

0-1 故障模型在自适应光学系统中的应用

宋定安^{1,2,3,4*}, 李新阳^{1,3*}, 彭真明²

- (1. 中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;
2. 电子科技大学 光电科学与工程学院, 四川 成都 610209;
3. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;
4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 自适应光学系统有效通光口径的变化会引起部分哈特曼传感器子孔径缺光以及部分变形镜驱动器失效, 造成系统子孔径排布和驱动器排布的匹配布局发生改变, 从而引起变形镜控制电压输入与哈特曼传感器反馈输出之间的对应关系发生变化。针对自适应光学系统有效布局变化的情况, 首先从理论上分析了系统不能稳定工作的原因, 并且提出采用 0-1 故障模型的新方法对自适应光学系统部分单元失效的情况进行建模, 然后针对经典比例-积分控制算法进行修正。最后通过实验证明, 采用 0-1 故障模型建模, 可以保证系统的稳定运行, 但自适应光学系统的部分单元失效, 会引起系统对波前像差的校正能力的下降。

关键词: 自适应光学系统; 哈特曼传感器; 变形镜; 0-1 故障模型

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1111004

Application of 0-1 fault model in adaptive optics system

Song Ding'an^{1,2,3,4*}, Li Xinyang^{1,3*}, Peng Zhengming²

- (1. Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;
2. School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610209, China;
3. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The change of effective aperture in adaptive optics system may lead to light shortage among some of the Hartmann-shack sensor sub-apertures and functional failure in a number of actuators, making the matching layout between system sub-aperture location and actuator location changes. The correspondence between the control voltage input of actuator and the feedback output of sub-aperture, therefore, changes consequently. In response to the effective layout change of the adaptive optics system, this paper firstly discussed the influence of the change of aperture on adaptive optics system and analyzed the reasons for instability. It then put forward a new method based on 0-1 fault model to model the

收稿日期: 2018-06-10; 修订日期: 2018-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(61205069, 61571096)

作者简介: 宋定安(1989-), 男, 博士生, 主要从事自适应光学系统中鲁棒控制方面的研究。Email: psupgpv@163.com

导师简介: 李新阳(1971-), 男, 研究员, 博士, 主要从事自适应光学相关技术方面的研究。Email: xyli@ioe.ac.cn

彭真明(1966-), 男, 教授, 博士, 主要从事光电成像目标检测、识别与跟踪, 数字图像与视频信号处理等方面的研究。

Email: zmpeng@uestc.edu.cn

partial failure situation in the system so as to modify proportional-integral control algorithms. Finally, it proved that through experiments using the 0-1 fault model can guarantee the stable operation of the system, but the failure of some parts of the adaptive optics system will lead to the decrease of the correction ability of the system to the wavefront aberration.

Key words: adaptive optics system; Hartmann-Shack sensor; deformable mirror; 0-1 fault model

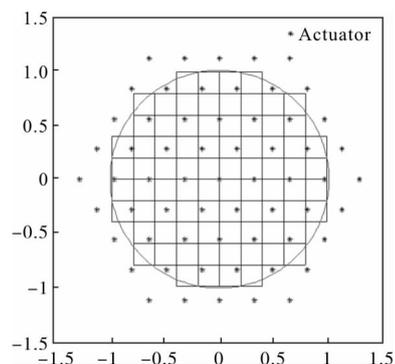
0 引言

自适应光学(Adaptive Optics, AO)系统在天文观测、激光传输和医疗成像等领域具有重要作用,主要用于校正光波在传输过程中产生的波前畸变,以提高成像分辨率或者激光光束质量^[1-2]。AO 系统一般作为一种专用系统,用于校正特定的光学波前。在工作过程中,AO 系统的相关参数和工作状态通常固定不变,并且要求系统输入光学波前的通光口径足够大,可以充满哈特曼(Hartmann-Shack, H-S)传感器整个探测靶面,保证每个子孔径都能有效探测到光学波前,有效反馈回斜率信号。目前国内对于 AO 系统的理论和应用研究已经进行了多年,并取得了丰富的成果^[3-6]。这些研究几乎全部针对设计状态下的情况,AO 系统可以获得令人满意的校正性能和稳定性。但在实际工程中,工作环境是复杂多变的,其使用条件可能会发生一些变化,比如 AO 系统的有效通光口径发生变化,或者输入波前的光强分布不均匀,使 H-S 传感器在探测部分子孔径时检测不到光。这些情况都会引起 H-S 传感器有效子孔径数和变形镜(DM)有效驱动器数的变化,造成 AO 系统有效布局的变化,给系统的稳定工作带来恶劣影响。针对系统部分单元失效的问题,目前的工程实践中主要通过采用一些临时修正处理的方法来保证系统的稳定运行,并且获得相对满意的性能,但没有文献针对此问题进行分析,并提出相应的数学模型,因此处理方法的通用性和灵活性受到了限制,必须专业人员才可以进行操作。因此,希望找到一种数学模型,可以有效描述 AO 系统部分单元失效的情况,简化处理方式,增强方法的通用性。

