

文章编号 1004-924X(2007)09-1347-06

# 利用激光全息技术校正大口径光学成像系统像差

唐敏学<sup>1,2</sup>, 沈为民<sup>1,3</sup>

(1. 苏州大学 江苏省现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006;

2. 苏州大学 信息光学工程研究所, 江苏 苏州 215006; 3. 苏州大学 现代光学技术研究所, 江苏 苏州 215006)

**摘要:** 基于光学全息原理, 分析了激光全息技术校正光学成像系统像差的机理和方法, 建立了全息记录实验系统, 用于校正口径 500 mm、低质量球面反射镜光学系统对有限远物体成像时的像差。采用原光路再现的方法, 通过比较像差校正前后的干涉图样和成像结果, 验证了该校正方法的可行性。实验结果表明, 校正后该系统剩余波像差约为  $\lambda/8$ 。

**关键词:** 全息术; 光学成像系统; 大口径反射镜; 像差校正

**中图分类号:** O438.1; TH703 **文献标识码:** A

## Aberration correction of a large aperture optical imaging system by holography

TANG Min-xue<sup>1,2</sup>, SHEN Wei-min<sup>1,3</sup>

(1. Jiangsu Province Key Laboratory of Modern Optical Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China;

2. Institute of Information Optics Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China;

3. Modern Optical Technology Institute, Soochow University, Suzhou 215006, China)

**Abstract:** Based on the principle of holography, the working mechanism and holographic correction method of an aberrated optical imaging system was described and analyzed in detail. An experimental system was established for the aberration correction in an optical system with a low quality and 500 mm diameter spherical mirror for finite object imaging. By comparing the interferograms and images obtained before and after correction, the feasibility of the correction method was verified. The experimental results show diffraction-limited performance of the system and residual aberration is about  $\lambda/8$ .

**Key words:** holography; optical imaging system; large aperture mirror; aberration correction

## 1 引言

对地遥感和天文探测技术的发展要求空间光学系统具有宽覆盖范围、高角分辨率等性能, 因此

需要研制口径几十至上百米、焦距几百至几千米的空天光学系统, 该项技术需要解决的首要问题是减小光学系统尤其是望远系统中反射主镜的面密度<sup>[1]</sup>。

主镜采用柔性聚合物薄膜为基坯的膜基反射

镜,是实现超大口径、低面密度空间光学系统的技术途径之一。它具有重量超轻、易于折叠和展开、制造和发射成本相对较低等特点<sup>[2]</sup>。但是,膜基反射镜的面形易偏离设计面形,会给光学系统引入大的像差。因此,采用有效的技术手段,补偿和校正膜基反射镜的面形误差和系统像差,是实现实用化、满足空间光学系统成像要求的关键技术之一。

校正膜基反射镜面形误差和系统像差的方法主要有激光全息技术和自适应光学技术。从 20 世纪 90 年代初起,随着大口径、超轻型、可折叠/展开空间光学系统概念的提出,人们开始运用与自适应补偿技术相比廉价得多的激光全息技术补偿光学系统的像差。十多年来,美国、俄罗斯等发达国家先后投入大量资金开展相关研究<sup>[3-6]</sup>。如美国空军研究院在美国自然科学基金和 NASA 的资助下,利用全息校正技术已获得了膜基反射主镜口径达 1 m、成像质量接近衍射极限的薄膜望远镜<sup>[5]</sup>。利用激光全息技术校正光学系统的像差,是研究和开发未来新型大口径空间光学系统的有效技术手段和发展方向之一。国内已对空间用大口径轻型反射镜及其相关系统展开了研究<sup>[7-9]</sup>,但对于膜基反射镜及其光学系统的研究,尚在起步阶段。

本文以光学全息原理为基础,对于利用激光全息技术校正光学成像系统像差开展了理论和实验研究,建立了适于校正口径 500 mm 光学成像系统像差的全息记录实验装置。采用原光路再现的方法,通过比较像差校正前后的干涉图样、小孔和分辨率板经系统的成像结果,检测和分析了利用激光全息技术校正大口径光学成像系统像差的效果。

