

用于检测光栅线密度的长程面形仪系统

吴新朴, 韦怀坤, 刘正坤*, 邱克强, 徐向东, 洪义麟

中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029

摘要 衍射光栅已被广泛应用于同步辐射光源软 X 射线与真空紫外光栅单色器中, 光栅线密度偏差会直接影响单色器的性能。为了检测光栅线密度的偏差, 本文在合肥先进光源预研过程中搭建了长程面形仪(LTP)系统。使用自准直仪对 LTP 检测光栅系统在 $26 \mu\text{rad}$ 内的检测精度进行了标定。利用 LTP 对自主研发的 760 line/mm 与 2400 line/mm 等间距光栅进行线密度均匀性检测, 使用干涉仪对 760 line/mm 光栅进行 0 级与 1 级衍射波前检测, 并将检测结果与 LTP 测量结果进行比较。结果表明: 系统标定的均方根误差为 30 nrad , 与干涉仪检测结果相比, 两者同位置处的高度轮廓曲线具有较好的一致性。这说明搭建的 LTP 系统具有较高精度的检测光栅线密度的能力, 为检测同步辐射光栅线密度的变化提供了平台。

关键词 测量; 长程面形仪; 等间距光栅; 线密度均匀性

中图分类号 TH741

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0612002

Long Trace Profiler for Measuring Groove Density of Diffraction Gratings

Wu Xinpu, Wei Huaikun, Liu Zhengkun*, Qiu Keqiang, Xu Xiangdong, Hong Yilin

National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China,

Hefei, Anhui 230029, China

Abstract Diffraction gratings are widely used in the soft X-ray and vacuum ultraviolet grating monochromators of the synchrotron radiation source, and thus the deviation of the groove density of the gratings directly affects the performance of the monochromators. In order to detect the deviation of the groove density, we built a long trace profiler (LTP) system in the pre-research process of Hefei Advanced Light Source (HALS). First, an autocollimator was used to calibrate the detection accuracy of the LTP system within $26 \mu\text{rad}$. Then, the LTP was applied to detect the groove density uniformity of the self-developed 760 line/mm and 2400 line/mm uniform-line-spacing diffraction gratings adopted in the pre-research of HALS. Furthermore, an interferometer was employed to detect the zeroth and first-order diffraction wavefronts of the 760 line/mm grating. Finally, the above detection results were compared with the LTP-based measurement results. The results show that the root mean square error of the system calibration is 30 nrad , and the height profile curves at the same position are in good agreement in terms of LTP detection and interferometer measurement. This indicates that the LTP system can detect the groove density of diffraction gratings with high precision, providing a platform for detecting the deviation of the groove density of synchrotron radiation gratings.

Key words measurement; long trace profiler; uniform-line-spacing diffraction grating; groove density uniformity

OCIS codes 120.6650; 120.3930; 050.1950

收稿日期: 2020-09-18; 修回日期: 2020-10-21; 录用日期: 2020-11-05

基金项目: 国家自然科学基金(U1731116)、合肥先进光源预研项目

* E-mail: zhkliu@ustc.edu.cn

1 引言

近年来,同步辐射光源性能的不断提高对同步辐射光束线中的单色器提出了更高要求。光栅作为单色器常用的色散元件,已被广泛应用于同步辐射真空紫外与软 X 射线单色器中^[1]。光栅线密度精度会直接影响光栅的分光和成像性能,从而影响单色器的性能,所以在合肥先进光源预研过程中发展高精度光栅线密度检测技术,对于光栅制作及其在同步辐射单色器中的应用具有重要意义^[2]。

对于同步辐射大尺寸光学元件来说,对其进行检测的方法有干涉法^[3-5]、长程面形仪(LTP)法^[6-8]等。LTP 是检测同步辐射大尺寸光学元件的主要设备。经 30 多年的发展,国内与国外的同步辐射光源纷纷搭建了 LTP 系统^[9-17]。LTP 系统的搭建成本昂贵,为拓展其功能,国外研究人员^[18-22]提出了利用 LTP 检测光栅线密度变化的方法。与原子力显微镜法、干涉法^[23-24]、衍射法^[25-27]等检测光栅线密度的方法相比,LTP 法具有评价光栅整体线密度变化的优点。Senba 等^[12]采用拼接法实现了对线密度变化较大的变间距光栅的测量。为了减小光栅倾斜带来的测量误差,Sheung 等^[22]、Thomasset 等^[28]在 LTP 系统中增加了双反射镜结构,但是由于是在已有的 LTP 系统上进行改造,系统的精度有限[他们对 500 line/mm 的等间距光栅进行了测试,其 1 级衍射级次的测试重复性只达到了 7 μrad (峰谷值)]。

合肥国家同步辐射实验室的 LTP 系统研发时间较早,其精度已不能满足同步辐射反射光学元件和同步辐射光栅的高精度检测需求。因此,本课题

组在合肥先进光源预研项目中开展了高精度 LTP 系统的研制工作,该系统同时具有检测光学元件面形与光栅线密度的功能。本文第二部分介绍了 LTP 的工作原理;第三部分介绍了系统的搭建;第四部分利用自准直仪对 LTP 系统 26 μrad 内的检测精度进行了标定,然后利用 LTP 系统对自主研制的 760 line/mm 与 2400 line/mm 等间距光栅进行检测,使用干涉仪检测 760 line/mm 光栅的衍射波前,并将检测结果与 LTP 测量结果进行了对比;第五部分对本文进行总结,并提出了提高 LTP 精度的方法。

