

用数字干涉仪测量变形镜影响函数的实验研究

饶学军 凌 宁 姜文汉

(中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

摘 要 分析了变形反射镜面形影响函数的意义, 鉴于自适应光学系统中波前探测大都以测量波前斜率为基础的特点, 提出应研究斜率影响函数, 并在此基础上构成波前复原矩阵。还介绍了用数字干涉仪测量变形镜影响函数的方法和结果, 并对测量结果进行了分析, 得到了影响函数的各种参数, 例如: 交连值, 高斯指数, 特征宽度等。并将干涉法测量斜率影响函数的结果与实际的哈特曼探测器的测试结果进行了比较。

关键词 变形镜, 影响函数, 哈特曼探测器。

变形反射镜是自适应光学系统的核心器件, 与常规反射镜不同, 它可以通过在镜面后的驱动器上施加控制电压, 产生需要的镜面变形, 从而改变由它反射的光束的波前相位。正是由于变形反射镜赋予自适应光学系统能动可控的特性, 使实时校正波前误差成为可能。

驱动器上施加的电压与产生面形变化的关系是变形镜的重要性能, 它决定变形镜对波前误差的校正能力。在以前的文献中^[1, 2], 一般用面形影响函数来描述, 但几乎找不到实际变形反射镜的实测结果。本文作者利用 Zygo 数字干涉仪对所研制的 37/55 单元变形镜进行了实测, 取得了实测数据。而且根据实际自适应光学系统中波前探测器大都是直接测量局部波前斜率而不是波前相位这一情况, 提出了斜率影响函数的概念。这一斜率影响函数可以直接用来构作波前复原矩阵, 因而是十分有用的参数。本文也将报导其实测结果, 并与哈特曼传感器的测量结果进行比较。

1 变形镜的影响函数

1.1 面形影响函数

面形影响函数是表示当仅有一个驱动器作用而其它驱动器仅由弹性力约束时的镜面局部变形。分立式驱动器的变形反射镜, 其影响函数是由驱动器间距, 镜面刚度, 驱动器的驱动头的几何形状所决定的。单个驱动器的影响函数是高度定域的, 但仍存在着相交变形, 驱动器之间的耦合就代表了相交变形。

变形镜的整个面形是各个驱动器上的影响函数叠加所确定。严格地讲, 镜面的各个驱动

器的影响函数都不相同,它是驱动器位置的函数,但一般除边缘驱动器外,其它驱动器的影响函数差别不大^[3]。影响函数可以近似看作一个高斯函数。

$$f(r) = \exp[-(|r|/\omega)^\alpha] \quad (1)$$

式中 α 为高斯指数, ω 为影响函数的特征宽度, r 为变形镜各个点的坐标。坐标原点在驱动器的中心。其中 ω 的大小取决于驱动器的间距、镜面刚度、支承点的直径和镜面与驱动器的连接方法。面形影响函数的另一个主要指标是机械耦合系数或交连值 (C_m)。交连值是主动驱动器单位变形在相邻驱动器上引起的变形。变形镜的交连值一般在 5%~20% 之间,如果太小,会使拟合面形不连续,引起高阶像差,如果太大,会产生各个控制通道的交连。

1.2 斜率影响函数

在大多数实际自适应光学系统中,波前探测器是直接测量波前斜率而不是波前相位。根据波前斜率测量结果,经过波前复原算法^[4],求出波前误差。在目前使用最广泛的哈特曼传感器中,光波前被透镜阵列分割成许多小区域,它们彼此相连,并且大小相同,每一个区域的波前通过透镜阵列汇聚成彼此分离的焦点,每一个透镜确定一个子孔径。在焦平面上,放一块电荷耦合器件(CCD 相机)记录透镜阵列所产生的成像图形。从两个方向测量每个焦斑重心位置相对于标定位置的偏移,从而得到了每个子孔径对应区域波前的平均波前倾斜。

