

文章编号 1004-924X(2008)02-0208-07

# 拼接镜面合成孔径光学系统的像质评价

张 伟,邓 键,龙夫年,左宝君

(哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心,黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**拼接镜面合成孔径光学系统的出瞳波前是离散的,需要同时引入波象差和衍射光学理论来拟合最佳高斯参考球面,计算出瞳波前和波象差,并通过对像面的衍射积分,评估系统像质。对比了两种像质评估的方法:其一是直接利用干涉仪实测获得的整体出瞳波面参数拟合 Zernike 多项式衍射直接积分法计算像面复振幅分布,其二是对子出瞳波面衍射直接积分在像面的复振幅进行叠加。设计并制造了一个三子镜合成的成像光学系统,在此基础上用 ZYGO GPIXP 干涉仪对两种方法计算的像质进行了验证和对比。结果表明,子出瞳波面直接衍射积分叠加法的精度更高,但计算量大;在衍射极限附近,前者的拟合精度也能满足像质的定性评估要求,且计算量较小。

**关 键 词:**合成孔径光学系统;拼接镜面;像差;误差分析;波前

**中图分类号:**TH743 **文献标识码:**A

## Imaging quality of segmented mirror synthetic aperture optics

ZHANG Wei, DENG Jian, LONG Fu-nian, ZUO Bao-jun

(*Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

**Abstract:** The exit pupil wavefront of a segmented mirror Synthetic Aperture Optics(SAO) is discrete, and different from traditional system. To evaluate imaging quality, the theory of wave aberration and diffraction optics should be introduced simultaneously. By using the diffraction integral, two methods are used to evaluate imaging quality, one way is to fit the exit pupil wavefront to Zernike polynomial directly to calculate the complex amplitude distribution, and the other way is to calculate the complex amplitude distribution of each sub-exit-pupil individually, and overlap them in image plane. A segmented mirror system with three sub-mirrors was built, and the wavefront was obtained by ZYGO GPIXP interferometer, including overall exit pupil wavefront and each sub-exit-pupil wavefront. By comparing the two methods, the result shows that the latter is more precise but complex; the former is more simple and can satisfy the required precision, when the system exit pupil wavefront is near the diffraction limit.

**Key words:** synthetic aperture optical system; segmented mirror; aberration; error analysis; wavefront

收稿日期:2007-08-03;修订日期:2007-09-27.

基金项目:总装备部共用技术预研基金资助项目

## 1 引言

随着对地光学成像观测要求的逐步提高,需要更高分辨率大视场太空望远系统。分辨率的提高意味着光学系统口径的增大,但口径增大受光学材料、制造工艺等的限制,而且增大口径必将导致系统的体积和质量相应增大,会对整个系统的发射带来困难。因此传统整块主镜的光学系统已不适应现代航天技术的要求。合成孔径光学成像系统采用多个子孔径按一定规律排列组合,通过相位匹配和光路调整,实现子孔径光场的共焦同相,实现单一大口径光学系统的全部或部分功能<sup>[1-3]</sup>,能满足更大、更轻和可折叠的要求,在空间观测领域将占据越来越重要的地位。

与传统光学系统相比,合成孔径成像系统的出瞳波前是离散的,而拼接子镜或子系统误差将对像面复振幅分布造成较大影响,严重降低系统像质。根据几何光学成像理论,系统实现理想成像必须满足等光程条件,也就是物理光学上的同位相。因此,光学合成孔径系统的像场应是各子镜或子系统像场的同位相叠加。若不能保持位相同步,则不能达到合成孔径的目的,只能起到提高光能接收率的作用<sup>[4]</sup>。但大口径长焦距光学系统的成像质量如果再沿用传统概念的平行光管测量,则要求研制出口径更大、焦距更长的高质量平行光管,这在工程上是不经济的,也是不现实的。

由于出瞳波前包含了光学系统的所有光学信息,而系统波前可通过波前分析仪或波前径向斜率测量原理<sup>[5]</sup>等方法获得。通过对波前函数的菲涅耳衍射积分可获得像面的复振幅分布和点扩散函数(系统的特征响应函数),再进行傅里叶变换即可获得 MTF 曲线。因此,出瞳波前函数作为系统像质的评价标准,具有完备性和可实测性。对地观测目的的子孔径合成孔径光学系统由于近地环境的影响,在轨自动检测和主动调整的相对困难,以及对地观测时大气的影响,不可避免地造成系统产生较大波前误差。但在一定误差范围内,对于较低截止频率的系统,仍可获得较好的 MTF 曲线<sup>[6]</sup>。这是因为出瞳波前函数表示整个系统性能的信息,而 MTF 曲线只表明系统截止分辨率范围内的性能。但基于传统的多项式拟合

