

文章编号: 0253-2239(2008)12-2321-04

点衍射干涉仪中小孔衍射波面误差分析

马 强^{1,2} 刘伟奇¹ 李香波^{1,2} 康玉思^{1,2} 魏忠伦¹ 冯 睿¹ 柳 华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 针孔或光纤直径的大小是影响点衍射干涉仪检测精度的重要因素,在实际检测中须根据检测任务的精度要求来选择小孔的尺寸。基于标量衍射理论,仿真计算了小孔尺寸引起的衍射波面相对标准球面偏离的误差。结果表明,当小孔直径为 $2.5\ \mu\text{m}$,数值孔径(NA)为 0.3 时,与小孔有关的光学系统误差峰值(PV)约为 0.07 nm。仿真方法和计算结果为针对各种高精度面形检测任务而设计点衍射干涉仪和分析其精度提供了理论和数据参考。

关键词 光学检测;点衍射干涉仪;标量衍射;衍射波面误差

中图分类号 O436.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20082812.2321

Analysis of Diffraction Wavefront Error in Point Diffraction Interferometer

Ma Qiang^{1,2} Liu Weiqi¹ Li Xiangbo^{1,2} Kang Yusi^{1,2} Wei Zhonglun¹
Feng Rui¹ Liu Hua¹

(¹ State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130031, China)
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract The diameter of pinhole or fiber is a critical element that affects the precision of point diffraction interferometer (PDI). The dimension of the aperture is determined by variational accuracy of practical measurement. Based on the scalar diffraction theory, the deviation between diffraction wavefront and sphericity aroused by the dimensions of the aperture is simulated and analyzed. The results show the wavefront error of the optical system is about 0.07 nm peak-valley value (PV) when the numerical aperture (NA) is 0.3 and the aperture diameter is $2.5\ \mu\text{m}$. The method and results of simulation analysis provide theory and data reference for choosing the dimension of aperture along with the analysis or design of PDI for various testing tasks of accuracy requirement.

Key words optical testing; point diffraction interferometer; scalar diffraction; diffraction wavefront error

1 引 言

球面镜是许多光学系统的重要组成部分,而其面形质量也是影响整个系统性能的至关重要的问题。例如在 X 射线望远镜中,一些球面的面形精度均方根(RMS)值要求达到 $1.25\sim 5\text{nm}$ ^[1],在使用波长 $11\sim 14\ \text{nm}$ 的极紫外光刻中,要求某些光学元件的面形 RMS 精度为 0.27 nm,如果使用常用的波长为 632.8 nm 的可见光来检验,要求检测仪的本身

RMS 精度至少达到 $\lambda/10000$ ^[2]。而现有商业干涉仪的 RMS 精度大约为 $\lambda/50\sim\lambda/100$,远远不能满足检测要求。干涉检测法的精度往往取决于使用的参考波面的精度。传统的干涉检测仪,一般使用标准参考球面来产生参考波面,其精度往往受限于参考球面的较大误差。点衍射干涉仪不使用参考球面而是使用小圆孔衍射来产生理想的球面波,可以实现面形的绝对测量。

收稿日期: 2008-03-28; 收到修改稿日期: 2008-06-02

作者简介: 马 强(1984—),男,硕士研究生,主要从事光学检测、视频显示和图象处理技术等方面的研究。

E-mail: maqiang19842002@163.com

导师简介: 刘伟奇(1958—),男,研究员,博士生导师,主要从事光学检测、激光彩色视频显示技术等方面的研究。

E-mail: liuwq@ciomp.ac.cn (通信联系人)

点衍射干涉仪的两个主要的误差来源是参考波面误差和系统的几何结构产生的误差,在几何结构产生的误差能被精确测量时,可被完全消除,但参考波面的误差却难以消除^[2],所以各种点衍射干涉仪的重要误差来源都是小孔衍射产生参考波面的误差,即衍射波面相对于标准球面的偏离^[3]。参考波面的误差主要与产生它的小孔尺寸有关。本文基于标量衍射理论,仿真计算了小孔尺寸引起的衍射波面相对标准球面偏离的误差。

2 仿真计算和分析

如图 1 为点衍射干涉仪(PDI)的基本原理。氦氖激光器产生的短相干长度激光经物镜聚焦在小孔后发生衍射,产生近似球面的衍射波面。其中一部分作为参考球面波 W1,一部分作为照明光 W2(或称检测波)照射待检球面,反射后携带了待检球面面形信息的 W3 又经小孔处反射镜反射后(W4)与参考球面波 W1 发生干涉,干涉条纹由 CCD 相机接收,然后输入到计算机进行分析^[4]。