该研究针对 AO 系统部分单元失效的问题,提出采用 0-1 故障模型对系统的有效单元进行描述,将容错控制理论与自适应光学理论相结合,通过开关对角矩阵修正控制电压的计算,这种方式简单方便,可以适用于多种 AO 系统单元失效的情况。

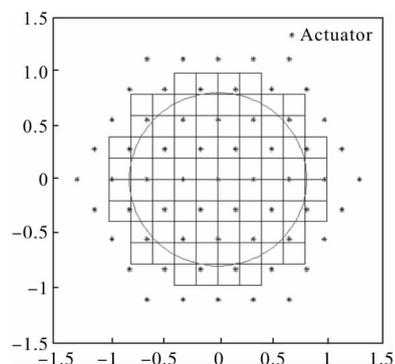
1 AO 系统的布局

采用 61 路驱动器单元 DM 作为校正器和 80 个子孔径的 H-S 传感器探测,驱动器和子孔径的归一化布局如图 1 所示,蓝点表示驱动器位置,小方块为子孔径布局,红色圆圈表示有效通光口径,驱动器与子孔径的编号均依次从上到下及从左到右按从小到大排列(见图 2)。图 1(a)为有效通光口径为 100%的状态,图 1(b)为通光口径为 80%的状态,两种状态的有效布局不同。



(a) 50 mm 通光口径

(a) 50 mm incident light aperture



(b) 40 mm 通光口径

(b) 40 mm incident light aperture

图 1 变形镜驱动器与 H-S 传感器子孔径的归一化排布图
Fig.1 Normalized location of DM actuators and H-S sensor sub-apertures

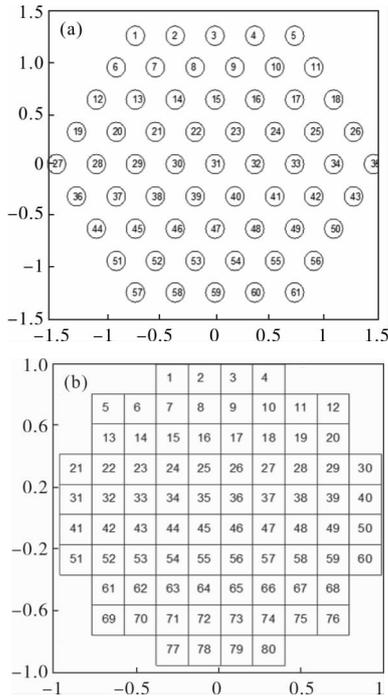


图 2 变形镜驱动器与 H-S 传感器子孔径编号

Fig.2 Numbers of DM actuators and H-S sensor sub-apertures

为保证系统的校正性能，变形镜必须具有足够的 Zernike 波前校正能力。根据参考文献[7]，定义变形镜的校正效率为：

$$\eta = \frac{RMS_{err}}{RMS_{orig}} \quad (1)$$

式中：RMS 表示统计学上的均方根； RMS_{orig} 为原始输入波前的均方根值； MS_{err} 为残差波前(原始波前与拟合波前之差) 的均方根值； η 为 AO 系统的校正效率，值越接近于零，表示 AO 系统的校正能力越好。AO 系统的数值仿真结果如图 3 所示，这里，Zernike 排布顺序按照参考文献[8]中 Noll 的排序。图中，某些高阶像差的校正效果比低阶像差要好，与 Zernike 阶数不一致，是因为像差模式与 AO 系统布局的匹配程度不同所致。结果显示，在有效通光口径为 100%的情况下，系统对第 1~14 阶、19~20 阶 Zernike 波前，具有比较好的校正能力，可以校正掉 90%左右

的像差成份，对 15~17 阶 Zernike 波前的校正能力稍差，大约只有 80%的校正能力；在有效能光口径为 80%的情况下，系统对 1~9 阶、13~14 阶 Zernike 波前的校正能力大于 90%，对第 12、19、20 阶 Zernike 波前的校正能力略低于 85%，对 10、11、17 阶 Zernike 波前的校正能力约为 75%，而对 15、16、18 阶的 Zernike 波前的校正能力比较差，略大于 50%。对比两条曲线可以看出，对前 9 阶 Zernike 波前，两种情况下的校正能力相差不大，都大于 90%，但对 10 阶以后的 Zernike 波前，有效通光口径为 80%的校正能力迅速下降，二者出现明显差异。需要说明的是，在缺光更严重的情况下，处理方式与文中相同，但对性能影响的不同，就不在文中的讨论范围内。

