文章编号: 1672-8785(2023)01-0001-10

基于 Ronchi 光栅检测非球面镜 系统中的杂光现象分析

包兴臻何锋赟赵楠董健王尧

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所精密仪器与装备研发中心, 吉林 长春 130033)

摘 要:为指导某 600 mm 口径的双曲面反射镜的加工,设计了 Ronchi 光栅检测系统。针对系统检测过程中存在的杂光现象,分析产生该现象的原因,并提出相应的解决方案。结果表明,在光线两次经过光栅的光路结构中,分光棱镜的剩余反射率大于 5%时,像面处暗条纹的照度增大 27 倍,条纹明暗对比度下降,难以分辨;随着光栅剩余反射增加,条纹中心产生亮斑现象,条纹无法分辨。条纹面正对分光镜的亮斑区域的背景照度增加 40 多倍,玻璃面正对分光镜的亮斑区域的背景照度增加 80 多倍。通过优化系统结构,对分光镜与光栅进行替换与表面处理,有效解决了杂光问题,提高了像面条纹对比度。

关键词: Ronchi 光栅; 分光棱镜; 剩余反射; 条纹对比度

中图分类号: O439 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.01.001

Analysis of Stray Light in Aspheric Mirror System Detection Based on Ronchi Grating

BAO Xing-zhen, HE Feng-yun, ZHAO Nan, DONG Jian, WANG Yao

(Fine Instrument and Equipment Research & Development Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to guide the machining of a 600 mm hyperboloid mirror, the detection system of Ronchi grating is designed. In view of the stray light phenomenon in the process of system detection, the causes of the phenomenon are analyzed, and the corresponding solutions are put forward. The analysis results show that when the residual reflection of the splitting prism is greater than 5%, the illumination of the dark fringe on the image plane increases by 27 times, and the contrast of the fringe decreases, making it difficult to distinguish. With the increase of the residual reflection of the grating, bright spots appear in the center of the fringe, and the fringe cannot be distinguished. The background illumination of the bright spot area of the spectroscope is increased by more than 40 times by the striped surface, and the background illumination of the bright spot area of the spectroscope is increased by more than 80 times. By optimizing the system structure, the spectroscope

收稿日期: 2022-10-08

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20190302102GX); 吉林省发改委项目(2020C030-4)

作者简介:包兴臻(1987-),男,甘肃庆阳人,博士研究生,主要从事微纳器件的研制、光学检测、光学设计等方面的研究。E-mail:baoxingzhen@126.com

and grating are replaced and treated. The stray light phenomenon is effectively solved and the contrast of the image plane fringe is improved.

Key words: Ronchi grating; splitting prism; residual reflection; fringe contrast

0 引言

检测大口径球面与非球面镜的方法包括三 坐标法、计算全息法(Computer-Generated Hologram, CGH)、哈特曼波前法、干涉仪等 方法^[1-4]。其中,三坐标法是接触式测量方法, 测量时采集数据较多且耗时长;测量探头和运 动机构的精度影响着测量结果的精度,而且设 备体积庞大,操作环境受限。干涉仪检测精度 较高,但检测过程对环境稳定性要求较高。哈 特曼波前法精度高,但量程较小。CGH检测 法受器件微纳加工工艺精度的影响较大。相比 较而言,Ronchi检测法结构简单、操作方便, 通过调整光栅的频率可调制检测精度,可用于 精磨阶段与抛光过程的检测^[5-6]。

Ronchi 检测法最初主要用于对大口径非球 面的定性检测,通过判断条纹弯曲来对面型进 行抛光修正。随着研究的深入,对条纹的变化 进行数据反演,计算出镜面面型参数,能够定 量测试镜面的面型。Ronchi 检验法在精磨阶段 可采用低频光栅检测粗面型误差。随着加工精 度的提高,在抛光阶段更换高频光栅检测,从 而提高检测精度^[7-9]。在 Ronchi 检测系统中, 分光棱镜、透镜、光栅等元件剩余反射引入杂 光会影响像面上的明暗条纹对比度。本文根据 实验过程中产生的杂光现象,分析了系统中杂 光的主要来源,提出了对应的解决方案,并通 过实验验证了优化结果。