2 测量原理

2.1 LTP 测量原理

LTP 测量原理如图 1 所示。一束光经过分束棱镜(PBS)入射到理想镜面之后并反射,若理想镜面没有倾斜,反射光经过傅里叶透镜(FT lens)后会聚焦到透镜后焦面的焦点上;若理想镜面倾斜一定的角度 θ ,反射光经过傅里叶透镜后就会聚焦到透镜的后焦面上。由几何光学可知 θ 、 d 、 f 之间的关系为

$$\tan(2\theta) \approx \frac{d}{f}, d \ll f, \quad (1)$$

式中: d 为聚焦点与焦点之间的距离; f 为傅里叶透镜的焦距。由于 $d \ll f$,所以(1)式可以简化为

$$\theta \approx \frac{d}{2f}, d \ll f. \quad (2)$$

LTP 利用顺序扫描法将待测镜面划分为无数个微小平面,通过细光束探测得到微小平面的斜率信息,从而获得待测面形信息。

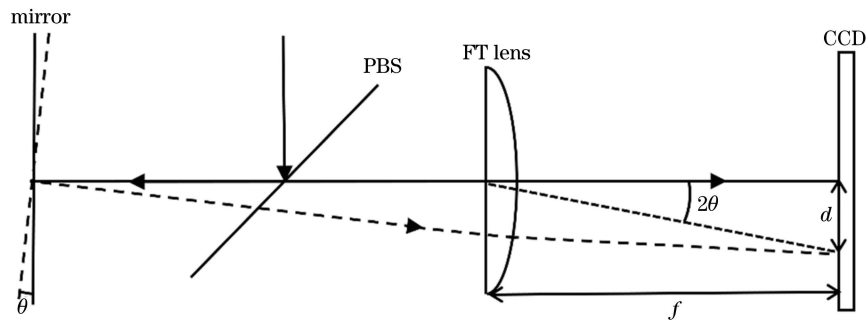


图 1 LTP 测量原理图

Fig. 1 Measurement schematic of LTP

2.2 LTP 测量光栅的原理

LTP 检测平面基底时,通过测量反射光的角度偏差获得镜面的斜率信息。同理,LTP 测量光栅线

密度时,通过测量衍射角的角度偏差获得光栅线密度的变化。LTP 检测光栅线密度时,需要在 Littrow 角下对光栅进行检测,如图 2 所示。

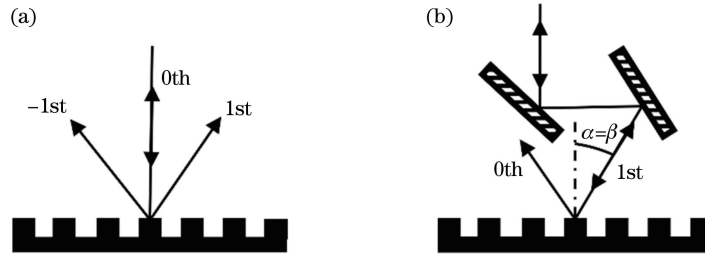


图2 LTP检测光栅原理图。(a)正入射时检测光栅基底面形;(b)Littrow角入射时检测光栅线密度的变化
Fig. 2 Principle diagram of LTP detects grating. (a) Grating surface shape measurement with normal incidence;
(b) detecting deviation of the grating density at Littrow angle of incidence

光栅方程为

$$mN\lambda = \sin \alpha + \sin \beta, \quad (3)$$

式中: m 为衍射级次; N 为光栅线密度,单位为line/mm; λ 为入射光波长,nm; α 为入射角; β 为衍射角。由光栅方程可知,若要满足Littrow角条件,需使 $\alpha = \beta$ 。由(3)式可推导出

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{mN\lambda}{2}\right)。 \quad (4)$$

在Littrow角条件下,光栅方程为

$$mN_0\lambda = 2\sin \alpha_0, \quad (5)$$

式中: N_0 为光栅的初始线密度; α_0 为对应的入射角。在检测过程中,入射角不变,光栅线密度变化会导致衍射角 β 发生改变,即

$$m(N_0 + \Delta N)\lambda = \sin \alpha_0 + \sin(\alpha_0 + \Delta\beta), \quad (6)$$

式中: ΔN 为光栅线密度的变化量; $\Delta\beta$ 为衍射角的变化量。根据(5)式与(6)式可以推导出线密度的变化为

$$\frac{\Delta N}{N_0} = \frac{\sin(\alpha_0 + \Delta\beta) - \sin \alpha_0}{m\lambda N_0} \approx \frac{1}{2}\Delta\beta \cot \alpha_0。 \quad (7)$$