算法难于精确表征离散的出瞳波前,干涉仪实测获得的光瞳函数经快速傅里叶变换(FFT)后获得的 MTF 与实际系统有较大差异<sup>[7]</sup>。

本文运用波像差理论,使用菲涅尔衍射直接积分<sup>[8-9]</sup>法,对比了广义光瞳拟合波阵面函数法和子出瞳波函数积分叠加法对子孔径合成成像光学系统子镜像质评估的差异,分析并比较了失调产生的像差特性及其对系统成像质量的影响。

## 2 子镜误差及分析

光学系统可看作一个线性不变系统,物点通过入射光瞳平面和光学系统,在出射光瞳平面形成出瞳波前,如图 1,光瞳函数可表示为<sup>[10]</sup>:

$$\tilde{P} = P \exp(jkW),$$

$$P = \begin{cases} 1, & \text{光学系统孔径内} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $k = 2\pi/\lambda$ ;  $W$  为一个通过出射光瞳中心  $O_1'$  的波面,它与从  $P_0$  到达像空间的成像波面相关联。 $W$  即为出瞳波前,代表光学系统所有的像差信息。在没有像差时, $W$  与一个中心在高斯像点  $P_1^*$  并通过  $O_1'$  的高斯参考球面  $S$  重合。对于确定的光学系统,光波的传输方向由物面坐标  $x, y$  和瞳面坐标  $\eta, \xi$  惟一确定,直观表示各种误差对系统像质的影响。

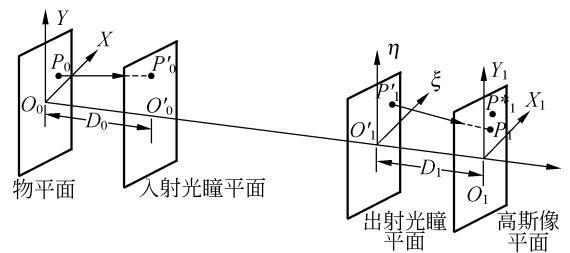
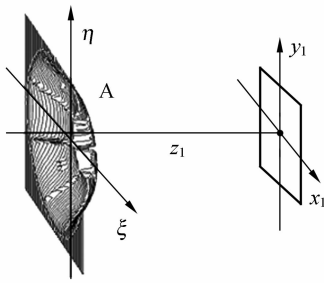


图 1 物平面、像平面与出瞳面

Fig. 1 Object, image and exit pupil planes

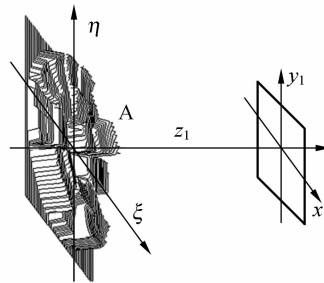
由于子孔径合成的光学系统面形不一致(曲率半径误差、非球面系数误差、边缘效应、温度和应力变形等)和装调产生的位置度误差,子出瞳波前不可避免地产生离散,每一块子镜都相当于离轴系统的主镜,子镜的倾斜和平移可相互补偿,有不同的最佳拟合的参考球面坐标和各自的波像差展开式(如图 2)。

可通过两种方法计算整个系统的出瞳波面



(a)理想出瞳的波前

(a) Ideal exit pupil wavefront



(b)有误差时出瞳的波前

(b) Exit pupil wavefront with misadjustment

图 2 理想和失调情况下的出瞳波面

Fig. 2 Exit pupil wavefront of ideal and misadjustment

在像面的复振幅分布:

(a) 对各子出瞳波面按照惠更斯子波衍射积分的原理在像面直接叠加;