斜率影响函数表示的是当一个驱动器作用时,在它周围子孔径内引起的斜率变化量。此处的子孔径是由哈特曼波前探测器所决定的。当第 i 驱动器上施加单位电压时,在第 j 子孔径上产生 X 和 Y 方向的平均波前倾斜为 M_{xij} 和 M_{yij} 。这就是斜率影响函数。对同一块变形镜由于哈特曼波前探测器中子孔径的不同,它的斜率影响函数也不一样,即斜率影响函数不仅由变形镜自身结构所决定,而且还取决于哈特曼波前探测器中子孔径的大小和排列形式。

各个驱动器上施加电压 V_i 时,各个子孔径上产生的斜率为:

$$S_{xj} = \sum_{i=1}^N V_i M_{xij}, \quad S_{yj} = \sum_{i=1}^N V_i M_{yij}. \quad (2)$$

用矩阵表示,即:

$$S = M \cdot V. \quad (3)$$

向量 S 和 V 的元素是 (S_{xj}, S_{yj}) 和 V_i , M 的元素是 M_{xij} 和 M_{yij} 。自适应光学系统工作时,需要从波前传感器实时测量出 S ,由此求出所需施加的校正电压 V 。由(3)式求广义逆得:

$$V = M^+ \cdot S, \quad (4)$$

这就是波前复原算法。由此可见,斜率影响函数组成的矩阵 M 是波前复原算法的基础。通过测量斜率影响函数,就可以离线构造波前复原矩阵。

1.3 数字干涉仪测量变形镜影响函数的原理。

利用数字干涉仪两个面形相减的功能,测量出被测驱动器施加正负电压时的面形变化的波前位相数据,就得到了该驱动器面形影响函数。根据哈特曼探测器中子孔径布局形式划分波前位相数据,然后运用最小二乘法原理对每个子孔径对应的波前位相数据进行最佳平面拟合,从而计算出最佳拟合平面方程:

$$Z = C_2 Y + C_1 X + C_0, \quad (5)$$

中的各个系数,其中 C_1 、 C_2 两个系数就分别表示了该子孔径对应的波前在 X 、 Y 两个垂直方向的平均斜率量,即斜率影响函数。

2 实验装置及测量结果

利用 Zygo 数字干涉仪对作者研制的 37/55 单元变形反射镜，进行了影响函数的实测。

2.1 37/55 单元变形反射镜

37/55 单元变形反射镜是一种分立式变形镜，如图 1 所示。分立的驱动器采用叠片式压电陶瓷，反射镜面使用连续薄镜片。变形镜的工作基础是驱动器阵列，这些驱动器以快的时间响应、高的位移分辨率、稳定性和低的能量耗散提供要求的位移量。驱动器相对于刚性基底的伸缩就产生了镜面的变形。驱动器是由以逐层方式排列的多层陶瓷片组成的，各层间机械连接，在电学上是并联的，产生的总位移是多层小位移的总和。为了改善变形镜边缘驱动器的影响函数附加了 18 个作为边界支撑的辅助驱动器，其驱动电压是相邻两个有效的边缘驱动器的平均值，所以总的驱动器数为 55 个。