利用LTP测量光栅时,首先使光正入射光栅表面($m=0$),测得光栅基底面形斜率信息 $\theta_0(x)$,再利用(4)式得到待测光栅的Littrow角;然后使光以 α_0 入射,测量光栅的1级衍射 $\theta_1(x)$ 。由图1可知,待测平面倾角为 θ 时,反射光偏转 2θ ,那么测量光栅时,取 $\theta_1(x)$ 与 $\theta_0(x)$ 差值的两倍就可获得光栅线密度变化导致的衍射角的变化,将其代入(7)式就可以得到线密度变化为

$$\frac{\Delta N(x)}{N_0} = [\theta_1(x) - \theta_0(x)] \cot \alpha_0。 \quad (8)$$

3 测量系统的搭建

本文根据LTP检测光栅的原理设计了LTP系统,其光路如图3所示。系统采用波长为402 nm的单体光作为光源,激光经光纤准直器后形成平行光束,光斑直径为0.75 mm;平行光束通过分束棱镜(PBS)、双反射镜M1与M2后,以Littrow角入射到待测光栅表面。衍射光束经双反射镜反射后被傅里叶透镜聚焦到CCD像面上。利用自准直仪监

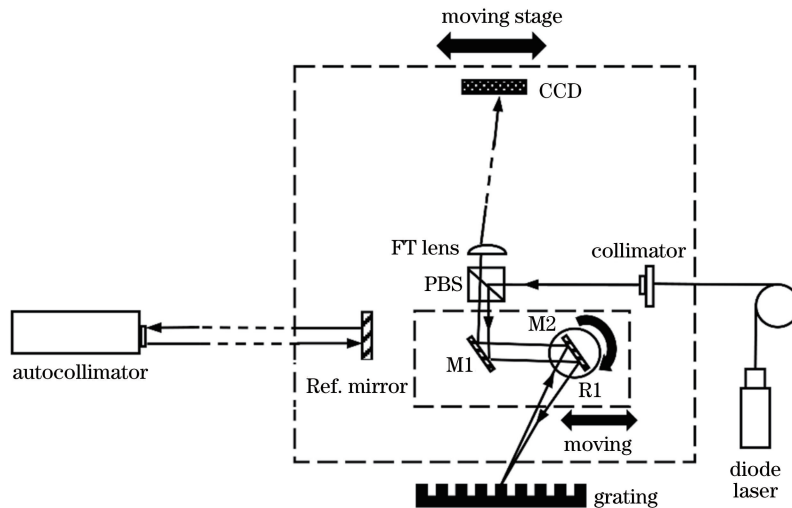


图3 LTP系统光路图

Fig. 3 Optical path diagram of LTP system

测参考镜(Ref. mirror)的角度变化,获得导轨的移动误差,并在数据处理中进行误差的扣除,以提高系

统的测量精度。搭建的 LTP 测量光栅系统的实物图如图 4 所示。

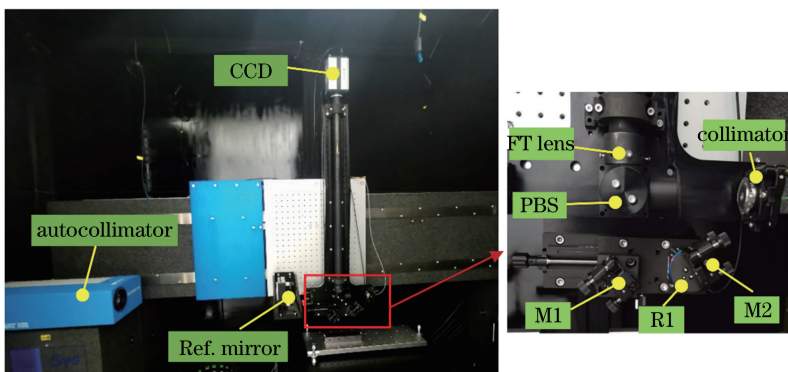


图 4 LTP 系统实物图

Fig. 4 Image of LTP system

LTP 测试房间的设计要求如下:24 h 内的温度波动为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 $45\% \pm 5\%$ 。实际测试温度波动为 $\pm 0.06\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 $45\% \pm 3\%$ 。在 LTP 外增加金属隔离罩,以进一步提升温度稳定性,同时降低空气扰动对 LTP 测试精度的影响。实测可得隔离罩内 24 h 温度稳定性优于 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ (峰谷值)。测试时,待测元件应尽可能贴近光学头(图 3 虚线框部分,实际测试时,距离小于 10 mm),以减小空气扰动的影响,保证 LTP 系统的测量精度。

4 实验测量

4.1 LTP 测量光栅系统的标定

利用自准直仪对 LTP 系统进行标定,自准直仪型号为 ELCOMAT HR,自准直仪精度($10''$ 内偏差):X 方向为 $0.015''$ (峰谷值)、Y 方向为 $0.018''$ (峰谷值)。标定原理如图 5 所示。利用压电陶瓷驱动器产生位移,使参考镜 1 与光栅产生相同的倾斜角。采用自准直仪监测参考镜 1 角度的变化,采用 LTP 光学头检测光栅 0 级衍射角度的变化,并将测量结果进行对比。标定结果如图 6 所示,在 $26\text{ }\mu\text{rad}$ 之内,自准直仪与 LTP 光学头检测结果的偏差为 30 nrad (均方根, RMS),这表明 LTP 光学头具有较高的测量精度。