(b) 近似拟合出系统整体的出瞳波前,再进行衍射积分。

对于方案(a),合成孔径光学系统的广义光瞳函数可看作出瞳积分面上子波前的叠加:

$$\tilde{P} = \sum_{n=1}^N P_n \exp(jkW_n), \quad (2)$$

其中: $P_n$ 为第 $n$ 个子出瞳; $W_n$ 为第 $n$ 个子光瞳的波像差。将每块子镜的波阵面方程带入衍射公式直接积分并叠加,可获得像面的复振幅分布:

$$E(x, y) = \iint_{\Sigma} \tilde{P} d\eta d\xi = \sum_{n=1}^N \iint_{\Sigma_n} P_n \exp(jkW_n) d\eta d\xi, \quad (3)$$

则光强分布为:

$$I = E \cdot E^*, \quad (4)$$

由于子出瞳波面都有各自的最佳拟合球面,当式(3)中像面位置改变时,系统波前误差的分布

将发生较大改变,进而影响到像面的复振幅分布。

文献[11]给出在理想高斯像面位置时子镜各种失调误差对系统整体波前误差影响大小的关系,从大到小顺次排列为:piston 误差、倾斜误差、离焦误差、球差、慧差和像散。该文献同时也指出,适当离焦后各单项失调误差造成的波面方差也将随之改变,整体波像差有较大幅度的改善。使用该方法评估像质,直观精确,但需要在系统理想高斯参考球面半径上施加微扰并不断迭代,以重新确定最佳像面。

当合成镜面的误差较小时,即整体波前误差 RMS 值在  $\lambda/10$  以内,尤其是 piston 误差  $< 0.01 \lambda$ [12],也可以将合成镜面看作一块整体,通过最小二乘法或 Zernike 多项式拟合的方法,把由离散子波面组成的出瞳波前看作近似连续的波面,直接确定最佳拟合球面及其像平面位置,并在此基础上直接进行衍射积分。由于离散子波面的失调误差足够小,可以认为被测光学系统的出瞳波面是趋于光滑和连续的,因此这样的波面函数可以表达成为一个完备的基底函数的线性组合,此时的广义光瞳函数为多个分离的子出瞳波面合成的一个波面,其间断部分将作为误差拟合到波面方程中。该方法对像质的评估精度与整体波像差的大小、子镜数量和分布有关,并将随着拼接镜面误差的增加而急剧下降。

Zernike 多项式描述了表面变形而多出的那部分值,其表达式为<sup>[13]</sup>:

$$z(\rho, \varphi) = \sum_{i=1}^N A_i Z_i(\rho, \varphi), \quad (5)$$

式中: $A_i$ 为多项式第 $i$ 项的系数; $\rho$ 为径向长度除以最大的径向值; $\varphi$ 为角度; $N$ 为多项式的最大项数。

应该指出的是,其基底函数为定义在单位圆上的正交多项式,因而实际光瞳都要经过归一化后方可进行 Zernike 多项式拟合,因此,Zernike 多项式拟合波面的方法不适用于形状不规则的子镜。

使用光瞳直接拟合的方法,在拟合过程中即可获得最佳像面位置,计算量较小,适用于合成镜面的误差较小,已经达到共焦及共相要求,且仅需定性分析的情况。

### 3 实验验证系统的像质评估

设计并制造了 1 个折反系统,3 个子镜合成的主镜为抛物面。子镜采用了特殊工艺加工,面形精度在装卡前的测试值 RMS 值均  $< \lambda/40$ ,具有较好的光学一致性,波像差主要由失调引起,子镜面形差异对系统的波像差影响基本可忽略<sup>[14]</sup>,设计值达到衍射极限,如图 3 所示。

