的条纹间距不影响。将检测装置得到的图像送入计算机进行偏差分析,得到的每个维度偏转量传送给压电陶瓷微调装置实现实时监测调节。

2.1 光学检测方法

通常仅利用一级衍射光干涉场来监测三个轴向上的偏转,条纹间距不能反应三个维度的信息,而条纹形状粗细变化又难以定量准确地分析,故以拼接光栅的零级反射光和一级衍射光的干涉场来分离:零级反射光干涉场实现对光栅面平行的检测,一级衍射光实现对栅线平行的检测;通过条纹横、纵向的间距得到相应自由度的偏转情况。

光路示意图如图 1 所示,扩束光以利特罗(Littrow)角 θ 入射到拼接光栅 G_1, G_2 上,经分束镜 BS_1 后一部分光与光栅反射光发生干涉,经望远镜系统 T_1 成像到 CCD_1 上,一部分光经分束镜 BS_2 后也以利特罗角入射到光栅 G_3 上发生衍射与 G_1 返回的一级衍射光发生干涉,经望远镜系统 T_2 成像到 CCD_2 上。 G_1, G_2, G_3 均为相同参数的光栅。调节 M_1 绕 x 轴旋转 δ 及 G_3 绕 z 轴旋转 δ_1 。CCD 所在接收面与光栅及参考光、被检测光关系如图 2 所示。 G_2 绕 x 轴顺时针旋转角为 α , 绕 y 轴顺时针旋转角

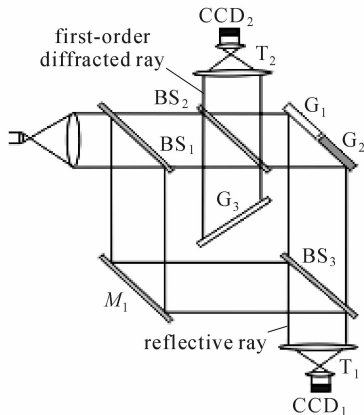


图 1 实验光路

Fig. 1 Experimental light path

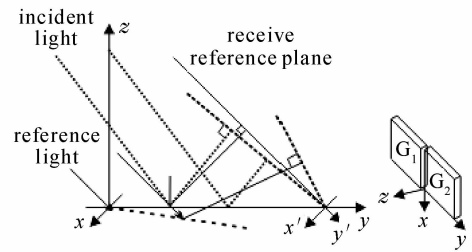


图 2 光栅绕 x 轴旋转导致的光程差示意图

Fig. 2 Optical path difference induced by grating rotation around the x -axis

为 β 。栅线旋转对零级光无影响,可得光栅 G_2 的条纹方程为

$$k\lambda = \Delta L_0 - x' \sin 2\beta - y' \sin(2\delta + 2\beta), \quad (1)$$

式中 ΔL_0 为参考光与被测光之间的固定光程差。若光栅 G_1, G_2 面平行,光栅 G_2 面绕 z 轴旋转 γ , 由光栅的空间衍射方程^[6,7],可得到 G_2 衍射光条纹方程为

$$k\lambda = \Delta L_1 - \sin(2\gamma + 2\delta_1)x', \quad (2)$$

式中 ΔL_1 为参考光与被测光之间的固定光程差。通过测得零级光干涉场横、纵向的条纹宽度,通过(1)式即可得到光栅面 2 个旋转角度的偏转量;在 G_1, G_2 光栅面调节达到平行后,得到一级衍射光干涉条纹宽度,通过(2)式得到 G_2 栅线旋转的角度,实现旋转偏差的检测。

2.2 调节装置

调节需要亚微弧度量级的精度,普通的机械装置达不到精度要求,采用压电陶瓷串联方式实现旋转偏差的精细调节。但由于压电驱动器本身固有的特性,如蠕变等以及环境的影响,使输出位移随时间而缓慢变化,因此需要实时监测调节。

2.3 实时监测的实现

将光学检测装置得到的干涉图送入计算机,利用程序对图像处理得到旋转偏差量,将偏移量换算成需要调节的电压值传送给驱动电源,将光栅位置保持在精度范围内,循环执行可保证位置的稳定性。

光学检测装置将干涉图成像在 CCD 上,利用图像采集卡采集干涉图像送入计算机进行处理。采集到的原始图像因噪声等影响需要先做预处理,去除高频噪声和孤立的噪声点以提高处理的精度。图像预处理后,需要对干涉条纹的中心位置高精度地检测,要处理的对象是简单的直条纹,采用拟合方式^[8,9]可以满足测量精度的要求(计算量小)。

