

近柱面干涉检测研究

谢本超^{1,2}, 卢振武¹, 李凤有¹, 孙强¹

(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2.中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:采用计算机仿真技术模拟了近柱非球面的正入射式检测装置。获取并分析了理想近柱面和理想柱透镜下的干涉图。讨论了降低干涉图 $P-V$ 值的方法以及不同面形的近柱面在该装置下的可检性。

关键词:光学检测; 近柱面; 柱透镜; 干涉图

中图分类号: O438 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)01-0054-04

Interferometric measurement of near-cylindrical surfaces

XIE Ben-chao^{1,2}, LU Zhen-wu¹, LI Feng-you¹, SUN Qiang¹

(1.State Key Laboratory for Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In this paper, the testing set for near-cylindrical surfaces is simulated by computer. The interferograms under ideal near-cylindrical surfaces and ideal cylindrical lens are got and analyzed. The method to reduce $P-V$ value of the interferograms and the testability of all kinds of near-cylindrical surfaces under the testing set are discussed.

Key words: Optical testing; Near-cylindrical surfaces; Cylindrical lens; Interferogram

0 引言

在 Wolter-I 和 Wolter-II 型 X 射线望远镜中, 系统的主镜和次镜均为抛物面镜和双曲面镜^[1]。欧洲航天局的 XMM (X-射线多镜片) Wolter-I 型望远镜, 其主镜和次镜分别由 58 块可被独立加工和检测的小镜片组合而成; 主镜上的 58 块小镜片构成抛物面环, 次镜上的 58 块小镜片构成双曲面环^[1,2]。由于环的局部面形与柱面近似, 故称这类环面为“近柱面”。

使用 Fezau 干涉仪检测近柱面的面型误差时, 入射光有两种入射方式: 正入射和掠入射。J. M. Geary 分析了掠入射式检测的不足, 并首次采用正入射方式对近柱面进行了检测。利用 J. M. Geary 的正入射式装置检测近柱面时, 主要步骤包括: 获取近柱面无制作误差时的理想干涉图; 采集实际干涉图; 将理想干涉对应的波像差从实际干涉图对应的波像差中去除^[3,4]。

目前, 国内对深空探测的研究已被提上日程^[5]; 作为深空探测的重要手段之一, X 射线望远镜逐渐受到

收稿日期: 2004-07-16; 修订日期: 2004-09-05

作者简介: 谢本超(1980-), 男, 四川隆昌人, 硕士生, 研究方向为光学检测。

关注;但对 X 射线望远镜中近柱镜面的加工和检测,相关报道较少。本文利用仿真软件模拟了近柱面的正入射式检测装置,得到多种情形下的理想干涉图并对其进行了分析;为了降低干涉图条纹密度、改善干涉图质量,讨论了两种检测装置优化方案;通过对不同圆锥系数的各种二次曲面上不同部位处的干涉图进行比较分析,得到了近柱二次曲面在该装置下可检性的一般结论。

1 检测装置

检测装置主要包括 Feizau 干涉仪、反射镜、平凹柱透镜及被检近柱面^[3],如图 1 所示。其中,平凹柱透镜作为该装置中的关键元件,其加工误差必须被高精度标定,以便于将其带来的检测装置系统误差从干涉图中去除^[6,9]。

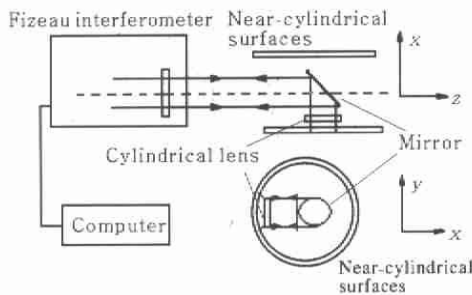


图 1 近柱面检测装置

Fig.1 Testing set for near-cylindrical surfaces

从干涉仪射出的平面波,被反射镜转折 90°后穿过柱透镜,变成标准柱面波(暂不考虑理想柱透镜的像差)。柱面波经近柱面反射后原路返回,在干涉仪内部与参考波发生干涉,形成干涉条纹。显然,为了使光波原路返回,被检面的旋转对称轴应与柱透镜的焦线重合^[3]。