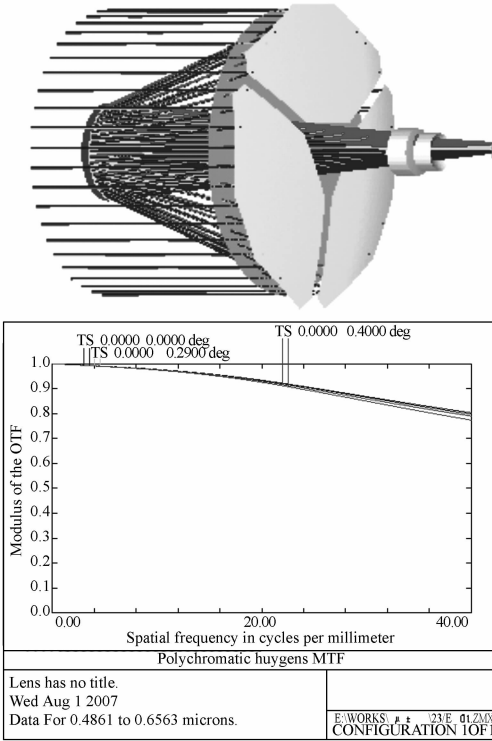


图 3 光学系统及 MTF 曲线

Fig. 3 Optical system and its MTF

系统装调使用了 ZYGO GPIXP 干涉仪,图 4 为去除 piston、tilt 和 power 后在近轴视场内的一个采样,其合成的出瞳波前 RMS 值约为  $0.093 \lambda$ ,斯特涅尔比约为 0.724,干涉仪相干光测试时的 MTF 在 0.3~0.4 之间。在三维波前的干涉图上,可清晰地看到由于加工产生的高频波纹误差和因装卡受力不均匀而产生的边缘效应。将干涉仪数据拟合的 36 项系数带入 Zernike 方程式,获得波前误差的 RMS 值约为  $0.098 \lambda$ ,斯特涅尔比约为 0.744(见图 4),实测数据和拟合面的计算数据基本吻合,误差主要来源于子镜间隔和实际波面的拟合平滑度。

单独显示每块子镜的测量状态,因为是离轴

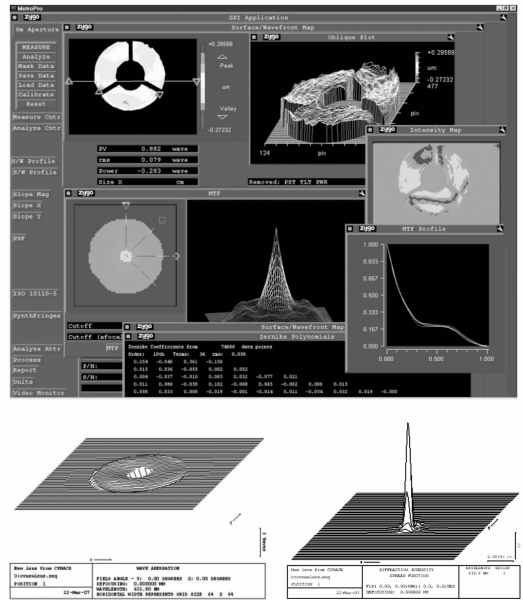


图 4 干涉仪实测参数、拟合的整体出瞳波前及 PSF  
Fig. 4 Test parameters of interferometer, calculated exit pupil wavefront and its PSF

状态,有部分倾斜和偏心相互补偿,装调时难以更进一步提高精度。测量时消除了 piston、tilt 和 power,其中子镜 1 的出瞳波前误差 RMS 值为  $0.069 \lambda$ ;子镜 2 的出瞳波前误差 RMS 值约为  $0.099 \lambda$ ;子镜 3 的出瞳波前误差 RMS 值约为  $0.093 \lambda$ 。

将干涉仪实测数据重构每块子镜的出瞳波面。因为 Zernike 多项式仅在圆域内正交,对单块不规则子镜采用了多个圆域数据的采样和子孔径拼接的数据处理<sup>[15]</sup>,将获得的方程带入式(3)、(4),经计算获得的斯特涅尔比约为 0.567,实测和拟合的参数见图 5。确定最佳像面后斯特涅尔比约为 0.603,此时从系统的理想高斯像面移动了约  $-0.014 \text{ mm}$ 。与干涉仪的实测数据对比,斯特涅尔比相对误差为:

$$[|0.603 - 0.724| / 0.724] \times 100\% \approx 16.7\%$$

进一步精调使实测波前误差的 RMS 值下降到  $0.077 \lambda$ ,按以上步骤计算,由干涉仪参数拟合的出瞳波面直接衍射积分获得的斯特涅尔比为 0.799,与干涉仪实测参数显示的 0.797 基本吻合(如图 6)。通过对子出瞳复振幅叠加并移动像面到最佳位置后获得的斯特涅尔比约为 0.705,斯特涅尔比的相对误差仍然达到:

$$[|0.705 - 0.797| / 0.797] \times 100\% \approx 11.5\%$$

由于各种技术限制,没有继续进行更高精度的装调实验。即便如此,仍可得出如下结论:随着波前误差的减小,干涉仪的测试参数和子波衍射积分在用像面直接叠加方法获得的结果差异将逐渐减小并趋于一致。但即便系统波前误差已经接近于衍射极限,这样的误差水平对于系统性能评估的精度要求仍显不足。

