

计算全息法检测离轴凸非球面照明镜组初始结构设计

任建锋^{1,2} 郭培基^{1,2}

(¹ 苏州大学现代光学技术研究所, 江苏 苏州 215006
² 苏州大学江苏省现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006)

摘要 设计一种特殊的应用于计算全息法(CGH)高精度检测离轴凸非球面系统的照明系统。该照明系统一方面用作参考系统,另一方面将检测光近似垂直投射到待检测镜面上,使得检测系统为近似共光路系统,降低照明系统的制造精度。分析了照明系统的几何光路模型,将复杂的两用途系统简化,得到照明系统工作距离、照明系统焦距以及参考面曲率半径三个特征参量之间的关系。设计时,通过控制这几个特征参量,得到满足检测要求的系统初始结构。设计结果表明,该方法可以满足系统使用要求。

关键词 全息术;计算全息法;离轴凸非球面;照明系统;近似共光路

中图分类号 O435.2 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0222005

Design of Original Structure of Illuminating System in Off-Axis Convex Aspherical Lens Testing System with Computer-Generated Hologram

Ren Jianfeng^{1,2} Guo Peiji^{1,2}

(¹ Institute of Modern Optical Technologies, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China
² Key Laboratory of Modern Optical Technologies of Jiangsu Province, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

Abstract A special illuminating system is proposed and designed in order to accurately test convex off-axis aspherical mirrors with computer-generated holograms (CGH). Illuminating system is used as reference system and used to project testing beam on under-testing aspherical mirrors vertically and also makes testing beam and reference beam near common-path. The geometrical system of this illuminating system is introduced and analysed. Then the relation of characters of work distance, focal length and the curvature radius of reference surface of illuminating system is obtained after simplify this multipurpose system to simple model system. The initial system can be realized by controlling these characteristic parameters as merit function during optical design process. Design results show that this method can satisfy requirement of system use.

Key words holography; computer-generated holograms; off-axis convex aspherical mirror; illuminating system; near common optical path

OCIS codes 050.1950; 120.2880; 120.3180; 120.4630; 120.4820

1 引言

在光学系统中应用非球面不但能够简化系统结构,还能够提高系统性能,因此在国防、航空航天等领域已开始大量使用非球面系统代替传统的球面系

统^[1~3]。

在一些高性能高要求的光学系统中,高精度非球面已经成为必不可少的元件。非球面元件的结构特殊性,使得其加工与检测极为困难,这成为制约高

收稿日期: 2011-06-06; 收到修改稿日期: 2011-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(60978045)、苏州市应用基础研究项目(SYG201037)和江苏高校优势学科建设工程资助课题。

作者简介: 任建锋(1980—),男,博士研究生,主要从事非球面加工检测方面的研究。E-mail: 210323003@suda.edu.cn

导师简介: 郭培基(1968—),男,博士,教授,主要从事非球面加工与检测等方面的研究。E-mail: gpj@suda.edu.cn (通信联系人)

精度非球面元件广泛应用的主要因素。而非球面检测技术是加工的基础,尤其是离轴凸非球面检测更是难点中的难点,而离轴凸非球面在大口径国防、空间遥感以及科研系统中常常不可避免,并且应用越来越广泛,因此,研究大口径离轴凸非球面的检测技术非常重要^[1~4]。

使用计算全息法检测非球面是美国 Arizona 大学光学中心 J. C. Want 等^[5~7]于 20 世纪 70 年代提出的,该方法利用计算机、绘图仪和照相技术合成全息图,用该计算全息图改变系统中的波面,使得波面与非球面表面匹配,从而形成检验非球面的计算全息法(CGH)。但是该方法在检测不透明材料大口径凸非球面时有很大的局限性。

20 世纪 90 年代 J. Burge 等^[8~10]应用曲面计算全息检测大口径非球面,这项技术也可以应用在凸非球面的检测上。之后,他们又运用双 CGH 检测离轴非球面^[11,12],并且在实际应用中,得到了较为理想的检测结果。但是运用双 CGH 检测离轴非球面这种方法,检测光路的搭建十分困难,需要在计算全息片上附加辅助相位结构或者使用其它定位方法来定位镜片在检测系统中的位置^[13],检测光路的搭建是制约其得到普遍应用的主要问题。