干涉装置在 $x-z$ 平面内的光路如图 2 所示。设被

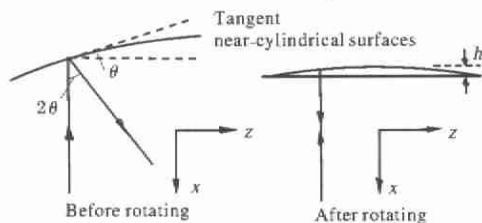


图 2 $x-z$ 平面内光路分析

Fig.2 Analyses for optical paths in $x-z$ plane

检面的切线与 z 轴的夹角为 θ ,则反射光线和入射光线的夹角为 2θ ,可见后者对前者的变化是敏感的。为了使光线近似原路返回(使 $2\theta \approx 0^\circ$),可以将被检面旋转一定角度,使其截线的弦与 z 轴平行。此时 θ 显著减小, $2\theta \approx 0^\circ$,光线近似原路返回。

2 干涉图的获取和分析

按图 2 所提到的要求,在仿真软件中构造正入射式干涉检测装置。取光源波长 $\lambda=550 \text{ nm}$,柱透镜面积为 $15 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 。考虑到柱透镜对光波的发散作用,实际被检区的宽度要略大于 15 mm 。

设被检面是圆锥系数为 -1.0 的无制作误差抛物面,旋转半径为 300 mm ,被检部位所在环面距抛物面顶点约 200 cm 。干涉图如图 3 所示,每条条纹代表 2λ 的程差; $P-V$ 值约 30λ 。该干涉图有如下两个特点:

- (1)干涉条纹近似平行于 y 轴,表明干涉装置的像差主要分布在 z 方向上, y 方向上的像差较小;
- (2)自中心向外,干涉图条纹密度越来越大;随着被检区面积的扩大,干涉图条纹密度的平均值和局部最大值将显著增加。

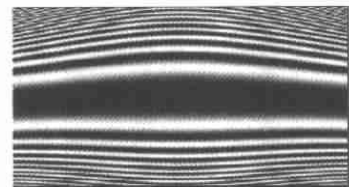


图 3 抛物面的干涉图

Fig.3 Interferogram of paraboloid

计算机模拟表明,以上两个特点在各种近柱面干涉图中普遍存在。

3 干涉装置优化设计

如前所述,随着被检区面积的扩大,干涉图条纹密度的平均值和局部最大值将显著增加。由于光电探测器感光元数目有限,过大的条纹密度将导致干涉图不能被光电探测器正确采集,这就需要对干涉装置进行优化设计,以降低干涉图 $P-V$ 值并阻止条纹的局部聚集。本文重点讨论了引入离焦和调整倾斜角对干涉图 $P-V$ 值和条纹聚集状态的影响。

在图 3 中, y, z 两个方向上的干涉条纹均呈现出

愈往外密度愈大的趋势;在视场的四个角落里条纹密度最大。为了提高干涉图的质量,可以考虑引入适量的离焦,让离焦带来的像差与原有像差相互作用,将四个角落里的部分干涉条纹赶出视场。采取该措施后,干涉图 $P-V$ 值由 30λ 大幅降低至 16λ ,四个角落里的条纹密度显著降低。引入离焦后该抛物面的干涉图如图 4 所示。

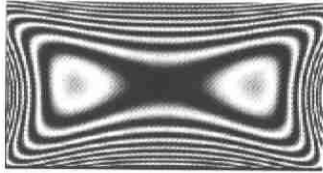


图 4 引入离焦后抛物面的干涉图

Fig.4 Interferogram of paraboloid with defocus

引入离焦带来的又一后果是使 y 方向上的像差显著增加,限制了可检区长度在 y 方向上的进一步扩展。因此,可以认为引入离焦是以减小可检区在 y 方向上的长度为代价来增加可检区在 z 方向上的长度。考虑到问题的主要方面是 z 方向上的可检长度不足,那么引入离焦就显得很有必要了。