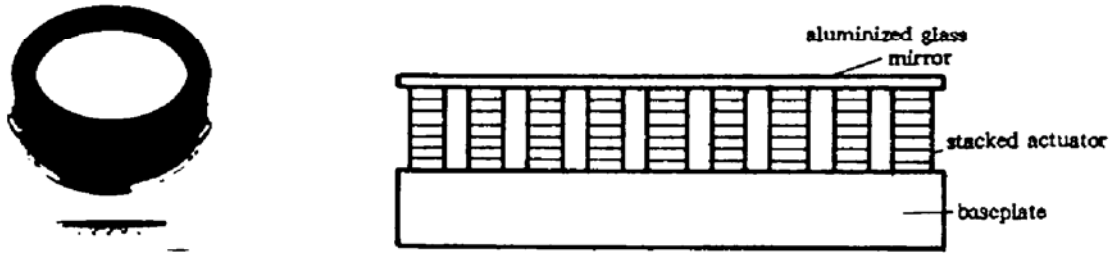


Fig. 1 37-element deformable mirror

变形镜参数：排布方式如图 2 所示；口径 ϕ 120 mm；控制区口径 ϕ 100 mm；圆形驱动器数目 37+18；变形量 $\pm 1.5 \mu\text{m}/\pm 400 \text{V}$ ；最大使用电压 $\pm 400 \text{V}$ ；驱动器灵敏度 $3.7 \text{nm}/\text{V}$ ；驱动器材料 PZT；驱动器电容 $16 \text{nF}(33 \text{nF})$ ；谐振频率 $\geq 1 \text{kHz}$ ；镜面质量 $\leq 1/2 \lambda (\lambda = 0.6328 \mu\text{m})$

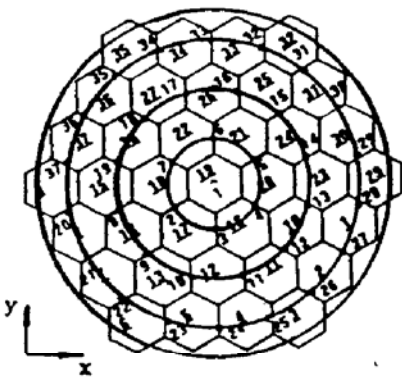


Fig. 2 37-DM subapertures and actuators arrangement

2.2 Zygo N 型波面数字干涉仪

Zygo N 型干涉仪是一种菲索式的干涉仪。通过参考面的移动产生干涉图形的相位调制，用数据采集和处理系统提供被测表面的面形，进行泽尼克 (Zernike) 多项式分析，计算点扩散函数 (PSF)，调制传递函数 (MTF)，环围能量 (Encircled energy)。对平面测试精度为峰谷值 (P-V) $\pm \lambda/20$ ，均方根值 (RMS) $\pm \lambda/120$ ，重复性为峰谷值 $\pm \lambda/100$ ，均方根值 $\pm \lambda/240$ 。

2.3 定标

在测量过程中，需要进行一系列定标，以确定干涉仪中 CCD 摄像机每个象素点所对应的实际尺寸，确定变形镜中心驱动器的坐标和旋转方向。在此基础上利用干涉仪的计算机，按照所用哈特曼传感器的子孔径划分，在干涉图上生成子孔径分割线。在图 2 中，有下划线的数字表示子孔径编号，没有下划线的数字表示驱动器编号。

2.4 测量变形镜的面形影响函数

对每个驱动器分别施加 $\pm 250 \text{V}$ 的驱动电压，利用干涉仪的面形相减功能测量两个状态的面形变化即得到面形影响函数数据。图 3 是 1, 4, 19, 28 号 (图 2 所标) 驱动器单元影响函数的立体图和等高线图。

图中 PV 代表峰谷值， PTS 代表采样点， RMS 代表均方根值，其中 PV 和 RMS 单位均为波长 ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$)