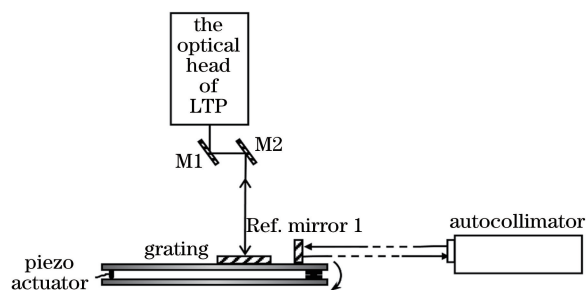


图 5 系统误差标定原理图

Fig. 5 Schematic of system error calibration

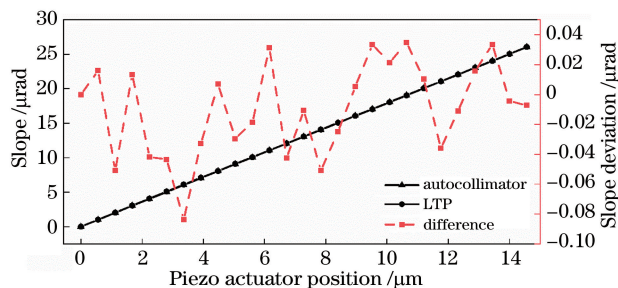


图 6 系统误差标定结果

Fig. 6 Result of system error calibration

4.2 LTP 检测 760 line/mm 与 2400 line/mm 光栅

利用搭建的 LTP 对合肥先进光源预研项目中自主研发的 760 line/mm 与 2400 line/mm 等间距光栅的线密度均匀性进行检测。光栅基本参数如表 1 所示。

表 1 光栅基本参数

Table 1 Basic parameters of grating

Groove density of grating / (line \cdot mm $^{-1}$)	Material of substrate	Dimension of substrate / (mm \times mm \times mm)	Dimension of grating / (mm \times mm)
760	Si	160 \times 30 \times 30	146 \times 20
2400	Si	160 \times 30 \times 30	145 \times 20

以 Littrow 角测量光栅 1 级 ($m=1$) 衍射, 正入射测量 0 级 ($m=0$) 衍射, 步进长度均为 1 mm。760 line/mm 光栅的测量长度为 144 mm, 2400 line/mm 光栅的测量长度为 143 mm。往返扫描 1 次为 1 组数据, 每个衍射级次下测量 6 组数据。由于受到 R1 转台精度的限制, LTP 系统无法对光栅线密度的绝对值进行高精度测试, 只能测得光栅线密度的均匀性。

760 line/mm 光栅的测量结果如图 7 所示。图

7(a) 为 1 级 ($m=1$) 衍射与 0 级 ($m=0$) 衍射下 LTP 测得的 6 组数据的平均值, 1 级和 0 级衍射角 6 次测试的重复性如图 7(b)、(c) 所示, 重复性 (RMS) 分别为 62 nrad ($m=1$) 和 64 nrad ($m=0$)。将图 7(a) 的测试结果代入 (8) 式得光栅线密度均匀性为 $\Delta N/N = 5.66 \times 10^{-6}$ (RMS), 如图 7(d) 所示。将两个衍射级次下重复性平方和开根号的值代入 (8) 式可得到线密度测量重复性误差 $\Delta N/N = 5.76 \times 10^{-7}$ (RMS)。