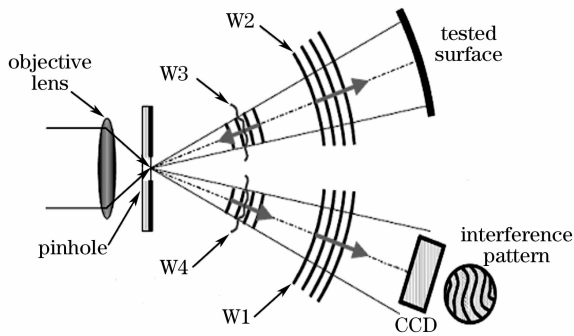


图 1 点衍射干涉仪的基本原理

Fig. 1 Principle of PDI

因聚焦在小孔处的高斯光束的束腰一般为小孔尺寸的几倍,所以入射波可看作平面波^[5,6]。仿真计算将圆孔分为若干点光源,并假定它们在圆孔处的振幅和相位都是一致的。因圆孔的直径相当小(微米级),假设应该符合常理。在仿真计算前,首先

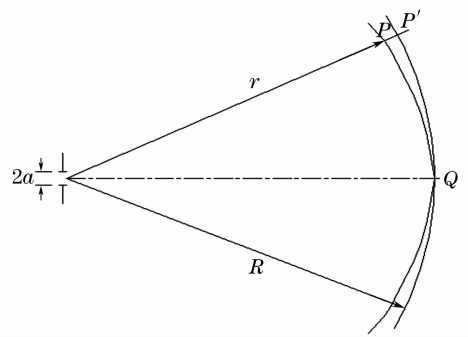


图 2 衍射波面示意图

Fig. 2 Sketh of diffraction wavefront

定性分析一下小孔衍射后的波面。如图 2,因为圆孔的圆对称性和连续性,衍射波面应该是关于球顶点 Q 对称的,在等相位面上远离顶点时其曲率半径也应该是连续变化的。即衍射波面可认为是一个近似球面的对称面,且越远离顶点,衍射波面离标准球面越远,即衍射球面误差越大。基于以上分析,将衍射波面边缘点 P 到标准球面点 P' 的距离等效为衍射波面偏离球面的误差(或称衍射球面的误差)峰值(PV),即 $E_{PV} = R - r$,因为仅考虑 PV 不大于一个波长时的情况,又可将 PV 用标准球面边缘点 P 处衍射波面相位与标准球面顶点 Q 处相位的差值来表示:

$$E_{PV} = (\psi_Q - \psi_P)\lambda / (2\pi), \quad (1)$$

式中 ψ_Q, ψ_P 分别为 Q, P 处的相位。这样,衍射波面偏离球面的误差 PV 的计算就转化为衍射波面在两个确定点的相位的计算。

根据光波叠加原理,对于频率相同,振动方向相同的单色光波,在空间某点的合振动场强为

$$E = \sum A_i \cos(\alpha_i - \omega t), \quad (2)$$

式中 α_i, A_i 分别为参与叠加的各点的相位和振幅。此点的相位为

$$\psi = \arctan \left[\frac{\sum A_i \sin \alpha_i}{\left(\sum A_i \cos \alpha_i \right)} \right], \quad (3)$$

所以,

$$E_{PV} = \left\{ \arctan \left[\frac{\sum A_{iQ} \sin \alpha_{iQ}}{\left(\sum A_{iQ} \cos \alpha_{iQ} \right)} \right] - \arctan \left[\frac{\sum A_{iP} \sin \alpha_{iP}}{\left(\sum A_{iP} \cos \alpha_{iP} \right)} \right] \right\} \lambda / (2\pi), \quad (4)$$

式中 $A_{iQ}, \alpha_{iQ}, A_{iP}, \alpha_{iP}$ 分别为小孔上各点在 Q 点和 P 点的振幅和相位。

需要指出的是,严格的讲,在圆孔尺寸与波长相比拟甚至小于波长时,入射光波在圆孔边界上会发生电(磁)矢量的三个分矢量之间的耦合,所以需要使用严格的电磁理论计算衍射场的分布,即矢量衍

射理论。而使用电磁理论计算,不但计算过程十分复杂,而且要达 10^{-5} 的计算精度也十分困难,另外因为基于电磁理论的数值仿真在可见光部分的收敛速度很慢而需花费很长的计算时间^[6]。所以上采用的仿真分析是基于标量衍射理论的。标量衍射理论已被证明在小孔直径为几倍波长时可认为与矢量