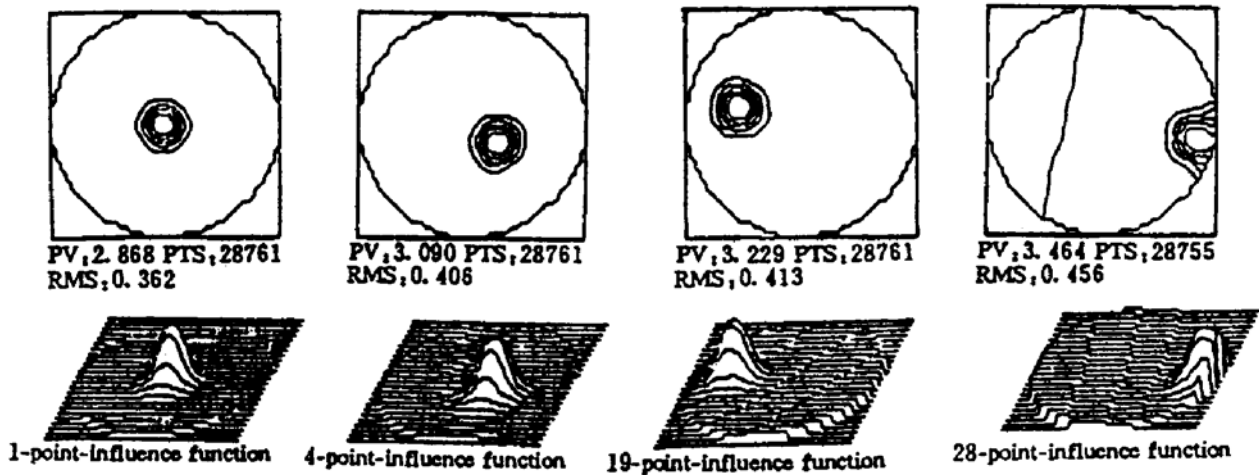


Fig. 3 Contour plot and isometric plot of the influence function, actuator No. 1, 4, 19, 28

3 实验数据分析

3.1 面形影响函数在 X, Y 方向剖面线的高斯拟合。

拟合过程包括以下三个步骤：

1) 对剖面线数据进行归一化；2) 由归一化数据求出特征宽度；3) 利用最小二乘法原理，求出最佳拟合的高斯指数。

图 4 是 1, 4, 19, 28 号驱动器单元影响函数在 X, Y 方向的剖面线图，图中虚线表示最佳拟合曲线，实线表示干涉仪实测曲线，并标明了实测的 α 和 ω 值。从图 4 中的剖面线可以

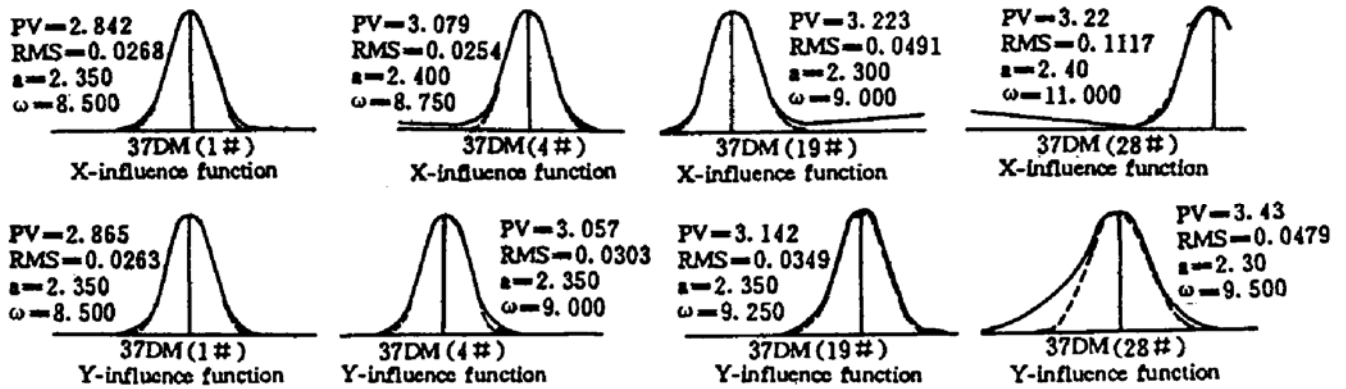


Fig. 4 Profile plot at x, y direction of the influence function, actuator No. 1, 4, 19, 28.

看出，1、4、19 号驱动器单元影响函数的特征宽度、高斯指数都比较相近，而 28 号边缘驱动器的影响函数形状与它们有一定差别。它们的高斯指数一般在 2.3~2.4 之间，特征宽度由中心向外圈边逐渐增大，这是由于驱动器约束力逐渐减小所引起的，从表 1 的交连值中也可以看出这点。作者对最外圈辅助驱动器单元的影响函数也进行了测量，图 5 是其剖面线图。

