

# 变线距光栅线密度的干涉测量\*

朱向冰<sup>1,2</sup> 付绍军<sup>1</sup> 叶为全<sup>1</sup> 何世平<sup>3</sup> 陈 瑾<sup>2</sup> 刘 颖<sup>1</sup> 徐向东<sup>1</sup>, 洪义麟<sup>1</sup>

1 中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 合肥 230029  
2 安徽师范大学物理系, 芜湖 241000  
3 中国科学技术大学工程科学学院, 合肥 230027

**摘要:** 变线距光栅在同步辐射装置、激光核聚变装置上有着广阔的应用前景, 它的制作和检测方法尚未成熟。用干涉法测量变线距光栅的线密度, 给出了测量原理、实验中的光路、数据处理的方法、测量结果。在待测光栅表面, 衍射光干涉条纹的数量和密度是入射光干涉条纹和倍增后光栅的刻线之差。采用共光路的方案, 使光路具有很强的抗干扰能力。用中值滤波消除干涉图像中的干扰。针对不同的干涉条纹, 讨论和比较了两种测量方法, 提出相对密度不变性。证明了干涉法完全可以用于变线距光栅的线密度测量, 并能达到一定的精度, 初步解决了检测问题, 认为这种方法也可以用于变线密度光栅的加工中。

**关键词:** 物理光学; 变线距光栅; 线密度; 干涉测量

中图分类号: O436.1 文献标识码: A

## 1 引 言

变线距光栅能够自动聚焦和消像差, 所以单色仪采用变线距光栅可以节省光学元件、减少杂散光、简化单色仪的设计和加工、提高单色仪的分辨本领, 但是由于受到制造和检测技术的限制, 长期以来一直得不到发展。现代核科学、天文学在不断发展, 对分光仪器提出了越来越高的要求, 分光仪器的设计加工变得非常复杂, 因而在同步辐射装置、惯性约束核聚变诊断、太空探测器中变线距光栅有着广阔的应用前景<sup>[1~4]</sup>。这类光栅在上个世纪初就有人提出来了, 近三十年来, 由于制造工艺、检测技术的发展和同步辐射的迫切需要, 这种光栅才逐步被采用。

迄今为止很少有文献报道变线距光栅的线密度检测方法<sup>[5]</sup>, 变线距光栅的检测难点在于精确的测量线密度, 并找出它的变化规律, 而光栅的其它参量可以用检测普通光栅的方法来测量。干涉法是研究和测量各种光学元件性能的基本方法, 原则上可以检测各种光学参量, 本文将这种方法应用到光栅线密度的检测中, 介绍变线距光栅线密度或刻线间距的典型表达方式和测量原理, 给出实用的光路和数据处理方法, 提出相对密度不变性, 给出测量结果。

## 2 测量原理和光路

对刻线分布检测最简单的方法是用显微镜观察, 近几年发展的原子力显微镜可以直接观察刻线结构, 对刻线的深度和宽度进行测量, 但是这种方法只能测几条刻线, 难以对整块光栅作全面的评价。衍射角和光栅的密度有关, 如能准确的测量光栅表面各点衍射角, 就可以算出光栅的密度。国外最近几年发展起来的长程面形仪(光笔式干涉仪)可以用来测衍射角<sup>[6]</sup>, 这种方法简单可靠, 但是一般只适于检测已加工好的成品, 难以实现在线检测。日本的光子工厂采用 He-Ne 光扫描光栅表面来测量衍射角<sup>[7]</sup>。陈镛、王秋平等人用测量自准直角的方式来测量光栅密度<sup>[8]</sup>。干涉法早就用到光栅检测中了, 如用泰曼干涉仪检测凹面光栅和平面等线距光栅, 在变线距光栅的测量中, 干涉法具有一些优点, 下面针对变线距光栅的情况, 探讨具体的干涉方法。