## 2 原 理

利用全息技术校正光学透镜和系统像差的方法首先由 Upatnieks 等人于 1966 年提出<sup>[10]</sup>,其实质是利用激光全息技术获得像差波面的位相共轭波面,从而补偿、校正原始像差波面,实现无像差光学成像。

### 2.1 激光全息图的记录

激光全息术的第一步是将物光波波面的全部信息(振幅和位相信息)记录在全息图上。若以  $O$

和  $r$  分别表示激光照明的物体和参考光源,两者发出的光波到达全息记录干版  $H$  时的复振幅分布  $A_o(x, y)$  和  $A_r(x, y)$  分别可表示为<sup>[11]</sup>:

$$A_o(x, y) = a_o(x, y) \exp[i\varphi_o(x, y)], \quad (1)$$

$$A_r(x, y) = a_r(x, y) \exp[i\varphi_r(x, y)], \quad (2)$$

其中  $a_o(x, y)$  和  $a_r(x, y)$  分别为物光和参考光的振幅分布,  $\varphi_o(x, y)$  和  $\varphi_r(x, y)$  为它们的位相分布。若物光和参考光在  $H$  处重合并满足相干条件,则在全息干版上产生的干涉条纹强度分布为<sup>[11]</sup>:

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |A_o(x, y) + A_r(x, y)|^2 = \\ &|A_o(x, y)|^2 + |A_r(x, y)|^2 + \\ &A_o^*(x, y)A_r(x, y) + A_o(x, y)A_r^*(x, y) = \\ &a_o^2(x, y) + a_r^2(x, y) + 2a_o(x, y)a_r(x, y) \\ &\cos[\varphi_r(x, y) - \varphi_o(x, y)], \end{aligned} \quad (3)$$

式中第一、第二项分别为物光和参考光单独照射全息记录材料时产生的光强,其和表示干涉条纹的平均强度;第三项包含物光波和参考光波的振幅和位相信息,表示干涉条纹的强度变化。

全息干版经过线性记录和处理,得到的全息图的振幅透过率  $T(x, y)$  可表示为:

$$\begin{aligned} T(x, y) &= k_0 + k_1 I(x, y) = \\ &[k_0 + k_1 |A_o(x, y)|^2 + k_1 |A_r(x, y)|^2] + \\ &k_1 A_o^*(x, y)A_r(x, y) + k_1 A_o(x, y)A_r^*(x, y) = \\ &[k_0 + k_1 a_o^2(x, y) + k_1 a_r^2(x, y)] + 2k_1 a_o(x, y)a_r(x, y) \\ &\cos[\varphi_r(x, y) - \varphi_o(x, y)], \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $k_0$  和  $k_1$  均为常数。上式表明全息图中含有直流分量和简谐交流分量,直流分量(即第一项)中只包含物光波和参考光波的振幅信息;而交流分量(即第二项)中既包含物光波和参考光波的振幅信息,亦包含它们的位相信息。因此利用全息图的交变分量,可望得到物光波、或共轭物光波、或参考光波、或共轭参考光波的信息。

### 2.2 全息图的波前再现

激光全息术的第二步是由全息图再现所需要的光波。设利用相干光波照明再现全息图,再现光波到达全息图时的复振幅分布为:

$$A_c(x, y) = a_c(x, y) \exp[i\varphi_c(x, y)]. \quad (5)$$

由式(4)可得透过全息图的复振幅分布为:

$$\begin{aligned} T'(x, y) &= A_c(x, y)T(x, y) = \\ &[k_0 + k_1 |A_o(x, y)|^2 + k_1 |A_r(x, y)|^2]A_c(x, y) \\ &+ k_1 A_c(x, y)A_o(x, y)A_r^*(x, y) + \\ &k_1 A_c(x, y)A_o^*(x, y)A_r(x, y), \end{aligned} \quad (6)$$

式中第一项表示沿再现光波方向传播,第二、第三项的传播方向由物光波、参考光波和再现照明光波的位相确定,一般在再现照明光波方向的两侧,其中包含有物光波和共轭物光波的振幅和位相的全部信息。