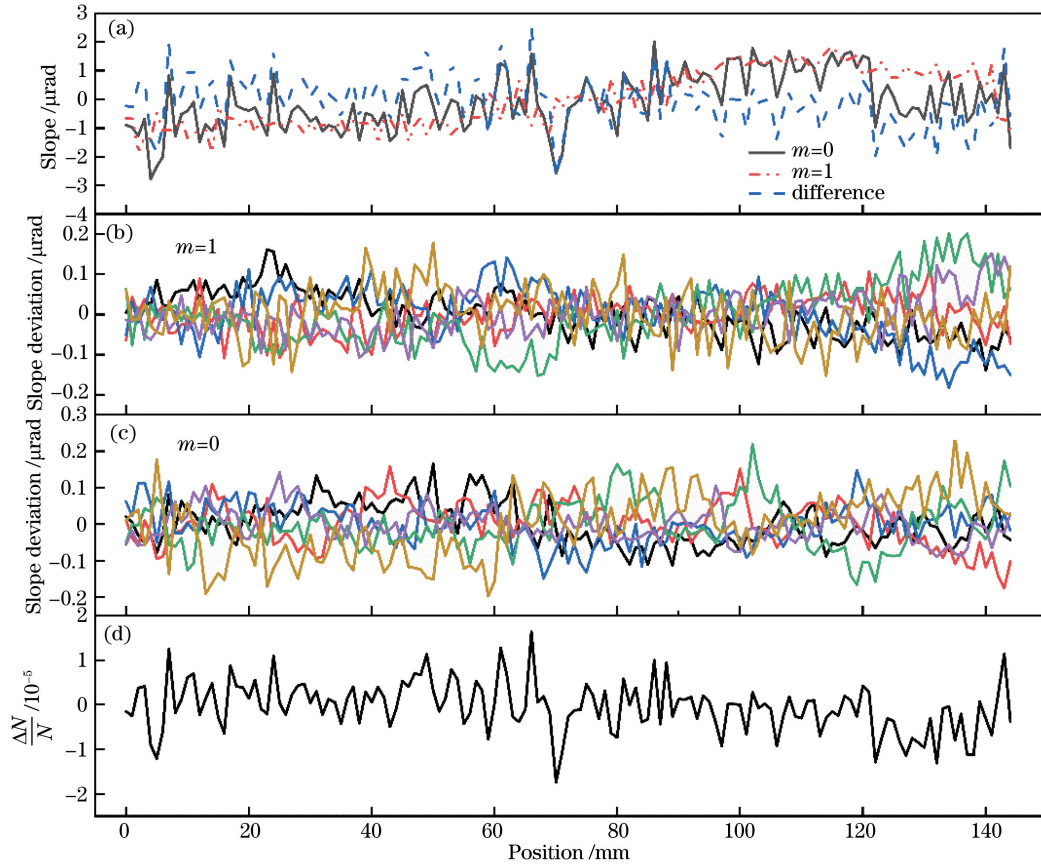


图 7 760 line/mm 光栅的测量结果。(a) LTP 测量光栅 1 级 ($m=1$) 衍射与 0 级 ($m=0$) 衍射结果 (取 6 组平均值); (b)(c) LTP 测量光栅 1 级 ($m=1$) 衍射与 0 级 ($m=0$) 衍射的重复性 (每组测量值与 6 组平均值之间的偏差); (d) 光栅线密度的均匀性
Fig. 7 Measurement results of 760 line/mm grating. (a) LTP measurement of the grating in the first diffraction order ($m=1$) and in the zeroth diffraction order ($m=0$) (average of 6 groups); (b) (c) reproducibility of LTP measurement on the grating in the first diffraction order ($m=1$) and in the zeroth diffraction order ($m=0$) (deviations between each result and the average of 6 groups); (d) uniformity of grating groove density

2400 line/mm 光栅在 1 级和 0 级衍射角下的测量结果如图 8(a) 所示; 1 级和 0 级衍射角的 6 次测试重复性 (RMS) 分别为 73 nrad ($m=1$) 与 68 nrad ($m=0$), 如图 8(b)、(c) 所示; 线密度均匀性为 $\Delta N/N = 1.77 \times 10^{-6}$ (RMS), 如图 8(d) 所示; 对应的线密度测量重复性误差为 $\Delta N/N = 1.81 \times 10^{-7}$ (RMS)。检测结果表明, LTP 系统具有较高的测量重复性。

由 (4) 式可知, 采用波长为 402 nm 的光源测量

2400 line/mm 光栅时, 1 级衍射级次下的 Littrow 角为 28.84° , 光斑直径为 0.75 mm 的光束以该角度入射到光栅面后变为椭圆光斑, 椭圆光斑的长轴为 0.86 mm。如果测试激光的波长为 632.8 nm, 测量 2400 line/mm 光栅时, Littrow 角为 49.41° , 则入射到光栅面上的椭圆光斑的长轴为 1.15 mm。由此可知, 采用短波光源可以使系统获得更高的空间分辨能力, 这也是系统采用短波光源的一个重要原因。