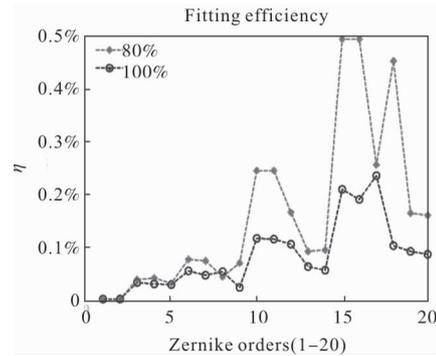


图 3 变形镜拟合效率(红色:80%有效口径, 蓝色:100%有效口径)

Fig.3 Fitting efficiency of DM (Red and blue are 80% and 100% effective incident light aperture, respectively)

2 AO 系统控制模型的建立

2.1 AO 系统的控制模型

AO 系统的信号流图如图 4 所示^[9]。Reference 为已知相位波前的参考光学波前，通常为平面波。波前传感器(WFS)用于探测经变形镜补偿后的光学残差波前，并反馈给波前处理机，计算产生控制信号驱动变形镜工作，补偿光学波前的扰动像差，形成闭环回路。AO 系统控制器的设计是一个扰动抑制和

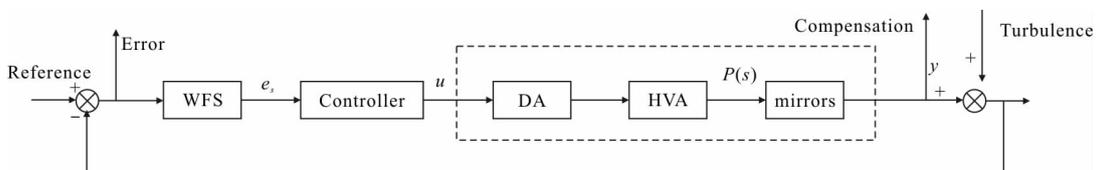


图 4 AO 系统的信号流图

Fig.4 Signal flow graph of AO system

输出跟踪的控制问题,通过控制校正器工作,抑制外部湍流扰动影响,并跟踪 Reference 的面形。

采用 H-S 传感器探测光学波前的相位信息,并反馈回斜率信号,维度为子孔径个数的二倍。在波前处理机中,通过波前复原计算,将斜率残差信号转换为电压残差信号,再通过一定的控制算法,计算产生控制电压,驱动校正器工作。从控制的角度看,AO 系统的控制结构图可以简化如图 5 所示, φ_d 为外部

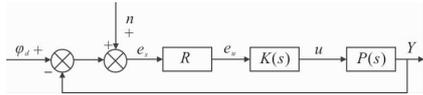


图 5 AO 系统控制结构图

Fig.5 Configuration diagram of AO system

湍流扰动, n 为噪声, e_s 为探测到的残差斜率, R 为复原矩阵,将残差斜率信号映射为残差电压信号, e_u 为残差电压, y 为校正器补偿输出, $K(s)$ 为控制器传递函数矩阵, u 为控制电压输出, $P(s)$ 为被控对象模型,包括了从控制电压输入到传感器输出的整个通路。从控制的角度看, φ_d, n, e_s 和 y 均为传感器空间的斜率信号, u 和 e_u 为控制器空间的电压信号。根据图 5,被控对象的输入输出关系表示为:

$$Y=P(s)u \quad (2)$$

式中: $P(s)$ 为被控对象的传输函数矩阵。

被控对象的模型可以分为两个部分:静态特性和动态特性。考虑到校正器的响应带宽足够高,一般可以忽略校正器自身的动态特性,但由于信号的处理过程和传输过程会产生延时,因此系统的动态可以简化为一个纯延时算子^[10],即:

$$P(s)=De^{-s\tau} \quad (3)$$

式中: D 为线性映射矩阵,由波前复原算法决定,反映校正器输入电压与传感器斜率输出之间的映射关系; $e^{-s\tau}$ 为纯延时算子, τ 为系统延时。

参考文献[11]给出了直接斜率矩阵的计算公式,如公式(4)所示:

$$\begin{cases} Y_x(i)=\sum_{j=1}^a u_j \frac{\iint_{S_i} \frac{\partial f_j(x,y)}{\partial x} dx dy}{S_i} = \sum_{j=1}^a u_j D_{xj}(i) \\ Y_y(i)=\sum_{j=1}^a u_j \frac{\iint_{S_i} \frac{\partial f_j(x,y)}{\partial y} dx dy}{S_j} = \sum_{j=1}^a u_j D_{yj}(i) \end{cases} \quad (4)$$