对系统进行了成像实验,采用 36 lp 的辐射状鉴别率板和对应像面分辨率为 40 lp/mm 的矩形光栅,波谱为  $0.48\sim 0.65\ \mu\text{m}$ ,所得图像如图 7 所示。辐射状分划板对应的可鉴别线对约为 100 lp/mm,矩形光栅换算后对应线对 40 lp/mm 时 MTF 约为 0.20。考虑到电子器件的传递函数(标称为 0.5)和其他降低传递函数的不确定误差,光学系统的非相干光成像获得的传递函数应

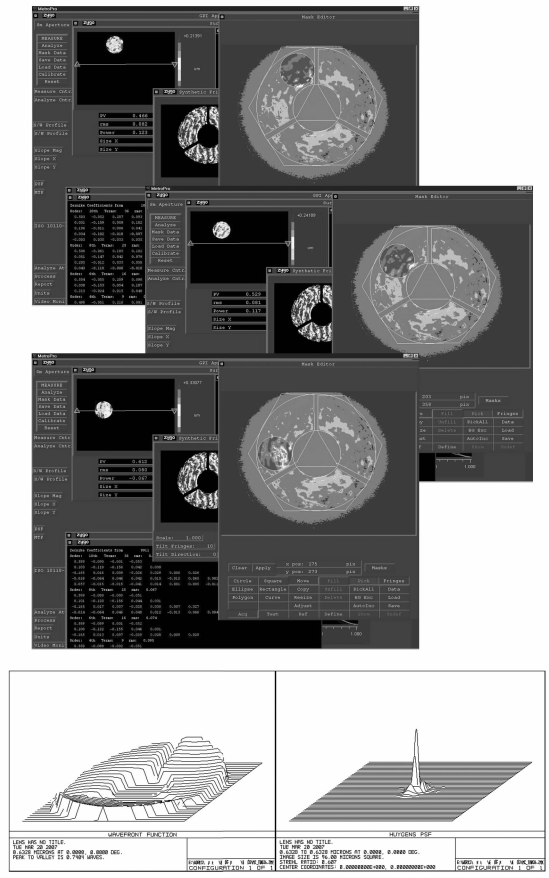


图 5 子镜的出瞳波前和波前直接叠加获得的 PSF  
Fig. 5 Exit pupil wavefront and its PSF

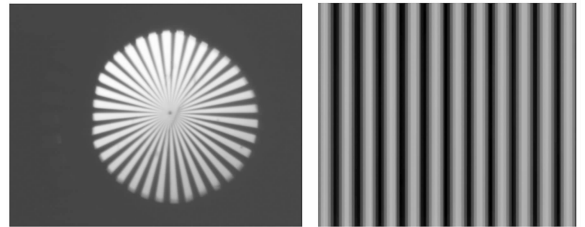


图 7 辐射状鉴别率板和矩形光栅通过系统所成像  
Fig. 7 Images of segmented mirror system

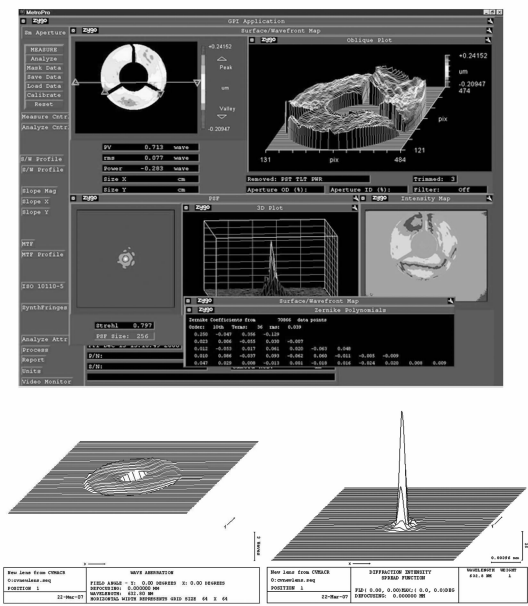


图 6 干涉仪实测参数,拟合的整体出瞳波前及 PSF  
Fig. 6 Test parameters of interferometer, calculated exit pupil wavefront and its PSF