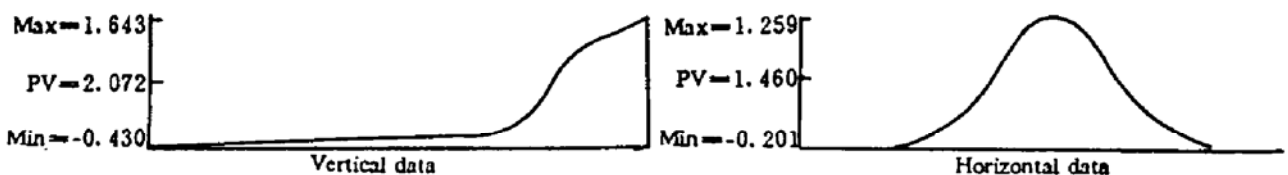


Fig. 5 Profile plot at x, y direction of the influence function, subsidiary actuator

Table 1. Actuator No. 1, 4, 19, 28 —— value of coupling

1#	number	2	3	4	5	6	7
	coupling	9.2%	8%	7.5%	7.4%	8.9%	8.7%
4#	number	1	3	5	12	13	14
	coupling	10.9%	11.3%	11.6%	9.6%	9.4%	2.5%
19#	number	2	7	8	18	36	37
	coupling	7%	13.9%	14.6%	12.7%	3.7%	5.8%
28#	number	12	13	14	27	29	
	coupling	6.8%	12.3%	6.9%	12.4%	13.1%	

从图中可以看出, 如果没有辅助驱动器的支撑作用, 有效的边缘驱动器(如 28 号)的影响函数将与辅助驱动器相似, 有了辅助驱动器, 边缘驱动器的影响函数形状有明显改善。

3.2 计算每个子孔径内 X, Y 两个垂直方向的斜率值

将测量出来的驱动器影响函数的波前位相数据, 根据划分的子孔径形状进行分割, 用 1.3 节所述方法, 求出 X, Y 两个垂直方向的斜率影响函数。

在图 6 中分别画出了 37 单元变形镜中心驱动器(1 号), 第二圈的 4 号驱动器, 第三圈的 19 号驱动器, 第四圈的 28 号驱动器对 37 个子孔径在 X, Y 两个方向的斜率影响函数。从图