$j=1,2,\dots,b$

式中: a 为驱动器单元个数; b 为子孔径个数; S_j 为子孔径 i 的归一化面积; u_j 为第 j 个驱动器上的控制电压; D_{xj} 和 D_{yj} 为影响函数在哈特曼上的斜率响应; $Y_x(i)$ 和 $Y_y(i)$ 分别为子孔径 i 的 x 方向和 y 向上的平均波前斜率量; $f_j(x,y)$ 为变形镜第 j 路驱动器的影响函数。根据参考文献[9],影响函数可以表述为一超高斯方程,如下式所示:

$$f_j(x,y)=\exp\left\{\ln w \left[\sqrt{(x-x_j)^2+(y-y_j)^2} / d \right]^\alpha\right\} \quad (5)$$

式中: (x_j, y_j) 为驱动器的坐标; (x, y) 为波前像素点的位置; d 为驱动器间距; α 为高斯指数; w 为驱动器交联值,即单个影响函数中加电的驱动器的变形量 δ_1 与相邻位置驱动器变形量 δ_2 的比值, $w=\delta_2/\delta_1$ 。

控制电压在合适范围内,变形镜的相位校正量与驱动器电压呈近似线性,并满足叠加原理,子孔径斜率量也与驱动器电压呈线性关系,且满足叠加原理,公式(4)的矩阵形式为:

$$Y=Du \quad (6)$$

因此,采用直接斜率法建模,公式(3)中的线性映射矩阵即为直接斜率矩阵,可由公式(4)计算或者测量获得。公式(6)给出了系统从电压到斜率的近似线性关系,对直接斜率矩阵 D 求广义逆,则系统从斜率到电压的映射关系表示为:

$$u=D^+Y \quad (7)$$

式中: D^+ 为直接斜率矩阵的广义逆。

则残差斜率信号到残差电压信号的映射关系为:

$$e_u=D^+e_s=Re_s \quad (8)$$

即复原矩阵 $R=D^+$ 。

2.2 AO 系统部分单元失效分析

根据图 5,驱动器控制电压的表达式为:

$$u=K(s)e_u \quad (9)$$

式中: $K(s)$ 为多路平行积分控制器的连续域表达式。在实际工程中,AO 系统一般采用波前控制机进行控制,第 j 路控制器的离散表达式为:

$$k_j(z)=\frac{g_{zj}}{1-g_{aj}Z^{-1}} \quad (10)$$

式中: z 表示 Z 变换算子; g_{aj} 为积分常数; g_{zj} 为积分增益。则第 j 路驱动器控制电压的离散表达式为:

$$u_j(k)=g_{aj}u_j(t-1)+g_{zj}e_{uj}(t) \quad (11)$$

式中：括号里面的 t 表示第 t 时刻； e_{uj} 表示驱动器 j 的电压残差输入。

令 r_j 表示复原矩阵 R 的第 j 行， e_{uj} 表示第 j 路驱动器的电压残差，由残差斜率信号到残差电压信号的映射关系公式(7)可以得到：

$$e_{uj} = r_j e_s \quad (12)$$

将公式(12)代入公式(11)则有：

$$u_j(t) = a u_j(t-1) + g_{sj} r_j e_s(t) \quad (13)$$

由公式(13)可知，当控制器确定时，驱动器的控制电压由当前时刻所有子孔径的残差斜率和前一时刻该驱动器的控制电压决定，并且所有子孔径的残差斜率会通过积分累加作用影响驱动器的控制电压。变形镜在控制电压作用下的校正面形，可以通过各个驱动器的影响函数 $f_j(x, y)$ 展开表示，表达式为：

$$\varphi(x, y) = \sum_{j=1}^n u_j f_j(x, y) \quad (14)$$

式中： $\varphi(x, y)$ 为变形镜拟合的波前相位； u_j 为第 j 个驱动器上的输入电压。

根据变形镜面形公式(5)，考虑到交联值 w 小于 1， $\ln w$ 为负值，指数 α 一般大于 1 且为正，所以离驱动器位置越远的子孔径，反馈回的子孔径斜率受驱动器工作的影响越小。也就是说，当 AO 系统的通光口径变小时，边缘子孔径缺光，部分驱动器的行程产生的响应在其周边缺光子孔径中不会反馈回控制回路，离驱动器较远的子孔径反馈回的斜率并不能反应驱动器的工作状态，这一错误的信息会通过控制器的积分作用一直积累，并且与其他的子孔径反馈信息共同作用 AO 系统，使失效驱动器产生一个不可预见的异常电压，通常现象为驱动器控制电压发散或者饱和，影响系统的稳定性与性能。