作为二次曲面的固有属性,被检区面形在 z 方向上不具有严格的对称性。体现在干涉图上,就是上半平面和下半平面内各自包含的条纹数总是不同。就视场的四个角落来看,上边两角处的干涉纹密度明显大于下边两角。这在图 5 所示双曲面的干涉图中表现尤为明显,其中,双曲线旋转半径为 100 mm ,圆锥系数为 -1.1 ,被检部位所在环面距双曲线面顶点约 100 cm 。干涉图的 $P-V$ 值约 47λ 。

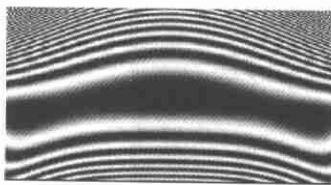


图 5 双曲面的干涉图

Fig.5 Interferogram of hyperboloid

为了提高干涉图质量,可以对双曲面旋转轴与 z 轴的夹角 θ 进行微调,使干涉条纹在上、下半平面内重新分配。调整后的干涉图如图 6 所示, $P-V$ 值由调整前的 47λ 降至 31λ ,上边两角处的条纹密度有所降

低。注意,调整倾斜角并不一定能使条纹总数减少;它的主要作用是把上半平面内的部分条纹转移到下半平面,改变了条纹分布。

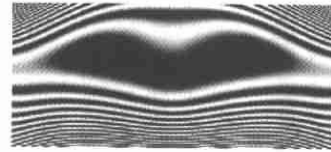


图 6 调整倾斜角后双曲面的干涉图

Fig.6 Interferogram of hyperboloid with tilt

为了将干涉图的条纹密度尽可能地降到最低,需要在引入离焦的同时对倾斜角 θ 进行调整。设干涉图的 $P-V$ 值为 P_V 、离焦量为 L ,则有: $P_V = P_V(L, \theta)$ 。利用仿真软件中的优化算法可以求出 $P_V(L, \theta)$ 的局部最小值。经此优化后的干涉图如图 7 所示,其 $P-V$ 值由最初的 47λ 急剧降低至 16λ 。

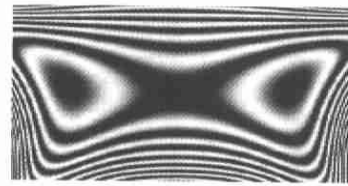


图 7 引入离焦、调整倾斜角后双曲面的干涉图

Fig.7 Interferogram of hyperboloid with defocus and tilt

4 关于近柱二次曲面的可检性的讨论

通过对干涉装置进行优化设计来改变干涉图,其效果是有限的;影响干涉图的决定性因素是被检面的面形。不同圆锥系数的近柱面上不同部位处的面形不同、干涉图各异。为了讨论近柱面在正入射式检测装置下的可检性,首先需要分析圆锥系数和被检区位置对干涉图的影响。

当被检面是一理想柱面时,干涉装置在 z 方向上没有像差,在 y 方向上有数值较小的柱透镜球差,其干涉图为一组平行于 z 轴的直线。对一旋转半径为 300 mm 的柱面,引入适量离焦后 $P-V$ 值能被控制在 4λ 以内,干涉图如图 8 所示。显然,可检区在 z 方向上的长度几乎不受像差限制;限制可检区面积大小的主要因素是 y 方向上的球差。

与柱面不同的是,近柱面在 $x-z$ 平面内的截线总是具有一定的弧度。截线上特定点附近的干涉条纹密度(ρ)由该点的切线与 z 轴的夹角(θ)所决定,即: $\rho =$

$k|\text{tg}(\theta)|$, 式中 k 为与波长相关的常数。通常, 当二次曲面圆锥系数越小、被检区距顶点越远时, 截线的弧度越小, 从而 $|\text{tg}(\theta)|$ 越小, 截线上的干涉条纹密度也越小; 反之则条纹密度越大。

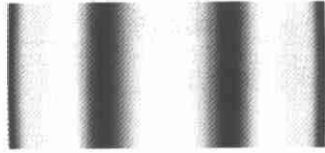


图 8 柱面的干涉图

Fig.8 Interferogram of cylinder

与柱面类似, 近柱面干涉图在 y 方向上的像差主要源于柱透镜的球差; 当二次曲面的圆锥系数越大、被检区距顶点越近时, 要求柱透镜凹面的旋转半径越小, 此时柱透镜的球差增大。近柱面在 y 方向上的像差还与近柱面旋转轴相对于 z 轴的倾斜角有关; 当近柱二次曲面的圆锥系数越小、被检区距顶点越近时, 引入的倾斜角越大。