目前,应用双 CGH 检测离轴凸非球面的检验方法也得到其它科研单位的认可^[14]。但是对于其中最为重要的照明系统,目前尚无文献报道如何进行设计。一个好的照明系统能使得附加在 CGH 上的相位足够小,以减小制造误差对出射波面的影响。本文从几何光路出发,利用近轴近似条件,通过简化系统,推导出检测离轴凸非球面用的照明系统的特征参数,用其来指导设计,得到满足检测系统要求的照明系统。

2 系统分析

采用同轴检测系统检测离轴凸非球面可以降低系统装调难度,光路示意图如图 1 所示^[14]。从图中可以看出,若忽略成像系统且将离轴非球面镜看成是旋转对称结构,则该检测系统为同轴检测系统,因此,只要以两片计算全息片的零级光作为指导光,即可将待检测离轴镜放置于光轴上。

如图 1 所示,入射光波经过 CGH1 后,将 +1 级衍射光用作使用光,该光束经过 CGH2 后,选取 0 级衍射光作为参考光波,其被照明透镜最后一个面反射;选取 +1 级衍射光作为检测光波,其最终被待检测镜片反射。两束反射光均经过照明系统后在

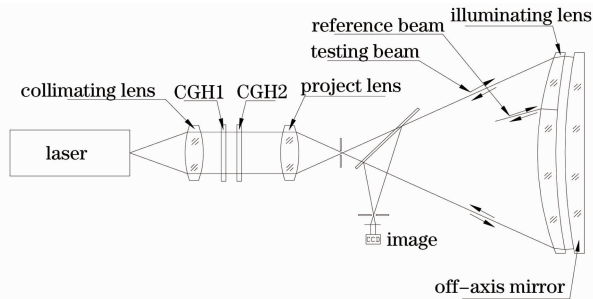


图 1 应用双计算全息片检测离轴凸非球面
Fig. 1 Testing off-axis convex aspheric mirror with double CGH

共同的像面上形成干涉。通过分析干涉图,可以得到待检测离轴非球面的面形误差分布情况。明显,在检测系统中,照明系统的最后一个面为系统参考面,CGH1 用于矫正参考系统中的残余球差,CGH2 用于矫正检测系统中的非轴对称像差以及残余球差。

为快速确定照明系统的特征参数,现对系统进行分析。图 2 为照明系统示意图,设入射点到照明系统主点的距离为 x_0 ,入射光被反射面反射后的会聚点到照明系统主点距离为 y_0 。设反射面的顶点到主点距离为 d_0 ,设光线与镜面的交点为 p ,入射光和反射光的延长线与光轴的交点与反射面的距离分别为 L 和 L' ,参考面曲率半径为 R 。另外在 p 点处,设入射光与法线夹角为 θ , p 点到光轴的距离为 h 。为了便于分析,设变量为无符号变量。

根据几何关系有

$$\begin{cases} \tan \varphi = \frac{h}{L-x} \\ \tan(\varphi + \theta) = \frac{h}{R-x} \\ \tan(\varphi + 2\theta) = \frac{h}{L'-x} \end{cases} \quad (1)$$

设考察光为近轴光,则有关近轴光的角度量很小,角度的正切值可以用其值来代替^[15],即 $\tan \varphi = \varphi$, $\tan(\varphi + \theta) = \varphi + \theta$, $\tan(\varphi + 2\theta) = \varphi + 2\theta$, 于是(1)式可以写为

$$\begin{cases} \varphi = \frac{h}{L-x} \\ \varphi + \theta = \frac{h}{R-x} \\ \varphi + 2\theta = \frac{h}{L'-x} \end{cases} \quad (2)$$