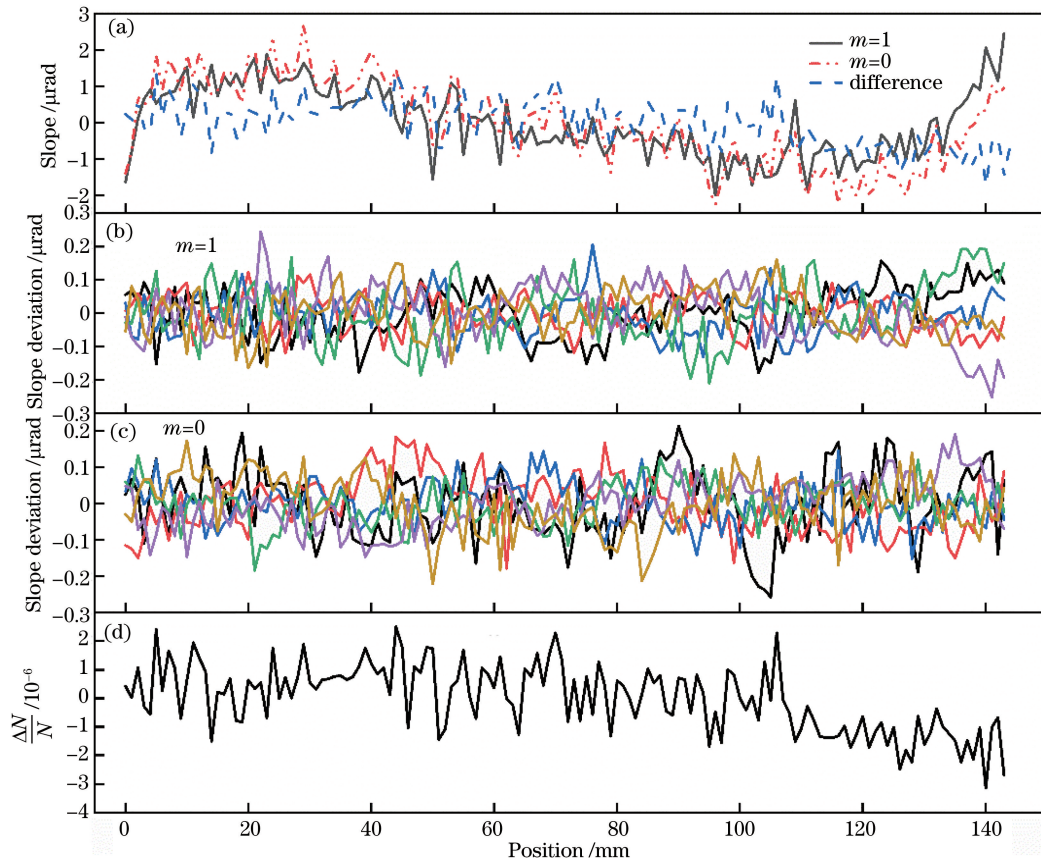


图 8 2400 line/mm 光栅的测量结果。(a)LTP 测量光栅 1 级($m=1$)衍射与 0 级($m=0$)衍射的结果(取 6 组平均值);(b)(c) LTP 测量光栅 1 级($m=1$)衍射与 0 级($m=0$)衍射的重复性(每组测量值与 6 组平均值之间的偏差);(d)光栅线密度的均匀性
 Fig. 8 Measurement results of 2400 line/mm grating. (a) LTP measurement of the grating in the first diffraction order ($m=1$) and in the zeroth diffraction order ($m=0$) (average of 6 groups); (b) (c) reproducibility of LTP measurement on the grating in the first diffraction order ($m=1$) and in the zeroth diffraction order ($m=0$) (deviations between each result and the average of 6 groups); (d) uniformity of grating groove density

4.3 干涉仪检测 760 line/mm 光栅

为了验证 LTP 测量光栅线密度均匀性的精度, 利用 Verifire™ HDX 型 6 英寸(1 英寸=2.54 cm)

Zygo 激光干涉仪($\lambda=632.8\text{ nm}$)对 760 line/mm 光栅进行 0 级与 1 级衍射波前检测,其参考镜面形优于 $\lambda/40$ (峰谷值),检测结果如图 9 所示。

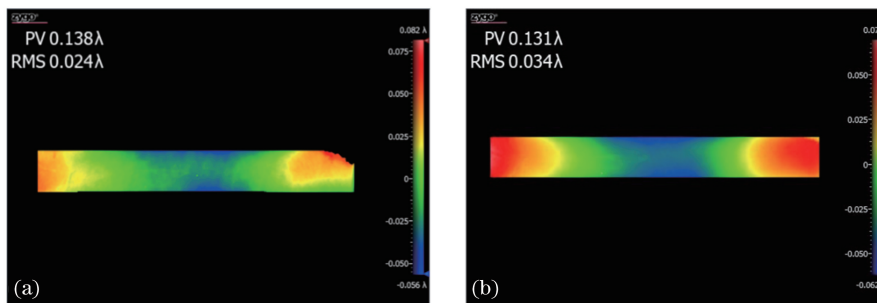


图 9 干涉仪检测 760 line/mm 光栅衍射波前图。(a) 1 级衍射;(b) 0 级衍射
 Fig. 9 Diagrams of 760 line/mm grating diffraction wavefront detected by interferometer. (a) The first diffraction order; (b) the zeroth diffraction order

将图 7(a)中 0 级和 1 级衍射的角度数据进行积分获得高度轮廓曲线,从干涉仪测量数据中获得相同位置的 0 级与 1 级衍射波前的高度轮廓曲线,

结果如图 10 所示。计算得到 1 级衍射级次下干涉仪与 LTP 之间的测量差值为 1.50 nm(RMS),0 级衍射级次下两者之间的测量差值为 0.79 nm