### 2.1 待测量

在讨论测量之前, 首先看看光栅密度的表达式, 变线距光栅的密度一般用级数形式来表征<sup>[9]</sup>, Benoit Deville, Francis Bonnemason<sup>[10]</sup>等使用下列形式表示光栅的线密度  $n$

$$n = \frac{dN}{dy} = \sum_{i=0}^{\infty} a_i y^i = a_0 + a_1 y + a_2 y^2 + a_3 y^3 + a_4 y^4 + \dots, \quad (1)$$

光栅中心是坐标原点, 法线为  $x$  轴,  $y$  轴基本上垂直

\* 国家自然科学基金(10272098)资助课题。

E-mail: readword@263.net

收稿日期: 2002-07-08; 收到修改稿日期: 2002-12-02

于光栅刻线,  $N$  是坐标原点到表面任意点之间的刻线总数,  $a_0$  是坐标原点处的光栅密度,  $a_1, a_2, a_3, \dots$  反映了光栅密度的变化特性, 一般在实际测量中最多只要求测到  $a_3, a_4$ 。

## 2.2 测量光路

检测光路见图 1<sup>[9]</sup>,  $G$  为待测光栅, 它的刻线在  $yz$  平面上的投影基本上平行于  $z$  轴,  $C$  是入射波, 一部分直接照到光栅表面, 其余部分被平面镜  $M_2$  反射形成另一路入射波  $D$  (图中不便画出), 恰当的选择入射角, 使  $C, D$  的衍射光基本上沿相同方向出射, 两衍射光将在光栅表面形成较宽的干涉条纹。为了处理数据和调整光路方便, 一般情况下让  $C, D$  对称入射到光栅上, 并选择  $x$  轴方向作为衍射光的传播方向。

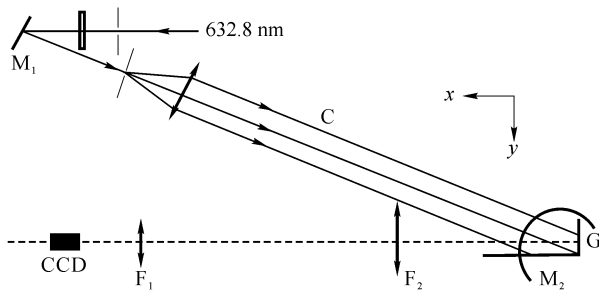


Fig. 1 Schematic of the measurement

在该光路中, 激光通过衰减片, 使 CCD 上的光强恰到好处, 反射镜  $M_1$  改变光束的方向, 激光通过显微物镜、针孔和准直镜后, 基本上是平面波。待测光栅  $G$  和反射镜  $M_2$  互相垂直地放在转台上, 光栅和反射镜的交线垂直于入射平行光  $C$ , 并在光束  $C$  的中心, 该交线还要平行于光栅的刻线, 尽量和旋转台的转轴重合。凸透镜  $F_1, F_2$  和 CCD 构成干涉图像采集系统,  $F_1$  和  $F_2$  共焦点, 光栅和 CCD 分别在它们的焦平面上, 光栅表面有很多级衍射光以及两束入射光, 因为其它光束的角度偏差太远, 都不在  $F_1, F_2$  的范围内, 只有选定的两衍射光的干涉图样才能被 CCD 采集到。在  $F_1, F_2$  中间的焦点处加上一个直径约为 1 mm 的小孔可以大大抑制干扰和噪声, 达到改善图像的目的。

## 2.3 原理

两衍射波分别为  $m_C, m_D$  级, 它们在光栅表面  $S$  点干涉场的光强是

$$I(y, z) = I'_C + I'_D + 2\sqrt{I'_C I'_D} \cos 2\pi K, \quad (2)$$

$I'_C$  和  $I'_D$  反映了两衍射光的强度,

$$K = \frac{1}{\lambda} [(\overline{P_C S} - \overline{P_D S}) - N(m_D - m_C)\lambda]$$