消去 θ 和 φ , (2)式可以简化为

$$\frac{h}{L'-x} + \frac{h}{L-x} = \frac{2h}{R-x} \quad (3)$$

当 $x \rightarrow 0$ 时, (3)式变形为

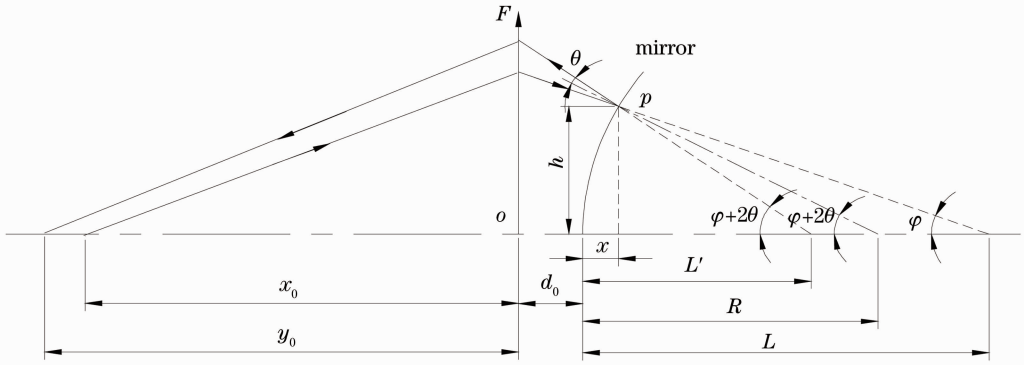


图2 系统示意图

Fig. 2 Configuration of testing system

$$\frac{1}{L'} + \frac{1}{L} = \frac{2}{R}, \quad (4)$$

对于参考光,结合高斯公式^[16,17]和(4)式,得到

$$\begin{cases} \frac{1}{x_0} + \frac{1}{d_0 + L_1} = \frac{1}{f} \\ \frac{1}{y_0} + \frac{1}{d_0 + L_1'} = \frac{1}{f} \\ \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_1'} = \frac{2}{R_1} \end{cases} \quad (5)$$

式中 R_1 为参考面曲率半径。

根据高斯公式,假设待检测面与参考面距离为 d ,对于检测光同样满足

$$\begin{cases} \frac{1}{x_0} + \frac{1}{d_0 + d + L_2} = \frac{1}{f} \\ \frac{1}{y_0} + \frac{1}{d_0 + d + L_2'} = \frac{1}{f} \\ \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_2'} = \frac{2}{R_2} \end{cases} \quad (6)$$

式中 R_2 为待检测凸非球面最接近球面曲率半径, d 为待检测面顶点与参考面顶点距离。

共光路系统中,参考光和检测光共光路经过某一零件后,该零件表面的形貌误差对最终干涉结果的影响可以忽略不计,所以使用共光路系统检测镜面可以提高检测精度^[18],本系统中共光路的前提为:检测光波垂直于待检测面,参考光垂直于参考面。在本检验光路中,离轴非球面为非旋转对称面而参考面为旋转对称面,所以无法使得系统为绝对共光路系统,但采用近似共光路检测系统(检测光与参考光经过的光路近似共光路)也可以降低对共光路零件的精度要求,尤其是低频误差。近似共光路的前提就是:检测光近似垂直于待检测面,参考光近似垂直于参考光。

检测光波被待检测面反射,且检测光波近似垂直于待检测面,根据光路可逆原理可以知道物点与像点在同一位置,即 $x_0 = y_0$ 。于是有

$$\begin{cases} L_1 = L_1' \\ L_2 = L_2' \\ L_1 = L_1' = R_1 \\ L_2 = L_2' = R_2 \end{cases} \quad (7)$$

系统中,由于有 $R_1 = R_2 + d$,则(5),(6)式整体变形为

$$\frac{1}{x_0} + \frac{1}{d_0 + R} = \frac{1}{f}, \quad (8)$$

式中 x_0 为物点到照明系统主点距离, d_0 为待检测面顶点到参考面顶点的距离, R 为待检测离轴非球面的最接近球面曲率半径, f 为照明系统焦距。

设计时,通过控制照明系统的这些特征参数,可以得到系统的初始结构。

3 设计实例

离轴凸非球面曲率半径为 277.152 mm,离轴量为 6 mm,离轴镜口径为 80 mm,工作距为 460 mm。经过计算,待检测离轴非球面的最接近球面曲率半径为 281.59 mm。利用(8)式得到表 1 所示基本参数。

选定照明透镜为 2 片式结构,控制如表 1 所示焦距、参考面曲率半径以及物点到镜头距离,以球差最小为优化目标,得到镜头如图 3 所示。

将图 3 所示系统最后一个面作为反射面,反射光经过照明镜组回到物点处,得到如图 4 所示光路。设定参考面曲率半径以及物点距参考面的距离为固定值,以球差最小为优化目标,进行优化设计。

表 1 照明镜基本参数

Table 1 Basic parameters of illuminating lens

Parameters of aspherical surface		Parameters of illuminating system	
Off-axis amount	6	Focal length	178.5
Diameter	80		
Radius of curvature (ROC)	252.17	Distance between reference surface and under-testing surface	10
Working distance	460		
ROC of best fitting sphere	281.59	ROC of reference surface	291.59