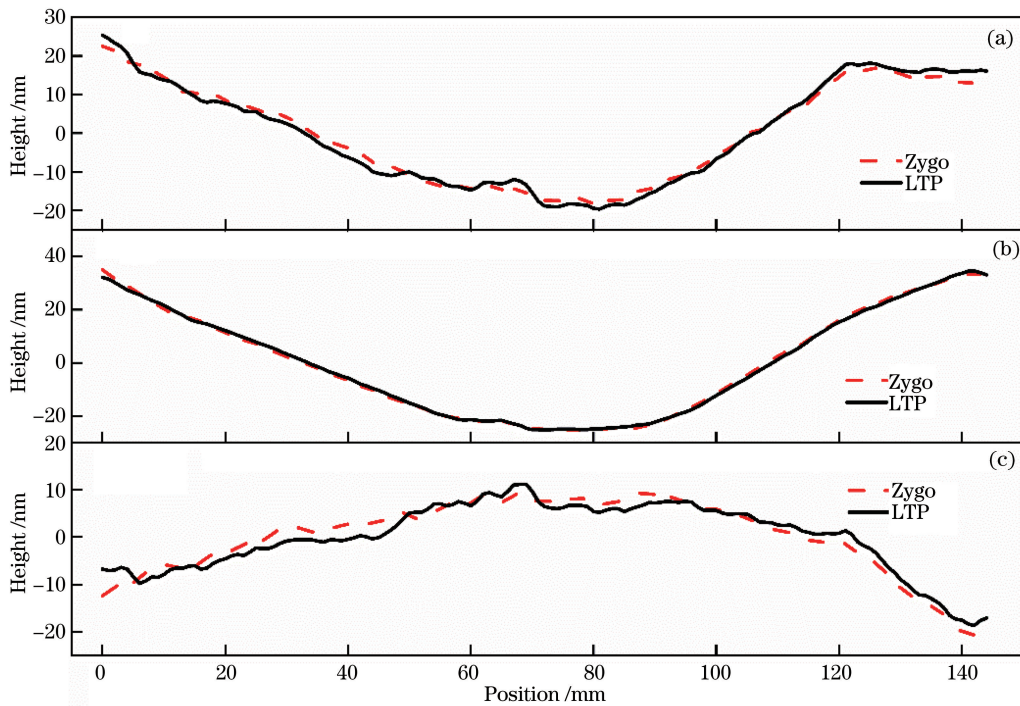


图 10 LTP 测量 760 line/mm 光栅中心与干涉仪测得的高度轮廓的对比图。(a) 1 级衍射；
(b) 0 级衍射；(c) 1 级衍射减去 0 级衍射

Fig. 10 Comparison of height profiles for a center line trace on the 760 line/mm grating between LTP and interferometer.
(a) The first diffraction order; (b) the zeroth diffraction order; (c) the first diffraction order subtracts the zeroth diffraction order

(RMS)。这表明，LTP 与 Zygo 干涉仪测量 760 line/mm 光栅时，在 1 级衍射与 0 级衍射的高度轮廓曲线上有着较好的一致性，验证了 LTP 测量光栅线密度的准确性。

5 结 论

本文搭建了 LTP 系统，该系统具有检测光学元件面形和光栅线密度的功能。采用波长为 402 nm 的单色光作为光源，提高了 LTP 测量光栅系统的空间分辨能力。利用自准直仪对系统 26 μrad 内的检测精度进行标定，标定偏差为 30 nrad(RMS)。本文对合肥先进光源预研项目中自主研制的 760 line/mm 与 2400 line/mm 光栅进行了检测，其线密度的均匀性分别为 5.66×10^{-6} (RMS) 和 1.77×10^{-6} (RMS)，对应的测量重复性分别为 5.76×10^{-7} (RMS) 和 1.81×10^{-7} (RMS)。本文还对 LTP 与 Zygo 干涉仪检测 760 line/mm 光栅的 0 级和 1 级衍射结果进行了对比分析，在 1 级衍射级次下两者测量差值为 1.50 nm(RMS)，在 0 级衍射级次下测量差值为 0.79 nm(RMS)，这表明两者在相同位置的高度轮廓曲线具有较好的一致性。LTP 与干涉仪检测结果之间出现差异的原因可能是光栅

的占宽比、槽深、槽型对不同的检测方式有不同的影响，下一步将继续探究两者差异的原因。

LTP 中使用的 PBS、傅里叶透镜面形存在中高频误差，会对检测精度有一定影响。后续拟通过选择性能更好的光学元件、增加相位板以及进一步减小环境对检测结果的影响等措施来提高测量精度，为检测变间距光栅和制作高精度同步辐射光栅奠定基础。

参 考 文 献

- [1] Xu C Y. Optics and engineering of synchrotron radiation [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2013: 113-178.
徐朝银. 同步辐射光学与工程[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2013: 113-178.
- [2] Li Z Y. Variable-line-spacing grating monochromators design and key techniques [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014: 85-90.
李朝阳. 变线距光栅单色器设计及关键技术[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014: 85-90.
- [3] Liu A, He Y H, Li Q, et al. Power spectral density test of large aperture optical elements by stitching interferometry[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019,