总体上看, 在 z, y 两个方向上, 过大的圆锥系数和被检部位对曲面顶点的过于接近, 都将导致像差的增加。当二次曲面的旋转半径、被检区所在环面距曲面顶点的距离分别取某一定值时, 曲面圆锥系数与干涉图 $P-V$ 值之间的关系如图 9 所示; 当二次曲面的旋转半径、曲面圆锥系数分别取某一定值时, 被检区所在环面距曲面顶点的距离与干涉图 $P-V$ 值之间的关系如图 10 所示。

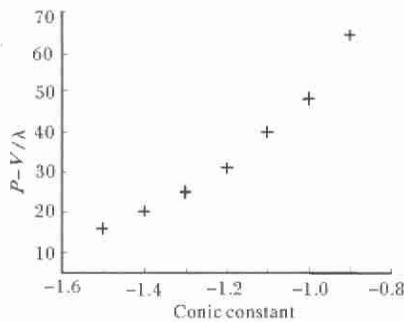


图 9 圆锥系数与 $P-V$ 值的关系

Fig.9 Conic constants as a function of $P-V$ values

在光电探测器性能一定的情况下, 过大的条纹密度将导致干涉图不能被正确采集。因此, 干涉图在 y, z 两个方向上的像差都被限制在一定范围内。由上述模拟和分析可知, 近柱二次曲面的可检性必与其圆锥系数和被检部位到曲面顶点的距离密切相关; 当圆锥

系数较小、被检部位距曲面顶点距离较近时, 逐渐增大的像差将使二次曲面在本装置下缺乏可检性。

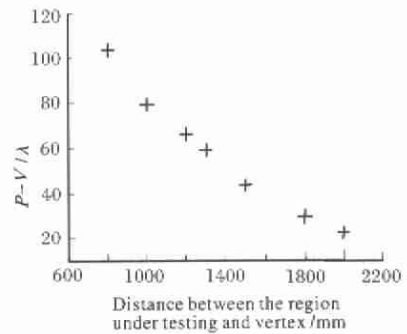


图 10 被检区位置与 $P-V$ 值的关系

Fig.10 Positions of the tested area

as a function of $P-V$ values

5 结论

采用计算机仿真技术模拟近柱面检测装置, 便于得到理想近柱面和理想柱透镜下的干涉图(该干涉图将在后续的数据处理过程中用到)。模拟的意义还在于便于确定检测装置的结构参数, 包括柱透镜的厚度和凹面半径、近柱面旋转轴相对于 z 轴的倾斜角等。

对理想干涉图的分析表明, 引入适量离焦和对倾斜角进行微调均能起到改善干涉图质量、降低干涉条纹密度的作用; 综合利用两种方法, 则效果更佳。由于常见的光学设计软件中都有求二元函数局部最小值的现成算法, 这简化了寻找最佳离焦量和倾斜角数据的过程。

本文对多种面形下的近柱面干涉图进行了比较分析, 结果表明: 当圆锥系数较小、被检部位距曲面顶点较近时, 近柱二次曲面在本装置下将缺乏可检性。该装置也能对柱面进行检测, 且能一次性检测较大的面积。检测柱面时限制被检区大小的主要因素是 y 方向上的像差; 检测近柱面时的主要限制因素是 z 方向上的像差。

参考文献:

[1] Patrick L Thompson, James E Harvey. The 'aplanatic' wolter type I telescope design: is there a practical advantage? [A]. SPIE[C]. 1998, 3444.526-542.