当用与记录时参考光波相同的光波照明再现全息图,即  $A_c(x, y) = A_r(x, y)$  时,由式(6)得:

$$T' = A_c(x, y) T(x, y) = [k_0 + k_1 |A_o(x, y)|^2 + k_1 |A_r(x, y)|^2] A_r(x, y) + k_1 |A_r(x, y)|^2 A_o(x, y) + k_1 A_r^2(x, y) A_o^*(x, y), \quad (7)$$

由上式可知,第二项可再现得到与原物光波相同的波前  $A_o$ ,由此可观察到位于原物体位置处且与原物体完全一样的三维立体像。

### 2.3 激光全息技术校正光学成像系统像差的原理

由以上激光全息记录和再现原理及式(6)可知,从本质上讲,物光波和参考光波是同等的,即当用与记录全息图时完全一样的物光波照明再现全息图,即  $A_c(x, y) = A_o(x, y)$  时,同样可由式(6)得:

$$T' = A_c(x, y) T(x, y) = [k_0 + k_1 |A_o(x, y)|^2 + k_1 |A_r(x, y)|^2] A_o(x, y) + k_1 A_o^2(x, y) A_r^*(x, y) + k_1 |A_o(x, y)|^2 A_r(x, y), \quad (8)$$

式中第三项可再现得到与原参考光波性质相同的光波。若原参考光为平面波或球面波,则再现得到的也是平面波或球面波。

从上述激光全息记录和再现原理可以进一步推断,若首先记录光学系统产生的像差波前与无像差的理想平面波或球面波干涉所形成的全息图,经适当处理后置于光学系统中并精确复位至原记录位置,当用与记录全息图时完全相同的光学系统产生的像差波前再现全息图时,即可得到理想的、无像差的平面波或球面波。

由此,利用激光全息技术校正光学成像系统像差的原理如图 1、2 所示。首先使理想的光波(如平面波)与光学系统所产生的有像差光波相干涉(如图 1),用全息记录材料记录理想平面波与像差波面的干涉图样,经过适当处理后得到全息图。然后,将该全息图精确复位到原光学系统中的记录位置(如图 2),用点物经过待校正光学系统后产生的像差波前照明全息图。根据全息再现原理,从全息图出射的光波将是与记录用参考光

波相同的理想平面波前。为便于观测,用像差校正良好的光学镜头汇聚再现得到的平面波前,便可在其焦平面上得到理想的点像,光学系统的像差从而得到了校正。

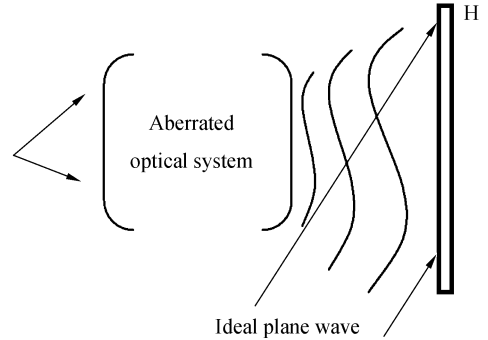


图 1 记录光学系统像差校正用全息图

Fig. 1 Hologram for recording aberration correction of an optical system

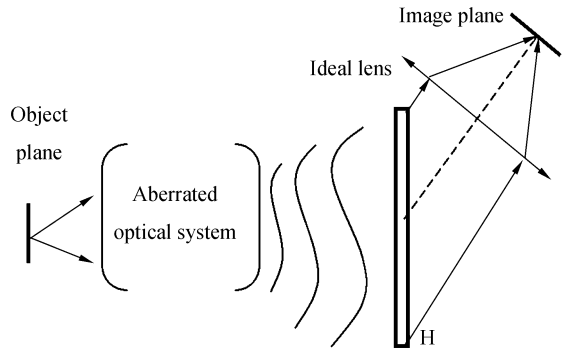


图 2 全息图校正光学系统像差原理示意图

Fig. 2 Scheme of an aberrated optical system corrected by hologram

### 3 实验系统设计和实验结果分析

在利用激光全息技术校正膜基空间光学系统像差基本原理与技术研究的起始阶段,首先对含有口径 500 mm 玻璃基底低质量球面反射镜的光学成像系统进行了全息校正实验研究,以验证方法和技术上的可行性。