利用 VC++ 6.0 编写主程序, MATLAB 作为

计算引擎运行在后台,可以方便地调用 MATLAB 的图像处理函数,以便实验中调试^[10]。MATLAB 调用编好的文件,驱动 CCD 采集图像处理,通过 VC++ 主程序调用压电陶瓷电源的动态链接库文件,将需要调节的电压值传给相应调节维度的电源调节光栅回到正常位置。

3 实验与结果

3.1 检测方法的验证

实验采用三块 100 mm×100 mm,1200 lp/mm 的铝光栅,CCD 分辨率为 768 pixel×576 pixel,压电陶瓷调节电源 PI E-665 作为微调驱动源,采用 632.8 nm 的氦氖气体激光经扩束准直为 φ300 mm 的光束作为实验检测光源,远离 1053 nm 工作波长,以获得较强的零级反射光。

由(1)式可知当 β 非常小时,条纹倾角非常小,为处理方便以斜率 1 进行方向扫描得到条纹宽度

$$d_1 = \lambda \sin \nu / [\sin 2\beta \sin(45^\circ + \nu)], \quad (3)$$

式中 $\nu = \arctan(\sin 2\beta / \sin 2\delta)$, 为条纹与 x 轴的夹角。由(3)式通过逐次逼近计算得到绕 y 轴的偏转角 β。

通过理论计算得到的条纹间距与偏转角度的关系曲线和手动调节压电陶瓷电源转动的角度与实测得到的条纹间距的关系曲线进行比较,如图 3,4 所示。由图可知,实测曲线关系与理论计算在几个微弧度范围内吻合得相当好,当角度增大时,由于 x, y 轴有轻微的联动现象导致与理论计算值有一定的偏移(z 轴方向基本没有联动现象,与理论计算曲线基本重合,故未列图)。

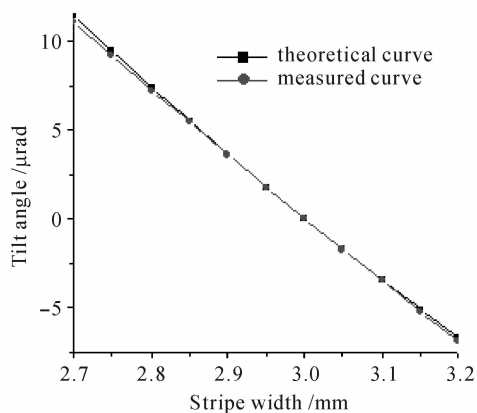


图 3 绕 x 轴偏转角与纵向条纹宽度的关系
Fig. 3 Relation of vertical stripe width and tilt angle around x axis

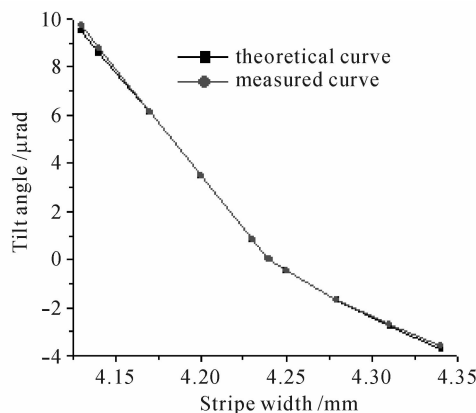


图 4 绕 y 轴偏转角与 45° 角方向条纹的关系
Fig. 4 Relation of 45° directional stripe width and tilt angle around y axis

3.2 长时间稳定性分析

通过验证,采用设计的光学检测方法得到的结果与实测值基本吻合,可用作在线调节的实时监测。通过 CCD₁ 采集零级反射光的干涉图像,调节 x 轴的偏转角,检测调节达到允许范围内后再调节 y 轴,直到面平行调节好;最后进行 z 轴方向的调节,如此循环检测调节。

如图 5 所示,在调节过程中 x, y 轴因存在轻微的联动现象,需要调节多次才能使面平行达到要求。保持程序运行,则程序一直处于检测状态,发生偏移即可调回到正常位置,在长时间的运行下稳定情况良好。如图 6 所示,各偏转角控制在误差范围内。

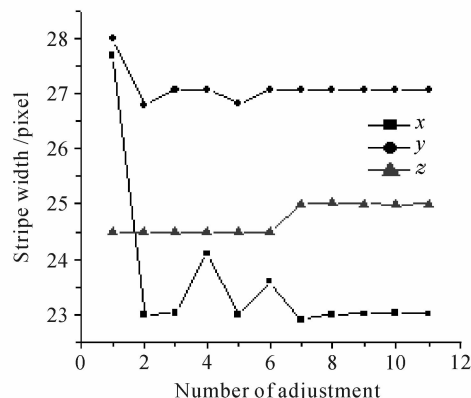


图 5 启动闭环,各维条纹的变化情况
Fig. 5 Change in the dimensions of stripe width after loop starting