是干涉条纹的级次,  $P_C, P_D$  分别是入射光  $C, D$  等平面上的点, 经过它们的光线入射到光栅表面的  $S$  点  $\overline{P_C S}, \overline{P_D S}$  是直线距离,  $N$  是从坐标原点到  $S$  点之间的刻线数。

用  $K_{PS} = \frac{1}{\lambda} (\overline{P_C S} - \overline{P_D S})$  表示  $K$  中几何距离的作用, 用  $K_{Nm} = N(m_D - m_C)$  表示  $K$  中光栅刻线的作用, 则  $K = K_{PS} - K_{Nm}$ 。对  $K$  求导数, 就得到干涉条纹的密度

$$\frac{dK}{dy} = \frac{dK_{PS}}{dy} - (m_D - m_C) \frac{dN}{dy}. \quad (3)$$

可以将  $K_{PS}$  看作一个虚拟的光栅的刻线, 它的密度  $\frac{dK_{PS}}{dy}$  就是  $C, D$  两入射光干涉条纹的密度,  $N(m_D - m_C)$  相当于将待测光栅的刻线增加  $(m_D - m_C)$  倍, 衍射光在光栅表面的干涉条纹的数量和密度是它们两者之差。测量出干涉条纹的位置和级次, 计算出干涉条纹的密度  $\frac{dK}{dy}$ , 根据入射角求出  $\frac{dK_{PS}}{dy}$ , 根据衍射级次就能求出待测光栅密度  $\frac{dN}{dy}$  和  $a_0, a_1, a_2, a_3, \dots$ 。

## 3 干涉图像和数据处理

衍射级次和虚栅的密度比较好算, 由于各种原因, 通过干涉图像测量干涉条纹的位置和密度比较难, 下面介绍图像和数据处理。

### 3.1 减少干扰和噪声

实验中采集了很多干涉图像, 可以发现一些现象<sup>[11]</sup>: 1) 干涉条纹图有大量的杂散信号, 并且叠加有横向条纹; 2) 有几组形状相同的干涉条纹, 其中一组比较强, 其它比较弱; 3) 干涉图像在大范围内强度不均匀; 4) 干涉条纹是环形的; 5) 入射角等有关参量连续改变时, 干涉图像特殊的变化规律。其中 1)、2) 和 3) 是由于噪声和干扰引起的, 会严重影响干涉条纹的自动判读, 限于篇幅本文不再逐一解释这些现象和规律, 仅简单介绍数据处理方法。图 2 是一幅干涉图

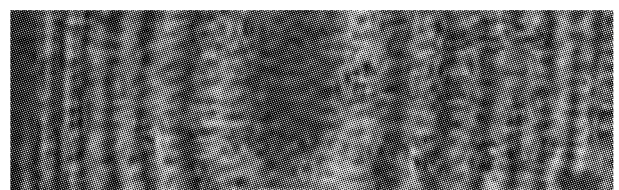


Fig. 2 The pattern of interference when incident angle is 0.3070 rad

像,入射角为  $0.3070 \text{ rad}$ ,可以明显观察到 1)、3)、4) 等现象,沿着水平方向过条纹的中心,读出各点的强度,用图 3(a)表示,可见图像上有很多干扰,几乎不能读取条纹的位置,必须去掉干扰,图 3(b)是用中值滤波后的强度,可见滤波的效果非常好,曲线上的干扰已基本消除,只有最宽的峰和谷上有几个小峰,但这些小峰不影响条纹位置的判读。每一个很高的峰代表一个亮条纹,各峰之间的距离不一样,表明条纹的密度是变化的,反映了光栅的密度是变化的。中值滤波实际上是非线性低通滤波,窗口的大