本文实验中采用的记录激光光源位于有限远,原光路再现并对有限远物体成像的实验系统,如图 3 所示。首先记录用于光学系统像差校正的全息图。激光光束经透镜  $L_1$  汇聚到球面反射镜  $M$  的曲率中心附近,即相当于记录光源位于球面反射镜  $M$  的曲率中心附近,然后以微小的离轴角

度入射到 M(M 上入射光中心线和反射光中心线之间的夹角约为  $2.5^\circ$ )。反射光束经高质量照相机镜头  $L_2$  ( $f=50\text{ mm}$ ,  $F/1.4$ ) 准直后, 垂直照射到全息记录干版 H 上, H 位于 M 经  $L_2$  所成像的像面上。由傅里叶变换透镜 ( $f=400\text{ mm}$ 、 $\Phi 60\text{ mm}$ ) 产生一束衍射受限平面参考光波 R, 以与物光波成约  $45^\circ$  的角度入射至全息干版 H。这样, 在 H 上可记录带有系统像差的光波(即物光波)与 R 相干涉形成的干涉图样, 实际记录的全息图大小为  $\Phi 12\text{ mm}$ 。

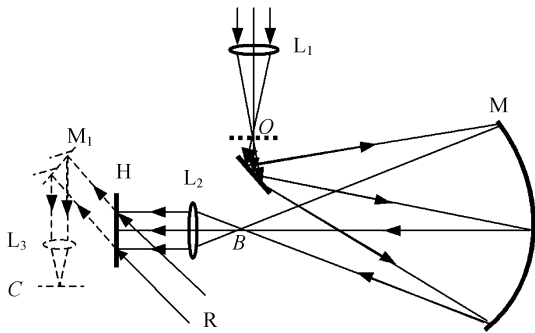


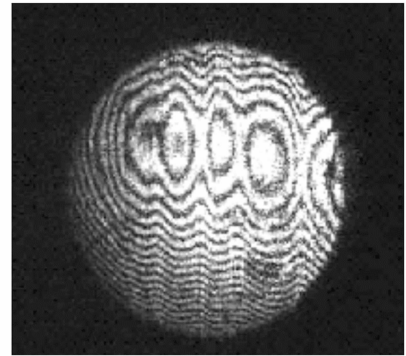
图 3 记录激光光源位于有限远、原光路再现、并对有限远物体成像的实验系统

Fig. 3 Experimental system where a laser source is located at finite, a hologram is reconstructed in its original position and objects at finite distance are imaged.

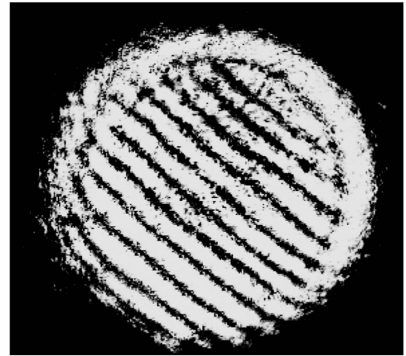
实验中采用氦-镉(He-Cd)激光器作为记录和再现光源( $\lambda=441.6\text{ nm}$ ), 全息记录材料为正性光致抗蚀剂。记录时全息干版被放置于一高精度五维可调装置上, 以便于经曝光和化学处理后将其精确复位至记录时的位置。球面反射镜 M 采用 K9 玻璃材料制成, 口径为  $500\text{ mm}$ , 曲率半径为  $1\,993\text{ mm}$ , 采用球面干涉仪测得其面形误差约  $5\lambda$  ( $\lambda=633\text{ nm}$ )。为了给光学系统引入大的像差, 在 M 前另外加入了一块厚  $5\text{ mm}$  的普通玻璃, 用位于 M 曲率中心附近的球面干涉仪测得的干涉图样如图 4(a) 所示, 计算显示波像差约为  $25\lambda$ 。

将经曝光、显影和定影处理后的全息干版精确复位至原记录位置, 用  $441.6\text{ nm}$  激光沿原光路(即用带有系统像差的原物光波)照明再现全息图, 则可再现得到沿原参考光波方向传播的平面光波(如图 3 中虚线部分所示)。由此再现光波与