图 7 表示在调节达到最小误差后,关闭程序数小时后,拼接光栅位置变动较明显,超出精度要求范围,若启动程序,则可逐渐校正到精度范围内,实时监测调节在长时间内保持姿态的稳定能满足激光系

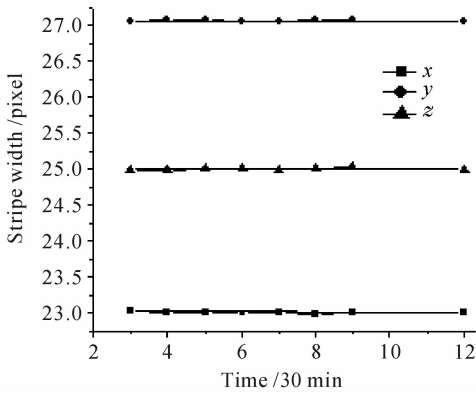


图 6 保持实时监测调节,各维条纹的宽度变化
Fig. 6 Change of stripe width in the dimensions with real time regulation

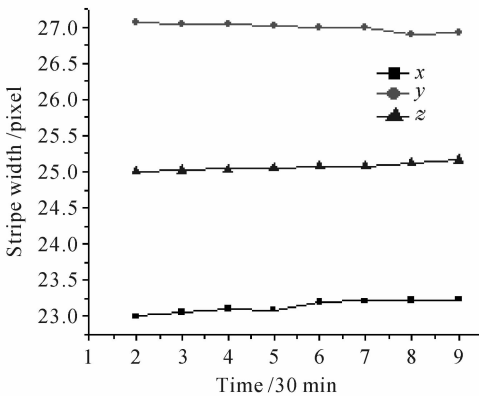


图 7 关闭闭环,各维条纹的变化情况
Fig. 7 Change of stripe width in dimensions after loop is closed

统长时间运行的要求。

3.3 精度分析和讨论

压电陶瓷可以达到亚微弧度的调节精度,只要检测装置检测精度能达到拼接光栅精度范围的要求,就能通过实时监测调节保持光栅位置的稳定。

经过理论计算要保证远场焦斑不因光束方向偏离而发生分离,旋转偏差需控制在 $1 \mu\text{rad}$ 内,才能消除对光束带来的影响。

表 1 为某次干涉图对 10 个不同纵向位置的 25 个条纹周期测量得到的均值和标准差。由于光源质量和环境扰动影响干涉条纹的质量及测量精度,多次测量不同的干涉条纹,得到最大标准差不超过 0.1 pixel。

零级光参考条纹宽度 d_0 约 3.0 mm(23.0 pixel, 一级衍射光参考条纹宽度约 3.26 mm),在参考条纹宽度附近最大测量误差 4.3%,子光栅纵向条纹宽度 d_x 为 $3.0 \pm 0.013 \text{ mm}$, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$,角度检测

表 1 条纹间距平均值及其标准差

Table 1 Average fringe interval and standard deviation

		pixel	
Average fringe interval	Standard deviation σ	Average fringe interval	Standard deviation σ
22.42	0.059	22.37	0.052
22.43	0.048	22.35	0.035
22.39	0.068	22.36	0.062
22.40	0.025	22.29	0.051
22.38	0.066	22.33	0.063

精度:

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(\arcsin \frac{\lambda}{d_0} - \arcsin \frac{\lambda}{d_x} \right) \approx 0.46 \mu\text{rad}, \tag{4}$$

当光栅旋转偏差约 $0.5 \mu\text{rad}$ 时,通过光学检测装置检测到偏转,通过微调机构进行校正,检测精度高于要求的拼接精度,能达到旋转偏差要求的拼接精度和稳定性。

4 结 论

利用拼接光栅的零级反射光 and 一级衍射光的干涉场实现对拼接光栅旋转偏差的监测,通过二次拟合曲线方式检测干涉条纹的中心位置,精度可达到 0.1 pixel 的亚像素,满足光栅拼接测量的要求。设计的光学检测装置检测精度达到 $0.5 \mu\text{rad}$,能监测到光栅位置的微小移动。采用压电陶瓷作为拼接光栅的微调机构,可达到亚微弧度的调节精度,实现了拼接光栅旋转偏差的高精度和姿态长时间稳定的要求,也为进行更高精度的拼缝和面垂直方向调节实验提供了条件。