衍射理论完全近似^[5]，而本文主要计算的是小孔直径为波长的 2~8 倍时的情况，所以仿真计算误差可忽略。

使用数值计算方法^[7]和计算机仿真时，使用了积分的方法来避免将小孔分为有限个点源时产生的计算误差。取待检球面半径为 1 m，检测波长为 632.8 nm，得到不同的小孔半径时在不同数值孔径 (NA) 上的衍射波面误差 PV。如图 3 所示。

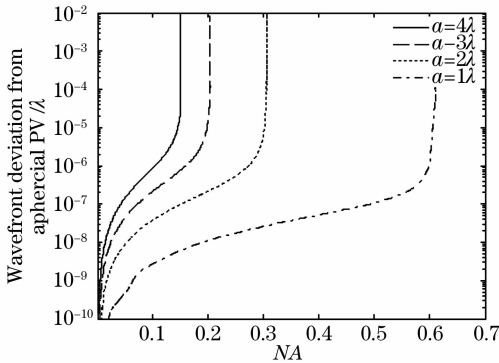


图 3 衍射波面偏离球面的误差与小孔半径的关系

Fig. 3 Deviation of a diffraction wavefront from sphericity for different aperture radius *a*

由图 3 可知，若要使衍射球面误差小于 $10^{-5}\lambda$ ，当待检球面 $NA=0.2$ 时，小孔半径需小于 3λ (小孔直径小于 $3.7\ \mu\text{m}$)。当待检球面 $NA=0.6$ 时，小孔半径要小于 1λ (小孔直径小于 $1.3\ \mu\text{m}$)。而由上文可知标量计算的适用范围为小孔直径为波长的 2 倍以上，所以若要求精度为 $10^{-5}\lambda$ ，待检球面 $NA < 0.6$ 时可使用本计算结果，而待检球面 $NA > 0.6$ 时，必须使用矢量衍射理论仿真计算。具体适用情况应根据待检球面数值孔径和精度要求具体分析。将图 3 改变为更容易观察的形式，如图 4 所示。

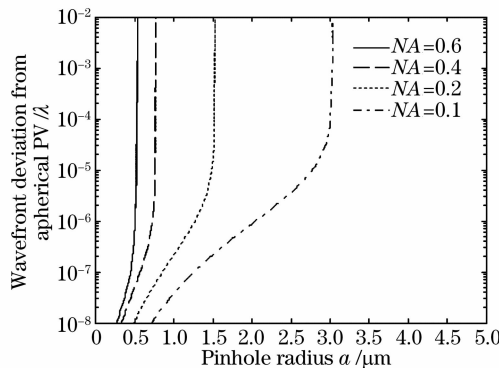


图 4 波面误差和小孔的关系

Fig. 4 Wavefront error versus pinhole radius

另外根据不同参数时的仿真计算可知衍射球面误差 PV 是关于小孔半径与波长的比值，待检球面

半径和 NA 的函数。在小孔半径与波长比值、待检球面半径、NA 一定时，PV 与波长的比值也是一定的，所以选取更小的检测波长和相应的小孔半径时，PV 越小，这也是使用短工作波长检测精度更高的原因。当小孔半径与波长的比值，NA 一定时，待检球面半径越大，衍射球面误差越小，这也是符合常理的。因为相对于越大的待检球面半径，有限尺寸的小孔越可近似为一个点。

3 有效性及其他误差分析

文献[8]使用矢量衍射理论分析了二维情况下的点衍射后的波面误差，其参数为：波长为 632.8 nm，待检球面半径为 0.1 m， $NA=0.6$ ，小孔直径分别 400~700 nm (在此范围内，标量近似实际是无效的)。文献[7]的仿真结果与同样的参数下使用本文的标量分析计算的结果的比较如图 5 所示。可知在小孔直径小于波长时误差大约为两个数量级，而随着小孔直径的增加，标量计算的结果与矢量分析中 TE 波的差别逐渐缩小，可以预见在本文计算的小孔直径为 2~8 倍波长范围内，计算误差能保持在一个数量级之内 (即实际衍射球面误差可能会比计算结果大一个数量级)。

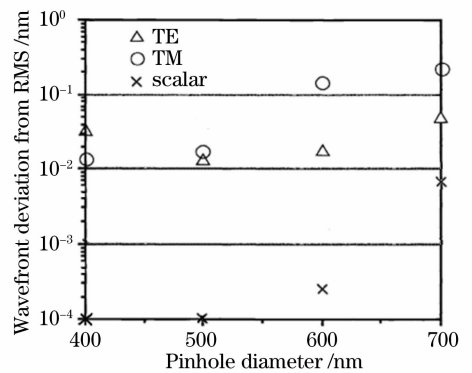


图 5 标量仿真的结果与矢量结果的比较

Fig. 5 Comparison of scalar simulation and vector results

仿真计算结果实际为峰值，一般来说，RMS 值为 PV 的 $1/2 \sim 1/8$ ，即实际 RMS 值还要优于数值计算 PV 的结果。所以若将计算结果作为 RMS 值保守考虑时，误差会更小。