原参考光波产生的干涉图样如图 4(b) 所示, 可见剩余波差应  $< \lambda/8$ , 表明再现光波为接近衍射极限的平面光波。



(a)



(b)

(a) 像差校正前, 用球面干涉仪测得的  $\Phi 500\text{ mm}$  球面反射镜干涉图形; (b) 采用全息技术校正后, 再现参考光束与原参考光束干涉图

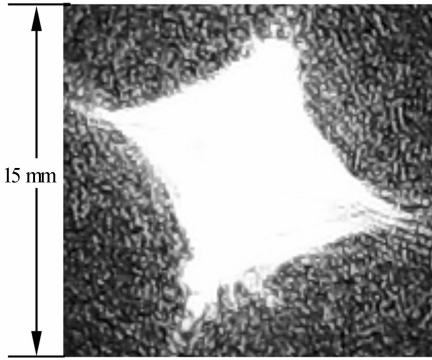
(a) Interferogram of  $500\text{ mm}$  aberrated spherical mirror measured by a sphericity interferometer; (b) Interference pattern created by reproduced reference beam and original one

图 4 像差校正前后的干涉图

Fig. 4 Interferogram before and after aberration correction

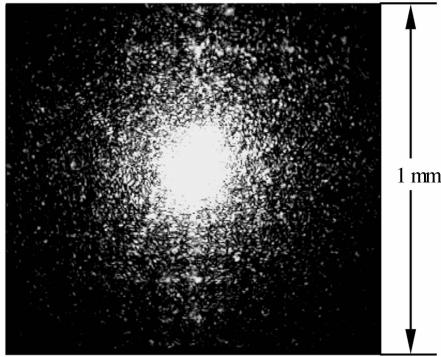
为分析系统像差的校正情况, 在图 3 所示实验系统中的 O 点放置  $15\ \mu\text{m}$  大小的针孔作为物体, 分别在 B、C 点得到像差校正前、后针孔经光学系统的成像结果(如图 5 所示), 其中图 5(a) 的边框实际尺寸约为  $15\text{ mm}$ , 图 5(b) 的边框实际尺寸约为  $1\text{ mm}$ 。由实验装置结构参数计算可知, 针孔的理想几何像尺寸为  $\Phi 120\ \mu\text{m}$ , 爱瑞斑的大小为  $36\ \mu\text{m}$ , 即在理想情况下, 针孔像的直径为

156  $\mu\text{m}$ ;而从图 5(b)可估算出的中心亮斑直径约为 160  $\mu\text{m}$ ,因此,可以说校正效果接近于衍射极限。但是,在图 5(b)中未看到小孔的衍射环,原因主要是受现有实验室洁净条件的限制,光学元件表面附有微小的尘埃颗粒;另外,平板玻璃存在划痕等缺陷,在激光束的照射下产生散射光,从而影响系统的成像质量。



(a)校正前

(a) Before correction



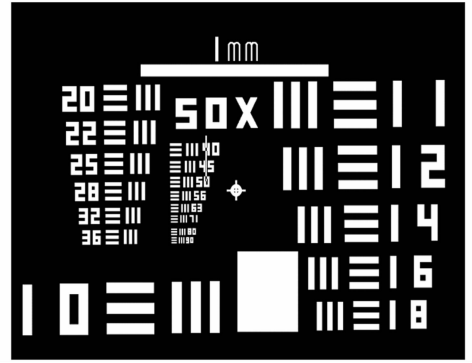
(b)校正后

(b) After correction

图 5 15  $\mu\text{m}$  针孔经光学系统的成像结果

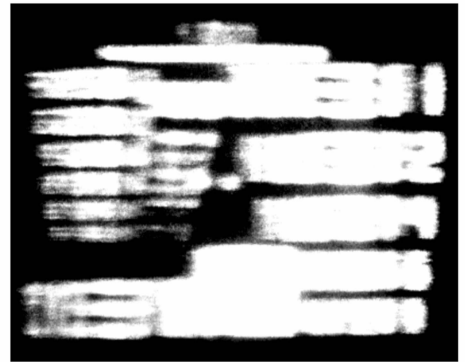
Fig. 5 Images of a 15  $\mu\text{m}$  diameter pinhole.