3 AO 系统部分单元失效的处理方法

针对 AO 系统的部分单元失效的情况，这里提出一种基于 0-1 故障模型的通用处理方法，保证系统的稳定运行。通过引入开关阵 M 和 N 对 AO 系统的子孔径缺光和驱动器失效建立 0-1 故障模型，并在复原矩阵的计算过程增加开关阵 M 和 N 运算，不需要增加其它步骤。这种方法简化了处理过程，扩大了方法的通用性和灵活性，并且可以为研究 AO 系统的主动容错控制问题提供一定思路。

根据容错控制理论^[12-15]，当系统的实际输出与正常输出不匹配时，即可以认为系统发生了故障。AO 系统中 H-S 传感器子孔径部分缺光和校正器驱动器部分失效可以被认为是一种广义的系统故障，即缺光子孔径的输出始终为零且失效驱动器的输出对波前校正没有影响。系统的故障描述模型有多种，其中 0-1 型故障模型主要用于描述失效故障，可对 AO 系统通光口径变化引起有效布局变化的情况进行有效描述。AO 系统的 0-1 型故障模型结构框图如图 6 所示，引入对角型开关阵 M 和 N 分别描述可能的驱动器失效和子孔径缺光，其他符号与图 5 表示的一样，对角型开关阵 M 和 N 的表达式分别如公式(15)、(16)所示。

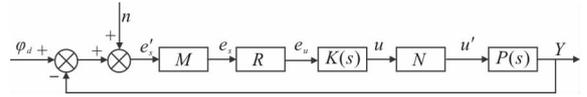


图 6 AO 控制 0-1 故障模型结构框图

Fig.6 Configuration diagram of 0-1 fault model of AO system

$$M = \text{diag}(m_1 \cdots m_j \cdots m_a) \quad (15)$$

式中： a 为驱动器单元数，对角元素的取值为：

$$m_j = \begin{cases} 0, & \text{第 } j \text{ 个驱动器无效} \\ 1, & \text{第 } j \text{ 个驱动器有效} \end{cases}, j=1, \cdots, a$$

$$N = \text{diag}(n_1 \cdots n_i \cdots n_b) \quad (16)$$

式中： b 为子孔径的单元数，对角元素的取值为：

$$n_{2i-1} = n_{2i} = \begin{cases} 0, & \text{第 } i \text{ 个子孔径缺光} \\ 1, & \text{第 } i \text{ 个子孔径不缺光} \end{cases}, j=1, \cdots, b$$

根据图 5 和公式(3)，AO 系统的 0-1 型故障模型表达式为：

$$P'(s) = MDN e^{-s} \quad (17)$$

式中： D 为直接斜率矩阵。复原矩阵 R 的表达式则变为：

$$R = (MDN)^+ = N^+ D^+ M^+ = ND^+ M \quad (18)$$

此时，系统和残差斜率信号到残差电压信号的映射关系变为：

$$e_u = R e_s = ND^+ M e_s \quad (19)$$

因此，通过两个对角矩阵 M 和 N 实现了对残差斜率信号的约束，从而限制了各平行回路控制器的输入信号，保证了系统的闭环稳定性。

4 实验结果分析

实验平台采用中国科学院自适应光学重点实验

室自主研发的 61 单元 AO 系统(见图 7),实验校正对象为已知像差的像差板(静态像差)。图 7 中,A 为波前控制计算机的软件主界面,B 为波前校正器模块,主要的执行器件 DM 和 TM 安装在该模块内,C

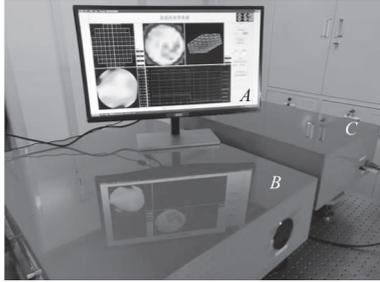
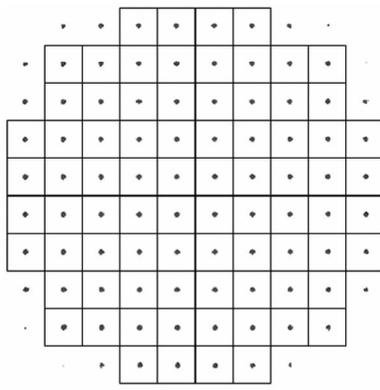