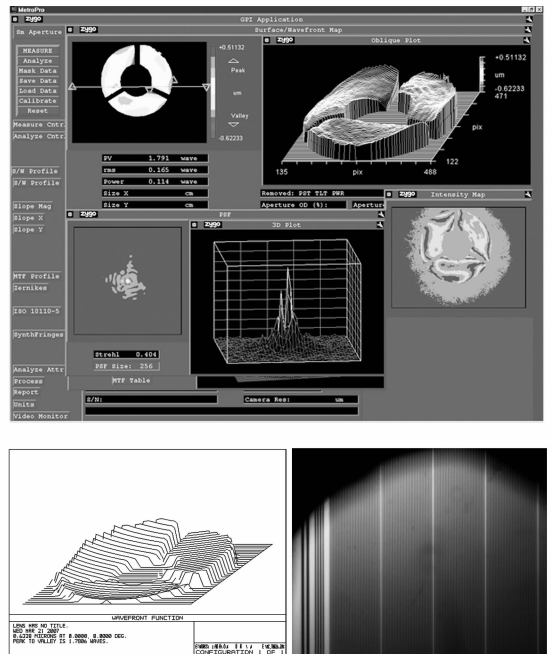


图 8 波前 RMS 值为  $0.165\ \lambda$  及所成像  
Fig. 8 Exit pupil RMS wavefront is  $0.165\ \lambda$  and its grating image

$>0.40$ ,与干涉仪相干光测量的  $0.3\sim 0.4$  的 MTF 测量值基本吻合。

当合成镜面的误差较大时,通过式(3)计算的结果与实测参数有较大差异。图8为实测波前误差 RMS 为  $0.165\lambda$  的干涉仪参数,波前误差 PV 值约为  $1.791$ ,斯特涅尔比为  $0.303$ ;由式(3)计算获得的波前误差 PV 值约为  $1.781\lambda$ , RMS 值约为  $0.155\lambda$ ,理想高斯像面的斯特涅尔比为  $0.257$ ,移动  $0.016\text{ mm}$  获得最佳像面后的斯特涅尔比为  $0.413$ 。成像实验表明,此时系统既不共焦也不共相,其成像效果甚至不如单块子镜。显然,此时讨论系统的像质是没有意义的。

## 4 结 论

在子孔径合成光学成像系统中,离散子镜的

失调误差使出瞳波面离散。由于干涉仪的算法和拟合精度限制,不可避免带来较大误差。如果以 MTF 为评价函数,其拟合精度以及相干光测量的特点,难于保证精确像质评估的要求,特别是当波前误差较大时,测量参数仅能对系统进行定性的像质评价。使用直接衍射积分的方法可以较为精确地获得实际像面的复振幅分布和像差的能量分布,具有较高的像质评估精度,但由于子出瞳形状的不规则,需要使用均匀细分曲面或子出瞳拼接的方法进行曲面重构,并不断迭代以重新确定最佳焦面,有较大的计算量。