1 基于 Ronchi 光栅检测非球面镜的工作原理与系统设计

基于 Ronchi 光栅检测反射镜面型的基本 原理如图 1 所示。将光栅放置在被检反射镜面 的曲率中心附近。光源发出的光经过光栅,光 栅的像又回落至光栅上,产生莫尔条纹。该条 纹的形状携带了被检反射镜面的像差^[10-12]。



图 1 基于 Ronchi 光栅检测非球面镜的示意图

为方便分析,物体与光源均位于光轴上 (也可离轴测量)。通过条纹变化测量光轴上被 检镜的横向像差 TA。假设用 Z(x,y)表示非球 面方程,Z₀(x,y)表示密接球面方程,则理想 Ronchi 图的波面偏差可表示为

 $Z(x,y) - Z_0(x,y) = 2W(x,y)$ (1)

通过式(1)可计算非球面的理想 Ronchi 波 像差。根据 Rayces J L 与 Malacara D 总结的公 式,得到被检光学系统上的波像差:

$$\frac{\partial W}{\partial x} = -\frac{TA_x}{r - W}, \ \frac{\partial W}{\partial y} = -\frac{TA_y}{r - W}$$
(2)

式中, r 为被测面至 Ronchi 光栅的距离。若设 置光栅刻线之间的间隔为 d,光栅栅格与 y 轴 之间的夹角为 φ ,则检测图像上第 m 个条纹上 的点(x,y)可表示为

$$\frac{\partial W}{\partial x}\cos\varphi - \frac{\partial W}{\partial y}\sin\varphi = -\frac{md}{r} \tag{3}$$

用第 k 级的二维多项式表示波面函数:

$$W(x,y) = \sum_{i=0}^{k} \sum_{j=0}^{i} B_{ij} x^{i} j^{i-j}$$
(4)

则式(1)的偏导可表示为

$$\frac{\partial W}{\partial x} = \sum_{i=0}^{k-1} \sum_{j=0}^{i} (j+1)B_{i+1,j+1}x^{i}y^{i-j} \qquad (5)$$

$$\frac{\partial W}{\partial y} = \sum_{i=0}^{k-1} \sum_{j=0}^{i} (i-j+1) B_{i+1,j} x^{i} y^{i-j} \quad (6)$$

则由式(2)的 Ronchi 检验法几何原理,可以写出: $\frac{\partial W}{\partial x}\cos\varphi - \frac{\partial W}{\partial y}\sin\varphi = -\frac{[m(x,y) - m_0(x,y)]}{r}d$

http://journal.sitp.ac.cn/hw

(9)

式中, m(x,y)表示测得的第 m 级条纹上点 (x,y)的波像差, $m_0(x,y)$ 表示被检镜理想波 面的理论波像差。用 $m_x(x,y)$ 与 $m_y(x,y)$ 表 示光栅与 y 轴的夹角为 0°和 90°时第 m 级条 纹上点(x,y)的波像差, 即

$$\frac{\partial W}{\partial x} = -\frac{\left[m_x(x,y) - m_0(x,y)\right]}{r} d \ (\varphi = 0^\circ)$$
(8)

$$\frac{\partial W}{\partial y} = -\frac{\left[m_y(x,y) - m_0(x,y)\right]}{r} d \ (\varphi = 90^\circ)$$

基于最小二乘法,用差分函数 $(m_y - m_0)$ 拟合第k-1级次的二维多项式,有

$$\frac{\partial W}{\partial x} = \sum_{i=0}^{k-1} \sum_{j=0}^{i} C_{i+1,j} x^{i} y^{i-j}$$
(10)

$$\frac{\partial W}{\partial y} = \sum_{i=0}^{k-1} \sum_{j=0}^{i} D_{i+1,j} x^{i} y^{i-j} \qquad (11)$$

将式(10)和式(11)结合式(5)、式(6)可得:

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{C_{i-1,j-1}}{j} + \frac{D_{i-1,j-1}}{i-j} \right)$$

$$\begin{cases} i = 2, 3, \cdots, k \\ j = 1, 2, 3, \cdots, i-1 \end{cases}$$
(12)