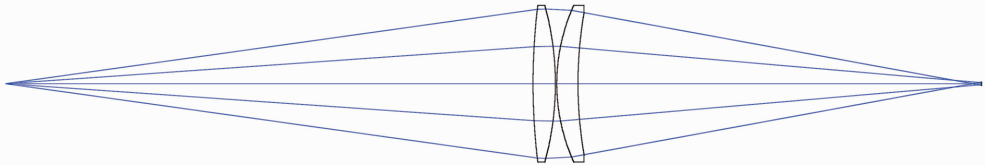


图 3 照明透镜初始外形

Fig. 3 Original configuration of illuminating lens

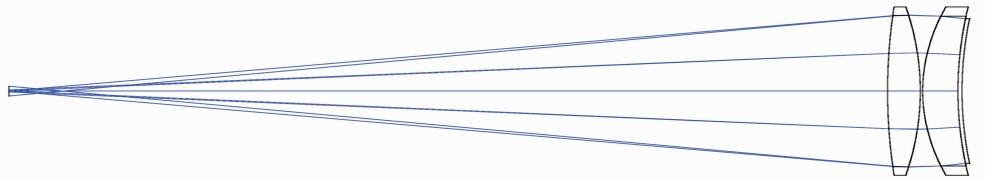


图 4 照明系统示意图

Fig. 4 Configuration of illuminating lens

将设计得到的照明系统放置到预先设定好的投影透镜后,进行优化设计,得到系统设计图(图 5),两束光干涉图(图 6)表明这两束光可以形成零条纹($P_v < 1/20\lambda$, $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$)。如果待检测面存在几何偏差,将在干涉图上显示出来^[16~18],通过判读干涉图,可以分析出几何误差的位置,从而指导加工。图 7 为检测系统中计算全息片上的相位分布图。可以看出 CGH1 为旋转对称相位分布,矫正参