当出瞳波前误差接近衍射极限时,实测数据和计算结果有较高的一致性,因此,在不需要更高精度的情况下,可以使用测量数据作为像质定性的评估基准。

## 参考文献:

- [1] KEVIN B, RUTH M, MIKE P, *et al.*. A deployable optical telescope ground demonstration[J]. *SPIE*, 2000, 4013: 559-567.
- [2] JIM C, CHARLIE A, DENNIS E, *et al.*. TRW/Ball: Next Generation Space Telescope, NGST[J]. *SPIE*, 2000, 4013: 27-34.
- [3] JOHN M, STOCKMAN H S. Next generation space telescope[J]. *SPIE*, 2000, 4013: 2-16.
- [4] DAVID R, SCOTT B, DAVID C, *et al.*. Wavefront control for a segmented deployable space telescope[J]. *SPIE*, 2000, 4013: 546-558.
- [5] 曹根瑞,朱秋东,苏鹏.一种新型的自基准哈特曼波前传感器[J]. *光电工程*, 2004, 31(6): 1-5.  
CAO G R, ZHU Q D, SU P. A novel self-referenced Hartmann wavefront sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(6): 1-5. (in Chinese)
- [6] FLORES J L, PAEZ G, STROJNIK M, *et al.*. Effect of misalignment errors on the optical transfer function of the synthetic aperture telescopes [J]. *SPIE*, 2003, 5152: 391-401.
- [7] ROUSSET G, LAUREN T M M. Imaging with multi-aperture optical telescopes and an application [J]. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Series IV Physics*, 2001, 2(1): 17-25.
- [8] BORN M, WOLF E. *Principles of Optics* [M]. Beijing: Science Press, 1978: 277-296.
- [9] 陆乃光. 傅里叶光学[M]. 北京:机械工业出版社, 1998: 123-133.  
LU N G. *Fourier Optics* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1998: 123-133. (in Chinese)
- [10] 王之疆,武树东. 成像光学[M]. 北京:科学出版社, 1991.  
WANG ZH J, WU SH D. *Imaging Optics* [M]. Beijing: Science Press, 1991. (in Chinese)
- [11] 陈旗海,王治乐,张伟. 光学合成孔径成像系统子镜像差研究 [J]. *应用光学*, 2006, 27(2): 112-115.  
CHEN Q H, WANG ZH L, ZHANG W. Study on sub-aperture aberration of optical synthetic aperture imaging

- system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2006,27(2): 112-115. (in Chinese)
- [12] WIZINOWICH P, MAST T, NELSON J, *et al.*. The optical quality of the W. M. Keck Telescope [J]. *SPIE*, 1994, 2199: 94-104.
- [13] 鄢静舟, 雷凡, 周必方, 等. 用 Zernike 多项式进行波面拟合的几种算法[J]. *光学 精密工程*, 1999,7(5):119-128.  
YAN J ZH, LEI F, ZHOU B F, *et al.*. Algorithms for wavefront fitting using Zernike polynomial[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999,7(5): 119-128. (in Chinese)
- [14] DENG J, ZHANG W, LIU J F. Tolerance study of the sub-mirror's surface shape and misadjustment for segmented mirror Synthetic Aperture Optics (SAO) [J]. *SPIE*, 2006, 6148: 20-25.
- [15] 张明意, 李新南. 子孔径拼接检验法中倾斜的影响及消除方法[J]. *光电工程*, 2006,33(8):117-122.  
ZHANG M Y, LI X N. Influence of tilt in stitching interferometry and how to eliminate it[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006,33(8): 117-122. (in Chinese)

作者简介: 邓 键(1976—), 男, 重庆人, 博士研究生, 主要从事光学系统设计、检测和装调方面的研究。E-mail: bush-masterdeng@gmail.com, warhorse99@sina.com

张 伟(1962—), 男, 黑龙江牡丹江人, 博士生导师, 教授, 主要从事空间光学有效载荷、光学半实物仿真等方面的研究。E-mail: wzhang@hit.edu.cn

## ● 下期预告

# 低损耗 193 nm 反射膜的设计

尚淑珍<sup>1</sup>, 邵建达<sup>2</sup>, 范正修<sup>2</sup>

- (1. 华东理工大学机械与动力工程学院承压系统安全科学教育部重点实验室, 上海 200237;
2. 中国科学院 上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

采用 1/4 规整膜系, 从电场强度、吸收损耗及散射损耗的分布几个方面, 对影响 193 nm 反射膜性能的因素进行了分析。以分析结果为基础, 对低损耗 193 nm 反射膜的设计进行了探讨。结果表明: 在空气侧的外膜层中电场强度较大, 随着层数向内过渡, 电场强度迅速减小; 高折射率材料膜层的吸收损耗明显高于低折射率材料膜层的吸收损耗, 而且靠近空气侧最外层的高折射率膜层的吸收损耗最大, 按由外层向内层过渡的方向, 吸收损耗迅速减小, 减小的速度与高低折射率材料折射率的比值相关; 表面散射损耗与两种材料的折射率比值成正比, 但折射率比值减小。欲取得一定的反射率的反射膜, 必须增加膜层数, 但会使表面粗糙度增加, 并且引入其它的损耗。因此, 选择折射率差值适当大一些的材料对降低散射损耗是有利的。设计了 27 层膜堆的 193 nm 反射膜, 设计反射率在 98% 以上。