在式(5)、式(6)、式(9)、式(10)、式 (11)中, *B_{ij}*、*C_{ij}*、*D_{ij}*表示拟合系数。解算拟 合系数 *B_{ij}*可实现对光学表面的拟合,从而可 对光学镜面进行检测。

在 Ronchi 检测系统中,设计补偿镜组以 保证无像差时接收面上的条纹为直条纹。与 补偿光栅设计相比,该方法过程简单,对光 栅位置精度要求低,同时补偿器可实现多功 能使用。将补偿镜组与被检镜系统设计为二 次成像结构。设计结果保证被检镜在 632.8 nm 波长处的波像差小于 0.01λ。在成像系统 中,光栅位于补偿镜组的焦点位置,成像镜 组与补偿镜组共同对被检镜成像。被检镜为 双曲面,其镜面参数如下:k = -1.3, R = 2800 mm, D = 620 mm。图 2 所示为由补偿 镜组、成像镜组、被检镜、光源组成的 Ronchi 检测系统结构。

在图 2 所示的结构中,光源与系统光轴垂 直,分光棱镜将光源发光光束耦合进检测系 统。成像镜组与补偿镜组同时对被检镜成像, 像面位置固定。在此系统中,光两次透过光栅 进入相机,其条纹为莫尔条纹。该系统可用扩 展光源,无需激光或小孔径点光源。

2 实验与杂光分析

根据设计的 Ronchi 检测系统参数加工并搭 建系统结构。系统中的透镜透过率大于 99%, 分光镜单面透过率大于 97%。光源半径为 0.5 mm,光栅置于被检镜与光源之间,即光两次透 过光栅。实验所选的探测器规格为 1034×779, 像元尺寸为 4.65 μ m×4.65 μ m,被检镜为口径 D=620 mm, k=-1.3的双曲面。基于 Ronchi 光栅检测双曲面镜的系统如图 3 所示。

基于图 3 所示的实验结构检测双曲面后 的像面条纹结果如图 4 所示。由实验结果可 知,像面上条纹对比度极低,无法分辨被检 镜面型引入的条纹形状,难以判断被检镜面 的加工状况。将光源倾斜,图像上呈现条纹 形状,但有明显的亮斑现象。该现象证明系 统中存在杂光成像问题。

根据图 4 的现象建立系统模型,用光线 追迹法分析造成条纹对比度低的原因。采用 LightTools 光学软件对杂光现象进行分析。 该软件具有光线追迹效率高、数据记录全面 的特点。在系统设计过程中考虑了透镜引入 杂光的现象。通过调整面型参数与镜面间隔, 消除了透镜剩余反射引入的杂光。根据系统



图 2 基于 Ronchi 光栅检测双曲面的示意图



图 3 基于 Ronchi 光栅检测双曲面的实物图



图 4 基于 Ronchi 光栅检测双曲面时的条纹图

特点,除透镜外还能引入杂光的原件包括分光 镜、光栅及镜筒。镜筒内表面通过磨砂黑化处 理后,引入杂光的可能性低,因此主要分析分 光镜及光栅剩余反射引入的杂光现象。

2.1 棱镜表面反射对像面照度的影响分析

根据图 2 所示的系统建模。设置被检镜的 反射率为 10%(未镀膜),光源功率为 10 W, 分光镜各面剩余反射率分别为 0.1%、0.5%、 1%、2%、3%、5%。计算像面上条纹的照度 分布(结果见图 5)。由图 5 的对比结果可知, 随着棱镜表面反射率的增加,像面条纹对比度 逐渐降低。当剩余反射率增加至 5%时,像面 条纹无法分辨。

分析图 5 中 y=0位置上的条纹数据。由于整个条纹呈现出周期分布,因此取像面中心位置一个周期(-0.3, 0.3)内的数据,建立照度分布数据曲线(见图 6)。

由图 6 的数据对比曲线可知,随着分光棱 镜表面反射增加,像面上的背景亮度也增加 了。随着棱镜表面反射增加,像面上的条纹对 比度下降。与 0.1%剩余反射相比,5%剩余 反射时的暗条纹照度增加了 27 倍,最大照度 与背景照度之比降低了 7 倍,条纹无法分辨。 因此需控制分光棱镜表面的反射接近于 0,或 者采用其他方式保证条纹的分辨率。