考系统中的残余球差,CGH2 为非旋转对称相位分布,矫正检测系统中离轴非球面镜引入的非旋转对称像差和残余球差。

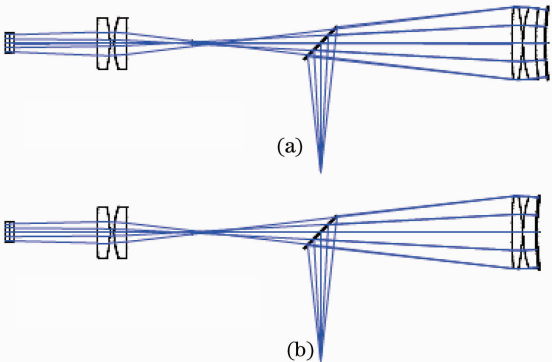


图 5 系统结构图

Fig. 5 Configuration of testing system

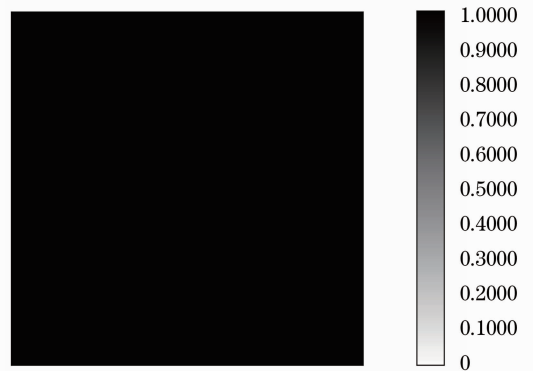


图 6 参考光与检测光干涉图

Fig. 6 Interferogram of testing beam and reference beam

4 结 论

从几何光学角度出发,利用近轴近似,分析了应用计算全息检测离轴凸非球面系统中照明系统的光路情况,将复杂的两用系统简化,分析了照明系统中

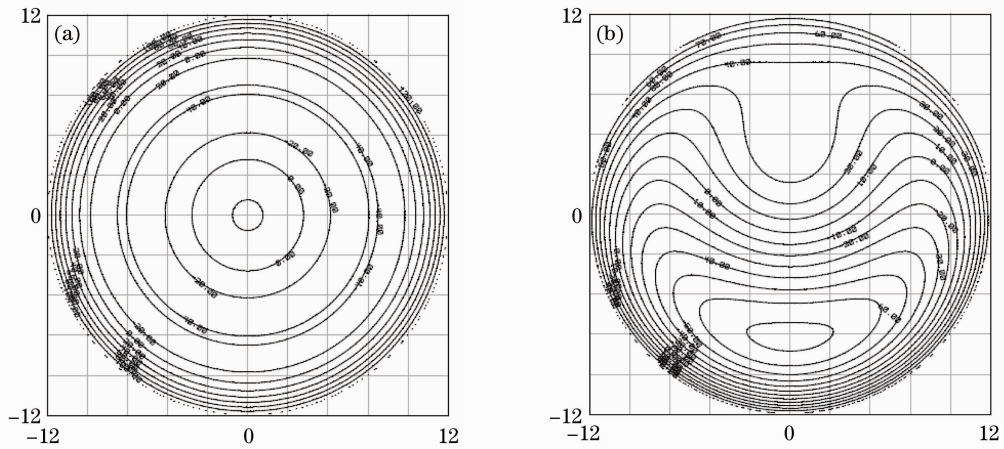


图7 计算全息片相位分布示意图。(a) CGH1的相位分布图；(b) CGH2的相位分布图

Fig. 7 Phase distribution of CGH. (a) Phase distribution of CGH1; (b) phase distribution of CGH2

工作距离、照明系统焦距及参考面曲率半径这三个特征参量之间的关系,从而计算出未知参量,并在设计照明系统时控制需要的特征参量。利用上述方法设计出的照明系统的初始结构可以满足计算全息检测凸非球面结构设计要求,从而加快系统设计,为应用计算全息元件检测离轴凸非球面打下应用技术基础。

参 考 文 献

- 1 He Yinghong, Ma Zhen, Zhao Baochang *et al.*. Optical system design of space sensor with two long focal length lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 3027~3033
贺应红, 马 臻, 赵葆常等. 实现两档长焦距的空间遥感光学系统设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 3027~3033
- 2 Li Xuyang, Li Yingcai, Ma zhen *et al.*. Optical system design of space camera with long focal length and correction of image distortion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2657~2661
李旭阳, 李英才, 马 臻等. 消畸变、长焦距相机光学系统设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2657~2661
- 3 Zhang Ruirui, Shen Weimin. Long focal-length optical system using annular aperture [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1140~1143
张蕊蕊, 沈为民. 环形孔径长焦距光学系统[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1140~1143
- 4 Wang Xiaokun, Zheng Ligong, Zhang Xuejun. Testing convex aspheres by subaperture stitching interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2022~2027
王孝坤, 郑立功, 张学军. 子孔径拼接干涉检测凸非球面的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2022~2027
- 5 J. C. Wyant, V. P. Bennett. Using computer generated holograms to test aspheric wavefronts [J]. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(12): 2833~2839

- 6 J. C. Wyand, P. K. O'Neill. Computer generated hologram: null lens test of aspheric wavefronts [J]. *Appl. Opt.*, 1974, **13**: 2762~2765
- 7 James C. Wyant. Precision optical testing [J]. *Science*, 1979, **206**(12): 168~172
- 8 J. H. Burge. Fizeau interferometry for large convex surface [C]. *SPIE*, 2005, **2536**: 127~138
- 9 J. H. Burge. Measurement of large convex aspheres [C]. *SPIE*, 2005, **2871**: 362~373
- 10 Feenix Y. Pan, Jim Burge. Efficient testing of segmented aspherical mirrors by use of reference plate and computer-generated holograms [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(28): 5303~5312
- 11 J. H. burge, S. Benjamin, D. Caywood *et al.*. Fabrication and testing of 1.4-m convex off-axis aspheric optical surfaces [C]. *SPIE*, 2009, **7426**: 74260L
- 12 James H. Burge, Chunyu Zhao, Matt Dubin. Measurement of aspheric mirror segments using Fizeau interferometry with CGH correction [C]. *SPIE*, 2010, **7739**: 773902
- 13 James H. Burge, Peng Su, Chunyu Zhao *et al.*. Use of a commercial laser tracker for optical alignment [C]. *SPIE*, 2007, **6676**: 66760E
- 14 Jianfeng Ren, Peiji Guo. Study on four-step computer-generated hologram with same diffraction efficiency of the zeroth and first order [J]. *Opt. Engng.*, 2011, **50**(8): 085801
- 15 Zhang Yimo. Applied Optics [M]. Beijing: China Machine Press, 1982. 17
张以谟. 应用光学[M]. 北京:机械工业出版社, 1982. 17
- 16 Li Lin, Huang Yifang, Wang Yongtian. Applied Optics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology press, 2005. 23~24
李 林, 黄一帆, 王涌天. 应用光学[M]. 北京理工大学出版社, 2005. 23~24
- 17 Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering Optics [M]. Beijing: Beijing: China Machine Press, 2002. 8
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京:机械工业出版社, 2002. 8
- 18 Daniel Malacara. Optical Shop Testing [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. Publication, 2007. 87~88

栏目编辑: 谢 婧