实际的点衍射干涉仪中还有影响参考波面的其他误差，比如汇聚物镜的像差 (主要是彗差)^[9,10]，聚焦光斑和小孔的对准精度、小孔的不圆度、小孔反射镜的表面粗糙度等。文献[11]给出的这些误差的典型值分别为 0.01 nm, 0.04 nm, 0.05 nm, 0.02 nm，则小孔直径为 $2.5\ \mu\text{m}$ ， $NA=0.3$ 时，与小孔有关的

光学系统误差 $\Delta\omega=0.07\text{ nm}$ 。

如果要提高整个系统的精度,还需考虑减小包括以上几个因素之内的许多方面的误差。另外因为待检面反射回的波面汇聚点相对小孔位置的偏移也会引起误差,所以系统的实际精度还与待检面的面形质量有关。待检面面形质量越好,检测精度越高。

4 结 论

仿真计算了小孔尺寸大小引起的衍射波面偏离球面的误差。根据计算可以估计点衍射干涉仪的系统 RMS 精度能够达到 $0.05\sim 0.1\text{ nm}$,计算结果可为点衍射干涉仪的设计提供数据支持。在根据实际检测任务精度要求选择小孔尺寸时,小孔尺寸越小,参考波面的质量越好,但同时透过的光功率也越小,所以会要求更高的光功率来获得对比度较好的干涉条纹,同时要求更长的曝光时间。所以要根据实际情况具体分析选择合适的小孔尺寸。

参 考 文 献

- 1 Liu Guogan, Zhang Xuejun, Wang Quandou *et al.*. Fiber point diffraction interferometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, **9**(2): 142~145
刘国淦,张学军,王权陡等. 光纤点衍射干涉仪的技术研究[J]. *光学精密工程*, 2001, **9**(2): 142~145
- 2 Patrick Naulleau, Kenneth A. Goldberg, Sang H. Lee *et al.*. The EUV phase-shifting point diffraction interferometer[C]. *AIP Conf. Proc.*, 2000, 66~72
- 3 Patrick Naulleau, Kenneth Goldberg, Sang Lee *et al.*. Characterization of the accuracy of EUV phase-shifting point diffraction interferometry[C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3331**: 114~123
- 4 Zhu Xiangbing, Chen Jin, Deng Shanxi *et al.*. Fabrication of varied-line-space plane gratings and wave fronts inspection[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(1): 72~75
朱向冰,陈瑾,邓善熙等. 平面变线密度光栅的制作和波前检测[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 72~75
- 5 Deng Xiaojiu, Li Huailong, Liu Caixia *et al.*. A comparative study of vectorial diffraction theories and the validity of scalar approximation[J]. *Chin. J. Quant. Electron.*, 2007, **24**(5): 543~547
邓小玖,李怀龙,刘彩霞等. 矢量衍射理论的比较研究及标量近似的有效性[J]. *量子电子学报*, 2007, **24**(5): 543~547
- 6 Zhou Wanzhi, Lu Zhenwu. A point-diffraction holographic interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 1986, **6**(12): 1130~1135
周万治,卢振武. 点衍射全息干涉仪[J]. *光学学报*, 1986, **6**(12): 1130~1135
- 7 Ye Yidong, Li Jianmin, Yan Hong *et al.*. Numerical simulation for optical beam diffraction propagation[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(suppl): 284~286
叶一东,李建民,颜宏等. 光束衍射传输的数值计算方法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(suppl): 284~286
- 8 K. Otaki, Y. Zhu, M. Ishii *et al.*. Rigorous wavefront analysis of the visible-light point diffraction interferometer for EUVL[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5193**: 182~190
- 9 Liu Hongzhan, Xu Rongwei, Liu Liren *et al.*. Far-field approximation and divergence of Gaussian beam with phase aberrations diffracted by a circular aperture[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 131~135
刘宏展,徐荣伟,刘立人等. 圆孔受限波差高斯光束的远场近似及发散度分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 131~135
- 10 Zhang Dongqing, Wang Xiangzhao, Shi Weijie *et al.*. New technique for aberration in-situ measurement of a lithographic projection system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 679~684
张冬青,王向朝,施伟杰等. 光刻机投影物镜的像差原位检测新技术[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 679~684
- 11 Kazuya Ota, Takahiro Yamamoto, Yusuke Fukuda *et al.*. Advanced point diffraction interferometer for EUV aspherical mirrors[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4343**: 543~550