由于将棱镜用作分光镜时表面反射易造成 像面条纹对比度降低,用分光片替代棱镜可实 现分光。分光片与光轴的夹角为45°,只有分 光面与透光面,其表面反射的光难以直接进入 相机。为进一步分析分光片反射对条纹照度与 分辨率的影响,设置分光片厚度为3 mm,分 光面反射率与透过率分别为50%。当非分光 面反射率为10%和20%时,像面照度分布结 果如图7所示。





由图 7 的照度对比结果可知,随着分光片 非分光面反射率的增加,条纹分辨率不发生变 化,条纹分布依然清晰。因此,在 Ronchi 光 栅检测系统中用分光片替代棱镜作为分光元件 是切实可行的。

2.2 光栅反射对像面照度的影响分析

为避免分光棱镜剩余反射对分析光栅的影

响,设置分光棱镜各表面透过率为100%,对 光栅表面反射对应的像面条纹形状及照度分布 进行追迹。光栅为在K9玻璃上刻蚀的等间隔 直条纹,栅格间介质为K9,厚度为2mm,光 栅周期为0.2mm。玻璃光栅结构如图8所示。 A面为刻蚀条纹面,B面为无刻蚀条纹的玻璃 面。根据图3所示的结构,分别设置光栅A



图 6 分光棱镜取不同剩余反射率时像面一个条纹周期照度分布的对比曲线





面、B面正对分光镜,并设置光栅表面剩余反 射率为0、0.1%、0.5%、1%。相应像面的条 纹分布如图9所示(上排为A面正对分光镜, 下排为B面正对分光镜)。

由图 9 的结果可知,随着光栅表面反射的 增加,条纹中心产生亮斑。在同样的反射率 下,B面正对分光镜时的中心亮斑强度大于 A 面正对分光镜时,前者对条纹分辨率的影响更 加严重。为进一步分析对比 A 面与 B 面正对 分光镜形成亮斑的影响,提取亮斑位置数据并 分析 y=0 时 x 坐标从-0.8 至 0.8 区间的数据 分布(见图 10)。



图 8 玻璃光栅双面示意图



图 9 玻璃光栅不同面反射率引起的照度分布对比: (a) 0; (b) 0.1%; (c) 0.5%; (d) 1%



图 10 光栅不同面正对分光镜时表面反射对应的条纹照度分布曲线

由图 10 的数据对比曲线可知,当光栅 A 面正对分光镜时,随着光栅表面反射增大,像 面中心照度值增大。与光栅表面反射率为 0 时 相比,表面反射率为 0.5%时的亮斑区域最大 照度值增加 1.45 倍,背景照度增加 22 倍;当 光栅表面反射率为 1%时,亮斑区域背景照度 增加 40 倍以上,最大照度增加接近 2 倍。当 光栅 B 面正对分光镜且表面反射率为 0.5% 时,亮斑区域最大照度增加 1.98 倍,背景照 度增加 42.3 倍;当光栅表面反射率为 1%时, 亮斑区域背景照度增加 83 倍,最大照度增加 2.7 倍。因此,光栅 B 面正对分光镜时的背景 亮度比 A 面正对分光镜时增加接近 2 倍,亮斑 现象更加明显。这是因为 B 面正对分光镜时, 光源发出的光经 B 面反射直接进入相机;而当 A 面正对分光镜时,光源发出的光经 B 面反射 后再经过 A 面,被 A 面光栅栅格衰减一半, 导致亮斑亮度下降。因此,当检测系统采用玻



图 11 Ronchi 光栅检测系统的调试装置



图 12 光栅表面亚光处理前后的像面条纹对比

璃光栅时,尽量避免 B 面正对分光镜。

3 系统优化与实验

用分光片代替分光棱镜。分光片厚度为3 mm,与光轴呈 45°安装。优化系统间隔,补偿 分光棱镜的光程。玻璃光栅的表面反射率很难 小于 0.5%,因此不宜将玻璃光栅用作 Ronchi 检测时的光栅,而应采用金属光栅。金属光栅 只有一面反射可能影响条纹对比度,影响因子