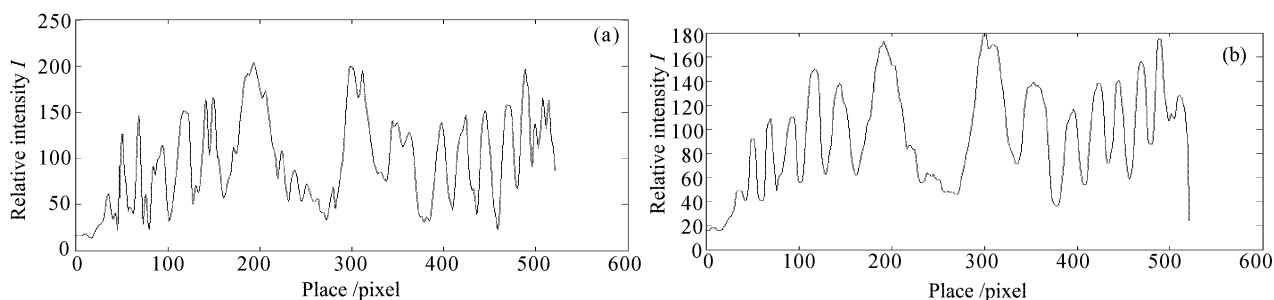


Fig. 3 (a) The original signal; (b) The signal after median filtering

### 3.2 两种处理方案

对干涉图像初步处理后,就可以测量光栅的密度了,光栅的密度可以用两种方案来测量。在干涉条纹密度变化非常快的图像中,部分条纹很稀疏很清晰,部分条纹密的难以分辨,用连续转动转台,改变  $K_{PS}$  的斜率(虚栅密度),记录若干幅干涉图像中条纹最疏点的位置,这些点干涉条纹的密度为零,计算出这些点的光栅密度,再用多项式拟合求  $a_i$ ;另一种方法主要用在干涉条纹密度变化很缓慢的干涉图像中,一幅干涉图中全场的干涉条纹都能很清楚地识别和读取,该方法是对 1~2 幅干涉图进行处理,精确测量每根条纹的位置,求得  $a_i$ 。

在第二种测量方法中,分析得出了一个有用的结论,我们将它称为“相对密度不变”。图 4 表示一块矩形光栅,所有的刻线都是平行平直的,干涉条纹平行于光栅刻线,  $A_1B_1$  和  $A_2B_2$  是任意两条直线,它们和光栅的边界分别交于  $A_i, B_i$  点,沿着这两条线测量出的干涉条纹(或刻线)密度不一样,那是因为  $A_iB_i$  是斜的,密度单位是“线/毫米( $\text{gr}/\text{mm}$ )”,但是如果以线段  $A_iB_i$  的长度为一个长度单位,测出的干涉条纹(或刻线)密度是相同的,因为不同斜线  $A_iB_i$  的实际长度不一样,斜线的影响和长度单位的变化互相抵消了,密度的单位为“线/长度单位”,无论沿那一条直线测量,测出的干涉条纹(或刻线)的相对密度都是一样的。如果测出相对密度,用光栅

小非常重要,窗口太小,毛刺去不掉,窗口太大,有用的信号也被抹平了,对于不同的图像应该选择不同的窗口,窗口的选取主要靠经验。实验中也进行了圆形窗口的中值滤波,发现它的效果并不比方形窗口好多少。一些实验结果表明二维自适应除噪滤波效果更好一些,但是算法要复杂得多,实验中也采用 Gaussian, Sobel, Prewitt, Laplacian, LoG 等算子进行了二维线性滤波,总的感觉是使用这些较复杂的滤波方法需要很多经验,如果算子和参量选择的很好,会达到很好的效果。