图 7 AO 系统实验平台

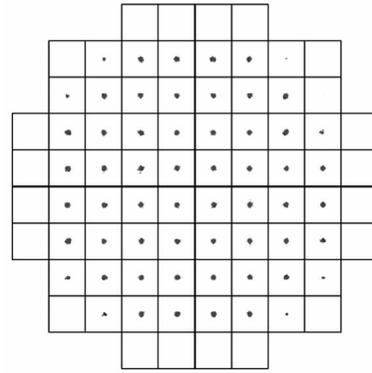
Fig.7 Experiment platform of AO system

为波前探测器模块,内有 CCD 阵列和微透镜阵列。AO 系统设计通光口径为 50 mm,即 100%有效通光口径为 50 mm,同时考虑通光口径为 40 mm 的情况,即 80%的有效通光口径。在 100%有效通光口径条件下,光斑阵列布满全部哈特曼传感器子孔径(见图 8(a)),这种情况下系统闭环,变形镜控制电压的拟合曲面连续,如图 9(a)所示。但是在 80%有效通光口径条件下,哈特曼传感器的部分子孔径缺光(见图 8(b)),这种情况下闭环,变形镜的部分驱动器控制电压的拟合曲面不连续,在边缘处出现不稳定或者饱和。这种现象会引起系统工作的不稳定,部分驱动器的控制电压剧烈波动且幅值比较大,造成变形镜面形变化剧烈,对于动态像差,由于变形镜面形变化频率很高,这种现象对变形镜的影响更加恶劣,容易引起变形镜的机械损坏,降低使用寿命。因此,在工程中必须作一定的处理,才能保证系统的稳定工作。



(a) 通光口径 50 mm

(a) 50 mm incident light aperture



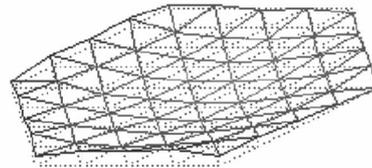
(b) 通光口径 40 mm

(b) 40 mm incident light aperture

图 8 H-S 传感器光斑阵列图

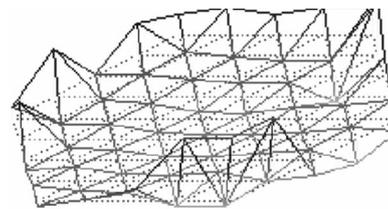
Fig.8 Beam array of H-S sensor

采用第 3 节所述的方法进行处理后,变形镜驱动器控制电压的拟合面形如图 9(c)所示。与图 9(b)相比,驱动器电压在边缘处没有出现不稳定或者饱和,整个拟合曲面比较连续光滑,处理后系统可以稳定工作,消除了变形镜面形剧烈变化的情况。



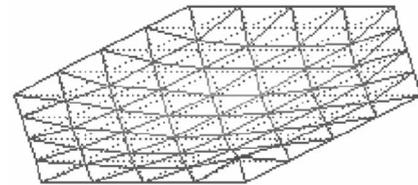
(a) 100%有效通光口径

(a) 100% incident light aperture



(b) 80%有效通光口径(没有 0-1 模型)

(b) 80% incident light aperture without 0-1 model



(c) 80%有效通光口径(0-1 模型)