虽然离轴入射使视网膜漫反射光的光强分布与沿光轴入射稍有不同,但 Hartmann-Shack 波前传感器测量的是光斑与参考点阵的相对移动,通过光斑移动的斜率算出眼睛的波像差和泽尼克系数,所以离轴入射不会对测量精度产生影响,这一点已被实验所证实。而且薄半透半反镜不具有对偏振态的筛选性,会使入射到 CCD 上的视网膜反射光能量有很大提高,大幅提高信噪比,得到极为清晰的图样,如图 3 (d) 所示。

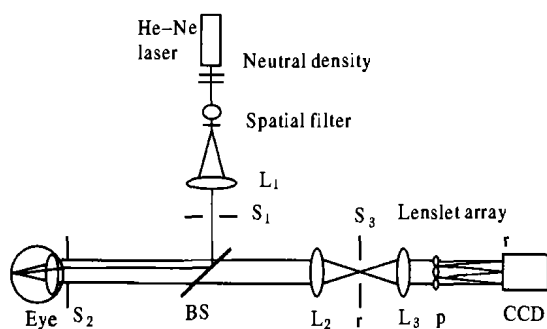


图 4 离轴入射的 Hartmann-Shack 人眼波前传感器
Fig.4 Schematic of Hartmann-Shack wave front sensor for the eye with off-axial methods.

4 结论

实验研究了消除波前传感器中角膜反射光噪声的两种方法,并通过实验用模拟人眼进行了验证。

利用偏振分光棱镜虽然可以提高信噪比,但其额外带来的内部反射噪声是正入射时不可克服的困难。用旋转偏振分光棱镜,使光线斜入射的方法在保证原

有高信噪比的前提下,完全消去了偏振分光棱镜的内反射噪声。但由于偏振分光棱镜对偏振态的筛选性,使反射信号有一定程度衰减,不利于测量。离轴入射法解决了这一问题,这种方法不但具有高信噪比而且增加了入射到 CCD 上信号的能量,并使光斑的均匀性得到提高。

参考文献:

- [1] H von Helmholtz. Physiological Optics[M]. New York: Dover, 1896.
- [2] Liang J, Grimm B, Goelz S, et al. Objective measurement of the wave aberrations of the human eye with the use of a Hartmann-Shack wave-front sensor[J]. J Opt Soc Am A, 1994, 11: 1949-1957.
- [3] Hofer H, Artal P, Singer B, et al. Dynamics of the eye's wave aberration [J]. J Opt Soc Am A, 2000, 18: 497-506.
- [4] Liang J, Williams D R. Aberrations and retinal image quality of the normal human eye[J]. J Opt Soc Am A, 1997, 14: 2873-2883.
- [5] 潘笃武, 贾玉润, 陈善华. 光学[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1997.
- [6] Pierscionek B K, Weale R A. Investigation of the polarization optics of the living human cornea and lens with Purkinje images[J]. Applied Optics, 1998, 37: 6845-6851.
- [7] Williams D R, Brainard D H, McMahon M J, et al. Double-pass and interferometric measures of the optical quality of the eye[J]. J Opt Soc Am A, 1994, 11: 3123-3135.
- [8] Van Blokland G J. Ellipsometry of the human retina in vivo: preservation of polarization[J]. J Opt Soc Am A, 1985, 2: 72-75.
- [9] Bueno J M, Artal P. Double-pass imaging polarimetry in the human eye [J]. Optic Letters, 1999, 24: 64-66.

(上接第 57 页)

- [2] Glatzel H, Schmid M, Egle W, et al. Assembly, performance prediction and X-ray test of the demonstration model ODM for the X-ray telescope XMM [A]. SPIE[C]. 1994, 2210: 360-372.
- [3] Geary J M. Interferometry on grazing incidence optics [J]. Optical Engineering, 1987, 26(12): 1125-1128.
- [4] Geary J M. Interferometry on Wolter X-ray optics: a possible approach[J]. Optical Engineering, 1989, 28(3): 217-221.
- [5] 欧阳自远, 李春来, 邹永廖. 深空探测进展与开展我国深空探测的思考[J]. 国际太空, 2003, (2): 2-6.
- [6] Alfred Gatzweiler, Holger Glatzel. Interferometric measurement of near-cylindrical surfaces with high amplitude resolution[J]. Applied optics, 1995, 34(31): 7207-7212.
- [7] Geary J M. New test for cylindrical optics[J]. Optical Engineering, 1987, 26(8): 813-820.