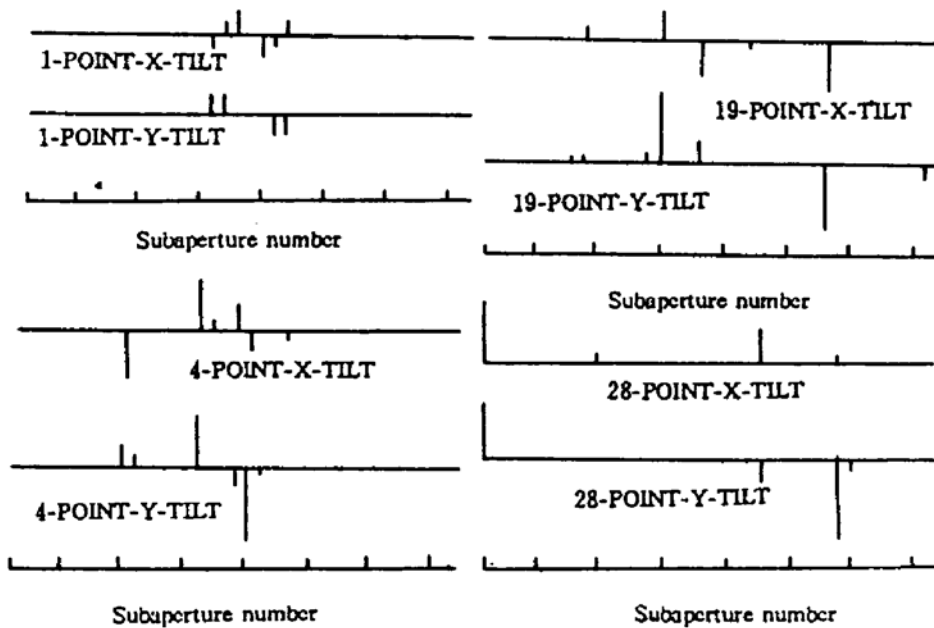


Fig. 6 Slope influence function of No. 1, 4, 19, 28 actuators

形中可以看出单个驱动器作用时, 只对它周围一圈的子孔径内的斜率量有显著影响, 对其它子孔径斜率量影响不大。中心(1 号)驱动器的斜率影响函数比较特殊, 在中心驱动器周围有六个子孔径, 但只有四个子孔径的 Y 斜率量有显著变化, 这主要是由中心驱动器与子孔径位置的匹配关系所决定的。而且, 由于中心驱动器与中央子孔径中心重合, 当中心驱动器作用时, 在该子孔径内产生以离焦为主的波象差, 因而, 波面平均斜率在该子孔径内的变化极小, 这种变化只能由邻近的驱动器(第二圈驱动器)作用时引起。

将 Zygo 干涉仪测量的斜率影响函数与用哈特曼传感器实际测量的结果进行比较。表 2 是 1 号驱动器对周围的子孔径用两种方法测量结果比较。

Table 2. No. 1 actuator —— slope influence function ($\times 10^{-6}$ rad)

subaperture number		16	17	18	20	21	22
the interferometric results	X	-24.88	23.32	45.44	-42.32	-20.44	20.80
	Y	37.99	40.39	0.04	0.09	-32.94	-37.63
the H-S sensing results	X	-23.93	24.16	43.03	-43.52	-20.19	21.64
	Y	38.83	40.87	0.07	0.13	-34.26	-37.27

两个实验的测试数据基本吻合,它们偏差的均方根误差为 1.004×10^{-6} rad。这主要是由下面几个因素所引起:

1) 子孔径与变形镜驱动器相对位置调整状态的差别

由于两个实验光路不同,实际哈特曼探测器的透镜阵列与变形镜驱动器之间的相对位置通过机械调整来实现的,存在一定误差,且实际透镜阵列的加工和装调也存在一定误差。

2) 两个实验标定光的偏差

在模拟实验中的标定平面波前峰值 ($P - V$) 为 $\lambda/20$, 而实际哈特曼探测器的标定平面波前峰谷值 ($P - V$) 只能达到 $\lambda/10$ 。

3) CCD 的读出噪声等因素的影响

由于现有的 CCD 探测器带有附加噪声,对测试结果有影响。

结束语 通过该实验实现了用两种不同方法表示变形镜影响函数,对变形镜影响函数有了进一步的了解,为今后研制变形镜和研究其拟合像差能力进行系统仿真提供可靠的实验数据。

在实验过程中,得到了鲜浩、官春林等同志的许多帮助,特此感谢。

参 考 文 献

- [1] J. W. Hardy, Instrumental limitations in adaptive optics for astronomy. *Proc. SPIE*, 1989, 1114 : 2~13
- [2] R. K. Tyson, *Principles of Adaptive Optics*, Academic Press, San Diego, 1991 : 200~202
- [3] Wenhan Jiang, Ning Ling, Xuejun Rao *et al.*, Fitting capability of deformable mirror. *Proc. SPIE*, 1991, 1542 : 130~139
- [4] Wenhan Jiang, Huagui Li, shufu Huang *et al.*, Hartmann-shack wavefront sensing and wavefront control algorithm. *Proc. SPIE*, 1990, 1271 : 82~93

Experiment of Measuring Influence Function of Deformable Mirror Using Digital Interferometer

Rao Xuejun Ling Ning Jiang Wenhan

(*Institute of Optics & Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209*)

(Received 15 September 1994; revised 8 December 1994)

Abstract In this paper the figure influence function of deformable mirror is discussed. In view of that the most useful wavefront sensing methods are based on measuring the wavefront slopes, we propose to measure the slope influence function, by using which the wavefront reconstruction matrix is composed. The method of measuring influence function of deformable mirror by digital interferometer is introduced. From the measured data, several parameters of influence function such as coupling, Gauss exponent and characteristic width can be obtained. The interferometric results of slope influence function are compared with the measuring data from a H-S sensor.

Key words deformable mirror, influence function, Hartmann-Shack sensor.