为进一步分析像差校正前后光学系统的成像效果,在图 3 所示实验系统中的 O 点放置 SH-01 型分辨率板(如图 6(a)所示)作为物体,像差校正前、后经光学系统的成像结果如图 6(b)、(c)所示,可见经像差校正后的成像质量得到了明显的改善。在光学系统像差得到完善校正的情况下,在 C 点应可获得分辨率板的无像差像。



(a)原物体

(a) Original chart



(b)校正前

(b) Before correction



(c)校正后

(c) After correction

图 6 SH-01 型分辨率图案经光学系统的成像结果  
Fig. 6 Images of SH-01 resolution chart obtained by the optical system

## 4 结 论

本文研究了激光全息技术校正大口径光学成像系统像差的机理和方法,通过全息记录和校正实验,给出了接近衍射极限的校正效果,验证了原理的正确性和方法的可行性。本文实验中的大口径球面反射镜可用作望远系统中的反射主镜。

在望远系统中亦可利用激光全息技术校正其像差,这样,即使使用低质量的球面反射主镜,也可获得高质量的光学成像效果。该项技术为今后进一步开展大口径膜基反射镜用于空间光学成像系统的研究提供了必要的理论和技术基础。

致谢:感谢薛鸣球院士的悉心指导。感谢吴建宏、郭培基、钱煜和李朝明等老师在实验中提供的有益讨论和帮助。

## 参考文献:

- [1] STAHL H P. Optic needs for future space telescopes[J]. *SPIE*, 2003, 5180: 1-5.
- [2] BECKY I. Very large yet extremely lightweight space imaging systems[J]. *SPIE*, 2002, 4849: 17-27.
- [3] MUNCH J, WUERKER R. Holographic technique for correcting aberrations in a telescope[J]. *Appl. Opt.*, 1989, 28(7): 1312-1317.
- [4] BOGDANOV M P, DIMAKOV S A, GOLANOV A V, *et al.*. Compensation for distortions of telescope's primary mirror by means of a volume dynamic hologram[J]. *SPIE*, 1998, 3263: 2-10.
- [5] ANDERSEN G, KNIZE R J. Large Diameter, Holographically corrected membrane telescopes[J]. *SPIE*, 2002, 4849: 348-355.
- [6] ANDERSEN G. Holographic correction and phasing of large sparse-array telescopes[J]. *Appl. Opt.*, 2005, 44(8): 1355-1359.
- [7] 刘磊,李景林,吕清涛,等. 大口径反射光学系统装调装置设计研究[J]. *光学 精密工程*, 2005, 13(增): 134-137.  
LIU L, LI J L, LV Q T, *et al.*. Research on adjusting device of large aperture reflective optics system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(Supp.): 134-137. (in Chinese)
- [8] 张舸,赵文兴. 轻型反射镜镜体结构参数的分析[J]. *光学 精密工程*, 2006, 14(1): 48-53.  
ZHANG G, ZHAO W X. Analysis on structural parameters of light-weighted mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 48-53. (in Chinese)
- [9] 张剑寒,张宇民,韩杰才,等. 空间用碳化硅反射镜的设计制造与测试[J]. *光学 精密工程*, 2006, 14(2): 179-184.  
ZHANG J H, ZHANG Y M, HAN J C, *et al.*. Design, fabrication and testing of space-borne SiC mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 179-184. (in Chinese)
- [10] UPATNIEKS J, LUGT A V, LEITH E. Correction of lens aberrations by means of holograms[J]. *Appl. Opt.*, 1966, 5(4): 589-593.
- [11] 于美文. 光学全息及信息处理[M]. 北京:国防工业出版社.  
YU M W. *Optical Holography and Information Processing* [M]. Beijing: National Defense Industry Press. (in Chinese)

作者简介:唐敏学(1962—),女,苏州大学副研究员,硕士生导师,主要从事光信息处理技术与器件、膜基反射镜及其成形技术等方面的研究工作。E-mail: mxtang@suda.edu.cn