- 46(2): 0204008.
- 刘昂, 何宇航, 李强, 等. 大口径光学元件功率谱密度的拼接干涉检测[J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0204008.
- [4] Zhu R H, Sun Y, Shen H. Progress and prospect of optical freeform surface measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0112001.
朱日宏, 孙越, 沈华. 光学自由曲面面形检测方法进展与展望[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0112001.
- [5] Li M Y, Cao T F, Yuan X D, et al. Effect of reference surface error on subaperture stitching for flat optics[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1204006.
李荫阳, 曹庭分, 袁晓东, 等. 参考面误差对平面子孔径拼接的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1204006.
- [6] Zeng D H, Xiao T Q, Du G H, et al. New long trace profiler based on phase plate diffraction for optical metrology of SSRF [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77(9): 093305.
- [7] Liu B, Wang Q P, Fu S J. Investigation of long trace profiler for aspherical optics [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(2): 46-53.
刘斌, 王秋平, 傅绍军. 长程大型非球面轮廓测量仪的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(2): 46-53.
- [8] Qian S N, Wang Q P, Hong Y L, et al. Multiple functions long trace profiler (LTP-MF) for National Synchrotron Radiation Laboratory of China [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5921: 592104.
- [9] von Bieren K. Pencil beam interferometer for aspherical optical surfaces[J]. *Proceedings of SPIE*, 1982, 343: 101-108.
- [10] Takacs P Z, Church E L, Bresloff C J, et al. Improvements in the accuracy and the repeatability of long trace profiler measurements [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(25): 5468-5479.
- [11] Qian S N, Takacs P. Wave front-splitting phase shift beam splitter for pencil beam interferometer [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, 74(11): 4881-4884.
- [12] Senba Y, Kishimoto H, Ohashi H, et al. Upgrade of long trace profiler for characterization of high-precision X-ray mirrors at SPring-8 [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2010, 616(2/3): 237-240.
- [13] Li Z, Zhao Y, Li D C, et al. A diffractive long trace profiler for large aspherical optics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(10): 1224-1228.
李直, 赵洋, 李达成, 等. 衍射型长程大型非球面轮廓测量仪[J]. 光学学报, 2002, 22(10): 1224-1228.
- [14] Li S, Gong Y. Error analysis and correction during measurement of tube-shaped super-smooth mirrors using long trace profiler [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1112001.
李顺, 巩岩. 长程轮廓仪用于筒状超光滑表面测量的误差分析及校正[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1112001.
- [15] Liao J S, Gong Y, Zhang W, et al. Beam splitter with two Fresnel biprisms for long trace profiler[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0123001.
廖家胜, 巩岩, 张巍, 等. 长程轮廓仪非涅耳双棱镜对分束结构[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0123001.
- [16] Li M, Yang F G, Wang Q S, et al. High-precision long-range surface shape detector for optical surface: CN104019762A[P]. 2014-09-03.
李明, 杨福桂, 王秋实, 等. 一种高精度长程光学表面面形检测仪: CN104019762A[P]. 2014-09-03.
- [17] Yang F G, Li M, Liu P, et al. High-precision long-range surface shape detecting system and method: CN103292728A[P]. 2013-09-11.
杨福桂, 李明, 刘鹏, 等. 一种高精度长程面形检测系统及检测方法: CN103292728A[P]. 2013-09-11.
- [18] Irick S C, McKinney W R. Measurement of diffraction gratings with a long trace profiler with application for synchrotron beamline gratings [J]. *AIP Conference Proceedings*, 1997, 417(1): 118-123.
- [19] Senba Y, Kishimoto H, Miura T, et al. Measurement of groove density variation of varied-line-space grating for high-resolution soft X-ray monochromator [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8501: 850104.
- [20] Cocco D, Sergio R, Sostero G, et al. High-precision measurements of the groove density of diffraction gratings[J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 4146: 143-150.
- [21] Cocco D, Sostero G, Zangrando M. Technique for measuring the groove density of diffraction gratings using the long trace profiler[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, 74(7): 3544-3548.
- [22] Sheung J, Qian J, Sullivan J, et al. Metrology of variable-line-spacing X-ray gratings using the APS Long Trace Profiler[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 1038: 1038508.
- [23] Zhu X B, Fu S J, Ye W Q, et al. Explanation of the round interference fringes in the measurement of varied-line-space gratings [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(6): 634-638.
- [23] Explanation of the round interference fringes in the measurement of varied-line-space gratings[J]. *Optics*

- and Precision Engineering, 2002, 10(6): 634-638.
- 朱向冰, 付绍军, 叶为全, 等. 对变线距光栅干涉测量中的环形条纹的分析[J]. 光学精密工程, 2002, 10(6): 634-638.
- [24] Zhu X B, Fu S J, Ye W Q, et al. Interferometric measurement of the line density of varied-line-space gratings [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(11): 1354-1358.
- 朱向冰, 付绍军, 叶为全, 等. 变线距光栅线密度的干涉测量[J]. 光学学报, 2003, 23(11): 1354-1358.
- [25] Chen Q, Wang Q P, Yu X J, et al. The groove density measurement of VLS plane grating by diffraction method[J]. Nuclear Techniques, 2001, 24(7): 557-563.
- 陈镛, 王秋平, 余小江, 等. 变间距光栅刻线密度的测试精度分析[J]. 核技术, 2001, 24(7): 557-563.
- [26] Chen Q, Hu Z W, Yu X J, et al. Performance of a grating groove density measuring system by diffraction method[J]. Nuclear Techniques, 2004, 27(1): 9-13.
- 陈镛, 胡中文, 余小江, 等. 变间距光栅刻线密度测试系统的性能评价[J]. 核技术, 2004, 27(1): 9-13.
- [27] Liu B, Lou J, Liu Z K, et al. Determination of groove density for bending gratings [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(6): 986-989.
- 刘斌, 楼俊, 刘正坤, 等. 压弯光栅线密度检测[J]. 光学精密工程, 2006, 14(6): 986-989.
- [28] Thomasset M, Dvorak J, Brochet S, et al. Grating metrology for X-ray and V-UV synchrotron beamlines at SOLEIL [J]. The Review of Scientific Instruments, 2019, 90(2): 021714.