(c) 80% incident light aperture with 0-1 model

图 9 变形镜拟合面形图

Fig.9 Fitting wavefront of DM

图 10 给出了四个驱动器 (54 号、55 号、59 号和 60 号,位置如图 2 所示)在不同处理方法下的闭环控

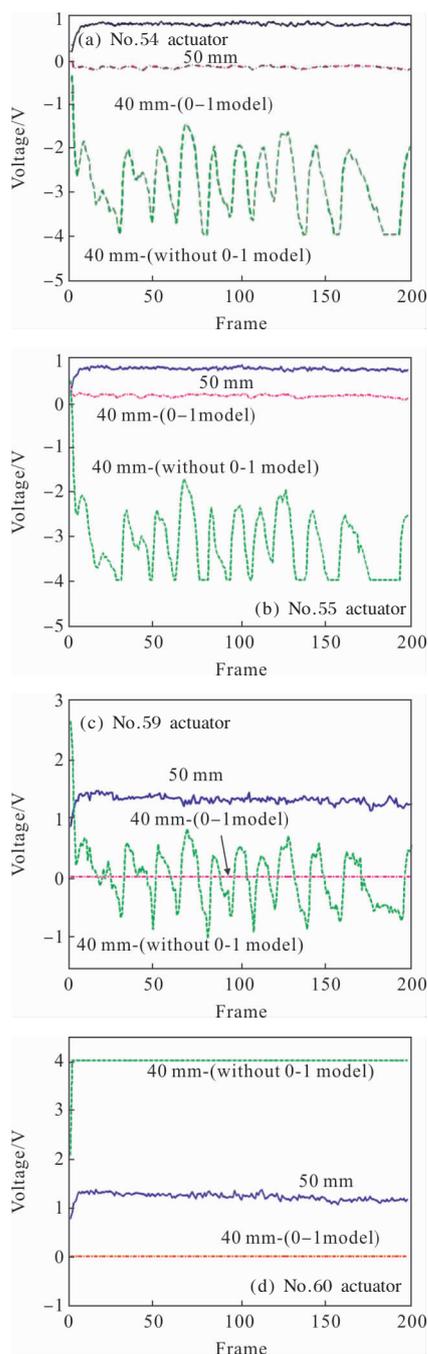


图 10 闭环控制电压曲线

Fig.10 Curves of close loop control voltage

制电压曲线,表 1 给出了各驱动器在不同方法下闭环控制电压的平均值。对比图 10 中闭环控制电压曲线和表 1 中的电压平均值可以看出:在 100%有效通光口径下(蓝实线),四个驱动器的控制电压值均能稳定,不出现振荡或者饱和。但是当通光口径变为

80%有效通光口径时(青虚线),若不作处理,则四个驱动器的控制电压都不稳定,驱动器(54 号、55 号和 59 号)的闭环控制电压处于振荡状态,不能稳定收敛,60 号驱动器的控制电压则出现饱和,处于发散状态,也就是说,在这种情况下,系统不能稳定工作。采用 0-1 故障模型进行处理修正后,对于驱动器(54 号和 55 号)控制电压,其幅值收敛于一个稳定值,而驱动器(59 号和 60 号)被当作无效驱动器,其控制电压被置为零。因此,从控制电压的曲线可以看出,采用 0-1 故障模型进行处理后,系统可以稳定工作。

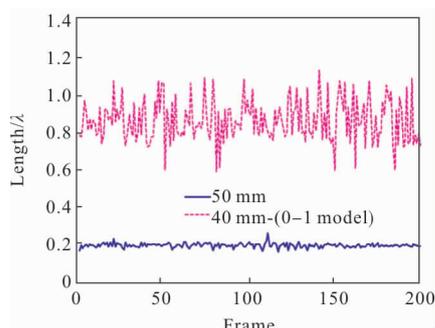
表 1 驱动器闭环控制电压均值

Tab.1 Mean values of actuator's close loop control voltage

No.	100%	80%(without 0-1 model)	80%(with 0-1 model)
54	0.432 9 V	-2.907 0 V	-0.465 9 V
55	0.727 7V	-3.169 5 V	0.038 3 V
59	1.292 1 V	0.002 6 V	0 V
60	1.212 4 V	3.990 3 V	0 V

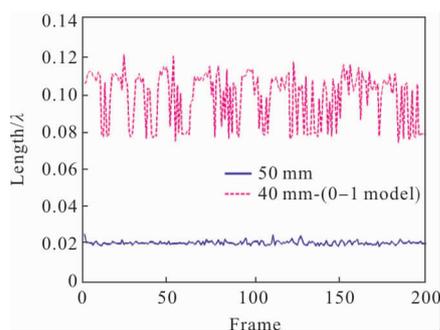
图 11 绘出了不同方法下残差波前的 PV 曲线和 RMS 曲线,表 2 给出了 PV 和 RMS 值的统计平均值,反应了 AO 系统的波前校正性能,残差波前的 PV 和 RMS 的数值越接近于 0,校正性能越好。在 100%有效通光口径条件下,系统开环波前的 PV 和 RMS 值分别为 3.250 4 λ 和 0.747 9 λ (1 λ =650 nm),系统闭环残差波前的 PV 曲线和 RMS 曲线分别如图 11 中蓝实线所示,闭环后,残差波前的 PV 和 RMS 均值为 0.188 5 λ 和 0.020 3 λ 。在 80%有效通光口径条件下如果不作处理系统不能稳定工作,因此只考虑在 0-1 故障模型处理后的闭环情况。在这种条件下系统开环波前的 PV 和 RMS 值分别为 2.902 9 λ 和 0.677 6 λ ,处理后系统闭环残差波前的 PV 曲线和 RMS 曲线分别如图 11 中红虚线所示,在这种条件下 PV 和 RMS 值分别为 0.851 8 λ 和 0.098 1 λ 。对比两种情况可以看出,当系统的有效通光口径变小以后,系统的校正能力有所下降,这主要是由系统的有效驱动器个数和有效子孔径个数下降引起的,但同时,由于系统在波前重构过程中,没有去除传感器的无效子孔径,也就是说重构波前的通光口径还是 100%的有效通光口径,因此,重构精度会下降,系统 PV 和 RMS

值只是 AO 系统 H-S 传感器自身探测的结果,在一定程度上反应了激光的光束质量,可以作为一个重要指标,但并不能完全反应实际的激光光束质量。



(a) PV 曲线

(a) PV curves



(b) RMS 曲线

(b) RMS curves

图 11 残差波前 PV&RMS 曲线

Fig.11 PV & RMS curves of residual wavefront

表 2 PV&RMS 值

Tab.2 Value of PV & RMS

	100%(open loop)	100%(close loop)	80%(open loop)	80%(way 3)
PV(λ)	3.250 4	0.188 5	2.902 9	0.851 8
RMS(λ)	0.747 9	0.020 3	0.677 6	0.098 1