图 13 消除杂光后双曲面镜(抛光中)在检测系统中的面型状况

减半。大口径双曲面为被检镜,无法用于检测 系统调试,因此改用小口径球面镜对 Ronchi 检测系统进行调试。在检测系统前置入附加镜 头,将其改为小口径球面镜检测系统。相应的 球面镜参数如下:D=50 mm,R=350 mm。 调试系统如图 11 所示,其中的插图为球面镜 的 Zygo 干涉仪检测结果。该球面镜的 RMS 值 为 0.018 λ (λ =632.8 nm),面型修正较好,可 将其用作系统调试的标准镜。

图 12 所示为金属光栅表面不同处理时调 试系统的检测结果。可以看出,只对光栅进行 黑化处理时,光栅表面存在反射,像面条纹对 比度改善,但中心亮斑现象依然存在,且有光 斑扩散现象。若依次对光栅表面进行亚光和黑 化处理,则像面上的中心亮斑现象消失,条纹 明暗对比度提高。将调试后的 Ronchi 检测系 统用于待检双曲面粗加工检测,其抛光过程条 纹如图 13 所示。图 13(a)所示为抛光过程某阶 段的结果。由条纹图可知,存在较大球差、环 带球差,需要有针对性地进行局部抛光,尤其 是修正环带球差。图 13(b)所示为抛光修正部 分像差后的结果。可以看出,环带球差已修 正,但存在整体球差,需要对整个镜面精细抛 光。

4 结束语

在光两次透过 Ronchi 光栅检测非球面镜 面型的检测光路中,系统元件的剩余反射会造

成像面上明暗条纹对比度下降。分光棱镜表面 剩余反射会造成像面上背景亮度的增加,影响 条纹对比度。分光镜表面剩余反射需接近于 0,像面条纹方可分辨。用分光片替代分光棱 镜可避免剩余反射对条纹对比度的影响。光栅 表面反射会使像面中心产生亮斑现象。当玻璃 光栅非条纹面正对分光镜时,产生的亮斑亮度 大于条纹面正对分光镜时产生的亮斑亮度,条 纹难以分辨。避免使用玻璃刻蚀光栅, 而采用 金属-空气光栅。对金属光栅表面进行粗糙、 染黑处理有助于解决条纹中心的亮斑问题。对 光栅表面粗糙化后进行黑化处理,像面上的杂 光现象消失,明暗条纹对比度较高,检测系统 具有高可靠性。基于该研究,后续将重点分析 不同照明方式、不同光栅特征对检测结果的影 响,同时研究 Ronchi 光栅与 Moire 条纹法检测 非球面的区别。

参考文献

- [1] Malacara D. Optical shop testing [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2007.
- [2] Omura K, Yatagai T. Phase measuring Ronchi test [J]. Applied Opcics, 1988, 27(3): 523– 528.
- [3] Alberto C D, Santiago C P, Jorge G G. Lensometer with autocollimation and a square Ronchi grid
 [J]. Applied Optics, 2020, 59(6): 1726–1731.
- [4] 雷柏平, 伍凡, 陈强. 大口径非球面 Ronchi 光

栅测量方法 [J]. 光电工程, 2007, 34(5): 140-144.

- [5] Malacara D, Cornejo A. Null Ronchi test for aspherical surfaces [J]. Appl Opt, 1974, 13(8): 1778–1780.
- [6] 郭春风, 苏显渝, 陈文静, 等. 一种新的非球面 零朗齐检测法 [J]. 光学学报, 2012, **32**(8): 0812002.
- [7] Malacara D. Geometrical Ronchi test of aspherical mirrors [J]. Appl Opt, 1965, 4(11): 1371– 1374.
- [8] 郭春风,苏显渝,窦蕴甫,等. 用正弦光栅的朗

奇法检验大口径非球面面形 [J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0422001.

- [9] Cornejo A, Malacara D. Ronchi test of aspherical surfaces, analysis and accuracy [J]. Appl Opt, 1970, 9(8): 1897–1901.
- [10] Malacara D著. 白国强, 薛君敖译. 光学车间检验 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [11] 高海滨. 二次曲面镜的朗奇法检验灵敏度及精度分析研究 [D]. 烟台: 烟台大学, 2008.
- [12] 苏显渝,李继陶. 信息光学 [M]. 北京:科学出版社,1999.