的实际宽度代替长度单位,就可以算出实际密度(线/毫米),所以只要准确的知道光栅的宽度,无论沿光栅表面哪一条直线测量,都会得到一样的结果。

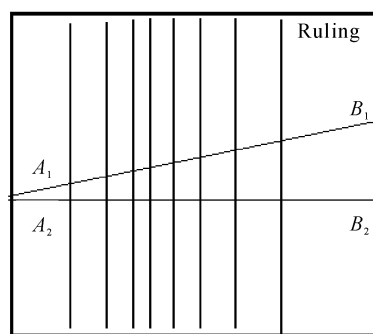


Fig. 4 The relative density is same

### 3.3 实验结果

实验中先用第二种方法对一块光栅进行了测量,光栅的尺寸为  $31 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ ,刻线平行于长边,使用 2 幅干涉条纹图测量光栅密度,光栅表面被两束入射光都照到的区域一般靠近反射镜,将靠近反射镜的一端定为坐标原点,计算出密度为

$$\begin{aligned} a_0 &= 239.6715 \text{ gr}/\text{mm}, \\ \delta a_0 &< 0.4291 \text{ gr}/\text{mm}; \\ a_1 &= -0.02483 \text{ gr}/\text{mm}^2, \\ \delta a_1 &< 0.001935 \text{ gr}/\text{mm}^2; \\ a_2 &= -0.001428 \text{ gr}/\text{mm}^3, \\ \delta a_2 &< 1.622 \times 10^{-4} \text{ gr}/\text{mm}^3; \end{aligned}$$

$$a_3 = 1.934 \times 10^{-5} \text{ gr/mm}^4,$$

$$\delta a_3 < 4.1877 \times 10^{-6} \text{ gr/mm}^4;$$

以上的各数据和实际使用中的变线距光栅相近,测量结果具有代表性。限于篇幅,本文不再分析误差。

我们也用第一种方案测量了光栅密度,图 5 中比较了两种方法测量的密度差异,实线表示用上段中的  $a_i$  求出的各点密度,“+”表示转动平台由多幅图像求出各点密度,可见两者差距很小,两种测量方法都是可信的;图中“+”并没有均匀的分布在实线两侧,说明有系统误差存在,采集系统放大倍数  $M$  的误差常常会造成这种现象。

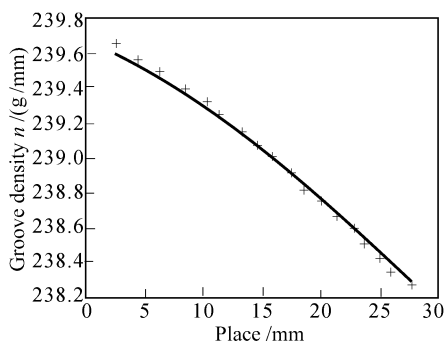


Fig. 5 The comparison of two kinds of measurements

**结论** 变线距光栅的线密度检测比较困难,本文从理论上对干涉法测量变线距光栅进行了探讨,认为干涉法完全可以用来测量光栅的密度及其变化,给出了有关公式,提出了测量光路,在该光路中衍射光在光栅表面的干涉条纹密度反映了光栅的密度,只要准确地测出入射光的角度、衍射光级次和干涉条纹的位置就能算出光栅的密度及其变化。

我们用实验证明提出的方法是可行的,简单的描述了干涉条纹中的一些现象,对数据处理方法进行了初步的尝试,使用了中值滤波的方法,减小了干扰信号,使计算机能够自动读取条纹的级次和位置,为进一步编写软件和制作检测仪器提供了基础,我们提出了两种计算密度变化系数  $a_i$  的具体方案,实验表明两种方案得到的结果相近,计算出了光栅测量中的误差,分析得出了“相对密度不变性”,认为沿光栅表面哪一条直线测量,都会得到一样的结果,不必严格要求垂直于光栅刻线进行测量。

对于凹面光栅也应该可以用这样的方法测量,只不过图像采集系统的像差的影响要大一些。该方

法中的干涉图反映了全场光栅密度分布和衍射效率,比逐点测量衍射角的方法更方便快捷,提供了更多的信息。如果将待测光栅换成已知密度的标准光栅,C、D不是平面波,由衍射光的干涉条纹的密度可以算出C、D的干涉条纹密度,用光刻胶记录C、D的干涉条纹,就能做出变线距光栅,所以该方法可以用到变线距光栅的全息制作中,辅助光路调节,下一步需要研究这些方法制作光栅中的应用,以及制作检测的仪器。