5 结论

针对 AO 系统的通光口径变化引起系统部分单元失效的情况,讨论了在 100%有效通光口径(完全有效)和 80%有效通光口径(部分单元失效)状态下系统的稳定性和校正能力。实验结果表明,当系统为 80%有效通光口径时,如果系统不作处理,变形镜驱动器的控制电压容易发散,系统不能稳定工作。对此,文中提出了一种基于 0-1 故障模型的新处理方

式,具有很好的通用性和灵活性。这种方法采用 0-1 故障模型对系统子孔径缺光和驱动器失效进行建模,通过两个对角开关阵描述系统单元的失效情况,可以很好地保证系统在部分单元失效情况下工作的稳定性。同时,由于受到系统硬件和算法的局限,系统的校正能力也会有所下降。

参考文献:

- [1] Jiang Wenhan. Adaptive optical technology [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2005, 28(1): 7-13. (in Chinese)
姜文汉. 自适应光学技术[J]. 自然杂志, 2005, 28(1): 7-13.
- [2] Luo Qi, Li Xinyang. Control performance analysis of a double overlap adaptive optics system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0501002. (in Chinese)
罗奇, 李新阳. 嵌套双自适应光学系统的控制特性分析[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0501002.
- [3] Lin Xudong, Xue Chen, Liu Xinyue, et al. Current status and research development of wavefront correctors for adaptive optics [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5 (4): 337-351. (in Chinese)
林旭东, 薛陈, 刘欣悦, 等. 自适应光学波前校正器技术发展现状, 中国光学, 2012, 5(4): 337-351.
- [4] Luo Qi, Li Xinyang. Design of optics axis jitter rejection controller for adaptive optics system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 0432003. (in Chinese)
罗奇, 李新阳. 自适应光学系统光轴抖动抑制控制器设计[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(4): 0432003.
- [5] Yu Hao, Huang Linhai, Huang Lixin, et al. Experiment of full field compensation with two-deformable mirrors adaptive optics system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40 (8): 1542-1546. (in Chinese)
余浩, 黄林海, 黄利新, 等. 双变形镜自适应光学系统全场补偿实验验证[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(8): 1542-1546.
- [6] Zhang Dongge, Fu Yutian. Deformable mirror modeling and control based on on-line least square support vector maching [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45 (11): 1118007. (in Chinese)
张东阁, 傅雨田. 基于在线最小二乘支持向量机的变形镜建模与控制[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(11): 1118007.
- [7] Luo Qi. Optimal control technology of adaptive optics [D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2016: 72-75. (in Chinese)

- 罗奇. 自适应光学优化控制技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2016: 72-75.
- [8] Noll R. Zernike polynomials and atmospheric turbulence [J]. *JOSA*, 1976(A), 66: 207-211.
- [9] Zhang Yudong, Rao Changhui, Li Xinyang. Adaptive Optics and Laser Control [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016: 38, 136-141. (in Chinese)
张雨东, 饶长辉, 李新阳. 自适应光学及激光操控 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 38, 136-141.
- [10] Nagashima M, Agrawal B N. Active control of adaptive optics system in a large segmented mirror Telescope [J]. *International Journal of Systems Science*, 2012, 45(12): 1-17.
- [11] Yan Haixing, Zhang Deliang, Li Shushan. Numerical simulation of an adaptive optics system direct wavefront gradient control method[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, 17(6): 758-765. (in Chinese)
严海星, 张德良, 李树山. 自适应光学系统的数值模拟: 直接斜率控制法律[J]. 光学学报, 1997, 17(6): 758-765.
- [12] Zhang Dengfeng, Wang Zhiquan, Hai Xiaodong. Satisfactory Fault-tolerant Control[M]. Beijing: Science Press, 2014: 24-26. (in Chinese)
张登峰, 王执铨, 韩笑冬. 满意容错控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 24-26.
- [13] Long Zhiqing, Xue Song, Chen Huixing. Passive fault tolerant control for Suspension system of maglev train Based on LMI [J]. *Computer Simulation*, 2008, 25(2): 265-268.
- [14] Xiang Yu, Jin Jiang. Hybrid Fault-tolerant flight control system design against partial actuator failures [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, 20(4): 871-886.
- [15] Zhang Guoguang, Zhang Hui, Huang Xiaoyu, et al. Active fault-tolerant control for electric vehicles with independently driven rear in-wheel motors against certain actuator faults [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2016, 24(5): 1557-2016.