参 考 文 献

- 1 M. D. Perry, R. D. Boyd, J. A. Britten. High-efficiency multilayer dielectric diffraction grating [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(8):940~942
- 2 Kong Weijin, Fan Zhengxiu, Shao Jianda. Development of all dielectric pulse compressor grating [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(1):32~36
- 3 孔伟金,范正修,邵建达. 全电介质脉宽压缩光栅的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(1):32~36
- 4 Fan Weijun, Zhou Bifang, Wang Haitao et al.. Research of Fourier phase in optical synthetic-aperture imaging technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3):408~412
- 5 范伟军,周必方,王海涛等. 光学综合孔径成像中的傅里叶相位研究 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(3):408~412
- 6 Wang Zhile, Zhang Wei, Long Funian. Image quality evaluation for diffraction-limited optical synthetic aperture

- system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1):35~39
王治乐,张 伟,龙夫年. 衍射受限光学合成孔径成像系统像质评价[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1):35~39
- 5 Tiejun Zhang, Motoki Yonemura, Yoshiaki Kato. An array-grating compressor for high-power chirped-pulse amplification lasers [J]. *Opt. Commun.*, 1998, **145**:367~376
- 6 Zhao Bo, Hao Defu. Tiling to make large area diffraction grating [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, **8**(5):503~507
赵 博,郝德阜. 用拼接法获取大面积衍射光栅[J]. *光学精密工程*, 2000, **8**(5):503~507
- 7 Wu Guoan. Spectroscopy Instrument Design [M]. Beijing: Science Press, 1978. 109~111
吴国安. 光谱仪器设计[M]. 北京:科学出版社, 1978. 109~111
- 8 He Junji, Zhang Guangjun. Study on method for processing image of strip in structured-light 3D vision measuring technique [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2003, **29**(7): 593~597
贺俊吉,张广军. 结构光三维视觉检测中光条图像处理方法研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 2003, **29**(7):593~597
- 9 Liu Lishuang, Zhang Yao, Lu Huiqing *et al.*. A fast sub-pixel edge detection method for images [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2005, **16**(8):993~996
刘力双,张 铤,卢慧卿 等. 图像的快速亚像素边缘检测方法[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(8):993~996
- 10 Xu Fei. MATLAB Application of Image Processing [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2002. 1~2
徐 飞. MATLAB应用图像处理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2002. 1~2

《中国激光》“综述”栏目征稿启事

《中国激光》创刊 30 多年以来,以反映我国激光领域的研究进展和成果为己任,见证了中国激光领域的发展历程和重大突破,在读者中树立了较高的学术地位,形成了较为成熟的办刊风格。近年来,激光研究的领域取得了令人瞩目的成就,在我国科技体系与国民经济中占据了越来越重要的地位,为了给广大研究人员提供更丰富、更全面的信息,应部分读者的要求,本刊增辟“综述”栏目,刊发综述类文章,反映激光领域热点专题的研究进展或动态。

具体要求:综述应尽可能就激光领域的研究热点结合最新的研究成果进行论述,涉及范围不需太大,但必须要有一定的深度和时间性,能反映出这一专题的历史背景、研究现状和发展趋势。文章必须有作者自己的研究经验或体会,所介绍的工作应尽量适合国内已开展的工作或将要开展工作的需要。

综述的写作格式一般包括四部分,即引言、正文、结论、参考文献。

引言,要用简明扼要的文字说明写作的目的、必要性、有关概念的定义,综述的范围,阐述有关问题的现状和动态,以及目前对主要问题争论的焦点等。引言一般以 200~300 字为宜,不宜超过 500 字。

正文,是综述的重点,应能较好地表达综合的内容。正文主要包括论据和论证两个部分,通过提出问题、分析问题和解决问题,比较不同学者对同一问题的看法及其理论依据,进一步阐明问题的来龙去脉和作者自己的见解。当然,作者也可从问题发生的历史背景、目前现状、发展方向等提出文献的不同观点。正文的重要部分应包括作者自己的工作实践。正文部分可根据内容的多少分为若干个小标题分别论述。

结论,是对综述正文部分作扼要的总结,作者应对各种观点进行综合评价,提出自己的看法,指出存在的问题及今后发展的方向和展望。

参考文献,是综述的重要组成部分。一般参考文献的多少可体现作者阅读文献的广度和深度,应以最近 3~5 年内的最新文献为主。

文章篇幅一般在 1 万字左右,一经录用,从速发表,稿酬从优。

《中国激光》编辑部