### 参 考 文 献

- 1 Namioka T, Koike M. Aspheric wave-front recording optics for holographic gratings. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(13):2180~2186
- 2 Wang Wei, Yang Houmi. Principle and design of varied line-space plane gratings. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(9):1158~1162 (in Chinese)
- 3 Hettrick M C, Bowyer S. Varied line-space gratings: new designs for use in grazing incidence spectrometers. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24):3921~3924
- 4 Shi Lun, Hao Defu. Theory and applications of varied line-space gratings. *Optics and Precision Engineering* (光学精密工程), 2001, **9**(3):284~287 (in Chinese)
- 5 Singh S. Diffraction gratings: aberrations and application. *Opt. Laser Technol.*, 1999, **31**:195~218
- 6 Cocco D, Sergo R, Sostero G *et al.*. High precision measurements of the groove density of diffraction gratings. *Conference on Soft X-Ray and EUV Imaging Systems, Proc. SPIE*, 2000, **4146**:143~150
- 7 Amemiya K, Kitajima Y, Yamamoto Y *et al.*. Fabrication of a varied-line-spacing plane grating with aspheric wavefront holographic recording for a new grazing incidence monochromator at the photon factory. *Proc. SPIE*, 1997, **3150**:171~182
- 8 Chen Qiang, Wang Qiuping, Yu Xiaojiang. The groove density measurement of VLS plane grating by diffraction method. *Nuclear Techniques* (核技术), 2001, **24**(7):557~563 (in Chinese)
- 9 Zhu Xiangbing, He Shiping, Fu Shaojun. Measurement of the line-density of varied-line-space grating by Moiré Fringe. *Optics and Precision Engineering* (光学精密工程), 2002, **10**(3):285~289 (in Chinese)
- 10 Deville B, Bonnemason F. Holographically recorded, ion etched variable line space gratings. *Proc. SPIE*, 1998, **3450**:24~355
- 11 Zhu Xiangbing, Fu Shaojun, Ye Wei-quan *et al.*. Explanation of the round interference fringes in the measurement of varied-line-space gratings. *Optics and Precision Engineering* (光学精密工程), 2002, **10**(6):634~637 (in Chinese)

## Interferometric Measurement of the Line Density of Varied-Line-Space Gratings

Zhu Xiangbing<sup>1,2</sup> Fu Shaojun<sup>1</sup> Ye Weiquan<sup>1</sup> He Shiping<sup>3</sup> Chen Jin<sup>2</sup>  
Liu Ying<sup>1</sup> Xu Xiangdong<sup>1</sup> Hong Yilin<sup>1</sup>

1 *National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029*  
2 *Department of Physics, Anhui Normal University, Wuhu 241000*  
3 *School of Engineering Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027*

(Received 8 July 2002; revised 2 December 2002)

**Abstract:** Varied-line-space grating is very useful in synchrotron radiation devices and laser fusion devices, but there are no good ways to measure them. The line density of varied-line-space gratings have been measured by using interferometry. The principle and geometry are introduced, the methods of data processing and the results are given. On the surface of grating to be tested, quantity and density of diffracted light interferometric fringes are difference of interferometric fringes of incident light and grating groove quantity multiplied. Two sets of waves are in the common path, it is easier to make adjustment and measurement. Interference in interferometric image is removed by mid-value filtering method. Two projects are put forward for different interference fringes. The invariance of relative density is brought forward. The grating diffracts two coherent incident waves, the fringes appear, the density relates to groove density, if the incidence angles and the diffraction orders and the position of fringes are known, the groove density can be calculated. The method can satisfy the requirements of varied-line-space gratings, and it is suitable in the measurement of varied-line-space gratings and can reach some precision. Finally, the method is suggested into fabrication of holographic varied-line-space gratings.

**Key words:** physical optics; varied-line-space grating; line density; interferometry